



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

해양-대기 접합모델을 이용한  
큐슈 지형에 의한 2020년 태풍  
하이선의 영향 조사

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

도 세 원

2021 년 8 월



# 해양-대기 접합모델을 이용한 큐슈 지형에 의한 2020년 태풍 하이선의 영향 조사




지도교수 문 일 주

도 세 원

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2021년 6 월

도세원의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 김광일   
위 원 차은정   
위 원 문일주 

제주대학교 대학원

2021 년 6 월

# Investigation of the Influence of Kyushu Topography on Typhoon Haishen (2020) Using Ocean-Atmospheric Coupled Model

Se-Won Do

(Supervised by professor Il-Ju Moon)

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

2021. 06.

This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director Kwang-Il Kim, Prof. of Marine Industry and Maritime Police

.....  
Eun-Jeong, Cha, Ph. D of National Institute of Meteorological Sciences

.....  
Il-Ju Moon, Prof. of Marine Industry and Maritime Police

Date 2021. 06

Interdisciplinary Postgraduate Program in Marine Meteorology  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY



# 목 차

List of Figures .....	ii
List of Tables .....	vii
Abstract .....	viii
I. 서론 .....	1
II. 자료 및 연구방법 .....	3
2.1 해양-대기 접합모델 개요 및 입력자료 .....	3
2.2 검증 자료 및 방법 .....	10
2.3 연구 사례 선정 .....	13
III. 큐슈의 지형 효과 민감도 실험 결과 .....	18
3.1 수치모델 정확도 검증 .....	18
3.2 큐슈 지형에 따른 하이선의 진로 변화 .....	28
3.2.1 하이선 진로 변화 .....	28
3.2.2 배경지향류 변화 .....	30
3.2.3 하층 대류권 순환 변화 .....	34
3.3 큐슈 지형에 따른 하이선의 강도 변화 .....	36
3.3.1 하이선 강도 변화 .....	36
3.3.2 한반도 인근 해역 풍속 변화 .....	40
3.3.3 수직 풍속 변화 .....	45
3.4 큐슈 지형에 따른 하이선의 강수 분포 및 최대 강수량의 변화 .....	48
IV. 요약 및 결론 .....	53
참고문헌 .....	56
부록 .....	60

## List of Figures

- Fig. 1.** Schematic of ocean–atmosphere coupled modeling system using the Weather Research and Forecasting (WRF) and Regional Ocean Modelling System (ROMS). The elements of the coupled model such as sea surface temperature (SST), air pressure (Pair), air temperature (Tairs) among others, are exchanged through the Model Coupling Toolkit (MCT) connected through the Coupled Ocean–Atmosphere–Wave–Sediment Transport (COAWST) modeling system. .... 4
- Fig. 2.** The topographic map of the model domain. The black box indicates the domain use for the ocean and atmosphere models. .... 8
- Fig. 3.** Schematic of the sensitivity experiments based on varyings terrain in the Kyushu Island. .... 8
- Fig. 4.** The typhoon tracks (gray lines) that passed (a) Korea Peninsula (red box) from 1983 to 2020. (b), same for a but for typhoon tracks that passed within 200 km radius of Mt. Aso in Kyushu Island (red circle). .... 15
- Fig. 5.** Tracks of selected five cases of tropical cyclones with rapid decrease in wind speed that passed within 200 km radius of Mt. Aso in Kyushu from 1983 to 2020. .... 17
- Fig. 6.** Six hourly best and simulated tracks of Typhoon Haishen The blue, and red lines represent the simulated tracks of the COAWST, WRF only model, respectively, while the gray line indicates the track from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC). The yellow stars are location of buoy observing stations by the Korean Meteorological Administration and green triangle is location of Mt. Aso. .... 21

- Fig. 7.** Comparison of simulated minimum central pressure of typhoon Haishen from 00UTC Sep 5 to 00UTC Sep 8. Comparison of model results from COAWST and WRF only models, respectively. The blue and red lines indicate the hourly precipitation from COAWST, WRF only model. The gray line indicates the track from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC). ..... 22
- Fig. 8.** Comparison of hourly precipitation between simulated experiments and Eorimok Automatic Weather Station (AWS). Comparison of model results from COAWST and WRF only models, respectively. The blue, and red lines indicate the hourly precipitation from COAWST, WRF only model. .... 23
- Fig. 9.** Comparison of observed and simulated wind speed and pressure (1-h interval) between Korean Meteorological Administration (KMA) buoy observing stations (dashed) and control (CTL) experiments (solid). The blue, and red lines indicate pressure and wind speed, respectively,. The inset statistics show the model bias, root mean square error (RMSE), and correlation coefficient (r) against the KMA observation for 3 days. .... 26
- Fig. 10.** Comparison of between simulated experiments and JTWC 17m/s wind radius (R34) for Haishen from 12UTC September 5 to 00UTC September 7 (12-h intervals). The light green area has a wind speed of more than 17m/s and green triangle is location of Mt. Aso. The dashed line indicate distance between the Haishen and Mt. Aso. .... 27
- Fig. 11.** Six hourly best and simulated tracks of Typhoon Haishen The black, blue and red lines represent the simulated tracks of the control (CTL), reduced (RED) and enhanced (ENH) sensitivity experiment, respectively, while the gray line indicates the track from the Joint

Typhoon Warning Center (JTWC). The yellow stars are location of buoy observing stations by the Korean Meteorological Administration and green triangle is location of Mt. Aso. .... 29

**Fig. 12.** The difference in background steering flow (200 to 850 hPa mean) from 06UTC September 6 to 18UTC September 6 (6-h intervals). The black lines (dots) represent the best track (central locations) of Typhoon Haishen. The black, blue, and red lines represent the simulated tracks of Typhoon Haishen using the control (CTL), reduced (RED) and enhanced (ENH) experiments. .... 32

**Fig. 13.** Schematic of the influence of Kyushu topography on the wind direction and intensity of Typhoon Haishen. The black, blue, and red arrows represents the control, reduced and enhanced experiments. .... 33

**Fig. 14.** The difference in the low-level circulation (850hPa) associated with typhoon Haishen from 12UTC September 6 to 18UTC September 6 (3-h intervals). The black dot represents the location of typhoon Haishen. While black dashed lines indicate the typhoon tracks until 00UTC on September 7. The black, blue, and red lines represent the control (CTL), reduced (RED) and enhanced (ENH) experiments. .... 35

**Fig. 15.** Comparison of simulated (a), minimum central pressure and (b), maximum wind speed of Typhoon Haishen from 06UTC Sep 6 to 12UTC Sep 7. The blue, and red lines indicate the intensity difference of the reduced (RED) and enhanced (ENH) relative to the control experiment (black lines). .... 38

**Fig. 16.** Mean sea surface temperature (SST) difference within 100 km radius of Mt. Aso in Kyushu Island from 06UTC September 6 to 06UTC September 7. (a), mean SST difference between initial SST and 1-h interval updated SST of the control (CTL) experiments. (b), mean SST difference between the control (CTL) and reduced (RED) experiments. .... 39

- Fig. 17.** Simulated maximum wind speeds at 10m (6-h interval) in sensitivity experiments, simulated maximum wind speed and typhoon track using the reduced (RED), control (CTL) and enhanced (ENH) experiments. .. 43
- Fig. 18.** same as Fig. 17 but shows the difference of maximum wind speed at of 10m for control (CTL) minus reduced (RED) experiments and enhanced (ENH) minus RED experiments. The black, blue, and red lines represent the track of Typhoon Haishen using CTL, RED and ENH experiments. Vertical cross section of difference in wind speed in sensitivity experiments based on varying Kyushu topography from. Left panels, the difference between control (CTL) and reduced (RED) experiments. Right panels, the difference between enhanced (ENH) and RED experiments. The black dashed line represents central location of Typhoon Haishen while the black shading indicates the terrain. .... 44
- Fig. 19.** Vertical cross section of difference in wind speed in sensitivity experiments based on varying Kyushu topography from. Left panels, the difference between control (CTL) and reduced (RED) experiments. Right panels, the difference between enhanced (ENH) and RED experiments. The black dashed line represents central location of Typhoon Haishen while the black shading indicates the terrain.. .... 47
- Fig. 20.** Cumulative precipitation in sensitivity experiments and track of Typhoon Haishen from 00 Korean Standard Time (KST) September 6 to 00KST September 8. (a) and (b) cumulative precipitation in reduced (RED) and control (CTL) experiments. (c), mean difference of cumulative precipitation in CTL and RED experiments, (d), enhanced (ENH) and RED experiments. The yellow arrow represents the direction of moisture. In (a)-(d), the black, blue and red lines indicate the track of Typhoon Haishen using CTL, RED and ENH experiments. .... 50
- Fig. 21.** Difference of upward moisture flux (QFX) in sensitivity experiments and track of Typhoon Haishen from 00 Korean Standard Time (KST) 6

September to 00KST September 8 (6-h intervals). mean difference in QFLX between control (CTL) and reduced (RED) experiments and enhanced (ENH) and RED experiments. The black, blue, and red lines indicate the track of Typhoon Haishen using CTL, RED and ENH experiments. ....51

**Fig. 22.** Comparison of hourly precipitation between simulated experiments and Eorimok Automatic Weather Station (AWS). comparison of model results from COAWST models, respectively. The black, blue, and red lines indicate the hourly precipitation from control (CTL), reduced (RED) and enhanced (ENH) experiments. ....52

## List of Tables

<b>Table 1.</b> Summary of WRF and ROMS model configuration. ....	9
<b>Table 2.</b> List of typhoons that passed within 200 km radius of Mt. Aso in Kyushu Island. ....	16
<b>Table 3.</b> Observed and simulated of COAWST and WRF only model mean, total and maximum rainfall in Korean Peninsula and Jeju Island. ....	23
<b>Table 4.</b> Observed and simulated mean, total and maximum rainfall in Korean Peninsula and Jeju Island. ....	52

## Abstract

This study investigates how the topography of Kyushu affected the track, intensity, and precipitation of Typhoon Haishen (2020), which headed towards the Korean Peninsula, through a series of sensitive experiment using a coupled ocean-atmosphere model. The sensitivity experiments is designed with modifications of the Kyushu topography: reduced topography (RED), experiments with real topography (CTL), and experiments with enhanced topography (ENH). The modelling results show that the topography of Kyushu has influenced the track, intensity, and associated precipitation of Typhoon Haishen as it approached Korean Peninsula. Analysis reveals that the Kyushu topography deflected the Haishen's track to the northeast. Kyushu's topography also weakened the intensity of Haishen (in terms of central pressure) due to increased frictions, but it diverted typhoon-induced southerly winds near the Kyushu Island, resulting in the increase in the maximum wind speed of Haishen by wind convergence. The typhoon-associated water vapor collided with the topography of Kyushu, causing more precipitation in Kyushu, which reduced precipitation on Jeju Island. This result can be used as basic data when predicting typhoons approaching the Korean Peninsula. However, since this study is based on the result of one typhoon case, it is necessary to perform additional experiments on more typhoon cases in the future in order to generalize this result

**Key words:** Typhoon Haishen, Topography effect, Typhoon-ocean interaction, atmosphere-ocean coupled model, Numerical experiment.



## I. 서론

지구상에서 가장 파괴적인 자연재해 중 하나인 태풍은 해양으로부터 에너지를 얻기 때문에 발생부터 소멸까지 해양과 끊임없이 상호작용을 한다(Emanuel, 1999; DeMaria and Kaplan, 1994). 지난 20여년 동안 관측 및 수치모델의 기술 발달과 더불어 태풍과 해양의 상호작용의 이해와 개선은 태풍의 예측기술을 크게 향상시켰다(Rogers et al., 2006). 그러나 급격히 발달(Rapid intensification) 또는 쇠퇴하는 태풍의 경우 아직도 그 예측 오차는 크게 개선되지 않고 있다. 특히, 태풍이 이동하는 동안 높은 지형을 만날 경우, 태풍-해양-지형의 복잡한 상호작용을 거치면서 태풍의 강도 및 진로의 변화가 심해져 예측이 더욱 어려워 진다(Chang et al., 1993). 따라서 태풍이 높은 지형을 만났을 때 태풍의 반응과 영향에 대한 연구는 태풍 예측기술 향상을 위해 많은 연구자들이 관심을 가지는 주제가 되어왔다.

지금까지 지형이 태풍에 미치는 영향을 조사한 연구는 대부분 비교적 강한 태풍의 영향을 받고 높은 산맥이 있는 대만에서 많이 이루어졌다. 태풍은 대만을 통과할 때 대만 동부에 위치한 높은 산맥의 영향을 받아 태풍의 크기, 강도, 진로 그리고 이동속도가 급격하게 변화한다(Chang et al., 1993; Wu, 2001). Chou et al. (2011)은 2000~2010년 동안 위성자료를 사용하여 필리핀과 대만을 통과한 태풍 사례를 분석하였다. 그 결과 태풍이 지형에 접근 및 이탈하면서 태풍의 눈벽 크기와 구조가 변화하고 있음을 보고하였다. Wu et al. (2003)는 필리핀에 상륙 후 대만에 접근한 1998년 태풍 제브(Zeb)를 수치모델을 이용하여 Chou et al. (2011)의 관측 결과와 유사한 눈벽의 크기 변화를 재현하고 그 기작을 밝혔다. Yeh and Elsberry (1993)는 대만의 높은 산맥으로 인해 남쪽에서 진입하는 태풍은 북쪽으로 편향되고 북쪽에서 진입하는 태풍은 남쪽으로 편향됨을 보고하였다. 대만의 지형을 제거한 수치실험을 통해서도 태풍의 진로뿐 아니라 강도, 구조 그리고 강수도 대만의 높은 산맥 영향을 받는 것으로 나타났다(Chih et al., 2015; Ge et al., 2010; Jang and Chun, 2013; Wang, 2013;

Wu et al., 2002).

우리나라도 태풍이 한반도에 상륙하기 이전에 큐슈와 제주도의 높은 지형을 통과하는 경우가 있다. 따라서 태풍이 이러한 지형을 통과하면서 어떤 영향을 받는 지를 밝히는 것은 한반도 상륙 태풍을 예측하는 데 도움이 될 것이다. 저위도에 위치한 대만과는 다르게 한반도에 상륙하는 태풍은 비교적 약한 강도를 유지하고, 지형의 높이도 대만 동부의 산맥에 비해 약 2,000m 가량 낮기 때문에 지형이 태풍에 미치는 영향도 대만의 경우와 다를 수 있다. 그러나 지금까지 한반도 상륙 태풍에 대해 지형이 미치는 영향을 조사한 연구는 없었다. 또한 지금까지 선행연구에서는 대기모델만을 사용하여 지형이 태풍에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나 대기모델만을 사용할 경우 태풍-해양 상호작용을 정확하게 모의하기 어렵다. 특히, 태풍 시기 해양에서 수직혼합과 용승으로 인해 발생하는 해수면 냉각의 효과가 제대로 반영되지 않기 때문에 태풍의 강도 변화를 현실적 고려하기 힘들다(Chen et al., 2007; Yablonsky and Ginis, 2012; Zambon et al., 2014; Wu, 2018; Kim et al., 2021). 한 예로 Kuo et al. (2018)에서는 2011년 쿠로시오 해류 위를 통과했던 태풍 난마돌(Nanmadol)을 대기모델만을 사용한 것과 대기-해양 접합모델을 사용한 결과를 비교하였다. 그 결과, 접합모델을 사용한 경우 태풍과 쿠로시오 해류간의 상호작용에 의한 해수면 냉각을 제대로 모의하여 태풍의 강도를 더욱 현실적으로 모의할 수 있었다. 따라서 지형이 태풍에 미치는 영향을 조사하는 실험에서도 지형에 의해 변화된 바람장은 해양의 혼합에 영향을 미치고, 이는 해수면온도의 변화를 유도하고 궁극적으로 태풍의 강도에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 과정은 태풍-해양 결합 모델을 통해서만 설명이 가능하다.

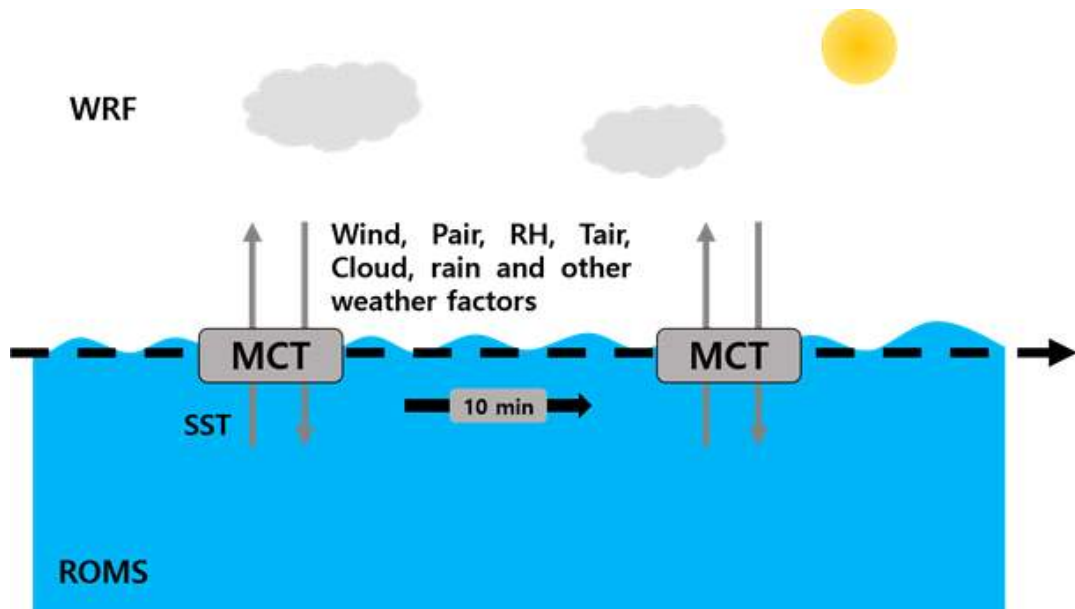
본 연구에서는 대기-해양 접합모델을 사용하여 기존에 연구가 진행되지 않았던 큐슈의 지형이 한반도로 북상하는 태풍에 어떠한 영향을 미치는 지 조사하였다. 큐슈의 지형 효과를 분석하기 위해 큐슈의 지형 고도를 변화시키는 따른 민감도 실험을 수행하였다. 이를 통해 큐슈의 지형에 따라 변화되는 태풍의 진로 및 강도의 변화를 해양-대기 상호작용 효과를 고려하여 조사하였다.

## II. 자료 및 연구방법

### 2.1 해양-대기 접합모델 개요 및 입력자료

본 연구에서 사용된 수치모델은 Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) 모델시스템을 사용하였다. COAWST 모델시스템은 Regional Ocean Modeling System (ROMS) 해양모델, Weather Research Forecasting (WRF) 대기모델, Simulating Waves Nearshore (SWAN) 파랑모델, Community Sediment Transport Modeling System (SCTMS) 퇴적물모델로 구성되어 있으며, Model Coupling Toolkit (MCT) 커플러를 통해 각 모델의 요소들이 교환된다(Warner et al., 2010). 본 연구에서는 COAWST 시스템 중 대기와 해양모델인 WRF와 ROMS만 접합된 모델을 사용하여 연구를 진행하였으며 각 모델은 10분마다 서로의 변수를 교환하였다(Fig. 1). 접합모델에서 WRF는 ROMS로부터 해수면온도(sea surface temperature, SST)를 대기-해양 경계값으로 받으며, ROMS는 WRF로부터 바람, 기압, 상대습도 등 다양한 기상요소를 받아 모델을 수행하게 된다.

WRF와 ROMS가 접합된 모델의 장점은 대기와 해양의 상호작용을 연구할 수 있으며, 시공간적으로 변화하는 대기와 해양의 환경을 동시에 연구할 수 있는 장점이 있다. 특히, 대기와 해양의 상호작용이 중요하게 작용하는 태풍에 대한 연구에서는 선행연구에서 보고된 것처럼 접합모델이 필수적이다(Chen et al., 2007; Yablonsky and Ginis, 2012; Zambon et al., 2014; Kuo et al., 2018; Wu et al., 2018).



**Fig. 1.** Schematic of ocean-atmosphere coupled modeling system using the Weather Research and Forecasting (WRF) and Regional Ocean Modelling System (ROMS). The elements of the coupled model such as sea surface temperature (SST), air pressure (Pair), air temperature (Tairs) among others, are exchanged through the Model Coupling Toolkit (MCT) connected through the Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system.

접합모델에서 사용된 대기모델 WRF는 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발된 중규모 기상 모델로 사용 목적에 따라 현업용에 사용되는 Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) 버전과 연구에 사용되는 Advanced Research WRF (ARW) 버전으로 나뉜다. COAWST 시스템에서는 WRF 모델 중 ARW 버전을 사용한다. ARW은 완전압축성(fully-compressible), 비정수계(non-hydrostatic) 오일러 지배 방정식으로 구성되며 지배 방정식은 플럭스의 형태로 보존 속성의 변수들을 계산한다(Skamarock et al., 2008; Warner et al., 2010). WRF 모델의 물리과정은 미세 물리(Microphysics), 적운 모수화(Cumulus parameterization), 지면 표층 모델(Land surface model), 행성 경계층(Planetary boundary layer), 대기복사 모수화(Radiation)로 구성되어 있다. WRF에 사용된 물리과정은 미세물리 과정은 Microphysics-WRF Single-Moment (WSM) 6-class scheme, 행성 경계층 과정은 Yonsei University Scheme, 적운 모수화는 Kain-Fritsch Scheme을 사용하였다.

접합모델에서 사용된 해양모델 ROMS는 3차원의 원시방정식을 사용한 해양 순환 모델로 러트거스 대학교(Rutgers University)에서 개발된 모델이다. 3차원 모델 ROMS는 태풍에 의한 지역 규모의 해수의 유동 및 수송을 모의할 수 있으며 태풍에 의한 수직난류혼합(vertical turbulent mixing)과 용승(upwelling) 그리고 수평 이류과정(horizontal advection)을 모의할 수 있어 많은 연구에서 사용되고 있다. 이번 연구에서는 정역학 근사와 부시네스크(boussinesq) 근사를 적용한 원시 방정식을 사용하여 해수의 유동 및 수송 과정을 계산하였으며 수직 혼합은 generic length-scale (GLS) k-omega 방법을 사용하였다(Menter 1992; Moore et al., 2011).

WRF에 사용된 초기장 및 경계장 자료는 미국 국립환경예보센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)의 Final (FNL) Operation Global Analysis 0.25° 자료를 사용하였다. NCEP의 FNL 자료는 재분석 바람장 속에 모의된 태풍에 대해 크기 및 강도를 보정하고 중심위치를 조정(vortex

relocation)하는 소용돌이 초기화(bogussing) 기법이 적용된 자료로 태풍의 위치 및 강도를 보다 현실적이게 모의할 수 있는 장점이 있다.

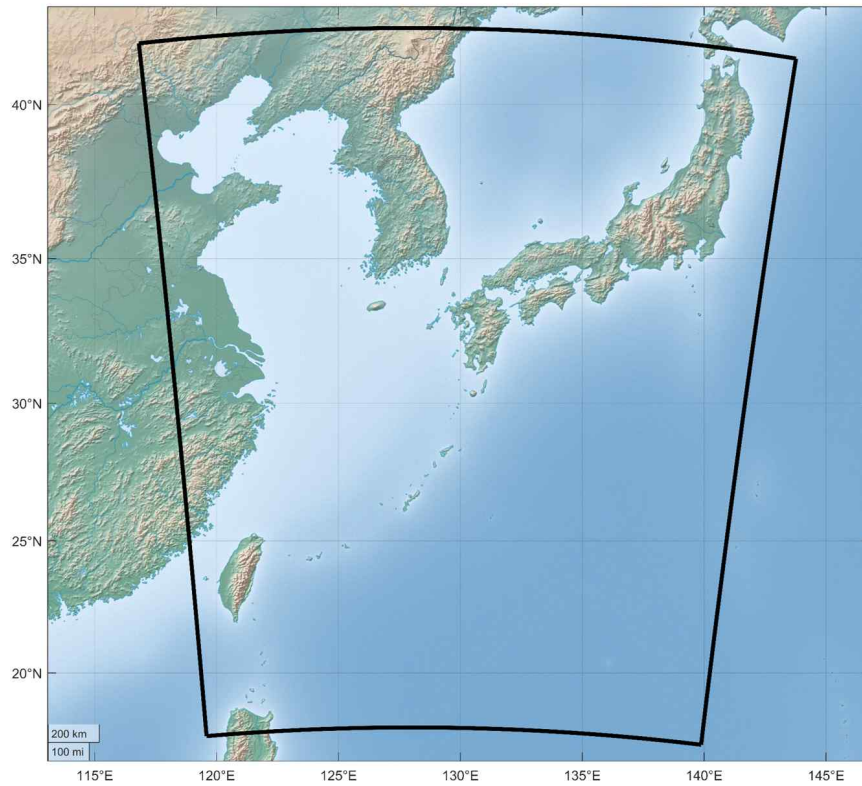
ROMS에 초기장 및 경계장으로 사용된 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) 자료는 Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE)의 일환으로 Naval Research Laboratory (NRL)에서 개발되어 해양 상태의 3차원의 수온, 염분, 해류, 해수면 등의 자료를 제공하고 있다. 수평해상도는 1/12°의 고해상도로 많은 해양모델에서 초기입력장 및 경계으로 사용되고 있다. ROMS 모델에서 조석을 고려하기 위하여 (TOPEX.POSEIDON, TPXO) 7-atlas자료를 사용하였으며, 총 8개의 분조(M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1)가 사용되었다.

큐슈의 지형이 태풍에 어떠한 영향을 주고 있는지 상세한 분석을 하기 위해서는 큐슈가 포함된 고해상도의 도메인 설정이 필요하였다. 고해상도 도메인을 사용하는 방법으로 첫째, 태풍의 중심을 따라서 도메인이 움직이는 이동-동지격자화(moving nesting) 방법이 있다. 그러나 움직이는 도메인에서 사용되는 지형 자료는 상위 도메인의 지형 자료를 사용하기 때문에 높은 해상도의 지형 자료를 사용하기에 어려움이 있었다. 또 다른 방법으로는 큐슈의 지형을 고해상도로 동지격자화(nesting) 하는 방법이 있다. 그러나 큐슈를 포함하는 영역을 동지격자화하여 고해상도로 사용하는 방법은 태풍이 동지격자화의 경계로부터 진입하는 과정에서 태풍의 구조를 현실적으로 모의하기에 어려움이 있었다. 이에 고해상도의 지형 자료를 사용하며, 태풍의 구조를 보다 현실적으로 모의할 수 있도록 WRF의 도메인을 단일 도메인으로 설정하였다. WRF 모델에서 사용된 지형 자료는 USGS 30초 고해상도 지형 자료를 사용하였으며, 모델의 수평해상도 5km로 하였다. WRF와 ROMS의 도메인은 동일하며, 영역은 태풍이 한반도에 근접 및 상륙하기 전까지 충분히 발달할 수 있도록 넓은 영역의 도메인을 설정하였다(Fig. 2).

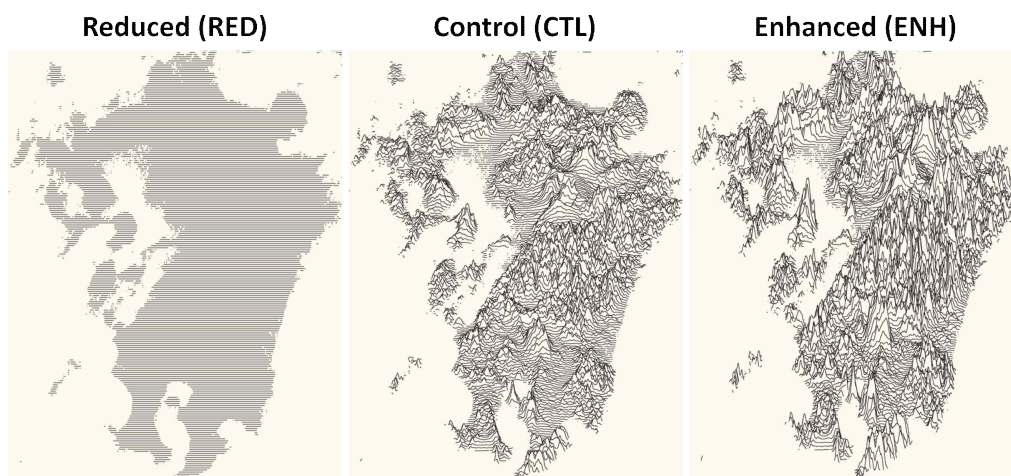
태풍에 대한 지형의 민감도 실험을 위해 큐슈의 지형을 수정하였다. 지형의 고도에 따라 WRF 모델의 USGS 지형 자료를 사용하여 control (CTL), reduced (RED), enhanced (ENH) 세 실험으로 구성하였다(Fig. 3). RED 실험은 큐슈의

모든 지형을 1m로 설정하였으며, ENH 실험은 CTL 실험에 비해 두배 상승된 지형 고로 설정하였다. 태풍이 큐슈를 통과하면서 발생하는 지형 효과는 CTL 실험과 RED 실험의 차이를 통해 분석하였으며, ENH 실험과 RED 실험의 차이를 통해 지형에 의한 영향이 증가된 효과를 분석하였다. 본 연구에서 사용된 모델의 구성은 Table 1에 정리하였다.





**Fig. 2.** The topographic map of the model domain. The black box indicates the domain use for the ocean (ROMS) and atmosphere (WRF) models.



**Fig. 3.** Schematic of the sensitivity experiments based on varying terrain in the Kyushu Island.



**Table 1.** Summary of WRF and ROMS model configuration.

Model	WRF(Version 3.7.1)	ROMS(Version 3.7)
Grid size	5km	
Time Step	60 seconds (s)	
Time interval between coupling of model	10 minutes (min)	
Map projection	Lambert Conformal	
Grid dimension	450 x 550	
Terrain resolution	USGS 30 arcseconds (")	Etopo01 1 arcminute (')
Initial & Boundary Condition	NCEP FNL data	HYCOM data

## 2.2 검증 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 접합모델에서 모의된 태풍의 진로 및 강도는 International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) v04r00 자료와 비교하였다. 모델에서 모의된 풍속과 기압은 기상청 해양기상부이와 비교하였다. IBTrACS는 전 세계 모든 해역에서 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO), 지역특별기상센터(Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC), 미국합동태풍경보본부(Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 등 다양한 기관으로부터 수집된 6시간 간격 열대저기압의 최적진로(best track)의 정보를 내삽을 통해 3시간 단위로 제공하고 있으며, 본 연구에서는 그 중 미국의 JTWC 자료를 1시간 단위로 다시 내삽하여 사용하였다. 1시간 단위로 재구성된 JTWC 자료를 통해 모델에서 모의된 태풍의 진로와 강도(풍속, 기압)를 비교하였으며, 제주도와 큐슈의 지형효과 연구의 사례선정을 위한 자료로도 사용되었다. 기상청 해양기상부이는 태풍이 한반도에 근접했을 때 모의된 태풍 강도의 정확도를 확인하기 위해 사용하였다. 모델로부터 모의된 풍속과 기압은 해양기상부이와 비교하였다. 모델의 정확도는 편차(Bias), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상관계수(Correlation,  $r$ )를 사용하여 평가하였다(식 (1)~(3) 참고).

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 관측자료의 개수,  $M$ 은 모델에서 모의된 값 그리고  $O$ 는 기상청 해양기상부이로부터 관측값이다.

모델에서 모의된 강도의 정확도를 평가를 위해 사용된 부이는 태풍의 진로와 인접한 부이를 사용하였다. 모델의 격자 위치와 부이의 위치가 정확하게 일치하지 않았기 때문에 부이와 가장 인접한 모델의 격자값과 비교하였다. 부이와 비교를 위해 사용된 모델에서의 모의된 풍속은 해수면 위 10m 높이의 풍속(해상풍)이다. 그러나 해양기상부이에서 제공되는 풍속 자료는 3.6~4.0m 고도에 있는 풍속계로부터 관측된 값을 제공한다. 때문에 선행연구에서 사용된 방법을 통해 관측된 풍속을 해상풍 고도(10m)로 변환하였다(De Rooy and Kok, 2004; Oh and Ha, 2005; Park et al., 2018).

$$U_{10} = U_H \frac{\ln(10/Z_0)}{\ln(H/Z_0)} \quad (4)$$

여기서  $U_{10}$ 은 10m 고도의 해상풍을,  $U_H$ 는 관측된 고도에서의 풍속을, 그리고  $Z_0$ 는 풍속이 0이 되는 고도의 거칠기 길이를 의미한다(Oh and Ha, 2005). 모델과 비교하기 위해 사용된 부이는 외해보다는 연안에 근접하기 때문에 Stull(1988)이 제시한 연안의 거칠기 길이인  $10^{-3}$ m을 사용하였다.

Kurihara filter를 사용하여 큐슈의 지형에 따라 변화되는 태풍의 진로를 분석하였다. Kurihara filter는 태풍의 위도, 경도 방향으로 일정 상수값에 대하여 Smoothing하여 태풍의 회전성분을 제거하는 분석 방법으로 최종적으로는 태풍의 회전성분이 제거된 배경바람장을 추출할 수 있다(Kurihara, 1993).

$$f = f_B + f_D \quad (5)$$

$$\overline{f_{\lambda,\varphi}} = f_{\lambda,\varphi} + K(f_{\lambda-\Delta\lambda,\varphi} + f_{\lambda+\Delta\lambda,\varphi} - 2f_{\lambda,\varphi}) \quad (6)$$

$$f_{B\lambda,\varphi} = \overline{f_{\lambda,\varphi}} + K(\overline{f_{\lambda,\varphi-\Delta\varphi}} + \overline{f_{\lambda,\varphi+\Delta\varphi}} - 2\overline{f_{\lambda,\varphi}}) \quad (7)$$

$$K = \frac{1}{2}(1 - \cos\frac{2\pi}{m})^{-1} \quad (8)$$

여기서  $f$ 는 수평성분의 바람장으로 태풍의 영향이 제거된 배경바람장  $f_B$ 와 태풍에 의해 발생한 회전성분  $f_D$ 가 더해진 바람장이며 모델로부터 모의된  $u, v$ 값을 사용하여 계산하였다.  $\lambda, \varphi$ 는 경도와 위도이며  $\overline{f_{\lambda,\varphi}}$ 는 지역의 바람장을 Smoothing한 바람장이다.  $K$ 는 filtering parameter로  $m$ 은 2, 3, 4, 2, 5, 6, 7, 2, 8, 9, 2의 상수값이다(식 (5), (6), (7) and (8) 참고). 태풍의 회전성분이 제거된 배경바람장을 추출하기 위해 식 (8)에서  $m$ 값을 순서대로 대입하여 최종적으로 태풍의 회전성분이 제거된 배경바람장만을 추출하였다. Kurihara filter에서 사용된 배경바람장을 추출하는 방법은  $1^\circ \times 1^\circ$ 의 배경바람장을 추출하는 방법으로 모델에서의 모의된 값을  $1^\circ \times 1^\circ$ 로 내삽하여 사용하였다.

## 2.3 연구 사례 선정

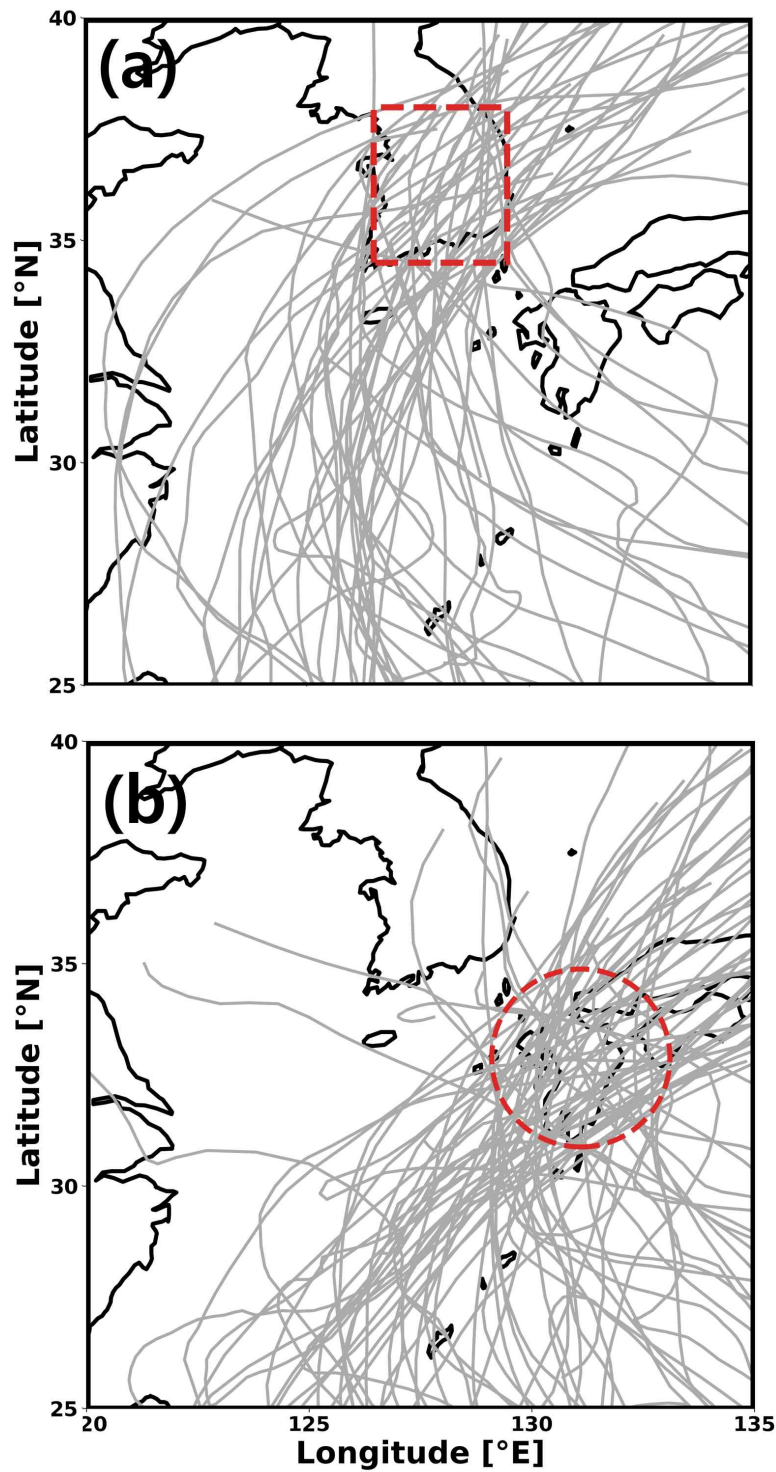
1983~2020년까지 우리나라에 접근한 태풍 중 큐슈를 근접하게 통과한 태풍 사례를 조사하였다. 한반도에 접근한 태풍에 대한 기준은 위도 34.5~38°N, 경도 126.5~129.5°E로 설정하였다(Fig. 4a). 큐슈를 통과한 태풍의 기준은 태풍이 큐슈의 중앙에 있는 아소산(131.10°E, 32.88°N)에 가장 근접한 시간을 기준으로 태풍과의 거리가 200km 이내로 통과하는 경우로 설정하였다(Fig. 4b).

1983~2020년까지 다수의 사례에서 한반도로 접근한 태풍은 한반도 남쪽으로 북상하는 진로를 보이며 제주도를 인접하게 통과한 태풍이 많았다. 큐슈의 경우 아소산을 200km 이내로 통과한 태풍은 총 66개의 태풍이 있었다. 그러나 대다수의 경우 일본 본토 및 동해로 이동하였으며 7개의 사례만 한반도에 접근하였다.

큐슈의 지형 효과에 대한 연구 사례를 선정하기 위해 IBTrACS (JTWC) 자료를 1시간 단위로 내삽하여 아소산에 가장 근접한 시간을 기준으로 ±6시간 동안 풍속의 변화를 조사하였다. 조사된 기간 동안 큐슈의 아소산을 200km 이내로 통과한 태풍은 총 7개의 사례가 있었다(Table 2). 1991년 12호 태풍 글래디스(Gladys), 2020년 10호 태풍 하이선(Haishen)을 제외한 5개 사례의 태풍은 큐슈에 상륙 후 한반도에 접근하였다. 특히, 하이선은 아소산과 183km 떨어져 통과했지만 아소산에 가장 근접했던 시간을 기준으로 ±6시간 동안 -18.72m/s의 가장 큰 폭의 감소가 있었다. 하이선 사례에서 나타난 풍속의 감소는 큐슈를 통과한 태풍 7 사례의 평균 9.19m/s 감소의 약 두배였으며, 하이선을 제외한 6개 사례의 평균인 7.69m/s 감소에 비해 매우 큰 폭의 감소였다. 때문에 본 연구에서는 큐슈를 통과하면서 강도 변화가 컸던 2020년 10호 태풍 하이선을 큐슈의 지형 효과를 조사 사례로 선정하였다.

2020년 10호 태풍 하이선은 9월 1일 12UTC경 괌 북쪽 약 780km 부근 해상에서 19호 열대저압부가 발달하여 발생하였다(기상청 2020년

한반도영향태풍보고서, 2020). 19호 열대저압부는 9호 태풍 마이삭으로 인한 남서류의 영향을 받았다. 남서류로부터 유입된 고온다습한 기류의 영향으로 열대저압부 발생 12시간 만에 빠르게 태풍으로 발달하였다. 하이선의 진로상에 SST는 30~31°C, 해양열용량은 150kJ/cm<sup>2</sup> 내외였으며, 연직시어가 15kt 이하로 해양조건과 대기조건이 모두 양호하여 하이선은 지속적으로 발달할 수 있었다. 하이선의 최대강도는 9월 15일 06UTC경 일본 오키나와 동남동쪽에서 중심기압 915hPa, 최대풍속 55m/s로 기상청에서는 하이선을 강도 초강력 태풍을 분류하였다. 이후, 하이선은 큐슈를 통과하면서 강도가 약화되어 중심기압 955hPa로 한반도 울산 남서쪽에 상륙하였으며, 우리나라 동해안을 따라 직선의 형태로 북진하였다. 한반도를 향해 북상한 하이선은 직선의 형태로 특이한 진로를 보였다. 하이선이 한반도를 향해 북상할 당시 우리나라 서해상에는 상층 기압골이 정체하고 있었으며, 일본 서쪽에 중심을 두고 있는 상층 고기압이 있었다. 하이선이 북상할 당시 상층 기압골과 상층 고기압이 서로 균형을 이루면서 하이선이 계속 북진성분을 유지할 수 있었다. 하이선은 제주도 동쪽 해상을 지나면서 지형적인 영향으로 인해 제주산간 지역과 동해안에 많은 강수를 내렸다. 하이선에 동반된 수증기가 강한 바람에 의해 지형과 충돌하면서 하이선 시기 제주도 어리목에서 547.5mm의 최대누적강수량이 관측되었다.

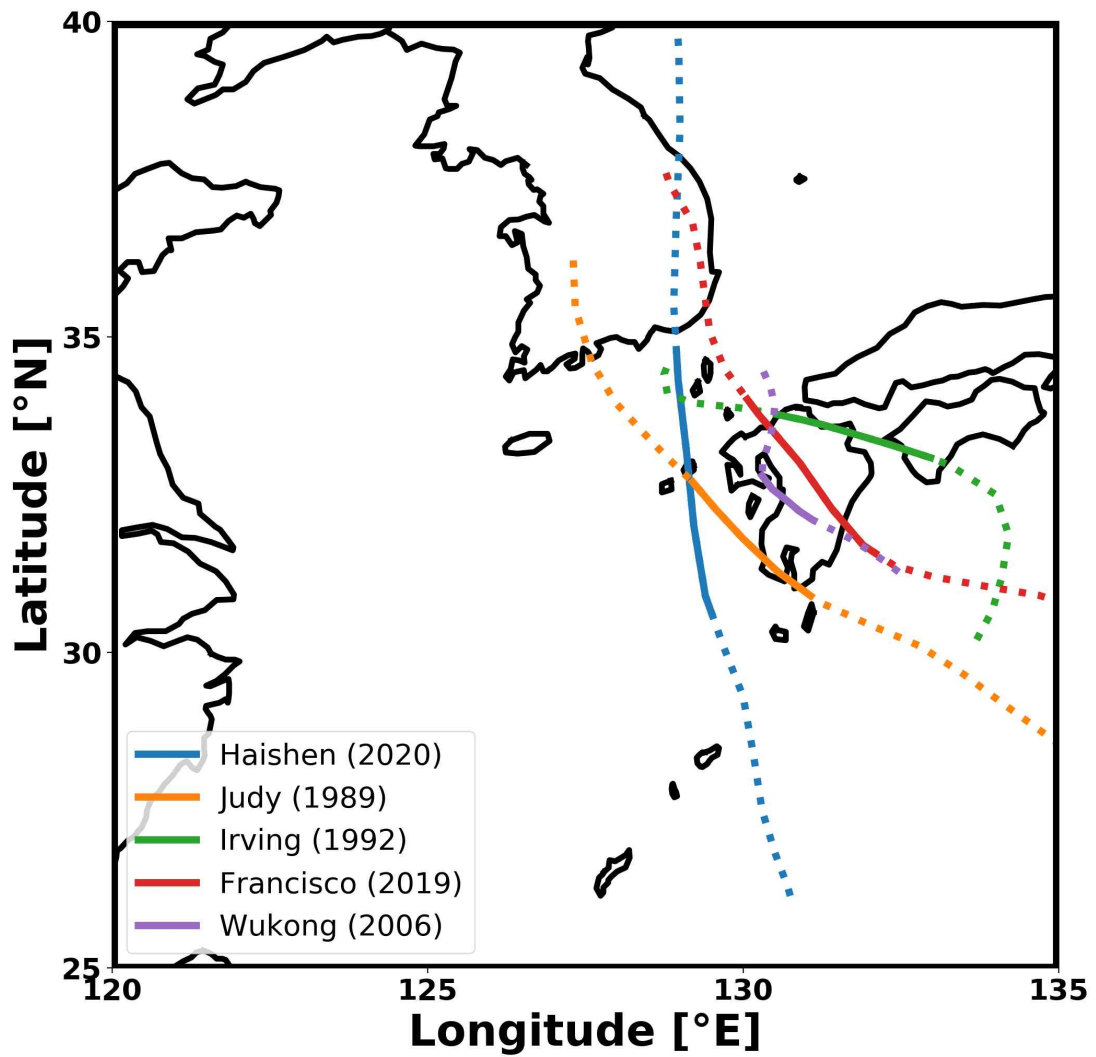


**Fig. 4.** The typhoon tracks (gray lines) that passed (a) Korea Peninsula (red box) from 1983 to 2020. (b), same for a but for typhoon tracks that passed within 200 km radius of Mt. Aso in Kyushu Island (red circle).

**Table 2.** List of typhoons that passed within 200 km radius of Mt. Aso in Kyushu Island.

<b>A typhoon passed by Mt. Aso</b>				
<b>Name (year)</b>	<b>-6 hour (m/s)</b>	<b>+6 hour (m/s)</b>	<b>Anomaly (m/s)</b>	<b>Distance (km)</b>
Judy (1989)	46.29	33.43	12.86	155
Gladys (1991)	24.69	22.11	2.58	195
Irving (1992)	29.83	18.51	11.32	82
Wukong (2006)	28.29	20.57	7.72	64
Leepi (2018)	21.60	18.00	3.6	7
Francisco (2019)	35.66	27.60	8.06	13
Haishen (2020)	47.83	29.66	18.17	183
<b>Average</b>	<b>33.45</b>	<b>24.26</b>	<b>9.19</b>	<b>99.85</b>





**Fig. 5.** Tracks of selected five cases of tropical cyclones with rapid decrease in wind speed that passed within 200 km radius of Mt. Aso in Kyushu from 1983 to 2020.

### Ⅲ. 큐슈의 지형효과 민감도 실험 결과

#### 3.1. 수치모델 정확도 검증

본 연구에서는 큐슈의 지형에 따라 변화되는 태풍 하이선의 진로 및 강도를 분석하기에 앞서, 해양이 결합된 모델(COAWST)과 다수의 선행연구에서 많이 사용되었던 대기모델만 사용한 모델(WRF only)을 관측값과 비교하여 검증하였다. COAWST 모델은 WRF only 모델과는 다르게 해양이 접합되어 있기 때문에 해양-대기의 상호작용을 고려할 수 있었다. 특히, 해양-대기 상호작용을 통해 변화되는 변수 중에서 SST를 고려할 수 있었다. SST는 이번 연구에서 유일하게 해양에서 대기로 제공되는 변수이며, 태풍 예측에 있어 매우 중요하게 사용되는 변수이다.

태풍 예측에 있어 SST에 대한 중요성은 해양이 접합된 모델과 대기모델만을 사용하는 모델과의 비교를 통해 확인할 수 있다. 다수의 선행연구에서 해양이 접합된 모델을 사용하여 태풍을 모의하는 것이 대기모델만 사용한 결과보다 더 높은 모의성능을 나타낼 수 있음이 밝혀진 바 있다(Chen et al., 2007; Yablonsky and Ginis, 2013; Zambon et al., 2014). 이러한 이유는 접합모델에서는 해양-대기의 상호작용을 고려할 수 있기에 현실적인 SST의 cooling 효과를 반영할 수 있기 때문이다. 이에 본 연구에서는 큐슈의 지형 효과를 분석하기에 앞서 해양이 접합된 해양이 접합된 COAWST 모델과 해양이 접합되지 않은 WRF only 모델을 비교하여 두 모델에서 모의한 하이선의 진로와 강도를 우선적으로 비교하였다. WRF only 모델의 도메인 및 대기입력 자료는 COAWST 모델과 동일하며, 사용된 SST는 하이선에 의한 냉각효과가 반영되지 않은 96 시간 이전의 SST로 고정하여 수치실험을 수행하였다.

COAWST 모델과 WRF only 모델에서 하이선의 진로를 JTWC와 비교한

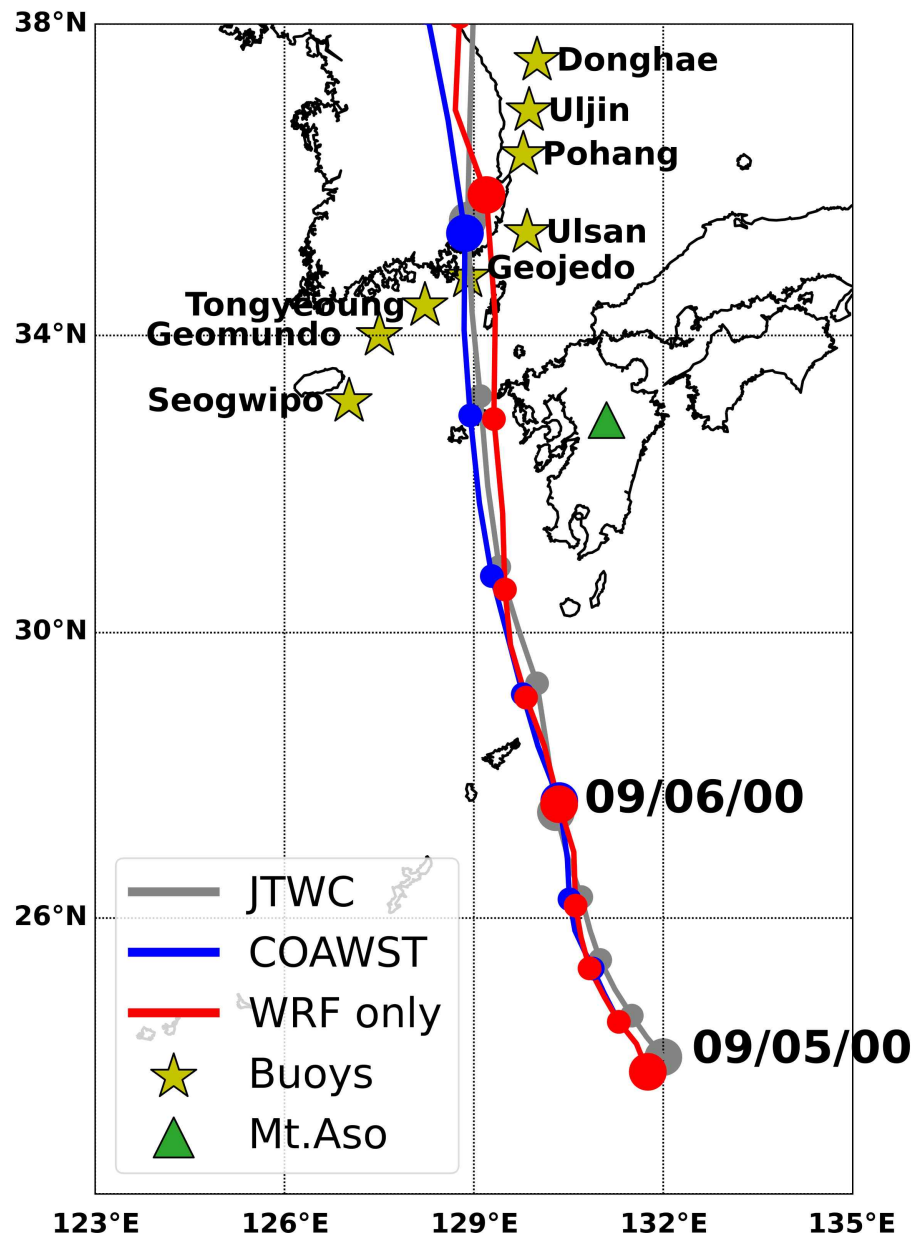
결과 9월 6일 12UTC경부터 하이선의 진로에서 차이가 발생하기 시작하였다(Fig. 6). 상대적으로 COAWST 모델에서 모의된 하이선의 진로는 큐슈와 더 멀리 떨어져 북상하였으며, WRF only 모델은 큐슈에 더욱 접근한 상태로 북상하였다. 하이선이 한반도에 상륙한 위치는 COAWST 모델이 JTWC와 더 유사하였다. WRF only 모델에서는 하이선이 한반도에 더 이른 시간에 상륙하였으며, 위치 또한 북동쪽으로 편향되어 있었다.

COAWST 모델과 WRF only 모델에서 모의된 하이선의 강도는 진로에 비해 더 큰 차이가 발생하였다(Fig 7). JTWC 자료에서 추정된 하이선의 중심기압은 두 모델이 모의되기 시작한 9월 5일 00UTC부터 중심기압이 증가로 인해 하이선의 강도가 지속적으로 약화되고 있었다. COAWST 모델에서는 JTWC와 유사하게 모델이 모의되기 시작된 이후부터 지속적으로 하이선의 중심기압이 증가로 강도가 약화되고 있었다. 그러나 WRF only 모델에서는 9월 5일 18UTC경까지 하이선의 강도가 강화되었다. 그 이후 하이선의 강도 약화가 발생하였지만, JTWC에 비해 하이선의 강도를 강하게 모의하고 있었다.

지형에 의해 진로 및 강도의 변화 뿐만 아니라 강수에 대한 변화도 분석하였다. 강수는 하이선이 한반도에 내습한 당시 가장 많은 누적강수량이 관측되었던 제주산간에 위치한 어리목 AWS 지점에서의 관측값과 COAWST 모델과 WRF only 모델의 누적강수량을 비교하였다(Fig 8, Table 3). 두 모델에서 누적강수량은 COAWST 모델은 555.79mm, WRF only 모델은 625.23mm로 모의되었다. COAWST 모델에서 모의된 누적강수량의 오차는 약 8mm였다. 그러나 WRF only 모델에서는 9월 6일 18UTC경 하이선이 제주도의 동쪽을 통과하면서 약 77mm의 큰 오차가 발생하였다.

본 연구에서는 큐슈의 지형효과를 분석하기에 앞서 해양이 접합된 효과를 우선적으로 분석하였다. 그 결과 선행연구에서도 밝혀진 바 있듯이 태풍의 진로, 강도 그리고 강수에서도 더 높은 모의성능이 나타났다. 이러한 결과는 해양이 접합된 모델은 해양모델에서 모의된 SST가 대기모델로 즉각적으로 반영되기 때문으로 사료되었다. 특히, WRF only 모델에서 사용된 SST는 위성을 기반으로

한 자료이기 때문에 위성기반의 부정확한 SST를 사용할 경우 태풍의 예측에도 부정적인 영향을 줄 수 있었다. 이에 본 연구에서는 기존에 사용되지 않았던 해양이 접합된 모델인 COAWST 모델을 사용하여 하이선에 대한 큐슈의 영향을 분석하였다.



**Fig. 6.** Six hourly best and simulated tracks of Typhoon Haishen. The blue, and red lines represent the simulated tracks of the COAWST, WRF only model, respectively, while the gray line indicates the best track from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC). The yellow stars are location of buoy observing stations by the Korean Meteorological Administration and green triangle is location of Mt. Aso.

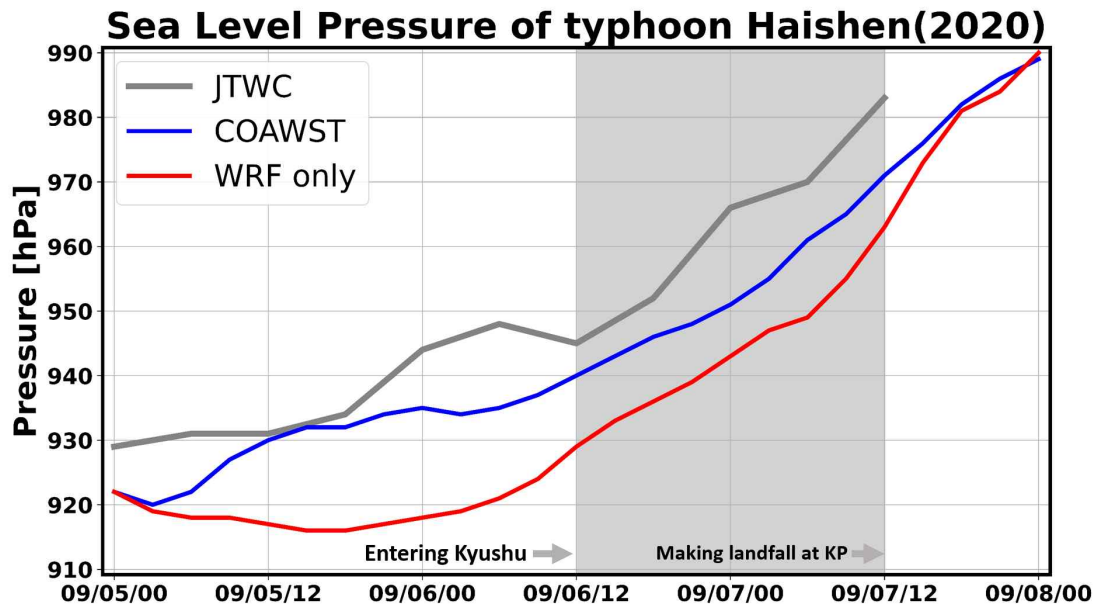


Fig. 7. Comparison of simulated minimum central pressure of typhoon Haishen from 00UTC Sep 5 to 00UTC Sep 8. Comparison of model results from COAWST, and WRF only models, respectively. The blue, and red lines indicate the hourly precipitation from COAWST, WRF only model. The gray line indicates the track from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC).

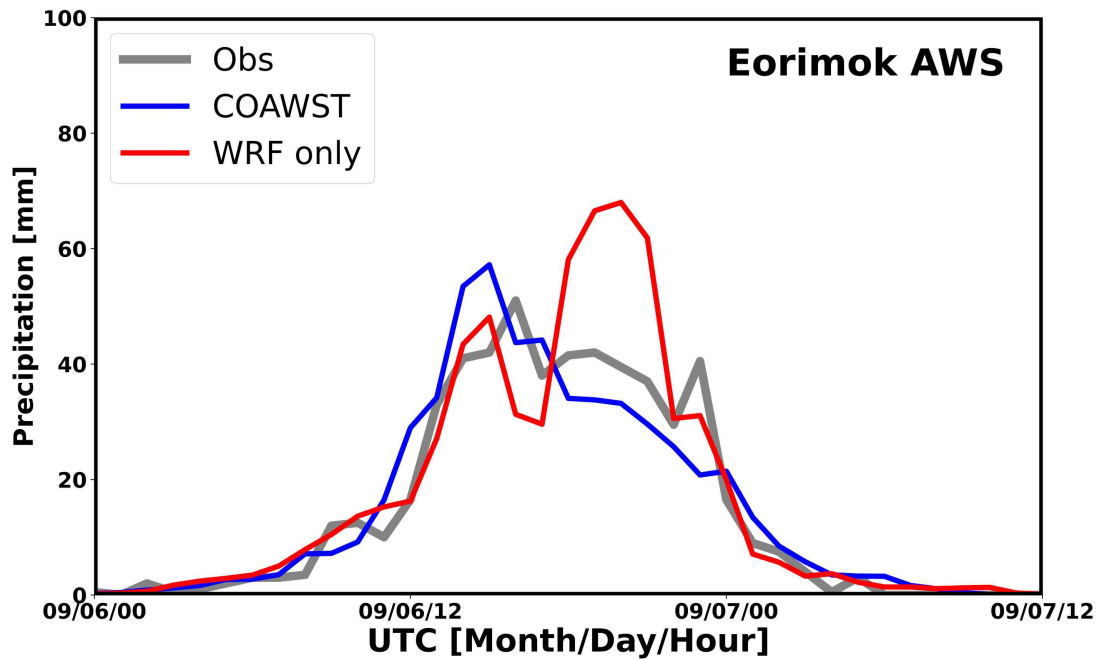


Fig. 8. Comparison of hourly precipitation between simulated experiments and Eorimok Automatic Weather Station (AWS). Comparison of model results from COAWST and WRF only models, respectively. The blue, and red lines indicate the hourly precipitation from COAWST, WRF only model.

Table 3. Observed and simulated of COAWST and WRF only model mean, total, and maximum rainfall in Korean Peninsula and Jeju Island.

Rainfall (mm)	Korea mean	Jeju Island mean	Eorimok
Observation	-	-	547.50
COAWST	80.60	114.19	555.79
WRF only	100.80	124.33	625.23

한반도 인근 해역에서 COAWST 모델의 정확도는 기상청 해양기상부이와 비교를 통해 검증하였다(Fig 9). COAWST 모델의 검증은 모의시간(72h) 동안 풍속, 기압을 비교하였으며, 하이선이 북상하면서 부이에 영향을 준 시간 순서대로 가장 남쪽에 있던 서귀포 부이부터 동해 부이까지 총 8개의 부이를 비교하였다. 일부 부이에서 결측이 있었지만 결측된 기간에 대한 추가적인 고려는 하지 않았다.

JTWC 자료와 비교를 통해 COAWST 모델이 하이선의 중심기압을 실제보다 과소모의하고 있었다. 이러한 결과는 해양기상부이와 비교했을 때도 유사하게 나타났다. 모델과 부이를 비교한 결과 기압은 Bias=-0.67hPa, RMSE=3.85hPa, r=0.99로 실제보다 하이선의 기압을 과소모의하고 있었으며, 풍속은 Bias=1.18 m/s, RMSE=9.71m/s, r=0.90로 실제보다 과대모의하였다. 즉, 전반적으로 모델이 하이선의 강도를 과대모의하고 있었다. 일부 부이에서는 모델에서 모의된 풍속에 큰 오차가 있었지만, 하이선의 중심이 근접하게 통과한 거제도 부이에서는 관측에서 나타난 풍속의 급격한 변화를 모델이 매우 잘 모의하였다(Fig 9d).

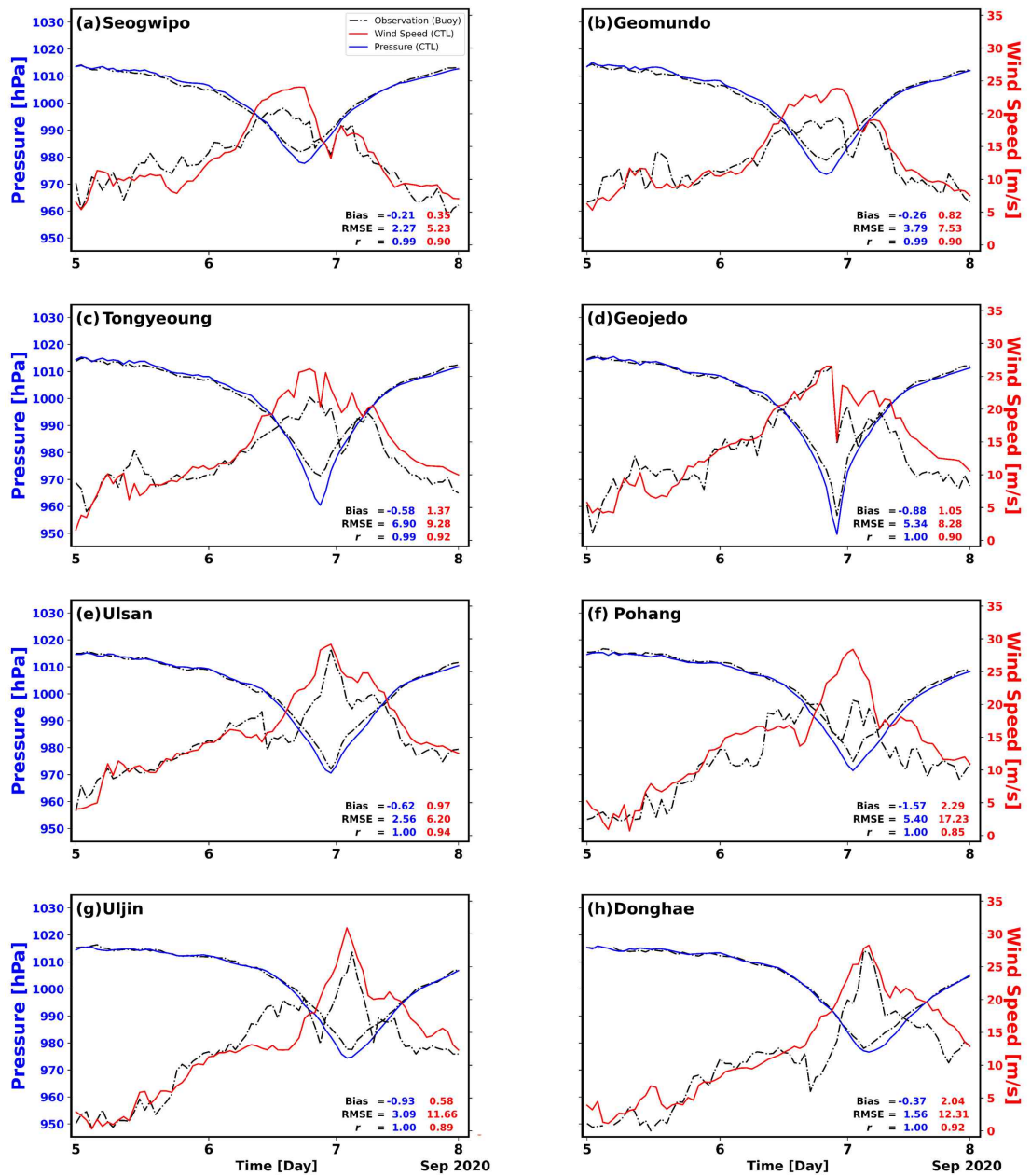
하이선을 기준으로 동쪽에 위치한 부이에서는 서쪽에 위치한 부이에 비해 특이한 점이 발견되었다. 좌측에 위치한 부이에서는 하이선이 북상하면서 풍속이 계속 증가하여 하이선이 한반도에 상륙(9월 7일 00UTC) 이전에 최대풍속이 나타났다(Fig 9a, b, c). 우측에 위치한 부이에서 최대풍속은 한반도 상륙 이후에 관측되었다(Fig 9e, f, g, h). 또한, 하이선이 한반도에 상륙하기 이전 9월 6일 12UTC경 울산, 포항, 울진에서 급격한 풍속의 증가 이후 급격한 풍속의 감소가 나타났다. 동해안에 위치한 부이에서 관측된 급격한 풍속의 증가와 하강은 하이선이 큐슈에 진입 또는 그 이전부터 멀리 떨어진 우리나라 동해안에 영향을 주고 있음을 시사하고 있었다. 그러나 관측과는 다르게 모델에서는 동쪽에 위치한 부이에서 나타난 급격한 풍속 변화를 잘 모의하지 못하였다.

추가적으로 하이선이 한반도를 향해 북상하면서 발생된 강풍을 확인하기 위하여 17m/s (34knot) 이상의 풍속 반경(wind radii, R34)을 확인하였다(Fig. 10). 모델에서 추정된 R34의 크기는 JTWC 자료에서 제공된 R34의 크기와

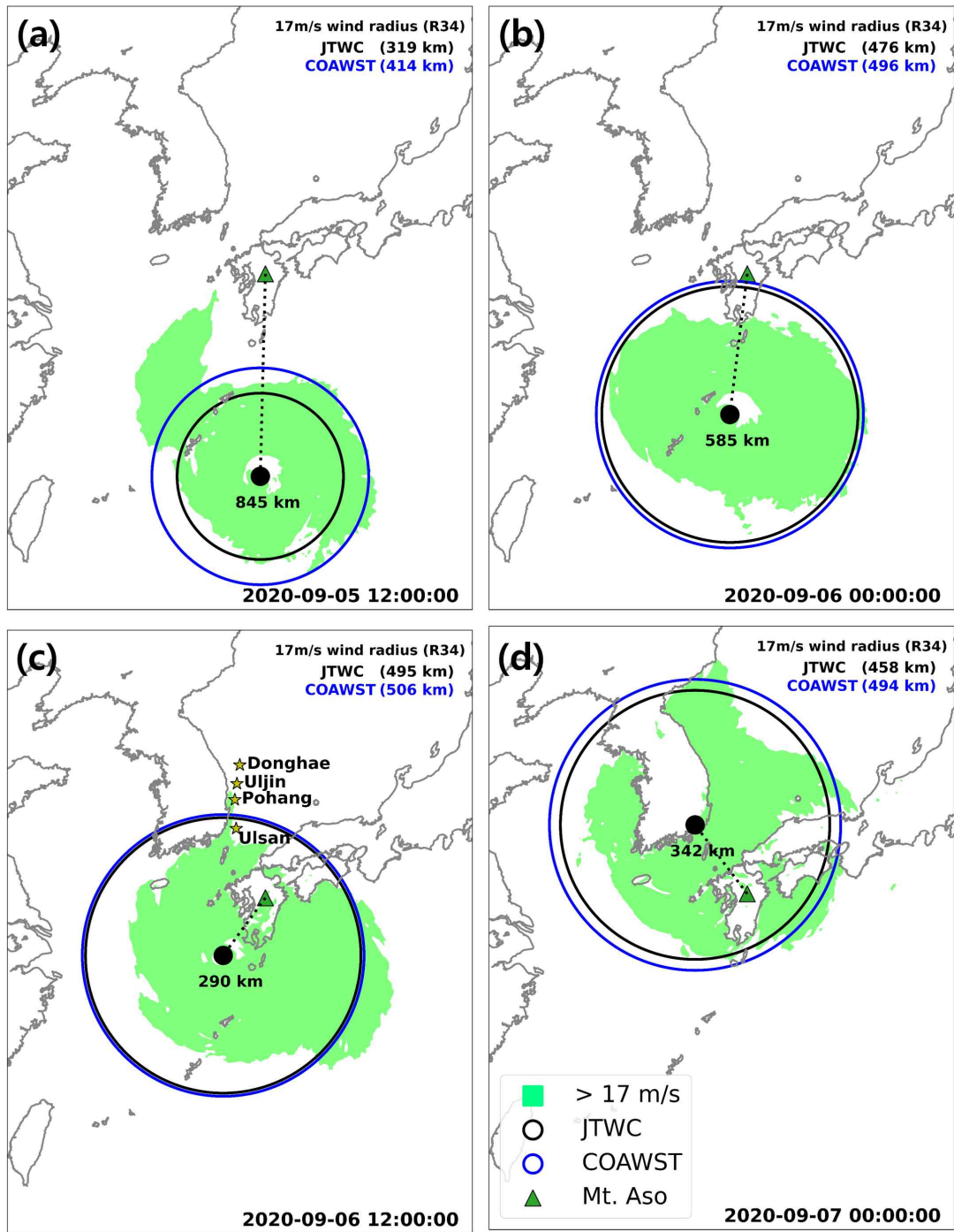


비교하였다. 비교기간은 9월 5일 12UTC부터 한반도에 상륙한 9월 7일 00UTC까지 36시간동안의 변화를 확인하였다. 모델에서 추정된 R34의 크기는 초기에 다소 오차가 있었지만, 큐슈에 진입하기 시작한 이후부터 한반도에 상륙한 시점까지는 JTWC와 매우 유사하였다. 앞서 모델과 부이와의 비교를 통해 동해안에 위치한 부이에서 9월 6일 00UTC경 급격한 풍속의 증가를 모델에서 모의하지 못하였다. 비록, 17m/s 이상의 풍속이 동해안을 따라 나타났지만 부이가 위치한 영역까지 확장되지 않았다(Fig 10c). 다시 말해, 모델에서도 부이에서 관측되었던 것처럼 하이선이 큐슈에 진입하기 시작하였던 9월 6일 12UTC경부터 동해안에 풍속이 급격하게 증가하는 경향을 모의하고 있었으나, 실제와는 다르게 17m/s 이상의 풍속이 좁은 범위에 한정되어 있었다.

모델에서 모의된 강도와 강풍반경을 관측자료인 부이와 JTWC에서 제공된 R34의 크기와 비교하였다. 그 결과 한반도 인근 해역에서 모델이 JTWC와 유사하게 모의되고 있음을 확인하였다. 또한, 17m/s 이상의 강풍의 반경도 큐슈를 통과하는 동안 적은 오차를 보이고 있었다. 이에 본 연구에서는 관측자료를 통해 정확도를 확인한 COAWST 모델을 사용하여 큐슈의 지형 효과를 분석하였다.



**Fig. 9.** Comparison of observed and simulated wind speed and pressure (1-h interval) between Korean Meteorological Administration (KMA) buoy observing stations (dashed) and control (CTL) experiments (solid). The blue and red lines indicate pressure and wind speed, respectively. The inset statistics show the model bias, root mean square error (RMSE), and correlation coefficient ( $r$ ) against the KMA observation for 3 days.

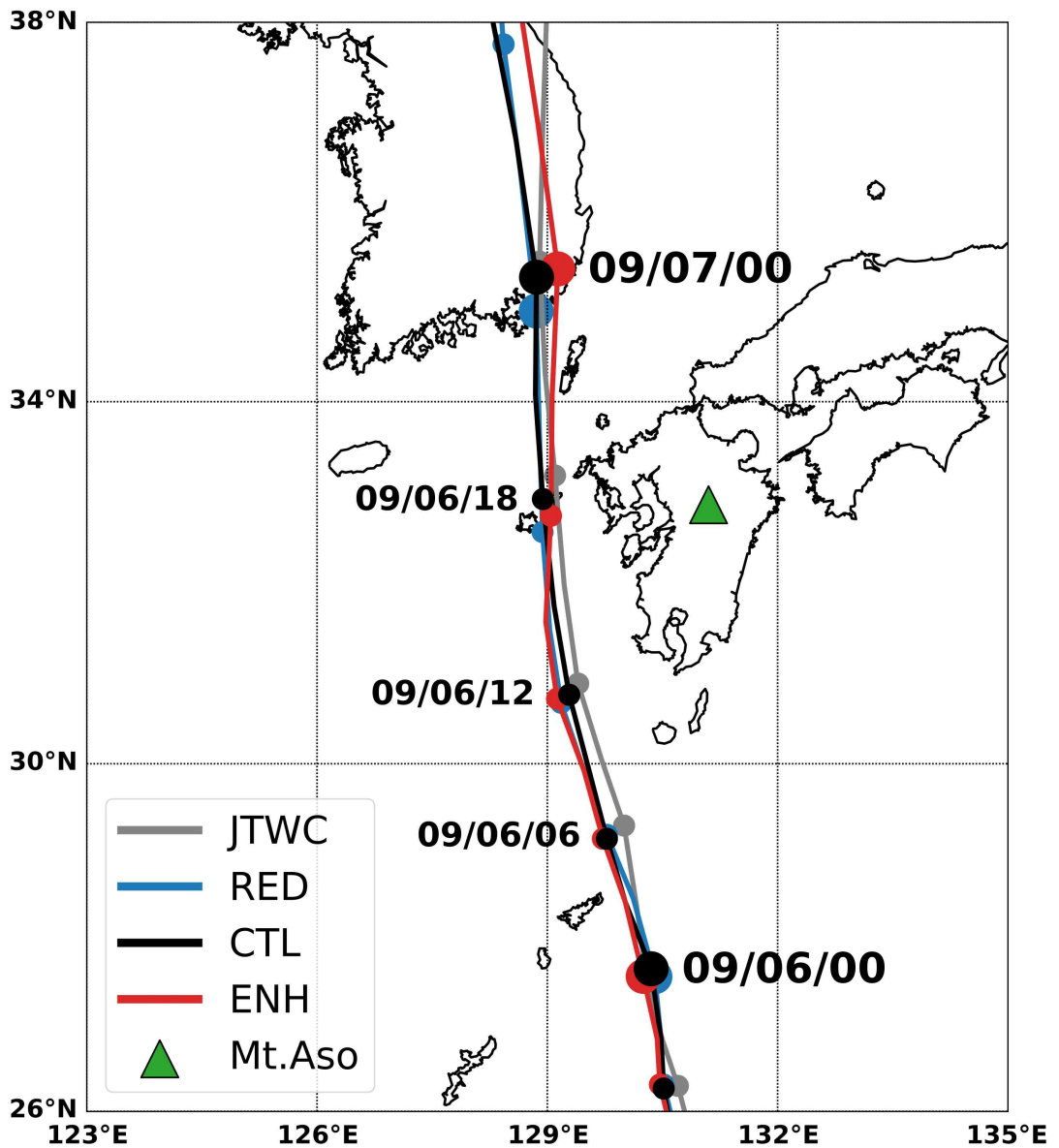


**Fig. 10.** Comparison of between simulated experiments and JTWC 17m/s wind radius (R34) for Haishen from 12UTC September 5 to 00UTC September 7 (12-h intervals). The light green area has a wind speed of more than 17m/s and green triangle is location of Mt. Aso. The dashed line indicate distance between the Haishen and Mt. Aso.

## 3.2. 큐슈 지형에 따른 하이선의 진로 변화

### 3.2.1 하이선 진로 변화

큐슈 지형에 따른 하이선의 진로는 큐슈에 근접한 이후부터 차이가 발생하였다(Fig. 11). CTL 실험의 진로는 JTWC에 비해 큐슈 인근에서 서쪽에 위치하였지만, 전체적으로 유사하였다. 큐슈의 지형에 따라 하이선의 진로는 9월 6일 06UTC부터 하이선의 이동 방향에서 차이가 발생하였으며, 9월 6일 12UTC부터 이동속도에서 차이가 발생하기 시작하였다. 큐슈의 아소산에 근접한 9월 6일 18UTC경 방향 및 이동속도에서 발생한 차이로 인해 지형에 따른 실험에서 상대적인 위치가 달라졌다. 상대적인 위치는 RED 실험이 큐슈와 가장 멀리 떨어져 있었으며, CTL 실험, ENH 실험 순으로 큐슈에 인접하였다. 이러한 상대적인 위치는 한반도에 상륙한 9월 7일 00UTC에서도 유사하였다. 한반도에 상륙한 지점을 기준으로 각 실험에서 나타난 특징은 큐슈의 지형이 높아질수록 이동속도가 빨라졌으며, 동쪽으로 편향되고 있었다. 큐슈의 지형에 따라 태풍의 이동속도 및 방향이 변화된 이러한 결과는 큐슈의 지형에 의해 하이선이 영향을 받고 있는 것으로 사료되었다. 선행연구에 따르면 태풍이 지형에 접근할 경우 태풍의 하층 대류권이 지형에 의해 영향을 받게 되면서 태풍의 이동속도 및 방향을 변화시킬 수 있음이 보고되었다(Chambers and Li, 2011; Yeh and Elsberry, 1993).



**Fig. 11.** Six hourly best and simulated tracks of Typhoon Haishen. The black, blue, and red lines represent the simulated tracks of the control (CTL), reduced (RED), and enhanced (ENH) sensitivity experiment, respectively, while the gray line indicates the track from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC). The yellow stars are location of buoy observing stations by the Korean Meteorological Administration and green triangle is location of Mt. Aso.

### 3.2.2 배경지향류 변화

태풍은 주변의 대기의 흐름 및 해양의 환경 등 다양한 요소에 의해 진로가 결정되기 때문에 주변 대기의 흐름에 대한 분석이 매우 중요하다. 큐슈 지형에 따라 변화된 진로의 차이가 대기의 흐름의 변화로 인해 야기된 것인지 분석하였다. 태풍의 진로 분석에서 있어 중요하게 사용되고 있는 배경지향류(environment steering flow)를 분석하였다. 배경지향류는 태풍의 하층부터 중층 대류권을 모두 포함하는 200~850hPa 평균지향류를 Kurihara filter를 사용하여 태풍에 의한 회전 성분을 제거한 후 분석에 사용되었다. 산출된 배경지향류의 해상도는  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  이며, 큐슈의 지형에 따른 진로의 차이는 큐슈의 지형이 높은 실험에서 낮은 실험의 평균지향류 차이를 통해 분석하였다(Fig. 12).

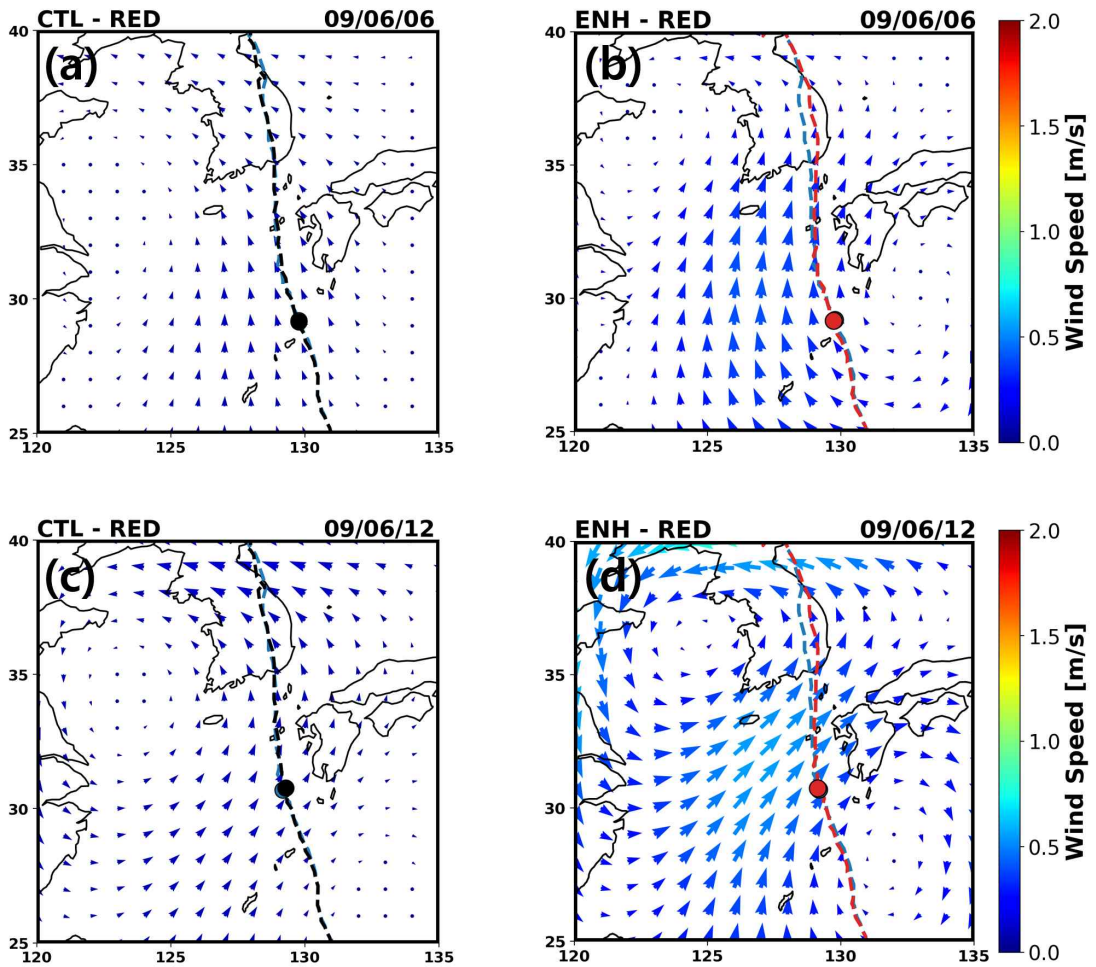
9월 6일 06UTC CTL 실험, RED 실험 그리고 ENH 실험에서 태풍의 위치는 큰 차이가 없었다. 그러나 하이선의 전면부에서부터 배경지향류의 차이가 발생하기 시작하였다(Fig. 12a, b). CTL 실험은 RED 실험에 비해 태풍이 이동하는 진로를 따라 북쪽으로 향하는 배경지향류가 나타났다. ENH 실험에서도 RED 실험에 비해 하이선의 진로를 따라 북쪽으로 향하는 배경지향류의 흐름이 있었다. 그러나 CTL 실험과 RED 실험에서 나타난 배경지향류보다 상대적으로 더 강한 흐름이 있었으며, 배경지향류의 방향도 북동쪽으로 향하는 차이가 있었다. 9월 6일 12UTC CTL 실험은 RED 실험에 비해 북쪽으로 향하는 흐름이 있었다(Fig. 12c). 9월 6일 12UTC ENH 실험과 RED 실험에서 배경지향류의 차이는 9월 6일 06UTC에서 나타났던 북동쪽에서의 흐름이 더욱 강화되었다(Fig. 12d). 남해안을 향했던 배경지향류가 대한해협을 통과하는 배경지향류로 변화하였으며, 그 속도 또한 빨라졌다.

Kurihara filter를 통해 큐슈의 지형에 따른 배경지향류를 분석하였다, 그 결과 큐슈의 지형이 높아짐에 따라 하이선이 큐슈를 서쪽을 통과하면서 배경지향류의 방향이 북동쪽으로 변화되었다. 이로 인해 ENH 실험에서 하이선이 한반도에 가장 빠르게 상륙하였으며, 상륙하는 위치는 북동쪽으로 편향되었다.

큐슈의 지형에 따라 변화되는 배경지향류의 차이는 200~850hPa 평균지향류 중 지형의 영향을 많이 받는 태풍의 하층 대류권 순환에 있는 850hPa 순환에서부터 큐슈의 지형에 의해 변화되었을 것으로 사료되었다. 게다가 하이선에 의한 바람이 큐슈의 서쪽을 통과하면서 RED 실험에서는 큐슈의 상공을 통과할 수 있었다. 그러나 CTL 실험과 ENH 실험에서는 큐슈의 상공을 통과하지 못하고 큐슈의 상공에 충돌하게 되면서 큐슈를 통과하기 위해서는 지형을 우회할 수 밖에 없었다. 큐슈의 지형에 충돌한 후 우회하여 통과하게 된다(Fig. 13). 때문에 태풍의 하층 대류권 순환에서부터 큐슈에 지형에 의해 변화가 일어나고 있을 것으로 사료되어 하층 대류권 순환을 추가적으로 조사하였다.

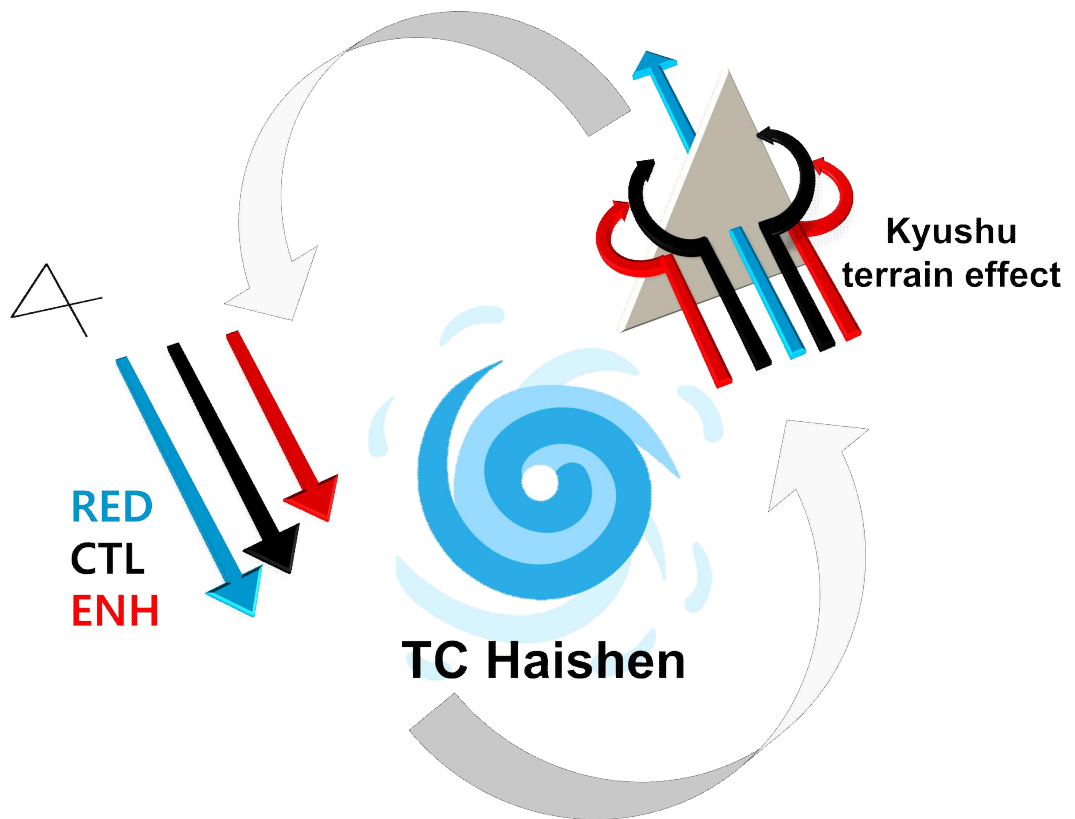


## Cross-Section of Vertical Steering Flow



**Fig. 12.** The difference in background steering flow (200 to 850 hPa mean) from 06UTC September 6 to 18UTC September 6 (6-h intervals). The black lines (dots) represent the best track (central locations) of Typhoon Haishen. The black, blue, and red lines represent the simulated tracks of Typhoon Haishen using the control (CTL), reduced (RED), and enhanced (ENH) experiments.





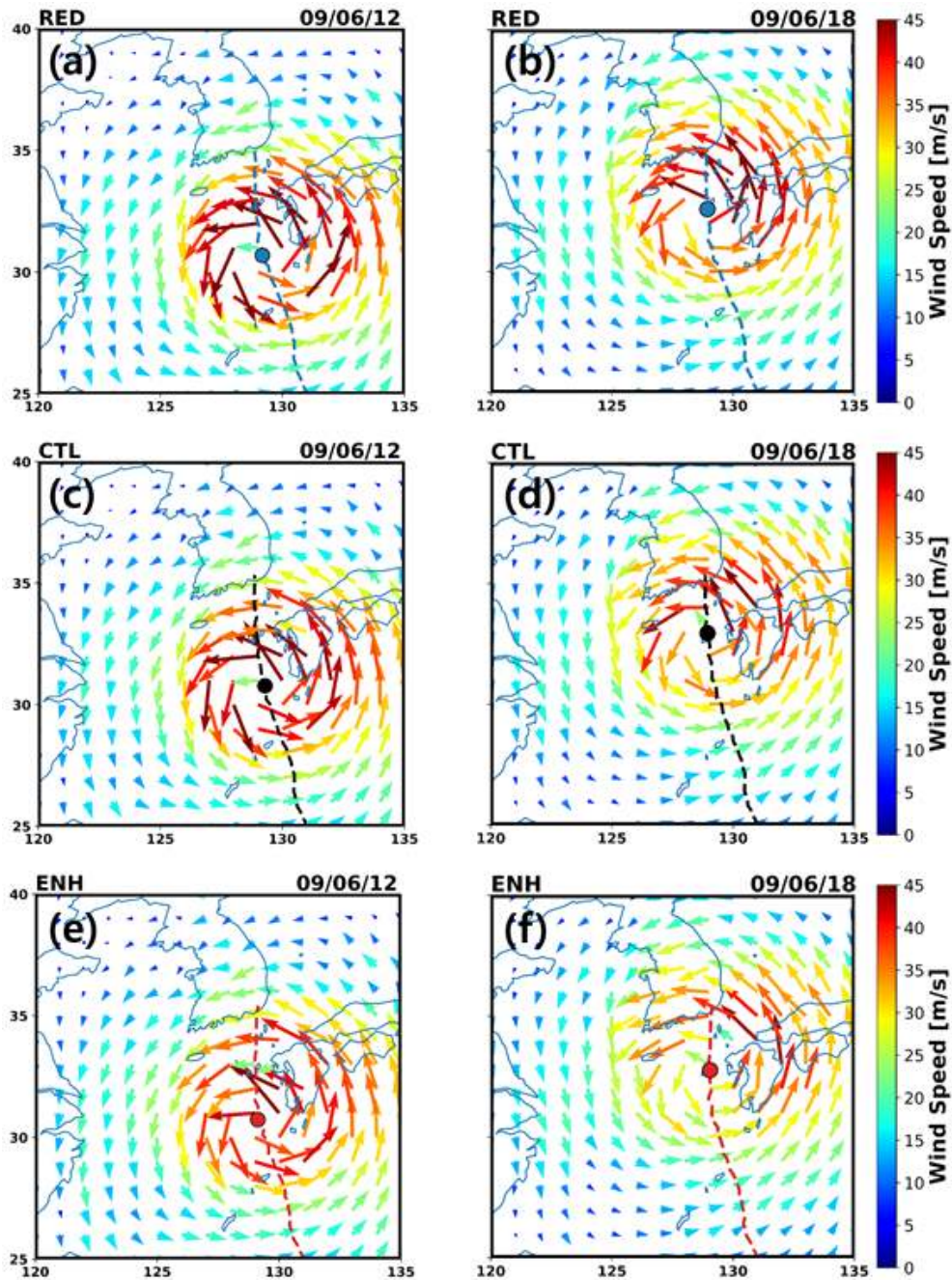
**Fig. 13.** Schematic of the influence of Kyushu topography on the wind direction and intensity of Typhoon Haishen. The black, blue, and red arrows represents the control, reduced, and enhanced experiments

### 3.2.3 하층 대류권 순환 변화

큐슈 지형에 따른 하이선 진로의 차이가 태풍의 하층 순환의 변화로 인해 발생된 것인지 분석하기 위해 850hPa의 풍향과 풍속을 확인하였다(Fig. 14). RED 실험에서는 하이선의 저기압성 순환이 큐슈에 진입하기 시작한 9월 6일 12UTC와 큐슈의 아소산과 근접했던 9월 6일 18UTC에서 모두 큐슈에 큰 영향을 받지 않고 저기압성 순환이 상대적으로 강하게 유지되었다(Fig. 14a, b). CTL 실험도 큐슈에 진입하기 시작한 9월 6일 12UTC에 큐슈로 향하는 저기압성 순환은 RED 실험과 유사하였다. 그러나 아소산이 위치한 큐슈의 중심부에서 북서쪽을 향해 흐르는 순환은 약화되었으며, 9월 6일 18UTC에는 아소산을 포함한 큐슈 전체 지역에서 저기압성 순환이 약화되었다. 큐슈의 지형 고도가 가장 높았던 ENH 실험에서 지형에 의한 마찰력의 강화로 인해 9월 6일 12UTC부터 큐슈 내륙에서의 흐름이 매우 약화되었으며, 9월 6일 18UTC의 흐름 또한 상대적으로 저기압성 순환이 가장 약하였다.

태풍의 하층 대류권 순환을 분석한 결과 큐슈의 고도가 높아짐에 따라 저기압성 순환의 흐름이 약해지고 있었다. 이는 큐슈의 지형에 의해 태풍의 하층 대류권 순환에서 변화가 발생하고 있는 것을 의미하고 있었다. 또한, 변화된 하층 대류권 순환은 큐슈와 인접한 지역에 국한되지 않고 제주도 인근 해역과 동해안까지 영향을 주고 있었다. 9월 6일 12UTC 제주도 인근 해역에서의 풍속은 큐슈의 지형이 낮았던 RED 실험에서 가장 높았으며 ENH 실험에서 가장 낮았다(Fig. 14b, f). 이와 반대로 동해안에서는 RED 실험보다 ENH 실험에서 풍속이 높게 타나났다.

큐슈 지형에 따라 태풍의 하층 대류권 순환에서 변화가 발생했다. 상대적으로 지형이 낮았던 RED 실험에서 저기압성 순환이 가장 강하였다. 이에 반해 지형이 가장 높았던 ENH 실험에서 저기압성 순환은 큐슈의 지형에 의해 마찰력 증가하였다. 큐슈의 지형에 의해 저기압성 순환에 방해가 되어 큐슈의 지형을 우회하며 더 넓은 순환이 나타났다.



**Fig. 14.** The difference in the low-level circulation (850hPa) associated with typhoon Haishen from 12UTC September 6 to 18UTC September 6 (3-h intervals). The black dot represents the location of typhoon Haishen While black dashed lines indicate the typhoon tracks until 00UTC on September 7. The black, blue, and red lines represent the control (CTL), reduced (RED), and enhanced (ENH) experiments.

### 3.3 큐슈 지형에 따른 하이선의 강도 변화

#### 3.3.1 하이선 강도 변화

큐슈의 지형에 따라 변화된 하이선의 강도는 CTL 실험의 중심기압과 최대풍속을 기준으로 하여 RED 실험과 ENH 실험의 차이를 확인하였다(Fig 15). 중심기압의 차이를 통해 큐슈의 지형에 따라 하이선의 강도는 차이가 있었다. 하이선은 큐슈의 지형이 낮았던 RED 실험에서 강도가 강하였으며, ENH 실험에서는 강도가 약하였다(Fig 15a). ENH, RED 두 실험에서 나타난 중심기압의 차이는 최대 5hPa로 한반도에 하이선이 상륙한 시점에서 나타났다. 큐슈의 지형이 높은 ENH 실험에서 강도가 약화된 원인으로서는 하이선이 큐슈의 지형에 의해 발생된 마찰력의 증가가 있었다. 이러한 마찰력의 증가는 Fig 14를 통해 태풍의 하부구조에 해당하는 850hPa에서 큐슈에 의한 풍속의 감소를 통해 간접적으로 확인할 수 있다.

지형에 의한 마찰력의 증가로 인해 강도의 약화가 발생할 수도 있었다. 게다가 지형에 따른 SST의 변화도 하이선의 강도에 영향을 줄 수 있었다. 하이선에 의해 냉각된 SST를 확인한 결과 큐슈에 진입부터 한반도에 상륙하기 이전까지 하이선의 중심으로부터 100km 이내의 SST가 약 1°C 가량 냉각되고 있었다(Fig 16a, 회색 영역). 하이선에 의해 냉각된 SST는 큐슈의 지형에 따른 실험에서 차이가 있었다. CTL 실험과 RED 실험에서 하이선의 중심에 따른 100km 이내의 평균 SST는 큐슈의 진입하기 이전(9월 6일 12UTC)까지는 유사하였다(Fig. 16b). 그러나 평균 SST는 큐슈에 진입하기 시작한 9월 6일 12UTC부터 차이가 발생하기 시작하였다. 평균 SST는 CTL 실험이 RED 실험에 비해 더 낮았으며, 이러한 경향은 Fig 15a에서 나타난 중심기압의 차이와 유사하였다. 해양이 접합된 모델을 사용한 이번 실험을 통해 큐슈의 지형에 따라 평균 SST에서 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 지형에 의해 변화된 평균 SST는 하이선의 강도에 영향을 줄 수 있었다. 해양이 접합된 모델에서 확인된

지형에 의해 변화되는 평균 SST는 해양이 접합되지 않아 일정한 SST를 입력자료로 사용하는 모델(대기모델만 사용하는 경우)에 비해 큰 장점으로 사료되었다.

큐슈의 지형이 높아짐에 따라 중심기압은 상대적으로 증가하고 있었다. 그러나 중심기압과는 반대로 최대풍속은 ENH 실험에서 가장 강하였으며, RED 실험에서 가장 약화되었다. 큐슈의 지형에 따라 상대적으로 하이선의 중심기압과 최대풍속이 같이 증가 및 감소하는 이러한 결과는 일반적으로 태풍의 중심기압이 낮을수록 최대풍속이 증가하는 경향과는 반대의 패턴이 나타났다. 이에 본 연구에서는 지형이 높아짐에 따라 ENH 실험에서는 중심기압이 증가되어 태풍의 강도가 약화되었지만, 최대풍속이 증가하게 된 원인을 분석할 필요성이 있었다. 큐슈의 지형이 높아짐에 따라 나타난 최대풍속의 증가는 태풍의 하층 구조에서부터 큐슈의 지형에 의해 우회되는 바람과 관련이 있을 것으로 사료되었으며, 최대풍속이 증가하게 되는 원인 분석은 다음 장에서 분석하였다

## Haishen Intensity Difference

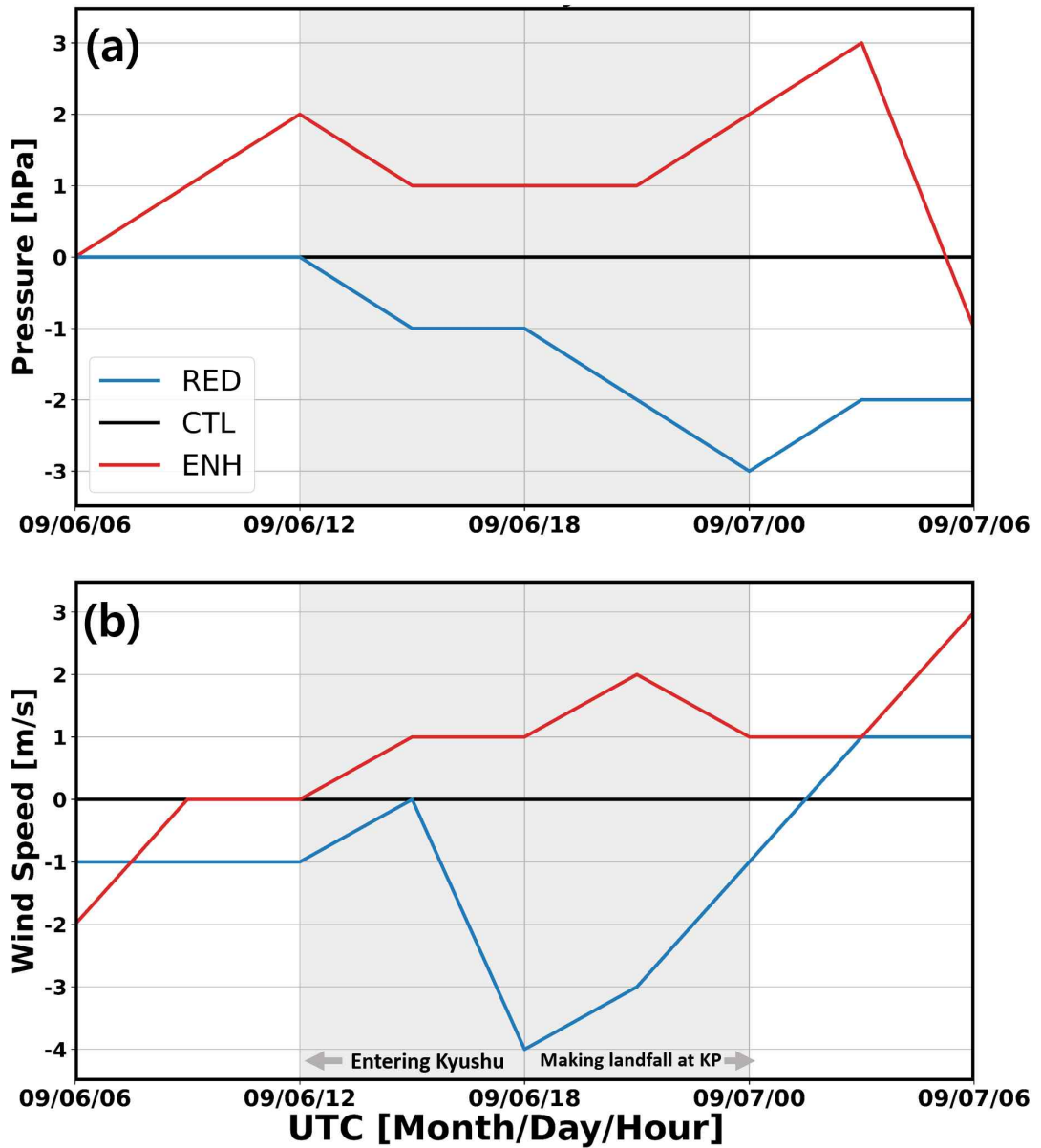


Fig. 15. Comparison of simulated (a), minimum central pressure and (b), maximum wind speed of Typhoon Haishen from 06UTC Sep 6 to 12UTC Sep 7. The blue, and red lines indicate the intensity difference of the reduced (RED) and enhanced (ENH) relative to the control experiment (black lines).



## Mean SST Difference within 100km

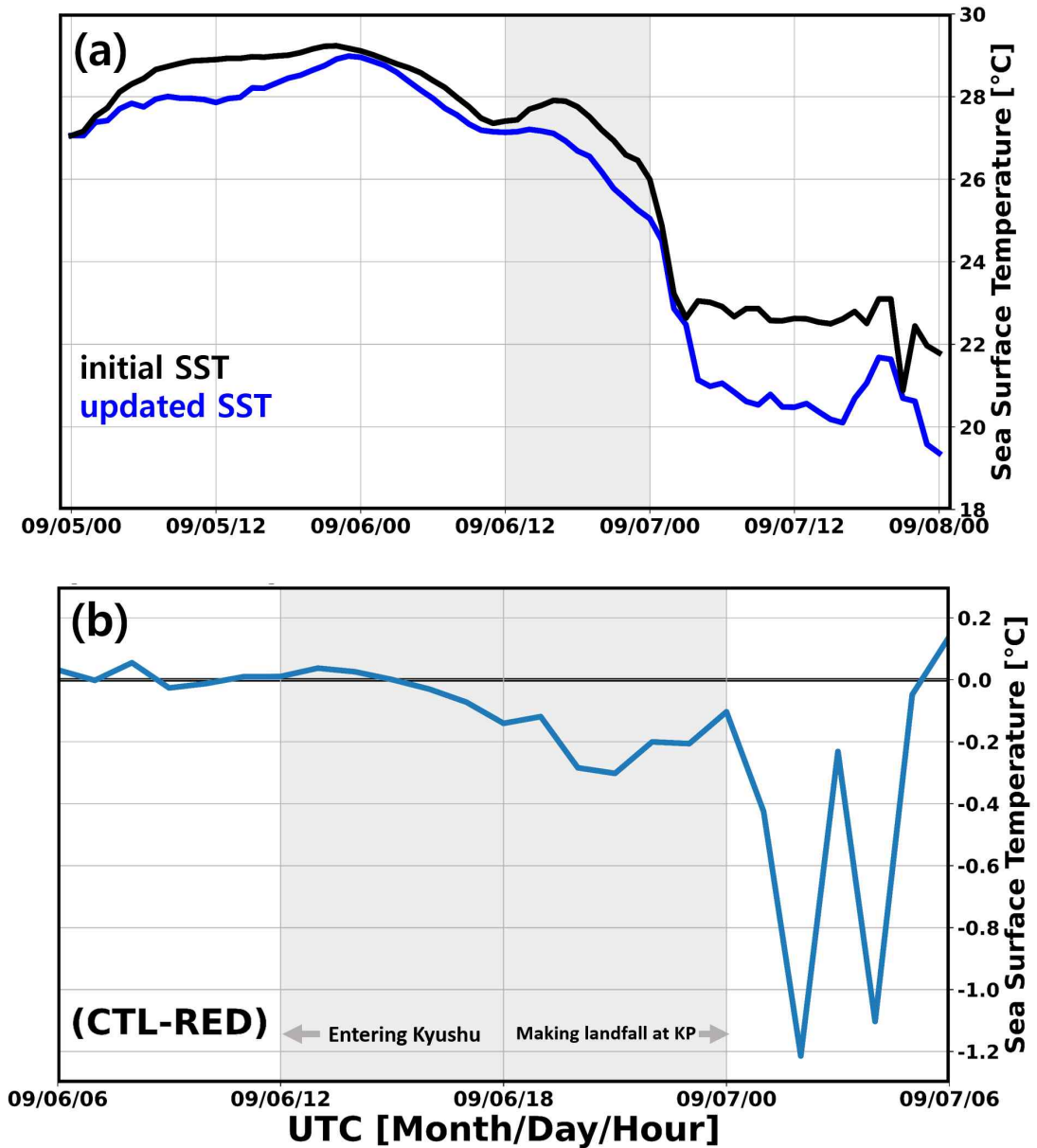


Fig. 16. Mean sea surface temperature (SST) difference within 100 km radius of Mt. Aso in Kyushu Island from 06UTC September 6 to 06UTC September 7. (a), mean SST difference between initial SST and 1-h interval updated SST of the control (CTL) experiments. (b), mean SST difference between the control (CTL) and reduced (RED) experiments.

### 3.3.2 한반도 인근 해역 풍속 변화

큐슈의 지형이 가장 높았던 ENH 실험에서 최대풍속은 가장 강했으며, 큐슈의 지형을 1m로 설계한 RED 실험에서 가장 약하였다. 그러나 태풍의 하층인 850hPa에서 저기압성 순환은 ENH 실험에서 약화되는 것이 나타났으며, RED 실험에는 상대적으로 유지 및 강화되었다. Fig 15b에서 나타난 최대풍속은 하이선의 최대풍속으로 좁은 범위에 제한된 태풍의 강풍대에서 나타났다. 때문에 하이선에 의해 발생하는 넓은 지역에서 발생된 최대풍속과는 다를 수 있었다. 이에 모의기간동안 한반도 인근에서 발생된 최대 풍속(10m 높이)을 분석하였다(Fig 17).

CTL 실험에서 35m/s 이상의 풍속은 약 위도 32°N까지 분포하고 있었다. 큐슈의 서쪽 해안을 따라 우리나라 동해안까지 이어져 울진, 동해, 강릉의 해안가까지 30m/s 이상의 풍속이 분포하고 있었다. 25m/s 이상의 풍속은 동해안 전반에 분포하고 있었다. 울릉도와 독도 인근 해역에서부터 동해 먼 바다는 20m/s 이상의 풍속이 분포하였다. 제주도 인근 해역에서 풍속 분포를 살펴보면 제주도 남쪽과 동쪽 해상에서는 25m/s 이상의 풍속이 분포하였다. 부산 남쪽을 비롯한 남해안의 일부 해상에서만 25m/s 이상의 풍속이 분포하였다. 남해안의 중앙에 위치한 여수, 통영을 기준으로 서쪽에 있는 해역과 서해에서는 20m/s의 풍속 분포를 보였다.

RED 실험에서 나타난 35m/s 이상의 풍속은 CTL 실험에 비해 약 위도가 1° 낮은 31°N 정도에 머물러 있었다. 30m/s 이상의 풍속은 CTL 실험과 유사하게 큐슈의 서쪽 해안선을 따라 우리나라 동해안까지 이어져 있는 분포를 보였다. 그러나 동해 앞바다와 큐슈의 서쪽 일부 해역에서 30m/s 이상의 풍속 분포가 절단되어 있는 형태가 나타났다. 울릉도와 독도를 포함한 동해안에서 25m/s 이상의 풍속이 나타났다. 25m/s 이상의 풍속은 서해의 일부분과 제주도 북동쪽 해역에 분포하였다. 우리나라 내륙에서 동해안을 제외하고 나타나지 않았던 15m/s 이상의 풍속이 우리나라 남서쪽에 위치한 목포에서 나타났으며, 목포를



중심으로 서해에서부터 제주도 북동쪽으로 이어지는 풍속 분포가 나타났다.

ENH 실험에서는 35m/s 이상의 풍속 분포가 큐슈의 남단에 그치지 않고 33°N 보다 더 북쪽까지 분포하였다. 게다가 30m/s 이상의 풍속도 동해안을 따라 속초까지 더 넓게 뻗어있었다. 또한, 큐슈의 동쪽 해안선에서도 RED, CTL 실험과는 다르게 25m/s 이상이 풍속이 분포하였으며, 일부에서는 30m/s 이상의 풍속도 있었다. 그러나 ENH 실험에서 25m/s 이상의 풍속은 태풍의 중심과 인접한 해역에서만 나타났다. 특히, 제주도 인근 해역에서는 RED 실험과 CTL 실험에 비해 25m/s 이상의 풍속 분포가 매우 한정되었다.

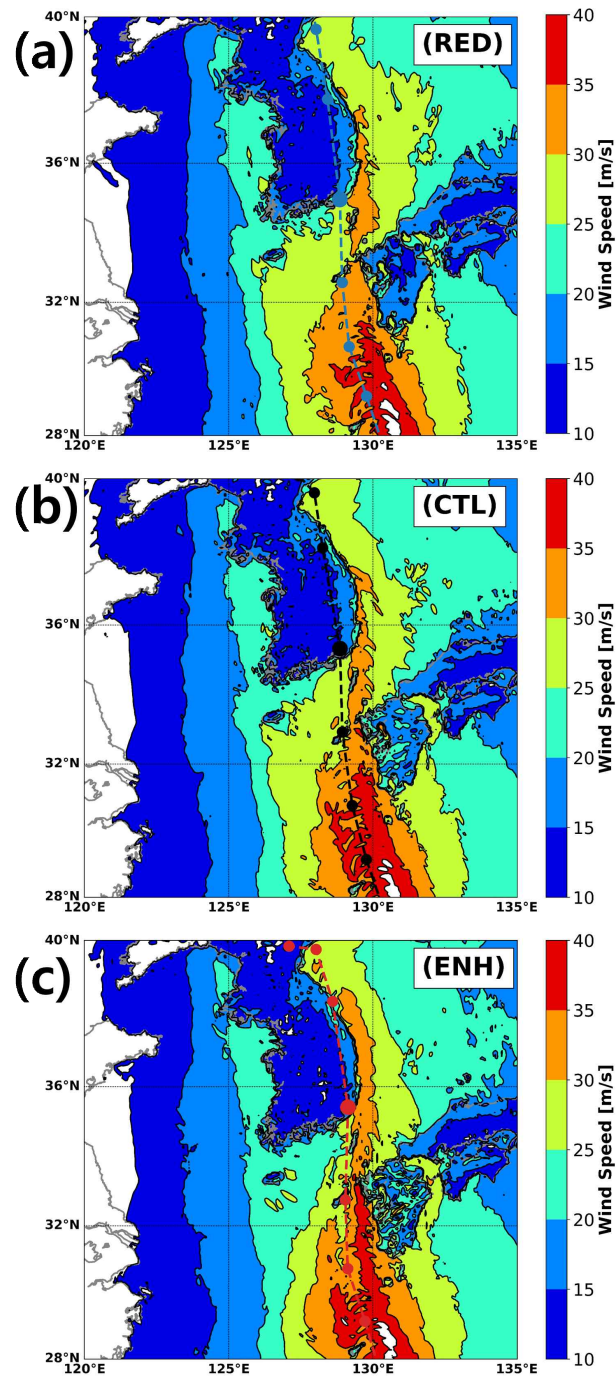
큐슈의 지형에 따라 한반도 인근 해역에서 최대풍속의 차이를 확인하기 위해서 지형이 높은 실험에서 낮은 실험의 풍속 차이를 확인하였다(Fig 18). 실제 큐슈의 지형이 한반도 인근 해역에 어떠한 영향을 주었는지 분석하기 위하여 CTL 실험과 RED 실험의 차이를 확인하였다(Fig. 18a). 큐슈의 지형이 높아짐(낮아짐)에 따라 풍속이 강화(약화)되는 지역은 빨간색(파란색)으로 표시하였다. 큐슈의 서쪽 해안부터 한반도에 상륙하기 전까지 하이선의 진로를 따라 풍속이 강화되고 있었다. 그러나 이와 반대로 전반적인 동해와 목포를 포함한 제주도 인근 해역에서는 풍속이 약화되었다. 풍속이 약화된 지역은 풍속이 강화된 지역에 비해 상대적으로 태풍의 중심에서 멀리 떨어져 있었다. 때문에 풍속이 약화는 큐슈의 지형으로 인한 태풍의 강도 약화가 원인으로 사료되었다. CTL 실험과 RED 실험에서의 최대풍속 차이를 통해 큐슈의 지형이 하이선의 중심으로부터 인접한 지역 뿐만 아니라 더 넓은 지역의 최대풍속에도 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다.

추가적으로 큐슈 지형에 따른 영향이 더 극대화될 경우를 분석하기 위하여 ENH 실험과 RED 실험을 비교하였다. ENH 실험에서 더 높아진 큐슈의 지형에 의해 남쪽에서 불어오는 더 많은 바람이 우회되었으며, 이는 강풍대에 더 많은 바람을 수렴시켰다. 그 결과 큐슈의 서쪽 해안에서 최대풍속이 강화되었다. 또한, 큐슈 지형에 의해 ENH 실험에서 하이선의 진로가 우측으로 편향되면서 우리나라 동해안에 풍속을 강화시켰다.

큐슈의 지형에 따른 실험에서 풍속의 차이를 비교한 결과 큐슈의 지형 고도가 높아질수록 한반도 인근 해역에서 높은 풍속이 발생하는 영역은 감소하였다. 그러나 큐슈의 지형에 따른 민감도 실험에서 최대풍속의 차이를 비교한 결과 큐슈의 지형은 남쪽에서부터 큐슈를 향해 부는 하이선의 바람을 수렴을 시켰다. 수렴된 바람으로 인해 큐슈의 서쪽 해안에서부터 우리나라에 상륙하기 전까지의 하이선의 최대풍속을 강화시켰으며, 북부 동해안 일부 지역의 최대풍속도 강화시켰다.

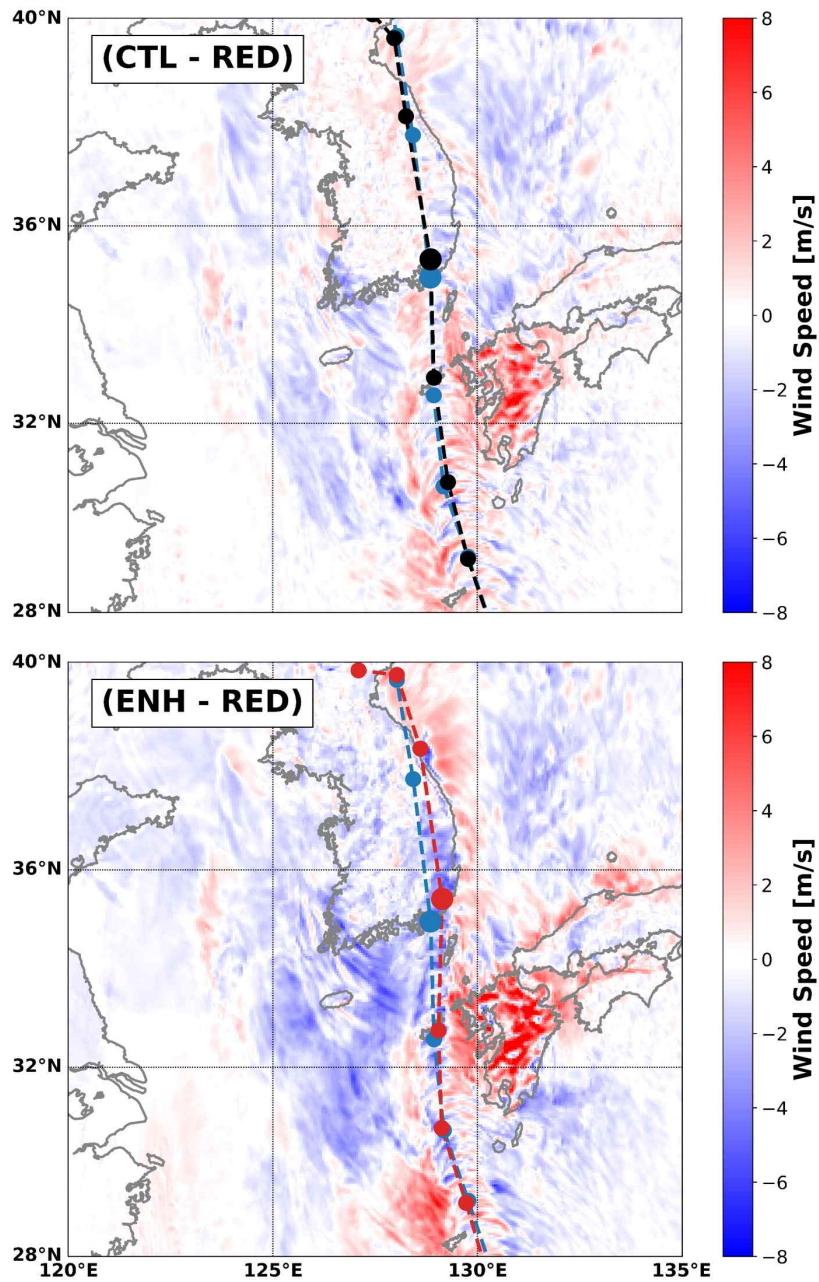
추가적으로, 태풍 하이선의 내습으로 북부 동해안에 있는 많은 항구에서 큰 피해가 발생하였는데 이러한 피해는 동해안을 직선의 형태로 북상한 하이선의 이례적인 진로와 큐슈의 지형 효과가 복합적으로 작용한 결과일 수 있었다. 특히, 동해안에 위치한 많은 항구는 항구의 입구가 남쪽에 있어 지속적으로 남풍이 불게 될 경우 예크만 수송에 의해 항구 안쪽으로 해수의 수송이 발생하기 때문에 구조적으로 남풍계열의 바람에 취약하였다. 동해안을 직선의 형태로 북상한 하이선에 의해 지속적인 남풍과 동풍계열의 바람의 발생과 큐슈의 지형에 의해 강화된 풍속은 동해안에 있는 많은 항구에 더 치명적인 피해가 발생시킬 수 있었다.

## Tracks and Maximum Wind Speeds



**Fig. 17.** Simulated maximum wind speeds at 10m (6-h interval) in sensitivity experiments, simulated maximum wind speed and typhoon track using the reduced (RED), control (CTL), and enhanced (ENH) experiments.

## Tracks and Maximum Wind Speeds(Diff)



**Fig. 18.** same as Fig. 17 but shows the difference of maximum wind speed at of 10m for control (CTL) minus reduced (RED) experiments, and enhanced (ENH) minus RED experiments. The black, blue, and red lines represent the track of Typhoon Haishen using CTL, RED, and ENH experiments.

### 3.3.3 수직 풍속 변화

큐슈 지형의 영향으로 하이선은 큐슈를 통과하면서 최대풍속이 강화되고 있었다. 최대풍속의 강화는 큐슈 지형에 의해 우회된 바람이 하이선의 강풍대에 수렴된 결과로 분석되었다. 만약, 최대풍속이 강화되는 이유가 큐슈의 지형으로 인해 우회되는 바람이 강풍대에 수렴하기 때문이라면 풍속의 강화는 해수면에 가까운 높이(해수면 위 10m) 뿐만 아니라 큐슈의 지형 고도와 비슷한 높은 고도까지 강화되어야 했다.

이에 큐슈의 지형에 따라 변화되는 풍속의 차이를 수직적으로 비교하였다(Fig. 19). 수직적인 풍속의 변화를 확인하기 위해 CTL 실험과 RED 실험 그리고 ENH 실험과 RED 실험을 비교하였다. 수직적인 풍속을 비교한 시간은 큐슈의 아소산을 근접하게 통과하기 시작한 9월 6일 17UTC부터 20UTC까지를 비교하였다. 풍속의 수직적인 비교는 각 실험에서의 하이선의 중심을 기준으로 동일한 거리만큼 떨어져 있는 풍속을 비교했으며, Fig. 19에 검은색 표시된 지형의 고도는 큐슈의 지형이 높았던 실험을 기준으로 나타냈다.

CTL 실험과 RED 실험의 수직적인 풍속을 비교한 결과 지형에 의해 마찰이 작용하는 CTL 실험에서는 큐슈에서의 풍속은 약화되었다. 그러나 큐슈와 태풍의 중심 사이에서는 CTL 실험에서의 풍속이 강화되었다. 이러한 결과는 큐슈의 지형으로 인해 우회되는 바람이 강풍대에 수렴된 결과로 분석되었다. 큐슈 지형에 의해 우회된 흐름으로 풍속이 강화되는 경향은 하이선이 큐슈 아소산에 근접한 시간부터 큐슈를 통과하기 직전까지 유지되었다. 큐슈의 서쪽에서와 동일하게 큐슈의 동쪽에서도 우회되는 바람이 하이선이 큐슈의 아소산을 통과한 이후부터 나타났다(Fig. 19e, f).

ENH 실험과 RED 실험의 수직적인 풍속을 비교한 결과 CTL 실험과 RED 실험과 유사하였지만, 수직적으로 더 큰 풍속의 차이가 있었다. ENH 실험은 CTL 실험에 비해 풍속이 강화되는 곳은 더욱 강화되고, 약화되는 곳은 더욱

약화되었다. 이러한 결과는 ENH 실험에서 높아진 지형이 더 많은 바람을 우회시켰기 때문이며, 그 결과 큐슈의 서쪽에서는 CTL 실험에서보다 더 강화된 풍속이 나타났다.

큐슈 지형에 따른 민감도 실험에서 수직 풍속의 비교를 통해 큐슈의 지형은 높은 고도에 이르기까지 하이선의 바람을 우회시키고 있었다. 우회된 바람 중 큐슈의 지형으로 인해 하이선의 강풍대가 위치한 큐슈의 서쪽으로 우회되어 수렴된 바람은 해수면 높이에 국한되지 않고 높은 고도에 이르기까지 하이선의 강풍대의 풍속을 수직적으로 강화시켰다.



## Cross-Section Wind Speeds(Diff)

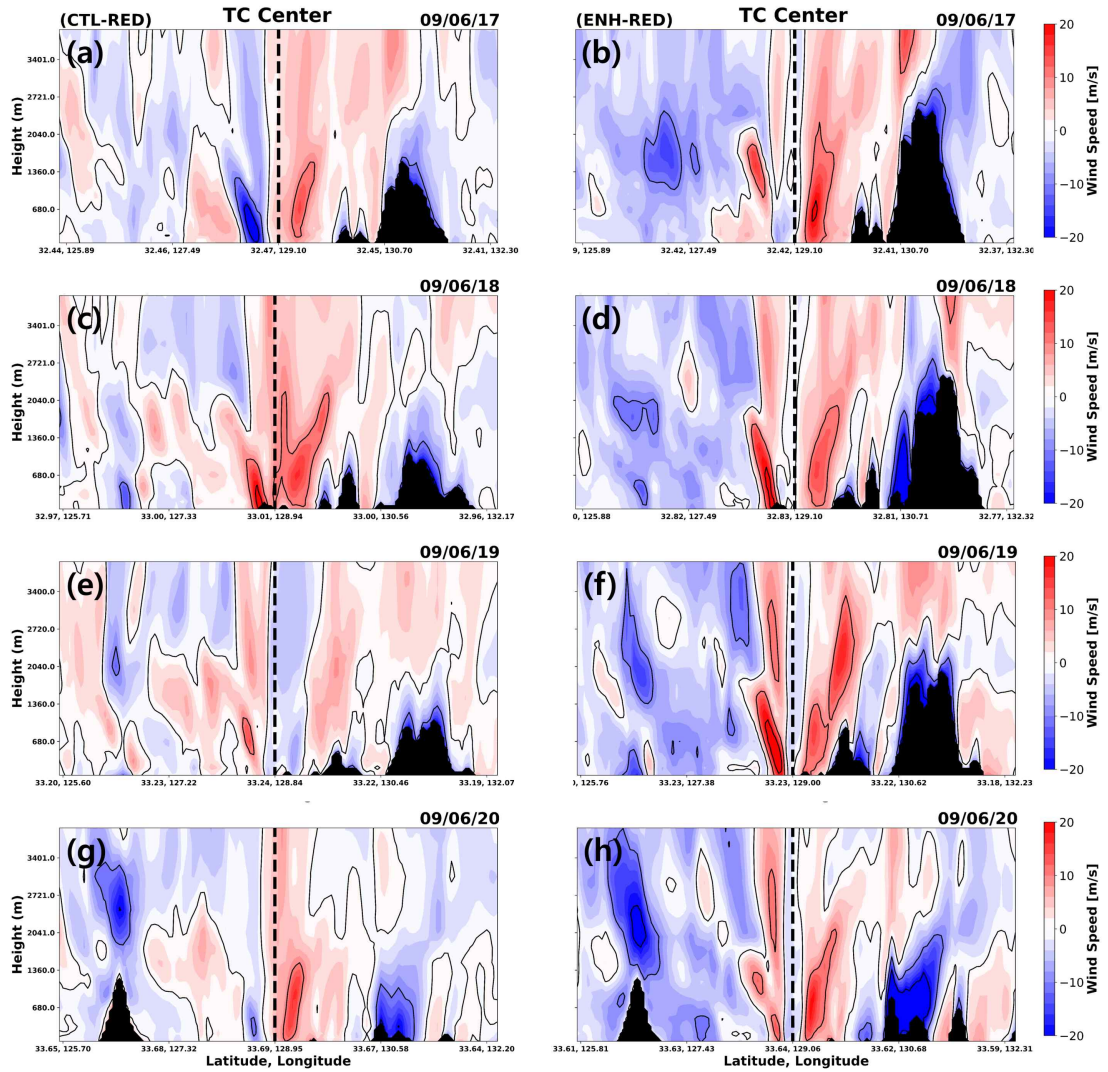


Fig. 19. Vertical cross section of difference in wind speed in sensitivity experiments based on varying Kyushu topography from. Left panels, the difference between control (CTL) and reduced (RED) experiments. Right panels, the difference between enhanced (ENH) and RED experiments. The black dashed line represents central location of Typhoon Haishen while the black shading indicates the terrain.

### 3.4 큐슈 지형에 따른 하이선의 강수 분포 및 최대 강수량의 변화

한반도 및 한반도 인근 해역에서 큐슈 지형에 따라 변화된 누적강수량을 조사하였다. 한반도 인근에서 누적강수량은 RED 실험과 CTL 실험에서 공통적으로 제주도과 한반도 동해안에 많이 내렸다(Fig. 20). CTL 실험에서 나타난 강수 패턴은 제주산간 지역과 동해안 그리고 일부 서해안에서 많은 강수가 내렸으며, 실제 관측과 유사한 분포를 보였다(Fig. A. 1). RED 실험에서 강수 패턴은 상대적으로 제주산간에서 많은 누적강수량이 나타났다. 큐슈 지형에 따라 변화되는 강수의 패턴은 CTL 실험과 RED 실험의 누적 강수량의 차이를 통해 확인하였다(Fig. 20c).

큐슈 지역에서는 고도의 차이로 인해 RED 실험에 비해 CTL 실험에서 더 많은 누적강수량이 나타났다. 그러나 제주산간을 비롯하여 제주도와 큐슈 사이의 해역 그리고 제주도 한라산과 서해안을 잇는 해역에서는 RED 실험에서 더 많은 강수가 나타났다. 큐슈 지형에 따라 변화되는 강수 차이는 ENH 실험과 RED 실험에서 더 명확하게 차이가 나타났다(Fig. 20d). ENH 실험에서는 CTL 실험과 RED 실험에 비해서 지형 고도가 가장 높아진 큐슈에서 더 많은 강수가 발생했으며, 동해안과 서해 먼 바다에서의 강수는 증가하였다. 그러나 RED 실험에 비해 전체적인 한반도 내륙과 서해 앞바다 그리고 제주도 동쪽 해상에서의 강수는 급격하게 감소하였다.

ENH 실험에서 나타난 한반도를 포함한 한반도 남쪽 해상에서 강수량이 급격하게 감소되는 이유는 큐슈의 지형에 따른 수증기의 유입의 차이로 설명할 수 있었다. ENH 실험에서 높아진 큐슈의 고도는 하이선의 남쪽에서부터 유입되는 고온다습한 수증기가 RED 및 CTL 실험에 비해 더 높은 고도까지 충돌하게 되면서 많은 강수를 발생시켰다. 큐슈에 상대적으로 많은 양의 강수는 한반도 인근 해역으로 수증기의 유입을 차단 및 제한시킬 수 있었다.

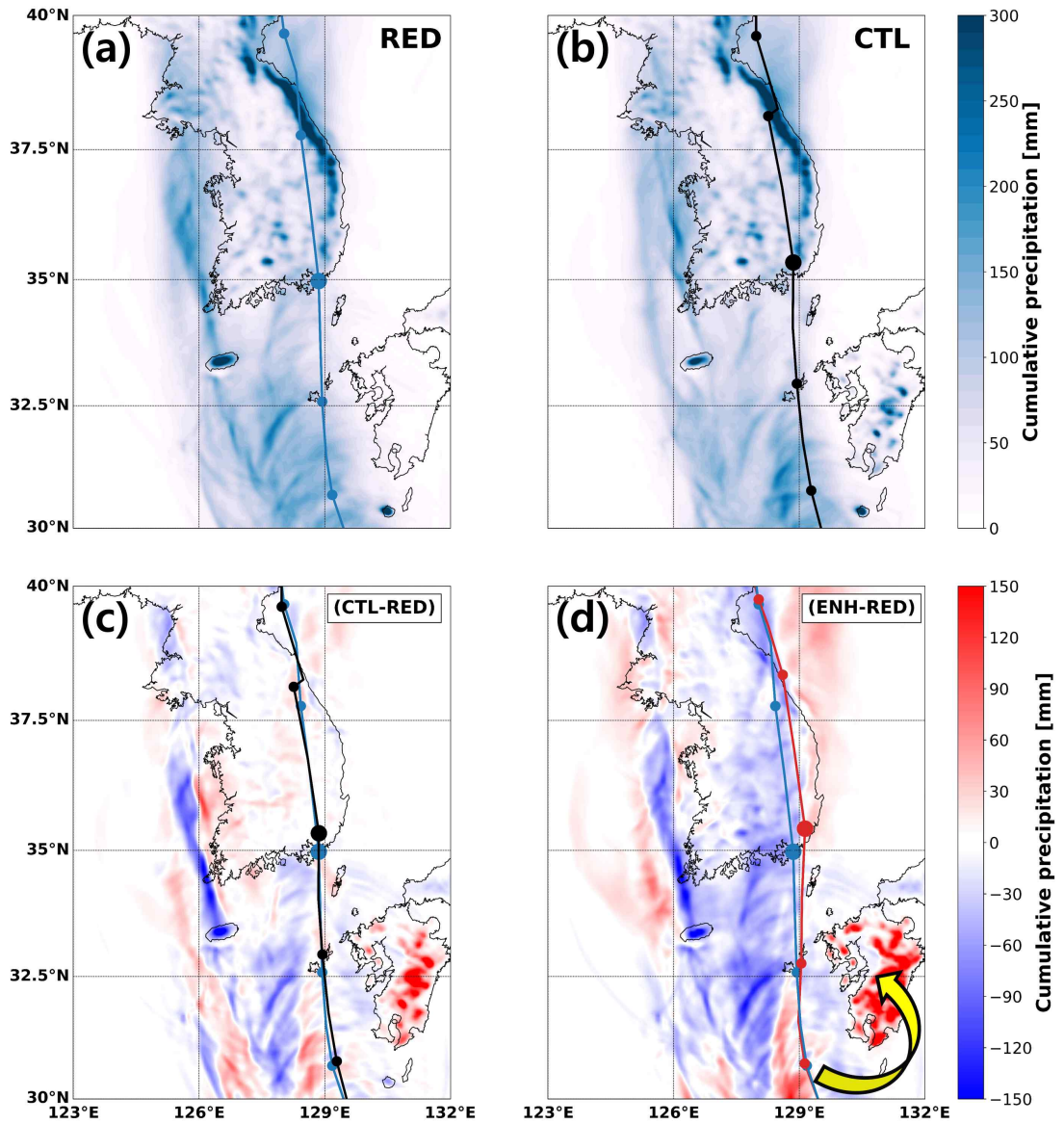
한반도 인근으로 유입되는 수증기의 양을 확인하기 위하여 수증기의 이동량을 확인하였다(Fig. 21). CTL 실험과 RED 실험 그리고 ENH 실험의



차이를 통해 큐슈의 지형이 높을수록 큐슈 인근에서는 양의 Flux가 나타났으며, 제주도 인근 해역에서는 음의 Flux가 나타났다. 큐슈 인근에서 양의 Flux가 나타난 이유는 남쪽에서부터 유입되는 수증기가 큐슈의 지형에 가로막혀 수증기가 다른 지역으로 이동하지 못하고 정체되었기 때문이며, 제주도 인근 해역에서 나타난 음의 Flux는 큐슈의 지형이 제거된 RED 실험에서는 수증기가 큐슈의 지형을 통과하여 제주도 인근 해역까지 이동한 결과이다.

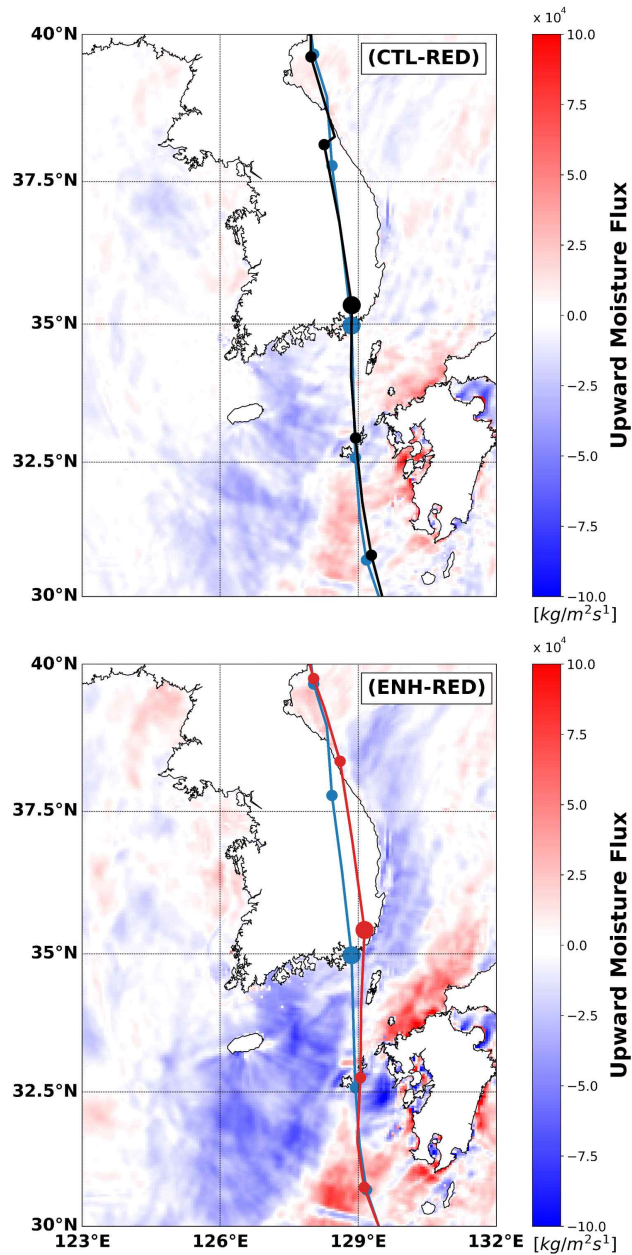
큐슈의 지형에 따라 한반도 인근으로 유입되는 수증기의 양이 달라지고 있었으며, 이로 인해 하이선에 의한 강수량의 변화가 나타났다. 큐슈의 지형에 따라 한반도 및 한반도 인근 해역에서의 강수 패턴이 변화하고 있었다. 큐슈의 지형에 따라 변화되는 강수량을 확인하기 위해서 앞서 분석했던 어리목 지점에서 민감도 실험에 따른 강수량의 차이를 비교하였다(Fig. 22, Table 4). 그 결과 큐슈의 지형 고도에 따라 누적강수량에서 큰 차이가 있었다. 하이선이 제주도 동쪽 해상을 통과하는 6일 12UTC부터 7일 00UTC까지 RED 실험에서는 시간당 최대 80mm 이상의 강수가 나타났지만, ENH 실험에서는 시간당 50mm 이상의 강수가 발생하지 않았다. 이러한 결과는 큐슈의 지형에 의해 차단된 수증기의 유입과 관련이 있었다.

## RAIN 09/06/00 ~ 09/08/00 [KST]



**Fig. 20.** Cumulative precipitation in sensitivity experiments and track of Typhoon Haishen from 00 Korean Standard Time (KST) September 6 to 00KST September 8. (a) and (b), cumulative precipitation in reduced (RED) and control (CTL) experiments. (c), mean difference of cumulative precipitation in CTL and RED experiments, (d), enhanced (ENH) and RED experiments. The yellow arrow represents the direction of moisture. In (a)-(d), the black, blue, and red lines indicate the track of Typhoon Haishen using CTL, RED, and ENH experiments.

**QFX 09/06/00~09/08/00 [KST]**



**Fig. 21.** Difference of upward moisture flux (QFX) in sensitivity experiments and track of Typhoon Haishen from 00 Korean Standard Time (KST) 6 September to 00KST September 8 (6-h intervals). mean difference in QFLX between control (CTL) and reduced (RED) experiments and enhanced (ENH) and RED experiments. The black, blue, and red lines indicate the track of Typhoon Haishen using CTL, RED, and ENH experiments.

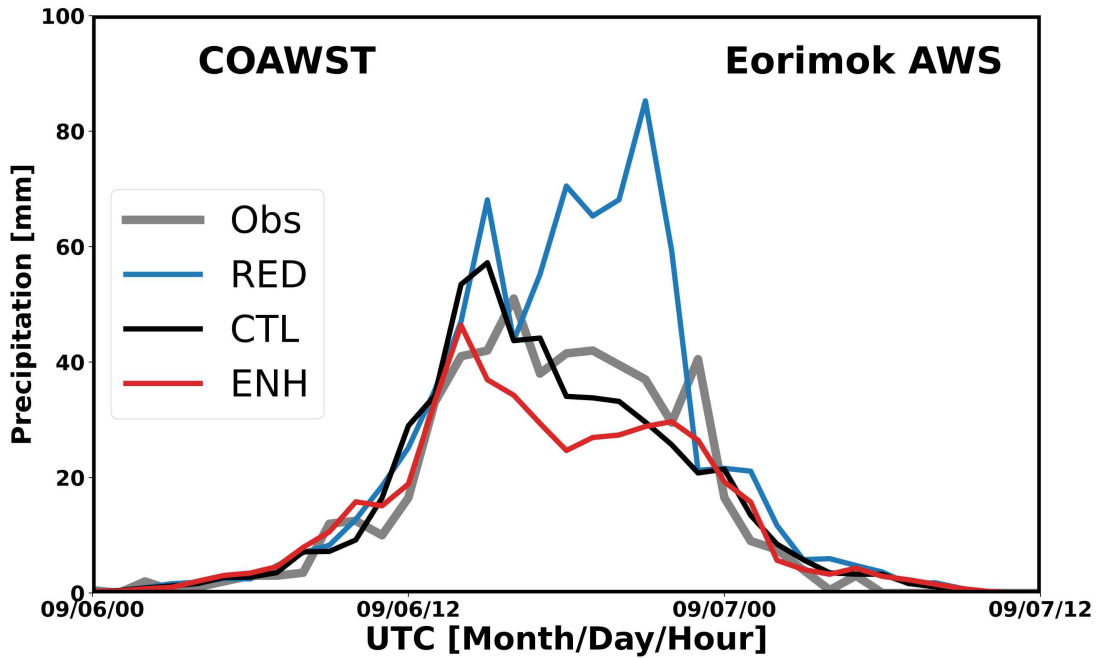


Fig. 22. Comparison of hourly precipitation between simulated experiments and Eorimok Automatic Weather Station (AWS). comparison of model results from COAWST models, respectively. The black, blue, and red lines indicate the hourly precipitation from control (CTL), reduced (RED), and enhanced (ENH) experiments.

Table 4. Observed and simulated mean, total, and maximum rainfall in Korean Peninsula and Jeju Island

Rainfall (mm)	Korea mean	Jeju Island mean	Eorimok
Observation	-	-	547.50
RED	78.14	166.77	786.25
CTL	80.60	114.19	555.79
ENH	60.01	105.58	488.18

## IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 해양(ROMS)과 대기(WRF)가 접합된 COAWST 모델을 사용하여 큐슈의 지형이 태풍의 진로 및 강도에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 조사하였다. 큐슈의 지형에 대한 영향을 조사하기 위한 사례는 큐슈의 서쪽을 통과하면서 급격한 강도의 약화가 발생했던 2020년 10호 태풍 하이선을 선정하였다. 큐슈의 지형에 따른 태풍 하이선의 영향을 분석하기 위해 큐슈 지형을 변화시킨 민감도 실험을 설계하였다. 민감도 실험은 큐슈의 지형을 1m로 낮춘 실험(RED), 큐슈 실제 지형을 사용한 실험(CTL), CTL 실험에 비해 큐슈의 고도를 2배 높인 실험(ENH)으로 설계하였다. 수치실험을 통해 분석된 태풍 하이선에 대한 큐슈 지형의 영향을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 큐슈의 지형은 하이선의 진로를 북동쪽으로 편향시켰다. 태풍의 진로가 지형에 따라 변화되는 원인을 조사하기 위하여 Kurihara filter를 통해 태풍의 회전성분이 제거된 200~850hPa의 평균 배경지향류를 산출 후 분석하였다. 그 결과, 큐슈의 지형이 높아질수록 배경지향류의 흐름이 북동쪽으로 강화되었다. 강화된 배경지향류의 영향으로 ENH 실험에서 하이선은 한반도에 가장 빠르게 상륙하였으며, 상륙한 위치는 북동쪽으로 편향되었다.

둘째, 큐슈의 지형은 하이선의 중심기압과 최대풍속을 증가시켰다. 큐슈의 지형으로 인해 증가된 마찰력은 하이선의 강도를 약화시켰으며, 그 결과 하이선의 중심기압은 높아지게 되었다. 그러나 큐슈 지형으로 인해 하이선의 저기압성 순환으로 발생한 남풍계열의 바람이 큐슈를 우회하여 태풍의 강풍대(태풍의 중심으로부터 우측 및 큐슈의 서쪽)에 수렴하면서 하이선의 최대풍속이 증가하였다. 큐슈의 지형이 높아질수록 지형에 의해 더 많은 남풍계열의 바람이 우회되었으며, 그 결과 큐슈의 서쪽에 더 많은 바람이 수렴되어 하이선의 풍속이 더욱 강화되었다. 강화된 풍속은 하이선이 큐슈를

통과 후 대한해협을 거쳐 한반도에 상륙할 때까지 유지되었다. 즉, 큐슈의 지형은 중심기압 측면에서 하이선의 강도를 약화시켰지만 지형에 의해 남풍계열의 바람이 하이선의 강풍대가 위치한 곳에 수렴하게 되면서 하이선의 최대풍속을 강화시켰다. ENH 실험에서는 하이선의 진로가 상대적으로 북동쪽으로 편향되면서 동해안에서 풍속이 더욱 강화되었으며, 이는 동해안의 항구에 더 큰 피해가 발생할 수 있음을 시사하였다.

셋째, 큐슈의 지형은 제주도를 포함한 한반도 인근의 강수 패턴을 변화시켰으며, 한반도 및 제주도에 내린 누적강수량을 감소시켰다. 이러한 강수량의 감소는 하이선에 의해 남쪽에서부터 유입되는 고온다습한 수증기와 연관되어 있었다. 태풍에 의해 유입된 고온다습한 수증기가 큐슈의 높은 지형과 충돌하면서 큐슈에 많은 강수가 발생했으며, 이로 인해 제주도로 향하는 수증기의 유입은 감소되었다. ENH 실험에서는 큐슈의 지형에 의해 수증기 유입이 차단되어 한반도를 포함하여 한반도의 인근에서 누적강수량이 급격하게 감소하였다. 반면, 큐슈의 지형이 제거된 RED 실험에서는 큐슈에 큰 강수가 없었기 때문에 우리나라 인근으로 더 많은 양의 수증기가 유입되어 누적강수량이 증가하였다.

넷째, 대기-해양 접합모델을 사용하는 것이 지형이 태풍에 미치는 영향을 조사하는 데에도 효과적이었다. 지형 효과에 대한 다수의 선행 연구에서는 대부분 대기모델만을 사용하여 왔다. 그러나 대기모델만을 사용할 경우 태풍-해양 상호작용을 고려하지 못해 특히 태풍의 강도를 과대모의 할 수 있다. 이번 연구에서도 접합모델을 사용할 경우 모델의 과대모의 오차가 감소하였을 뿐 아니라 누적강수량에서도 높은 모의성능을 보였다. 또한 큐슈 지형에 대한 민감도 실험에서도 지형효과로 변화된 바람장이 해수면 냉각에 영향을 미쳐 결국 태풍의 강도를 변화시키는 과정이 잘 모의되었다.

본 연구에서는 한반도로 향하는 태풍이 큐슈 지형의 영향을 받아 진로, 강도, 강수가 어떻게 변화하는지를 대기-해양 접합모델을 이용하여 조사하였다. 이 결과는 향후 한반도로 접근하는 태풍을 예측할 때 기초자료로 활용이 가능할

것이다. 그러나 본 연구는 하나의 태풍 사례에 대한 결과이기 때문에, 본 결과를 일반화하기 위해서는 향후에 보다 많은 태풍 사례에 대해 추가 실험을 수행할 필요가 있다.



## 참 고 문 헌

- Chang, C. P., Yeh, T. C., and Chen, J. M., 1993; Effects of terrain on the surface structure of typhoons over Taiwan. *Monthly weather review*, 121, 734-752.
- Chambers, C. R., and Li, T. 2011; The effect of Hawai'i's big island on track and structure of tropical cyclones passing to the south and west. *Monthly weather review*, 131, 3609-3627
- Chen, S. S., Price, J. F., Zhao, W., Donelan, M. A., and Walsh, E. J., 2007; The CBLAST-Hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere - wave - ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 311-317.
- Chih, C. H., Chou, K. H., and Chiao, S., 2015; Topography and tropical cyclone structure influence on eyewall evolution in Typhoon Sinlaku (2008). *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 26, 571.
- Chou, K. H., Wu, C. C., and Wang, Y., 2011; Eyewall Evolution of Typhoons Crossing the Philippines and Taiwan: An Observational Study. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22.
- DeMaria, M., and Kaplan, J., 1994. Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. *Journal of climate*, 7, 1324-1334.
- De Rooy, W. and K. Kok, 2004: A combined physical statistical approach for the downscaling of model wind speed. *Weather Forecast*, 19, 485 - 495.
- Emanuel, K. A., 1999; Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 401, 665-669.
- Ge, X., Li, T., Zhang, S., and Peng, M., 2010; What causes the extremely



- heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)?. Atmospheric science letters, 11, 46–50.
- Jang, W., and Chun, H. Y., 2013; The effects of topography on the evolution of typhoon Saomai (2006) under the influence of tropical storm Bopha (2006). Monthly weather review, 141, 468–489.
- Kim, S., Moon, J. H., and Kim, T., 2021; A Coupled Numerical Modeling study of a sea fog case after the passage of Typhoon Muifa over the Yellow Sea in 2011. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2020JD033875.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2020; Typhoon Analysis Report, 11-1360000-001533-10, Seoul, Korea.
- Kuo, Y. C., Zheng, Z. W., Zheng, Q., Gopalakrishnan, G., and Lee, H. Y., 2018; Typhoon - Kuroshio interaction in an air - sea coupled system: Case study of typhoon nanmadol (2011). Ocean Modelling, 132, 130–138.
- Kurihara, Y., Bender, M. A., and Ross, R. J., 1993; An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. Monthly weather review, 121, 2030–2045.
- Menter, F. R., 1992; Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. AIAA journal, 30, 1657–1659.
- Moore, A. M., Arango, H. G., Broquet, G., Edwards, C., Veneziani, M., Powell, B., ... and Robinson, P., 2011; The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems: Part III - Observation impact and observation sensitivity in the California Current System. Progress in Oceanography, 91, 74–94.
- Oh, H. M. and K. J. Ha, 2005; Analysis of Marine Meteorological Characteristics at Jeodo Ocean Research Station from 2003 to 2004. AsiaPacific Journal of Atmospheric Sciences, 41, 671 - 680.
- Park, J. K., D. W. Kim, Y. H. Jo and D. S. Kim, 2018; Accuracy Evaluation of Daily-gridded ASCAT Satellite Data Around the Korean Peninsula.

- Korean Journal of Remote Sensing, 34, 213 - 225.
- Rogers, R., Aberson, S., Black, M., Black, P., Cione, J., Dodge, P., ... and Uhlhorn, E., 2006; The Intensity Forecasting Experiment: A NOAA multiyear field program for improving tropical cyclone intensity forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 1523-1538.
- Skamarock, W. C., and Klemp, J. B., 2008; A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227, 3465-3485.
- Stull, R. B., 1988: An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer academic publishers, Dordrecht, 670.
- Wang, C. C., Chen, Y. H., Kuo, H. C., and Huang, S. Y., 2013; Sensitivity of typhoon track to asymmetric latent heating/rainfall induced by Taiwan topography: A numerical study of Typhoon Fanapi (2010). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 3292-3308.
- Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., and Zambon, J. B., 2010; Development of a coupled ocean - atmosphere - wave - sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*, 35, 230-244.
- Wei-Jen Chang, S., 1982; The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 110, 1255-1270.
- Wu, C. C., 2001; Numerical simulation of Typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model. *Monthly weather review*, 129, 1533-1549.
- Wu, C. C., Yen, T. H., Kuo, Y. H., and Wang, W., 2002; Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect. *Weather and forecasting*, 17, 1001-1015.
- Wu, C. C., Chou, K. H., Cheng, H. J., and Wang, Y., 2003; Eyewall contraction, breakdown and reformation in a landfalling typhoon. *Geophysical research letters*, 30.

- Wu, R., Zhang, H., Chen, D., Li, C., and Lin, J., 2018. Impact of Typhoon Kalmaegi (2014) on the South China Sea: Simulations using a fully coupled atmosphere-ocean-wave model. *Ocean Modelling*, 131, 132-151
- Yablonsky, R. M., and Ginis, I., 2012;. Impact of a warm ocean eddy's circulation on hurricane-induced sea surface cooling with implications for hurricane intensity. *Monthly Weather Review*, 141, 997-1021.
- Yeh, T. C., and Elsberry, R. L., 1993; Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part I: Upstream track deflections. *Monthly Weather Review*, 121, 3193-3212.
- Zambon, J. B., He, R., and Warner, J. C., 2014; Investigation of hurricane Ivan using the coupled ocean - atmosphere - wave - sediment transport (COAWST) model. *Ocean Dynamics*, 64, 1535-1554.

부 록

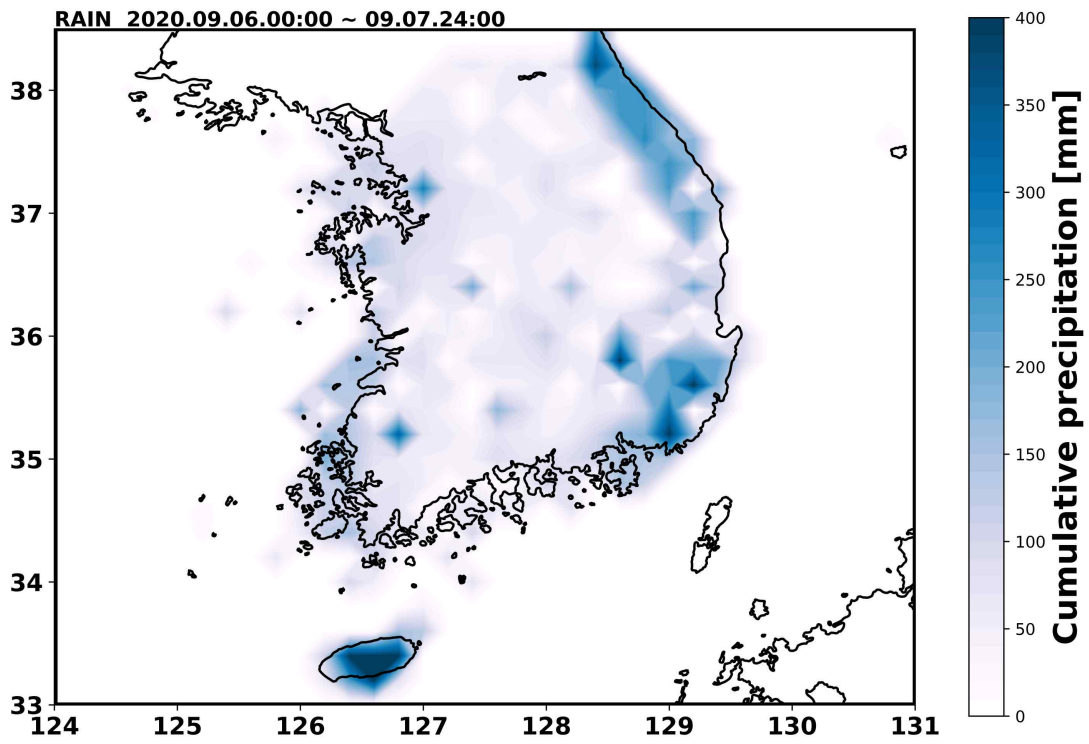


Fig. A. 1. Cumulative precipitation observed by Automatic Weather Station (AWS)