



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

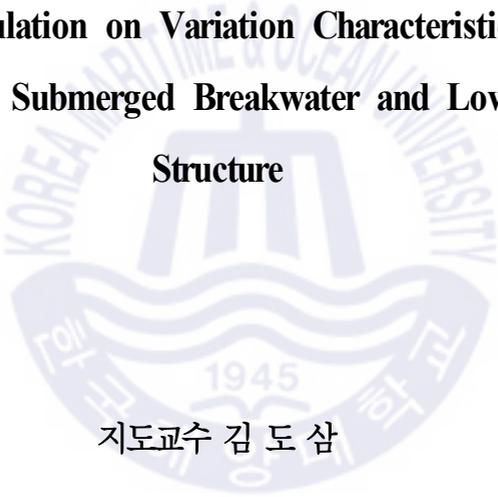
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

잠제 및 저천단구조물 주변에서 파동장의
변동특성에 관한 수치해석

**Numerical Simulation on Variation Characteristics of Wave
Field around Submerged Breakwater and Low-Crested
Structure**



지도교수 김도삼

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

안성욱

본 논문을 안성욱의 공학박사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 신 문 섭



위 원 공학박사 이 인 철



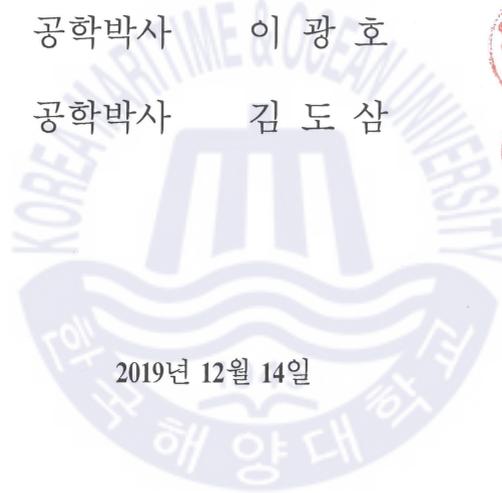
위 원 공학박사 김 태 형



위 원 공학박사 이 광 호



위 원 공학박사 김 도 삼



2019년 12월 14일

한국해양대학교 일반대학원

목 차

목차	(i)
LIST OF FIGURES	(v)
LIST OF TABLES	(x)
LIST OF PHOTOS	(xi)
ABSTRACT	(xii)
요약	(xvi)
제 1 장 서론	(1)
1.1 본 연구의 배경과 목적	(1)
1.2 본 연구의 내용	(6)
References	(9)
제 2 장 olaFlow 모델의 수치해석이론 및 검증	(11)
2.1 서언	(11)
2.2 olaFlow 모델의 기초방정식	(11)
2.3 불규칙파의 조파이론	(13)
2.4 olaFlow 모델의 검증	(14)
2.4.1 다공질매질을 통과하는 단파의 수위변동	(14)
2.4.2 투과성잠제 주변에서 파랑변동과 잠제내 및 지반내에서 과잉간극수압변동	(16)
2.4.3 파랑과 흐름의 공존장내 평균유속	(19)
2.4.4 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압	(20)
2.4.5 3차원불투과성잠제 주변에서 수위 및 유속	(26)
2.4.6 불규칙파의 조파검증	(29)
2.5 결언	(31)
References	(32)

제 3 장 투과성잠재 주변에서 규석파와 흐름의 공존장내 2차원파동장의 수치해석	(35)
3.1 서언	(35)
3.2 수치해석결과.....	(37)
3.2.1 파랑변형.....	(37)
3.2.2 파고의 분포.....	(44)
3.2.3 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포.....	(46)
3.3 결론.....	(48)
References	(49)
제 4 장 투과성잠재 주변에서 불규석파와 흐름의 공존장내 2차원파동장의 수치해석	(54)
4.1 서언	(54)
4.2 수치해석결과.....	(55)
4.2.1 파랑변형.....	(55)
4.2.2 파고분포.....	(62)
4.2.3 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포.....	(63)
4.3 결론.....	(66)
References	(67)
제 5 장 투과성잠재 주변에서 규석파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석	(70)
5.1 서언	(70)
5.2 수치해석 결과.....	(70)
5.2.1 계산조건.....	(70)
5.2.2 잠재 주변의 파고분포에 대한 고찰.....	(72)
5.2.3 평균수위분포.....	(78)
5.2.4 평균유속의 공간분포.....	(81)
5.2.5 연안류의 분포.....	(84)
5.2.6 평균난류운동에너지의 분포.....	(87)
5.3 결론.....	(91)
References	(92)

제 6 장 투과성잠재 주변에서 불규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석	(95)
6.1 서언	(95)
6.2 수치해석결과.....	(95)
6.2.1 계산조건.....	(95)
6.2.2 H_{rms} 의 분포.....	(97)
6.2.3 평균유속의 공간분포.....	(100)
6.2.4 연안류분포.....	(104)
6.2.5 평균난류운동에너지의 분포.....	(108)
6.3 결론.....	(109)
References	(110)
제 7 장 투과성잠재 주변에서 규칙파 혹은 불규칙파와 흐름의 공존장내 3차원파동장의 수치해석	(112)
7.1 서언	(112)
7.2 수치해석결과.....	(113)
7.2.1 계산조건.....	(113)
7.2.2 파고분포.....	(114)
7.2.3 평균유속의 공간분포.....	(119)
7.2.4 연안류분포.....	(122)
7.2.5 평균난류운동에너지의 분포.....	(126)
7.3 결론.....	(130)
References	(131)
제 8 장 저천단구조물 주변에서 규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석	(133)
8.1 서언	(133)
8.2 수치해석결과.....	(134)
8.2.1 계산조건.....	(134)
8.2.2 정상상태의 판단.....	(134)
8.2.3 파고분포와 파의 전파.....	(136)
8.2.4 평균유속.....	(141)
8.2.5 평균난류운동에너지.....	(142)
8.3 결론.....	(148)

References	(149)
제 9 장 결론	(152)
9.1 제 2장에서 결언.....	(152)
9.2 제 3장에서 결언.....	(152)
9.3 제 4장에서 결언.....	(153)
9.4 제 5장에서 결언.....	(154)
9.5 제 6장에서 결언.....	(155)
9.6 제 7장에서 결언.....	(156)
9.7 제 8장에서 결언.....	(157)
References	(158)



LIST OF FIGURES

Fig. 1.1.	Layout condition of submerged breakwaters installed in Korea.	(3)
Fig. 1.2.	Predictive relationship between L_s/S and S_{off}/L_s of salient formation condition and layout of submerged breakwater.	(6)
Fig. 2.1.	Comparison between simulated and measured water surface elevations.	(15)
Fig. 2.2.	An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.	(16)
Fig. 2.3.	Comparison between simulated and measured water surface elevations.	(17)
Fig. 2.4.	Comparison between simulated and measured pore-water pressures.	(18)
Fig. 2.5.	Comparison of simulated and measured water surface elevations in wave-current interaction.	(20)
Fig. 2.6.	Comparison of simulated and measured mean horizontal velocity profiles in wave-current interaction.	(23)
Fig. 2.7.	Illustrative sketch for layout of three-dimensional basin and permeable vertical structure.	(23)
Fig. 2.8.	Comparison between simulated and measured water surface elevations.	(25)
Fig. 2.9.	Comparison between simulated and measured wave pressures.	(26)
Fig. 2.10.	Illustrative sketch for layout of three-dimensional basin and impermeable vertical structure.	(27)
Fig. 2.11.	Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity.	(27)
Fig. 2.12.	Comparison between simulated and measured water surface elevations.	(28)
Fig. 2.13.	Comparison between simulated and measured X - and Y -direction velocities. ..	(28)
Fig. 2.14.	Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra.	(30)
Fig. 2.15.	Comparison of target, input and incident spectra.	(31)
Fig. 3.1.	An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.	(38)

Fig. 3.2.	Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach.	(40)
Fig. 3.3.	Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach.	(41)
Fig. 3.4.	Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach.	(42)
Fig. 3.5.	Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach.	(44)
Fig. 3.6.	Spatial distribution of simulated wave heights.	(45)
Fig. 3.7.	Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater.	(47)
Fig. 3.8.	Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater.	(48)
Fig. 3.9.	Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy and its accumulation.	(48)
Fig. 4.1.	An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.	(56)
Fig. 4.2.	Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach.	(58)
Fig. 4.3.	Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach.	(60)
Fig. 4.4.	Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach.	(61)
Fig. 4.5.	Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach.	(62)
Fig. 4.6.	Spatial distribution of simulated wave heights.	(63)
Fig. 4.7.	Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater.	(64)
Fig. 4.8.	Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater.	(65)
Fig. 4.9.	Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy and its accumulation.	(66)
Fig. 5.1.	Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.	(71)

Fig. 5.2.	Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.	(73)
Fig. 5.3.	Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.	(73)
Fig. 5.4.	Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.	(74)
Fig. 5.5.	Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and beach.	(75)
Fig. 5.6.	Spatial distribution of simulated wave heights.	(76)
Fig. 5.7.	Spatial distribution of simulated wave heights according to change of distance between shoreline and submerged breakwater.	(78)
Fig. 5.8.	Spatial distribution of simulated wave heights.	(79)
Fig. 5.9.	Spatial distribution of simulated mean water level according to change of gap width.	(80)
Fig. 5.10.	Spatial distribution of simulated mean water level.	(80)
Fig. 5.11.	Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.	(82)
Fig. 5.12.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.	(83)
Fig. 5.13.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.	(83)
Fig. 5.14.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.	(85)
Fig. 5.15.	Spatial distribution of longshore current velocities.	(86)
Fig. 5.16.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.	(89)
Fig. 5.17.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.	(89)
Fig. 5.18.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.	(90)
Fig. 5.19.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.	(91)
Fig. 6.1.	Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.	(95)

Fig. 6.2.	Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.	.....	(98)
Fig. 6.3.	Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.	.....	(98)
Fig. 6.4.	Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.	.....	(100)
Fig. 6.5.	Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and sandy beach.	.....	(101)
Fig. 6.6.	Spatial distribution of simulated H_{rms} at three $Y-Z$ cross sections.	.....	(102)
Fig. 6.7.	Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.	.....	(103)
Fig. 6.8.	Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.	.....	(105)
Fig. 6.9.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.	.....	(106)
Fig. 6.10.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.	.....	(106)
Fig. 6.11.	Spatial distribution of longshore current velocities.	.....	(107)
Fig. 6.12.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.	.....	(108)
Fig. 6.13.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.	.....	(109)
Fig. 7.1.	Illustrative sketches of wave basin and submerged structure for numerical analysis.	.....	(114)
Fig. 7.2.	Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction.	.....	(116)
Fig. 7.3.	Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.	.....	(117)
Fig. 7.4.	Spatial distribution of simulated wave heights according to y direction.	.....	(119)
Fig. 7.5.	Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of current direction.	.....	(120)

Fig. 7.6.	Spatial distribution of simulated H_{rms} according to y direction.	(121)
Fig. 7.7.	Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane.(Regular wave conditions)	(122)
Fig. 7.8.	Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane.(Irregular wave conditions)	(123)
Fig. 7.9.	Spatial distribution of longshore current velocities.	(124)
Fig. 7.10.	Spatial distribution of longshore current velocities.	(125)
Fig. 7.11.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in $x-y$ plane.	(127)
Fig. 7.12.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.	(128)
Fig. 7.13.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in $x-y$ plane.	(129)
Fig. 7.14.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.	(130)
Fig. 8.1.	Definition sketch for layout of LCS, measuring points of water level and cross section.	(134)
Fig. 8.2.	Time variation of water level.	(136)
Fig. 8.3.	Spatial distribution of simulated wave heights according to the change of gap width($H=5\text{cm}$).	(138)
Fig. 8.4.	Spatial distribution of simulated wave heights according to the change of gap width($H=7\text{cm}$).	(139)
Fig. 8.5.	Snapshots of wave diffraction behind LCS(05H7G250Rc3).	(140)
Fig. 8.6.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane($H=5\text{cm}$).	(143)
Fig. 8.7.	Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane($H=7\text{cm}$).	(144)
Fig. 8.8.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane($H=5\text{cm}$).	(145)
Fig. 8.9.	Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane($H=7\text{cm}$).	(146)

LIST OF TABLES

Table 2.1.	Wave gauge positions.	(24)
Table 2.2.	Pressure gauge positions.	(24)
Table 2.3.	Incident wave conditions.	(30)
Table 3.1.	Condition of wave and current applied to numerical analysis.	(39)
Table 3.2.	Comparison of wave heights at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5.	(45)
Table 4.1.	Conditions of wave and current applied to numerical analysis.	(56)
Table 4.2.	Comparison of wave heights at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5.	(64)
Table 5.1.	Incident wave condition and 3-dimensional layout of submerged breakwater.	(72)
Table 5.2.	A longshore current's inflection point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.	(87)
Table 6.1.	Incident wave condition and 3-dimensional layout of submerged breakwater.	(96)
Table 6.2.	A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.	(107)
Table 7.1.	Regular wave and current conditions applied to numerical analysis and wave breaking on crown.	(114)
Table 7.2.	Irregular wave and current conditions applied to numerical analysis and wave breaking on crown.	(115)
Table 7.3.	A longshore current's convergence point on the shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.	(124)
Table 7.4.	A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.	(126)
Table 8.1.	Incident wave condition and 3-dimensional layout of LCS.	(135)

LIST OF PHOTOS

- Photo 1.1. Weolcheon-coast of Samcheok city from Google Earth. (3)
- Photo 1.2. Submerged breakwaters to protect beach erosion of Songdo, Busan. (4)
- Photo 1.3. DELOS. (4)



Numerical Simulation on Variation Characteristics of Wave Field around Submerged Breakwater and Low-Crested Structure

by

Sung Wook An

Department of Civil and Environmental Engineering

Graduate School of

Korea Maritime and Ocean University

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the variation characteristics of wave heights and nearshore currents by 2D or 3D numerical analysis according to the installation of submerged breakwater or low-crested structure(hereinafter referred to as LCS), representative structures of littoral drift control structures or offshore structures for the control of wave and current, in two-dimensional or three-dimensional sea area where regular or irregular waves and currents(tidal currents) coexist.

Since crest heights is lower than still water level, the submerged breakwater is known to create a natural beach by preventing the erosion or movement of bottom materials which induces maintaining the current status or promoting recovery of the eroded beach while providing eco-friendly effect in maintaining natural landscape of the coast. Although submerged breakwaters have been planned and installed in many sea areas including the South and East coasts of Korea, the economic feasibility due to wide width has also been pointed out. It is known that there are not many sites where the purposed function of preventing erosion is faithfully performed. The reasons of this phenomenon are as follows. First, the crest width of the submerged breakwaters, the gap width of breakwaters,

the length and distance from the coastline, etc. are not installed in accordance with the site conditions. The other reason is that the installation is not correspondent with two wave conditions, that is, normal wave and abnormal wave, simultaneously.

Thus, in Japan and Europe, LCS has been regarded as the alternative coastal structures to supplement the shortcomings of submerged breakwaters for a long time. LCS is generally a low crest structure parallel to the coast to protect the beach, and is known to perform an intermediate role between the submerged breakwaters and the detached breakwater. The shape of LCS is similar to that of submerged breakwaters or detached breakwaters, but the crest heights of LCS is relatively lower than that of detached breakwater. So, in case of high wave heights, wave overtopping is allowed in LCS case and the magnitude of horizontal wave force is smaller than that of conventional detached breakwater. The wave control mechanism of submerged breakwaters is to induce enforced breaking waves at the crest by improving the frictional resistance by wide widths and reducing the depth of crest. In contrast, LCS has a narrower crest widths compared to submerged breakwaters and high crest heights by means of protruding crests in the air, the wave control by reflection, wave overtopping and friction resistance of LCS is more powerful and economical than that of submerged breakwaters. While both LCS and submerged breakwaters reduce wave energy affecting on the beach without dissipation in some extent, the more transmitted wave energy is reduced in LCS. In view of the advantages of LCS, many theoretical and experimental studies have been conducted in Europe, and the design methods has been greatly improved and integrated by field application of results.

In general, the planar two-dimensional analysis method(mild slope equation and Boussinesq's equation) integrated in the depth direction is almost applied to estimate wave heights or nearshore currents in the sea area. In this case, variations of sea water level such as wave height is calculated with a good accuracy. Whereas, the value of nearshore currents is calculated by the mean flow in the depth direction, there may be some problem in the beach deformation analysis(bed load and suspended load) based on shallow waters

and nearshore currents, which are heavily influenced by water depths. Especially in case of porous submerged structures such as submerged breakwaters, wave fields are divided into areas where structures exist and areas where structures do not exist, vertical integration in the depth direction can cause a lot of errors. Therefore, in this study, three-dimensional numerical analysis is performed to solve the shortcomings of the planar two-dimensional analysis method described above and to obtain a high accuracy result. The olaFlow model, which has been in the spotlight recently, has been applied. This model was originally developed based on the OpenFOAM®(Open source Field Operation And Manipulation) model and is finite volume method based on strong nonlinear analysis. Two-phase fluid flows analysis, turbulence analysis, and wave breaking analysis is possible with this model, which is based on the three-dimensional VARANS(Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) equation. Recently, various modules are used and many researches are conducted to study interaction between waves and structures, the behavior of two-phase fluid flows in permeable structures, the interaction between waves, structures and foundations, the generation of isolated waves, ship motions, ship waves and propulsion. However, it is actively used and developed mainly in Europe where led the development of source code, there are few applications in Korea, especially in coastal engineering.

First of all, before applying the olaFlow model to investigate the fluctuation characteristics of wave heights and nearshore currents due to structures such as submerged breakwaters or LCS in three-dimensional waters, the verification of olaFlow model is performed. For this, the numerical results are analyzed compared to the existing experimental results about following issues, that is, 1) variation of seawater level of a bore penetrating porous media, 2) wave variation around permeable submerged breakwaters and variation of pore-water pressure in submerged breakwaters and foundations, 3) variation of mean flow velocity in coexistence fields of waves and currents, 4) variation of seawater level and wave pressure around three-dimensional permeable upright walls, 5) variation of seawater level and flow velocity around three-dimensional impermeable submerged breakwater. 6) generated wave profile and frequency spectrum of irregular wave.

Based on the high accuracy and validity of the results of the olaFlow model as described above, the numerical analyses of following topics are conducted. 1) numerical analysis of two-dimensional wave fields in the coexistence fields of regular waves and currents around permeable submerged breakwaters, 2) numerical analysis of two-dimensional wave fields in coexistence fields of irregular waves and currents around permeable submerged breakwaters, 3) numerical analysis of three-dimensional wave field under regular wave conditions around permeable submerged breakwaters, 4) numerical analysis of three-dimensional wave field under irregular wave conditions around permeable submerged breakwaters, 5) numerical analysis of three-dimensional wave fields in coexistence fields of regular or irregular waves and currents around permeable submerged breakwaters, and 6) numerical analysis of the three-dimensional wave field under regular wave conditions around low-crested structures. Variations of seawater levels, variations of wave heights and frequency spectra, and the fluctuation characteristics of mean flow velocity and mean turbulence kinetic energy according to conditions of incident waves, flow conditions and structure arrangements are discussed thoroughly. In particular, the variations of wave heights, flow velocity, and turbulent kinetic energy around LCS is derived. The results caused by changes of arrangement such as gap of structures and depth of crest, and changes of incident wave conditions such as wave height and wave period are compared and examined with those of submerged breakwaters. Through this process, the differences in the characteristics of LCS and submerged breakwaters are analyzed and discussed in detail.

Finally, the important conclusions of each chapter are presented at the end, and the final conclusions of this study is presented in the conclusion chapter.

잠제 및 저천단구조물 주변에서 파동장의 변동특성에 관한 수치해석

안 성 욱

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

요 약

본 연구는 2차원 혹은 3차원해역에서 규칙파 혹은 불규칙파와 흐름(조류)의 공존장에 표시 제어구조물(littoral drift control structure) 혹은 해역제어구조물(offshore structure for control of wave and current)중에 대표적인 잠제(submerged breakwater)나 저천단구조물(이후 LCS로 칭함 ; Low-Crested Structure)의 설치에 따른 파고와 해빈류의 변동특성을 2차원 혹은 3차원수치해석으로 규명하고자한 것이다.

여기서, 천단고가 정수면보다 낮아 수중에 설치되는 잠제는 연안의 자연경관을 유지하는 친환경적인 효과와 더불어 공학적으로는 잠제 배후에 양빈된 저질의 침식을 방지하거나 혹은 침식성 해빈에서 저질이동을 방지하여 해빈의 현상유지·회복을 도모할 수 있어 자연발생적인 형태와 유사한 해빈을 조성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 우리나라 남·동해안을 비롯한 다수의 해역에 침식방지대책으로 잠제를 계획·설치하여 왔지만, 광폭에 따른 비경제성이 또한 많이 지적되고 있고, 의도한 침식방지 역할이 충실히 수행되는 현장은 그다지 많지 않은 것으로도 알려져 있다. 이러한 이유로는 잠제의 천단폭, 개구폭, 길이 및 해안선에서 이격거리 등이 현장조건에 부합되지 않게 설치된 것, 그리고 평상파랑과 이상파랑의 두 파랑조건에 동시에 부합되지 않게 설치된 것 등을 들 수 있을 것이다.

따라서, 일본 및 유럽에서는 전술한 잠제의 기능에서 단점을 보완할 수 있는 해안구조물로 LCS에 오래 전부터 관심을 집중하여왔다. 여기서, LCS는 일반적으로 해빈을 보호하기 위해 해안에 평행한 낮은 천단의 구조물로, 전술한 잠제와 이안제(detached breakwater)의 중간적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있으며, LCS의 형상은 잠제나 이안제와 유사하지만, 천단고가 이안제보다 상대적으로 낮은 저천단이므로 고파랑의 경우는 율파가 허용되는 구조이고, 따라

서 종래의 이안제보다 작용수평파력이 적어진다. 그리고, 광폭에 의한 마찰저항을 향상시키고 천단수심을 적게 하여 천단상에서 강제쇄파를 유도하는 잠제의 파랑제어기구와는 달리, LCS는 잠제에 비해 천단폭이 좁고, 천단이 공기중으로 돌출되어 천단고가 높기 때문에 반사와 월파 및 마찰저항에 의한 파랑제어기능이 우수하므로 잠제보다는 훨씬 경제적이다. LCS와 잠제 모두 해빈에 작용되는 파에너지를 소멸시키지 않고 어느 정도로 줄이지만, LCS의 경우가 더 많은 전달파에너지를 감소시킨다. 이상과 같은 LCS의 장점에 주목하여 유럽에서는 많은 이론 및 실험연구를 수행하여왔고, 결과의 현장적용으로 설계기술이 많이 향상되었으며, 또한 집대성되었다.

일반적으로, 해역에서 파고 혹은 해빈류(nearshore current)를 산정하는 경우는 수심방향으로 적분된 형태의 평면 2차원해석수법(완경사방정식류 및 Boussinesq방정식류)을 적용하는 경우가 거의 대부분이다. 그러나, 이의 경우, 파고와 같은 수위변동은 어느 정도 정확성을 가진 결과가 도출되지만, 해빈류는 수심방향으로 평균류가 얻어지기 때문에 수심의 영향을 크게 받는 천해역과 해빈류에 기반하는 해빈변형해석(소류사와 부유사)에 정도상 문제가 발생할 수 있고, 특히 잠제와 같은 수중투과성구조물의 경우 파동장은 구조물이 존재하는 영역과 구조물이 존재하지 않는 영역으로 나누어지기 때문에 수심방향의 연속적분은 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전술한 평면 2차원해석법이 가지는 결점을 해결하고, 더불어 고정도의 결과를 도출하기 위하여 3차원수치해석을 수행하며, 이에 최근 세계적으로 각광을 받고 있는 olaFlow 모델을 적용하였다. 이 모델은 원래 OpenFOAM®(Open source Field Operation And Manipulation) 모델을 근간으로 개발되었으며, 액체와 기체의 혼상류해석, 난류해석 및 쇄파해석이 가능한 유한체적법의 강비선형해석법으로, 3차원 VARANS(Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식에 기초한다. 최근, 다양한 모듈을 이용하여 파와 구조물의 상호작용, 투과성구조물에서 혼상류의 거동, 파와 구조물 및 지반의 상호작용, 고립파의 발생, 선체운동과 항주파 및 추진 등에 관한 연구들이 수행되고 있다. 그러나, 소스코드 개발을 주도한 유럽을 중심으로 활발히 사용·개발되고 있지만, 국내 특히 해안공학분야에서의 적용 사례는 매우 미진한 실정에 있다.

따라서, 본 연구의 잠제 혹은 LCS가 설치된 3차원해역에서 구조물에 의한 파고 및 해빈류 등의 변동특성을 규명하기 위하여 전술한 olaFlow 모델을 적용함에 있어서 먼저 그의 정당성을 확인한다. 이를 위하여 1) 다공질매질을 통과하는 단파의 수위변동, 2) 투과성잠제 주변에서 파랑변동과 잠제내 및 지반내에서 파잉간극수압변동, 3) 파랑과 흐름의 공존장내 평균유속의

변화, 4) 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압변동, 5) 3차원불투과성잠제 주변에서 수위와 유속변동 및 6) 불규칙파의 조파파형과 주파수스펙트럼 등에 관해 얻어진 기존의 실험결과와 본 수치해석을 비교·검토하였다.

이상과 같은 olaFlow 모델에 의한 결과의 고정도 및 타당성에 근거하여 1) 투과성잠제 주변에서 규칙파와 흐름의 공존장내 2차원파동장의 수치해석, 2) 투과성잠제 주변에서 불규칙파와 흐름의 공존장내 2차원파동장의 수치해석, 3) 투과성잠제 주변에서 규칙파입사조건하 3차원파동장의 수치해석, 4) 투과성잠제 주변에서 불규칙파입사조건하 3차원파동장의 수치해석, 5) 투과성잠제 주변에서 규칙파 혹은 불규칙파와 흐름의 공존장내 3차원파동장의 수치해석 및 6) 저천단구조물 주변에서 규칙파입사조건하 3차원파동장의 수치해석을 각각 실시하였다. 이로부터 입사파랑과 흐름조건 및 구조물의 배치조건에 따른 수위변동, 파고변화, 주파수스펙트럼의 변동, 평균유속(해빈류)과 평균난류운동에너지의 변동특성 등을 면밀히 논의하였다. 특히, LCS 주변에서 파고와 유속변화 및 난류운동에너지 등을 도출하고, 구조물의 개구폭, 천단수심과 같은 배치형상의 변화 및 입사파고와 주기와 같은 입사파랑조건의 변화에 따른 결과를 잠제의 경우와 비교·검토하여 LCS와 잠제의 각각에 대한 특성의 차이 등을 면밀히 분석·논의하였다.

마지막으로, 이상의 각 장에서 도출된 중요한 결과를 말미에 결론으로 제시하였고, 각 결론을 종합하여 본 논문의 결론을 최종적으로 기술하였다.

제 1 장 서론

1.1 본 연구의 배경과 목적

본 연구에서는 2차원 혹은 3차원해역에서 규칙과 혹은 불규칙과와 흐름(조류)과의 공존장에 표시제 어구조물(littoral drift control structure) 혹은 해역제어구조물(offshore structure for control of wave and current)중에 대표적인 잠재(submerged breakwater)나 저천단구조물(이후 LCS로 칭함 ; Low-Crested Structure)의 설치에 따른 파고와 해빈류의 변동특성을 2차원과 3차원수치해석으로 규명하고자한다.

일반적으로, 해역에서 파고와 해빈류(nearshore current)를 산정하는 경우는 수심방향으로 적분된 형태의 평면 2차원해석수법(Karlsson, 1969; Berkhoff, 1972; Peregrine, 1967)을 적용하는 경우가 대부분이다. 이 경우, 파고와 같은 수위변동은 어느 정도 정확성을 가진 결과가 도출되지만, 해빈류는 수심방향으로 평균류가 얻어지기 때문에 수심의 영향을 크게 받는 천해역과 해빈류에 기반하는 해빈변형해석에 정도상 문제가 발생할 수 있고, 특히 잠재와 같은 수중투과성구조물의 경우 파동장은 구조물이 존재하는 영역과 구조물이 존재하지 않는 영역으로 나누어지기 때문에 수심방향의 연직적분은 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전술한 평면 2차원해석법이 가지는 결점을 해결하고, 더불어 고정도의 결과를 도출하기 위하여 3차원수치해석을 수행하며, 이에 최근 세계적으로 각광을 받고 있는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 적용하였다.

먼저, 상술한 본 연구의 3차원수치해석모델인 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 대해 그의 개요를 간략히 기술한다. 이 모델은 원래 OpenFOAM[®] 모델(Open source Field Operation And Manipulation; Jacobsen et al., 2012)을 근간으로 개발되었으며, 액체와 기체의 혼상류해석, 난류해석 및 쇄파해석이 가능한 유한체적법의 강비선형해석법으로, Navier-Stokes solver에 기초한다. OpenFOAM[®] 모델(Jacobsen et al., 2012)은 GNU GPL(일반 공중 사용 허가서 : General Public License)을 기반으로 하는 공개 CFD (Computational Fluid Dynamics) 소스코드로써 전 세계의 다양한 분야의 많은 수치해석관련 연구자들에 의해 지속적인 개발과 수정이 이루어지고 있다. 특히, OpenFOAM[®] 모델은 다양한 수치해석 분야에서 각각의 계산 목적에 대응할 수 있도록 비압축성유체의 흐름, 압축성유체의 층류 및 난류흐름, 혼상류, 화학반응, Lagrangian 입자추적과 같은 다양한 모듈을 포함하고 있다. 따라서, 최근에 이와 같은 다양한 모듈을 이용하여 파와 구조물의 상호작용(Chen et al., 2014), 투과성구조물에서 혼상류의 거동(Horgue et al., 2015), 파와 구조물 및 지반의 상호작용(Safti, 2013; Lin et al., 2015), 고립파의 발생(Wroniszewski et al., 2014), 선체운동과 항주파 및 추진(Shen et al., 2015) 등에 OpenFOAM[®] 모델을 적용한 연구들이 수행되고 있다. 하지만, 소스코드 개발을 주도한 유럽을 중심으로 활발히 사용·개발되고 있지만, 국내 특히 해안공학분야에서의 적용사례는 매우 미진한 실정에 있다.

오픈소스 기반인 OpenFOAM® 모델의 경우 초기에는 높은 범용성을 목적으로 개발되어 왔지만, 해안 및 항만공학에 적용하기 위해서 요구되는 조파기능 및 반사파제어기능이 불충분하여 파동역학에 관련된 공학적 문제로의 적용에는 한계가 있었다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 Higuera et al.(2013)은 3차원 VARANS(Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 기초로 OpenFOAM® 모델에 조파기능과 반사파제어 기능을 추가적으로 부가한 IHFOAM 모델을 개발하였다. 이후, Higuera et al.(2014)은 IHFOAM 모델에 공극률을 갖는 투과성구조물에서 유체저항을 고려하는 모듈을 추가하였으며, 최근 들어서 Higuera et al.(2015)은 Multi-paddle piston 방식의 조파기능을 완성하고, 조파와 반사파제어를 위한 감쇠영역에서 Cutting-edge 기술을 이용하여 CFD 기반의 수치계산에서 단점으로 지적되고 있는 계산비용을 절감한 olaFlow(olaFlow Reference Manual; <https://github.com/phicau/olaFlow/blob/master/reference.zip>) 코드를 개발하였다.

다음으로, 본 연구에서 표사제어구조물 혹은 해역제어구조물로 적용되는 잠제와 LCS에 대해 기술한다. 여기서, 천단고가 정수면보다 낮아 수중에 설치되는 잠제는 연안의 자연경관을 유지하는 친환경적인 효과와 더불어 공학적으로는 잠제 배후에 양빈된 저질의 침식을 방지하거나 혹은 Photo 1.1과 같은 침식성 해빈에서 저질이동을 방지하여 해빈의 현상유지·회복을 도모할 수 있어 자연발생적인 형태와 유사한 해빈을 조성할 수 있는 것으로 알려져 있다.

그러나, 우리나라 남·동해안을 비롯한 다수의 해역에 침식방지대책으로 잠제를 계획·설치하여 왔지만, 의도한 침식방지 역할이 충실히 수행되는 현장은 그다지 많지 않은 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로는 잠제의 천단폭, 개구폭, 길이 및 해안선에서 이격거리 등이 현장조건에 부합되지 않게 설치된 것, 그리고 평상파랑과 이상파랑의 두 파랑조건에 동시에는 부합되지 않게 설치된 것 등을 들 수 있을 것이다.

다음의 Fig. 1.1은 국내현장에 설치된 잠제의 배치조건을 분석하여 그의 무차원체원을 도기한 결과 (Shim, 2017)이다(그림에서 G 는 개구폭, S 는 해안선에서 잠제까지의 이격거리, L_s 는 잠제의 길이이며, 이는 후술하는 식(1.1)에서 L_s 의 2배에 해당함). 분석에 따르면 무차원연직축 L_s/G 의 변동폭이 매우 크게 나타나는 연직축의 값은 신중히 결정될 필요가 있고, Shim(2017)은 이 영역에 대한 3차원이동상수리 실험으로부터 침식방지의 목적상 무차원연직축의 값으로 3.0-6.0을 제시하였다.

여기서, 침식방지대책으로 설치되어 성공적인 역할을 수행하는 것으로 알려진 Photo 1.2의 부산 송도해수욕장 전면 해역에서 잠제를 예로 나타낸다. 한편, 전술한 바와 같이 잠제가 경관 및 해양환경의 측면 등에서 우수한 요소가 고려되지만, 해빈의 미흡한 침식방지대책과 광폭이라는 비경제적인 관점이 또한 많이 지적되고 있는 것이 현실이다.



(a) 2009.9.10.

(b) 2012.10.23.

Photo 1.1. Weolcheon-coast of Samcheok city from Google Earth.

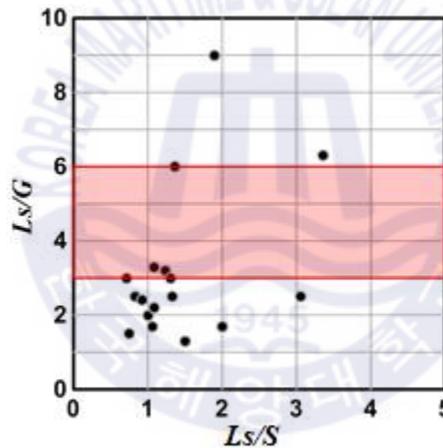


Fig. 1.1. Layout condition of submerged breakwaters installed in Korea.

따라서, 일본 및 유럽에서는 전술한 잠제의 기능에서 단점을 보완할 수 있는 해안구조물로 Photo 1.3에서 제시하는 LCS에 오래 전부터 관심을 집중하여왔다. 여기서, LCS는 일반적으로 해빈을 보호하기 위해 해안에 평행한 낮은 천단의 구조물로, 전술한 잠제와 이안제(detached breakwater)의 중간적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있으며, LCS의 형상은 잠제나 이안제와 동일하지만, 천단고가 이안제보다 상대적으로 낮은 저천단이므로 고파랑의 경우는 월파가 허용되는 구조이고, 따라서 종래의 이안제보다 작용수평파력이 적어진다. 그리고, 광폭에 의한 마찰저항을 향상시키고 천단수심을 적게 하여 천단상에

서 강제쇄파를 유도하는 잠제의 파랑제어기구와는 달리, LCS는 잠제에 비해 천단폭이 좁고, 천단이 공기중으로 돌출되어 천단고가 높기 때문에 반사와 월파 및 미찰저항에 의한 파랑제어기능이 우수하므로 잠제보다는 훨씬 경제적이다. LCS와 잠제 모두 해빈에 작용되는 파에너지를 소멸시키지 않고 어느 정도로 줄이지만, LCS의 경우가 더 많은 전달파에너지를 감소시킨다. 이상과 같은 LCS의 장점에 주목하여 유럽에서는 많은 이론 및 실험연구를 수행하여왔고, 결과의 현장적용으로 설계기술이 많이 향상되었으며, 또한 집대성되었다. 이에 대한 경우로, Lamberti and Martinelli(1999)는 유럽에서 연안관리를 위한 LCS의 적용사례를 종합하였고, Hawkins et al.(2007)은 LCS에 대한 설계지침서를 발표하였다.



Photo 1.2. Submerged breakwaters to protect beach erosion of Songdo, Busan(<https://www.crowdpic.net>).



Photo 1.3. DELOS(www.delos.unibo.it).

한편, Black and Andrews(2001)는 3차원잠제의 배치에서 단일잠제의 경우에 식(1.1)과 같은 3개의

매개변수를 사용하여 육계사주(tombolo)와 설상사주(salient)의 형성조건을 제시하였다.

$$\frac{S_{off}}{L_s} = 0.5 \left(\frac{L_s}{S} \right)^{-1.27} \quad (1.1)$$

여기서, S_{off} 는 잠제 설치로 인한 변형후의 해안선과 잠제와의 거리를 나타내며, 다음의 Fig. 1.2에 무차원매개변수 L_s/S 와 S_{off}/L_s 의 관계를 제시하였다. Fig. 1.2의 좌측 그림에는 설상사주의 형성조건인 $L_s/S < 2.0$ 과 본 연구에서 잠제의 각 배치조건을 나타내며, 우측 그림에는 각 조건을 보다 상세히 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 후술하는 본 연구에서 잠제의 배치조건은 모두 $L_s/S < 2.0$ 의 범위에 속하므로 설상사주가 형성되는 조건을 만족한다. 따라서, 본 연구에서 잠제는 설상사주가 형성되는 배치조건하에 3차원과동장에서 물리량들이 논의 · 검토되었다는 점을 강조하여 둔다.

그리고, Black and Andrews(2001)는 $L_s/S > 0.6$ 의 경우는 육계사주가 형성되고, $L_s/S < 2.0$ 의 경우는 설상사주가 형성되는 조건으로 나타내었다. 특히, Sulis et al.(2017)은 식(1.1)과 섬(island)에 대한 제안식 $S_{off}/L_s = 0.4(L_s/S)^{-0.52}$ (Black and Andrews, 2001)과를 결합한 $S_{off}/L_s = 0.48(L_s/S)^{-1.23}$ 을 이탈리아 Sardinia섬 주변의 많은 해빈에 형성된 설상사주에 관한 모니터링결과에 적용하였으며, 이로부터 Black and Andrews(2001)가 제시한 설상사주의 형성조건이 95% 일치한다는 사실을 규명하였다.

또한, Harris and Herbich(1986)와 Dally and Pope(1986)는 이안제에서 육계사주와 설상사주의 형성조건으로 각각 $L_s/S > 1.0 \sim 1.5$ 및 $L_s/S = 0.5 \sim 1.0$ 을 제시하였고, 개구폭의 영향을 추가하여 다기(多基)이안제에서 설상사주의 형성조건으로 $G/L_s^2 > 0.5$ 를 제시하였다. 여기서, Pilarczyk and Zeidler(1996)는 Harris and Herbich(1986)와 Dally and Pope(1986)가 제시한 결과식을 기초로 하여 다기이안제에서 설상사주의 형성조건으로 전달율 K_t 를 포함한 다음의 식(1.2)를 제안하였다.

$$G \frac{S}{L_s^2} > 0.5(1 - K_t) \quad (1.2)$$

여기서, K_t 는 2차원이안제에서 월파에 의한 전달율로, 범위는 0.1-0.3이며, 개구폭 G 는 $L \leq G \leq L_s$ (L 은 파장의 범위에서 값을 취한다. 그러나, 다기이안제에 대한 이 결과는 이안제의

경우에는 적용될 수 있지만, 본 연구의 잠제에는 적용될 수 없다.

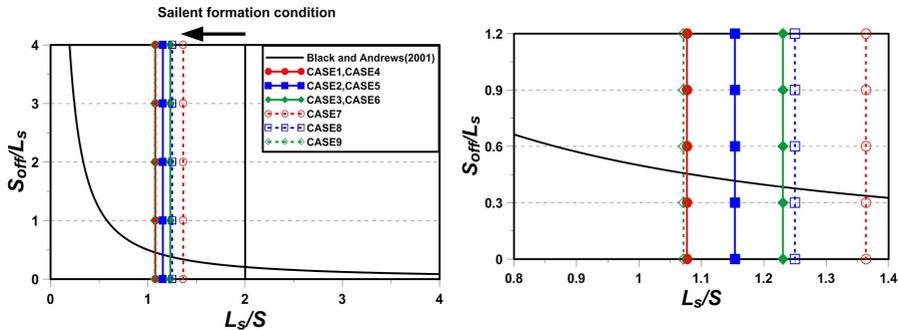


Fig. 1.2. Predictive relationship between L_s/S and S_{off}/L_s of salient formation condition and layout of submerged breakwater.

1.2 본 연구의 내용

본 연구의 잠제 혹은 LCS가 설치된 3차원해역에서 구조물에 의한 파고 및 해빈류 등의 변동특성을 규명하기 위하여 전술한 *olaFlow* 모델(Higuera et al., 2015)을 적용하였다. 이에 본 연구에서 수행되는 2차원 혹은 3차원수치해석은 다음과 같이 내용으로 구성된다.

(1) 서론

제1장에서는 본 연구의 배경과 목적 및 구성과 내용에 대해 간략히 기술하였다.

(2) *olaFlow* 모델의 수치해석이론 및 검증

제2장에서는 *olaFlow* 모델의 기초방정식과 검증을 기술하였다. 검증에서는 기존의 수치해석결과 혹은 수리실험결과와 비교되었다. 검증은 다음에 대해 실시되었다.

- 다공질매질을 통과하는 단파의 수위변동
- 투과성잠제 주변에서 파랑변동과 잠제내 및 지반내에서 과잉간극수압변동
- 파랑과 흐름의 공존장내 평균유속
- 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압
- 3차원불투과성잠제 주변에서 수위 및 유속
- 불규칙파의 조파

(3) 투과성잠제 주변에서 규칙파와 흐름의 공존장내 2차원파동장의 수치해석

제3장에서는 흐름과 규칙파가 공존하는 유체장에 투과성의 잠제구조물이 설치된 경우를 대상으로, 흐름방향의 변화 및 모래 혹은 자갈을 모사하는 배후사면을 고려하는 경우에 잠제 주변에서 수위변동과 파고변화 및 주파수스펙트럼, 쇄파형상, 평균유속 및 평균난류운동에너지 등과 같은 수리학적 특성을 검토하였다.

(4) 투과성잠제 주변에서 불규칙파와 흐름의 공존장내 2차원파동장의 수치해석

제4장에서는 불규칙파와 흐름이 공존하는 유체장에 모래 혹은 자갈로 구성된 배후사면의 전면에 놓인 투과성잠제구조물을 대상으로 흐름방향 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 제곱평균제곱근파고변화, 주파수스펙트럼의 변동, 쇄파양상의 차이, 평균유속 및 평균난류운동에너지의 변화 등과 같은 수리 특성을 면밀히 검토하였다.

(5) 투과성잠제 주변에서 규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석

제5장에서는 잠제 배후에 설상사주가 형성되는 조건하에서 3차원잠제의 개구폭, 잠제와 해안선 사이의 거리, 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잠제 주변에서의 외력환경인 파고분포와 평균수위분포를 검토하였다.

(6) 투과성잠제 주변에서 불규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석

제6장에서는 불규칙파랑 및 설상사주의 형성조건하에서 3차원잠제의 개구폭과 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 지승평균평방근파고분포와 같은 수면변동 특성과 평균유속(해빈류)의 분포 및 평균난류운동에너지의 분포 등과 같은 수리학적 특성을 검토함과 동시에 설상사주 형성과의 연관성을 규명하였다.

(7) 투과성잠제 주변에서 규칙파 혹은 불규칙파와 흐름의 공존장내 3차원파동장의 수치해석

제7장에서는 설상사주 형성조건하 규칙파동장 혹은 불규칙파동장에 흐름(순방향과 역방향)이 존재하는 경우를 대상으로 3차원잠제의 주변에서 파고, 해빈류, 순환셀 및 평균난류에너지 등의 변동특성을 흐름의 특성과 연계하여 논의하였다.

(8) 저천단구조물 주변에서 규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석

제8장에서는 잠제 대신에 LCS를 적용한 경우에 LCS의 배치를 잠제의 경우와 동일하게 하여 LCS 주변에서 파고와 유속변화 및 난류운동에너지 등을 도출하고, 구조물의 개구폭, 천단수심과 같은 배치형상의

변화 및 입사파고와 주기와 같은 입사파랑조건의 변화에 따른 결과를 잠제의 경우와 비교·검토하여 LCS와 잠제의 각각에 대한 특성의 차이 등을 면밀히 분석·논의하였다.

(9) 결론

제2장~제9장에서 잠제와 LCS에 2차원 혹은 3차원, 규칙과 혹은 불규칙과 및 흐름의 유무가 적용된 경우에 도출된 파고, 수위, 해빈류, 난류운동에너지 등에 관한 각 물리량의 변동특성을 면밀히 검토·논의하였으며, 각 장에서는 도출된 중요한 사항을 결론으로 나타내었고, 본 논문의 결론에서는 각 결론을 종합하여 기술하였다.

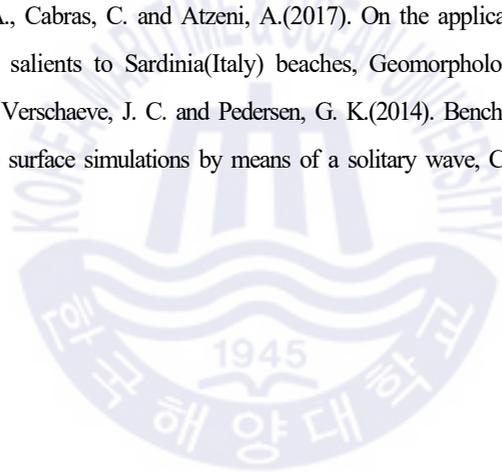
본 박사학위논문은 저자의 박사과정 동안 수행한 다음의 공동 연구논문을 바탕으로 작성되었다는 것을 부기하여 둔다.

- (1) Numerical Simulation of Three-Dimensional Wave-Current Interactions Due to Permeable Submerged Breakwaters by Using olaFLOW, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 30(4), 166~179, 2018. 08.
- (2) 3D Numerical Simulation of Water Surface Variations and Velocity Fields around Permeable Submerged Breakwaters under Irregular Waves, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 30(4), 153~165, 2018. 08.
- (3) Nonlinear Irregular Waves-current Interaction on Flow Fields with Wave Breaking around Permeable Submerged Breakwater, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 30(2), 39~50, 2018. 04.
- (4) Characteristics of Water Surface Variations around 3-Dimensional Permeable Submerged Breakwaters under the Conditions of Salient Formation, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 29(6), 305~314, 2017. 12.
- (5) Characteristics of Velocity Fields around 3-Dimensional Permeable Submerged Breakwaters under the Conditions of Salient Formation, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 29(6), 399~409, 2017. 12.
- (6) Numerical Analysis on Wave Characteristics around Submerged Breakwater in Wave and Current Coexisting Field by OLAFOAM, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 28(6), 332~349, 2016. 12.
- (7) Variation Characteristics of Wave Field around Three-Dimensional Low-Crested Structure,

References

- Berkhoff, J.C.W.(1972). Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., 471-490.
- Black, K. P. and Andrews, C. J.(2001). Sandy shoreline response to offshore obstacles Part 1: Salient and tombolo geometry and shape, J. Coastal Research, 82-93.
- Chen, L. F., Zang, J., Hillis, A. J., Morgan, G. C. J. and Plummer, A. R.(2014). Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM, Ocean Engineering, 88, 91-109.
- Dally, W. R. and Pope, J.(1986). Detached breakwaters for shore protection(No. CERC-TR-86-1), Coastal Engineering Research Center Vicksburg MS.
- Harris, M. M. and Herbich, J. B.(1986). Effects of breakwater spacing on sand entrapment, J. Hydraulic Research, 24(5), 347-357.
- Hawkins, S., Burcharth, H., Zanuttigh, B. and Lamberti, A.(2007). Environmental design guidelines for low crested coastal structures, 1st Ed.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J.(2013). Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM[®], Coastal Engineering, 71, 119-134.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J.(2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM[®]. Part I: Formulation and validation, Coastal Engineering, 83, 243-258.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, Coastal Engineering, 101, 35-47.
- Horgue, P., Soulaire, C., Franc, J., Guibert, R. and Debenest, G.(2015). An open-source toolbox for multiphase flow in porous media, Computer physics Communications, 187, 217-226.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsoe J.(2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM[®], International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, 1073-1088.
- Karlsson, T.(1969). Refraction of continuous ocean wave spectra, J. Waterways and Harbour Division, Proc. ASCE, 95, 437-448.

- Lamberti, A. and Martinelli, L.(1999). Prototype measurements of the dynamic response of caisson breakwaters, Coastal Engineering 1998, 1972-1985.
- Lin, Z., Guo, Y., Jeng, D. S., Rey, N. and Liao, C.(2015). An integrated finite element method model for wave-soil-pipeline interaction, Proceedings of IAHR.
- Peregrine, D.H.(1967). Long waves on a beach, J. Fluid Mech., 27, 815-827.
- Pilarczyk, K. W. and Zeidler, R. B.(1996). Offshore breakwaters and shore evolution control.
- Safti, H.(2013). A numerical wave-structure-soil interaction model for monolithic breakwaters subject to breaking wave impact, Ports 2013, ASCE, 1974-1984.
- Shen, Z., Wan, D. and Carrica, P. M.(2015). Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering, Ocean Engineering, 108, 287-306.
- Shim, B.S.(2017). Hydraulic characteristics and sediment transport around artificial reef for beach erosion control. Doctor's Thesis, Catholic Kwandong University.
- Sulis, A., Balzano, A., Cabras, C. and Atzeni, A.(2017). On the applicability of empirical formulas for natural salients to Sardinia(Italy) beaches, Geomorphology, 286, 1-13.
- Wroniszewski, P. A., Verschaeve, J. C. and Pedersen, G. K.(2014). Benchmarking of Navier-Stokes codes for free surface simulations by means of a solitary wave, Coastal Engineering, 91, 1-17.



제 2 장 olaFlow 모델의 수치해석이론 및 검증

2.1 서언

유한체적법에 근거한 3차원수치해석모델인 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)은 원래 OpenFOAM[®] 모델(Jacobsen et al., 2012)을 근간으로 개발되었다. 개발단계에서, 그리고 많은 연구자들에 의한 여러 적용분야에서 OpenFOAM[®] 모델을 포함하여 olaFlow 모델의 타당성이 검증되어왔다(Chen et al., 2019; Devolder et al., 2018; Higuera et al., 2013; Higuera, et al., 2014; Jacobsen et al., 2012; Lin et al., 2017; López et al., 2018). 그러나, 본 연구에서 대상으로 하는 잠재나LCS와2차원파랑 혹은3차원파랑과의 상호간섭에 대한 검증은 거의 실시되지 않았으며, 특히 3차원파동장에서 규칙파 혹은 불규칙파와 흐름이 공존하는 경우에 대한 검증은 거의 수행되지 않은 것으로 판단된다.

본 장에서는 본 연구에서 적용되는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의 기초방정식만을 간단히 기술하고, 다음의 경우에 대해 검증을 실시하여 olaFlow 모델의 적용성·타당성을 논의한다.

- 다공질매질을 통과하는 단파의 수위변동
- 투과성잠재 주변에서 파랑변동과 잠재내 및 지반내에서 과잉간극수압변동
- 파랑과 흐름의 공존장내 평균유속
- 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 과압
- 3차원불투과성잠재 주변에서 수위 및 유속
- 불규칙파의 조파

2.2 olaFlow 모델의 기초방정식

비압축성유체의 혼상류해석에 대해 소스코드가 공개된 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)는 유한체적 이산화법과 VOF 법(Kissling et al., 2010)을 이용하며, 그의 지배방정식은 다음의 식(2.1)과 (2.2)에 나타내는 연속방정식과 운동량보존방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\phi} \rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \right] = - \frac{\partial \langle p^* \rangle^f}{\partial x_i} + \phi g_j X_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right] - [CT] \quad (2.2)$$

여기서, t 는 시간, x_i 는 공간벡터좌표, ρ 는 후술하는 액체와 기체상태를 고려한 혼상유체의 밀도, u_i 와 u_j 는 속도벡터, p^* 는 Pseudo-dynamic 압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 는 공극률, D_{50} 은 중앙입경이며, μ_{eff} 는 $\mu + \nu_{turb}$ 이며, ν_{turb} 는 난류동점성계수, $[CT]$ 는 투과성구조물에 의한 저항 항으로 다음의 식(2.3)과 (2.4)로 주어진다.

$$[CT] = A \langle u_i \rangle + B |\langle u \rangle| \langle u_i \rangle + C \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} A = \alpha \frac{(1-\phi)^3}{\phi^2} \frac{\mu}{D_{50}^2} \\ B = \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-\phi}{\phi^2} \frac{\rho}{D_{50}} \\ C = 0.34 \end{cases} \quad (2.4)$$

여기서, α, β 는 Engelund 공식(1953)에 의해 제시된 마찰계수이다. KC 는 Keulegan-Carpenter 수로 $T_o u_M / D_{50} \phi$ 를 나타내며, T_o 은 진동주기, u_M 은 최대진동속도이다, 또한 C 는 del Jesus(2011)의 연구결과에 따라 일정치 $C=0.34$ 가 적용되었다.

혼상류에 있어서 액체와 기체의 경계면 추적에는 계산격자내에서 유체(액체)가 점유하는 체적을 나타내는 유체율 함수(VOF 함수) F 를 이용하는 VOF 법을 적용하며, VOF 함수는 액체셀의 경우 $F=1$, 기체셀의 경우 $F=0$, 그리고 액체와 기체를 모두 포함하고 있는 경계셀의 경우는 $0 < F < 1$ 의 값을 갖는다. VOF 함수 F 는 식(2.1)과 (2.2)로부터 산정된 유체속도에 의해 식(2.5)의 이류방정식으로부터 계산된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_i \rangle F}{\partial x_i} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_{ic} \rangle F(1-F)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

여기서, u_{ic} 는 인공압축항으로 $|u_{ic}| = \min [c_\alpha |u_i|, \max (|u_i|)]$ 과 같이 주어지며, 본 연

구에서는 $c_\alpha=1$ 을 적용하였다. 또한, 각각의 계산셀에서 유체의 밀도와 점성계수는 VOF 함수를 가중치로 적용하여 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\rho = \rho_{water}F + \rho_{air}(1 - F) \quad (2.6)$$

$$\mu = \mu_{water}F + \mu_{air}(1 - F) \quad (2.7)$$

또한, 진술한 난류동점성계수 ν_{turb} 는 LES(Large Eddy Simulation) 모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하여 산정하였으며, 그 밖의 olaFlow 모델에 대한 상세한 수치해석기법은 Lee et al.(2016) 혹은 olaFlow 매뉴얼([http:// openfoamwiki.net/index.php/Contrib/olaFlow](http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/olaFlow))을 참조하기 바란다.

2.3 불규칙파의 조파이론

불규칙파는 선형파이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여 무한급수의 합으로 고려된다. 수치조파에서는 조파지점에서 수면파형 η , 수평 및 연직유속 u, w 의 시간변동이 필요하며, 이들은 각각 식(2.8)-(2.10)과 같이 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.8)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h + z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.9)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m (h + z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.10)$$

여기서, ε_m 은 Random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, M 은 성분파의 수, h 는 수심이다. 그리고, 연직좌표 z 는 정수면에서 연직상방을 (+)방향으로 취하며, 진폭 a_m 은 다음의 식(2.11)로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (2.11)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도이며, 본 연구에서는 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식(2.12)의 Modified Bretshneider-Mitsuyasu(Goda, 1988)

스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (2.12)$$

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수 f_m 의 선택방법에는 주파수스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 동일하도록 등에너지로 분할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Modified Bretshneider-Mitsuyasu(Goda, 1988) 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(2000)에 의해 제안된 다음의 식(2.13)을 이용하여 주파수 f_m 을 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{\ln [2M / (2m - 1)]\}^{-1/4}, \quad m = 1, \dots, M \quad (2.13)$$

2.4 olaFlow 모델의 검증

2.4.1 다공성매질을 통과하는 단파의 수위변동

Liu et al.(1999)은 실내수리모형실험을 통해 상·하류에서 큰 수위차를 갖는 게이트의 급속개방에 의해 발생한 단파가 다공성매질을 통과하는 경우에 대한 수위변화를 측정하였다. 실험은 길이 89cm, 높이 58cm의 2차원수조에서 수행되었으며, 수조내에 폭 30cm의 다공성매질을 설치하였다. 다공성매질의 공극률은 $\phi=0.49$, 중앙입경 $D_{50}=1.59\text{cm}$ 이며, 저항계수는 $\alpha=50$ 과 $\beta=2$ 를 각각 적용하였다. 또한, Liu et al.(1999)의 실험을 수치모의하기 위해 수리실험에서 사용한 수조와 동일한 크기의 계산영역을 설정하고 $\Delta x=\Delta z=0.5\text{cm}$ 의 정방형 계산격자를 이용하여 178×116의 해상도로 게이트 개방으로부터 4초 동안 수치계산을 수행하였다. 적용한 난류모델은 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 수록된 LES 모델로 k 방정식(Ghosal et al., 1995)이며, 바닥경계조건은 바닥 부근의 경계층까지 고려하지 않으므로 Non-slip 조건을 적용하였다.

Fig 2.1은 게이트를 개방한 후 시간경과에 따른 수리모형실험과 수치계산결과와의 수위변동 결과를 나타내며, 그림에서 다공성매질은 음영으로 표기되었다. 그림으로부터 $t=0.35\text{s}$ 의 $x=0.5\text{m}$ 부근에서 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 수위변동의 계산결과가 Liu et al.(1999)의 실험결과와 다소 상이한 결과를 보이고 있지만, 이는 수치계산에서는 순간적인 게이트의 개방속도를 고려하고 있지 않고, 더욱이 바닥 부근에서 발생하는 순간적인 흐름에 따른 경계층의 형성 등이 상대적으로 낮은 계산 해상도를 갖는 바닥 부근에서 정확하게 수치적으로 모의되지 않은 현상에 기인하는 것으로 판단된

다. 하지만, 전체적으로 *olaFlow* 모델의 수치계산결과는 다공성매질의 전·후 및 내부영역에서 시·공간적으로 변동하는 수위변화를 정도 높게 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

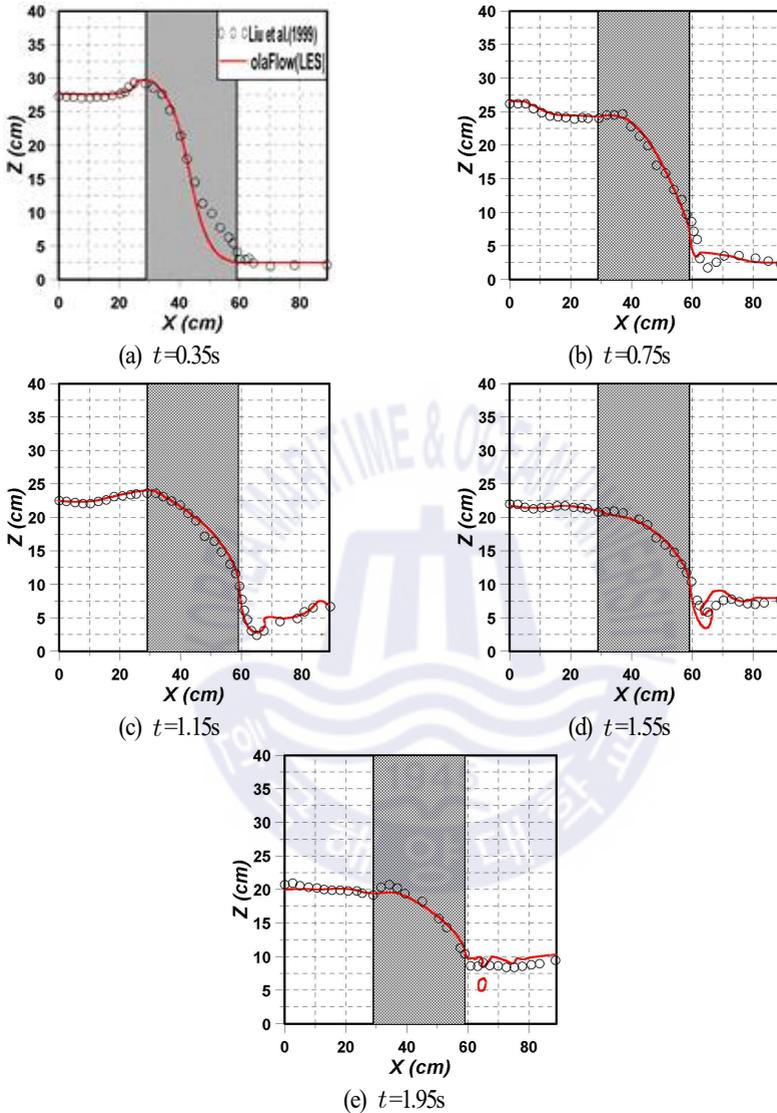


Fig. 2.1. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

2.4.2 투과성잠제 주변에서 파랑변동과 잠제내 및 지반내에서 과잉간극수압변동

투과성잠제에 대한 *olaFlow* 모델(Higuera et al., 2015)의 계산정도를 검증하기 위하여 모래지반상에

설치된 투과성잠제 주변에서 수위와 잠제내 및 모래지반내에서 진행파동으로 인한 과잉간극수압변동을 수리모형시험으로부터 측정된 Mizutani et al.(1998)에 의한 결과, 그리고 파동장과 지반거동의 해석에 각각 VARANS 방정식(Hsu et al., 2004)과 Biot 방정식(Biot, 1941)을 적용한 PORO-WSSI 모델(Jeng et al., 2013)에 의한 수치해석결과와 비교·검토한다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 25m, 높이 0.95m이며, 이 때 입사파의 파고는 $H=3\text{cm}$, 주기는 $T=1.4\text{s}$, 정수심은 $h=0.3\text{m}$ 이다. 또한, 조파관 반대쪽의 수조 끝단에는 반사파를 제어하기 위해 감쇠영역을 설치하였다. 잠제의 제원은 높이 21cm, 폭 105cm, 전·후면의 경사는 1:2이다. 지반의 제원은 높이 19cm, 폭 360cm이고, 잠제 전·후면 경사점으로부터 85.5cm 이격된 지점까지 설치하였으며, 이 외의 영역은 불투과성지반을 설치하였다. 잠제의 공극률은 $\phi=0.33$, 중앙입경은 $D_{50}=3\text{cm}$ 이며, 지반의 공극률은 $\phi=0.3$, 중앙입경은 $D_{50}=0.1\text{cm}$ 이다.

Fig. 22는 잠제 및 지반의 제원과 수리실험결과와의 비교를 위해 측정된 수위변동 및 과잉간극수압변동의 위치를 나타낸다. 계산시간을 줄이기 위해 수조의 크기를 길이 15m, 높이 0.65m로 구성하였고, 격자크기는 $\Delta x=1.0\text{cm}$, $\Delta z=0.5\text{cm}$ 인 가변격자로 구성하였다. 수치조파는 Stokes 2차파이론을, 바닥경계조건으로는 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i=0$ 을 적용하였다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였으며, 지반의 경우는 모래입경에 해당하는 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 의 다공성매질에 대한 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을 각각 적용하였다.

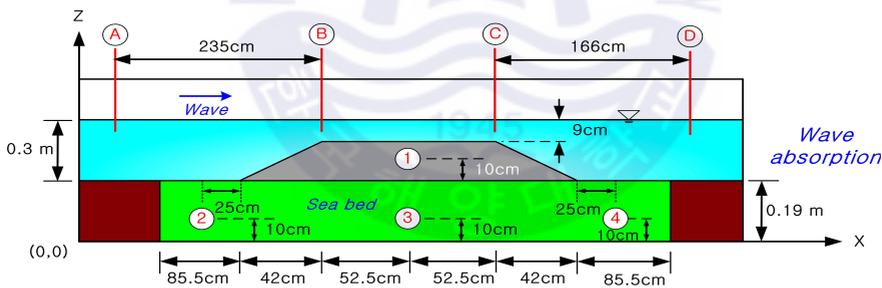


Fig. 22. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

Fig. 23은 Fig. 22에 주어진 A~D지점에서 무차원수위변동을 나타내며, olaFlow 모델에 의한 수치해석결과와 Mizutani et al.(1998)에 의한 실험치, Jeng et al.(2013)의 수치계산결과를 함께 나타낸다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 잠제 전면부인 A지점과 천단의 시작점인 B지점에서는 비선형파는 거의 발생되지 않지만, 잠제 천단의 끝부분인 C지점과 잠제의 후면부 D지점에서는 비선형파의 발생으로 파형에 관한 전·후 및 상·하에서 대칭성이 붕괴되고, 특히 D지점에서는 C지점의 파가 위상적으로

역전된 것과 같은 복잡한 파형의 수리실험결과를 매우 정도 높게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

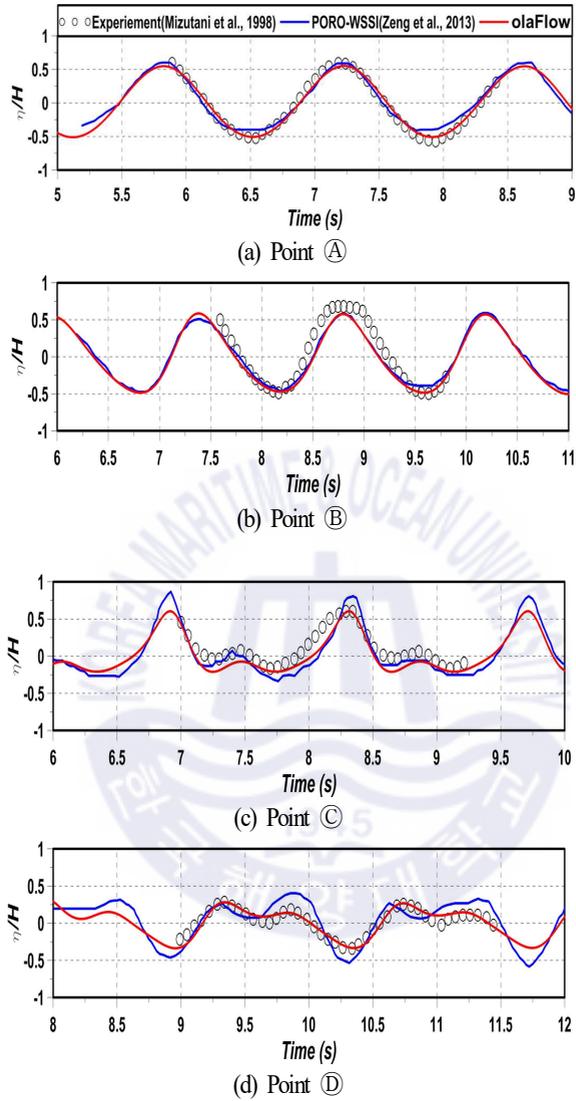


Fig. 2.3. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

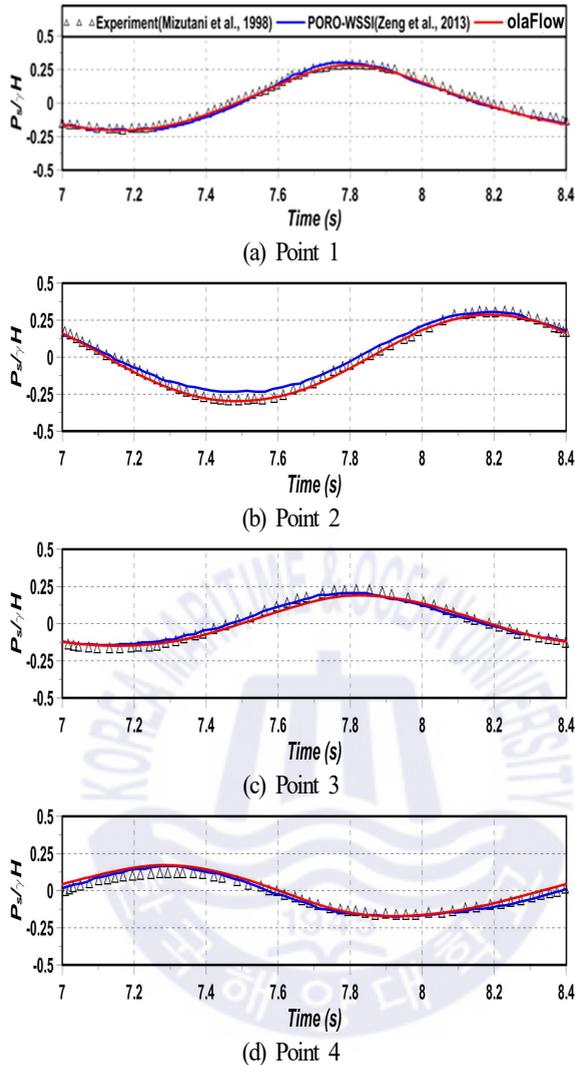


Fig. 2.4. Comparison between simulated and measured pore-water pressures.

Fig. 2.4는 Fig. 2.2에 주어진 ①~④지점에서 무차원간극수압변동을 나타내며, Fig. 2.3와 같이 olaFlow 모델에 의한 수치해석결과와 Mizutani et al.(1998)에 의한 실험치 및 Jeng et al.(2013)에 의한 수치계산결과를 같이 나타낸다. 그림으로부터 잠재내 및 해저지반내에서 간극수압에 관한 실험치를 전반적으로 잘 재현하고 있는 것으로 판단되며, 더불어 간극수압의 시간변동에서 비선형성분이 필터링되어 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, olaFlow 모델에 의한 수치해석결과는 지반의 불변형조건하에 지반내 간극수압의 변동까지도 실험치를 매우 정확하게 재현하고 있으므로 해저지반의 간극수압변동에도 적용성이 매우 높은 것으로 판단된다.

2.4.3 파랑과 흐름의 공존장내 평균유속

Umeyama(2011)는 흐름상에 규칙파를 조파시켜 규칙파와 흐름의 상호작용에 따른 수위변동과 유속 변화를 PIV(Particle Image Velocimetry)와 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 법을 이용하여 실험적으로 측정하였다. 수조의 크기는 길이 25m, 폭 0.7m, 높이 1.0m이며, 조파지점으로부터 14m의 위치에서 수위와 연직방향으로 수평평균유속을 각각 측정하였다. 실험은 흐름이 없는 상태에서 규칙파만 조파한 경우와 흐름이 존재하는 상태에서 규칙파를 조파한 케이스(WC1, WC2, 및 WC3)로 구성되며, 본 연구에서는 후자의 경우에 대해서만 olaFlow 모델에 의한 수치해석결과와 비교하여 olaFlow 모델의 타당성을 검증한다. 파고는 $H=1.03\text{cm}$ (WC1), 2.34cm (WC2) 및 3.61cm (WC3), 주기는 모든 케이스에서 $T=1.0\text{s}$, 흐름속도는 파와 순방향으로 $U=0.08\text{cm/s}$, 그리고 수심은 $h=0.3\text{m}$ 로 각각 조합·구성되었다.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 길이 17m, 높이 0.34m이며, 조파지점으로부터 10m 이격된 위치에서 수위와 연직방향으로 수평평균유속을 측정하였으며, 이 때 바닥경계조건은 Neumann 조건인 $\partial f / \partial x_i = 0$ 을 적용하였다. 격자크기는 $\Delta x = 0.5\text{cm}$, $\Delta z = 0.25\text{cm}$ 이며, 격자의 총 개수는 455,600 개이다. 목표파랑 발생을 위한 수치조파에는 Stokes 2차파이론을 사용하였으며, 난류해석에는 LES 모델 (Ghosal et al., 1995)을 적용하여 얻어진 수치결과를 비교·검토하였다.

Fig. 2.5는 규칙파와 흐름의 상호작용에 따른 수위변화의 수치계산결과를 실험결과와 비교한 것이다. 수치계산결과는 조파 이후에 완전히 발달한(fully developed) 파랑만을 대상으로 5주기 동안 산술평균한 결과이다. 그림을 살펴보면 입사파고가 증가할수록 파곡 부분에서 약간의 차이를 나타내지만 전반적으로 수치해석결과 실험치에 유사한 정도의 대응성을 나타낸다.

Fig. 2.6은 수중의 깊이 d 에서 수평평균유속을 나타낸 결과이다. 그림에서 $\bar{t} = 0.00\text{s}$ 는 수위의 측정지점에 파곡이 통과할 때의 위상, $\bar{t} = 0.5\text{s}$ 는 파봉이 통과할 때의 위상을 각각 나타내며, $\bar{t} = 0.25\text{s}$ 는 파곡과 파봉 사이에 중간 정도의 위상이고, $\bar{t} = 0.75\text{s}$ 는 파봉과 파곡 사이에 중간 정도의 위상에 해당한다. 제시된 결과는 전술한 수위변화에서 언급한 바와 같이 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 5주기 동안 산술평균한 결과이다.

그림으로부터 위상에 관계없이 바닥 부근에서는 급격한 유속변화가 나타나고, 수면으로 근접할수록 파곡의 위상에서는 유속이 약간 감소하고, 반대로 파봉의 위상에서는 유속이 약간 증가하며, 두 위상의 사이에서는 수심별 거의 일정한 수평평균유속을 나타내는 것을 알 수 있다. 여기서, 파고의 증가에 따라 전술한 경향은 거의 유사하게 나타나지만, 파고가 증가함에 따라 진동속도성분이 크게 나타나기 때문에 일정한 흐름속도와의 상호작용으로 유속의 크기변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 2.6(b)의 $\bar{t} = 0.25\text{s}$ ($d=20\text{cm}$ 부근)와 $\bar{t} = 0.75\text{s}$ ($d=25\text{cm}$ 부근)에서 약간의 차이가 발생하는 것은 Umeyama(2011)에서 실험오차로 판정된 점을 감안하여 이를 제외하면 olaFlow 모델(Higuera et

al., 2015)에 의한 수치해석결과와 실험결과의 대응성이 타당하다는 것을 확인할 수 있다.

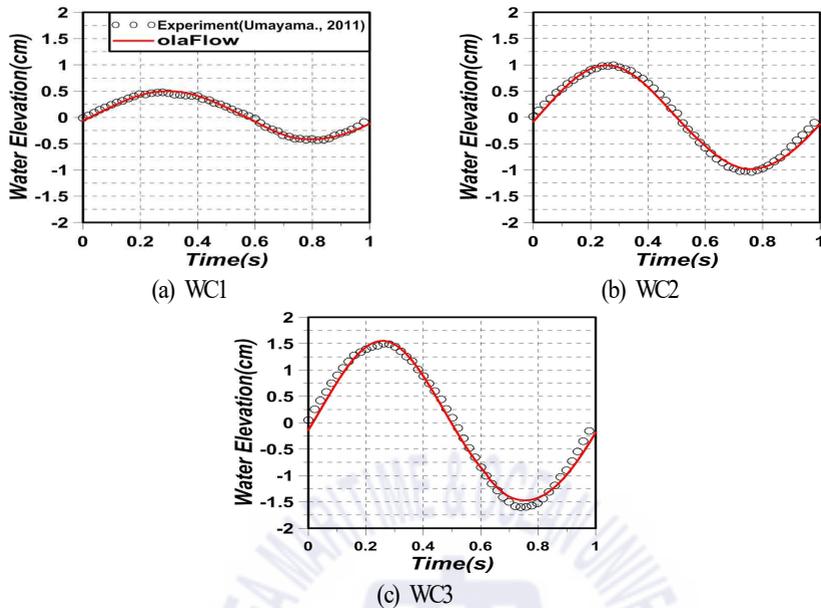


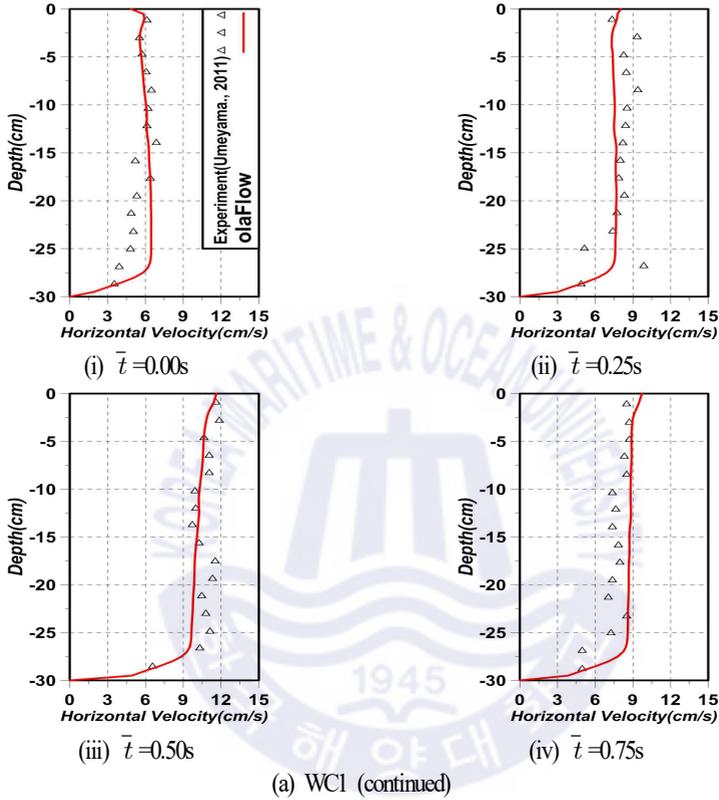
Fig. 2.5. Comparison of simulated and measured water surface elevations in wave-current interaction.

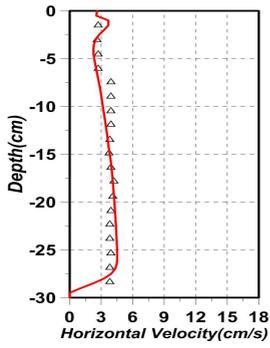
2.4.4 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압

olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의 이안제 혹은 LCS로 적용성을 검토할 목적으로 Lara et al.(2012)이 수리실험 및 수치해석을 수행한 투과성직립이안제를 대상으로 수치해석을 수행하여 도출된 수치결과를 Lara et al.(2012)에 의한 수위 및 파압에 관한 실험결과와 IH3VOF 모델에 의한 수치해석결과를 각각 비교·검토한다. Lara et al.(2012)은 Fig. 2.7과 같이 수심 $h=0.4\text{m}$ 를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.6m , 길이 4.0m , 폭 0.5m 의 투과성직립이안체에 규칙파를 작용시켜 직립벽 주변에서 수위변동과 파압변화를 각각 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 17.8m , 폭 8.6m , 높이 1.0m 이며, 투과성직립벽은 조파판에서 10.5m 로 이격되어 있고, 우측벽에 접해있다. 양측벽과 수조 끝단은 완전반사가 발생되도록 불투과성직립벽으로 구성되었다. 이 때, 투과성직립벽의 공극률은 $\phi=0.51$, 중앙입경은 $D_{50}=1.5\text{cm}$, 입사파고는 $H=9\text{cm}$, 주기는 $T=4\text{s}$ 이다.

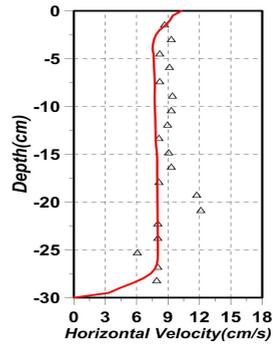
수치해석에 사용된 수치파동수조의 크기는 전술한 수리실험수조의 경우와 동일하지만, 구조물의 천단상으로 월파가 발생되지 않으므로 계산효율상 계산결과에 영향이 없는 것으로 판단되는 수조 높이를 투과성직립벽의 경우와 동일한 0.6m 로 구성하였다. 격자크기에서 수조 길이방향의 경우 조파직점에

서부터 8m까지는 $\Delta x=5\sim 2.5\text{cm}$ 의 가변격자로, 8~12.5m의 범위에서는 $\Delta x=2.5\text{cm}$ 로, 12.5~17.8m의 범위에서는 $\Delta x=5\sim 2.5\text{cm}$ 의 가변격자로 각각 구성하였고, 수조 폭방향의 크기는 $\Delta y=2.5\text{cm}$, 연직방향의 크기는 $\Delta z=1.25\text{cm}$ 로 각각 일정한 격자로 구성하였으며, 따라서 적용된 격자의 총 개수는 대략 880만에 달한다.

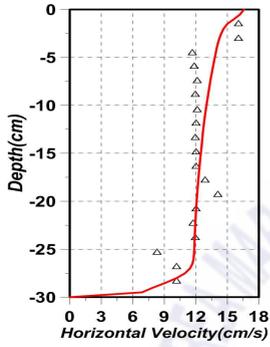




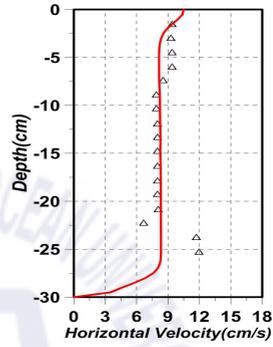
(i) $\bar{t} = 0.00s$



(ii) $\bar{t} = 0.25s$

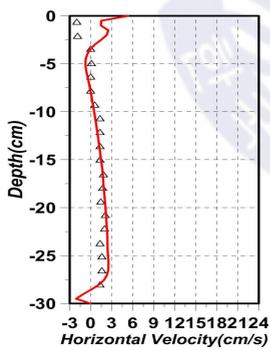


(iii) $\bar{t} = 0.50s$

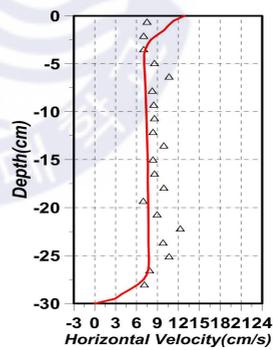


(iv) $\bar{t} = 0.75s$

(b) WC2



(i) $\bar{t} = 0.00s$



(ii) $\bar{t} = 0.25s$

(continued)

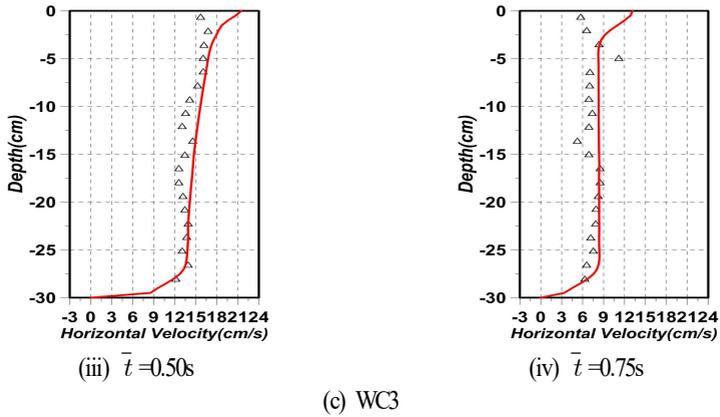


Fig. 2.6. Comparison of simulated and measured mean horizontal velocity profiles in wave-current interaction.

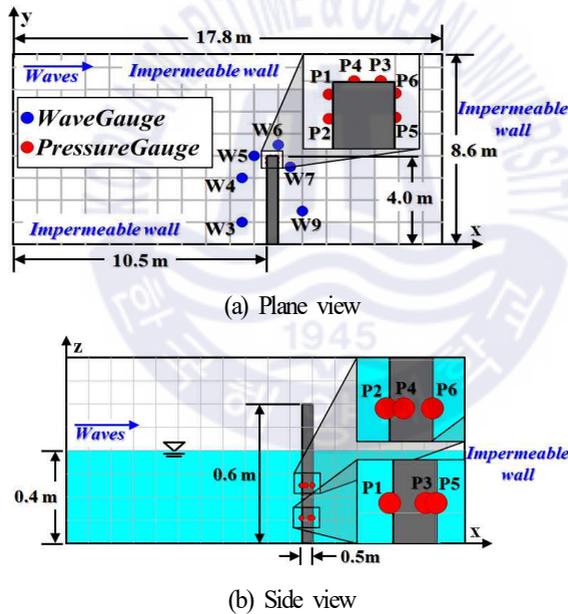


Fig. 2.7. Illustrative sketch for layout of three-dimensional basin and permeable vertical structure.

수치조파에 Cnoidal 파이론을, 난류모델에 LES 모델(Ghosal et al., 1995)을 각각 적용하였으며, 조파 개시 후 20s 동안 파랑의 전파과정을 시뮬레이션하였다. 투과성직립이안체에 대한 저항계수 식(4)의 α 와 β 는 전술한 바와 같이 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$ 과 $\beta=2.0$ 을 적용하였다. 여기서, Fig.

27은 수위 및 파압변동에 관한 수리실험 및 수치해석결과의 산정위치로, Fig. 2.7(a)가 수위변동의 경우를, Fig. 2.7(b)가 파압변동의 경우를 각각 나타내며, Table 2.1에 수위계의 설치위치를, Table 2.2에 파압계의 설치위치를 각각 제시한다. 수리실험에서 수위변동 및 파압변화는 총 15개 지점에서 각각 측정되었지만, 이 중에 6개 지점(W3~W7지점, W9지점)에서 산정된 수위와 6개 지점(P1~P6지점)에서 파압에 대한 각 실험결과를 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 수치해석결과와 이하에서 상호 비교·검토한다.

Table 2.1. Wave gauge positions.

Wave gauges	x (m)	y (m)
W3	9.5	1.0
W4	9.5	3.0
W5	10.0	4.0
W6	11.0	4.50
W7	11.5	3.50
W9	12.0	1.50

Table 2.2. Pressure gauge positions.

Pressure gauges	x (m)	y (m)	z (m)
P1	10.5	3.89	0.11
P2	10.5	3.69	0.25
P3	10.89	4.00	0.11
P4	10.69	4.00	0.25
P5	11.0	3.70	0.11
P6	11.0	3.90	0.25

Fig. 2.8은 수치해석결과와 실험결과를 비교한 투과성직립이안체 주변에서 수위변동을 나타낸 것으로, 그림에서는 IH3VOF 모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 같이 병기되어 있다. 그림을 살펴보면 W3과 W4지점은 투과성직립이안체 전면에서 수위변동을 나타낸 것으로, 8s 이후에 쌍봉형의 수위변동이 나타나며, 앞의 파봉은 입사파에 의한 것이고, 뒤는 투과성직립이안체로부터의 반사파에 의한 것이다. W5와 W6지점에서의 수위변동은 투과성직립이안체와 후면 불투과벽체로부터의 회절파 및 반사파의 영향을 동시에 받는 경우로, W6지점의 16s 근방에서 발생하는 쌍봉형의 수위변동은 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향이다. 다음의 W7지점은 투과성직립이안체에 의한 회절파가, W9지점은 후면 불투과벽체에 의한 반사파가 각각 영향을 크게 미치는 지점이다. 수리실험 및 수치해석결과의

대응성은 W6과 W7지점의 16s 이후 쌍봉형 수위변동에서 약간의 차이가 나타나지만, 전반적으로 매우 잘 구현되는 것으로 판단되며, 특히 이러한 결과는 W3, W4, W5, W9지점에서 확인할 수 있고, 또한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과와 본 수치해석결과는 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 29는 투과성직립이안체 주변에서 과압변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 비교한 것으로, Fig. 28과 동일하게 IH3VOF 모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 병기하였다. 그림을 살펴보면 투과성직립이안체 전면에서 과압변동을 나타낸 P1과 P2지점의 경우는 실험치와 거의 동일한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 투과성직립이안체과 후면 불투과벽체로부터의 회절과 및 반사파의 영향을 동시에 받는 P3-P6지점에서 과압변동은 전반적으로 실험치를 잘 재현하고 있지만, 수위변동에서와 같이 P3, P5, P6지점의 16s 근방에서 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향에 의해 생성되는 쌍봉형의 과압변동에서 약간의 차이가 인정된다. 그러나, 전체적으로 실험치를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 본 연구의 수치해석결과는 투과성직립이안체에 의한 과압변형과 작용과압의 변동과정에서 실험치를 잘 재현하고 있으므로 LCS와 같은 투과성구조물로의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

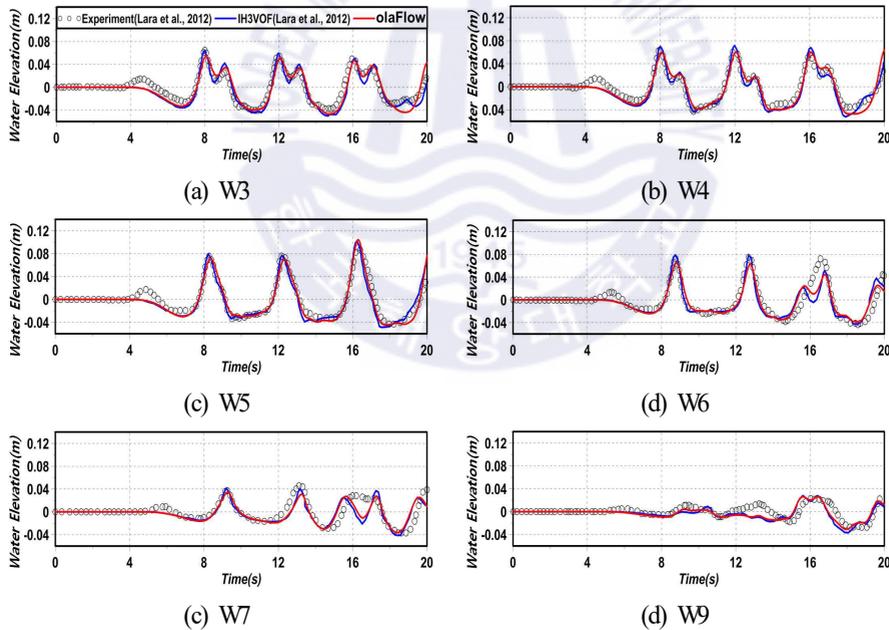


Fig. 2.8. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

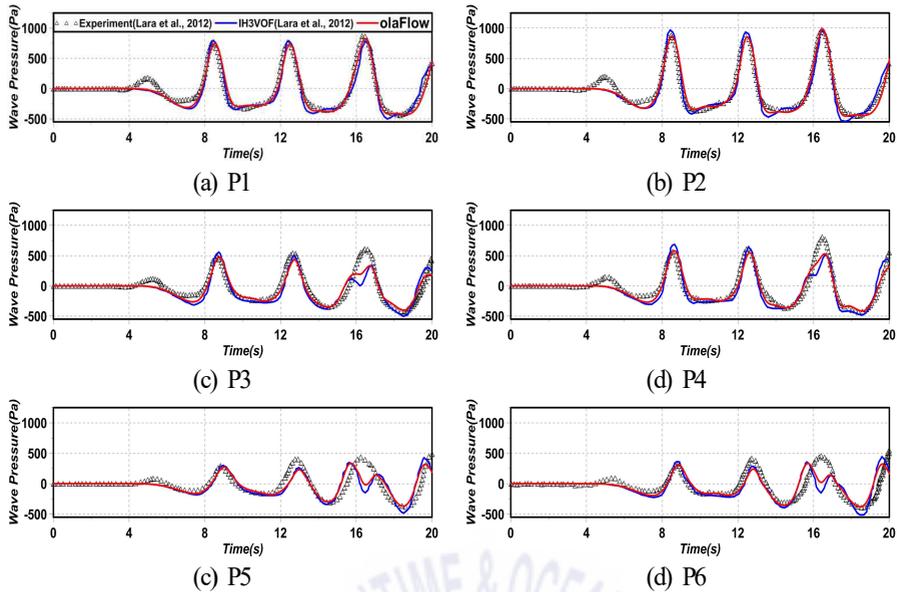


Fig. 2.9. Comparison between simulated and measured wave pressures.

2.4.5 3차원 불투과성 잠재 주변에서 수위 및 유속

구조물의 천단상에서 유수심을 갖는 3차원 잠재로 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의 적용성·타당성을 검토하기 위해 Kawasaki and Iwata(1999)의 수리실험을 재현하였다. Kawasaki and Iwata(1999)은 Fig. 2.10과 같이 $h=0.4\text{m}$ 를 갖는 3차원 파동장에 설치된 높이 0.24m 의 직사각형 불투과성 잠재에 규칙파를 작용시켜 잠재 주변에서 수위변동과 유속변화를 수리실험으로부터 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 28m , 폭 8m , 높이 0.8m 이며, 조파판에서 7m 의 이격지점에 직사각형 불투과성 잠재를 설치하였다. 그리고, 조파판 반대쪽의 수조 끝단에는 반사파의 제어를 위해 경사 $1:10$ 의 감쇠영역을 설치하였다. 입사파랑은 수위 측정에서는 파고 $H=0.1\text{m}$, 주기 $T=1.2\text{s}$ 의 규칙파를, 유속 측정에서는 파고 $H=0.087\text{m}$, 주기 $T=1.68\text{s}$ 의 규칙파를 각각 적용하였으며, 불투과성 잠재의 체면과 수위계 및 유속계의 설치위치를 Fig. 2.11에 각각 나타낸다.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 수치계산의 계산효율을 위하여 길이 $3L$ (L 은 파장)과 폭 $2L$ 로 적용되었고, 불투과성 잠재는 조파판으로부터 $1.5L$ 의 이격지점에 설치되었다. 여기서, 수위 측정시는 $L=2.0\text{m}$ 이고, 유속 측정시는 $L=3.0\text{m}$ 의 값을 가진다. 바닥경계조건은 Slip 조건을, 배후면과 양측면은 모두 감쇠영역으로 적용되었으며, 격자크기는 $\Delta x=2\text{cm}$, $\Delta y=2\text{cm}$, $\Delta z=1\text{cm}$ 이고, 격자의 총 개수는 수위 측정의 경우에 대략 310만개에, 유속 측정의 경우에 대략 702만개에 달한다. 수치조파에는 Stokes 5차파 이론을 적용하였으며, 난류모델에는 LES 모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였다.

Fig. 2.12는 Figs. 2.10과 2.11의 조건으로부터 산정된 Fig. 2.11(a)의 불투과성 잠재 주변에서 무차원 수위

변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 나타낸 것이다. 잠제 천단상인 ①과 ②지점에서는 급격한 비선형과의 발생·발달로 인하여 파형에서 대칭성이 붕괴되기 시작하고, 잠제 배후인 ③과 ④지점에서는 파의 재형성과정을 통하여 다시 대칭성을 갖는 파형이 재형성되는 것을 알 수 있다. ③지점의 실험파형에 포함된 작은 변동은 잠제로부터 짧은 이격거리 때문에 잠제 천단상에서 형성된 산란파(evanescent mode waves)가 직접적인 영향을 미친 결과이며, 이격거리가 보다 긴 ④지점에서는 그의 영향이 감소된 것을 알 수 있다. 이러한 시간변동과정에서 수치해석결과와 실험결과를 비교하면 상호간에 일치성이 매우 양호한 것으로 판단되며, 따라서 본 수치해석의 타당성이 충분히 확인된다.

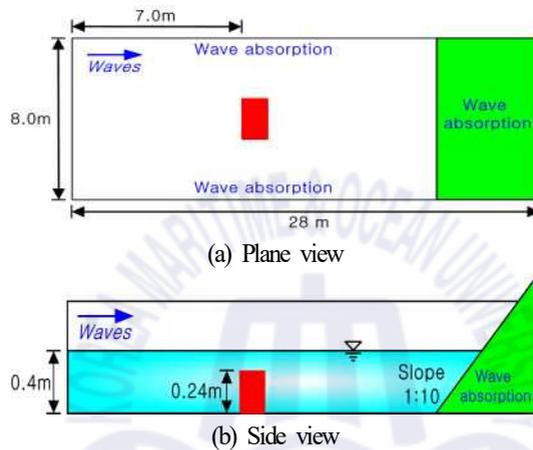


Fig. 2.10. Illustrative sketch for layout of three-dimensional basin and impermeable vertical structure.

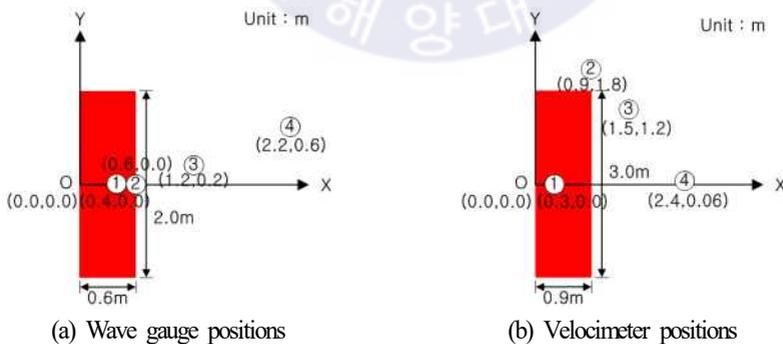


Fig. 2.11. Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity.

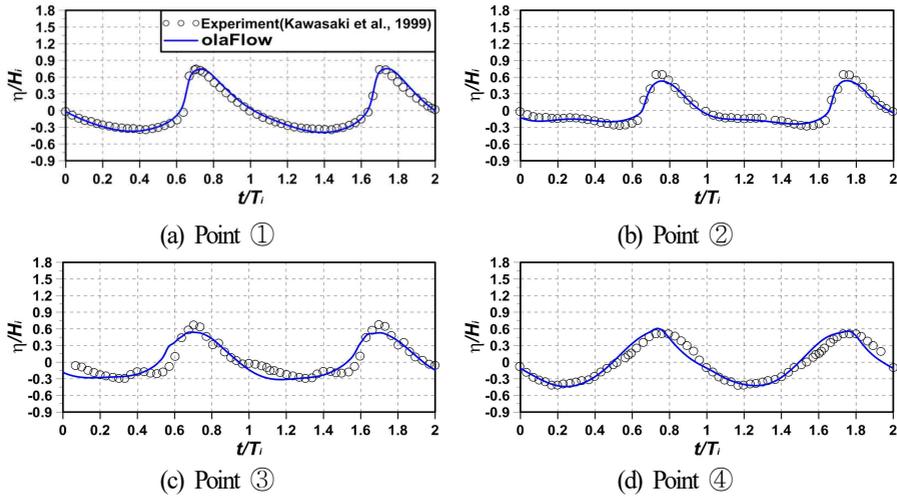


Fig. 2.12. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

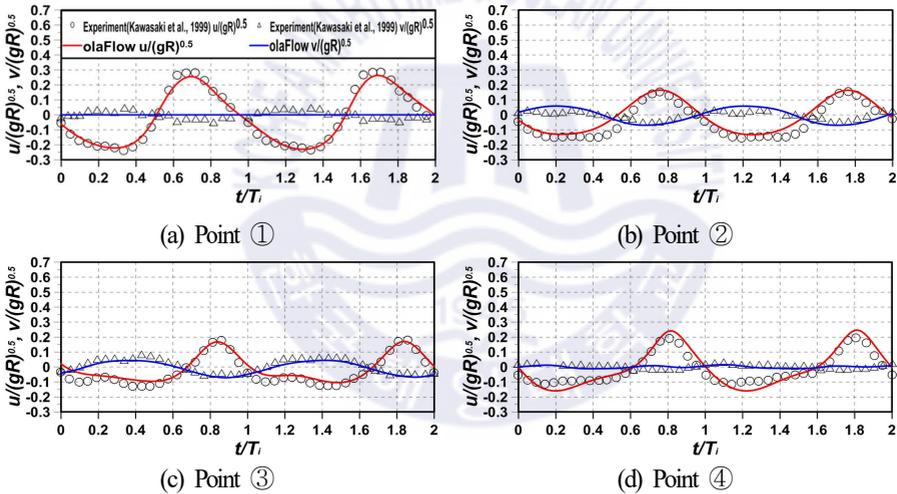


Fig. 2.13. Comparison between simulated and measured X- and Y-direction velocities.

Fig. 2.13은 Figs. 2.10과 2.11의 조건으로부터 선정된 Fig. 2.11(b)의 불투과잠재 주변에서 수치해석결과와 실험결과를 비교한 불투과잠재 주변에서 x 방향과 y 방향의 무차원수평유속변화를 나타낸 것이며, 측정 높이는 모두 바닥으로부터(①지점은 잠재 천단상으로부터) $z=0.28\text{m}$ 인 지점이다. ①지점은 천단상이고, ②와 ③지점은 회절파의 영향을 직접적으로 받는 곳이며, ④지점은 잠재의 배후이다. 잠재 천단상에서는 x 방향의 유속이, 나머지 지점에서는 y 방향의 유속이 탁월한 것을 알 수 있고, 시간변동과정에서 수평유속에 관한 수치해석결과와 실험결과를 비교하면 상호 대응성이 탁월한 것으로 판단되며, 따라서

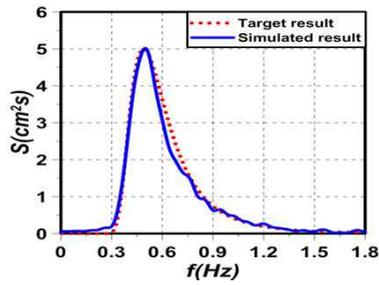
olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 3차원투과성잠재의 파동장 해석결과에 대한 타당성이 충분히 검증된다.

2.4.6 불규칙파의 조파검증

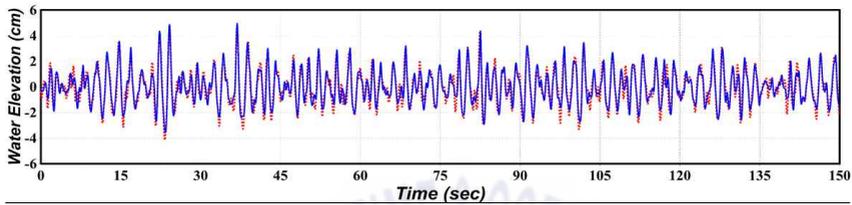
첫 번째로, olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 있어서 조파소스에 의한 불규칙파의 수치조파 성능을 검증하기 위하여 구조물이 설치되지 않은 일정수심 $h=0.4\text{m}$ 의 수치파동수조에서 유의파고 $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, 유의주기 $T_{1/3}=1.8\text{s}$ 를 목표로 불규칙파를 조파하였다. 적용한 스펙트럼은 식(2.12)에 제시한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)이며, 150개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. 그리고, 파랑의 반사 및 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 제거하기 위하여 수조 끝단에는 감쇠경계를 적용하였고, 조파판에는 조파와 감쇠가 동시에 작용하는 Pure active wave absorption 경계를 적용하였다. 이러한 조건으로부터 계산된 주파수스펙트럼과 불규칙파형이 Figs. 2.14(a)와 2.14(b)에 각각 제시되어 있고, 동시에 Fig. 2.14(a)에는 목표한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)도 병기되어 있다. 그림을 살펴보면 장시간의 해석에도 평균수위상승과 같은 특이한 사항이 나타나지 않으며, 영점상향교차법에 의한 파별해석으로부터 얻어진 유의파고 $H_{1/3}=4.9\text{cm}$, 유의주기 $T_{1/3}=1.81\text{s}$ 와 입력치가 매우 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

두 번째로, olaFlow 모델에 의한 불규칙파의 조파성능을 검토하기 위하여 Table 2.3에 나타낸 파랑조건을 적용하여 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)으로부터 150개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. Table 2.3의 유의파고에서 괄호 밖의 값은 조파판에서 12.5m 이격된 위치에서 유의파고 $H_{1/3}$ (target spectrum에서 유의파고)이고, 괄호내의 값은 조파판에서 입력된 입력유의파고 $H_{o,1/3}$ (input spectrum에서 유의파고)이다. 제시된 불규칙파랑의 입력유의파고와 유의주기는 모든 케이스에서 파형경사 $H_{o,1/3}/L_{1/3}$ 이 일정한 0.03을 갖도록 선정된 반면, Ursell수는 Case No.가 증가할수록 점차로 증가한다.

Fig. 2.15는 Table 2.3의 불규칙파랑조건으로부터 계산된 불규칙파의 주파수스펙트럼중에 일부의 결과를 제시한다. 그림에서 식(2.12)에 의한 입력조파스펙트럼을 입력스펙트럼(input spectrum)으로, 조파위치에서 발생된 수위변동으로부터 추정된 주파수스펙트럼을 목표스펙트럼(target spectrum)으로, 그리고 조파판에서 12.5m 이격된 위치에서의 수위변동으로부터 추정된 주파수스펙트럼을 입사스펙트럼(incident spectrum)으로 각각 칭한다.



(a) Wave frequency spectrum



(b) Calculated wave profiles at wave source position

Fig. 2.14. Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra.

Table 2.3. Incident wave conditions.

CASE No.	Wave maker theory	Spectrum	Water depth h (cm)	Significant wave height $H_{1/3} (H_{0.1/3})$ (cm)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	Significant wave length $L_{1/3}$ (m)	Ursell No. U_r
CASE 01	Irregular waves by superposition of linear waves	Modified Bretschneider-Mitsuyasu (Goda, 1988)	60	2.24 (3.61)	1.02	1.595	0.26
CASE 02				2.65 (3.93)	1.05	1.682	0.35
CASE 03				3.45 (4.61)	1.12	1.887	0.57
CASE 04				3.86 (4.96)	1.14	1.946	0.68
CASE 05				4.38 (5.40)	1.19	2.093	0.89
CASE 06				4.90 (5.75)	1.21	2.152	1.05
CASE 07				5.20 (6.02)	1.27	2.327	1.30
CASE 08				5.80 (6.37)	1.28	2.357	1.49
CASE 09				6.36 (6.81)	1.32	2.473	1.80
CASE 10				6.76 (7.16)	1.41	2.733	2.34
CASE 11				7.63 (7.76)	1.47	2.904	2.98
CASE 12				8.30 (8.36)	1.48	2.933	3.31
CASE 13				9.22 (8.96)	1.58	3.215	4.41

먼저, 입력스펙트럼과 목표스펙트럼을 살펴보면 주파수의 변화에 따른 두 스펙트럼의 변화과정이

매우 잘 일치하고, 특히 침두주파수에서의 두 스펙트럼 값이 동일하므로 본 연구에서 채택한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)이 정확하게 수치조파된다는 것을 알 수 있다. 다음으로, 입력스펙트럼과 목표스펙트럼을 비교하면 입력스펙트럼이 전체적으로 목표스펙트럼보다 적은 값을 나타내며, 특히 침두주파수대에서 가장 큰 차이를 나타내고, 이를 중심으로 우측의 단주기측에서 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 발달도상의 심해스펙트럼인 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)을 조파한 목표스펙트럼이 얇은 수심의 천해역을 전파하는 과정에서 나타나는 파랑에너지의 주파수분산과 해저마찰에 의한 파랑에너지의 감소에 따른 결과이며, 이러한 결과로부터 조파판에서 12.5m 이격된 위치에서 불규칙파랑의 특성은 조파위치에서의 특성과는 상이하게 나타난다. 또한, 두 스펙트럼의 침두주파수에서 약간 차이가 발생하며, 유의주기가 짧을수록 그의 차이가 커지고, 동시에 구조물 위치에서의 입사스펙트럼이 상대적으로 약간 장주기측으로 이동되는 현상을 볼 수 있다. 심해역과 천해역에서 나타나는 주파수스펙트럼의 이러한 특성들은 일반 해안공학에서 잘 알려진 현상과 합치되는 결과로 판단된다.

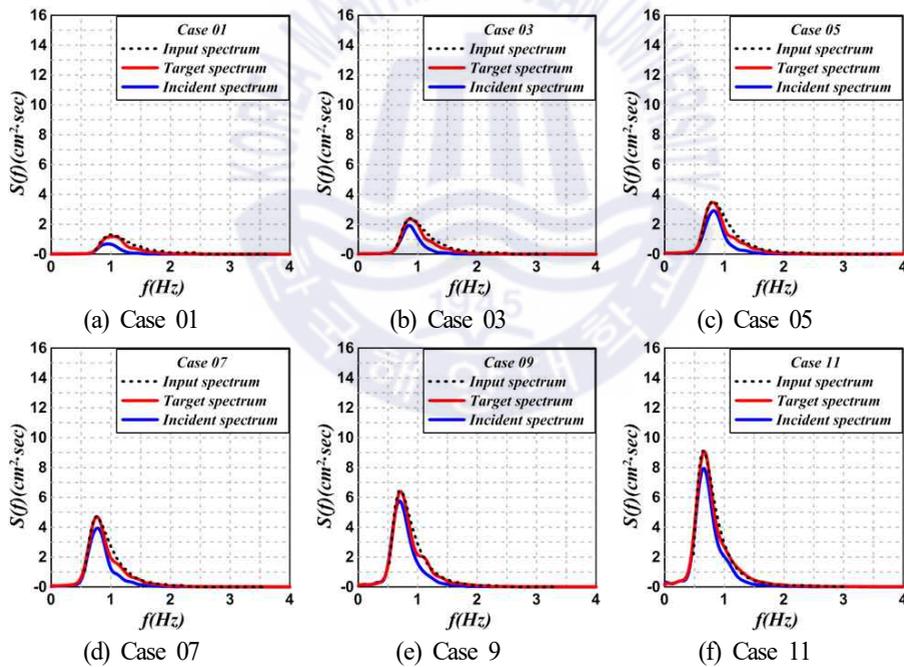


Fig. 2.15. Comparison of target, input and incident spectra.

2.5 결론

본 장에서는 본 연구 전체를 통하여 수치해석법으로 적용되는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의

적용성·타당성을 기존의 수치해석결과 및 수리실험결과와 비교로부터 논의·검토하였다. 비교에서는 불투과성구조물과 투과성구조물, 흐름(순방향과 역방향)의 유무, 2차원구조물과 3차원구조물, 단과, 규칙과 및 불규칙과 등의 여러 다양한 조건과 조합하여 검증 실시하였다. 이로부터 Navier-Stokes solver에 의한 혼상류해석, 유한체적이산화법, VOF 법 및 LES 난류해석에 기초한 강비선형의 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의 적용성·타당성을 충분히 검증할 수 있었으며, 불규칙과의 조파파랑에 대한 주파수스펙트럼의 분석으로부터 본 연구에 의해 조파된 불규칙과의 타당성도 충분히 검증할 수 있었다. 따라서, 이후 본 연구의 각 장에서 도출되는 수치해석결과의 타당성이 충분히 입증되는 것으로 판단된다.

References

- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N.(1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions, *Transport in Porous Media*, 35(3), 395-406.
- Biot, M.A.(1941), General theory of three-dimensional consolidation, *J. Applied Physics*, 12, 155-164.
- Chen, L.F., Stagonas, D., Santo, H., Buldakov, E.V., Simons, R.R. Taylor, P.H. and Zang, J.(2019). Numerical modelling of interactions of waves and sheared currents with a surface piercing vertical cylinder, *Coastal Engineering*, 145, 65-83.
- Del Jesus, M.(2011). Three-dimensional interaction of water waves with maritime structures, University of Cantabria, Ph.D. thesis.
- Devolder, B., Trocha, P. and Rauwoens, P.(2018). Performance of a buoyancy-modified $k-\omega$ and $k-\omega$ SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM[®], *Coastal Engineering*. 138, 49-65.
- Englund, F.(1953). On the laminar and turbulent flow of ground water through homogeneous sand, *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences* 3.
- Ghosal, S., Lund, T., Moin, P. and Akselvoll, K.(1995). A dynamic localization model for large-eddy simulation of turbulent flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 286, 229-255.
- Goda, Y.(1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Goda, Y.(2000). *Random seas and design of maritime structures*, World Scientific Publishing, Singapore.

- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J.(2013). Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM[®], Coastal Engineering, 71, 119-134.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J.(2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM[®]. Part I: Formulation and validation, Coastal Engineering, 83, 243-258.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, Coastal Engineering, 101, 35-47.
- Hsu, T. W., Hsieh, C. M. and Hwang, R. R.(2004). Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters, Coastal Engineering, 51(7), 557-579.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsoe J.(2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM[®], International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, 1073-1088.
- Jeng, D.S., Ye, J.H., Zhang, J.S. and Liu, P.L.F.(2013). An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures: Model verifications and applications, Coastal Engineering, 72, 1-19.
- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, Coastal Engineering, 84, 56-72.
- Kawasaki, K. and Iwata, K.(1999). Numerical analysis of wave breaking due to submerged breakwater in three-dimensional wave field, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 853-866.
- Kissling, K., Springer, J., Jasak, H., Schutz, S., Urban, K. and Piesche, M.(2010). A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids, European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD.
- Lara, J. L., del Jesus, M. and Losada, I. J.(2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures: Part II: Experimental validation, Coastal Engineering, 64, 26-46.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W., Kim, D. S. and Bae, K. S.(2016). Numerical analysis on wave characteristics around submerged breakwater in wave and current coexisting field

- by olaFlow, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 28(6), 332-349.
- Lin, Z., Pokrajac, D., Guo, Y., Jeng, D.S., Tang, T., Rey, N., Zheng, J. and Zhang, J.(2017). Investigation of nonlinear wave-induced seabed response around mono-pile foundation, Coastal Engineering, 121, 197-211.
 - Liu, P. L. F., Lin, P., Chang, K. A. and Sakakiyama, T.(1999). Numerical modeling of wave interaction with porous structures, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 125(6), 322-330.
 - López, I., Rosa-Santos, P., Moreira, C. and Taveira-Pinto, F.(2018). RANS-VOF modelling of the hydraulic performance of the LOWREB caisson, Coastal Engineering, 140, 161-174.
 - Mizutani, N., Mostafa, A. M. and Iwata, K.(1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, Coastal Engineering, 33(2), 177-202.
 - Umeyama, M.(2011). Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 137(2), 85-94.



제 3 장 투과성잠제 주변에서 규칙파와 흐름의 공존장내

2차원파동장의 수치해석

3.1 서언

잠제의 단면(2차원)수리특성에 대한 대표적인 2차원연구로는 Buccino and Calabrese(2007), d'Angremond et al.(1997), Goda and Ahrens(2008), Seabrook and Hall(1998) 및 van der Meer et al.(2005) 등이 수리모형실험을 통하여 잠제의 전달율에 대한 산정식을 제시하였고, Ranasinghe et al.(2009)는 규칙파랑의 작용하에서 투과성 및 불투과성잠제에 의한 파랑변형을 검토하였으며, Méndez et al.(2001)은 투과성잠제 주변의 파동장에서 평균수위 상승, 질량수송, 그리고 과잉운동량플럭스(radiation stress) 등과 같은 물리량으로부터 파의 굴절과 에너지 소산의 영향을 연구하였고, Garcia et al.(2004)는 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) 방정식을 이용한 COBRAS(CORnell BRaking waves And Structures) 수치모델을 이용하여 투과성잠제 주변에서 규칙파의 파랑 특성과 유속분포를 연구하였다.

그리고, Hsu et al.(2004)는 27(基)불투과잠제에 규칙파를 작용시켜 잠제 주변에서 와(vortex)와 물입 자체적에 대한 연구를 수행하여 파곡시에 시계방향의 와가 잠제 전면하에 생성되고, 역으로 파봉시에 반시계방향의 와가 잠제 전면상에 생성되는 것을 규명하였으며, Mizutani et al.(1998)은 규칙파의 조건에서 파와 투과성잠제와의 상호작용에 지반특성이 미치는 영향을 고려하여 잠제 주변에서 파랑변형과 잠제의 안정성을 평가하였다.

또한, 파랑과 흐름의 상호작용은 과거부터 광범위하게 연구되어 왔던 분야로, 포텐셜이론에 기초한 연구(Zhao and Falinsen, 1988; Baddour and Song, 1990; Isaasson and Cheung, 1993; Lin and Hsiao, 1994)에 따르면 파와 순방향 흐름인 경우에 파고는 감소하고 파장은 증가하지만 파랑과 역방향 흐름이 발생하는 경우에는 정반대의 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 실험결과(Thomas, 1981; 1990)와 해석해(Peregrine, 1976; Peregrine and Jonsson, 1983) 및 비선형해석(Thomas, 1990)은 상기의 포텐셜이론과 상이한 결과를 보이고 있다. 이러한 원인으로서는 파랑과 흐름의 상호간섭에 기인한 난류의 영향인 것으로 평가되고 있다(Umeyama, 2005). 수리모형실험결과에 따르면 파랑과 흐름의 운동으로부터 발생하는 평균유속분포는 흐름만이 존재하는 경우와는 상이하고, 흐름상에 파가 중첩되는 경우는 난류강도를 조장하는 것으로 알려져 있다. 이로부터 파랑과 순방향 흐름 혹은 역방향 흐름과의 결합은 바닥 근방에서 상대적으로 높은 혹은 낮은 속도를 나타내고, 바닥으로부터 일정 깊이 상부에서는 더 작은 혹은 더 큰 속도를 나타낸다. 이는 파랑과 흐름의 운동으로 인한 수평유속분포는 입자속도의 선형중첩에 의해 예측할 수 없다는 것을 의미한다.

파랑과 흐름이 공존하는 경우에 파랑변형 특성을 연구한 주요 사례로, 거친 해저면상에서 파와

흐름의 결합운동과 경계전단응력에 관한 해석이론을 제시한 Grant and Madsen(1979)의 연구, 바닥 근방에서 케적속도의 방향스펙트럼으로 파동을 규정함으로써 선행 연구를 수정·확장한 Madsen(1994)의 연구, 실험 및 현장데이터에 기초하여 흐름의 미찰속도와 흐름속도 형상을 계산하는 간단한 경험모델을 제시한 You(1994)의 연구, 평균운동과 진동운동을 분할할 수 있는 GLM(Generalized Lagrangian Mean)을 정식화한 Groeneweg and Klopman(1998)의 연구, 파와 흐름의 상호작용에서 물입자의 거동에 대한 3차 정도의 해석해를 유도한 Hsu et al.(2009)의 연구, 섭동법으로부터 Boussinesq 형의 새로운 정식화를 개발하여 파운동에 흐름이 존재하는 경우 평균수심의 영향을 조사한 Zou et al.(2013)의 연구, 그리고 van Hoften and Karaki(1976), Brevik(1980) 및 Kemp and Simons(1982, 1983) 등에 의한 실험적 연구, 거친 바닥상에서 파와 흐름의 운동에 의한 속도 및 난류특성에 관한 Mathisen and Madsen(1996a, b)과 Fredsøe et al.(1999)의 실험적 연구, PIV(Particle Image Velocimetry)와 PTV(Particle Tracking Velocimetry)를 적용한 Umeyama(2005, 2009, 2011)의 실험적 연구 등을 들 수 있다. 또한, 파랑과 흐름의 상호작용을 예측하기 위하여 Navier-Stokes 방정식에 기초한 수치모델이 Li et al.(2007), Teles et al.(2013), Markus et al.(2013) 등에 의해 개발되었으며, 수치결과를 파인운동량플럭스개념(radiation stress concept)의 모델과 비교하였다(Christensen et al., 2003; Johnson et al., 2005; Zheng and Tang, 2009). Park et al.(2001)은 비선형파랑과 흐름 및 물체와의 상호작용을 모델링하기 위하여 SGS(SubGrid-Scale) 난류모델과 MAC(Mark And Cell)법 및 유한차분법을 병용하는 수치파동수도를 개발하였다. 또한, Zhang et al.(2014)은 RANS 방정식을 이용하여 파의 주기, 유속의 크기 및 흐름의 방향에 따른 파동장의 변동특성을 모의하였고, Soltanpour et al.(2014)은 흐름의 방향과 크기에 따라서 불규칙파의 스펙트럼 형상의 변화특성을 실험과 수치해석으로부터 규명하였다.

하지만, 상기의 연구들은 파랑과 흐름과의 상호작용에만 국한되어 있고, 파-흐름-구조물의 상호작용에 대한 연구는 거의 수행되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 흐름과 규칙파가 공존하는 유체장에 투과성의 잠체구조물이 설치된 경우를 대상으로, 흐름방향의 변화 및 모래 혹은 자갈을 모사하는 배후사면을 고려하는 경우에 있어서 잠체 주변에서 수위변동과 파고변화 및 주파수스펙트럼, 쇄파형상, 평균유속 및 평균난류운동에너지 등과 같은 수리학적 특성을 검토한다. 이와 같은 물리현상은 연안침식방지를 목적으로 최근 들어 설치예가 증가하고 투과성잠체 및 하구폐쇄를 방지하기 위해 설치되는 연안 하구역 주변의 다양한 형태의 잠수구조물 주변의 수리학적 특성을 파악하는데 있어서 중요한 기초자료를 제공할 수 있다.

3.2 수치해석결과

3.2.1 파랑변형

(1) 계산조건

Fig. 3.1과 같은 일정수심 $h=25.5\text{cm}$ 를 갖는 파동장에 설치된 잠제를 대상으로 2차원수치파동수조(길이 21m, 높이 0.42m)를 구성하였다. 격자크기는 조파지점에서부터 7.05-10.95m의 범위에는 $\Delta x=0.75\text{cm}$, $\Delta z=0.75\text{cm}$ 의 정방격자를, 그 이외의 영역에는 $\Delta x=1.5\text{cm}$, $\Delta z=0.75\text{cm}$ 의 가변격자를 구성하였다. 조파판에서 9m 이격된 지점에 투과성잠제를 설치하였으며, 11.45m 이격된 지점에서부터 1:30의 경사면을 설치하였다. 잠제는 높이 22.5cm, 천단폭 0.85m를 가지며, 구조물의 천단 상에서 쇄파를 유도하기 위해 전·후의 비탈면경사를 1:1로 설정하였다. 잠제의 구성재료는 공극률 $\phi=0.44$, 중앙입경 $D_{50}=2\text{cm}$ 를 가지며, 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였다. 배후사면이 모래 혹은 자갈로 구성된 경우를 대상으로 하였으며, 모래인 경우는 공극률 $\phi=0.28$, 중앙입경 $D_{50}=0.2\text{cm}$, 저항계수 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을, 자갈인 경우는 공극률 $\phi=0.49$, $D_{50}=1.59\text{cm}$, 저항계수 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 를 각각 적용하였다. 바다경계조건으로는 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i=0$ 을 적용하였다.

Table 3.1은 규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. 표에서는 흐름이 없고 파만이 존재하는 경우를 WCN으로, 흐름과 파가 순방향인 경우를 WCF로, 흐름과 파가 역방향인 경우를 WCO로 표기 및 정의한다(이하 동일).

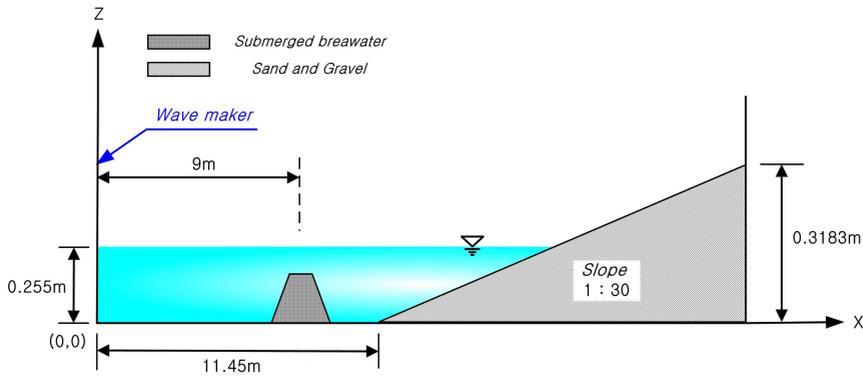
(2) 수위변동과 주파수스펙트럼

(a) 배후사면이 모래인 경우

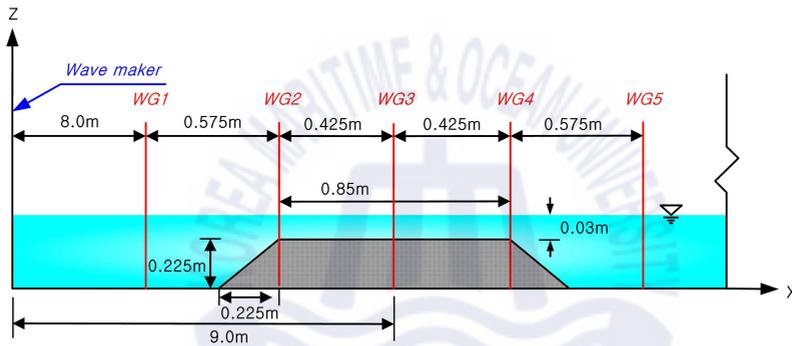
Fig. 3.2는 배후사면이 모래인 경우에 있어서 잠제 주변의 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸다. 수위변동의 측정위치는 Fig. 3.1(b)에 나타내는 바와 같이 잠제의 전면부(WG1, $x=8.0\text{m}$), 천단의 시작점(WG2, $x=8.575\text{m}$), 천단의 중앙(WG3, $x=9.0\text{m}$), 천단의 끝부분(WG4, $x=9.425\text{m}$) 및 잠제의 후면부(WG5, $x=10.0\text{m}$)에 각각 해당한다.

수위변동을 살펴보면 잠제 전면부 WG1에서는 잠제에 의한 반사파의 영향에 의해 파봉분열이 발생하기 시작하며, 천단의 시작점 WG2에서는 비선형파가 급격하게 발달되어 비대칭파가 형성되고, 따라서 우측의 주파수스펙트럼으로부터 알 수 있는 바와 같이 2배 및 3배의 기본주파수성분(고주파성분)이 발달하게 된다. 천단의 중앙 WG3에서는 쇄파가 발생한 것을 알 수 있고, 따라서 파고감쇠가 동반되며, 비선형파의 발달이 한층 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 대해서는 우측의 주파수스펙트럼으로부터 명확히 관찰할 수 있다. 다음으로, 천단 끝부분인 WG4에서는 WG3와 유사한 경향을 나타내지만 파의 진행과 더불어 파고감쇠가 더욱 크게 발생하며, 동시에 비선형파의 성분도 감소하는 경향을 나타낸다. 마지막으로, 잠제의 후면부 WG5에서는 WG4에서의 파형이 수심의 증가에 따른 반사파의 영향으로

보다 비대칭성을 갖는 파고 형성되어 배후로 전달되는 것을 알 수 있다.



(a) Side view



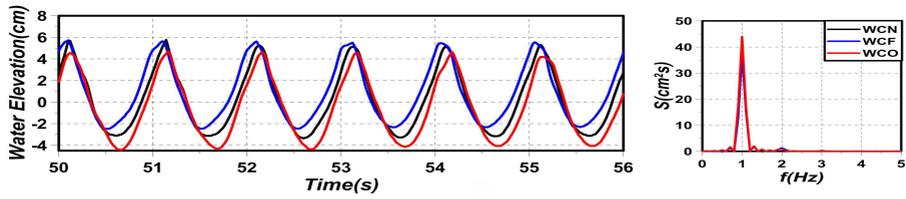
(b) Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation

Fig. 3.1. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

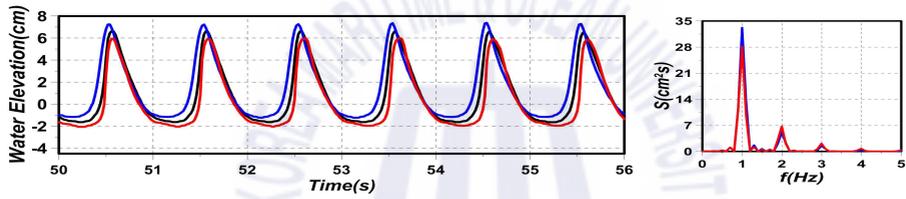
한편, 흐름방향에 따른 파고의 변화를 주파수스펙트럼의 기본주파수성분이 갖는 파랑에너지밀도로 평가하면 잠제 전면부에서는 흐름이 없는 경우의 파고에 비해 역방향 흐름의 경우가 큰 파고를, 순방향 흐름의 경우가 작은 파고를 나타내지만 잠제 천단 상 및 후면부에서는 흐름이 없는 경우의 파고에 비해 순방향 흐름의 경우가 큰 파고를, 역방향 흐름의 경우가 작은 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 평균난류운동에너지(난류강도)의 공간분포에서 알 수 있는 바와 같이 역방향 흐름의 경우에 잠제 천단 중앙부에서 후면부에 걸쳐 평균난류운동에너지가 가장 강하게 나타나고, 이로 인한 누적평균난류운동에너지가 커져 파랑에너지소산이 보다 크게 발생되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 후술하는 바와 같이 쇄파양상에서 흐름방향의 차이에 따른 차이가 나타나고, 쇄파로 인한 파랑에너지소산량의 차이에 기인하는 요소도 있는 것으로 판단된다.

Table 3.1. Condition of wave and current applied to numerical analysis.

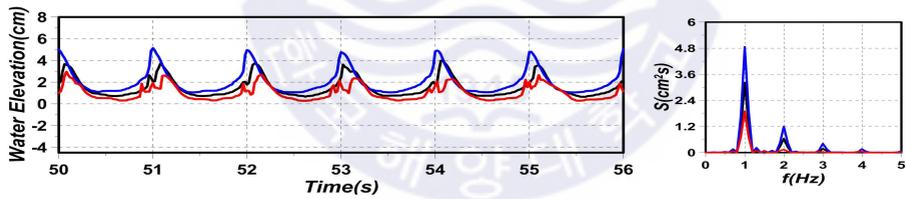
Case	WCN	WCF	WCO
Current velocity(cm/s)	0	5	-5
Wave type	Regular		
Wave maker theory	Stokes V		
H (cm)	7.5		
T (s)	1.0		



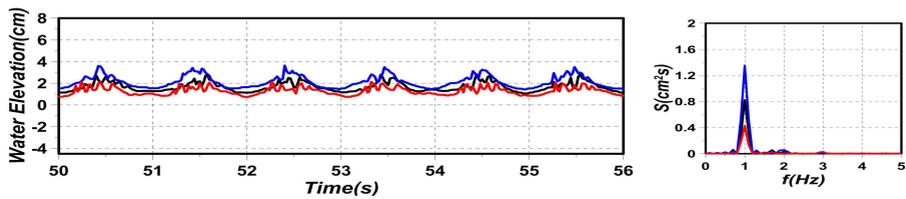
(a) WG 1



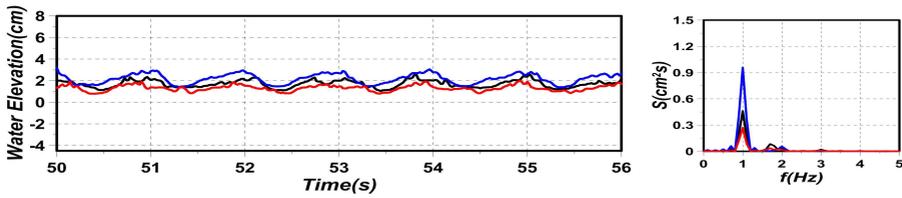
(b) WG 2



(c) WG 3



(d) WG 4 (continued)



(e) WG 5

Fig. 3.2. Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach

(b) 배후사면이 자갈인 경우

Fig. 3.3은 배후사면이 자갈인 경우에 있어서 잠제 주변의 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 전술한 배후사면이 모래일 때와 유사하게 잠제 전면부에서 잠제에 의한 반사파의 영향에 의해 쇄파분열이 발생, 천단 전면부에서 비선형파의 발달에 따라 비대칭성을 갖는 파형의 형성, 다음으로 파의 진행에 따라 쇄파 발생 및 그에 따른 비선형파의 발달과 감소 등이 나타나는 것을 알 수 있고, 또한 우측의 해당하는 주파수스펙트럼에서 이러한 현상을 보다 명확히 확인할 수 있다. 여기서, 배후사면이 모래인 경우와 다소 상이한 결과는 흐름이 없는 경우에 비해 순방향의 흐름보다 역방향 흐름에서 파형의 위상차가 상대적으로 크게 발생하고, 이러한 결과는 자갈을 모사하는 배후사면이 갖는 낮은 반사율에 기인하는 것으로 판단된다.

다음으로, 전술한 바와 같이 주파수스펙트럼의 기본주파수성분이 갖는 파랑에너지밀도로부터 흐름 방향에 따른 파고의 변화를 보면 배후사면이 모래인 경우와 유사한 경향을 나타내지만 반사율의 차이에 따른 값의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과도 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지(난류강도)의 공간적인 차이, 누적평균난류운동에너지 및 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지소산양의 차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

(3) 쇄파양상

Fig. 3.4는 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 조건하에서 흐름이 없는 경우, 순방향 및 역방향 흐름이 존재하는 경우에 대한 잠제 천단 상에서 쇄파되는 일련의 과정을 Snapshot으로 나타낸 것이다. 대상파랑은 수치조파 후 정상상태에 있는 파랑을 대상으로 하였으며, 흐름의 유무에 따라 쇄파발생 위치와 및 위상에서 다소 상이하지만 상호비교를 위해 쇄파 진행과정의 위상을 가능한 범위내에서 일치시킨 결과이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 입사파는 잠제 천단 상에서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로 수평유속이 증가하는 것을 알 수 있다. 흐름의 방향에 관계없이 권파형 쇄파가 발생하

지만 역방향 흐름의 경우, 흐름이 없는 경우, 그리고 순방향 흐름의 경우 순으로 보다 뚜렷한 권파형 쇄파가 발생한다. 반면에, 순방향 흐름의 경우가 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 중국어는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타낸다.

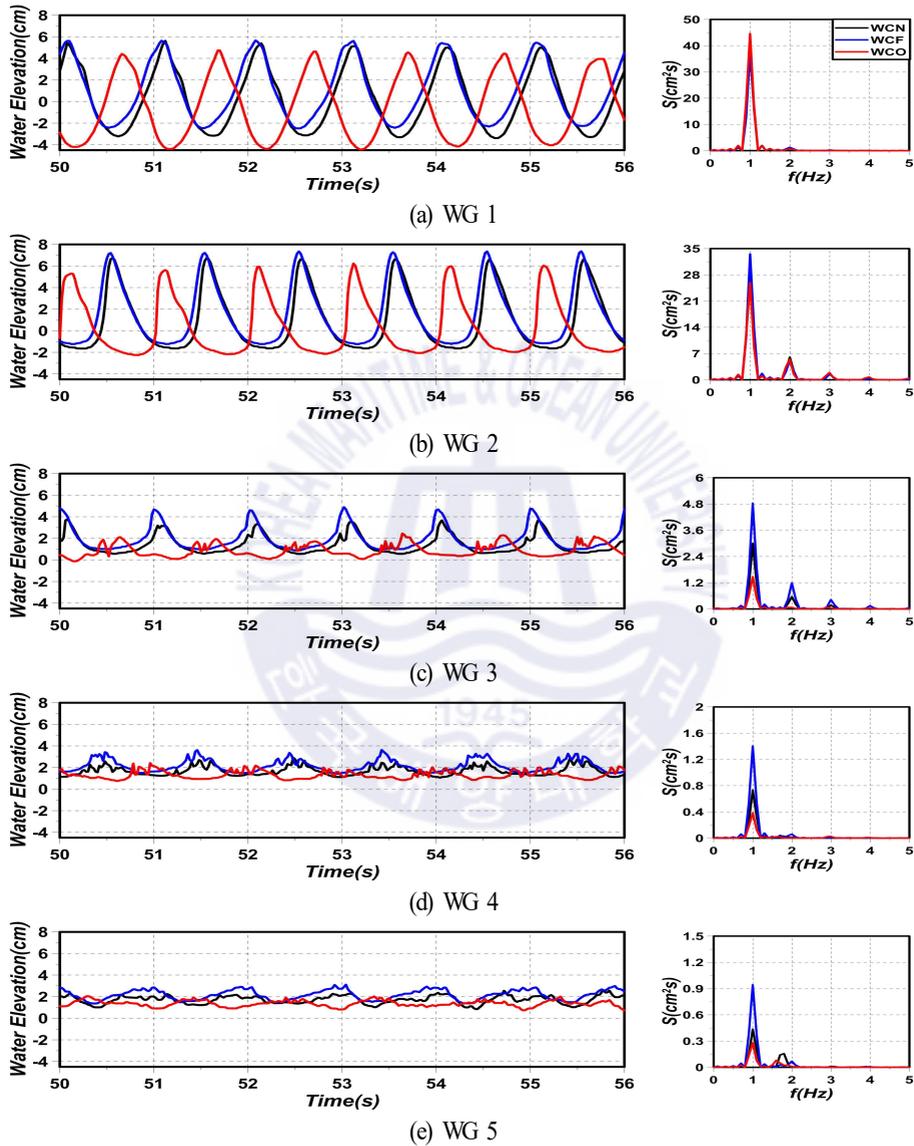


Fig. 3.3. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach

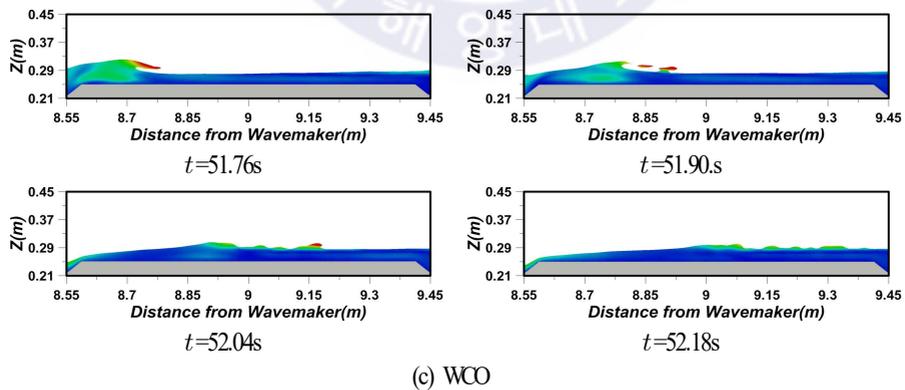
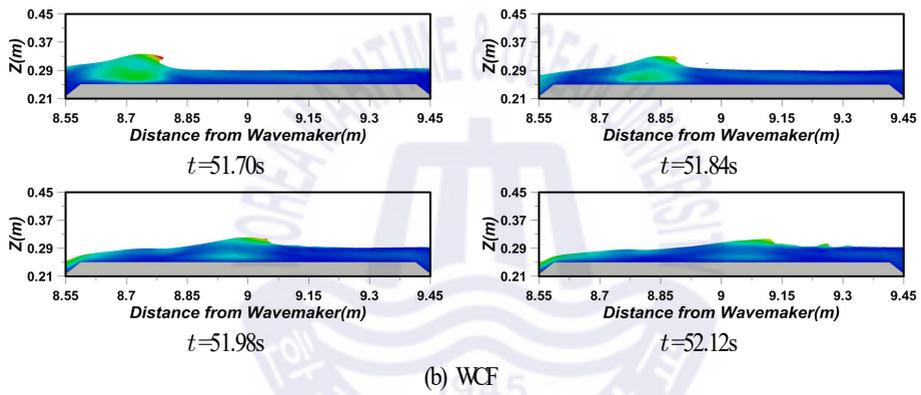
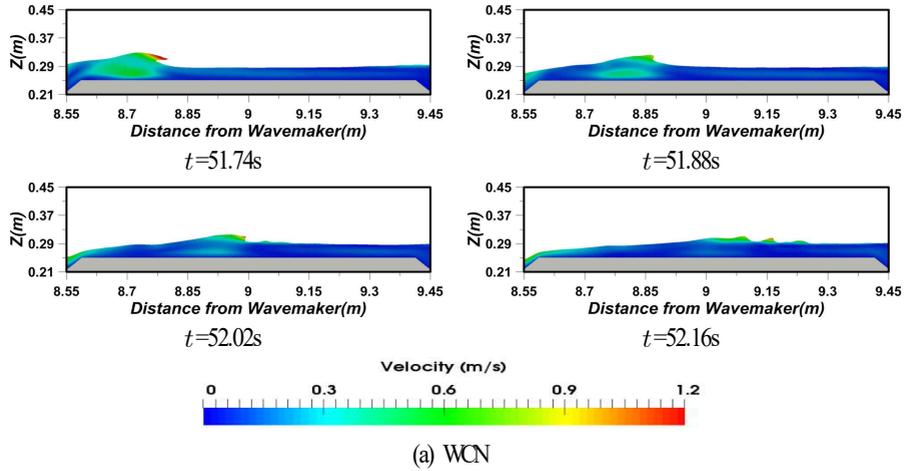
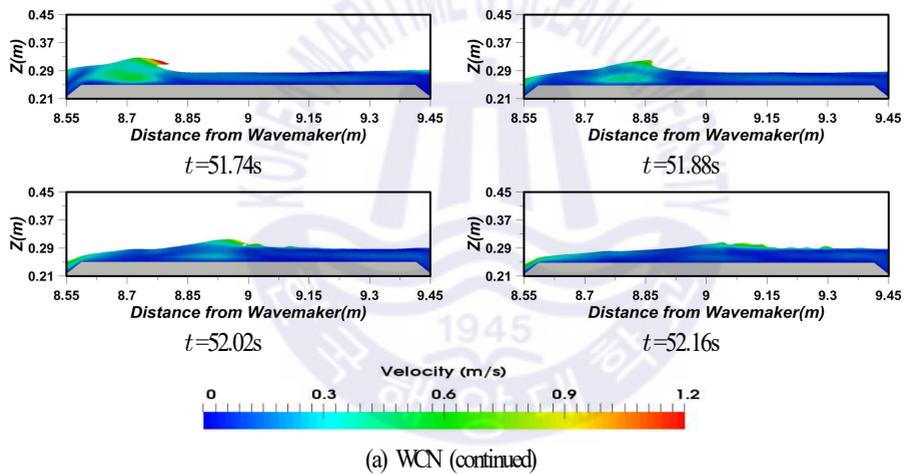
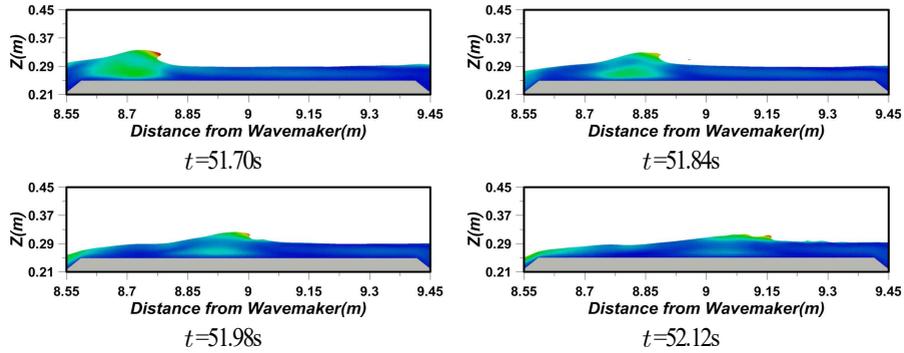


Fig. 3.4. Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach.

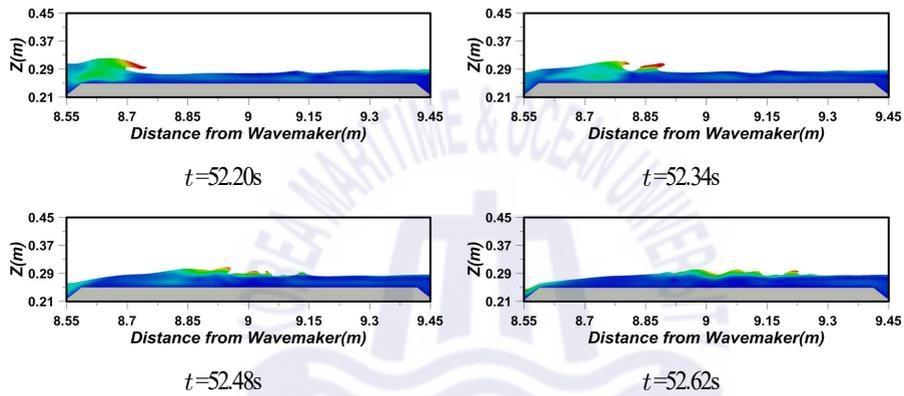
Fig. 3.5는 잠제 배후에 자갈사면이 위치하는 조건하에서 Fig. 3.4와 동일하게 흐름이 없는 경우,

순방향 및 역방향 흐름이 존재하는 각각 경우에 있어서 잠제 천단 상에서 쇄파되는 일련의 과정을 Snapshot으로 나타낸 것이다. Fig. 3.4와 같이 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 경우와 동일하게 역방향 흐름의 경우, 흐름이 없는 경우, 그리고 순방향 흐름의 경우 순으로 보다 뚜렷한 권파형 쇄파가 발생하며, 전술한 바와 같이 순방향 흐름의 경우 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타내는 것을 볼 수 있다. 순방향 흐름에서 복합적인 쇄파형이 발생하는 것은 잠수계류부체 상에서 쇄파형을 실험적으로 검토한 Iwata et al.(1990)에 의하면 잠수계류부체가 진행과 동일한 위상으로 운동할 때 복합형의 쇄파가 발생된다는 사실에 비추보면 본 연구의 순방향 흐름에서 복합적인 쇄파형을 나타내는 것은 진행과 흐름이 순방향이기 때문으로 판단된다. Figs. 3.4와 3.5로부터 배후사면이 모래인 경우와 자갈인 경우 흐름방향에 따라 천단 상에서 쇄파형상이 상이하게 나타나는 것은 잠제 천단 상의 파형과 흐름에 영향을 미치는 모래사면과 자갈사면에서의 반사율이 다르기 때문인 것으로 판단된다.





(b) WCF



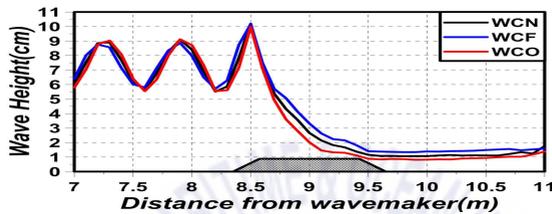
(c) WCO

Fig. 3.5. Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach.

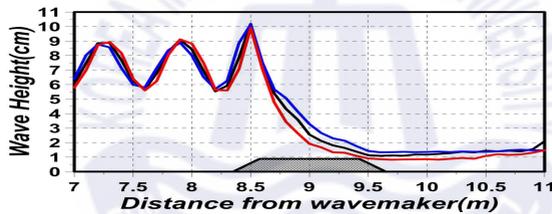
3.2.2 파고의 분포

Fig. 3.6은 Figs. 3.2와 3.3으로부터 도출한 공간파고분포를 나타낸 것으로, Fig. 3.6(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.6(b)가 자갈인 경우에 각각 해당한다. 전반적으로는 잠제로 인한 반사파의 영향으로 잠제 전면부에서는 부분중복파의 파동장이 형성되는 것을 알 수 있고, 흐름에 따른 상대적인 파고의 크기를 명확히 판단하기는 어렵지만 전술한 Figs. 3.2와 3.3의 주파수스펙트럼으로부터 역방향 흐름인 경우가 흐름이 없는 경우보다 잠제 전면에서 약간 파고가 커진다는 것을 확인할 수 있다. 반면, 잠제의 천단 상과 후면부에 걸쳐서는 배후사면이 모래나 자갈에 관계없이 흐름이 없는 경우보다 순방향 흐름에서 파고가 증가하고, 역방향 흐름에서 파고가 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터 잠제와 같은 구조물이 설치된 흐름-파동장에서는 위치에 따라 흐름의 방향에 따라 파고의 변화가 증가하거나 감소하는 일률적인 경향을 나타내는 것이 아니라는 중요한 사실을 알 수 있다.

Table 3.2는 Figs. 3.2와 3.3에서 나타낸 각 파고계 위치에서의 수위변동으로부터 파고를 산정한 것이다. 흐름이 없을 때를 기준으로 파고감쇠율($\frac{[WG1에서\ 파고]-[WG5에서\ 파고]}{[WG1에서\ 파고]}$)을 산정하면 배후사면이 모래와 자갈일 때 역방향 흐름에서 각각 90.53%와 90.22%의 값이 얻어지고, 순방향 흐름에서 87.29%와 83.05%의 값이 얻어지며, 이로부터 역방향 흐름에서 파고감쇠율이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지(난류강도)와 누적평균난류운동에너지의 공간적인 차이 및 전술한 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지소산양의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.



(a) Sandy beach



(b) Graveled beach

Fig. 3.6. Spatial distribution of simulated wave heights.

Table 3.2. Comparison of wave heights at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5.

Distance x from position of wave maker		Wave height for sandy beach(cm)			Wave height for graveled beach(cm)		
		WCN	WCF	WCO	WCN	WCF	WCO
WG1	$x=8.000\text{m}$	8.410	7.987	8.717	8.428	8.013	8.817
WG2	$x=8.575\text{m}$	8.157	8.181	7.948	8.176	8.207	7.863
WG3	$x=9.000\text{m}$	2.660	3.313	2.013	2.553	3.277	1.916
WG4	$x=9.425\text{m}$	1.291	1.670	1.030	1.306	1.650	1.039
WG5	$x=10.00\text{m}$	1.069	1.389	0.826	1.174	1.359	0.862

3.2.3 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포

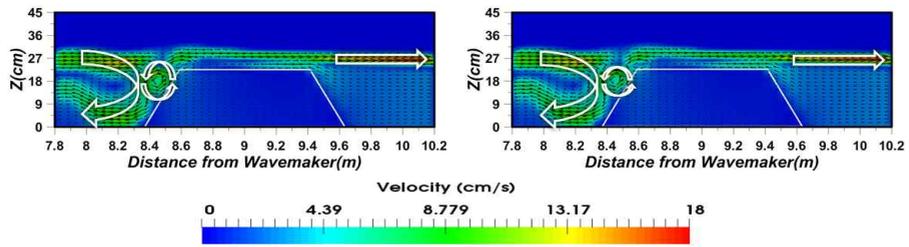
(1) 평균유속

Fig. 3.7은 평균유속(시간평균)을 나타내며, Fig. 3.7(a)는 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.7(b)는 자갈인 경우에 각각 해당하며, 각각에서 (i)은 흐름이 없는 경우, (ii)는 순방향 흐름의 경우, (iii)은 역방향 흐름의 경우에 해당한다. 그림으로부터 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 흐름이 없는 경우와 순방향 흐름의 경우에는 잠제 전면에서 반시계방향의 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

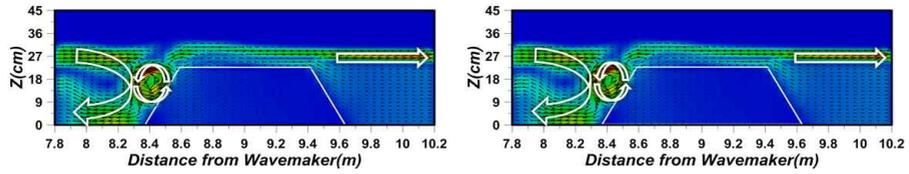
(2) 평균난류운동에너지

Fig. 3.8는 평균난류운동에너지를 나타내며, 이는 $(u'_x + u'_z)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $\overline{(u'_x + u'_z)/2}$ 으로, 여기서 u'_x, u'_z 는 각각 x, z 방향으로 난류속도성분이다. 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파괴에너지의 소산정도를 판정하는 중요한 요소로, 전술한 바와 같이 파고변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 3.8(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.8(b)가 자갈인 경우에 각각 해당하며, (i)은 흐름이 없는 경우, (ii)는 순방향 흐름의 경우, (iii)은 역방향 흐름의 경우이다. 그림으로부터 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 잠제 천단부에서 난류에너지가 적게 나타난다. 이하에서는 잠제 천단 상 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지와 누적평균 난류운동에너지에 대해 고찰하며, 이와 파고변화와의 연관성을 기술한다.

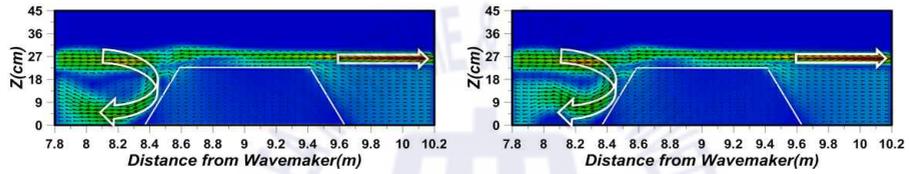
Fig. 3.9는 Fig. 3.8의 결과를 잠제 천단($z=0.21m$)부터 난류운동에너지의 영향이 미치는 영역($z=0.285m$)까지 수심방향으로 평균한 결과, 즉 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지(시·공간평균난류에너지로 칭한다)와 그에 대한 누적난류운동에너지(시·공간누적평균난류에너지로 칭한다)를 나타낸다. 그림으로부터 시·공간평균난류에너지의 공간분포를 살펴보면 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제 전면 비탈면상 및 천단 중앙 후반부에서 크게 나타나며, 역방향(순방향) 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 큰(작은) 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 공간파고변화와 직접적인 연관성을 갖는 시·공간누적평균난류에너지를 살펴보면 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 거의 나타나지 않지만 잠제 전면 비탈면을 지나서부터는 차이가 크게 나타나며, 역방향 흐름의 경우가 가장 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 구조물과 배후사면이 고려되지 않은 파고감쇠에 대해 Uneyama(2011)도 지적하고 있는 바와 같이 흐름의 방향에 따른 파고 감쇠율은 누적난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 누적난류운동에너지가 높을수록(낮을수록) 파고감쇠율이 높게(낮게) 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 이와 더불어 배후사면에서 반사율의 영향과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 동시에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(i) WCN



(ii) WCF

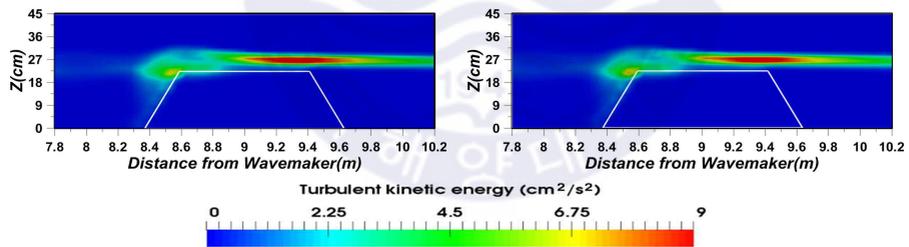


(iii) WCO

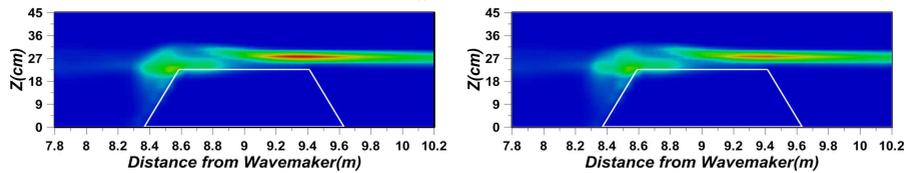
(a) Sandy beach

(b) Graveled beach

Fig. 3.7. Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater.



(i) WCN



(ii) WCF (continued)

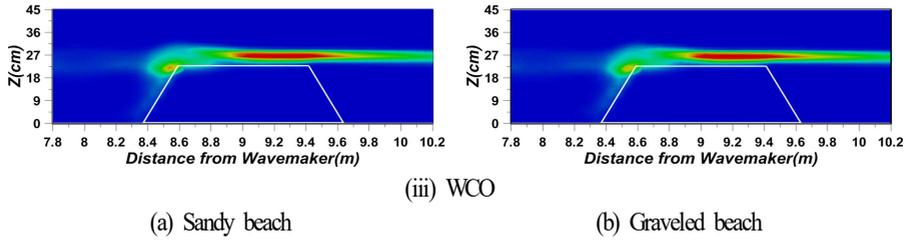


Fig. 3.8. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater.

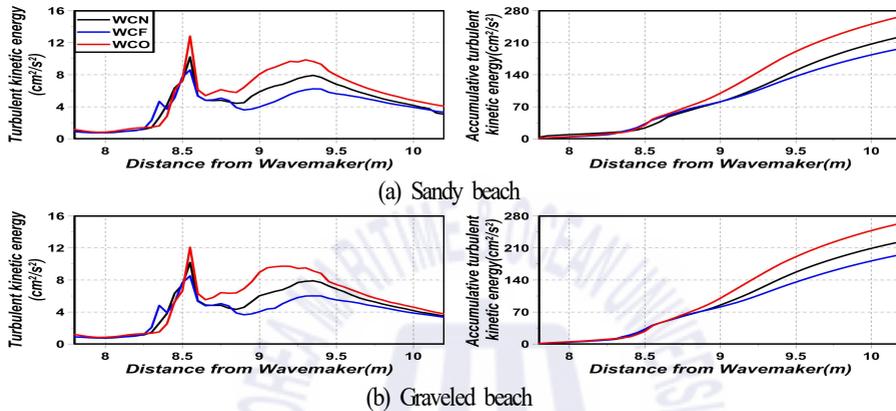


Fig. 3.9. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy and its accumulation.

3.3 결론

본 장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 통하여 투과성잠체가 설치된 일정수심의 수치파동 수로에 역방향 혹은 순방향 흐름이 있는 상태에서 규칙파를 조파하여 잠체 주변에서 수위변동과 그의 주파수스펙트럼, 파고의 분포, 쇄파형상, 평균흐름 및 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지 등과 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 파고에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠체의 전면부에서는 역방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높지만 잠체 천단 상의 전반부에서 후면부까지는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게 나타난다.

(2) 쇄파형상에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부 및 흐름의 방향에 관계없이 파봉이 휘말리면

서 부서지는 권파형 쇄파를 나타내며, 순방향의 흐름의 경우는 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타낸다.

(3) 평균유속에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 흐름이 없는 경우와 순방향 흐름의 경우에 잠제 전면 비탈면 앞에서 반시계방향의 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 강하다.

(4) 평균난류에너지에 대해, 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 잠제 천단부에서 난류에너지가 적게 나타난다.

(5) 시·공간누적평균난류에너지에 대해, 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 미미하지만 잠제 전면 비탈면을 지나서부터는 차이가 크게 나타나며, 역방향 흐름의 경우가 가장 큰 값을 가지며, 공간과고변화와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되고, 이와 더불어 배후사면에서 반사율과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 공간과고변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

References

- Baddour, R.E. and Song, S.(1990). On the interaction between waves and currents, Ocean Engineering, 17(1), 1-21.
- Brevik, I.(1980). Flume experiment on waves and current smooth bed, Coastal Engineering, 4, 149-177.
- Buccino, M. and Calabrese, M.(2007). Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 133(3), 213-224.
- Christensen, E.D., Zanuttigh, B. and Zyserman, J.A.(2003). Validation of numerical models against laboratory measurements of waves and currents around low-crested structures, Proceedings of Coastal Structures.
- d'Angremond, K., Van Der Meer, J.W. and De Jong, R.J.(1997). Wave transmission at low-crested structures, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2418-2427.
- Fredsøe, J., Andersen, K.H. and Sumer, B.M.(1999). Wave plus current over a ripple-covered

- bed, *Coastal Engineering*, 38(4), 177-221.
- Garcia N., Lara, J.L and Losada, I.J.(2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters, *Coastal Engineering*, 51, 991-1020.
 - Goda, Y. and Ahrens, J.P.(2008). New formulation of wave transmission over and through low crested structures, *Proceedings of Coastal Engineering, ASCE*, 628-650.
 - Grant, W.D. and Madsen, O.S.(1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), 1797-1808.
 - Groeneweg, J. and Klopman, G.(1998). Changes of the mean velocity profiles in the combined wave-current motion described in a GLM formulation, *Journal of Fluid Mechanics*, 370, 271-296.
 - Higuera, P., Losada, I.J. and Lara, J.L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
 - Horgue, P., Soulaire, C., Franc, J., Guibert, R. and Debenest, G.(2015). An open-source toolbox for multiphase flow in porous media, *Computer physics Communications*, 187, 217-226.
 - Hsu, H.C., Chen, Y.Y., Hsu, J.R. and Tseng, W.J.(2009). Nonlinear water waves on uniform current in Lagrangian coordinates, *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, 16(1), 47-61.
 - Hsu, T.W., Hsieh, C.M. and Hwang, R.R.(2004). Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters, *Coastal Engineering*, 51(7), 557-579.
 - Isaacson, M. and Cheung, K. F.(1993). Time-domain solution for wave-current interactions with a two-dimensional body, *Applied Ocean Research*, 15(1), 39-52.
 - Iwata, K, Kim, D.S., Asai, M. and Shimoda, M.(1990). Wave breaking on submerged floating structure, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, 37, 604-608(in Japanese).
 - Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J.(2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), 1073-1088.
 - Jensen, B., Jacobsen, N.G. and Christensen, E.D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, *Coastal Engineering*, 84, 56-72.
 - Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I.(2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters, *Coastal*

Engineering, 52(10), 949-969.

- Kemp, P.H. and Simons, R.R.(1982). The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating with the current, *Journal of Fluid Mechanics*, 116, 227-250.
- Kemp, P.H. and Simons, R.R.(1983). The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current, *Journal of Fluid Mechanics*, 130, 73-89.
- Li, T., Troch, P. and De Rouck, J.(2007). Interactions of breaking waves with a current over cut cells, *Journal of Computational Physics*, 223(2), 865-897.
- Lin, M.C. and Hsiao, S.S.(1994). Boundary element analysis of wave-current interaction around a large structure, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 14(4), 325-334.
- Madsen, O.S.(1994). Spectral wave-current bottom boundary layer flows, *Coastal Engineering*, 94, 384-397.
- Markus, D., Hojjat, M., Wüchner, R. and Bletzinger, K.U.(2013). A CFD approach to modeling wave-current interaction, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 23(1).
- Mathisen, P.P. and Madsen, O.S.(1996a). Waves and currents over a fixed rippled bed: 1. Bottom roughness experienced by waves in the presence and absence of currents, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C7), 16533-16542.
- Mathisen, P.P. and Madsen, O.S.(1996b). Waves and currents over a fixed rippled bed: 2. Bottom and apparent roughness experienced by currents in the presence of waves, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C7), 16543-16550.
- Méndez, F.J., Losada, I.J. and Losada, M.A.(2001). Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean engineering*, ASCE, 127(1), 7-15.
- Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K.(1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, *Coastal Engineering*, 33(2), 177-202.
- Park, J.C., Kim, M.H. and Miyata, H.(2001). Three-dimensional numerical wave tank simulations on fully nonlinear wave-current-body interactions, *Journal of Marine Science and Technology*, 6(2), 70-82.
- Peregrine, D. H.(1976). Interaction of water waves and currents, *Advances in Applied Mechanics*, 16, 9-117.
- Peregrine, D. H. and Jonsson, I. G.(1983). Interaction of waves and currents, *Bristol Univ.*

- Ranasinghe, R.S., Sato, S. and Tajima, Y.(2009). Modeling of waves and currents around porous submerged breakwaters, *Coastal Dynamics*, 12.
- Seabrook, S.R. and Hall, K.R.(1998). Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters, *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 2000-2013.
- Soltanpour, M., Samsami, F., Shibayama, T. and Yamao, S.(2014). Study of irregular wave-current-mud interaction, *Proceedings of ICCE*, ASCE, 1(34), 27.
- Teles, M.J., Pires-Silva, A.A. and Benoit, M.(2013). Numerical modelling of wave current interactions at a local scale, *Ocean Modelling*, 68, 72-87.
- Thomas, G.P.(1981). Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 110, 457-474.
- Thomas, G.P.(1990). Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 2. Nonlinear waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 216, 505-536.
- Umeyama, M.(2005). Reynolds stresses and velocity distributions in a wave-current coexisting environment, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 131(5), 203-212.
- Umeyama, M.(2009). Changes in turbulent flow structure under combined wave-current motions, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 135(5), 213-227.
- Umeyama, M.(2011). Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 137(2), 85-94.
- Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B.(2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering*, 52, 915-929.
- van Hoften, J.D.A. and Karaki, S.(1976). Interaction of waves and a turbulent current, *Proceedings of ICCE*, ASCE, 1(15).
- You, Z.J.(1994). A simple model for current velocity profiles in combined wave-current flows, *Coastal Engineering*, 23(3), 289-304.
- Zhang, J.S., Zhang, Y., Jeng, D.S., Liu, P.F. and Zhang, C.(2014). Numerical simulation of wave-current interaction using a RANS solver, *Ocean Engineering*, 75, 157-164.
- Zhao, R. and Faltinsen, O.M.(1988). Interaction between waves and current on a

two-dimensional body in the free surface, *Applied Ocean Research*, 10(2), 87-99.

- Zheng, J.H. and Tang, Y.(2009). Numerical simulation of spatial lag between wave breaking point and location of maximum wave-induced current, *China Ocean Engineering*, 23(1), 59-71.
- Zou, Z.L., Hu, P.C., Fang, K.Z. and Liu, Z.B.(2013). Boussinesq-type equations for wave-current interaction, *Wave Motion*, 50(4), 655-675.



제 4 장 투과성잠제 주변에서 불규칙파와 흐름의 공존상태

2차원파동장의 수치해석

4.1 서언

2차원잠제와 불규칙파의 상호작용에 관해서는 Lara et al.(2006)의 연구를 들 수 있고, 이는 Garcia et al.(2004)과 같은 COBRAS(COrell BReaking wAves and Structures) 모델을 이용하여 투과성잠제 주변에서 불규칙파와 잠제 내부에서 파압을 스펙트럼 분석으로부터 그의 특성을 연구하였고, Beji and Battjes (1993)은 불투과성잠제에 불규칙파를 작용시켜 실험으로부터 천단상에서 비쇄파, 권파형 쇄파 및 붕괴 파형 쇄파시에 얻어진 파랑스펙트럼을 분석하여 그의 파랑변동 특성을 규명하였다.

또한, 해안공학에 있어서 파랑과 흐름의 상호작용에 대한 이해는 연안에서 발생하는 다양한 물리현상을 규명하고 연안구조물에 작용하는 외력을 정도 높게 평가하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 파랑과 흐름의 상호작용에 대한 초기연구는 주로 포텐셜이론에 기초한 연구(Zaho and Falinsen, 1988; Baddour and Song, 1990; Isaacson and Cheung, 1993; Lin and Hsiao, 1994)가 대부분 이었으나 최근에는 포텐셜이론의 한계를 극복하기 위해 PIV(Particle Image Velocimetry) 혹은 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 같은 영상해석기법을 이용한 실험적인 연구(Umeyama, 2009, 2011)와 Navier-Stokes 방정식에 기반한 수치해석적 연구(Li et al., 2007; Teles et al., 2013; Markus et al., 2013; Zhang et al., 2014)가 활발하게 수행되고 있다. 하지만, 이상의 주요연구들은 주로 파랑과 흐름의 상호작용에만 국한되어 있어 구조물 주변에서 발생하는 파랑과 흐름의 특성에는 직접적인 적용이 곤란하다. 한편, 제3장에서는 규칙파와 흐름의 공존장에서 불투과성 혹은 투과성을 갖는 배후경사면의 전면에 설치된 투과성잠제를 대상으로 흐름방향 등의 변화(파랑의 진행방향과의 순방향 및 역방향)에 따른 잠제 주변에서의 파동장 특성을 수치적으로 검토하였다.

본 장은 제3장의 후속연구로써 실험역의 환경을 고려하여 규칙파를 불규칙파로 확장하여 투과성잠제가 설치된 해역을 대상으로 흐름 및 구조물과의 상호작용에 따른 파동장의 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 또한, 투과성잠제 배후사면의 영향을 고려하기 위해 모래 및 자갈로 구성된 사면을 각각 고려하여 수치실험을 실시하였다. 수치해석모델은 전술한 제3장에서와 동일한 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 적용하였다. 불규칙파-흐름-잠제의 상호작용에 대한 수치해석조건 또한 전술한 제3장에서와 동일한 제원과 조건의 잠제, 수심 및 흐름을 적용하였으며, 입사파랑으로는 규칙파의 파고와 주기에 각각 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파랑을 적용하였다. 이로부터 불규칙파와 흐름이 공존하는 유체장에 모래 혹은 자갈로 구성된 배후사면의 전면에 놓인 투과성잠제구조물을 대상으로 흐름방향 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 제곱평균제곱근파고변화, 주파수스펙트럼의 변동, 쇄파양상의 차이,

평균유속 및 평균난류운동에너지의 변화 등과 같은 수리특성을 면밀히 검토하였다.

4.2 수치해석결과

4.2.1 파랑변형

(1) 계산조건

Fig. 4.1과 같은 일정 수심 $h=25.5\text{cm}$ 를 갖는 파동장에 설치된 투과성잠제를 대상으로 2차원수치파동수조(길이 21m, 높이 0.42m)를 구성하였다. 격자크기는 조파지점에서부터 7.05-10.95m의 범위에는 $\Delta x=\Delta z=0.75\text{cm}$ 의 정방격자를, 그 이외의 영역에는 $\Delta x=1.5\text{cm}$, $\Delta z=0.75\text{cm}$ 의 가변격자를 구성하였다. 조파판에서 9m 이격된 지점에 투과성잠제를 설치하였으며, 11.45m 이격된 지점에서부터 모래 혹은 자갈로 구성되는 1:30의 경사면을 설치하였다. 잠제는 높이 22.5cm, 천단폭 0.85m를 가지며, 구조물의 천단상에서 강제쇄파를 유도하기 위해 전·후의 비탈면경사를 1:1로 설정하였다. 잠제의 구성재료는 공극률 $\phi=0.44$, 중앙입경 $D_{50}=2\text{cm}$ 을 가지며, 전술한 바와 같이 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였다. 배후사면은 모래 혹은 자갈로 구성된 경우를 대상으로 하였으며, 모래의 경우는 공극률 $\phi=0.28$, 중앙입경 $D_{50}=0.2\text{cm}$, 저항계수 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을, 자갈의 경우는 공극률 $\phi=0.49$, $D_{50}=1.59\text{cm}$, 저항계수 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 각각 적용하였다. 바닥경계조건으로는 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i=0$ 을 적용하였다.

Table 4.1은 불규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. 표에서는 흐름이 없고 오직 파랑만이 존재하는 경우를 WCN으로, 흐름과 파랑의 진행방향이 동일한 순방향인 경우를 WCF로, 흐름과 파랑의 진행방향이 서로 반대인 역방향인 경우를 WCO로 표기 및 정의한다(이하 동일).

(2) 수위변동과 주파수스펙트럼

(a) 배후사면이 모래인 경우

Fig. 4.2는 배후사면이 모래인 경우에 잠제 주변에서 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 수위변동의 측정위치는 Fig. 4.1(b)에 나타내는 바와 같이 잠제의 전면부(WG1, $x=8.0\text{m}$), 잠제천단의 시작점(WG2, $x=8.575\text{m}$), 잠제천단의 중앙(WG3, $x=9.0\text{m}$), 잠제천단의 끝부분(WG4, $x=9.425\text{m}$) 및 잠제의 후면부(WG5, $x=10.0\text{m}$)에 각각 해당하며, 수치계산결과는 주파수스펙트럼이 충분히 재현될 수 있도록 지속시간 50s(200s~250s) 동안에 취득된 파랑을 대상으로 해석하였다.

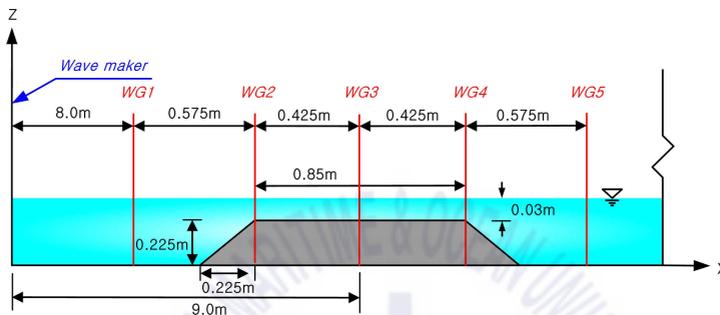
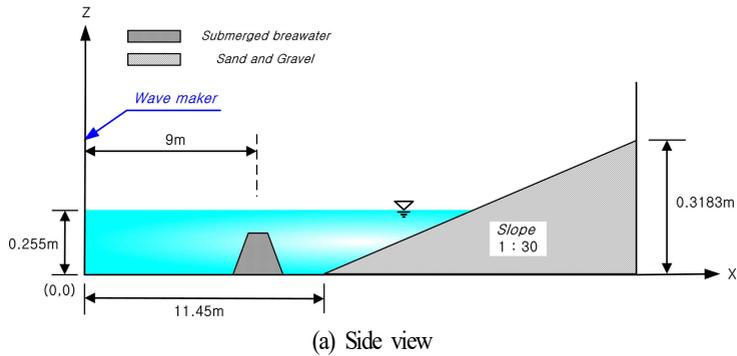


Fig. 4.1. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

Table 4.1. Conditions of wave and current applied to numerical analysis.

Case	WCN	WCF	WCO
Current velocity(cm/s)	0	5	-5
Wave type	Irregular : Linear superposition		
Spectrum	Modified Bretshneider-Mitsuyasu(Goda, 1988)		
Number of waves	150		
$H_{1/3}$ (cm)	7.5		
$T_{1/3}$ (s)	1.0		

수위변동을 살펴보면 잠제 전면부 WG1에서는 입사파와 잠제에 의한 반사파와 위상간섭의 영향으로 쌍봉형의 수위변동이 일부 발생하며, 잠제천단의 시작점 WG2에서는 급격한 수심의 감소에 따른 천수변형으로 WG1에 비해 보다 큰 수위변동이 나타나고, 전·후로 비대칭성이 큰 비선형효과가 형성되는 것을 볼 수 있다. 다음으로, 잠제 천단상의 WG3에서는 수위변동의 진폭이 급격히 감소된 것을 확인할 수 있고, 이로부터 WG2와 WG3 사이의 위치에서 쇄파가 발생하였다는 사실을 추정할 수 있다. WG3에서

의 수위변동에서 파동 부분이 솟아있고, 파곡 부분이 평탄하여 상대적으로 파곡의 길이가 길게 나타나므로 상하의 비대칭성(kurtosis)이 크며, 또한 WG2에서와 같이 파형에서 좌우의 비대칭성(skewness)이 크게 나타난다. WG4의 경우는 파가 잠제 천단상으로부터 보다 더 전파되었기 때문에 파고감쇠로 인하여 수위변동이 WG3보다 작게 나타나며, 전술한 파형에서 좌우 및 상하의 비대칭성이 유지되고 있다. WG5는 잠제 배후부로 파형에 고주파성분이 포함되어 나타나지만 파의 재형성과정을 통하여 파형에서 좌우의 비대칭성이 개선된 상황을 볼 수 있다.

입사파랑의 진행에 따른 각각의 위치에서의 주파수스펙트럼을 살펴보면 WG1에서 침두주파수 $f \approx 0.93/s$ 가 유의주파수 $f=1/s$ 보다 저주파수(장주기)영역에 놓이고, 주파수스펙트럼 전체가 저주파수영역으로 약간 이동된 결과를 나타낸다. 이와 같이 침두주파수가 저주파수영역으로 이동되는 현상은 WG2-WG5에서도 나타나며, 파의 전파에 따라 보다 심화되는 양상을 확인할 수 있다. 흐름방향에 따른 주파수스펙트럼의 변동양상을 살펴보면 잠제 전면부 WG1에서는 WCN의 주파수스펙트럼에 비해 WCO가 크고, WCF가 작은 값을 나타내지만 전체적으로 WCF, WCN, WCO의 순으로 침두주파수 근방에서 주파수스펙트럼이 큰 값을 나타내며, 특히 잠제 천단상 및 배후부에 걸쳐서 고·저주파수영역으로 파랑에너지가 분산되는 것을 볼 수 있다. 여기서, WG4와 WG5의 경우에 $f \approx 0/s$ 에서 급격히 증가되는 긴 장주기의 파랑에너지 성분을 볼 수 있으며, 이는 Lara et al.(2006)에 의해서도 지적된 바와 같이 부진동에 의한 성분이다. 반면에, 규칙파의 해석에서는 하나의 주파수 성분만을 가지므로 이러한 부진동 성분은 나타나지 않는 것으로 알려져 있다(Garcia et al., 2004; Lee et al., 2016).

각 위치에서 주파수스펙트럼의 크기변화를 살펴보면 WG2에서 급격히 상승된 큰 값을, 반면에 WG2에서 WG5로 갈수록 감쇠하는 작은 값을 각각 나타낸다. 특히, WG2와 WG3 사이에 크기변화가 급격히 발생하므로 전술한 바와 같이 이 위치 사이에 쇄파가 발생되었고, 이로 인하여 파랑에너지의 감쇠가 있었다는 사실을 유추할 수 있다. 따라서, 각 위치에서 주파수스펙트럼의 변동양상은 수심이 급격히 알아짐으로서 발생하는 천수변형, 잠제 천단상에서 쇄파변형, 천단에서 배후역으로 수심의 급격한 증가로 인한 반사 및 모래로 구성된 배후사면에서의 반사, 그리고 흐름의 존재여부와 흐름방향에 따라 크게 변화되는 것으로 판단되며, 많은 파라미터의 작용에 따른 복잡한 과정으로 이해될 수 있다. 여기서, 파의 전파에 따른 파랑에너지의 감쇠는 후술하는 평균난류운동에너지(난류강도), 누적평균난류운동에너지, 쇄파로 인한 파랑에너지의 소산 및 흐름방향에 따른 쇄파양상과도 연관성을 가진다.

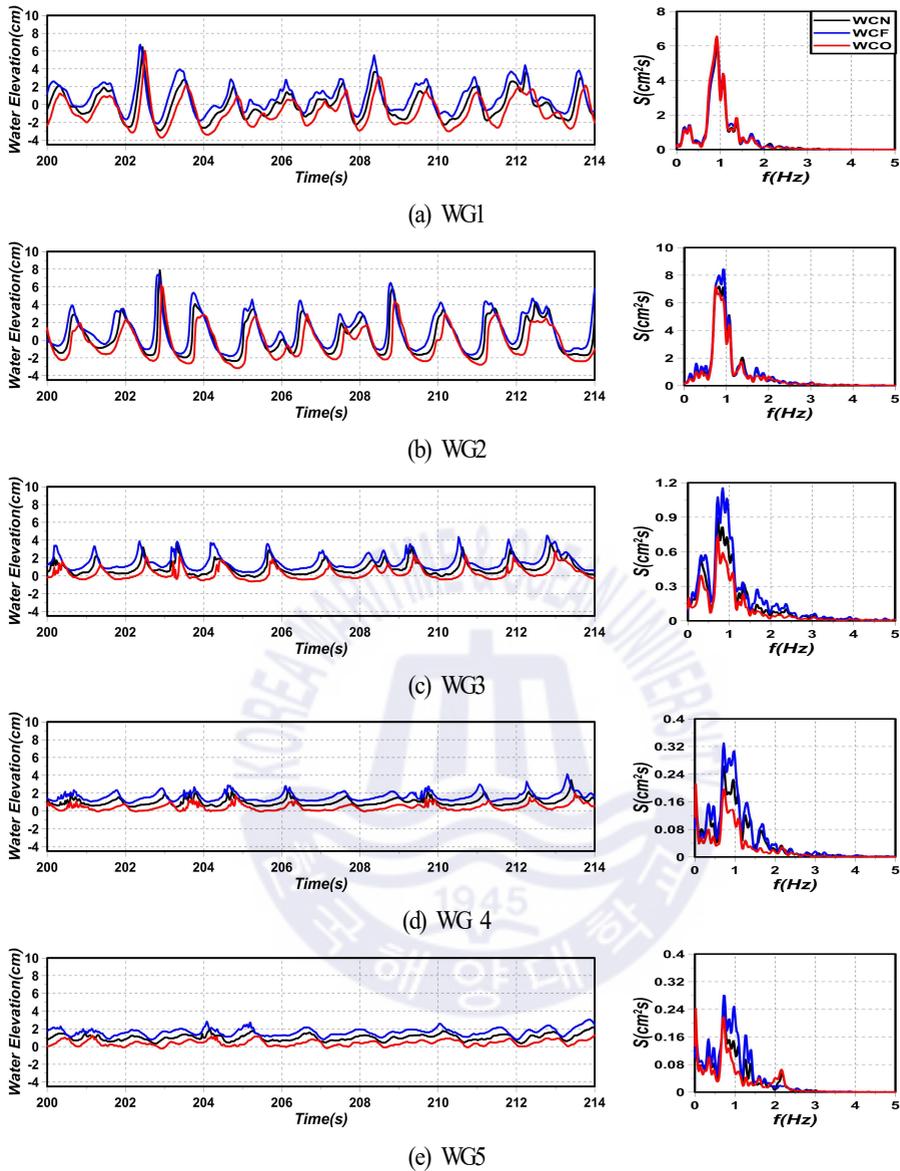


Fig. 4.2. Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach.

(b) 배후사면이 자갈인 경우

Fig. 4.3은 배후사면이 자갈인 경우에 잠제 주변에서 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 전술한 배후사면이 모래일 때와 유사하게 잠제 전면부에서 잠제에 의한 반사파

의 영향에 의해 일부에서 쌍봉형의 수위변동이 발생하고, 천단 전면부에서 비선형파의 발달에 따라 비대칭파형이 나타나고, 파의 전파에 따라 쇄파 발생, 비선형파의 발달 및 감쇠 등이 동반되며, 또한 이러한 수위변동의 현상과 특성을 우측의 해당하는 주파수스펙트럼으로부터도 명확히 확인할 수 있다. 전체적으로 파의 전파 및 흐름방향에 따른 주파수스펙트럼의 변동추이, 잠제 천단상 및 배후부에 걸쳐 고·저주파수영역으로 파랑에너지의 분산, WG4와 WG5에서 긴 장주기의 파랑에너지에 해당하는 부진동에 의한 성분의 발생, 각 위치에서 주파수스펙트럼의 크기변화 등은 전술한 바와 같이 배후사면이 모래인 경우와 유사한 특성을 나타낸다.

하지만, 전술한 배후사면이 모래인 경우와 다소 상이한 결과는 모래의 경우보다 잠제 중앙점인 WG3에서 WCF 및 WCN의 침두주파수 근방에서 주파수스펙트럼이 상대적으로 작은 값을, 천단의 끝부분인 WG4에서 WCF와 WCO는 큰 값을, 또한 잠제 배후인 WG5에서 WCF, WCO 및 WCN 모두 작은 값을 각각 나타낸다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 많은 파라미터의 영향에 의한 복잡한 변동과정으로 발생되지만 근본적으로 자갈로 구성된 배후사면의 공극률이 모래의 경우보다 크기 때문에 나타나는 낮은 반사율에 기인하는 것으로 판단된다.

(3) 쇄파현상

Fig. 4.4는 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 조건하에서 WCN, WCF 및 WCO의 경우에 잠제 천단상에서 쇄파되는 일련의 과정을 Snapshot으로 나타낸 것이다. 대상파랑은 Figs. 4.2(a)와 4.3(a)의 $t=202\sim 204s$ 에 나타나는 최대파를 대상으로 하였으며, 흐름의 유무에 따라 쇄파의 발생위치와 및 위상이 다소 상이하지만 상호비교를 위해 쇄파 진행과정의 위상을 가능한 범위내에서 일치시킨 결과이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 입사파는 잠제 천단상에서 쇄파되고, 더불어 파 전파방향으로 수평유속이 증가하는 것을 알 수 있다. 흐름의 방향에 관계없이 권파형쇄파가 발생하지만 WCO, WCN, WCF의 순으로 보다 뚜렷한 권파형쇄파가 발생한다.

한편, WCF의 경우 초기에는 권파형쇄파를 보이다가 중국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형쇄파를 동시에 나타낸다. WCF에서 복합적인 쇄파형이 발생하는 것은 잠수계류부채상에서 발생하는 쇄파형을 실험적으로 검토한 Iwata et al.(1990)에 의하면 잠수계류부채가 진행파와 동일한 위상으로 운동할 때 부채상에서 복합형의 쇄파가 발생된다는 사실에 비추보면 본 연구의 WCF에서 복합적인 쇄파형을 나타내는 것은 진행파와 흐름이 같은 방향이기 때문으로 판단된다.

Fig. 4.5는 잠제 배후에 자갈사면이 위치하는 조건하에서 Fig. 4.4와 동일하게 WCN, WCF 및 WCO의 경우에 최대파가 잠제 천단상에서 쇄파되는 일련의 과정을 Snapshot으로 나타낸 것이다. Fig. 4.4와 같이 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 경우와 동일하게 WCO, WCN, WCF의 순으로 보다 뚜렷한 권파형쇄파가 발생하지만 WCF의 경우는 배후에 모래사면이 위치하는 경우와는 상이하게 중국에 붕괴

파형쇄파를 동시에 나타내지는 않는다. 그리고, 권파형쇄파가 발생하는 경우에도 그 규모가 모래사면의 경우보다 약간 약하게 나타난다. 이러한 결과는 잠제 천단상의 파형과 흐름에 영향을 미치는 배후부 경사면에서 반사율이 상이하기 때문이며, 자갈사면의 경우가 모래의 경우보다 공극율이 크기 때문에 반사율이 작게 주어진다.

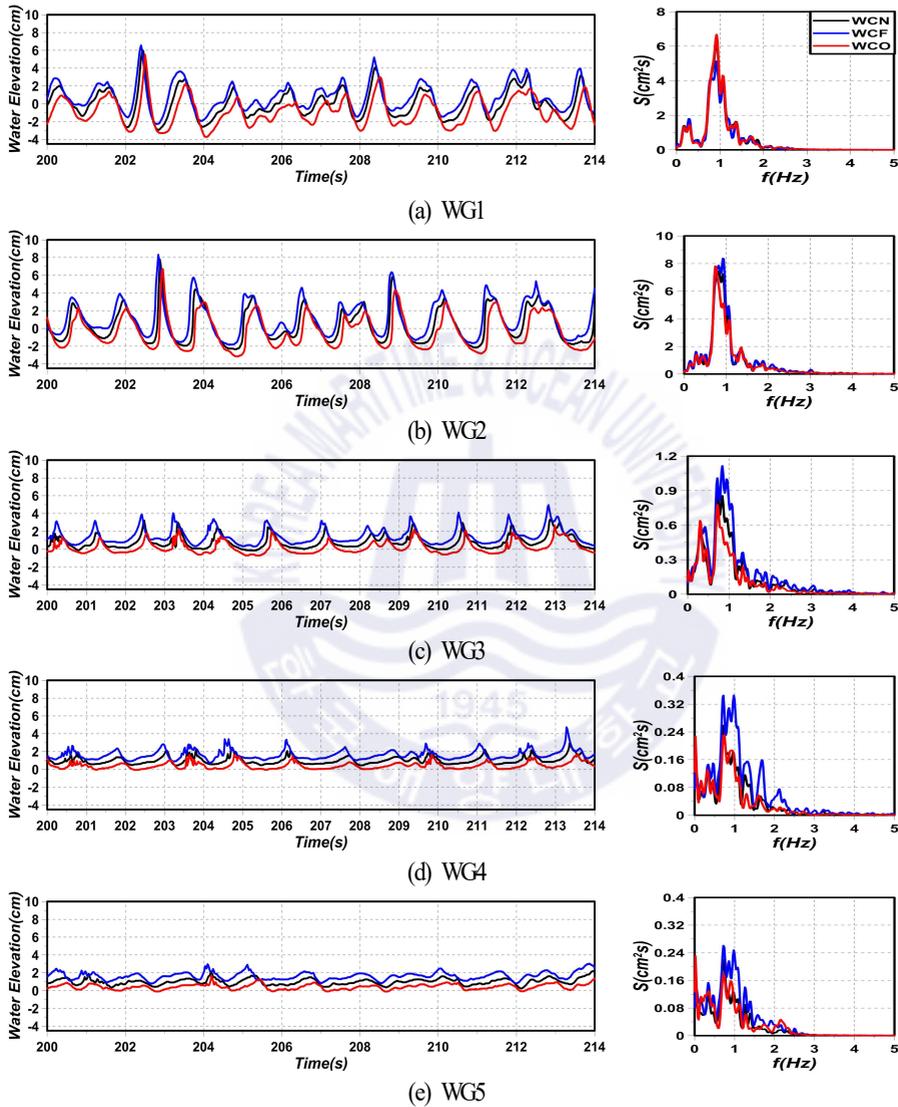
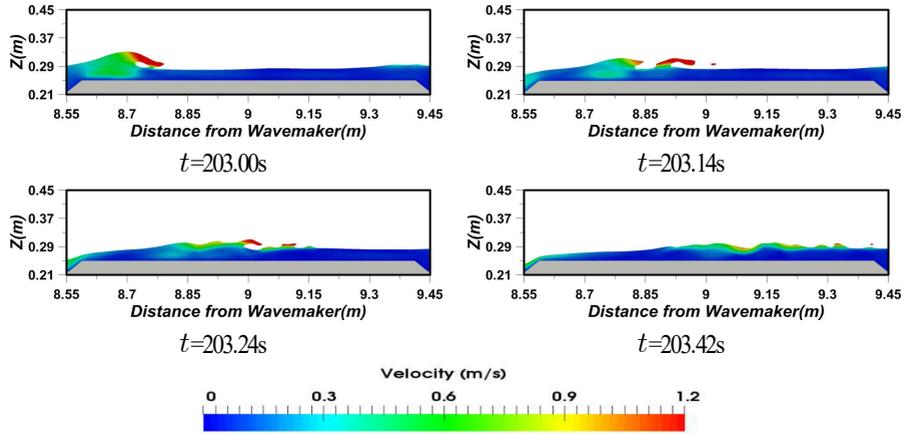


Fig. 4.3. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for gravelled beach.



(a) WCN

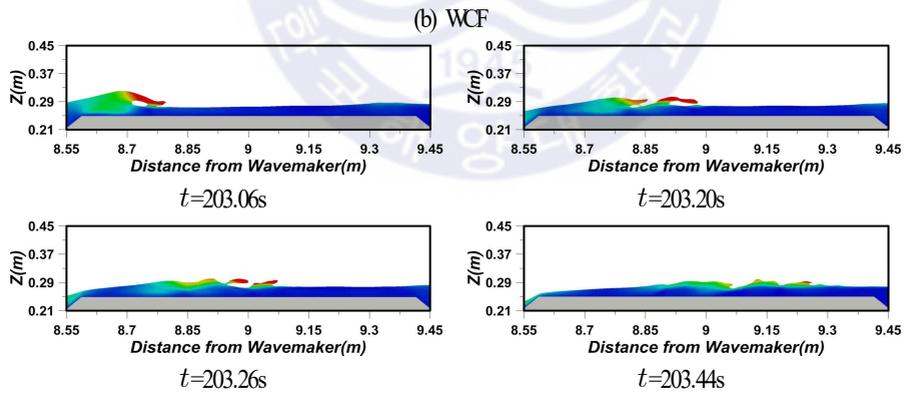
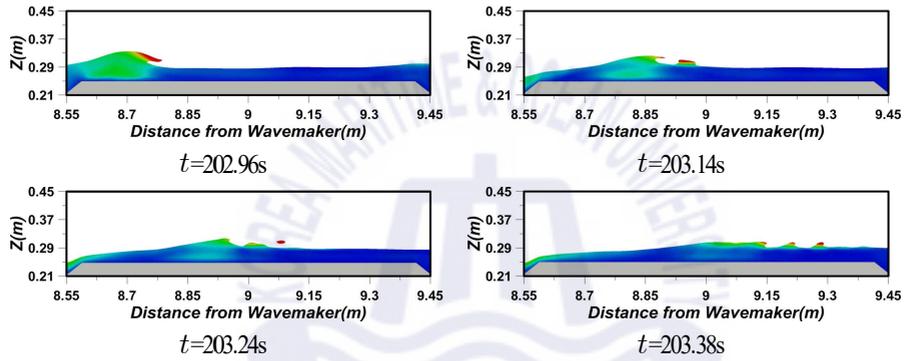


Fig. 4.4. Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach.

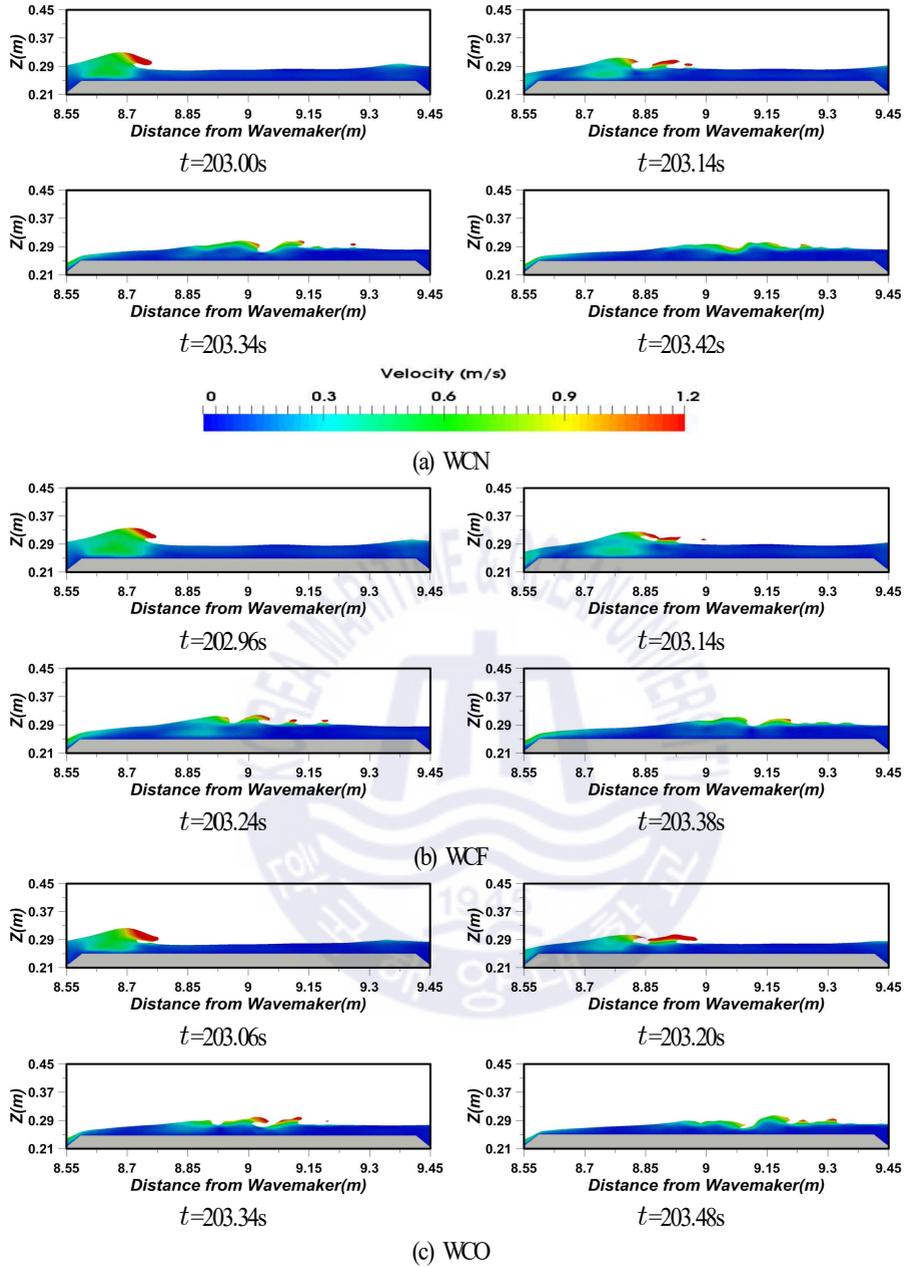


Fig. 4.5. Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach.

4.2.2 파고분포

Fig. 4.6은 Figs. 4.2과 4.3으로부터 도출한 제곱평균평방근과고(Root mean square wave height) H_{rms}

의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 4.6(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 4.6(b)가 자갈인 경우에 각각 해당한다. 전반적으로 잠제로 인한 반사파의 영향 때문에 잠제 전면부에서는 부분중복파의 파동장이 형성되는 것을 알 수 있고, 잠제의 천단상과 후면부에 걸쳐서 배후사면이 모래나 자갈에 관계없이 WCN보다 WCF에서 H_{rms} 파고가 증가하고, WCO에서 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이로부터 잠제와 같은 구조물이 설치된 흐름-파동장에서는 위치에 따라 흐름의 방향에 따라 H_{rms} 파고의 변화가 증가하거나 감소하는 일률적인 경향을 나타내는 것이 아니라는 중요한 사실을 알 수 있으며, 이러한 결과는 규칙파의 경우와도 일치한다(Lee et al., 2016).

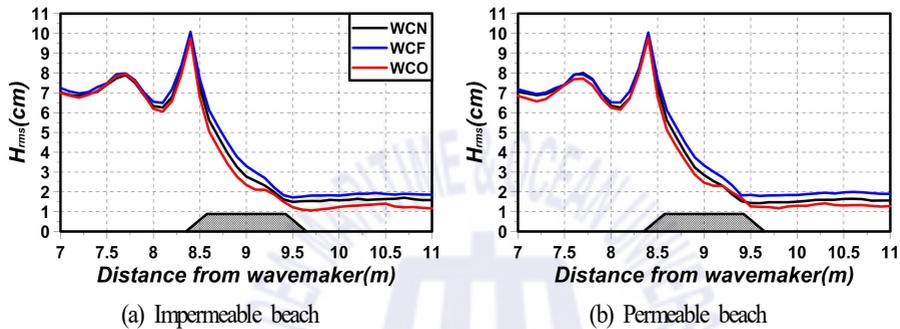


Fig. 4.6. Spatial distribution of simulated wave heights.

Table 4.2는 Figs. 4.2와 4.3에서 나타난 각 파고계 위치에서의 수위변동으로부터 H_{rms} 파고를 산정한 것이다. 흐름이 없을 때를 기준으로 파고감쇠율($[WGI$ 에서 H_{rms} 파고]- $[WG5$ 에서 H_{rms} 파고] $[WGI$ 에서 H_{rms} 파고])을 산정하면 배후사면이 모래와 자갈일 때 WCO에서 각각 79.70%와 80.51%의 파고감쇠율이 얻어지고, WCF에서 73.85%와 78.80%의 값이 얻어지며, 이로부터 WCO에서 파고감쇠율이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지(난류강도)와 누적평균난류운동에너지의 공간적인 차이 및 전술한 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지 소산량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

4.2.3 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포

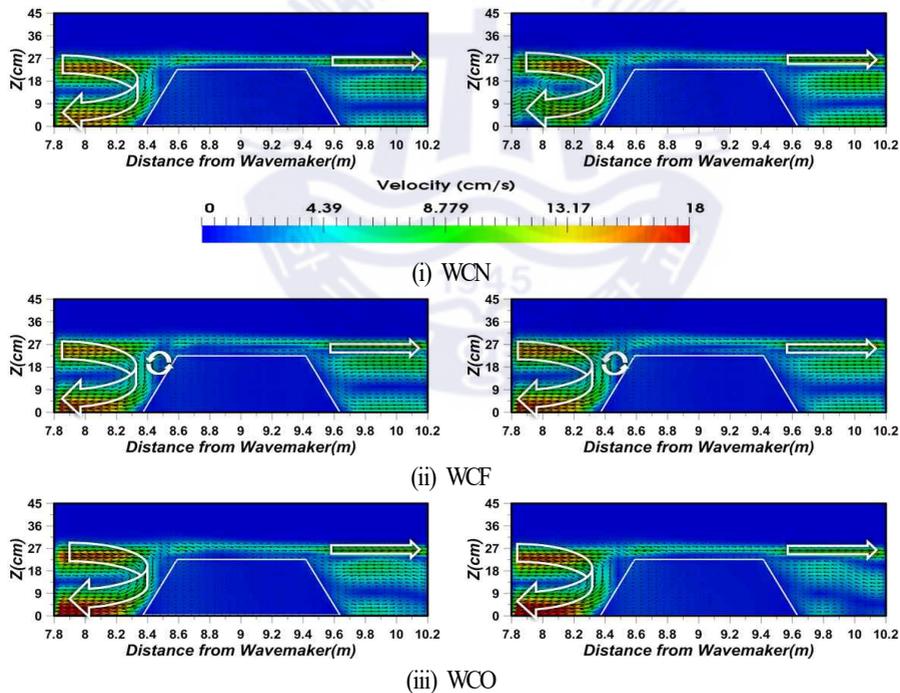
(1) 평균유속

Fig. 8은 정상상태에 도달한 50s 동안의 파랑을 대상으로 시간평균한 평균유속을 나타낸 것으로 Figs. 8(a)와 8(b)는 각각 배후사면이 모래와 자갈인 경우에 해당하며, 각각에서 (i)은 WCN, (ii)는 WCF, (iii)은 WCO의 경우이다. 그림으로부터 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 WCF의 경우에만 잠제

전면에서 반시계방향의 순환셀이 형성되고, 잠제 전면의 해저면에서는 해측으로 강한 유속이 발생한다. 해저면에서 유속의 크기는 WCO, WCF, WCN의 차례로 강하게 발생하며, 배후사면이 자갈인 경우에는 그 차이를 더욱 명확히 확인할 수 있기 때문에 WCO와 공극율이 큰 배후사면의 조건하에서는 잠제 전면에서 세굴의 가능성이 보다 높아진다는 것을 예측할 수 있다.

Table 4.2. Comparison of wave heights at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5.

Distance x from position of wave maker		H_{rms} for sandy beach(cm)			H_{rms} for graveled beach(cm)		
		WCN	WCF	WCO	WCN	WCF	WCO
WG1	$x=8.000\text{m}$	6.883	7.001	6.867	6.972	6.950	6.728
WG2	$x=8.575\text{m}$	8.123	8.447	7.773	8.086	8.426	7.734
WG3	$x=9.000\text{m}$	3.260	3.771	2.772	3.230	3.741	2.872
WG4	$x=9.425\text{m}$	1.844	2.059	1.467	1.725	2.199	1.632
WG5	$x=10.00\text{m}$	1.452	1.831	1.394	1.478	1.843	1.311



(a) Sandy beach (b) Graveled beach
Fig. 4.7. Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater.

(2) 평균난류운동에너지

Fig. 4.8은 평균난류운동에너지를 나타내며, 이는 $(u'_x{}^2 + u'_z{}^2)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 정상상태의 50s 동안에 시간평균한 $\overline{(u'_x{}^2 + u'_z{}^2)}/2$ 이며, 여기서 u'_x , u'_z 는 각각 x , z 방향으로 난류속도성분이다. 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산정도를 판정할 수 있는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 파고변화 및 파랑에너지의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 4.8(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 4.8(b)가 자갈인 경우에 각각 해당하며, (i)은 WCN, (ii)는 WCF, (iii)은 WCO의 경우이다. 그림으로부터 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 전반적으로 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 WCF의 경우가 잠제 천단부에서 난류에너지가 상대적으로 적게 나타난다. 이하에서는 잠제 천단상 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지에 대해 고찰하며, 이와 파고변화의 연관성을 기술한다.

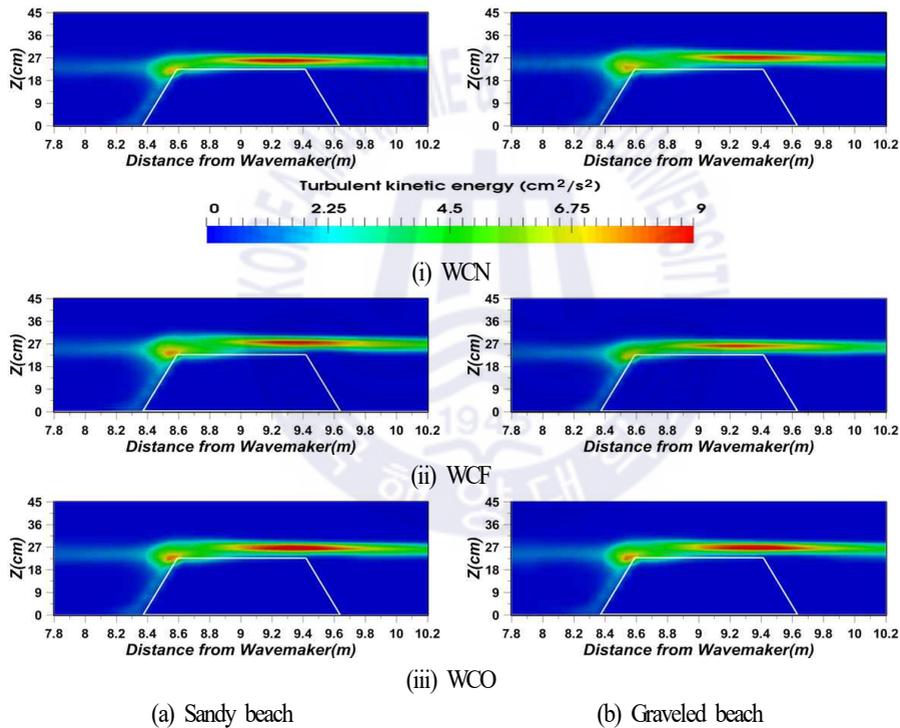


Fig. 4.8. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater.

Fig. 4.9는 Fig. 4.8의 결과를 잠제 천단($z=0.21m$)부터 난류운동에너지의 영향이 미치는 영역($z=0.285m$)까지 수심방향으로 평균한 결과, 즉 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지(시·공간평균난류에너지로 칭한다)와 그에 대한 누적난류운동에너지(시·공간누적평균난류에너지로 칭한다)를 나타

낸다. 그림으로부터 시·공간평균난류에너지의 공간분포를 살펴보면 배후사면의 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제 전면의 비탈면상에서 크게 나타나고, 천단 중앙의 후반부에서 약간 크게 나타나며, 천단 중앙의 후반부에서 WCO(WCF)의 경우가 WCN보다 큰(작은) 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 공간과고변화와 직접적인 연관성을 갖는 시·공간누적평균난류에너지를 살펴보면 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제 전면부에서 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 거의 나타나지 않지만 잠제 천단 중앙을 지나서부터 차이가 나타나며, 흐름의 여부에 따른 값의 차이는 미미하지만 전반적으로 WCO의 경우가 WCN과 WCF보다 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

이러한 사실로부터 구조물과 배후사면이 고려되지 않은 파·흐름장에 대해 Umeyama(2011)도 지적하고 있는 바와 같이 흐름의 방향에 따른 파고감쇠율은 누적난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 누적난류운동에너지가 높을수록(낮을수록) 파고감쇠율이 높게(낮게) 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 이와 더불어 전술한 규칙파·흐름 공존장내의 잠제 주변에서 파랑특성을 연구한 Lee et al.(2016)의 결과와 동일하게 불규칙파·흐름의 공존장내에서도 배후사면에서 반사율의 영향과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 동시에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

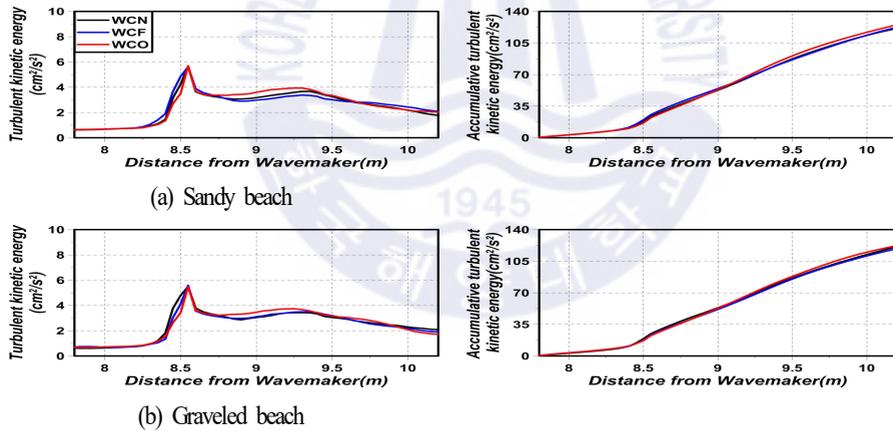


Fig. 4.9. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy and its accumulation.

4.3 결론

본 장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 수치해석으로부터 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 수치파동수조에 역방향 혹은 순방향흐름이 있는 상태에서 불규칙파를 조파하여 잠제 주변에서

수위변동과 그의 주파수스펙트럼, 파고분포, 쇄파형상, 평균흐름 및 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지 등과 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 제곱평균제곱근파고에 대해, 배후사면의 모래 혹은 자갈의 여부에 관계없이 잠제의 전면부에서는 역방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 제곱평균제곱근파고가 높지만 잠제 천단상의 전반부에서 후면부까지는 순방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높게 나타난다.

(2) 쇄파형상에 대해, 배후사면이 모래인 경우는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄파를 나타내며, 순방향흐름의 경우는 초기에는 권파형쇄파를 보이다가 중류에는 파봉이 부서지는 붕괴파형쇄파를 동시에 나타낸다. 배후사면이 자갈인 경우에는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄파만을 나타내지만 그의 규모는 모래의 경우보다 약하다.

(3) 평균유속에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 순방향흐름의 경우에만 잠제 전면의 비탈면 앞에 반시계방향의 순환셀이 형성되고, 잠제 전면의 해저면에서 해측으로 강한 유속이 발생하며, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우, 흐름이 없는 경우의 순으로 유속이 강해진다. 이로부터 흐름방향에 따라 잠제 전면 해저면에서 쇄굴의 여부 및 정도를 예상할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 평균난류에너지에 대해, 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 순방향흐름의 경우가 상대적으로 잠제 천단부에서 난류에너지가 적게 나타난다.

(5) 시·공간누적평균난류에너지에 대해, 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 미미하지만 잠제 전면의 천단 증상을 지나서부터는 차이가 나타난다. 전반적으로 역방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 순방향흐름의 경우보다 큰 값을 가지며, 공간파고변화와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되고, 이와 함께 배후사면에서 반사율과 흐름의 유무 및 흐름방향에 따른 잠제 천단상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 공간파고변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

References

- Baddour, R. E. and Song, S.(1990). On the interaction between wave and currents, Ocean Engineering, 17(1), 1-21.

- Beji, S. and Battjes, J.A.(1993). Experimental investigation of wave propagation over a bar, *Coastal Engineering*, 19, 151-162.
- Garcia N., Lara, J.L and Losada, I.J.(2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters, *Coastal Engineering*, 51, 991-1020.
- Goda, Y.(1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan, JSCE*, 31(1), 39-52.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Isaacson, M. and Cheung, K. F.(1993). Time-domain solution for wave-current interactions with a two-dimensional body, *Applied Ocean Research*, 15(1), 39-52.
- Iwata, K., Kim, D. S., Asai, M. and Shimoda, M.(1990). Wave breaking on submerged floating structure, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, 37, 604-608(in Japanese).
- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, *Coastal Engineering*, 84, 56-72.
- Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J.(2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, *Coastal Engineering*, 53, 395-417.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W., Kim, D. S. and Bae, K. S.(2016). Numerical analysis on wave characteristics around submerged breakwater in wave and current coexisting field by olaFlow, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 332-349.
- Li, T., Troch, P. and De Rouck, J.(2007). Interactions of breaking waves with a current over cut cells, *Journal of Computational Physics*, 223(2), 865-897.
- Lin, M. C. and Hsiao, S. S.(1994). Boundary element analysis of wave-current interaction around a large structure. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 14(4), 325-334.
- Markus, D., Hojjat, M., Wüchner, R. and Bletzinger, K. U.(2013). A CFD approach to modeling wave-current interaction, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 23(1), 29-32.
- Teles, M. J., Pires-Silva, A. A. and Benoit, M.(2013). Numerical modelling of wave current interactions at a local scale. *Ocean Modelling*, 68(0), 72-87.
- Umeyama, M.(2009). Changes in turbulent flow structure under combined wave-current coexisting environment, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*,

131(5), 203-212.

- Umeyama, M.(2011). Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 137(2), 85-94.
- Zhang, J. S., Zhang, Y., Jeng, D. S., Liu, P. L. F. and Zhang, C.(2014). Numerical simulation of wave-current interaction using RANS solver, *Ocean Engineering*, 75, 157-164.
- Zhao, R. and Faltinsen, O. M.(1988). Interaction between waves and current on a two-dimensional body in the free surface, *Applied Ocean Research*, 10(2), 87-99.



제 5 장 투과성잠제 주변에서 규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석

5.1 서언

3차원잠제에 대한 연구로는 Vicinanza et al.(2009)이 2차원잠제에 대한 전달율 산정식(Buccino and Calabrese, 2007; d'Angremond et al., 1997; Goda and Ahrens, 2008; Seabrook and Hall, 1998)을, 그리고 van der Meer et al.(2005)는 Penney and Price(1952)의 회절계수 산정식을 각각 결합하여 3차원잠제에서 전달율을 각각 추정하였으며, Sharifahmadian et al.(2014)는 인공신경망(ANN)을 통해 전달율을 평가하였다. 그리고, Kramer et al.(2003)은 3차원잠제 주변에서 파동장을 실험으로부터 분석하였고, Johnson et al.(2005)와 Johnson(2006)은 평면방정식모델(MIKE 21 모델, LIM 모델, Boussinesq 모델)에 의한 수치결과를 Kramer et al.(2003)의 실험결과와 비교·검토하였으며, Nobuoka et al.(1997)은 3차원단일잠제 배후에서, 그리고 Loveless and MacLeod(1999)는 다기이안제와 잠제 배후에서 각각의 순환패턴을 연구하였다. 하지만, 여전히 3차원잠제 주변에 형성되는 파동장 및 잠제 배후에서 형성되는 지형변동파의 명확한 상관관계를 충분히 설명할 수 없다.

본 장에서는 제3장의 2차원잠제에 대한 연구를 확장하여 3차원잠제 주변 파동장으로의 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 잠제 배후에 설상사주가 형성되는 조건하에서 잠제의 개구폭, 잠제와 해안선 사이의 거리, 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잠제 주변에서의 외력환경인 파고분포와 평균수위분포를 검토한다.

5.2 수치해석결과

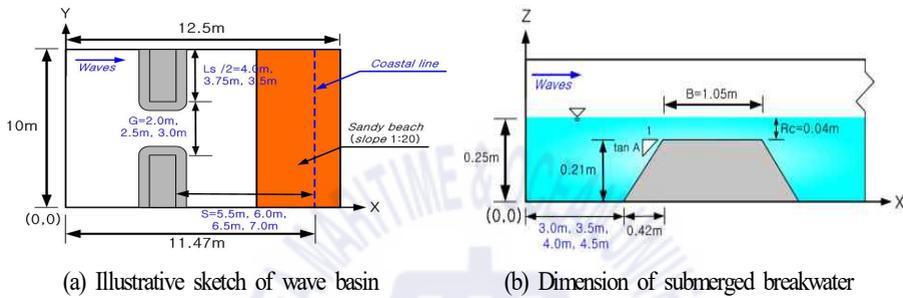
3차원잠제 주변의 파동장해석에 대한 olaFlow 모델의 적용성을 바탕으로 본 연구에서는 3차원잠제의 개구폭, 잠제와 해안선 사이의 거리, 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잠제 주변에서의 외력환경인 파고분포와 평균수위분포를 검토하였다.

5.2.1 계산조건

Fig. 5.1과 같은 일정 수심 $h=25\text{cm}$ 를 갖는 3차원파동장에 설치된 투과성잠제를 대상으로 3차원수치 파동수조(길이 12.5m, 폭 10m, 높이 0.4m)에 1:20의 경사를 갖는 사빈을 설치하여 수치해석을 수행하였다. 바닥경계조건은 Slip으로 구성하였고, 양측 벽경계조건도 Y-축방향으로 잠제가 반복적으로 설치되어 있는 것으로 가정하여 Slip 조건을 적용하였다. 잠제의 높이는 21cm, 천단수심은 4cm이며, 천단에서 구조물의 전·후면 및 개구방향으로 2:1의 경사면을 설정하고, 천단폭을 1.05m로 적용하였다. 격자크기는 $\Delta x=3\text{cm}$, $\Delta y=3\text{cm}$ 이며, Δz 는 계산효율을 위해 바닥에서부터 수면까지는 $\Delta z=1.4\text{--}0.7\text{cm}$ 의 가

변격자를, 수면에서부터 수조 상부경계로 설정된 $z=40\text{cm}$ 까지는 $\Delta z=0.7\text{--}1.4\text{cm}$ 의 가변격자를 각각 구성하였으며, 조파시에 z 축으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다.

한편, 잠제는 공극률 $\phi=0.33$, 중앙입경 $D_{50}=3.0\text{cm}$ 인 투과성재료로 구성되며, 사빈은 공극률이 $\phi=0.3$, 중앙입경이 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 인 모래로 가정되었다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였으며, 사빈의 경우는 모래 입경에 해당하는 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 의 다공성매질에 대한 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을 적용하였다. 적용한 난류모델은 LES 모델이며, 계산의 안정을 위해 Courant 상수를 0.3 이하가 되도록 설정하였다.



(a) Illustrative sketch of wave basin (b) Dimension of submerged breakwater
Fig. 5.1. Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.

잠제는 Fig. 5.1(b)에 제시된 바와 같이 조파관으로부터 잠제의 전면경사가 시작되는 지점까지 4.5m(CASE 7), 4.0m(CASE 8), 3.5m(CASES 1~6), 3.0m(CASE 9) 이격된 지점에 위치하도록 하였다. 한편, 잠제의 천단에서 해안선과의 거리는 Fig. 5.1(a)에 제시된 잠제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리 S 를 매개변수로 사용하여 설상시주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001)의 결과에 따라 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 S 를 5.5m(CASE 7), 6m(CASE 8), 6.5m(CASES 1~6), 7m(CASE 9)로 설정하였다. 또한, 개구폭 G 를 3.0m(CASES 1, 4), 2.5m(CASES 2, 5, 7, 8, 9) 및 2.0m(CASES 3, 6)로 설정함에 따라 잠제 길이 L_s 는 3.5m(CASES 1, 4), 3.75m(CASES 2, 5, 7, 8, 9), 4.0m(CASES 3, 6)로 구성되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잠제가 설치되는 것으로 가정하였다. 이상과 같은 잠제 배치와 입사파랑 조건을 종합적으로 나타낸 것이 Table 5.1이며, 표에는 잠제 천단상에서 쇄파 발생 여부도 병기되어 있다.

5.2.2 잠제 주변의 파고분포에 대한 고찰

(1) 개구폭의 변화

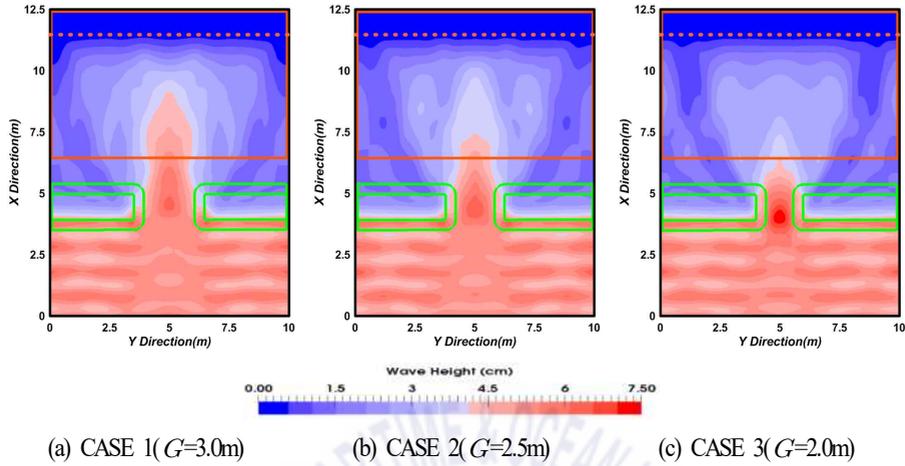
Fig. 5.2는 입사파고가 $H=5\text{cm}$ 인 경우 잠제 주변에서 형성되는 파고의 공간분포를 나타낸 것으로 Fig. 5.2(a)는 개구폭이 3.0m(CASE 1), Fig. 5.2(b)는 2.5m(CASE 2), 그리고 Fig. 5.2(c)는 2.0m(CASE 3)의 경우에 각각 해당하며, 그림중에 붉은 파선과 붉은 실선의 사각형은 해안선과 사빈 경사면을 나타낸다. 제시된 수치계산 결과는 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 연속되는 5개의 파를 산술평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 파고가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파가 집중되어 파고가 증대되며, 파가 집중되는 위치는 개구폭이 넓을수록 보다 잠제 배후로 이동되는 경향을 나타낸다. 또한, 개구폭이 좁을수록 잠제 배후로 전달되는 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 파고가 감소한다. 역으로, 개구폭이 넓을수록 개구부에서 파의 집중이 감소하여 파고가 작아지지만 잠제 배후에서 파고는 커지며, 잠제의 길이방향으로 공간변화가 커진다는 것을 알 수 있다.

Table 5.1. Incident wave condition and 3-dimensional layout of submerged breakwater.

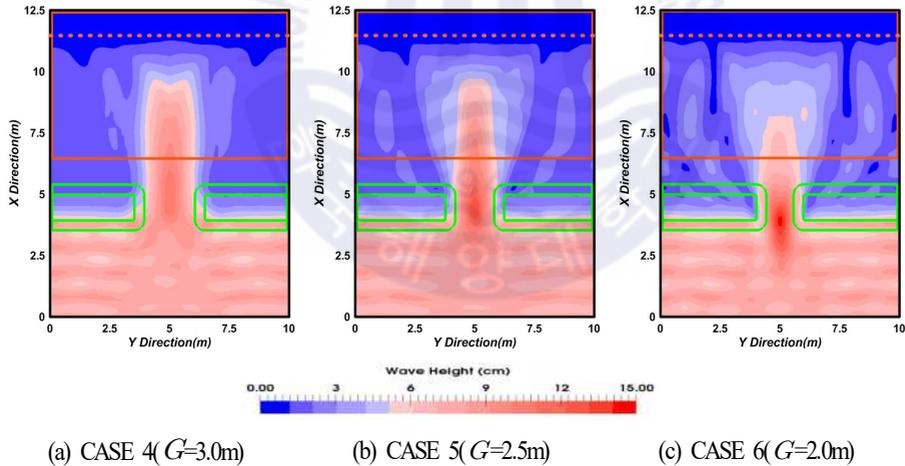
CASE No.	Wave maker theory	Wave height $H(\text{cm})$	Wave period $T(\text{s})$	Gap width $G(\text{m})$	Submerged breakwater length $L_s(\text{m})$	Distance between shoreline and submerged breakwater $S(\text{m})$	Wave breaking on crown
CASE 1	Stokes II	5	1.4	3.0	7.0	6.5	No
CASE 2				2.5	7.5		
CASE 3				2.0	8.0		
CASE 4		7		3.0	7.0	5.5	Yes
CASE 5				2.5	7.5		
CASE 6				2.0	8.0		
CASE 7		2.5		7.5	6.0	7.0	Yes
CASE 8							
CASE 9							

Fig. 5.3은 Fig. 5.2에 비해 입사파고가 증가한 $H=7\text{cm}$ 인 경우에 대한 파고의 공간분포를 나타낸 것이다. 개구폭의 변화에 따라 개구부에서 파의 집중 및 잠제 배후에서 파고 크기 등에 관한 경향은 전술한 Fig. 5.2의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있지만 입사파고가 더 큰 $H=7\text{cm}$ 의 경우는 개구폭이 좁을수록 전술한 $H=5\text{cm}$ 의 Fig. 5.2와는 달리 잠제 배후에서 회절현상이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 이는 $H=7\text{cm}$ 의 Fig. 5.3의 경우 잠제 천단상에서 쇄파가 발생되고, 또한 개구폭이 좁을수록

개구부에서 파 집중으로 인한 파고 증폭이 보다 커져 파고의 공간적인 차이로 인한 파랑에너지의 수평분산에 의한 회절현상이 강하게 나타난다.

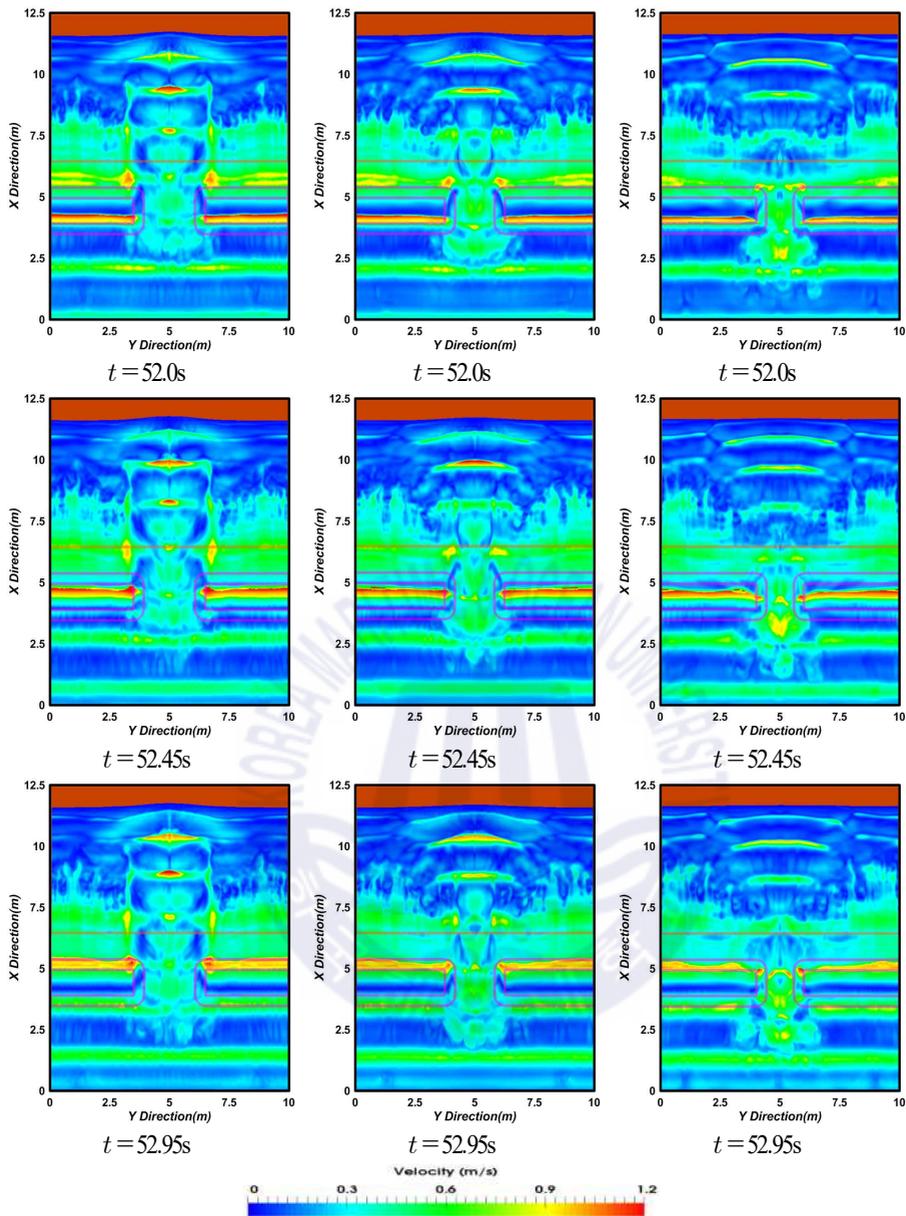


(a) CASE 1 ($G=3.0m$) (b) CASE 2 ($G=2.5m$) (c) CASE 3 ($G=2.0m$)
 Fig. 5.2. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.



(a) CASE 4 ($G=3.0m$) (b) CASE 5 ($G=2.5m$) (c) CASE 6 ($G=2.0m$)
 Fig. 5.3. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.

Fig. 5.4는 입사파고가 $H=7cm$ 인 경우 잠제 천단상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 입사하는 파가 시·공간적으로 회절되는 일련의 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이다. 일반적으로 입사파는 잠제 천단상에서 급격한 수심의 감소로 쇠파되면서 동시에 파 진행방향의 수평유속이 증가하



(a) CASE 4 ($G=3.0\text{m}$) (b) CASE 5 ($G=2.5\text{m}$) (c) CASE 6 ($G=2.0\text{m}$)
 Fig. 5.4. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

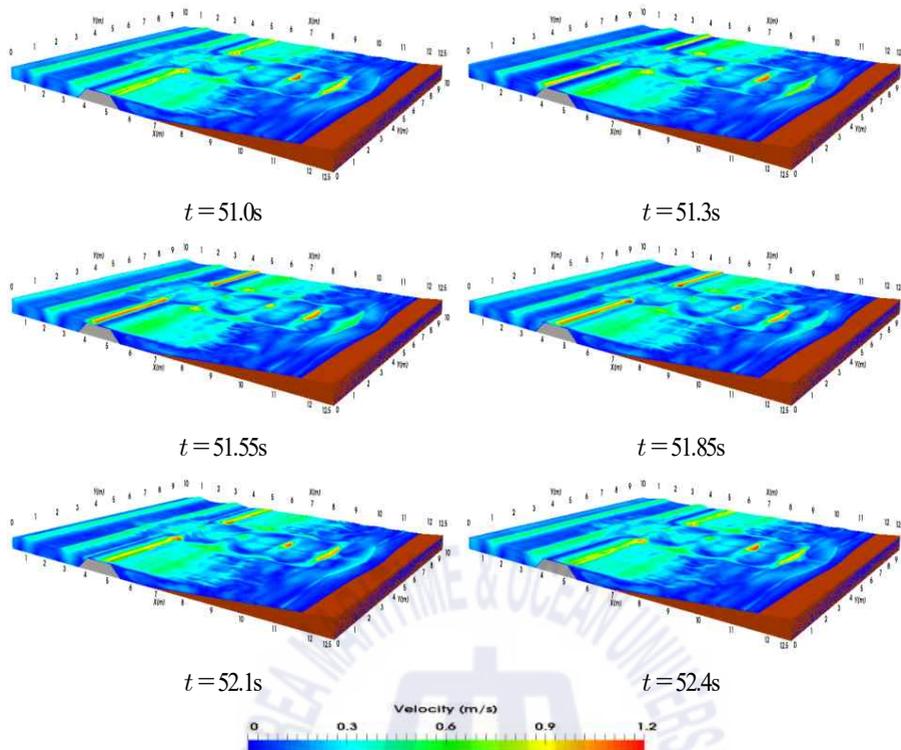


Fig. 5.5. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and beach.

고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것은 주지의 사실이며, 이러한 현상을 Fig. 5.4로부터도 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 5.3의 결과에서도 지적인 바와 같이 개구폭이 넓을수록 큰 속도는 개구부의 배면에 상대적으로 집중되고, 이로부터 회절현상이 상대적으로 작게 발생하는 것으로 추정된다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 해안선 근방에서는 대부분 쇄파가 발생되며, 개구폭이 넓을수록 유속의 증가가 현저히 나타나므로 보다 큰 규모와 강도의 쇄파가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 5.5는 입사파고가 $H=7cm$, 주기가 $T=1.4s$, 개구폭이 $G=3.0m$ 인 경우(CASE 1)인 경우 잠제 천단상 및 배후 사면에서 쇄파되는 일련의 과정을 나타낸 것이다. Fig. 5.4에서 확인할 수 있는 바와 같이 입사파는 잠제 천단상에서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로의 수평유속이 증가하며, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 5.4의 결과에서도 지적인 바와 같이 큰 속도의 유속은 개구부 배면에 집중되고, 개구부 배면의 해안선 근방에서 대부분 쇄파되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.6은 입사파고가 $H=5cm$ 와 $7cm$ 인 각각의 경우에 대해 해안선에 평행한 단면에서 Y -축을

CASE 4가 상대적으로 작은 파고를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 대체적으로 파고가 감소하는 경향을 나타내지만 제간부에서는 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않고 위치에 따라 상이한 크기를 나타내는 것은 Fig. 5.6(a)의 경우와 유사하다. 해안선에서는 Fig. 5.6(a)의 경우와 거의 동일하게 모든 CASE가 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 파고가 0cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다. 여기서, 각 그림의 (i)과 (ii)에서의 차이는 잠제 천단상에서 쇄파 여부 및 개구부에서 형성되는 파고 증폭의 크기에 따른 회절 영향에 의한 것으로 판단된다.

(2) 잠제 위치의 변화

Fig. 5.7은 잠제 위치에 따른 파고분포를 나타낸 것으로 입사파고가 $H=7\text{cm}$, 개구폭이 $G=2.5\text{m}$ 인 경우에 잠제 위치 $S=6.5\text{m}$ 를 중심(CASE 5)으로 해안선에 1.0m 보다 가까운 $S=5.5\text{m}$ 의 경우(CASE 7), 해안선에 0.5m 보다 가까운 $S=6.0\text{m}$ 의 경우(CASE 8)와 해안선에 0.5m 보다 먼 $S=7.0\text{m}$ 의 경우(CASE 9)를 각각 제시한다.

그림으로부터 파가 잠제를 통과하면서 파고가 감소하고, 제두부 근방에서 회절현상이 나타나는 것은 전반적으로 거의 유사한 경향이지만 잠제가 해안선에서 $S=7.0\text{m}$ 이격된 CASE 9의 경우는 개구부에서 파의 집중도가 상대적으로 약간 저하되고, 잠제 배후면에서 파고가 미미하지만 약간 작아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 해안선으로부터 잠제 설치위치의 변화에 따른 유의한 변화는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 잠제를 통하여 동일한 파랑에너지가 유입되는 상황에서 본 연구와 같이 대상 해역의 폭이 변하지 않는 조건하에서는 해안선부터 잠제까지의 이격거리 변화는 파랑변형에서 차이는 거의 발생되지 않고 주로 유입된 파랑에너지가 분포하는 면적의 변화로만 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5.8은 CASES 5와 7-9의 경우에 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $x=4.445\text{m}$ 이격된 지점), 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $x=9.0\text{m}$ 이격된 지점) 및 해안선(조파지점으로부터 $x=11.47\text{m}$ 이격된 지점)에서 해안선과 평행한 y 방향에 따른 파고분포를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 잠제 천단 중앙 개구부의 중앙에서는 CASE 7의 경우가 다소 큰 파고를, CASE 9의 경우가 다소 작은 파고를 나타내지만 $y>6.2\text{m}$ 에서는 거의 동일한 파고를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 회절이 상대적으로 크게 영향을 미쳐 y 축방향으로 파고의 변화가 발생하지만 이격거리에 따른 특정한 경향은 나타나지 않는다. 마지막으로, 해안선에서는 세 경우 모두 파고가 거의 0인 값을 나타내고, y 축을 따른 파고의 변화도 거의 나타나지 않는다는 것을 볼 수 있다.

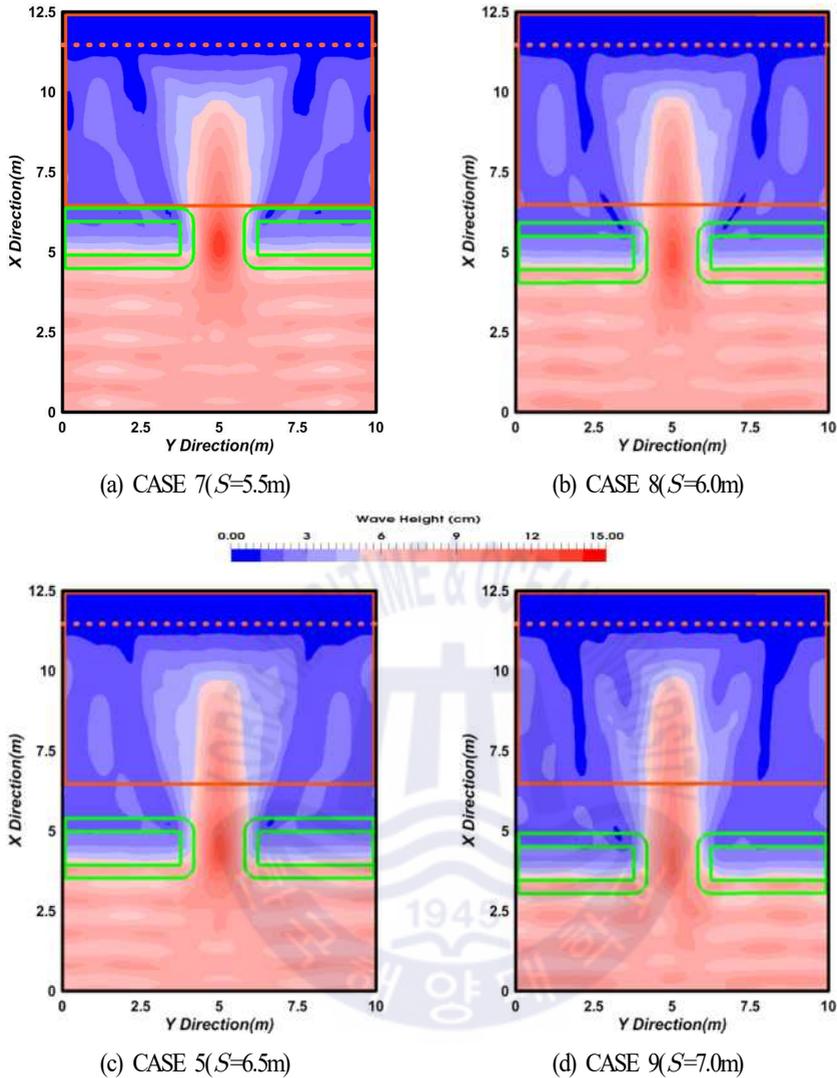


Fig. 5.7. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of distance between shoreline and submerged breakwater.

5.2.3 평균수위분포

Fig. 5.9는 입사파고 $H=5\text{cm}$ 인 경우 본 연구의 수치계산으로부터 추정된 평균수위분포에 관한 일례를 나타낸 것으로, Fig. 5.9(a)는 개구폭이 $G=3.0\text{m}$ 인 경우(CASE 1), Fig. 5.9(b)는 $G=2.5\text{m}$ 인 경우(CASE 2), Fig. 5.9(c)는 $G=2.0\text{m}$ 인 경우(CASE 3)에 해당한다. 제시하는 수치계산 결과는 전술한 파고분포에서와 동일하게 조파 이후 완전히 발달한 연속한 5파를 산술평균한 결과이다. 그림으로부터 잠재

전면에서는 평균수위의 하강(wave set-down)이 나타나고, 잠제 배후면에서는 평균수위의 상승(wave set-up)이 발생하며, 이러한 현상은 잠제가 설치된 해역에서 일반적으로 발생하는 현상과 일치되는 결과로, 잘 알려진 바와 같이 파가 잠제 천단상을 통과할 때 발생하는 쇄파로 인한 파의 진행방향으로의 질량수송 때문이다. 여기서, 전체적으로 제두부의 개구부에서 평균수위의 하강이 가장 크게 발생하고, 특히 개구폭이 좁을수록 보다 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 잠제 배후에서는 평균수위의 상승이 나타나지만 사빈 경사면에서 해안선으로 갈수록 보다 크게 나타나고, 개구부 배면의 해안선 근방에서 가장 큰 값을 나타낸다. 이러한 평균수위의 상승은 개구폭이 좁을수록 크게 되지만 해안선 부근에서는 상대적으로 작아지는 결과를 나타낸다. 이것은 개구폭이 넓을수록 잠제 배후에서 파고가 증가하는 전술한 현상과는 상반되는 결과이다. 한편, 잠제 전면에서도 평균수위가 하강하는 위치가 발생되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 중복파의 배 위치에서 평균수위의 상승이 나타나고, 중복파의 마디 위치에서 평균수위의 하강이 나타나는 결과를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

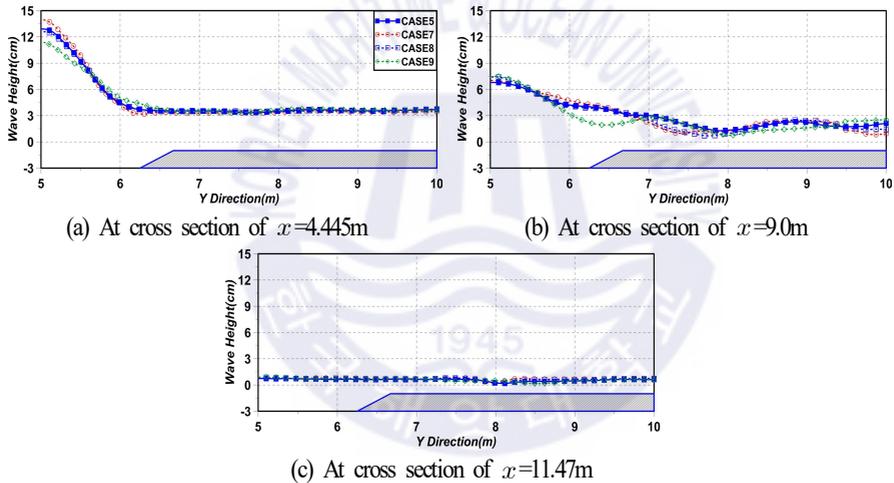


Fig. 5.8. Spatial distribution of simulated wave heights.

Fig. 5.10은 Fig. 5.6과 같이 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $x=4.445\text{m}$ 이격된 지점)과 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $x=9.0\text{m}$ 이격된 지점) 및 해안선(조파지점으로부터 $x=11.47\text{m}$ 이격된 지점)에서 해안선과 평행한 y 방향에 따른 평균수위분포를 나타낸 것이다. 잠제 천단 중앙의 개구부에서는 Fig. 5.9의 결과와 같이 평균수위의 하강이 발생하고, 더불어 개구폭이 좁을수록 그의 강도가 강해지는 것을 확인할 수 있다. 제간부에서는 개구폭의 변화에 따른 큰 차이는 주어지지 않지만 개구폭이 좁은 경우의 평균수위가 약간 더 상승하는 결과를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 전체적으로 평균수위 상승을 나타내고, 제두부에서 제간부로 갈수록 평균수위의 상승에서 증·감이 반복되지만 평균적인

개념에서는 상승률이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 개구폭의 영향으로는 개구폭이 좁을수록 더 큰 평균수위의 상승을 나타낸다. 반면, 해안선에서는 제두부에서 제간부로 갈수록 전 개구폭에서 평균수위의 상승률이 감소하는 경향을 나타내며, 제간부의 위치에 따라 약간 상이한 결과가 주어지지만 전반적으로는 개구폭이 좁을수록 작은 평균수위의 상승을 나타낸다. 여기서, 평균수위의 변화에 개구폭의 영향이 개구부에서 보다 현저히 발생하는 것을 확인할 수 있다.

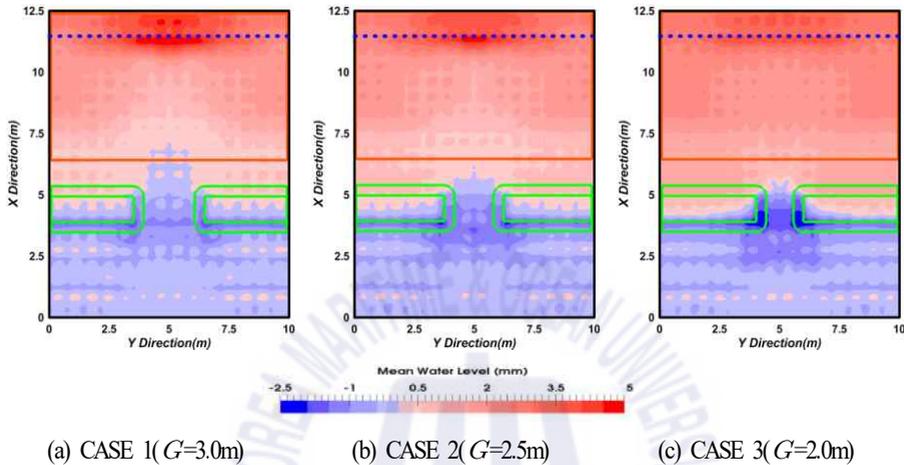


Fig. 5.9. Spatial distribution of simulated mean water level according to change of gap width.

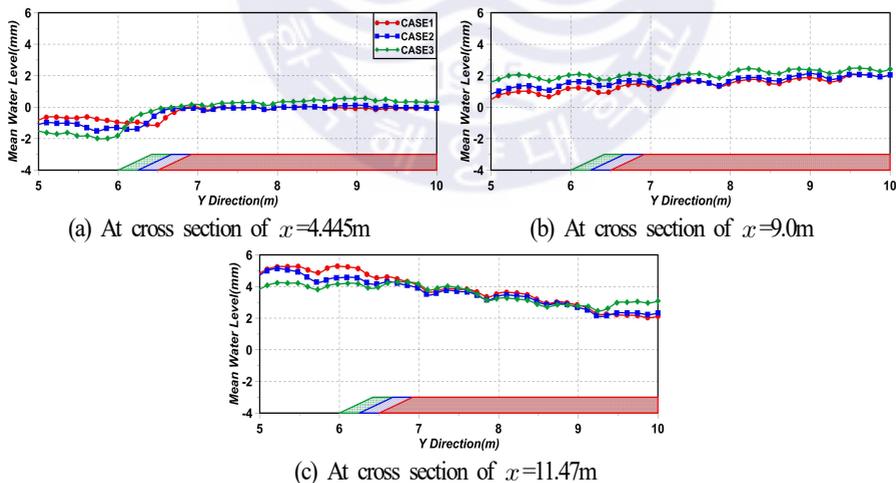


Fig. 5.10. Spatial distribution of simulated mean water level.

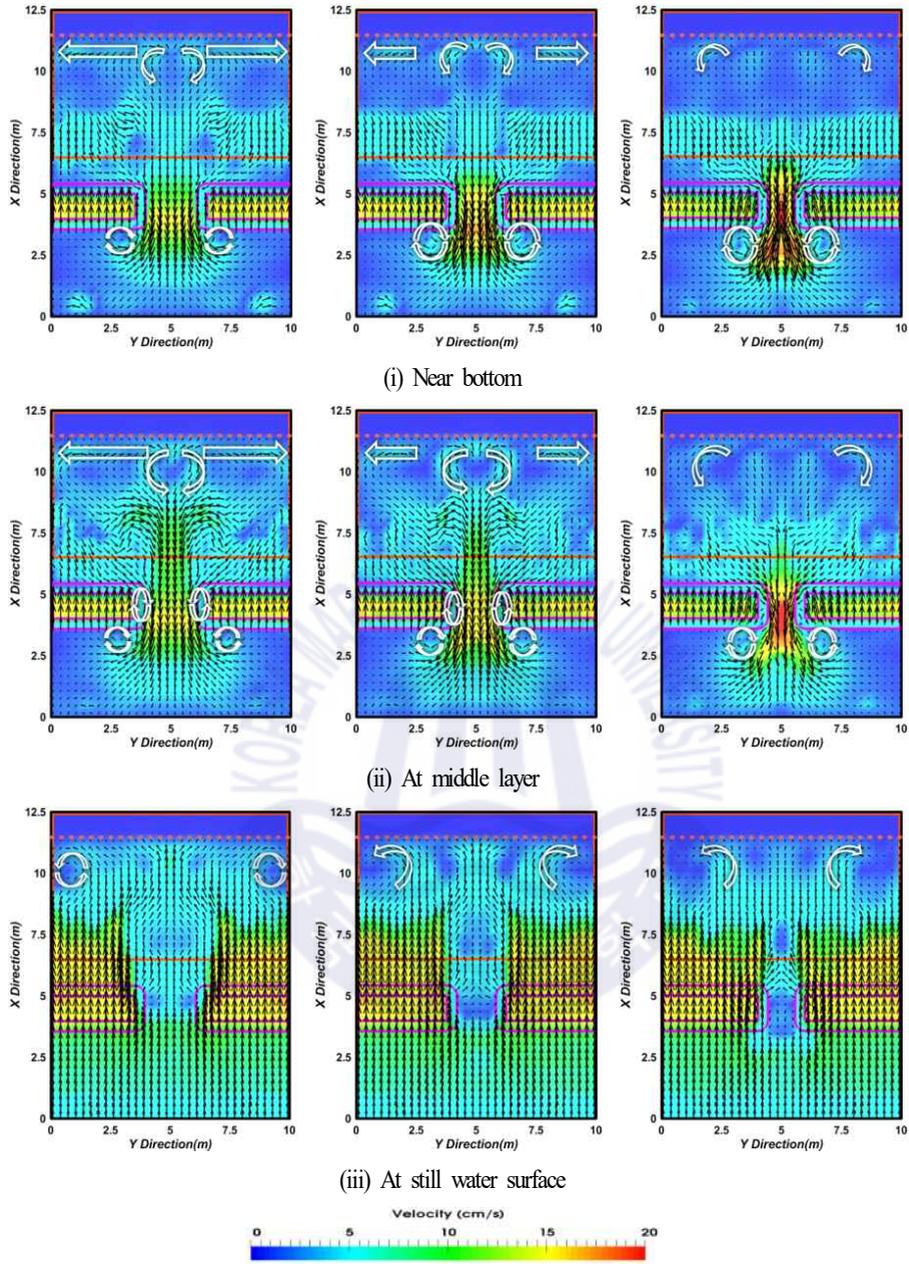
5.2.4 평균유속의 공간분포

(1) 개구폭의 변화

Fig. 5.11은 입사파고 $H=5\text{cm}$ 인 경우 개구폭의 변화에 따른 CASES 1~3에 대한 잠제 주변에서 시간평균유속을 나타낸 것이다. 각 그림에서 (i)는 바닥 근방에서 평균유속분포로 저면에서 $z=0.02\text{m}$ 인 지점에서의 평균유속분포를 나타내며, (ii)는 수심의 중간위치에서 평균유속을 나타내고, (iii)는 정수면 상에서 평균유속분포를 각각 나타낸다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측(onside)으로, 개구부에서는 해측(offshore side)으로의 흐름이 탁월하게 발생하며, 특히 개구부에서 해측흐름은 개구폭이 좁을수록 보다 탁월하게 발생한다. 제두부에서 이러한 육측과 해측으로의 흐름에 의해 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류의 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 해안선 근방에서는 순환셀이 형성되지 않지만 개구폭이 넓은 경우에는 연안류성분이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에는 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수심의 중간위치의 경우를 살펴보면 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이 탁월하게 발생하며, 또한 개구폭이 좁을수록 해측흐름이 보다 탁월하게 발생한다.

그리고, 잠제 전면 및 개구부 제두부 근방에서는 바닥 근방에서와 같이 순환셀이 형성되고, 개구폭이 넓은 경우에는 개구부의 양측 제두부에서도 순환셀이 형성되며, 여기서도 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나며, 개구폭이 넓을수록 해안선 부근에서 연안류가 강하게 나타나고, 잠제 천단상으로 유입되는 강한 육측흐름과의 상호간섭에 의해 양측벽 근방에서 순환셀이 형성된다.

Fig. 5.12는 Fig. 5.11과 동일한 조건인 입사파고 $H=5\text{cm}$ 인 경우 산정된 유속성분을 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속(해빈류)의 공간분포를 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으로 잠제에서 잘 알려진 플릭스수송현상과 일치한다. 개구부 근방에서 잠제 천단상에서 육측으로, 그리고 개구부에서 해측으로 급변하는 이러한 흐름 특성으로 인하여 개구폭에 관계없이 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성된다. 이는 다기이안제와 다기잠제 배후에서 순환셀의 방향을 실험적으로 검토한 Loveless and MacLeod(1999)의 결과와도 일치한다. 즉, 이안제의 경우 제두부에서 육측흐름이 발생하여 제간부로 향하는 순환류가 발생하는 반면, 잠제의 경우 제간부에서 육측흐름이 발생하여 제두부로 향하는 순환류가 발생한다는 것을 실험적으로 규명한 Loveless and MacLeod(1999)의 결과와 일치하며, 단일잠제에 대한 Nobuoka et al.(1997)에서도 유사한 순환패턴이 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) CASE 1 ($G=3.0m$)

(b) CASE 2 ($G=2.5m$)

(c) CASE 3 ($G=2.0m$)

Fig. 5.11. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.

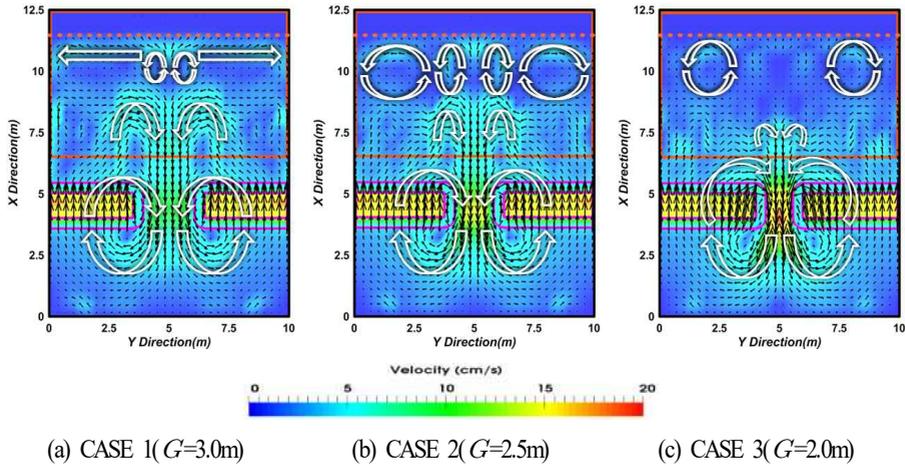


Fig. 5.12. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

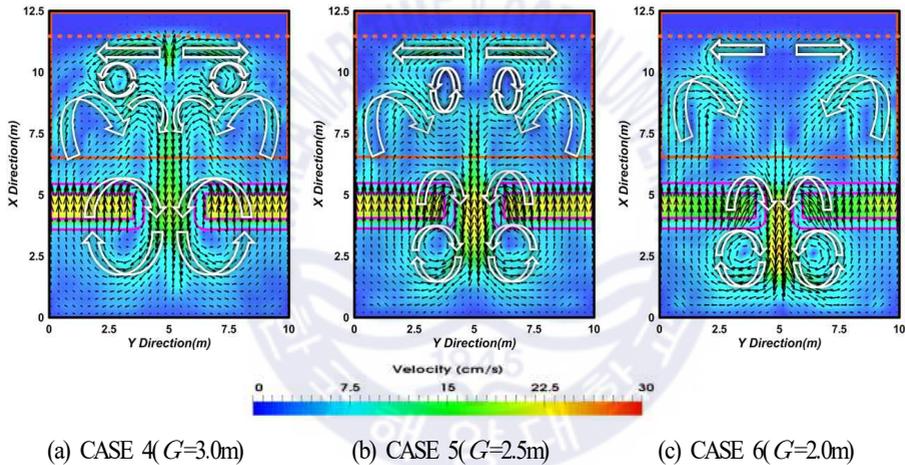


Fig. 5.13. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

또한, 해안선 부근에서는 개구폭에 관계없이 순환셀이 형성되지만 개구폭이 가장 좁은 CASE 3보다 개구폭이 넓은 CASE 2에서 순환셀의 크기가 해안선과 평행한 방향으로 보다 확장되고, 개구부 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성된다. 한편, 개구폭이 가장 넓은 CASE 1에서는 순환셀의 크기가 작아지는 반면, 연안류가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 개구부 배후 및 제간부 배후의 각각 해안선 부근에서 나타나는 평균수위(Lee et al., 2017)의 차이에 기인하는 연안류로 판단된다.

Fig 5.13은 입사파고 $H=7\text{cm}$ 인 경우에 Fig 5.12와 같이 수심적분 및 시간평균된 평균유속의 공간분포를 나타낸다. 입사파고 $H=5\text{cm}$ 의 경우와 동일하게 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성되고,

이는 제두부 근방의 제간부에서 육측흐름과 개구부를 통한 해측흐름과의 간섭에 의해 발생한다. 전술한 입사파고 $H=5\text{cm}$ 인 Fig. 5.11의 경우와는 상이하게 개구쪽에 관계없이 연안류가 형성되지만 개구폭이 넓을수록 보다 강한 연안류가 형성되며, 사빈 경사면상에서 보다 명확한 순환셀이 형성된다.

(2) 잠제 위치의 변화

Fig. 5.14는 잠제 위치에 따른 수심적분 및 시간평균된 평균유속분포를 나타내며, 입사파고가 $H=7\text{cm}$, 개구폭이 $G=2.5\text{m}$ 인 경우에 잠제 위치 $S=6.5\text{m}$ 를 중심(CASE 5)으로 해안선에서 1.0m 더 가까운 $S=5.5\text{m}$ 의 경우(CASE 7), 해안선에서 0.5m 더 가까운 $S=6.0\text{m}$ 의 경우(CASE 8)와 해안선에서 0.5m 더 먼 $S=7.0\text{m}$ 경우(CASE 9)를 각각 제시한다. 결과를 살펴보면 개구부 근방의 잠제 전면에서는 모두 순환셀이 형성되며, 이는 Loveless and MacLeod(1999)에서도 지적되어 있는 바와 같이 제두부 부근에서 발생하는 제간부에서 육측흐름과 개구부에서 해측흐름과의 상호작용에 의해 발생된다. CASES 7과 8을 CASE 5와 비교하면 사빈 경사면상에서 순환셀이 형성되는 현상은 동일하지만 CASE 5의 경우가 연안류의 형성이 보다 명확하다. 여기서, 잠제 위치가 해안선에 멀어질수록 CASE 5의 경우 사빈 경사면에서 종단방향으로 장축을 가진 타원형의 순환셀이 형성되고, 잠제 위치가 해안선에서 가장 멀리 떨어진 CASE 9의 경우 연안류성분이 강해지면서 순환셀의 형성은 불완전하게 되며, 최내측의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되는 것을 알 수 있다.

5.2.5 연안류의 분포

Ranasinghe and Turner(2006)의 결과에 의하면 해안선에 평행하게 설치된 단일잠제에 파가 직각방향으로 입사하는 경우 잠제 제간부 배후의 해안선 부근에서는 양측으로 발산하는 연안류가 발생하여 침식이 발생(Ranasinghe and Turner(2006)의 Fig. 11을 참조)하는 반면, 파가 해안선에 경사지게 입사하는 경우 파가 잠제를 통과한 후 해안선에서 연안류를 방해하여 연안류의 속도를 감소시키고, 이로 인하여 흐름이 정체되어 퇴적이 발생(Ranasinghe and Turner(2006)의 Fig. 12를 참조)한다. 또한, Ranasinghe et al.(2010)의 결과를 살펴보면 파가 해안선에 평행하게 입사하는 경우에도 잠제와 해안선과의 거리에 따라 해빈류 패턴이 달라지며, Ranasinghe and Turner(2006)와 동일하게 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생하고, 연안류가 수렴하는 지점에서 퇴적이 발생한다고 결론짓고 있다. 즉, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주며, 실상시주의 형성에 대한 예측에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다.

Fig. 5.15는 Figs. 5.12-5.14에서 조파지점으로부터 10.5~11.4m 이격된 부근에 형성된 연안류를 x 방향으로 평균하여 y 방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에서 제두부로 향하는 연안류를 각각 나타낸다. 개구폭에 따른 연안류의 변동을 살펴보면 입사파

고가 $H=5\text{cm}$ 인 경우 Fig. 5.15(a)에서 CASES 2와 3은 y 축을 따라 연안류가 진동하는 것을 알 수 있고, 잠제의 제두부 근방에서 감소하는 경향을, 제간부에서 증가하는 경향을 각각 나타내며, 이러한 결과는 순환셀이 형성되기 때문이다. 반면, CASE 1은 전술한 바와 같은 약간의 진동은 있지만 제두부 및 제간부에서 연안류가 상대적으로 안정된 큰 값을 나타낸다. 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우의 Fig. 5.15(b)에서는 개구폭이 넓은 CASES 4와 5에서 연안류가 보다 빠르게 나타나고, 이는 제두부에서 최대치를 나타낸 후 제간부로 갈수록 감소되는 경향을 나타낸다.

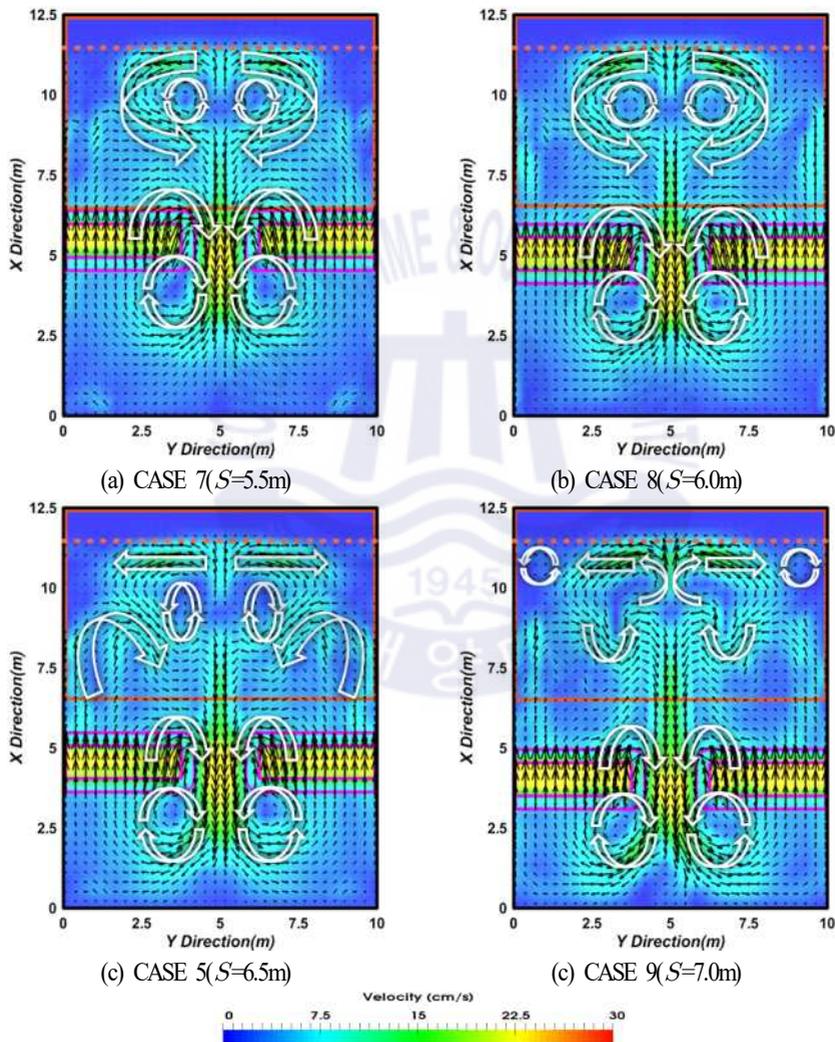


Fig. 5.14. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

잠제 위치에 따른 연안류의 차이를 나타낸 Fig. 5.15(c)는 Fig. 5.14에서 언급한 바와 같이 CASE

9의 경우 사빈 경사면상에서의 순환셀이 연안류 형성에 영향을 미쳐 연안류의 속도가 상대적으로 빠르게 나타나며, CASE 8의 경우는 CASE 5보다 사빈 경사면상에서 형성된 순환셀이 연안류의 흐름방향으로 확장되어 연안류 속도의 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. CASE 7의 경우도 CASE 8과 같이 CASE 5보다 사빈 경사면상에서의 순환셀이 연안류의 흐름방향으로 확장되어 있지만 잠제 배후의 공간이 좁기 때문에 연안류가 다소 약하게 형성된 것으로 판단된다.

본 연구는 다기로 구성된 잠제로 단일잠제에 대한 Ransinghe et al.(2006)과는 상이하게 파가 해안선에 직각으로 입사하는 경우 제간부 배후 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하지 않으며, 개구부 배후 해안선 부근에서 상승된 평균수위에 의해 제간부측으로 이동하는 연안류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ransinghe et al.(2010)의 결과에 따라 Fig. 5.15에서 제시된 연안류의 속도가 (+)에서 (-)로 변하는 변곡점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점으로 판단하고, 그 지점에서 각 방향(제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 5.2에 그 값을 제시한다.

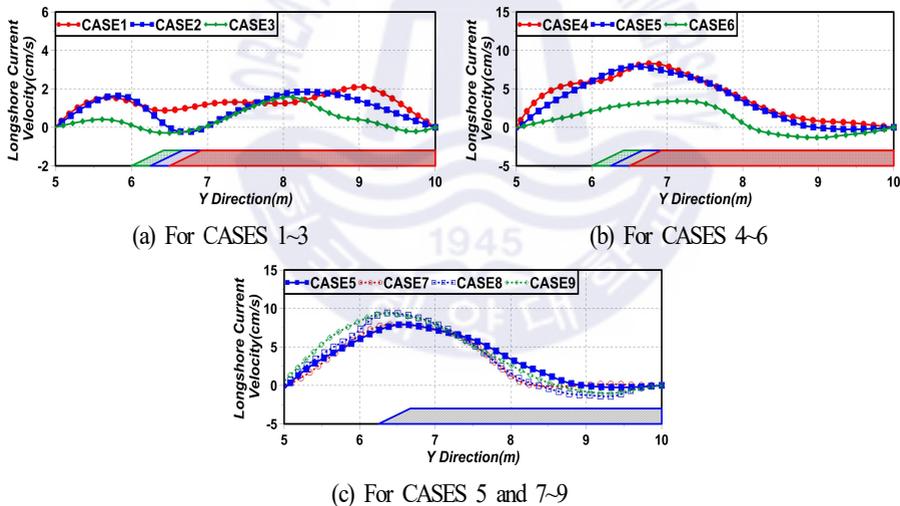


Fig. 5.15. Spatial distribution of longshore current velocities.

Table 5.2에 제시한 수송유량은 연안류의 흐름속도와 $x-z$ 평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 그리고, CASES 2와 3의 경우 Fig. 5.12에 나타난 바와 같이 순환셀에 의해 연안류가 완전히 형성되지 않아 연안류가 수렴되는 지점을 선정하기 어려웠기 때문에 CASE 1과 동일하게 잠제 제간부 배후의 지점을 연안류가 수렴되는 지점으로 선정하였다. 결과를 살펴보면 CASES 1-6의

경우는 개구폭이 넓을수록 연안류에 의한 수송유량이 증가하는 것을 알 수 있고, 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우의 CASES 4-6은 개구폭이 좁을수록 연안류의 변곡점이 제간부 중앙에서 체두부측으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생하는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있다. 한편, 잠제 위치에 따른 연안류의 수송유량은 잠제 위치에 상관없이 CASE 9, CASE 8, CASE 5, CASE 7의 순으로 크게 나타났으며, 연안류의 변곡점도 잠제 위치에 상관없이 CASE 7, CASE 5, CASE 9, CASE 8의 순으로 제간부에 근접하여 발생되었다.

Table 5.2. A longshore current's inflection point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

CASE No.	Inflection point	Transport flow discharge(cm^3/s) (From head of breakwater to middle of breakwater)	Transport flow discharge(cm^3/s) (From middle of breakwater to head of breakwater)	Total transport flow discharge (cm^3/s)
CASE 1	$y=10.0\text{m}$	8,155.42	0	8,155.42
CASE 2	$y=10.0\text{m}$	6,227.68	0	6,227.68
CASE 3	$y=10.0\text{m}$	2,579.38	0	2,579.38
CASE 4	$y=10.0\text{m}$	25,631.62	0	25,631.62
CASE 5	$y=9.00\text{m}$	22,857.21	219.85	23,077.06
CASE 6	$y=8.11\text{m}$	8,490.11	2,073.05	10,563.16
CASE 7	$y=10.0\text{m}$	20,343.89	0	20,343.89
CASE 8	$y=8.38\text{m}$	23,161.30	1,713.69	24,874.99
CASE 9	$y=8.64\text{m}$	25,411.64	1,075.66	26,487.30

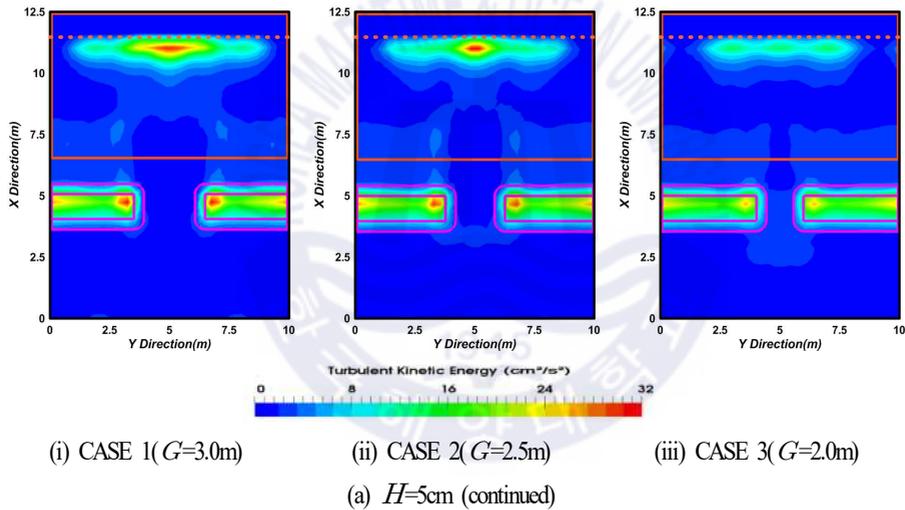
5.2.6 평균난류운동에너지의 분포

(1) 개구폭의 변화

Fig. 5.16은 Figs. 5.12와 5.13에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 $(u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 시간 평균한 $\overline{(u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)/2}$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_x , u'_y , u'_z 는 각각 x , y , z 방향으로 난류속도성분이다. 이러한 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 파고의 변화 및 평균수위의 변화에 영향을 미친다. 여기서, Fig. 5.16(a)는 입사파고가 $H=5\text{cm}$ 인 경우를, Fig. 5.16(b)는 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우를 각각 나타낸다.

그림으로부터 잠재 천단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하고, 개구폭이 넓을수록 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 상대적으로 크게 나타나며, 또한 종단방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.17은 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류에너지분포를 나타내며, $x=10.2\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이의 평균난류에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 시·공간평균난류에너지분포는 파랑에너지의 소산과 연관되어 있으므로 파고분포와 관계를 가진다. 또한, 파고의 자승에 비례하는 과잉운동량플럭스(radiation stress)는 쇄파시에는 증가하고, 쇄파후에는 감소하므로 해안선 근방에서 평균수위 상승이 발생하여 이에 균형을 취하는 것으로 알려져 있다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 5.16에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서 난류에너지가 증가하고, 더불어 개구폭이 넓을수록 이러한 경향이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 해안선 부근에서 평균수위 상승의 결과로 작용한다.



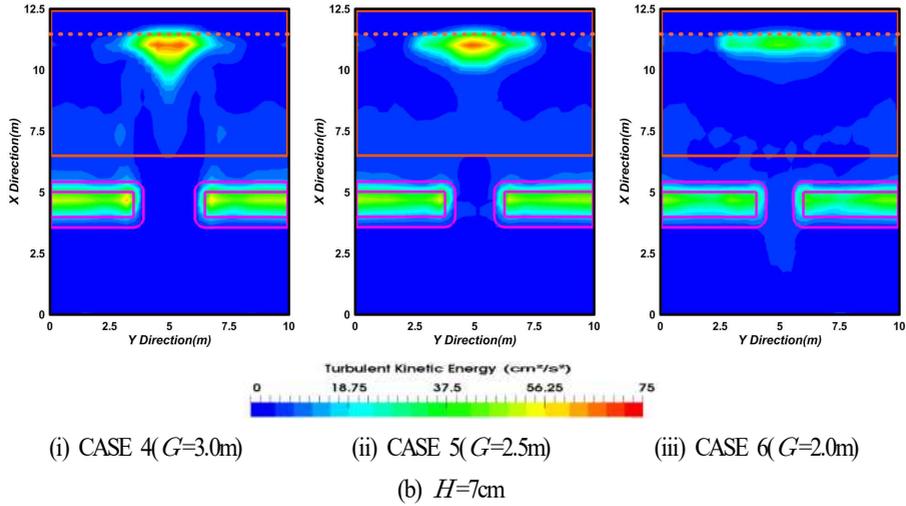


Fig. 5.16. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.

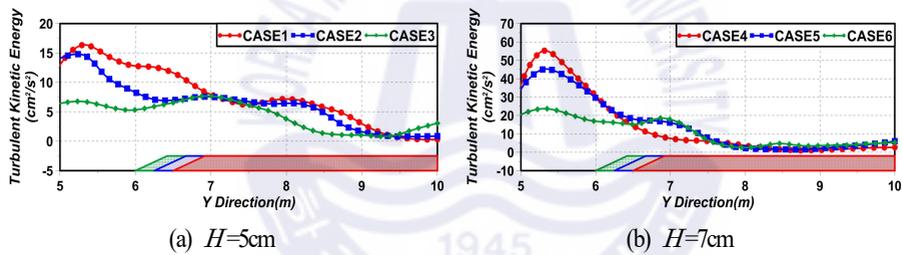


Fig. 5.17. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

(2) 잠제 위치의 변화

Fig. 5.18은 전술한 Fig. 5.16에서와 동일한 방법으로 잠제 위치에 따른 평균난류운동에너지분포를 나타낸 결과이다. 난류운동에너지의 분포 형상은 전술한 Fig. 5.16과 동일하게 잠제 천단상 및 개구부 배후 해안선 부근에서 집중·증가되는 것을 알 수 있다. 반면, 해안선과 잠제 사이의 이격거리 S 의 변화에 따른 뚜렷한 경향은 확인되지 않는다.

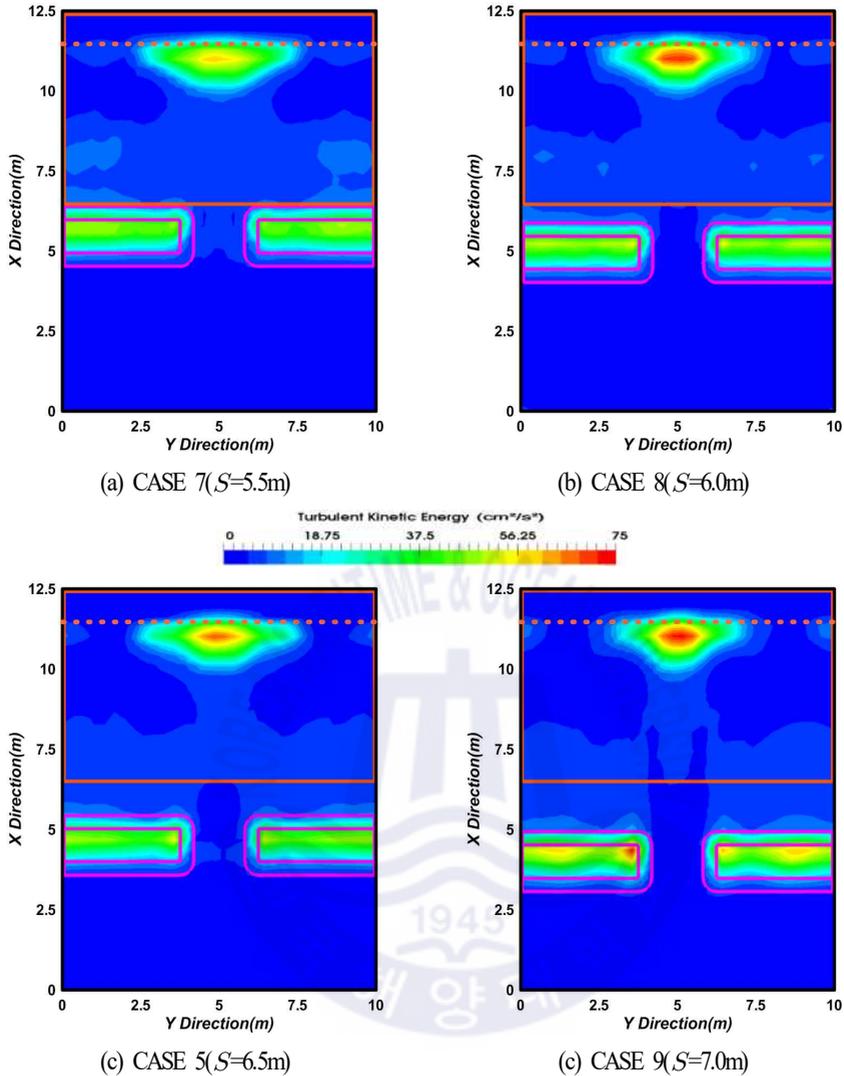


Fig. 5.18. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.

Fig. 5.19는 Fig. 5.17과 동일한 방법으로 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 개구부 배후 해안선 부근에서 CASES 8과 9의 경우 난류운동에너지가 다소 큰 값을 나타내지만 전체적으로는 제두부에서 제간부로 갈수록 난류운동에너지가 작아지는 변동 양상을 보이고, 각각에서 값의 차이는 그다지 크기 않다. 따라서, 이러한 변화는 전술한 파고분포나 평균수위 상승에서의 변화와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

이상으로부터 개구폭의 변화에 따른 개구부 배후의 평균수위변화 및 파고변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 개구부 배후에서 평균수위가 보다 상승하며, 이로 인하여 연안류의 속도에 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

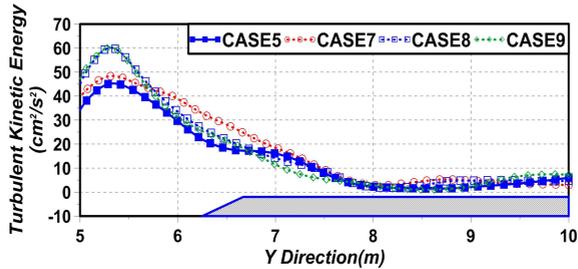


Fig. 5.19. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

5.3 결론

본 장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 규칙파동장하에서 3차원투과성직립벽에 의한 파의 변형과 파압변동 및 규칙파동장하에서 3차원불투과잠제에 의한 파의 변형 및 흐름에 대한 기존의 실험결과와의 비교·검토로부터 olaFlow 모델의 타당성을 검증하였다. 이에 근거하여 olaFlow 모델로부터 다기의 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 3차원수치파동수조에 규칙파를 조파하여 개구폭 및 잠제와 해안선 사이의 거리 등의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 파고와 평균수위의 시·공간분포 특성 및 그들의 상호연관성을 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 파고에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 파고는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 파고가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 파고감소율이 상대적으로 크게 나타났다. 하지만, 잠제 위치에 따른 결과에서는 파고의 변화가 크지 않고, 파고감소율도 대동소이한 경향을 나타내었다.

(2) 평균수위에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부의 제두부 근방에서 평균수위 하강이 보다 크게 나타났고, 잠제 배후에서는 개구폭이 넓을수록 평균수위의 상승률이 감소하였으며, 개구부 배후의 해안선 부근에서는 개구폭이 넓을수록 평균수위의 상승률이 크게 나타났다.

(3) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭 및 잠제 위치에 상관없이 제두부

전면에서는 순환셀이 대부분 형성되었고, 제두부 부근에서는 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여 개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인하였다. 또한, 개구폭이 넓어질수록 해안선 부근에서 해안선과 평행한 방향으로 순환셀의 크기가 커지다가 연안류 형성에 관여한 후에 다시 크기가 작아지는 경향을 나타내었다. 잠제 위치가 해안선에서 멀어질수록 사빈 경사면에서 해안선에 직각방향으로 장축을 가진 타원형의 순환셀을 형성하며, 이는 연안류에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

(4) 잠제의 배후에서의 연안류는 개구폭이 넓을수록 강하게 형성됨과 동시에 수송유량도 증가하였으며, 연안류가 수렴되는 지점은 개구폭이 좁을수록 제간부에서 제두부로 이동되는 것으로 추정되었다. 이러한 결과로부터 저질이 퇴적되는 지점을 예상할 수 있기 때문에 잠제 배후에 형성되는 설상사주와 같은 지형변동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 평균난류에너지는 개구폭이 넓을수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 시·공간누적평균난류에너지가 크게 나타났고, 이는 개구부 배후 해안선 부근에서 평균수위의 상승 정도와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되었으며, 더불어 연안류의 형성과 속도에도 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

References

- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N.(1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions, *Transport in Porous Media*, 35(3), 395-406.
- Black, K. P. and Andrews, C. J.(2001). Sandy shoreline response to offshore obstacles Part 1: Salient and tombolo geometry and shape, *J. Coastal Research*, 82-93.
- Buccino, M. and Calabrese, M.(2007). Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 133(3), 213-224.
- d'Angremond, K., Van Der Meer, J. W. and De Jong, R. J.(1997). Wave transmission at low-crested structures, *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 2418-2427.
- Goda, Y. and Ahrens, J. P.(2008). New formulation of wave transmission over and through low crested structures, *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 628-650.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.

- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, *Coastal Engineering*, 84, 56-72.
- Johnson, H. K.(2006). Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, 53(1), 39-48.
- Johnson, H. K., Karambas, T. V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I.(2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, 52(10), 949-969.
- Kramer, M., Zanuttigh, B., Baoxing, W., van der Meer, J. W., Lamberti, A. and Burcharth, H. F.(2003). Wave basin experiments. Internal Report, DELOS deliverable D31. Available from the Internet www.delos.unibo.it.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W. and Kim, D. S.(2017). Characteristics of water surface variations around 3-dimensional permeable submerged breakwaters under the conditions of salient formation, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 335-349.
- Loveless, J. H. and MacLeod, B.(1999). The influence of set-up behind detached breakwaters, *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 2026-2041.
- Nobuoka, H., Irie, I., Kato, H. and Mimura, N.(1997). Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection, *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 2391-2403.
- Penney, W. G. and Price, A. T.(1952). Part I. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 236-253.
- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J.(2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater, *Coastal Engineering*, 57(11), 1006-1017.
- Ranasinghe, R. and Turner, I. L.(2006). Shoreline response to submerged structures: a review, *Coastal Engineering*, 53(1), 65-79.
- Ranasinghe, R., Turner, I. L. and Symonds, G.(2006). Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modelling study, *Coastal Engineering*, 53(7), 589-611.
- Seabrook, S. R. and Hall, K. R.(1998). Wave transmission at submerged rubblemound

breakwaters, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2000-2013.

- Sharifahmadian, A. and Simons, R. R.(2014). A 3D numerical model of nearshore wave field behind submerged breakwaters, Coastal Engineering, 83, 190-204.
- Van der Meer, J. W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B.(2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change, Coastal Engineering, 52(10), 915-929.
- Vicinanza, D., Cáceres, I., Buccino, M., Gironella, X. and Calabrese, M.(2009). Wave disturbance behind low-crested structures: Diffraction and overtopping effects, Coastal Engineering, 56(11), 1173-1185.



제 6 장 투과성잠제 주변에서 불규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석

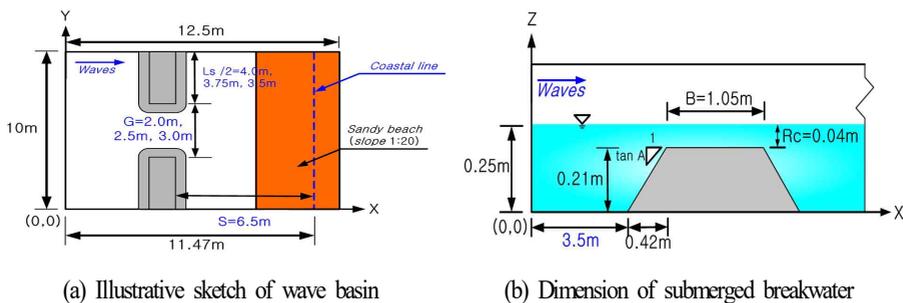
6.1 서언

제5장에서는 3차원수치파동수조에서 규칙파랑과 설상사주의 형성조건하에 있는 투과성잠제를 대상으로 잠제 주변에서 형성되는 파고분포, 평균수위분포 및 유속의 변동특성 등을 3차원수치해석법으로 면밀히 평가하였다. 본 장에서는 이에 연속하여 보다 현실적이고 산정된 결과의 실현장으로 적용성이라는 측면에서 불규칙파와 3차원잠제의 상호작용에 의해 특정되는 파동장의 변동특성 및 지형변동과의 관계 등을 기초적으로 논의·검토한다는 의미로 본 연구가 수행되었다. 본 장에서는 전술한 제5장에서와 동일한 제원과 조건의 잠제, 수심 및 흐름을 적용하며, 입사파랑으로는 규칙파의 파고와 주기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파랑을 적용한다. 따라서, 불규칙파랑 및 설상사주의 형성조건하에서 잠제의 개구폭과 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 자승평균평방근파고인 H_{rms} 의 분포와 같은 수면변동 특성과 평균유속(해빈류)의 분포 및 평균난류운동에너지의 분포 등과 같은 수리학적 특성을 검토함과 동시에 설상사주 형성과의 연관성을 규명한다.

6.2 수치해석결과

6.2.1 계산조건

본 장의 수치시뮬레이션을 위해 Fig. 6.1에 나타난 바와 같이 길이 12.5m, 폭 10m, 높이 0.4m의 크기를 갖는 3차원수치파동수조를 구성하고, 수심은 바닥의 경사를 고려하지 않는 일정수심 $h=25\text{cm}$ 를 적용하였으며, 수조의 끝단에는 1:20의 경사를 갖는 사빈을 설치하였다. 수치파동수조내에 3차원투과성잠제를 설치하여 잠제 사이의 개구폭에 따른 수치시뮬레이션을 수행하였다.



(a) Illustrative sketch of wave basin

(b) Dimension of submerged breakwater

Fig. 6.1. Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.

이하에서는 Mizutani et al.(1998)과 같은 기존의 수리실험과 잠제 천단상에서 강제쇄파의 유도 및

수치계산에서 소요되는 계산시간 등을 참조하여 잠제의 형상, 제체의 매질 및 사빈의 매질 등을 가정하였다. 먼저, Fig. 6.1에 보이는 바와 같이 해석대상의 잠제에서 천단고는 21cm, 천단수심은 4cm, 천단폭은 1.05m의 크기를 각각 가지며, 사면경사는 2:1로 설정되었다. 그리고, 잠제의 체체는 공극률 $\phi=0.33$, 중앙입경 $D_{50}=3.0\text{cm}$ 인 투과성매질로 구성되며, 잠제의 배후에 설치되는 사빈은 공극률이 $\phi=0.3$, 중앙입경이 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 인 모래로 각각 가정되었다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였으며, 사빈의 경우는 모래입경에 해당하는 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 의 다공성매질에 대한 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을 각각 적용하였다. 또한, Black and Andrews(2001)가 제시한 설상사주가 형성되는 조건인 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 잠제의 설치 위치를 선정하고, 각각의 조건에 따른 잠제 사이의 개구폭을 설정하였다. Table 1에 수치실험에 이용된 잠제의 배치와 입사파랑에 대한 조건을 나타낸다.

한편, 계산영역의 격자는 수평방향으로 일정격자를 적용하고, 연직방향으로는 가변격자를 적용한 $\Delta x=3\text{cm}$, $\Delta y=3\text{cm}$, $\Delta z=0.7\text{cm}\sim 1.4\text{cm}$ 로 구성되었으며, 구성된 격자에 대한 Courant 상수는 0.3 이하가 되도록 시간간격을 조정하면서 수치실험을 수행하였다. 경계조건으로는 계산영역의 모든 벽면에서 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i=0$ 을 적용하였다.

Table 6.1. Incident wave conditions and 3-dimensional layout of submerged breakwater.

CASE No.	Significant wave height $H_{1/3}$ (cm)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	Gap width G (m)	Submerged breakwater length L_s (m)	L_s/S	Distance between shoreline and submerged breakwater S (m)
CASE 1	5	1.4	3.0	7.0	1.08	6.5
CASE 2			2.5	7.5	1.15	
CASE 3			2.0	8.0	1.23	
CASE 4	7		3.0	7.0	1.08	
CASE 5			2.5	7.5	1.15	
CASE 6			2.0	8.0	1.23	

* wave maker theory : irregular waves by superposition of linear waves
 * spectrum : modified Bretschneider-Mitsuyasu spectrum(Goda, 1988)

잠제는 조파관으로부터 잠제의 전면경사가 시작되는 지점까지 3.5m 이격된 지점에 위치하고, 잠제의 천단에서 해안선과의 거리는 잠제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리 S 를

매개변수로 사용하여 설상시주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001)의 결과에 따라 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 6.5m로 설정하였다. 또한, 개구폭 G 를 3.0m(CASES 1, 4), 2.5m(CASES 2, 5), 2.0m(CASES 3, 6)로 설정함에 따라 잠제 길이 L_s 는 3.5m(CASES 1, 4), 3.75m(CASES 2, 5), 4.0m(CASES 3, 6)로 각각 구성되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잠제가 설치되는 것으로 가정하였다. 이상과 같은 잠제 배치와 입사파랑 조건을 종합적으로 나타낸 것이 Table 6.1이다.

6.2.2 H_{rms} 의 분포

Fig. 6.2는 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우 잠제 주변에서 형성되는 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 6.2(a)는 개구폭 G 가 3.0m(CASE 1), Fig. 6.2(b)는 2.5m(CASE 2), 그리고 Fig. 6.2(c)는 2.0m(CASE 3)의 경우에 각각 해당한다. 제시된 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 28s(45-73s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파가 집중되어 H_{rms} 가 증대되며, 파가 집중되는 위치는 개구폭이 넓을수록 보다 잠제 배후로 이동되는 경향을 나타낸다. 또한, 개구폭이 좁을수록 잠제 배후로 전달되는 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소한다. 역으로, 개구폭이 넓을수록 개구부에서 파의 집중이 감소하여 H_{rms} 가 작아지지만 잠제 배후에서 커지며, 또한 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화도 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6.3은 Fig. 6.2에 비해 유의파고가 증가한 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우에 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이다. 개구폭의 변화에 따라 개구부에서 파의 집중 및 잠제 배후에서 H_{rms} 의 크기 등에 관한 경향은 전술한 Fig. 6.2의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 유의파고가 더 큰 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 의 경우는 개구폭이 좁을수록 전술한 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 의 Fig. 6.2에서와 유사하게 개구부에서 파가 집중되는 현상이 발생하지만 Fig. 6.2의 경우보다 개구부에서 파의 집중이 보다 좁은 구간에 현저하게 발생하며, 따라서 잠제 배후에서 연안방향으로 파랑에너지의 수평분산에 의한 H_{rms} 의 변화율이 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 6.4는 유의파고가 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우 잠제 천단상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 입사하는 불규칙파가 시·공간적으로 회절되는 일련의 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이며, 대상파랑은 28s(45-73s) 동안에 취득한 파랑데이터에서 66-68s 사이의 연속데이터중에 나타나는 최대파

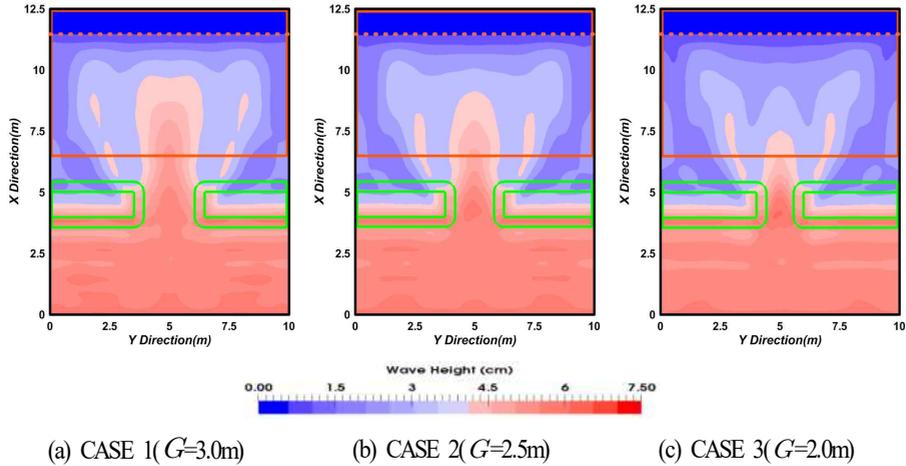


Fig. 6.2. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.

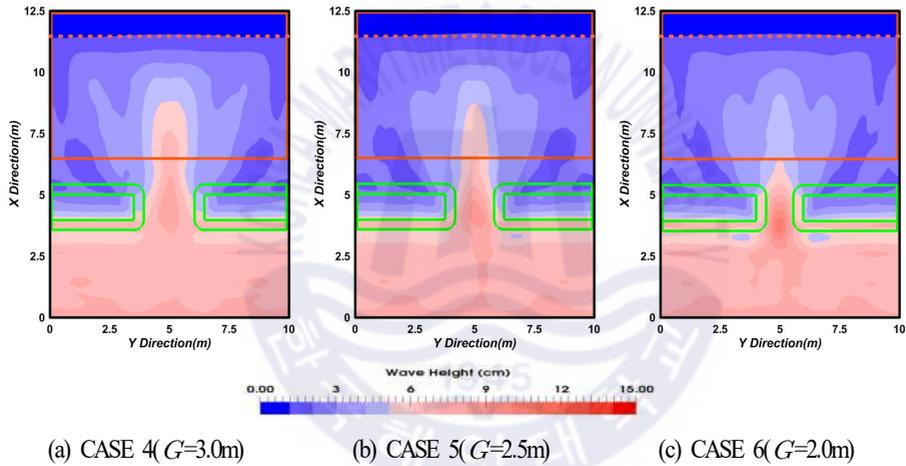
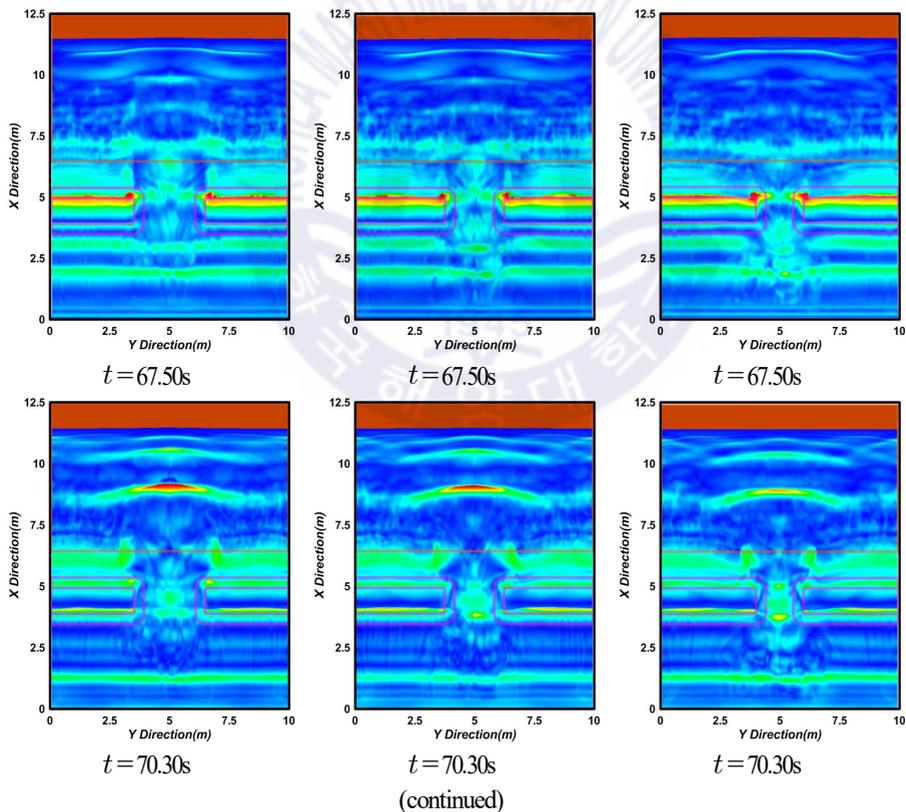


Fig. 6.3. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.

를 대상으로 하였다. 그림으로부터 입사파가 잠제 천단상에서 급격한 수심의 감소로 쇠파되면서 동시에 파 진행방향의 수평유속이 증가하고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 6.3의 결과에서도 지적인 바와 같이 개구폭이 넓을수록 큰 속도는 개구부의 배면에 상대적으로 집중되고, 이로부터 회절현상이 상대적으로 작게 발생하는 것으로 추정된다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 수심의 감소로 쇠파가 발생되며, 개구폭이 넓을수록 유속의 증가가 현저히 나타나므로 보다 큰 규모와 강도의 쇠파가 발생하는 것으로 판단된다. 해안선 근방에서는 개구부의 배면에 집중된 유속이 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있고, 개구폭이 넓을수록 유속의 이동이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 후술하는 연안류 및 수송유량에

영향을 미친다.

Fig. 6.6은 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 와 7cm 인 각각의 경우에 대해 해안선에 평행한 단면에서 Y -축을 따른 Table 6.1의 각 케이스별 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $X=4.445\text{m}$ 인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $X=9.0\text{m}$ 인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 $X=11.47\text{m}$ 인 지점)에서 해안선과 평행한 방향으로 H_{rms} 의 분포를 나타낸다. Fig. 6.6(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 $X=4.445\text{m}$ 의 지점에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 1→CASE 2→CASE 3) 개구부 중앙에서 H_{rms} 가 크게 나타나고, 재간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 크기의 H_{rms} 가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 $X=9.0\text{m}$ 의 지점에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 H_{rms} 가 감소하는 경향을 나타내며, 해안선인 $X=11.47\text{m}$ 의 지점에서는 모든 CASE가 얇은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 H_{rms} 가 1cm 에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.



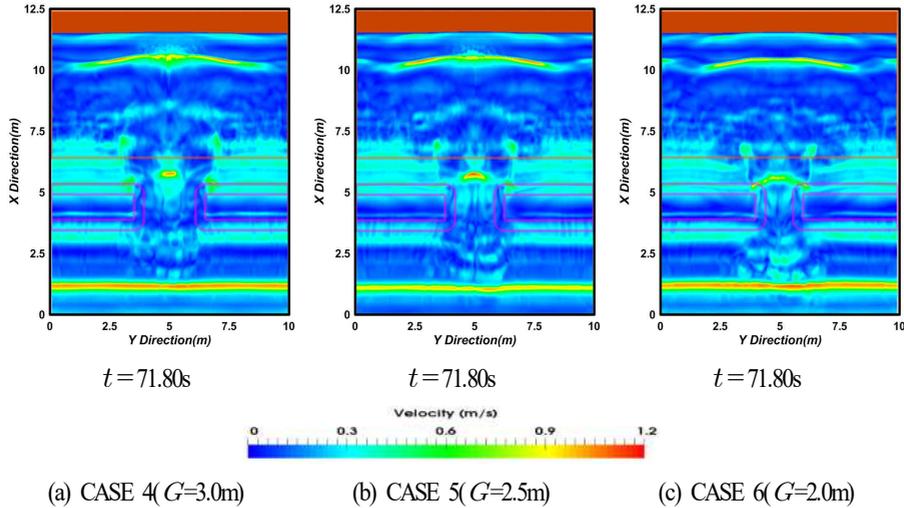


Fig. 6.4. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

Fig. 6.6(b)의 경우는 Fig. 6.6(a)의 경우와 유사하게 잠제 천단 중앙에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 4→CASE 5→CASE 6) 개구부 중앙에서 H_{rms} 가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 H_{rms} 가 나타나며, 사면 경사면 중앙에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 대체적으로 H_{rms} 가 감소하는 경향을 나타낸다. 해안선에서는 Fig. 6.6(a)의 경우와 거의 동일하게 모든 CASE가 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 H_{rms} 가 1cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

6.2.3 평균유속의 공간분포

Fig. 6.7은 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우 개구폭의 변화를 나타내는 CASES 1~3에 대해 잠제 주변에서 시간평균유속을 공간적으로 나타낸 것이다. 각 그림에서 (i)는 바닥 근방에서 평균유속분포로 저면에서 $Z=0.02\text{m}$ 인 지점에서의 값을, (ii)는 수심의 중간위치에서 평균유속을, (iii)는 정수면상에서 평균유속 분포를 각각 나타낸다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측(onside)으로, 개구부에서는 해측(offshore side)으로의 흐름이 탁월하게 발생하며, 특히 개구부에서 해측흐름은 개구폭이 좁을수록 보다 탁월하게 발생한다.

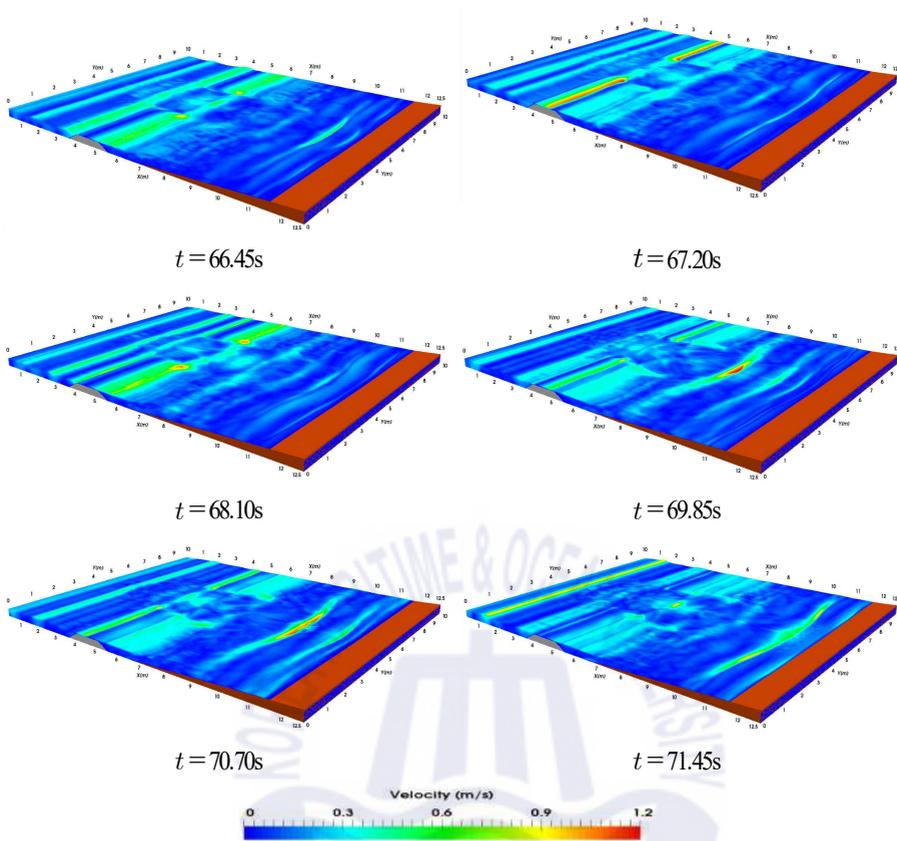


Fig. 6.5. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and sandy beach.

제두부에서 이러한 육측과 해측으로의 흐름에 의해 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류의 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 수심의 중간위치에서는 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이 탁월하게 발생하며, 또한 개구폭이 좁을수록 해측흐름이 보다 탁월하게 발생한다. 그리고, 잠제 전면 및 개구부 제두부 근방에서는 바닥 근방에서와 같이 순환셀이 형성되고, 제간부 배후의 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나며, 잠제 천단상으로 유입되는 강한 육측흐름과의 상호간섭에 의해 양측벽 근방에서 순환셀이 형성된다.

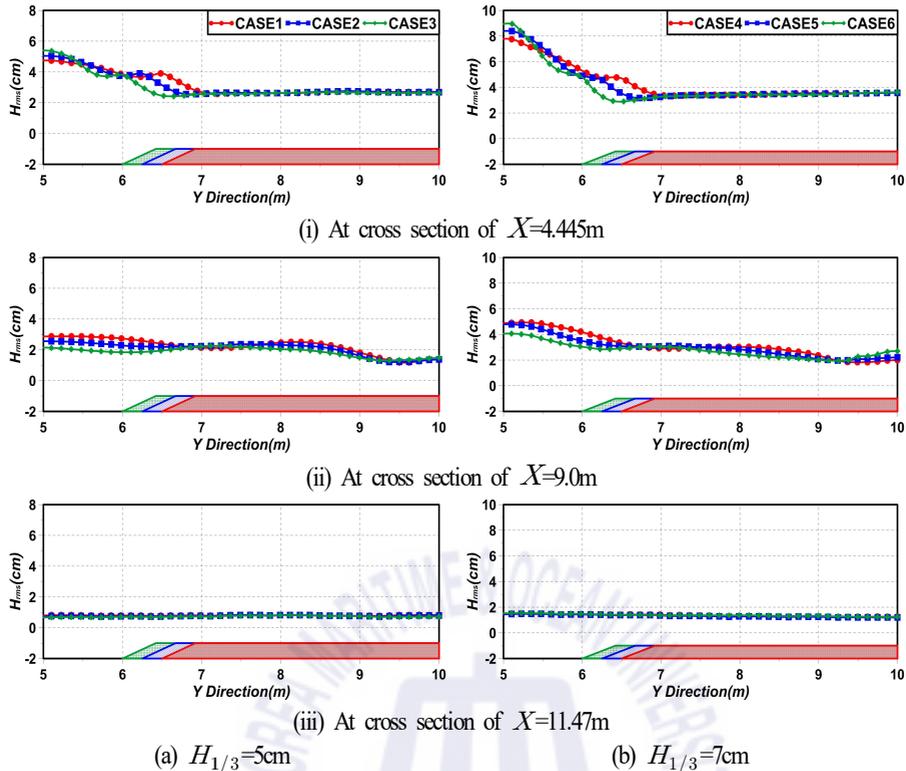


Fig. 6.6. Spatial distribution of simulated H_{rms} at three $Y-Z$ cross sections.

Fig. 6.8은 유의파고 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우 개구폭의 변화에 따른 CASES 4-6의 잠체 주변에서 시간평균 유속을 나타낸 것이다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 Fig. 6.7의 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우와 마찬가지로 잠체의 천단이 위치하는 곳에서는 육측으로, 개구부에서는 해측으로의 흐름이 탁월하게 발생하며, 제두부에서 잠체 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 와는 다르게 해안선 근방에서 연안류성분이 발달하며, 더욱이 개구폭이 넓을수록 보다 탁월하게 나타난다. 수심의 중간위치의 경우를 살펴보면 바닥 근방에서와 유사하게 잠체 천단상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이 탁월하게 발생하며, 잠체 전면 개구부 근방에서는 동일한 순환셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나고, 개구부 배후의 해안선 근방에서 양측 제간부방향으로 이동하는 흐름이 발생하며, 개구폭이 넓을수록 흐름의 강도가 강해진다. Fig. 6.7의 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우와는 다르게 Fig. 6.8의 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 에서 연안류가 탁월하게 발달하는

것은 잠제 천단상 및 개구폭을 통한 잠제 배후로의 파랑에너지의 수송이 많아지기 때문이며, 이는 파잉운동량프릭스(radiation stress)의 공간적 차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

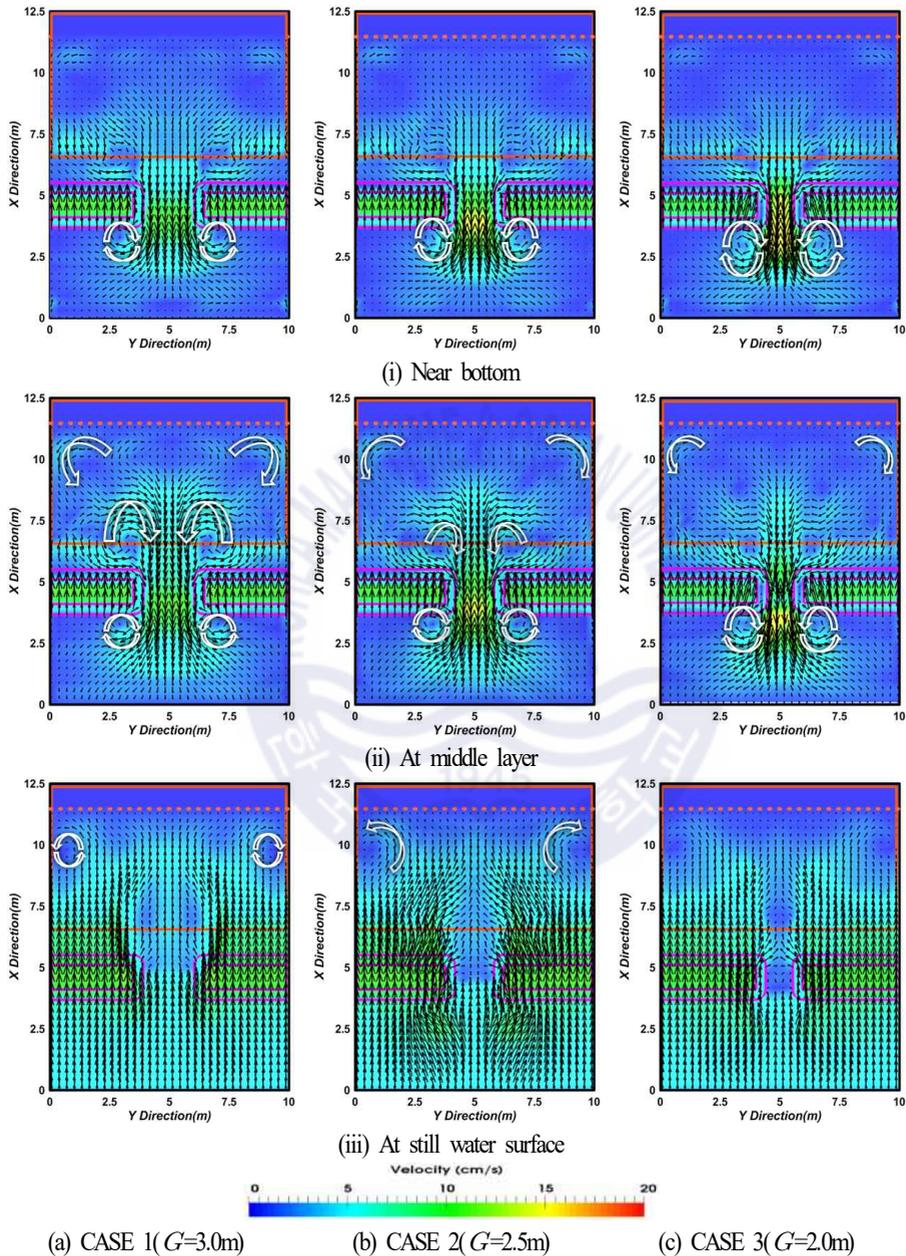


Fig. 6.7. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.

Fig. 6.9는 Fig. 6.7과 동일한 유의파고 $H_{1/3}=5m$ 의 경우에 산정된 유속성분을 저면에서 수면까지

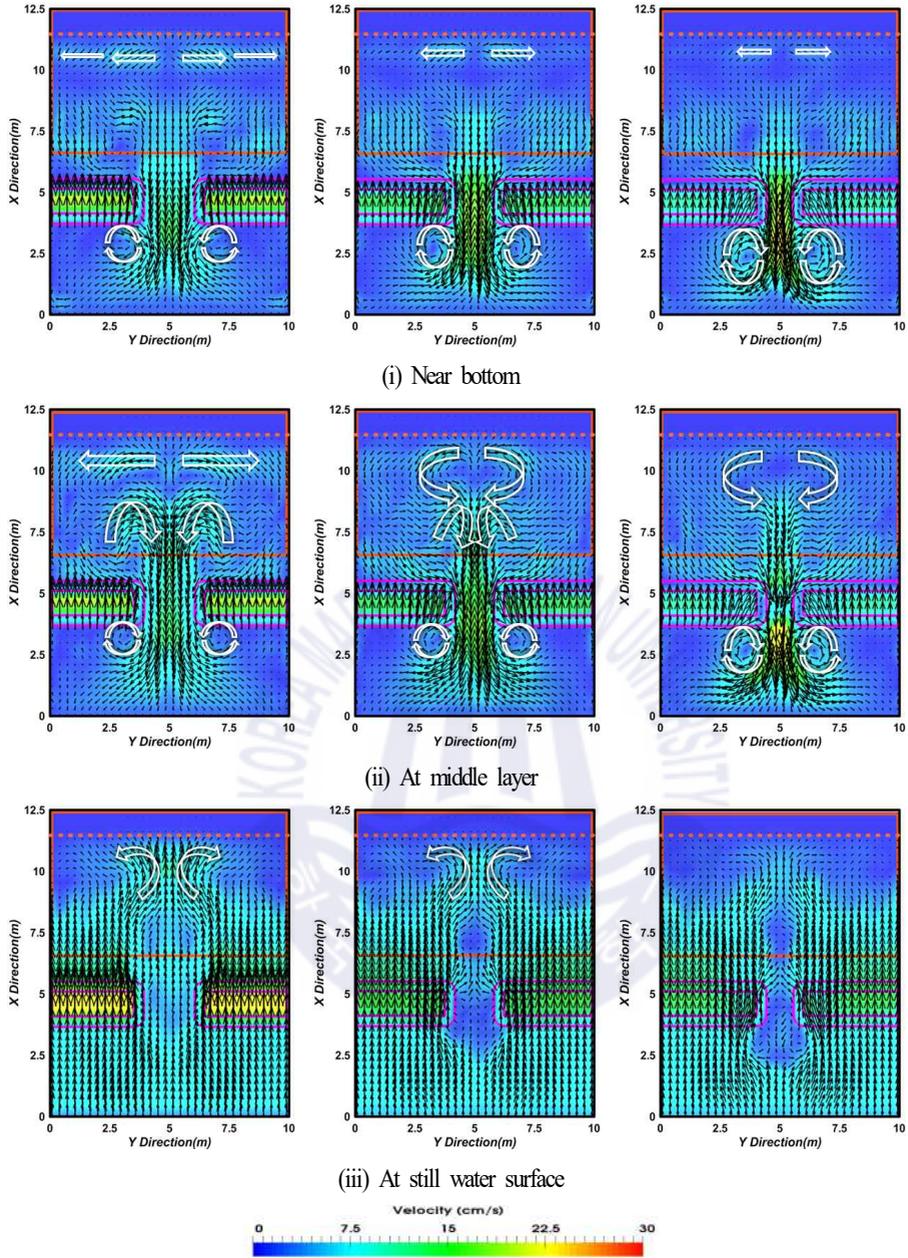
수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속(해빈류)의 공간분포를 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으로 잠제에서 잘 알려진 플릭스수송현상과 일치한다. 또한, 해안선 부근에서는 개구폭이 넓을수록 연안류 성분이 탁월한 것을 확인할 수 있으며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 1에서는 제간부 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성된다.

Fig. 6.10은 유의파고 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우에 Fig. 6.8과 같이 수심적분 및 시간평균된 평균유속의 공간분포를 나타낸다. CASES 5와 6은 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 의 경우와 동일하게 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성되지만 개구폭이 가장 넓은 CASE 4에서는 개구부 근방 잠제 전면의 순환셀이 개구부 배후의 이안류에 직접 관여하는 것으로 판단된다. 또한, 개구부 배후의 해안선 부근에서는 개구폭이 가장 좁은 CASE 6의 경우에 불완전한 셀이 형성되고, CASE 5의 경우에 완전한 셀이 형성되며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 4의 경우에 연안류가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

6.2.4 연안류분포

연안류와 지형변동의 관계를 검토한 Ranasinghe et al.(2006)에 따르면 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생되고, 연안류가 수렴하는 지점에서 퇴적이 발생되며, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주는 설상사주의 형성에 대한 예측에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다(Lee et al. 2017).

Fig. 6.11은 Figs. 6.9과 6.10에서 조파지점으로부터 10.5~11.4m 이격된 지점에 형성된 연안류를 X -방향으로 평균하여 Y -방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에서 제두부방향으로 연안류를 각각 나타낸다. 연안류의 변동을 살펴보면 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 의 경우 Fig. 6.11(a)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 개구부 및 제두부 근방보다는 제간부 근방에서 증가하는 경향을 나타내며, 전반적으로 개구폭이 넓을수록 연안류가 상대적으로 강하게 형성된다. 유의파고가 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우 Fig. 6.11(b)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 제간부 근방보다 개구부 및 제두부 근방에서 약간 증가하는 경향을 나타내며, Fig. 6.11(a)와 동일하게 개구폭이 넓을수록 연안류가 상대적으로 강하게 형성된다.



(a) CASE 4 ($G=3.0m$)

(b) CASE 5 ($G=2.5m$)

(c) CASE 6 ($G=2.0m$)

Fig. 6.8 Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.

본 연구에서는 다기로 구성된 잠제로 단일잠제에 대한 Ranasinghe et al.(2006)과는 상이하게 파가

해안선에 직각으로 입사하는 경우에 제간부 배후 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생되지 않으며, 개구부 배후 해안선 부근에서 상승된 평균수위에 의해 제간부측으로 이동하는 연안류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

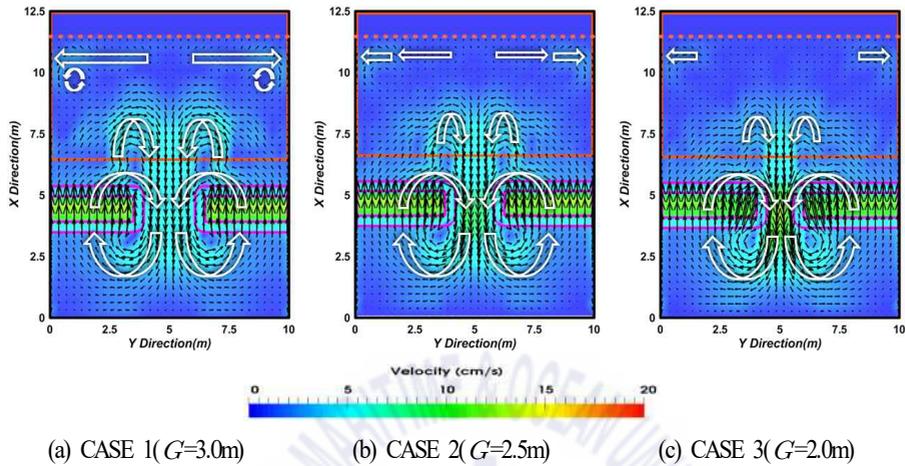


Fig. 6.9. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

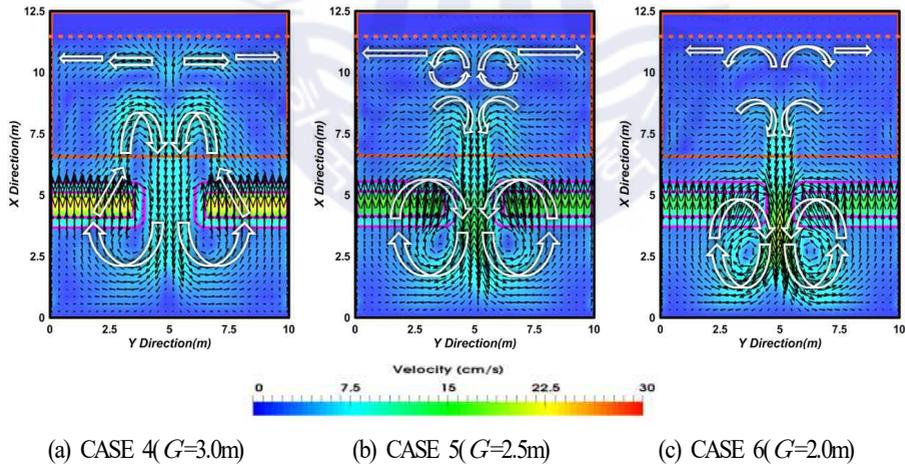


Fig. 6.10. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

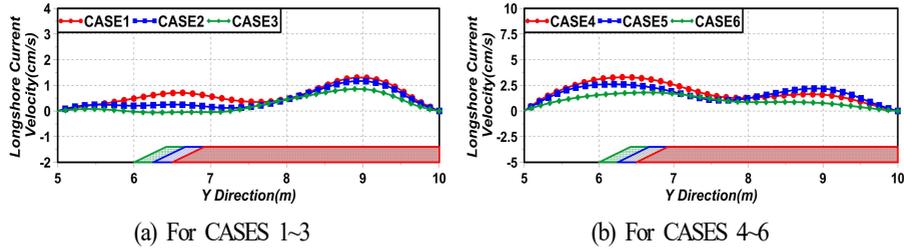


Fig. 6.11. Spatial distribution of longshore current velocities.

여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ranasinghe et al.(2010)의 결과에 따라 Fig. 6.10에서 제시된 연안류의 속도가 (+)에서 (-)로 변하는 지점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점으로 판단하고, 그 지점에서 각 방향(제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 6.2에 그 값을 제시한다.

Table 6.2. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

CASE No.	Converging point	Transport flow discharge(cm^3/s) (from head of breakwater to middle of breakwater)	Transport flow discharge(cm^3/s) (from middle of breakwater to head of breakwater)	Total transport flow discharge (cm^3/s)
CASE 1	$y=10.0m$	3,854.33	0	3,854.33
CASE 2	$y=10.0m$	2,758.86	0	2,758.86
CASE 3	$y=10.0m$	1,659.75	0	1,659.75
CASE 4	$y=10.0m$	11,638.88	0	11,638.88
CASE 5	$y=10.0m$	8,477.97	0	8,477.97
CASE 6	$y=9.74m$	4,665.12	14.98	4,680.10

Table 6.2에 제시한 수송유량은 연안류의 흐름속도에 $X-Z$ 평면에서 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 CASES 1-6의 경우는 개구폭이 넓을수록 연안류에 의한 수송유량이 증가하는 것을 알 수 있고, 유의파고가 $H_{1/3}=7cm$ 인 경우의 CASES 4-6은 개구폭이 가장 좁은 CASE 6에서 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에서 제두부측으로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생하는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있으며, 이러한 결과는 규칙파의 경우와도 일치한다(Lee et al., 2017).

6.2.5 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 6.12는 Figs. 6.9와 6.10에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 $(u'^2_x + u'^2_y + u'^2_z)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $\overline{(u'^2_x + u'^2_y + u'^2_z)/2}$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_x, u'_y, u'_z 는 각각 X, Y, Z 방향으로 난류속도성분이다. 이러한 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를

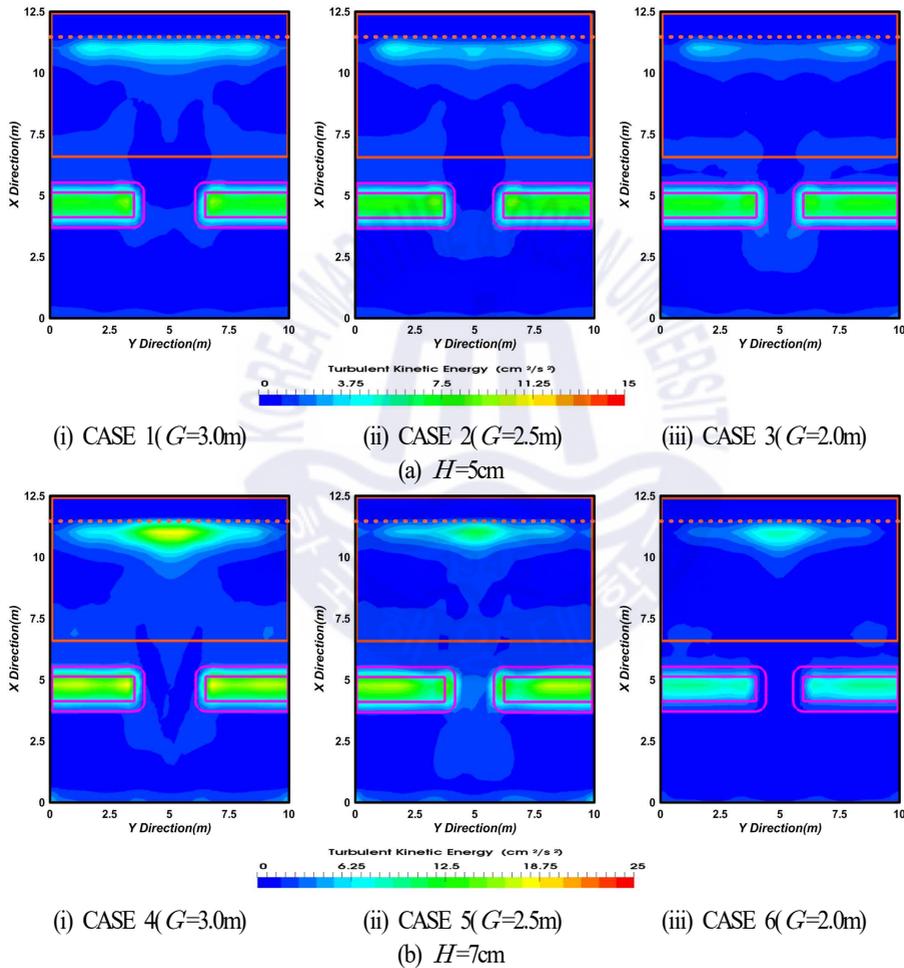


Fig. 6.12. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.

판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 H_{rms} 의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig

6.12(a)는 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우를, Fig. 6.12(b)는 유의파고가 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하고, 개구폭이 넓을수록 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류운동에너지가 상대적으로 크게 나타나며, 또한 종단방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6.13은 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, $X=10.2\text{m}$ 와 해안선 위치 $X=11.47\text{m}$ 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 시·공간평균난류운동에너지분포는 파랑에너지의 소산과 연관되어 있으므로 H_{rms} 의 분포와 관계를 가진다. 또한, 일반적으로 파고의 자승에 비례하는 과잉운동량플럭스(radiation stress)는 쇄파시에는 증가하고, 쇄파후에는 감소하므로 해안선 근방에서 평균수위 상승이 발생하여 이에 균형을 취하는 것으로 알려져 있다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 6.12에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서 난류운동에너지가 증가하고, 더불어 개구폭이 넓을수록 이러한 경향이 강해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 개구폭의 변화에 따른 개구부 배후의 H_{rms} 의 변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 연안류의 속도에 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

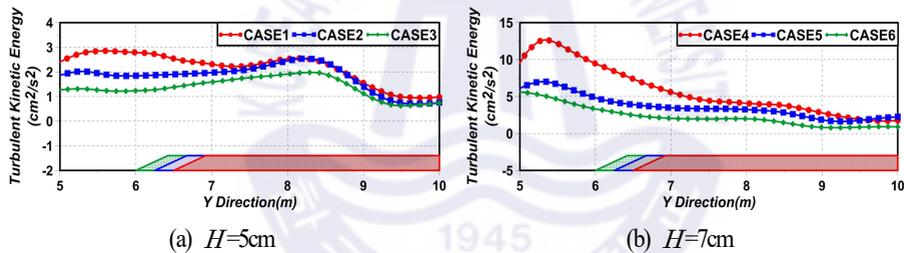


Fig. 6.13. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

6.3 결론

본 장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 다기의 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 3차원수치과동수조에 불규칙파를 조파하여 개구폭의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 H_{rms} 의 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 H_{rms} 는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 H_{rms} 가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 H_{rms} 의 감소율이 상대적으로 크게 나타났다.

(2) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭에 상관없이 제두부 부근에서 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여 개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인하였고, 개구폭이 넓어질수록 개구폭 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되다가 연안류로 흐름이 바뀌는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 잠제의 배후에서 연안류는 개구폭이 넓을수록 강하게 형성됨과 동시에 수송유량이 증가하였으며, 연안류가 수렴되는 지점은 개구폭이 좁은 경우 제간부에서 제두부로 이동되는 것으로 추정되었다. 이러한 결과로부터 저질이 퇴적되는 지점을 예상할 수 있으므로 잠제 배후에 형성되는 설상시주와 같은 지형변동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 평균난류에너지는 개구폭이 넓을수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 시·공간누적평균난류에너지가 크게 나타났고, 이는 개구부 배후 해안선 부근에서 평균수위의 상승 정도와 직접적인 연관성을 가지며, 더불어 연안류의 형성과 속도에도 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

References

- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N.(1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions, *Transport in Porous Media*, 35(3), 395-406.
- Black, K. P. and Andrews, C. J.(2001). Sandy shoreline response to offshore obstacles Part 1: Salient and tombolo geometry and shape, *J. Coastal Research*, 82-93.
- Goda, Y.(1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, *Coastal Engineering*, 84, 56-72.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W. and Kim, D. S.(2017). Characteristics of water surface variations around 3-dimensional permeable submerged breakwaters under the conditions of salient formation, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6),

335-349.

- Mizutani, N., Mostafa, A. M. and Iwata, K.(1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, *Coastal Engineering*, 33(2), 177-202.
- Ranasinghe, R., Turner, I. L. and Symonds, G.(2006). Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modelling study, *Coastal Engineering*, 53(7), 589-611.
- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J.(2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater, *Coastal Engineering*, 57(11), 1006-1017.



제 7 장 투과성잠제 주변에서 규칙파 혹은 불규칙파와 흐름의 공존장내

3차원파동장의 수치해석

7.1 서언

파-흐름-잠제의 3차원적인 상호작용문제를 다룬 연구는 매우 소수이며, 대표적으로 Johnson et al.(2005), Bellotti(2004), Cáceres et al.(2008), Sharifahmadian and Simons(2014) 등을 들 수 있다. Johnson et al.(2005)는 유럽에서 수행된 DELOS 프로젝트의 일환으로 파-흐름-잠제의 3차원적인 상호작용문제를 수치적 및 실험적으로 검토하였으며, 흐름으로는 해빈류를 대상으로 하였고, 수치해법으로는 파랑모델과 해빈류모델에 각각 수심적분된 2차원평면모델을 적용하였다. Bellotti(2004)는 파-흐름-단일잠제를 대상으로 흐름을 추정할 수 있는 수심적분된 형태의 간략모델을 제시하였지만 흐름으로는 이안류만을 한정하였으며, Cáceres et al.(2008)은 잠제 천단상의 월파로 인한 해빈류를 여러 잠제 배치안에 대해 실험적으로 검토하였다. 반면에, Sharifahmadian and Simons(2014)는 인공신경망모델을 적용하여 3차원 잠제와 파와의 상호작용문제를 다루었지만 흐름을 검토하지 않았다. 이상의 3차원상호작용에 관한 연구는 흐름으로 파랑의 쇄파로 인한 과잉운동량플릭스로부터 발생하는 해빈류만을 대상으로 하였고, 본 연구에서와 같이 조석류 혹은 하천류와 같은 흐름을 대상으로 하지 않았다.

한편, 제5장과 제6장은 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 3차원수치파동수조에서 설상사주 형성조건하 규칙파랑 혹은 불규칙파랑과 3차원투과성잠제와의 상호작용에 의한 주변 파동장에서 파고, 평균수위, 층별유속, 평균유속(해빈류) 및 평균난류운동에너지 등의 분포와 같은 수리학적 특성을 면밀히 검토하였다. 여기서, 설상사주 형성조건하 규칙파랑과 3차원투과성잠제와의 상호간섭에 따른 수면변동과 내부유속변동에서는 개구폭의 변화에 따른 파고의 변화, 제두부에서 제간부로의 파고감쇠율 및 평균수위의 변화 등을, 또한 개구폭의 변화 및 잠제 위치에 따른 순환셀의 형성, 연안류의 변동특성 및 평균난류에너지와 연안류와의 관계 등을 각각 논의하였다. 그리고, 동일한 조건하에서 불규칙파랑을 대상으로 한 제6장에서는 개구폭의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 자승평균평방근파고 $H_{r,m,s}$ 의 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 순환셀, 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 면밀히 검토하였다. 하지만, 전술한 선행연구에서는 파(규칙파 혹은 불규칙파)-흐름의 3차원적인 변동특성은 논의되지 않았다.

따라서, 본 장에서는 제5장과 제6장을 근간으로 설상사주 형성조건하 규칙파동장 혹은 불규칙파동장에 흐름(순방향과 역방향)이 존재하는 경우를 대상으로 3차원잠제 주변에서 파고, 해빈류, 순환셀, 평균난류에너지 등의 변동특성을 흐름의 특성과 연계하여 논의한다. 이 때, 배후경사면은 모래로 구성된다.

7.2 수치해석결과

7.2.1 계산조건

본 장의 수치시뮬레이션을 위해 Fig. 7.1에 나타난 바와 같이 길이 12.5m, 폭 10m, 높이 0.4m의 크기를 갖는 일정수심 $h=0.25\text{m}$ 의 3차원수치과동수조를 구성하고, 수조의 끝단에는 1:20의 경사를 갖는 경사사빈을 설치하였으며, 수치과동수조내에 3차원투과성잡제를 설치하여 흐름의 유무 및 흐름방향에 따른 물리량의 변화특성을 수치시뮬레이션하였다.

잡제는 조파판으로부터 잡제의 전면경사가 시작되는 지점까지 3.5m 이격된 지점에 위치하고, 잡제의 천단에서 해안선과의 거리는 잡제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잡제와의 거리 S 를 매개변수로 설상사주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001)의 조건인 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 6.5m로 설정하였다. 또한, 개구폭 G 는 3.0m이고, 잡제 길이 L_s 가 3.5m로 양측면에 배치되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잡제가 설치되는 것으로 가정한다.

먼저, Fig. 7.1에 보이는 바와 같이 해석대상의 잡제에서 천단고는 21cm, 천단수심은 4cm, 천단폭은 1.05m의 크기를 각각 가지며, 비탈면경사는 2:1로 설정되었다. 그리고, 잡제의 체체는 공극률 $\phi=0.33$, 중앙입경 $D_{50}=3.0\text{cm}$ 인 투과성매질로 구성되며, 잡제의 배후에 설치되는 경사사빈은 공극률이 $\phi=0.3$, 중앙입경이 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 인 모래로 각각 가정되었다. 잡제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였으며, 사빈의 경우는 모래입경에 해당하는 $D_{50}=0.2\text{cm}$ 의 다공성매질에 대한 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을 각각 적용하였다. 또한, Black and Andrews(2001)가 제시한 설상사주가 형성되는 조건인 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 잡제의 설치위치를 설정하였다. Table 7.11에 수치실험에 이용된 잡제의 배치와 입사파랑에 대한 조건을 나타낸다. 계산영역의 격자는 수평방향으로 일정격자를 적용하고, 연직방향으로는 가변격자를 적용한 $\Delta x=3\text{cm}$, $\Delta y=3\text{cm}$, $\Delta z=0.7\sim 1.4\text{cm}$ 로 구성하였으며, 구성된 격자에 대한 Courant 상수는 0.3 이하가 되도록 시간간격을 조정하면서 수치실험을 수행하였다. 경계조건으로는 계산영역의 모든 벽면에서 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i=0$ 을 적용하였다.

Table 7.1은 규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. 표에서는 흐름이 없고 파만이 존재하는 경우를 WCN으로, 흐름과 파가 순방향인 경우를 WCF로, 흐름과 파가 역방향인 경우를 WCO로 표기 및 정의하며, Table 7.2의 불규칙파와 구별하기 위해 규칙파를 RE로 표기한다. 또한, 잡제 천단상에서 쇄파 발생 여부도 병기되어 있다.

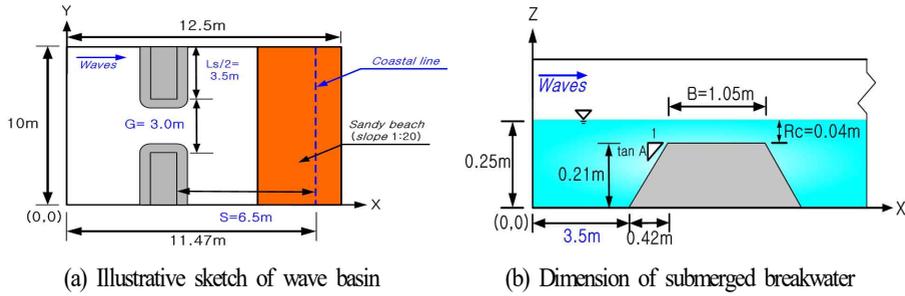


Fig. 7.1. Illustrative sketches of wave basin and submerged structure for numerical analysis.

Table 7.1. Regular wave and current conditions applied to numerical analysis and wave breaking on crown.

CASE No.	Wave maker theory	Wave height H (cm)	Wave period T (s)	Current velocity U (cm/s)	Wave breaking on crown
WCN-RE5	Stokes II	5	1.4	0.0	No
WCF-RE5				10.0	
WCO-RE5				-10.0	
WCN-RE7		7		0.0	Yes
WCF-RE7				10.0	
WCO-RE7				-10.0	

Table 7.2는 불규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 체원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. Table 1과 동일하게 WCN, WCF 그리고 WCO로 표기 및 정의하며, Table 7.1의 규칙파와 구별하기 위해 불규칙파를 IR로 표기한다. 입사파량으로는 Table 7.1에서 제시한 규칙파의 파고와 주기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파량을 적용하였다.

7.2.2 파고분포

(1) 규칙파

Fig. 7.2는 각각 입사파고 $H=5\text{cm}$ 와 $H=7\text{cm}$ 의 경우 잠제 주변에서 형성되는 공간파고분포를 나타낸 것이며, Fig. 7.2(a)는 입사파고가 $H=5\text{cm}$ 인 경우이다. (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-RE5), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-RE5), 그리고 (iii)는 역방향흐름의 경우(WCO-RE5)에 각각 해당하며, 그림중에 붉은 파선과 붉은 실선의 사각형은 해안선과 사빈경사면을 나타낸다. 제시된 수치계산결과는 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 연속되는 5개의 파를 산술평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전반적

으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 파고가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 개구부에서 파의 집중이 나타나며, 대부분의 파랑에너지가 개구부를 통하여 배후로 전달되는 것을 알 수 있다. 흐름방향에 따라 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지는 크게 차이나지 않지만 WCN, WCF, WCO의 순으로 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 파고가 감소하는 것을 알 수 있으며, 제간부 배후에서의 파고는 WCF가 WCN의 경우보다 높게, 그리고 WCO가 WCN의 경우보다 낮게 각각 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Lee et al.(2016)에서 언급된 바와 같이 후술하는 평균난류운동에너지가 클수록(적을수록) 파고감소율이 높게(낮게) 나타나는 결과와 일치한다. 이로부터 개구부의 배후로 전달되는 파랑에너지는 WCO, WCN, WCF의 순으로 잠제의 길이방향으로 공간변화가 커지는 것을 확인할 수 있다.

Table 7.2. Irregular wave and current conditions applied to numerical analysis and wave breaking on crown.

CASE No.	Wave maker theory	Spectrum	Significant wave height $H_{1/3}$ (cm)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	Current velocity U (cm/s)
WCN-IR5	Irregular waves by superposition of linear waves	Modified Bretschneider-Mitsuyasu(Goda, 1988)	5	1.4	0.0
WCF-IR5					10.0
WCO-IR5					-10.0
WCN-IR7			7		0.0
WCF-IR7					10.0
WCO-IR7					-10.0

Fig. 7.2(b)는 Fig. 7.2(a)에 비해 입사파고가 증가한 $H=7\text{cm}$ 인 경우에 대한 공간파고분포를 나타낸 것이다. 입사파고 $H=5\text{cm}$ 의 Fig. 7.2(a)와 유사한 개구부에서 파의 집중과 개구부 배후로 파랑에너지의 전달을 확인할 수 있으며, 흐름방향에 따른 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지의 감소는 크게 차이가 나지 않는다. 또한, 제간부 배후에서 파고는 각각 WCF가 WCN보다 높게, WCO가 WCN보다 낮게 나타나며, 이로부터 WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 길이방향으로 공간변화가 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7.3은 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우 흐름방향에 따른 잠제 천단상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 전파되는 파가 시·공간적으로 회절되는 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이다. 흐름의 유무에 따라 위상이 약간 상이하지만 상호비교를 위해 파 전파과정의 위상을 가능한 범위내에서 일치시킨 결과이다. 그럼으로부터 주지의 사실로 입사파가 잠제 천단상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되고, 동시에 진행방향의 수평유속이 증가하며, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여

유속이 느려지는 현상을 Fig. 7.3으로부터도 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 7.2(b)의 결과에서도 지적인 바와 같이 제간부 배후로 흐름방향에 따른 파고분포의 차이로 WCF는 WCN보다 큰 속도를, WCO는 WCN보다 작은 속도를 각각 나타낸다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 중심의 감소로 쇄파가 발생되고, WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 유속이 작게 나타나며, 해안선 근방에서는 개구부의 배면에 집중된 유속이 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있고, WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 유속의 이동이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 후술하는 연안류 및 수송유량에 영향을 미친다.

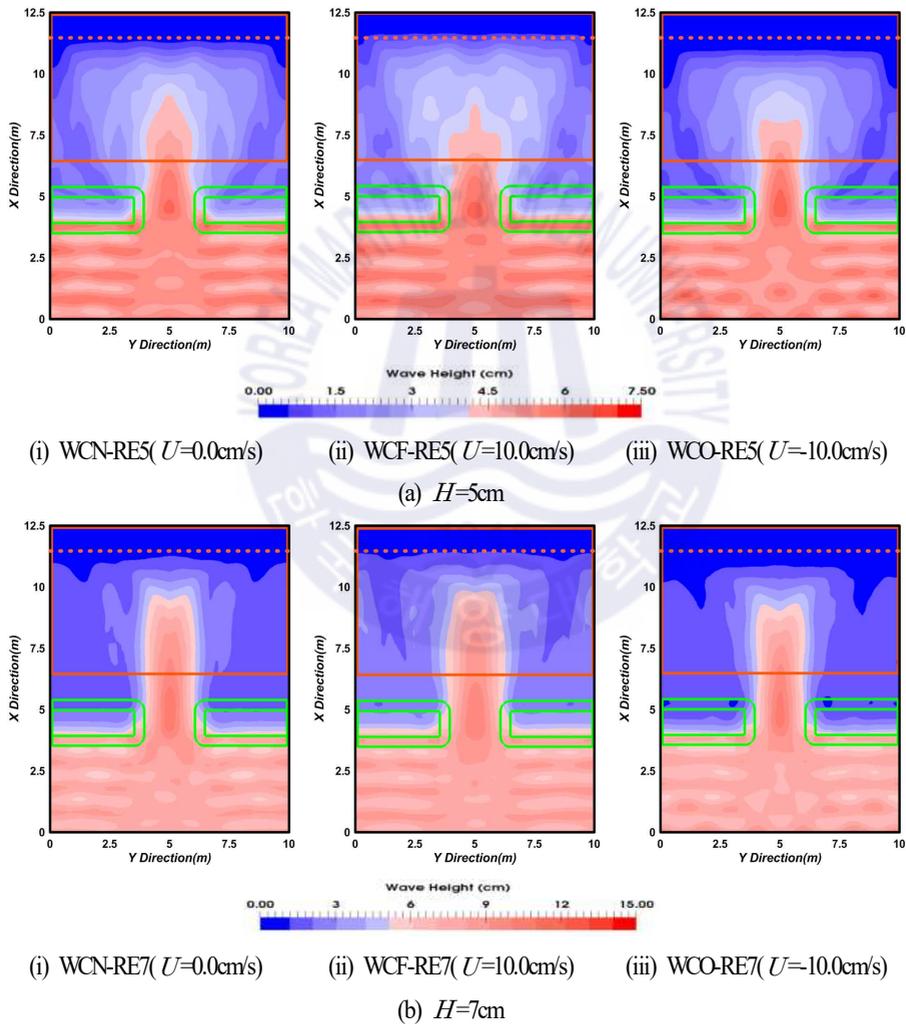
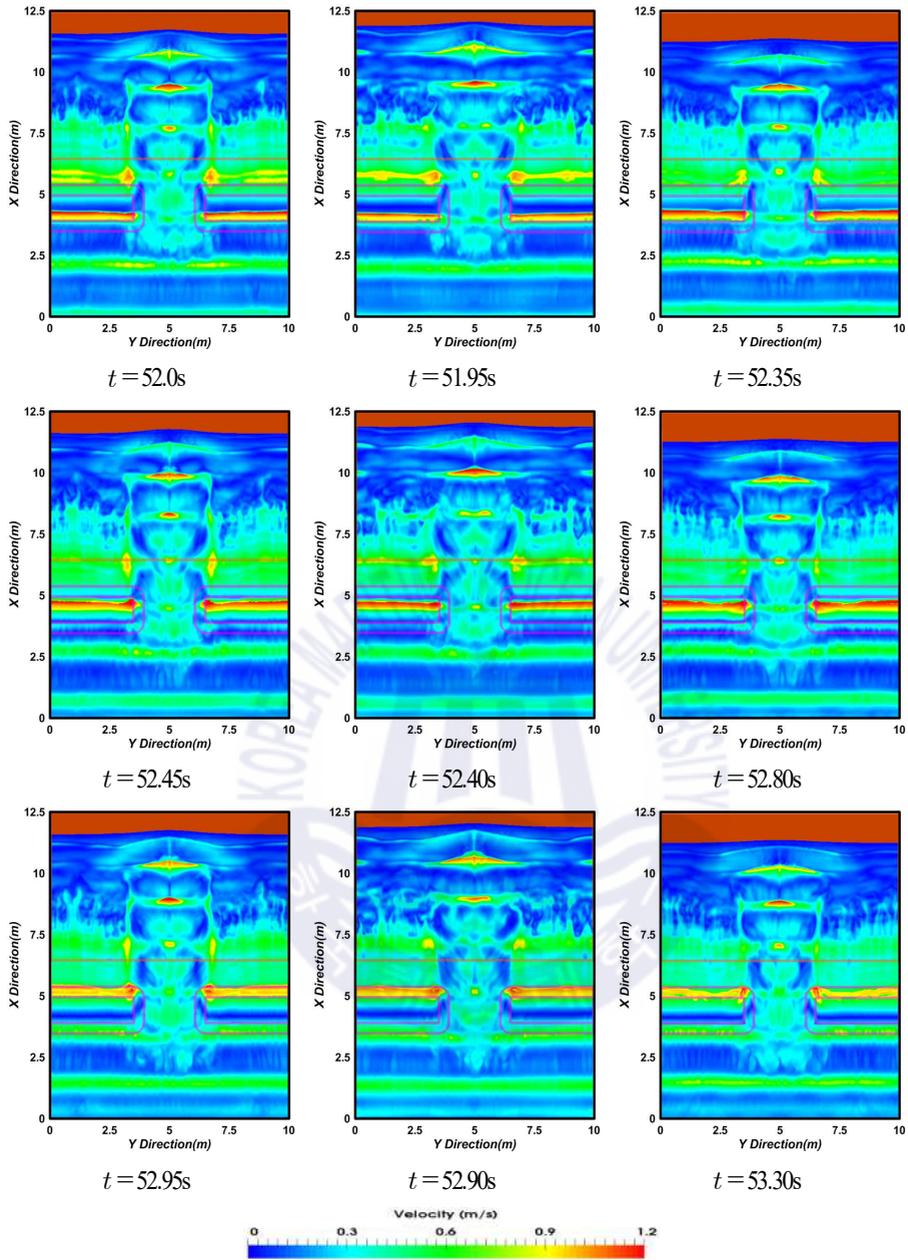


Fig. 7.2. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction.



(a) WCN-RE7 ($U=0.0\text{cm/s}$) (b) WCF-RE7 ($U=10.0\text{cm/s}$) (c) WCO-RE7 ($U=10.0\text{cm/s}$)

Fig. 7.3. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

Fig. 7.4는 각각 입사파고 $H=5\text{cm}$ 와 $H=7\text{cm}$ 의 경우 해안선에서 평행한 단면에서 흐름의 유무와 방향에 대해 y 축을 따른 공간파고분포를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 7.4(a)가 $H=5\text{cm}$ 의 경우이고, Fig. 7.4(b)가 $H=7\text{cm}$ 의 경우이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $x=4.445\text{m}$ 인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $x=9.0\text{m}$ 인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 $x=11.47\text{m}$ 인 지점)의 경우이다.

Fig. 7.4(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 $x=4.445\text{m}$ 인 지점에서는 흐름의 방향에 관계없이 개구부 중앙에서 $H \approx 6.4\text{cm}$ 의 거의 동일한 파고를 나타내지만 제간부에서는 WCF가 WCN보다 높게, WCO가 WCN보다 낮게 일정한 파고가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 $x=9.0\text{m}$ 의 지점에서는 제간부에서 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않지만 WCF의 경우가 상대적으로 큰 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 해안선인 $x=11.47\text{m}$ 의 지점에서는 모두 얇은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되며, 따라서 (i)잠제 천단 중앙과 동일하게 WCF가 WCN보다 높은 파고를, WCO가 WCN보다 낮은 파고를 각각 나타낸다.

Fig. 7.4(b)의 경우는 Fig. 7.4(a)와 유사하게 잠제 천단 중앙의 제간부와 해안선에서 WCF, WCN, WCO의 순으로 큰 파고가 나타나며, 사빈 경사면 중앙의 개구부 배면에서는 WCO, WCN, WCF의 순으로 파고가 감소하는 경향을 볼 수 있다.

(2) 불규칙파

Fig. 7.5는 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 와 7cm 인 각각의 경우 잠제 주변에서 형성되는 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 7.5(a)는 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우이다. (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-IR5), (ii)은 순방향흐름의 경우(WCF-IR5), 그리고 (iii)은 역방향흐름의 경우(WCO-IR5)에 각각 해당하고, 제시된 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 28s(45~73s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 결과를 살펴보면 규칙파 작용하의 Fig. 7.2(a)와 유사하게 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 제간부 배후에서는 WCF가 WCN보다 높은 파고를, WCO가 WCN보다 낮은 파고를 나타내는 반면, 흐름방향에 따라 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지는 WCF가 WCN과 WCO보다 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 7.5(b)는 Fig. 7.5(a)에 비해 유의파고가 증가한 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우에 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이다. 흐름방향에 따른 개구부 배후에서 파랑에너지의 전달 및 제간부 배후에서 H_{rms} 의 크기 등에 관한 경향은 전술한 Figs. 7.2(b)와 7.5(a)의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7.6은 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 와 7cm 인 각각의 경우에 대해 규칙파의 Fig. 7.4와 동일하게 해안선에 평행한 단면에서 y 축을 따라 흐름의 유무와 방향별 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것으로 Fig. 7.6(a)가

결과로 잠제 천단상 육측으로의 흐름에서는 WCF가 상대적으로 WCN과 WCO보다 약하게 형성되며, 해안선 부근에서 연안류 성분은 WCN가 WCF와 WCO보다 탁월하게 발생하는 반면, 제간부 배후에서는 WCF가 상대적으로 강한 연안류를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 연안류가 형성되는 지점의 경우 WCF는 WCN보다 육측으로, WCO는 WCN보다 해측으로 각각 형성됨을 확인할 수 있다.

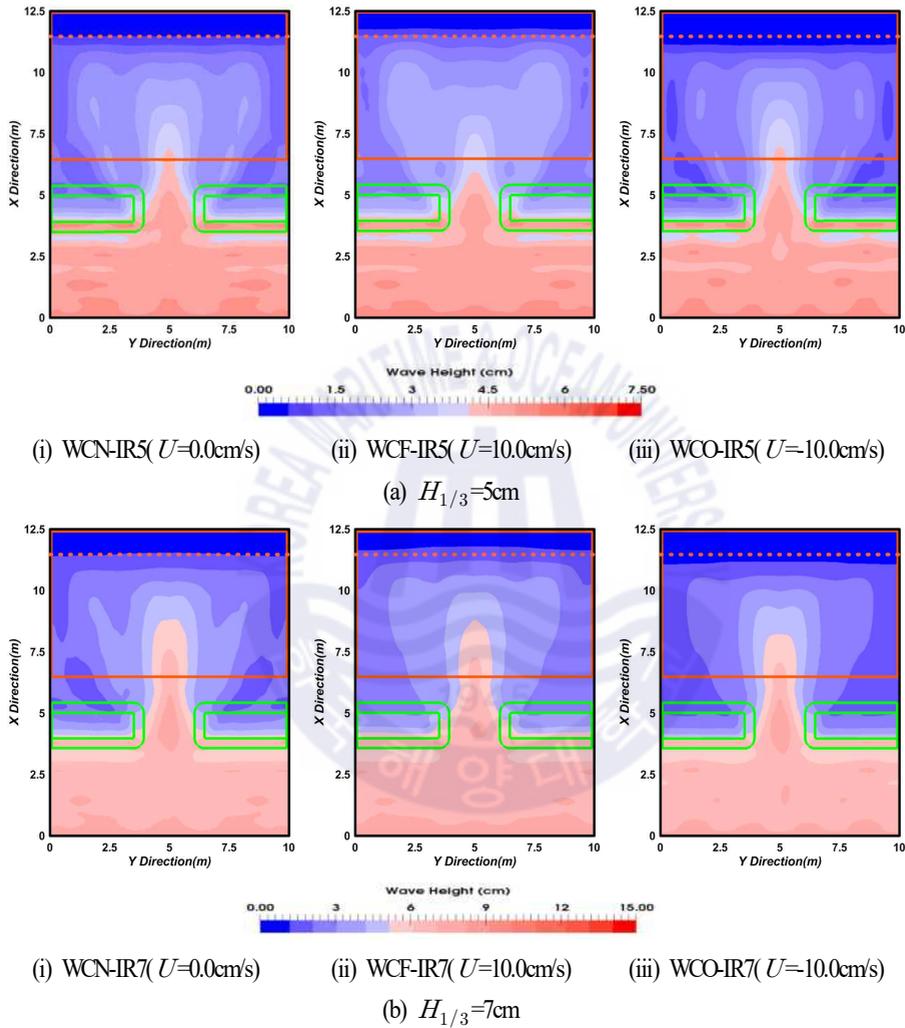


Fig. 7.5. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of current direction.

Fig. 7.7(b)는 입사파고 $H=7\text{cm}$ 인 경우에 Fig. 7.7(a)와 동일하게 평균된 평균유속의 공간분포를 나타낸다. 입사파고 $H=5\text{cm}$ 인 경우인 Fig. 7.7(a)와 동일하게 잠제 천단상에서 육측으로의 흐름은 WCF가 상대적으로 WCN과 WCO보다 약하게 형성되며, 해안선 부근에서 연안류는 WCF가 WCN보다 육측으로

로, WCO가 WCN보다 해측으로 각각 형성됨을 확인할 수 있다.

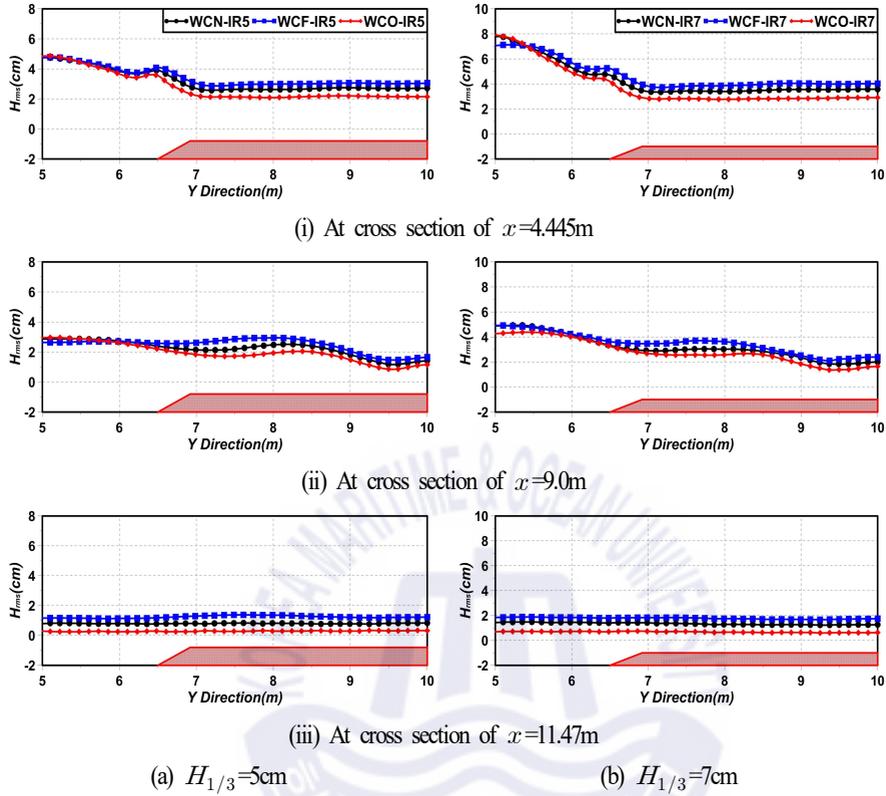


Fig. 7.6. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to y direction.

(2) 불규칙파

Fig. 7.8(a)는 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우, Fig. 7.8(b)는 유의파고가 7cm 인 각각의 경우에 해빈류의 공간분포를 나타낸 것으로 해빈류는 Fig. 7.7과 같이 산정된 평균치이다. 규칙과 작용하의 Fig. 7.7과 유사하게 WCN이 상대적으로 WCF와 WCO보다 연안류가 탁월하게 발생하지만 제간부 배후에서는 WCF가 상대적으로 강한 연안류를 형성하는 것을 볼 수 있다. 또한, 연안류가 형성되는 지점에 대해서는 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 각각 형성되는 것을 알 수 있다.

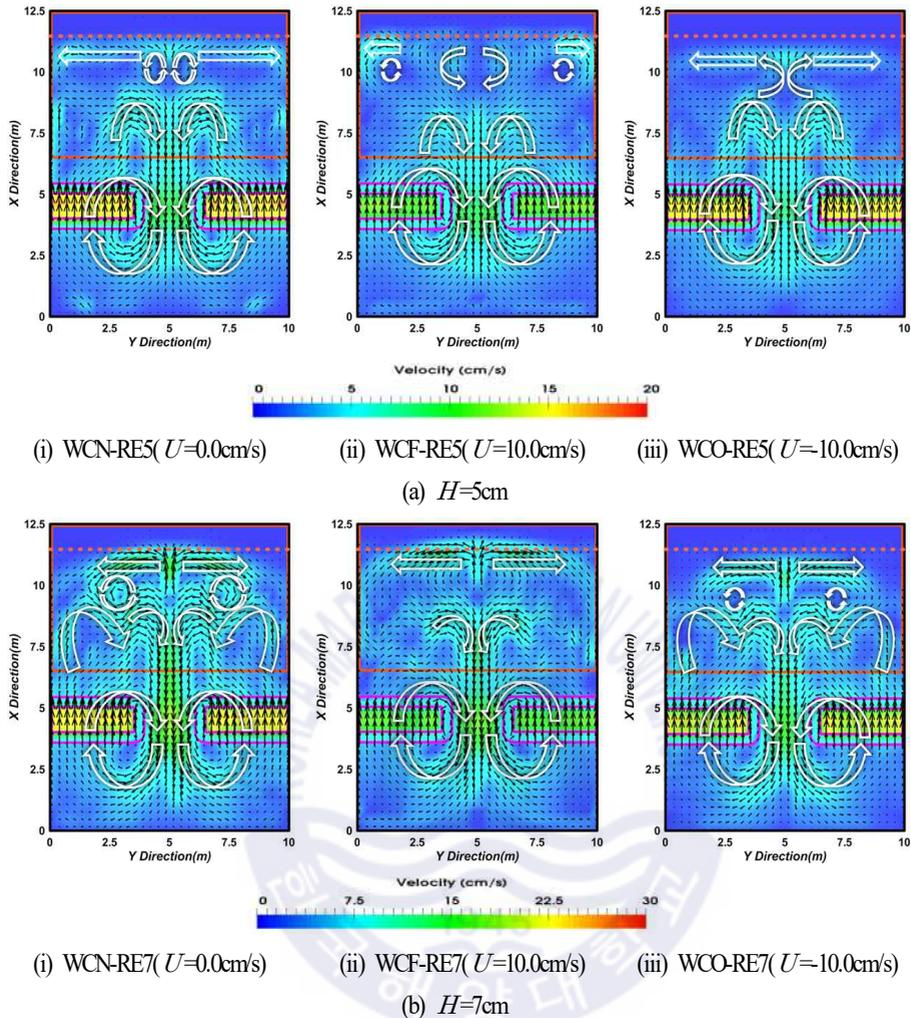


Fig. 7.7. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane.
(Regular wave conditions)

7.2.4 연안류의 공간분포

(1) 규칙파

연안류와 지형변동과의 관계는 [Ramasinge and Turner\(2006\)](#)가 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생하고, 연안류가 수렴하는 지점에서 퇴적이 발생한다고 결론짓고 있으며, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주는 설상사주의 형성에 대한 예측에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다(Lee et al. 2017).

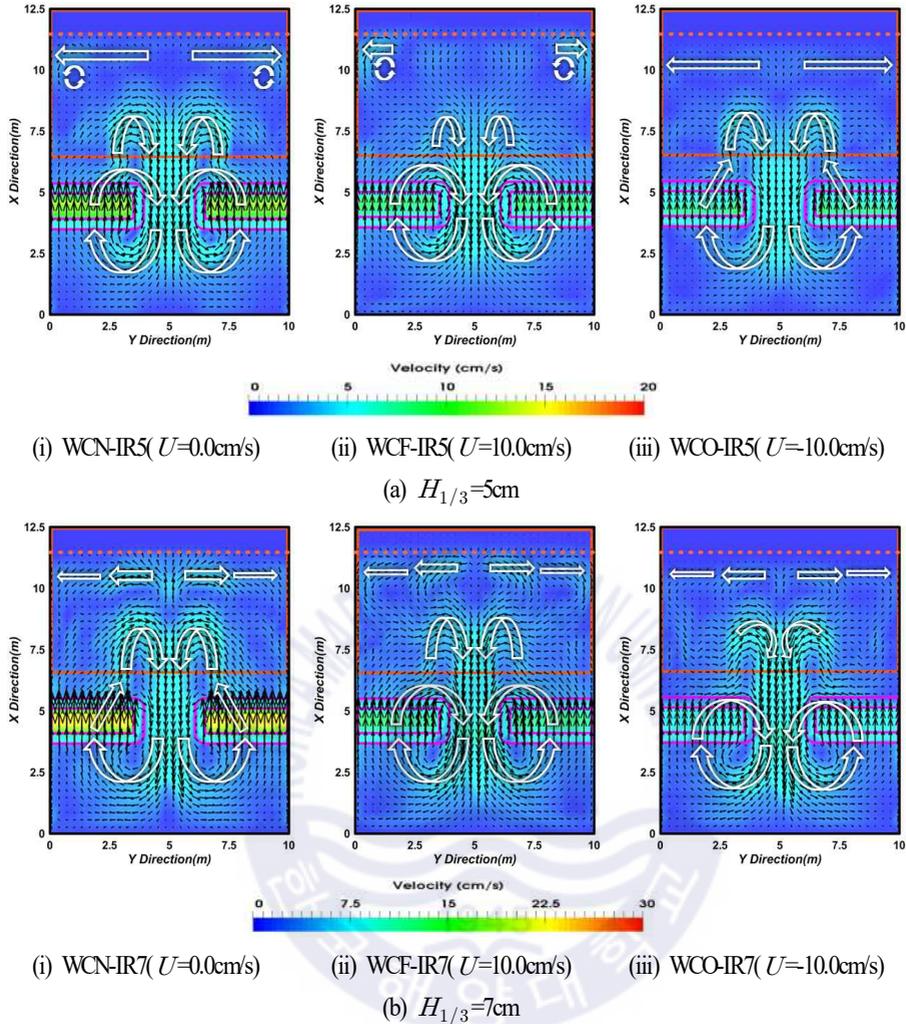


Fig. 7.8. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane.
(Irregular wave conditions)

Fig. 7.9는 Fig. 7.7에서 형성된 연안류를 x 방향으로 평균하여 y 방향에 대해 나타낸 것이며, WCN은 조파지점으로부터 10.5~11.4m 이격된 지점, WCF는 조파지점으로부터 10.6~11.5m 이격된 지점, 그리고 WCO는 조파지점으로부터 10.2~11.1m 이격된 지점에 형성된 연안류를 대상으로 하였다. 입사파고 $H=5\text{cm}$ 인 Fig. 7.9(a)에서 연안류는 Fig. 7.7(a)에서와 같이 개구부 및 체두부 근방에서 WCF가 WCN과 WCO보다 약하게 형성되는 반면, 체간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타낸다. 입사파고 $H=7\text{cm}$ 인 Fig. 7.9(b)에서는 전반적으로 WCO가 WCN과 WCF보다 약하게 형성됨을 알 수 있으며,

Fig. 7.9(a)와 유사하게 제간부 근방에서는 WCF가 강한 연안류를 나타낸다. 이러한 결과는 후술하는 평균난류운동에너지의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구는 다기로 구성된 잠재로 단일잠재에 대한 Ranasinghe and Turner(2006)과는 상이하게 과거 해안선에 직각으로 입사하는 경우 제간부 배후 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하지 않으며, 개구부 배후 해안선 부근에서 상승된 평균수위에 의해 제간부측으로 이동하는 연안류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ranasinghe et al.(2010)의 결과에 따라 Fig. 7.9에서 제시된 연안류가 (+)에서 (-)로 변하는 지점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점으로 판단하고, 그 지점에서 각 방향(제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 5.3에 그 값을 제시한다.

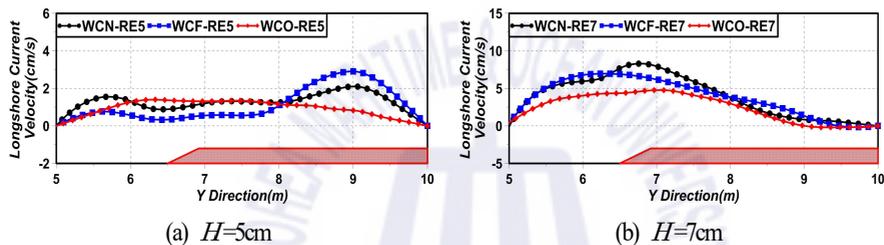


Fig. 7.9. Spatial distribution of longshore current velocities.

Table 7.3. A longshore current's convergence point on the shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

CASE No.	Converging point	Transport flow discharge(cm^3/s) (From head of breakwater to middle of breakwater)	Transport flow discharge(cm^3/s) (From middle of breakwater to head of breakwater)	Total transport flow discharge (cm^3/s)
WCN-RE5	$y=10.0m$	8,155.42	0	8,155.42
WCF-RE5	$y=10.0m$	7,168.65	0	7,168.65
WCO-RE5	$y=10.0m$	6,077.12	0	6,077.12
WCN-RE7	$y=10.0m$	25,631.62	0	25,631.62
WCF-RE7	$y=10.0m$	24,712.77	0	24,712.77
WCO-RE7	$y=9.03m$	16,091.86	175.87	16,267.73

Table 3에 제시한 수송유량은 연안류의 속도와 x - z 평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 흐름방향에 관계없이 파와 흐름의 공존장내에서는 WCN의 파동장보다 연안류에 의한 수송유량이 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 WCO가 상대적으로 수송유량이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우는 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에서 제두부측으로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생하는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있다.

(2) 불규칙파

Fig. 7.10은 Fig. 7.9와 동일하게 Fig. 7.8에서 형성된 연안류를 x 방향으로 평균하여 y 방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에서 제두부로 방향으로 연안류를 각각 나타낸다. 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 Fig. 7.10(a)에서는 규칙파 작용하의 Fig. 7.9(a)와 유사하게 개구부 및 제두부 근방에서 연안류는 WCF가 WCN과 WCO보다 약하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 유의파고 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 Fig. 7.10(b)에서 연안류는 규칙파 작용하의 Fig. 7.9(b)와 유사하게 전반적으로 WCO가 WCN과 WCF보다 약하게 형성되는 것을 알 수 있다.

Table 7.4에는 전술한 Table 7.3과 동일한 방법으로 Fig. 7.10에서 제시된 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 그 값을 제시하며, 연안류의 속도와 x - z 평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 규칙파의 경우에 대한 Table 7.3과 동일하게 흐름방향에 관계없이 파와 흐름의 공존장내에서 연안류에 의한 수송유량은 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 WCO가 상대적으로 수송유량이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있지만 흐름의 유무 및 방향에 따른 연안류의 수렴지점은 이동되지 않고, 모두 제두부 중앙에 나타나는 것을 알 수 있다.

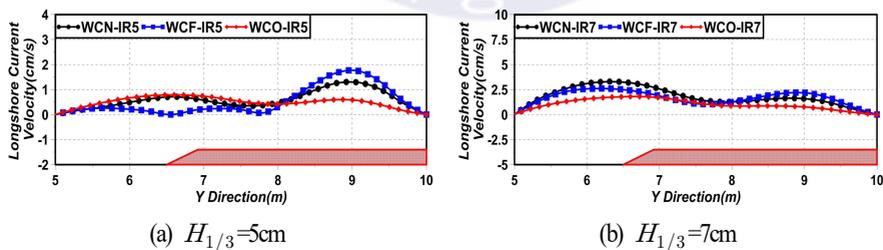


Fig. 7.10. Spatial distribution of longshore current velocities.

7.2.5 평균난류운동에너지의 공간분포

(1) 규칙파

Fig. 7.11은 Fig. 7.7에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류 운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 $(u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $\overline{(u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)/2}$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_x, u'_y, u'_z 는 각각 x, y, z 방향으로 난류속도 성분이다. 이러한 난류에너지는 난류 성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 파고의 변화에 영향을 미친다. 여기서, Fig. 7.11(a)는 입사파고가 $H=5\text{cm}$ 인 경우를, Fig. 7.11(b)는 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우를 각각 나타내며, 그림으로부터 잠제 천단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하는 것을 알 수 있다. 잠제 천단상에서는 WCO가 상대적으로 크게, WCF가 상대적으로 적게 나타나며, 이는 Lee et al.(2016)의 2차원수치실험결과와도 일치한다. 또한, 개구부 배후 해안선 부근에서는 WCN이 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 7.7에서 제시된 연안류의 형성위치와 동일하게 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 평균난류에너지가 집중·증가된 것으로 나타난다.

Table 7.4. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

CASE No.	Converging point	Transport flow discharge(cm^3/s) (From head of breakwater to middle of breakwater)	Transport flow discharge(cm^3/s) (From middle of breakwater to head of breakwater)	Total transport flow discharge (cm^3/s)
WCN-IR5	$y=10.0\text{m}$	3,854.33	0	3,854.33
WCF-IR5	$y=10.0\text{m}$	3,404.60	0	3,404.60
WCO-IR5	$y=10.0\text{m}$	3,211.89	0	3,211.89
WCN-IR7	$y=10.0\text{m}$	11,638.88	0	11,638.88
WCF-IR7	$y=10.0\text{m}$	10,725.36	0	10,725.36
WCO-IR7	$y=10.0\text{m}$	6,611.632	0	6,611.632

Fig. 7.12는 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, WCN은 $x=10.5\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이, WCF는 $x=10.6\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이, 그리고 WCO는 $x=10.2\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 7.11에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서는 WCN, WCO, WCF의

순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 WCF, WCN, WCO의 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 흐름 유무 및 방향에 따른 개구부 배후의 파고의 변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 연안류의 속도에 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다.

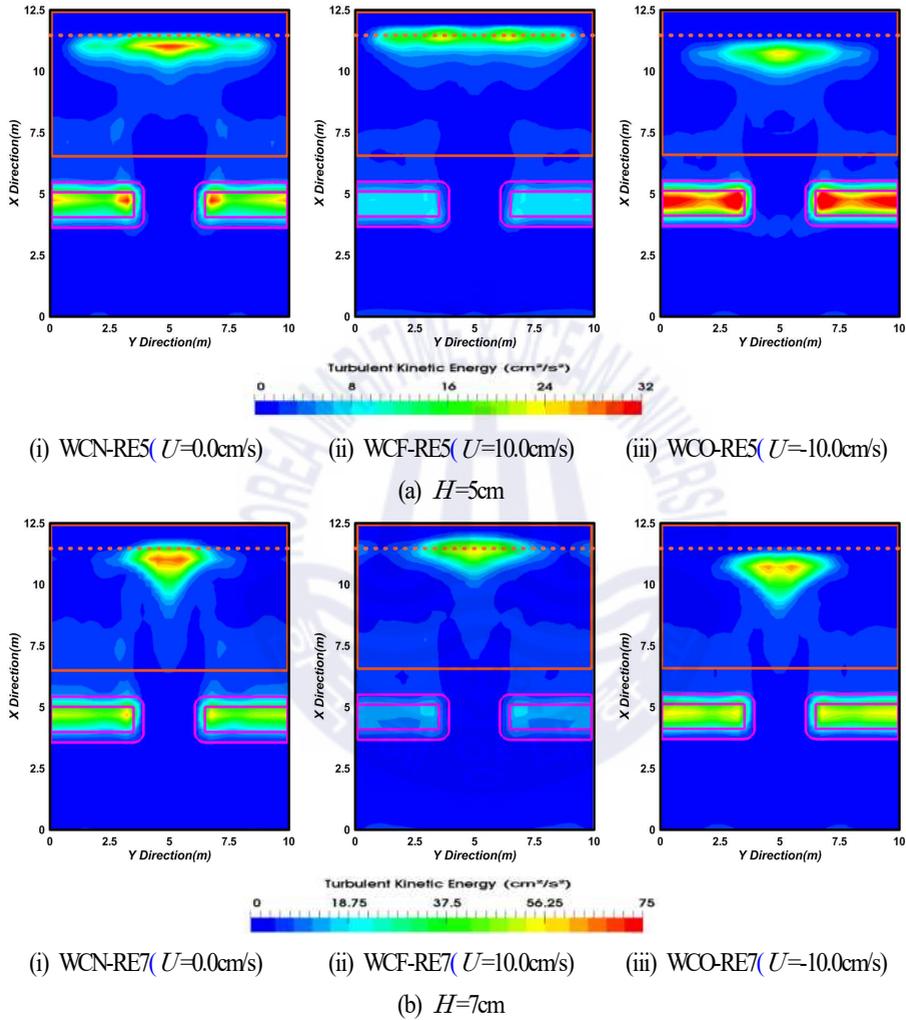


Fig. 7.11. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in x - y plane.

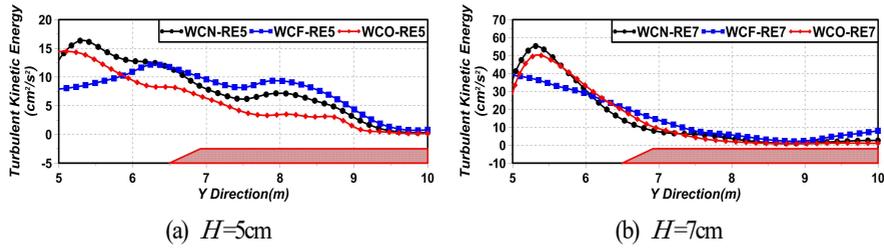
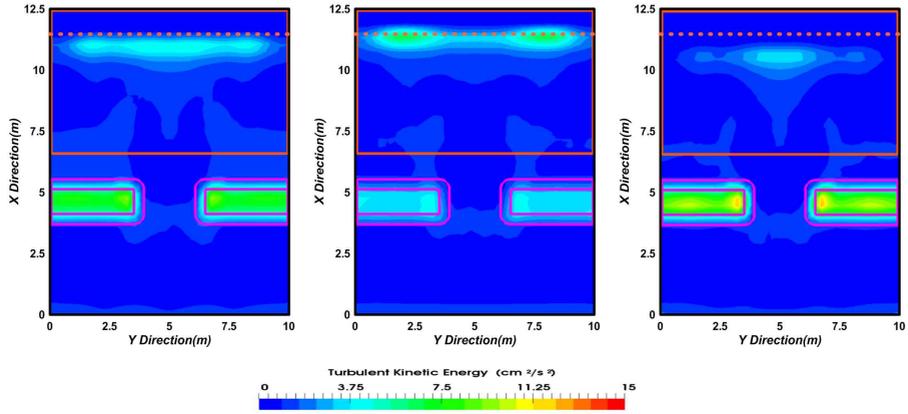


Fig. 7.12. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.

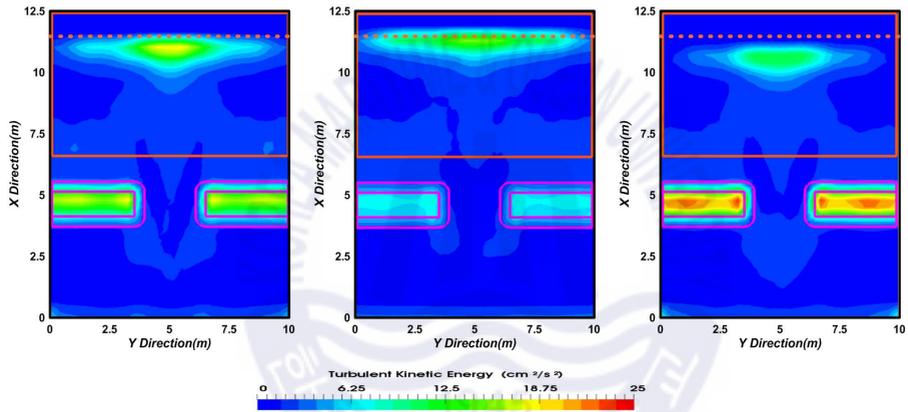
(2) 불규칙파

Fig. 7.13은 Fig. 7.8에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류 운동에너지를 나타낸 것이며, Fig. 7.13(a)는 유의파고 $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우를, Fig. 7.13(b)는 입사파고 $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 규칙파 작용하의 Fig. 7.15와 동일하게 잠제 천단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하는 것을 알 수 있고, 잠제 천단상에서는 WCO가 상대적으로 크게, WCF가 상대적으로 적게 나타나며, Fig. 7.8에서 제시된 연안류의 형성위치와 동일하게 WCF는 WCN보다 육측으로, WCO는 WCN보다 해측으로 평균난류에너지가 집중·증가한 것으로 나타난다.

Fig. 7.14는 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, WCN은 $x=10.5\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이, WCF는 $x=10.6\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이, 그리고 WCO는 $x=10.2\text{m}$ 에서 해안선 위치 $x=11.47\text{m}$ 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 규칙파 작용하인 Fig. 7.12와 유사하게 개구부 배후의 해안선 근방에서는 WCN, WCO, WCF의 순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 WCF, WCN, WCO의 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

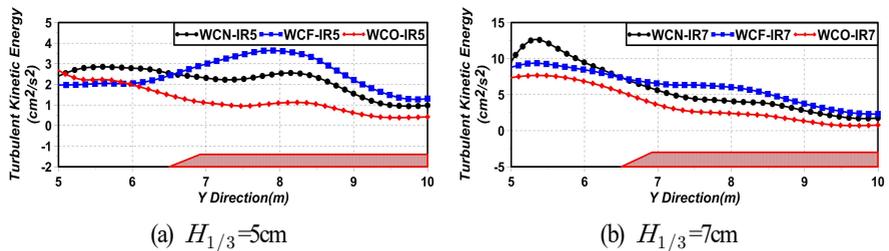


(i) WCN-IR5 ($U=0.0\text{cm/s}$) (ii) WCF-IR5 ($U=10.0\text{cm/s}$) (iii) WCO-IR5 ($U=-10.0\text{cm/s}$)
 (a) $H_{1/3}=5\text{cm}$



(i) WCN-IR7 ($U=0.0\text{cm/s}$) (ii) WCF-IR7 ($U=10.0\text{cm/s}$) (iii) WCO-IR7 ($U=-10.0\text{cm/s}$)
 (b) $H_{1/3}=7\text{cm}$

Fig. 7.13. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in $x-y$ plane.



(a) $H_{1/3}=5\text{cm}$

(b) $H_{1/3}=7\text{cm}$

Fig. 7.14. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.

7.3 결론

본 장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 다기로 구성된 투과성잠제가 설치된 일정수심의 3차원수치과동수조에 순방향 혹은 역방향흐름이 있는 상태에서 규칙파 및 불규칙파를 조파하여 흐름의 유무와 방향에 따른 잠제 주변 및 배후에서 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대한 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대해 잠제 제간부 배후로 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 낮게 나타나며, 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(2) 평균유속의 공간분포로부터 흐름이 없는 경우가 순방향흐름의 경우와 역방향흐름의 경우보다 잠제 천단상에서 육측으로의 흐름이 강하게 나타나며, 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 육측으로, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 해측으로 연안류가 형성되는 것을 알 수 있다.

(3) 잠제 배후의 개구부 및 제두부 근방에서의 연안류는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 역방향흐름의 경우보다 약하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 수송유량은 흐름이 없는 경우, 순방향흐름의 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 증가하였다. 이러한 결과로부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

(4) 평균난류에너지는 잠제 천단상에서 역방향흐름의 경우가 상대적으로 크게, 순방향흐름의 경우가 상대적으로 적게 나타나며, 시·공간누적평균난류에너지는 개구부 배후의 해안선 근방에서 흐름이 없는 경우, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우 순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 순방향 흐름의 경우, 흐름이 없는 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 나타난다. 이로부터 연안류의 형성과 속도에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

References

- Bellotti, G.(2004). A simplified model of rip currents systems around discontinuous submerged barriers, Coastal engineering, 51(4), 323-335.

- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N.(1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions, *Transport in Porous Media*, 35(3), 395-406.
- Black, K. P. and Andrews, C. J.(2001). Sandy shoreline response to offshore obstacles Part 1: Salient and tombolo geometry and shape, *J. Coastal Research*, 82-93.
- Cáceres, I., Stive, M. J., and Sánchez-Arcilla, A.(2008). Quantification of changes in current intensities induced by wave overtopping around low-crested structures, *Coastal Engineering*, 55(2), 113-124.
- Goda, Y.(1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, *Coastal Engineering*, 84, 56-72.
- Johnson, H. K., Karamabs, T. V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Cáceres, I.(2005). Modeling of waves and currents around submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, 52(10), 949-969.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W. and Kim, D. S.(2017). Characteristics of water surface variations around 3-dimensional permeable submerged breakwaters under the conditions of salient formation, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 335-349.
- Lee, K. H., Bae, J. H., An, S. W., Kim, D. S. and Bae, K. S.(2016). Numerical analysis on wave characteristics around submerged breakwater in wave and current coexisting field by olaFlow, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 332-349.
- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J.(2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater, *Coastal Engineering*, 57(11), 1006-1017.
- Ranasinghe, R. and Turner, I. L.(2006). Shoreline response to submerged structures: a review, *Coastal Engineering*, 53(1), 65-79.
- Sharifahmadian, A. and Simons, R. R.(2014). A 3D numerical model of nearshore wave field behind submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, 83, 190-204.

제 8 장 저전단구조물 주변에서 규칙파 입사조건하 3차원파동장의 수치해석

8.1 서언

LCS에 대한 초기연구는 2차원적인 파랑전달과 소요안정증량에 상대적으로 많이 집중되었다. 파랑 전달과 관련해서는 Iwasaki and Numata(1969), Hattori(1975), Tominaga and Sakamoto(1971), Katayama et al.(1973), Goda and Ahrens(2008), Tanaka(1976) 등과 같은 일본의 많은 연구사례를 예로 들 수 있고, 유럽의 경우는 상대적으로 최근이며, 대표적으로 Allsop and Channel(1989), Calabrese et al.(2002), Buccino and Calabrese(2007), d'Angremond et al.(1996), Seabrook and Hall(1998), van der Meer et al.(2005), Melito and Melby(2002), van der Meer et al.(2000) 및 van der Meer and Daemen(1994)와 같은 연구사례가 보고되어 있다. LCS의 파랑전달에 대해서는 비월파시와 월파시를 구분하여 구조물의 투과층을 통한 파랑에너지 과 월파시 천단상을 통한 파랑에너지의 합으로 전달율을 평가하였다. 그리고, LCS의 안정증량에 대한 연구로는 van der Meer and Pilarczyk(1990), Vidal et al.(1995), Burcharth et al.(2006), Kramer et al.(2005), Kramer and Burcharth(2003), Kudale and Kobayashi(1996), van der Meer et al.(1996) 등과 같은 주로 유럽의 연구사례를 들 수 있다. 한편, 우리나라에서 LCS에 대한 연구는 매우 미진한 수준이며, 최근의 사례로 Lee et al.(2017)의 연구를 들 수 있을 것이다.

한편, LCS에 대한 3차원연구는 대부분이 수리실험에 의해 수행되었으며, 대표적으로 Kramer et al.(2005), Vicinanza et al.(2009) 및 Burcharth et al.(2006) 등을 들 수 있다. 여기서, 3차원수치시뮬레이션에 의한 연구는 매우 미흡한 수준이고, 일부 기존의 연구(Zanuttigh and Lamberti, 2006; Ryu et al., 2007)는 평면파랑이론을 적용하여 파고분포 등의 일부 수리특성을 규명한 수준에 머물고 있으며, 본 연구와 같은 강비선형의 3차원시뮬레이션을 수행한 연구는 거의 없는 것으로 판단된다.

여기서, 제5장~제7장은 3차원수치파동수조에서 규칙파랑 및 불규칙파랑 작용시 설상사주의 형성조건하에 투과성잠제를 대상으로 잠제 주변에서 형성되는 파고분포, 평균수위분포 및 유속의 변동특성 등을 Navier-Stokes solver에 기초한 유한체적법의 수치기법으로 3차원혼상류를 해석하는 공개된 CFD Code인 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)로부터 면밀히 평가하였다. 본 장은 잠제 대신에 LCS를 적용한 경우에 해당한다. LCS의 배치를 잠제의 경우와 동일하게 하여 LCS 주변에서 파고와 유속변화 및 난류운동에너지 등을 도출하고, 구조물의 개구폭, 천단수심과 같은 배치형상의 변화 및 입사파고와 주기와 같은 입사파랑조건 변화에 따른 결과를 잠제의 경우와 비교·검토하여 LCS와 잠제의 각각에 대한 특성의 차이 등을 면밀히 분석·논의한다.

8.2 수치해석결과

8.2.1 계산조건

본 장의 수치해석에서 3차원수치과동수조는 Fig. 8.1(a)과 같은 길이 12.5m, 폭 10m, 높이 0.4m의 수조에 0.25m의 일정수심으로 구성되었고, 그내부에 본 수치해석의 대상구조물인 LCS와 해빈이 설치되었다. 바닥경계는 Slip조건으로 구성되었고, 양측벽경계조건에도 y 축방향으로 LCS가 반복적으로 설치되는 것으로 가정하여 Slip조건을 적용하였다. 격자크기는 $\Delta x=3\text{cm}$ 와 $\Delta y=3\text{cm}$ 이며, 계산효율상 수조바닥에서 수면까지는 $\Delta z=1.4\text{--}0.75\text{cm}$ 의 가변격자로, 수면에서 수조상부경계까지는 $\Delta z=0.75\text{--}1.4\text{cm}$ 의 가변격자로 각각 구성하였으며, 조파시에 z 축으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다. 여기서, G 는 정수위에서 구조물 사이의 개구폭을, L_s 는 정수위에서 구조물의 길이를, S 는 정수위에 대해 해안선에서 구조물까지의 이격거리를 각각 의미한다. 따라서, Black and Andrews(2001)가 제시한 조건에 따르면 설상사주의 형성 조건은 $L_s/S < 1.0$ 로 주어지며, 본 장에서 LCS의 배치조건은 이 조건의 범위에 속하므로 설상사주가 형성되는 조건을 만족한다.

Fig. 8.1(b)는 파랑의 정상상태를 파악하기 위한 수위측정위치의 좌표점을 나타낸다. Fig. 8.1(c)는 본 연구에 작용한 LCS의 형상에 대한 상세도이며, 이는 Lee et al.(2017)에서 적용된 LCS를 참조하여 도출하였다. 여기서, TTP 층은 1:1.5의 경사와 0.1967m의 두께를 갖고 월파를 허용할 때와 허용하지 않을 때를 상정하여 천단고를 $R_c=3\text{cm}$ 와 8cm로 각각 구축하였으며, 공극률 $\phi=0.5$, 중앙입경 $D_{50}=5\text{cm}$, 그리고 다공성매질에 대한 Madsen and White(1975)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=1200$ 과 $\beta=1.7$ 을 적용하였다. 마운드부분은 1:1.5의 경사와 0.1333m의 높이를 가지며, 공극률 $\phi=0.33$, 중앙입경 $D_{50}=3\text{cm}$, 그리고 Jensen et al.(2014)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=500$ 과 $\beta=2.0$ 을 적용하였다. 케이슨의 높이는 0.1467m이고, 불투과성으로 적용하였다. 해빈은 1:20의 경사를 가지며, 공극률 $\phi=0.3$, 중앙입경 $D_{50}=0.2\text{cm}$, 그리고 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha=0$ 과 $\beta=3.0$ 을 적용하였다.

Table 8.1은 수치해석에 적용된 규칙파랑의 제원, 구조물의 개구폭, 구조물의 길이, 구조물의 천단고 및 해안선으로부터 이격거리에 대한 각각의 수치를 나타낸다. 계산은 LES에 의한 난류모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하고, 계산의 안정을 위해 Courant 상수를 0.1 이하가 되도록 설정하여 수치해석을 수행하였다.

8.2.2 정상상태의 판단

본 수치해석에 사용되는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 3차원강비선형수치해석은 시간경과에 따라 반복계산과 수렴계산이 수행되기 때문에 많은 계산시간이 소요되고, 또한 많은 데이터의 양을 발생시킨다. 본 장의 3차원수치해석에서는 대략 528만개의 격자로 구성되었으며, 따라서 본 수치계산의 물리량에 대해 정상상태의 데이터를 취하여야 하는 시간을 알기 위하여, 그리고 물리량에 대한 평균치를 산정하기 위한 파의 수등을 결정하기 위하여 파가 정상상태에 도달하는 시간을 사전에 파악·인지할 필요가 있었다.

여기서, Table 8.1의 05H7G250Rc3의 케이스에 대해 대략 정상상태에 도달한 것으로 추정되는 $t=35s$ 이후의 파의 시간변동을 나타낸 것이 Fig. 8.2이다.

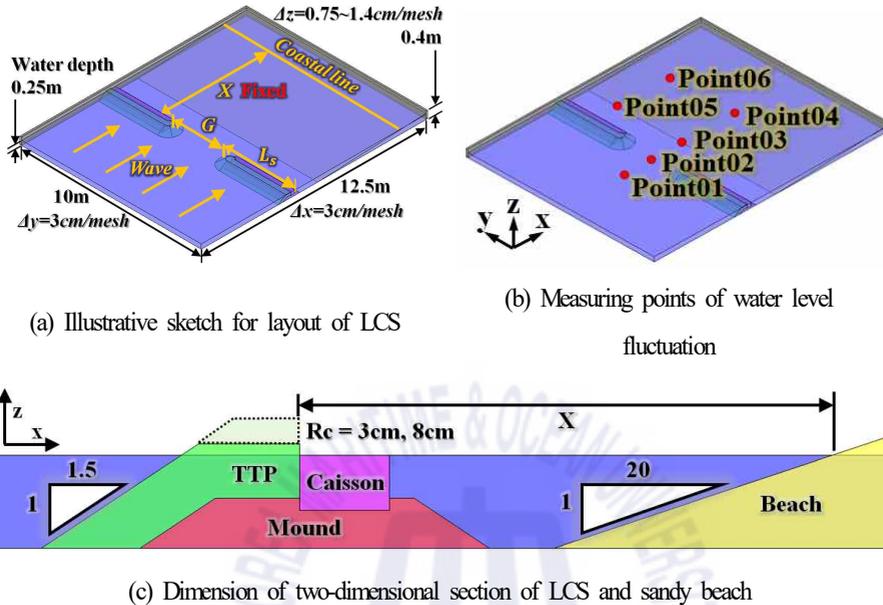


Fig. 8.1. Definition sketch for layout of LCS, measuring points of water level and cross section.

그림을 살펴보면 Fig. 8.2(a)-(d)는 Fig. 8.1(b)에 그의 위치를 나타내는 바와 같이 수조 중앙의 개구부에 위치한 지점에서 파의 시간변동을 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 8.2(a)-(b)-(c)-(d)로 진행할수록 육측의 정선에 가까운 위치를 나타내며, Fig. 8.2(d)는 수심이 얇아진 경우이다. Fig. 8.2(a)-(b)-(c)로 갈수록 파고가 점차로 커져 파봉부분이 뾰족해지지만, 파의 비선형성은 크게 나타나지 않는 것으로 보인다. Fig. 8.2(d)의 경우는 회절의 영향으로 일부의 파가 LCS의 배후로 회절되어 전술한 경우보다 파고가 감소되고, 파곡부분에 비선형파가 발달되는 것을 볼 수 있다. Fig. 8.2(e)와(f)는 LCS의 배후지점에서 파의 시간변동을 나타낸 것으로, Fig. 8.2(f)가 보다 수심이 얇은 경우이다. Fig. 8.2(e)의 경우는 천단상을 월파한 파와 개구부를 통하여 구조물 배후로 회절된 파가 중첩된 결과로 파고가 적고, 파봉부분에 매우 큰 비선형파가 포함된 것을 알 수 있다. Fig. 8.2(f)는 파의 시간변동 전체가 정수위 위에서 나타나므로 이 지점에서는 평균수위상승(wave set-up)이 발생된다는 것을 알 수 있다. 이상으로부터 비록 Fig. 8.2(f)의 경우 $t < 36s$ 에서 완전한 정상상태에 도달하지 않았지만, 전반적으로 $t > 35s$ 이후에는 정상상태의 시간과형을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 파고, 유속 및 그의 평균치 등은 $t > 36s$ 이후의 파를 대상으로 하였고, 평균치는 $t > 36s$ 이후 5개의 파를 평균하

였다.

Table 8.1. Incident wave condition and 3-dimensional layout of LCS.

CASE No.	Crest freeboard from still water level R_c (cm)	Wave maker theory	Incident wave height H (cm)	Incident wave period T (s)	Gap width G (m)	LCS length L_s (m)	Distance between shoreline and LCS S (m)	Over-topping			
01H5G300Rc3	3	Stokes II	5	1.4	3	7	6.5	○			
02H5G250Rc3					2.5	7.5		○			
03H5G200Rc3					2	8		○			
04H7G300Rc3			3		7	○					
05H7G250Rc3			2.5		7.5	○					
06H7G200Rc3			2		8	○					
01H5G300Rc8	8		Stokes II		5	1.4		3	7	6.5	×
02H5G250Rc8								2.5	7.5		×
03H5G200Rc8								2	8		×
04H7G300Rc8					3			7	×		
05H7G250Rc8					2.5			7.5	×		
06H7G200Rc8					2			8	×		

8.2.3 파고분포와 파의 전파

Fig. 8.3은 Table 8.1에 제시된 케이스중에 입사파고가 $H=5\text{cm}$ 인 경우에 LCS 주변, 특히 그의 배후에서 파고분포를 나타낸 것이며, 제5장의 잠제에 관한 결과도 비교·검토를 위하여 병기한다. 여기서, LCS(저면 폭이 1.20m, 천단고가 3cm, 8cm)와 잠제(저면폭이 1.89m, 천단수심이 4cm)의 평면배치에서 개구폭 G 과 구조물의 길이 L_s 및 해안선에서 구조물까지의 이격거리 S 는 동일하다. 하지만, 잠제는 천단이 잠수되어 있으므로 천단수심을 가지는 반면, LCS는 정수면상으로 돌출되어 있으므로 천단고를 가지는 관계로 단면형상이 상이하며, 잠제와 LCS의 구성재료 또한 상이하다.

먼저, 잠제와 LCS에 대한 각각의 파고분포를 비교·검토한다. Figs. 8.3(a)-(c)는 잠제의 경우를, Figs. 8.3(d)-(i)는 LCS의 경우를 각각 나타낸다. 잠제의 경우는 투과성재료로 구성되고, 천단상에 천단수심을 가지는 관계로 천단상과 제체 내부를 통한 파에너지의 전달이 발생하기 때문에 잠제 바로 배후에서 어느 정도의 크기를 갖는 파고를 확인할 수 있다. 개구폭이 줄어드는 경우(Figs. 8.3(a)-(b)-(c))에도 잠제 바로 배후의 파고변화에 거의 차이가 주어지지 않기 때문에 전술한 천단상과 제체 내부를 통한 파에너지의 전달이 많은 부분을 차지하는 것으로 여겨지며, 따라서 잠제의 바로 배후에서는 개구부를 통한 회절의 영향이 상대적으로

로 적다는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 잠제의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파 집중과 파고 증폭으로 배후로 전달되는 파에너지는 줄어들어 배후역에서 파고가 작아지는 결과를 나타낸다.

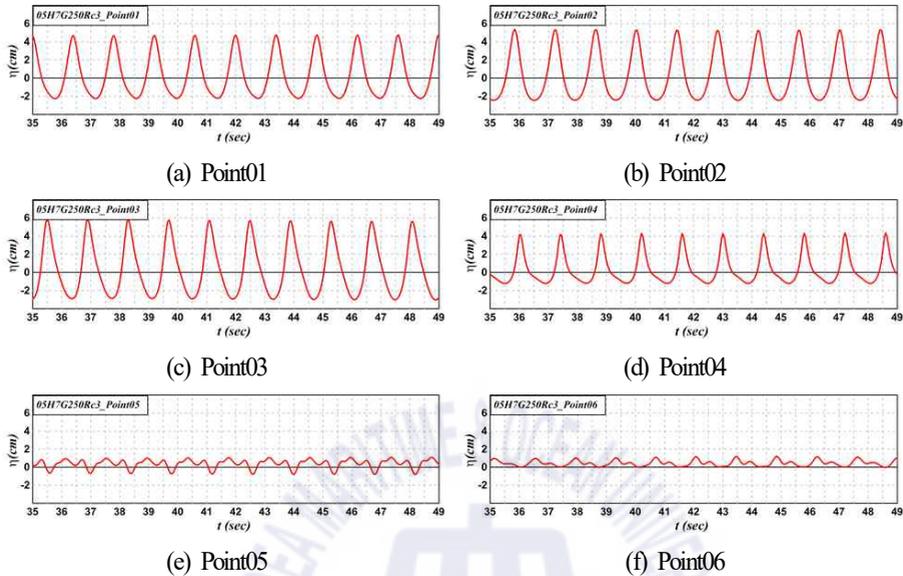


Fig. 8.2. Time variation of water level.

다음에, LCS에서 천단고가 $R_c = 3\text{cm}$ 인 Figs. 8.3(d)-(f)의 경우를 살펴보면 역시 구조물 바로 배후에 작은 파고를 확인할 수 있다. Table 8.1에서 나타난 바와 같이 천단고가 3cm인 경우는 월파가 발생하므로 잠제와 같이 천단상과 TIP 내부를 통한 파에너지의 전달로 인하여 바로 배후에서 약간의 파고가 발생되는 것으로 판단된다. 개구폭이 좁아짐에 따라 구조물 배후역에서 전체적으로 파고가 줄어드는 현상은 개구부를 통하여 배후로 전달되는 파에너지가 줄어들기 때문이다. 구조물 바로 배후에서 파고의 변화에 큰 차이를 나타내지 않는 것은 잠제와 같이 월파와 제체 내부를 통한 파에너지 전달이 커고, 반면에 구조물 바로 배후에서는 회절의 영향이 적다는 것을 나타낸다. 한편, 개구부 배후에서 파고가 줄어드는 경향은 잠제의 경우와 동일하지만, 개구폭이 좁아짐에 따라 잠제의 경우와는 달리 LCS의 경우는 개구부 중앙에서 파 집중과 파고 증폭이 줄어든다. 한편, 항외측인 구조물 전면에서는 전반적으로 잠제의 경우보다 다소 큰 부분 증폭과 동장이 형성되는 것을 알 수 있으며, 이는 LCS에 적용된 불투과성의 케이슨에 의한 큰 반사의 영향으로 판단된다.

Figs. 8.3(g)-(i)는 천단고가 $R_c = 8\text{cm}$ 로 구조물의 천단상으로 월파가 발생하지 않는 경우이다. 구조물 바로 배후에서 회절파의 영향과 개구폭이 좁아질수록 구조물 배후에서 파고 분포의 변화, 개구부에서 파 집중 및 파고 증폭과 같은 변동양상은 월파가 발생하는 Figs. 8.3(d)-(f)의 경우와 대체적으로 동일하다. 여기

서, 월파시 Figs. 8.3(d)-(f)의 경우와 비월파시 Figs. 8.3(g)-(i)의 경우가 구조물 배후에서 거의 동일한 파고변동과 파고분포를 나타내는 것은 비월파시 Figs. 8.3(g)-(i)의 경우는 케이슨을 전체적으로 포복하는 TTP 부분의 천단고가 높아 월파되지 않아 체체 내부를 통한 파에너지 전달이 많아지는 반면, 월파시 Figs. 8.3(d)-(f)의 경우는 TTP의 천단고가 낮아 내부를 통한 파에너지 전달은 상대적으로 적어지고 천단상 월파로 인한 파에너지 전달이 상대적으로 많이 발생하기 때문이다. 따라서, 본 수치해석에서 적용한 파랑조건과 구조물의 형상조건에 대해 비월파시 내부를 통해 전달되는 파에너지는 월파시 내부를 통한 파에너지와 천단을 통한 파에너지의 합과 거의 동일하다는 것이 추정될 수 있다.

Fig. 8.4(Figs. 8.3과 8.4에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)는 Table 8.1에서 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 인 경우 LCS 주변에서 파고분포를 나타낸 것이며, 또한 조건에 대응하는 잠제에 관한 제5장의 결과도 비교·검토를 위하여 병기한다. 전술한 Fig. 8.3의 경우와 비교하면 입사주기는 동일한 $T=1.4\text{s}$ 이지만, 입사파고가 $H=7\text{cm}$ 로 증가되었기 때문에 전체적으로 구조물 배후역에서 파고는 상대적으로 큰 값을 나타내고, 두부에서 회절이 적게 발생되어 해안선 근방까지 큰 파가 유입된다. 잠제에 대한 Figs. 8.4(a)-(c)의 경우는 전술한 Figs. 8.3(a)-(c)와 동일하게 개구폭이 좁아짐에 따라 배후역에서 파고가 전체 공간에 대해서는 다소 줄어들고, 개구부에서 파 집중과 파고 증폭이 나타난다. 반면에 잠제 바로 배후에서 파고가 커지는 것은 두부에서 회절의 영향이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 판단된다. 다음으로, 잠제와 LCS의 경우를 비교하면 전체적으로 LCS의 경우가 다소 적은 파고를 나타내고, 두부에서 회절현상이 상대적으로 약간 큰 경향을 나타낸다. LCS에서 개구폭의 감소에 따른 차이는 배후에서 파고가 줄어드는 것은 Fig. 8.3의 경우와 동일하지만, 회절의 영향이 감소하는 것은 Fig. 8.3의 경우와 약간 상이하다.

Figs. 8.4(g)-(i)는 천단고가 $R_c=8\text{cm}$ 로 구조물의 천단상으로 월파가 발생하지 않는 경우이며, 월파가 발생하는 Figs. 8.4(d)-(f)의 경우와 구조물 바로 배후에서 회절파의 영향과 개구폭이 줄어들어 따라 구조물 배후역에서 파고분포의 변화, 개구부에서 파 집중 및 파고 증폭과 같은 변동양상이 대체적으로 동일하다.

Fig. 8.5는 Table 8.1에서 제시된 05H7G250Rc3의 케이스에 대해 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. LCS의 전면에서 부분중복파가 형성되어 파봉선이 구조물의 길이방향과 평행하게 나타나고, LCS의 천단상을 월파하며, 개구부를 통하여 파에너지가 유입되고, 두부에서 구조물에 의해 차폐된 배후역으로 파가 회절되어 유입되며, 해안선 근방에서 파고가 크게 줄어든 상태로 정선에 거의 직각으로 입사되는 과정을 시각적으로 명확하게 파악할 수 있을 것이다.

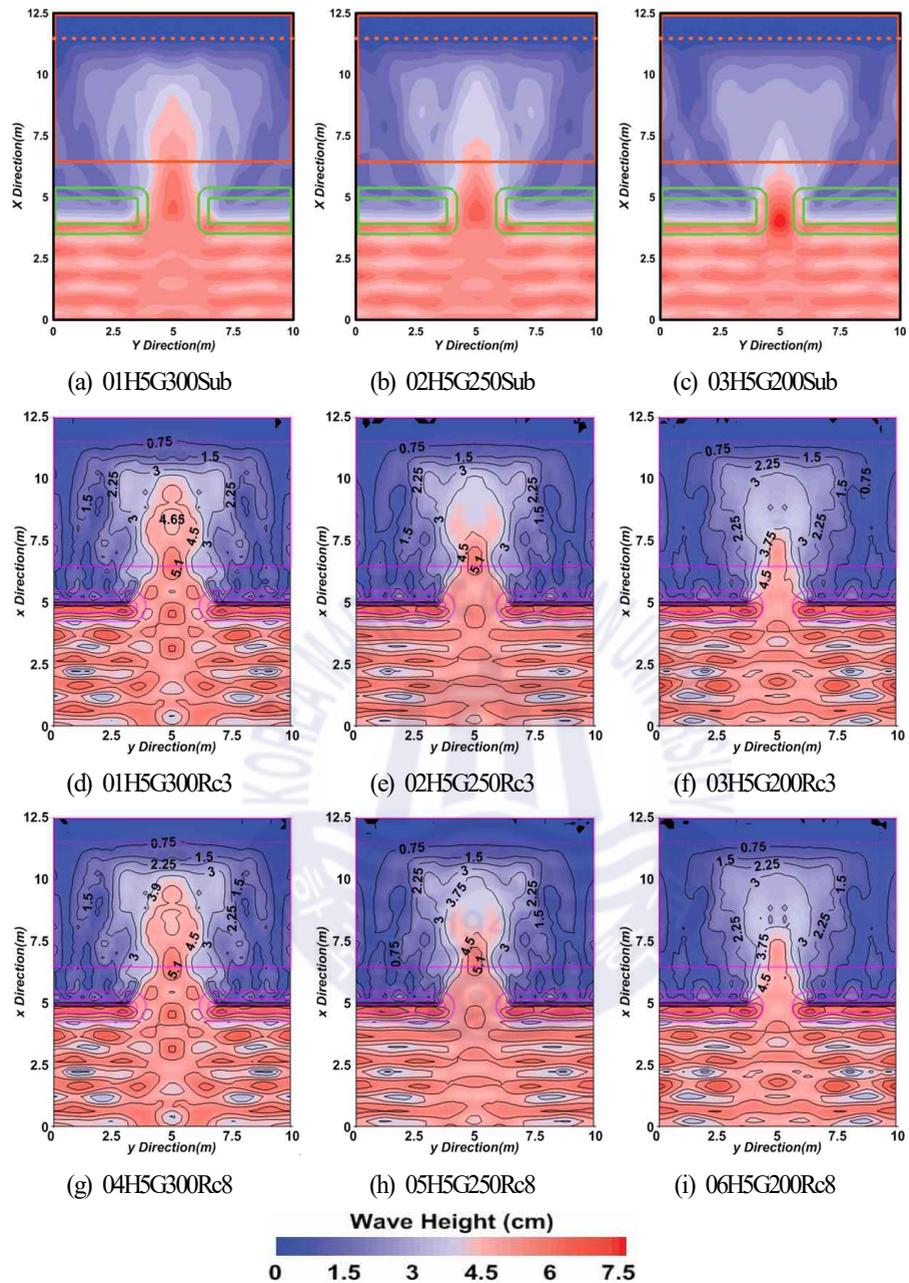


Fig. 8.3. Spatial distribution of simulated wave heights according to the change of gap width ($H=5\text{cm}$).

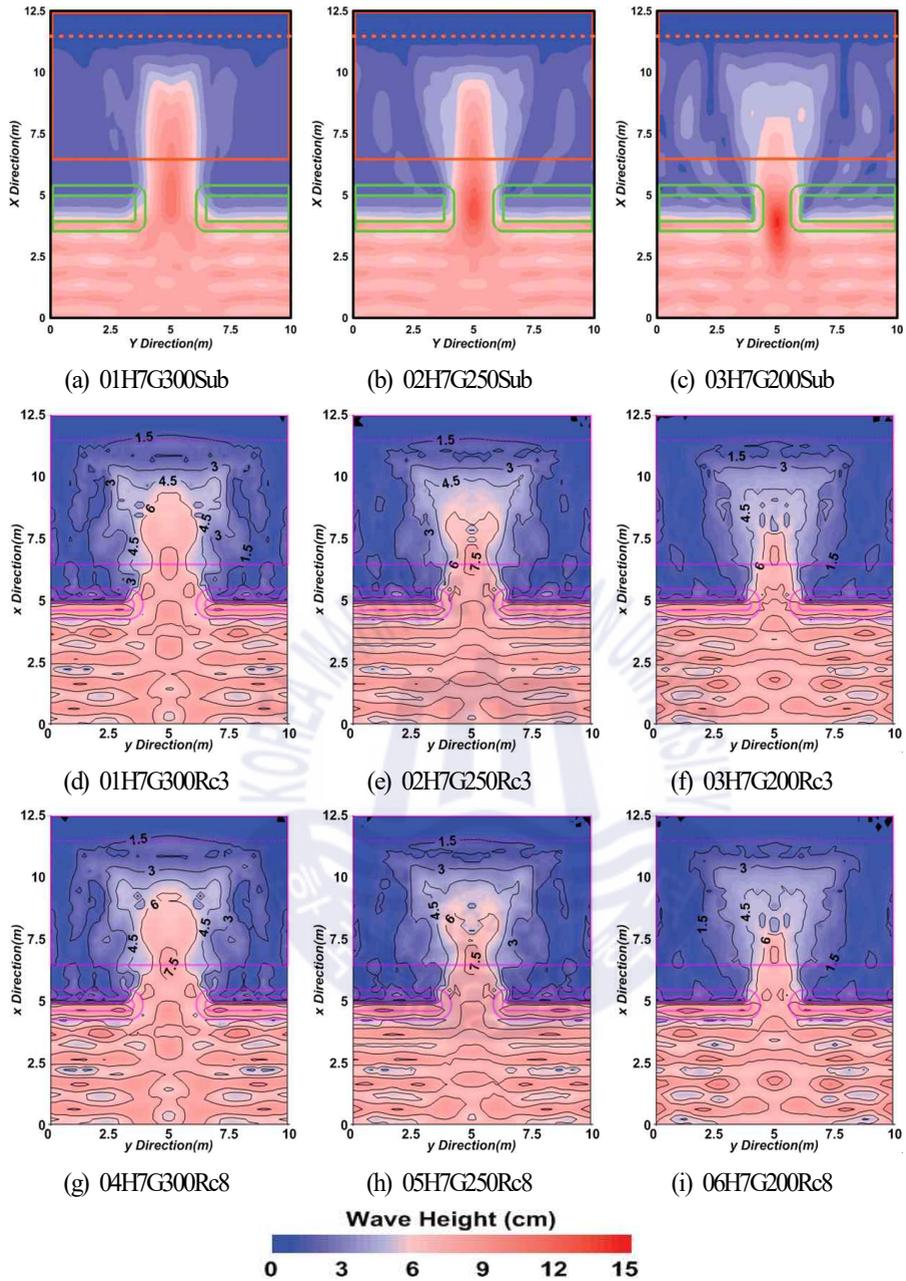


Fig. 8.4. Spatial distribution of simulated wave heights according to the change of gap width ($H=7\text{cm}$).

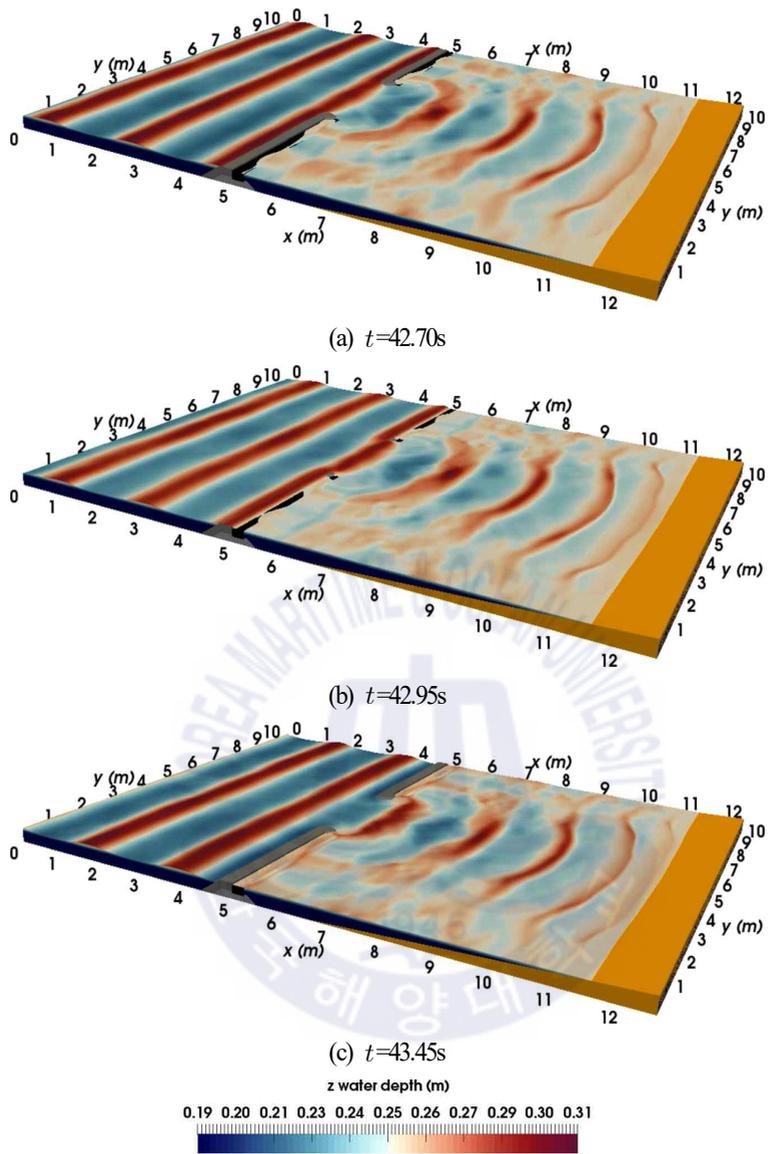


Fig. 8.5. Snapshots of wave diffraction behind LCS(05H7G250Rc3).

8.2.4 평균유속

Figs. 8.6과 8.7(두 그림에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)는 전술한 Figs. 8.3과 8.4와 동일한 한 케이스에 대해 LCS 주변, 특히 그 개구부와 배후에서 유속을 시간평균하고, 그리고 연직방향으로 평균한 유속을 나타낸 것이며, 잠제에 관한 제5장의 결과도 비교·검토를 위하여 병기한다. 여기서, LCS와 잠제는 8.2.33절에서 기술한 것과 동일한 단면, 평면배치 및 구성재료를 갖는다.

먼저, 잠제의 경우를 살펴보면 개구부에서 항내측에서 항외측으로의 강한 평균유속(흐름)이 발생하고, 이는 개구폭이 좁을수록 강해진다. 잠제의 천단상에서는 월류에 의한 강한 항내측 흐름이 발생하고, 개구폭이 넓을수록 해안선 근방에서 좌우측으로 발산하는 연안류 및 순환류가 발생한다. 잠제와 LCS의 경우를 비교하면 전체적으로 LCS에 의한 차폐역인 배후 $5m < x < 8.2m$ 구간에서 흐름양상이 잠제의 경우보다 상당히 복잡한 패턴을 나타내고, 개구부에서 항외측으로 흐르는 이안류의 크기가 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다. 그리고, 해안선 근방에서 해빈류 패턴에 대해 LCS의 경우는 수렴하는 연안류가, 잠제의 경우는 발산하는 연안류가 각각 발생하는 것이 큰 차이이며, 이로 인하여 궁극적으로 해안선 근방에서 후술하는 난류운동에너지 및 모레이동에서의 차이로 나타날 것으로 판단된다.

LCS의 경우 월파시의 Figs. 8.6(d)-(f)와 비월파시의 Figs. 8.6(g)-(i)를 비교하면 동일한 입사파고에 대해 천단고차이에 따른 해빈류의 차이는 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 8.2.3절의 파고분포에서 서술한 바와 같이 비월파시 Figs. 8.3(g)-(i)의 경우는 제체 내부를 통한 흐름이 많아지는 반면, 월파조건인 Figs. 8.3(d)-(f)의 경우는 제체 내부를 통한 흐름은 상대적으로 적고, 천단상 월류로 인한 흐름이 상대적으로 크게 발생하여 비월파시와 월파시 LCS 전체를 통한 유입흐름의 차이는 거의 없기 때문인 것으로 판단된다. 단지, 본 수치계산조건하에서는 개구폭의 너비에 따른 차이가 강하게 나타나며, 즉 개구폭이 넓어질수록 개구부에서 항외측으로 흐르는 이안류는 약해지고, 해안선 근방에서 연안류는 수렴되는 경향이 보다 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서, LCS 배후 $5m < x < 8.2m$ 구간에서 복잡한 흐름패턴을 나타내는 것은 LCS 천단상을 통한 월류와 제체 내부를 통한 흐름이 구조물의 길이방향으로 일정하지 않고, 그리고 두부에서 회절파에 의한 흐름과 상호간섭이 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

다음으로, 입사파고가 $H=7cm$ 로 증가된 Fig. 8.7을 살펴보면 잠제의 경우 해안선 근방에서 연안류가 상대적으로 명확히 나타나고, 또한 발산하는 경향을 나타낸다. 그리고, 개구부에서 항외측으로의 이안류가 보다 강하게 되는 것을 알 수 있다. LCS의 경우는 전술한 $H=5cm$ 의 경우보다 개구부에서 이안류 및 해안선 근방에서 수렴하는 연안류의 강도가 보다 강해지지만, 비월파시와 월파시에 대한 차이는 전술한 경우와 동일하게 거의 나타나지 않는다.

8.2.5 평균난류운동에너지

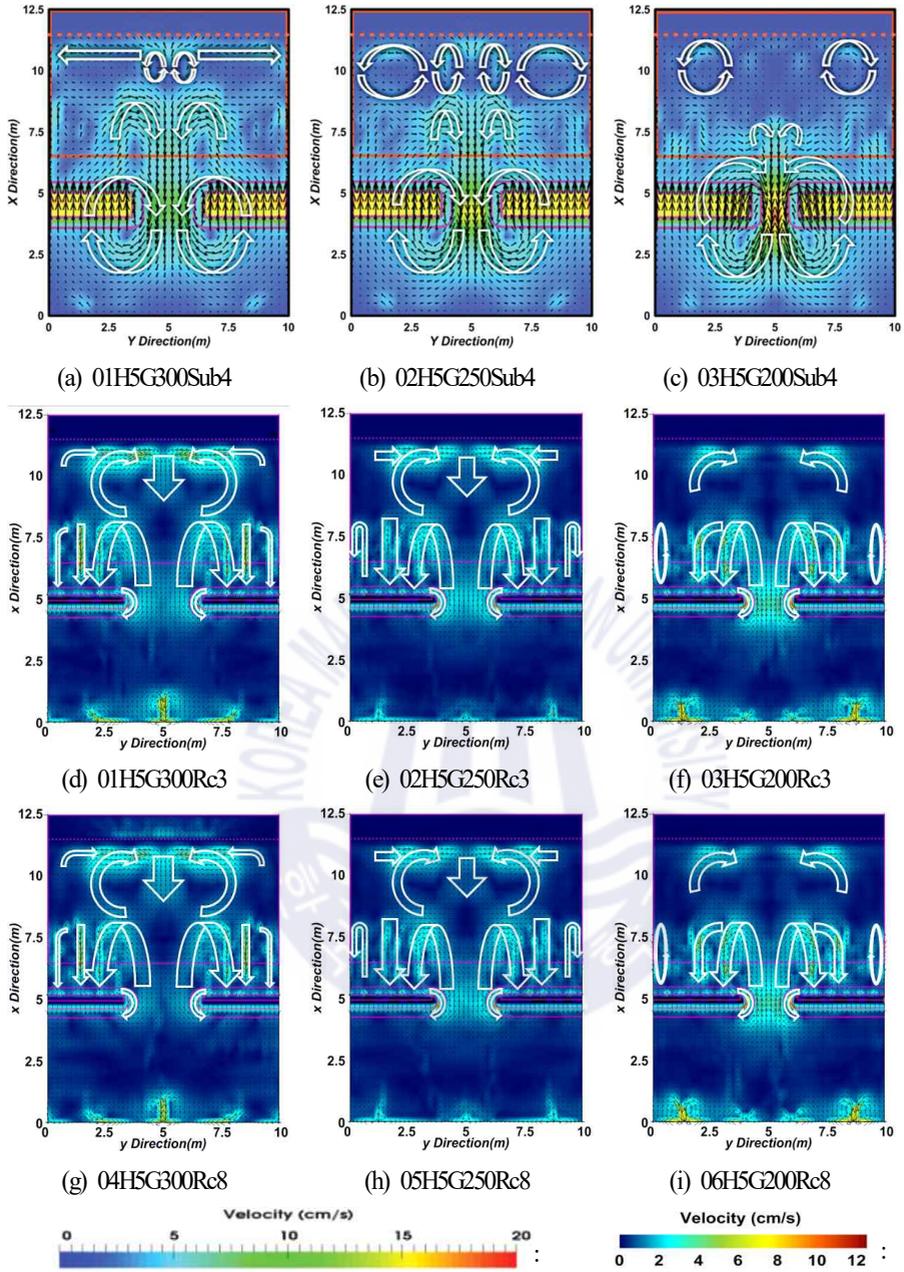
Figs. 8.8과 8.9(두 그림에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)는 전술한 Figs. 8.6과 8.7과 동일한 케이스에 대해 시간평균난류에너지를 연직방향으로 평균한 평균난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 결과이다. 입사파고 $H=5cm$ 인 Fig. 8.8을 살펴보면 잠제의 경우는 개구부를 향해 열려있는 해안선 근방의 중앙부에서 큰 값을 나타내고, 이를 중심으로 해안선에 평행한 좌·우측으로 감소하는 값의 변화를 나타낸다. 그리고, 잠제의 천단상에서도 평균난류에너지가 큰 값이 분포하는 것을 알 수 있다. 이러한 값의 공간분포는 개구폭이 좁아질수록 연안방향으로 다소 좁아지지만, 거의 동등한 분포양상을 나타내고, 값의 크기는

줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

LCS의 경우 천단고가 $R_c=3\text{cm}$ 의 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 잠제의 경우와 대체로 유사하지만, 해안선 근방에서는 잠제의 경우보다 종단방향의 분포폭이 넓어지고, 극대치 3개가 거의 동일한 위치에 명확히 나타나는 것은 잠제와 다르다. 또한, 이러한 값의 크기는 잠제의 경우와 동일하게 개구폭이 좁아질수록 줄어드는 것을 볼 수 있다. 여기서, LCS의 항내측 천단상에서 평균난류에너지의 값이 크게 나타나는 것은 천단상에서의 월류에 따른 난류강도가 강하게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 다음으로, 비월파인 천단고가 $R_c=8\text{cm}$ 인 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 전술한 잠제나 월파가 발생하는 $R_c=3\text{cm}$ 의 경우와 유사한 분포양상을 나타낸다. 그러나, 월파가 발생하는 LCS에 대한 케이스의 경우보다 전반적으로 분포폭이 적어진다는 것을 알 수 있다.

입사파고가 $H=7\text{cm}$ 로 증가된 Fig. 8.9로부터 다음을 확인할 수 있다. 잠제의 경우는 개구부를 향해 열려있는 해안선 근방의 중앙부에서 큰 값을 나타내고, 이를 중심으로 해안선에 평행한 좌·우측으로 감소하는 것은 전술한 Fig. 8.8의 경우와 유사한 결과이다. 그러나, 공간분포는 개구폭이 좁아질수록 연안방향으로 분포폭이 넓어지는 반면, 종단방향으로 다소 많이 좁아지는 경향을 나타내는 것은 전술한 Fig. 8.8의 경우와 상이한 결과이다. 그리고, 잠제의 천단상에서도 평균난류에너지가 큰 값이 분포하는 것을 Fig. 8.8의 경우와 동일하다.

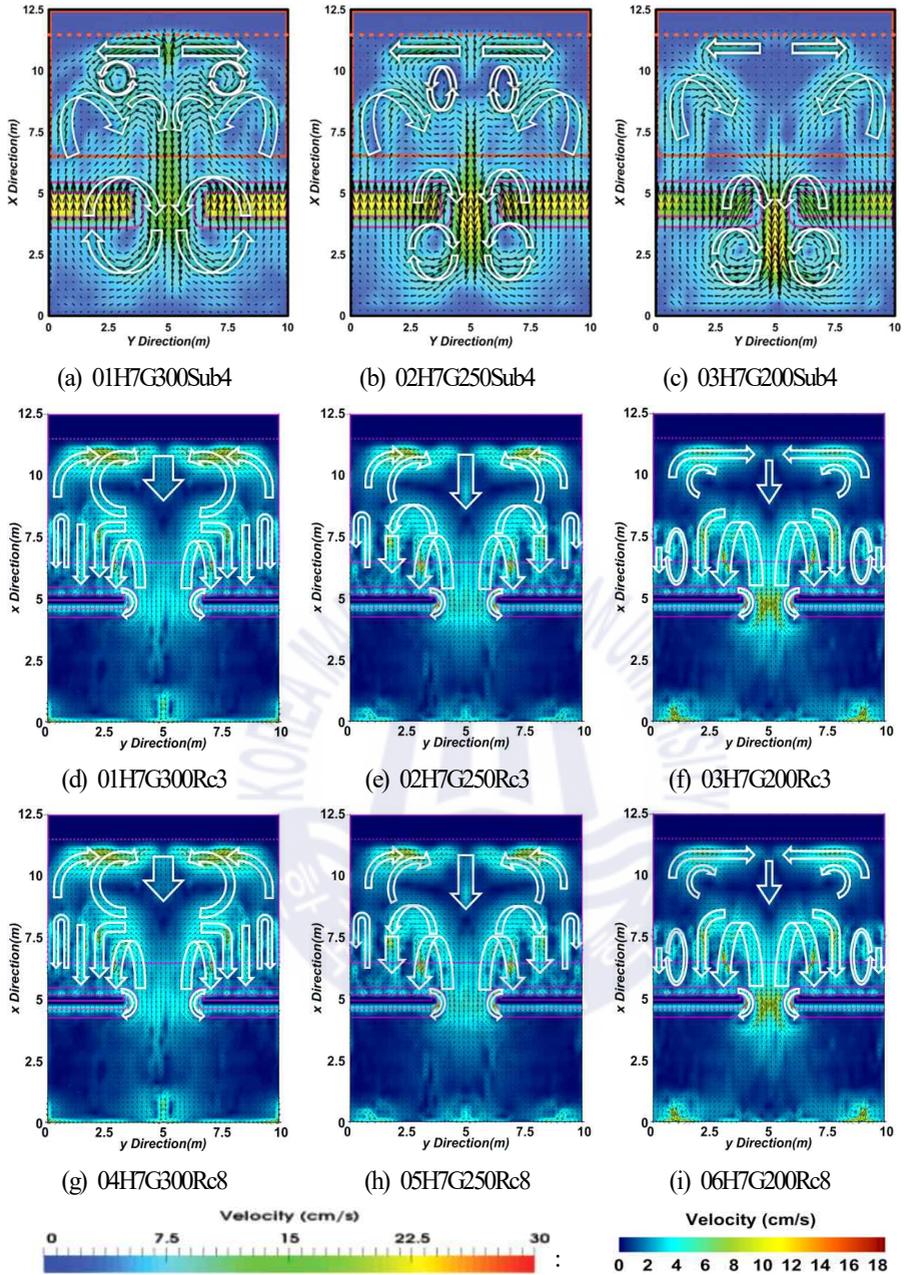
LCS의 경우 천단고가 $R_c=3\text{cm}$ 의 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 잠제의 경우와는 달리 해안선 근방에서 연안방향으로 분포폭이 넓고, 극대치 3개가 거의 동일한 위치에 명확히 나타나는 것을 볼 수 있다. LCS에서 값의 크기는 잠제의 경우와 동일하게 개구폭이 좁아질수록 줄어든다. 비월파인 천단고가 $R_c=8\text{cm}$ 인 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 전술한 잠제나 월파가 발생하는 $R_c=3\text{cm}$ 의 경우와 유사한 분포양상을 나타낸다. 그러나, 월파가 발생하는 LCS에 대한 케이스의 경우보다 값이 약간 적어진다는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 잠제와 LCS에서 나타나는 평균난류에너지에 대한 공간분포의 차이는 전술한 파고 및 흐름에서의 차이와 중첩되어 최종적으로 모래이동에서의 차이로 이어질 것으로 판단된다.



submerged breakwater

LCS

Fig. 8.6. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane($H=5\text{cm}$).



submerged breakwater

: LCS

Fig. 8.7. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane($H=7\text{cm}$).

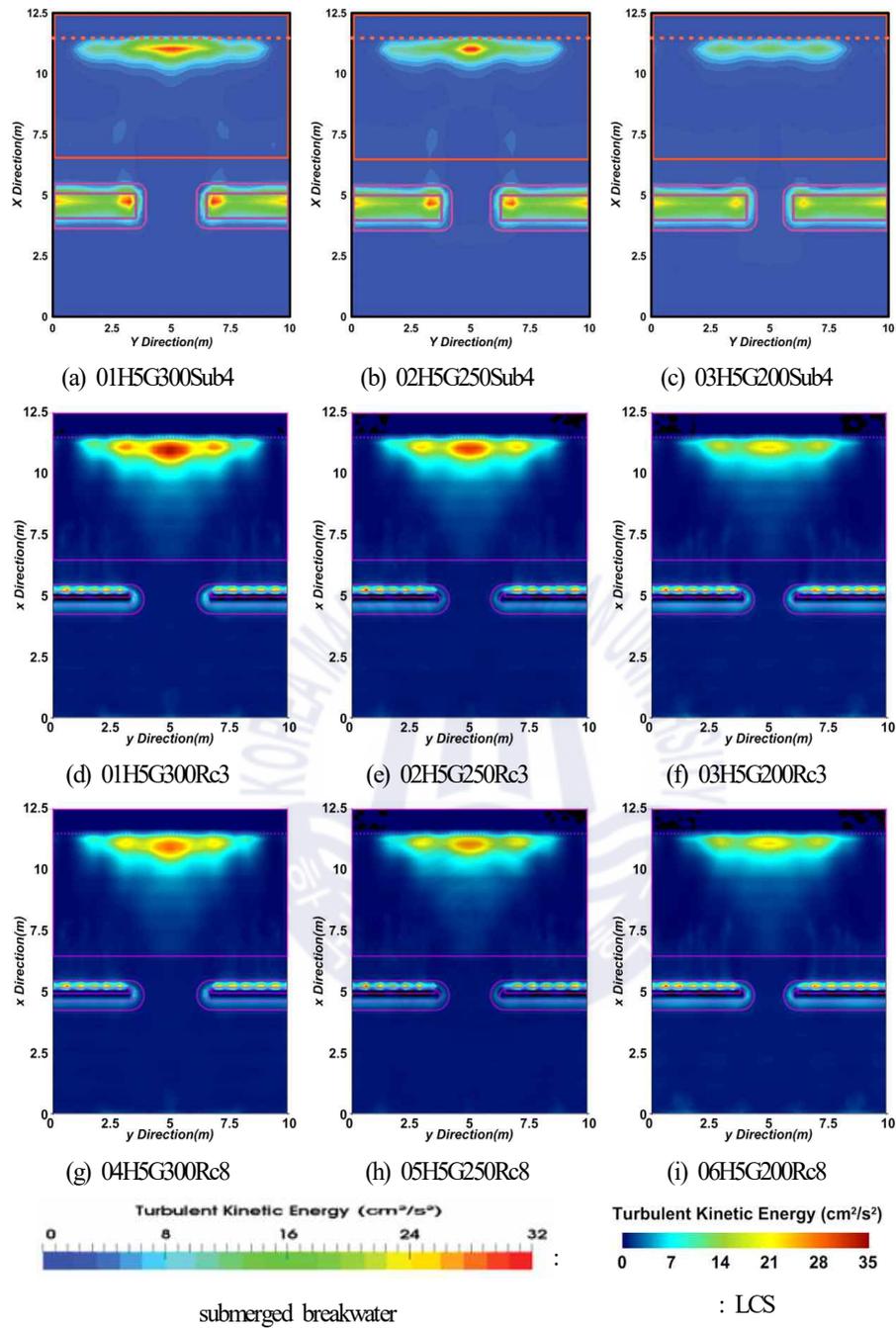
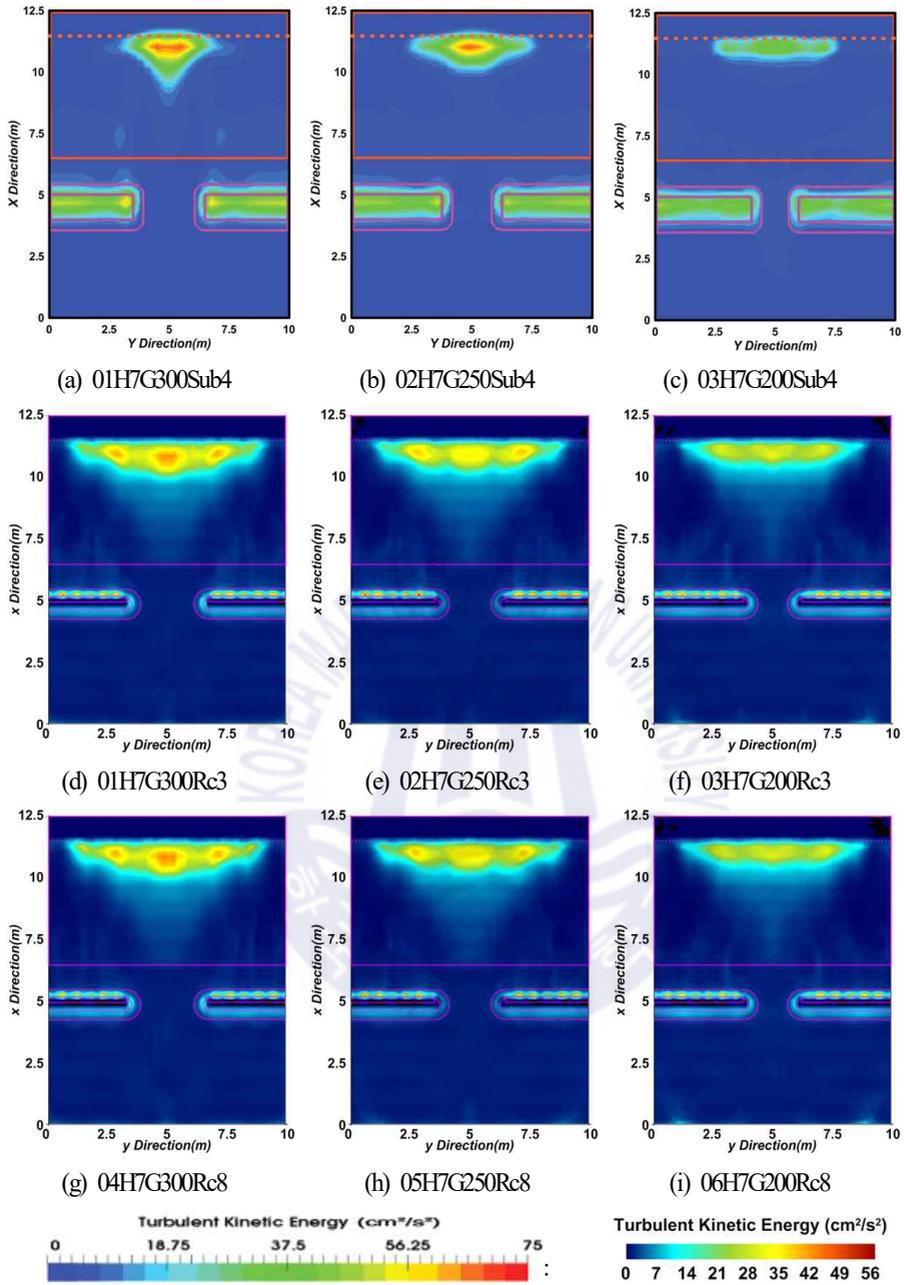


Fig. 8.8. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane ($H=5\text{cm}$).



submerged breakwater

: LCS

Fig. 8.9. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane($H=7\text{cm}$).

8.3 결론

본 장에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원 혼상류의 해석법인 공개된 CFD Code인 olaFlow 모델 (Higuera et al., 2015)을 이용하여 규칙파동장하 3차원 투과성 구조물인 LCS에 의한 파고, 평균유속(흐름) 및 평균 난류 운동에너지 등을 수치해석하였다. 실제 수치해석에서는 LCS에 관해 월파여부가 중요한 차이를 나타낼 것으로 판단하여 파고와 천단고를 변화시켰고, 또 다른 해빈유실대책공법으로 적용되는 잠제와의 역학적 차이점을 규명한다는 차원에서 동일한 파랑조건과 개구부폭에 대해 잠제의 경우와 비교·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·서술한다.

(1) 파고의 공간분포: LCS의 경우, 항외측에서는 구조물에 의한 반사파의 영향으로 큰 파고의 부분 반사파동장이 형성된다. 항내측에서는 항외측보다 정온한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 입사파고가 작을수록 항내측의 파고가 줄어든다. 이러한 항내측의 파고에는 천단상으로 월파 및 체체내를 통한 파랑에너지의 전달 및 두부에서 회절파의 영향을 크게 받을 수 있지만, 본 수치계산에 따르면 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월파 여부는 항내측의 파고분포와 그의 크기에 거의 영향을 미치지 않는다. 잠제와 LCS의 차이는 잠제의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파집중과 파고 증폭의 현상이 보다 강해지고, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어드는 반면, LCS의 경우 개구폭이 좁아짐에 따라 개구부 중앙에서 파집중과 파고 증폭의 현상이 미미해지고, 배후로 전달되는 파에너지가 줄어든다.

(2) 평균유속의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점으로 수렴하는 연안류가 발생하며, 이는 개구폭이 넓을수록 강해진다. 개구부에서는 이안류가 발생하며, 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 강해진다. 연안류와 이안류의 크기는 전체적으로 입사파고가 클수록 커진다. 한편, 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류여부가 평균유속에 미치는 영향은 거의 나타나지 않는다. 여기서, 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 좌·우측으로 발산하는 연안류가 발생하고, 해안선 근방의 항내측과 잠제 개구부와 개구부 근방의 천단상에 걸쳐 순환류가 형성되며, 이것이 평균유속의 공간분포에서 LCS와의 차이로 판단된다.

(3) 평균 난류 운동에너지의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 가장 큰 값이 주어지고, 이를 중심으로 좌·우측의 연안방향으로 갈수록 값이 감소한다. 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 분포값이 줄어드는 반면, 입사파고가 커지면 보다 커진다. 한편, 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류여부에 대해서는 비월파의 경우에 평균 난류 운동에너지에 미치는 영향이 줄어든다. 여기서, 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 좌·우측으로 갈수록

감소하고, 개구폭이 좁을수록 값의 크기가 또한 감소하는 경향은 LCS와 동일한 현상이지만, 입사파고가 커지면 LCS의 경우보다 해안선 근방에서 종단방향으로 분포폭이 보다 넓어지는 것이 LCS와의 차이로 판단된다.

References

- Allsop, N.W.H. and Channel, A.R.(1989). Wave reflections in harbours: reflection performance of rock armoured slopes in random waves. Hydraulic Research, Wallingford, Report OD, 102.
- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N.(1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions. *Transport in Porous Media*, 35(3), 395-406.
- Black, K.P. and Andrews, C.J.(2001). Sandy shoreline response to offshore obstacles, Part 1: Salient and tombolo geometry and shape. *J. Coastal Research*, 82-93.
- Buccino, M. and Calabrese, M.(2007). Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, 133(3), 213-224.
- Burcharth, H.F., Kramer, M., Lamberti, A. and Zanuttigh, B.(2006). Structural stability of detached low crested breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(4), 381-394.
- Calabrese, M., Vicinanza, V. and Buccino, M.(2002). Large scale experiments on the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves. *Proceedings of 28th ICCE, ASCE, 1900-1912*.
- D'Angremond, K., Van der Meer, J.W. and De Jong, R.J.(1996). Wave transmission at low crested structures. *Proceedings of 25th ICCE, ASCE, 3305-3318*.
- Ghosal, S., Lund, T., Moin, P. and Akselvoll, K.(1995). A dynamic localization model for large-eddy simulation of turbulent flows. *J. Fluid Mechanics*, 286, 229-255.
- Goda, Y. and Ahrens, J. P.(2008). New formulation of wave transmission over and through low-crested structures. *Proceedings of 31th ICCE, ASCE, 3530-3541*.
- Hattori, M.(1975). Coastal development and wave control, *Lecture Series on Hydraulic Engineering, 75-B2, Hydraulic Committee, JSCE, B2-1-B2-24*.(in Japanese)
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Iwasaki, T. and Numata, A.(1969). A study on wave transmission coefficient of permeable

- breakwater. Proceedings of 16th Coastal Engineering, JSCE, 329-334.(in Japanese)
- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D. (2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, Coastal Engineering, 84, 56-72.
 - Katayama, T., Irie, I. and Kawakami, T.(1973). Effects of Niigata Coast offshore breakwaters on beach protection and wave attenuation. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 519-524.(in Japanese)
 - Kramer, M. and Burcharth, H.F.(2003). Stability of low-crested breakwaters in shallow water short crested waves. Coastal Structures, Portland, USA.
 - Kramer, M., Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., Vidal, C. and Gironella, F.X.(2005). Laboratory experiments on low-crested breakwaters. Coastal Engineering, 52, 867-885.
 - Kudale, M.D. and Kobayashi, N.(1996). Hydraulic stability analysis of lee side slopes of overtopped breakwaters. Proceedings of 25th ICCE, ASCE, 1721-1734.
 - Lee, D.S., Lee, K.J., Yoon, J.S. and Oh, S.H.(2017). Prediction of mean water level rise behind low-crested structures and outflow velocity from openings by using a hybrid method based on two dimensional model test and hydrodynamic numerical modeling, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 29(6), 410-418.
 - Madsen, O.S. and White, S.M.(1975). Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwaters, Tech rept. No. 207, Parsons Lab, Dept of Civil Engrg., MIT.
 - Melito, I. and Melby, J.A.(2002). Wave runup, transmission, and reflection for structures armoured with CORE-LOC. Coastal Engineering, 45, 33-52.
 - Ryu, H.J., Shin, S.H., Hong, K.Y., Hong, S.W. and Kim, D.Y.(2007). A Simulation of directional irregular waves at Chagui-Do sea area in Jeju using the Boussinesq wave model. Journal of Ocean Engineering and Technology, 21(1), 7-17.
 - Seabrook, S.R. and Hall, K.R.(1998). Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters. Proceedings of 26th ICCE, ASCE, 2000-2013.
 - Tanaka, N.(1976). Wave deformation and beach stabilization capacity of wade-crested submerged breakwaters. Proceedings of 23rd Coastal Engineering, 152-157.(in Japanese)
 - Tominaga, M. and Sakamoto, T.(1971). Field measurements of wave attenuation by offshore breakwaters. Proceedings of 18th Coastal Engineering, 149-154.(in Japanese)
 - Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B.(2005). Wave transmission and

reflection at low-crested structures: design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering*, 52, 915–929.

- Van der Meer, J.W and Daemen, I.F.R.(1994). Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 120(1), 1-19.
- Van der Meer, J.W., and Pilarczyk, K.W.(1990). Stability of low-crested and reef breakwaters, *Proceedings of 22nd ICCE*, ASCE, Delft, the Netherlands.
- Van der Meer, J.W., Regeling, H.J. and De Waal, J.P.(2000). Wave transmission: spectral changes and its effects on run up and overtopping, *Proceedings 27th ICCE*, ASCE, 2156-2168.
- Van der Meer, J.W., Tutuarima, W.H. and Burger, G.(1996). Influence of rock shape and grading on stability of low-crested structures, *Proceedings 25th ICCE*, ASCE, 1957-1970.
- Vicinanza, D., Cáceres, I., Buccino, M., Gironella, X. and Calabrese, M.(2009). Wave disturbance behind low-crested structures: diffraction and overtopping effects. *Coastal Engineering*, 56, 1173-1185.
- Vidal, C., Losada, M.A. and Mansard, E.P.D.(1995). Stability of low-crested rubble-mound breakwater heads. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 121(2), 114-122.
- Zanuttigh, B. and Lamberti, A.(2006). Experimental analysis and numerical simulations of waves and current flows around low-crested rubble-mound structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 132.

제 9 장 결론

9.1 제 2장에서 결론

제2장에서는 본 연구 전체를 통하여 수치해석법으로 적용되는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의 적용성·타당성을 기존의 수치해석결과 및 수리실험결과와 비교로부터 논의·검토하였다. 비교에서는 불투과성구조물과 투과성구조물, 흐름(순방향과 역방향)의 유무, 2차원구조물과 3차원구조물, 단파, 규칙파 및 불규칙파 등의 여러 다양한 조건과 조합하여 검증을 실시하였다. 이로부터 Navier-Stokes solver에 의한 혼상류해석, 유한체적이산화법, VOF 법 및 LES 난류해석에 기초한 강비선형의 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)의 적용성·타당성을 충분히 검증할 수 있었으며, 불규칙파의 조파파랑에 대한 주파수스펙트럼의 분석으로부터 본 연구에 의해 조파된 불규칙파의 타당성도 충분히 검증할 수 있었다. 따라서, 이후 본 연구의 각 장에서 도출되는 수치해석결과의 타당성이 충분히 입증되는 것으로 판단된다.

9.2 제 3장에서 결론

제3장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 통하여 투과성잠제가 설치된 일정수심의 수치파동 수로에 역방향 혹은 순방향 흐름이 있는 상태에서 규칙파를 조파하여 잠제 주변에서 수위변동과 그의 주파수스펙트럼, 파고의 분포, 쇄파형상, 평균흐름 및 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지 등과 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 파고에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제의 전면부에서는 역방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높지만 잠제 천단 상의 전반부에서 후면부까지는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게 나타난다.

(2) 쇄파형상에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부 및 흐름의 방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형 쇄파를 나타내며, 순방향의 흐름의 경우는 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 중국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타낸다.

(3) 평균유속에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 흐름이 없는 경우와 순방향 흐름의 경우에 잠제 전면 비탈면 앞에서 반시계방향의 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 순방향 흐름의 경우가

상대적으로 강하다.

(4) 평균난류에너지에 대해, 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 잠제 전단부에서 난류에너지가 적게 나타난다.

(5) 시·공간누적평균난류에너지에 대해, 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 미미하지만 잠제 전면 비탈면을 지나서부터는 차이가 크게 나타나며, 역방향 흐름의 경우가 가장 큰 값을 가지며, 공간과고변화와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되고, 이와 더불어 배후사면에서 반사율과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 공간과고변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

9.3 제 4장에서 결론

제4장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)에 의한 수치해석으로부터 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 수치과동수로에 역방향 혹은 순방향흐름이 있는 상태에서 불규칙파를 조파하여 잠제 주변에서 수위변동과 그의 주파수스펙트럼, 파고분포, 쇄파형상, 평균흐름 및 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지 등과 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 제곱평균제곱근파고에 대해, 배후사면의 모래 혹은 자갈의 여부에 관계없이 잠제의 전면부에서는 역방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 제곱평균제곱근파고가 높지만 잠제 전단상의 전단부에서 후면부까지는 순방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높게 나타난다.

(2) 쇄파형상에 대해, 배후사면이 모래인 경우는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄파를 나타내며, 순방향흐름의 경우는 초기에는 권파형쇄파를 보이다가 중후에는 파봉이 부서지는 붕괴파형쇄파를 동시에 나타낸다. 배후사면이 자갈인 경우에는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄파만을 나타내지만 그의 규모는 모래의 경우보다 약하다.

(3) 평균유속에 대해, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 순방향흐름의 경우에만 잠제 전면의 비탈면 앞에 반시계방향의 순환셀이 형성되고, 잠제 전면의 해저면에서 해측으로 강한 유속이 발생하며, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우, 흐름이 없는 경우의 순으로 유속이 강해진다. 이로부터 흐름방

항에 따라 잠제 전면 해저면에서 쇄굴의 여부 및 정도를 예상할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 평균난류에너지에 대해, 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 순방향흐름의 경우가 상대적으로 잠제 전단부에서 난류에너지가 적게 나타난다.

(5) 시·공간누적평균난류에너지에 대해, 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 미미하지만 잠제 전면의 천단 중양을 지나서부터는 차이가 나타난다. 전반적으로 역방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 순방향흐름의 경우보다 큰 값을 가지며, 공간파고변화와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되고, 이와 함께 배후사면에서 반사율과 흐름의 유무 및 흐름방향에 따른 잠제 천단상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 공간파고변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

9.4 제 5장에서 결론

제5장에서는 olaFlow 모델(Figuera et al., 2015)을 이용하여 규칙파동장하에서 3차원투과성직립벽에 의한 파의 변형과 파압변동 및 규칙파동장하에서 3차원불투과잠제에 의한 파의 변형 및 흐름에 대한 기존의 실험결과와의 비교·검토로부터 olaFlow 모델의 타당성을 검증하였다. 이에 근거하여 olaFlow 모델로부터 다기의 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 3차원수치파동수조에 규칙파를 조파하여 개구폭 및 잠제와 해안선 사이의 거리 등의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 파고와 평균수위의 시·공간분포 특성 및 그들의 상호연관성을 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 파고에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 파고는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 파고가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 파고감소율이 상대적으로 크게 나타났다. 하지만, 잠제 위치에 따른 결과에서는 파고의 변화가 크지 않고, 파고감소율도 대동소이한 경향을 나타내었다.

(2) 평균수위에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부의 제두부 근방에서 평균수위 하강이 보다 크게 나타났고, 잠제 배후에서는 개구폭이 넓을수록 평균수위의 상승률이 감소하였으며, 개구부 배후의 해안선 부근에서는 개구폭이 넓을수록 평균수위의 상승률이 크게 나타났다.

(3) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭 및 잠제 위치에 상관없이 제두부 전면에서는 순환셀이 대부분 형성되었고, 제두부 부근에서는 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여

개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인하였다. 또한, 개구폭이 넓어질수록 해안선 부근에서 해안선과 평행한 방향으로 순환셀의 크기가 커지다가 연안류 형성에 관여한 후에 다시 크기가 작아지는 경향을 나타내었다. 잠제 위치가 해안선에서 멀어질수록 사빈 경사면에서 해안선에 직각방향으로 장축을 가진 타원형의 순환셀을 형성하며, 이는 연안류에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

(4) 잠제의 배후에서의 연안류는 개구폭이 넓을수록 강하게 형성됨과 동시에 수송유량도 증가하였으며, 연안류가 수렴되는 지점은 개구폭이 좁을수록 제간부에서 체두부로 이동되는 것으로 추정되었다. 이러한 결과로부터 저질이 퇴적되는 지점을 예상할 수 있기 때문에 잠제 배후에 형성되는 설상사주와 같은 지형변동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 평균난류에너지는 개구폭이 넓을수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 시·공간누적평균난류에너지가 크게 나타났고, 이는 개구부 배후 해안선 부근에서 평균수위의 상승 정도와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되었으며, 더불어 연안류의 형성과 속도에도 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

9.5 제 6장에서 결론

제6장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 다기의 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 3차원수치과동수조에 불규칙파를 조파하여 개구폭의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 H_{rms} 의 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 H_{rms} 는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 H_{rms} 가 증가하며, 체두부에서 제간부로의 H_{rms} 의 감소율이 상대적으로 크게 나타났다.

(2) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭에 상관없이 체두부 부근에서 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여 개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인하였고, 개구폭이 넓어질수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되다가 연안류로 흐름이 바뀌는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 잠제의 배후에서 연안류는 개구폭이 넓을수록 강하게 형성됨과 동시에 수송유량이 증가하였으며, 연안류가 수렴되는 지점은 개구폭이 좁은 경우 제간부에서 체두부로 이동되는 것으로 추정되었다.

이러한 결과로부터 저질이 퇴적되는 지점을 예상할 수 있으므로 잠제 배후에 형성되는 설상시주와 같은 지형변동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 평균난류에너지는 개구폭이 넓을수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 시·공간누적평균난류에너지가 크게 나타났고, 이는 개구부 배후 해안선 부근에서 평균수위의 상승 정도와 직접적인 연관성을 가지며, 더불어 연안류의 형성과 속도에도 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

9.6 제 7장에서 결론

제7장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2015)을 이용하여 다기로 구성된 투과성잠제가 설치된 일정수심의 3차원수치과동수조에 순방향 혹은 역방향흐름이 있는 상태에서 규칙파 및 불규칙파를 조파하여 흐름의 유무와 방향에 따른 잠제 주변 및 배후에서 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대한 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대해 잠제 제간부 배후로 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 낮게 나타나며, 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(2) 평균유속의 공간분포로부터 흐름이 없는 경우가 순방향흐름의 경우와 역방향흐름의 경우보다 잠제 천단상에서 육측으로의 흐름이 강하게 나타나며, 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 육측으로, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 해측으로 연안류가 형성되는 것을 알 수 있다.

(3) 잠제 배후의 개구부 및 제두부 근방에서의 연안류는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 역방향흐름의 경우보다 약하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 수송유량은 흐름이 없는 경우, 순방향흐름의 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 증가하였다. 이러한 결과로부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상시주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

(4) 평균난류에너지는 잠제 천단상에서 역방향흐름의 경우가 상대적으로 크게, 순방향흐름의 경우가 상대적으로 적게 나타나며, 시·공간누적평균난류에너지는 개구부 배후의 해안선 근방에서 흐름이 없는 경우, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우 순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 순방향

흐름의 경우, 흐름이 없는 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 나타난다. 이로부터 연안류의 형성과 속도에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

9.7 제 8장에서 결론

본 장에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원 혼상류의 해석법인 공개된 CFD Code인 olaFlow 모델 (Higuera et al., 2015)을 이용하여 규칙과 동장하 3차원 투과성 구조물인 LCS에 의한 파고, 평균 유속(흐름) 및 평균 난류 운동 에너지 등을 수치 해석하였다. 실제 수치 해석에서는 LCS에 관해 월파 여부가 중요한 차이를 나타낼 것으로 판단하여 파고와 천단고를 변화시켰고, 또 다른 해빈 유실 대책 공법에 의해 적용되는 잠제의 역학적 차이점을 규명한다는 차원에서 동일한 파랑 조건과 개구부 폭에 대해 잠제의 경우와 비교·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·서술한다.

(1) 파고의 공간 분포: LCS의 경우, 항외측에서는 구조물에 의한 반사파의 영향으로 큰 파고의 부분 반사파 동장이 형성된다. 항내측에서는 항외측보다 정온한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 입사파고가 작을수록 항내측의 파고가 줄어든다. 이러한 항내측의 파고에는 천단상으로 월파 및 체체내를 통한 파랑 에너지의 전달 및 두부에서 회절파의 영향을 크게 받을 수 있지만, 본 수치 계산에 따르면 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월파 여부는 항내측의 파고 분포와 그의 크기에 거의 영향을 미치지 않는다. 잠제와 LCS의 차이는 잠제의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파 집중과 파고 증폭의 현상이 보다 강해지고, 배후로 전달되는 파 에너지는 줄어드는 반면, LCS의 경우 개구폭이 좁아짐에 따라 개구부 중앙에서 파 집중과 파고 증폭의 현상이 미미해지고, 배후로 전달되는 파 에너지가 줄어든다.

(2) 평균 유속의 공간 분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙 지점으로 수렴하는 연안류가 발생하며, 이는 개구폭이 넓을수록 강해진다. 개구부에서는 이안류가 발생하며, 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 강해진다. 연안류와 이안류의 크기는 전체적으로 입사파고가 클수록 커진다. 한편, 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류 여부가 평균 유속에 미치는 영향은 거의 나타나지 않는다. 여기서, 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙 지점에서 좌·우측으로 발산하는 연안류가 발생하고, 해안선 근방의 항내측과 잠제 개구부와 개구부 근방의 천단상에 걸쳐 순환류가 형성되며, 이것이 평균 유속의 공간 분포에서 LCS와의 차이로 판단된다.

(3) 평균 난류 운동 에너지의 공간 분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙 지점에서 가장 큰 값이 주어지고, 이를 중심으로 좌·우측의 연안 방향으로 갈수록 값이 감소한다. 이러한 경향은

개구폭이 좁을수록 분포값이 줄어들어는 반면, 입사파고가 커지면 보다 커진다. 한편, 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류 여부에 대해서는 비월파의 경우에 평균난류운동에너지에 미치는 영향이 줄어든다. 여기서, 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 좌·우측으로 갈수록 감소하고, 개구폭이 좁을수록 값의 크기가 또한 감소하는 경향은 LCS와 동일한 현상이지만, 입사파고가 커지면 LCS의 경우보다 해안선 근방에서 종단방향으로 분포폭이 보다 넓어지는 것이 LCS와의 차이로 판단된다.

References

- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L.(2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, Coastal Engineering, 101, 35-47.

