

工學碩士 學位請求論文

태풍 내습에 따른 해안에서의 재해위험
예측에 관한 연구

A study on Hazard Prediction at the Coastal Area
due to Typhoon Attack

指導教授 李 重 雨

2005年 8月

韓國海洋大學校 産業大學院

海事工學科

權 素 鉉

A study on Hazard Prediction at the Coastal Area due to Typhoon Attack

So-Hyun Kwon

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

Abstract

Recently huge typhoons had attacked to the coastal waters in Korea and caused disastrous casualties in those area. There are some discussions on correction to the design parameters for the coastal structures. Wave transformation computations with the extreme waves are of value in planning and constructing engineering works, especially in coastal regions. Prediction of typhoon surge elevations in this study was based primarily on the numerical model, since it is difficult to study these events in real time or with on the physical model basic. Wave prediction with a two dimensional numerical model for a site with complicated coastal lines and structures at the period of typhoon Maemi was discussed. In order to input parameters for the extreme wave conditions, we analyzed the observed and predicted typhoon data. Finally we applied the model discussed above to the storm surge and extreme wave

problem at Busan Harbor, the southeast coast of Korea. Effects of water level variation and transformation of the extreme waves in relation with the flooding in coastal waters interested were analyzed. We then made an attempt to present a basic hazard map for the corresponding site.

목 차

ABSTRACT	i
LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	iv
NOMENCLATURE	vii
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 방법	1
1.3 이론적 배경	2
제2장 기초이론	5
2.1 고조 적용 방정식	5
2.2 극한 파랑 적용 방정식	11
제3장 고조 및 극한파랑의 현장자료 분석	14
3.1 고조 자료 분석	14
3.2 극한파랑의 분석	16
3.3 부산항 해안선역 주요 태풍 피해 분석	22
제4장 해안에서의 재해위험예측	29
4.1 재해위험예측을 위한 수치모형의 적용	29
4.1.1 고조계산	33
4.1.2 극한파랑의 계산	43
4.2 침수원인 및 재해위험예측	55
4.2.1 침수원인	56
4.2.2 재해의 위험예측	57
제5장 결론	65
참 고 문 헌	67

LIST OF TABLES

Table. 4.1	Outline of the <i>model typhoon</i>	33
Table. 4.2	Seabed profile over the continental shelf	36
Table. 4.3	Summary of numerical storm surge simulation	40
Table. 4.4	Incident <i>wave condition for extreme wave calculation</i>	43
Table. 4.5	Characteristics of numerical <i>model and simulation</i>	43

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1	Schematic diagram of the coordinate system	6
Fig. 3.1	The best track of typhoon <i>Maemi</i> (2003)	14
Fig. 3.2	Observed <i>water level at Busan Port</i> (Sept. 12~13)	15
Fig. 3.3	Observed <i>water level at Masan Port</i> (Sept. 12~13)	15
Fig. 3.4	Time series of observed <i>wave components at the offshore of Gejedo</i>	16
Fig. 3.5 (a)	Time series of <i>wave record at Busan New Port</i> (No. 1~515)	17
Fig. 3.5 (b)	Time series of <i>wave record at Busan New Port</i> (No. 516~1025)	18
Fig. 3.5 (c)	Time series of <i>wave record at Busan New Port</i> (No. 1026~1530)	19
Fig. 3.5 (d)	Time series of <i>wave record at Busan New Port</i> (No. 1530~2050)	20
Fig. 3.6	Time series of <i>calculated wave components at the offshore of Busan port</i>	21
Fig. 3.7	The change of <i>wave direction and mainly damaged areas at the time of Typhoon "Maemi" in Busan Harbor</i>	23
Fig. 3.8	<i>Destruction of Youngdo Bridge</i>	24
Fig. 3.9	<i>Damaged harbor in Jungli</i>	24
Fig. 3.10	The <i>flood water of Namhang-dong industrial complex</i>	25

Fig. 3.11	<i>Destruction of the walking way at Jeolyoung-ro</i>	25
Fig. 3.12	<i>Destruction by overflow at Gamji beach of Dongsam-dong</i>	26
Fig. 3.13	<i>Destruction by overflow at Korea Maritime University. and Jodo breakwater in Dongsam-dong</i>	27
Fig. 3.14	<i>Destruction of Container Cranes at Gammam terminal and Pier No.5</i>	28
Fig. 3.15	<i>Destruction of Songdo Beach area</i>	30
Fig. 4.1	<i>Location map for numerical simulation</i>	32
Fig. 4.2	<i>Calculated storm surges for macro area</i>	34
Fig. 4.3	<i>Calculated storm surges for nearshore of Youngdo</i>	34
Fig. 4.4	<i>Calculated storm surges by parameter of Typhoon Meami(2003)</i>	36
Fig. 4.5	<i>Calculated storm surges by parameter of Typhoon Sarah(1959)</i>	36
Fig. 4.6	<i>Calculated storm surges by parameter of Typhoon Agnes(1981)</i>	37
Fig. 4.7	<i>Calculated storm surges by parameter of Typhoon Thelma(1987)</i>	37
Fig. 4.8	<i>Computed surge hydrographs in terms of time for Maemi at spring tide period</i>	40
Fig. 4.9	<i>Computed surge hydrographs in terms of time for SPH at spring tide period</i>	40
Fig. 4.10	<i>Computed surge hydrographs in terms of distance for Maemi at spring tide period</i>	41
Fig. 4.11	<i>Computed surge hydrographs in terms of distance for SPH at spring tide period</i>	41
Fig. 4.12	<i>Computed surge hydrographs in terms of distance for Maemi at neap tide period</i>	42
Fig. 4.13	<i>Analysis of flood due to storm surge along the Youngdo coast</i>	43
Fig. 4.14	<i>Finite element mesh for Busan Harbor</i>	45
Fig. 4.15	<i>Detailed Finite element mesh for Busan Harbor(Section 1,2)</i>	46
Fig. 4.16	<i>Detailed Finite element mesh for Busan Harbor(Section 3,4)</i>	47
Fig. 4.17	<i>Detailed Finite element mesh for Busan Harbor(Section 5,6)</i>	48

Fig. 4.18	Calculated extreme wave at Yeong-do island	49
Fig. 4.19	Calculated extreme wave at Yeongdo Island(Section 1,2)	50
Fig. 4.20	Calculated extreme wave at Yeongdo Island(Section 3,4)	51
Fig. 4.21	Comparison of extreme waves along the Youngdo coast	52
Fig. 4.22	Calculated area at Busan Harbor	52
Fig. 4.23	Calculated extreme wave at Busan Harbor(Section A,B,C)	53
Fig. 4.24	Calculated extreme wave at Busan Harbor(Section D,E)	54
Fig. 4.25	Comparison of extreme waves along the Busan Harbor	55
Fig. 4.26	Hazard map for Youngdo from calculation of the storm surge and extreme wave	58
Fig. 4.27	Hazard map for Busan Port(Section A, B) from calculation of the storm surge and extreme wave	59
Fig. 4.28	Hazard map for Busan Port(Section C) from calculation of the storm surge and extreme wave	60
Fig. 4.29	Hazard map for Busan Port(Section D) from calculation of the storm surge and extreme wave	61
Fig. 4.30	Hazard map for Busan Port(Section E) from calculation of the storm surge and extreme wave	62

NOMENCLATURE

A	Amplitude of the incident wave
\tilde{a}	CC_g
B	Coastal boundaries
\tilde{b}	$\frac{C_g}{C} \sigma^2 + \delta w + iC_g \sigma \gamma$
$\mathcal{A}(x, y)$	Phase velocity = σ/k
$C_g(x, y)$	Group velocity = $\partial\sigma/\partial k = nC$ with $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$
E	Total number of elements
F	Functional
e_i	Elements around node I
f_r	Friction coefficient
$H/2$	Wave amplitude
J_n	n-th order Bessel functions
K_r	Reflection coefficient
$[K_1^e]$	Element matrix
$[K_3]$	Diagonal matrix of dimension M by M
$[K_4]$	Fully populated $N_\Gamma \times M$ matrix
L_P	Length of segment P
N_Γ	Total number of segments (= total number of nodes) along the circular boundary Γ

N_i^e	Linear interpolation functions
$N_i(x, y)$	Linear interpolation function for node i
$N_i^e(x, y)$	Linear interpolation function corresponding to an element e and one of its node I
n	Manning's dissipation coefficient
P_1, P_2	Boundary segments to either side on node I
r	Radius of the semicircle
w	Friction factor
α	Complex coefficient ($= \alpha_1 + \alpha_2$)
α_i, β_i	Unknown coefficients
β	Wave phase angle
Γ	Open boundary
γ	Wave breaking parameter
\hat{n}	Wave potential
\hat{n}_i	Solution \hat{n} at node I
\hat{n}_s	Scattering wave potential
\hat{n}^e	Linear two-dimensional function
\hat{n}_i^e	Wave potentials at the nodes of the element e
$\{\hat{n}^\Gamma\}$	Subset of $\{\hat{n}\}$ for nodes situated on boundary Γ
$\hat{n}(x, y)$	Complex surface elevation function, from which the wave height can be estimated
θ_I	Incident wave angle with respect to the x-axis
σ	Wave frequency under consideration (in radians/second)
Ω	Model domain

제1장 서론

1.1 연구의 배경

개방해역에서 폭풍고조 계산은 해안역의 개발계획 수립, 건설공사 시행, 해안재해 방지등의 분야에서 매우 중요하다. 해양과 연안의 이용도가 높아지고 이용자의 활동범위가 크게 확장되면서, 항만 및 해안의 인접해안에서 태풍이나 폭풍 같은 자연재해로부터 피해를 최소화하는 효과적인 방재의 필요성 역시 증대되고 있다. 2003년 내습하여 우리나라 남해안을 강타한 태풍 매미는 동남해안권 해안선, 특히 항만시설 집중지역인 부산권 해안선에 막대한 피해를 남겼으며, 피해를 복구하는 과정에서 자연재해 감소와 해안선 활용제고를 위해서 방재 기본자료 확보가 매우 중요하다는 사실이 자연스럽게 부각 되었다.

본 연구에서는 부산항의 항만 주요시설물을 보호하고 있는 영도의 기능적·지리적 특성에 주목하여, 영도의 해안선을 따라서 발생하는 해일로 인한 수면 변화에 대한 예측과 분석을 시도 하였다. 연구의 결과로 얻어진 자료는 부산항 및 영도지역 해안선과 인접 육역지역의 방재에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

1.2 연구의 방법

폭풍고조로 인한 해수면 변화를 예측하기 위한 도구로 수치모형을 이용하기로 한다. 모형에서 여러 가지 가정, 유효범위, 적용성을 이해하기 위하여 먼저

태풍과 폭풍의 발생과정을 좌우하는 물리적 인자들에 대하여 분석하기로 한다. 본 논문에서 적용할 기본방정식은 폭풍고조의 기초 지배방정식을 축약시킨 것이다. 최종적으로 수립한 모형을 부산항의 해안선 특히 영도 연안역을 중심으로 폭풍고조의 문제에 적용하여 천문조, 초기수면, 대기압에 따른 수위 상승의 효과를 검토하였으며, 부산 해안역에서의 폭풍고조로 인한 수위상승과 침수인자를 분석하고, 침수 및 재해방지를 위한 합리적인 제안도 검토하기로 한다. 이 과정에서 영도를 포함한 부산항 해안선에서 태풍 매미로 인한 피해 특성과 폭풍해일의 규모를 좌우하는 풍향, 풍속, 조위변화 및 이와 병행한 극한과랑의 변화 등을 분석하여 재난 방재에 활용할 수 있도록 의도하였다.

1.3 이론적 배경

태풍은 태평양의 적도부근 해역의 열대지방에서 발생하는 이동형 사이클론을 지칭하며, 지구의 자전방향으로 인해 태풍은 북반구에서는 반시계방향, 남반구에서는 시계방향으로 선형풍의 순환을 가진다. 해면에서의 대기압은 태풍의 눈에서 최소가 되고 보통 중심에서 방사형으로 증가한다. 중심에서의 온도는 주위보다 높으며, 공기는 주로 아래층에서 수직으로 상승하므로 인접 풍역에서 중심으로 바람이 분다. 따뜻하고 습기가 많은 공기가 중심으로 들어가면 가열되어 상승하게 되고 상층 대기권에 확산하여 열을 운동에너지로 변화시키는 과정을 밟게 된다.

태풍의 폭풍외곽기압(P_{∞})과 중심(태풍의 눈) 기압(P_0)의 차이인 압력차(ΔP), 중심에서부터 최대 풍속역까지의 거리인 최대풍속 반경(R), 태풍의 눈이 움직이는 진행속도(V) 등은 폭풍고조 및 표면파를 생성하는 중요 특성인자로, 대기압(P)는 폭풍장의 위치 및 시간의 함수 $P = \mathcal{A}(x, y, t)$ 로 나타낼 수 있

다. 일반적으로 대기압은 폭풍의 중심($p=p_0$)에서 최소가 되고, 폭풍의 가장자리($p=p_n$)까지 방사형으로 점차 증가한다. 개방해역에서 압력의 변화로 해면은 저기압에서 상승, 고기압에서 하강하고 압력이 높은 해역은 해면을 밀어 압력이 낮은 곳으로 물을 이동하도록 하여 해면을 상승하게 한다. 또한, 물을 한 곳에서 다른 해역으로 이동시키는 것은 시간이 요하므로 이 과정은 시간의 존 형태가 된다. 압력변화가 급격하다면 이송을 완전하게 하기 위한 시간이 부족하게 되고, 따라서 해면의 변화는 미약할 것이나, 시간이 충분하다면 압력이 중력과 균형을 이루는 평형상태에 도달할 수 있게 된다. 연안역에서는 이송이 해저마찰에 의해 제지되어 물의 이동에는 훨씬 많은 시간을 요하게 되고 실제 폭풍에서 압력으로 인한 해면변화는 폭풍의 속도에 의존하고 경과된 시간에 따라 변화한다. 따라서, 고속으로 움직이는 폭풍은 시간이 충분하지 않으므로 해면이 실제의 압력차에 해당하는 수위에 이르지 못하게 된다. 결과적으로 폭풍의 진행속도는 수면의 실제적 상승량과 밀접한 관계가 있다.

태풍이 통과하는 기간 중에 개방해안에서의 최고의 수위상승은 여러 가지 요소나 인자에 관계되는데, Jelesnianski(1967)는 직선상의 등심선을 갖는 해안 모델에서 폭풍계에 대한 최고조의 위치는 폭풍이 해안에 접근하는 방향에 관계됨을 수치적으로 나타내었으며, 대륙붕 및 해안선의 불규칙한 정도, 초기바다의 상태, 폭풍이 진행하는 바다의 특성, 폭풍자체의 거동 및 특성, 내만의 특성 및 외부에서 폭풍계에 가해지는 힘과 밀접한 관계가 있음을 밝혀내었다.

이상과 같이 태풍의 발생과 그 영향으로 인한 해면의 변화를 예측하는 것은 항만건설 및 해안지역을 개발하고 사후 재해방지에 가장 중요한 요소이지만, 태풍으로 인한 수위의 변화 예측은 물리모형에서나 실제 현장에서 다루기가 매우 어렵기 때문에 수치모형에 주로 근거를 둔다. 해안에서 고조의 예측은

간단하게 준2차원 수치해석방법으로 행할 수도 있다. 이 방법은 지구 자전에 의한 연안류 효과를 고려하여 대륙붕의 가장자리에서부터 바람응력을 정상상태에 이르도록 적분하는 것이다. 전향력의 효과(Coriolis effect)를 고려한 해역회전 근사는 적분과정이 일차원 문제와 유사한 방법으로 수행될 수 있다는 점에서 단순하다.

Bretschneider & Collins(1963)는 Freeman et al.(1957)이 개발한 이론을 Texas의 Corpus Christi 및 그 부근에서 개방해안의 고조를 예측하는데 이용하였다. 또한, Bodine(1971)은 해역회전 근사 이론으로부터 2차원에 준하는 모형을 수립하였다. 본 연구에서는 준2차원 모형과 함께 수심평균 2차원 운동방정식과 연속방정식으로부터 출발한 폭풍고조의 지배방정식에 의해 해저응력 및 해면응력, 해안, 해저, 해면 및 개방 경계조건을 도입하여 2차원 모형을 구성하고, 영도를 포함한 인근 해역을 대상영역으로 하여 모형에 도입한다. 선택한 영도해안은 한반도의 남해안에 위치하여 태풍의 직접적인 영향권에 노출되어 있으므로 이로 인한 고조를 수치해석으로 계산하는데 적합한 해역으로 사료된다.

본 연구에서는 해안역에서 침수원인이 되는 고조 및 이와 병행한 극한파랑의 분석을 위해 최근 100년 빈도에 해당하는 2003년도의 태풍 매미를 선정하고 이것이 지닌 태풍 파라메타를 이용하기로 한다. 부산항 외해에서의 태풍 매미로 인한 극한파랑의 입사조건은 태풍이 통과하는 기간과 경로 상에서 측정한 바람, 파랑, 기압, 태풍의 진행속도 등의 실측자료와 함께 제주도를 포함한 한반도 남해안역을 대상영역으로 한 광영역 WAM모형 실험으로 예측한 자료를 분석하여 반영하기로 한다.

제2장 기초이론

2.1 고조 적용 방정식

본 절에서 다루는 폭풍고조이론은 대륙붕에 대해 단일 횡단선을 따라 해수면의 변화를 평가하기 위한 준 2차원적 방법이다. 다른 1차원적 방법과는 달리 지구자전의 영향을 다소 고려하고 있다. 그러나 이 이론은 완전한 폭풍생성과정에 대해 근사화한 것으로 실제 폭풍의 예측에는 고려하는 상황에 따라 다를 수 있다. 어떤 경우에는 이와 같은 근사가 개방해안의 고조에 대해 합리적인 정도로 예측할 수 있으나 다른 경우에는 2배 혹은 그 이상의 오차를 포함할 수 있으며, 이 방법의 유용성을 알기 위해서는 이 이론이 포함하고 있는 아래의 근본적인 가정과 개발단계에서 무시한 수력학적인 과정을 이해할 필요가 있다.

폭풍고조를 발생시키는 지배방정식을 유도하기 위해 부과한 조건으로는 1) 단주기 파랑은 제외하여 수평방향의 단위를 $L \gg D$ 및 $L \ll R_E$ 로 제약한다. 여기서 D 는 수심, L 은 파장, R_E 는 지구의 반경 2) 지구 자전으로 인한 가속은 일정하다. 3) 유체는 균질하며 비압축적이므로 물의 밀도는 일정하다. 4) 유체는 비점성이므로 점성에 의한 내부력은 무시한다. 5) 해저면은 고정, 불투과성으로 간주한다. 6) 표면파의 영향은 폭풍고조에 선형적으로 중첩시킬 수 있는 것으로 간주한다. 의 여섯 가지이다.

폭풍고조에 적합한 기초 방정식은 체적 수송의 방법을 사용하며 총 수심에 대해 연직 적분하여 구한다. x 방향은 해안선에 대해 수직 방향으로 해안선을

향하고 y 방향은 해안선과 나란한 것으로 정의하며(Fig. 2.1) 이에 따른 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \\ = fV - gD \frac{\partial S}{\partial x} + gD \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} - W_x P \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} \\ = -fU - gD \frac{\partial S}{\partial y} + gD \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} - W_y P \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = P \quad (2.3)$$

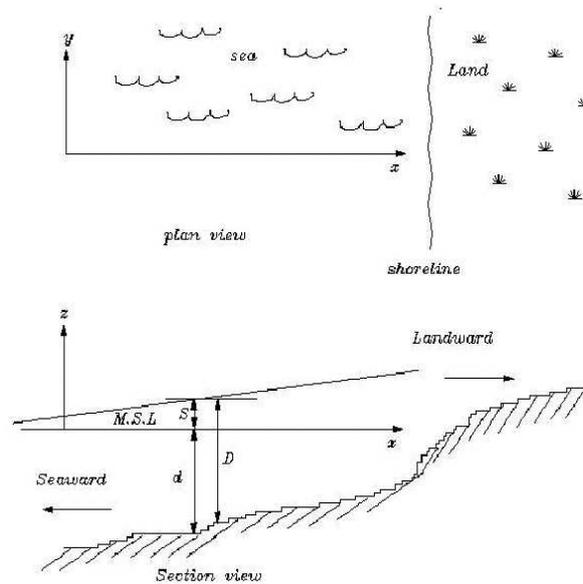


Fig. 2.1 Schematic diagram of the coordinate system

식 (2.1)과 (2.2)는 운동방정식, 식 (2.3)은 비압축성유체에 대한 연속방정식을 나타내며, 여기서 사용된 기호는 다음과 같다.

U, V = 단위폭당 체적 수송의 x, y 성분

$$U = \int_{-d}^S u \, dz, \quad V = \int_{-d}^S v \, dz$$

M_{xx}, M_{yy}, M_{xy} = 운동량 수송량

$$M_{xx} = \int_{-d}^S u^2 \, dz, \quad M_{yy} = \int_{-d}^S v^2 \, dz, \quad M_{xy} = \int_{-d}^S uv \, dz$$

S = 시간 및 공간에 따른 자유해면의 변화

(평균해면으로부터의 거리)

d = 평균해면에서의 수심

t = 시간

D = 시간 t 에서 전수심 ($S+d$)

f = $2\omega \sin\phi$, 코리올리계수

ω = 지구의 각속도

ϕ = 위도

$\tau_{sx}, \tau_{bx} (\tau_{sy}, \tau_{by}) = x(y)$ 방향 해면 및 해저면 응력

ρ = 해수밀도

W_x, W_y = x, y 방향 풍속

ξ = 해면기압 감소

u, v = x, y 방향 유속

P = 강수율(깊이/시간)

g = 중력가속도

해저와의 응력 관계를 수송식으로 나타내면 식 (2.4)와 같다.

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{KV|V|}{D^2} \quad (2.4)$$

여기서, V = 유속의 y 방향 성분

K = 무차원 해저마찰계수

Chezy계수 C 와 Darcy-Weisbach마찰인수 f_f 를 사용하여 식 (2.5)와 같이 정리할 수 있다.

$$K = \frac{g}{C^2} = \frac{f_f}{2} \quad (2.5)$$

표준 해저면에 대해서 K 는 보통 $2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ 의 범위인 것으로 알려져 있다. 바람으로 인한 해면 응력은 다음과 같다.

$$\tau_s = \rho k W^2 = \rho k |W| |W| \quad (2.6)$$

여기서, k = 무차원 해면마찰계수

W = 풍속

표준 관측치를 사용하기 위해서는 해면으로부터 10m 높이에서, 10분간의 평균풍속을 취한다. 식 (2.6)의 해면 응력을 최종적으로 정리하면 식 (2.7)과 같

다. 이때 θ 는 x 축과 풍향이 이루는 각을 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{sx}}{\rho} &= kW^2 \cos\theta \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho} &= kW^2 \sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

해면 상승치의 연안 방향에 미치는 영향은 식 (2.2), (2.3)을 다음 식 (2.8) 및 (2.9)의 형태로 분리하여 생각한다.

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} = \frac{kW^2 \cos\theta}{gD}, \quad \frac{\partial S_y}{\partial y} = \frac{kW^2 \sin\theta}{gD} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial S_y}{\partial x} = \frac{fV}{gD}, \quad \frac{\partial S_x}{\partial y} = -\frac{fU}{gD} \quad (2.9)$$

따라서 x , y 축을 따르는 총 평균해면 상승은 이 둘을 합한 식 (2.10)이 된다.

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial x}, \quad \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial S_x}{\partial y} + \frac{\partial S_y}{\partial y} \quad (2.10)$$

해안에서 총 해면 상승량은 기상고조에 직접적으로 관계된 여러 성분 및 이와 무관한 성분을 합하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다(이, 1989).

$$S_T = S_x + S_y + S_{\Delta\rho} + S_e + S_A + S_W + S_L \quad (2.11)$$

여기서, $S_{\Delta\rho}$ = 기압강하로 인한 해면 상승치

S_e = 초기 평균해면 상승치

S_A = 천문조에 의한 상승치

S_W = 파랑에 의한 상승치

S_L = 지역적 해면 상승치

압력을 hPa 로 하여 평상시 대기압에 대해 중심압력차로 인한 해면 상승량 $S_{\Delta p}$ 를 정리하면 식 (2.12)와 같아진다.

$$S_{\Delta p} = 0.991(p_n - p_o)(1 - e^{-R/r}) \quad (2.12)$$

여기서, p_o = 초기치 압력

p_n = 폭풍외곽에서의 압력

여기서, R 및 r 은 횡단선을 따라 태풍의 중심에서 최대풍속 및 계산지점까지의 거리이다. 이로 인한 해면 상승량의 단위는 cm 이다.

$S_W = \alpha H_B$ 로 쇄파대에서 해안측의 파랑으로 인한 해면상승치, H_B 는 쇄파고, α 는 계수로 약 0.1~0.2의 값을 갖는다. 지역적 해면상승 혹은 하강 S_L 은 내륙 하천으로부터의 유입이나 연안만류 혹은 해안선 모양, 해저형상 등 연안해역의 지형적 특징으로 인해 계산된 수위로부터 해면의 변화 부분을 나타낸다.

2.2 극한파랑 적용방정식

쇄파대에서 해안방향으로의 해면상승치는 연안해역에서 극한 파랑을 입력조건으로 하여 해안선에서의 수위변화와 연계하여야 한다. 이를 위해서 파랑의 천수효과, 굴절, 회절, 부분반사, 해저마찰, 쇄파의 영향까지를 고려한 파랑모델을 도입하여 파랑변환 과정에서 복잡한 연안역의 해저변화 및 해안선 변화의 제 조건을 만족시킬 필요가 있다.

연안의 표면파랑 모델을 구축하기 위하여 2차원 타원형 환경사 파랑 방정식은 식 (2.13)과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (2.13)$$

여기서, $\hat{\eta}(x, y)$ = 복소해면변동함수

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad ; \quad \text{각주파수(radians/sec)}$$

$$C(x, y) = \sigma/k \quad ; \quad \text{위상속도(phase velocity)}$$

$$C_g(x, y) = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC \quad ; \quad \text{군속도(group velocity)}$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

$$K(x, y) = \text{수심 } d(x, y) \text{에서 선형분산관계식 } \sigma^2 = kg \tanh(kd) \\ \text{을 만족하는 파수}(= 2\pi/L)$$

식 (2.13)은 임의의 모양의 해안영역에서의 파랑의 굴절, 회절. 그리고 반사가 고려된 방정식이다. 그러나 해안영역에서는 이 외에도 해저면의 마찰, 쇄파 등의 다른 인자들도 파랑의 거동에 영향을 미치게 되며, 이를 고려하면 환경사 방정식은 식 (2.14)와 같이 확장이 가능하다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{n}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + \delta w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{n} = 0 \quad (2.14)$$

여기서, w 는 마찰항 $\left[= \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left(\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right) \right]$

γ 는 쇄파 파라메타 $\left[= \frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.16d^2}{4a^2} \right) \right]$

본 연구에서는 Dalrymple et al.(1984)에 따라 아래와 같은 진폭 감쇄계수를 사용하여 마찰항을 나타낸다.

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \quad (2.15)$$

여기서, $a = \frac{H}{2}$; 파랑의 진폭

$f_r =$ 마찰계수

마찰계수는 레이놀즈수와 저면조도에 좌우되며 Madsen(1976)과 Dalrymple et al.(1984)를 참조하였다. 일반적으로 계수 f_r 의 크기는 Manning의 소산계수 또는 조도계수 n 과 비슷한 범위의 값을 가지며, 공간 (x, y) 의 함수로서

f_r 을 지정할 때 항내 진입에 따른 손실요소를 위해 항만입구에 더 큰 값을 부여한다. 쇄파 파라메타인 γ 은 다음 식을 사용한다 (Dally et al., 1985; Demirbilek, 1994).

$$\gamma = \frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.4^2 d^2}{4d^2} \right) \quad (2.16)$$

위의 관계식 외에도, 비선형파의 시뮬레이션은 환경사방정식을 이용하여 실험할 수 있다. 이것은 이러한 시뮬레이션에 중요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계를 사용할 수 있다. 식 (2.13) 및 (2.14)에 있는 선형분산관계식을 비선형 산란관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\omega^2 = gk \left[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 ka \right] \tanh \{ kd + kaF_2 \} \quad (2.17)$$

$$\text{여기서, } F_1 = \frac{\cosh(4ka) - 2 \tanh^2(ka)}{8 \sinh^4(ka)}$$

$$F_2 = \left(\frac{kd}{\sinh(ka)} \right)^4$$

지배방정식과 경계조건을 고려한 수치모형의 기법, 수치모형의 구성 및 체반 식의 유도는 김 등(2003)을 참조한다.

제3장 고조 및 극한파랑의 현장자료 분석

3.1 고조 자료 분석

2003년 9월 12일 21시에 경남 사천으로 상륙한 태풍 매미는 우리나라 남해안에 기록적인 극한파랑을 발생시켰으며, 당시 태풍으로 인한 폭풍해일과 만조위가 겹침에 따라 마산, 부산 등지에 많은 재해를 남겼다. Fig. 3.1은 태풍 매미의 이동경로와 최대 중심기압 및 풍속을 나타낸다.

천해에서는 해파와 강풍에 의한 해류의 상호작용이 중요한 것으로 알려져 있고, 천해파의 쇄파에 따른 백파(breaking white caps)가 해변 전단력을 크게 증가시켜 높은 해일을 유발시킨다는 이론이 있다.

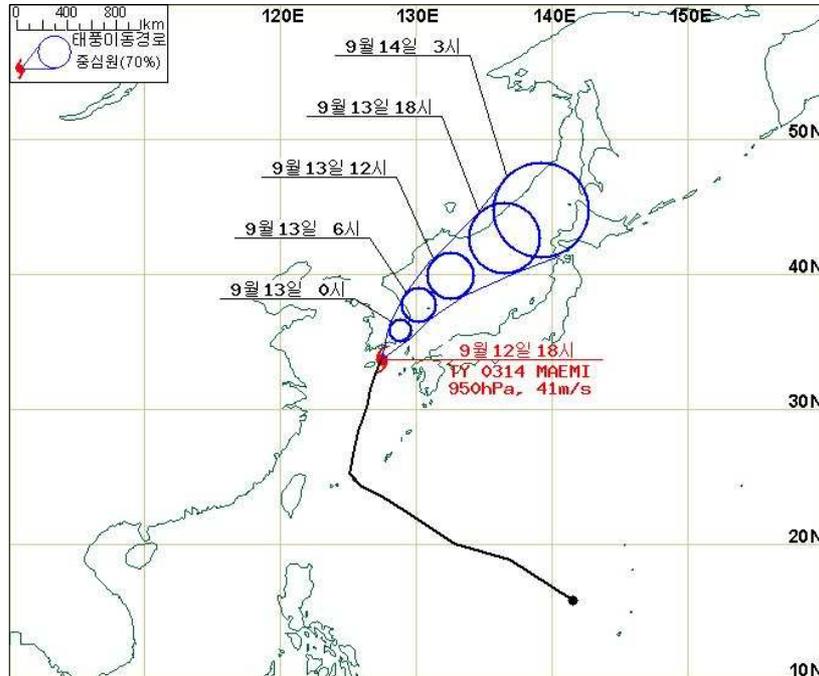


Fig. 3.1 The best track of typhoon *Maemi*(2003)

Fig. 3.2~3.3은 태풍 매미 내습시 부산항과 마산항에서 해수면의 변화의 관측 값과 예측값을 나타낸 것으로, 부산항에서는 부진동의 최고 높이가 236cm로 나타났으며, 조석 최고높이는 211cm로 예보치인 134cm를 77cm 이상을 초과 하였다. 또한, 마산항은 부진동의 최고 높이가 452cm로 나타났으며 조석 최고 높이는 439cm로 예보치인 181cm보다, 258cm 이상으로 초과 하였다.

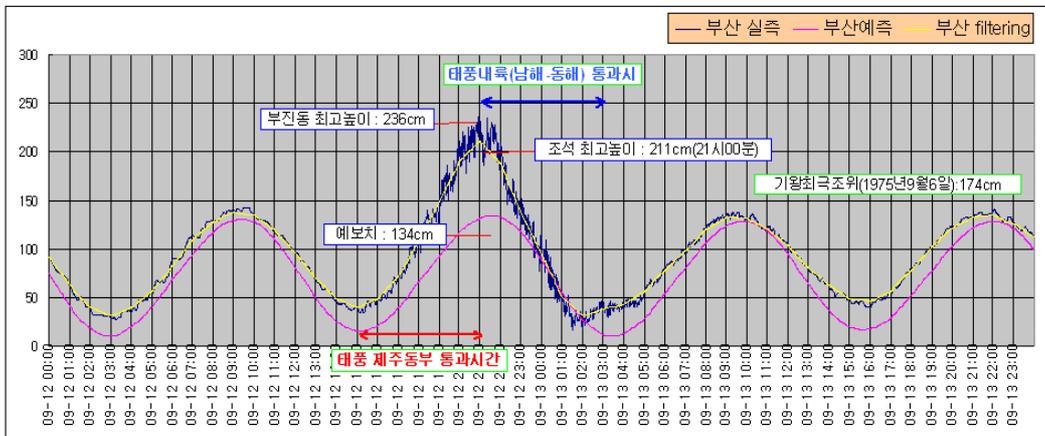


Fig. 3.2 Observed *water level* at Busan Port (Sept. 12~13)

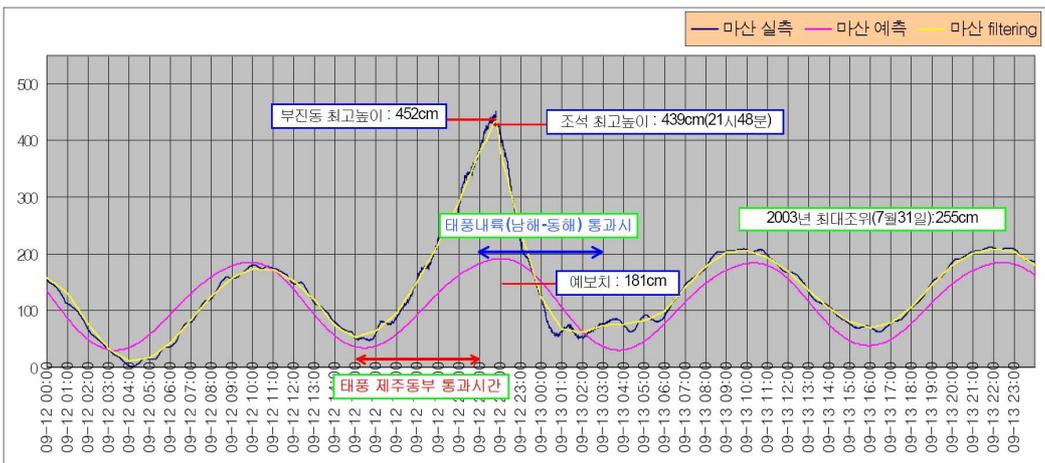


Fig. 3.3 Observed *water level* at Masan Port (Sept. 12~13)

3.2 극한파랑의 분석

태풍매미가 통과한 시기에 기상청이 설치한 거제도 해상부이 관측자료(Fig. 3.4)에 의하면, 12일 21시의 최대 유의파고가 7m인 것으로 분석되었으며, 파의 주기는 16.7sec, 파향은 332° 이었으며, 최대파는 16m에 달하는 것으로 보고되었다. 3m 이상의 유의파고는 12일 18시부터 다음날 1시까지 지속된 것으로 관측되었다.

한국해양연구원이 태풍매미 내습시 부산신항 동방파제 전면에서의 파고관측자료(Fig. 3.5)에 의하면 12일 21시 12분쯤에 최대파고가 6m에 이른 것으로 나타났으며 이후에 2m이상의 파고가 지속된 것을 알 수 있다. 이때 관측한 부이식 파고 파향 관측자료는 입사파와 반사파의 복합된 기록치로 최대유의파고 $H_S = 8.0m$, 최대유의파주기 $T_{1/3} = 16.56sec$ 이며 이시기의 최대파고 $H_{max} = 10.84m$ 로 보고되었다. 이 당시 동방파제의 반사파를 제외시킨 유의파고 $H_S = 7.4m$ 로 기상청의 거제도 해상부이 관측결과와 잘 맞는 것으로 나타났다.

거제도 해파 관측은 부산신항에 비해 개방된 외해측에서 이루어지고 있어 유의파고는 과소 관측되고, 최대파는 과대 관측된 경향을 보이고 있다.

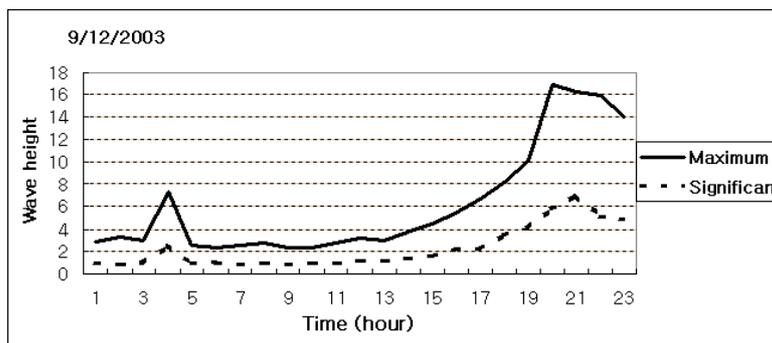


Fig. 3.4 Time series of observed wave components at the offshore of Gejedo

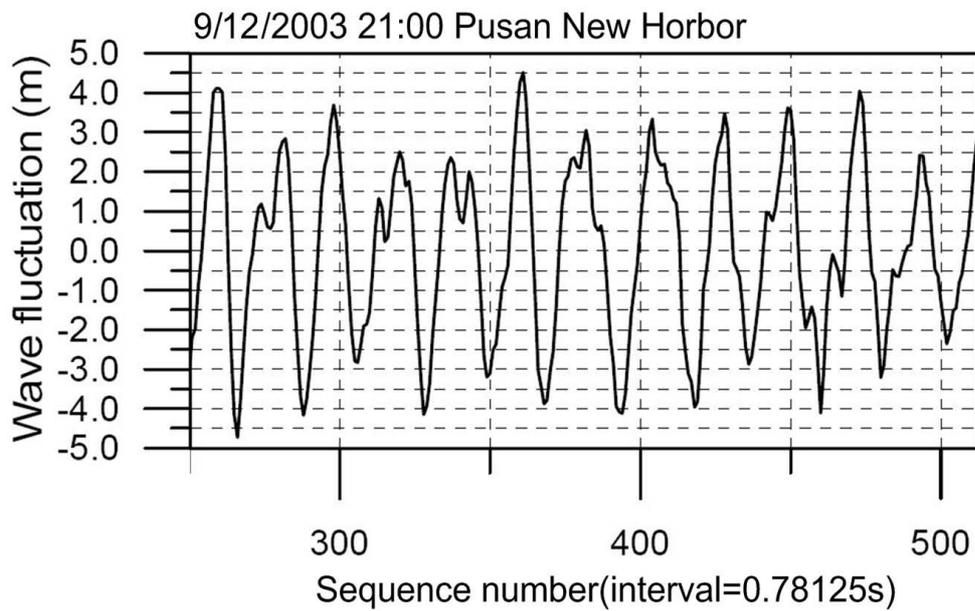
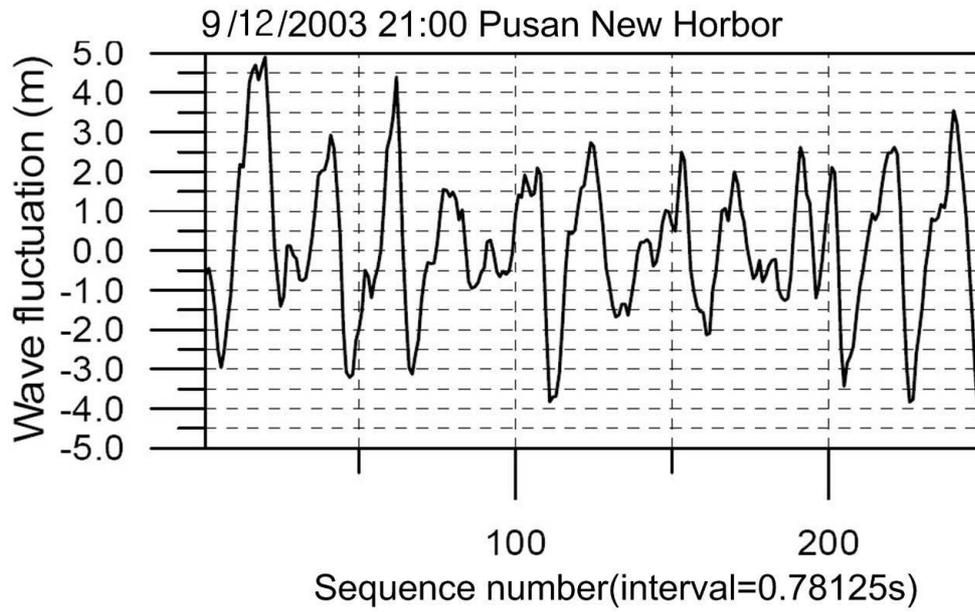


Fig. 3.5 (a) Time series of wave record at Busan New Port
(No. 1~515)

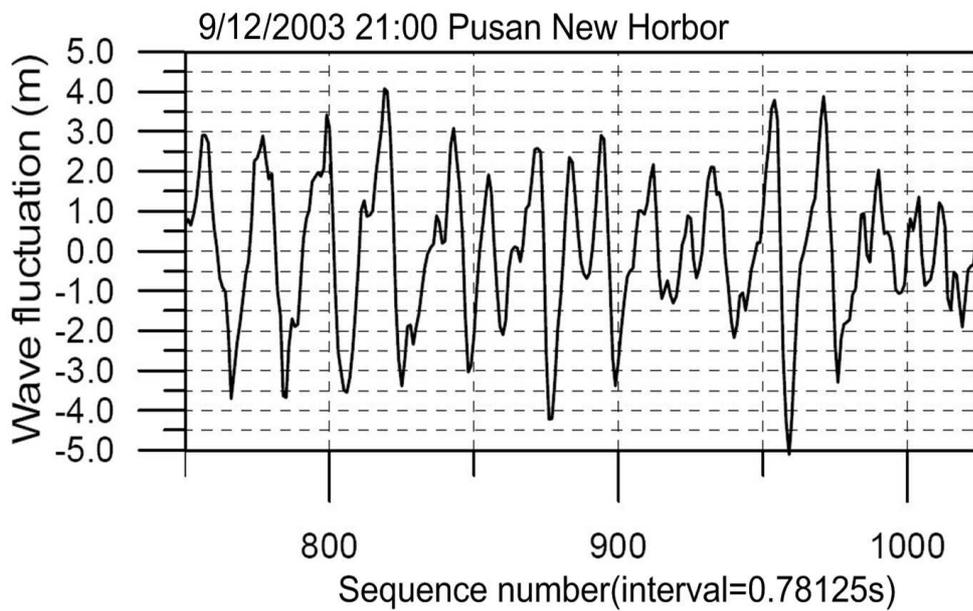
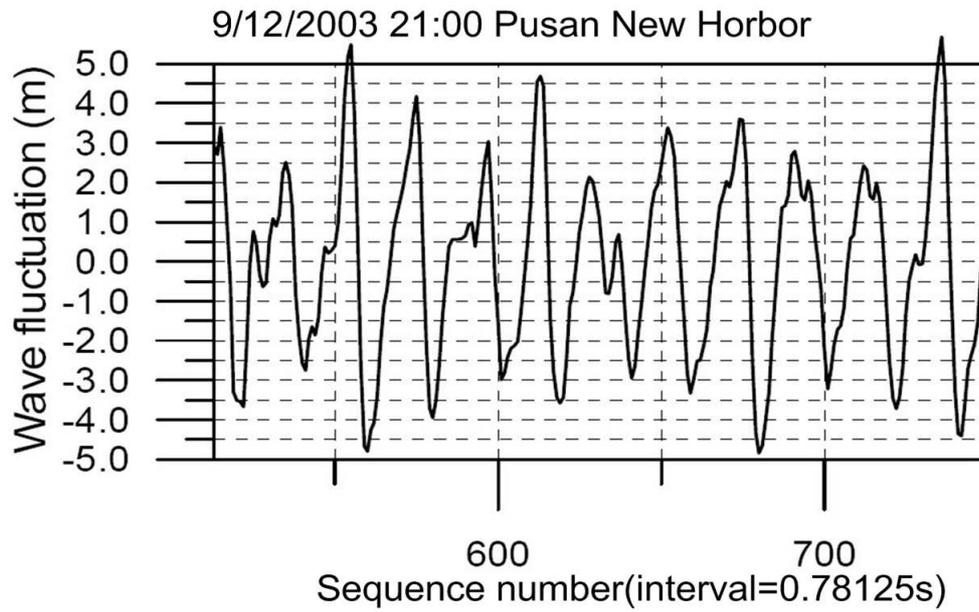


Fig. 3.5 (b) Time series of wave record at Busan New Port
(No. 516~1025)

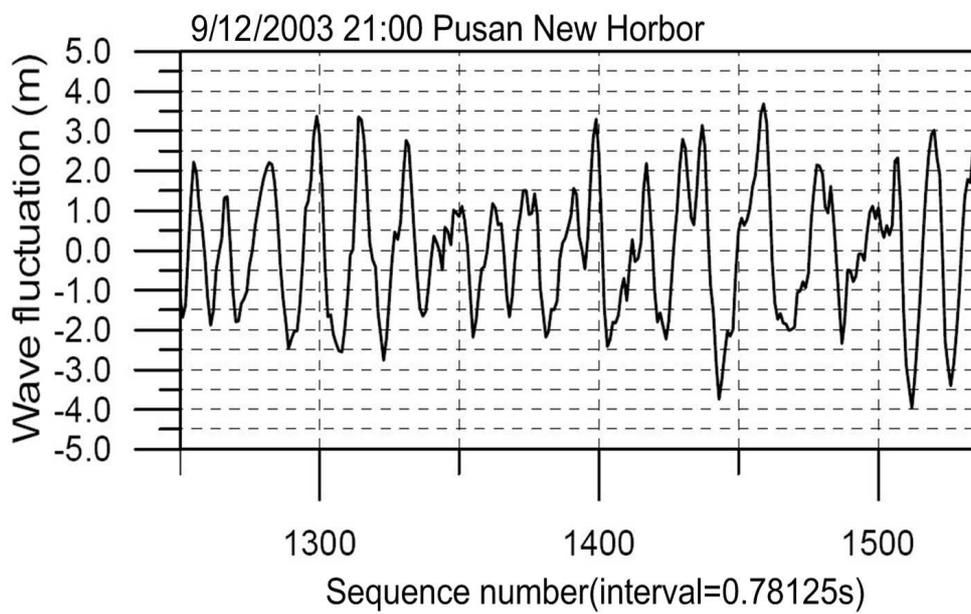
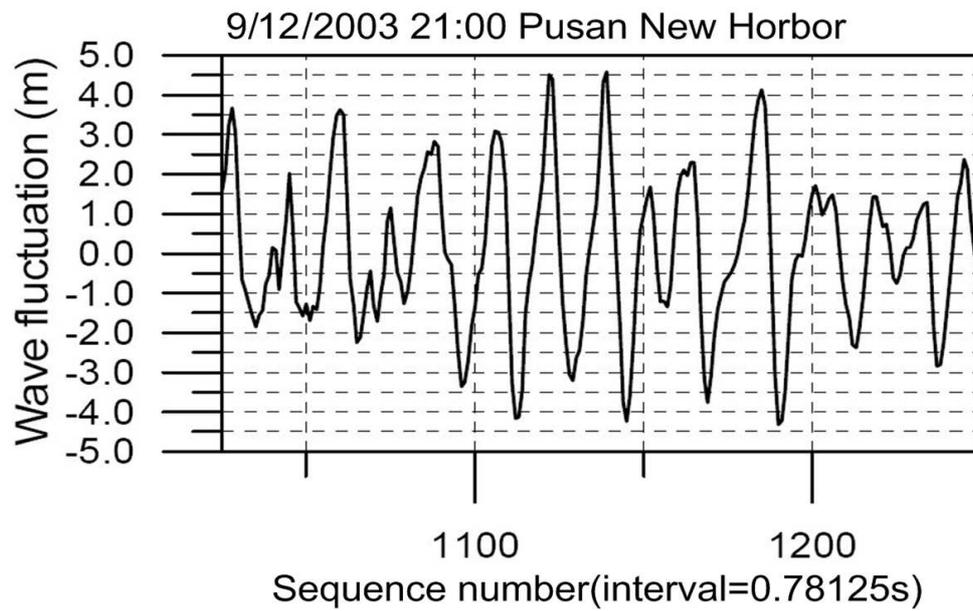


Fig. 3.5 (c) Time series of *wave* record at Busan New Port
(No. 1026~1530)

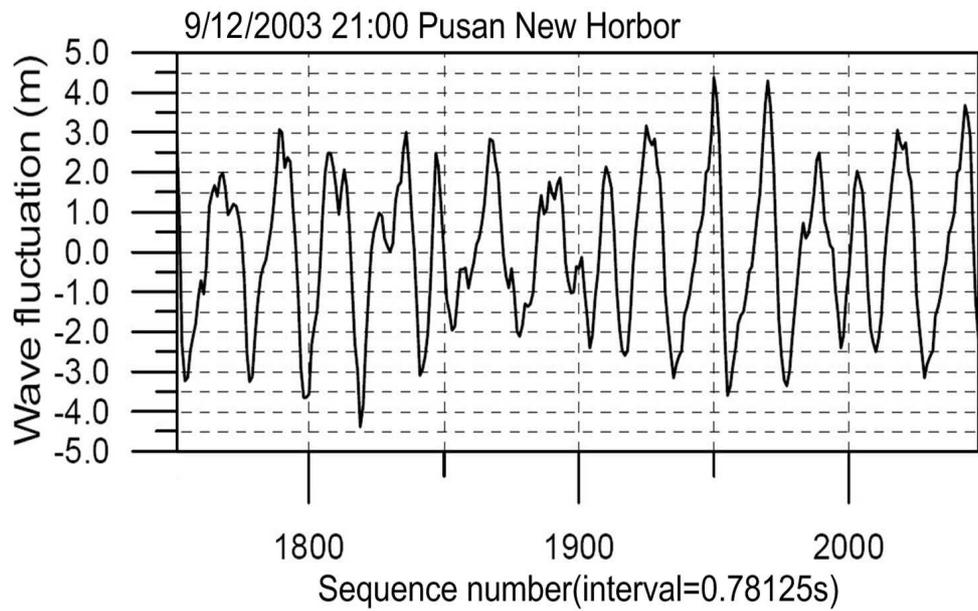
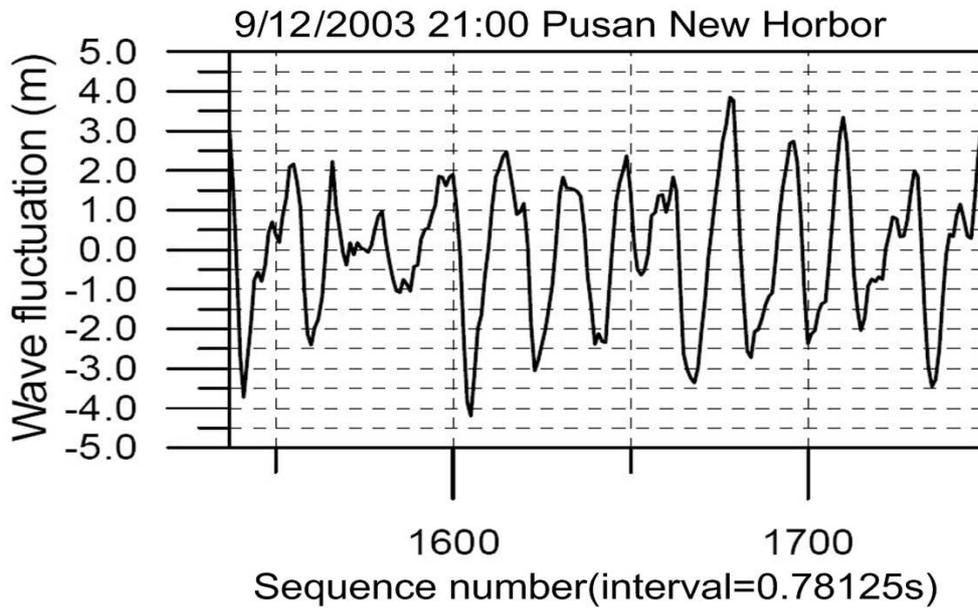


Fig. 3.5 (d) Time series of *wave* record at Busan New Port
(No. 1531 ~ 2050)

신과 홍(2004)은 연안 해역에서의 정밀도 높은 파랑추산을 위해 수정된 WAM 모형(신 등, 2004)을 적용하여, 20km 공간격자에 대한 해상풍 자료로부터 동북아시아의 해역에 대해 0.1° 계산 공간격자로 태풍 매미의 발생 기간을 포함한 2003년 9월 한 달 동안의 파랑을 추산하였다. 이 계산에서 태풍 매미는 제주도 서편 차귀도의 경우 12일 16시, 마산만의 경우 12일 21시, 부산항 입구는 12일 22시, 울산항 입구에서는 12일 23시에 각각 최대 유의파고 7.41m, 12.50m, 13.85m, 11.00m를 기록하였으며, 부산항 전면 해상에서는 2003년 9월 12일 22시에 최대 유의파고 13.85m, 평균 주기 13.81sec, 평균 파향 0.2°로 각각 추산하였다. Fig. 3.6은 부산항 연안 해역에서의 시간에 따른 파랑 추산결과이다. 태풍이 오기 12일 이전에는 2m이하의 파고들이 주로 발생하였으나 태풍이 시작되는 12일부터 파고가 점차 높아지기 시작하여 다음날 13일에는 엄청난 크기의 파고와 장주기를 가진 파가 형성되고, 오후가 되면서부터 파고가 수그러들면서 여느 때와 같은 파고가 나타나는 것을 볼 수 있다.

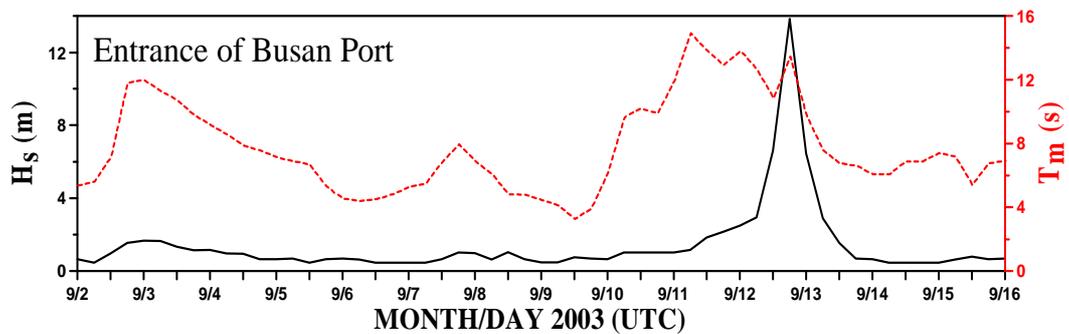


Fig. 3.6 Time series of calculated wave components at the offshore of Busan port

3.3 부산항 해안선역 주요 태풍 피해 분석

부산지역에서 태풍 매미로 인한 피해는 태풍상륙 시간과 만조시간이 겹쳐 해일의 피해가 심해졌다. 특히 영도 해안선을 따라 발생한 피해는 Fig. 3.8~Fig. 3.13과 같다. Fig. 3.7은 태풍 도래시 때의 풍향 및 파향의 변화로 피해를 입은 주요해안선을 나타낸다.

Fig. 3.8은 태풍당시 강한 바람과 파랑에 의해 어선이 반 침수되면서 영도대교 교각에 부딪쳐 어선은 물론 교량 상판의 파손된 상태를 나타내며, Fig. 3.9는 중리 선착장에서 해일로 인한 월파 및 침수피해로 인근 거주구역까지 영향을 미쳤던 현장이다. 한편, Fig. 3.10은 남항동 해변공단의 침수현장을 나타내며, Fig. 3.11은 절영 해변 산책로의 가설 인도의 파손상태를 가리킨다. Fig. 3.12는 동삼동 감지해변의 침수피해로 대부분의 해안구조물이 이동되거나 파손되었음을 나타내며, 또한 조도 한국해양대학교의 방파제 상부 캡(cap) 콘크리트가 파손되었으며, 대학 내 건물의 피해가 막심하였음을 Fig. 3.13에서 알 수 있다. Fig. 3.14는 신감만 부두에 위치한 컨테이너 크레인 6기 및 제5부두에서 크레인 2기가 태풍 매미에 동반된 강한 돌풍으로 전도된 상태를 나타낸 것이다. 한편, Fig. 3.15는 송도 해수욕장 일대에서의 피해를 나타내는 것으로 인근의 30t 급 T.T.P가 도로 위로 떠오르는 정도의 해일과 파랑이 기록되었으며, 극한 파랑이 펌프장을 급습하여 전기 공급이 중단되어 강우에 의한 우수가 배제되지 못해 주택가 범람이 더욱 가중되는 피해가 발생하였다. 이 밖에도 부산 북항의 대규모 철골 갠트리 크레인의 붕괴와 송도해수욕장의 해안가 침수 및 해변유실 등이 발생하였으며, 해운대, 광안리, 가덕 부산신항만, 낙동강 등 영도 주변의 피해도 극심했다.

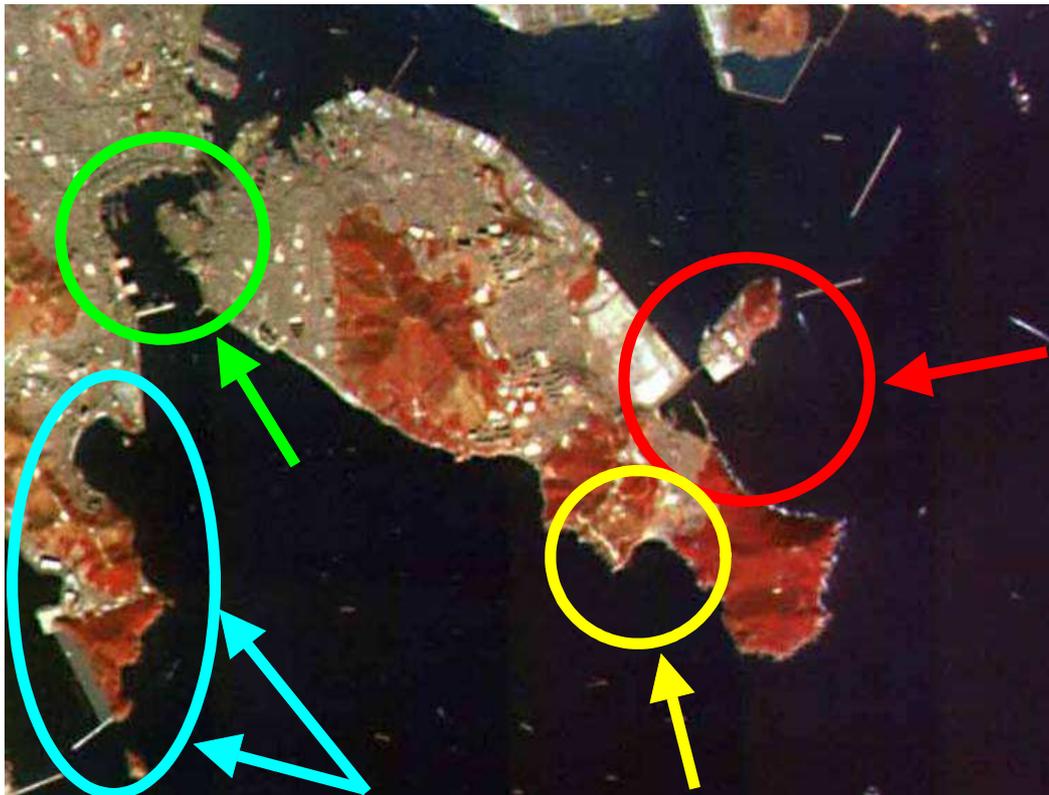


Fig. 3.7 The change of *wave* direction and *mainly* damaged areas at the time of Typhoon "*Maemi*" in Busan Harbor



Fig. 3.8 *Destruction of Youngdo Bridge*



Fig. 3.9 *Damaged harbor in Jungli, Youngdo*



Fig. 3.10 The flood water at Namhang-dong industrial complex



Fig. 3.11 Destruction of the walking way at Jeolyoung-ro



Fig. 3.12 *Destruction by overflow at Gamji beach of Dongsam-dong*



Fig. 3.13 *Destruction by overtopping at Korea Maritime University and Jodo breakwater in Dongsam-dong*



Fig. 3.14 Destruction of Container Cranes at Gammam terminal and Pier No.5



Fig. 3.15 Destruction of Songdo Beach area

제4장 해안에서의 재해위험예측

4.1 재해위험예측을 위한 수치모형의 적용

고조의 예측을 위해 본 연구에서는 우리나라 남해안권 전역을 포함한 부산 권역에서 지역 전체가 개방해역에 노출되어 있는 영도 및 부산항 해역을 대상으로 하여 폭풍고조를 추산하였으며 아래와 같이 설계폭풍을 결정하여 고조위를 산출 하였다.

해안구조물 설계분석에서 실제에 응용하기 위해 지역의 특성에 밀접하게 관계된 2개의 가상설계폭풍이 미국 기상청 및 육군공병단에 의해 완성되었는데 이를 각기 표준계획폭풍(Standard Project Hurricane, SPH), 최대발생폭풍(Probable Maximum Hurricane, PMH)이라 한다. 특정해역에 가장 적절한 방재수준은 그 지역의 기록된 태풍을 설계자료로 하여 결정하게 되며, 이미 지정된 경로를 불변적으로 진행하는 것으로 가정한다. 최종적으로 선택한 값을 대상으로 하는 폭풍급의 발생확률을 고려한 것이어야 한다. 가상폭풍을 적용함에는 보통 천문조위를 폭풍고조의 최대치와 겹쳐진 것으로 한다. SPH에는 대조시의 고조를, PMH에는 이 대조를 10% 초과하는 수준으로 취하며 다루게 될 지역의 지리적 특성에 따라 특정 진폭을 선택한다.

Graham & Nunn은 과거 폭풍자료를 세부 분석하여 SPH를 정의하기 위한 기준을 만들었다(NOAA, 1979 참조). 이 설계폭풍의 개발목적은 폭풍에 대한 해안구조물의 설계에 기초가 되는 표준을 제공하기 위함이었다. 그들의 분석에서는 미국의 대서양 및 멕시코만 연안을 따라 기술된 여러 해역에서 발생한

폭풍의 특성을 통계적으로 정리하였으며 주요 특성은 중심기압(CPI), 최대풍의 반경(R), 진행속도(V_f), 최대 경도풍속(*maximum gradient wind speed*, V_{gx}), 최대풍속(*maximum wind speed*, V_x)이다. 특히 SPH는 100년에 1회의 발생확률을 가진 CPI에 기초하고 있다. 또한 최대풍 반경 및 진행속도는 조사할 해안에 최고의 고조를 일으키며, CPI, R, V_f 는 여러 지역중 대표적 위치에 대한 값으로 하였다. *Graham & Nunn*은 좀더 상세하게 SPH를 정의하였는데 이는 ‘지극히 희귀한 것은 조합에서 제외하고 합리적인 특성을 가진 폭풍파라메타 중 가장 심한 조합을 나타내기 위한 가상폭풍’이라고 했다.

과거 수십년 동안 많은 원자력발전소가 건설 또는 계획되었다. 이들 중 상당한 숫자가 미국의 대서양 및 멕시코만을 따라 위치하고 있어 폭풍고조 및 해면파로 공격을 받기 쉽게 되었다. 폭풍고조나 극히 예외적으로 발생하지만 강한 바람으로 인한 표면파로 인해 이들 발전소가 범람되지 않도록 하기위해 미국원자력위원회는 공중보건안전의 기준을 마련하였다. 즉, PMH와 관계된 고조 및 표면파로 이들 발전소 부지가 범람하지 않도록 하는 안전조치로 결론지었다.

NOAA의 보고서(1979)에 따르면 PMH의 특성은 실제로 SPH보다 더 심하여 ‘관계된 특정지역에서 발생할 수 있는 가장 심한 폭풍을 일으키는 특성을 조합한 가상폭풍’으로 정의하고 대상역을 최악의 경로로, 최적이동속도로 접근하는 것으로 하고 있다. 이 두 가지 가상설계폭풍에서 시간당 마일로 표시된 최대풍계내에 최대경도풍속(V_{gx}) 및 수면상 10m에서의 최대풍속(V_x)은

$$V_{gx} = \kappa \sqrt{p_n - p_0} - R(0.575 \beta), \quad V_x = 0.865 V_{gx} + 0.5 V_f \text{ 로 나타낸다.}$$

등풍속장의 구성은 본질적으로 양자가 같으나 SPH에서는 p_n 을 표준해수면

에서의 기압 29.92inHg 로한 반면 PMH에서는 위도의 함수로 나타내고 있는 점이다. 또한, κ 는 SPH에서는 상수 73으로 취하였으나 PMH에서는 역시 위도의 함수로 하였다. 또한, 거리 R은 Nmiles, f 는 시간당 코리올리 파라메타를 나타내며, 풍속 및 진행속도의 단위는 kts 이다. 따라서, 대상역에 대한 이들 변수를 구하여 폭풍의 전체 등풍속장을 계산하고 도식적으로 나타낼 수 있다.

고려한 폭풍은 앞에서 기술한 PMH는 제외하고 SPH와 2003년 9월에 강타했던 100년 빈도를 가진 태풍 매미의 경우이며. 이로 인해 연구지역에서 최고조도의 높이를 수립한 모형을 통해 산정해 보기로 한다. SPH와 태풍 매미의 관측으로부터 선택한 상륙 직전의 태풍파라메타는 다음과 같다. 또한, 극한파랑의 변환 계산에 적용한 입사파고는 최대 유의파고 13.0m, 유의파의 주기 13.8sec, 입사파향 0°로 하였다.

대상지역인 부산권역과 영도해안 지역은 Fig. 4.1에 나타내었다.

다음은 태풍 매미의 파라메타이다.

<div style="text-align: center;"> <p>< SPH ></p> <p>$CPI = 933.63hPa, P_n = 1013.25hPa$</p> <p>$R = 35N.miles$</p> <p>$V_F = 40.7Km/hour, V = 164.1Km/hour$</p> <p>< Maemi ></p> <p>$CPI = 955hPa, P_n = 1013.25hPa$</p> <p>$R = 35NM$</p> <p>$V_F = 37.0Km/hour, V = 136.8Km/hour$</p> <p>$CPI =$ 중심기압 , $P_n =$ 폭풍외곽에서의 압력,</p> <p>$R =$ 최대풍의반경 , $V_F =$ 진행속도, $V =$ 최대풍속</p> </div>
--



Fig. 4.1 Location map for numerical simulation

4.1.1 고조계산

광역 폭풍해일 실험 결과, 부산해역에서의 폭풍 해일에 의한 조위 상승고 중 양의 해일고는 40~120cm이고(Fig. 4.2 참조), 음의 해일고는 -40~-120cm로 평가되었고, 해역에 따라 다소 차이가 있지만 관측치와 거의 비슷한 결과가 나타났다. 영도 부근해역에서의 계산에 의한 등 고조위선은 Fig. 4.3과 같다.

영도 중리 전면해상에서 공간적, 시간적 해면변화를 나타내기 위하여 남형제도 외해측에서 횡단선을 따라 평균최저간조면(MLLW)이하의 수심과 거리는 Table. 4.2에 정리하였다.

폭풍고조계산에서 초기해면상승치는 일반적으로 계산하고자 하는 지점에서 검조소의 조석 관측치와 추산치의 차이를 평균한 값을 사용하고 수치계산에서는 단순히 일정한 값을 총 해면에 가산한다. 특히, 폭풍이 도착하기 2일전의 값을 평균하여 처리하게 되는데 여기에서는 15cm를 도입하였다.

한편, 계산에서 천문조는 2가지로 나누어 도입하였다. 먼저 태풍 매미가 실제로 통과한 2003년 9월 5일에서 7일간의 조석자료를 이용하거나, 1년 동안 이 해역에 대한 조석의 특징을 파악하여 대조시의 조석을 입력치로 하여 다루었다. 특히 태풍이 통과한 시기는 대조와 일치하는 시점이다.

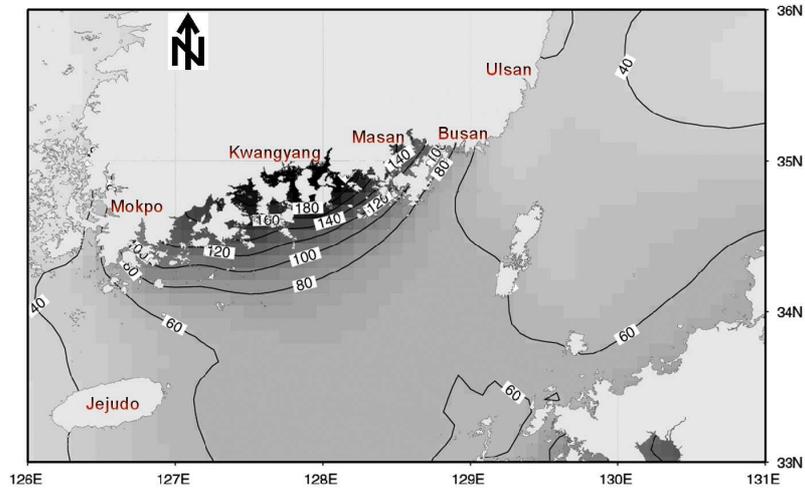


Fig. 4.2 Calculated storm surges for macro area

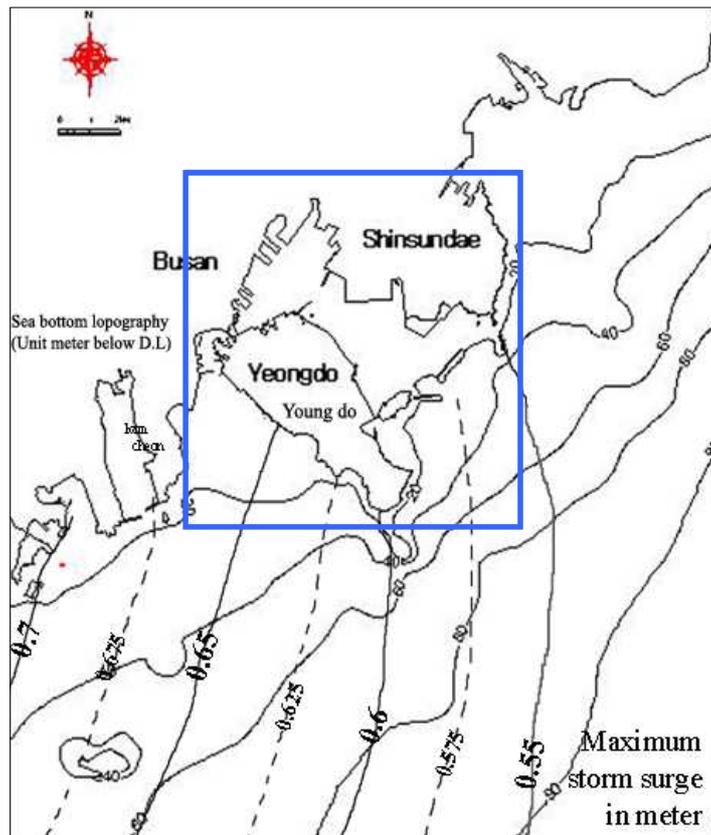


Fig. 4.3 Calculated storm surges for nearshore of Yeongdo

과거의 태풍자료 중 본 대상해역에 가장 큰 피해를 준 네 개의 태풍인 SARAH, AGNES, THELMA, MEAMI를 모델태풍으로 선정하여 각 태풍에 대한 대상영역의 고조를 Fig 4.4~4.7에 나타내었다. Table 4.1에는 모델 태풍의 개략적인 개요를 나타내었다. Fig 4.4는 최근 가장 큰 규모의 태풍 *Maemi*의 파라메타를 적용하여 수치실험한 결과로 수위 상승은 50~65cm로 상당히 수위가 상승하는 것으로 예측되었다, Fig. 4.5는 태풍 Sarah의 파라메타로 수치실험한 결과이며 수면 상승이 20~50cm로 계산되었다. Fig. 4.6는 태풍 Agnes의 파라메타를 사용하였으며 수위 상승은 10~15cm로 예측되었으며, Fig. 4.7은 태풍 Thelma시의 파라메타를 사용하여 수치실험 하였고, 수위 상승은 5~15cm로 예측되었다.

Table. 4.1 Outline of the model typhoon

구 분	내 용	
계산 영역	22.5km × 25km = 562.5km	
격자 체계	100m 등간격 (총 격자수 : 225×250=56250개)	
모델 태풍	SARAH	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일 : 1959년 9월 15일 • 중심기압 : 951.5hPa • 풍속 : 34.7m/sec • 풍향 : ENE
	AGNES	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일 : 1981년 9월 1일 • 중심기압 : 985.5hPa • 풍속 : 20.0m/sec • 풍향 : NE
	THELMA	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일 : 1987년 7월 15일 • 중심기압 : 985.8hPa • 풍속 : 24.3m/sec • 풍향 : SSW
	MEAMI	<ul style="list-style-type: none"> • 발생일 : 2003년 9월 6일 • 중심기압 : 955hPa • 풍속 : 40.7m/sec • 풍향 : SE
조석 조건	Mean Water Level	

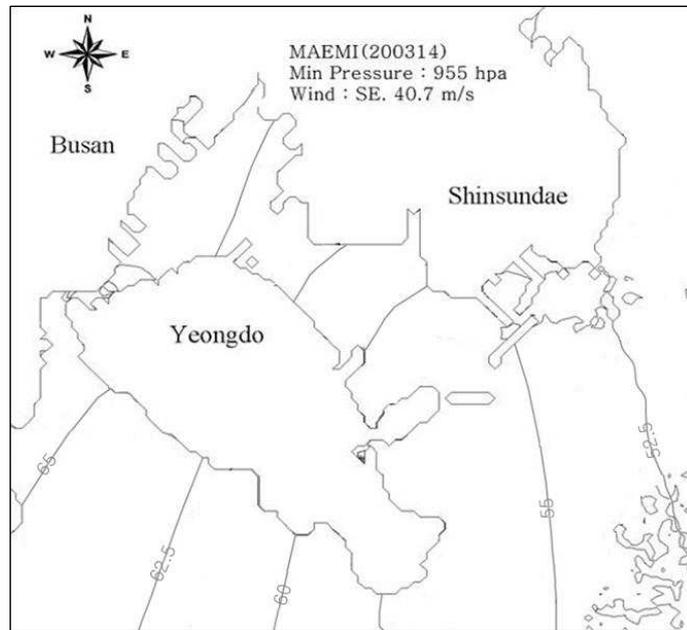


Fig. 4.4 Calculated storm surges by parameter of Typhoon Meami(2003)

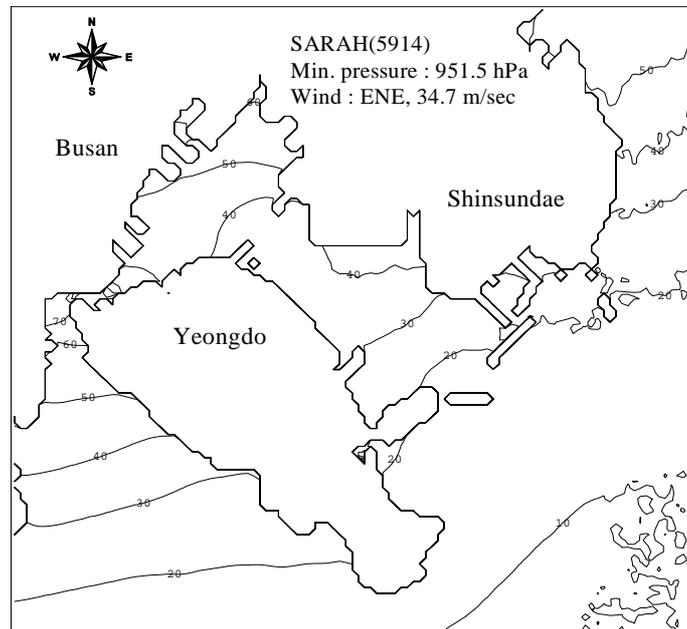


Fig. 4.5 Calculated storm surges by parameter of Typhoon Sarah(1959)

Table. 4.2 Seabed profile over the continental shelf

distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)
80	78	55	77	30	78	12.5	63
79	76	54	77	29	78	12	63
78	73	53	76	28	80	11.5	61
77	72	52	70	27	79	11	61
76	72	51	70	26	79	10.5	60
75	68	50	80	25	78	10	61
74	67	49	80	24	80	9.5	58
73	66	48	76	23	70	9	57
72	67	47	74	22	65	8.5	54
71	67	46	76	21	65	8	54
70	69	45	77	20	65	7.5	56
69	69	44	77	19.5	66	7	55
68	70	43	78	19	68	6.5	53
67	65	42	79	18.5	70	6	52
66	65	41	81	18	72	5.5	51
65	62	40	83	17.5	72	5	50
64	60	39	82	17	72	4.5	47
63	65	38	83	16.5	70	4	46
62	72	37	80	16	69	3.5	45
61	73	36	80	15.5	66	3	44
60	74	35	83	15	65	2.5	42
59	76	34	82	14.5	64	2	40
58	77	33	82	14	63	1.5	29
57	77	32	80	13.5	63	1	27
56	76	31	79	13	63	0.5	20

한편, Fig. 4.8는 해안선에서 시간변화에 따른 폭풍고조 파라메타의 계산결과를 나타낸 것으로 각각 태풍 매미가 발생하여 한반도를 통과한 2003년 9월 11일에서 13일의 대조기 조석 예측치를 도입한 것이다.

조석의 고조가 wind setup과 다른 파라메타들이 일치한 경우에 해당하여 해면이 상당한 높이까지 상승한 것으로 나타났다. 이 결과에서 호안 등 해안방호구조물의 설계는 wind setup이 고조시와 결합된 최고조위 이상으로 하여야

함을 알 수 있다. 또한, Fig. 4.8~4.12는 거리와 시간에 따른 폭풍고조 계산의 결과를 나타낸 것으로서 모형에서는 16시간을 경과한 경우로 폭풍고조에 의한 영향을 쉽게 이해할 수 있다. Fig.4.8~4.9에서는 대조시 고조일 때 시간에 따른 태풍 매미의 고조와 SPH의 고조를 비교한 그림이다. 두 그림 모두 16시간을 경과한 이후에 고조에 의한 수위가 급격히 상승한다. Fig. 4.10~4.11은 부산항 입구에서 외해로 거리에 따른 폭풍고조의 수위상승의 그림을 나타낸다. 항 입구에서 외해로 거리가 멀어짐에 따라 폭풍고조로 인한 수위상승이 낮아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.12는 대조시 저조일 때 시간에 따른 태풍 매미에 의한 수위상승을 나타내는 그림이다. 고조일 때와 저조일 때의 수위상승 차이가 1m 가량 차이가 남을 알 수 있다. 따라서, 태풍 매미는 대조시 고조일 때 내습함으로 우리나라 남해안에 더 많은 피해를 입힌 것으로 판단된다.

연구대상해역 입구에서 총 평균해면상승의 원인이 되는 폭풍고조의 파라메타를 시간에 따라 요약한 결과, Table. 4.3에서와 같이 폭풍에 대한 최고고조가 3.3m로 계산되었다.

표로 나타난 전체해역에서 최고고조는 정확하게 추산 되어지지만 총 해수위에 관한 값은 조위변화에 따른 보정이 필요하다. 이러한 보정은 현장의 조석치나 조석 예보치로부터 도입할 수 있다. Fig. 4.13은 수치실험 및 현장조사 결과 해안선을 따라 침수가 발생된 영역에서 대표적인 침수원인 및 수위를 나타낸 것으로 영도 남항입구에서 중리에 이르는 해변을 대상으로 하였다. 연안해역의 해저형상, 만 입구(inlet)의 영향 등 파랑의 변형에 따른 고조의 영향은 다음절에서 검토하기로 한다. 그러나, 연구대상 해역 입구에서의 강수 및 하천 유출수 등이 총 수위에 영향을 미칠 것이나, 이 실험에서는 이를 무시하는 것으로 하였다.

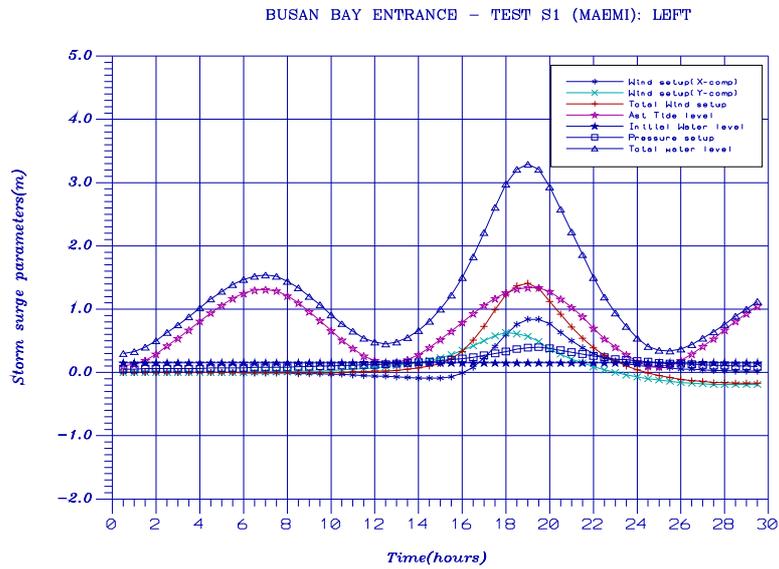


Fig. 4.8 Computed surge hydrographs in terms of time for *Maemi* at spring tide period

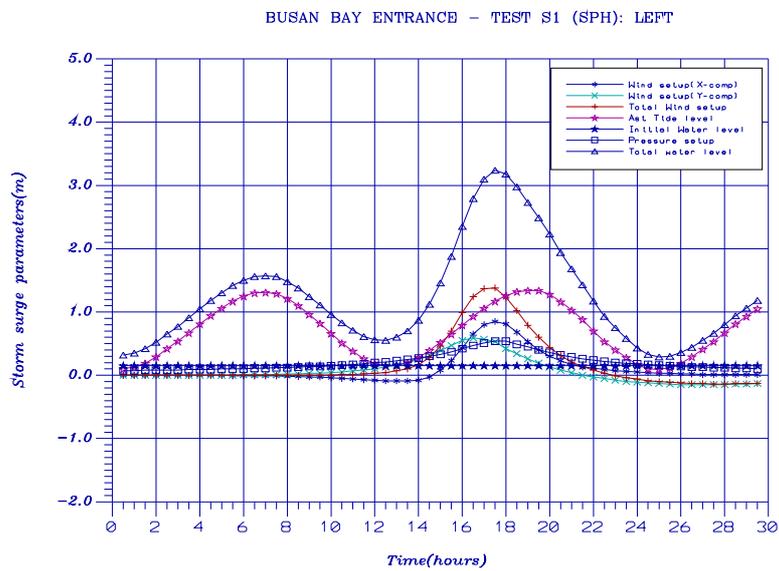


Fig. 4.9 Computed surge hydrographs in terms of time for *SPH* at spring tide period

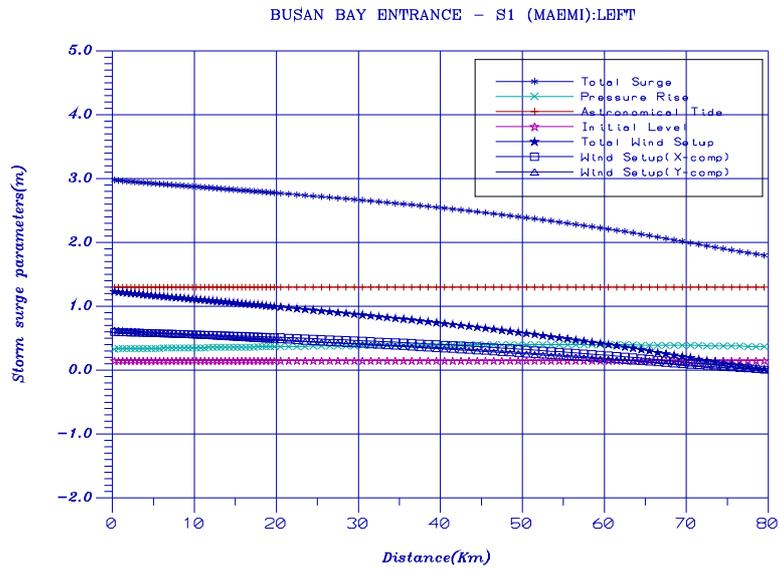


Fig. 4.10 Computed surge hydrographs in terms of distance for *Maemi* at spring tide period

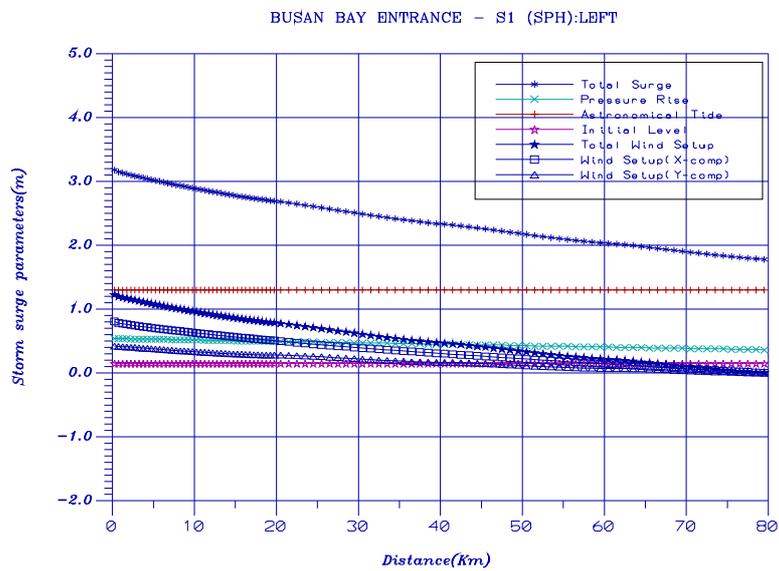


Fig. 4.11 Computed surge hydrographs in terms of distance for *SPH* at spring tide period

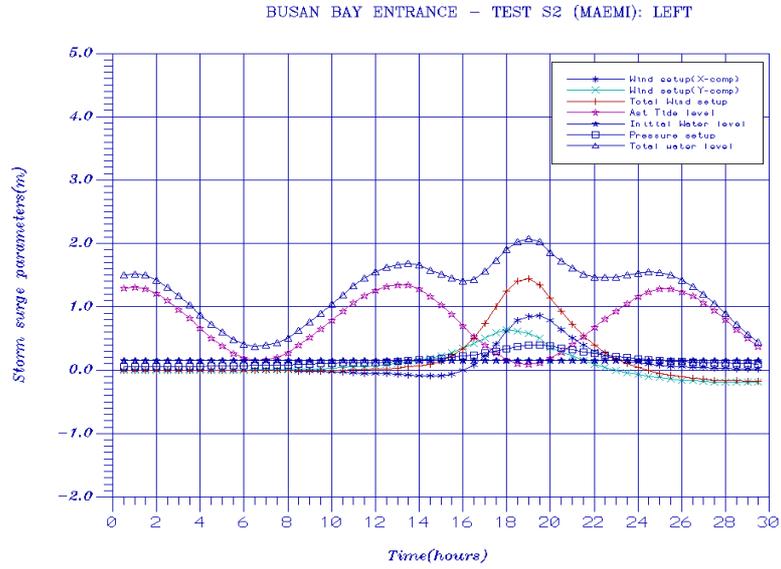


Fig. 4.12 Computed surge hydrographs in terms of distance for Maemi at neap tide period

Table. 4.3 Summary of numerical storm surge simulation

수위상승인자	표준 태풍 (고조, m)	태풍 매미 (고조, m)
바람상승(전체)	-0.1~1.4	-0.2~1.4
해안과직교	-0.1~0.9	-0.1~0.8
해안과평행	-0.2~0.6	-0.2~0.6
천문조	0.1~1.4	0.1~1.4
전조(초기해면)	0.1~0.3	0.1~0.3
기압상승	0.3~0.4	0.3~0.4
총수위상승량	0.3~3.2	0.3~3.3

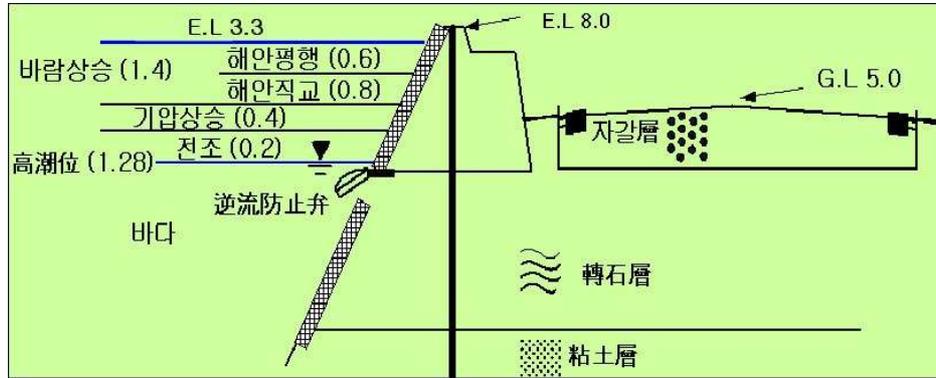


Fig. 4.13 Analysis of flood due to storm surge along the Youngdo coast

4.1.2 극한파랑의 계산

본 절에서는 확장완경사방정식에 기초한 파랑모형을 다대포에서 동백섬에 이르는 영도를 포함한 부산항 해역에 태풍 매미가 도래시 외해측에 극한파랑의 조건을 적용하여 해안선 인근해역에서의 파랑변화를 알아보고자 한다. 모형은 복합요소법(HEM)을 통해 삼각요소로 대상역을 구성하고 쇄파조건 및 비선형 조건의 상태에서 수치모의를 수행하였다. 수치모형실험을 위한 수심자료는 이 해역에 대한 해양조사원 간행 수치해도(Chart No. 201, No. 202)를 이용하여 입력하였으며, 북항측 해군부두의 경계조건을 반영하였다.

Table. 4.4~4.5는 수치모형실험을 위한 입사파의 조건과 유한요소 모형의 요소망, 격자수, 계산시간을 각각 나타낸 것이다. 2003년 태풍 매미 내습시의 극한파랑으로 현장 계측치 및 모델링에 의한 계산치를 분석하여 파고 13m, 주기 13.8sec를 적용하였다. 극한파랑 계산을 위한 유한요소 격자망의 광역구성도 및 세부구간의 상세는 Fig. 4.14 ~ Fig. 4.17과 같다.

Fig. 4.18 ~ Fig. 4.20은 영도 인근 해역의 극한파랑 계산결과를 정리한

것으로 태종대에서 중리영역을 1구간, 중리에서 남항의 대교동을 2구간, 북내외항역을 3구간, 조도에서 태종대를 4구간으로 하여 정리된 극한파랑은 2구간의 중간인 남항방파제에서 최대파고인 $5.3m$ 를 나타내었으며, 1구간의 동삼동감지해변에서도 $5m$ 이상으로 나타났다. 북항내에서는 일부 구간을 제외하고는 $1m$ 이하로 비교적 낮은 파고가 형성되는 것으로 계산되었다. Fig. 4.21은 각 세부구간에서 부산항 해안선을 따라 극한 파랑의 계산 결과를 비교한 것이다. Fig. 4.22 ~ Fig. 4.25는 부산항의 극한파랑 계산결과를 정리한 것으로 감천항 영역을 A구간, 송도 해수욕장 영역을 B구간, 북항 내 영역을 C구간, 신선대 부두 영역을 D구간, 오륙도 부근 영역을 E구간으로 하여 정리된 극한파랑은 E구간인 오륙도 부근에서 최대파고인 $3.89m$ 를 나타냈으며, 감천항에서는 파랑의 직접적인 영향으로 항 입구에서 최고 $3.78m$ 의 비교적 높은 파고가 발생하였고 파랑이 항내로 진입하면서 $1m$ 이내의 낮은 파고가 발생하였다. 송도 해수욕장에서는 $1m$ 미만의 낮은 파고가 발생하였다. 북항 및 신선대 부두 영역에서는 영도 및 방파제에 의한 파랑감쇄효과로 $1m$ 미만의 낮은 파고가 발생하였고, 오륙도 부근 영역에서는 파랑의 직접적 영향으로 $1.29\sim 3.46m$ 의 파고가 발생하였다.

이상의 결과에서 극한파랑은 영도영역에서는 주로 1,2,4구간의 개방역에서 크게 나타났으며, 3구간의 북내항 및 외항에서는 방파제 및 영도 및 조도로부터 바람과 파랑이 차단되어 비교적 낮은 반응을 나타내었다. 부산항 영역에서는 개방역인 A구간의 감천항 입구와 E구간에서 크게 나타났으며, B,C,D 구간은 방파제 및 영도로부터 바람과 파랑이 차단되어 비교적 낮은 반응을 나타내었다.

Table. 4.4 Incident *wave* condition for *extreme wave* calculation

Wave			
Direction	Height	Period	Remark
S	13.0m	13.8 sec	Typhoon 'MAEMI(2003)' induced Significant Wave

Table. 4.5 Characteristics of *numerical model* and *simulation*

Number of Nodes	Number of Elements	Calculation Time (P4 2.6Gh 512Mb)
54,920	106,582	50 Min.

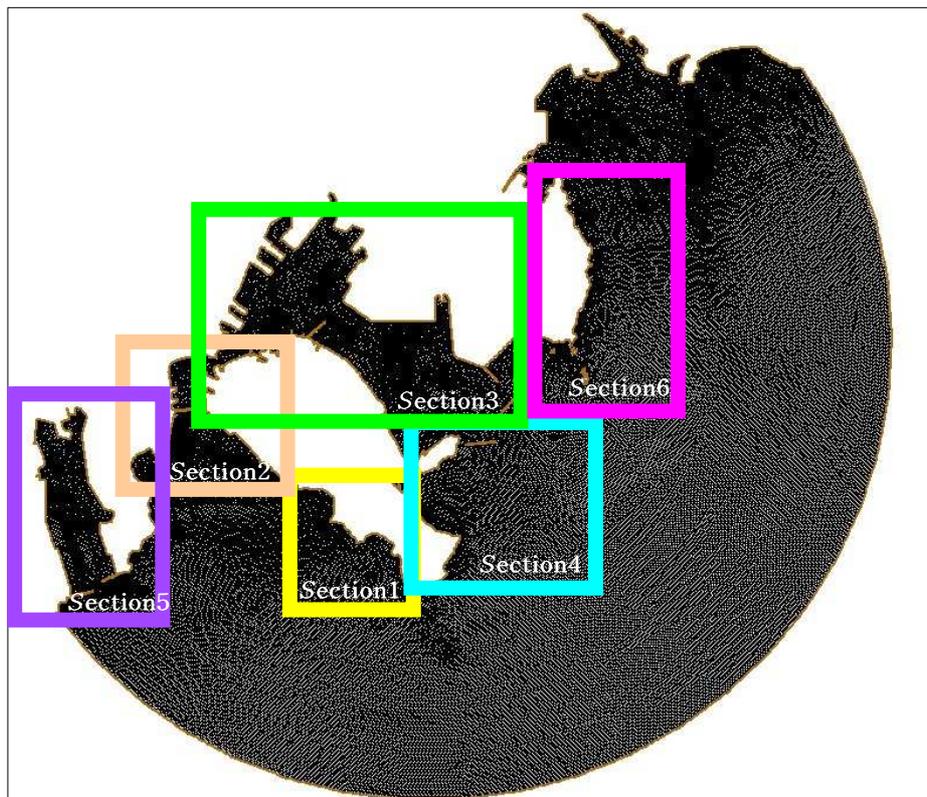
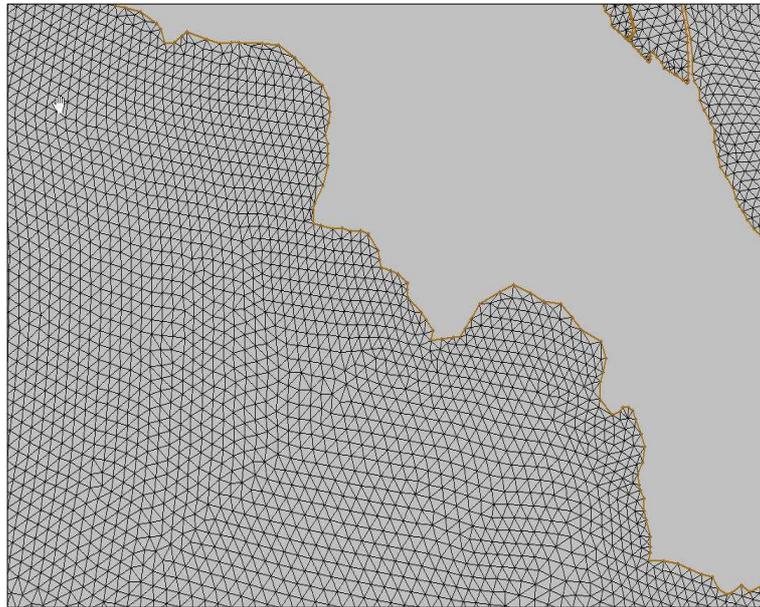


Fig. 4.14 Finite element *mesh* for Busan Harbor

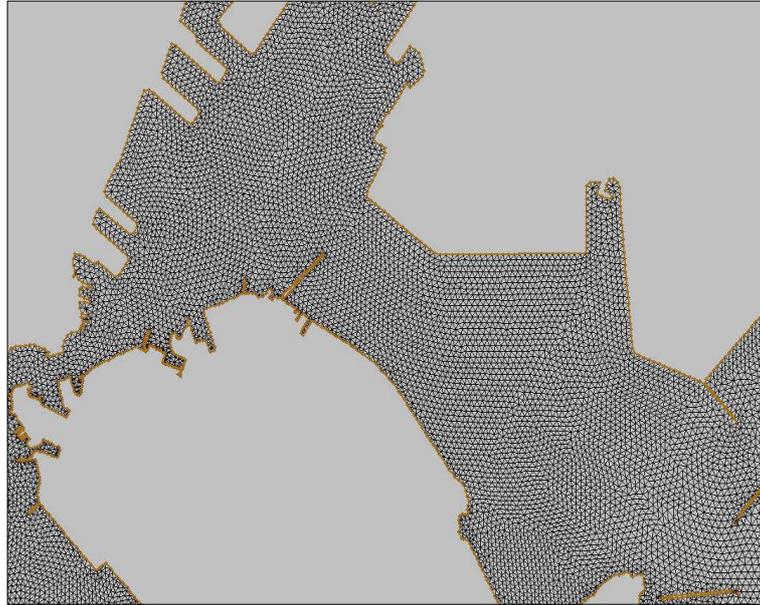


(a) Section 1

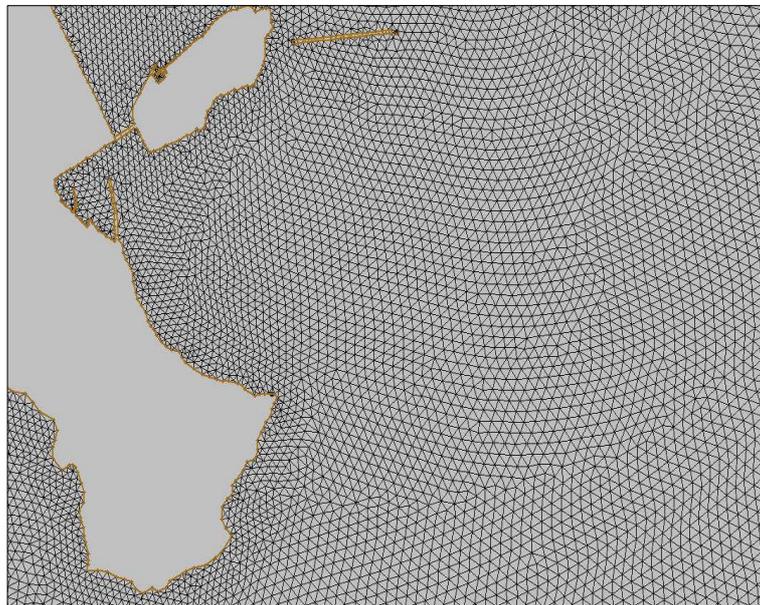


(b) Section 2

Fig. 4.15 Detailed Finite element *mesh* for Busan Harbor(Section 1,2)



(a) Section 3

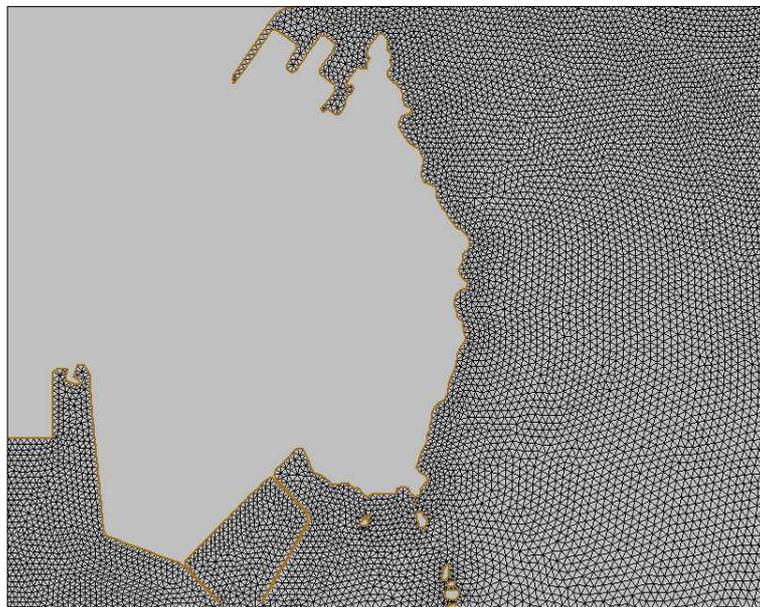


(b) Section 4

Fig. 4.16 Detailed Finite element mesh for Busan Harbor(Section 3,4)



(a) Section 5



(b) Section 6

Fig. 4.17 Detailed Finite element *mesh* for Busan Harbor(Section 5,6)

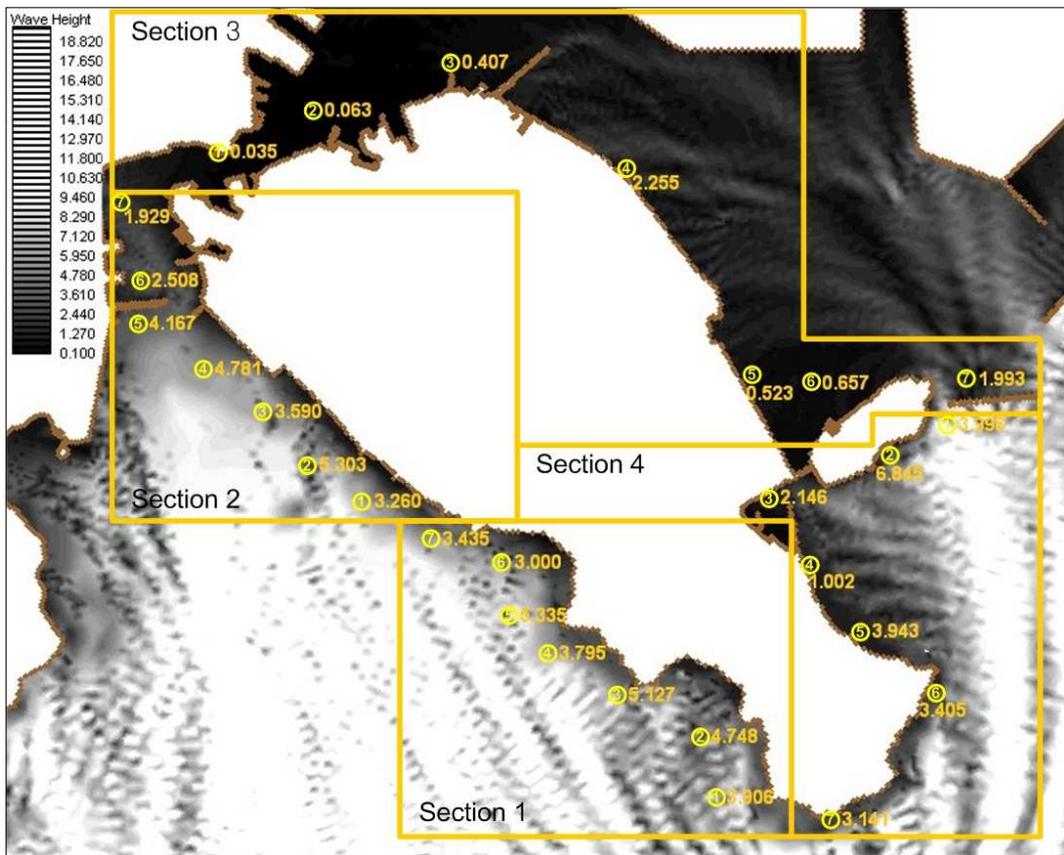
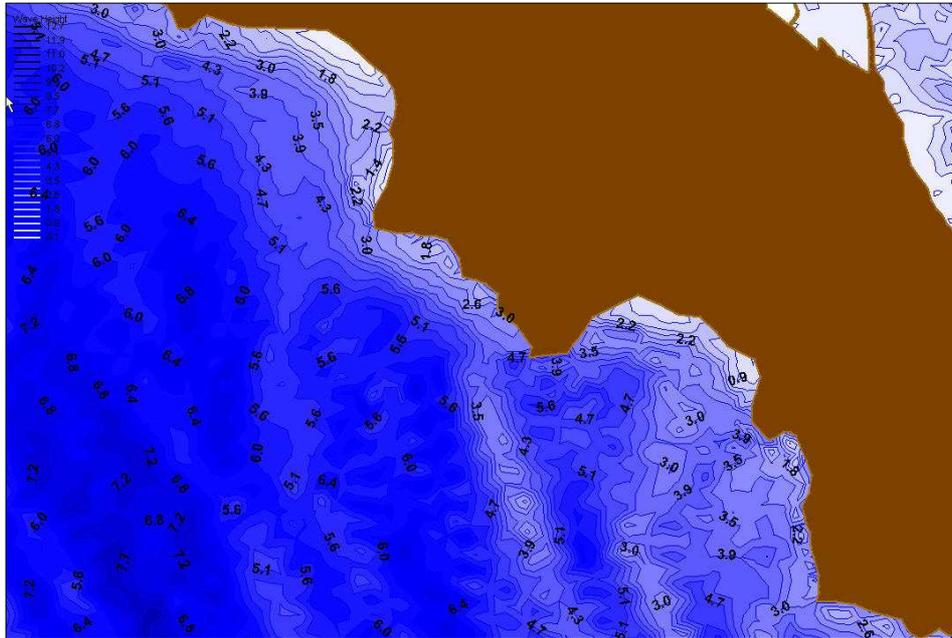
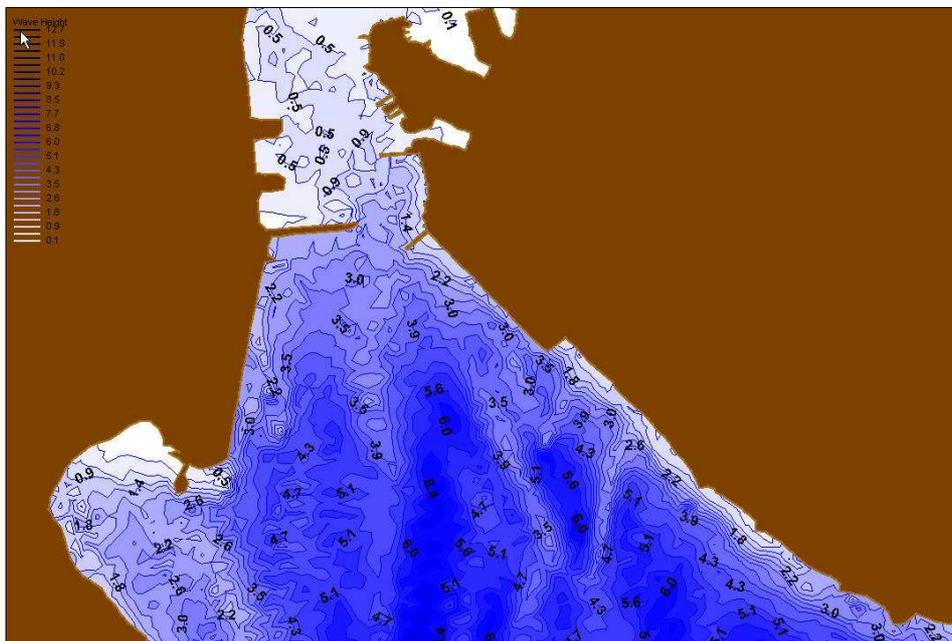


Fig. 4.18 Calculated extreme wave at Yeong-do island

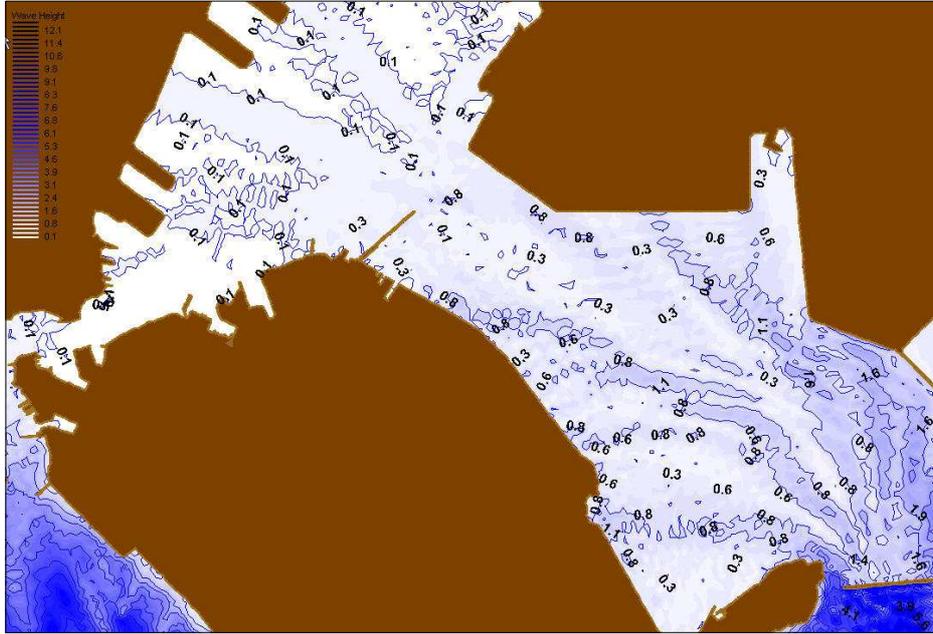


(a) Section 1

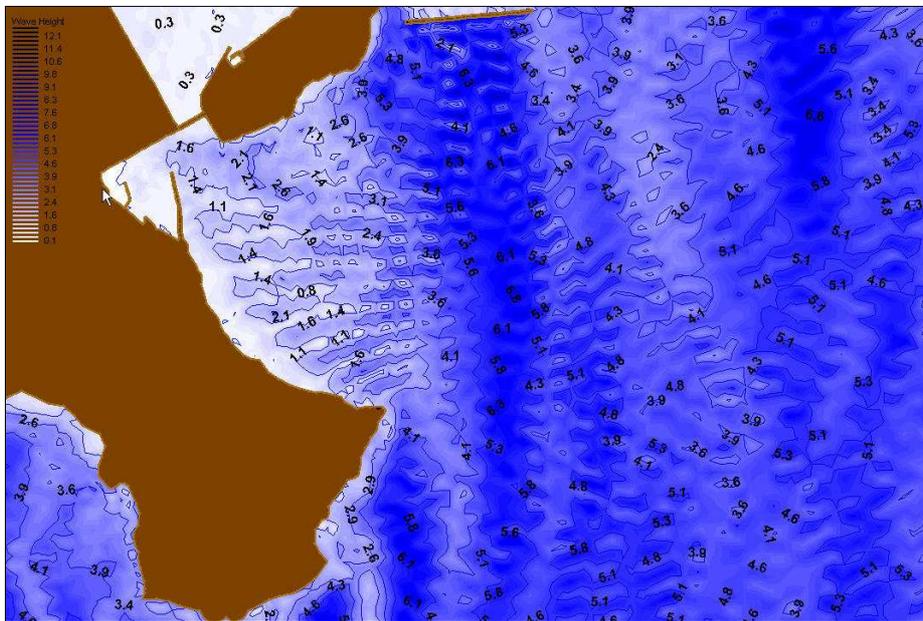


(b) Section 2

Fig. 4.19 Calculated extreme w ave at Yeongdo Island(Section 1,2)



(a) Section 3



(b) Section 4

Fig. 4.20 Calculated extreme w ave at Yeongdo Island(Section 3,4)

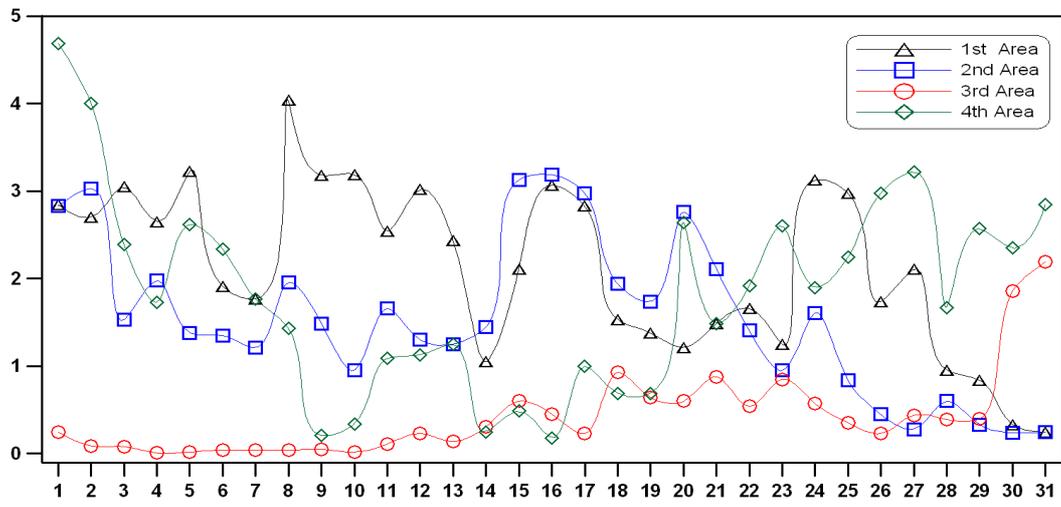


Fig. 4.21 Comparison of extreme waves along the Youngdo coast

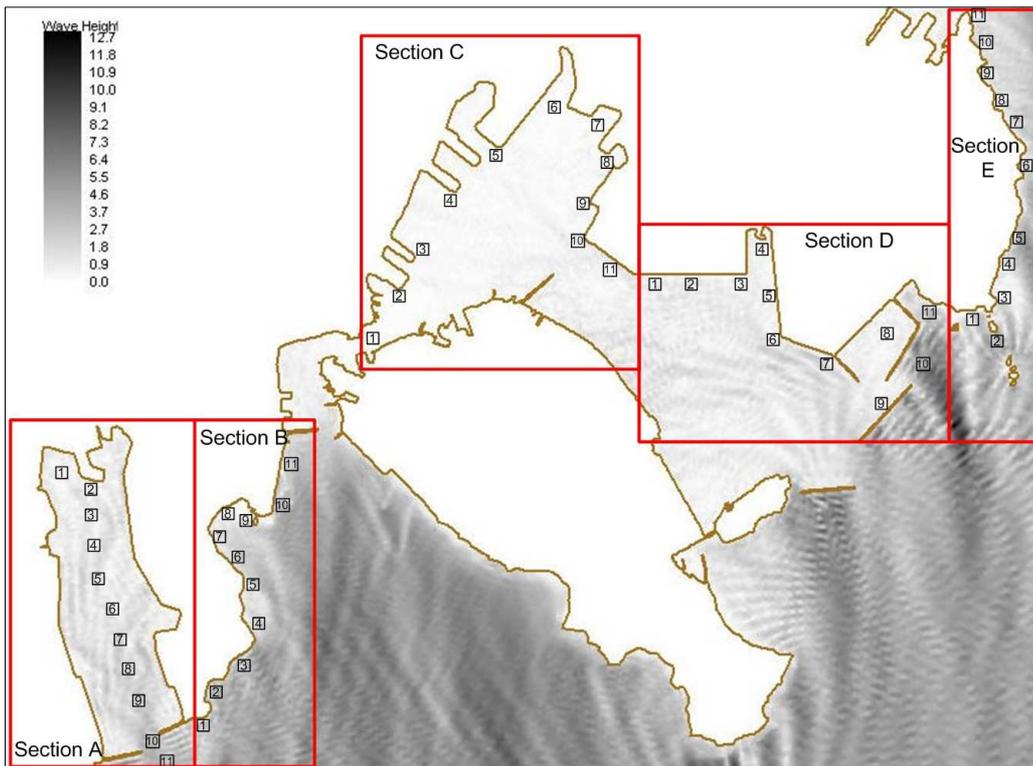
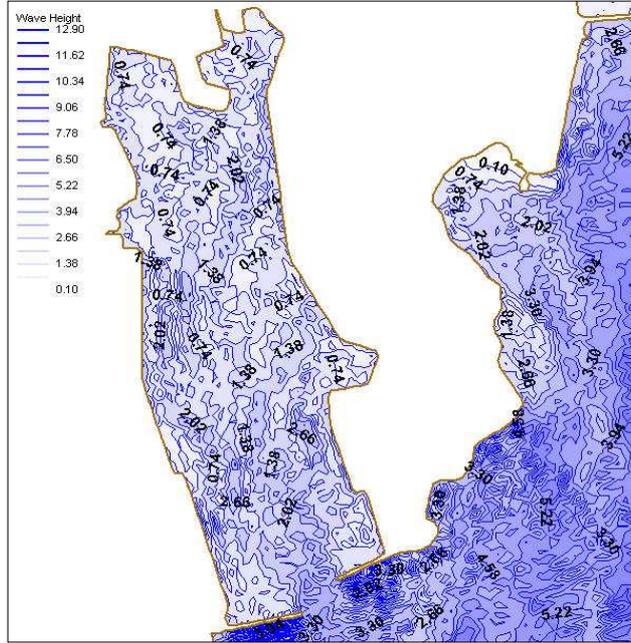
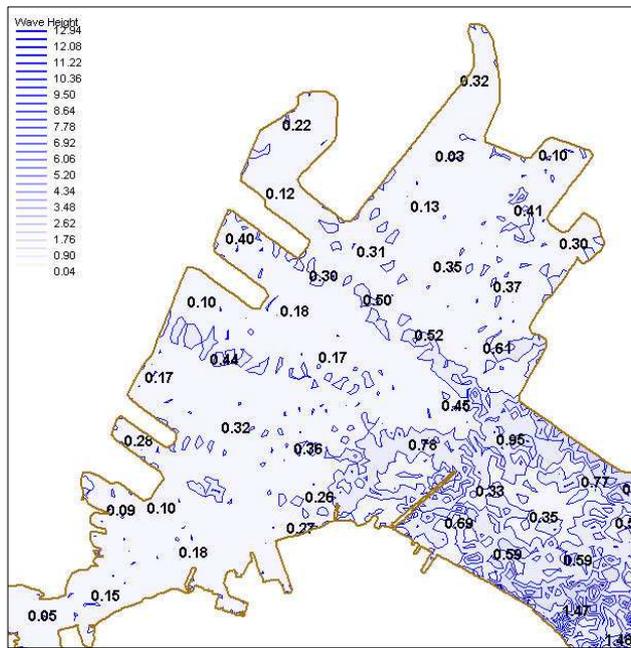


Fig. 4.22 Calculated area aroundt Busan Harbor

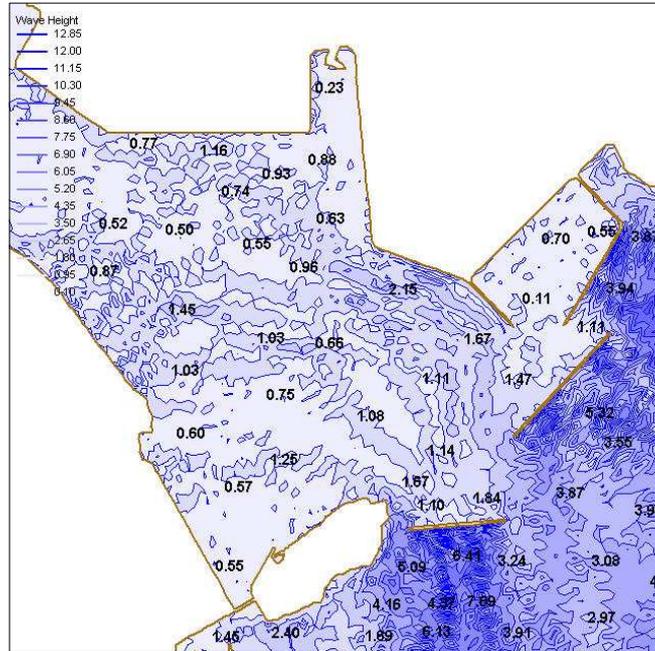


(a) Section A, B

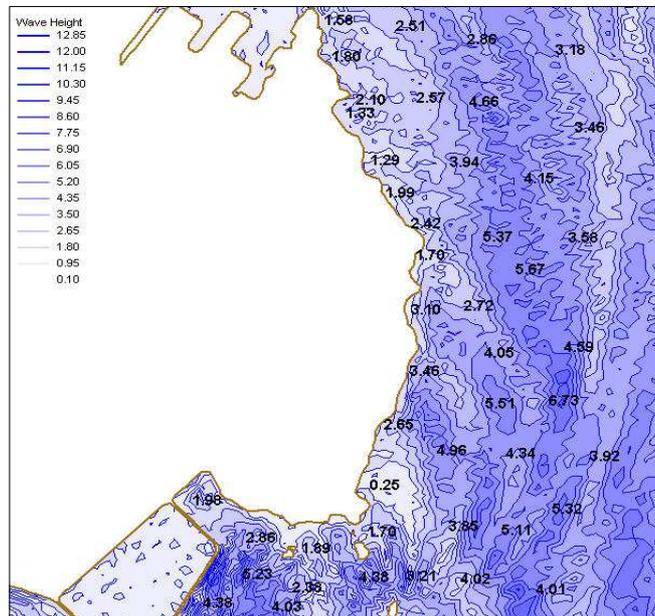


(b) Section C

Fig. 4.23 Calculated extreme wave at Busan Harbor(Section A,B,C)



(a) Section *D*



(b) Section *E*

Fig. 4.24 Calculated extreme wave at Busan Harbor(Section *D,E*)

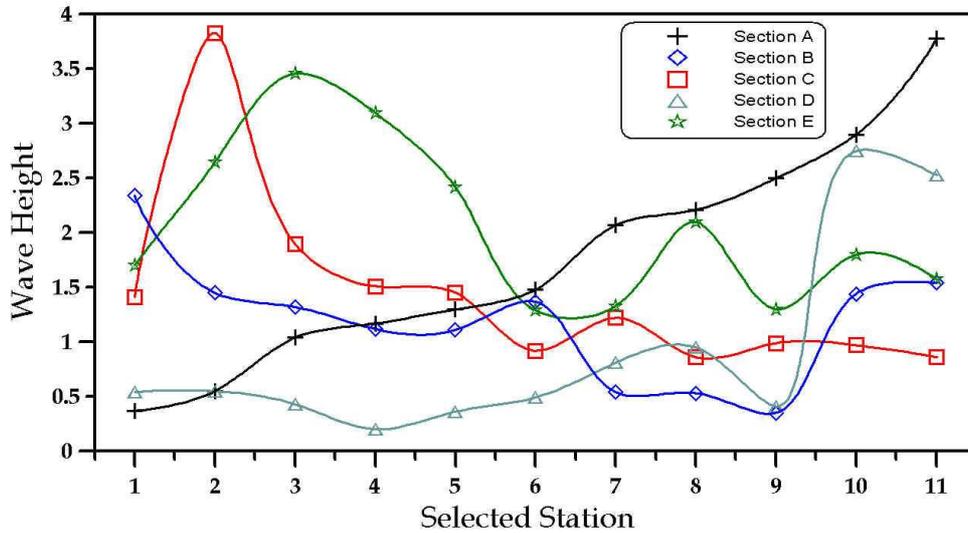


Fig. 4.25 Comparison of extreme waves along the Busan Harbor

4.2 침수원인 및 재해위험예측

이상의 결과와 현장조사를 통해 영도 해안역 및 감천항과 송도해수욕장, 부산 북항에서 발생한 침수 대상역을 분석하고 계산에 의한 해수면의 높이와 각 영역 저지대의 표고 자료를 활용하여 태풍시 발생할 수 있는 침수피해지역을 등급별로 영역을 설정하여 경고지역, 위험지역, 대피지역 등 재해지도를 작성해 보았다. 대피지역은 직접적으로 폭풍고조와 극한파랑의 영향으로 침수가 발생할 것으로 예상되어 대피를 해야 할 지역이고, 위험지역은 직접적으로 침수는 되지 않으나 집중강우 및 국지강풍이 발생할 때 또는 배수로가 차단될 때 침수 위험이 나타나는 지역이며, 경고지역은 위험지역과 인접된 지반고 15m 이하의 지역을 지칭한다. 계산과 표고분석 결과에 따른 영도의 재해지도는 Fig. 4.26와 같으며, 감천항과 송도해수욕장을 포함하는 부산항 영역에 대한 재해지도는 Fig. 4.27~4.30과 같다.

전반적으로 볼 때 침수의 원인은 두 가지로 대별하여 대상역의 자연지형적 특성과 대규모 호안 변경공사의 인공적인 인자가 결합된 것으로 분석되었다.

4.2.1 침수원인

1). 자연적 요인

- ① 남외항역이 개방해역이고 남항 방파제에 이르는 구간이 송도 및 태종대로 삼각형의 만을 형성, 태풍시 지속적으로 강한 바람에너지를 해수면에 수평방향으로 공급함으로써 wind setup현상이 발생하여 해수의 집적과 대조기 만조시가 어우러졌다
- ② 해안선과 직각방향으로 태풍 상륙시 고조의 영향이 3.3m 상승하였다
- ③ 태풍 매미는 발생빈도 100년 주기 이상의 거대 태풍으로 기록되어 사라호 보다 큰 수준이었다. 따라서 호안이 없는 해안지대는 침수 및 강한 파력으로 인한 피해를 피할 수 없었다.
- ④ 적은 양이긴 하지만 위치적인 특성으로 온난화로 인한 수위 상승과 조차가 과거보다 증가한 것도 일조한 것으로 판단된다.

2). 인위적인 요인

영도측 남항 방파제 부근 호안역에서 대교건설시 호안의 소파를 위한 TTP를 제거하여 쉽게 월과를 하였으며 아울러 모래, 자갈 등의 골재가 배수로를 메워버려 월과된 해수 및 우수가 쉽게 배출되지 못하게 된 것도 일부 원인으로 가세된 것으로 나타나 연안역 공사시 폭풍도래를 대비한 방재노력이 얼마나 중요한가를 알려주는 계기가 되었다.

장래의 재해에 대비하기 위한 대책으로 저지대 구시가지 주민을 이주시키거나 도시 재정비가 필연적이거나 현재의 시가지 형성특성을 볼 때 추진 가능성은 희박하다.

4.2.2 재해의 위험예측

Fig. 4.27의 감천항은 좁고 긴 만의 특성상 태풍 발생시 많은 피해가 예상된다. 특히, 주요 시설인 한전 부산화력 발전소의 침수 피해시 인근 지역의 2차 피해가 예상되며 만의 좌측은 바람의 직접적인 영향과 폭풍고조의 수위상승과 병행하여 침수피해가 넓게 발생하며 주변에 많이 퍼져있는 냉동 공장 및 창고에 피해가 예측된다. 송도의 경우 태풍 매미 발생시 많은 피해가 발생하였고 해안 주변의 횃집들은 해안선과 불과 수 m 에 집중해 있어 침수 및 파랑의 직접적인 피해가 발생할 것으로 판단된다. 송도해수욕장 전면에 파랑감쇄를 위해 잠제를 설치하였지만 태풍매미에서와 같이 폭풍고조의 높은 수위상승과 병행한 태풍의 내습에 대비한 체계적인 방재와 대피 방안이 수립되어야 될 것이다. Fig. 4.28에서 부산 북항컨테이너 부두의 경우에는 영도와 오륙도 방파제의 소파효과로 인하여 파랑의 피해는 적을 것으로 예상되지만 주변 저지대 매립지 및 부두가 많으므로 폭풍고조의 수위상승으로 인한 침수의 피해가 발생할 것으로 예상된다. 또한, 부두 시설의 각별한 안전 대책이 요구되고 대형 기계장비들에 대한 바람으로 인한 피해를 막기 위해 장비의 고정 및 안전대책방안을 수립하여 태풍 매미 때와 같은 사고가 발생하지 않도록 각별히 신경을 써야 할 것이다. Fig. 4.29는 부산항 입구 또한 방파제의 소파 기능으로 인하여 파랑 내습은 어느 정도 막을 수 있지만 폭풍고조로 인한 침수는 막을 수가 없다. 신선대 컨테이너 부두에 대한 침수피해가 발생하며, 태풍의 진행방향에 위치하여 강한 바람의 영향을 받을 것으로 판단되어 주요 대형기계의 바람에 대한 피해대책을 수립하여야 할 것이다. Fig. 4.30은 오륙도 주변과 용호동 일대에 대한 재해지도로 지형상 주요구조물이 없지만 오륙도의 파랑에 의한 피해가 예상된다. 용호도 일대에는 산지로서 해안가에는 자연석과 절벽으로 이루어져 있어 파랑과 폭풍고조에 의한 침수피해는 적을 것으로 판단되며, 바람에 의한 피해를 최소화 할 수 있도록 해야 할 것이다.

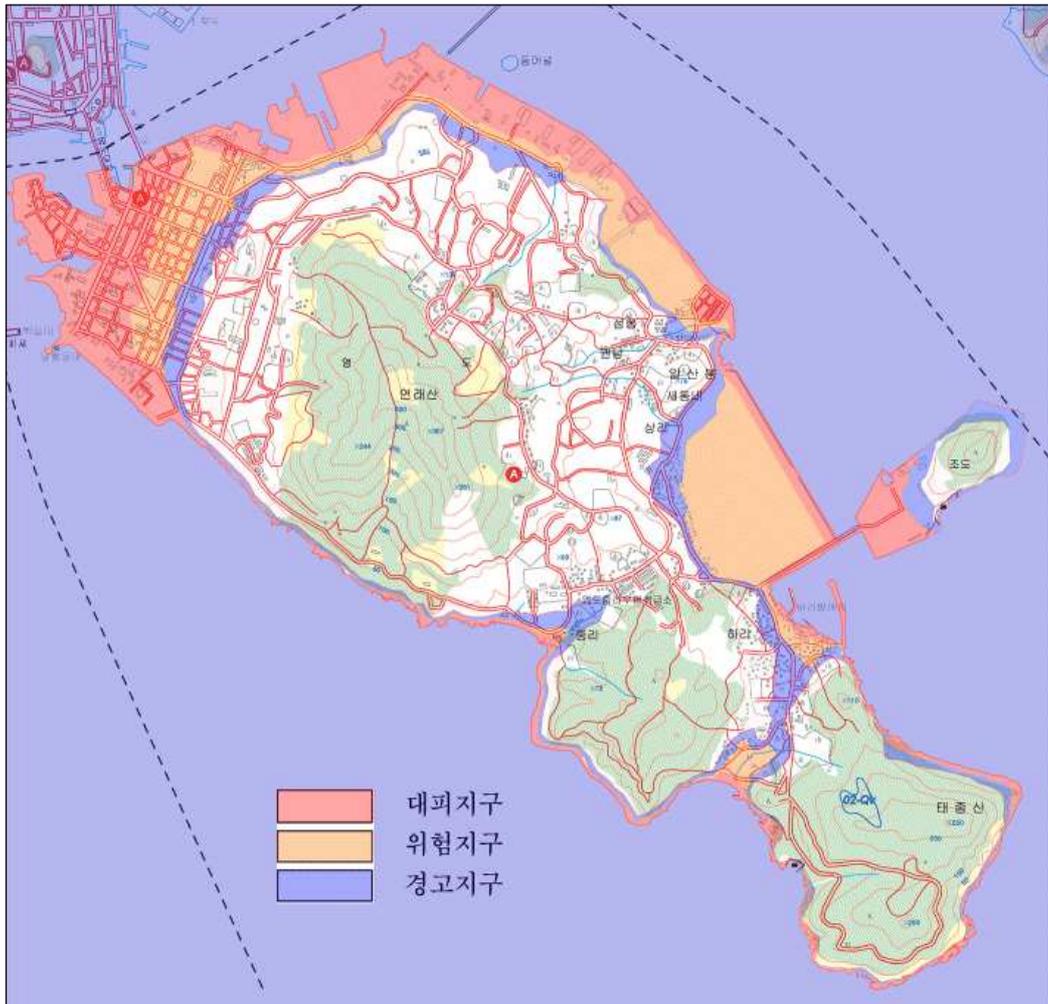


Fig. 4.26 Hazard map for Youngdo from calculation of the storm surge and extreme wave

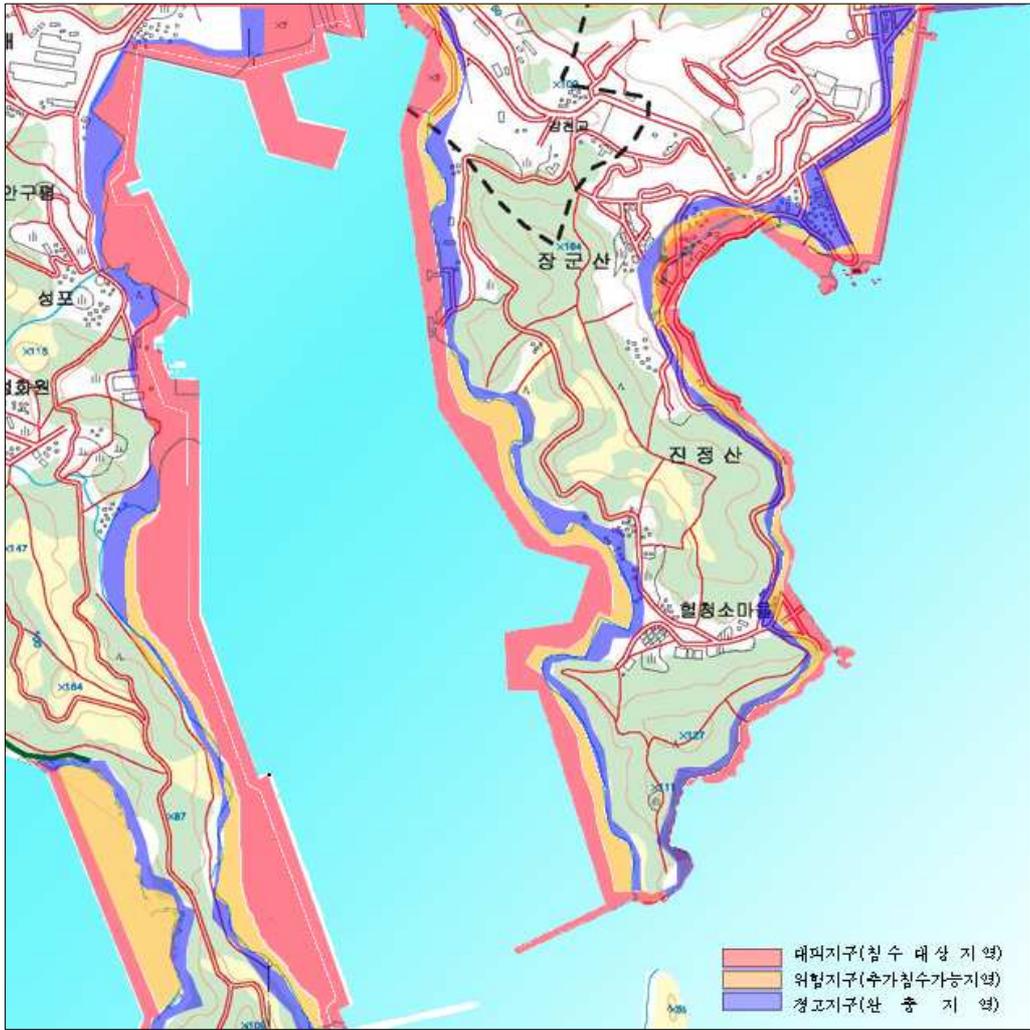


Fig. 4.27 Hazard map for Busan Port(Section A, B) from calculation of the storm surge and extreme wave

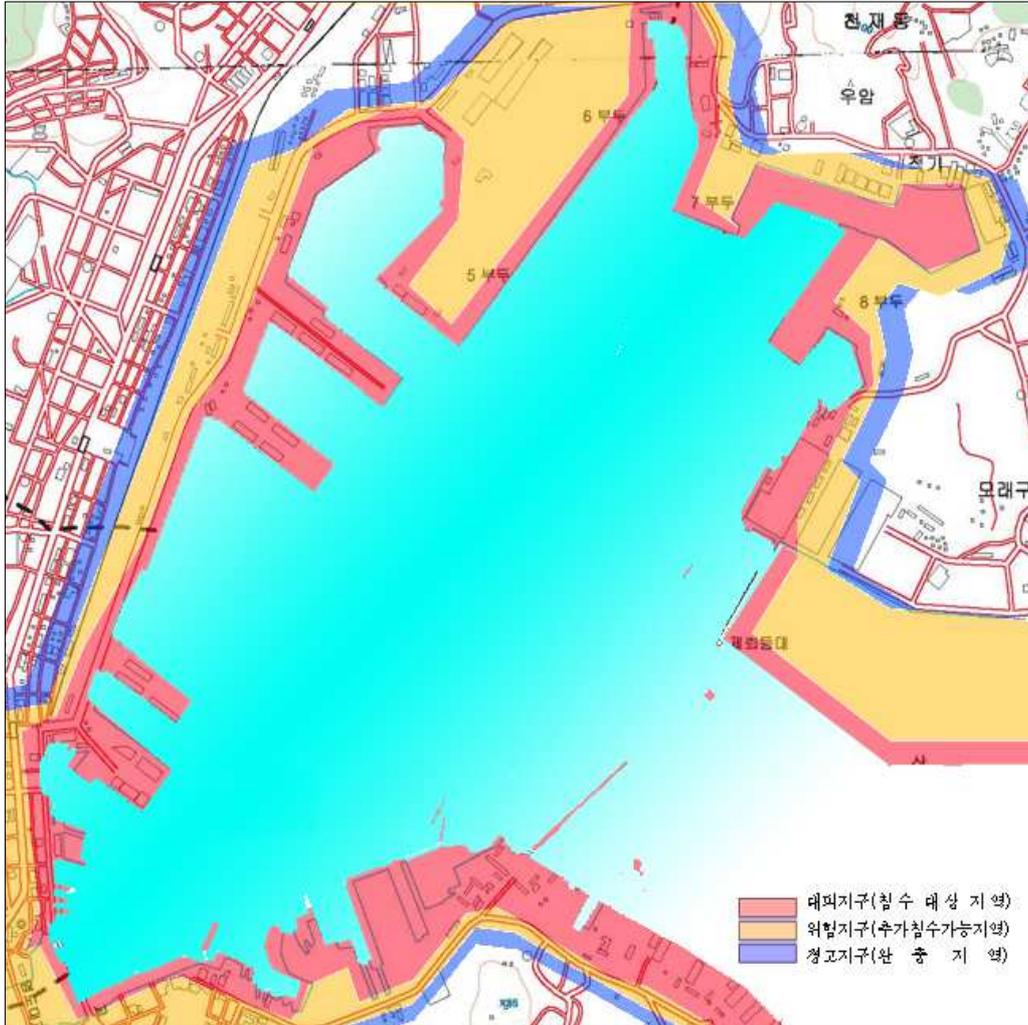


Fig. 4.28 Hazard map for Busan Port(Section C) from calculation of the storm surge and extreme wave



Fig. 4.30 Hazard map for Busan Port(Section E) from calculation of the storm surge and extreme wave

위에서 나타난 재해지도는 수치모형실험과 개략적인 자료에 의하여 제작하였으며 보다 상세한 재해위험지도는 지형정보시스템(GIS) 정보망을 이용하여 재해위험지역이나 장소의 사전발견, 발생의 경보, 재해의 대응 및 재해복구를 위한 시스템을 구축하고 기상시물레이션이나 지진해일시물레이션등의 모의실험과 병행하여 나타낼 수 있다. 또한, 강 및 하천 유량의 정확한 계산으로 이에 의한 범람을 병행 계산하여 재해지도에 반영함으로써 좀 더 정확한 재해지도를 작성할 수 있을 것이다.

이상의 재해지도에 나타난 침수 피해에 대한 대책방안으로 단기적인 방안과 장기적 방안으로 나누어 보았다.

1). 단기적 대책방안

- ① 폭풍고조의 수위상승에 의해서 발생하는 역류를 방지하고 토사에 의한 우·오수 관거의 막힘현상을 예방하기 위해 우수관과 오수관을 분리하고 재정비해야 할 것이다. 또한, 하수처리장을 신설하거나 기존의 관거와 연계하여 설치해야 할 것이다.
- ② 파랑의 내습에 대한 대책으로 노후된 해안의 호안을 재정비하고 지반고를 높이는 작업이 수행되어야 할 것이다.
- ③ 차수벽을 설치 및 역류방지밸브를 설치하여 대조시 역류현상을 방지하여 침수피해를 줄이고, 스크린을 정비함으로써 토사 및 폐쓰레기에 대한 막힘을 방지해야 할 것이다.
- ④ 중계 펌프장 설치고 우기 및 대조시 상승적으로 침수되는 구역에 대해 강제 배수시킴으로 침수 피해를 줄일 수 있다.

2). 장기적인 대책방안

- ① 저지대 해안매립지의 피해가 상당히 큼으로 매립시 계획에서부터 단지고를 높여서 설계해야 할 필요가 있다.
- ② 방파제, 호안 및 안벽 설계함에 있어 좀 더 안전측으로 설계할 필요가 있으므로 설계기준을 강화해야 할 것이다.
- ③ 해안 녹지 공원(완충지대) 및 저지대 유수지를 조성함으로써 범람된 물을 저수하였다가 재활용할 수 있도록 계획하는 것이 필요하다.
- ④ 태풍 매미시 침수로 인하여 지하공간이 밖과 단절된 상태에서 많은 사상자가 발생하였으므로, 이와 같은 피해를 막기 위해서 해안 매립지 주위 지하공간에 수문을 설치하고 유로를 확보하는 것이 필요하다.
- ⑤ 항만 계획 수립시 Zone계획 반영하여 거주지 및 상업지 연계 대상을 정리해야 할 것이다.

제 5 장 결론

태풍이 해안으로 이동할 때 기상 및 해양의 특성과 천문조의 결합으로부터 발생하는 폭풍고조의 예측은 해안구조물의 계획 및 설계에 매우 중요하다. 최근 원자력발전소, 초대형항만구조물 등, 대규모의 해안시설의 수요가 꾸준히 증가하고 있어 이들을 보전하기 위한 폭풍고조가 가진 잠재력을 추산하는 것이 더욱 중요해 지고 있다. 본 연구는 태풍으로 인한 고조의 예측 및 극한 파랑의 변환을 수치모델을 통해서 기초적으로 다루어 보았다. 광역권 계산치로부터 부산 영도 남항 연안해역, 감천항, 송도, 부산항에 이르는 영역에서 태풍 '매미'의 파라메타를 사용하여 폭풍고조를 추산하고, 이와 병행하여 태풍 매미의 도래시 극한 파랑의 변화 및 이의 영향까지를 수치모델로 예측하고자 하였다. 또한, 태풍 매미가 내습시 부산 인근 해역에서 관측한 파랑 및 검조 기록을 분석하여 수치실험 대상 해역에서의 폭풍고조의 한계치 및 극한 파랑의 유의 파고를 도출하였다.

본 연구를 통해 기초적이거나 고조 및 극한 파랑으로 인한 침수예상 연안해역을 예측하고, 침수정도에 따라 경고지역, 위험지역, 대피지역으로 구분하여 재해지도를 작성하여 방재계획에 반영할 수 있는 근거를 마련하였다.

본 연구에서 도입한 모델이 실제로 이용될 수 있음을 나타내어 보였지만 계산에 사용된 초기해면상승치, 바람응력, 해저마찰 및 이들의 상호관계는 적절하게 도입할 수는 없었다. 그 이유는 다음과 같다.

i) 조석관측기록으로 부터 과거의 태풍과 관계된 초기해면상승치를 찾아낼 표준이 없으며, 더구나 초기해면상승은 태풍과 독립적으로 발생한다.

ii) 폭풍고조의 계산에서 해저마찰은 수심과 외해의 저면지형상태의 함수로 알려져 있는데 모델에서는 독립적으로 사용된 해저마찰계수를 결정하기 위한 수단이 없다.

iii) 해저마찰과 바람응력은 수치계산에서 결합되어 있으나 정확한 바람응력을 계산하는 방법이 미흡하다. 모델에서는 바람응력을 작은 풍속치로부터 보간하거나 외삽하여 계산에 도입하였기 때문에 풍속이 증가하면 해면반응의 체계가 달라져 오차를 유발하게 된다.

그러므로 방재의 관점에서 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 과거의 태풍 및 해면관측기록이 뒤따라야 하며 수치모델에 도입한 폭풍파라메타의 검정이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

김지연, 이중우, 이학승, 양상용 (2003), “영일만 신항건설에 따른 항만정온도의 변화”, 한국항해항만학회지 28권 5호, pp. 421-428.

신승호, 홍기용, 최학선, N. Hashimoto (2004), “제3세대 파랑추산모형을 이용한 태풍매미의 극한파랑 재현 (I) -WAM 모형의 파향격자 분할법 및 파 발달 제한조건의 수정-”, 한국항해항만학회지 28권 6호, pp. 557-564.

신승호, 홍기용 (2004), “제3세대 파랑추산모형을 이용한 태풍매미의 극한파랑 재현 (I) - 태풍 '매미'가 야기한 우리나라 남해안 일대의 극한파랑 특성-”, 한국항해항만학회지 28권 8호, pp. 557-564.

이중우 (1989), 태풍파를 기준으로한 전설계수심의 산정에 관한 연구”, 한국항해학회지 제13권, 제3호, pp.45~65.

Bodine, B. R. (1971), "Storm Surge on the Open Coast Fundamentals and Simplified Prediction," U.S. Army, Corps of Engineers, CERC Tech. Memo. No. 35.

Bretschneider, C. L. and J. I. Collins (1963), "Prediction of Hurricane Surge; An Investigation for Corpus Christi, Texas and Vicinity", National Engineering Science Co., Technical Report No. SN-120.

Dally, W. R., Dean, R. G., and R. A. Dalrymple, R. A. (1985), "Wave Height Variation across Beaches of Arbitrary Profile", J. Geophys. Research, Vol. 90, pp. 1917-1927.

Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A. (1984), "Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation", J. Waterway, Port, Coastal and

Ocean *Eng.*, Vol. 110, 67-79.

Demirbilek, Z. (1994), "*Comparison Between REFDIRS and CERC Shoal Laboratory Study*", Unpublished Report, Waterways Exp. Station, Vicksburg, MS.

Madsen, O.S. (1976), "*Wave Climate of the Continental Margin: Elements of its Mathematical Description*", *Marine Sediment Transport and Environmental Management* (eds. D. Stanley and D.J.P. Swift), John Wiley, New York, pp. 65-87.

Freeman, J. C. Jr., Baer, L., and C. H. Jung (1957), "*The Bathystrophic Storm Tide*", *Journal of Marine Research*, Volume 16, No. 1.