

工學碩士 學位論文

명지주거단지 인근에서 폭풍해일과
연안파랑환경의 평가

**Evaluation of Storm Surge and Coastal Wave Environment
in Myeong-Ji Residential Complex**

指導教授 金 度 三

2007年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

土木環境工學科

奇 敬 學

Evaluation of Storm Surge and Coastal Wave Environment in Myeong-ji Residential Complex

by

Kyeong Hak Ki

*Department of Civil & Environment System Engineering
Graduate School
Korea Maritime University*

ABSTRACT

A natural disaster is increased by the unusual climate fluctuation due to ecocide and global warming in not only our country but also all over world, and the scale of damage is increased too. Coastal areas were damaged by typhoon and storm surges accompanying severe water wave in sea by effect of these environment, and recently, the interest about nature disaster with social confusion increases by the typhoon Rusa and Maemi's terrible damage. Therefore, the correct forecast of the occurrence time of storm surge and the water level rise amount is very important, because storm surges cause great damage to coastal area.

In this study, typhoon of Sarah, Thelma and Maemi, which caused terrible damage to the coastal area in the coast of Busan in the past, were taken as an object of the storm surge simulations. In addition, new

deepwater design wave conditions were applied to SWAN model, the characteristics of shallow waves were investigated. Based on this result, design water level considering storm surge and shallow wave estimated by new deepwater design wave were applied to computation of overtopping rate. Also, calculation of overtopping rate was calculated by the VOF method.

명지주거단지 인근에서 폭풍해일과 연안파랑환경의 평가

奇 敬 學

韓國海洋大學校 海事産業大學院
土木環境工學科

요 약

전 지구적인 이상기후변화로 우리나라 뿐 만 아니라 전 세계에서 환경과피와 지구온난화에 따른 예측이 곤란한 자연재해가 자주 발생하며 그 피해 규모도 증가하고 있다. 이러한 환경의 영향으로 해상에서 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인한 연안재해를 입어왔으며, 최근 태풍 Rusa와 Maemi에 의한 막대한 재산과 인명의 피해로 사회적 혼란과 함께 자연재해에 대한 관심이 증가하고 있다. 해일이 조석의 만조시에 중복하여 일어나면 수위가 매우 높아지므로 방조제를 파괴하고, 연안시설, 가옥, 인명 등에 큰 피해를 끼치기 때문에 해일의 발생시각과 수위 상승량을 정확히 예보하는 것은 매우 중요한 일이다.

본 연구에서는, 과거 부산 연안역에서 심각한 피해를 발생시킨 태풍 Sarah, Thelma, Maemi를 대상으로 폭풍해일고의 검토를 위해 수치시뮬레이션 실시하였다. 그리고, 부산 전 연안역에 대해서 신심해설계파 제원을 SWAN모델에 적용하여 천해파랑의 특성을 검토하였다. 이를 기초로

하여 추정된 폭풍해일고를 고려한 설계조위와 신심해설계파로부터 산정된 천해파량을 기초로 하여 VOF법으로 월파량을 산정하였다.

目 次

ABSTRACT	i
요약	iii
目次	v
LIST OF FIGURES	viii
LIST OF TABLES	x
LIST OF SYMBOLS	xi
 제1장 서론	 1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 연구의 구성	3
 제2장 이론적 배경	 4
2.1 폭풍해일모델	4
2.1.1 개요	4
2.1.2 태풍모델	5
2.1.3 기초방정식	6
2.2 SWAN모델	12
2.2.1 개요	12
2.2.2 기초방정식	12
2.2.3 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입항 S_{in}	13
2.2.4 파랑에너지의 소산 S_{ds}	14
2.2.5 비선형 상호작용에 의한 에너지전달항 S_{nl}	15
2.3 VOF법	16
2.3.1 개요	16

2.3.2 기초방정식	16
2.3.3 이류방정식	18
2.3.4 무반사모델	19
(1) 무반사 조파시스템	19
(2) 에너지감쇠대	19
제3장 수치해석결과	21
3.1 폭풍해일	21
3.1.1 태풍경로 및 조건	21
3.1.2 대상영역	25
3.1.3 수치계산의 검증	31
(1) 기압	31
(2) 폭풍해일고	33
3.1.4 기압장과 바람장의 해석	35
(1) 태풍 Sarah의 기압장과 바람장	35
(2) 태풍 Thelma의 기압장과 바람장	35
(3) 태풍 Maemi의 기압장과 바람장	35
3.1.5 폭풍해일고	42
3.2 SWAN모델에 의한 천해파랑	47
3.2.1 대상영역 및 조건	47
3.2.2 수치해석결과	52
(1) 녹산수문 및 하구언수문이 닫혀 있는 경우의 파고분포	52
(2) 녹산수문 및 하구언수문이 닫혀 있는 경우의 파고분포	55
3.2.3 설계조위 결정	58
3.3 월파량산정	59
3.3.1 원안의 대표호안단면에서 월파량의 추정	59
(1) 원안단면	59
(2) 원안의 호안단면에서 월파재현	60
(3) 원안의 호안단면에서 월파량	62
3.3.2 대안의 대표호안단면에서 월파량의 추정	62
(1) 대안단면	62

(2) 대안의 호안단면에서 월파재현	63
(3) 대안의 호안단면에서 월파량	64
제4장 결 론	65
4.1 폭풍해일	65
4.2 SWAN모델	65
4.3 월파량산정	66
<참고문헌>	67

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Astronomical tide and Meteorological tide	4
Fig. 2.2 Definition sketch of numerical wave channel	16
Fig. 3.1 Route of typhoon Sarah	22
Fig. 3.2 Route of typhoon Thelma	22
Fig. 3.3 Route of typhoon Maemi	23
Fig. 3.4 Route of typhoons used in numerical simulation	23
Fig. 3.5 Area of storm surge simulation	26
Fig. 3.6 Spatial distribution of water depth	30
Fig. 3.7 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi	32
Fig. 3.8 Comparison of storm surge height between measured and calculated results for typhoon Maemi	34
Fig. 3.9 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Sarah	37
Fig. 3.10 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Thelma	39
Fig. 3.11 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Maemi	41
Fig. 3.12 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Sarah ...	43

Fig. 3.13 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Thelma ...	44
Fig. 3.14 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Maemi ...	45
Fig. 3.15 Computation area of SWAN simulation	48
Fig. 3.16 Spatial distribution of water depth	51
Fig. 3.17 Spatial distribution of wave height and setup in case of closing floodgate	54
Fig. 3.18 Spatial distribution of wave height and setup in case of opening floodgate	57
Fig. 3.19 Section for original plan in numerical analysis	60
Fig. 3.20 Snapshot of overtopping	61
Fig. 3.21 Section for counterplan in numerical analysis	62
Fig. 3.22 Snapshot of overtopping	64

LIST OF TABLE

Table 3.1 Characteristics of typhoon Sarah	24
Table 3.2 Characteristics of typhoon Thelma	24
Table 3.3 Characteristics of typhoon Maemi	25
Table 3.4 Mesh sizes applied to each simulating area	26
Table 3.5 Maximum storm surge height in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi	46
Table 3.6 Mesh sizes applied to each simulating area	48
Table 3.7 Water level for each simulating area	49
Table 3.8 Deepwater design wave	49
Table 3.9 Reflection coefficient	51
Table 3.10 The last design water level considering the wave-setup	58
Table 3.11 Incident wave condition	60
Table 3.12 Overtopping rate in numerical analysis	62
Table 3.13 Overtopping rate in numerical analysis	64

LIST OF SYMBOLS

A	선형파의 성장
A_h	수평 와동점성계수
A_v	연직 와동점성계수
BE	파의 지속적 성장
C	파속
C_1	풍속저감계수
C_{bottom}	해저마찰계수
C_D	항력계수
C_M	관성력계수
C_X	X 방향의 전파속도(균속도)
C_Y	Y 방향의 전파속도(균속도)
C_σ	σ 공간에서의 전파속도
C_θ	θ 공간에서의 전파속도
D	전수심 ($h+n$)
D_{tot}	쇄파에 의한 총에너지의 소산율
$E(\sigma, \theta)$	에너지 밀도 스펙트럼
E_{tot}	총파랑에너지
n	폭풍해일에 의한 수면변위
F	VOF함수
f	Coriolis 계수
g	중력가속도
Γ	파형경사 종속계수
∇_v	유체의 공극률
∇_x	x 방향의 면적공극률

$\forall_z$	z 방향의 면적공극률
h	수심
k	파수
$\bar{k}$	평균 파수
l	에너지감쇠대의 넓이
l_0	에너지감쇠대의 개시위치
M	x 방향의 유량
N	y 방향의 유량
$\mathcal{M}(\sigma, \Theta)$	action 밀도 스펙트럼
n_n	Manning의 조도계수
v_ε	분자동점성계수와 와동점성계수의 합
p	압력
Δp	기압심도
p_c	태풍의 중심기압
p_r	태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압
p_0	수면에서의 기압
Φ	유속 등의 물리량
ρ_a	대기의 밀도
ρ_w	해수의 밀도
r	등압선의 곡률반경
r_0	태풍반경
S	파랑스펙트럼을 구성하는 성분파
S_{in}	바람에 의한 파랑으로의 에너지유입
S_{ds}	쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항
S_{nl}	비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달
σ	각주파수

$\bar{\sigma}$	평균 각주파수
τ_{bx}	해저에서 x 방향으로 전단력
τ_{by}	해저에서 y 방향으로 전단력
τ_{sx}	해면에서 x 방향으로 전단력
τ_{sy}	해면에서 y 방향으로 전단력
Θ_x	무차원계수
Θ_z	무차원계수
$U(x, t)$	조파소스의 유속
U	x 방향의 해저에서 해면까지 평균유속성분
U_1	해상풍의 풍속
U_2	태풍이동에 의한 풍속
U_{10}	해면상 10m에서의 풍속
U_*	마찰속도
U_{gv}	경도풍의 풍속
U_x	해면 10m에서 x 방향으로 풍속
U_y	해면 10m에서 y 방향으로 풍속
u	x 방향의 유속성분
V	y 방향의 해저에서 해면까지 평균유속성분
V_T	태풍의 진행속도
v	y 방향의 유속성분
v	동점성계수
w	z 방향의 유속성분
Δx	수평방향의 격자간격
z	지반고

제1장 서론

1.1 연구의 배경과 목적

전 지구적인 이상기후변화로 재해발생빈도가 증가함과 아울러 그 규모 또한 대형화 되는 추세이다. 우리나라 뿐만 아니라 전 세계에서 환경파괴와 지구온난화에 따른 기상이변, 게릴라성 집중호우 등으로 예측이 곤란한 자연재해가 자주 발생하며 그 피해 규모도 증가하고 있다. 이러한 환경변화의 영향으로 해상에서 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인한 연안재해가 빈번히 발생되고 있다. 특히, 우리나라 남해안의 연안역은 거의 매년 태풍으로 인한 막대한 연안재해를 입어왔으며, 최근 태풍 Rusa와 Maemi에 의한 막대한 재산과 인명의 피해로 사회적 혼란과 함께 자연재해에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 중 1959년도의 태풍 14호 Sarah, 1987년도의 태풍 5호 Thelma, 2003년도의 태풍 14호 Maemi는 남해안의 연안역에 엄청난 피해를 초래한 대표적인 태풍이다.

폭풍해일현상은 일반적으로 태풍 및 발달한 온대성 저기압에 의해서 일어나는 수위의 상승을 말한다. 즉, 태풍이나 발달한 저기압이 통과함에 따라 폭풍과 현저한 기압강하로 인하여 해안에서 예보조위보다 수위가 현저히 상승하는 현상을 폭풍해일이라고 한다. 해일이 조석의 만조시에 중복하여 일어나면 수위가 매우 높아지므로 인명과 재산에 큰 피해를 끼치기 때문에 해일의 발생시각과 수위 상승량을 정확히 예보하는 것은 매우 중요한 일이다.

한편, 연안에 설치되는 해양구조물은 일반적으로 파랑과 수위증가가 그 주요 외력인 자이며, 우리나라 해안구조물 설계를 위한 기준 또한 태풍의 내습빈도에 따른 파랑의 통계적 특성 값이 근간이 되고 있다. 그러나 최근에 와서 구조물의 안정성에 영향을 미치는 주요 요인인 파랑조건이 이상기상현상 등으로 점점 그 규모와 강도가 커지고 있고, 여기에 따른 대책과 설계기준 강화의 필요성이 대두되고 있는 것이 현실이다. 그리하여, 최근에 태풍내습에 따른 대상해역에서 파랑장의 영향을 추정하여 연안사업의 적절한 평가를 수행하기 위한 방안의 일환으로, 빈번한 이상기후의 영향을 고려한 신심해설계과가 추정되었다(한국해양연구원, 2005).

여기서, 본 연구의 대상지인 부산 명지주거단지 인근에서 전술한 3개의 태풍 Sarah, Thelma 및 Maemi에 대한 폭풍해일고를 추정하고, 이에 따른 신심해설계과가 내습하는

경우에 대상지 및 인근에서 파랑환경을 정확히 평가하는 것은 배후지의 배수계획, 지반 고의 결정 및 호안천단고의 산정 등에 주요한 요소이다. 따라서, 2003년 9월 경남 및 부산연안역에 막대한 피해를 입힌 14호 태풍 Maemi를 대상으로 폭풍해일고를 산정하고, 다음으로 과거의 기록에서 부산을 포함한 우리나라 남해안의 동부연안에 큰 피해를 발생시킨 1959년 14호 태풍 Sarah와 1987년 5호 태풍 Thelma에 대하여 폭풍해일고를 산정하였다. 그리고, 대상영역에서 가장 높은 폭풍해일고가 산정된 태풍 Maemi에 대해 추정된 자유대기풍과 해상풍을 조건으로 새로운 바람장을 추정하고, 그 결과를 SWAN모델에 적용하여 부산광역시 강서구 명지주거단지 주변해역에서 천해파랑의 특성을 검토함과 동시에, 추정된 설계조위와 신심해설계파를 고려한 천해파랑을 입력치로 하여 기존 및 대안의 호안단면에 VOF법을 적용하여 산정된 월파량으로 적절한 호안천단고를 제시하였다.

1.2 연구의 구성

본 연구는 총 4장으로 구성된다. 제1장에서는 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해 간단히 기술한다.

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

제3장에서는 본 연구에서 제안한 모델에 대한 수치해석을 수행하고 폭풍해일모델의 타당성, 대상지역의 최대폭풍해일고, 천해설계파랑조건 및 월파랑 추정결과를 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 개 요

Fig. 2.1과 같이 조석에는 2개의 성분이 있다. 그 중 하나는 태양과 달의 인력에 의해 해수면이 규칙적으로 변동하는 성분을 천문조(Astronomical tide)라고 하며, 천문조의 높은 피크를 만조(고조), 낮은 피크를 간조(저조)라고 한다. 만조와 간조의 차이인 조위차(조차)가 크게 되는 시기를 대조, 적게 되는 시기를 소조라고 하며, 모두 약 반개월의 주기로 나타난다. 달과 태양은 규칙적으로 운동하기 때문에 장기간에 걸쳐서 조위관측을 수행하면 과거 및 앞으로의 임의시각에 있어서 천문조위를 정확히 추정할 수 있다.

그러나, 태풍이나 저기압이 접근하여 기압이 저하되고 강풍이 불면 실제의 조위는 천문조보다 높아지게 된다. 또한, 해류의 유로가 변화하는 경우에도 수주에서 수개월에 걸쳐 조위가 변화하는 경우도 있다. 이와 같은 조위의 변화는 달이나 태양 등의 천체운동과는 직접적인 관계는 없고, 지구상의 여러 기상적인 요인에 의해 발생하기 때문에 기상조(Meteorological tide)라고 불린다. 그리고, 이 기상조의 진폭(천문조로부터 높이)을 폭풍해일고 혹은 조위편차라고 부른다.

폭풍해일은 저기압에 의한 수위상승(pressure setup)과 바람에 의한 수위상승(wind setup) 및 고파랑의 쇄파에 의한 수위상승(wave setup)의 3성분으로 구성된다.

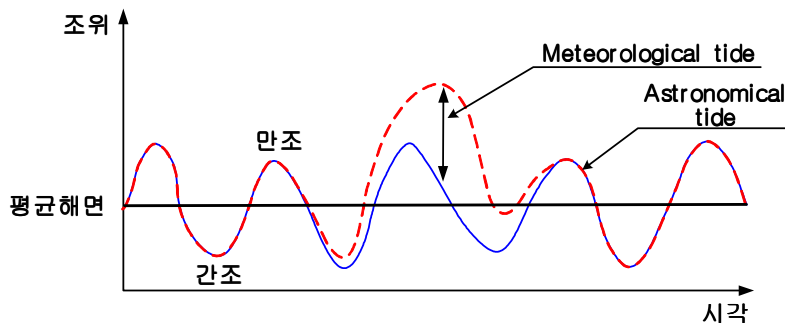


Fig. 2.1 Astronomical tide and Meteorological tide

2.1.2 태풍모델

태풍의 중심부는 주변에 비해 기압이 낮기 때문에 그 기압차를 메우기 위하여 바람이 불게 된다. 그러나, 지구가 자전하고 있기 때문에 북반구에서는 오른쪽 방향의 힘 (Coriolis력)이 작용하고, 그 결과로써 태풍의 중심주변으로 반시계방향으로 바람이 분다. 이 바람을 경도풍이라고 부르고 있다. 해면에 있어서 마찰의 영향을 받지 않는 상공에서 경도풍의 풍속 U_{gr} 은 기압경도력, 원심력, Coriolis력의 평형으로부터 다음의 식과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{U_{gr}^2}{r} + f U_{gr} \quad (2.1)$$

여기서, p 는 기압, r 은 태풍중심에서 반경방향으로 거리, f 는 Coriolis계수 ($= 2\omega \sin \psi$, ω : 지구자전의 각속도 $= 7.29 \times 10^{-5} rad/s$, ψ : 위도), ρ_a 는 대기의 밀도($= 1.22 kg/m^3$)이다.

Myers and Malkin(1961)의 기압분포를 가정하여 식(3.1)을 풀면 다음의 식이 얻어진다.

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (2.2)$$

여기서, Δp 는 기압차, r_0 는 태풍의 반경이다.

그리고, 해면에서 마찰의 영향을 받지 않는 상공의 바람을 자유대기풍이라고 한다. 그러나, 해면부근에서는 해면에서 마찰저항에 의해 풍속이 작아지며, 풍향도 태풍의 중심 측으로 약간 편향된다. 이의 바람을 해상풍이라고 하며, 그 풍속 U_1 은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$U_1 = C_1 U_{gr} \quad (2.3)$$

여기서, C_1 은 계수이며, 이는 바람의 관측치와 비교로부터 산정되지 않고 폭풍해일의 추산치가 관측치에 맞도록 산정되는 경험치로 0.6~0.7(紫木, 2004)의 값이 사용되어 왔다. 또한, 풍속의 편향은 30~40(deg)(紫木, 2004) 정도이다.

또한, 태풍의 이동에 의해서도 바람이 발생한다. 이의 풍속 U_2 는 다음의 식으로 주어 진다.

$$U_2 = \frac{U_{gr}(r)}{U_{gr}(r_0)} V_T \quad (2.4)$$

여기서, V_T 는 태풍의 진행속도이며, U_2 의 방향은 태풍의 진행속도와 동일하다.

따라서, 태풍에 의해 실제로 발생하는 바람은 풍속성분 U_1 과 U_2 가 벡터적으로 합성 된 것이다. 즉, 태풍이 眞北으로 진행한다고 하면 태풍중심의 우측(동측)에서는 경도풍 성분과 U_2 의 성분이 같은 방향으로 되고, 좌측(서측)에서는 이들의 성분이 상쇄되는 방향으로 된다.

2.1.3 기초방정식

본 연구의 폭풍해일고 추산에 적용되는 기초방정식은 다음의 연속방정식(2.5)과 운동 방정식(2.6)~(2.8)로 구성된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.8)$$

여기서, x, y 는 수평방향으로, z 는 연직방향으로 각각 취한 좌표계이고, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이다. 그리고, f 는 Coriolis계수, ρ_w 는 해수의 밀도, p 는 압력, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직와동점성계수, g 는 중력가속도이다. η 는 폭풍해일에 의한 수면변위이다.

식(2.5)을 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음의 식(2.9)를 얻는다.

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz = - (w_{z=\eta} - w_{z=-h}) \quad (2.9)$$

여기서, h 는 수심이다.

또한, U, V 를 해저에서 해면까지의 평균유속으로 한다면 다음의 식을 정의할 수 있다.

$$(h + \eta) U = \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (2.10)$$

$$(h + \eta) V = \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (2.11)$$

식(2.5)의 우변에 Leibnitz적분공식을 적용하면 다음의 결과식(2.12)과 (2.13)을 얻는다.

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.13)$$

식(2.9)의 우변에 있는 연직방향의 유속 $w_{z=\eta}$ 와 $w_{z=-h}$ 는 각각 해면과 해저에서 수면경계조건 및 불투과 경계조건으로부터 다음과 같이 된다.

$$w_{z=\eta} = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$w_{z=-h} = - \frac{dh}{dt} = - u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

식(2.10)~(2.16)를 사용하면 식(2.9)는 z 방향으로 적분된 연속식(2.17)으로 귀착된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{ (h+\eta) U \}}{\partial x} + \frac{\partial \{ (h+\eta) V \}}{\partial y} = 0 \quad (2.17)$$

유속 u, v 를 해저 $z=-h$ 에서 해면 $z=\eta$ 까지 적분하여 그 유량을 M, N 으로 하면 다음의 식을 나타낼 수 있다.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h+\eta) = UD \quad (2.18)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h+\eta) = VD \quad (2.19)$$

D 는 기본수심 h 와 폭풍해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심이다.

식(2.17)에 유량 M , N 에 관한 식(2.18)와 (2.19)를 적용하면 다음의 연속식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

식(2.8)을 z 방향에 대해서 적분하면 다음 식(2.21)이 얻어진다.

$$p = \rho_w g(n - z) + p_0 \quad (2.21)$$

여기서, p_0 는 수면에서의 기압이다.

식(2.6)과 (2.7)에서 연직와동점성계수를 포함하는 항에 전단응력을 적용하면 다음의 관계를 나타낼 수 있다.

$$A_v \int_{-h}^n \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = A \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=n} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2.22)$$

$$A_v \int_{-h}^n \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz = A \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=n} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \quad (2.23)$$

식(2.21)을 식(2.6) 및 (2.7)에 대입하여 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = n$ 까지 적분하면 다음과 같은 운동방정식(2.24)과 (2.25)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ &= fN - gD \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \quad (2.25)$$

$$= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

여기서, τ_{sx} 와 τ_{sy} 및 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해면 및 해저에서 x , y 방향으로 각각의 전단력이며, 다음의 식(2.26) ~ (2.29)로 나타내어진다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D U_x \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.26)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D U_y \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.27)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.28)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.29)$$

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)이다.

항력계수에 대해서는 모형실험이나 현지관측에 기초한 많은 경험값이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 다음의 Mitsuyasu and Kusaba(1984)에 의한 제안식을 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 U_{10}) / 10^3 & (U_{10} < 8 \text{ m/s}) \\ (0.581 + 0.063 U_{10}) / 10^3 & (U_{10} \geq 8 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (2.30)$$

여기서, U_{10} 은 해면상 10m에서 풍속이다.

이상과 같은 폭풍해일고의 추정이론으로부터 수치시뮬레이션을 실시하기 위해서는 연속식(2.20)과 비선형장파방정식(2.22) 및 (2.23)을 동시에 수치적으로 풀어야 하며, 이에 수치기법으로 유한차분법을 적용하였다.

2.2 SWAN모델

2.2.1 개 요

SWAN(Simulation **W**ave **N**earshore)에서 고려할 수 있는 전파과정은 지리적 공간좌표 상에서의 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 평균수위변동(wave-induced set-up)이 있다. 그리고, 바람에 의한 파랑에너지의 생성, 백파(whitcapping), 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

SWAN모형에서 파랑은 쇄파대에서와 같이 비선형성이 큰 조건에서도 파랑의 스펙트럼 분포를 고정도로 예측할 수 있는 2차원 wave action density spectrum으로 표현된다. SWAN에서 고려되는 action density spectrum $\mathcal{M}(\sigma, \Theta)$ (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 $\mathcal{E}(\sigma, \Theta)$ 보다 일반화된 물리량이다. $\mathcal{M}(\sigma, \Theta)$ 는 $\mathcal{E}(\sigma, \Theta)$ 를 상대주파수 σ 로 나눈 값과 동일하다.

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial X} C_X \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial Y} C_Y \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \Theta} C_\Theta \mathcal{N} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.31)$$

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 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 다음의 식(2.32)로 표현되는 바와 같이 에너지 입·출력을 표현한 것으로, 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형 상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.32)$$

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.

2.2.3 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입항 S_{in}

수면상에 바람이 불면 수면파가 발생하며, 이것이 시·공간적으로 발달한다. 이와 같은 풍파의 발생·발달과정은 바람과 수면파의 상호작용에 의한 결과, 바람으로부터 파랑으로 에너지가 이송되기 때문에 발생된다. 이것을 표현한 것이 바람에 의한 파랑으로 에너지유입항이며, 바람으로부터 파랑으로의 에너지전송은 Phillips(1957)의 공명기구(resonance mechanism)와 Miles(1957)의 불안정기구(feed-back)로 설명되며, 대응하는 source 항은 통상 선형과 지수함수적인 증가의 합으로 기술된다. SWAN에서는 일반적으로 다음의 식을 나타낸다.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.33)$$

여기서, A 는 선형파의 성장을, BE 는 파의 지속적 성장을 의미한다. A 와 B 는 주파수와 파향, 풍속과 풍향에 의존한다. 모델에서 사용되는 풍속은 U_{10} (해면상 10m에서의 풍

속)이며 계산에 사용되는 마찰속도 U_* 는 다음과 같다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.34)$$

여기서, C_D 는 다음의 식으로 표현되는 Wu (1982)의 저항계수이다.

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \text{ m/s} \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.35)$$

2.2.4 파랑에너지의 소산 S_{ds}

파랑에너지의 소산항은 세 가지의 다른 요인, 백파(whitecapping, $S_{ds, w}(\sigma, \Theta)$), 해저마찰(bottom friction, $S_{ds, b}(\sigma, \Theta)$)과 쇄파(depth-induced breaking, $S_{ds, br}(\sigma, \Theta)$)의 합으로 나타내어 진다.

SWAN을 포함하는 현재의 제3세대 파랑추산모델에 있어서, 백파의 수식화는 다음과 같은 pulse-based model(Hasselmann, 1974)에 기초한다.

$$S_{ds, w}(\sigma, \Theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{\tilde{k}}{k} E(\sigma, \Theta) \quad (2.36)$$

여기서, Γ 는 파형경사 종속계수, k 는 파수, $\tilde{\sigma}$ 와 $\tilde{k}$ 는 각각 평균 각주파수와 평균 파수를 나타낸다. Komen et al.(1984)은 충분히 발달된 조건에서 파의 에너지평형을 완료시키는 것으로 Γ 의 값을 산정하고 있다.

Depth-induced dissipation은 해저마찰, 저면운동(bottom motion), 침투(percolation) 또는 바닥의 불규칙성으로 인한 back-scattering에 의해 발생한다. 대륙붕에서 소산의 지배적인 메카니즘은 해저마찰로 발생하며 일반적으로 다음과 같이 제시된다.

$$S_{ds, b}(\sigma, \Theta) = - C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \Theta) \quad (2.37)$$

여기서, C_{bottom} 은 해저마찰계수를 나타낸다. Hasselmann et al.(JONSWAP, 1973)은 경험상수의 이용을 제안하였다. 해저마찰에 의한 파랑에너지의 소산에 미치는 평균류의 영향은 저면 조도길이 스케일의 정확한 산정이 평균류의 효과보다 에너지소산율에 큰 영향을 주지 않기 때문에 고려되지 않는다.

파랑장에서 수심에 의해 발생하는 쇄파에 의한 파랑에너지소산의 계산에는 단파(bore)의 소산이 적용된다(Battjes and Janssen, 1978). Eldeberky and Battjes(1995)는 스펙트럼 형이 보존되는 Battjes and Janssen (1978)의 bore모델에 의한 스펙트럼을 체계화하였다. SWAN은 방향성을 고려하여 다음과 같이 사용하였다.

$$S_{ds, br}(\sigma, \Theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \Theta) \quad (2.38)$$

여기서, E_{tot} 는 총파랑에너지를, $D_{tot} < 0$ 은 Battjes and Janssen (1978)에 따른 쇄파에 의한 총에너지의 소산율을 나타낸다. D_{tot} 의 값은 쇄파지표(breaking parameter)인 $Y = H_{max} / h$ (H_{max} 는 수심 h 에서 존재할 수 있는 최대파고)를 따른다. SWAN에서는 상수값과 변수값이 이용되는데, 상수값은 $Y = 0.73$ (Battjes and Stive, 1985)이다.

2.2.5 비선형 상호작용에 의한 에너지전달항 S_{nl}

심해에서는 quadruplet wave-wave interactions이 스펙트럼의 발달에 지배적이다. 이 현상으로 파랑에너지는 스펙트럼피크에서 저주파수와 고주파수영역으로 전달된다. 극천해역에서는 triad wave-wave interactions에 의해 에너지가 저주파수영역에서 종종 고주파수영역으로 전달되며, 따라서 고차의 조화성분으로 된다. quadruplet wave-wave interactions을 완전히 계산하기에는 상당한 시간이 소요되며, FD-RIAM이라 불리는 기법으로 수행된다. 계산속도를 향상시키기 위해 파라미터법(parametric method)을 비롯한 많은 기법이 제안되어 있으며, Discrete Interaction Approximation(DIA)으로 실행된다.

DIA근사는 발달과정에 있는 파랑스펙트럼의 본질적인 특징을 상당히 잘 나타내고 있다는 것이 밝혀져 있다. 경우에 따라 DIA기법은 충분한 정확도를 나타내지 않을 수도 있다. DIA의 정도는 quadruplet configurations의 수가 증가함에 따라 향상될 수 있다.

2.3 VOF법

2.3.1 개요

최근, 자유수면을 갖는 비압축성 유체의 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 이후, 許(2000)는 3차원 구조물에 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 2차원 파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 김 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고 잠제주변의 파동장해석을 수행하였다.

CADMAS-SURF에서 적용하고 있는 Fig. 2.2의 수치파동수로는 2차원 수치파동수로내에 파의 재반사를 방지하지 위한 개경계처리기법으로 해석영역 양쪽에 에너지감쇠영역을 두고 있고, 조파를 위해 조파소스를 적용하고 있다.

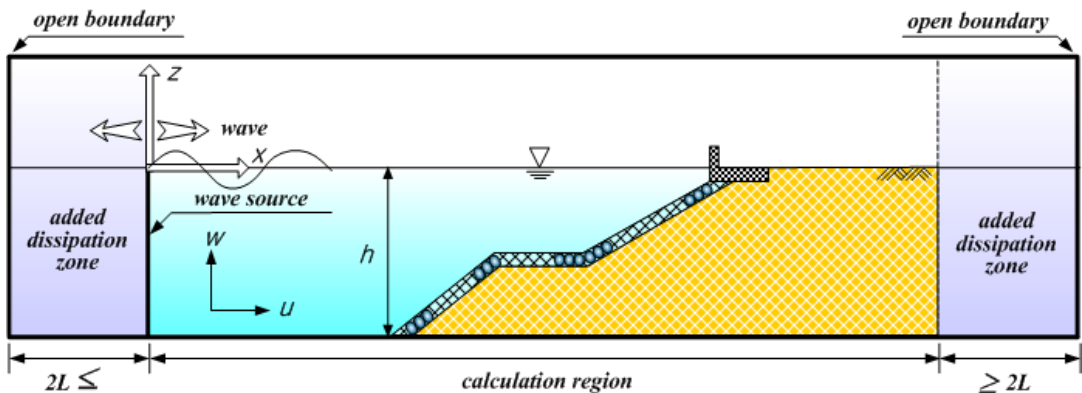


Fig. 2.2 Definition sketch of numerical wave channel

2.3.2 기초방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식(2.39)와 porous로 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식(2.40), (2.41)로 구성된다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & - \frac{\gamma_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & - \frac{\gamma_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \end{aligned} \quad (2.41)$$

여기서, γ_v 는 분자동점성계수와 와동점성계수의 합, γ_v 는 체적 공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극률을 나타낸다. 또한, $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 관성력계수 C_M 을 사용하면 식(2.42)~(2.44)와 같이 주어진다.

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (2.42)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \quad (2.43)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \quad (2.44)$$

그리고, D_x, D_z 는 후술하는 식(2.53), (2.54)에 나타내는 계수이며, S_p, S_u, S_w 는 조파소스항으로 다음의 식과 같이 정의된다.

$$S_p = q(z, t) \quad (2.45)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (2.46)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (2.47)$$

여기서, $q(z, t)$ 는 $x=x_s$ 의 위치에서 격자간격을 Δx_s 로 두면 다음의 식(2.48)과 같이 주어진다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \quad (2.48)$$

여기서, $U(x, t)$ 는 조파소스의 유속이다. 또한, 항력항 R_x , R_z 를 항력계수 C_D 를 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.49)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.50)$$

여기서, Δx , Δz 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

2.3.3 이류방정식

VOF함수 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(2.51)에 의해 VOF함수가

이류된다.

$$\mathbb{V}_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \mathbb{V}_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \mathbb{V}_z w F}{\partial z} = S_F \quad (2.51)$$

여기서, $S_F = Fq(z, t)$ 는 조파소스를 위한 소스항이다.

2.3.4 무반사모델

(1) 무반사 조파시스템

정상상태의 파동장을 얻기 위해서는 장시간의 해석이 필요하게 되며, 이 때 해석영역의 양단으로부터 반사파를 제거하기 위하여 무반사모델이 적용되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 다음에 기술하는 Sommerfeld의 방사경계조건과 에너지감쇠대를 조합한 무반사조건식(2.52)를 적용한다.

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + C \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (2.52)$$

여기서, Φ 는 유속 등의 물리량, C 는 파속이다.

(2) 에너지감쇠대

에너지감쇠대는 식(2.40)과 식(2.41)의 운동방정식에 이하의 식(2.53) 및 식(2.54)의 유속에 비례하는 감쇠항을 부가한다.

$$\text{x방향유속의 감쇠항} = -D_x u$$

$$D_x = \Theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N_1 + 1) \left(\frac{x - x_0}{l} \right)^N \quad (2.53)$$

$$z\text{방향유속의 감쇠항} = -D_z w$$

$$D_z = \Theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N_1 + 1) \left(\frac{x - x_0}{l} \right)^{N_1} \quad (2.54)$$

여기서, h 과 l_0 는 에너지감쇠대의 넓이와 개시위치, N_1 은 분포함수의 차수, Θ_x 와 Θ_z 는 무차원계수이다.

제3장 수치해석결과

3.1 폭풍해일

3.1.1 태풍경로 및 조건

Fig. 3.1~3.3은 본 연구에서 대상으로 하는 태풍 Sarah(5914)와 Thelma(8705) 및 Maemi(0314)의 진행경로를 나타내며, 그림으로부터 3개의 태풍은 남부연안을 통과하는 대표적인 정상진행경로라는 것을 알 수 있다. 태풍 Sarah(5914)는 한반도로 직접 상륙하지 않고 부산 앞바다를 통과하였으나, 태풍이 남해안에 상륙할 당시의 기압심도(대기압 1013hPa)과 태풍중심기압과의 기압차가 68hPa로써 태풍 Maemi(기압심도 63hPa)나 Thelma(기압심도 43hPa)가 남해안에 상륙할 당시 보다 높은 수치를 나타내고 있다. 전라남도 고흥반도 인근으로 상륙하여 한반도의 중앙을 관통한 태풍 Thelma는 Rusa(0215) 이전 한반도에 내습한 태풍 가운데 재산피해로서는 최고를 기록하였다(이종섭 등, 1990). 또한, 과거최대태풍으로 인식되고 있는 태풍 Maemi는 경남 사천 부근의 해안으로 상륙하여 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 경북 울진해안을 통해 동해상으로 빠져나갔다.

Fig. 3.4는 전술한 태풍의 이동경로를 공간적으로 비교한 것이다. 또한, 폭풍해일고의 산정을 위한 계산의 입력값으로서 Table 3.1~3.3에 각각 나타내고 있는 시각에 따른 태풍의 위치(경도, 위도), 기압심도, 태풍반경 및 이동속도를 이용하였다.

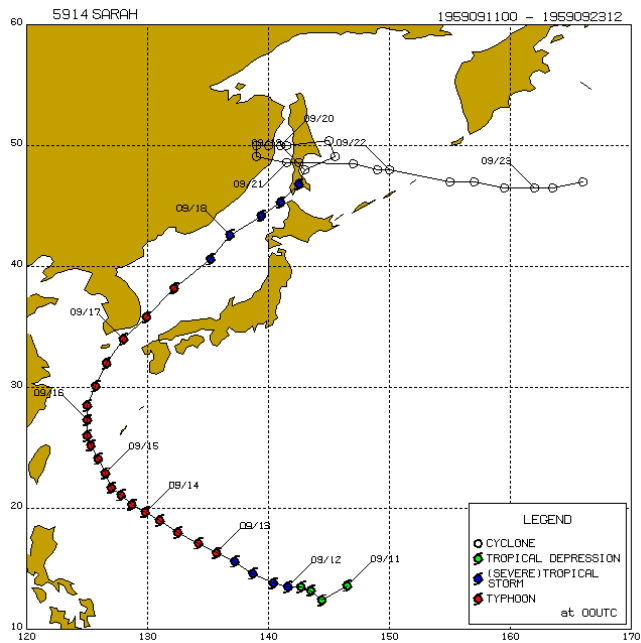


Fig. 3.1 Route of typhoon Sarah

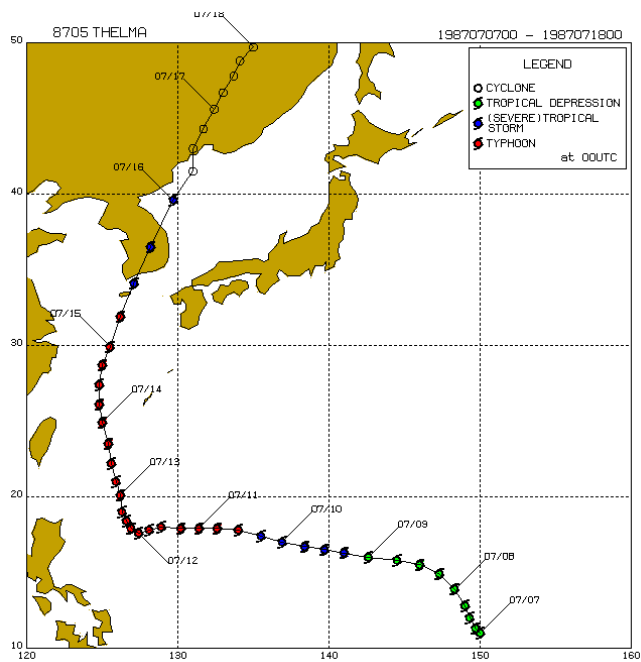


Fig. 3.2 Route of typhoon Thelma

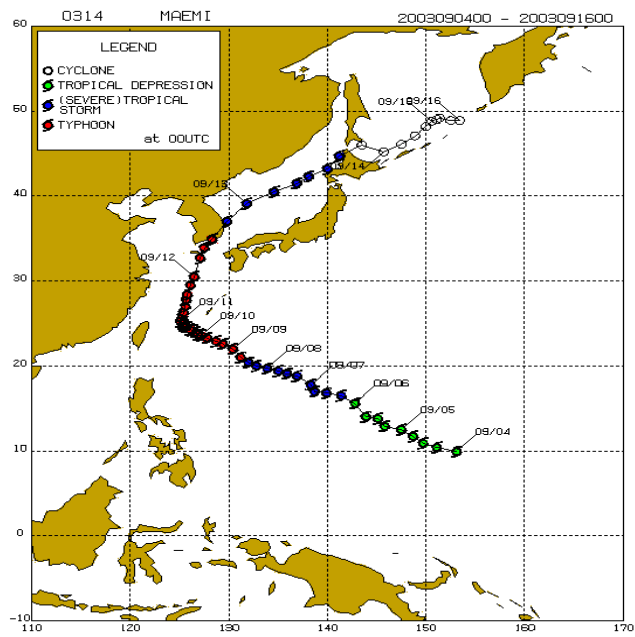


Fig. 3.3 Route of typhoon Maemi

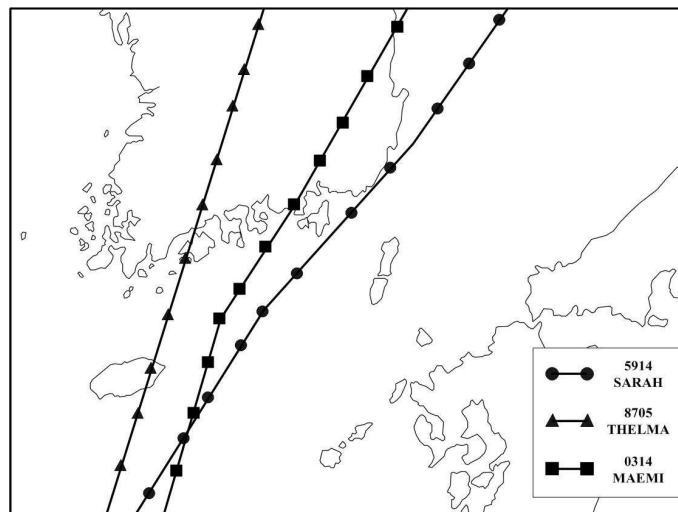


Fig. 3.4 Route of typhoons used in numerical simulation

Table 3.1 Characteristics of typhoon Sarah

시 각	경 도 (°E)	위 도 (°N)	기압심도 (hpa)	태풍반경 (km)	이동속도 (km/h)
5909151800	125.000	26.000	108.0	35.0	24.0
5909160000	125.000	27.300	108.0	33.0	22.2
5909160600	125.000	28.500	78.0	51.0	32.3
5909161200	125.700	30.100	78.0	52.0	37.4
5909161800	126.600	32.000	78.0	55.0	42.9
5909170000	128.000	34.000	68.0	71.0	44.1
5909170600	129.900	35.800	63.0	96.0	56.0
5909171200	132.200	38.200	48.0	134.0	62.0
5909171800	135.200	40.600	43.0	170.0	43.3

Table 3.2 Characteristics of typhoon Thelma

시 각	경 도 (°E)	위 도 (°N)	기압심도 (hpa)	태풍반경 (km)	이동속도 (km/h)
8707140600	124.800	26.100	68.0	96.0	24.0
8707141200	124.800	27.400	73.0	73.0	24.3
8707141800	125.000	28.700	68.0	85.0	23.6
8707150000	125.500	29.900	63.0	79.0	38.6
8707150600	126.200	31.900	58.0	112.0	43.0
8707151200	127.100	34.100	43.0	119.0	47.4
8707151800	128.200	36.500	38.0	158.0	61.4
8707160000	139.700	39.600	33.0	168.0	39.7
8707160600	131.000	41.500	33.0	199.0	27.8

Table 3.3 Characteristics of typhoon Maemi

시 각	경 도 (°E)	위 도 (°N)	기압심도 (hpa)	태풍반경 (km)	이동속도 (km/h)
0309111500	125.300	25.900	0.0	38.0	10.0
0309111800	125.400	26.300	46.5	38.0	15.0
0309112100	125.600	27.000	83.0	38.0	20.0
0309120300	125.800	28.400	73.0	40.0	25.0
0309120600	126.100	29.500	68.0	40.0	30.0
0309120900	126.500	30.500	68.0	38.0	35.0
0309121200	126.900	31.700	68.0	38.0	35.0
0309121500	127.000	32.700	68.0	50.0	40.0
0309121700	127.300	33.500	68.0	55.0	40.0
0309122100	128.300	34.800	63.0	50.0	45.0
0309130300	129.700	36.900	43.0	90.0	45.0
0309131500	134.800	40.500	33.0	110.0	45.0

3.1.2 대상영역

폭풍해일 시뮬레이션의 대상영역은 Fig. 3.5에 나타내는 것과 같이 태풍의 주경로가 놓이는 한국 및 일본과 태평양을 포함하는 광역으로 설정되었다. 대상으로 하는 관심영역에서 계산정도를 높이기 위하여 계산영역을 제1영역에서 제7영역까지 nesting하여 계산을 수행하였다. 계산격자의 구성은 제1영역은 한 격자의 크기가 32.4km이고, 영역은 수평(IMESH)으로 86개 및 연직(JMESH)으로 72개인 격자로 분할되었다. 다음으로, 제2영역은 제1영역내에 존재하며, 격자크기는 16.2km이고, 격자의 수는 수평(IMESH)으로 60개 및 연직(JMESH)으로 42개로 분할되었다. 이와 같이 순차적으로 외부의 대영역은 내부의 소영역으로 분할되고, 최종적으로 제7영역은 격자 크기가 100m이고, 격자의 수는 수평(IMESH)으로 160개 및 연직(JMESH)으로 120개이며, 본 영역내에 명지지구 연안해역이 전부 포함되도록 되어 있다.

Table 3.4에는 격자에 대한 상세한 정보가 제시되어 있으며, Imesh와 Jmesh는 I,J방향으로 격자의 갯수를 나타낸다. Fig. 3.6은 Fig. 3.5에 나타난 각 영역에서 보다 상세한 영역범위와 등수심선을 나타내고 있다.

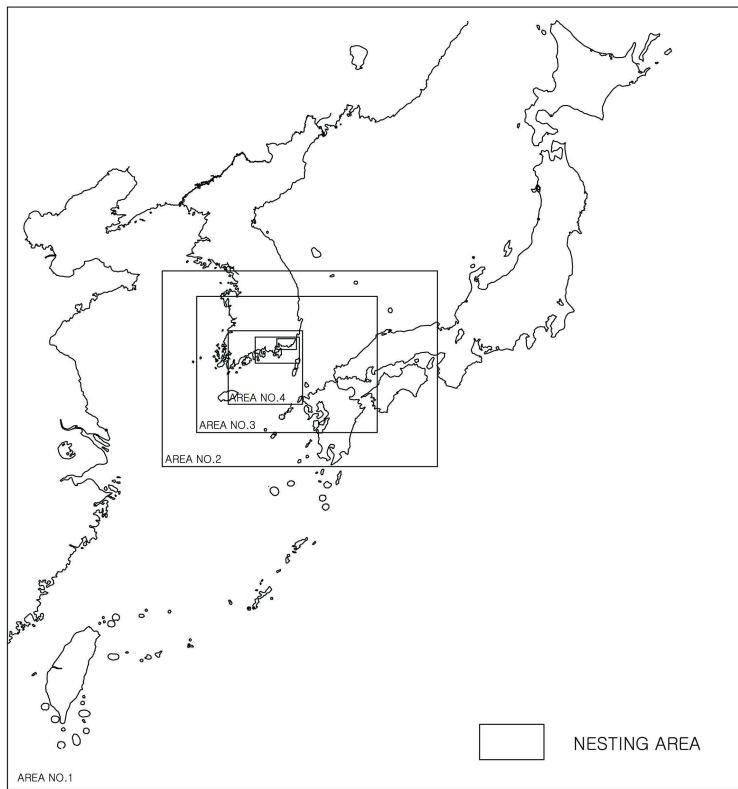
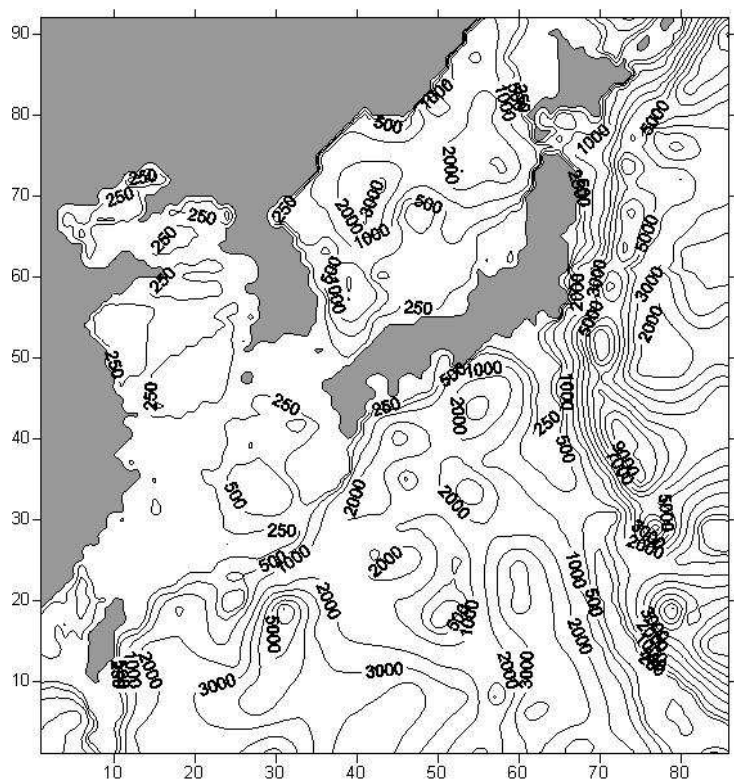


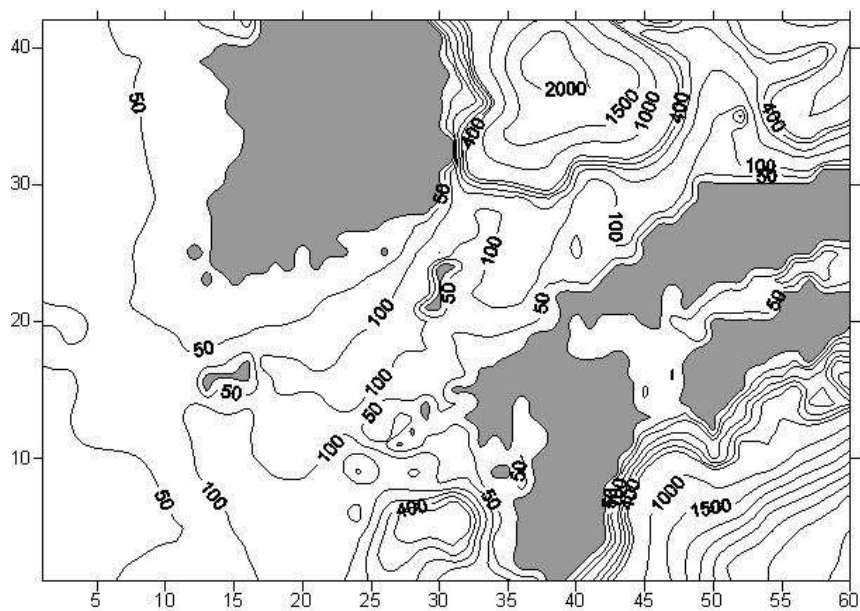
Fig. 3.5 Area of storm surge simulation

Table 3.4 Mesh sizes applied to each simulating area

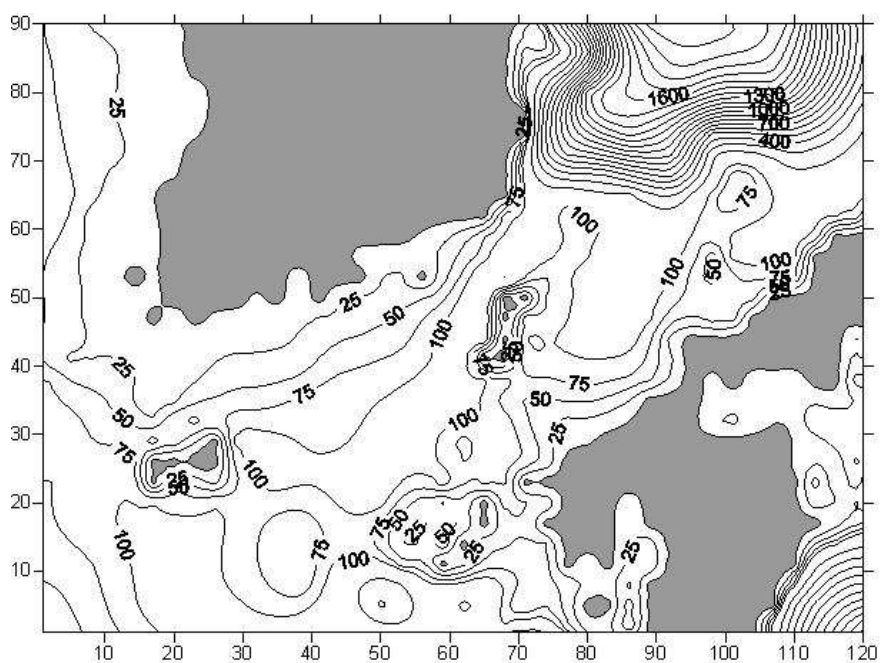
영역 번호	Mesh size(m)	I _{mesh} × J _{mesh}
AREA NO.1	32,400	86×72
AREA NO.2	16,200	60×42
AREA NO.3	5,400	120×90
AREA NO.4	1,800	180×150
AREA NO.5	600	270×159
AREA NO.6	200	363×198
AREA NO.7	100	160×120



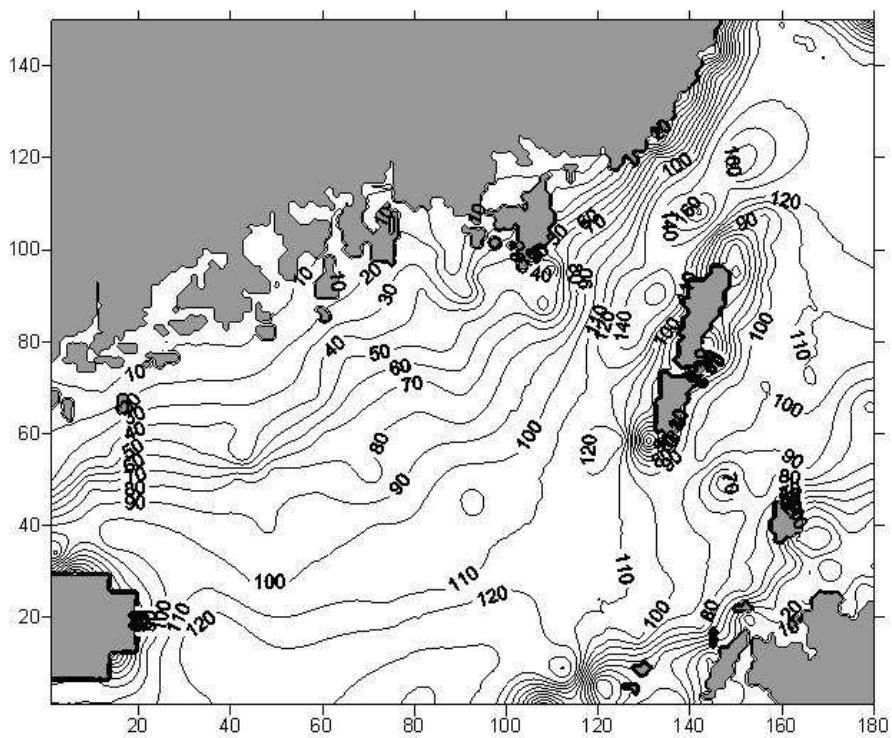
(a) AREA NO.1



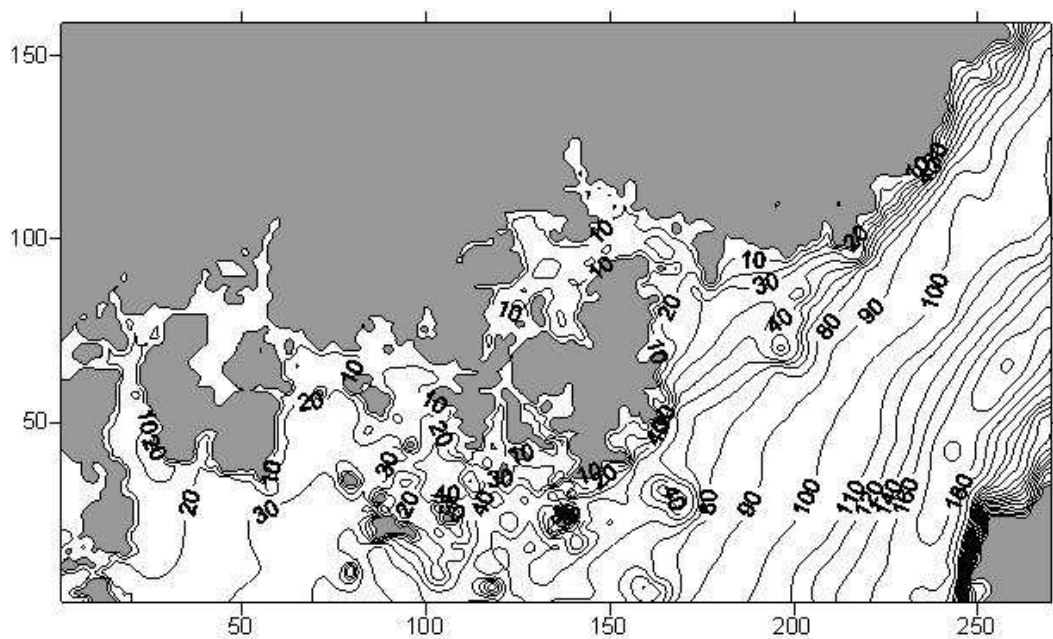
(b) AREA NO.2



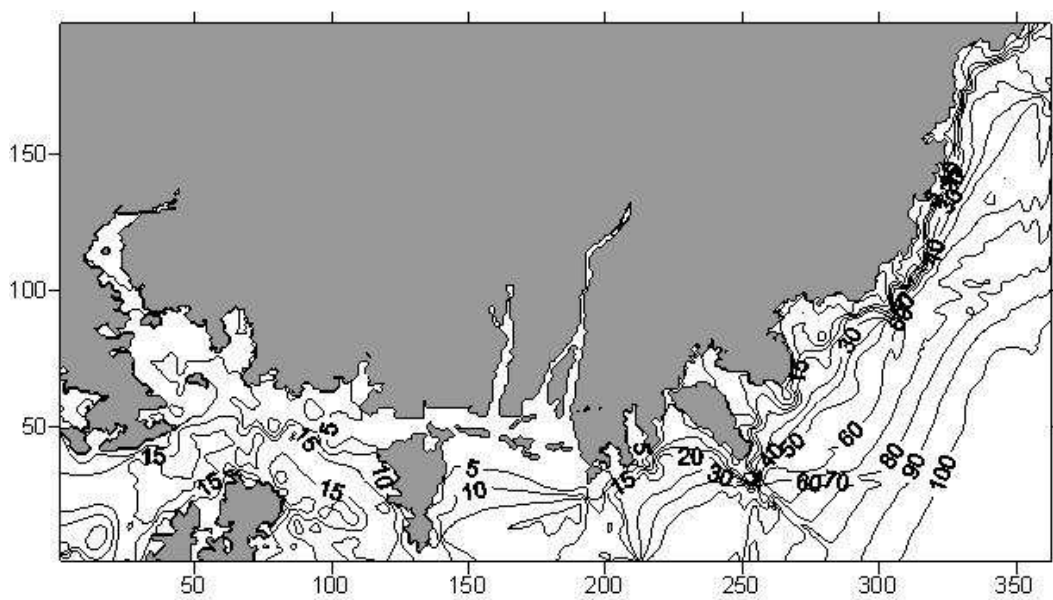
(c) AREA NO.3



(d) AREA NO.4



(e) AREA NO.5



(f) AREA NO.6

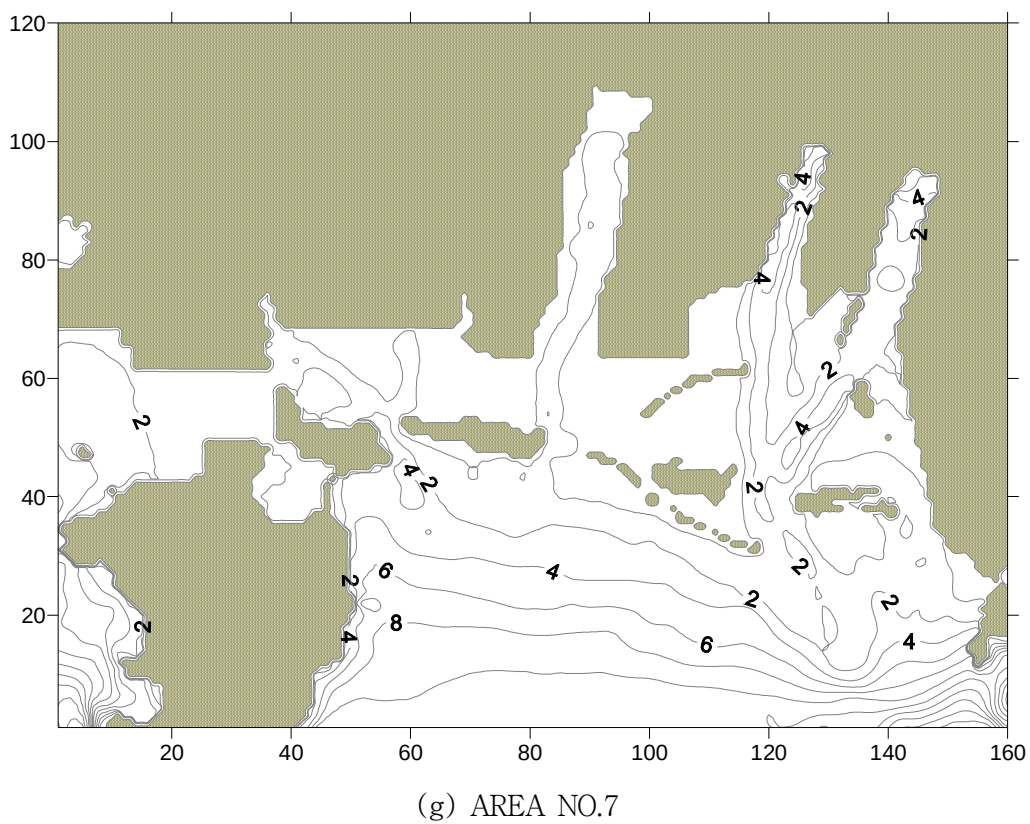


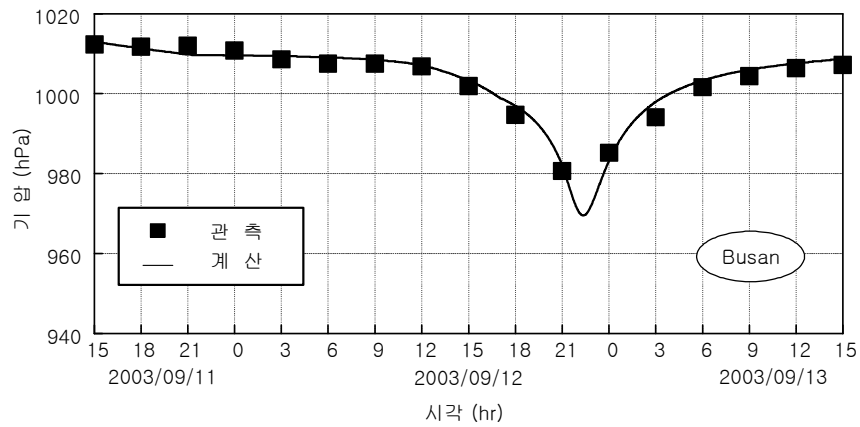
Fig. 3.6 Spatial distribution of water depth

3.1.3 수치계산의 검증

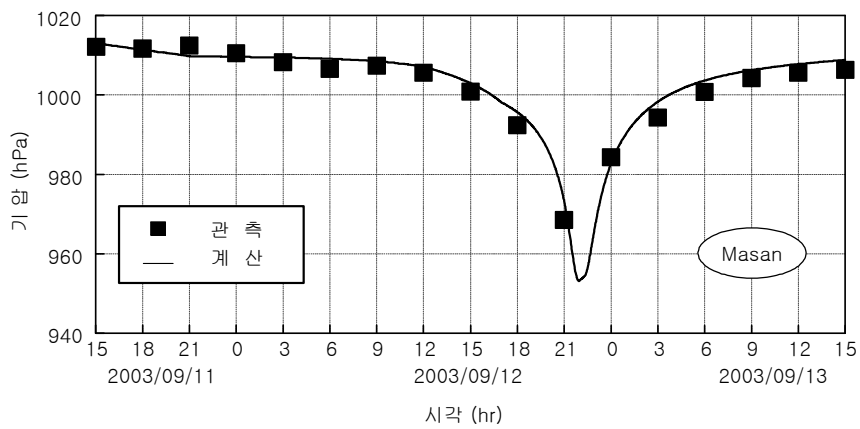
(1) 기압

폭풍해일고의 시뮬레이션을 실시함에 있어서 우선 2003년 9월 12일 태풍 Maemi에 대한 수치계산을 수행하여 본 수치시뮬레이션의 타당성을 검토하였다. 폭풍해일의 추산에 이용된 기압분포에는 식(2.28)의 Myers and Malkin(1961) 분포식을 사용하였고, 최대풍속 반경 r_0 는 남해안의 관측기압으로부터 산정되었다.

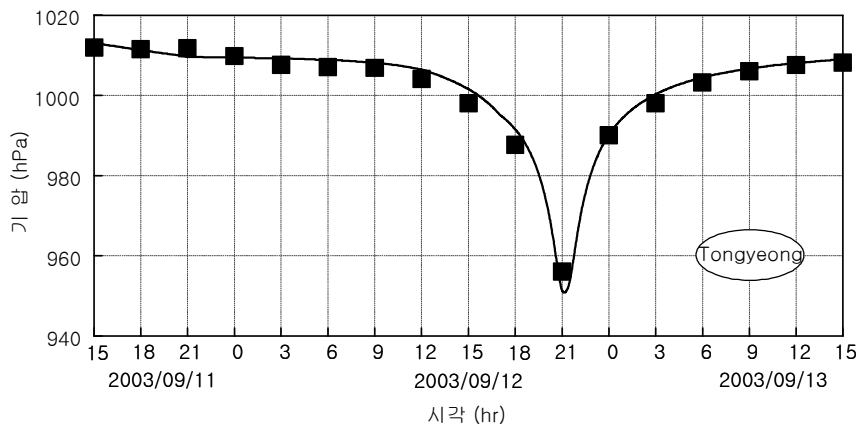
Fig. 3.7은 태풍 Maemi 통과시에 기상대에서 관측된 기압과 수치시뮬레이션에 의한 기압의 시간변화를 비교한 결과이다. 종축과 횡축은 각각 시각 및 기압변화를 나타내고, 짙은 사각형은 관측치를, 실선은 계산치를 각각 나타낸다. 부산의 경우에는 최저기압이 971hPa정도로, 이는 태풍 Maemi시의 최저기압 950hPa보다는 큰 값을 나타내고 있다. 이는 태풍의 중심경로보다 부산이 우측으로 떨어져 있었기 때문으로 판단된다. 반면에, 중심경로(경남 사천시)에 보다 가까운 통영과 마산으로 갈수록 중심기압이 954hPa과 951hPa 정도의 값을 나타내고 있으며, 최저기압 950hPa에 가까운 수치를 나타낸다. Fig. 3.7을 통해 알 수 있는 바와 같이 시각의 변화에 따라 각 지역에서의 기압의 변화는 관측치 및 해석치 모두 전체적으로 잘 일치하는 경향을 알 수 있다.



(a) Busan



(b) Masan



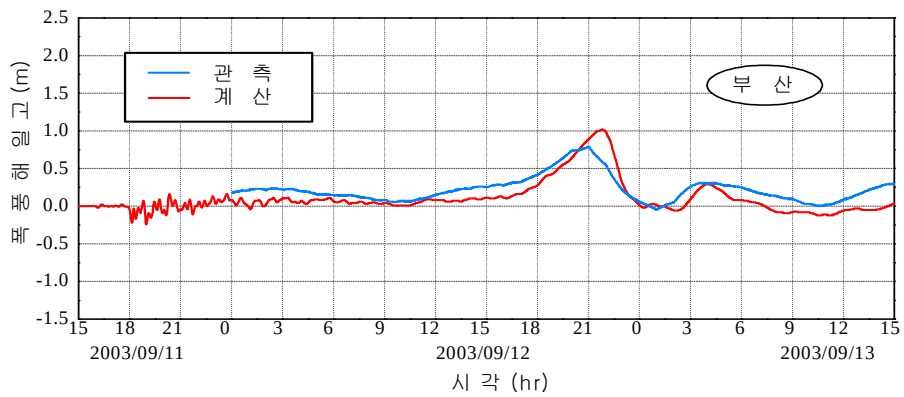
(c) Tongyeong

Fig. 3.7 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi

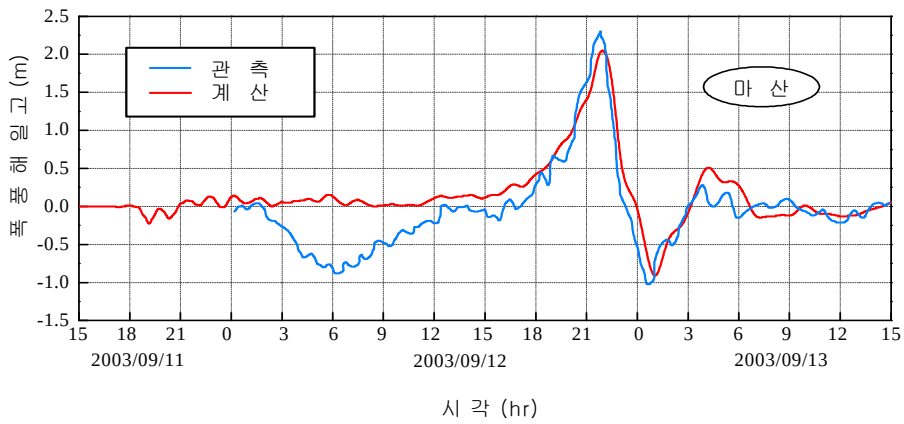
(2) 폭풍해일고

태풍 Maemi 내습시에 부산 연안에 설치되어 있는 파랑관측소 및 검조소로부터 폭풍해일고(기록조위-예측조위)를 얻을 수 있지만, 고파랑에 의한 유실 및 결측 등으로 신뢰할 수 있는 조위기록은 많지 않다. 폭풍해일고에 대해서 부산항 검조소와 인근 마산항 및 통영 검조소의 기록과 비교·검토하여 수치시물레이션에 의한 결과의 타당성을 검증한다.

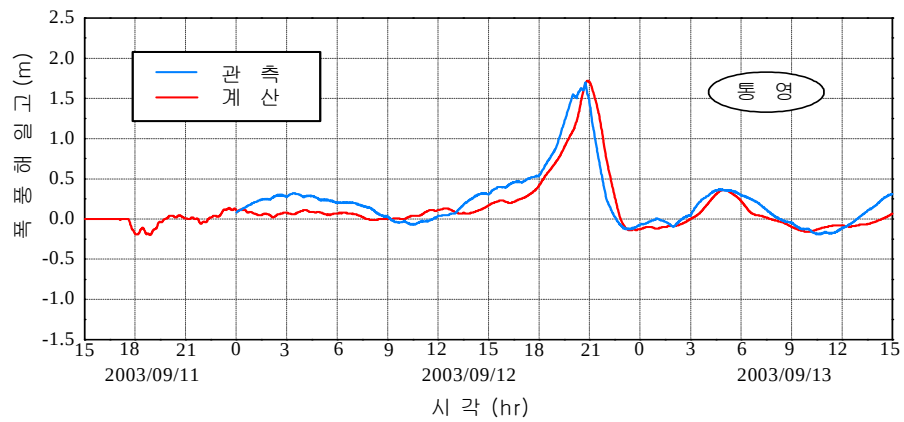
Fig. 3.8은 태풍 Maemi 통과시에 각 검조소에서 관측된 폭풍해일고와 수치시물레이션에 의한 폭풍해일고의 시간변화를 비교한 결과이다. 부산항 검조소에서 관측된 해일고와 해석된 해일고를 비교한 결과를 보면 폭풍해일고의 최대치가 발생하는 시각에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 그 값에서 관측치는 0.8m 정도이고 계산치는 1.0m 정도를 나타내어 계산치가 다소 큰 값을 나타내지만 만족스러운 대응성을 갖는 것으로 판단된다. 마산항 검조소에서 관측된 해일고와 본 연구에서 해석된 해일고를 비교한 결과에서 태풍이 본격적으로 상륙하기 전인 2003년 9월 11일 06시 전후의 관측기록에서 해일고가 하강하고 있는 현상은 일반적으로 이해될 수 없는 현상이며, 이는 기계의 오작동으로 판단된다. 이 부분을 제외하면 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화는 매우 잘 일치하는 것으로 판단되며, 여기서 피크치를 나타내고 있는 2003년 9월 12일 22시 전후에서 관측치는 2.3m 정도, 해석치는 2.1m 정도로 약간의 차이를 나타내고 있지만, 미소한 것으로 여겨진다. 통영 검조소에서 얻어진 관측결과와 계산결과를 비교한 것을 보면 부산항 검조소와 마찬가지로 피크치에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 피크치는 관측이 1.65m, 계산이 1.72m로 매우 잘 일치하며, 동시에 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화과정도 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 폭풍해일고의 피크치에서 계산치가 약간 과소평가되고 있지만, 계산치와 관측치와의 전반적인 일치성을 살펴보면 계산치는 관측치를 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Busan



(b) Masan



(c) Tongyeong

Fig. 3.8 Comparison of storm surge height between measured and calculated results for typhoon Maemi

3.1.4 기압장과 바람장의 해석

(1) 태풍 Sarah의 기압장과 바람장

Fig. 3.9는 태풍 Sarah 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 태풍의 중심에 원점을 둔 Myers and Malkin(1961)에 의한 결과식으로부터 산정되는 경도풍을 적용하고 있기 때문에 결과로부터도 알 수 있는 바와 같이 반시계방향으로 동심원상의 기압장과 바람장이 형성되어 있다.

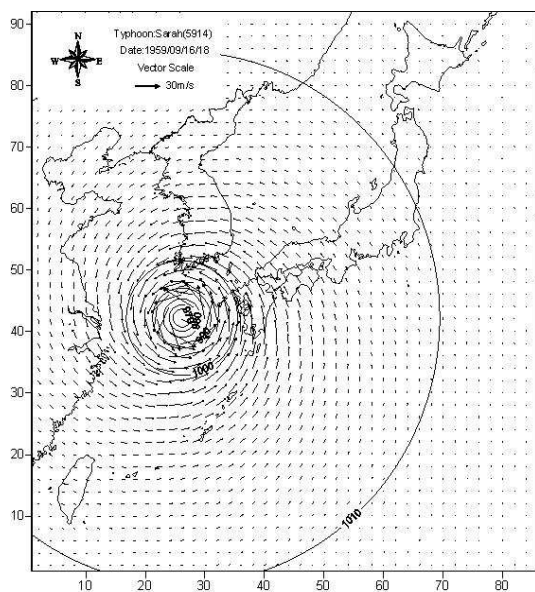
해석결과에 의하면 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압이 커지는 것을 알 수 있고, 역으로 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 이의 결과는 전술한 Table 3.1의 조건으로부터도 확인할 수 있다.

(2) 태풍 Thelma의 기압장과 바람장

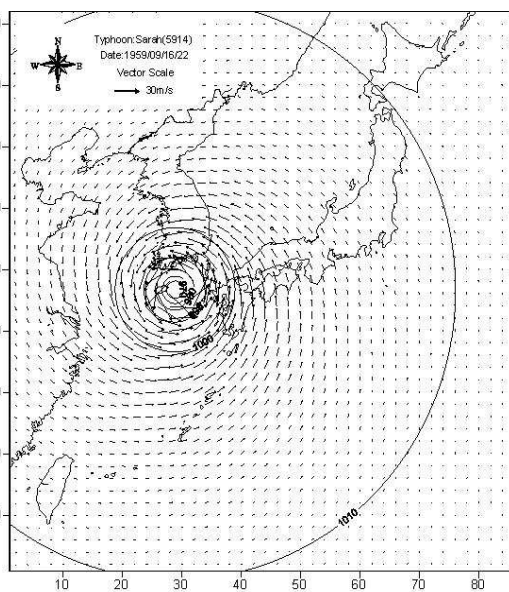
Fig. 3.10은 태풍 Thelma 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압에서 약간의 변동이 있지만, 전반적으로 커지고 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 전술한 Sarah의 결과와 비교하면 중심기압이 크고 풍속은 작다. 이의 결과는 전술한 Table 3.2의 조건으로부터도 확인할 수 있다.

(3) 태풍 Maemi의 기압장과 바람장

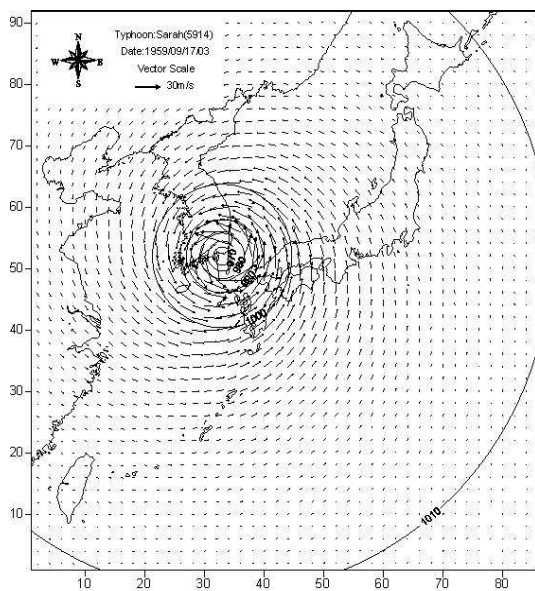
Fig. 3.11은 태풍 Maemi 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압에서 약간의 변동이 있지만, 전반적으로 커지고 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 전술한 Sarah의 결과와 비교하면 태풍반경은 작고 경로가 다르지만 규모로써는 거의 동등한 것으로 판단된다. 이의 결과는 전술한 Table 3.3의 조건으로부터도 확인할 수 있다.



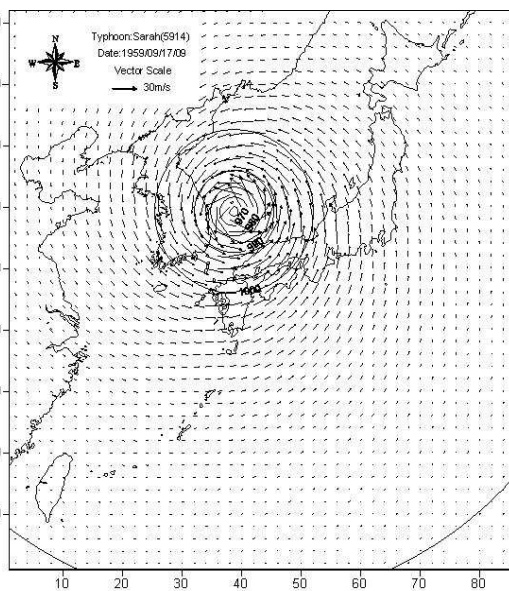
1) 1959.09.16.18



2) 1959.09.16.22

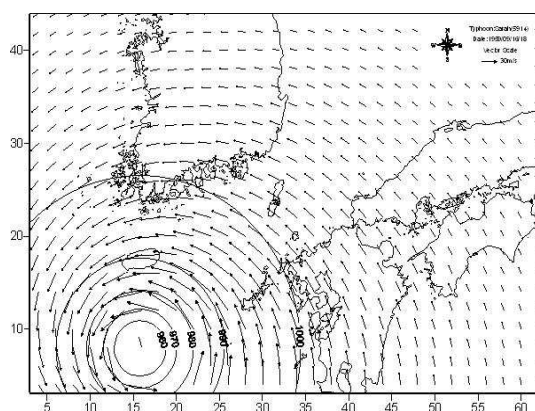


3) 1959.09.17.03

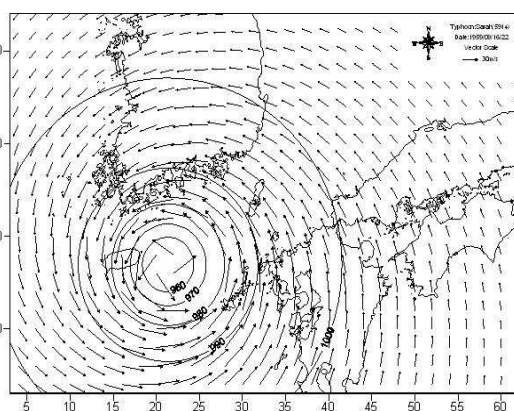


4) 1959.09.17.09

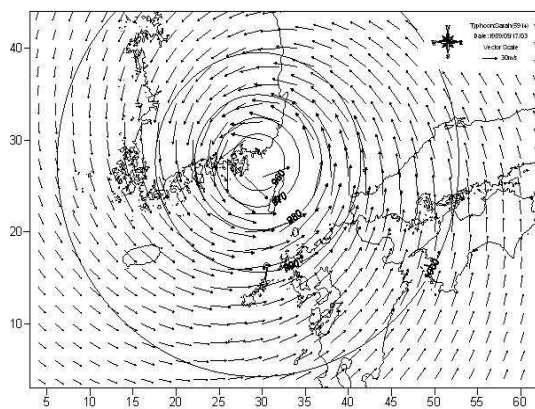
(a) AREA NO.1



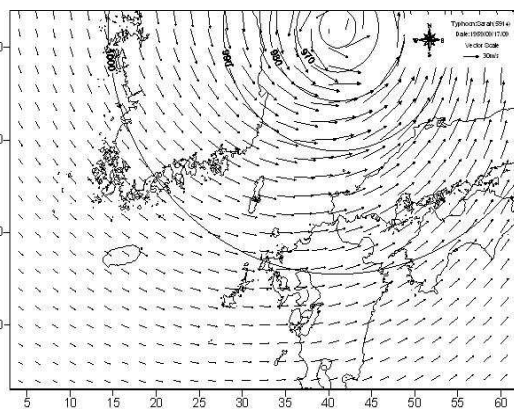
1) 1959.09.16.18



2) 1959.09.16.22



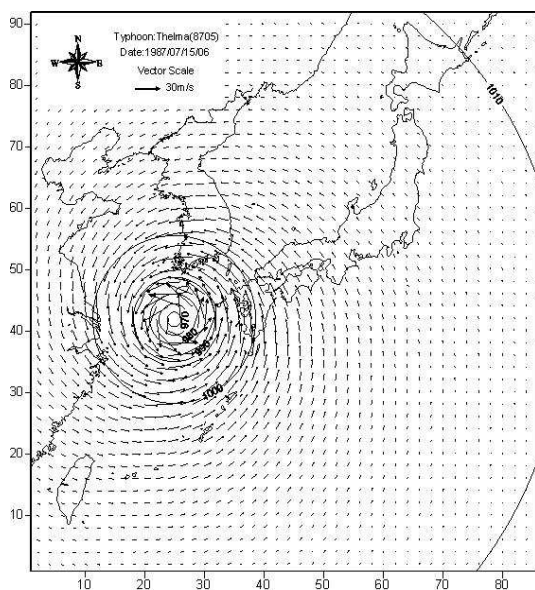
3) 1959.09.17.03



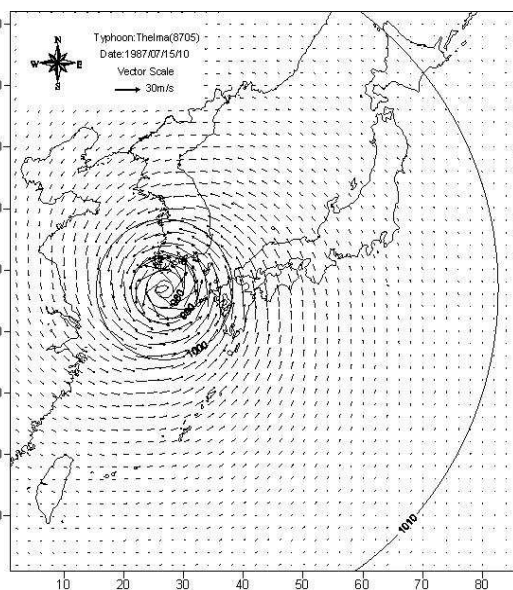
4) 1959.09.17.09

(b) AREA NO.2

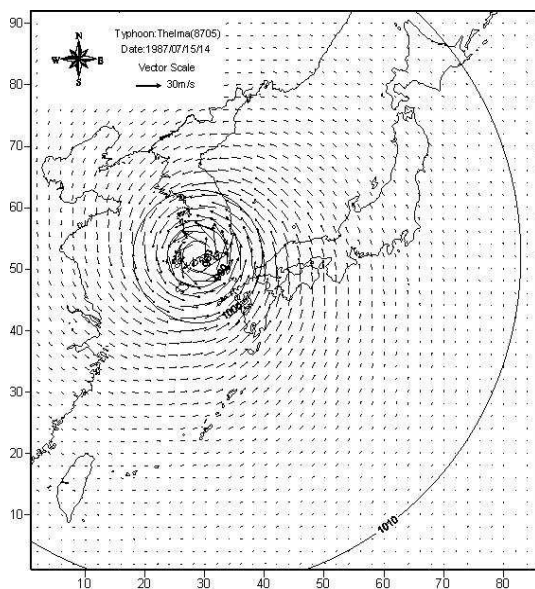
Fig. 3.9 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Sarah



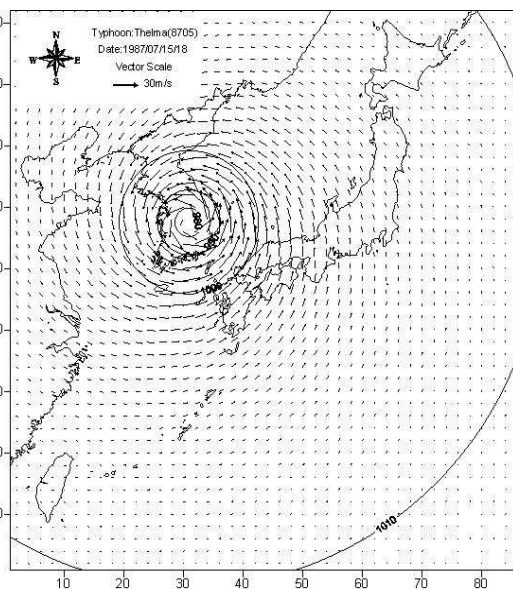
1) 1987.07.15.06



2) 1987.07.15.10

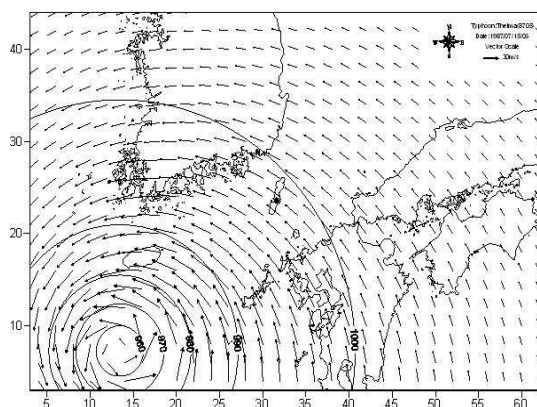


3) 1987.07.15.14

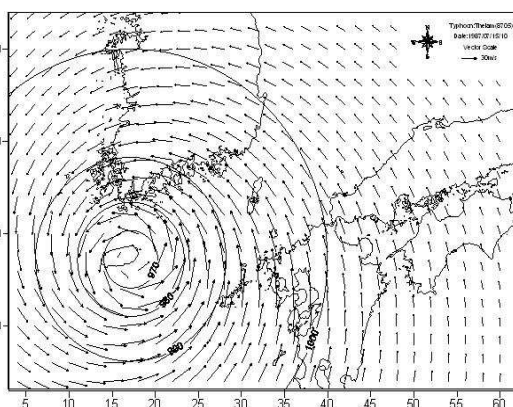


4) 1987.07.15.18

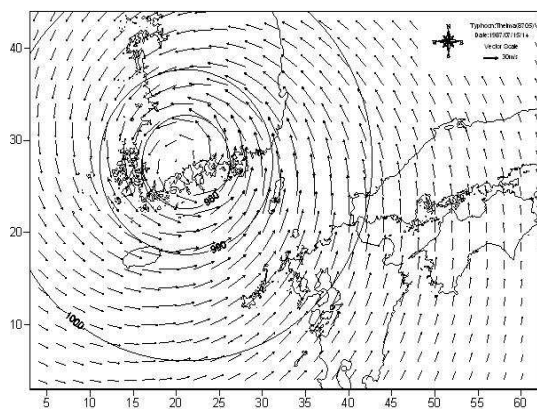
(a) AREA NO.1



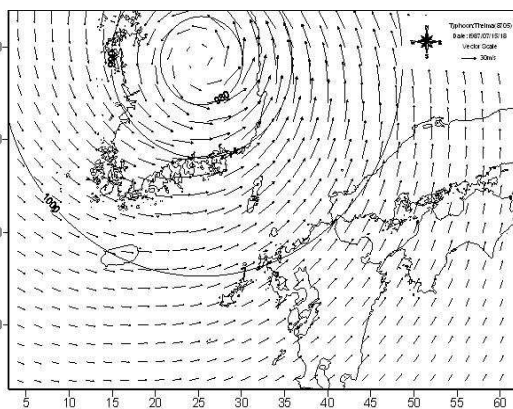
1) 1987.07.15.06



2) 1987.07.15.10



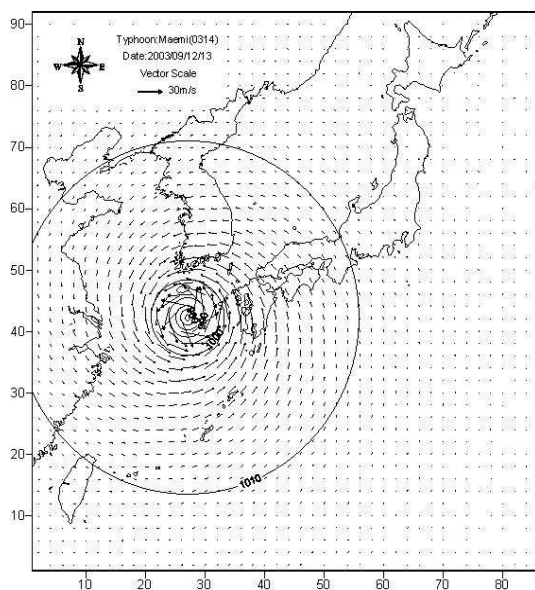
3) 1987.07.15.14



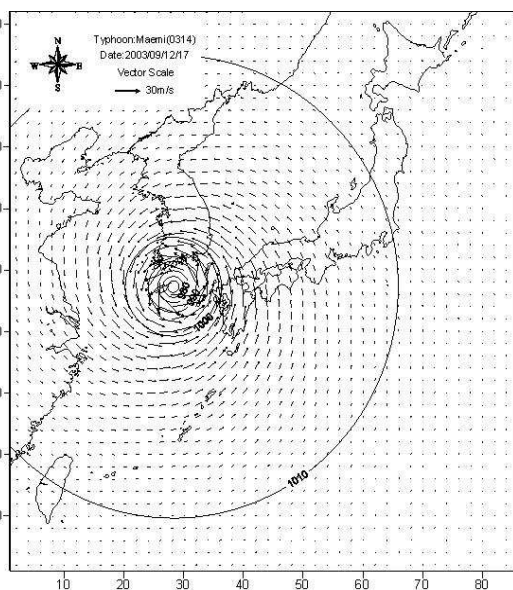
4) 1987.07.15.18

(b) AREA NO.2

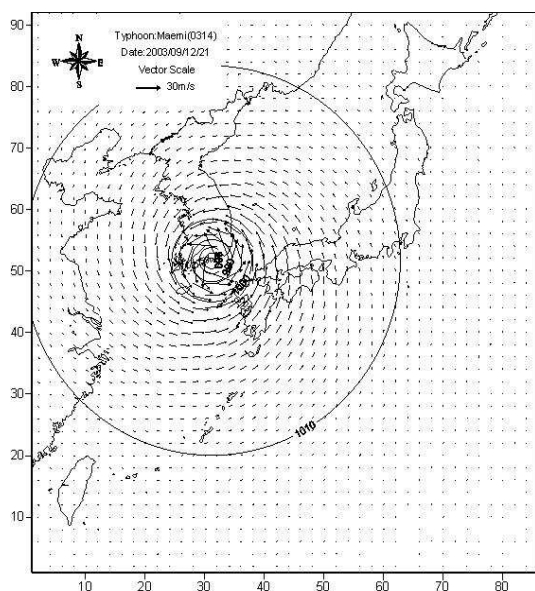
Fig. 3.10 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Thelma



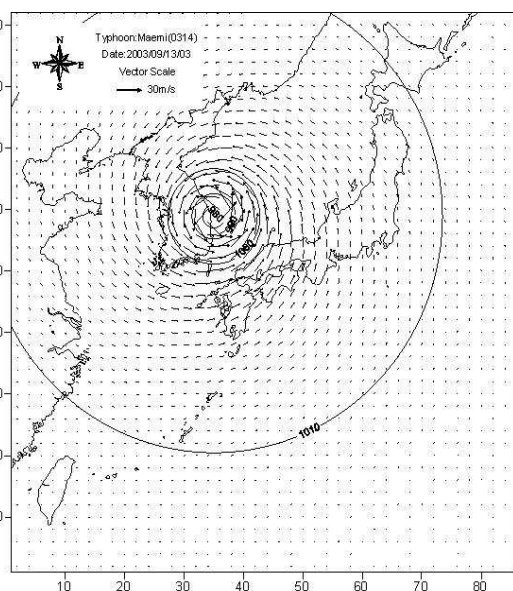
1) 2003.09.12.13



2) 2003.09.12.17

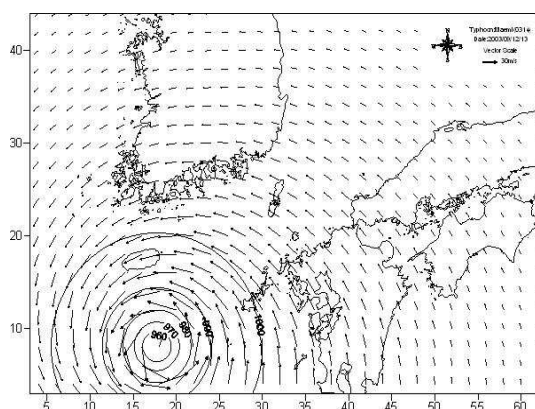


3) 2003.09.12.21

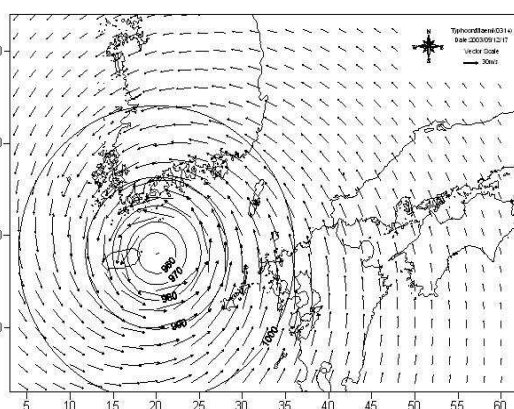


4) 2003.09.13.03

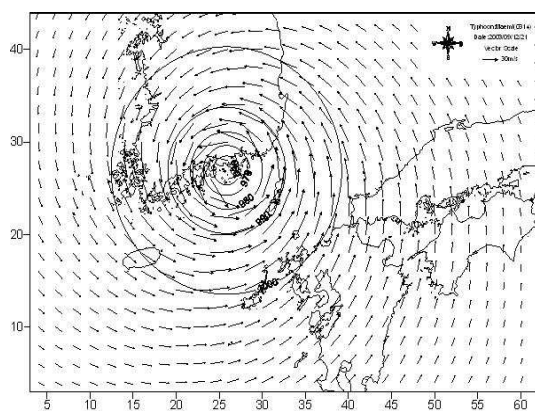
(a) AREA NO.1



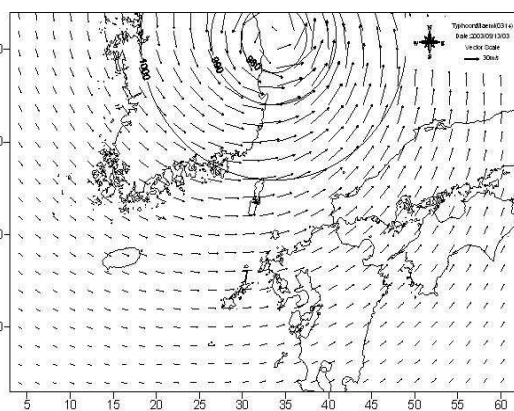
1) 2003.09.12.13



2) 2003.09.12.17



3) 2003.09.12.21



4) 2003.09.13.03

(b) AREA NO.2

Fig. 3.11 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Maemi

3.1.5 폭풍해일고

(1) 태풍 Sarah 내습시의 폭풍해일고

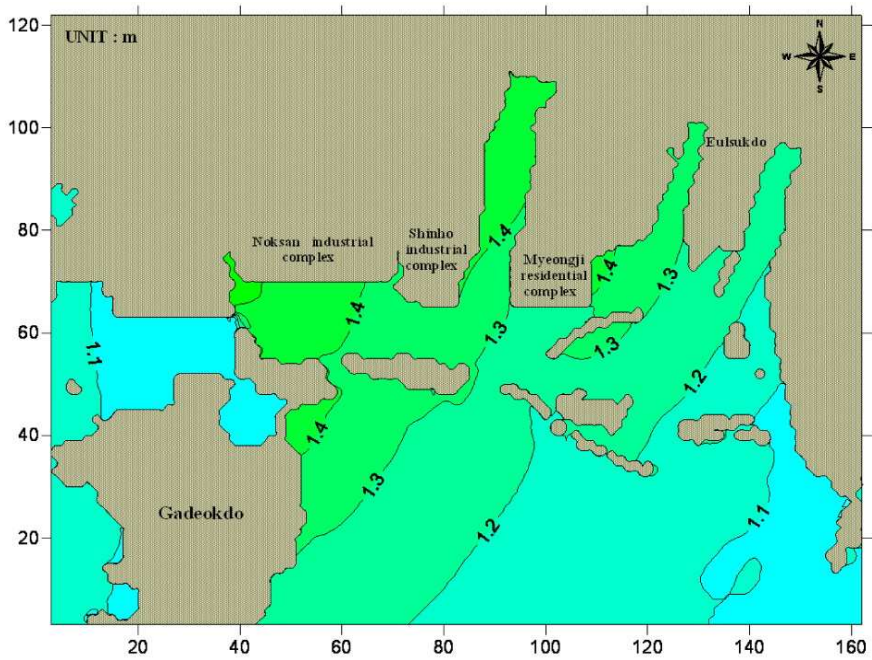
Fig. 3.12는 태풍 Sarah 내습시에 명지지구 연안해역에서 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 녹산 및 하구언 수문이 닫혀 있는 경우에 명지지구 전면해역에서 1.2~1.3m 정도의 높이를 나타내고 있으며, 서낙동강에서 1.4~1.5m 정도의 크기분포를 나타내고 있다. 그리고, 녹산 및 하구언 수문이 열려 있는 경우에 명지지구 전면해역에서 1.2~1.3m 정도의 높이를 나타내고 있으며, 서낙동강에서 1.25~1.35m 정도의 크기분포를 나타내고 있다. 서낙동강의 최대폭풍해일고가 상대적으로 낮아지는 것은 수문이 열려 있어 상류로 폭풍해일이 전파되었기 때문으로 판단된다.

(2) 태풍 Thelma 내습시의 폭풍해일고

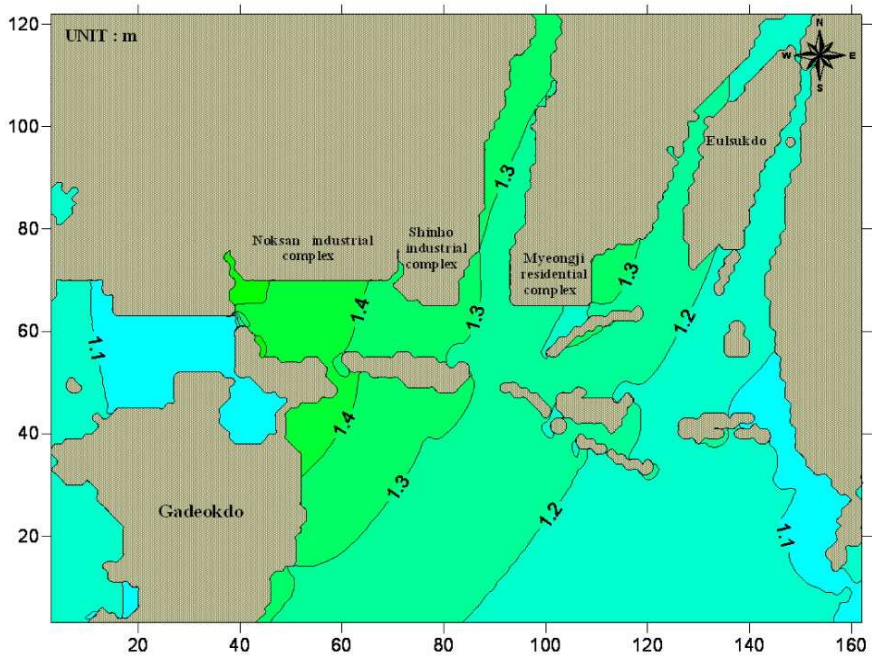
Fig. 3.13은 태풍 Thelma 내습시에 명지지구 연안해역에서 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 녹산 및 하구언 수문이 닫혀 있는 경우와 열려 있는 경우 모두 명지지구 전면해역에서 0.8m 정도의 높이를 나타내고 있으며, 서낙동강에서 0.9~1.1m 정도의 크기분포를 나타내고 있다. 태풍 Thelma의 경우는 수문의 개폐 유무에 따른 폭풍해일고 변화의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

(3) 태풍 Maemi 내습시의 폭풍해일고

Fig. 3.14는 태풍 Maemi 내습시에 명지지구 연안해역에서 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 녹산 및 하구언 수문이 닫혀 있는 경우에 명지지구 전면해역에서 1.7m 정도의 높이를 나타내고 있으며, 서낙동강에서 2.0~2.3m 정도의 크기분포를 나타내고 있다. 그리고, 녹산 및 하구언 수문이 열려 있는 경우에 명지지구 전면해역에서 1.6m 정도의 높이를 나타내고 있으며, 서낙동강에서 1.8~2.2m 정도의 크기분포를 나타내고 있다. 수문의 개폐에 따라 명지지구 전면해역에서 0.1m, 서낙동강에서 0.1~0.2m 정도의 최대폭풍해일고의 변화가 발생하며, 이는 전술한 바와 같이 녹산수문 및 하구언 수문이 열리게 되면서 폭풍해일이 수문 상류측으로 전파되었기 때문으로 판단된다.

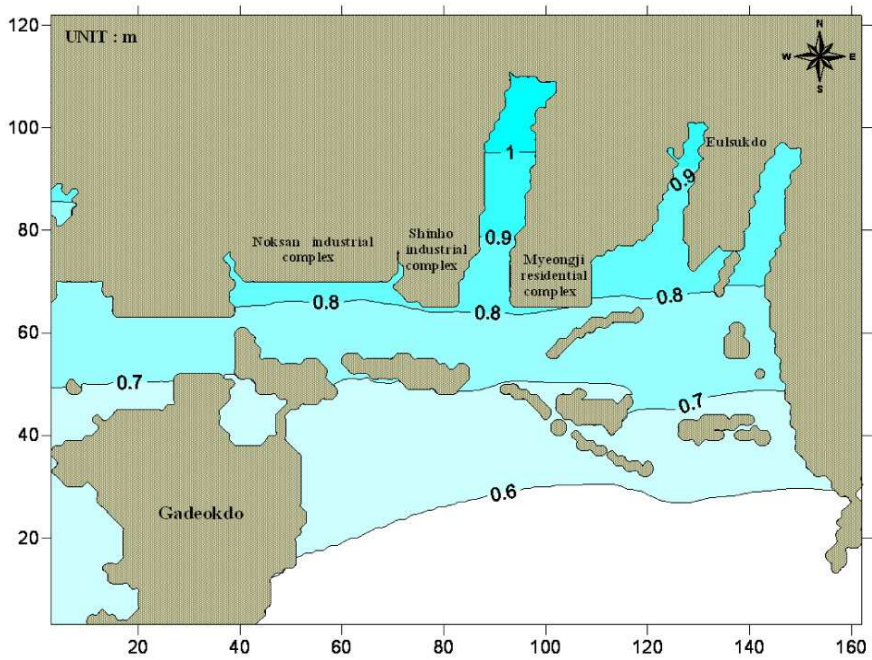


(a) Closing floodgate

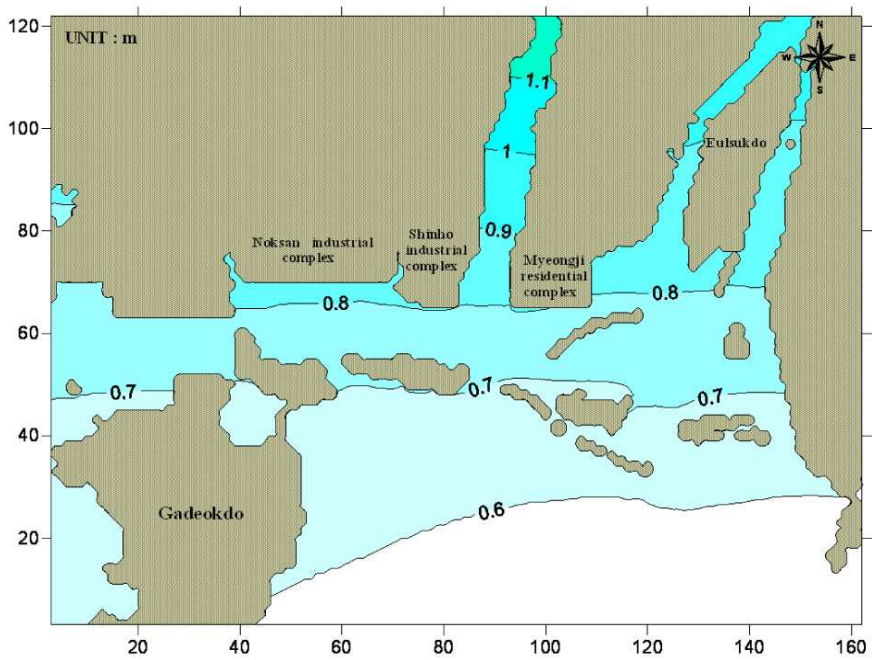


(b) Opening floodgate

Fig. 3.12 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Sarah

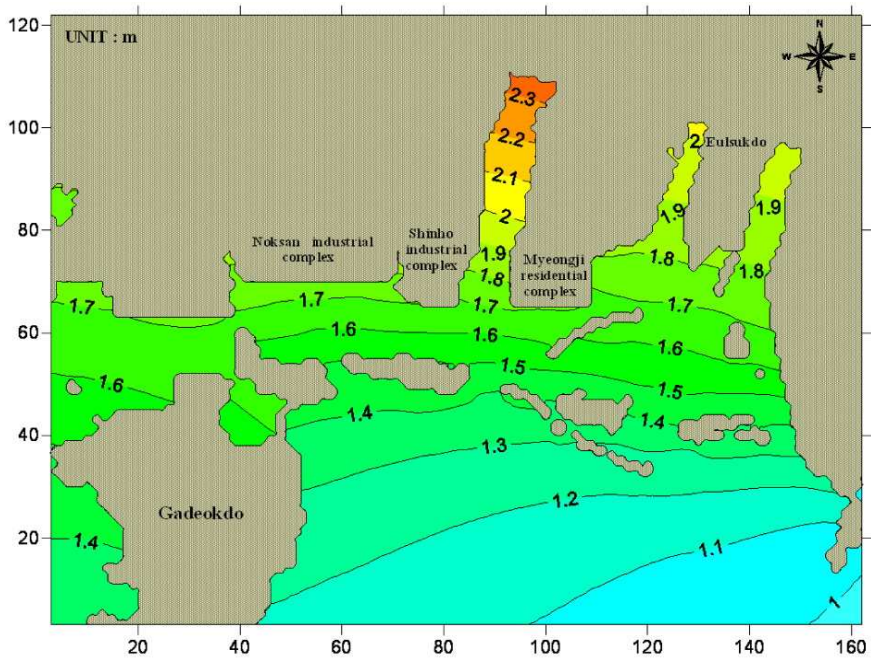


(a) Closing floodgate

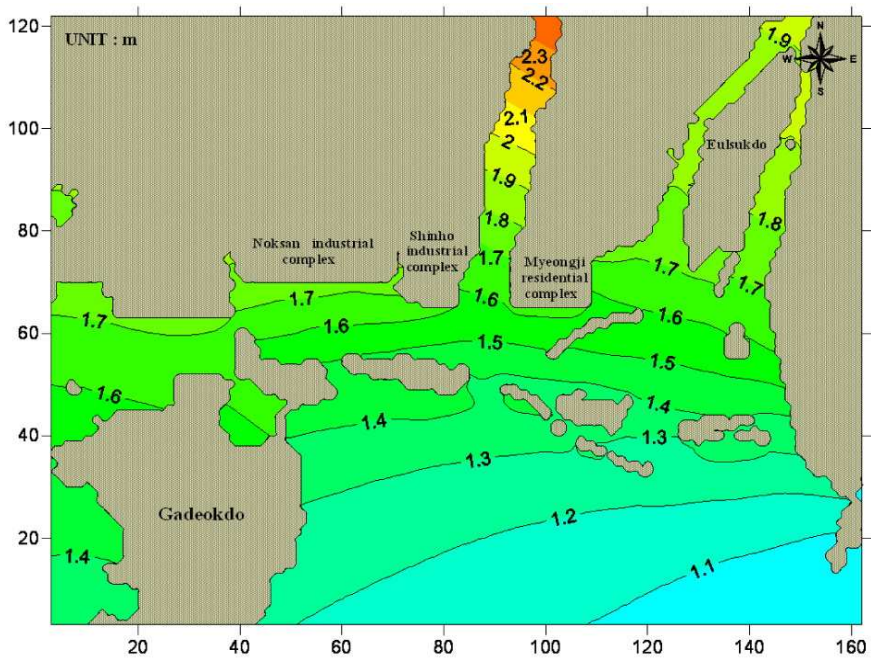


(b) Opening floodgate

Fig. 3.13 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Thelma



(a) Closing floodgate



(b) Opening floodgate

Fig. 3.14 Spatial distribution of storm surge height for typhoon Maemi

이상의 3개태풍(Sarah, Thelma, Maemi)시의 대상지에서 최대폭풍해일고를 종합하여 나타내면 다음의 Table 3.5와 같다. 녹산수문 및 하구언 수문의 개폐유무가 명지지구 전면해역의 최대폭풍해일고에 0.1m 정도의 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 최대폭풍해일고는 Maemi 내습시에 2.2m로 주어지는 것을 알 수 있다.

Table 3.5 Maximum storm surge height in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi

Storm	Maximum storm surge height(m)	
	Closing floodgate	Opening floodgate
Sarah	1.43	1.32
Thelma	1.0	1.0
Maemi	2.2	2.1

3.2 SWAN모델에 의한 천해파랑

3.2.1 대상영역 및 조건

태풍 Maemi에 의해 피해를 입었던 부산광역시 강서구 명지주거단지 인근해역을 대상으로 천해파랑을 추산하였다. 해당지역에 영향을 미칠 수 있는 모든 연안격자점의 신심해설계파를 고려하기 위해 광역은 200m, 중역은 50m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였으며, 계산영역을 Fig. 3.21에, 격자구성에 대한 제반사항을 Table 3.6에 제시한다. 고려된 계산영역의 수심데이터와 해안선은 기본적으로 수치해도를 이용하였으며, 협역에서 충분하지 않은 수심데이터에 대해서는 실제 측량데이터를 추가하여 사용하였다. 각 영역의 수심에 대해서는 Fig. 3.22에 나타내었다. 그리고, 계산영역에 일치하도록 필요한 바람장 데이터를 추출하였다. 계산에 사용된 신심해설계파제원(한국해양연구원, 2005)을 Table 3.7에 나타내었다. 3.1절에서 추산한 폭풍해일고와 조위(해양수산부, 2005)를 Table 3.8에 나타내었으며, 해안선의 상태에 따라 적용한 반사율(Goda, 1985)의 값은 Table 3.9에 제시하였다.

Table 3.6 Mesh sizes applied to each simulating area

구 분	Mesh size(m)	I _{mesh} ×J _{mesh}	비 고<AREA>
AREA NO.1-1	200	385×300	Wide
AREA NO.1-2	200	410×220	Wide
AREA NO.2	50	220×214	Middle
AREA NO.3	20	250×450	Small

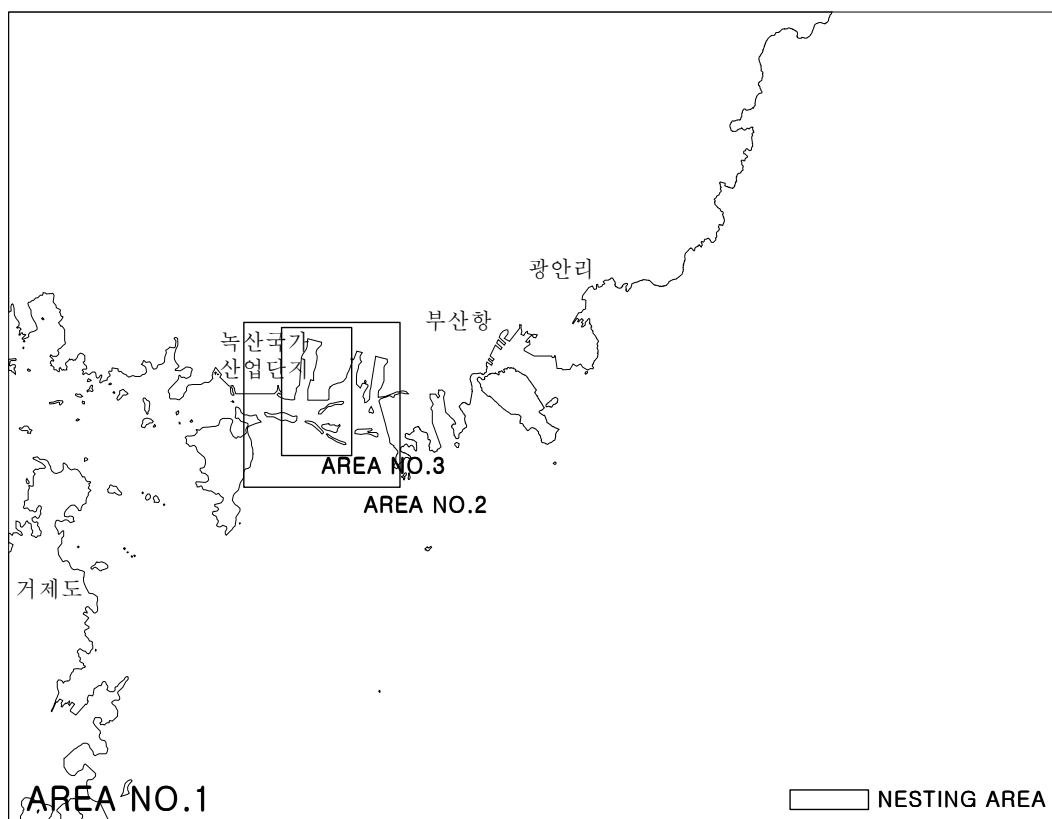


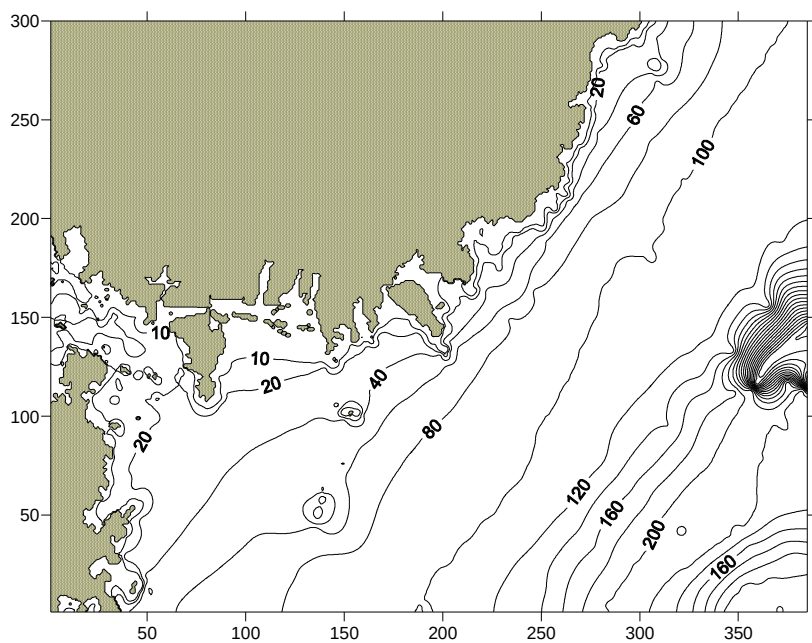
Fig. 3.15 Computation area of SWAN simulation

Table 3.7 Design water levels(For typhoon Maemi)

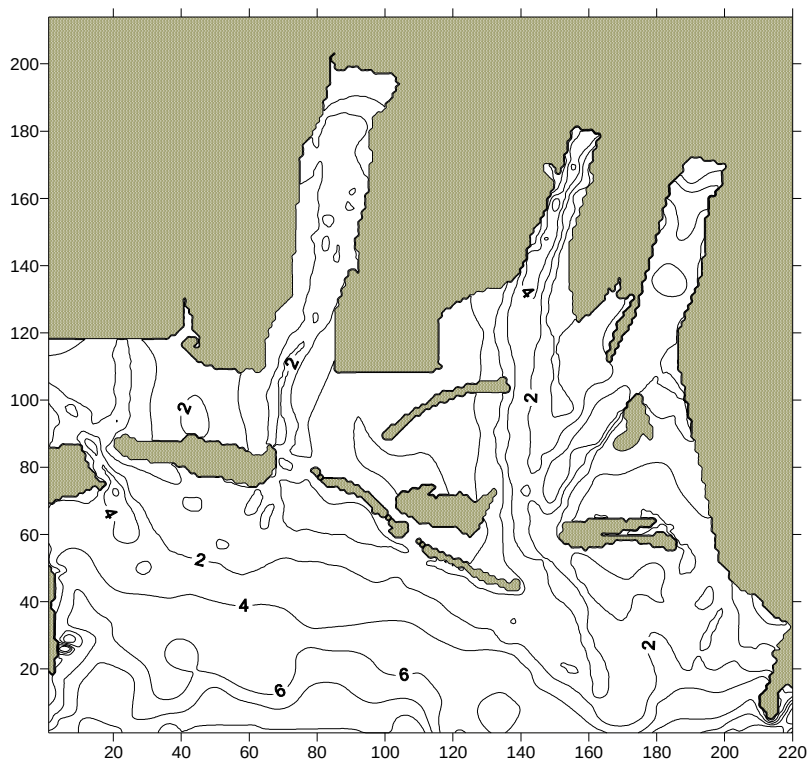
구 분	Approx. HHW (m)	Storm surge height (m)		Design level : Approx.HHW +Storm surge height(m)	
		Closing floodgate	Opening floodgate	Closing floodgate	Opening floodgate
AREA NO.1-1	1.774	2.2	2.1	3.974	3.874
AREA NO.1-2					
AREA NO.2					
AREA NO.3					

Table 3.8 Deepwater design waves

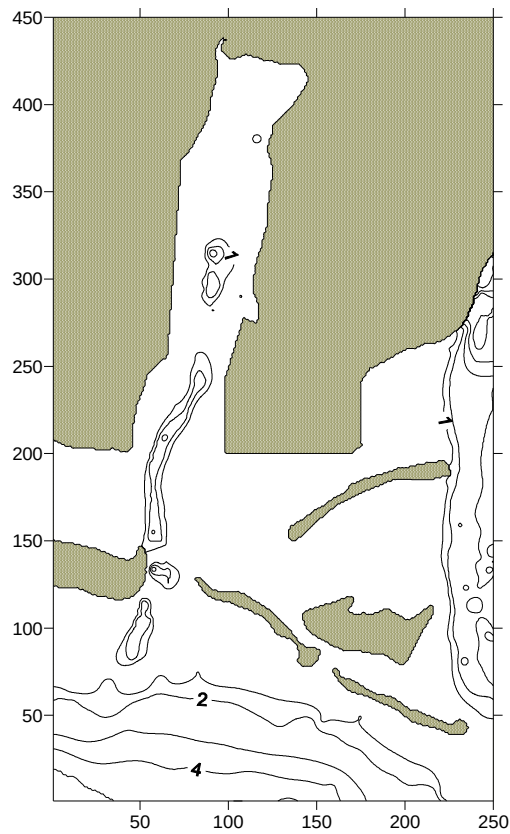
심해파랑 지점	Hs(m)	Ts(s)	파 향(dir.)	비 고
072125 (N34.80°, E128.83°)	12.47	15.54	SSE	Case 1
	9.63	14.18	S	Case 2
	6.12	11.91	SSW	Case 3
073125 (N34.80°, E129.00°)	11.91	14.49	SE	Case 4
	12.39	15.50	SSE	Case 5
	11.37	15.41	S	Case 6
074124 (N34.94°, E129.17°)	10.56	13.15	ESE	Case 7



(a) Wide area NO.1-1



(b) Middle area NO.2



(c) Object area NO.3

Fig. 3.16 Spatial distribution of water depth

Table 3.9 Reflection coefficient

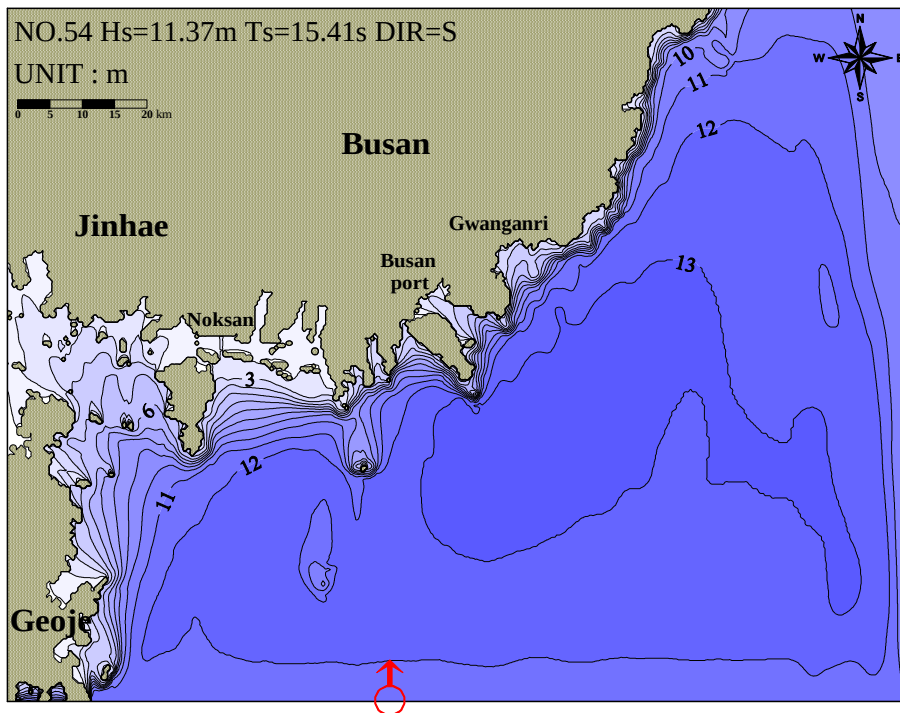
구 분	반 사 율
자연해빈	0.1~0.2
이형콘크리트블록사면	0.2~0.4
사석사면	0.3~0.5
완경사벽면	0.4~0.8
직립벽, 급경사벽면	0.8~1.0
이형소파블록	0.3~0.5

3.2.2 수치해석결과

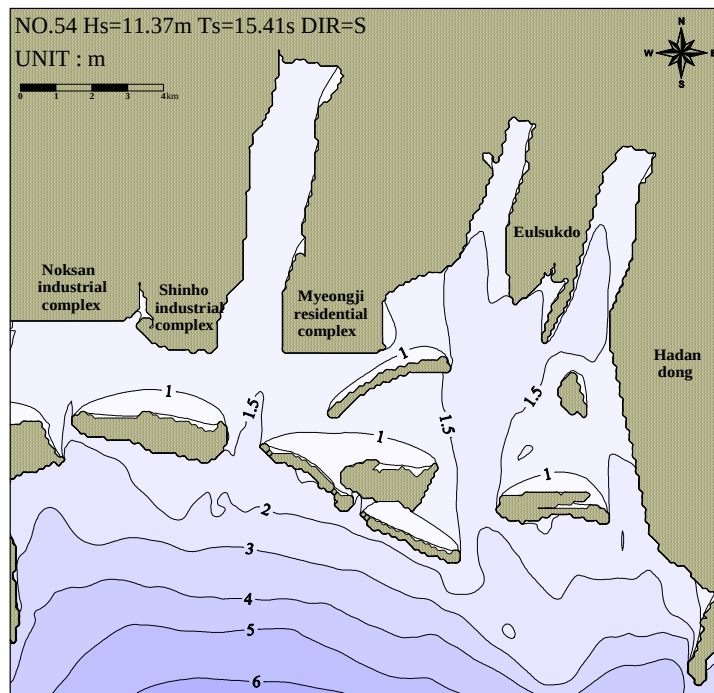
Fig. 3.17~3.18은 Table 3.7의 설계조위 및 Table 3.8에 제시된 심해파랑조건을 적용하여 산정된 파고분포, 파향분포 및 wave-setup을 나타낸 결과이다. 명지주거단지 인근해역에서 파랑산정에 영향을 미칠 수 있는 녹산수문 및 하구언수문의 개폐유무에 따라 각각 계산을 수행하였으며, 가장 큰 영향을 미치는 심해파 제원인 $\langle H_s=11.37\text{m}, T_s=15.41\text{s}$ Dir=S> 즉, Table 3.8의 Case 6에 대해서 나타내었다.

(1) 녹산수문 및 하구언수문이 닫혀 있는 경우의 파고분포

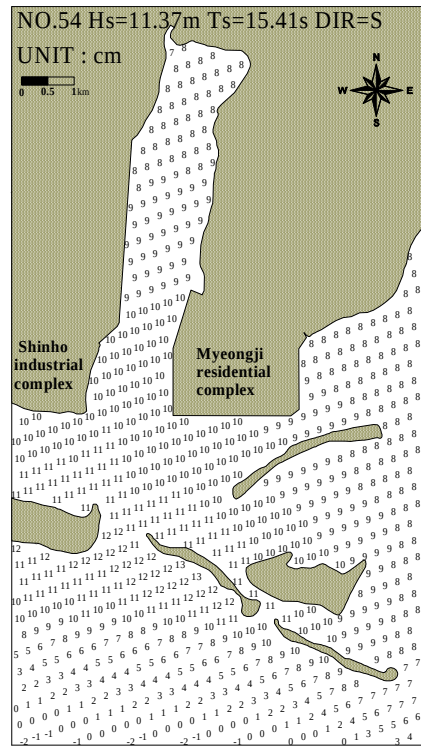
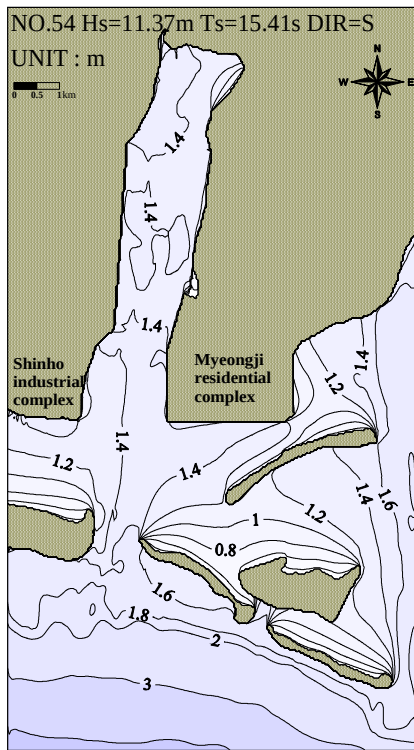
Fig. 3.17 (a) ~ (d)는 Table 3.7과 3.8에 제시된 조건으로부터 태풍 Maemi시의 바람장을 이용하여 명지주거단지 인근해역에서 산정된 천해파랑 및 wave-setup의 값을 나타낸 것이다. 상세역의 계산에는 신호공단과 명지지구의 전면 그리고 대상지구의 모든 해안선에 대해서 반사율을 고려하였다. 그림으로부터 진우도 전면해상에서 2m전후의 파고분포를 나타내고 있으며, 진우도와 장자도 개구부에서 1.6m의 파가 내습하는 상황을 볼 수 있으며, 서낙동강 내의 파고분포가 반사파의 영향으로 최고 1.4m까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, wave-setup의 경우 진우도와 장자도 사이의 개구부에서 최고 12cm의 값을 확인할 수 있으며, 대상호안에는 9cm정도의 값이 나타났다.



(a) Spatial distribution of wave height in wide area



(b) Spatial distribution of wave height in middle area

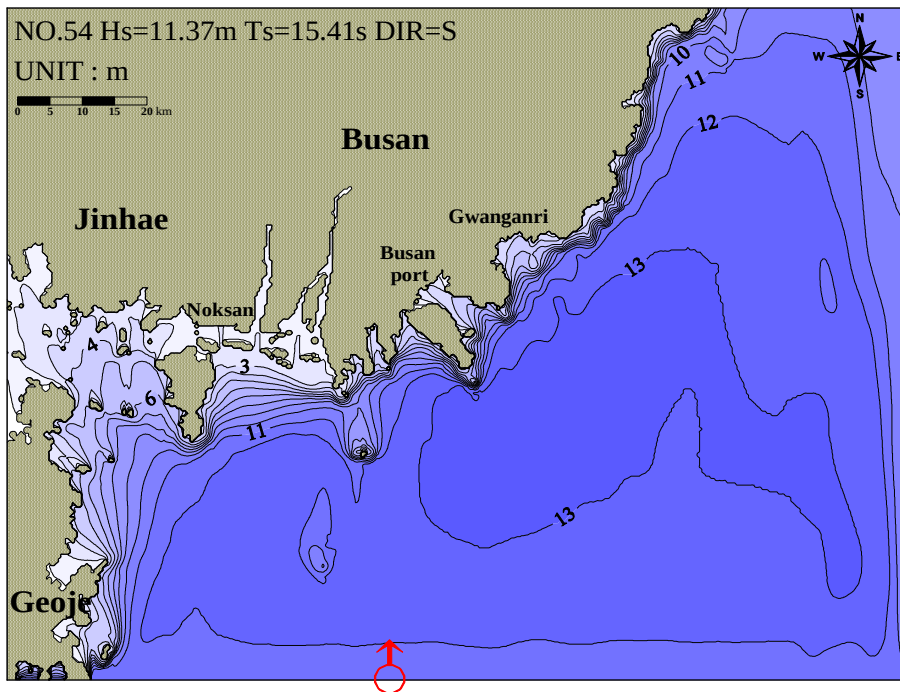


(c) Spatial distribution of wave height in object area (d) Spatial distribution of wave setup in object area

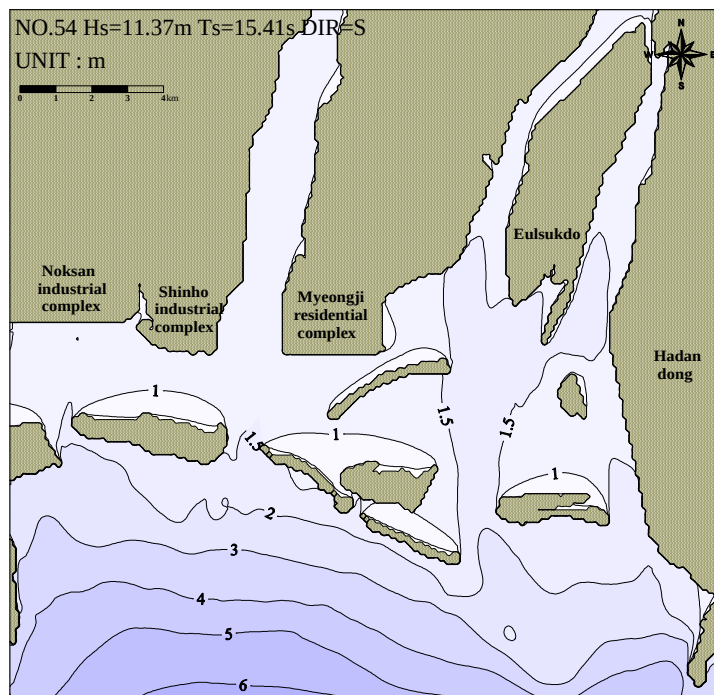
Fig. 3.17 Spatial distribution of wave height and setup in case of closing floodgate

(2) 녹산수문 및 하구언수문이 열려 있는 경우의 파고분포

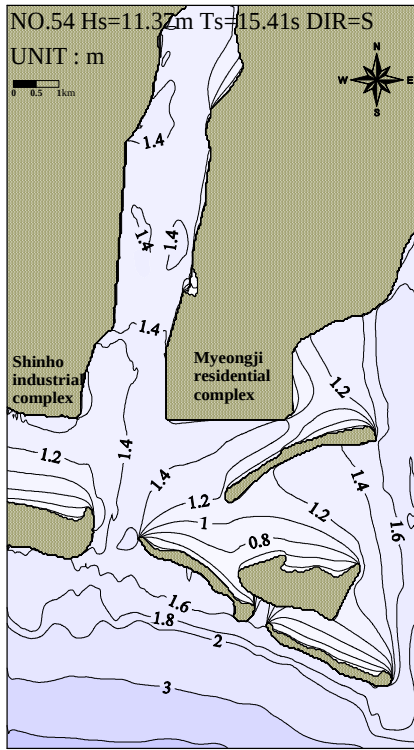
Fig. 3.18 (a) ~ (d)는 Table 3.7과 3.8에 제시된 조건으로부터 태풍 Maemi시의 바람장을 이용하여 명지주거단지 인근해역에서 산정된 천해파랑 및 wave-setup의 값을 나타낸 것이다. 상세역의 계산에는 신호공단과 명지지구의 전면 그리고 대상지구의 모든 해안선에 대해서 반사율을 고려하였다. 그림으로부터 진우도 전면해상에서 광역에서는 3m 정도의 파고분포가 나타나고, 중역에서는 2m정도의 파고분포를 나타내고 있다. 진우도와 장자도 개구부에서 1.5m의 파가 내습하는 상황을 볼 수 있으며, 서낙동강 내의 파고분포가 반사파의 영향으로 최고 1.4m까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, wave-setup의 경우 수문이 닫혀있는 경우와 비슷한 양상을 보이고 있으며, 진우도와 장자도 사이의 개구부에서 최고 12cm의 값을 확인할 수 있으며, 대상호안에는 9cm정도의 값이 나타났다. 결과의 비교로부터, 수문이 닫혀있는 경우보다는 서낙동강 내의 파고분포가 약간 줄어든 것을 확인할 수 있다.



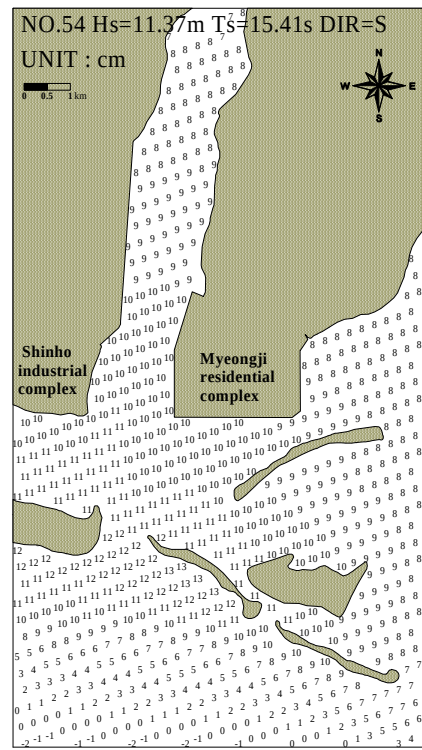
(a) Spatial distribution of wave height in wide area



(b) Spatial distribution of wave height in middle area



(c) Spatial distribution of wave height
in object area



(d) Spatial distribution of wave setup
in object area

Fig. 3.18 Spatial distribution of wave height and setup in case of opening floodgate

3.2.3 설계조위결정

월파량의 계산 혹은 수리실험에서 가장 큰 변수가 되는 조위는 결과적으로 Table 3.7의 설계조위에 본 연구에서 얻어진 wave-setup에 의한 수위상승량을 고려한 조위가 최종설계조위로 되어야 한다. 따라서, Table 3.10은 월파량의 추정에서 적용되어야 하는 최대파랑($H_s=11.37\text{m}$, $T_s=15.41\text{s}$, $\text{Dir}=\text{S}$)의 경우에 최종설계조위를 나타낸다.

Table 3.10 The design water level considered the wave-setup

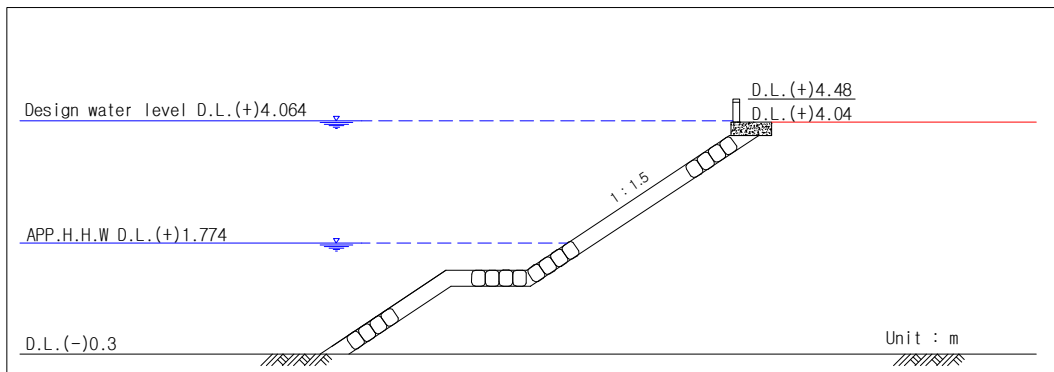
심해파랑 지점	설계조위(m)	심해파랑조건			최대 wave-setup량 (cm)	최종설계조위 (m)
		$H_s(\text{m})$	$T_s(\text{s})$	Dir		
073125	D.L.(+)3.974	11.37	15.41	S	9	D.L.(+)4.064

3.3 월파랑산정

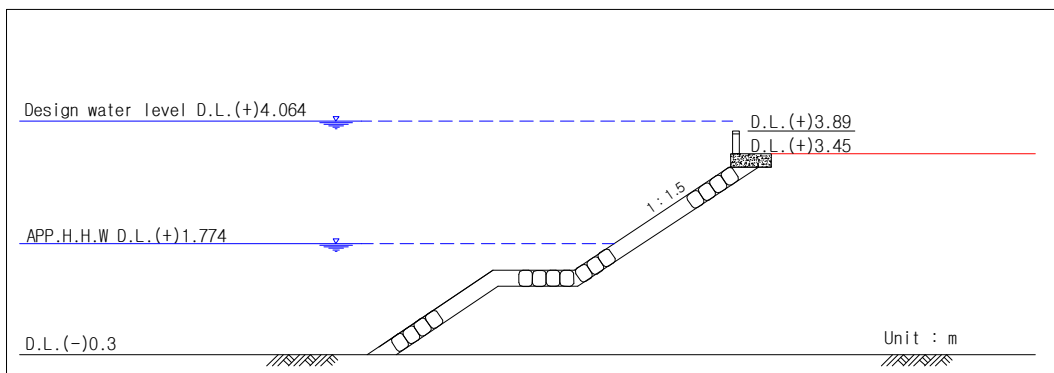
3.3.1 원안의 대표호안단면에서 월파랑의 추정

(1) 원안단면

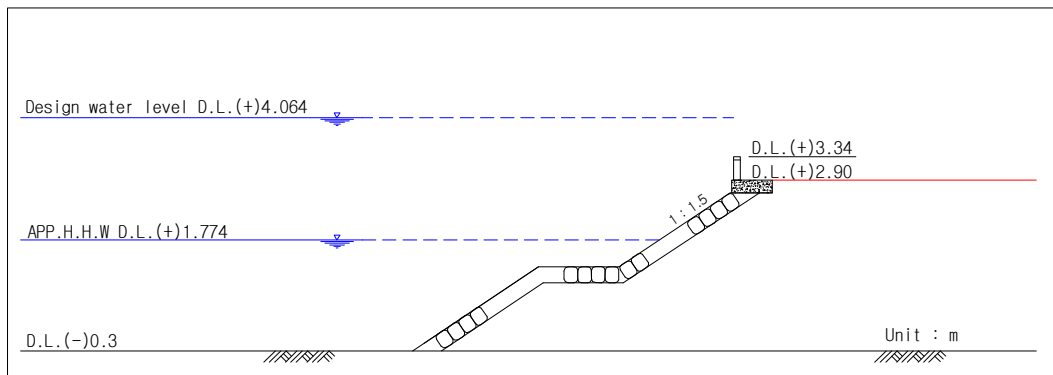
Fig. 3.19는 월파에 관한 수치실험을 통하여 월파상황을 검토하기 위해 제시된 대상지역에서 대표호안의 단면형상을 나타내고 있다.



(a) Section 1



(b) Section 2



(c) Section 3

Fig. 3.19 Section for original plan in numerical analysis

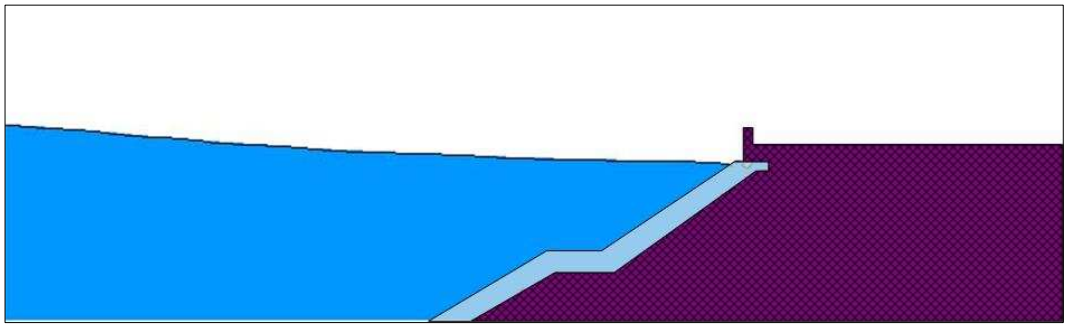
(2) 원안의 호안단면에서 월파재현

대상지역의 대표호안의 단면형상(Fig. 3.19)에 대한 월파상황을 검토하기 위해 적용된 입사파랑조건을 Table 3.11에 나타낸다. Table 3.11의 조건은 호안의 반사를 고려하지 않고 얻어진 호안전면에서 입사파랑조건이다. Fig. 3.19에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 지반고가 설계조위보다 낮기 때문에 월파량을 추정할 수 없고, Fig. 3.19(a)의 경우는 반파공의 천단이 설계조위보다 높기 때문에 파랑에 의한 월파량을 추산할 수 있다. 따라서, 이하에서는 Fig. 3.19(a)의 경우만에 대한 결과이다.

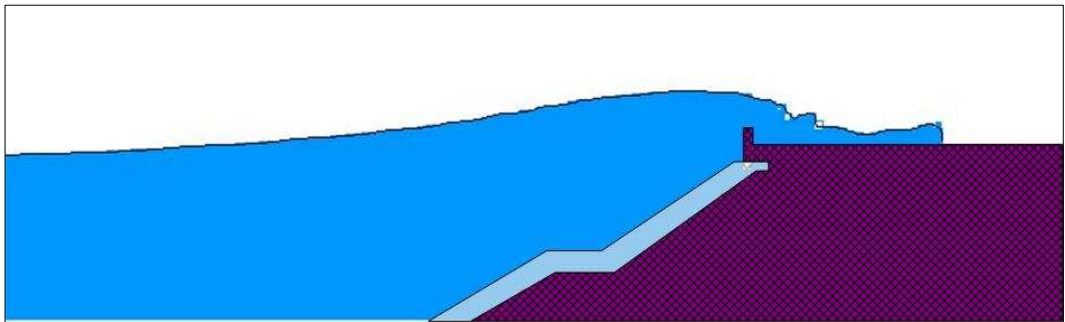
Table 3.11 Incident wave condition

단면형상	조위(m)	Hs(m)	Ts(s)
Fig. 3.19(a)	D.L.(+)4.064	1.2	15.41

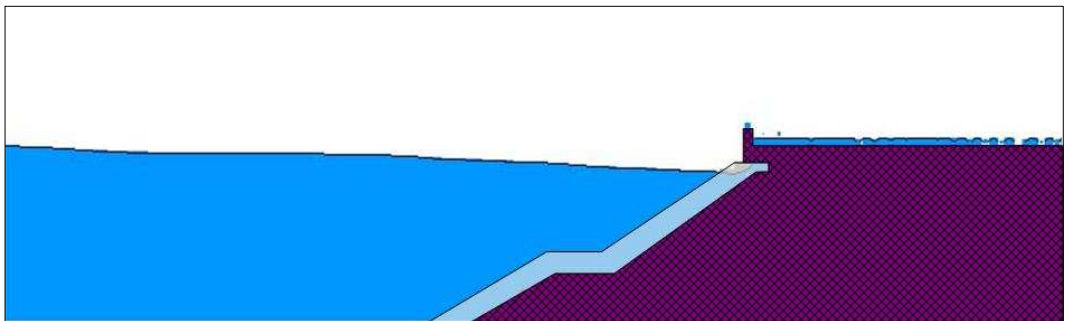
Table 3.11에 제시된 파랑조건에 있어서 Fig. 3.19(a)에 제시된 원안의 호안단면에 대한 수위변동분포를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3.20이다. 결과에 의하면 월파재현실험으로부터 다소 월파를 허용하는 것을 알 수 있다.



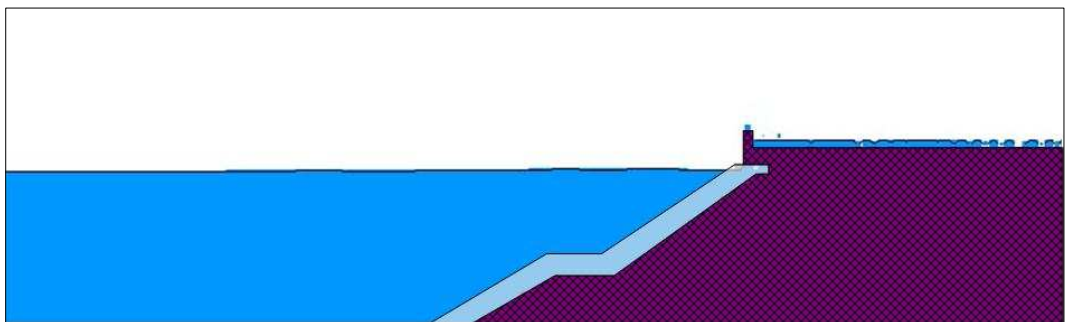
(a) $t = T/4$



(b) $t = 2T/4$



(c) $t = 3T/4$



(c) $t = T$

Fig. 3.20 Snapshot of overtopping

(3) 원안의 호안단면에서 월파량

Table 3.11의 조건으로 재현한 월파상황에서 산정된 월파량의 결과를 Table 3.12에 나타낸다. 결과를 살펴보면, 월파량이 $0.0119 (m^3/sec/m)$ 로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 수치모형실험으로부터 얻어진 월파량은 배후에 민가, 공공시설 밀집으로 월파, 물보라 등의 유입으로 중대한 재해가 예상되는 지역의 허용치 $0.01 (m^3/sec/m)$ 를 초과하는 것을 알 수 있다(해양수산부, 2005).

Table 3.12 Overtopping rate in numerical analysis

단면 형상	월파량 ($m^3/sec/m$)
Fig. 3.19(a)	0.0119

3.3.2 대안의 대표호안단면에서 월파량의 추정

(1) 대안단면

Fig. 3.21은 대상지역에서 월파를 저감시키기 위하여 적용된 대안의 단면형상을 나타낸다.

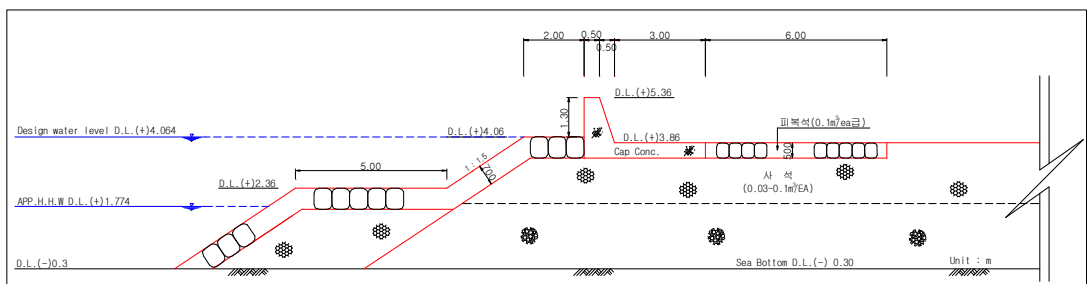


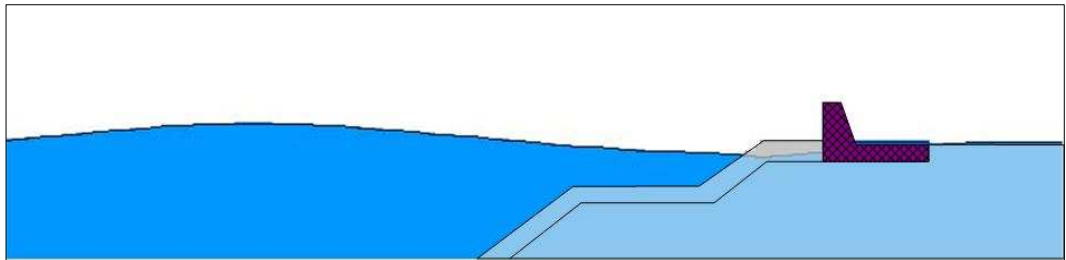
Fig. 3.21 Section for counterplan in numerical analysis

Fig. 3.21에서 대안단면의 형상은 원안과 유사하지만 전체적으로 투과성으로 구성되어

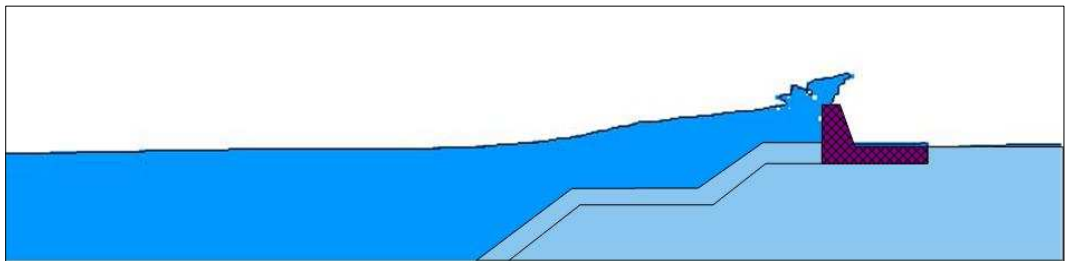
있고, 반파공을 월류한 월류수가 제외지로 수위차에 의해 배수될 수 있는 구조로 구성되어 있다. 그리고, 본 연구에서는 Fig. 3.21의 단면형상이 대상지구의 전면호안에 동일한 천단고로 구축되는 것을 대상으로 하고 있다.

(2) 대안의 호안단면에서 월파재현

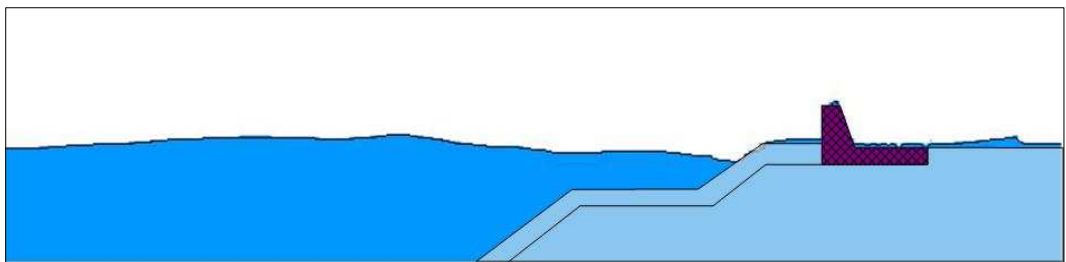
대상지역의 대안단면형상(Fig. 3.21)에 대한 월파상황을 검토하기 위해 적용된 입사파랑조건을 Table 3.11과 동일하다. Table 3.11에서 제시된 파랑조건에 있어서 대안의 호안단면에 대한 수위변동분포를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3.22에 주어져 있다. 결과에 의하면 원안과 마찬가지로 다소간의 월파가 발생하는 것을 확인할 수 있다.



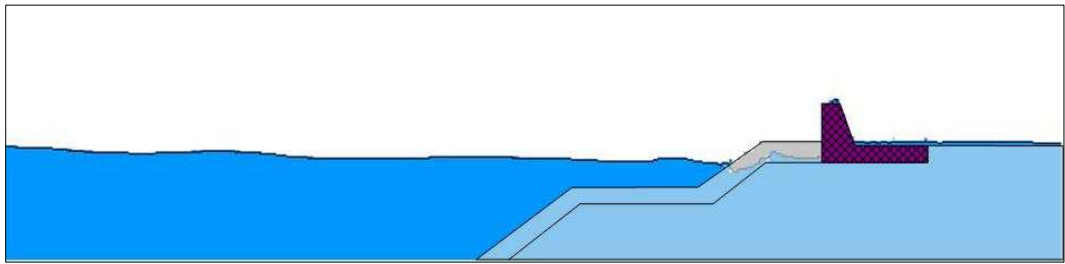
(a) $t = T/4$



(b) $t = 2T/4$



(c) $t = 3T/4$



(d) $t = T$

Fig. 3.22 Snapshot of overtopping

(3) 대안의 호안단면에서 월파량

Table 3.11의 조건으로 재현한 월파상황에서 산정된 월파량의 결과를 Table 3.13에 나타낸다. 결과를 살펴보면 원안의 경우보다 적은 월파량을 나타내지만, 허용월파량 $0.01 (m^3/sec/m)$ 의 이하로 주어지는 것을 알수 있다.

Table 3.13 Overtopping rate in numerical analysis

단면 형상	월 파 량 ($m^3/sec/m$)
Fig. 3.21	0.0055

제4장 결 론

본 연구에서는 대상해역에 대표적인 태풍 Sarah, Thelma, Maemi에 의한 폭풍해일고를 추정하였고, 심해설계파랑 조건을 SWAN모델에 적용하여 대상해역의 전면에서 천해파랑의 파고분포를 추정하였으며, 동시에 wave-setup을 추정하였다. 그리고, 대상해역 전면호안에 대해 원안 및 제시되는 대안의 호안단면에 대해 VOF법에 의한 월파현상의 재현 및 월파랑산정을 수행하여 제반 연안파랑환경을 검토하였다. 이와 같은 수치해석으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

4.1 폭풍해일

(1) 폭풍해일고에 대해 대상해역에서 큰 영향을 미친 3개의 태풍 Sarah, Thelma, Maemi에 대해 폭풍해일고를 추정하였으며, 동시에 낙산수문 및 하구언 수문의 개폐에 따라 폭풍해일고에 미치는 영향도 검토하였다. 결과에 의하면 수문이 닫혀 있는 경우 태풍 Maemi에 의한 해일고가 제일 큰 값을 나타내었고, 그 값은 서낙동강 내에서 2.2m로 주어진다. 여기서, 수문의 개폐에 따라 대상해역의 해일고에 약간의 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.2 SWAN모델

(1) 수문의 개폐여부를 포함하여 Table 3.8에 주어지는 7개의 심해파랑조건으로부터 대상지역의 전면해역에서 천해파랑의 파고분포를 검토하였다. 결과에 의하면 수문의 개폐에 따라 천해파랑의 크기변화는 유의한 값의 변화로는 판단되지 않는다. 그리고, 검토된 7개의 심해설계파랑조건 모두 대상지역의 전면해역에서 대등한 파고분포를 나타내며, 1.15~1.27m의 크기분포를 나타낸다.

(2) 수문의 개폐에 따라 Table 3.8에 주어지는 7개의 심해파랑조건으로부터 대상지역의 전면해역에서 wave-setup을 검토하였다. 결과에 의하면, 수문의 개폐에 따라 wave-setup의 크기변화에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 최대의

wave-setup은 (NO.54 Hs=11.37m, Ts=15.41s, Dir=S)의 경우에 발생하며, 그 값은 9cm로 주어진다. 구체적인 결과는 Fig. 3.17(d)를 참조바란다.

4.3 월파량산정

(1) CADMAS-SURF로부터 원안단면 및 대안단면의 월파현상을 재현하였고, 이로부터 월파량을 추정하였다. 결과에 의하면, 대부분의 천단고가 설계조위보다 낮기 때문에 월파량을 추정할 수 없는 상태이며, 최고로 높은 천단고의 경우에도 수치해석에 의한 월파량은 배후에 민가, 공공시설 밀집으로 월파, 물보라 등의 유입으로 중대한 재해가 예상되는 지역의 허용치 $0.01 (m^3/sec/m)$ 를 초과한다. 대안단면의 경우는 원안의 경우보다 적은 월파량을 나타내고, 허용월파량 $0.01 (m^3/sec/m)$ 의 이하로 주어지지만 일반적으로 월파량은 수리모형실험으로부터 추정되는 것이 합리적이기 때문에 설계시에는 수리모형실험을 실시하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

〈 참고문헌 〉

- [1] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정관, 2001 : VOF법에 기초한 불투과잠재 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B), pp.551-560.
- [2] 이종섭, 주귀홍, 장선덕, 1990 : 부산 연안 폭풍해일의 변동양상과 수치예측, 한국해양공학학회 논문집, 제2권, 제2호, pp 104-111.
- [3] 한국해양연구원, 2005 : 전해역 심해설계과 추정 보고서Ⅱ.
- [4] 해양수산부, 2005 : 항만 및 어항설계기준.
- [5] Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978 : Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp.569-587.
- [6] Battjes, J.A. and M.J.F. Stive, 1985 : Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, J. Geophys. Res., 90, No. C5, 9159-9167
- [7] Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1995 : Parameterization of triad interactions in wave energy models, Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, pp.140-148.
- [8] Goda, Y. 1985 : "Random seas and design of marine structures". Univ. of Tokyo press.
- [9] Hasselmann, K., 1974 : On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, pp.107-127.
- [10] 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.
- [11] Hirt, CW., Nichols, BD. 1981 : Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, 201–225.
- [12] Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984 : On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, J. Phys. Oceanogr., 14, pp.1271 –1285.
- [13] Miles, J.W., 1957 : On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3, pp.185–204.
- [14] 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.
- [15] Myers, V.A. and Malkin, W., 1961 : Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories, U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- [16] Phillips, O.M., 1957 : On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2, pp.417–445.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] Wu, J., 1982 : Wind–stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, J. Geophys. Res., 87, C12, pp.9704–9706.
- [20] 岩田好一郎, 川崎浩司, 金度三, 1994 : 水中構造物による砕波の数値解析, 海岸工学論文集, 42, pp.781–785.
- [21] 紫木秀之, 2004 : 波浪・高潮津波の数値計算と沿岸防災支援システムへの応用に関する研究, 東京大学博士學位論文.
- [22] (財) 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, 295p.
- [23] 許東秀, 2000 : 潜堤による多方向不規則波の砕波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 177p