

工學碩士 學位論文

연안역의 침수범람해석과 현지적용

Inundation Analysis and Application
in Coastal Areas

指導教授 金 度 三



2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

千 載 英

Inundation Analysis and Application in Coastal Areas

by
Jae Young Chun

Department of Civil & Environment Engineering
Graduate School
Korea Maritime University

ABSTRACT

Coastal disasters such as typhoons, severe rain storms, storm surges and beach erosion have been occurring continuously all over the world. Because they cause considerable damage in property and life, budget for coastal preservation projects have become very large. The coast near Kyungnam and Busan, in particular, are constantly exposed to danger of inundation due to typhoons accompanied by severe water waves and storm surges in addition to geographic distinctiveness.

An examination on inundation trends for the coastal areas due to typhoons and storm surges is needed because during the last few years damage to coastal areas have occurred repeatedly and are becoming larger in scale. In general, structures in coastal areas are designed to permit a certain amount of wave overtopping. However, the situation in coastal area is such that we must accept inundation damage when external forces greater than the amount that the structures were designed for are unleashed by massive typhoons accompanied by severe water waves and storm surges that were mentioned above.

In order to prepare quickly for inundation damage in this situation, information on water level increase, that follows overflowing of coastal structures by approaching storm surges and waves, is required. And discerning the inundation trend within areas protected by embankments is an urgent problem. Therefore, in this study, inundation caused by typhoon Maemi that occurred in September 11, 2003 in the reclaimed land in Su-yeong Bay, Haeundaegu, Busan and hinterland in Masan will be examined numerically. Maemi, whose center pressure reached 910hPa, was selected from typhoons that caused terrible damage in the Kyungnam and Busan coast. For the reclaimed land in Su-yeong Bay, VOF method was applied to the waves in the shallow sea to calculate the wave overtopping rate caused by irregular waves. Using this result, a numerical simulation technique to examine the inundation phenomenon in the areas protected by embankments, due to the combined severe water waves and storm surges, was described. And the characteristic of each result obtained by applying this result in various inundation analysis system was compared to the results of field survey. Next, the storm surges height caused by typhoons were estimated again and inundation analysis results for Masan Bay, Masan were compared to the on-site investigation results and their validity were examined.

According to the results for the inundation analysis models that were examined in this research, the discharge that was obtained by estimating the overflow amount due to irregular waves was more rational compared to the result for regular waves. Overall inundation trends obtained from each inundation analysis system agreed quite well when compared to results of field survey, although there were some areas that yielded conflicting results.



연안역의 침수범람해석과 현지적용

千 載 英

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科

요 약

전 세계적으로 태풍, 집중호우, 폭풍해일 및 해빈침식 등과 같은 연안재해가 속출하고 있으며, 이로 인한 많은 재산 및 인명 피해가 발생하고 있기 때문에 연안 보전사업에 많은 예산이 투입되고 있는 실정이다. 특히, 우리나라의 경남 및 부산의 연안은 지리적인 특수성과 더불어 해상에서 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인해 연안지역이 항상 범람위험에 노출되어 있다. 최근 몇 년간 연안지역의 피해가 반복되고 대형화되는 상황에서 태풍 및 폭풍해일로 인한 연안지역의 침수 경향에 대한 검토가 필요하다. 일반적으로 연안역의 구조물들은 어느 정도 월파를 허용할수 있게 설계가 이루어지고 있으나, 이상에서 언급한 고파랑을 동반한 대형 태풍의 내습시와 같은 설계외력 이상의 해일 및 파랑 내습시에는 연안지역은 침수피해를 감수해야 하는 상황에 있다.

이러한 상황에서 연안지역의 침수피해에 신속히 대비하기 위해서는 연안에 접근하는 해일 및 파랑 등이 호안구조물을 월류시에 수반되는 수위증가에 대한 정보를 필요로 하며, 이에 따른 제내지내의 침수범람의 경향을 파악하고 도심지의 특성에 따른 범람해석모델을 적용하는 것이 시급한 문제이다. 따라서, 본 연구에서는 경남 및 부산 연안에 많은 피해를 입힌 태풍중에 2003년 9월 11일에 발생한 중심기압 910hPa까지 달했던 태풍 Maemi를 대상으로 부산광역시 해운대구 수영



만매립지에서 침수범람, 마산만의 배후지에서 침수범람을 수치적으로 검토한다. 수영만매립지의 경우에는 천해파랑을 VOF법에 적용하여 불규칙파에 의한 월파량을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 제내지의 침수현상을 검토할 수 있는 수치해석수법을 기술하였다. 그리고, 이 결과를 다양한 범람해석수법에 적용하여 얻어지는 각 결과들의 특징을 현지조사결과와 비교하여 수영만매립지의 특성에 맞는 범람해석수법의 적용성을 검토하였다. 다음으로, 경남 마산시 마산만을 대상으로 폭풍해일고의 재추정 및 폭풍해일의 범람으로 인한 대상지역의 범람 해석결과를 현지조사결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

이상과 같이 본 연구에서 검토된 범람해석 모델들의 결과에 의하면, 불규칙파랑에 의한 월파량의 추정법으로 얻어진 월파유량은 규칙파랑에 의한 결과보다 합리적인 결과를 나타내었으며, 각 범람해석수법들은 현지조사결과와 비교했을 때 일부 영역에서 다소 상이한 값을 나타내고 있지만 전반적인 침수경향은 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.



目 次

ABSTRACT	i
요약	iii
目次	v
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	x
LIST OF PHOTO	xi
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 연구의 구성	4
제2장 이론적 배경	5
2.1 폭풍해일모델	5
2.1.1 개요	5
2.1.2 기초방정식	5
2.2 SWAN모델	7
2.2.1 개요	7
2.2.2 기초방정식	7
2.3 VOF모델	9
2.3.1 개요	9
2.3.2 불규칙파의 조파	9
(1) 불규칙파의 조파방법	10
2.4 범람해석 모델	12
2.4.1 개요	12
2.4.2 데카르트좌표계 모델	12
(1) 기초방정식	12
2.4.3 비구조격자 모델	14
(1) 기초방정식	14



2.4.4	폭풍해일에 의한 범람해석 모델	16
(1)	기초방정식	16
제3장	수치해석결과	17
3.1	폭풍해일	17
3.1.1	태풍 Maemi의 내습시 최대폭풍해일고	17
3.2	SWAN모델에 의한 천해파랑	18
3.2.1	대상영역 및 조건	18
3.2.2	수치해석결과	19
3.2.3	설계조위 결정	20
3.3	불규칙파에 의한 월파유량의 추정	22
3.3.1	대표단면에서 월파량의 추정	22
(1)	대표단면의 형상 및 월파의 재현	22
(1)	대표단면에서 월파량	24
3.4	범람해석	25
3.4.1	관측결과	25
3.4.2	데카르트좌표계 모델을 이용한 침수해석	26
(1)	범람해석의 결과	26
3.4.3	비구조격자 모델을 이용한 침수해석	28
(1)	범람해석의 결과	28
3.4.4	범람해석결과의 비교	29
3.4.5	폭풍해일에 의한 범람해석	31
(1)	대상영역 및 계산조건	31
(2)	폭풍해일고의 산정 및 범람예측	32
제4장	결 론	36
4.1	폭풍해일고, 천해파랑 및 월파유량의 추정	36
4.2	범람해석	37
4.2.1	데카르트좌표계 모델에 의한 범람해석	37
4.2.2	비구조격자 모델에 의한 범람해석	37
4.2.3	폭풍해일의 쳐오름에 의한 범람해석	37





LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Schematic sketch of the numerical wave tank	9
Fig. 2.2 Concept of flood flow head	14
Fig. 2.3 Definition of unknown quantity	15
Fig. 2.4 Area of continuity equation	15
Fig. 2.5 Calculation of momentum equation	16
Fig. 3.1 Spatial distribution of maximum storm surge height for typhoon Maemi	17
Fig. 3.2 Calculating area of SWAN simulation	19
Fig. 3.3 Spatial distribution of wave height	20
Fig. 3.4 Spatial distribution of wave setup	20
Fig. 3.5 Representative cross section of seawall used in numeric simulation	22
Fig. 3.6 Snapshot of wave overtopping simulation	23
Fig. 3.7 A survey of inundation area behind Su-Young bay	25
Fig. 3.8 Trigonometric network for topographical data	26
Fig. 3.9 Spatial distribution of inundation depth by	



structure grid system behind Su-Young bay	27
Fig. 3.10 Unstructure grid for numerical analysis	28
Fig. 3.11 Spatial distribution of inundation depth by unstructure grid system behind Su-Young bay	29
Fig. 3.12 Compare with structure grid system and unstructure grid system	30
Fig. 3.13 Computation areas	31
Fig. 3.14 Elevation in area No.9 including sea and land	32
Fig. 3.15 Comparison between observed and calculated time variation of storm surge height in Masan bay	33
Fig. 3.16 Spatial distribution of maximum storm surge height and inundation area for typhoon Maemi around Masan bay	34
Fig. 3.17 Result of a field survey for inundation areas and depth in Masan bay	34
Fig. 3.18 Hazard map around Masan bay	34



LIST OF TABLES

Table 1.1	A loss of life and property damage by typhoon	1
Table 3.1	Mesh sizes applied to each area	18
Table 3.2	The last design water level	21
Table 3.3	Incident wave condition	22



LIST OF PHOTOS

Photo 1.1 Damaged area by typhoon Sarah in Busan 2

Photo 1.2 Damaged area by typhoon Maemi in Masan 2



제1장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라 연안은 지리적인 특수성으로 수반되는 태풍(Table 1.1을 참조), 집중호우, 폭풍해일 및 해빈침식 등에 의한 연안재해가 집중되고 있으며, 이로 인하여 많은 재산과 인명의 피해가 발생하고 있고(예로, Photo 1.1과 1.2를 참조), 국토의 보존차원에서 연안 보전사업에 많은 예산을 투입하고 있는 실정이다. 여기서, 경남 및 부산의 연안은 폭풍해일과 고파랑 등에 의한 침식과 침수 등의 연안피해가 빈번히 발생하고 있으며, 해상에서 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인해 연안지역이 항상 범람위험에 노출되어 있다. 특히, 근년의 지구온난화에 따른 해수온도의 상승영향으로 향후 태풍의 발생빈도와 재해규모가 증대될 것으로 예측되고 있다.

Table 1.1 A loss of life and property damage by typhoon.

순위	인 명			재 산		
	발생일	태풍명	사망·실종 (명)	발생일	태풍명	재산피해총액(백만원)
1	'36.8.20~28	3693호	1,232	'02.8.30~9.1	Rusa	5,147,917
2	'23.8.11~14	2353호	1,157	'03.9.12.~9.13	Maemi	4,222,486
3	'59.9.15~18	Sarah	849	'99.7.23~8.4	Olga	1,107,788
4	'72.8.19~20	Betty	550	'87.7.15~16	Thelma	617,429
5	'25.7.15~18	2560호	516	'95.8.19~30	Janis	567,578
6	'14.9.7~13	1428호	432	'91.8.22~26	Gladys	326,899
7	'33.8.3~5	3383호	415	'98.9.29~10.1	Yanni	284,245
8	'87.7.15~16	Thelma	343	'00.8.23~9.1	Prapiroon	260,846
9	'34.7.20~24	3486호	265	'84.8.31~9.4	June	258,900
10	'02.8.30~9.1	Rusa	246	'59.9.15~17	Sarah	254,148

주1)재산피해액은 2002년도 가격기준임(단, 2003~2004년은 제외).

주2)'95년 태풍 Janis, '99년 태풍 Olga, 2000년 태풍 Prapiroon피해액은 호우와 태풍의 중복 피해액.





Photo. 1.1 Damaged area by typhoon Sarah in Busan.



Photo. 1.2 Damaged area by typhoon Maemi in Masan.

본 연구에서는 Table 1.1 제시된 태풍중에 2003년 9월 11일에 발생한 중심기압 910hPa까지 달했던 태풍 Maemi를 대상으로 부산광역시 해운대구 수영만매립지에서 침수범람, 마산만의 배후지에서 침수범람을 수치적으로 검토한다. 이를 위하여 폭풍해일고와 태풍 Maemi에 대해 바람장을 상세히 추정하고, 그 결과를 SWAN모델에 적용하여 수영만 매립지의 주변해역에서 천해파랑을 추정한다.

또한, 수영만매립지의 경우에는 설계조위와 심해설계파(POSCO, 2004)를 고려하여 산정된 천해파랑을 VOF법(沿岸開發技術研究Center, 2001)에 적용하여 불규칙파에 의한 월파랑(Fujiwara, 2005; 이민기, 2007)을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 제내지의 침수현상(김도삼 등, 2007)을 검토할 수 있는 수치해석수법을 기술하였다. 그리고, 이 결과를 다양한 범람해석수법에 적용하여 얻어지는 각 결과들의 특징을 비교한다. 여기서, 범람해석수법으로 해석격자의 형상과 배치에 따라 정방격자를 사용하는 데카르트좌표계 모델과 격자의 형상에 제약을 받지 않는 비구조격자 모델을 부산광역시 수영만매립지에 적용하여 범람해석을 실시하였으며, 두 모델의 특징에 따른 범람해석결과를 현지결과(부산광역시, 2005)와 비교하여, 도심지의 특성에 따른 범람해석모델의 적용성을 검토하였다.

다음으로, 경남 마산시 마산만을 대상으로 폭풍해일고의 재추정 및 폭풍해일의 범람으로 인한 대상지역의 범람해석결과를 현지조사결과(마산시, 2004)와 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

이상 본 연구에서 검토된 범람해석 모델들의 결과를 비교하여 대상지역 및 도심지의 특성에 따른 각각의 범람해석 모델을 적용함으로써 보다 정도 높은 침수경향의 예측 및 범람특성을 규명하였다.



1.2 연구의 구성

본 연구는 총 4장으로 구성된다.

제1장에서는 본 연구의 배경 및 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해 간단히 기술한다.

제2장에서는 수치해석을 위하여 본 연구에서 제안하는 VOF법 및 범람해석모델에 관한 기초방정식과 경계조건에 대한 이론을 전개하고, 수치해석을 수행함에 있어 필요한 전반적인 사항을 기술한다.

제3장에서는 본 연구에서 제안한 모델을 적용하여 수치해석을 수행하고 월과량 추정 결과와 범람해석의 결과를 제시한다.

제4장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 연구의 결론으로 한다. 마지막으로 본 연구에 있어서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 제시한다.



제2장 이론적 배경

2.1 폭풍해일모델

2.1.1 개요

폭풍해일은, 주로 태풍의 중심부근에서 발생하는 저기압에 의한 수위상승(pressure setup)과 바다에서 육지로 향하여 부는 강풍과 해면과의 마찰력에 의한 수위상승(wind setup) 및 고파랑의 쇄파에 의한 수위상승(wave setup)의 3성분으로 구성된다.

2.1.2 기초방정식

본 연구에 적용되는 기초방정식은 연직방향으로 적분된 다음의 연속방정식(2.1)과 비선형장파방정식(2.2), (2.3)으로 구성된다.



$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ & = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ & = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$



여기서, x, y 는 수평방향으로 각각 취한 직각좌표계이고, f 는 Coriolis계수, η 는 수면 변위, h 는 수심, D 는 기본수심 h 와 폭풍해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심, $M=UD$, $N=VD$, U, V 는 x, y 방향의 평균유속, ρ_w 는 해수의 밀도, p_0 는 수면에서의 기압, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직외동점성계수, g 는 중력가속도이다. 그리고, τ_{sx} 와 τ_{sy} 및 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해면 및 해저에서 x, y 방향으로 각각의 전단력으로 다음의 식으로 주어진다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D U_x \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.4)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D U_y \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.5)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.6)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.7)$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, U_x 와 U_y 는 해면상 10m에서 각각 x, y 방향으로 풍속, n_n 은 Manning의 조도계수, C_D 는 해면저항계수(항력계수)로, 항력계수는 모형실험이나 현지관측에 기초한 많은 경험값이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 다음의 Mitsuyasu and Kusaba(1984)에 의한 제안식을 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 U_{10}) / 10^3 & (U_{10} < 8m/s) \\ (0.581 + 0.063 U_{10}) / 10^3 & (U_{10} \geq 8m/s) \end{cases} \quad (2.8)$$

여기서, U_{10} 은 해면상 10m에서 풍속이다.



2.2 SWAN모델

2.2.1 개요

SWAN(Simulation WAve Nearshore)에서 고려할 수 있는 전파과정은 지리적 공간좌표상에서의 이류, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 굴절, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 천수, 역류에 의한 파랑의 반사 및 차단, 구조물(장애물)에 의한 파랑의 반사, 차단 및 전달, Phase-decoupled approach를 이용한 회절, 파랑에 의한 평균수위 변동(wave-induced setup)이 있다. 그리고, 바람에 의한 파랑에너지의 생성, 백파(whitecapping), 쇄파(depth-induced wave breaking), 저면마찰(bottom friction)에 의한 파랑에너지의 소산, 비선형상호작용에 의한 파랑간의 에너지전달 등의 파랑에너지의 생성, 소산 등을 고려할 수 있다.

2.2.2 기초방정식

SWAN 모형에서 파랑은 쇄파대에서도 같이 비선형성이 큰 조건에서도 파랑의 스펙트럼 분포를 고정도로 예측할 수 있는 2차원 wave action density spectrum으로 표현된다. SWAN에서 고려되는 action density spectrum $N(\sigma, \theta)$ (σ 와 θ 는 각각 상대주파수와 파향)은 흐름이 존재할 때 파동(action density)은 보존되는 반면에 에너지(energy density)는 보존되지 않기 때문에, energy density spectrum $E(\sigma, \theta)$ 보다 일반화된 물리량이다. $N(\sigma, \theta)$ 는 $E(\sigma, \theta)$ 를 상대주파수 σ 로 나눈 값과 동일하다.

SWAN에서 파랑스펙트럼에 관한 기초방정식은 다음과 같이 주어진다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial X} C_X N + \frac{\partial}{\partial Y} C_Y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2.9)$$

여기서, 좌변의 첫 번째 항은 파동의 국소적인 시간변화를 나타내며, 두 번째와 세 번째 항은 파동의 이류항을 나타낸다. 네 번째 항은 수심과 흐름의 변화에 의해 발생하는



상대주파수의 변화를 나타내고, 다섯 번째 항은 수심과 흐름으로 인한 굴절에 의한 변화를 나타낸다. 그리고, C_x, C_y 는 각각 X, Y 방향의 전파속도(군속도)를, C_σ 와 C_θ 는 σ 와 θ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. 우변의 항 $S = (S(\sigma, \theta))$ 는 식(2.10)와 같이 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지 입·출력을 표현한 것으로, 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형 상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.10)$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입을 나타내며, S_{ds} 는 쇄파와 저면 마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항을, S_{nl} 은 비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달을 나타내고 있다.



2.3 VOF모델

2.3.1 개요

최근, 자유수면을 갖는 비압축성유체의 동역학적인 문제의 해석을 위해 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF법이 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히, 일본에서는 잠제에 의한 쇄파해석에 岩田 등(1994)이 처음으로 VOF법을 적용하였고, 유럽에서는 Petit et al.(1994), Van Gent et al.(1994) 등에 의해 VOF법의 유효성이 보고되고 있으며, 그 이후에 許(2000)는 3차원구조물에 대한 파력해석에까지 VOF법을 확장시켰다. 또한, 많은 일본 연구자에 의한 공동연구의 결과로 개발된 CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究Center, 2001)는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 김 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고, 잠제주변의 파동장해석을 수행하였다.

CADMAS-SURF에서 적용하고 있는 Fig. 2.1의 수치파동수로는 2차원의 수치파동수로 내에 파의 재반사를 방지하기 위한 개경계처리기법으로 해석영역의 양쪽에 에너지감쇠영역을 두고 있고, 조파를 위해 조파소스를 적용하고 있다.

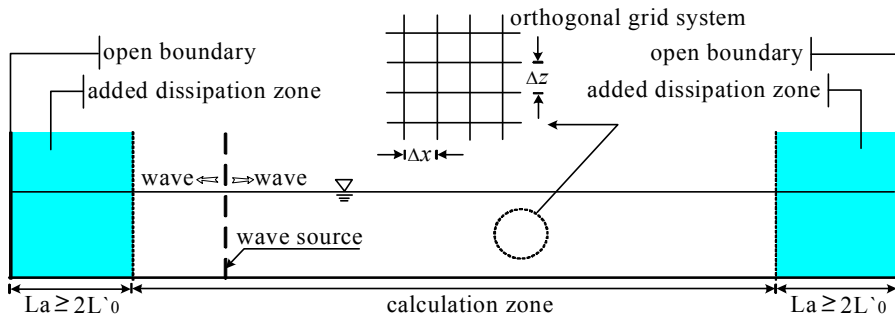


Fig. 2.1 Schematic sketch of the numerical wave tank.

2.3.2 불규칙파의 조파

CADMAS-SURF는 규칙파 뿐만 아니라 불규칙파에 대해서도 검토가 가능한 수치모델로, CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 조파지점에서의 수위변동 및 물입자속도(수평 및 연직유속)를 사용자가 독자적으로 입력데이터로 작성할 필요가 있다. 일반적으로 CADMAS-SURF에서는 선형이론으로부터 얻어진 성분파를 선형중첩하여 불규칙파를 조파하게 되지만, 이 때 조파지점에서 발생하는 파에서 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 불규칙파로서 해석하기 위해 필요한 100파 정도의 파수를 얻기까지는 다소 무리가 있을 수 있고, 대상으로 하는 불규칙파에 대한 검토의 결과를 과대평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 절에서는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우에 문제로 지적되는 평균수위상승을 억제하면서 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 시스템을 기술한다 (Fujiwara, 2005; 이민기, 2007).

(1) 불규칙파의 조파방법

불규칙파의 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(2.11)~(2.13)으로 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.11)$$

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

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (2.13)$$



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, 진폭 a_m 은 식(2.14)로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (2.14)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도로, 본 연구에서 적용하는 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식(2.15)의 Bretschneider-Mitsuyasu(1970)의 스펙트럼이다.

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (2.15)$$

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 Stokes의 질량수송속도(mass transport velocity)를 빼주는 방법을 적용한다(Fujiwara, 2005; 이민기, 2007). 즉, 식(2.12)에서 질량수송속도를 뺀 수평유속 $u(z, t)$ 는 식 (2.16)과 같이 표현된다.

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \overline{U}_m \right\} \quad (2.16)$$

여기서, Stokes의 질량수송속도 \overline{U}_m 은 식 (2.17)로 주어진다.

$$\overline{U}_m = \frac{1}{2} \frac{\pi H_m}{T_m} \frac{\pi H_m}{L_m} \frac{\cosh 4\pi(h + \overline{z}_m)/L_m}{\sinh^2(2\pi h/L_m)} \quad (2.17)$$

여기서, \overline{z}_m 는 물입자의 평균위치를 나타낸다.



2.4 범람해석 모델

2.4.1 개요

범람류해석을 위해 Xanthopoulos and Koutitas(1976)은 범람류의 거동에 천수방정식을 적용하여 유한차분법으로 해석하였으며, Miura and Shimizu(1993)은 건물이나 도로가 복잡하게 배치되어 있는 도시역에 적용하여 범람류를 계산하였다. 武田(1996)은 임해해역에서의 고조범람해석을 수치해석을 통해 해석하였으며, 도심부의 건물 등과 같은 구조물이 존재하는 경우에 계산격자내에서 건물이 차지하는 점유율의 개념을 도입하여 수치계산을 수행하였다. 또한, Takeda et al.(2005)은 유한체적법의 개념을 도입한 비구조격자를 이용하여 폭풍해일 등에 의한 연안역에서의 범람을 도로를 통한 홍수전파의 특성으로 재현하여 해석하였다. 본 연구에서는 직각좌표계를 적용한 정방형격자의 범람해석법과 비구조격자의 범람해석법을 각각 사용하여 연안역에서 폭풍해일에 의한 홍수 범람류의 전파특성을 유한차분법으로 해석한다(김도삼 등, 2007). 그리고, 태풍 내습시에 지형데이터를 이용하여 연안역에서 폭풍해일의 쳐오름으로 인한 범람해석을 수행한다. 다음으로, 임의의 가상적인 지형에 3차원 VOF법을 이용한 범람해석을 수행하여 그 적용성을 검토한다.

2.4.2 데카르트좌표계 모델

(1) 기초방정식

평면2차원에서 범람모델의 기초방정식은 연속방정식(2.18)과 운동방정식(2.19), (2.20)로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (2.19)$$



$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (2.20)$$

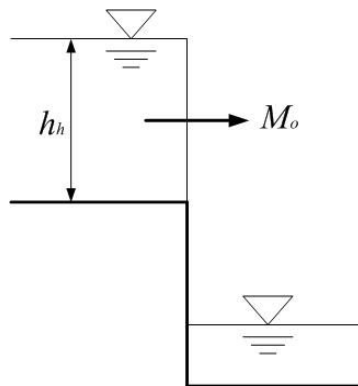
여기서, $M = uh$, $N = vh$, ρ_w 는 해수의 밀도, τ_x 와 τ_y 는 해저에서 x , y 방향으로 각각의 전단력이며, H 는 수위 ($H = h + z$, z 는 지반고)이다.

그리고, 범람을 해석하는 경우 수위가 0인 상태의 격자에 범람수가 전파하는 범람수 선단부의 취급이 문제가 된다. 본 연구에서는 선단부를 포함하여 범람수가 불연속이 되는 경우에 Fig. 2.2에 나타낸 지반고와 수위의 관계에 따라 단락식이나 월류식을 각각 적용하였다. 즉, 인접한 지역에 비해 지반고가 높은 경우(Fig. 2.2(a))에 식(2.21)의 단락식을, 인접한 지역에 비해 지반고가 낮은 경우(Fig. 2.2(b))에 대해서는 식(2.22)의 월류식을 각각 적용하여 유량을 산정한다.

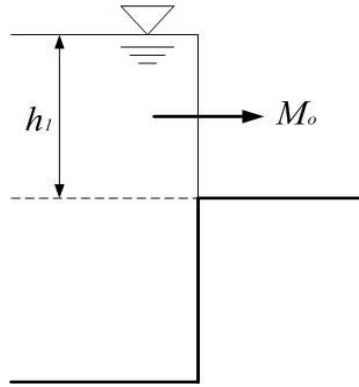
$$M_o = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (2.21)$$

$$M_o = \mu' h_i \sqrt{2gh_i} \quad (2.22)$$

여기서, M_o 는 월류유량, $\mu = (2/3)^{3/2} = 0.544$, $\mu' = 0.35$ 이며(井上, 1986), h_h 는 단락시의 수심, h_i 은 월류시의 수심을 나타낸다.



(a) Case of down-stream



(b) Case of up-stream

Fig. 2.2 Concept of flood flow head.

침수역(침수되는 영역)과 지반역(침수되지 않는 영역)의 경계는 수심의 최소치 $\varepsilon = 0.001m$ 에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 이 때 ε 이하의 지역에 대해서는 지반역, ε 이상의 지역에 대해서는 침수역으로 표현된다. 지형정보(지반고)를 파악하여 침수역인지 아닌지를 판단한다. 또한, 침수역이 지반역으로 변하는 경우에 발생할 수 있는 (-)수심에 대해서는 수심을 영(零)으로 하였다.

2.4.3 비구조격자 모델

(1) 기초방정식

본 연구에서는 영역을 다각형의 비구조격자로 분할한다. 그리고, 전 영역에 대해 $x-y$ 적교좌표축을 설정해 Fig. 2.3에 나타내는 바와 같이 각 방향의 유량 및 유속을 비구조격자의 경계에서 수심을 비구조격자의 도심으로 정의해 leap-frog법을 이용해 계산한다.

비구조격자 모델의 범람해석에 이용한 기초방정식은 연속방정식(2.18)과 운동방정식(2.19), (2.20)으로 구성된다. 수치계산에서 연속방정식은 Fig. 2.4에 나타내는 바와 같이 식(2.23)과 같이 차별화 된다.

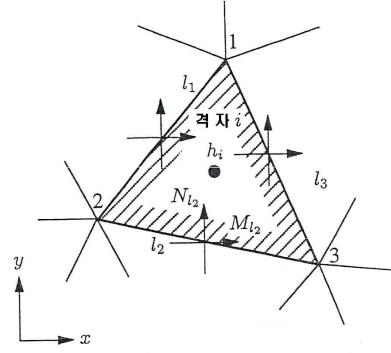
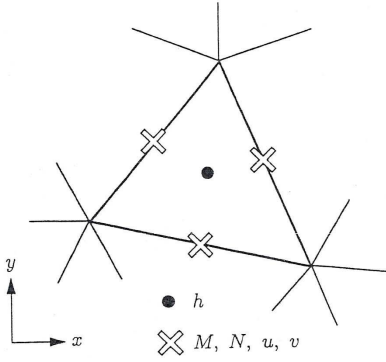


Fig. 23 Definition of unknown quantity. Fig. 24 Area of continuity equation.

$$\frac{h_i^{n+3} - h_i^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{A_i} \sum_{L=1}^{m_i} \{M_L^{n+2}(\Delta y)_L - N_L^{n+2}(\Delta x)_L\} = 0 \quad (2.23)$$

여기서, h_i 는 격자 i 의 수심, m_i 는 격자 i 를 둘러싸는 링크의 수, A_i 는 격자 i 의 면적이다. 그리고, M_L , N_L 는 각각 링크 L 상에서의 x , y 방향의 유량을 나타낸다. 격자 i, j 사이의 링크 L 의 계산은 Fig. 25에 나타내는 값을 이용해 다음과 같은 운동방정식을 차분화하여 수행된다.

$$\frac{M_L^{n+2} - M_L^n}{2\Delta t} + M1 + M2 = -g \widetilde{h}_L^{n+1} (\nabla H)_x - \frac{g \widetilde{n}_L^2 \frac{M_L^{n+2} + M_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\widetilde{h}_L^{n+1})^{4/3}} \quad (2.24)$$

$$\frac{N_L^{n+2} - N_L^n}{2\Delta t} + N1 + N2 = -g \widetilde{h}_L^{n+1} (\nabla H)_y - \frac{g \widetilde{n}_L^2 \frac{N_L^{n+2} + N_L^n}{2} \sqrt{(u_L^n)^2 + (v_L^n)^2}}{(\widetilde{h}_L^{n+1})^{4/3}}$$

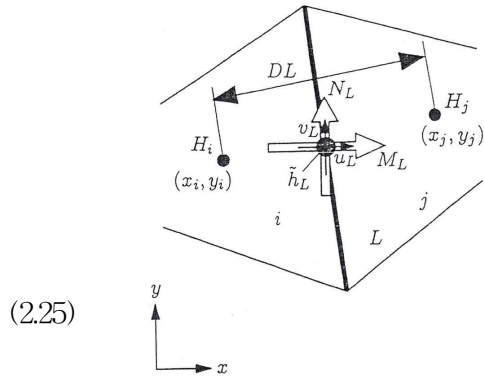


Fig. 2.5 Calculation of momentum equation.

여기서, M_L , N_L 은 링크 L 상에서 x , y 방향의 유량, u_L , v_L 은 링크 L 상에서 x , y 방향의 유속이다.

2.4.4 폭풍해일에 의한 범람해석 모델

(1) 기초방정식

본 연구에 적용되는 기초방정식은 2.1절에 기술한 연속방정식(2.1)과 비선형장파방정식 (2.2), (2.3)으로 구성된다. 자세한 사항은 본 논문 2.1절을 참고하기 바란다.



제3장 수치해석결과

3.1 폭풍해일

3.1.1 태풍 Maemi의 내습시 최대폭풍해일고

본 연구에서는 태풍 Maemi에 의해 많은 피해를 입었던 부산광역시 해운대구 수영만 매립지를 대상으로 태풍 Maemi 내습시 시각에 따른 태풍의 위치(경도, 위도), 기압심도, 태풍반경 및 이동속도(부산광역시, 2005)를 입력조건으로 최대폭풍해일고를 추정하였으며, Fig 3.1에 나타내는 바와 같이 대상지역의 전면에서 약 0.82m의 폭풍해일고가 나타나는 것을 알 수 있다.



Fig 3.1 Spatial distribution of maximum storm surge height for typhoon Maemi.

3.2 SWAN모델에 의한 천해파랑

3.2.1 대상영역 및 조건

본 연구에서 대상으로 하는 해운대구 수영만 매립지에서의 천해파랑산정은 SWAN모델(Hasselmann et al., 1973)로부터 추산하였다. 계산영역의 광역은 200m, 중역은 50m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였으며, 격자구성에 대한 제반사항을 Table 3.1에, 계산영역을 Fig. 3.2에 제시한다. 고려된 계산영역의 수심데이터와 해안선은 기본적으로 수치해도를 이용하였고, 전절에서 폭풍해일고의 추정으로부터 해석되는 바람장을 계산영역에 일치하도록 계산에 필요한 바람장의 데이터를 추출하였다. 설계조위는 전절에서 얻어진 최대폭풍해일고 0.82m와 만조위 1.2m(해양수산부, 2005)로부터 산정하였으며, 적용한 심해설계파 제원($H_s=12.4m$, $T_s=15.0s$, $S25^\circ E$)은 태풍 Maemi 내습시 부산신항만의 외곽방파제인 동방파제의 전면해역에서 실측되어진 파고값으로부터 역추산된 심해파를 사용하였다(POSCO건설, 2004).

Table 3.1 Mesh sizes applied to each area.

구 분	Mesh Size(m)	I _{mesh} ×J _{mesh}	비 고
AREA No.1	200	385×282	광역
AREA No.2	50	420×320	중역
AREA No.3	20	180×125	협역

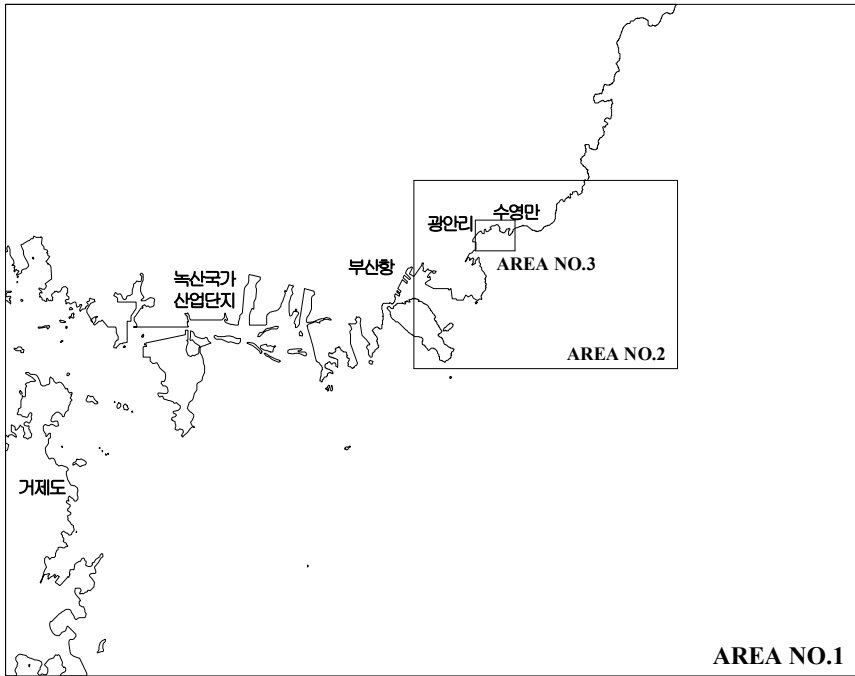


Fig. 3.2 Calculating areas of SWAN simulation.

3.2.2 수치해석결과



태풍 Maemi에 의해 피해를 입었던 부산광역시 해운대구 수영만 매립지를 대상으로 천해파랑을 추산하였다. Fig. 3.3은 설계조위 및 제시된 심해파랑조건($H_s=12.4m$, $T_s=15.0s$, $S25^\circ E$)을 적용하여 산정된 파고분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 3m 이상의 파고분포를 보이고 있으며, 대상영역의 전면해역에서 3.5~4.0m의 파고분포가 나타난다. Fig. 3.4는 수영만 매립지 인근해역에서 wave setup의 분포를 나타낸 결과이다. 대상해역의 전면에서 15cm 전후의 wave setup 분포를 나타내고 있다.



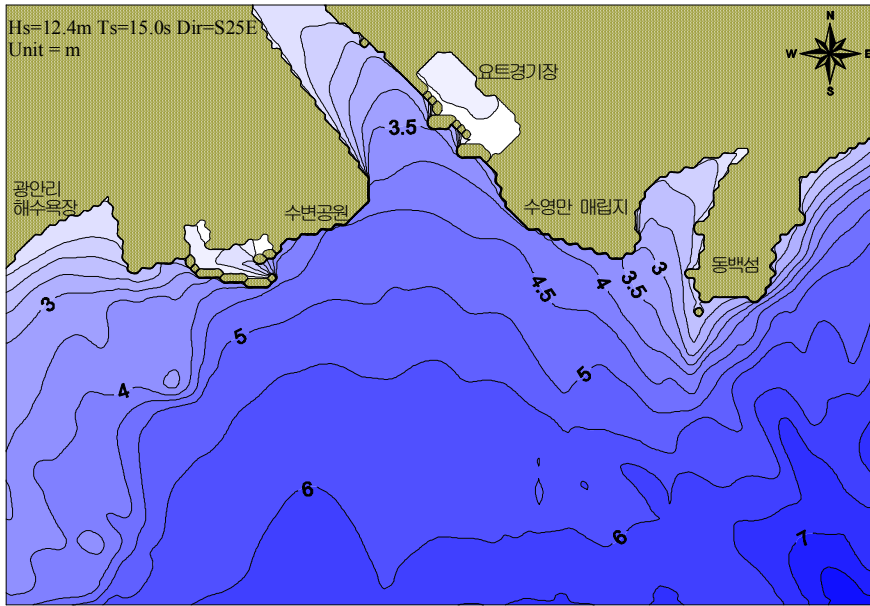


Fig. 3.3 Spatial distribution of wave height

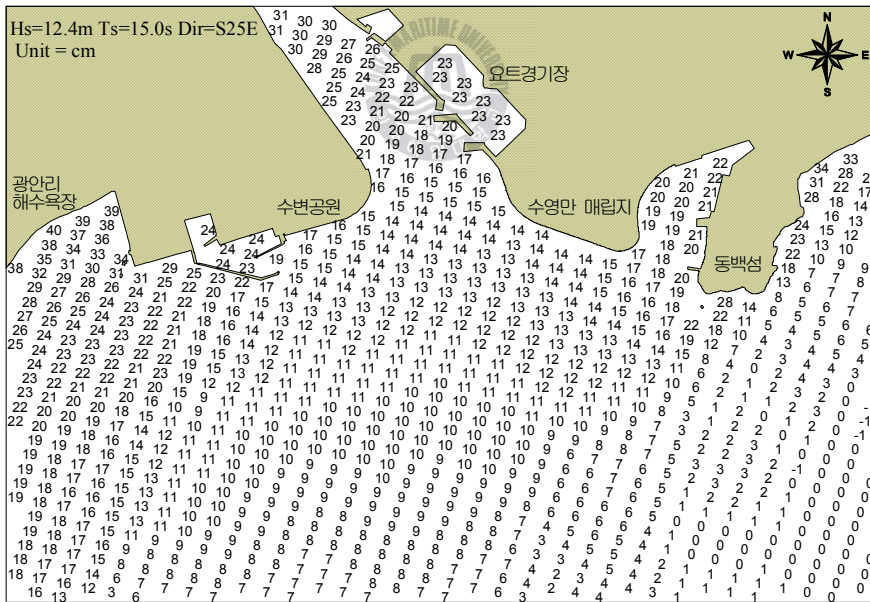


Fig. 3.4 Spatial distribution of wave setup

3.2.3 설계조위 결정

월파량의 계산 혹은 그의 수리실험에서 가장 큰 변수가 되는 조위는 결과적으로 Table 3.2의 설계조위에 본 연구에서 얻어진 wave setup에 의한 수위상승량을 고려한 조위가 최종설계조위로 되어야 한다. Table 3.2는 적용된 파랑조건($H_s=12.40\text{m}$, $T_s=15.00\text{s}$, $\text{Dir}=S25^\circ E$)의 경우에 최종설계조위를 나타낸다.

Table 3.2 The last design water level.

심해파랑 지점	설계조위 (m)	심해파랑조건			최대 wave setup량 (cm)	최종설계조위 (m)
		Hs(m)	Ts(s)	Dir		
No.6360	D.L.(+)2.02	12.40	15.00	S25°E	15	D.L.(+)2.17



3.3 불규칙파에 의한 월파유량의 추정

3.3.1 대표단면에서 월파유량의 추정

(1) 대표단면의 형상 및 월파의 재현

Fig. 3.5는 불규칙파랑의 수치실험에 적용된 수영만 매립지의 대표단면형상을 나타내고 있다(부산광역시, 2005).

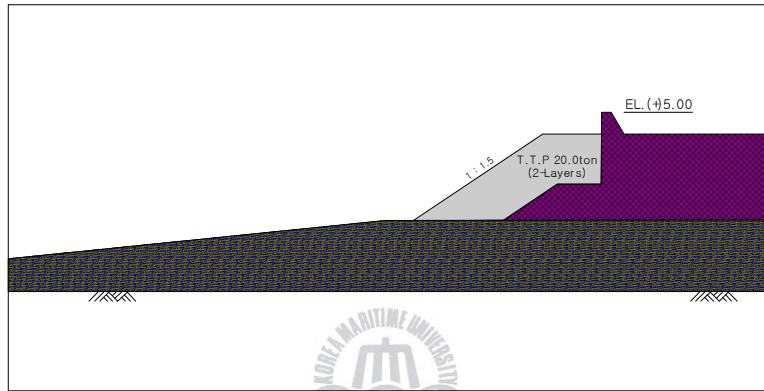


Fig. 3.5 Representative cross section of seawall used in numeric simulation.

수영만 매립지에서의 월파상황을 검토하기 위해 적용된 입사파랑조건을 Table 3.3에 나타낸다. Table 3.3의 조건은 호안의 반사를 고려하지 않고 얻어진 호안전면에서 입사파랑 조건이다.

Table 3.3 Incident wave condition.

단면형상	수심(m)	최종설계조위(기압의 영향+바람의 영향+wave-setup)	Hs(m)	Ts(s)
대표단면	D.L.(-)7.0m	D.L.(+)2.17	4.0	10.0

Fig. 3.6은 불규칙파랑의 산정법으로 계산하여 얻어진 불규칙파의 월파현황을 나타내며, TTP의 반사율은 계산상에서 공극률로 적용되었다. 결과에 의하면, 대표단면에서 상당한 월파를 허용하는 것을 알 수 있다.

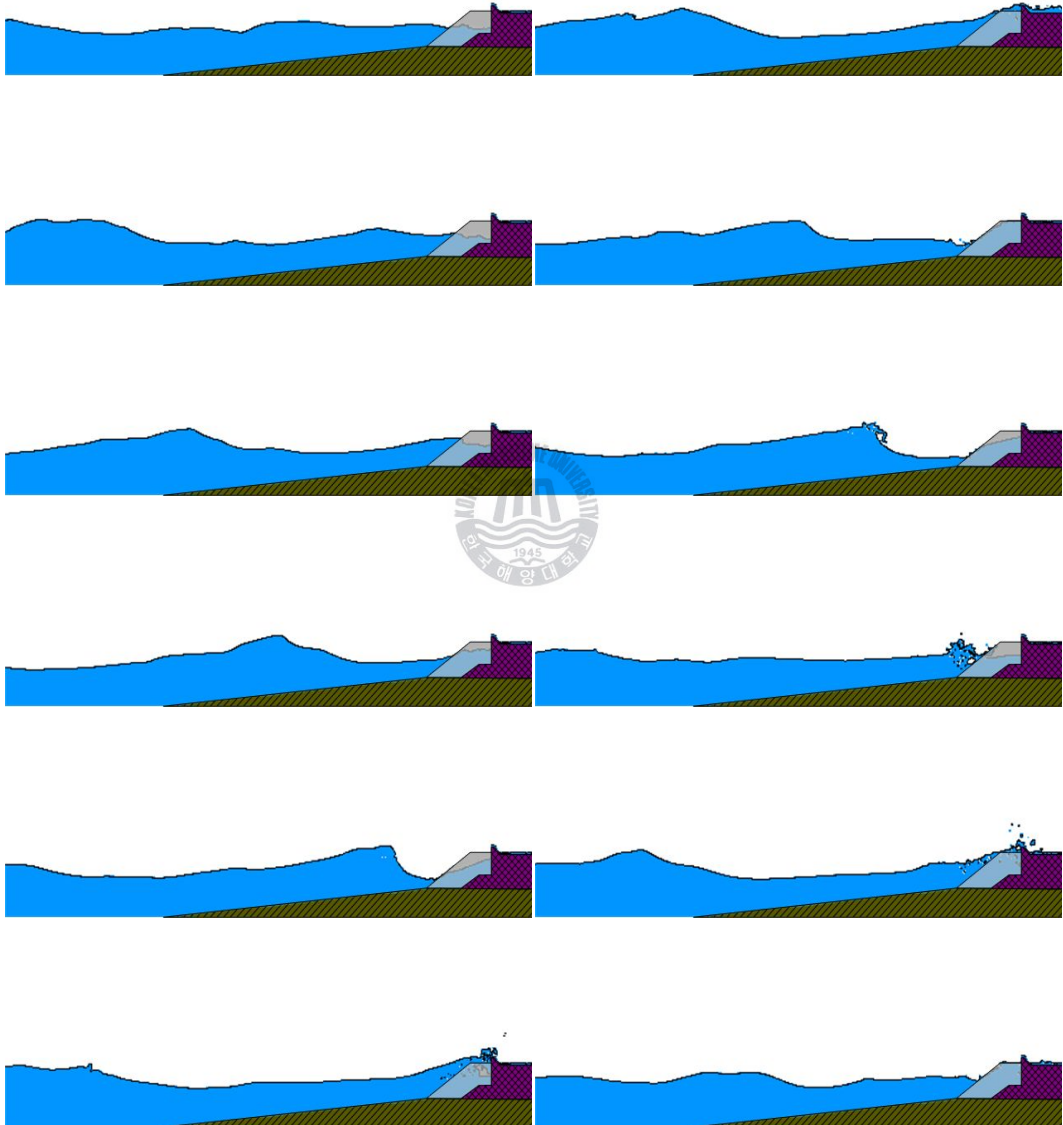


Fig. 3.6 Snapshot of wave overtopping simulation.

(2) 대표단면에서 월파량

Table 3.3의 조건으로 산정한 불규칙파의 월파량은 호안의 배후지가 주거지역인 경우의 허용월파량 $0.01 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ (해양수산부, 2005)를 훨씬 초과하는 $0.13 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ 의 값을 나타내었다. 본 연구에서는 월파량 $0.13 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ 의 값을 입력치로 하여 범람해석을 실시한다.



3.4 범람해석

3.4.1 관측결과

3.3절의 수치모형실험에서 산정된 불규칙파의 월파량을 적용시켜 침수현상을 재현하여 월파에 의한 침수역과 침수위의 변화를 검토한다. 본 연구에서는 불규칙파에 의한 월파량 $0.13 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ 의 값을 입력치로 하여 범람해석을 실시하였으며, 범람류의 거동에 영향을 미치는 조도계수의 경우에 주거지격자는 0.067 (Miura and Simizu, 1993), 도로는 0.043 (Fukuoka et al., 1996)의 값을 적용하였다. 수영만 매립지내의 침수현상을 상세히 나타내기 위하여 x 축과 y 축의 격자크기를 2m로 각각 설정하여 계산하였다. Fig. 3.7은 수영만 매립지의 현지조사를 토대로 작성된 침수피해 상황도(부산광역시, 2005)이며, 음영으로 표시된 부분이 침수면적이다. 이는 현지주민들의 설문조사에 의해 작성된 개략적인 결과로 실제 피해를 입은 지역만 침수피해 상황도에 반영이 되었고, 배후지 뒤편의 도로주변 및 블록은 약 30~50cm의 침수고를 보였음에도 불구하고 실제 피해를 입지 않은 지역이라서 상황도에 반영이 되지 않았기 때문에 실제 침수면적과는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.



Fig. 3.7 A survey of inundation area behind Su-yeong bay.

3.4.2 데카르트좌표계 모델을 이용한 침수해석

(1) 범람해석의 결과

Fig. 3.8은 수치실험에 사용된 지형데이터를 추출하기 위한 삼각망을 작성한 것으로 해석결과를 상세히 나타내기 위해 격자크기를 2m로 설정하여 지형데이터를 추출하였다. Fig. 3.9는 본 연구의 데카르트좌표계 모델에 의해 추정된 침수역의 시간별 공간분포를 나타낸 그림이다. 해석결과를 살펴보면, 2.5m 이상의 높은 침수고가 나타나는 첫 번째 블록의 좌측과 두 번째 블록의 좌측 그리고 가운데 부분은 태풍 Maemi 내습시에 공사를 위한 터파기에 의해 지반고가 상대적으로 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 첫 번째 블록과 세 번째 블록의 좌측부분에서는 일부 3.0m정도의 침수고가 나타났는데, 이러한 현상은 이 부분의 지반고가 주위보다 현저히 낮아서 나타난 결과로 볼 수 있다. 첫 번째 블록의 우측은 수치지도상에 높은 언덕으로 표현되어 있어 침수현상이 발생하지 않았다.

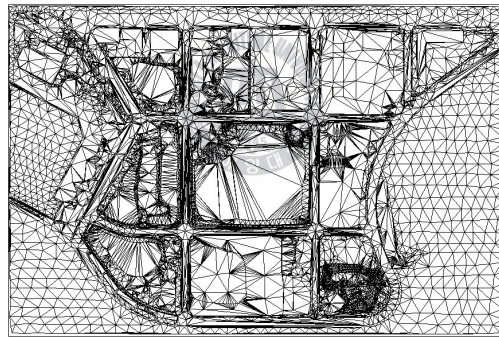
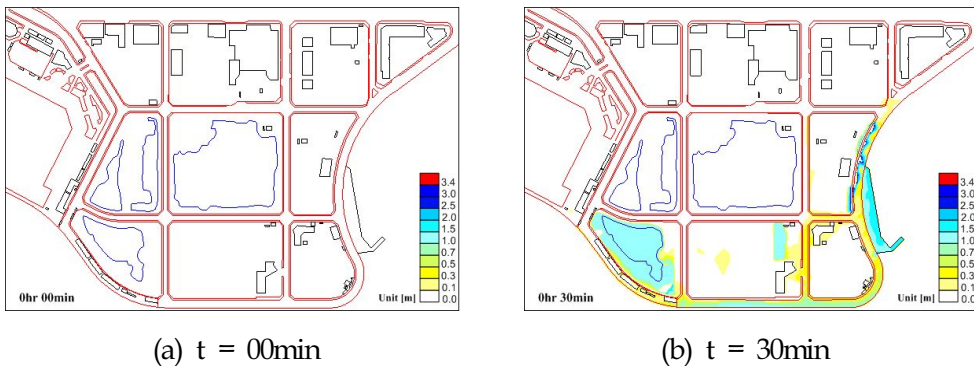
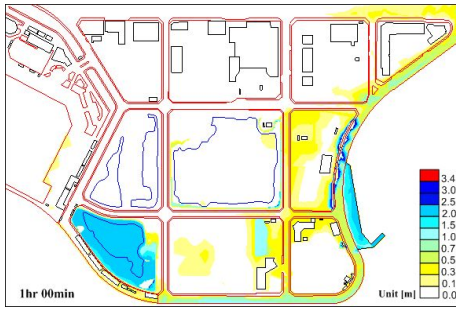
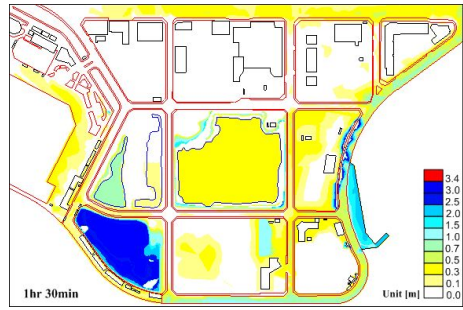


Fig. 3.8 Trigonometric network for topographical data.

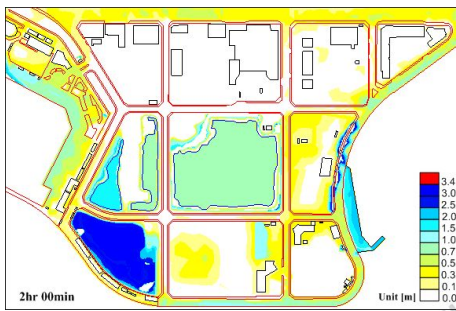




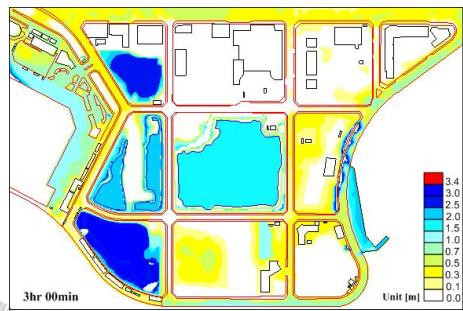
(c) $t = 60\text{min}$



(d) $t = 90\text{min}$



(e) $t = 120\text{min}$



(f) $t = 180\text{min}$

Fig. 3.9 Spatial distribution of inundation depth by structure grid system behind Su-Yeong bay.

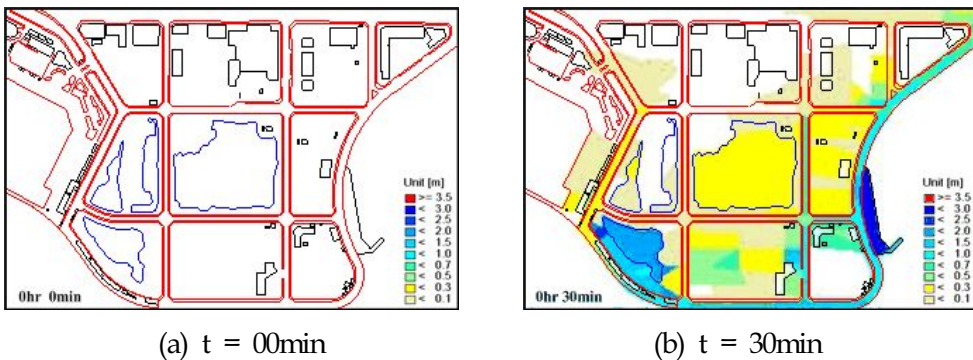
3.4.3 비구조격자 모델을 이용한 침수해석

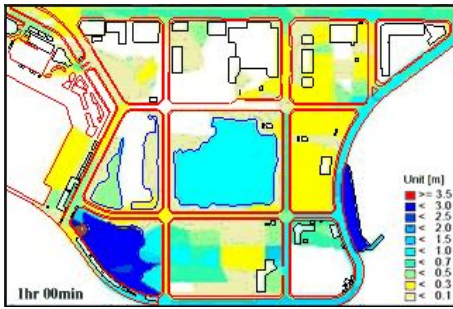
(1) 범람해석의 결과

Fig. 3.10은 범람해석을 실시하기 위해 설정한 비구조격자의 형태를 나타낸 그림이며, Fig. 3.11은 본 연구의 비구조격자 모델에 의해 추정된 침수역의 시간별 공간분포를 나타낸 그림이다. 해석결과를 살펴보면, 데카르트좌표계 모델과 마찬가지로 2m 이상의 높은 침수고가 나타나는 첫 번째 블록의 좌측, 두 번째 블록의 좌측과 가운데 부분은 태풍 Maemi 내습시 공사를 위한 터파기에 의해 지반고가 상대적으로 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 첫 번째 블록의 좌측부분에서는 일부 3.5m 정도의 침수고가 나타났는데, 이러한 현상은 이 부분의 지반고가 주위보다 현저히 낮아서 나타난 결과로 볼 수 있다. 전반적인 침수경향은 데카르트좌표계 모델과 비슷하지만, 전체적으로 침수고가 약간씩 높게 나타나며 특히, 뒤쪽 세 번째 블록에서 데카르트좌표계 모델의 의한 해석 결과는 거의 침수가 일어나지 않았지만, 비구조격자 모델에 의한 해석 결과는 약 30~70cm의 침수고를 나타내었다.

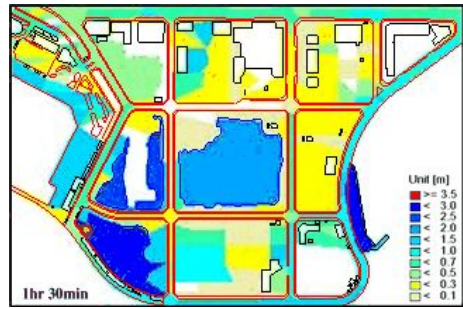


Fig. 3.10 Unstructure grid for numerical analysis.





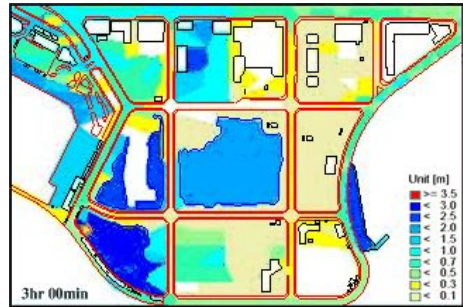
(c) $t = 60\text{min}$



(d) $t = 90\text{min}$



(e) $t = 120\text{min}$



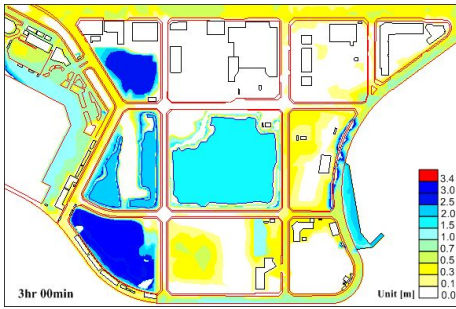
(f) $t = 180\text{min}$

Fig. 3.11 Spatial distribution of inundation depth by unstructure grid system behind Su-Yeong bay.

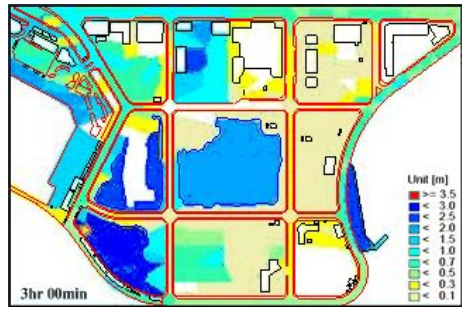
3.4.4 범람해석결과의 비교

Fig. 3.12는 태풍 Maemi 내습시를 대상으로 수영만매립지내에서 데카르트좌표계 모델과 비구조격자 모델을 적용하여 범람해석을 실시한 결과를 나타낸 그림이다. 두 해석모델을 비교하면, 전체적으로 비구조격자 모델이 데카르트좌표계 모델에 비해 침수고가 높게 나타난 것을 확인할 수 있으며, 실제 현장조사결과와 비교하였을때 실제로 피해를 입지는 않았지만 태풍 Maemi 내습시 약 30~50cm 정도의 침수고를 보인 뒤쪽 세 번째 블록의 침수현상을 고려한다면, 도로의 형상을 따른 범람류의 전파가 원활히 이루어진 비구조격자 모델에 의한 해석결과가 더 타당한 것으로 판단된다. 현지 주민들의 의견과 설문을 토대로 작성된 침수피해 현황도와 본 연구의 범람모델의 해석결과는 다소 차이를 보이긴 하지만 수영만매립지와 같은 시가지의 형태를 취하고 있는 지역의 범람해석에서는 비구조격자 모델이 더 적합한 것으로 판단된다.





(a) Structure grid system



(b) Unstructure grid system

Fig. 3.12 Compare with Structure grid system and Unstructure grid system.



3.4.5 폭풍해일에 의한 범람해석

(1) 대상영역 및 계산조건

본 연구에서는 2003년 경남 및 부산연안에 많은 피해를 입힌 태풍 Maemi를 대상으로 경남 마산시 마산만 인근에 있는 호안에서 폭풍해일고의 추정 및 폭풍해일에 의한 범람 해석을 실시하였다. 수치계산에 있어서 3.4.1절과 3.4.2절에 계산된 수영만 매립지와 다른 영역을 선택한 이유는 폭풍해일에 의한 범람해석은 파랑의 영향이 고려되지 않기 때문에 호안이 개방된 수영만 매립지와는 달리 마산만은 상대적으로 파랑의 영향이 적은 만의 형태를 취하고 있기 때문이다. 계산영역은 Fig. 3.13에 나타내는 바와 같이 제1영역에서 제9영역까지로 구성된다. 고려된 계산영역의 수심데이터는 수치해도를 이용하였으며, 범람해석의 수행에 필요한 지반고는 수치지형도를 이용하였다. 보다 정도 높은 범람 해석결과를 도출하기 위해 마지막 영역인 제9영역은 계산격자를 5m로 구성하여 계산하였다.

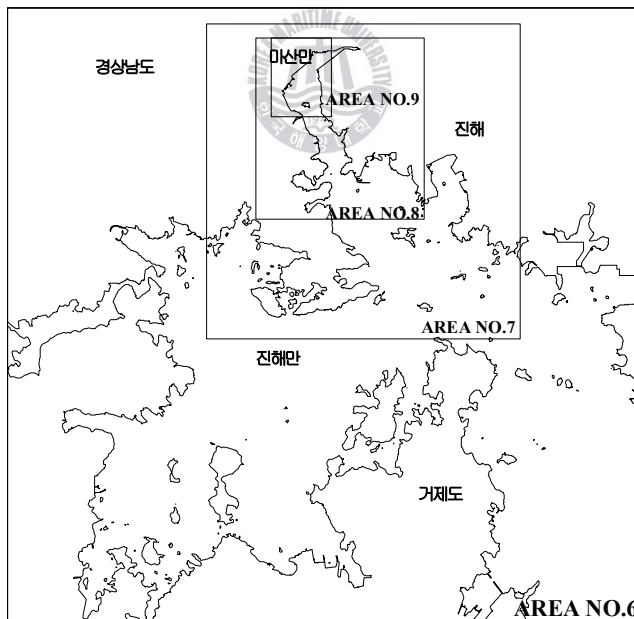


Fig. 3.13 Computation areas.

Fig. 3.14는 제9영역에서 지반데이터가 고려된 수심도로서, 계산격자를 5m로 설정하였

기 때문에 마산만 호안 배후에 있는 건물밀집도와 도로상황 등을 보다 상세히 나타낼 수 있었다. 본 연구에서는 침수피해가 예상되는 호안의 배후에 있는 시가지를 제외한 지반고가 높은 내륙 및 산지는 지반데이터를 고려하지 않았다.

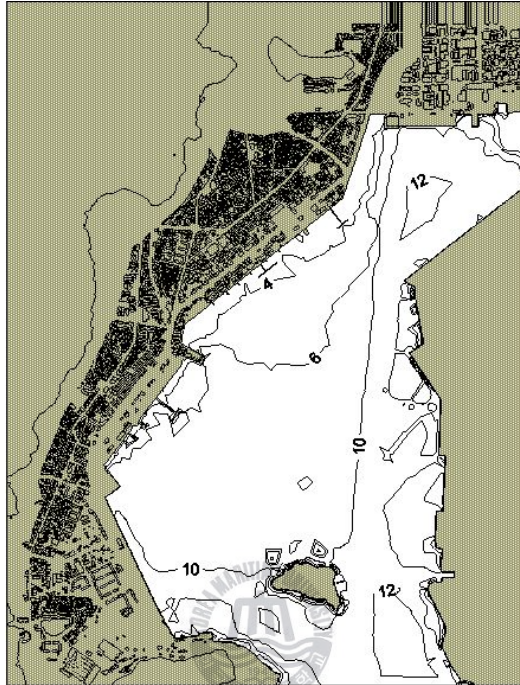


Fig. 3.14 Elevation in area No.9 including sea and land.

(2) 폭풍해일고의 산정 및 범람예측

Fig. 3.15는 태풍 Maemi 내습시 마산만 김조소에서 관측된 해일고와 폭풍해일에 의한 쳐오름을 고려하지 않은 계산1(마산시, 2004)과 쳐오름을 고려한 계산2에 있어서 해일고의 시간변화를 비교한 그림이다. 계산치는 모두 관측치보다 다소 작은 값을 나타내었다. 쳐오름을 고려한 계산2의 결과가 계산1의 결과보다 작아야 하지만 실제 계산결과는 계산2의 결과값이 약간 크게 나온 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 계산1은 쳐오름을 고려하지 않고 최소격자의 크기를 50m로 계산을 수행하였고, 계산2는 쳐오름을 고려하기 위해 최소격자의 크기를 5m로 수행하였기 때문에 계산1에 비해 보다 상세한 수심데이터가 보간 되었기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 관측치 또한 부진동의 효과를 제외한 최대해일고는 2.11m의 값(마산시, 2004)으로 본 연구의 계산결과와 거의 동일함을 알 수 있다.

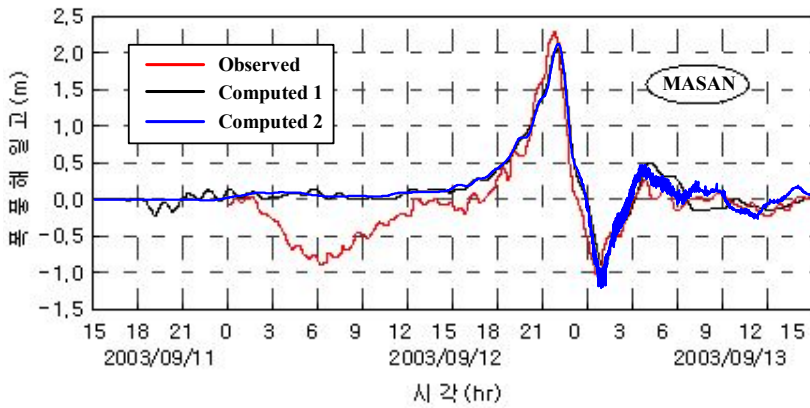
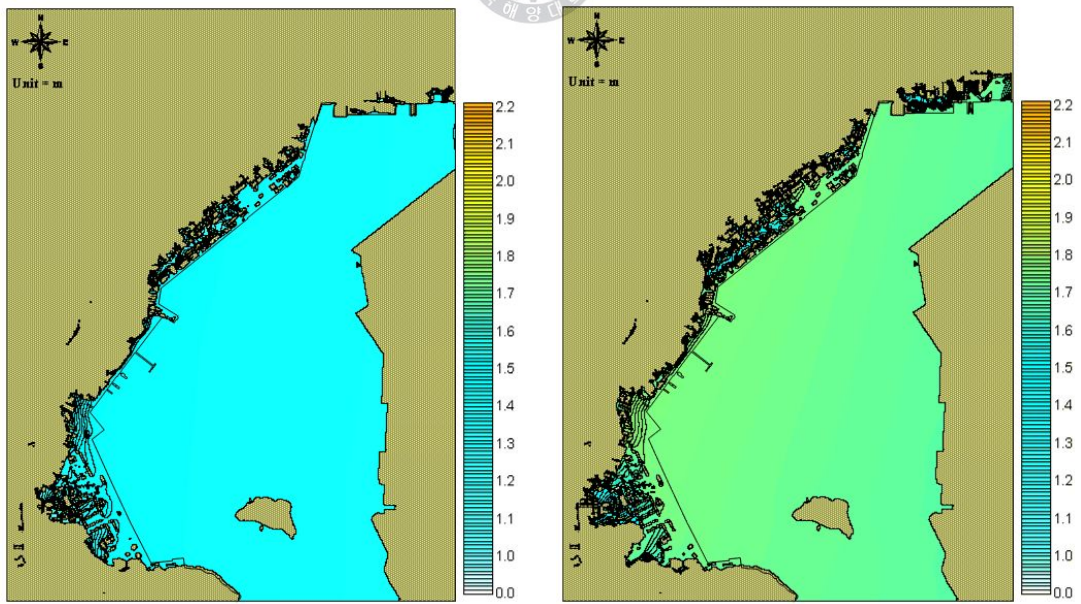


Fig. 3.15 Comparison between observed and calculated time variation of storm surge height in Masan bay.

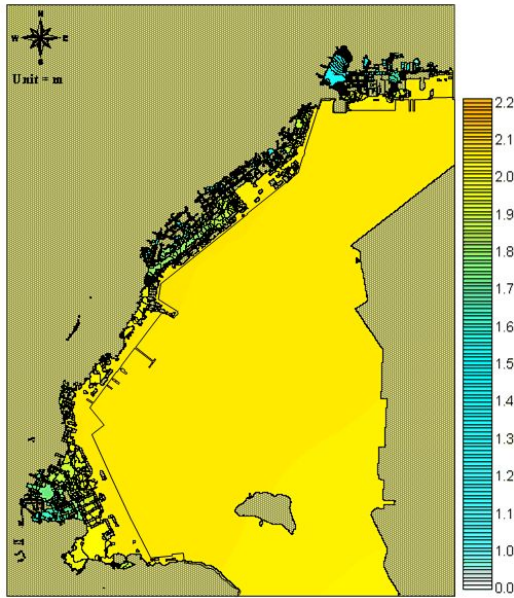
Fig. 3.16은 마산만 인근해역에서 시간에 따른 최대폭풍해일고 및 침수영역과 침수고를 나타낸 그림이다. 최대폭풍해일고는 태풍이 발생한지 31시간 만에 2.1m 전후의 값을 나타낸다. 이의 결과는 마산만 검조소의 관측결과(마산시, 2004)와 호안 배후를 비범람의 가정하에 얻어진 수치해석결과와 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있지만, 전술한 이유로 인하여 본 결과가 약간 큰 값을 나타낸다.



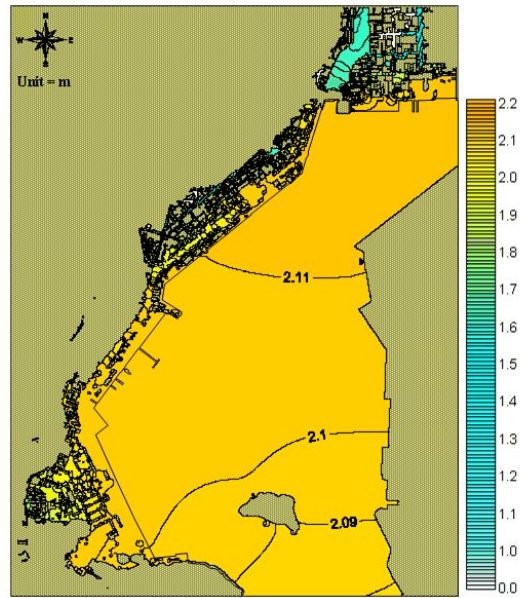
(a) t = 30hr 00min

(b) t = 30hr 30min





(a) $t = 30\text{hr } 50\text{min}$



(b) $t = 31\text{hr } 00\text{min}$

Fig. 3.16 Spatial distribution of maximum storm surge height and inundation area for typhoon Maemi around Masan bay.

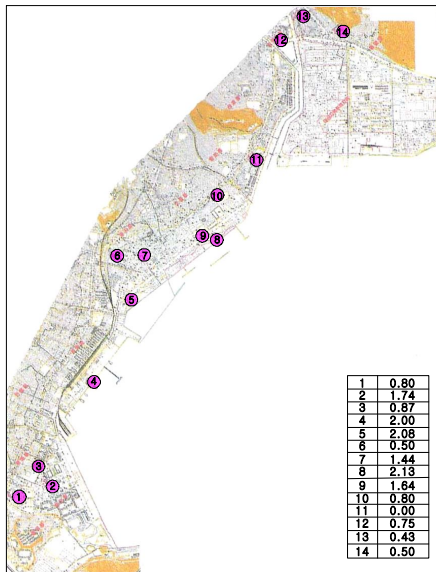


Fig. 3.17 Result of a field survey for inundation areas and depth in Masan bay.

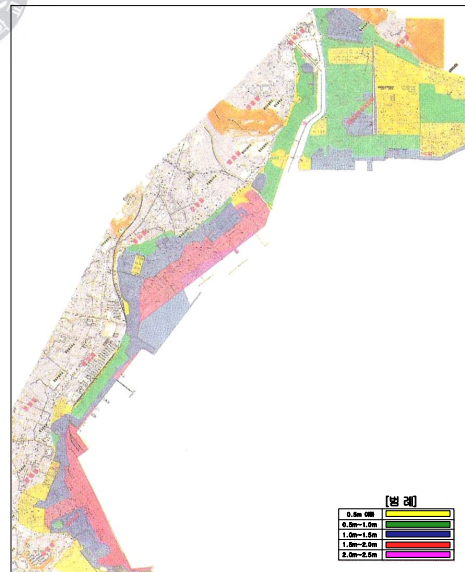


Fig. 3.18 Hazard map around Masan bay.

Fig. 3.17은 태풍 Maemi 내습시에 현지조사를 토대로 작성된 마산만의 침수역 및 침수고를 나타낸 그림이다(마산시, 2004). 호안 전 영역에 걸쳐 많은 침수피해가 있었음을 알 수 있으며 일부지역에서 최대 2m가 넘는 침수고를 보이고 있다. Fig. 3.16의 수치해석결과와 침수고에서 다소 차이를 보이고 있으나, 전반적인 침수역영 및 침수경향은 일치함을 알 수 있었다. Fig. 3.18은 마산만의 재해지도(마산시, 2004)를 나타낸 것으로 본 연구의 범람해석결과와 비교하면 비슷한 침수영역과 침수고를 나타내는 것을 알 수 있다.



제4장 결 론

본 연구에서는 연안재해중에 매우 큰 요소인 침수범람을 예측하기 위하여 경남 및 부산 연안역에 엄청난 피해를 입힌 태풍 Maemi를 대상으로 수영만매립지에서 폭풍해일고를 추정하였으며, 또한 정도 높은 천해설계파랑을 추정하기 위해 SWAN모델을 이용하여 부산광역시 해운대구 수영만매립지 인근을 대상으로 유의파고를 추산하였다. 그리고, 산정된 천해파랑을 수영만매립지 전면호안에 적용하여 VOF법으로 불규칙파에 의한 월파랑을 산정하였다. 다음으로, 산정된 월파랑으로부터 월류량을 추정하고, 이로부터 제내지에서 침수범람을 해석하기 위하여 범람해석 모델인 데카르트좌표계 모델과 비구조격자 모델을 각각 이용하여 대상지역의 배후에서 도로와 공장등 기타 건물 등에 대한 상세한 지형과 표고를 고려하여 침수범람을 예측하였다.

또한, 마산시 마산만 인근의 호안전면에서 폭풍해일고의 추정(비범람으로 가정) 및 호안 배후역에서 폭풍해일(범람으로 해석)에 의한 침수범람해석을 실시하였다. 이와 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

4.1 폭풍해일고, 천해파랑 및 월파유량의 추정

(1) 본 연구에서는 수영만매립지를 대상으로 태풍 Maemi의 내습시에 시각에 따른 태풍의 위치(위도, 경도), 기압심도, 태풍반경 및 이동속도를 입력조건으로 최대폭풍해일고를 추정하였으며, 대상지역의 전면에서 약 0.82m의 폭풍해일고가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 태풍 Maemi를 대상으로 얻어진 폭풍해일고 0.82m와 만조위 1.2m로부터 산정된 설계조위와 태풍 Maemi 내습시에 역추산된 심해설계파를 적용하여 대상지역의 전면해역에서 천해파랑을 추산한 결과 대상해역에서 약 3.5m~4.0m의 파고분포를 나타내었다.

(3) 수영만매립지의 호안전면에서 불규칙파에 의한 월파랑은 호안배후지가 주거지역인 경우의 허용월파랑 $0.01 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ 를 훨씬 초과하는 $0.13 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ 의 값이 산출되었다.



4.2 범람해석

4.2.1 데카르트좌표계 모델에 의한 범람해석

부산광역시 해운대구 수영만매립지를 대상으로 태풍 Maemi 내습시에 대해 데카르트 좌표계 모델을 이용하여 범람해석을 수행하였다. 현지조사를 토대로 한 피해상황도와 비교·검토한 결과에 의하면 일부 구간에서 조사결과와는 다소 상이한 침수고를 보이고 있었다.

4.2.2 비구조격자 모델에 의한 범람해석

수영만매립지에 대해 비구조격자 모델을 이용하여 범람해석을 수행하였다. 비구조격자 모델 역시 현지조사를 토대로 한 피해상황도와 비교·검토한 결과에 따르면 일부 구간에서 조사결과와 다소 상이한 침수고를 보이고 있었으며, 데카르트좌표계 모델에 비해 많은 영역이 침수되었음을 확인할 수 있었다. 실제 침수현상과 비교하면 도심지에서 도로를 따른 범람류의 전파가 원활히 이루어진 비구조격자 모델의 결과가 더 타당한 것으로 판단된다. 향후 도심지의 특성을 고려한 범람해석모델을 적용함으로써 보다 정도 높은 침수범람해석결과를 도출 할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.3 폭풍해일의 처오름에 의한 범람해석

경남 마산시 마산만의 인근에 있는 호안의 배후역을 대상으로 태풍 Maemi 내습시의 최대폭풍해일고의 추정 및 범람해석을 실시한 결과와 현지조사를 토대로 한 결과와 비교·검토하여 이로부터 본 연구의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한, 침수범람에 대한 현지조사결과와 전반적인 침수영역 및 경향이 상당히 일치함을 알 수 있었다.

이상의 범람해석에 대한 수치해석법은 향후 실제현장의 지반데이터를 이용할 수 있는 경우에는 보다 정도 높은 침수예측시스템으로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



〈 참고문헌 〉

- [1] 김도삼, 김지민, 이광호, 이성대, 2007 : 연안역에서 고파랑과 폭풍해일을 고려한 침수해석, 한국해양공학회지, 제21권 제2호, pp. 35-41.
- [2] 김도삼, 이광호, 2002 : 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지, 16(2), pp. 1-5.
- [3] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정관, 2001 : VOF법에 기초한 불투과잠제 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B), pp. 551-560.
- [4] 마산시, 2004 : 태풍 '매미'에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방지대책 보고서.
- [5] 부산광역시, 2005 : 해일피해영향분석 및 피해방지계획수립용역 보고서.
- [6] 이민기, 2007 : CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과 월파랑 추산에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교.
- [7] 해양수산부, 2005 : 항만 및 어항설계기준.
- [8] POSCO건설, 2004 : 03-00부두 태풍피해복구 시설공사 구조 및 수리계산서(제2권 폭풍해일 및 태풍 '매미'시 심해파추정).
- [9] Fukuoka, S., Kawasima, M., Matsunaga, N. and Maeuchi, H. (1994) : Flooding Water Over a Crowded Urban District, Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering, No.491, II-27, pp. 51-60.
- [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.
- [12] Hasselmann, K., and T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P.Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973 : Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
- [13] Hirt, C.W., and B.D. Nichols, 1981 : Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, pp. 201-225.
- [14] 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.
- [15] Miura, A., and Shimizu, Y. 1993 : Flood flow analysis in urban areas, International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization Bangkok, Thailand.
- [16] Mitsuyasu, H. and Kusaba, T., 1984 : Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind, Journal of Natural Disaster Science, Vol.6, No.2, pp. 43-50.
- [17] Takeda, M., Pokharel Parameshor and Naoki Matsuo, 2005 : The Study on overlapping between flood and storm surge in river and estuary region, 한국수자원학회 학술대회지, pp. 868~867.



- [18] Petit, H. A. H., Tonjes, P., van Gent, M. R. A., and van den Bosch, P., 1994 : Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model, Proc. 23rd Int. Conference on Coastal Eng., ASCE, pp. 511-524.
- [19] Van Gent, M. R. A., Tonges, H. A. H., and van den Bosch, 1994 : Wave action on and in permeable structure, Proc. 23rd Int. Conference on Coastal Eng., ASCE, pp. 1739-1753.
- [20] Xanthopoulos, Th. and Ch. Koutitas, 1976 : Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp. 321-330.
- [21] 岩田好一朗, 川崎浩司, 金度三, 1994 : 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 42, pp. 781-785.
- [22] 許東秀, 2000 : 潛堤による多方向不規則波の碎波特性と潛堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大學學位論文, 177p..
- [23] 沿岸開發技術研究センタ, 2001 : CADMAS-SURF 數値波動修路の開發・研究, pp. 10-29.
- [24] 武田 誠, 1996 : 高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に關する研究, 京都大學博士學位論文.

