



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

韓半島 南東沿岸에서 暴風 및 地震海溢高의 推定

**Estimation of Storm Surge and Tsunami Height at
Southeastern Coast of Korea**

 指導教授 金 度 三






2010年 8月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

金 智 敏

본 論文을 金智敏의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長	工學博士	裴基成	
委員	工學博士	金圭漢	
委員	工學博士	慶甲秀	
委員	工學博士	金泰亨	
委員	工學博士	金度三	

2010年 8月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

金智敏

Estimation of Storm Surge and Tsunami Height at Southeastern Coast of Korea

by

Ji-Min Kim

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

ABSTRACT



The occurrence frequency of earthquakes is rapidly increasing around the world, also the scale of earthquake is on the increase trend. Earthquake itself makes heavy loss of human life and property, if the earthquake generates at undersea such as 2010 Chile Earthquake and 2004 Indian Ocean Earthquake, it makes possible tsunami that is increasing the scale of damage. Tsunami generated by near west Japan made the huge damage at coast of the East Sea in Korea at 1983 and 1993. It can be known the fact that the fault activities are active from occurrence of tsunami and situation of damages, since it is expected the occurrence frequency of tsunamis will increase, the necessity of the research for tsunami caused by earthquake is emphasized, the interest for its dangerousness is increasing around the world.

And, recently coastal disasters occur frequently by the typhoon and storm surge which accompanied by severe water waves due to the global warming and changing the oceanic environment. Especially, increasing the temperature in the sea due to global warming makes that scale and intensity of the typhoon are becoming large, also the scale of disaster due to these typhoons will increase too.

In this study, detailed storm surge height was simulated for typhoon Sarah(5914), Thelma(8705), Maemi(0314) at each region of the coast of Busan, storm surge height caused by typhoon was estimated for coastal area behind Masan Bay simultaneously with inundation phenomenon at coastal area by storm surge investigated numerically. Sea wind field which calculated by existing typhoon model and new wind field which calculated by MASCON model was applied to SWAN model and then characteristics of shallow water wave were estimated, numerical results were compared and investigated with field data. Estimated shallow water wave was applied for VOF method which is calculating wave overtopping rate for dike of object area and then overflow rate was calculated, flooding was predicted by analysis of inundation phenomenon at inland.

And, tsunami generated by 1983 Central East Sea Earthquake and 1993 Southwest off Hokkaido Earthquake which exerted enormous influence on the coast of Korea and virtual tsunami generated by hypothetical earthquake is numerically simulated. And, characteristics of tsunami such as variation of water level and propagation time of tsunami are compared with observed data. Also, maximum water level and time variation of water level at each area along south eastern coast of Korea are discussed.

And, in order to handle the repeated surge damages which is in company with natural phenomenon, coastal prevention measures of comprehensive view which are enough considering characteristic of disaster for surge are reviewed.

The results of our study lead to the following conclusions.

(1) Storm surge

1) In this study, numerical analysis method was presented and propriety of study was verified by comparing and reviewing analysis results and observed data, typhoon Maemi was indicated maximum storm surge height at the west coast of Busan and typhoon Sarah was indicated maximum storm surge height at the east coast of Busan from numerical simulation of typhoon Sarah, Thelma, Maemi came in the past.

2) Storm surge did not propagate due to narrow channel and topographical property such as long bay and shallow depths at west coast of Busan. For this reason, storm surge height was increasing. On the other hand, storm surge is more affected by topographical property than characteristics of typhoon(central pressure, progression speed, radial distance from the typhoon center) and route of typhoon because east coast of Busan has smooth coastal line.

3) Results of inundation analysis are comparing and reviewing by result of base on the field survey and existing numerical simulation for inundation analysis near Masan bay, it was confirmed that this study has verification and application. It will be possible to use the virtual result which is obtained as important basic materials in future for coast business and coastal prevention business at near Masan Bay and other coastal area.

(2) Tsunami

1) Through the numerical analysis method proposed by this study, propagation velocity of tsunami generated by 1983 Central East Sea Earthquake and 1993 Southwest off Hokkaido Earthquake was compared and reviewed with observed data, it was confirmed that this study has verification.

2) Numerical analysis results of tsunami generated by 1983 Central East Sea Earthquake and 1993 Southwest off Hokkaido Earthquake showed almost same propagation velocity and aspect compared with observed data. It is indicated that most of the energy with tsunami has propagated to the Russia, a part of energy has propagated from Korea plateau(center of the East Sea) to south of Japan by refraction.

3) Maximum water level height of tsunami generated by 1983 Central East Sea earthquake and 1993 Hokkaido south off west earthquake has same result from post enumeration. When the results of water level variation at each region compared with observed data, arrive time of first wave is agree with observed data, the result of maximum and minimum water level and its variation is agree with qualitative view but disagree with quantitative view. Present topography is different from past topography when tsunami attacked, due to development of near the seas at each region.

4) Tsunami generated by hypothetical earthquake, its propagation velocity is same result numerical analysis result of previously occurred tsunami, each virtual tsunami has substantial different distribution of water level according to the different of fault parameters.



韓半島 南東沿岸에서 暴風 및 地震海溢高의 推定

金智敏

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科

요 약

세계적으로 지진의 발생빈도가 증가하며, 그 규모도 증대되고 있는 추세이다. 지진은 그 자체로서도 많은 인명 및 재산피해를 발생시키고, 2010년 칠레지진, 2004년 인도양 지진과 같이 해저에서 발생할 경우에는 그로 인한 지진해일로 그 피해규모는 더욱 증대된다. 우리나라도 1983년과 1993년에 동해의 일본 서부연안에서 발생한 지진해일에 의해 동해연안에 상당한 피해를 입힌 바가 있다. 이와 같은 지진해일의 발생과 피해상황으로부터 단층활동이 활발한 것을 알 수 있고, 지진해일의 발생빈도도 증가할 것으로 예측되므로 지진해일에 대한 연구의 필요성이 강조되며, 지진해일의 위험성에 대한 관심이 세계적으로 고조되고 있는 추세에 있다.

그리고 최근 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 연안재해가 빈번히 발생되고 있으며, 특히 지구온난화 등에 의한 해수온도의 상승은 폭풍해일의 발생빈도와 재해규모를 증가시킬 것으로 예상된다.

본 연구에서는 태풍 Sarah(5914), Thelma(8705), Maemi(0314)를 대상으로 부산연안의 각 지역별로 상세한 폭풍해일고를 추정하고, 마산만 연안에서는 폭풍해일고를 추정함과 동시에 폭풍해일에 의한 배후역의 범람현상을 수치적으로 규명하였다. 기존의 태풍모델로 산정된 해상풍과 MASCON모델로 산정된 해상풍을 SWAN모델에 적용하여 천해파랑을 산정하고 관측치와 비교·검토하였다. 산정된 천해파랑을 대상지역 호안에 적용하여 VOF 법으로 월파랑을 산정한 후 월류량을 추정하고, 이로부터 제내지의 침수현상을 해석하여 범람을 예측하였다.

또한, 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일과 지진공백역을 대상으로 가상지진해일을 수치시뮬레이션하여 남동해연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 특성을 검토하고, 관측치와 비교하였으며, 남동해연안의 각 지점에서 최대수위상승고와 시간에 따른 수위변화 등을 비교·검토하여 그 특성들을 평가하였다.

이상의 과정으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 폭풍해일

1) 본 연구에서 제안하는 수치해석기법을 관측치와 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었으며, 과거에 내습한 태풍 Sarah, Thelma, Maemi의 수치시뮬레이션으로부터 부산 서부연안에서는 태풍 Maemi가, 부산 동부연안에서는 태풍 Sarah가 가장 높은 폭풍해일고를 나타내었다.

2) 부산 서부연안에서는 협수로로 인하여 수괴의 진행이 차폐되고, 만의 길이가 길고 수심이 얇은 지형적인 특성으로 조위편차가 크게 나타났다. 반면에 부산 동부연안은 대체적으로 평활한 해안선으로 이루어져 있기 때문에 지형적인 영향보다는 태풍의 특성(중심기압, 이동속도, 태풍반경)과 이동경로에 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

3) 본 연구의 범람해석결과를 현지조사를 토대로 얻어진 결과 및 마산만 인근연안역에서 범람해석에 관한 기존의 수치해석결과와 비교·검토하여 본 연구의 타당성과 적용성을 확인할 수 있었고, 얻어진 결과는 마산만의 인근연안역을 비롯한 타지역에서의 연안사업 및 연안방재사업에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.



(2) 지진해일

1) 본 연구에서 제안하는 수치해석기법을 통해 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 전파속도에 대한 계산치와 관측치를 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

2) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 대한 수치해석결과에서 관측치와 거의 동일한 전파속도와 전파양상을 나타냈으며, 지진해일이 갖는 에너지의 대부분이 러시아 방향으로 전파되는 것을 확인하였고, 대화퇴의 부근에서 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있었다.

3) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 발생한 최고수위는 사후조사에서 얻어진 최고수위와 거의 비슷한 결과를 나타내는 것을 알 수 있었으며, 각 지역에서 수위변동의 관측치와 수치모형실험결과를 비교한 결과, 제 1파가 도달하는 시간은 관측치와 일치하고 최저 및 최고수위의 값과 그의 변동양상은 정성적으로는 일치하지만 정량적인 관점에서는 다소 불일치하는 결과를 나타낸다. 이는 각 지역에서 주변해역의 개발로 인해 지진해일 내습 당시의 지형과 현재의 지형이 다소 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

4) 지진공백역에서 발생한 가상지진의 경우도 그의 전파속도는 이전에 발생한 지진해일에 대한 해석결과와 거의 동일하게 나타나며, 단층파라미터의 차이에 따라 각 가상지진해일에서 상당한 수위분포의 차이를 나타내었다.



목 차

ABSTRACT	i
요약	iv
목차	vii
LIST OF TABLES	xi
LIST OF PHOTOS	xiii
LIST OF FIGURES	xiv

제 1장 서론

1.1 연구의 배경과 목적	1
1.1.1 폭풍해일	1
1.1.2 천해파랑과 침수 및 범람	4
1.1.3 지진해일	5
1.2 연구의 구성	9
< 참고문헌 >	10

제 2장 폭풍해일의 수치시뮬레이션

2.1 서언	12
2.2 기초방정식	12
2.3 유한차분근사	16
2.3.1 유한차분근사	16

2.3.2	외해경계조건	18
2.3.3	이동경계조건	21
2.4	해석결과 및 검토	23
2.4.1	태풍경로 및 조건	23
2.4.2	대상영역	25
2.4.3	수치계산의 검증	27
2.4.4	기압장과 바람장의 해석	31
2.4.5	폭풍해일고	36
2.4.6	폭풍해일에 의한 범람해석	41
2.5	결언	47
	< 참고문헌 >	48

제 3장 천해파랑과 침수·범람의 수치시뮬레이션



3.1	서언	49
3.2	해석모델의 개요	50
3.2.1	SWAN모델	50
3.2.2	MASCON모델	53
3.2.3	수치파동수로	55
3.2.4	침수·범람모델	58
3.3	해석결과 및 검토	60
3.3.1	MASCON모델에 의한 바람장	60
3.3.2	SWAN모델에 의한 천해파랑	61
3.3.3	침수·범람해석	70
3.4	결언	82

3.4.1 MASCON모델	82
3.4.2 SWAN모델	82
3.4.3 침수 범람해석모델	83
< 참고문헌 >	84

제 4장 지진해일의 수치시뮬레이션

4.1 서언	86
4.2 기초방정식	88
4.3 유한차분근사	93
4.3.1 유한차분근사	93
4.3.2 외해경계조건	93
4.3.3 이동경계조건	93
4.3.4 단층파라미터	93
4.4 해석결과 및 검토	95
4.4.1 단일격자모델	95
4.4.2 복합격자모델	110
4.5 결론	129
< 참고문헌 >	131

제 5장 결론

5.1 폭풍해일	132
5.2 MASCON모델	133

53 천해파랑 133

54 침수·범람해석 134

55 지진해일 134



LIST OF TABLES


Table 2.1 Characteristics of typhoon Sarah	24
Table 2.2 Characteristics of typhoon Thelma.....	24
Table 2.3 Characteristics of typhoon Maemi.....	25
Table 2.4 Mesh Sizes applied to each simulating area.....	25
Table 2.5 Maximum storm surge heights in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi	40
Table 2.6 Mesh sizes applied to each simulation area	42
Table 2.7 Comparison of inundation depths between field survey and computation.....	46
	
Table 3.1 Mesh sizes applied to each simulating area	62
Table 3.2 Deepwater design waves for Busan coast	63
Table 3.3 Approximate values of reflection coefficient	63
Table 3.4 Water levels for each simulating area.....	65
Table 3.5 Distribution of significant wave height and period around front seawall of Sam-ik APT	71
Table 3.6 Design water levels for typhoon Maemi.....	76
Table 3.7 Resultant design water level considered wave-setup.....	76
Table 3.8 Incident wave conditions	77
Table 3.9 Overtopping rates calculated by numeric analysis.....	79
Table 3.10 Overtopping rates by hydraulic model test.....	79
Table 3.11 Overtopping rates obtained by numerical and experimental results	80
Table 3.12 Comparison of inundation depths.....	80

Table 4.1 Computation condition.....	95
Table 4.2 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Aida (1984)>	96
Table 4.3 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Tada (1984)>	96
Table 4.4 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Tanaka (1984)>	96
Table 4.5 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Satake (1985)>.....	96
Table 4.6 Fault parameters of 1993 Hokkaido southwest off earthquake<Takahashi et al. (1994)>.....	104
Table 4.7 Fault parameters of hypothetical earthquake <Ichikawa(1994); Tohoku university (1995)>.....	107
Table 4.8 Maximum and minimum water levels due to hypothetical earthquake.....	108
Table 4.9 Computation conditions of each area.....	111
Table 4.10 Computation conditions	117
Table 4.11 Comparison between observed and calculated maximum water level.....	122
Table 4.12 Computation conditions	125




LIST OF PHOTOS

Photo 1.1 Inundation disasters due to Hurricane Katrina	1
Photo 1.2 Damages by typhoon Sarah and Maemi	2
Photo 1.3 Damages due to Chile tsunami	5
Photo 1.4 Satellite pictures of before and after Indian Ocean tsunami.....	5
Photo 1.5 Damages due to tsunami at 1983 and 1993 in Korea.....	6



LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Earthquake distributions around Japan	7
Fig. 1.2 Location of hypothetical earthquake	7
Fig. 2.1 Sketch of the arrangement of variables and grid points for finite difference method in this study	16
Fig. 2.2 Conceptual diagram of open boundary treatment using method of characteristics	18
Fig. 2.3 Schematic sketch of the moving boundary treatment	22
Fig. 2.4 Schematic sketch of the overflow	22
Fig. 2.5 Route of typhoon Sarah	23
Fig. 2.6 Route of typhoon Thelma	23
Fig. 2.7 Route of typhoon Maemi	24
Fig. 2.8 Route of typhoons used in numerical simulation	24
Fig. 2.9 Areas of storm surge simulation	26
Fig. 2.10 Spatial distributions of water depth	27
Fig. 2.11 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi	29
Fig. 2.12 Comparison of storm surge heights between measured and calculated results for typhoon Maemi	30
Fig. 2.13 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Sarah	33
Fig. 2.14 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Thelma	34
Fig. 2.15 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Maemi	35
Fig. 2.16 Spatial distributions of maximum storm surge heights for typhoon Sarah	36
Fig. 2.17 Spatial distributions of maximum storm surge heights for typhoon Thelma	37

Fig. 2.18 Spatial distributions of maximum storm surge heights for typhoon Maemi	38
Fig. 2.19 Calculating positions of storm surge height in Busan coast	39
Fig. 2.20 Computation areas	41
Fig. 2.21 Elevation in area No.9 including sea and land	42
Fig. 2.22 3D-map for numerical simulation around Masan bay	42
Fig. 2.23 Comparison between observed and calculated storm surge heights in Masan bay	43
Fig. 2.24 Spatial distributions of maximum storm surge heights and inundation areas around Masan bay for typhoon Maemi	44
Fig. 2.25 Time variation of inundation heights at each position around Masan bay	46
Fig. 2.26 Result of field survey for inundation areas around Masan bay	46
Fig. 2.27 Hazard map and its inundation depths around Masan bay	46
	
Fig. 3.1 Flow chart for shallow water design waves and inundation simulation by using severe waves and storm surge	50
Fig. 3.2 Sketch of numerical wave channel	55
Fig. 3.3 Concept of flood flow head	59
Fig. 3.4 Simulation area for MASCON model.....	60
Fig. 3.5 Sea wind field calculated by Eq.(3.12) for typhoon Maemi	61
Fig. 3.6 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Maemi	61
Fig. 3.7 Sea wind field calculated by Eq.(3.12) for typhoon Sarah	61
Fig. 3.8 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Sarah	61
Fig. 3.9 Computation area of SWAN simulation	62
Fig. 3.10 Spatial distributions of water depth	65
Fig. 3.11 Comparison of wave height distributions between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi	

around Noksan (case 2)	67
Fig. 3.12 Comparison of wave height distributions between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwangalli (case 16)	68
Fig. 3.13 Spatial distribution of significant wave heights around front seawall of Sam-ik APT	69
Fig. 3.14 Spatial distribution of significant wave periods around front seawall of Sam-ik APT	70
Fig. 3.15 Snapshot of overtopping	71
Fig. 3.16 Spatial distribution of inundation height (Unit : m)	72
Fig. 3.17 Inundation map around Gwangalli for typhoon Maemi	73
Fig. 3.18 Spatial distributions of wave heights and wave-setups before construction of Busan new port	75
Fig. 3.19 Spatial distributions of wave heights and wave-setups after construction of Busan new port	76
Fig. 3.20 Representation sections of original seawall used in numerical simulation	77
Fig. 3.21 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-A	78
Fig. 3.22 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-B	78
Fig. 3.23 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-C	78
Fig. 3.24 Spatial distributions of inundation depth in Noksan industrial complex	81
Fig. 3.25 Results of a field survey for inundation areas and depths in Noksan industrial complex	82
Fig. 4.1 Earthquake-generated tsunami	87
Fig. 4.2 Shoaling and refraction of tsunami	87
Fig. 4.3 Changes of wave height caused by variation of depth and width	87
Fig. 4.4 Fault types	93
Fig. 4.5 Faults parameters and coordinate system	94

Fig. 4.6 Concept of fault movement and ground displacement	94
Fig. 4.7 Computation area	96
Fig. 4.8 Distribution of depth	96
Fig. 4.9 Propagation of tsunami occurred by 1983 Central east Sea earthquake	97
Fig. 4.10 Maximum water level height of tsunami occurred by 1983 Central East Sea earthquake	98
Fig. 4.11 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Sokcho	100
Fig. 4.12 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Mukho	100
Fig. 4.13 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Pohang	102
Fig. 4.14 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Ulsan	102
Fig. 4.15 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Imwon	103
Fig. 4.16 Propagation of tsunami occurred by 1993 Hokkaido southwest off earthquake	104
Fig. 4.17 Maximum water level height of tsunami occurred by 1993 Hokkaido southwest off earthquake	104
Fig. 4.18 Comparison of time history of water level occurred by 1993 Hokkaido southwest off earthquake	106
Fig. 4.19 Propagation of tsunami occurred by hypothetical earthquake	109
Fig. 4.20 Maximum water level height of tsunami occurred by hypothetical earthquake	109
Fig. 4.21 Computation area and distribution of depth	111
Fig. 4.22 Distribution of depth at each region	112
Fig. 4.23 Propagation and Maximum water level height of tsunami occurred by 1983 Central East Sea earthquake	113
Fig. 4.24 Maximum water level height at each region	114
Fig. 4.25 Time history of water level height at each region	116
Fig. 4.26 Computation area and spatial distribution of depth	117
Fig. 4.27 Propagation and Maximum water level height of tsunami occurred by Hokkaido southwest off earthquake	119

Fig. 4.28 Maximum water level height at each region	120
Fig. 4.29 Time history of water level height at each region	121
Fig. 4.30 Computation area	123
Fig. 4.31 Propagation and Maximum water level height of tsunami occurred by hypothetical earthquake	125
Fig. 4.32 Maximum water level height at each region	126
Fig. 4.33 Time history of water level height at each region	128



1. 서론

1.1 연구의 배경과 목적

1.1.1 폭풍해일

최근에 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 그로 인한 폭풍해일로 연안재해가 빈번히 발생하고, 특히 지구온난화 등에 의한 해수온도의 상승으로 향후 그의 발생빈도가 더욱 증가할 것으로 예측되며, 더불어 재해규모도 증대될 것으로 예상된다.

2005년 8월 28일 미국 플로리다주 동쪽 약 280km의 열대성저기압으로부터 발생한 허리케인 카트리나(Hurricane Katrina)가 미국 남동부를 강타하였다. 플로리다를 가로질러 남서쪽으로 이동한 후 멕시코 만으로 빠져 나간 카트리나로 인하여 가장 큰 피해를 입은 지역은 미국 뉴올리언즈지역으로 호수의 제방이 붕괴되면서 도시의 80% 이상이 침수되었다. 도심침수, 주택, 항구, 교량시설, 정유시설 등 기반시설의 파괴 등으로 1,000억 달러 이상의 재산피해와 1,800명이 넘는 인명피해를 발생시켰고, 수 많은 건물과 주택이 파괴되면서 수 십 만명의 이재민이 발생하였으며, Photo 1.1은 당시 상황을 잘 나타내고 있다.

삼면이 바다로 둘러싸여 해안지역의 비율이 높은 우리나라와 같은 환경에서는 육지에서 가용공간의 부족과 육상에서 자원고갈의 대안으로 연안이 갖는 무한한 이용이 점차 강조되고, 연안워터프론트개발의 필요성이 대두되면서 그의 근간을 이루는 인프라구축의 필요성과 연안매립으로 대표되는 해안개발이 불가피할 경우가 많다.



Photo 1.1 Inundation disasters due to Hurricane Katrina

우리나라 연안은 복잡한 해안선을 가진 남해안과 조석의 차가 큰 서해안은 태풍의 내습에 따른 피해, 동해안은 동계계절풍과 일본에서 발생하는 지진해일에 의한 피해에 노출되어 있으며, 지리적인 특수성 때문에 거의 매년 평균 3-4개의 태풍으로부터 직·간접적인 영향을 받아왔다. 태풍시에 수반되는 강풍, 고파랑, 집중호우 및 폭풍해일 등에 의한 연안재해로 막대한 물적·인적피해를 끊임없이 받아왔으며, 1959년도의 14호 태풍 Sarah, 1987년도의 5호 태풍 Thelma 및 2003년도의 14호 태풍 Maemi는 연안역에 엄청난 물적 및 인적피해를 초래한 남해안의 대표적인 태풍이다(Photo 1.2). 특히, 초대형태풍 Sarah(5914호), Thelma(8714호), Maemi(0314호)의 태풍경로로부터 잘 알 수 있는 바와 같이 상대적으로 긴 해안선을 갖고, 어항과 항만관련시설이 집중분포되어 있는 전남과 경남 및 부산의 연안역은 한반도에 영향을 미치는 태풍의 주경로상에 위치하므로 태풍에 수반되는 폭풍해일과 고파랑 등에 의한 월파(월류)와 작용파력으로 인한 어항 및 항만시설의 파괴 및 해안저지대의 침수범람 등과 같은 연안재해가 거의 매년 반복적으로 발생하고 있고, 재해복구에 엄청난 국가예산이 소요되고 있는 실정이다. 특히 과거의 무분별하고 무계획적인 매립으로 조성된 연안저지대는 폭풍해일과 고파랑에 의한 범람위험에 항상 노출되어 있고, 더욱이 지구온난화에 따른 해수온도 상승에 의한 해수면이 보다 높아질 것으로 예측되고 있는 현실을 감안하면, 기존 호안의 기능성 저하 및 내습태풍의 빈도와 강도의 증대로 인한 침수범람이 확대될 것으로 충분히 예상된다.

태풍에 의한 피해로 일반적으로 고파랑, 폭풍해일과 강풍에 의한 연안구조물과 가옥 등의 피해 및 폭우와 더불어 발생하는 폭풍해일에 의한 해수면상승으로 인한 배후역의 침수피해를 주로 들 수 있다. 여기서 해안범람은 조석, 폭풍해일, 지진해일 등의 장주기 해수위변동과 그로 인한 고파랑 등의 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이 중에서 조석은 충분한 정도로 예측될 수 있기 때문에 설계에 반영될 수 있어 큰 문제를 발생시키지 않지만, 폭풍해일의 경우에는 이상파랑시에 발생하고 특히 최대폭풍해일고가 만조와 중첩되는 경우는 호안을 비롯한 해안구조물을 월류하여 해안가 저지대 등의 범람으로 인한 많은 인명손실과 막대한 재산피해를 초래할 수 있다.



(a) Damages by typhoon Sarah



(b) Disaster recovery after typhoon Maemi

Photo 1.2 Damages by typhoon Sarah and Maemi

이와 같이 대형태풍에 동반되는 침수피해의 주된 원인이 되는 폭풍해일고의 추정 및 예측은 해안 및 항만공학의 설계분야에서 설계조위의 설정 등에 가장 중요한 기초자료로 활용될 수 있고, 폭풍해일에 의한 침수와 침수범위의 추정은 지반고의 결정과 계획범위에 관련된 연안사업 및 지역연안방재계획의 수립에 직결되는 주요한 요소이므로 정확히 검토되어야 할 시급한 과제로 판단된다.

최근에 전술한 태풍 Maemi에 의한 엄청난 연안재해를 겪은 이후로 국가경제에 미치는 연안재해의 심각성, 연안방재계획의 실시와 보완 및 기존 해역시설물의 보완 등을 심각하게 인식하게 되었고, 동시에 태풍 Maemi를 포함한 남해안에서 발생하는 폭풍해일에 관한 연구도 국내·외에서 다소 활발히 수행되고 있다(강원구 등, 2004; 최병호 등, 2004; Takayama et al., 2004; Kawai et al., 2004; 2005a; 2005b; Yasuda et al., 2004a; 2004b; 허동수 등, 2006a; 2006b; 김도삼 등, 2007). 이들의 연구는 호안을 불투과벽체로 가정하여 해역내에서의 폭풍해일고만을 추정하거나 혹은 검조소에서 관측된 폭풍해일고를 사용하여 호안배후역에서 침수해석만을 수행하고 있고, 해역·육역의 일체화된 격자구성을 통한 상호연계된 침수해석에까지는 이르지 못하고 있다. 한편 이와 같은 과거의 대형태풍에 의한 폭풍해일고는 지역적으로 그의 분포특성이 매우 상이하기 때문에 지역내에서 연안방재계획의 수립 및 연안재해예보에 주요한 요소이므로 조속히 검토되어야 할 과제일 뿐만 아니라 동시에 이로 인한 제내지내에서 도시계획적인 문제 및 지반고의 결정 등에 범람구역의 정확한 추정이 절실히 요구되는 시점에 있다.

이와 같이 연안방제를 위한 다각도의 노력이 활발히 이루어지고 있고, 최근 태풍에 의한 바람장 등의 영향까지도 고려하여 보다 정도 높은 천해파랑을 추정하고 있다. 특히 태풍에 의한 바람장을 이용하여 천해파랑을 산정하는 경우 태풍 내습시 자유대기풍상태의 바람장을 해상풍으로 변환하여 사용하는 경우가 대부분이며, 육지의 영향을 고려한 바람장을 천해파랑산정에 사용하는 경우는 매우 미진한 것으로 판단된다.

한편 연안역의 개발과 보전사업의 계획 및 설계에 있어서 주요한 외력조건은 일반적으로 태풍에 의한 고파랑과 이상조위에 의한 수위상승이다. 이 중에서 고파랑의 설계파는 태풍내습시에 파랑의 통계적 특성으로 산정되며, 근래에 급격한 지구환경변화에 따른 이상기후로 인하여 태풍의 규모와 강도가 커지고 있고, 향후 발생빈도도 더욱 증가할 것으로 예측되며, 더불어 재해규모도 증대될 것으로 예상되고 있다. 국내에 건설되고 있는 해안·항만구조물은 일반적으로 50년빈도의 심해설계파를 대상으로 설계되며, 일반적으로 수심 10~20m 내외에 여러 형태로 건설되어 왔다. 해안·항만구조물의 설계에서 가장 중요한 외력인 파고는 주어진 심해설계파조건을 이용하여 천해설계파로 산정되며, 이러한 천해설계파의 산정은 일반적으로 수치시물레이션을 이용한다. 그리고 최근에 태풍내습에 따른 대상해역에서 파랑장의 영향을 추정하여 연안사업의 적절한 평가를 수행하기 위한 방안의 일환으로 빈번한 이상기후의 영향을 고려한 신심해설계파가 추정되었다(한국해양연구원, 2005).

따라서 본 연구에서는 폭풍해일의 피해에 가장 많이 노출되어 있는 부산연안역을 대상으로 폭풍해일고의 검토를 위한 수치시물레이션을 실시하였다. 먼저 2003년 9월 12일 경남 사천에 상륙하여 경남 및 부산연안역에 막대한 피해를 입혔고, 과거 태풍중에 태풍규모와 재해규모의 양측면에서 각종 기록을 경신한 14호 태풍 Maemi를 대상으로 폭풍해일고를 산정하였다. 다음으로 과거의 기록에서 부산을 포함한 우리나라 남해안의 동부연안에 큰 피해를 발생시킨 1959년 14호 태풍 Sarah와 1987년 5호 태풍 Thelma 상륙시의 부산연안역의 폭풍해일고를 산

정하였다.

그리고 경남연안역에서 당시의 설계태풍이었던 태풍 Sarah를 상회하는 수위상승을 기록한 태풍 Maemi(0314호)를 대상으로 많은 인명피해와 막대한 침수피해를 초래한 마산만 배후의 해안저지대에서 폭풍해일고를 재추정하고 범람현상을 해역·육역의 일체화된 격자구성을 통한 상호연계된 수치해석법으로 명확히 규명한다. 기초방정식으로 폭풍해일고와 침수범람에 고정도의 결과를 나타내는 것으로 널리 알려져 있고, 또한 그의 타당성이 인정되는 2차원비선형침수방정식을 적용하며(Kawai, 2003; 허동수 등, 2006a; 2006b; 김도삼 등, 2007), 수치해석법으로 유한차분법을 적용한다. 이로부터 얻어진 본 연구의 수치해석결과를 현지조사결과 및 기존의 연구결과(마산시, 2004; Yasuda et al., 2004a) 등과 비교하여 본 연구의 타당성과 적용성을 검토하였으며, 대상지역 및 도심지의 특성에 따른 범람해석모델을 적용함으로써 보다 정도 높은 침수경향의 예측 및 범람특성을 규명하였다. 향후 본 연구의 해석결과가 마산만 인근의 해안배후역을 비롯한 기타 다른 지역에서의 연안사업 등에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

1.1.2 천해파랑과 침수 및 범람

폭풍해일을 동반하는 태풍 시에 보다 정확한 경도풍을 추정하기 위하여 육상지형의 영향을 고려하는 MASCON모델(Goto and Shibaki, 1993)을 적용하며, 이러한 육상지형의 영향이 고려된 바람장으로부터 얻어진 해상풍이 침수·범람해석의 입력치로 되는 천해파랑에 미치는 영향을 검토한다. 먼저 경남 남해안 일대의 해역을 대상으로 태풍 Maemi와 태풍 Sarah의 내습 시에 MASCON모델로 산정된 해상풍의 타당성을 확인하고, 다음으로 지역적으로 차폐 및 개방된 해역특성이 분명한 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 전면해역과 부산광역시 수영구 광안리 주변해역을 대상으로 기존의 태풍모델로 산정된 해상풍과 육상지형의 영향을 고려할 수 있는 MASCON모델로 산정된 해상풍을 SWAN모델에 적용하여 천해파랑을 산정하며, 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 및 수영구 광안리 주변해역에서 천해파랑의 특성을 검토하였다. 그 결과를 상호 비교·검토함으로써 고정도의 높은 천해파랑산정을 위한 MASCON모델의 필요성을 논의한다.

설계조위(약최고고조위+조위편차)와 신심해설계과를 고려하여 산정된 천해파랑에 대해 수치파동수모에 적용하여 불규칙과에 의한 월파랑(Fujiwara, 2005; 이민기, 2007)을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 제내지의 침수현상(김도삼 등, 2007)을 검토할 수 있는 수치해석수법을 논의한다. 더불어 이러한 월파랑을 범람해석수법 중 해석격자의 형상과 배치에 따라 정방격자를 사용하는 데카르트좌표계모델에 적용하여 부산광역시 수영구 광안리 삼익아파트 단지내의 범람해석을 실시한다. 또한 녹산국가산업단지 침수 및 범람해석을 실시하고, 산정된 침수범위 및 침수고 등의 범람해석결과를 현지조사결과(부산광역시, 2004; 한국토지공사, 2005)와 비교·검토함으로써 도심지의 특성에 따른 범람해석모델의 적용성 및 본 연구의 타당성을 검토한다.

1.1.3 지진해일

세계적으로 지진발생의 빈도가 급증하고, 여러 나라에서 지진에 의한 피해가 다수 보도되고 있다. 가장 최근인 2010년 2월 27일 칠레에서 발생한 규모 8.8의 강진에 의한 지진해일이 발생하였다. 이의 강진으로 사망자가 최소 723명, 실종자가 150명이 발생하였으며, 당시의 피해상황을 Photo 1.3에 나타내었다.

그리고 2004년 12월 26일에 발생한 인도양 지진해일로 약 23만 여명의 인명피해과 150여만명의 이재민, 100억달러가 넘는 천문학적인 재산피해를 발생시킨 역사상 최악의 지진해일이었으며, 지진해일로 인해 지형을 찾아볼 수 없을 정도로 피해를 입은 당시의 상황을 Photo 1.4에 나타내었다.

이상과 같은 지진해일의 발생과 피해상황으로부터 단층활동이 활발한 것을 알 수 있고, 따라서 이로 인한 지진해일의 발생빈도도 증가할 것으로 예측되므로 지진해일에 대한 연구의 필요성이 강조되고 있고, 더불어 지진해일의 위험성에 대한 관심이 세계적으로 고조되고 있는 추세에 있다.



(a) Damage by the tsunami



(b) Ship carried onshore by the tsunami

Photo 1.3 Damages due to Chile tsunami

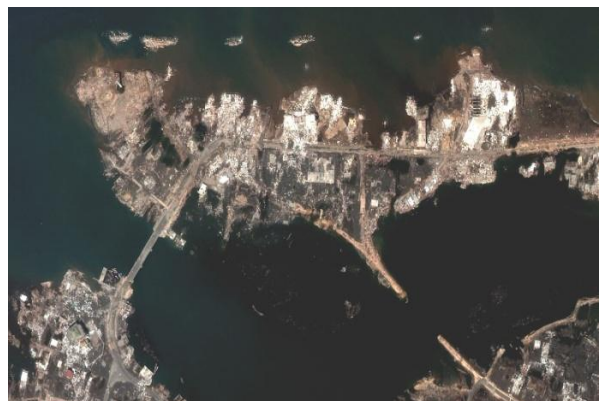


Photo 1.4 Satellite pictures of before and after Indian Ocean tsunami

한편 동해의 일본근해에서 발생한 지진해일은 일본의 연안에 치명적인 피해를 입혀왔으며, 동시에 동해상을 전파하여 우리나라의 동해연안에 인명 및 재산피해를 발생시켜왔다. 이 중에서 1983년 5월 26일 일본 아키타현의 전면해역에서 발생한 리히터 규모 7.7의 동해중부지진에 의해 발생한 지진해일과 1993년 7월 12일의 일본 북해도남서외해에서 발생한 리히터 규모 7.8의 일본 북해도남서외해지진에 의해 발생한 지진해일은 일본뿐만 아니라 우리나라에도 많은 인명 및 재산피해를 가져다 준 근래의 대표적인 지진해일이며(국립방재연구소, 1998), 당시 피해상황을 Photo 1.5에 나타내었다.

대략 10년을 주기로 발생하는 이와 같은 지진해일의 발생과 그로 인한 피해를 고려하면 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 단층활동이 주기적으로 일어나는 것을 알 수 있고(Fig. 1.1), 이로 인한 지진해일의 발생빈도도 증가할 것으로 예측되므로 기왕에 우리나라로 내습한 지진해일의 거동특성의 정확한 이해뿐만 아니라 향후 내습할 가능성이 있는 지진해일에 대한 연구 및 대책이 시급히 요구되는 실정에 있다.



(a) After 1983 Central East Sea tsunami in Imwon



(b) Before 1993 Hokkaido southwest off tsunami in Samcheck



(c) After 1993 Hokkaido southwest off tsunami in Samcheck

Photo 1.5 Damages due to tsunami at 1983 and 1993 in Korea

지진이 발생한지 충분한 시간이 경과되었거나 아직 지진이 발생하지 않은 일본 서측연안의 단층대에 위치하는 지진공백역(Fig. 1.2 참조)은 상당한 잠재에너지를 가지고 있는 것으로 알려져 있고, 향후 지진활동이 발생할 가능성이 높으며 이에 따른 지진해일의 발생으로 큰 피해가 예상되고 있다. 이러한 지진공백역은 기존의 연구결과를 통해 추정될 수 있다. Sato(1995)는 과거에 발생한 지진의 진원분포상에 표시된 기왕의 대지진에 있어서의 여진역으로부터 플레이트의 경계상에 존재하는 여진역의 사이에 지진활동이 적은 공백역이 존재한다는 사실을 확인하였으며, 이를 제 1종 지진공백역이라 칭한다. 羽鳥(1984)는 지진과 지진해일에 대한 역사자료를 근거로 플레이트의 사이에 기왕의 지진해일에 있어서의 파원역을 추정하였으며, 플레이트의 경계상에서 파원역으로 둘러싸인 영역이 제 1종 지진공백역에 상당한다. 이 제 1종 지진공백역은 장래에 지진해일을 동반하는 대규모의 지진이 발생할 가능성이 높은 지역으로 알려진 지역이다. 그리고 일정기간마다 발생하는 소지진의 분포로부터 지진공백역의 크기가 확대 혹은 축소되면서 변화되는 지역이 있으며, 이를 제 2종 지진공백역이라 칭한다. 이 중에 지진공백역의 크기가 확대되는 경향이 있는 지역이 장래에 지진해일이 발생할 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(松澤, 1996).

동해에서 일본측의 연안에 기인하는 지진으로 발생한 지진해일이 우리나라의 연안에 미치는 구조를 면밀히 분석하고, 동시에 금후 내습할 수 있는 지진해일의 영향을 정확히 예측하기 위해서는 해저지형변화에 따른 지진해일의 굴절, 회절, 반사 및 분산과정과 해안에 가까워지면서 나타나는 천수 및 처오름 등의 현상을 상세히 고려할 수 있는 수치모형의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정에 있지만 만족할 정도의 단계에 이르지 못하고 있는 것으로 판단된다. 이로부터 얻어지는 결과들은 향후 동해안을 위시한 국내의 연안에서 원자력 및 화력발전소의 부지고의 결정, 해안 및 항만구조물의 내파설계와 연안방재의 계획 및 정책 등에 주요한 자료로 활용될 수 있다.

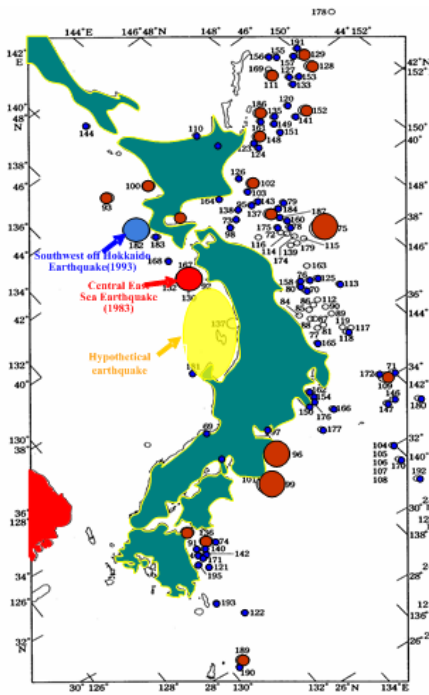


Fig. 1.1 Earthquake distributions around Japan

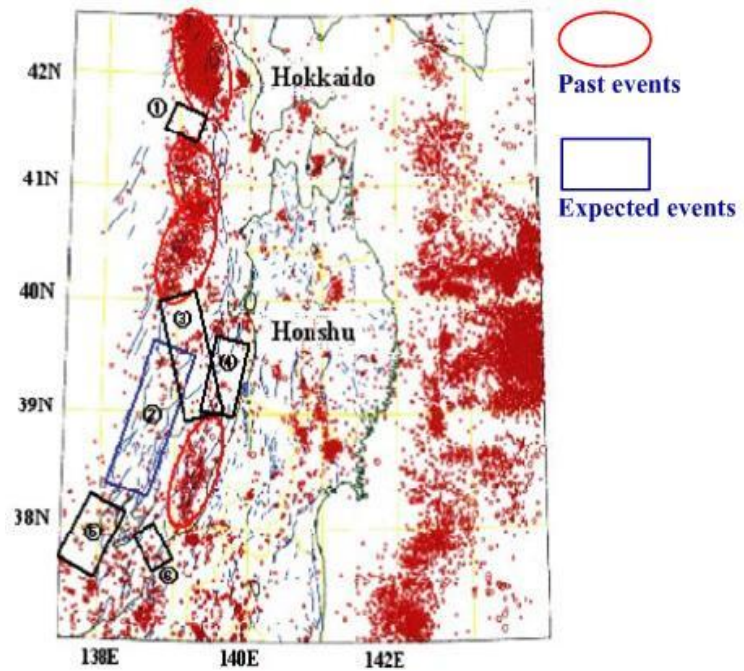


Fig. 1.2 Location of hypothetical earthquake

지진해일의 수치시뮬레이션에 관한 연구는 지진해일의 피해를 자주 입는 하와이, 알래스카, 캘리포니아 등의 미국과 캐나다 및 일본에서 활발히 진행되어 오고 있으며, 우리나라와 러시아에서도 동해안의 주요 항구에 대해 예상범람지도를 작성하는 등의 상당한 수준에 이르고 있다.

일본의 경우에 1983년 동해중부지진에 의한 지진해일을 수치적으로 해석하면서 연구가 본격화되었으며, 천수방정식과 leap-frog의 유한차분기법을 사용한 수치모형으로 일본의 근해에서 발생하는 지진해일을 해석하였다 (Goto and Shuto, 1983). Imamura et al.(1988)은 칠레지진해일을 수치해석하였으며, 장거리를 전파하는 지진해일의 물리적 분산효과의 중요성을 인지하고, 수치분산효과를 이용하여 물리적 분산효과를 고려하는 방법을 제시하였으나 수심이 변하는 지역에 대해서는 정도가 높지 않은 단점이 있다.

Yoon and Liu(1992)는 완변수심에서 물리적 분산효과를 고려할 수 있는 유한요소모형을 제시하여 1983년 동해중부지진해일의 해석에 적용하였으며, 우리나라 동해안에 내습하는 지진해일의 전파에 대화퇴가 미치는 영향을 확인하였다. 최병호 등(1993, 1994, 1995, 1997)은 일본의 동북대학을 중심으로 수행된 TIME(Tsunami Inundation Modeling Exchange) 프로그램의 일환으로 유한차분모형을 적용하여 1983년 동해중부지진해일과 1993년 북해도 남서외해지진해일, 1992년 이카리구아의 지진해일, 1994년 필리핀 민도로섬의 지진해일을 해석하였다. 국립방재연구소(1998)는 우리나라 동해안에 영향을 미친 지진해일에 대한 광범위한 조사와 함께 지형의 fractal차원을 도입하여 대화퇴의 중요성을 재확인하였으며, 정도 높은 수치해석을 위한 격자간격에 대해 논의하였다. 윤성범 등(2002)은 균일한 격자와 계산시간간격을 사용하면서 수심이 완만하게 변하는 지형상을 전파하는 지진해일의 국부적인 분산관계를 만족시키기 위해 2차원완변수심상에서 분산보정의 유한차분기법을 제시하였으며, 유한차분모형의 대신에 병렬유한요소모형(ADCIRE)으로 수치해석을 실시하였다.

본 연구에서는 천해역에서 수심이 얕아지면서 발생하게 되는 천수효과를 충분히 재현하기 위한 격자접속기법과 연안역에서의 처오름을 고려하기 위한 이동경계조건을 도입하여 우리나라의 동해연안에 막대한 영향을 미친 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 있어서 동해연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 특성을 수치모형실험으로부터 검토하고, 관측치와 비교한다. 또한 지진해일에 의한 동해연안의 각 지점에서 최대수위상승고과 시간에 따른 수위변화 등을 비교·검토한다.

그리고 Ishikawa(1994)가 제안한 지진공백역을 적용하여 일본 서부연안의 지진공백역에 주어지는 가상의 지진에 의한 지진해일을 수치시뮬레이션으로부터 예측한다. 이로부터 얻어진 결과와 우리나라의 동해연안에 영향을 미친 기존의 지진해일에 대한 관측치와 비교하고, 더불어 남동부연안의 각 지점에 있어서 최대수위상승고와 시간에 따른 수위변화 등을 검토하여 지진공백역에서 발생한 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향을 평가한다.

이상에서 얻어진 가상의 결과는 우리나라의 남동연안에서 향후 연안방재의 계획 및 설계, 연안개발의 방향, 해안·항만구조물의 배치 및 내파설계 등에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

1.2 연구의 구성

본 연구는 총 5장으로 구성되며, 각 장에서 기술되는 내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해 간단히 기술한다.

제 2장에서는 대상지역의 폭풍해일을 추산하기 위하여 본 연구에서 제안하는 모델의 기초방정식과 경계조건에 대한 이론을 전개하고, 수치해석의 수행에 있어서 필요한 전반적인 사항을 기술하며, 기압과 폭풍해일고를 현지데이터와 비교하여 수치모델의 타당성을 검증한 후 대상영역에서의 최대폭풍해일고와 태풍의 내습에 따른 범람해석을 수행하여 그 결과를 제시한다.

제 3장에서는 대상지역에서 침수범람해석을 수행하기 위하여 지형의 영향이 고려된 바람장을 추산할 수 있는 MASCON모델, 천해설계파를 산정하기 위한 SWAN모델, 월파랑 산정을 위한 수치파동수모형, 범람해석모델의 기초방정식과 경계조건 및 수치해석의 수행에 따른 필요한 제반사항을 기술하고 각 모델들의 수치해석결과를 제시하며, 대상지역에서의 수치해석 결과를 현지자료와 비교·검토한다.

제 4장에서는 지진해일의 수치모형실험에 대하여 본 연구에서 제안하는 모델의 기초방정식, 유한차분식 및 단층파라미터 등과 같은 수치해석의 수행함에 있어서 필요한 전반적인 사항을 기술한다. 본 연구의 모델을 바탕으로 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 대해서 수치모형실험의 결과와 관측치와의 비교·검토를 수행하고, 지진공백역에서 발생가능한 여러 지진에 의한 지진해일에 대해 수치시뮬레이션을 수행하여 지진해일의 전파속도, 최고수위분포 등에 관한 수치해석결과를 제시함과 동시에 그의 특성을 분석한다.

제 5장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 논문의 결론으로 한다.

마지막으로 본 연구에서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 수록한다.

< 참고문헌 >

- 강윤구, 富田孝史, 김도삼, 안성모 (2004) : 태풍 매미내습시 남동연안에서의 해일 · 파랑에 의한 침수재해 특성, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 35-43.
- 국립방재연구소 (1998) : 동해안에서의 지진해일 위험도 평가, 국립방재연구소 연구보고서, NIDP-98-06.
- 김도삼, 김지민, 이광호, 이성대 (2007) : 연안역에서 고파랑과 폭풍해일을 고려한 침수해석, 한국해양공학회지 제21권, 제2호, pp 35-41.
- 마산시 (2004) : 태풍 매미에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방지대책.
- 부산광역시 (2004) : 녹산공단 해일피해 방재대책 수립용역 종합보고서.
- 부산광역시 (2005) : 해일피해영향분석 및 피해방지계획수립용역 보고서.
- 윤성범, 임채호, 조용식, 최철순 (2002) : 지진해일 전파 분산보정 유한차분모형의 정밀도 평가, 한국해안 · 해양 공학회지, 제14권, 제2호, pp. 116-127.
- 이민기 (2007) : CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과 월파랑 추산에 관한 연구, 한국해양대학교 석사 학위논문.
- 최병호, 김덕구, 노상준, 이호준 (1997) : 1994년 필리핀 민도로섬의 쓰나미 산정, 한국해안 · 해양공학회지, 제 9권, 제3호, pp. 140-154.
- 최병호, 엄현민, 김현승, 정원무, 심재설 (2004) : Wave-Tide-Surge Coupled Simulation for Typhoon Maemi, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 121-144.
- 최병호, Pelinovsky, E, 홍성진 (2006) : 병렬 FEM 모형을 이용한 1983년 동해 중부 지진해일 시뮬레이션, 한국해안 · 해양공학회지, 제18권, 제1호, pp. 21-34.
- 최병호, 우승범, Pelinovsky, E. (1994) : 1993년 동해 쓰나미의 산정, 한국해안 · 해양공학회지, 제6권, 제4호, pp. 404-412.
- 최병호, 이호준 (1993) : 1983년 동해 쓰나미의 산정, 대한토목학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 207-219.
- 최병호, 정홍화 (1995) : 1992년 니카라과 쓰나미의 범람 산정, 한국해안 · 해양공학회지, 제7권, 제1호, pp. 24-32.
- 한국토지공사 (2005) : 녹산산단 태풍 매미 피해원인 분석용역 최종보고서.
- 한국해양연구원 (2005) : 전해역 심해설계과 추정 보고서II.
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006a) : 부산연안에서 폭풍해일고의 추정, 한국해양공학회지, 제20권, 제3호, pp 37-45.
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006b) : 경남연안의 지역특성에 따른 폭풍해일고의 변동, 한국해양공학회지, 제20권, 제3호, pp 45-53.
- Fujiwara, R. (2005) : A method for generating irregular waves using CADMAS-SURF and applicability for wave transformation

- and overtopping, Coastal Eng., JSCE, Vol. 52, pp. 41-45.
- Goto, C. and Shibaki, H. (1993) : A Hindcast of Marine Surface Wind Including Effects of Land Topography, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.32, No.3, 65-97.
 - Goto, C. and Shuto, N. (1983) : Numerical simulation of tsunami propagations and run-up, tsunami-Their Science and Engineering, edited by Iida and Iwasaki, Terra Science Publishing Company, Tokyo, pp. 439-451.
 - Imamura, F., Shuto, N. and Goto, C. (1988) : Numerical simulation of the transoceanic propagation of tsunamis, Proc. of 6th Congress Asian and Pacific Regional, IAHR, Japan, pp. 975-987.
 - Ishikawa, Y. (1994) : Remaining earthquake vacant region, Monthly Ocean, Vol. 7, pp. 102-104.
 - Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005a) : Hindcasting of Storm Surge at Southeast Coast by Typhoon Maemi, 한국해양공학회지, 제19권, 제2호, pp 12-18.
 - Kawai, H. (2003) : Storm Surge, Textbook for Port and Coastal Engineers, PARI, pp 1-48.
 - Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005b) : Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314(Maemi), Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, pp 446-453.
 - Kawai, H., Tomita, T., Hiraishi, T., Kim, D.S. and Kang, Y.K. (2004) : Hindcasting and Field Investigation of Storm Surge in Masan Bay, Korea by Typhoon 0314, Annual Journal of Coastal Engineering, JSCE, Vol. 51, pp 1361-1365.
 - Sato, S. (1995) : Handbook of earthquake fault parameters, Kashima Press.
 - Takayama, T., Amamori, H., Kim, H.M., Mase, H., Kang, Y.K. and Kawai, H. (2004) : Disasters along Busan Coast Due to Storm Surge and Waves Generated by Typhoon 0314, Annual Journal of Coastal Engineering, JSCE, Vol. 51, pp 1371-1375.
 - Yasuda, Y., Hiraishi, T., Kawai, H. and Nagase, K. (2004a) : Numerical Analysis of Storm Surge Inundation in Masan, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 75-79.
 - Yasuda, Y., Hiraishi, T., Kawai, H. and Nagase, K. (2004b) : Field Survey of Storm Surge Disaster in Masan City in the Southern Part of Korea and Verification Simulation on Underground Inundation, Annual Journal of Coastal Engineering, JSCE, Vol. 51, pp 1366-1370.
 - Yoon, S.B. and Liu, P.L.-F. (1992) : Numerical simulation of a distant small-scale tsunami, Recent Advances in Marine Science and Technology, PACON92, Pacific Congress on Marine Science & Technology, Kona, Hawaii, pp. 67-78.
 - 羽鳥徳太郎 (1984) : 日本の歴史地震津波, 月刊海洋, No. 9, pp. 538-545.
 - 松澤 (1996) : 最新の秋田・山形県域中の地震活動について, 東北地域災害科学研究, No. 32, pp. 293-303.

2. 폭풍해일의 수치시물레이션

2.1 서언

태양과 달의 인력에 의해 해수면이 규칙적으로 변동하는 성분을 천문조라고 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 조위 변화는 달이나 태양 등의 천체운동과는 직접적인 관계는 없고, 지구상의 여러 기상적인 요인에 의해 발생하기 때문에 기상조라고 불린다. 그리고 이 기상조의 진폭(천문조로부터 높이)을 폭풍해일고 혹은 조위편차라고 부른다.

폭풍해일은 주로 태풍의 중심부근에서는 그 주변과 비교하여 기압이 낮고 해면을 누르는 힘이 약하기 때문에 해면이 높아지게 되는 저기압에 의한 수위상승(pressure setup)과 바람이 바다에서 육지로 향하여 불면 해면에 발생하는 마찰력에 의해 해수는 육지측으로 운반되고 이것이 축적되어 해면이 높아지게 되는 바람에 의한 수위상승(wind setup) 및 고파랑의 쇄파에 의한 수위상승(wave setup)의 3성분으로 구성된다.

2.2 기초방정식

본 연구의 폭풍해일고 추산에 적용되는 기초방정식은 다음의 연속방정식(2.1)과 운동방정식(2.2)~(2.4)로 구성된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (24)$$

여기서, x, y 는 수평방향으로, z 는 연직방향으로 각각 취한 좌표계이고, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속 성분, $\frac{d}{dt}$ 는 시간 t 에 대한 전미분이다. 그리고 f 는 Coriolis 계수, ρ_w 는 해수의 밀도, p 는 압력, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직외동점성계수, g 는 중력가속도, η 는 폭풍해일에 의한 수면변위이다.

식(21)을 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음의 식(25)를 얻는다.

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz = - (w_{z=\eta} - w_{z=-h}) \quad (25)$$

여기서, h 는 수심이다.

또한, U, V 는 해저에서 해면까지의 평균유속으로 다음의 식과 같이 정의될 수 있다.

$$(h + \eta)U = \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (26)$$

$$(h + \eta)V = \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (27)$$

식(21)의 우변에 Leibnitz 적분공식을 적용하여 다음의 식(28)과 (29)를 얻는다.

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (28)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (29)$$

식(25)의 우변에 있는 연직방향의 유속 $w_{z=\eta}$ 와 $w_{z=-h}$ 는 각각 해면와 해저에서 수면경계조건 및 불투과경계 조건으로부터 다음과 같이 된다.

$$w_{z=\eta} = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (210)$$

$$w_{z=-h} = -\frac{dh}{dt} = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (211)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (212)$$

식(26)~(212)를 사용하면 식(25)는 z 방향으로 적분된 다음의 연속식(213)으로 귀착된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{(h + \eta)U\}}{\partial x} + \frac{\partial \{(h + \eta)V\}}{\partial y} = 0 \quad (213)$$

유속 u, v 를 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분한 유량 M, N 은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{U}(h + \eta) = \bar{U}D \quad (2.14)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{V}(h + \eta) = \bar{V}D \quad (2.15)$$

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

식(2.13)에 유량 M, N 에 관한 식(2.14)와 (2.15)를 적용하면 다음의 연속식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.16)$$

식(2.4)를 z 방향에 대해서 적분하면 다음의 식(2.17)이 얻어진다.

$$p = \rho_w g (\eta - z) + p_0 \quad (2.17)$$

여기서, p_0 는 수면에서의 기압이다.

식(2.17)을 식(2.2) 및 (2.3)에 대입하여 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음과 같은 운동방정식 (2.18)과 (2.19)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (2.19)$$

식(2.18)과 (2.19)에서 연직외동점성계수 A_v 를 포함하는 항에 전단응력을 사용한 다음의 관계를 적용하였다.

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=\eta} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2.20)$$

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{s=\eta} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{s=-h} \right\} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \quad (2.21)$$

여기서, τ_{sx} 와 τ_{sy} 및 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해면 및 해저에서 x, y 방향으로 각각의 전단력이며, 다음의 식(2.22)와 (2.23) 및 (2.24)와 (2.25)로 주어진다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D U_x \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.22)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D U_y \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.23)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.24)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.25)$$

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 적용하였다.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024U_{10}) / 10^3 & (U_{10} < 8m/s) \\ (0.581 + 0.063U_{10}) / 10^3 & (U_{10} \geq 8m/s) \end{cases} \quad (2.26)$$

여기서, U_{10} 은 해면상 10m에서 풍속이다.

이상과 같은 폭풍해일고의 추정이론으로부터 수치시뮬레이션을 실시하기 위해서는 연속식(2.16)과 비선형장파방정식(2.18) 및 (2.19)를 동시에 수치적으로 풀어야 하며, 수치기법으로 다음의 절에서 기술하는 유한차분법을 적용하였다.



2.3 유한차분근사

2.3.1 유한차분근사

본 연구에서 사용하는 지진해일의 수치해석모델에서는 연속방정식 및 운동방정식을 유한차분법에 기초하여 이산화한다. 이 때, 공간 및 시간항에는 각각 다음의 Fig. 2.1에 나타내는 바와 같은 staggered mesh와 leap-frog법에 의한 스킴을 적용한다. Leap-frog법의 차분스킴에서는 수위와 수평유량의 계산점을 각각 다른 위치에 정의하며, 그림에서 직각좌표 x, y 에 대응하는 이산화량을 아래첨자로, 시간에는 윗첨자로 각각 나타낸다.

연속식(2.16)에서 각 항의 차분식은 중앙차분으로부터 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k] \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}] \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial N}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} [N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}] \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{1}{\Delta t} [\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k] + \frac{1}{\Delta x} [M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}] + \frac{1}{\Delta y} [N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}] \quad (2.30)$$

운동방정식의 차분화에서는 표시를 간단히 하기 위하여 비선형항을 분리하여 나타내며, x, y 방향의 선형항은 각각 다음의 식과 같이 표현된다.

$$M_{i+1/2,j}^{k+1/2} = M_{i+1/2,j}^{k-1/2} - gD_{i+1/2,j}^k \frac{\Delta t}{\Delta x} [\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k] \quad (2.31)$$

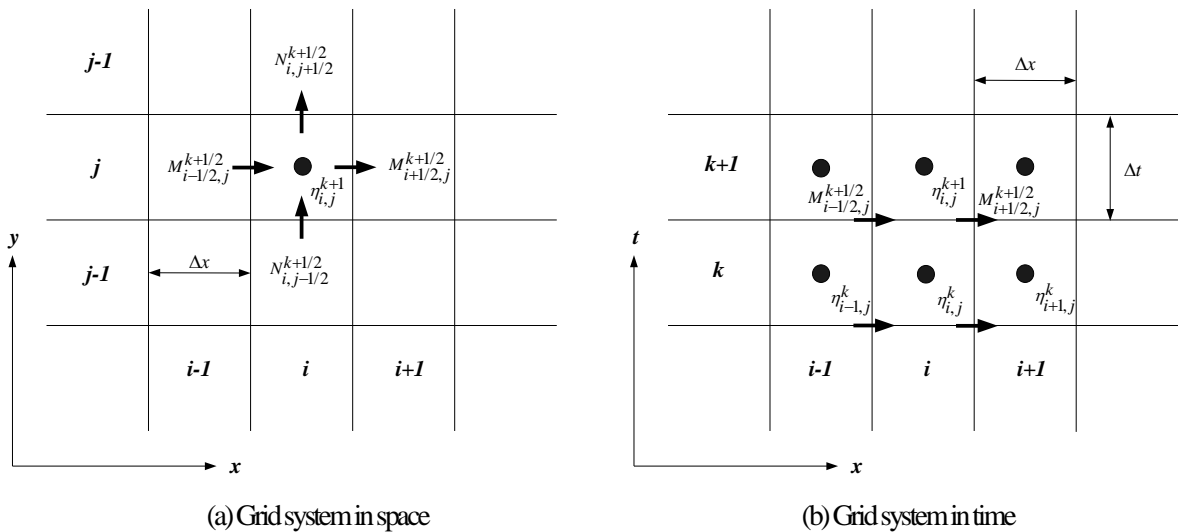


Fig. 2.1 Sketch of the arrangement of variables and grid points for finite difference method in this study

$$N_{i,j+1/2}^{k+1/2} = N_{i,j+1/2}^{k-1/2} - gD_{i,j+1/2}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} [\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k] \quad (2.32)$$

비선형항에 풍상차분을 적용하면 다음의 식과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\{M_{i+3/2,j}^{k-1/2}\}^2}{D_{i+3/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{21} \frac{\{M_{i-1/2,j}^{k-1/2}\}^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{31} \frac{\{M_{i-1/2,j}^{k-1/2}\}^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} \right] \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[v_{11} \frac{M_{i+1/2,j+1}^{k-1/2} N_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j+1}^{k-1/2}} + v_{21} \frac{M_{i+1/2,j}^{k-1/2} N_{i+1/2,j}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + v_{31} \frac{M_{i+1/2,j-1}^{k-1/2} N_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}}{D_{i+1/2,j-1}^{k-1/2}} \right] \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{M_{i+1,j+1/2}^{k-1/2} N_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i+1,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{22} \frac{M_{i,j+1/2}^{k-1/2} N_{i,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + \lambda_{32} \frac{M_{i-1,j+1/2}^{k-1/2} N_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}}{D_{i-1,j+1/2}^{k-1/2}} \right] \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[v_{12} \frac{\{N_{i,j+3/2}^{k-1/2}\}^2}{D_{i,j+3/2}^{k-1/2}} + v_{22} \frac{\{N_{i,j+1/2}^{k-1/2}\}^2}{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}} + v_{32} \frac{\{N_{i,j-1/2}^{k-1/2}\}^2}{D_{i,j-1/2}^{k-1/2}} \right] \quad (2.36)$$

여기서, 식(2.33)~(2.36)에 주어진 계수 $\lambda_i, v_i (i=1,2,3)$ 는 유량의 방향에 의해 다음의 값이 취해진다.

$$\begin{aligned} M_{i+1/2,j}^{k-1/2} &\geq 0; \lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = -1 \\ &< 0; \lambda_1 = 0, \lambda_2 = -1, \lambda_3 = 0 \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} N_{i+1/2,j}^{k-1/2} &\geq 0; v_1 = 0, v_2 = 1, v_3 = -1 \\ &< 0; v_1 = 1, v_2 = -1, v_3 = 0 \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} M_{i,j+1/2}^{k-1/2} &\geq 0; \lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = -1 \\ &< 0; \lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1, \lambda_3 = 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} N_{i,j+1/2}^{k-1/2} &\geq 0; v_1 = 0, v_2 = 1, v_3 = -1 \\ &< 0; v_1 = 1, v_2 = -1, v_3 = 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

운동방정식에서 해저전단력항은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn_n^2}{\{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}\}^{7/3}} \times \frac{1}{2} \times [M_{i+1/2,j}^{k+1/2} + M_{i+1/2,j}^{k-1/2}] \sqrt{\{M_{i+1/2,j}^{k-1/2}\}^2 + \{N_{i+1/2,j}^{k-1/2}\}^2} \quad (2.41)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{gn_n^2}{\{D_{i,j+1/2}^{k-1/2}\}^{7/3}} \times \frac{1}{2} \times [N_{i,j+1/2}^{k+1/2} + N_{i,j+1/2}^{k-1/2}] \sqrt{\{M_{i,j+1/2}^{k-1/2}\}^2 + \{N_{i,j+1/2}^{k-1/2}\}^2} \quad (2.42)$$

2.3.2 외해경계조건

계산영역의 외해경계에서 방사되는 지진해일에 대해서는 진행성장파의 특성곡선에 근거한 방법에 의해 지진해일을 자유투과시킨다. 외해경계조건의 설정방법은 다음과 같다.

(1) 입사파만을 고려하는 경계경계

지진해일수치계산을 외해에서 지진해일의 전파계산과 상세한 지형근사가 수행되는 내만에서 지진해일계산으로 분리하여 실시하는 경우에 외해에서 지진해일 전파계산의 입사파성분이 내만에서 지진해일계산의 외해경계조건으로서 주어지고, 만내로부터의 반사파를 자유투과시키는 경계처리를 실시한다.

외해경계에서 파를 강제입력하는 경우 계산영역내로부터의 반사파가 외해경계를 자유투과할 수 없기 때문에 강제입력한 파형과는 다른 별도의 모드진동이 새롭게 발생한다. 이 반사파를 외해로 자유투과시키기 위해서는 특성곡선법을 적용한다.

일정수심의 해역에서 외해경계로부터 sin 형으로 표현되는 파가 입사하는 경우를 가정하고, 해역을 전파하는 파를 선형장파로 근사할 수 있는 것으로 가정한다.

선형장파는 1차원전파의 경우에는 다음의 식과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.44)$$

식(2.43)과 (2.44)을 특성량 $\sqrt{\frac{g}{h}}\eta$ 을 이용해 변형하면 다음과 같이 된다.

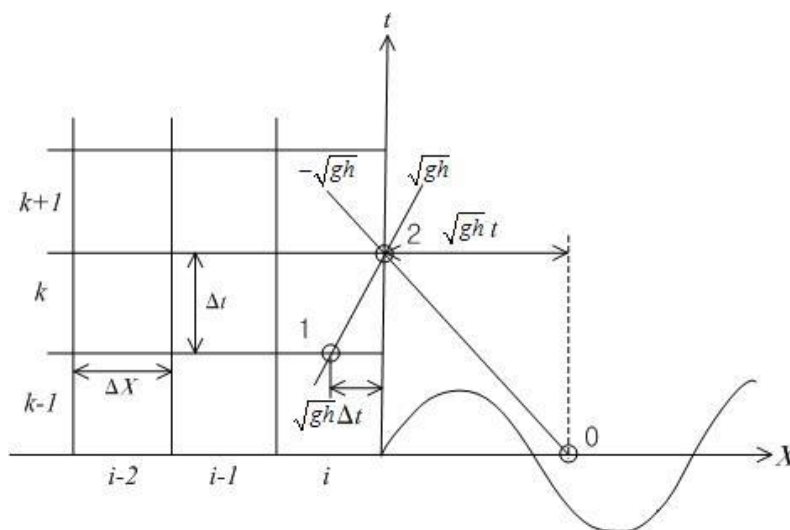


Fig. 2.2 Conceptual diagram of open boundary treatment using method of characteristics

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g}{h}} \eta \right) = 0 \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sqrt{\frac{g}{h}} \eta \right) + \sqrt{gh} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.46)$$

식(2.45), (2.46)의 합과 차를 취하면 다음의 식과 같이 구해진다.

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} \pm \sqrt{gh} \frac{\partial}{\partial x} \right\} \left(u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \right) = 0 \quad (2.47)$$

특성곡선법에 근거하면 식(2.47)의 물리적인 의미는 $\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{gh}$ 라고 하는 특성 곡선상에서, $u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta$ 라고 하는 Riemann 특성량을 갖는다는 것을 나타낸다.

이 관계로부터 다음이 얻어진다.

$$\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{gh} \quad \text{상에서} \quad u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta = \text{const.} \quad (2.48)$$

Fig. 2.2에 나타내는 바와 같이 $x = x_0$ 를 경계점으로 두고, x 축의 (-)방향으로 진행하며, sin 파가 입사하는 것으로 한다. 특성량 $u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta$ 의 관계는 (+)기울기의 특성선을 따라 식(2.49)이 성립한다.

$$u_2 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_2 = u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1 \quad (2.49)$$

(-)기울기의 특성선을 따라 식(2.50)이 성립한다.

$$u_2 - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_2 = u_0 - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_0 \quad (2.50)$$

(-)특성선을 따른 특성량은 외해로부터의 진행파를 나타내는 것이기 때문에 u_0, η_0 의 사이에서는 다음의 관계가 성립된다.

$$u_0 = -\sqrt{\frac{g}{h}} \eta_0 \quad (2.51)$$

따라서 이의 관계식(2.51)을 이용하면, 식(2.50)은 다음과 같이 된다.

$$u_2 - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_2 = 2u_0 \quad (2.52)$$

(+)특성선을 따른 관계식(2.49), (2.51)로부터 η_2 를 소거하면 다음의 관계가 유도된다.

$$u_2 = u_0 + \frac{1}{2} \left(u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1 \right) \quad (2.53)$$

여기서, 입사파를 (-)방향으로 진행하는 sin 파로서 다음의 식으로 둔다.

$$\eta_0 = a \sin(k_0(x - x_0)) \quad (2.54)$$

따라서 식(2.51)에 식(2.54)을 대입하여 다음의 식을 얻는다.

$$u_0 = -a \sqrt{\frac{g}{h}} \sin(k_0(x - x_0)) = a \sqrt{\frac{g}{h}} \sin(k_0 \sqrt{gh} \cdot t) \quad (2.55)$$

식(2.55)를 경계위치에 있어서 유속 u_2 에 관한 식(4.50)에 대입하면 유량 u_2 는 다음과 같이 된다.

$$u_2 = -a \sqrt{\frac{g}{h}} \sin(k_0 \sqrt{gh} \cdot t) + \frac{1}{2} \left(u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1 \right) \quad (2.56)$$

식(2.56)을 지진해일수치계산으로 사용하는 유량 M 으로 나타내면 다음의 식으로 주어진다.

$$M_{i+1/2,j}^{k+1/2} = -\sqrt{gh} \sin \left(k_0 \sqrt{gh} \left(k + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right) + \frac{1}{2} \left(M_1 + \sqrt{gh} \eta_1 \right) \quad (2.57)$$

여기서, 식(2.57)의 M_1, η_1 은 격자내의 정의점이 아니기 때문에 내삽법에 의해 다음의 식과 같이 구해진다.

$$M_1 = \frac{1}{\Delta x} \left[\sqrt{gh} \cdot \Delta t \cdot M_{i-1/2,j}^{k-1/2} + \left(\Delta x - \sqrt{gh} \cdot \Delta t \right) M_{i-1/2,j}^{k+1/2} \right] \quad (2.58)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{gh} \cdot \Delta t - \frac{\Delta x}{2} \right) \left(\eta_{i-1,j}^k + \eta_{i-1,j}^{k-1} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2} \Delta x - \sqrt{gh} \cdot \Delta t \right) \left(\eta_{i,j}^k + \eta_{i,j}^{k-1} \right) \right] \quad (2.59)$$

이상은 1차원전파의 경우이기 때문에 2차원전파의 경우로 확장한다. 2차원 파의 경우는 특성관계가 특성곡면 상에서 성립하는 것이 일반적이지만, 여기에서는 1차원전파의 결과를 확장하여 이용하는 것으로 한다. 1차원전파와 크게 다른 점은 파의 진행방향에 관한 것이다. 일반적으로 파의 진행방향은 일정하기 때문에 (-)의 특성선 방향은 일정인 방향으로 된다. 그러나 계산영역내로부터의 반사파를 나타내는 (+)의 특성선은 입사방향과 다른 경우가 있다. 따라서 (+), (-)양쪽의 특성선방향을 고려하며 1차원전파와 같은 방법으로 계산을 수행하면 처리가 가능하다. 지진해일의 계산에서는 반사파의 특성선을 $M_{i,j}^{k-1/2}, N_i^{k-1/2}$ 의 합성방향으로부터 결정한다.

(2) 자유투과경계

자유투과경계는 계산영역내로부터의 반사파를 경계로부터 자유롭게 투과시키는 조건이다. 이 경우에는 전술한 입사파를 주는 특성곡선법을 사용한 관계의 반사파 성분만을 고려하면 된다. Fig. 22에서 경계위치 $x = x_0$ 에서 반사파를 자유투과시키는 방법을 검토한다.

먼저 경계조건식에 있어서 다음을 고려한다.

$$u_0 = \eta_0 = 0, \quad u_1 + \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_1 \quad (2.60)$$

경계조건은 다음의 식(2.61)과 같이 간단히 표현된다.

$$u_2 = u_1 \quad \text{또는} \quad M_{i+1/2j}^{k+1/2} = M_1 \quad (2.61)$$

입사파경계와 동일하게 2차원전파에 관해서는 유향으로부터 파의 전파방향을 계산하여 경계조건을 주는 것이 필요하다.

2.3.3 이동경계조건

정수면상에 고정격자를 두는 연속적분형태의 천수방정식으로부터 육상으로의 처오름을 해석하기 위해서는 처오름에 따른 해석영역의 변동으로 인한 이동경계조건이 요구된다. 본 연구에서는 이동경계조건으로 Fig. 23에 나타내는 바와 같이 파선단부에서의 지형을 계단상으로 고려하고, 육측격자점의 지반고보다 해측격자점의 수위가 높은 경우에 그 차를 실수심 D 로 하여 유량 flux 를 계산하는 방법을 적용한다(Iwasaki and Mano, 1979). 여기서, $D > 10^{-5}$ m 를 계산최소수심으로 하며, 이 값 이상의 격자점에 대해서 계산을 수행한다.

계산영역내의 방파제와 제방 등에서 수위가 그 천단고를 넘는 경우에는 다음의 공식으로부터 단위폭당의 월류량 Q 를 계산한다(Iwasa et al., 1986).

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1}, \quad H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (\text{Perfect-overflow}) \quad (2.62)$$

$$Q = 0.91H_1\sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \quad H_2 > \frac{2}{3}H_1 \quad (\text{Submerged-overflow}) \quad (2.63)$$

여기서, H_1, H_2 는 천단고를 기준으로 방파제 혹은 제방의 전후에서 수심이며, $H_1 > H_2$ 이다. Fig. 24에 완전 월류와 수중월류에 관한 모식도를 나타낸다.

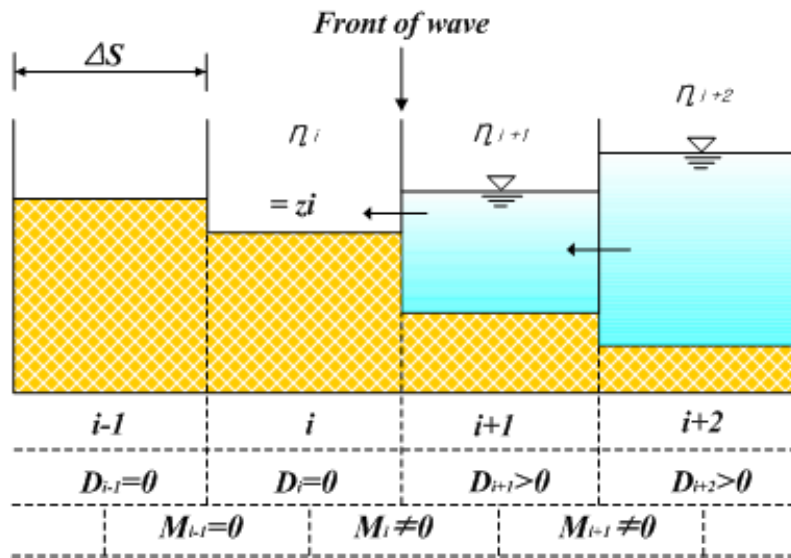


Fig. 2.3 Schematic sketch for the moving boundary treatment

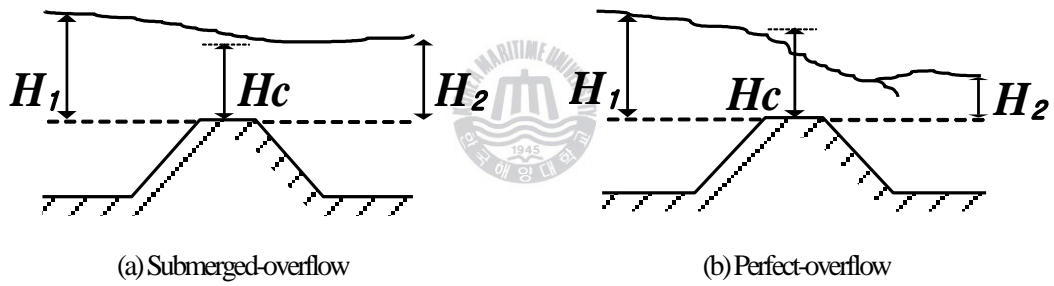


Fig. 2.4 Schematic sketch for the overflow

2.4 해석결과 및 검토

2.4.1 태풍경로 및 조건

Fig. 25~27은 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 남해안에 직접 상륙하지 않고 부산 앞바다를 통과하였으나, 태풍이 남해안에 상륙할 당시의 기압심도(대기압(1013hPa)과 태풍중심기압과의 기압차)가 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(이중섭 등, 1990). 또한 과거최대태풍으로 인식되고 있는 태풍 Maemi는 경남 사천 부근의 해안으로 상륙하여 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 경북 울진해안을 통해 동해상으로 빠져나갔다.

Fig. 28은 전술한 태풍의 이동경로를 공간적으로 비교한 것이다. 또한 폭풍해일고의 산정을 위한 계산의 입력값으로서는 Table 2.1~2.3에 각각 나타내고 있는 시각에 따른 태풍의 위치(경도, 위도), 기압심도, 태풍반경 및 이동속도를 이용하였다.

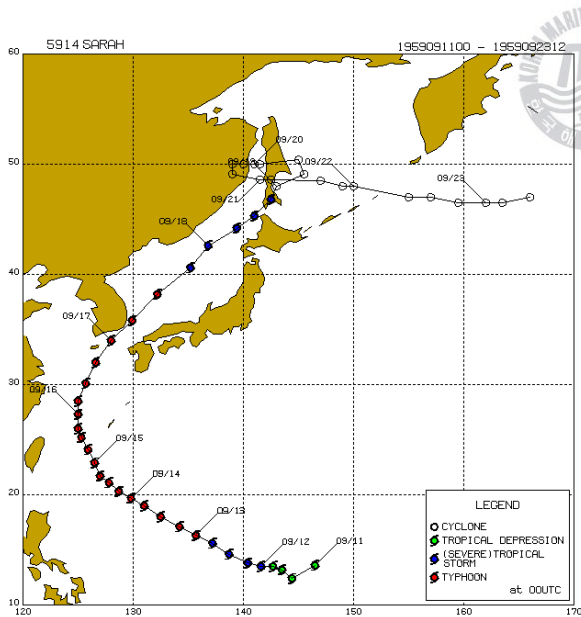


Fig. 2.5 Route of typhoon Sarah

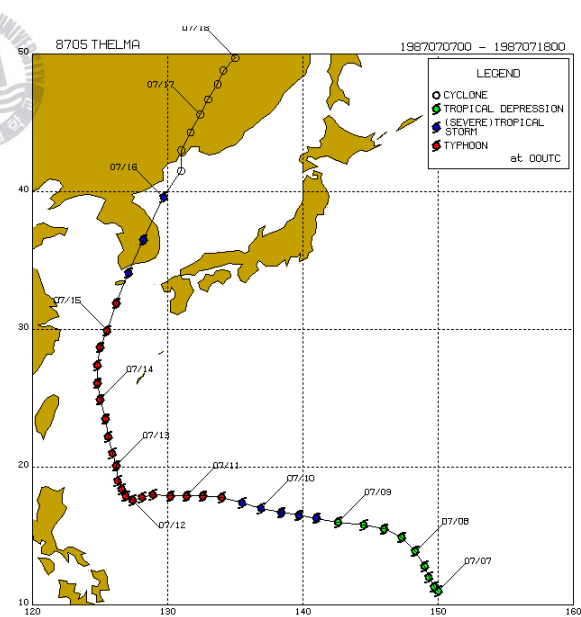


Fig. 2.6 Route of typhoon Thelma

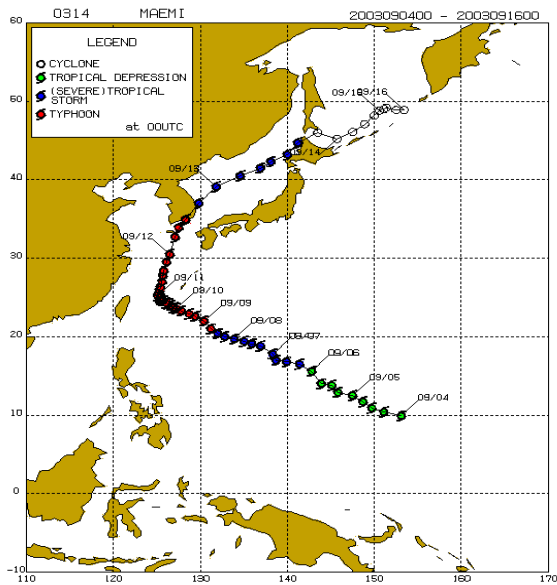


Fig. 2.7 Route of typhoon Maemi

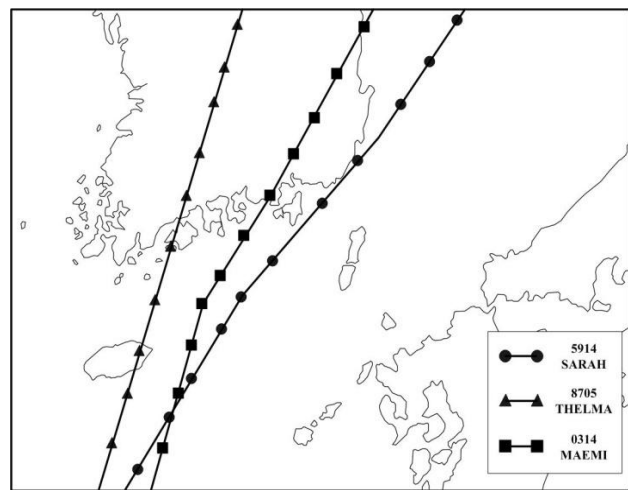


Fig. 2.8 Routes of typhoons used in numerical simulation

Table 2.1 Characteristics of typhoon Sarah

Time	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Air pressure difference (hPa)	Radial distance from the typhoon center (km)	Progression speed (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 2.2 Characteristics of typhoon Thelma

Time	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Air pressure difference (hPa)	Radial distance from the typhoon center (km)	Progression speed (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 2.3 Characteristics of typhoon Maemi

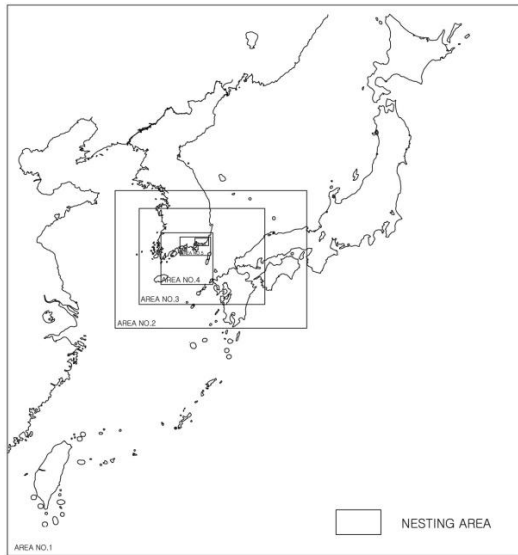
Time	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Air pressure difference (hPa)	Radial distance from the typhoon center (km)	Progression speed (km/h)
0309111500	125.300	25.900	0.0	38.0	10.0
0309111800	125.400	26.300	46.5	38.0	15.0
0309112100	125.600	27.000	83.0	38.0	20.0
0309120300	125.800	28.400	73.0	40.0	25.0
0309120600	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

2.4.2 대상영역

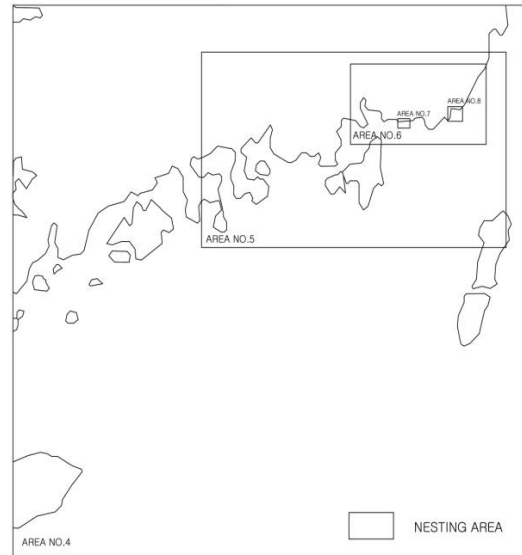
폭풍해일의 시뮬레이션에 있어서 대상영역은 Fig. 2.9(a)에 나타내는 것과 같이 태풍의 주경로가 놓이는 우리나라 및 일본과 태평양을 포함하는 광역으로 설정되었다. 대상으로 하는 관심영역에서 계산정도를 높이기 위하여 계산영역을 제 1영역에서 제 8영역까지 nesting하여 계산을 수행하였다. 계산격자의 구성은 제 1영역에서 32.4km의 격자크기로 시작하여 순차적으로 16.2km, 5.4km, 1.8km, 600m, 200m의 격자간격을 이용하였으며, 관심영역인 제 7, 8영역, 즉 Fig. 2.9(b)에 나타내는 부산연안역에 있어서 최소격자간격은 100m로 설정되었다. Table 2.4에 격자에 대한 상세한 정보를 제시하며, I_{mesh}와 J_{mesh}는 I, J방향으로 격자의 갯수를 나타낸다. Fig. 2.10는 Fig. 2.9에 나타난 각 영역에서 보다 상세한 영역범위와 등수심선을 나타내고 있다.

Table 2.4 Mesh sizes applied to each simulating area

AREA	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	122×84
AREA NO.8	100	60×72

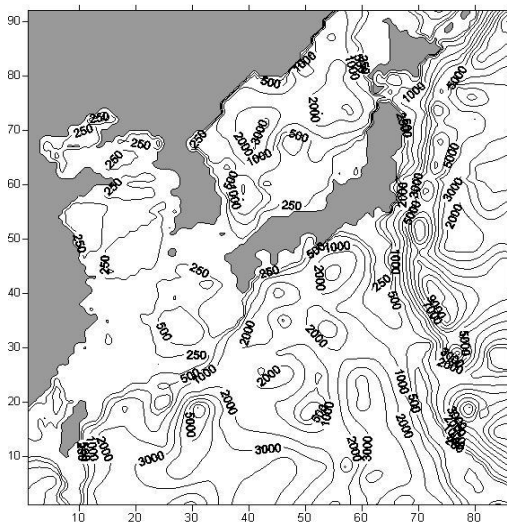


(a) Wide area(NO.1~4)

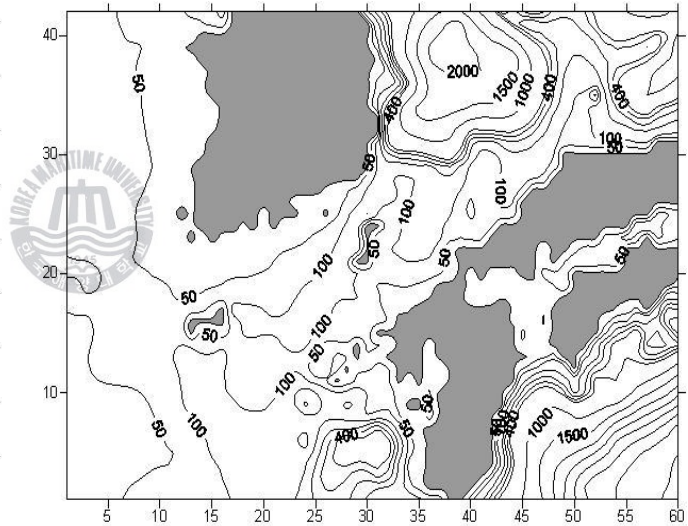


(b) Object area(NO.4-8)

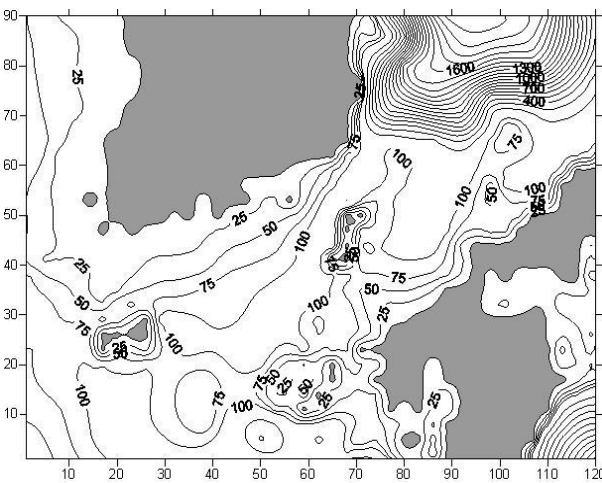
Fig.2.9 Areas of storm surge simulation



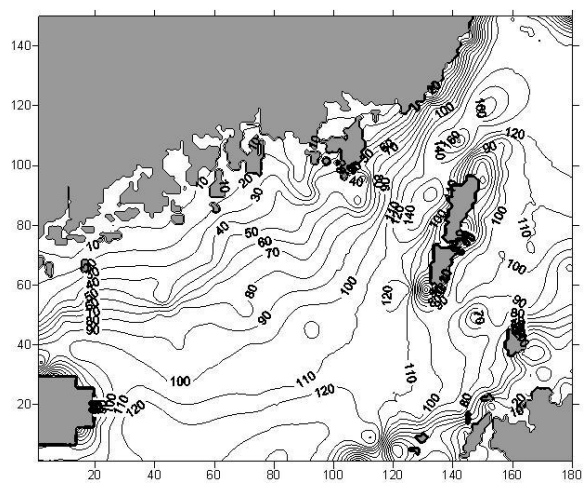
(a) AREA NO.1



(b) AREA NO.2



(c) AREA NO.3



(d) AREA NO.4

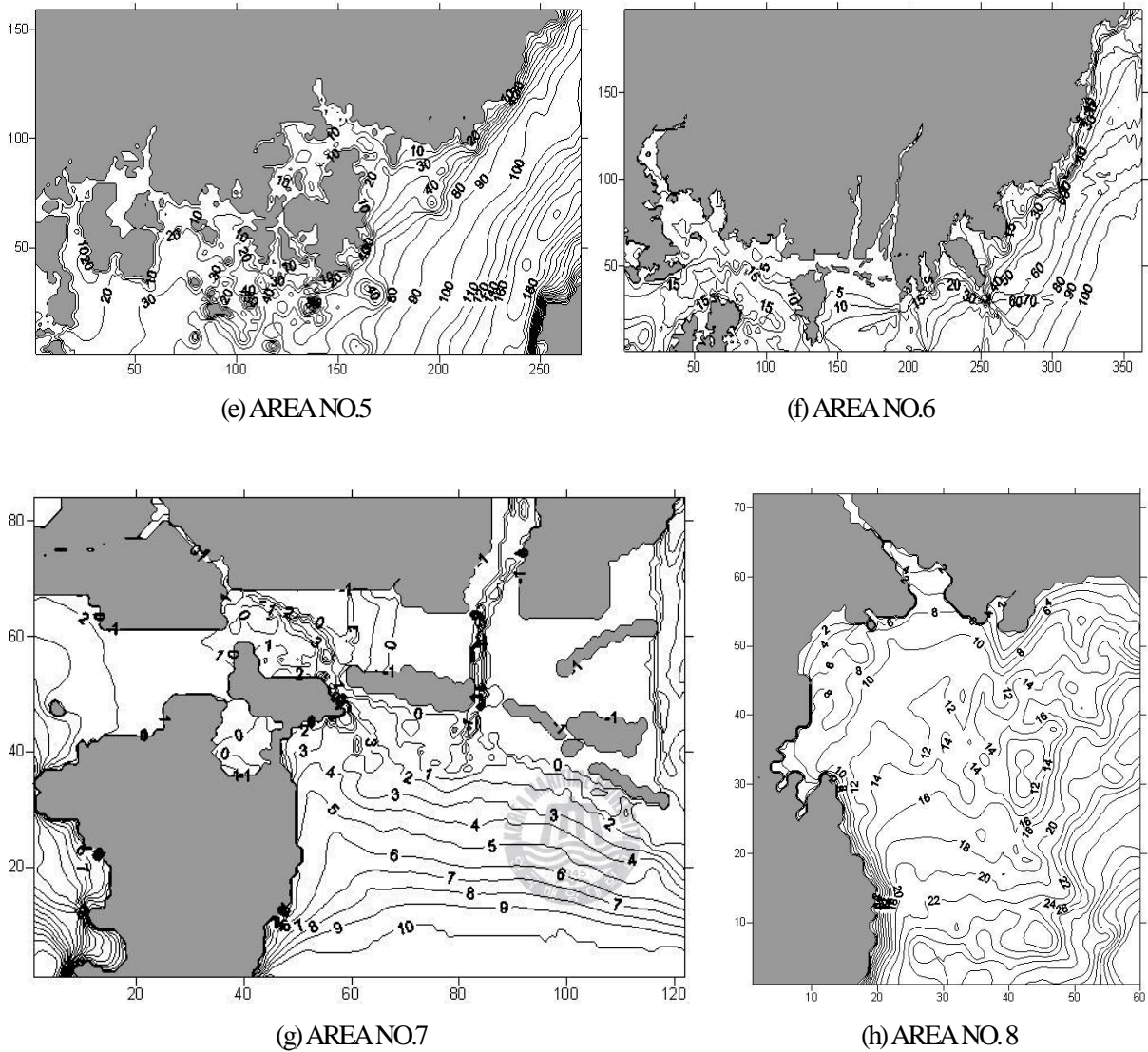


Fig. 2.10 Spatial distributions of water depth

2.4.3 수치계산의 검증

(1) 기압

폭풍해일의 시뮬레이션을 실시함에 있어서 우선 2003년 9월 12일 태풍 Maemi에 대한 수치계산을 수행하여 본 수치시뮬레이션의 타당성을 검토하였다. 폭풍해일의 추산에 이용된 기압분포에는 식(2.64)의 Myers and Malkin(1961)의 분포식을 적용하였고, 최대풍속반경 r_0 는 남해안의 관측기압으로부터 산정되었다.

$$p_r = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (2.64)$$

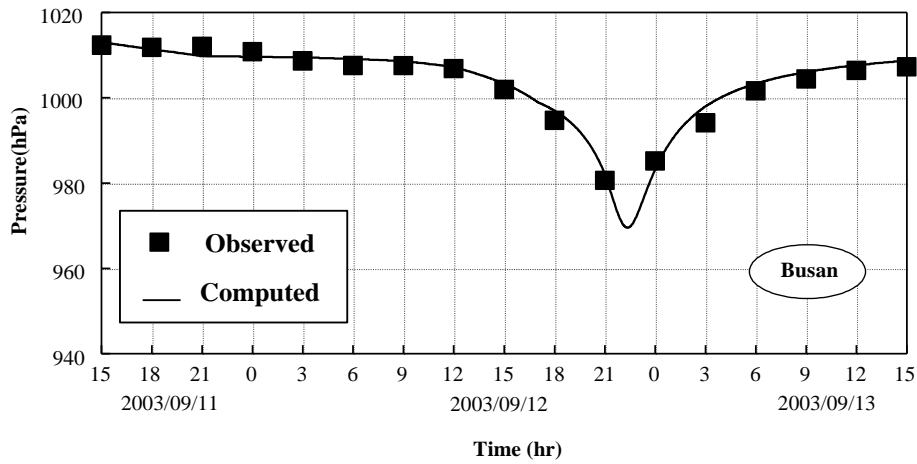
여기서, p_c 는 태풍의 중심기압, Δp 는 기압심도, p_r 은 태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 지점에서의 기압, r_0 는 태풍반경, r 은 등압선의 곡률반경이다.

Fig. 2.11은 태풍 Maemi 통과시에 기상대에서 관측된 기압과 수치시뮬레이션에 의한 기압의 시간변화를 비교한 결과이다. 종축과 횡축은 각각 시각 및 기압변화를 나타내고, 사각형은 관측치를, 실선은 계산치를 각각 나타낸다. 부산의 경우에는 최저기압이 971hPa 정도로, 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. 2.11을 통해 알 수 있는 바와 같이 시각의 변화에 따라 각 지역에서의 기압의 변화는 관측치 및 해석치 모두 전체적으로 잘 일치하는 경향을 알 수 있다.

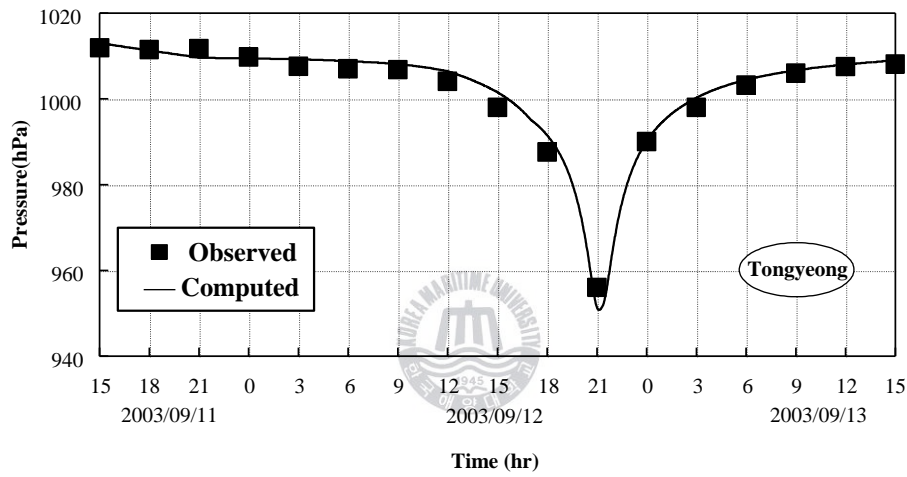
(2) 폭풍해일고

태풍 Maemi의 내습시에 부산연안에 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 부산항검조소와 인근 마산항 및 통영검조소의 기록과 비교·검토하여 수치시뮬레이션에 의한 결과의 타당성을 검증한다.

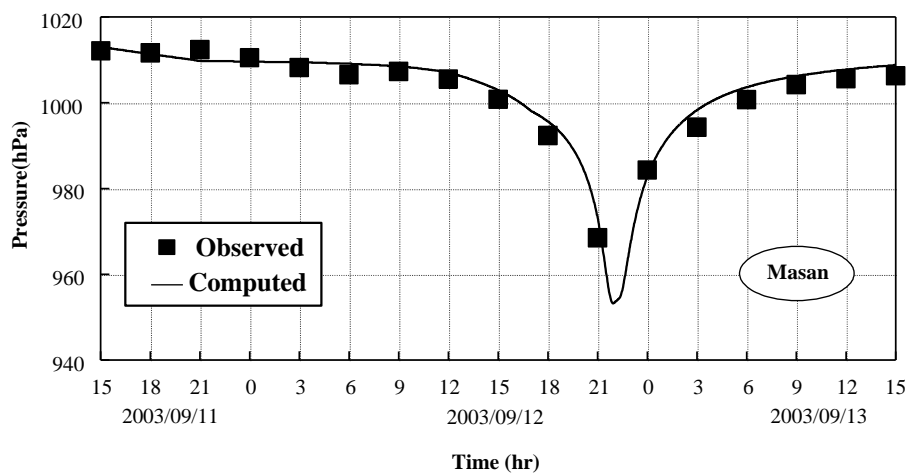
Fig. 2.12은 태풍 Maemi 통과시에 각 검조소에서 관측된 폭풍해일고와 수치시뮬레이션에 의한 폭풍해일고의 시간변화를 비교한 결과이다. 부산항 검조소에서 관측된 해일고와 해석된 해일고를 비교한 결과를 보면 폭풍해일고의 최대치가 발생하는 시각에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 관측치는 0.8m 정도이고 계산치는 1.0m 정도를 나타내어 계산치가 다소 큰 값을 나타내지만 만족스러운 대응성을 갖는 것으로 판단된다. 통영검조소에서 얻어진 관측결과와 계산결과를 비교한 것을 보면 부산항검조소와 마찬가지로 피크치에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 피크치는 관측이 1.65m, 계산이 1.72m로 매우 잘 일치하며, 동시에 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화과정도 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 마산항검조소에서 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. 폭풍해일고의 피크치에서 계산치가 약간 과소평가되고 있지만 계산치와 관측치와의 전반적인 일치성을 살펴보면 계산치는 관측치를 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Busan

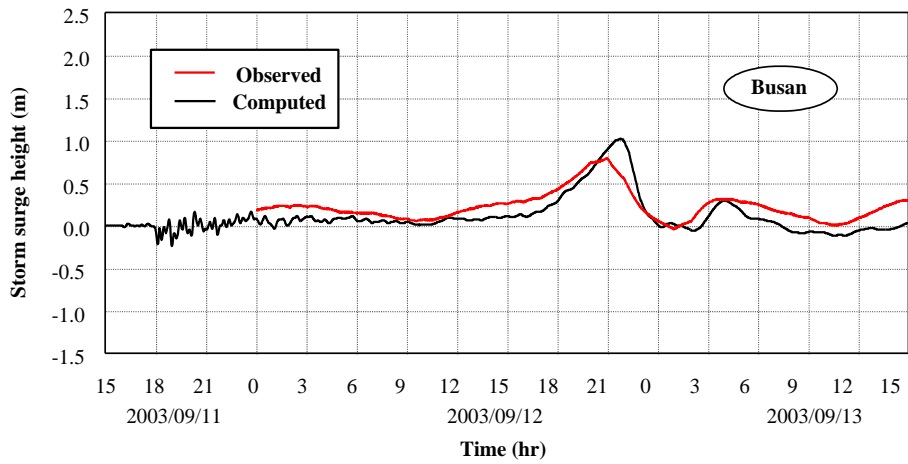


(b) Tongyeong

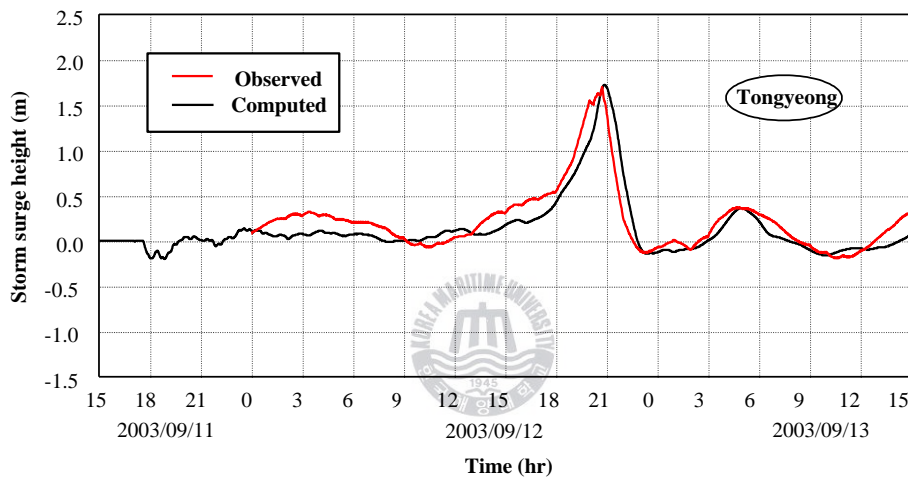


(c) Masan

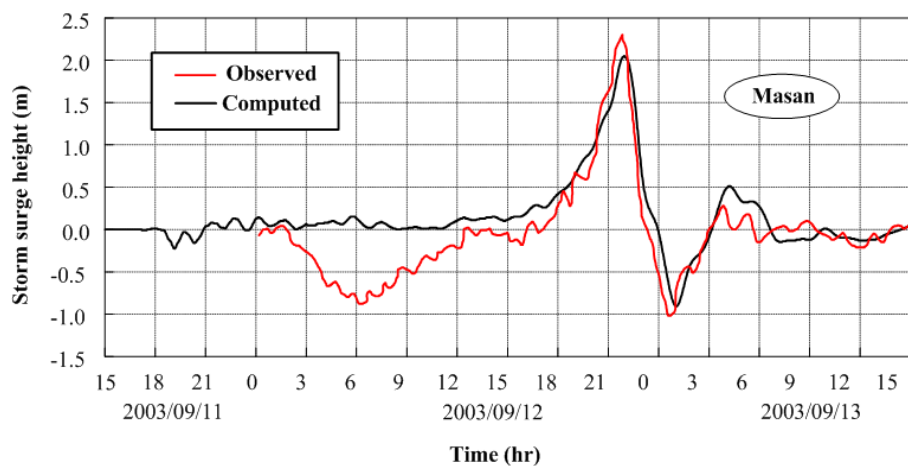
Fig. 2.11 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi



(a) Busan



(b) Tongyeong



(c) Masan

Fig. 2.12 Comparison of storm surge heights between measured and calculated results for typhoon Maemi

2.4.4 기압장과 바람장의 해석

(1) 태풍 Sarah의 기압장과 바람장

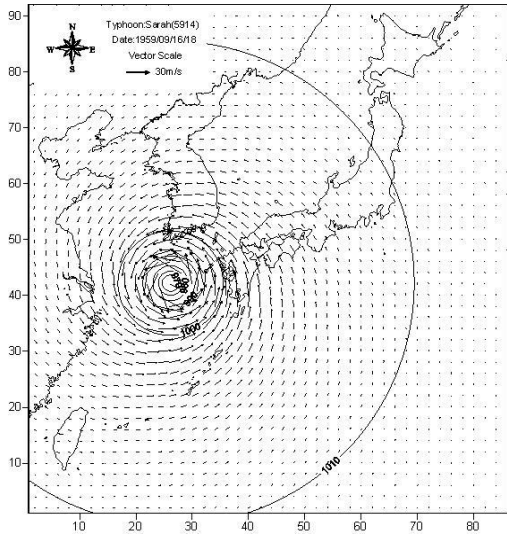
Fig. 2.13은 태풍 Sarah 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 본 연구에서는 태풍의 중심에 원점을 둔 Myers and Malkin(1961)에 의한 결과식으로부터 산정되는 경도풍을 적용하고 있기 때문에 결과로부터도 알 수 있는 바와 같이 반시계방향으로 동심원상의 기압장과 바람장이 형성되어 있다. 해석결과에 의하면 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압이 커지는 것을 알 수 있고, 역으로 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 이의 결과는 전술한 Table 2.1의 조건으로부터도 확인할 수 있다.

(2) 태풍 Thelma의 기압장과 바람장

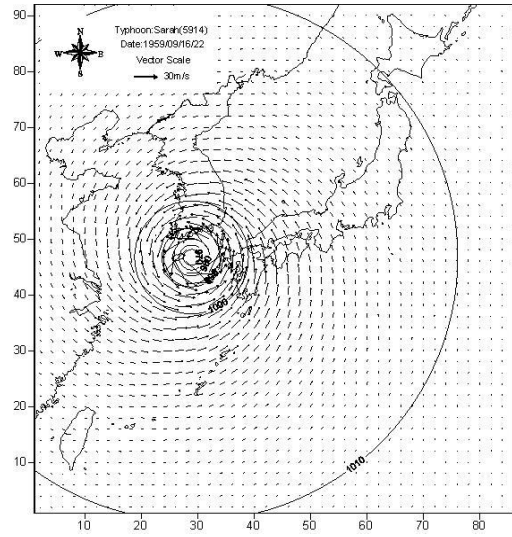
Fig. 2.14는 태풍 Thelma 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압에서 약간의 변동이 있지만, 전반적으로 커지고 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 전술한 Sarah의 결과와 비교하면 중심기압이 크고 풍속은 작다. 이의 결과는 전술한 Table 2.2의 조건으로부터도 확인할 수 있다.

(3) 태풍 Maemi의 기압장과 바람장

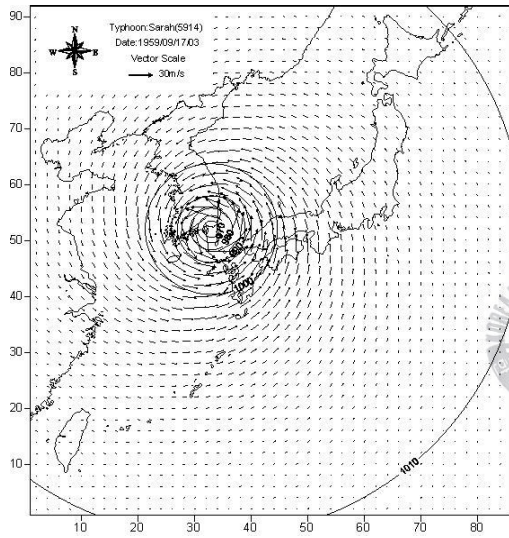
Fig. 2.15는 태풍 Maemi 통과시에 우리나라의 주변에 나타나는 기압장과 바람장을 시각별로 나타낸 결과이다. 태풍이 남해안에 접근할수록 태풍반경과 중심기압에서 약간의 변동이 있지만, 전반적으로 커지고 풍속은 감소하는 결과를 나타낸다. 전술한 Sarah의 결과와 비교하면 태풍반경은 작고 경로가 다르지만 규모로써는 거의 동등한 것으로 판단된다. 이의 결과는 전술한 Table 2.3의 조건으로부터도 확인할 수 있다.



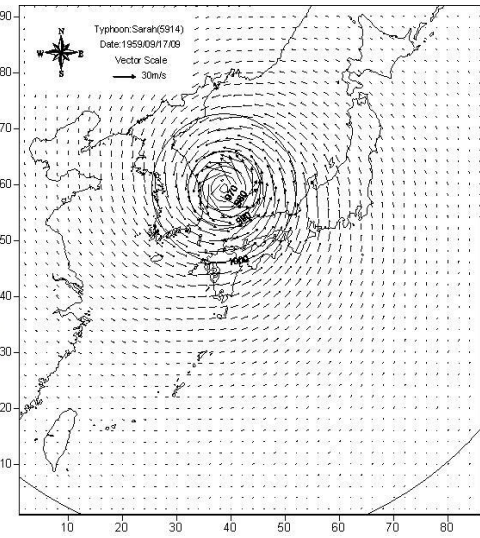
1) 1959.09.16.18



2) 1959.09.16.22

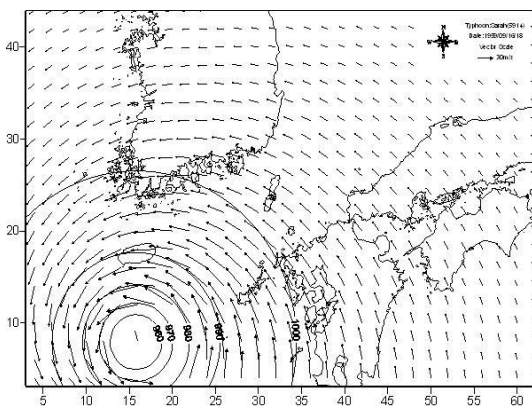


3) 1959.09.17.03

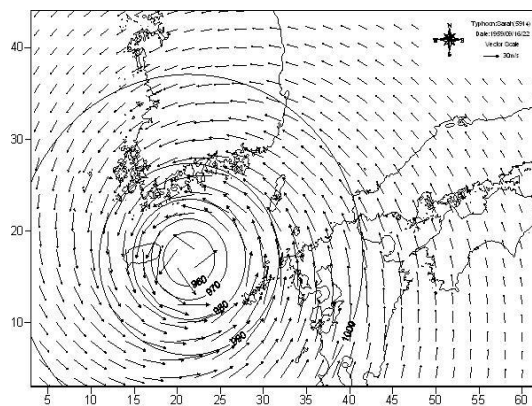


4) 1959.09.17.09

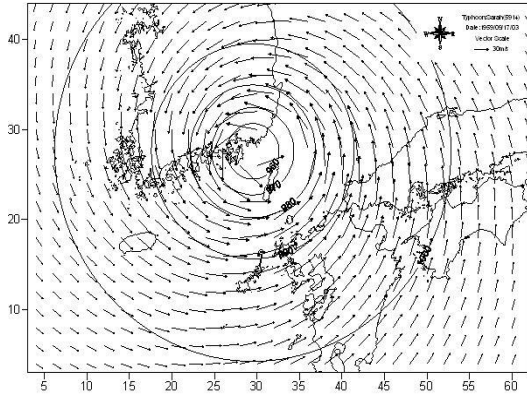
(a) AREA NO.1



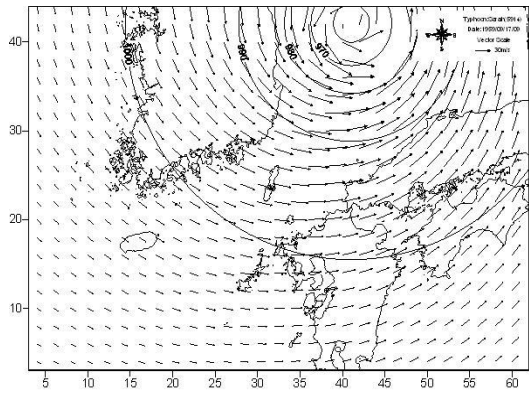
1) 1959.09.16.18



2) 1959.09.16.22



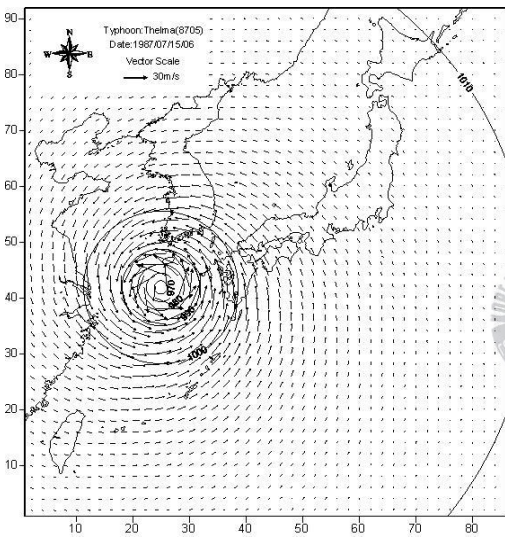
3) 1959.09.17.03



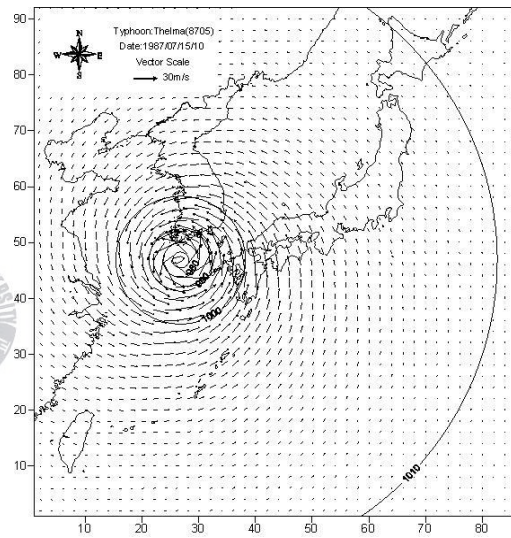
4) 1959.09.17.09

(b) AREA NO.2

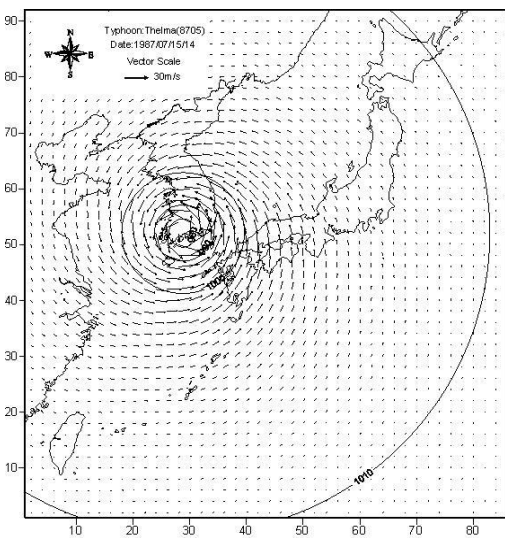
Fig. 2.13 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Sarah



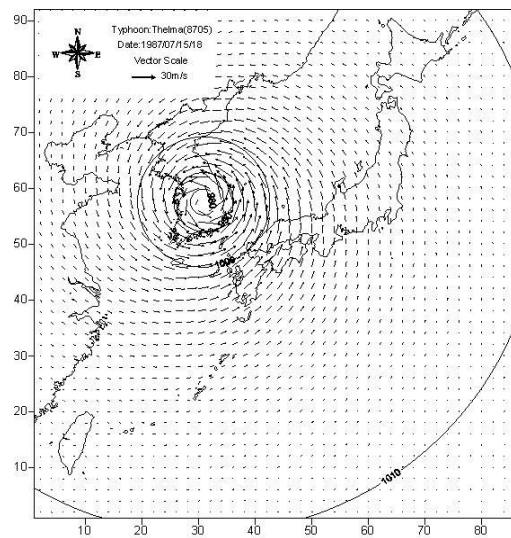
1) 1987.07.15.06



2) 1987.07.15.10

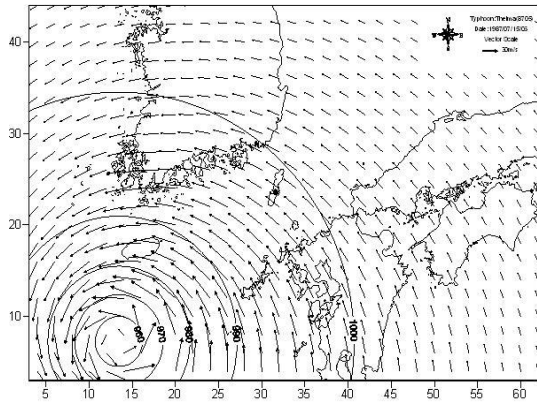


3) 1987.07.15.14

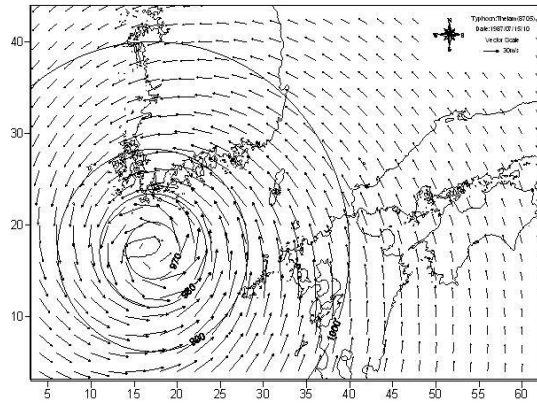


4) 1987.07.15.18

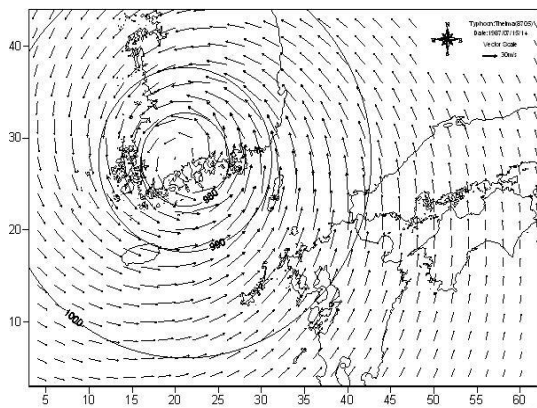
(a) AREA NO.1



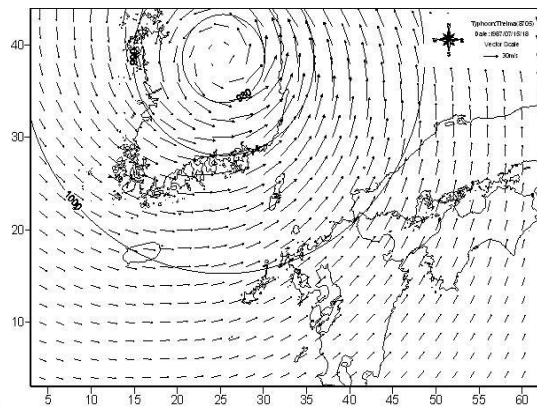
1) 1987.07.15.06



2) 1987.07.15.10



3) 1987.07.15.14

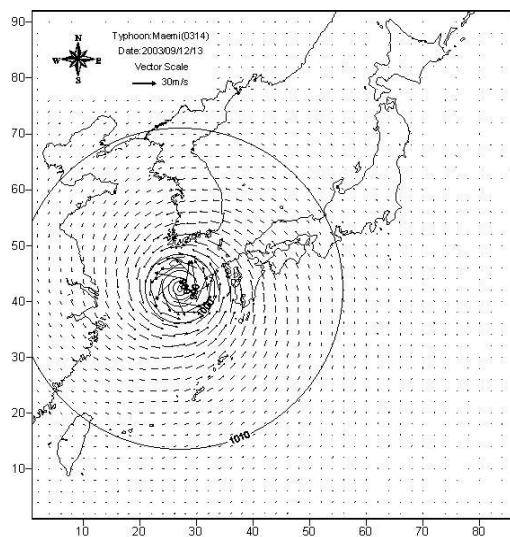


4) 1987.07.15.18

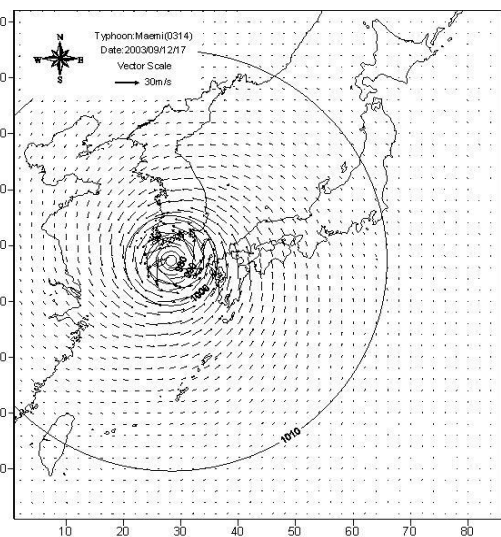


(b) AREA NO.2

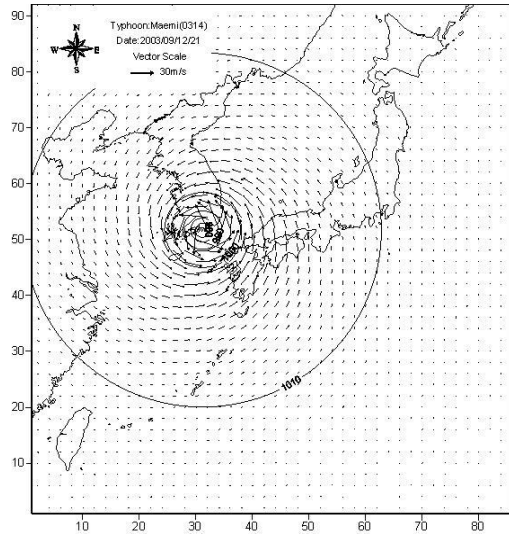
Fig. 2.14 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Thelma



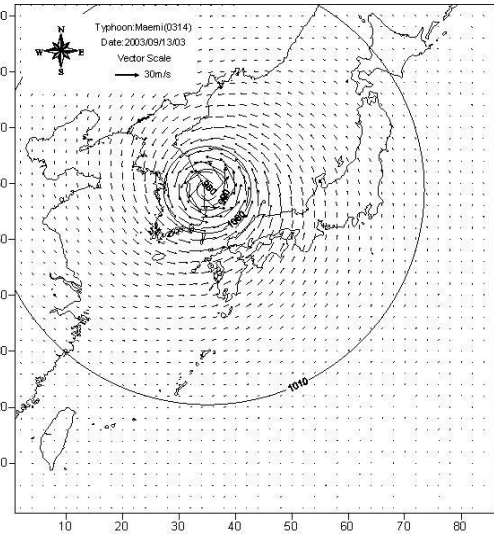
1) 2003.09.12.13



2) 2003.09.12.17

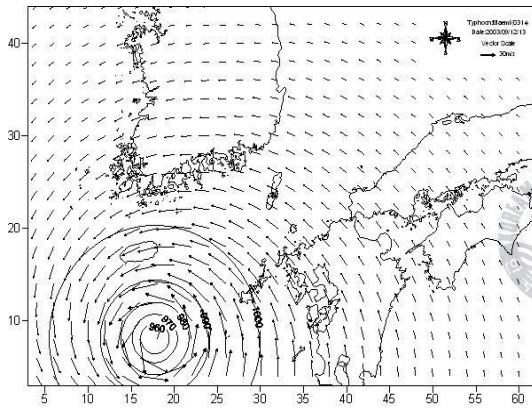


3) 2003.09.12.21

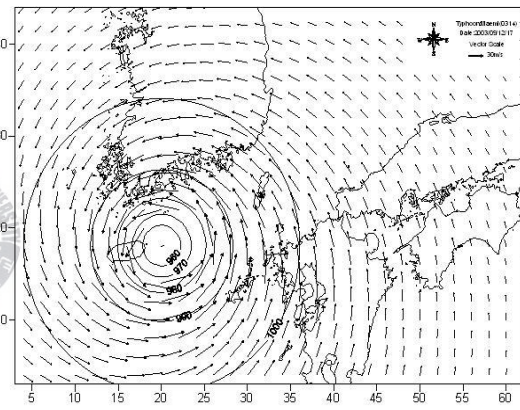


4) 2003.09.13.03

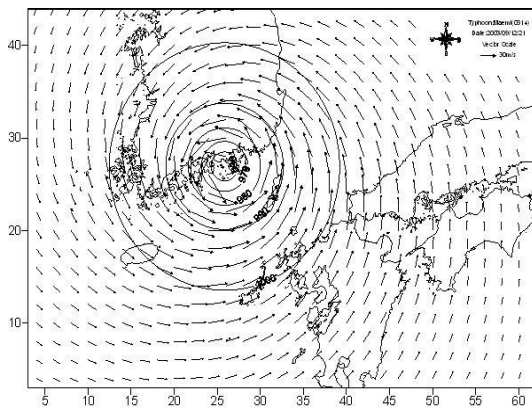
(a) AREA NO.1



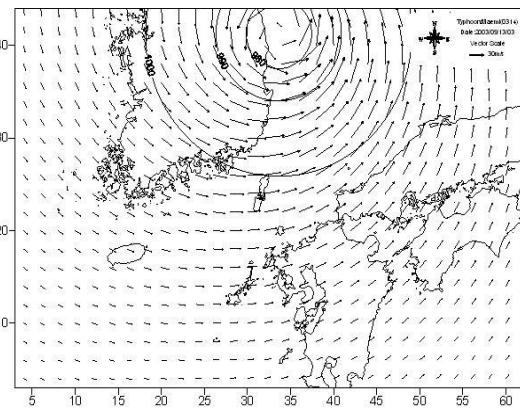
1) 2003.09.12.13



2) 2003.09.12.17



3) 2003.09.12.21



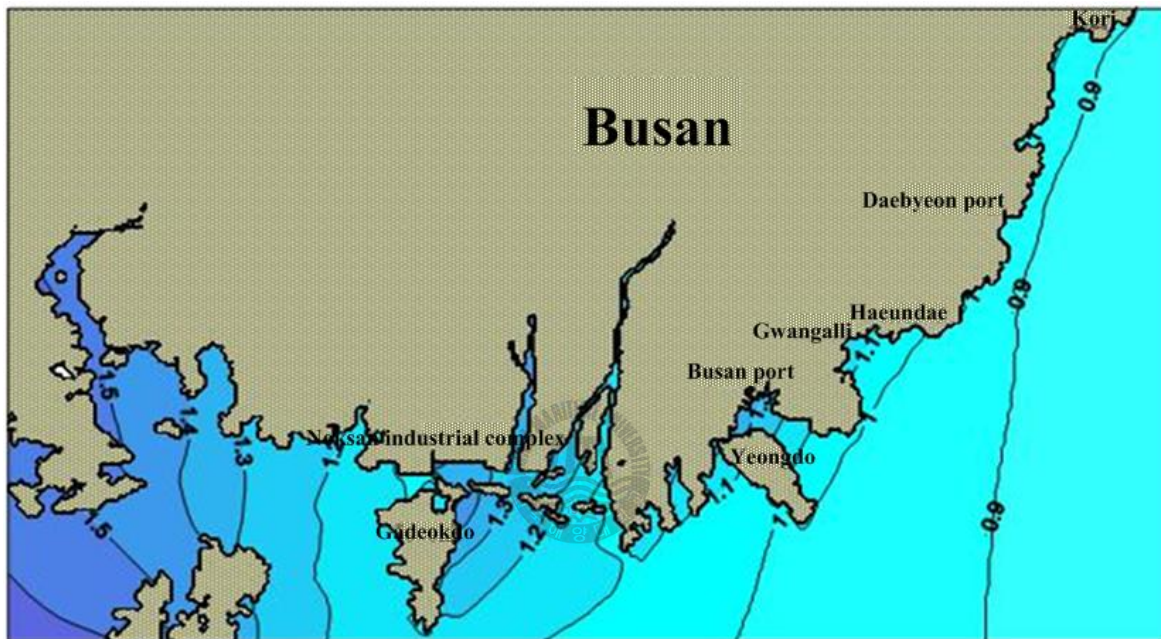
4) 2003.09.13.03

(b) AREA NO.2

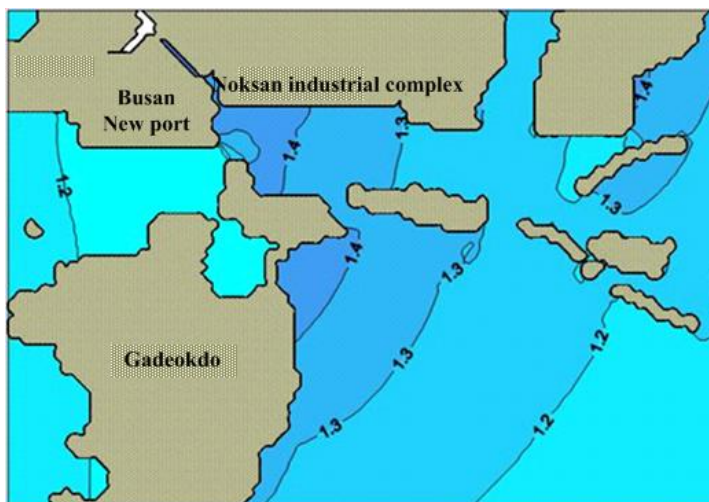
Fig. 2.15 Atmospheric pressure and wind field for typhoon Maemi

2.4.5 폭풍해일고

Fig. 2.16은 태풍 Sarah 내습시에, Fig. 2.17은 태풍 Thelma 내습시에, Fig. 2.18은 태풍 Maemi 내습시에 각각 부산 연안해역에서 발생한 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 부산연안역에 막대한 해안재해를 유발한 태풍 Sarah, Thelma 및 Maemi에 대해 가덕도에서부터 고리에 이르기까지 최대폭풍해일고의 공간분포를 검토하였다. 전체적으로 태풍 Thelma에 의한 폭풍해일고가 다른 2개의 태풍에 의한 값보다도 상당히 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) AREA NO.6

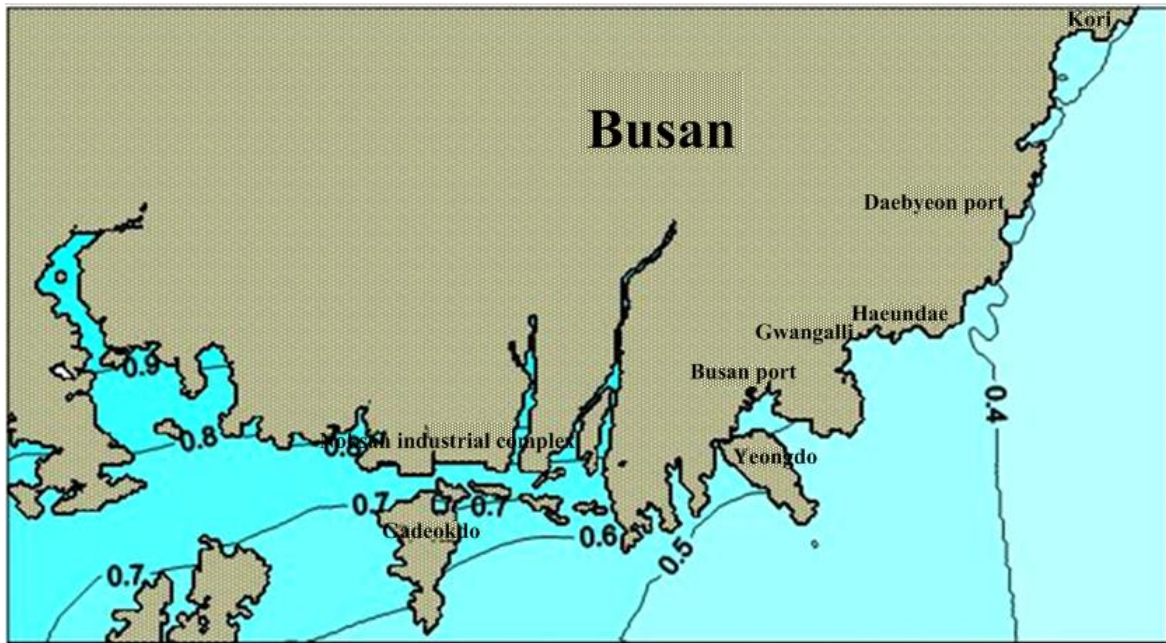


(b) AREA NO.7



(c) AREA NO.8

Fig. 2.16 Spatial distributions of maximum storm surge heights for typhoon Sarah



(a) AREA NO.6

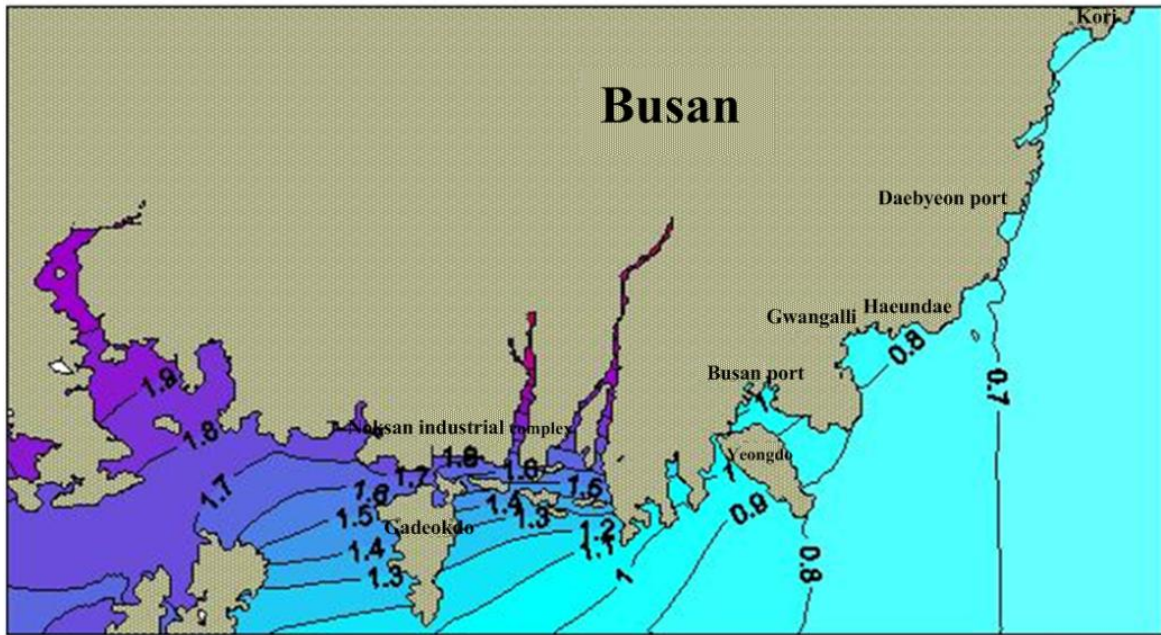


(b) AREA NO.7

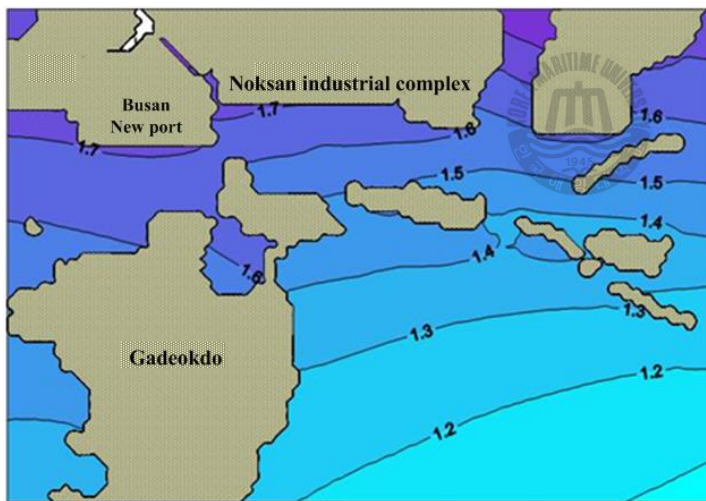


(c) AREA NO.8

Fig. 2.17 Spatial distributions of maximum storm surge heights for typhoon Thelma



(a) AREA NO.6



(b) AREA NO.7



(c) AREA NO.8

Fig. 2.18 Spatial distributions of maximum storm surge heights for typhoon Maemi

부산연안해역의 각 지점에 대해서 태풍 Sarah, Thelma 및 Maemi에서 얻어진 최대폭풍해일고를 Fig. 2.19에서 보여주는 지점별로 비교한 결과를 Table 2.5에 나타낸다. 이 결과로 각 지역에서 폭풍해일고를 결정할 경우에 어느 태풍에 의한 폭풍해일고를 적용하는 것이 합리적인가를 판단할 수 있으며, 태풍 Maemi의 경우는 괴정천에서 제일 큰 값 1.9m를 나타내고, 다대포→부산항→광안리→해운대→송정→기장으로 갈수록 작은 값을 나타내며, 최소값은 고리원자력발전소의 전면해역에서 0.7m를 갖는다. 태풍 Thelma의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 전체적으로는 태풍 Sarah 및 Maemi보다는 상대적으로 작은 값을 나타내지만 역시 괴정천에서 제일 큰 값 0.88m를 나타내고, 태풍 Maemi와 같이 다대포에서 기장으로 갈수록 작은 값을 나타내며, 최소치는 일광해수욕장의 전면해역에서 0.41m를 나타낸다. 태풍 Sarah의 경우는 녹산공단의 전면해역에서 제일 큰 값 1.41m를 나타내고, 부산항에서 1.35m를 기록한 다음, 전반적으로 대략 1.0~1.1m 정도를 값을 나타내고 있다. 여기서, 가덕도, 녹산공단 및 괴정천 부근의 해역에서는 검토된 3개의 태풍에 모두 대해서 가장 큰 폭풍해일고가 발생하는 지역이라는 것을 알 수 있다.

이상에서와 같이 각 지역에 있어서 최대폭풍해일고의 값은 3개의 태풍에 대해 각각 상이하므로 폭풍해일고에 대한 설계대상폭풍은 달라지게 된다. 얻어진 결과에 따르면 가덕도 천성항, 부산신항 전면 녹산공단 전면 및 괴정천의 경우는 태풍 Maemi에 의한 폭풍해일고가 제일 크게 나타나고 있고, 검토된 다른 해역에서는 태풍 Sarah에 의한 폭풍해일고가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 태풍경로의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 태풍 Maemi의 경우는 경남 사천지방을 통과하였기 때문에 부산연안해역이 태풍의 진로에 우측에 놓인 반면(가항반원)에, 태풍 Sarah의 경우는 부산연안해역을 약간 벗어난 남동해안을 통과하였지만 태풍의 중심세력은 부산 연안해역에 직접적인 영향을 주었고, 상대적으로 부산연안해역의 동측에 있는 부산항에서 고리까지의 해역에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

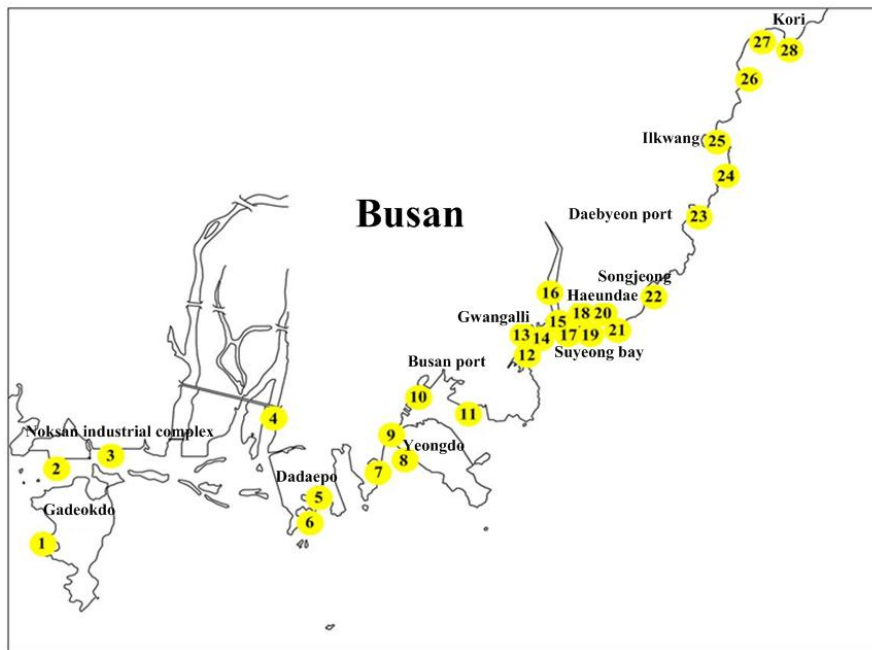


Fig. 2.19 Calculating positions of storm surge height in Busan coast

Table 2.5 Maximum storm surge heights in cases of typhoons Sarah, Thelma and Maemi

Point	Calculating position	Sarah(m)	Thelma(m)	Maemi(m)
No.1	Gadeokdo cheonseoung port	1.10	0.63	1.36
No.2	Busan New Port	1.06	0.75	1.71
No.3	Noksan Industrial Complex	1.41	0.80	1.69
No.4	Goejeong stream	1.17	0.88	1.90
No.5	Dadaepo(a)	1.16	0.56	1.09
No.6	Dadaepo(b)	1.17	0.56	1.08
No.7	Songdo beach	1.19	0.54	1.03
No.8	Yeongdo namhang-dong	1.18	0.55	1.05
No.9	Busan port tidal station	1.26	0.54	1.02
No.10	Busan port	1.35	0.54	1.01
No.11	Gamman container storage yard	1.14	0.50	0.91
No.12	Samik beach	1.10	0.46	0.83
No.13	Gwangalli beach	1.12	0.48	0.86
No.14	Playground	1.09	0.47	0.85
No.15	waterfront park	1.07	0.47	0.84
No.16	Suyeong river	1.10	0.48	0.86
No.17	Hanhwa condo	1.05	0.46	0.82
No.18	Seaworld hotel	1.03	0.46	0.83
No.19	Dongbaek island	1.02	0.46	0.81
No.20	Haeundae beach	1.04	0.46	0.81
No.21	Haeundae mipo port	1.01	0.46	0.81
No.22	Songjeong beach	1.02	0.43	0.77
No.23	Daebyun port	1.00	0.43	0.75
No.24	Duho port	0.97	0.42	0.72
No.25	Ilgwang beach	1.03	0.41	0.72
No.26	Chilam port	0.98	0.41	0.71
No.27	Imrang beach	1.00	0.45	0.75
No.28	Kori nuclear power plant	0.91	0.42	0.70

2.4.6 폭풍해일에 의한 범람해석

(1) 대상영역 및 계산조건

본 연구에서는 2003년 경남 및 부산연안에 많은 피해를 입힌 태풍 Maemi를 대상으로 경남 마산시 마산만 인근에 있는 호안에서 폭풍해일고의 추정 및 폭풍해일에 의한 범람해석을 실시하였다. 수치계산영역은 Fig. 2.20과 Table 2.6에 나타내는 바와 같이 총 9개 영역으로 구성되고, 제 1영역은 32,805m의 격자크기를, 일부의 해역과 육역을 포함하는 마지막인 제 9영역은 5m의 격자크기를 각각 갖는다. 큰 영역에서 작은 영역으로의 계산은 nesting을 통하여 계산이 수행되고, 큰 격자에서 다음의 작은 격자의 크기비율은 1/3로 구성되어 있다. 계산영역에서 중심데이터는 상용의 수치해도로부터 취득되었고, 또한 범람해석의 수행에 필요한 건물의 위치 및 도로 등의 지반고의 데이터는 상용의 수치지형도로부터 land desktop(<http://www.autodesk.co.kr>)을 통하여 5m×5m의 격자에 대한 지반고의 디지털데이터를 세밀하게 획득하였다. 여기서, 전술한 바와 같이 해상의 일부영역과 육상을 포함하는 마지막 영역인 제 9영역에서 침수가 발생되지 않는 산지와 내륙 및 수치지형도로부터 높이를 알 수 없는 건물의 경우에 대해서는 그의 높이를 적절히 높게 하여 계산 중에 침수가 발생되지 않도록 고려하였다. 이와 같은 과정을 통해 획득한 마산만의 호안배후에 있는 건물밀집도와 도로상황의 계산초기조건에 대한 평면도와 마산만 주변의 지형데이터를 각각 Fig. 2.21과 2.22에 나타낸다. 본 연구에서는 침수피해가 예상되는 호안의 배후에 있는 시가지지를 제외한 지반고가 높은 내륙 및 산지는 지반데이터를 고려하지 않았다.

한편 범람류는 지반의 조도계수에 의해 그 거동이 영향을 받기 때문에 바닥조건에 따라 상이한 조도계수를 적용하는 것으로 하였다. 즉, 본 계산에서 사용하는 조도계수로 도로의 경우는 0.04(Fukuoka et al, 1994), 건물은 밀도비에 따라 0.03-0.8(Miura and Shimizu, 1993)의 범위의 값을 적용하였고, 그리고 해저에서 조도계수로 0.026(Kawai, 2003)을 적용하였다.

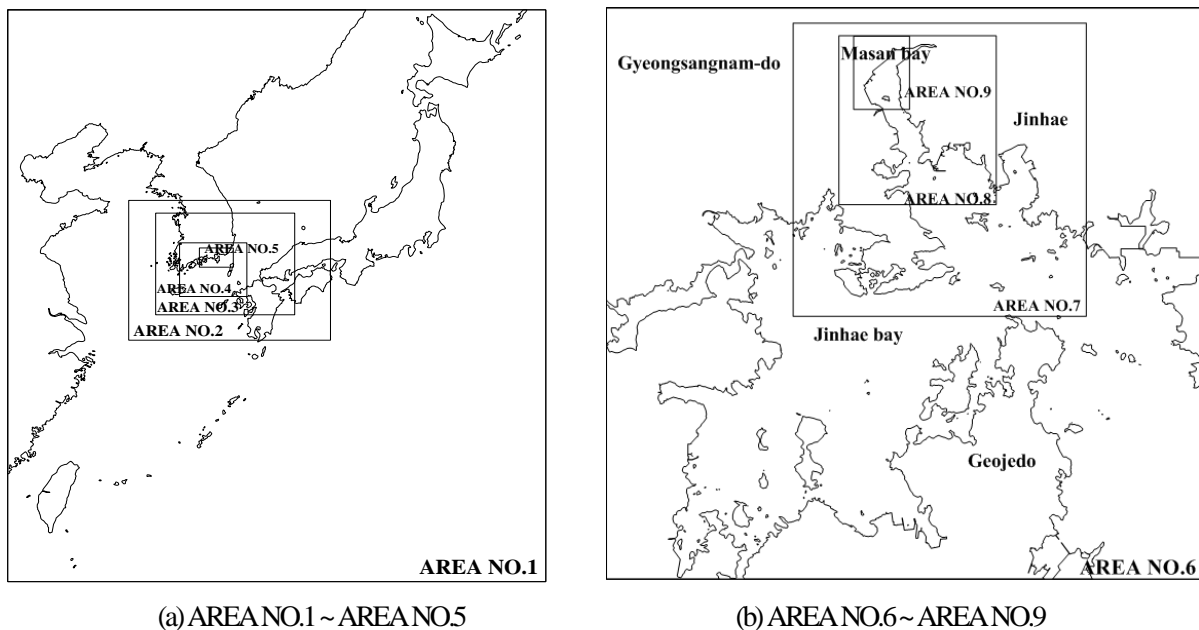


Fig. 2.20 Computation areas

Table 2.6 Mesh sizes applied to each simulation area

Area	Mesh size(m)	I _{mesh} × J _{mesh}
AREA NO.1	32,805	80 × 90
AREA NO.2	10,935	84 × 60
AREA NO.3	3,645	180 × 138
AREA NO.4	1,215	264 × 222
AREA NO.5	405	402 × 240
AREA NO.6	135	306 × 294
AREA NO.7	45	456 × 456
AREA NO.8	15	738 × 792
AREA NO.9	5	780 × 1026

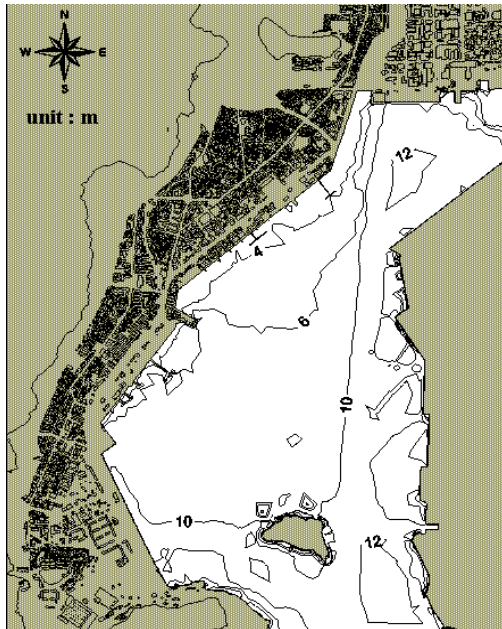


Fig. 2.21 Elevation in area No.9 including sea and land

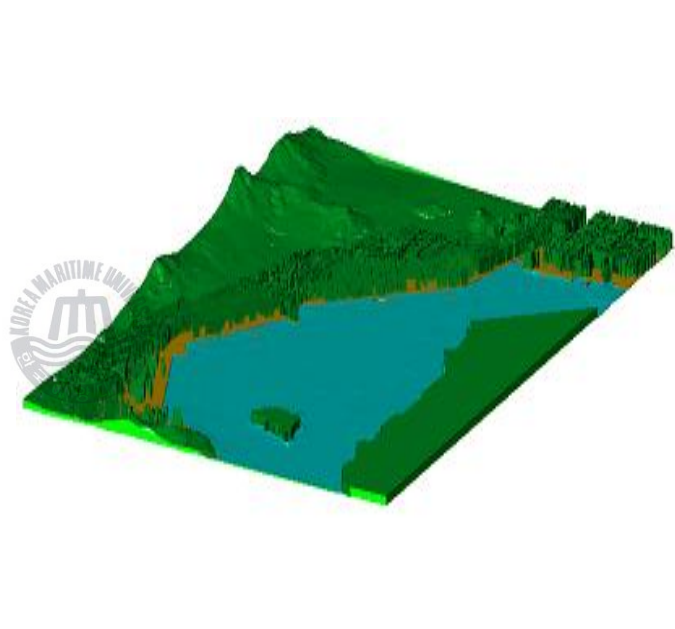


Fig. 2.22 3D-map for numerical simulation around Masan bay

(2) 폭풍해일고의 산정 및 범람예측

Fig. 2.23은 태풍 Maemi 내습시 마산만검조소에서 관측된 해일고와 폭풍해일에 의한 초오름을 고려하지 않은 계산(마산시, 2004)과 초오름을 고려한 계산2에 있어서 해일고의 시간변화를 비교한 그림이다. 계산치는 모두 관측치보다 다소 작은 값을 나타내었다. 초오름을 고려한 계산2의 결과가 계산1의 결과보다 작아야 하지만 실제 계산결과는 계산2의 결과값이 약간 크게 나온 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 계산1은 초오름을 고려하지 않고 최소격자의 크기를 50m로 계산을 수행하였고, 계산2는 초오름을 고려하기 위해 최소격자의 크기를 5m로 수행하였기 때문에 계산1에 비해 보다 상세한 수심데이터가 보간되었기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 관측치 또한 부진동의 효과를 제외한 최대해일고는 2.11m의 값(마산시, 2004)으로 본 연구의 계산결과와 거의 동일함을 알 수 있다.

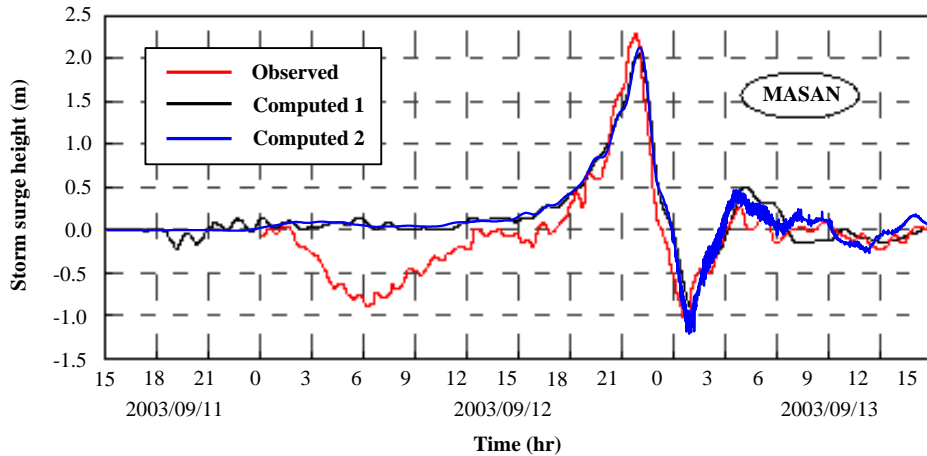


Fig. 2.23 Comparison between observed and calculated storm surge heights in Masan bay

Fig. 2.24는 Fig. 2.23에서 언급한 본 해석의 계산2의 방법을 적용하여 태풍 Maemi내습시 마산만과 주변저지대에서 발생한 폭풍해일고와 침수고 및 침수범위의 시·공간변화를 나타낸 결과이다. 이를 시간대별로 구분하여 기술하면 다음과 같다.

① 25hrs(태풍 발생 후 25시간 경과, Fig. 2.24(a)) : 태풍의 중심이 남해안상에 존재하여 마산항내의 해수면상승은 상대적으로 작은 약 0.19m 정도의 값을 나타내고, 인근저지대에서 침수는 나타나지 않는다.

② 28hrs(Fig. 2.24 (b)) : 항내에 약 0.69m 정도의 폭풍해일고가 발생하고, 이로 인하여 해운동과 동성동지역에서 침수가 시작된다.

③ 29hrs(Fig. 2.24 (c)) : 항내에 약 0.9m 정도의 수면상승이 발생하여 해운동에 0.1~0.9m, 동성동에서는 0.5m 전후, 합포동에서는 0.8m 전후의 침수고를 나타낸다.

④ 30hrs(Fig. 2.24 (d)) : 항내에서는 약 1.43m 정도의 폭풍해일고가 발생하고, 해운동지역에서 약 1.5m 전후, 월영동의 일부지역에서 약 1.0m 전후, 문화동의 일부지역에서 약 1.5m 전후, 반월동의 호안주변지역에서 약 1.4m 전후, 신포동의 일부지역과 동성동에서 약 1.2m 전후, 오동동과 합포동에서 약 1.4m 전후의 침수고가 나타나며, 동시에 마산자유무역지역에서 침수가 시작된다.

⑤ 30.5hrs(Fig. 2.24 (e)) : 항내에서 약 1.75m 정도의 폭풍해일고가 발생하고, 해운동에서 약 1.7m 전후, 월영동에서 약 1.5m 전후, 반월동에서 약 1.7m 전후, 신포동과 동성동에서 약 1.5m 전후, 합포동에서 약 1.7m 전후, 마산자유무역지역에서 약 1.4m 전후의 침수고가 각각 나타난다.

⑥ 31hrs(Fig. 2.24 (f)) : 항내에서 약 2.11m의 최대폭풍해일고가 발생하고, 해운동지역에서 약 2.1m 전후, 월영동에서 약 1.9m 전후, 반월동, 신포동, 동성동 및 합포동 등의 호안배후지역에서 대부분이 약 2.1m 전후의 높은 침수고가 나타나며, 양덕동에서 약 1.5m 전후, 마산자유무역지역에서 약 2.0m 전후의 침수고가 나타나는 것을 알 수 있다. 가장 심각한 침수상황을 나타낸 31hrs의 본 침수결과는 후술하는 마산시(2004)의 현장조사결과를 매우 잘 재현하고 있고, Yasuda et al.(2004a)의 침수해석결과와 매우 잘 일치한다.

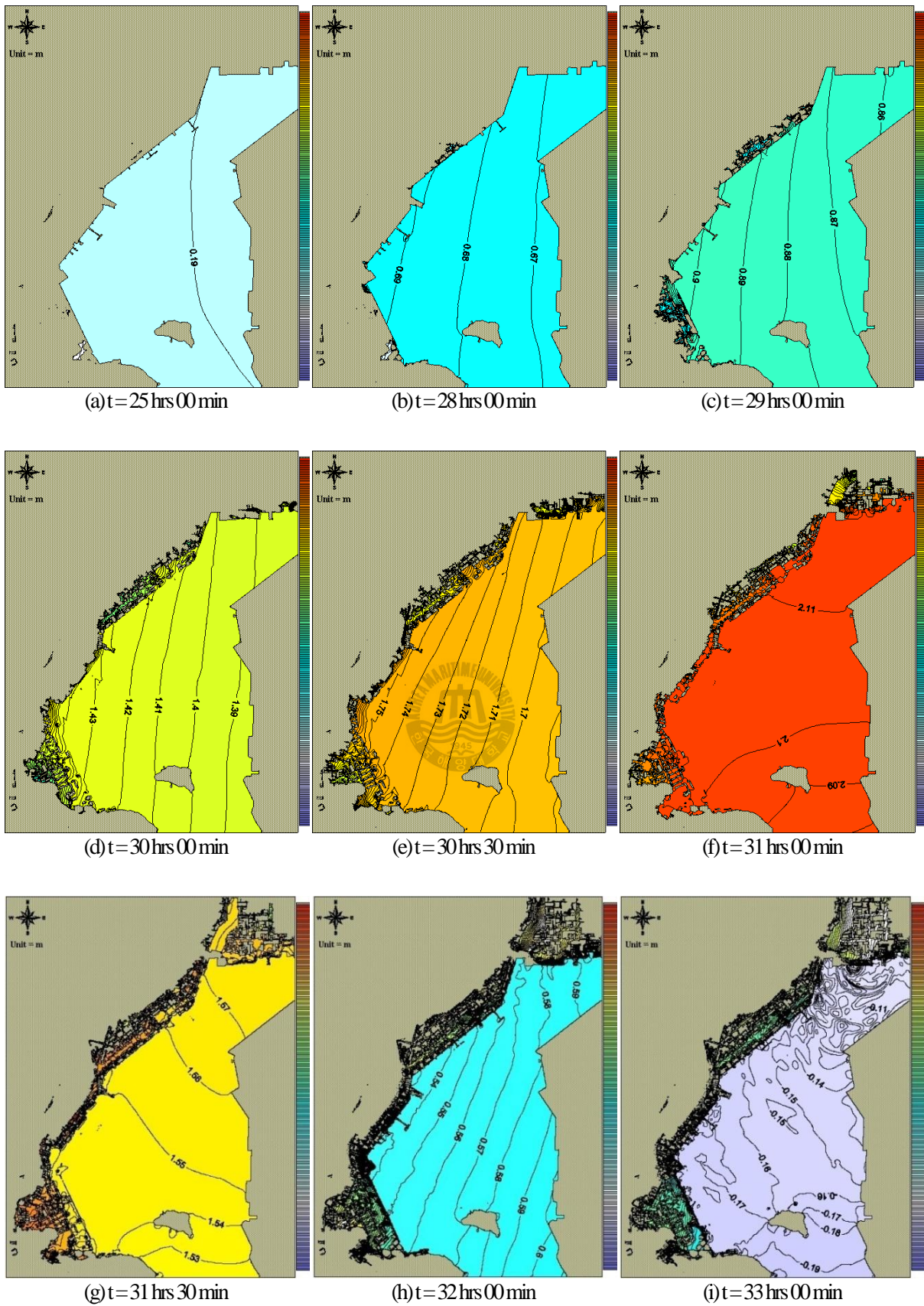


Fig. 2.24 Spatial distributions of maximum storm surge heights and inundation areas around Masan bay for typhoon Maemi

⑦ 31.5hrs(Fig. 2.24 (g)) : 항내에서 약 1.57m의 폭풍해일고가 나타나고, 해운동지역에서 약 1.5m 전후, 월영동에서 약 1.8m 전후, 반월동에서 약 1.7m 전후, 신포동과 동성동에서 약 1.9m 전후, 합포동에서 약 1.7m 전후, 마산자유무역지역에서 약 1.7m 전후의 침수고가 각각 나타난다. 이는 최대폭풍해일고와 최악의 침수상황을 나타낸 31hrs에서 30분이 경과된 시점에서의 상황으로, 만내에서 해일고의 하강에 따른 주변범람수의 유출로 주변저지대에서 침수고가 줄어드는 것을 알 수 있다.

⑧ 32hrs(Fig. 2.24 (h)) : 항내에 약 0.6m 정도의 수위상승이 존재하고, 해운동지역에서 약 1.1m 전후, 월영동에서 약 1.3m 전후, 반월동에서 약 1.4m 전후, 신포동과 동성동에서 약 1.5m 전후, 합포동에서 약 1.3m 전후, 마산자유무역지역에서 약 1.7m 전후의 침수고가 주어지며, 30분전인 Fig. 2.23 (g)의 경우와 비교하여 0.1~0.4m 정도의 침수고가 감소하였음을 알 수 있다. 이 시각에서는 태풍이 마산지역을 벗어나 북상하고 있었다.

⑨ 33hrs(Fig. 2.24 (i)) : 항내에서 상승수위가 많이 감소하여 0.17m의 값을 나타내며, 해운동지역에서 약 0.7m 전후, 월영동에서 약 1.1m 전후, 반월동에서 약 1.2m 전후, 신포동과 동성동에서 약 1.3m 전후, 합포동에서 약 0.8m 전후, 마산자유무역지역에서 약 1.4m 전후의 침수고를 나타낸다.

이상의 본 해석결과로부터 태풍 Maemi가 발생하여 약 27시간 30분 후에 해운동과 동성동에서 먼저 침수가 발생하기 시작하여 약 28시간 후에는 합포동과 문화동 및 반월동 등에서도 침수가 발생하기 시작하였고, 시간이 경과함에 따라 항내로부터 월류수가 증가하여 이 지역들에서부터 범람수가 제내지로 퍼지면서 침수면적이 넓어지고, 동시에 침수고가 높아지는 사실을 확인할 수 있었다. 그리고 약 30시간 후에 마산자유무역지역에서도 침수가 나타나기 시작하여 양덕동으로 침수지역이 확대되는 것도 알 수 있었고, 이후에 태풍이 마산지역을 벗어나에 따라 항내의 수위상승량도 감소하여 더 이상 침수지역이 확대되지 않았으며, 약 33시간 후에는 항내의 해일고가 0.17m로 하강하는 양상도 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 후술하는 사후조사 및 수치해석(마산시, 2004; Yasuda et al., 2004a)에서 얻어진 침수상황과 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

위의 Fig. 2.24에서 언급된 각 침수지역에서 침수고의 시간변화를 Fig. 2.25에 종합하여 나타낸다.

Fig. 2.26과 2.27은 태풍 Maemi의 내습시에 현지조사(탐문 및 흔적조사) 및 침수해석을 토대로 작성된 마산만의 인근해안역에서 침수역 및 침수고를 나타낸 hazard map이다(마산시, 2004). 그림을 살펴보면 ①~③지역인 해운동, ④지역인 반월동, ⑦~⑨지역인 동성동 등의 호안주변에서 보다 높은 침수고가 발생한 것을 알 수 있으며, 일부지역에서는 2m가 넘는 침수고를 나타내고 있다. 여기서, 마산시(2004)에서 수행된 침수해석결과는 마산항검조소에서 관측된 폭풍해일고를 초기조건으로 사용한 수치해석으로부터 얻어진 값이다(Yasuda et al., 2004a). 여기서, Fig. 2.26과 2.27의 현장조사결과와 본 연구의 폭풍해일에 의한 범람해석결과를 Table 2.7에 나타내었다. ①~③지역인 해운동, ④지역인 반월동, ⑦~⑨지역인 동성동 등에서는 조사결과와 거의 동일한 침수고가 나타남을 알 수 있으며, 그 외의 지역에서는 약간의 차이를 보이고 있지만 현지조사치의 가변성을 감안하여 제시된 지점에서 수치보다는 구역이라는 공간분포의 관점에서 비교하면 조사결과와 매우 유사한 경향을 알 수 있고, 전반적인 침수고 및 침수영역이 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

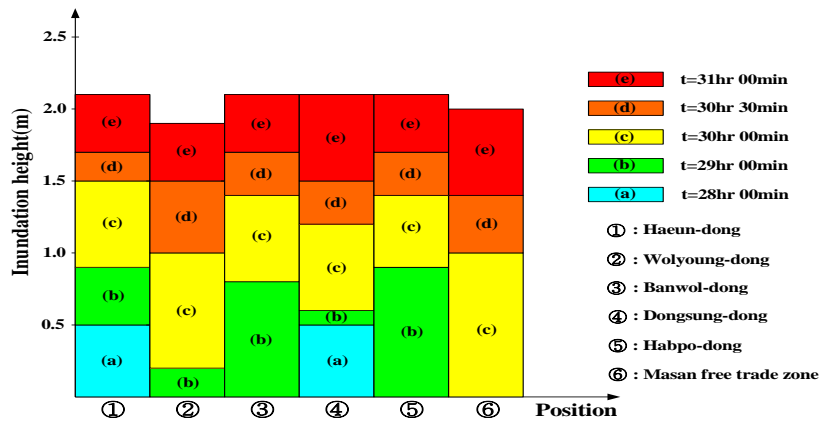


Fig. 2.25 Time variation of inundation heights at each position around Masan bay

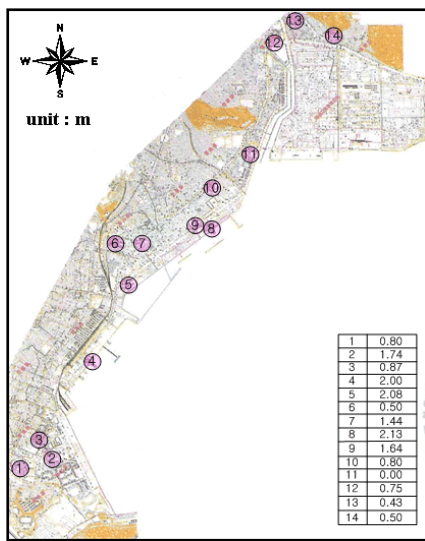


Fig. 2.26 Result of field survey for inundation areas around Masan bay

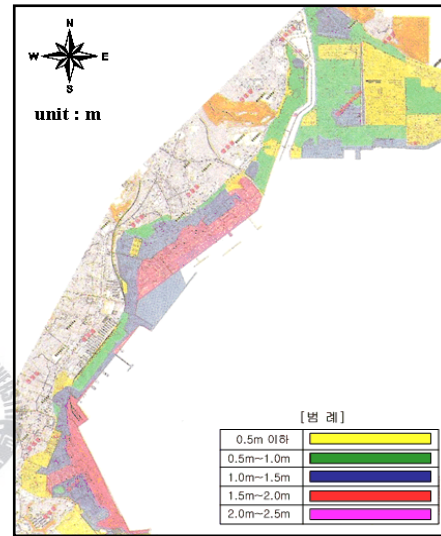


Fig. 2.27 Hazard map and its inundation depths around Masan bay

Table 2.7 Comparison of inundation depths between field survey and computation

Point	Field survey (m)	Computation (m)
1	0.80	2.0
2	1.74	
3	0.87	
4	2.00	2.1
5	2.08	2.0
6	0.50	1.5
7	1.44	
8	2.13	2.05
9	1.64	
10	0.80	1.3
11	0.00	1.3
12	0.75	
13	0.43	
14	0.50	

2.5 결론

본 장에서는 부산 및 경남연안역에 막대한 물적·인적재해를 초래한 태풍 **Maemi**(0314)와 이전에 물적·인적으로 큰 재해를 발생시킨 태풍 **Sarah**(5914)와 **Thelma**(8705)를 대상으로 부산연안의 각 지역별로 상세한 폭풍해일고를 추정하였고, 또한 본 해일고의 타당성을 검증하기 위하여 태풍 **Maemi** 통과시에 부산, 통영, 마산기상대와 검조소에서 관측된 기압 및 폭풍해일고의 시간변화와 본 연구에 의한 수치해석결과치를 각각 비교·분석하였으며, 2차원비선형천수방정식을 적용하여 마산만의 인근연안역에서 폭풍해일고를 추정함과 동시에 폭풍해일에 의한 배후역의 범람현상을 수치적으로 규명하였다. 본 해석법은 관측치의 폭풍해일고를 사용하여 침수해석을 수행하는 기존의 범람해석법(마산시, 2004; Yasuda et al., 2004a)과는 달리 해역과 육상을 일체화한 격자구성을 통하여 폭풍해일고를 계산함과 동시에 육상으로 초오름을 계산하는 범람해석법으로, 이는 기존의 해석법보다 합리적인 수치해석방법으로 판단되며, 이로부터 전반적인 좋은 대응성을 확인할 수 있었다.

- (1) 본 장에서 제안하는 수치해석기법을 관측치와 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.
- (2) 과거에 내습한 태풍 **Sarah**, **Thelma**, **Maemi**의 수치시물레이션으로부터 부산 서부연안에서는 태풍 **Maemi**가, 부산 동부연안에서는 태풍 **Sarah**가 가장 높은 폭풍해일고를 나타내었다.
- (3) 부산 서부연안에서는 녹산공단의 전면과 가덕도 사이의 협수로로 인하여 수괴의 진행이 차폐되고, 더불어 낙동강하구와 같이 만의 길이가 길고 수심이 얕은 지형적인 특성으로 조위편차가 크게 나타났다. 반면에, 부산 동부연안은 대체적으로 평활한 해안선으로 이루어져 있기 때문에 지형적인 영향보다는 태풍의 특성(중심기압, 이동속도, 태풍반경)과 이동경로에 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구의 범람해석결과를 현지조사를 토대로 얻어진 결과(마산시, 2004) 및 마산만 인근연안역에서 범람해석에 관한 기존의 수치해석결과(Yasuda et al., 2004a)와 비교·검토하여 본 연구의 타당성과 적용성을 확인할 수 있었고, 얻어진 결과는 마산만의 인근연안역을 비롯한 타지역에서의 연안사업 및 연안방재사업에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 보다 정도 높은 폭풍해일을 추산하기 위하여 조석, 밀도성층, 하천수의 유입, **wave-setup** 등을 고려할 필요가 있고, 이들은 향후 해결되어야 할 과제이다.

< 참고문헌 >

- 이종섭, 주귀홍, 장선덕 (1990) : 부산 연안 폭풍해일의 변동양상과 수치예측, 한국해안·해양공학회 논문집, 제 2권, 제2호, pp 104-111.
- 마산시 (2004): 태풍 매미에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방지대책.
- Fukuoka, S., Kawasima, M., Matsunaga, N. and Maeuchi, H. (1994) : Flooding Water Over a Crowded Urban District, Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering, No.491, II-27, pp. 51-60.
- Iwasa, Y., Inoue, K. and Mizutori, M. (1986) : Hydraulic Analysis of Overland Flood Flows by Means of Numerical Method, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol 23, B-2 pp 305-317.
- Iwasaki, T. and Mano, A. (1979) : Two Dimensional Numerical Simulation of Tsunami Run-up in the Eulerian Description, Proceeding 26th Coastal Engineering Conference, JSCE, pp 70-72(in Japanese).
- Kawai, H. (2003) : Storm Surge, Textbook for Port and Coastal Engineers, PARI, pp 1-48.
- 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, pp43-50.
- Miura, A., and Shimizu, Y. (1993) : Flood flow analysis in urban areas, International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization Bangkok, Thailand.
- 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.
- Yasuda, Y., Hiraishi, T., Kawai, H. and Nagase, K. (2004a) : Numerical Analysis of Storm Surge Inundation in Masan, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 위크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 75-79.

3. 천해파랑과 침수·범람의 수치시물레이션

3.1 서언

삼면이 바다로 둘러싸여 해안지역의 비율이 높으며, 국토가 좁고 인구가 많은 우리나라와 같은 환경에서는 연안매립으로 대표되는 해안지역개발이 불가피한 경우가 많다. 이러한 연안역의 개발과 보전사업의 계획 및 설계에 있어서 주요 외력조건은 일반적으로 태풍에 의한 고파랑과 이상조위에 의한 수위상승이다. 이 중에서 고파랑의 설계파는 태풍 내습시에 파랑의 통계적 특성으로 산정되며, 근래에 급격한 지구환경변화에 따른 이상기후로 인하여 태풍의 규모와 강도가 커지고 있고, 향후 발생빈도도 더욱 증가할 것으로 예측되며, 더불어 재해규모도 증대될 것으로 예상되고 있다. 이와 같이 연안역에서 연안재해의 주요한 인자인 폭풍해일의 위험성에 대한 인식이 비교적 높아지고 있고, 최근 2003년도의 14호 태풍 Maemi에 의한 엄청난 재해를 입은 후로 폭풍해일에 관한 연구도 활발히 수행되고 있다(강윤구 등, 2004; 김경옥 등, 2004; 최병호 등, 2004; Kawai et al., 2005a, 2005b; 허동수 등, 2006). 그리고 해안·항만구조물의 설계에서 가장 중요한 외력인 파고는 주어진 심해설계파 조건을 이용하여 천해설계파로 산정되며, 이러한 천해설계파 산정은 일반적으로 수치시물레이션을 이용한다. 최근의 태풍 내습에 따른 대상해역에서 파랑장의 영향을 추정하여 연안사업의 적절한 평가를 수행하기 위한 방안의 일환으로 빈번한 이상기후의 영향을 고려한 심해설계파가 추정되었다(한국해양연구원, 2005).

이와 같이 연안방제를 위한 다각도의 노력이 활발히 이루어지고 있고, 최근 태풍에 의한 바람장 등의 영향까지도 고려하여 보다 정도 높은 천해파랑을 산정하고 있다. 특히 태풍에 의한 바람장을 이용하여 천해파랑을 산정하는 경우 태풍 내습시 자유대기풍상태의 바람장을 해상풍으로 변환하여 사용하는 경우가 대부분이며, 육지의 영향을 고려한 바람장을 천해파랑산정에 사용하는 경우는 거의 없는 것으로 판단된다.

따라서 본 장에서는 육상지형의 영향을 고려한 바람장을 산출하기 위하여 MASCON모델(Goto and Shibaki, 1993)을 이용하며, 이러한 육상지형의 영향이 고려된 바람장으로부터 얻어진 해상풍이 천해파랑산정에 미치는 영향을 검토한다. 먼저 경남 남해안 일대의 해역을 대상으로 태풍 Maemi와 태풍 Sarah의 내습시에 MASCON모델로 산정된 해의 타당성을 확인하고, 다음으로 지역적으로 차폐 및 개방되는 해역특성이 분명한 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 전면해역과 부산광역시 수영구 광안리 주변해역을 대상으로 기존의 태풍모델로 산정된 해상풍과 육상지형의 영향을 고려할 수 있는 MASCON모델로 산정된 해상풍을 SWAN모델에 적용하여 천해파랑을 산정하며, 그 결과를 상호 비교·검토함으로써 정도 높은 천해파랑산정을 위한 MASCON모델의 필요성을 논의한다.

이상으로부터 얻어지는 천해파랑조건(파고, 주기 및 wave set-up)과 제 2장에서 주어지는 폭풍해일고를 Navier-Stokes solver와 불규칙파랑에 기초한 2차원 수치파동수모에 적용하여 불규칙파랑에 의한 월파랑을 추산한다. 다음으로 이러한 월파랑을 다시 본 연구의 침수·범람모델에 적용하여 대상지역에서 침수·범람의 특성을 검토한다. 본 장에서 수정되는 일련의 과정을 도식화하면 다음의 Fig.3.1과 같다.

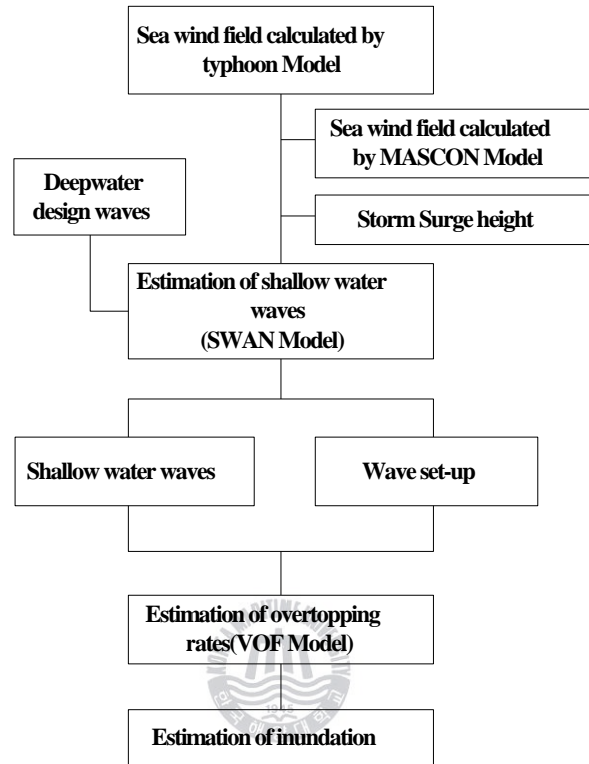


Fig. 3.1 Flow chart for shallow water design waves and inundation simulation by using severe waves and storm surge

3.2 해석모델의 개요

3.2.1 SWAN 모델

SWAN(Simulation WAve Nearshore)에서 고려할 수 있는 전파과정은 지리적 공간좌표상에서의 이류, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 굴절, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 천수, 역류에 의한 파랑의 반사 및 차단, 구조물(장애물)에 의한 파랑의 반사, 차단 및 전달, phase-decoupled approach를 이용한 회절, 파랑에 의한 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 생성과 소산 등을 고려할 수 있다.

SWAN모형에서 파랑은 쇄파대에서와 같이 비선형성이 큰 조건에서도 파랑의 스펙트럼분포를 고정도로 예측할 수 있는 2차원 wave action density spectrum으로 표현된다. SWAN에서 고려되는 action density spectrum $N(\sigma, \theta)$ (σ 와 θ 는 각각 상대주파수와 파향)은 흐름이 존재할 때 파동(action density)은 보존되는 반면에 에너지(energy density)는 보존되지 않기 때문에 energy density spectrum $E(\sigma, \theta)$ 보다 일반화된 물리량이다. $N(\sigma, \theta)$

는 $E(\sigma, \theta)$ 를 상대주파수 σ 로 나눈 값과 동일하다.

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

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial X} C_X N + \frac{\partial}{\partial Y} C_Y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (3.1)$$

여기서, 좌변의 첫 번째 항은 파동의 국소적인 시간변화를, 두 번째와 세 번째 항은 파동의 이류항을, 네 번째 항은 수심과 흐름의 변화에 의해 발생하는 상대주파수의 변화를, 다섯 번째 항은 수심과 흐름으로 인한 굴절에 의한 변화를 각각 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, 우변 $S = S(\sigma, \theta)$ 는 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지 입 · 출력을 표현한 것으로, 다음 식과 같이 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

$$S = S_m + S_{ds} + S_{nl} \quad (3.2)$$

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

수면상에 바람이 불면 수면파가 발생하고 이것이 시 · 공간적으로 발달한다. 이와 같은 풍파의 발생 · 발달과정은 바람과 수면파의 상호작용에 의한 결과로 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 source항은 통상 선형과 지수함수적인 증가의 합으로 기술된다. SWAN에서는 일반적으로 다음의 식을 나타낸다.

$$S_m(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3.3)$$

여기서, A 는 선형파의 성장을, BE 는 파의 지속적 성장을 의미한다. A 와 B 는 주파수와 파향, 풍속과 풍향에 의존한다. 모델에서 사용되는 풍속은 해면상 10m에서의 풍속이며, 계산에 사용되는 마찰속도 U_* 는 다음과 같다.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (3.4)$$

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

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \text{ m/s} \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3.5)$$

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

SWAN을 포함한 현재의 제3세대 파랑추산모델에 있어서 백파의 수식화는 다음과 같은 pulse-based

model(Hasselmann, 1974)에 기초한다.

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (3.6)$$

여기서, Γ 는 파형경사의 종속계수, k 는 파수, $\tilde{\sigma}$ 와 \tilde{k} 는 각각 평균각주파수와 평균파수를 나타낸다. Komen et al.(1984)은 충분히 발달된 조건에서 파의 에너지평형이 완료되는 것으로 하며 값을 산정하고 있다.

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

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (3.7)$$

여기서, C_{bottom} 은 해저마찰계수를 나타내며, Hasselmann et al.(JONSWAP, 1973)은 경험상수의 이용을 제안하였다. 해저마찰에 의한 파랑에너지의 소산에 미치는 평균류의 영향은 저면조도길이 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 스펙트럼형이 보존되는 Battjes and Janssen (1978)의 단파모델에 의한 스펙트럼을 체계화하였다. SWAN은 방향성을 고려하여 다음과 같이 사용하였다.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (3.8)$$

여기서, E_u 는 총파랑에너지를, $D_u < 0$ 은 Battjes and Janssen (1978) 에 따른 쇄파에 의한 총에너지의 소산율을 나타낸다. D_u 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 이용되며, 상수값은 $Y = 0.73$ (Battjes and Stive, 1985)이다.

삼해에서는 quadruplet wave-wave interactions이 스펙트럼의 발달에 지배적인 요소이다. 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 있고 경우에 따라 DIA기법은 충분한 정확도를 나타내지 않을 수도 있으며 DIA의 정도는 quadruplet configurations의 수가 증가함에 따라 향상될 수 있다.

3.2.2 MASCON모델

태풍의 중심부는 주변에 비해 기압이 낮기 때문에 그 기압차를 메우기 위하여 바람이 불게 되며 지구가 자전하고 있기 때문에 북반구에서는 오른쪽 방향으로 힘(Coriolis력)이 작용한다. 이로 인하여 태풍의 중심주변으로 반시계방향으로 부는 경도풍이 발생한다. 해면에 있어서 마찰의 영향을 받지 않는 상공에서 경도풍의 풍속 U_{gr} 은 기압경도력, 원심력 및 Coriolis력의 평형으로부터 다음의 식과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_r}{\partial r} = \frac{U_{gr}^2}{r} + fU_{gr} \quad (3.9)$$

여기서, r 은 등압선의 곡률반경, ρ_a 는 대기의 밀도, p_r 은 태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압, f 는 Coriolis 계수이다.

Myers and Malkin(1961)의 분포식(3.10)에 의한 기압분포를 가정한 다음 식(3.9)을 풀면 다음의 식(3.11)이 얻어진다.

$$p_r = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (3.10)$$

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{p_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (3.11)$$

여기서, Δp 는 기압심도, p_c 는 태풍의 중심기압, r_0 는 태풍반경이다.

해상풍의 풍속 U_1 은 다음 식(3.12)로 표현될 수 있다.

$$U_1 = C_1 U_{gr} \quad (3.12)$$

여기서, C_1 은 계수이며, 바람의 관측치와 비교로부터 산정되지 않고 폭풍해일의 추산치가 관측치와 일치하도록 산정되는 경험치로 0.6~0.7정도(紫木, 2004)의 값을 가지며, 본 연구에서는 0.67을 적용하였다. 또한 풍속의 편향은 30°(紫木, 2004)로 설정되었다. 그리고 태풍의 이동에 의해 발생하는 풍속 U_2 는 다음 식(3.13)로 표현된다.

$$U_2 = \frac{U_{gr}(r)}{U_{gr}(r_0)} V_T \quad (3.13)$$

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

MASCON모델의 기초방정식은 비압축성의 대기에 대해 질량보존식을 나타내는 다음의 연속식으로 주어진다.

$$\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

여기서, u_m, v_m, w_m 은 x, y, z 방향의 풍속성분이다.

MASCON 모델은 태풍모델에 의해 얻어진 바람장(u_m^0, v_m^0, w_m^0) 을 초기치로 하여 다음에 주어지는 변분방정식(3.15)의 보정량 $E(u_m, v_m, w_m, \lambda)$ 가 최소가 되도록 풍속(u_m, v_m, w_m) 을 산정한다.

$$E(u_m, v_m, w_m, \lambda) = \int_V \left[\alpha_1^2 \left\{ (u_m - u_m^0)^2 + (v_m - v_m^0)^2 \right\} + \alpha_2^2 (w_m - w_m^0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (3.15)$$

여기서, u_m, v_m, w_m 는 질량보존식을 만족하도록 조정된 풍속성분, u_m^0, v_m^0, w_m^0 는 초기풍속성분, λ 는 Lagrange의 미정계수, $\alpha_i (i=1,2)$ 는 Gauss의 정도계수로 다음의 식으로부터 산정된다.

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \sigma_i^{-2} \quad (3.16)$$

여기서, σ_i 는 관측오차이며, 이는 풍속성분에서 관측된 풍속성분의 기울기를 나타낸다. α_1 과 α_2 의 비 $\{\alpha_1 / \alpha_2\}$ 는 조정된 풍속의 수평성분과 연직성분의 상대적인 크기를 결정하는 계수이다.

식(3.14)의 최소해를 가지는 Euler-Lagrange의 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_m = u_m^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (3.17)$$

$$v_m = v_m^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (3.18)$$

$$w_m = w_m^0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} = 0 \quad (3.20)$$

또한, 이 방정식들은 다음의 경계조건을 만족하여야 한다.

$$n_x \lambda \delta(u_m) = 0 \text{ for } x\text{-directional boundary} \quad (3.21)$$

$$n_y \lambda \delta(v_m) = 0 \text{ for } y\text{-directional boundary} \quad (3.22)$$

$$n_z \lambda \delta(w_m) = 0 \text{ for } z\text{-directional boundary} \quad (3.23)$$

여기서, $\delta(\)$ 는 괄호내 변수의 제1변분, n_x, n_y, n_z 는 각각 외향법선의 단위벡터이다. 식(3.17)~(3.19)을 각각의 방향으로 미분하여 변분방정식(3.15)에 대입하면 다음과 같은 Poisson형의 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_1^2 \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x} + \frac{\partial v_m^0}{\partial y} + \frac{\partial w_m^0}{\partial z} \right) \quad (3.24)$$

위의 식으로부터 λ 를 구하여 식(3.17)~(3.20)에 대입하면 질량보존식을 만족하도록 조정된 u_m, v_m, w_m 가 얻어진다. 동시에, 저면 및 측면의 경계조건으로서 다음의 식이 주어진다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial n} = 0 \quad (3.25)$$

3.2.3 수치파동수로

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 있다. 또한 많은 일본 연구자에 의한 공동연구의 결과로 개발된 CDMAS-SURF(沿岸開發技術研究センタ, 2001)는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원 파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 김도삼 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고 잠제주변의 파동장 해석을 수행하였다.

Fig. 3.2에서 제시하는 본 수치파동수로는 2차원수치파동수로내에 파의 재반사를 방지하기 위한 개경계처리방법으로 해석영역 양쪽에 에너지감쇠영역을 두고 있고 조파를 위해 조파소스를 적용하고 있다.

(1) 기초방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식(3.26)과 porous로 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식(3.27), (3.28)으로 구성된다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_\rho \quad (3.26)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (3.27)$$

$$(3.28)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g$$

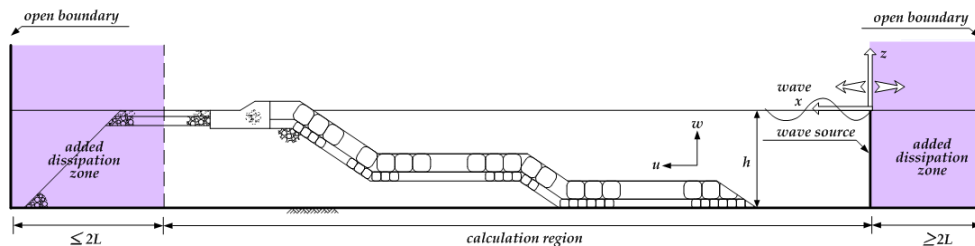


Fig. 3.2 Sketch of numerical wave channel

여기서, v_e 는 분자동점성계수와 외동점성계수의 합, γ_v 는 체적공극률, 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(3.29)-(3.31)과 같이 주어진다.

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M \quad (3.29)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \quad (3.30)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M \quad (3.31)$$

그리고 D_x, D_z 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 x, z 방향에 대한 파랑에너지감쇠계수이고, S_p, S_u, S_w 는 조파소스항으로 다음의 식과 같이 정의된다.

$$S_p = q(z, t) \quad (3.32)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (3.33)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (3.34)$$

여기서, $q(x, z)$ 는 $x = x_s$ 의 위치에서 격자간격을 Δx_s 로 두면 다음의 식(3.35)과 같이 주어진다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \quad (3.35)$$

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

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (3.36)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (3.37)$$

여기서, $\Delta x, \Delta z$ 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

(2) 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(3.38)에 의해 VOF함수가 이류된다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (3.38)$$

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

(3) 불규칙파의 조파

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

본 절에서는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우에 문제로 지적되는 평균수위상승을 억제하면서 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 시스템을 기술한다(Fujiwara, 2005; 이민기, 2007). 불규칙파의 파동운동을 digital방식으로 작성하는 방법은 Goda(1985)에 의해 제안된 바가 있고, 여기서는 그 방법에 따른 불규칙파의 조파방법을 간략히 기술한다.

불규칙파의 조파방법은 선형이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여 이를 무한급수의 합으로 고려하는 것이다. 조파지점에 있어서는 수면파형 η , 수평 및 연직유속 u, w 의 시간적인 변동이 필요하게 되며, 이들은 각각 식(3.39)~(3.41)으로 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (3.39)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (3.40)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (3.41)$$

여기서, ε_m 은 random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, m 은 성분파, M 은 성분파의 수, h 는 수심이다. 단, 연직좌표 z 는 정수면에서 상방향을 양(+)으로 취한다. 그리고 진폭 a_m 은 식(3.42)로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (3.42)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도로, 본 연구에서 적용하는 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식(3.43)의 Bretschneider-Mitsuyasu(1970)의 스펙트럼이다.

$$S(f) = 0.258H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (3.43)$$

여기서, H_{13} 는 유의파고, T_{13} 은 유의파주기를 각각 나타낸다.

일반적으로 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 해석시간이 증가됨에 따라 평균수위가 상승하는 문제가 지적되고 있고(沿岸開發技術研究センター, 2001), 본 연구에서는 평균수위상승을 억제하는 방법으로 조파지점에서 수평유속 u 를 산출할 때 각 성분파에 대응하는 Stokes의 질량수송속도(mass transport velocity)를 빼주는 방법을 적용한다(Fujiwara, 2005; 이민기, 2007). 즉, 식(3.40)에서 질량수송속도를 뺀 수평유속 $u(z, t)$ 는 식 (3.44)와 같이 표현된다.

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \bar{U}_m \right\} \quad (3.44)$$

여기서, Stokes의 질량수송속도 \bar{U}_m 은 식 (3.45)로 주어진다.

$$\bar{U}_m = \frac{1}{2} \frac{\pi H_m}{T_m} \frac{\pi H_m}{L_m} \frac{\cosh 4\pi (h + \bar{z}_m) / L_m}{\sinh^2 (2\pi h / L_m)} \quad (3.45)$$

여기서, \bar{z}_m 는 물입자의 평균위치를 나타낸다.

3.2.4 침수·범람모델

범람류 해석을 위해 McDonald and Ledger(1981)는 대상영역이 산지나 제방 등으로 둘러싸인 폐쇄적인 지형인 경우에 수위와 유량의 관계로부터 연속방정식만을 적용하여 범람역을 구하는 방법을 제안하였다. 하지만, 이 방법은 적용가능한 영역이 제한적이고, 얻을 수 있는 결과도 매우 부족한 단점이 있다. 범람해석을 행하는 대부분의 영역이 평면적이므로 2차원홍수범람류해석이 요구되고 있다. Xanthopoulos and Koutitas(1976)은 범람류의 거동에 천수방정식을 적용하여 유한차분법으로 해석하였으며, Miura and Shimizu(1993)은 건물이나 도로가 복잡하게 배치되어 있는 도시역에 적용하여 범람류를 계산하였다. 武田(1996)은 임해역에서의 고조범람해석을 수치해석을 통해 해석하였으며, 도심부의 건물 등과 같은 구조물이 존재하는 경우에 계산격자내에 건물이 차지하는 점유율의 개념을 도입하여 수치계산을 수행하였다. 또한, Takeda et al.(2005)은 유한체적법의 개념을 도입한 비구조격자를 이용하여 폭풍해일 등에 의한 연안역에서의 범람을 도로를 통한 홍수전파의 특성으로 재현하여 해석하였다. 본 연구에서는 직각좌표계 장방형격자 범람해석법을 사용하여 연안역에서의 폭풍해일에 의한 홍수범람류의 전파특성을 유한차분법으로 해석한다.

평면2차원범람모델의 기초방정식은 다음에 제시하는 연속방정식(3.46)와 운동방정식(3.47), (3.48)으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3.48)$$

여기서, $M = uh$, $N = hv$, ρ_w 는 해수의 밀도, τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해저에서 x, y 방향으로 각각의 전단력이며, H 는 수위 ($H = h + z$, z 는 지반고)이다. 그리고 범람을 해석하는 경우 수위가 0인 상태의 격자에 범람수가 전파하는 범람수 선단부의 취급이 문제가 된다. 본 연구에서는 선단부를 포함하여 범람수가 불연속이 되는 경우에 Fig. 3.3에 나타난 지반고와 수위의 관계에 따라 단락식이나 월류식을 각각 적용하였다. 즉, 인접한 지역에 비해 지반고가 높은 경우(Fig. 3.3(a))에 식(3.49)의 단락식을, 인접한 지역에 비해 지반고가 낮은 경우(Fig. 3.3(b))에 대해서는 식(3.50)의 월류식을 각각 적용하여 유량을 산정한다.

$$M_0 = \mu h_n \sqrt{gh_n} \quad (3.49)$$

$$M_0 = \mu' h_l \sqrt{2gh_l} \quad (3.50)$$

여기서, M_0 는 월류유량, $\mu = (2/3)^{3/2} = 0.544$, $\mu' = 0.35$ 이며(井上, 1986), h_n 는 단락시의 수심, h_l 은 월류시의 수심을 나타낸다.

침수역(침수되는 영역)과 지반역(침수되지 않는 영역)의 경계는 수심의 최소치 $\varepsilon = 0.001m$ 에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 이 때 ε 이하의 지역에 대해서는 지반역, ε 이상의 지역에 대해서는 침수역으로 표현된다. 지형정보(지반고)를 파악하여 침수역인지 아닌지를 판단한다. 또한, 침수역이 지반역으로 변하는 경우에 발생할 수 있는 (-)수심에 대해서는 수심을 0으로 하였다.

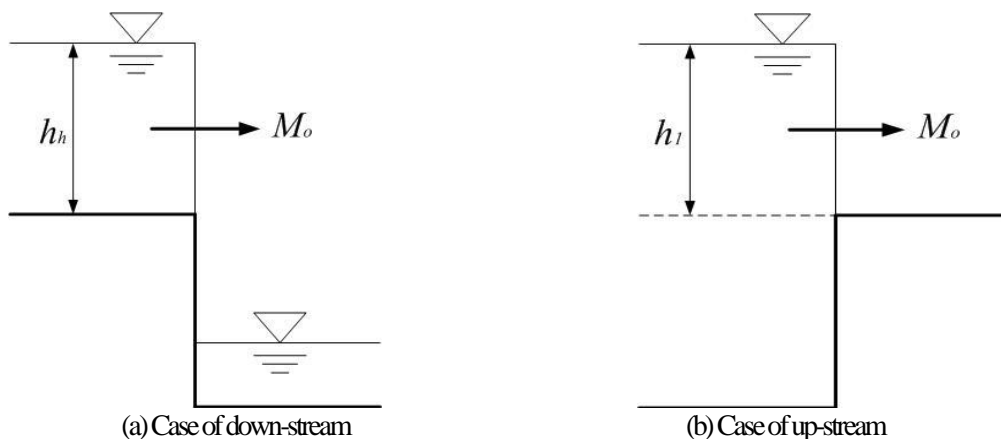


Fig. 3.3 Concept of flood flow head

3.3 해석결과 및 검토

3.3.1 MASCON모델에 의한 바람장

(1) 대상영역 및 조건

제2장에서 부산 연인역에 태풍 Sarah, Thelma, Maemi에 의한 폭풍해일고를 추정하였다. 그 결과, 태풍 Thelma에 의해 추정된 폭풍해일고가 다른 2개의 태풍에 의한 해일고보다 상당히 작은 값을 나타내었기 때문에 본 장에서는 태풍 Sarah와 Maemi에 대해서만 검토한다.

MASCON모델의 계산에서 대상영역은 태풍의 주경로를 포함한 Fig. 3.4와 같은 영역으로 설정하였으며, 격자 크기는 600m, Imesh×Jmesh는 247×166이다. 계산에 필요한 입력치(기압심도, 태풍반경, 이동속도)는 태풍 Sarah에 대해서 Table 2.1, 태풍 Maemi에 대해서 Table 2.3에 제시된 값을 각각 사용하였다.

(2) 타당성의 검증

태풍 Maemi와 태풍 Sarah에 대해서 기압, 태풍반경, 이동속도 등을 고려하여 태풍 Maemi의 내습시에 최대폭풍해일고의 발생시간인 2003년 09월 12일 22시의 해상풍을 산정한 결과가 Fig. 3.5에 주어지고, 같은 시간에 MASCON모델로 추정한 지형의 영향이 고려된 해상풍이 Fig. 3.6에 주어지고 있다. Fig. 3.5와 Fig. 3.6을 비교하면 태풍의 중심이 육상에 존재하기 때문에 그 위치가 명확하지 않지만 중심의 위치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단되며, 전반적으로 관측치와 비슷한 값을 재현하고 있으므로 지형의 영향이 고려된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.7은 태풍 Sarah 내습시 최대폭풍해일고의 발생시간인 1959년 09월 17일 03시의 해상풍을 나타내고, Fig. 3.8은 동시간에 MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 해상풍을 보여준다. Fig. 3.7과 Fig. 3.8을 비교하면 해상풍에서의 중심이 MASCON모델에 의해 지형이 고려되면서 위치가 약간 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 지형의 영향으로 인하여 풍향과 풍속의 변화가 무풍지대의 풍향과 풍속에 영향을 미친 것이라 판단되며, 전반적으로 지형에 의한 바람장의 변화를 MASCON모델이 잘 재현하는 것으로 판단된다.

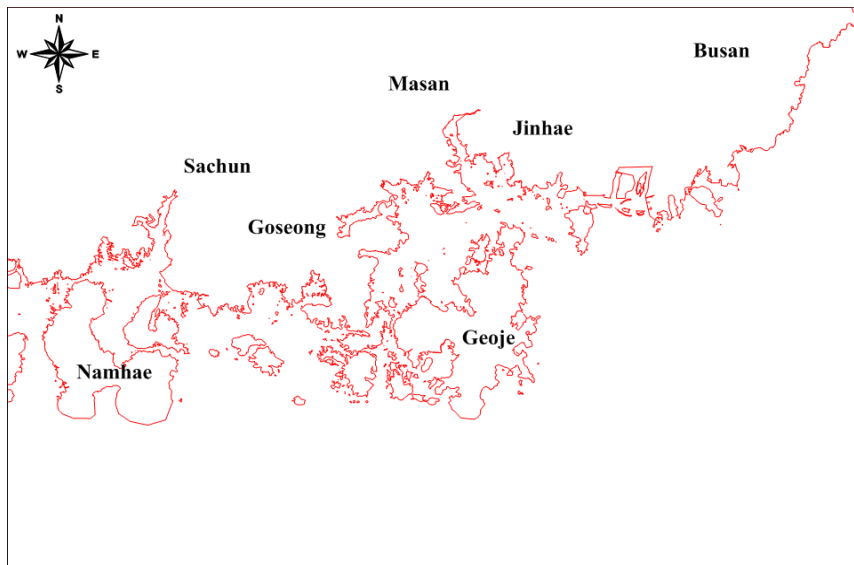


Fig. 3.4 Simulation area for MASCON model

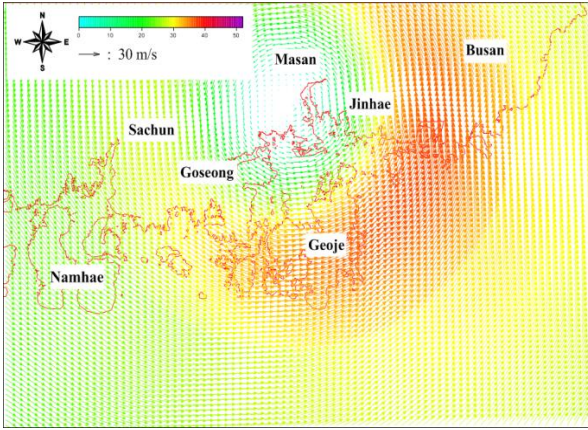


Fig. 3.5 Sea wind field calculated by Eq.(3.12) for typhoon Maemi

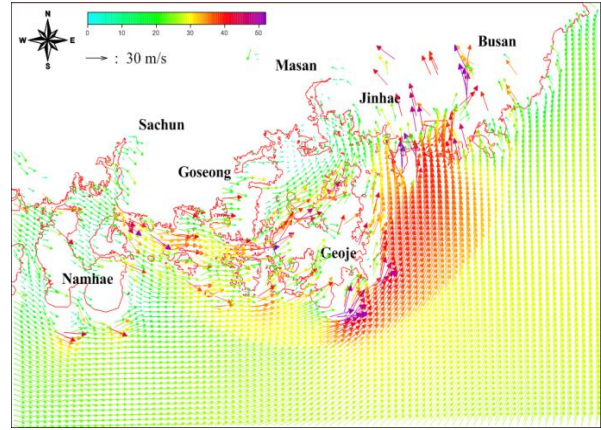


Fig. 3.6 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Maemi

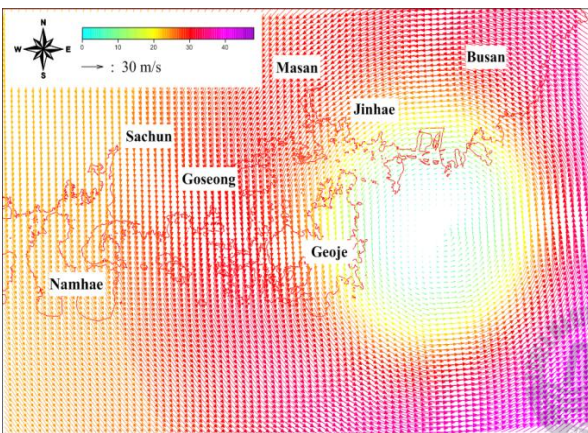


Fig. 3.7 Sea wind field calculated by Eq.(3.12) for typhoon Sarah

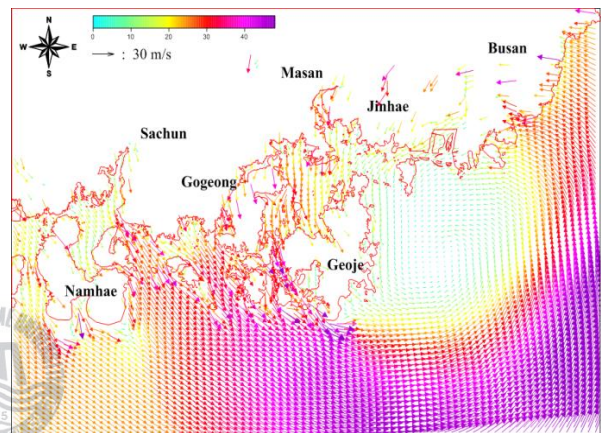


Fig. 3.8 Sea wind field calculated by MASCON model for typhoon Sarah

3.3.2 SWAN모델에 의한 천해파랑

(1) 대상영역 및 조건

태풍 Maemi에 의해 많은 피해를 입었던 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지와 수영구 광안리 해역을 대상으로 천해파랑을 추산하였다. 전자와 후자는 차폐 및 개폐라는 지역적특성이 분명한 지역으로 지형의 영향이 고려된 바람장의 변화가 천해파랑특성에 미치는 영향의 유무를 비교·검토하기에 적절한 해역으로 판단된다.

해당지역에 영향을 미칠 수 있는 모든 연안격자점의 신심해설계좌를 고려하기 위해 광역은 200m, 중역은 50m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였으며, 계산영역을 Fig. 3.9에, 격자구성에 대한 제반사항을 Table 3.1에 각각 제시한다. 고려된 계산영역의 수심데이터와 해안선은 기본적으로 수치해도를 이용하였으며, 협역에서 충분하지 않은 수심데이터에 대해서는 실제 측량데이터를 추가하여 사용하였다. 각 영역의 수심에 대해서는 Fig. 3.10에 나타내었다. 그리고 본 연구에서 고려된 태풍은 제 3.3.1절에서와 같아 태풍 Maemi, 태풍 Sarah의 경우이다. 태풍 Maemi에 대해서는 Fig. 3.5에 제시된 해상풍의 바람장과 Fig. 3.6의 MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 해상풍을, 태풍 Sarah에 대해서는 Fig. 3.7에 제시된 해상풍의 바람장과 Fig. 3.8의 MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 해상풍을 각각 계산영역에 일치하도록 계산에 필요

한 바람장의 데이터를 추출하였다. 계산에 사용된 신심해설계과 제원(한국해양연구원, 2005)을 Table 3.2에 나타내었다. 해안선의 상태에 따라 적용한 반사율(Goda, 1985)의 값을 Table 3.3에 제시하였고, 반사율내 괄호()안의 값이 실제로 사용된 반사율이며, 제 2장에서 추산한 폭풍해일고와 조위(해양수산부, 2000)를 Table 3.4에 나타내었다.

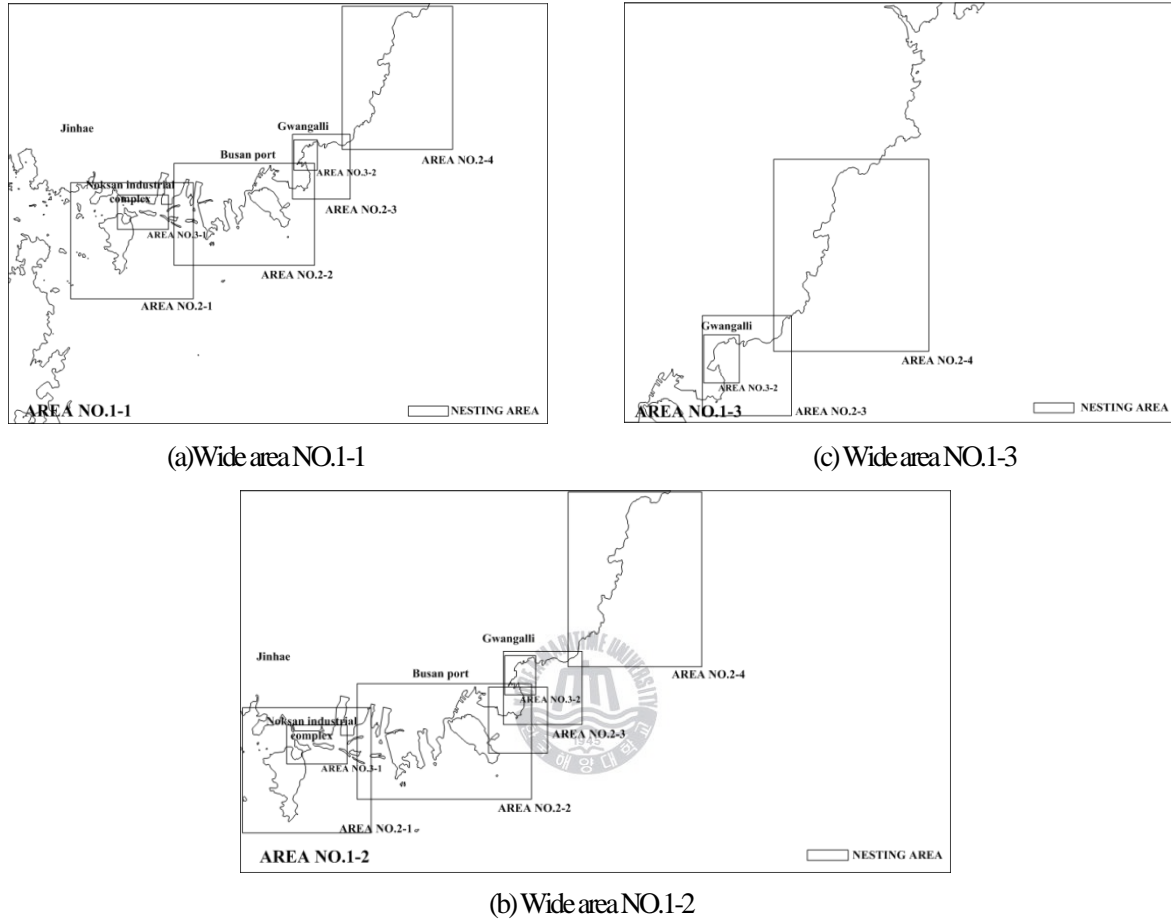


Fig. 3.9 Computation area of SWAN simulation

Table 3.1 Mesh sizes applied to each simulating area

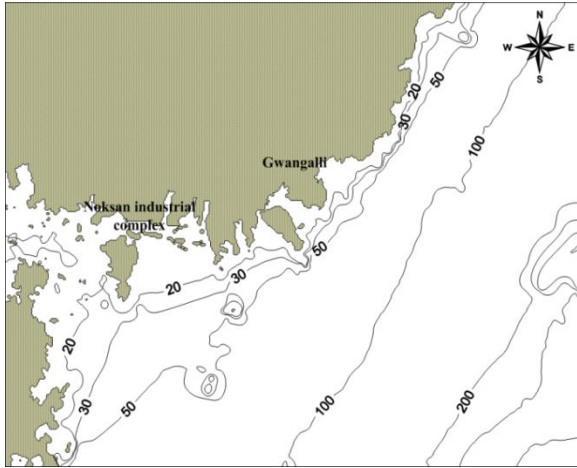
Area number	Mesh size(m)	$I_{mesh} \times J_{mesh}$	Remark<AREA>
AREA NO.1-1	200	385×300	Wide
AREA NO.1-2	200	410×220	Wide
AREA NO.1-3	200	300×228	Wide
AREA NO.2-1	50	314×260	Middle
AREA NO.2-2	50	420×290	Middle
AREA NO.2-3	50	200×216	Middle
AREA NO.2-4	80	325×275	Middle
AREA NO.3-1	20	320×185	Object
AREA NO.3-2	20	160×268	Object

Table 3.2 Deepwater design waves for Busan coast

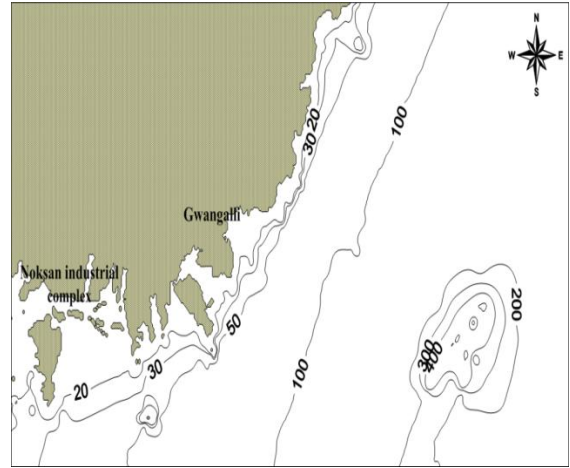
Points of deepwater design waves	Hs(m)	Ts(s)	Wave direction	Remark
072125 (N34.80°,E128.83°)	12.02	14.69	SE	Case 1
	12.47	15.54	SSE	Case 2
	9.63	14.18	S	Case 3
	6.12	11.91	SSW	Case 4
	3.99	10.25	SW	Case 5
073125 (N34.80°,E129.00°)	11.91	14.49	SE	Case 6
	12.39	15.50	SSE	Case 7
	11.37	15.41	S	Case 8
	7.52	12.98	SSW	Case 9
074124 (N34.94°,E129.17°)	10.56	13.15	ESE	Case 10
	11.21	13.85	SE	Case 11
	12.25	15.16	SSE	Case 12
	9.91	14.33	S	Case 13
	7.02	12.72	SSW	Case 14
075124 (N34.94°,E129.33°)	9.86	12.49	ESE	Case 15
	10.37	12.83	SE	Case 16
	9.99	12.91	SSE	Case 17
	8.06	12.43	S	Case 18
076123 (N35.08°,E129.50°)	8.04	11.54	E	Case 19
	10.18	12.67	ESE	Case 20
	10.21	10.68	SE	Case 21
	10.76	13.30	SSE	Case 22
077122 (N35.21°,E129.67°)	6.60	10.83	ENE	Case 23
	7.73	11.25	E	Case 24
	10.10	12.63	ESE	Case 25
077121 (N35.35°,E129.67°)	6.61	11.67	ENE	Case 26
	7.94	11.45	E	Case 27
077120 (N35.49°,E129.67°)	6.79	11.83	NE	Case 28
	6.56	11.02	ENE	Case 29

Table 3.3 Approximate values of reflection coefficient

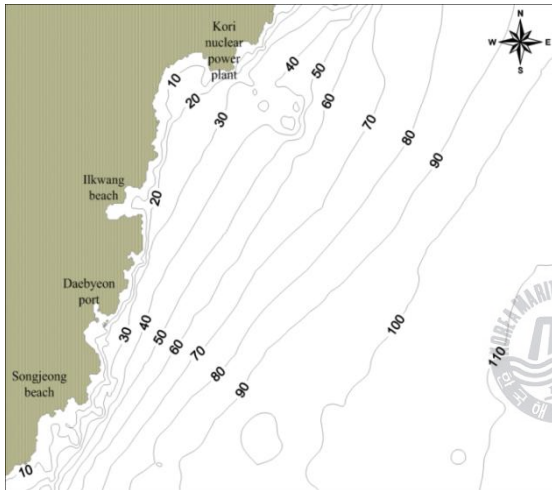
Structural types	Reflection coefficient
Vertical wall with crown above still wave level	0.7 ~ 1.0
Vertical wall with submerged crown	0.5 ~ 0.7
Rubble stones(slope of 1 on 2 to 3)	0.3 ~ 0.6
Energy dissipating concrete blocks	0.3 ~ 0.5
Vertical structure of energy dissipating type	0.3 ~ 0.8
Natural beach	0.05 ~ 0.2



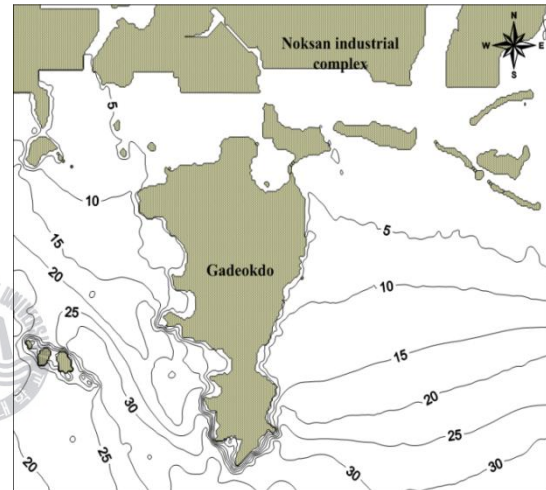
(a) Wide area NO.1-1



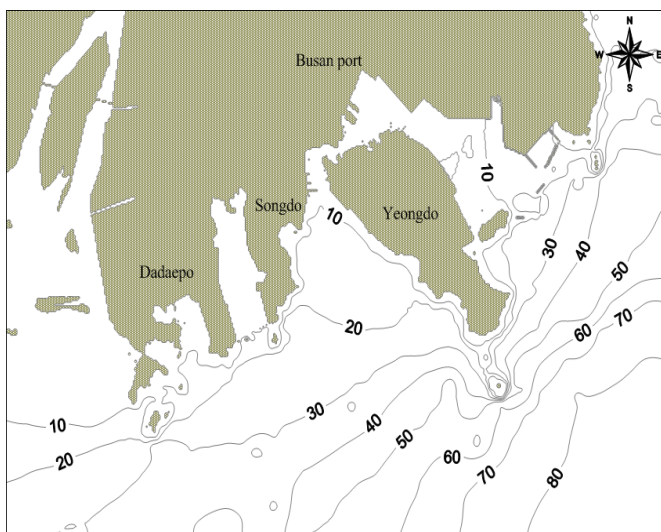
(b) Wide area NO.1-2



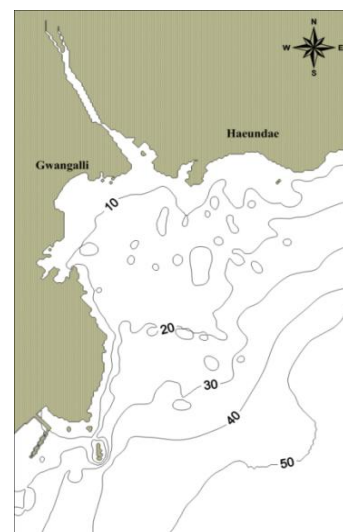
(c) Wide area NO.1-3



(d) Middle area NO.2-1



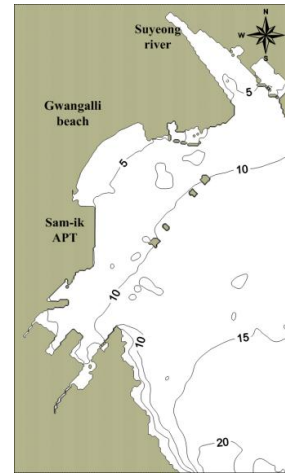
(e) Middle area NO.2-2



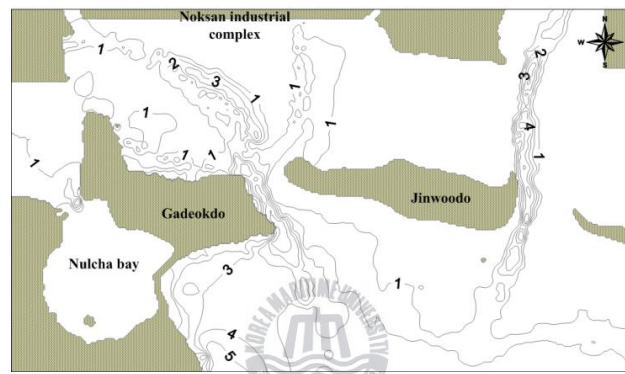
(f) Middle area NO.2-3



(g) Middle area NO.2-4



(i) Object area NO.3-2



(h) Object area NO.3-1

Fig. 3.10 Spatial distributions of water depth

Table 3.4 Water levels for each simulating area

Area number	Approx.HHW (m)	Storm surge height (m)	Design water level : Approx.HHW + Storm surge height(m)	Remark <Nesting area>
AREA NO.1-1	1.906	1.69	3.596	NO.2-1
	1.476	1.35	2.826	NO.2-2
	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.009	0.77	1.779	NO.2-4
AREA NO.1-2	1.906	1.69	3.596	NO.2-1
	1.476	1.35	2.826	NO.2-2
	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.009	0.77	1.779	NO.2-4
AREA NO.1-3	1.137	1.12	2.257	NO.2-3
	1.009	0.77	1.779	NO.2-4
AREA NO.2-1	1.906	1.69	3.596	NO.3-1
AREA NO.2-3	1.137	1.12	2.257	NO.3-2
AREA NO.3-1	1.906	1.69	3.596	
AREA NO.3-2	1.137	1.12	2.257	

(2) 수치해석결과

1) 녹산국가산업단지

Fig. 3.11은 Table 3.2와 3.4에 제시된 조건으로부터 태풍 Maemi시의 바람장을 이용하여 녹산국가산업단지(이하; 녹산공단) 전면에서 산정된 천해파랑의 일례(Table 3.2의 Case 2)를 나타낸 것이다. Fig. 3.11에서 (a), (c), (e)의 파고분포도는 지형의 영향이 고려되지 않은 바람장을, (b), (d), (f)의 파고분포도는 MASCON모델에 의해 지형의 영향을 고려한 바람장을 각각 적용하여 SWAN모델에 의해 산정된 결과이다. 바람이 천해파랑산정에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이므로 계산에 필요한 모든 조건들은 동일하게 설정하고 바람장만의 차이를 고려하여 모델을 실행하였다. 그림으로부터 녹산공단 전면에서의 파고분포는 Fig. 3.11에서 (a), (c), (e)의 경우보다 (b), (d), (f)의 경우가 약간 크게 주어진다. 또한, 외해에 비해 상대적으로 차폐된 지역(가덕도-녹산공단-진우도)에서의 등파고선도는 Fig. 3.11의 (a), (c), (e)에 비해 (b), (d), (f)의 경우가 복잡하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 보다 정도 높은 천해파랑을 산정하기 위하여 지형의 영향을 고려한 바람장이 계산에 적용될 필요가 있는 것으로 판단된다.

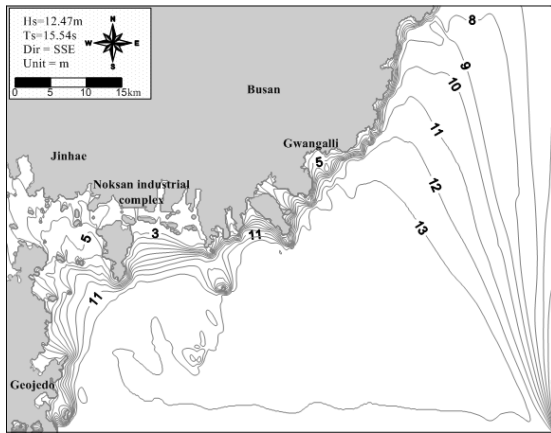
2) 광안리 인근해역

Fig. 3.12는 Table 3.2와 3.4에 제시된 조건으로부터 최대폭풍해일고를 나타낸 태풍 Sarah의 바람장을 이용하여 광안리 전면에서 산정된 천해파랑의 일례(Case 16)를 나타낸 것이다. Fig. 3.12의 (a), (c), (e)는 지형의 영향이 고려되지 않은 바람장을, (b), (d), (f)은 MASCON모델에 의해 지형의 영향을 고려한 바람장을 이용하여 얻어진 결과이다. 바람이 천해파랑산정에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이므로 계산에 필요한 모든 조건들은 동일하게 설정하고 바람장만의 차이를 고려한 후 모델을 실행하였다. 광안리 지역의 경우는 녹산공단의 경우와 비교하여 상대적으로 개폐된 해역이기 때문에 바람장의 변화가 크지 않으며, 따라서 파고의 변화도 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

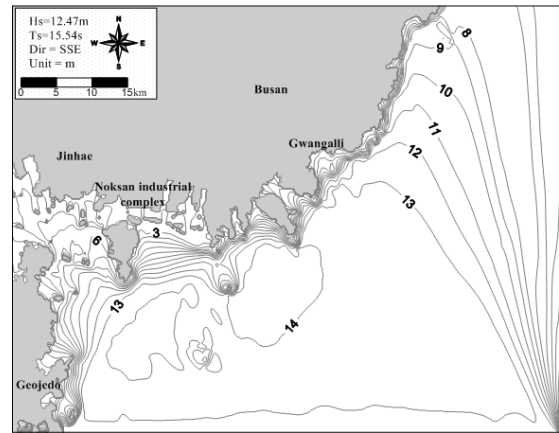
3) 삼익아파트의 전면에서 파고 및 주기의 산정

삼익아파트 전면해역에 대해서 산정한 유의파고를 Fig. 3.13에 나타내며, Fig. 3.14는 평균주기로 얻어지는 값을 유의주기로 환산한 값이다(Goda, 1985). 이 때, 본 계산에서는 삼익아파트 전면해역에 발생될 수 있는 반사파의 중복을 방지하기 위하여 삼익아파트 전면호안에 설치된 TTP의 반사에 의한 영향을 고려하지 않는 것으로 하였다.

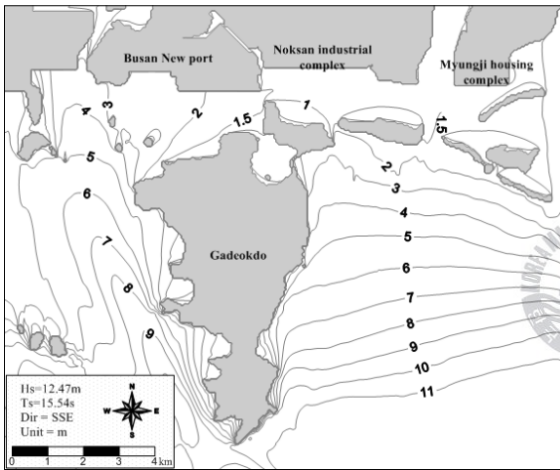
Fig. 3.13과 3.14의 결과값을 비교하면 고려된 다섯 개의 신심해설계파제원 중에서 Case 12(Hs=12.25m, Ts=15.16sec, Dir=SSE)는 삼익아파트 전면호안에서 353~357cm의 파고분포와 13.25~13.70sec의 주기분포를 가지며, Case 13(Hs=9.91m, Ts=14.33sec, Dir=S)은 328~354cm의 파고분포와 11.57~12.09sec의 주기분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. Case 16(Hs=10.37m, Ts=12.83sec, Dir=SE)은 356~390cm의 파고분포와 12.23~12.79sec의 주기분포, Case 17(Hs=9.99m, Ts=12.91sec, Dir=SSE)은 349~372cm의 파고분포와 12.12~12.53sec의 주기분포, Case 19(Hs=8.04m, Ts=11.54sec, Dir=E)는 355~403cm의 파고분포와 11.04~11.63sec의 주기분포를 각각 나타내고 있다.



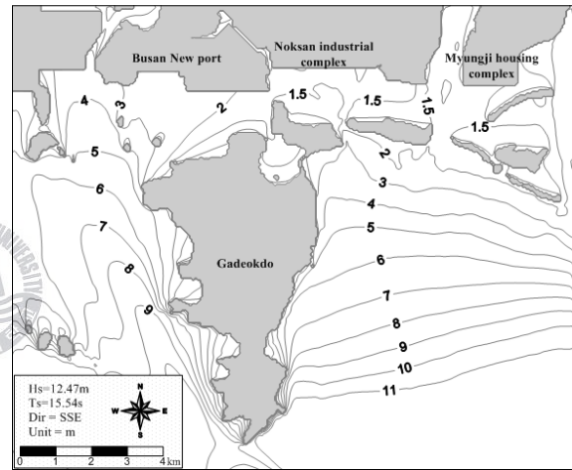
(a) Wide area NO.1-1 (Typhoon)



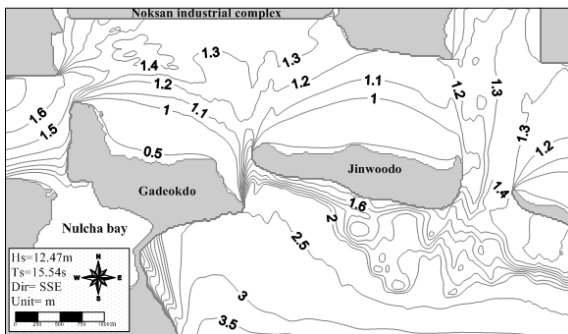
(b) Wide area NO.1-1 (MASCON)



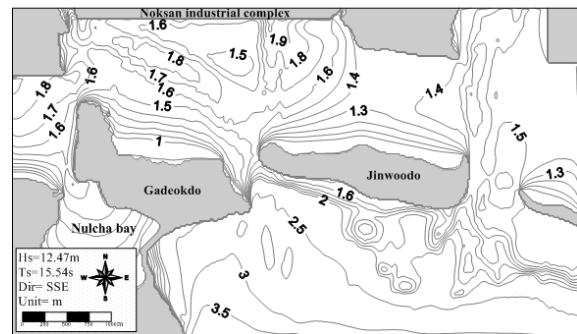
(c) Middle area NO.2-1 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-1 (MASCON)

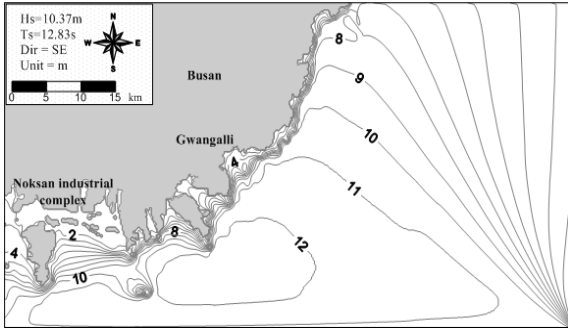


(e) Object area NO.3-1 (Typhoon)

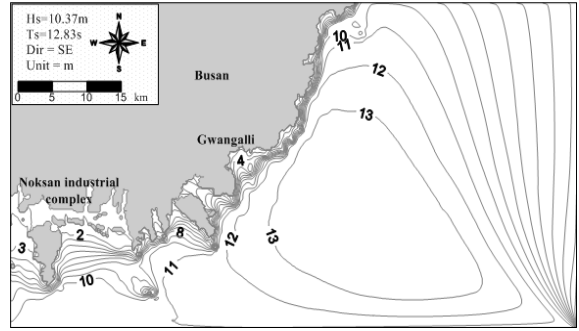


(f) Object area NO.3-1 (MASCON)

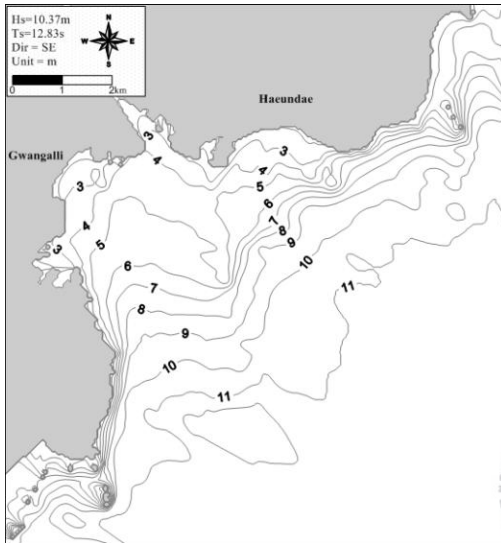
Fig. 3.11 Comparison of wave height distributions between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Maemi around Noksan (case 2)



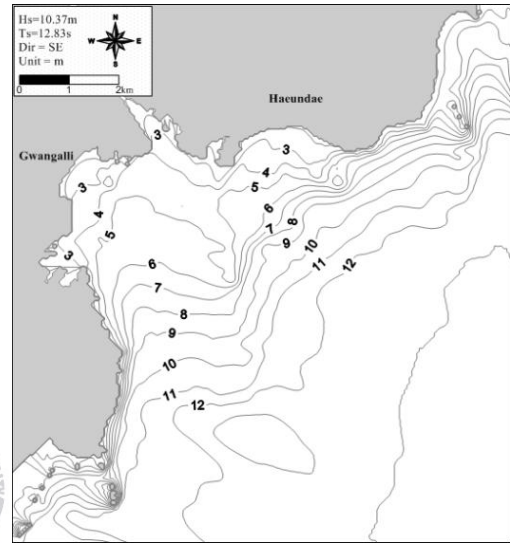
(a) Wide area NO.1 (Typhoon)



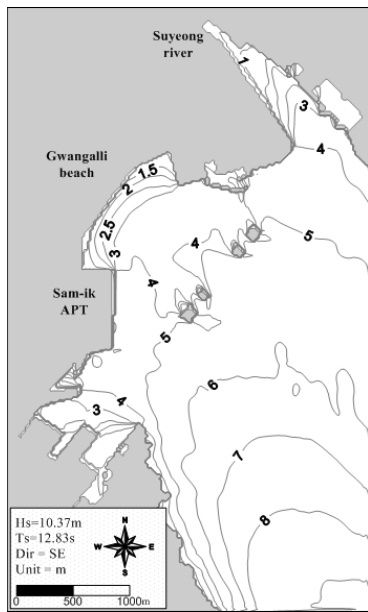
(b) Wide area NO.1 (MASCON)



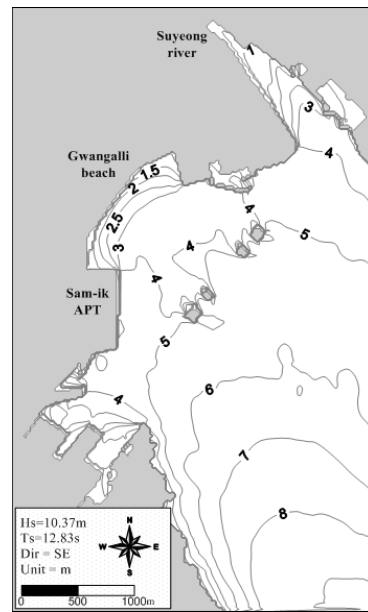
(c) Middle area NO.2-3 (Typhoon)



(d) Middle area NO.2-3 (MASCON)

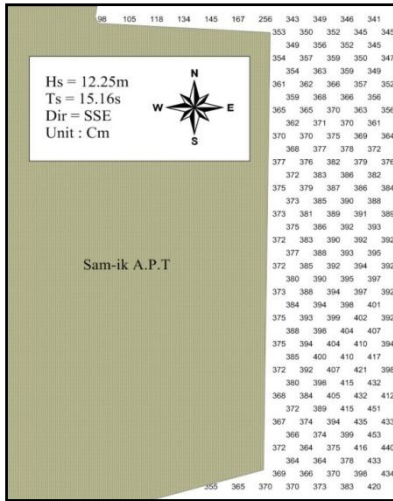


(e) Object area NO.3-2 (Typhoon)

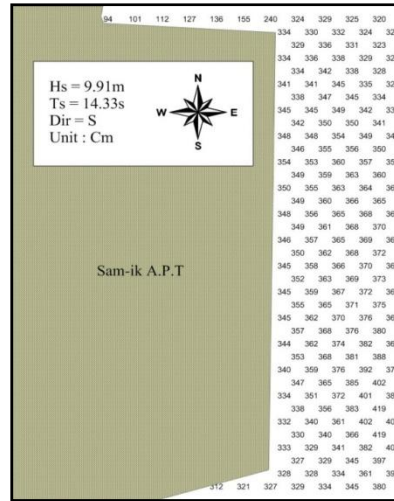


(f) Object area NO.3-2 (MASCON)

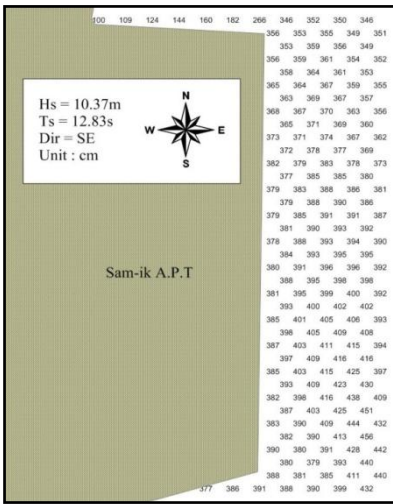
Fig. 3.12 Comparison of wave height distributions between sea wind model and MASCON wind model for typhoon Sarah around Gwangalli (case 16)



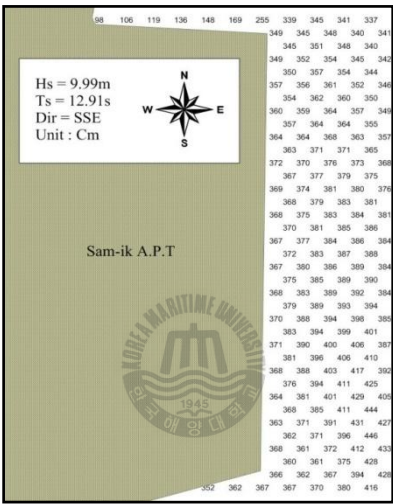
(a) case 12



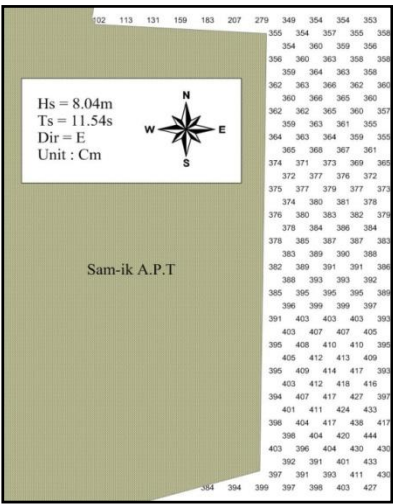
(b) case 13



(c) case 16

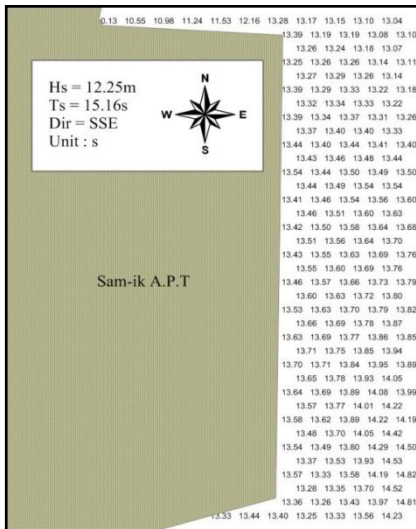


(d) case 17

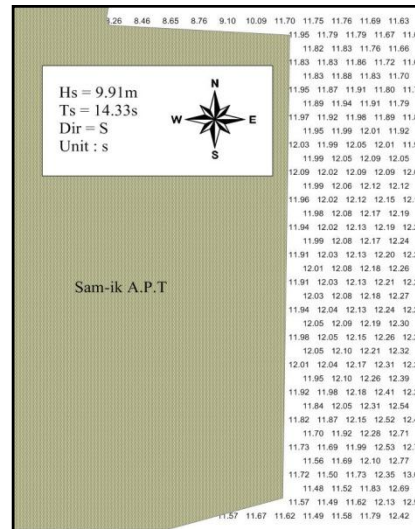


(e) case 19

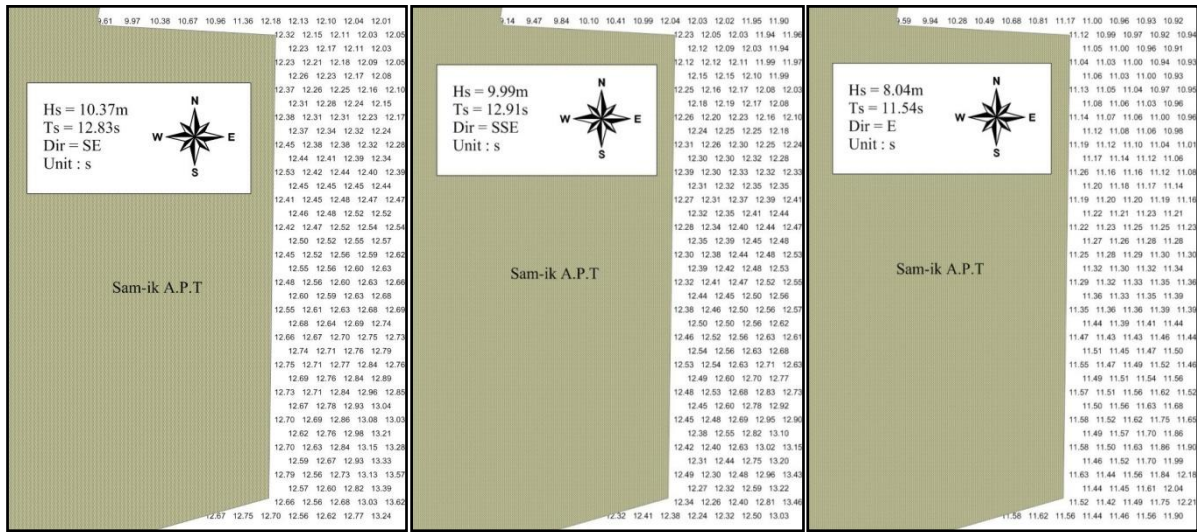
Fig. 3.13 Spatial distribution of significant wave heights around front seawall of Sam-ik APT



(a) case 12



(b) case 13



(c) case 16

(d) case 17

(e) case 19

Fig. 3.14 Spatial distribution of significant wave periods around front seawall of Sam-ik APT

3.3.3 침수해석

(1) 광안리 인근해역

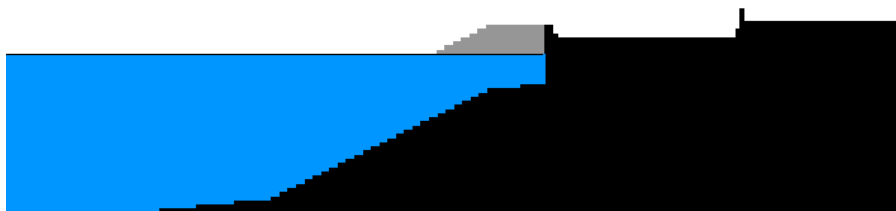
1) 월파량 산정

Fig. 3.13과 3.14의 결과로부터 삼익아파트의 전면해역에서 얻어지는 최대유의파고 및 최대유의주기를 입사파의 조건으로 하여 삼익아파트의 전면호안에 대한 월파량을 수치파동수로부터 산정한다. 전절에서 산정한 파고분포와 주기분포를 아래의 Table 3.5에 간략히 나타내었다. 여기서, 주기의 분포만을 생각하면 Case 12가 가장 많은 월파량이 산정되어야 하지만 긴 주기에 비해 상대적으로 파고가 작기 때문에 적절하지 않고, 파고의 분포만으로 생각하면 Case 19가 가장 많은 월파량이 산정되어야 하지만 상대적으로 높은 파고에 비해 주기가 짧기 때문에 최대월파량을 산정하는 경우에는 적절하지 않다. 이 중에서 파고분포도 상대적으로 높고 주기분포 또한 높은 Case 16(Hs=10.37m, Ts=12.83sec, Dir=SE)의 값으로 최대 월파량을 추정하기 위한 제원으로 사용한다. 최대유의파고 및 최대유의주기는 각각 $H_{1/3} = 390cm, T_{1/3} = 12.73sec$ 다.

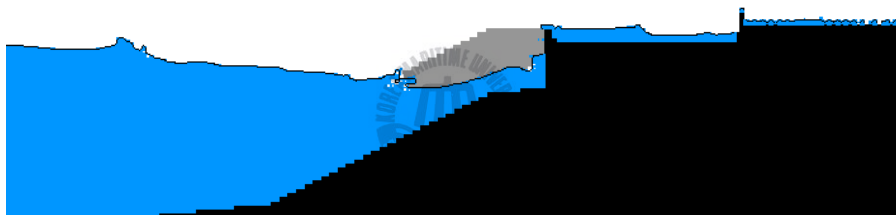
Fig. 3.15는 VOF법으로 계산하여 얻어진 월파현황의 일례를 나타내며, 파랑산정에 고려하지 않았던 TIP의 반사율은 계산상에서 공극률로 대체하여 사용하였으며, (a)는 계산시작시간에서의 시작상태를 나타내고, (b)는 2-3번의 파가 전면 호안뿐만아니라 해안도로 배후옹벽까지 월파하고 전면호안에서 파곡이 나타나는 그림이다. 그리고 (c)는 (b)시간 이후에 2-3번의 파가 더 월파가 된 경우에 전면호안과 해안도로 배후옹벽에서 월파상황을 보여주는 그림이다. 이와 같이 산정된 월파량은 전면호안에서 $00192 m^3 / m \cdot s$ 해안도로 배후옹벽에서 $0.0176m^3 / m \cdot s$ 이다. 이 값은 호안의 배후지가 주거지역인 경우의 허용월파량 $0.01m^3 / m \cdot s$ (해양수산부, 2000)을 초과한다.

Table 3.5 Distribution of significant wave height and period around front seawall of Sam-ik APT

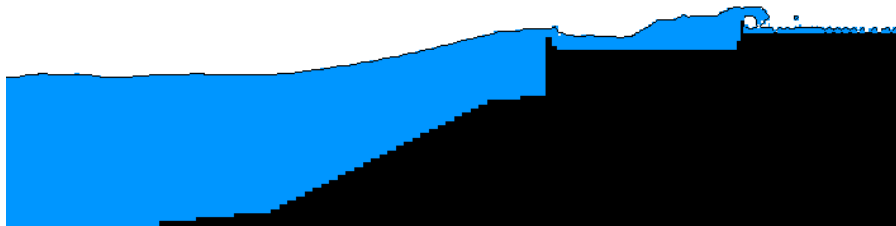
Deepwater design waves	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
Case 12(Hs=12.25m, Ts=15.16sec, Dir=SSE)	353~357	13.25~13.70
Case 13(Hs=9.91m, Ts=14.33sec, Dir=S)	328~354	11.57~12.09
Case 16(Hs=10.37m, Ts=12.83sec, Dir=SE)	356~390	12.23~12.79
Case 17(Hs=9.99m, Ts=12.91sec, Dir=SSE)	349~372	12.12~12.53
Case 19(Hs=8.04m, Ts=11.54sec, Dir=E)	355~403	11.04~11.63



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 3.15 Snapshot of overtopping

2) 범람예측

전절에서 얻어진 월파량으로 삼익아파트의 단지내에서 범람을 예측하였다. 이 때, 호안 및 옹벽의 선단부에서 월파하는 것으로 하였으며, 삼익아파트내와 주변도로 및 주택 등을 세밀히 고려하기 위하여 격자를 x 축으로 $1m$, y 축으로 $2m$ 로 각각 설정하여 계산하였다. 범람모델의 수행에서 중요한 입력치인 지반고는 Land Desktop3의 프로그램으로 대상영역의 호안, 옹벽, 건물 및 도로까지 포함된 각각의 지반고를 입력하였다. 또한, 계산시간은 실제 태풍내습시간에 따른 영향과 경향을 일치시키기 위하여 1시간 30분으로 하였으며, 저면의 조도가 다르고

조도계수가 범람류의 거동에 영향을 미치므로 조도계수로 도로는 0.04(福岡, 1996), 건물은 밀도비에 따라 0.03-0.8(Miura and Shimizu, 1993)의 범위의 값을 적용하였다.

Fig. 3.16은 본 계산에서 얻어진 범람의 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과에 따르면 삼익아파트 단지내의 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 해안에서 떨어져 있는 아파트단지내의 도로에서는 0.1~0.5m 정도의 침수가, 아파트단지내의 해안도로 배후옹벽에 가까운 도로에서는 0.6~1.0m 정도의 침수가, 해안산책로에 대해서는 1.3m 내외의 침수가 발생하였다.

여기서, 해석결과는 2.5절에서 광안리 인근에 대해서 추정된 최대폭풍해일고가 태풍 Maemi보다 태풍 Sarah 내습시 더 크게 나타났기 때문에 태풍 Sarah에 의해서 추정된 폭풍해일고와 바람장을 입력조건으로 하여 계산을 수행하였다. 그러나 1959년에 내습한 태풍 Sarah 내습시의 침수피해 상황은 현재와 지형의 형상도 다르고 침수 피해에 대해서 정확히 인지할 수가 없는 관계로 가장 최근에 내습한 태풍 중에 광안리 인근지역에 영향을 많이 미친 태풍 Maemi 내습시의 침수현황도와 비교한다. 본 결과와 Fig. 3.17의 침수피해 현황도(부산광역시, 2005)를 비교하면 Fig. 3.17에 침수면적만 제시가 되어 있고 각각의 영역에 침수고는 제시가 되어 있지 않아 직접적인 비교는 다소 무리가 있지만 침수면적에서는 본 연구의 해석결과와 전반적으로 잘 일치하는 경향을 확인할 수 있다.

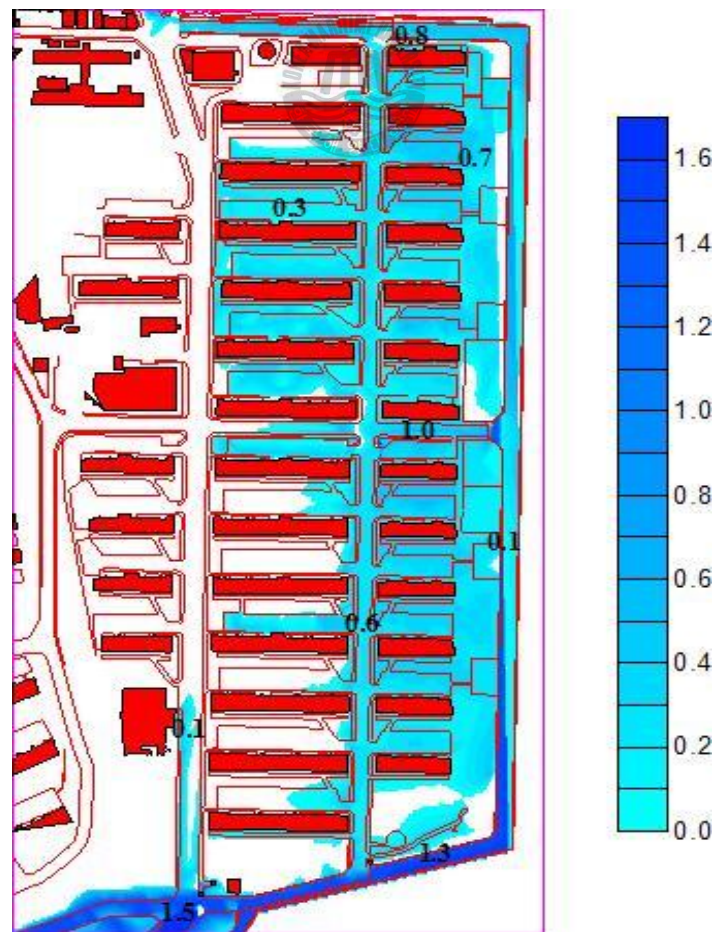


Fig. 3.16 Spatial distribution of inundation height (Unit : m)



Fig. 3.17 Inundation map around Gwangalli for typhoon Maemi

(2) 녹산국가산업단지 인근

1) 천해파랑 산정

태풍 Maemi에 의해 많은 피해를 입었던 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지를 대상으로 천해파랑을 추산하였다. 녹산국가산업단지의 파랑산정에 영향을 미칠 수 있는 신항의 건설 상황을 고려하기 위해서 신항의 현재 상태와 차후 완공이 되었을 때의 상태에 대해 각각 계산을 수행하였으며, Fig. 3.18~3.19는 Table 3.6의 설계조위 및 Table 3.2에 제시된 심해파랑조건을 적용하여 산정된 파고분포 및 wave-setup의 일례(Table 3.2의 Case8)를 나타낸 것이다.

① 신항 완공전

Fig. 3.18(a)는 Table 3.6의 설계조위 및 Table 3.2에 제시된 $\langle H_s=11.37m, T_s=15.41s \text{ Dir}=S \rangle$ 의 심해파랑조건을 적용하여 산정된 광역에서 파고분포를 나타낸 결과이다. 전반적으로 12m 이상의 파고분포를 보이고 있으며, 부분적으로 13m 이상의 파고분포가 나타난다. Fig. 3.18(b)는 신항만, 가덕도, 녹산국가산업단지의 인근해역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 가덕도 동측에서 12m 이상의 파고가 녹산국가산업단지 전면해역으로 진행함에 따라 천수, 굴절, 회절 및 쇄파 등의 영향으로 2m까지 감소하고, 가덕도 서측 역시 파랑변형에 의해 파고가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.18(c)는 녹산국가산업단지의 인근해역에서 각 심해파랑조건에 따른 협역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 산정된 파고분포를 살펴보면 진우도의 좌측에 있는 개구부로부터 입사파랑이 녹산국가산업단지 전면해역의 파고분포에 큰 영향을 미치며, 이로 인하여 개구부의 바로 배후위치에서 가장 큰 파고값 1.54m를 나타내고, 이를 중심으로 좌우로 작은 파고값을 나타낸다. 또한, 신항만에서 녹산국가산업단지 전면해역으로 파랑이 입사되고 있음을 알 수 있으며, 신항만으로 부터 유입되는 파랑에 의해 전면해역의 좌측에 부분적으로 1.4m의 파고분포가 나타난다. 그리고 신항만내의 정온도가 1.5m 내외의 분포로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3.18(d)는 녹산국가산업단지의 인근해역에서 wave-setup 분포를 나타낸 결과로 녹산국가산업단지의 전면해역에서 전체적으로 30cm 전후의 wave-setup 분포를 나타내고 있다.

② 신항 완공후

Fig. 3.19(a)는 Table 3.6의 설계조위 및 Table 3.2에 제시된 $\langle H_s=11.37m, T_s=15.41s \text{ Dir}=S \rangle$ 의 심해파랑조건을 적용하여 산정된 광역에서 파고분포를 나타낸 결과이다. 전반적으로 12m 이상의 파고분포를 보이고 있으며 부분적으로 13m 이상의 파고분포가 나타나기도 한다. Fig. 3.19(b)는 신항 완공후의 경우에 신항만, 가덕도, 녹산국가산업단지의 인근해역에서의 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 가덕도 동측에서 12m 이상의 파고가 녹산국가산업단지 전면해역으로 진행함에 따라 천수, 굴절, 회절 및 쇄파 등의 영향으로 2m까지 감소하고, 가덕도 서측 역시 파랑변형에 의해 파고가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 신항만의 항내파고는 신항 완공전 경우와 비교하면 신항이 완공됨에 따라서 2.0m 전후의 파고분포가 1.0m 내외로 줄어드는 양상을 나타낸다. Fig. 3.19(c)는 신항 완공후에 녹산국가산업단지의 인근해역에서 심해파랑조건에 따른 협역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 산정된 파고분포를 살펴보면 신항의 영향을 받지 않는 진우도 좌측의 개구부를 통하여 많은 파랑에너지

가 녹산국가산업단지의 전면해역으로 전달되며, 이로 인하여 개구부의 바로 배후위치에서 가장 큰 파고값 1.58m를 나타내고, 이를 중심으로 좌우로 작은 파고값을 나타내는 것은 전술한 신항 완공전의 경우와 동일한 경향이다. 또한, 신항만이 완공됨에 따라 신항만내의 정온도가 1.3m 내외의 분포를 나타내고 신항만에서 녹산국가산업단지의 전면해역으로 입사되던 파랑이 감소되었음을 알 수 있으며, 유입되는 파랑이 감소함으로써 녹산국가산업단지의 전면해역에 부분적으로 나타났던 1.4m의 파고분포가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이상으로부터 신항의 완공여부가 녹산국가산업단지 전면해역에서 파랑의 크기에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있다. Fig. 3.19(d)는 협역에서의 wave-setup 분포를 나타낸 결과이다. 신항 완공전의 경우와 마찬가지로 녹산국가산업단지의 전면해역에서 전체적으로 30cm 전후의 wave-setup 분포를 나타내고 있다.

월파랑의 계산 혹은 그의 수리실험에서 가장 큰 변수가 되는 조위는 결과적으로 Table 3.6의 설계조위에 본 연구에서 얻어진 wave-setup에 의한 수위상승량을 고려한 조위가 최종설계조위로 되어야 한다. 따라서, Table 3.7은 월파랑의 추정에서 적용되어야 하는 최대파랑(Table 3.2에서 $H_s=11.37m$, $T_s=15.41s$, $Dir=S$)의 경우에 최종설계 조위를 나타낸다.

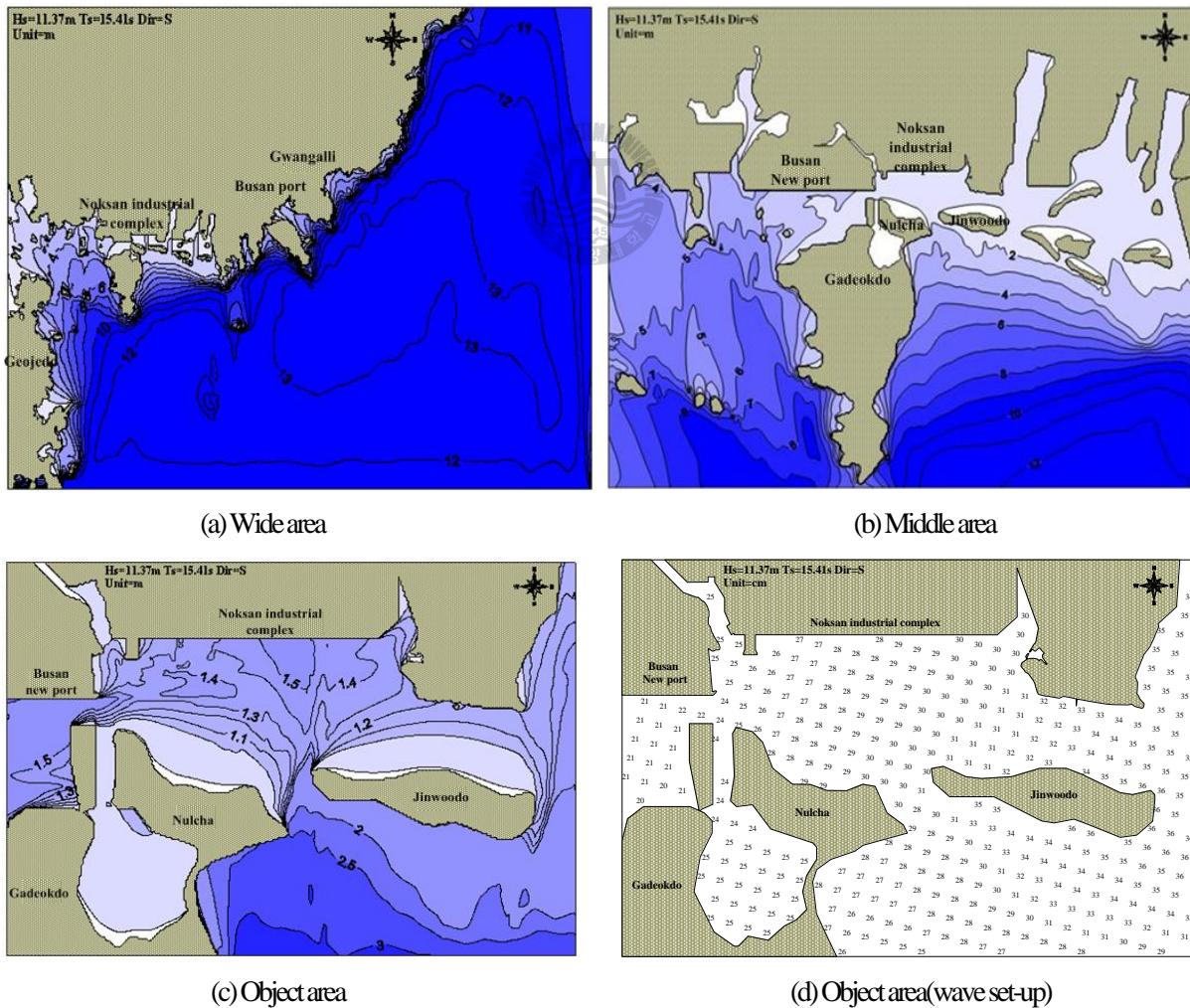


Fig. 3.18 Spatial distributions of wave heights and wave-setups before construction of Busan new port

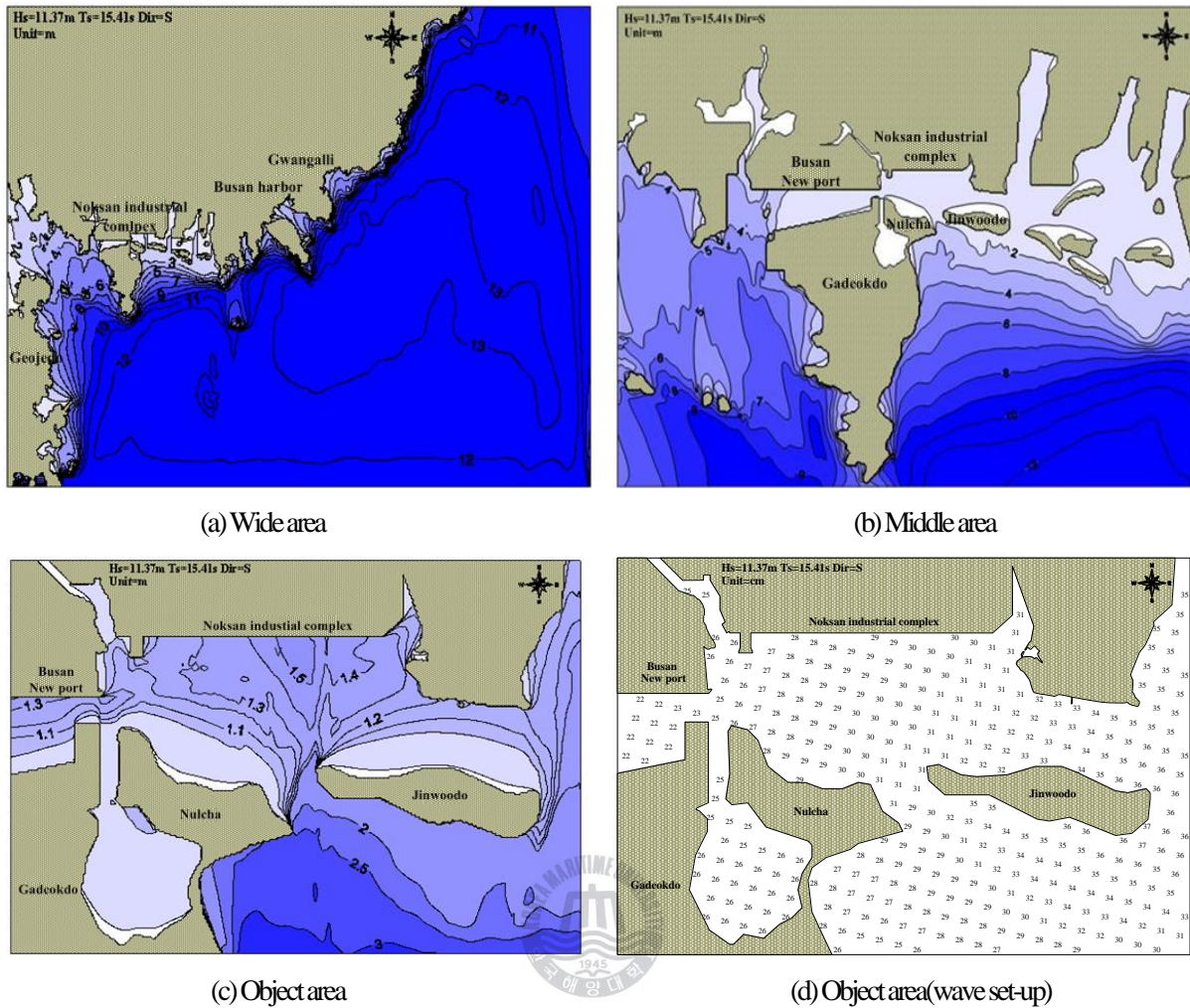


Fig. 3.19 Spatial distributions of wave height and wave-setups after construction of Busan new port

Table 3.6 Design water levels for typhoon Maemi

Area numbers	Approx. H.H.W (m)	Maximum storm surge height (m)		Approx. H.H.W + Maximum storm surge height (m)	
		Before construction of Busan new port	After construction of Busan new port	Before construction of Busan new port	After construction of Busan new port
AREA No.1	1.906	1.69	1.68	3.596	3.586
AREA No.2	1.906	1.69	1.68	3.596	3.586
AREA No.3	1.906	1.69	1.68	3.596	3.586

Table 3.7 Resultant design water level considered wave-setup

Point of deepwater wave	Design level (m)	Condition of deepwater wave			Maximum wave-setup (cm)	Total design level (m)
		Hs(m)	Ts(s)	Dir.		
073125	DL.(+3.596)	11.37	15.41	S	30	DL.(+3.896)

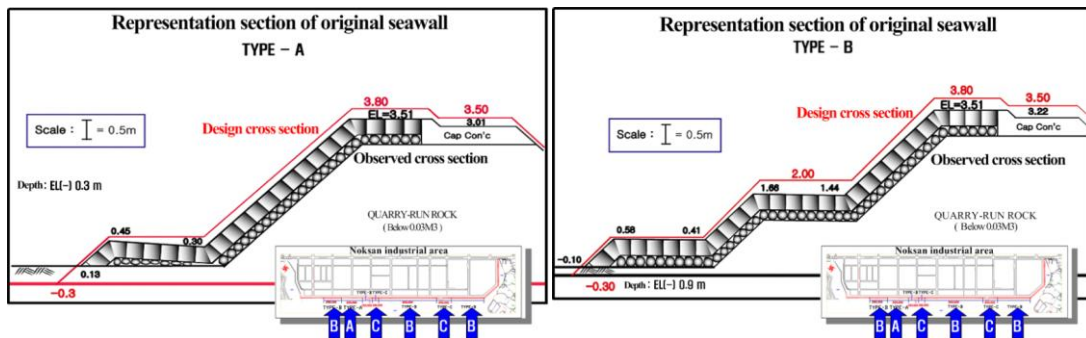
2) 월파량산정

Fig. 3.20은 월파의 수치실험을 통하여 월파상황을 검토하기 위해 제시된 녹산국가산업단지의 대표호안단면의 형상을 나타내고 있다(부산광역시, 2004). 녹산국가산업단지 대표호안의 단면형상(Fig. 3.20참조)에 대한 월파상황을 검토하기 위해 적용된 입사파랑조건을 Table 3.8에 나타낸다. Table 3.8의 조건은 Fig. 3.18(c)에서와 같이 호안의 반사를 고려하지 않고 얻어진 호안전면에서 입사파랑조건이다.

Table 3.8에서 제시된 각 파랑조건에 있어서 대표호안의 단면형상에 따른 수위변동분포를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3.21~3.23이다. Fig. 3.21~3.23은 본 연구의 수치파동수로로 계산하여 얻어진 월파현황의 일례를 나타내며, 파랑산정에 고려하지 않았던 TTP의 반사율은 계산상에서 공극률로 대체하여 사용하였다. (a)는 2~3번의 파가 내습한 후 임의의 시간에 대한 $t = T/4$ 시간의 상태를 나타내고, (b)는 $t = 2T/4$ 의 시간에 파가 전면호안을 월파하는 상태를 나타내고 있다. 그리고 (c)는 $t = 3T/4$ 의 시간에 파가 월파하고 난 후 파곡이 나타나는 그림이고, (d)는 $t = T$ 의 시간에 대한 상태를 나타내는 그림이다. 결과에 의하면 월파재현실험으로부터 단면형상 Type-A, Type-B, Type-C 모두 다소 월파를 허용하는 것을 알 수 있다.

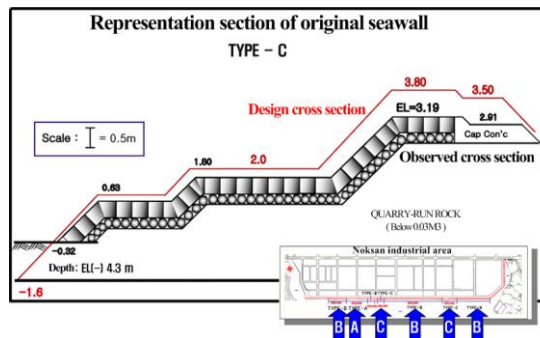
Table 3.8 Incident wave conditions

Cross section	Depth (m)	Storm surge height (pressure setup + wind setup + wave setup)	Hs(m)	Ts(s)
Type-A	Below E.L.(-)0.3m	D.L.(+)3.896	1.46	15.0
Type-B	E.L.(-)0.3m ~ E.L.(-)0.9m		1.58	15.0
Type-C	E.L.(-)0.9m ~ E.L.(-)4.3m		1.49	15.0



(a) Type-A

(b) Type-B



(c) Type-C

Fig. 3.20 Representation sections of original seawall used in numerical simulation

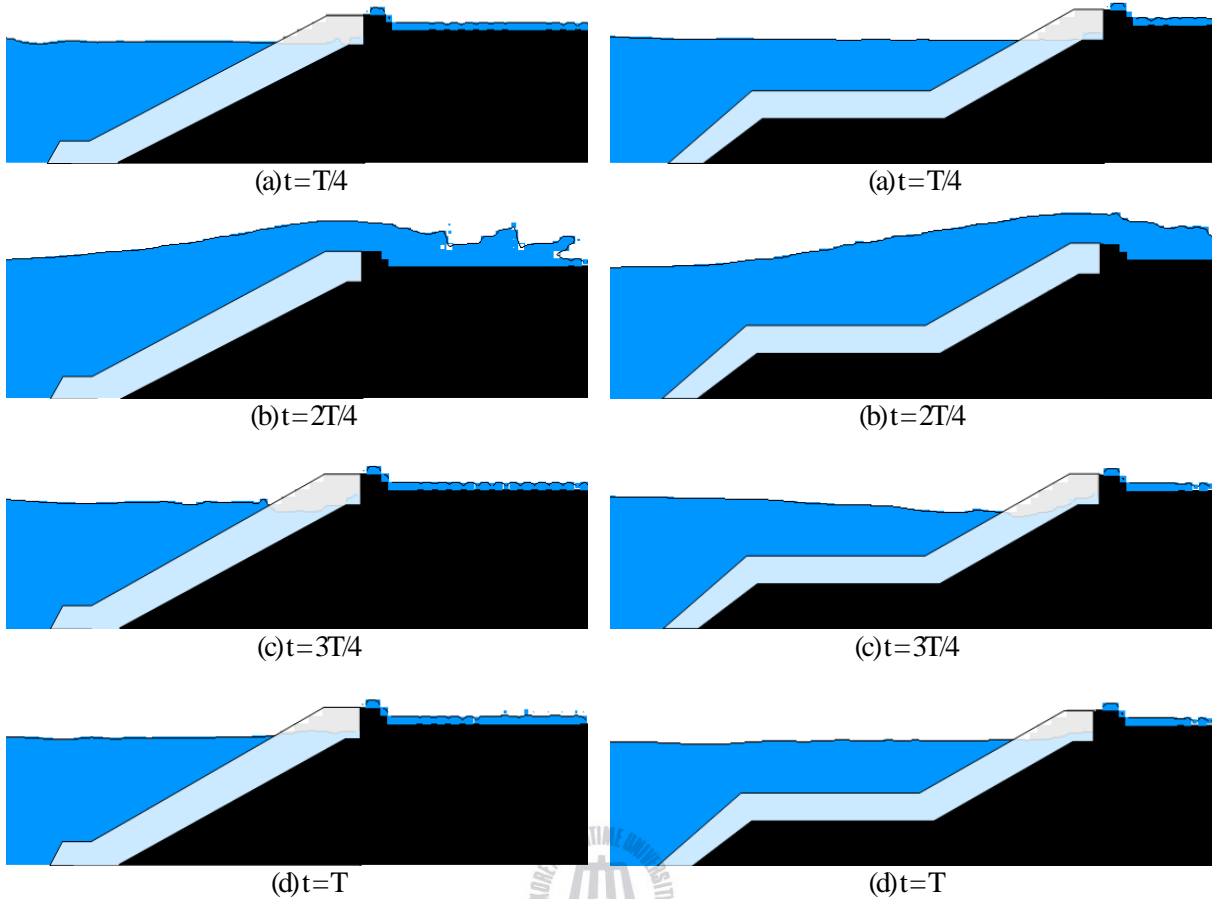


Fig. 3.21 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-A Fig. 3.23 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-C

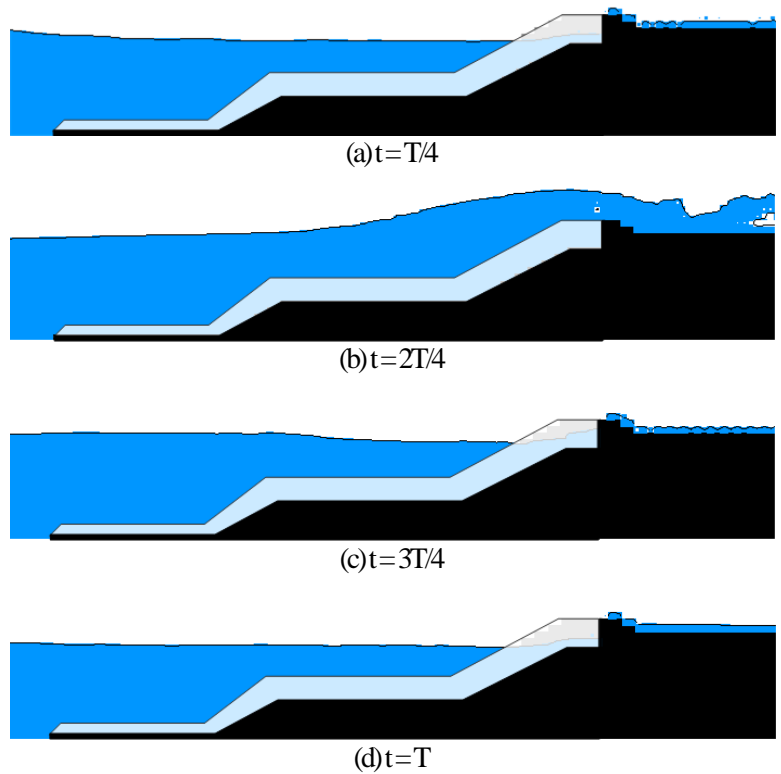


Fig. 3.22 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-B

Table 3.8의 조건으로 재현한 월파상황에서 산정한 월파량의 결과를 Table 3.9에 나타낸다. 결과를 살펴보면 Type-A, Type-B, Type-C의 단면형상과 계산조건들은 차이가 나지만, 월파량은 $0.0173m^3 / m \cdot s \sim 0.0181m^3 / m \cdot s$ 로 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있으며, 이 값은 호안의 배후지가 주거지역인 경우의 허용월파량 $0.01m^3 / m \cdot s$ (해양수산부, 2005)을 초과한다. 그리고 Table 3.10은 태풍 Maemi 내습시의 녹산국가산업단지 월파 및 침수에 관한 보고서(한국토지공사, 2005)에 의한 수리모형실험으로부터 산정된 단면형상 Type-A, Type-B, Type-C의 계산조건과 월파량이다.

Table 3.9와 3.10을 비교하면 수치모형실험과 수리모형실험의 결과값의 차이가 크게 나타남을 알 수 있고, 수치모형실험보다 수리모형실험으로부터 얻어진 월파량은 허용치 ($0.01m^3 / m \cdot s$)를 훨씬 초과하는 것을 알 수 있다.

Table 3.9 Overtopping rates calculated by numeric analysis

Cross section	Overtopping rates ($m^3/m \cdot s$)
Type-A	0.0178
Type-B	0.0173
Type-C	0.0181

Table 3.10 Overtopping rates by hydraulic model test

Experimental cross section	Storm surge height (pressure setup + wind setup + wave setup)	Crown height (E.L.(+), m)	Wave height (m)	Period (s)	Overtopping rates ($m^3/m \cdot s$)
NO.2 (Type-A)	3.646	3.37	1.41	15.0	0.059
NO.11 (Type-B)	3.646	3.31	1.47	15.0	0.063
NO.20 (Type-C)	3.646	3.43	1.55	15.0	0.113

3) 범람예측

태풍 Maemi 내습시 도로와 건물의 배치에 따른 녹산국가산업단지 배후에서의 침수범위 및 침수고를 예측하기 위하여 범람모델의 입력치로 주어지는 각 호안단면에서의 월파량을 산정한다. 이 때, 각 호안의 단면형상에 따른 월파량에 대한 수리모형실험(한국토지공사, 2005)은 전 절에서 언급한 각 호안별 전면해역에서의 최대유의 파고 및 최대유의주기를 조건으로 하여 산정되며, 그 결과를 Table 3.11에 제시한다. 녹산국가산업단지내와 주변 도로 및 건물 등을 세밀히 고려하기 위하여 격자를 x축으로 5m, y축으로 5m로 각각 설정하여 계산하였다. 범람모델의 수행에서 중요한 입력치인 지반고는 land desktop3 프로그램으로 대상영역의 호안, 건물 및 도로까지 포함된 각 mesh의 지반고를 입력하였다. 또한, 계산시간은 실제 태풍내습시간에 따른 영향을 일치시키기 위하여 3시간으로 하였으며, 저면의 조도가 다르고, 조도계수가 범람류의 거동에 영향을 미치므로 조도계수로 도로는 0.04(福岡, 1996), 건물은 밀도비에 따라 0.03~0.8(Miura and Shimizu, 1993)의 범위의 값을 적용하였다.

Fig. 3.24(a)는 수리모형실험에 의해 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 호안전면의 두 블럭 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 전면 첫 번째 블럭은 0.3m~0.8m정도 침수가, 두 번째 블럭에서는 0.5m 이하의 침수고가 대부분이며 부분적으로 0.7m 이상의 침수가 발생함을 알 수 있다. 그리고 호안전면에서 멀어질수록 0.2m 이하로 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3.24(b)는 수치모형실험에 의해 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과에 따르면 녹산국가산업단지내의 두 블럭 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 전면 첫 번째 블럭은 0.7m~1.2m 정도 침수가, 두 번째 블럭에서 부분적으로 0.7m 이상의 침수가 발생하지만, 호안전면에서 멀어질수록 0.3m 이하로 감소함을 알 수 있다. 수리모형실험(한국토지공사, 2005)은 단면2차원으로 수행되었기 때문에 본 결과와 직접적인 비교는 어렵지만 단면에 대해서만 비교하면 단면형상 Type-A, Type-B, Type-C에 대해서 호안으로부터 내측 거리 30m 지점의 침수고는 0.77m~0.91m, 80m 지점의 침수고는 0.74m~0.89m, 130m 지점은 0.20m~0.23m로 본 연구의 결과와 경향이 매우 일치함을 알 수 있다. 이를 Table 3.12에 나타내었다.

Table 3.11 Overtopping rates obtained by numerical and experimental results

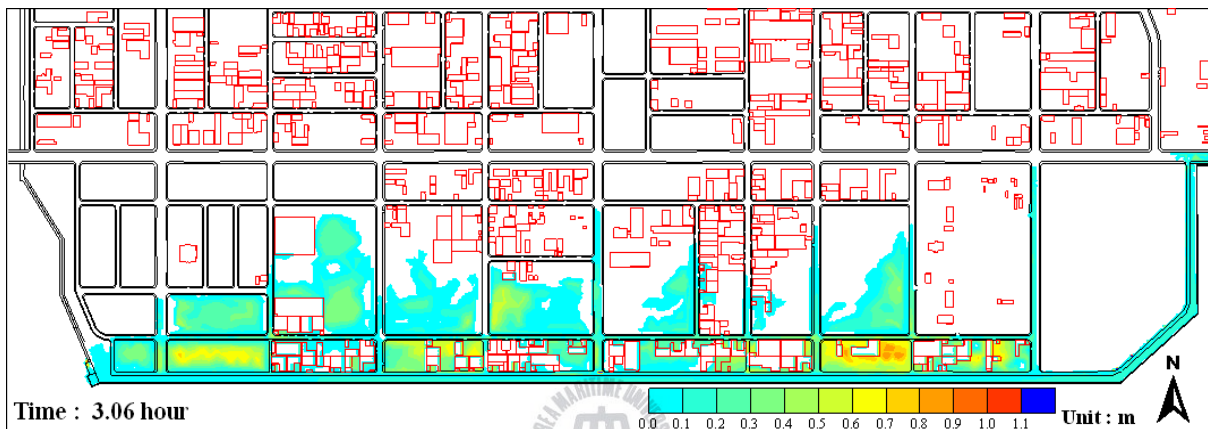
Cross section	Wave overtopping rates by numerical analysis (m ³ /m.s)	Wave overtopping rates by experimental analysis (m ³ /m.s)
Type-A	0.0178	0.059
Type-B	0.0173	0.063
Type-C	0.0181	0.113

Table 3.12 Comparison of inundation depths

Cross section	Distance from seawall (m)	Inundation depth by the experimental result (m)	Inundation depth by the numerical result (m)
NO.2 (Type-A)	30	0.91	0.9
	80	0.89	0.7
	130	0.23	0.2
NO.11 (Type-B)	30	0.77	0.8
	80	0.74	0.7
	130	0.21	0.2
NO.20 (Type-C)	30	0.79	0.9
	80	0.79	0.8
	130	0.20	0.2



(a) Inundation depth by experimental overtopping rates



(b) Inundation depth by numerical overtopping rates

Fig. 3.24 Spatial distributions of inundation depth in Noksan industrial complex

Fig. 3.25는 태풍 Maemi 내습 후 녹산국가산업단지 인근의 설문조사에 의한 침수고(부산광역시, 2004)를 나타내며 그 결과를 살펴보면 녹산국가산업단지 내 공터지역에서는 조사가 이루어지지 않았기 때문에 비교가 불가능 하지만, 전체적으로 호안에 인접한 전면 첫 번째 블록에서는 침수고가 150cm에 이르고, 다음 블록에서는 대체로 50cm에 해당한다.

그리고 Fig. 3.24의 결과를 Fig. 3.25의 조사가 이루어진 단면과 비교·검토하면 Fig. 3.24는 전면 첫 번째 블록에서 0.7m~1.2m 정도, 두 번째 블록에서 부분적으로 0.7m 이상의 침수가 발생하지만, 호안전면에서 멀어질수록 0.3m 이하로 감소하는 등 침수고의 양상이 설문조사결과와 잘 일치한다. 또한, 최대침수고의 발생위치에 대하여 Fig. 3.24는 Fig. 3.25의 조사결과를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 전체적으로 침수고가 높은 곳은 단면형식 Type-B의 배후역으로, 주변 지반고보다 상대적으로 낮은 지반고에서 높은 침수고가 발생하는 것을 알 수 있었다. 한편, Fig. 3.24가 Fig. 3.25의 설문조사결과와 약간의 차이를 나타내는 것은 본 연구의 수치해석결과는 강우에 의한 침수, 배수, 역류 및 건물 등의 지하로 유입되는 침수량의 영향까지 충분히 고려하고 있지 않기 때문으로 판단되며, 뿐만 아니라 Fig. 3.25는 지역주민들을 대상으로 설문조사한 자료에 기초하여 작성된 개략적인 결과로 실제 침수고와는 다소 차이가 있는 것으로 판단된다.

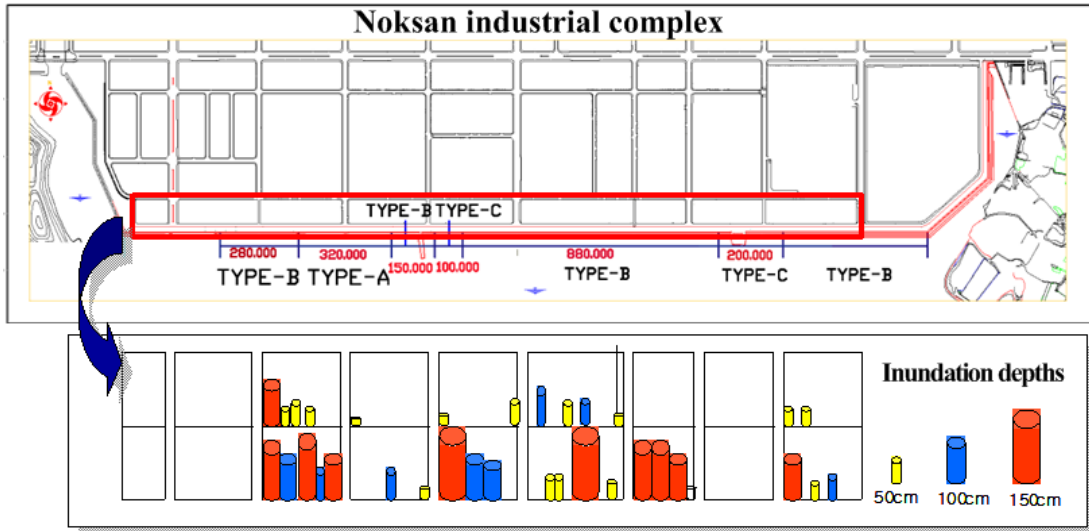


Fig. 3.25 Results of a field survey for inundation areas and depths in Noksan industrial complex

3.4 결론

본 장에서는 육상지형의 영향을 고려한 바람장을 산출하기 위하여 MASCON모형을 이용하였다. 이로부터 육상지형의 영향이 고려된 바람장으로부터 얻어진 해상풍이 천해파랑산정에 미치는 영향을 검토하였으며, 지역적으로 차폐 및 개방되는 해역특성이 분명한 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 전면해역과 부산광역시 수영구 광안리 주변해역을 대상으로 기존의 태풍모델로 산정된 해상풍과 육상지형의 영향을 고려할 수 있는 MASCON모델로 산정된 해상풍을 SWAN모델에 적용하여 천해파랑을 산정하였고, 그 결과를 상호 비교·검토함으로써 고정도의 천해파랑산정을 위한 MASCON모델의 필요성을 논의하였다.

산정된 천해파랑을 광안리 인근과 녹산국가산업단지의 전면호안에 적용하여 본 연구의 수치파동수로로 월과량을 산정하였다. 산정된 월과량으로부터 월류량을 추정하고, 이로부터 제내지의 침수현상을 해석하여 대상지역의 배후에 있는 도로와 공장 등의 건물을 고려하여 범람을 예측하였다. 이와 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 본 장의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

3.4.1 MASCON모델

(1) 지형의 영향이 고려되지 않은 경우에 바람장의 분포는 동심원을 그리며 일정하지만, MASCON모델에 의해 지형의 영향이 고려된 경우는 지형주위의 풍향이 변하고 풍속이 빨라지는 것을 MASCON모델로부터 확인할 수 있다.

3.4.2 SWAN모델

(1) 차폐된 지역일수록 지형을 고려한 바람장을 이용하여 천해파랑을 추산할 필요가 있으며, 지형이 복잡할수록 바람의 영향을 많이 받는다는 기존의 사실을 확인할 수 있었다.

(2) 보다 정도 높은 유의파고의 추산을 위해서 조석 및 조류, 하천유입 등의 고려될 필요가 있으며, 이는 향후 해결되어야 할 과제이다.

3.4.3 침수·범람해석모델

(1) 태풍 Maemi 내습으로 인한 녹산국가산업단지 인근에서의 침수역 및 침수고를 예측하였고, 그 결과를 수리모형실험의 결과 및 설문조사와 비교·검토하여 본 연구의 타당성을 확인할 수 있었다.

(2) 고파랑에 대한 호안월파랑의 고정도산정은 제내지내의 침수고 및 침수역을 예측하는데 중요한 파라미터로 작용할 수 있다.

(3) 본 연구의 범람모델은 연안재해의 예측, 방재계획의 수립, 위험도작성, 배후역에서의 지반고결정, 도시계획적인 문제 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 향후 강우에 의한 침수, 배수, 역류 및 건물 등의 지하로 유입되는 침수량을 고려하여 보다 정도 높은 해석을 수행할 필요가 있다.



< 참고문헌 >

- 강운구, 富田孝史, 김도삼, 안성모 (2004) : 태풍 매미내습시 남동연안에서의 해일 · 파랑에 의한 침수재해 특성, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 35-43.
- 김경옥, 山下隆男 (2004) : 해파-해일 복합현상에 의한 해일고 산정, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 81-86.
- 김도삼, 이광호 (2002) : 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지, 제16권, 제2호, pp.1-5.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정관 (2001) : VOF법에 기초한 불투과잠재 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 제21권, 5-B, pp.551-560.
- 부산광역시 (2005) : 해일피해영향분석 및 피해방지계획수립용역 보고서.
- 부산광역시 (2004) : 녹산공단 해일피해 방재대책 수립용역 종합보고서.
- 이민기(2007) : CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과 월파랑 추산에 관한 연구, 한국해양대학교 석사학위논문.
- 최병호, 엄현민, 김현승, 정원무, 심재설 (2004) : Wave-Tide-Surge Coupled Simulation for Typhoon Maemi, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 121-144.
- 한국토지공사 (2005) : 녹산산단 태풍 매미 피해원인 분석용역 최종보고서.
- 한국해양연구원 (2005) : 전해역 심해설계과 추정 보고서II.
- 허동수, 엄경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006) : 부산연안에서 폭풍해일고의 추정, 한국해양공학회지, 제20권, 제3호, pp 37-45.
- 해양수산부 (2000) : 항만 및 어항설계기준.
- 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.
- 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.
- 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.
- Fukuoka, S., Kawasima, M., Matsunaga, N. and Maeuchi, H. (1994) : Flooding Water Over a Crowded Urban District, Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering, No.491, II-27, pp. 51-60.
- Goda, Y (1985) : Random Seas and Design of Maritime Structures, University of Tokyo Press.
- Goto, C. and Shibaki, H. (1993) : A Hindcast of Marine Surface Wind Including Effects of Land Topography, Report of Port and Harbour Research Institute, 32(3), 65-97.
- Hasselmann, K. (1974) : On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, pp.107-127.

- 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.
- Hirt, C.W., and B.D. Nichols (1981) : Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, pp.201-225.
- Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005a) : Hindcasting of Storm Surge at Southeast Coast by Typhoon Maemi, 한국해양공학회지, 제19권, 제2호, pp 12-18.
- Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005b) : Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314(Maemi)", Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, pp 446-453.
- 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.
- McDonald, A. and D. Ledger (1981) : Flood Area Modeling from an Elementary Data Base, Journal of Hydrology, Vol.53, pp85-94.
- Miura, A. and Shimizu, Y. (1993) : Flood flow analysis in urban areas, International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization Bangkok, Thailand.
- Miles, J.W. (1957) : On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3, pp.185-204.
- 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.
- 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.
- Phillips, O.M. (1957) : On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., 2, pp.417-445.
- Takeda, M., Pokharel Parameshor and Naoki Matsuo (2005) : The Study on overlapping between flood and storm surge in river and estuary region, 한국수자원학회 학술대회지, pp. 868~867.
- 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.
- Wu, J. (1982) : Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, J. Geophys. Res., 87, C12, pp.9704-9706.
- Xanthopoulos, Th. and Ch. Koutitas (1976) : Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp.321-330.
- 井上和也 (1986) : 開水路非正常流の數値解析法とその水工學への応用に關する研究, 京都大學學位論文, pp. 172-177.
- 福岡捷二, 川島幹雄, 松氷宣夫, 前内氷敏 (1994) : 密集市街地の氾濫流に關する研究, 土木學會論文集, No.491, II-27, pp.51-60.
- 武田 誠 (1996) : 高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に關する研究, 京都大學博士學位論文.
- 沿岸開發技術研究センタ (2001) : CADMAS-SURF數値波動修路の開発 研究, pp.10-29.
- 紫木秀之 (2004) : 波浪・高潮・津波の數値計算と沿岸防災支援システムへの応用に關する研究, 東京大學博士學位論文.

4. 지진해일의 수치시물레이션

4.1 서언

해저지진이나 해저지반의 *sliding*, 해저화산활동 등으로 말미암아 지층의 수직이동(단층활동)이 발생하면 그와 동일한 현상으로 해면이 변화하여 파형이 형성되며, 이렇게 형성된 대단히 긴 주기를 갖는 해양파가 지진해일이라 불리고, 해저지반의 연직변위가 클수록 지진해일의 크기는 증가한다. 지진해일은 만이나 항구에서 상당한 수위상승 또는 진동을 유발시켜 해안지역을 침수시키거나 해안 및 항만구조물에 심각한 피해를 준다.

지진해일의 발생원인은 암석권에 있는 판(plate)의 움직임에 있으며, 직접적으로 지진을 일으키기도 하고 다른 형태로 지진의 에너지를 제공하기도 한다. 판을 움직이는 힘은 다양한 형태로 나타날 수 있으며, 침강지역에서 판이 암석권 밑의 상부맨틀에 비해 차고 무겁기 때문에 이를 뚫고 들어가려는 힘, 상부맨틀 밑에서 판이 상승하여 분리되거나 좌우로 넓어지려는 힘, 지구내부의 열대류에 의해 상부맨틀이 판의 밑부분을 끌고 이동하는 힘이 있지만 이것들이 어느 정도의 비율로 작용하는지는 정확히 알려져 있지 않다. 암석권(lithosphere)은 지표에서 100km 정도에 달하는 두께의 딱딱한 층으로, 그 밑에는 암석권에 비해 덜 딱딱하고 온도도 높아 쉽게 변형될 수 있는 상부맨틀층이 존재하고, 지진이 일어날 수 있는 깊이의 한계는 지표로부터 약 700km이다.

해저지반이 연직방향으로 변위를 일으키면 그 위에 놓여진 해수는 수평방향으로는 이동할 시간도 없이 같은 방향인 연직방향으로 변위가 발생하고, 이는 주위와 수위차를 갖게 된다. 수면변위는 다시 중력에 의해 반복적으로 상하운동을 하면서 대양으로 전파된다. 대양에서 지진해일이 발생하기 위해서는 규모 7.0 이상의 대형지진이 수심 1,000m 이상의 해저면에서 발생하여야 하는 것으로 알려져 있다(국립방재연구소, 1998).

전술한 바와 같이 지진해일의 발생원인으로 해저지진에 의한 해저면의 융기와 침강, 화산분화, 해저 *sliding*, 연안지역에 있어서의 절벽붕괴, 운석의 낙하 등을 들 수 있다. 지진해일의 발생원인별 발생횟수와 비율을 살펴보면, 해저지진에 의한 발생비율이 가장 높으며 화산폭발과 해저 *sliding*의 순으로 많이 발생한 것을 알 수 있다(양금석, 2007). 그리고 Fig. 4.1은 해저지진에 의한 지진해일의 발생모식도를 나타내고 있다.

이상과 같이 발생된 지진해일은 연안에 가까워짐에 따라 천수, 굴절, 반사, 회절, 공진(부진동) 등에 의해 변형된다. 지진해일이 발생하는 해역의 수심이 1,000m 이상인 경우는 대부분 심해에 해당하며, 심해를 횡단하는 중의 지진해일은 천수효과와 파고분산에 의한 파고의 상쇄효과 때문에(soliton) 파고의 증폭은 없고, 지진해일의 전파속도는 $C = \sqrt{gh}$ 로 수심에 비례하여 전파된다(여기서 C 는 위상전파속도, g 는 중력가속도, h 는 수심). 지진해일이 천해에 도달하면 파장이 감소하고, 일반적으로 파고는 높아진다. 이 때의 해일의 높이는 Fig. 4.2의 천수효과에 의해 $h^{1/4}$ 에 반비례하여 증폭되고, Fig. 4.2의 굴절에 의해 $b^{1/2}$ 에 반비례하여 증폭된다. 이의 관계가 Fig. 4.3의 Green정리로 알려져 있고 다음의 식(4.1)로 나타낼 수 있다.

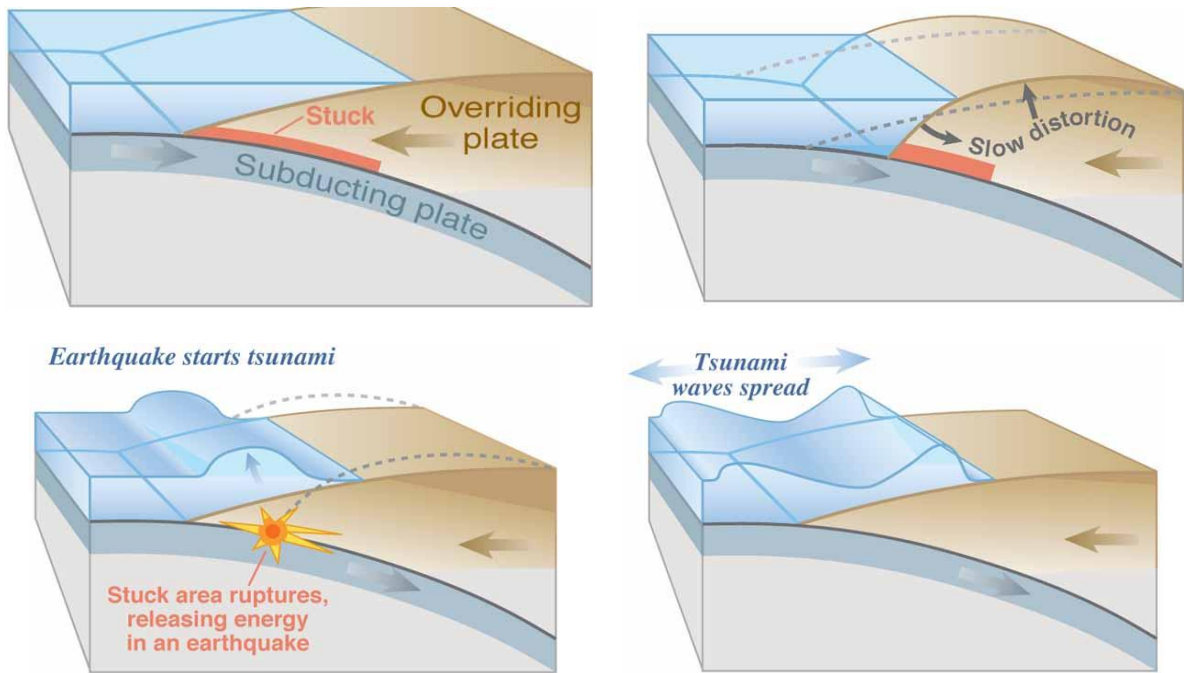
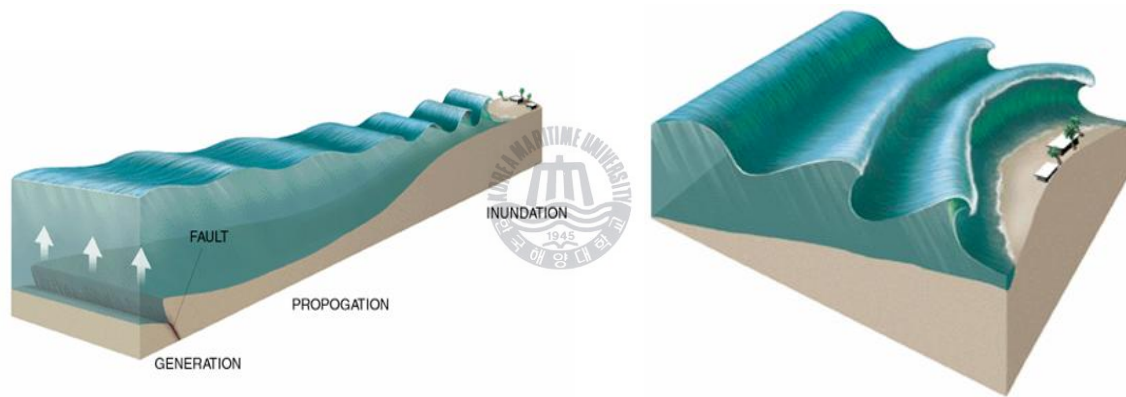


Fig.4.1 Earthquake-generated tsunami



(a) Shoaling

(b) Refraction

Fig.4.2 Shoaling and refraction of tsunami

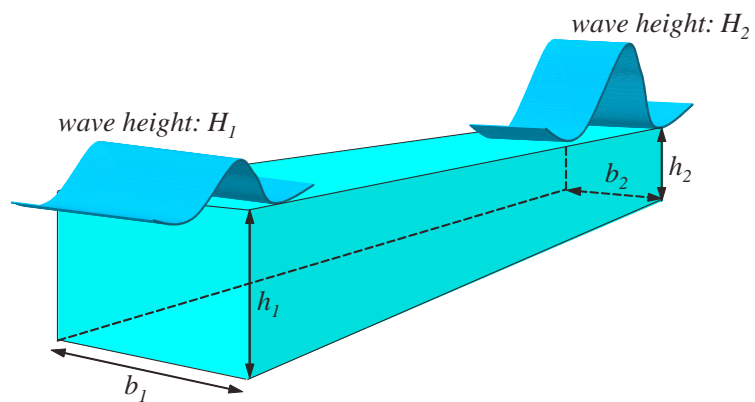


Fig.4.3 Changes of wave height caused by variation of depth and width

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1}{\left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{1/2} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{1/4}} \quad (4.1)$$

식(4.1)에 따르면 수심의 감소가 1/10배 되면 파고는 1.8배 증가하고, 폭이 1/10배 감소되면 파고는 3.2배 증가하게 된다. 풍파와는 달리 지진해일의 파장은 수 십 km에 달하기 때문에 지진해일이 파원을 출발하여 파동의 선단부가 천해역에 도달했을 때에 그 후단은 아직 심해역에 위치하고 있는 경우가 많다. 따라서 지진해일의 전달 속도가 수심의 함수이기 때문에 연안에 접근하는 해일의 선단은 진행이 지체되고 후단이 빠르게 진행되어 그 사이에서 응축된 에너지가 높은 파고로 전환되게 된다.

해안에 도달한 지진해일의 선단부가 가파르게 증폭되는 전경화현상이 발생하면 그 전면의 수위와는 층을 이루게 된다. 일반적인 풍파의 경우에 전경화가 일어나 산이 형성되면 그 배면의 수위는 낮아지게 되지만, 지진해일의 경우는 주기가 충분히 길기 때문에 전경화된 부분의 배면은 수위가 하강하지 않고 선단을 경계로 수위에 계단을 형성하게 된다. 이러한 파동을 단파(bore)라 한다.

쇄파형단파는 전경화된 파의 전면이 파도처럼 되는 경우이며, 이 원리는 천해역에서 파의 진행속도에 비해 물입자가 진행하는 속도, 즉 관성이 크기 때문이다. 쇄파가 발생하여도 파고는 거의 일정하게 유지된다. 쇄파되지 않고 단파의 선단으로부터 단주기의 파군이 발생하는 경우를 파상단파라 한다.

단파의 배후에서 파동은 상하로 원운동을 하면서 산을 형성하게 된다. 위로 볼록한 원운동을 하면서 해면을 상승시키고 배후로 돌아갈 때는 다시 아래로 볼록한 원운동을 하면서 해면이 하강한다. 이러한 원운동 가운데 원심력에 의해 산은 점차 높아지고 곡은 낮아지게 된다. 곡률이 클수록 원심력의 효과는 커지게 되는 현상을 파의 곡률효과라 한다. 또한, 이러한 과정 속에서 단주기의 파성분이 점차 분리되어 나가며, 이를 천해역에서의 파동분산현상이라 한다.

4.2 기초방정식

지진해일과 같은 장파에서의 유체운동을 지배하는 기초방정식은 운동량보존식과 질량보존식으로 구성되며, 각각 운동방정식, 연속방정식에 의해 기술된다. 지진해일의 거동은 초기조건으로써 해면의 변위분포를 주고 2개의 방정식을 시간의 경과에 따라 해석함으로써 지진해일의 거동특성을 수치적으로 표현할 수 있다.

지진해일과 같이 파장이 긴 파의 운동은 천수장파이론에 의해 표현되며, 천수장파이론은 파고 H 와 파장 L 의 비인 H/L 및 수심 h 와 파장 L 의 비인 h/L 중에 어느 하나라도 작은 것으로 하여 유도된다. 이 근사에서 압력은 정수압분포로 가정되고, 수평유속 (u, v) 는 연직방향으로 균등분포로 된다. 즉, 해저에서 수면까지를 연직방향으로 적분한 방정식으로 기술할 수 있다.

비압축유체에 대한 3차원질량보존식은 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

여기서, x, y 는 수평방향으로, z 는 연직방향으로 각각 취한 좌표계이고, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속 성분이다.

식(4.2)를 해서 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz + w(x, y, \eta) - w(x, y, -h) = 0 \quad (4.3)$$

여기서, h 는 수심, η 는 정수면에서 수위변동을 나타낸다.

식(4.3)의 우변에 Leibniz의 적분공식을 적용하면 다음의 식(4.4)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u(x, y, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - u(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial x} + w(x, y, \eta) - w(x, y, -h) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v(x, y, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - v(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

또한, U, V 를 해저에서 해면까지의 평균유속으로 정의하면 다음의 식이 성립된다.

$$(h + \eta)U = \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (4.5)$$

$$(h + \eta)V = \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (4.6)$$

식(4.5)와 (4.6)을 식(4.4)에 적용하면 다음의 결과식(4.7)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} [U(h + \eta)] + \frac{\partial}{\partial y} [V(h + \eta)] - v(x, y, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - v(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial y} \\ - u(x, y, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - u(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial x} + w(x, y, \eta) - w(x, y, -h) = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

운동학적자유수면경계조건과 시간에 대해 고정인 바닥경계조건은 다음의 식(4.8)과 (4.9)로 표현된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u(x, y, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + v(x, y, \eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} = w(x, y, \eta) \quad (4.8)$$

$$w(x, y, -h) = -u(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial x} - v(x, y, -h) \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.9)$$

(4.8)과 (4.9)를 식(4.7)에 적용하면 식(4.2)는 z 방향으로 적분된 연속식(4.10)으로 귀착된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{(h + \eta)U\}}{\partial x} + \frac{\partial \{(h + \eta)V\}}{\partial y} = 0 \quad (4.10)$$

비선형장파방정식의 운동방정식은 해수의 마찰을 고려한 파동의 Navier-Stokes 운동방정식으로 주어질 수 있다.

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4.11)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (4.12)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4.13)$$

여기서, $\frac{d}{dt}$ 는 시간에 대한 전미분, f 는 Coriolis계수, ρ_w 는 해수의 밀도, p 는 압력, A_h, A_v 는 수평 및 연직 와동점성계수, g 는 중력가속도이다.

위의 운동방정식에서 Lagrange의 미분표시를 Euler의 미분표시로 기술하면 다음과 같이 분리될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (4.14)$$

여기서, dw/dt 는 다른 항과 비교하여 미소하기 때문에 생략하고, z 방향의 운동방정식(4.13)을 수심방향으로 적분하여 압력 p 에 관한 다음의 식을 얻는다.

$$p = -\rho g z + f(x, y) \quad (4.15)$$

해면이 평균해면상 η 의 높이에 있고, 해면의 기압을 0으로 하면 압력 p 는 다음과 같이 주어진다.

$$p = \rho g (\eta - z) \quad (4.16)$$

식(4.16)으로부터 $\partial p / \partial x, \partial p / \partial y$ 를 계산하여, 운동방정식(4.11)과 (4.12)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (4.18)$$

연속식(4.2)를 성립하는 것을 고려하여 운동방정식에서의 Lagrange미분을 변형하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \quad (4.19)$$

y방향에 대해서도 동일하게 표현된다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \quad (4.20)$$

식(4.19)와 (4.20)의 각 항을 연직방향 z 에 대해서 Leibniz의 적분공식으로부터 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dz = \frac{d}{dt} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.21)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u^2}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz - u^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - u^2 \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.22)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial uv}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial y} - uv \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.23)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial uw}{\partial z} dz = (uw)_{z=\eta} - (uw)_{z=-h} = u \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \Big|_{z=\eta} + u \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \Big|_{z=-h} \quad (4.24)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial t} - v \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.25)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial uv}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial x} - uv \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.26)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v^2}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v^2 dz - v^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} - v^2 \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.27)$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial vw}{\partial z} dz = (vw)_{z=\eta} - (vw)_{z=-h} = v \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \Big|_{z=\eta} + v \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \Big|_{z=-h} \quad (4.28)$$

여기서, 식(4.24), (4.28)의 유도과정에 식(4.8), (4.9)가 적용되었다. 또한, 식(4.17)과 (4.18)에서 연직외동점성계수를 포함하는 항에 전단응력을 적용하면 다음의 관계를 나타낼 수 있다. 여기서, 연직외동점성계수 A_v 는 공간 및 시간에 대해 일정한 것으로 가정된다.

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=\eta} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (4.29)$$

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=\eta} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (4.30)$$

여기서, τ_x 와 τ_y 는 해저에서 x, y 방향으로 전단력이며, 각각 식(4.31)과 (4.32)로 주어진다.

$$\tau_x = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4.31)$$

$$\tau_y = \frac{\rho_w g n_n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (4.32)$$

여기서, M, N 은 다음의 식(4.33), (4.34)에 정의되는 바와 같고, n_n 은 Manning의 조도계수, D 는 기본수심 h 와 지진해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심이다.

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

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = U(h + \eta) = UD \quad (4.33)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = V(h + \eta) = VD \quad (4.34)$$

이상으로부터 수심방향으로 적분된 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (4.36)$$

식(4.10)에 유량 M, N 에 관한 식(4.33)과 (4.34)를 적용하면 다음의 연속식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4.37)$$

지진해일의 전달에서 육지에서의 run-up을 제외할 경우 해저면의 마찰에 비하여 수평외동점성의 효과는 무시될 수 있으므로 식(4.35)과 (4.36)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g n_n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g n_n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (4.39)$$

이상과 같은 지진해일의 추정이론으로부터 수치해석을 실시하기 위해서는 연속식(4.37)과 비선형장파방정식 (4.38) 및 (4.39)를 동시에 수치적으로 풀어야 하며, 이에 수치기법으로 본 연구에서는 유한차분법을 적용한다.

4.3 유한차분근사

4.3.1 유한차분근사

본 연구에서 사용하는 지진해일의 수치해석모델에서는 연속방정식(4.37) 및 운동방정식(4.35), (4.36)을 차분형식으로 변환한다. 공간차분에는 엇갈림격자를 사용하고, 시간차분에는 leap-frog법을 사용하며, 이는 폭풍해일에서 서술한 2.3절의 유한차분근사이론과 동일하다.

4.3.2 외해경계조건

계산영역의 외해경계에서 방사되는 지진해일에 대해서는 진행성장파의 특성곡선에 근거한 방법에 의해 지진해일을 자유투과시키며, 이는 폭풍해일에서 서술한 2.3.2절의 외해경계조건과 동일하다.

4.3.3 이동경계조건

육상으로 초오름을 해석하는 경우에는 이동경계처리법을 적용할 수 있으며, 이는 폭풍해일에서 서술한 2.3.3절의 이동경계조건과 동일하다.

4.3.4 단층파라미터

지진해일의 수치계산에서 초기조건으로 지진단층모델을 사용하여 계산되는 해저지각변동의 연직성분을 해면상에 주는 방법을 사용하고 있다.

Fig. 4.4에 나타내는 단층운동 자체는 미세하게 보면 대단히 복잡한 과정을 갖지만 운동자체를 거시적으로 보면 간단한 모델로 나타낼 수가 있다. 가장 간단한 모델은 Fig. 4.5에 나타내는 바와 같은 길이 L , 폭 W 를 갖는 직사각형의 단층면이 평균적으로 미끌어지는 량 또는 엇갈리는 량 u ' 만큼 서로 어긋나는 것을 고려한다. 이 때 단층의 기하적인 특성은 미끌어지는 방향 λ , 단층의 주향(走向) θ , 단층면의 경사각 δ 에 의해 표현된다. 이상의 6개가 단층파라미터이며, 이는 지진파해석으로부터 추정된다.

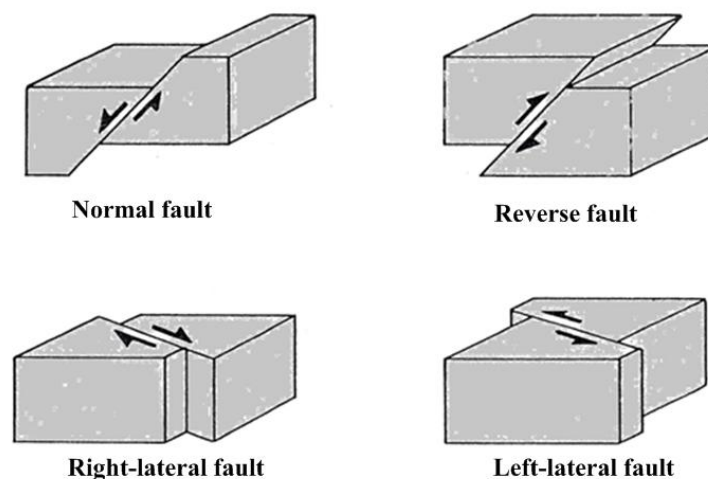


Fig. 4.4 Fault types

상기의 단층파라미터가 주어지면 단층근방의 해저면(지표면)에서 연직변위분포는 탄성론을 기초로 한 Mansinha and Smylie(1971)의 방법에 의해 계산으로 구해질 수 있다.

Fig. 4.6에 단층의 운동과 지표변위의 개념을 나타낸다. 이 연직변위를 해면의 수위로 사용하여 지진해일의 수치계산에서 초기조건으로 준다.

통상 해저변위를 해면상으로 줄 때에는 변동전체가 순간적으로 완료되는 것으로 하고 있다. 실제의 지진단층 운동에 있어서 지진동은 순간적으로 발생하는 것이 아니라 수 초에서부터 100초 정도의 지속시간을 갖는 것으로 알려져 있지만, 지진해일 발생시의 수위변동이 순간적으로 해면상에 변화가 발생한 경우와 1~2분의 상승시간으로 완료된 경우와는 거의 차이가 없는 것이 Aida(1969)의 연구에 의해 확인되어 있다.

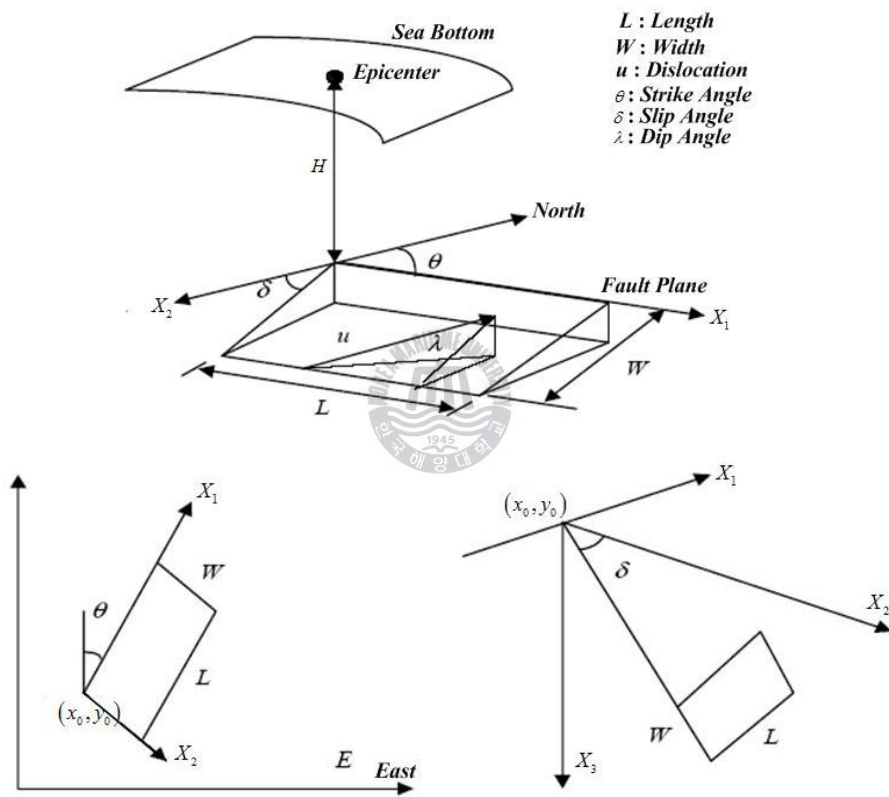


Fig. 4.5 Faults parameters and coordinate system

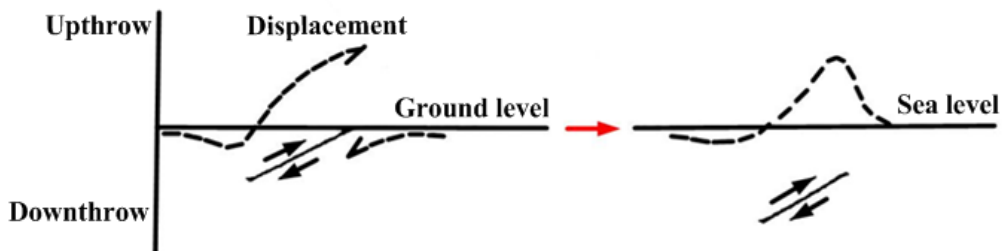


Fig. 4.6 Concept of fault movement and ground displacement

4.4 해석결과 및 검토

4.4.1 단일격자모델

(1) 1983년 동해 중부 지진

1) 대상영역 및 계산조건

전술한 기초방정식과 후술하는 단층파라미터를 기초로 1983년 5월 26일에 발생하여 동해안에 상당한 피해를 야기한 동해중부지진해일에 대한 수치해석을 수행한다. 대상영역은 지진이 발생하여 그로 인한 지진해일이 충분히 재현될 수 있도록 하기 위해 Fig. 4.7에 나타내는 바와 같이 좌하측 격자점(약 경도 124°, 위도 30°), 우상측 격자점(약 경도 143°, 위도 47°)을 취하였고, 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진의 발생시간부터 6시간 동안 모의하였다. 지진해일의 계산에 있어서 수치모형의 상세한 계산조건을 Table 4.1에 나타낸다. 육지경계조건을 완전반사로 결정한 것은 연안에 도달한 지진해일의 파고가 연직방향으로 두 배가 되는 것이 해안사면을 쳐오르는 지진해일의 쳐오름높이와 유사하다는 경험적 논리를 바탕으로 하였다(都司와 小西, 1985).

Fig. 4.8에 대상영역 수심의 공간분포를 제시하며, 이는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 1' 데이터(약 1.8km 간격)를 사용하여 결정하였다. 수심은 지진해일의 전파에서 가장 큰 변수로, 동해상에는 최고 3.5~4km의 수심분포가 나타나며, 해저에 퇴적물질이 퇴적되어 형성된 얇은 구릉인 대화퇴(大和堆)의 수심이 약 200~500m 정도의 상대적으로 아주 얇은 부분도 존재하며, 이로 인한 파의 천수, 회절 및 굴절변형으로 지진해일의 전파양상이 상당히 변하게 된다. 동해중부지진해일에 대한 여러 가지 단층모델이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 Table 4.2~4.5에 제시하는 4개의 모델에 대해서 검토한다. Table 4.2~4.5에 초기조건의 산정에 사용되는 동해중부지진해일에 대한 단층파라미터를 제시한다.

Table 4.1 Computation condition

Δx (km)	Δt (sec)	Number of mesh		Computation time (hr)	Boundary condition of land	Boundary condition of outside sea
		I mesh	J mesh			
1.8	4	900	1,100	6	Perfect reflection	Free transmission

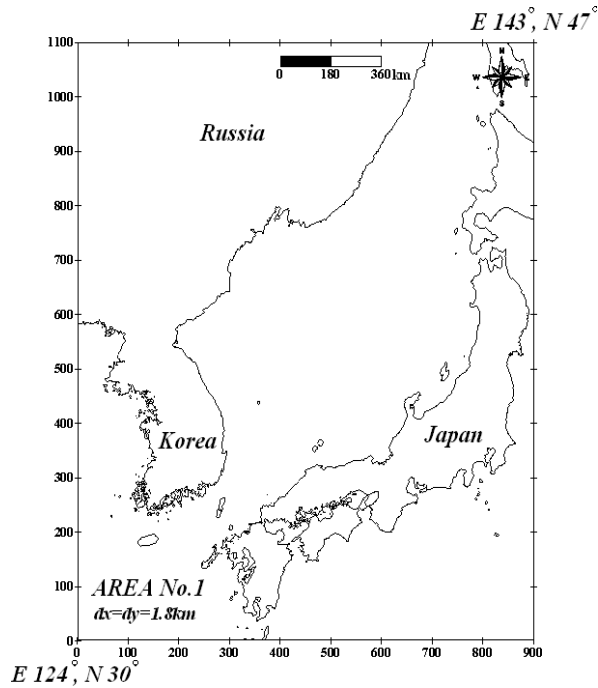


Fig. 4.7 Computation area

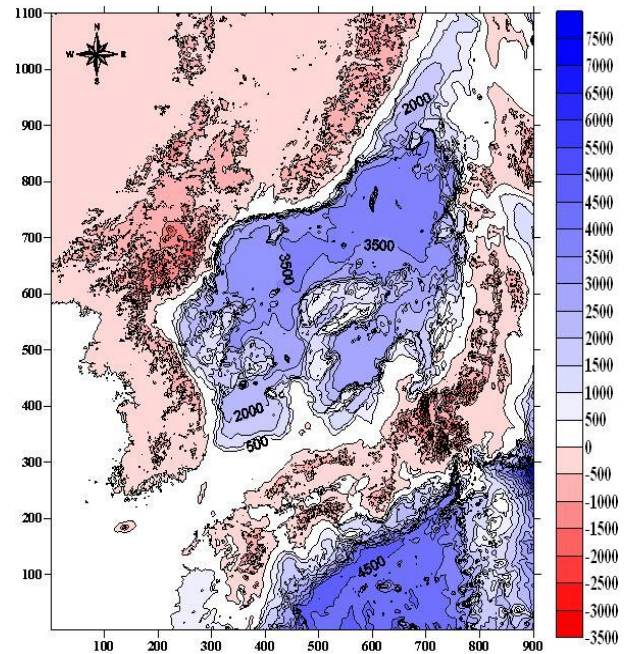


Fig. 4.8 Distribution of depth

Table 4.2 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Aida(1984)>

Aida	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km)	θ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	u' (km)
Fault 1	40.21	138.84	2	22	40	90	40	30	7.60
Fault 2	40.54	139.02	3	355	25	80	60	30	3.05

Table 4.3 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Tada(1984)>

Tada	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km)	θ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	u' (km)
Fault 1	40.20	138.80	0	13	20	90	60	40	3.50
Fault 2	40.73	138.96	0	335	20	90	60	30	3.50

Table 4.4 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Tanaka(1984)>

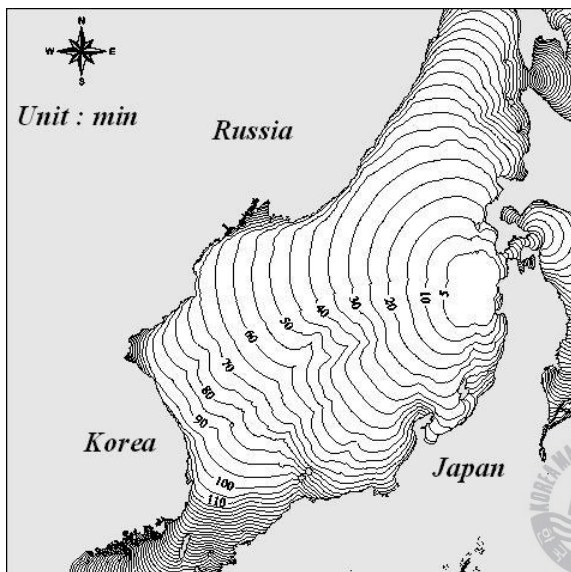
Tanaka	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km)	θ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	u' (km)
Fault 1	40.37	138.87	0	15	20	120	30	35	6.00
Fault 2	40.61	139.06	0	350	20	90	60	40	4.00

Table 4.5 Fault parameters for 1983 Central East Sea earthquake <Satake(1985)>

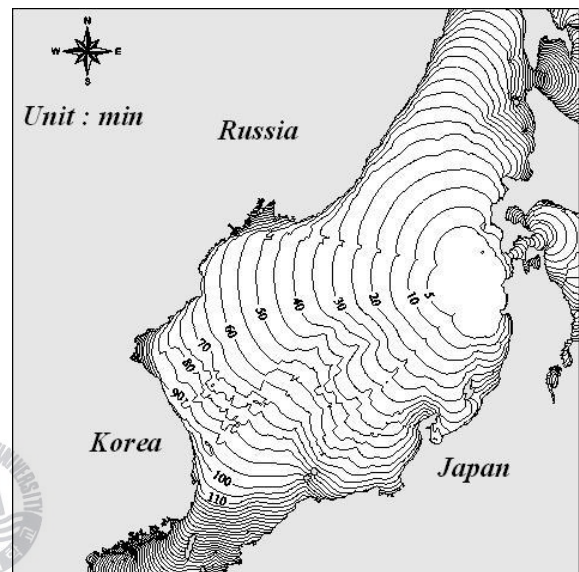
Satake	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km)	θ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	u' (km)
Fault 1	40.21	138.80	1	20	30	90	60	40	5.00
Fault 2	40.67	139.18	1	340	30	90	60	40	4.00

2) 수치해석결과

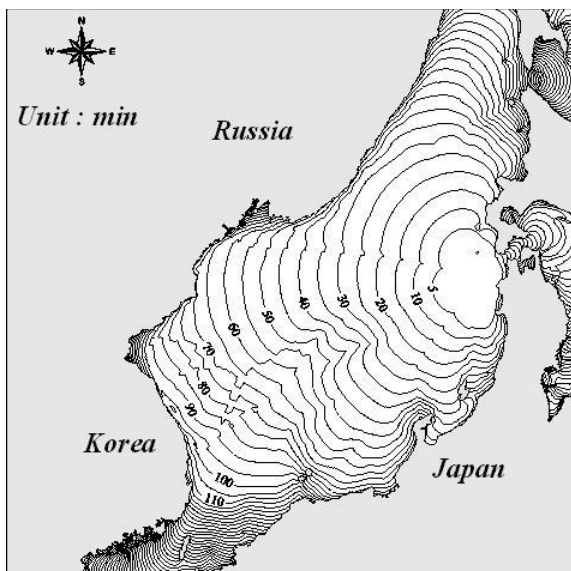
Fig. 4.9는 Table 4.2~4.5에서 제시된 단층파라미터를 사용하여 도출된 수치해석의 결과 중 지진해일의 전파속도 나타내고 있다. 검토된 4개 모델 모두 대화퇴 부근에서 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 전파되는 양상이 다소 상이하지만 모두 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 내습하는 것을 알 수 있다. 여기서, 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도로 북에서 남의 순서로 도달하는 것을 알 수 있고, 이는 관측치와 상당히 일치하는 것을 알 수 있다(국립방재연구소, 1998).



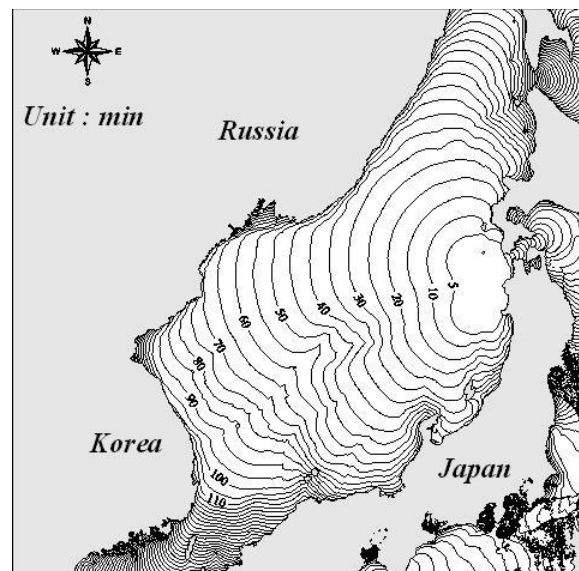
(a) Aida



(b) Tada



(c) Tanaka



(d) Satake

Fig. 4.9 Propagation of tsunami occurred by 1983 Central East Sea earthquake

Fig. 4.10은 각 모델에 의한 지진해일의 계산결과에서 영역내의 최고수위분포를 나타내며, 이는 에너지의 전파 과정을 설명하는데 사용된다. 그림을 살펴보면 에너지의 대부분은 러시아 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있고, 대화퇴 부근에서 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있다. 동해안은 수심이 상당히 깊기 때문에 영역내에서 수위는 모델에 따라 다른 양상을 보이지만, 공해상에서 0.1m~1.0m 정도의 분포를 확인할 수 있고, 진원지 부근의 초기수위는 최고 4m 이상의 값이 나타나는 것을 알 수 있다. 전반적으로 Fig. 4.10(a)와 (d)가 (b)와 (c)에 비해 상대적으로 높은 수위분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 전술한 Mansinha and Smylie(1971)에 의해 주향과 미끌어지는 방향에 의해 초기수위가 영향을 받기 때문이다.

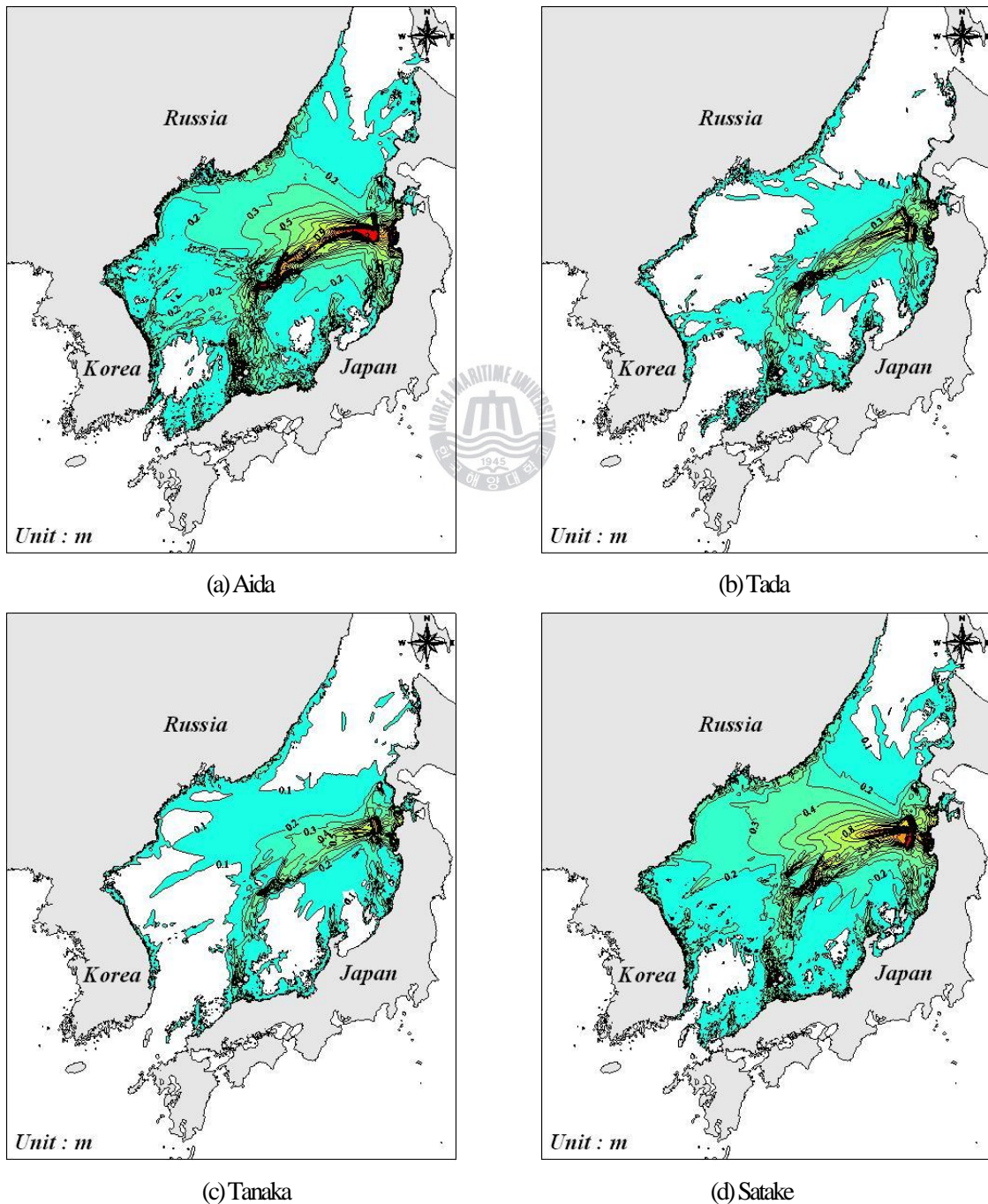
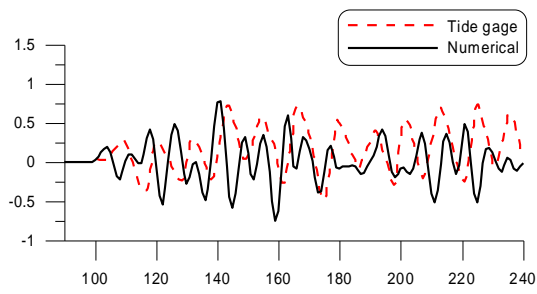


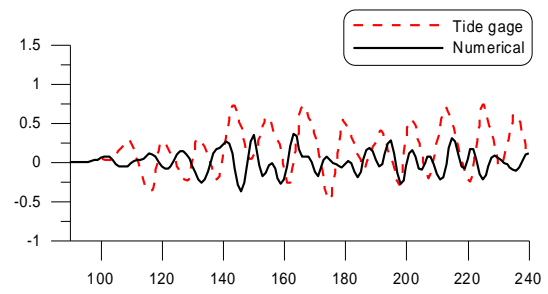
Fig. 4.10 Maximum water level height of tsunami occurred by 1983 Central East Sea earthquake

Fig. 4.11은 속초지역에서 수치해석결과와 관측치와의 시간에 따른 수위변화를 비교한 그림이다. 4개의 모델 모두 지진 발생 후 약 100분 후에 제 1파가 도달하는 양상은 일치하지만 Fig. 4.11(b)와 (c)는 (a)와 (d)의 결과와 비교해서 상대적으로 계산치가 관측치보다 과소평가되는 것을 알 수 있다. Fig. 4.11(a)를 살펴보면 시간에 따른 수위변화의 최고치가 수 분의 차이를 두고 발생하고, 부분적으로 일치하지 않는 시간도 존재하지만, 정성적인 관점에서는 관측치와 일치하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 4.11(b)는 관측치와 비교하여 최고치와 0.5m 정도의 수위차이를 내며 과소평가하고 있고, Fig. 4.11(c)도 (b)와 마찬가지로 관측치를 과소평가하고 있지만 수위분포의 형상은 Fig. 4.11(b)보다는 관측치에 보다 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.11(d)의 수위분포는 최고치가 관측치의 수위고를 잘 재현하지만 수위분포의 형상이 수 분 늦게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있다. 이상으로부터 정량적으로는 일치하지 않는 부분도 있지만 정성적 관점에서 Fig. 4.11(a)의 Aida모델이 속초의 관측치를 가장 잘 재현하고 있다고 판단된다.

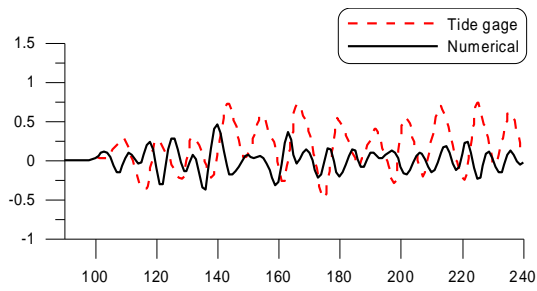
Fig. 4.12는 묵호지역에서 관측치와 계산치를 비교한 그림으로, 속초와 마찬가지로 약 100분에 제 1파가 도달하는 양상을 확인할 수 있다. Fig. 4.12(a)를 살펴보면 수치해석결과의 초기파형은 관측치보다 크게 나타나지만 150분 이후의 파형에서는 관측치가 높게 나타남을 알 수 있으며, Fig. 4.12(b)는 제 1파의 수위변동은 관측치와 비슷한 경향을 보이지만 이후의 수위변동의 분포는 관측치를 과소평가하고 있다. Fig. 4.12(c)의 초기파형은 관측치와 비슷한 양상을 보이지만 시간이 지날수록 관측치를 과소평가하며, 전반적인 지진해일고의 높이는 Fig. 4.12(b)와 비교할 때 약간 높게 나타난다. Fig. 4.12(d)는 초기에는 관측치의 수위고를 잘 재현하고 정성적인 관점에서는 잘 일치하지만 역시 시간이 흐를수록 관측치를 과소평가하고 있다. 이상으로부터 상대적으로 Fig. 4.12(a)와 (d)의 모델이 4.12(b)와 (c)의 모델보다는 관측치를 잘 재현하고 있다고 판단된다.



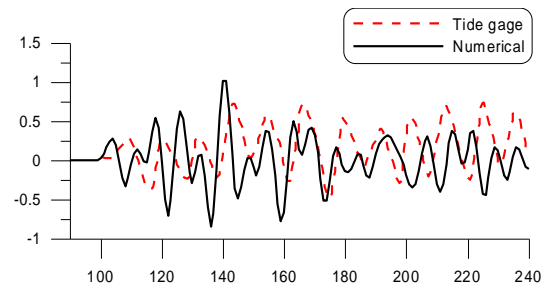
(a) Aida



(b) Tada

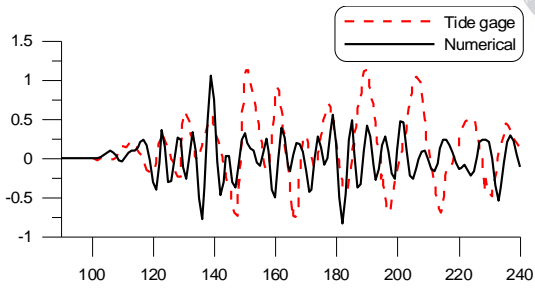


(c) Tanaka

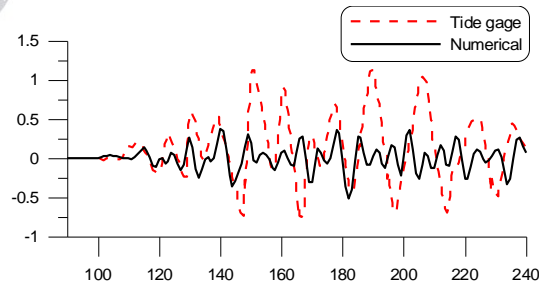


(d) Satake

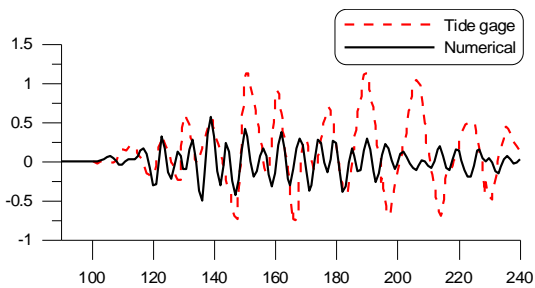
Fig. 4.11 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Sokcho



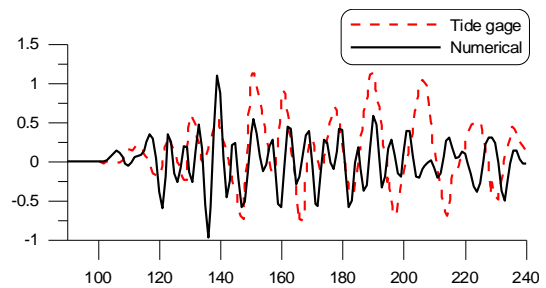
(a) Aida



(b) Tada



(c) Tanaka

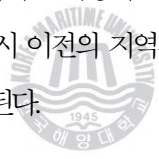


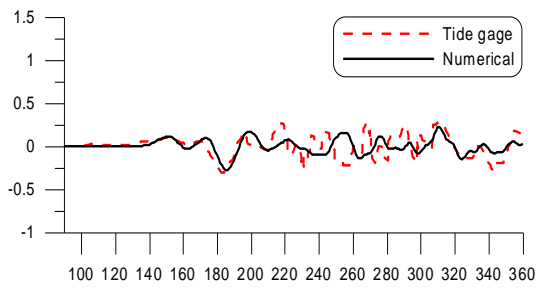
(d) Satake

Fig. 4.12 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Mukho

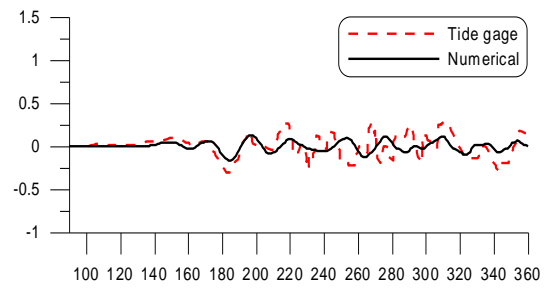
Fig. 4.13은 포항지역에서 수치해석결과와 관측치와의 시간에 따른 수위변화를 비교한 그림이다. 제 1파의 도달시간이 약 140분으로 그림 상의 관측치와 거의 일치하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 4.13(a)를 살펴보면 약 200분까지는 관측치와 계산치가 상당히 잘 일치하는 경향을 보이지만 이후로는 수위의 최고치와 파형이 다소 상이한 변동을 나타내며, Fig. 4.13(b)는 약 180분에서 최저치가 조금 작게 나타나고, 약 210분까지 관측치와 계산치가 잘 일치하는 경향을 보이지만 이후로는 Fig. 4.13(a)와 마찬가지로 최고치와 파형이 다소 상이한 변동을 나타낸다. Fig. 4.13(c)는 수위변동의 양상은 Fig. 4.13(b)와 다르지만 관측치와 비교하면 (b)와 비슷한 경향을 보이고 Fig. 4.13(d)는 4.13(a)와 비슷한 양상을 나타내면서 진행하고 약 300분 이후에 관측치와 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 수위변동의 초기는 Fig. 4.13(a)가 상당히 일치하지만 전반적인 경향은 Fig. 4.13(d)가 관측치에 상대적으로 잘 일치한다고 판단된다.

Fig. 4.14는 울산지역에서 관측치와 계산치를 비교한 그림으로, 약 150분에 제 1파가 도달하는 양상을 확인할 수 있으며, 그림상의 관측치와도 상당히 일치한다. Fig. 4.14(a)는 시간에 따른 전반적인 수위변동 양상이 관측치보다 10여분 정도 늦게 나타나지만 정성적으로는 상당히 일치함을 알 수 있다. Fig. 4.14(b)와 (c)는 전반적인 수위변동이 관측치보다 과소평가되고, 수위변동이 거의 없음을 확인할 수 있으며, 이는 전술한 바와 같이 초기수위를 결정하는 조건인 단층파라미터의 차이에 의해 야기된 결과라고 판단된다. Fig. 4.14(d)는 수위변동의 최고치와 최저치를 잘 재현하고 있지만 Fig. 4.14(a)와 마찬가지로 위상의 차이가 약 10분 정도 발생한다. 그러나 정성적 관점에서 상당히 일치함을 알 수 있다. 울산지역 역시 이전의 지역과 동일하게 Fig. 4.14(a)와 (d)의 결과가 (b)와 (c)의 결과보다 관측치에 보다 일치하는 것으로 판단된다.

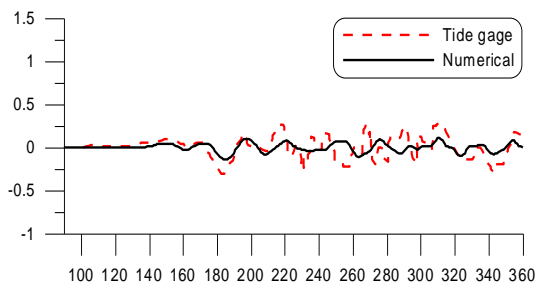




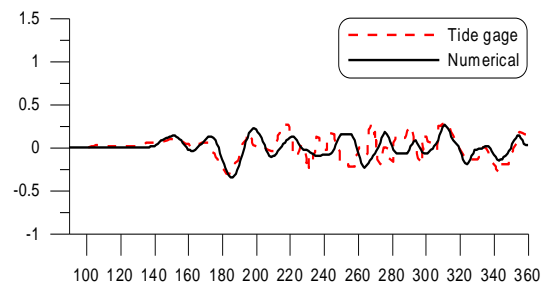
(a) Aida



(b) Tada

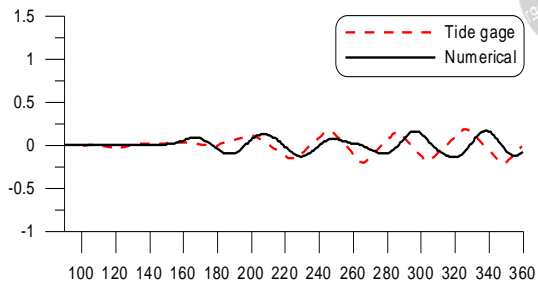


(c) Tanaka

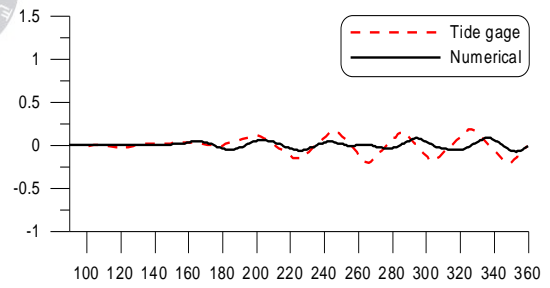


(d) Satake

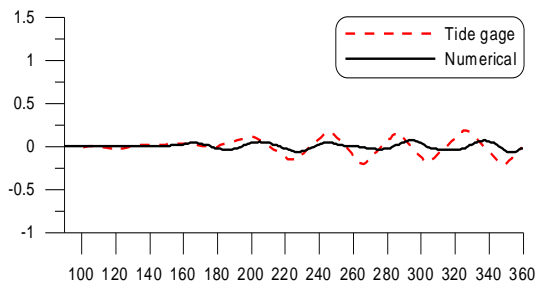
Fig. 4.13 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Pohang



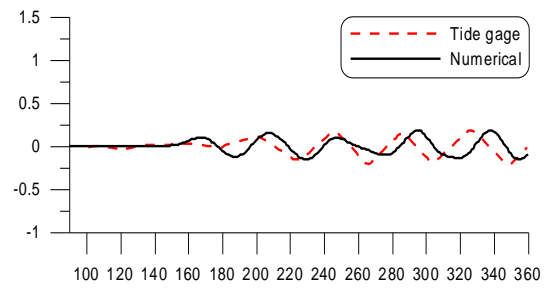
(a) Aida



(b) Tada



(c) Tanaka



(d) Satake

Fig. 4.14 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Ulsan

Fig. 4.15는 동해중부지진해일에 의해 가장 많은 피해를 입은 임원지역에 대한 계산치이다. 임원지역은 사후조사에 의해 침수의 흔적 높이로 최고수위를 추정할 수 있지만 수위변동의 관측치는 존재하지 않아 계산치만 나타내었다. 각 모델에 의한 Fig. 4.15(a)~(d)의 결과는 전술한 속초, 묵호, 포항 및 울산에 비해서는 높은 수위분포를 나타내지만 모두 사후조사에서 얻어진 최고수위 5m에는 미치지 못하는 것을 알 수 있으며, 이는 천해역에서 수심이 깊어지면서 발생하게 되는 천수효과를 본 연구의 수치해석수법에서 충분히 재현을 할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다. 향후 격자접속기법 등의 도입을 통해 계산격자의 간격을 작게 설정하여 천해의 수심을 정확히 고려한다면 해결될 수 있는 문제라고 판단된다.

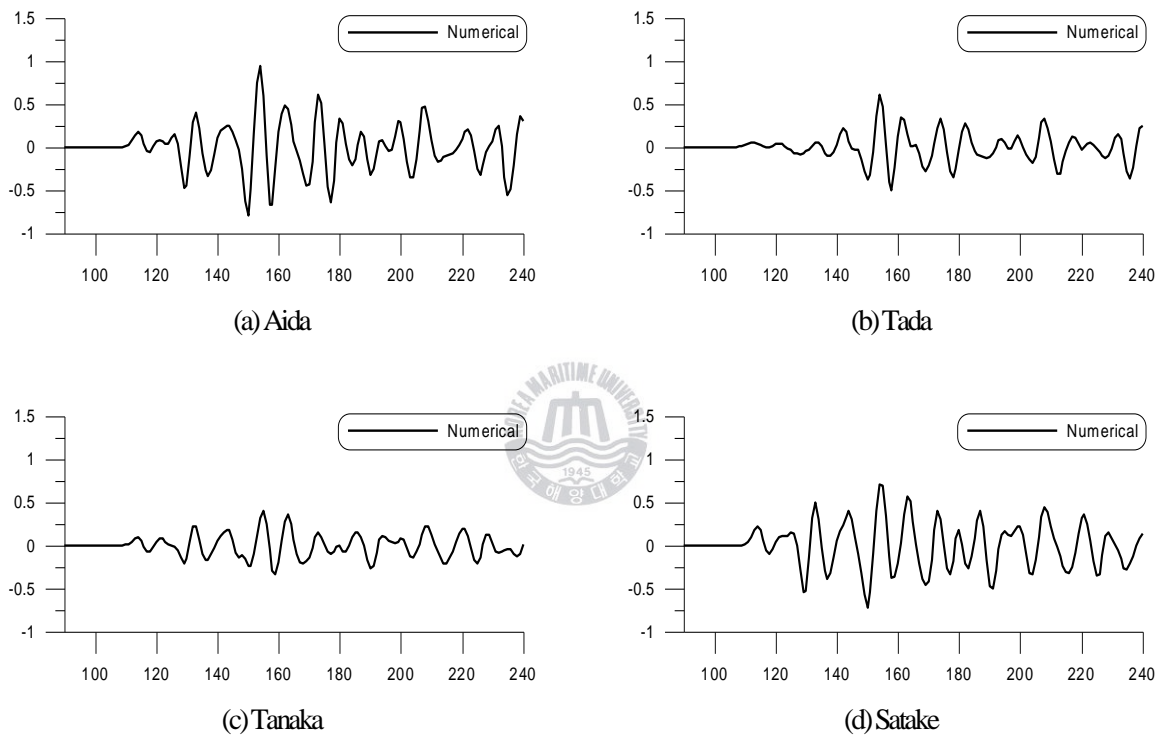


Fig. 4.15 Comparison of time history of water level occurred by 1983 Central East Sea earthquake at Imwon

(2) 1993년 북해도 남서 외해 지진

1) 계산조건

전술한 기초방정식과 Table 4.6의 단층파라미터를 기초로 1993년 7월 12일에 발생하여 동해안에 상당한 피해를 야기한 북해도 남서외해지진해일에 대한 수치해석을 수행한다. 동해중부지진해일을 수치모의한 Fig. 4.7의 대상영역과 Fig. 4.8의 수심을 동일하게 적용하였으며, 수치해석에 필요한 상세한 계산조건은 Table 4.1에 나타난 바와 같다. 초기조건의 산정에 사용되는 북해도 남서 외해 지진에 대한 단층파라미터를 Table 4.6에 나타낸다.

2) 수치해석결과

Fig. 4.16은 Table 4.6에 제시된 단층파라미터를 사용하여 도출된 수치해석의 결과 중 지진해일의 전파속도를 나타내고 있다. 수심이 깊은 심해에서는 전파속도가 빠르고 천해로 전파됨에 따라 전파속도가 상대적으로 줄어드는 양상을 알 수 있고, 대화퇴 부근에서 굴절 및 회절이 되는 현상을 확인할 수 있다. 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해안에 내습하는 것을 알 수 있다. 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도에 각각 도달하는 것을 확인할 수 있고, 이는 관측치와 상당히 일치함을 알 수 있다(국립방재연구소, 1998).

Table 4.6 Fault parameters of 1993 Hokkaido southwest off earthquake<Takahashi et al.(1994)>

Takahashi et al.	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km)	θ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	u' (km)
fault 1	42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	12
fault 2	42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	2.5
fault 3	43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	5.71

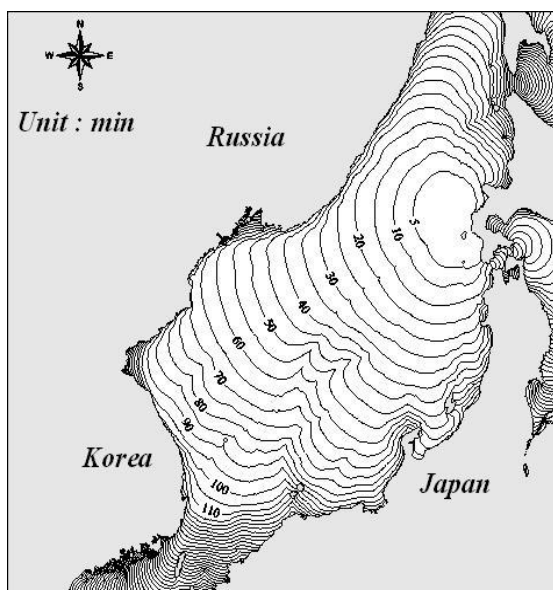


Fig. 4.16 Propagation of tsunami occurred by 1993 Hokkaido southwest off earthquake

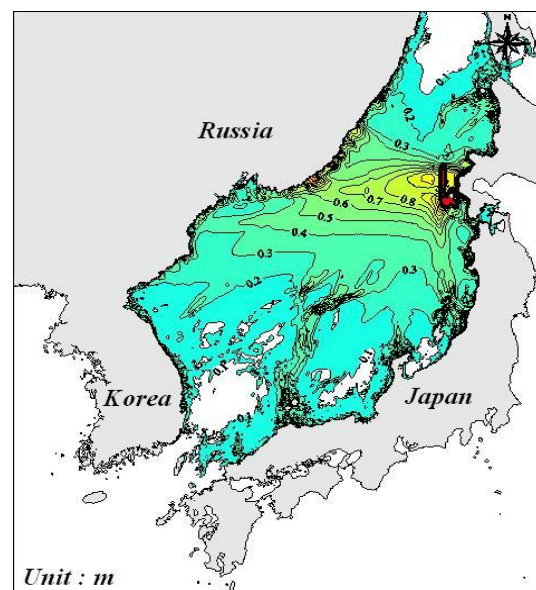
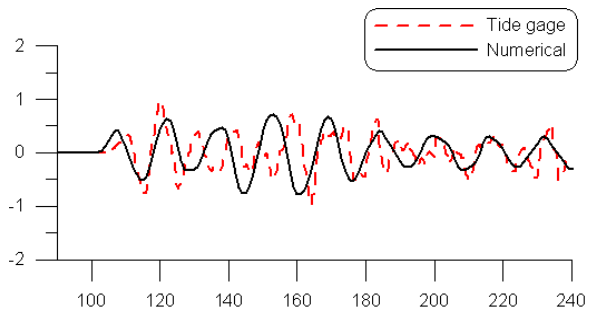


Fig. 4.17 Maximum water level height of tsunami occurred by 1993 Hokkaido southwest off earthquake

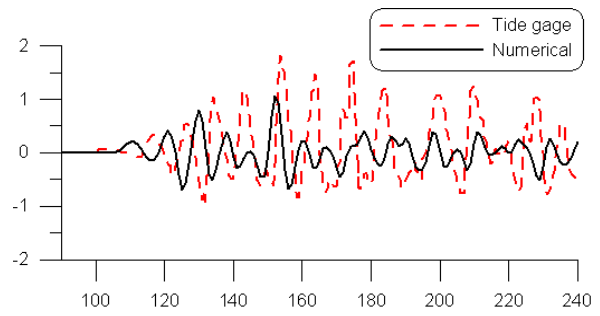
Fig. 4.17은 에너지의 전파과정을 설명할 수 있는 계산영역내의 최고수위분포를 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 대부분의 에너지가 러시아 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있고, 대화퇴 부근에서 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있다. 동해안의 수심이 상당히 깊기 때문에 영역내에서 수위는 공해상에서 0.1m~1.0m 정도의 분포를 확인할 수 있고, 진원지 부근의 초기수위는 최고 7m 정도의 값이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.18는 계산된 수치해석결과와 관측치(국립방재연구소, 1998)와의 시간에 따른 수위변화를 나타낸 그림이다. Fig. 4.18(a)는 속초지역에서 관측치와 계산치의 결과를 비교한 그림이다. 지진 발생 후 약 100분 후에 제 1파가 도달하는 양상을 관측치와 일치하지만 시간에 따른 수위변화를 살펴보면 제 1파부터 최고치를 잘 재현하고 있지만 수 분의 차이를 두고 발생한다. Fig. 4.18(b)는 묵호지역에서 관측치와 계산치를 비교한 그림으로, 속초와 마찬가지로 약 100분에 제 1파가 도달하며, 전반적으로 관측치보다 과소평가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.18(c)는 포항에서의 비교결과로, 정성적 관점에서는 관측치와 계산치가 상당히 잘 일치하는 경향을 보이지만 Fig. 4.18(b)에서와 마찬가지로 부분적으로 불일치하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 4.18(d)는 울산지역에 대한 결과의 비교 그림으로 전반적인 수위변동 양상이 계산치와 관측치가 상당히 일치함을 알 수 있다. Fig. 4.18(e)는 임원지역에 대한 계산결과를 나타낸 그림으로 임원지역에 대한 수위변동의 관측치가 존재하지 않아 계산치만 나타내었다. 임원의 경우는 사후 조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 2.39m에는 못 미치는 것을 알 수 있으며, 이는 수심에 의한 영향을 상당히 많이 받는 지진해일의 특성상 천해역에서의 수심분포를 본 수치해석수법에서 충분히 재현할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 이는 차후 격자접속기법의 도입으로 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

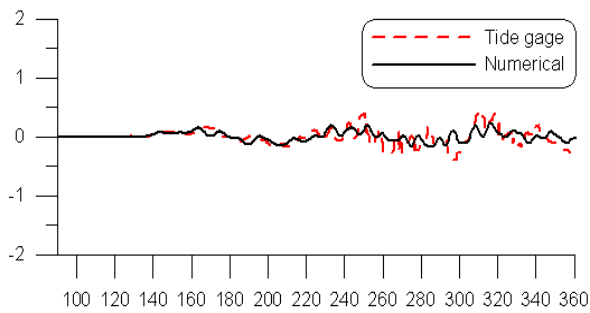




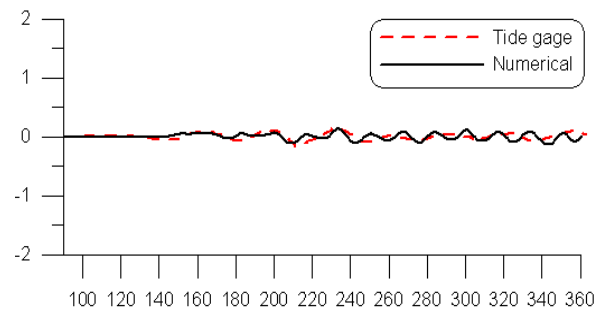
(a) Sokcho



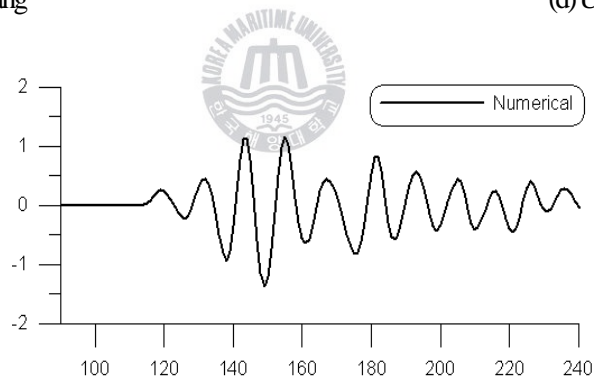
(b) Mukho



(c) Pohang



(d) Ulsan



(e) Inwon

Fig. 4.18 Comparison of time history of water level occurred by 1993 Hokkaido southwest off earthquake

(3) 지진공백역에서의 지진

1) 계산조건

전술한 기초방정식과 Table 4.7의 단층파라미터를 기초로 일본의 서측 연안을 지나는 단층대에서 지진이 발생한지 충분한 시간이 경과되었거나 아직 지진이 발생하지 않아 상당한 잠재적인 에너지를 가지고 있는 지진공백역에 대해서 발생 가능한 여러 종류의 지진에 의한 지진해일을 수치적으로 모의한다. 이 지진공백역은 향후 지진이 발생할 가능성이 높고, 이로 인한 지진해일 역시 상당할 것으로 판단되므로 가상적인 지진에 대한 지진해일을 예측하여 우리나라의 연안에 어떠한 영향을 미칠 것인지 검토한다.

대상영역은 전술한 수치해석에 사용된 Fig. 4.7을, 수심은 Fig. 4.8를 적용한다. 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진의 발생 시작시간부터 6시간 동안 모의하고, Table 4.1의 조건들을 적용하며, Table 4.7에 지진공백역에서 가정된 단층파라미터의 값들을 제시한다.

Table 4.7 Fault parameters of hypothetical earthquake <Ichikawa(1994); Tohoku university(1995)>

Hypothetical earthquake	Latitude (°N)	Longitude (°E)	H' (km)	θ (deg)	δ (deg)	λ (deg)	L (km)	W (km)	u' (km)
1	41.7	139.2	3	110	45	100	45	25	2.3
2	38.3	138.5	1	23	35	90	140	50	5.0
3	39.4	139.2	1	105	45	90	100	50	4.1
4	39.3	139.9	1	105	45	90	100	50	4.1
5	37.9	137.9	1	15	20	90	70	40	3.2
6	37.8	138.8	1	190	55	90	60	20	1.9

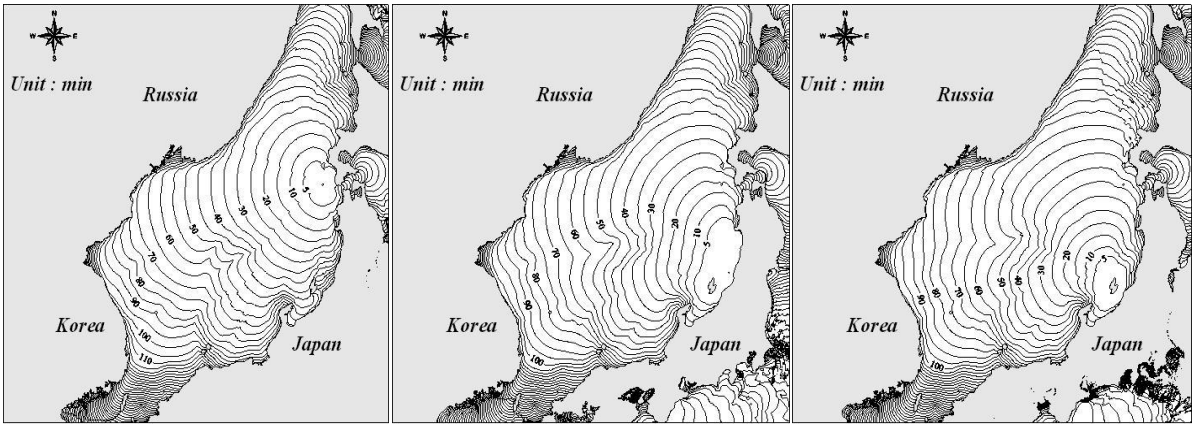
2) 수치해석결과

Fig. 4.19는 Table 4.7에 제시된 단층파라미터를 사용하여 도출된 수치해석의 결과 중 가상지진해일, 2, 5의 우에 대한 각 지진해일의 전파속도를 나타내고 있다. 발생한 지진의 단층에 따라 대화퇴 부근에서 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 전파되는 양상이 다소 상이하지만 3개 모두 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 내습하는 것을 알 수 있다. 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도로, 그 전파속도는 전술한 지진해일에 대한 해석결과와 거의 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.20은 각 가상지진에 의한 지진해일에 있어서 발생한 영역내의 최고수위를 나타낸다. 그림을 살펴보면 에너지의 대부분이 러시아 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있고, 대화퇴 부근에서 발생하는 회절현상으로 일본의 남쪽으로 전파되는 성분이 있음을 알 수 있다. 단층파라미터의 차이에 따라 각 가상지진해일의 경우에 상당한 수위분포의 차이를 나타내며, 가상지진해일, 4, 6은 상대적으로 동해안에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 가상지진해일 3은 일본 연안에는 상당한 해일고를 발생시키지만 우리나라에는 그 영향이 비교적 적다고 할 수 있고, 가상지진해일 5의 경우 역시 상대적으로 우리나라 연안에 미치는 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 가상지진해일 2의 경우가 가장 높은 수위분포를 나타내며, 동해연안에도 상당한 해일고를 발생시킨다. 이때, 각 지점에서의 최저 및 최고수위를 Table 4.8에 제시한다.

Table 4.8 Maximum and minimum water levels due to hypothetical earthquake

Position	Sokcho		Mukho		Pohang		Ulsan		Imwon	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1	-0.14	0.14	-0.12	0.11	-0.05	0.06	-0.02	0.02	-0.18	0.19
2	-0.95	0.75	-0.66	0.70	-0.67	0.75	-0.38	0.48	-1.00	1.59
3	-0.16	0.17	-0.14	0.18	-0.42	0.40	-0.20	0.13	-0.36	0.44
4	-0.06	0.06	-0.04	0.03	-0.12	0.11	-0.05	0.05	-0.07	0.05
5	-0.17	0.18	-0.15	0.16	-0.26	0.26	-0.14	0.16	-0.37	0.40
6	-0.03	0.04	-0.02	0.02	-0.06	0.06	-0.03	0.04	-0.05	0.04

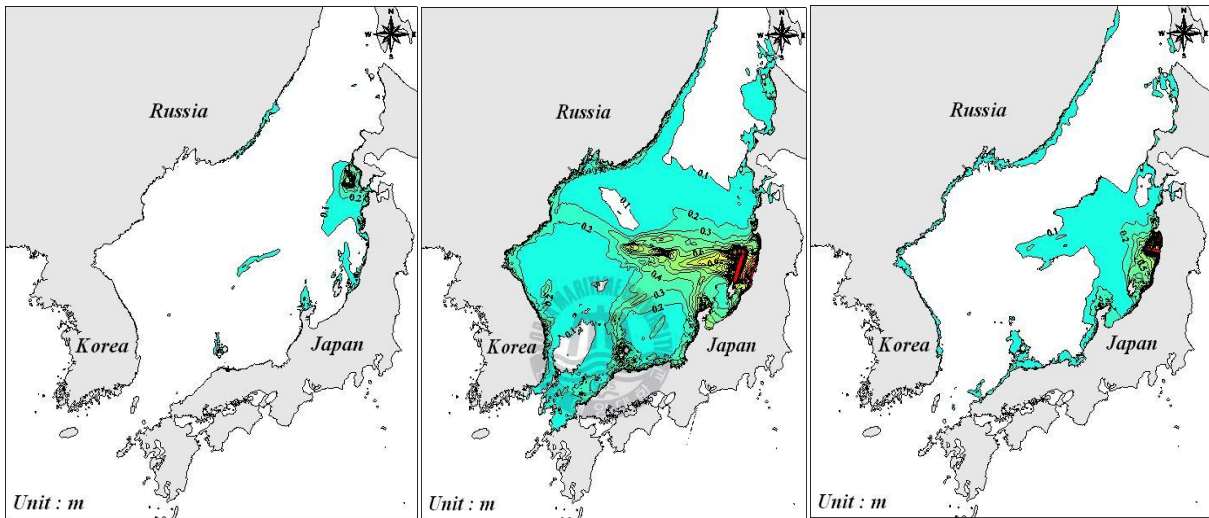


(a) Hypothetical earthquake 1

(b) Hypothetical earthquake 2

(c) Hypothetical earthquake 5

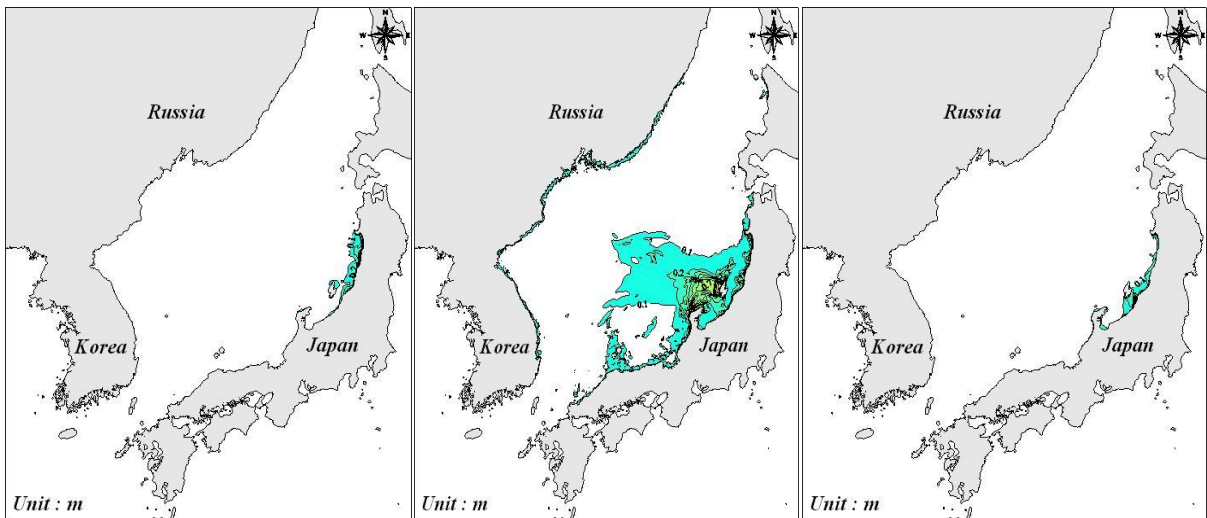
Fig. 4.19 Propagation of tsunami occurred by hypothetical earthquake



(a) Hypothetical earthquake 1

(b) Hypothetical earthquake 2

(c) Hypothetical earthquake 3



(d) Hypothetical earthquake 4

(e) Hypothetical earthquake 5

(f) Hypothetical earthquake 6

Fig. 4.20 Maximum water level height of tsunami occurred by hypothetical earthquake

4.4.2 복합격자모델

(1) 1983년의 동해중부지진에 의한 지진해일

1) 대상영역 및 계산조건

단일격자모델은 계산이 용이하며, 계산시간도 빠른 장점을 가지고 있는 반면에 천해역에서 수심이 얕아지면 서 발생하는 천수효과를 충분히 재현할 수 없기 때문에 수위상승량에 상당한 차이가 발생하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 천해역에서 수심의 변화에 따라 큰 격자와 작은 격자를 동적으로 연결하여 천수효과를 충분히 재현하고자 한다. 그리고 연안에 도달한 지진해일 파고의 두 배가 해안사면을 치오르는 지진해일의 치오름고와 대략 동등하다는 경험적 논리에 근거한 완전반사의 육지경계조건 대신에 본 연구에서는 지진해일이 육지에 도달함에 따라 육지경계를 이동시켜 치오름을 해석하는 이동경계조건을 적용한다.

전술한 기초방정식 및 단층파라미터를 기초로 1983년 5월 26일에 발생하여 동해연안에 상당한 피해를 야기한 동해중부지진에 의해 발생된 지진해일 중 가장 높은 지진해일 분포를 나타내는 Table 4.2의 Aida모델을 적용하여 수치시뮬레이션으로 재현하였다. 본 절에서는 동해연안의 속초, 묵호, 임원, 포항, 울산 등의 지역과 남해연안의 부산과 마산에 대하여 지진해일에 의한 수위변동 및 최대수위분포 등을 검토한다. 대상영역은 지진이 발생하여 그로 인한 지진해일이 충분히 재현될 수 있도록 Fig. 4.21에 나타내는 바와 같이 좌하측의 격자점(경도 124°, 위도 30°)과 우상측의 격자점(경도 143°, 위도 47°)을 취하였고, 이는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 1'데이터(약 1.8km 간격)를 사용하여 결정하였다. 수심은 지진해일의 전파에서 가장 큰 변수로, 동해상에는 최고 3.5~4km의 수심분포가 나타나며, 해저에 퇴적물질이 퇴적되어 형성된 얇은 구릉인 대화퇴(大和堆)의 수심이 약 200~500m 정도의 상대적으로 아주 얇은 부분도 존재하고, 이로 인한 파의 천수, 회절 및 굴절변형으로 지진해일의 전파양상이 상당히 변하게 된다. 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진의 발생시간부터 6~12시간 동안에 수치모의하였으며, 지진해일의 계산에 있어서 수치모형의 상세한 계산조건을 Table 4.9에 나타내고, Fig. 4.22는 제 6영역의 각 지점 부근의 수심분포를 나타내고 있다.

2) 수치해석결과

Fig. 4.23은 Table 4.2에서 제시된 단층파라미터를 사용하여 도출된 수치해석의 결과 중에 제 1영역에서 지진해일의 전파속도와 최고수위분포에 대한 결과를 나타내고 있다. 지진해일의 전파과정에서 대화퇴의 부근에서 지진해일이 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 지진해일이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 내습하는 것을 알 수 있다. 여기서, 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도로 북에서 남의 순서로 도달하는 것을 알 수 있고, 이는 관측치와 상당히 일치함을 알 수 있다(국립방재연구소, 1998). 그리고 지진해일의 계산결과에서 제 1영역내의 최고수위분포는 지진해일이 갖는 에너지의 전파과정을 설명하는데 사용된다. Fig. 4.23를 살펴보면 에너지의 대부분은 러시아 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있고, 대화퇴의 부근에서 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있다. 동해안은 수심이 상당히 깊기 때문에 영역내에서 수위는 공해상에서는 0.1~1.0m 정도의 분포를 확인할 수 있고, 진원지의 부근에서 초기수위는 최고 4m 이상의 값이 나타나는 것을 알 수 있다.

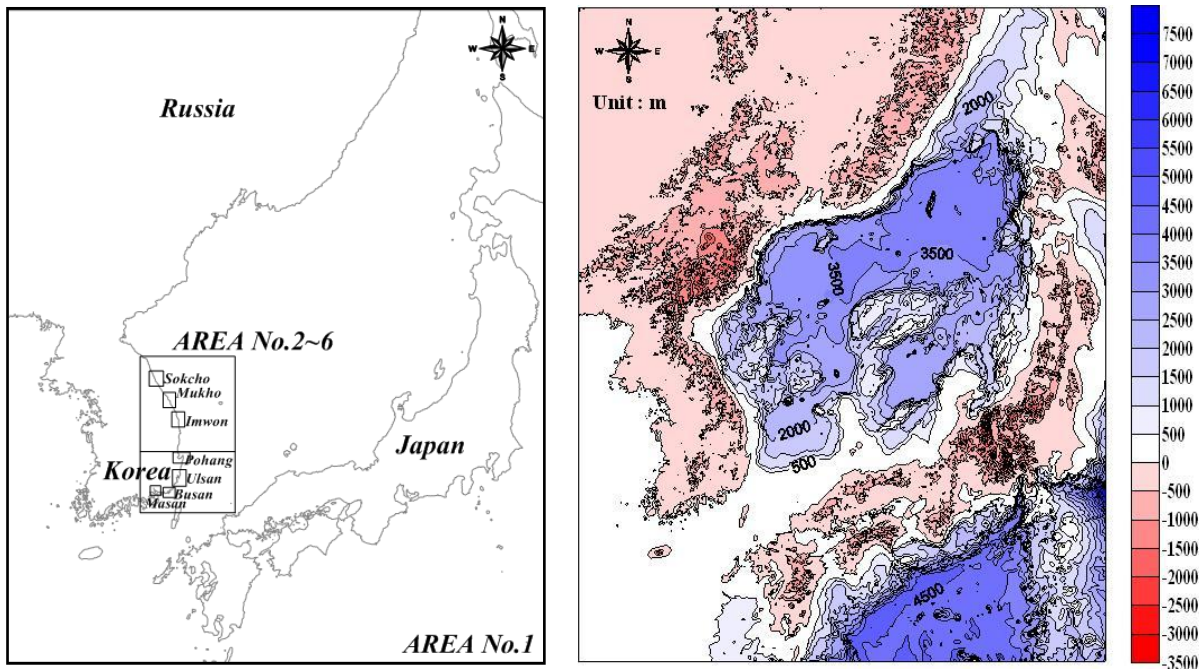
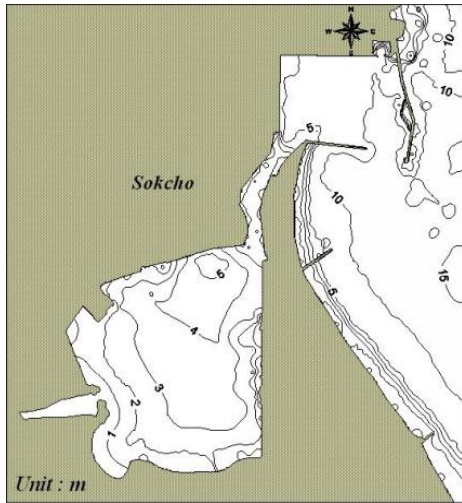


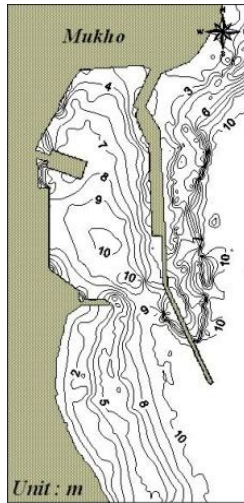
Fig. 4.21 Computation area and distribution of depth

Table 4.9 Computation conditions of each area

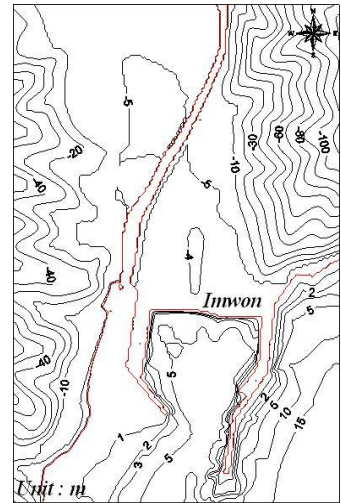
Number of area	Mesh size (m)	Number of mesh						Boundary condition of land	Open boundary condition
		Sokcho	Mukho	Imwon	Pohang	Ulsan	Busan		
AREA NO.1	1,215	1333×1629						Perfect reflection	Free transmission
AREA NO.2	405	687×582			687×630				282×234
AREA NO.3	135	405×480	363×444	369×450	435×753	174×210	306×198		300×291
AREA NO.4	45	387×711	930×744	450×450	819×819	546×393	294×387		444×444
AREA NO.5	15	258×348	594×894	150×216	744×744	894×774	564×562		378×786
AREA NO.6	5	494×534	192×399	144×213	1284×1401	879×909	645×552		684×894
								Runup	Nesting of each area



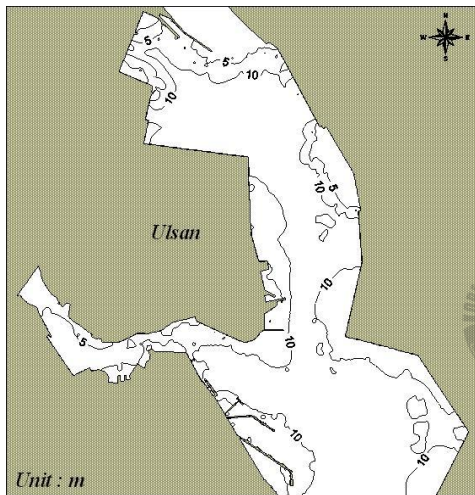
(a) Sokcho



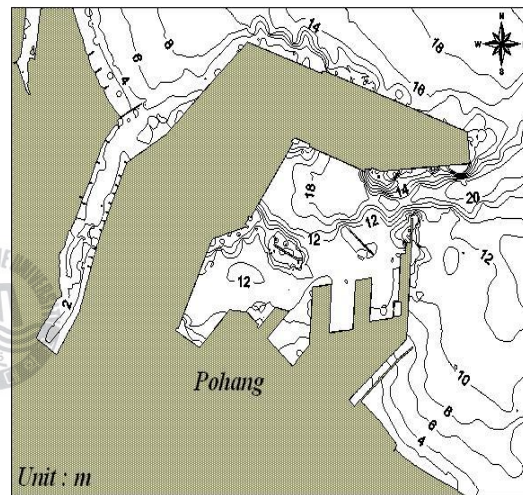
(b) Mukho



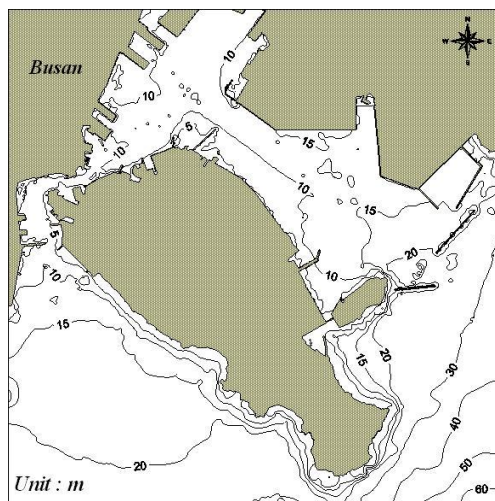
(c) Imwon



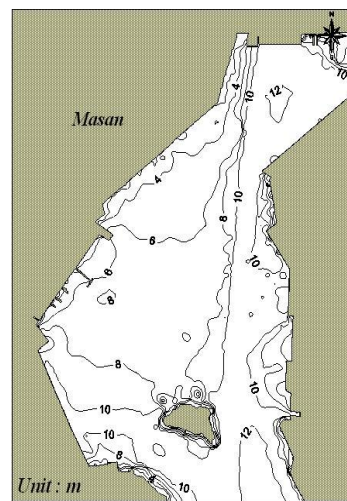
(d) Ulsan



(e) Pohang



(f) Busan



(g) Masan

Fig. 4.22 Distribution of depth at each region

Fig. 4.24에 제 6영역에서 최대수위분포를 제시한다. Fig. 4.24(a)는 속초지역에서 최고수위분포를 나타낸다. 결과에 의하면 지진해일의 내습에 따라서 최고 약 0.9m의 수위상승량을 보인다. 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 파고 1.5m와 거의 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 4.24(b)는 묵호지역에서 최고수위의 공간 분포를 나타내며, 항입구와 항내에서 수위분포가 크게 상이하게 나타나고, 최고 약 2.2m의 수위가 상승함을 알 수 있다. 묵호지역 역시 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 2.4m와 거의 비슷한 값이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 4.24(c)는 임원지역에서 최고수위분포를 보여준다. 임원항내에 지진해일이 내습함에 따라 수위가 상승하여 약 5m 정도의 호안을 월류하여 배후지의 일부분이 침수가 되는 것을 확인할 수 있으며, 이 때 항내의 최고수위는 약 5.3m 정도이다. 울산지역과 포항지역은 각각 Fig. 4.24(d)와 (e)에서 나타내고 있는 바와 같이 두 지역 모두 전술한 강원도의 속초, 묵호, 임원지역에 비해서는 상당히 낮은 수위분포를 나타내며, 지진해일의 내습에 따른 최고수위는 울산지역에서 약 0.3m, 포항지역에서 약 0.5m 정도를 나타낸다. 그리고 남해연안의 부산지역과 마산지역에서 최고수위의 공간분포를 Fig. 4.24(f)와 (g)에 제시하며, 각각의 최고수위는 부산지역에서 약 0.2m, 마산지역에서 약 0.1m 정도이다.

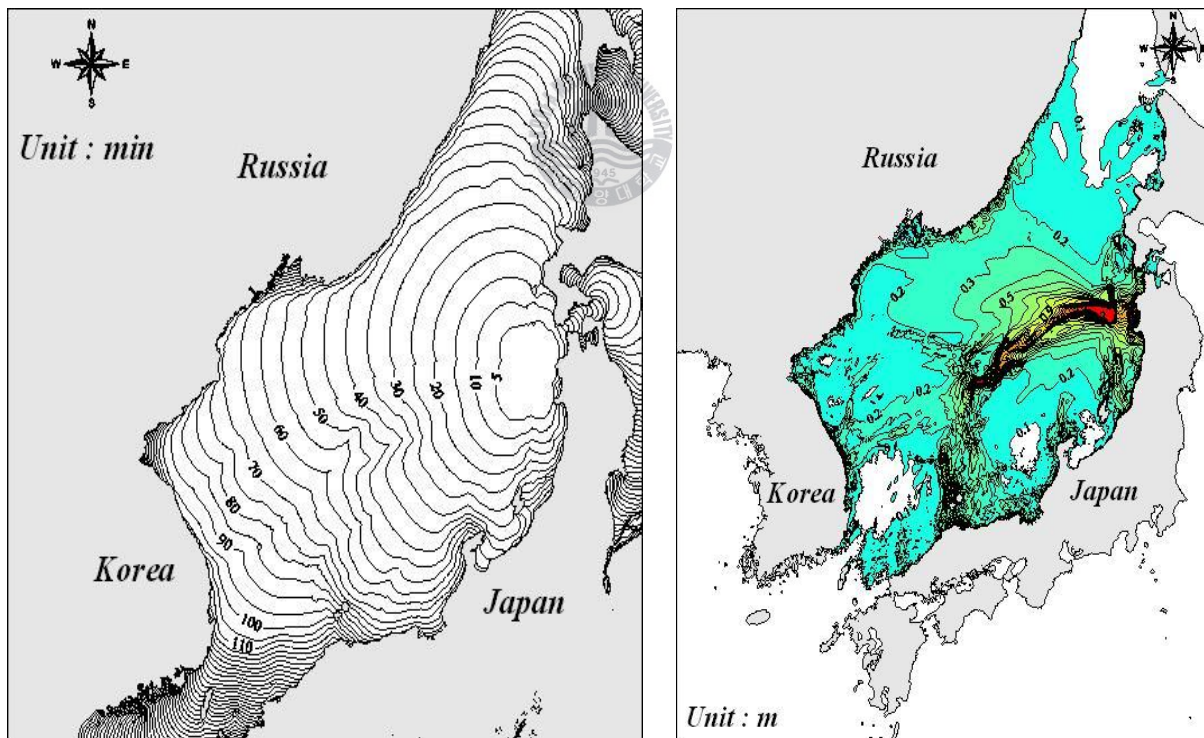
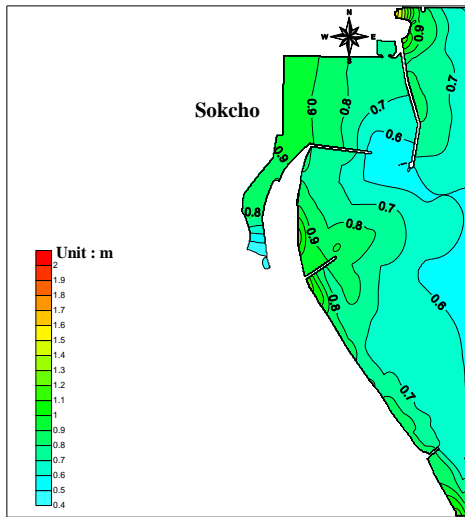
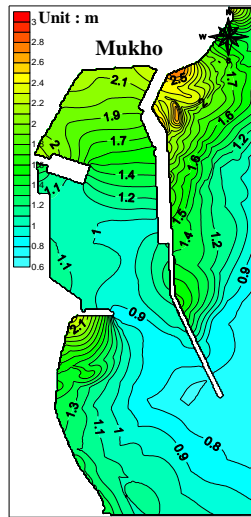


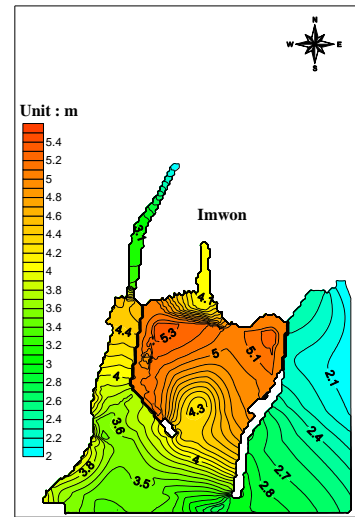
Fig. 4.23 Propagation and Maximum water level height of tsunami occurred by 1983 Central East Sea earthquake



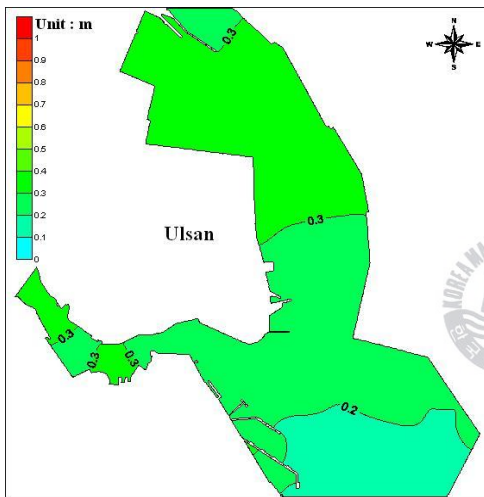
(a) Sokcho



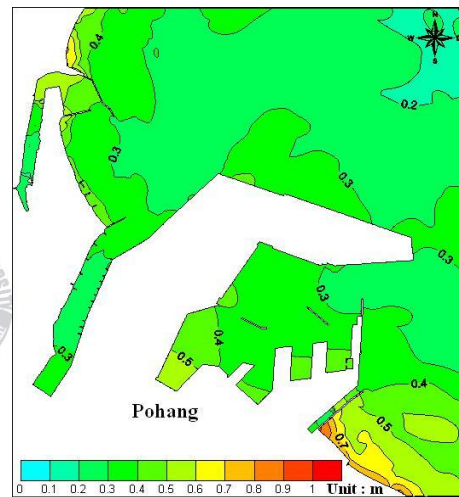
(b) Mukho



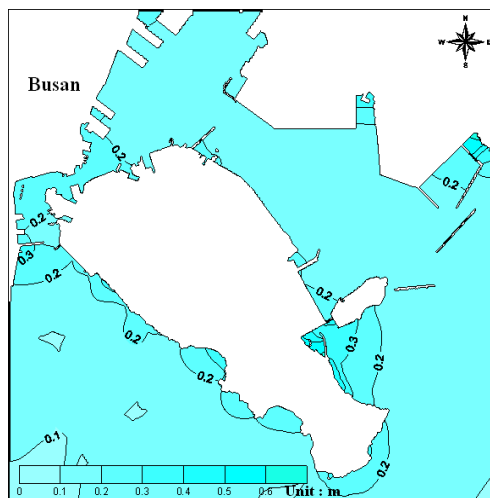
(c) Imwon



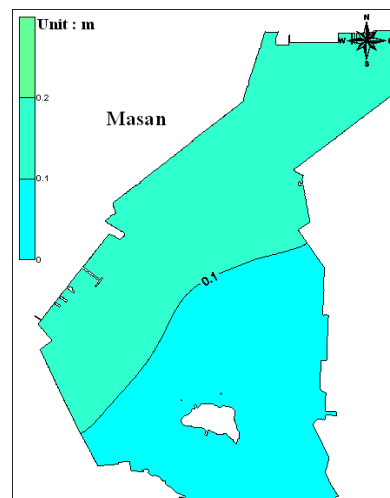
(d) Ulsan



(e) Pohang



(f) Busan

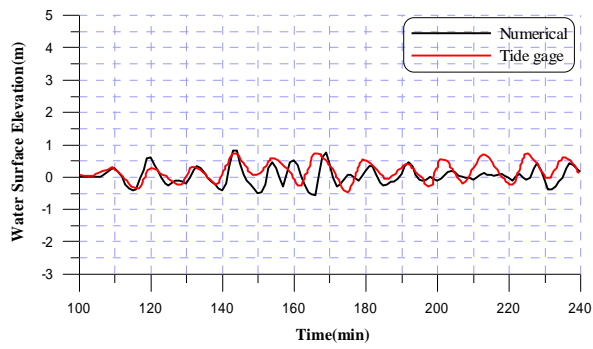


(g) Masan

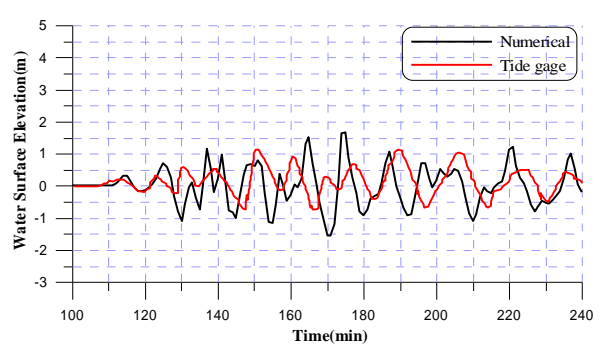
Fig. 4.24 Maximum water level height at each region

Fig. 4.25(a)는 속초지역에서 수치해석결과와 관측치와의 시간에 따른 수위변화를 비교한 것이다. 지진의 발생으로부터 약 100분 후에 제 1파가 도달하는 양상은 관측치(국립방재연구소, 1998)와 잘 일치하지만, 약 120분에서 관측치보다 과대평가되는 것을 확인할 수 있다. 최고수위가 나타나는 약 140분에 관측치를 잘 재현하며, 두 번째 최고수위 또한 잘 재현함을 알 수 있다. 그러나 약 200분 후부터 0.4~0.5m 정도 나타나는 관측치에 비해 상대적으로 수치해석결과가 과소평가되는 것을 알 수 있다. Fig. 4.25(b)는 묵호지역에서 관측치와 계산치를 비교한 결과이다. 속초와 마찬가지로 약 100분에 제 1파가 도달하는 양상을 확인할 수 있으며, 관측치와도 상당히 잘 일치한다. 관측치는 약 150분에 최고수위 약 1.2m 정도를 나타내지만 계산치는 약 170분에 약 1.6m 정도의 최고수위를 보인다. 부분적으로 관측치와 잘 일치하는 부분도 있지만 전체적으로는 관측치보다 수치해석결과가 과대평가되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.25(c)는 동해중부지진에 의한 지진해일로부터 가장 많은 피해를 입은 임원지역에 대한 계산치이다. 임원지역은 사후조사(국립방재연구소, 1998)에 의해 침수의 흔적높이로 최고수위를 추정할 수 있지만 수위변동의 관측치는 존재하지 않아 계산치만 나타내었다. 속초, 묵호, 포항 및 울산에 비해서 상대적으로 높은 수위가 나타나고, 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 5m보다도 높은 수위를 확인할 수 있다. Fig. 4.25(d)에 육상부에서 시간에 따른 수위분포를 제시하며, 약 160분에 내습하는 최고수위에 의한 침수현상으로 월류가 발생하며, 이후 시간의 경과에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.25(e)는 포항지역에서 수치해석결과와 관측치의 시간에 따른 수위변화를 비교한 결과이다. 제 1파의 도달시간이 약 140분으로 관측치와 거의 일치하는 경향을 확인할 수 있다. 약 0.3m의 최고수위와 -0.3m의 최저수위를 나타내는 관측치보다는 최고수위가 0.1m 정도, 최저수위가 0.2m 정도 더 크게 나타나지만 그 값의 차이는 미소하다고 판단할 수 있다. 관측치의 수위변동이 상당히 복잡하게 나타나기 때문에 정성적인 관점에서 그림을 살펴보면 전반적으로 약간의 위상차이가 나타나고, 약 250분까지는 관측치와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있지만 그 이후에는 관측치와는 다소 상이한 변화양상이 나타남을 알 수 있다. 포항지역의 주변해역이 항만개발등으로 인하여 지진해일 내습당시의 지형과 현재의 지형이 다소 상이하야 관측치와 계산치가 다른 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

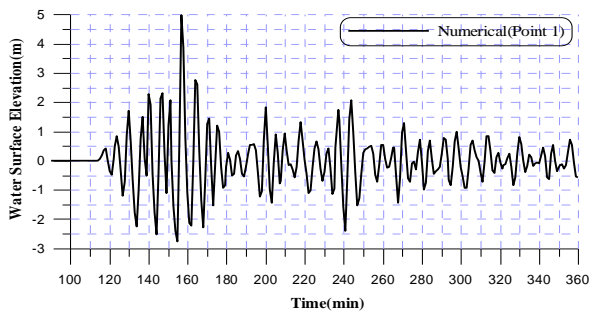
Fig. 4.25(f)는 울산지역에서 관측치와 계산치를 비교한 것이다. 약 150분에 제 1파가 도달하는 양상을 확인할 수 있으며, 관측치와도 상당히 일치한다. 시간에 따른 전반적인 수위변동의 양상이 관측치보다 수 분 정도 늦게 나타나지만 수위변동의 최고치와 최저치 역시 잘 재현되는 것으로 판단되며, 시간에 따른 수위분포의 변화과정이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.25(g)는 부산지역에서 시간에 따른 수위변화를 나타낸 결과이며, 약 180분에 제 1파가 도달하고, 최고수위는 약 0.27m, 최저수위는 약 -0.22m 정도로 나타난다. Fig. 4.25(h)는 마산지역에서 시간에 따른 수위변화를 나타낸 결과로 약 250분에 제 1파가 도달하며, 약 0.1m 정도의 수위변화가 나타남을 알 수 있다. 이로부터 일본에서 발생한 지진해일에 의해서 남해연안에서의 수위변화는 크지 않음을 알 수 있다.



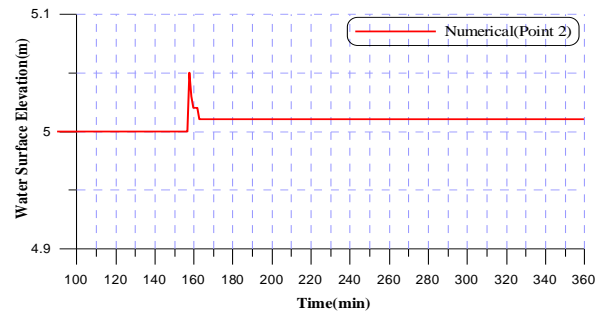
(a) Sokcho



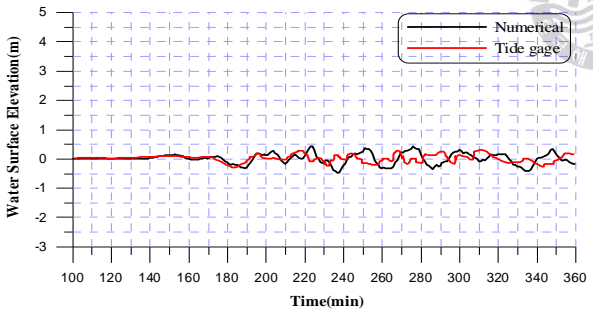
(b) Mukho



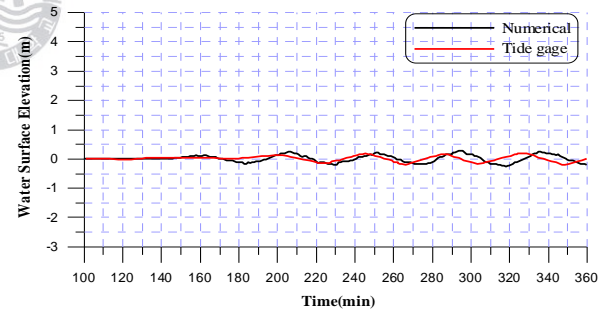
(c) Imwon(sea)



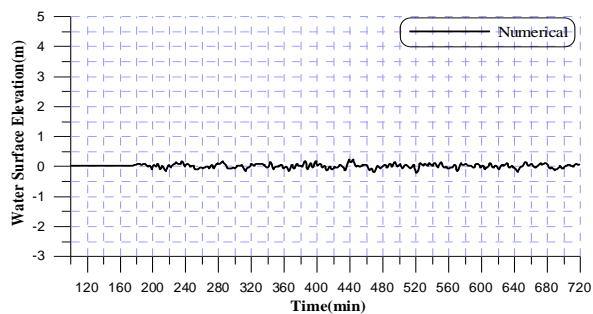
(d) Imwon(land)



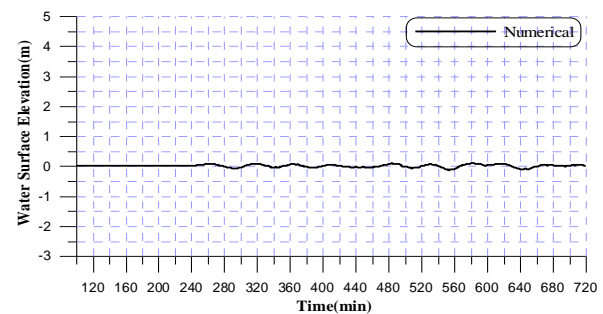
(e) Pohang



(f) Ulsan



(g) Busan



(h) Masan

Fig. 4.25 Time history of water level height at each region

(2) 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일

1) 대상영역 및 계산조건

전술한 기초방정식과 단층파라미터를 기초로 1993년 7월 12일에 발생하여 동해안에 상당한 피해를 야기한 북해도남서외해 지진해일에 대한 수치해석을 수행한다. 동해중부지진해일에서 수치모의의 대상영역인 속초, 묵호, 임원, 포항, 울산과 1993년의 북해도남서외해 지진해일에 의해 피해를 입은 삼척지역을 추가하여 계산을 수행하였다. 속초, 묵호, 임원, 포항, 울산, 부산, 마산지역의 계산조건은 Table 4.9, 계산영역과 수심은 Fig. 4.21, 4.22에 각각 제시된 것을 동일하게 사용하고, 삼척지역의 계산영역과 수심은 Fig. 4.26에 제시하며, 수치해석에 필요한 상세한 계산조건은 Table 4.10에 나타낸 바와 같다. 초기조건의 산정에 사용되는 1993년의 북해도남서외해지진에 대한 단층파라미터는 Table 4.6의 값을 적용한다.

Table 4.10 Computation conditions

Number of area	Mesh Size (m)	Number of mesh	Boundary condition of land	Open boundary condition
		Samcheok		
AREA NO.1	1,215	1333×1629	Perfect reflection	Free transmission
AREA NO.2	405	687×582		Nesting of each area
AREA NO.3	135	369×450		
AREA NO.4	45	936×750		
AREA NO.5	15	600×900		
AREA NO.6	5	198×405	Runup	

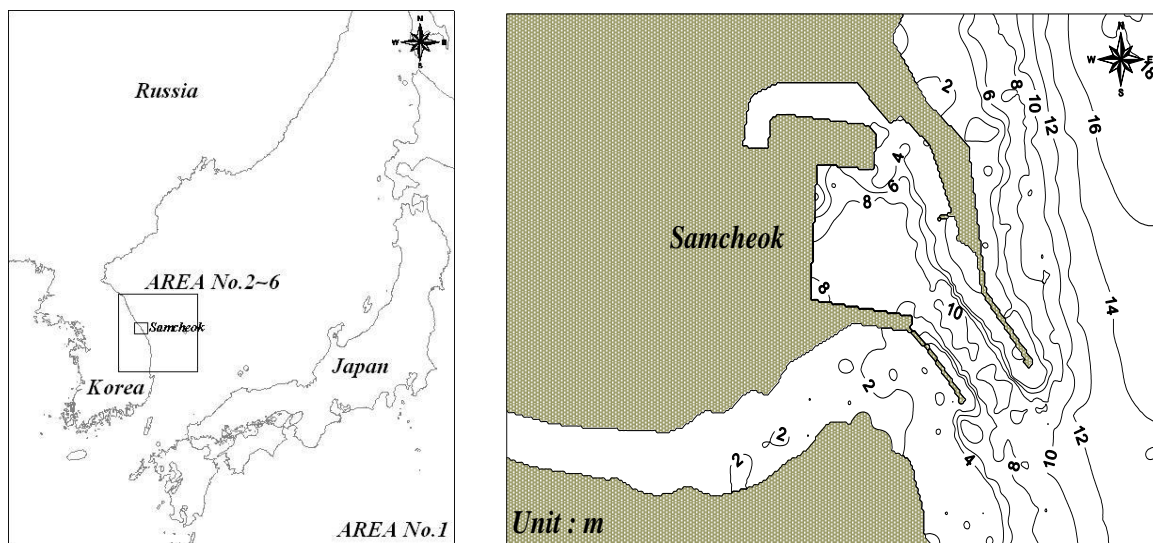


Fig. 4.26 Computation area and spatial distribution of depth

2) 수치해석결과

Fig. 4.27은 Table 4.6에 제시된 단층파라미터를 사용하여 도출된 수치해석의 결과 중에 지진해일의 전파속도에 대한 결과를 나타내고 있다. 수심이 깊은 심해에서는 전파속도가 빠르고 천해로 전파됨에 따라 전파속도가 상대적으로 줄어드는 양상을 알 수 있고, 대화퇴의 부근에서 굴절 및 회절이 되는 현상을 확인할 수 있다. 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 내습하는 것을 알 수 있다. 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도에 각각 도달하는 것을 확인할 수 있고, 이는 관측치(국립방재연구소, 1998)와 상당히 일치함을 알 수 있다. 그리고 지진해일의 계산결과에서 제 1영역내의 최고수위분포는 지진해일이 갖는 에너지의 전파과정을 설명하는데 사용된다. Fig. 4.27을 살펴보면 대부분의 에너지가 러시아 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있고, 대화퇴의 부근에서 일본측의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있다. 동해안의 수심이 상당히 깊기 때문에 영역내에서 수위는 공해상에서 0.1~1.0m 정도의 분포를 확인할 수 있고, 진원지의 부근에서 초기수위는 최고 7m 정도의 값이 나타나는 것을 알 수 있으며, 계산격자가 1.8km인 Fig. 4.17과 큰 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4.28에 제 6영역에서 최대수위분포를 제시한다. Fig. 4.28(a)는 속초지역의 최고수위분포를 나타내며, 지진해일의 내습에 따라 항외에서 약 0.8m, 항내에서 최고 약 1.1m의 수위상승량을 보인다. 국립방재연구소(1998)의 사후조사에서 최고 1.2m의 지진해일이 내습한 결과와 거의 비슷함을 알 수 있다. Fig. 4.28(b)는 묵호지역에서 최고수위의 공간분포를 나타내며, 항입구와 항내에서 수위분포가 매우 상이하게 나타나는 것을 알 수 있고, 최고 약 2.0m의 수위가 상승함을 알 수 있다. 묵호지역의 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 1.98m와 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 4.28(c)는 임원지역에서 최고수위분포를 나타낸다. 임원항내에 지진해일이 내습함에 따라 수위가 상승하여 항내의 최고수위가 약 2.8m 정도까지 나타나며, 1983년의 동해중부지진의 지진해일과 달리 배후지로의 쳐오름은 발생하지 않는다. 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 2.13m보다도 높은 수위를 확인할 수 있다. Fig. 4.28(d)에 삼척지역에서 수위분포를 나타내며 항내에서 최고 약 2m의 수위상승량이 발생함을 알 수 있다. 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 1.69m보다는 다소 과소평가되어 있으며, 이는 지진해일 내습 당시의 해저지형과 현재의 해저지형에서 많은 변화따른 결과로 판단된다. 울산지역과 포항지역은 각각 Fig. 4.28(e)와 (f)에 나타내는 바와 같이 두 지역 모두 강원도의 속초, 묵호, 임원지역에 비해서는 상당히 낮은 수위분포를 나타내며, 지진해일 내습에 따른 최고수위는 울산지역은 약 0.3m, 포항지역은 약 0.6m 정도이다. Fig. 4.28(g)와 (h)는 부산지역과 마산지역에서 지진해일 내습에 따른 최고수위의 공간분포를 나타낸 결과로, 그 값은 약 0.2m와 약 0.15m정도로 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.29는 수치해석결과와 관측치의 시간에 따른 수위변화를 나타낸 결과이다. Fig. 4.29(a)는 속초지역에서 관측치와 계산치의 결과를 비교한 그림이다. 지진발생 약 100분 후에 제 1파가 도달하는 것은 관측치와 잘 일치하지만 시간에 따른 수위변화를 살펴보면 제 1파부터 최고치를 잘 재현하고 있지만 수분의 차이를 두고 발생하는 것을 알 수 있고, 약 1.0m의 최고수위가 나타난다. Fig. 4.29(b)는 묵호지역에서 관측치와 계산치를 비교한 것이다. 속초와 마찬가지로 약 100분에 제 1파가 도달하며, 약 150분까지는 관측치를 잘 재현하지만 약 160분에 나타나

는 약 1.9m의 최고수위보다는 다소 과소평가되며, 계산치에서는 약 190분에 약 1.9m의 최고수위가 나타남을 알 수 있다. Fig. 4.29(c)는 삼척지역에서의 시간에 따른 수위분포를 나타낸 것으로 관측치가 없어 수치계산에 의한 결과만을 제시한다. 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위는 1.69m지만 계산치는 약간 과소평가된 약 1.25m정도로 나타난다. 이는 전술한 바와 같이 지진해일 내습 당시의 해저지형과 현재의 해저지형에서 많은 변화가 발생한 결과로 판단된다. Fig. 4.29(d)는 임원지역에 대한 계산결과를 나타낸 그림으로, 임원지역에 대한 수위변동의 관측치가 존재하지 않아 계산치만 나타내었다. 임원의 경우는 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 최고수위 2.13m와 비교할 때 최고수위 2.7m로 약 0.5m 정도 과대평가되었다. Fig. 4.29(e)는 포항에서의 비교결과로, 약 315분 정도에 나타나는 최고수위는 관측치가 0.4m 정도이며, 계산치는 이보다 0.2m 정도 높은 약 0.6m의 수위상승량이 나타난다. 수위분포의 정성적인 변화양상을 잘 일치하나 관측치의 수위변동에 soliton분열과 같은 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.29(f)는 울산지역에 대한 결과를 비교한 것으로, 전반적인 수위변동의 양상에서 계산치가 과대평가되나 그 차이는 약 0.1m로 미소하다. Fig. 4.29(g)는 부산지역에서 시간에 따른 수위변동을 나타낸 결과로, 약 180분에 제 1파가 도달하며, 수위의 변동량은 약 0.22m로 미소함을 알 수 있다. Fig. 4.29(h)는 마산지역에서 시간변화에 따른 수위의 변동을 나타내며, 제 1파가 약 250분에 도달하고 최고수위는 약 0.15m정도로 나타나는 것을 알 수 있다.

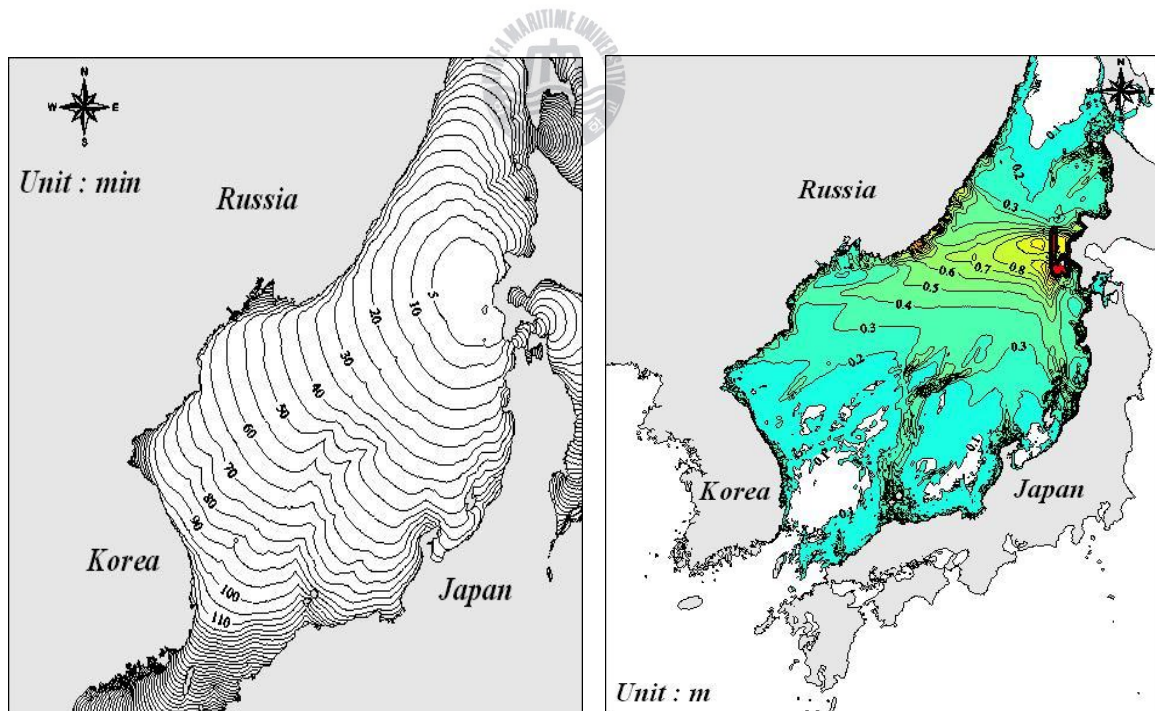
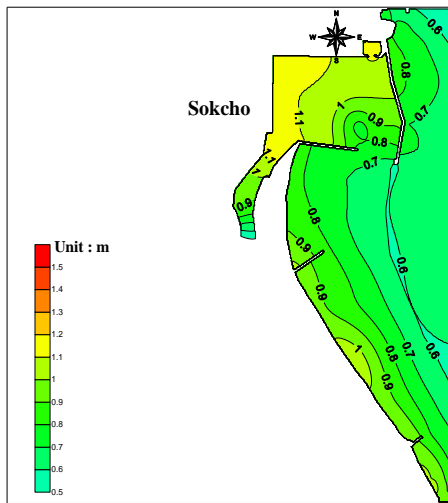
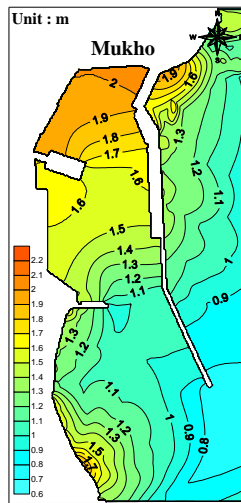


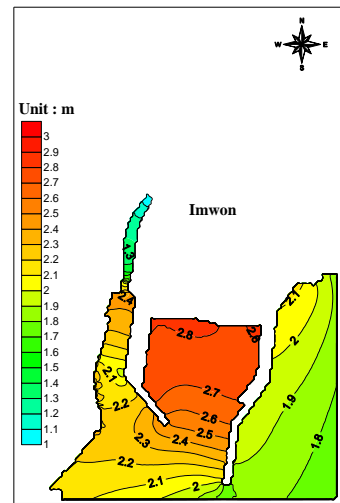
Fig. 4.27 Propagation and Maximum water level height of tsunami occurred by Hokkaido southwest off earthquake



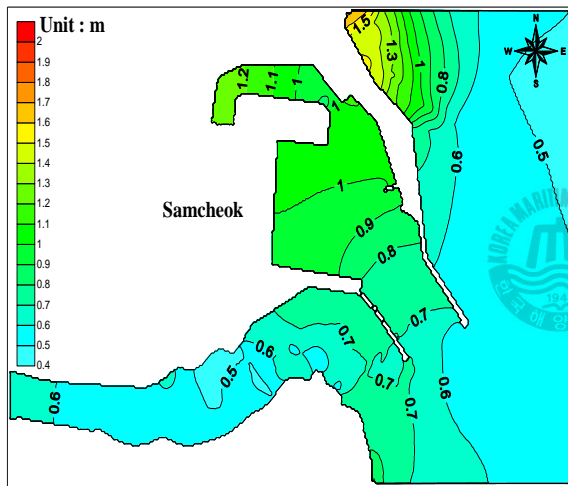
(a) Sokcho



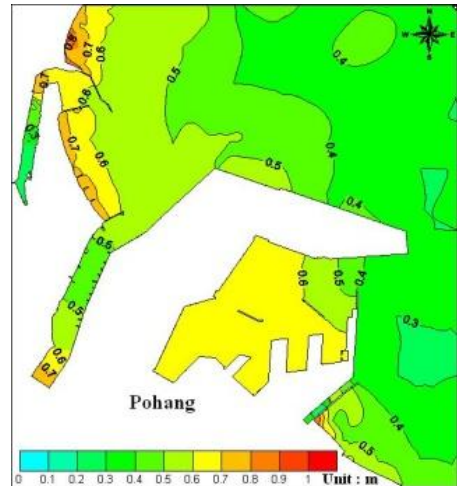
(b) Mukho



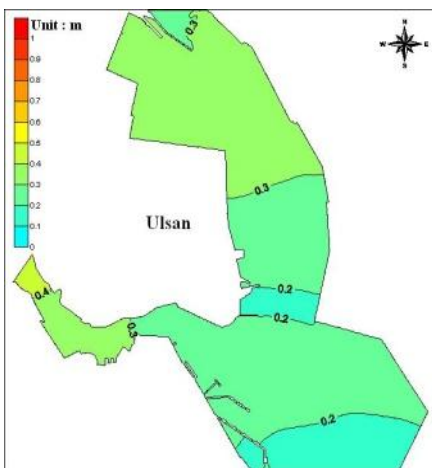
(c) Imwon



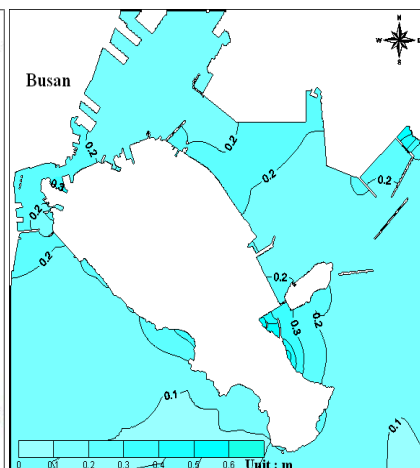
(d) Samcheok



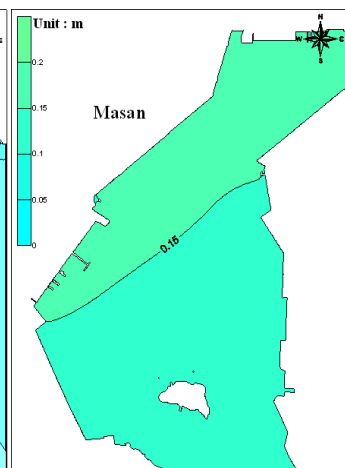
(e) Pohang



(f) Ulsan

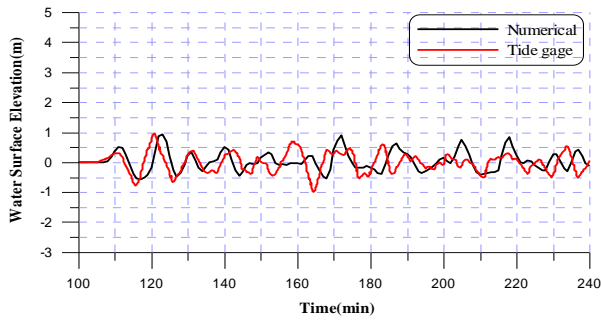


(g) Busan

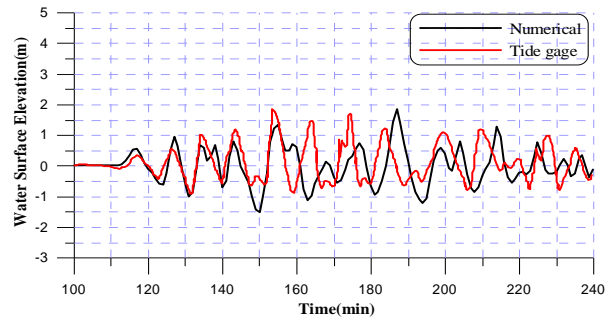


(h) Masan

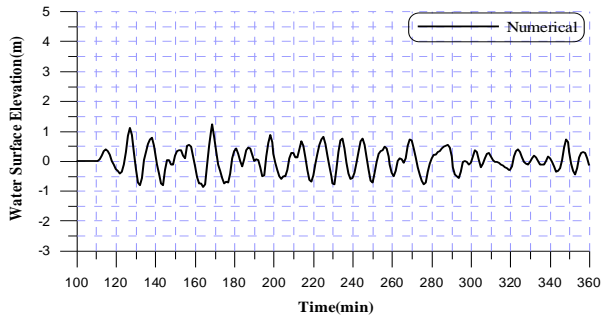
Fig. 4.28 Maximum water level height at each region



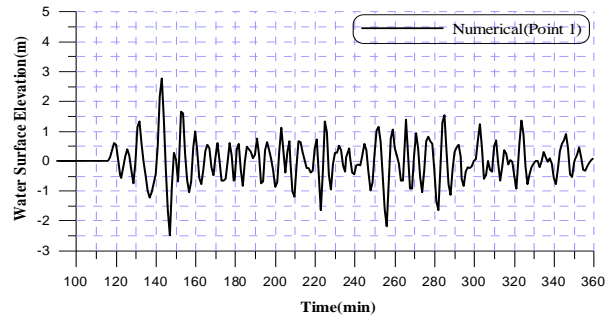
(a) Sokcho



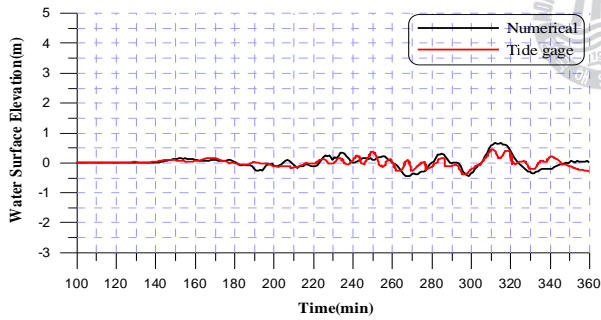
(b) Mukho



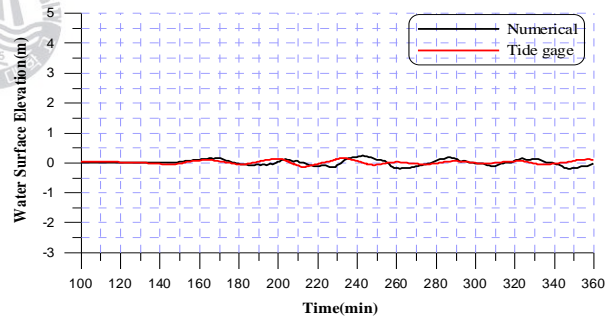
(c) Samcheok



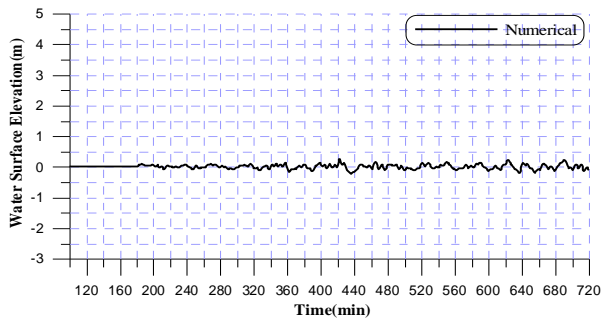
(d) Imwon



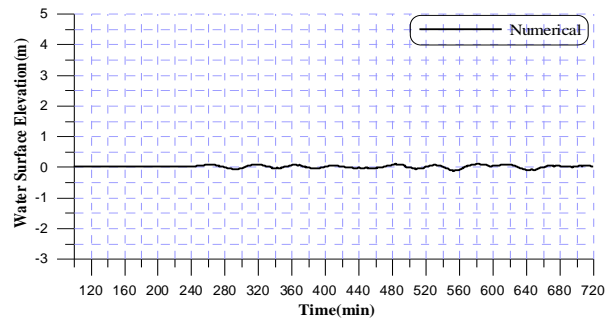
(e) Pohang



(f) Ulsan



(g) Busan



(h) Masan

Fig. 4.29 Time history of water level height at each region

이상에서 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 대한 여러 가지 물리량들을 검토하였다. Table 4.11에 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 의한 수치시뮬레이션 결과 중에 사후조사(국립방재연구소, 1998)에서 얻어진 관측치와 계산에서 얻어진 최고수위에 대한 결과를 나타내었다.

Table 4.11 Comparison between observed and calculated maximum water level

Position	1983 Central East Sea earthquake		Hokkaido southwest off earthquake	
	Observed(m)	Calculated(m)	Observed(m)	Calculated(m)
Sokcho	1.5	0.9	1.2	1.1
Mukho	2.4	2.2	1.98	2.0
Samcheok	-	-	2.13	2.8
Imwon	5	5.3	1.69	1.2
Pohang	-	0.5	-	0.6
Ulsan	-	0.3	-	0.3
Busan	-	0.25	-	0.2
Masan	-	0.1	-	0.15



(3) 지진공백역에서의 지진해일

1) 대상영역 및 계산조건

전술한 지진공백역에서 지진해일에 대한 결과를 나타낸 Table 4.8을 살펴보면 가상지진해일 2가 6개의 가상지진해일 중에 우리나라의 연안에 가장 큰 수위상승량을 나타내기 때문에 가상지진해일 2의 경우에 대해서만 복합격자모델을 적용하여 수치해석을 수행한다. 대상지역은 기존의 지진해일 가운데 동해안에 상당한 피해를 발생시킨 1983년의 동해중부지진해일과 1993년의 북해도남서외해지진해일에 의해 피해가 발생한 속초, 묵호, 삼척, 임원, 포항, 울산과 남해안의 부산 및 마산을 포함한 8개 지역에 대해서 지진해일의 전파속도 및 수위변동량 등을 예측하여 우리나라의 연안에 어떠한 영향을 미칠 것인지 검토한다.

대상영역은 Fig. 4.30에 제시하며, Fig. 4.22, 4.26의 제 6영역의 수심을 사용한다. 계산시간은 지진해일의 영향을 충분히 고려할 수 있도록 지진이 발생하는 시간부터 지역에 따라 6~12시간 동안에 Table 4.12의 조건들을 적용하여 수치모의하고, Table 4.7의 지진공백역에서 가정된 단층파라미터 중에 가장 높은 수위상승량이 나타나는 가상지진해일 2의 값을 사용한다.



Fig. 4.30 Computation area

2) 수치해석결과

Fig. 4.31은 Table 4.7에서 제시된 단층파라미터 가운데 가상지진해일 2를 적용하여 도출된 수치해석의 결과에 있어서 제 1영역에서 지진해일의 전파속도와 최고수위분포에 대한 결과를 나타내고 있다. 지진해일의 전파과정을 살펴보면 대화퇴의 부근에서 굴절 및 회절되는 현상을 확인할 수 있으며, 그리고 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 지진해일의 제 1파가 강원도 부근의 동해연안에 내습하는 것을 알 수 있다. 여기서, 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도로, 그 전파속도는 과거에 발생하여 우리나라에 영향을 미친 1983년 동해중부지진, 1993년 북해도남서외해지진에 대한 해석결과와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 지진해일의 계산결과에서 제 1영역내의 최고수위분포는 지진해일이 갖는 에너지의 전파과정을 설명하는데 사용된다. Fig. 4.31을 살펴보면 에너지의 대부분은 러시아 방향으로 전파하는 것을 확인할 수 있고, 대화퇴의 부근에서 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있다. 동해안은 수심이 상당히 깊기 때문에 영역내에서 수위는 공해상에서는 0.1~1.0m 정도의 분포를 확인할 수 있고, 진원지 부근의 초기수위는 약 4m 정도의 값이 나타나는 것을 알 수 있으며, 계산격자가 1.8km인 Fig. 4.20과 큰 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4.32는 제 6영역에서 최대수위분포를 나타낸 결과이다. Fig. 4.32(a)는 속초지역에서 최고수위분포를 나타낸다. 지진해일의 내습에 따라 항외에서 약 0.8m, 항내에서 최고 약 1.1m의 수위상승량을 나타낸다. Fig. 4.32(b)는 묵호지역에서 최고수위의 공간분포를 나타낸 결과이다. 항입구와 항내에서 수위분포가 급격히 변화하는 양상을 알 수 있으며, 최고 약 2.9m의 수위가 상승하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.32(c)는 임원지역에서 최고수위분포를 나타낸 것으로 임원항내에 지진해일이 내습함에 따라 수위가 상승하여 항내의 최고수위가 약 3.2m 정도까지 나타나며, 1983년의 동해중부지진시의 지진해일과 달리 배후지로의 처오름은 발생하지 않는다. Fig. 4.32(d)는 삼척지역에서 수위분포를 나타낸 것이다. 항내에서 최고 약 1.1m의 수위상승량이 발생함을 알 수 있다. 포항지역에서의 최고수위분포를 Fig. 4.32(e)에 나타내고 있다. 지진해일의 내습에 따른 최고수위는 약 0.8m 정도인 것을 알 수 있다. Fig. 4.32(f)에 울산지역에서 최고수위분포를 나타낸 것으로 지진해일의 내습에 따른 최고수위는 약 1.1m 정도이며, 이는 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의해 발생된 지진해일의 내습시보다 약 0.8m 이상의 수위상승량이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 4.32(g)는 부산항에서 최고수위분포를 나타낸 것으로 지진해일의 내습에 따른 최고수위는 약 0.5m 정도로 나타난다. Fig. 4.32(h)는 마산항에서 지진해일의 내습에 따른 최고수위분포로, 그 값은 약 0.4m 정도인 것을 알 수 있다.

Table 4.12 Computation conditions

Number of area	Mesh Size (m)	Number of mesh								Boundary condition of land	Open boundary condition
		Sok cho	Muk ho	Sam cheok	Im won	Po hang	Ul san	Bu san	Ma san		
AREA NO.1	1,215	1333×1629								Perfect reflection	Free transmission
AREA NO.2	405	687×582				687×630			282×234		Nesting of each area
AREA NO.3	135	405×480	363×444	369×450		435×753	174×210	306×198	300×291		
AREA NO.4	45	387×711	930×744	936×750	450×450	819×819	546×393	294×387	444×444		
AREA NO.5	15	258×348	594×894	600×900	150×216	744×744	894×774	564×562	378×786		
AREA NO.6	5	494×534	192×399	198×405	144×213	1284×1401	879×909	645×552	684×894		

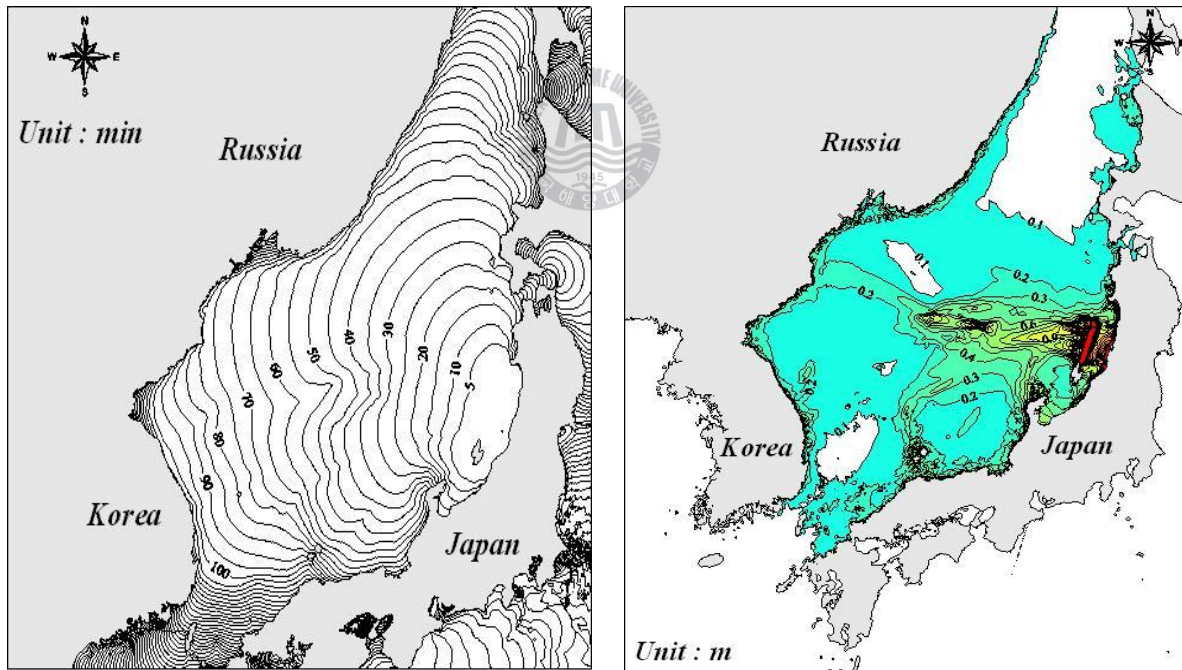
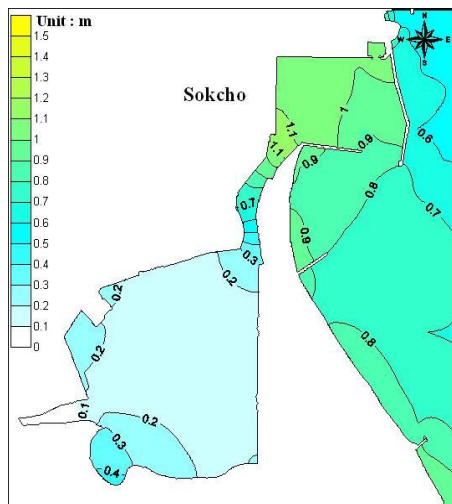
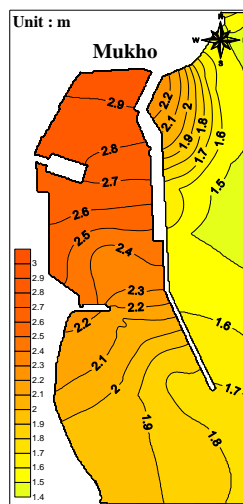


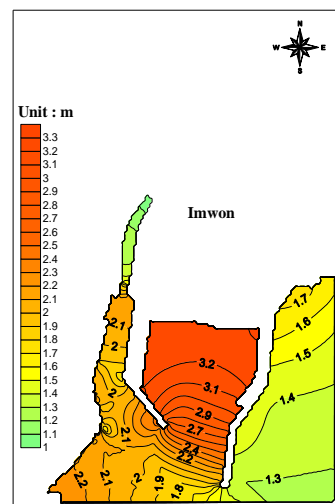
Fig. 4.31 Propagation and Maximum water level height of tsunami occurred by hypothetical earthquake



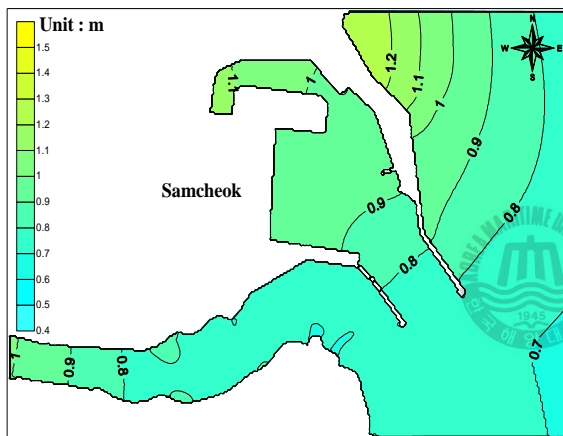
(a) Sokcho



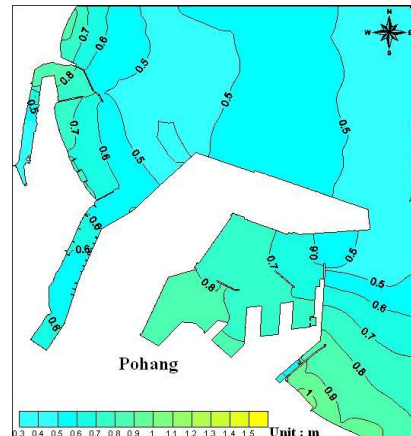
(b) Mukho



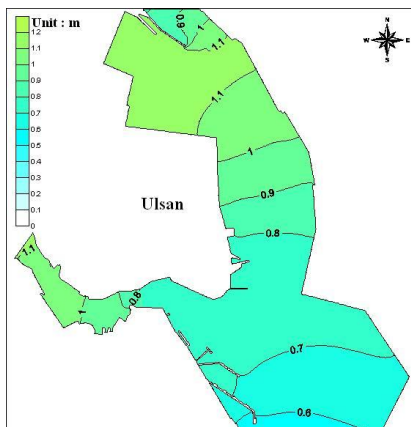
(c) Imwon



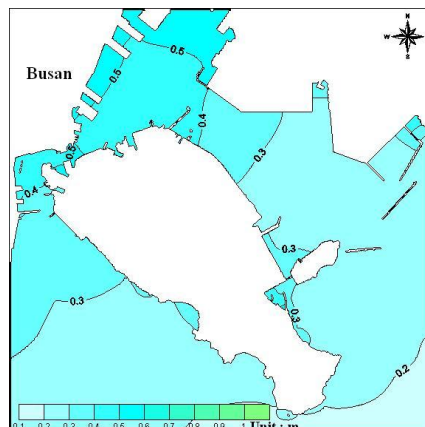
(d) Samcheok



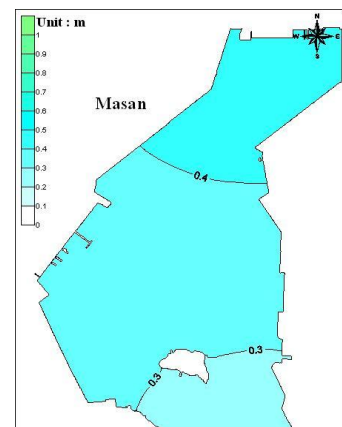
(e) Pohang



(f) Ulsan



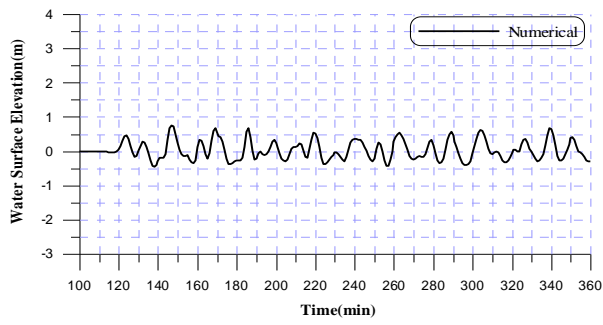
(g) Busan



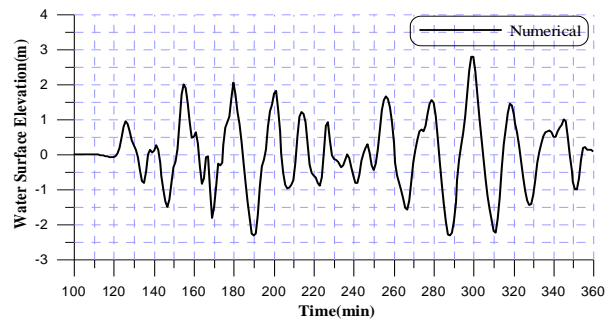
(h) Masan

Fig 4.32 Maximum water level height at each region

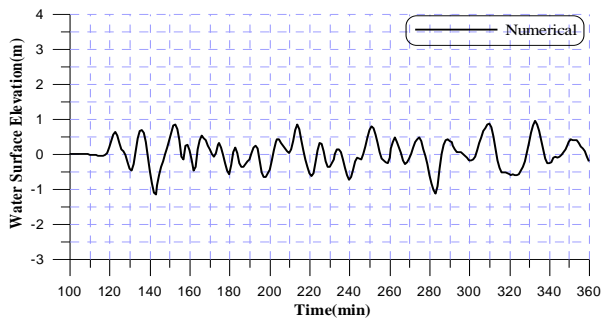
Fig. 4.33은 수치해석으로부터 얻어진 시간에 따른 수위변화를 나타낸 결과이다. Fig. 4.33(a)는 속초지역에서의 계산치의 결과를 나타내고 있으며, 지진발생 약 120분 후에 제 1파가 도달한다. 시간에 따른 수위변화를 살펴보면 약 150분경에 약 0.8m의 수위상승량을 보이며, 이 후에도 그에 상응하는 수위상승량이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4.33(b)는 묵호지역에서의 계산결과를 나타내며 속초와 마찬가지로 약 120분에 제 1파가 도달하며, 약 2m 정도의 수위상승이 나타나고, 약 300분에 약 3m의 최고수위상승량이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4.33(c)는 삼척지역에서 시간에 따른 수위분포를 나타내며 지진발생 후 약 110분이 지나서 제 1파가 도달하는 것을 알 수 있으며, 최고수위상승량은 약 0.9m 정도이다. Fig. 4.33(d)는 임원지역에 대한 계산결과를 나타낸 결과로, 속초, 묵호지역과 비슷한 약 120분에 제 1파가 도달하며, 약 160분에 3.2m의 최고수위가 나타난 이후에 약 1.5m 정도의 수위가 상승함을 알 수 있다. Fig. 4.33(e)는 포항에서 시간에 따른 수위분포를 나타내며, 약 140분정도에 제 1파가 도달하고, 약 210분에 약 0.8m의 최고수위가 나타나며, 시간이 경과되면서 약 0.6m의 수위가 상승한다. Fig. 4.33(f)는 울산지역에 대한 수위의 시간변화를 나타낸 결과이다. 약 140분에 제 1파가 도달하는 것은 포항지역과 동일하다. 약 210분에 발생하는 최고수위 약 0.8m는 울산지역에서 나타난 기존의 지진해일에 의한 결과에 비해 가장 높은 수위상승량이며, 이후에도 이와 동등한 정도의 수위가 상승함을 알 수 있다. Fig. 4.33(g)는 부산항에서 시간에 따른 수위분포를 나타내며, 지진해일의 내습상황을 보다 자세히 수치모의하기 위해서 지진해일의 발생 후 12시간 동안에 수위분포를 제시한다. 약 170분에 제 1파가 도달하고, 약 0.5m 정도의 수위변화가 발생하며, 이후에도 이와 동등한 높이의 지진해일이 내습함을 알 수 있다. Fig. 4.33(h)는 마산항에서 지진해일의 발생에 따라 시간에 따른 수위변화를 나타내는 결과로 부산항과 마찬가지로 12시간 동안 수치모의하였으며, 약 250분에 제 1파가 도달함을 알 수 있다. 최고수위는 약 320분과 540분에 약 0.4m 정도로 주어지고, 그 주기가 약 50분 정도로 나타남을 알 수 있다.



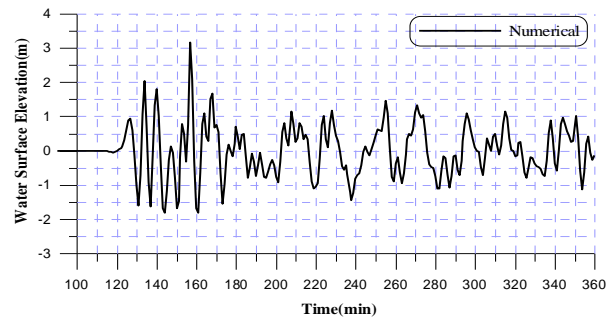
(a) Sokcho



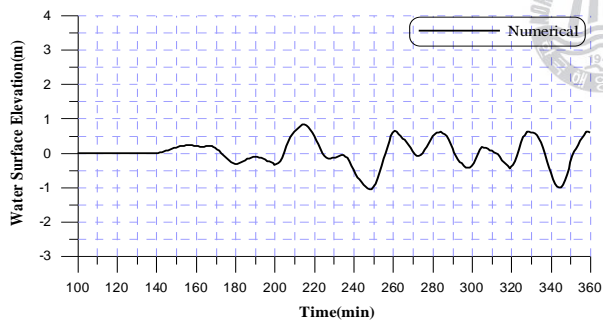
(b) Mukho



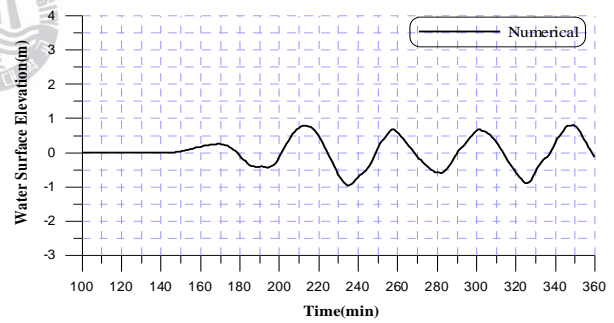
(c) Samcheok



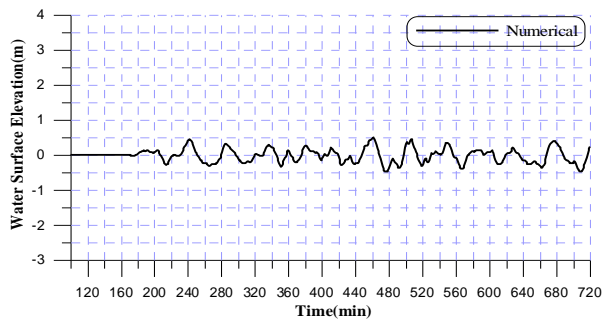
(d) Imwon



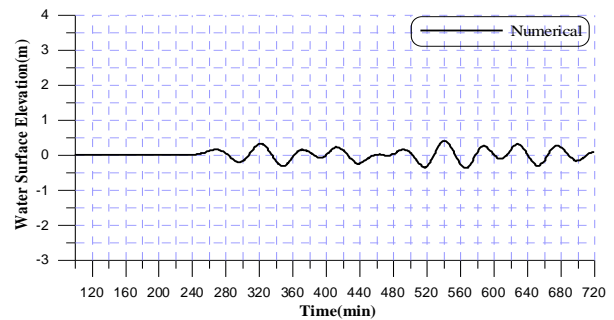
(e) Pohang



(f) Ulsan



(g) Busan



(h) Masan

Fig. 4.33 Time history of water level height at each region

4.5 결론

본 장에서는 천해역에서 수심이 얕아지면서 발생하게 되는 천수효과를 충분히 재현하기 위한 격자접속기법과 연안역에서의 처오름을 고려하기 위한 이동경계조건을 도입하여 우리나라의 동해연안에 막대한 영향을 미친 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 있어서 동해연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 특성을 수치모형실험으로부터 검토하고, 관측치와 비교하였으며, 또한 지진해일에 의한 동해연안의 각 지점에서 최대수위상승고과 시간에 따른 수위변화 등을 비교·검토하여 그 특성들을 평가하였다. 또한 지진활동이 발생할 가능성이 높은 일본의 서측연안에 존재하는 단층대에 존재하는 지진공백역을 대상으로 여러 종류의 지진에 의한 가상지진해일을 수치시뮬레이션하였다. 이로부터 남동해연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 특성을 검토하고, 지진해일에 의한 남동해연안의 각 지점에서 최대수위상승고과 시간에 따른 수위변화 등을 검토하여 그 특성들을 평가하였다. 이상과 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다. 이러한 결과들은 남동해연안에서 해안 및 항만구조물의 내파설계, 연안방재의 계획 및 정책과 향후의 연안개발계획 등에 기본자료로 활용될 수 있을 것이다.

- (1) 본 장에서 제안하는 수치해석기법을 통해 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 전파속도에 대한 계산치와 관측치를 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.
- (2) 1983년의 동해중부지진에 의한 지진해일에 대한 수치해석결과에서 관측치와 거의 동일한 전파속도와 전도양상을 나타내었으며, 지진발생으로부터 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 내습하며, 포항은 약 130~140분, 울산은 150분 정도로 북에서 남의 순서로 도달한다. 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 수치해석결과에서는 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 동해연안을 내습하며, 포항은 약 130~140분, 울산은 150분 정도에 각각 지진해일이 도달한다.
- (3) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일이 갖는 에너지의 대부분이 러시아 방향으로 전파되는 양상을 확인하였고, 대화퇴의 부근에서 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있었다. 공해상에서는 0.1~1.0m 정도의 분포가 나타나며, 진원지의 부근에서 1983년의 동해중부지진에 의한 지진해일의 경우는 최고 4m 이상이 나타났고, 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 경우는 공해상에서 0.1~1.0m 정도의 최고수위분포가, 진원지의 부근에서 7m 정도의 수위변화가 발생하였다.
- (4) 1983년의 동해중부지진에 의한 지진해일에 의해 발생한 최고수위는 속초지역에서 0.9m, 묵호지역에서 2.2m, 임원지역에서 5.3m, 포항지역에서 0.5m, 울산지역에서 0.3m, 부산지역에서 0.25m, 마산지역에서 0.1m 정도로 사후조사에서 얻어진 최고수위와 거의 비슷한 결과를 나타낸다. 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 의해 발생한 최고수위는 속초지역에서 1.1m, 묵호지역에서 2.0m, 삼척지역에서 1.2m, 임원지역에서 2.8m, 포항지역에서 0.6m, 울산지역에서 0.3m, 부산지역에서 0.2m, 마산지역에서 0.15m 정도로 사후조사에서 얻어진 최고수위와 거의 비슷한 결과를 나타낸다.
- (5) 1983년의 동해중부지진에 의한 지진해일과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 경우에 속초, 묵

호, 삼척, 임원, 포항, 울산, 부산 및 마산지역에서 수위변동의 관측치와 수치모형실험결과를 비교한 결과, 제 1파가 도달하는 시간은 관측치와 일치하지만 최저 및 최고수위의 값과 그의 변동양상은 정성적으로는 일치하지만 정량적인 관점에서는 다소 불일치하는 결과를 나타낸다. 이는 각 지역에서 주변해역의 개발로 인해 지진해일 내습당시의 지형과 현재의 지형이 다소 상이하어 관측치와 계산치가 다른 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

(6) 지진공백역에서 발생한 가상지진의 경우도 가상지진해일의 전파속도는 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 도달하며, 포항은 약 130~140분, 울산은 150분 정도로 그 전파속도는 이전에 발생한 지진해일에 대한 해석결과와 거의 동일하게 나타난다.

(7) 지진공백역에서 가상지진해일은 에너지의 대부분이 러시아 방향으로 전파되며 대화퇴 부근에서 발생하는 회절현상으로 일본의 남쪽으로 상당한 에너지가 전파되는 것을 알 수 있다. 단층파라미터의 차이에 따라 각 가상지진해일에서 상당한 수위분포의 차이를 나타내며 가상지진해일 1, 4, 6은 상대적으로 동해안에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 가상지진해일 3과 5는 일본의 연안에는 상당한 해일고를 발생시키지만 우리나라에는 그 영향이 비교적 적고, 가상지진해일 2의 경우가 가장 높은 약 4m의 수위분포를 나타내며, 동해안에도 상당한 해일고를 발생시킨다.

(8) 가상지진해일 2에서 시간에 따른 수위변화는 속초지역에서 지진발생 약 120분 후에 제 1파가 도달한다. 시간에 따른 수위변화를 살펴보면 약 150분경에 약 0.8m의 수위상승량을 나타낸다. 묵호지역에서는 속초와 마찬가지로 약 120분에 제 1파가 도달하며, 약 2m 정도의 수위상승이 나타나고, 약 300분에 약 3m의 최고수위상승량이 발생한다. 삼척지역에서는 지진해일 발생 후 약 110분이 경과되어 제 1파가 도달하는 것을 알 수 있으며, 최고수위상승량은 약 0.9m 정도이다. 임원지역에서는 속초, 묵호지역과 비슷한 약 120분에 제 1파가 도달하며 약 160분에 3.2m의 최고수위가 나타난 이후에 약 1.5m 정도의 수위가 상승하며, 포항에서는 약 140분정도에 제 1파가 도달하고, 약 210분에 약 0.8m의 최고수위가 나타나며, 시간이 지나면서 약 0.6m의 수위가 상승한다. 울산지역에서 약 140분에 제 1파가 도달하는 것은 포항지역과 동일하다. 약 210분에 발생하는 최고수위 약 0.8m는 울산지역에서 나타난 기존의 지진해일에 의한 결과(윤성범 등, 2002)에 비해 상당히 높은 수위상승량이며, 이후에도 이와 동등한 정도의 수위가 상승함을 알 수 있다. 부산항에서는 약 170분에 제 1파가 도달하고 약 0.5m 정도의 수위변화가 발생하며, 이후에도 이와 동등한 높이의 지진해일이 내습한다. 마산항에서는 약 250분에 제 1파가 도달하고 최고수위는 약 320분과 540분에 도달하는 약 0.4m 정도로 이며 그 주기가 약 50분 정도이다.

< 참고문헌 >

- 국립방재연구소 (1998): 동해안에서의 지진해일 위험도 평가, 국립방재연구소 연구보고서, NIDP-98-06.
- 양금석 (2007): 일본근해에 기원한 지진해일이 동해연안의 수위변동에 미치는 영향의 평가, 한국해양대학교 석사학위논문.
- 윤성범, 임채호, 조용식, 최철순 (2002): 지진해일 전파 분산보정 유한차분모형의 정밀도 평가, 한국해양·해양공학회지, 제14권, 제2호, pp.116-127.
- Aida, I. (1969): Numerical Experiments for Tsunami Caused by Moving Deformations of the Sea Bottom, Bull. Earthquake Res. Inst., Vol 47, pp 673-700.
- Aida, I. (1984): A source models of the 1983 Nihonkai-earthquakes tsunami, Proc. Symp. Nihonkai Chubu Earthquake Tsunami, JSCE, pp.9-21.
- Ishikawa, Y. (1994): Remaining earthquake vacant region, Monthly Ocean, Vol. 7, pp. 102-104.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E. (1971): The Displacement Fields of Inclined Faults, Bull. Seismol. Soc. Amer., Vol 61, No 5, pp 1433-1440.
- Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Ortis, M. (1994): Fault Model to Describe Hokkaido Nansei Offshore Earthquake for Tsunami, JSCE, Vol41, pp 251-255.
- Tohoku University (1995): Observation of continuous crustal change in Tohoku area, Report of Disaster Control Research Center.
- 都司嘉宣, 小西達男 (1985): 日本海に發生した地震津波と數値計算結果, 國立防災科學術センター研究報告, No. 35, pp. 277-297

5. 결론

본 연구에서는 부산 및 경남 연안역에 막대한 물적·인적재해를 초래한 태풍 Sarah(5914), Thelma(8705), Maemi(0314)를 대상으로 부산연안의 각 지역별로 상세한 폭풍해일고를 추정하였고, 2차원비선형천수방정식을 적용하여 미산만의 인근연안역에서 해역과 육상을 일체화한 격자구성을 통하여 폭풍해일고를 추정함과 동시에 폭풍해일에 의한 배후역의 범람현상을 수치적으로 규명하였다.

또한 육상지형의 영향을 고려한 바람장을 산출하기 위하여 MASCON모델을 이용하며, 지역적으로 차폐 및 개방되는 해역특성이 분명한 지역을 대상으로 기존의 태풍모델로 산정된 해상풍과 MASCON모델로 산정된 해상풍을 SWAN모델에 적용하여 천해파랑을 산정하며, 그 결과를 상호 비교·검토함으로써 정도 높은 천해파랑 산정을 위한 MASCON모델의 필요성을 논의하였다. 산정된 천해파랑을 대상지역 호안에 적용하여 본 연구의 수치과동수로 월파랑을 산정하였다. 산정된 월파랑으로부터 월류량을 추정하고, 이로부터 제내지의 침수현상을 해석하여 대상지역 배후에 있는 도로와 공장 등의 건물을 고려하여 범람을 예측하였다.

그리고 격자접속기법과 이동경계조건을 도입하여 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 있어서 동해연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 특성을 수치모형실험으로부터 검토하고 관측치와 비교하였으며, 동해연안의 각 지점에서 최대수위상승고과 시간에 따른 수위변화 등을 비교·검토하여 그 특성들을 평가하였다. 또한 지진활동이 발생할 가능성이 높은 지진공백역을 대상으로 가상지진해일을 수치시뮬레이션하였다. 이로부터 남동해연안에서의 수위변동, 전파시간 등과 같은 지진해일의 특성을 검토하고, 남동해연안의 각 지점에서 최대수위상승고과 시간에 따른 수위변화 등을 검토하여 그 특성들을 평가하였다. 이러한 결과들은 남동해연안에서 해안 및 항만구조물의 내파설계, 연안방재의 계획 및 정책과 향후의 연안개발계획 등에 기본자료로 활용될 수 있을 것이며, 남해안에서는 폭풍해일 내습에 대한 대책, 동해안에서는 지진해일 내습에 대한 대책이 각각 필요함을 알 수 있다. 이상의 과정으로부터 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

5.1 폭풍해일

(1) 본 연구에서 제안하는 수치해석기법을 태풍 Maemi 통과시 부산항검조소에서 관측된 기압 및 폭풍해일고의 시간변화 등의 관측치와 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 검토한 태풍 Sarah, Thelma, Maemi의 수치시뮬레이션의 결과를 통해서 부산 서부연안에서는 태풍 Maemi가, 부산 동부연안에서는 태풍 Sarah에 의해 가장 높은 폭풍해일고가 나타났다.

(3) 부산 서부연안에서는 녹산공단 전면과 가덕도 사이의 협수로로 인하여 수괴의 진행이 차폐되고, 더불어 낙동강하구와 같이 만의 길이가 길고 수심이 얕은 지형적인 특성으로 조위편차가 크게 나타났다, 반면에 부산 동부연안에서는 부산 서부연안에 비해 대체적으로 평활한 해안선으로 이루어져 있기 때문에 지형적인 특성에 의한 영향보다는 중심기압, 이동속도, 태풍반경과 같은 태풍의 기본특성과 태풍의 이동경로에 의해 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서 연안역에서 범람해석을 추정할 수 있는 기법을 제시하였으며 이 수치해석모델에 의한 범람해석 결과를 마산만 인근연안역에서 현지조사를 토대로 얻어진 결과 및 범람해석에 관한 기존의 수치해석결과와 비교·검토하여 본 연구의 타당성과 적용성을 확인할 수 있었다. 얻어진 결과는 마산만의 인근연안역을 비롯한 타 지역에서의 연안사업 및 연안방재사업에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

(5) 폭풍해일의 정확도를 높이기 위하여 조석, 밀도성층, 하천수의 유입, wave-setup 등을 고려할 필요가 있고, 육상지형의 영향을 고려할 수 있는 모델을 해상풍 추산시 이용함으로써 폭풍해일 수치해석수법의 정확도를 높일 수 있을 것이라 판단된다.



5.2 MASCON모델

(1) 지형의 영향이 고려되지 않은 경우에 바람장의 분포는 태풍의 기본특성에 의해 동심원을 그리며 일정하게 나타나지만, 지형의 영향이 고려된 경우는 지형주위의 풍향이 변하고 풍속이 빨라지는 것을 MASCON모델을 통한 수치해석으로부터 확인할 수 있다.

(2) 본 연구에서 제안하는 MASCON모델은 산지 등의 지형적인 특성에 의해 바람장에 영향을 미칠 수 있는 지역에서 유용하게 사용될 수 있을 것이며, 컴퓨터에 의한 계산용량의 증대에 따라 바람장 산정을 위한 계산격자의 해상도를 높인다면 연안 및 도심지의 건물의 영향도 고려할 수 있는 보다 자세한 바람장의 해석이 가능할 것이라 판단된다.

5.3 천해파랑

(1) 지형적으로 차폐된 지역일수록 MASCON모델을 이용한 지형의 영향을 고려한 바람장을 이용하여 천해파랑을 추산할 필요가 있으며 지형이 복잡할수록 바람의 영향을 많이 받는다는 기존의 사실을 확인할 수 있었다.

(2) 유의파고의 고정도 추산을 위해서 조석 및 조류, 하천유입 등의 고려될 필요가 있으며 이는 향후 해결되어야 할 과제이다.

5.4 침수·범람해석

- (1) 본 연구에서는 태풍 Sarah에 대한 부산광역시 광안리 인근해역에 대한 침수역 및 침수고를 수치해석하였으며, 태풍 Maemi 내습으로 인한 녹산국가산업단지 인근에서의 침수역 및 침수고를 예측하였다. 그 결과를 수치모형 실험의 결과 및 설문조사와 비교·검토하여 본 연구의 타당성을 확인할 수 있었다.
- (2) 침수고 및 침수역의 예측 등 범람해석모델의 수치해석에 있어서 고파랑의 내습에 따른 호안 월파량의 고정도산정은 중요한 파라미터로 작용할 수 있다.
- (3) 본 연구에서 제안하는 범람모델은 연안재해의 예측, 방재계획의 수립, 위험도 작성, 배후역에서의 지반고 결정, 도시계획적인 문제 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 보다 실제적인 침수범람해석을 수행하기 위하여 강우에 의한 침수, 제내지에서의 배수 및 역류와 건물 등의 지하로 유입되는 침수량을 고려할 필요가 있으며, 이는 향후 해결되어야 할 과제이다.



5.5 지진해일

- (1) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 수치모형실험에 있어서 가장 중요한 요소인 제 1파의 도달시간에 대한 계산치와 관측치를 비교·검토함으로써 본 연구에서 제안하는 수치해석 기법의 타당성을 검증할 수 있었다.
- (2) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 대한 수치해석결과에서 관측치와 거의 동일한 전파속도와 전도양상을 나타내었으며, 지진해일 발생으로부터 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 내습하며, 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도로 동해안의 북쪽에서 남동해안으로 지진해일이 도달함을 알 수 있다.
- (3) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일이 갖는 에너지의 대부분이 러시아 방향으로 전파되어 상대적으로 우리나라의 피해가 적음을 확인하였고, 대화퇴에 의해 일본의 남쪽으로 굴절되는 성분이 있음을 알 수 있었다. 진원지의 부근에서 1983년의 동해중부지진에 의한 지진해일의 경우는 최고 4m 이상, 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 경우는 최고 7m 정도의 수위변화가 발생하였으며 공해상에서는 0.1~1.0m 정도 나타났다.

(4) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일에 의해 발생한 최고수위는 강원도 부근에서는 0.9m ~ 5.3m, 남동해안에서는 0.6m ~ 0.15m 정도이며, 이는 사후조사에서 얻어진 최고수위와 거의 비슷한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

(5) 1983년의 동해중부지진과 1993년의 북해도남서외해지진에 의한 지진해일의 경우에 대상지역에서 수위변동의 관측치와 수치모형실험결과를 비교하였다. 제 1파가 도달하는 시간은 관측치와 일치하지만 최저 및 최고수위의 값과 그의 변동양상은 정성적으로는 일치하지만 정량적인 관점에서는 다소 불일치하는 결과를 나타낸다. 이는 각 지역에서 주변해역의 개발로 인해 지진해일 내습 당시의 지형과 현재의 지형이 다소 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

(6) 지진공백역에서 발생한 가상지진의 경우에서도 가상지진해일의 전파속도는 지진이 발생하고 약 100분 정도 후에 처음으로 강원도 부근의 동해연안에 도달하며, 포항은 약 110~120분, 울산은 140분 정도로 그 전파속도는 이전에 발생한 지진해일에 대한 해석결과와 거의 동일하게 나타난다.

(7) 지진공백역에서 발생한 가상지진해일이 가진 에너지 역시 대부분이 러시아 방향으로 전파되며, 대화퇴 부근에서 많은 회절현상이 발생하여 일본의 남쪽으로도 상당한 에너지가 전파되는 것을 알 수 있다. 단층파라미터의 차이에 따라 각 가상지진해일에서 상당한 수위분포의 차이를 나타내며, 가상지진해일 1, 4, 6은 상대적으로 동해안에 거의 영향을 미치지 않고, 가상지진해일 3과 5는 일본의 연안에는 상당한 해일고를 발생시키지만 우리나라에는 그 영향이 비교적 적고, 가상지진해일 2의 경우가 가장 높은 약 4m의 수위분포를 나타내며 동해안에도 상당한 해일고를 발생시키는 것을 알 수 있다.

(8) 가상지진해일 2에서 시간에 따른 수위변화는 강원도 지역에서는 지진해일 발생 약 110 ~ 120분 후에 제 1파가 도달하고 최대수위상승은 지역마다 다소 차이가 발생하나 약 150 ~ 160분경에 약 0.8 ~ 3.2m의 최고수위가 나타난다. 남동해안에서는 약 140분에 제 1파가 도달하고 약 210분에 약 0.8m의 최고수위가 나타나며, 남해안에서는 약 170 ~ 250분에 제1파가 도달하고, 약 0.4 ~ 0.5m 정도의 수위변화가 발생하며 그 주기가 약 50분 정도로 나타난다.

감사의 글

2004년 2월에 연구실에 들어와서 6년이라는 시간이 흘렀습니다. 비록 지금은 서울에 있는 회사에서 생활하고 있지만 제 기억에 남아 있는 대부분은 연구실과 관련되어 있을 만큼 연구실은 저에게 아주 큰 존재입니다. 청구논문을 작성하는 내내, 그리고 감사의 글을 적고 있는 지금 이 순간까지도 박사라는 단어가 낯설게 느껴집니다. 예전부터 고대해왔던 시간이기는 하지만 이 말을 들을 만한 능력이 있을까라는 생각이 듭니다. 이쯤에서 감사의 말을 꺼내야겠습니다. 고마운 사람들이 너무 많습니다.

지도교수님이신 김도삼 교수님의 가르침이 없었다면 해안공학을 가지고 박사 논문을 쓰는 것을 생각하지 못했을 것 입니다. 연구에 매진하시느라 제자들보다도 더 늦게 퇴근하시던 교수님을 뵈 때마다 부끄럽기도 하고 새삼 각오를 다지기도 했습니다. 여전히 교수님은 저만치 앞서 가시지만, 그 길이 어디로 향하는지 알 수 있게 되었다는 사실만으로도 충분히 감격스럽습니다.

부족한 논문의 위원장을 맡아주시고 논문에 대한 아낌없는 말씀해주신 경상대학교 배기성 교수님, 논문 심사를 위해 먼 길을 마다 않으시고 부족한 부분을 세심하게 심사해주신 관동대학교 김규한 교수님, 항상 격려해주시고 좋은 말씀 아끼지 않으신 경갑수 교수님, 더 좋은 논문이 될 수 있도록 각별한 지도와 조언을 해주신 김태형 교수님께 심심한 감사를 드립니다. 대학생활에서부터 지금까지 많은 관심으로 지켜봐 주신 이중우 교수님, 김태곤 교수님, 멀리서도 항상 관심 가져주시신 인제대학교 윤중성 교수님께 감사의 뜻을 전합니다.

직장생활을 하면서 논문을 쓸 수 있도록 많은 배려와 격려를 해주신 노영환 상무님, 이종운 실장님, 김현범 부장님, 이상의 차장님, 이계석 차장님, 이광섭 과장님, 남두현 대리님, 박기태 주임님께 감사 드립니다.

멀리 일본에서도 항상 연구실을 챙기는 광호 형, 창훈 형, 논문 심사 내내 같이 고민하고 격려해 준 성호 형, 힘들 때마다 아낌없는 조언을 해준 순철 형에게 감사 드립니다. 2년 동안 연구실을 잘 이끌어온 든직한 선욱, 자신의 길을 찾아 열심히 할 진우, 바쁜 시간에도 바라는 내용과 모양을 갖춘 논문이 나오도록 최선을 다해준 보배, 더욱 발전된 연구실을 만들어 줄 (최)현석, 동진, 성심, (이)현석과 연구실 선배님께 고마움을 전합니다.

힘들고 피로울 때 항상 힘이 되어주고 늘 따뜻함으로 반겨주는 성실, 든든한 길동무가 되어 주는 가족과 같은 친구들 명구, 성진, 찬희, 경진, 창석, 일우와 98학번 동기들에게 고마움을 전합니다. 항상 응원해주고 격려해주는 도성 형, 종국 형 고맙습니다.

대학 입학 후 타지에서 생활하다 보니 부모님께 잘 헤드리지 못한 부분이 가슴에 많이 남습니다. 논문 쓴다는 핑계, 회사일 바쁘다는 핑계로 자주 찾아 뵈지 못한 것이 죄송하기만 합니다. 이 한 권의 논문과 몇 줄의 글이 그 동안의 일들을 만회할 수는 없지만 앞으로 자식으로서 도리를 다하겠습니다. 부족한 형을 걱정해주고 격려해준 동생 명운, 지금은 저 멀리 하늘에 계시지만 세상 누구보다 절 사랑해 주셨던 할머니께 고마움을 전합니다.

너무나 착한 당신이 있어 항상 즐겁고 행복하다는 말을 전하며 이 논문으로 그 빛의 일부나마 대신하고자 합니다.

저를 아껴주시는 고마운 분들과 제가 존경하는 모든 분들께 이 논문으로나마 감사의 인사를 드립니다.