

碩士學位論文

제주도 연안해역의 폭풍해일고 산정



2008 年 月

濟州道 沿岸海域의 暴風海溢高 算定

指導教授 楊 城 基

金 祥 奉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

金祥奉의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 김 상 진

委 員 이 동 우

委 員 양 성 기



濟州大學校 大學院

2008年 2月

CALCULATION OF THE HEIGHTS OF
STORM SURGES OF THE COAST SEA AREA
OF JEJU ISLAND

Sang-Bong Kim

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Engineering

2008.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

目 次

目 次	i
LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
Summary	vii
제 1 장 서 론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	2
3. 연구의 구성	3
제 2 장 자료 및 방법	4
1. 조위자료	4
2. 태풍자료	5
3. 연구방법	6
제 3 장 제주도 연안해역의 조석관측	8
1. 제주항 조석관측	8
2. 서귀포항 조석관측	14
제 4 장 폭풍해일	19
1. 폭풍해일	19

2. 우리나라 주변의 해일	20
3. 태풍의 특징 및 경로	23
4. 우리나라에 영향을 미친 주요 태풍	26
제 5 장 폭풍 해일 수치모의	33
1. 태풍 해상풍 모델	33
1.1 태풍 파라미터 모델	33
1.2 태풍 파라미터의 추정	34
1.3 태풍 해면기압 및 해상풍 모형	35
2. 폭풍해일모델	40
2.1 Princeton Ocean Model(POM)	40
2.2 Smagorinsky 확산계수	41
2.3 수치계산 방법 및 격자배열	41
2.4 계산안정조건	44
2.5 폭풍해일모형	45
2.6 폭풍해일 계산조건	47
2.7 격자망의 구성	48
제 6 장 제주도 연안해역의 폭풍해일고 산정	53
1. 과거 주요 태풍 선정	53
2. 태풍의 기압장과 바람장	58
3. 태풍 통과 시의 해일고 검토	67
4. 주요 태풍에 대한 해일고 산정	70
제 7 장 결 론	80
참 고 문 헌	83

LIST OF TABLES

Table 1. Typhoons which influenced our country and Jeju Island(1987~2003)	5
Table 2. Average sea level and Max. and Min. sea level of Jeju Port	9
Table 3. Average sea level and Max. and Min. sea level of Seogwipo Port	15
Table 4. Classification of typhoon	23
Table 5. Strength of typhoon	23
Table 6. Classification of the size of typhoon	24
Table 7. Classification by the route of typhoons which influenced our country (1904~2004)	26
Table 8. Number of typhoons which influenced our country(1904~2005) ..	30
Table 9. Number of typhoons which influenced our country for the recent 30 years(1971~2000)	30
Table 10. Ranking of the occurrences of typhoon disasters by the damaged size of our country(1904~2004)	31
Table 11. Ranking of daily Max. precipitations when the typhoons pass by(1904~2004)	32
Table 12. Calculation grid and input term used in the model	49
Table 13. Typhoon and simulation time used in the numerical simulation ·	53
Table 14. Comparison of the observed heights of tidal waves and the calculated of Jeju Port and Seogwipo Port	71

LIST OF FIGURES

Figure 1. Flow chart of calculation of numerical simulation for calculating the height of storm surge	7
Figure 2. Location of Jeju Tidal Station	8
Figure 3. Highest high · lowest low water level and average sea level by year of Jeju Port	11
Figure 4. Annual average sea level of Jeju Port(1964~2003)	11
Figure 5. Change of monthly average sea level of Jeju Port	12
Figure 6. Change of average Max. sea level by month of Jeju Port	12
Figure 7. Change of average Min. sea level by month of Jeju Port	13
Figure 8. Location of Seogwipo Tidal Station	14
Figure 9. Highest high · lowest low water level and average sea level by year of Seogwipo Port	16
Figure 10. Annual average sea level of Seogwipo Port(1985~2005)	17
Figure 11. Change of monthly average sea level of Seogwipo Port	17
Figure 12. Change of average Max. sea level by month of Seogwipo Port	18
Figure 13. Change of average Min. sea level by month of Seogwipo Port	18
Figure 14. Paths of typhoons by month	24
Figure 15. Ordinary paths of typhoons and extraordinary paths of typhoons	25
Figure 16. Comparison of ocean buoy data of Japan Meteorological Administration and the results applying PVM and TPM model(Kang, Jun, 2002)	36
Figure 17. A simplified illustration of the interaction of the external mode and internal mode	42
Figure 18. Flow diagram of the POM Code	42
Figure 19. The staggered numerical model grid with the location of model	

variables indicated	43
Figure 20. Province of the wide area and distribution chart of the depth of water	50
Figure 21. Province of the middle area and distribution chart of the depth of water	50
Figure 22. Province of the detailed area(Jeju Port) and distribution chart of the depth of water	51
Figure 23. Grid system of the detailed area(Jeju Port)	51
Figure 24. Province of the detailed area(Seogwipo Port) and distribution char of the depth of water	52
Figure 25. Grid system of the detailed area(Seogwipo Port)	52
Figure 26. Path of “THELMA”, the 5th typhoon of 1987	54
Figure 27. Path of “GLADYS”, the 12th typhoon of 199	55
Figure 28. Path of “JANIS”, the 7th typhoon of 1995	55
Figure 29. Path of “YANNI”, the 9th typhoon of 1998	56
Figure 30. Path of “OLGA”, the 7th typhoon of 1999	56
Figure 31. Path of “PRAPIROON”, the 12th typhoon of 2000	57
Figure 32. Path of “RUSA”, the 15th typhoon of 2002	57
Figure 33. Path of “MAEMI”, the 14th typhoon of 2003	58
Figure 34. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “THELMA”	59
Figure 35. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “GLADYS”	60
Figure 36. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “JANIS”	61
Figure 37. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “YANNI”	62
Figure 38. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “OLGA”	63

Figure 39. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “PRAPIROON”	64
Figure 40. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “RUSA”	65
Figure 41. Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “MAEMI”	66
Figure 42. Comparison of the height of Jeju Port and Seogwipo Port by the typhoon, “MAEMI”(Grid of the detailed area)	68
Figure 43. Comparison of Max. height of storm surge of Jeju Port and Seogwipo Port	72
Figure 44. Heights of storm surges of Jeju Port by the typhoon, “THELMA”, “GLADYS” and “JANIS”	74
Figure 45. Heights of storm surges of Jeju Port by the typhoon, “YANNI”, “OLGA” and “PRAPIROON”	75
Figure 46. Heights of storm surges of Jeju Port by the typhoon, “RUSA” and “MAEMI”	76
Figure 47. Heights of storm surges of Seogwipo Port by the typhoon, “THELMA”, “GLADYS” and “JANIS”	77
Figure 48. Heights of storm surges of Seogwipo Port by the typhoon, “YANNI”, “OLGA” and “PRAPIROON”	78
Figure 49. Heights of storm surges of Seogwipo Port by the typhoon, “RUSA” and “MAEMI”	79

Summary

The results calculating the height of storm surge as performing the numerical model of storm surge(POM) experiment and analyzing and reviewing the wind field and the path after selecting the typhoons of which the dimension of damage were high and broke the disaster records among the past typhoons occurred at the coast sea area of Jeju Island.

Of the typhoons for 16years(1987~2003) influencing our country, those caused the relatively great damage to Jeju Island were 8 (Maemi, Rusa, Prapiroon, Olga, Yanni, Janis, Gladys, Thelma). The height of storm surge as the result that simulating the storm of Jeju and of Seogwipo Port about these typhoons was realized to be relatively in accordance with the observed values. And the occurring times of the heights of storm surge were various but generally appeared a little bit later than the observed times.

At the coast sea area of Jeju Island, Jeju Port showed higher height of wave than Seogwipo Port and the heights of wave were not over 1m at both Juju Port and Seogwipo Port. Of the selected 8 typhoons, Maemi showed 77.97cm of the height of storm surge at Jeju Port as the highest and Janis appeared 5.3cm at Seogwipo Port as the lowest. The Max. heights of storm surges at the coast of Jeju Island by each typhoons were appeared as 77.97cm for Maemi, 62.9cm for Thelma, 59.5cm for Rusa, 45.38cm for Yanni, 33.2cm for Prapiroon, 32.2cm for Olga, 24.15cm for Gladys and 6.44 for Janis.

That Jeju Port appeared the higher height of storm surge than Seogwipo port is considered to be resulted from the path of typhoon, the topography and the depth of water, the waves, the seiche, sea state, etc. And that the height of Jeju Port and Seogwipo Port were appeared lower than the West coast or the South coast is why the coast line of Jeju Island is relatively simple, the depth of water of the coast sea area is relatively deep comparing

to the South coast and the shape and the topography is V-letter shape or there is no topography where the long bay is developed.

These study results can contribute to the forecast of flooded district of the coast region of Jeju Island in the future and the establishment of the coast disaster prevention plan like the drawing up of storm surge map, etc. For the minuter calculation and forecast of the height of storm surge, the simulations considering the minuter depth of water of coast sea area, the data of topography, the wave and the sea state are required.



제 1 장 서 론

1. 연구의 배경

우리나라는 매년 찾아오는 2~3회의 태풍과 온대성 저기압에 동반된 폭풍우 및 동계의 강한 북서계절풍 등으로 인해 해상의 큰 파도와 함께 연안에는 해일이 빈번히 발생하며, 해수가 범람하여 연안침수와 더불어 제반 시설물의 붕괴와 유실로 해마다 막대한 인명과 재산상의 피해가 발생하고 있다. 연안에서 해수의 범람은 주로 조석과 폭풍 또는 태풍 등에 의한 해수면상승이 대조기와 중첩될 때 복합작용으로 발생한다. 또한 이상해수면 상승이 발생할 때 이상 파랑도 동시에 발생하여 해안선 부근에서는 해수면상승을 가중시키게 된다. 우리나라 서해안 및 남해안은 태풍의 내습으로 강한 바람과 파랑이 발생하여 해안구조물의 파괴가 빈번히 발생하였고 최근에는 큰 피해를 주는 대형 태풍의 잦은 내습으로 인해 해일재해에 대한 심각한 문제점을 보이고 있다(양, 2006).

태풍은 발생과 발달 과정에서 해수온도나 기온이 영향을 크게 받는다. 지구환경 오염에 의한 지구온난화현상으로 여러 가지 기상현상이 변화하고 있는 실정이며, 태풍도 다른 기상현상들과 마찬가지로 발생빈도나 강도, 규모 등이 최근 10년에서 20년 사이에 크게 변화하고 있을 뿐 아니라 피해액도 더욱 증가하는 추세이다(기상청, 2005). 그 대표적인 예로 2003년 태풍 매미가 마산지역을 강타했을 때 전남해안에도 크고 작은 해일 피해가 발생하였다. 평상시 보다 더욱 많은 피해를 입은 이유는 매미의 내습시간이 만조시간과 겹쳐져 더욱 피해가 커졌다. 2002년 태풍 루사가 우리나라에 내습하여 대규모 피해를 일으켰던 당시에도 남해안 고흥, 여수, 사천지방에 해일이 내습하여 크고 작은 피해를 유발하였고 그 이전인 2000년 강한 바람피해를 동반한 태풍 프라피룬 역시 남해안 일대에 해일 피해를 유발하였다(이, 2005). 따라서 해안재해의 체계적 조사필요성이 대두되면서 복구와 대책에 관한 종합대책 수립을 위한 분석이 이루어 졌다(국립방재연구소, 2003).

이를 바탕으로 폭풍해일에 대한 인식의 높아짐에 따라 재해방지, 재해저감 및

복구 등 많은 조사가 추진되면서 기존의 해일의 특성분석(오·김, 1998), 윤 등 (1998))과 최근의 수치모델을 이용한 사례분석(최 등(2004), 문 등(2003), 전 등 (2004), 이 (2005))을 통해 태풍에 의한 폭풍해일 연구가 활발하게 진행되고 있다.

제주도 연안해역은 외해와 직접 접해 있어 계절풍과 외양의 각종 해상·기상 현상으로부터 영향을 쉽게 받아 다양한 해양재해가 발생하고 있다. 하계에는 태풍이 통과하는 길목이며, 동계에는 강한 북서 계절풍에 의해 북부 연안역은 폭풍해일로 인한 월파가 자주 발생하고 있으며 태풍 및 계절풍 등의 폭풍으로 인한 해일, 이상해수면 상승에 따른 해수범람으로 연안침수, 시설물의 붕괴, 유실, 해안침식 등 여러 형태의 연안재해가 빈번히 발생되고 있어(양, 2006), 이에 대한 대비책이 필요한 실정이다.

2. 연구의 목적

절해고도인 제주도 연안해역에는 한 해 평균 2~3개의 태풍이 영향을 주어 크고 작은 해일이 발생하였다. 그 중 2003년 9월 12일 제 14호 태풍 매미(MAEMI)의 영향으로 제주도 서귀포항은 설계파고 이상의 파랑내습과 월파로 인해 외항 방파제 등의 파손유실피해가 발생하기도 하였다. 이 외에도 크고 작은 항만에서는 기상조에 의한 부진동이나 침수가 발생하고 있지만, 이에 대한 해일대책은 일시적인 것으로 미흡한 실정이다. 태풍, 기상조, 북서계절풍 등에 의해 발생하는 해일의 특성과 함께 해수면의 상승을 분석하여 제주도 연안해역의 피해를 최소화 할 수 있는 대책이 필요하다.

이 연구에서는 제주도 연안해역의 해일재해의 현황을 파악하고 제주도 연안의 해수면 변화를 분석하여 태풍에 의한 폭풍해일발생 기구와 피해에 대한 자료를 분석·검토하였다. 또한, 제주도 연안해역을 대상으로 과거 태풍 중 각종 기록경신과 많은 피해규모를 준 태풍들을 대상으로 POM(Princeton Ocean Model) (Blumberg and Mellor, 1987)모형을 이용하여 폭풍해일고를 산정하였다.

이러한 연구결과는 제주도 연안역에서 태풍으로 인한 해일 대책을 수립하고

해수면 상승으로 인한 위험지역과 해일지도의 작성 및 사전 재해대비책을 수립하는데 있어서 중요한 기초자료로 사용이 가능할 것이다.

3. 연구의 구성

본 연구에서는 총 7장으로 구성되었으며, 개략적인 내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 연구배경 및 목적에 대하여 서술하였으며, 제 2장에서는 자료 및 방법으로 조위자료와 태풍자료의 자료이용 방법에 대하여 기술하였다.

제 3장에서는 제주항과 서귀포항의 1964년부터 ~2006년까지의 검조소 자료를 이용하여 해수면 변화를 살펴보았다.

제 4장에서는 폭풍해일과 관련된 사항들에 대해 기술하였으며, 우리나라에 영향을 준 태풍들에 대해 살펴보았다.

제 5장에서는 태풍 해상풍 모델과 폭풍해일수치모델을 수행함에 있어서 필요한 전반적인 사항을 기술하였으며 폭풍수치모델(POM)과 태풍해상풍모델(PVM)의 계산 격자망의 구성과 수심도를 작성하여 폭풍수치모형을 수립하였다.

제 6장에서는 본 연구에 사용된 태풍들에 대해 바람장과 기압장을 산출하였으며 폭풍수치모형에 의해 대상지역의 폭풍해일고를 산정하였다.

제 7장에서는 결론부분으로 대상지역의 폭풍해일고를 분석·검토하였으며 이상의 결과로부터 해일 내습 시 피해저감을 위한 대책을 위해 효율적인 방안을 도출하였다.

제 2 장 자료 및 방법

1. 조위자료

태풍 통과 시 제주도 연안에 발생한 폭풍해일고를 계산하기 위해 비교적 재산 피해 및 규모가 큰 과거 태풍(1987~2003) 중 8개의 주요 태풍을 선정하여 태풍의 통과 한 기간의 조위자료를 사용하였다. 제주연안에는 4개 검조소가(제주, 서귀포, 성산포, 모슬포)가 있으며, 본 연구에서는 국립해양조사원의 제주항과 서귀포항의 조석자료를 사용하여 제주항과 서귀포항의 폭풍해일모델의 결과 값과 비교·검토하였다. 성산포 및 모슬포 검조소의 조위자료는 폭풍해일모델에 사용한 8개 태풍들의 검조소가 설치되기 전에 통과한 태풍들로서 이 연구에서는 제외하였다.

해일고(기록조위-예측조위)의 관측치는 국립해양조사원의 실측 조위관측 자료를 사용하였으며, 예측조위는 조화분석 프로그램인 FOREMAN의 프로그램(Foreman & Henry, 1984)을 이용하여 조위예측을 하였다. FOREMAN프로그램은 해당 연도의 관측된 조위로 조화분석을 하여 다시 해당 연도의 조위를 예측하는 프로그램이다. 실제 검조소의 기록은 항이나 만내의 부진동효과를 포함하고 있고 국립해양조사원의 제공하는 예측조위자료는 직전년 이전에 자료를 이용하여 조화분석을 통해 예측한 것으로 해당연도의 천문조를 포함했다고 보기 힘들다.(강주환 등, 2006) 따라서, 본 연구에서는 국립해양조사원의 1987년부터 2003까지의 검조기록부 자료를 이용하였으며 1년 조위자료를 이용하여 69개의 조화상수를 산정하고 산정되어진 조화상수를 이용하여 다시 해당연도를 예측하였다. 이러한 조화분해 프로그램을 이용하여 제주항과 서귀포항 주변해역의 실측해일고를 산정하였으며, 각각 수치모의된 태풍들에 대한 결과 값과 비교·검증 하였다.

2. 태풍자료

태풍은 전체 자연재해 중에서 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 우리나라에 영향을 미친 태풍(1904~2005년)을 보면 한 해에 3개 정도의 태풍이 우리나라에 영향을 미치며 7월, 8월, 9월 동안에 내습한 태풍 수는 전체의 91%이며 아주 드물게 6월, 10월에 내습하는 경우도 있다(기상청, 2005).

본 연구에서는 제주도 연안역의 해일재해의 현황을 파악하기 위하여 폭풍해일 등에 의한 해일발생 및 피해의 자료를 분석·검토하였으며, 제주도 연안해일의 위험도를 분석하기 위하여 제주 및 서귀포검조소가 설치된 이후 1987년도부터 2003년까지의 7월에서 9월 사이에 발생한 태풍 중 재산피해와 태풍 강도면에서 우리나라 및 제주도 주변해역에 영향을 크게 끼친 주요 태풍을 선정하고 분석하였다(Table 1).

Table 1. Typhoons which influenced our country and Jeju Island(1987~2003) (NEMA, 2005)

순 위	발생기간	태풍이름	재산피해총액 (백만원)
1	2002.8.30 ~ 9.1	RUSA	5,147,917
2	2003.9.12 ~ 9.13	MAEMI	4,222,486
3	1999.7.23 ~ 8.4	OLGA	1,107,788
4	1987.7.15 ~ 7.16	THELMA	617,429
5	1995.8.19 ~ 8.30	JANIS	567,578
6	1991.8.22 ~ 8.26	GLADYS	326,899
7	1998.9.29 ~ 10.1	YANNI	284,245
8	2000.8.23 ~ 9.1	PRAPIROON	260,846

폭풍수치모델의 기상자료(기압장, 바람장)는 한국해양연구원(KORDI)에서 사용하고 있는 태풍해상풍모형(Primitive Vortex Model, PVM)을 이용하여 광역격자

(1/20°)의 기압장 및 바람장을 산출한 결과를 이용하였다. 태풍의 중심 위치와 중심기압자료는 우리나라 기상청의 태풍파라메타 자료를 수집하여 사용하였으며 지상 기압자료는 전국 73개 기상 측후소에서 관측된 해면기압자료를 사용하였다. 최대풍 반경을 구하기 위해서 우리나라와 그 주변을 통과했던 주요 태풍을 선정하여 우리나라의 기상청과 일본기상청의 지상 및 해상 기상관측소의 해면기압자료와 중국연안 관측소의 해면 기압 자료가 사용되었다.

3. 연구방법

본 연구에서는 제주도 주변해역에 영향을 크게 미친 8개 태풍(Table 1)을 대상으로 폭풍수치모의하기 위해 제주항과 서귀포항을 연구대상해역으로 선정하였다.

폭풍수치모의에 필요한 수심자료는 미국 국립지리 자료원(National Geographic Data Center)에의 1/12°해상도의 수심 자료인 ETOPO5를 사용하였으며 제주도 부근 및 제주항, 서귀포항 주변해역은 해양조사원에서 발행한 해도를 사용하였다

해일고의 상세한 분포특성을 파악하기 위해 광역의 지역적 특성과 함께 연안해역의 지형적 요소가 잘 반영되도록 3단계의 격자체계를 구축하였다.

태풍해상풍모형(Primitive Vortex Model, PVM)(전기천 등 2001, 강시환 등 2002)을 이용하여 광역격자(1/20°)의 기압장 및 바람장을 산출한 결과를 이용하여 폭풍해일모델 (Princeton Ocean Model, POM)(Blumberg and Mellor, 1987)의 입력자료로 이용하였다. 광역격자에서 사용된 기압장과 바람장은 보간법(interpolation)을 통하여 중간역, 상세역에 대해 바람장과 기압장을 산출하고 각각 입력자료로 이용하였다. 이러한 입력자료를 이용하여 폭풍해일모델을 통해 대상해역에 대한 해일고를 수치모의 하였으며 해일모의 결과를 토대로 대상지역의 폭풍해일고를 산정하기 위해 실측해일고와 비교·검토하였다.

비교된 관측치는 국립해양조사원의 관측 조위자료를 사용하였으며, 예측조위자료는 조화분석 프로그램(Foreman & Henry, 1984)이용하여 조위예측을 하여 제주항과 서귀포항의 실측해일고(관측조위-예측조위)를 산정하였다.

이러한 과정을 거쳐 각각 수치모의된 태풍들에 대한 해일고와 실측해일고를

비교·검토하여 최종적으로 폭풍해일고를 산정하였다. Fig. 1은 폭풍해일고 산정을 위한 수치모의 계산의 흐름도를 나타낸다.

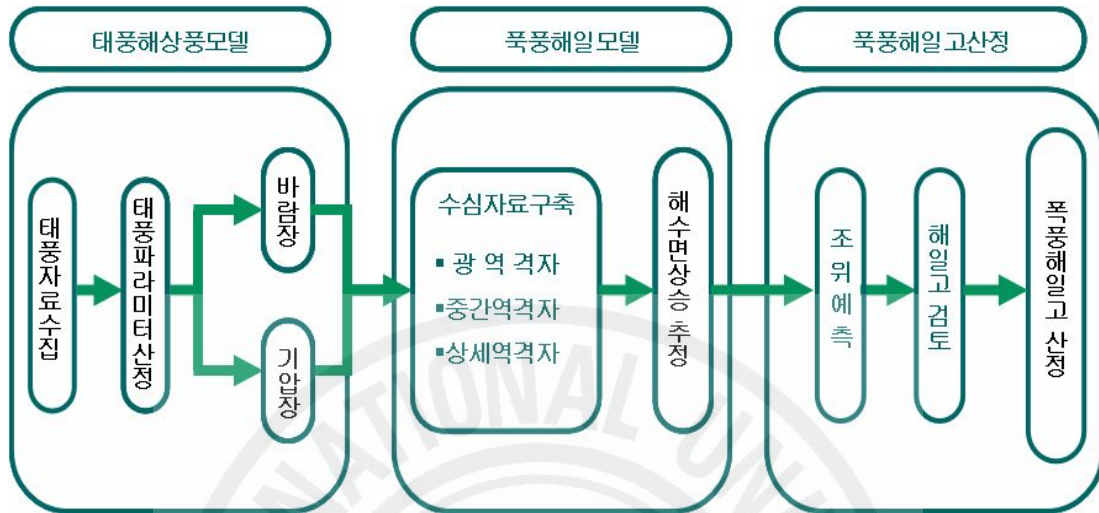


Fig. 1 Flow chart of calculation of numerical simulation for calculating the height of storm surge

제 3 장 제주도 연안해역의 조석관측

1. 제주항 조석관측

본 연구에서 사용된 제주항의 조위관측자료는 국립해양조사원에서 제공된 관측개시부터 매 시간별 자료를 기초로 하고 있다. 제주조위관측소(Fig. 2)는 제주특별자치도 제주시 건입동 제 7부두에 위치해 있으며, 제주검조소의 조위관측개시일은 1964년 1월 1일부터 실시되었다. 제주항은 1927년 7월 개항 이래 제주지역 물류중심지이자 대표적인 항으로 역할을 수행하고 있다. 기존 제주항의 내항시설로는 대형 국제여객선 접안을 위한 선회장 및 전면수심 확보등이 곤란하고 항만 시설 부족으로 만성적 체선, 체화현상이 발생되고 있는 실정으로 제주항의 여객 및 일반화물 하역기능을 효과적으로 분담시키고 항만 운영 효율화 및 활성화를 하기 위해 제주의항에 외곽시설과 국제유람선 및 일반화물부두 등을 건설하기 위해 제주 검조소 주변 일대에는 제주의항 공사가 진행 중에 있다.



Fig. 2 Location of Jeju Tidal Station(Google Earth, 2007)

제주검조소의 조위관측자료를 살펴보면 1964년부터 2006년도까지 각 월의 통계처리한 연평균해면(Ao), 연평균고조위(A.M.H.W.), 연평균저조위(A.M.L.W.), 연최고고조위(A.H.H.W.), 연최저저조위(A.L.L.W.)의 관측된 값은 Table 2와 같다.

관측기간 중 제주항의 연최고고조위(Annual Highest High Water)는 2004년 7월에 328cm로 가장 높았으며, 연최저저조위(Annual Lowest Low Water)는 1966년 2월의 -48cm로 가장 낮았다.

1964년부터 2006년도의 연평균해면을 살펴보면 2월, 3월에는 평균해면이 가장 낮았고, 7월, 8월, 9월에 가장 높은 평균해면 변화를 보이고 있다. Table 2 에서 보면 1964년에 관측된 연평균해면(Ao, Observed Mean Sea Level)을 보면 141.39cm였는데 2003년에는 160.37cm로 약 20cm의 평균해면이 증가된 양상을 보이고 있으며, 연평균고조위(Annual Highest Mean High Water)는 약 20cm, 연최고고조위는 15cm로 전체적으로 해면이 증가된 양상을 보이고 있다.

Table 2. Average sea level and Max. and Min. sea level of Jeju Port (단위:cm)

연 도	연평균해면	연평균고조위	연평균저조위	연최고고조위	연최저저조위
1964	141.39	161.6	121.8	304	-39
1965	143.09	159.8	127.9	297	-36
1966	146.13	175.3	125.6	316	-48
1967	138.38	155.2	120.4	292	-32
1968	135.00	161.3	112.9	304	-35
1969	141.94	162.1	118.2	307	-36
1970	140.53	157.3	122.4	300	-47
1971	142.27	168.4	122.7	310	-24
1972	144.65	166.4	128.2	304	-32
1973	139.19	156.9	126.2	300	-40
1974	146.73	166.9	131.6	324	-33
1975	144.36	166.4	126.1	303	-37
1976	140.49	159.9	125.2	307	-23
1977	146.23	169.8	122.5	308	-1
1978	146.18	166.3	126.2	299	-16
1979	147.52	166.8	124.8	312	-2
1980	148.28	166.3	130.0	306	-3

(계속)

연 도	연평균해면	연평균고조위	연평균저조위	연최고고조위	연최저저조위
1981	150.09	173.1	133.9	303	-15
1982	148.01	166.6	131.9	304	-21
1983	149.56	169.3	131.6	309	-22
1984	147.87	162.8	128.7	306	-26
1985	148.84	167.3	130.4	300	-22
1986	148.26	170.1	129.7	301	3
1987	150.84	168.4	135.5	322	-10
1988	147.82	163.4	130.7	302	-40
1989	151.52	177.1	132.3	310	-29
1990	151.53	176.5	134.5	309	-31
1991	152.20	177.1	135.1	310	-31
1992	153.52	174.5	135.0	310	-34
1993	149.34	164.9	130.4	306	-32
1994	154.16	177.7	137.2	304	-6
1995	152.04	168.2	138.8	301	-9
1996	151.95	169.4	131.8	305	-12
1997	155.47	174.3	140.7	312	0
1998	156.06	172.0	144.2	310	-4
1999	156.42	173.0	135.0	313	-20
2000	158.77	181.4	142.5	320	-23
2001	159.83	183.3	143.9	326	-27
2002	160.58	181.2	139.6	316	-26
2003	160.37	174.9	140.5	317	-16
2004	-	-	-	328	-13
2005	-	-	-	316	-30
2006	-	-	-	301	-21
평 균	148.69	168.8	130.67	308	-23

Fig. 3은 1964년부터 2003년까지의 제주항에 대한 연별 고·저극조위 및 평균해면 조위면을 나타낸 것으로 연평균해면, 고극조위 및 저극조위는 당해연도에서 최극 조위값을 나타낸 것이다. 연평균고극조위와 연평균저극조위는 당해연도의 월별 극값을 평균한 결과이다. Fig. 4~7은 1964년부터 2006년까지 제주항 연평균 해면, 월별 평균해수면, 평균고조위, 평균저조위 변화를 나타내고 있다.

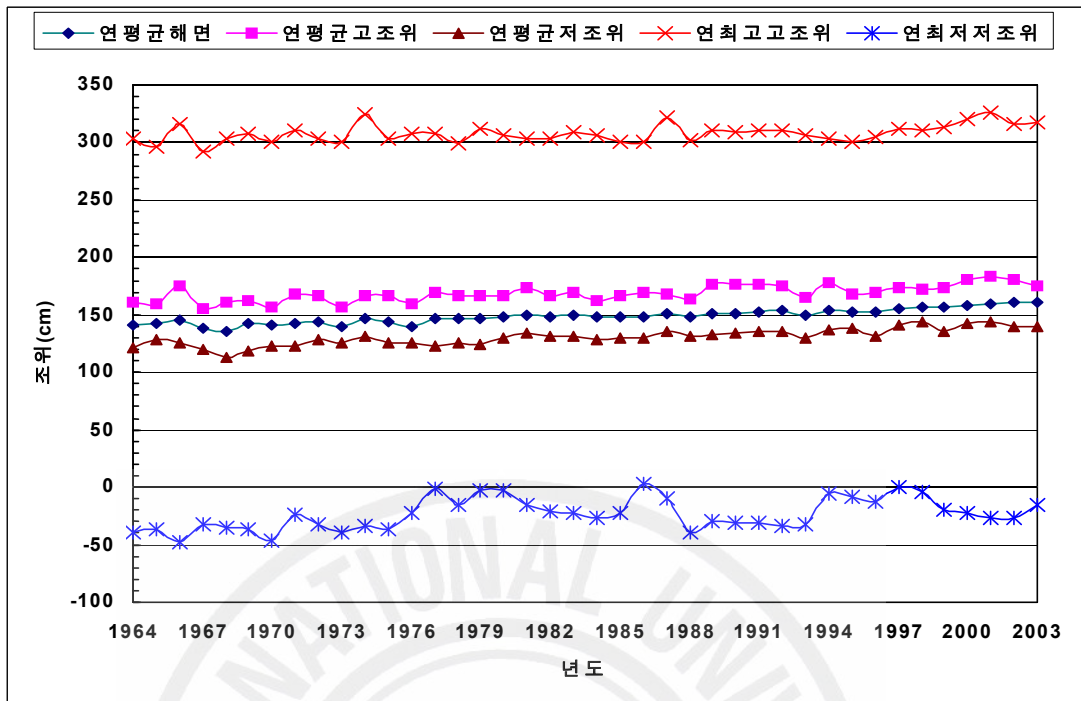


Fig. 3 Highest high · lowest low water level and average sea level by year of Jeju Port

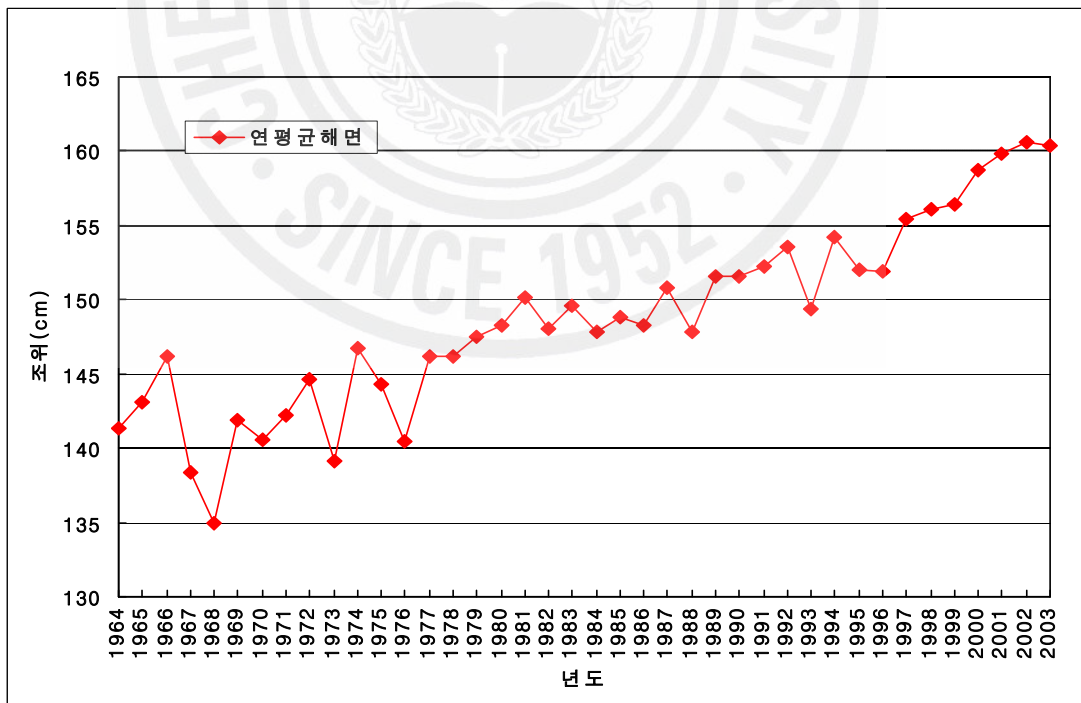


Fig. 4 Annual average sea level of Jeju Port(1964~2003)

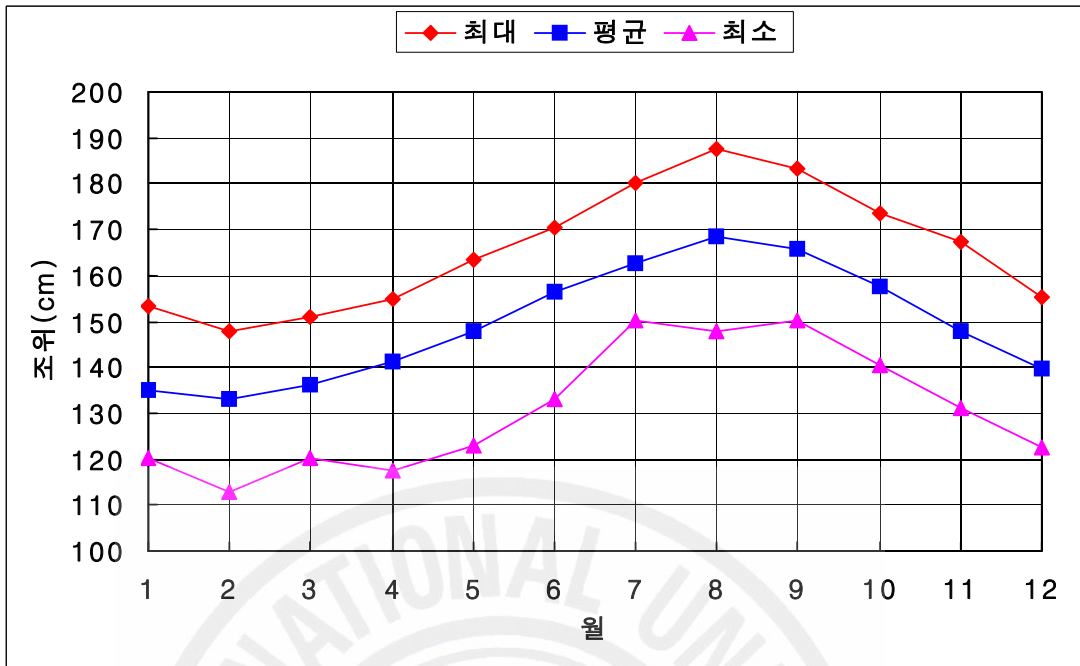


Fig. 5 Change of monthly average sea level of Jeju Port

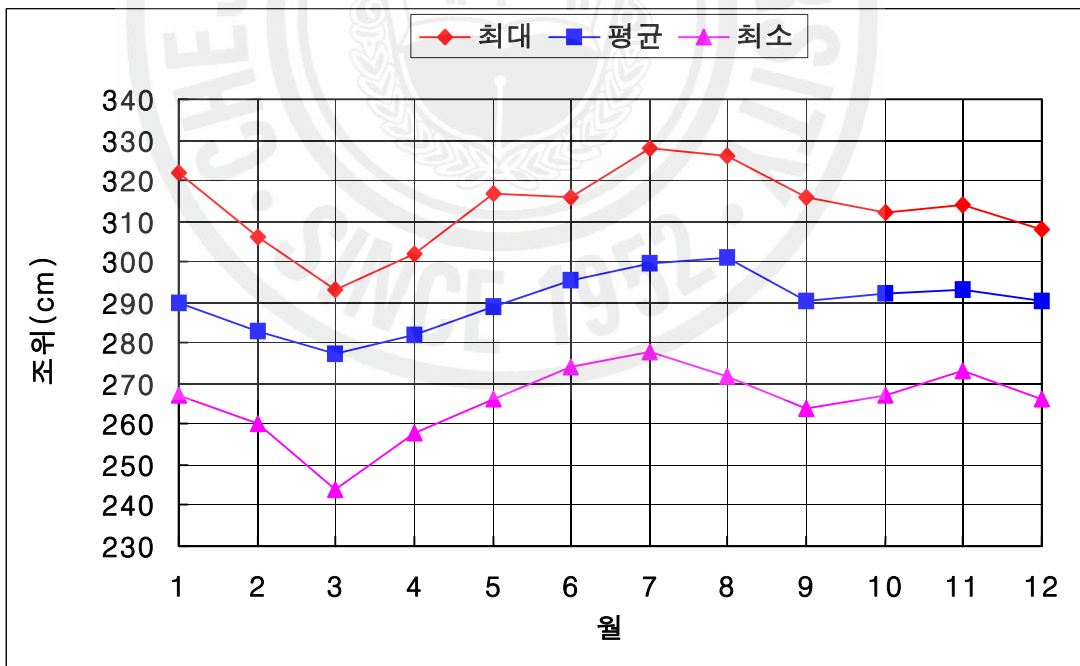


Fig. 6 Change of average Max. sea level by month of Jeju Port

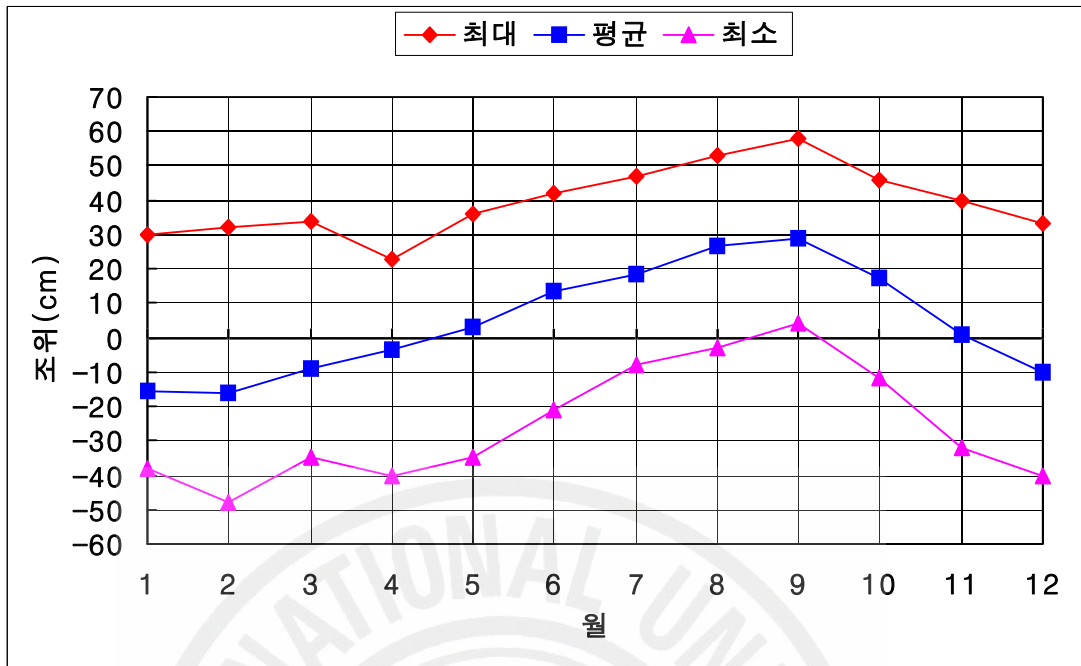


Fig. 7 Change of average Min. sea level by month of Jeju Port

2. 서귀포항 조석관측

서귀포항의 조위관측자료는 국립해양조사원에서 제공된 관측개시부터 매 시간별 자료를 기초로 하고 있다. 서귀포조위관측소(Fig. 8)는 제주특별자치도 서귀포시 서귀동 물양장에 위치해 있으며, 서귀포검조소의 조위관측개시일은 1985년 1월 1일부터 실시되었다. 서귀포항은 제주남부지역의 화물수송 거점항 및 연근해로 출항하는 어선들의 모항으로서 어업전진기지의 기능을 수행하고 있다. 2003년 9월 12일 제 14호 태풍 ‘매미’(MAEMI)의 영향으로 서귀포항은 설계과고 이상의 파랑내습과 월파로 인해 외항방파제 등의 부분적으로 파손유실피해가 발생하기도 하였다.



Fig. 8 Location of Seogwipo Tidal Station(Google Earth, 2007)

서귀포항의 조위관측자료를 살펴보면 1985년도부터 2006년도까지 각 월의 통계처리한 연평균해면(Ao), 연평균고조위(A.M.H.W.), 연평균저조위(A.M.L.W.), 연최고고조위(A.H.H.W.), 연최저저조위(A.L.L.W.)의 관측된 값은 Table 3과 같다.

관측기간 중 서귀포항의 연최고고조위(Annual Highest High Water)는 2004년

8월 20일 347cm로 가장 높았으며, 연최저저조위(Annual Lowest Low Water)는 1988 2월 18일 -43cm로 가장 낮았다.

1985년부터 2005년도의 연평균해면을 살펴보면 제주항과 같이 2월,3월에 가장 낮고, 7월,8월,9월에 가장 높았다. Table 3.에서 보면 1986년에 관측된 연평균해면 (Ao, Observed Mean Sea Level)을 보면 152.60cm였는데 2005년에는 162.08cm로 약 10cm의 평균해면이 증가된 양상을 보이고 있으며, 연평균고조위(Annual Highest Mean High Water)는 서귀포 검조소가 관측 시작한 1985년도에 172.0cm였는데 2004년도에는 연평균고조위가 190.4cm로 약 18cm , 연최고고조위는 약 30cm로 전체적으로 해면이 증가된 양상을 보이고 있다.

Table 3. Average sea level and Max. and Min. sea level of Seogwipo Port (단위:cm)

연도	연평균해면	연평균고조위	연평균저조위	연최고고조위	연최저저조위
1985	152.60	172.0	137.1	316	-32
1986	152.72	173.1	134.4	317	-31
1987	156.16	174.5	143.4	328	-42
1988	154.28	168.9	138.4	322	-43
1989	157.92	182.6	140.3	329	-32
1990	157.51	180.4	140.8	330	-33
1991	158.77	183.1	143.2	325	-31
1992	160.98	183.2	144.9	325	-38
1993	158.14	173.6	140.7	327	-36
1994	161.43	183.3	144.8	326	-26
1995	158.66	175.1	147.1	325	-38
1996	158.59	175.0	141.4	327	-30
1997	161.99	179.9	148.0	338	-27
1998	163.72	179.3	152.8	333	-29
1999	163.08	181.0	143.0	330	-23
2000	164.58	188.1	151.1	339	-24
2001	164.71	189.2	148.3	347	-33
2002	-	-	-	339	-29
2003	165.01	179.8	146.6	335	-24
2004	166.54	190.4	145.2	345	-14
2005	162.08	178.4	143.8	326	-29
2006	-	-	-	319	-22
평균	159.97	179.5	143.8	329	-30

Fig. 9는 1985부터 2005년까지의 서귀포항에 대한 연별 고·저극조위 및 평균해면 조위면을 나타낸 것으로 고극조위 및 저극조위는 당해연도에서 최극조위값을 나타낸 것이다. 연평균고극조위와 연평균저극조위는 당해연도의 월별 극값을 평균한 결과이다. Fig. 10~13는 1985년부터 2005년까지 서귀포항의 연평균해명, 월별 평균해수면, 평균고조위, 평균저조위 변화를 나타내고 있다.

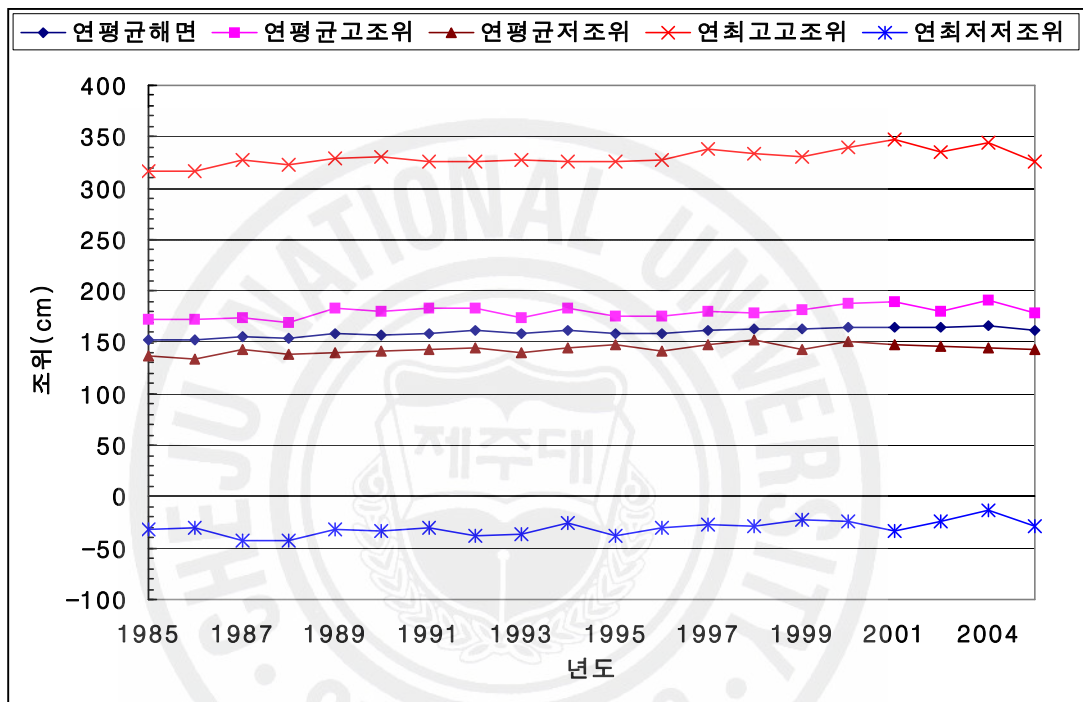


Fig. 9 Highest high · lowest low water level and average sea level by year of Seogwipo Port

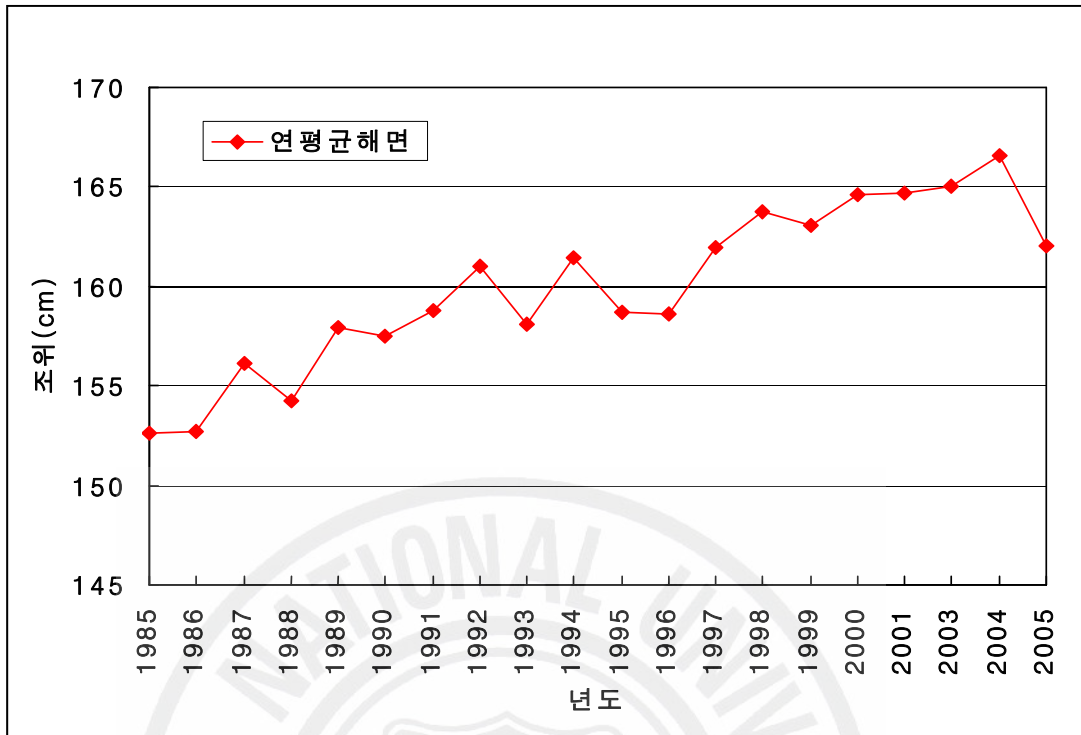


Fig. 10 Annual average sea level of Seogwipo Port(1985~2005)

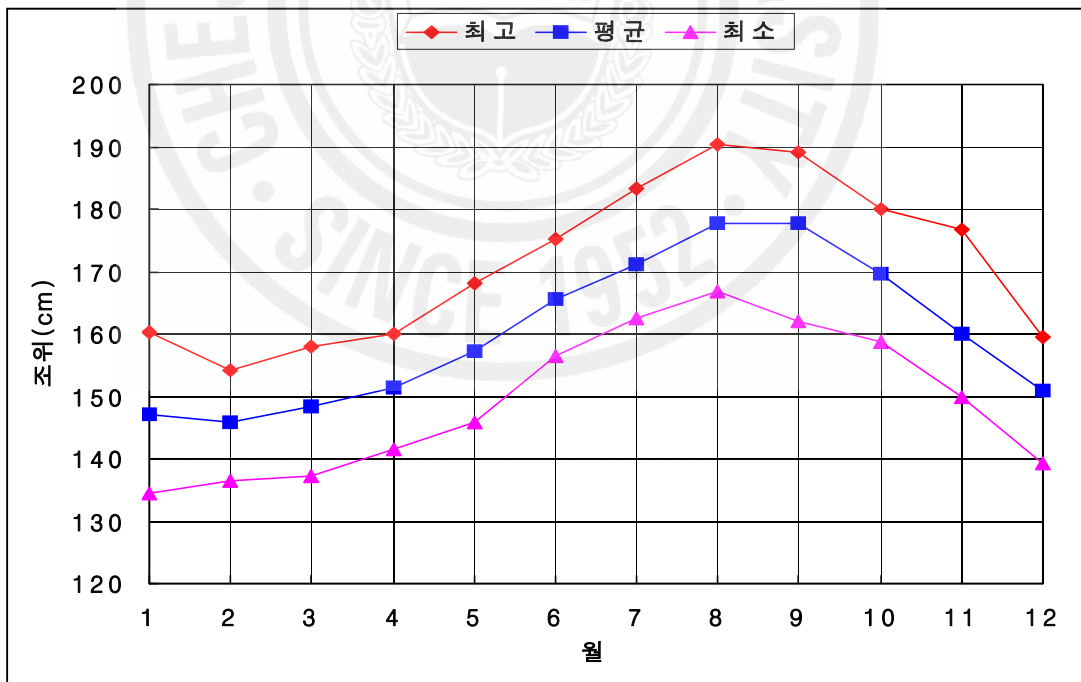


Fig. 11 Change of monthly average sea level of Seogwipo Port

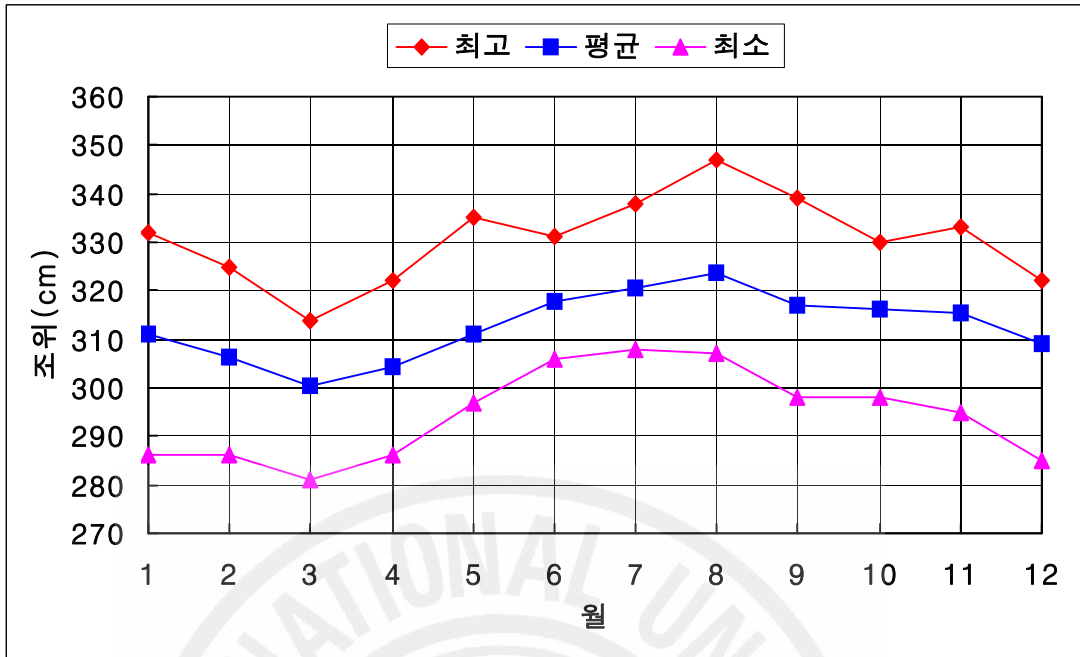


Fig. 12 Change of average Max. sea level by month of Seogwipo Port

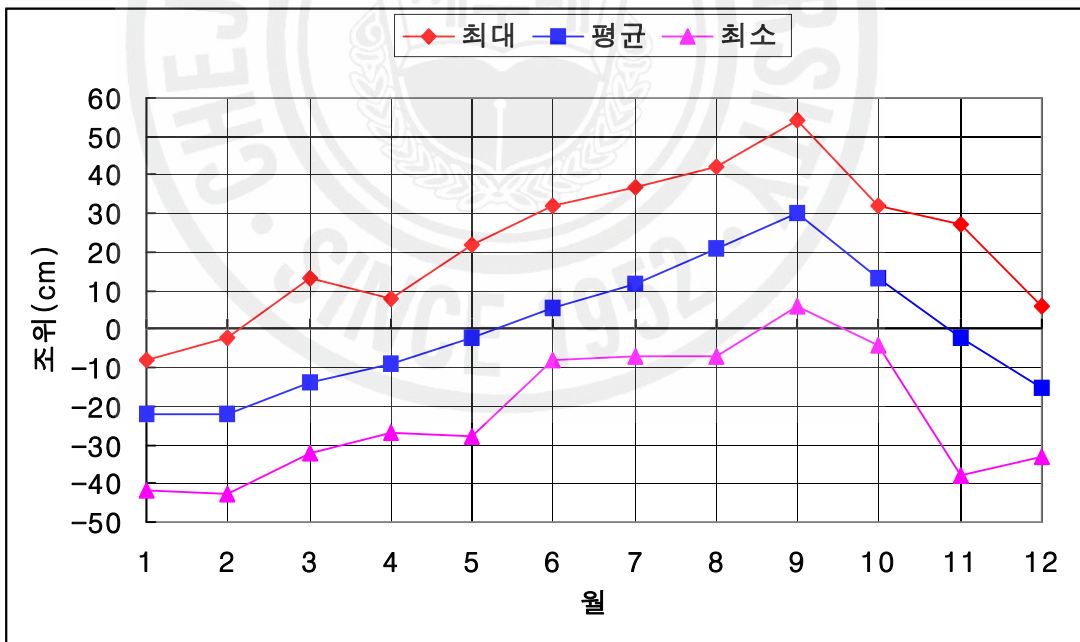


Fig. 13 Change of average Min. sea level by month of Seogwipo Port

제 4 장 폭 풍 해 일

1. 폭풍해일

폭풍해일(storm surge)이란 태풍 및 발달한 온대성 저기압 등의 기상 요인에 의해 야기되는 바람과 기압의 변화에 의해서 해수면이 변동하는 현상을 말한다. 폭풍해일은 외해에서도 발생하나 그 영향이 적고 별로 눈에 띄지 않은 반면, 연안에서는 지형적인 영향에 의해 증폭될 뿐만 아니라 만조 시에 중복되면 해수면 상승으로 인해 방파제 및 호안 등 항만시설이 해수의 범람으로 인해 침수되는 피해가 발생할 수 있다. 폭풍해일에 의한 피해는 연안에 위치한 가옥이나 시설물 등이 침수되거나 파괴되는 경우가 많다.

우리나라의 경우, 폭풍해일의 영향은 긴 내만이나 V자형 내만 그리고 비교적 수심이 낮은 곳에서 주로 나타난다. 이것은 기상 외력에 의해 만 밖의 해수가 만 안쪽으로 유입되거나 낮은 수심으로 인해 기상 외력에 직접적인 영향을 받기 쉽기 때문인 것으로 파악된다. 이 밖에 풍파나 너울의 효과, 기상 교란의 이동과 장파 속도와의 공명 현상, 지구자전의 효과, 만의 자유진동 등이 폭풍해일 현상에 복잡하게 영향을 미치고 있다. 특히, 우리나라 서해안의 경우 폭풍해일로 인하여 방조제가 파괴되어 농토가 침수되는 피해가 종종 발생하고 있으며 1997년 8월 19일 새벽에 백중사리와 태풍 Winnie에 의한 폭풍해일이 겹쳐 전라북도 군산에서는 시내가 침수되는 피해가 발생하였다(윤용훈 등, 1998). 또한, 2003년의 태풍 Maemi에 의해 야기된 폭풍해일로 인하여 부산광역시, 진해시, 마산시 일원에서는 침수 등으로 인하여 막대한 인명과 재산 손실이 발생하였다. 이러한 폭풍해일이 고조시에 중첩되면 조위는 더욱 높아져 방파제를 파괴하고, 연안시설, 가옥, 인명 등에 큰 피해를 미치기 때문에 폭풍해일의 발생시각과 해면 상승량을 예보하는 것은 아주 중요한 일이다(이, 2005).

2. 우리나라 주변의 해일

2.1 연안해일

해일(surge)이란 태풍, 또는 발달한 저기압으로 생기는 해수면의 이상상승을 말한다. 즉 태풍이나 발달한 저기압이 통과할 때 생기는 폭풍과 발달한 저기압으로 인해 예보조위보다 수위가 상승하는 현상으로, 발생 원인에 따라 조석해일과 폭풍해일 및 지진해일로 구분한다. 해일로 인한 피해는 해일이 갖는 큰 유압과 강한 풍랑으로 생기는 인명피해, 항만시설과 제방의 파괴, 선박피해, 해안근처의 농경지 침수와 양식장 피해를 들 수 있다. 해일은 하천의 홍수와 달리 육지가 단 시간에 침수되어 해안선의 넓은 범위에 걸쳐 피해가 일어난다. 따라서 우리나라의 해일피해는 남해안 지방에 주로 일어나며, 태풍이 접근할 때나 통과할 때에 많이 발생한다.

태풍, 온대성저기압(주로 겨울철) 통과 시 해면기압 하강에 따른 흡입상승, 그리고 수반된 강풍에 의해 수심이 얕은 연안 내해 또는 내만 쪽으로 해수가 충전되어 연안에서 이상해수면 상승의 해일을 유발한다. 그러나 해일은 긴 주기의 장파이기 때문에 수위가 상승하는 양(positive)의 해일과 수위가 하강하는 음(negative)의 해일이 발생한다(양, 2006).

해일은 방조제를 파괴하고, 연안시설, 가옥, 인명에 큰 피해를 끼치기 때문에 연안해역에 위치한 지역에는 해일 내습 시 예·경보 및 대피가 적절히 이루어지지 않으면 큰 인명피해를 입을 수 있다 또한, 해일의 발생 시각과 해수면 변동 상황을 정확히 예보하는 것도 매우 중요한 일이다.

2.2 조석해일(Tidal bore)

조석(Tide)은 짧은 주기(수초에서 수 십분)의 해면 변동을 제외한 주로 태양과 달 그리고 지구의 운동에 의해 발생하는 해면의 주기적인 해면 변동을 말한다. 이러한 조석은 태양과 달 상호간의 위치 및 거리의 변화에 따른 지구상에 미치

는 인력의 방향과 세기의 변화, 대륙과 크고 작은 섬들, 불규칙한 수심 등에 의해서 발생하는 조석과의 반사, 굴절, 간섭 등으로 장소에 따라 각기 다른 조석현상을 나타낸다. 천체(태양과 달) 이외의 작용으로 인하여 일어나는 조석과 구별하기 위하여 이들을 총칭하여 천문조(Astronomical Tide)라 부르며, 천체이외에 기상의 영향이 주된 것으로 인한 조석을 기상조(Meteorological Tide)라 한다.

1997년 8월 서해안은 천문조 이외의 비주기적인 기상요소에 의한 이상조위현상으로 서해안 일대가 침수되는 피해가 발생하였다. 8월 19일 서해안의 최극조위는 백중사리와 태풍 위니의 간접적인 영향이 중첩되어 해수면의 급격히 상승하여 연안역이 범람되기 시작하여 8월 21일까지 약 3일간 주택지 및 농경지가 침수되고 노후 방조제가 유실되는 등 피해가 발생하였다. 이 때 서해안에는 폭풍주위보가 발효되었으며, 해일은 예측조위보다 30~70cm 높았다.

2.3 폭풍해일(Storm Surge)

폭풍해일은 짧은 기간 동안 일어나는데 해안에서 큰 파가 바닷물이 밀려오는 형태가 아니라 바람에 의한 큰 파가 갑작스럽게 매우 높이 육지로 밀려오는 것처럼 보인다. 해안으로 오면서 수심이 얕아지면 점점 더 높아지고 폭풍으로 인한 큰 풍파에 밀려 해안으로 바닷물이 넘쳐 오르게 된다. 해수가 폐쇄된 만이나 하구로 밀려오는 경우는 해수면이 이보다 훨씬 더 높아지기도 한다. 그리고 태풍이 상륙하면서 만조가 겹친다면 매우 위험해 질 것이며, 여기에 만약 만과 같이 폐쇄된 해역에서 폭풍에 앞선 강한 강우로 해면이 더 높아져 있다면 더욱 위험해지게 될 것이다. 예를 들면, 태풍 매미에 의한 경남해안지방의 해일피해가 대표적인 예이다. 통상 기압이 1hpa 낮아질 때마다 약 1cm 정도 해수면이 상승한다. 2003년 9월 12일 20시 경남 사천부근으로 태풍 매미가 상륙할 당시 중심기압은 955hpa로서 낮은 대기압으로 인해 바닷물이 평소보다 50cm 이상 높아진 상태였고 남해안에는 초속 35m 이상의 강한 남풍이 불었다. 특히, 마산이 폭풍해일이 높게 나온 것은 만의 길이가 길고 반 폐쇄성의 지형적 특성으로 인해 바람과 부진동의 영향으로 인해 급격한 수위상승을 일으켰다. 또한, 만조가 겹쳐 조석에

의한 해수가 함께 마산만으로 밀려들면서 지하시설물들이 순식간에 수몰되었고, 일부 시민들이 미리 대피 하지 못하는 등 큰 피해를 입혔다.

2.4 쓰나미(지진해일)

쓰나미(tsunami)란 말은 일본 주변해저에서 많은 지진으로 인해 해일이 발생하고 이로 인한 피해가 많아서 일본에서 부르는 말이 국제용어로 불리고 있다. 쓰나미는 해저에서 단층이 발생하거나 지진에 의해 수중에서 산사태가 일어날 때 생성된다. 초기에는 해수면 변동에 의해 조그마한 쓰나미가 발생하면서 최고 파고가 보통 1m 보다 낮으며 파장(파의 마루와 마루사이)의 거리가 100~700km에 이를 정도로 매우 길기 때문에, 대양에서는 쓰나미를 발견하지 못할 수도 있다. 그러나 수심이 얇은 해안 가까이 도달하면, 쓰나미는 속도가 느려지고 해파의 파고는 높아져 해안을 덮친다. 특히, 만과 같이 제한된 해역에서는 매우 위험하다.

우리나라는 1983년과 1993년 일본에서 발생한 지진해일로 인하여 동해안에서 피해가 발생하였다. 우리나라는 일본열도 서쪽의 중북부 근해에서 대규모 지진이 발생하면 쓰나미로 인하여 동해안에 침수 피해가 발생된다.

최근 우리나라에서 쓰나미로 인한 침수피해는 '83년 5월 일본의 아끼다지진(규모 7.7)에 의한 쓰나미로 동해안에서 인명피해 3명, 재산피해 약 4억원(당시 금액)이 발생되었고, '93년 7월에도 일본의 홋카이도 지진(규모 7.8)으로 인한 쓰나미로 동해안에서 약 4억원정도의 재산피해가 있었다. 1993년 7월 12일 22시 17분 일본 홋카이도 오키시리섬 북서쪽 근해 지점에서 발생한 규모 7.8의 지진해일이 우리나라 속초에는 약 100분 후에 해일이 시작되었다(양, 2006).

3. 태풍의 특징 및 경로

태풍은 일반적으로 최대 풍속이 17 m/s 이상인 열대저기압 모두를 태풍이라고 부르며 열대저기압인 태풍은 저위도지방의 따뜻한 공기가 바다로부터 수증기를 공급받아 강한 바람과 많은 비를 동반하여 고위도로 이동하는 현상을 말한다(기상청, 2005).

태풍은 지역에 따라 다른 이름으로 불리는데 북서태평양에서는 태풍(Typhoon), 북중미에서는 허리케인(Hurricane), 인도에서는 사이클론(Cyclone)이라고 한다. 세계기상기구(WMO)는 열대저기압 중에서 중심부근이 최대풍속이 33 m/s 이상인 것을 태풍(TY), 25~32 m/s인 것을 강한 열대폭풍(STS), 17~24 m/s 인 것을 열대폭풍(TS), 그리고 17 m/s 미만인 것을 열대저압부(TD)로 구분한다(Table 4).

Table 4. Classification of typhoon(KMA, 2006)

중심부근 최대풍속	17m/sec 미만	17~24m/sec	25~32m/sec	33m/sec 이상
세계기상기구 (WMO)	약한 열대저기압 Tropical Depression(TD)	열대폭풍 Tropical Storm (TS)	강한 열대폭풍 Severe Tropical Storm (STS)	태풍 Typhoon (TY)
한국, 일본	약한열대저기압	태풍		

Table 5. Strength of typhoon(KMA, 2006)

단 계	최 대 풍 속
약	17m/s(34Knots) 이상 ~ 25m/s(48Knots) 미만
중	25m/s(48Knots) 이상 ~ 33m/s(64Knots) 미만
강	33m/s(64Knots) 이상 ~ 44m/s(85Knots) 미만
매우강	44m/s(85Knots) 이상

Table 6. Classification of the size of typhoon(KMA, 2006)

단 계	풍속 15m/s 이상의 반경
소 형	300km미만
중 형	300km이상 ~ 500km미만
대 형	500km이상 ~ 800km미만
초대형	800km이상

열대저기압은 열대해역에서 해수면의 온도가 보통 26℃ 이상이어야 하고, 공기의 소용돌이가 있어야 하므로 적도 부근에서는 발생하지 않으며, 남북 위도 5° 이상에서 발생한다. 또한 공기가 따뜻하고 공기 중에 수증기가 많고 공기가 매우 불안정해야 한다. 따라서 우리나라에 영향을 주는 태풍은 북위 5~20°, 동경 110~180° 해역에서 연중 발생하며, 주로 7, 8, 9월에 많이 발생한다.

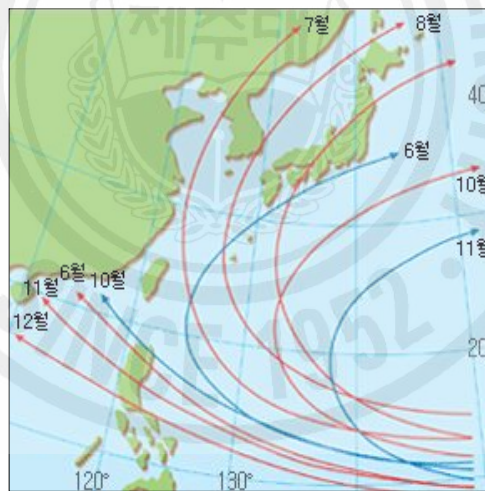


Fig. 14 Paths of typhoons by month(KMA, 2006)

태풍은 따뜻한 구름에 찬 공기가 유입되면, 구름의 아랫부분은 따뜻한 해수로 따뜻해지는 작용이 계속 일어나고, 윗부분은 찬 공기 때문에 냉각되어 차지는데, 이는 불안정한 공기가 되고, 더욱 강한 상승기류가 발생한다. 상승기류로 인해

구름 덩어리의 하층에 있는 따뜻하고 습한 공기가 구름 덩어리 속으로 빨려 들어가고 따뜻하고 습한 공기가 중심으로 모이면서 전향력이 작용해 소용돌이가 생기고 태풍으로 발전한다.

즉, 태풍은 수증기의 공급이 충분한 따뜻한 바다를 건널 때 발달이 쉽고, 육지에 상륙할 경우에는 더 많은 수증기를 공급받지 못 하는데다가 지면마찰 등의 영향이 더해져 빠른 속도로 약화되면서 그 생을 마감하게 된다.

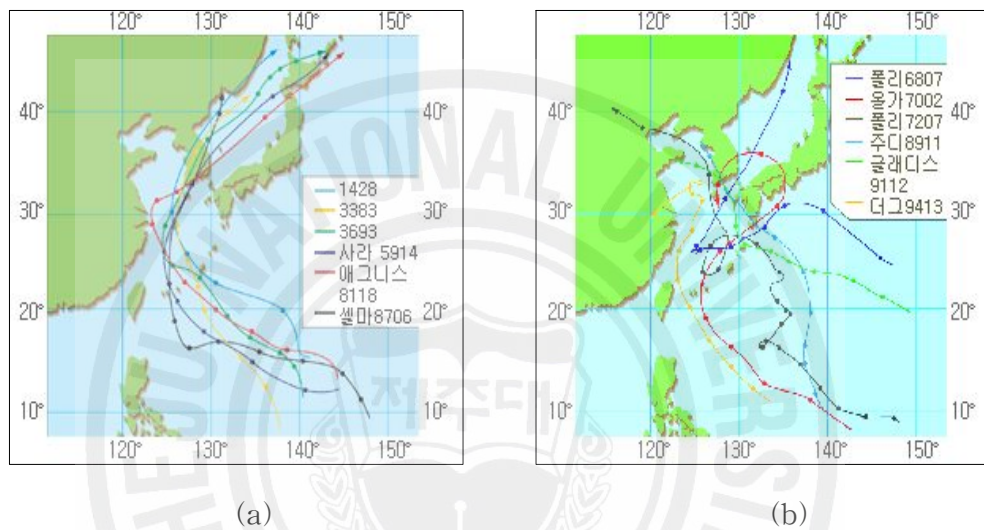


Fig. 15 Ordinary paths of typhoons and extraordinary paths of typhoons(KMA, 2006)

태풍은 대개 발생 초기에는 저위도에서 발생해서 천천히 서진한 후 소멸되는 것과 발생 후 점차 북상하여 북위 20~30° 부근에서 진로를 북동쪽으로 틀어 빠른 속도로 진행한다. 우리나라에 영향을 주는 태풍들을 보면 대부분의 여름철의 태풍경로로, 8월 이후 북태평양고기압이 약화되거나 일본 남쪽 해상으로 치우치게 되면 우리나라나 일본열도로 방향을 바꾸는 경우가 많다.

Table 7에서와 같이 태풍의 진로이동에는 정상 경로와 이상 경로로 구분할 수 있는데 정상경로인 경우 북태평양 남서부에서 발생하여 아시아로 올라오면서 우리나라에 영향을 미치는데 우리나라에 접근하면서 편서풍 영향으로 오른쪽으로 조금씩 포물선을 그리며 방향을 틀게 되면서 빠져나가는 경우를 말하며 이상경

로인 경우는 경로가 포물선을 그리지 않고 직선에 가깝거나 지그재그 모양으로 방향이 일정하지 않게 가는 경우를 말한다.

Table 7. Classification by the route of typhoons which influenced our country (1904~2004)(KMA, 2006)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계	비율(%)
정상경로	-	-	-	-	1	18	73	102	76	8	-	-	278	88
이상경로	-	-	-	-	1	2	16	16	2	-	-	-	37	12
합계	-	-	-	-	2	20	89	118	78	8	-	-	315	100

4. 우리나라에 영향을 미친 주요 태풍

우리나라에는 1년에 보통 2~3개의 태풍이 찾아오는데, 그 중에서도 태풍 Sarah에 의한 피해는 기록적이었다. 1959년 9월 17일 우리나라 남해안에 상륙하여 동해로 빠져나간 이 태풍으로 약 1,900억원(1992년도 화폐 가치)의 재산 피해와 사망·실종 849명의 인명피해를 입었다. 우리나라에서 가장 큰 재산 손실을 일으킨 태풍은 Olga 이후 2002년 Rusa(246명, 5조1000억 원)와 2003년 Maemi(129명, 약 4조2000억 원) 등 우리나라에 큰 피해를 준 태풍은 주로 8, 9월에 나타났으며 본 연구에 사용된 8개 태풍에 대한 내용은 다음과 같다.

1987년 7월 15일부터 16일까지 집중호우를 동반한 강력한 태풍 Thelma가 남해안 일대를 휩쓸면서 남해안 지방에 엄청난 피해를 안겼다. 이 태풍으로 118명이 사망하고, 215명 실종, 선박 2829척 침몰 및 파손, 6174억원의 재산피해가 발생했다. 태풍의 피해가 큰 이유는 태풍의 내습시간이 야간이었고 강우강도가 높은 집중호우를 동반하였다. 그리고 태풍의 중심원이 경남 마산지역을 스치면서 만조시간과 일치하여 강한 해일을 유발시켰다.

1991년 여름, 태풍 Gladys는 전라도 남해안에 상륙하였다. 보통 태풍은 상륙하

면 빠르게 북동진하면서 동해상으로 진출하여 소멸되는데, 우리나라 북동쪽에 고기압이 급격히 확장으로 인해 진로가 가로막혀 23일 새벽 기상청의 예상과 달리 진로를 서북쪽으로 바꿔 전남 여수반도 동쪽에 상륙, 지역에 따라 강수량 600mm 이상의 폭우를 뿌리는 등 중부지방을 제외한 전국에 큰 피해를 가져왔다. 태풍 Gladys는 비구름의 중심이 상륙지인 전라도 인근이 아니라 동쪽인 부산과 울산, 마산, 포항 인근에 있었기 때문에 이 지역에는 이틀 동안 끝없이 폭우가 쏟아졌다. 이때 부산에는 이날 하루 동안에만 439mm의 비가 내려 부산기상관측 개시 이래 1일 강수량기록을 경신했으며 남부지방 곳곳에서 강수량 최고기록을 세웠다.

1995년 8월25~27일에 한반도를 강타한 태풍 Janis는 서해안으로 상륙해 중부지방을 관통하였다. 태풍 Janis는 사망, 실종 등 인명 피해 65명, 재산피해 5천 484억 원으로 당시 역대 재산피해 1위를 기록하였다. 태풍 Janis가 소형태풍에 불과한데도 피해가 컸던 이유는 강우피해 때문이었다. 1995년 8월 23일부터 이미 중부 일원에 300mm를 훨씬 넘는 비가 내려 한강과 금강 수계에 홍수비상이 내려진 뒤에 찾아온 태풍이었고 약한 세력에도 불구하고 엄청난 비구름을 동반하였기 때문이다.

특히 남서쪽으로 불던 바람의 영향으로 태풍 Janis가 머금고 있던 상당량의 비구름이 태풍에 앞서 24일과 25일 도착, 이미 상당량의 비를 뿌린 상태였던 것이다. 23일 이후 26일 오후 7시까지 내린 지역별 강수량은 충남 보령이 624mm고 일 최다강수량은 361mm를 기록하였다.

1998년 9월 30일~10월1일에 제 9호 태풍 Yanni가 전남 장흥지방에 상륙하여 북동진하면서 남부와 강원 영동지방을 강타했다. 태풍이 상륙함에 따라 제주도와 영·호남 지역을 중심으로 29일부터 30일 오전 10시까지 내린 강수량은 제주 291mm를 비롯하여, 산청 등 경남 일부지역에서는 300mm 안팎의 집중호우를 기록하였다. 강한 바람과 함께 폭우가 쏟아지면서 34명이 숨지거나 실종됐고 농경지 6만 여ha가 침수되고 20여만ha의 벼가 쓰러져 수확을 앞둔 농작물에 큰 피해를 주었으며 2천842억 원의 재산피해를 냈다.

호남지방에 상륙한 태풍 Yanni는 전남 보성 부근에서 일시적인 정체현상을 보

이는 등 매우 느린 속도로 북북동진해 영남과 강원 영동지방을 거치면서 저기압으로 약화돼 1일 아침 동해 쪽으로 빠져나갔다.

1999년 8월 3일 제7호 태풍 Olga는 제주도 서쪽 해안을 통과해 서해안을 따라 북상하면서 당시로서는 사상최대의 피해를 안겼다. 7월 말부터 계속 집중호우가 내려 전국이 이미 많은 피해를 겪고 있던 상황에 태풍 Olga가 우리나라를 지나면서 많은 재산피해를 냈다.

예상보다 적은 양인 100~300mm의 비를 뿌렸지만 바람의 위력은 강력하여 곳곳에서 가로수가 뽑히고 유리창이 깨졌다. 대형 광고탑이 무너져 상가를 덮쳤고, 제방들이 무너졌다. 당시 Olga의 최대 순간풍속은 완도에서 측정된 46m/s의 완도와 해남(36m/s) 청주(32m/s)를 포함해 국내 76곳의 유인관측소 중 무려 13곳에서 관측이 시작된 이후 가장 강한 바람을 기록했다.

Olga는 67명이 죽거나 실종됐고 2만5327명의 이재민이 발생했다. 재산 피해는 약 1조1500억 원, 태풍 피해액이 1조 원을 넘어선 것은 이때가 처음이었다.

2000년 8월28일~9월에 영향을 미쳤던 제12호 태풍 Prapiroon은 전국 각지에 많은 피해를 냈다. 이 태풍의 특징은 강한 바람과 많은 비를 동반하였는데, 특히 8월 31일 흑산도에서 최대순간풍속이 58.3m/s로 전년 순위 1위를 갱신하였다. 강풍을 동반한 채 서천군을 강타, 선박이 부서지고 도로가 유실되는 등 10억 원의 재산피해를 남긴 채 물러갔다.

태풍을 가장 먼저 접했던 제주지역에선 재산피해액이 56억 원이었으며 특히 남제주군 남원읍 위미2리 바닷가 일대에는 높이 100m이상의 회오리바람이 휩쓸고 지나가 가옥 80여채의 지붕이 날아가는 피해가 발생하기도 했다.

또 대정항과 운진항 및 신도2리항에 정박했던 어선 17척이 파손됐다. 이와 함께 제주시내 교통신호등 및 가로등의 파손됐으며 하수도가 범람하기도 하였다.

태풍 Rusa는 2002년 8월 30일~9월 1일 까지 한반도를 관통하며 전국적으로 사상 최대의 피해를 입히고 지나갔다. 2002년도에는 남해상의 해수온도가 평년보다 1℃높아 지속적으로 수증기가 유입되면서 태풍 Rusa가 우리나라에 접근하였

다. 태풍 Rusa는 강릉지방의 1904년 우리나라에서 기상관측이 시작된 이래 가장 많은 1일 최고 강우량을 기록한 태풍으로, 이전까지 1일 최고 강수량 기록이던 전남 장흥의 547.4mm보다 훨씬 많은 870.5mm를 기록하였다. 지방 2급 및 소하천 상류부의 피해가 심하였으며, 집중호우로 인한 외수범람과 내수배제 불량으로 도심 저지대를 중심으로 대규모 침수피해 발생하였다.

태풍 Rusa가 휩쓸고 간 강릉지역에서는 30명이 급류에 휩쓸리거나 산사태로 목숨을 잃었고, 16명이 실종돼 생사조차 확인되지 않는 등 태풍으로 인한 피해가 매우 컸으며, 하천이 범람하고 도시의 저지대가 침수되었으며, 제방, 도로, 교량 등이 유실되는 등 그 피해가 다른 지역보다 극심하였다.

전국적인 피해규모는 인명피해 321명(사망 209, 실종 37, 부상75), 이재민 21,318세대 63,085명, 주택침수 27,562, 농경지 유실이 17,749ha 이며 재산피해가 5조1,479억 원이 발생하였다.

2003년 9월 12일~2003년 9월 13일까지 우리나라 남부지역을 강타한 태풍 Maemi는 역대 각종 기록을 뛰어 넘었다. 태풍 Maemi는 이날 오후 4시10분 북제주군 한경면 고산 수월봉 기상대에 설치된 풍속계에서 60.0m/s를 기록했다. 제주도 고산에서 기록된 최대순간풍속은 지난 2000년 8월31일 태풍 Prapiroon 이 흑산도에서 기록한 전국 최대순간풍속이었던 58.3m/s를 뛰어넘은 것으로 1904년 우리나라 기상 관측이래 최대순간풍속 최고치이다.

또 지난 1923년 제주지방에서 기상관측이 시작된 이래 가장 강한 바람이었던 Rusa가 지난 2002년 8월31일 기록한 56.7m/s보다 강했다.

태풍 Maemi는 또 폭우를 동반, 지난 11일~12일 제주시 269mm, 성산포 240mm, 표선면 256mm의 비를 뿌려 피해가 속출했다.

특히 12일 오후 강한 비바람에 중·산간 지역의 송전선로들이 끊어지고 해안 지역의 전신주가 쓰러 넘어지면서 서귀포 신시가지를 시작으로 제주시 일도2동, 북제주군 한경면, 구좌읍, 조천읍, 남제주군 표선면, 안덕면 등지의 정전사태가 되어 전역으로 확산됐다. 태풍 Maemi의 크기는 중형이지만 내륙에서도 중심기압을 950hPa로 유지했고 이로 인해 한반도 상공에 있던 대륙고기압과의 큰 기압차로 강한 바람을 계속 불어댔던 것이다.

태풍 Maemi 우리나라에서 약 7시간가량 머물면서 전국적으로 4조 7,810억 원의 재산피해(이중 사유시설 피해액 1조 5,170억 원)와 132명(사망 119, 실종 13, 부상 366)의 인명피해 발생하였고 10,975여명의 이재민이 발생했다.

인명 피해가 최악으로 기록된 것은 1936년 8월 발생했던 3693호로 남한 전역을 강타한 태풍이었다(당시에는 태풍에 이름을 붙이지 않았음). 당시 제주에선 35.8m/s의 강풍이 불고, 강릉에서는 358 mm의 집중호우가 내렸다. 이 태풍으로 인해 사망·실종 1,232명, 부상 1,646명의 인명 피해를 냈으며, 재산 피해는 3693호보다 훨씬 컸다.

기상청에 따르면 태풍은 매년 평균 30개가량 발생하지만 우리나라에 영향을 미친 태풍은 1904년부터 316개로서 연평균 약 3개정도이다(Table 8). 태풍의 최다 내습은 8월, 7월, 9월에 약 91%가 오고 있다. 아주 드물게 6월, 10월에도 내습하는 경우가 있다.

Table 8. Number of typhoons which influenced our country(1904~2005)
(KMA, 2006)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계	연평균
횟수	-	-	-	-	2	20	89	119	78	8	-	-	316	3.1

최근 30년 동안(1971~2000)의 우리나라 영향 태풍의 수는 다소 늘어난 경향을 보이고 있다. 이 동안에도 월별 영향 태풍의 분포는 8월,7월,9월 순서로 보이고 있으나, 연평균 영향 태풍 수는 3.4개로 증가한 경향을 보인다(Table 9).

Table 9. Number of typhoons which influenced our country for the recent 30 years(1971~2000) (KMA, 2006)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계	연평균
횟수	-	-	-	-	-	8	29	38	24	3	-	-	102	3.4

태풍에 의한 피해는 Table 10과 같이 인명피해는 줄어들고 있으나 재산피해는 점차 증가하고 있는 추세이다. 태풍 Rusa가 많은 재산피해를 낸 원인은 Table 11과 같이 강우량이 많았으며, 강우량이 많은 태풍은 대체로 재산피해가 크다.

Table 10. Ranking of the occurrences of typhoon disasters by the damaged size of our country(1904~2004) (NEMA, 2005)

순위	인명피해			재산피해		
	발생기간	태풍명	사망·실종 (명)	발생기간	태풍명	재산피해 총액 (백만원)
1	1936.8.20 ~8.28	3693호	1,232	2002.8.30 ~9.1	RUSA	5,147,917
2	1923.8.11 ~8.14	2353호	1,157	2003.9.12 ~9.13	MAEMI	4,222,486
3	1959.9.15 ~9.18	SARAH	849	1999.7.23 ~8.4	OLGA	1,107,788
4	1972.8.19 ~8.20	BETTY	550	1987.7.15 ~7.16	THELMA	617,429
5	1925.7.15 ~7.18	2560호	516	1995.8.19 ~8.30	JANIS	567,578
6	1914.9.7 ~9.13	1428호	432	1991.8.22 ~8.26	GLADYS	326,899
7	1933.8.3 ~8.5	3383호	415	1998.9.29 ~10.1	YANNI	284,245
8	1987.7.15 ~7.16	THELMA	345	2000.8.23 ~9.1	PRAPIROON	260,846
9	1934.7.20 ~7.24	3486	265	1984.8.31 ~9.4	JUNE	258,900
10	2002.8.30 ~9.1	RUSA	246	1959.9.15 ~9.17	SARAH	254,148

Table 11. Ranking of daily Max. precipitations when the typhoons pass by(1904~2004) (KMA, 2006)

순위	태풍명	지명	일최다강우량(mm)	나타난 일자
1	RUSA	강릉	870.5	2002. 8.31
2	AGNES	장흥	547.4	1981. 9. 2
3	TANNI	포항	516.4	1998. 9.30
4	GLADYS	부산	439.0	1991. 8.23
5	MAEMI	남해	410.0	2003. 9.12
6	BETTY	해남	407.5	1972. 8.20
7	OLIVE	삼척	390.8	1971. 8. 5
8	OLGA	동두천	377.5	1999. 8. 1
9	JANIS	보령	361.5	1995. 8.25
10	ROBYN	대관령	349.0	1993. 8.10

강한 바람과 많은 비를 포함한 태풍은 엄청난 피해를 입히는 것은 사실이지만 늘 해로운 것만은 아니다. 태풍은 중요한 수자원의 공급원으로 물 부족 현상을 해소한다. 한 예로 1994년 여름은 유난히 덥고 길어 가뭄이 극심했었다. 그나마 더위를 식혀주고 가뭄을 어느 정도 해갈할 수 있도록 해준 것이 8월에 내습한 태풍 Doug이다. 또한 태풍은 저위도 지방에서 축적된 대기 중의 에너지를 고위도 지방으로 운반하여 지구상의 남북의 온도 균형을 유지시켜 주고, 해수를 뒤섞어 순환시킴으로써 플랑크톤을 용승 분해시켜 바다 생태계를 활성화 시키는 역할을 한다. 이렇듯 대기의 난폭자인 태풍은 동시에 유용한 면도 지니고 있는 매우 중요한 대기 현상이라 할 수 있다.

제 5 장 폭풍 해일 수치모의

1. 태풍 해상풍 모델

1.1 태풍 파라미터 모델

폭풍해일이나 파랑을 보다 정확히 예측하기 위해서는 해상에서의 바람장에 대한 정확한 산정이 선행되어야 하며, 특히 우리나라의 경우 해상·연안 재해가 주로 태풍이 내습하는 상황에서 발생되기 때문에 태풍 내습 시의 바람장에 대한 정확한 예측이 매우 중요하다. 그러나 태풍은 일반적인 온대성 저기압이나 고기압과는 달리 그 중심 부근에서 기압과 바람의 시·공간적 변화가 크고 태풍의 중심이 빠른 속도로 이동할 뿐만 아니라, 태풍의 주요 이동 경로인 해상에서의 관측 자료가 거의 전무하여 태풍 중심 부근의 기압과 바람을 파악하기 어려운 실정이다(과학기술부, 2000).

태풍 통과 시의 해상풍 산출은 주로 중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 분포 등의 태풍 파라미터로부터 경험적 함수 관계를 도출하여 사용하고 있는데, 이는 기상자료 분석에 의해 산출된 바람장으로는 해양 모델에서 요구되는 상세한 변화를 나타내지 못하므로 일반적인 수치 모델의 결과나 일기도의 기압장으로 해상풍을 구하는 것은 큰 오차를 낼 수 있기 때문이다(해양수산부, 2001).

태풍 영향권 내의 등압선을 동심원으로 가정하여, 몇 개의 파라미터로 태풍 중심 주위의 기압 분포를 해석적으로 나타냄으로써, 태풍 이동의 영향, 해면 마찰의 영향 등을 고려하여 해상풍을 추정하는 것이 가능하다. 또한, 태풍에 대한 시간별 풍향과 풍속의 시계열과 예상되는 태풍의 위치와 중심기압 등의 태풍 파라미터를 입력하여 풍향과 풍속을 예측할 수 있다. 태풍 파라미터 모델을 적용하려면 최대풍 반경(R_{max})의 값이 필요한 데 한반도 부근에서는 최대풍 반경이 보고되지 않는 경우가 대부분이어서 이를 간접적으로 추정하여야 한다(전 등 2001, 강 등 2002a).

본 연구에서는 태풍 파라미터에 의한 해면기압 분포와 원시 운동방정식을 기

초로 한 태풍 파라미터 모형을 이용하여 태풍 시의 해면기압과 해상풍을 산출하였다. 태풍 파라미터는 우리나라의 기상청과 일본 기상청에서 추정된 태풍의 중심 위치와 중심기압을 사용하였으며, 최대풍 반경은 태풍이 육지에 접근하였을 때에는 우리나라의 기상청과 일본기상청의 기상측후소 자료를 사용하여 추정하였으며, 해상에 위치하였을 때는 해상 부이 자료 및 위성자료 등을 사용하여 추정하였다.

1.1 태풍 파라미터의 추정

태풍 해상풍 모형에서 요구되는 입력 자료는 태풍 진로, 태풍 중심 기압, 최대풍 반경, 태풍 영향권 밖의 기압, 태풍이 없을 경우를 가정했을 때의 평균풍속 등이다. 이 중에서 태풍 진로와 태풍 중심 기압은 태풍 예보 시에 발표되며 태풍 영향권 밖의 기압 분포와 바람장은 기상 수치모형의 결과에서 얻을 수 있으나, 최대풍의 반경에 대한 정보는 제공되지 않고 있다. 따라서 태풍 해상풍 모형을 사용하기 위해서는 가능한 모든 자료를 활용하여 최대풍 반경을 정확히 추산할 필요가 있다.

최대풍 반경을 구하기 위해서 우리나라와 그 주변을 통과했던 과거 태풍을 선별하여 우리나라의 기상청과 일본기상청의 지상 및 해상 기상관측소의 해면기압 자료와 중국 연안 관측소의 해면 기압 자료가 사용되었다. 특히 태풍이 동중국해에 위치했을 경우에는 주변에 기상 관측소가 없기 때문에 태풍에 대한 정확한 분석에 어려움이 있으나 우리나라 주변으로 접근했을 때에는 우리나라, 일본, 중국의 기상 관측소에서 관측된 해면 기압자료를 사용하여 최대풍 반경을 구할 수 있다(전 등, 2001; 해양수산부, 2001).

후술하는 식에서 $A = B = 1$ 일 때 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ln(P_{(r)} - P_0) = \ln(P_\infty - P_0) - \frac{r_0}{r} \quad (1.1.1)$$

여기서, $\ln(P(r) - P_0)$ 는 $1/r$ 은 선형관계가 되므로, 기상관측소에서 관측된 해면 기압자료의 태풍중심에서의 거리에 따른 분포를 회귀분석하면, 최대풍반경 r_0 를 구할 수 있다.

또한, 풍속에 대해서도 과거 미 공군이 항공기로 관측한 바람 자료와 인공위성 GEOSAT, TOPEX의 바람 관측 자료로부터 최대풍 반경의 추정이 가능하다.

1.2 태풍 해면기압 및 해상풍 모형

본 연구에서 사용한 해상풍 모형은 PVM(Primitive Vortex Model)으로써, PVM은 움직이는 태풍의 중심을 원점으로 하는 이동식 좌표체계에 대하여 PBL(Planetary Boundary Layer) 내에서 연직 평균된 운동방정식으로 해석하여 바람장을 구하는 수치 모형으로 1987년부터 2003년까지의 16년간 제주도 연안해역에 영향을 미친 태풍 중 8개를 선정하여 광역격자에 대한 기압장과 바람장을 산출하였다. PVM모형에서는 태풍의 중심을 원점으로 하는 이동식 격자시스템을 사용하며, 태풍의 중심 부근에서는 2km 간격으로 조밀하게 격자를 설정하고 중심에서 멀어 질수록 2배씩 격자간격이 커지도록 한 Nested grid 시스템을 사용하여 태풍중심 부근에서의 바람변화를 정밀하게 계산할 수 있도록 하였다.

태풍 통과 시 해상풍 산출은 주로 중심기압, 최대풍 반경, 주변기압 등의 태풍 파라미터로부터 경험적 함수 관계를 도출하여 사용하고 있는데, Schoemer(1954)는 태풍 영향권 내의 등압선을 동심원으로 가정하여 Rankine vortex 이론에 근거한 태풍의 기압분포 모형을 제시한 바 있다. 이러한 형태의 태풍 파라미터 모형은 Atkinson and Holliday(1977), Wang(1978), Holland(1980) 등 여러 연구자에 의해서 실제 관측된 자료로부터 경험적 관계식들이 도출되었다.

최근에 와서는 태풍의 형태를 단순화시킨 태풍 파라미터 모형과는 달리 해상의 대기경계층(Planetary Boundary Layer) 내에서의 물리적인 과정을 포함한 원시운동방정식(Primitive Equation of Motion)을 수치적으로 해석할 수 있는 모형이 연구·개발되었다(Cardone *et al.*, 1992; Thompson and Cardone, 1996). 강등(2002)은 태풍 해상풍 모형과 해상에서 관측된 바람 자료와의 비교에서 원시운

동방정식을 기초로 한 모형(PVM)이 관측치와 근사한 결과(Fig. 16)를 보여주었으며, 본 연구에서는 PVM을 이용하여 태풍 시의 해면기압과 해상풍을 산출하였다.

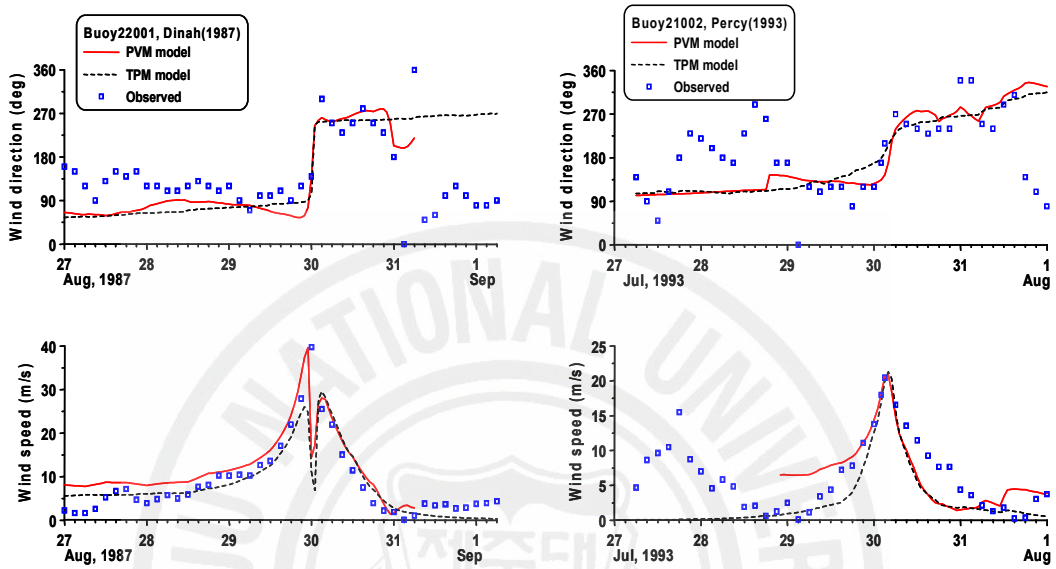


Fig. 16 Comparison of ocean buoy data of Japan Meteorological Administration and the results applying PVM and TPM model(Kang, Jun, 2002)

태풍 주위의 바람장은 일반적으로 태풍 파라미터로부터 표시되는 기압장으로부터 해상풍을 구하며, 태풍 중심역에서의 기압 분포를 몇 개의 파라미터(중심기압, 최대풍 반경, 주변 기압 등)로 표시하는 태풍 기압분포 모형이 여러 형태로 제시되어 왔다.

$$(P_{(r)} - P_0) / (P_\infty - P_0) = A_e \left(\frac{B^{\frac{r_0}{r}}}{r} \right) \quad (1.2.1)$$

여기서, $P_{(r)}$ 은 태풍의 중심으로부터 거리 r 인 지점의 해면기압, P_0 는 중심

해면기압, P_∞ 는 태풍영향권 밖에서의 해면기압, r_0 는 태풍 중심으로부터 최대 풍속이 발생하는 지점까지의 거리(최대풍 반경)를 각각 나타낸다.

태풍 파라미터 모형에서는 기압의 분포를 동심원으로 가정하여, 마찰과 태풍의 이동속도를 무시하고 원심력과 전향력, 기압경도력만을 고려하면, 지형풍 (gradient wind)의 관계식[식 (1.2.2)]으로 부터 해석해[식 (1.2.3)]를 구할 수 있다.

$$\frac{U^2}{r} + fU = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (1.2.2)$$

$$U = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (1.2.3)$$

여기서, U 와 P 는 태풍의 중심으로부터 거리 r 인 지점에서의 풍속과 해면기압, ρ 는 공기의 밀도, f 는 Coriolis 파라미터를 각각 나타낸다. $\frac{\partial P}{\partial r}$ 은 식 (1.2.1)로부터 Rankine vortex 관계식을 사용하여 식 (1.2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\Delta P}{\rho} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}} \quad (1.2.4)$$

여기서, ΔP 는 태풍 중심에서의 기압과 태풍영향권 밖의 원거리에서의 기압의 차이이다. 무시된 해면 마찰의 영향과 태풍 이동의 영향을 보정하면 최종적으로 해면 10 m 고도의 해상풍(\vec{U})을 얻을 수 있다.

$$\vec{U} = \vec{U}_s + \vec{U}_{SM} \quad (1.2.5)$$

$$\vec{U}_{SM} = \frac{r_0 r \vec{V}_c}{r_0^2 + r^2} \quad (1.2.6)$$

여기서, \vec{U}_s 는 해면 마찰이 고려된 정지 태풍 시의 풍속이며, 일반적으로 풍속의 비와 풍향의 편차를 위도에 따른 경험식으로 구한다(Atkinson and Holliday, 1977). 태풍 이동의 영향은 위에서 구한 정지 태풍의 해상풍(\vec{U}_s)에 태풍의 이동속도(\vec{V}_c)를 보정한 해상풍(\vec{U}_{SM})의 vector 합으로 구한다. \vec{U}_{SM} 은 식 (1.1.7)과 같이 태풍 중심에서의 거리에 따라 태풍 이동속도의 영향이 줄어드는 경험식이 주로 사용된다(Jelesnianski, 1966).

해면 마찰 영향, 태풍 이동 영향을 무시하고 단순화한 방정식에서 해석적으로 경도풍을 구하고 점차 무시된 영향을 보정하는 과정에서 해면 마찰에 의한 풍향 및 풍속의 변화 계산 및 태풍 이동의 영향 고려 시에 경험적인 방법을 이용할 때에 불확실성과 오차를 보일 수 있다. Primitive Vortex Model(PVM)은 움직이는 태풍의 중심을 원점으로 하는 이동식 좌표체계에 대하여 대기경계층(planetary boundary layer, PBL) 내에서 연직 평균된 운동방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + f\vec{k} \times (\vec{V} - \vec{V}_g) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p_c + \vec{\nabla} \cdot (K_H \vec{\nabla} \vec{V}) - \frac{C_D}{h} |\vec{V} + \vec{V}_c| (\vec{V} + \vec{V}_c) \quad (1.2.7)$$

$$p = p_c + \bar{p} \quad (1.2.8)$$

$$p_c(r) = p_0 + \Delta p e^{-r_0/r} \quad (1.2.9)$$

$$f\vec{k} \times (\vec{V}_g + \vec{V}_c) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \bar{p} \quad (1.2.10)$$

여기서, \vec{V} , \vec{V}_g , \vec{V}_c 는 각각 태풍 이동에 대한 상대 풍속, 태풍 이동에 대한 상대 지균풍과 태풍의 이동 속도를 나타내며, p_c , \bar{p} 는 각각 태풍에 의한 기압장, 태풍이 없다고 가정했을 때의 중관 기압장을 나타낸다. 또한, h 는 PBL의

높이이며, K_H , C_D 는 각각 수평확산계수(horizontal eddy viscosity coefficient), 마찰계수(drag coefficient)이다. 수평확산계수는 Smagorinsky(1963)가 제안한 식을 사용하였으며, 마찰 계수는 Arya(1977)에 의해 제안된 식을 사용하였다.

$$K_H = 2\kappa^2 \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.2.11)$$

$$C_D = \frac{k^2}{(\ln \widehat{z}_0 + A_m)^2 + B_m^2} \quad (1.2.12)$$

여기서, Δx 는 격자간격이며, κ 는 무차원 상수로 0.4의 값을 사용하였다. 식 (2.1.13)에서 k 는 von Karman 상수이고, $\widehat{z}_0 (= \alpha/h)$ 는 조도계수(z_0)를 PBL의 높이 h 에 대하여 무차원화한 값이다. 또한, A_m, B_m 은 PBL의 높이 h 와 Monin-Obukov length scale로 결정되는 상수이며, Arya(1977)의 유사함수 (Similarity function) 관계식과 Cardone(1969)의 해수면에서의 표면마찰공식을 결합한 관계식에서 계산될 수 있다(Thompson and Cardone, 1996).

2. 폭풍해일모델

2.1. Princeton Ocean Model(POM)

본 연구에 사용된 폭풍해일 수치모형은 기상 외력에 의한 이상 해면을 구하는 모형으로 Alan F. Blumberg와 George L. Mellor(1987)에 의해 개발된 프린스턴 대학의 해양 순환 모델인 POM(Princeton Ocean Model)을 이용하였다. POM은 전 세계적으로 가장 많은 사용자가 이용하고 있으며 연안해수순환에 관한 연구에 많이 적용되고 있다. 수심이 얇은 곳과 깊은 해양의 운동에 대해 시뮬레이션 하기에 적합하여 대서양의 일반적 해양 순환뿐 아니라 대축적 해안 관리 문제에 걸친 다양한 개발에 사용되고 있다. 본 모델은 해양에서의 물리적인 문제 중에서 다양한 공간적 크기와 조석에서부터 수개월에 달하는 크기와 시간적인 문제를 실제에 가깝게 해결할 수 있고, 실제에 수심과 해안선 구조를 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 따라서 해안선 및 수심변화가 큰 연안에서 매우 유용한 모델로써 인정받고 있다. 또한, 프린스턴대학의 Dynalysis와 NOAA의 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(GFDL)를 중심으로 POM 사용자간의 연구 성과 및 bug patch 등 활발한 상호교류가 이루어지고 있다.(양, 2006) 본 연구에서 사용되고 있는 3차원 해양순환모델 POM은 Alan F. Blumberg와 George L. Mellor(1987)에 의해 개발되었고 다음과 같은 특징이 있다.

- 연직혼합계수를 산정하기 위하여 2차 난류종결모델을 이용하고 있다.
- 연직좌표를 수심에 대하여 분해하는 σ -좌표계를 도입하고 있다.
- 수평격자는 직교곡선좌표(curvilinear orthogonal coordinates)를 고려할 수 있으면, 'Arakawa C' 격자체계를 도입하고 있다.
- 수평시간차분은 양해법(explicit)으로 연직시간차분은 음해법(implicit)으로 풀고 있으며 후자의 도입에 의해 연직좌표에 대하여 시간 제약성이 완화되고, 표층과 저층의 경계층에서 상세한 연직해를 구할 수 있다.
- 이 모델은 자유표면과 시간스텝분리를 이용하고 있다. 이 모델에서의 외부모

드는 2차원적이고 외부파속도에 기초한 짧은 시간스텝의 CFL 조건을 취해야 하며, 내부모드는 3차원적이고 내부파속도에 기초하여 보다 긴 시간스텝의 CFL 조건을 취할 수 있기 때문에 계산 효율성에 있어서 매우 경제적이다.

- 완전한 열역학방정식을 만족하고 있다.

2.2 Smagorinsky 확산계수

일반적으로 수평확산에 대해서는 Smagorinsky(1963)확산계수를 사용하였다. Smagorinsky식은

$$A_M = C \Delta x \Delta y \frac{1}{2} \sqrt{\nabla \cdot \vec{V} + (\nabla \cdot \vec{V})^T} \quad (2.2.1)$$

여기서,

$$\frac{\nabla \cdot \vec{V} + (\nabla \cdot \vec{V})^T}{2} = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 / 2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.2)$$

이다.

0.10에서 0.20의 범위인 C(HORCON 파라메타)의 값은 매우 적절한 것으로 보이지만 만약 격자간격이 충분히 작다면 C는 0이 된다(Oey et al.,1985a,b). Smagorinsky 확산계수의 이점은 C가 무차원이라는 것이고 A_M 이 해상도가 증가함에 따라 감소하고 A_M 이 만약 속도경사가 작다면 작은 값을 가진다는 것이다.

2.3 수치계산방법 및 격자배열

외부모드계산은 해수면 승강 EL과 연직평균유속 UA, VA에 대해 시간스텝 진행에 따라 계산하고 있으며, 내부모드계산에서는 U, V, T, S와 난류량에 대하여 계산을 수행하고 있다. Fig. 17은 외부모드와 내부모드에 대한 시간스텝의 진행

과정을 도시한 것이다.

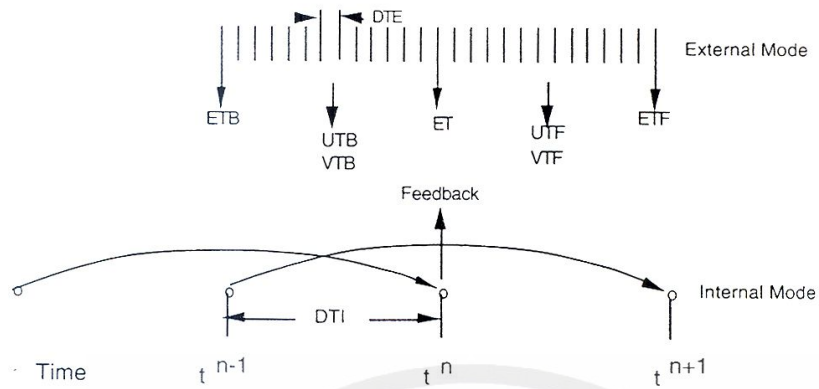


Fig. 17 A simplified illustration of the interaction of the external mode and internal mode

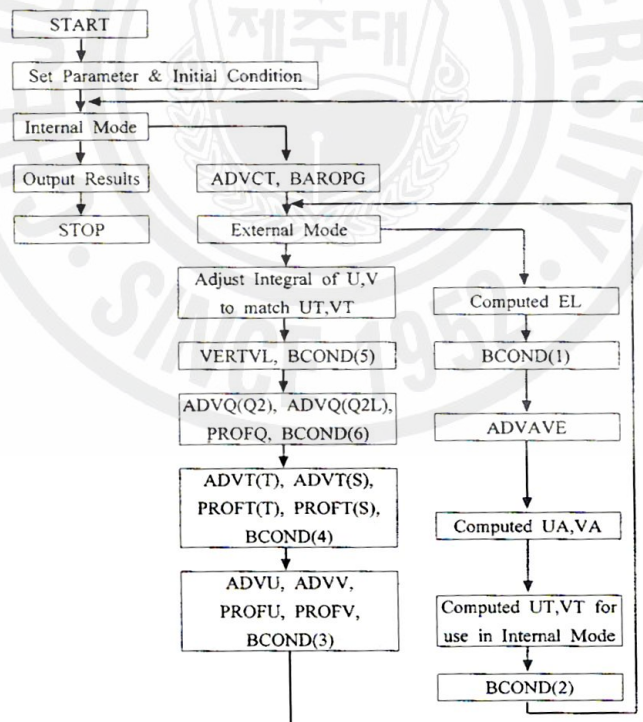


Fig. 18 Flow diagram of the POM Code

Fig. 18은 POM의 기본 코드에 관한 개략적인 계산 흐름도이다.

외부모드에 대해서는 짧은 시간스텝 DTE가 사용되고, 내부모드는 보다 긴 시간스텝 DTI를 사용한다. 외부모드는 주로 내부모드에 수면승강에 대한 정보를 제공하고 반면에 내부모드는 외부모드에 운동량이류, 밀도적분과 저면응력에 대한 정보를 제공한다.

내부모드 및 외부모드에 대한 엇갈림 격자배열은 Fig. 19에 나타내었다. 이러한 격자배열은 직교곡선좌표계에서도 그대로 사용할 수 있다

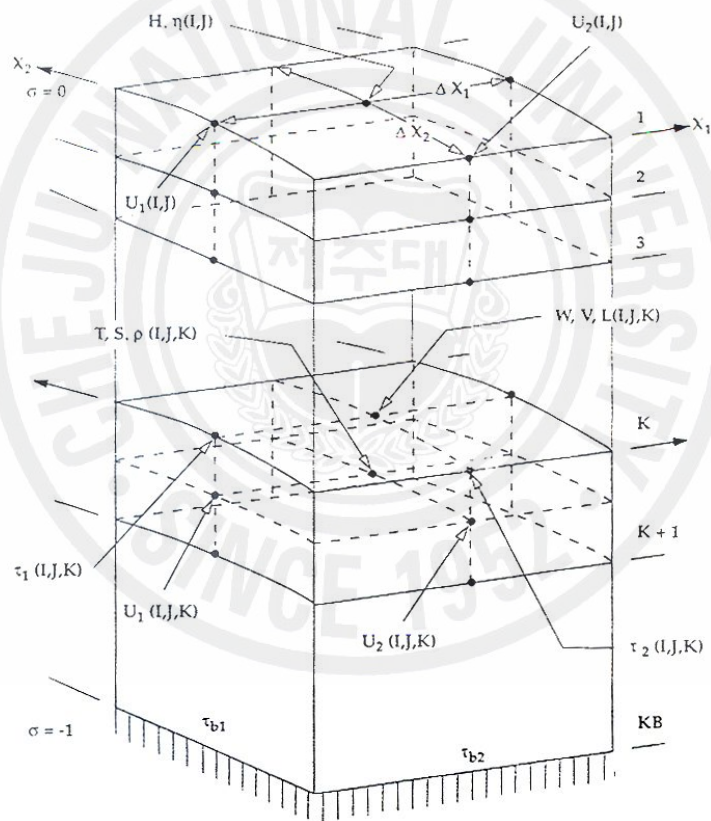


Fig. 19 The staggered numerical model grid with the location of model variables indicated

2.4 계산안정조건

연직적분, 외부모드, 수송방정식 상에서의 CFL(Courant-Friedrichs-Levy) 계산 안정조건은 시간간격에 제한을 둔다(Blumberg and Mellor, 1981).

다음에서,

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_t} \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (2.4.1)$$

여기서,

$$C_t = 2(gH)^{1/2} + \overline{U_{\max}} \quad (2.4.2)$$

$\overline{U_{\max}}$ 는 최대평균속도를 나타낸다. CFL조건은 모델에 대한 제한 중에 가장 중요한 조건으로써 모델시간간격을 보통 이 한계의 90% 범위 내에서 선정된다. 내부모드는 빠르게 움직이는 외부모드 보다 긴 시간간격을 가진다. 시간스텝 간격은 식(2.4.1)에 주어진 외부모드에 대한 조건으로서 구해진다.

$$\Delta T_I < \frac{1}{C_T} \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (2.4.3)$$

여기서, C_T 는 $2C + U_{\max}$ 이고, 여기서 C_T 는 일상적으로 2m/s 정도의 크기를 가지는 최대 내부 중력파속도이다. 그리고 U_{\max} 는 최대이류속도이다. 전형적인 연안해양조건에서 시간스텝 비율 $\Delta T_I / \Delta t_E$ 는 50~80 또는 그 이상의 규모를 갖는다.

부가적인 제한이 운동량이나 스칼라량의 수평확산에 의해 제기될 수도 있다. 다음에서 $A = A_M$ 또는 $A = A_H$ 이면

$$\Delta T_I < \frac{1}{4A} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1} \quad (2.4.4)$$

이 사용된다.

회전에 대한 제한 조건은

$$\Delta T \ll \frac{1}{f} = \frac{1}{2\Omega \sin \Phi} \quad (2.4.5)$$

여기서, A_H 는 수평확산계수이고 Ω 는 지구의 각속도이고, Φ 는 위도이다.

2.5 폭풍해일모형

본 연구에 사용된 POM은 폭풍해일모형으로 2차원 수심적분 모드이며 초기조건과 경계조건이 주어지는 지배방정식을 이용해서 해를 구하는 유한차분모형으로 수평적으로는 Arakawa-C격자 체계를 사용하여 원시 방정식의 수치해를 계산한다.(Mellor, 1998) 본 모델은 조석과 기상 외력을 동시에 고려한 결과에서 조석만을 고려한 결과를 빼서 폭풍해일을 계산하였다. 이는 조석과 기상 외력에 의한 비선형 효과를 고려하기 위한 것으로 특히 2차의 저면 마찰식을 사용할 경우 조류와 취송류를 분리하기 쉽지 않기 때문이다. 조석은 광역 격자의 개방경계에 4개 분조(M2, S2, K1, O1)을 합성한 조위를 부여하여 고려하도록 하였으며, 기상 외력은 태풍 해상풍 모형으로부터 산출된 광역 격자의 기압장과 바람장을 입력 자료로 사용하여 고려하도록 하였다. 폭풍해일 현상은 국지적인 조건, 즉 해안선과 천해의 지형적 특성(만, 열도, 섬, 대륙사면의 폭과 경사 등)에 대해 매우 민감해서 태풍, 폭풍 등 악기상의 영향권이 충분히 포함될 수 있는 원해의 광역적 특성과 함께 연안 해역의 세부지형적 요소가 잘 반영되도록 구성하는 것이 중요하다.

개방경계에서의 조위는 다음과 같다.

$$\zeta(i, j, t) = \sum_{k=1}^4 f_k A_k(i, j) \cos(\omega_k t - P_k(i, j) + k_k) \quad (2.5.1)$$

여기서, $\zeta(i, j, t)$ 는 개방경계 (i, j) 격자점에서의 조위, 밑첨자 k 는 분조를 의미하며 $A_k(i, j)$ 는 (i, j) 격자점에서의 진폭, $P_k(i, j)$ 는 위상, w_k 는 분조의 각속도, f_k 는 18.6년 주기의 달 공전궤도 변화에 따른 변동을 고려하는 노드 인수(Nodal factor)이고 k_k 는 조석 계산을 위한 천문 인수(astronomical arguments)이다.

개방경계에서 진폭 $A_k(i, j)$ 과 위상 $P_k(i, j)$ 은 Matsumoto et al.[2000]이 TOPEX/POSEIDON 자료를 동화시켜 계산한 전 지구 조석 모델 결과를 사용하였다.

폭풍해일 수치모형의 기본방정식은 수직축에 따른 유속분포가 균일하여 수직 방향의 가속 성분을 무시할 수 있다고 가정하여 구한 수심 적분된 연속방정식과 2차원 운동방정식을 사용하였는데, 이를 직교 좌표(Cartesian coordinate)로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (2.5.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial Pa}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_x^w - \tau_x^b}{\rho H} + F_x \quad (2.5.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial Pa}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_y^w - \tau_y^b}{\rho H} + F_y \quad (2.5.4)$$

여기서, ζ 는 정수면에 대한 수위, (u, v) 는 각각 수심 적분된 동향 및 북향 유속성분, f 는 Coriolis 계수, H 는 총 수심($= h + \zeta$), h 는 정지수면 하의 수심, g 는 중력가속도, ρ 는 해수의 밀도, Pa 는 기압, (τ_x^w, τ_y^w) 는 바람응력, (τ_x^b, τ_y^b) 는 해저면의 마찰응력, (F_x, F_y) 는 이류와 확산의 영향을 나타낸다.

바람에 의한 전단 응력과 해저면 마찰 응력은 각각 풍속과 유속의 제곱에 비례하도록 하였는데, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\tau_x^w, \tau_y^w) = \rho_{air} C_d \sqrt{W_x^2 + W_y^2} (W_x, W_y) \quad (2.5.5)$$

$$(\tau_x^b, \tau_y^b) = \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} (u, v) \quad (2.5.6)$$

여기서, C_d 와 C_f 는 각각 바람응력계수와 저면마찰계수, (W_x, W_y) 는 각각 동향 및 북향의 풍속, ρ_{air} 는 공기의 밀도를 나타낸다.

광역 및 중간역에서의 폭풍해일 모형은 지구좌표계를 사용하여 지구의 곡률과 위도에 따른 편향력 차이를 고려하도록 하였으며, 상세역에서의 폭풍해일 모형은 직교 좌표계를 사용하였다.

폭풍해일에 대한 지배방정식, 식 (2.5.2)~(2.5.4)을 해석하기 위해 음해법(implicit method)을 사용하였다. 음해법을 사용함에 따라 큰 매트릭스(matrix)의 계산이 필요한데 이는 CGM(Conjugate Gradient Method)를 사용하였다. 이류항은 TVD(Total Variation Diminish) 방법을 사용하였고, 확산 계수는 Smagorinsky(1963)방법을 도입하여 격자 크기와 유속의 차에 따라 각 계산점에서 다르게 정의된 값을 사용하였다.

한편 초기조건으로서는 전 계산 영역에 대하여 해수위와 유속을 모두 영(0)으로 설정하는 cold start 기법을 적용하였으며, 육지 경계면에서는 육지 경계의 법선 방향 유속을 0으로 처리하였다.

2.6 폭풍해일고 계산조건

제주항 및 서귀포항 주변의 상세한 해일 분포를 산출하기 위해 다단계 격자 삽입기법을 사용하였으며, 1단계의 광역 격자망에서 3단계의 상세역 격자에 걸쳐 단계적으로 폭풍해일고를 계산하였다. 여기서 수치모형의 의한 폭풍해일고는 조석과 기상 외력(대기압, 바람응력)을 동시에 고려한 계산결과에서 조석을 빼서 계산하였으며, 태풍의 중심위치와 중심기압 등은 본 연구에서는 1시간 간격으로 내삽하여 1시간 간격의 기압과 풍속이 폭풍해일 모델에 입력조건으로 사용되었다.

폭풍해일모델이 3단계 격자 삽입 단계를 사용하므로, 입력된 바람장도 각각의

격자망에 상응되는 3단계 격자에 대해 1시간 간격으로 계산되었다. 모든 격자망에서 기압장과 바람장은 1시간 간격의 기압장과 바람장을 매 6분마다 내삽하여 사용하였다. 광역 격자의 개방 경계에 4개 분조(M2, S2, K1 및 O1)을 합성한 조위와 함께 광역 격자에 대한 기상 외력(기압장과 바람장)을 부여하여 광역 격자에 대한 해수위를 계산한 후, 광역 모형의 해수위를 시간과 공간적으로 내삽하여 중간역 모형의 개방 경계 해수위로 지정하고 중간역에 대한 기상 외력을 부여하여 중간역에 대한 해수위를 구하였다. 이 경우 중간역의 개방 경계에 대한 해수위는 조위뿐만 아니라 기상 외력에 대한 영향도 포함된 값이다. 이러한 과정은 상세역의 해수위 계산에 동일하게 적용하였으며 중간역 및 상세역에 대한 기상외력은 보간법을 이용하여 각각 산출하고 입력자료로 이용하였다. 개방 경계에 조위만을 부여한 수치 실험을 병행하여, 최종적으로 조석과 기상 외력을 동시에 고려한 결과에서 조석만을 고려한 결과를 빼서 폭풍 해일고를 계산하였다. 이러한 과정이 상세역까지 3단계를 거치면서 제주항 및 서귀포항의 지형 변화를 보다 상세히 반영하도록 하였다.

2.7 격자망의 구성

제주도 주변에 접근하는 태풍들에 대해 태풍의 발생 및 이동경로 등을 충분히 반영하고 재현하기 위하여 계산영역을 동해, 서해, 남해 및 동중국해를 포함하는 대상해역을 선정하였다. 해역의 수심 자료는 동중국해 및 서해와 동해 전역을 포함한 해역으로 미국 국립지리 자료원(National Geographic Data Center)에의 1/12°해상도의 수심 자료인 ETOPO5를 사용하였으며 제주도 부근 및 제주항, 서귀포항 주변해역은 해양조사원에서 발행한 해도를 사용하였다.

태풍에 의한 폭풍해일의 계산영역은 매우 광대하기 때문에 해일고의 상세한 분포특성을 파악하기 위해 광역의 지역적 특성과 함께 연안해역의 지형적 요소가 잘 반영되도록 3단계의 격자체계를 구축하고 1단계에서 3단계 영역까지 nesting하여 계산하였다. 폭풍해일 수치모형의 계산격자 및 입력조건은 Table 12와 같으며, 계산격자는 해상풍의 경우와 동일하다.

한반도를 중심으로 동중국해를 포함한 광역 격자, 제주도 부근을 중심으로 한

중간역 격자, 제주항과 서귀포항을 포함하는 상세역 격자로 구성하였으며, IMESH, JMESH는 I, J의 방향으로 격자의 개수를 나타낸다. 제 1단계인 광역격자의 격자간격은 위도와 경도 방향으로 모두 1/12°(약 9km격자)이고, IMESH×JMESH는 313×361로 구성하였다.

2단계인 중간역 격자는 격자 간격이 위도와 경도 방향으로 모두 1/60°(약 2km격자)이고, IMESH×JMESH는 301×136으로 격자를 구성하였다. 제 3단계는 제주항과 서귀포항을 중심으로 주변해역을 포함하는 상세역의 격자간격은 각각 250m이고, IMESH×JMESH는 121×78로 제주항과 서귀포항의 격자간격 및 격자수는 같다.

Table 12. Calculation grid and input term used in the model

격자망	광역 격자	중간역 격자	상세역 격자 (제주항)	상세역 격자 (서귀포항)
격자 범위	117°~143°E 20°~50°N	124°~129°E 32°~34.25°N	126.23°~126.43°E 33.30°~33.41°N	126.25°~126.45°E 33.05°~33.15°N
격자 간격	1/12°	1/60°	250m	250m
격자 수	313×361	301×136	121×78	121×78
경계조건	태풍바람	광역 결과 이용	중간역 결과 이용	중간역 결과 이용

Fig. 20~25은 각 대상영역의 범위와 수심분포도를 나타내고 있다.

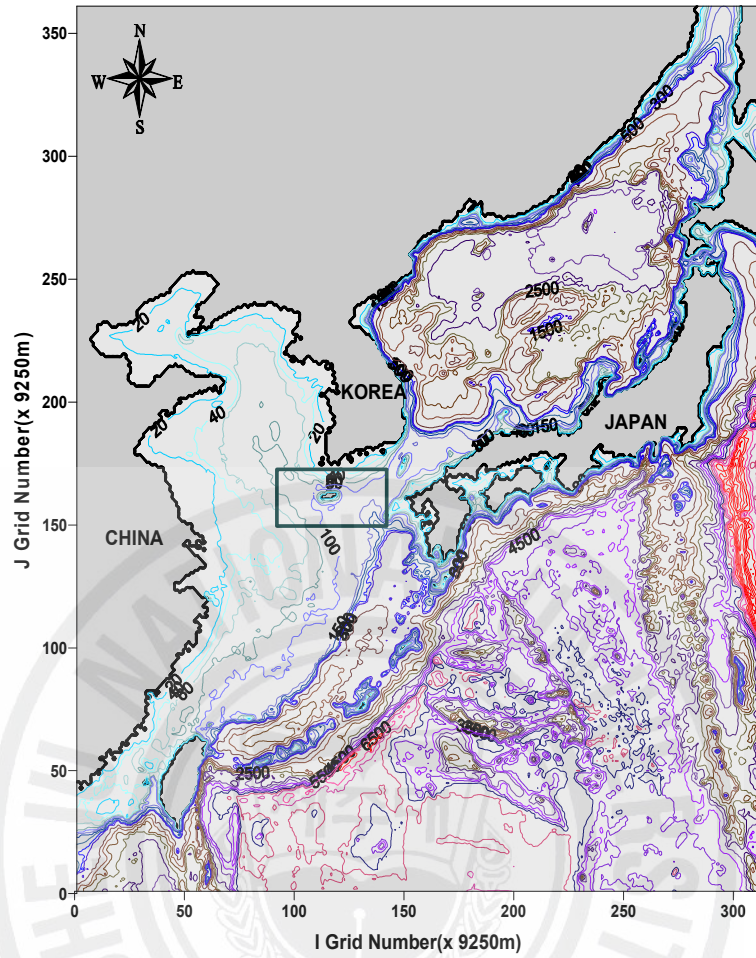


Fig. 20 Province of the wide area and distribution chart of the depth of water

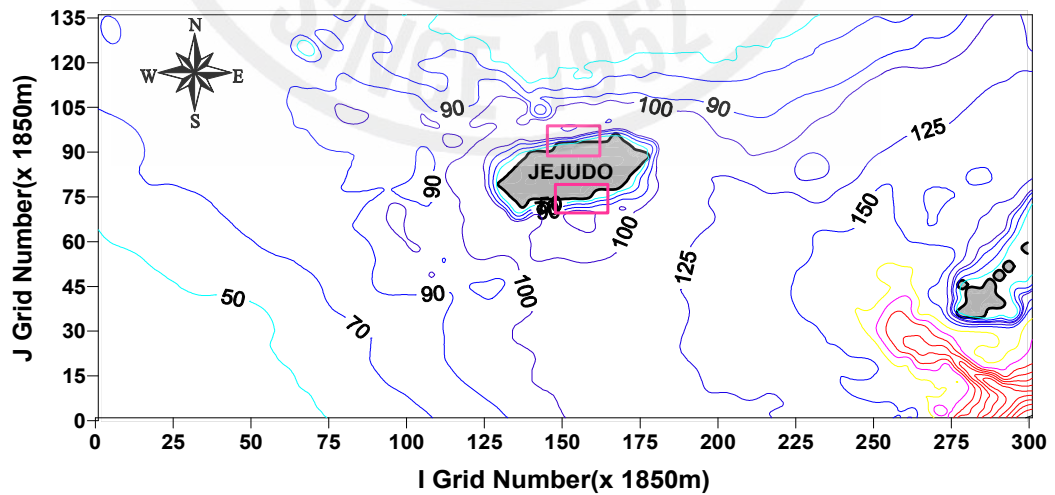


Fig. 21 Province of the middle area and distribution chart of the depth of water

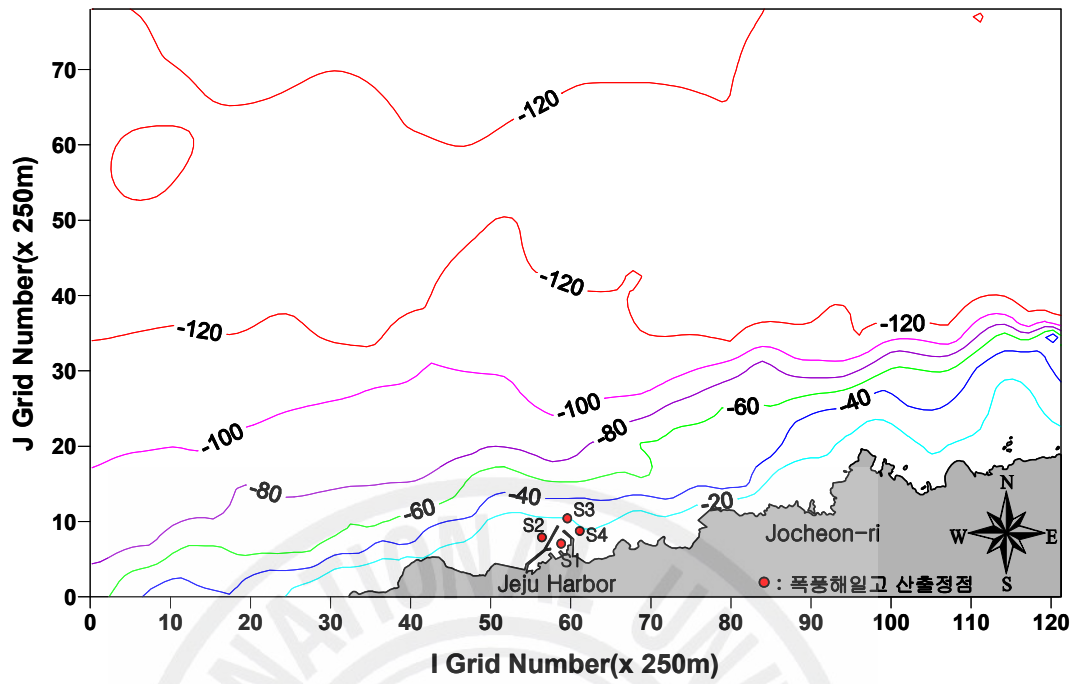


Fig. 22 Province of the detailed area(Jeju Port) and distribution chart of the depth of water

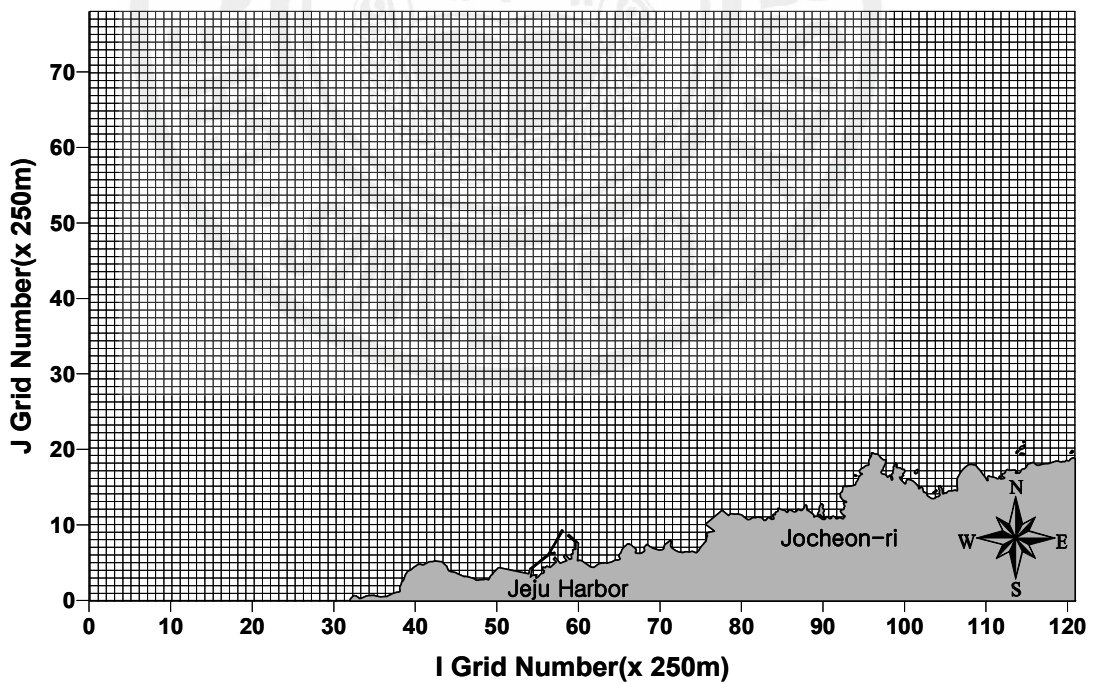


Fig. 23 Grid system of the detailed area(Jeju Port)

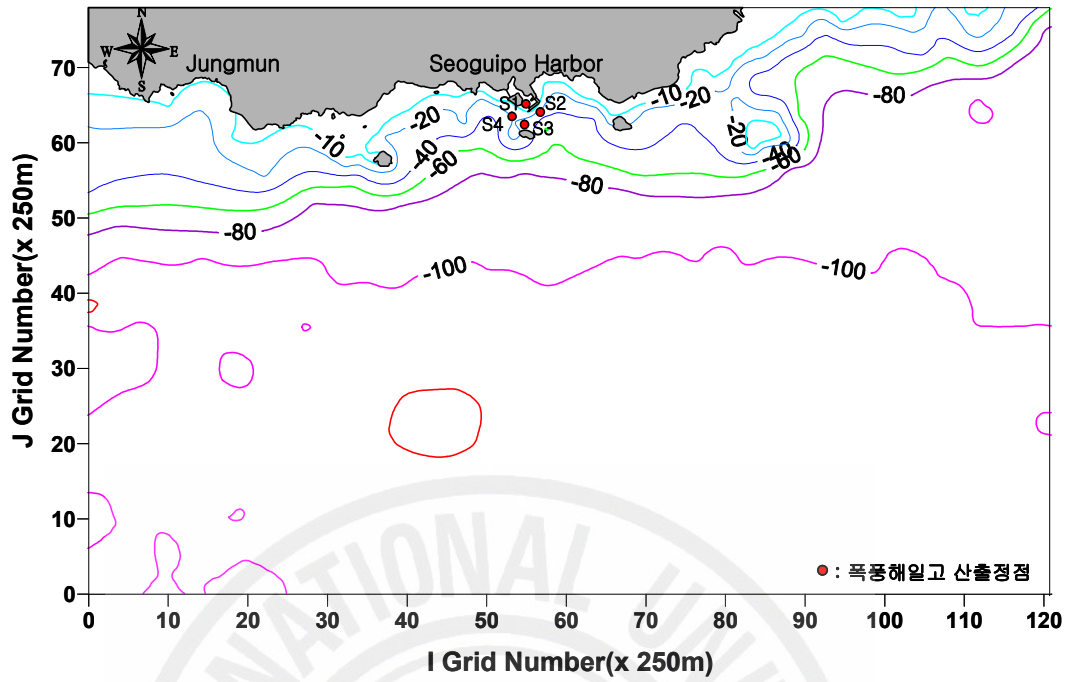


Fig. 24 Province of the detailed area(Seogwipo Port) and distribution chart of the depth of water

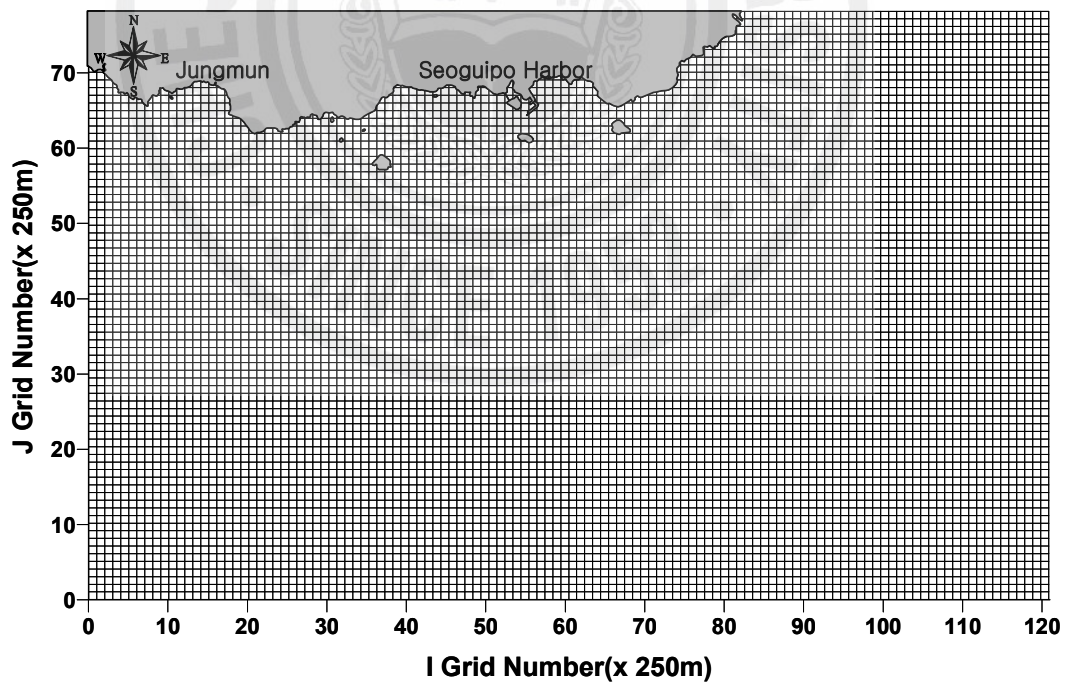


Fig. 25 Grid system of the detailed area(Seogwipo Port)

제 6 장 제주도 연안해역의 폭풍해일고 산정

1. 과거 주요 태풍선정

기상청에 따르면 태풍은 매년 평균 30개가량 발생하지만 우리나라에는 1년에 보통 2~3개의 태풍이 찾아오는데 우리나라에 영향을 미친 태풍은 1904년부터 315개로서 연평균 약 3개정도이다. 태풍의 최다 내습은 8월, 7월, 9월에 약 91%가 오고 있고 아주 드물게 6월, 10월에도 내습하는 경우가 있다.

본 연구에서는 제주연안을 대상으로 주요 태풍 통과 시의 폭풍해일고를 산출하기 위하여 1987년부터 2003년까지의 16년간 제주연안 해역에 영향을 미친 주요 태풍 중 비교적 강도 및 재산피해를 많이 준 8개의 태풍(Table 13)을 선정하여 수치모의를 수행하였다.

Table 13. Typhoon and simulation time used in the numerical simulation

년 도	태풍번호	태풍이름	모의시작	모의종료
1987	8705	THELMA	1987. 7. 13. 00:00	1987. 7. 17. 00:00
1991	9112	GLADYS	1991. 8. 20. 07:00	1991. 8. 24. 07:00
1995	9507	JANIS	1995. 8. 23. 06:00	1995. 8. 28. 06:00
1998	9809	YANNI	1998. 9. 27. 12:00	1998. 9. 30. 06:00
1999	9907	OLGA	1999. 7. 30. 12:00	1999. 8. 3. 12:00
2000	0012	PRAPIROON	2000. 8. 28. 12:00	2000. 9. 1. 12:00
2002	0215	RUSA	2002. 8. 28. 00:00	2002. 9. 2. 00:00
2003	0314	MAEMI	2003. 9. 9. 00:00	2003. 9. 13. 12:00

Fig. 26~33은 해일모의 대상인 8개 태풍의 이동경로를 나타낸 것이다. 과거 16년간 8개의 태풍의 이동경로를 살펴보면 1995년 태풍 “JANIS”, 1999년 태풍 “OLGA”, 2000년 태풍 “PRAPIROON”을 제외하고는 모두 제주도 동쪽을 지나는 것을 알 수가 있다. 태풍은 일반적으로 포물선 모양을 그리며 이동하는데 처음에는 편동풍 지역에서 천천히 서북서쪽으로 이동하다가 우리나라 중위도 편서풍대 접근하면서 진행방향을 북동쪽으로 바꾸기 시작하기 때문에 대부분 우리나라에 접근하는 태풍들은 동쪽으로 빠져나가면서 태풍으로서의 생을 마감하는 경우가 대부분이다. 특히, 제주도는 우리나라에 접근 하는 모든 태풍들의 지나가는 길목에 위치한 지리적인 조건 때문에 항상 태풍의 위험반경에 속하고 있다.

이 중 제주도 동쪽을 통과한 2002년 태풍 “RUSA”, 2003년 태풍 “MAEM”은 규모가 매우 큰 태풍으로 제주도를 포함한 우리나라 대부분의 영향권에 들어 역사상 가장 큰 피해를 준 태풍이기도 하다.

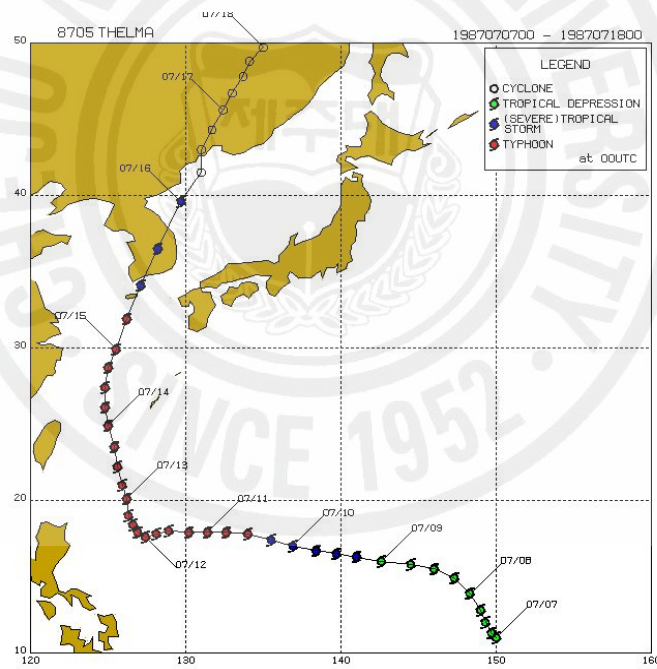


Fig. 26 Path of “THELMA”, the 5th typhoon of 1987(Typhoon, 2007)

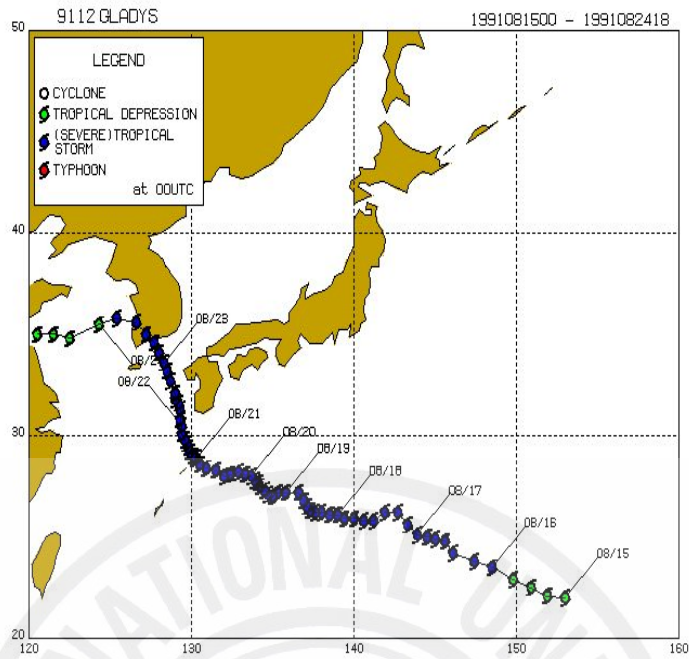


Fig. 27 Path of “GLADYS”, the 12th typhoon of 1991(Typhoon, 2007)

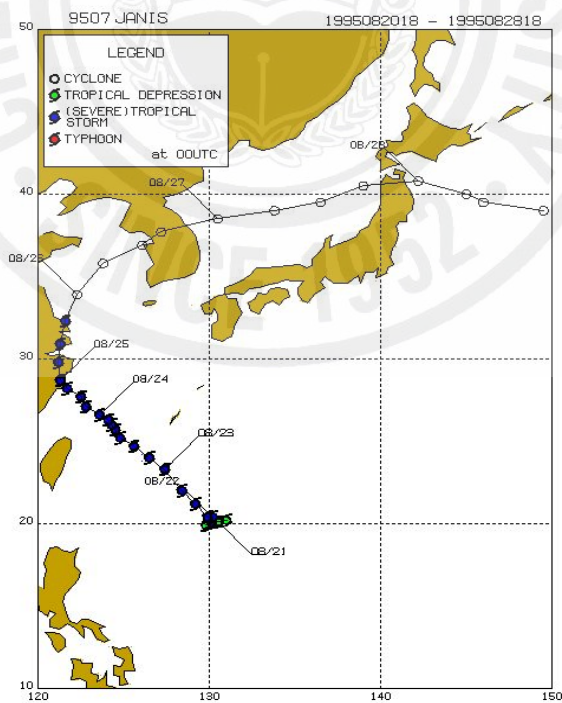


Fig. 28 Path of “JANIS”, the 7th typhoon of 1995(Typhoon, 2007)

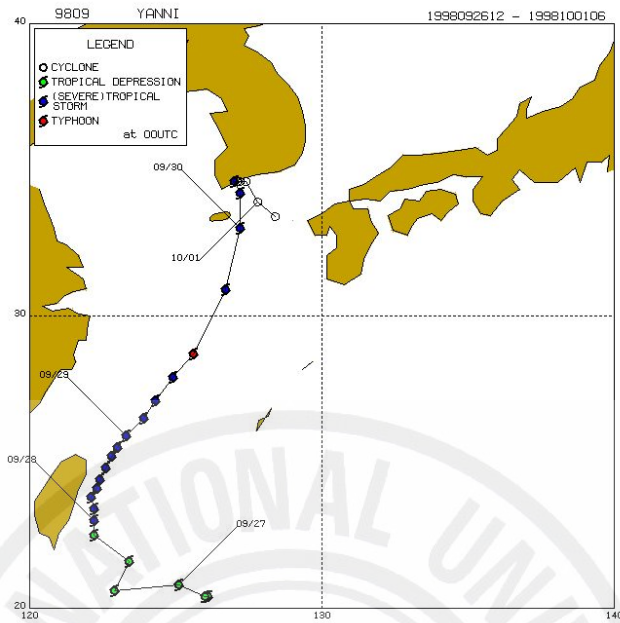


Fig. 29 Path of “YANNI”, the 9th typhoon of 1998(Typhoon, 2007)

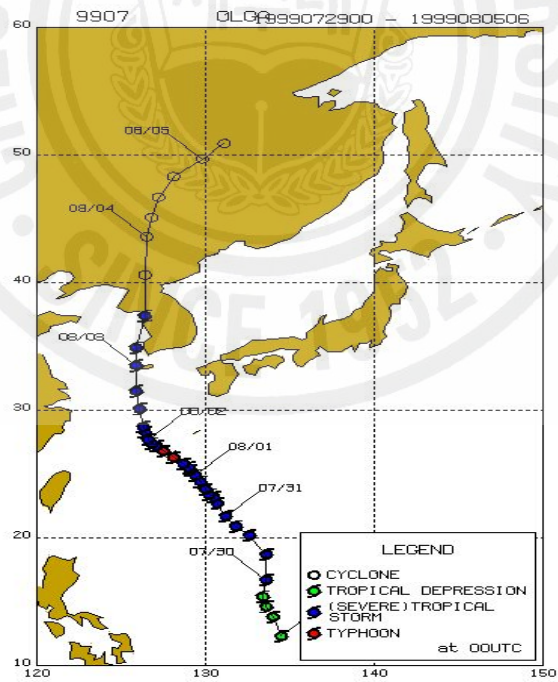


Fig. 30 Path of “OLGA”, the 7th typhoon of 1999(Typhoon, 2007)

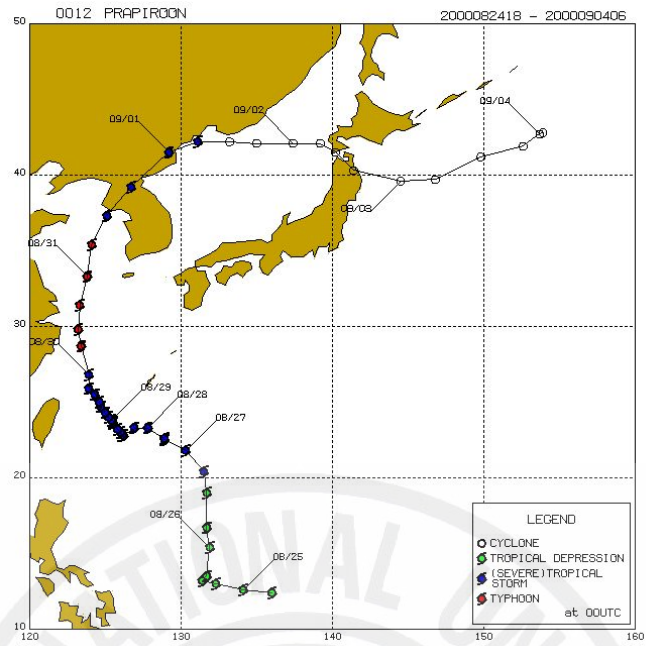


Fig. 31 Path of “PRAPIROON”, the 12th typhoon of 2000(Typhoon, 2007)

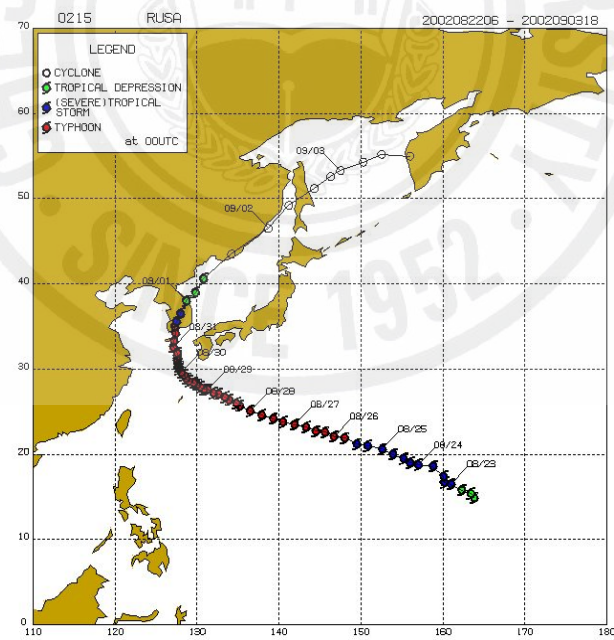


Fig. 32 Path of “RUSA”, the 15th typhoon of 2002(Typhoon, 2007)

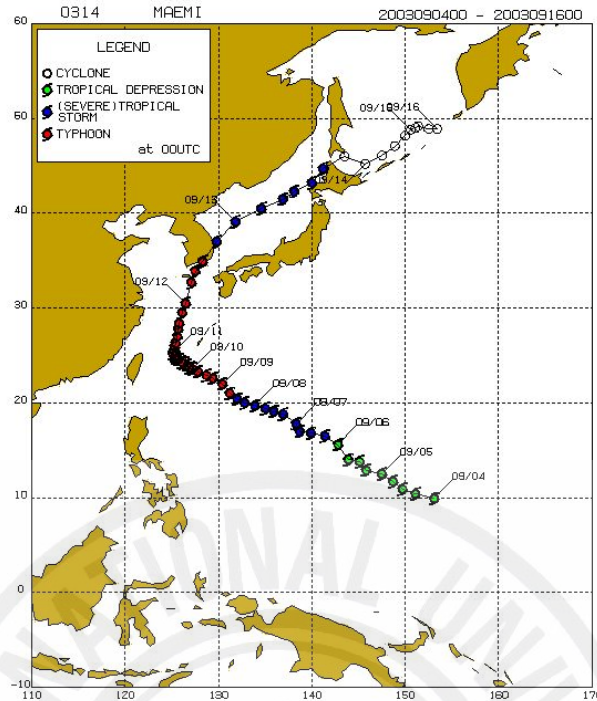
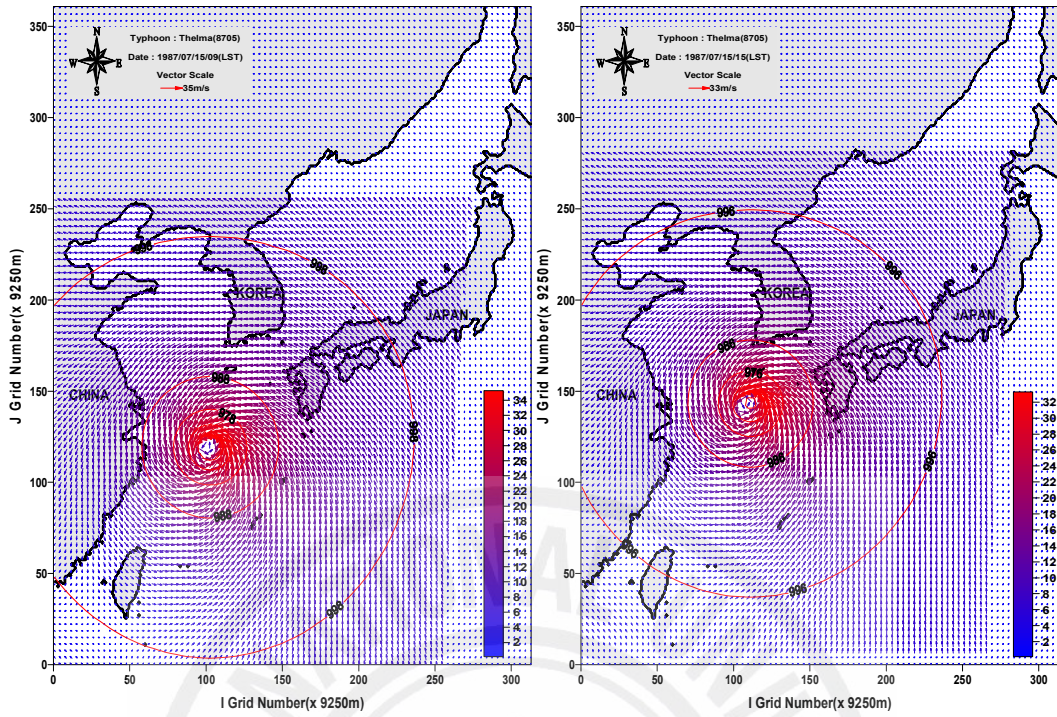


Fig. 33 Path of “MAEMI”, the 14th typhoon of 2003(Typhoon, 2007)

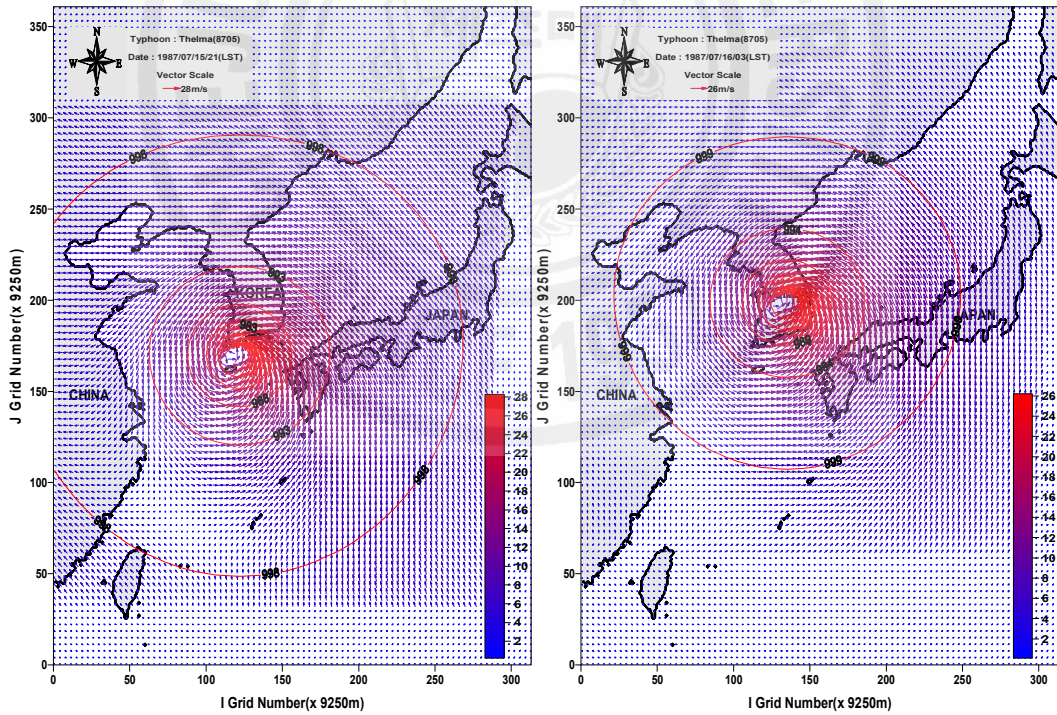
2. 태풍의 기압장과 바람장

Fig. 34~41은 8개 태풍에 대해 태풍해상풍 모형을 이용하여 태풍 진행시간에 따라 모든 격자점에서 구한 기압장과 바람장이다. 등치선은 해면기압을 화살표의 크기와 방향은 바람벡터를 나타낸다. Fig. 34~41에서 보는 바와 같이 태풍모델 기압장을 동심원으로 가정하기 때문에 바람장도 동심원의 형태를 나타내고 있으며 태풍중심에서 멀리 떨어진 태풍 영향권 밖의 지점에서는 바람의 크기가 작게 나타난다. 이는 태풍 파라메타모델은 태풍영향권 내의 바람장만을 정확히 산출하기 위한 것이며 폭풍해일 또한 태풍영향권 내에서 발생하기 때문이다. 제시된 결과는 광역 격자를 사용하여 6시간간격으로 나타내었고, 실제 폭풍해일 모형에 사용된 기압장과 바람장은 광역, 중역, 상세역에 대해 각각 1시간마다 계산된 값이다.



(a) 1987년 7월 15일 09시

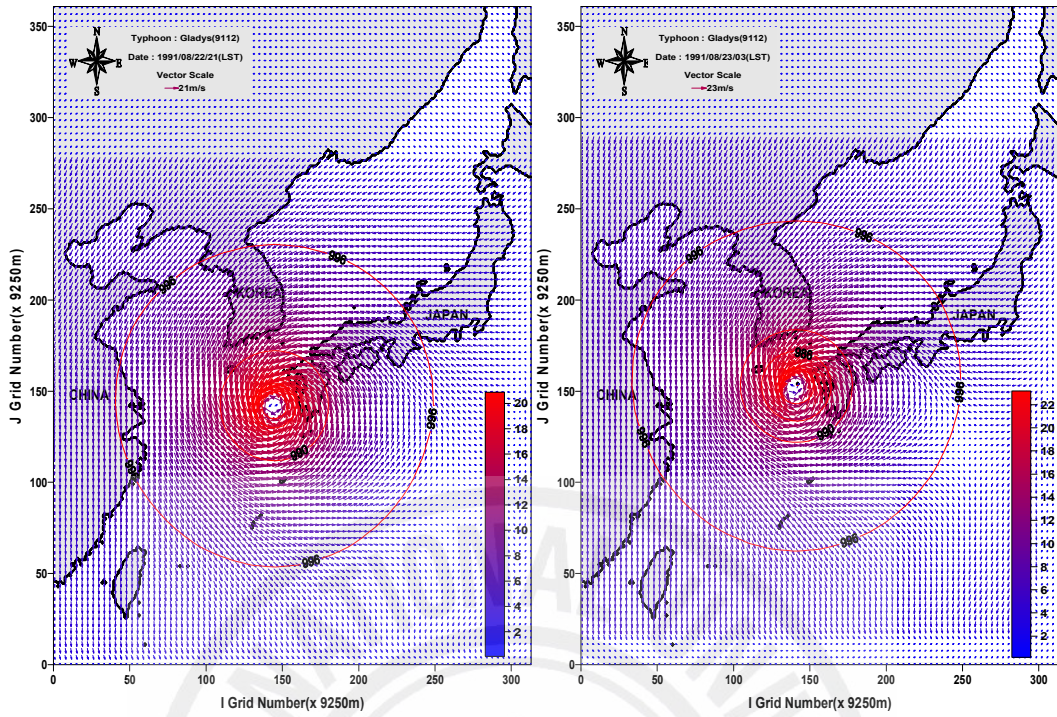
(b) 1987년 7월 15일 15시



(c) 1987년 7월 15일 21시

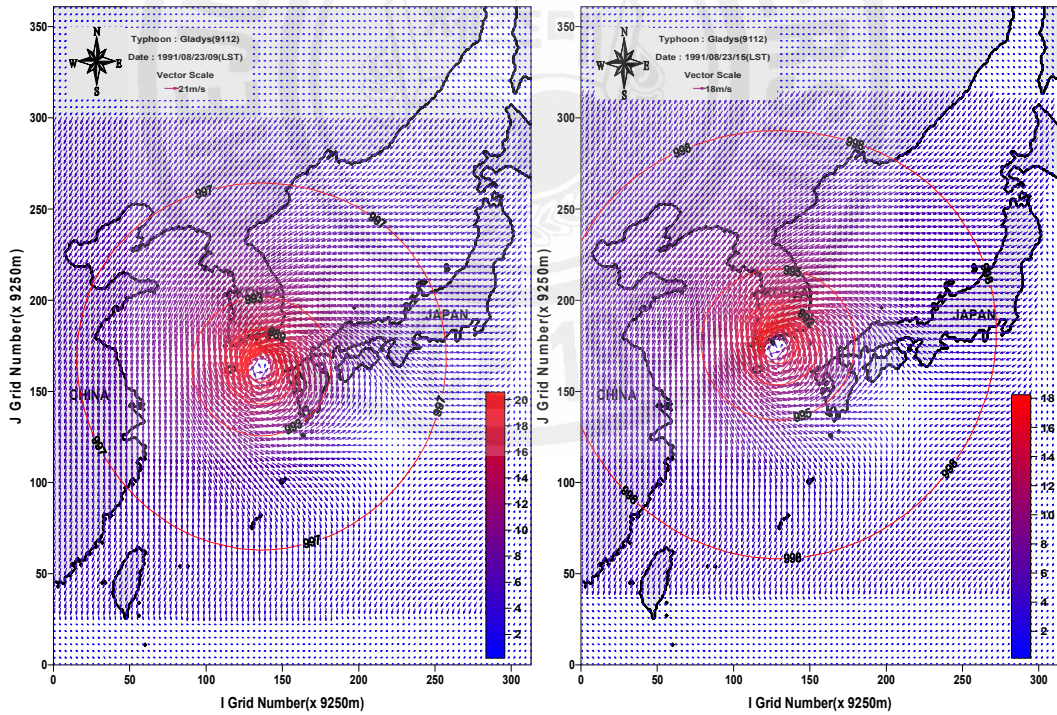
(d) 1987년 7월 16일 03시

Fig. 34 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "THELMA"



(a) 1991년 8월 22일 21시

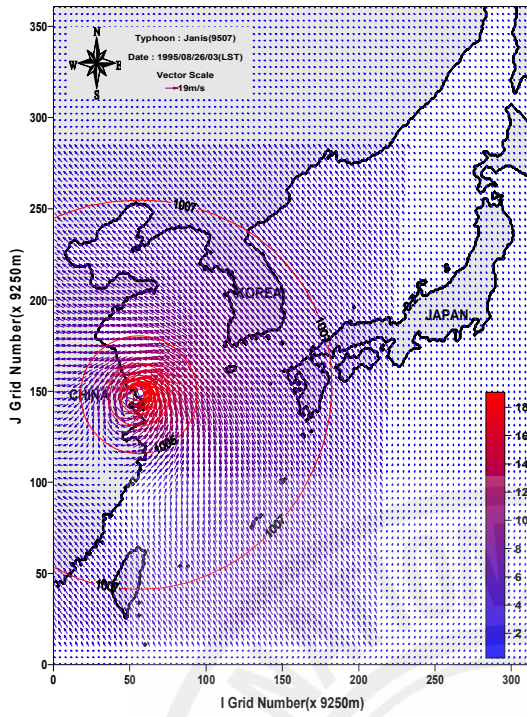
(b) 1991년 8월 23일 03시



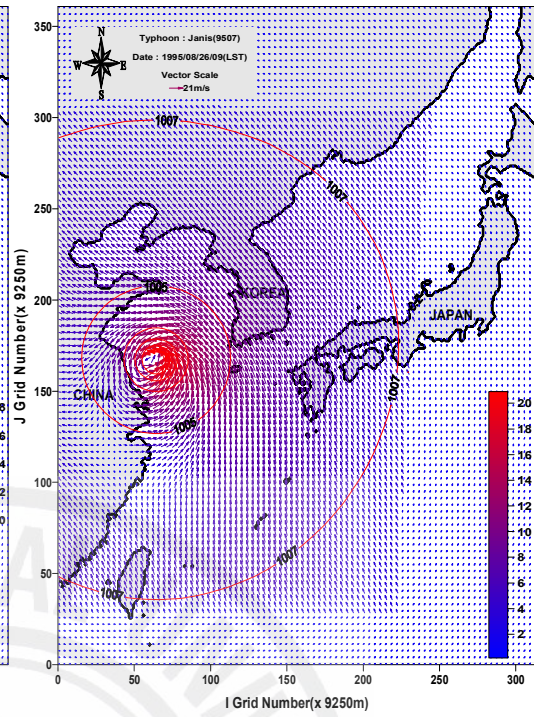
(c) 1991년 8월 23일 09시

(d) 1991년 8월 23일 15시

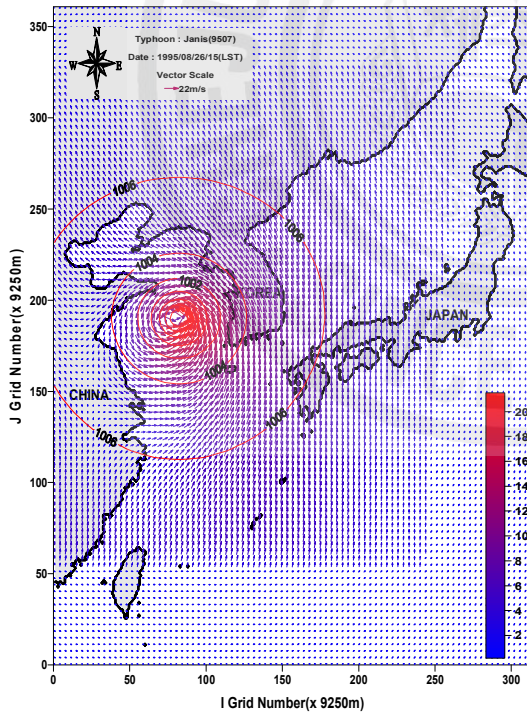
Fig. 35 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "GLADYS"



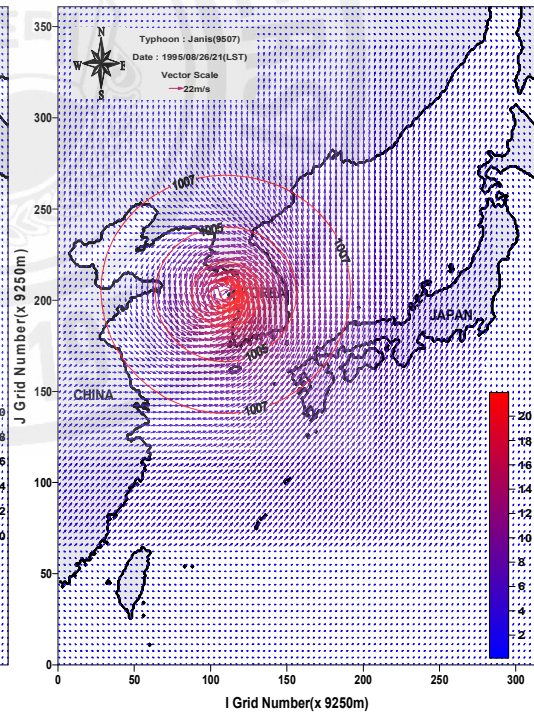
(a) 1995년 8월 26일 03시



(b) 1995년 8월 26일 09시

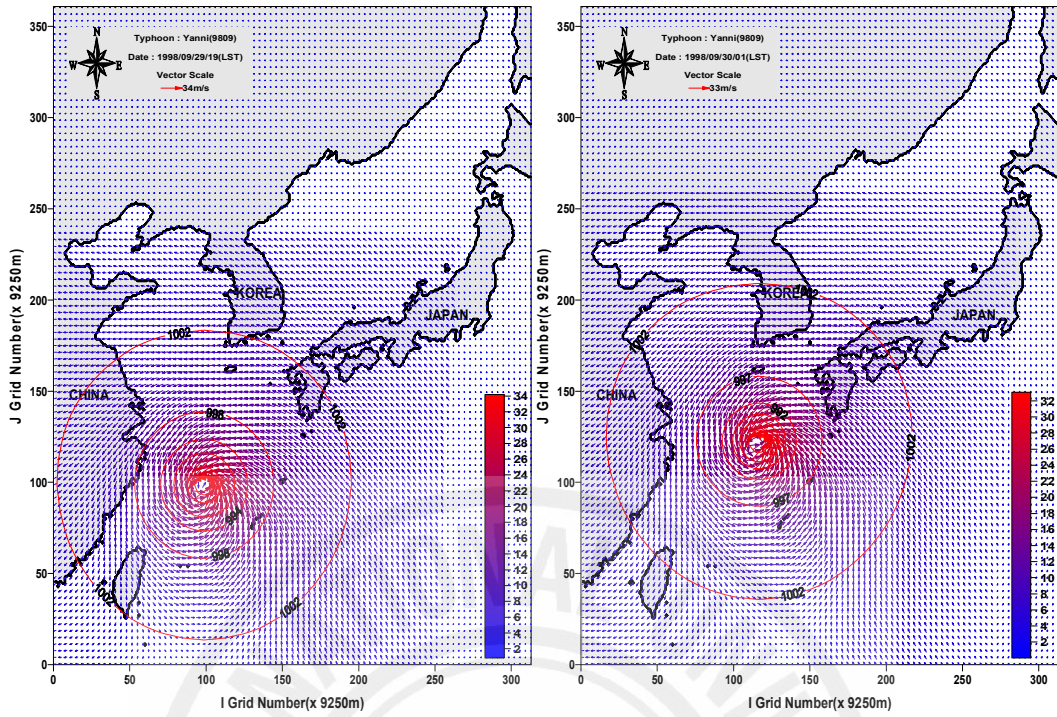


(c) 1995년 8월 26일 15시



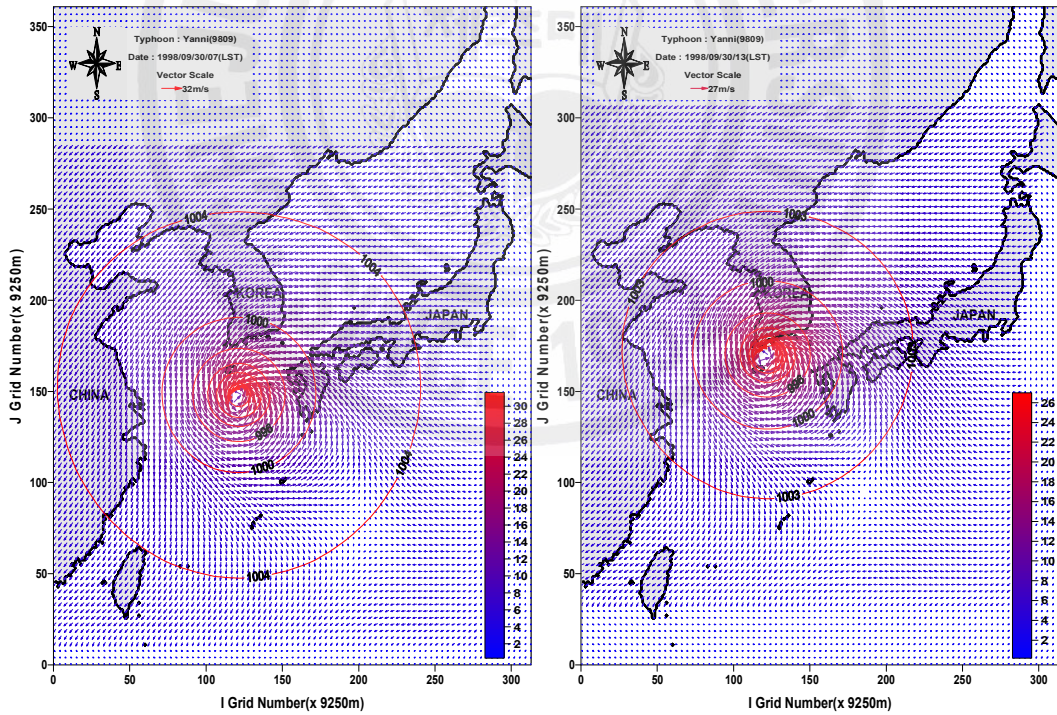
(d) 1995년 8월 26일 21시

Fig. 36 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "JANIS"



(a) 1998년 9월 29일 19시

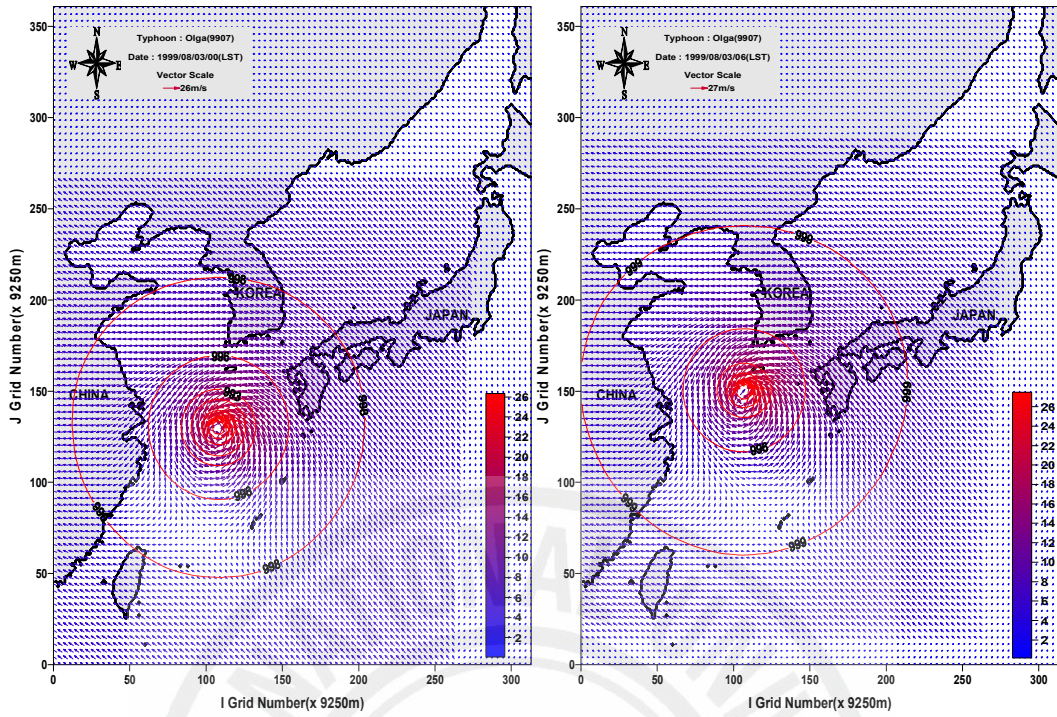
(b) 1998년 9월 30일 01시



(c) 1998년 9월 30일 07시

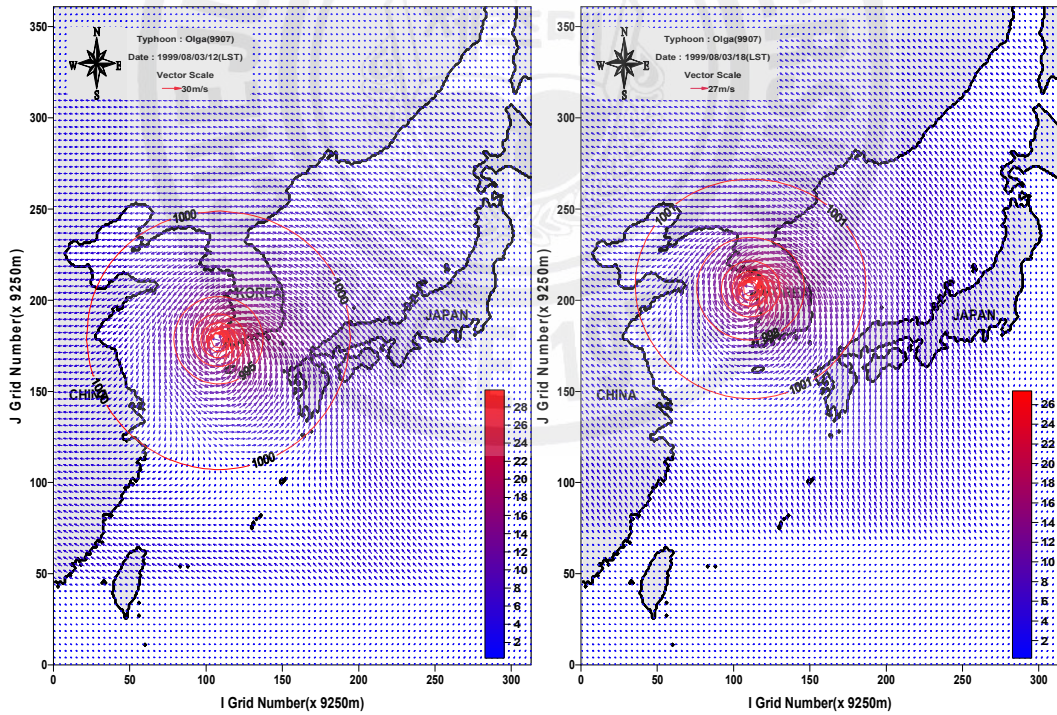
(d) 1998년 9월 30일 13시

Fig. 37 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, “YANNI”



(a) 1999년 8월 3일 00시

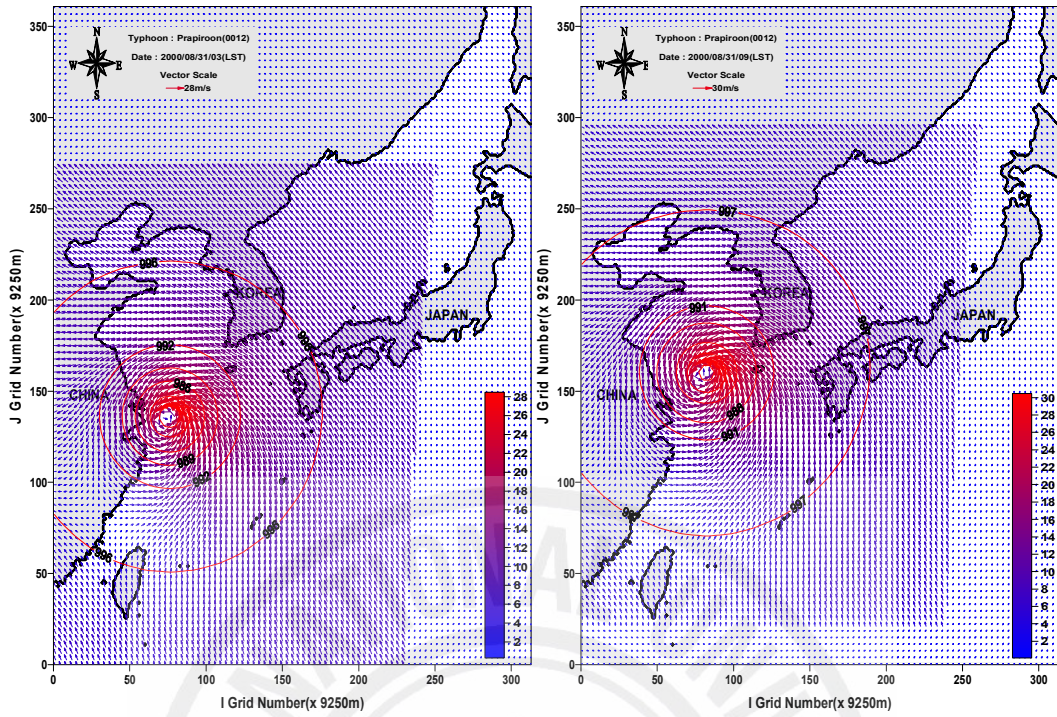
(b) 1999년 8월 3일 06시



(c) 1999년 8월 3일 12시

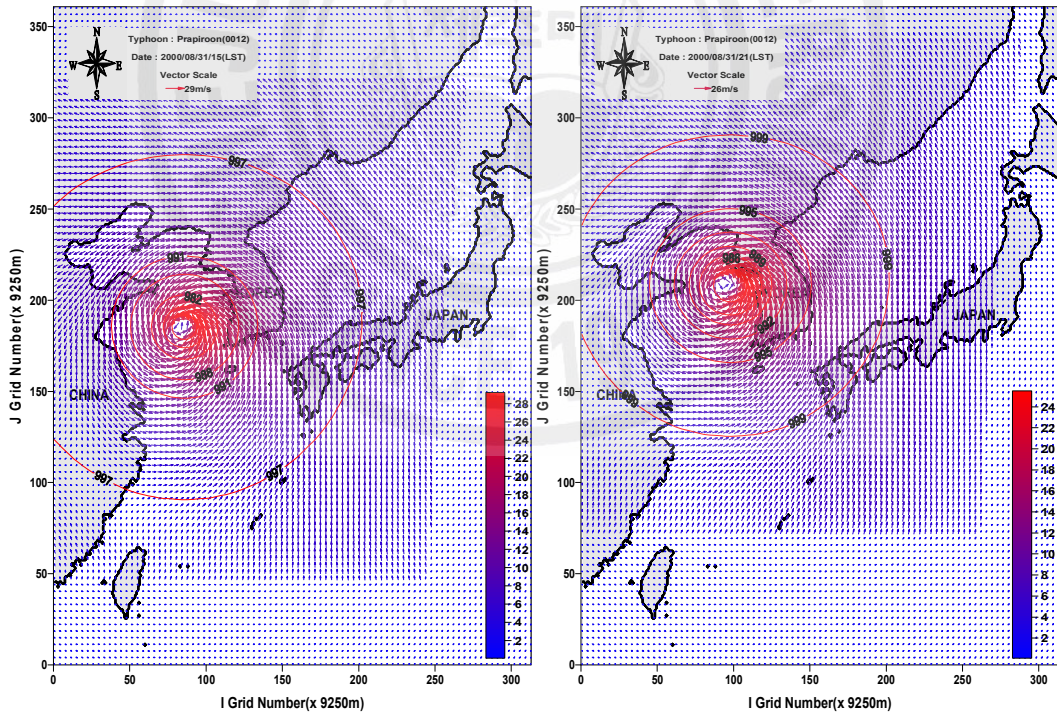
(d) 1999년 8월 3일 18시

Fig. 38 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "OLGA"



(a) 2000년 8월 31일 03시

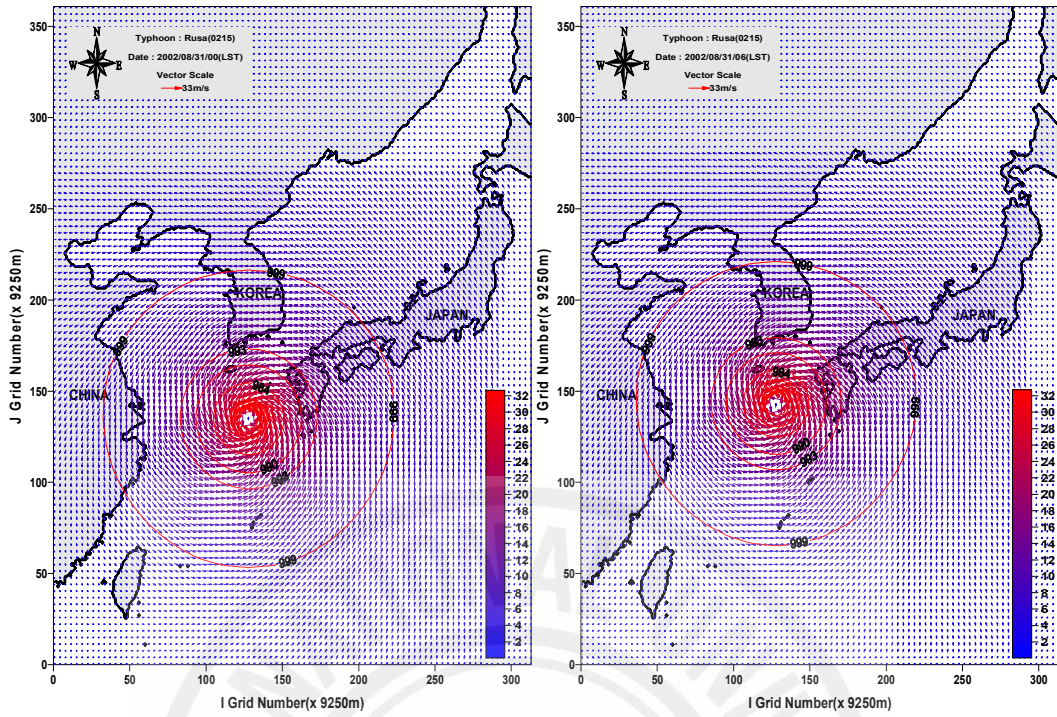
(b) 2000년 8월 31일 09시



(c) 2000년 8월 31일 15시

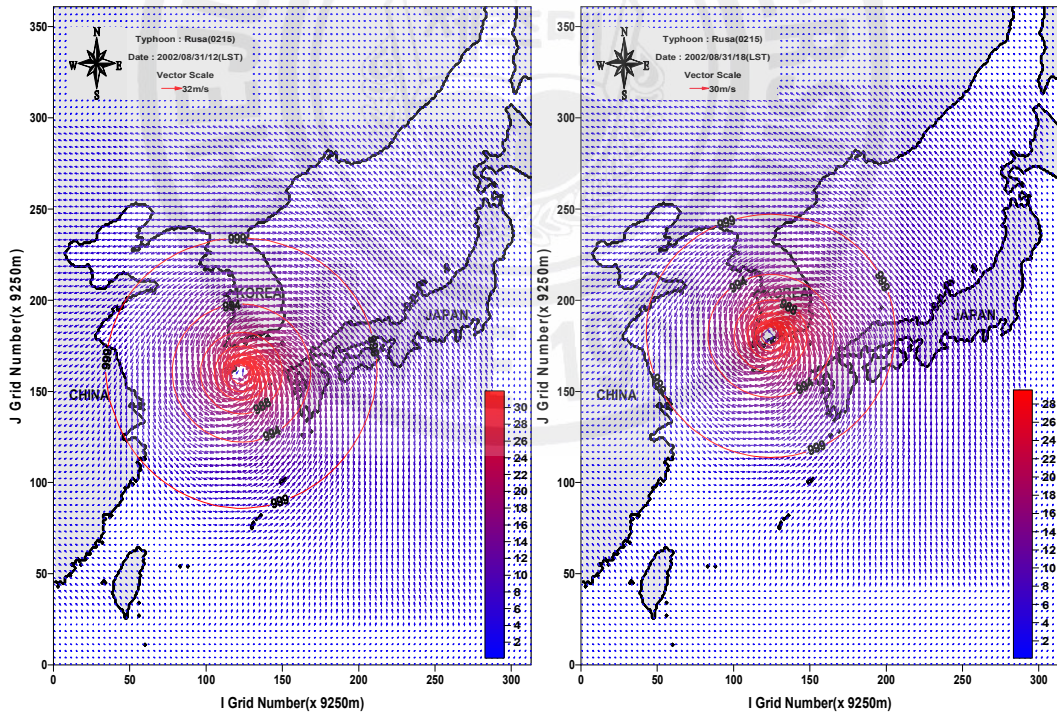
(d) 2000년 8월 31일 21시

Fig. 39 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "PRAPIROON"



(a) 2002년 8월 31일 00시

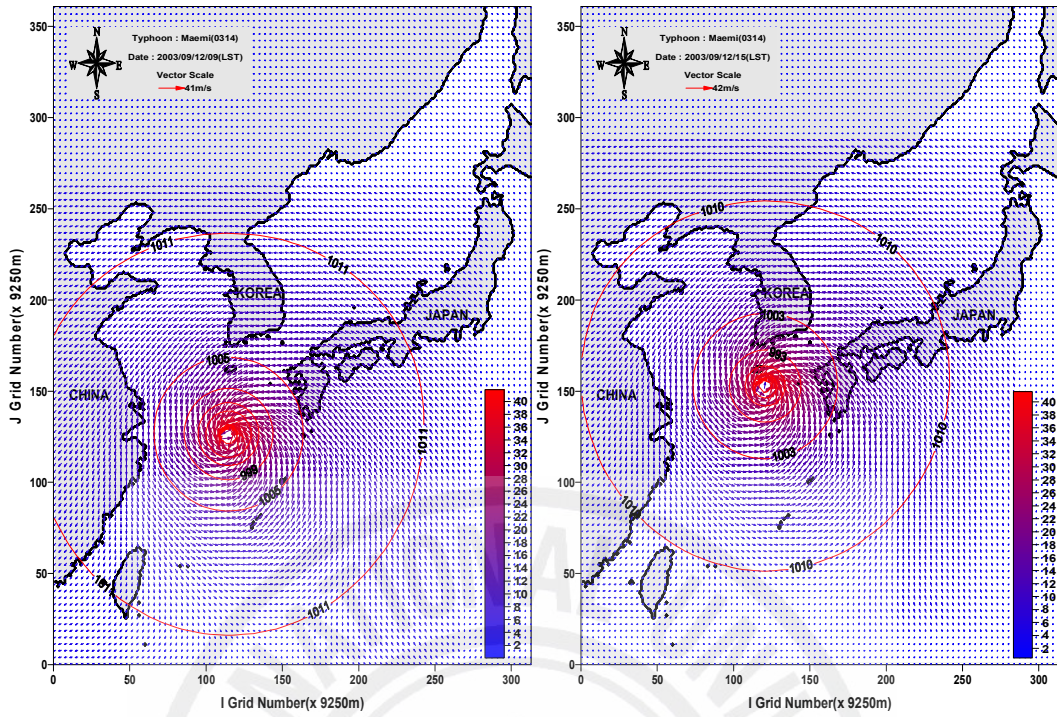
(b) 2002년 8월 31일 06시



(c) 2002년 8월 31일 12시

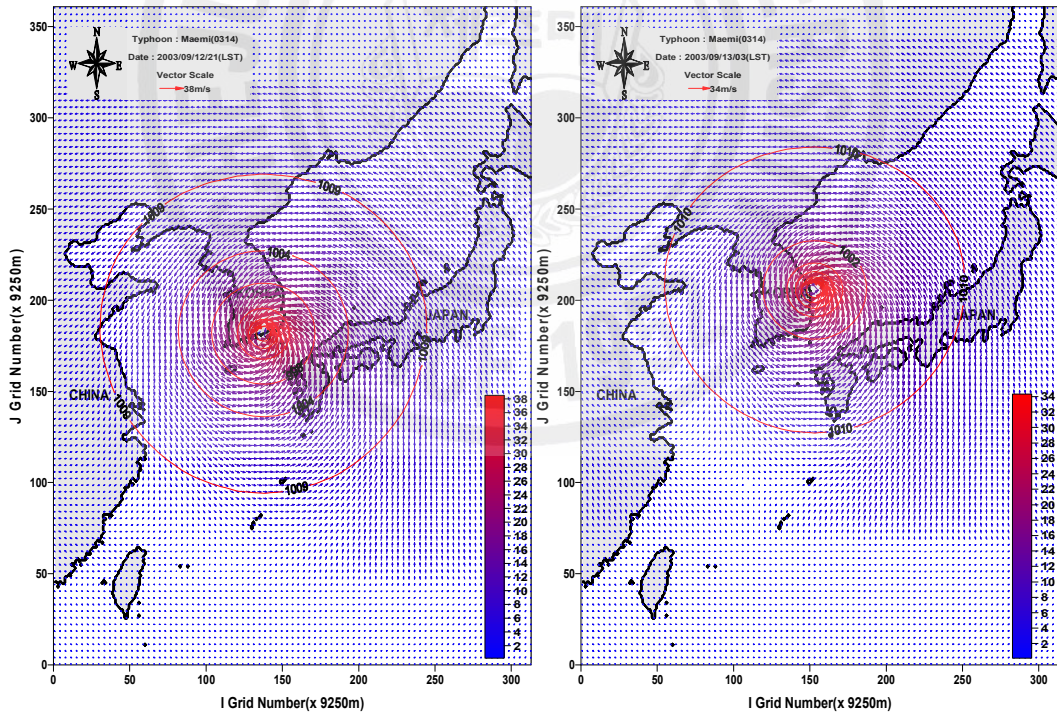
(d) 2002년 8월 31일 18시

Fig. 40 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "RUSA"



(a) 2003년 9월 12일 09시

(b) 2003년 9월 12일 15시



(c) 2003년 9월 12일 21시

(d) 2003년 9월 13일 03시

Fig. 41 Atmospheric pressure field and wind field(wide grid) during the passage of typhoon, "MAEMI"

3. 태풍 통과 시의 해일고 검토

본 연구에서는 8개 태풍에 대한 제주항과 서귀포항 주변해역의 폭풍해일고를 산출하기에 앞서 우선 태풍에 대한 폭풍해일모델의 신뢰도를 파악하기 위해 우리나라에 영향을 준 태풍 중 가장 강했던 태풍 “Maemi”를 대상으로 제주 및 서귀포 연안해역의 폭풍해일고를 수치모의 하였다.

폭풍해일고는 조석과 기상 외력(기압장, 바람장)을 동시에 고려한 결과에서 조석만을 고려한 결과를 빼서 구하였으며 제주항과 서귀포항의 상세한 해일고를 산출하기 위해 3단계 격자체계인 광역, 중간역, 상세역 격자를 구성하여 단계적으로 폭풍해일고를 계산하였고 태풍 해상풍 모델에서 얻어진 광역격자의 바람장, 기압장 자료는 폭풍수치모형의 입력자료로 이용하였으며 광역에서 얻어진 바람장, 기압장 자료는 보간법을 이용하여 중간역, 상세역의 바람장, 기압장을 산출하여 입력 자료로 이용하였다.

태풍의 중심 위치와 중심기압 등은 기본적으로 6시간 간격 혹은 3시간 간격으로 보고되고 있으나 본 연구에서는 1시간 간격으로 폭풍해일모델에 내삽하여 1시간 간격의 기압장과 바람장을 광역, 중간역, 상세역의 입력조건으로 이용하였다. 폭풍해일모델에 사용된 3단계의 격자체계는 광역 격자의 개방경계에 4개 분조를 합성한 조위와 함께 광역 격자에 대해 기상외력을 부여하여 광역 격자에 대한 해수위를 계산한 후, 광역 모형의 해수위를 시간과 공간적으로 내삽하여 중간역 모형의 개방 경계 해수위로 지정하고 중간역에 대한 기상 외력을 부여하여 중간역에 대한 해수위를 구하였다. 이 경우 중간역의 개방 경계에 대한 해수위는 조위뿐만 아니라 기상 외력에 대한 영향도 포함된 값이다. 이러한 과정은 상세역의 해수위 계산에 동일하게 적용하였다. 개방 경계에 조위만을 부여한 수치 실험을 병행하여, 최종적으로 조석과 기상 외력을 동시에 고려한 결과에서 조석만을 고려한 결과를 빼서 폭풍해일고를 계산하였다.

모델의 검증을 위해 제주 및 서귀포검조소의 관측 해일고와 상세역 격자를 사용하여 얻은 폭풍 해일고와 비교하였다.(Fig. 42) 본 연구에서의 관측해일고는 국립해양조사원의 10분 간격의 실측조위자료와 FOREMAN의 프로그램을 이용하여 구한 예측조위를 이용하여 실측해일고(관측조위-예측조위)값을 사용하였다.

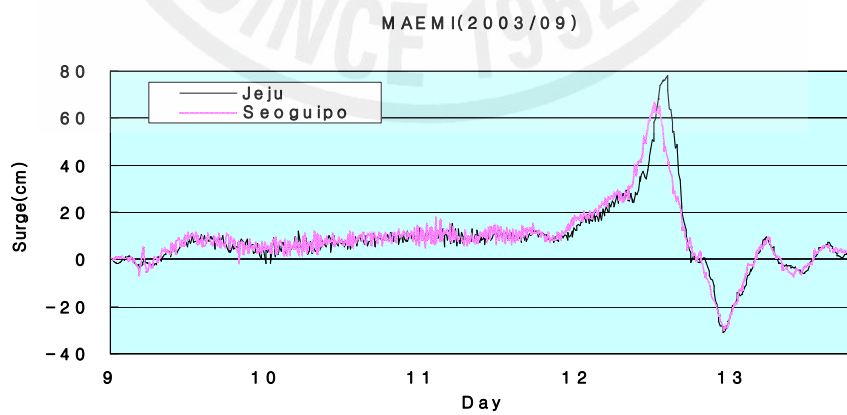
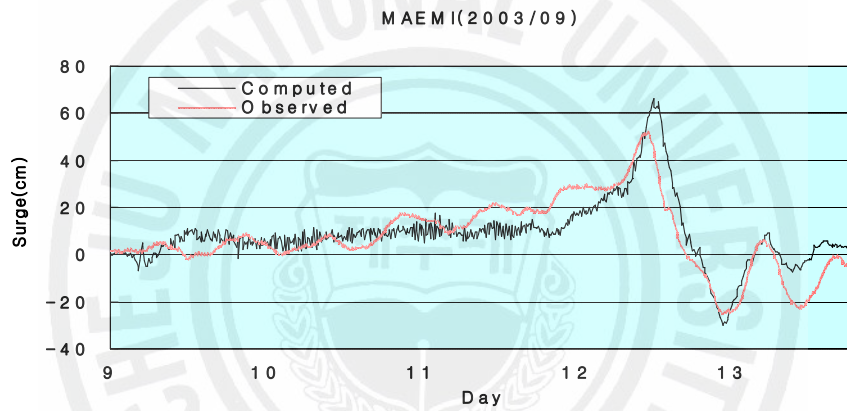
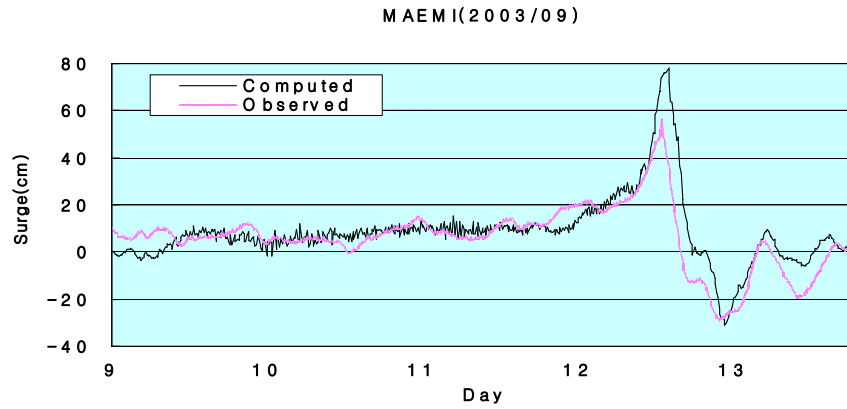
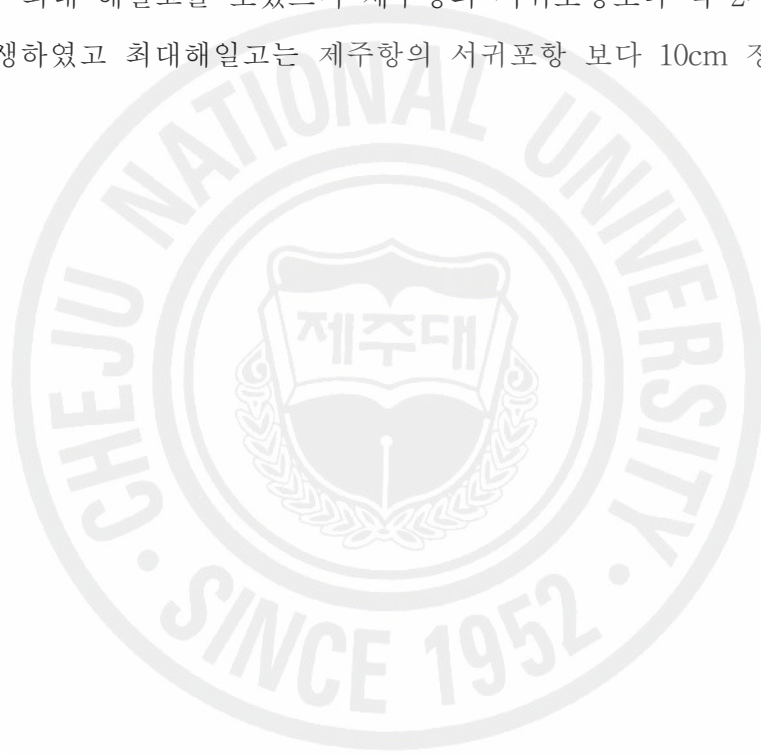


Fig. 42 Comparison of the height of Jeju Port and Seogwipo Port by the typhoon, "MAEMI"(Grid of the detailed area)

실제 검조소의 기록은 향이나 만내의 부진동효과를 포함하고 있지만 약 250m에 달하는 격자를 사용한 계산에서는 이 같은 향만의 지형적인 효과를 재현할 수는 없다. 따라서 큰 격자를 이용한 계산으로 인한 오차는 있을 수 있으나 본 수치모의의 결과는 관측치와 비교적 잘 일치하고 있다.

상세역에 대한 최대 해일고를 살펴보면, 제주항이 77.89cm로 관측값에 비해 약 20cm 크게 계산되었으며 서귀포항은 67.19cm로 관측값 보다 약 15cm 크게 계산되었다. 제주항과 서귀포항의 해일의 시간변화를 비교해 보면 태풍의 통과 할 당시에 각각 최대 해일고를 보였으며 제주항의 서귀포항보다 약 2시간 정도 늦게 해일이 발생하였고 최대해일고는 제주항의 서귀포항 보다 10cm 정도 크게 나타났다.



4. 주요 태풍에 대한 해일고 산정

본 연구에서는 제주항과 서귀포항 주변해역의 폭풍해일고를 산출하기 위해 1987년부터 2003년까지의 16년간 우리나라에 영향을 미친 태풍 중 8개를 선정 (Maemi, Rusa, Prapiroon, Olga, Yanni, Janis, Gladys, Thelma)하여 폭풍해일고를 산출하였다. 태풍 Maemi에 대해 수치모의한 결과를 검토한 결과 계산된 해일고가 관측된 해일고보다 약간 크게 나왔지만 대체적으로 잘 재현되었음을 알 수 있었다. 따라서 제주항 및 서귀포항의 폭풍해일고를 계산하기 위해 광역, 중간역, 상세역에 대해 8개 태풍에 대한 수치실험을 수행하였으며, 태풍 Maemi에 의한 폭풍해일고 재현에 사용된 모델 매개 변수를 다른 태풍들에 대해서도 동일한 조건을 주어 수치모의 하였다. 비교된 해일고(관측조위-예측조위)의 관측치는 국립해양조사원의 실측 조위관측 자료를 사용하였다. 예측조위는 조화분석 프로그램인 FOREMAN의 프로그램(Foreman & Henry, 1984)을 이용하여 1년 조위자료를 조화분해하여 69개의 조화상수를 산정하고 산정되어진 조화상수를 이용하여 다시 해당연도를 예측하였다.

수치모의 한 결과를 보면, 대상해역의 수심과 태풍의 통과 시간대 및 조시 등에 따라 다르게 나타났으며 태풍의 이동경로에 따라 해일의 시간변화는 약간의 차이가 있었다. 수치모의 한 8개 태풍 중 제주도 연안해역에는 태풍 Maemi가 가장 높은 폭풍해일고를 나타냈으며 Janis가 가장 낮은 폭풍해일고를 나타냈다. 해일고를 산정한 결과(Table 14)와 같이 수치 모의한 8개 태풍 중 최대 폭풍해일고를 보인 태풍 Maemi는 제주항과 서귀포항의 각각 77.89cm, 66.47cm로 관측값 55.8cm, 51.6cm에 비해 약 20cm, 15cm 정도 크게 나타났으며 제주항이 서귀포항에 비해 높은 해일고를 나타냈다. 남해안에 높은 폭풍해일고를 발생시킨 태풍 Maemi가 제주도 연안에는 비교적 낮은 해일고가 나타난 것은 태풍의 위치 및 지형의 특성도 있지만 태풍 Maemi가 제주도 연안을 통과할 당시 저조에 해당되어 비교적 낮은 폭풍해일고가 나타난 것으로 사료된다. 두 번째 높은 해일고를 보인 태풍 Thelma는 제주항과 서귀포항 모두 관측값의 해일 발생시각과 매우 잘 일치하였으며 계산된 폭풍해일고 값은 62.9cm, 62.51로 관측값에 비해 12cm, 8cm 정도 크게 나타났다. 태풍 Rusa는 8개 수치모의 한 태풍 중 관측된 폭풍해

일고 중에 최고인 89.6cm의 조위편차를 보였다. 계산된 폭풍해일고 값은 제주항이 59.5cm, 서귀포항이 59.3cm로 거의 같은 폭풍해일고 값을 나타냈다. 관측값에 비해 30cm 정도의 차이를 보이고 있지만 태풍 Rusa가 제주연안을 통과 시 해일의 시간변화를 보면 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 14. Comparison of the observed heights of storm surges and the calculated of Jeju Port and Seogwipo Port

태풍이름	대상해역	관측해일고(cm)	각 지점의 계산 해일고(cm)			
			S1	S2	S3	S4
THELMA (8705)	제주항	50.3	62.7	62.9	62.4	62.8
	서귀포항	54.4	62.38	62.51	61.7	61.92
GLADYS (9112)	제주항	35.6	24.15	23.93	24.01	23.62
	서귀포항	39.8	22.64	22.94	22.4	22.67
JANIS (9507)	제주항	11	6.44	6.43	6.43	6.23
	서귀포항	9.9	5.39	5.35	5.38	5.39
YANNI (9809)	제주항	30.2	45.38	45.16	45.21	45.09
	서귀포항	32	38.22	38.51	38.1	38.48
OLGA (9907)	제주항	32.3	25.3	25.7	25.3	25.7
	서귀포항	48.2	32.2	32.02	31.8	31.65
PRAPIROON (0012)	제주항	33.7	33.1	33.1	33.1	33.2
	서귀포항	28.4	30.36	30.47	30.23	30.32
RUSA (0215)	제주항	82.9	59.5	59.1	59.1	58.9
	서귀포항	89.6	59	59.2	59.1	59.3
MAEMI (0314)	제주항	55.8	77.89	76.97	77.85	77.68
	서귀포항	51.6	66.47	66.78	66.84	67.19

태풍 Yanni는 제주항이 45.38cm로 관측값에 비해 15cm 정도 크게 나왔으며 서귀포항이 38.51cm로 관측값 32cm에 비해 6cm 정도 크게 나타났다. 태풍 Gladys는 제주항, 서귀포항의 해일 발생 시각은 관측된 해일고에 비해 약간 늦게 나타났지만 계산된 폭풍해일고 값은 각각 24.15cm, 22.94cm로 관측값 35.6cm, 39.8cm에 비해 약 10~17cm 낮게 나타났다. 제주도 서쪽을 통과한 태풍 Janis, Olga, Prapiroon는 제주도 동쪽을 통과한 태풍들에 비해 다소 낮은 폭풍해일고를

보였으며 계산된 폭풍해일고 값은 제주항이 6.44, 25.7cm, 33.2cm로 나타났고 서귀포항이 5.39cm, 32.2cm, 30.47cm로 각각 나타났다. 태풍 Janis, Olga는 관측값에 비해 5~10cm이하의 차이를 보였고 계산된 폭풍해일고 값이 작게 나타났으며 태풍 Prapiroon은 제주항과 서귀포항의 계산된 폭풍해일고 값은 33.2cm, 30.47cm로 관측값 33.7cm, 28.4cm와 거의 일치했다. 태풍 Janis는 계산된 폭풍해일고 값과 관측된 값 모두 태풍의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

보통 태풍의 강도는 태풍의 진행경로상에 위치한 지형 및 수심, 수온의 영향이 많이 미치는데 제주 주변의 수괴는 크게 제주도 동쪽으로 대마난류와, 서쪽으로 냉수인 황해저층냉수로 구분할 수 있다. 서쪽에 형성되어 있는 황해저층냉수는 수심에 의해 수온차이가 심한지역으로 수치 모의한 태풍 중 제주도 서쪽을 통과한 Janis, Olga, Prapiroon가 이러한 영향으로 인해 태풍의 제주연안 및 우리나라에 접근하면서 강도가 떨어져 비교적 낮은 해일고를 보인 것으로 사료된다.

본 연구에서 8개 태풍에 대해 수치 모의한 결과 Fig. 43과 같이 태풍 Olga를 제외한 나머지 태풍들은 제주항에서 서귀포항 보다 5~10cm정도 높은 해일고를 나타냈으며 해일고는 제주항, 서귀포항 모두 1m를 넘지 않았다.

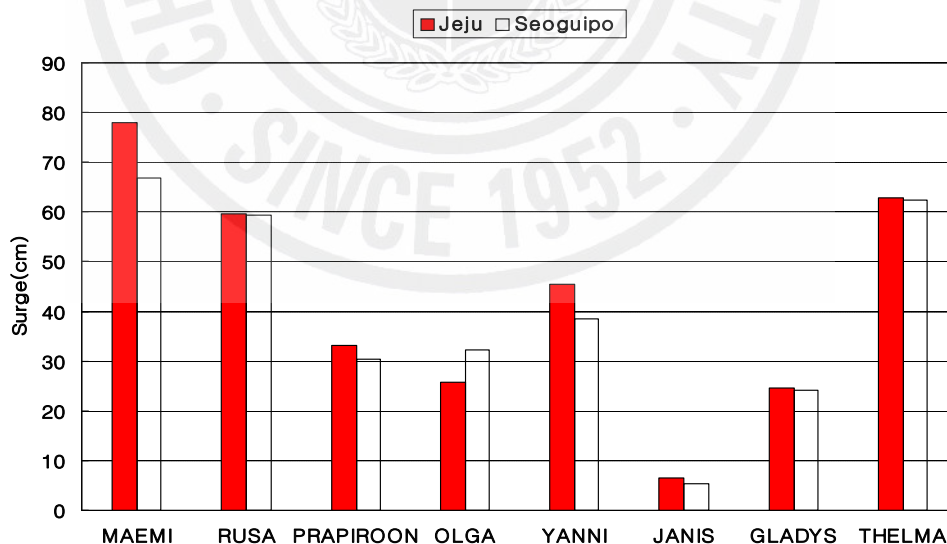
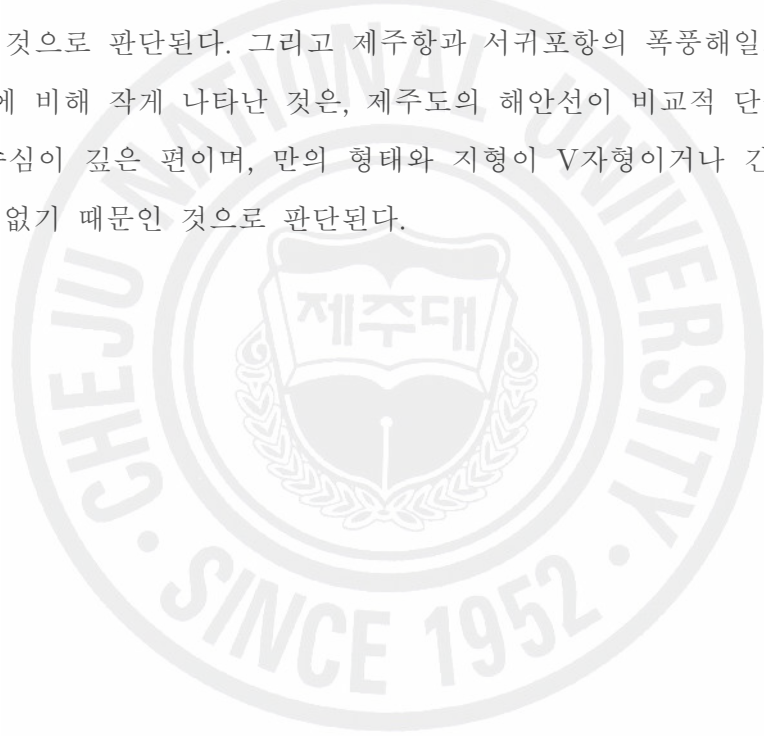


Fig. 43 Comparison of Max. height of storm surge of Jeju Port and Seogwipo Port

Fig. 44~49는 제주항과 서귀포항의 상세역에 대한 수치모의 결과와 관측된 폭풍해일고의 해일시간변화를 비교한 결과이다. 관측해일고와 계산된 폭풍해일고의 해일고 시간변화를 보면 수치모의 한 폭풍해일고가 대체적으로 관측된 해일고보다 약간 늦게 해일이 발생하였지만 전체적인 해일의 시간변화나 크기는 비교적 잘 재현된 것으로 나타났다. 보다 정확한 수치모의의 계산결과를 얻기 위해서는 보다 정밀한 격자를 이용한 계산의 결과가 필요하다고 사료된다.

이상의 결과로 인해 제주도의 주변해역의 지형 및 수심, 수괴 그리고 수치모의한 해일고 등을 고려해 볼 때 태풍으로 인한 제주도 연안해역은 지형적인 특성(만, 열도, 섬, 대륙사면의 폭과 경사 등) 보다는 태풍의 특성(바람 및 비)에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 그리고 제주항과 서귀포항의 폭풍해일고가 서해안이나 남해안에 비해 작게 나타난 것은, 제주도의 해안선이 비교적 단순하고 남해안에 비해 수심이 깊은 편이며, 만의 형태와 지형이 V자형이거나 긴 내만이 발달한 지형이 없기 때문인 것으로 판단된다.



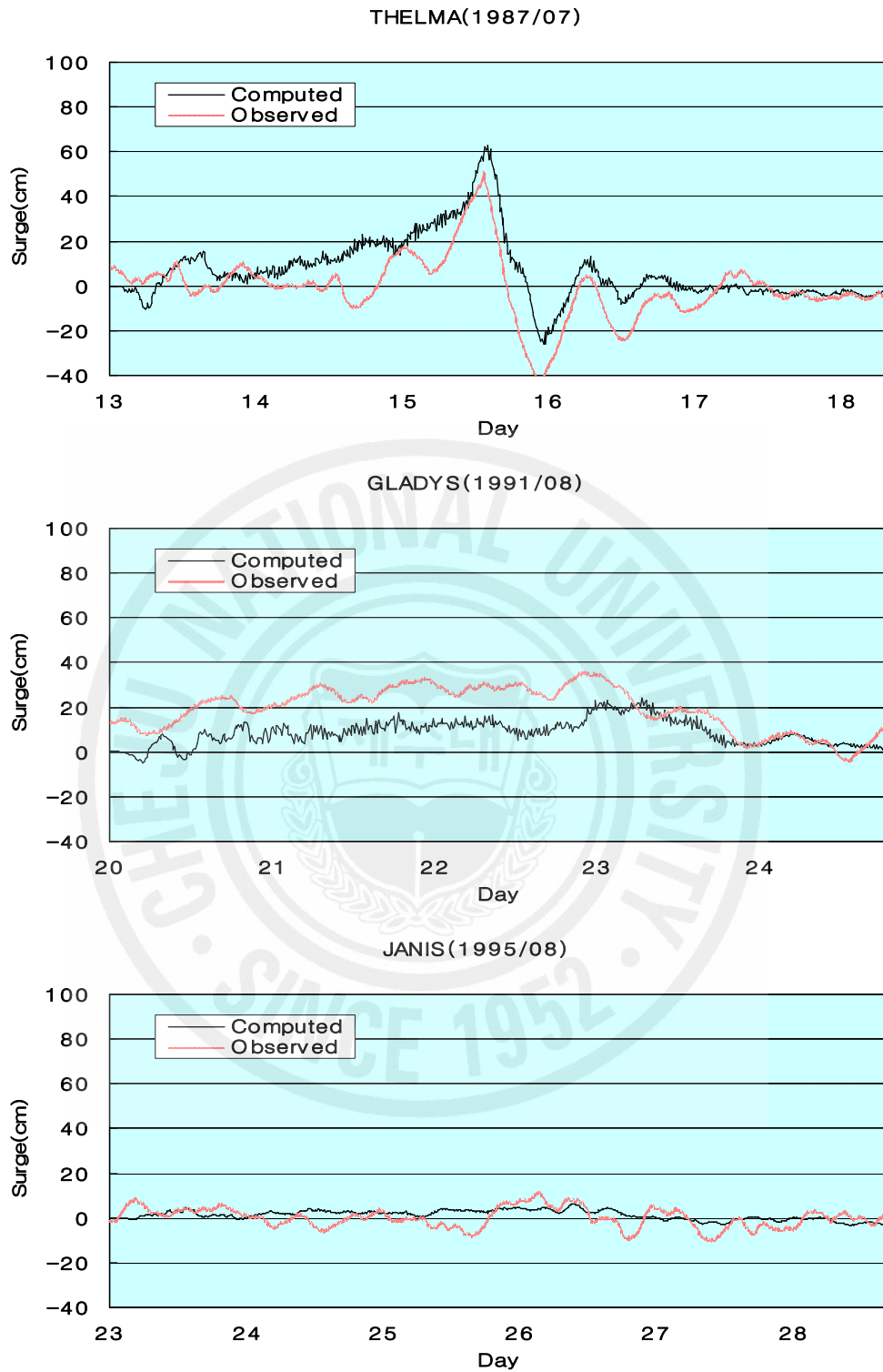


Fig. 44 Heights of storm surges of Jeju Port by the typhoon, “THELMA”, “GLADYS” and “JANIS”

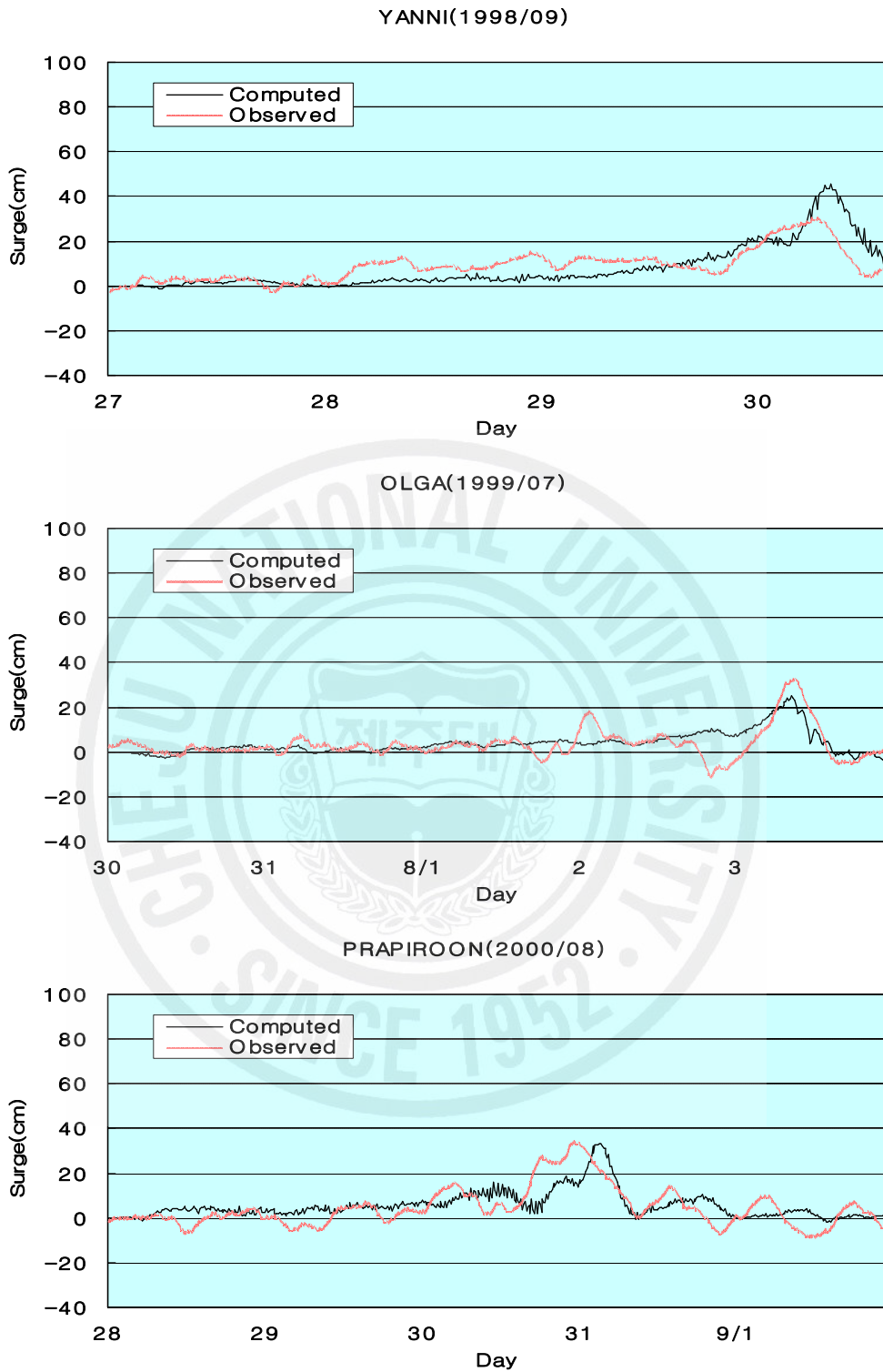


Fig. 45 Heights of storm surges of Jeju Port by the typhoon, “YANNI”, “OLGA” and “PRAPIROON”

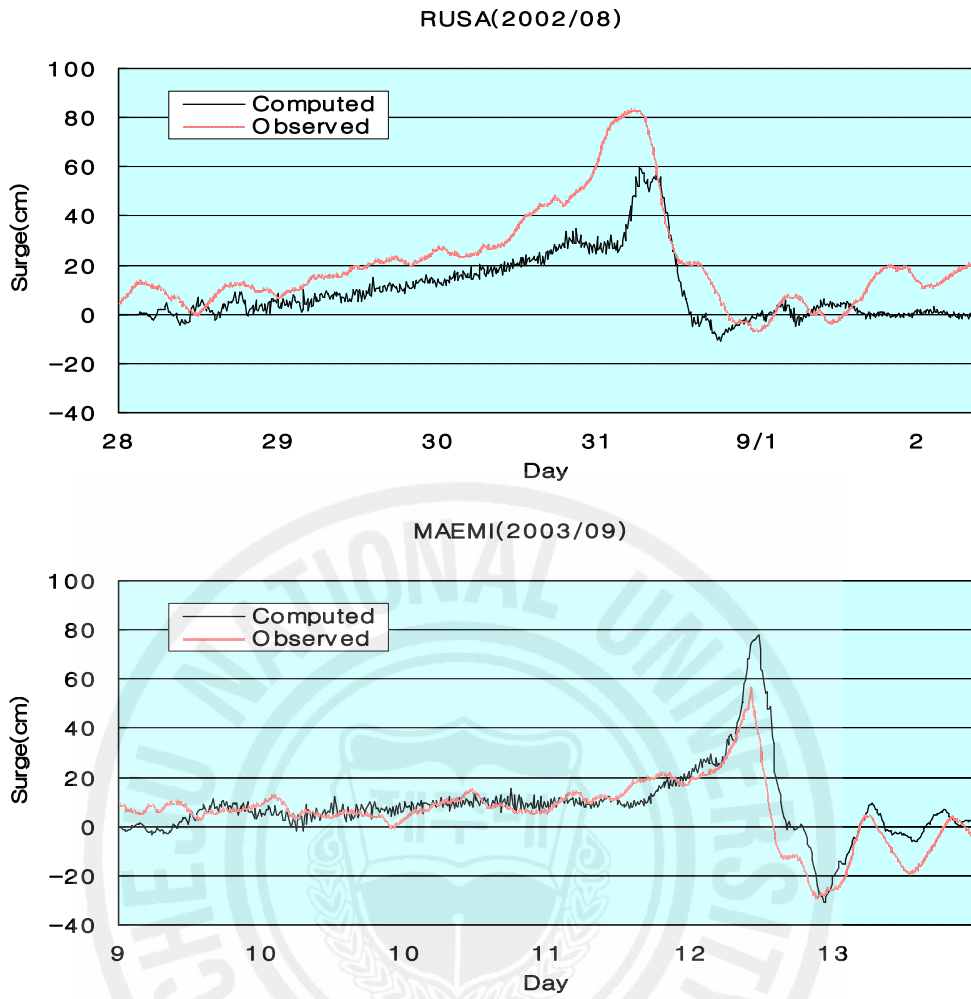


Fig. 46 Heights of storm surges of Jeju Port by the typhoon, "RUSA" and "MAEMI"

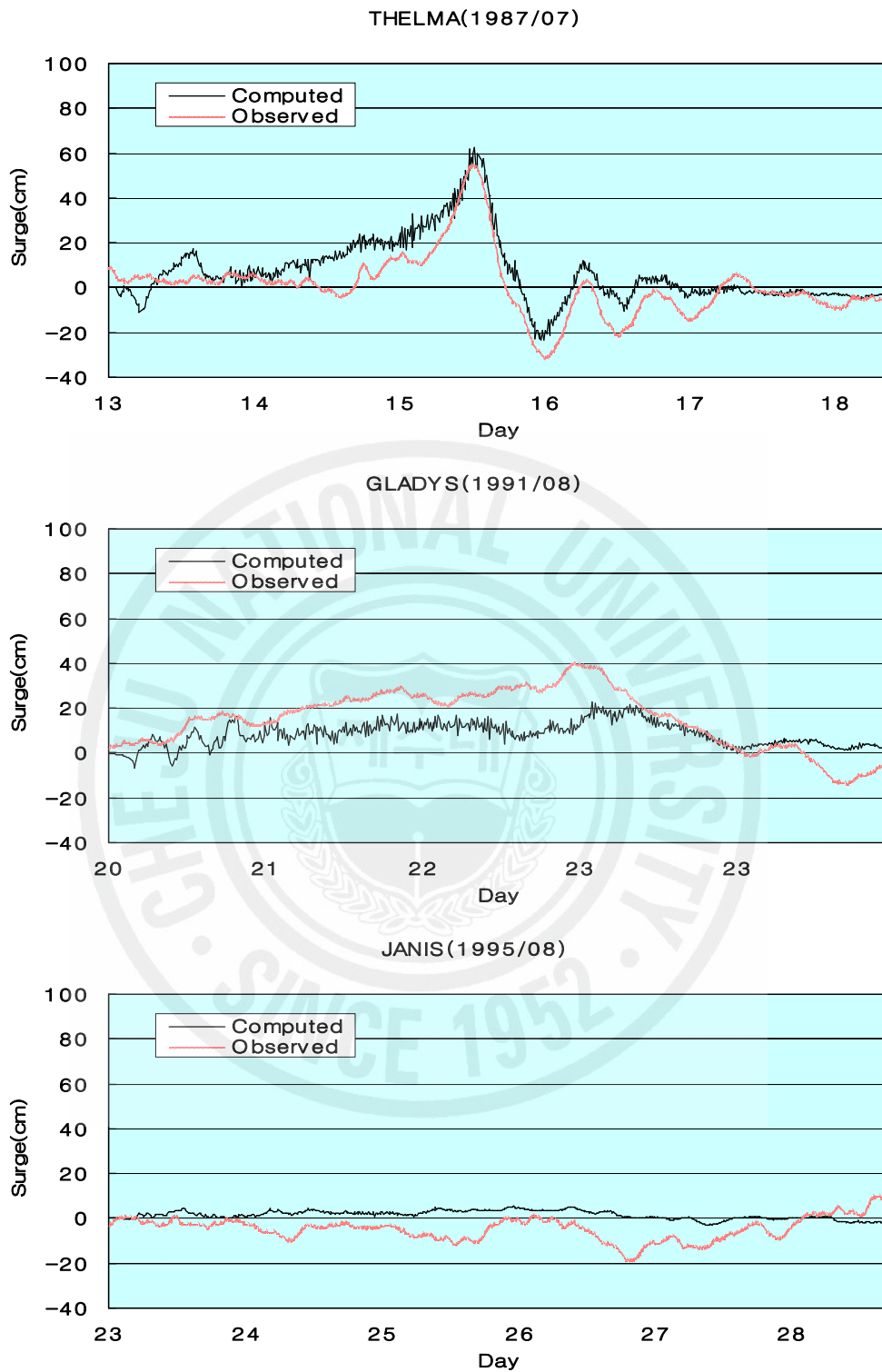


Fig. 47 Heights of storm surges of Seogwipo Port by the typhoon, “THELMA”, “GLADYS” and “JANIS”

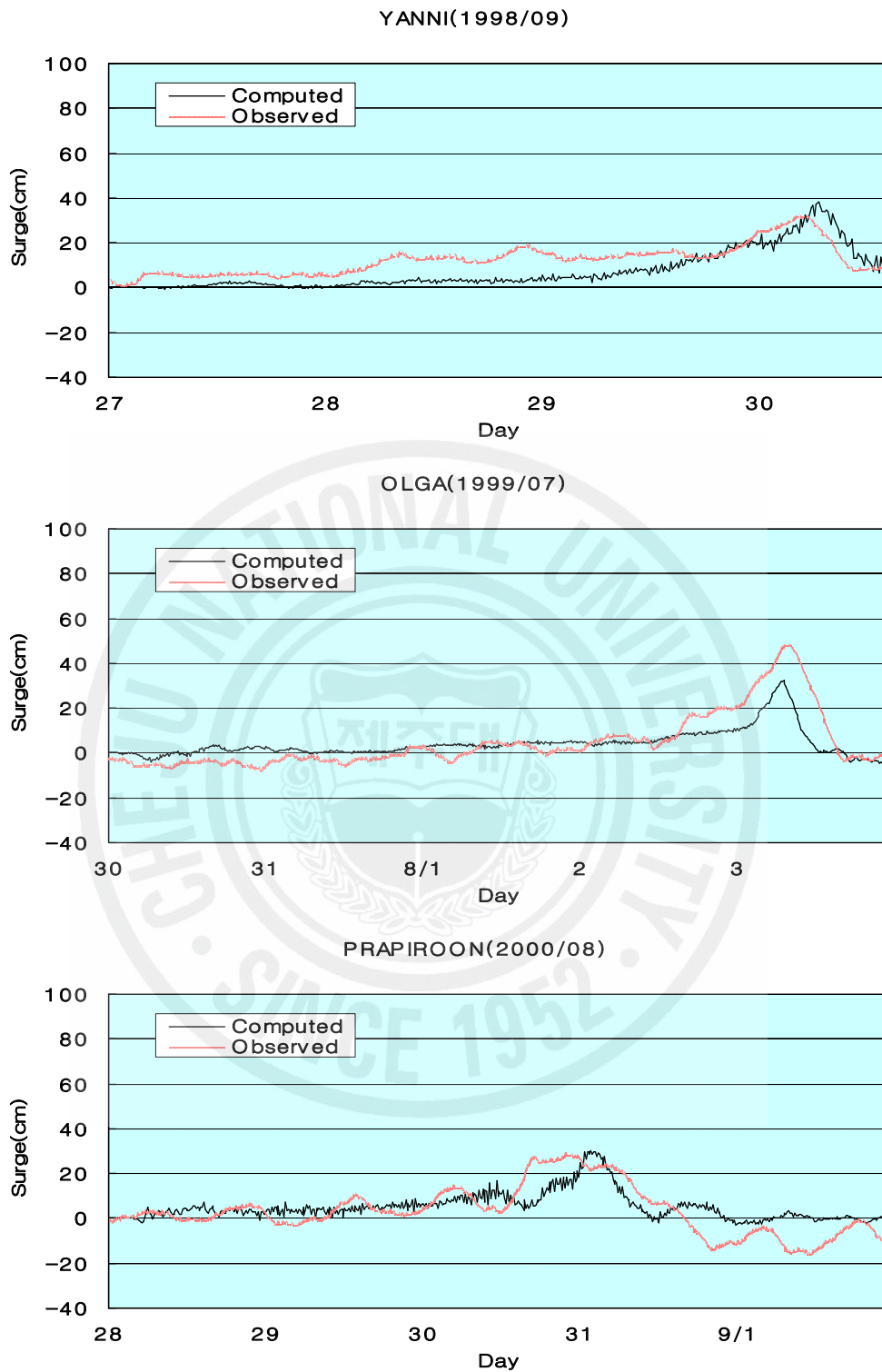


Fig. 48 Heights of storm surges of Seogwipo Port by the typhoon, “YANNI”, “OLGA” and “PRAPIROON”

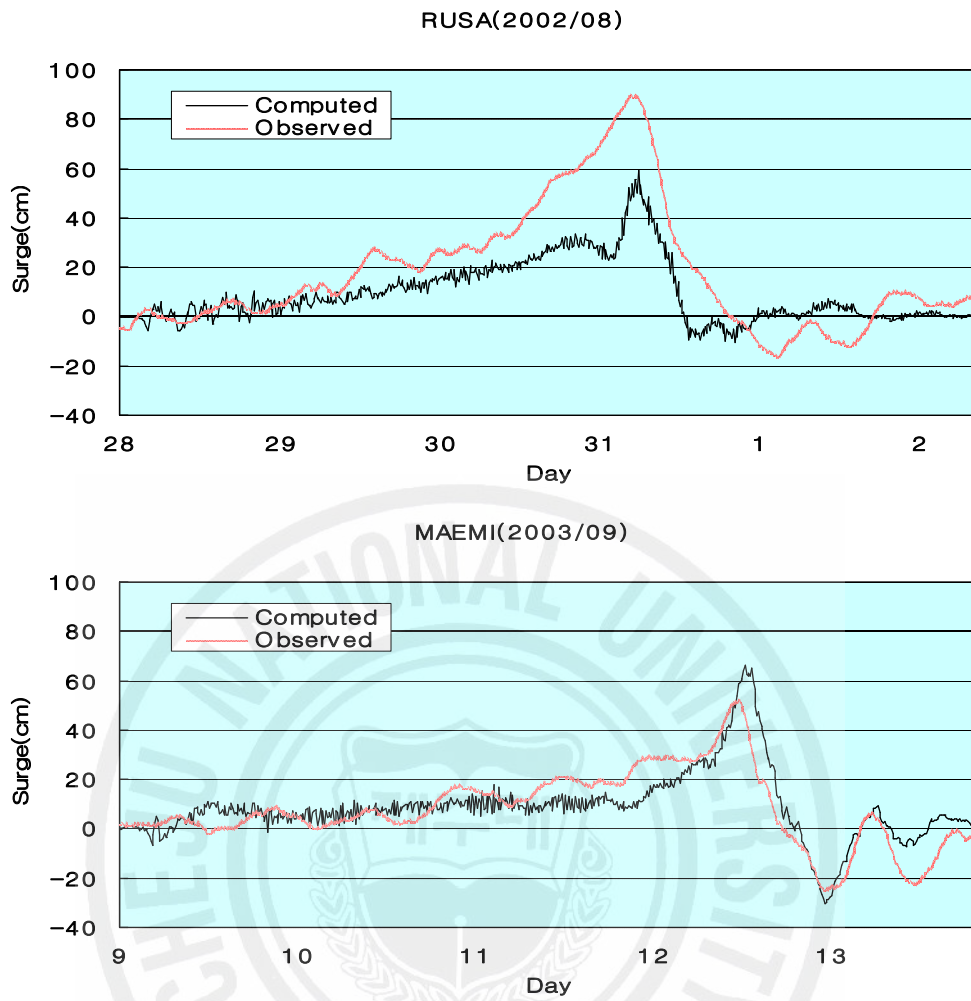


Fig. 49 Heights of storm surges of Seogwipo Port by the typhoon, "RUSA" and "MAEMI"

결 론

본 연구에서는 제주도 연안해역의 해수면 변화를 분석하고 태풍에 의한 폭풍해일 발생 기구와 피해에 대한 자료를 분석·검토하였으며, 16년간(1987~2003) 제주도 연안해역에 영향을 미친 8개 태풍(Maemi, Rusa, Prapiroon, Olga, Yanni, Janis, Gladys, Thelma)에 대해 제주항과 서귀포항의 폭풍해일 수치모형(POM) 실험을 실시하여 폭풍해일고를 산정하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 제주항과 서귀포항의 조위관측자료(1964~2006)를 이용하여 해수면 변화를 살펴본 결과 제주항은 관측이 시작된 1964년에 연평균해면은 141.39cm, 2003년에는 160.37cm로 약 20cm의 증가된 양상을 보였으며, 1986년에 관측이 시작된 서귀포항은 연평균해면이 152.60cm, 2005년에는 162.08cm 로 약 10cm의 평균해면이 증가된 양상을 보였다.

2. 제주항과 서귀포항의 수치 모의한 폭풍해일고는 관측된 폭풍해일고의 발생 시각 보다 약간 늦게 해일이 발생하였지만 전체적인 폭풍해일고의 시간변화나 크기는 비교적 잘 재현된 것으로 나타났다. 선정된 8개의 태풍 중 폭풍해일고는 Maemi가 제주항에서 최대인 77.89cm를 보였으며, 태풍 Janis가 서귀포항에서 가장 낮은 5.35cm를 나타내었다.

3. 수치 모의한 8개 태풍 중 제주연안의 최대 폭풍해일고는 태풍 Maemi 77.89cm, Thelma 62.9cm, Rusa 59.5cm, Yanni 45.38cm, Prapiroon 33.2cm, Olga 32.2cm, Gladys 24.15cm, Janis 6.44cm를 나타내었다.

4. 제주 연안해역에서 제주항은 서귀포항보다 높은 해일고를 보였으며, 해일고는 제주항, 서귀포항 모두 1m를 넘지 않았다. 제주항이 서귀포항에 비해 해일고가 높게 나타난 것은 태풍의 진로, 지형 및 수심, 파랑, 부진동, 해황 등이 기인

된 것으로 사료된다.

5. 수치 모의한 8개 태풍 중 제주도 서쪽해역을 통과한 태풍 Janis, Olga, Prapiroon은 제주도 동쪽을 통과한 태풍들에 비해 비교적 낮은 해일고를 보였다. 이러한 낮은 해일고 임에도 태풍 Janis, Olga, Prapiroon에 의해 피해가 컸던 이유는 태풍이 통과 할 당시 기존에 내린 집중호우에 이어 태풍으로 인한 집중호우와 바람의 영향으로 인해 피해가 컸던 것으로 나타났다.

6. 제주항과 서귀포항의 폭풍해일고가 서해안이나 남해안에 비해 작게 나타난 것은, 제주도의 해안선이 비교적 단순하고 남해안에 비해 수심이 깊은 편이며, 만의 형태와 지형이 V자형이거나 긴 내만이 발달한 지형이 없기 때문인 것으로 판단된다.

7. 제주항과 서귀포항 주변해역에 대해 수치모의한 결과 제주도의 주변해역의 지형 및 수심, 수괴 그리고 수치모의한 해일고 등을 고려해 볼 때 태풍으로 인한 제주도 연안해역은 지형적인 특성(만, 열도, 섬, 대륙사면의 폭과 경사 등) 보다는 태풍의 특성(바람 및 비)에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

8. 본 연구에서는 250m 격자를 사용하여 계산하였지만 이 같은 격자에서는 항만의 지형적인 효과를 잘 재현할 수 없기 때문에 보다 정밀한 해일고의 산정과 예측을 위해서는 보다 정밀한 연안해역의 수심 및 지형 자료와 파랑과 해황을 고려한 모의가 요구되며, 연안개발로 인한 지형과 수심변화에 따른 지속적인 수치해도 DB구축이 요구된다.

9. 해일로 인한 저지대의 침수예상지역을 조사하고 분석하여 해일 내습 시 피해가 최소화 될 수 있도록 제주도에 여건에 맞는 해일재해지도 작성과 연안개발 계획 및 방재대책이 필요하며, 해일로 인한 범람에 대비해 연안해일 예측시스템 구축이 요구된다.

10. 이상의 결과로 인해 차후에 항만공사 및 연안개발에 따른 연안구조물 설계·시공에 있어서의 해일고 정보를 제공하고 활용할 수 있을 것으로 기대되며 앞으로 제주연안에 영향을 미칠 태풍들에 대비하여 여러 가지 유형의 태풍 이동 경로 조건을 주어 태풍의 진로에 따른 제주연안의 해일고 산정을 위해 해일고 DB구축은 앞으로의 연구과제이다.



참 고 문 헌

- 소방방재청, 국립 방재연구소, 2004, 태풍 매미 내습 시 경남 해역의 조석 및 폭풍해일 모의, pp.1~60
- 소방방재청, 2005, 재해연보
- 과학기술부, 2000, 해상·연안재해대응기술 개발, N2-02-01-A-02, pp.397
- 기상청, 2003a, 기상백서, pp.112
- 기상청, 2003b, 해상·연안재해 대응기술 개발, 한국해양연구원 보고서, pp.188
- 문승록, 2006, 목포해역 해일/범람모의 및 고극조위 해석, 박사학위논문, 목포대학교, pp.1~180
- 우찬조, 2006, 하구항의 폭풍해일 저감방안, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 1~55
- 윤은찬, 2003, 낙동강 하천플룸의 3차원 혼합거동 해석, 석사학위논문, 부경대학교, pp. 1~61
- 강시환, 전기천, 김상익, 박광순, 방경훈, 2002, 해상풍 관측자료에 근거한 태풍 해상풍 모형간의 상호 비교, 한국해양학회지, Vol. 7, No. 3, pp.100~107
- 전기천, 강시환, 이동영, 박광순, 2001, 폭풍해일 예측을 위한 태풍 해면기압 및 해상풍 추정, 한국기상학회지, pp.532~535
- 강시환, 전기천, 김상익, 한성대, 2003b, 제 14호 태풍 MAEMI로 인한 마산만 내습 해일 산출, 한국해양학회 2003년도 추계 학술발표대회 논문집, pp.76~77
- 강시환, 전기천, 박광순, 방경훈, 2002, 해상풍 관측자료에 근거한 태풍해상풍모형의 비교분석, 한국해양학회지 「바다」, 7(3), pp.100~107
- 이종찬, 2005, 광양항 동측배후단지 조성공사, 한국해양연구원 보고서
- 문일주, 오임상, 2003, 파랑-해양순환 접합모형을 이용한 폭풍해일에 대한 파랑과 조석의 영향 연구, 한국기상학회지, pp.563~574
- 문승록, 강태순, 남수용, 황준, 2007, 폭풍해일에 의한 해안침수예상도 작성 시

- 나리오 연구, 한국해안·해양공학회지, pp.492~501
- 문승록, 박선중, 강주환, 윤종태, 2006, MIKE 21 모델을 이용한 폭포해역 해일/범람모의, 한국해안·해양공학회지, pp.348~359
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성, 2006, 부산연안에서 폭풍해일고 추정, 한국해양공학회지, pp.37~44
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성, 2006, 경남연안의 지역특성에 따른 폭풍해일고의 변동, 한국해양공학회지, pp.45~53
- 최병호, 2004, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp.1~33
- 최병호, 1999, 자연재해경감학술발표회(한국근해의 폭풍해일) 논문집, 한국해안·해양공학회, pp.1~10
- 윤용훈, 김충기, 1999, 태풍의 이동경로에 따른 해일 특성 분석, 한국기상학회지, pp.344~353
- 윤용훈, 김충기, 김우규, 김태희, 서장원, 1998, '97 백중사리시의 조석 및 해일 특성 분석, 한국기상학회 가을 학술 발표회, pp.302~305
- 양성기, 2007, 지구의 수권과학, pp.51~167
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coastal Ocean Model, Vol.4, edited by N. Heap, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1987.
- Kawai, H, Kim, D.S, Kang, Y.K, Tomita, T. and Hiraishi, T., 2005(b), Hindcasting of Storm Surge in Korea by Typhoon 0314(Maemi), Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, pp.446~453
- Mitsuyasu, H. and Kusaba, T., 1984, "Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind, Journal of Natural Disaster Science, Vol 6, No 2, pp.43~50
- Fujita, T, 1962, "Numerical estimation of sea waves in typhoon area" ,

- paper in *Meteo. and Geophysics*, 26(4), pp.199~217
- Thompson, E. F. and V. j. Cardone, 1996. Practical modeling of hurricane surface wind fields, *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 122(4);, pp.195~205
- Smagorinsky, J, 1963, General circulation experiment with the primitive equation. I: The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3);, pp.99~164.
- Wu, J.(1980). Wind stress coefficients over sea surface near neutral conditions : A revisit, *J. Phy. Oceanogr*, 10, pp.727~740
- Arya, S. P. S., 1977, Suggested revisions to certain boundary layer parameterization schemes used in atmospheric circulation models, *Mon. Wea. Rev.*, 105(2), pp.215~227
- Kang, S.W., K.C. Jun, K.S. Park, and D.Y. Lee, 2003, Long-term Estimation of Storm Surge in the Korean Coast, *Coastal Hazard 2003, Japan*, pp.G1~G8.
- Li, Y.S. and Zhang, M.Y.(1997).Dynamic coupling of wave and surge models by Eulerian-Lagrangian method. *Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering*, ASCE, 123(1), pp.1~7

www.kma.go.kr

www.typhoon.or.kr

www.nori.go.kr

www.kordi.re.kr

www.coast.kr

www.ocean.go.kr

감사의 글

대학원 석사과정 2년, 무엇인가 배우기엔 짧은 기간이었지만 어느덧 2년 이란 시간이 흘렀습니다. 지나온 길을 되돌아보면 밝은 햇살이 비치는 날보다는 어둡고 답답했던 날이 더 많았던 것 같습니다. 그렇게 힘든 시간을 지탱할 수 있게 저에게 힘을 주신 분들이 참 많습니다. 이 자리를 빌어 모든 사람들에게 감사의 뜻을 전합니다.

우선, 매사에 인격적으로 성숙할 수 있도록 제 자신을 발전시킬 수 있게 해주시고 이 논문을 쓸 수 있도록 연구의 방향과 진행에 많은 지도와 격려를 해주시며 저를 이끌어 주신 양성기 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 일정에도 심사를 맡아 주신 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사드립니다. 또한, 대학원을 다니는 동안 지도를 해주신 김남형 교수님, 남정만 교수님, 박상렬 교수님, 이병걸 교수님께도 감사를 드립니다.

바쁘신 와중에도 논문의 완성되기까지 태풍과 수치모델에 대해 많은 가르침과 조언 그리고 논문의 중요한 자료를 제공해 주시며 많은 도움을 주신 한국해양연구원의 전기천 박사님, 이종찬 박사님께 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 조석의 전반적인 내용에 대해 직접 교육해 주신 국립해양조사원이 김호균 박사님께에도 감사의 말씀을 전합니다. 또한, 해양조사에 따른 여러 가지 현장조사를 함께 하였던 김상현 박사님께에도 고맙다는 말 전해주고 싶습니다.

학부생활동안 일일호프, 축제, 체육대회를 같이 즐기며 제게 소중한 기억을 만들게 해준 진호형, 희민이형, 무철이형과 친구 행남, 형석, 채윤, 희철, 권필, 태훈, 경덕, 지훈에게도 고마움을 전합니다. 또한, 대학원 동기인 승현이형, 도형이형, 행식이형, 성룡, 향혜, 지원에게도 축하의 말과 함께 서로 뜻하는바 이루시길 바라며 앞으로 다른 곳에서 각자의 길을 걸겠지만, 모두 좋은 일들만 가득하길 바랍니다. 대학원 생활을 같이는 못했지만 연구실 생활에 대해 많은 조언을 해주신 연구실 선배 건이형에게도 감사의 말을 전합니다. 석사과정동안 같은 연구실

일원으로써 서로 다른 분야를 연구하였지만 서로 힘들 때 항상 옆에 있으며 같이 고민하고 서로 격려하며 힘이 되어준 대학원 동기이자 친구인 우열이게도 축하와 함께 진심어린 고마움을 전합니다. 이 논문이 나오기까지 조교생활을 하며 바쁜 와중에도 프로젝트를 함께하며 대학원 생활과 논문에 대한 조언을 해주며 힘들 때는 밖에서 같이 술을 마시며 친구가 되어 위로와 격려를 해주시고 연구실에서는 선배로서 채찍질을 해주시며 언제나 함께 같이한 태혁이형에게 미안한 마음과 함께 이 자리를 빌어 진심으로 감사하다는 말 전해주고 싶습니다.

대학원 2년 동안 함께했던 해양수리학 연구실...

논문의 나오기까지 저에게 많은 격려를 해주신 양성필 계장님, 이재부 계장님, 고재욱 사장님, 양재수 사장님, 오영진 사장님에게 고마움을 전합니다. 연구실에서 동고동락하며 거의 모든 일을 같이 하며 논문이 나오기까지 많이 도와주고 즐거움을 더해주며 활력소가 되었던 친구이자 석사과정인 옹규에게 고마움을 전하고 연구실 막내로 힘든 일을 도맡아했던 석사과정 승호에게는 미안한 마음과 함께 고맙다는 말을 전해주고 싶습니다. 연구실 신입생 현탁에게도 고맙고 연구실 선배들을 도와 열심히 하길 바랍니다. 연구실 일을 도우면서 논문 자료정리를 도와준 학부생 기석과 승한에게도 고마움을 전합니다. 그리고 지금은 졸업하였지만 대학원 입학 때부터 많이 도와줬던 축구를 좋아하는 호성, 항상 해맑고 착한 성윤, 무슨 일이든 시키면 열심히 하는 안수에게 고맙다는 말을 전해 주고 싶습니다.

짧은 시간이었지만 좋은 말씀을 많이 해주셨던 박사과정 창훈이형에게 고맙다는 말을 전합니다. 학부생활 때부터 석사과정동안 항상 웃으며 언제나 부탁하면 흔쾌히 도와줬던 후배 경남, 성협, 경태에게도 고마움을 전하고 종환이형에게도 고마움을 전합니다. 공부하고 있는 근혁이와 배드민턴을 하는 영준이게도 고마움을 전합니다. 그리고 승현, 창림, 현철, 영민, 태건, 창선, 정호의 대학원 입학을 축하하며 뜻하는 바 이루시길 바랍니다. 현장일로 인해 바쁜 일정에도 불구하고 해수욕장 측량을 자기 일처럼 도와줬던 친구 현구와 상훈에게 진심으로 고마움을 전합니다.

어릴 적부터 한 동네에서 긴 시간동안 힘들 때나 기쁠 때나 함께 자리를 했고 앞으로도 함께할 소중한 내 친구 형건, 용석, 동산, 태종, 영부에게도 고마움을 전합니다. 시간이 지날수록 점차 각자의 생활 속에서 바쁘겠지만, 같이 했던 즐거운 기억들과 함께 서로에게 힘이 되어 주며 우정 변치 않았으면 합니다.

토목기사 시험을 준비할 때부터 대학원에 입학하여 논문이 완성되기까지 고민과 투정을 받아주고 내 마음을 조금은 가볍게 덜어주며 나에게 용기를 북돋아줬던 희숙에게 미안한 마음과 함께 진심으로 고맙다는 말을 전해주고 싶습니다.

항상 따뜻한 관심과 배려로 제 곁에서 진로를 같이 걱정해 주고 조언과 함께 물심양면으로 큰 도움을 주신 매형에게 진심으로 감사드리고 어릴 적부터 지금 막 사회에 한 발짝 내밀려고 하는 제가 있기 까지 이 못난 동생을 위해 모든 생활에 아낌없이 도와준 나의 든든한 후원자이자 나의 하나뿐인 누나에겐 너무나 감사할 따름입니다. 이젠 이 동생의 누나의 든든한 후원자가 되어 성숙한 모습과 발전된 모습으로 보답하겠습니다.

마지막으로 오늘날까지 많은 힘이 되어주고 늘 저를 믿어주시고 아낌없이 도와주시며 묵묵히 저를 뒷바라지 해주신 아버지, 어머니께 죄송하다는 말과 함께 마음 깊이 감사드리며 사랑합니다.