

工學碩士 學位論文

CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과
월파랑 추산에 관한 연구

*Irregular Wave Analysis and Estimation of Wave Overtopping Rate
for Irregular Waves by Applying CADMAS-SURF*

指導教授 金 度 三

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

李 敏 起

*Irregular Wave Analysis and Estimation of Wave Overtopping Rate
for Irregular Waves by Applying CADMAS-SURF*

by

Min-Gi Lee

Department of Civil & Environmental Engineering

Graduate School

Korea Maritime University

ABSTRACT

In general, a generation method of irregular wave by linear combination of component waves obtained from linear wave theory is widely used. Especially, in case of generation of irregular wave by using CADMAS-SURF model, which can simulate the nonlinear wave due to the wave and structure interaction in a numerical wave tank including the wave overtopping process with acceptable accuracy, mean water level is rising from time to time because of nonlinear effect for generated wave at wave source position generally. In this study, in order to overcome rising problem of mean water level and stabilization of calculation from time to time in generation of irregular wave by using CADMAS-SURF, generation method of irregular wave is newly proposed. Namely, mass transport velocity for calculated horizontal velocity at wave source position is considered. Firstly, the rising problem of mean water level is checked by comparing calculated wave profile

from newly proposed generation method of irregular wave with target wave profile at wave source position. And then, numerically calculated variations of significant wave on a sloping sea bottom in irregular wave field are compared with measured results in hydraulic model experiments. Based on the validity in this study, the accuracy of wave overtopping rate is discussed by comparing computed results with measured results in hydraulic model experiments for vertical seawall located on a sloping sea bottom. Therefore, based on the comparison results of wave overtopping for irregular waves, newly proposed source generation of irregular wave is a powerful tool for estimating wave overtopping rate for irregular waves.

CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과 월파랑 추산에 관한 연구

李 敏 起

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科

요 약

일반적으로 불규칙파랑은 선형이론으로부터 얻어진 성분파를 선형중첩하여 발생시키는 방법이 널리 이용되고 있다. 특히, 비선형성의 파랑에 대해서도 고정도로 파랑특성을 예측할 수 있는 수치모델로 알려진 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 조파할 경우, 조파지점에서 발생하는 파의 비선형성을 고려하지 않고 있기 때문에 해석시간이 증가와 함께 평균수위가 상승되는 문제가 지적되고 있다. 본 연구에서는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토할 경우 조파지점에서 산정되는 물입자의 수평유속에서 질량수송속도를 미리 빼는 방법을 적용함으로써 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 조파방법의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 조파지점에서의 계산파형과 목표파형을 비교·검토하고, 다음으로 본 연구의 조파방법으로부터 계산된 경사수심역에서의 유의파고변화가 기존의 실험치와 상호 비교

되었다. 본 연구의 타당성을 바탕으로 경사해저지반에 설치된 호안을 대상으로 월파량을 산정한 결과 본 연구의 결과는 기존의 실험치를 잘 재현하고 있었으며, 그 정도가 매우 높은 것을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 조파방법은 불규칙파에 의한 월파량 산정에 매우 유용한 수법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

目 次

ABSTRACT	i
요약	iii
目次	v
List of Figures	vii
List of Photographs	ix
1. 서론	1
1.1 본 연구의 배경과 목적	1
1.2 본 연구의 구성	3
2. 수치해석이론	4
2.1 개요	4
2.1.1 지배방정식	5
2.1.2 이류방정식	7
2.1.3 격자설정방법	7
2.2 불규칙파의 조파	8
2.2.1 불규칙파의 조파방법	8
2.2.1 난수의 발생방법	10
2.2.2 주파수의 선택	12
3. 해석결과	13
3.1 개요	13
3.2 불규칙파의 조파검증	13

3.3 무반사모델	17
3.4 유의파고의 변화	19
3.5 월과량의 검토	20
3.5 월과현상의 재현	22
4. 결 론	33
<참고문헌>	35

List of Figures

Fig. 2.1 Schematic sketch of the numerical wave tank used in CADMAS-SURF	5
Fig. 2.2 Location of variables in a staggered mesh	8
Fig. 2.3 Random pahse angles	12
Fig. 3.1 Schematic sketch of numerical wave tank	14
Fig. 3.2 Comparison of target wave profile and calculated wave profile at source position by using original CADMAS-SURF	14
Fig. 3.3 Example of comparison between this study and CADMAS-SURF for horizontal velocity at wave source position	15
Fig. 3.4 Comparison of target wave profile and calculated wave profile at wave source position by using this study's method	15
Fig. 3.5 Spatial distribution of mean water level	16
Fig. 3.6 Comparison of frequency spectrum	17
Fig. 3.7 Non-reflection model for irregular wave	19

Fig. 3.8 Numerical setup for comparison of significant wave height 20

Fig. 3.9 Comparison between experimental and numerical results for spatial variation of significant wave height 20

Fig. 3.10 Numerical setup for wave overtopping over vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10 20

Fig. 3.11 Comparison between experimental and numerical results for wave overtopping rate over vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10 ($H_o/L'o=0.017$) 21

Fig. 3.12 Spatial distributions of irregular wave on a sea bottom slope of 1/10 ($hc/H_o=0.75, h/H_o=3.0$) 32

List of Photographs

Photo. 1.1 Wave overtopping	1
Photo. 1.2 Damage in inland	1

1. 서론

1.1 본 연구의 배경과 목적

최근, 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일 등의 내습빈도가 증가하고 있고, 이로 인해 기설치된 해안구조물의 피해사례 뿐만 아니라 월파로 인한 연안재해사례가 빈번히 보고되고 있다(日本土木學會海岸工學委員會, 1995; 대한토목학회, 2002; 한국토지공사, 2005). 특히, 사진. 1.1(부산광역시 영도 남항동)과 사진. 1.2(부산광역시 서구 송도해수욕장)에 보이는 바와 같이 고파랑이 호안구조물을 월파하는 경우에는 제내지내에는 막대한 재산피해가 발생할 우려가 높다. 따라서, 호안월파에 대한 방재대책의 수립이 시급히 요구되며, 그의 일환으로 수리실험 및 수치실험에 의한 다각도의 검토가 수행되고 있다(한국토지공사, 2005 ; 한국토지공사, 2006). 여기서, 수치실험은 막대한 시간과 경제적 면이 요구되는 수리실험을 대체한다는 점에서 최근 방재대책수립에 많이 이용되고 있다.

수치실험을 통하여 방재대책을 수립하는 경우 다양한 수치기법이 적용되고 있으며, 그 중 기존의 천해역모델인 천수방정식(Kobayashi and Wurjanto, 1990)이나 비선형천수방정식(Hu et al., 2000) 등은 자유수면의 거동특성을 정도 높게 평가할



Photo. 1.1 Wave overtopping



Photo. 1.2 Damage in inland

수 없고, 쇄파와 같은 복잡한 물리적 현상을 재현하기에는 다소 무리가 있다. 최근, 강비선형의 파랑 및 쇄파로 인한 복잡한 자유수면의 거동특성까지도 고정도로 해석할 수 있는 VOF(Volume of Fluid; Hirt and Nichols, 1981; 이하 VOF법)법을 활용한 연구가 증가 추세이며, 월파현상의 검토에까지도 적용되고 있다. 그러나, 월파에 대한 대부분의 연구는 규칙파를 대상으로 수치실험 및 수리실험이 수행되어 왔으며(한국토지공사, 2006; Shal et al., 2006), 불규칙파를 대상으로 한 연구는 극히 적은 것으로 판단된다. 일반적으로, 규칙파를 대상으로 산정된 월파량은 불규칙파를 적용하여 산정된 월파량과 비교하여 월파량에 상당한 차이가 있는 것으로 알려져 있다(Goda, 1985).

최근, 일본의 연안개발기술연구센터(沿岸開發技術研究センター, 2001)에서 개발한 수치파동수로 CADMAS-SURF(Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure; 이하 CADMAS-SURF)는 VOF법에 기초하여 자유수면을 추적하며, 월파현상의 재현이 가능하고 비선형성의 파랑에 대해서도 고정도로 파랑특성을 예측할 수 있는 수치모델로 규칙파뿐만 아니라 불규칙파에 대한 검토도 가능하다. 그러나, CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 해석시간이 증가됨에 따라 평균수위가 상승하는 문제가 지적되고 있다(沿岸開發技術研究センター, 2001). 따라서, 해석시간이 증가됨에 따른 평균수위의 상승으로 불규칙파의 검토는 다소 무리가 있을 수 있고, 대상으로 하는 불규칙파에 대한 검토의 결과를 과대평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하며, 동시에 문제로 지적되는 평균수위상승을 억제하여 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템을 소개한다. 본 연구의 불규칙파를 경사수심을 갖는 불규칙파동장에 적용하여 수심변동에 따른 유의파고변화를 실험치와 비교·검토함으로써 결과의 타당성을 논의한다. 또한, 불규칙파동장에 설치된 호안을 대상으로 호안배후로 전달되는 월파량을 산정하고, 이의 결과를 실험치와 비교하여 산정된 월파량의 정도를 검토하며, 기존 수치실험에서는 불가능하였던 불규칙파에 의한 호안의 월파량을 고정도로 예측하고자 한다.

1.2 본 연구의 구성

본 연구는 총 4장으로 구성되며, 제 1장에서는 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해서 간단히 기술한다. 제 2장에서는 VOF법에 기초하여 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석프로그램으로 알려져 있는 CADMAS-SURF의 기본이론을 간략히 기술하며, CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토할 경우 문제로 지적되는 평균수위상승에 대해 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템을 소개한다. 제 3장에서는 본 연구에서 검토하는 불규칙파의 조파성능, 평균수위의 공간변화 및 부가감쇠영역에서 불규칙파랑의 에너지감쇠를 검토한다. 그리고, 경사수심을 갖는 불규칙파동장에서의 유의파고변화 및 호안배후로 전달되는 월파량을 산정하여, 이를 실험치와 상호 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 논의한다. 더불어, 월파현상을 재현함으로써 주변 불규칙파동장의 변화를 고찰한다. 제 4장에서는 이상의 검토로부터 얻어진 중요한 사항을 요약하여 본 연구의 결론을 얻는다. 마지막으로 본 연구에 있어서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 제시한다.

2. 수치해석 이론

2.1 개요

비압축성의 점성유체에 대한 복잡한 자유수면을 효과적으로 수치모의할 수 있는 VOF법이 제안된 이후, 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 이를 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, VOF법은 쇄파과정 및 쇄파후의 파형변형 특성을 수치적으로 재현할 수 있어 최근 들어서 해안공학분야에서도 VOF법을 활용한 수치모델의 개발이 다양하게 시도되고 있다. VOF법은 단지 자유수면을 모의하는 기법이므로 해안공학분야에 적용시 파랑의 전달과 반사를 정확하게 모의할 수 있는 효과적인 경계조건과 주기적인 파동장을 위한 조파방법이 필요하다. 이러한 경계조건과 조파방법을 결부시켜 VOF법을 활용한 수치파동수로의 연구개발이 최근 활발하게 이루어지고 있으며(沿岸開發技術研究センター, 2001; Van der Meer et al., 1992; Troch, P., 1997; Hur and Mizutani, 2003; Hur, 2004; 김 등, 2001, 2004, 허 등, 2005), 그 중 항만구조물의 내파설계를 목적으로 일본 연안개발기술연구센터(沿岸開發技術研究センター, 2001)에서 개발한 수치파동수로 CADMAS-SURF는 실무분야에서 활발히 활용되고 있으며, 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다(Fujima, 2002).

CADMAS-SURF에서 적용하는 수치파동수로는 Fig. 2.1(그림에서 L'_0 는 목표 파의 파장, L_a 는 부가감쇠영역의 길이, Δ_x , Δ_z 는 수평 및 연직방향의 격자간격)에 보인 바와 같이 2차원수치파동수로내에 파의 재반사를 방지하기 위한 개 경계처리기법으로 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 두고, 해석영역내에 조파를 위한 조파소스를 적용하고 있다.

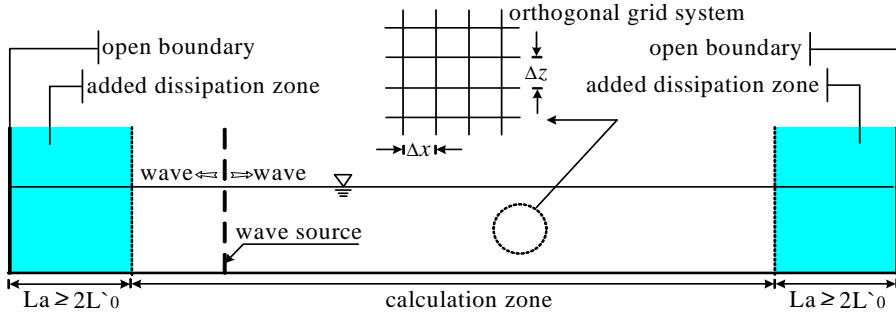


Fig. 2.1 Schematic sketch of the numerical wave tank used in CADMAS-SURF

2.1.1 지배방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식 (2.1) 과 porous media로 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식 (2.2), (2.3)으로 구성된다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = q^* \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & - \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \gamma_v \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \gamma_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + u q^* - R_x \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & - \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \gamma_v \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \gamma_v \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + w q^* + \frac{v}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - R_z - \gamma_v g \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서, $q^* = q(z, t)\delta(x - x_s)$ 는 조파지점 $x = x_s$ 에서의 조파소스의 밀도, δ 는 direct delta 함수, t 는 시간, x, z 는 수평 및 연직좌표, u, w 는 유속의 수평 및 연직성분, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, v_e 는 동점성계수(ν)와 와점성계수(ν)의 합, g 는 중력가속도, γ_v 는 체적공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극률, D_x, D_z 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 x, z 방향에 대한 파랑에너지감쇠계수이다. 그리고, $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 구조물로부터 받는 관성력의 효과를 나타내며, $\gamma_v, \gamma_x, \gamma_z$ 및 관성력계수 C_M 을 사용하면 식 (2.4)~(2.6)과 같이 주어진다(柳山·鹿島, 1992).

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M \quad (2.4)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \quad (2.5)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M \quad (2.6)$$

또한, R_x, R_z 는 등가분포저항으로써 항력항을 비선형항으로 도입하고 있는 柳山·鹿島(1992)의 항력항을 도입하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.7)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.8)$$

여기서, C_D 는 항력계수이다.

2.1.2 이류방정식

CADMAS-SURF는 자유수면을 추적하기 위해 VOF법을 이용하고 있다. VOF 함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가진다. 여기서, $F=1$ 일 경우는 유체셀로, $F=0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단하여 자유수면을 추적하게 되며, 다음의 이류방정식 (2.9)에 의해 VOF함수가 이류된다.

$$\nabla_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \nabla_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \nabla_z w F}{\partial z} = Fq^* \quad (2.9)$$

2.1.2 격자설정 방법

CADMAS-SURF는 지배방정식을 유한차분법으로 차분근사하여 수치계산을 수행한다. 그리고, 계산영역을 직사각형의 격자로 나누어, 셀 전체에 유체가 있는 경우를 유체셀, 셀 전체에 기체가 있는 경우를 기체셀, 셀 내에 유체와 기체가 혼합한 경우를 표면셀, 셀 전체에 구조물이 있는 경우를 구조물셀로 정의한다. 셀 주위에는 직접 계산에 이용되지는 않지만 경계처리시에 필요한 가상셀을 둔다. 격자를 설정한 후에는 각 셀에서의 수평 및 연직유속 u , w 를 각각 셀 경계인 오른쪽과 위쪽에 위치시키고, 압력 p , 조파지점에서의 유량밀도 q 및 VOF함수 F 를 각각 셀 중앙에 위치시키는 Fig. 2.2와 같은 엇갈린격자 (staggered mesh)를 적용한다.

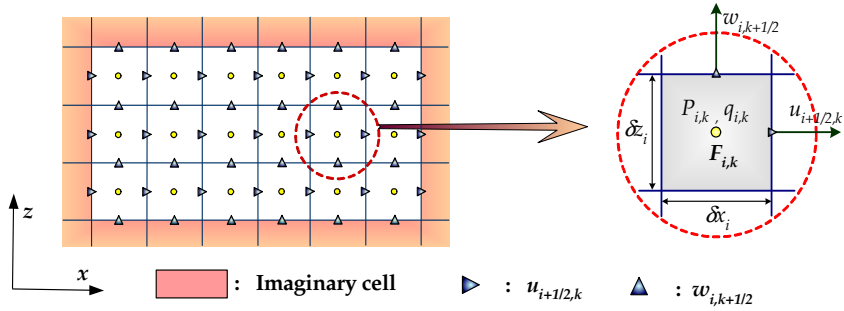


Fig. 2.2 Location of variables in a staggered mesh

2.2 불규칙과의 조파

CADMAS-SURF는 규칙과 뿐만 아니라, 불규칙과에 대해서도 검토가 가능한 수치모델로, CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙과를 검토하는 경우 조파지점에서의 수위변동 및 물입자속도(수평 및 연직유속)를 사용자가 독자적으로 입력데이터로 작성할 필요가 있다. 일반적으로 CADMAS-SURF에서는 선형이론으로부터 얻어진 성분과를 선형중첩하여 불규칙과를 조파하게 되며, 이 때 조파지점에서 발생하는 파는 해석시간이 증가됨에 따라 평균수위가 상승하는 문제가 지적되고 있다(沿岸開發技術研究センター, 2001). 따라서, 장시간의 해석시간이 요구되는 경우에 평균수위의 상승으로 불규칙과로서 해석하기 위해 필요한 100과 정도의 파수를 얻기까지는 다소 무리가 있을 수 있고, 대상으로 하는 불규칙과에 대한 검토의 결과를 과대평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 절에서는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙과를 검토하는 경우 문제로 지적되는 평균수위상승을 억제면서 안정적으로 불규칙과가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템을 소개한다.

2.2.1 불규칙과의 조파방법

불규칙과의 파동운동을 digital방식으로 작성하는 방법은 Goda(1985)에 의해

제안된 바가 있고, 여기서는 그 방법에 따른 불규칙파의 조파방법을 간략히 기술한다.

불규칙파의 조파방법은 선형이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여, 이를 무한급수의 합으로 고려하는 것이다. 조파지점에 있어서는 수면파형 η , 수평 및 연직유속 u , w 의 시간적인 변동이 필요하게 되며, 이들은 각각 식 (2.10)~(2.12)로 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.10)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.11)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.12)$$

여기서, ε_m 은 random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, m 은 성분파, M 은 성분파의 수, h 는 수심이다. 단, 연직좌표 z 는 정수면에서 상방향을 양(+)으로 취한다. 그리고, ε_m 및 f_m 의 선택방법은 후술하는 2.2.2절 및 2.2.3절에서 언급하며, 진폭 a_m 은 식 (2.13)으로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (2.13)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도로 본 연구에서 적용하는 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식 (2.14)의 Bretschneider-Mitsuyasu(1970)의 스펙트럼이다.

$$S(\mathcal{A}) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} \mathcal{A})^{-4}] \quad (2.14)$$

여기서, $H_{1/3}$ 는 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다.

일반적으로 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 해석시간이 증가됨에 따라 평균수위가 상승하는 문제가 지적되고 있고(沿岸開發技術研究センター, 2001), 본 연구에서는 평균수위상승을 억제하는 방법으로 조파지점에서 수평유속 u 를 산출할 때 각 성분파에 대응하는 Stokes파의 질량수송속도(mass transport velocity)를 빼주는 방법을 적용한다. 즉, 식 (2.11)에서 질량수송속도를 뺀 수평유속 $U(z, t)$ 는 식 (2.15)와 같이 표현된다.

$$U(z, t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \overline{U}_m \right\} \quad (2.15)$$

여기서, Stokes파의 질량수송속도 \overline{U}_m 은 성분파를 나타내는 m 을 제외하면 식 (2.16)으로 주어진다(Ippen, 1966).

$$\overline{U} = \frac{1}{2} \frac{\pi H}{T} \frac{\pi H}{L} \frac{\cosh 4\pi(h+\overline{z})/L}{\sinh^2(2\pi h/L)} \quad (2.16)$$

여기서, \overline{z} 는 물입자의 평균위치를 나타낸다.

2.2.2 난수의 발생방법

난수(random numbers)는 random한 현상을 다루는 수치해석에서 많이 사용되는 매우 중요한 부분이다. 난수를 발생시키는 방법에는 물리적인 방법과 수식

을 이용한 방법이 있으며, 물리적인 방법으로 난수를 발생시킬 경우에는 많은 시간이 걸리며, 컴퓨터를 이용한 모의실험에는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 수치해석에 사용되는 난수는 수식을 이용하여 발생되며, 이러한 방법을 이용한 대표적인 난수발생방법으로 중앙제곱법(mid-squar method), 합동법(congruential method) 그리고 시프트법(shift method)등이 있다(조 등, 1992).

본 연구에서는 합동법에 기초하여 난수를 발생시켰고, 난수발생은 IMSL (International Mathematical and Statistical Library)의 난수발생기(Random number generator)를 이용하였다. 그리고, 그 알고리즘은 다음과 같다(Compaq Computer Corporation, 2001).

먼저 임의정수 X_1 을 선택하고 식 (2.17)에 의해 두 번째 정수 X_2 를 얻는다.

$$X_2 = \text{mod}(Y, b), \quad Y = aX_1 \quad (2.17)$$

여기서, X_1 은 seed number이며, $\text{mod}(Y, b)$ 는 Y 를 b 로 나눈 나머지를 나타낸다. 이러한 계산이 임의의 주기동안 진행되면서 X_1 이 X_2 로 변환되고, 연속된 정수 X_i 를 산출하는 과정을 반복한다. 0과 1사이에 할당된 난수는 식 (2.18)에 의해 얻어질 수 있으며, 상수는 식 (2.19)에 나타난 특수한 값으로 주어진다.

$$R_i = X_i / q, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.18)$$

$$a = 7909, \quad b = 2^{36}, \quad q = 2^{35} - 1 \quad (2.19)$$

이러한 과정에서 임의정수 X_i 가 2^{35} 을 초과할 경우 X_i 는 정수 $(2^{36} - 1)$ 로 변환된 후 계산이 수행되며, 식 (2.18)로부터 구한 난수는 $[0, 1]$ 사이에 분포한다.

이로부터 불규칙파의 각 성분파간의 위상각 ε_m 은 Fig. 2.3에 나타낸 바와 같이 $[0, 1]$ 사이에서 분포하는 난수를 발생시킨 후 위상을 조정하기 위해 2π 를 곱하여 $[0, 2\pi]$ 사이에서 분포하는 값을 취하는 것으로 하였다.

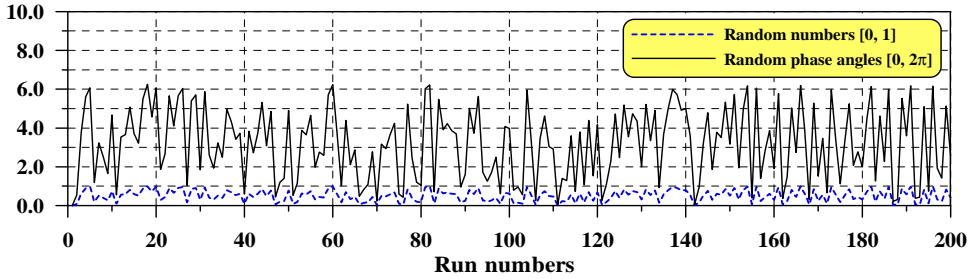


Fig. 2.3 Random phase angles

2.2.3 주파수의 선택방법

불규칙파를 모의하기 위한 주파수 f_m 의 선택방법에는 주파수 스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 거의 같도록 하는 등에너지로 분할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Bretschneider-Mitsuyasu의 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(1985)에 의해 제안된 다음의 식 (2.20)을 이용하여 주파수 f_m 를 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{ \ln [2M / (2m - 1)] \}^{-1/4}, \quad m = 1, \dots, M \quad (2.20)$$

3. 해석결과

3.1 개요

CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 본 연구의 조파방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 다음의 경우와 같이 나누어 검토를 수행한다.

- I) 불규칙파의 조파검증
- II) 무반사모델
- III) 유의파고의 변화
- IV) 월파량의 검토
- V) 월파현상의 재현

3.2 불규칙파의 조파검증

불규칙파의 조파성능을 검증하기 위하여 Fig. 3.1과 같은 구조물이 설치되지 않은 수심 $h = 50\text{ cm}$ 의 2차원수치파동수로(부가감쇠영역과 해석영역으로 구성)에서 파고 $H_0 = 3\text{ cm}$ 주기 $T_0 = 1.0\text{ sec}$ 를 목표로 성분파 200개를 선형중첩하여 불규칙파를 조파시켰다.

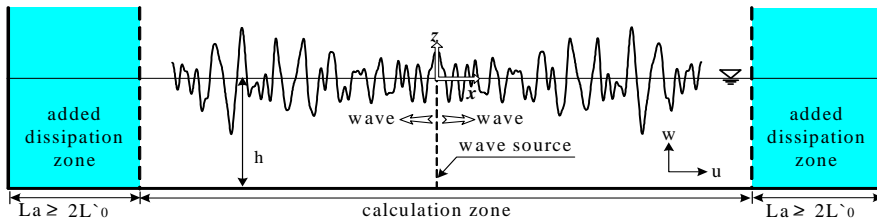


Fig. 3.1 Schematic sketch of numerical wave tank

Fig. 3.2는 선형파의 중첩으로부터 발생된 조파지점에서의 계산파형을 목표한 파형과 비교한 그림이다. 그림으로부터 계산파형은 해석시간이 증가됨에 따라 수위가 상승하는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 조파지점에서 선형파를 중첩하여 목표로 하는 불규칙파를 조파할 경우 발생파의 비선형성분에 기인하는 질량수송속도가 발생한 결과로 판단된다.

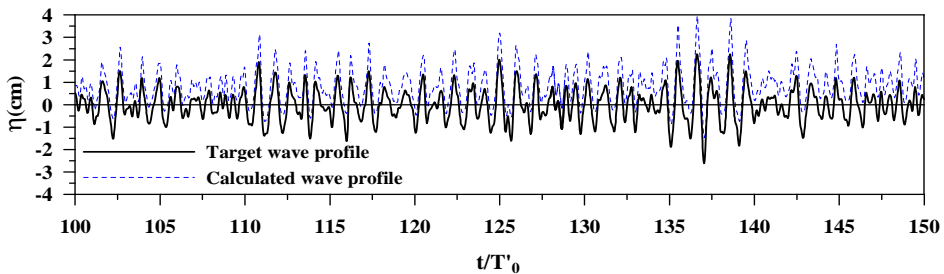


Fig. 3.2 Comparison of target wave profile and calculated wave profile at wave source position by using original CADMAS-SURF

본 연구에서는 Fig. 3.2에서 검토된 계산파형의 평균수위상승문제에 대하여 Fig. 3.3에 제시된 바와 같이 조파지점에서 수평유속 u 를 산출할 때 각 성분파에 대응하는 Stokes파의 질량수송속도를 빼주는 방법을 적용한다.

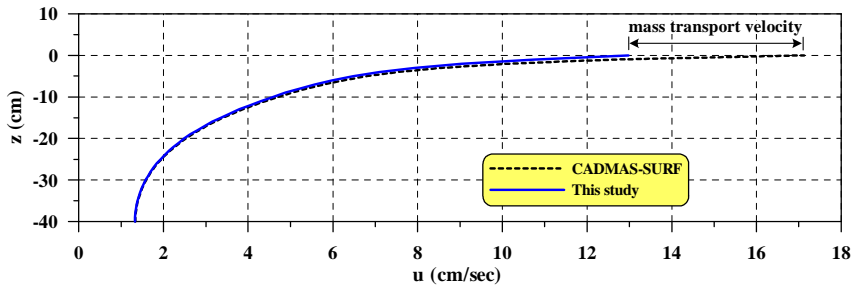


Fig. 3.3 Example of comparison between this study and CADMAS-SURF for horizontal velocity at wave source position

Fig. 3.4는 Stokes파의 질량수송속도를 고려하여 얻어진 계산파형을 목표한 파형과 비교한 그림이다. Fig. 3.4에서 본 연구의 조파방법으로 얻어진 계산파형은 Fig. 3.2와 비교하여 장시간의 해석에도 평균수위상승은 크게 관찰되지 않으며, 목표한 파형과 비교하여 전체적으로 파형과 위상이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

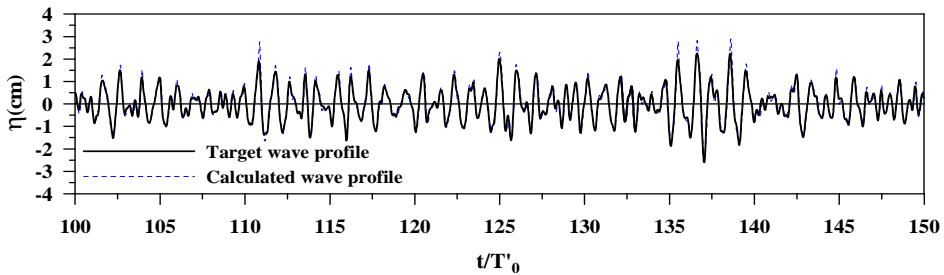


Fig. 3.4 Comparison of target wave profile and calculated wave profile at wave source position by using this study's method

Fig. 3.4에서 검토한 결과를 좀더 면밀히 살펴보기 위하여 불규칙파동장의 파 에너지가 충분히 도달한 조파개시후 무차원시간 $t/T_0 = 50 \sim 400$ 사이의 파를 대상으로 zero-up-cross법을 이용하여 평균수위변동 $\bar{\eta}$ 의 공간분포를 고찰한다.

Fig. 3.5는 평균수위변동 $\bar{\eta}$ 의 공간분포를 목표로 하는 파고 H_0 로 무차원화

하여 나타낸 그림이다. 그림으로부터 계산과형은 약 2%정도의 평균수위상승을 나타내고 있으나, 이의 값은 전수량에 비해 매우 미소한 값으로 불규칙파에 대한 검토의 결과에 큰 영향은 미치지 않을 것으로 판단된다.

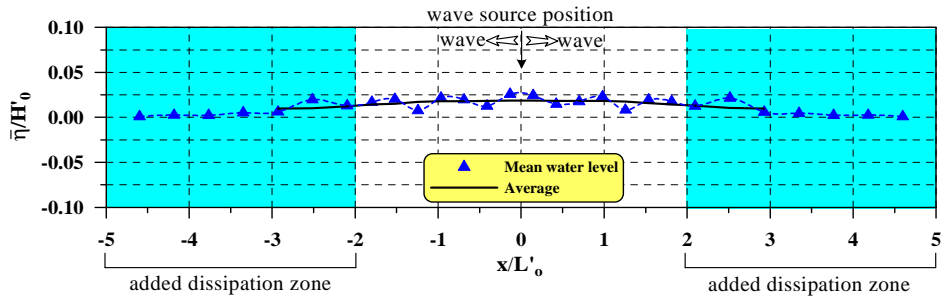


Fig. 3.5 Spatial distribution of mean water level

본 연구의 조파방법에 대한 조파성능을 검토하기 위하여 Fig. 3.4에서 검토한 계산과형을 대상으로 주파수 스펙트럼을 계산하고, 이 결과를 목표스펙트럼 (Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼)과 함께 비교한 결과를 Fig. 3.6에 제시한다. 결과를 살펴보면 본 연구의 계산스펙트럼은 목표스펙트럼의 밴드폭과 피크치를 잘 재현하고 있으므로 기대한 불규칙파를 만족스럽게 조파시키는 것으로 판단된다. 따라서, 장시간의 해석시간이 요구되는 불규칙파의 검토에 있어 본 연구의 조파 방법은 타당한 결과를 도출할 수 있는 매우 효율적인 방법으로 판단된다.

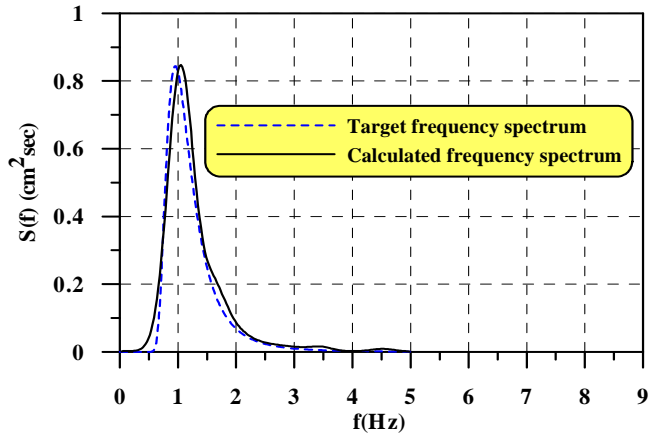
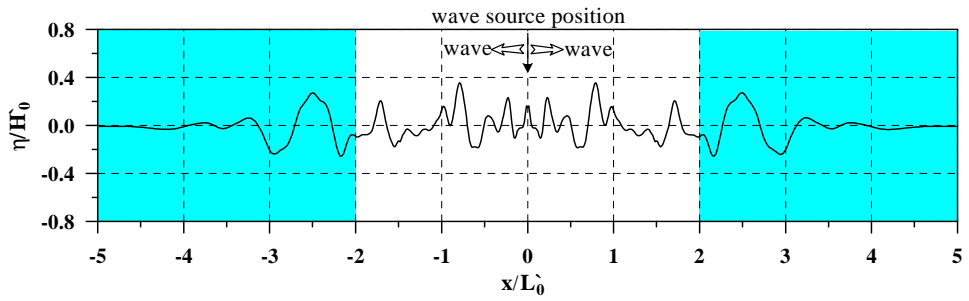


Fig. 3.6 Comparison of frequency spectrum

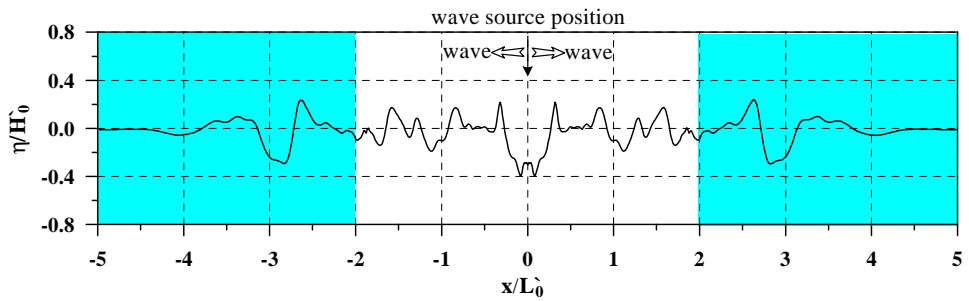
3.3 무반사모델

불규칙파의 경우는 물론이고, 규칙파에 있어서도 정상상태의 파동장을 얻기 위해서는 장시간의 해석이 필요하게 된다. 이 때, 해석영역의 양단으로부터 반사파를 제거하기 위하여 무반사모델이 적용되어야 한다.

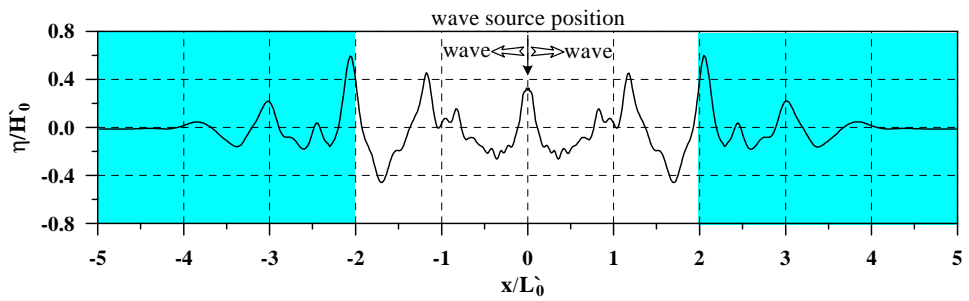
Fig. 3.7은 Fig. 3.1의 조파개시후 무차원시간 $t/T_0 = 100, 110, 120, 130$ 에 대한 수위변동 η 의 공간분포를 목표로 하는 파고 H_0 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 그림으로부터 해석영역($-2 < x/L'_0 < 2$)의 불규칙파는 부가감쇠영역($-5 \leq x/L'_0 \leq 2, 2 \leq x/L'_0 \leq 5$)에서 기대한 파랑의 감쇠가 발생하고 있다. 또한, 개경계에서 발생하는 반사파는 부가감쇠영역에서 충분한 소파효과를 기대할 수 있으므로 계산영역의 파동장에 영향을 미치지 않으며, 따라서 CADMAS-SURF에서 적용하는 개경계처리방법은 장시간의 불규칙파의 조파에 대해서도 무반사모델을 만족하고 있는 것을 확인할 수 있다.



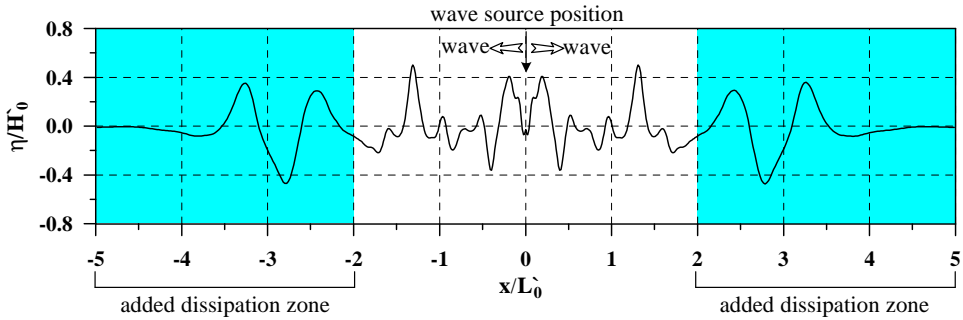
(a) $t/T_o = 100$



(b) $t/T_o = 110$



(c) $t/T_o = 120$



(d) $\beta T'_o = 130$

Fig. 3.7 Non-reflection model for irregular wave

3.4 유의파고의 변화

불규칙파동장의 경사수심역에 있어 본 연구에서 계산된 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화를 Fujiwara(2005)의 실험치와 비교·검토한다.

Fig. 3.8은 비교에 사용된 수치파동수로의 제원 및 유의파고 $H_{1/3}$ 의 비교위치를 나타내며, 적용한 파 조건은 주기 $T'_o = 2.0\text{sec}$, 파고 $H'_o = 12.4\text{cm}$ 를 목표로 하였다.

Fig. 3.9는 Fig. 3.8의 비교위치에서 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화를 실험치와 비교한 결과로, 유의파고 $H_{1/3}$ 의 산정은 zero-up-cross법을 이용하였다. 또한, 계산된 유의파고 $H_{1/3}$ 및 수심 h 는 목표로 하는 파고 H'_o 로 무차원화하였다. 그림을 살펴보면 본 연구의 결과는 수심변동에 따른 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화특성을 포함하여 천해역에서의 천수변형 및 쇄파로 인한 유의파고 $H_{1/3}$ 의 변화값을 실험치와 비교하여 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

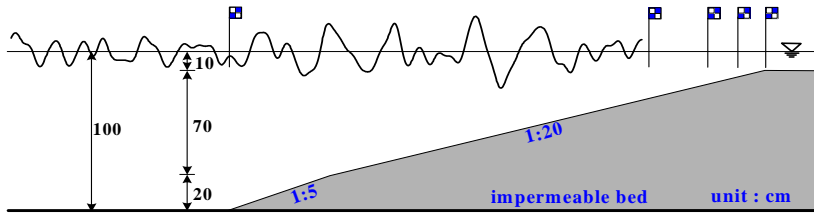


Fig. 3.8 Numerical setup for comparison of significant wave height

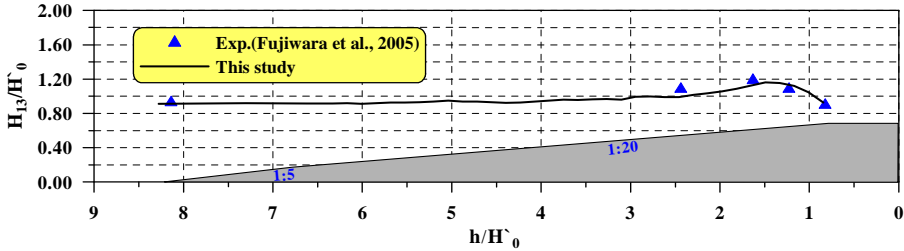


Fig. 3.9 Comparison between experimental and numerical results for spatial variation of significant wave height

3.5 월파량의 검토

본 절에서는 3.2~3.4절에서 검토한 본 연구의 타당성을 바탕으로 호안구조물 배후로 전달되는 파랑의 월파량을 검토한다.

Fig. 3.10은 월파량산정을 위하여 고려된 수치파동수로이다.

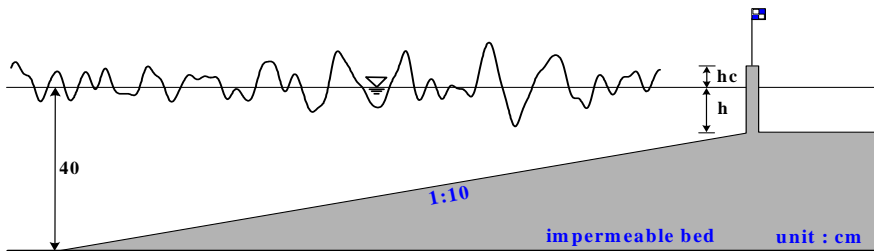


Fig. 3.10 Numerical setup for wave overtopping over vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10

Fig. 3.11은 Fig. 3.10의 수치파동수로에서 호안의 전면수심 h_c 천단고 hc 의 변화를 파라미터로 하여 산정된 호안 월파량을 Goda(1985)의 실험치와 비교한 결과이며, 이 때 적용한 파 조건은 주기 $T_0 = 1.2\text{sec}$, 파고 $H_0 = 4.0\text{cm}$ 를 목표로 하였다. 그리고, 월파량산정에 이용한 불규칙파는 파가 안정한 것으로 판단되는 조파개시후 50sec 에서부터 300sec 사이의 파이며, 월파량은 호안 천단상부에 설치된 각 수평유속계로부터 얻어진 월파량을 합하고 이를 시간평균하여 산정하였다(Goda, 1985).

Fig. 3.11의 결과를 살펴보면 호안의 전면수심 h_c 천단고 hc 의 변화에 따른 월파량의 변화특성을 본 연구의 계산치는 실험치를 잘 재현하고 있을 뿐만 아니라, 산정된 월파량의 정도는 실험치와 비교하여 상당히 높은 것으로 판단된다.

따라서, 불규칙파에 대한 월파량검토에 있어서 본 연구의 조파방법은 합리적으로 월파량을 산정할 수 있는 유용한 수법으로 활용될 수 있을 것이다.

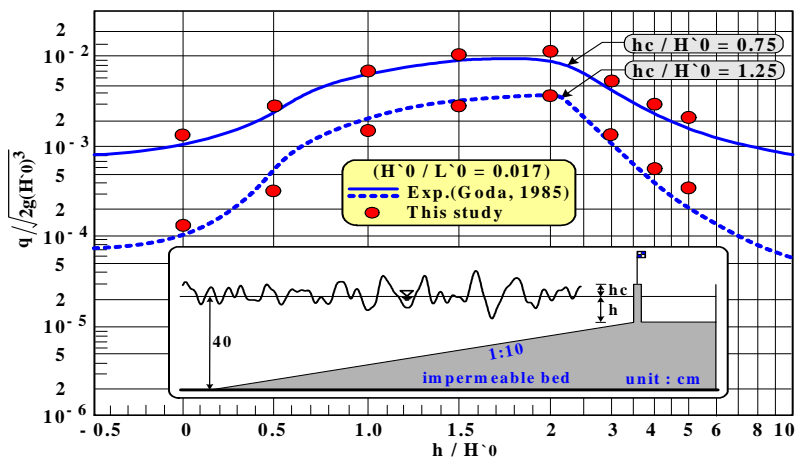
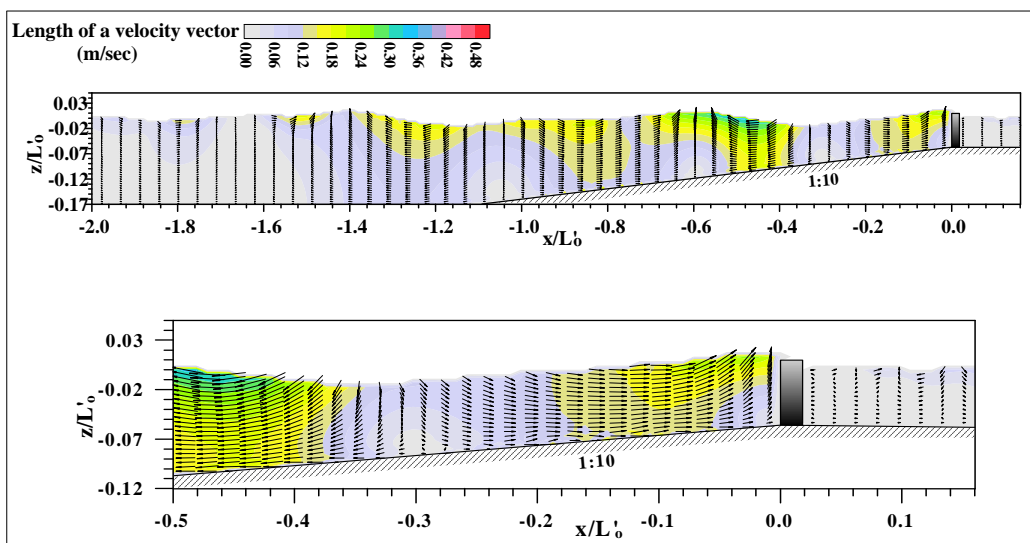


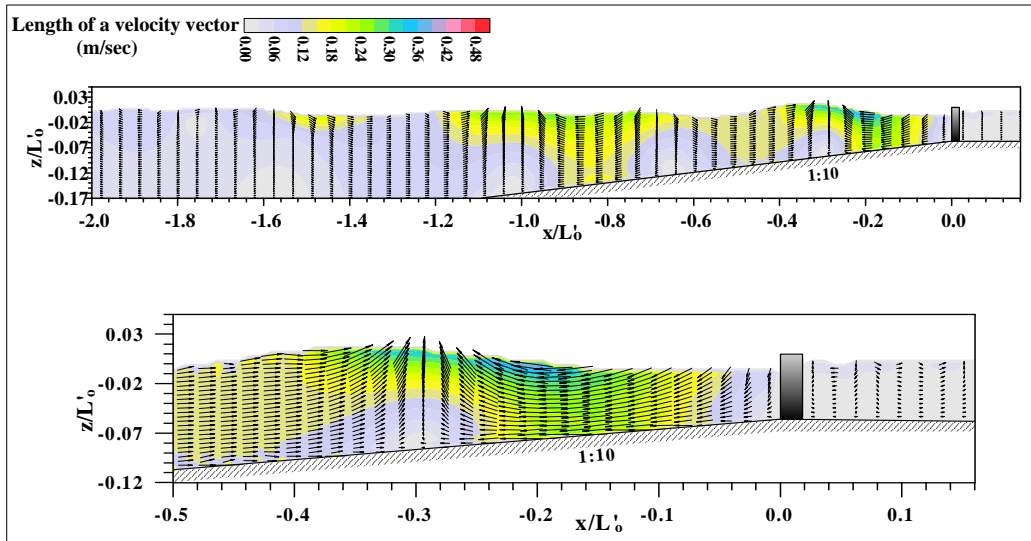
Fig. 3.11 Comparison between experimental and numerical results for wave overtopping rate over vertical seawall on a sea bottom slope of 1/10 ($H_0/L_0 = 0.017$)

3.6 월파현상의 재현

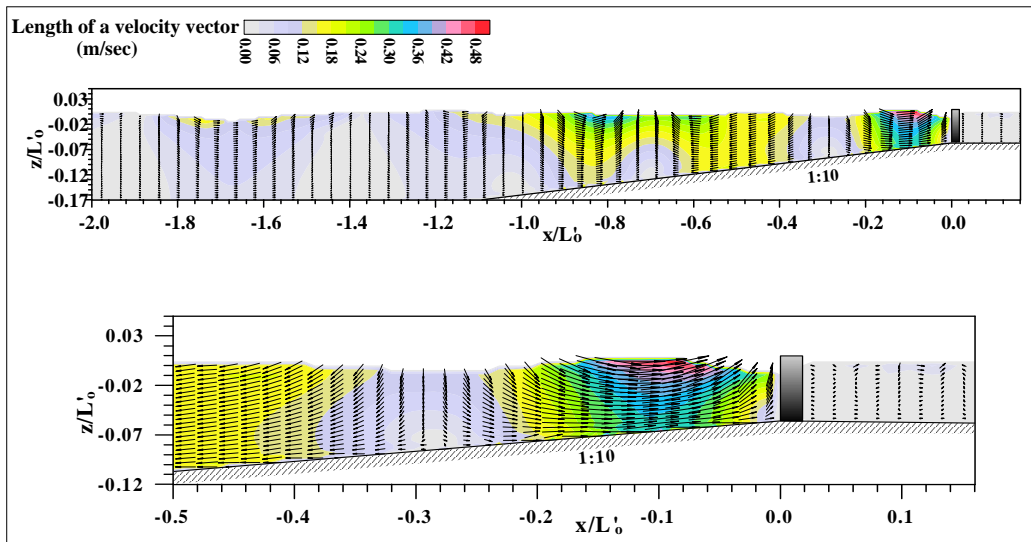
Fig. 3.12는 Fig. 3.11의 $hc/H_0 = 0.75$, $h/H_0 = 3.0$ 의 경우에 대한 월파현상의 일례를 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면 본 연구의 수치파동수로는 기대하는 불규칙파동장을 잘 재현하는 것을 알 수 있다. 그리고, 경사수심역상에는 수심변동으로 인한 천수변형을 확인할 수 있으며, 호안의 천단상에서는 호안월파로 인해 배후면으로 낙하되는 빠른 유속의 수괴가 관찰된다(예를 들면, Fig. 3.12(d)). 그 결과 호안배후의 파동장은 수괴의 낙하로 크게 교란되며, 물입자속도는 수심방향에 대해 수면부근에서 큰 값으로 나타난다(예를 들면, Fig. 3.12(e)). 따라서, 본 연구의 수치파동수로는 불규칙파동장의 재현 및 수심변동에 따른 천수변형, 호안월파로 인한 배후면의 파동장교란 등에 대해 기대한 결과를 제시하고 있고, 향후 본 연구의 수치파동수로는 다양한 형식을 가진 해안구조물의 불규칙파 검토에 있어 주변 파동장의 이해에 도움을 줄 뿐만 아니라, 호안월파로 인한 제내지내의 피해분석에도 유용한 수법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



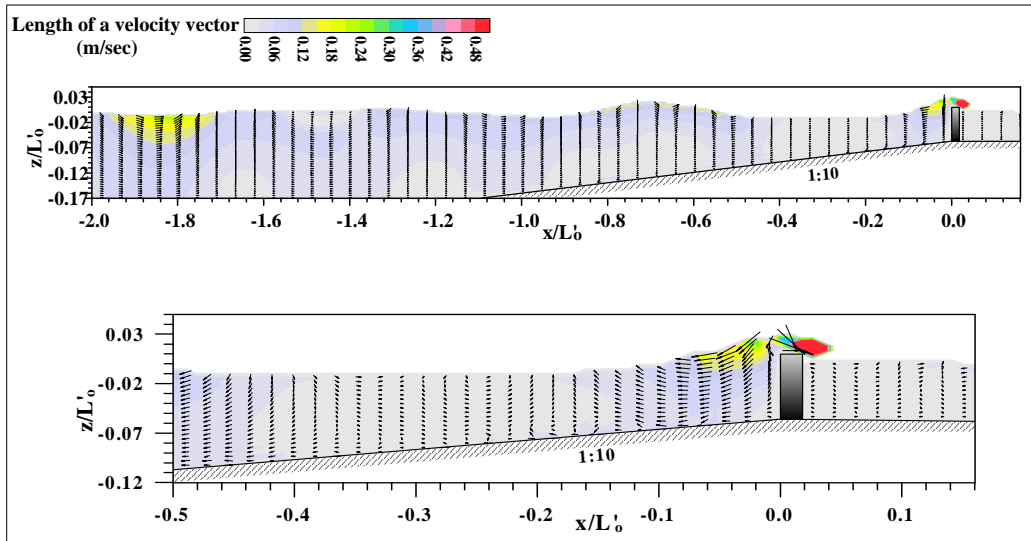
(a) $t = 100.11$ sec



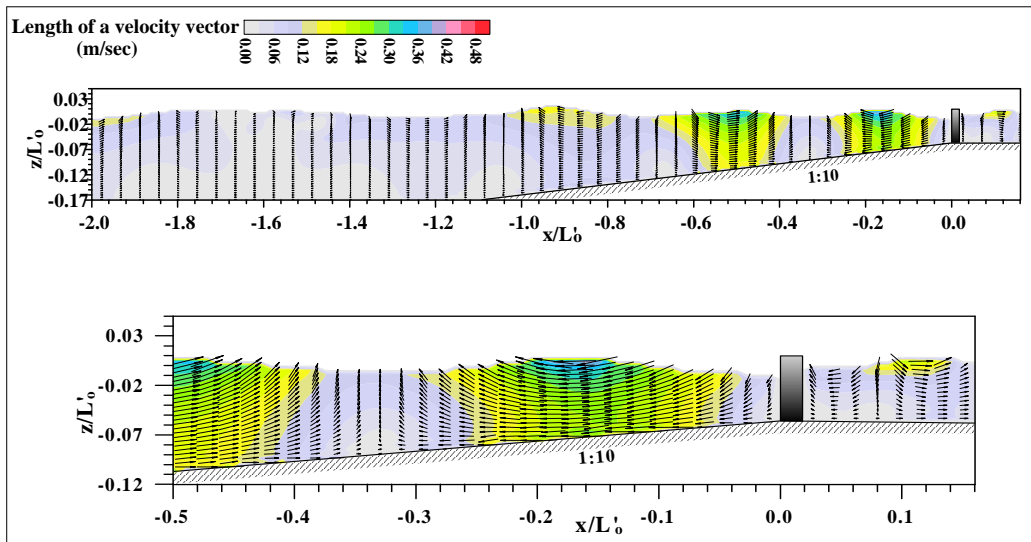
(b) $t = 100.66$ sec



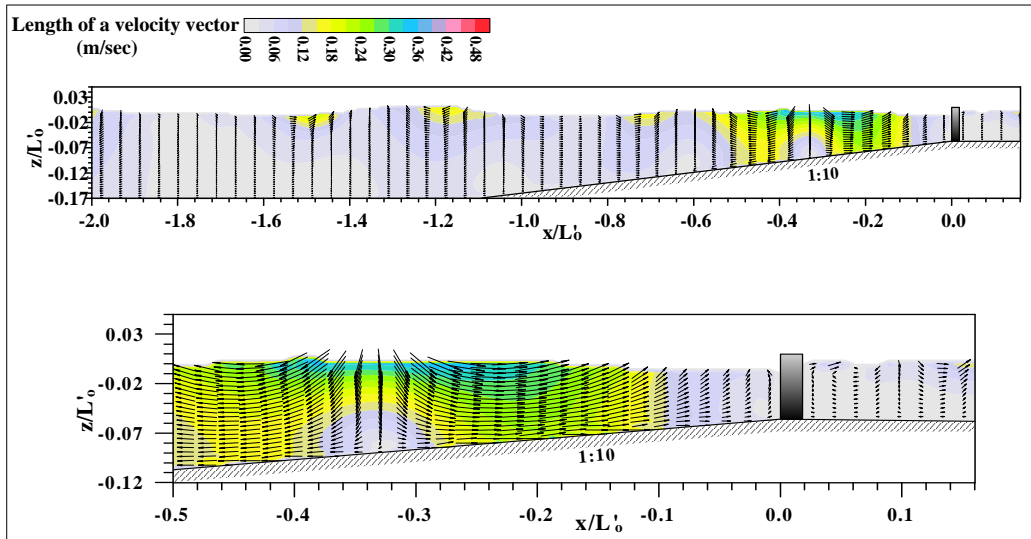
(c) $t = 101.15$ sec



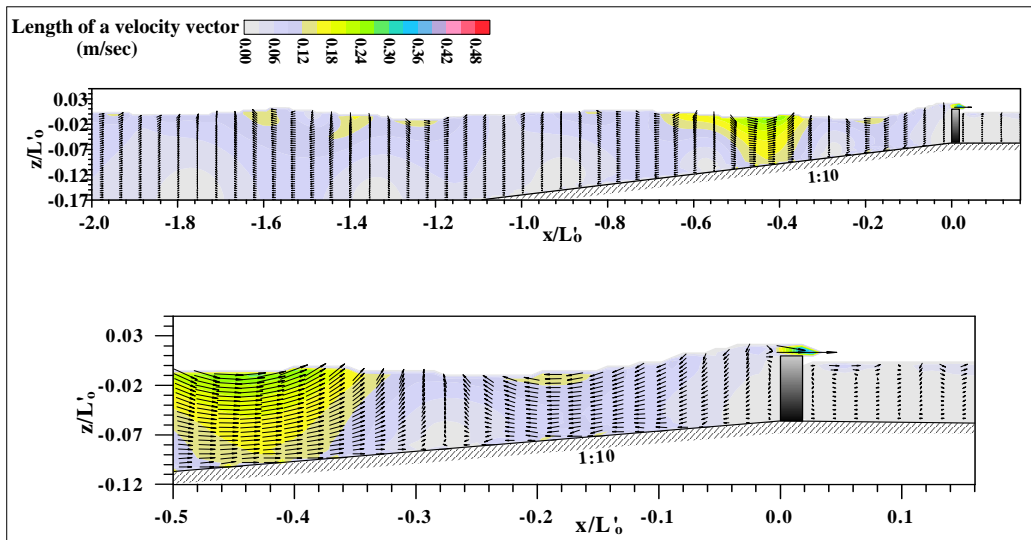
(d) $t = 101.46$ sec



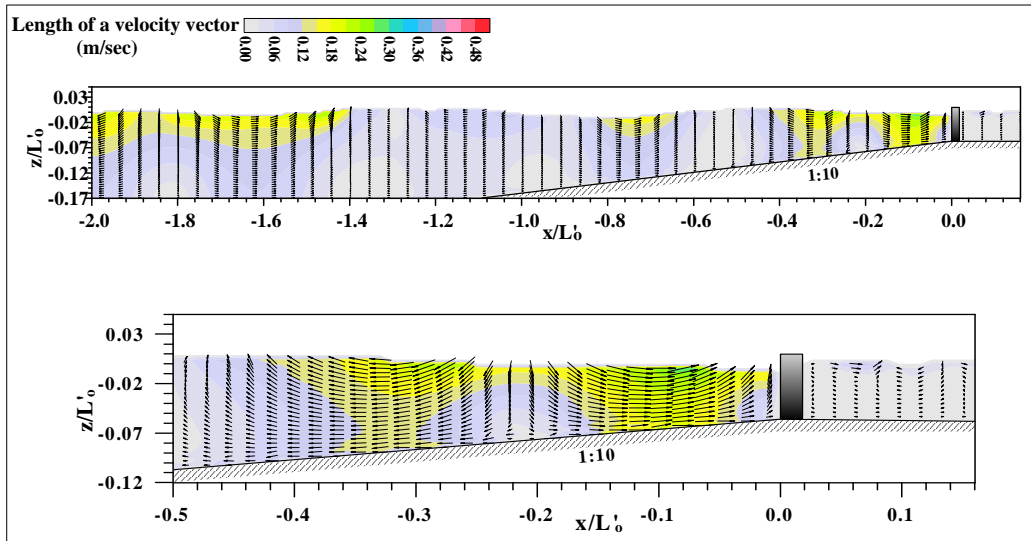
(e) $t = 101.77$ sec



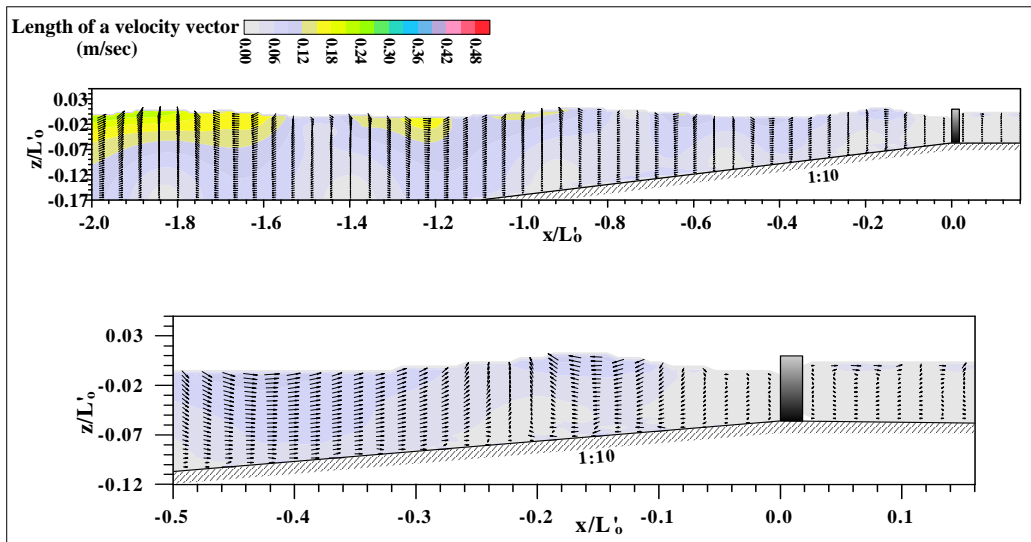
(f) $t = 102.30$ sec



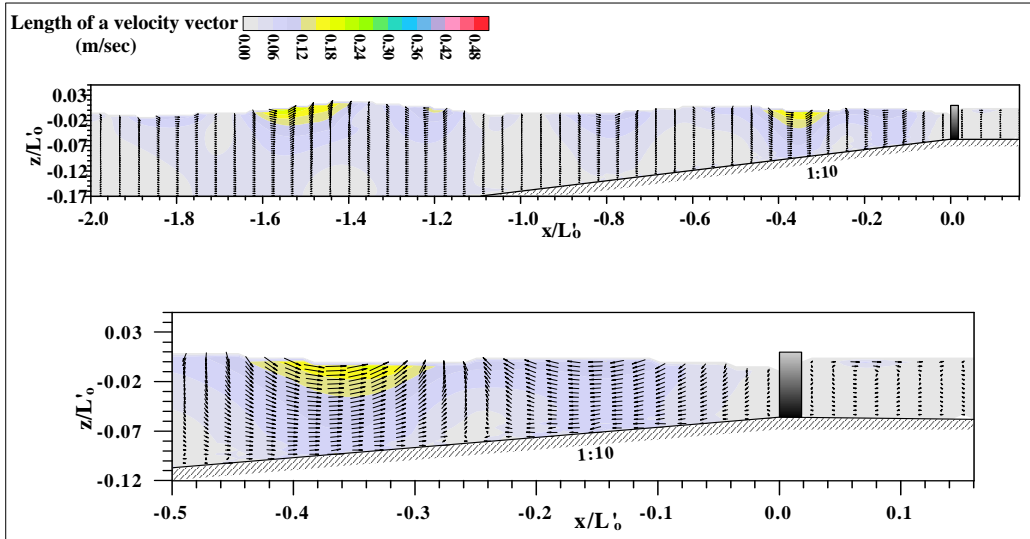
(g) $t = 102.79$ sec



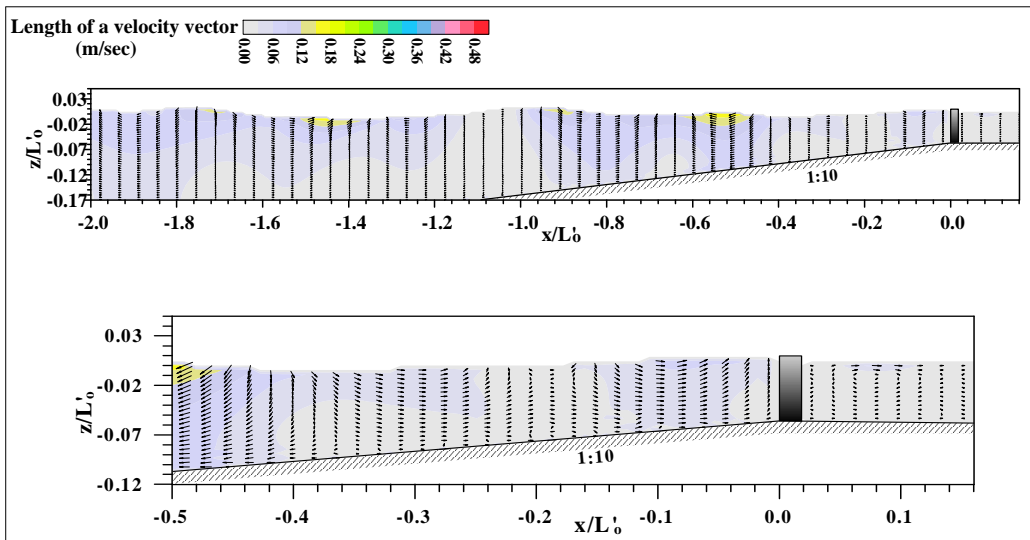
(h) $t = 103.45$ sec



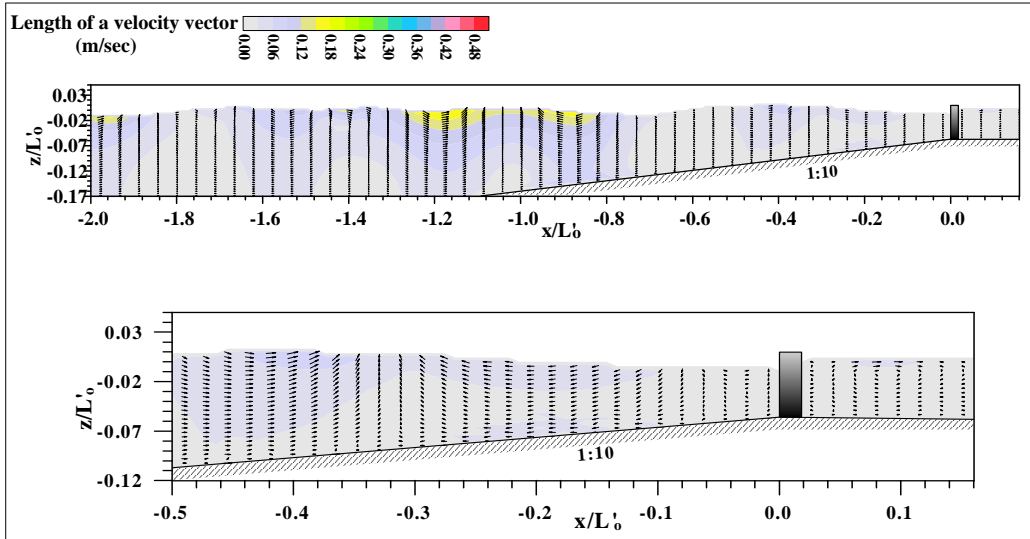
(i) $t = 104.09$ sec



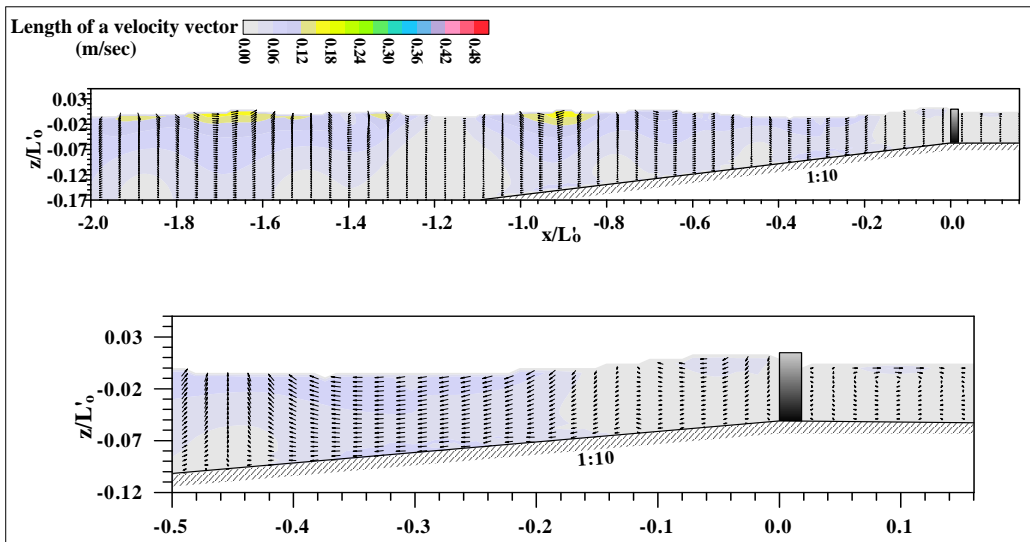
(j) $t = 104.86$ sec



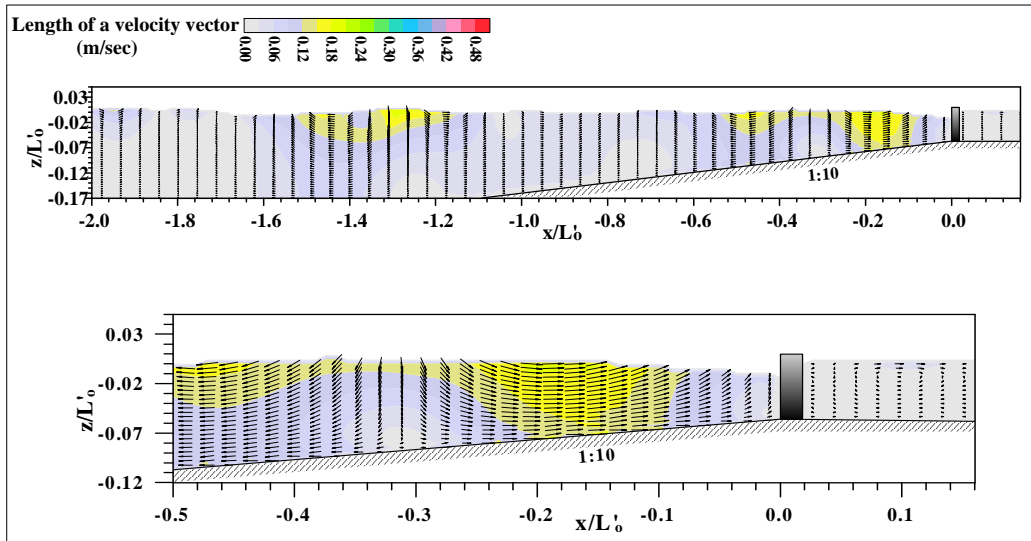
(k) $t = 105.63$ sec



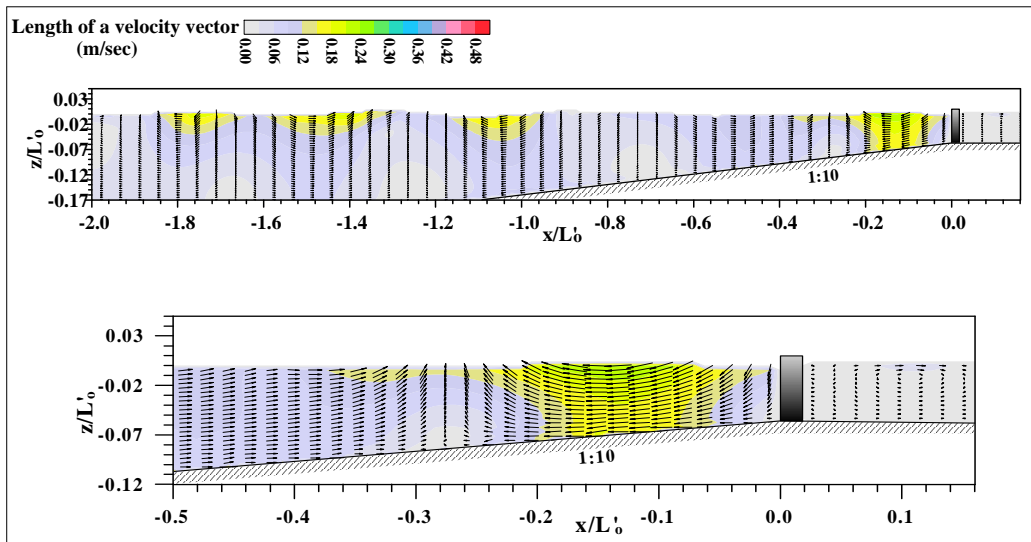
(l) $t = 106.40$ sec



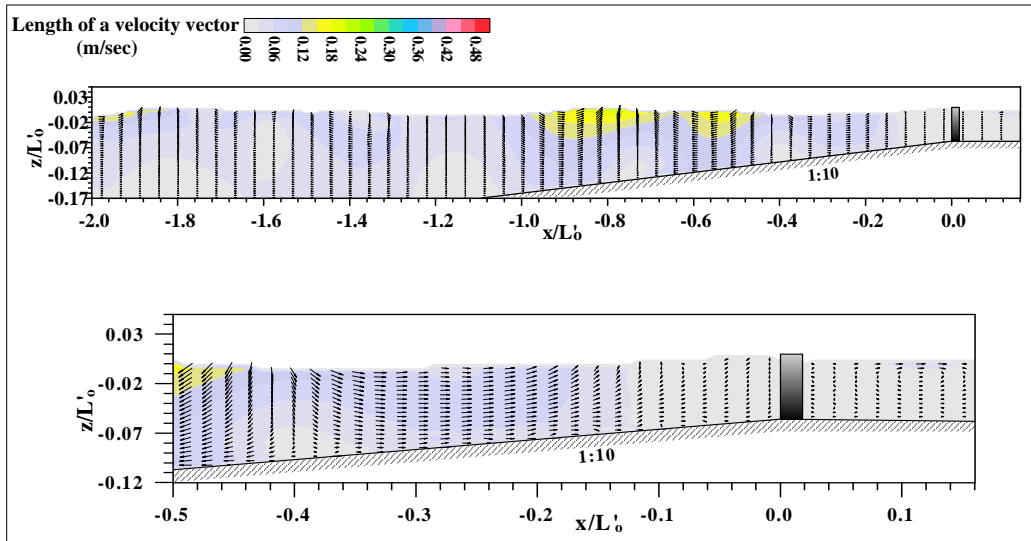
(m) $t = 107.21$ sec



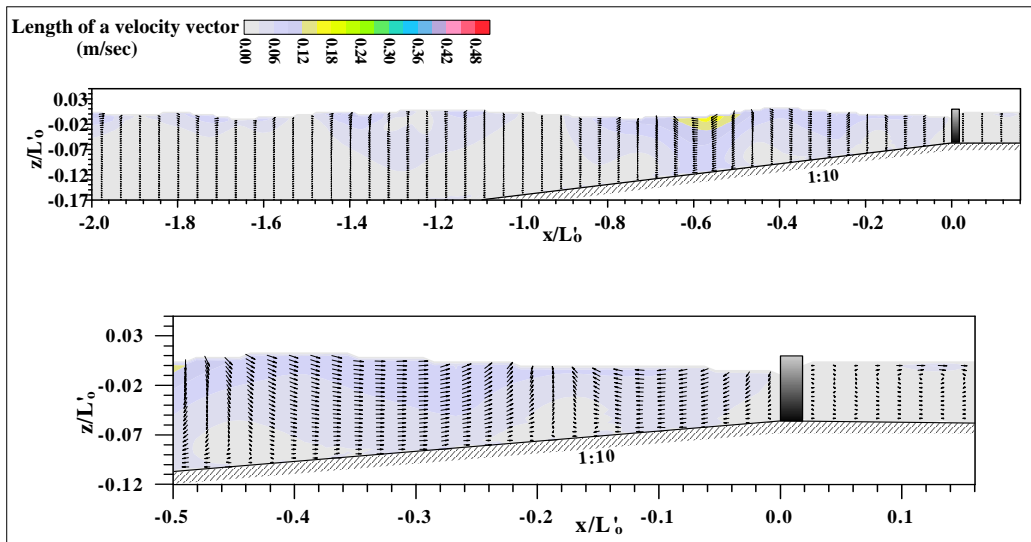
(n) $t = 108.03$ sec



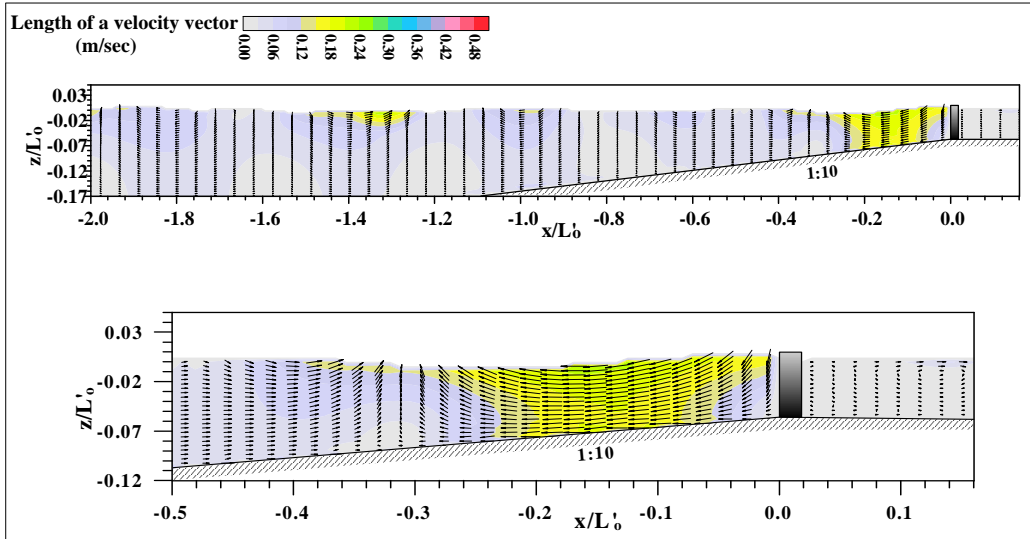
(o) $t = 108.73$ sec



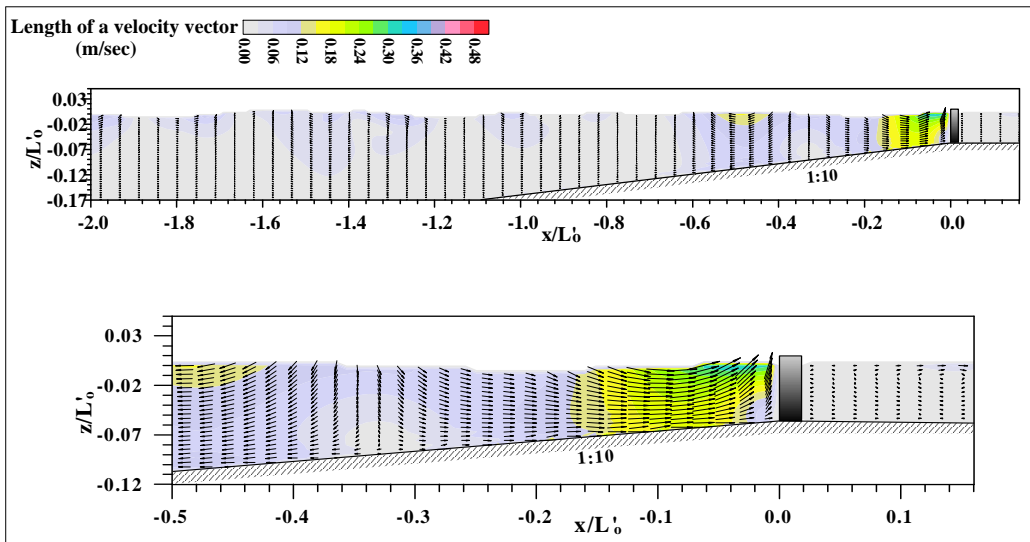
(p) $t = 109.58$ sec



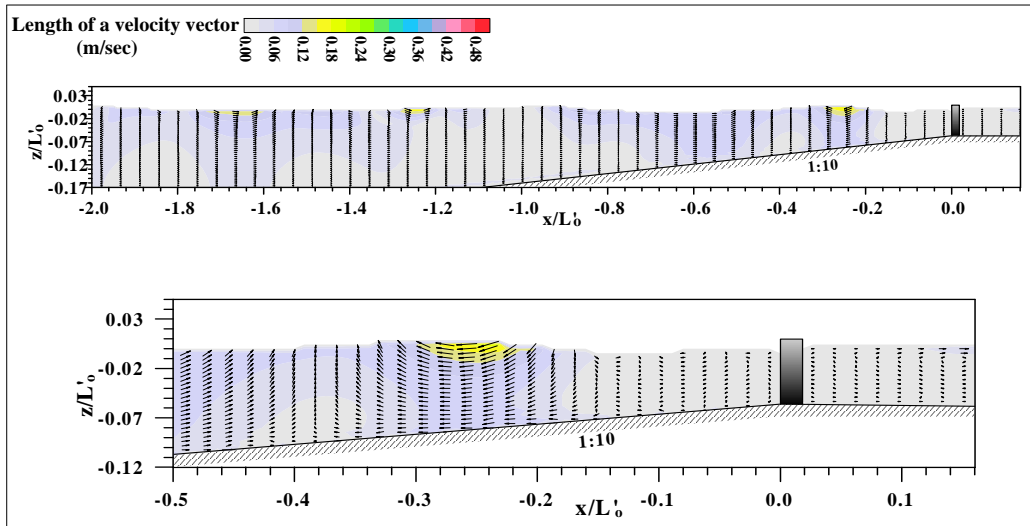
(q) $t = 110.45$ sec



(r) $t = 111.32 \text{ sec}$



(s) $t = 112.07 \text{ sec}$



(t) $t = 112.86 \text{ sec}$

Fig. 3.12 Spatial distributions of irregular wave on a sea bottom slope of 1/10

($hc/H_0 = 0.75$, $h/H_0 = 3.0$)

4결 론

본 연구에서는 VOF법에 기초하여 자유수면을 추적할 수 있는 수치과동수로 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파의 특성과 그에 의한 월파량 등을 검토하였으며, 문제로 지적되는 평균수위의 상승문제에 대하여 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템을 제안하였다. 그리고, 본 연구의 조파방법으로 조파된 불규칙파를 실험치와 비교·검토함으로써 해의 타당성을 검증하였다. 또한, 불규칙파동장의 경사수심역에 설치된 호안구조물을 대상으로 호안배후로 전달되는 월파량을 실험치와 비교하여 산정된 월파량의 정도를 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 아래에 기술한다.

1. CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 기존에 문제로 지적되었던 평균수위상승문제에 대하여 안정적으로 불규칙파를 조파할 수 있는 새로운 조파시스템을 제안하였다.

2. 본 연구에서 제안하는 불규칙파의 조파방법은 실험치와 비교·검토한 결과 타당한 것으로 판단된다.

3. 불규칙파동장의 경사수심역에 설치된 호안구조물을 대상으로 호안배후로 전달되는 월파량을 실험치와 비교·검토한 결과, 본 연구에서 산정된 월파량은 상당히 높은 정도를 나타내었다. 따라서, 본 연구의 수치과동수로는 기존 수치실험에서는 불가능하였던 불규칙파에 의한 호안월파량을 고정도로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 본 연구의 수치과동수로는 다양한 형식을 가진 해안구조물의 불규칙과 검토에 있어 주변 파동장의 이해에 도움을 줄 뿐만 아니라, 호안율파로 인한 제내지내의 피해분석에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 금후 본 연구의 결과는 막대한 시간과 경제적 면이 요구되는 수리실험을 충분히 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001) : VOF법에 기초한 불투과 잠재 주변 파동장의 해석, 대한토목학회논문집, Vol, 21, No. 1, pp. 31-35.
- [2] 김도삼, 이광호, 유현상, 김창훈, 손병규 (2004) : 불규칙파동장에 있어서 VOF 법에 의한 투과성잡제의 파랑제어 특성에 관한 연구, 한국해안·해양공학회지, Vol. 16, No. 3, pp. 121-129.
- [3] 대한토목학회 (2002) : 부산신항 서방파제의 침하발생 원인분석 및 복구방안, 동·서방파제 전체의 안정성 검토 최종보고서.
- [4] 한국토지공사 (2005) : 녹산산단 태풍 「매미」 피해원인 분석용역 최종보고서.
- [5] 한국토지공사 (2006) : 명지주거단지 인근에서 폭풍해일고, 천해설계파 및 월 파유량의 수치모형실험에 관한 학술연구용역.
- [6] 허동수, 김창훈, 이광호, 김도삼 (2005) : 파·구조물·지반의 비선형 동적응답해석을 위한 직접수치해석기법의 개발, 한국해안·해양공학회지, Vol. 17, No. 2, pp. 86-97.
- [7] 조영석, 권순일, 한영훈, 김미화, 신혜정 (1992) : 난수 발생기의 비교, Youngnam Statistical Letters, Vol. 3, No. 2, pp. 75-87.
- [8] Compaq Computer Corporation. (2001) : IMSL SRAT/LIBRARY - chapter 18 : random number generation, Compaq Visual fortran Version 6.6, pp.

1159-1245.

- [9] Fujima, K. (2002) : Review; Development of Numerical wave flume CADMAS-SURF(SUper Roller Flume for Computer Aided Design of MARitime Structure), Proc. Coastal and Ocean Eng., Korea, pp. 1-13.
- [10] Fujiwara, R. (2005) : A method for generating irregular waves using CADMAS-SURF and applicability for wave transformation and overtopping, Coastal Eng., JSCE, Vol 52, pp. 41-45.
- [11] Goda, Y. (1985) : Random seas and design of maritime structures, University of Tokyo press, 323p..
- [12] Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981) : Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., Vol 39, pp. 201-225.
- [13] Hu, K., Mingham, C.G. and Causon, D.M. (2000) : Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations, Coastal Eng., Vlo. 41, pp. 433-465.
- [14] Hur, D.S. (2004) : Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed, Ocean Eng., Vlo. 31, pp. 1295-1311.
- [15] Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003) : Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater, Coastal Eng., Vlo. 47, pp. 329-345.

- [16] Ippen, A.T. (1966) : Estuary and coastline hydrodynamic, McGraw-Hill, Inc., 744p..
- [17] Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1985) : Wave overtopping on coastal structures, J. Waterw. Port. Coast. Ocean., ASCE 115(2), pp. 235-251.
- [18] Mitsuyasu, H. (1970) : On the growth of spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch, Proc. Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, pp. 1-7.
- [19] Shal, S., Ji, C., Graham, D.I., Reeve, D.E., James, P.W. and Chadwick, A.J. (2006) : Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model, Coastal Eng., Vol. 53., pp. 723-735.
- [20] Troch, P. (1997) : VOFbreak, a numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwater, Proc. 27th IAHR Congress, San Francisco, USA, pp. 1366-1371.
- [21] Van der Meer, J.W., Petit, H.A.H., Van den Bosch, P., Klopmanm G. and Broekens, R.D. (1992) : Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures, Proc. 23rd ICCE, Venice, Italy, pp. 1772-1784.
- [22] 榊山 勉, 鹿島遼一 (1992) : ポーラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究報告書, 48p..
- [23] 土木學會海岸工學委員會 (1995) : 海岸波動, 520p..

- [24] 沿岸開発技術研究センター (2001) : CADMAS- SURF 数値波動水路の研究
・開発. 216p..

감사의 글

대학을 졸업하면서 막연히 공부를 더 했으면 좋겠다는 생각을 했지만 선뜻 행동으로 실천하기에는 망설였던 저에게 대학원 생활을 할 수 있게 기회를 주시고 많이 부족하지만 잘 이끌어 주시어 이렇게 졸업하게 지도 해주신 김도삼 교수님께 무한한 감사를 드립니다.

학부 때부터 자상한 가르침과 애정 어린 관심을 주신 이중우 교수님, 김태곤 교수님, 경갑수 교수님, 그리고 부임 초 열정으로 상담과 지도를 해주시던 김태형 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

대학원을 시작하려던 저에게 자상하게 상담해주시던 광호 형, 직장생활 속에서도 연구실 후배들을 잘 챙겨주시던 승현이 형, 항상 웃는 얼굴로 대해주시던 현상이 형, 만사에 낙천적인 영재, 자신감 100%에 매사에 적극적인 낙훈이, 유학준비에 힘든 시기를 보내면서도 마지막까지 도움을 준 창훈이, 선배들 뒤치다꺼리로 고생한 지민이, 윤석이, 상기, 올해 대학원에 들어와서 열심히 학문에 정진하는 재영이, 이 모든 연구실 선배 동기들에게도 감사를 드립니다.

어렸을 적부터 형제처럼 어울리면서 항상 나의 편이 되어주고 응원해주는 민재, 현녕이, 환기, 성복이, 세상누구보다도 손자를 사랑하시는 할아버지, 할머니, 항상 묵묵히 아들을 지원해주시는 아버지, 아들의 앞날을 위해 기도로 후원해 주시는 어머니, 하나밖에 없는 동생과 제수씨 그리고 예쁜 조카 아인이, 올해 태어난 사랑스런 나의 아들 정인이와 사랑과 정성으로 보필하고 내조해주는 인생의 동반자 아내 정화에게 사랑과 고마움을 전합니다.

끝으로 저의 모든 일을 주관하시고 인도해 주시는 하나님께 모든 영광과 감사를 드립니다.