



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](#)

공학석사 학위논문

저천단구조물의 주변에서 파동장의 변동특성에 관한  
수치시뮬레이션

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



지도교수 김도삼

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

이준형

본 논문을 이준형의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장      경    갑    수



위    원      오    재    홍



위    원      김    도    삼



2019년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iv
LIST OF TABLES .....	vii
LIST OF PHOTOS .....	viii
ABSTRACT .....	ix
요약 .....	xi

## 제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구의 구성 .....	4
Reference .....	5

## 제 2 장 수치해석이론

2.1 지배방정식 .....	7
2.2 불규칙파의 조파이론 .....	8
Reference .....	9

## 제 3 장 2차원저천단구조물의 주변에서 규칙파동장의 변동특성

3.1 수치해석의 검증 .....	11
3.1.1 2차원불투과성잠재 주변에서 파랑변형 .....	11
3.1.2 2차원투과성잠재 주변에서 유속 .....	13
3.2 계산조건 .....	17
3.3 수치해석결과 .....	18
3.3.1 LCS에 의한 전달율 .....	18
3.3.2 파의 전파과정 .....	19
3.3.3 LCS 주변에서 평균파고의 공간분포 .....	20
3.3.4 평균유속의 공간분포 .....	25
3.3.5 평균난류운동에너지의 공간분포 .....	25

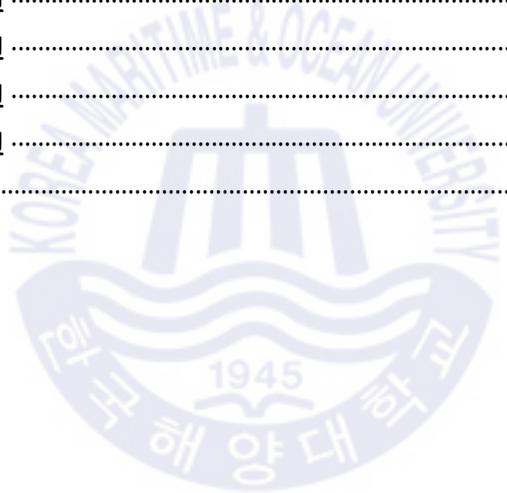
3.4 결언 .....	28
Reference .....	28
<b>제 4 장 2차원저천단구조물의 주변에서 불규칙파동장의 변동특성</b>	
4.1 수치해석의 검증 .....	31
4.1.1 불규칙파의 조파 .....	31
4.2 계산조건 .....	34
4.3 수치해석결과 .....	35
4.3.1 LCS 주변에서 파랑스펙트럼 .....	35
4.3.2 LCS에 의한 전달을 .....	38
4.3.3 파의 전파과정 .....	39
4.3.4 LCS 주변에서 $H_{rms}$ 파고의 공간분포 .....	40
4.3.5 평균유속의 공간분포 .....	45
4.3.6 평균난류운동에너지의 공간분포 .....	45
4.4 결언 .....	48
Reference .....	49
<b>제 5 장 3차원저천단구조물 주변에서 규칙파동장의 변동특성</b>	
5.1 수치해석의 검증 .....	51
5.1.1 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압 .....	51
5.1.2 3차원불투과성직립벽 주변에서 수위 및 유속 .....	55
5.2 계산조건 .....	56
5.3 수치해석결과 .....	59
5.3.1 정상상태의 판단 .....	59
5.3.2 평균파고분포와 파의 전파 .....	61
5.3.3 해빈류의 분포 .....	66
5.3.4 평균난류운동에너지의 분포 .....	67
5.4 결언 .....	72
Reference .....	73

**제 6 장 3차원저천단구조물 주변에서 불규칙파동장의 변동특성**

6.1 계산조건 .....	75
6.2 수치해석결과 .....	76
6.2.1 $H_{rms}$ 파고분포와 파의 전파 .....	76
6.2.2 해빈류의 분포 .....	79
6.2.3 평균난류운동에너지의 분포 .....	83
6.3 결론 .....	88
Reference .....	89

**제 7 장 결론**

7.1 제 3장에서 결론 .....	91
7.2 제 4장에서 결론 .....	91
7.3 제 5장에서 결론 .....	92
7.4 제 6장에서 결론 .....	93
Reference .....	94



## List of Figures

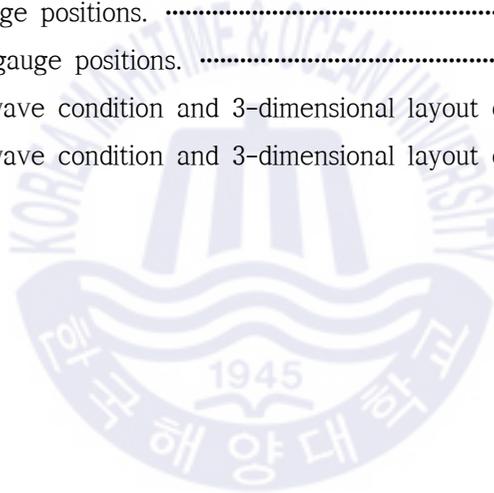
Fig. 1.1. Typical Section of LCS. ....	4
Fig. 3.1. Cross-section of wave flume and measuring positions of water surface elevation. ....	11
Fig. 3.2. Comparison between simulated and measured water surface elevations. ....	12
Fig. 3.3. Illustrative sketch of wave flume and measuring positions of water velocity. ....	13
Fig. 3.4. Comparison between simulated and measured $X$ -direction velocities. ....	15
Fig. 3.4. Comparison between simulated and measured $Y$ -direction velocities. ....	16
Fig. 3.6. Definition sketch of wave flume and LCS. ....	17
Fig. 3.7. Comparison of the transmission coefficients. ....	19
Fig. 3.8. Snapshots of water velocity and water level around LCS for $H_i=4\text{cm}$ . ....	21
Fig. 3.9. Snapshots of water velocity and water level around LCS for $H_i=8.8\text{cm}$ . ....	22
Fig. 3.10. Spatial distribution of simulated wave heights for different $R_c$ . ....	23
Fig. 3.12. Spatial distribution of simulated wave heights for different $H_i$ . ....	24
Fig. 3.12. Spatial distribution of time-averaged velocities around LCS. ....	26
Fig. 3.13. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around LCS. ....	27
Fig. 4.1. Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra. ....	32
Fig. 4.2. Comparison of target, input and incident spectra. ....	33
Fig. 4.3. Definition sketch of wave flume and LCS. ....	34
Fig. 4.4. Comparison of spectra obtained at WG1, WG2 and WG3 for various significant incident wave heights in case of $R_c=3\text{cm}$ and $T_{1/3}=1.4\text{s}$ . ....	36

Fig. 4.5. Comparison of spectra obtained at WG1, WG2 and WG3 for various significant incident wave heights in case of $R_c=8\text{cm}$ and $T_{1/3}=1.4\text{s}$ . ....	37
Fig. 4.6. Comparison of spectra obtained at $x=6.0\text{m}$ (WG3) for $T_{1/3}=1.4\text{s}$ . ....	38
Fig. 4.7. Comparison of the transmission coefficients. ....	39
Fig. 4.8. Snapshots of water velocity and water level around LCS for $H_{1/3}=4\text{cm}$ . ....	41
Fig. 4.9. Snapshots of water velocity and water level around LCS for $H_{1/3}=8.8\text{cm}$ . ....	42
Fig. 4.10. Spatial distribution of simulated $H_{rms}$ for different $R_c$ . ....	43
Fig. 4.11. Spatial distribution of simulated wave heights for different $H_i$ . ....	44
Fig. 4.12. Spatial distribution of time-averaged velocities around LCS. ....	46
Fig. 4.13. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around LCS. ....	47
Fig. 5.1. Illustrative sketch of 3D-wave tank and 3D-permeable vertical caisson. ....	52
Fig. 5.2. Comparison between simulated and measured water surface elevations. ....	54
Fig. 5.3. Comparison between simulated and measured wave pressures. ....	54
Fig. 5.4. Illustrative sketch of 3D-wave tank and 3D-impermeable submerged breakwater. ....	55
Fig. 5.5. Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity. ....	55
Fig. 5.6. Comparison between simulated and measured water surface elevations. ....	57
Fig. 5.7. Comparison between simulated and measured $X$ -and $Y$ -direction velocities. ....	57
Fig. 5.8. Definition sketch for layout of LCS, measuring points of water level and cross section. ....	58
Fig. 5.9. Time variation of water level. ....	60
Fig. 5.10. Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=5\text{cm}$ ). ....	62
Fig. 5.11. Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=7\text{cm}$ ). ....	63
Fig. 5.12. Snapshots of waves on LCS and and sandy beach(05H7G250Rc3). ....	65

<b>Fig. 5.13.</b> Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=5\text{cm}$ ). .....	68
<b>Fig. 5.14.</b> Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=7\text{cm}$ ). .....	69
<b>Fig. 5.15.</b> Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=5\text{cm}$ ). .....	70
<b>Fig. 5.16.</b> Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=7\text{cm}$ ). .....	71
<b>Fig. 6.1.</b> Definition sketch for layout of LCS. ....	76
<b>Fig. 6.2.</b> Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H_{1/3}=5\text{cm}$ ). .....	80
<b>Fig. 6.3.</b> Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H_{1/3}=7\text{cm}$ ). .....	81
<b>Fig. 6.4.</b> Snapshots of wave diffraction behind LCS (05H7G250Rc3). ....	82
<b>Fig. 6.5.</b> Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H_{1/3}=5\text{cm}$ ). .....	84
<b>Fig. 6.6.</b> Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H_{1/3}=7\text{cm}$ ). .....	85
<b>Fig. 6.7.</b> Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H_{1/3}=5\text{cm}$ ). .....	86
<b>Fig. 6.8.</b> Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H_{1/3}=7\text{cm}$ ). .....	87

## List of Tables

<b>Table 3.1.</b> Measuring points of water elevation. ....	11
<b>Table 3.2.</b> Measuring points of water velocity. ....	14
<b>Table 3.3.</b> Incident wave condition and 2-dimensional layout of LCS. ....	18
<b>Table 4.1.</b> Incident wave conditions. ....	32
<b>Table 4.2.</b> Incident wave condition and 2-dimensional layout of LCS. ....	35
<b>Table 5.1.</b> Wave gauge positions. ....	53
<b>Table 5.2.</b> Pressure gauge positions. ....	53
<b>Table 5.3.</b> Incident wave condition and 3-dimensional layout of LCS. ....	59
<b>Table 6.1.</b> Incident wave condition and 3-dimensional layout of LCS. ....	77



## List of Photos

Photo 1.1. Locally damaged cases and coastal protection structures. ....	2
Photo 1.2. Various types of breakwater. ....	3



# **Numerical Simulation on Variation Characteristics of Wave Field around Low-Crested Structure**

by  
**Jun-Hyeong, Lee**

**Department of Civil and Environmental Engineering  
Graduate School of  
Korea Maritime and Ocean University**

## **Abstract**

In this study, we carried out the numerical simulation and analysis of the variation characteristics of the wave field around LCS (Low-Crested Structure), and the results were compared with the existing studies on submerged breakwater.

Europe and Japan have conducted many researches on the LCS to prevent the beach erosion such that LCS has been regarded as an alternative to the submerged breakwaters. In addition, the research results were used for the design manuals. However, most conventional studies on LCS have been focused on the estimation of required weight of armor units with two-dimensional wave transmission, mainly based on experimental examinations and discussions.

We conducted 2-D and 3-D numerical analysis for permeable LCS. In the study, we used the olaFlow model that is based on the Navier-Stokes momentum equations with the OpenFOAM®(Open source Field Operation And Manipulation) model. This model is a strongly nonlinear analysis method based on the finite volume method and it enables the breaking and turbulence analysis.

First of all, we performed the verification of the olaFlow model. To this end, we compared the numerical results of the model to the existing experimental results in various aspects that include the wave variation around 2-D impermeable submerged breakwater, the water velocity around 2-D permeable submerged breakwater, the variation of seawater level and wave pressure

around three-dimensional permeable upright walls, the variation of seawater level and flow velocity around three-dimensional impermeable submerged breakwater, and the generated wave profile and frequency spectrum of irregular wave. Then, we applied the model to LCS to carry out the numerical analysis of wave field characteristics in different cases such as (1) Variation Characteristic of Wave Field around 2-D LCS, (2) Variation Characteristics of Irregular Wave Fields around 2-D LCS, (3) Variation Characteristics of Wave Field around 3-D LCS, (4) Variation Characteristics of Irregular Wave Field around 3-D LCS.

In case (1), experiments were carried out on the wave flume around the LCS with beach by changing the conditions like crest freeboard height, incident wave height and period. The variation characteristics such as the transmission by LCS, the wave propagation, the averaged wave height spatial distribution, the averaged water velocity and spatial distribution, and averaged turbulent kinetic energy were investigated. In case (2), we carried out experiments for the irregular wave field with additional analysis of characteristic of wave spectrum. In case (3) and (4), the experiments were conducted for 3-D numerical wave tank with the same cross section with case (1) and (2) by changing incident wave height, crest freeboard height, and structures gap width. Both the regular and irregular wave fields are studied, respectively. Variation characteristics and distribution of mean wave ( $H_{rms}$  wave) nearshore current as well as the mean turbulent kinetic were investigated compared with existing study results on submerged breakwater.

**KEY WORDS:** LCS(Low-Crested Structure), gap width, creste freeboard, OpenFOAM, olaFlow, 2-Dimensional wave flume, 3-Dimensional wave tank, irregular wave, wave height distribution, nearshore current, turbulent kinetic energy, submerged breakwater

# 저천단구조물의 주변에서 파동장의 변동특성에 관한 수치시물레이션

이 준 형

한국해양대학교 대학원  
토목환경공학과

## 요 약

본 연구는 저천단구조물(LCS; Low-Crested Structure)의 주변에서 파동장의 변동특성을 수치시물레이션 하여 면밀히 분석하고, 기존의 잠제(submerged breakwater)에 대한 연구와 비교·검토하였다.

먼저, LCS는 유럽과 일본을 비롯한 해외에서 해빈유실방지대책공법의 하나이며, 잠제의 대안으로 여겨지는 LCS에 관한 많은 연구를 수행하였고, 그의 결과들을 집약하여 설계매뉴얼까지 편찬하였다. 지금까지 LCS에 관한 연구는 2차원적인 파랑전달율과 피복재의 안정중량산정에 치우쳐 있으며, 이들은 주로 실험에 기초하여 검토·논의되었다. 본 연구에서는 투과성의 LCS를 대상으로 2차원수치해석과 3차원수치 해석을 수행하였다.

여기서, 수치해석은 *olaFlow* 모델을 사용하였고, 이는 *OpenFOAM*<sup>®</sup>(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.

수치해석에 앞서 *olaFlow* 모델의 타당성을 검증하기 위해 2차원불투과성잠제 주변에서 파랑변형, 2차원투과성잠제 주변에서 유속, 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압, 3차원불투과성직립벽 주변에서 수위 및 유속 그리고 불규칙파의 수위변동 및 주파수스펙트럼등에 관해 얻어진 기존의 실험결과와 본 수치해석을 비교·검토하였다. 이를 통해 (1) 2차원저천단구조물 주변에서 규칙파동장의 변동특성, (2) 2차원저천단구조물 주변에서 불규칙파동장의 변동특성, (3) 3차원저천단구조물 주변에서 규칙파동장의 변동특성 그리고 (4) 3차원저천단구조물 주변에서 불규칙파동장의 변동특성의 수치해석을 수행하였다.

(1)에서는 배후사빈이 존재하는 경우 입사파고와 LCS의 천단고를 변화시키는 경우 LCS에 의한 전달율, 파의 전파과정, LCS 주변에서 평균파고의 공간분포, 평균유속의 공간분포 및 평균난류운동에너지의 공간 분포 등의 변동특성을 면밀히 검토하였다. (2)에서는 (1)과 같은 조건에서 불규칙파동장을 적용하여 추가적으로 구조물 주변에서 파랑스펙트럼의 특징을 확인하였다. (3)과 (4)는 3차원수치파동수조에 (1) 혹은 (2)와 같은 단면을 적용하고 입사파고, 천단고 및 개구폭에 변동을 주어 각각 규칙파동장과 불규칙파동장하 평균파고분포( $H_{rms}$  파고분포)와 파의 전파, 해빈류의 분포 및 평균난류운동에너지의 분포를 선행연구인 잠제의 경우와 면밀히 분석·논의하였다.

**핵심용어:** 저천단구조물, 개구폭, 천단고, OpenFOAM, olaFlow, 2차원수치파동수조, 3차원수치파동수조, 불규칙파, 파고분포, 해빈류, 평균난류운동에너지, 잠제



# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

본 연구는 저천단구조물(이후 LCS로 칭함 ; Low-Crested Structure)의 주변에서 파동장의 변동특성을 수치시물레이션하여 면밀히 분석하고, 기존의 잠제(submerged breakwater)에 대한 연구와 비교·검토하였다.

Photo. 1.1은 국내 해안침식 및 해안도로 유실사례를 각각 나타낸다. 동해안을 비롯한 다수의 해역에서 해안침식 및 해안도로 유실 등의 피해가 심각하게 진행되고 있고, 이는 각 정부 도처에서도 유심히 다루고 있는 문제이다. 여기서, 전술한 문제에 대한 원인은 주로 환경적인 요인과 인위적인 문제로 제시되고, 대표적인 환경적인 요인은 기후변화 및 이상기후에 의한 해수면 상승 혹은 너울성 고파랑 등의 이상파랑의 영향 등이 있으며, 인공적인 요인으로는 구조물의 천단폭, 개구폭, 길이 및 해안선에서 이격거리 등이 현장조건에 부합되지 않게 설치된 것, 평상파랑과 이상파랑의 두 파랑조건을 동시에 고려하지 않고 설치된 것 등에 의한 비예측의 해빈류의 발생 등이 있을 것이다. 제시된 문제는 지속적인 양변만으로 해결하기 어려우며, 따라서 현장조건에 부합하는 경제적이고 친환경적인 설계가 요구되는 상황이다.

여기서, Photo. 1.2는 침식방지대책으로 설치되는 이안제, 잠제 및 LCS를 각각 제시한다. 먼저, 이안제의 경우 높은 천단고를 갖기 때문에 월과의 영향이 적어 항내의 정온 확보 및 항내의 수위상승 억제 등의 장점이 있으나 높은 천단고로 인해 자연경관의 훼손이 단점으로 지적되고, 이는 관광산업을 겸하는 어촌·어항에 문제가 될 수 있으며, 일본의 Niigata현은 해안의 이용 및 환경성을 고려하여 기존의 이안제를 철거하고 잠제를 다시 설치한 사례가 있다. 잠제의 경우, 성공적인 역할을 수행하는 것으로 알려진 Photo. 1.2(b)의 부산 송도해수욕장 전면 해역을 예로 나타낸다. 잠제는 천단고가 정수면보다 낮아 수중에 설치되기 때문에 연안의 자연경관을 유지하는 친환경적인 효과와 더불어 공학적으로는 잠제 배후에 양변된 저질의 침식을 방지하거나 혹은 침식성 해빈에서 저질이동을 방지하여 해빈의 현상유지·회복을 도모할 수 있어 자연발생적인 형태와 유사한 해빈을 조성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 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.

이러한 측면에서 일본 및 유럽에서는 Photo. 1.2(c)에서 제시하는 LCS가 오래 전부터 관심을 받아왔다(Delos project, 2003). 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 월파를 허용하는 구조이고, 따라서 종래의 이안제보다 수평파력의 작용이 적어진다. 그리고, 잠제의 파랑제어기구가 광폭에 의한 마찰저항을 향상시키고 천단수심을 적게 하여 천단상에서 강제쇄파를 유도하지만, LCS는 잠제에 비해 천단폭이 1/5~1/2 정도로 좁고, 천단이 공기중으로 돌출되어 천단고가 높기 때문에 반사와 월파 및 마찰저항에 의한 파랑제어기능이 우수하므로 잠제보다는 훨씬 경제적이다. LCS와 잠제 모두는 해빈에 작용되는 파에너지를 소멸시키지 않고 어느 정도로 줄이지만, LCS의 경우가 더 많은 전달파에너지를 감소시킨다. 이상과 같은 LCS의 장점에 주목하여 유럽에서는 많은 이론연구와 실험을 수행하여왔고, 결과의 현장적용으로 설계기술이 많이 향상되었으며, 집대성되었다. 이에 대한 경우로 Lamberti and Martinelli(1999)는 유럽에서 연안관리를 위한 LCS의 적용사례를 종합하였고, Hwakins et al.(2007)은 LCS에 대한 설계지침서를 발표하였다.



(a) Case of coastal erosion (<https://www.yna.co.kr>)



(b) Case of road erosion (<https://www.nocutnews.co.kr>)

Photo 1.1. Locally damaged cases and coastal protection structures.



(a) Submerged breakwaters (<https://www.crowdpic.net>).



(b) Detached breakwater (<http://www.reporterside.com>)



(c) Tel Aviv, Israel (2004 Thomson books.cole)

Photo 1.2. Various types of breakwater.

이상의 연구들은 대부분 실험에 기반한 연구이며, Fig. 1.1(a)와 같은 경사제 형태의 사석 혹은 이형 블록으로 구성된 단순한 단면형상이 적용되었다. 그리고, 실험에서는 파랑제어에 관한 파고전달율이나 구성재료의 안정중량에 집중되었다. 그러나, LCS 주변에서 흐름과 난류 등의 변동특성은 거의 규명되어 있지 않은 상황이다. 또한, 국내에서는 내부사석층 상에 TTP와 같은 이형블록을 피복하고 천단상에 케이슨을 상치하는 Fig. 1.1(b)와 같은 복합단면형태가 적용되었지만(Kim and Lee, 2017), 대부분의 선행연구를 살펴보면 본 연구에서 적용하는 복합단면이 적용된 사례는 거의 없다. 이에 대한 파랑제어 기능 등이 수치적으로도 혹은 수리실험적으로도 충분히 연구되어 있지 않은 것이 현상이다.

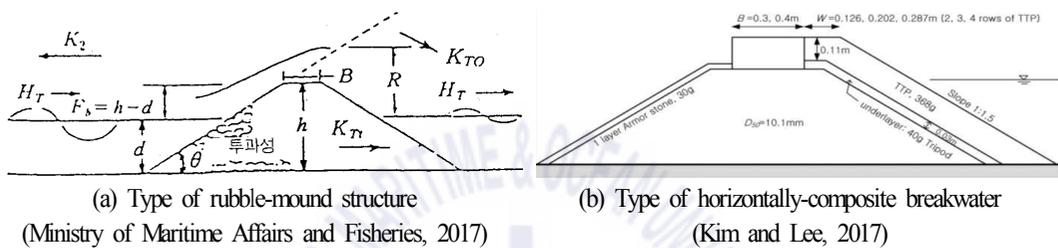


Fig. 1.1. Typical Section of LCS.

따라서, 본 연구에서는 2차원 혹은 3차원해역에서 규칙과동장 혹은 불규칙과동장하 LCS에 대한 파랑제어기능 및 파랑특성을 규명할 목적으로 고정도의 수치해석기법으로 알려진 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)을 적용한다. 이는 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. 본 모델은 후술하는 2장에서 상세히 다룬다.

## 1.2 연구의 구성

본 연구는 7장으로 구성되며, 각 장의 내용은 다음과 같다.

- 1) 제 1장에서는 본 연구의 배경 및 목적에 대하여 서술하고, 연구의 구성을 간략히 기술하였다.
- 2) 제 2장에서는 OpenFOAM®을 기반으로한 olaFlow모델에 대한 이론적인 배경과 본 연구에서 적용한 불규칙파의 조파이론에 대해 기술하였다.
- 3) 제 3장에서는 먼저 투과성 및 불투과성 구조물에 대한 olaFlow 모델의 2차원수치해석의 타당성을 검증하기 위해 2차원불투과성잠제 주변에서 파랑변형과 2차원투과성잠제 주변에서 유속변동의 수

리실험결과와 수치해석결과를 비교·분석하였다. 그리고 2차원저천단구조물 주변에서 규칙파 작용하 전달, 파의 전파과정, 평균파고의 공간분포, 평균유속의 공간분포 및 평균난류에너지의 공간분포를 검토하였다.

4) 제 4장에서는 소스에 의한 불규칙파의 조파에서 목표주파수스펙트럼과 조파된 파랑의 주파수스펙트럼을 비교·검토하고, 3장과 같은 조건하 불규칙파랑을 적용하여 수치해석하였으며, LCS 주변에서 파랑스펙트럼, LCS에 의한 전달율, 파의 전파과정,  $H_{r.m.s}$  파고의 공간분포, 평균유속의 공간분포 및 평균난류에너지의 공간분포를 산출하여 규칙파의 경우와 비교·검토하였다.

5) 제 5장에서는 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압의 변동과 3차원불투과성직립벽 주변에서 수위 및 유속변동에 대한 기존실험결과와의 비교·검토로부터 olaFlow 모델의 3차원수치해석에 대한 타당성을 검증하고, 3장 혹은 4장과 동일한 단면에 3가지 경우의 개구폭 너비를 적용하여 수치해석을 통해 산출된 평균파고분포와 파의 전파과정, 해빈류의 분포 및 평균난류운동에너지 등의 결과를 잡제를 다룬 선행연구와 비교·검토하였다.

6) 제 6장에서는 5장의 수치해석조건에 불규칙파동장을 적용하여  $H_{r.m.s}$  파고분포와 파의 전파과정, 해빈류의 분포 및 평균난류운동에너지 등의 결과를 규칙파동장의 결과 혹은 잡제를 다룬 선행연구와 비교·검토하여 LCS와 잡제의 각각에 대한 특성의 차이 등을 면밀히 분석·논의하였다.

7) 제 7장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 논문의 결론으로 종합하였다.

## References

- DELOS project (2003). [www.delosunibo.it](http://www.delosunibo.it).
- Hawkins, S., Burcharth, H., Zanuttigh, B. and Lamberti, A. (2007). Environmental design guidelines for low crested coastal structures, 1st Ed.
- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2017). Hydraulic experiments on wave transmission coefficients for rubble mound structure armored with tetrapods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(4), 198-205.(in Korean)
- Lamberti, A. and Martinelli, L. (1999). Prototype measurements of the dynamic response of caisson breakwaters, *Coastal Engineering* 1998, 1972-1985.



## 제 2 장 수치해석이론

### 2.1 지배방정식

본 연구는 소스코드가 공개된 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)을 사용하였고, 이는 비압축성유체의 혼상류해석에 대해 유한체적이산화법과 VOF 법(Kissling et al., 2010)을 이용한다. 그의 지배방정식은 다음의 식(2.1)과 (2.2)에 나타내는 연속방정식과 운동량보존방정식으로 구성된다.

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

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

여기서,  $t$ 는 시간,  $x_i$ 는 공간벡터좌표,  $\rho$ 는 후술하는 액체와 기체상태를 고려한 혼상유체의 밀도,  $u_i$ 와  $u_j$ 는 속도벡터,  $p^*$ 는 Pseudo-dynamic 압력,  $X_j$ 는 위치벡터,  $\phi$ 는 공극률,  $D_{50}$ 은 중앙입경이며,  $\mu_{eff}$ 는  $\mu + \nu_{turb}$ 이며,  $\nu_{turb}$ 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,  $\alpha, \beta$ 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 연구 결과에 따라 일정치  $C=0.34$ 가 적용되었다.

혼상류에 있어서 액체와 기체의 경계면 추적에는 계산격자내에서 유체(액체)가 점유하는 체적을 나

타내는 유체를 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 연구에서는  $c_\alpha=1$ 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, 전술한 난류동점성계수  $\nu_{turb}$ 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(<https://github.com/phicau/olaFlow/tree/master/reference>)을 참조하기 바란다.

## 2.2 불규칙파의 조파이론

불규칙파는 선형파이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여 무한급수의 합으로 고려된다. 수치조파에서는 조파지점에서 수면파형  $\eta$ , 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,  $\varepsilon_m$  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,  $\Delta f$ 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.

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

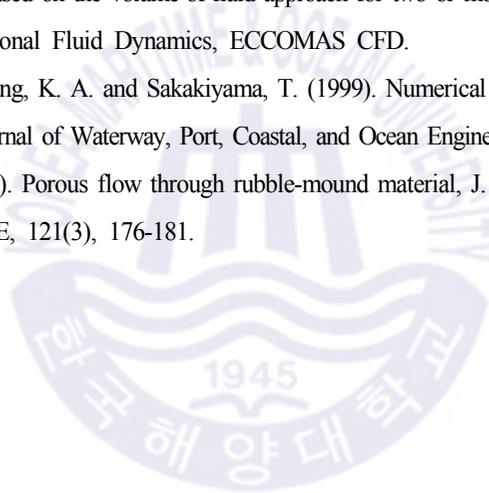
여기서,  $H_{1/3}$ 은 유의파고,  $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수  $f_m$ 의 선택방법에는 주파수스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 동일하도록 등에너지로 분할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Modified Bretshneider-Mitsuyasu(Goda, 1988) 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(2000)에 의해 제안된 다음의 식(2.13)을 이용하여 주파수  $f_m$ 을 선택하였다.

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

## 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.
- del Jesus, M. (2011). Three-dimensional interaction of water waves with maritime structures, University of Cantabria, Ph.D. thesis.

- Englund, F. (1953). On the laminar and turbulent flow of ground water through homogeneous sand, Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences, 3.
- Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures, World Scientific Publishing, Singapore.
- 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., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. Journal of Fluid Mechanics, 847, 186-227.
- 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.
- 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.
- 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.
- van Gent, M. R. A. (1995). Porous flow through rubble-mound material, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 121(3), 176-181.



## 제 3 장 2차원저천단구조물의 주변에서 규칙파동장의 변동특성

### 3.1 수치해석의 검증

#### 3.1.1 2차원불투과성잠재 주변에서 파랑변형

Li and Zhang(2019)은 Fig. 3.1과 같은 불투과성잠재가 설치된 2차원수로에서 수리모형실험을 통해 수위변화를 측정하였다. 그림을 살펴보면 길이 24m의 2차원수로에서 조파관 전면으로부터 6m에 불투과성잠재를 설치하였고, 잠재는 전면경사 1:20, 후면경사 1:10, 천단폭 2m 및 높이 0.3m로 구성된다. 또한, 수심  $h=0.4\text{m}$ 에 파고  $H=1\text{cm}$ , 주기  $T=2.02\text{초}$ 의 규칙파로 적용하여 수행하였으며, Table 3.1은 수위계의 위치를 나타낸다. 본 절에서는 실험을 수치모의하기 위해 수리실험에서 사용한 수로와 동일한 크기의 계산영역을 설정하고  $\Delta x=1\text{cm}$ ,  $\Delta z=0.5\text{cm}$ 의 가변격자를 이용하여 수치계산을 수행하였다. 적용한 난류모델은 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)에 수록된 LES 모델로 방정식(Ghosal et al., 1995)이다.

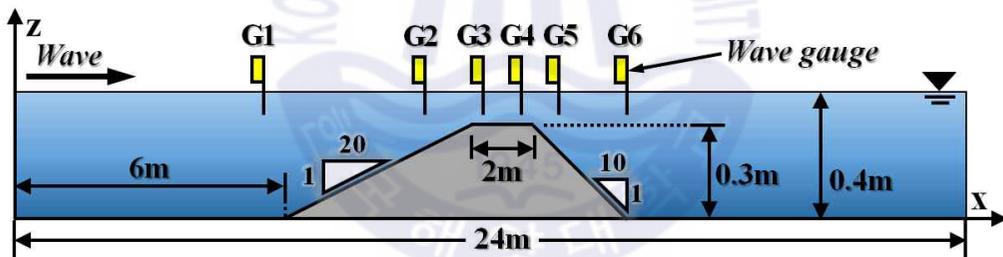


Fig. 3.1. Cross-section of wave flume and measuring positions of water surface elevation.

Table 3.1. Measuring points of water elevation.

Wave Gauges	$x$ (m)
G01	5.2
G02	10.5
G03	12.5
G04	13.5
G05	14.5
G06	17.3

Fig. 3.2는 Fig. 3.1에 주어진 G1~G6의 지점에서 무차원주기에 대한 수위변동을 나타내며, Li and Zhang(2019)의 수리실험결과와 *olaFlow*에 의한 수치해석결과를 같이 나타낸다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 잠제 전면부인 G1지점은 비선형파가 거의 발생되지 않지만, 경사면인 G2지점에서는 대칭성이 약해지고, 잠제 천단인 G3지점, G4지점 및 잠제의 후면경사인 G5, G6지점에서는 비선형파의 발생으로 파형에 관한 전·후 및 상·하에서 대칭성이 붕괴되며, 이러한 복잡한 파형의 수리결과를 매우 정도 높게 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

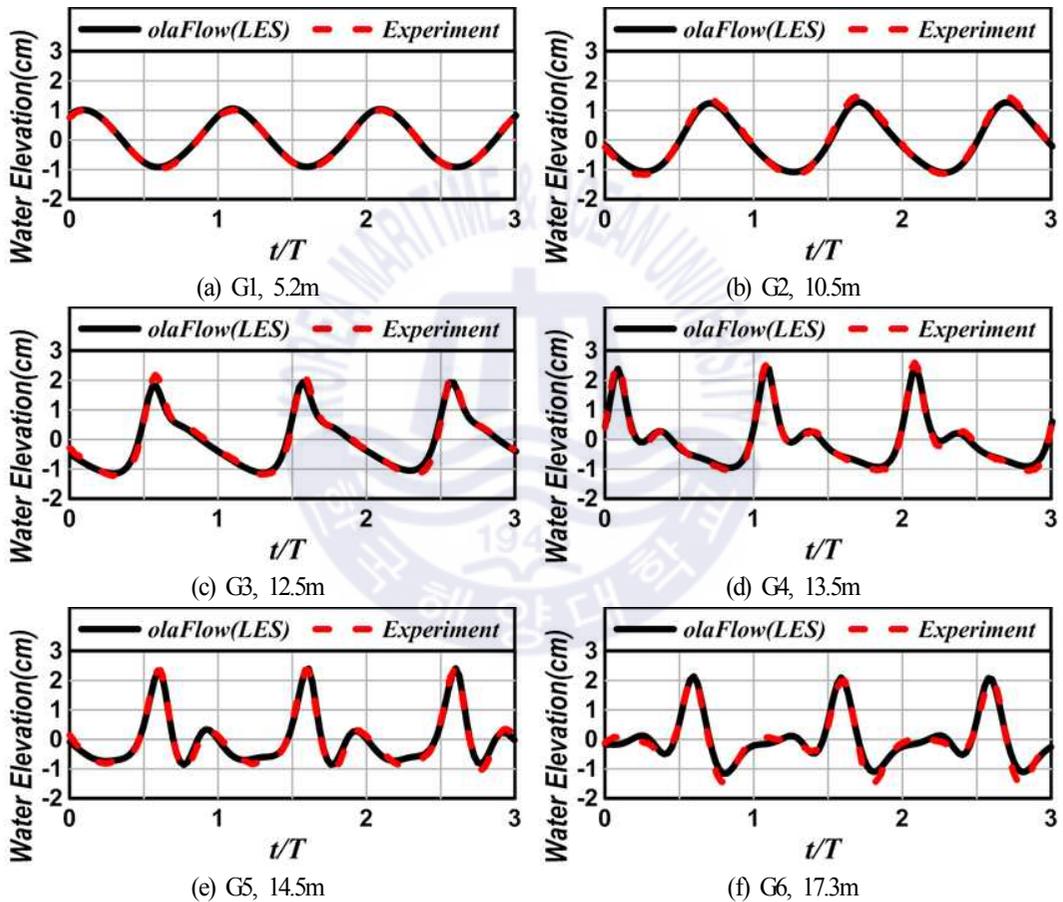
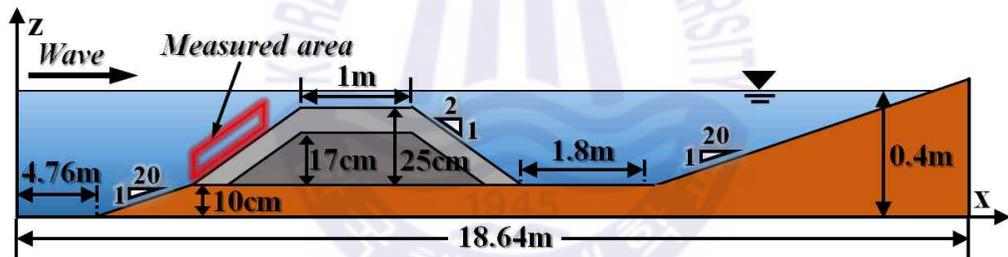


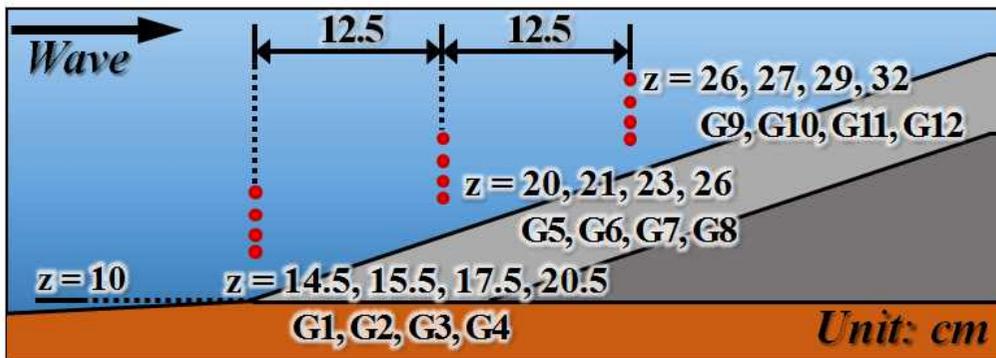
Fig. 3.2. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

### 3.1.2 2차원투과성잠제 주변에서 유속

Fig. 3.3은 Garcia et al.(2004)이 투과성잠제주변에서 유속변동을 측정하기 위해 수행한 2차원수로의 단면과 유속계 설치위치를 제시한다. 수리실험에 사용된 조파수로는 길이 18.64m이고, 불투과성지반 위에 투과성 잠제를 설치하였다. 여기서, 불투과성지반은 조파관의 전면으로부터 4.76m에서 1:20의 경사로 시작되고, 높이 10cm와 길이 2.8m의 평탄한 지반을 가지며, 이후에 1:20의 배후경사를 유지한다. 잠제의 내부사석층과 피복층은 각각 17cm의 높이와 25cm의 높이를 갖고, 전·후면경사는 2:1로 구성되며, 천단폭은 1m로 설정된다. 유속은 Fig. 3.3(b)에 나타내는 바와 같이 잠제 전면경사의 위에서 연직으로 4개씩 수평으로 12.5m의 간격을 유지한 채 설치된 유속계에 의해 측정되며, Table 3.2는 해당하는 지점의 좌표를 나타낸다. 수리실험은 수심  $h=0.4\text{m}$ , 파고  $H=7\text{cm}$ , 주기  $T=1.6\text{초}$ 의 조건에서 수행되었고,  $\Delta x=1\text{cm}$ ,  $\Delta z=1\text{cm}$ 의 정방형 계산격자를 이용하여 수행하였고, 내부사석층의 공극률은  $\phi=0.49$ , 중앙입경  $D_{50}=1.18\text{cm}$ 이며, 저항계수는  $\alpha=1000$ 과  $\beta=1.2$ 를 각각 적용하였다. 또한, 피복층은 공극률  $\phi=0.53$ , 중앙입경  $D_{50}=3.87\text{cm}$ ,  $\alpha=1000$ 과  $\beta=0.8$ 이 적용되었다.



(a) Cross-section of wave flume



(b) Velocimeter positions

Fig. 3.3. Illustrative sketch of wave flume and measuring positions of water velocity.

Fig. 3.4와 Fig. 3.5는 Garcia et al.(2004)의 수리실험결과 및 COBRAS 모델에 의한 수치해석결과, olaFlow 모델에 의한 수치해석결과를 각각 빨간색 점선, 파란색 점선 및 검정색 실선으로 함께 도시한다. 여기서, 수평축은 무차원주기  $t/T$ 를 나타내고, 연직축의  $U$ 와  $V$ 는 각각 수평유속과 연직유속을 의미한다.

Table 3.2. Measuring points of water velocity.

Wave Gauges	$x$ (m)	$z$ (m)
G1	6.760	14.5
G2		15.5
G3		17.5
G4		20.5
G5	6.885	20.0
G6		21.0
G7		23.0
G8		26.0
G9	7.010	26.0
G10		27.0
G11		29.0
G12		32.0

먼저 수평유속의 변동을 나타내는 Fig. 3.4를 살펴보면 Fig. 3.4(a)에서 약간의 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 수리실험의 경우 피복층의 표면이 거칠하고 돌출된 부분이 존재하는 반면, 본 모델에서 구현한 피복층은 격자를 가로지르는 직선 형태로 경계면이 구분되어 형성되기 때문이다. 따라서 수리실험에서는 돌출되거나 거친 부분에서 국부적으로 유체의 흐름에 저항을 주어 수치해석과 상이한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 그러나 olaFlow 모델은 Garcia et al.(2004)이 제시하는 COBRAS 모델보다 근접한 값으로 구현하였고, 전반적으로 다른 지점에서도 상당히 잘 재현한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.5는 연직유속에 대한 결과를 나타내고, 전체적으로 Fig. 3.4의 경우보다 정확도가 떨어지는 것으로 판단될 수 있다. 그러나, 이는 거칠한 표면이나 돌출된 부분의 구현에 의한 것뿐만 아니라 발생하는 연직유속의 크기가 수평유속보다 1/5~1/4배 정도로 작은 값을 갖기 때문이다. 또한 연직유속의 결과에서도 COBRAS 모델로 수치해석한 결과보다 수리모형실험결과에 더 근접한 결과를 산출하므로, 따라서 투과성구조물로의 적용성이 높은 것으로 검토된다.

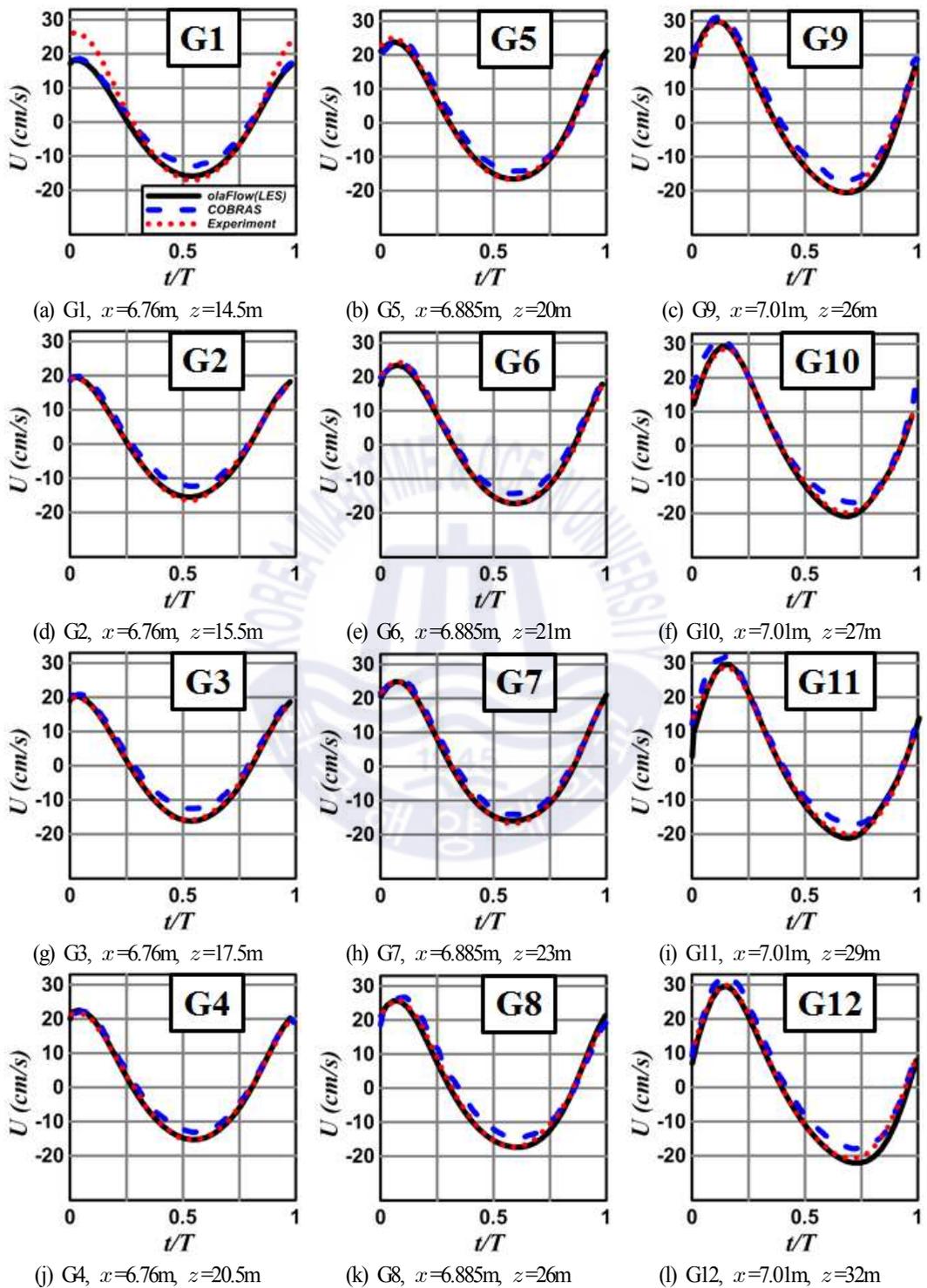


Fig. 3.4. Comparison between simulated and measured  $X$ -direction velocities.

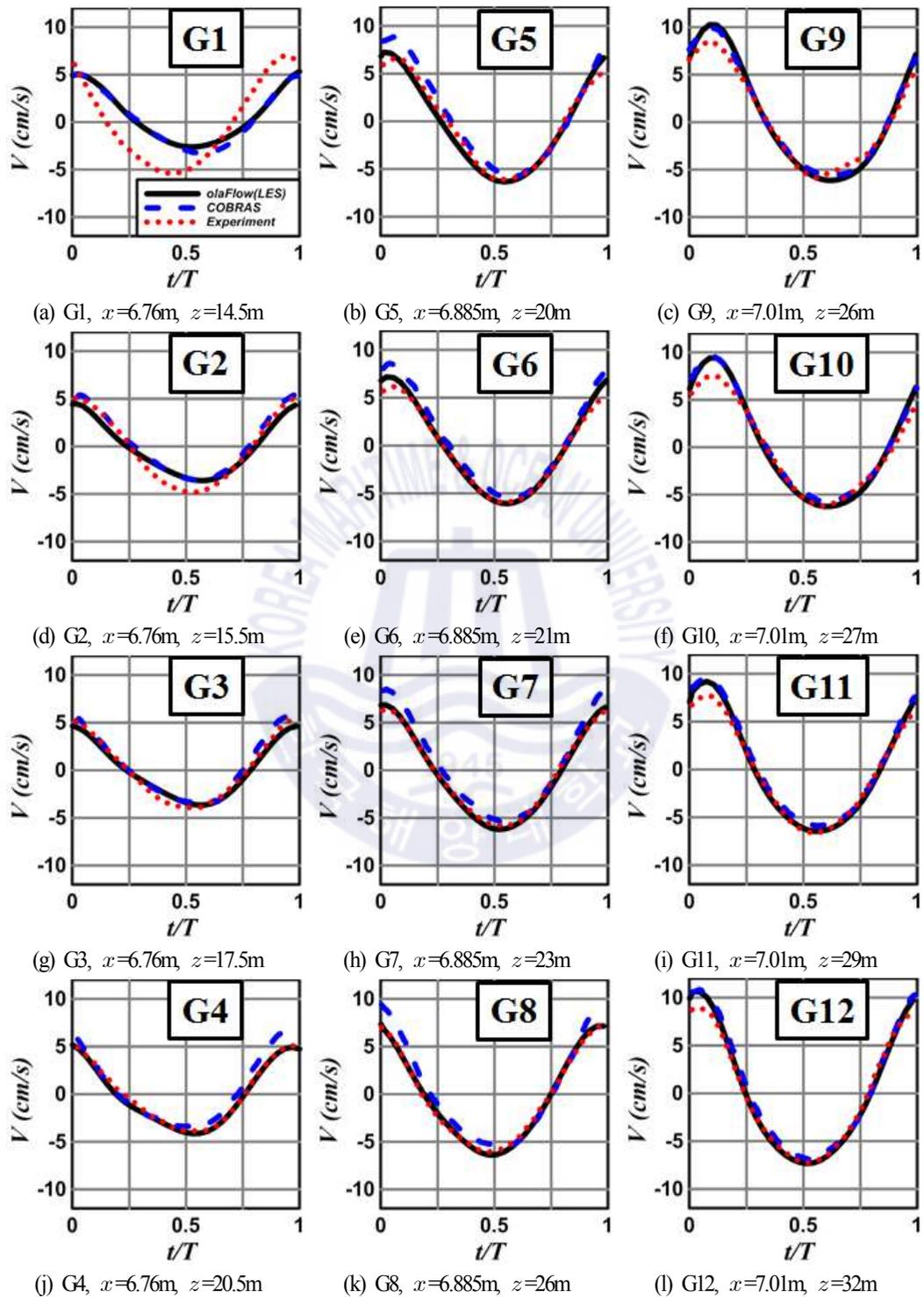


Fig. 3.5. Comparison between simulated and measured  $Y$ -direction velocities.

### 3.2 계산조건

LCS에 관한 규칙파동장의 변동특성을 규명하기 위하여 적용한 본 수치해석의 2차원수치파동수로는 Fig. 3.6(a)와 같이 길이 12.5m, 높이 0.4m의 수로에 0.25m의 일정수심으로 구성되었고, 수로 내에 LCS와 경사사빈을 설치하였다. 이 때, 수치해석에서의 바닥경계는 Slip조건으로 적용되었고, 격자크기는 파의 진행방향으로  $\Delta x=0.75\text{cm}$ , 연직으로  $\Delta z=0.75\text{cm}$ 의 정방격자로 각각 구성되었으며, 조파 시 정수면 상에 연직방향으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다.

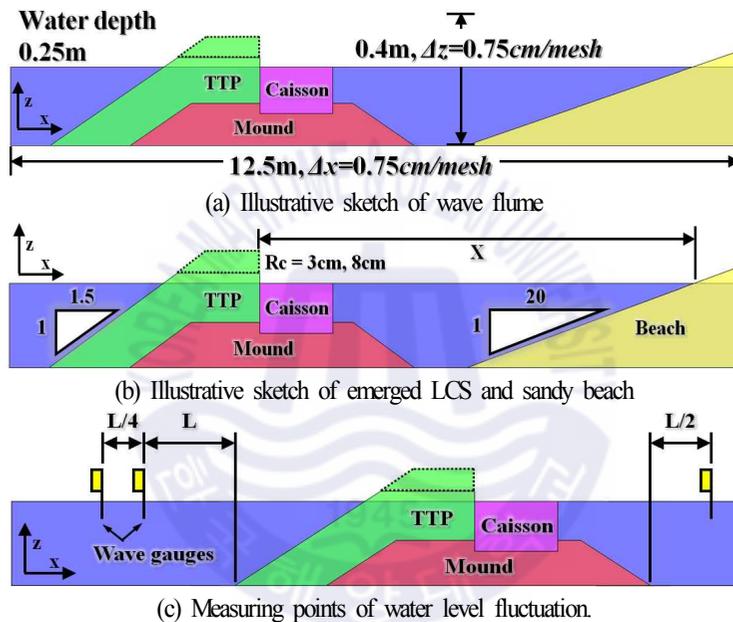


Fig. 3.6. Definition sketch of wave flume and LCS.

Fig. 3.6(b)는 본 장에 사용되는 LCS의 단면형상에 대한 상세도이며, 단면형상은 Lee et al.(2019)을 참조하여 도출하였다. 여기서, TTP층은 1:1.5의 경사와 0.1967m의 두께를 가지며, 윗과 시와 비윗과 시를 상정하여 천단고를  $R_c=3\text{cm}$ 와  $8\text{cm}$ 로 각각 구성하였다. 그리고, TTP층의 공극률은  $\phi=0.5$ 로 고려되며, 저항계수는 Madsen and White(1975)의 실험으로부터 산정된  $\alpha=1200$ ,  $\beta=1.7$ 가 적용되었다. 또한, 사석마운드 부분은 1:1.5의 경사와 0.1333m의 높이를 가지며, 공극률이  $\phi=0.33$ , 중앙입경이  $D_{50}=3\text{cm}$ 이고, 이에 대한 Jensen et al.(2014)의 실험으로부터 도출된  $\alpha=500$ ,  $\beta=2.0$ 의 저항계수가 적용되었다. 반면, Caisson 부분은 불투과성으로 고려되었고, 그의 높이는 0.1467m이다. 사빈은 1:20의 경사를 가지며, 공극률이  $\phi=0.3$ , 중앙입경이  $D_{50}=0.2\text{cm}$ 이며, Billstein et al.(1999)의 실험에 의해 얻어지는 저항계

수  $\alpha=0$ ,  $\beta=3.0$ 이 적용되었다. 여기서,  $X$ 는 정수위에서 정선으로부터 구조물까지의 이격거리를 의미한다.

Table 3.3은 본 수치해석에 적용한 규칙파랑의 제원, 구조물의 천단고, 구조물의 해안선으로부터 이격거리 및 월파 여부를 나타낸다. 계산은 LES에 의한 난류모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였으며, 안정적인 계산을 위해 Courant 상수를 0.1 이하가 되도록 설정하여 수치해석을 수행하였다.

Table 3.3. Incident wave condition and 2-dimensional layout of LCS.

CASE No.	Crest freeboard from still water level $R_c$ (cm)	Wave maker theory	Incident wave Height $H_i$ (cm)	Incident wave period $T$ (s)	Distance between shoreline and LCS $X$ (m)	Overtopping
01H30Rc3	3	Stokes II	3	1.4	6.5	×
02H40Rc3			4			×
03H50Rc3			5			×
04H60Rc3			6			○
05H70Rc3			7			○
06H80Rc3			8			○
07H88Rc3			8.8			○
09H40Rc8	8	Stokes II	4	1.4	6.5	×
10H50Rc8			5			×
11H60Rc8			6			×
12H70Rc8			7			×
13H80Rc8			8			×
14H88Rc8			8.8			×

### 3.3 수치해석결과

#### 3.3.1 LCS에 의한 전달율

Fig. 3.7은 Table 3.3에 제시한 입사파랑조건을 적용하여 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)로부터 수치적으로 얻어진 전달율과 Kim and Lee(2017)의 수리모형실험에 의해 도출된 전달율의 추정식에 의한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이 때, 본 장에서는 Fig. 3.6(c)에서 나타낸 3개의 파고계를 사용하여 LCS 전면의 2개의 파고계로부터 입사파스펙트럼과 반사파스펙트럼을 Goda and Suzuki(1976)의 2점법

으로부터 분리·도출하고, 동시에 LCS 배후면에 설치된 1개의 파고계에서 얻어지는 전달파스펙트럼을 전술의 입사파스펙트럼으로 나누어 전달율을 추정하였다. 그림에서 수평축은 구조물의 천단고  $R_c$ 를 입사파고  $H_i$ 로 무차원화시킨 값을 나타내고, 연직축은 LCS에 의한 전달율  $K_t$ 를 나타낸다. 전반적으로, 무차원천단고의 변화에 따른 전달율의 변화는 크지 않으며,  $R_c/H_i \leq 0.5$ 의 범위에서는 무차원천단고가 적을수록 전달율이 약간 상승하는 경향을 나타내지만,  $R_c/H_i > 0.5$ 의 범위에서는 무차원천단고의 영향이 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 여기서, 실험결과와 수치결과를 비교·검토하면  $R_c/H_i \leq 0.5$ 의 범위에서 두 결과 사이에 약간의 차이가 나타나지만, 고려된 무차원천단고의 전체범위에서는 두 결과가 합리적인 대응성을 나타내는 것을 알 수 있다. 한편, 잠제에 의한 전달율과 비교하면 LCS의 전달율이 상대적으로 매우 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있고(Lee et al., 2016), 이에 따라 배후 경사사빈에 미치는 파동의 영향은 잠제의 경우보다 LCS의 경우가 적을 것이며, 이로 인하여 구조물의 배후에 형성되는 3차원해빈류가 상이하게 나타날 것으로 추정된다(Lee et al., 2019).

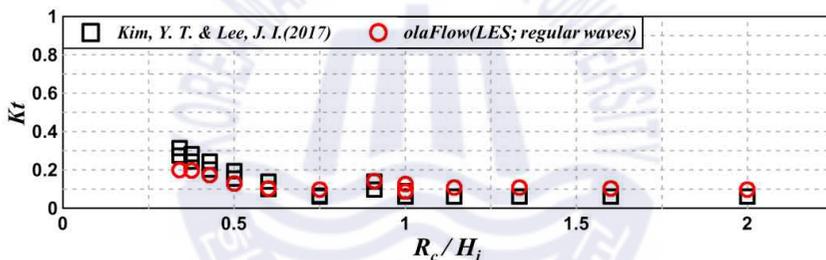


Fig. 3.7. Comparison of the transmission coefficients.

### 3.3.2 파의 전파과정

다음의 Fig. 3.8은 Table 3.3에서 제시한 케이스 중에 02H40Rc3과 09H40Rc8의 경우에 대한 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. 두 케이스는 동일한 입사파랑의 제원을 가지지만, 천단고가 상이한 경우를 나타낸다. 여기서, 천단고가 상이하지만, 입사파고가  $H_i=4\text{cm}$ 로 적은 값을 가지기 때문에 두 천단 상에서 월파가 발생되지 않고, 피복층인 TPP층 내로 파가 전파되기 때문에 두 경우 모두 유속과 수위변동의 각각에서 유의한 차이가 발생되지 않는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 그리고, 두 경우 모두 TPP층 내를 통과한 파에너지는 대부분이 케이스 천단 상에서 빠른 흐름의 속도에너지로 변환되어 LCS의 배후로 전달된다.

다음으로, Fig. 3.9는 Table 3.3에서 입사파고가 제일 큰  $H_i=8.8\text{cm}$ 에 대해 천단고가 상이한 두 케이스 07H88Rc3과 14H88Rc8의 경우에 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보

면 전반적으로 천단이 낮은  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우는 입사파가 피복층의 TTP층을 윤표하는 반면, 천단이 상대적으로 높은  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우는 비윤표한다. 이러한 연유로 TTP층의 내부와 위에서 수위변동 및 유속변화가 매우 상이하게 나타나고, 특히 천단이 낮은  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우는 케이슨의 천단 상에서 매우 빠른 흐름이 발생하고, 케이슨 배후로 바로 전달되어 LCS의 배후에서 전달파에 직접적인 영향을 미치게 된다. 한편, 천단이 높은  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우 파가 피복층의 TTP층을 윤표하지 않기 때문에 파에너지는 TTP층 내에서 크게 소산되고, 따라서 케이슨 천단 상에서 흐름으로 변환이 상대적으로 작고, LCS의 배후로 전달되는 파에너지는 적어지게 된다.

### 3.3.3 LCS 주변에서 평균파고의 공간분포

이상과 같은 파랑의 전파과정에서 발생하는 TTP의 피복층 및 내부사석층에서 파에너지의 소산 등으로 천단고 및 입사파고의 차이에 따라 공간파고의 크기에 많은 차이가 있을 것으로 판단되며, 이러한 결과를 나타낸 것이 Fig. 3.10이다. 그림을 살펴보면 입사파고가 작은  $H_i \leq 5\text{cm}$ 의 경우에 천단고의 차이에 따른 공간파고의 변동은 거의 나타나지 않는 반면,  $H_i > 5\text{cm}$ 의 경우는 LCS의 전면 및 배후면에서 미미하지만 약간의 파고 차이가 나타나며, 배후면에서는 천단고가 높은 경우가 전체적으로 약간 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 천단고가 높은 경우가 비윤표로 되고, 이에 따라 TTP층 내에서 마찰에 의한 파에너지의 소산이 상대적으로 크게 발생되기 때문이다. 여기서, LCS의 전면에서는 부분중복파동장이 형성되지만,  $H_i \leq 6\text{cm}$ 의 경우 전술한 바와 같이 천단고의 차이에 따른 부분중복파고에서 차이가 거의 나타나지 않는다. 그러나,  $H_i > 6\text{cm}$ 의 경우 천단고의 차이에 따라 부분중복파고에서 차이가 나타나지만, 값의 차이는 미소하며, 따라서 천단고의 차이에 따른 반사율의 차이는 매우 적은 것으로 판단된다. 이로부터 케이슨 전면으로부터 반사되는 파는 TTP층 내부를 전파하는 동안 거의 소산되는 것으로 판정된다.

다음의 Fig. 3.11은 Fig. 3.10의 결과를 천단고별로 입사파고의 변화에 따른 무차원공간파고분포를 일괄하여 나타낸 것이며, 수평축은 조파경계위치로부터 거리  $D$ 를 입사파장  $L$ 로 나눈 무차원거리를 나타내며, 연직축은 각 수평위치에서 정상상태로 판단되는 10개의 파를 평균한 평균파고  $\bar{H}$ 를 입사파고  $H_i$ 로 나눈 무차원파고를 나타낸다. Fig. 3.11(a)는 천단고가  $R_c=3\text{cm}$ 인 경우에, Fig. 3.11(b)는  $R_c=8\text{cm}$ 인 경우에 각각 해당한다. 여기서, 케이슨 바로 전면에서 비윤표의 경우 수위는 높아지는 반면, 윤표의 경우 수위는 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 케이슨 전면에서 비윤표의 경우 반사율이 커지고, 윤표의 경우 반사율이 작아지기 때문이다. 또한, 향내측의 구조물 근방에서 무차원전달파고는  $R_c=3\text{cm}$ 의 윤표 시에 연직방향으로 상대적으로 큰 값의 변동을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 이는 천단고가 보다 낮기 때문에 윤표가 발생되고, 이에 따라 윤표수괴가 향내측의 수면을

강타하여 수면교란이 크게 되기 때문이다.

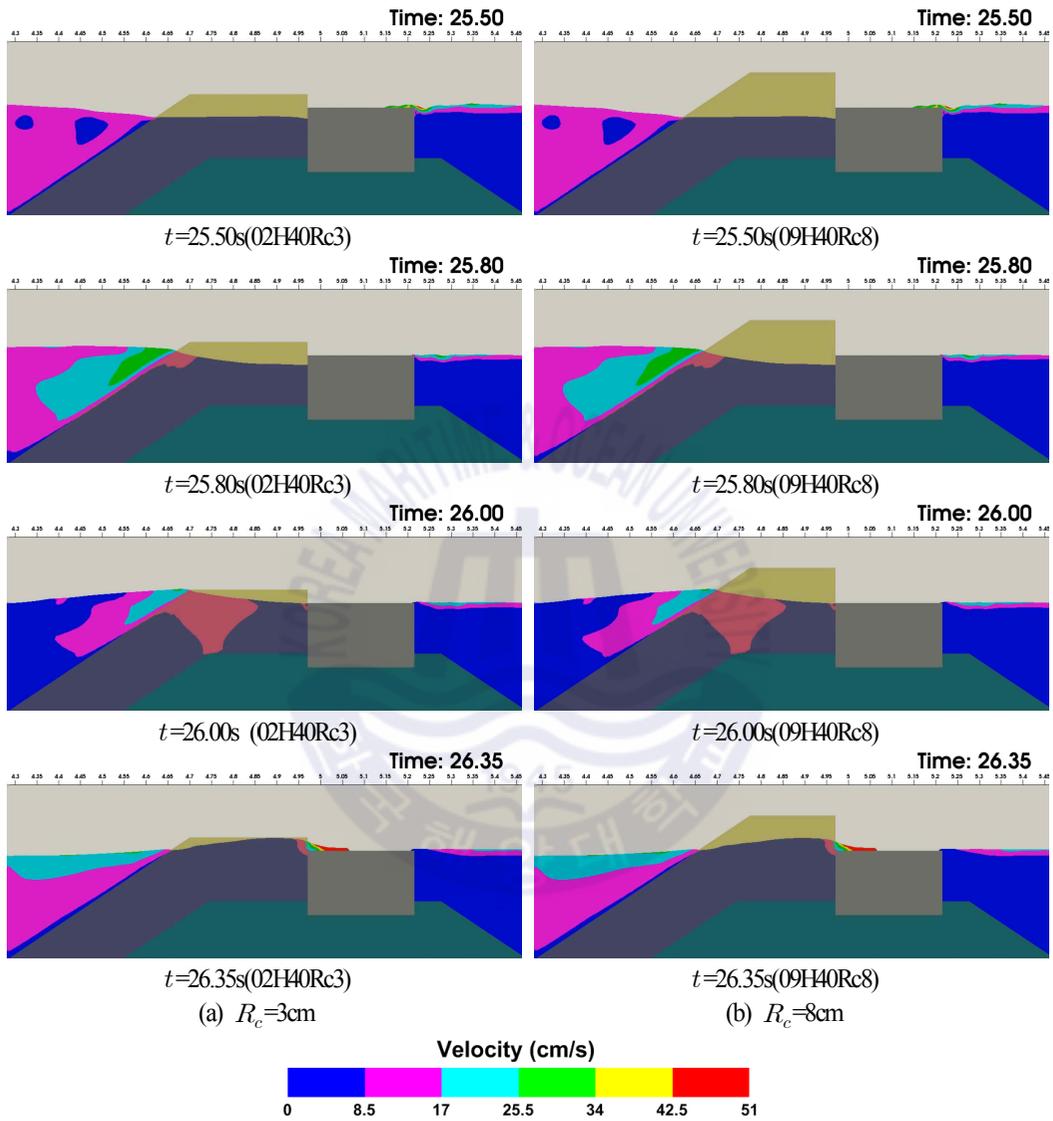


Fig. 3.8. Snapshots of water velocity and water level around LCS for  $H_i=4\text{cm}$ .

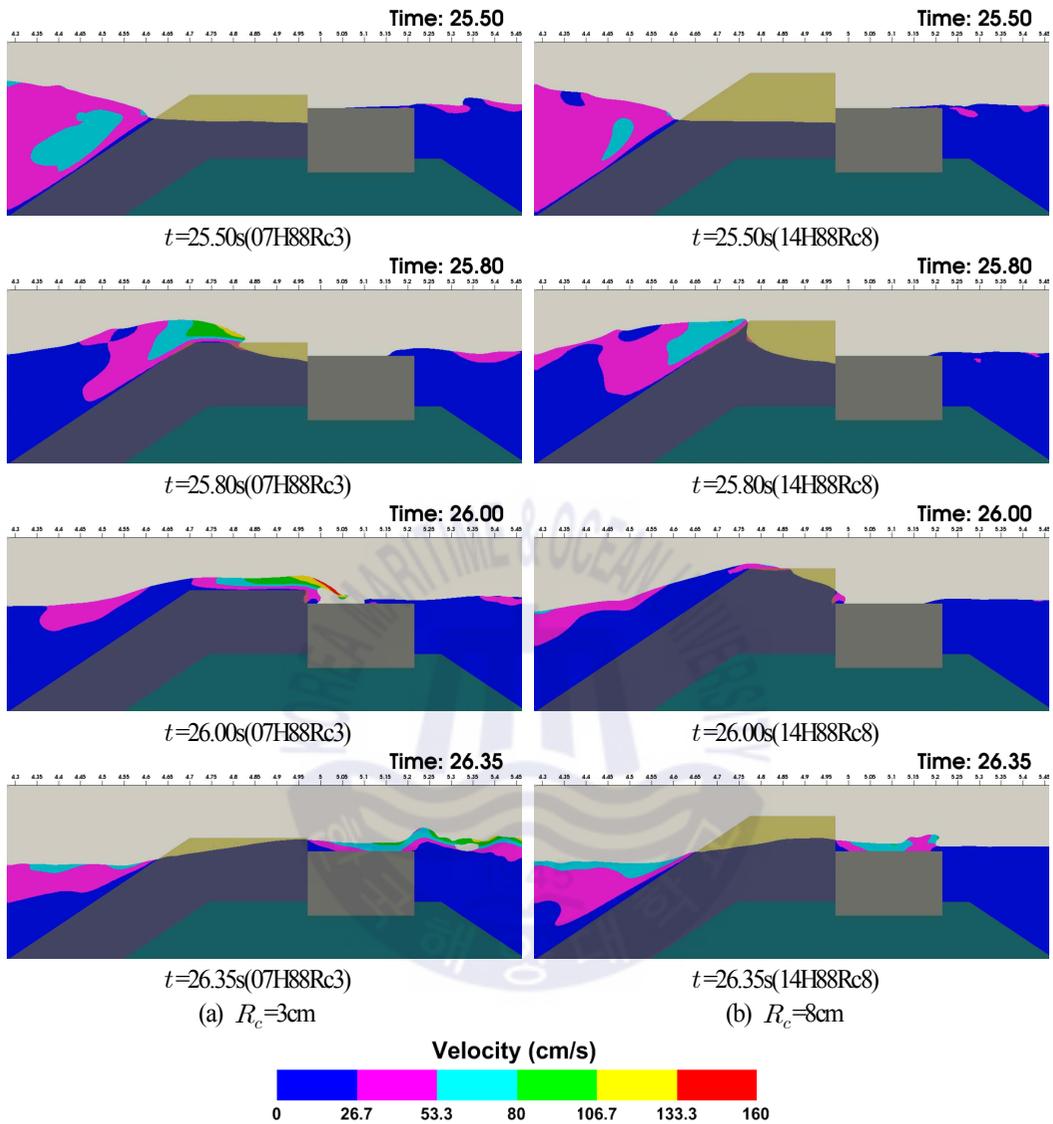
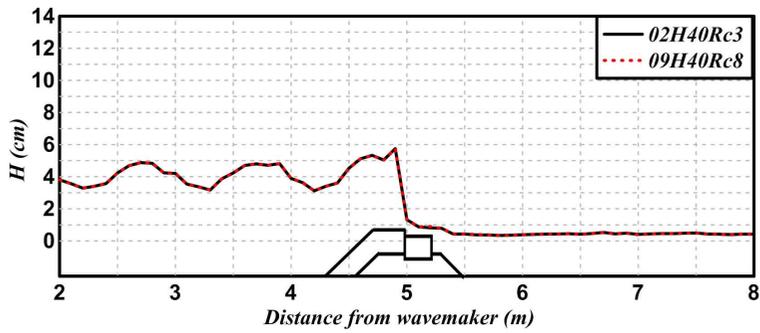
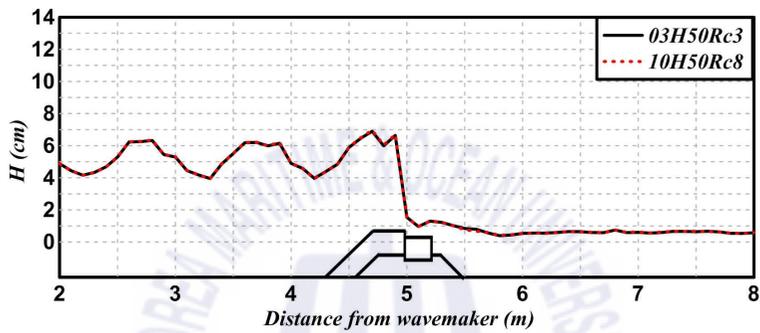


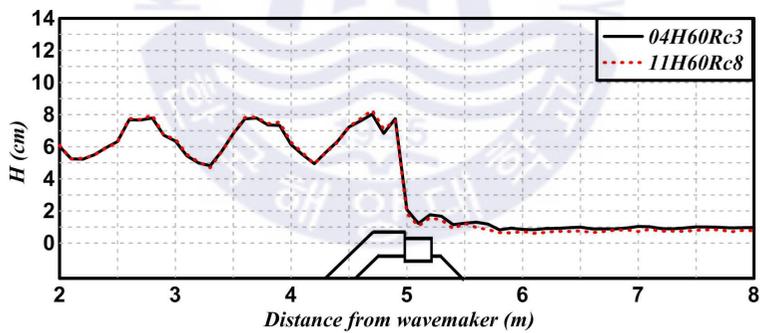
Fig. 3.9. Snapshots of water velocity and water level around LCS for  $H_i=8.8\text{cm}$ .



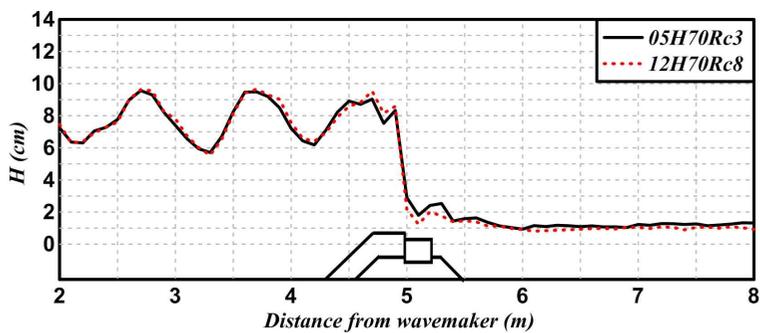
(a)  $H_i=4\text{cm}$



(b)  $H_i=5\text{cm}$

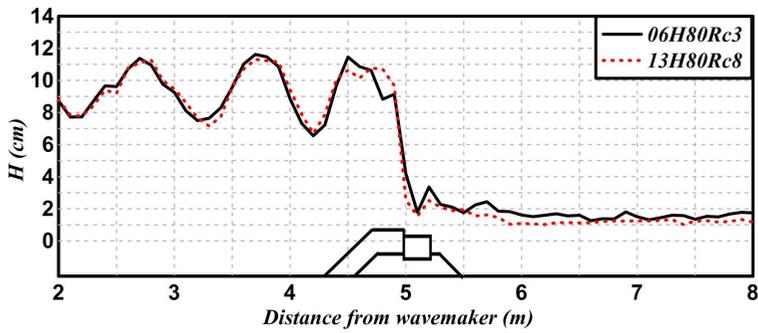


(c)  $H_i=6\text{cm}$

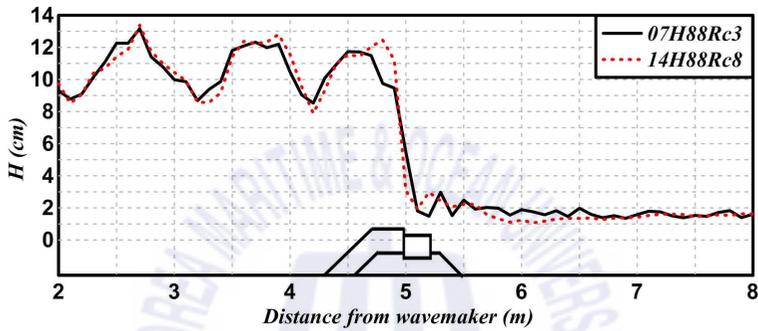


(d)  $H_i=7\text{cm}$

(continued)

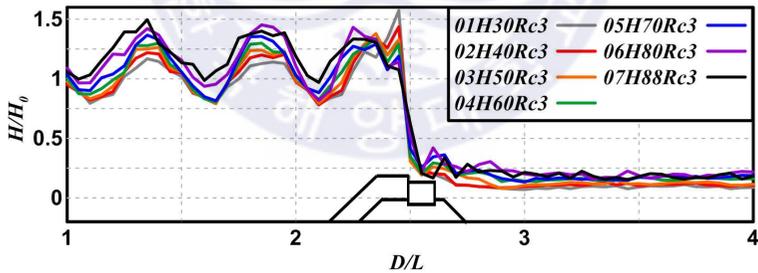


(e)  $H_i=8\text{cm}$

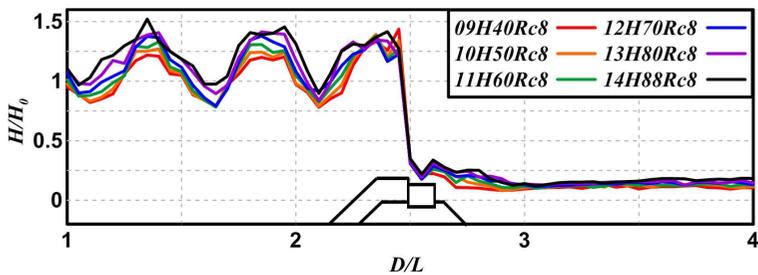


(f)  $H_i=8.8\text{cm}$

Fig. 3.10. Spatial distribution of simulated wave heights for different  $R_c$ .



(a)  $R_c=3\text{cm}$



(b)  $R_c=8\text{cm}$

Fig. 3.11. Spatial distribution of simulated wave heights for different  $H_i$ .

### 3.3.4 평균유속의 공간분포

Fig. 3.12는 Table 3.3에 나타난 전체케이스에 대해 LCS 주변에서 유속을 시간평균한 평균유속의 공간분포를 나타낸 결과이다. 시간평균에 적용된 파의 수는 정상상태에 도달한 것으로 판별된 5개의 파를 대상으로 하였다. 그림을 살펴보면 전반적으로 항외측인 LCS의 전면비탈면 앞에 반시계방향의 순환류셀이 현저히 형성되는 것과 항내측의 정수위 부근에서 항내측으로 향하는 일방향흐름이 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 LCS의 전면에서 세굴 혹은 항내측에 3차원헤비류(연안류와 이안류)에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다(Lee et al., 2019). 여기서, 천단고의 높이에 관계없이 입사파고가 커질수록 LCS의 항외측에서 순환류셀의 강도 및 흐름속도가 커지고, 더불어 항내측의 정수위 부근에서 발생하는 일방향흐름도 커지는 것을 확인할 수 있다(각 그림에서 범례의 크기가 상이한 것에 유의바란다). 한편, 동일한 입사파고의 비월파 시는 천단고의 높이에 따라 항외측의 순환류셀 및 항내측의 일방향흐름이 거의 차이를 나타내지 않지만, 동일한 입사파고의 월파와 비월파 시는 비월파의 높은 천단고의 경우가 항외측의 순환류셀에서 보다 강한 강도를 나타내는 반면, 항내측의 일방향흐름의 크기는 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 LCS의 TTP층 내에서 마찰에 의한 파에너지의 소산, 비탈면 상에서 쇄파 및 월파 혹은 비월파와 연관되어 나타는 현상으로 판단된다.

### 3.3.5 평균난류운동에너지의 공간분포

Fig. 3.13은 정상상태에 도달한 5개의 파에 대한 평균난류운동에너지를 시간평균하여 공간분포로 나타낸 것이다. 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산정도를 판단하는 중요한 요소로, 파고변화에 직접적인 영향을 미친다. 그림에서 관찰할 수 있는 전체적인 경향은 평균난류운동에너지가 구조물 근방에서 크게 나타나며, 구조물에서 항외·내측으로 갈수록 급격히 감소되는 경향을 나타낸다. 또한, 항외측 정수위 근방과 그 위의 TTP층 내에서, 그리고 케이스 배후의 정수위 근방에서 평균난류운동에너지가 집중되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 결과는 정수위 근방에서 유속이 증가하기 때문에 이에 따른 난류성분도 동시에 증가되기 때문이며, 또한 정수위 근방에서 파에너지가 집중되고, 구조물과의 상호작용에 따른 난류성분이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 한편,  $R_c=3\text{cm}$ 와  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우를 비교하면 입사파고가 증가할수록  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우에 대한 평균난류운동에너지의 크기가 상대적으로 증가하는 현상을 볼 수 있다. 여기서, 케이스 배후의 정수위 근방에서 평균난류운동에너지가 집중되는 현상은 전술한 수위변동과 흐름의 패턴으로부터 알 수 있는 바와 같이 케이스의 천단 상에서 강한 수평류가 발달되고, 이로 인한 수괴가 케이스의 배후로 돌입되기 때문이다.

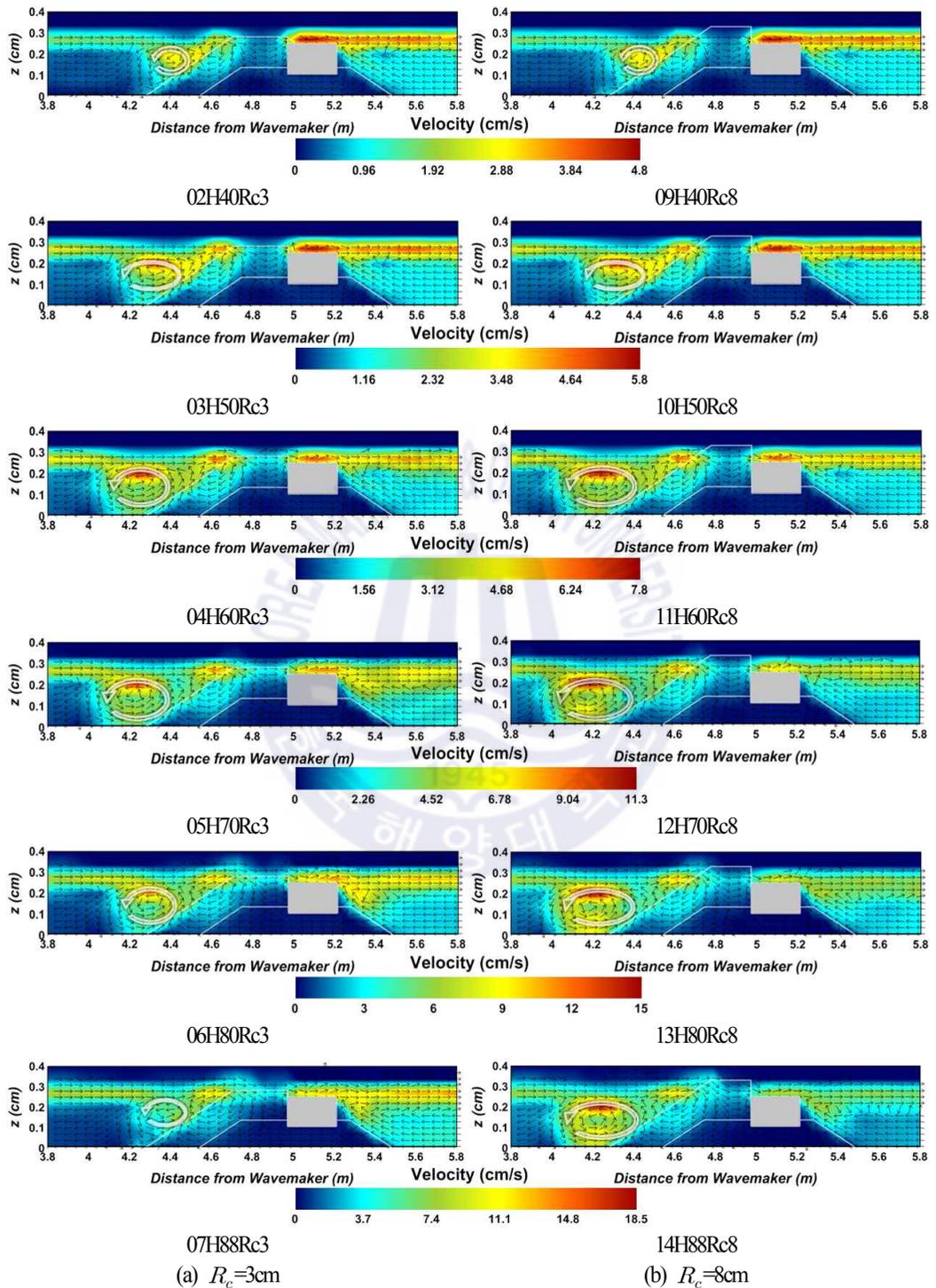


Fig. 3.12. Spatial distribution of time-averaged velocities around LCS.

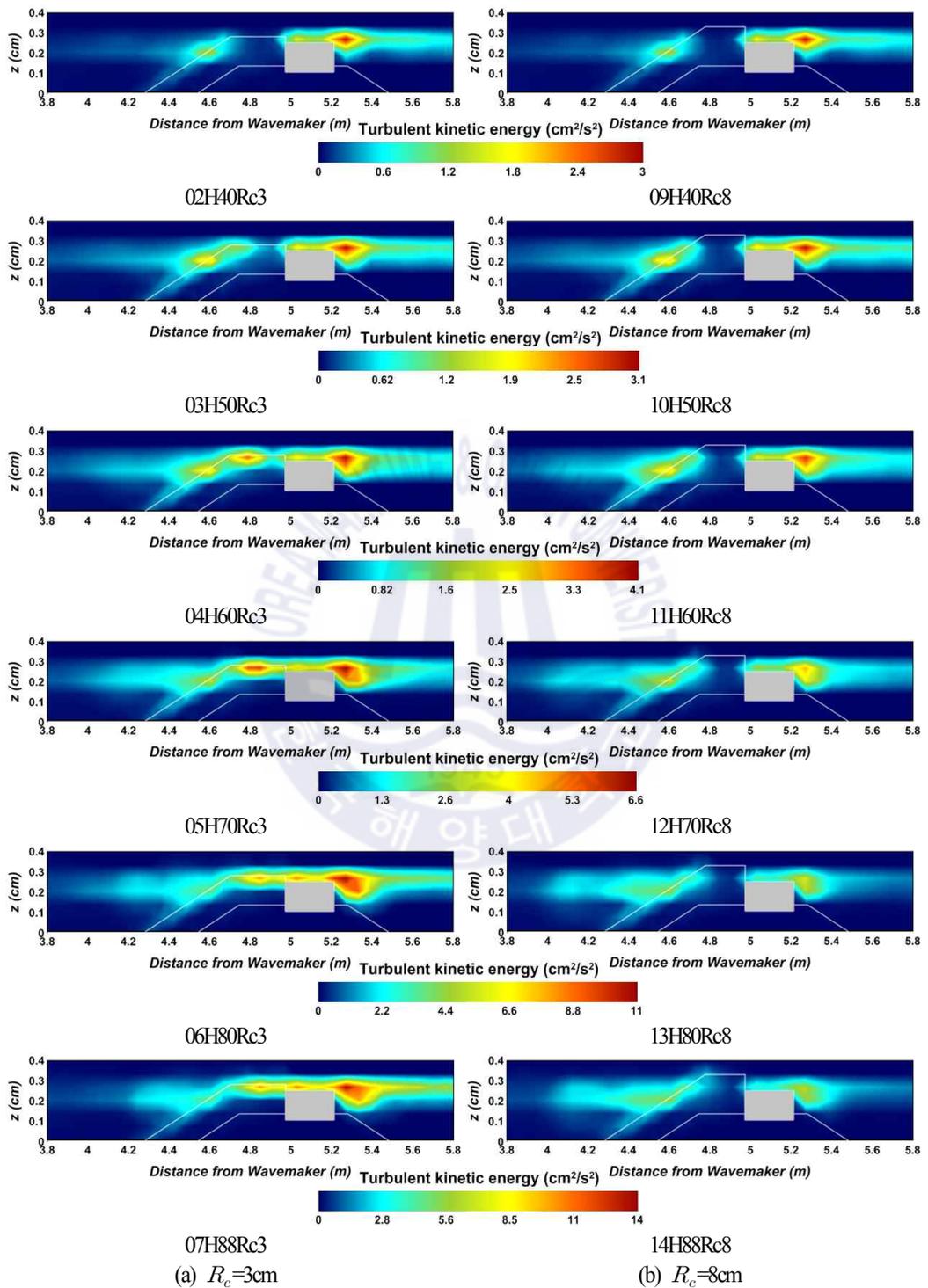


Fig. 3.13. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around LCS.

### 3.4 결론

본 장에서는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)을 이용하여 다공성매질에서 단파의 수위변동과 규칙 파동장에서 잡재에 의한 파의 변형에 관한 기존의 수리실험결과와 비교·검토로부터 그 타당성을 검증하였다. LCS가 설치된 2차원수치파동수로에 규칙파를 작용시켜 구조물에 의한 전달율, 파고의 공간분포, 구조물 주변에서 흐름 및 난류운동에너지를 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 결과를 다음에 요약 기술한다.

(1) 파고전달율은 전체적으로  $R_c/H_i$ 가 적을수록 약간 증가하는 경향을 나타내지만,  $R_c/H_i > 0.5$ 의 영역에서는 파고전달율의 변화가 거의 없다. 이러한 결과는 기존의 수리실험결과와 잘 일치한다.

(2) 파고의 공간분포에서 LCS의 전·후면 항내·외측에서 천단고의 변화에 따른 파고의 차이는 적다. 하지만, 천단고의 차이에 따른 공간파고의 차이는 입사파고가 커질수록 약간 나타난다. 전달파고는 천단고가 높은 비월파의 경우가 상대적으로 작은 값을 나타낸다.

(3) 평균유속은 구조물 항외측의 전면에 반시계방향의 순환류셀이 형성되고, 항내측에서 항내로 향하는 일방향흐름이 강하게 나타나며, 이러한 순환류셀의 강도 및 일방향흐름은 천단고의 높이와 이에 따른 월파여부 및 입파파고의 크기와 밀접한 관계를 가진다.

(4) 평균난류운동에너지는 유속이 큰 평균수위의 상면부근에서 구조물과 파와 상호작용에 의한 난류성분이 발달하는 케이슨 전면의 TTP층 내, 케이슨의 천단부 및 케이슨의 배면에서 크게 나타난다. 특히, 케이슨의 배면에 나타나는 큰 평균난류운동에너지는 케이슨의 천단 상에서 강한 수평류가 항내로 하향돌입하면서 발생된다. 이러한 평균난류운동에너지의 변동은 전술한 바와 같이 천단고의 높이와 이에 따른 월파여부 및 입사파고의 크기와 밀접한 관계를 가진다.

### Reference

- 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.
- Garcia, N., Lara, J. L., Losada, I. J. (2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters, *Coastal Engineering*, (51) 991-1020
- 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 Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments.

ICCE, ASCE, 828-845.

- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- 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.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2017). Hydraulic experiments on wave transmission coefficients for rubble mound structure armored with tetrapods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(4), 198-205.(in Korean)
- Lee, J.H., Bae, J.H., An, S.W., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019). Variation characteristics of wave field around three-dimensional low-crested structure. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(3), 180-198.(in Korean)
- 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 OLAFOAM. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 332-349.(in Korean)
- Li, X and Zhan, W. (2019). 3D numerical simulation of wave transmission for low-crested and submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, (152) 103517
- 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 Eng., MIT.



## 제 4 장 2차원저천단구조물의 주변에서 불규칙파동장의 변동특성

### 4.1 수치해석의 검증

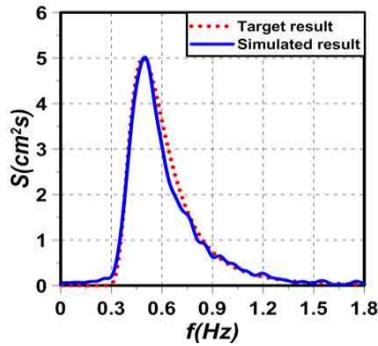
#### 4.1.1 불규칙파의 조파

제 2장에서는 Garcia et al.(2004)에 의한 2차원투과성잠제 주변에서 유속을 분석하는 수리모형실험과 Li and Zhang(2019)에 의한 2차원불투과성잠제 주변에서 파랑변형을 측정한 수리모형실험을 각각 olaFlow 모델에 의한 수치해석결과와 비교 및 검토를 하여 타당성을 검증하였다.

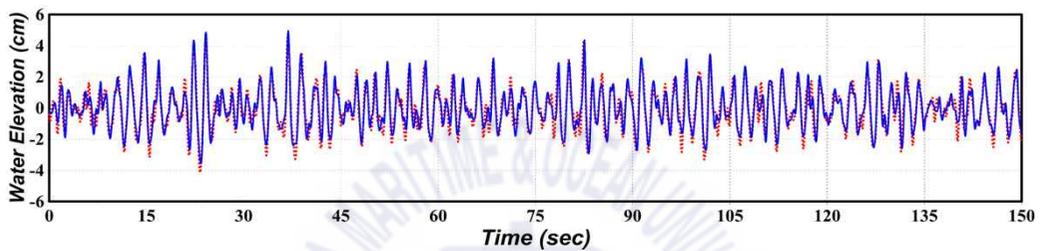
본 장에서는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)에 있어서 조파소스에 의한 불규칙파의 수치조파 성능을 검증하기 위하여 구조물이 설치되지 않은 일정수심  $h=0.4\text{m}$ 의 수치파동수조에서 유의파고  $H_{1/3}=5.0\text{cm}$ , 유의주기  $T_{1/3}=1.8\text{s}$ 를 목표로 불규칙파를 조파하였다. 적용한 스펙트럼은 식(2.12)에 제시한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)이며, 150개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. 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. 4.1(a)와 4.1(b)에 각각 제시되어 있고, 동시에 Fig. 4.1(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 4.1에 나타난 파랑조건을 적용하여 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)으로부터 150개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. Table 4.1의 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. 4.2는 Table 4.1의 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. 4.1. Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra.

Table 4.1. 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

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 감쇠에 따른 결과이며, 이러한 결과로부터 조파관에서 12.5m 이격된 위치에서 불규칙파랑의 특성은 조파위치에서의 특성과는 상이하게 나타난다. 또한, 두 스펙트럼의 침두주파수에서 약한 차이가 발생하며, 유의주기가 짧을수록 그의 차이가 커지고, 동시에 구조물 위치에서의 입사스펙트럼이 상대적으로 약한 장주기측으로 이동되는 현상을 볼 수 있다. 심해역과 천해역에서 나타나는 주파수스펙트럼의 이러한 특성들은 일반 해안공학에서 잘 알려진 현상과 합치되는 결과로 판단된다.

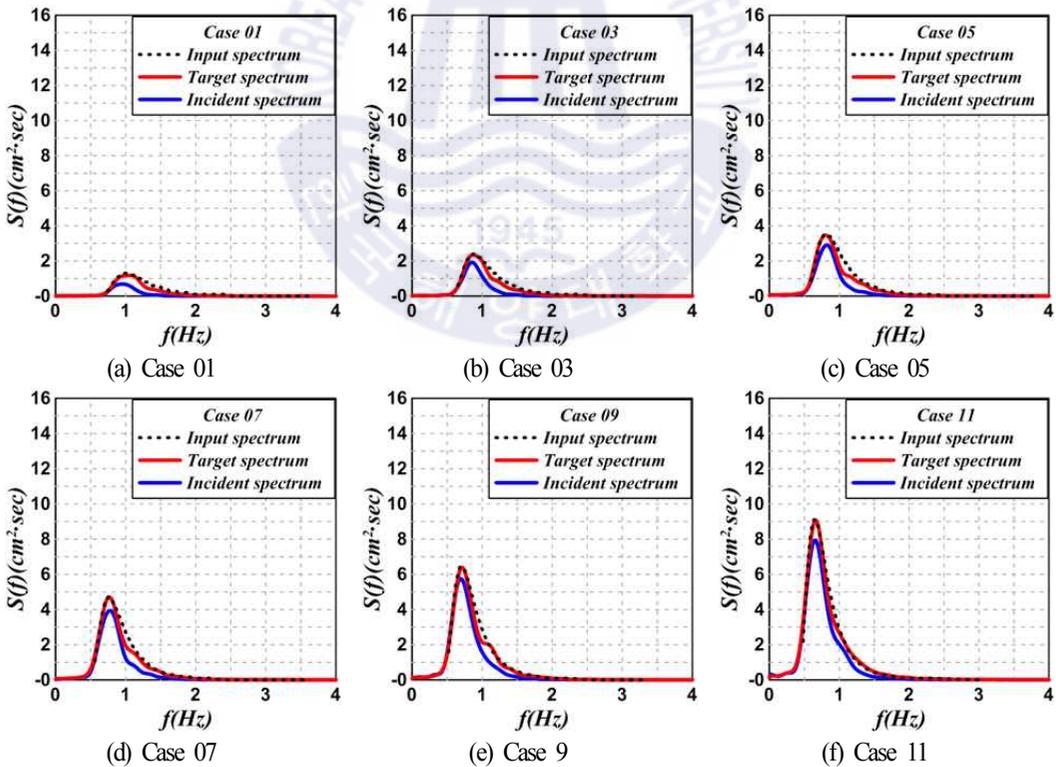
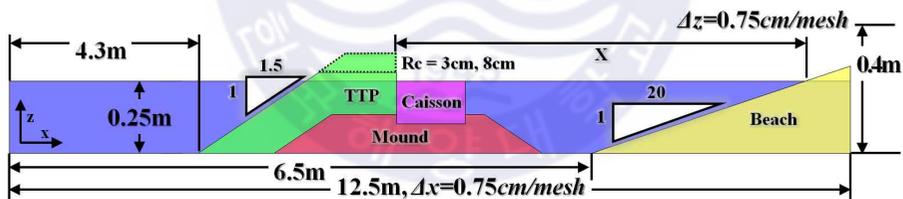


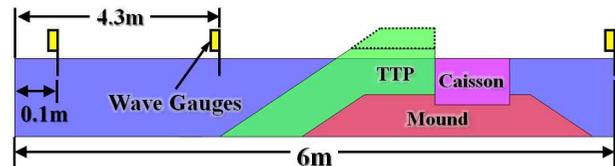
Fig. 4.2. Comparison of target, input and incident spectra.

## 4.2 계산조건

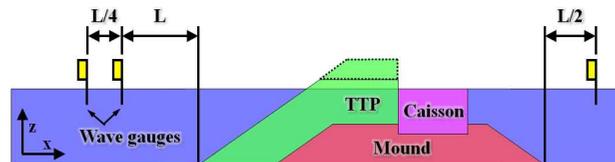
Fig. 4.3(a)는 본 수치해석에서 LCS에 의한 불규칙과동장의 변동특성을 분석하기 위하여 구성된 수치과동수로 및 LCS의 단면형상을 나타낸다. 그림과 같이 12.5m, 높이 0.4m의 수로에서 바닥경계에는 Slip조건이 적용되었고, 격자는 수평방향으로  $\Delta x=0.75\text{cm}$ , 연직방향으로  $\Delta z=0.75\text{cm}$ 의 크기를 갖는 정방격자로 구성되었고, 조파 시 정수면 상에 연직방향으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다. 수위는 0.25m의 일정수심으로 구성되었고, LCS와 경사사빈은 각각 조파판으로부터 4.2807m와 6.47m로 이격되었다. 여기서, LCS의 단면형상은 Lee et al.(2019a)를 참조하여 도출되었고, 이는 케이슨, TTP 및 사석마운드로 구성된다. 본 LCS의 피복층인 TTP층은 1:1.5의 경사와 0.1967m의 두께를 가지고, 천단고는  $R_c=3\text{cm}$ 와  $R_c=8\text{cm}$ 로 상정되며, TTP층의 공극률은  $\phi=0.5$ , 저항계수는 Madsen and White(1975)의 실험으로부터 산정된  $\alpha=1200$ 과  $\beta=1.7$ 을 적용한다. 사석마운드부는 1:1.5의 경사와 0.1333m의 높이를 가지며, 공극률은  $\phi=0.33$ , 중앙입경은  $D_{50}=3\text{cm}$ 이고, 이에 대한 저항계수는 Jensen et al.(2014)의 실험에서 제시한  $\alpha=500$ 과  $\beta=2.0$ 을 적용한다. 반면, 케이슨은 불투과성으로 고려되었고, 높이는 0.1467m이다. 경사사빈은 1:20의 경사를 가지며, 공극률은  $\phi=0.3$ , 중앙입경은  $D_{50}=0.2\text{cm}$ 이며, Billstein et al.(1999)의 실험에 의해 얻어지는 저항계수  $\alpha=0$ 와  $\beta=3.0$ 이 적용되었다. 여기서,  $X$ 는 정수면에서 정선으로부터 LCS까지의 이격거리를 나타낸다.



(a) Illustrative sketch of wave flume, emerged LCS and sandy beach



(b) Measuring points of water level fluctuation for analyzing spectrum



(c) Measuring points of water level fluctuation for analyzing wave transmission

Fig. 4.3. Definition sketch of wave flume and LCS.

Table 4.2는 본 수치해석에 적용한 불규칙파랑의 제원, 구조물의 천단고, 구조물의 해안선으로부터 이격거리 및 월파 여부를 나타낸다. 계산은 LES에 의한 난류모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였으며, 안정적인 계산을 위해 Courant 상수를 0.1 이하가 되도록 설정하여 수치해석을 수행하였다.

Table 4.2. Incident wave condition and 2-dimensional layout of LCS.

CASE No.	Crest freeboard from still water level $R_c$ (cm)	Incident wave spectrum	Significant incident wave height $H_{1/3}$ (cm)	Significant incident wave period $T_{1/3}$ (s)	Distance between shoreline and LCS $X$ (m)	Number of waves
01H30Rc3	3	Modified Bretshneider-Mitsuyasu	3	1.4	6.5	150
02H40Rc3			4			
03H50Rc3			5			
04H60Rc3			6			
05H70Rc3			7			
06H80Rc3			8			
07H88Rc3			8.8			
08H30Rc8			8			
09H40Rc8	4					
10H50Rc8	5					
11H60Rc8	6					
12H70Rc8	7					
13H80Rc8	8					
14H88Rc8	8.8					

### 4.3 수치해석결과

#### 4.3.1 LCS 주변에서 파랑스펙트럼

Fig. 4.4는 동일한 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 와 입사유의주기  $T_{1/3}=1.4\text{s}$ 에 대해 입사유의파고  $H_{1/3}$ 의 변화에 따른 조파판 전면(WG1,  $x=0.1\text{m}$ ), LCS의 시작점(WG2,  $x=4.3\text{m}$ ) 및 LCS의 배후(WG3,  $x=6\text{m}$ )에서의 불규칙수위변동으로부터 얻어진 파스펙트럼의 비교를 나타내고, 각 측정위치는 Fig. 4.3(b)에 제시하였다. 그림에서 입사유의파고가 증가함에 따라 WG1과 WG2에서의 파스펙트럼이 증가하는 경향을 나타

내지만 LCS의 배후인 WG3에서는 파스펙트럼의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 여기서, WG1과 WG2에서 파스펙트럼의 차이는 LCS에 의한 부분중복파의 형성에 따른 공간과고에서의 차이에 따른 요인과 WG1에서의 파가 전파되어 WG2의 위치에 도달하기까지의 유체점성 및 난류형성에 따른 파에너지의 감쇠에 따른 요인의 영향 때문이다. 이러한 요인은 입사유의과고의 증가에 따라 크게 되며, 결과적으로 WG2에서 파스펙트럼의 감쇠율이 크게 나타난다. 특히, 입사유의과고가 증가함에 따라 침두주파수를 중심으로 고·저주파수영역으로 파에너지의 전이가 발생되고, 입사유의과고가 가장 큰 Fig. 4.4(d)의 WG2에서는 삼봉형스펙트럼이 형성되는 것을 볼 수 있다. 한편, WG3에서 파스펙트럼의 변화가 거의 나타나지 않는 것은 LCS의 투과성매질 내에서 배후로 전달되는 파에너지의 대부분이 소산되어 파에너지의 전달이 거의 발생되지 않는다는 것을 나타내며, 이러한 결과는 후술하는 LCS에 의한 파전달율에 직접적인 영향을 미친다. 다음의 Fig. 4.6에서는 보다 상세한 영역에서 도시한 전달파스펙트럼을 고찰한다.

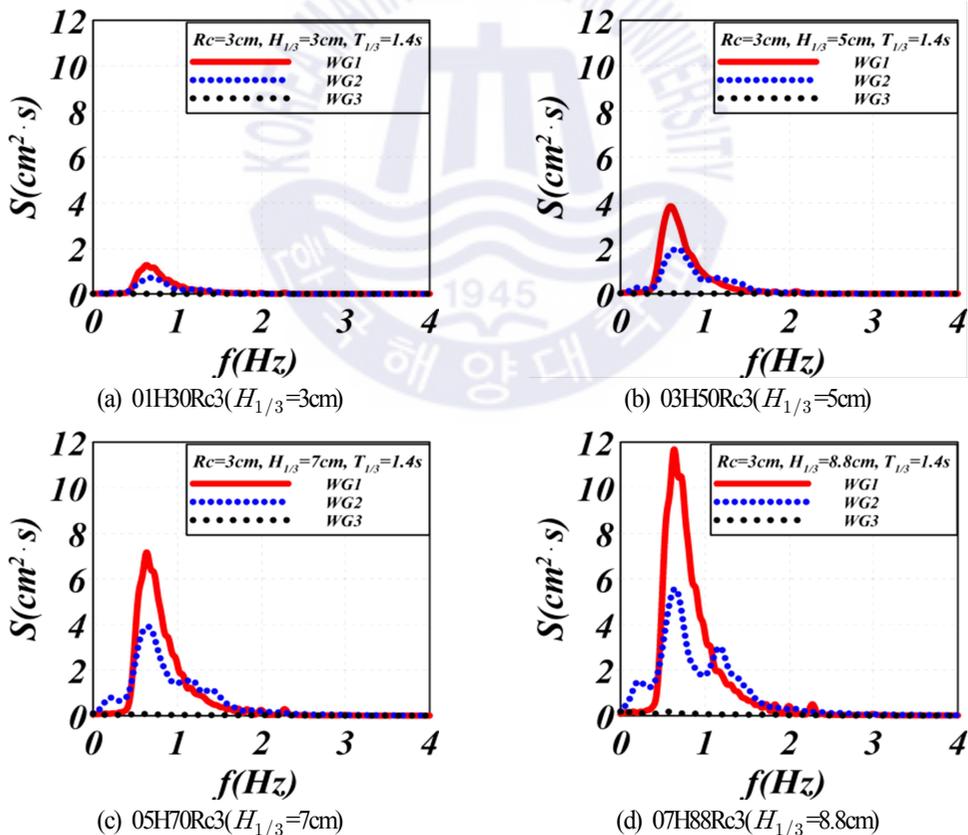


Fig. 4.4. Comparison of spectra obtained at WG1, WG2 and WG3 for various significant incident wave heights in case of  $R_c=3\text{cm}$  and  $T_{1/3}=1.4\text{s}$ .

Fig. 4.5는 Fig. 4.4에서의 조건과 모두 동일하지만 단지 천단고가  $R_c=3\text{cm}$ 에서  $R_c=8\text{cm}$ 로 증가된 경우의 파스펙트럼을 도시한 결과이다. 입사유의파고의 변화에 따른 변동경향은 Fig. 4.4의 경우와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 에서  $R_c=8\text{cm}$ 로의 증가가 LCS 전면의 부분중복과동장과 후면으로 전달과에 영향을 미치지 않기 때문이며, 따라서 후술하는 LCS에 의한 반사율과 전달율에서 천단고의 변화에 따른 차이가 미미하다는 것을 추론할 수 있다.

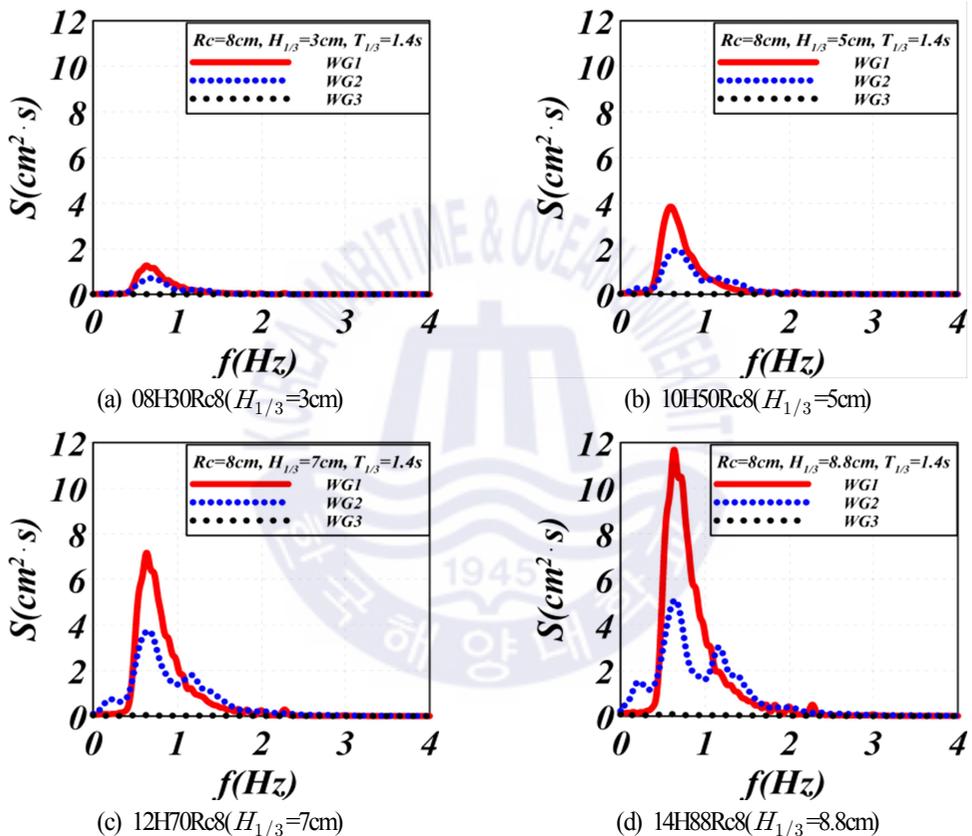


Fig. 4.5. Comparison of spectra obtained at WG1, WG2 and WG3 for various significant incident wave heights in case of  $R_c=8\text{cm}$  and  $T_{1/3}=1.4\text{s}$ .

Fig. 4.6은 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 와  $R_c=8\text{cm}$ 인 경우에 Figs. 4.4와 4.5에서 제시된 LCS의 배후인 WG3에서 얻어진 두 전달파스펙트럼을 보다 상세한 영역에서 나타낸 결과로, 입사유의파고의 차이에 따른 두 전달파스펙트럼을 비교한 결과이다. Figs. 4.4와 4.5에서는 두 전달파스펙트럼에서 차이가 거의 분별되지 않았지만 상세역에서는 입사유의파고가 증가할수록 낮은 천단고인  $R_c=3\text{cm}$ 에서의 전달파스펙트럼

이 미미하지만 약간 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 적은 차이이지만 낮은 천단인  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우가  $R_c=8\text{cm}$ 보다 약간 큰 파전달율을 나타내는 결과로 이어진다. 그리고, LCS의 전면에서 파스펙트럼 형상과 비교하면 LCS의 후면에서는 매우 다른 형상의 파스펙트럼을 나타내며, 특히 침두주파수가 상당히 저주파수의 영역에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 입사유의주기를 중심으로 단주기측의 파는 장주기측의 파보다 상대적으로 LCS의 투과성매질 내에서 보다 잘 소산된다는 사실을 간접적으로 시사한다.

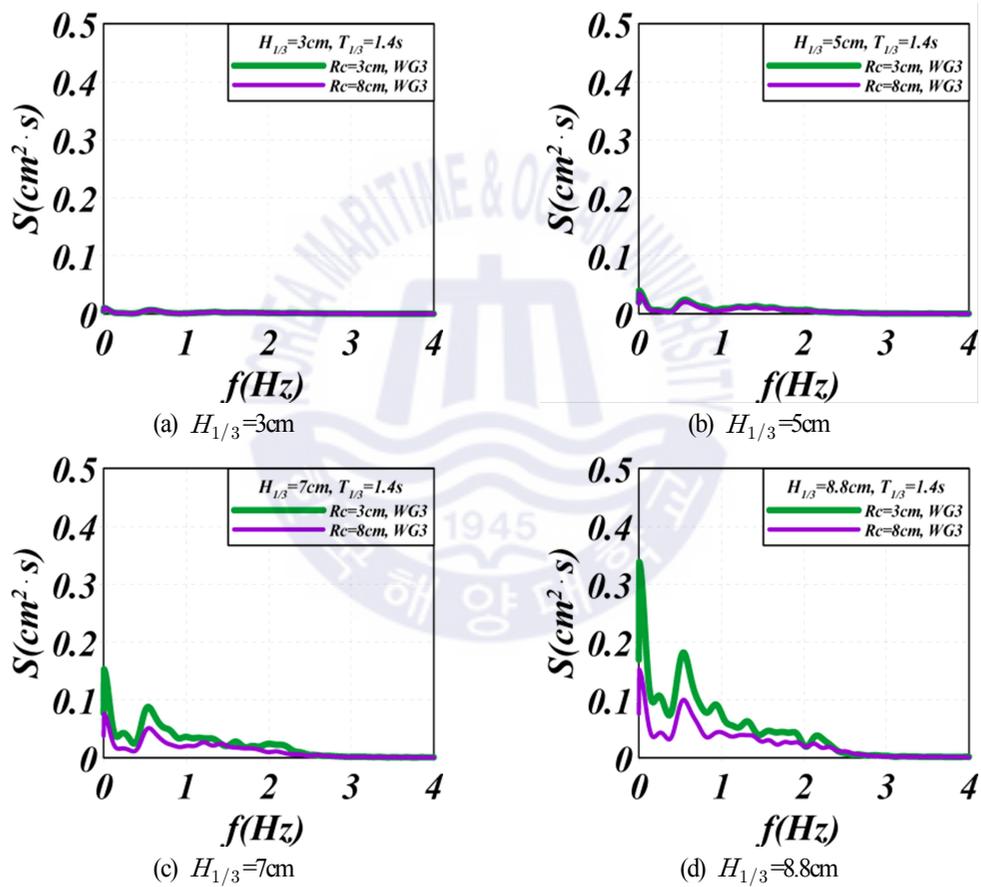


Fig. 4.6. Comparison of spectra obtained at  $x=6.0\text{m(WG3)}$  for  $T_{1/3}=1.4\text{s}$ .

#### 4.3.2 LCS에 의한 전달율

Fig. 4.7은 Table 4.2에서 제시한 불규칙입사파랑조건을 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)에 적용하여 수치적으로 산정된 파전달율과 Kim and Lee(2017)의 수리모형실험에 기초하여 제시된 추정식으로부터

얻어진 파전달율을 각각 비교한 결과이다. 그림에는 Lee et al.(2019b)에서 규칙파동장 하에 산출된 파전달율도 병기한다. 여기서, 파전달율은 Fig. 4.3(c)에서 도시한 3개의 파고계에 대해 LCS 전면의 2개의 파고계로부터 입사파스펙트럼과 반사파스펙트럼을 Goda and Suzuki(1976)의 2점법으로부터 분리·도출하고, 동시에 LCS 배후면에 설치된 1개의 파고계에서 얻어지는 전달파스펙트럼을 전술의 입사파스펙트럼으로 나누어 전달율을 추정하였다.

그림의 수평축은 LCS의 천단고  $R_c$ 를 입사파고  $H$ (규칙파) 혹은  $H_{1/3}$ (불규칙파)로 각각 무차원화한 무차원천단고를 나타내고, 연직축은 LCS에 의한 파전달율  $K_t$ 를 나타낸다. 전체적인 경향은 무차원천단고의 변화에 따른 전달율의 변화는 크지 않으며, 무차원천단고가 0.5보다 적은 범위에서는 무차원천단고가 작을수록 전달율이 약간 상승하는 경향을 나타내지만 0.5보다 큰 범위에서는 무차원천단고의 영향이 거의 나타나지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 실험결과와 수치결과를 비교·검토하면 무차원천단고가 0.5보다 적은 범위에서는 실험결과가 약간 크고, 반면 0.5보다 큰 범위에서는 실험결과가 약간 작지만 그 차이는 미소하며, 고려된 무차원천단고의 전체범위에서는 세 결과가 합리적으로 대응하는 것을 알 수 있다. 그리고, 규칙파와 불규칙파에 대한 수치해석결과를 비교하면 무차원천단고가 0.5보다 큰 범위에서 두 경우 거의 동일한 파전달율을 나타내지만 0.5보다 적은 범위에서는 규칙파의 경우가 미미하지만 약간 큰 값을 나타낸다.

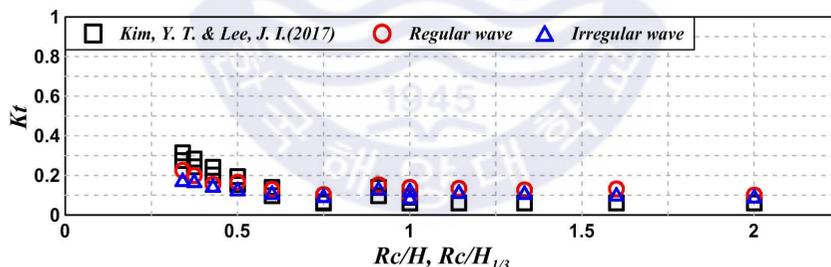


Fig. 4.7. Comparison of the transmission coefficients.

### 4.3.3 파의 전파과정

Fig. 4.8은 Table 4.2에서 제시한 케이스 중에 02H40Rc3과 09H40Rc8의 경우에 최대파가 LCS 근방에 전파되었을 때 불규칙파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. 여기서, 천단고가 상이하지만 입사유의파고가  $H_{1/3}=4\text{cm}$ 로 상대적으로 적은 값을 가지기 때문에 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 와  $R_c=8\text{cm}$  모두 월파가 발생되지 않고, 피복층인 TTP을 통해 파의 대부분이 전파되기 때문에 두 경우 모두 유속과 수위변동의 각각에서 유의한 차이를 나타내지 않는 것이 시각적으로 확인된다. 그리고, 두 경우 모두 TTP층을 통과한 파에너지의 대부분은 케이스 천단 상에서 빠른 흐름의 속도에너지로 전환되어 LCS

의 배후로 전달된다.

Fig. 4.9는 Table 4.2에서 가장 큰 입사유의파고  $H_{1/3}=8.8\text{cm}$ 가 내습한 경우 상이한 천단고를 가진 07H88Rc3과 14H88Rc8에서 최대파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. 그림으로부터 상대적으로 천단이 낮은  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우는 불규칙입사파가 피복층인 TTP층을 약간 월파하는 반면, 천단이 상대적으로 높은  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우는 상대적으로 적은 월파가 발생된다. 이러한 연유로 LCS의 전면과 주변에서 수위변동 및 유속변화가 상이하게 나타나고, 특히 천단이 낮은  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우는 케이슨의 천단 상에서 매우 빠른 흐름이 나타나고, 케이슨 배후로 바로 전달되어 LCS의 배후전달파에 직접적인 영향을 미친다. 한편, 천단이 높은  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우 파가 피복층인 TTP층을 상대적으로 적게 월파하기 때문에 파에너지는 TTP층 내에서 크게 소산되고, 따라서 케이슨 천단 상에서 흐름으로의 전환이 상대적으로 적고, LCS의 배후전달파에도 적은 영향을 미친다.

#### 4.3.4 LCS 주변에서 $H_{rms}$ 파고의 공간분포

전술한 불규칙파랑의 전파과정에서 발생하는 LCS에 의한 파에너지의 소산 등으로 천단고 및 입사유의파고의 차이에 의한 Root-mean square 파고  $H_{rms}$ 의 크기는 다소 차이를 가질 것으로 판단되며, Fig. 4.10은 이러한 결과를 도시한 것이다. 이 때, 그림의 수평축은 조파판으로부터 이격된 거리를 나타내고, 수직축은  $H_{rms}$ 를 나타내며, 수치해석결과는 정상상태에 도달한 210s 동안의 불규칙파를 대상으로 하였다. 그림에는 두 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 와  $R_c=8\text{cm}$ 에 대한 결과를 비교한다. 전반적으로, 입사유의파고가 적은  $H_{1/3} \leq 5\text{cm}$ 의 경우 천단고의 차이에 따른  $H_{rms}$ 의 공간변동에서 차이는 거의 나타나지 않는 반면,  $H_{1/3} > 5\text{cm}$ 의 경우는 LCS의 전면 및 배후면에서 미미하지만  $H_{rms}$ 에서 약간 차이가 나타나며, 배후면에서 천단고가 높은  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우가 전체적으로 약간 적은 값을 나타내는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 이는 천단고가 높은 경우가 월파를 상대적으로 적게 허용하고, 따라서 TTP층 내에서 마찰에 의한 파에너지의 소산이 상대적으로 크게 발생하기 때문이다. 여기서, LCS의 전면에서는 규칙파의 경우(Lee et al., 2019b)보다 부분중복과동장이 상대적으로 작게 형성되는 경향을 나타낸다.

한편, 입사유의파고가 증가할수록  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우는  $R_c=3\text{cm}$ 보다 LCS의 케이슨 바로 전면에서  $H_{rms}$ 가 국부적으로 급격히 증가되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 결과는 불투과케이슨에 의한 큰 반사파(적은 월파)에 의한 현상으로, 이러한 큰 반사파는 파진행방향의 반대방향으로 전파하면서 피복층 내에서 대부분 소산되고, LCS 전면의 부분중복과동장에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

규칙파(Lee et al., 2019b)의 경우와 비교하면 불규칙파의 경우가 LCS의 전면에서 적은 반사율로 인하여 부분중복과동장이 상대적으로 작게 형성되지만 케이슨의 배후측에서 상대적으로 낮은 파고의 형성 및 TTP층 내부를 통한 파에너지소산에 관한 양상 등은 전체적으로 유사하게 나타났다.

다음의 Fig. 4.11은 Fig. 4.10의 결과를 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 와  $R_c=8\text{cm}$ 에 대해 무차원특성파고  $H_{rms}/H_{1/3}$ 의 공간분포를 일괄하여 나타낸 것이다. 그림에서 수평축은 조파경계위치로부터 거리  $D$ 를 입사유의주기에 해당하는 입사유의파장  $L_{1/3}$ 로 나눈 무차원거리를 나타내고, 연직축은 무차원특성파고  $H_{rms}/H_{1/3}$ 를 나타낸다.

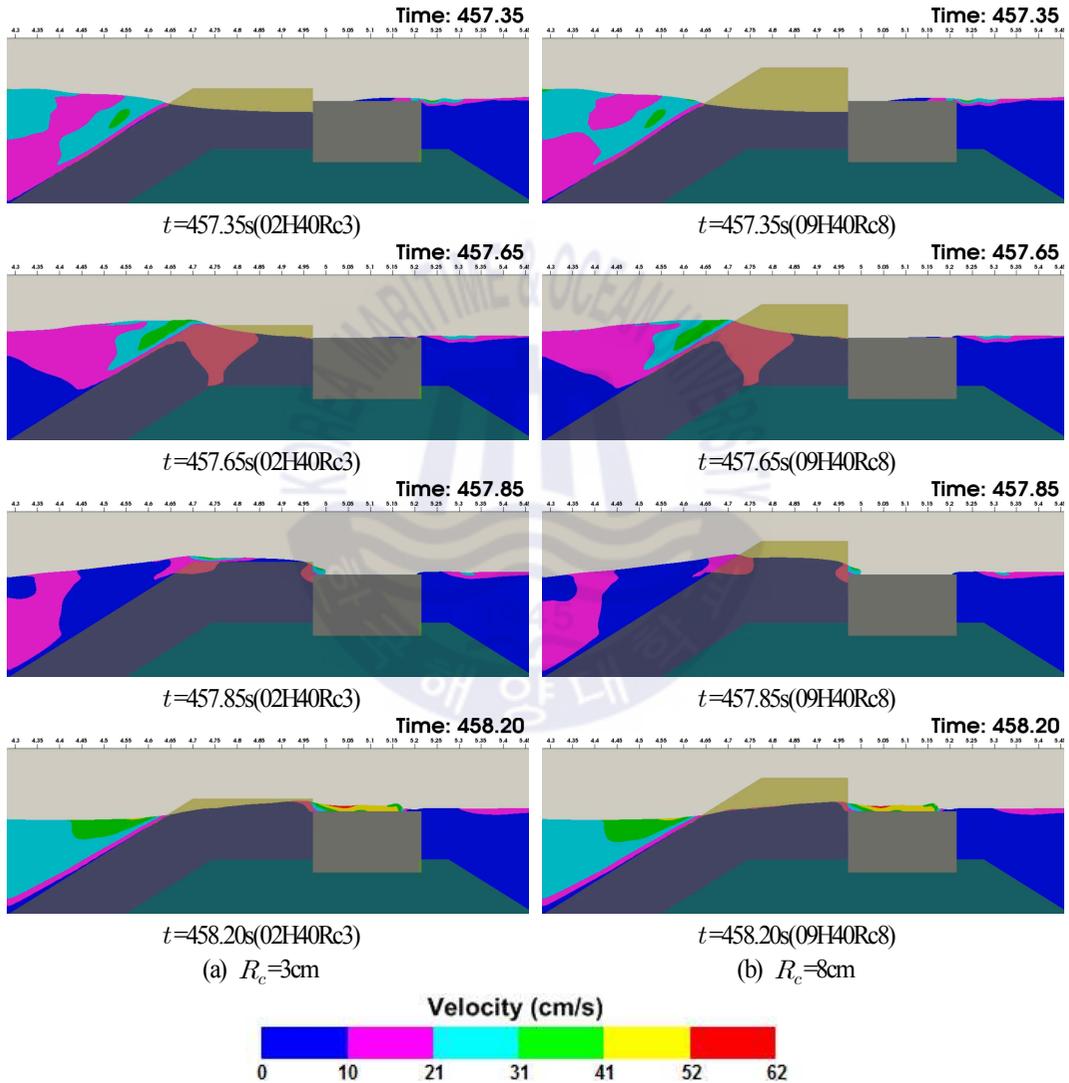


Fig. 4.8. Snapshots of water velocity and water level around LCS for  $H_{1/3}=4\text{cm}$ .

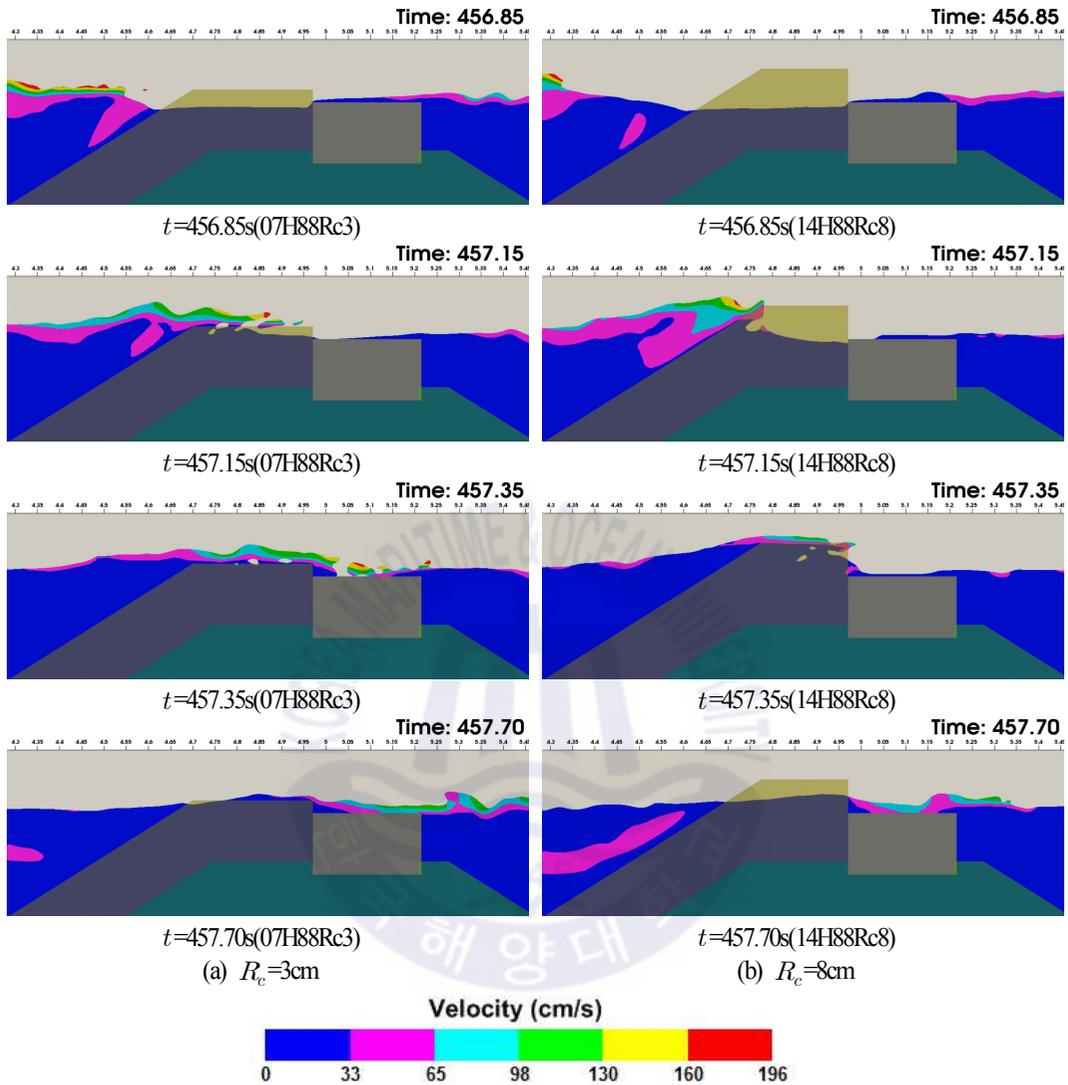
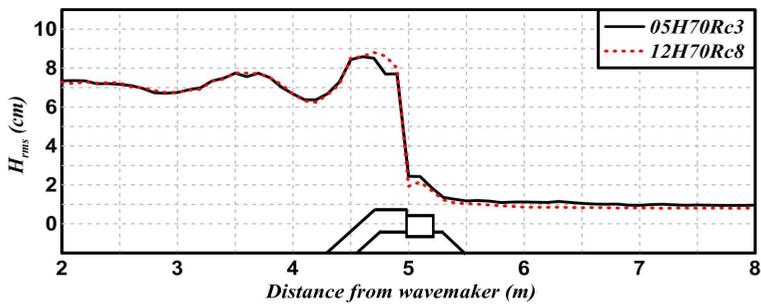
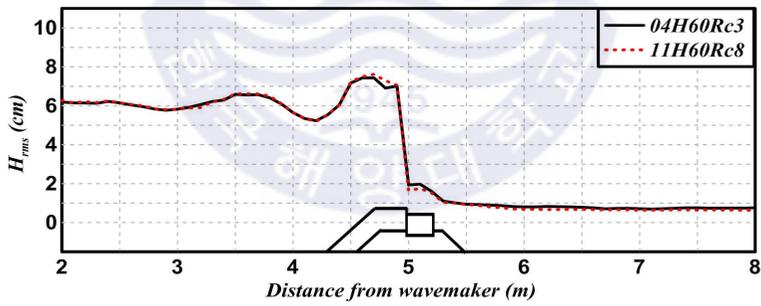
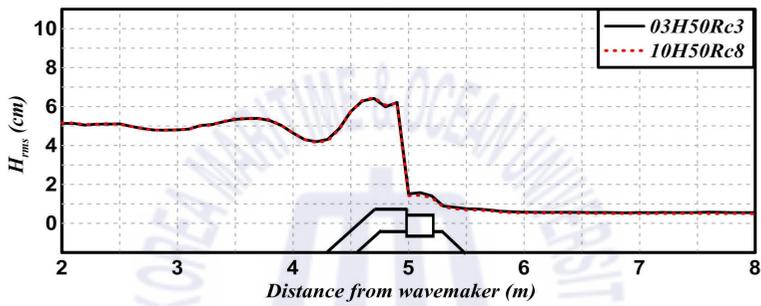
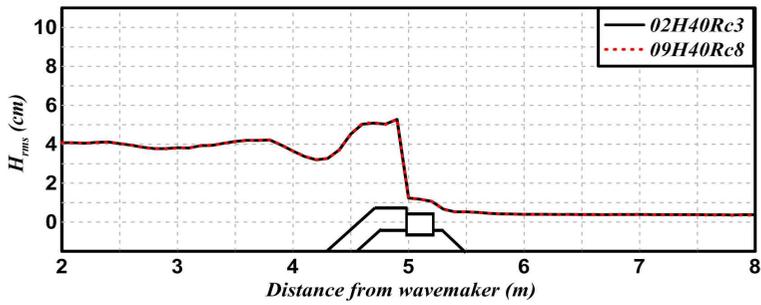


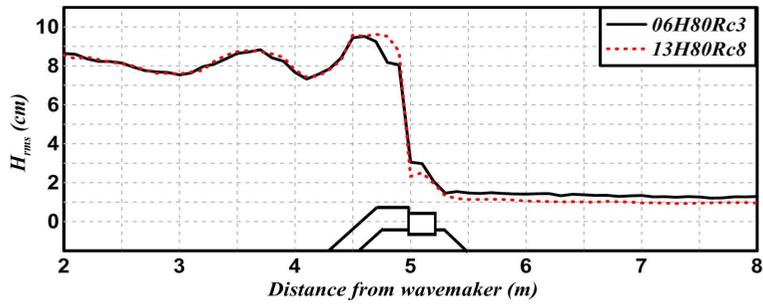
Fig. 4.9. Snapshots of water velocity and water level around LCS for  $H_{1/3}=8.8\text{cm}$ .

Fig. 4.11(a)는 천단고가  $R_c=3\text{cm}$ 인 경우에, Fig. 4.11(b)는  $R_c=8\text{cm}$ 인 경우에 각각 해당한다. 그림으로부터 LCS 전면의 부분중복파동에서 입사유의파고에 따른 무차원특성파고  $H_s/H_{1/3}$ 의 공간분포는 케이스에 바로 전면에서 케이스에 의한 반사 때문에 큰 변동치를 나타내지만 LCS에서 이격될수록 변동치가 줄어드는 경향을 나타낸다. 그리고, LCS의 배후면에서 무차원특성파고  $H_s/H_{1/3}$ 의 공간분포는 두 경우 모두 일정치를 나타내지만 입사유의파고에 따른 차이는 천단고가 높은  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우가 다소 적은 변동을 나타낸다. 이러한 결과는  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우 대부분 율파가 발생되지 않기 때문에 대부

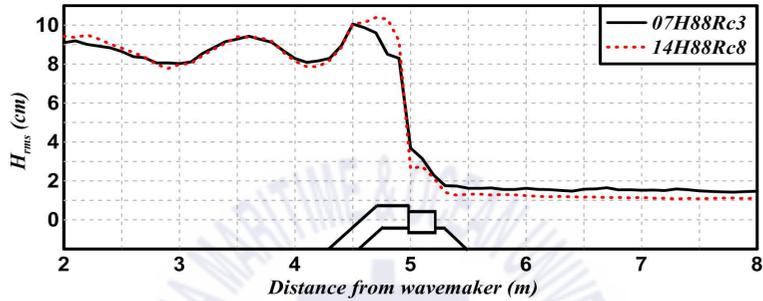
분의 파에너지가 피복층 내에서 소산되기 때문인 것으로 판단된다.



(continued)

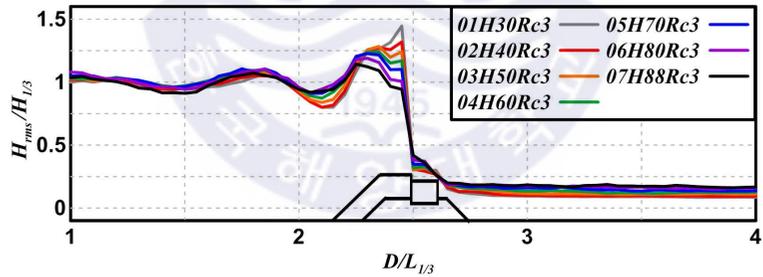


(e)  $H_i = 8\text{cm}$

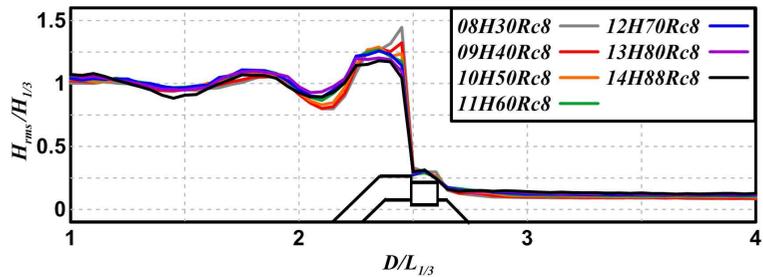


(f)  $H_i = 8.8\text{cm}$

Fig. 4.10. Spatial distribution of simulated  $H_{rms}$  for different  $R_c$ .



(a)  $R_c = 3\text{cm}$



(b)  $R_c = 8\text{cm}$

Fig. 4.11. Spatial distribution of simulated wave heights for different  $H_i$ .

#### 4.3.5 평균유속의 공간분포

Fig. 4.12는 Table 4.2에 나타난 전체케이스에 대해 LCS 주변에서 유속을 시간평균한 평균유속의 공간분포를 나타낸 결과이다. 시간평균은 파랑이 충분히 발달한 210s 동안의 파를 대상으로 하였다. 그림을 살펴보면 전반적으로 LCS의 외해측에서는 시계방향의 해빈류와 전면비탈면 앞에 반시계방향의 순환류셀이 현저히 형성되는 것과 내해측의 정수면 부근에서는 항내측으로 향하는 일방향흐름이 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 LCS의 전면에서는 세굴이 야기될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 여기서, 천단고의 높이에 관계없이 입사유의파고가 커질수록 외해측에서 순환류셀의 강도 및 흐름속도가 커지다가 순환류셀은 해빈류로 전환되고, 더불어 내해측의 정수면 부근에서 발생하는 일방향흐름은 강해지는 것을 확인할 수 있다(각 그림에서 범례의 크기가 상이한 것에 유의바란다).

또한, 월파를 상대적으로 적게 허용하는 낮은 입사유의파고의 조건에서 천단고의 변화는 외해측의 순환류셀 및 내해측의 일방향흐름에서 차이를 거의 발생시키지 않지만 낮은 천단고에서 상대적으로 월파를 많이 허용하는 높은 입사유의파고의 조건에서는 상대적으로 월파를 적게 허용하는 높은 천단고의 경우가 외해측의 순환류셀에서 보다 강한 강도를 나타내고, 동시에 내해측에서 적은 강도의 일방향흐름을 나타낸다. 이상의 경향은 규칙파(Lee et al., 2019b)에서도 동일하게 관찰되는 현상이지만 규칙파에서는 높은 천단의 경우 외해측에서 형성되는 순환셀의 강도가 불규칙파의 경우보다 강하게 형성되는 것을 알 수 있다.

#### 4.3.6 평균난류운동에너지의 공간분포

Fig. 4.13은 난류운동에너지를 시간평균한 평균난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 것이다. 시간평균은 파랑이 충분히 발달한 210s 동안의 파를 대상으로 하였다. 그림으로부터 평균난류운동에너지는 정수면 부근, LCS의 전·후 및 TTP층의 외해측에서 큰 값을 확인되고, LCS로부터 멀어질수록 적은 값을 갖는 것을 알 수 있다(각 그림에서 범례의 크기가 상이한 것에 유의바란다). 또한, 파고가 커질수록 평균난류운동에너지의 크기가 커지고, 동시에 분포범위가 확대되는 것을 알 수 있고, 외해측보다 내해측에서 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 여기서, 정수면 부근에 집중되는 난류성분은 정수면 근방에서 큰 수면변동과 유속 및 이에 따른 LCS와의 상호작용에 기인하는 것으로 판단된다. 그리고 천단고에 따른 차이를 비교하면 입사유의파고가 증가할수록  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우에 대한 평균난류운동에너지의 크기가 상대적으로 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 여기서, 낮은 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우가 상대적으로 월류를 많이 허용하기 때문에 월류수가 케이슨의 천단상에서 강한 수평흐름으로 전환되고, 이 흐름이 배후수면에 그대로 돌입됨에 따라 배후수면이 크게 교란되기 때문인 것으로 판단된다.

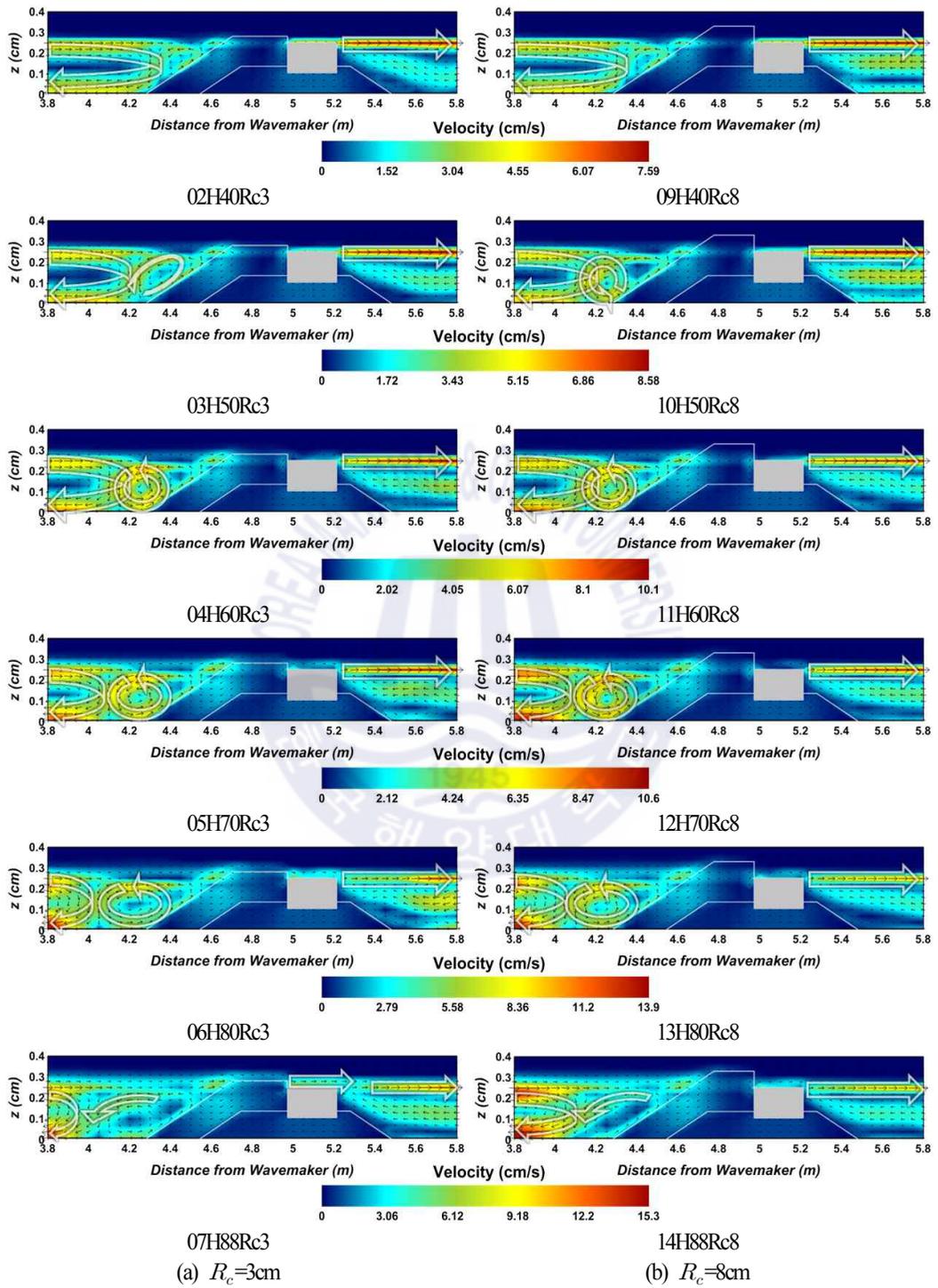


Fig. 4.12. Spatial distribution of time-averaged velocities around LCS.

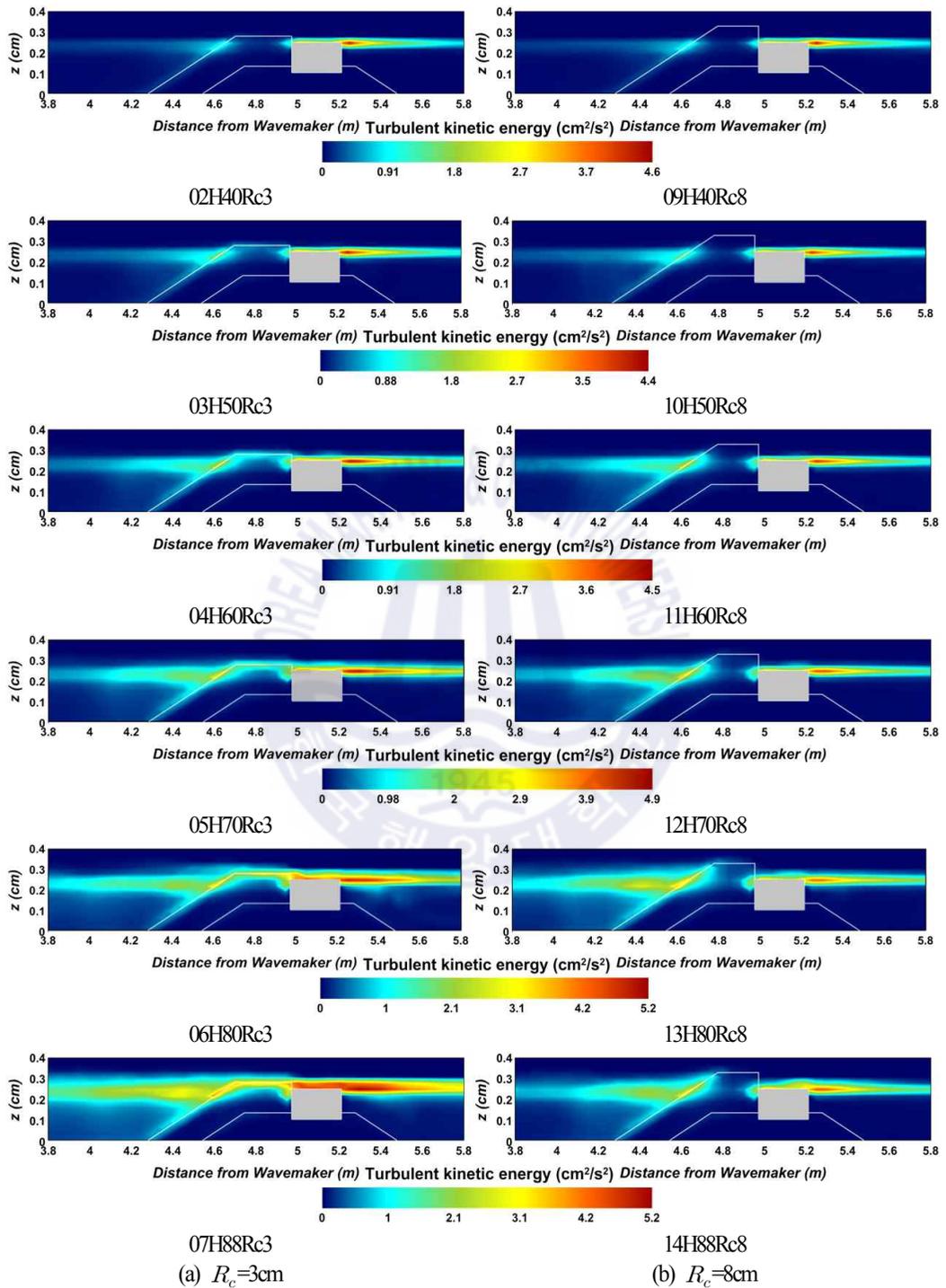


Fig. 4.13. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around LCS.

여기서, 규칙파(Lee et al., 2019b)의 경우와 비교하면 LCS의 정수면 근방에 큰 난류성분이 집중되고, LCS의 전면보다 배후면에 큰 경향을 나타내며, 천단고가 낮은  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우가 높은  $R_c=8\text{cm}$ 보다 큰 값을 나타내는 것은 동일하지만 불규칙파의 경우는 규칙파보다 평균난류에너지의 분포가 정수면 근방의 연직방향으로 보다 좁은 영역 내에 분포하며, 따라서 불규칙파는 정수면 근방에 평균난류에너지가 보다 집중되는 것이 특징이다.

#### 4.4 결론

본 장에서는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)에 Modified Bretschneider-Mitsuyasu스펙트럼(Goda 1988)을 적용하여 LCS가 설치된 2차원수치과동수로에서 위치에 따른 주파수스펙트럼의 변동특성, 파고전달율,  $H_{rms}$ 의 공간분포, LCS 주변에서 흐름(해빈류) 및 난류운동에너지의 공간분포 등을 입사유의파고와 천단고의 변화에 따라 면밀히 검토 분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 결과를 다음에 요약 기술한다.

(1) 입사유의파고가 증가함에 따라 LCS 근방(WG2의 경우)의 파스펙트럼에서는 첨두주파수를 중심으로 고저주파수영역으로 파에너지의 전이가 발생되고, 경우에 따라 삼봉형스펙트럼이 형성된다. LCS의 배후면에서 파스펙트럼은 파전달이 거의 없기 때문에 매우 적은 값을 나타내지만 첨두주파수가 상당히 저주파수측으로 이동된다.

(2) 파고전달율은 전체적으로 무차원천단고가 0.5보다 작은 영역에서는 무차원천단고가 적을수록 약간 증가하는 경향을 나타내지만 0.5보다 큰 영역에서는 거의 일정치를 나타낸다.

(3)  $H_{rms}$ 는 천단고의 변화에 따른 차이는 적고, 배후면에서는 천단고가 높은 경우가 약간 적은 값을 나타낸다.

(4) 평균유속(해빈류)은 LCS의 외해측 전면에서 시계방향의 해빈류와 반시계방향의 순환류셀이 형성되고, 내해측에서는 항내로 향하는 일방향흐름이 강하게 나타난다. 외해측에서 시계방향의 해빈류는 천단고가 높을수록, 내해측의 정수면 근방에서 일방향흐름은 천단고가 낮을수록 강해진다.

(5) 평균난류운동에너지는 정수면 상의 LCS 부근에서 큰 값을 가지며, LCS로부터 멀어질수록 감소한다. 또한, 파고가 커질수록 커지고, 동시에 분포범위가 확대되며, 외해측보다 내해측에서 더 큰 값을 갖는다.

본 수치해석결과는 케이스이 상치된 복합단면의 LCS 주변에서 파동장의 변동특성을 규명하기 위하여 불규칙파해석을 수행하였다. 결과에 따르면 잠제에 비해 파랑제어능이 탁월하고, 구조물의 전체적

인 폭을 줄일 수 있기 때문에 경제적이지만 사빈의 유지 및 개선이라는 원래의 목적을 달성하기 위해서는 다양한 입사파랑조건과 LCS의 평면배치조건에 대한 3차원적인 접근을 통하여 해빈류의 평면적인 변동특성을 면밀히 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## Reference

- 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.
- 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. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *ICCE, ASCE*, 828-845.
- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- 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.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2017). Hydraulic experiments on wave transmission coefficients for rubble mound structure armored with tetrapods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(4), 198-205.(in Korean)
- Lee, J.H., Bae, J.H., An, S.W., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019a). Variation characteristics of wave field around three-dimensional low-crested structure. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(3), 180-198.(in Korean)
- Lee, J.H., Jung, U.J., Bae, J.H., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019b). Variation characteristics of wave field around 2-dimensional low-crested structure. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(5), 294-304.(in Korean)
- 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 Eng., MIT.



## 제 5장 3차원저천단구조물 주변에서 규칙파동장의 변동특성

### 5.1 수치해석의 검증

#### 5.1.1 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압

본 장에서 적용하는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)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 IH3VOF모델에 의한 수치해석결과를 각각 비교·검토한다.

Lara et al.(2012)은 Fig. 5.1과 같이 수심  $h=0.4\text{m}$ 를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.6m, 길이 4.0m, 폭 0.5m의 투과성직립이안제에 규칙파를 작용시켜 직립벽 주변에서 수위변동과 파압변화를 각각 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 17.8m, 폭 8.6m, 높이 1.0m이며, 투과성직립벽은 조파판에서 10.5m로 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 0.6m로 구성하였다. 격자크기에서 수조 길이방향의 경우 조파지점에서부터 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. 수치조파에 Cnoidal파이론을, 난류모델에 LES모델(Ghosal et al., 1995)을 각각 적용하였으며, 조파 개시 후 20s 동안 파랑의 전파과정을 시뮬레이션하였다. 투과성직립이안제에 대한 저항계수식(2.4)의  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 전술한 바와 같이 Jensen et al.(2014)이 제시한  $\alpha=500$ 과  $\beta=2.0$ 을 적용하였다. 여기서, Figs. 5.1(b)와 (c)는 수위 및 파압변동에 관한 수리실험 및 수치해석결과의 산정위치를, Fig. 5.1(b)가 수위변동의 경우를, Fig. 5.1(c)가 파압변동의 경우를 각각 나타내며, Table 5.1에 수위계의 설치위치를, Table 5.2에 파압계의 설치위치를 각각 제시한다. 수리실험에서 수위변동 및 파압변화는 총 15개 지점에서 각각 측정되었지만, 이 중에 6개 지점(3~7지점, 9지점)에서 산정된 수위와 6개 지점(1~6지점)에서 파압에 대한 각 실험결과를 olaFlow에 의한 수치해석결과와 이하에서 상호 비교·검토한다.

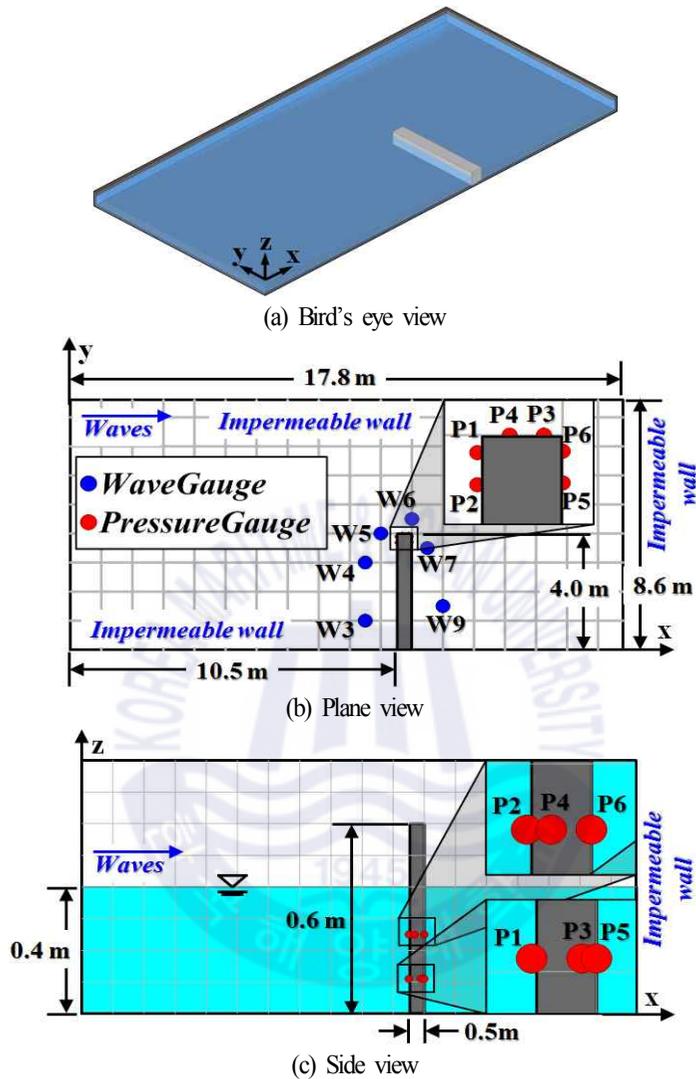


Fig. 5.1. Illustrative sketch of 3D-wave tank and 3D-permeable vertical caisson.

Fig. 5.2는 수치해석결과와 실험결과를 비교한 투과성직립이안체 주변에서 수위변동을 나타낸 것으로, 그림에서는 IH3VOF모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 같이 병기되어 있다. 그림을 살펴보면 3과 4지점은 투과성직립이안체 전면에서 수위변동을 나타낸 것으로, 8s 이후에 쌍봉형의 수위변동이 나타나며, 앞의 파봉은 입사파에 의한 것이고, 뒤는 투과성직립이안체로부터의 반사파에 의한 것이다. 5와 6지점에서의 수위변동은 투과성직립이안체와 후면 불투과벽체로부터의 회절파 및 반사파의 영향을 동시에 받는 경우로, 6지점의 16s 근방에서 발생하는 쌍봉형의 수위변동은 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향이다. 다음의 7지점은 투과성직립이안체에 의한 회절파가, 9지점은 후면

불투과벽체에 의한 반사파가 각각 영향을 크게 미치는 지점이다. 수치실험 및 수치해석결과의 대응성은 6과 7지점의 16s 이후 쌍봉형 수위변동에서 약간의 차이가 나타나지만, 전반적으로 매우 잘 구현되는 것으로 판단되며, 특히 이러한 결과는 3, 4, 5, 9지점에서 확인할 수 있고, 또한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과와 본 수치해석결과는 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

Table 5.1. Wave gauge positions.

Wave Gauges	$x$ (m)	$y$ (m)
W3	9.5	1.00
W4	9.5	3.00
W5	10.0	4.00
W6	11.0	4.50
W7	11.5	3.50
W9	12.0	1.50

Table 5.2. Pressure gauge positions.

Wave Gauges	$x$ (m)	$y$ (m)	$z$ (m)
P1	10.50	3.89	0.11
P2	10.50	3.69	0.25
P3	10.89	4.00	0.11
P4	10.69	4.00	0.25
P5	11.00	3.70	0.11
P6	11.00	3.90	0.25

Fig. 5.3은 투과성직립이안제 주변에서 파압변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 비교한 것으로, Fig. 5.2와 동일하게 IH3VOF모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 병기하였다. 그림을 살펴보면 투과성직립이안제 전면에서 파압변동을 나타낸 1과 2지점의 경우는 실험치와 거의 동일한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 투과성직립이안제과 후면 불투과벽체로부터의 회절파 및 반사파의 영향을 동시에 받는 3~6지점에서 파압변동은 전반적으로 실험치를 잘 재현하고 있지만, 수위변동에서와 같이 3, 5, 6지점의 16s 근방에서 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향에 의해 생성되는 쌍봉형의 파압변동에서 약간의 차이가 인정된다. 그러나, 전체적으로 실험치를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, olaFlow모델(Higuera et al., 2018)에 의한 수치해석결과는 투과성직립이안제에 의한 파랑변형과 작용파압의 변동과정에서 실험치를 잘 재현하고 있으므로 LCS와 같은 투과성구조물로의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

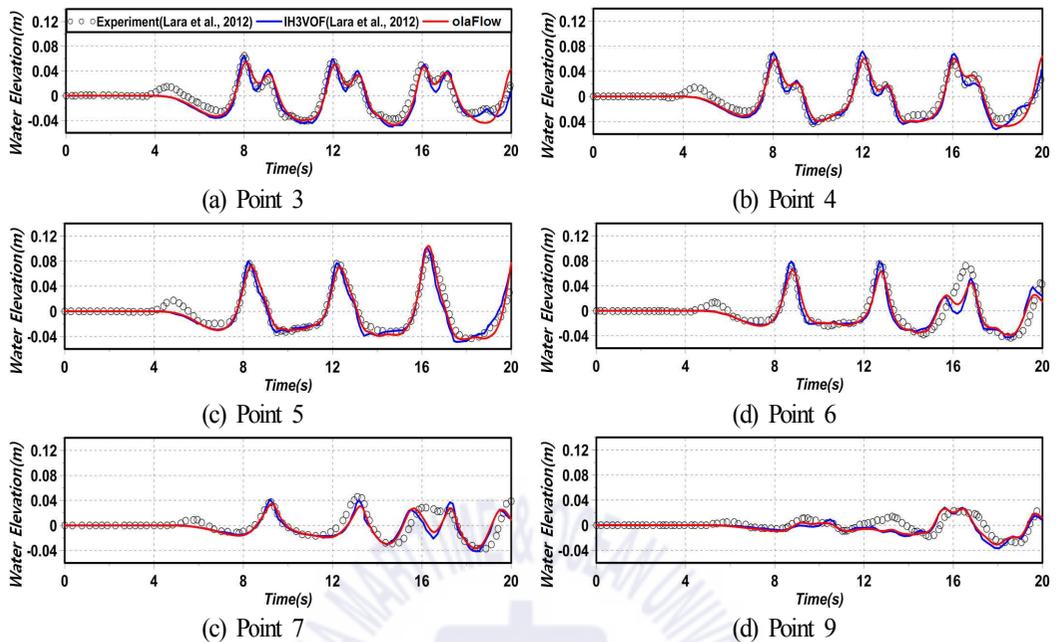


Fig. 5.2. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

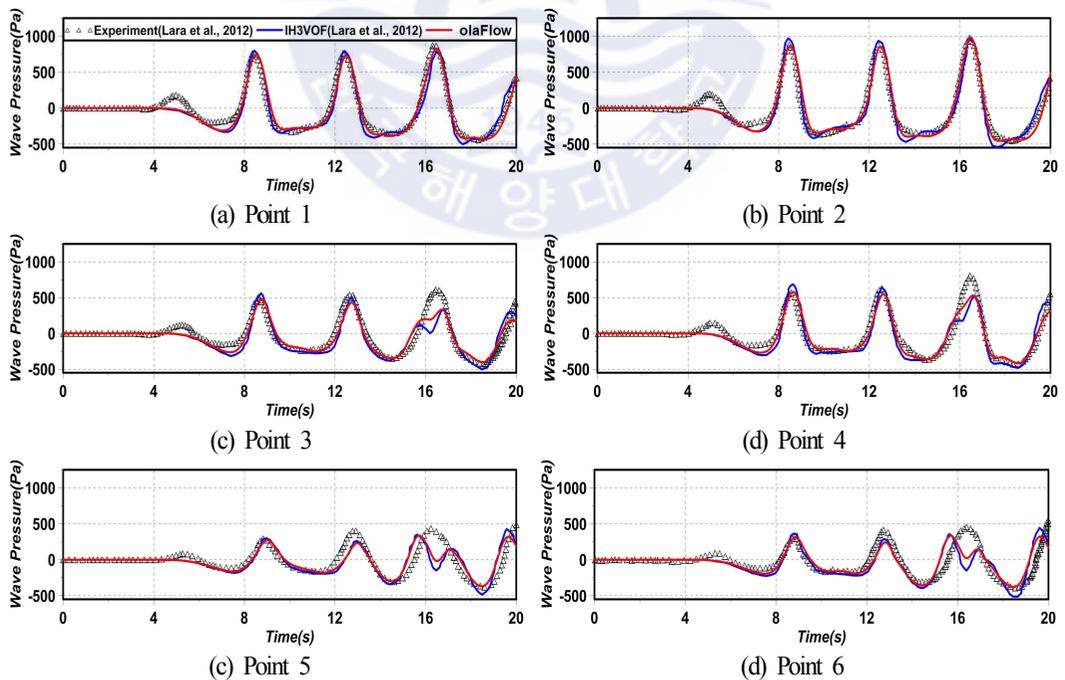


Fig. 5.3. Comparison between simulated and measured wave pressures.

### 5.1.2 3차원불투과성직립벽 주변에서 수위 및 유속

구조물의 천단상에서 유수심을 갖는 3차원잠제로 olaFlow(Higuera et al., 2018)의 적용-타당성을 검토하기 위해 Kawasaki et al.(1999)의 수리실험을 재현하였다. Kawasaki et al.(1999)은 Fig. 5.4와 같이  $h=0.4\text{m}$ 를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.24m의 직사각형불투과잠제에 규칙파를 작용시켜 잠제 주변에서 수위변동과 유속변화를 수리실험으로부터 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 28m, 폭 8m, 높이 0.8m이며, 조파관에서 7m의 이격지점에 직사각형불투과잠제를 설치하였다. 그리고, 조파관 반대쪽의 수조 끝단에는 반사파의 제어를 위해 경사 1:10의 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, 불투과잠제의 제원과 수위계 및 유속계의 설치위치를 Fig. 5.5에 각각 나타낸다.

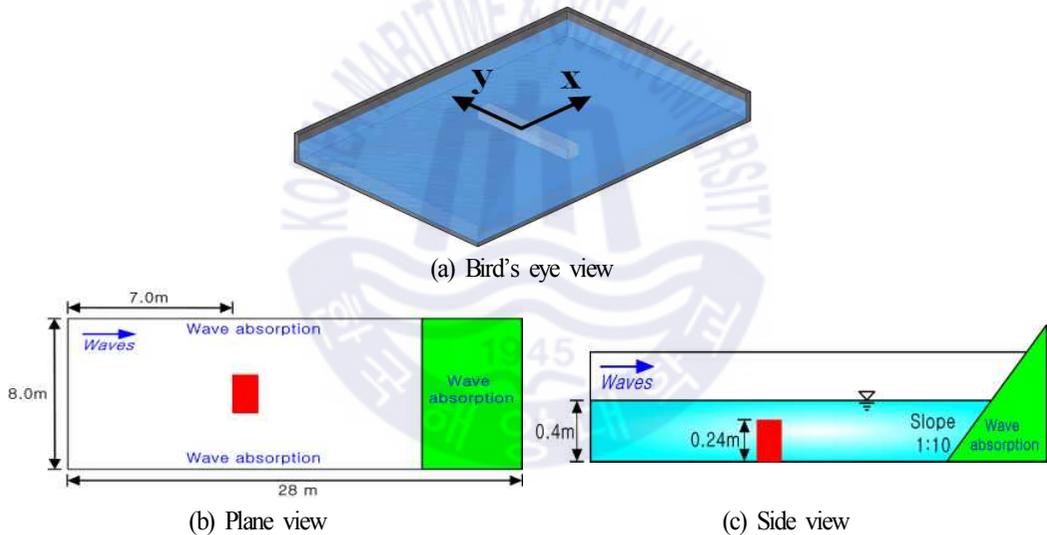


Fig. 5.4. Illustrative sketch of 3D-wave tank and 3D-impermeable submerged breakwater.

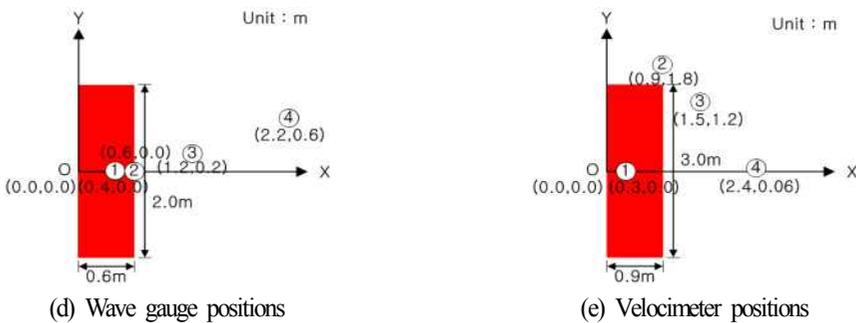


Fig. 5.5. Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 수치계산의 계산효율을 위하여 길이  $3L$  ( $L$ 은 파장)과 폭  $2L$ 로 적용되었고, 불투과잡제는 조파판으로부터  $1.5L$ 의 이격지점에 설치되었다. 여기서, 수위 측정은  $L \approx 2.0\text{m}$ 이고, 유속 측정은  $L \approx 3.0\text{m}$ 의 값을 가진다. 바닥경계조건은 Slip조건을, 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 5차파이론을 적용하였으며, 난류모델에는 LES모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였다.

Fig. 5.6은 Figs. 5.4와 5.5의 조건으로부터 산정된 Fig. 5.4(a)의 불투과잡제 주변에서 무차원수위변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 나타낸 것이다. 잡제 천단상인 1과 2지점에서는 급격한 비선형파의 발생·발달로 인하여 파형에서 대칭성이 붕괴되기 시작하고, 잡제 배후인 3과 4지점에서는 파의 재형성과정을 통하여 다시 대칭성을 갖는 파형이 재형성되는 것을 알 수 있다. 3지점의 실험파형에 포함된 작은 변동은 잡제로부터 짧은 이격거리 때문에 잡제 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. 5.7은 Figs. 5.4와 5.5 조건으로부터 산정된 Fig. 5.5(b)의 불투과잡제 주변에서 수치해석결과와 실험결과를 비교한 불투과잡제 주변에서  $x$ 방향과  $y$ 방향의 무차원수평유속변화를 나타낸 것이며, 측정 높이는 모두 바닥으로부터(1지점은 잡제 천단상으로부터)  $z=0.28\text{m}$ 인 지점이다. 1지점은 천단상이고, 2와 3지점은 회절파의 영향을 직접적으로 받는 곳이며, 4지점은 잡제의 배후이다. 잡제 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(Higuera et al., 2018)에 의한 3차원투과성잡제의 파동장 해석결과에 대한 타당성이 충분히 검증된다.

## 5.2 계산조건

본 수치해석의 3차원수치파동수조는 Fig. 5.8(a)와 같은 길이  $12.5\text{m}$ , 폭  $10\text{m}$ , 높이  $0.4\text{m}$ 의 수조에  $0.25\text{m}$ 의 일정수심으로 구성되었고, 그 내부에 본 수치해석의 대상구조물인 LCS과 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  $\Delta z=1.4\sim 0.75\text{cm}$ 의 가변격자로, 수면에서 수조상부경계까지는  $\Delta z=0.75\sim 1.4\text{cm}$ 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,  $X$ 는 정수위에 대해 해안선에

서 구조물까지의 이격거리를 각각 의미한다. 여기서, 본 장에서 설상사주의 형성조건하라는 것에 대해 검토한다. Black and Andrews (2001)가 제시한 조건에 따르면 설상사주의 형성조건은  $L_s/X < 1.0$ 로 주어지며, 본 연구에서 LCS의 배치조건은 이 조건의 범위에 속하므로 설상사주가 형성되는 조건을 만족한다.

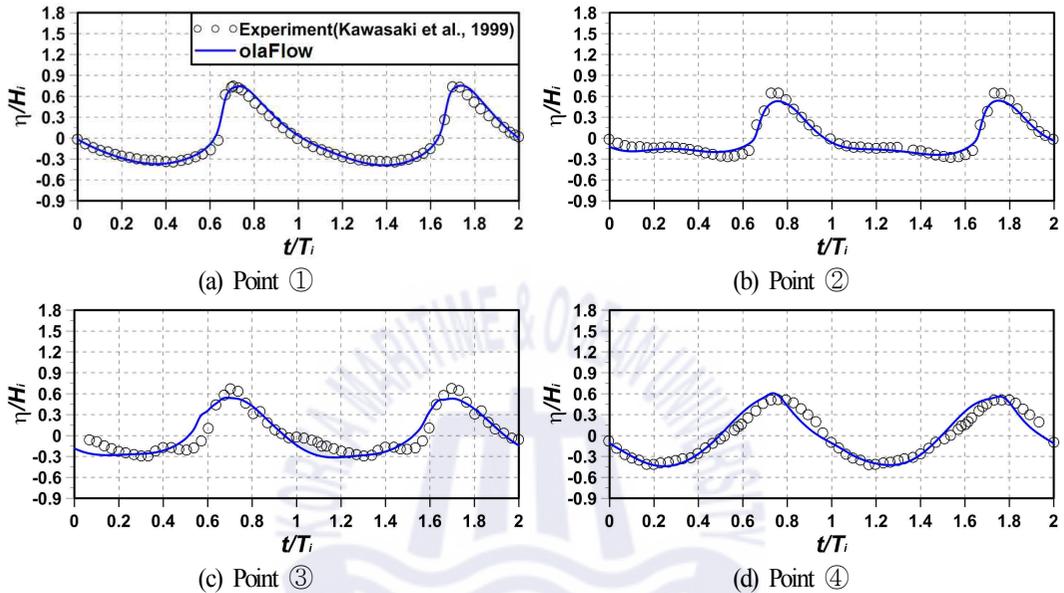


Fig. 5.6. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

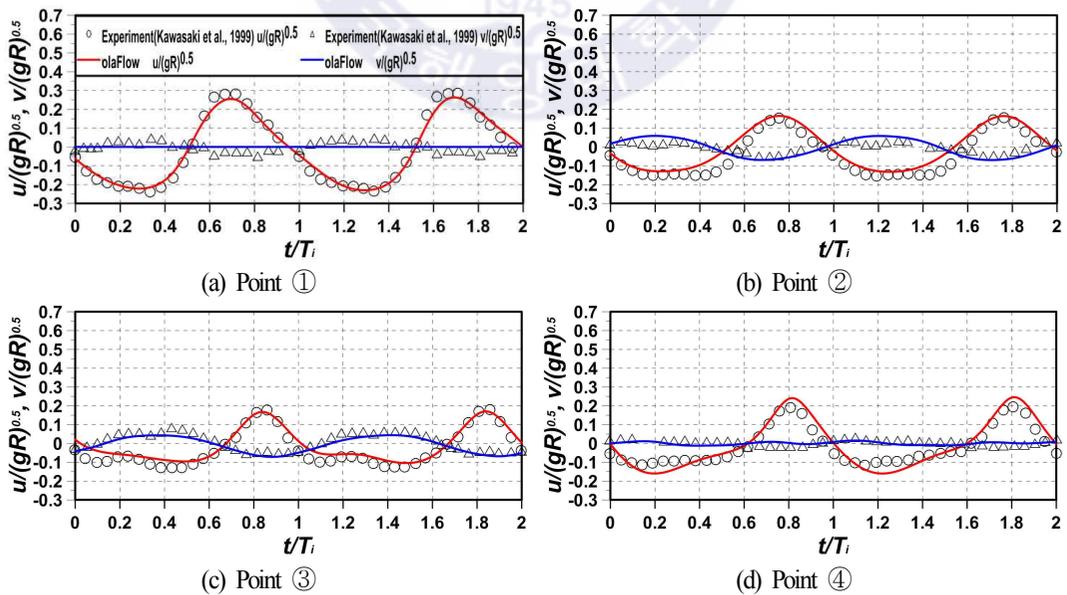
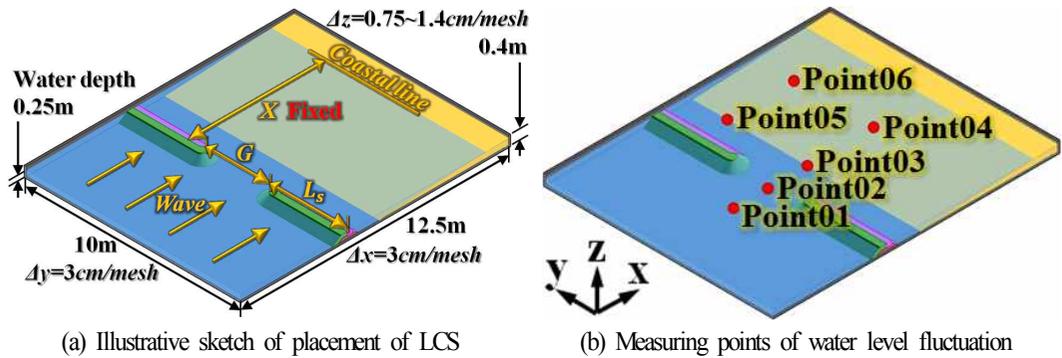
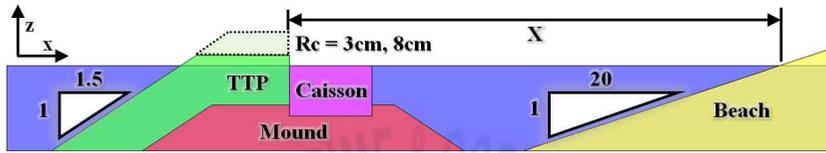


Fig. 5.7. Comparison between simulated and measured X- and Y-direction velocities.



(a) Illustrative sketch of placement of LCS (b) Measuring points of water level fluctuation



(b) Dimension of two-dimensional section of LCS and sandy beach

Fig. 5.8. Definition sketch for layout of LCS, measuring points of water level and cross section.

Fig. 5.8(b)는 파랑의 정상상태를 파악하기 위한 수위측정위치의 좌표점을 나타낸다. Fig. 5.8(c)는 본 연구에 작용한 LCS의 형상에 대한 상세도이며, 이는 Lee et al.(2017)에서 적용된 LCS를 참조하여 도출하였다. 여기서, TTP층은 1:1.5의 경사와 0.1967m의 두께를 갖고 율파를 허용할 때와 허용하지 않을 때를 상정하여 천단고를  $R_c=3\text{cm}$ 와  $8\text{cm}$ 로 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 0.1467m 이고, 불투과성으로 적용하였다. 해변은 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 5.3은 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 Courant상수를 0.1 이하가 되도록 설정하여 수치해석을 수행하였다.

Table 5.3. 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 $X$ (m)	Over-topping		
01H5G300Rc3	3	Stokers II	5	1.4	3	7	6.5	○		
02H5G250Rc3					2.5	7.5		○		
03H5G200Rc3					2	8		○		
04H7G300Rc3			7		3	7		○		
05H7G250Rc3					2.5	7.5		○		
06H7G200Rc3					2	8		○		
01H5G300Rc8	8		5		5	3		7	6.5	×
02H5G250Rc8						2.5		7.5		×
03H5G200Rc8						2		8		×
04H7G300Rc8			7		3	7		×		
05H7G250Rc8					2.5	7.5		×		
06H7G200Rc8					2	8		×		

### 5.3 수치해석결과

#### 5.3.1 정상상태의 판단

본 수치해석에 사용되는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)에 의한 3차원강비선형수치해석은 혼상류 해석법이며, 유한체적법에 기초하여 3차원 Navier-Stokes 운동방정식, LES에 의한 난류모델 및 VOF법에 의한 수면추적 등을 시간경과에 따라 반복계산과 수렴계산이 수행되기 때문에 많은 계산시간이 소요되고, 또한 많은 데이터의 양을 발생시킨다. 본 3차원수치해석에서는 대략 528만개의 격자로 구성되고, 문제가 발생하지 않는 경우 1케이스의 계산에 Workstation(Intel®Xeon(R) CPU E5-2630 v3 @2.40GHz x16)의 16개 Processor로 병렬계산을 수행한 경우 49s의 파전파에 대해 대략 192h이 소요되며, 데이터량은 600GB에 달한다. 따라서, 본 수치계산의 물리량에 대해 정상상태의 데이터를 취하여야 하는 시간을 알기 위하여, 그리고 물리량에 대한 평균치를 산정하기 위한 파의 수 등을 결정하기 위하여 파가 정상상태에 도달하는 시간을 사전에 파악 인지할 필요가 있다. 여기서, Table 5.3의 05H7G250Rc3의 케이스에 대해 대략 정상상태에 도달한 것으로 추정되는  $t=35s$  이후의 파의 시간변동을 나타낸 것이 Fig. 5.9이다.

그림을 살펴보면 Fig. 5.9(a)-(d)는 Fig. 5.8(b)에 그의 위치를 나타내는 바와 같이 수조 중앙의 개구부에 위치한 지점에서 파의 시간변동을 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 5.9(a)-(b)-(c)-(d)로 진행할수록 육측의 정선에 가까운 위치를 나타내며, Fig. 5.9(d)는 수심이 얇아진 경우이다. Fig. 5.9(a)-(b)-(c)로 갈수록 파고가 점차로 커져 파봉부분이 뾰족해지지만, 파의 비선형성은 크게 나타나지 않는 것으로 보인다. Fig. 5.9(d)의 경우는 회절의 영향으로 일부의 파가 LCS의 배후로 회절되어 전술한 경우보다 파고가 감소되고, 파곡부분에 비선형파가 발달되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5.9(e)와 (f)는 LCS의 배후지점에서 파의 시간변동을 나타낸 것으로, Fig. 5.9(f)가 보다 수심이 얇은 경우이다. Fig. 5.9(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. 5.9(f)는 파의 시간변동 전체가 정수위 위에서 나타나므로 이 지점에서는 평균수위상승(wave set-up)이 발생된다는 것을 알 수 있다. 이상으로부터 비록 Fig. 5.9(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 평균하였다.

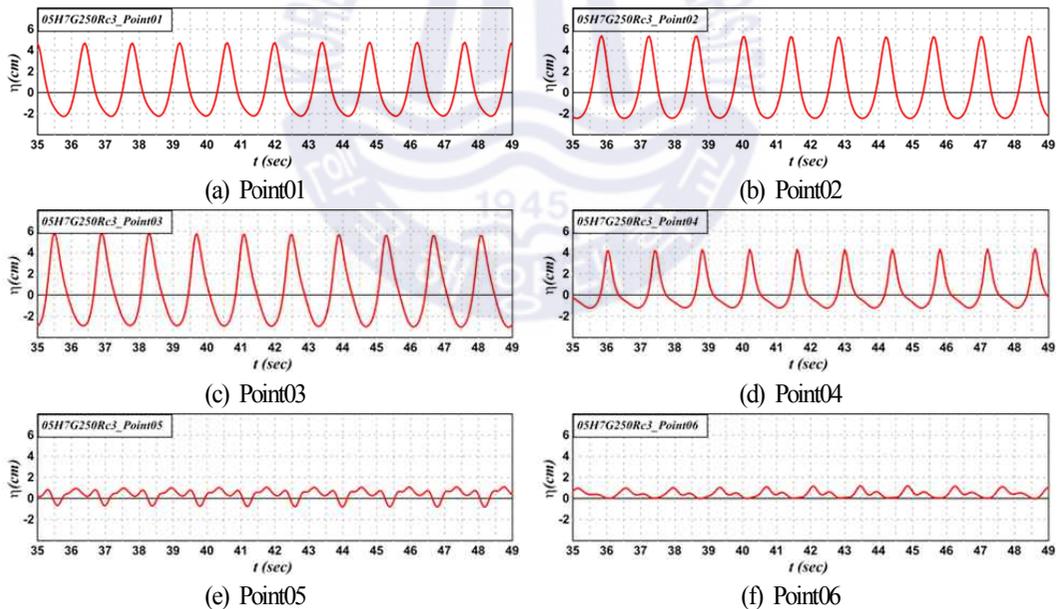


Fig. 5.9. Time variation of water level.

### 5.3.2 평균파고분포와 파의 전파

Fig. 5.10은 Table 5.3에 제시된 케이스 중에 입사파고가  $H=5\text{cm}$ 인 경우에 LCS 주변, 특히 그의 배후에서 파고분포를 나타낸 것이며, 잠제에 관한 선행 연구(Lee et al., 2017)의 결과도 비교·검토를 위하여 병기한다. 여기서, LCS(저면폭이 1.20m, 천단고가 3cm, 8cm)와 잠제(저면폭이 1.89m, 천단수심이 4cm)의 평면배치에서 개구폭  $G$ 와 구조물의 길이  $L$ , 및 해안선에서 구조물까지의 이격거리  $X$ 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. 5.10(a)~(c)는 잠제의 경우를, Figs. 5.10(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. 5.10(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 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.

다음에, LCS에서 천단고가  $R_c=3\text{cm}$ 인 Figs. 5.10(d)~(f)의 경우를 살펴보면 역시 구조물 바로 배후에 작은 파고를 확인할 수 있다. Table 5.3에서 나타낸 바와 같이 천단고가 3cm인 경우는 월파가 발생하므로 잠제와 같이 천단상과 TTP 내부를 통한 파에너지의 전달로 인하여 바로 배후에서 약간의 파고가 발생하는 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 부분중복파동장이 형성되는 것을 알 수 있으며, 이는 LCS에 적용된 불투과성의 케이스에 의한 큰 반사의 영향으로 판단된다.

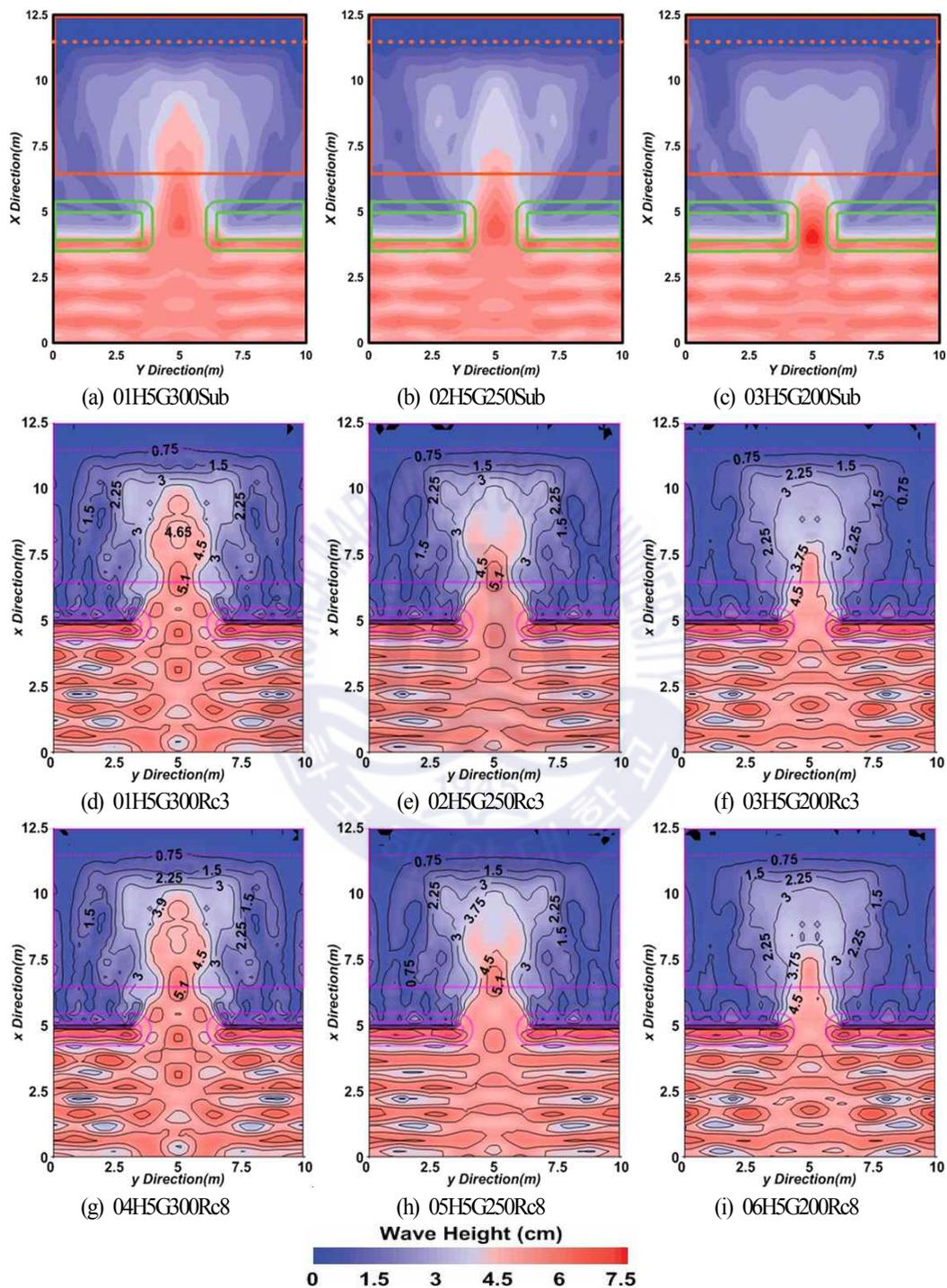


Fig. 5.10. Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H=5\text{cm}$ ).

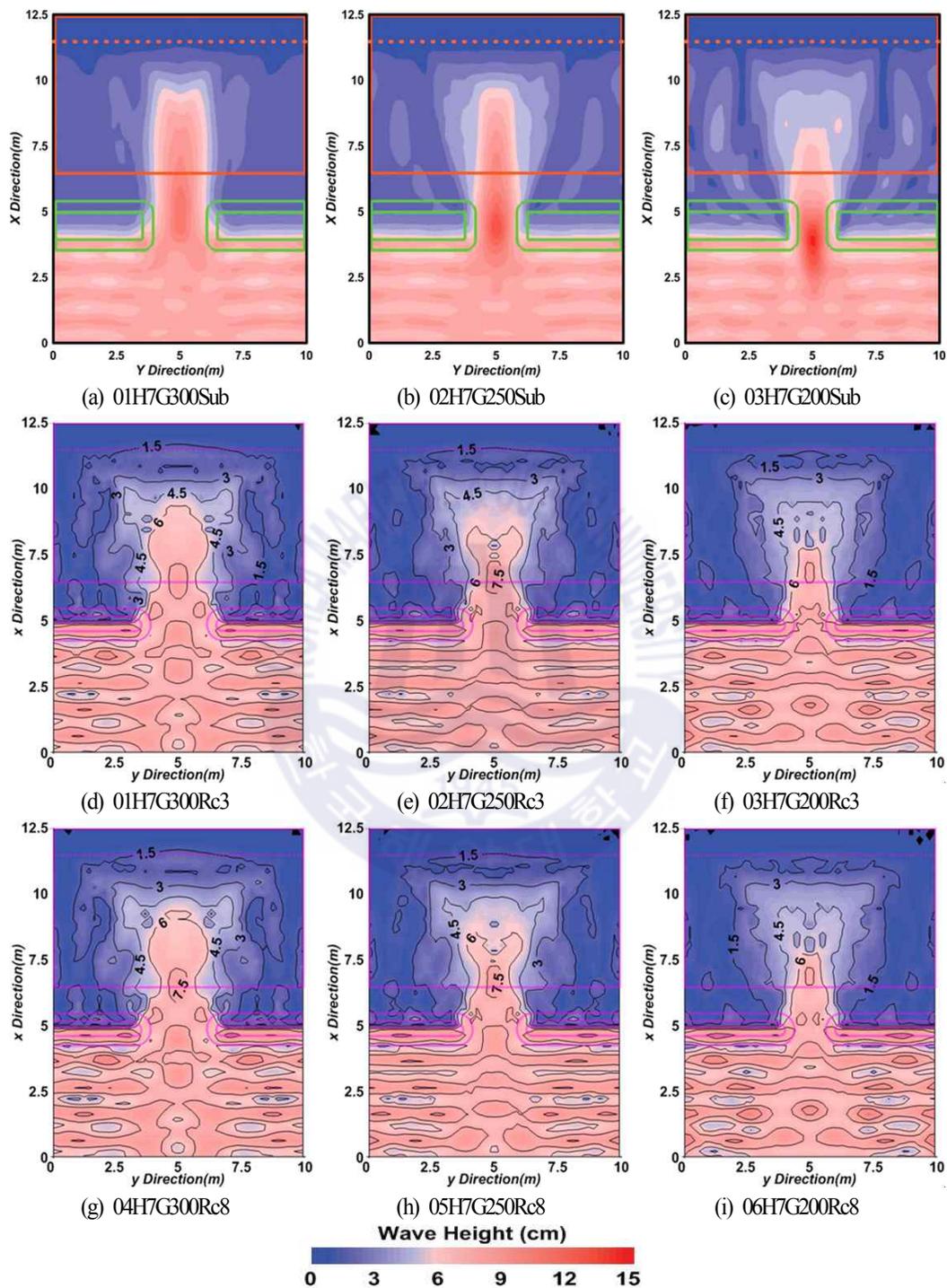


Fig. 11. Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H=7\text{cm}$ ).

Figs. 5.10(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 파고분포의 변화, 개구부에서 파 집중 및 파고 증폭과 같은 변동양상은 월파가 발생하는 Figs. 5.10(d)~(f)의 경우와 대체적으로 동일하다. 여기서, 월파시 Figs. 5.10(d)~(f)의 경우와 비월파시 Figs. 5.10(g)~(i)의 경우가 구조물 배후에서 거의 동일한 파고변동과 파고분포를 나타내는 것은 비월파시 Figs. 5.10(g)~(i)의 경우는 케이스를 전체적으로 피복하는 TPP 부분의 천단고가 높아 월파되지 않아 제체 내부를 통한 파에너지 전달이 많아지는 반면, 월파시 Figs. 5.10(d)~(f)의 경우는 TPP의 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. 5.11(Figs. 5.10과 5.11에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)는 Table 5.3에서 입사파고가  $H=7\text{cm}$ 인 경우 LCS 주변에서 파고분포를 나타낸 것이며, 또한 조건에 대응하는 잠제에 관한 선행연구(Lee et al., 2017)의 결과도 비교·검토를 위하여 병기한다. 전술한 Fig. 5.10의 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. 5.11(a)~(c)의 경우는 전술한 Figs. 5.10(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 배후역에서 파고가 줄어드는 것은 Fig. 5.10의 경우와 동일하지만, 회절의 영향이 감소하는 것은 Fig. 5.10의 경우와 약간 상이하다.

Figs. 5.11(g)~(i)는 천단고가  $R_c=8\text{cm}$ 로 구조물의 천단상으로 월파가 발생하지 않는 경우이며, 월파가 발생하는 Figs. 5.11(d)~(f)의 경우와 구조물 바로 배후에서 회절파의 영향과 개구폭이 줄어들음에 따라 구조물 배후역에서 파고분포의 변화, 개구부에서 파 집중 및 파고 증폭과 같은 변동양상이 대체적으로 동일하다.

Fig. 5.12는 Table 5.3에서 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 직

각으로 입사되는 과정을 시각적으로 명확하게 파악할 수 있을 것이다.

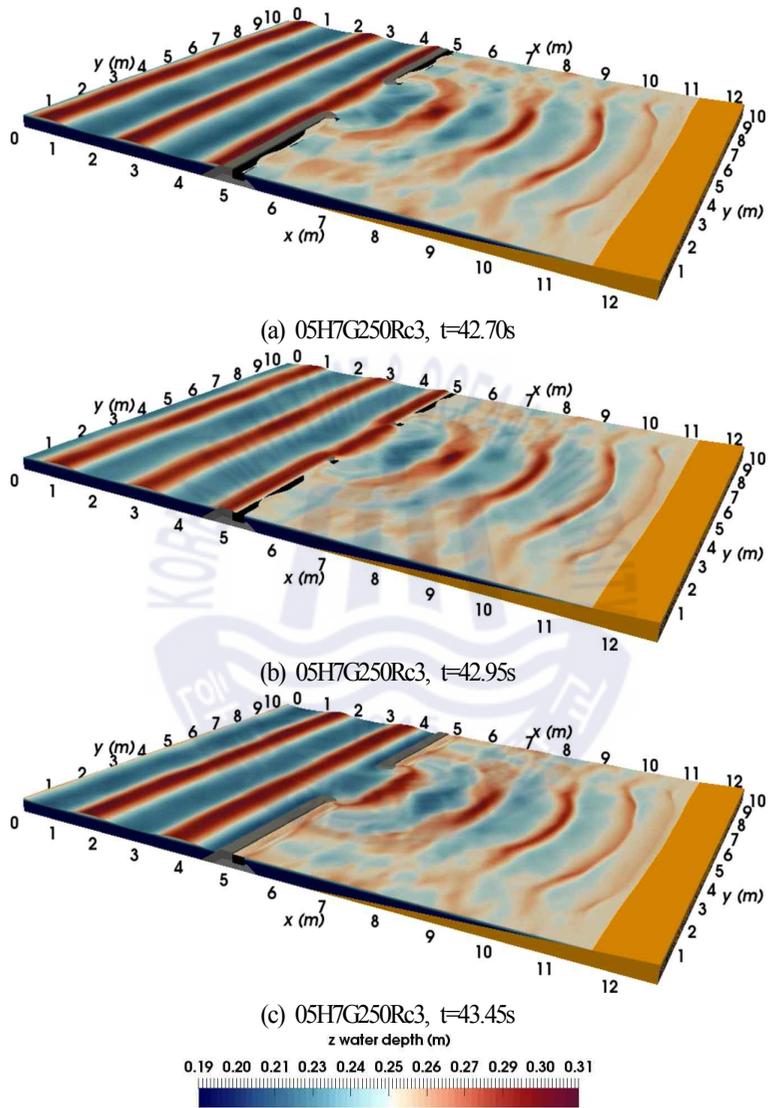


Fig. 5.12. Snapshots of waves on LCS and sandy beach(05H7G250Rc3).

### 5.3.3 해빈류의 분포

Figs. 5.13과 5.14(두 그림에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)는 전술한 Figs. 5.10과 5.11과 동일한 케이스에 대해 LCS 주변, 특히 그의 개구부와 배후에서 유속을 시간평균하고, 그리고 연직 방향으로 평균한 유속을 나타낸 것이며, 잠제에 관한 선행 연구(Lee et al., 2017)의 결과도 비교·검토를 위하여 병기한다. 여기서, LCS와 잠제는 5.3.2절에서 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, 해안선 근방에서 이안류와 개구부에서 항외측으로 흐르는 항안류의 크기가 각각 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 모래이동에서의 차이로 나타날 것으로 판단된다.

LCS의 경우 월파시의 Figs. 5.13(d)-(f)와 비월파시의 Figs. 5.13(g)-(i)를 비교하면 동일한 입사파고에 대해 천단고 차이에 따른 해빈류의 차이는 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 5.3.2절의 파고분포에서 서술한 바와 같이 비월파시 Figs. 5.10(g)-(i)의 경우는 제체 내부를 통한 흐름이 많아지는 반면, 월파조건인 Figs. 5.10(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 내해측으로 흐르는 항안류는 약해지고, 해안선 근방에서 이안류가 발달하며, 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. 5.14를 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.

### 5.3.4 평균난류운동에너지의 분포

Figs. 5.15와 5.16(두 그림에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)은 전술한 Figs. 5.13와 5.14와 동일한 케이스에 대해 시간평균난류에너지를 연직방향으로 평균한 평균난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 결과이다. 입사파고  $H=5\text{cm}$ 인 Fig. 5.15를 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 율류에 따른 난류강도가 강하게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 다음으로, 비율파인 천단고가  $R_c=8\text{cm}$ 인 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 전술한 잠제나 율파가 발생하는  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우와 유사한 분포양상을 나타낸다. 그러나, 율파가 발생하는 LCS에 대한 케이스의 경우보다 전반적으로 분포값이 적어진다는 것을 알 수 있다.

입사파고가  $H=7\text{cm}$ 로 증가된 Fig. 5.16으로부터 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. 5.15의 경우와 유사한 결과이다. 그러나, 공간분포는 개구폭이 좁아질수록 연안방향으로 분포폭이 넓어지는 반면, 종단방향으로 다소 많이 좁아지는 경향을 나타내는 것은 전술한 Fig. 5.15의 경우와 상이한 결과이다. 그리고, 잠제의 천단상에서도 평균난류에너지가 큰 값이 분포하는 것을 Fig. 5.15의 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. 비율파인 천단고가  $R_c=8\text{cm}$ 인 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 전술한 잠제나 율파가 발생하는  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우와 유사한 분포양상을 나타낸다. 그러나, 율파가 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.

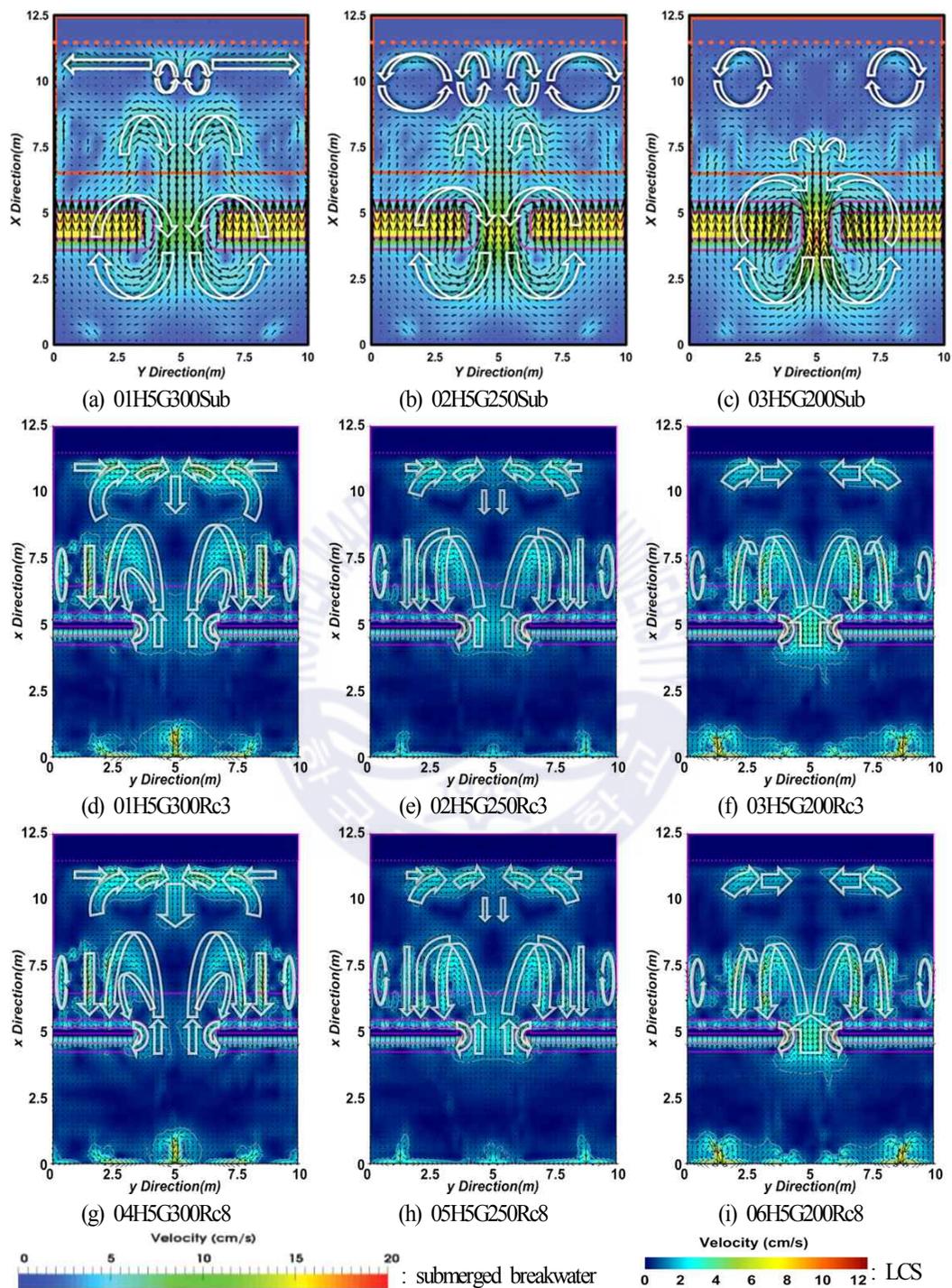


Fig. 5.13. Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H=5\text{cm}$ ).

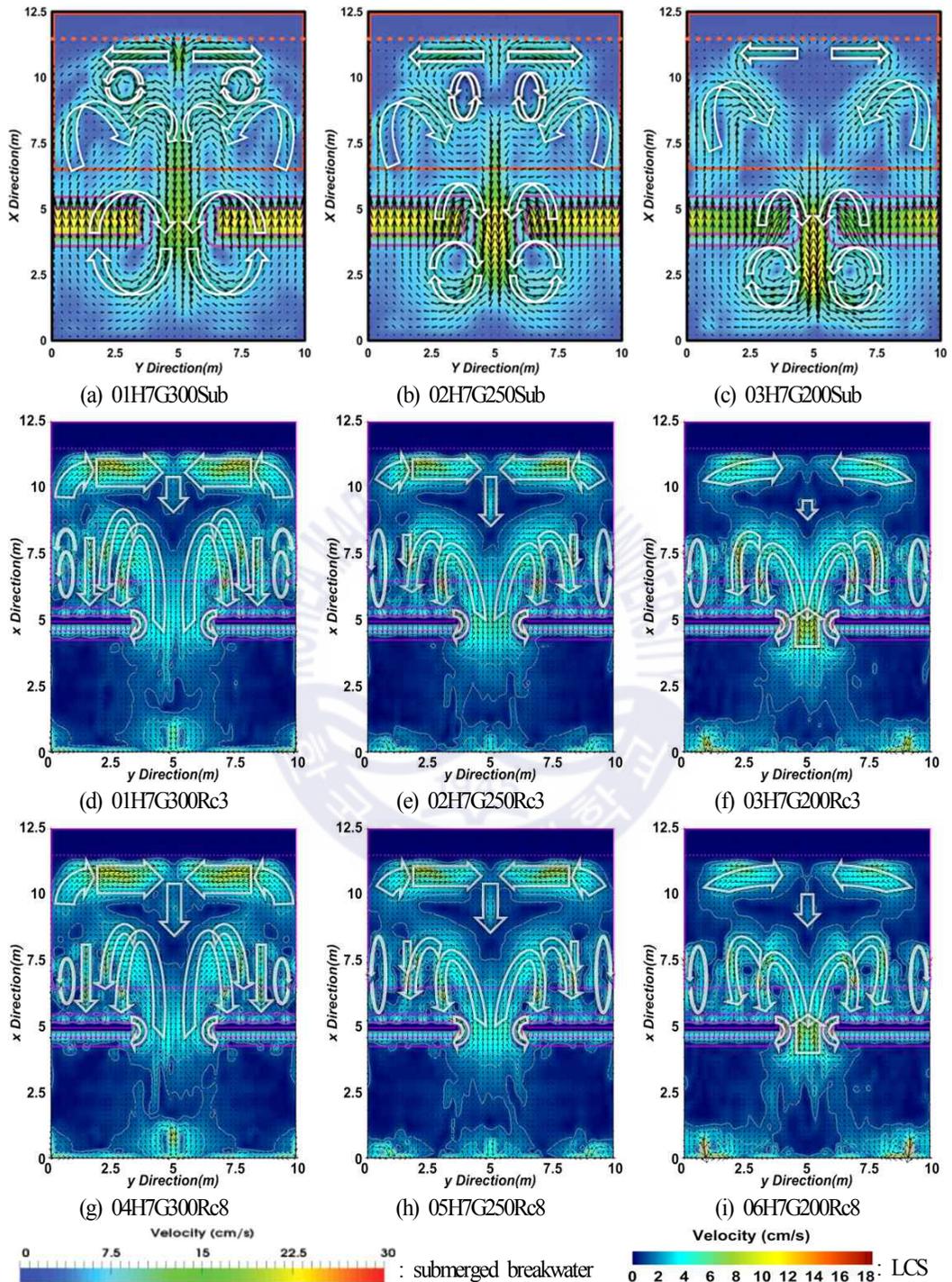


Fig. 5.14. Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H=7\text{cm}$ ).

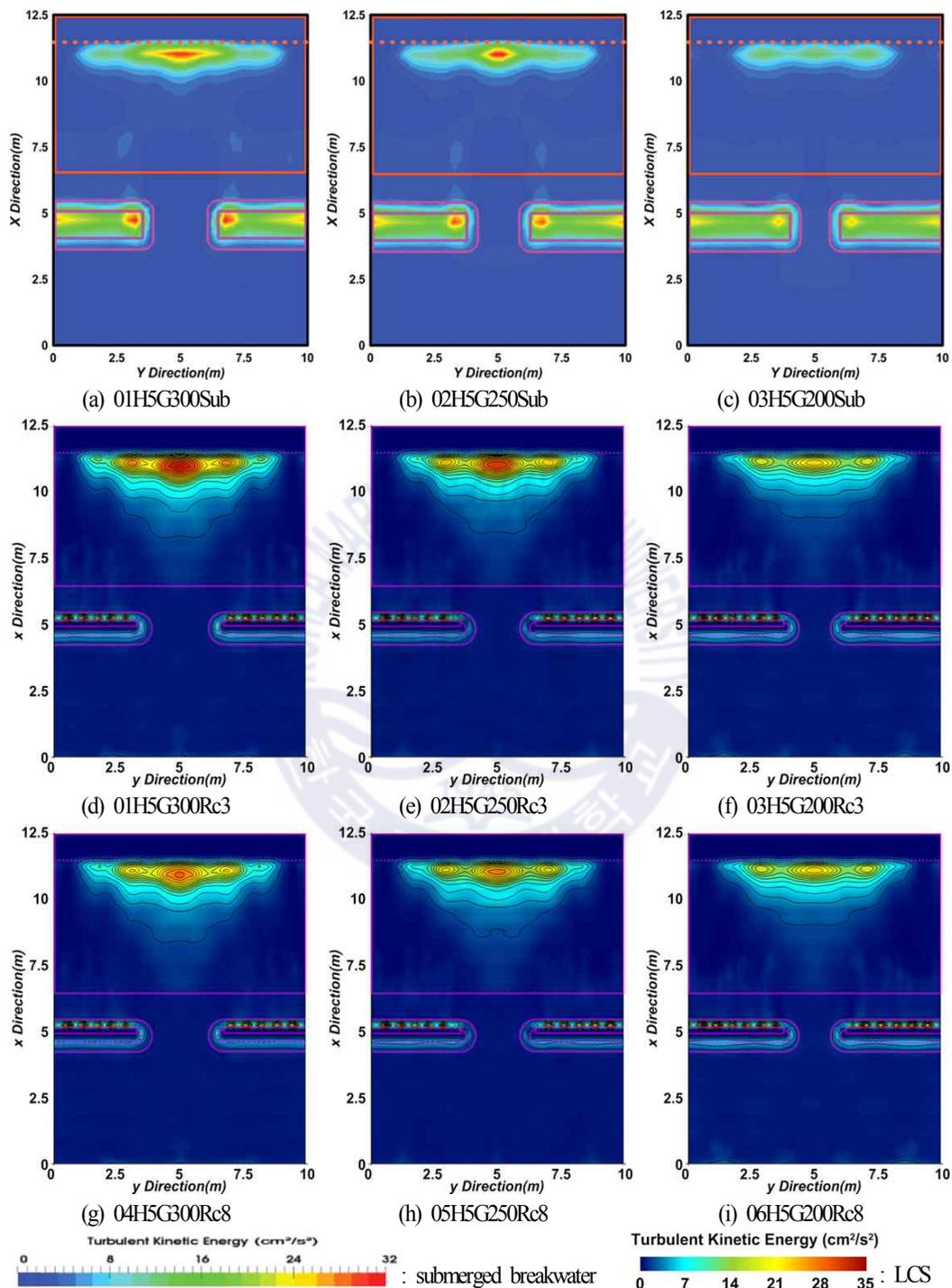


Fig. 5.15. Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank( $H=5\text{cm}$ ).

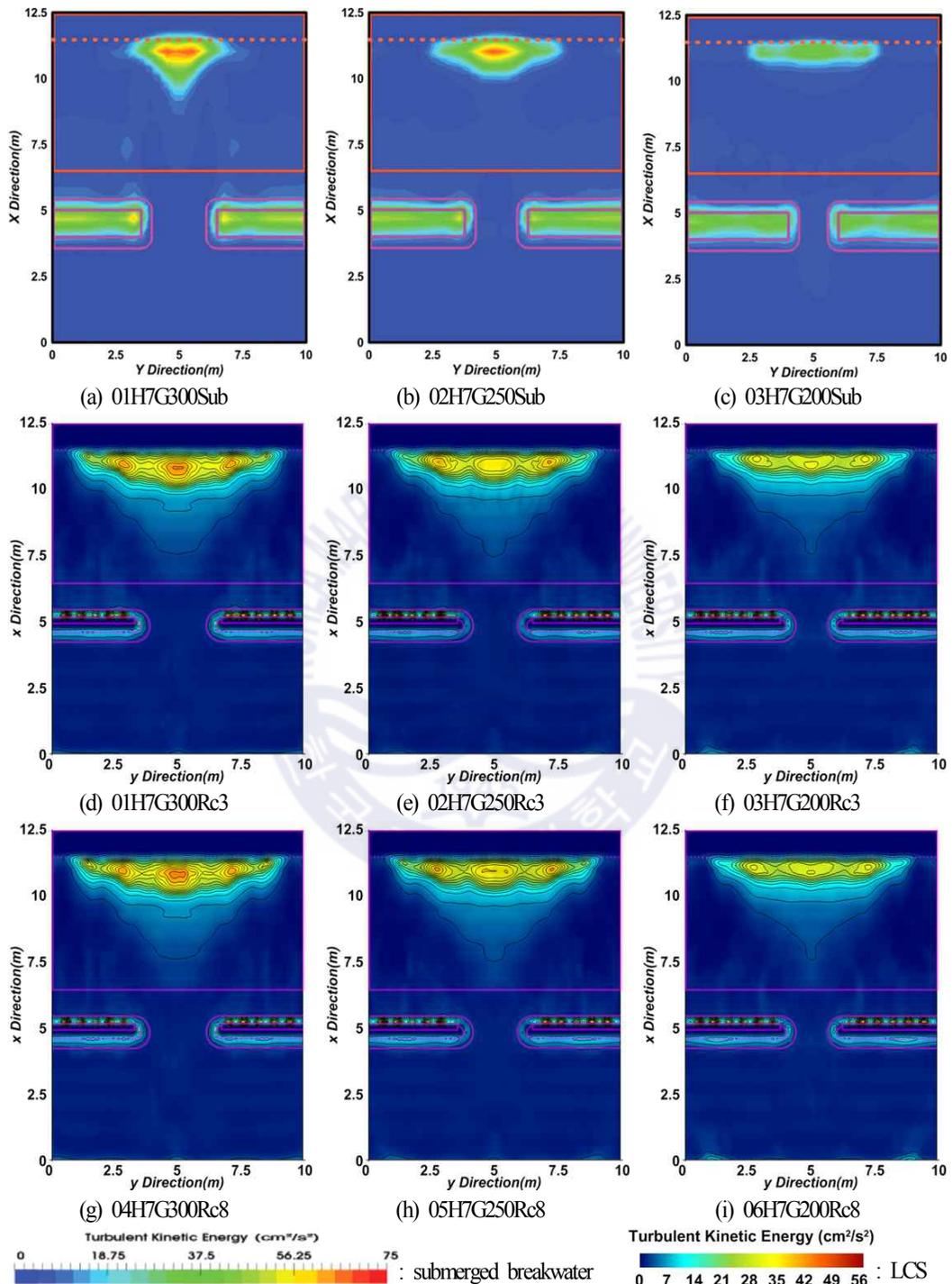


Fig. 5.16. Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H=7\text{cm}$ ).

## 5.4 결론

본 장에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원혼상류의 해석법인 공개된 CFD Code인 olaFlow를 이용하여 규칙파동장하 3차원투과성구조물인 LCS에 의한 파고, 평균유속(흐름) 및 평균난류운동에너지 등을 수치해석하였으며, 기존의 실험해석 및 수치해석에 대한 결과와의 비교·검토로부터 LCS로의 타당성을 검증하였다. 실제 수치해석에서는 LCS에 관해 월파 여부가 중요한 차이를 나타낼 것으로 판단하여 파고와 천단고를 변화시켰고, 또 다른 해빈유실대책공법으로 적용되는 잠제와의 역학적인 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 부분반사파동장이 형성된다. 항내측에서는 항외측보다 정온한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 입사 파고가 작을수록 항내측의 파고가 줄어든다. 이러한 항내측의 파고에는 천단상으로 월파 및 제체내를 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 파 집중과 파고 증폭의 현상이 보다 강해지고, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어드는 반면, LCS의 경우 개구폭이 좁아짐에 따라 개구부 중앙에서 파 집중과 파고 증폭의 현상이 미미해지고, 배후로 전달되는 파에너지가 줄어든다.

(2) 해빈류의 공간분포 : LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점으로 수렴하는 연안류가 발생하며, 이는 개구폭이 넓을수록 강해진다. 개구부에서는 항안류가 발생하며, 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 강해진다. 연안류와 항안류의 크기는 전체적으로 입사파고가 클수록 커진다. 한편, 동일한 입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류 여부가 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) 평균난류운동에너지의 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 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.

## Reference

- 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 I: Salient and tombolo geometry and shape. *J. Coastal Research*, 82-93.
- 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.
- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- 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.
- 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, J.H., Jung, U.J., Bae, J.H., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019). Variation characteristics of wave field around 2-dimensional low-crested structure. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(5), 294-304.(in Korean)
- 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.
- 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 Eng., MIT.



## 제 6장 3차원저천단구조물 주변에서 불규칙파동장의 변동특성

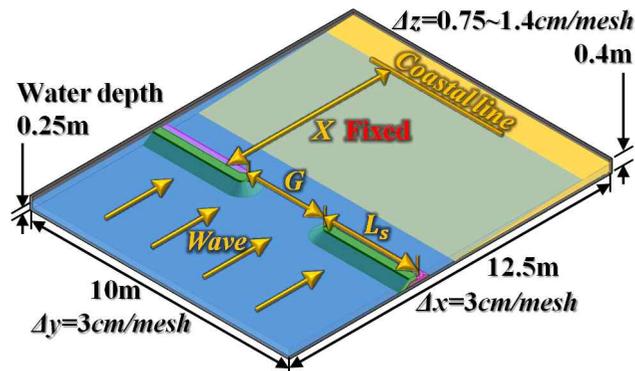
### 6.1 계산조건

제 5장에서는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)의 적용성을 검토할 목적으로 Kawasaki et al.(1999)에 의한 3차원볼투과성직립벽 주변에서 수위 및 유속의 결과와 Lara et al.(2012)이 수리실험 및 수치해석을 수행한 3차원투과성직립벽을 대상으로 수치해석을 수행하여 도출된 수치결과를 olaFlow 모델에 의한 수치해석 결과와 각각 비교 및 검토가 충분히 이루어져 이에 대한 타당성은 검증되었다. 또한, 불규칙파랑의 조파는 제 2장에서 Modified Bretschneider -Mitsuyasu스펙트럼(Goda 1988)을 장시간동안 수치조파하였음에도 불구하고 수위상승 등과 같은 특이한 현상이 나타나지 않았고, 목표스펙트럼과 측정스펙트럼 및 불규칙파형이 상당히 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서, 수치모델의 타당성 및 불규칙파의 조파성능은 충분히 검증되었기 때문에 본 장에서는 검증에 대한 반복적인 기술을 생략하는 것으로 한다.

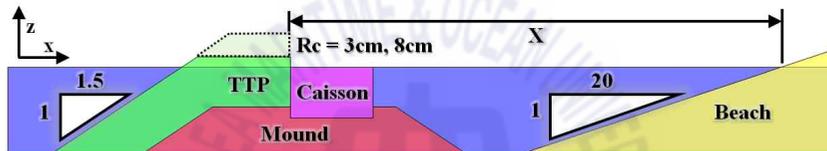
본 장에서의 3차원수치조파동수조는 Fig. 6.1(a)와 같은 길이 12.5m, 폭 10m, 높이 0.4m의 수조에 0.25m의 일정수심으로 구성되었고, 그 내부에 본 수치해석의 대상구조물인 LCS과 해빈이 설치되었다. 바닥경계는 Slip조건으로 구성되었고, 양측벽경계조건에도  $y$  축방향으로 LCS가 반복적으로 설치되는 것으로 가정하여 Slip조건을 적용하였다. 격자크기는  $\Delta x=3\text{cm}$ 와  $\Delta y=3\text{cm}$ 이며, 계산효율상 수조바닥에서 수면까지는  $\Delta z=1.4\sim 0.75\text{cm}$ 의 가변격자로, 수면에서 수조상부경계까지는  $\Delta z=0.75\sim 1.4\text{cm}$ 의 가변격자로 각각 구성하였다. 여기서,  $G$ 는 정수위에서 구조물 사이의 개구폭을,  $L_s$ 는 정수위에서 구조물의 길이를,  $X$ 는 정수위에 대해 해안선에서 구조물까지의 이격거리를 각각 의미한다. 여기서, 본 장에서 설상사주의 형성조건하라는 것에 대해 검토한다. Black and Andrews (2001)가 제시한 조건에 따르면 설상사주의 형성조건은  $L_s/X < 1.0$ 로 주어지며, 본 연구에서 LCS의 배치조건은 이 조건의 범위에 속하므로 설상사주가 형성되는 조건을 만족한다.

Fig. 6.1(b)는 Kim and lee(2017)를 참조하여 도출한 LCS의 형상과 해빈을 단면도로 나타낸다. 먼저, 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. 케이스는 수조 저면으로부터 0.1022m의 높이에 상치하여 0.1467m의 높이와 0.24m의  $x$  방향 길이를 갖고, 볼투과성으로 적용하였다. TTP층은 조파경계로부터 4.2807m 이격되어 1:1.5의 경사와 0.1967m의 두께를 갖고 월파를 많이 허용하는 경우와 상대적으로 적게 허용하는 경우를 상정하여 천단고를  $R_c=3\text{cm}$ 와 8cm로 각각 고려하였으며, 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. 해빈은 조파경계로부터 6.47m로 이격하여 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.



(a) Illustrative sketch of placement of LCS



(b) Dimension of two-dimensional section of LCS and sandy beach

Fig. 6.1. Definition sketch for layout of LCS.

Table 6.1은 본 수치해석에 적용된 불규칙파랑의 제원, 구조물의 개구폭, 구조물의 길이, 구조물의 천단고 및 해안선으로부터 이격거리 및 불규칙파의 성분과 개수를 각각 나타낸다. 수치계산은 LES에 의한 난류모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였고, 계산의 안정을 위해 Courant상수를 0.1 이하가 되도록 제한하여 수치해석을 수행하였다.

## 6.2 수치해석결과

### 6.2.1 $H_{rms}$ 파고분포와 파의 전파

Fig. 6.2는 Table 6.1에서 제시한 케이스 중에 입사파고가  $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 경우에 LCS주변과 배후에서  $H_{rms}$  파고분포를 나타낸 것이며, 잠제에 관한 선행연구 (Lee et al., 2018)의 결과도 함께 병기하여 비교·검토한다. 이 때, 제시된 수치계산 결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 65s(35~100s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 여기서, LCS와 잠제의 평면배치에서 개구폭  $G$ 와 구조물의 길이  $L_s$  및 해안선에서 구조물까지의 이격거리  $X$ 는 동일하다. 또한, 잠제는 천단이 잠수되어 있으므로 천단수심을 가지는 반면, LCS는 정수면상으로 돌출되어 있으므로 천단고를

가지는 관계로 단면형상이 상이하며, 구성재료 또한 상이하다.

Table 6.1. Incident wave condition and 3-dimensional layout of LCS.

CASE No.	Crest freeboard from still water level $R_c$ (cm)	Incident wave spectrum	Significant incident wave Height $H_{1/3}$ (cm)	Significant incident wave period $T_{1/3}$ (cm)	Gap width $G$ (m)	LCS length $L_s$ (m)	Distance between shoreline and LCS $X$ (m)	Number of waves				
01H5G300Rc3	3	Modified Bretschneider-Mitsuyasu	5	1.4	3	7	6.5	150				
02H5G250Rc3					2.5	7.5						
03H5G200Rc3					2	8						
04H7G300Rc3			3		7							
05H7G250Rc3			2.5		7.5							
06H7G200Rc3			2		8							
01H5G300Rc8	8		Modified Bretschneider-Mitsuyasu		7	1.4			3	7	6.5	150
02H5G250Rc8									2.5	7.5		
03H5G200Rc8									2	8		
04H7G300Rc8					3				7			
05H7G250Rc8					2.5				7.5			
06H7G200Rc8					2				8			

Figs. 6.2(a)~(c)는 잠체의 경우를, Figs. 6.2(d)~(f)는 낮은 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 인 LCS의 경우를, Figs. 6.2(g)~(i)는 높은 천단고  $R_c=8\text{cm}$ 인 경우를 각각 나타내고, 등파고선은  $0.375\text{cm}$  간격으로 표시한다. 먼저, 잠체의 경우는 투과성재료로 구성되고, 천단상에 천단수심을 갖기 때문에 천단상과 체체 내부를 통한 파에너지의 전달이 발생하며, 잠체 바로 배후에서 어느 정도의 크기를 갖는 파고가 확인된다. 잠체의 개구폭이 줄어드는 경우(Figs. 6.2(a)~(b)~(c))에 잠체 바로 배후의  $H_{rms}$  파고변화에 거의 나타나지 않는 것을 통해 천단상과 체체 내부를 통한 파에너지의 전달이 많은 부분을 차지하는 것으로 판단되며, 따라서 잠체의 바로 배후에서는 개구부를 통한 회절의 영향이 상대적으로 적다는 것을 확인할 수 있다. 또한 잠체의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파 집중과 파고증폭이 강하게 나타나며, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어들어 배후역에서  $H_{rms}$  파고가 작아지는 결과가 확인된다.

LCS에서 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 인 Figs. 6.2(d)~(f)의 경우는 2차원불규칙파(Lee et al., 2019b)의 결과와 비교할 수 있다. 먼저, 구조물 바로 배후에 발생하는 작은 파고는 TPP 내부를 통한 파에너지의 전달의 영향이다. 개구폭이 좁아짐에 따라 구조물 배후역에서 전체적으로 파고가 줄어드는 현상은 개구부를

통하여 배후로 전달되는 파에너지가 줄어들기 때문이고, 구조물 바로 배후에서 파고의 변화에 현저한 차이를 나타내지 않는 것은 잠제와 같이 개구폭에 의한 회절보다 월파와 체체 내부를 통한 파에너지 전달의 영향이 큰 것을 나타낸다. 한편, 개구부 배후에서 파고가 줄어드는 경향은 잠제의 경우와 동일하지만, 개구폭이 좁아짐에 따라 잠제의 경우와는 다르게 LCS의 경우는 개구부 중앙의 외해측에서 파 집중과 파고 증폭이 강해진다. 또한, 외해측인 구조물 전면에서는 전반적으로 잠제의 경우보다 상대적으로 큰 부분중복과동장이 형성되며, 이는 LCS에 적용된 불투과성의 케이스에 의한 반사의 영향으로 판단된다.

높은 천단고인  $R_c=8\text{cm}$ 의 결과를 나타내는 Figs. 6.2(g)~(i)는 상대적으로 월파가 적은 경우이다. 구조물 바로 배후에서 회절파의 영향과 개구폭이 좁아질수록 구조물 배후에서 파고분포의 변화, 개구부에서 파 집중과 파고증폭 등의 변동양상은 낮은 천단고의 결과인 Figs. 6.2(d)~(f)와 대체적으로 동일하다. 여기서, 천단고  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우와  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우가 구조물 배후에서 거의 동일한 파고변동과 파고분포를 나타내는 것은 높은 천단고의 경우가 케이스를 전체적으로 피복하는 TTP의 천단고가 높아 월파되지 않아 체체 내부를 통한 파에너지 전달이 상대적으로 많아지는 반면, 낮은 천단고의 경우는 TTP의 천단고가 낮아 내부를 통한 파에너지 전달은 상대적으로 적어지고, 천단상 월파로 인한 파에너지 전달이 상대적으로 많이 발생하기 때문이다. 따라서, 2차원불규칙파의 결과를 참고하면 본 수치해석에서 적용한 파랑조건과 구조물의 형상조건에 대해 높은 천단고의 경우 내부를 통해 전달되는 파에너지는 월파시 내부를 통한 파에너지와 천단을 통한 파에너지의 합과 거의 동일하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6.3(등파고선의 간격은  $0.75\text{cm}$ 로 표시되고, Figs. 6.2와 6.3에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의 바란다)은 유의파고가  $H_{1/3}=7\text{cm}$ 인 경우 LCS 주변에서  $H_{rms}$  파고를 나타낸 것이며, 또한 조건에 대응하는 잠제에 관한 선행연구(Lee et al., 2018)의 결과도 함께 병기한다. 전술한 Fig. 6.2의 경우와 비교하면 유의주기는  $T_{1/3}=1.4\text{s}$ 로 동일하지만, 유의파고는  $H_{1/3}=7\text{cm}$ 로 증가시켰다. 따라서, 전체적으로 구조물 배후역에서 파고는 상대적으로 큰 값을 나타내고, 제두부에서 회절이 상대적으로 적게 발생되어 연안 근방까지 큰 파가 유입된다. 잠제에 대한 Figs. 6.3(a)~(c)의 경우는 전술한 Figs. 6.2(a)~(c)와 동일하게 개구폭이 좁아짐에 따라 배후역에서 파고가 전체 공간에 대해서는 다소 줄어들고, 개구부에서 파 집중과 파고증폭이 나타난다. 반면에 잠제 바로 배후에서 파고가 커지는 것은 제두부에서 회절의 영향이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 판단된다. 다음으로 잠제와 LCS의 경우를 비교하면 전체적으로 LCS의 경우가 다소 적은 파고를 나타내고, 제두부에서 회절현상이 상대적으로 약간 큰 경향을 나타낸다. LCS에서 개구폭의 감소에 따른 차이를 확인하면 배후에서 파고가 줄어드는 것은 Fig. 6.2와 동일하지만 회절의 영향이 감소하는 것은 Fig. 6.2의 경우와 약간 상이하다.

Fig. 6.4는 05H7G250Rc3의 가장 큰 파가 발생한 시각에 대해서 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. LCS의 전면에서 부분중복파가 형성되어 파봉선이 구조물의 길이방향과 평행하게 나타

나지만, 개구부 중앙의 외해측에서 약간의 작은 수위를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 진행파는 LCS의 천단상을 월파하며, 개구부를 통하여 파에너지가 유입되고, 제두부에서 구조물에 의해 차폐된 배후역으로 파가 회절되어 유입되며, 연안 근방에서 파고가 크게 줄어든 상태로 거의 직각으로 정선에 입사되는 과정을 시각적으로 확연하게 파악할 수 있다.

## 6.2.2 해빈류의 분포

Figs. 6.5와 6.6(두 그림에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)은 유속을 시간평균하고, 연직방향으로 평균한 유속을 나타낸 것이다. 여기서, 잠제에 관한 선행연구(Lee et al., 2018)의 결과를 병기하고, 2차원저천단구조물에 관한 선행연구(Lee et al., 2019b) 및 3차원규칙파동장(Lee et al., 2019a)의 결과도 함께 비교·검토한다.

먼저 잠제의 경우를 살펴보면 개구부에서 내해측에서 외해측으로의 이안류가 탁월하게 발생하고, 이는 좁을수록 강해진다. 잠제의 천단상에서는 월류에 의해 외해측으로 흐름이 강하게 발생하고, 개구폭이 넓을수록 해안선 근방에서 좌·우측으로 발산하는 연안류 및 순환류가 탁월하게 발생한다. 잠제와 LCS의 경우를 비교하면 전체적으로 LCS에 의한 차폐역인 배후  $5m < x < 8.2m$  구간에서 흐름양상이 잠제의 경우와 상반된 패턴을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 여기서, 해안선 근방에서 해빈류 패턴에 대해 LCS의 경우는 수렴하는 연안류가, 잠제의 경우는 발산하는 연안류가 각각 발생하고, 잠제의 경우 내해측에서 외해측으로 흐르는 이안류가, LCS의 경우는 외해측에서 내해측으로 유입되는 항안류가 발생하는 것이 큰 차이이며, 이로 인하여 궁극적으로 해안선 근방에서 후술하는 난류운동에너지 및 모래이동에서의 차이로 나타날 것으로 판단된다.

LCS의 경우 월파를 상대적으로 많이 허용하는 낮은 천단고인  $R_c=3cm$ 인 경우의 Figs. 6.5(d)~(f)와 월파를 적게 허용하는 높은 천단고인  $R_c=8cm$ 인 경우의 Figs. 6.5(g)~(i)를 비교하면 동일한 유의파고에 대해 천단고 차이에 의한 해빈류의 차이는 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 6.2.1절의 파고분포에서 서술한 바와 같이 낮은 천단고인  $R_c=3cm$ 인 경우의 Figs. 6.2(d)~(f)는 제체 내부를 통한 흐름은 상대적으로 적고, 천단상 월류로 인한 흐름이 상대적으로 크게 발생하여 높은 천단고와 낮은 천단고인 경우에 LCS 전체를 통한 유입흐름의 차이는 거의 없기 때문인 것으로 판단된다. 단지, 본 수치계산조건하에서는 개구폭의 너비에 따른 차이가 강하게 나타나며, 즉 개구폭이 넓어질수록 개구부에서 외해측으로 흐르는 항안류는 약해지고, 해안선 근방에서 이안류가 발달하며, 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.

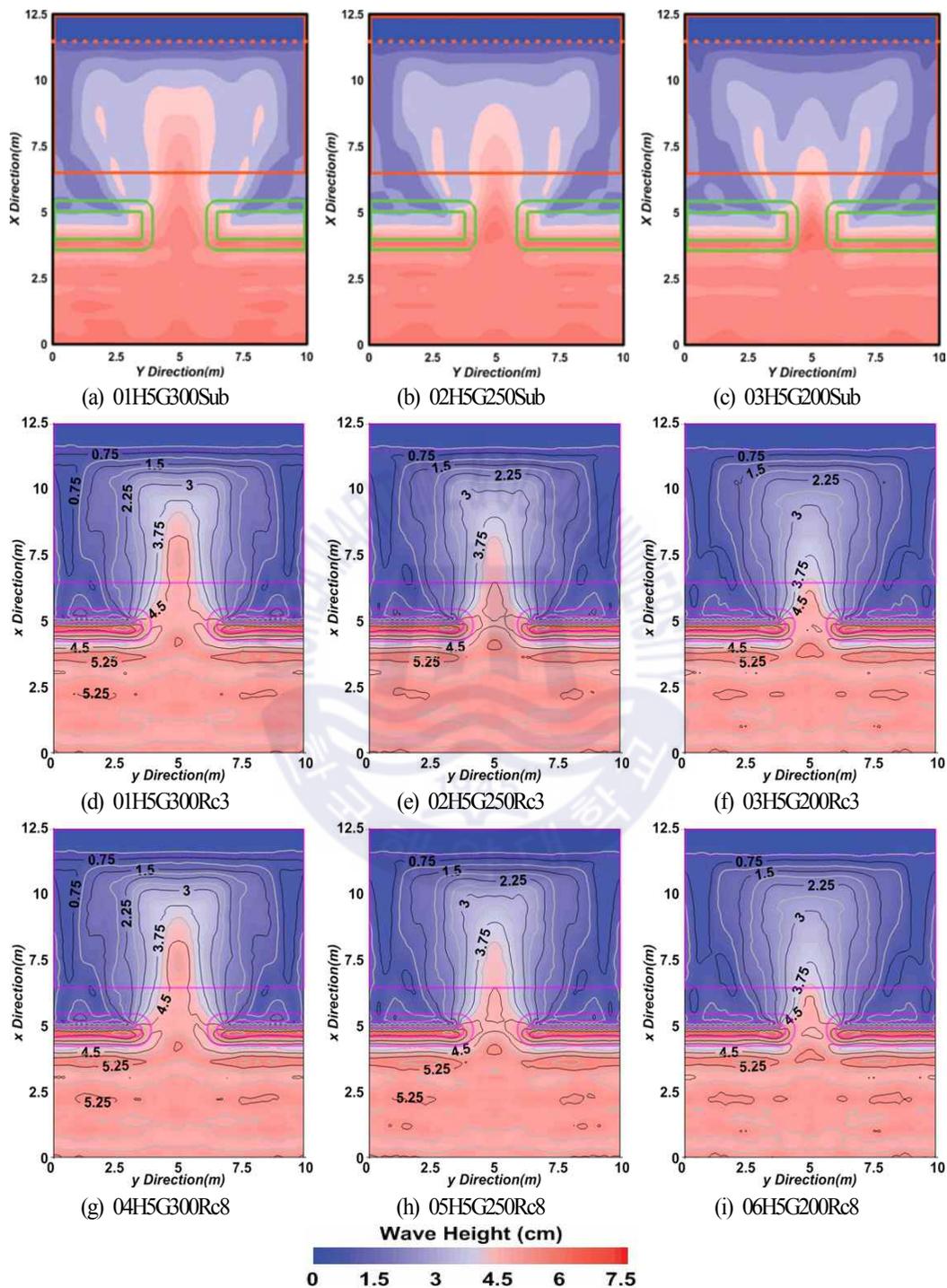


Fig. 6.2. Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H_{1/3}=5\text{cm}$ ).

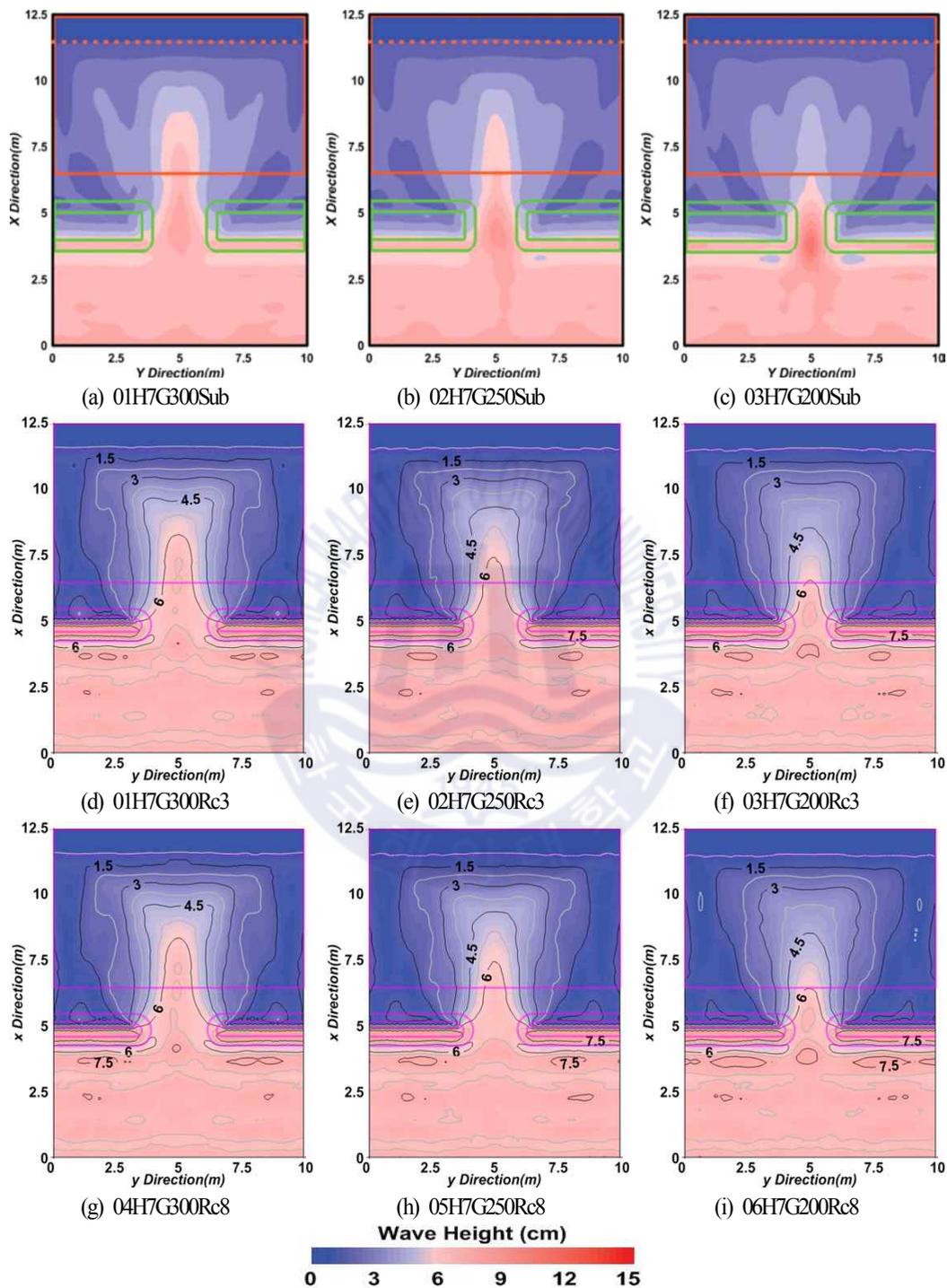


Fig. 6.3. Spatial distribution of wave heights of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H_{1/3}=7\text{cm}$ ).

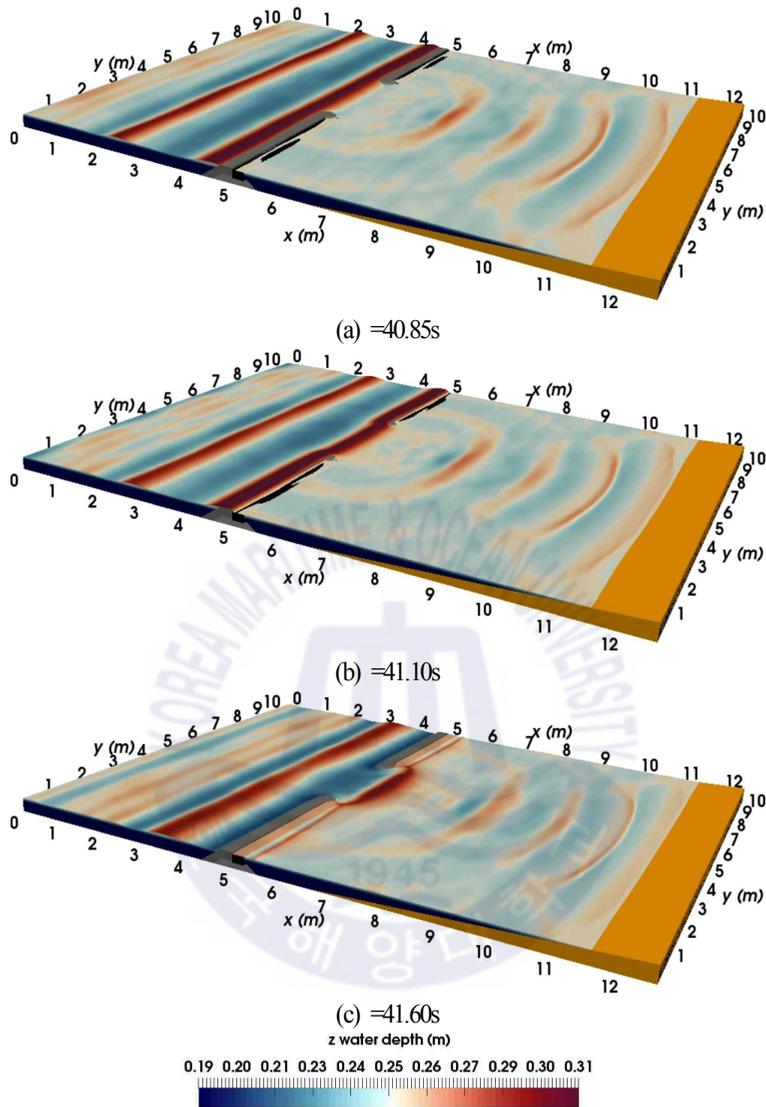


Fig. 6.4. Snapshots of wave diffraction behind LCS (05H7G250Rc3).

다음으로, 유의파고가  $H_{1/3}=7\text{cm}$ 로 증가된 Fig. 6.6을 살펴보면 잠제의 경우 해안선 근방에서 연안류가 상대적으로 명확히 나타나고, 또한 발산하는 경향을 나타낸다. 그리고, 개구부에서 외해측으로의 이안류가 보다 강하게 형성되는 것을 알 수 있다. LCS의 경우는 전술한 유의파고  $H_{1/3}=5\text{cm}$ 의 경우보다 개구부에서 항안류, 해안선 근방에서 이안류 및 수렴하는 연안류의 강도가 천단고 높은 경우보다 강해지고, 특히 구조물의 바로 배후에서 반사되는 흐름이 강해지는 것을 알 수 있다. 이는 불규칙 파동장하 2차원저천단구조물(Lee et al., 2019b)의 결과를 통해 개구부에서 파에너지 유입 또는 회절 등

의 영향이 적은 제간부의 배후에서 발생하는 현상임을 확인할 수 있다. 이상의 경향은 규칙파(Lee et al., 2019a)에서도 동일하게 관찰되는 현상이지만 규칙파에서는 LCS의 배후에 해빈류의 강도가 불규칙파의 경우보다 강하게 형성되는 것을 알 수 있다.

### 6.2.3 평균난류운동에너지의 분포

Figs. 6.7과 6.8(두 그림에서 범례의 크기가 다르다는 것에 유의바란다)은 시간평균난류운동에너지를 연직방향으로 평균한 평균난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 것이며, 잠제에 관한 선행연구 (Lee et al., 2018)의 결과도 함께 병기하여 비교·검토한다. 유의파고  $H_{1/3}=5\text{cm}$ 인 Fig. 6.7을 살펴보면 잠제의 경우는 개구부를 향해 열려있는 해안선 근방의 중앙부를 중심으로 해안선에 평행한 좌우측으로 극대치 3개를 형성한다. 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 중앙부분부터 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

LCS의 경우 천단고인  $R_c=3\text{cm}$ 인 경우 난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 잠제의 경우와 대체로 유사하지만 중앙부에 2개의 극대치를 갖고, 해안선 근방에서는 잠제의 경우보다 종단방향의 분포폭이 현저하게 넓게 나타난다. 또한, 이러한 값의 크기는 잠제의 경우와 동일하게 개구폭이 좁아질수록 줄어드나, 중앙부의 극대치를 중심으로 줄어든다. 여기서, LCS의 내해측 천단상에서 평균난류에너지의 값이 크게 나타나는 것은 천단상에서의 월류에 따른 난류강도가 강하게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 다음으로, 높은 천단고인  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우 평균난류에너지의 전반적인 공간분포양상은 전술한 잠제나 월파가 발생하는 낮은 천단고인  $R_c=3\text{cm}$ 인 경우와 유사하다.

유의파고가  $H_{1/3}=7\text{cm}$ 로 증가된 Fig. 6.8로부터 잠제의 경우 개구부를 향해 열려있는 해안선 근방의 중앙부에서 큰 값을 나타내고, Fig. 6.7과는 다르게 이를 중심으로 해안선에 평행한 좌우측으로 감소한다. 또한, 공간분포는 개구폭이 좁아질수록 연안방향으로 분포폭과 종단방향으로 다소 많이 좁아지는 경향을 나타내는 것은 Fig. 6.7과 상이하지만, 잠제의 천단상에서 평균난류에너지가 큰 값이 분포하는 것은 Fig. 6.7의 경우와 동일하다.

LCS의 경우 천단고인  $R_c=3\text{cm}$ 인 경우 평균난류운동에너지의 전반적인 공간분포양상은 잠제의 경우와는 달리 해안선 근방에서 연안방향으로 분포폭이 넓고, 극대치 2개가 거의 동일한 위치에 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 Fig. 6.7의 경우와 유사하다. LCS에서 극대치의 크기는 잠제의 경우와 동일하게 개구폭이 좁아질수록 줄어든다. 높은 천단고인  $R_c=8\text{cm}$ 의 경우 평균난류운동에너지의 전반적인 공간분포양상은 전술한 잠제나 낮은 천단고인  $R_c=3\text{cm}$ 의 경우와 유사한 분포양상을 나타낸다. 그러나 월파가 상대적으로 많이 발생하는 낮은 천단고의 LCS에 대한 케이스의 경우보다 값이 약간 적어진다는 것을 알 수 있다.

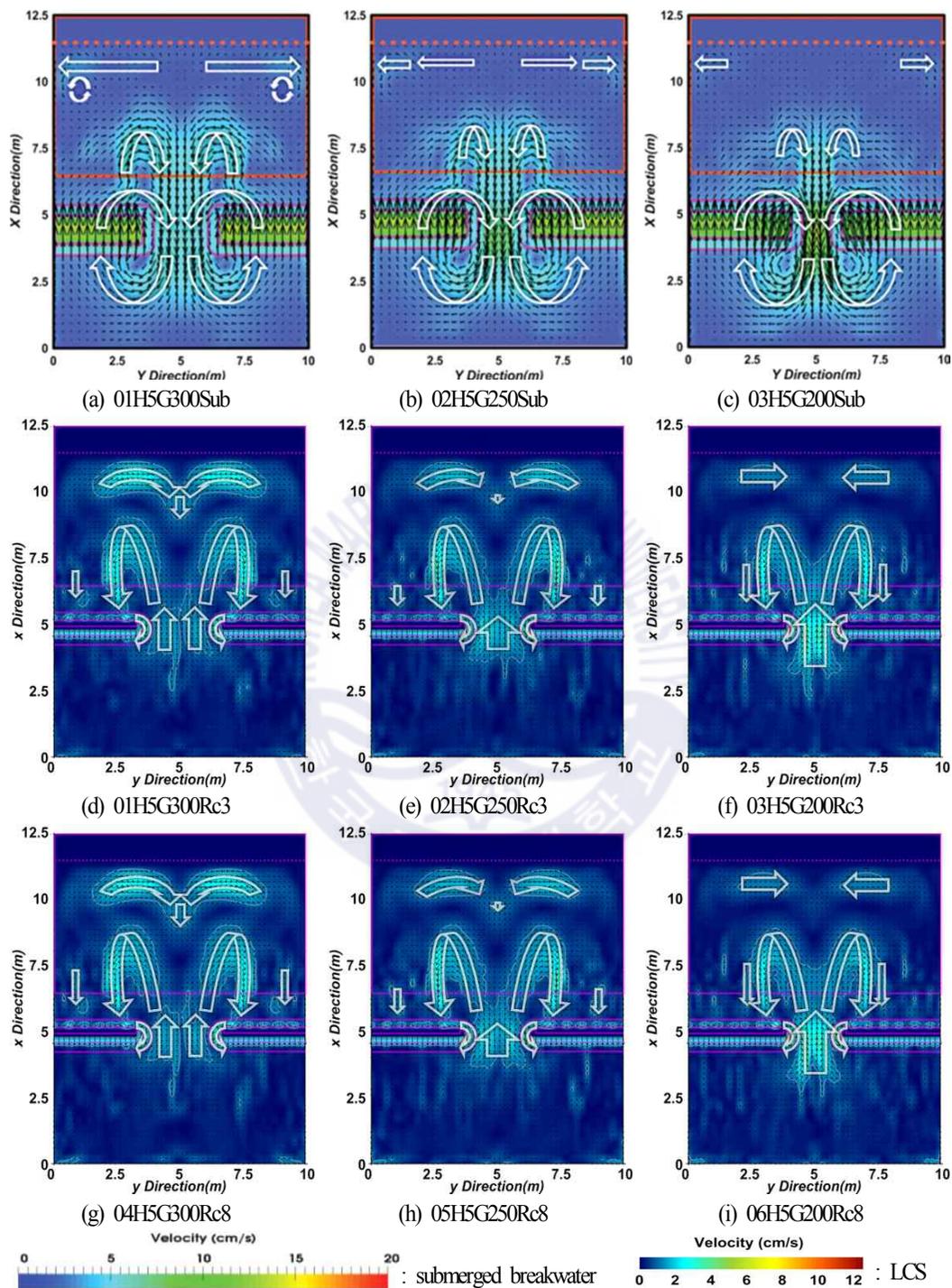


Fig. 6.5. Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H_{1/3}=5\text{cm}$ ).

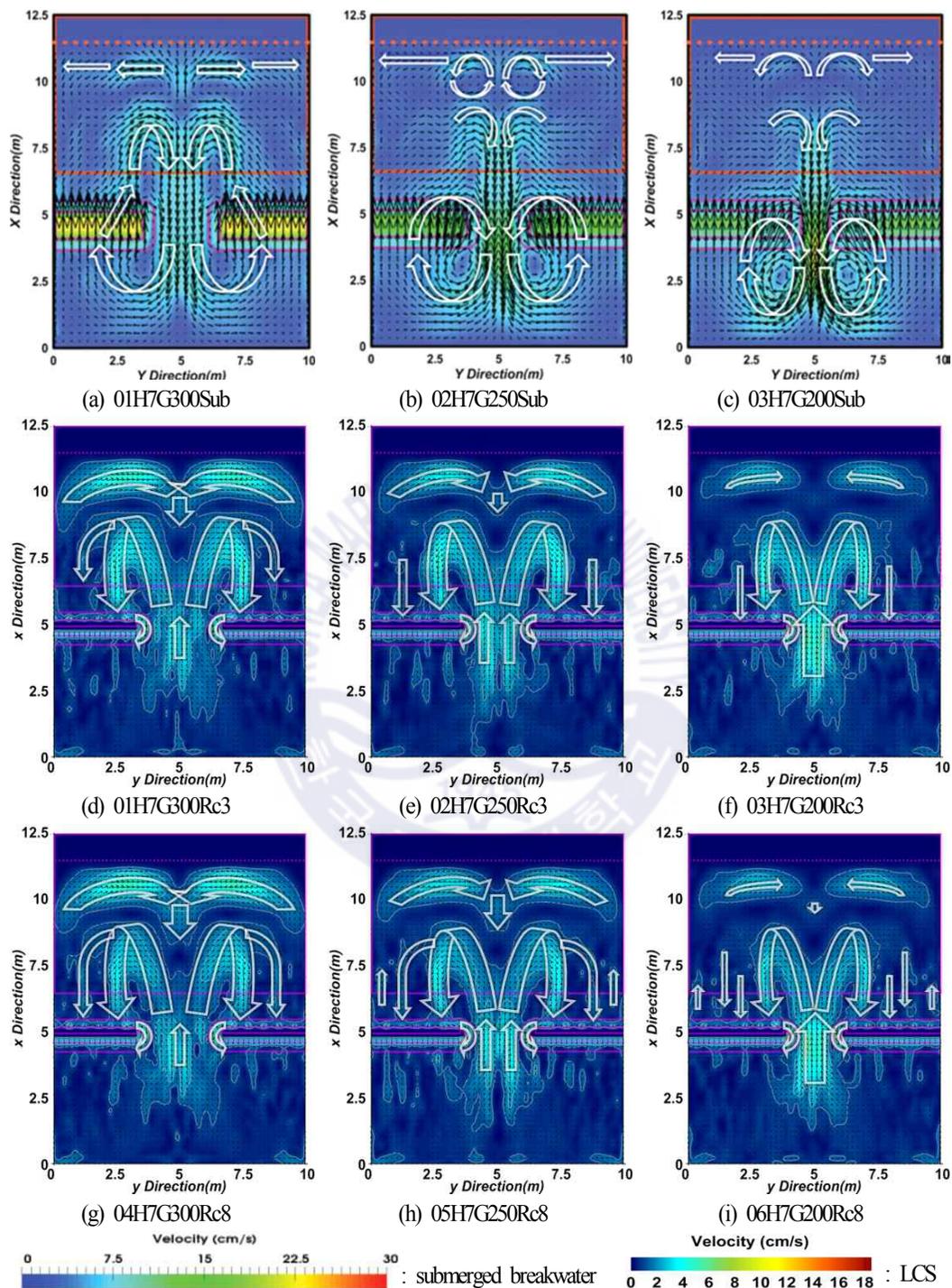


Fig. 6.6. Spatial distribution of mean velocities of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H_{1/3}=7\text{cm}$ ).

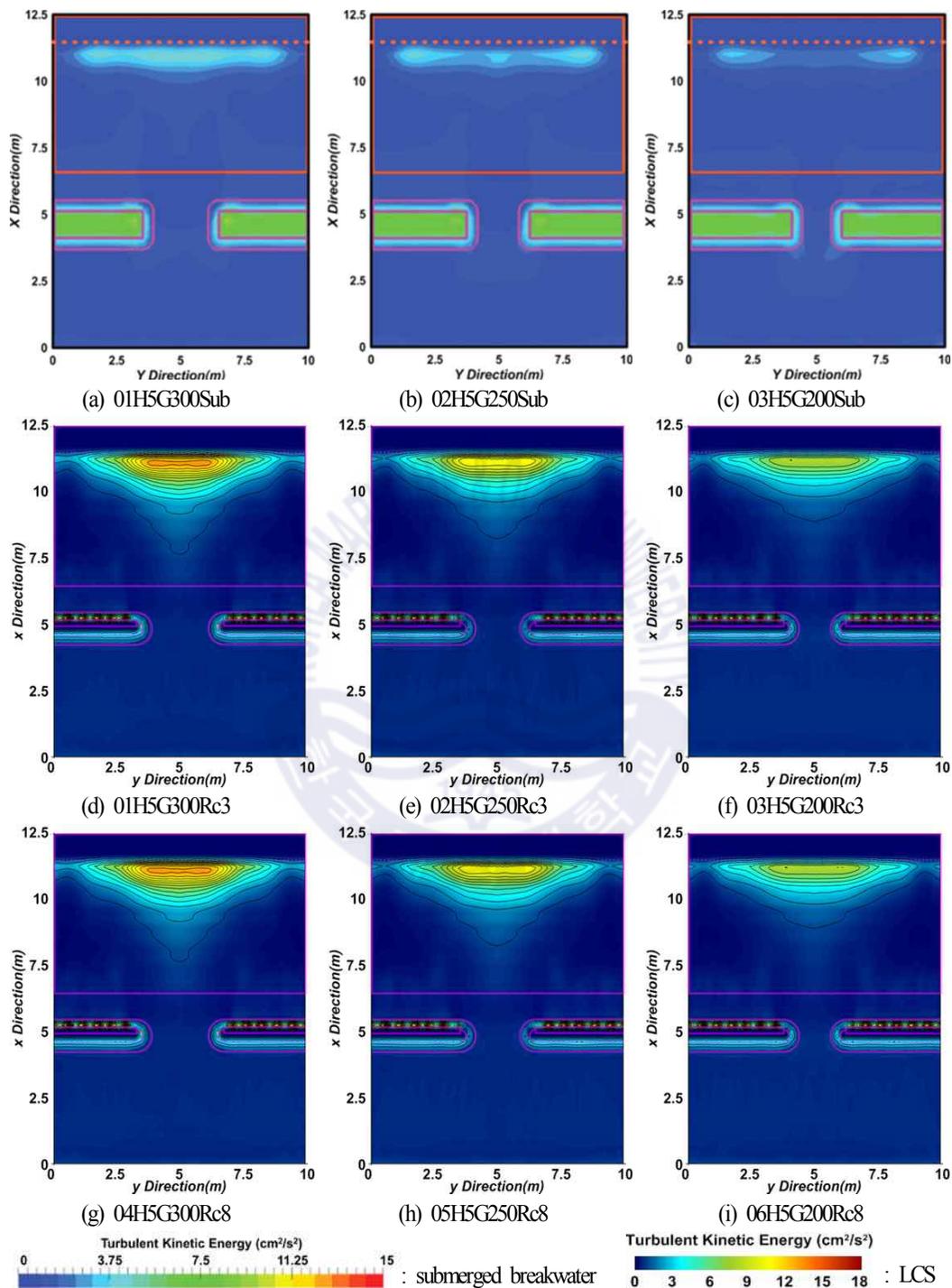


Fig. 6.7. Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H_{1/3} = 5\text{cm}$ ).

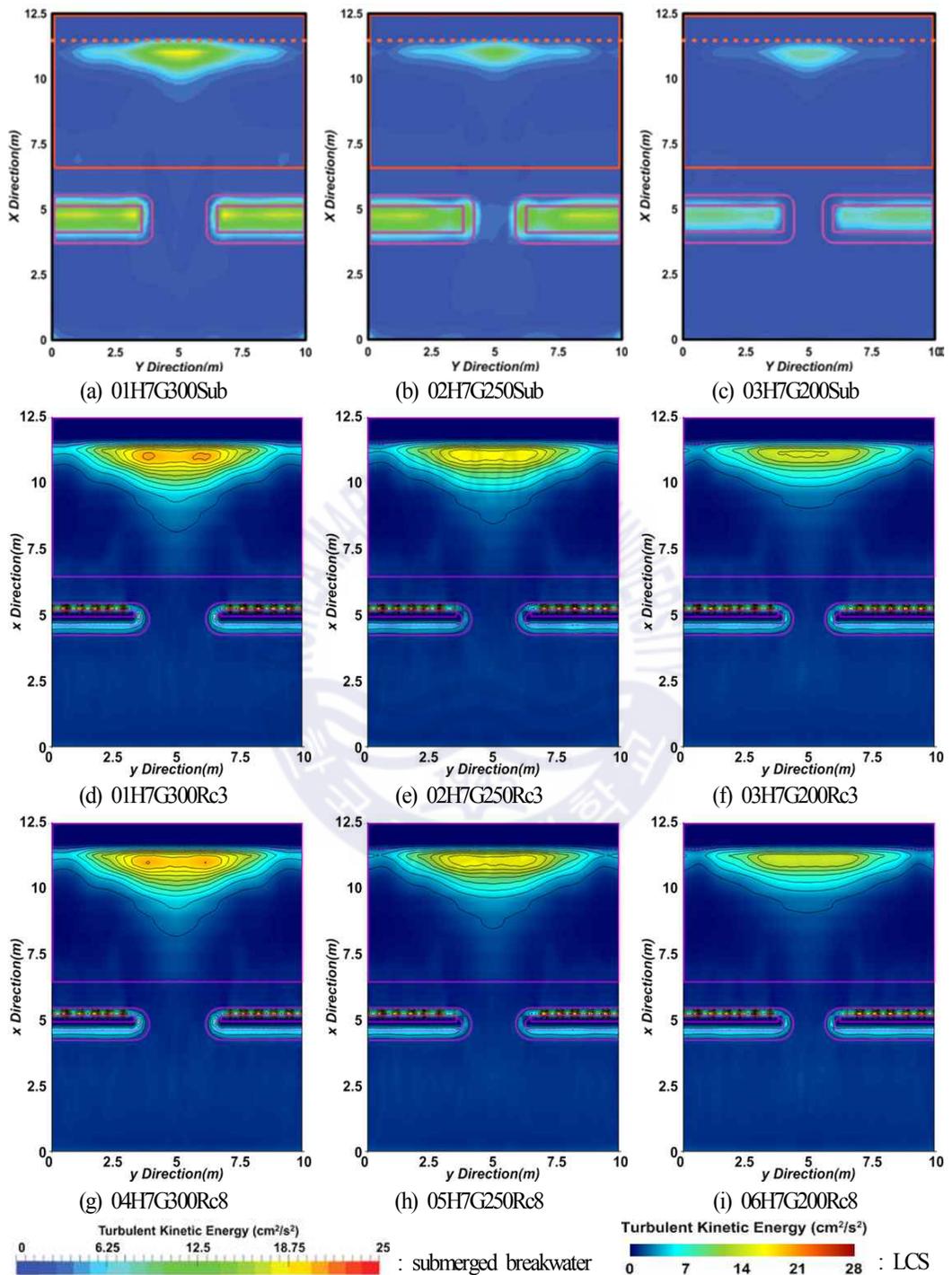


Fig. 6.8. Spatial distribution of turbulent kinetic energies of submerged breakwaters and LCS constructed at wave tank ( $H_{1/3}=7\text{cm}$ ).

이상의 경향은 평균난류운동에너지가 전반적으로 규칙파(Lee et al., 2019a)의 경우보다 작은 값을 나타내고, 형성되는 극대치의 개수와 형성되는 위치가 상이한 것이 특징이다. 또한, LCS의 상치케이스 바로 배후에서 평균난류운동에너지가 집중되는 것은 월류수가 케이스의 천당상에서 강한 수평흐름으로 전환되고, 이 흐름이 배후수면에 그대로 돌입됨에 따라 배후수면이 크게 교란되기 때문이다(Lee et al., 2019b). 따라서, 잠제와 LCS에서 나타나는 평균난류운동에너지에 대한 공간분포의 차이는 전술한 파고 및 흐름에서의 차이와 중첩되어 최종적으로 모래에동에서의 차이로 이어질 것으로 판단된다.

### 6.3 결론

본 장에서는 불규칙파동장하 3차원구조물인 LCS에 의한 파고, 해빈류 및 평균난류운동에너지 등을 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원혼상류의 해석법인 olaFlow 모델을 이용하여 수치해석하였고, 기존의 수치해석에 대한 결과를 검토하였다. 입사유의파고와 천단고의 변화를 통해 LCS에 관해 월파가 야기한 차이를 확인하였고, 잠제와의 역학적인 차이점을 규명하기 위해서 동일한 파랑조건과 개구부폭을 동일하게 적용하여 잠제의 경우와 비교·분석하였다. 이로부터 도출된 사항을 다음에 서술한다.

(1) 파고의 공간분포: LCS의 경우, 항외측에서는 구조물에 의한 반사파의 영향으로 큰 파고의 부분 중복파동장이 형성된다. 내해측에서는 외해측보다 정온한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 유의입사파고가 작을수록 내해측의 파고가 줄어든다. 이러한 내해측의 파고에는 천단상으로 월파 및 제테내를 통한 파랑에너지의 전달 및 두부에서 회절파의 영향을 크게 받을 수 있지만, 본 수치계산에 의하면 동일한 유의입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월파 여부는 내해측의 파고분포와 그의 크기에 거의 영향을 미치지 않는다. 잠제와 LCS의 차이는 잠제의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파 집중과 파고증폭의 현상이 보다 강해지고, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어드는 반면, LCS의 경우 개구폭이 좁아짐에 따라 개구부 중앙의 외해측에서 파 집중과 파고증폭이 나타난다.

(2) 해빈류의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점으로 수렴하는 연안류가 발생하며, 이는 개구폭이 넓을수록 강하게 나타난다. 개구부에서는 항안류가 발생하며, 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 강해진다. 연안류와 항안류의 크기는 전체적으로 입사파고가 클수록 커지고, 동일한 유의파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류 여부가 해빈류에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 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) 평균난류운동에너지의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 극대치가 주어지고, 이를 중심으로 좌·우측의 연안방향으로 갈수록 값이 감소한다. 이러한 경향

은 개구폭이 좁을수록 분포값이 줄어드는 반면, 유의파고가 커지면 보다 커진다. 한편, 동일한 입사파 고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류 여부에 대해서는 비월파의 경우에 평균난류운동에너지에 미치는 영향이 줄어든다. 여기서, 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 좌우측으로 갈수록 감소하고, 개구폭이 좁을수록 값의 크기가 감소하는 경향은 LCS와 동일한 현상이지만, 입사파고가 커지면 LCS의 경우와 다르게 중앙부분 분포폭이 현저하게 넓어지는 것이 LCS와의 차이로 판단된다.

## Reference

- 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.
- 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. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- 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.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2017). Hydraulic experiments on wave transmission coefficients for rubble mound structure armored with tetrapods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(4), 198-205.(in Korean)
- 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, J.H., Bae, J.H., An, S.W., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019a). Variation characteristics of wave field around three-dimensional low-crested structure. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*,

31(3), 180-198.(in Korean)

- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W., Kim, D.S. (2018). 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.(in Korean)
- Lee, K.H., Choi, G.H., Lee, J.H., Jung, U.J. Kim, D.S. (2019b). Variation Characteristics of Irregular Wave Fields around 2-Dimensional Low-Crested-Breakwater. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(6), 356-367.(in Korean)
- 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 Eng., MIT.



## 제 7 장 결론

### 7.1 제 3장에서 결론

제 3장에서는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)을 이용하여 다공성매질에서 단파의 수위변동과 규칙 파동장에서 잠체에 의한 파의 변형에 관한 기존의 수리실험결과와 비교·검토로부터 그 타당성을 검증하였다. LCS가 설치된 2차원수치파동수로에 규칙파를 작용시켜 구조물에 의한 전달율, 파고의 공간분포, 구조물 주변에서 흐름 및 난류운동에너지를 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 결과를 다음에 요약 기술한다.

(1) 파고전달율은 전체적으로  $R_c/H_i$ 가 적을수록 약간 증가하는 경향을 나타내지만,  $R_c/H_i > 0.5$ 의 영역에서는 파고전달율의 변화가 거의 없다. 이러한 결과는 기존의 수리실험결과와 잘 일치한다.

(2) 파고의 공간분포에서 LCS의 전·후면 항내·외측에서 천단고의 변화에 따른 파고의 차이는 적다. 하지만, 천단고의 차이에 따른 공간파고의 차이는 입사파고가 커질수록 약간 나타난다. 전달파고는 천단고가 높은 비월파의 경우가 상대적으로 작은 값을 나타낸다.

(3) 평균유속은 구조물 항외측의 전면에 반시계방향의 순환류셀이 형성되고, 항내측에서 항내로 향하는 일방향흐름이 강하게 나타나며, 이러한 순환류셀의 강도 및 일방향흐름은 천단고의 높이와 이에 따른 월파여부 및 입파파고의 크기와 밀접한 관계를 가진다.

(4) 평균난류운동에너지는 유속이 큰 평균수위의 상면부근에서 구조물과 파와 상호작용에 의한 난류성분이 발달하는 케이슨 전면의 TTP층 내, 케이슨의 천단부 및 케이슨의 배면에서 크게 나타난다. 특히, 케이슨의 배면에 나타나는 큰 평균난류운동에너지는 케이슨의 천단 상에서 강한 수평류가 항내로 하향돌입하면서 발생된다. 이러한 평균난류운동에너지의 변동은 전술한 바와 같이 천단고의 높이와 이에 따른 월파여부 및 입사파고의 크기와 밀접한 관계를 가진다.

### 7.1 제 4장에서 결론

제 4장에서는 olaFlow모델(Higuera et al., 2018)에 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)을 적용하여 LCS가 설치된 2차원수치파동수로에서 위치에 따른 주파수스펙트럼의 변동특성, 파고전달율,  $H_{rms}$ 의 공간분포, LCS 주변에서 흐름(해빈류) 및 난류운동에너지의 공간분포 등을 입사유 의파고와 천단고의 변화에 따라 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 결과를 다음에 요약 기술한다.

(1) 입사유의과고가 증가함에 따라 LCS 근방(WG2의 경우)의 파스펙트럼에서는 침두주파수를 중심으로 고·저주파수영역으로 파에너지의 전이가 발생되고, 경우에 따라 삼봉형스펙트럼이 형성된다. LCS의 배후면에서 파스펙트럼은 파전달이 거의 없기 때문에 매우 적은 값을 나타내지만 침두주파수가 상당히 저주파수측으로 이동된다.

(2) 파고전달율은 전체적으로 무차원천단고가 0.5보다 적은 영역에서는 무차원천단고가 적을수록 약간 증가하는 경향을 나타내지만 0.5보다 큰 영역에서는 거의 일정치를 나타낸다.

(3)  $H_{rms}$ 는 천단고의 변화에 따른 차이는 적고, 배후면에서는 천단고가 높은 경우가 약간 적은 값을 나타낸다.

(4) 평균유속(해빈류)은 LCS의 외해측 전면에 시계방향의 해빈류와 반시계방향의 순환류셀이 형성되고, 내해측에서는 항내로 향하는 일방향흐름이 강하게 나타난다. 외해측에서 시계방향의 해빈류는 천단고가 높을수록, 내해측의 정수면 근방에서 일방향흐름은 천단고가 낮을수록 강해진다.

(5) 평균난류운동에너지는 정수면 상의 LCS 부근에서 큰 값을 가지며, LCS로부터 멀어질수록 감소한다. 또한, 파고가 커질수록 커지고, 동시에 분포범위가 확대되며, 외해측보다 내해측에서 더 큰 값을 갖는다.

본 수치해석결과는 케이스이 상치된 복합단면의 LCS 주변에서 파동장의 변동특성을 규명하기 위하여 불침착과해석을 수행하였다. 결과에 따르면 잠제에 비해 파랑제어능이 탁월하고, 구조물의 전체적인 폭을 줄일 수 있기 때문에 경제적이지만 사빈의 유지 및 개선이라는 원래의 목적을 달성하기 위해서는 다양한 입사파랑조건과 LCS의 평면배치조건에 대한 3차원적인 접근을 통하여 해빈류의 평면적인 변동특성을 면밀히 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 7.1 제 5장에서 결론

본 장에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원혼상류의 해석법인 공개된 CFD Code인 olaFlow를 이용하여 규칙파동장하 3차원투과성구조물인 LCS에 의한 파고, 평균유속(흐름) 및 평균난류운동에너지 등을 수치해석하였으며, 기존의 실험해석 및 수치해석에 대한 결과와의 비교·검토로부터 LCS로의 타당성을 검증하였다. 실제 수치해석에서는 LCS에 관해 율파 여부가 중요한 차이를 나타낼 것으로 판단하여 파고와 천단고를 변화시켰고, 또 다른 해빈유실대책공법으로 적용되는 잠제와의 역학적인 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 부분반사파동장이 형성된다. 항내측에서는 항외측보다 정온한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 입사 파고가 작을수록 항내측의 파고가 줄어든다. 이러한 항내측의 파고에는 천단상으로 월파 및 제체내를 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 파 집중과 파고 증폭의 현상이 보다 강해지고, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어드는 반면, LCS의 경우 개구폭이 좁아짐에 따라 개구부 중앙에서 파 집중과 파고 증폭의 현상이 미미해지고, 배후로 전달되는 파에너지가 줄어든다.

(2) 해빈류의 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 월류 여부가 평균유속에 미치는 영향은 거의 나타나지 않는다. 여기서, 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 좌우측으로 발산하는 연안류가 발생하고, 해안선 근방의 항내측과 잠제 개구부와 개구부 근방의 천단상에 걸쳐 순환류가 형성되며, 이것이 평균유속의 공간분포에서 LCS와의 차이로 판단된다.

(3) 평균난류운동에너지의 공간분포 : LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 가장 큰 값이 주어지고, 이를 중심으로 좌우측의 연안방향으로 갈수록 값이 감소한다. 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 분포값이 줄어드는 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 좌우측으로 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.

## 7.1 제 6장에서 결론

본 장에서는 불규칙파동장하 3차원구조물인 LCS에 의한 파고, 해빈류 및 평균난류운동에너지 등을 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원혼상류의 해석법인 olaFlow 모델을 이용하여 수치해석하였고, 기존의 수치해석에 대한 결과를 검토하였다. 입사유의파고와 천단고의 변화를 통해 LCS에 관해 월파가 야기할 차이를 확인하였고, 잠제와의 역학적인 차이점을 규명하기 위해서 동일한 파랑조건과 개구부폭

을 동일하게 적용하여 잠제의 경우와 비교·분석하였다. 이로부터 도출된 사항을 다음에 서술한다.

(1) 파고의 공간분포: LCS의 경우, 항외측에서는 구조물에 의한 반사파의 영향으로 큰 파고의 부분 증폭과동장이 형성된다. 내해측에서는 외해측보다 정온한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 유의입사파고가 작을수록 내해측의 파고가 줄어든다. 이러한 내해측의 파고에는 천단상으로 월파 및 제테내를 통한 파랑에너지의 전달 및 두부에서 회절파의 영향을 크게 받을 수 있지만, 본 수치계산에 의하면 동일한 유의입사파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월파 여부는 내해측의 파고분포와 그의 크기에서의 영향을 미치지 않는다. 잠제와 LCS의 차이는 잠제의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파 집중과 파고증폭의 현상이 보다 강해지고, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어드는 반면, LCS의 경우 개구폭이 좁아짐에 따라 개구부 중앙의 외해측에서 파 집중과 파고증폭이 나타난다.

(2) 해빈류의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점으로 수렴하는 연안류가 발생하며, 이는 개구폭이 넓을수록 강하게 나타난다. 개구부에서는 항안류가 발생하며, 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 강해진다. 연안류와 항안류의 크기는 전체적으로 입사파고가 클수록 커지고, 동일한 유의파고에 대해 천단고의 차이에 따른 월류 여부가 해빈류에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 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) 평균난류운동에너지의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 극대치가 주어지고, 이를 중심으로 좌·우측의 연안방향으로 갈수록 값이 감소한다. 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 분포값이 줄어드는 반면, 유의파고가 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 감소하는 경향은 LCS와 동일한 현상이지만, 입사파고가 커지면 LCS의 경우와 다르게 중앙부분 분포폭이 현저하게 넓어지는 것이 LCS와의 차이로 판단된다.

## Reference

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