



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

황해 저층냉수에 기인한 표층 수온  
냉각이 한반도 연안 기상요소에  
미치는 영향

제주대학교 대학원

지구해양과학과

김 수 빈

2020 년 2 월

# 황해 저층냉수에 기인한 표층 수온 냉각이 한반도 연안 기상요소에 미치는 영향

지도교수 문재홍

김수빈

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 신청함

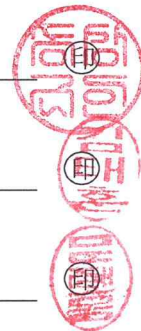
2019 년 12 월

김수빈의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장            송 상 근

위 원            김 태 훈

위 원            문 재 홍



제주대학교 대학원

2019 년 12 월

# Influence of Sea Surface Cooling due to the Yellow Sea Bottom Cold Water on weather condition around Korean Peninsula

Subin Kim

(Supervised by professor Jae-Hong Moon)

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

December 2019

This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director, Sang-Keun Song, Prof. of Earth Marine Sciences

.....  
Tae-Hoon Kim, Prof. of Earth Marine Sciences

.....  
Jae-Hong Moon, Prof. of Earth Marine Sciences

Date 2019. 12.

Department of Earth and Marine Sciences  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 목 차

목차 .....	i
List of Figures .....	ii
List of Tables .....	iv
Abstract .....	v
1. 서론 .....	1
2. 자료 및 방법 .....	4
3. SST 냉각과 황해 저층냉수 .....	13
4. SST 냉각에 대한 대기의 반응 .....	20
4.1 표층 기온 .....	20
4.2 해기차 .....	28
4.3 수증기 응결량 .....	30
5. 수증기 수렴과 수직 혼합 .....	38
6. 요약 및 결론 .....	42
참고문헌 .....	45

## List of Figures

<b>Figure 1.</b> Schematic view of ocean-atmosphere coupled modeling system .....	8
<b>Figure 2.</b> (a) The best track of typhoon MUIFA(1109) with bottom topography (m). Solid box indicates the model domain for ocean and atmosphere models. (b) Distribution of climatological temperature at 50m depth in August from Yellow sea Atlas with four ocean buoy locations. ....	9
<b>Figure 3.</b> Horizontal distribution of temperature at (a, b, c) 0m, (d, e, f) 30m and (g, h, i) 50m in August from HYCOM (left), NCOM (middle), Climatology (right panels) data. ....	11
<b>Figure 4.</b> Vertical structure of temperature along 126°E line in August from (a) HYCOM, (b) NCOM, and (c) climatology data. ....	12
<b>Figure 5.</b> Timeseries of observed (black line) and modeled sea surface temperature (SST) results (Exp 1: magenta, Exp 2: cyan, Exp 3: green, Exp 4: blue). at four KMA buoy locations: (a) Geomundo (22103), (b) Geojedo (22104), (c) Marado (22107), (d) Oeyeondo (22108) .....	16
<b>Figure 6.</b> Distribution of sea surface temperature (SST) at 12 UTC 9 of August 2011 from the results of (a) Exp 1, (b) Exp 2, (c) Exp 3, (d) Exp 4 .....	18
<b>Figure 7.</b> Distribution of difference in SST before (12 UTC 5 of August) and after (12 UTC 9 of August 2011) typhoon passage of Typhoon Muifa from the results of (a) Exp 2, (b) Exp 3, (c) Exp 4 .....	19
<b>Figure 8.</b> Same as Figure 5 except for surface air temperature (SAT) .....	23
<b>Figure 9.</b> Lead-Lag correlation for sea surface temperature (SST) and surface air temperature (SAT) for observation (black) and each experiment (Exp 2: cyan, Exp 3: green, Exp 4: blue) at four KMA buoy locations: (a) Geomundo (22103), (b) Geojedo (22104), (c) Marado (22107), (d) Oeyeondo (22108). positive (negative)	

value in x-axis means SST (SAT) leads SAT (SST) .....	25
<b>Figure 10.</b> Same as Figure 6 except for surface air temperature (SAT). .....	26
<b>Figure 11.</b> Same as Figure 7 except for surface air temperature (SAT) result of (a) Exp 1, (b) Exp 2, (c) Exp 3, (d) Exp 4. ....	27
<b>Figure 12.</b> Same as Figure 6 except for air sea difference (ASD, contour) and wind (vector) .....	29
<b>Figure 13.</b> Same as Figure 6 except for liquid water contents (LWC) .....	33
<b>Figure 14.</b> Vertical structure of air temperature (color contour) and liquid water contents (LWC, gray contour) along the red line (A-B) marked in Figure 13 (a) at 12 UTC 9 of August 2011 from the results of (a) Exp 1, (b) Exp 2, (c) Exp 3, (d) Exp 4. ....	34
<b>Figure 15.</b> Time series of area averaged (a) liquid water contents (LWC) and (b) surface air temperature (SAT) over the central Yellow Sea region (shown in gray box of Figure 13) from the model results (Exp 1: magenta, Exp 2: cyan, Exp 3: green, Exp 4: blue). ....	35
<b>Figure 16.</b> Satellite composite images from Korea National Meteorological Satellite Center ( <a href="http://nmssc.kma.go.kr/homepage/html/main/main.do">http://nmssc.kma.go.kr/homepage/html/main/main.do</a> ) around the Korean peninsula at (a) 09 UTC 8, (b) 09 UTC 9, (c) 09 UTC 10 of August 2011. ....	36
<b>Figure 17.</b> Surface liquid water contents (LWC) at (a,b) 09 UTC 8, (c,d) 09 UTC 9 and (e,f) 09 UTC 10 of August 2011 from the results of Exp 1 (left), Exp 4 (right panels). ....	37
<b>Figure 18.</b> Horizontal distributions of (a, d, g) Advection, (b, e, h) Convergence and (c, f, I) MFC term with wind(vector) results from Exp 1 (upper), Exp 4 (middle) and the difference between two experiments (Exp 4-Exp 1, bottom panels). ....	40
<b>Figure 19.</b> Horizontal distribution of Planetary Boundary Layer (PBL) height at 12 UTC 9 of August from the results of (a) Exp 1, (b) Exp 4 and (c) the difference between two experiments (Exp 4 - Exp 1). ....	41

## List of Tables

<b>Table 1.</b> Comparison of experimental designs .....	10
<b>Table 2.</b> Comparison of Bias, root mean square error (RMSE) and correlation (R) between the sea surface temperature (SST) from each experiment and the observed SST at four buoy locations .....	17
<b>Table 3.</b> Comparison of Bias, root mean square error (RMSE) and correlation (R) between the surface air temperature (SAT) from each experiment and the observed SAT at four buoy location. ....	24



## Abstract

Despite strong summer stratification in the Yellow Sea (YS), it is often observed that sea surface temperature (SST) decreases sharply due to a vertical mixing between warm surface water and cold subsurface water that originated from the Yellow Sea Bottom Cold Water (YSBCW). SST is one of the most important factors in controlling heat and water vapor exchange across the air-sea interface and thus influences atmospheric phenomena significantly, including synoptic weather conditions. In this study, we examine and quantify how the SST reduction associated with the YSBCW affects the weather conditions around the Korea Peninsula, using a coupled modeling system for ocean-atmosphere interaction. A set of comparative experiments are performed during Typhoon Muifa: 1) uncoupled atmosphere model with a constant SST taken as the initial value from Real Time Global (RTG), 2) uncoupled atmosphere model with daily SST prescribed from RTG, and coupled ocean-atmosphere with different initial of ocean model from 3) global Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) and 4) Navy Coastal Ocean Model (NCOM). Buoy observations showed an abnormal SST cooling during the typhoon passage; however, the prescribed SST in the atmosphere model (i.e., uncoupled experiments) did not fully resolve the sharp fluctuating feature generated by Muifa. As a result, the uncoupled model results do not predict the abrupt changes of SAT in response to the typhoon-induced SST cooling. On the other hand, the ocean-atmosphere coupled model indicates a key role of the YSBCW in determining the sea surface cooling during the typhoon passage, and demonstrates that the oceanic cooling affects significantly the weather predictions around the Korean Peninsula. The SST reduction cools the low-level atmosphere, which leads to the convergence in moisture flux over the colder ocean, providing a favorable condition for the formation and evolution of sea fog. In addition, the sea surface cooling stabilizes the atmospheric boundary layer that promotes the condensation of water vapor within the low-level and then

suppresses vertical mixing, which inhibits the dissipation of sea fog. These results suggest that the oceanic cooling through air-sea coupling plays an important role in weather conditions around the Korean Peninsula.

## 1. 서론

해양-대기 상호작용은 다양한 해양 및 대기 현상이 상호간 영향을 주고받는 과정으로, 해수면 온도(sea surface temperature, SST)는 해양과 대기 간 열, 수증기, 운동량의 교환 과정을 조절하는 핵심 요인이 된다(Roxy and Tanimoto. 2007; Deremble et al. 2012; Yanai and Tomita (1998), Qian et al. (2012)). SST의 변화는 해양-대기 경계층 (air-sea interface) 내에서 기온, 기압, 습도, 바람 등 기상요인의 변화를 야기하여 경계층의 안정도에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Huang et al. 2011; Xu et al. 2011; Guo et al. 2015). 특히, 급격한 SST 변화에 의한 경계층 내의 대기장 변화는 종관적인 날씨 시스템(synoptic weather systems)을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

황해는 중국과 한반도 사이에 위치하며, 평균 수심이 약 50m인 천해역으로 몬순기후의 영향을 강하게 받는 반 폐쇄성 해역이다. 계절에 따른 대기와의 열 교환 변화가 발생하기 때문에 황해의 SST는 연간 변동 폭이 매우 큰 특징을 보인다(Chu et al. 1997; Shi and Wang. 2012). 겨울에는 표층 냉각과 강한 바람에 의해 표층과 저층이 수직적으로 균일한 수온 구조를 나타내지만, 여름철에는 강한 태양 복사에 의해 표층의 해수가 가열되면서 25°C 이상의 해수가 표층에 고르게 분포하고, 낮은 온도의 저층수 존재로 강한 수온약층이 형성된다(Fralick. 1994; Hong et al. 2004). 특히, 여름철 저층에는 10°C 이하, 34psu 이하의 특징을 갖는 황해 저층 냉수대가 황해 중앙에 폭넓게 분포하고 있어 수직적인 성층 구조가 강화된다(Chu et al. 1997; Zhang et al. 2008). 이로 인해 여름철 황해의 표층과 저층의 수온 차가 15°C에 이르며, 이러한 특징은 다른 해역과 비교해 매우 드문 현상이다(Chu et al. 1997).

황해 저층냉수는 겨울철 복사냉각과 강한 바람으로 인해 형성된 수직적으로 균일한 저온수가 봄에서 여름에 걸쳐 증가하는 태양 복사에 의해 표층수가 가열되면서 저층에 찬 해수가 고립되어 형성되는 것으로 알려져 있다(e.g., Zhang et al. 2008; Zhu et al. 2017). 최근의 몇몇 연구들은 이전 겨울의 표층 냉각 강도가

여름철 황해 저층냉수의 수온과 밀접한 관련이 있음을 보였다(Yang et al. 2014; Zhu et al. 2017). 황해 저층냉수의 존재는 여름철 표층에서 저층으로의 열전달을 방해하여 수직적인 성층화를 강화하는 데 기여하지만, 수직 혼합이 활발한 해역에서는 저층의 차가운 해수와 혼합되면서 표층 수온을 크게 낮추는 역할을 하기도 한다. 예를 들어, 강한 조석의 영향을 받는 황해는 조류와 해저지형의 상호작용을 통해 황해 양쪽 연안을 따라 강한 수직 혼합이 일어나 조석전선(tidal fronts)을 형성한다(Lee and Beardsley, 1999; Moon et al. 2009). 그로 인해 황해 양쪽 연안을 따라서는 수직적으로 잘 혼합되지만, 황해 중앙에서는 강한 성층이 유지되어 황해 저층냉수가 표층과는 고립되는 “돔(dome)” 형태의 수직적인 수온 구조가 형성된다(Lu et al. 2006).

조류 효과와 달리 황해를 관통하는 태풍은 강한 수직 혼합에 의해 고온의 표층수가 저층의 황해 냉수대와 섞이면서 연안뿐만 아니라 황해 중앙 해역까지 폭넓게 SST의 급격한 냉각을 발생시키곤 한다(Wang et al. 2011; Fu et al. 2016; Zhang et al. 2017). Lee et al. (2016). 은 여름철 황해를 통과한 태풍 무이파에 의해 SST가  $\sim 8^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각된 반면, 저층수는  $\sim 4^{\circ}\text{C}$  정도 수온이 상승한 결과를 보였다. 공간적인 SST의 변화는 해양-대기 상호작용을 통해 대기 하층부 조건에 영향을 주어 주변 해역의 기상변화를 야기한다(e.g. Xie et al. 2002; Yamamoto and Hirose, 2007). 특히, 여름철 SST의 냉각은 해양-대기 경계층을 통한 열, 수증기 및 운동량 교환을 통해 하층 대기의 안정도 및 해무의 발생과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다(Tokinaga and Xie, 2009; Kim and Yum, 2012).

앞서 언급한 것처럼 태풍이 황해를 관통할 때 황해의 SST는 황해 저층냉수와 혼합으로 황해 전역에 걸쳐 급격한 SST 냉각이 발생할 수 있다. 이러한 SST 냉각은 황해뿐만 아니라 주변 연안해역의 날씨 변화에 커다란 영향을 줄 수 있음에도 황해 저층냉수, SST 냉각, 그리고 대기 세 요소 간의 관계는 여전히 불명확하다. Lee et al. (2016) 은 주로 황해 저층냉수와 SST의 혼합과정에 초점을 맞추고 있어 해양과 대기 사이의 상호작용에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서는 해양-대기 접합 모델을 활용하여 2011년 태풍 무이파 사례에 있어 황해 저층냉수가 얼마나 SST 냉각에 기여하는지 분석했고, 냉각된 황해 SST가 어떤 과정을 통해 기상요소에 영향을 주는지를 검토하였다. 특히, 비교실험을 통해서

초기 저층냉수의 조건에 따른 황해 SST 냉각의 강도 변화, 그리고 그와 관련된 대기 조건의 변화를 정량적으로 분석하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 모델은 Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) 접합 모델 시스템으로, 이 시스템은 Weather Research Forecasting (WRF) 대기 모델과 Regional Ocean Modeling System (ROMS) 해양 모델, Simulating Waves Nearshore (SWAN) 파랑 모델, Community Sediment Transport Modeling System (CSTMS) 퇴적물 모델로 구성되며 각 모델 접합 시 Model Coupling Toolkit (MCT) 커플러가 모델 간 요소들 교환에 사용된다(Warner et al. 2010). 이 중 해양 모델과 대기 모델의 접합을 통해 연구를 진행하였다.

연구에 사용된 대기 모델 WRF는 대기의 운동과 다양한 현상을 예측 및 연구하기 위해 개발된 수치모델이다. Advanced Research WRF (ARW)와 Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) 두 가지 방식의 역학 계산 방식이 사용되며 COAWST 시스템에서는 ARW 방식을 사용한다(Skamarock et al. 2008; Warner et al. 2010). WRF-ARW 시스템은 실제 대기 조건 또는 이상적 조건의 대기 변화를 시뮬레이션할 수 있고, 수십m에서 수 km 범위의 모델 실행이 가능하기 때문에 다양한 연구에 활용되고 있다.

연구에 사용된 해양모델 ROMS는 지역 규모의 해수 유동 및 물질 수송 등의 연구에 사용되는 수치모델로서 정역학 근사와 부시네스크(Boussinesq) 근사를 적용한 원시 방정식을 사용한다(Moore et al. 2011). 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며 수직 격자는 S-coordinate를 사용한다. 최근에는 생지화학, 퇴적물, 해빙 등의 다양한 분야의 연구에도 활용되고 있다.

접합 모델의 접합 과정은 Figure 1에 나타냈다. 각 모델의 초기장과 경계장 생성 후 ROMS의 초기 SST 자료를 WRF 초기 SST에 입력한 후 두 모델이 첫 10분간 각각 실행된 후 MCT 커플러(Larson et al. 2005; Jacob et al. 2005)를 통해 각 모델의 요소들이 서로 교환된다. 접합 과정에서 대기 모델은 해양 모델에서 갱신된 2차원의 SST를 받고, 동시에 해양모델은 바람, 강수량, 열속 등을 포함하는 기상 변수를 대기 모델로부터 받은 후 다시 10분간 각 모델이 실행된다. 이러

한 일련의 과정이 반복되며 접합 모델이 실행되었으며 모델의 Output 자료는 각 모델에서 도출된다.

2011년 7월 27일 필리핀 동쪽 해역에서 발생한 제9호 태풍 무이파(Muifa)는 30일 이후 급격히 성장하여 이후 카테고리 5에 해당하는 슈퍼태풍으로 성장하였다(기상 연감, 2011; 2011년 태풍 분석 보고서, 2011). 무이파의 최대 강도는 발생 5일 후인 31일 중심기압 930hPa, 최대풍속 50m/s을 보이며 점차 북진했고, 이후 점차 세력이 약화되며 6-8일 사이 황해 중앙을 관통했다(Figure 2). 무이파가 황해를 통과하는 시기에 북태평양 고기압이 예년에 비해 남북으로 발달되어 이전의 다른 태풍과 같이 동진하지 못하고 황해를 따라 느리게 북상하는 경로를 보였다. 황해를 따라 북상하는 동안에도 30m/s 이상의 최대풍속과 400km 이상의 강풍반경이 유지되었고, 8월 8일 09 UTC경 신의주 부근에 상륙, 9일 00 UTC경 열대저압부로 약화되었다. 무이파는 태양 복사에 의한 표층수 가열로 성층 구조가 발달한 한여름에 발생했으며 황해 중심을 관통하는 경로와 400km 이상의 강풍반경, 느린 이동속도로 인해 황해 전체에서 태풍의 영향이 미쳤고, 이와 같은 사례가 드물기 때문에 실험 사례로 선정되었다.

무이파 사례에 대한 연구를 위해 모델 도메인은 황해, 동중국해 및 동해 일부를 포함하는 동아시아 해역을 대상으로 수평해상도 9km로 구성했다(box in Figure 2 a). 해양과 대기 모델은 동일한 모델 도메인을 사용하며, 수직 해상도 또한 30 layer로 동일하다. 두 모델은 모두 태풍이 도메인 내로 진입하기 전, 2011년 8월 1일에 대해 초기화되었다. 수온, 염분, 해류, 해수면 등의 해양모델의 초기 및 경계장은 global Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM, <http://www.hycom.org>) 자료를 사용했으며, 추가적으로 Naval Oceanographic Office Global Navy Coastal Ocean Model (NCOM, Coelho et al., 2009) 자료를 사용한 실험을 수행했다. 조석은 TPXO (TOPEX/POSEIDON) 7-atlas로부터 총 8개 분조(M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1)를 사용하여 해양 경계장에서 강제된다. 대기 모델의 초기 및 경계장은 수평해상도 ~100km(1°)를 가지는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Final (FNL) Operational Global Analysis 자료를 사용했다. SST에 대한 대기 모델의 저층 경계장은 수평해상도 ~50km(0.5°)를 가지는 NCEP Real-time Global (RTG) SST analysis 자료를 사용했다. 대기 모델의 미

세 물리 과정, 경계층 물리 과정, 구름 물리 과정에 사용된 방법은 각각 Microphysics-WRF Single-Moment (WSM) 3-class scheme, Yonsei University Scheme, Kain-Fritsch Scheme이며 해양모델의 수직 혼합 모수화는 Generic length-scale (GLS) k-omega 방법을 사용했다(Menter. 1992).

황해 저층냉수와 SST 냉각의 관계 및 이와 관련한 대기의 반응을 알아보기 위해 총 4가지의 모델 실험이 수행되었다. 1) Control case로써 초기의 RTG SST가 고정된 WRF 단독 모델 실험(Exp 1), 2) 초기 RTG 일 간격 SST가 시간에 따라 갱신되는 WRF 단독 모델 실험(Exp 2), 3) HYCOM 자료를 해양모델의 초기 및 경계장을 사용하는 접합 모델 실험(Exp 3), 4) NCOM 자료를 해양모델의 초기 및 경계장을 사용하는 접합 모델 실험(Exp 4). Exp 1과 Exp 2의 결과 비교를 통해 황해 SST 냉각에 대한 대기 반응을 확인할 수 있으며, 실험 Exp 2와 접합 모델 결과와의 차이를 통해서 접합 모델에서 재현된 SST 냉각 효과를 확인할 수 있다. 두 접합 모델 실험(Exp 3과 Exp 4)에서 초기 해양조건을 HYCOM과 NCOM을 적용한 이유는 각각의 자료에서 초기의 황해 저층냉수의 수온분포를 다르게 묘사하기 때문이다. 황해 저층냉수의 수평적 분포를 각 수심별로 비교한 결과 (Figure 3) 50m 깊이에서 황해 중심부에 존재하는 황해 저층냉수의 존재가 두 자료에서 모두 잘 나타난다. 하지만 저층냉수의 분포는 NCOM자료에서 더 넓은 범위에 걸쳐 나타난다. 수온약층 범위의 30m의 수온 자료는 NCOM 자료의 저온수 분포가 연안과 남쪽으로 더 넓게 나타나며 이는 NCOM 자료가 관측(Climatology)과 더 유사한 결과를 나타내게 한다. 저층에서의 수온분포는 두 자료에서 차이를 보이지만 0m 수온자료를 비교한 결과에서는 두 자료 모두 강한 태양 복사에 의해 고온의 해수가 넓게 분포하고 있어 초기 SST 분포가 유사함을 확인할 수 있다. 두 자료의 수직 수온 분포 특성을 알아보기로자 경도 126°E선의 수직 수온분포를 비교했다(Figure 4). Figure 3에 나타난 것처럼 두 자료 모두 표층은 25°C 이상의 높은 수온분포를 보이며 유사한 값을 나타내지만, 수온약층의 급격한 수온 감소를 HYCOM 자료보다 NCOM 자료에서 더 잘 묘사하고, 40m 아래의 결과 또한 NCOM 자료에서 더 낮은 (2~4°C) 수온분포를 보이며 NCOM 자료가 관측(Climatology)과 더 유사한 분포를 나타내도록 한다. 두 자료에서 차이를 보이는 이유는 자료 제공 모델 구성의 차이 때문이다. 황해의 경우 조석의 영향이 크게



작용하는 지역으로 특히 연안지역에서는 강한 조석의 영향으로 인해 SST의 변화가 나타나는 해역이다. 이러한 해역에서 조석이 고려되지 않은 HYCOM 모델과 조석이 고려된 NCOM 모델이 서로 다른 수온분포를 모사한 것이다. 그 차이로 인해 조석의 영향이 고려된 NCOM 자료에서의 저층의 낮은 수온분포는 실제 황해 저층냉수의 수온과 HYCOM 자료보다 유사한 분포를 나타낸다(Figure 4 c). 따라서, 두 실험 결과의 비교는 황해 저층냉수의 수온분포와 SST 냉각의 관계, 그리고 그에 따른 대기 반응을 보여줄 수 있다.

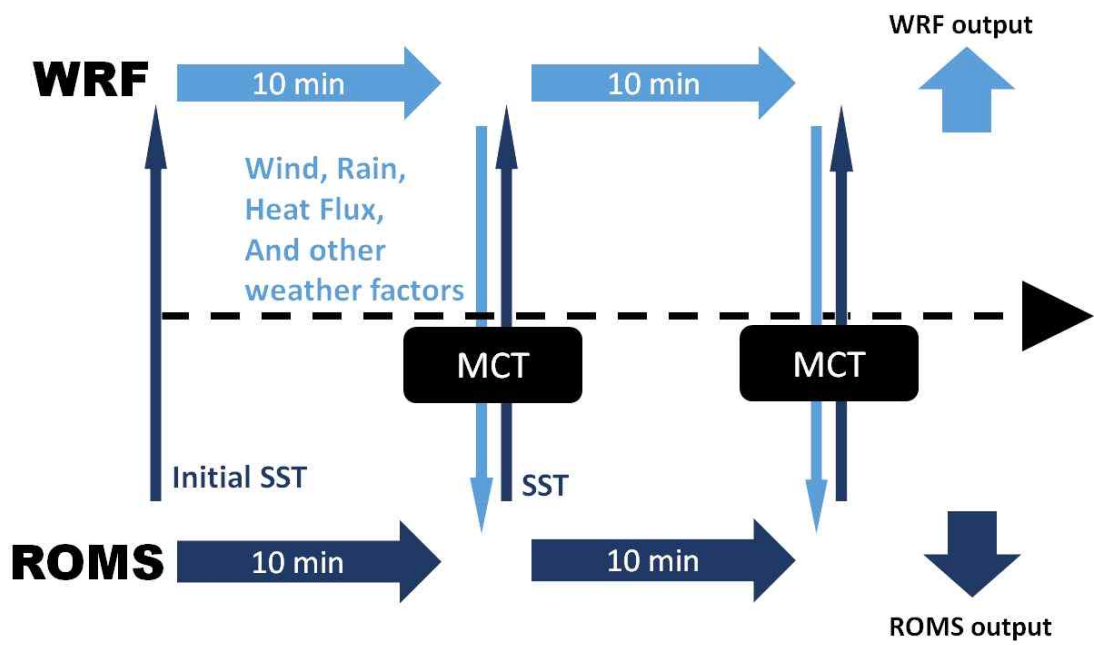
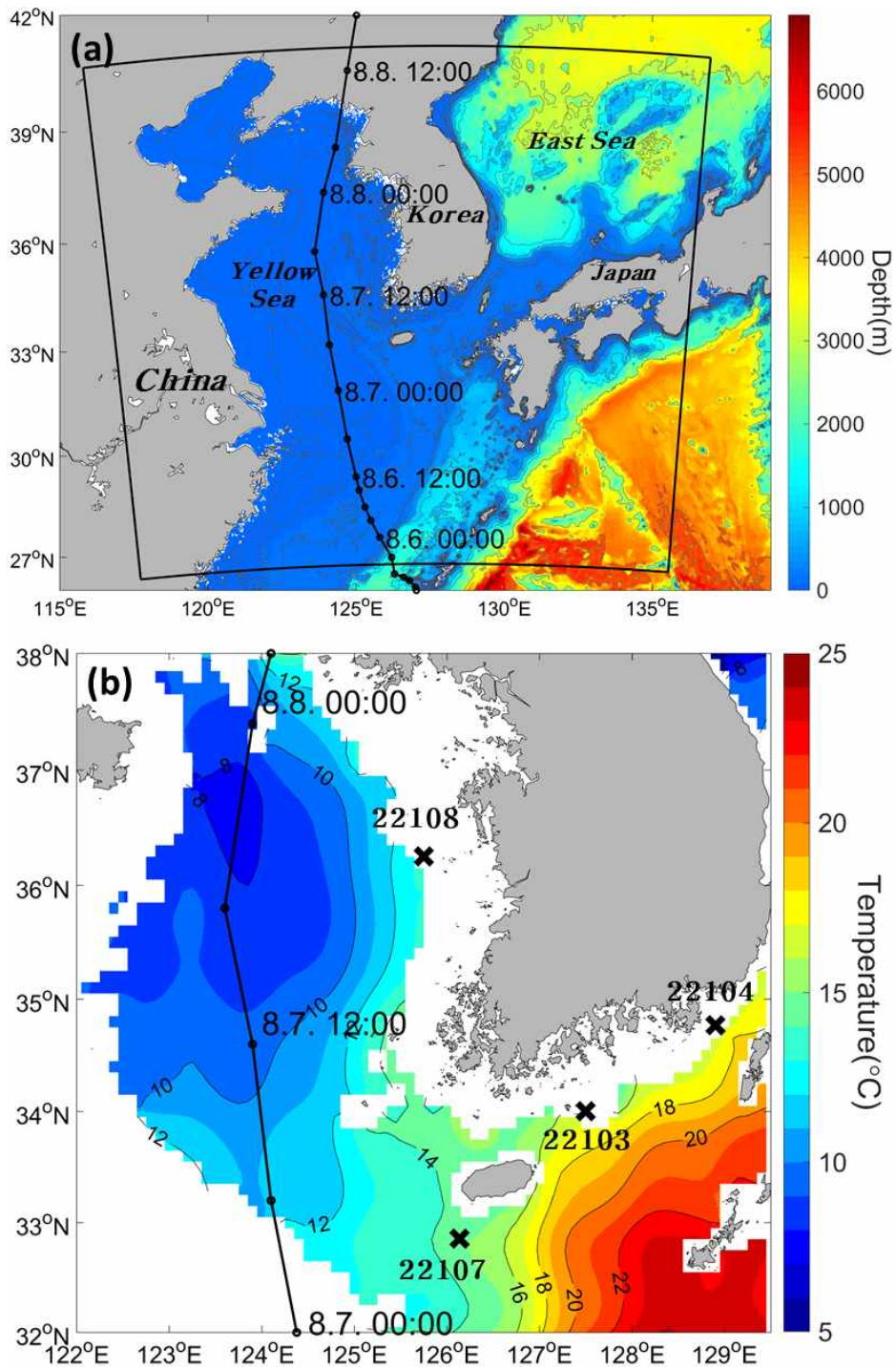


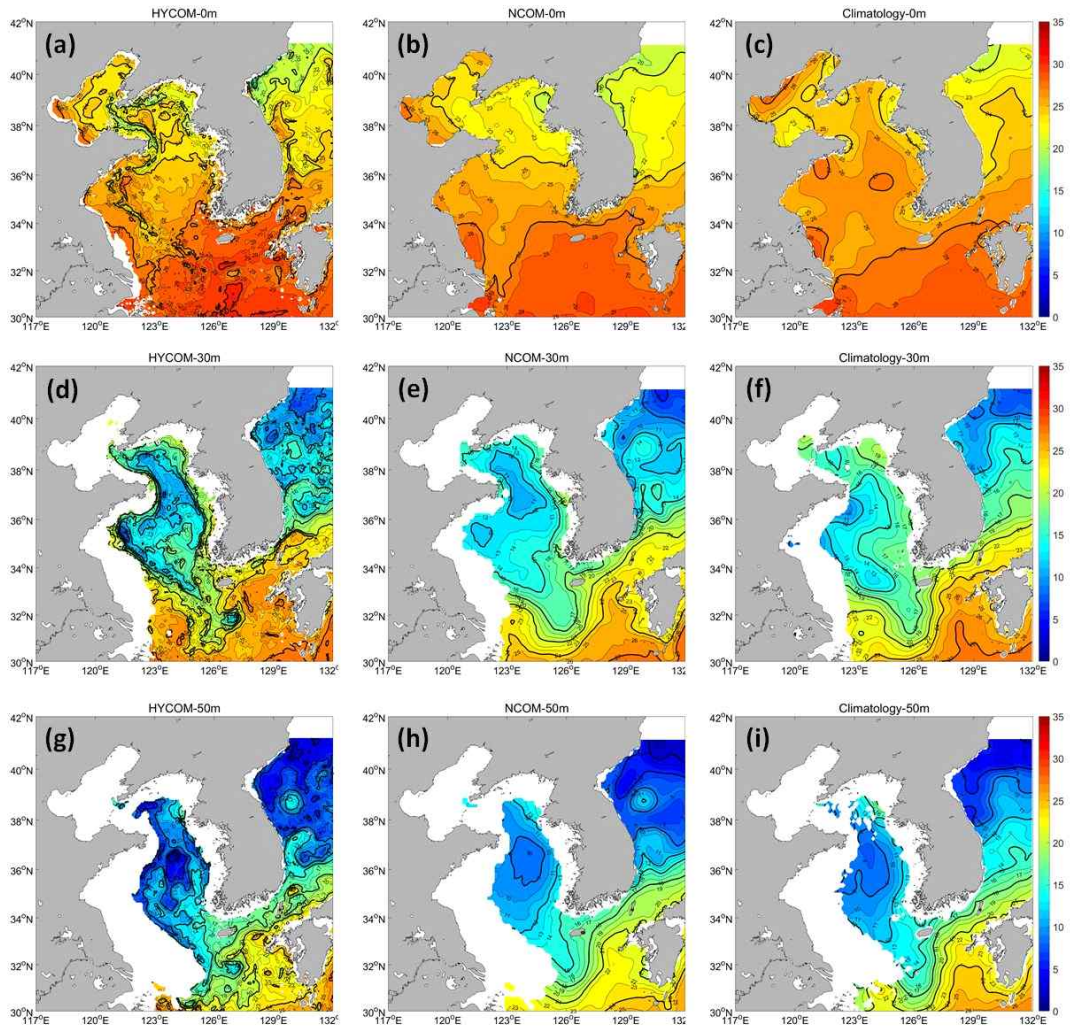
Figure 1. Schematic view of ocean-atmosphere coupled modeling system



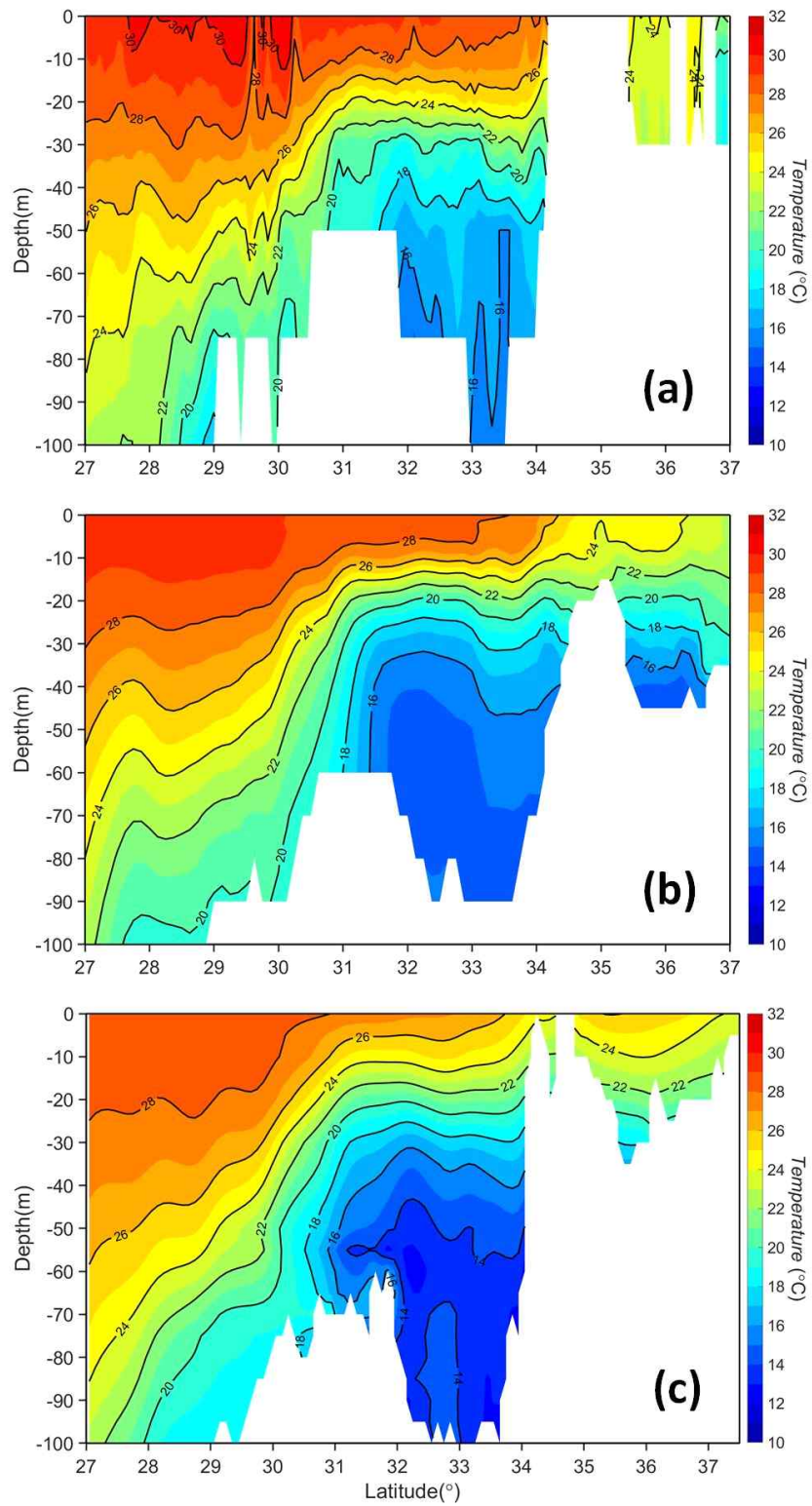
**Figure 2.** (a) The best track of typhoon MUIFA(1109) with bottom topography (m). Solid box indicates the model domain for ocean and atmosphere models. (b) Distribution of climatological temperature at 50m depth in August from Yellow sea Atlas with four ocean buoy locations.

**Table 1.** Comparison of experimental designs

Experiment	MODEL	SST input to WRF	ROMS initial condition
Exp 1	WRF	RTG(constant)	/
Exp 2	WRF	RTG(daily)	/
Exp 3	WRF-ROMS	ROMS(10min)	HYCOM
Exp 4	WRF-ROMS	ROMS(10min)	NCOM



**Figure 3.** Horizontal distribution of temperature at (a, b, c) 0m, (d, e, f) 30m and (g, h, i) 50m in August from HYCOM (left), NCOM (middle), Climatology (right panels) data.



**Figure 4.** Vertical structure of temperature along 126°E line in August from (a) HYCOM, (b) NCOM, and (c) climatology data.

### 3. SST 냉각과 황해 저층냉수

SST는 해양-대기 상호작용에서 유일하게 해양에서 대기로 제공되는 변수이며, 그 변동은 대기의 다양한 변수에 직·간접적인 영향을 준다. 그렇기 때문에 SST 냉각이 대기 변화에 미치는 영향을 알아보기 전에, 대기 모델의 하부 경계조건으로 제공되는 위성 SST자료와 해양모델에서 재현되는 SST에 대한 검증이 필요하다(Figure 5). 검증에 사용된 관측 SST 자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 운용하는 해양부이 관측자료로, 거문도(22103), 거제도(22104), 마라도(22107) 외연도(22108), 네 지점의 관측자료를 사용했으며(marked in Figure 2 b) 태풍 무이파가 황해를 통과했던 2011년 8월 기간에 대해 분석했다.

해양 부이에서 관측된 수온은 태풍 무이파가 황해를 통과하는 7-8일 사이에 급격하게 냉각되는 특징을 나타낸다. SST 냉각의 강도는 지점별로 차이가 있으며, 특히 서해(22108)와 제주도 남쪽(22107)에 위치한 부이에서 급격한 냉각 현상이 뚜렷하다. 예를 들어, 마라도 부이의 경우 28°C의 고수온이 태풍이 통과한 후 21°C까지 냉각됐지만, 거제도 부이에서는 3°C 정도 냉각되는 결과를 보였다(Figure 5 c, d). 이러한 SST 냉각은 8월 말까지도 태풍 이전의 수온 값으로 회복되지 못하였다. 지역별로 다른 SST냉각은 황해 저층냉수의 분포와 관련이 있다. 여름철 황해 저층냉수는 서해를 포함한 황해 중앙에서 제주도 남서해역까지 폭넓게 분포하고 있기 때문에(Figure 3 i) 태풍에 의한 강한 수직 혼합이 발생할 경우 남해안보다는 서해안과 제주도 해역의 SST 냉각에 크게 기여할 수 있다(Figure 5 b).

황해 저층냉수와 SST 냉각과의 관계는 Exp 3과 Exp 4를 통해서 분명하게 나타난다. Exp 1과 Exp 2는 위성기반 SST 자료가 대기 모델에 직접 제공되는 실험으로 황해 저층냉수와 관계는 파악할 수 없지만, 주목할 만한 점은 위성기반 일 간격 SST자료의 경우(Exp 2) 실제 부이에서 관측에서 나타난 단기간(1일 이내)에 나타나는 급격한 냉각을 감지하지 못하고 있다(Figure 5, cyan). 이러한 차

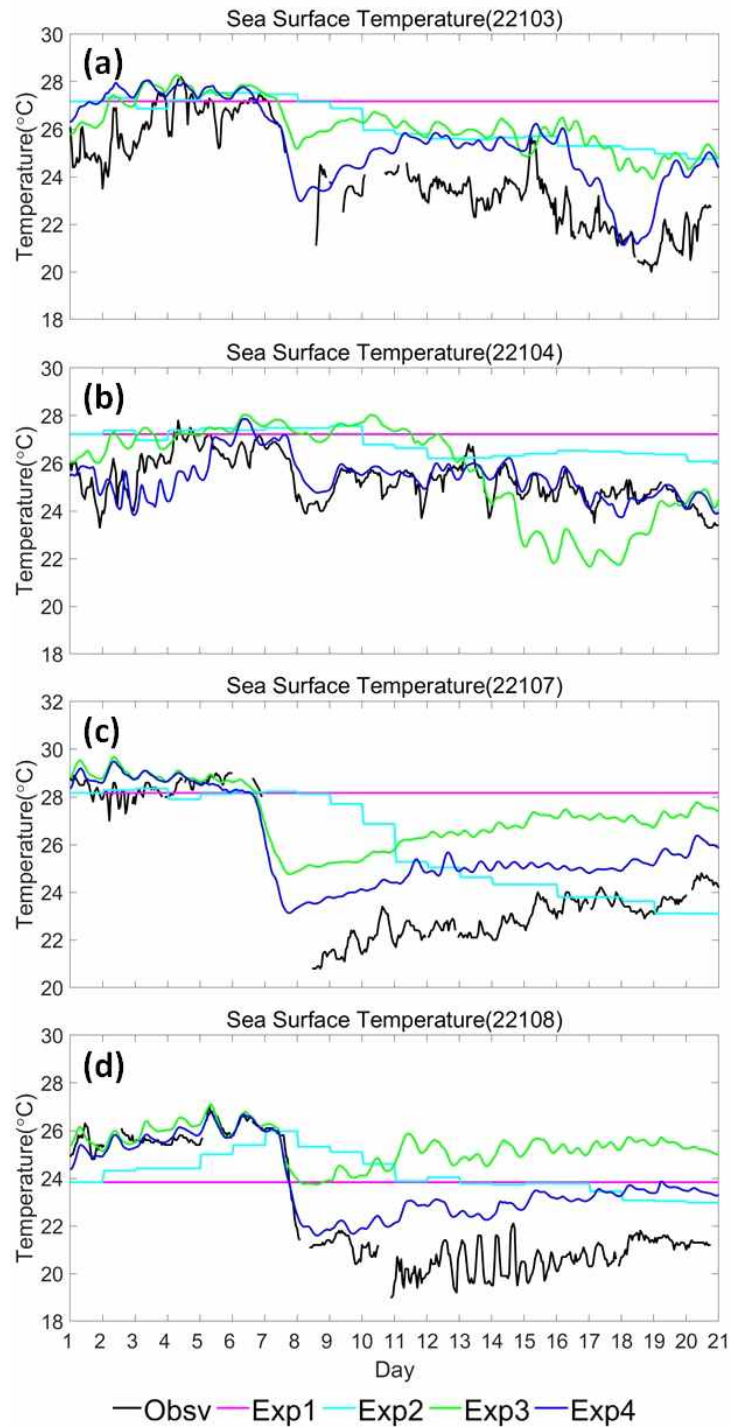
이는 위성기반 자료의 시·공간적인 해상도, 내·외삽 과정 및 자료처리 알고리즘 등 다양한 원인에 기인하며, 특히 태풍, 조석, 용승과 같은 급격한 수온변화가 발생하는 해역에서 오차가 더 커진다. 대부분의 대기 모델은 위성기반 SST자료를 하부 경계장으로 직접 사용하고 있기 때문에 부정확한 위성기반 SST자료의 사용은 날씨 예측 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 이와 관련된 내용은 다음 장에서 논의될 것이다. 위성기반 자료와는 달리 해양모델에서 재현된 SST는 두 접합 실험(Exp 3과 Exp 4) 모두 태풍 직후에 관측에서 나타난 급격한 수온 냉각 현상을 잘 보여준다. 또한 태풍 전의 수온 값으로 회복되지 못하는 점까지 실제 관측 수온과 일치하는 패턴을 보인다. 전체적인 패턴은 두 실험 모두 관측과 유사하지만 태풍이 황해를 통과하는 7~8일 이후 감소된 SST는 두 실험 간 차이를 보이기 시작한다. 초기 SST는 두 실험에서 거의 유사하지만, 태풍이 통과한 직후 최대 2°C 이상의 수온차를 보이며, 관측과 비교한 네 지점에서 Exp 3보다 Exp 4에서 태풍 이후에 더 낮은 SST를 모의한다. Exp 4에서 재현된 SST는 실제 관측과 더 유사하며 이는 통계분석 결과에서도 확인할 수 있다(Table 2). 외연도 지점의 경우 Exp 3의 결과에 비하여 Exp 4의 결과에서 Bias는 1.55 감소하고, RMSE는 1.70 감소하는 반면에, Correlation은 상승함으로써 관측과 보다 더 유사한 결과를 제시한다. 두 실험 간 이러한 차이는 초기 저층냉수의 분포에서 기인한다. 초기 저층냉수의 수온이 낮은 경우에는 태풍에 의한 강한 수직 혼합을 통해 강한 SST 냉각을 발생시키지만, 수온이 상대적으로 높은 경우에는 수직 혼합에 의한 SST 냉각 효과가 약화된다. 저층냉수의 공간적인 분포 또한 SST 냉각에 기여하는데, 모델 초기 냉수대의 분포가 관측과 유사한 패턴을 보이는 실험에서 더 나은 결과를 재현한다.

관측 결과와의 비교는 연안지역의 SST만을 비교 가능했기 때문에 공간적인 수온변화를 확인하기 위해 태풍 이후, 8월 9일 12 UTC의 SST 공간분포를 Figure 6에 나타냈다. Exp 1과 Exp 2는 공간적으로 큰 차이를 보이지 않으며 황해 북부와 서부에 25°C 이하의 낮은 온도의 SST가 분포해 있다. 그에 반해 Exp 3과 Exp 4는 황해 전체에서 25°C 이하의 낮은 수온이 분포해 있으며 이 분포는 초기 저층냉수의 분포와 유사하다(Figure 3). 황해 중심부는 냉각으로 인해 20°C 이하까지 수온 떨어졌으며 연안지역보다 더 낮은 수온이 확인된다. 두 실험 모두 황해



전역에서의 냉각이 뚜렷하게 나타나고 있으나 초기 저층냉수가 더 넓게 분포하는 Exp 4에서 더 넓은 범위에 걸쳐 낮은 SST 분포가 나타났다(Figure 6 c, d).

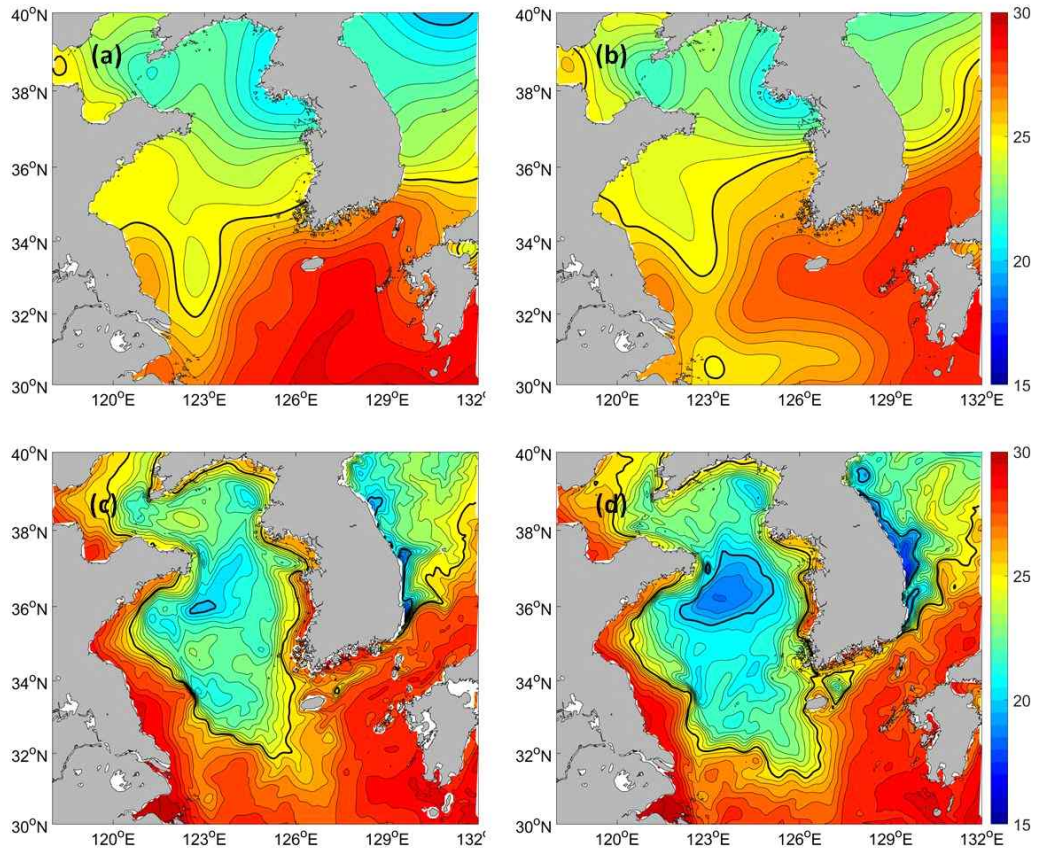
Figure 7은 태풍 후 SST(Figure 6)와 태풍 전(5일 12 UTC) SST의 차이(9일 12 UTC SST - 5일 12 UTC SST)를 실험별로 나타낸다. Exp 1의 경우 SST의 시간 변화에 따른 차이가 없기 때문에 나타내지 않았다. Figure 7 (a)를 확인하면 Figure 5의 그래프와 비교하여 확인할 수 있듯 Exp 2의 SST 위성 자료는 황해 전체에서 아주 약한 냉각에 의해 태풍 전후의 SST는 큰 차이를 보이지 않는다. 위성자료에서 태풍 직후의 강하고 급격한 SST의 냉각을 황해 전체적으로 표현하지 못하는 모습 때문에 나타난 결과이다. 두 접합 실험에서는 태풍 통과 후 강한 SST 냉각이 황해 전체에서 나타난다. 태풍 후 SST는 황해 중심부에서 더 낮은 값을 보이지만(Figure 6 c, d), SST 냉각은 황해 전역에서 고르게 나타났으며 황해 중심부에서 연안으로 향할수록 약한 냉각이 나타난다. 이러한 냉각의 분포는 황해 저층냉수의 분포의 영향을 받아 황해 저층냉수의 남하와 수온약층의 수온 변화가 잘 나타난 초기장을 사용한 Exp 4에서 냉각의 영역이 남쪽으로 확장되었으며, 더 강한 냉각이 나타났다. 결과적으로 SST 냉각의 분포와 강도는 초기 황해 저층냉수의 분포와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.



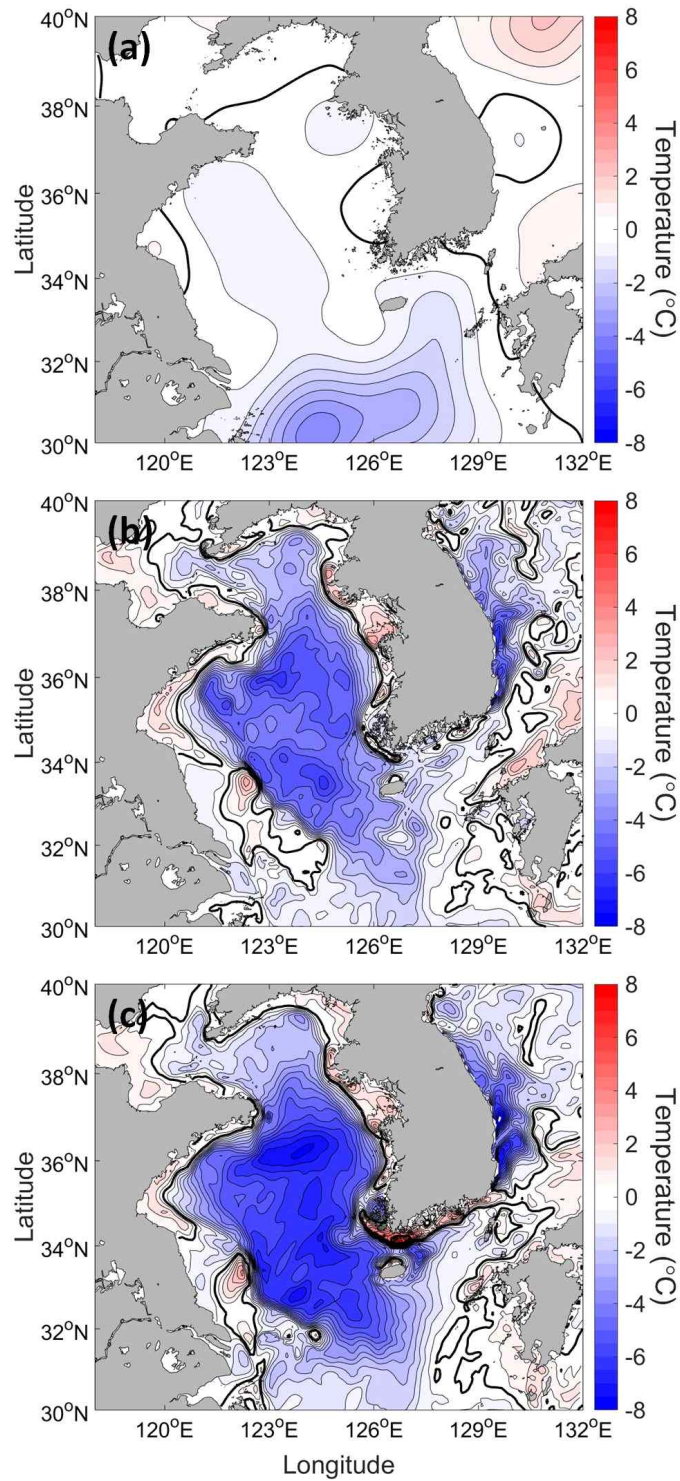
**Figure 5.** Timeseries of observed (black line) and modeled sea surface temperature (SST) results (Exp 1: magenta, Exp 2: cyan, Exp 3: green, Exp 4: blue). at four KMA buoy locations: (a) Geomundo (22103), (b) Geojeodo (22104), (c) Marado (22107), (d) Oeyeondo (22108)

**Table 2.** Comparison of Bias, root mean square error (RMSE) and correlation (R) between the sea surface temperature (SST) from each experiment and the observed SST at four buoy locations

	<b>22103</b>			<b>22104</b>			<b>22107</b>			<b>22108</b>		
	<b>Bias</b>	<b>RMSE</b>	<b>R</b>	<b>Bias</b>	<b>RMSE</b>	<b>R</b>	<b>Bias</b>	<b>RMSE</b>	<b>R</b>	<b>Bias</b>	<b>RMSE</b>	<b>R</b>
Exp 1	3.11	3.74	0	1.91	2.13	0	3.64	4.5	0	1.38	2.80	0
Exp 2	2.15	2.54	0.85	1.53	1.75	0.43	1.30	2.55	0.58	1.73	2.75	0.5
Exp 3	2.11	2.39	0.88	0.30	1.74	0.54	2.53	2.92	0.96	2.90	3.55	0.64
Exp 4	1.47	1.80	0.86	0.04	0.79	0.63	1.57	1.87	0.97	1.35	1.85	0.91



**Figure 6.** Distribution of sea surface temperature (SST) at 12 UTC 9 of August 2011 from the results of (a) Exp 1, (b) Exp 2, (c) Exp 3, (d) Exp 4



**Figure 7.** Distribution of difference in SST before (12 UTC 5 of August) and after (12 UTC 9 of August 2011) typhoon passage of Typhoon Muifa from the results of (a) Exp 2, (b) Exp 3, (c) Exp 4

## 4. SST 냉각에 대한 대기의 반응

### 4.1. 표층 기온

해양 모델 실험 결과는 황해 저층냉수의 초기 수온과 공간적인 분포가 SST 냉각에 결정적인 역할을 하고 있음을 보였다. 이러한 실험 간 SST의 변동성의 차이는 대기와 해양의 열 교환 과정에서 차이를 발생시키며, 이는 해상과 맞닿아 있는 대기 하층의 기온에 직접적인 영향을 줄 수 있다(Xie et al. 2002, Yamamoto and Hirose, 2007).

Figure 8는 부이에서 관측된 표층 기온(Surface Air Temperature, SAT)과 각 실험에서 재현된 SAT 결과를 나타낸다. 관측 SAT는 수온 자료에서 관측된 것과 같이 태풍 무이파가 통과한 7~8일 사이를 기점으로 모든 지점에서 급격하게 감소하는 특징을 보인다. 기온 하강의 강도 또한 수온 자료 에서처럼 외연도(22108)와 마라도(22107) 지점에서 뚜렷하고, 거제도(22104) 부이에서는 다른 지점보다 상대적으로 약한 감소가 관측되었다(Figure 8). 기온의 감소는 SST의 급격한 냉각으로 대기의 열이 해양으로 빼앗기며 기온이 하강하는 결과로 SAT와 SST의 lead-lag correlation을 통해 SST의 변화가 SAT의 변화를 이끌었음이 확인된다(Figure 9). Figure 9의 검은 선이 나타내는 부이 관측 SST와 SAT의 관계는 lead나 lag가 고려되지 않은 경우 0.7 이상의 아주 높은 상관관계를 보이며 lead-lag correlation은 전 지점에서 SST가 1-2시간 앞서는 경우 상관관계가 가장 높은 특징을 보인다.

저층냉수에 기인한 SST 냉각에 의한 SAT감소 현상은 모델 실험을 통해서도 확인이 되며, 특히 Exp 1과 Exp 4 결과 비교에서 분명하게 나타난다. 초기 위성 SST값으로 일정하게 유지되는 Exp 1의 결과에서는 모든 지점에서 태풍 전과 후에서 발생하는 급격한 SAT의 냉각이 나타나지 않고, 초기 SST와 유사한 값으로 유지되다가 시간이 지날수록 다른 요인에 의해 서서히 감소하는 패턴을 나타낸다. 반면에 태풍 통과 직후 저층냉수와의 혼합으로 인한 급격한 수온 냉각이 고

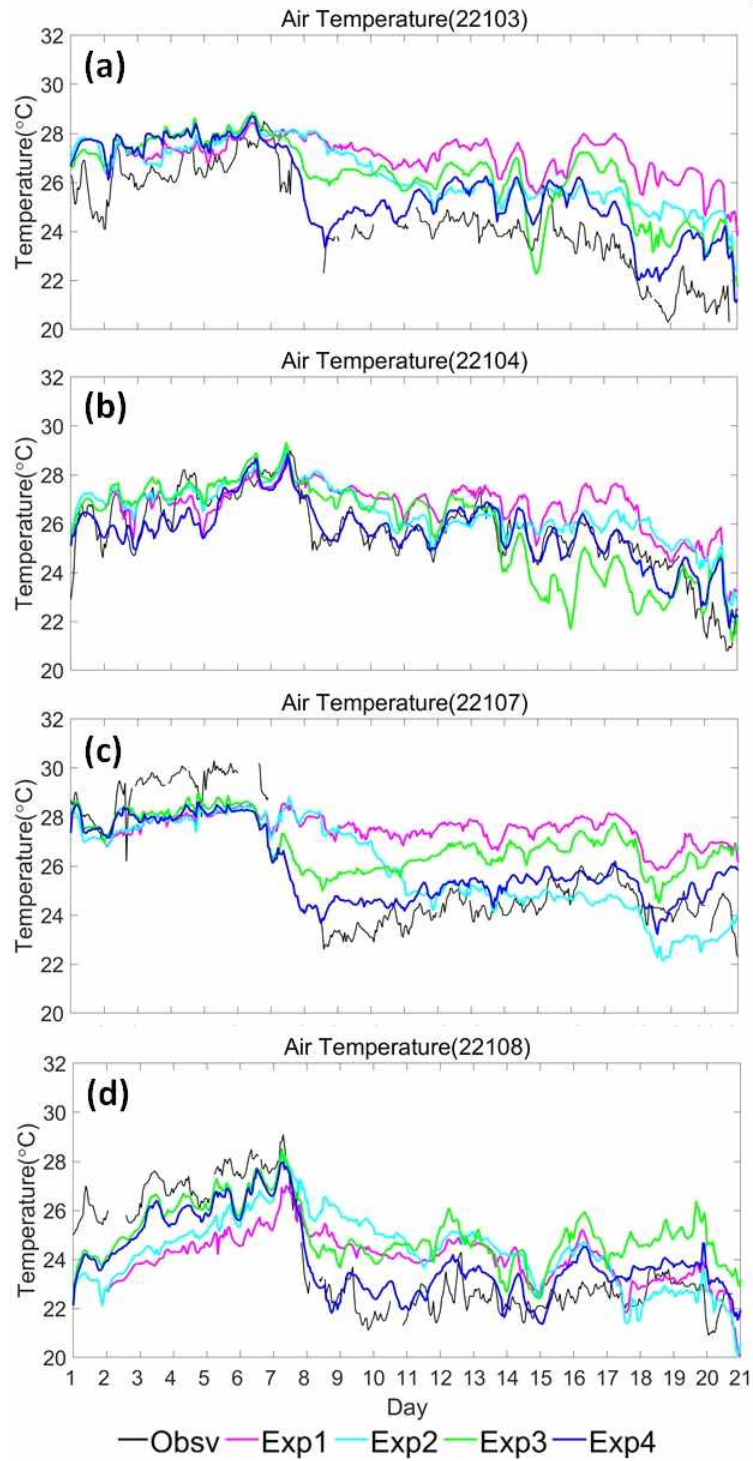
려된 Exp 4의 결과에서는 SST 냉각과 동시에 SAT 또한 급격하게 하강하며, 그 이후로 초기 기온으로 회복되지 못하고 유지된다(Figure 8). SST와 SAT의 lead-lag correlation 결과에서도 0.6 이상의 값을 보이며 SST와 SAT의 높은 상관관계를 잘 보여준다. 그리고 대부분 지점에서 SST가 1-2시간 앞선 경우 가장 강한 상관관계가 나타나며 관측과 유사한 결과를 통해 SST의 냉각에 의한 기온 하강을 접합 모델에서 잘 표현하고 있음을 보여준다. Exp 4에서 재현된 기온은 관측 결과와 유사한 변화를 나타내며, 통계치에서도 낮은 Bias와 RMSE, 그리고 높은 상관관계를 보여 관측과 가장 잘 일치하는 결과를 보인다. 이러한 SST-SAT 관계는 해양-대기 접합 모델의 효과를 극적으로 보여주는 결과로, 태풍이 황해를 통과할 때 저층의 냉수가 표층의 고온수와 섞이면서 SST가 급격하게 냉각되는 현상이 해양모델을 통해 정확히 재현되었고, 급격히 냉각된 SST로 인해 대기의 열이 해양으로 전달되는 과정이 대기 모델을 통해서 잘 재현되었음을 보여준다.

두 접합 모델(Exp 3과 Exp 4) 실험 결과의 비교는 해양모델 초기장에 따라 대기 모델의 정확도 변화를 야기할 수 있음을 제시하고 있다. Exp 3의 결과는 Exp 4와 유사하게 태풍이 황해를 관통한 직후에 기온이 하강하는 시간적인 변화를 잘 재현하고 있다. 그러나 기온 하강의 강도가 Exp 4와 비교해서 약하게 발생하며, 그 결과 태풍 이후의 기온에서도 Exp 4의 결과에 비해 높은 값을 유지한다. 이러한 차이는 앞선 SST 분포에서 언급한 것처럼 Exp 3에서 Exp 4 결과와 비교해서 약한 SST 냉각을 모의했기 때문이다. 두 실험의 차이는 초기 황해 저층냉수의 분포에 있기 때문에 결과적으로 황해 저층냉수에 기인하는 SST 냉각의 차이가 해양-대기 경계층에서의 SAT의 변화를 야기했음을 알 수 있다. 일 간격 위성자료가 대기 하층 경계로 제공되는 Exp 2의 결과는 태풍 통과 후의 기온 하강이 접합 모델 결과와 비교해 완만하게 나타나는 특징을 보인다. 이는 이전 장에서 언급한 바와 같이 위성 SST는 시·공간적인 해상도 및 다양한 이유로 급격한 수온의 변화를 탐지하는데 어려움이 있기 때문이다. 태풍 통과 직후에 나타나는 급격한 SST 냉각은 일 간격 위성자료에서 정확하게 포착되지 않고, 그 결과 약한 냉각이 나타난 SST가 대기 모델의 경계장으로 제공되면서 기온 감소의 강도가 접합 모델과 비교해 약하게 재현된다. SST와 SAT의 lead-lag correlation의 결과 또한 두 자료의 상관관계가 0.8 이상으로 높게 나타나지만 lead-lag에 상관없

이 값이 일정하게 나타나며 그 관계가 다른 실험이나 관측과 같이 명확한 관계가 나타나지 않는다(Figure 9, cyan). 따라서 위성기반 SST를 대기 경계 자료로 사용하는 경우 주의가 필요하며, 특히 수온의 변화가 급격하게 발생하는 해역에서는 해양-대기 접합 모델을 통한 상세 SST를 제공할 필요가 있을 것이다.

부이 지점 비교를 통해 나타난 SST-SAT의 관계는 태풍 전과 후의 기온의 공간분포에서도 명확하게 나타난다. Figure 10는 태풍 이후 SAT의 분포를 각 실험 별로 나타낸다. 황해상에서의 SAT 분포는 Figure 6에서 나타난 SST보다 높은 온도를 보이지만 이와 유사한 분포를 나타내고 있다. 태풍 전의 기온과 비교한 결과(Figure 11) 또한 해상에서의 기온 변화는 SST 냉각이 강하게 나타난 해역 위에서 강한 기온 냉각이 나타나며 SST의 변화(Figure 7)와 유사한 결과를 보인다. Exp 1의 기온 변화는 SST가 일정하기 때문에 황해 전체에서 뚜렷하게 나타나지 않고 황해 서부 해역에서는 오히려 기온이 약간 상승하는 모습을 보이기도 한다. Exp 2의 기온 변화는 Exp 1의 결과보다 강한 냉각이 나타나긴 하나 그 정도가 매우 약한 반면, 두 접합 실험에서 나타난 기온 냉각은 황해 중앙과 한반도 연안에 걸쳐 폭넓게 발생하며 두 실험 결과 모두 저층냉수에 의한 SST 냉각이 나타난 지역과 아주 유사한 분포를 갖는다. 특히 한반도 연안 남서쪽 해역에서 강한 냉각이 나타나고, 남해안 지역에서는 보다 약한 냉각이 나타나는 점이 부이 자료와 비교한 시계열 그래프의 결과와 유사하다. 두 실험에서 모의된 기온 하강의 분포는 유사하나, SST 냉각이 더 강하게 나타난 Exp 4에서 더 강한 기온 하강이 나타난다.

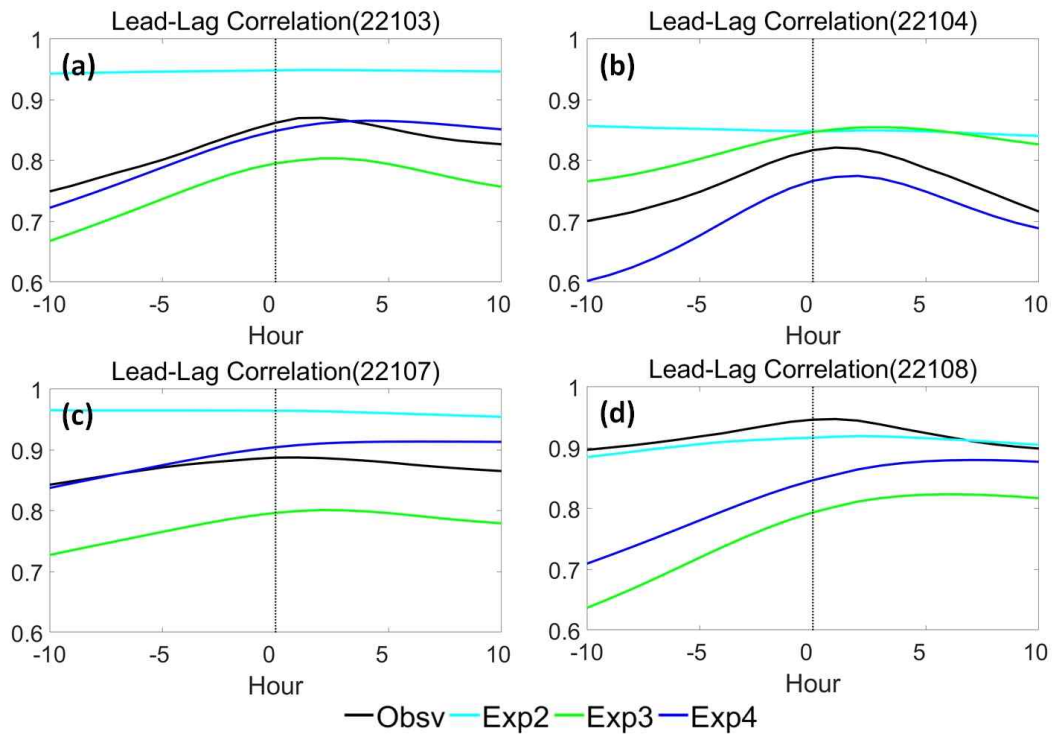




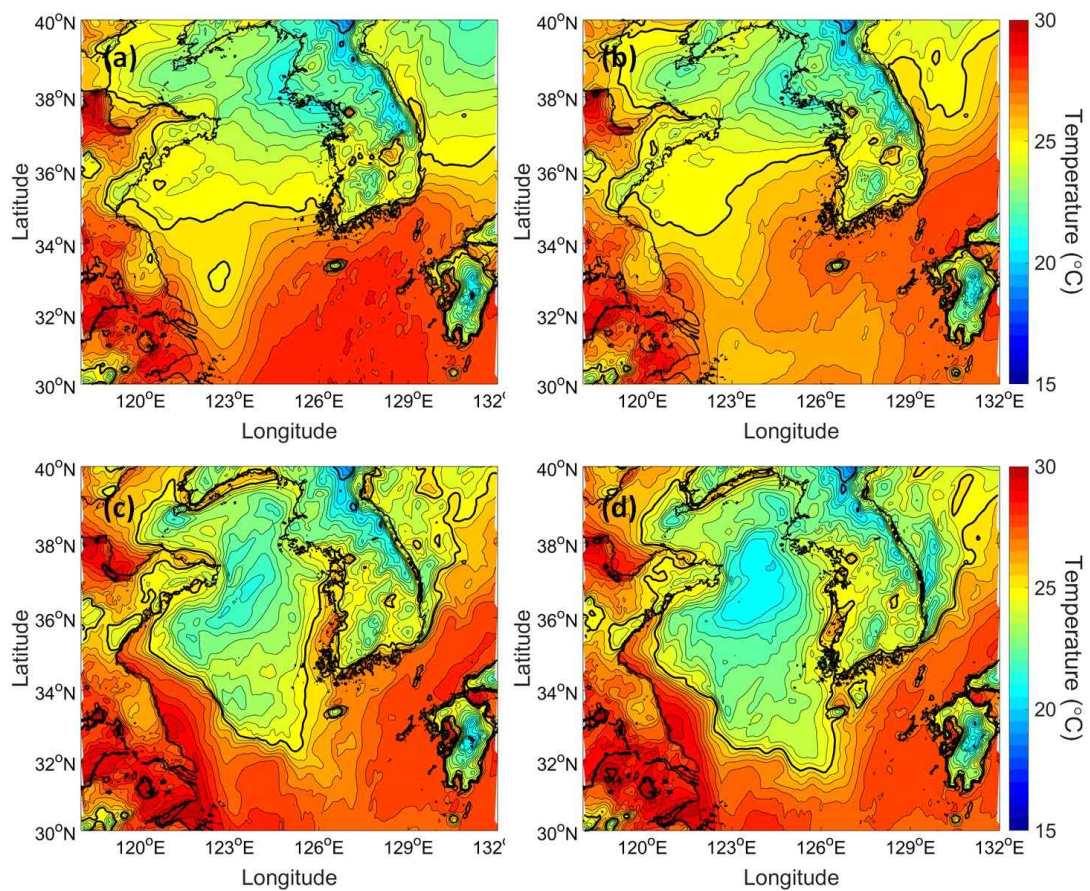
**Figure 8.** Same as Figure 5 except for surface air temperature (SAT)

**Table 3.** Bias, root mean square error (RMSE) and correlation (R) of the result from each experiment compare to observed surface air temperature (SAT) data.

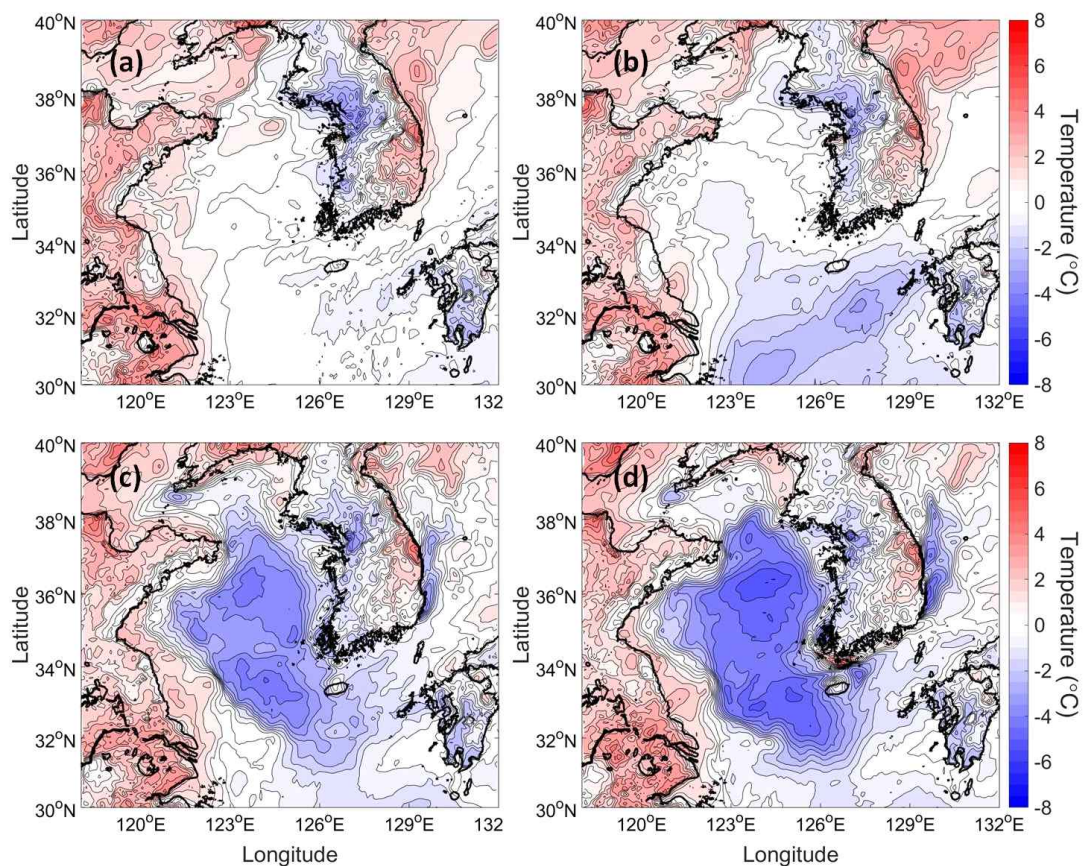
	22103			22104			22107			22108		
	Bias	RMSE	R	Bias	RMSE	R	Bias	RMSE	R	Bias	RMSE	R
Exp 1	2.57	3.03	0.63	0.99	1.41	0.77	1.72	2.72	0.49	0.11	2.03	0.43
Exp 2	1.81	2.13	0.86	0.74	1.12	0.84	-0.05	1.72	0.68	0.42	2.10	0.45
Exp 3	1.62	1.87	0.88	-0.27	1.28	0.72	0.99	1.78	0.87	1.08	1.91	0.75
Exp 4	1.25	1.47	0.92	-0.09	0.80	0.85	0.18	1.09	0.94	0.09	1.11	0.90



**Figure 9.** Lead-Lag correlation for sea surface temperature (SST) and surface air temperature (SAT) for observation (black) and each experiment (Exp 2: cyan, Exp 3: green, Exp 4: blue) at four KMA buoy locations: (a) Geomundo (22103), (b) Geojeodo (22104), (c) Marado (22107), (d) Oeyeondo (22108). positive (negative) value in x-axis means SST (SAT) leads SAT (SST)



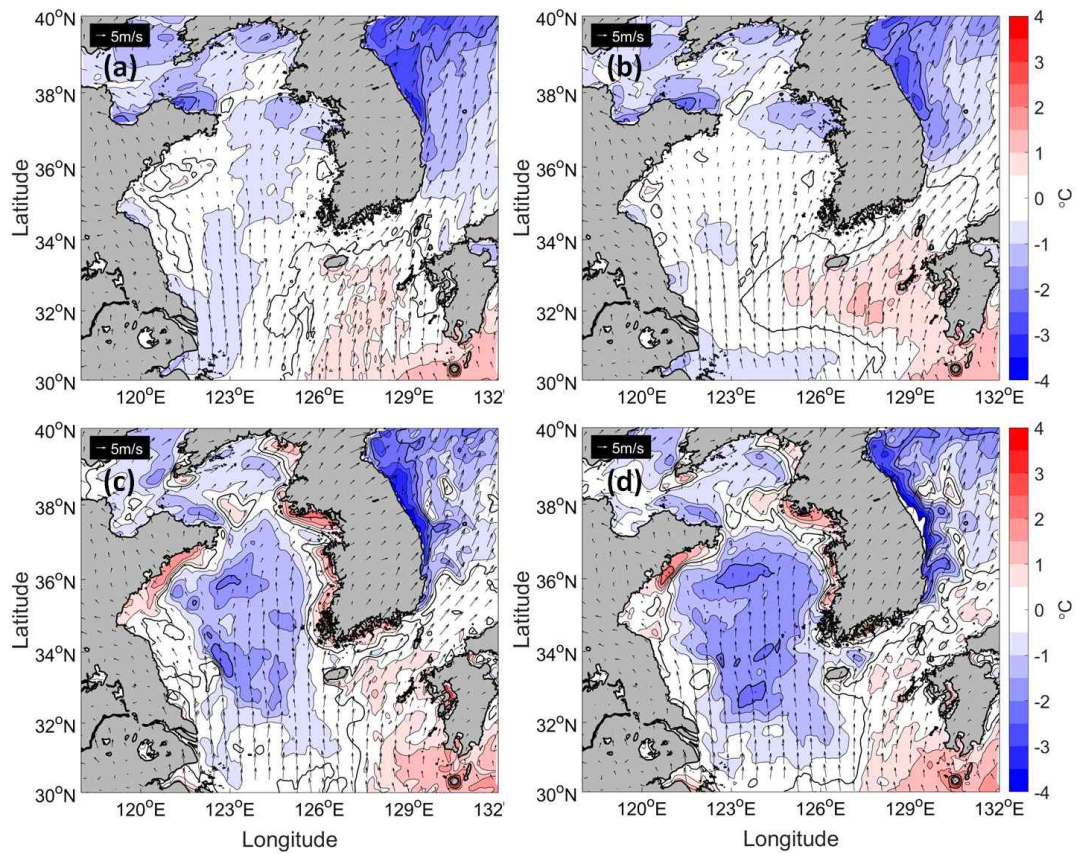
**Figure 10.** Same as Figure 6 except for surface air temperature (SAT).



**Figure 11.** Same as Figure 7 except for surface air temperature (SAT) result of (a) Exp 1, (b) Exp 2, (c) Exp 3, (d) Exp 4.

## 4.2 해기차

황해 저층냉수에 기인한 급격한 SST 냉각은 황해 중앙을 중심으로 폭넓게 발생하고, 동시에 상대적으로 고온의 공기덩어리가 황해로 유입되면서 고온의 대기와 저온의 SST에 의해 해양과 대기의 온도차가 커지게 된다(Figure 12). Figure 12는 태풍이 통과한 직후인 8월 9일 12 UTC에 각 실험 별 해기차(SST-SAT)와 바람 패턴을 나타낸다. 해기차는 해양과 대기의 온도차를 나타내는 지표로 해양과 대기 사이의 열의 이동을 나타낸다(Friehe and Schmitt, 1976; Kara and Hurlburt, 2002). 양(음)의 해기차를 갖는 경우 더 높은 온도를 갖는 해양(대기)에서 더 낮은 온도의 대기(해양)로 열의 이동을 나타낸다. 황해상에서 바람의 방향은 전반적으로 남풍계열이 우세하며, 이로 인해 남쪽 해역의 따뜻한 성질의 공기가 황해상으로 유입된다. 남쪽에서 유입되는 공기는 27°C 이상의 고온수가 존재하는 동중국해를 통과하며 해양에서 수증기를 공급받아 고온 다습한 상태이다(Figure 6). 고온 다습한 공기덩어리가 SST 냉각이 나타난 황해상으로 유입되면서 음의 해기차가 황해 저층냉수의 분포와 유사하게 황해 중앙을 중심으로 폭넓게 발생한다. 이러한 분포는 SST 냉각이 크게 발생하는 접합 모델의 결과(Exp 3과 Exp 4)에서 뚜렷하게 나타나는 반면에 SST 냉각이 크지 않은 두 실험(Exp 1과 Exp 2)에서는 상대적으로 약한 분포를 보인다. 고온 다습한 공기덩어리가 차가운 SST로 인해 기온이 내려가면 상대습도는 높아지고, 기온 하강이 계속 진행될 경우, 수증기의 응결 현상이 나타나기 때문에 대기 하층에서의 수증기 응결량이 증가하고 동시에 해무(이류무) 발생에 좋은 조건을 형성할 수 있다.



**Figure 12.** Same as Figure 6 except for air sea difference (ASD, contour) and wind (vector)

### 4.3. 수증기 응결량

해기차에 의해 기온이 낮아지며 발생한 수증기 응결량을 확인하기 위해 각 실험 별 대기 모델의 최하층 격자의 구름 수액량(Liquid Water Contents, LWC)을 비교하였다. LWC는 구름이나 강수를 형성하는 일련의 과정들에 대한 정보를 제공함으로써 수치모델 내의 구름-강수 물리 모수화(microphysical schemes) 과정을 향상시키는데 중요한 요소가 된다. Tokinaga and Xie (2009)는 오토츠크 해에 발생하는 해무 연구에서 LWC가 0.1g/kg 이상인 경우를 안개, 즉 해양에서의 해무로 판단하여 비교했으며 본 연구에서도 같은 기준을 적용했다. Figure 13는 태풍 이후인 9일 12 UTC의 LWC의 공간분포를 나타낸다. 직관적인 비교를 위해 0.1g/kg 미만의 값이 나타난 부분은 흰색으로 표시하여 안개 지역이 분명하게 구분되도록 하였다. LWC분포에 있어 가장 큰 차이점은 접합 모델과 비 접합 모델 간에 발생한다.

비 접합 실험인 Exp 1과 Exp 2의 결과는 0.1g/kg 이상의 LWC가 황해 북부와 서부 해역에 걸쳐 나타나지만, 대부분이 0.4g/kg 이하의 비교적(접합 실험에 비해) 얇은 해무가 발생하는 것으로 보인다. 그러나 접합 모델 실험(Exp 3과 Exp 4) 결과는 황해 중앙을 중심으로 높은 농도의 LWC(0.5g/kg)가 폭넓게 나타나고 제주도 서부해역까지 확장되어 발달한다. 두 접합 실험 간의 차이를 보면, Exp 4에서 LWC가 황해 중앙부에서 좀 더 폭넓게 분포하고, 동시에 제주도 남서부보다 확장되는 결과를 나타낸다. LWC의 수평 분포는 Figure 12에 나타난 음의 해기차 분포와 유사한 패턴을 보이며, 특히 접합 모델 결과에서 저층냉수에 기인한 기온 하강과 LWC분포가 잘 일치한다. 이것은 차가운 저층냉수와의 혼합에 의해 냉각된 SST 위로 따뜻하고 습한 공기가 유입되면서 음의 해기차를 야기하고, 동시에 대기 하층의 수증기 응결량을 증가시키기 때문이다.

이러한 분포는 주로 해면으로부터 약 200m 고도 범위 내에서 일어난다. Figure 14은 황해 중앙을 남북으로 가로지르는(Figure 13a에 나타난 붉은 실선) 대기의 수직적인 기온(color contour)과 LWC 분포(gray contour)를 각 실험 별로 나타낸다. 비 접합 실험 결과에서 나타난 대기 하층의 수직 구조는 황해 중앙부와 북부 해역에서 다른 기온과 LWC의 분포를 보인다. 황해 중앙부에서는 표층에서 기온이

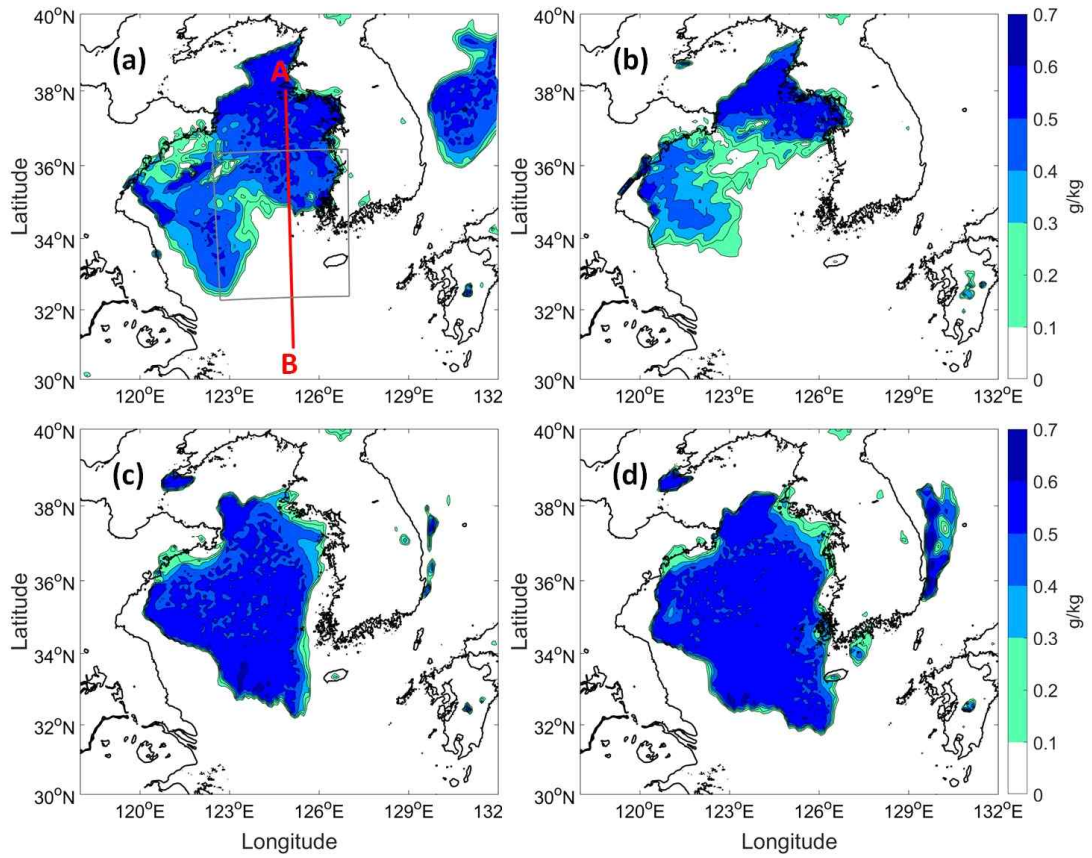


높고 고도에 따라 기온이 낮아지면서 대기 불안정이 유지되며, 그로 인해 불안정층 내에서 수증기의 응결이 발달되지 못한다. 황해 북부에서는 SST 냉각에 의한 표층 기온 하강으로 대기 하부의 불안정이 약화되면서 응결된 수증기량이 대기 하부층에서 발달하는 구조를 보인다. 반면 접합 실험의 경우 황해 남부 일부를 제외한 황해 전반에 걸쳐 발생하는 SST 냉각에 의해 표층 기온이 하강하고, 그 결과 하층 대기는 기온 역전층을 형성해 안정화된 수직구조를 보인다. 표층의 낮은 기온은 더 많은 수증기를 응결시키고, 응결된 수증기는 상층 공기와의 혼합에 의한 소산이 약화되기 때문에 안정한 대기 하층 내에 갇히게 되어(표층~200m 범위) 고도가 상승함에 따라 응결되는 수증기량이 감소되는 양상을 보인다. 대기의 수직구조 비교 결과는 급격한 SST 냉각에 기인한 기온 하강으로 기온 역전층이 형성되며 대기 하층이 안정되고, 응결된 수증기가 안정된 대기 하층에 갇히게 되어 짙은 안개가 유지될 수 있는 조건이 형성될 수 있음을 보여준다.

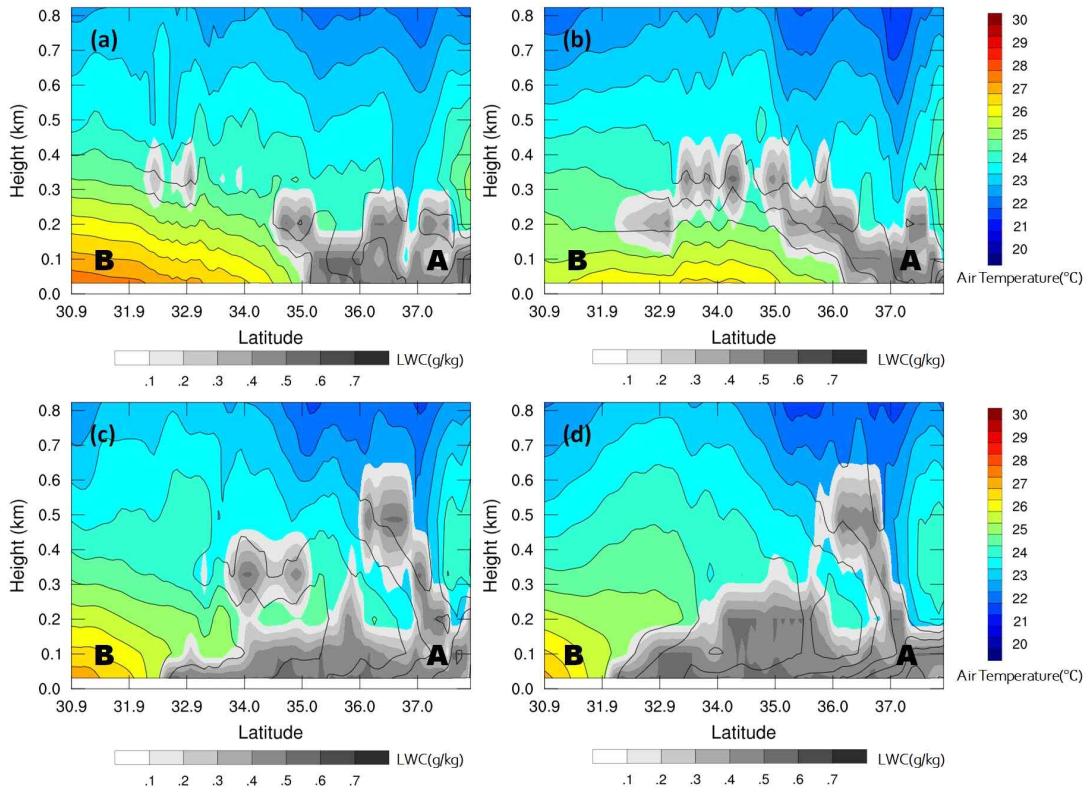
대기 하부층 내 수증기 응결이 시간적으로 어떤 변화를 보이는지 확인하기 위해 황해 중앙 해역(Figure 13a의 회색 박스 내부)을 평균한 LWC와 SAT을 Figure 15에 시계열로 나타냈다. 앞서 언급한 것처럼 기온 하강에 의한 대기 하부층 내의 수증기 응결 현상은 접합 모델 실험에서 분명하게 나타난다. 흥미로운 점은 기온은 태풍이 통과하는 시기(7-8일 사이)에 급격하게 하강하지만(Figure 15 b) 수증기 응결은 하강한 기온이 유지되는 시기인 8-9일 사이에 가파르게 증가하기 시작한다. 이는 태풍이 통과한 후에 냉각된 SST 위로 고온 다습한 공기덩어리가 황해 내부로 유입되면서 해기차가 발생하고, 그 결과 수증기의 응결이 발달했음을 의미한다. 황해에서 발달한 LWC는 북풍이 불기 시작하는 18일 이후에는 빠르게 감소하는 경향을 나타낸다. 접합 실험(Exp 3과 Exp 4)의 경우 SST 냉각이 더 크게 나타나는 Exp 4에서 더 많은 양의 수증기 응결이 발생한다.

태풍 시기에 수증기량의 변화는 국가기상위성센터의 천리안 위성 1호 합성영상을 통해서도 확인할 수 있다. Figure 16은 2011년 8월 8일 09 UTC부터 24시간 간격의 위성 합성영상 자료이다. 위성 합성영상의 경우 하층운과 안개는 붉은색으로, 고층운은 푸른색, 그리고 흰색은 저층부터 고층까지 구름이 수직적으로 높게 발달한 부분을 가리킨다. 태풍이 황해 중앙을 통과해 한반도 북부에 육상하는 시기(8일 09 UTC)에는 황해 중앙부에 급격한 SST 냉각이 발생함에도 불구하고

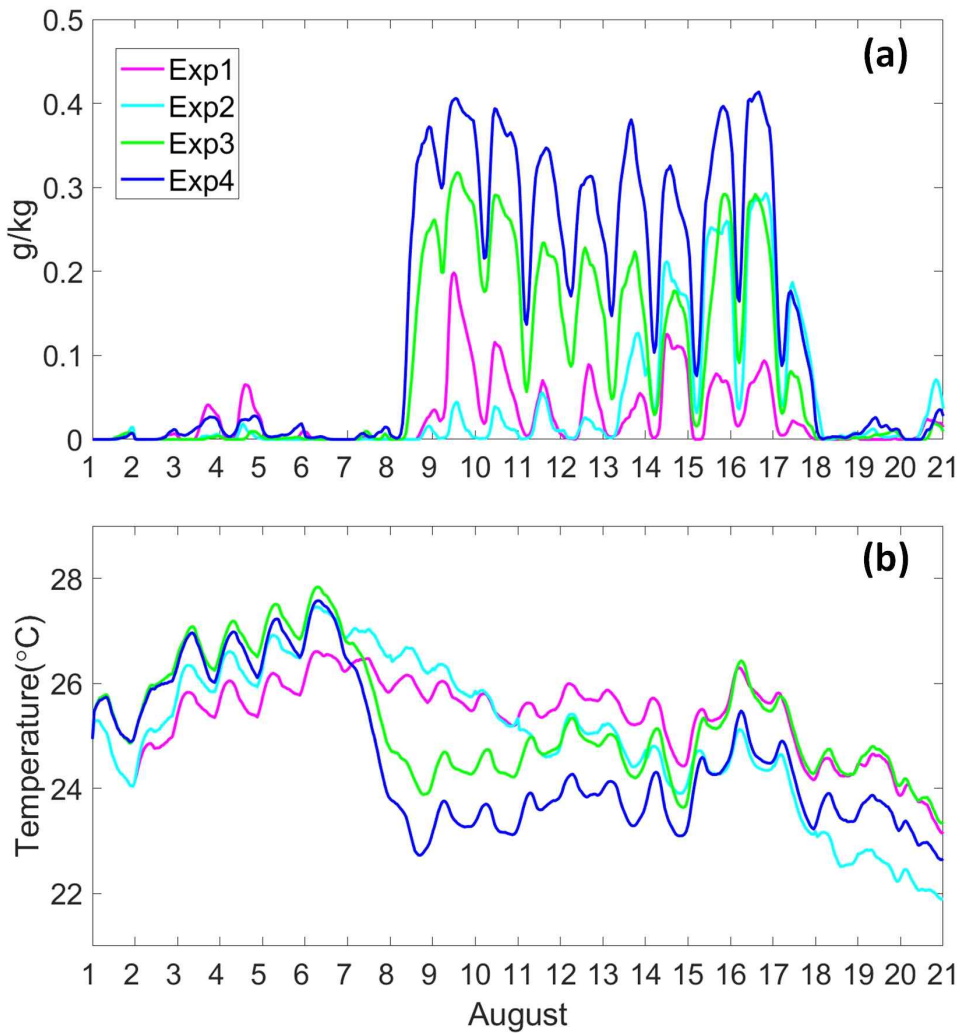
고 대기 하층에는 구름이 형성되지 않고 맑은 상태를 나타낸다. 그러나 그 이후에는 황해 전반에 걸쳐 대기 하층에서 구름이 감지되며, 이러한 시간에 따른 구름의 변화는 해양-대기 접합 모델 결과에서 더 잘 재현된다(Figure 17). 예를 들어, Exp 4의 경우 황해 전반에 걸쳐 수증기 응결이 발달하여 구름 영상과 유사한 분포를 나타내지만, 비 접합 실험인 Exp 1의 결과는 황해 북부와 서부 일부에만 국한되어 수증기 응결이 나타나며 제주 남서부 해역까지 나타나는 실제 구름 분포를 제대로 모의하지 못한다.



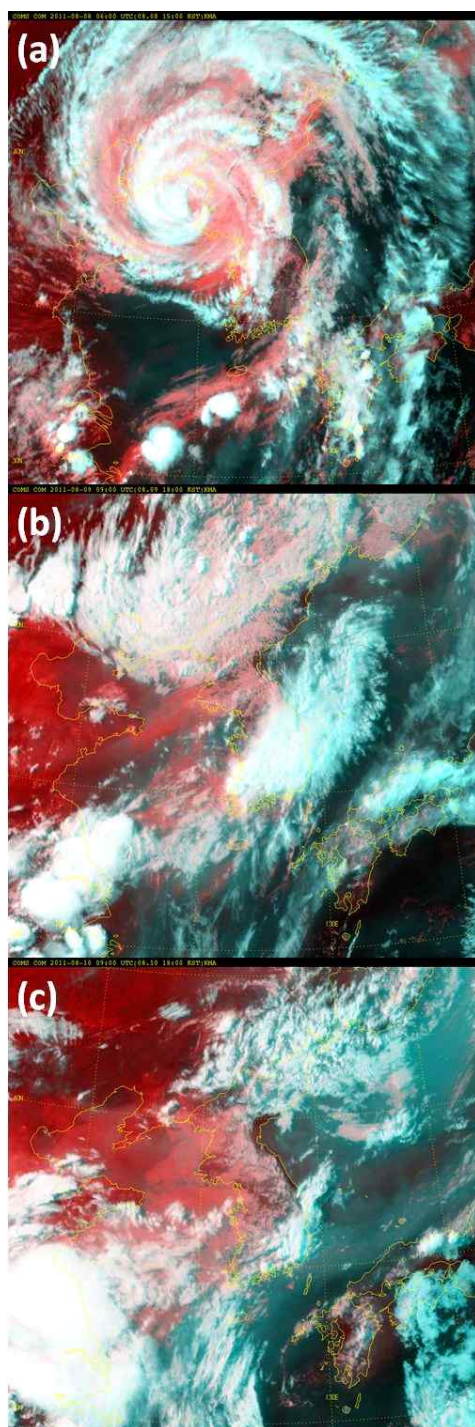
**Figure 13.** Same as Figure 6 except for liquid water contents (LWC)



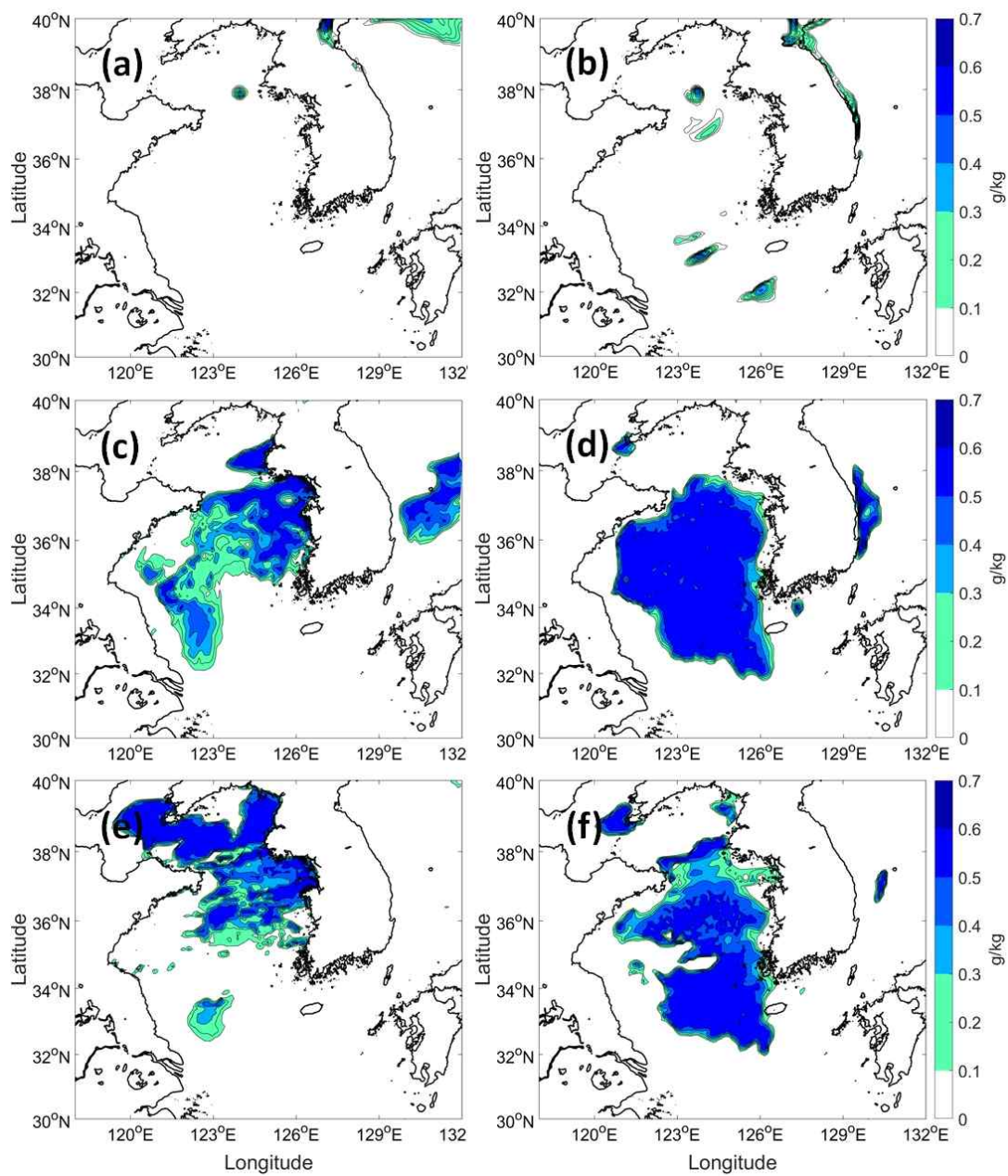
**Figure 14.** Vertical structure of air temperature (color contour) and liquid water contents (LWC, gray contour) along the A-B (red) line marked in Figure 13 (a) at 12 UTC 9 of August 2011 from the results of (a) Exp 1, (b) Exp 2, (c) Exp 3, (d) Exp 4.



**Figure 15.** Time series of area averaged (a) liquid water contents (LWC) and (b) surface air temperature (SAT) over the central Yellow Sea region (shown in gray box of Figure 13) from the model results (Exp 1: magenta, Exp 2: cyan, Exp 3: green, Exp 4: blue).



**Figure 16.** Satellite composite images from Korea National Meteorological Satellite Center (<http://nmsc.kma.go.kr/homepage/html/main/main.do>) around the Korean peninsula at (a) 09 UTC 8, (b) 09 UTC 9, (c) 09 UTC 10 of August 2011.



**Figure 17.** Surface liquid water contents (LWC) at (a,b) 09 UTC 8, (c,d) 09 UTC 9 and (e,f) 09 UTC 10 of August 2011 from the results of Exp 1 (left), Exp 4 (right panels).

## 5. 수증기의 수렴과 수직 확산

SST의 급격한 냉각은 대기 하층의 기온 하강을 야기하였으며 결과적으로 해무 형성에 영향을 주었음이 이전 장의 결과 비교를 통해 확인되었다. 해무 형성 과정에서 SST의 냉각이 해무 형성과 발달 조건에 대하여 기온 냉각 외 어떠한 추가적인 영향을 미쳤는지 확인하기 위해 Exp 1과 Exp 4의 결과를 비교하였다. 구름 또는 안개의 형성과 발달은 대기 하층에 충분한 수증기가 공급되는 조건에서 발생하지만, 음의 해기차를 갖는 해역에서 증발에 의한 수증기 공급은 나타나지 않는다(Tachibana et al. 2008). 그러나 표층 LWC 분포는 접합 모델 결과에서 대기 하층에 안개가 형성 및 발달하고 있음을 보였는데, 이는 다른 지역에서 황해 저층냉수와의 혼합으로 SST가 급격히 냉각된 황해 중앙부로 수증기 유입이 발생했다는 것을 의미한다. 대기 하층에서 황해로 유입 또는 유출되는 수증기의 변화를 확인하기 Moisture Flux Convergence (MFC)를 확인했다. MFC는 다음과 같이 정의된다.

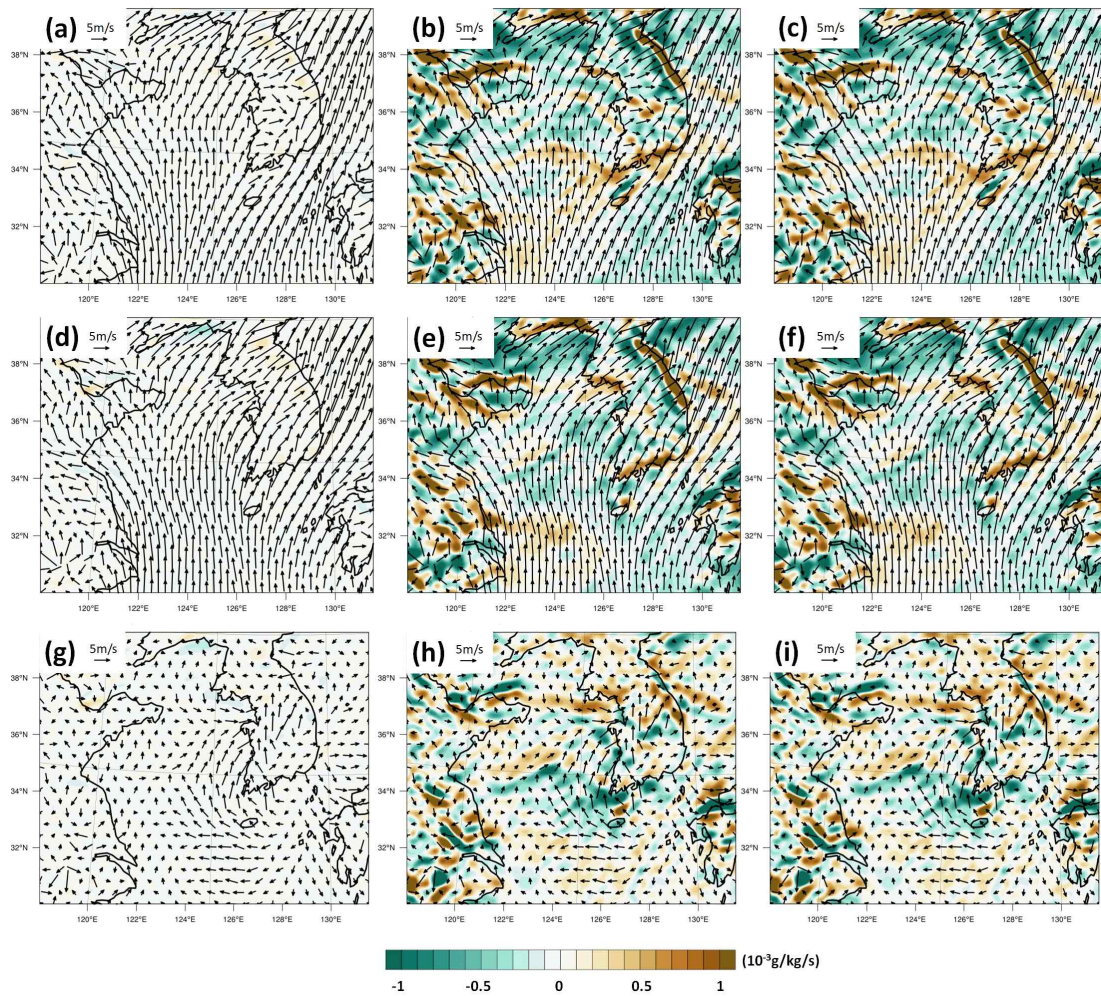
$$\begin{aligned} MFC &= - \nabla \cdot (qV_h) \\ &= V_h \cdot \nabla q - q \nabla \cdot V_h \\ & (= \text{Advection term} + \text{Convergence term}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $q$ 와  $V_h$ 는 각각 수증기량과 바람에 의한 수평 확산을 나타내며, 수평 MFC는 수분(moisture)의 이류(Advection)항과 수렴(Convergence)항으로 구분될 수 있다. MFC가 음의 값을 나타내면 수증기의 수렴을, 양의 값이면 수증기의 발산을 의미한다. Figure 18은 8월 9일 12 UTC의 두 실험 결과 이류항, 수렴항, 그리고 두 항의 합인 MFC를 왼쪽부터 나열했고, 같은 시기의 바람을 중첩해서 나타낸다. 또한 실험 간 차이를 확인하기 위해 각 항들에 대한 두 실험의 차를 추가했다(Figure 18 g, h, i). 두 실험 결과 모두에서 황해 북부해역에서 수증기 수렴이 강하게 발생하는데, 이것은 태풍이 한반도 북부를 통과한 직후이기 때문에 태풍에 의한 많은 수증기가 황해 북부에서 수렴된 것으로 보인다. 또한 MFC에 대한 각 항에 대한 기여도는 이류항보다는 주로 수렴항에 의해 결정되고 있음을 알

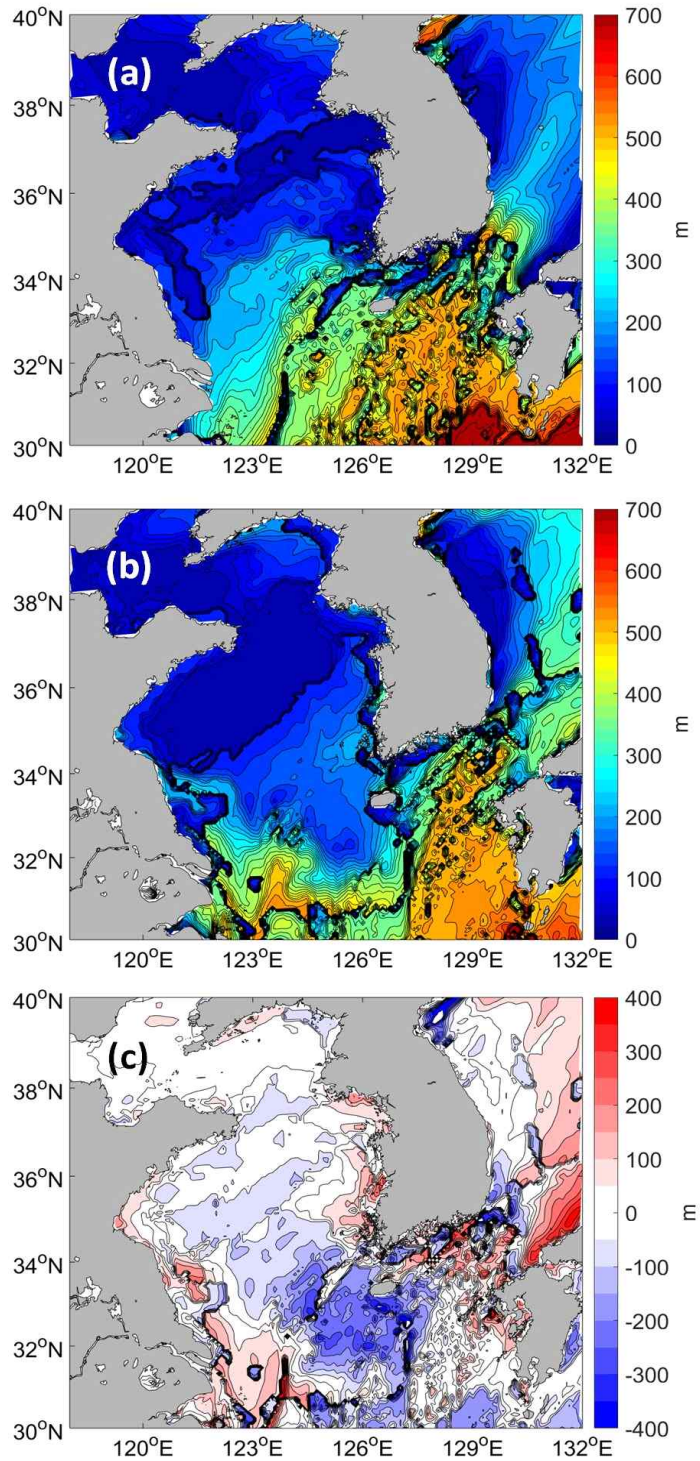


수 있다. 반면에 황해 중앙 해역에서는 접합 실험 결과에서 수증기의 수렴 현상이 강하게 나타나며, 바람도 제주도 남부에서 황해 중앙으로 유입되는 공간패턴을 보인다(Figure 18 h, j). 두 실험 간 MFC 결과의 비교는 급격한 SST 냉각이 발생하는 황해 중앙으로 대기 하층에서 수증기를 포함한 공기의 유입이 많아지고, 그 결과 수증기 수렴이 강화되어 해무 또는 안개가 쉽게 형성될 수 있음을 나타낸다.

수증기의 공급은 해무의 형성과정에 크게 영향을 주지만, 상층 공기와의 강한 혼합이 발생하면 형성된 해무는 더 이상 발달하지 못하고 짧은 시간 내에 소산된다. 수증기의 수렴으로 형성된 해무가 유지되고 발달하기 위해서는 상층과의 수직 혼합이 억제되도록 대기 하층이 안정된 상태가 만들어져야 한다. 대기 안정도는 수직적 확산 범위를 나타내는 대기 경계층 고도(Planetary Boundary Layer, PBL)의 비교를 통해 확인할 수 있다(Figure 19). 대기 경계층 고도는 일반적으로 대기 가열에 의한 혼합층(Mixed Layer)과 표층 냉각에 의한 안정 경계층(Stable Boundary Layer)으로 구분된다. Figure 14를 통해 기온의 수직 분포를 확인한 결과, 비접합 실험의 경우 황해 북부에서 수직적인 기온 변화가 나타나지 않았고 접합 실험의 경우 황해 전체에서 기온의 역전이 발생해 안정층이 형성되었다. 이를 통해 하층 대기 냉각이 나타나는 지역의 대기 경계층 고도는 안정 경계층의 형성으로 결정된다는 점이 확인된다. 안정 경계층 내의 공기는 상층의 공기와 혼합이 일어나지 않아 경계층 내에서 형성된 해무가 유지되고 발달할 수 있는 최적의 조건이 되며 Figure 14를 통해서 안정층 내에서 해무가 발달한 모습이 확인된다. Exp 1에서 나타난 태풍 통과 후의 PBL 고도는 황해 북부에서 낮은 고도를 보이며 황해 남부에서는 비교적 높은 고도를 나타낸다(Figure 19 a). Exp 4의 태풍 통과 후 PBL 고도는 황해 전체적으로 200m 이하의 고도를 보이며(Figure 19 b) 두 실험(Exp 1과 Exp 4)의 차이는 황해 전반에 걸쳐 Exp 4에서 낮은 고도를, 황해 남부지역에서 최대 300m가량 낮은 고도 분포를 나타낸다(Figure 19 c). 이것은 SST 냉각 해역 위로 수증기가 수렴되면서 해무가 형성되고, 동시에 표층 기온이 하강하면서 대기 하층이 안정되어 형성된 해무가 안정적으로 유지되고 발달할 수 있음을 보여주는 결과이다.



**Figure 18.** Horizontal distributions of (a, d, g) Advection, (b, e, h) Convergence and (c, f, I) MFC term with wind(vector) results from Exp 1 (upper), Exp 4 (middle) and the difference between two experiments (Exp 4-Exp 1, bottom panels).



**Figure 19.** Horizontal distribution of Planetary Boundary Layer (PBL) height at 12 UTC 9 of August from the results of (a) Exp 1, (b) Exp 4 and (c) the difference between two experiments (Exp 4 - Exp 1).

## 6. 요약 및 결론

황해 저층냉수는 여름철 황해의 해양 특성을 대표하는 수괴 분포로 황해 중앙부의 저층, 즉 수온약층 아래에 위치하고, 각종 동물플랑크톤 등의 어류 자원이 풍부한 수괴로 알려져 있다. 황해 저층냉수의 존재는 여름철 표층에서 저층으로의 열전달을 막아 수직적인 성층을 강화하는데 기여하지만, 종종 고온의 표층수와 혼합되면서 표층의 수온을 크게 낮추는 역할을 하기도 한다. 예를 들어 여름철 태풍이 황해를 통과하며 황해 전반에 걸쳐 급격한 SST 냉각이 발견되는 경우가 황해 저층냉수와 수직 혼합에 의해 나타난 결과이다. 황해 저층냉수에 기인하는 광범위한 SST 냉각은 황해뿐만 아니라 주변 연안해역의 날씨 변화에 커다란 영향을 줄 수 있음에도 황해 저층냉수와 SST 냉각, 그리고 대기 사이의 관계는 불명확하며, 관련 연구 또한 여전히 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 태풍이 황해를 관통하는 경우 황해 저층냉수가 얼마나 SST 냉각에 기여하고, 냉각된 황해 SST가 어떤 과정을 통해 기상요소에 영향을 주는지를 검토하였다. 저층냉수의 분포와 SST 냉각, 그리고 SST 냉각에 의한 해양-대기 상호작용을 고려하기 위해 해양-대기 접합 모델을 적용하였으며, 2011년 여름철 황해를 관통했던 태풍 무이파 사례에 대해 다양한 비교실험을 수행하여 저층냉수의 조건에 따른 황해 SST 냉각 강도 변화, 그리고 그와 관련된 대기의 반응을 분석하였다. 분석 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 태풍 통과 후 황해 SST 냉각의 강도 및 분포는 황해 저층냉수의 초기 분포에 의해 결정된다. 해양모델의 초기장과 경계장으로 사용된 HYCOM과 NCOM 자료의 비교를 통해 NCOM 자료에서 황해 저층냉수가 수직·수평적으로 더 확장된 ‘돔(dome)’ 형태를 나타내며, 확장 지역 저층의 수온과 수온약층의 수온도 보다 낮게 제시하고 있음을 확인하였다. 그 결과 접합 모델 실험에서도 NCOM 자료를 사용한 실험 결과에서 SST 냉각이 더 강하고 넓게 나타났다. 이것은 여름철 SST의 시·공간적인 분포 변화에 있어 황해 저층냉수의 분포가 중요한 역할을 할 수 있음을 의미한다.

둘째, 황해 저층냉수에 기인한 SST 냉각은 해양-대기 경계층을 통한 열 교환을 통해 대기 하층부의 기온 변화에 직접적인 영향을 미친다. 관측과 비교한 시계열 그래프와 태풍 전후 공간분포 비교 결과에서 나타난 것처럼 황해 전반에 걸쳐 강한 SST 냉각이 발생하는 경우 1-2시간의 시간 지연을 두고 강한 기온의 하강이 나타났다. 이는 SST 냉각에 의해 해기차가 커지고, 대기의 열이 해양으로 빼앗기는 과정을 통해 발생한다.

셋째, 수증기 수렴, 기온 냉각, 안정층 형성에 의한 짙은 해무 형성은 SST 냉각에 의한 결과이다. 강한 SST 냉각이 발생한 해역에서는 기류 변화에 의한 수증기의 수렴 현상이 나타나며 해양-대기 경계층에서 열 교환에 의한 기온 하강으로 많은 수증기가 응결되어 해무를 형성한다. 동시에 대기 하층의 열 손실은 수직적으로 안정된 상태를 형성하며 하층에서 형성된 해무가 상층의 공기와 혼합이 저해되며 해무가 더 발달할 수 있는 호조건을 제공한다.

넷째, 본 연구사례와 같이 급격한 SST 변화가 나타나는 경우, 보다 정확한 기상예측을 위해서는 접합 모델의 사용이 필수적이다. 기존 기상예측에서 많이 사용되는 위성 SST는 저층냉수에 기인하는 급격한 냉각을 포착하기 힘들기 때문에 위성 SST 자료가 사용된 모델은 예측 정확도가 떨어지는 결과를 초래한다. 일반적으로 위성 SST 자료가 일 간격으로 생산되기 때문에 그보다 짧은 기간에 급변하는 SST의 영향을 대기 모델에서 표현할 수 없는 한계가 있다. 반면 접합 모델의 경우 SST가 급격히 변하는 경우에도 SST의 영향이 대기 모델에 즉각적으로 반영되기 때문에 모델의 정확도가 향상될 수 있다.

본 연구에서는 따뜻한 표층수와 저층의 황해 냉수대가 태풍에 의해 강한 수직 혼합이 발생할 경우 황해 전반에 걸쳐 SST 냉각을 야기할 수 있고, 동시에 해양-대기 상호작용을 통해 황해 기상현상에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 확인했다. 기존의 해양-대기 상호작용 연구는 대기 외력(바람, 비, 열 수송 등)에 의한 SST 변화와 그에 따른 대기 현상에 주목하였고 해양 내부의 조건에 기인한 SST 변화가 유발하는 대기 현상에 관한 연구는 매우 드물다. 본 연구는 해양 내부의 조건에 기인한 SST 변동이 해양-대기 상호작용을 통해 대기 하층에 주는 변화를 분석했다는 점에서 의미가 있다. 황해는 조석의 영향이 강한 지역으로 조석 혼합에 의한 냉각 또한 대기 하층의 변화에 영향을 줄 수 있기 때문에 향후 조석 혼

함에 의한 수온 냉각과 기상현상에 대한 연구가 필요하다. 특히, 서해안의 경우 조석에 의한 혼합으로 연안을 따라 저층의 냉수가 영향을 미칠 수 있기 때문에 보다 정확한 기상예측을 위해서는 조석 혼합에 기인하는 해수면 온도 변화와 그와 관련된 기상변화에 대한 연구는 필수적이다.

## 참고문헌

- Chu, P. C., Fralick Jr, C. R., Haeger, S. D., & Carron, M. J. (1997). A parametric model for the Yellow Sea thermal variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C5), 10499-10507.
- Chu, P. C., Wells, S. K., Haeger, S. D., Szczechowski, C., & Carron, M. (1997). Temporal and spatial scales of the Yellow Sea thermal variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5655-5667.
- Coelho, E., Peggion, G., Rowley, C., Jacobs, G., Allard, R., & Rodriguez, E. (2009). A note on NCOM temperature forecast error calibration using the ensemble transform. *Journal of Marine Systems*, 78, S272-S281.
- Deremble, B., Lapeyre, G., & Ghil, M. (2012). Atmospheric dynamics triggered by an oceanic SST front in a moist quasigeostrophic model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(5), 1617-1632.
- Fralick Jr, C. R. (1994). Yellow Sea Thermal Structure. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA.
- Friehe, C. A., & Schmitt, K. F. (1976). Parameterization of air-sea interface fluxes of sensible heat and moisture by the bulk aerodynamic formulas. *Journal of Physical Oceanography*, 6(6), 801-809.
- Fu, D., Luan, H., Pan, D., Zhang, Y., Wang, L. A., Liu, D., ... & Li, X. (2016). Impact of two typhoons on the marine environment in the Yellow Sea and East China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34(4), 871-884.
- Guo, J., Li, P., Fu, G., Zhang, W., Gao, S., & Zhang, S. (2015). The structure and formation mechanism of a sea fog event over the Yellow Sea. *Journal of Ocean University of China*, 14(1), 27-37.
- Hong, B., Dunxin, H., Yongli, C., & Qingye, W. (2004). Statistic characteristics of thermal structure in the southern Yellow Sea in summer. *Chinese Journal of*

- Oceanology and Limnology, 22(3), 237-243.
- Huang, G., Qu, X., & Hu, K. (2011). The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(2), 421-432.
- Jacob, R., Larson, J., & Ong, E. (2005). M× N communication and parallel interpolation in Community Climate System Model Version 3 using the model coupling toolkit. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 19(3), 293-307.
- Kara, A. B., Rochford, P. A., & Hurlburt, H. E. (2002). Air-sea flux estimates and the 1997-1998 ENSO event. *Boundary-layer meteorology*, 103(3), 439-458.
- Kim, C. K., & Yum, S. S. (2012). A numerical study of sea-fog formation over cold sea surface using a one-dimensional turbulence model coupled with the weather research and forecasting model. *Boundary-Layer Meteorology*, 143(3), 481-505.
- Larson, J., Jacob, R., & Ong, E. (2005). The model coupling toolkit: a new Fortran90 toolkit for building multiphysics parallel coupled models. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 19(3), 277-292.
- Lee, J.-h., Pang, I.-C., and Moon, J.-H. (2016), Contribution of the Yellow Sea bottom cold water to the abnormal cooling of sea surface temperature in the summer of 2011, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 3777- 3789
- Lee, S. H., & Beardsley, R. C. (1999). Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C7), 15679-15701.
- Lü, X., Qiao, F., Xia, C., Zhu, J., & Yuan, Y. (2006). Upwelling off Yangtze River estuary in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11).
- Menter, F. R. (1992). Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. *AIAA journal*, 30(6), 1657-1659.
- Moon, J. H., Hirose, N., & Yoon, J. H. (2009). Comparison of wind and tidal contributions to seasonal circulation of the Yellow Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C8).



- Moore, A. M., Arango, H. G., Broquet, G., Powell, B. S., Weaver, A. T., & Zavala-Garay, J. (2011). The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems: Part I—System overview and formulation. *Progress in Oceanography*, 91(1), 34-49.
- Qian, H., Suxiang, Y., & Yaocun, Z. (2012). Analysis of Local Air–Sea Interaction in East Asia Using a Regional Air–Sea Coupled Model. *Journal of Climate*, 25(2), 767–776.
- Roxy, M., & Tanimoto, Y. (2007). Role of SST over the Indian Ocean in influencing the intraseasonal variability of the Indian summer monsoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 85(3), 349-358.
- Shi, W., & Wang, M. (2012). Satellite views of the bohai sea, yellow sea, and East China Sea. *Progress in Oceanography*, 104, 30-45.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, 88, 7-25.
- Tachibana, Y., Iwamoto, K., Ogawa, H., Shiohara, M., Takeuchi, K., & Wakatsuchi, M. (2008). Observational study on atmospheric and oceanic boundary-layer structures accompanying the Okhotsk anticyclone under fog and non-fog conditions. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 86(5), 753-771.
- Tokinaga, H., & Xie, S. P. (2009). Ocean tidal cooling effect on summer sea fog over the Okhotsk Sea. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D14).
- Wang, L., Li, T., & Zhou, T. (2012). Intraseasonal SST variability and air–sea interaction over the Kuroshio Extension region during boreal summer. *Journal of Climate*, 25(5), 1619-1634.
- Wang, X., Han, G., Qi, Y., & Li, W. (2011). Impact of barrier layer on typhoon-induced sea surface cooling. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 52(3), 367-385.
- Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., & Zambon, J. B. (2010). Development of a

- coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*, 35(3), 230-244.
- Xie, S. P., Hafner, J., Tanimoto, Y., Liu, W. T., Tokinaga, H., & Xu, H. (2002). Bathymetric effect on the winter sea surface temperature and climate of the Yellow and East China Seas. *Geophysical Research Letters*, 29(24), 81-1.
- Xu, H., Xu, M., Xie, S. P., & Wang, Y. (2011). Deep atmospheric response to the spring Kuroshio over the East China Sea. *Journal of Climate*, 24(18), 4959-4972.
- Yamamoto, M., & Hirose, N. (2007). Impact of SST reanalyzed using OGCM on weather simulation: A case of a developing cyclone in the Japan Sea area. *Geophysical research letters*, 34(5).
- Yanai, M., & Tomita, T. (1998). Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis. *Journal of climate*, 11(3), 463-482.
- Yang, H. W., Cho, Y. K., Seo, G. H., You, S. H., & Seo, J. W. (2014). Interannual variation of the southern limit in the Yellow Sea Bottom Cold Water and its causes. *Journal of Marine Systems*, 139, 119-127.
- Zhang, S. W., Wang, Q. Y., Lü, Y., Cui, H., & Yuan, Y. L. (2008). Observation of the seasonal evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996-1998. *Continental Shelf Research*, 28(3), 442-457.
- Zhang, L., Zhang, X., Chu, P. C., Guan, C., Fu, H., Chao, G., ... & Li, W. (2017). Impact of sea spray on the Yellow and East China Seas thermal structure during the passage of Typhoon Rammasun (2002). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(10), 7783-7802.
- Zhu, J., Shi, J., Guo, X., Gao, H., & Yao, X. (2018). Air-sea heat flux control on the Yellow Sea Cold Water Mass intensity and implications for its prediction. *Continental Shelf Research*, 152, 14-26.
- 기상청. (2011), 기상 연감.
- 기상청. (2011), 2011년 태풍 분석 보고서