



공학석사 학위논문

OLAFOAM에 의한 해안구조물의 주변에서 파랑특성의 수치시뮬레이션

Numerical Simulation of Wave Characteristics around Coastal Structures by OLAFOAM



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

배 주 현

본 논문을 배주현의 공학석사 학위논문으로 인준함

| 위 | 원 | 공학박사 | 김 도 삼 | (인) |
|----|----|------|-------|-----|
| 위 | 원 | 공학박사 | 김 태 형 | (인) |
| 위원 | 븬장 | 공학박사 | 김 인 철 | (인) |

2018년 2월

1945

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

배 주 현



Numerical Simulation of Wave Characteristics around Coastal Structures by OLAFOAM

by

Ju Hyun Bae

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

ABSTRACT

This study deals with the modeling and application of the coastal structures using OLAFOAM based on OpenFOAM[®], and the structures were submerged breakwater representing permeable structure and circular perforated caisson breakwater consisting of a bundle of latticed blocks. This paper consists of the two topics. The first topic includes 3 parts: (1) numerical analysis on wave characteristics around 2-dimensional permeable submerged breakwater in wave and current coexisting field, (2) numerical analysis on variation characteristics of water surface and velocity around 3-dimensional permeable submerged breakwater, and (3) numerical analysis on variation characteristics of water surface and velocity around 3-dimensional permeable submerged breakwater in wave overtopping, reflection, wave pressure acting on circular perforated caisson breakwaters and the interconnectivity between them in a 3-dimensional numerical irregular wave tank.

In the first part of the first topic, OLAFOAM was validated for 1) wave transformation inside porous structure under bore conditions, 2) wave transformation and fluctuation of excess pore-water pressure in sand bed by submerged breakwater under regular wave condition, and 3) regular wave transformation and resultant vertical velocity distribution under current by comparison with existing laboratory measurements and the performance for irregular waves was examined from the reproducibility of the target irregular waves and frequency spectrum analysis. Hereafter, this part, which is almost no examination carried out until now, analyzed closely variation characteristics of wave height or H_{rms} , frequency spectrum, breaking waves, averaged velocity and turbulent kinetic energy around 2-dimensional porous submerged breakwater in the wave and current coexisting field for the case of sandy or graveled rear beach.



In the second part of the first topic, the comparisons are made with available experimental results on 1) wave transformation and fluctuation of wave pressure by a 3-dimensional permeable upright wall and 2) wave transformation and fluctuation of wave velocities by a 3-dimensional impermeable submerged breakwater to verify its applicability to the 3-dimensional numerical analysis. Hereafter, the characteristics of the water surface variations like wave height or H_{rms} distribution and velocity fields including the average flow velocity, longshore current and turbulent kinetic energy acting as the main external forces formed around the 3-dimensional permeable submerged breakwaters are investigated under regular or irregular waves and salient formation. Shoreline response is also predicted by the longshore-induced flux.

The third part of the first topic is expanded first and second parts. This part, which is almost no examination carried out until now, analyzed closely the characteristics of the water surface variations like wave height or H_{rms} distribution and velocity fields including the average flow velocity, longshore current and turbulent kinetic energy acting as the main external forces formed around the 3-dimensional permeable submerged breakwaters are investigated under wave-current coexisting field and the formation condition of salient. The target waves were regular and irregular waves. Shoreline response is also predicted by the longshore-induced flux, and the effect on formation process of salient is investigated as existing current and current direction.

In the second topic, to investigate the applicability of OLAFOAM to the specialized breakwater like the circular perforated caisson breakwater, the variations of wave pressure acting on the 3-dimensional slit caisson breakwater were compared to the previous experimental results under the regular wave conditions. As a result, a series of numerical simulations for the circular perforated caisson breakwaters, which is similar to slit caisson breakwater, was carried out under the irregular wave actions. The hydraulic characteristics of the breakwater such as wave overtopping, reflection, and wave pressure distribution were carefully investigated respect to the significant wave height and period, the wave chamber width, and the interconnectivity between them. Also, the wave pressure distribution was compared with the Goda equation for the impermeable vertical wall or Takahashi equation for the slit caisson breakwater, and the reflection coefficient was compared with the Tanimoto equation.



OLAFOAM에 의한 해안구조물의 주변에서 파랑특성의 수치시뮬레이션

배 주 현

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

요 약

본 연구는 OpenFOAM[®]을 기반으로한 OLAFOAM을 적용하여 해안구조물의 모델링과 그의 적용을 다루며, 구조물로는 투과성 구조물을 대표하는 잠제와 격자블록으로 결속된 방파제인 원형유공방파제를 대상으로 하였다. 따라서 본문에서는 크게 2가지 주제를 다루며, 첫 번째 주제는 잠제를 대상으로 (1) 파와 흐름의 공존장 내 2차원투과성잠제 주변에서의 파랑특성의 수치해석, (2) 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동과 내부유속변 동의 특성에 관한 수치해석 그리고 (3) 파와 흐름의 공존장내 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동과 내부유속 변동의 특성에 관한 수치해석과 같이 3개의 부분으로 구성 하였으며, 두 번째 주제는 3차원불규칙파동장하에서 원형유공케이슨 방파제를 대상으로 월파량, 반사율, 파압분포 및 그들의 상호연관성에 대한 수치시뮬레이션이 다.

첫 번째 주제의 (1)에서는 먼저 1) 단파하 투과성구조물에서 파의 변형, 2) 규칙파하 잠제에 의한 파의 변형과 모래지반내 과잉간극수압변동 및 3) 흐름하 규칙파의 변형과 연직유속분포에 대해 기존의 각 실험결과 와 비교·검토하고, 불규칙파를 조파하여 목표한 파의 재현과 주파수스펙트럼을 비교·검토하여 OLAFOAM의 타당성을 검증한다. 이로부터 지금까지 거의 검토되지 않은 규칙파와 흐름의 공존장 및 불규칙파와 흐름의 공존장에 설치된 2차원투과성잠제에 대해 배후사면을 모래 혹은 자갈로 고려한 경우 흐름방향 등에 변화에 따른 잠제 주변에서 파고 및 H_{rms} , 주파수스펙트럼, 쇄파, 평균유속 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 면밀히 검토하였다.

(2)에서는 OLAFOAM의 3차원수치해석의 타당성을 검증하기 위해 1) 3차원투과성직립벽에 의한 파의 변형 과 파압변동 및 2) 규칙파동장하에서 3차원불투과잠제에 의한 파의 변형 및 흐름에 대한 기존의 실험결과와의 비교·검토를 하였다. 이로부터 규칙파, 불규칙파 및 설상사주 형성조건하에 투과성잠제 주변에서 형성되는 파고 및 H_{rms} 분포와 같은 수면변동의 특성과 배후에서 형성되는 설상사주의 주요외력으로 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토하였다. 또한, 연안류에 의한 수송유량으로부

Collection @ kmou

터 해안선의 지형변동도 예측하였다.

(3)에서는 (1)과 (2)를 확장하여, 파와 흐름의 공존장 및 설상사주의 형성조건하에 설치된 3차원투과성잠제 에 관해 흐름방향에 따라 변화되는 잠제 주변에서 파고 및 H_{rms} 분포와 같은 수면변동의 특성 및 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토하 였으며, 대상파랑은 규칙파와 불규칙파로 하였다. 또한, 연안류에 의한 수송유량으로부터 해안선의 지형변동도 예측하여, 흐름방향에 따른 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 검토하였다.

두 번째 주제에서는 먼저 규칙파랑하 3차원슬리트케이슨방파제에서 파의 파압변동에 대해 기존의 실험결 과와 비교·검토하여 OLAFOAM의 원형유공케이슨 방파제와 같은 특수방파제에 대한 수치해석의 타당성을 검증하였다. 이로부터 슬리트케이슨제와 유사한 원형유공케이슨 방파제가 설치된 일정수심의 3차원수치파동 수조에 불규칙파를 조파하여 유수실 폭과 유의파고 및 유의주기의 변화에 따른 원형유공케이슨 방파제에서 월파량, 반사율, 파압분포 및 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 또한, 파압분포는 불투과연직벽 체에 대한 Goda 식 및 슬리트케이슨제에 대한 Takahashi 식과 비교하였으며, 반사율은 Tanimoto 식과 비교하였 다.





목 차

| ABSTRACT ····· | ·····(i) |
|-----------------------|--------------|
| 요약 | ·····(iii) |
| 목차 | ·····(v) |
| LIST OF FIGURES ····· | ·····(viii) |
| LIST OF TABLES | ·····(xii) |
| LIST OF PHOTOS ····· | ······(xiii) |

제1장 서론

| 1.1 연구의 배경 및 목적 | (1) |
|------------------------|------|
| 1.2 연구의 구성 | (9) |
| References | (10) |
| 제2장 수치해석이론 | |
| 2.1 지배방정식 | (17) |
| 2.2 수치파동수조에 의한 불규칙파 조파 | (19) |
| References | (20) |

제3장 파-흐름 공존장내 2차원잠제 주변의 파랑특성

| 3.1 수치해석의 검증(| (21) |
|--|------|
| 3.1.1 다공성매질을 통과하는 단파의 수위변화에 대한 검증(| (21) |
| 3.1.2 잠제 주변의 파랑변동과 잠제 내 및 지반 내에서 과잉간극수압변동에 관한 검증…(| (22) |
| 3.1.3 파랑과 흐름의 공존장에 있어서 수위변화와 평균유속변화에 대한 검증(| (25) |
| 3.1.4 불규칙파의 조파검증(| (27) |
| 3.2 계산조건 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | (28) |
| 3.3 규칙파-흐름 공존장내 잠제 주변의 파랑특성의 수치해석(| (30) |
| 3.3.1 수위변동과 주파수스펙트럼(| (30) |
| 3.3.2 쇄파형상(| (34) |



| 3.3.3 파고의 분포(37) |
|--|
| 3.3.4 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포(38) |
| 3.4 불규칙파-흐름 공존장내 잠제 주변의 파랑특성의 수치해석(41) |
| 3.4.1 수위변동과 주파수스펙트럼 ······(41) |
| 3.4.2 쇄파형상 |
| 3.4.3 H _{rms} 의 분포 ·····(48) |
| 3.4.4 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포(49) |
| 3.5 결언(52) |
| References(53) |

제4장 설상사주 형성조건 하에 있는 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성

| 4.1 수치해석의 검증 | (54) |
|---|------|
| 4.1.1 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압에 대한 검증 | (54) |
| 4.1.2 3차원불투과성잠제 주변에서 수위 및 유속에 대한 검증 | (57) |
| 4.2 계산조건 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | (60) |
| 4.3 규칙파랑하 수면변동 및 내부유속변동의 특성 | (62) |
| 4.3.1 파고의 분포 | (62) |
| 4.3.2 평균유속의 공간분포 | (69) |
| 4.3.3 연안류의 분포 | (74) |
| 4.3.4 평균난류운동에너지의 분포 | (77) |
| 4.4 불규칙파랑하 수면변동 및 내부유속변동의 특성 | (81) |
| 4.4.1 <i>H_{rms}</i> 의 분포 ······ | (81) |
| 4.4.2 평균유속의 공간분포 | (86) |
| 4.4.3 연안류의 분포 | (90) |
| 4.4.4 평균난류운동에너지의 분포 | (91) |
| 4.5 결언 | (93) |
| References | (94) |

Collection @ kmou

| 제5장 파흐름공존장 및 설상사주 형성조건 하게 있는 3차원투과상잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성 |
|--|
| 5.1 계산조건 |
| 5.2 규칙파-흐름공존장하 수면변동 및 내부유속변동의 특성(97) |
| 5.2.1 파고의 분포(97) |
| 5.2.2 평균유속의 공간분포 |
| 5.2.3 연안류의 분포(102) |
| 5.2.4 평균난류운동에너지의 분포 |
| 5.3 불규칙파-흐름공존장하 수면변동 및 내부유속변동의 특성 |
| 5.3.1 H _{rms} 의 분포 ······(106) |
| 5.3.2 평균유속의 공간분포 |
| 5.3.3 연안류의 분포(109) |
| 5.3.4 평균난류운동에너지의 분포(111) |
| 5.4 결언 |
| References ·····(113) |
| |
| 세6상 원형유공케이슨 망파세의 월파량, 반사율 및 작용파업에 관한 3차원시뮬레이션 |
| 6.1 슬리트케이슨에 작용하는 파압(동압)의 검증(114) |
| 6.2 계산조건 |
| 6.3 수치해석 결과 |
| 6.3.1 월파량의 비교 |
| 6.3.2 반사율의 비교 |
| 6.3.3 파압분포의 비교(123) |
| 6.4 결언 |
| References ·····(132) |

제7장 결론

| 7.1 제3장 : 파-흐름 공존장내 2차원잠제 주변의 파랑특성 |
|--|
| 7.2 제4장 : 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성(135) |
| 7.3 제5장 : 파-흐름 공존장내 3차원잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성 (135) |
| 7.4 제6장 : 원형유공케이슨 방파제의 월파량, 반사율 및 작용파압 |

LIST OF FIGURES

| Fig. 3.1. Comparison between simulated and measured water surface elevations. | (21) |
|--|----------|
| Fig. 3.2. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis. | (22) |
| Fig. 3.3. Comparison between simulated and measured water surface elevations. | (23) |
| Fig. 3.4. Comparison between simulated and measured pore-water pressures. | (24) |
| Fig. 3.5. Comparison of simulated and measured water surface elevations in wave-current interaction. | (25) |
| Fig. 3.6. Comparison of simulated and measured mean horizontal velocity profiles in wave-current interaction. | (27) |
| Fig. 3.7. Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra. | (28) |
| Fig. 3.8. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis. | (29) |
| Fig. 3.9. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach. | (31) |
| Fig. 3.10. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach. | (33) |
| Fig. 3.11. Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach. | (35) |
| Fig. 3.12. Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach. | (36) |
| Fig. 3.13. Spatial distribution of simulated wave heights. | (37) |
| Fig. 3.14. Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater. | (38) |
| Fig. 3.15. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater. | (39) |
| Fig. 3.16. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy, and its accumulation. | (40) |
| Fig. 3.17. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach. | (43) |
| Fig. 3.18. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach. | (44) |
| Fig. 3.19. Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach. | (46) |
| Fig. 3.20. Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach. | (47) |
| Fig. 3.21. Spatial distribution of simulated H_{rms} . | (48) |
| Fig. 3.22. Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater. | (49) |
| Fig. 3.23. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater. | (50) |
| Fig. 3.24. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy, and its accumulation. | (51) |
| Fig. 4.1. Illustrative sketch of wave basin and porous structure. | (54) |
| Fig. 4.2. Comparison between simulated and measured water surface elevations. | (56) |
| Fig. 4.3. Comparison between simulated and measured wave pressures. | (57) |
| Fig. 4.4. Illustrative sketch of wave basin. | (58) |
| | |



| Fig. 4.5. Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity. | (58) |
|--|----------|
| Fig. 4.6. Comparison between simulated and measured water surface elevations. | (59) |
| Fig. 4.7. Comparison between simulated and measured X- and Y-direction horizontal velocities. | (59) |
| Fig. 4.8. Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis. | (60) |
| Fig. 4.9. Predictive relationship between L_s/S and S_{off}/L_s of salient formation condition and layout of submerged breakwater. | (62) |
| Fig. 4.10. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width. | (63) |
| Fig. 4.11. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width. | (63) |
| Fig. 4.12. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour. | (64) |
| Fig. 4.13. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and beach. | (65) |
| Fig. 4.14. Spatial distribution of simulated wave heights at three $Y-Z$ cross sections. | (66) |
| Fig. 4.15. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of distance between shoreline and submerged breakwater. | (68) |
| Fig. 4.16. Spatial distribution of simulated wave heights at three Y-Z cross sections. | (69) |
| Fig. 4.17. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane. | (71) |
| Fig. 4.18. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane. | (72) |
| Fig. 4.19. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane. | (72) |
| Fig. 4.20. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane. | (74) |
| Fig. 4.21. Spatial distribution of longshore current velocities. | (76) |
| Fig. 4.22. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane. | (78) |
| Fig. 4.23. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region. | (79) |
| Fig. 4.24. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane. | (80) |
| Fig. 4.25. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region. | (80) |
| Fig. 4.26. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width. | (81) |
| Fig. 4.27. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width. | (82) |
| Fig. 4.28. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour. | (83) |
| Fig. 4.29. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and sandy beach. | (84) |
| Fig. 4.30. Spatial distribution of simulated H_{rms} at three Y-Z cross sections. | (85) |
| Fig. 4.31. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane. | (87) |
| Fig. 4.32 Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane. | (88) |
| Fig. 4.33. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane. | (89) |
| Fig. 4.34. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane. | (89) |



| Fig. | 4.35. Spatial distribution of longshore current velocities. | (90) |
|------|--|-----------|
| Fig. | 4.36. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane. | (92) |
| Fig. | 4.37. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region. | (93) |
| Fig. | 5.1. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction. | (98) |
| Fig. | 5.2 Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction. | (98) |
| Fig. | 5.3. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour. | (99) |
| Fig. | 5.4. Spatial distribution of simulated wave heights according to y direction. | (100) |
| Fig. | 5.5. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane. | (102) |
| Fig. | 5.6. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane. | (102) |
| Fig. | 5.7. Spatial distribution of longshore current velocities. | (103) |
| Fig. | 5.8. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in $x-y$ plane. | (105) |
| Fig. | 5.9. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region. | (106) |
| Fig. | 5.10. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of current direction. | (107) |
| Fig. | 5.11. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of current direction. | (107) |
| Fig. | 5.12. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to y direction. | (108) |
| Fig. | 5.13. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane. | (109) |
| Fig. | 5.14. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in $x-y$ plane. | (109) |
| Fig. | 5.15. Spatial distribution of longshore current velocities. | (110) |
| Fig. | 5.16. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in $x-y$ plane. | (111) |
| Fig. | 5.17. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region. | (112) |
| Fig. | 6.1. Illustrative sketch of wave basin and dimension of slit caisson breakwater. | (114) |
| Fig. | 6.2. Measuring positions of wave pressure. | (115) |
| Fig. | 6.3. Comparison between simulated and measured wave pressures. | (116) |
| Fig. | 6.4. Snapshot of waves acting on slit caisson breakwater. | (116) |
| Fig. | 6.5. Illustrative sketch of wave basin for numerical analysis. | (118) |
| Fig. | 6.6. Dimension of circular perforated caisson breakwater for numerical analysis. | (118) |
| Fig. | 6.7. Mesh generation around structure using SnappyHexMesh utility. | (119) |
| | | |



| Fig. | 6.8. Wave overtopping rates of circular perforated caisson breakwater. | (120) |
|------|--|-----------|
| Fig. | 6.9. Snapshots of wave overtopping on circular perforated caisson breakwater. | (121) |
| Fig. | 6.10. Reflection coefficient for circular perforated caisson breakwater. | (122) |
| Fig. | 6.11. Measuring positions of wave pressure. | (123) |
| Fig. | 6.12. Comparison of pressure acting on the front wall of the circular perforated caisson breakwater ($T_{1/3}$ =11.0s). | (125) |
| Fig. | 6.13. Comparison of pressure acting on the front wall of the circular perforated caisson breakwater ($H_{1/3}$ =3.0m). | (126) |
| Fig. | 6.14. Comparisons of pressure acting on the bottom of the circular perforated caisson breakwater ($T_{1/3}$ =11.0s). | (127) |
| Fig. | 6.15. Comparison of pressure acting on the bottom of the circular perforated caisson breakwater ($H_{1/3}$ =3.0m). | (128) |
| Fig. | 6.16. Comparison of pressure acting on the inner wall of the circular perforated caisson breakwater ($T_{1/3}$ =11.0s). | (129) |
| Fig. | 6.17. Comparison of pressure acting on the bottom of the circular perforated caisson breakwater ($H_{1/3}$ =3.0m). | (130) |
| | | |

1945 01 EH



LIST OF TABLES

| Table 3.1. Condition of regular wave and current applied to numerical analysis. | ••••• | (29) |
|--|-------|-------|
| Table 3.2. Condition of irregular waves and current applied to numerical analysis. | | (29) |
| Table 3.3. Comparison of wave heights at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5. | | (37) |
| Table 3.4. Comparison of H_{rms} at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5. | | (48) |
| Table 4.1. Wave gauge positions. | | (55) |
| Table 4.2. Pressure gauge positions. | | (55) |
| Table 4.3. Incident regular wave condition and 3-dimensional layout of submerged breakwater. | | (61) |
| Table 4.4. Incident irregular waves condition and 3-dimensional layout of submerged breakwater. | | (61) |
| Table 4.5. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current. | | (76) |
| Table 4.6. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current. | | (91) |
| Table 5.1. Condition of regular wave and current applied to numerical analysis and wave breaking on crown. | | (96) |
| Table 5.2. Condition of irregular wave and current applied to numerical analysis and wave breaking on crown. | | (97) |
| Table 5.3. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current. | | (103) |
| Table 5.4. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current. | | (110) |
| Table 6.1. Incident wave condition. | | (118) |
| Table 6.2. Maximum wave height for Goda and Takahashi equations. | | (123) |



LIST OF PHOTOS

| Photo 1.1. Chilam fishing port of Busan. | (5) |
|---|---------|
| Photo 1.2. Wolnae fishing port of Busan. | (5) |
| Photo 1.3. Installation procedure of circular perforated caisson breakwater bound lattice | (6) |
| blocks. | (0) |





제1장 서론

1.1 연구의 배경과 목적

OpenFOAM[®] (Open source Field Operation And Manipulation; Jacobsen et al., 2012)은 GNU GPL (일반 공중 사용 허가서: General Public License)을 기반으로 하는 공개 CFD (Computational Fluid Dynamics) 소스코드로써 전 세계의 다양한 분야의 많은 수치해석과련 연구자들에 의해 지속적인 개발과 수정이 이루어지고 있다. 특히, OpenFOAM[®]은 다양한 수치해석 분야에서 각각의 계산 목적에 대응할 수 있도록 비압축성유체의 흐름, 압축성 유체의 층류 및 난류흐름, 혼상류, 화학반응, Lagrangian입자추적과 같은 다양한 모듈을 포함하고 있다. 따라서, 최근에 이와 같은 다양한 모듈을 이용하여 파와 구조물의 상호작용 (Chen et al., 2014), 투과성구조물에서 혼상류 거동 (Horgue et al., 2015), 파와 구조물 및 지반의 상호작용 (Safti, 2013; Lin et al., 2015), 고립파의 발생 (Wroniszewski et al., 2014), 선체운동과 항주파 및 추진 (Shen et al., 2015) 등에 OpenFOAM[®]을 적용한 연구들이 수행되고 있다. 하지만, 소스코드 개발을 주도한 유럽을 중심으로 적용되고 있으며 국내에서의 적용 예는 매우 미진한 실정에 있다.

오픈소스 기반인 OpenFOAM[®]의 경우 높은 범용성을 목적으로 개발되어 왔지만 해안 및 항만공학에 적용하기 위해서 요구되는 조파기능 및 반사파제어기능이 불충분하여 파동역학에 관련된 공학적 문제로 의 적용에는 한계가 있었다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 Higuera et al. (2013)은 3차원 VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes)방정식을 기초로 OpenFOAM[®]에 조파기능과 반사파제어 기능을 추가적으로 부가한 IHFOAM을 개발하였다. 이후에 Higuera et al. (2014)은 IHFOAM에 공극률을 갖 는 투과성구조물에서 유체저항을 고려하는 모듈을 추가하였으며, 최근 들어서 Higuera et al. (2015)은 multi-paddle piston방식의 조파기능을 완성하고, 조파와 반사파제어를 위한 감쇠영역에서 cutting-edge 기술 을 이용하여 CFD 기반의 수치계산에서 단점으로 지적되고 있는 계산비용을 절감한 OLAFOAM (olaFOAM Reference Manual; https://github.com/phicau/OLAFOAM/blob/master/reference.zip) 코드를 개발하였다.

본 연구의 첫 번째 주제(제3~5장)로 적용한 수중에 설치되는 잠제는 연안의 자연경관을 유지하는 친 환경적인 효과와 더불어 공학적으로는 잠제 배후에 양빈된 저질의 침식을 방지하거나 혹은 침식성 해빈 에서 저질이동을 방지하여 해빈의 현상유지 · 회복을 도모할 수 있어 자연발생적인 형태와 유사한 해빈 을 조성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 잠제는 천단이 정수면 아래에 위치하기 때문에 잠제 전면의 수 심과 잠제 천단과의 급격한 수심의 변화에 의해 구조물 주위에서 매우 복잡한 수면변동을 초래하므로 이를 규명하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 잠제의 단면(2차원)수리 특성에 대한 대표적인 2차원연 구로는 Buccino and Calabrese(2007), d'Angremond et al.(1997), Goda and Ahrens(2008), Seabrook et al.(1999) 및 van der Meer et al.(2005) 등이 수리모형실험을 통하여 잠제의 전달율에 대한 산정식을 제시하였고, Ranasinghe et al.(2009)는 규칙파랑의 작용하에서 투과성 및 불투과성잠제에 의한 파랑변형을 검토하였으



며, Méndez et al.(2001)은 투과성잠제 주변의 파동장에서 평균수위 상승, 질량수송, 그리고 과잉운동량플 럭스(radiation stress) 등과 같은 물리량으로부터 파의 굴절과 에너지 소산의 영향을 연구하였고, Garcia et al.(2004)는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) 방정식을 이용한 COBRAS(COrnell BReaking waves And Structures) 수치모텔을 이용하여 투과성잠제 주변에서 규칙파의 파랑 특성과 유속분포를 연구 하였다. 그리고, Hsu et al.(2004)는 2기의 불투과잠제에 규칙파를 작용시켜 잠제 주변에서의 와(vortex)와 물입자 궤적에 대한 연구를 수행하여 파곡 시에 시계방향의 와가 잠제 전면하에 생성되고, 역으로 파봉 시에 반시계방향의 와가 잠제 전면 상에 생성되는 것을 규명하였으며, Mizutani et al.(1998)은 규칙파 조 건에서 파와 투과성잠제와의 상호작용에 지반 특성이 미치는 영향을 고려하여 잠제 주변에서 파랑변형 과 잠제의 안정성을 평가하였다. 2차원잠제와 불규칙파의 상호작용에 관해서는 Lara et al.(2006)의 연구 를 들 수 있고, 이는 전술한 Garcia et al.(2004)과 같이 COBRAS 모델을 이용하여 투과성잠제 주변에서 불규칙파와 잠제 내부에서 파압을 스펙트럼 분석으로부터 그의 특성을 연구하였고, Beji et al.(1993)은 불투과성잠제에 불규칙파를 작용시켜 실험으로부터 천단 상에서 비쇄파, 권파형 쇄파 및 붕괴파형 쇄파 시에 얻어진 파랑스펙트럼을 분석하여 그의 파랑면동 특성을 규명하였다.

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

더 나아가 잠제는 대표적인 연안표사제어구조물로 잠제와 지형변동과의 관계를 규명하기 위한 다양 한 연구들이 수행되어 왔다. 잠제 배후에서 지형변동과 관련된 대표적 연구로 Groenewoud et al. (1997) 은 다기 (多基)잠제의 제두부 주변에서 측정한 유속으로부터 잠제 배후에서 세굴을 실험적으로 예측하였 고, Ranasinghe et al. (2006)은 삼각형상의 다기능잠제 배후에서 평균흐름의 패턴 및 실험과 수치해석으 로부터 해안선에서 침·퇴적을 예측하였으며, Ranasinghe and Turner (2006)는 단일잠제에서 해안선에 대 한 평행입사파와 경사입사파의 경우에 잠제 배후에서 해빈류 패턴을 비교·검토하여 해안선의 침·퇴적 을 예측하였다. 또한, Ranasinghe et al. (2010)은 MIKE21 모델을 이용하여 해안선과 단일잠제와의 거리에 따른 해빈류의 패턴을 비교하여 해안선의 침·퇴적을 수치적으로 예측하였다. 한편, Black and Andrews (2001)는 3차원잠제의 배치에 있어서 단일잠제의 경우에 다음의 식 (1.1)과 같은 3개의 매개변수를 사용 하여 육계사주 (tombolo)와 설상사주 (salient)의 형성조건을 제시하였다.



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

여기서, L_s 는 잠제의 길이, S는 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리, S_{off} 는 잠제 설치로 인한 변형 후의 해안선과 잠제와의 거리를 나타내며, 후술하는 Fig. 4.9에 무차원매개변수 L_s/S 와 S_{off}/L_s 의 관계를 제시하였다. 그리고, Black and Andrews(2001)는 L_s/S >0.6의 경우는 육계사주가 형성되고, L_s/S <2.0의 경우는 설상사주가 형성되는 조건으로 나타내었다. 특히, Sulis et al. (2017)은 식 (1.1)과 섬 (island)에 대한 제안식 $S_{off}/L_s = 0.4(L_s/S)^{-1.52}$ (Black and Andrews, 2001)과를 결합한 $S_{off}/L_s =$ $0.48(L_s/S)^{-1.23}$ 를 이탈리아 Sardinia 섬 주변의 많은 해빈에 형성된 설상사주를 모니터링한 결과에 적 용하여 Black and Andrews (2001)가 제시한 설상사주의 형성조건이 95% 일치한다는 사실을 규명하였다.

또한, Harris and Herbich (1986)와 Dally and Pope (1986)는 이안제에 있어서 육계사주와 설상사주의 형성조건으로 각각 $L_s/S>1.0~1.5$ 및 $L_s/S=0.5~1.0$ 를 제시하였고, 개구폭의 영향을 추가하여 다기이안제 에서 설상사주의 형성조건으로 $GS/L_s^2>0.5$ (G는 개구폭)를 제시하였다. 여기서, Pilarczyk and Zeidler (1996)는 Harris and Herbich (1986)와 Dally and Pope (1986)가 제시한 결과식을 기초로 하여 다기이안제 에서 설상사주의 형성조건으로 전달율을 포함한 다음의 식 (2.2)를 제안하였다.

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

(1.2)

여기서, K_t 는 2차원이안제에서 월파에 의한 전달율로 그의 범위는 0.1~0.3이며, 개구폭 G는 $L \le G \le L_s$ (L은 파장)의 범위에서 값을 취한다. 다기이안제에 대한 이러한 결과는 이안제 설치에 따 른 해빈변형에만 적용되며, 다기잠제와 지형변동과의 관계에 적용하기에는 무리가 있다.

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

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

하지만, 상기의 연구들은 파랑과 흐름과의 상호작용에만 국한되어 있고, 파·흐름-구조물의 상호작용 에 대한 연구는 거의 수행되어 있지 않다. 따라서, 본 연구의 첫 번 째 주제에서는 OLAFOAM(Higuera et al., 2015)을 이용하여 흐름과 규칙파 및 흐름과 불규칙파가 공존하는 유체장에 2차원투과성의 잠제구조 물이 설치된 경우를 대상으로, 흐름방향의 변화 및 모래 혹은 자갈을 모사하는 배후사면을 고려하는 경 우에 있어서 자제 주변에서 수위변동과 파고 및 H_{rms} 변화 및 주파수스펙트럼, 쇄파형상, 평균유속 및 평균난류운동에너지 등과 같은 수리학적 특성을 검토하며, 3차원으로 확장하여 잠제 배후에 설상사주가 형성되는 조건하에서 잠제의 개구폭, 잠제와 해안선 사이의 거리, 입사파랑조건(규칙파 및 불규칙파), 흐 름방향의 변화 등의 변화에 따른 파고 및 H_{rms} 분포와 같은 수면변동 특성과 평균유속(해빈류)의 분포 및 평균난류운동에너지의 분포와 같은 수리학적 특성을 검토함과 동시에 설상사주 형성과의 연관성을 규명한다.

한편, 근래에 친수 및 여가활동을 위하여 호안 및 방파제와 같은 연안구조물의 사용자가 증가함에 따라 부주의 등으로 인한 안전사고가 빈번히 발생하고 있다. 특히, TTP와 같은 소파블록으로 피복되어

- 4 -

있는 중력식 호안 및 중력식 방파제 등은 이러한 안전사고를 가중시키는 요인으로 작용하고 있다. 언론 보도 (JTBC, 2015)와 Kim et al. (2017)에 따르면 2014년 실족으로 인한 추락사고가 총 95건 (이 중에 사 망사고는 26명), 2015년에 실족으로 인한 추락사고가 총 100여건 (이 중에 사망사고는 약 20%)이 발생하 였다. 이러한 안전사고는 TTP 표면에 부착되는 미끄러운 해조류에 의한 실족사고와 반사율의 저감을 위 해 TTP 사이에 형성된 공극으로의 추락사고, 경우에 따라서는 사망사고로도 이어지는 불상사가 빈번히 발생하고 있다. 그리고, 매년 반복되는 폭풍파랑의 내습으로 중력식 호안 및 중력식 방파제에 피복된 TTP의 안정중량 부족으로 인한 산란과 기초지반의 세굴 등으로 인한 TTP의 활동으로 전술한 안전문제 는 보다 악화되고, 또한 경관상에 악영향을 주면서 친수공간으로의 이미지가 저하되어 사용자 측면에서 악영향을 초래한다.

따라서, TTP 피복의 호안과 방파제에 항상 내재되어 있는 안전와 경관의 문제 등을 해결하기 위하여 최근 유공회파 (有孔回波)블록을 고안하고, 제체의 내파안정성을 향상시키기 위하여 블록과 블록을 현장 타설 말뚝으로 결속하는 공법 (특허번호 : 제10-2016-0107522호)이 개발되었다. 이러한 형식의 구조물을 격자블록결속 호안 (interlocking revetment bound latticed blocks) 혹은 격자블록결속 방파제 (interlocking breakwater bound latticed blocks)로 칭하며, 다음의 Photos 1.1과 1.2에서 실제현장에 설치된 호안의 사례 를 제시한다.



Photo 1.1. Chilam fishing port of Busan.

Photo 1.2. Wolnae fishing port of Busan.

본 연구의 두 번째 주제(제6장)에서는 전술한 유공회파블록제의 기능성을 보다 향상시킨 것으로, 어 항 등과 같은 소규모 항에서 항내정온도 및 낚시와 같은 레크리에이션과 친수할동 등에서 안전을 동시 에 확보할 수 있으며, 더불어 우수한 경관을 유지할 수 있는 격자블록결속에 의한 신형식의 원형유공케 이슨 방파제를 개발한다. 이 방파제의 형식은 전술한 유공회파블록제에서 현장타설 말뚝으로 블록과 블 록을 결속하는 공법은 동일하지만 반사율을 보다 저감시키기 위하여 유공회파블록의 배후에 슬리트케이 슨 방파제와 같이 유수실을 적용한 경우이다. 여기서, 블록과 블록을 결속하여 내파안정성을 도모하는 공법은 대규모 항만의 외곽 방파제에서 케이슨과 케이슨을 뒷채움재 혹은 케이블 등으로 결속하여 장대 케이슨을 계획·확보하는 Park et al. (2016)와 Seo et al. (2015)의 연구와 동일한 것으로 판단되며, 이러한 결속 방파제는 특히 경사입사파에 대해 내파안정성이 탁월한 큰 장점을 가진다. Photo 1.3에서 본 연구 의 격자블록결속에 의한 원형유공케이슨 방파제의 시공순서를 모식적으로 나타낸다. 구성요소인 개개의 블록은 소규모 항에서 외곽방파제 혹은 호안을 대상으로 하기 때문에 중량이 크지 않아 육상에서 공장 제작이 가능하고, FD 선을 이용하지 않고 일반 Barge 선으로 이송이 가능하기 때문에 공기가 짧고, 경제 적이다. 하지만, 본 원형유공케이슨 방파제가 실해역을 대상으로 다수 계획되고 있지만 그의 기능성과 내파안정성이 명확히 규명되어 있지 않으므로 기존의 슬리트케이슨 방파제나 혼성방파제에 대한 결과들 이 그대로 적용되는 실정을 감안하면 원형유공케이슨 방파제에 대한 기능성 (반사율과 월파량)과 내파안 정성 (파압분포)이 시급히 해결되어야 하는 과제인 것으로 판단된다.



(e) Plane view (f) Bird's eye view Photo 1.3. Installation procedure of circular perforated caisson breakwater bound lattice blocks.

Collection @ kmou

이상에서 나타낸 본 연구의 격자블록결속에 의한 원형유공케이슨 방파제는 격자블록결속에 의해 내 파안정성을 향상시킨다는 구조적인 특성을 제외하면 일반적인 슬리트케이슨 방파제와 유사한 형상을 갖 는다. 따라서, 본 연구에서 검토·논의하는 월파량과 반사율 (기능성) 및 작용파압 (안정성)에 대한 기존의 슬리트케이슨 방파제의 주요 연구결과들을 요약하면 다음과 같다.

먼저, 대표적인 예로 Jarlan (1961)의 연구를 들 수 있고, 이로부터 슬리트케이슨이 처음 계획·설계되 었다고 하여도 과언이 아니다. Boivon (1964)는 슬리트케이슨 전면에서 파고를 실험으로 측정하여 전면 의 유공율과 유수실 폭이 반사율에 영향을 미치는 주요 인자이며, 횡슬리트, 종슬리트 및 원통형의 유공 과 같이 전면의 유공형상이 반사율에 미치는 영향은 크지 않다고 결론지었다. Kondo (1979)는 선형천수 파이론을 기반으로 유수실이 1개 혹은 2개인 슬리트케이슨의 반사율을 평가하는 해석모델을 개발하였으 며, 유수실이 1개보다는 2개의 경우가 반사율 저감에 더 효과적이라는 것을 규명하였다. 반면, Fugazza and Natale (1992)는 포텐셜이론과 수리실험을 기반으로 한 해석모델로부터 유수실이 1개인 경우가 실제 적용범위에서 가장 크게 반사율을 저감시킨다는 Kondo (1979)와는 다른 결론을 지었으며, 반사율은 유수 실 폭과 관련되고, 유수실 폭이 파장의 1/4배일 경우가 가장 작은 반사율에 도달하다는 사실을 규명하였 다. Huang et al. (2011)은 광범위한 주파수 영역에서 복수의 유수실인 경우가 작은 반사율을 얻을 수 있 다고 결론지었다. Tanimoto and Yoshimoto (1982)는 슬리트의 유공벽 높이와 수심의 비가 0.33~0.83의 범 위일 경우 유수실 폭과 파장의 비가 0.15~0.20의 범위에서 반사율이 가장 작다는 사실을 수리실험으로부 터 규명하였다. Suh et al. (2006)은 Galerkin 고유함수법 (Galerkin-eigenfunction method)과 유한차분법에 기 초하여 기초사석의 마운드 상에 설치된 슬리트케이슨에 의한 반사율을 추정하였으며, 2차원수리실험을 실시하여 검증하였다. 그러나, 수치해석에서는 속도포텐셜의 소멸과 성분이 무시되었고, 2차압력강하조 건에 선형화된 모델이 적용되었다. Garrido and Medina (2012)는 Jarlan 형식의 방파제에 인공신경망을 기 반으로 반경험적 모델을 적용하여 추정한 결과와 수리실험결과를 비교하였으며, Meringolo et al. (2015) 은 SPH (Soothed Particle Hdrodynamics)법을 이용하여 2차원파동장에서 파와 슬리트케이슨과의 상호작용 을 연구하였다.

다음으로, 슬리트케이슨에 작용하는 파압분포에 대해서는 대표적으로 Takahashi 방법 (Takahashi et al., 1992, 1996; Tanimoto and Takahashi, 1994)과 Tabet-Aoul and Lambert 방법 (Tabet-Aoul and Lambert, 2003), 그리고 DUT (Dalian University of Technology) 방법이 제안되어 있다. 여기서, Takahashi 방법은 Goda 식 (Goda, 2000)을 수정한 방법으로 Goda 식에서 파압보정계수 λ_1 , λ_2 , λ_3 를 구조물에 작용하는 파의 위상에 따라 재산정하여 적용하였다. Takahashi (1996)는 6개의 파위상에 따라 보정계수 λ_1 , λ_2 , λ_3 를 제시하고 있지만 이글루블록이나 워록과 같은 블록 방파제에 대해서는 λ_1 , λ_3 = 0.8~1.0, λ_2 =0을 적 용하고, Tanimoto et al. (1981)은 곡면슬리트케이슨, 다공케이슨, 중슬리트케이슨 등의 경우 평균적으로 λ_1 , λ_3 = 1.0, λ_2 =0을 적용하였다. Tabet-Aoul and Lambert 방법은 수리실험결과를 기반으로 Takahashi 방법 외자 동일하게 Goda 식을 수정한 방법으로 Takahashi (1996)가 제시한 6개의 파위상에서 파곡시의 파위 상에 대한 위상조정계수 (phase adjustment factor)와 전면 유공벽의 유공율을 파라메터로 추가하였다. 그



Collection @ kmou

러나, Chen et al. (2005)는 유수실 폭과 파장의 비가 0.1보다 작은 경우 Tabet-Aoul and Lambert 방법은 수리실험결과보다 작은 값이 산출된다는 것을 나타내었다. DUT 방법은 1998년부터 중국에서 수치해석, 이론해석 및 수리실험으로부터 슬리트케이슨에 작용하는 파압분포를 검토한 방법이다. 또한, Chen et al. (2003, 2007)은 2차원유한차분법에 기반한 RANS 방정식을 이용하여 규칙파 및 불규칙파의 작용 하 슬리 트케이슨에 작용하는 파압을 산정하였고, Li et al. (2002, 2003a), Teng et al. (2004), Liu et al. (2006, 2007, 2008)는 확장고유함수법을 이용하여 슬리트케이슨에 작용하는 파압을 산정하였으며, Liu (2003), Jiang (2004), Ma (2004), Li et al. (2003b, 2005a, 2005b)는 2차원 및 3차원수리실험으로 평행입사파와 경 사입사파가 슬리트케이슨에 작용하는 파력을 산정하였다. 또한, Lee et al. (2010)은 혼상류의 2차원 및 3 차원수치해석법으로부터 슬리트케이슨에서 반사율과 작용파압에 대한 2차원해석결과와 3차원해석결과의 차이점을 검토하였으며, Lee et al. (2011)은 Lee et al. (2010)과 동일한 구조물과 해석법을 적용하여 규칙 파와 고립파의 작용시 각각의 작용파압을 산정하여 차이점을 비교 검토하였다. 한편, 본 연구의 원형유 공케이슨 방파제와 같이 전면이 원형인 유공을 갖는 케이슨 방파제에 대한 연구로는 Tanimoto et al. (1976)을 들 수 있으며, 그들은 원통형으로 천공된 케이슨 방파제를 대상으로 불규칙파를 작용시켜 유수 실 폭의 변화에 따른 반사율의 변화를 실험으로 추정하였고, Tamrin et al. (2014)은 원통형으로 천공된 블록을 대상으로 규칙파를 작용시켜 반사율을 실험으로 추정하였으며, Franco and Franco (1999)는 3차원 수리실험을 통하여 원통형유공케이슨 방파제에서 월파량을 산정하였다.

이상에서는 다양한 형상의 유공을 갖는 슬리트케이슨에 대한 기존의 연구를 검토하였으며, 이들의 대부분은 기능성과 안정성 모두에 관점을 둔 접근도 있지만 대부분은 기능성 혹은 안정성 중의 하나에 관접을 두고 수치적 혹은 실험적으로 검토하였다. 여기서, 검토된 단면은 정수면을 중심으로 상하의 일 부 구간에만 슬리트를 적용한 경우가 대부분이고, 또한 3차원보다는 2차원적인 접근이 대부분이었다. 또 한, 수치해석적인 접근에서는 포텐셜이론 등과 같은 선형적인 접근이 주를 이루었으며, 본 연구에서와 같이 쇄파를 동반한 강비선형의 파동장도 정밀하게 추정할 수 있는 수치적인 접근은 거의 없었다.

따라서, 본 연구의 두 번째 주제에서는 OLAFOAM을 적용하여 Photo 1.3에서와 같이 전면의 원형유 공은 완전히 천공되어 배면의 유수실과 연결되는 구조로 되어 있는 원형유공케이슨 방파제가 기초사석 마운드 상에 놓인 경우를 대상으로 수리특성을 파악하기 위한 3차원수치해석을 수행하였다. 불규칙파랑 이 작용하는 신형식의 3차원원형유공케이슨 방파제를 대상으로 유수실 폭, 입사파고 및 주기의 변화에 따른 반사율, 월파량, 그리고 전면 유공벽, 케이슨 저면 및 유수실 후면벽에 작용하는 파압분포 등과 같 은 수리학적 특성을 비교·검토하였다.



1.2 연구의 구성

Collection @ kmou

본 연구는 7장으로 구성되며, 각 장의 내용은 다음과 같다.

1) 제 1장에서는 본 연구의 배경 및 목적에 대하여 서술하고, 연구의 구성을 간단히 기술한다.

2) 제 2장에서는 OpenFOAM[®]을 기반으로 한 OLAFOAM모델에 대한 이론적인 배경에 대해 기술하고, 불규칙파 의 조파에 대한 이론을 기술한다.

3) 제 3장에서는 먼저 단파하 투과성구조물에서 파의 변형, 규칙파하 잠제에 의한 파의 변형과 잠제 내 및 모래지반내 과잉간극수압변동 및 흐름하 규칙파의 변형과 연직유속분포에 대해 기존의 각 실험결과와 비교·검 토와 소스에 의한 불규칙파의 조파에서 목표주파수스펙트럼과 조파된 파랑의 주파수스펙트럼과의 하여 비교· 검토하여 OLAFOAM의 타당성을 검증하고, 규칙파와 흐름 및 불규칙파와 흐름의 공존장에 설치된 2차원투과성 잠제에 대해 배후사면을 모래 혹은 자갈로 고려한 경우 흐름방향 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 파고 및 H_{rms} , 주파수스펙트럼, 쇄파, 평균유속 및 난류운동에너지 등의 변동특성과 상관관계를 면밀히 검토한다.

4) 제 4장에서는 먼저 규칙과동장하에서 3차원투과성직립벽에 의한 파의 변형과 파압변동 및 규칙과동장하에 서 3차원불투과잠제에 의한 파의 변형 및 흐름에 대한 기존 실험결과와의 비교·검토로부터 OLAFOAM의 3차원 해석에 대한 타당성을 검증하고, 규칙과 및 불규칙과랑하 3차원투과성잠제를 대상으로 잠제 주변에서 형성되 는 파고 및 H_{rms} 분포와 같은 수면변동의 특성과 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토한다.

5) 제 5장에서는 3장과 4장의 연구를 확장하여 규칙파와 흐름 및 불규칙파와 흐름의 공존장에 설치된 3차원투과 성잠제를 대상으로 4장과 동일하게 잠제 주변에서 수면변동의 특성과 유속장의 특성을 수치적으로 검토한다.

6) 제 6장에서는 먼저 규칙파동장하 3차원슬리트케이슨 방파제에서 파의 파압변동에 대해 기존의 실험 결과와 비교·검토로부터 OLAFOAM의 원형유공케이슨 방파제해석에 대한 타당성을 검증하고, 슬리트케이슨과 유사 한 원형유공케이슨이 설치된 일정수심의 3차원수치파동수조에 불규칙파를 조파하여 유수실 폭과 유의파고 및 유의주기의 변화에 따른 원형유공케이슨 방파제에서 월파량, 반사율, 파압분포 및 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석한다.

7) 제 6장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 논문의 결론으로 한다.

References

- Baddour, R. E. and Song, S. (1990). On the interaction between waves and currents, Ocean Engineering, 17(1), 1-21.
- Beji, S. and Battjes, J. A. (1993). Experimental investigation of wave propagation over a bar. Coastal Engineering, 19(1-2), 151-162.
- 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.
- · Brevik, I. (1980). Flume experiment on waves and current smooth bed, Coastal Engineering, 4, 149-177.
- Boivin, R. (1964). Comments on vertical breakwaters with low coefficients of reflection, The Dock and Harbour Authority, London.
- Buccino, M. and Calabrese, M.(2007). Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 133(3), 213-224.
- Chen, L. F., Zang, J., Hillis, A. J., Morgan, G. C. J. and Plummer, A. R. (2014). Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM, Ocean Engineering, 88, 91-109.
- Chen, X. F., Li, Y. C., Ma, B. L., Jiang, J. J. and Lu, G. R., (2005). Calculating method of irregular wave pressures on components of perforated caissons with top cover, China Offshore Platform 20(4), 1-9 (in Chinese).
- Chen, X., Li, Y. and Teng, B. (2007). Numerical and simplified methods for the calculation of the total horizontal wave force on a perforated caisson with a top cover, Coastal engineering, 54(1), 67-75.
- Chen, X., Li, Y. C., Wang, Y. X., Dong, G. H. and Bai, X. (2003). Numerical simulation of wave interaction with perforated caissons breakwaters. China Ocean Engineering, 17(1), 33-43.
- Christensen, E. D., Zanuttigh, B. and Zysermanl, J. A. (2003). Validation of numerical models against laboratory measurements of waves and currents around low-crested structures, Proceedings of Coastal Structures.
- Dally, W. R. and Pope, J. (1986). Detached breakwaters for shore protection (No. CERC-TR-86-1), Coastal Engineering Research Center Vicksburg MS.
- d'Angremond, K., Van Der Meer, J. W. and De Jong, R. J.(1997). Wave transmission at low-crested structures, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2418-2427.
- Franco, C., and Franco, L. (1999). Overtopping formulas for caisson breakwaters with nonbreaking 3D waves. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 125(2), 98-108.
- Fredsøe, J., Andersen, K. H. and Sumer, B. M. (1999). Wave plus current over a ripple-covered bed, Coastal Engineering, 38(4), 177-221.
- Fugazza, M. and Natale, L. (1992). Hydraulic design of perforated breakwaters. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 118(1), 1-14.
- Garcia, N., Lara, J. L. and Losada, I. J.(2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters, Coastal Engineering, 51(10), 991-1020.



- Garrido, J. M. and Medina, J. R. (2012). New neural network-derived empirical formulas for estimating wave reflection on Jarlan-type breakwaters, Coastal Engineering, 62, 9-18.
- · Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures, World Scientific Publishing, Singapore.
- Goda, Y. and Ahrens, J. P.(2008). New formulation of wave transmission over and through low crested structures, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 628-650.
- Grant, W. D. and Madsen, O. S. (1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom, Journal of Geophysical Research: Oceans, 84(C4), 1797-1808.
- Groeneweg, J. and Klopman, G. (1998). Changes of the mean velocity profiles in the combined wavecurrent motion described in a GLM formulation, Journal of Fluid Mechanics, 370, 271-296.
- Groenewoud, M. D., van de Graaff, J., Claessen, E. W. and van der Biezen, S. C. (1997). Effect of submerged breakwater on profile development, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2428-2441.
- Harris, M. M. and Herbich, J. B. (1986). Effects of breakwater spacing on sand entrapment, J. Hydraulic Research, 24(5), 347-357.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®, Coastal Engineering, 71, 102-118.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: formulation and validation, Coastal Engineering, 83, 243-258.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, Coastal Engineering, 101, 35-47.
- Horgue, P., Soulaine, C., Franc, J., Guibert, R. and Debenest, G. (2015). An open-source toolbox for multiphase flow in porous media, Computer physics Communications, 187, 217-226.
- Hsu, H. C., Chen, Y. Y., Hsu, J. R. and Tseng, W. J. (2009). Nonlinear water waves on uniform current in Lagrangian coordinates, Journal of Nonlinear Mathematical Physics, 16(1), 47-61.
- Hsu, T. W., Hsieh, C. M. and Hwang, R. R.(2004). Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters, Coastal Engineering, 51(7), 557-579.
- Huang, Z., Li, Y. and Liu, Y. (2011). Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: A review, Ocean Engineering, 38(10), 1031-1053.
- Isaacson, M. and Cheung, K. F. (1993). Time-domain solution for wave-current interactions with a two-dimensional body, Applied Ocean Research, 15(1), 39-52.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70(9), 1073-1088.
- Jarlan, G. E. (1961). A perforated vertical wall breakwater, Dock and Harbour Authority XII (486), 394-398.
- Jiang, J. J., (2004). Experimental study on vertical wave forces acting on perforated caissons, Master Thesis. Dalian University of Technology (in Chinese).
- Johnson, H. K.(2006). Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters, Coastal Engineering, 53(1), 39-48.



- Johnson, H. K., Karambas, T. V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I. (2005).
 Modelling of waves and currents around submerged breakwaters, Coastal Engineering, 52(10), 949-969.
- Kemp, P. H. and Simons, R. R. (1982). The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating with the current, Journal of Fluid Mechanics, 116, 227-250.
- Kemp, P. H. and Simons, R. R. (1983). The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current, Journal of Fluid Mechanics, 130, 73-89.
- Kim, I. C., Park, K. C. and Park, H. J. (2017). Experimental study on hydraulic performance of perforated wall breakwater with turning wave blocks, Proceedings of Coastal and Ocean Engineering in Korea, 210 (in Korean).
- Kondo, H. (1979). Analysis of breakwaters having two porous walls, Coastal Structures-79, ASCE, Alexandria, VA, 962-977.
- Kramer, M., Zanuttigh, B., Baoxing, W., van der Meer, J. W., Lamberti, A. and Burcharth, H. F.(2003).
 Wave basin experiments. Internal Report, DELOS deliverable D31. Available from the Internet www.delos.unibo.it.
- Lara, J. L., Garcia, N. and Losada, I. J.(2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, Coastal Engineering, 53(5), 395-417.
- Lee, K. H., Choi, H. S., Baek, D. J. and Kim, D. S. (2010). Two and three dimensional analysis about the reflection coefficient by the slit caisson and resulting wave pressure acting on the structure, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(6), 374-386 (in Korean).
- Lee, K. H., Choi, H. S., Kim, C. H., Kim, D. S. and Cho, S. (2011). The Study on the wave pressure of the tsunami acting on the permeable structure, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(1), 79-92 (in Korean).
- Li, T., Troch, P. and De Rouck, J. (2007). Interactions of breaking waves with a current over cut cells, Journal of Computational Physics, 223(2), 865-897.
- Li, Y. C., Chen, X. F., Sun, D. P., Liu, Y., Jiang, J. J. and Ma, B. L. (2005a). The calculation of horizontal wave forces on perforated caisson with top cover, China Offshore Platform 20 (1), 1-6 (in Chinese).
- Li, Y. C., Dong, G. H., Liu, H. J. and Sun, D. P. (2003a). The reflection of oblique incident waves by breakwaters with double-layered perforated wall, Coastal Engineering 50, 47-60.
- Li, Y. C., Jiang, J. J., Ma, B. L., Sun, D. P. and Liu, Y. (2005b). Calculation of irregular wave forces acting on perforated caisson, China Offshore Platform 20 (2), 12-19 (in Chinese).
- Li, Y. C., Liu, H. J. and Sun, D. P. (2003b). Analysis of wave forces induced by the interaction of oblique incident waves with partially-perforated caisson structures, Journal of Hydrodynamics Series A 18 (5), 553-563 (in Chinese).
- Li, Y. C., Liu, H. J., Teng, B. and Sun, D. P. (2002). Reflection of oblique incident waves by breakwaters with partially-perforated wall, China Ocean Engineering 16(3), 329-342.
- · Lin, M. C. and Hsiao, S. S. (1994). Boundary element analysis of wave-current interaction around a large



structure, Engineering Analysis with Boundary Elements, 14(4), 325-334.

- Lin, Z., Guo, Y., Jeng, D. S., Rey, N. and Liao, C. (2015). An integrated finite element method model for wave-soil-pipeline interaction, Proceedings of IAHR.
- Liu, Y., Li, Y. C., Teng, B. and Ma, B. L. (2007). Reflection of regular and Irregular waves from a partially-perforated caisson breakwater with a rockfilled core, Acta Oceanologica Sinica 26(3), 129-141.
- Liu, Y., Li, Y. C., Teng, B., Jiang, J. J. and Ma, B. L. (2008). Total horizontal and vertical forces of irregular waves on partially perforated caisson breakwaters. Coastal Engineering, 55, 537-552.
- Liu, Y., Li, Y. C., Teng, B. and Jiang, J. J. (2006). Experimental and theoretical investigation of wave forces on a partially-perforated caisson breakwater with a rock filled core, China Ocean Engineering, 20(2), 179-198.
- Liu, H. J. (2003). The Interaction between oblique incident waves and caisson structures with perforated wall. Doctoral Thesis, Dalian University of Technology (in Chinese).
- Loveless, J. H. and MacLoed, B.(1999). The influence of set-up behind detached breakwaters, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2026-2041.
- Ma, B. L. (2004). Wave interaction with perforated vertical wall breakwater, Master Thesis. Dalian University of Technology (in Chinese).
- · Madsen, O. S. (1994). Spectral wave-current bottom boundary layer flows, Coastal Engineering, 94, 384-397.
- Markus, D., Hojjat, M., Wüchner, R. and Bletzinger, K. U. (2013). A CFD approach to modeling wave-current interaction, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 23(1).
- Mathisen, P. P. and Madsen, O. S. (1996a). Waves and currents over a fixed rippled bed: 1. Bottom roughness experienced by waves in the presence and absence of currents, Journal of Geophysical Research: Oceans, 101(C7), 16533-16542.
- Mathisen, P. P. and Madsen, O. S. (1996b). Waves and currents over a fixed rippled bed: 2. Bottom and apparent roughness experienced by currents in the presence of waves, Journal of Geophysical Research: Oceans, 101(C7), 16543-16550.
- Méndez, F. J., Losada, I. J. and Losada, M. A.(2001). Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean engineering, ASCE, 127(1), 7-15.
- Meringolo, D. D., Aristodemo, F. and Veltri, P. (2015). SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction, Coastal Engineering, 101, 48-68.
- Mizutani, N., Mostafa, A. M. and Iwata, K.(1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, Coastal Engineering, 33(2), 177-202.
- Nobuoka, H., Irie, I., Kato, H. and Mimura, N.(1997). Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2391-2403.
- Park, J. C., Kim, M. H. and Miyata, H. (2001). Three-dimensional numerical wave tank simulations on fully nonlinear wave-current-body interactions, Journal of Marine Science and Technology, 6(2), 70-82.
- Park, W. S., Won, D. H. and Seo, J. H. (2016). An Interlocking Caisson Breakwater with Fillers, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 64(8), 28-32 (in Korean).



- Penney, W. G. and Price, A. T.(1952). Part I. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 236-253.
- Peregrine, D. H. (1976). Interaction of water waves and currents, Advances in Applied Mechanics, 16, 9-117.
- · Peregrine, D. H. and Jonsson, I. G. (1983). Interaction of waves and currents, Bristol Univ..
- · Pilarczyk, K. W. and Zeidler, R. B. (1996). Offshore breakwaters and shore evolution control.
- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J. (2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater, Coastal Engineering, 57(11), 1006-1017.
- Ranasinghe, R. and Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged structures: a review, Coastal Engineering, 53(1), 65-79.
- Ranasinghe, R., Turner, I. L. and Symonds, G. (2006). Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modelling study, Coastal Engineering, 53(7), 589-611.
- Ranasinghe, R. S., Sato, S. and Tajima, Y.(2009). Modeling of waves and currents around porous submerged breakwaters, Coastal Dynamics, 12.
- Safti, H. (2013). A numerical wave-structure-soil interaction model for monolithic breakwaters subject to breaking wave impact, Ports 2013, ASCE, 1974-1984.
- Seabrook, S. R. and Hall, K. R.(1999). Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2000-2013.
- Seo, J. H., Lee, J. H., Park, W. S. and Won, D. H. (2015). Dispersion characteristics of wave force on interlocking caisson breakwaters by cross cables, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 27(5), 315-323 (in Korean).
- Sharifahmadian, A. and Simons, R. R.(2014). A 3D numerical model of nearshore wave field behind submerged breakwaters, Coastal Engineering, 83, 190-204.
- Shen, Z., Wan, D. and Carrica, P. M. (2015). Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering, Ocean Engineering, 108, 287-306.
- Soltanpour, M., Samsami, F., Shibayama, T. and Yamao, S. (2014). Study of irregular wave-current-mud interaction, Proceedings of ICCE, ASCE, 1(34), 27.
- Suh, K. D., Park, J. K. and Park, W. S. (2006). Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater, Ocean Engineering, 33(2), 264-280.
- Sulis, A., Balzano, A., Cabras, C. and Atzeni, A. (2017). On the applicability of empirical formulas for natural salients to Sardinia (Italy) beaches, Geomorphology, 286, 1-13.
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003). Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated caisson. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 129(1), 34-40.
- Takahashi, S. (1996). Design of vertical breakwaters, Reference Document No. 34, Port and Harbour Research Institute, Japan.
- · Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, S. (1992). Experimental study of impulsive pressures on



composite breakwaters. Report of Port and Harbour Research Institute, 31(5), 35-74.

- Tamrin, P. S., Parung, H. and Thaha, A. (2014). Experimental study of perforated concrete block breakwater, International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, 14(03), 6-10.
- Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M. and Osato, M. (1976). An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls, Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst, 246 (in Japanese).
- Tanimoto, K. and Takahashi, S. (1994). Design and construction of caisson breakwaters-the Japanese experience, Coastal Engineering, 22, 57-77.
- Tanimoto, K., Takahashi, S. and Kitatani, T. (1981). Experimental study of impact breaking wave forces on a vertical-wall caisson of composite breakwater, Report of Port and Harbour Research Institute, 20(2), 3-39.
- Tanimoto, K. and Yoshimoto, Y. (1982). Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall, Report of the Port and Harbour Research Institute, 21(3), 44-77.
- Teles, M. J., Pires-Silva, A. A. and Benoit, M. (2013). Numerical modelling of wave current interactions at a local scale, Ocean Modelling, 68, 72-87.
- Teng, B., Zhang, X. T. and Ning, D. Z. (2004). Interaction of oblique waves with infinite number of perforated caissons, Ocean Engineering, 31(5), 615-632.
- Thomas, G. P. (1981). Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves, Journal of Fluid Mechanics, 110, 457-474.
- Thomas, G. P. (1990). Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 2. Nonlinear waves, Journal of Fluid Mechanics, 216, 505-536.
- Umeyama, M. (2005). Reynolds stresses and velocity distributions in a wave-current coexisting environment, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 131(5), 203-212.
- Umeyama, M. (2009). Changes in turbulent flow structure under combined wave-current motions, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 135(5), 213-227.
- Umeyama, M. (2011). Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 137(2), 85-94.
- Van der Meer, J. W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B.(2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change, Coastal Engineering, 52(10), 915-929.
- van Hoften, J. D. A. and Karaki, S. (1976). Interaction of waves and a turbulent current, Proceedings of ICCE, ASCE, 1(15).
- Vicinanza, D., Cáceres, I., Buccino, M., Gironella, X. and Calabrese, M.(2009). Wave disturbance behind low-crested structures: Diffraction and overtopping effects, Coastal Engineering, 56(11), 1173-1185.
- Wroniszewski, P. A., Verschaeve, J. C. and Pedersen, G. K. (2014). Benchmarking of Navier–Stokes codes for free surface simulations by means of a solitary wave, Coastal Engineering, 91, 1-17.



- You, Z-J. (1994). A simple model for current velocity profiles in combined wave-current flows, Coastal Engineering, 23(3), 289-304.
- Zhao, R. and Faltinsen, O. M. (1988). Interaction between waves and current on a two-dimensional body in the free surface, Applied Ocean Research, 10(2), 87-99.
- Zheng, J. H. and Tang, Y. (2009). Numerical simulation of spatial lag between wave breaking point and location of maximum wave-induced current, China Ocean Engineering, 23(1), 59-71.
- Zhang, J. S., Zhang, Y., Jeng, D. S., Liu, P. F. and Zhang, C. (2014). Numerical simulation of wavecurrent interaction using a RANS solver, Ocean Engineering, 75, 157-164.
- Zou, Z. L., Hu, P. C., Fang, K. Z. and Liu, Z. B. (2013). Boussinesq-type equations for wave-current interaction, Wave Motion, 50(4), 655-675.





제2장 수치해석이론

2.1 **지배방정식**

Collection @ kmou

본 연구에서 적용한 수치해석모델인 OLAFOAM은 비혼합 및 비압축성을 갖는 혼상유체 (액체 및 기체)의 거동을 해석하기 위하여 식 (2.1)의 연속방정식과 식 (2.2)의 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 유한체적법과 VOF법(Kissling et al., 2010)에 기초하여 이산화한다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{2.1}$$

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

여기서, t는 시간, x_i 는 공간벡터좌표, ρ 는 유체밀도, u_i (i = x, y, z)는 유체속도의 Cartesian 성분, p^* 는 Pseudo-dynamic 압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 과 D_{50} 은 해석영역 내에 위치하는 투과성구조물의 공극률과 중앙입경을 각각 나타내며, μ_{eff} 는 $\mu + \nu_{turb}$ 로 μ 는 점성계수이고, ν_{turb} 는 난류동점성계수이며, [CT]는 투과성구조물에 의한 저항 항으로 다음의 식 (2.3)과 (2.4)으로 주어진다.

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

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

여기서, α,β 는 Engelund 공식 (1953)을 van Gent (1995)가 수정하여 제시한 마찰계수로 자세한 사항 은 후술되지만, α 는 선형마찰계수이고, β 는 비선형마찰계수이다. *KC*는 Keulegan-Carpenter 수로 $\left(\frac{T_o u_M}{D_{50}\phi}\right)$ 를 나타내며, T_o 은 진동주기이고, u_M 은 최대진동속도이다. 또한, *C*는 del Jesus (2011)의 연구 결과에 따라 일정치 *C*=0.34로 주어지는 계수이다. 식 (2.4)에서 제시된 바와 같이 투과성 구조물에 의 한 저항항에서 α 와 β 는 매질의 형상, 종횡비 또는 매질의 방향 등에 의해 영향을 받는 상수이며, van



Gent (1995)가 제시한 α=1,000과 β=1.1의 값이 해안공학 분야에 널리 적용되고 있지만 다양한 실험을 통하여 얻어진 값을 많은 문헌에서 확인할 수 있다.

한편, OpenFOAM[®]을 이용하여 저항계수를 재산정한 Jensen et al. (2014)는 Reynolds 수에 따라 층류 흐름 (Forchheimer flow), 층류와 난류가 혼합된 흐름 (Forchheimer/turbulent flow) 및 난류흐름 (turbulent flow)으로 각각 나누어서 수치적으로 해석하고, 실험결과와 비교하였다. 층류흐름에 대해서는 모래는 아 니지만 모래입경에 속하는 중앙입경 D₅₀=2mm, 공극률 φ=0.34의 다공성매질에 단과를 작용시켜 수행한 Billstein et al. (1999)의 실험이었고, 층류와 난류가 혼합된 흐름에 대해서는 중앙입경 D₅₀=1.59cm, 공극 률 φ=0.49의 쇄석에 단과를 작용시킨 Liu et al. (1999)의 실험이었으며, 난류흐름의 경우는 중앙입경 D₅₀=2.5cm, 공극률 φ=0.41의 유리구슬에 단과를 작용시킨 Billstein et al. (1999)의 실험이었다. 최종적으 로, Jensen et al. (2014)는 이러한 3가지 흐름상태의 모두를 만족하는 저항계수값으로 α=500, β=2.0을 제 시하였으며, 따라서 본 수치해석에서의 저항계수값으로 Jensen et al. (2014)의 결과인 α=500, β=2.0을 적 용하였다.

액체와 기체의 경계면은 계산격자 내에서 유체가 점유하고 있는 체적을 나타내는 VOF 함수 F를 이 용하는 VOF 법을 적용하며, VOF 법에서는 액체셀의 경우 F=1, 기체셀의 경우 F=0 그리고 액체와 기체를 모두 포함하고 있는 경계셀의 경우 0 < F < 1의 값을 갖는다. VOF 함수 F는 식 (5)의 이류방 정식에 의해 계산된다.

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

위의 식의 마지막 항에 나타낸 u_{ic} 는 인공압축항으로 $|u_{ic}| = \min[c_{\alpha}|u_i|, \max(|u_i|)]$ 와 같이 주 어지며, 본 연구에서는 $c_{\alpha} = 1$ 을 적용하였다. 또한, 각각의 계산셀에 있어서의 유체밀도와 점성계수는 VOF 함수를 가중치로 적용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

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

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

여기서, 난류동점성계수 ν_{turb}는 LES 모델을 적용하여 산정하였으며, ρ_{water}는 유체밀도, ρ_{air}는 기체 밀도, $|u_{ic}| = \min[c_{\alpha}|u_i|, \max(|u_i|)]$ 이며, c_{α} 는 기본적으로는 1의 값을 가지며, 액체와 기체의 경계 면에서 압축을 증가시키기 위해서는 더 큰 값의 적용도 가능하다. 한편, OpenFOAM[®]은 경계면에서 정확 한 계산과 F가 0에서 1의 값을 유지하기 위하여 식 (2.7)에 나타내는 바와 같이 압축차분스킴

Collection @ kmou

(compressing differencing scheme) 대신 인공압축항 (artificial compression term) $(\partial u_{ic}/\partial t)F(1-F) = 적용$ 하고 있다. 이는 보존적이고, 경계면에서 0이 아닌 값을 사용한다. 게다가, F값보다 더 큰 값을 지닌 지 점에서 u_{ic} 가 경계면에 수직방향 ($\nabla \alpha / |\nabla \alpha|$) 이면 흐름은 압축되지 않기 때문에 액체는 기체로부터 압축되지 않는다.

2.2 수치파동수조에 의한 불규칙파 조파

불규칙파는 선형파이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여서 이를 무한급수의 합으로 고려된다. 수치조파에서는 조파지점에서 수면파형 η, 수평 및 연직유속 u, w의 시간변동이 필요 하며, 이들은 각각 식 (2.8)-(2.10)로 주어진다.

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

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

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

여기서, ε_m 은 random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, M은 성분파의 수, h는 수심 이다. 그리고, 연직좌표 z는 정수면에서 연직상방을 (+)으로 취하며, 진폭 a_m 은 다음의 식 (2.11)로 정의 된다.

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

여기서, Δf는 주파수폭, S(f)는 파랑에너지밀도이며, 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식 (2.12)의 Modified Bretshneider-Mitsuyasu (Goda, 1988) 스펙트럼을 적용하였다.

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

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수 f_m 의 선택방법에는 주 파수스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 거의 같도록 하는 등에너지로 분



할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Modified Bretshneider-Mitsuyasu (Goda, 1988)의 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda (2000)에 의해 제안된 다음의 식 (2.13)을 이용하여 주파수 f_m 을 선택하였다.

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


제3장 파-흐름 공존장내 2차원잠제 주변의 파랑특성

3.1 수치해석의 검증

3.1.1 다공성매질을 통과하는 단파의 수위변화에 대한 검증

Liu et al. (1999)은 실내수리모형실험을 통해 상·하류에서 큰 수위차를 갖는 게이트의 급속개방에 의 해 발생된 단파가 다공성매질을 통과하는 경우에 대한 수위변화를 측정하였다. 실험은 길이 89cm, 높이 58cm의 2차원수조에서 수행되었으며, 수조 내에 폭 30cm의 다공성매질을 설치하였다. 다공성매질의 공 극률은 0.49, 중앙입경 D₅₀=1.59cm이며, 저항계수 α,β는 각각 50과 2를 적용하였다.

Liu et al. (1999)의 실험을 수치모의하기 위해 수리실험에서 사용한 수조와 동일한 크기의 계산영역 을 설정하고 Δ*x*=Δ*z*=0.5cm의 정방형 계산격자를 이용하여 178×116의 해상도로 게이트 개방으로부터 4 초 동안 수치계산을 수행하였다. 적용한 난류모델은 OLAFOAM에 수록된 LES모델로 *k*방정식 (Ghosal et al., 1995)이며, 바닥경계조건은 바닥부근의 경계층까지 고려하지 않으므로 non-slip조건을 적용하였다.



Fig. 3.1은 게이트를 개방한 후 시간경과에 따른 수리모형실험과 수치계산결과와의 수위변동 결과를 나타내며, 그림에서 다공성매질은 음영으로 표기하였다. 그림으로부터 *t*=0.35s의 경우, *x*=0.5m 부근에 있어서 OLAFOAM에 의한 수위변동의 계산결과가 Liu et al. (1999)의 실험결과와 다소 상이한 결과를 보이고 있지만 이는 수치계산에서는 순간적인 게이트의 개방속도를 고려하고 있지 않고, 더욱이 바닥부근



에서 발생하는 순간적인 흐름에 따른 경계층의 형성 등이 상대적으로 낮은 계산해상도를 갖는 바닥부근 에서 정확하게 수치적으로 모의되지 않은 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만, 전체적으로 OLAFOAM의 수치계산결과는 다공성매질의 전·후 및 내부영역에서 시·공간적으로 변동하는 수위변화를 정도 높게 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.1.2 잠제 주변의 파랑변동과 잠제 내 및 지반 내에서 과잉간극수압변동에 관한 검증

투과성잠제에 대한 본 수치해석모델의 계산정도를 검증하기 위하여 모래지반 상에 설치된 투과성잠 제 주변에서의 수위와 잠제 내 및 모래지반 내에서 진행파동으로 인한 과잉간극수압변동을 수리모형시 험으로부터 측정한 Mizutani et al. (1998)에 의한 결과, 그리고 파동장과 지반거동의 해석에 각각 VARANS 방정식 (Hsu et al., 2002)과 Biot 방정식 (Biot, 1941)을 적용하는 PORO-WSSI 모델 (Jeng et al., 2013)에 의한 수치해석결과와 비교·검토한다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 25m, 높이 0.95m이 며, 이 때 입사파의 파고는 3cm, 주기는 1.4s, 정수심은 0.3m이다. 또한, 조파판 반대 쪽의 수조 끝단에는 반사파를 제어하기 위해 감석영역을 설치하였다. 잠제의 제원은 높이 21cm, 폭 105cm, 전·후면의 경사 는 1:2이다. 지반의 제원은 높이 19cm, 폭 360cm이고, 잠제 전·후면 경사점으로부터 85.5cm 이격된 지 점까지 설치하였으며, 이 외의 영역은 불투과성지반을 설치하였다. 잠제의 공극률은 φ=0.33, 중앙입경은 D₅₀=3cm이며, 지반의 공극률은 φ=0.3, 중앙입경은 D₅₀=0.1cm이다.



Fig. 3.2. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

Fig. 3.2는 잠제 및 지반의 제원과 수리실험결과와의 비교를 위해 측정된 수위변동 및 과잉간극수압 변동의 위치를 나타낸다. 계산시간을 줄이기 위해 수조의 크기를 길이 15m, 높이 0.65m로 구성하였고, 격자크기는 Δx=1.0cm, Δz=0.5cm인 가변격자로 구성하였다. 수치조파는 Stokes 2차파이론을, 바닥경계 조건으로는 Neumann 조건인 ∂f/∂x_i = 0 을 적용하였다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al. (2014)이 제시한 α=500, β=2.0을 적용하였으며, 지반의 경우는 모래입경에 해당하는 D₅₀=0.2cm의 다 공성매질에 대한 Billstein et al. (1999)의 실험으로부터 산정된 α=0.0, β=3.0을 각각 적용하였다.



Fig. 3.3. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

Fig. 3.3은 Fig. 3.2에 주어진 A~D 지점에서 무차원수위변동을 나타내며, OLAFOAM에 의한 수치해석 결과와 Mizutani et al. (1998)에 의한 실험치, Jeng et al. (2013)의 수치계산결과를 함께 나타낸다. 그림으 로부터 확인되는 바와 같이 잠제 전면부인 A 지점과 천단의 시작점인 B 지점에서는 비선형파는 거의 발생되지 않지만 잠제 천단의 끝부분인 C 지점과 잠제의 후면부 D 지점에서는 비선형파의 발생으로 파 형에 관한 전·후 및 상·하에서 대칭성이 붕괴되고, 특히 D 지점에서는 C 지점의 파가 위상적으로 역전 된 것과 같은 복잡한 파형의 수리실험결과를 매우 정도 높게 예측하고 있음을 확인 할 수 있다.



Fig. 3.4. Comparison between simulated and measured pore-water pressures.

Fig. 3.4는 Fig. 3.2에 주어진 1~4의 지점에서 무차원간극수압변동을 나타내며, Fig. 3.3과 같이 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와 Mizutani et al. (1998)에 의한 실험치 및 Jeng et al. (2013)에 의한 수 치계산결과를 같이 나타낸다. 그림으로부터 잠제 내 및 해저지반 내에서 간극수압에 관한 실험치를 전 반적으로 잘 재현하고 있는 것으로 판단되며, 더불어 간극수압의 시간변동에서 비선형성분이 필터링되 어 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, OLAFOAM에 의한 수치해석결과는 지반의 불변형 조건 하에 지반 내 간극수압의 변동까지도 실험치를 매우 정확하게 재현하고 있으므로 해저지반의 간극 수압변동에도 적용성이 매우 높은 것으로 판단된다.

3.1.3 파랑과 흐름의 공존장에 있어서 수위변화와 평균유속변화에 대한 검증

Umeyama (2011)는 흐름상에 규칙파를 조파시켜 규칙파와 흐름의 상호작용에 따른 수위변동과 유속 변화를 PIV와 PTV법을 이용하여 실험적으로 측정하였다. 수조의 크기는 길이 25m, 폭 0.7m, 높이 1.0m 이며, 조파지점으로부터 14m의 위치에서 수위와 연직방향으로 수평평균유속을 각각 측정하였다. 실험은 흐름이 없는 상태에서 규칙파만 조파한 경우와 흐름이 존재하는 상태에서 규칙파를 조파한 케이스 (WC1, WC2, 및 WC3)로 구성되며, 본 연구에서는 후자의 경우에 대해서만 OLAFOAM에 의한 수치해석 결과와 비교하여 OLAFOAM의 타당성을 검증한다. 파고는 1.03cm (WC1), 2.34cm (WC2) 및 3.61cm (WC3), 주기는 모든 케이스에서 1.0s, 흐름속도는 파와 순방향으로 0.08cm/s, 그리고 수심은 0.3m로 각각 조합·구성되었다.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 길이 17m, 높이 0.34m이며, 조파지점으로부터 10m 이격된 위치에서 수위와 연직방향으로 수평평균유속을 측정하였으며, 이 때 바닥경계조건은 Neumann 조건인 $\partial f / \partial x_i = 0$ 을 적용하였다. 격자크기는 Δx=0.5cm, Δz=0.25cm이며, 격자의 총 개수는 455,600개이다. 목 표파랑 발생을 위한 수치조파에는 Stokes 2차파이론을 사용하였으며, 난류해석에는 LES모델을 적용하여 얻어진 수치결과를 비교·검토하였다.

Fig. 3.5는 규칙파와 흐름의 상호작용에 따른 수위변화의 수치계산결과를 실험결과와 비교한 것이다. 수치계산결과는 조파 이후에 완전히 발달한 (fully developed) 파랑만을 대상으로 5주기 동안 산술평균한 결과이다. 그림을 살펴보면 입사파고가 증가할수록 파곡 부분에서 약간의 차이를 나타내지만 전반적으 로 수치해석결과 실험치에 유사한 정도의 대응성을 나타낸다.

Fig. 3.6은 수심별 수평평균유속을 나타낸 결과이다. 그림에서 t=0.00s는 수위의 측정지점에 파곡이 통과할 때의 위상을, t=0.5s는 파봉이 통과할 때의 위상을 각각 나타내며, t=0.25s는 파곡과 파봉 사이 에 중간 정도의 위상이고, t=0.75s는 파봉과 파곡 사이에 중간 정도의 위상에 해당한다. 제시된 결과는 전술한 수위변화에서 언급한 바와 같이 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 5주기 동안 산술 평균한 결과이다.



Fig. 3.5. Comparison of simulated and measured water surface elevations in wave-current interaction.

그림으로부터 위상에 관계없이 바닥부근에서는 급격한 유속변화가 나타나고, 수면으로 근접할수록 파곡의 위상에서는 유속이 약간 감소하고, 반대로 파봉의 위상에서는 유속이 약간 증가하며, 두 위상의 사이에서는 수심별 거의 일정한 수평평균유속을 나타내는 것을 알 수 있다. 여기서, 파고의 증가에 따라 전술한 경향은 거의 유사하게 나타나지만 파고가 증가함에 따라 진동속도성분이 크게 나타나기 때문에 일정한 흐름속도와의 상호작용으로 유속의 크기변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 3.6(b)의 \overline{t} =0.25s (*h*=20cm 부근)와 \overline{t} =0.75s (*h*=25cm 부근)에서 약간의 차이가 발생하는 것은 Umeyama (2011)에 서 실험오차로 판정된 점을 감안하여 이를 제외하면 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와 실험결과의 대 응성이 타당하다는 것을 확인할 수 있다.

이상으로부터 투과성구조물과 단파에 의한 흐름과의 상호작용, 파와 잠제와 같은 투과성구조물과의 상호작용 및 파와 흐름과의 상호작용에 대해 OLAFOAM의 적용성을 충분히 검증하였으며, 이하에서는 OLAFOAM을 이용한 수치실험을 통해 지금까지 거의 검토되지 않은 흐름 (순방향과 역방향)과 규칙파와 투과성잠제의 상호작용을 검토한다. 이 때, 잠제 배후에 해빈을 상정한 경사면을 적용하며, 수치해석에 서는 경사면을 모래 혹은 자갈로 각각 가정하여 수치결과를 도출하고, 각각이 유체장에서 해의 특성에 미치는 영향을 면밀히 검토한다.







Fig. 3.6. Comparison of simulated and measured mean horizontal velocity profiles in wave-current interaction.

3.1.4 불규칙파의 조파검증

Collection @ kmou

본 연구의 OLAFOAM에 의한 불규칙파의 조파성능을 검증하기 위하여 구조물이 설치되지 않은 수심 h=10.1m의 수치파동수조에서 유의파고 $H_{1/3}$ =3.0m, 유의주기 $T_{1/3}$ =11.0s를 목표로 불규칙파를 조파하였 다. 적용한 스펙트럼은 식(2.12)에 제시한 Modified Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)이며, 150 개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. 그리고, 파랑의 반사 및 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 제거하기 위하여 수조 끝단에는 감쇠경계를 적용하였고, 조파판에는 조파와 감쇠가 동시에 작용 하는 Pure active wave absorption 경계를 적용하였다. 이러한 조건으로부터 계산된 불규칙과형과 주파수 스펙트럼이 Figs. 3.7(a)와 3.7(b)에 각각 제시되어 있고, 동시에 Fig. 3.7(b)에는 목표한 Modified Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)도 병기되어 있다. 그림을 살펴보면 장시간의 해석에도 평균 수위상승과 같은 특이한 사항이 나타나지 않았으며, 영점상향교차법에 의한 파별해석으로부터 얻어진 유의파고 $H_{1/3}$ =3.067m, 유의주기 $T_{1/3}$ =11.014s와 입력치가 매우 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Calculated wave profiles at wave source position
 (b) Wave frequency spectrum
 Fig. 3.7. Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra.

3.2 계산조건

Fig. 3.8과 같은 일정수심 h=25.5cm를 갖는 파동장에 설치된 잠제를 대상으로 2차원수치파동수조 (길 이 21m, 높이 0.42m)를 구성하였다. 격자크기는 조파지점에서부터 7.05-10.95m의 범위에는 $\Delta x=0.75$ cm, $\Delta z=0.75$ cm의 정방격자를, 그 이외의 영역에는 $\Delta x=1.5$ cm, $\Delta z=0.75$ cm의 가변격자를 구성하였다. 조파 판에서 9m 이격된 지점에 투과성잠제를 설치하였으며, 11.45m 이격된 지점에서부터 1:30의 경사면을 설 치하였다. 잠제는 높이 22.5cm, 천단폭 0.85m를 가지며, 구조물의 천단 상에서 쇄파를 유도하기 위해 전· 후의 비탈면경사를 1:1로 설정하였다. 잠제의 구성재료는 공극률 $\phi=0.44$, 중앙입경 $D_{50}=2$ cm을 가지며, 저항계수로 Jensen et al. (2014)이 제시한 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 을 적용하였다. 배후사면이 모래 혹은 자갈로 구 성된 경우를 대상으로 하였으며, 모래인 경우는 공극률 $\phi=0.28$, 중앙입경 $D_{50}=0.2$ cm, 저항계수 $\alpha=0.0$, $\beta=3.0$ 을, 자갈인 경우는 공극률 $\phi=0.49$, $D_{50}=1.59$ cm, 저항계수 $\alpha=500$, $\beta=2.0$ 를 각각 적용하였다. 바닥 경계조건으로는 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i = 0$ 을 적용하였다.





Table 3.1은 규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. 표에서는 흐름이 없고 파만이 존재하는 경우를 WCN으로, 흐름과 파가 순방향인 경우를 WCF로, 흐름과 파가 역방향인 경우를 WCO로 표기 및 정의하며 (이하 동일), Table 3.2의 불규칙파와 구 별하기 위해 규칙파는 RE로 표기한다.

| Case | WCN-RE | WCF-RE | WCO-RE | |
|-------------------------|---|--------|--------|--|
| current velocity (cm/s) | 0 | 5 | -5 | |
| wave type | regular | | | |
| wave maker theory | Stokes V | | | |
| H (cm) | 7.5 The The Test The Test Test Test Test Test Test Test Tes | | | |
| T (s) | 1.0 | | | |

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

Table 3.2는 불규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. Table 3.1과 동일하게 WCN, WCF 그리고 WCO로 표기 및 정의하며, Table 3.1의 규칙파 와 구별하기 위해 불규칙파는 IR로 표기한다. 입사파랑으로는 Table 3.1에서 제시한 규칙파의 파고와 주 기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파랑을 적용하였다.

Table 3.2. Condition of irregular waves and current applied to numerical analysis.

| Case | WCN-IR WCF-IR | | WCO-IR | | | |
|-------------------------|---|-----|--------|--|--|--|
| current velocity (cm/s) | 0 | 0 5 | | | | |
| wave type | Irregular : Linear superposition | | | | | |
| spectrum | Modified Bretshneider-Mitsuyasu(Goda, 1988) | | | | | |
| number of waves | 150 | | | | | |
| $H_{1/3}~({ m cm})$ | 7.5 | | | | | |
| $T_{1/3}$ (s) | 1.0 | | | | | |



3.3 규칙파-흐름 공존장내 잠제 주변의 파랑특성의 수치해석

3.3.1 수위변동과 주파수스펙트럼

(1) 배후사면이 모래인 경우

Fig. 3.9는 배후사면이 모래인 경우에 있어서 잠제 주변의 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타 낸다. 수위변동의 측정위치는 Fig. 3.8(b)에 나타내는 바와 같이 잠제의 전면부 (WG1, *x*=8.0m), 천단의 시작점 (WG2, *x*=8.575m), 천단의 중앙 (WG3, *x*=9.0m), 천단의 끝부분 (WG4, *x*=9.425m) 및 잠제의 후 면부 (WG5, *x*=10.0m)에 각각 해당한다.

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

한편, 흐름방향에 따른 파고의 변화를 주파수스펙트럼의 기본주파수성분이 갖는 파랑에너지밀도로 평가하면 잠제 전면부에서는 WCN의 파고에 비해 WCF이 큰 파고를, WCO이 작은 파고를 나타내지만 잠제 천단 상 및 후면부에서는 WCN의 파고에 비해 WCF이 큰 파고를, WCO이 작은 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 평균난류운동에너지 (난류강도)의 공간분포에서 알 수 있 는 바와 같이 WCO에 잠제 천단 중앙부에서 후반부에 걸쳐 평균난류운동에너지가 가장 강하게 나타나 고, 이로 인한 누적평균난류운동에너지가 커져 파랑에너지소산이 보다 크게 발생되기 때문인 것으로 판 단된다. 또한, 후술하는 바와 같이 쇄파양상에서 흐름방향의 차이에 따른 차이가 나타나고, 쇄파로 인한 파랑에너지소산양의 차이에 기인하는 요소도 있는 것으로 판단된다.





Fig. 3.9. Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach.

(2) 배후사면이 자갈인 경우

Fig. 3.10은 배후사면이 자갈인 경우에 있어서 잠제 주변의 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나 타낸 것이다. 전술한 배후사면이 모래일 때와 유사하게 잠제 전면부에서 잠제에 의한 반사파의 영향에 의해 파봉분열이 발생, 천단 전면부에서 비선형파의 발달에 따라 비대칭성을 갖는 파형의 형성, 다음으 로 파의 진행에 따라 쇄파 발생 및 그에 따른 비선형파의 발달과 감쇠 등이 나타나는 것을 알 수 있고, 또한 우측의 해당하는 주파수스펙트럼에서 이러한 현상을 보다 명확히 확인할 수 있다. 여기서, 배후사 면이 모래인 경우와 다소 상이한 결과는 WCN에 비해 WCF보다 WCO에서 파형의 위상차가 상대적으로 크게 발생하고, 이러한 결과는 자갈을 모사하는 배후사면이 갖는 낮은 반사율에 기인하는 것으로 판단 된다.

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







Fig. 3.10. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach.



3.3.2 쇄파형상

Fig. 3.11은 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 조건하에서 흐름이 없는 경우(WCN-RE), 순방향 (WCF-RE) 및 역방향(WCO-RE) 흐름이 존재하는 경우에 대한 잠제 천단 상에서 쇄파되는 일련의 과정을 snapshot으로 나타낸 것이다. 대상파랑은 수치조파 후 정상상태에 있는 파랑을 대상으로 하였으며, 흐름 의 유무에 따라 쇄파발생 위치와 및 위상에서 다소 상이하지만 상호비교를 위해 쇄파 진행과정의 위상 을 가능한 범위 내에서 일치시킨 결과이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 입사파는 잠제 천단 상에 서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로 수평유속이 증가하는 것을 알 수 있다. 흐름의 방향에 관계없이 권파형 쇄파가 발생하지만 WCO, WCN, 그리고 WCF 순으로 보다 뚜렷한 권파형 쇄파가 발생한다. 반면 에, WCF이 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타 낸다.

Fig. 3.12는 잠제 배후에 자갈사면이 위치하는 조건 하에서 Fig. 3.11과 동일하게 흐름이 없는 경우 (WCN-RE), 순방향(WCF-RE) 및 역방향(WCO-RE) 흐름이 존재하는 각각 경우에 있어서 잠제 천단 상에 서 쇄파되는 일련의 과정을 snapshot으로 나타낸 것이다. Fig. 3.11과 같이 잠제 배후에 모래사면이 위치 하는 경우와 동일하게 WCO, WCN, 그리고 WCF 순으로 보다 뚜렷한 권파형 쇄파가 발생하며, 전술한 바와 같이 WCF 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타내는 것을 볼 수 있다. 순방향흐름에서 복합적인 쇄파형이 발생하는 것은 잠수계류부체 상에서 쇄 파형을 실험적으로 검토한 Iwata et al. (1990)에 의하면 잠수계류부체가 진행파와 동일한 위상으로 운동 할 때 복합형의 쇄파가 발생된다는 사실에 비춰보면 본 연구의 순방향 흐름에서 복합적인 쇄파형을 나 타내는 것은 진행파와 흐름이 순방향이기 때문으로 판단된다. Figs. 10와 11로부터 배후사면이 모래인 경우와 자갈인 경우 흐름방향에 따라 천단 상에서 쇄파형상이 상이하게 나타나는 것은 잠제 천단 상의 파형과 흐름에 영향을 미치는 모래사면과 자갈사면에서의 반사율이 다르기 때문인 것으로 판단된다.





Fig. 3.11. Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach.



Fig. 3.12. Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach.

3.3.3 파고의 분포

Fig. 3.13은 Figs. 3.9와 3.10으로부터 도출한 공간파고분포를 나타낸 것으로, Fig. 3.13(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.13(b)가 자갈인 경우에 각각 해당한다. 전반적으로는 잠제로 인한 반사파의 영향으로 잠제 전면부에서는 부분중복파의 파동장이 형성되는 것을 알 수 있고, 흐름에 따른 상대적인 파고의 크기를 명확히 판단하기는 어렵지만 전술한 Figs. 3.9와 3.10의 주파수스펙트럼으로부터 WCO이 WCN보다 잠제 전면에서 약간 파고가 커진다는 것을 확인할 수 있다. 반면, 잠제의 천단 상과 후면부에 걸쳐서 는 배후사면이 모래나 자갈에 관계없이 WCN보다 WCF에서 파고가 증가하고, WCO에서 파고가 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터 잠제와 같은 구조물이 설치된 흐름-파동장에서는 위치에 따라 흐름의 방향에 따라 파고의 변화가 증가하거나 감소하는 일률적인 경향을 나타나는 것이 아니라는 중요한 사실을 알 수 있다.



Table 3.3은 Figs. 3.9와 3.10에서 나타낸 각 파고계 위치에서의 수위변동으로부터 파고를 산정한 것이 다. 흐름이 없을 때를 기준으로 파고감쇠율 ([[WG1에서 파고]-[WG5에서 파고]]/[WG1에서 파고])을 산정 하면 배후사면이 모래와 자갈일 때 WCO에서 각각 90.53%와 90.22%의 값이 얻어지고, WCF에서 87.29% 와 83.05%의 값이 얻어지며, 이로부터 역방향흐름에서 파고감쇠율이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있 다. 이러한 결과는 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지 (난류강도)와 누적평균난류운동에너지 의 공간적인 차이 및 전술한 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지소산양의 차이에 기인하는 것으로 판단 된다.

| Table 3.3. | Comparison | of wave | heights | at | WG1, | WG2, | WG3, | WG4 | and | WG5. |
|------------|------------|---------|---------|----|------|------|------|-----|-----|------|
|------------|------------|---------|---------|----|------|------|------|-----|-----|------|

| distance x | from position | wave height for sandy beach (cm) | | | wave height for graveled beach (cm) | | | |
|--------------|------------------|----------------------------------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--|
| of wa | ive maker | WCN-RE | WCF-RE | WCO-RE | WCN-RE | WCF-RE | WCO-RE | |
| WG1 | x=8.000m | 8.410 | 7.987 | 8.717 | 8.428 | 8.013 | 8.817 | |
| WG2 | <i>x=</i> 8.575m | 8.157 | 8.181 | 7.948 | 8.176 | 8.207 | 7.863 | |
| WG3 | <i>x=</i> 9.000m | 2.660 | 3.313 | 2.013 | 2.553 | 3.277 | 1.916 | |
| WG4 | <i>x=</i> 9.425m | 1.291 | 1.670 | 1.030 | 1.306 | 1.650 | 1.039 | |
| WG5 | x=10.00m | 1.069 | 1.389 | 0.826 | 1.174 | 1.359 | 0.862 | |



3.3.4 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포

(1) 평균유속의 분포

Fig. 3.14는 평균유속 (시간평균)을 나타내며, Fig. 3.14(a)는 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.14(b)는 자갈인 경우에 각각 해당하며, 각각에서 (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-RE), (ii)는 순방향흐름의 경우 (WCF-RE), (iii)은 역방향흐름의 경우(WCO-RE)에 해당한다. 그림으로부터 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 WCN과 WCF에는 잠제 전면에서 반시계방향의 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 WCF이 상대 적으로 크다는 것을 알 수 있다.



Fig. 3.14. Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater.

(2) 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 3.15는 평균난류운동에너지를 나타내며, 이는 $(u'_x + u'_z)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 시간평 균한 $\overline{(u'_x + u'_z)}/2$ 으로, 여기서 u'_x , u'_z 는 각각 x, z방향으로 난류속도성분이다. 난류에너지는 난류 성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산정도를 판정하는 중요한 요소로, 전술한 바와 같이 파고변 화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 3.15(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.15(b)가 자갈인 경 우에 각각 해당하며, (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-RE), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-RE), (iii)은 역방향 흐름의 경우(WCO-RE)이다. 그림으로부터 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너 지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 잠제 천 단부에서 난류에너지가 적게 나타난다. 이하에서는 잠제 천단 상 시간평균의 연직방향평균난류운동에너 지와 누적평균난류운동에너지에 대해 고찰하며, 이와 파고변화와의 연관성을 기술한다.



Fig. 3.15. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater.

Fig. 3.16은 Fig. 3.15의 결과를 잠제 천단 (z=0.21m)부터 난류운동에너지의 영향이 미치는 영역 (z =0.285m)까지 수심방향으로 평균한 결과, 즉 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지 (시·공간누적평균 난류운동에너지로 칭한다)를 나타낸다. 그림으로부터 시·공간평균난류에너지의 공간분포를 살펴보면 배 후사면이 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제 전면 비탈면상 및 천단 중앙 후반부에서 크게 나타나며, WCO (WCF)이 WCN보다 큰 (작은) 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 공간파고변화와 직접 적인 연관성을 갖는 시·공간누적평균난류에너지를 살펴보면 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향 에 따른 차이는 거의 나타나지 않지만 잠제 전면 비탈면을 지나서부터는 차이가 크게 나타나며, WCO이 가장 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 구조물과 배후사면이 고려되지 않은 파흐 름장에 대해 Umeyama (2011)도 지적하고 있는 바와 같이 흐름의 방향에 따른 파고 감쇠율은 누적난류 운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 누적난류운동에너지가 높을수록 (낮을수록) 파 고감쇠율이 높게 (낮게) 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 이와 더불어 배후사면에서 반사율의 영향과 흐 름의 유무와 흐름 방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 동시에 영향을 미치는 것으로 판단 된다.



Fig. 3.16. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy, and its accumulation.

3.4 불규칙파-흐름 공존장내 잠제 주변의 파랑특성의 수치해석

3.4.1 수위변동과 주파수스펙트럼

(1) 배후사면이 모래인 경우

Collection @ kmou

Fig. 3.17은 배후사면이 모래인 경우에 잠제 주변에서 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸다. 수위변동의 측정위치는 Fig. 3.8(b)에 나타내는 바와 같이 잠제의 전면부(WG1, *x*=8.0m), 천단의 시작점 (WG2, *x*=8.575m), 천단의 중앙(WG3, *x*=9.0m), 천단의 끝부분(WG4, *x*=9.425m) 및 잠제의 후면부(WG5, *x*=10.0m)에 각각 해당하며, 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 50s(200s~250s) 동안에 취득된 파랑을 대상으로 하였다.

수위변동을 살펴보면 잠제 전면부 WGI에서는 잠제에 의한 반사파와의 위상간섭의 영향으로 일부 수위변동에서 쌍봉형이 발생하며, 천단의 시작점 WG2에서는 급격한 수심의 감소에 따른 천수변형으로 WGI에서보다 큰 수위변동이 발생하고, 비선형파가 발달되어 전·후로 비대칭파형이 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 다음으로, 잠제 천단상의 WG3에서는 수위변동의 진폭이 급격히 감소된 것을 알 수 있고, 이로부터 WG2와 WG3 사이의 위치에서 쇄파가 발생되었다는 사실을 추정할 수 있다. WG3에서의 수위 변동은 파봉 부분이 솟아있고, 파곡 부분은 평탄하여 상대적으로 길이가 길게 나타나므로 상하의 비대 칭성(kurtosis)이 크며, 또한 WG2에서와 같이 파형에서 좌우의 비대칭성(skewness)이 크게 나타난다. WG4 의 경우는 파가 잠제 천단상에서 보다 전파되었기 때문에 파고감쇠로 인하여 수위변동이 WG3보다 작게 나타나며, 전술한 파형에서 좌우 및 상하의 비대칭성이 유지되고 있다. WG5는 잠제 배후부이므로 급격 한 수심의 증가에 따른 반사파의 영향으로 파형에 고주파성분의 파형이 포함되어 나타나지만 파의 재형 성과정을 통하여 파형에서 좌우의 비대칭성이 개선된 상황을 볼 수 있다.

주파수스펙트럼을 보면 WG1에서 첨두주파수 *f* ≈ 0.93/s가 유의주파수 *f*=1/s보다 저주파수(장주기)영 역에 놓이고, 주파수스펙트럼 전체가 저주파수영역으로 약간 이동된 결과를 나타낸다. 이와 같이 첨두주 파수가 저주파수영역으로 이동되는 현상은 WG2~WG5에서도 나타나며, 파의 전파에 따라 보다 심화되는 양상을 확인할 수 있다. 흐름방향에 따른 주파수스펙트럼의 변동양상을 살펴보면 잠제 전면부 WG1에서 는 WCN의 주파수스펙트럼에 비해 WCO이 크고, WCF이 작은 값을 나타내지만 전체적으로 WCF, WCN, WCO의 순으로 첨두주파수 근방에서 주파수스펙트럼이 큰 값을 나타내며, 특히 잠제 천단상 및 배후부 에 걸쳐서 고·저주파수영역으로 파랑에너지의 분산이 발생하는 것을 볼 수 있다. 여기서, WG4와 WG5 의 경우에 *f* ≈ 0/s에서 급격히 증가되는 긴 장주기의 파랑에너지 성분을 볼 수 있으며, 이는 Lara et al.(2006)에 의해서도 지적된 바와 같이 부진동에 의한 성분이다. 반면에, 3.3절에서 전술한 규칙파의 해 석에서는 하나의 주파수 성분만을 가지므로 이러한 부진동 성분은 나타나지 않는 것으로 알려져 있다 (Garcia et al., 2004).

각 위치에서 주파수스펙트럼의 크기변화를 살펴보면 WG2에서 급격히 상승된 큰 값을, 반면에 WG2

에서 WG5로 갈수록 감쇠하는 작은 값을 나타낸다. 특히, WG2와 WG3 사이에 크기변화가 급격히 발생 하므로 전술한 바와 같이 이 위치 사이에 쇄파가 발생되었고, 이로 인하여 큰 파랑에너지의 큰 감쇠가 있었다는 것을 유추할 수 있다.

따라서, 각 위치에서 주파수스펙트럼의 변동양상은 수심이 급격히 얕아짐으로서 발생하는 천수변형, 잠제 천단상에서 쇄파변형, 천단에서 배후역으로 수심의 급격한 증가로 인한 반사 및 모래로 구성된 배 후사면에서의 반사, 그리고 흐름의 존재여부와 흐름방향에 따라 크게 변화되는 것으로 판단되므로 많은 파라미터에 의한 복잡한 과정으로 이해될 수 있다. 여기서, 파의 전파에 따른 파랑에너지의 감쇠는 후술 하는 평균난류운동에너지(난류강도), 누적평균난류운동에너지, 쇄파로 인한 파랑에너지의 소산 및 흐름방 향에 따른 쇄파양상과도 연관성을 가지는 것으로 판단된다.

(2) 배후사면이 자갈인 경우

Fig. 3.18은 배후사면이 자갈인 경우에 잠제 주변에서 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 전술한 배후사면이 모래일 때와 유사하게 잠제 전면부에서 잠제에 의한 반사 파의 영향에 의해 일부에서 쌍봉형의 수위변동이 발생하고, 천단 전면부에서 비선형파의 발달에 따라 비대칭파형이 나타나고, 파의 전파에 따라 쇄파 발생, 비선형파의 발달 및 감쇠 등이 동반되며, 또한 이 러한 수위변동의 현상과 특성을 우측의 해당하는 주파수스펙트럼으로부터도 명확히 확인할 수 있다. 전 체적으로 파의 전파 및 흐름방향에 따른 주파수스펙트럼의 변동추이, 잠제 천단상 및 배후부에 걸쳐서 고·저주파수영역으로 파랑에너지의 분산, WG4와 WG5에서 긴 장주기의 파랑에너지에 해당하는 부진동 에 의한 성분의 발생, 각 위치에서 주파수스펙트럼의 크기변화 등은 전술한 바와 같이 배후사면이 모래 인 경우와 유사한 특성을 나타낸다.

하지만, 전술한 배후사면이 모래인 경우와 다소 상이한 결과는 모래의 경우보다 잠제 중앙점인 WG3 에서 WCF 및 WCN에 첨두주파수 근방에서 주파수스펙트럼이 상대적으로 작은 값을, 천단의 끝부분인 WG4에서 WCF과 WCO에는 큰 값을, 또한 잠제 배후인 WG5에서 WCF, WCO 및 WCN 모두 작은 값을 각각 나타낸다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 많은 파라미터에 의한 복잡한 변동과정으로 발생되지 만 근본적으로 자갈로 구성된 배후사면의 공극률이 모래의 경우보다 크기 때문에 나타나는 낮은 반사율 에 기인하는 것으로 판단된다.





Fig. 3.17. Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for sandy beach.



Fig. 3.18. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for graveled beach.

3.4.2 쇄파형상

Fig. 3.19는 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 조건하에서 WCN, WCF 및 WCO이 존재하는 경우에 대한 잠제 천단상에서 쇄파되는 일련의 과정을 snapshot으로 나타낸 것이다. 대상파랑은 Figs. 3.17(a)의 *t* =202~204s에 나타나는 최대파를 대상으로 하였으며, 흐름의 유무에 따라 쇄파의 발생위치와 및 위상이 다소 상이하지만 상호비교를 위해 쇄파 진행과정의 위상을 가능한 범위내에서 일치시킨 결과이다. 그림 으로부터 확인되는 바와 같이 입사파는 잠제 천단상에서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로 수평유속이 증가하는 것을 알 수 있다. 흐름의 방향에 관계없이 권파형쇄파가 발생하지만 WCO, WCN, WCF 순으로 보다 뚜렷한 권파형쇄파가 발생한다. 한편, WCF 초기에는 권파형쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서 지는 붕괴파형쇄파를 동시에 나타낸다. 순방향흐름에서 복합적인 쇄파형이 발생하는 것은 잠수계류부체 상에서 쇄파형을 실험적으로 검토한 Iwata et al.(1990)에 의하면 잠수계류부체가 진행파와 동일한 위상으로 운동할 때 부체상에서 복합형의 쇄파가 발생된다는 사실에 비춰보면 본 연구의 순방향흐름에서 복합 적인 쇄파형을 나타내는 것은 진행파와 흐름이 같은 방향이기 때문으로 판단된다.

Fig. 3.20은 잠제 배후에 자갈사면이 위치하는 조건하에서 Fig. 3.19와 동일하게 WCN, WCF 및 WCO 에서 최대파가 잠제 천단상에서 쇄파되는 일련의 과정을 snapshot으로 나타낸 것이다. Fig. 3.19와 같이 잠제 배후에 모래사면이 위치하는 경우와 동일하게 WCO, WCN, 그리고 WCF의 순으로 보다 뚜렷한 권 파형쇄파가 발생하지만 WCF은 배후에 모래사면이 위치하는 경우와는 상이하게 종국에 붕괴파형쇄파를 동시에 나타내지는 않는다. 그리고, 권파형쇄파가 발생하는 경우에도 그 규모가 모래사면의 경우보다 약 간 약하게 나타난다. 이러한 결과는 잠제 천단상의 파형과 흐름에 영향을 미치는 배후부 경사면에서 반 사율이 상이하기 때문이며, 자갈사면의 경우가 모래의 경우보다 공극율이 크기 때문에 반사율이 작게 주어진다.





Fig. 3.19. Snapshots of breaking waves according to the current direction for sandy beach.



Fig. 3.20. Snapshots of breaking waves according to the current direction for graveled beach.

3.4.3 H_{rms}의 분포

Fig. 3.21은 Figs. 3.17과 3.18로부터 도출한 공간파고 H_{rms} 의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 3.21(a)가 배 후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.21(b)가 자갈인 경우에 각각 해당한다. 전반적으로 잠제로 인한 반사파의 영향 때문에 잠제 전면부에서는 부분중복파의 파동장이 형성되는 것을 알 수 있고, 잠제의 천단상과 후 면부에 걸쳐서 배후사면이 모래나 자갈에 관계없이 WCN보다 WCF에서 H_{rms} 파고가 증가하고, WCO에 서 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이로부터 잠제와 같은 구조물이 설치된 흐름-파동장에서는 위치에 따라 흐름의 방향에 따라 H_{rms} 파고의 변화가 증가하거나 감소하는 일률적인 경향을 나타나는 것이 아 니라는 중요한 사실을 알 수 있으며, 이러한 결과는 3.3절의 규칙파의 경우와도 일치한다.



Table 3.4는 Figs. 3.17과 3.18에서 나타낸 각 파고계 위치에서의 수위변동으로부터 파고를 산정한 것 이다. 흐름이 없을 때를 기준으로 파고감쇠율([[WG1에서 H_{rms} 파고]-[WG5에서 H_{rms} 파고]]/[WG1에서 H_{rms} 파고])을 산정하면 배후사면이 모래와 자갈일 때 WCO에서 각각 79.70%와 80.51%의 파고감쇠율이 얻어지고, WCF에서 73.85%와 78.80%의 값이 얻어지며, 이로부터 역방향흐름에서 파고감쇠율이 상대적 으로 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지(난류강도) 와 누적평균난류운동에너지의 공간적인 차이 및 전술한 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지소산양의 차 이에 기인하는 것으로 판단된다.

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

Table 3.4. Comparison of H_{rms} at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5.



3.4.4 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포

(1) 평균유속의 분포

Fig. 3.22는 정상상태에 도달한 50s 사이의 파랑을 대상으로 시간평균한 평균유속을 나타낸 것으로 Figs. 3.22(a)와 3.22(b)는 각각 배후사면이 모래와 자갈인 경우에 해당하며, 각각에서 (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-IR), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-IR), (iii)은 역방향흐름의 경우(WCO-IR)에 해당한다. 그림 으로부터 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 WCF에만 잠제 전면에서 반시계방향의 순환셀이 형성 되고, 잠제 전면의 해저면에서는 해측으로 강한 유속이 발생한다. 해저면에서 유속의 크기는 WCO, WCF, WCN의 순으로 강하게 발생하며, 배후사면이 자갈인 경우에는 그 차이를 더욱 명확히 확인할 수 있기 때문에 역방향흐름과 공극율이 큰 배후사면의 조건하에서는 잠제 전면에서 쇄굴의 가능성이 보다 높아진다는 것을 예측할 수 있다.







(2) 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 3.23은 평균난류운동에너지를 나타내며, 이는 $(u'_x + u'_z)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 정상상태 의 50s 사이에 시간평균한 $\overline{(u'_x + u'_z)}/2$ 이며, 여기서 u'_x , u'_z 는 각각 x, z방향으로 난류속도성분이다. 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 파고변화 및 파랑에너지의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 3.23(a)가 배후사면이 모래인 경우를, Fig. 3.23(b)가 자갈인 경우에 각각 해당하며, (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-IR), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-IR), (iii)은 역방향흐름의 경우(WCO-IR)에 해당한다. 그림으로부터 전반적으로 잠제 전면 비탈면 상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 모두 WCF이 상대 적으로 잠제 천단부에서 난류에너지가 적게 나타난다. 이하에서는 잠제 천단상 시간평균의 연직방향평균난 류운동에너지와 누적평균난류운동에너지에 대해 고찰하며, 이와 파고변화와의 연관성을 기술한다.







Fig. 3.24는 Fig. 3.23의 결과를 잠제 천단(z=0.21m)부터 난류운동에너지의 영향이 미치는 영역(z =0.285m)까지 수심방향으로 평균한 결과, 즉 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지(시·공간평균난류에 너지로 칭한다)와 그에 대한 누적난류운동에너지(시·공간누적평균난류에너지로 칭한다)를 나타낸다. 그림 으로부터 시·공간평균난류에너지의 공간분포를 살펴보면 배후사면의 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제 전면의 비탈면상에서 크게 나타나고, 천단 중앙의 후반부에서 약간 크게 나타나며, 천단 중앙의 후 반부에서 WCO(WCF)이 WCN보다 큰(작은) 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 공간파고변화 와 직접적인 연관성을 갖는 시·공간누적평균난류에너지를 살펴보면 배후사면이 모래 혹은 자갈 여부에 관계없이 잠제 전면부에서 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 거의 나타나지 않지만 잠제 천단 중 앙을 지나서부터 차이가 나타나며, 흐름의 여부에 따른 값의 차이는 미미하지만 전반적으로 WCO이 WCN과 WCF보다 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

이러한 사실로부터 구조물과 배후사면이 고려되지 않은 파-흐름장에 대해 Umeyama(2011)도 지적하고 있는 바와 같이 흐름의 방향에 따른 파고감쇠율은 누적난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인 할 수 있고, 누적난류운동에너지가 높을수록(낮을수록) 파고감쇠율이 높게(낮게) 나타나는 것을 알 수 있 다. 또한, 이와 더불어 전술한 3.3절의 규칙과-흐름 공존장내의 잠제 주변에서 파랑특성의 결과와 동일하 게 불규칙파-흐름의 공존장내에서도 배후사면에서 반사율의 영향과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구 조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 동시에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



Fig. 3.24. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy, and its accumulation.



3.5 결언

Collection @ kmou

본 장에서는 OLAFOAM 모델에 의한 수치해석으로부터 투과성잠제가 설치된 일정수심의 수치파동수 로에 역방향 혹은 순방향흐름이 있는 상태에서 규칙파 및 불규칙파를 조파하여 잠제 주변에서 수위변동 과 그의 주파수스펙트럼, 파고 및 H_{rms} 분포, 쇄파형상, 평균흐름 및 평균난류운동에너지와 누적평균난류 운동에너지 등과 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 파고 및 H_{rms}파고에 대해, 배후사면의 모래 혹은 자갈의 여부에 관계없이 잠 제의 전면부에서는 역방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 H_{rms}파고가 높지만 잠제 천단상의 전반 부에서 후면부까지는 순방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높게 나타난다.

(2) 쇄파형상에 대해, 규칙파동장하에서는 배후사면의 모래 혹은 자갈의 여부 및 흐름의 방향에 관계 없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형 쇄파를 나타내며, 순방향의 흐름의 경우는 초기에는 권파향 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타내며, 불규칙파동장하에서는 배후사면이 모래인 경우는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄파를 나타내며, 순방향흐름의 경우는 초기에는 권파형쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형쇄파를 동시 에 나타낸다. 배후사면이 자갈인 경우에는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄 파만을 나타내지만 그의 규모는 모래의 경우보다 약하다.

(3) 평균유속에 대해, 규칙파동장하에서는 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 흐름이 없는 경우와 순방향흐름의 경우에 잠제 전면 비탈면 앞에서 반시계방향의 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 강하며, 불규칙파동장하에서는 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 순방 향흐름의 경우에만 잠제 전면의 바탈면 앞에 반시계방향의 순환셀이 형성되고, 잠제 전면의 해저면에서 해측으로 강한 유속이 발생하며, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우, 흐름이 없는 경우의 순으로 유 속이 강해진다. 이로부터 흐름방향에 따라 잠제 전면 해저면에서 쇄굴의 여부 및 정도를 예상할 수 있 을 것으로 판단된다.

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

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

References

- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N.(1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions, Transport in Porous Media, 35(3), 395-406.
- · Biot, M.A.(1941), General theory of three-dimensional consolidation, J. Applied Physics, Vol.12, pp.155-164.
- Garcia N., Lara, J.L and Losada, I.J.(2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwters, 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, Journal of Fluid Mechanics, 286, 229-255.
- Goda, Y.(1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum, Coastal Engineering in Japan, JSCE, 31(1), 39-52.
- Hsu, H. C., Chen, Y. Y., Hsu, J. R. and Tseng, W. J. (2009). Nonlinear water waves on uniform current in Lagrangian coordinates, Journal of Nonlinear Mathematical Physics, 16(1), 47-61.
- Iwata, K, Kim, D. S., Asai, M. and Shimoda, M. (1990). Wave breaking on submerged floating structure, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 37, 604-608 (in Japanese).
- Jeng. D. S., Ye, J. H., Zhang, J. S., and Liu, P. F.(2013). An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures : Model verifications and applications. Coastal Engineering, 72, 1-19.
- Jensen, B., Jacobsen, N. G. and Christensen, E. D.(2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures, Coastal Engineering, 84, 56-72.
- Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J.(2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures, Coastal Engineering, 53, 395-417.
- 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.
- Mizutani, N., Mostafa, A. M. and Iwata, K. (1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, Coastal Engineering, 33(2), 177-202.
- Umeyama, M. (2011). Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 137(2), 85-94.



제4장 설상사주 형성조건 하에 있는 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성

4.1 수치해석의 검증

4.1.1 3 차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압에 대한 검증

본 연구에서 적용한 수치해석모델의 투과성구조물에 대한 적용성을 검토하기 위해 Lara et al.(2012) 의 투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압에 관한 실험결과를 수치적으로 모의하였다. Lara et al.(2012)는 Fig. 4.1과 같이 수심 *h*=0.4m를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.6m, 길이 4m, 폭 0.5m의 투과성직립 벽에 규칙과를 작용시켜 직립벽 주변에서 수위변동과 파압변화를 수리실험과 IH3VOF 모델에 의한 수치 해석으로부터 각각 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 17.8m, 폭 8.6m, 높이 1.0m이며, 투 과성직립벽은 조파판에서 10.5m 이격되어 있고, 우측 측벽에 연결되어 있다. 양측벽과 수조 끝단은 완전 반사가 발생되도록 불투과성직립벽으로 구성되었다. 이 때, 투과성직립벽의 공극률은 ϕ =0.51, 중앙입경 은 D_{so} =1.5cm이며, 입사파고는 *H=*9cm이고, 주기는 *T=*4s이다.



Fig. 4.1. Illustrative sketch of wave basin and porous structure.

수치해석에 사용된 수치파동수조의 크기는 전술한 수리실험수조의 경우와 동일하지만 구조물에 월파 가 발생하지 않기 때문에 계산비용의 감소를 위해 계산결과에 영향이 없을 것으로 판단되는 수조의 높 이를 투과성직립벽과 동일한 높이인 0.6m로 구성하였다. 격자크기에서 수조 길이방향의 경우 조파지점 에서부터 8m까지는 ΔX=5~2.5cm의 가변격자로, 8~12.5m의 범위에서는 ΔX=2.5cm로, 12.5~17.8m의 범위 에서는 ΔX=5~2.5cm의 가변격자로 각각 구성하였고, 수조 폭방향의 크기는 ΔY=2.5cm, 연직방향의 크 기는 ΔZ=1.25cm로 각각 일정한 격자로 구성되었으며, 따라서 적용된 격자의 총 개수는 대략 8,800,000 개이다. 수치조파를 위해 비선형성을 고려한 Cnoidal wave 이론을, 난류모델은 LES 모델(Ghosal et al., 1995)을 각각 적용하였으며, 조파 개시 후 20s 동안 파랑의 전파과정을 시뮬레이션하였다. 투과성직립벽 에 대한 저항계수 α 와 β 는 전술한 바와 같이 Jensen et al.(2014)이 제시한 α =500, β =2.0을 적용하였다. 여기서, Table 4.1에 수위계의 설치위치를, Table 4.2에 파압계의 설치위치를 각각 제시한다. 수리실험에 서 수위변동 및 파압변화는 총 15지점에서 각각 측정되었지만 이 중에 6지점(3~7지점, 9지점)에서 산정 된 수위와 6지점(1~6지점)에서 파압에 대한 각 실험결과를 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와 이하에서 상호 비교·검토한다.

Table 4.1. Wave gauge positions.

| Wave gauges | X(m) | Y(m) |
|-------------|------|------|
| Point 3 | 9.5 | 1.0 |
| Point 4 | 9.5 | 3.0 |
| Point 5 | 10.0 | 4.0 |
| Point 6 | 11.0 | 4.50 |
| Point 7 | 11.5 | 3.50 |
| Point 9 | 12.0 | 1.50 |

Table 4.2. Pressure gauge positions.

| Pressure gauges | <i>X</i> (m) | <i>Y</i> (m) | <i>Z</i> (m) | | | |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--|--|--|
| Point 1 | 10.5 | 3.89 | 0.11 | | | |
| Point 2 🗧 | 10.5 | 3.69 | 0.25 | | | |
| Point 3 | 10.89 | 4.00 | 0.11 | | | |
| Point 4 | 10.69 | 4.00 | 0.25 | | | |
| Point 5 | 11.0 | 3.70 | 0.11 | | | |
| Point 6 | 11.0 19 | 45 3.90 | 0.25 | | | |
| St Store | | | | | | |

AND OCEN

Fig. 4.2는 수치해석결과와 실험결과를 비교한 투과성직립벽 주변에서 수위변동을 나타낸 것으로 그 림에서는 IH3VOF 모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 같이 병기한다. 그림을 살펴보면 3과 4지점은 투과성직립벽 전면에서 수위변동을 나타낸 것으로 8s 이후에 쌍봉형의 수위변동이 나타나며, 앞 의 파봉은 입사파에 의한 것이고, 뒤는 투과성직립벽으로부터의 반사파에 의한 것이다. 5와 6지점에서의 수위변동은 투과성직립벽과 후면 불투과벽체로부터의 회절과 및 반사파의 영향을 동시에 받는 경우로 6 지점의 16s 근방에서 발생되는 쌍봉형의 수위변동은 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향이다. 다음의 7지점은 투과성직립벽에 의한 회절파가, 9지점은 후면 불투과벽체에 의한 반사파가 각각 영향을 크게 미치는 지점이다. 수리실험 및 수치해석결과의 대응성은 6과 7지점의 16s 이후 쌍봉형 수위변동에서 약 간이 차이가 나타나지만 전반적으로 매우 잘 구현되는 것으로 판단되며, 특히 이러한 결과는 3, 4, 5, 9 지점에서 확인할 수 있고, 또한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과와 본 수치해석결과는 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.





Fig. 4.3은 투과성직립벽 주변에서 파압변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 비교한 것으로 Fig. 4.2와 동일하게 IH3VOF 모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 같이 나타내었다. 그림을 살펴보 면 투과성직립벽 전면에서 파압변동을 나타낸 1과 2지점의 경우는 실험치와 거의 동일한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 투과성직립벽과 후면 불투과벽체로부터의 회절파 및 반사파의 영향을 동시에 받는 3~6지점에서 파압변동은 전반적으로 실험치를 잘 구현하고 있지만 수위변동에서와 같이 3, 5, 6지점의 16s 근방에서 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향에 의해 생성되는 쌍봉형의 파압변동에 약 간의 차이가 인정된다. 그러나, 전체적으로 실험치를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, OLAFOAM에 의한 수치해석결과는 투과성구조물의 파랑변형과 파압변동과정에서 실험치를 잘 재현하고 있으므로 잠제와 같은 투과성구조물로의 적용성이 높은 것으로 판단된다.


4.1.2 3 차원불투과성잠제 주변에서 수위 및 유속에 대한 검증

Collection @ kmou

다음으로, 구조물의 천단에서 유수심을 갖는 3차원잠제로의 OLAFOAM에 대한 적용성을 검토하기 위해 Kawasaki et al.(1999)의 수리실험을 재현하였다. Kawasaki et al.(1999)은 Fig. 4.4와 같이 *h*=0.4m를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.24m의 직사각형불투과잠제에 규칙파를 작용시켜 잠제 주변에서 수위 변동과 유속변화를 수리실험으로부터 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 28m, 폭 8m, 높 이 0.8m이며, 조파판에서 7m 이격된 지점에 직사형의 불투과잠제를 설치하였다. 그리고, 조파판 반대 쪽 의 수조 끝단에는 반사파를 제어하기 위해 경사 1:10의 감쇠영역을 설치하였다. 입사파랑은 수위 측정에 서는 파고 *H*=0.1m, 주기 *T*=1.2s의 규칙파를, 유속 측정에서는 파고 *H*=0.087m, 주기 *T*=1.68s의 규칙파 를 각각 적용하였으며, 불투과잠제의 제원과 수위계 및 유속계의 설치위치를 Fig. 4.5에 각각 나타낸다.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 수치계산의 계산비용 감소를 위해 길이 3*L*(*L*은 파장), 폭 2*L*로 적용되었고, 불투과잠제는 조파판으로부터 1.5*L* 이격된 지점에 설치되었다. 여기서, 수위 측정 시 는 *L*≈2.0m이고, 유속 측정 시는 *L*≈3.0m의 값을 가진다. 바닥경계조건은 Slip 조건을, 배후면과 양측 면은 모두 감쇠영역을 적용하였으며, 격자크기는 *ΔX*=2cm, *ΔY*=2cm, *ΔZ*=1cm로, 총 개수는 수위 측정 의 경우에 3,120,000개, 유속 측정의 경우에 7,020,000개이다. 수치조파에는 Stokes 5차파 이론을 적용하였 으며, 난류모델에는 LES 모델을 적용하였다.



Fig. 4.5. Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity.

Fig. 4.6은 Figs. 4.4와 4.5의 조건으로부터 산정된 Fig. 4.5(a)의 불투과잠제 주변에서 무차원수위변동 에 관한 수치해석결과와 실험결과를 나타낸 것이다. 잠제 천단 상인 1과 2지점에서는 급격한 비선형과 의 발생·발달로 인하여 파형에서 대칭성이 붕괴되기 시작하고, 잠제 배후인 3과 4지점에서는 파의 재 형성 과정을 통하여 다시 대칭성을 갖는 파형이 형성되는 것을 알 수 있다. 3지점의 실험파형에 포함된 작은 변동은 잠제로부터 이격거리가 짧기 때문에 잠제 천단 상에서 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 상호 일치성이 매우 양호한 것 으로 판단되며, 따라서 본 수치해석의 타당성이 충분히 확인된다.



Fig. 4.7은 Figs. 4.4와 4.5의 조건으로부터 산정된 Fig. 4.5(b)의 불투과잠제 주변에서 수치해석결과와 실험결과를 비교한 불투과잠제 주변에서 X-방향과 Y-방향의 무차원수평유속변화를 나타낸 것으로 측 정 높이는 모두 바닥으로부터(1지점은 잠제 천단 상으로부터) Z=0.28m인 지점이다. 1지점은 천단 상, 2 와 3지점은 회절파의 영향을 직접적으로 받는 곳이며, 4지점은 잠제의 배후면이다. 잠제 천단 상에서는 X-방향의 유속이, 나머지 지점에서는 Y-방향의 유속이 탁월한 것을 알 수 있고, 시간변동과정에서 수 평유속에 관한 수치해석결과와 실험결과를 비교하면 상호 일치성이 탁월한 것으로 판단되고, 따라서 OLAFOAM에 의한 3차원투과성잠제의 파동장 해석결과의 타당성이 충분히 확인된다.



Fig. 4.7. Comparison between simulated and measured X- and Y-direction horizontal velocities.

4.2 계산조건

본 연구의 수치시뮬레이션을 위해 Fig. 4.8에 나타낸 바와 같이 길이 12.5m, 폭 10m, 높이 0.4m의 크 기를 갖는 3차원수치파동수조를 구성하고, 수심은 바닥의 경사를 고려하지 않는 일정수심 *h=*25cm를 적 용하였으며, 수조의 끝단에는 1:20의 경사를 갖는 사빈을 설치하였다. 수치파동수조 내에 3차원투과성잠 제를 설치하여 잠제 사이의 개구폭에 따른 수치시뮬레이션을 수행하였다.

이하에서는 Mizutani et al. (1998)과 같은 기존의 수리실험과 잠제 천단 상에서 강제쇄파의 유도 및 수치계산에서 소요되는 계산시간 등을 참조하여 잠제의 형상, 제체의 매질 및 사빈의 매질 등을 가정하 였다. 먼저, Fig. 8에 보이는 바와 같이 해석대상의 잠제에서 천단고는 21cm, 천단수심은 4cm, 천단폭은 1.05m의 크기를 각각 가지며, 사면경사는 2:1로 설정하였다. 그리고, 잠제의 제체는 공극율 φ=0.33, 중앙 입경 D_{50} =3.0cm인 투과성매질로 구성되며, 잠제의 배후에 설치되는 사빈은 공극률이 φ=0.3, 중앙입경이 D_{50} =0.2cm인 모래로 각각 가정되었다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al. (2014)이 제시한 α =500, β =2.0을 적용하였으며, 사빈의 경우는 모래 입경에 해당하는 D_{50} =0.2cm의 다공성매질에 대한 Billstein et al. (1999)의 실험으로부터 산정된 α =0.0, β =3.0을 각각 적용하였다.

한편, 계산영역의 격자는 수평방향으로 일정격자를 적용하고, 연직방향으로는 가변격자를 적용한 ΔX =3cm, ΔY =3cm, ΔZ =0.7cm~1.4cm로 구성하였으며, 구성된 격자에 대한 Courant 상수는 0.3 이하가 되도록 시간간격을 조정하면서 수치실험을 수행하였다. 경계조건으로는 계산영역의 모든 벽면에서 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i = 0$ 을 적용하였다.



Fig. 4.8. Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.



잠제는 Fig. 4.8(b)에 제시된 바와 같이 조파판으로부터 잠제의 전면경사가 시작되는 지점까지 4.5m(CASE 7), 4.0m(CASE 8), 3.5m(CASES 1~6), 3.0m(CASE 9) 이격된 지점에 위치하도록 하였다. 한편, 잠제의 천단에서 해안선과의 거리는 Fig. 8(a)에 제시된 잠제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리 S를 매개변수로 사용하여 설상사주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001) 의 결과에 따라 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 S를 5.5m(CASE 7), 6m(CASE 8), 6.5m(CASES 1~6), 7m(CASE 9)로 설정하였다. 또한, 개구폭 G를 3.0m(CASES 1, 4), 2.5m(CASES 2, 5, 7, 8, 9) 및 2.0m(CASES 3, 6)로 설정함에 따라 잠제 길이 L_s 는 3.5m(CASES 1, 4), 3.75m(CASES 2, 5, 7, 8, 9), 4.0m(CASES 3, 6)로 구성되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잠제가 설치되는 것으로 가정하였다. 이상 과 같은 잠제 배치와 입사파랑 조건을 종합적으로 나타낸 것이 Table 4.3과 Table 4.4이며, Table 4.3은 규칙파의 제원을, Table 4.4는 Table 4.3에서 제시한 규칙파의 파고와 주기에 대응하는 유의파고와 유의 주기의 불규칙파랑을 각각 나타낸다. 또한, Table 4.3에는 Table 4.4의 불규칙파와 구별하기 위해 규칙파 는 RE로 표기하고, 표에는 잠제 천단 상에서 쇄파 발생 여부도 병기되어 있으며, Table 4.4에는 Table 4.3의 규칙파와 구별하기 위해 불규칙파는 IR로 표기한다.(이하동일)

| CASE No. | Wave maker theory | Wave height H (cm) | Wave period T (s) | Gap width G (m) | Submerged breakwater length L_s (m) | Distance between shoreline and submerged breakwater S (m) | L_{s}/S | Wave breaking on crown |
|-----------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|---|-----------|------------------------------|
| CASE 1-RE | | | (0) | 3.0 | 7.0 | 1 A | 1.08 | |
| CASE 2-RE | | 5 | | 2.5 | 7.5 | | 1.15 | No |
| CASE 3-RE | | | | 2.0 | 8.0 | 65 | 1.23 | |
| CASE 4-RE | Ctalvar | | 19 | 3.0 | 7.0 | 0.5 | 1.08 | |
| CASE 5-RE | | | 1.4 | 2.5 | 7.5 | | 1.15 | |
| CASE 6-RE | ш | 7 | | 2.0 | 0 8.0 | | 1.23 | Vœ |
| CASE 7-RE | | | | | 0 | 5.5 | 1.36 | 165 |
| CASE 8-RE | | | | 2.5 | 7.5 | 6.0 | 1.25 | |
| CASE 9-RE | | | | | | 7.0 | 1.07 | |

| Table 4.3. | Incident | regular | wave | condition | and | 3-dimensional | layout | of | submerged | breakwater. |
|------------|----------|---------|------|-----------|-----|---------------|--------|----|-----------|-------------|
|------------|----------|---------|------|-----------|-----|---------------|--------|----|-----------|-------------|

| T 1 1 1 1 1 | T '1 / | · 1 | | 1.4. | 1 | 21 . 1 | 1 / | c | 1 1 | 1 1 4 |
|-------------|----------|-----------|-------|-----------|-----|---------------|--------|----|-----------|-------------|
| Table 4.4. | Incident | irregular | waves | condition | and | 3-dimensional | layout | OI | submerged | breakwater. |

| CASE No. | Wave maker theory | Spectrum | Significant wave height $H_{1/3}$ (cm) | Significant wave period $T_{1/3}$ (s) | Gap width G (m) | Submerged breakwater length L_s (m) | L_s/S | Distance between shoreline and submerged breakwater S (m) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|---|--|-----|-----|------|--|
| CASE 1-IR | | | | | 3.0 | 7.0 | 1.08 | | | | | | | | | | | | |
| CASE 2-IR | Irregular | Modified Breshneider- Mitsuyasu | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | Modified | 5 | | 2.5 | 7.5 | 1.15 | |
| CASE 3-IR | waves by superpositi | | resnneider- Mitsuyasu | 14 | 2.0 | 8.0 | 1.23 | 65 | | | | | | | | | | | |
| CASE 4-IR | on of | spectrum (Goda | spectrum (Goda, 7 1988) | 1.4 | 3.0 | 7.0 | 1.08 | 0.5 | | | | | | | | | | | |
| CASE 5-IR | waves | 1988) | | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | | 2.5 | 7.5 | 1.15 | | | | | | | |
| CASE 6-IR | | | | | 2.0 | 8.0 | 1.23 | | | | | | | | | | | | |



다음으로, Black and Andrews(2001)가 제시한 두 무차원파라미터 L_s/S 와 $S_{off}/L_s(S_{off}$ 는 잠제 설치로 인한 해빈변형 후의 해안선과 잠제와의 거리를 나타낸다)의 관계를 도시한 것이 Fig. 4.9이다. 좌측 그림 에는 설상사주의 형성조건인 L_s/S <2.0과 잠제의 각 배치조건을 나타내며, 우측 그림에는 각 조건을 보다 상세히 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서의 잠제 배치조건은 L_s/S <2.0의 범위에 속하므로 설상사주가 형성되는 조건을 만족한다.



Fig. 4.9. Predictive relationship between L_s/S and S_{off}/L_s of salient formation condition and layout of submerged breakwater.

4.3 규칙파랑하 수면변동 및 내부유속변동의 특성

4.3.1 파고의 분포

(1) 개구폭의 변화

Fig. 4.10은 입사파고가 H=5cm인 경우 잠제 주변에서 형성되는 파고의 공간분포를 나타낸 것으로 Fig. 4.10(a)는 개구폭이 3.0m(CASE 1-RE), Fig. 4.10(b)는 2.5m(CASE 2-RE), 그리고 Fig. 4.10(c)는 2.0m(CASE 3-RE)의 경우에 각각 해당하며, 그림 중에 붉은 파선과 붉은 실선의 사각형은 해안선과 사빈 경사면을 나타낸다. 제시된 수치계산 결과는 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 연속되는 5 개의 파를 산술평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 파고가 감소 하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 개구폭이 좁을수록 개구 부에서 파가 집중되어 파고가 증대되며, 파가 집중되는 위치는 개구폭이 넓을수록 보다 잠제 배후로 이 동되는 경향을 나타낸다. 또한, 개구폭이 좁을수록 잠제 배후로 전달되는 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 파고가 감소한다. 역으로, 개구폭이 넓을수록 개구부에서 파의 집중이 감소하여 파고가 작아지 지만 잠제 배후에서 파고는 커지며, 잠제의 길이방향으로 공간변화가 커진다는 것을 알 수 있다.





(a) CASE 1-RE(G=3.0m)(b) CASE 2-RE(G=2.5m)(c) CASE 3-RE(G=2.0m)Fig. 4.10. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.

Fig. 4.11은 Fig. 4.10에 비해 입사파고가 증가한 *H=7cm*인 경우에 대한 파고의 공간분포를 나타낸 것 이다. 개구폭의 변화에 따라 개구부에서 파의 집중 및 잠제 배후에서 파고 크기 등에 관한 경향은 전술 한 Fig. 4.10의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있지만 입사파고가 더 큰 *H=7cm*의 경우는 개구폭이 좁을수록 전술한 *H=5cm*의 Fig. 4.10와는 달리 잠제 배후에서 회절현상이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 이는 *H=7cm*의 Fig. 4.11의 경우 잠제 천단 상에서 쇄파가 발생되고, 또한 개구폭이 좁을수록 개구 부에서 파 집중으로 인한 파고 증폭이 보다 커져 파고의 공간적인 차이로 인한 파랑에너지의 수평분산 에 의한 회절현상이 강하게 나타난다.



(a) CASE 4-RE(G=3.0m) (b) CASE 5-RE(G=2.5m) (c) CASE 6-RE(G=2.0m) Fig. 4.11. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.



(a) CASE 4-RE(G=3.0m) (b) CASE 5-RE(G=2.5m) (c) CASE 6-RE(G=2.0m) Fig. 4.12. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.



Fig. 4.12는 입사파고가 *H*=7cm인 경우 잠제 천단 상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 입사하는 파 가 시·공간적으로 회절되는 일련의 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이다. 일반적으로 입사파는 잠제 천단 상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되면서 동시에 파 진행방향의 수평유속이 증가하 고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것은 주지의 사실이며, 이러한 현상을 Fig. 4.12로부터도 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 4.11의 결과에서도 지적한 바와 같이 개구폭이 넓 을수록 큰 속도는 개구부의 배면에 상대적으로 집중되고, 이로부터 회절현상이 상대적으로 작게 발생되 는 것으로 추정된다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 해안선 근방에서는 대부분 쇄파가 발생되며, 개 구폭이 넓을수록 유속의 증가가 현저히 나타나므로 보다 큰 규모와 강도의 쇄파가 발생되는 것으로 판 단된다.



Fig. 4.13. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and beach.

Fig. 4.13은 입사파고가 H=7cm, 주기가 T=1.4s, 개구폭이 G=3.0m인 경우(CASE 4-RE)인 경우 잠제 천단 상 및 배후 사면에서 쇄파되는 일련의 과정을 나타낸 것이다. Fig. 4.12에서 확인할 수 있는 바와 같이 입사파는 잠제 천단 상에서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로의 수평유속이 증가하며, 배후로 전 파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 4.11의 결과 에서도 지적한 바와 같이 큰 속도의 유속은 개구부 배면에 집중되고, 개구부 배면의 해안선 근방에서 대부분 쇄파되는 것을 알 수 있다.



Fig. 4.14. Spatial distribution of simulated wave heights at three Y-Z cross sections.

Fig. 4.14는 입사파고가 H=5cm와 7cm인 각각의 경우에 대해 해안선에 평행한 단면에서 Y-축을 따 른 각 케이스별 공간파고분포를 나타낸 것으로 Fig. 4.14(a)가 H=5cm의 경우이고, Fig. 4.14(b)가 H=7cm 의 경우이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 X=4.445m인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중 앙(조파지점으로부터 X=9.0m인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 X=11.47m인 지점)에서 각각 해안선과 평행한 방향으로의 파고분포를 나타낸다.

Fig. 4.14(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 X=4.445m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 1→CASE 2

→CASE 3) 개구부 중앙에서 파고가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 파고가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 *X*=9.0m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 파고가 감소하는 경향을 나타내지만 제간부에서는 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않고 위치 에 따라 상이한 크기를 나타낸다. 해안선인 *X*=11.47m의 지점에서는 모든 CASE가 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 파고가 0cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

Fig. 4.14(b)의 경우 Fig. 4.14(a)의 경우와 유사하게 잠제 천단 중앙 제간부에서는 일정한 크기의 파고 를 나타내지만 개구부의 중앙에서는 CASES 5과 6의 파고가 비슷한 값을 가지며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 4이 상대적으로 작은 파고를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면 에서 대체적으로 파고가 감소하는 경향을 나타내지만 제간부에서는 회절현상으로 일정한 경향의 파고분 포를 나타내지 않고 위치에 따라 상이한 크기를 나타내는 것은 Fig. 4.14(a)의 경우와 유사하다. 해안선에 서는 Fig. 4.14(a)의 경우와 거의 동일하게 모든 CASE가 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 파고가 0cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다. 여기서, 각 그림의 (i)과 (ii)에서의 차 이는 잠제 천단 상에서 쇄파 여부 및 개구부에서 형성되는 파고 증폭의 크기에 따른 회절 영향에 의한 것으로 판단된다.

(2) 잠제 위치의 변화

Fig. 4.15는 잠제 위치에 따른 파고분포를 나타낸 것으로 입사파고가 *H=*7cm, 개구폭이 *G=*2.5m인 경 우에 잠제 위치 *S=*6.5m를 중심(CASE 5-RE)으로 해안선에 1.0m 보다 가까운 *S=*5.5m의 경우(CASE 7-RE), 해안선에 0.5m 보다 가까운 *S=*6.0m의 경우(CASE 8-RE)와 해안선에 0.5m 보다 먼 *S=*7.0m 경우 (CASE 9-RE)를 각각 제시한다.

THE AND OCEAN

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





Fig. 4.15. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of distance between shoreline and submerged breakwater.

Fig. 4.16은 CASES 5-RE와 7-RE-9-RE의 경우에 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 X=4.445m 이격된 지점), 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 X=9.0m 이격된 지점) 및 해안선(조파지점으로부터 X =11.47m 이격된 지점)에서 해안선과 평행한 Y-Z방향의 단면에서 파고분포를 나타낸 것이다. 결과를 살 펴보면 잠제 천단 중앙 개구부의 중앙에서는 CASE 7의 경우가 다소 큰 파고를, CASE 9의 경우가 다소 작은 파고를 나타내지만 Y>6.2m에서는 거의 동일한 파고를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 회절이 상대적으로 크게 영향을 미쳐 Y-축방향으로 파고의 변화가 발생하지만 이격거리에 따른 특정한 경향은 나타나지 않는다. 마지막으로, 해안선에서는 세 경우 모두 파고가 거의 0m인 값을 나타내고, Y-축을 따 른 파고의 변화도 거의 나타나지 않는다는 것을 볼 수 있다.



4.3.2 평균유속의 공간분포

(1) 개구폭의 변화

Fig. 4.17은 입사파고 H=5cm인 경우 개구폭의 변화에 따른 CASES 1-RE~3-RE에 대한 잠제 주변에서 시간평균유속을 나타낸 것이다. 각 그림에서 (i)는 바닥 근방에서 평균유속분포로 저면에서 Z=0.02m인 지점에서의 평균유속분포를 나타내며, (ii)는 수심의 중간위치에서 평균유속을 나타내고, (iii)는 정수면 상에서 평균유속분포를 각각 나타낸다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측 (onshore side)으로, 개구부에서는 해측 (offshore side)으로의 흐름이 탁월하게 발생하며, 특히 개구부에서 해측흐름은 개구폭이 좁을수록 보다 탁월하게 발생한다. 제두부에서 이러한 육측과 해 측으로의 흐름에 의해 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류의 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 해안선 근방에서는 순환셀이 형성되지 않지만 개구폭이 넓은 경우에는 연안류성분이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에는 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수심의 중간위치의 경우를 살펴보면 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단 상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이



탁월하게 발생하며, 또한 개구폭이 좁을수록 해측흐름이 보다 탁월하게 발생한다. 그리고, 잠제 전면 및 개구부 제두부 근방에서는 바닥 근방에서와 같이 순환셀이 형성되고, 개구폭이 넓은 경우에는 개구부의 양측 제두부에서도 순환셀이 형성되며, 여기서도 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분 이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서 는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나며, 개구폭이 넓을수록 해안선 부근에 서 연안류가 강하게 나타나고, 잠제 천단 상으로 유입되는 강한 육측흐름과의 상호간섭에 의해 양측벽 근방에서 순환셀이 형성된다.







Fig. 4.17. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.



(a) CASE 1-RE (G=3.0m) (b) CASE 2-RE (G=2.5m) (c) CASE 3-RE (G=2.0m) Fig. 4.18. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.



(a) CASE 4-RE (G=3.0m) (b) CASE 5-RE (G=2.5m) (c) CASE 6-RE (G=2.0m) Fig. 4.19. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

Fig. 4.18은 Fig. 4.17과 동일한 조건인 입사파고 *H*=5cm인 경우 산정된 유속성분을 저면에서 수면까 지 수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속 (해빈류)의 공간분포를 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단 상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으 로 잠제에서 잘 알려진 플럭스수송현상과 일치한다. 개구부 근방에서 잠제 천단 상에서 육측으로, 그리 고 개구부에서 해측으로 급변하는 이러한 흐름 특성으로 인하여 개구폭에 관계없이 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성된다. 이는 다기이안제와 다기잠제 배후에서 순환셀의 방향을 실험적으로 검토 한 Loveless and MacLeod (1999)의 결과와도 일치한다. 즉, 이안제의 경우 제두부에서 육측흐름이 발생하 여 제간부로 향하는 순환류가 발생하는 반면, 잠제의 경우 제간부에서 육측흐름이 발생하여 제두부로 향하는 순환류가 발생한다는 것을 실험적으로 규명한 Loveless and MacLeod (1999)의 결과와 일치하며, 단일잠제에 대한 Nobuoka et al. (1996)에서도 유사한 순환패턴이 나타나는 것을 알 수 있다.

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

Fig. 4.19는 입사파고 *H=*7cm인 경우에 Fig. 4.18과 같이 수심적분 및 시간평균된 평균유속의 공간분 포를 나타낸다. 입사파고 *H=*5cm의 경우와 동일하게 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성되고, 이는 제두부 근방의 제간부에서 육측흐름과 개구부를 통한 해측흐름과의 간섭에 의해 발생한다. 전술한 입사파고 *H=*5cm인 Fig. 4.18의 경우와는 상이하게 개구폭에 관계없이 연안류가 형성되지만 개구폭이 넓 을수록 보다 강한 연안류가 형성되며, 사빈 경사면 상에서 보다 명확한 순환셀이 형성된다.

THE AND OCEAN

(2) 잠제 위치의 변화

Fig. 4.20은 잠제 위치에 따른 수심적분 및 시간평균된 평균유속분포를 나타내며, 입사파고가 *H=*7cm, 개구폭이 *G=2.5m*인 경우에 잠제 위치 *S=6.5m를* 중심 (CASE 5-RE)으로 해안선에서 1.0m 더 가까운 *S* =5.5m의 경우 (CASE 7-RE), 해안선에서 0.5m 더 가까운 *S=6.0m*의 경우 (CASE 8-RE)와 해안선에서 0.5m 더 먼 *S=*7.0m 경우 (CASE 9-RE)를 각각 제시한다. 결과를 살펴보면 개구부 근방의 잠제 전면에서 는 모두 순환셀이 형성되며, 이는 Loveless and MacLeod (1999)에서도 지적되어 있는 바와 같이 제두부 부근에서 발생하는 제간부에서 육측흐름과 개구부에서 해측흐름과의 상호작용에 의해 발생된다. CASES 7과 8을 CASE 5과 비교하면 사빈 경사면 상에서 순환셀이 형성되는 현상은 동일하지만 CASE 5의 경우 가 연안류의 형성이 보다 명확하다. 여기서, 잠제 위치가 해안선에 멀어질수록 CASE 5의 경우 사빈 경 사면에서 종단방향으로 장축을 가진 타원형의 순환셀이 형성되고, 잠제 위치가 해안선에서 가장 멀리 떨어진 CASE 9의 경우 연안류성분이 강해지면서 순환셀의 형성은 불완전하게 되며, 최내측의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되는 것을 알 수 있다.





(c) CASE 5-RE (S=6.5m) (c) CASE 9-RE (S=7.0m) Fig. 4.20. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

4.3.3 연안류의 분포

Ranasinghe and Turner (2006)의 결과에 의하면 해안선에 평행하게 설치된 단일잠제에 파가 직각방향 으로 입사하는 경우 잠제 제간부 배후의 해안선 부근에서는 양측으로 발산하는 연안류가 발생하여 침식 이 발생 (Ranasinghe and Turner (2006)의 Fig. 11을 참조)하는 반면, 파가 해안선에 경사지게 입사하는 경 우 파가 잠제를 통과한 후 해안선에서 연안류를 방해하여 연안류의 속도를 감소시키고, 이로 인하여 흐 름이 정체되어 퇴적이 발생 (Ranasinghe and Turner (2006)의 Fig. 12를 참조)한다. 또한, Ranasinghe et al. (2010)의 결과를 살펴보면 파가 해안선에 평행하게 입사하는 경우에도 잠제와 해안선과의 거리에 따라 해빈류 패턴이 달라지며, Ranasinghe and Turner (2006)과 동일하게 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생하고, 연안류가 수렴하는 지점에서 퇴적이 발생한다고 결론짓 고 있다. 즉, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주며, 설상사주의 형성에 대한



예측에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다.

Fig. 4.21은 Figs. 4.18~4.20에서 조파지점으로부터 10.5m~11.4m 이격된 부근에 형성된 연안류를 X-방 향으로 평균하여 Y-방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제 간부에서 제두부로 향으로 연안류를 각각 나타낸다. 개구폭에 따른 연안류의 변동을 살펴보면 입사파고 가 H=5cm인 경우 Fig. 4.21(a)에서 CASES 2과 3은 Y-축을 따라 연안류가 진동하는 것을 알 수 있고, 잠제의 제두부 근방에서 감소하는 경향을, 제간부에서 증가하는 경향을 각각 나타내며, 이러한 결과는 순환셀이 형성되기 때문이다. 반면, CASE 1은 전술한 바와 같은 약간의 진동은 있지만 제두부 및 제간 부에서 연안류가 상대적으로 안정된 큰 값을 나타낸다. 입사파고가 H=7cm인 경우의 Fig. 4.21(b)에서는 개구폭이 넓은 CASES 4과 5에서 연안류가 보다 빠르게 나타나고, 이는 제두부에서 최대치를 나타낸 후 제간부로 갈수록 감소되는 경향을 나타낸다.

잠제 위치에 따른 연안류의 차이를 나타낸 Fig. 4.21(c)는 Fig. 4.20에서 언급한 바와 같이 CASE 9의 경우 사빈 경사면 상에서의 순환셀이 연안류 형성에 영향을 미쳐 연안류의 속도가 상대적으로 빠르게 나타나며, CASE 8의 경우는 CASE 5보다 사빈 경사면 상에서 형성된 순환셀이 연안류의 흐름방향으로 확장되어 연안류 속도의 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. CASE 7의 경우도 CASE 8과 같이 CASE 5 보다 사빈 경사면 상에서의 순환셀이 연안류의 흐름방향으로 확장되어 있지만 잠제 배후의 공간이 좁기 때문에 연안류가 다소 약하게 형성된 것으로 판단된다.

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





Table 4.5. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

| CASE No. | Converging point | Transport flow discharge (cm^3/s) (From head of breakwater to middle of breakwater) | Transport flow discharge (cm^3/s) (From middle of breakwater to head of breakwater) | Total transport flow discharge (cm^3/s) |
|-----------|---------------------|--|--|---|
| CASE 1-RE | Y=10.0m | 8,155.42 | 0 | 8,155.42 |
| CASE 2-RE | Y=10.0m | 6,227.68 | 0 | 6,227.68 |
| CASE 3-RE | Y=10.0m | 2,579.38 | 0 | 2,579.38 |
| CASE 4-RE | Y=10.0m | 25,631.62 | 0 | 25,631.62 |
| CASE 5-RE | Y=9.0m | 22,857.21 | 219.85 | 23,077.06 |
| CASE 6-RE | <i>Y</i> =8.11m | 8,490.11 | 2,073.05 | 10,563.16 |
| CASE 7-RE | Y=10.0m | 20,343.89 | 0 | 20,343.89 |
| CASE 8-RE | Y=8.38m | 23,161.30 | 1,713.69 | 24,874.99 |
| CASE 9-RE | <i>Y</i> =8.64m | 25,411.64 | 1,075.66 | 26,487.30 |



여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ranasinghe et al. (2010)의 결과에 따라 Fig. 4.21에서 제시된 연안류의 속도가 (+)에서 (-)로 변하는 지점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점 으로 판단하고, 그 지점에서 각 방향 (제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 4.5에 그 값을 제시한다.

Table 4.5에 제시한 수송유량은 연안류의 흐름속도와 X-Z 평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 그리고, CASES 2과 3의 경우 Fig. 4.18에 나타난 바와 같이 순환셀에 의해 연안류가 완전히 형성되지 않아 연안류가 수렴되는 지점을 선정하기 어려웠기 때문에 CASE 1과 동일하 게 잠제 제간부 배후의 지점을 연안류가 수렴되는 지점으로 선정하였다. 결과를 살펴보면 CASES 1~6의 경우는 개구폭이 넓을수록 연안류에 의한 수송유량이 증가하는 것을 알 수 있고, 입사파고가 H=7cm인 경우의 CASES 4~6은 개구폭이 좁을수록 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에서 제두부측으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생되는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이 로부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있다. 한편, 잠제 위치에 따른 연안류의 수렴지점도 잠제 위치에 상관없이 CASE 9, CASE 8, CASE 5, CASE 7의 순으로 제간부에 근접하여 발생되었다.

4.3.4 평균난류운동에너지의 분포

(1) 개구폭의 변화

Fig. 4.22는 Figs. 4.18과 4.19에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 (u'_X+u'_Y+u'_Z)/2으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 (u'_X+u'_Y+u'_Z)/2을 나타낸 것이다. 여기서, u'_X, u'_Y, u'_Z 는 각각 X, Y, Z 방향으로 난류속도성분 이다. 이러한 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 파고의 변화 및 평균수위의 변화에 영향을 미친다. 여기서, Fig. 4.22(a)는 입사 파고가 *H*=5cm인 경우를, Fig. 4.22(b)는 입사파고가 *H*=7cm인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단 상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중 · 증가하고, 개구폭이 넓을 수록 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류운동에너지가 상대적으로 크게 나타나며, 또한 종단방향으 로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.



Fig. 4.22. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.

Fig. 4.23은 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, *X*=10.2m에서 해안선 위치 *X*=11.47m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 시·공간평균난류운 동에너지분포는 파랑에너지의 소산과 연관되어 있으므로 파고분포와 관계를 가진다. 또한, 파고의 자승에 비례하는 잉여응력 (radiation stress)은 쇄파 시에는 증가하고, 쇄파 후에는 감소하므로 해안선 근방에서 평균수위 상승이 발생하여 이에 균형을 취하는 것으로 알려져 있다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 4.22에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서 난류운동에너지가 증가하고, 더불어 개구폭이 넓을수록 이러한 경향이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 해안선 부근에서 평균수위 상승의 결과로 작용한 다.



Fig. 4.23. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

(2) 잠제 위치의 변화

Collection @ kmou

Fig. 4.24는 전술한 Fig. 4.22에서와 동일한 방법으로 잠제 위치에 따른 평균난류운동에너지분포를 나 타낸 결과이다. 난류운동에너지의 분포 형상은 전술한 Fig. 4.22와 동일하게 잠제 천단 상 및 개구부 배 후 해안선 부근에서 집중·증가되는 것을 알 수 있다. 반면, 해안선과 잠제 사이의 이격거리 *S*의 변화 에 따른 뚜렷한 경향은 확인되지 않는다.

Fig. 4.25는 Fig. 4.23과 동일한 방법으로 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포 를 나타낸 것이다. 그림으로부터 개구부 배후 해안선 부근에서 CASES 8과 9의 경우 난류운동에너지가 다소 큰 값을 나타내지만 전제적으로는 제두부에서 제간부로 갈수록 난류운동에너지가 작아지는 변동양 상을 보이고, 각각에서 값의 차이는 그다지 크기 않다. 따라서, 이러한 변화는 전술한 파고분포나 평균 수위 상승에서의 변화와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

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



Fig. 4.24. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.



Fig. 4.25. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

4.4 불규칙파랑하 수면변동 및 내부유속변동의 특성

4.4.1 H_{rms}의 분포

Collection @ kmou

Fig. 4.26은 유의파고가 $H_{1/3}$ =5cm인 경우 잠제 주변에서 형성되는 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 4.26(a)는 개구폭 G가 3.0m(CASE 1-IR), Fig. 4.26(b)는 2.5m(CASE 2-IR), 그리고 Fig. 4.26(c)는 2.0m(CASE 3-IR)의 경우에 각각 해당한다. 제시된 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도 록 지속시간 28s(45~73s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제 로 인해 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파가 집중되어 H_{rms} 가 증대되며, 파가 집중되는 위치는 개구폭이 넓을 수록 보다 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소한다. 또한, 개구폭이 좁을수록 잠제 배후로 전달되는 파랑에너 지가 감소하여 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소한다. 역으로, 개구폭이 넓을수록 개구부에서 파의 집중이 감소하 여 H_{rms} 가 작아지지만 잠제 배후에서 커지며, 또한 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화도 커진다는 것을 알 수 있다.





Fig. 4.27은 Fig. 4.26에 비해 유의파고가 증가한 $H_{1/3}$ =7cm인 경우에 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이 다. 개구폭의 변화에 따라 개구부에서 파의 집중 및 잠제 배후에서 H_{rms} 의 크기 등에 관한 경향은 전술 한 Fig. 4.26의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 유의파고가 더 큰 $H_{1/3}$ =7cm의 경우는 개구폭이 좁을수록 전술한 $H_{1/3}$ =5cm의 Fig. 4.26와는 달리 잠제 배후에서 회절현상이 크게 나타나는 것 을 볼 수 있다. 이것은 $H_{1/3}$ =7cm의 Fig. 4.27에서는 잠제 천단상에서 파가 쇄파되는 경우가 많아지고, 또한 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파 집중으로 H_{rms} 가 보다 증폭되어 H_{rms} 의 공간적인 차이로 파랑 에너지의 수평분산에 의한 회절현상이 강하게 나타난다.



Fig. 4.27. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.

Fig. 4.28은 유의파고가 H_{1/3}=7cm인 경우 잠제 천단 상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 입사하는 불규칙파가 시·공간적으로 회절되는 일련의 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이며, 대상 파랑은 28s(45-73s) 동안에 취득한 파랑데이터에서 66-68s 사이의 연속데이터중에 나타나는 최대파를 대 상으로 하였다. 그림으로부터 입사파가 잠제 천단상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되면서 동시에 파 진행방향의 수평유속이 증가하고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 4.27의 결과에서도 지적한 바와 같이 개구폭이 넓을수록 큰 속도는 개구 부의 배면에 상대적으로 집중되고, 이로부터 회절현상이 상대적으로 작게 발생되는 것으로 추정된다. 또 한, 잠제 배후인 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 수심의 감소로 쇄파가 발생되며, 개구폭이 넓을수 록 유속의 증가가 현저히 나타나므로 보다 큰 규모와 강도의 쇄파가 발생되는 것으로 판단된다. 해안선 근방에서는 개구부의 배면에 집중된 유속이 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있고, 개구 폭이 넓을수록 유속의 이동이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 후술하는 연안류 및 수송유량에 영향을 나 타낸다.



- 82 -



(a) CASE 4-IR(G=3.0m) (b) CASE 5-IR(G=2.5m) (c) CASE 6-IR(G=2.0m) Fig. 4.28. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

Fig. 4.29는 유의파고가 $H_{1/3}$ =7cm, 유의주기가 $T_{1/3}$ =1.4s, 개구폭이 G=3.0m인 경우(CASE 4-IR)에 잠 제 천단상 및 배후 사면에서 쇄파되는 일련의 과정을 나타낸 것이다. Fig. 4.28에서 확인할 수 있는 바와 같이 입사파는 잠제 천단상에서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로의 수평유속이 증가하며, 배후로 전파 됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 4.28의 결과에 서도 지적한 바와 같이 큰 속도의 유속은 개구부 배면에 집중되고, 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 대부분 쇄파되며, 해안선 부근에서 개구부 배면에 집중된 유속은 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 알 수 있다.



Fig. 4.29. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and sandy beach.



Fig. 4.30은 유의파고가 H_{1/3}=5cm와 7cm인 각각의 경우에 대해 해안선에 평행한 단면에서 Y-축을 따 른 Table 4.4의 각 케이스별 H_{rms}의 공간분포를 나타낸 것이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점 으로부터 X=4.445m인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 X=9.0m인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 X=11.47m인 지점)에서 해안선과 평행한 방향으로 H_{rms}의 분포를 나타낸다. Fig. 4.30(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 X=4.445m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 1→CASE 2→ CASE 3) 개구부 중앙에서 H_{rms}가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 크기 의 H_{rms}가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 X=9.0m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 H_{rms}가 감소하는 경향을 나타내며, 해안선인 X=11.47m의 지점에서는 모든 CASE가 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 H_{rms}가 1cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

Fig. 4.30(b)의 경우는 Fig. 4.30(a)의 경우와 유사하게 잠제 천단 중앙에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 4→ CASE 5→CASE 6) 개구부 중앙에서 *H*_{rms}가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정

한 H_{rms} 가 나타나며, 사빈 경사면 중앙에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 대체적으로 H_{rms} 가 감소 하는 경향을 나타낸다. 해안선에서는 Fig. 4.30(a)의 경우와 거의 동일하게 모든 CASE가 얕은 수심에 의한 쇄 파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 H_{rms} 가 1cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

4.4.2 평균유속의 공간분포

Collection @ kmou

Fig 4.31은 유의파고 H_{1/3}=5cm인 경우 개구폭의 변화를 나타내는 CASES 1-IR~3-IR에 대해 잠제 주 변에서 시간평균유속을 공간적으로 나타낸 것이다. 각 그림에서 (i)는 바닥 근방에서 평균유속분포로 저 면에서 Z=0.02m인 지점에서의 값을, (ii)는 수심의 중간위치에서 평균유속을, (iii)는 정수면상에서 평균유 속분포를 각각 나타낸다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측(onshore side)으로, 개구부에서는 해측(offshore side)으로의 흐름이 탁월하게 발생하며, 특히 개구부에 서 해측흐름은 개구폭이 좁을수록 보다 탁월하게 발생한다. 제두부에서 이러한 육측과 해측으로의 흐름 에 의해 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류의 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 수심의 중 간위치에서는 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이 탁월 하게 발생하며, 또한 개구폭이 좁을수록 해측흐름이 보다 탁월하게 발생한다. 그리고, 잠제 전면 및 개 구부 제두부 근방에서는 바닥 근방에서와 같이 순환셀이 형성되고, 제간부 배후의 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나며, 잠제 천단상으로 유입되는 강한 육측흐름과의 상호간섭에 의해 양측벽 근방에서 순환셀이 형성된다.

Fig 4.32는 유의파고 $H_{1/3}$ =7cm인 경우 개구폭의 변화에 따른 CASES 4-IR-6-IR의 잠제 주변에서 시 간평균유속을 나타낸 것이다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 Fig 4.31의 유의파고 $H_{1/3}$ =5cm 인 경우와 마찬가지로 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측으로, 개구부에서는 해측으로의 흐름이 탁 월하게 발생하며, 제두부에서 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 유의파고 $H_{1/3}$ =5cm와는 다르게 해안선 근방에서 연안류성분이 발달하며, 더욱이 개구폭이 넓 을수록 보다 탁월하게 나타난다. 수심의 중간위치의 경우를 살펴보면 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이 탁월하게 발생하며, 잠제 전면 개구부 근방에서는 동일한 순환셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류 성분이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면 에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나고, 개구부 배후의 해안선 근방에 서 양측 제간부방향으로 이동하는 흐름이 발생하며, 개구폭이 넓을수록 흐름의 강도가 강해진다. Fig 4.31의 $H_{1/3}$ =5cm인 경우와는 다르게 Fig 4.32의 $H_{1/3}$ =7cm에서 연안류가 탁월하게 발달하는 것은 잠제 천단상 및 개구폭을 통한 잠제 배후로의 파랑에너지의 수송이 많아지기 때문이며, 이는 과잉운동량프럭 스(radiation stress)의 공간적 차이에 의해 발생되는 것으로 판단된다.



Fig. 4.31. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.





Fig. 4.32 Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.

Fig. 4.33은 Fig. 4.31와 동일한 유의파고 $H_{1/3}$ =5cm의 경우에 산정된 유속성분을 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속(해빈류)의 공간분포를 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으로 잠 제에서 잘 알려진 플럭스수송현상과 일치한다. 또한, 해안선 부근에서는 개구폭이 넓을수록 연안류성분 이 탁월한 것을 확인할 수 있으며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 3에서는 제간부 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성된다.



(a) CASE 4-IR(G=3.0m) (b) CASE 5-IR(G=2.5m) (c) CASE 6-IR(G=2.0m) Fig. 4.34. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

Fig. 4.34는 유의파고 $H_{1/3}$ =7cm인 경우에 Fig. 4.32와 같이 수심적분 및 시간평균된 평균유속의 공간 분포를 나타낸다. CASES 5과 6은 유의파고 $H_{1/3}$ =5cm의 경우와 동일하게 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성되지만 개구폭이 가장 넓은 CASE 4에서는 개구부 근방 잠제 전면의 순환셀이 개구부 배 후의 이안류에 직접 관여하는 것으로 판단된다. 또한, 개구부 배후의 해안선 부근에서는 개구폭이 가장 좁은 CASE 6의 경우에 불완전한 셀이 형성되고, CASE 5의 경우에 완전한 셀이 형성되며, 개구폭이 가 장 넓은 CASE 4의 경우에 연안류가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

4.4.3 연안류의 분포

Fig. 4.35는 Figs. 4.33과 4.34에서 조파지점으로부터 10.5~11.4m 이격된 지점에 형성된 연안류를 X-방향으로 평균하여 Y-방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에 서 제두부방향으로 연안류를 각각 나타낸다. 연안류의 변동을 살펴보면 유의파고가 $H_{1/3}$ =5cm의 경우 Fig. 4.35(a)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 개구부 및 제두부 근방보다는 제간부 근방에서 증가하는 경향을 나타내며, 전반적으로 개구폭이 넓을수록 연안류가 상대적으로 강하게 형성된다. 유의파고가 $H_{1/3}$ =7cm인 경우 Fig. 4.35(b)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 제간부 근방보다 개구부 및 제두부 근방보다 강하게 형성된다. 유의파고가 $H_{1/3}$ =7cm인 경우 Fig. 4.35(b)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 제간부 근방보다 개구부 및 제두부 근방에서 약간 증가하는 경향을 나타내며, Fig. 4.35(a)와 동일하게 개구폭이 넓을수록 연안류가 상대적으로 강하게 형성된다.

본 연구에서는 다기로 구성된 잠제로 단일잠제에 대한 Ranasinghe et al. (2006)과는 상이하게 파가 해 안선에 직각으로 입사하는 경우에 제간부 배후 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생되지 않으며, 개구부 배후 해안선 부근에서 상승된 평균수위에 의해 제간부측으로 이동하는 연안류가 발생하 는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 4.35. Spatial distribution of longshore current velocities.



여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ranasinghe et al. (2010)의 결과에 따라 Fig. 4.35에서 제시된 연안류의 속도가 (+)에서 (-)로 변하는 지점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점 으로 판단하고, 그 지점에서 각 방향(제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 4.6에 그 값을 제시한다.

Table 4.6. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

| | Transport flow discharge | Transport flow discharge | |
|-----------------|--|---|---|
| Converging | (cm^3/s) | (cm^3/s) | Total transport flow |
| point | (from head of breakwater to | (from middle of breakwater to | discharge (cm^3/s) |
| | middle of breakwater) | head of breakwater) | |
| Y=10.0m | 3,854.33 | 0 | 3,854.33 |
| Y=10.0m | 2,758.86 | 0 | 2,758.86 |
| Y=10.0m | 1,659.75 | 0 | 1,659.75 |
| Y=10.0m | 11,638.88 | 0 | 11,638.88 |
| Y=10.0m | 8,477.97 | | 8,477.97 |
| <i>Y=</i> 9.74m | 4,665.12 | 14.98 | 4,680.10 |
| | Converging point <i>Y</i> =10.0m <i>Y</i> =10.0m <i>Y</i> =10.0m <i>Y</i> =10.0m <i>Y</i> =9.74m | Converging point Transport flow discharge (cm^3/s) Y=10.0m 3,854.33 Y=10.0m 2,758.86 Y=10.0m 1,659.75 Y=10.0m 11,638.88 Y=10.0m 8,477.97 Y=9.74m 4,665.12 | Converging pointTransport flow discharge (cm^3/s) Transport flow discharge (cm^3/s) $Y=10.0m$ 3,854.330 $Y=10.0m$ 2,758.860 $Y=10.0m$ 1,659.750 $Y=10.0m$ 11,638.880 $Y=10.0m$ 8,477.970 $Y=9.74m$ 4,665.1214.98 |

Table 4.6에 제시한 수송유량은 연안류의 흐름속도에 *X-Z* 평면에서 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 CASES 1~6의 경우는 개구폭이 넓을수록 연안류에 의한 수송유량이 증가 하는 것을 알 수 있고, 유의파고가 *H*_{1/3}=7cm인 경우의 CASES 4~6은 개구폭이 가장 좁은 CASE 6에서 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에서 제두부측으로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과 로부터 퇴적이 발생되는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로부터 설상사주가 형성되는 지점 을 예측할 수 있으며, 이러한 결과는 4.3.3절의 규칙파의 경우와도 일치한다.

4.4.4 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 4.36은 Figs. 4.33과 4.34에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 (u'_X+u'_Y+u'_Z)/2으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $\overline{(u'_X^2+u'_Y^2+u'_Z)}/2$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_X , u'_Y , u'_Z 는 각각 X, Y, Z 방향으로 난류속도성분 이다. 이러한 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 H_{rms} 의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 4.36(a)는 유의파고가 $H_{1/3}$ =5cm인 경우를, Fig. 4.36(b)는 유의파고가 $H_{1/3}$ =7cm인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하고, 개구폭이 넓을수 록 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류운동에너지가 상대적으로 크게 나타나며, 또한 종단방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.







Fig. 4.37은 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, X=10.2m와 해안선 위치 X=11.47m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 시·공간평균난류운동에너지분포는 파랑에 너지의 소산과 연관되어 있으므로 H_{rms} 의 분포와 관계를 가진다. 또한, 일반적으로 파고의 자승에 비례하는 잉여 응력 (radiation stress)는 쇄파시에는 증가하고, 쇄파 후에는 감소하므로 해안선 근방에서 평균수위 상승이 발생하여 이에 균형을 취하는 것으로 알려져 있다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 4.36에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근 방에서 난류운동에너지가 증가하고, 더불어 개구폭이 넓을수록 이러한 경향이 강해지는 것을 확인할 수 있다. 따 라서, 개구폭의 변화에 따른 개구부 배후의 H_{rms} 의 변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인 할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 연안류의 속도에 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.


Fig. 4.37. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

4.5 결언

본 장에서는 OLAFOAM을 이용하여 다기의 투과성잠제가 설치된 일정 수심의 3 차원수치과동수조에 규칙 파를 조파하여 개구폭 및 잠제와 해안선 사이의 거리 등의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 파고의 시·공가 분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변통특성을 검토하였으며, 규칙파의 파고와 주기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙과랑을 적용하여 개구폭의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 H_{rms} 의 시·공가분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변통 특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 파고 및 H_{rms} 에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 파고는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 파고가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 파고감소율이 상대적으로 크게 나타났다. 하지만, 잠제 위치에 따른 결과에서는 파고의 변화가 크지 않고, 파고감소율도 대동소이한 경향을 나타 내였다.

(2) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭 및 자제 위치에 상관없이 제두부 부근에서 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여 개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인하였다. 또한, 규칙파동장하에서는 개구폭이 넓어질수록 해안선 부근에서 해안선과 평향한 방향으로 순환셀의 크기가 커지다가 연안류 형성에 관여한 후에 다시 크기가 작아지는 경향을 나타내었고, 불규칙

파동장하에서는 개구폭이 넓어질수록 개구폭 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되다가 연안류로 흐름이 바뀌는 것을 확인 할 수 있었다. 잠제 위치가 해안선에서 멀어질수록 사빈 경사면에서 해안선 에 직각방향으로 장축을 가진 타원형의 순환셀을 형성하며, 이는 연안류에 직접적인 영향을 미치는 것 으로 판단되었다.

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

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

References

HIV ULL

- 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.
- 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.
- Loveless, J. H. and MacLoed, B.(1999). The influence of set-up behind detached breakwaters, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2026-2041.
- Mizutani, N., Mostafa, A. M. and Iwata, K.(1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, Coastal Engineering, 33(2), 177-202.



- Nobuoka, H., Irie, I., Kato, H. and Mimura, N.(1997). Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection, Proceedings of Coastal Engineering, ASCE, 2391-2403.
- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J. (2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater, Coastal Engineering, 57(11), 1006-1017.
- Ranasinghe, R. and Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged structures: a review, Coastal Engineering, 53(1), 65-79.
- Ranasinghe, R., Turner, I. L. and Symonds, G. (2006). Shoreline response to multi-functional artificial surfing reefs: A numerical and physical modelling study, Coastal Engineering, 53(7), 589-611.





제5장 파-흐름공존장 및 설상사주 형성조건 하에 있는 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성

본 장에서는 제4장에서 기술한 설상사주 형성조건 하에 있는 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동 및 내부 유속변동의 특성에 관한 연구를 확장하여 제3장의 연구와 동일하게 파-흐름의 공존장내에 투과성구조물을 설치하여 파-흐름의 공존장에 설치된 3차원투과성잠제에 관해 흐름방향에 따라 변화되는 잠제 주변에서 파고 분포와 같은 수면변동의 특성 및 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토한다.

5.1 계산조건

Collection @ kmou

수조의 크기, 잠제의 위치 및 형상, 배후사면의 위치 및 경사, 잠제의 저항계수, 중앙입경, 공극률 및 격자의 크기는 4.1절에서 전술한 바와 같으며, 입사파랑으로는 규칙파와 불규칙파로 Table 4.2와 Table 4.3에서 제시한 값과 동일하다.

TIME AND OCF ...

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

Table 5.1. Condition of regular wave and current applied to numerical analysis and wave breaking on crown.

Table 5.1은 규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각 각 나타낸다. 표에서는 흐름이 없고 파만이 존재하는 경우를 WCN으로, 흐름과 파가 순방향인 경우를 WCF로, 흐름과 파가 역방향인 경우를 WCO로 표기 및 정의하며, Table 5.2의 불규칙파와 구별하기 위해 규칙파를 RE로 표기한다. 또한, 잠제 천단상에서 쇄파 발생 여부도 병기되어 있다.

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

Table 5.2. Condition of irregular wave and current applied to numerical analysis and wave breaking on crown.

Table 5.2는 불규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. Table 5.1과 동일하게 WCN, WCF 그리고 WCO로 표기 및 정의하며, Table 5.1의 규칙파 와 구별하기 위해 불규칙파를 IR로 표기한다. 입사파랑으로는 Table 5.1에서 제시한 규칙파의 파고와 주 기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파랑을 적용하였다.

1945

5.2 규칙파-흐름공존장하 수면변동 및 내부유속변동의 특성

5.2.1 파고의 분포

Fig. 5.1은 입사파고가 H=5cm인 경우 잠제 주변에서 형성되는 공간파고분포를 나타낸 것이며, Fig. 5.1(a)는 흐름이 없는 경우(WCN-RE5), Fig. 5.1(b)는 순방향흐름의 경우(WCF-RE5), 그리고 Fig. 5.1(c)는 역방향흐름의 경우(WCO-RE5)에 각각 해당하며, 그림 중에 붉은 파선과 붉은 실선의 사각형은 해안선과 사빈경사면을 나타낸다. 제시된 수치계산결과는 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 연속되는 5개의 파를 산술평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 파고가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 개구부에서 파의 집중이 나타나며, 대부분의 파랑에너지가 개구부를 통하여 배후로 전달되는 것을 알 수 있다. 흐름방 향에 따라 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지는 크게 차이나지 않지만 WCN, WCF, WCO의 순으로 파랑에너지가 감소하는 것을 알 수 있으며, 제간부 배후에서의 파고는 WCF가 WCN의 경우보다 높게, 그리고 WCO가 WCN의 경우보다 낮게 각각 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 제3장에서 언급된 바와 같이 후술하는 평균난류운동에너지가 클수록(적을수록) 파고감소 율이 높게(낮게) 나타나는 결과와 일치한다. 이로부터 개구부의 배후로 전달되는 파랑에너지는 WCO, WCN, WCF의 순으로 잠제의 길이방향으로 공간변화가 커지는 것을 확인할 수 있다.



(a) WCN-RE5(U=0.0cm/s)(b) WCF-RE5(U=10.0cm/s)(c) WCO-RE5(U=-10.0cm/s)Fig. 5.1. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction.

Fig. 5.2는 Fig. 5.1에 비해 입사파고가 증가한 *H=*7cm인 경우에 대한 공간파고분포를 나타낸 것이다. 입사파고 *H=*5cm의 Fig. 5.1과 유사한 개구부에서 파의 집중과 개구부 배후로 파랑에너지의 전달을 확인 할 수 있으며, 흐름방향에 따른 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지의 감소는 크게 차이가 나지 않는다. 또한, 제간부 배후에서 파고는 각각 WCF가 WCN보다 높게, WCO가 WCN보다 낮게 나타나며, 이로부터 WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 길이방향으로 공간변화가 커지는 것을 확인할 수 있다.



(a) WCN-RE7(*U*=0.0cm/s) (b) WCF-RE7(*U*=10.0cm/s) (c) WCO-RE7(*U*=-10.0cm/s) Fig. 5.2 Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction.





(a) WCN-RE7(U=0.0cm/s)
 (b) WCF-RE7(U=10.0cm/s)
 (c) WCO-RE7(U=-10.0cm/s)
 Fig. 5.3. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

Fig. 5.3은 입사파고가 H=7cm인 경우 흐름방향에 따른 잠제 천단상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 전파되는 파가 시·공간적으로 회절되는 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이다. 흐름의 유 무에 따라 위상이 약간 상이하지만 상호비교를 위해 파 전파과정의 위상을 가능한 범위내에서 일치시킨 결과이다. 그림으로부터 주지의 사실로 입사파가 잠제 천단상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되고, 동시 에 진행방향의 수평유속이 증가하고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지 는 현상을 Fig. 5.3으로부터도 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 5.2의 결과에서도 지적한 바와 같이 제간부 배 후로 흐름방향에 따른 파고분포의 차이로 WCF는 WCN보다 큰 속도를, WCO는 WCN보다 작은 속도를 각각 나타낸다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 수심의 감소로 쇄파가 발생되고, WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 유속이 작게 나타나며, 해안선 근방에서는 개구부의 배면에 집중된 유속이 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있고, WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 유속 의 이동이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 후술하는 연안류 및 수송유량에 영향을 나타낸다.



Fig. 5.4. Spatial distribution of simulated wave heights according to y direction.

Fig. 5.4는 각각 입사파고 H=5cm와 H=7cm의 경우 해안선에서 평행한 단면에서 흐름의 유무와 방향 에 대해 y축을 따른 공간파고분포를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 5.4(a)가 H=5cm의 경우이고, Fig. 5.4(b) 가 H=7cm의 경우이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 x=4.445m인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 x=9.0m인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 x=11.47m인 지 점)의 경우이다.

Fig. 5.4(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 *x*=4.445m인 지점에서는 흐름의 방향에 관계없이 개구부 중앙에 서 *H*≈6.4cm의 거의 동일한 파고를 나타내지만 제간부에서는 WCF가 WCN보다 높게, WCO가 WCN보다 낮게 일정한 파고가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 *x*=9.0m의 지점에서는 제간부에서 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않지만 WCF의 경우가 상대적으로 큰 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 해안선인 *x*=11.47m의 지점에서는 모두 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소 산되며, 따라서 (i)잠제 천단 중앙과 동일하게 WCF가 WCN보다 높은 파고를, WCO가 WCN보다 낮은 파고를 각각 나타낸다.

Fig. 5.4(b)의 경우는 Fig. 5.4(a)와 유사하게 잠제 천단 중앙의 제간부와 해안선에서 WCF, WCN, WCO의 순으로 큰 파고가 나타나며, 사빈 경사면 중앙의 개구부 배면에서는 WCO, WCN, WCF의 순으 로 파고가 감소하는 경향을 볼 수 있다.

5.2.2 평균유속의 공간분포

Collection @ kmou

Fig. 5.5는 입사파고 *H=*5cm인 경우 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속(해빈류)의 공간분포를 나타낸다. 그림으로부터 흐름의 유무 및 흐름방향에 관계없이 잠제 천단 상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으로 잠제에 서 잘 알려진 플럭스수송현상과 일치한다. 흐름방향에 따른 결과로 잠제 천단상 육측으로의 흐름에서는 WCF가 상대적으로 WCN과 WCO보다 약하게 형성되며, 해안선 부근에서 연안류 성분은 WCN가 WCF와 WCO보다 탁월하게 발생하는 반면, 제간부 배후에서는 WCF가 상대적으로 강한 연안류를 형성하는 것 을 확인할 수 있다. 또한, 연안류가 형성되는 지점의 경우 WCF는 WCN보다 육측으로, WCO는 WCN보 다 해측으로 각각 형성됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5.6은 입사파고 *H=*7cm인 경우에 Fig. 5.5와 동일하게 평균된 평균유속의 공간분포를 나타낸다. 입사파고 *H=*5cm인 경우인 Fig. 5.5와 동일하게 잠제 천단상에서 육측으로의 흐름은 WCF가 상대적으로 WCN과 WCO보다 약하게 형성되며, 해안선 부근에서 연안류는 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 각각 형성됨을 확인할 수 있다.





(a) WCN-RE5(U=0.0cm/s) (b) WCF-RE5(U=10.0cm/s) (c) WCO-RE5(U=-10.0cm/s) Fig. 5.5. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in x-y plane.



(a) WCN-RE7(U=0.0 cm/s) (b) WCF-RE7(U=10.0 cm/s) (c) WCO-RE7(U=-10.0 cm/s) Fig. 5.6. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in x-y plane.

5.2.3 연안류의 분포

연안류와 지형변동과의 관계는 Ranasinghe and Turner(2006)가 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연 안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생하고, 연안류가 수렴하는 지점에서 퇴적이 발생한다고 결론짓고 있으며, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주는 설상사주의 형성에 대한 예측 에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다.

Fig. 5.7은 Figs. 5.5와 5.6에서 형성된 연안류를 *x*방향으로 평균하여 *y*방향에 대해 나타낸 것이며, WCN은 조파지점으로부터 10.5~11.4m 이격된 지점, WCF는 조파지점으로부터 10.6~11.5m 이격된 지점, 그리고 WCO는 조파지점으로부터 10.2~11.1m 이격된 지점에 형성된 연안류를 대상으로 하였다. 입사파



고 *H*=5cm인 Fig. 5.7(a)에서 연안류는 Fig. 5.5에서와 같이 개구부 및 제두부 근방에서 WCF가 WCN과 WCO보다 약하게 형성되는 반면, 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타낸다. 입사파고 *H* =7cm인 Fig. 5.7(b)에서는 전반적으로 WCO가 WCN과 WCF보다 약하게 형성됨을 알 수 있으며, Fig. 5.7(a)와 유사하게 제간부 근방에서는 WCF가 강한 연안류를 나타낸다. 이러한 결과는 후술하는 평균난 류운동에너지의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

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



Fig. 5.7. Spatial distribution of longshore current velocities.

Table 5.3. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current.

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



여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ranasinghe et al.(2010)의 결과에 따라 Fig. 5.7에서 제시된 연안류가 (+)에서 (-)로 변하는 지점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점으로 판단 하고, 그 지점에서 각 방향(제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 5.3에 그 값을 제시한다.

Table 5.3에 제시한 수송유량은 연안류의 속도와 *x-z*평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적 한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 흐름방향에 관계없이 파와 흐름의 공존장내에서는 WCN의 파동 장보다 연안류에 의한 수송유량이 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 WCO가 상대적으로 수송유량이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 입사파고가 *H=*7cm인 경우는 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에 서 제두부측으로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생되는 지점이 이동 된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있다.

5.2.4 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 5.8은 Figs. 5.5와 5.6에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균 난류운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 $(u'_x + u'_y + u'_z)/2 \circ z$ 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $\overline{(u'_x + u'_y + u'_z)}/2$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_x , u'_y , u'_z 는 각각 x, y, z방향으로 난류속도 성분이 다. 이러한 난류에너지는 난류 성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요 소로 전술한 바와 같이 파고의 변화에 영향을 미친다. 여기서, Fig. 5.8(a)는 입사파고가 *H*=5cm인 경우 를, Fig. 5.8(b)는 입사파고가 *H*=7cm인 경우를 각각 나타내며, 그림으로부터 잠제 천단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·중가하는 것을 알 수 있다. 잠제 천단상에서는 WCO가 상대적으로 크게, WCF가 상대적으로 적게 나타나며, 이는 제3장에서 기술한 2차원수치실험결과 와도 일치한다. 또한, 개구부 배후 해안선 부근에서는 WCN이 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Figs. 5.5와 5.6에서 제시된 연안류의 형성위치와 동일하게 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO 가 WCN보다 해측으로 평균난류에너지가 집중·증가된 것으로 나타난다.





Fig. 5.8. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in x-y plane.

Fig. 5.9는 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, WCN은 *x*=10.5m 에서 해안선 위치 *x*=11.47m 사이, WCF는 *x*=10.6m에서 해안선 위치 *x*=11.47m 사이, 그리고 WCO는 *x* =10.2m에서 해안선 위치 *x*=11.47m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 5.8에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서는 WCN, WCO, WCF의 순으로 크 게 나타나지만 제간부로 이동하면서 WCF, WCN, WCO의 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라 서, 흐름 유무 및 방향에 따른 개구부 배후의 파고의 변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 연안류의 속도에 영향을 크게 미치는 것으로 판 단된다.



Fig. 5.9. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.

5.3 불규칙파-흐름공존장하 수면변동 및 내부유속변동의 특성

5.3.1 H_{rms} 의 분포

Collection @ kmou

Fig. 5.10은 유의파고 $H_{1/3}$ =5cm인 경우 잠제 주변에서 형성되는 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 5.10(a)는 흐름이 없는 경우(WCN-IR5), Fig. 5.10(b)는 순방향흐름의 경우(WCF-IR5), 그리고 Fig. 5.10(c)는 역방향흐름의 경우(WCO-IR5)에 각각 해당하고, 제시된 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분 히 재현할 수 있도록 지속시간 28s(45~73s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 결과를 살 펴보면 규칙과 작용하의 Fig. 5.1과 유사하게 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확 인할 수 있고, 제간부 배후에서는 WCF가 WCN보다 높은 파고를, WCO가 WCN보다 낮은 파고를 나타내 는 반면, 흐름방향에 따라 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지는 WCF가 WCN과 WCO보다 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 5.11은 Fig. 5.10에 비해 유의파고가 증가한 $H_{1/3}$ =7cm인 경우에 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이다. 흐름방향에 따른 개구부 배후에서 파랑에너지의 전달 및 제간부 배후에서 H_{rms} 의 크기 등에 관한경향은 전술한 Figs. 5.2와 5.10의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있다.



(a) WCN-IR7(U=0.0cm/s) (b) WCF-IR7(U=10.0cm/s) (c) WCO-IR7(U=-10.0cm/s) Fig. 5.11. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of current direction.

Fig. 5.12는 유의파고가 $H_{1/3}$ =5cm와 7cm인 각각의 경우에 대해 규칙파의 Fig. 5.3과 동일하게 해안선 에 평행한 단면에서 y축을 따라 흐름의 유무와 방향별 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것으로 Fig. 5.12(a)가 $H_{1/3}$ =5cm의 경우이고, Fig. 5.12(b)가 $H_{1/3}$ =7cm의 경우이다. 규칙파 작용하의 Fig. 5.3와 유사하게 잠제 천단 중앙의 제간부와 해안선에서 WCF, WCN, WCO의 순으로 파고가 크게 나타나고, 유의파고 $H_{1/3}$ =7cm인 경우는 규칙파에 대한 Fig. 5.3(b)와 동일하게 사빈 경사면 중앙의 개구부 배면에서 WCO, WCN, WCF의 순으로 파고가 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

Collection @ kmou



5.3.2 평균유속의 공간분포

Fig. 5.13은 유의파고 $H_{1/3}$ =5cm인 경우, Fig. 5.14는 유의파고 $H_{1/3}$ =7cm인 경우에 해빈류의 공간분포 를 나타낸 것으로 해빈류는 Fig. 9와 같이 Figs. 9와 10과 같이 산정된 평균치이다. 규칙파 작용하의 Figs. 5.5와 5.6과 유사하게 WCN이 상대적으로 WCF와 WCO보다 연안류가 탁월하게 발생하지만 제간부 배후 에서는 WCF가 상대적으로 강한 연안류를 형성하는 것을 볼 수 있다. 또한, 연안류가 형성되는 지점에 대해서는 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 각각 형성되는 것을 알 수 있다.





(a) WCN-IR5(U=0.0cm/s) (b) WCF-IR5(U=10.0cm/s) (c) WCO-IR5(U=-10.0cm/s) Fig. 5.13. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in x-y plane.



(a) WCN-IR7(U=0.0cm/s) (b) WCF-IR7(U=10.0cm/s) (c) WCO-IR7(U=-10.0cm/s) Fig. 5.14. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in x-y plane.

5.3.3 연안류의 분포

Collection @ kmou

Fig. 5.15는 Fig. 5.7과 동일하게 Figs. 5.13과 5.14에 형성된 연안류를 *x*방향으로 평균하여 *y*방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에서 제두부로 방향으로 연안류를 각각 나타낸다. 유의파고 *H*_{1/3}=5cm인 Fig. 5.15(a)에서는 규칙파 작용하의 Fig. 5.7(a)와 유사하 게 개구부 및 제두부 근방에서 연안류는 WCF가 WCN과 WCO보다 약하게 형성되지만 제간부 근방에서 는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 유의파고 *H*_{1/3}=7cm인 Fig. 5.15(b)에서 연안류는 규칙파 작용하 의 Fig. 5.7(b)와 유사하게 전반적으로 WCO가 WCN과 WCF보다 약하게 형성되는 것을 알 수 있다.



Table 5.4에는 전술한 Table 5.3과 동일한 방법으로 Fig. 5.14에서 제시된 연안류에 의해 수송되는 유 량을 산정하여 그 값을 제시하며, 연안류의 속도와 *x-z*평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 규칙파의 경우에 대한 Table 5.3과 동일하게 흐름방향에 관계없이 파와 흐름의 공존장내에서 연안류에 의한 수송유량은 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 WCO가 상대적으 로 수송유량이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있지만 흐름의 유무 및 방향에 따른 연안류의 수렴지점은 이동되지 않고, 모두 제두부 중앙에 나타나는 것을 알 수 있다.

| Table | 5.4. | А | longshore | current's | convergence | point | on | shoreline | and | total | transport | flow | discharge | due | to |
|--------|-------|-------|-----------|-----------|-------------|-------|----|-----------|-----|-------|-----------|------|-----------|-----|----|
| longsh | ore c | curre | ent. | | | | | | | | | | | | |

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



5.3.4 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 5.16은 Figs. 5.13과 5.14에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, Fig. 5.16(a)는 유의파고가 $H_{1/3}$ =5cm인 경우를, Fig. 5.16(b)는 입사 파고가 $H_{1/3}$ =7cm인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 규칙파 작용하의 Fig. 5.8과 동일하게 잠제 천 단상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하는 것을 알 수 있고, 잠제 천단상에서는 WCO가 상대적으로 크게, WCF가 상대적으로 적게 나타나며, Figs. 5.13과 5.14에서 제시된 연안류의 형성위치와 동일하게 WCF는 WCN보다 육측으로, WCO는 WCN보다 해측으로 평균난 류에너지가 집중·증가한 것으로 나타난다.



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



Fig. 5.17은 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, WCN은 *x* =10.5m에서 해안선 위치 *x*=11.47m 사이, WCF는 *x*=10.6m에서 해안선 위치 *x*=11.47m 사이, 그리고 WCO는 *x*=10.2m에서 해안선 위치 *x*=11.47m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이 다. 결과를 살펴보면 규칙과 작용하인 Fig. 5.9와 유사하게 개구부 배후의 해안선 근방에서는 WCN, WCO, WCF의 순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 WCF, WCN, WCO의 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.



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

5.4 결언

본 장에서는 OLAFOAM을 이용하여 다기로 구성된 구성된 투과성잠제가 설치된 일정수심의 3차원수 치파동수조에 순방향 혹은 역방향흐름이 있는 상태에서 규칙파 및 불규칙파를 조파하여 흐름의 유무와 방향에 따른 잠제 주변 및 배후에서 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대해 시·공간 분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로 부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대해 잠제 제간부 배후로 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 낮게 나타나며, 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. (2) 평균유속의 공간분포로부터 흐름이 없는 경우가 순방향흐름의 경우와 역방향흐름의 경우보다 잠제 천단상에서 육측으로의 흐름이 강하게 나타나며, 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 육측으로, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 해측으로 연안류가 형성되는 것을 알 수 있다.

(3) 잠제 배후의 개구부 및 제두부 근방에서의 연안류는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 역 방향흐름의 경우보다 악하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 수송 유량은 흐름이 없는 경우, 순방향흐름의 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 증가하였다. 이러한 결과로 부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

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

References

- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J. (2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater, Coastal Engineering, 57(11), 1006-1017.
- Ranasinghe, R. and Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged structures: a review, Coastal Engineering, 53(1), 65-79.



제 6 장 원형유공케이슨 월파량, 방파제의 반사율 및 작용파압에 관한 3차원시뮬레이션

6.1 슬리트케이슨에 작용하는 파압(동압)의 검증

Wang et al. (2011)은 Fig. 6.1(a)와 같은 일정수심 *h*=0.4m의 3차원파동장에 설치된 높이 0.7m의 슬리 트케이슨에 규칙파를 작용시켜 전면 유공벽과 유수실 후면벽에서 파압(동압)변동을 수리실험으로부터 측 정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 56m, 폭 1.0m, 높이 0.7m이며, 조파판의 반대 수조 끝단 에 슬리트케이슨을 설치하였다. Fig. 6.1(b)는 슬리트케이슨에서 유공벽의 제원을 나타내며, 슬리트의 두 께 및 유수실 측벽의 두께는 1cm로 구성하였다. 입사파랑은 파고 *H*=6cm, 주기 *T*=1.4s의 규칙파를 적용 하였으며, Fig. 6.2는 전면 유공벽과 유수실 후면벽에서 파압계의 부착위치를 나타낸다.



(b) Slit caisson breakwater model Fig. 6.1. Illustrative sketch of wave basin and dimension of slit caisson breakwater.





Fig. 6.2. Measuring positions of wave pressure.

OLAFOAM에 의한 본 수치해석에서는 계산비용의 감소를 위해 수리실험에 비해 축소된 길이 5.12m 의 수치조파수조를 적용하였고, 슬리트케이슨은 조파판으로부터 4.8m 이격된 지점에 설치하였다. 벽면경 계조건으로는 바닥 및 양측면에 Slip 조건을 적용하였으며, 격자크기는 Δx=1.0cm, Δy=0.5cm, Δz =1.0cm로 총 격자수는 5,076,000개로 구성하였다. 수치조파에 적용된 파는 Choidal 파이고, 적용된 난류모 델은 LES 모델 (Ghosal et al., 1995)이다.

Fig. 6.3은 Fig. 6.2에 나타내는 슬리트케이슨의 전면 유공벽과 유수실 후면벽에 작용하는 파압의 시 간변동에 대해 본 연구의 수치해석결과와 Wang et al. (2011)의 실험결과를 비교한 것으로, 그림에서 1~3 지점은 전면 유공벽에 대한 경우를, 4~6지점은 유수실 후면벽에 대한 경우를 각각 나타낸다. 여기서, 1 지점에서 3지점으로 갈수록, 그리고 4지점에서 6지점으로 갈수록 정수면에 가까워지고, 3과 6지점은 바 로 정수면에서 수평파압을 나타낸다. 그림을 살펴보면 정수면 아래에 위치한 1과 2지점에서는 비선형파 압의 발생으로 비대칭적인 파압변동을 나타내며, 4와 5지점에서도 동일한 비선형파압에 의한 비대칭변 화를 나타내지만 1과 2지점보다는 그의 정도가 약하다는 것을 알 수 있다. 이는 전면 유공벽과 후면 불 투과벽체의 형상적인 차이와 반사파의 발생위치의 차이로 판단되며, 1과 2지점에 영향을 미치는 반사파 는 전면 유공벽의 불투과벽체와 유수실 후면의 불투과벽체로 각각 구성되기 때문에 각각은 위상차를 가 지고 1과 2지점에서의 파에 영향을 미친다. 정수면에 위치하는 3과 6지점에서는 파곡부분이 통과할 때 공기중으로 들어나기 때문에 부압은 거의 나타나지 않고 정압이 크게 나타난다. 각 지점에서 최대파압 의 크기를 살펴보면 1->2->3지점으로 갈수록, 그리고 4->5->6지점으로 갈수록 증가하므로 정수면에서 가 장 큰 파압을 나타내는 것을 알 수 있다. 수리실험결과 및 수치해석결과를 비교하면 6지점의 파곡부분 에서 약간의 차이는 인정되지만 전반적으로 대응성은 매우 탁월한 것으로 판단된다. 따라서, OLAFOAM 에 의한 수치해석결과는 슬리트케이슨의 전면 유공벽과 유수실 후면벽에 작용하는 파압의 변동과정에서 실험치를 고정도로 재현하므로 슬리트케이슨과 유사한 형태를 갖는 원형유공형케이슨으로의 적용성이 높은 것으로 판단된다.



Fig. 6.4. Snapshot of waves acting on slit caisson breakwater.



Fig. 6.4는 슬리트케이슨 주변에서 수위의 3차원적인 시·공간변화과정을 가시화한 결과이다. 그림을 살펴보면 입사파에서 파봉 근방의 위상에서 파가 전면 유공부로 유입되고, 반대로 파곡 근방의 위상에 서 전면 유공부로 다시 유출되는 일련의 시간변동에 따른 수위변동과정을 시각적으로 확인할 수 있다.

6.2 계산조건

Collection @ kmou

Fig. 6.5와 같은 일정수심 *h*=10.1m를 갖는 3차원파동장에 설치된 원형유공케이슨 방파제를 대상으로 3차원수치파동수조를 구성하였다. 수조의 크기는 폭 19.2m, 높이 22m이며, 길이는 반사율을 측정하기 위 해 조파판과 구조물 사이 2*L* (*L* : 파장), 구조물 길이 42m, 구조물 배후에서 수조 끝단까지 55m를 고려 하여 전체 2*L*+97m로 구성되었다. 그리고, 수조 끝단에는 반사파를 제어하기 위해 감쇠영역을 적용하였 다. 바닥경계조건 및 양측면경계는 Slip 조건이고, 격자는 Δ*x*=0.5m, Δ*y*=0.4m, Δ*z*=0.5m의 크기를 가지 며, 적용한 난류모델은 LES 모델이다.

Fig. 6.6은 케이슨의 제원을 나타내며, 케이슨의 폭은 20m, 높이는 11.2m이며, 전면 유공벽에 해측으 로 직경 1.2m의 원형 구멍이, 육측으로 직경 0.6m의 원형 구멍이 원뿔 관통형을 형성하고 있다. 정수면 근방에 형성되는 일반적인 슬리트케이슨과는 달리 본 케이슨은 원형유공이 케이슨 하단부터 천단까지 형성되어 있고, 유공율은 해측에서 44.18%, 육측에서 11.04%이다. 유수실은 0.8m의 격벽으로 총 6개로 나눠져 있고, 각 유수실의 길이는 2.4m이며, 폭은 1, 2, 3, 4, 5, 6m로 각각 구성되었다. 또한, 유수실은 상치구조물이 없고, 케이슨 바닥부터 천단까지 연결되어 있다. 유수실 격벽은 폭 0.5m, 길이 1.8m의 직 사각형 유공부를 가지며, 폭이 1m일 때 유공부는 1열로, 폭이 1m 씩 증가할 때 유공부의 열이 하나씩 추가되며, 유수실 폭이 6m일 때는 6열의 유공부로 구성된다. Fig. 6.5에 나타내는 바와 같이 케이슨 아래 는 높이 1.6m의 기초사석과 그 위에 두께 1.2m의 피복석이 놓여 있고, 전·후의 비탈면은 1:1.5의 경사를 가진다. 기초사석은 공극률 ϕ =0.28, 중앙입경이 D_{50} =2.75cm이고, 피복석은 공극률이 ϕ =0.3, 중앙입경이 D_{50} =20cm인 투과성 재료이며, 저항계수로는 Jensen et al. (2014)이 제시한 α =500, β =2.0의 값을 적용하였다.

본 연구에서는 유수실과 구조물 전면에 유공부가 없는 혼성방파제의 경우도 동일한 조건 하에 수치 해석을 수행하여 월파량, 반사율 및 파압분포 등의 결과를 본 연구의 원형유공케이슨의 경우와 비교하 였으며, 이하에서는 유수실 폭이 1.7m인 경우를 CASE 1, 폭이 2.7m인 경우를 CASE 2, 폭이 3.7m인 경 우를 CASE 3, 폭이 4.7m인 경우를 CASE 4, 폭이 5.7m인 경우를 CASE 5, 폭이 6.7m인 경우를 CASE 6 로 나타내었고, 혼성방파제의 경우를 CASE 0으로 나타내었다.



Fig. 6.5. Illustrative sketch of wave basin for numerical analysis.



Table 6.1에 나타낸 바와 같이 불규칙파랑의 조건은 파고변화에 따른 구조물의 성능비교를 위하여 유 의주기 (*T*_{1/3}=11s)를 고정하고, 유의파고를 *H*_{1/3}=2.5, 3.0, 3.5m로 조정하였으며, 주기변화에 따른 구조물 의 성능을 비교하기 위하여 유의파고 (*H*_{1/3}=3.0m)를 고정하고, 유의주기를 *T*_{1/3}=11.0, 13.0, 15.0s로 조정 하였다.

Table 6.1. Incident wave condition.

| | $H_{\!1/3}$ | $T_{1/3}$ | | | |
|--|----------------------------------|-------------------|--|--|--|
| Condition | 2.5, 3.0, 3.5m | 11.0, 13.0, 15.0s | | | |
| Wave theory | Irregular : Linear superposition | | | | |
| Number of waves | 150 | | | | |
| Spectrum Modified Bretshneider-Mitsuyasu (Goda, 19 | | | | | |



Fig. 6.7은 OpenFOAM[®]이 제공하는 SnappyHexMesh를 사용하여 케이슨 전면 유공벽 주변 및 유수실 의 격자를 구성한 예를 나타낸다. SnappyHexMesh는 castellatedMeshControls, snapControls, addLayerControls 의 단계를 거쳐 최종적으로 수렴조건에 맞는 격자를 만들어 주는 기능으로, 선행 단계로 blockMesh 기능 으로 계산영역의 기본 격자를 생성한 다음 사용된다. SnappyHexMesh의 3단계를 간략하게 설명하면, catellatedMeshControls는 blockMesh에서 생성된 기본 격자를 정제(refine)하는 과정으로, 불투과 구조물에 해당되는 격자를 제거하는 기능이다. 또한, 정제 단계(refine level)에 따라 불투과 구조물에 해당되는 격 자를 분할하여 구조물 경계를 상세하게 표현할 수 있다. snapControls는 casteelatedMeshControls에 의해 구 성된 격자의 꼭지점 좌표들을 불투과 구조물의 경계로 이동시키는 과정을 반복적으로 수행하는 기능으 로, 곡면이나 경사가 있는 구조물을 매끄럽게 표현할 수 있다. addLayerControls는 불투과 구조물 경계에 특정 개수의 경계층을 삽입하는 기능이다. 본 연구에는 castellatedMeshControls와 snapControls 기능을 이 용하여, 전면유공벽과 유수실을 표현하였다.



Fig. 6.7. Mesh generation around structure using SnappyHexMesh utility.

6.3 수치해석의 결과

6.3.1 월**파량의 비교**

Fig. 6.8은 단위폭당 월파량을 나타낸 것이며, 케이슨 폭을 따라 케이슨 천단의 끝단에서 수조 상부경 계까지 각 격자에 유속계를 설치하고, 각 유속계에서 산출된 유량을 합한 후에 경과시간과 케이슨 폭 19.2m를 나누어 단위폭당 월파량으로 산정하였다. Fig. 6.8(a)는 유의주기 ($T_{1/3}$ =11.0s)를 고정하고, 유의 파고를 $H_{1/3}$ =2.5, 3.0, 3.5m로 변화시켜 산정한 결과이고, Fig. 6.8(b)는 유의파고 ($H_{1/3}$ =3.0m)를 고정하고, 유의주기를 $T_{1/3}$ =11.0, 13.0, 15.0s로 변화시켜 산정한 월파량이다. 그림을 살펴보면 각 케이스에서 월파 량은 Q=0.0012~0.117 $m^3/s/m$ 의 범위 내에 존재하며, 적용된 모든 케이스의 원형유공케이슨 방파제가 혼성방파제보다 월파량이 작다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 기본적으로 본 원형유공케이슨 방파제가

월파량이 감소하는 결과를 나타내며, 또한 유의파고가 클수록, 유의주기가 길수록 월파량이 증가하는 경 향을 보인다. 이러한 경향 역시 전술한 반사율과 밀접한 연관성을 가지기 때문이다. 또한, 월파량은 주 기에 비해 파고에 보다 민감함을 확인할 수 있다.



Fig. 6.9는 CASE 1, CASE 3 및 CASE 6에서 유의파고 $H_{1/3}$ =3.5m, $T_{1/3}$ =11.0s의 경우에 구조물 주변에 서 수위의 시·공간적인 3차원변화과정을 나타낸 것이다. 그림으로부터 전면 유공부를 통한 입사파의 유수 실로 유입, 반사 및 유출, 그리고 주변에서 파랑변형과 천단상으로 월파과정 등을 시각적으로 명확히 확인 할 수 있다. 또한, 유수실 폭이 넓을수록 케이슨 천단 상으로의 월파량이 작아진다는 것도 확인할 수 있다.

6.3.2 반사율의 비교

Collection @ kmou

Fig. 6.10은 유수실 폭에 따른 반사율 K_R의 변화를 나타낸 것으로, 전술한 Fig. 6.8과 같이 Fig. 6.10(a)는 유의주기 (T_{1/3}=11.0s)를 고정하고, 유의파고를 H_{1/3}=2.5, 3.0, 3.5m로 변화시킨 경우이고, Fig. 6.10(b)는 유의파고 (H_{1/3}=3.0m)를 고정하고, 유의주기를 T_{1/3}=11.0, 13.0, 15.0s로 변화시킨 경우이다. 반 사율을 추정하기 위하여 케이슨 전면으로부터 L+h (h : 수심)만큼 떨어진 지점에 파고계를 간격 0.5L 로 수조의 길이방향으로 두 열 (하나의 열에 수조의 폭방향으로 5개의 파고계를 설치하고 독치를 평균 하였음)로 설치하였으며, Goda and Suzuki (1976)에 의한 2점법을 사용하여 반사율을 추정하였다. Fig. 6.10에는 Tanimoto et al. (1976)에서 의한 얻어진 반사율의 상한치와 하한치도 같이 병기하였으며, 동시 에 유수실 폭에 따른 결과를 명확하게 구분할 수 있도록 상세도도 추가하였다. 여기서, Tanimoto et al. (1976)은 유수실 폭 B와 파장 L과의 비 B/L에 대해 B/L>0.05의 경우에만 실험을 수행하였고, B/L <0.05의 경우에는 추세선을 이용하여 반사율을 추정하였다.



Fig. 6.9. Snapshots of wave overtopping on circular perforated caisson breakwater.

본 연구에서는 B/L=0.012 (T_{1/3}=15.0s, B=1.7m)-0.065 (T_{1/3}=11.0, B=6.7m)의 범위에 속하며, Fig. 6.10(a)는 B/L=0.065의 경우이고, Fig. 6.10(b)는 B/L=0.05의 경우이다. 그림을 살펴보면 각 케이스에서 반사율은 K_R=0.567-0.731의 값을 나타내며, 모든 케이스가 Tanimoto et al. (1976)에 의한 실험결과의 범위 에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 입사파고가 중가할수록 감소하고, 주기가 길수록 반사율이 증가하는 경향을 나타낸다. 유수실 폭의 변화에 따른 반사율을 비교하면 유수실 폭이 넓을수록 감소하 며, 유공과 유수실이 없는 혼성제 CASE 0의 경우는 원형유공케이슨의 다른 케이스보다 상대적으로 큰 반사율을 나타낸다. 이러한 결과는 유수실 내에 파랑에너지가 포획되고, 좌우 격벽 및 전면벽 유공부 배 면의 유수실 내에서 와류 및 난류로 인한 파랑에너지의 소산이 커지고, 이로 인하여 반사율이 작아지기 때문이며, 본 연구의 계산범위 내에서 이러한 현상은 유수실 폭이 넓을수록 보다 현저하게 발생되는 것 으로 판단된다. 또한, 월파량의 특성과 비교하면 전술한 바와 같이 월파량이 많을수록 전반적으로 반사 율이 작아지는 결과를 확인할 수 있다. 즉, 월파량이 많다는 것은 구조물 배후로 전달율이 크다는 것을 나타내고, 따라서 파랑에너지보존으로부터 반사율이 작아지는 것을 나타낸다.



Fig. 6.10. Reflection coefficient for circular perforated caisson breakwater.

6.3.3 파압분포의의 비교

Fig. 6.11은 전면 유공벽에 작용하는 최대파압과 유수실 후면벽에 작용하는 최대파압의 측정위치를 나타낸 것이다. 전면 유공벽에 작용하는 파압은 유공이 없는 케이슨 바닥에서부터 상단까지 폭방향으로 5열에서 측정되었고, 유수실 후면벽에 작용하는 파압은 각 유수실에서 3열로 바닥에서부터 상단까지 측 정되었으며, 각각을 평균하여 파압을 산출하였다. 산정된 파압은 $hog H_{1/3}$ 로 무차원화되었고, 연직깊이 Z 는 수심 h로 무차원화되었다.



caisson breakwater

breakwater

Fig. 6.11. Measuring positions of wave pressure.

1945

| Condition | $H_{\mathrm{max}output}$ | $H_{ m maxoutput}/H_{ m 1/3}$ | $H_{\rm max}(H_{\rm max}=1.8H_{1/3})$ | $H_{\rm max}/H_{1/3}$ |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| $H_{1/3}$ =2.5m ; $T_{1/3}$ =11s | 3.82m | 1.53 | 4.5m | 1.80 |
| $H_{1/3}$ =3.0m ; $T_{1/3}$ =11s | 4.87m | 1.62 | 5.4m | 1.80 |
| $H_{1/3}$ =3.5m ; $T_{1/3}$ =11s | 4.66m | 1.33 | 6.3m | 1.80 |
| $H_{1/3}$ =3.0m ; $T_{1/3}$ =13s | 4.31m | 1.44 | 5.4m | 1.80 |
| $H_{1/3}$ =3.5m ; $T_{1/3}$ =15s | 4.17m | 1.39 | 5.4m | 1.80 |

Table 6.2. Maximum wave height for Goda and Takahashi equations.

Table 6.2는 수치해석결과와 Goda 식 (Goda, 2000 ; 전면벽에서 파압) 및 Takahashi 식 (Takahashi et al., 1992, 1996 ; Tanimoto and Takahashi, 1994 ; 유수실 후면벽에서 파압)과를 비교하기 위해 구조물이 설치되지 않은 진행파 조건 하에서 구조물 설치위치에서 얻어진 수위변동에 영점상향교차법을 적용하여 최대파고 $H_{\max output}$ 을 산출하였으며, 이로부터 최대파고와 유의파고의 비 $H_{\max output}/H_{1/3}$ 도 산출·병기 하였다. 또한, Goda 식 및 Takahashi 식에서 최대파고는 대상으로 하는 파군 중에서 가장 큰 파력이 작 용하는 최대파를 적용하며, 이는 출현확률이 해역에 따라 일정치로 나타나지 않는 점을 고려하여 유의 파고 $H_{1/3}$ 의 1.8배에 해당하는 값을 사용하기 때문에 $H_{\max} = 1.8 H_{1/3}$ 의 값도 병기하였다. 이하의 Fig.



16~Fig. 22는 본 수치해석결과와 Goda 식 및 Takahashi 식에 의한 결과를 비교한 것이며, 그림에서는 Goda 식 및 Takahashi 식의 적용시 구조물이 설치되지 않은 조건 하에서 구조물 설치위치에서 산출된 $H_{\max xoutput}$ 과 $H_{\max} = 1.8H_{1/3}$ 을 적용한 결과도 함께 제시한다.

(1) 전면유공벽에 작용하는 최대파압

1) 유의파고의 변화

Fig. 6.12는 유의주기 (T1/3=11.0s)를 고정하고, 유의파고의 변화에 따른 전면 유공벽에 작용하는 최대 파압분포를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 6.12(a)는 유의파고 H_{1/3}=2.5m인 경우, Fig. 6.12(b)는 유의파고 H_{1/3}=3.0m인 경우, Fig. 6.12(c)는 유의파고 H_{1/3}=3.5m인 경우이다. 그림을 살펴보면 전체적으로 무차원 파압은 혼성방파제의 직립부에 작용하는 Goda 파압분포와 유사하게 정수면에서 가장 큰 값을 나타내고. 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소를 나타낸다. 각 케이스 별로 정수면에서 무차원파압을 비교하면 유의파고 H_{1/3}=2.5m인 경우는 p/pgH_{1/3}=1.41~1.56의 범위, 유의파고 H_{1/3}=3.0m인 경우는 p/pgH_{1/3} =1.41~1.48의 범위, 유의파고 H_{1/3}=3.5m인 경우는 p/pgH_{1/3}=1.18~1.44의 범위에 속하며, 입사파고가 클 수록 정수면에서 무차원파압이 작아지는 경향을 나타낸다. 유의파고 H1/3=3.5m에서 무차원파압이 상대 적으로 많이 작아지는 것은 입사파가 쇄파된 후에 구조물에 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 다음으 로, 유수실 폭이 넓을수록 무차원파압이 작아지는 것을 알 수 있으며, 이는 유수실 폭이 증가하면 파랑 에너지의 포획이 보다 많게 되고, 유수실 내에서 외류 및 난류 등으로 인한 파랑에너지 소산이 보다 많 아 반사율이 작아지기 때문이다. 이러한 유수실 폭에 따른 파압의 결과는 단일 및 이중 유수실 유공케 이슨에 작용하는 수평파력을 수리실험을 통해 측정·비교한 Oh et al.(2013)의 결과와 동일한 경향을 보인 다. Goda 식과 비교하면 최대파고를 구조물이 설치되지 않은 조건 하에서 구조물 설치위치에서 산출된 최대파고 $H_{\max output}$ 을 적용한 경우 CASE 0, CASE 1, CASE 2 및 CASE 3은 불안정측에 놓이지만 최대 파고로 유의파고 $H_{1/3}$ 을 1.8배한 H_{max} 를 적용하면 모두 안정측에 놓인다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 원형유공케이슨 방파제의 전면 유공벽에 작용하는 파압 산정에 $H_{\max} = 1.8 H_{1/3}$ 을 고려한 Goda 파압분포를 적용하면 보수적인 설계로 되지만 과다설계로 될 가능성이 매우 높다는 것을 나타낸 다.





Fig. 6.12. Comparison of pressure acting on the front wall of the circular perforated caisson breakwater ($T_{1/3}$ =11.0s).

2) 유의주기의 변화

Collection @ kmou

Fig. 6.13은 유의파고 ($H_{1/3}$ =3.0m)를 고정하고, 유의주기의 변화에 따른 전면 유공벽에 작용하는 최대파 압분포를 나타낸 것이며, Fig. 6.13(a)는 유의주기 $T_{1/3}$ =11.0s인 경우, Fig. 6.13(b)는 입사파고 $T_{1/3}$ =13.0s인 경우, Fig. 6.13(c)는 입사파고 $T_{1/3}$ =15.0s인 경우이다. 전술한 Fig. 6.12와 같이 Goda 파압분포와 유사하게 정 수면에서 가장 큰 값을 나타내며, 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소를 나타낸다. 각 케이스 별로 정수 면에서 무차원파압을 비교하면, 유의주기 $T_{1/3}$ =11.0s인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.41~1.48의 범위, 입사파고 $T_{1/3}$ =13.0s인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.57~1.41의 범위, 입사파고 $T_{1/3}$ =15.0s인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.38~1.64의 범위에 놓이고, 유의주기가 길어질수록 정수면에서 무차원파압이 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 6.12와 같이 유수 실 폭이 넓을수록 무차원파압이 작아지며, Goda 식과 비교하면 최대파고 $H_{\max output}$ 을 적용한 경우는 불안 정측에 속하는 케이스가 있지만 최대파고 H_{\max} 를 적용하면 모두 안정측에 속하는 것을 알 수 있다.



Fig. 6.13. Comparison of pressure acting on the front wall of the circular perforated caisson breakwater ($H_{1/3}$ =3.0m).



(2) 케이슨 저면에 작용하는 최대양압

1) 유의파고의 변화

Fig. 6.14는 유의주기 (T_{1/3}=11.0s)를 고정하고, 유의파고의 변화에 따른 케이슨 저면에 작용하는 최대 양압분포를 나타낸 것이며, Fig. 6.14(a)는 유의파고 H_{1/3}=2.5m인 경우, Fig. 6.14(b)는 유의파고 H_{1/3} =3.0m인 경우, Fig. 6.14(c)는 유의파고 H_{1/3}=3.5m인 경우이다. 그림을 살펴보면 모든 케이스가 직선분포 를 나타내지만 수치해석결과는 항내측 저면 끝단에서 무차원양압이 p/pgH_{1/3}=0.15~0.19의 값을 나타내 며, 이는 p/pgH_{1/3}=0인 Goda 식의 결과와는 큰 차이를 나타낸다. 항외측 저면 끝단에서 무차원양압은 p/pgH_{1/3}=0.75~0.96의 값을 나타내며, 최대파고 H_{maxoutput} 및 H_{max}를 적용한 Goda 식의 결과는 전체 적으로 안정측에 속한다. 또한, 유수실 폭이 넓을수록 무차원양압이 작아지는 경향을 나타내며, 이는 피 복석과 기초사석을 침투하는 과정에서 파랑에너지가 감쇠되기 때문이다. 여기서, 본 연구의 원형유공케 이슨 방파제의 케이슨 하부에 작용하는 양압의 산정에 H_{max} = 1.8H_{1/3}을 고려한 Goda 양압분포를 적 용하면 보수적인 설계로 되지만 과다설계로 될 가능성이 높다는 것을 또한 알 수 있다.



2) 유의주기의 변화

Collection @ kmou

Fig. 6.15는 유의파고 (H_{1/3}=3.0m)를 고정하고, 유의주기의 변화에 따른 케이슨 저면에 작용하는 최대 양압분포를 나타낸 것이며, Fig. 6.15(a)는 유의주기 T_{1/3}=11.0s인 경우, Fig. 6.15(b)는 유의주기 T_{1/3} =13.0s인 경우, Fig. 6.15(c)는 유의주기 $T_{1/3}$ =15.0s인 경우이다. 그림을 살펴보면 전술한 Fig. 6.14와 같이 모든 케이스가 직선분포를 나타내지만 수치해석결과는 항내측 저면 끝단에서 무차원양압이 $p/\rho g H_{1/3}$ =0.17~0.22의 값을 나타내며, 이는 $p/\rho g H_{1/3}$ =0인 Goda 식의 결과와는 큰 차이를 나타내고, 항외측 저면 끝단에서 $p/\rho g H_{1/3}$ = 0.82~1.08의 값을 나타낸다. 또한, 유수실 폭이 넓을수록 무차원양압이 작아지는 경 향을 볼 수 있다. 여기서, 최대파고 H_{\max} 및 H_{\max} 를 적용한 경우는 전체적으로 안정측에 속한다.



(3) 유수실 후면벽에 작용하는 최대파압

1) 유의파고의 변화

Collection @ kmou

Fig. 6.16은 유의주기 (T_{1/3}=11.0s)를 고정하고, 유의파고의 변화에 따른 유수실 후면벽에 작용하는 최 대파압분포를 나타낸 것이며, Fig. 6.16(a)는 유의파고 H_{1/3}=2.5m인 경우, Fig. 6.16(b)는 유의파고 H_{1/3} =3.0m인 경우, Fig. 6.16(c)는 유의파고 H_{1/3}=3.5m인 경우이다. 그림을 살펴보면 전체적으로 무차원파압 은 직립 소파케이슨의 직립부에 작용하는 Takahashi 파압분포 (Takahashi et al., 1992, 1996; Tanimoto and Takahashi, 1994)와 유사하게 정수면에서 가장 큰 값을 나타내고, 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소 를 나타낸다. 각 케이스 별로 정수면에서 무차원파압을 비교하면 유의파고 H_{1/3}=2.5m인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.30~1.54의 범위, 유의파고 H_{1/3}=3.0m인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.32~1.44의 범위, 유의파고 H_{1/3} =3.5m인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.12~1.32의 범위에 속하며, 전술한 바와 같이 유의파고 H_{1/3}=3.5m인 경우는 쇄파된 파가 구조물에 작용하기 때문에 무차원파압이 상대적으로 많이 작아지는 것으로 판단된다. 다음
으로, 유수실 폭이 넓을수록 무차원파압이 작아지며, 이는 전술한 바로 유수실로 유입되는 파랑에너지가 유수실 내에서 소산이 크게 되고, 또한 유수실 폭이 넓을수록 이러한 경향은 보다 현저히 발생되기 때 문인 것으로 판단된다. Takahashi 식과 비교하면 모두 안정측에 속하는 것을 알 수 있다.



Fig. 6.16. Comparison of pressure acting on the inner wall of the circular perforated caisson breakwater ($T_{1/3}$ =11.0s).



Fig. 6.17. Comparison of pressure acting on the bottom of the circular perforated caisson breakwater $(H_{1/3}=3.0\text{m}).$

2) 유의주기의 변화

Collection @ kmou

Fig. 6.17은 유의파고 (H_{1/3}=3.0m)를 고정하고, 유의주기의 변화에 따른 유수실 후면벽에 작용하는 최 대파압분포를 나타낸 것이며, Fig. 6.17(a)는 유의주기 T_{1/3}=11.0s인 경우, Fig. 6.17(b)는 유의주기 T_{1/3} =13.0s인 경우, Fig. 6.17(c)는 유의주기 T_{1/3}=15.0s인 경우이다. 그림을 살펴보면 전체적으로 무차원파압 은 직립 소파케이슨의 직립부에 작용하는 Takahashi 파압분포 (Takahashi et al., 1992, 1996; Tanimoto and Takahashi, 1994)와 유사하게 정수면에서 가장 큰 값을 나타내며, 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소 를 나타낸다. 각 케이스 별로 정수면에서 무차원파압을 비교하면 유의주기 $T_{1/3}$ =11.0s인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.32~1.44의 범위, 유의주기 $T_{1/3}$ =13.0s인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.31~1.48의 범위, 유의주기 $T_{1/3}$ =15.0s인 경우는 $p/\rho g H_{1/3}$ =1.25~1.55의 범위에 속하며, 전술한 Fig. 6.16과 같이 유수실 폭이 넓을수록 무차원동파압이 작아지고, Takahashi 식과 비교하면 모두 안정측에 속하는 것을 알 수 있다.

6.4 결언

Collection @ kmou

본 장에서는 OLAFOAM을 이용하여 규칙과동장 하에서 3차원슬리트케이슨에 의한 파압변동에 대한 기존의 실험결과와의 비교·검토 및 3차원수치과동수조에서 불규칙과를 조과하여 목표한 불규칙과의 재 현과 주파수스펙트럼을 비교·검토하여 OLAFOAM의 타당성을 검증하였다. 이에 근거하여 OLAFOAM으 로부터 슬리트케이슨과 유사한 본 연구의 원형유공케이슨이 설치된 3차원수치과동수조에 불규칙과를 조 파하여 유수실 폭과 유의파고 및 유의주기의 변화 등에 따른 원형유공케이슨에서 월파량, 반사율, 파압 분포 및 그들의 상호연관성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기 술한다.

(1) 월파량에 대해, 유수실 폭이 넓을수록 월파량이 감소하며, 입사파고가 클수록 또는 주기가 길수록 월파량은 증가한다.

(2) 반사율에 대해, 유수실 폭의 변화와 파고 및 주기의 변화에 상관없이 모두 Tanimoto et al. (1976)의
실험치의 범위 내에 속하며, 유수실 폭이 넓을수록, 파고가 증가할수록 감소하고, 주기가 길수록 증가한
다. 이는 월파량과 비교하여 월파량이 많을수록 반사율이 작아지는 결과를 나타낸다.

(3) 파압분포에 대해, 일반적으로 유수실 폭이 넓을수록 전면 유공벽에 작용하는 파압이 작아지며, 유 수실 폭이 좁은 경우 Goda 식 (Goda, 2000)보다 불안정측에 속하는 경우도 있지만, $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ 을 적 용하면 모두 안정측에 속한다. 케이슨 저면에 작용하는 양압은 Goda 식과는 상이하게 항내측 케이슨 끝 단에서 0이 아닌 값을 나타내지만 전체적으로는 Goda 식에 의한 두 결과가 안정측에 속한다. 유수실 후 면벽에 작용하는 파압도 $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ 을 적용한 Takahashi 식 (Takahashi et al., 1992, 1996; Tanimoto and Takahashi, 1994)의 결과가 안정측에 속한다. 따라서, Goda 식과 Takahashi 식에 의한 파압 산정결과 를 적용하는 경우는 보수적인 것으로 되지만 과다설계로 될 소지가 매우 높다.



References

- 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. (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.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1977). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, ICCE-1976, ASCE, 828-845.
- 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.
- Oh, S. H., Ji, C. H., Lee, D. S., Oh, Y. M. and Jang, S. C. (2013). Comparison of horizontal wave forces due to regular waves acting on the single- and double-chamber caisson, Proceedings of Coastal and Ocean Engineering in Korea, 1-4 (in Korean).
- Takahashi, S. (1996). Design of vertical breakwaters, Reference Document No. 34, Port and Harbour Research Institute, Japan.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, S. (1992). Experimental study of impulsive pressures on composite breakwaters. Report of Port and Harbour Research Institute, 31(5), 35-74.
- Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M. and Osato, M. (1976). An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls, Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst, 246 (in Japanese).
- Tanimoto, K. and Takahashi, S. (1994). Design and construction of caisson breakwaters-the Japanese experience, Coastal Engineering, 22, 57-77.
- Wang, Y. X., Ren, X. Z., Dong, P. and Wang, G. Y. (2011). Three-dimensional numerical simulation of wave interaction with perforated quasi-ellipse caisson, Water Science and Engineering, 4(1), 46-60.



ਗ7ਿਲ <u></u>ਭਵ

Collection @ kmou

본 논문에서는 OpenFOAM[®]을 기반으로한 OLAFOAM을 적용하여 해안구조물의 모델링과 그의 적용성을 다루기 위해 제1장에서 기술한 바와 같이 투과성을 대표하는 잠제와 격자블록으로 결속된 방파제인 원형유공 방파제를 대상으로 해안구조물의 주변에서 파랑특성의 수치해석을 진행하였다. 첫 번째 주제인 잠제에 대해서 는 크게 3개의 부분으로 구성하여, 제3장~제5장에 기술하였으며, 두 번째 주제인 원형유공방파제에 대해서는 제6장에 기술하였다.

제3장에서는 파와 흐름의 공존장에 설치된 2차원투과성잠제에 대해 배후사면을 모래 혹은 자갈로 고려한 경우 흐름방향 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 파고, 주파수스펙트럼, 쇄파, 평균유속 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 면밀히 검토하였다. 결과로부터 흐름방향에 따른 파고 및 H_{rms} 의 변화는 난류운동에너지와 밀접한 관계를 가지는 것 등의 중요한 사실을 알 수 있었다.

제4장에서는 규칙과 및 불규칙과랑하 3차원투과성잠제를 대상으로 개구폭과 잠제와 배후의 해안선거리에 따른 잠제 주변에서 형성되는 파고 및 H_{rms} 분포와 같은 수면변동의 특성과 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토하였다. 결과로부터 잠제의 개구폭이 넓을수록 강한 연안류가 형성됩과 동시에 수송유량이 증가하고, 개구폭이 좁을수록 연안류가 수렴되 는 지점이 제간부에서 제두부로 이동함을 확인하였으며, 이로부터 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성원인 을 파악할 수 있었다. 또한, 연안류는 해안선에서 난류운동에너지의 변화와 밀접한 관계를 가지는 것을 알 수 있었다.

제5장에서는 제3장과 제4장의 확장된 연구로 파와흐름의 공존장에 설치된 3차원투과성잠제에 관해 흐름방 향에 따라 변화되는 잠제 주변에서 파고 및 H_{rms} 분포와 같은 수면변동의 특성 및 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토하였다. 결과로부 터 흐름방향에 따른 잠제 제간부 배후에서 파고변화는 난류운동에너지와 밀접한 관계를 가지며, 흐름이 존재하 는 경우는 흐름이 없는 경우보다 약한 연안류가 형성됨과 동시에 수송유량이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

제6장에서는 슬리트케이슨제와 유사한 원형유공케이슨 방파제가 설치된 일정수심의 3차원불규칙파수치파 동수조에서 유수실 폭과 유의파고 및 유의주기의 변화에 따른 원형유공케이슨 방파제에서 월파량, 반사율, 파압분포 및 그들의 상호연관성을 검토 · 분석하였으며, 이로부터 파압분포는 불투과연직벽체에 대한 Goda 식 및 슬리트케이슨제에 대한 Takahashi 식의 결과보다 작은 결과를 나타내었으며, 반사율은 원형인 유공을 갖는 케이슨방파제의 반사율을 측정한 Tanimoto의 실험치의 변동범위 내에 존재하는 것을 알 수 있었다. 이상의 각 장에서 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 다음에 기술한다.

7.1 제3장 : 파-흐름 공존장내 2차원잠제 주변의 파랑특성

(1) 흐름의 영향에 따른 파고 및 H_{rms}파고에 대해, 배후사면의 모래 혹은 자갈의 여부에 관계없이 잠 제의 전면부에서는 역방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 H_{rms}파고가 높지만 잠제 천단상의 전반 부에서 후면부까지는 순방향흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높게 나타난다.

(2) 쇄파형상에 대해, 규칙파동장하에서는 배후사면의 모래 혹은 자갈의 여부 및 흐름의 방향에 관계 없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형 쇄파를 나타내며, 순방향의 흐름의 경우는 초기에는 권파향 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타내며, 불규칙파동장하에서는 배후사면이 모래인 경우는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄파를 나타내며, 순방향흐름의 경우는 초기에는 권파형쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형쇄파를 동시 에 나타낸다. 배후사면이 자갈인 경우에는 흐름방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형쇄 파만을 나타내지만 그의 규모는 모래의 경우보다 약하다.

(3) 평균유속에 대해, 규칙파동장하에서는 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 흐름이 없는 경우와 순방향흐름의 경우에 잠제 전면 비탈면 앞에서 반시계방향의 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 강하며, 불규칙파동장하에서는 배후사면이 모래 혹은 자갈에 관계없이 순방 향흐름의 경우에만 잠제 전면의 바탈면 앞에 반시계방향의 순환셀이 형성되고, 잠제 전면의 해저면에서 해측으로 강한 유속이 발생하며, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우, 흐름이 없는 경우의 순으로 유 속이 강해진다. 이로부터 흐름방향에 따라 잠제 전면 해저면에서 쇄굴의 여부 및 정도를 예상할 수 있 을 것으로 판단된다.

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

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

Collection @ kmou

7.2 제4장 : 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성

(1) 파고 및 H_{rms} 에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 파고는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 파고가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 파고감소율이 상대적으로 크게 나타났다. 하지만, 잠제 위치에 따른 결과에서는 파고의 변화가 크지 않고, 파고감소율도 대동소이한 경향을 나타 내였다.

(2) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭 및 자제 위치에 상관없이 제두부 부근 에서 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여 개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인 하였다. 또한, 규칙파동장하에서는 개구폭이 넓어질수록 해안선 부근에서 해안선과 평향한 방향으로 순 환셀의 크기가 커지다가 연안류 형성에 관여한 후에 다시 크기가 작아지는 경향을 나타내었고, 불규칙 파동장하에서는 개구폭이 넓어질수록 개구폭 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되다가 연안류로 흐름이 바뀌는 것을 확인 할 수 있었다. 잠제 위치가 해안선에서 멀어질수록 사빈 경사면에서 해안선 에 직각방향으로 장축을 가진 타원형의 순환셀을 형성하며, 이는 연안류에 직접적인 영향을 미치는 것 으로 판단되었다.

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

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

7.3 제5장 : 파-흐름 공존장내 3차원잠제 주변에서 수면변동 및 내부유속변동의 특성

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

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



Collection @ kmou

(3) 잠제 배후의 개구부 및 제두부 근방에서의 연안류는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 역 방향흐름의 경우보다 악하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 수송 유량은 흐름이 없는 경우, 순방향흐름의 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 증가하였다. 이러한 결과로 부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

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

7.4 제6장 : 원형유공케이슨 방파제의 월파량, 반사율 및 작용파압

(1) 월파량에 대해, 유수실 폭이 넓을수록 월파량이 감소하며, 입사파고가 클수록 또는 주기가 길수록 월파량은 증가한다.

(2) 반사율에 대해, 유수실 폭의 변화와 파고 및 주기의 변화에 상관없이 모두 Tanimoto et al. (1976)의 실험치의 범위 내에 속하며, 유수실 폭이 넓을수록, 파고가 증가할수록 감소하고, 주기가 길수록 증가한 다. 이는 월파량과 비교하여 월파량이 많을수록 반사율이 작아지는 결과를 나타낸다.

がらたい

(3) 파압분포에 대해, 일반적으로 유수실 폭이 넓을수록 전면 유공벽에 작용하는 파압이 작아지며, 유 수실 폭이 좁은 경우 Goda 식 (Goda, 2000)보다 불안정측에 속하는 경우도 있지만, $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ 을 적 용하면 모두 안정측에 속한다. 케이슨 저면에 작용하는 양압은 Goda 식과는 상이하게 항내측 케이슨 끝 단에서 0이 아닌 값을 나타내지만 전체적으로는 Goda 식에 의한 두 결과가 안정측에 속한다. 유수실 후 면벽에 작용하는 파압도 $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ 을 적용한 Takahashi 식 (Takahashi et al., 1992, 1996; Tanimoto and Takahashi, 1994)의 결과가 안정측에 속한다. 따라서, Goda 식과 Takahashi 식에 의한 파압 산정결과 를 적용하는 경우는 보수적인 것으로 되지만 과다설계로 될 소지가 매우 높다.

Collection @ kmou

감사의 글

대학교에 입학하기 전 바다라고는 가족여행 때만 접했던 제가 대학교 학사과정을 지나 해안·항만관련 석사과정을 마치는데 있어서 그 시간 속에서 좀 더 열심히 하지 못한 후회가 많이 남습니다. 그러나, 대 학과 대학원생활을 하면서 저에게 많은 격려와 도움을 주신 분들께 진심으로 감사하게 생각합니다.

학부생활부터 지금까지 큰 가르침을 주시고, 부족한 저에게 대학원생활의 기회를 주시고, 석사과정동안 지도해주신 김도삼 교수님께 감사드립니다. 저의 완고한 고집과 표현도 잘 하지 않아 많이 힘드셨던 것 같이 죄송합니다. 교수님의 가르침과 평소의 말씀의 기억을 되새기고, 마음에 담아 교수님께서 제자로서 부끄럽지 않도록 노력하겠습니다.

학부과정에서부터 많은 가르침을 주신 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 경갑수 교수님, 이재하 교수님께 감사하고, 논문을 완성하기에 세심한 지도와 격려를 해주신 김태형 교수님, 동서대학교 김인철 교수님, 가톨릭관동대학교 이광호 교수님께 감사의 말씀 드립니다.

바쁘신 업무 중에서도 연구실 후배들을 위해 힘써주시는 김동욱 선배님, 안성욱 선배님, 박광수 선배님, 신동훈 선배님, 이귀섭 선배님, 정성호 선배님, 정욱진 선배님, 김창훈 선배님, 변찬식 선배님께 감사드리 며, 연구 중에 힘든 부분이 있을 때마다 도움을 주신 황웅기 선배님과 백동진 선배님, 김경진 선배님, 막 사회 초년생이 된 류흥원 선배님 그리고 아직 취업 준비중이지만, 원하는 목표를 달성할 우경환 선배님께 감사의 말씀을 드립니다. 같이 대학원에 입학한 상민이와 승효 그리고 일본에 있는 의석이 모두 취업의 성공을 기원하고, 연구실에서 항상 불같이 화만내고 잔소리만 했던 선배인 저를 잘 따라준 준형이와 군호 그리고 승진에게 미안한 마음을 전하며 이루고자하는 목표를 잘 이뤄질 수 있도록 기원합니다.

마지막으로, 항상 무뚝뚝하고 표현을 잘 하지 않는 아들, 오빠로써, 옆에서 응원해주시고 무사히 졸업 할 수 있도록 도와주신 가족에게 이 논문을 통해 사랑하고 죄송하고 감사한 마음을 전합니다.

사람은 자신이 노력한 결과를 이룰 수 있는 힘이 있다고 생각하며 이를 기적이라고 합니다. 대학원생 활을 하고 논문을 작성하면서 과연 잘 해낼 수 있을까라는 의구심이 많았습니다. 그러나, 위의 많은 분 들의 도움으로 저는 힘을 가지고 기적을 이루어 냈습니다. 저는 해안공학연구실을 벗어나 사회라는 현 실 속에서 새로운 기적을 만들고자 합니다. 이제는 저의 기적을 이루는 동시에 다른 분들의 기적을 위 해 도움을 주고자 합니다.

그리고, 미처 언급하지 못했던 모든 분들에게 진심으로 감사드리며, 건승하시고 항상 건강하시길 바랍니다.

2018년 2월 배주현 드림



- 137 -