



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](#)



석사학위논문

북서태평양에서 선형 및 근접 태풍에  
의한 태풍의 진로와 강도 변화 연구

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

고 철 민

2012년 1월



북서태평양에서 선행 및 근접 태풍에 의한 태풍의 진도와 강도 변화 연구

고  
철  
민

二〇二二



석사학위논문

# 북서태평양에서 선형 및 근접 태풍에 의한 태풍의 진로와 강도 변화 연구

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

고 철 민

2012년 1월



# 북서태평양에서 선행 및 근접 태풍에 의한 태풍의 진로와 강도 변화 연구

지도교수 문 일 주

고 철 민

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

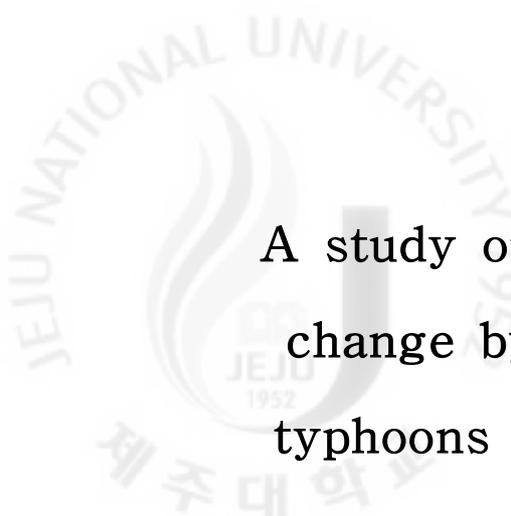
2011년 12월

고철민의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장 \_\_\_\_\_ (인)  
위 원 \_\_\_\_\_ (인)  
위 원 \_\_\_\_\_ (인)

제주대학교 대학원

2011년 12월



A study on typhoon track and intensity  
change by preceding and approaching  
typhoons in the Western North Pacific

Ko Chul Min

(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Master of Science

2011. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Marine Meteorology  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	ii
LIST OF TABLES .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1. 서 론 .....	1
2. 자료 및 연구방법 .....	4
2.1 수치 모델 개요 및 접합 과정 .....	4
2.1.1 WRF(Weather Research Forecasting) 모델 .....	4
2.1.2 ROMS(Regional Ocean Modeling System) 모델 .....	8
2.1.3 WRF-ROMS 접합과정 .....	9
2.2 접합 모델의 초기 입력자료 .....	13
2.3 사례 선정 .....	15
2.3.1 선행 태풍의 영향에 대한 사례 선정 .....	15
2.3.2 근접 태풍의 영향에 대한 사례 선정 .....	22
2.4 실험 방법 .....	25
2.4.1 접합 모델의 민감도 실험 방법 .....	25
2.4.2 선행 태풍의 영향에 대한 실험 방법 .....	26
2.4.3 근접 태풍의 영향에 대한 실험 방법 .....	27
3. 연구 결과 .....	28
3.1 접합 모델의 민감도 실험 .....	28
3.2 선행 태풍에 의해 냉각된 해수면 위를 통과하는 태풍에 미치는 영향 ..	31
3.2.1 태풍 에위니아(0603)와 빌리스(0604) 사례 .....	31
3.3 근접 태풍에 의해 변형된 대기 구조가 주변 태풍에 미치는 영향 .....	45
3.3.1 태풍 라이언락(1006), 곤파스(1007), 남테운(1008) 사례 .....	45
4. 요약 및 결론 .....	55
참고문헌 .....	57
감사의 글 .....	60

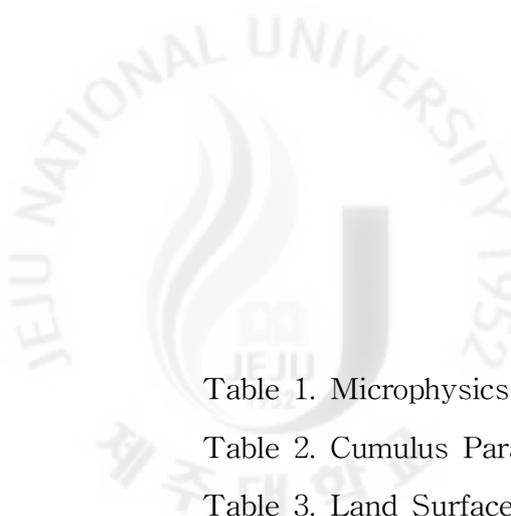
## LIST OF FIGURES

- Fig. 1. Typhoon Ivan(left) and Joan(right) in Northwest Pacific at 18 Oct 1997. .... 1
- Fig. 2. The typhoon Bilis passing on SST cooling generated by preceding the typhoon Ewiniar. .... 2
- Fig. 3. Arakawa-C grid staggering for a portion of a parent domain and an imbedded nest domain with a 3:1 grid size ratio. .... 5
- Fig. 4. Vertical coordinate used in WRF model. Black lines between 0.0 and 1.0 represent values, respectively. .... 5
- Fig. 5. Direct interaction of parameterization in WRF model. .... 6
- Fig. 6. Vertical coordinate in ROMS model. lines and shading in vertical section represent grid point and topography, respectively. .... 8
- Fig. 7. Schematic of vertical mixing/entrainment process by typhoon(refered from presentation of Ginis in TCOI, 2009). .... 9
- Fig. 8. Schematic of upwelling process by typhoon(refered from presentation of Ginis in TCOI, 2009). .... 9
- Fig. 9. Schematic of coupled model using MPI function. .... 10
- Fig. 10. Schematic of bogussing process in WRF model(refered from presentation of Chris Davis & Simon Low-Nam). .... 13
- Fig. 11. Track of the typhoon Ewiniar(0603) and Bilis(0604). Circles and squares represent locations of the typhoon Ewiniar and Bilis, respectively. Values in brackets represent intensity of typhoons. .... 16
- Fig. 12. 3-day composited TMI(TRMM microwave images) SST(Sea Surface Temperature) at (a) 6day (b) 10day (c) 11day (d) 15day July 2006. Black lines represent track of typhoon Ewiniar and Bilis. .... 18
- Fig. 13. Track of the typhoon Phanfone(0213), Rusa(0215), Sinlaku(0216). Triangles, squares, circles represent locations of the typhoon Phanfone,

Sinlaku, Rusa, respectively. Values in brackets represent intensity of typhoons. ....	19
Fig. 14. 3-day composited TMI(TRMM microwave images) SST(Sea Surface Temperature) at (a) 1day (b) 4day September 2002. Black lines represent track of typhoon Rusa and Sinlaku. ....	21
Fig. 15. Tracks of the typhoon Lionrock(1006), Kompasu(1007), Namtheun (1008). Triangles, squares, circles represent locations of the typhoon Namthun, Lionrock, Kompasu, respectively. Values in brackets represent intensity of typhoons. ....	23
Fig. 16. Satellite observation of typhoon Lionrock, Namtheun, Kompasu. Red arrows indicate center of typhoon. ....	24
Fig. 17. Track forecast of typhoon Kompasu(1007) in KMA at (a) 09UTC (b) 15UTC 30 August. ....	27
Fig. 18. Simulated track of typhoon Ewiniar(0603) in sensitivity experiment of coupled model. Cross, square, diamond, triangle, circle markers represent EMM, EML, MYM, MYL, observation(RSMC-Tokyo), respectively. ....	28
Fig. 19. Simulated (a) Sea Level Pressure and (b) Surface wind of typhoon Ewiniar(0603) in sensitivity experiment of coupled model. Dashed, dotted, dash-dot, dot-dot, solid lines represent EMM, EML, MYM, MYL, observation(RSMC-Tokyo), respectively. ....	29
Fig. 20. Comparison of (a) HYCOM SST ,(b) simulated SST and (c) TMI SST at 9 July 2006. ....	32
Fig. 21. Simulated sea surface temperature and surface current in coupled model at (a) 3day (b) 5day (c) 7day (d) 9day July 2006. White lines represent simulated track of typhoon Ewiniar. ....	33
Fig. 22. Time series of SST cooling averaged at square. Solid and Dotted lines represent coupled model and TMI observation, respectively. ...	34
Fig. 23. Time series of vertical temperature at maximum cooling point. Each	

lines indicates depths of coupled model. ....	34
Fig. 24. Simulated OHC(Ocean Heat Content) in coupled model at (a) 3day (b) 5day (c) 7day (d) 9day July 2006. ....	36
Fig. 25. Translation speed of typhoon Ewiniar(0603). Solid and dashed lines represent observation and coupled model, respectively. ....	37
Fig. 26. Vertical profile of temperature at cooling point. Solid, dashed, dotted line indicates day 3, 7, 8, July 2006, respectively. ....	38
Fig. 27. Track of typhoon Bilis. Triangle, circle marker represent experiment including cooling condition of upper ocean and not, respectively. Square marker represents RSMC-Tokyo. ....	40
Fig. 28. Time series of (a) sea level pressure (b) surface wind according to cooling condition. Dashed, dotted, solid line represents cooling, not cooling, RSMC-Tokyo. ....	41
Fig. 29. Difference of surface net heat flux according to upper ocean condition at (a) 11day (b) 13day July 2006. ....	42
Fig. 30. Difference of 500hPa vorticity according to upper ocean condition at (a) 11day (b) 13day July 2006. Black line indicates location of typhoon Bilis. ....	43
Fig. 31. Difference of v-wind according to upper ocean condition at (a) 11day (b) 13day July 2006. The star marker indicates location of typhoon Bilis. ....	44
Fig. 32. Track of typhoon Kompasu. Triangle, square marker represents experiment with and without bogussing, respectively. Circle marker represents RSMC-Tokyo. ....	47
Fig. 33. Time series of (a) sea level pressure (b) surface wind according to bogussing effect. Dashed, dotted, Solid lines represent bogussing, not bogussing, RSMC-Tokyo, respectively. ....	48
Fig. 34. Track of typhoon Namtheun. Triangle, square marker represents experiment with and without bogussing, respectively. Circle marker	

represents RSMC-Tokyo. ....	49
Fig. 35. Time series of (a) sea level pressure (b) surface wind according to bogussing effect. Dashed, dotted, Solid lines represent bogussing, not bogussing, RSMC-Tokyo, respectively. ....	50
Fig. 36. 500hPa vorticity at (a) 29day (b) 30day (c) 31day August (d) 1day (e) 2day September 2006. Left, right figures indicate without and with bogussing effect, respectively. Black line represents simulated track of typhoon Kompasu. ....	51
Fig. 37. Same as in Fig. 36, but 500hPa streamlines. ....	53



## LIST OF TABLES

Table 1. Microphysics options of WRF model. ....	6
Table 2. Cumulus Parameterization options of WRF model. ....	7
Table 3. Land Surface Options of WRF model. ....	7
Table 4. Planetary Boundary Layer Options of WRF model. ....	7
Table 5. Radiation Options of WRF model. ....	7
Table 6. Summary of WRF and ROMS model configuration. ....	12
Table 7. Cases for impact of preceding typhoon. ....	15
Table 8. Cases for impact of approaching typhoon. ....	22
Table 9. Design for sensitivity experiments of coupled model. ....	25
Table 10. Mean error of track and intensity for each case. ....	30

## Abstract

The impact of the preceding and approaching typhoon on track and intensity of typhoon in Western north pacific is studied using coupled model which consist of WRF atmosphere model and ROMS ocean model.

After passage of typhoon Ewiniar(0603) in the Philippine Sea, Typhoon Bilis(0604) pass over the region which is cooled by preceding typhoon Ewiniar. The result of experiments for simulated track and intensity of typhoon Bilis using data initialized as cooling upper ocean and not cooling indicated that although difference of track is not significant, intensity of cooling experiment is smaller than not cooling experiment with about 20hPa, because there was less heat flux and OHC(Ocean Heat Content) in upper ocean by impact of the preceding typhoon Ewiniar.

Typhoon Kompasu(1007) pass over the vicinity of region where typhoon Lionrock(1006) interacted with typhoon Namtheun(1008). The result of experiments for simulated track and intensity of typhoon Kompasu as initial condition including bogussing effect to approaching typhoon and not including suggest that although difference of intensity is not significant, track difference between bogussing and not bogussing experiment is quite large with discrepancy of about 500km at the maximum, because approaching typhoon Namtheun impacted by bogussing effect relatively moved upward, changing edge of North Pacific High through 500hPa streamlines.

**Keyword** : coupled model, preceding typhoon, upper ocean cooling, approaching typhoon, bogussing effect

# 1. 서론

수치모델의 전반적인 기술 향상에도 불구하고, 태풍의 진로 및 강도 예측에 대한 오차는 여전히 남아 있다. 태풍의 예측 오차를 줄이기 위해서는 태풍의 진로와 강도에 영향을 미치는 주변 환경에 대한 이해가 필요하다. 대부분의 태풍과 관련된 선행연구에서는 태풍의 진로가 대기의 기압 패턴에 의해 결정되고, 상층 해양의 조건에 따라 태풍의 강도가 달라질 수 있음을 보여준다. 그러나 단시간 예보를 중요시하는 태풍에 있어서 근접 태풍이나 선행 태풍에 의한 급격한 환경 변화가 주변 태풍에 미치는 영향에 대해서도 수치모델을 통해 실제 사례를 분석해볼 필요성이 있다.

근접 태풍은 태풍과 태풍의 상호작용인 후지와라 효과(Fujiwhara effect)라는 것으로 기존에 많은 연구가 진행되어 왔다. 초기에 Fujwhara(1921)는 회전하는 2개의 소용돌이가 중심 간의 거리, 구조, 강도에 따라 서로 융합되거나 멀어진다고 설명하였고, Dong and Neumann(1983)은 태풍 중심 간의 거리가 위도상  $6^\circ$  이하이면 지향류의 흐름보다 태풍 간의 상호작용 영향이 더 큼을 밝혔다. 이러한 것들을 보다 명확하게 정의하기 위해 Carr and Elsberry(1997)는 태풍 간의 상호작용에 대한 다양한 패턴을 개념적으로 제시하였다. 수치실험으로는 Falkovich et al.(1995)가 대기-해양 접합 모델을 이용하여 태풍간의 양의 와도가 서로 융합하는데 있어 호의적인 조건임을 제시한 연구가 있고, Khain et al.(2000)은 태풍-해양 접합 모델을 이용하여 이상적인 환경에서 태풍 중심 간의 초기 거리와 강도 차이에 따라 태풍간의 상호작용이 다양하게 나타남을 보여주었다.

수치모델을 이용한 태풍의 진로와 강도 연구에서 초기 조건은 중요하다. 보통 수치모델의 초기·경계 조건은 전지구 모델에서 제공하는 분석장을 내삽해서 사용하는 경우가 대부분이다. 그러나 수치모델에서 낮은 해상도의 분석장으로는 태풍의 구조를 실제 구조와 비슷하게 모의하지 못하기 때문에 태풍 예측에서 상당한 진로 및 강도 오차를 유발시킨다. Kurihara(1995)는 이러한 점을 보완하기 위하여 수치 모델에서 모의되는 태풍을 관측값과 유사한 모조 태풍으로 초기화하는 방법을 제시하기도 하였다.

태풍과 태풍의 상호작용 연구에 있어서도 근접 태풍의 초기 상태가 주변 태풍의 예측 정확도에 상당한 영향을 미치게 된다. Hsiao(2000)는 북서태평양에서 동시에 태풍 2개 이상이 존재하는 경우가 평균적으로 매년 7.4개라고 하였다(Fig. 1). 대부분의 태풍 예측 모델은 예측하고자 하는 태풍에만 초점을 맞춰 초기화가 가능하기 때문에 동시에 같은 지역에 존재하는 근접 태풍의 초기 상태를 고려하지 않는다. 그리고 태풍과 태풍간의 상호작용에 대한 대부분의 연구가 이상적인 실험들을 통해 제시되었을 뿐, 실제 사례에 대한 분석은 아직 미비하다.

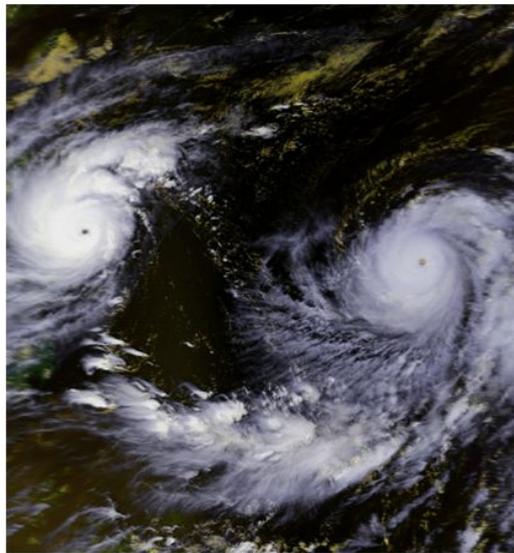


Fig. 1. Typhoon Ivan(left) and Joan(right) in Northwest Pacific at 18 Oct 1997.

한편, 근접 태풍 뿐만 아니라, 선행 태풍이 주변 태풍의 강도에 미치는 영향도 중요하다. 태풍의 후면에는 해류의 연직시어에 의한 난류 혼합과 해류의 발산에 의한 용승으로 해양의 혼합층에 수온약층의 차가운 해수가 유입되어 국지적인 해수면 온도 냉각이 발생한다(Price 1981; Bender et al., 1993). 태풍이 통과한 후에도 해양은 관성운동(Inertial motion)으로 인해 해수면 온도 냉각이 오랫동안 유지되는 것으로 알려져 있다(Shay, 1992). 태풍에 의해 발생한 냉각 자취(cold wake)의 정도에 따라 다음에 그 위를 통과하는 태풍의 강도에 영향을 미치게 된다(Fig. 2).

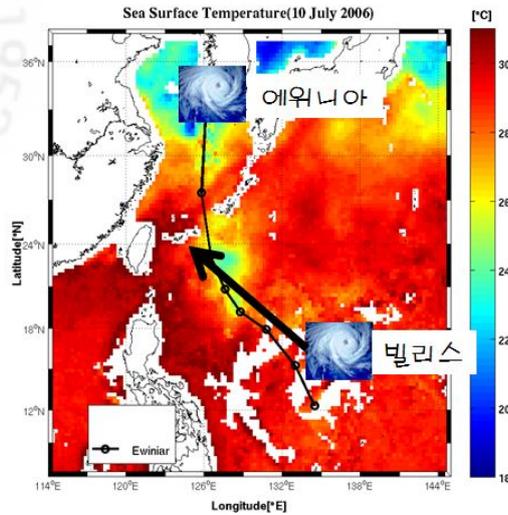


Fig. 2. The typhoon Bilis passing on SST cooling generated by preceding the typhoon Ewiniar.

대부분의 연구는 태풍이 통과하는 시기에 발생한 해수면 냉각에 초점이 맞춰져 있어 태풍 통과 후에 변화된 해수면 위를 통과하는 후속 태풍에 대한 연구는 미비하고, 대다수의 연구와 현업에서 사용되는 태풍 예측 모델은 하층 경계로 위성에서 관측된 일일 해수면 온도 자료를 사용하여 해수면 온도가 시간에 따라 변화가 없는 것으로 간주된다. 또한 해수면 온도가 같더라도 해양 상층에 존재하는 해수의 온도에 따라 태풍 통과 후에 해수면 냉각 정도는 다르게 나타나기 때문에 상층해양의 열적구조를 나타내는 해양 열용량(Ocean Heat Content; OHC)도 고려해야 한다(Shay et al., 2000; Lin et al., 2008; Tseng et al. 2009).

본 연구에서는 관측 자료의 분석을 통해 선행 및 근접 태풍에 대한 실제 사례를 선정하고, 접합 모델로 모의하여 선행 및 근접 태풍이 주변 태풍의 진로와 강도에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 2장에서는 본 연구에 사용된 접합 모델의 구성 요소인 대기 모델과 해양 모델의 특징, 접합 과정, 접합 모델에 사용된 초기조건, 실험 사례, 실험 방법을 설명하였다. 3장에서는 접합 모델에서 모의된 선행 태풍과 근접 태풍이 주변 태풍의 진로와 강도에 미치는 영향에 대해 상세하게 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 연구를 요약하고 결론을 제시하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

### 2.1 수치 모델 개요 및 접합 과정

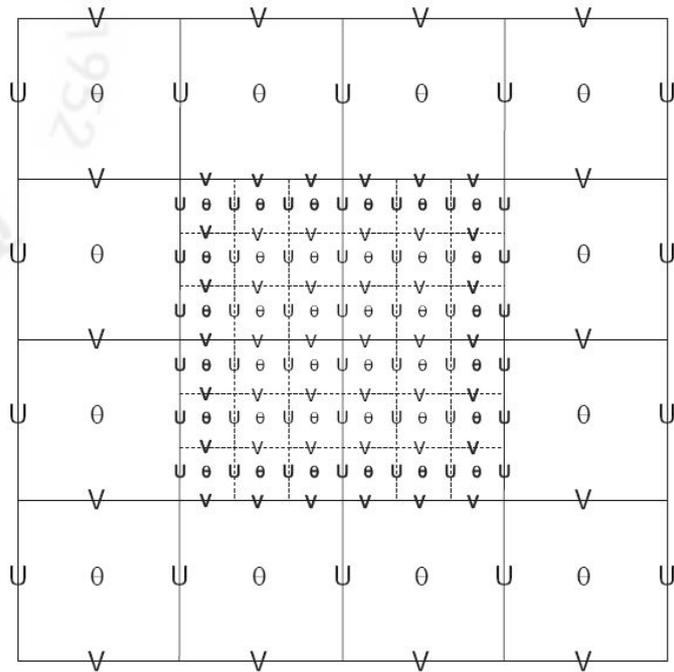
#### 2.1.1 WRF(Weather Research Forecasting) 모델

NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 중규모 기상 모델인 WRF(Weather Research and Forecasting)는 사용 목적에 따라 현업용인 NMM(Nonhydrostatic Mesoscale Model)과 연구용인 ARW(Advanced Research WRF) 버전으로 나뉜다. 본 실험에서 사용된 ARW(Advanced Research WRF) 버전은 완전 압축성(fully-compressible), 비정수계(non-hydrostatic) 오일러 지배 방정식으로 구성되고, 지배 방정식은 보존 속성의 변수들을 플럭스(flux) 형태로 계산한다.

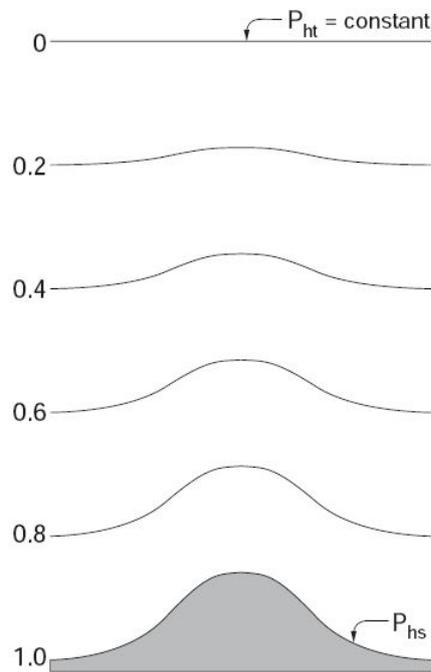
WRF 모델의 수평 격자는 Fig. 3의 Arakawa C 격자 체계를 사용하고 있으며, 각 격자의 중앙은 기압, 기온, 습도 등과 같은 보존 속성의 변수들을 배치하고, 격자의 좌·우는 동서 방향의 풍속, 상·하는 남북 방향의 풍속으로 구성되어 있다. 연직 격자 체계는 지형을 따르는 정수압(hydrostatic-pressure) 연직 좌표계를 사용한다(Laprise, 1992). Fig. 4는 WRF 모델의 연직 격자 체계를 나타내고, 아래 식(1)에 의해 정의된다.

$$\eta = (p_h - p_{ht}) / \mu, \quad \mu = p_{hs} - p_{ht} \quad (1)$$

여기서 식(1)의  $p_{hs}$ ,  $p_{ht}$ 는 각각 하층 경계와 상층 경계의 기압을 의미한다.  $p_{ht}$ 는 일정하게 50hPa로 설정하였고,  $\eta$ 는 하층의 1부터 상층의 0까지 다양한 값을 나타내는데, 실험에서 사용된  $\eta$ 는 28개의 층으로 1.000, 0.990, 0.978, 0.964, 0.946, 0.922, 0.894, 0.860, 0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576, 0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273, 0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093, 0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000을 나타낸다.



**Fig. 3.** Arakawa-C grid staggering for a portion of a parent domain and an imbedded nest domain with a 3:1 grid size ratio.



**Fig. 4.** Vertical  $\eta$  coordinate used in WRF model. Black lines between 0.0 and 1.0 represent  $\eta$  values, respectively.

WRF 모델의 물리과정은 미세 물리(Microphysics), 적운 모수화(Cumulus parameterization), 지면 표층 모델(Land surface model), 행성 경계층(Planetary Boundary Layer; PBL), 대기 복사(Radiation)의 모수화(parameterization)로 구성되어 상호작용을 한다(Fig. 5). WRF 모델에서 사용되는 다양한 모수화 방법에 대해서는 Table 1-5에 제시하였고, 사용된 모수화 방법은 명암 표시를 하였다.

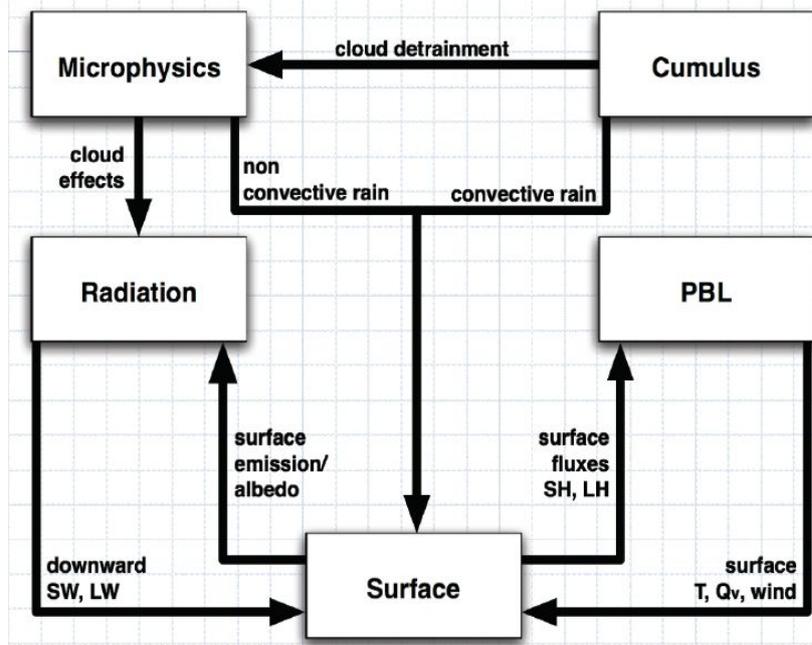


Fig. 5. Direct interaction of parameterization in WRF model.

Table 1. Microphysics options of WRF model.

Scheme	Number of variables	Ice-Phase Processes	Mixed-Phase Processes
Kessler	3	N	N
Purdue Lin	6	Y	Y
WSM3	3	Y	N
WSM5	5	Y	N
WSM6	6	Y	Y
Eta GCP	2	Y	Y
Thompson	7	Y	Y
Goddard	6	Y	Y
Morrison 2-Moment	10	Y	Y

**Table 2.** Cumulus parameterization options of WRF model.

Scheme	Cloud Detrainment	Type of scheme	Closure
Kain-Fritsch	Y	Mass flux	CAPE removal
Betts-Miller-Janjic	N	Adjustment	Sounding adjustment
Grell-Devenyi	Y	Mass flux	Various
Grell-3	Y	Mass flux	Various

**Table 3.** Land surface options of WRF model.

Scheme	Vegetation Processes	Soil Variables(Layers)	Snow Scheme
5-layer	N	Temperature(5)	none
Noah	Y	Temperature, Water+ Ice, Water(4)	1-layer, fractional
RUC	Y	Temperature, Ice, Water+ Ice(6)	multi layer
Pleim-Xiu	Y	Temperature, Moisture(2)	input only

**Table 4.** Planetary Boundary Layer options of WRF model.

Scheme	Unstable PBL Mixing	Entrainment treatment	PBL Top
MRF	K profile+ countergradient term	part of PBL mixing	from critical bulk Ri
YSU	K profile+ countergradient term	explicit term	from buoyancy profile
MYJ	K from prognostic TKE	part of PBL mixing	from TKE
ACM2	transilient mixing up, local K down	part of PBL mixing	from critical bulk Ri

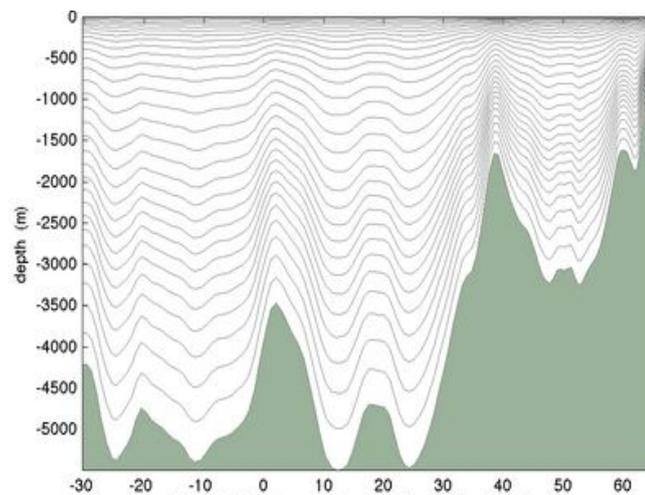
**Table 5.** Radiation options of WRF model.

scheme	Longwave/ Shortwave	Spectral Bands	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds
RRTM	LW	16	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds
GFDL LW	LW	14	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds
CAM3 LW	LW	2	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds
GFDL SW	SW	12	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds
MM5(Dudhia) SW	SW	1	clouds
Goddard	SW	11	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds
CAM3 SW	SW	19	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , clouds

### 2.1.2 ROMS(Regional Ocean Modeling System) 모델

해양모델은 러트거스 대학교(Rutgers University)에서 개발된 ROMS(Regional Ocean Modeling System)모델을 사용하였다. ROMS 모델은 3차원의 원시 방정식을 사용한 해양 순환 모델이다.

수평 격자는 Arakawa C 격자체계를 사용하고, 직각 또는 곡선 좌표계를 사용한다. 연직 격자는 지형을 따르는 시그마 좌표계( $\sigma$ -coordinate)를 사용하는데, 연구 영역에 따라 해상도 조절이 가능하다. Fig. 6은 ROMS 모델의 연직 좌표를 나타낸다. 격자의 중앙은 수온, 염분 등의 보존 속성의 변수를 배치하고, 좌우와 상하의 각각 동서 방향의 유속과 남북방향의 유속으로 구성되어 중앙 유한 차분법에 의해 계산된다.



**Fig. 6.** Vertical  $\sigma$  coordinate in ROMS model. lines and shading in vertical section represent grid point and topography, respectively.

3차원의 ROMS 모델은 태풍에 의한 연직난류혼합(vertical turbulent mixing)과 용승(upwelling), 수평 이류(horizontal advection)과정 등을 모의할 수 있다. 태풍의 바람응력은 해양 표층에서 해류를 발생시키고, 해류의 연직시어(깊이에 따른 해류 크기와 방향의 차이)에 의해 난류혼합이 발생하여 해수가 섞이게 된다(Fig. 7). 또한 태풍의 저기압성 바람 응력은 해류의 발산을 일으켜 상대적으로 태풍 중심에서 해수의 양은 주변보다 작아지기 때문에 용승이 유도된다(Fig. 8).

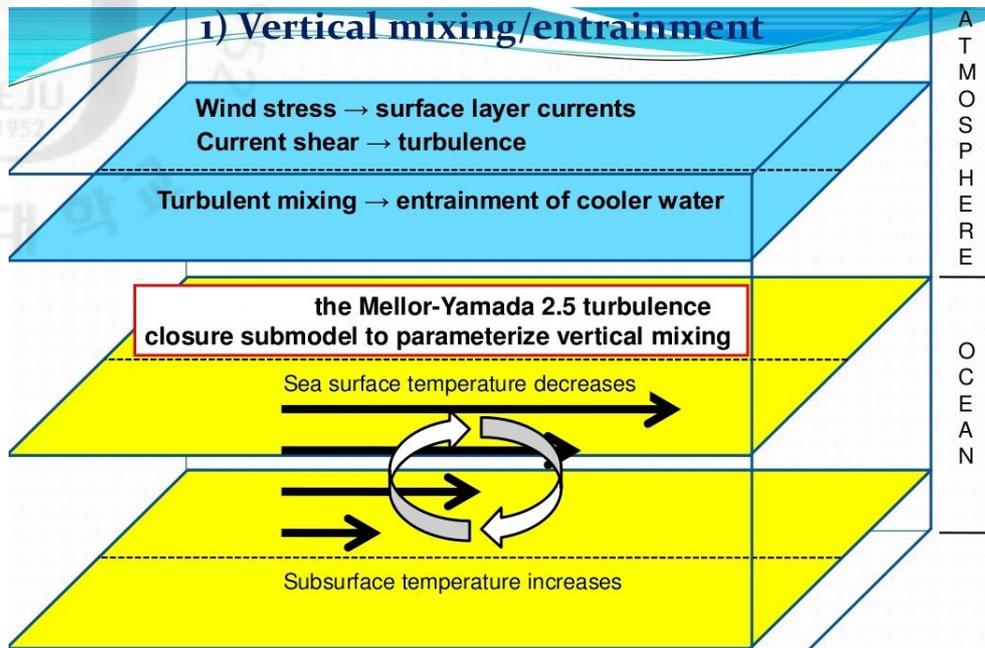


Fig. 7. Schematic of vertical mixing/entrainment process by typhoon(referred from presentation of Ginis in TCOI, 2009).

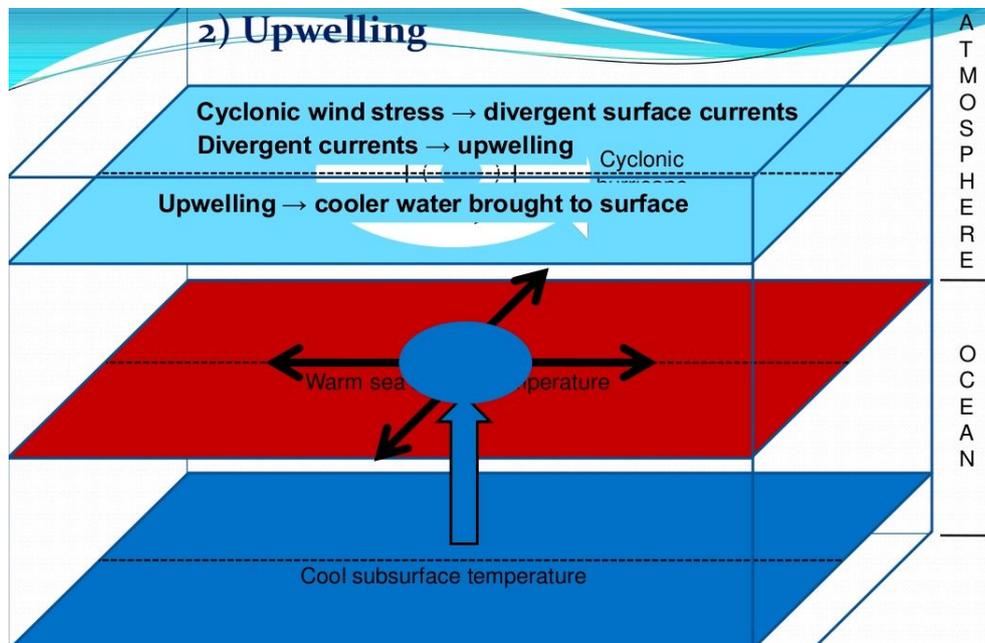


Fig. 8. Schematic of upwelling process by typhoon(referred from presentation of Ginis in TCOI, 2009).

### 2.1.3 WRF-ROMS 접합과정

접합 모델은 대기과 해양의 시·공간적 변화를 동시에 연구할 수 있다는 점과 대기-해양의 상호작용 연구에 있어서 중요한 가치를 지닌다. 그래서 접합모델은 WRF 대기 모델과 ROMS 해양 모델을 MPI(Message Passing Interface)라는 병렬 프로그래밍 언어를 이용하여 접합하였다.

MPI는 프로세서들 사이의 통신을 위해 코드에서 호출해 사용하는 함수들의 라이브러리를 일컫는다. MPI-2는 MIMD(Multi Instruction, Multiple Data)모델에 따라 다른 내부 통신자에 속한 프로세서도 서로 메시지를 주고 받을 수 있도록 MPI-1의 통신 함수를 광역 통신자를 통해서도 기능을 하도록 함수를 확장했다. 그래서 MIMD모델은 마스터의 규칙에 맞으면 새로운 기능의 종속 프로그램을 쉽게 붙일 수 있어 큰 규모의 프로그래밍에 보다 적합하고 확장성도 뛰어나다.

접합 모델의 접합 방식은 두 프로세스 중 하나가 연결을 요청해서 상대가 그 요청을 받아들이면 서로 새로운 광역 통신자를 받으므로 연결하려는 두 프로세스는 서버와 클라이언트의 관계가 된다. 연결이 완료되면 각각의 모델들이 서로 통신할 수 있도록 MPI 함수를 기존의 모델 코드에 삽입하였다(Fig. 9).

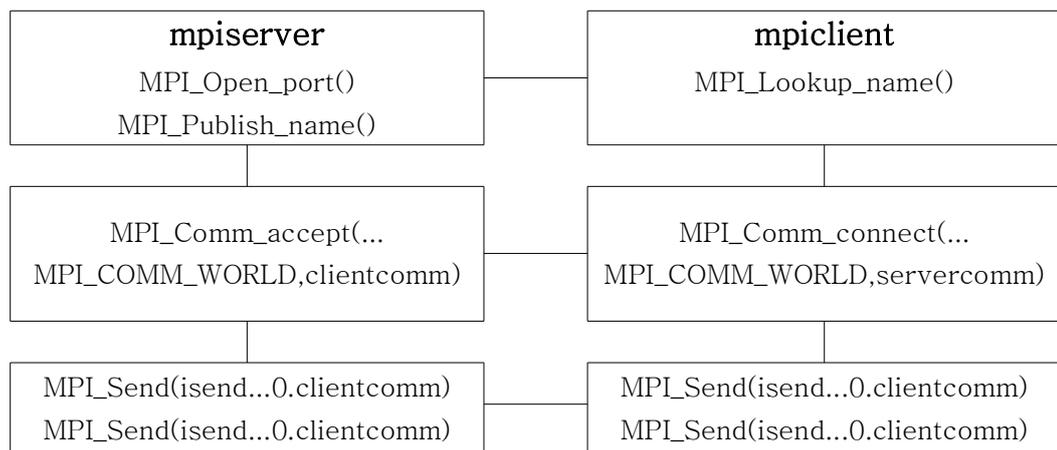


Fig. 9. Schematic of coupled model using MPI function.

WRF 대기 모델은 ROMS 해양 모델에게 바람응력(wind stress)과 순열속(net heat flux)을 전달하고, 반대로 ROMS 해양모델은 WRF 대기모델에게 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)를 제공한다. 모델에서 외력으로 사용되는 바람 응력( $\tau$ ), 현열속( $H$ ), 잠열속( $E$ )은 모닌-오브코프 유사 이론(Monin-Obukhov similarity theory)에 의해 각각 식(2), (3), (4)으로 표현된다.

$$\tau = \rho u_* u_* \quad (2)$$

$$H = \rho c_p u_* \theta_* \quad (3)$$

$$E = \rho l_e u_* q_* \quad (4)$$

여기서  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $l_e$ 는 각각 공기의 밀도, 정압비열, 증발 잠열을 나타내고,  $u_*$ ,  $\theta_*$ ,  $q_*$ 는 각각 바람, 대기온도, 비습에 대한 척도 매개변수를 의미한다. 계산된 변수들은 정해진 시간 간격(time step)마다 교환될 수 있도록 하였다. 단, 이 접합모델에서는 대기 모델과 해양 모델의 위경도 격자구성이 같기 때문에 접합모델 내부에 내삽 과정 코드는 포함되어 있지 않다. 접합 모델에 대한 전반적인 설명은 Table 6에 제시하였다.

**Table 6.** Summary of WRF and ROMS model configuration.

Model	WRF(Version 3.2.1)	ROMS(revision 519)
Grid size	약 12-15km	
Time step	90s	
Map projection	Lambert projection	
Vertical layers	28	30
Grid dimension	270 × 270 (center : 128°E, 25°N)	
Terrain resolution	USGS 2'	Etopo 2'
Initial & Boundary condition	NCEP FNL data	HYCOM data

## 2.2 접합 모델의 초기 입력자료

접합 모델을 사용하는 연구에서는 대기과 해양의 3차원 초기·경계 자료를 필요로 한다. 대기 모델은  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  해상도의 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) FNL(Final Analyses) 전지구 분석장을 사용하였다. 그러나 전지구 분석장의 태풍은 낮은 해상도로 인해 과소평가되기 때문에 고해상도 모델에서 관측값과 유사한 태풍의 구조를 재현하기가 어렵다. 이러한 점을 보완하기 위하여 WRF 모델의 보거싱(bogussing) 기법을 통해 실제 태풍과 유사한 모조 태풍(bogus vortex)을 만들어 분석장에 있는 기존의 태풍을 제거하고 삽입하는 방법을 적용하였다.

보거싱 기법에 대한 과정을 간단히 설명하면, 표층(1000hPa) 근처의 기압장에서 상대 와도의 최대값을 찾는다. 이 때, 태풍의 중심은 Fig. 10과 같이 최적경로 자료(Best track data)를 참고하여 미리 설정한 반지름 내에 있는 지점 중 상대 와도의 최대값을 가진 격자점으로 간주하게 된다. 분석장에서 기존의 태풍을 찾게 되면 태풍과 관련된 풍속(wind velocity), 고도 편차(Height anomaly), 기온 편차(Temp anomaly)를 제거하고, 새롭게 정의된 모조 태풍으로 삽입된다. 새롭게 삽입된 모조 태풍의 바람장은 식(5)과 같이 Rankine vortex에 의해 정의된다.

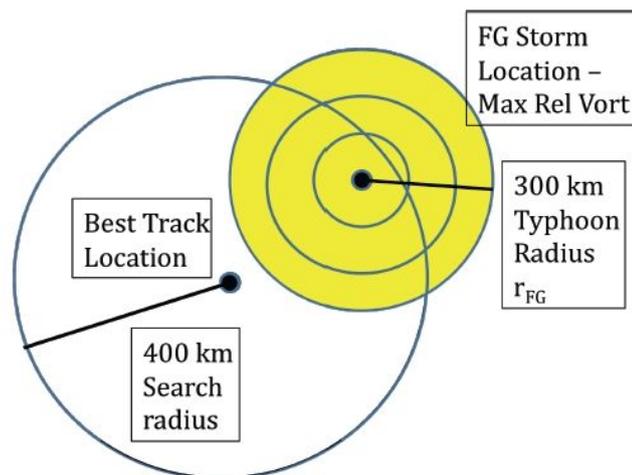


Fig. 10. Schematic of bogussing process in WRF model(referred from presentation of Chris Davis & Simon Low-Nam).

$$v = A(z)F(r) \quad (5)$$

$$F(r) = \frac{v_m}{r_m} r \quad (r \leq r_m), \quad F(r) = \frac{v_m}{r_m^\alpha} r^\alpha \quad (r > r_m)$$

여기서  $v_m$ 은 최대 풍속 반지름  $r_m$ 에서 접선방향(tangential)의 최대 풍속을 나타낸다.  $\alpha$ 는 -0.75의 값을 사용하고,  $A(z)$ 는 고도와 높이에 따라 0.1-1.0의 값을 나타낸다. 모조 태풍의 상대 습도는 최대풍속 반지름 이내에서 거의 포화된 상태를 나타내고, 최대풍속 반지름보다 큰 부분에서는 최외각을 0으로 가정하여 선형 내삽에 의해 주어졌다.

해양 모델의 초기조건은 HYCOM(HYbrid Coordinate Ocean Model)의 3차원 수온, 염분, 동서방향과 남북방향의 해류 자료를 사용하였다. HYCOM은 NRL(Naval Research Laboratory)에서 개발하였고, 1/12°의 수평 해상도와 32개의 연직층으로 구성되어 있다. 표층 외력은 NOGAPS(Navy Operational Global Atmospheric Prediction System)의 바람응력과 열속을 사용하고, 자료동화를 위해 미해군 자료동화자료(Navy Coupled Ocean Data Assimilation; NCODA)를 사용한다.

## 2.3 사례 선정

### 2.3.1 선행 태풍의 영향에 대한 사례 선정

연구 사례는 2000년부터 2011년까지의 기간 중에 북서태평양에서 발생한 태풍을 대상으로 하여 RSMC-Tokyo(도쿄 지역특별기상센터)에서 보고된 태풍 전문과 TMI(TRMM Microwave Imager) SST 자료를 참고하여 조사하였다.

사례 선정을 위한 기준은 다음과 같다. 첫 번째, 선행 태풍에 의한 명확한 해수면 냉각 효과를 얻기 위해서는 강도가 TS(Tropical Storm), STS(Severe Tropical Storm)급의 약한 태풍보다는 TY(Typhoon)급의 강한 태풍을 선정하였다(Ginis, 1995). 두 번째, 선행연구 중 관측자료 분석(Shay et al.,1992)과 수치실험(Tuleya and Kurihara, 1982; Bender et al., 1993)에서 태풍의 이동시 태풍 주변에 국지적으로 약 1-6°C의 해수면 냉각 효과가 나타남을 보여주었는데, 이 연구에서는 TMI SST 자료를 이용하여 태풍 통과 후에 약 3°C이상의 강한 해수면 냉각이 발생한 경우이어야 하며, 마지막으로 다음 태풍이 약 7일 이내에 강한 해수면 냉각이 발생한 지역을 약 300km이내로 통과하는 경우를 기준으로 정하였다. 위의 모든 조건을 만족하는 사례에 대해 조사한 결과는 Table 7에 제시하였다. Table 7에서 태풍 이름은 각각 선행 태풍과 다음 태풍을 의미하고, 다양한 사례 중에 두 번째 사례를 실험 대상으로 선정하였다.

**Table 7.** Cases for impact of preceding typhoon.

No.	Period	Name
1	2002.08.12-2002.09.08	RUSA(TY) / SINLAKU(TY)
2	2006.07.01-2006.07.15	EWINIAR(TY) / BILIS(STS)
3	2011.07.12-2011.08.09	MA-ON(TY) / MUIFA(TY)
4	2011.09.24-2011.10.05	NESAT(TY) / NALGAE(TY)

Track of typhoon Ewiniar(0603) & Bilis(0604)

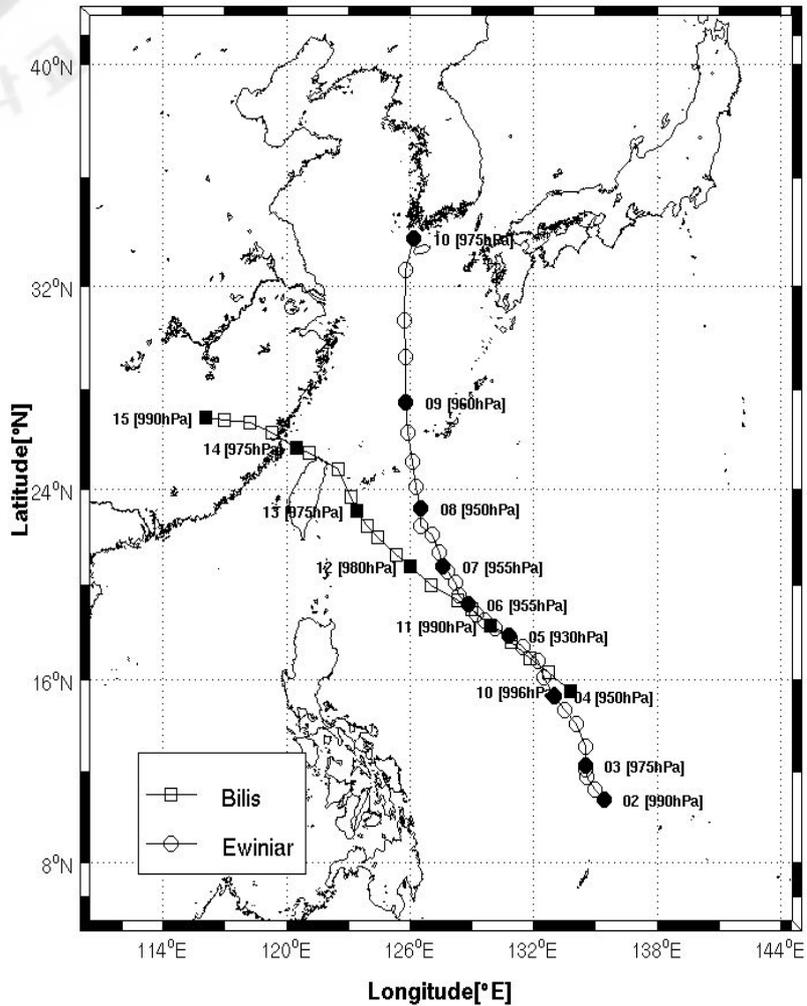


Fig. 11. Track of the typhoon Ewiniar(0603) and Bilis(0604). Circles and squares represent locations of the typhoon Ewiniar and Bilis, respectively. Values in brackets represent intensity of typhoons.

전체 사례 중에서 본 연구의 수치 실험에 사용된 사례는 태풍 에위니아(Ewiniar, 0603)와 빌리스(Bilis, 0604)이다. 이 사례를 선택한 것은 선행 태풍 에위니아에 의해 가장 강한 해수면 냉각을 보였고, 다음 태풍인 빌리스의 강도가 다른 사례에 비해 약한 것으로 보아 선행 태풍의 영향이 다음 태풍에 어느 정도 영향을 미쳤는지를 파악하기가 다소 용이하기 때문이다.

Fig. 11는 태풍 에위니아와 빌리스의 시간별 위치(진로), 중심기압(강도)을 나타낸다. 태풍 에위니아는 7월 3일 00UTC에 12.3°N, 134.5°E 지점에서 중심기압 975hPa, 최대풍속 33m/s인 TY급 태풍으로 발달해 북서쪽으로 진행하다가 필리핀 해상에서 북쪽으로 전향하여 7월 10일 00UTC에 중심기압 975hPa, 최대풍속 30m/s의 강도로 한반도에 상륙하였다. 비슷한 시기에 태풍 빌리스는 중심기압 998hPa, 최대풍속 17m/s인 열대저압부(TD)로 13.4°N, 137.0°N 지점에서 형성되었고, 북서쪽으로 진행하면서 중심기압 975hPa까지 발달하다가 대만을 거쳐 중국 남부지방에서 소멸하였다.

태풍 에위니아는 2006년 7월 6일에 필리핀 해상에서 약 9km/h의 이동속도로 한반도를 향해 전향하면서 가장 느리게 움직였고, 강한 해수면 냉각을 발생시켰다. 그리고 약 5일 후에 태풍 빌리스는 태풍 에위니아에 의해 냉각된 해수면 지역을 통과하였다(Fig. 12).

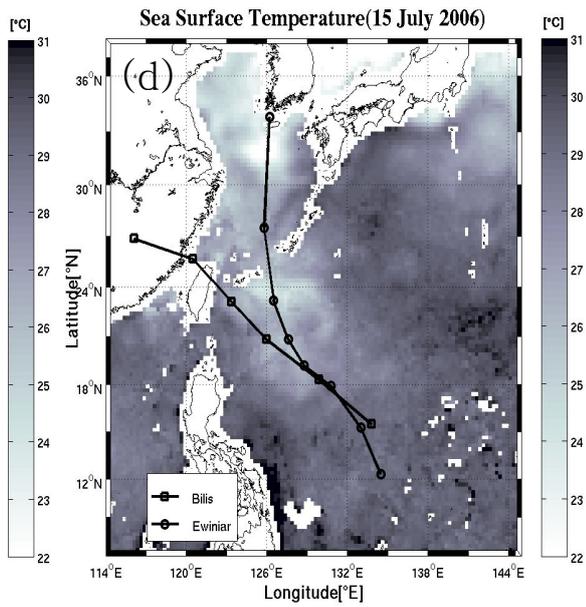
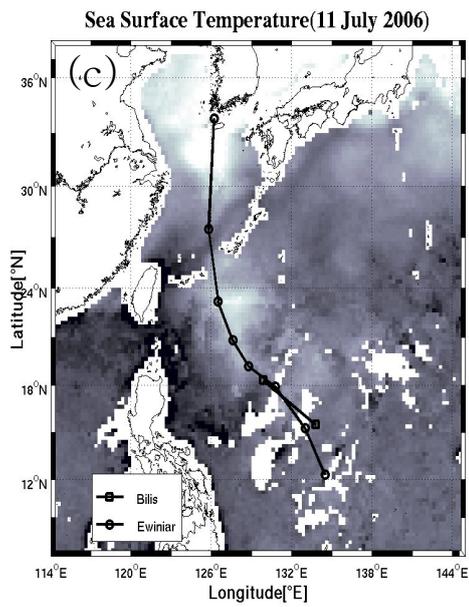
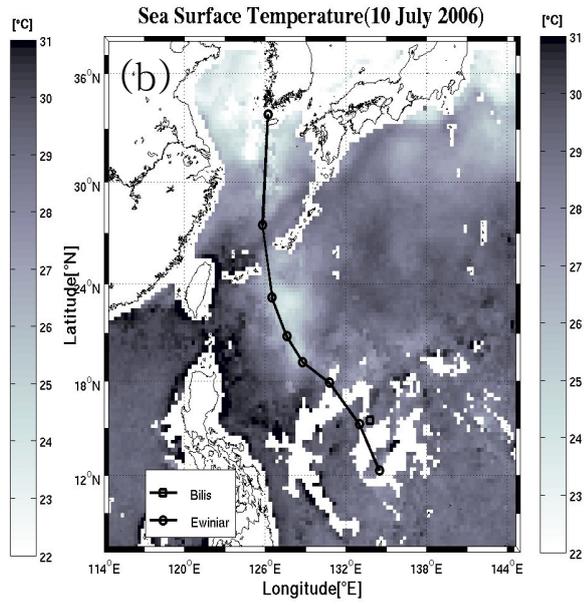
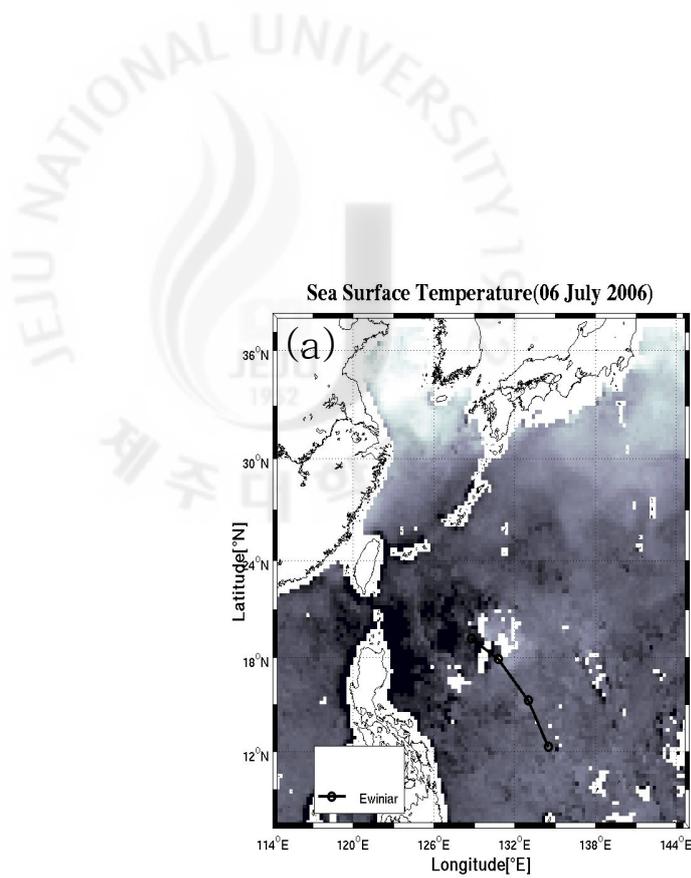


Fig. 12. 3-day composited TMI(TRMM microwave images) SST(Sea Surface Temperature) at (a) 6day (b) 10day (c) 11day (d) 15day July 2006. Black lines represent track of typhoon Ewiniar and Bilis.

Track of typhoon Phanfone(0213) & Rusa(0215) & Sinlaku(0216)

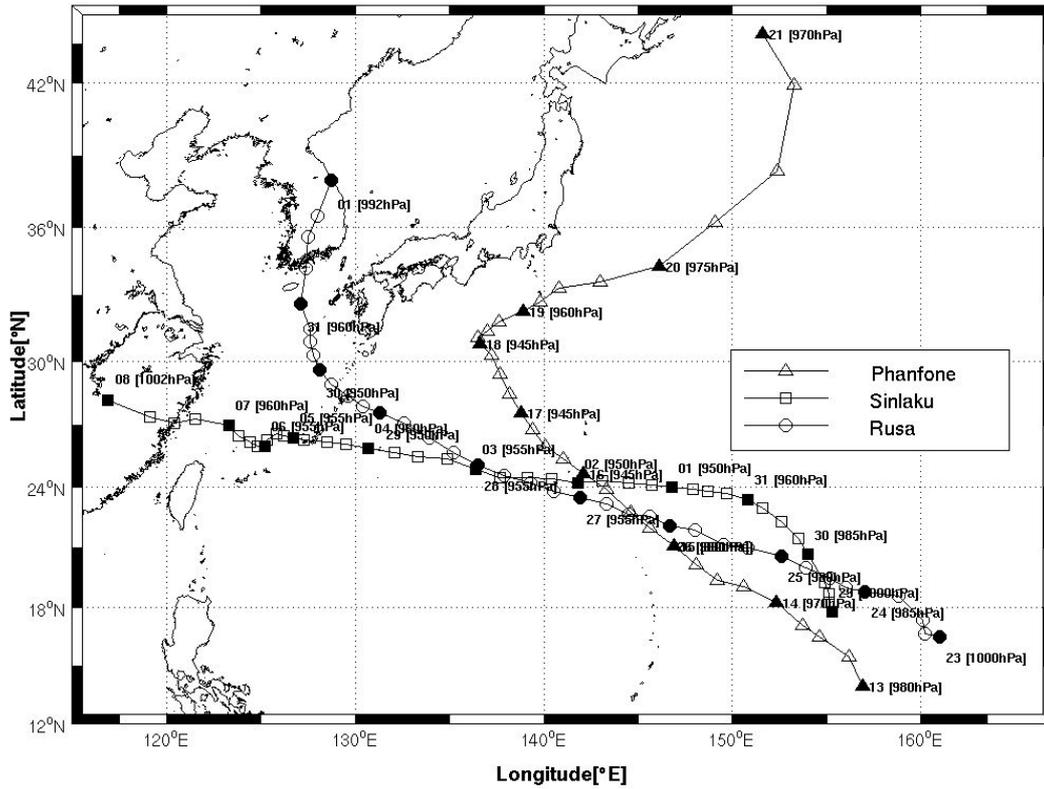


Fig. 13. Track of the typhoon Phanfone(0213), Rusa(0215), Sinlaku(0216). Triangles, squares, circles represent locations of the typhoon Phanfone, Sinlaku, Rusa, respectively. Values in brackets represent intensity of typhoons.

다른 사례로는 태풍 루사(Rusa, 0215)와 신라쿠(Sinlaku, 0216)이다. 태풍 루사는 2002년 8월 30일부터 9월 1일까지 한반도에 영향을 미쳤고, 일최대순간풍속 56.7m/s와 일최다강수량 870.5mm를 기록하며 많은 인명 손실(246명 사망·실종)과 재산 피해(51,479억원)를 주었다(태풍백서, 2011).

Fig. 13은 태풍 루사와 신라쿠의 시간별 위치(진로), 중심기압(강도)을 나타낸다. 태풍 루사는 8월 23일 00UTC에 16.5°N, 161.0°E 지점에서 중심기압 1000hPa, 최대풍속 17.5m/s의 TD급 태풍으로 형성되어 8월 25일 18UTC에 TY급 태풍으로 급격하게 발달하였다. 8월 29일에 태풍 루사가 류큐열도 근처에서 한반도로 접근하는 동안 태풍 신라쿠는 18.3°N, 155.1°E 지점에서 중심기압 996hPa, 최대풍속 17.5m/s의 TD급 태풍으로 형성되고 8월 31일에 TY급 태풍으로 발달하여 서쪽으로 이동하다가 중국 남부지방에서 소멸하였다.

그중에서도 태풍 루사는 8월 28일에 약 25.1°N, 136.5°E 지점을 통과하면서 태풍 후면에 주변보다 약 5°C이상의 강한 해수면 냉각을 발생시켰다. 선행 태풍에 의해 강하게 냉각되었던 지역은 점차 해수면 온도가 원상태로 회복되었지만, 태풍 신라쿠가 다시 냉각된 해수면 위를 통과하였다(Fig. 14).

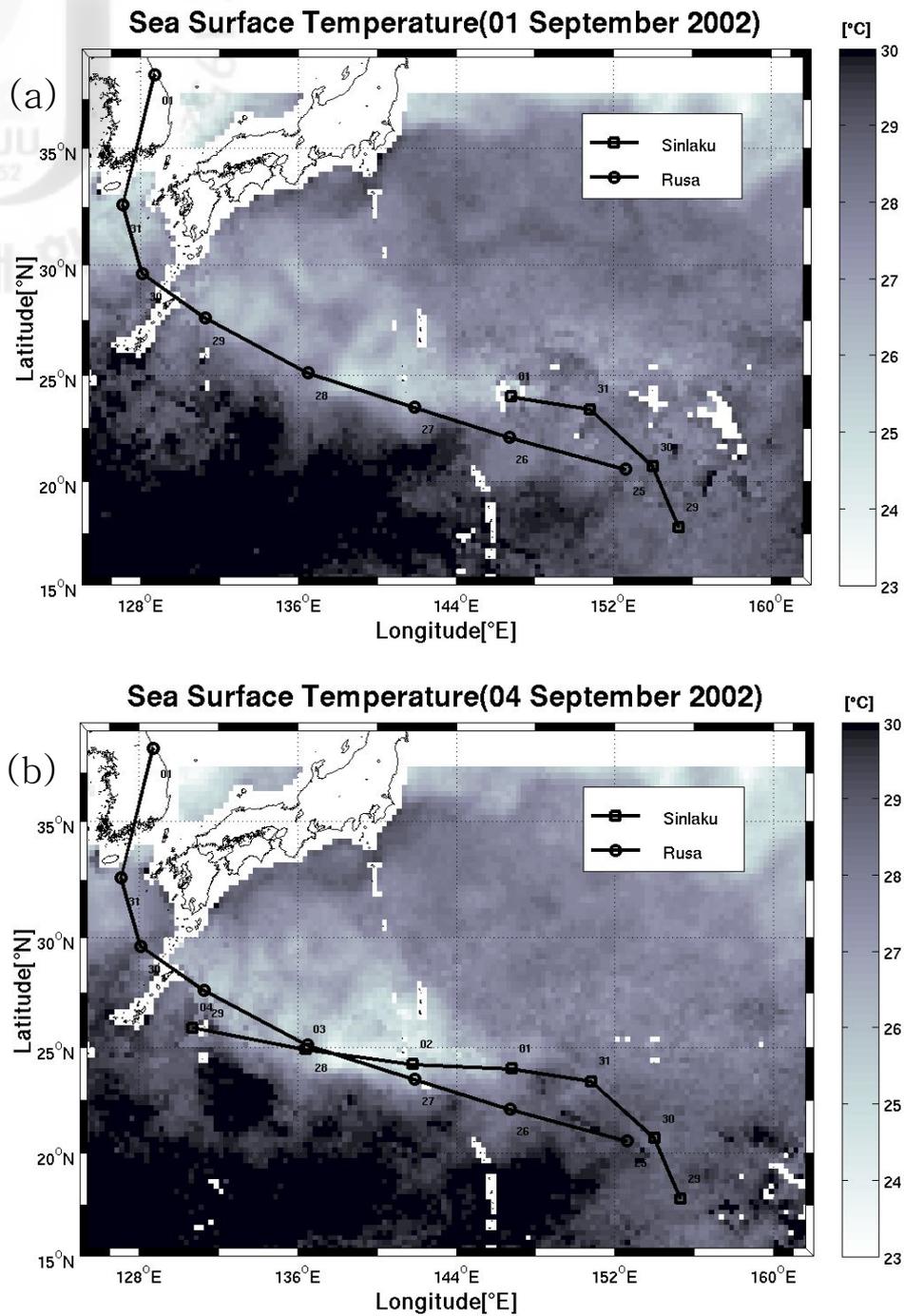


Fig. 14. 3-day composited TMI(TRMM microwave images) SST(Sea Surface Temperature) at (a) 1day (b) 4day September 2002. Black lines represent track of typhoon Rusa and Sinlaku.

### 2.3.2 근접 태풍의 영향에 대한 사례 선정

근접 태풍은 주변에 분포하는 다른 태풍과 직접적인 상호작용을 일으킬 수도 있고, 태풍 주변에 분포한 대기의 열역학 구조에 변화를 일으켜 원거리에 있는 태풍에도 간접적으로 영향을 줄 수 있다.

연구 사례는 RSMC의 태풍 전문을 이용하여 2000년부터 2011년까지의 기간 동안 북서태평양에서 동시간대에 발생한 태풍 중에 태풍 중심 간의 거리가 약 1,450km 이하인 경우를 상호간에 직간접적으로 영향을 줄 수 있는 근접 태풍으로 정의하여 조사하였다(Table 8). 약 1,450km는 후지와라 효과(Fujiwhara effect)가 나타날 수 있는 거리를 의미한다. 다양한 사례 중에서 다섯 번째 사례를 연구 대상으로 선정하였다.

**Table 8.** Cases for impact of approaching typhoon.

No.	Period	Name
1	2006.08.13-2006.08.19	WUKONG(TS), SONAMU(TS)
2	2007.11.20-2007.11.28	HAGIBIS(TS), MITAG(TY)
3	2009.09.29-2009.10.14	PARMA(TY), MELOR(TY)
4	2009.11.23-2009.12.03	NIDA(TY), URDUJA(TD)
5	2010.08.29-2010.09.03	NAMTHEUN(TS), LIONROCK(STS), KOMPASU(TY)
6	2011.07.12-2011.07.24	MA-ON(TY), TOKAGE(TS)
7	2011.07.28-2011.08.09	MUIFA(TY), LANDO(TD)
8	2011.08.23-2011.09.05	TALAS(TS), NANMADOL(TY)

Track of typhoon Lionrock(1006) & Kompas(1007) & Namtheun(1008)

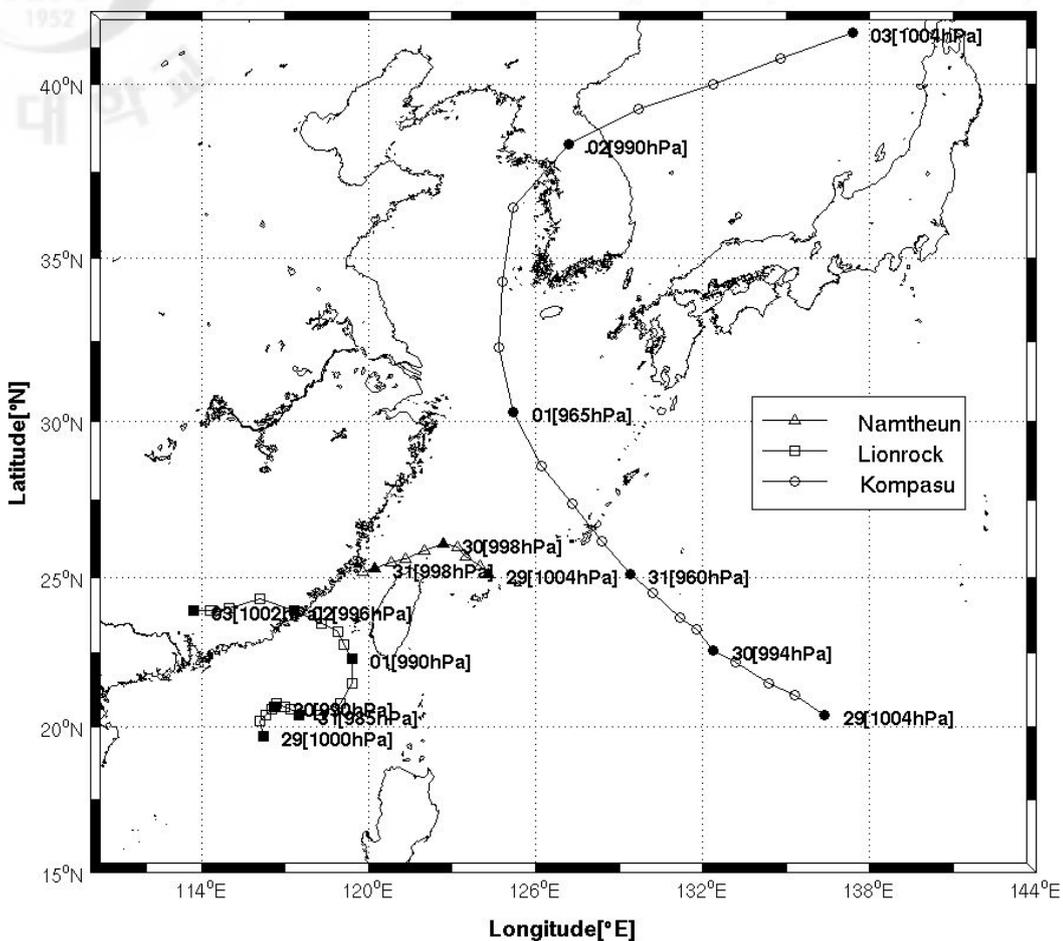
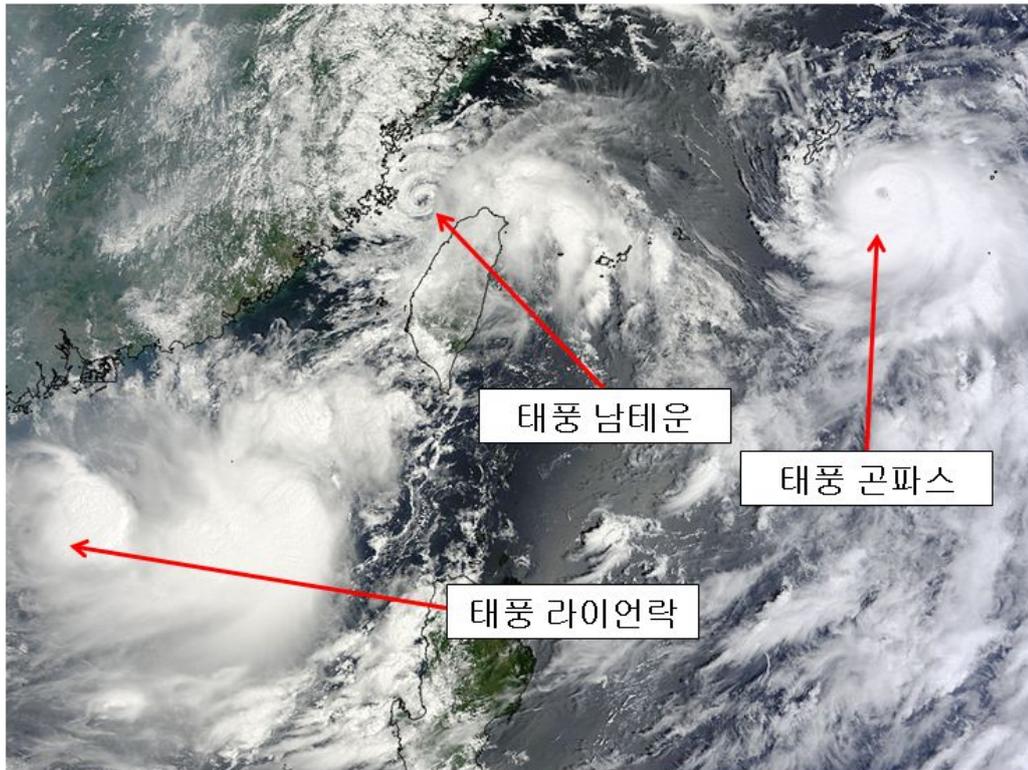


Fig. 15. Tracks of the typhoon Lionrock(1006), Kompas(1007), Namtheun(1008). Triangles, squares, circles represent locations of the typhoon Namthun, Lionrock, Kompas, respectively. Values in brackets represent intensity of typhoons.

전체 사례 중에서 수치실험에 사용된 사례는 태풍 라이언락(Lionrock, 1006), 곤파스(Kompasu, 1007), 남테운(Namtheun, 1008)이다(Fig. 15). 특정 시간대에 위성으로 관측된 세 개 태풍의 중심과 위치를 확인할 수 있다(Fig. 16). 태풍 곤파스는 8월 29일 18UTC에 22.2°N, 133.2°E 지점에서 중심기압 998hPa, 최대풍속 17.5m/s의 TD급 태풍으로 발생하여 류큐열도 부근으로 이동하였고, 비슷한 시기에 20.6°N, 116.5°E 지점인 남중국해에서는 태풍 라이언락이 중심기압 996hPa, 최대풍속 20m/s의 TD급 태풍으로 존재하였다. 8월 30일 12UTC에는 대만해협 근처에서 태풍 남테운이 중심기압 996hPa, 최대풍속 17.5m/s의 TD급 태풍으로 발생하였으나, 하루 만에 태풍 라이언락에 흡수되어 소멸된다. 그 이후에 태풍 라이언락은 전향하여 중국 남부지방을 통과해 소멸되었고, 태풍 곤파스는 류큐열도에서 동중국해와 황해를 거쳐 한반도의 서해안으로 상륙하였다.



**Fig. 16.** Satellite observation of typhoon Lionrock, Namtheun, Kompas. Red arrows indicate center of typhoon.

## 2.4 실험 방법

### 2.4.1 접합 모델의 민감도 실험 방법

접합모델을 이용한 태풍의 진로와 강도 연구에서는 다양한 모수화 방법에 대한 민감도 실험으로 최적의 모수화 방법을 선정한다. 다양한 모수화 방법 중에서 태풍의 진로와 강도에 큰 영향을 미칠 수 있는 대기모델의 경계층 모수화와 해양모델의 연직 난류 혼합 모수화에 대해 민감도 실험을 실시하였다.

민감도 실험은 MYL(MM5-YSU-LMD), MYM(MM5-YSU-MY25), EML(ETA-MYJ-LMD), EMM(ETA-MYJ-MY25)의 4가지 방법으로 구분하였다(Table 9). 이외에도 단·장파 복사 물리과정은 각각 Dudhia, RRTM, 지면 표층은 Noah land surface model, 적운 모수화는 Kain-Fritsch, 미세물리는 WSM6를 사용하였다(Table 1-5 참고). 민감도 실험을 위한 사례는 태풍 에위니아를 선정하였다.

**Table 9.** Design for sensitivity experiments of coupled model.

No.	Atmosphere model			Ocean model
	PBL schemes	Cumulus schemes	Microphysics	Vertical mixing schemes
1(MYL)	YSU-MM5	Kain-Fritsch	WSM6	LMD
2(MYM)	YSU-MM5	Kain-Fritsch	WSM6	MY25
3(EML)	MYJ-ETA	Kain-Fritsch	WSM6	LMD
4(EMM)	MYJ-ETA	Kain-Fritsch	WSM6	MY25

#### 2.4.2 선행 태풍의 영향에 대한 실험 방법

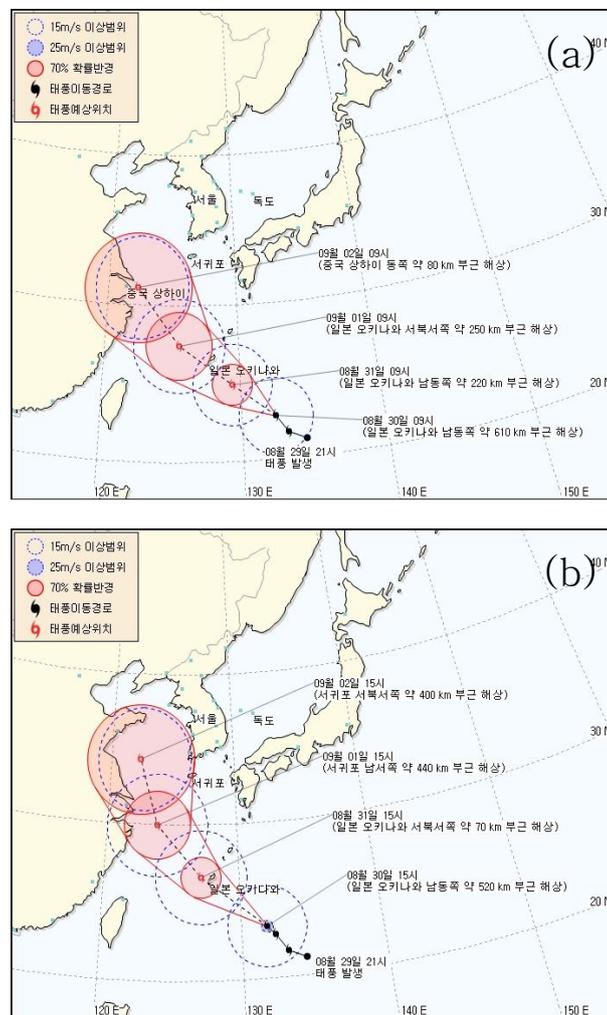
태풍 에위니아와 빌리스의 사례에서는 선행 태풍 에위니아에 의해 냉각된 해양 상층구조를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우로 나누고, 해수면 위를 통과하는 태풍 빌리스의 진로와 강도에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

선행 태풍 에위니아 사례는 2006년 7월 3일부터 10일까지의 기간 동안 접합 모델을 이용해 재현되었다. 접합 모델에서 사용된 대기 초기장은 NCEP FNL 자료이고, 해양 초기장은 HYCOM을 사용하였다. 그리고 대기 초기장의 태풍은 낮은 해상도로 인해 과소 모의될 수 있기 때문에 WRF 모델의 보거싱 기법을 통해 관측값과 유사한 모조 태풍으로 초기장에 삽입시켜 주었다.

다음 태풍 빌리스는 NCEP FNL 대기 자료를 사용하였고, 해양 자료는 선행 태풍 에위니아에 의해 접합모델로 재현된 3차원 수온과 염분 자료를 이용하여 2006년 7월 10일부터 15일까지 재현되었다. 여기서 해양 3차원 자료를 연속으로 사용하는 것은 선행 태풍에 의해 냉각된 해양 상층구조를 HYCOM 모델에서 제대로 모사하지 못하기 때문이다. 반대로 냉각된 해양 상층구조를 포함하지 않는 경우는 선행 태풍 에위니아가 통과하기 이전의 3차원 해양 자료를 사용하는 것으로 실험에서 정의하였다. 접합 모델에 의해 재현된 결과 중에 대기 자료는 19개의 등압면(1000/950/900/850/800/750/700/650/600/550/500/450/400/350/300/250/200/150/100)으로 내삽하여 분석하였고, 해양 자료는 상층 부분인 표층부터 300m까지 1m간격으로 내삽하였다.

### 2.4.3 근접 태풍의 영향에 대한 실험 방법

기상청(KMA)의 태풍 예보에서 2010년 8월 30일 09시와 15시 사이에 태풍 곤파스의 진로 예보는 상당한 차이가 나타났다(Fig. 17). 태풍 곤파스의 진로가 급격하게 변화하는 원인을 알아보기 위해 태풍 라이언락(1006), 곤파스(1007), 남태운(1008)의 사례를 2010년 8월 29일부터 9월 3일까지 집합 모델을 이용하여 재현하였다. 실험은 보거싱 효과가 똑같이 적용된 태풍 곤파스를 제외한 나머지 근접 태풍의 보거싱 효과가 적용된 경우와 적용되지 않은 경우로 나누어 비교하였다.



**Fig. 17.** Track forecast of typhoon Kompasu(1007) in KMA at (a) 09UTC  
(b) 15UTC 30 August.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 접합 모델의 민감도 실험

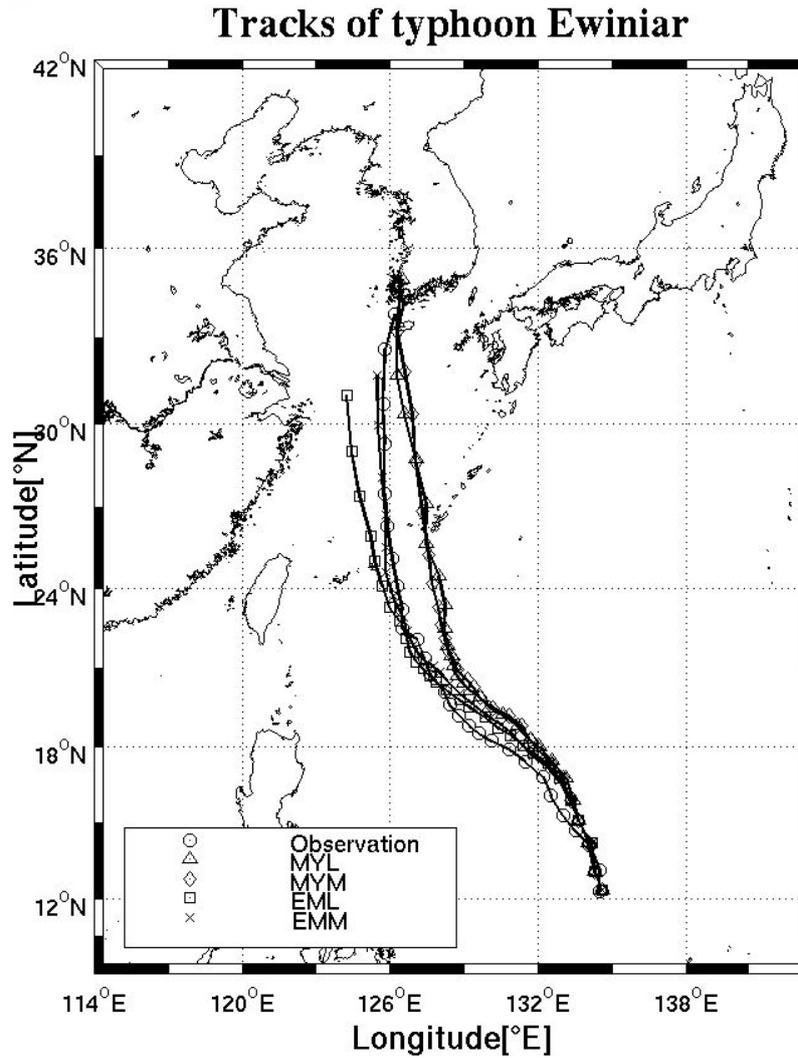


Fig. 18. Simulated track of typhoon Ewinar(0603) in sensitivity experiment of coupled model. Cross, square, diamond, triangle, circle markers represent EMM, EML, MYM, MYL, observation(RSMC-Tokyo), respectively.

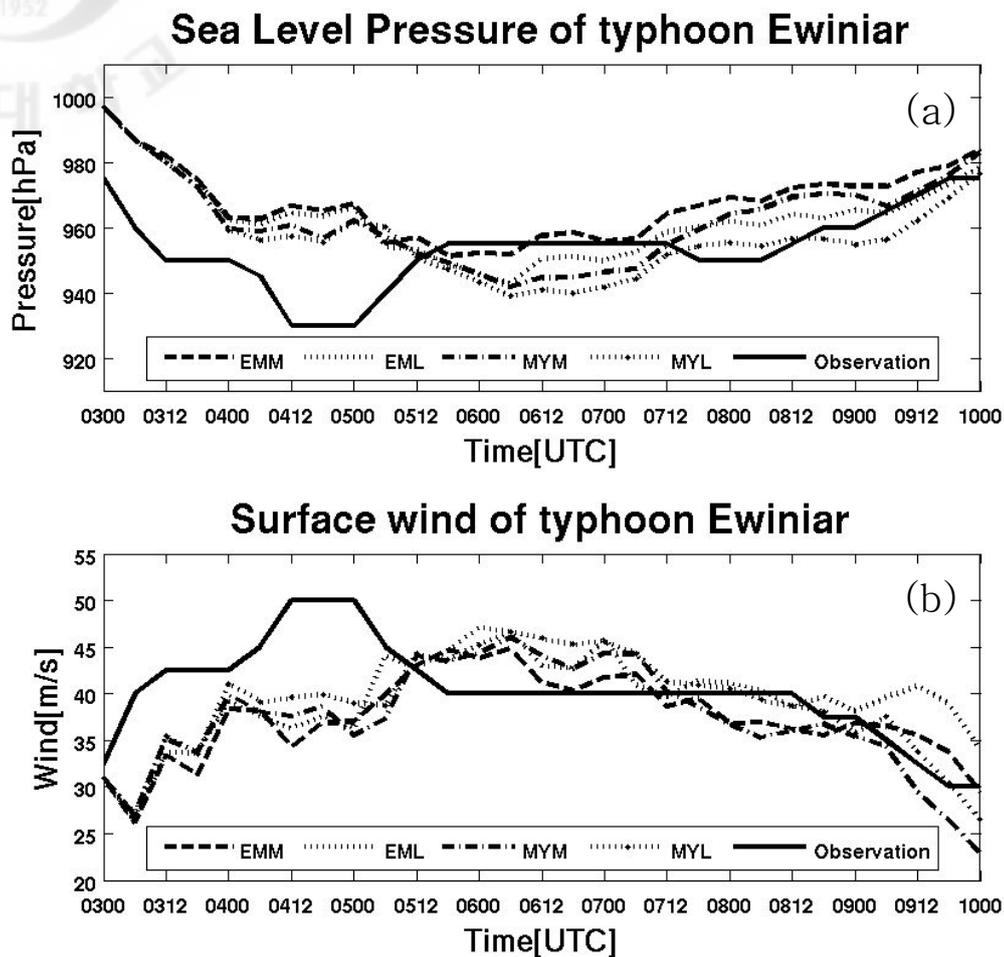


Fig. 19. Simulated (a) Sea Level Pressure and (b) Surface wind of typhoon Ewiniar(0603) in sensitivity experiment of coupled model. Dashed, dotted, dash-dot, dot-dot, solid lines represent EMM, EML, MYM, MYL, observation(RSMC-Tokyo), respectively.

접합 모델을 이용한 민감도 실험에서 태풍의 진로는 EMM 방법이 관측자료에 비해 다소 이동속도가 느리기는 하였지만, 진로나 강도에서 다른 실험 사례에 비해 관측값에 비슷하게 재현되었다(Table 10). 여기서 풍속은 RSMC의 10분 평균과 접합 모델의 1시간 간격의 결과값을 비교하였다. 초기에 태풍 에위니아의 최대 강도가 제대로 재현되지 못한 것은 보거싱 기법의 한계로 인해 초기에 관측값과 유사한 모조 태풍이 형성되지 못한 것이 원인으로 사료된다(Fig. 19).

MYL과 MYM은 EMM에 비해 태풍의 진로예측에서 큰 오차를 보이는데, 행정 경계층 모수화가 북태평양 고기압을 제대로 재현하지 못한 것이 태풍을 보다 이르게 전향시킨 것으로 보이며, 태풍의 진로 예측에 매우 중요한 요소임을 알 수 있었다(Fig. 18).

EML은 EMM과 비교하여 예보 초기에는 비슷한 진로와 강도 패턴을 보였으나, 태풍의 전향 시기 이후부터 진로 차이가 발생하였다. 접합 모델의 난류 혼합 모수화 방법 차이에 의해 해수면 냉각 차이가 발생하고 점차 누적된 차이가 태풍의 구조에 변화를 일으켜 태풍의 작은 진로 차이를 유발시킨 것으로 보인다(Fig. 18). 그래서 전반적인 민감도 실험을 통해 EMM(ETA-MYJ-MY25)을 접합 모델의 최적화된 모수화 방법으로 선정하였다.

**Table 10.** Mean error of track and intensity for each case.

Case	Track error	Intensity error
EMM	35.15km	4.693m/s
EML	48.37km	5.136m/s
MYM	101.48km	5.101m/s
MYL	100.00km	4.445m/s

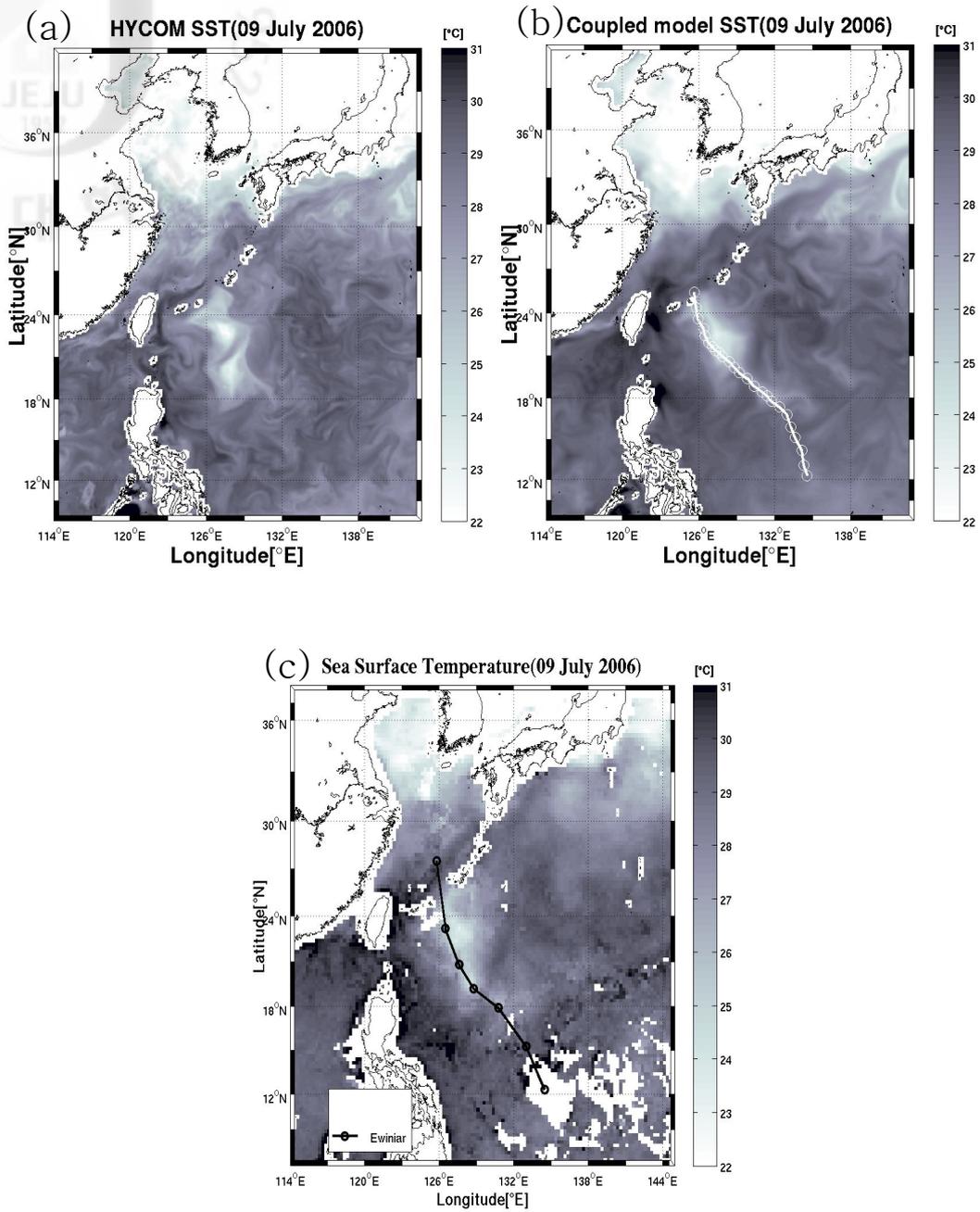
## 3.2 선행 태풍에 의해 냉각된 해수면 위를 통과하는 태풍에 미치는 영향

### 3.2.1 태풍 에위니아(0603)와 빌리스(0604) 사례

선행 태풍에 의해 냉각된 상층 해양이 다음 태풍의 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 해수면 온도를 정확하게 재현하는 것이 무엇보다 중요하다. 접합 모델이 해수면 온도를 어느 정도 재현하였는지를 알아보기 위해 HYCOM 자료와 TMI 자료를 비교하였다(Fig. 20). 접합 모델의 결과값은 초기조건으로 사용된 HYCOM 자료보다 해수면 냉각의 크기와 공간적인 범위에서 TMI 관측값에 비슷하게 재현되었다. 또한, 접합 모델은 황해 근처에서 약한 저기압에 의해 냉각되었던 해수면 온도가 다시 원상태로 회복되는 것을 잘 재현하였고, 쿠로시오 해류와 쓰시마 난류 등의 해류도 비교적 잘 재현하였다(Fig. 21).

강한 해수면 냉각이 발생한 지역(Fig. 21의 사각형)의 해수면 온도를 평균해서 관측값과 좀 더 상세하게 비교해보면 접합 모델은 TMI 자료와 비슷하게 약 5°C 정도의 강한 해수면 냉각을 잘 재현하였다(Fig. 22).

동일 지역에서 가장 강한 해수면 냉각이 발생한 지점(127.6°E, 22.0°N)의 해양 상층 구조(0-80m)를 20m간격으로 분석하였다(Fig. 23). 해수면 냉각은 강한 용승과 연직혼합에 의해 표층에서 변화가 가장 크고, 하층으로 갈수록 변화는 작았다. 그리고 표층에서는 최대 7°C 이상의 해수면 냉각이 발생했다.



**Fig. 20.** Comparison of (a) HYCOM SST ,(b) simulated SST and (c) TMI SST at 9 July 2006.

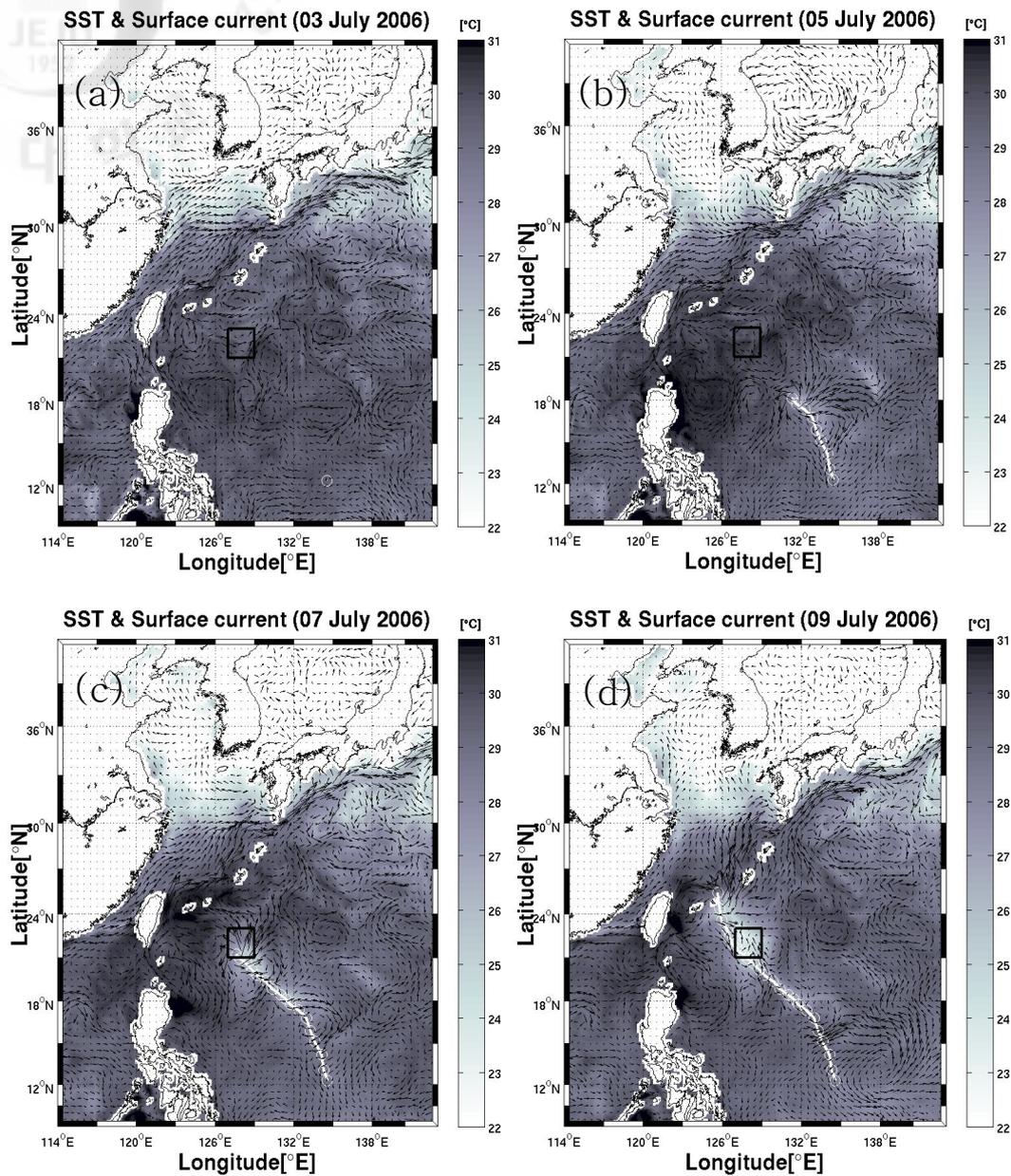


Fig. 21. Simulated sea surface temperature and surface current in coupled model at (a) 3day (b) 5day (c) 7day (d) 9day July 2006. White lines represent simulated track of typhoon Ewinari.

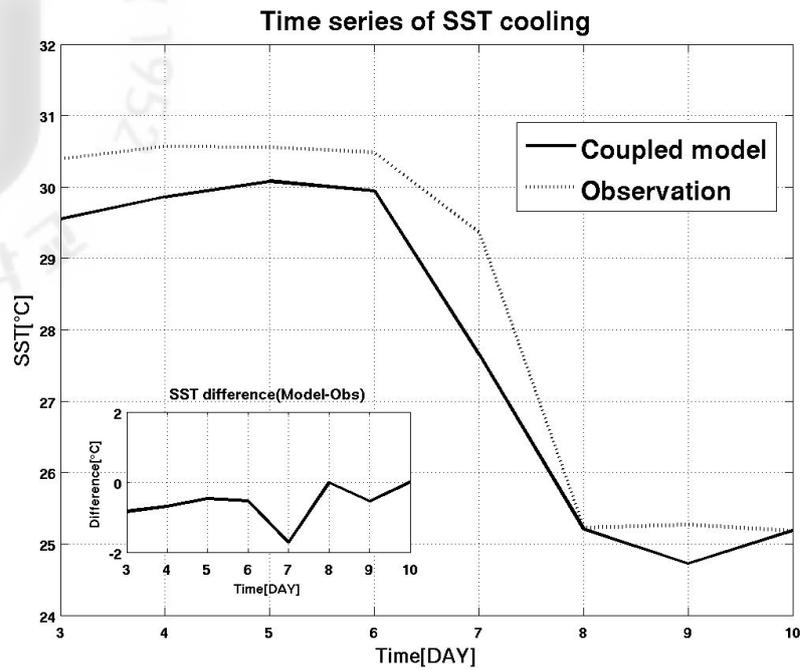


Fig. 22. Time series of SST cooling averaged at square. Solid and Dotted lines represent coupled model and TMI observation, respectively.

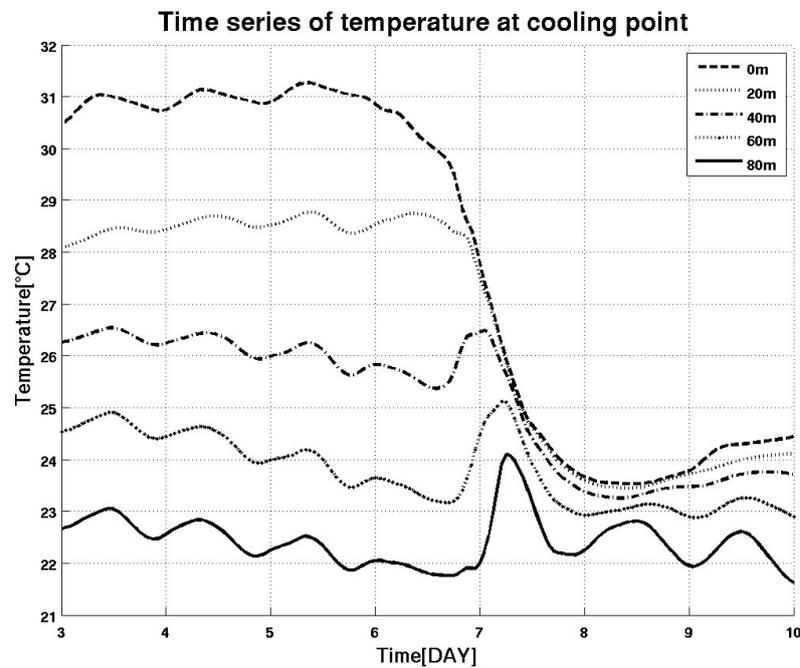


Fig. 23. Time series of vertical temperature at maximum cooling point. Each lines indicates depths of coupled model.

해수면 온도 이외에도 다음 태풍의 강도에 영향을 미칠 수 있는 상층 해양의 열적 구조를 재현하는 것 또한 중요하다. 허리케인 카트리나의 사례처럼 상층 해양의 열적 구조는 급격한 발달에 영향을 줄 수 있는 요인이기 때문이다.

상층해양의 열적구조는 해양열용량(Ocean Heat Content; OHC)의 공간적인 분포와 강하게 냉각된 지역에서의 수온 연직 구조를 살펴보았다. 여기서 해양 열용량은 태풍의 발달에 영향을 미칠 수 있는 표층부터 수온이 26°C가 되는 깊이까지의 열량 총합을 의미한다.

$$OHC = c_p \int_0^{D_{26}} \rho [T(z) - 26] dz \quad (7)$$

식(7)에서  $c_p$ 는 비열이고,  $D_{26}$ 는 26°C의 등온 깊이이며,  $\rho$ 는 해수 밀도를 의미한다. 7월 9일에는 태풍에 의한 강한 혼합으로 태풍 후면 오른쪽의 해양 열용량이 넓은 범위에 걸쳐 주변보다 많이 감소하였다(Fig. 24). 해양 열용량이 넓은 범위에 걸쳐 주변보다 많이 작아진 것은 강한 해수면 냉각이 일어난 지역에서 선행 태풍 에위니아가 통과하기 이전에 해양 열용량이 주변보다 작았기 때문이다. 그리고 7월 5일을 시작으로 태풍 에위니아는 전향하면서 점차 이동 속도가 느려지고, 7월 7일(Fig. 25의 약 96시간 경과 후를 의미함)에 태풍의 이동속도가 가장 느린 것을 확인할 수 있는데(Fig. 25), 느린 이동속도에 의해 강한 연직 혼합이 작용하여 해수면 온도를 더욱 강하게 냉각시켰다.

그중에서도 가장 강하게 해수면 냉각이 발생한 지점(127.6E, 22.0N)의 연직 수온 구조는 Fig. 26과 같다. 7월 3일에는 표층 수온이 약 31°C의 고온을 유지하다가 태풍 에위니아가 전향하는 시기인 7월 7일에는 표층 수온이 조금 낮아졌고, 얇은 혼합층이 생겼다. 7월 8일에는 해수면 온도가 약 24°C로 상당히 낮아졌고, 깊은 혼합층이 발생한 것으로 보아 전향하면서 느린 이동속도에 의해 강한 연직 혼합이 발생한 것을 알 수 있다(Fig. 26).

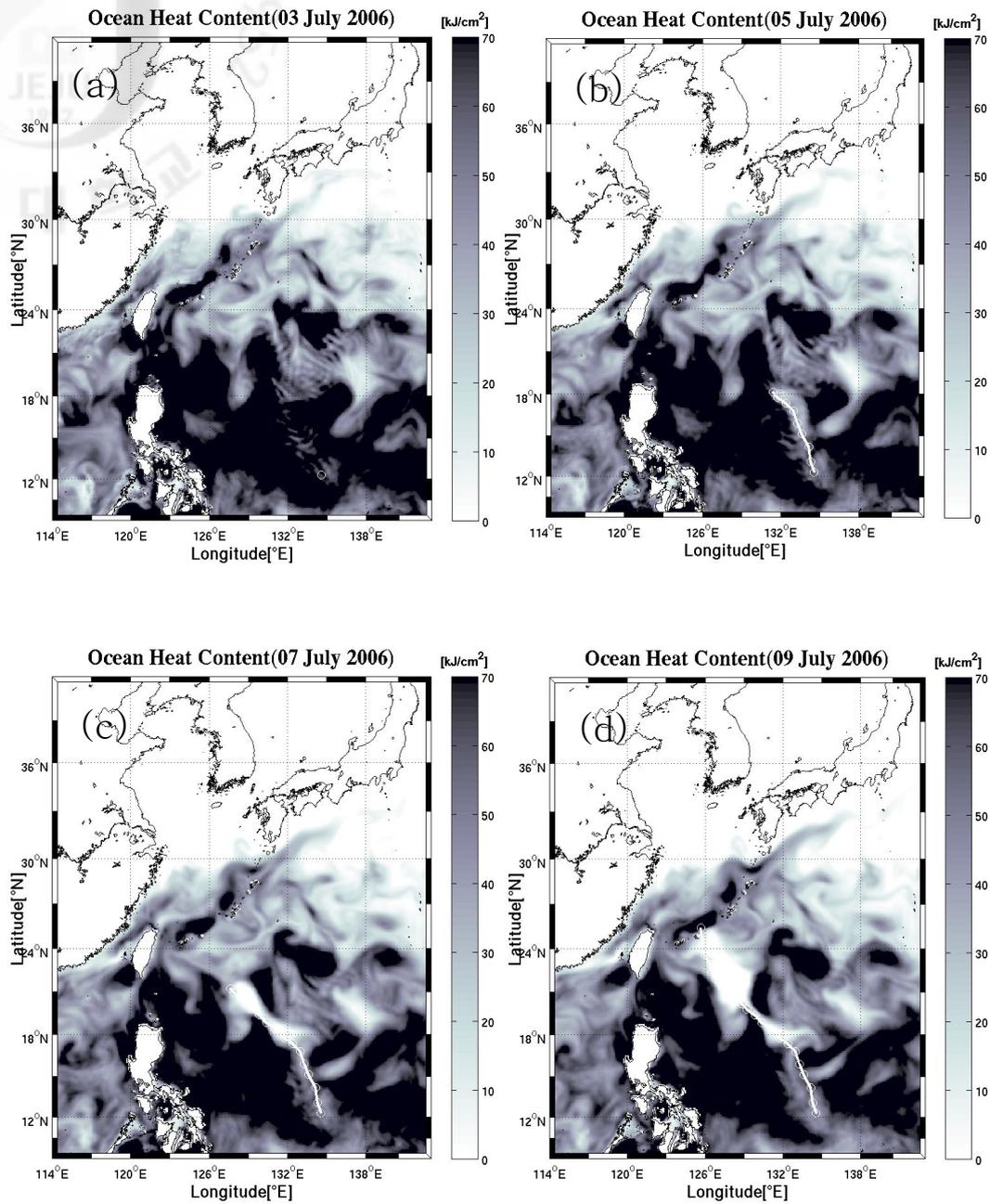


Fig. 24. Simulated OHC(Ocean Heat Content) in coupled model at (a) 3day (b) 5day (c) 7day (d) 9day July 2006.

Translation speed of typhoon Ewiniar

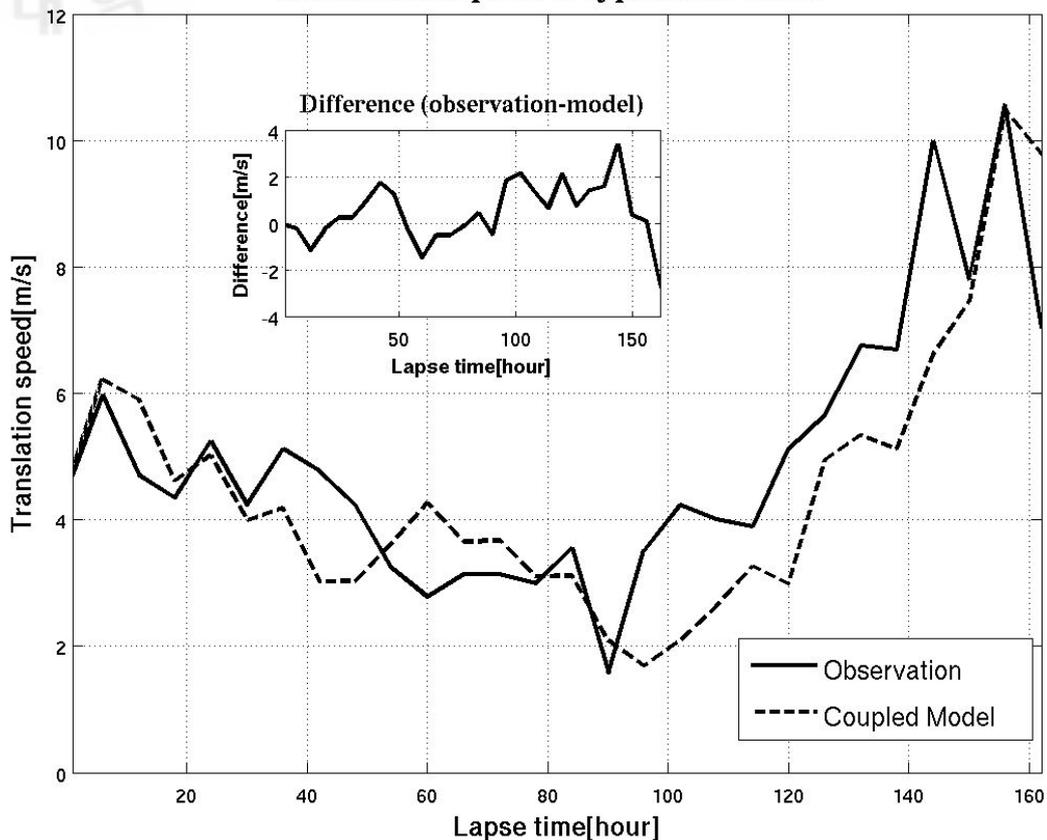


Fig. 25. Translation speed of typhoon Ewiniar(0603). Solid and dashed lines represent observation and coupled model, respectively.

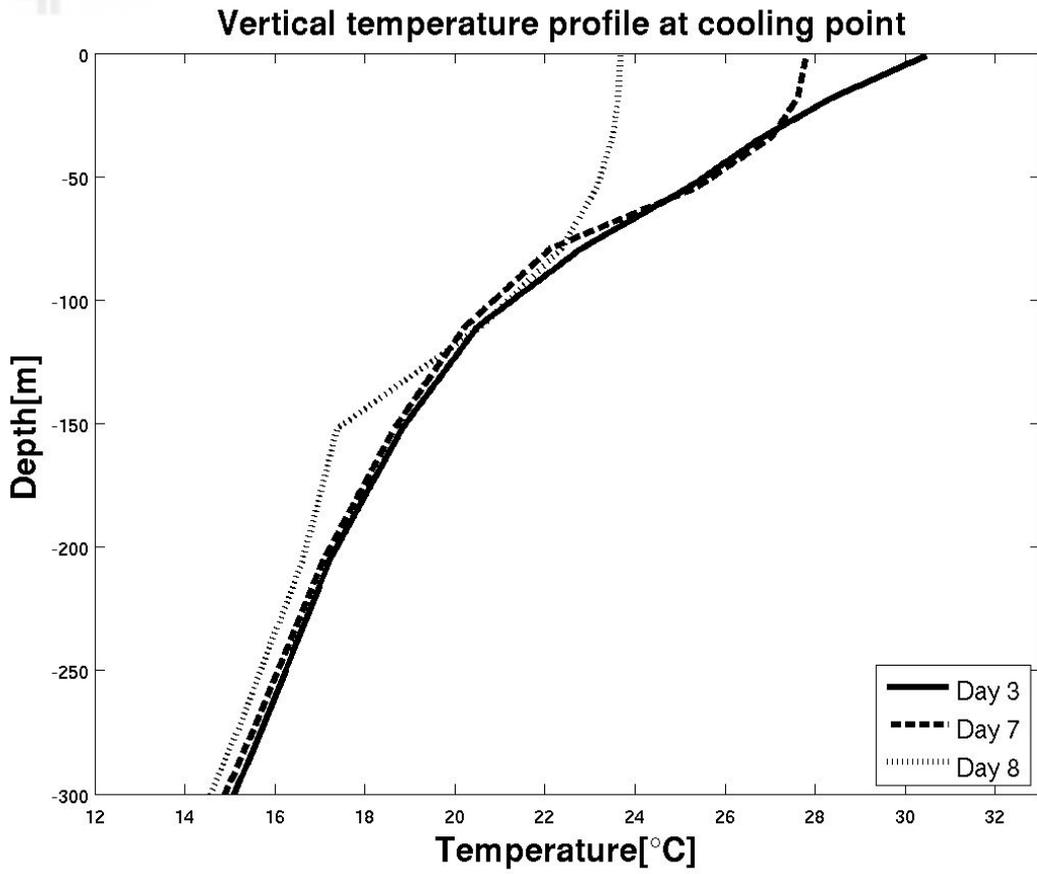


Fig. 26. Vertical profile of temperature at cooling point. Solid, dashed, dotted line indicates day 3, 7, 8, July 2006, respectively.

태풍 에위니아의 통과 후에 태풍 빌리스는 선행 태풍에 의해 냉각된 해수면 위를 통과하였다. 선행 태풍에 의해 냉각된 상층 해양 열적 구조가 태풍 빌리스에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 상층 해양 열적 구조가 냉각된 상태와 냉각되지 않은 상태로 나누어 접합 모델을 이용해 태풍 빌리스를 재현하였다.

접합 모델에서 재현된 태풍 빌리스의 진로는 냉각된 상층 해양 열적 구조의 포함에 관계없이 관측값과 비슷하였고(Fig. 27), 강도는 냉각된 상층해양 열적구조의 경우가 냉각되지 않은 경우보다 관측값에 비슷하게 재현되었다(Fig. 28). 냉각된 상층 해양의 열적 구조에 따라 중심기압은 최대 약 20hPa, 최대풍속은 약 8m/s의 차이가 발생하였다. 여기서 풍속은 RSMC-Tokyo의 10분 평균과 접합 모델의 1시간 간격의 결과값을 비교하였다.

해양 상층 구조에 따라 태풍 빌리스의 강도 차이가 나타난 원인을 알기 위해 냉각된 상층 해양을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 표층 순열속(net heat flux) 차이를 구하였다. 태풍 빌리스가 강하게 냉각된 해수면 지역을 통과하기 이전인 7월 11일에 냉각된 상층 해양을 포함한 경우가 포함하지 않은 경우보다 약  $200 \text{ W/m}^2$  이상의 열속 차이가 발생하여 태풍 발달에 필요한 잠열 에너지의 공급이 상대적으로 작게 나타났다. 냉각된 해수면 지역을 통과한 직후인 7월 13일에는 다소 잠열 에너지의 증가가 나타나긴 하였으나, 태풍이 이미 통과한 상태이기 때문에 태풍 발달에 크게 영향을 미치지 않았다(Fig. 29).

태풍에 공급된 에너지의 차이에 따른 태풍의 구조 차이를 분석하였는데, 냉각된 상층 해양의 경우에서 냉각되지 않은 경우의 차이를 수평으로 500hPa 와도장(Vorticity)과 연직으로 남북방향의 바람을 이용하였다.

강하게 냉각된 해수면 지역을 기준으로 태풍 빌리스가 통과하기 전에는 와도차가 작게 나타났지만, 통과 후에는 태풍을 중심으로 음의 와도가 강하게 형성되어 태풍의 저기압성이 상대적으로 작았다는 것을 보여주었다(Fig. 30). 연직으로는 태풍 중심에서 남북방향의 바람차가 상당히 작았지만, 통과하면서 남북 방향의 바람차가 상당히 커졌다. 그리고 태풍 중심에서 좌측은 양의 값이 나타나고, 우측은 음의 값이 나타나 시계방향의 아노말리 형태를 보였다(Fig. 31). 그래서 냉각된 상층 해양을 포함한 경우가 냉각되지 않은 상층 해양을 포함한 경우보다 저기압성 구조가 약했기 때문에 태풍의 강도 차이가 나타났다.

### Track of typhoon Bilis

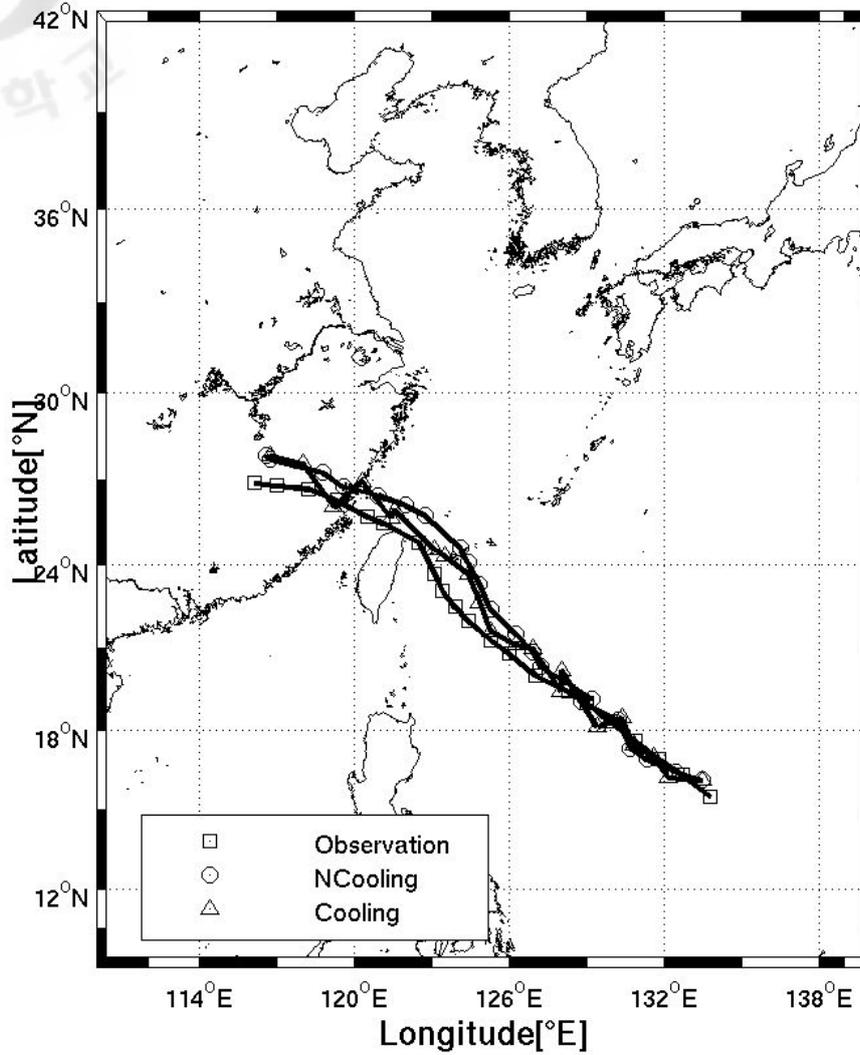


Fig. 27. Track of typhoon Bilis. Triangle, circle marker represent experiment including cooling condition of upper ocean and not, respectively. Square marker represents RSMC-Tokyo.

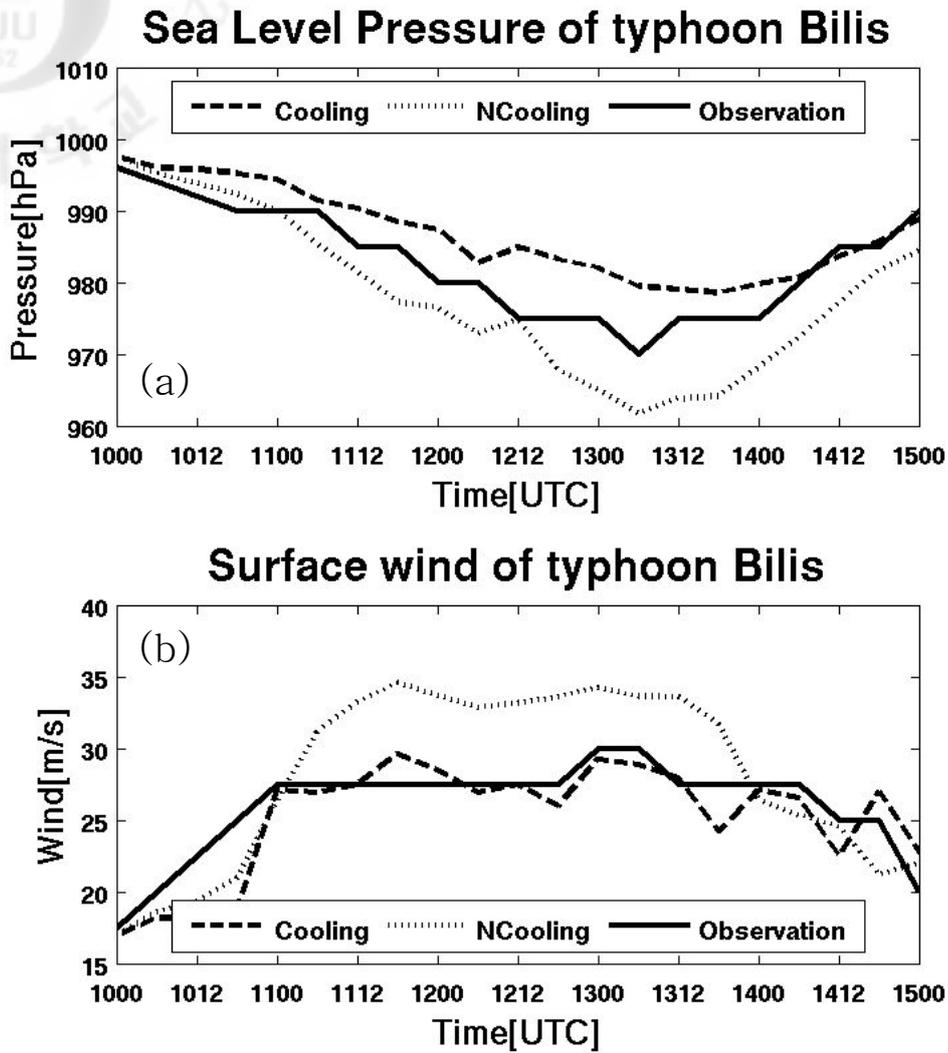


Fig. 28. Time series of (a) sea level pressure (b) surface wind according to cooling condition. Dashed, dotted, solid line represents cooling, not cooling, RSMC-Tokyo.

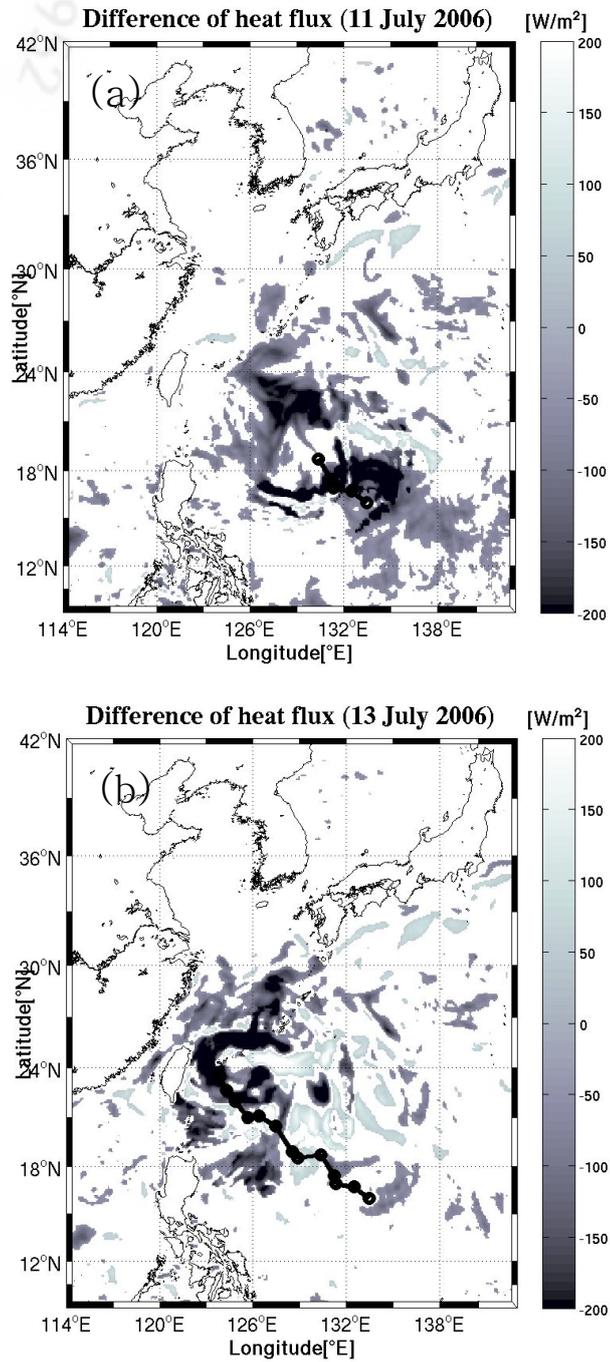
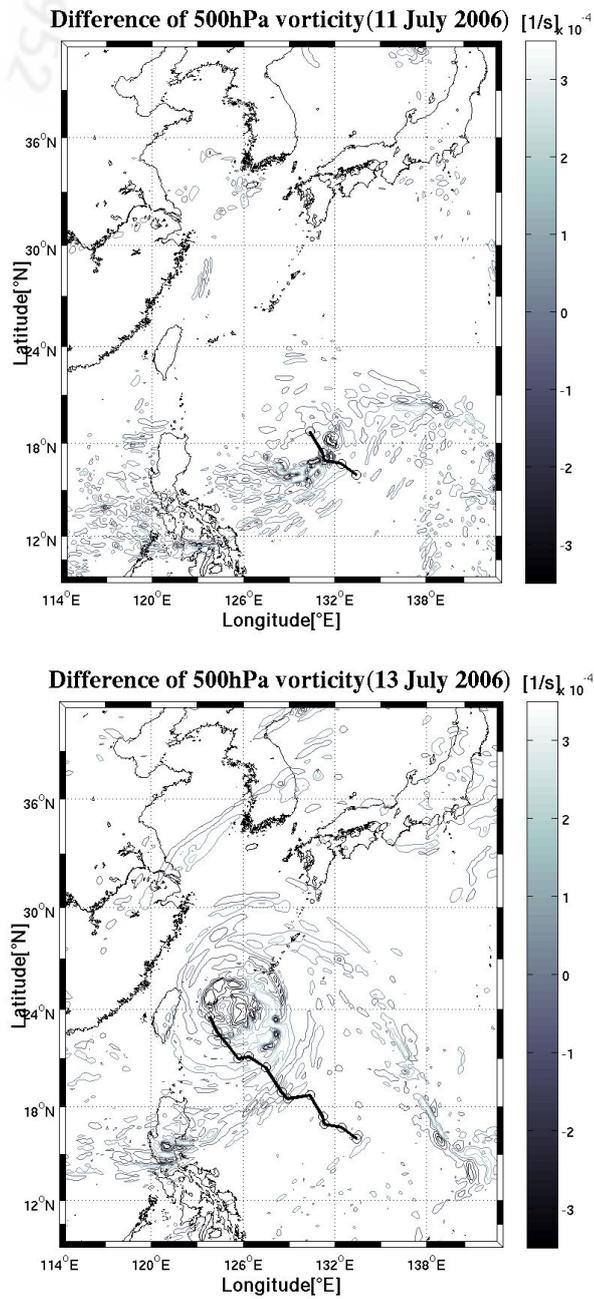


Fig. 29. Difference of surface net heat flux according to upper ocean condition at (a) 11day (b) 13day July 2006.



**Fig. 30.** Difference of 500hPa vorticity according to upper ocean condition at (a) 11day (b) 13day July 2006. Black line indicates location of typhoon Bilis.

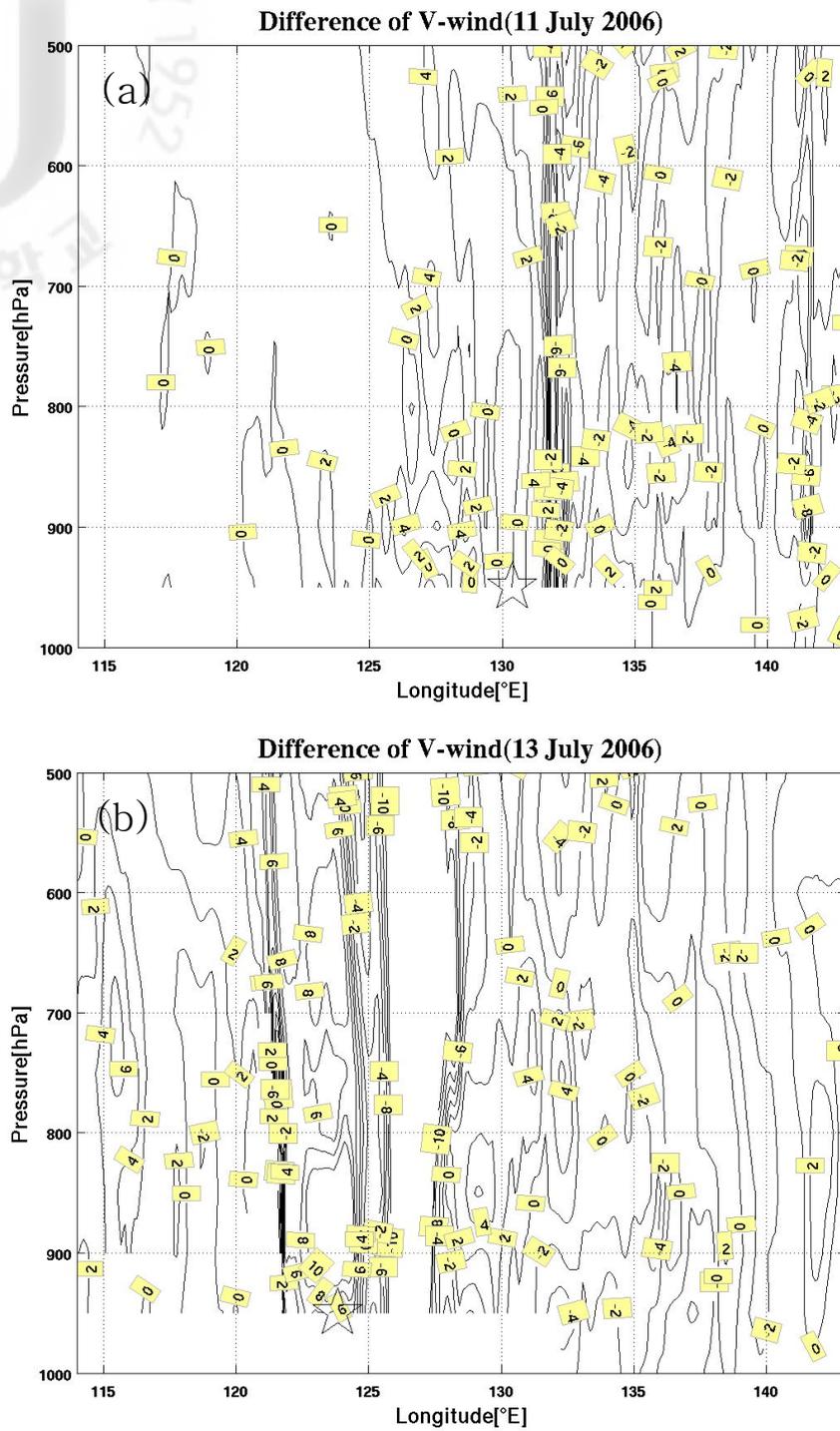


Fig. 31. Difference of v-wind according to upper ocean condition at (a) 11day (b) 13day July 2006. The star marker indicates location of typhoon Bilis.

### 3.3 근접 태풍에 의해 변형된 대기 구조가 주변 태풍의 진로에 미치는 영향

#### 3.3.1 태풍 라이언락(1006), 곤파스(1007), 남테운(1008) 사례

기상청의 예보에서 태풍 곤파스(1007)는 동중국해에서 중국 내륙지방으로 향하는 진로에서 황해를 거쳐 한반도로 급격하게 전향하는 진로로 바뀌었다. 특히 태풍 곤파스가 급격히 전향을 하는 시기에 남중국해 근처에서는 태풍 남테운이 태풍 라이언락에 흡수되고 있었다. 그래서 근접 태풍 남테운과 라이언락의 주변을 통과하던 태풍 곤파스가 어떠한 영향을 받았는지 수치모의를 통해 알아보았다.

태풍 곤파스 사례를 위한 실험은 대기의 초기조건에서 태풍 곤파스를 제외한 근접 태풍인 라이언락과 남테운에 보거싱 효과를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어 태풍-해양 접합 모델로 재현해 태풍 곤파스의 진로와 강도를 분석하였다. 보거싱 효과를 적용하는 것은 대기의 초기조건에서 태풍 구조를 실제 태풍과 비슷한 구조로 모사하기 위해서다.

접합 모델에서 재현된 태풍 곤파스는 류큐열도(Ryukyu Island)를 통과하기 이전까지 진로 차이가 작았으나, 통과하면서 진로 차이가 점점 커졌다(Fig. 32). 그렇지만 태풍의 강도는 근접 태풍의 보거싱 효과를 적용한 여부에 관계없이 관측값과 비슷하게 나타났다(Fig. 33). 태풍 남테운은 진로에서 보거싱 효과를 적용한 것이 관측값과 유사하게 나타났으나, 적용하지 않은 것은 관측값에 비해 초기위치부터 차이가 나타났다(Fig. 34). 강도도 보거싱 효과를 적용한 경우가 적용하지 않은 경우에 비해 관측값과의 오차가 작게 나타났다.(Fig. 35).

근접 태풍의 보거싱 효과에 따른 태풍 곤파스의 진로 차이의 원인을 알기 위해 태풍의 구조를 확인할 수 있는 500hPa 와도장(vorticity)과 태풍의 진로를 결정하는 500 hPa 유선도(streamline)를 사용하여 분석하였다. Fig. 36과 Fig. 37은 각각 와도장과 유선도의 시공간 분포를 나타내고, 그중에서도 좌측은 근접 태풍의 보거싱 효과가 적용되지 않은 경우이고, 우측은 근접 태풍의 보거싱 효과가 적용된 경우를 의미한다.

8월 29일에 보거싱 효과를 적용한 경우에서 근접 태풍 라이언락, 남태운의 구조가 명확하게 나타나는 것에 비해, 적용하지 않은 경우는 태풍 곤파스만 뚜렷한 구조가 나타났다. 8월 30일에는 두 경우 모두 이전보다 뚜렷한 구조가 나타나면서 태풍의 강도가 점차 강해지고 있음을 알 수 있다. 8월 31일 이후로 소형 태풍 남태운은 주변에 있는 태풍 라이언락에 의해 흡수되어 점차 소멸되기 시작한다.

8월 29일부터 30일까지는 태풍들의 위치 차이가 크지 않았으나, 8월 31일부터 근접 태풍 남태운은 보거싱 효과의 적용 여부에 따라 상대적으로 태풍 중심의 위치 차이가 나타났다(Fig. 37(c)). 이러한 위치의 차이는 500hPa에서 북태평양 고기압 가장자리의 흐름을 바꾸어 놓는 결정적인 역할을 하였다. 그래서 근접 태풍에 보거싱 효과를 적용하지 않은 경우에는 태풍 곤파스의 진로를 서쪽으로 유도하였고, 보거싱 효과를 적용한 경우에는 북쪽으로 유도하였다. 이처럼 태풍 라이언락, 남태운과 같은 근접 태풍이 주변을 통과하던 태풍 곤파스의 진로에 미치는 영향을 모의하기 위해서는 태풍 예측 모델에서 예측하고자 하는 태풍에만 보거싱 효과를 적용하기 보다는 주변 태풍에도 보거싱 효과를 적용하여 태풍의 정확한 구조를 모의해야 함을 보여준다.

### Track of typhoon Kompas

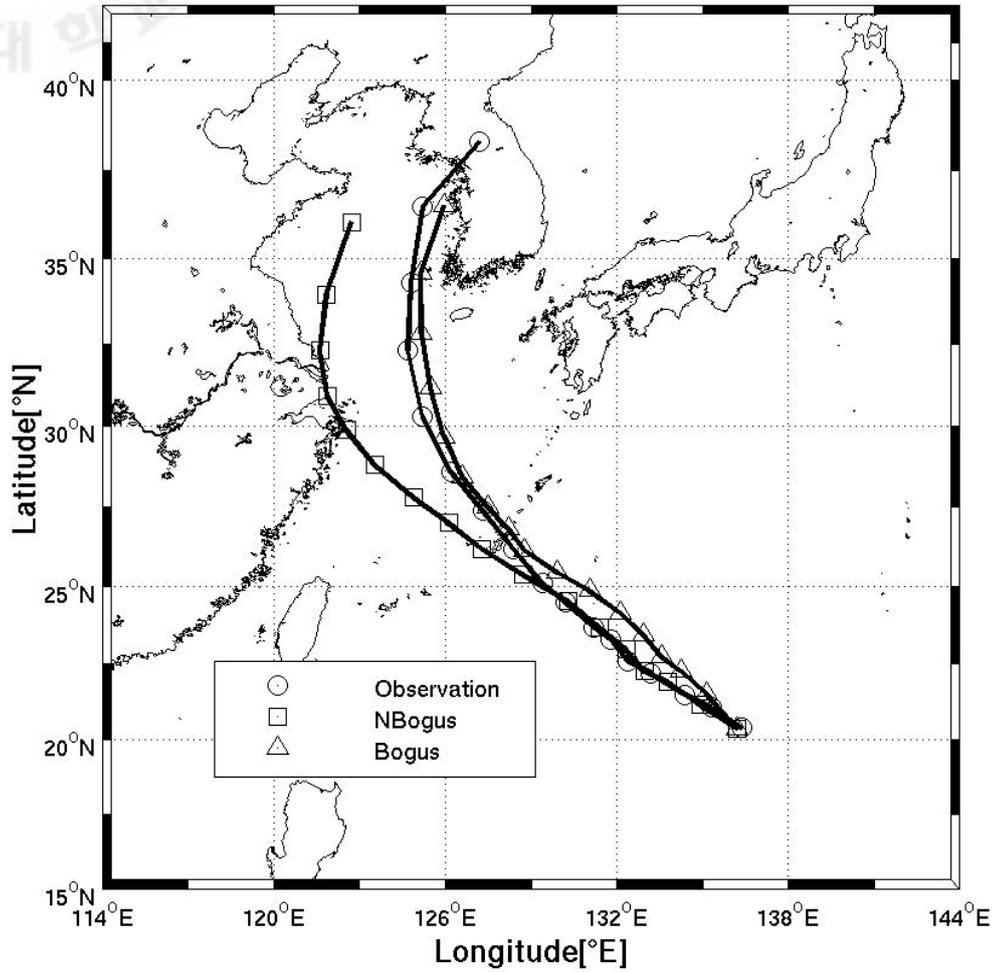
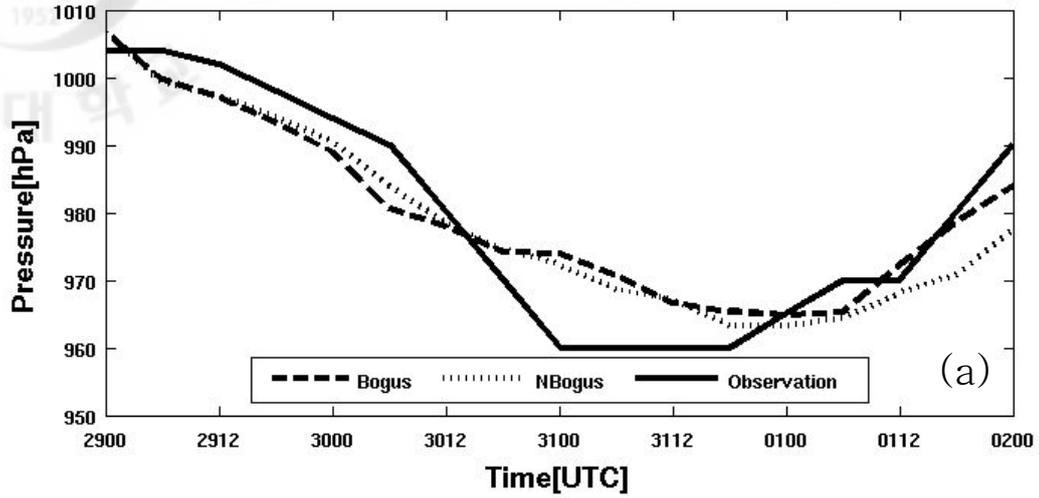


Fig. 32. Track of typhoon Kompas. Triangle, square marker represents experiment with and without bogussing, respectively. Circle marker represents RSMC-Tokyo.

Sea Level Pressure of typhoon Kompasu



Surface wind of typhoon Kompasu

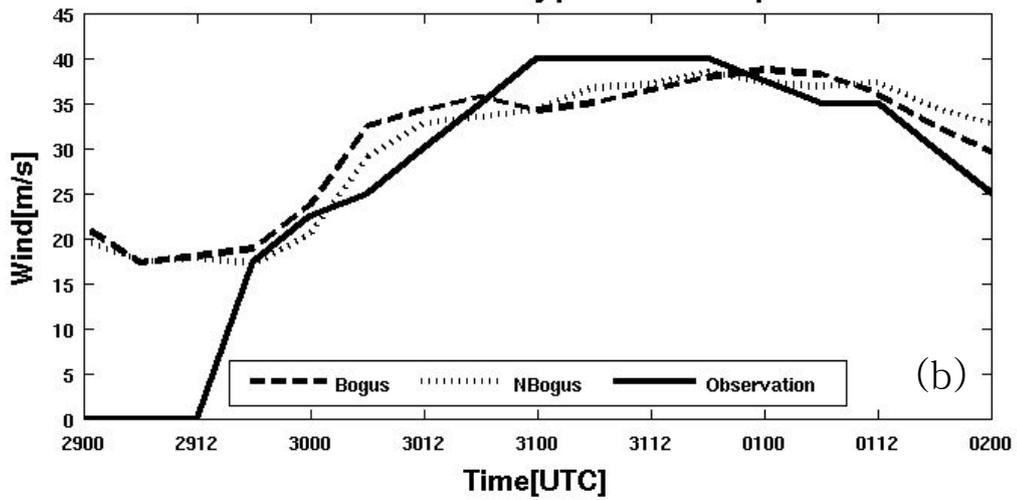


Fig. 33. Time series of (a) sea level pressure (b) surface wind according to bogussing effect. Dashed, dotted, Solid lines represent bogussing, not bogussing, RSMC-Tokyo, respectively.

### Track of typhoon Namtheun

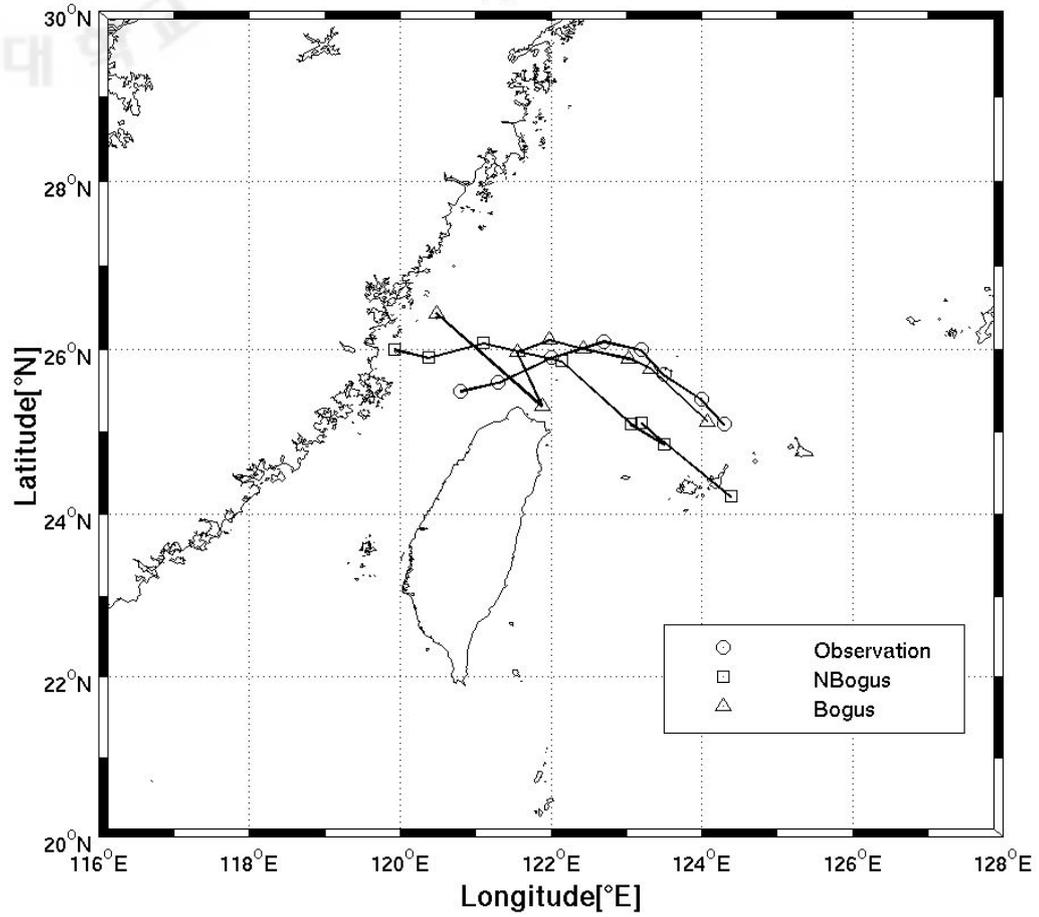
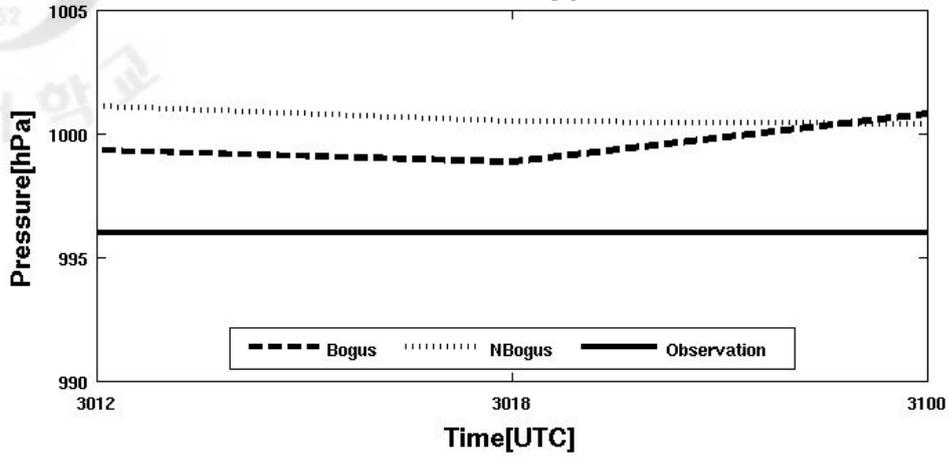


Fig. 34. Track of typhoon Namtheun. Triangle, square marker represents experiment with and without bogussing, respectively. Circle marker represents RSMC-Tokyo.

Sea Level Pressure of typhoon Namtheun



Surface wind of typhoon Namtheun

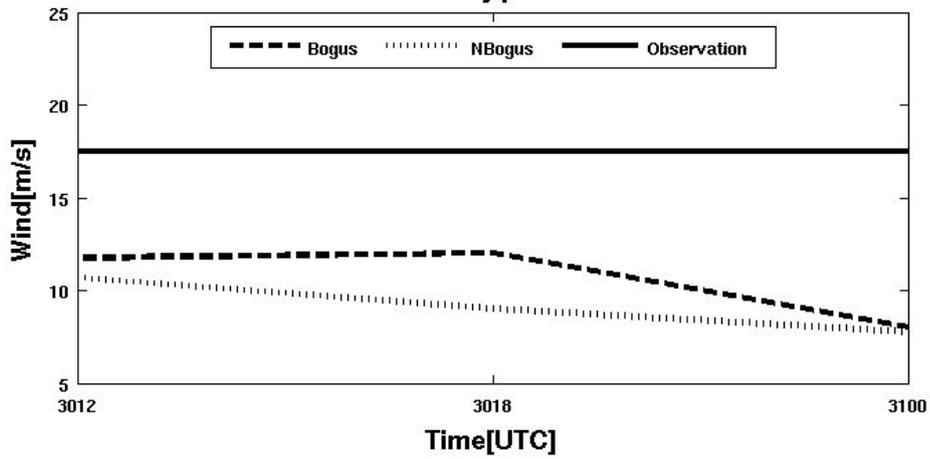
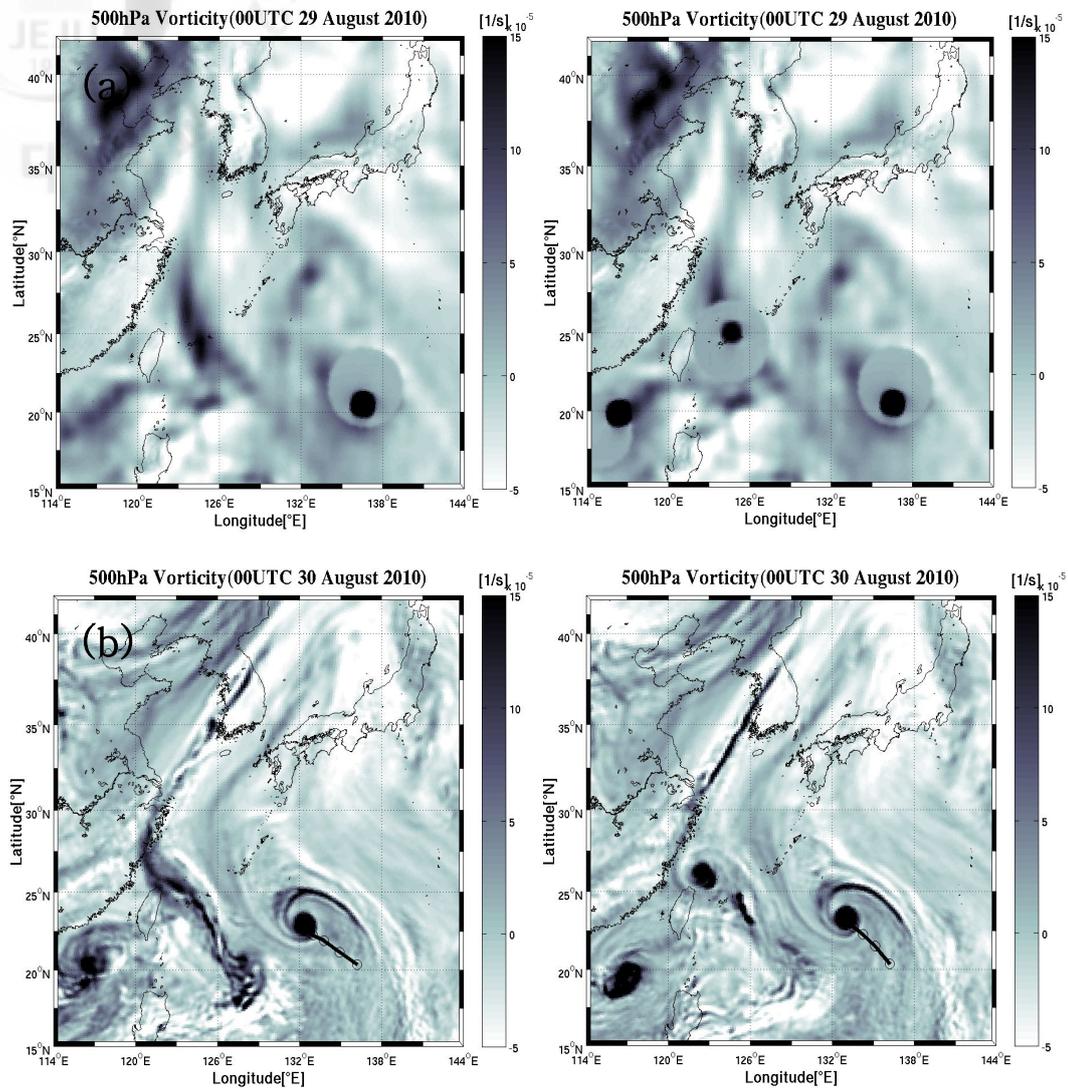
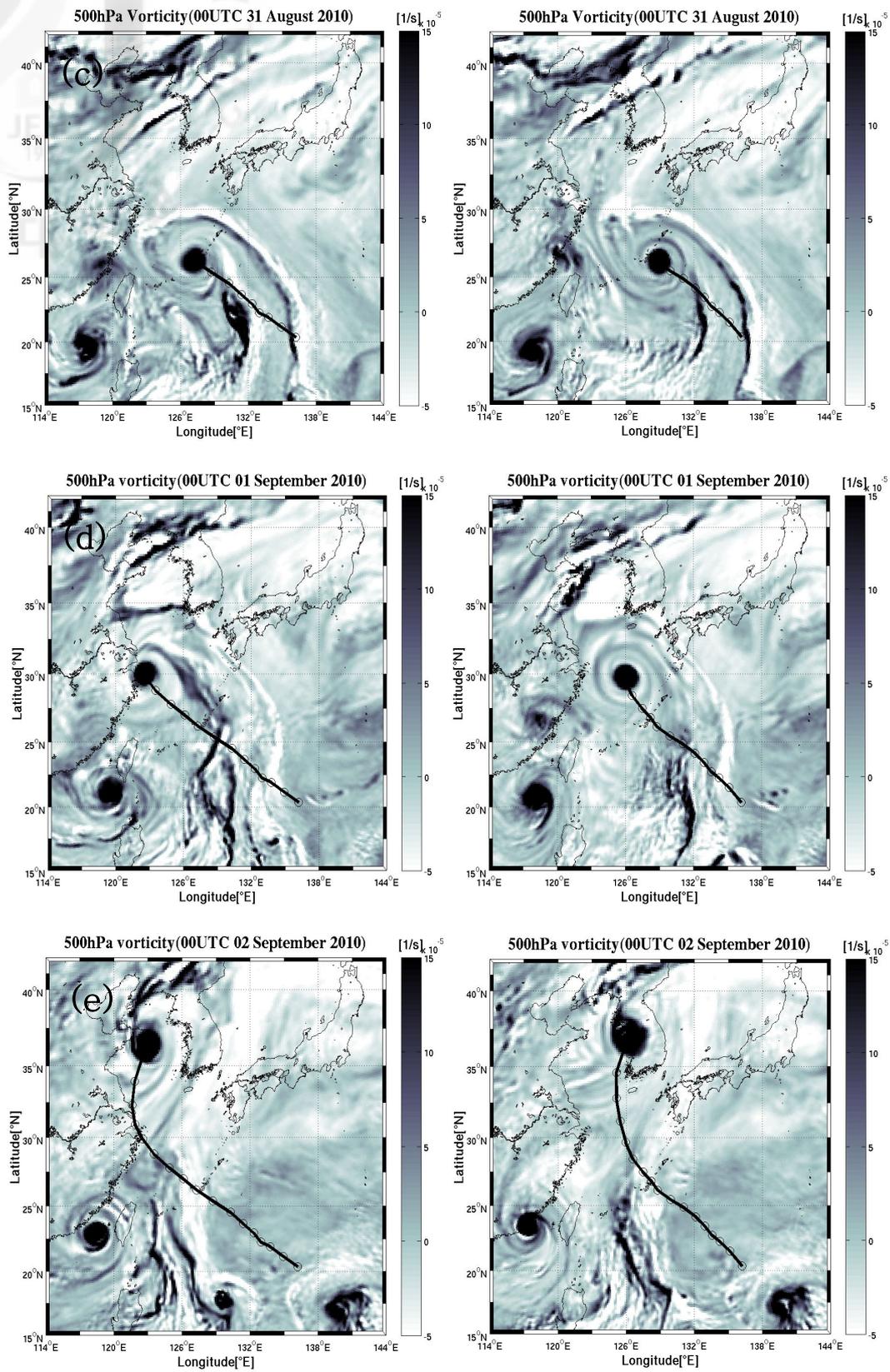


Fig. 35. Time series of (a) sea level pressure (b) surface wind according to bogussing effect. Dashed, dotted, Solid lines represent bogussing, not bogussing, RSMC-Tokyo, respectively.



**Fig. 36.** 500hPa vorticity at (a) 29day (b) 30day (c) 31day August (d) 1day (e) 2day September 2006. Left, right figures indicate without and with bogussing effect, respectively. Black line represents simulated track of typhoon Kompas.



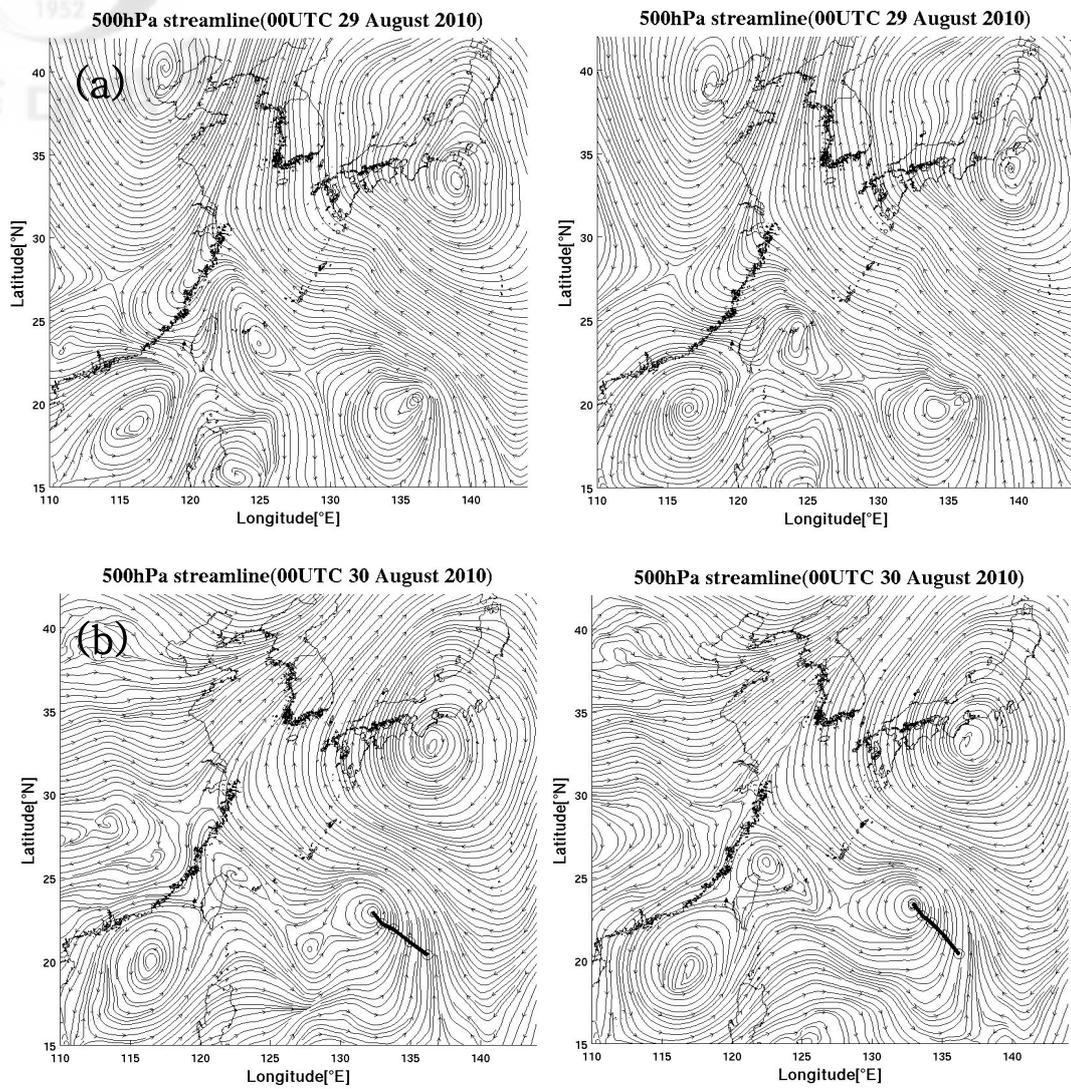
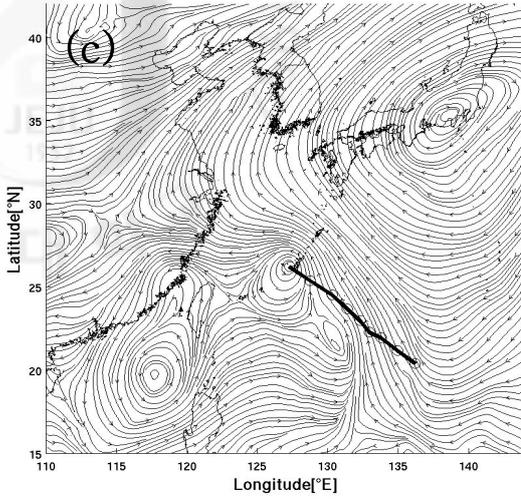
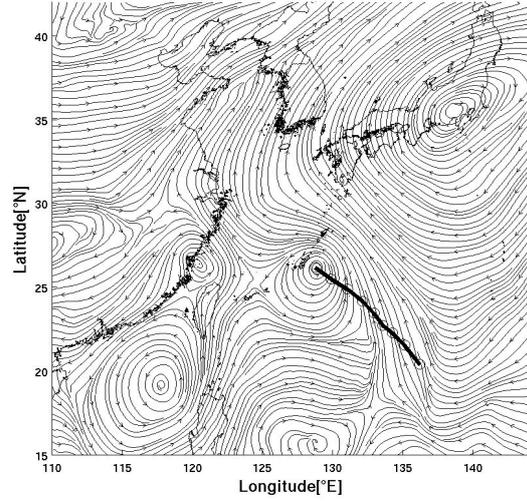


Fig. 37. Same as in Fig. 36, but 500hPa streamlines.

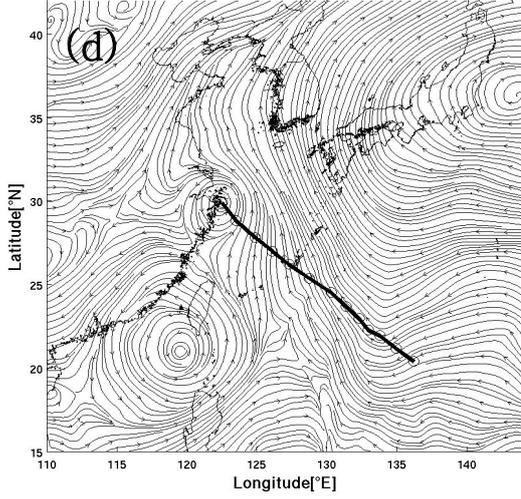
500hPa streamline(00UTC 31 August 2010)



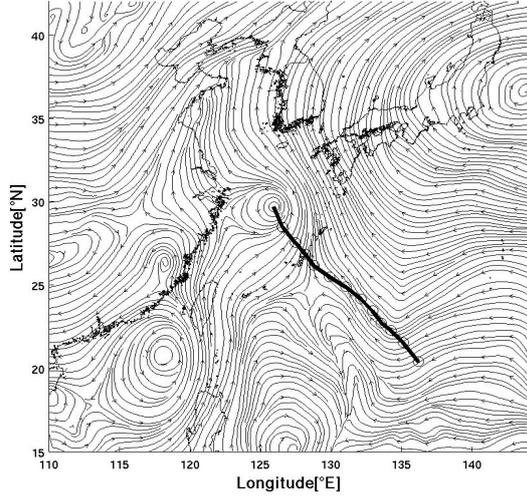
500hPa streamline(00UTC 31 August 2010)



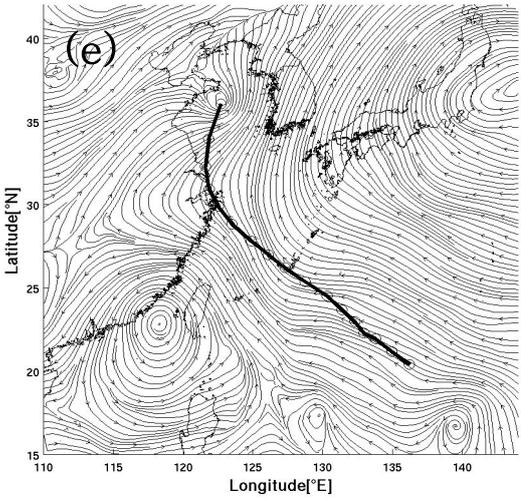
500hPa streamline(00UTC 01 September 2010)



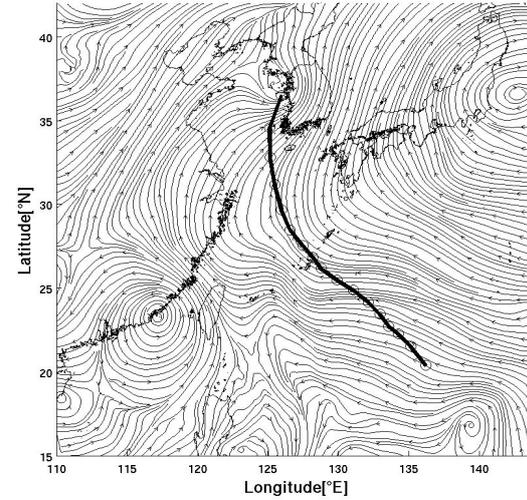
500hPa streamline(00UTC 01 September 2010)



500hPa streamline(00UTC 02 September 2010)



500hPa streamline(00UTC 02 September 2010)



## 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 태풍-해양 접합 모델을 이용하여 모델의 물리과정 모수화 방법에 대한 민감도 실험을 수행하고, 태풍 예측의 정확도를 높일 수 있는 최적화된 모수화 방법을 선정하여 북서태평양에서 선행 및 근접 태풍이 태풍의 진로와 강도에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

수치 실험에 사용된 접합 모델은 WRF 대기모델과 ROMS 해양모델을 MPI라는 병렬 프로그래밍 함수를 이용하여 접합되었다. 접합모델에서 WRF모델은 ROMS모델에게 바람응력과 열속을 전달하고, 반대로는 해수면 온도를 동일한 시간에 전달하는 방식으로 구성하였다. 모델의 물리과정 민감도 실험은 태풍 에위니아(0603) 사례에 대해 수행하였다. 수행결과, 관측값과의 진로 및 강도 오차가 가장 작은 EMM(ETA-MYJ-MY25)을 최적화된 모수화 방법으로 선정해 모든 실험에 적용하였다.

먼저 태풍-해양 접합모델을 이용하여 선행 태풍 에위니아(0603)에 의해 발생한 상층 해양의 열적변화가 그 해역을 지나는 후속 태풍 빌리스(0604)에게 어떠한 영향을 미쳤는지 조사하였다. 필리핀 해상에서 전향하던 태풍 에위니아에 의해 발생한 해수면 냉각은 TMI SST의 위성 관측자료와 접합모델의 수행결과에서 최대 7°C까지 나타났다. 이러한 강한 해수면 냉각이 발생한 것은 필리핀 해상의 얇은 혼합층(즉, 낮은 해양열용량)과 전향으로 인한 태풍 이동속도가 느려졌기 때문이다.

태풍 에위니아의 통과 후에 태풍 빌리스는 태풍 에위니아에 의해 강하게 냉각된 해수면 위를 통과하였다. 선행 태풍에 의해 냉각된 해수면이 태풍 빌리스에 미치는 영향을 알아보기 위해서 선행 태풍 에위니아에 의해 냉각된 상층 해양과 선행 태풍 에위니아가 통과하기 이전의 상층 해양을 초기조건으로 하여 태풍 빌리스의 진로와 강도를 모의하였다. 수치실험 결과, 두 실험에서 태풍 빌리스의 진로 차이는 거의 없었으나, 강도(즉, 중심기압)는 약 20hPa의 차이가 발생하였다. 이러한 태풍 강도의 차이는 500hPa 와도장과 연직으로 남북방향의 바람장을 통해 태풍이 냉각된 상층 해양을 통과하면서 태풍의 에너지원인 열속이 감소하

여 태풍의 저기압성 구조가 약해진 것으로 사료된다.

태풍-해양 접합모델을 이용하여 선행 태풍 뿐만 아니라 근접 태풍이 태풍의 강도와 진로에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 기상청의 2010년 8월 30일 09UTC 예보에서 태풍 곤파스(1007)는 실제 경로(황해로 전향)와는 달리 중국 남부지방으로 직진하는 것으로 보고하였다. 이렇게 경로 예측의 오차가 발생한 시기에 남중국해에서는 태풍 남태운이 태풍 라이언락으로 흡수되고 있었고, 태풍 곤파스는 그 주변을 통과하고 있었다. 본 연구에서는 태풍 곤파스의 진로가 근접 태풍 남태운과 라이언락의 영향을 받았는지를 조사하기 위하여 태풍 곤파스의 진로 부근에 위치한 태풍 라이언락과 남태운을 실제 강도와 유사하게 보거싱한 경우와 하지 않은 경우로 나누어 수치실험을 수행하였다.

그 결과, 근접 태풍을 보거싱한 경우는 하지 않은 경우에 비해 태풍 곤파스의 실제 진로를 비슷하게 재현하였다. 태풍 라이언락과 남태운에 보거싱을 적용한 경우가 하지 않은 경우에 비해 태풍의 구조가 뚜렷하게 나타났고, 강도 또한 관측값과 유사하게 나타났다. 태풍의 진로를 결정하는 500hPa 유선도의 분석 결과, 이러한 주변 태풍의 강도 개선이 태풍 남태운의 진로에 영향을 주었고, 결과적으로 진로 주변에 분포하는 북태평양의 고기압 가장자리의 흐름을 변화시켜 태풍 곤파스의 진로 차이를 유발시킨 것으로 나타났다. 이러한 결과는 향상된 태풍의 진로 및 강도 예측을 위해서 태풍-해양 접합모델을 이용하여 선행 태풍에 의한 변화된 상층 해양을 고려해야 하고, 태풍 간의 상호작용을 현실적으로 고려할 수 있도록 보거싱을 통해 예측하고자 하는 태풍 뿐만 아니라, 경로 상에 있는 태풍의 초기 강도까지도 정확하게 예측해야 함을 시사한다.

## 참고문헌

- 김주홍, 허창희, 백종진, 2002: 1951-2001동안 한반도 주변을 통과하는 태풍에 대한 연구. *대기지*, **12**, 436-439.
- 이두호, 권혁조, 원성희, 박선기, 2006: 모수화된 해면 냉각을 활용한 태풍 모의 실험, *대기지*, **16**, 97-110.
- 정영윤, 2010: 태풍 통과 후 상층 해양의 변동특성 연구, 제주대학교 석사학위 논문, 1-47pp.
- Bender M. A., I. Ginis and Y. Kurihara, 1993: Numerical simulations of the tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. *J. Geophys. Res.*, **98**, 23 245-23 263.
- Bender, M. A., and I. Ginis, 2000: Real case simulations of hurricane-ocean interaction using a high resolution coupled model: Effects on hurricane intensity. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 917-946.
- Dong, K., and C. J. Neumann, 1983: On the relative motion of binary tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 945-953.
- Emanuel, K. A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- Emanuel, K., C. DesAutels, C. Holloway and R. Korty, 2004: Environmental control of tropical cyclones intensity. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 843-858.
- Fujiwhara, S., 1921: The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **47**, 287-293.
- Ginis I., 1995: Interaction of tropical cyclones with the ocean. Global Perspectives on Tropical Cyclones, Ch. 5, R. L. Elsberry, Ed., Tech. Doc. WMO/TD No.693, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 198-260.
- Hsiao, L. F., 2000: An eof analysis and modeling study of the multi-typhoons

- movement over the west northern pacific and the south china sea. 24th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Fort. Lauderdale, 466-467.
- Hsiao, L. F. and K. Y. Liu, 2001: An objective diagnosis and modeling of binary tropical cyclones: a case study of typhoon Saomai and Bopha in 2000. International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon in East Asia, Taipei, 195-200.
- Khain, A., I. Ginis, A. Falkovich and M. Frumin, 2000: Interaction of binary tropical cyclones in a coupled tropical cyclone-ocean model. *J. Geop. Res.*, **105**, 22337-22354.
- Kuo, H. C., G. T.-J. Chen and C. H. Lin, 2000: Merger of tropical cyclones Zeb and Alex. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2967-2975.
- Kurihara, Y., M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 439-470.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.
- Laprise R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 197-207.
- Lin, I. I., C. C. Wu, I. F. Pun, and D. S. Ko, 2008: Upper-ocean thermal structure and the Western North Pacific category 5 typhoon. Part I: Ocean features and the category 5 typhoon's intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3288-3306.
- Moon. I.-J., 2005: Impact of a coupled ocean wave-tide-circulation system on coastal modeling. *Ocean Modeling*, **8**, 203-236.
- \_\_\_\_\_, I. Ginis, and T. Hara, 2004: Effect of surface waves on air-sea momentum exchange: II. Behavior of drag coefficient under tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, **61(19)**, 2334-2348.
- \_\_\_\_\_, and S. J. Kwon, 2010: Impact of upper-ocean thermal structure on the

- intensity of Korean Peninsular landfall typhoons, *Progress in Oceanography*, accepted.
- Oey, L.-Y., T. Ezer, D.-P. Wang, X.-Q. Yin and S.-J. Fan, 2007: Hurricane-induced motions and interaction with ocean currents, *Cont. Shelf Res.*, **27**, 1249-1263;doi:10.1016/j.csr.2007.01.008.
- Price, J. F., 1981: Upper Ocean Response to Hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 153-175.
- Shay, L. K., P. G., Black, A. J., Mariano, J. D., Hawkins, L., Russell, 1992: Upper ocean response to hurricane Gilbert. *J. Geophys. Res. Lett.*, **97**, 227-248.
- Shay, L. K., and G. J. Goni, and P. G. Black, 2000: Effects of a warm oceanic feature on hurricane Opal. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1366-1383.
- Tseng, Y.-H., S. Jan, D. E. Dietrich, I. I., Lin, Y. Y., Chang, and T. Y., Tang, 2010: Modeled oceanic response and sea surface cooling to typhoon Kai-Tak. *Terr Atmos. Ocean. Sci.*, **21(1)**, 85-98.
- Tuleya, R. E., and Y. Kurihara, 1982: A Note on the Sea Surface Temperature Sensitivity of a Numerical Model of Tropical Storm Genesis. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 2063-2069.
- Wu, C. -R., Y. -L., Chang, L. -Y., Oey, C. -W. J., Chan, and Y. -C., Hsin, 2008: Air-sea interaction between tropical cyclone Nari and Kuroshio. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L12605, doi:10.1029/2008GL033942.

## 감사의 글

제가 석사학위 논문을 마치기까지의 과정동안 물신양면으로 도와주신 모든 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

우선 제가 제주대학교 해양기상학 협동과정에 들어와서 학문의 길을 걸어가도록 도와주신 지도교수 문일주 교수님께 깊이 감사드립니다. 교수님께서 잘 이끌어주신 덕분에 가끔씩 흔들렸던 마음에도 꺾끗하게 이겨낼 수 있었습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 정성을 다해 논문 심사를 해주시고, 격려를 아끼시지 않았던 방익찬 교수님, 강기룡 박사님께도 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

해양 기상학 실험실에 있는 동안 좋은 추억을 가져다주신 분들께도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 연구실의 귀감이 되어주시는 의수형과 경식이형, 먹을거리 부족함 없이 배부르게 해주시는 지희누나와 미영이누나, 인생의 멘토가 되어주시는 준호형, 모든 일에 적극적인 자세로 임하시는 상명이형, 학문의 멘토가 되어주시는 성훈이형, 실험실의 유머 전도사이신 민영이형, 웃음으로 실험실을 환하게 밝혀주시는 광석이형, 실험실 최고의 분위기 메이커 영윤이, 항상 잘 챙겨주는 동기 명순이, 웃음 바이러스를 퍼트려주는 동기 유선이, 귀염둥이 막내 유정이와 함께 실험실내에서 울고 웃었던 모든 추억 영원히 잊지 않고, 오래도록 간직하겠습니다.

제가 가는 길에 부족함 없이 채워주시는 우리 아버지, 어머니, 그리고 내 동생 동환이 언제나 사랑하고 감사합니다. 인생의 목표를 향해 흔들림 없이 잘 하도록 노력하고, 베풀어주신 은혜에 꼭 보답하겠습니다.

마지막으로 힘들고 괴로워도 저를 위로해 주었던 절친 담이, 대석이, 그리고 뒤에서 항상 지켜봐주는 대학 동기들, 고등학교 친구들, 대학원 동기 미소에게도 감사의 인사를 전합니다. 여러분들이 있었기에 지금까지 제가 행복하게 지낼 수 있었다고 생각합니다. 감사의 글을 통해 일일이 언급하진 못했지만, 모든 분들의 관심과 격려에 감사드립니다. 앞으로 모든 분들에게 보답하는 자세로 겸손하게 인생을 살아가겠습니다. 사랑합니다, 여러분!

2012년 1월 10일 고 철 민