



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](#)

碩士學位論文

대기-해양 결합모델을 이용한 서해안  
지역 국지기상 영향 연구: 예측성능  
평가 및 자료동화 효과

濟州大學校 大學院

地球海洋融合學部 地球海洋專攻

李 晟 賓

2023年 2



이학석사 학위논문

대기-해양 결합모델을 이용한 서해안  
지역 국지기상 영향 연구: 예측성능  
평가 및 자료동화 효과

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 지구해양전공

이 성 빈

2023년 2월



# 대기-해양 결합모델을 이용한 서해안 지역 국지기상 영향 연구: 예측성능 평가 및 자료동화 효과

지도교수 송 상 근

이 성 빈

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2022年 12月

이성빈의 이학 석사학위 논문을 인준함

|       |              |     |
|-------|--------------|-----|
| 심사위원장 | <u>문 재 홍</u> | (인) |
| 위 원   | <u>송 상 근</u> | (인) |
| 위 원   | <u>김 태 균</u> | (인) |

제주대학교 대학원



A study on local meteorological analysis in the west  
coastal region of Korea using a coupled  
atmosphere-ocean model: prediction performance  
evaluation and data assimilation effect

Sung-Bin Lee

(Supervised by professor Sang-Keun Song)

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

2023. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

|  |    |
|--|----|
| List of Tables .....                   | ii |
| List of Figures .....                  | iv |
| <br>                                   |    |
| 제 1 장 서론 .....                         | 1  |
| <br>                                   |    |
| 제 2 장 재료 및 방법 .....                    | 4  |
| 2.1. 대상지역, 자료 및 방법 .....               | 4  |
| 2.2. 모델 구성 .....                       | 7  |
| 2.2.1. 대기-해양 결합모델 구성 및 입력자료 .....      | 7  |
| 2.2.2. 결합모델의 자료동화 방법 .....             | 12 |
| <br>                                   |    |
| 제 3 장 결과 및 고찰 .....                    | 15 |
| 3.1. 단일모델과 결합모델의 예측성능 평가 .....         | 15 |
| 3.2. 자료동화에 따른 결합모델의 개선효과 분석 .....      | 35 |
| 3.2.1 서해안 연안지역 조위 분석 및 검증 .....        | 35 |
| 3.2.2. 기상모델 자료동화를 적용한 효과 분석 .....      | 40 |
| 3.2.3. 기상 및 해양모델 자료동화를 적용한 효과 분석 ..... | 49 |
| <br>                                   |    |
| 제 4 장 요약 및 결론 .....                    | 76 |
| 참 고 문 헌 .....                          | 78 |
| Abstract .....                         | 85 |

## List of Tables

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Table 1.</b> Details of the grids and physical options used in the coupled atmosphere-ocean model. ....  | <b>10</b> |
| <b>Table 2.</b> Statistical evaluation of sea surface temperature and meteorological variables for the observed and model-simulated values (Uncoupled and Coupled) at the monitoring sites during the study period. ....                    | <b>33</b> |
| <b>Table 3.</b> Statistical evaluation of the sea level anomaly between the observed and model-predicted values at four tidal stations for the study period. ....   | <b>39</b> |
| <b>Table 4.</b> The deviation of three meteorological variables between two model-simulated values (COAWST_WRFDA and COAWST_BASE) and observations at six monitoring sites during the study period. ....                                    | <b>45</b> |
| <b>Table 5.</b> The deviation of three meteorological variables between two model-simulated values (COAWST_DA and COAWST_BASE) and observations at six monitoring sites during the study period. . ....                                     | <b>60</b> |
| <b>Table 6.</b> Statistical evaluation of sea surface temperature and meteorological variables for the observed and model-simulated values (COAWST_BASE, COAWST_WRFDA and COAWST_DA) at the monitoring sites during the study period.. .... | <b>65</b> |

## List of Figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 1.</b> The nested model domains used in this study for coupled atmosphere-ocean model (WRF and ROMS) simulations and the geographical locations of four buoy and six tide stations for SST and six monitoring sites for meteorological variables. .... | 6  |
| <b>Fig. 2.</b> Configuration of COAWST system (U.S. Geological Survey, 2020). ....   | 7  |
| <b>Fig. 3.</b> Flow chart of WRF-ARW modeling system (ARW, 2017). ....   | 9  |
| <b>Fig. 4.</b> Time series plot of the observed and simulated sea surface temperature (SST) at several marine buoy monitoring sites for ROMS (Uncoupled) and COAWST (Coupled) during the study period (March 17-26, 2019).<br>.....                            | 17 |
| <b>Fig. 5.</b> Same as Fig. 4 except for the study period (January 16-25, 2019). ....  | 18 |
| <b>Fig. 6.</b> Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for WRF (Uncoupled) and COAWST (Coupled) during the study period (March 17-26, 2019). ....   | 22 |
| <b>Fig. 7.</b> Same as Fig. 6 except for wind speed. ....  | 23 |
| <b>Fig. 8.</b> Same as Fig. 6 except for relative humidity. ....   | 24 |
| <b>Fig. 9.</b> Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for WRF (Uncoupled) and COAWST (Coupled) during the study period (January 16-25, 2019). ....   | 25 |
| <b>Fig. 10.</b> Same as Fig. 9 except for wind speed. ....   | 26 |
| <b>Fig. 11.</b> Same as Fig. 9 except for relative humidity. ....  | 27 |
| <b>Fig. 12.</b> Time series plot of meteorological variables deviation (air temperature, mixing ratio, pressure) for the observed and model-simulated at several monitoring site for the study period (March 17-26, 2019). ....                                | 30 |
| <b>Fig. 13.</b> Same as Fig. 12 except for the study period (January 16-25, 2019). ....  | 31 |
| <b>Fig. 14.</b> Time series plot of sea level anomaly the observed and model-simulated at four tidal station for the study period (March 17-26, 2019). ....  | 38 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Fig. 15.</b> Same as Fig. 14 except for the study period (January 16-25, 2019). .....  | <b>39</b> |
| <b>Fig. 16.</b> Time series of the observed and simulated sea surface temperature (SST) at several marine buoy monitoring sites for COAWST_BASE and COAWST_DA during the study peorid (March 17-26, 2019). .....  | <b>42</b> |
| <b>Fig. 17.</b> Same as Fig. 16 except for the study period. ....   | <b>43</b> |
| <b>Fig. 18.</b> Mean differences of sea surface temperature and meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) between two simulation experiments (COAWST_WRFDA and COAWST_BASE) during the study period (March 17-26, 2019). .... | <b>47</b> |
| <b>Fig. 19.</b> Same as Fig. 18 except for the study period (January 16-25, 2019). ...  | <b>48</b> |
| <b>Fig. 20.</b> Time series of the observed and simulated sea surface temperature (SST) at several marine buoy monitoring sites for COAWST_BASE and COAWST_DA during the study period (March 17-26, 2019). ....   | <b>50</b> |
| <b>Fig. 21.</b> Same as Fig. 20 except for the study period (January 16-25, 2019). ....   | <b>51</b> |
| <b>Fig. 22.</b> Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for COAWST_BASE and COAWST_DA during the study period (March 17-26, 2019). ....  | <b>53</b> |
| <b>Fig. 23.</b> Same as Fig. 22 except for wind speed. ....   | <b>54</b> |
| <b>Fig. 24.</b> Same as Fig. 22 except for relative humidity. ....  | <b>55</b> |
| <b>Fig. 25.</b> Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for COAWST_BASE and COAWST_DA during the study period. ....  | <b>56</b> |
| <b>Fig. 26.</b> Same as Fig. 25 except for wind speed. ....   | <b>57</b> |
| <b>Fig. 27.</b> Same as Fig. 25 except for relative humidity. ....  | <b>58</b> |
| <b>Fig. 28.</b> Time series plot of meteorological variables deviation (air temperature, wind speed, pressure) for the observed and model-simulated at several monitoring site for the study period (March 17-26, 2019). ....                                     | <b>62</b> |
| <b>Fig. 29.</b> Same as Fig. 28 except for the study period (January 16-25, 2019). ....   | <b>63</b> |
| <b>Fig. 30.</b> Mean differences of sea surface temperature and meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) between two   |           |

|   |    |
|---|----|
| simulation experiments (COAWST_DA and COAWST_BASE) during the study period. ....  | 68 |
| <b>Fig. 31.</b> Same as Fig. 30 except for the study period (January 16-25, 2019). ...  | 69 |
| <b>Fig. 32.</b> Time series of the deviation of sea surface temperature (SST) and sea surface wind speed between observations and model-simulated values at four monitoring sites the study period (March 17-26). ....                                | 71 |
| <b>Fig. 33.</b> Same as Fig. 32 except for the study period (January 16-25, 2019). ....   | 72 |
| <b>Fig. 34.</b> Correlation between sea surface temperature and three meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) for observations and two simulation experiments during the study period (March 17-26, 2019). .... | 74 |
| <b>Fig. 35.</b> Same as Fig. 34 except for the study period (January 16-25, 2019). ....   | 75 |

# 1. 서론

한반도 연안해역은 지역적으로 다양한 지형적 특징이 있으며, 조석현상도 해역마다 다르게 나타나고 있다(Jung and Jeong, 2013). 서해와 같은 연안지역은 해면조건(해수면온도, 해수면높이)과 기상상태에 따라 대기와 해양 상호간의 열적 교환과 수증기 교환이 활발히 일어나 장·단기적 해안지역의 기후변화를 분석할 때 기상요소와 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST)의 연관성을 언급하였다(Han and Jeong, 1991, Park et al., 2005).

여러 인자들 중, 특히 해수면온도는 다양한 대기 및 해양 현상이 영향을 주고 받는 과정에서 열과 수증기 운동량 교환 조절에 중요한 역할을 하고(Yanai and Tomita, 1998; Deremble et al., 2012; Song et al., 2022), 해수면온도의 변화는 대기-해양 경계층 내 기상요소(기온, 습도, 바람)의 변화에도 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다(Kang and Jin, 1984). 이외에도, 대기와 해수면온도와의 관계에 대한 연구는 활발히 수행되고 있다(Ninomiya, 1974).

추가적으로, 서해는 조차가 크고 완만한 지형 경사로 인해 연안에 넓은 조간대가 잘 발달되어 있고(An et al., 2017), 조석현상에 의해 하루에 2번씩 지표가 변화하게 되어 서해안 인근지역의 기상상태에 영향을 미치기 때문에 수치모의 연구시 조간대의 면적 변화를 고려하여 수행하는 것이 중요하다(An et al., 2017, Moon and Song 2021). 이러한 대기와 해양의 연관성과 지형적 조건은 대기-해양 결합모델에서 반영하여 수치모의를 수행할 수 있다(Burls and Reason, 2008).

많은 연구자들은 모델의 수치모의 결과를 향상시키기 위해 초기 및 경계조건을 개선하여 모델에 반영하는 자료동화 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다(Lim et al., 2003; Ha et al., 2011; Choi et al., 2012; Cho et al., 2021, Han et al., 2021, 2022; Song et al., 2022). 여러 가지 자료동화 방법 중, 중규모 모델에 많이 이용되고 있는 3DVAR (Three Dimensional Variational data Assimilation), FDDA(Four Dimensional Data Assimilation)를 적용하여 개선시킨 선행연구들이 진행되었다. Lim et al. (2003)과 Ha et al. (2001)은 우리나라 지역을 대상으로

WRF-3DVAR를 이용하여 강수량 수치모의 결과가 향상되었음을 밝혔고, Choi et al, (2012) 또한 WRF-3DVAR 기법을 이용해 KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System)에 레이다 자료를 동화하여 호우 시스템 메커니즘과 누적 강수량 모의결과를 개선시켰다. 이외에도, Cho et al. (2019)는 기상모델 자료동화 효과가 PM<sub>2.5</sub> 농도 수치모의 결과에도 영향을 미치는 것을 확인하였다.

추가적으로, 해양모델 또한 자료동화를 적용하여 수치모의 개선효과를 분석한 연구들이 진행되었다(Lee et al., 2018; 2020). Lee et al, (2018)은 서해 지역에서 해양모델 ROMS (Regional Ocean Modeling System)에 4DVAR 자료동화를 적용하여 자료동화 적용에 따른 해수면온도 수치모의 결과를 비교하였고, 해수면온도를 동화하였을 때 모의가 향상되었음을 밝혔다. 또한, Lee et al, (2020)에서는 여러 자료동화 기법에 대한 비교를 진행하였고, 4DVAR 기법이 앙상블 OI (Optimal interpolation) 기법에 비해 해수면온도 편차가 감소하였음을 나타냈다.

최근 수치예보모델링에 있어서 복잡한 기상현상들을 예측하기 위해 새로운 시도들이 이루어지고 있는데, 대기, 해양, 지면과정등을 결합하여 지구시스템의 다양한 상호작용들이 고려된 수치모델링이 시도되고 있다(Laloyaux et al., 2016). 그 중 수치예측에서 대기-해양 결합모델링 연구는 예측성능을 향상시키기 위해 0대기와 해양모델을 각각 수행하여 만들어진 배경장으로 자료동화를 따로 적용하는 연구가 많이 진행되고 있다(Balmaseda and Anderson, 2009). 그러나 이 방법으로 수행 할 경우, 결합모델 초기에 결합부위에서 초기장 불균형이 일어나 수치예측에 어려움이 있을 수 있다(Smith et al., 2015). 이 현상을 최소화 하기 위해 결합모델이 생산한 배경장을 사용하여 자료동화하는 약한 결합자료동화 (Weakly coupled data assimilation)방법을 이용하면 비교적 쉽고 균형 잡힌 대기-해양 초기조건을 생산할 수 있다(Yoon et al., 2019).

앞서 언급하였듯이, 서해는 다른 해역에 비해 상대적으로 열량이 적어 보다 정확한 수치모의를 하기 위해서는 복잡한 해안선과 조석현상이 고려된 고해상도 자료가 필요하고, 대기-해양 상호작용을 고려한 결합모델 수치모의 연구가 필요하다고 할 수 있다(Lee et al., 2007). 앞선 여러 연구들에서 볼 수 있듯, 조석효과를 고려하여 기상모델을 수행한 연구들이 많이 수행되어 왔지만, 대기-해양 상호작용과 함께 조석현상까지 고려된 수치모델링 연구는 거의 진행되지 않았다. 이



에 따라, 본 연구에서는 조석현상이 반영된 대기-해양 결합모델에 의한 자료동화 기법을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 수치모의 결과들을 비교 및 분석하여 자료동화 적용이 서해 연안 국지기상에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 서해 특징 중 하나인 조석현상이 수치모델링에 반영되었는지 확인하기 위해 서해 연안 내 해수면 아노말리(Sea level anomaly)를 관측값과 비교하였고, 연구 내 실험결과의 신뢰성을 평가하기 위해 통계적 검증과 모델링 결과들을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 지역 및 자료

본 연구에서는 큰 조위차로 인한 조석현상이 강하게 일어났고 강수와 태풍이 존재하지 않았던 겨울철 및 봄철 (2019년 2월, 2019년 3월)을 대상으로, 가장 조석효과가 강하게 나타나는 음력 15일(1월 20일, 3월 21일)을 포함한 총 10일(2019년 1월 16일 ~ 25일, 2019년 3월 17일 ~ 26일)간의 기상변화를 분석하였다. 본 연구에서의 대상지역으로 선정된 서해는 유럽의 북해 연안, 아마존 습지, 캐나다 동부 연안, 미국의 동부 연안 다음 조차가 가장 큰 해역으로 알려져 있다(Choi et al., 2018). 이로 인해 넓은 갯벌이 형성되기 좋은 조건을 가지고 있어 우리나라 갯벌의 약 36.1% 정도가 경기만 일대에 분포하고 있다.

또한, 대기-해양 결합모델의 예측성능 평가 및 자료동화 효과에 따른 해양기상(해수면온도, 해수면 높이)과 주변 인근지역의 국지기상(기온, 풍속, 상대습도)의 변화를 비교하고, 해양기상의 변화가 국지기상에 미치는 영향도 함께 상세하게 분석하기 위해, 대상지역 내 존재하는 4개의 해양부이 관측지점, 6개의 기상 관측지점(AWS), 6개의 조위관측소를 선정하여 관측자료를 이용하였다(Fig. 1). 해양부이 및 조위관측 자료로는 국립해양조사원(<https://www.khoa.go.kr/>)에서 제공하고 있는 해수면온도, 해수면 높이 관측값을, 기상관측 자료로는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)에서 기상요소(기온, 풍속, 상대습도) 관측값을 제공한다. 국립해양조사원에서는 1차 QC (Quality Control) 자동 분류 작업을 통해서 관측값의 정상 여부를 판단하여 제공하고, 기상자료는 품질검사 플래그(QC FLAG)작업을 통해 기온, 풍속, 상대습도, 기압 등의 시간/분 관측값의 제공 여부를 실시하여 배포하고 있다.

해양부이 관측지점은 인천의 덕적도(DJ), 인천항(IC), 충남의 태안항(TA), 경기도 평택당진항(PT) 4곳이고, 기상 관측지점은 인천의 영종도(YJ), 경기도의 시흥(SH), 안산(AS), 화성(HS), 그리고 충남의 당진(DJ), 대산(DS) 총 6개 지점이다. 마찬가지로, 조위관측소 또한 인천의 경인항(GI), 영흥도(YH), 덕적도(DJ), 경기도의 안산(AS), 그리고 충남의 태안항(TA)과 대산(DS) 6개의 지점을 선정하였다.

대기-해양 결합모델 수행시 조석현상이 잘 반영되었는지 확인하기 위해 조차가 크게 나타난 GI, YH, AS 3개의 지점을 대상으로 조위 관측값과 모델값을 비교하였고, 해수면온도 변화에 따른 해상기상의 변화를 비교·분석 하기 위해 DJ, TA, TP 해양부이 지점의 해수면온도 자료와 가장 인접해 있는 조위관측소 지점(DJ, TA, DS)의 해상기상관측 자료(해상풍, 기압)를 이용하여 해수면온도가 기상장에 미치는 영향을 파악하였다. 분석 시 시간별 대기 해양 간 상호작용 반영에 따른 수치모의 차이를 확인하기 위해 대기-해양 상호작용이 반영된 결합모델과 반영되지 않은 실험 간 수치모의 결과를 비교하였고, 더불어 결합모델에 자료동화를 적용한 실험과 적용하지 않은 실험으로 나눠 초기장이 개선된 자료동화 기법의 효과를 분석하였다. 본 연구에서 사용되었던 모델 옵션들은 2.2 절에서 설명하였고, 또한 수치모의 결과들을 검증하기 위해, 연구대상 지점(4개의 해양부이, 6개의 AWS, 조위관측소)을 대상으로 해면조건(해수면높이, 해수면온도) 및 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)의 관측값과 모델값간의 통계적 분석을 실시하였다. 통계적 분석으로는 해면조건의 경우 관측값과 모델값에 대해 RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error), COR (Correlation)을 수행하였으며, 기상요소는 COR을 제외하고 IOA (Index Of Agreement)들을 통해 검증하였다.

$$IOA = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (1)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{n} \quad (4)$$

여기서 시간별 모델값과 관측값 및 관측값의 평균을 나타내는  $M_i$ ,  $O_i$ ,  $\bar{O}$ 과 자료의 개수를 의미하는 N을 통해 계산된다. IOA와 COR은 0~1 사이의 값을 가지고

1에 가까울수록 관측값과 일치도가 높음을 의미하며, RMSE와 MBE는 0에 가까울수록 오차가 작음을 나타내며, MBE를 통해 과대모의, 과소모의를 파악한다.

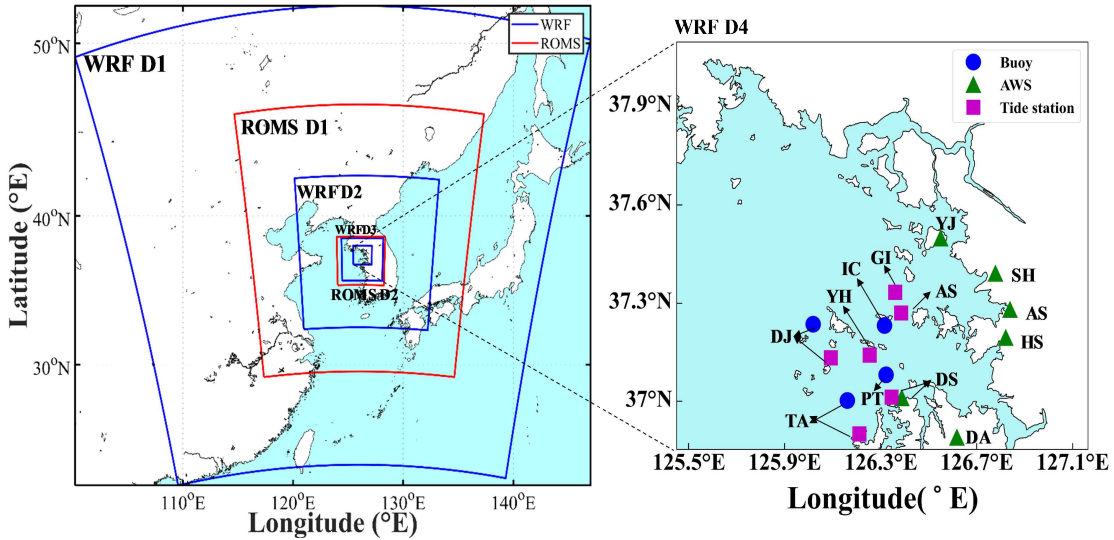


Fig. 1. The nested model domains used in this study for coupled atmosphere-ocean model (WRF and ROMS) simulations and the geographical locations of four buoy and six tide stations for SST and six monitoring sites for meteorological variables.

## 2.2. 모델 구성

### 2.2.1. 대기-해양 결합모델 구성 및 입력자료

본 연구에서는 서해 지역에서 조석현상이 반영되고 대기 해양 상호작용에 따른 수치모의 예측성능 평가를 살펴보았다. 또한, 보다 향상된 수치예측을 위해 상호작용이 반영된 결합모델에 초기장이 개선된 입력자료를 적용하였다.

본 연구에서 사용된 결합모델은 Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) 결합모델로, WRF 기상모델과 ROMS 해양모델, SWAN (Simulating waves nearshore) 파랑모델, CSTM (Community Sediment Transport Model) 모델로 구성된다. 결합모델 내 모델 간 결합 시 MCT (Model coupling toolkit) 커플러를 이용하여 각 모델들의 요소들을 교환하는데 사용되고 있다(Warner et al., 2010). COAWST 결합모델의 경우 주로 연안환경에서의 수치모의 연구에 많이 활용되고 있으며(Kumar et al., 2012; Olabarrieta, 2012; Liu et al., 2011), 여러 모델들을 선택하여 결합할 수 있다는 장점이 있고, 현 연구에서는 WRF 기상모델과 ROMS 해양모델만 결합하여 연구에 사용되었다(Fig. 2.) 결합 시 MCT 커플러를 통해 WRF 모델로부터 10 m 지표 위 바람성분(u, v 성분), 기온, 구름, 강수, 단파, 장파 복사, 상대습도, 기압 요소들의 값을 ROMS 모델로 전달하고, ROMS 모델에서는 해수면온도를 WRF 모델에 전달하여 상호교환하며 모델이 수행된다 (Warner et al., 2010).

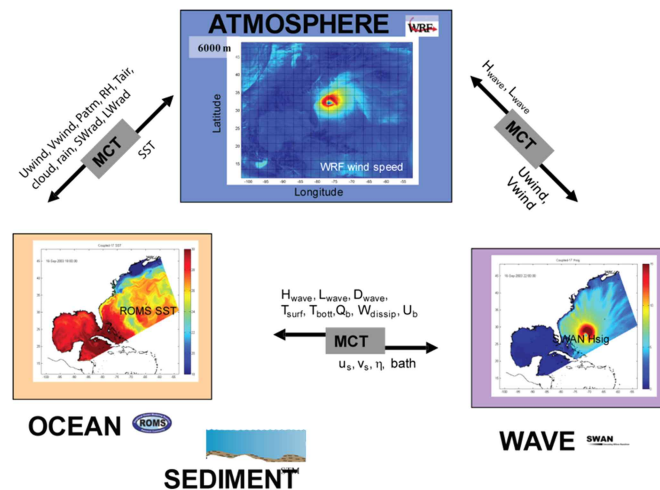


Fig. 2. Configuration of COAWST system (U.S. Geological Survey, 2020).

COAWST 결합모델에 사용된 기상모델은 중규모 기상모델 WRF-ARW (Weather Reserch & Forecasting model - Advanced Research WRF) 3.8 version 을 사용하였다(Skamarock et al., 2008). WRF 모델의 경우 NCAR (National center for Atmospheric Research) 미국 국립 기상연구소와 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 국립환경예측센터에서 공동으로 개발되어 기상 관련 연구 뿐만 아니라 현업예보에도 이용될 수 있게 설계되었다. 이 모델의 경우 NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) 코어와 ARW 코어 두 가지로 구분되며, NMM 코어는 미국에서의 기상예측에 적절하여 미국 내 현업용으로 사용되고 있고, ARW 코어는 NCAR에서 연구 및 개발용으로 개발되어 다방면에서 이용할 수 있다(Bernardet et al., 2009). 이러한 WRF 모델은 Arakawa-C 수평 격자체계와 연직 격자체계로 Eulerian 질량 좌표계 (mass-based terrain following coordinate)를 사용하여 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 모형으로 이루어져 있으며(Skamarock et al., 2008), Fig. 3을 통해 WRF 모델링의 전반적인 흐름을 확인할 수 있다.

WRF 모델링 시스템은 WPS (WRF Preprocessing System) 전처리 과정과 모델 수행단계로 구분된다. WPS는 GEOGRID, UNGRIB, METGRID 3단계로 구성되어 GEOGRID에서 모델 영역 설정 및 토지피복, 지형의 경계자료를 생성하고, UNGRIB 단계에서 전지구 기상자료(GFS, FNL)들을 이용하여 등기압면 기상자료를 생성하게 된다. 마지막으로, METGRID를 통해 GEOGRID의 지형자료와 UNGRIB의 기상자료를 내삽하여 WRF 모델의 초기 및 경계자료를 생성한다. 생성된 자료는 WRF 모델의 수행단계에 입력자료로 이용되어 REAL 단계를 통해 최종 모델의 초기 및 경계 조건의 입력장이 생성되어 마지막으로 WRF 모델을 수행하게 된다. WRF 모델은 netCDF 파일로 산출되며, 여러 프로그램(MATLAB, Python, RIP, R) 등을 통해 가시화가 가능하다.

모델을 수행하기 위해 초기 및 경계자료로 NCEP에서 제공하고 있는 GDAS/FNL (Global Data Assimilation System)  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 수평 해상도 및 6 시간 간격 자료를 사용하였다. 모델의 지형고도는 GMTED 2010 (Global Multi-resolution Terration Elevation Data) 30초 자료를 이용하였고, 지표면 토지 피복자료로는 21개의 유형을 가진 MODIS\_IGBP (Moderate resolution imaging

spectroradiometer\_international geosphere-biosphere programme)의 landuse 30 초를 적용하여 결과를 산출하였다. 본 연구에서 결합모델을 수행하기 위해 WRF 기상모델 수치모의 영역으로 Fig. 2와 같이 총 4개의 도메인 영역을 순서대로 27 km, 9 km, 3 km, 1 km로 설정하였으며, 모델의 외부 및 내부 영역을 양방향 상호 등지 격자체계(Two-way interacting nested grid system)를 적용하였고, 상호 간의 피드백(Feedback) 되도록 구성하였다.

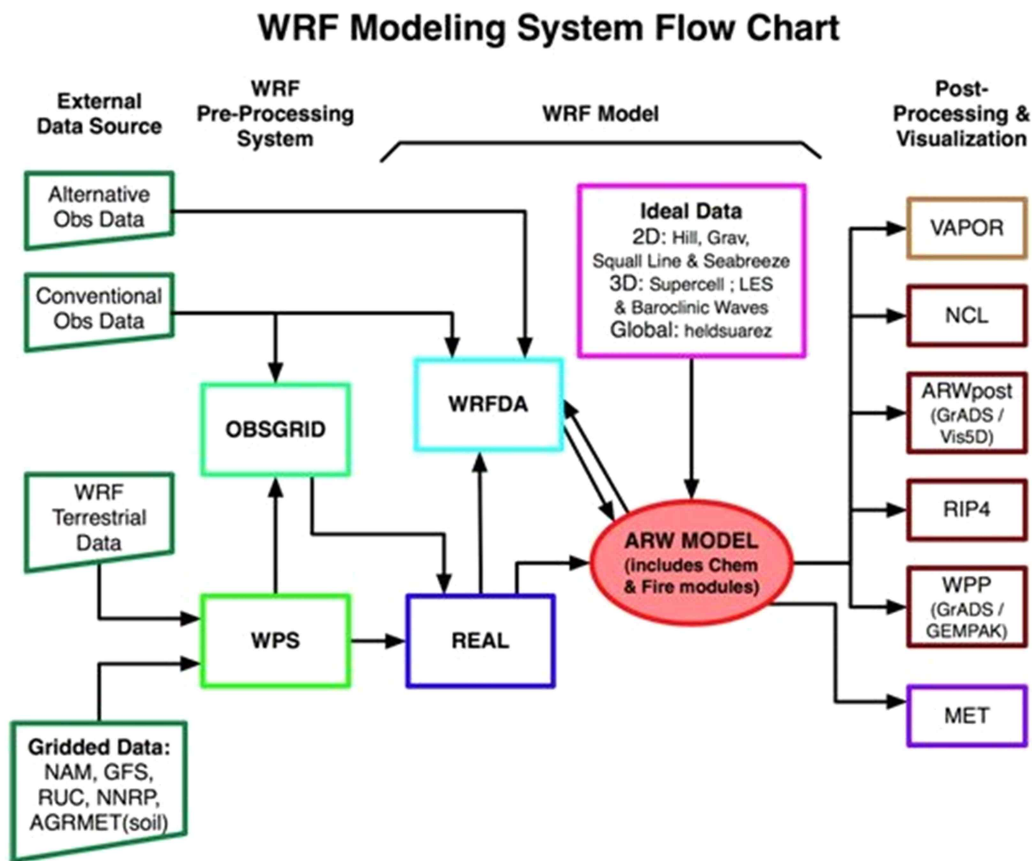


Fig. 3. Flow chart of WRF-ARW modeling system (ARW, 2017).



연구에 사용되었던 WRF 기상모델에 대한 세부적인 물리 옵션들은 Table 1에 제시하였는데, 먼저 미세물리과정(Microphysics)의 경우 D1에서는 WSM3 (WRF Single-Moment 3-class, Hong et al., 2004), 나머지 도메인(D2~D4)에서는 WDM6 (WRF Double-Moment 6-class, Lim et al., 2010)을 적용하였고, 장파 및 단파복사의 모수화는 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model, Mlawer et al., 1997)과 Dudhia (Dudhia, 1989)를 이용하였다. 마지막으로 대기 경계층을 모수화하기 위해 YSU (Yonsei University, Hong et al., 2006)로 구성하여 수행하였다.

Table 1. Details of the grids and physical options used in the coupled atmosphere-ocean model

[A] WRF

| Domains                    | Domain 1  | Domain 2                                | Domain 3 | Domain 4 |
|----------------------------|---|---|----------|----------|
| Horizontal grid            | 120x120   | 120x117                                 | 102x108  | 135x147  |
| Horizontal resolution (km) | 27 km   | 9 km                                    | 3 km     | 1 km     |
| Vertical layers            | 30 layers   |   |          |          |
| Microphysics               | WSM 3<br>(Hong et al., 2004)                                | WDM 6 for D2-D4<br>(Lim and Hong, 2010) |          |          |
| Short wave radiation       | Dudhia (Dudhia, 1989)                                       |   |          |          |
| Long wave radiation        | Rapid radiative transfer model (RRTM) (Mlawer et al., 1997) |   |          |          |
| Planetary Boundary layer   | YSU (Hong and Pan, 1996)                                    |   |          |          |
| Land surface               | Noah Land Surface Model (NLSM) (Dudhia, 1996)               |   |          |          |
| Meteorological data        | NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Analyses and Forecast data |   |          |          |

[B] ROMS

| Domains                          | Domain 1                                     | Domain 2 |
|----------------------------------|--|----------|
| Horizontal grid                  | 186x206                                      | 123x114  |
| Horizontal resolution (km)       | 9 km   | 3 km     |
| Vertical layers                  | 20 layers                                    |          |
| Vertical mixing Parameterization | Generic Length-Scale mixing                  |          |
| Initial condition of model       | Global Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) |          |
| Tidal data                       | TPXO 7                                       |          |



결합모델에서 해양 요소들을 고려하기 위해 사용된 해양 순환 모델로 연안과 대양을 재현하는 연구에 자주 사용되는 ROMS (Regional Ocean Modeling System)를 이용하였다. ROMS 모델은 물질의 수송 및 해수 유동 등의 수치모의 연구에서 많이 사용되고 있고 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식에 유체간 질량과 압력이 균형을 이루는 정역학평형 근사와 부시네스크(Boussinesq) 근사를 이용한 원시 방정식을 사용한다(Moore et al., 2011). ROMS는 격자의 중심에서 해양요소(수온, 밀도, 염분, 수심 등)들을 계산하는 Arakawa-C 수평 격자체계를 이용하여 지형을 표현하고(Arakawa and Lamb 1977), S-coordinate (Stretched terrain-following coordinate) 연직 격자체계를 사용하여 수온약층이나 바닥경계층 등의 변화 현상을 파악하기 쉽다(Shchepetkin and McWilliams, 2005).

앞선 기상모델과 마찬가지로, COAWST 결합모델에 사용된 ROMS 해양모델의 도메인 설정 또한 기상모델 보다 상대적으로 작게 9km, 3km 2개의 도메인 영역으로 구성하였고(Fig. 2), 모델의 초기 및 경계조건으로는 전 지구적 해양 예측장 이면서 1/12°의 수평 해상도를 가지는 HYCOM (Global Hybrid Coordinate Ocean Model) 분석장 자료를 이용하였다. 지형자료는 GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean), 모델에 조석효과를 반영하기 위해 인공위성 관측을 기반으로 한 TPXO (TOPEX/POSEIDON) 7 자료를 이용하였으며(Egbert and Erofeeva, 2002), 복잡한 서해연안에서 모델을 수행되는 동안 해양 모델의 안정화를 위해 최소 수심을 1.0m로 설정하였고, 대기 외력장의 경우 기상모델과의 결합을 통해서 받은 기상변수로 사용되었다. 본 연구에서는 총 10개의 분조 (M2, S2, N2, K2, O1, P1, Q1, Mm, Mf)를 이용하였으며, 마찬가지로 연구에서 사용된 해양모델의 상세한 물리 옵션 또한 기상모델과 함께 Table 1에 제시하였다.

## 2.2.2. 결합모델의 자료동화 방법

수치 모델은 초기장과 지표 및 경계조건에 따라 수치 모의 값이 달라지기 때문에 보다 정확한 수치모의 결과를 얻기 위해서는 초기 조건의 개선이 중요하다. 현재 수치모델 현업기관들은 모델 예보장과 관측 자료를 통계적으로 결합하여 초기장을 생성하고, 기상 및 해양모델의 수치모의 결과를 향상시키는 연구들이 많이 수행하고 있다(Desroziers and Ivanov, 2001). 이러한 방법을 자료동화라고 하며, 정확한 대기 및 해양의 조건을 얻기 위해 여러 정보들을 이용한다(Talagrand, 1997). 관측값만 사용하여 모델의 초기장을 생성할 경우 정확성이 낮은 관측자료들로 인해 개선된 초기장을 만들 수 없기 때문에, 모델의 예보장과 관측자료를 함께 결합하여 초기장을 생성하고 있다. 관측자료와 모델 배경장 결합시 통계적 방법을 통해 서로 간의 오차 정보를 계산하여 최상의 값을 생성한다(Talagrand, 1997).

본 연구에서 사용된 WRF 자료동화 기법으로는 NCAR/UCAR (National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research)에서 개발한 WRFDA 자료동화 기법 중 3차원 변분자료동화 3DVAR를 적용하여 초기장을 개선하였다(Routray et al., 2010). WRFDA 시스템 흐름은 Fig 4와 같으며, 레이더, GPS 등과 같은 다양한 관측자료를 동화할 수 있다. WRF REAL 작업으로 생성된 초기조건들과 OBSPROC (관측자료와의 오차), Background Error (배경오차 공분산)들을 통해 자료동화한다. OBSPROC은 LITTLE\_R 포맷의 형태로, 필요하지 않은 관측은 제거하고 관측 오차를 할당해 WRFDA에서 사용할 수 있는 관측 자료 형태로 만들게 된다. OBSPROC을 생성하기 위해 연구 사례일(2019년 3월 17일)에 PREPBUFR 포맷 형태의 ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations 자료를 LITTLE\_R 형태로 변환하여 사용하였다. 배경오차는 모델이 가지는 오차를 의미하고, NMC (National Meteorological Center) 방법으로 배경오차 공분산을 생성한다(Parrish and Derber, 1992).

추가적으로 연구에 사용된 해양모델 ROMS의 자료동화 기법으로는 Courtier et al. (1994)가 제안했던 4차원 변분자료동화(ROMS-4DVAR) 기법을 적용하여 해양모델 초기장을 개선하였다(Moore et al., 2011). 4DVAR는 오차 공분산을 발전

시키고 제약을 가하기 위해 물리 모수화를 사용하여 모델의 시간에 따른 의존적 역학을 이용하고, 적절한 오차가 있는 정확한 관측 시간의 관측값을 수집한다 (Janekovic et al., 2013). 관측 값과 모델 값 간의 비용함수(cost function)를 최소화하여 분석하는 3DVAR와는 달리, 4DVAR는 시간 간격 내에 존재하는 관측값들도 고려하여 계산하기 때문에 시간의 연속성까지도 고려할 수 있고, 역학모델로 상태 변수들 간의 제약을 주기 때문에 수치모의 정확도가 개선된다고 알려져 있다(Edward et al., 2015).

결합모델의 수치모의 정확도 향상을 위해, 본 연구에서는 대기-해양 결합모델을 수행한 결과로 생성된 배경장을 이용하여 기상모델 및 해양모델의 초기장을 각각 자료동화한 약한 결합자료동화를 수행하였다. 대부분의 연구에서는, 기상모델과 해양모델을 각각 자료동화하여 생성된 초기장을 사용하는 비 결합 자료동화를 수행하지만(Yoon et al., 2019), 이러한 방법은 결합모델을 수행하는 과정에서 발생하는 모델간의 초기장 결합부위에 초기 조건 불균형 현상이 일어나게 되고, 결합모델에서의 물리과정 차이로 initialization shock가 올 수 있다(Smith et al., 2015). 완벽하게 균형을 이룬 대기 및 해양 조건을 만들기에는 한계가 존재하지만, 이를 최소화 하기 위해 결합모델이 생성한 초기장을 이용하여 대기 및 해양 자료동화를 수행하는 약한 결합자료동화 기법을 본 연구에서는 이용하였다.

### 2.3. 연구 방법 및 실험설계

한반도 서해와 같은 수심이 얇고 복잡한 지형을 가진 연안지역은 해수면온도 변동성이 심해 국지순환계에 영향을 미치게 된다. Burls and Reason, 2008에서는 시·공간적으로 빠르게 변하는 해수면 온도를 적용하였을 때 저층의 바람과 열플럭스 모의 향상에 큰 영향을 미쳤고, 해수면 온도자료의 정확성을 요구함과 동시에 대기-해양 결합모델의 필요성을 언급하였다. Heo et al., 2010는 안개 종류 별(이류안개, 증기안개) 사례일을 선정하여 결합모델과 결합하지 않은 단일모델 실험에 따른 안개 형성에 영향을 미치는 요소(해수면온도, 기온, 풍속, 습도, 현·잠열 플럭스, 해기차 등)들을 비교·분석 한 결과, 결합모델 실험에서 안개들의 형성과 소멸의 단계를 더 명확하게 모의됨을 밝혔다.

이에 따라, 본 연구에서는 시간별로 반영된 대기-해양 상호작용이 인근 국지기상에 미치는 영향을 살펴보기 위해 상호작용이 반영되는 결합모델 실험(COAWST)와 반영되지 않은 단일모델 실험(WRF, ROMS)으로 구분하여 해수면온도와 기상요소(기온, 풍속, 상대습도) 수치모의 결과들을 비교하였다. 또한, 결합모델의 수치모의를 향상시키기 위해 자료동화 기법을 적용하여 수치모의 개선을 실시하였다. 이에 따라 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_DA)과 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE), 기상모델만 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_WRFDA) 간의 분석도 실시하여 각 자료동화 효과가 수치모의 결과를 비교 및 분석하였고, 인근 국지기상에 미치는 영향도 함께 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 단일모델과 결합모델의 예측성능 평가

본 연구에서는 대기-해양 상호작용이 반영되는 결합모델의 예측성능 평가를 위하여 먼저 대상지역(서해안) 내 SST 관측값과 모델값을 서로 비교분석하였다(Fig. 4와 Fig. 5). 2장에서 언급한 바와 같이, 분석에 이용된 사례일은 조석현상이 상대적으로 강하게 일어났던 봄철(2019년 3월 17일~ 2019년 3월 26일) 및 겨울철(2019년 1월 16일~ 2019년 1월 25일) 두 사례이다. 또한, 연구지점 내 해수면온도 관측값이 존재하는 해양부이 4개지점(덕적도(DJ), 태안항(TA), 평택당진항(PT), 인천항(IC))을 대상으로 결합하지 않은 기상모델 WRF와 해양모델 ROMS를 각각 수행하여 결합모델(COAWST)과 단일 해양모델(ROMS)의 해수면온도와 결합모델과 단일 기상모델(WRF)의 기상요소 수치모의 결과들을 관측값과 비교하였고, 단일모델(Uncoupled)과 결합모델(Coupled) 간 예측성능을 평가하였다.

봄철 사례에 대한 SST 비교 결과(Fig. 4), DJ지점과 TA지점에서 Coupled 실험이 Uncoupled 실험보다 관측값에 더 뚜렷하게 유사한 수치모의 결과(평균 약  $0.55^{\circ}\text{C}$ ,  $0.07^{\circ}\text{C}$ )가 나타났으며, 나머지 지점(PT, IC)에서는 PT와 IC지점 모두 모든 시간대에서 Uncoupled가 관측값에 더 가까운 모의결과(평균 약  $0.78^{\circ}\text{C}$ ,  $0.80^{\circ}\text{C}$ )를 나타내 다른 결과를 보였다. 이 원인으로는 상대적으로 PT, IC 지점이 DJ, TA 지점보다 인접한 지리적 지형(만, 갯, 섬)들이 존재하여 결합모델 수행과정에서 대기-해양 상호작용의 흐름을 모의하는데 어려움이 있었던 것으로 사료되며, 실질적인 대기와 해양의 교환과정을 보완하여 이를 반영해서 결합모델을 수행해야 할 것으로 판단된다.

겨울철에 대한 수치모의 결과를 보면(Fig. 5), 전반적으로 결합모델(COAWST)이 결합하지 않은 모델(ROMS)에 비해 관측값에 더 가까운 수치모의 결과가 나타났다. 지점별로 하나씩 분석해보면, DJ 지점에서는 관측값과 모델값들(Uncoupled, Coupled)의 차이가 평균  $2.24^{\circ}\text{C}$ ,  $2.01^{\circ}\text{C}$ 의 차이를 나타내 Coupled에서 수치모의가 향상되었으며, 특히 모델 초반부(1월 17일~19일)에서 시간순서대로 약  $0.87^{\circ}\text{C}$ ,  $0.81^{\circ}\text{C}$ ,  $0.32^{\circ}\text{C}$  정도로 뚜렷하게 향상된 모습을 보였다. TA지점과

PT지점에서는, 모든 시간대에서 Coupled가 Uncoupled에 비해 관측값에 더 가깝게 모의된 것을 뚜렷하게 확인할 수 있었고, TA지점은 평균 약 1.7℃, PT지점은 1.18℃ 보다 작은 차이를 나타내 Coupled 수치모의 결과가 더 향상된 모의결과를 나타냈다. 반면, IC지점에서는 상대적으로 Coupled에서 최저수온(평균 약 0.6℃)을 더 모의하지 못하였고, Uncoupled가 Coupled에 비해 평균 약 0.4℃ 향상된 수치모의 결과를 나타내 앞선 3개의 지점과 다른 결과를 보였다.

[A] Spring

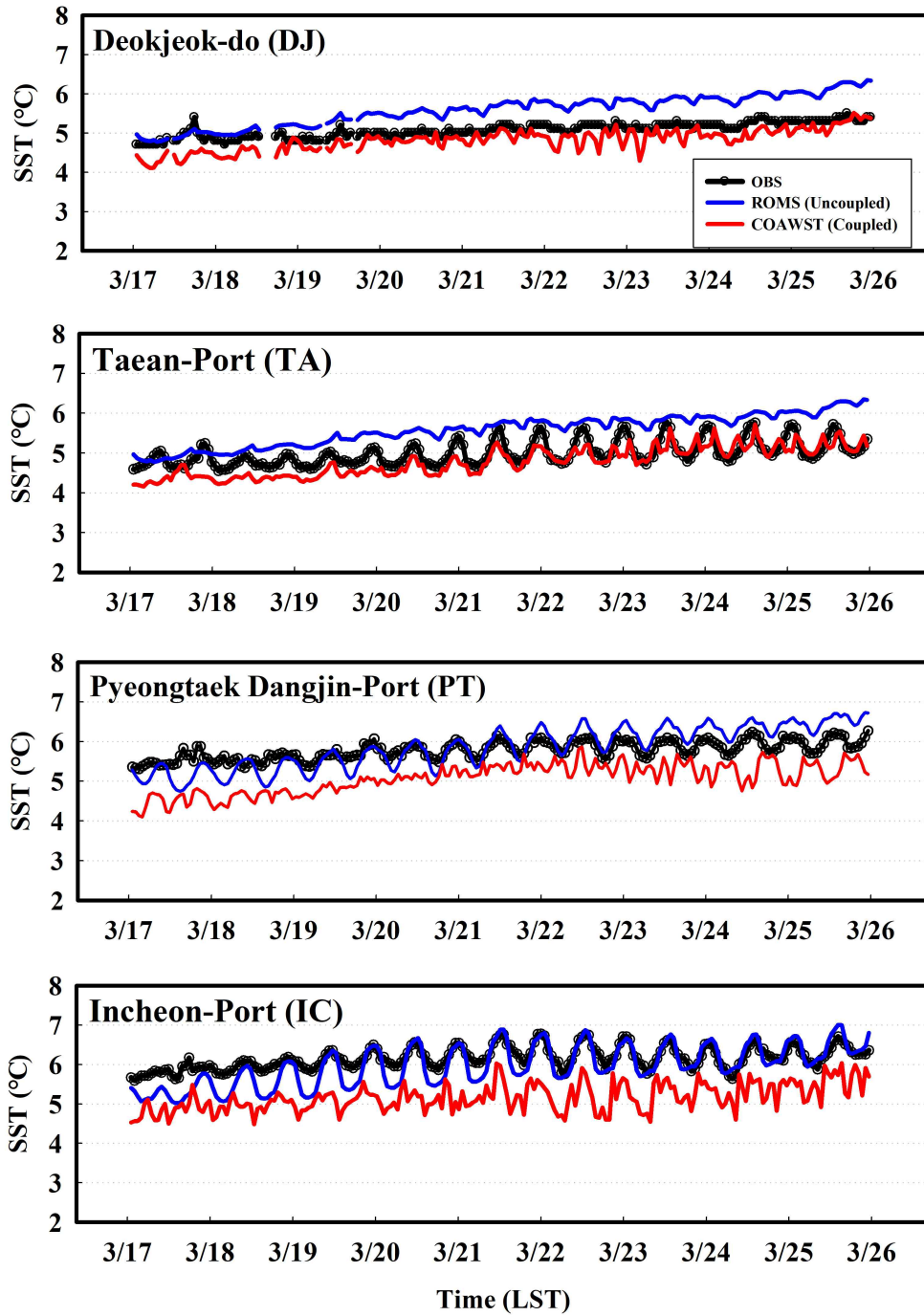


Fig. 4. Time series of the observed and simulated sea surface temperature (SST) at several marine buoy monitoring sites for ROMS (Uncoupled) and COAWST (coupled) during the study period (March, 17-26, 2019).



[B] Winter

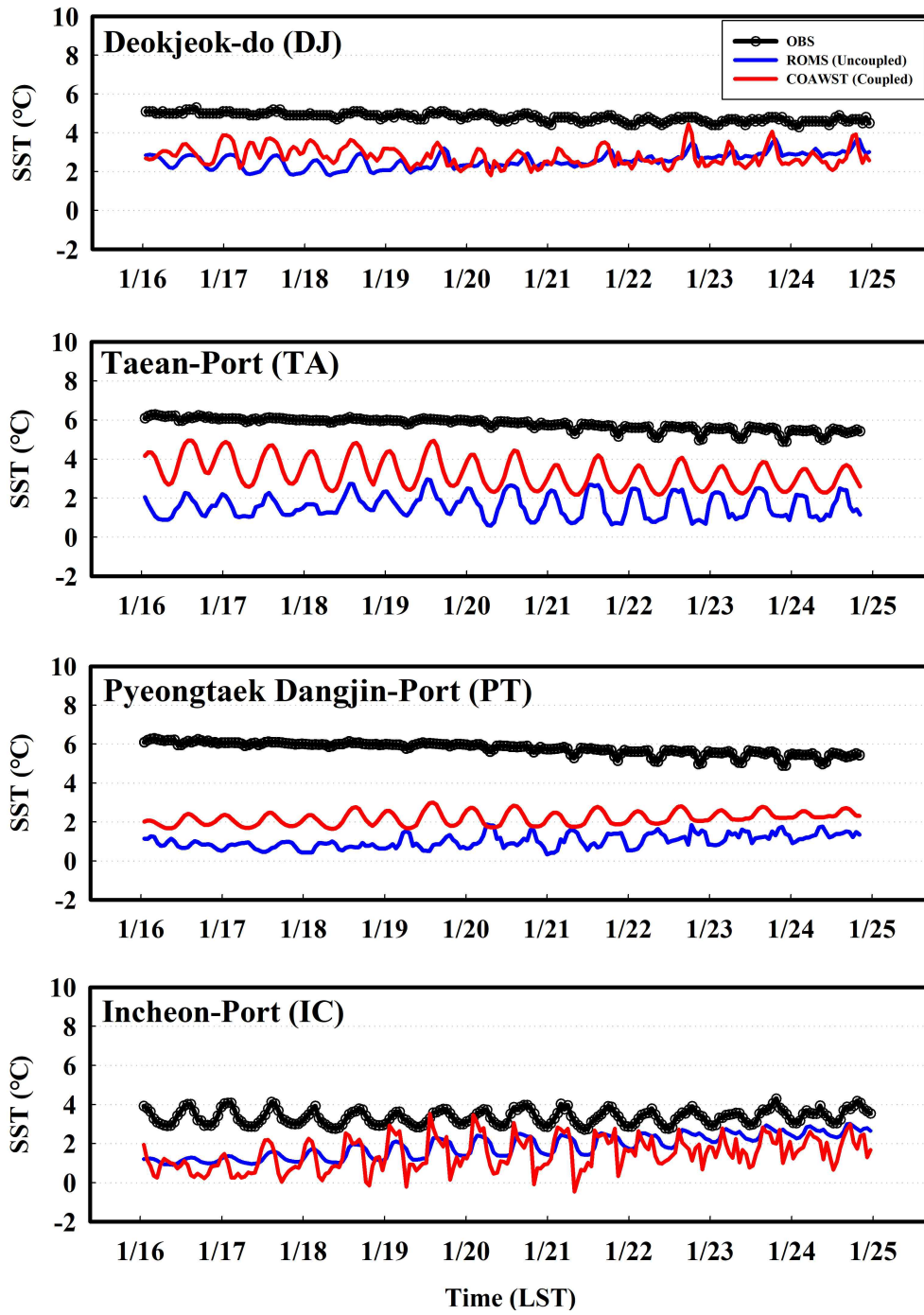


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for the study period (January 16-25, 2019).



대기-해양 결합모델은 모델 수행시 해수면온도 변화에 따른 대기 해양 간 상호 작용이 시간별로 반영된다. 이러한 해수면온도의 변화는 주변 연안지역의 기상장에 큰 영향을 미치게 된다. 앞에서 언급하였듯이 여러 선행연구들에서 관련된 연구들이 많이 진행되었는데, 해양과 인접한 연안지역은 해면조건(해수면온도, 해수면높이)과 기상상태에 따라 대기와 해양의 상호교환(대기와 해양의 열 플럭스 교환 및 수증기 플럭스 교환)이 활발이 일어나기 때문에, 연안지역의 기후변화에 큰 영향을 미치고 연안지역 연구 시 이를 반드시 고려해야 한다고 언급하고 있다(Han and Jeong, 1991; Jung and Jeong, 2013). 이에 따라, Fig. 6~11은 대기-해양 결합모델의 해수면온도 변화에 따른 주변 국지기상의 변화를 파악하기 위해 연구기간 동안 연구대상 지점 내 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)관측값 중 관측값이 모두 존재하는 6개의 AWS 지점(영종도(YJ), 안산(AS), 화성(HS), 시흥(SH), 대산(DS), 당진(DJ))을 선정하여 기상자료를 이용하였고, 기상 단일모델과 결합모델(WRF(Uncoupled), COAWST(Coupled)) 실험으로 나눠 해당 지점에서의 결합의 효과에 따른 국지기상의 모델 예측성능 및 영향을 함께 분석하였다.

먼저 봄철 기온에 대해 살펴보면(Fig. 6), 모든 지점에서 대부분 시간대에 관측값의 최고값을 Uncoupled에서 더 가깝게 모의하여 반대되는 경향을 보였으며, 이외에도, YJ, SH, HS 지점에서는 Uncoupled가 Coupled에 비해 관측값과 더 작은 차이가 나타났지만(평균 약 0.4°C, 0.16°C, 1.03°C), 나머지 지점(AS, DS, DJ)에서는 Coupled 수치모의 결과가 더 향상된 수치모의 결과를 보여(평균 약 0.47°C, 0.11°C, 0.01°C) 지점마다 향상된 실험이 다르게 나타났다. 추가적으로 겨울철의 기온의 경우(Fig. 9), 대부분 지점에서 Coupled 실험결과가 Uncoupled 실험결과에 비해 관측값에 더 가깝게 모의되었다. YJ 지점에서는 Uncoupled보다 Coupled에서 모든 시간 평균 대비 약 1.1°C 향상되었으며, 특히, 1월 22일 17시 시간에서 Coupled가 Uncoupled에 비해 가장 크게 개선된 모습을 보였다(평균 약 2.16°C). 또한 특정 시간대(1월 17일, 1월 23일 오전)를 제외하고, 상대적으로 Coupled 모의 결과가 관측값의 최고값과 최저값들을 잘 모의하는 경향을 보였다. AS 지점은 YJ 지점보다 Coupled에서 관측값의 최고값에서 더 떨어진 모의 결과가 나타났지만(평균 약 1.2°C), 최저값은 Uncoupled보다 더 향상된 수치모의 결과를 보였으며(평균 약 0.91°C), 그 중 1월23일 01시 시간에 평균 약 2.24°C정도

로 가장 뚜렷하게 향상되었다. 이외에도, SH 지점 또한 AS 지점과 유사한 수치모의 결과가 나타났고, 마지막으로 DS 지점과 DJ 지점에서는 다른 지점들보다 Coupled가 관측값에 가깝게 모의되어 나타난 것을 뚜렷하게 확인할 수 있었으며, 특히 DS 지점에서 평균 약 1.5°C까지 향상되어 가장 크게 향상된 수치모의 결과를 보였다. 반면, HS 지점에서는 Uncoupled가 대부분 시간대에서 더 향상된 수치모의 결과를 나타내(평균 약 1.56°C) 앞선 지점들과 다른 결과가 나타났다.

추가적으로 봄철 풍속을 살펴보았을 때(Fig. 7), 모든지점에서 Uncoupled, Coupled 모두 관측값에 과대모의하는 경향을 보였고, YJ, AS, DJ 지점에서 3/21 일 시간대에 두 실험 모두 관측값에 크게 과대모의 하는 경향을 뚜렷하게 나타냈다. 추가적으로, 두 실험 간 예측성능을 평가하였을 때, 모든 지점에서 Coupled에서 관측값에 더 향상되었다(평균 약 0.25m/s). 겨울철 풍속의 경우(Fig. 10), 앞선 기온에서의 수치모의 결과보다 Coupled와 Uncoupled 모두 SH 제외한 나머지 지점들에서 전반적으로 관측값에 과대모의하는 경향을 보였다. 특히, 대부분 지점들이 1월 21일 오후 시간대에서(11시~13시) 관측값에 비해 크게 과대모의하여 수치모의 결과가 나타났다. 한편 두 실험(Coupled, Uncoupled)간 수치모의 예측성능을 비교하였을 때는, 대부분 지점에서 Coupled가 Uncoupled에 비해 관측값에 미세하게 더 가까운 수치모의 결과가 나타났다. YJ와 AS 지점에서는 평균 약 0.19, 0.25m/s, HS 지점과 DS 지점은 0.29, 1.37m/s, 마지막으로 DJ 지점에선 0.32m/s 향상되었고, 지점들 중 DS 지점이 가장 향상된 모습을 보였지만, SH 지점에선 Uncoupled가 0.06m/s 관측값과 더 작은 편차를 나타내 기온의 결과처럼 앞의 지점들과 상반된 결과를 확인할 수 있었다.

마지막으로 봄철 및 겨울철 상대습도에서는(Fig. 8, Fig. 11), 모든 지점에서 모든 지점에서 Coupled, Uncoupled 수치모의 결과가 관측값의 최저값들을 잘 모의하지 못하는 경향을 알 수 있었으며, 또한 AS, DJ 지점들을 제외한 나머지 4개의 지점(YJ, SH, HS, DS)에서 Uncoupled에서 더 관측값과의 평균 편차가 감소한 수치결과를 보여(2.46%, 3.87%, 4.63%, 6.38%) 기온과 풍속에 비해 상대습도에서는 단일모델이 결합모델 수치모의 결과보다 더 향상된 지점들이 상대적으로 더 많았다.

결론적으로, 봄철과 겨울철 모두 상대습도는 단일모델 수치모의 결과가 결합모

델에 비해 관측값에 향상되었지만, 기온과 풍속은 결합모델이 대부분 지점에서 관측값과의 평균 편차가 더 작게 나타났다. 특히 풍속의 경우, 봄철 SH 지점을 제외한 봄철 겨울철 모두 6개의 연구지점에서 결합모델이 더 향상된 모의결과를 확인할 수 있었으며, 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)들 중 풍속이 Coupled 실험에서 가장 향상된 결과를 보였다. 추가적으로, 해수면온도와 함께 분석하였을 때, 대부분 지점에서 모든 시간대에 Coupled가 향상됨에 따라 기온과 풍속 또한 향상되었음을 통해, 결합모델이 대기-해양 상호교환이 이루어져 수치모의에 영향을 준 것으로 사료되나, 상대습도는 다른 요소들에 비해 상대적으로 대기-해양 간 수증기 교환에 더 민감한 반응을 보이기 때문에 결합모델 수행시 이와 관련된 과정들을 계산하는 과정에서 좀 더 자세하게 보완하여 결합모델에 반영하고, 수행할 필요가 있음을 확인하였다.

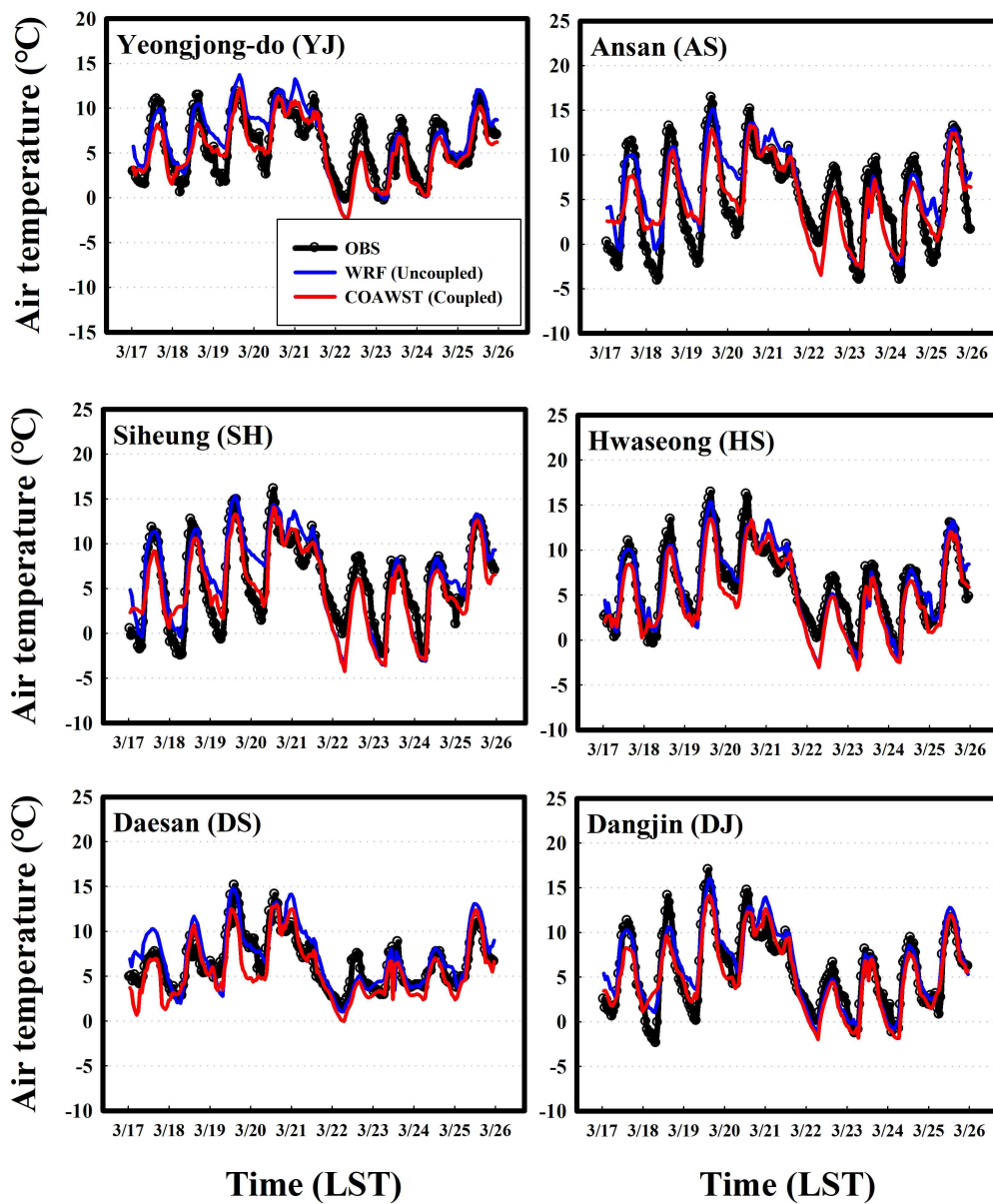


Fig. 6. Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for WRF (Uncoupled) and COAWST (Coupled) during the study period (March 17-26, 2019).

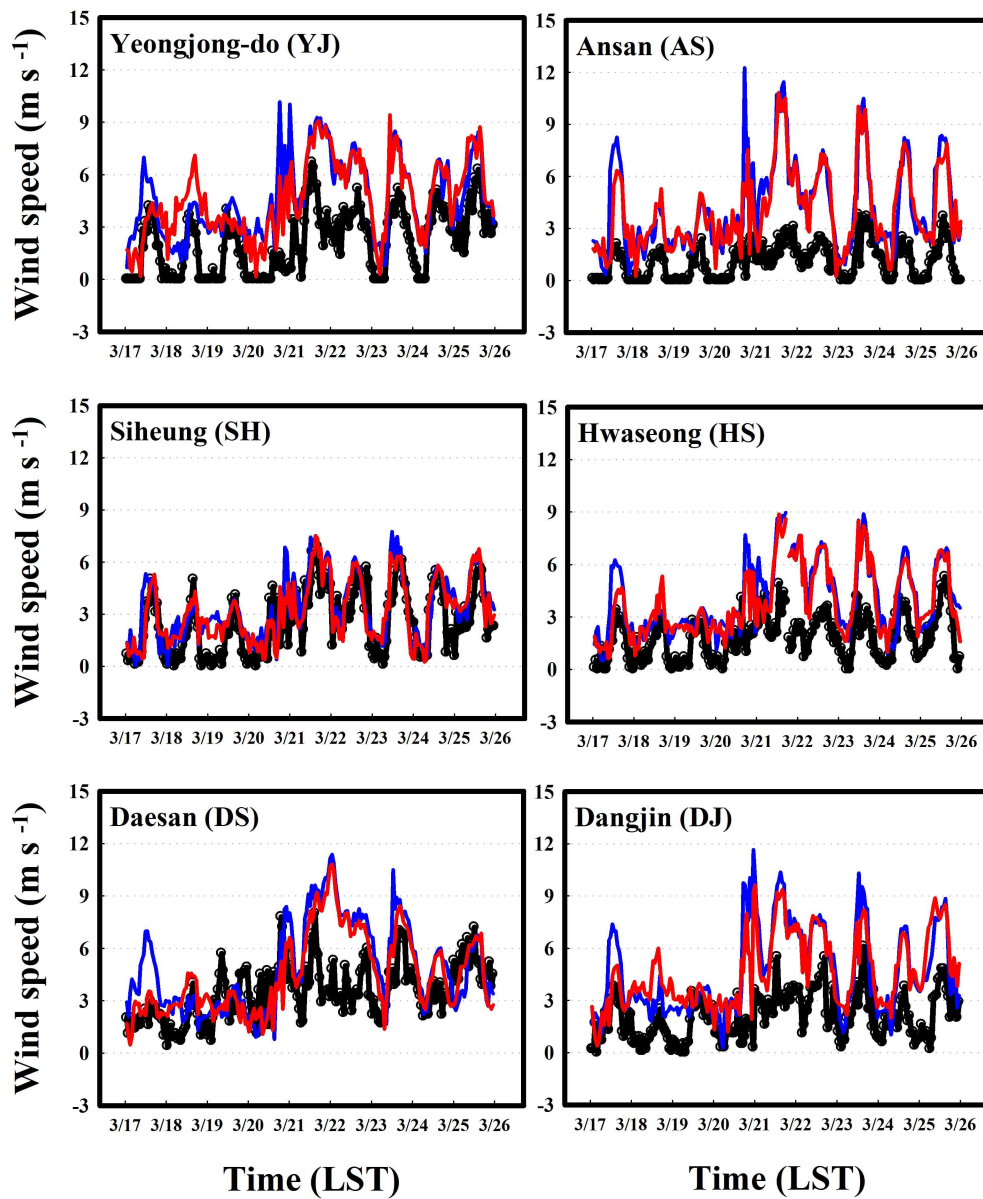


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for wind speed.

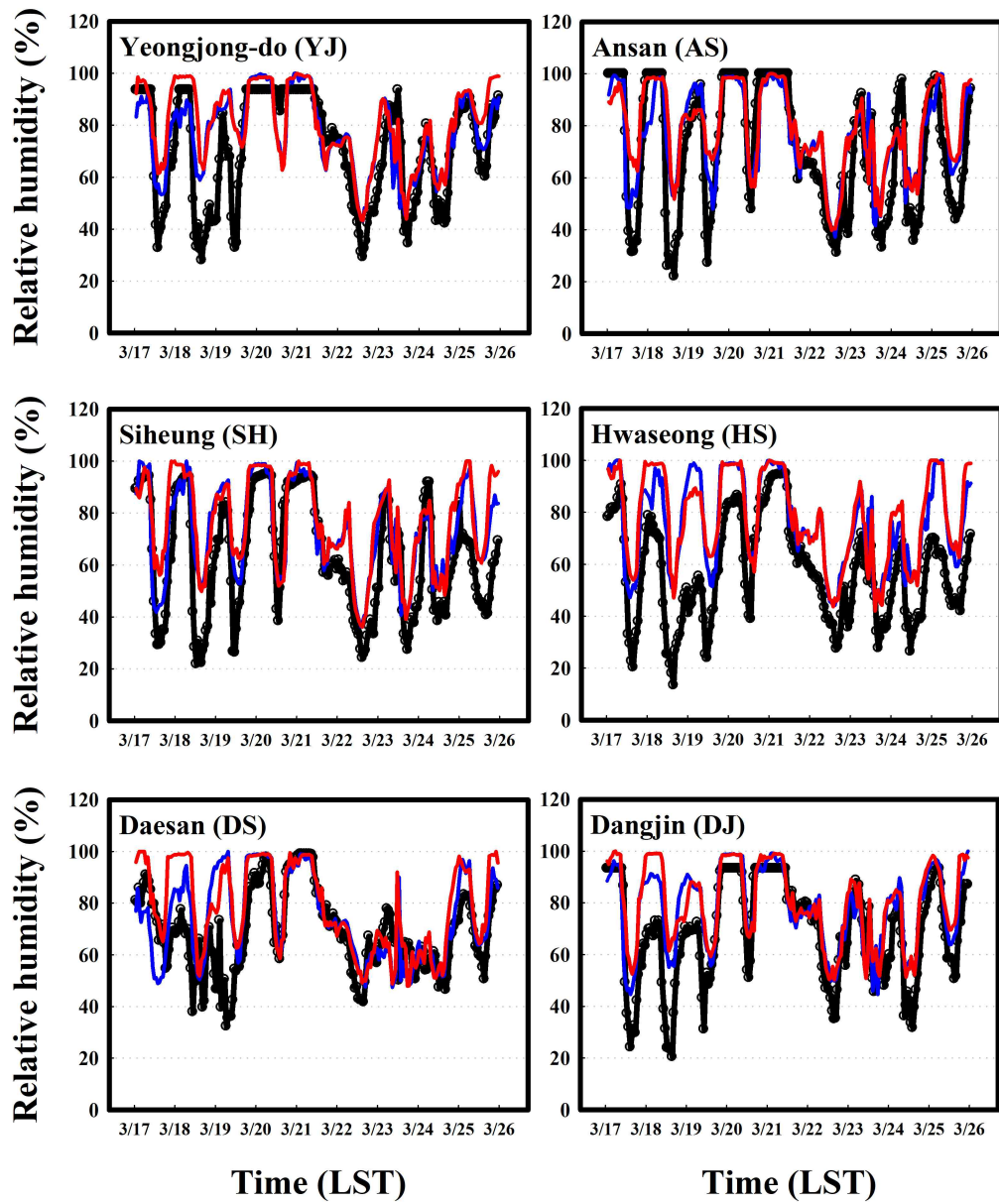


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for relative humidity.



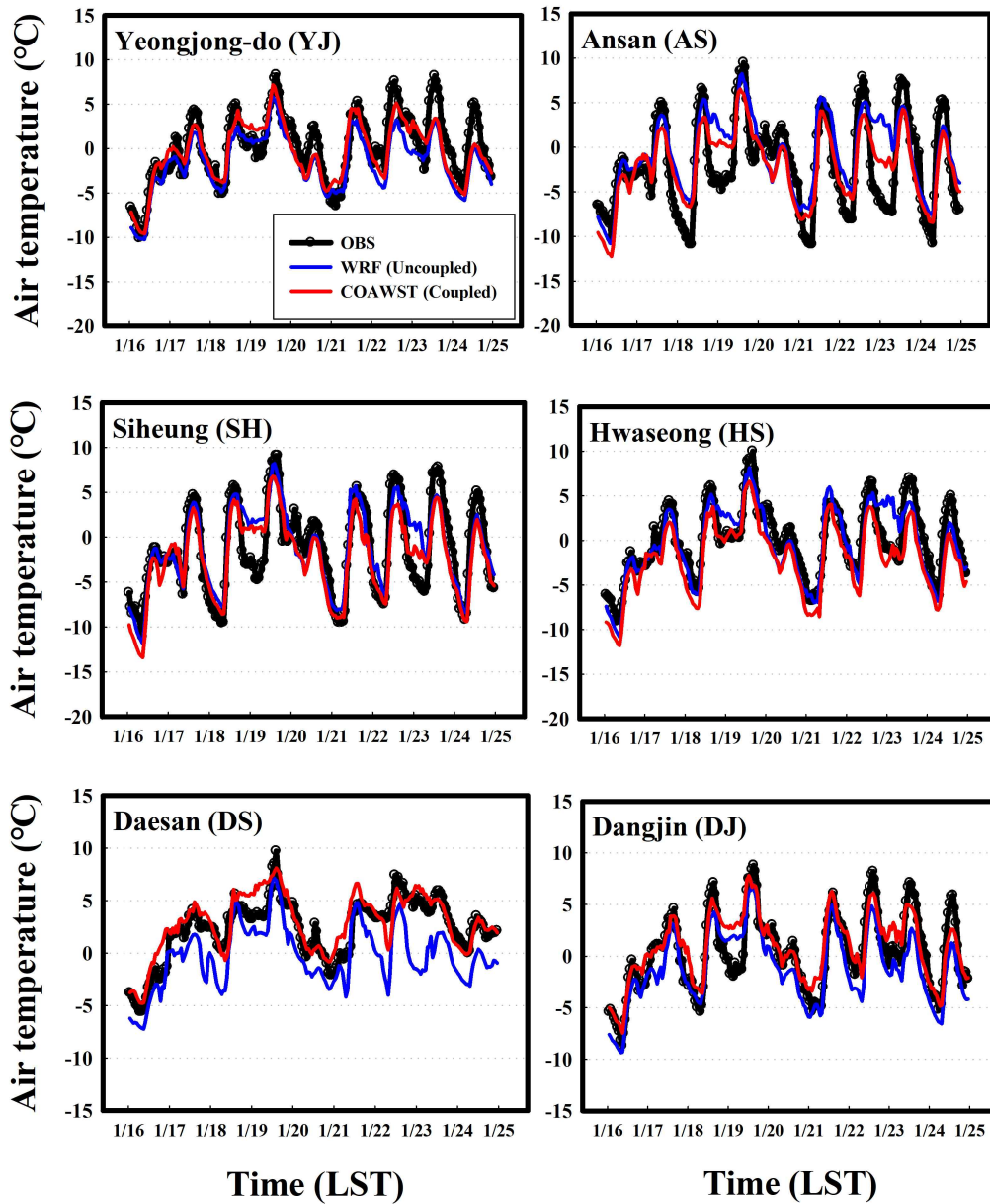


Fig. 9. Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for WRF (Uncoupled) and COAWST (Coupled) during the study period (January 16-25, 2019).

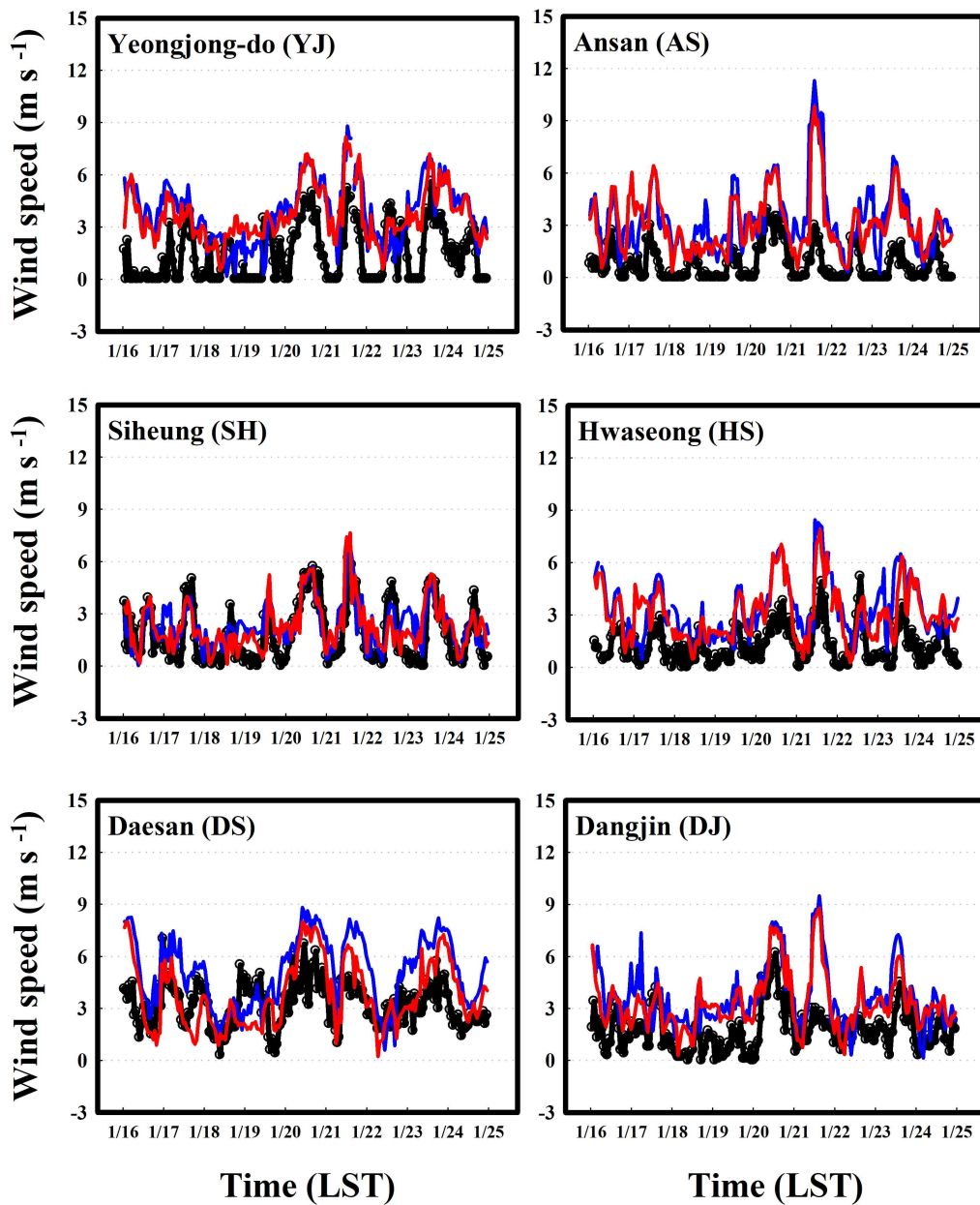


Fig. 10. Same as Fig. 9 except for wind speed.



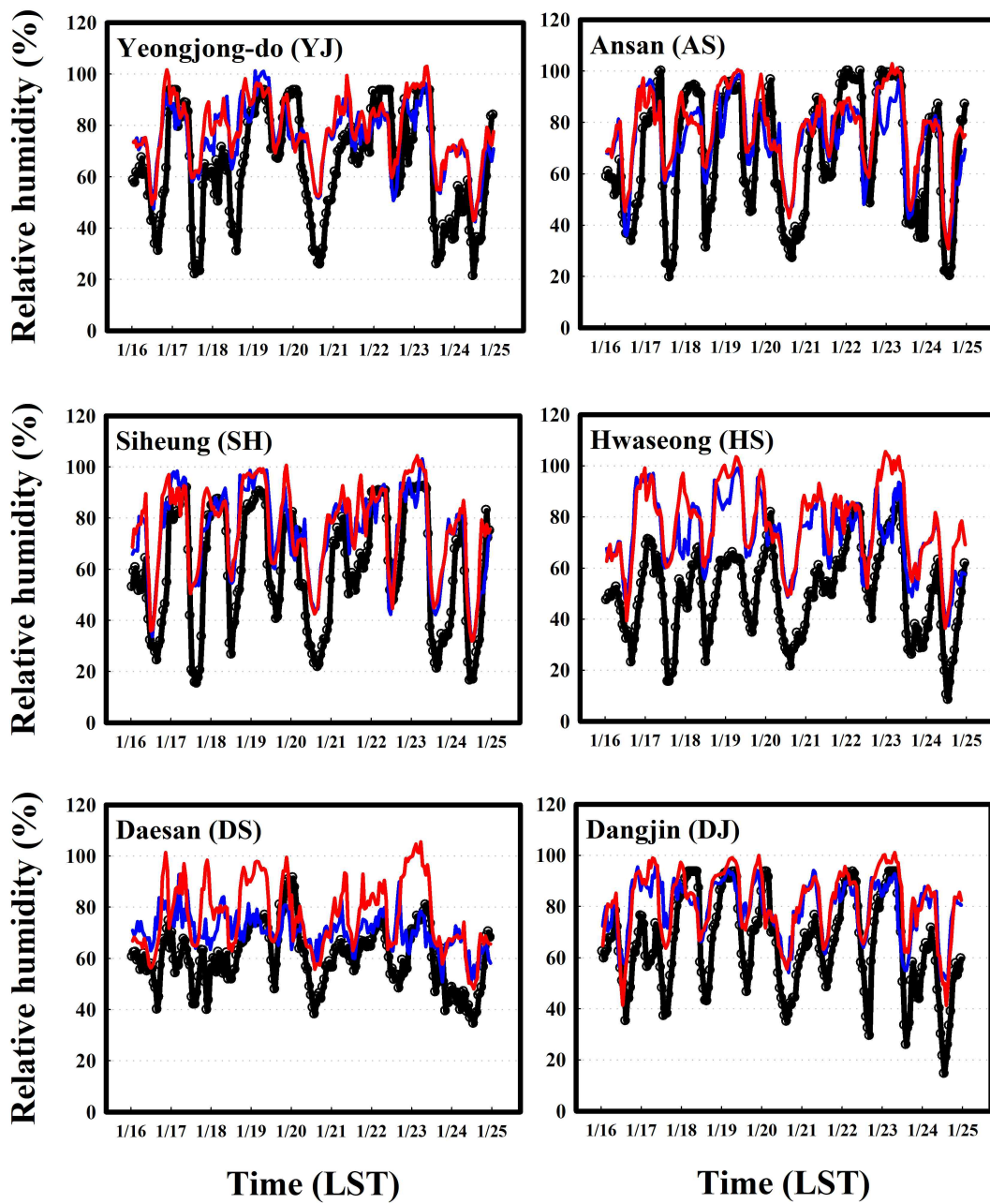


Fig. 11. Same as Fig. 9 except for relative humidity.

앞선 결과에서 볼 수 있듯이, 기온과 풍속의 경우 대부분 지점 및 시간대에서 결합모델이 단일모델에 비해 관측값에 가깝게 향상된 모습을 보였으나, 상대습도에서는 이와 달리 일부 지점의 시간대에서 단일모델의 결과가 관측값에 더 가깝게 모의되어 나타났다. 상대습도에 대해 결합모델의 예측 정확도가 다소 낮게 나타난 원인을 규명하기 위해, 상대습도 산정에 필요한 핵심 요소들(기온, 혼합비, 기압)의 시계열 변화를 추가로 비교 분석하였다(Fig. 12와 Fig. 13). 여기서 혼합비는 관측값이 없는 관계로 분석에서 제외하였다. 나머지 기온과 기압 요소가 모두 존재하는 DS(대산) 지점을 대상으로, 모델값과 관측값 간 편차로 나타내 상대습도 수치모의 결과에 영향을 준 인자를 사례별로 파악하였으며, Fig. 8과 11의 상대습도 시계열 변화와 비교하였다. 본 연구에서는 식 (5)~(7)을 이용하여 포화수증기압( $e_s$ ), 수증기압( $e$ )을 구하였으며 이를 이용하여 식 (5)에서의 상대습도를 계산하는데 사용되었다. 식 (6)의 포화수증기압을 계산하기 위하여  $t(^{\circ}\text{C})$ 를 지상 2m에서의 온도를 나타내는  $T2(\text{K})$ 로 단위 변환 후 대입하여 계산하였고, 식 (7)에서 혼합비인  $w(\text{kg}/\text{kg})$ 에 지상 2m에서의 혼합비  $Q2$ 를 대입하고 기압( $\text{hPa}$ )을 나타내는  $p$ 에 PSFC ( $\text{Pa}$ )로 단위를 변환하여 수증기압( $e$ )을 구하였다.

$$RH(\%) = (e/e_s) * 100 \quad (5)$$

$$e_s = 6.1078 \exp((19.8 * t) / (273.15 + t)) \quad (6)$$

$$e = ((w * p) / (0.622 + w)) \quad (7)$$

봄철의 상대습도와 기압 및 기온 변화를 서로 비교해 보면, 3월 17일과 18일에서 특히 단일모델이 관측값과 더 가깝게 모의된 결과를 나타냈으며, 기압의 편차에서도 같은 시간대에 관측값과의 편차가 단일모델에서 더 감소하였음을 뚜렷하게 확인할 수 있었다(Fig. 12). 3월 18일 이후부터는 3월 19일을 제외하고 상대적으로 두 실험 간 기압 편차가 크지 않아 상대습도 수치모의 결과 또한 실험 모두 관측값과 유사한 수치모의 결과를 나타냈고, 미세하게 단일모델의 결과가 향상되었음을 볼 수 있었다. 또한 기온의 편차는 기압과 마찬가지로 특정 시간대(3월 18일) 이후부터 결합모델과 단일모델이 비슷한 관측값과의 편차를 나타내었으

며, 두 실험 모두 상대습도의 예측 정확도가 다소 낮았던 3월 17일과 18일에서도 유사한 편차를 보였다. 겨울철 상대습도(Fig 11) 또한 특정 시간대(1월 19일, 22일, 23일) 에서 단일모델이 결합모델에 비해 뚜렷하게 관측값에 향상된 모습이 나타났고, Fig. 13의 기압 역시 같은 시간대에 기압 편차 차이가 단일모델에서 더 작은 편차를 보였다. 특히 기온 편차에서는 결합모델이 단일모델보다 관측값과의 편차가 더 감소하였으나, 상대습도 수치모의 결과는 대부분 시간대에 단일모델이 더 향상되었다. 이는 기온보다 기압의 차이로 인해 이러한 결과가 나타났다고 추정되며, 기압의 영향이 상대습도 수치모의에 더 영향을 미쳤을 거라 판단된다. 추가적으로 사례별로 혼합비의 편차에 대해 살펴보았을 때, 봄철에서는 대부분 실험간의 편차가 음(-)을 기록하여 단일모델이 미세하게 과대모의 하였고, 겨울철은 양(+)을 나타내 결합모델이 더 과대모의 경향을 보였다. 또한, 혼합비의 경우 기압과 기온의 요소에 비해 수치가 매우 작게 나타나 상대습도 계산에 보다 영향이 적었음으로 사료되며, 혼합비가 계산될 때 포함되는 요소들에 대해 좀 더 자세한 분석이 요구된다.

[A] Spring

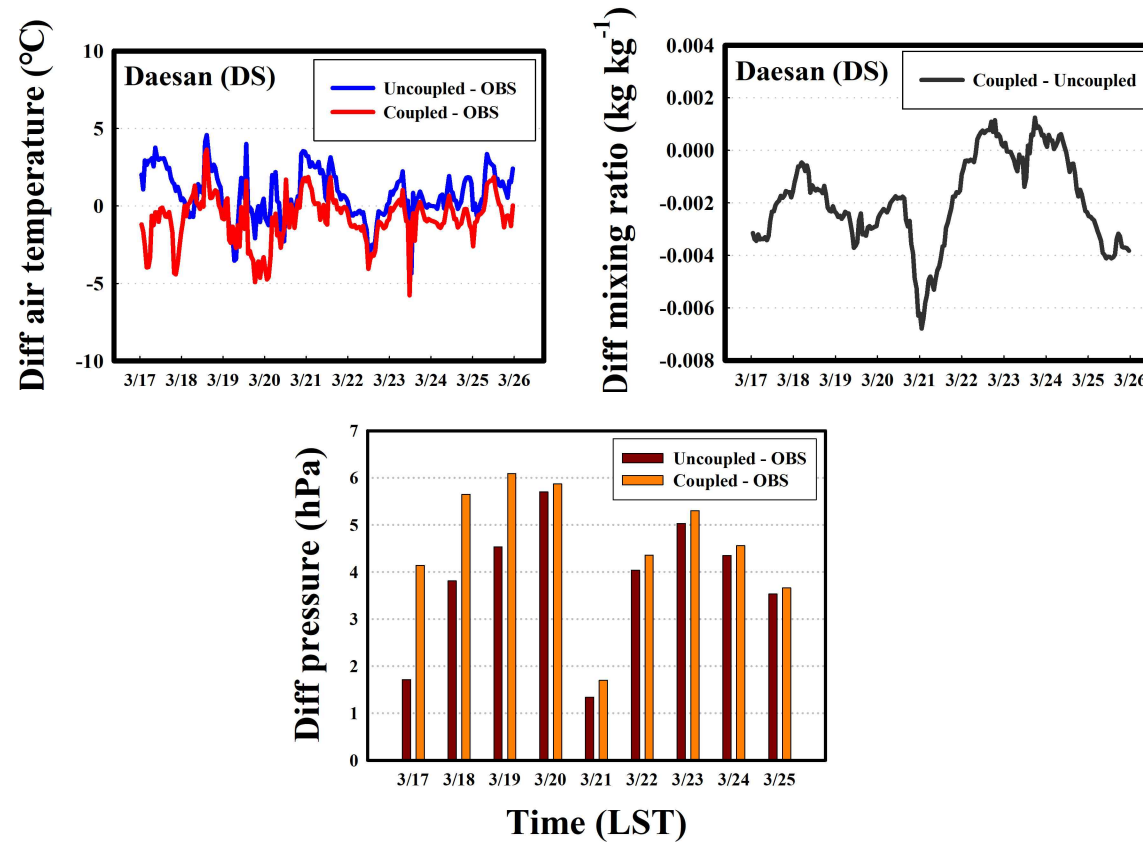


Fig. 12. Time series plot of meteorological variables deviation (air temperature, mixing ratio, pressure) for the observed and model-simulated at several monitoring site for the study period (March, 17-26, 2019).

[B] Winter

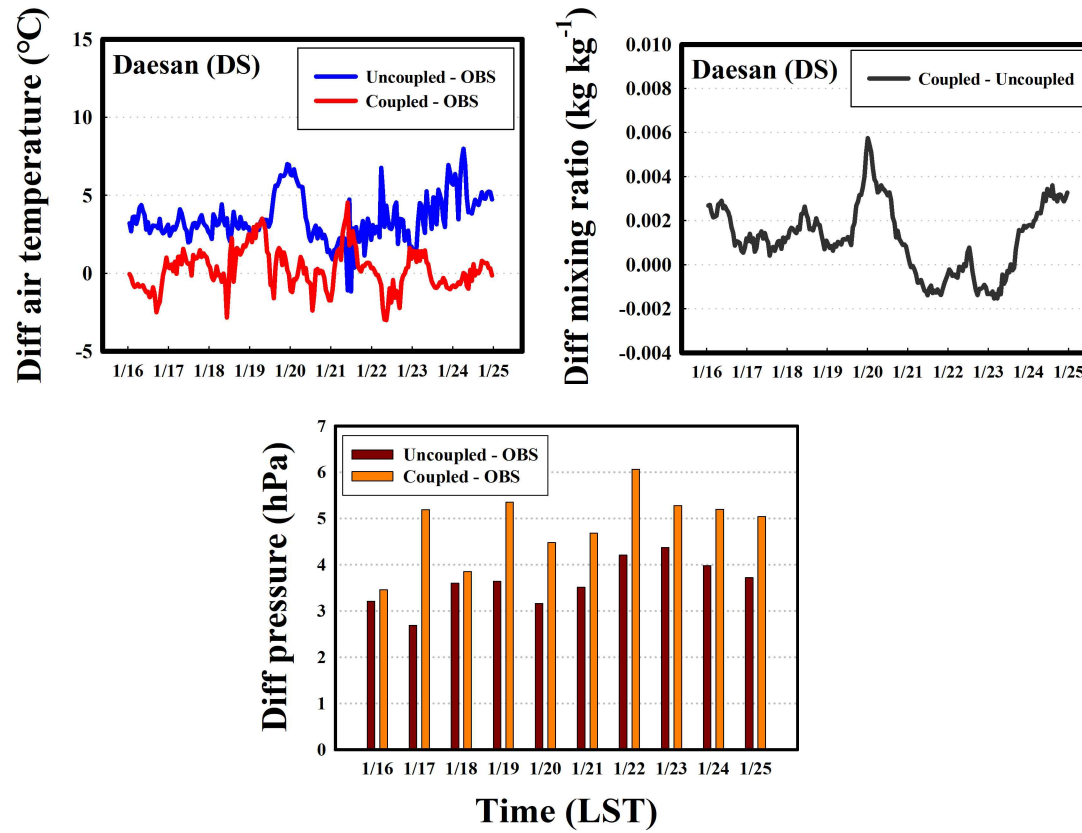


Fig. 13. Same as Fig. 12 except for the study period(January, 16-25, 2019).

Table 2는 연구사례일 동안 단일모델(ROMS, WRF)과 결합모델(COAWST) 간의 해수면온도와 기상요소 수치모의 결과를 정량적으로 파악하기 위해 해수면온도 및 기상요소 관측값과 모델값들의 수치모의 결과에 대한 통계적 검증(RMSE, IOA, MBE, COR)을 실시하였고 그 결과값들을 연구 사례일 별로 제시하였다. 겨울철 해수면온도의 경우, DJ, TA, PT 지점에서 RMSE 값이 Coupled가 Uncoupled에 비해 약 0.24°C, 1.67°C, 1.18°C 감소한 수치결과를 나타냈고, MBE 또한 1.7°C, 1.18°C, 0.4°C 감소하였고, COR에서는 DJ, TA 지점은 0.32, 0.314로 향상되었지만, PT 지점에서는 오히려 Uncoupled가 0.516 향상된 결과를 나타냈다. 마지막으로 COR 모두 Coupled에서 향상된 결과(RMSE 약 0.26°C, 0.31°C, MBE 약 0.27°C, 0.36°C, COR 약 0.03, 0.08)를 보였지만, PT 지점과 IC 지점은 Uncoupled가 모든 통계적 검증 값들이 더 향상되어 나타났다(RMSE 약 0.41°C, 0.68°C, MBE 약 0.64°C, 0.80°C, COR 약 0.28, 0.30). 봄철에서의 해수면온도에 대한 통계적 검증 결과값들을 살펴보았을 때 겨울철과 마찬가지로 DJ, TA 지점에서 Coupled가 Uncoupled에 비해 RMSE, MBE, COR 모두 향상된 결과를 보였지만, PT, IC 지점에서는 Uncoupled에서 더 향상된 모의결과가 나타났다.

기상요소에 대해 살펴보면, 겨울철에서 기온의 경우 YJ 지점과 HS 지점을 제외하고 대부분 지점에서 IOA 수치가 Coupled가 약 0.01(SH)~ 0.15(DS)까지 향상되었고, RMSE 또한 0.1(SH)~ 1.6°C(DS) 정도로 감소한 수치결과를 보였다. 풍속 또한 모든 지점에서 IOA, RMSE 수치가 평균 약 0.09, 0.48m/s 향상되어 나타났다. 이외에도, 봄철도 겨울철과 마찬가지로 특정 지점에서의 기온(SH)을 제외한 모든 지점에서의 기온, 풍속 IOA, RMSE도 향상된 모의 결과를 볼 수 있었다. 이와 달리 상대습도의 경우, 봄철 겨울철 모두 Uncoupled에서 Coupled보다 대부분 지점에서 통계적 검증 결과들이 더 향상되어 앞선 기온 풍속과 다른 수치모의 결과가 나타났는데, 이는 결합모델이 수행되는 동안 대기 해양 간 교환되는 과정에서 수증기 교환과 관련된 현·잠열 유속들이 자세하게 반영되지 않았거나 초기 결합시 결합과정에서의 대기-해양 흐름의 불균형 때문인 것으로 추정된다.

Table 2. Statistical evaluation of sea surface temperature and meteorological variables for the observed and model-simulated values (Uncoupled and Coupled) at the monitoring sites during the study period.

[A] Spring

| Site                         | ROMS (Uncoupled) |        |       | COAWST (Coupled) |        |       |
|------------------------------|------------------|--------|-------|------------------|--------|-------|
|                              | RMSE             | MBE    | COR   | RMSE             | MBE    | COR   |
| Deokjeok-do (DJ)             | 0.568            | 0.517  | 0.752 | 0.306            | -0.25  | 0.755 |
| Tacan-Port (TA)              | 0.652            | 0.572  | 0.625 | 0.341            | -0.212 | 0.707 |
| Pyeongtaek dangjin-Port (PT) | 0.361            | 0.065  | 0.846 | 0.773            | -0.707 | 0.569 |
| Incheon-Port (IC)            | 0.358            | -0.191 | 0.88  | 1.038            | -0.997 | 0.576 |

| Site              | Variable | WRF (Uncoupled)  |                   |                  | COAWST (Coupled) |                   |                  |
|-------------------|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                   |          | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> |
| Ycongjong-do (YJ) | TEMP     | 0.921            | 1.996             | -0.614           | 0.932            | 1.684             | -0.614           |
|                   | WS       | 0.626            | 2.956             | 2.533            | 0.647            | 2.847             | 2.476            |
|                   | RH       | 0.814            | 15.011            | 5.955            | 0.779            | 17.180            | 9.448            |
| Ansan (AS)        | TEMP     | 0.911            | 2.818             | 0.686            | 0.915            | 2.560             | -0.219           |
|                   | WS       | 0.411            | 3.674             | 3.105            | 0.436            | 3.390             | 2.900            |
|                   | RH       | 0.874            | 14.382            | 5.770            | 0.841            | 16.020            | 8.042            |
| Siheung (SH)      | TEMP     | 0.939            | 2.309             | 0.458            | 0.938            | 2.172             | -0.620           |
|                   | WS       | 0.826            | 1.512             | 0.845            | 0.851            | 1.355             | 0.637            |
|                   | RH       | 0.854            | 15.543            | 9.954            | 0.806            | 18.440            | 13.090           |
| Hwaseong (HS)     | TEMP     | 0.961            | 1.668             | -0.190           | 0.949            | 1.864             | -1.218           |
|                   | WS       | 0.537            | 2.705             | 2.220            | 0.568            | 2.465             | 2.010            |
|                   | RH       | 0.711            | 22.482            | 18.898           | 0.687            | 24.210            | 20.950           |
| Daesan (DS)       | TEMP     | 0.913            | 1.752             | 0.730            | 0.914            | 1.747             | -0.837           |
|                   | WS       | 0.554            | 2.725             | 1.456            | 0.617            | 2.276             | 1.029            |
|                   | RH       | 0.746            | 15.861            | 5.239            | 0.740            | 16.860            | 9.166            |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | 0.954            | 1.740             | 0.510            | 0.955            | 1.710             | -0.510           |
|                   | WS       | 0.523            | 3.208             | 2.588            | 0.524            | 3.048             | 2.569            |
|                   | RH       | 0.840            | 14.070            | 8.709            | 0.792            | 16.260            | 10.850           |

<sup>a</sup> IOA: index of agreement.

<sup>b</sup> RMSE: root mean square error.

<sup>c</sup> MBE: mean bias error.

[B] Winter

| Site                         | ROMS (Uncoupled) |        |        | COAWST (Coupled) |        |        |
|------------------------------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
|                              | RMSE             | MBE    | COR    | RMSE             | MBE    | COR    |
| Deokjeok-do (DJ)             | 2.309            | -2.267 | -0.155 | 2.068            | -2.025 | 0.47   |
| Taeon-Port (TA)              | 4.225            | -4.183 | 0.244  | 2.566            | -2.482 | 0.558  |
| Pyeongtaek dangjin-Port (PT) | 4.806            | -4.769 | -0.639 | 3.623            | -3.592 | -0.123 |
| Incheon-Port (IC)            | 1.593            | -1.507 | 0.522  | 2.205            | -2.119 | 0.619  |

| Site              | Variable | WRF (Uncoupled)  |                   |                  | COAWST (Coupled) |                   |                  |
|-------------------|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                   |          | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> |
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | 0.931            | 1.855             | -0.522           | 0.901            | 2.258             | -1.614           |
|                   | WS       | 0.525            | 2.985             | 2.431            | 0.581            | 2.640             | 2.246            |
|                   | RH       | 0.714            | 18.797            | 11.129           | 0.709            | 19.942            | 13.585           |
| Ansan (AS)        | TEMP     | 0.849            | 3.583             | 1.197            | 0.893            | 2.887             | -0.130           |
|                   | WS       | 0.417            | 3.030             | 2.538            | 0.472            | 2.663             | 2.290            |
|                   | RH       | 0.780            | 17.848            | 5.681            | 0.785            | 18.368            | 9.547            |
| Siheung (SH)      | TEMP     | 0.938            | 1.975             | -0.411           | 0.912            | 2.392             | -1.976           |
|                   | WS       | 0.807            | 1.274             | 0.547            | 0.809            | 1.280             | 0.481            |
|                   | RH       | 0.795            | 19.400            | 13.659           | 0.778            | 20.815            | 15.767           |
| Hwasong (HS)      | TEMP     | 0.938            | 1.975             | -0.411           | 0.912            | 2.392             | -1.976           |
|                   | WS       | 0.749            | 2.536             | 2.094            | 0.784            | 2.218             | 1.816            |
|                   | RH       | 0.568            | 26.218            | 22.350           | 0.561            | 29.600            | 26.934           |
| Dacsan (DS)       | TEMP     | 0.779            | 3.028             | -2.582           | 0.931            | 1.452             | 0.569            |
|                   | WS       | 0.544            | 2.512             | 1.924            | 0.684            | 1.722             | 0.553            |
|                   | RH       | 0.531            | 15.002            | 10.016           | 0.587            | 19.555            | 16.393           |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | 0.907            | 2.198             | -1.462           | 0.936            | 1.725             | 0.516            |
|                   | WS       | 0.560            | 2.349             | 1.881            | 0.622            | 1.978             | 1.561            |
|                   | RH       | 0.647            | 19.978            | 14.084           | 0.690            | 20.040            | 15.757           |



## 3.2. 자료동화에 따른 결합모델의 개선효과 분석

### 3.2.1. 서해안 연안지역 조위 분석 및 검증

앞에서 언급하였듯이, 서해 지역은 지리·지형적 특성과 강한 조석현상 등 복합적인 이유로 인해 다양한 기상현상이 존재하고, 그 중 조석현상이 연안지역의 기상조건을 변화시켜 기상 수치모의에 영향을 미친 연구들이 많이 수행되어 조석현상의 중요성을 언급하였다. 이에 따라, Fig. 14와 Fig. 15는 연구에서 사용된 결합모델 내 조석현상이 잘 반영되었는지 검증하기 위해, 연구기간(2019년 1월 16일~25일, 2019년 3월 17일~26일)동안 대상 지역 내 존재하는 조위관측지점(GI, AS, YH, IC) 4곳에서의 해수면높이 편차를 관측값과 결합모델 모델값으로 나눠 함께 비교·분석하였다.

먼저 겨울철에서는, 조위관측소(GI, AS, YH, IC) 관측지점에서 각각 약 -500(최저)~490 cm(최고), -446 ~ 454 cm, -435 ~ 446 cm, -464 ~ 479 cm의 해수면 편차 분포를 보였다. 또한, 자료동화 효과에 따른 조석현상 반영의 차이를 파악하고자 조위 관측소에서의 관측값과 실험들(COAWST\_BASE, COAWST\_DA)간의 해수면 편차 수치모의 결과 비교를 실시하였으며(Fig. 12~13), 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)은 -437 ~ 439 cm, -435 ~ 425 cm, -412 ~ 407 cm, -437 ~ 422 cm 수치모의 결과가 나타났고, 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_DA)에서는 -444 ~ 445 cm, -434 ~ 426 cm, -415 ~ 412 cm, -442 ~ 430 cm 모의 결과를 보였다.

추가적으로 봄철의 경우, 관측지점에서 약 -517(최저)~452 cm(최고), -460 ~ 437 cm, -449 ~ 423 cm, -487 ~ 453 cm 해수면 편차 분포가 나타났으며, 겨울철에 비해 모든지점에서 최저값이 더 낮으며(약 -30cm) 최고값(약 20cm)은 더 높은 결과를 보였다. COAWST\_BASE 및 COAWST\_DA에서도 관측값과 마찬가지로 유사한 모의 결과를 보였다.

이러한 해수면 편차에 대한 모델들의 수치모의 결과들을 정량적으로 파악하고 검증하기 위해 Table 3은 연구기간 동안 선정한 4개 지점(경인항, 안산, 영흥도, 인천)의 해수면 편차에 대한 모의 결과들에 대한 통계적 분석을 제시하였다. 먼저 겨울철 IOA는 COAWST\_BASE, COAWST\_DA 실험에서 각각 0.936~0.969,

0.980~0.995로 나타났으며, RMSE의 경우 82.072~120.81cm, 33.22~65.324cm 의 값을 보여 전반적으로 두 실험 모두 관측값과의 해수면 편차가 높은 수치결과를 나타내 조석현상을 잘 반영하였으므로 판단된다. 마지막으로 MBE 또한 모든 지점에서 0.001 cm 이하 수치모의 결과를 나타내었으며, 두 실험 간 통계적 검증을 비교하였을 때, COAWST\_DA에서 IOA, RMSE가 보다 향상되었음을 확인할 수 있었다. 봄철 또한 COAWST\_DA가 COWAST\_BASE에 비해 약간 향상된 수치를 보였다.

[A] Spring

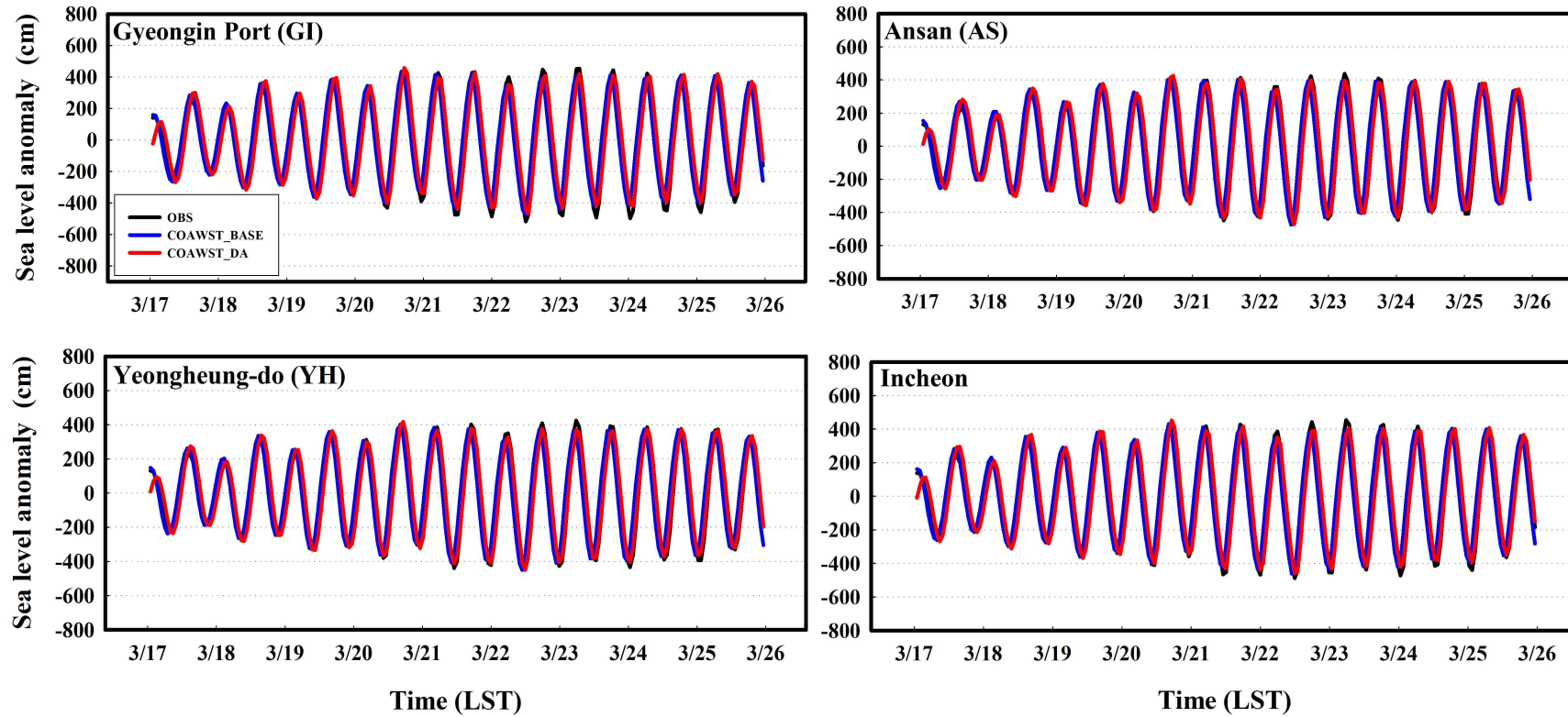


Fig. 14. Time series plot of sea level anomaly the observed and model-simulated at four tidal station for the study period (March, 17-26, 2019).

[B] Winter

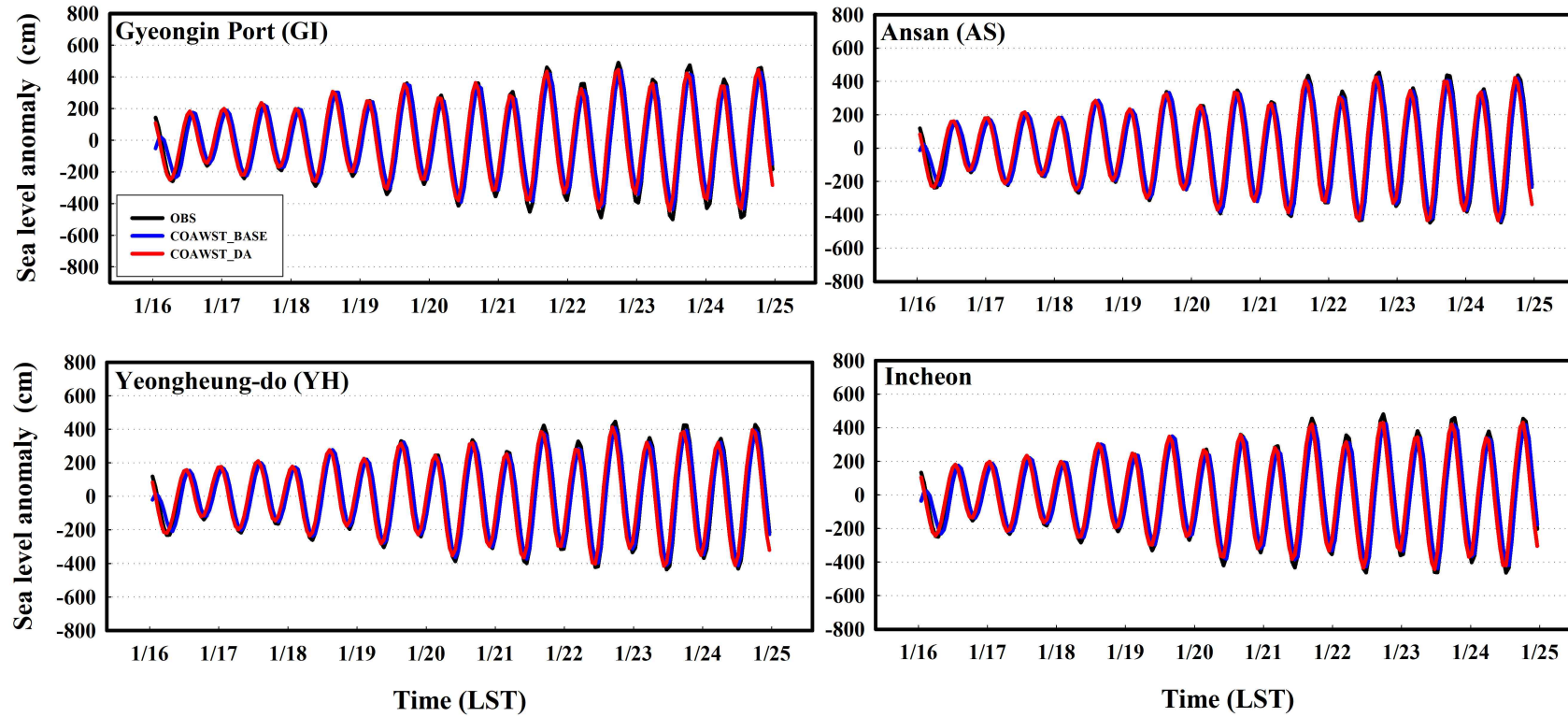


Fig. 15. Same as Fig. 14 except for the study period (January, 16-25).

Table 3. Statistical evaluation of the sea level anomaly between the observed and model-predicted values at four tidal stations for the study period.

[A] Spring

| Site    | Variable               | COAWST_BASE |         |        | COAWST_DA |        |        |
|---------|------------------------|-------------|---------|--------|-----------|--------|--------|
|         |                        | IOA         | RMSE    | MBE    | IOA       | RMSE   | MBE    |
| 경인항(GI) |                        | 0.957       | 108.112 | <0.001 | 0.988     | 56.291 | <0.001 |
| 안산(AS)  | Sea level anomaly (cm) | 0.935       | 125.953 | <0.001 | 0.996     | 32.033 | <0.001 |
| 영흥도(YH) |                        | 0.936       | 120.816 | <0.001 | 0.995     | 33.220 | <0.001 |
| 인천(IC)  |                        | 0.957       | 105.569 | <0.001 | 0.990     | 52.062 | <0.001 |

[A] Winter

| Site    | Variable               | COAWST_BASE |        |        | COAWST_DA |        |        |
|---------|------------------------|-------------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|         |                        | IOA         | RMSE   | MBE    | IOA       | RMSE   | MBE    |
| 경인항(GI) |                        | 0.969       | 82.072 | <0.001 | 0.980     | 65.324 | <0.001 |
| 안산(AS)  | Sea level anomaly (cm) | 0.953       | 96.898 | <0.001 | 0.993     | 36.480 | <0.001 |
| 영흥도(YH) |                        | 0.936       | 120.81 | <0.001 | 0.995     | 33.22  | <0.001 |
| 인천(IC)  |                        | 0.954       | 91.973 | <0.001 | 0.992     | 39.670 | <0.001 |

## 3.2. 자료동화에 따른 결합모델의 개선효과 분석

### 3.2.2. 기상모델 자료동화를 적용한 효과 분석

앞선 3.1절에 언급하였듯이, 결합모델의 수치예측을 평가하기 위해 단일모델과 비교하였을 때, 결합모델이 대부분 지점에서 해수면온도나 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)수치모의 결과가 단일모델에 비해 관측값에 더 향상된 모의결과를 보였으나, 다소 상반되는 결과가 나타난 지점들도 존재하였고, 특히 기상요소 중 상대습도에 대해 잘 모의하지 못하는 경향을 볼 수 있었다. 이러한 결과들을 보완하기 위해, 본 연구에서는 현재 기상 및 해양 수치모의를 향상시키기 위해 모델의 초기 및 경계조건을 개선시키는 방법 중 자료동화 기법을 모델에 적용하여 보다 향상된 수치모의 결과를 분석하였다. 본 연구에 사용된 자료동화 기법에 대해서는 앞의 2.2절에서의 모델 구성에서 언급한 것처럼, 기상모델 WRF에서는 3차원 변분 자료동화 기법인 3DVAR를 적용하였고, 해양모델 ROMS는 3DVAR 방법에서 시간의 연속성까지 고려된 4차원 변분 자료동화기법(4DVAR)으로 초기 및 경계조건을 개선하였다.

추가적으로, 결합모델의 수치모의 정확도를 향상시키기 위해 본 연구에서는 결합모델에 자료동화 효과를 적용할 때 대기-해양 결합모델을 먼저 수행하여 수행된 결과로 생성되는 배경장 자료를 이용하여 기상모델과 해양모델의 초기장을 각각 자료동화한 약한 결합자료동화(Weakly Coupled assimilation) 기법을 수행하였다. 이 방법의 경우, 현재 대부분의 연구에서 기상모델과 해양모델을 각각 자료동화하여 생성되는 초기장을 사용하는 비 결합자료동화를 수행하는 방법에서 보완된 기법으로, 결합모델을 수행할 때 발생하는 모델간의 초기장 결합부위에서 초기 조건이 불균형하고 결합모델의 물리과정 차이로 인해 발생하는 initialization shock를 최소화한 기법이다. 그럼에도 불구하고, 완벽하게 균형을 이룬 대기-해양 초기조건 및 물리과정을 만들기에는 이론적, 기술적으로 한계가 존재하지만, 약한 결합자료동화 기법을 이용해 이를 최소화하였다는 것에 의의를 두고 있다. 이에 따라, 연구기간 동안 약한 결합자료동화 적용에 따른 해수면온도 및 기상요소의 수치모의 결과 비교 및 분석을 실시하였고, 이러한 자료동화가 수치모의 결과에 미치는 영향도 함께 파악하였다.

Fig. 16은 연구 사례일(겨울철 및 봄철) 중 봄철(2019년 1월 16일~25일) 동안 자료동화 효과를 파악하기 위해, 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)과 기상모델만 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_WRFDA)으로 분류하였고, 앞선 3.2절과 같은 해양부이 지점(DJ, TA, PT, IC)에서의 해수면 온도 관측자료와 모델값들의 결과를 나타낸다. 겨울철에는 대체로 IC 지점을 제외하고 COAWST\_BASE 실험이 COAWST\_WRFDA 실험보다 해수면온도 관측값에 더 가깝게 모의하였다. IC 지점에서는 COAWST\_WRFDA에서 연구사례 기간 동안 평균 약 1.5°C 정도로 향상된 결과를 보였으나, 나머지 3개의 지점(DJ, TA, PT)에서는 COAWST\_BASE가 더 관측값에 향상되었다(0.55°C, 0.66°C, 0.29°C).

겨울철의 경우(Fig. 17), 전반적으로 대부분 지점에서 COAWST\_WRFDA가 COAWST\_BASE에 비해 관측값에 더 가깝게 모의된 걸 확인할 수 있었다. 특히, TA 지점을 제외하고 나머지 지점들에서는 뚜렷한 향상을 볼 수 있었으며 PT 지점에서 0.44°C 가장 높게 향상되었고 DJ, IC 지점 또한 0.22°C, 0.35°C 향상된 값이 나타났다. 이외에도, TA 지점도 3월 24일 이후 시간대부터 관측값과 비교하였을 때 COAWST\_WRFDA에서 차이가 점점 증가하였지만, 대부분 시간대에 COAWST\_BASE보다 0.06°C 향상되었고, 이러한 결과들을 통해 겨울철과 봄철의 자료동화 효과에 따른 해수면온도의 수치모의가 다르게 나타났다.



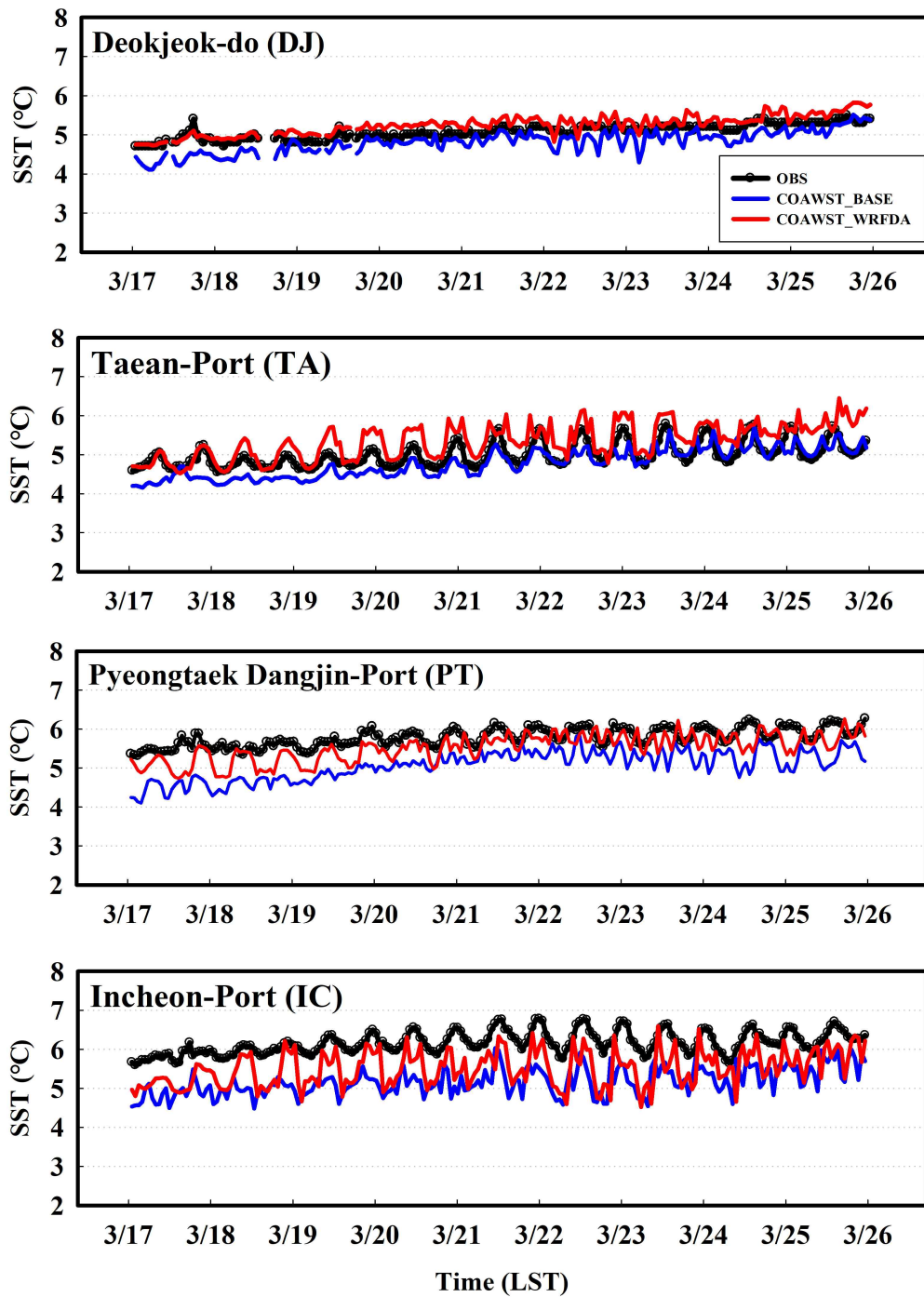


Fig. 16. Time series of the observed and simulated sea surface temperature (SST) at several marine buoy monitoring sites for COAWST\_BASE and COAWST\_DA during the study period (March 17-26, 2019).



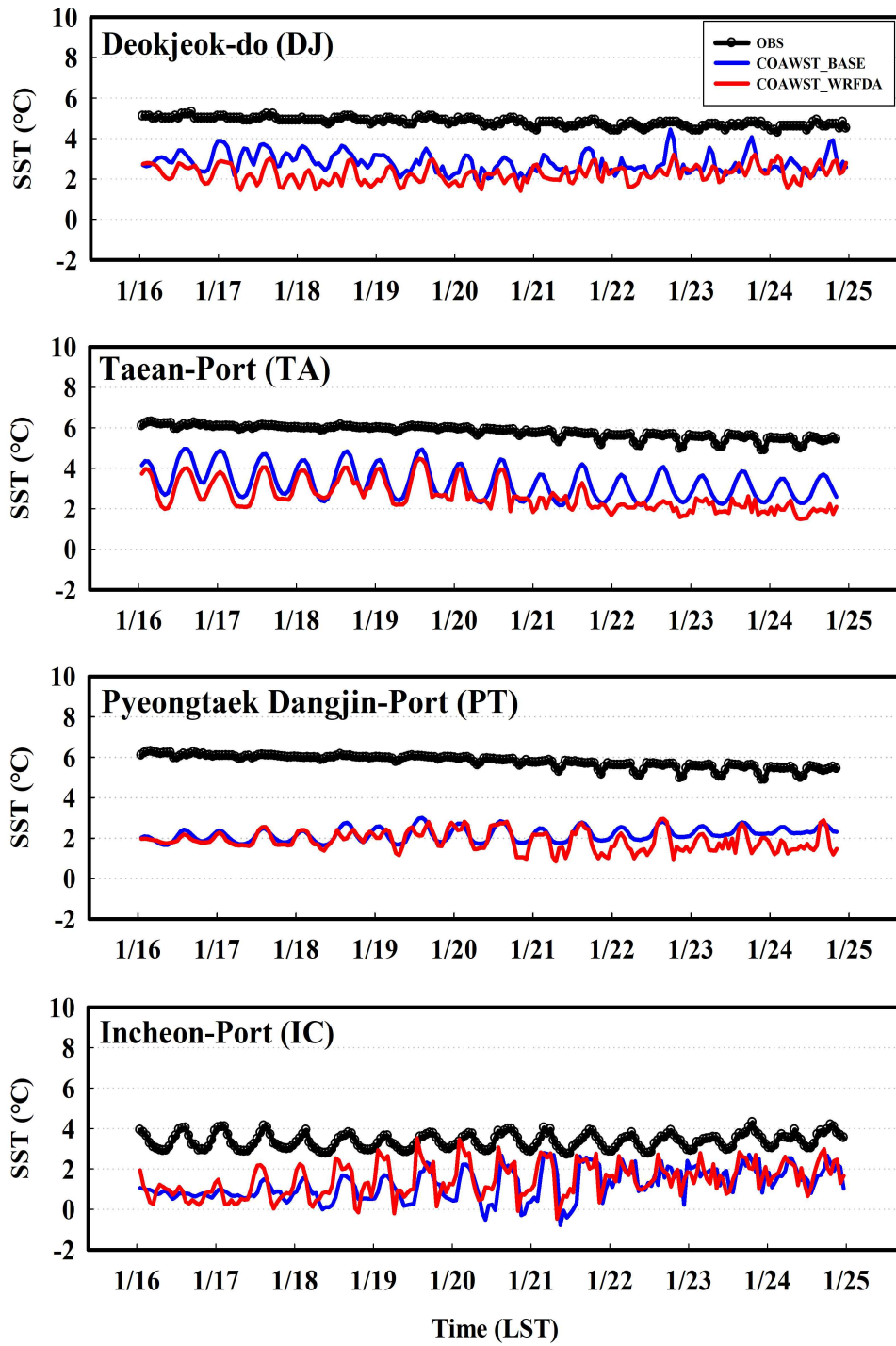


Fig. 17. Same as Fig. 16 except for the study period (Winter 16-25, 2019).

Table 4는 연구 사례일을 대상으로 기상요소의 자료동화 효과를 파악하기 위해, 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)과 기상모델만 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_WRFDA)으로 구분하여 앞의 3.2절과 같은 기상요소 지점(YJ, AS, SH, HS, DS, DJ)에서의 기상요소(기온, 풍속, 상대습도) 관측자료와 모델값들 간의 편차 결과(EXP\_WRFDA, EXP\_BASE)를 제시하였다. 전반적으로, 봄철 및 겨울철 모두 기온, 풍속, 상대습도의 편차가 대부분 EXP\_WRFDA 실험에서 EXP\_BASE 실험에 비해 더 감소한 결과가 나타났다. 또한 봄철 YJ, DJ 지점에서 풍속 수치모의 결과는 EXP\_BASE가 관측값에 가까운 결과를 보였으나(약 0.13 m/s, 0.19 m/s), 두 지점의 풍속 수치모의 결과를 제외하고 나머지 수치모의 결과가 0.11~0.29 m/s EXP\_WRFDA에서 더 향상되었다. 겨울철은 YJ 지점의 풍속과 AS 지점의 기온, 풍속이 앞선 봄철과 마찬가지로 EXP\_BASE에서 더 향상된 결과가 나타났고, 대부분 지점에서 모든 기상요소가 EXP\_WRFDA 실험이 향상된 모습을 보였다. 특히 단일모델과 결합모델을 비교한 실험에서 결합모델이 상대습도를 일부 잘 모의하지 못했으나, EXP\_WRFDA 자료동화 실험에서 뚜렷하게 개선된 모습을 볼 수 있었다.

Table 4. The deviation of three meteorological variables between two model-simulated values (COAWST\_WRFDA and COAWST\_BASE) and observations at six monitoring sites during the study period.

[A] Spring

| Site              | Variable | EXP_WRFDA (COAWST_WRFDA - OBS) | EXP_BASE (COAWST_BASE - OBS) |
|-------------------|----------|--------------------------------|------------------------------|
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | -0.494                         | -0.614                       |
|                   | WS       | -1.308                         | -1.179                       |
|                   | RH       | 5.944                          | 9.450                        |
| Ansan (AS)        | TEMP     | -0.372                         | 0.360                        |
|                   | WS       | -1.097                         | -1.107                       |
|                   | RH       | 5.833                          | 8.050                        |
| Siheung (SH)      | TEMP     | -0.429                         | -0.620                       |
|                   | WS       | -2.634                         | -2.652                       |
|                   | RH       | 11.286                         | 13.130                       |
| Hwaseong (HS)     | TEMP     | -0.924                         | -1.218                       |
|                   | WS       | -2.228                         | -2.222                       |
|                   | RH       | 18.530                         | 20.960                       |
| Daesan (DS)       | TEMP     | -0.837                         | -0.837                       |
|                   | WS       | -1.060                         | -1.964                       |
|                   | RH       | 8.014                          | 9.240                        |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | -0.330                         | -0.510                       |
|                   | WS       | -1.182                         | -0.990                       |
|                   | RH       | 8.280                          | 10.850                       |

[B] Winter

| Site              | Variable | EXP_WRFDA (COAWST_WRFDA - OBS) | EXP_BASE (COAWST_BASE - OBS) |
|-------------------|----------|--------------------------------|------------------------------|
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | -0.502                         | -0.314                       |
|                   | WS       | 2.450                          | 2.220                        |
|                   | RH       | 11.657                         | 13.585                       |
| Ansan (AS)        | TEMP     | -1.479                         | -1.201                       |
|                   | WS       | 2.402                          | 2.290                        |
|                   | RH       | 8.385                          | 9.547                        |
| Siheung (SH)      | TEMP     | -0.534                         | -0.790                       |
|                   | WS       | 0.547                          | 0.661                        |
|                   | RH       | 15.393                         | 15.779                       |
| Hwaseong (HS)     | TEMP     | -0.062                         | 0.210                        |
|                   | WS       | 1.845                          | 2.063                        |
|                   | RH       | 25.392                         | 26.934                       |
| Daesan (DS)       | TEMP     | 0.220                          | -0.872                       |
|                   | WS       | 0.553                          | 0.830                        |
|                   | RH       | 15.482                         | 16.393                       |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | -0.092                         | -0.279                       |
|                   | WS       | 1.561                          | 1.724                        |
|                   | RH       | 10.642                         | 15.757                       |

자료동화 효과가 해수면온도 및 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)에 미치는 영향을 공간적으로 파악하기 위해, 연구기간(겨울철, 봄철)동안 해수면온도, 기온, 풍속, 상대습도의 실험 간 수치모의 차이 (COAWST\_WRFDA - COAWST\_BASE)의 평균장을 자세하게 비교하였다(Fig. 18, Fig. 19).

봄철의 해수면온도에서는(Fig. 18), 겨울철의 해수면온도에 비해 특정 해양부근에서 두 실험의 차이를 비교하였을 때, COAWST\_BASE에서 더 큰 과대모의를 보였으나, 대부분 지역에서 COAWST\_WRF가 평균 약  $0.2^{\circ}\text{C}$  높은 과대모의 경향이 나타났으며, 해양보다 육지에서 COAWST\_WRF의 과대모의 경향성이 뚜렷하였다. 추가적으로 기상요소는, 기온의 경우 겨울철의 기온의 결과와 유사한 패턴을 보였고, 봄철의 기온이 겨울철의 기온 결과보다 COAWST\_WRFDA에서  $+0.2^{\circ}\text{C}$  더 큰 과대모의가 나타났다. 풍속은  $37.3^{\circ}\text{N}$  보다 높은 위도 지역에서 평균  $-0.3\text{m/s}$ , 낮은 위도에서는  $-0.04\text{m/s}$ 를 기록하여 지역마다 다르게 나타났다. 마지막으로 상대습도는, 기온과 반대로 대부분 지역에서 COAWST\_WRFDA가  $-3.4\%$  더 낮은 수치모의를 보여 COAWST\_BASE 실험에서 더 과대모의 하였음을 알 수 있었다. 특히, 기온은 연안지역이 육지지역에 비해 상대적으로  $+0.2\sim+1^{\circ}\text{C}$  정도의 차이가 나타났으며, 상대습도도 연안에서 약  $3\sim7\%$  정도로 뚜렷한 차이를 보였는데, 이는 서해 연안지역의 지형적인 특성이나 추가적인 요소, 모델의 사실적인 재현의 한계 등의 이유로 인해 실험 간 수치모의에 차이가 있었음으로 사료된다.

겨울철의 해수면온도의 경우(Fig. 19), 대부분 지역에서 COAWST\_WRFDA와 COAWST\_BASE의 차이가 평균 약  $+1.8^{\circ}\text{C}$  더 높게 나타나 상대적으로 COAWST\_WRFDA 실험에서 COAWST\_BASE 실험에 비해 과대모의하는 경향을 볼 수 있었고, 특히 해양 부분보다 연안지역에서 전반적으로 더 큰 과대모의하는 모습을 보였다(평균 약  $+2.3^{\circ}\text{C}$ ). 기상요소에 대해서 살펴보면, 기온, 풍속은 전반적으로 COAWST\_WRFDA가 과대모의 하였고(평균 약  $+0.4^{\circ}\text{C}$ ,  $+0.3\text{m/s}$ ), 상대습도는 더 낮은 모의결과를 보여 반대의 결과가 나타났다(평균 약  $-0.8\%$ ). 특히 풍속의 경우, 위도  $37.3^{\circ}\text{N}\sim 37.8^{\circ}\text{N}$  사이의 해양 지역에서 COAWST\_WRFDA에서 뚜렷한 과대모의 경향을 보였다.

[A] Spring (WRFDA - BASE)

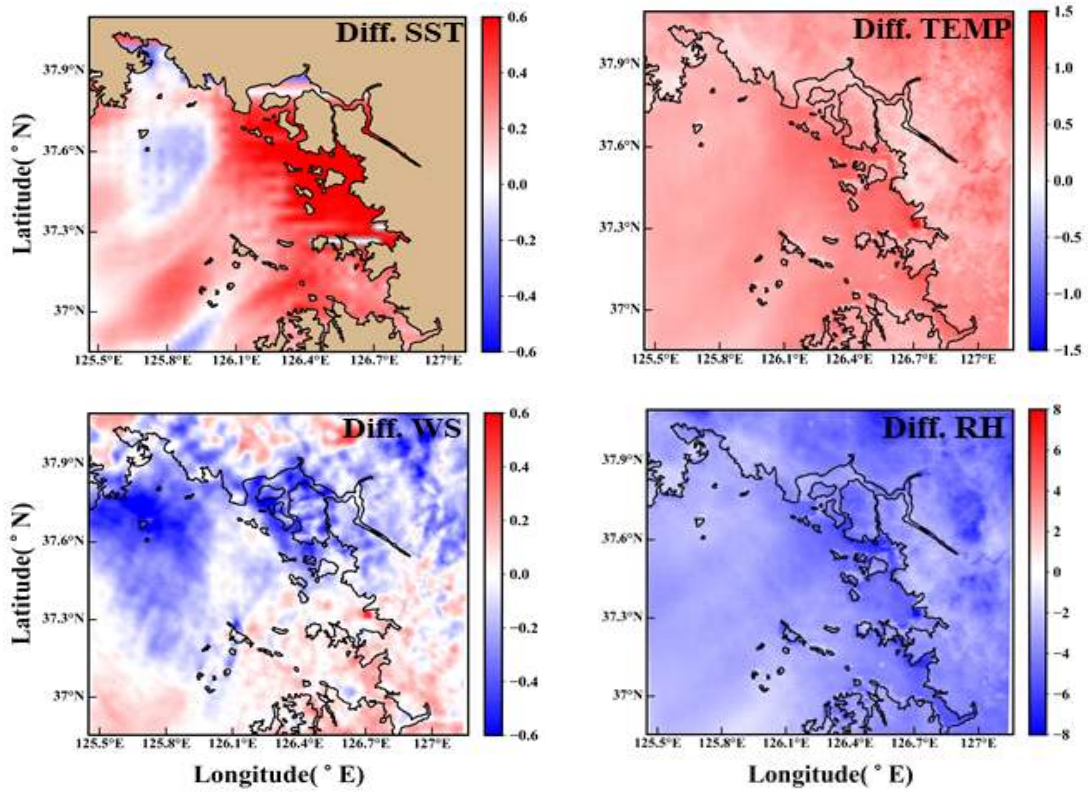


Fig. 18. Mean differences of sea surface temperature and meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) between two simulation experiments (COAWST\_WRFDA and COAWST\_BASE) during the study period (March 17-26, 2019).

[B] Winter (WRFDA - BASE)

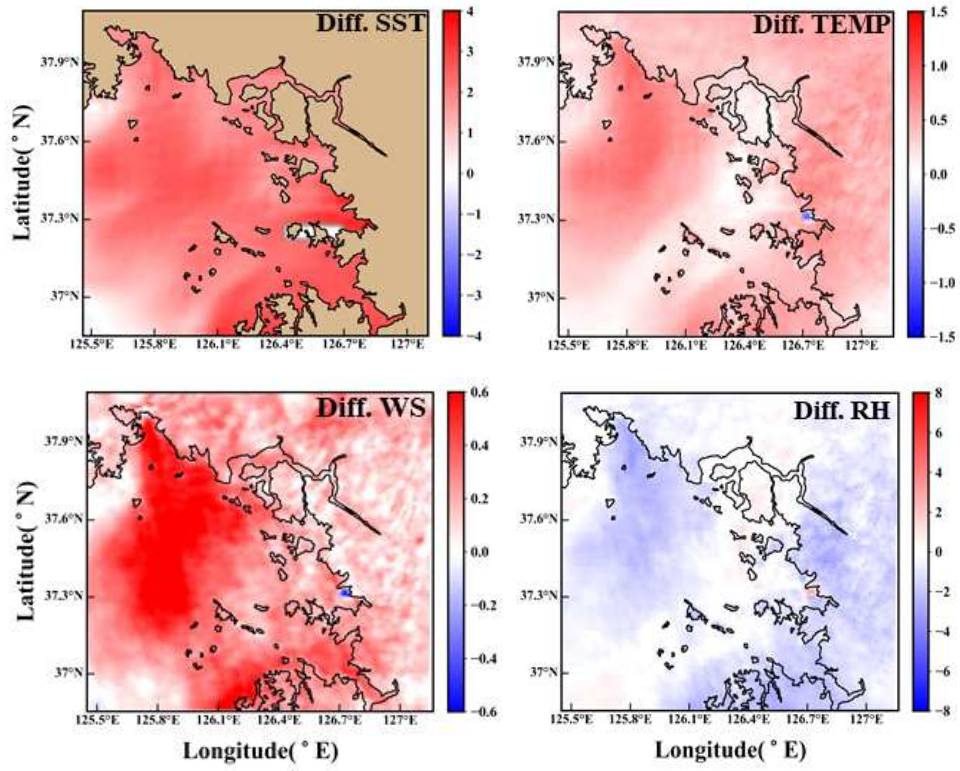


Fig. 19. Same as Fig. 18 except for the study period (January 16-25, 2019).



### 3.2.3. 기상 및 해양모델 자료동화를 적용한 효과 분석

본 연구에서는 앞선 3.3.1절에서의 기상모델만 자료동화를 적용하여 효과를 분석한 실험에서 해양모델까지 함께 자료동화를 적용하여 이러한 기법들을 보완하였고, 해양모델의 초기 입력자료까지 개선된 결합모델을 수행하였다. 이를 통해, 더 개선된 자료동화 기법에 따른 결합모델의 효과를 파악하기 위해, Fig. 20과 Fig. 21은 동일한 사례일 및 연구지점을 선정하여 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)과 기상 및 해양모델 모두 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_DA)의 해수면온도 수치모의 결과들을 관측값과 비교하였다.

봄철의 해수면온도 경우(Fig. 20), 모든 지점에서 전반적으로 COAWST\_DA에서 더 관측값에 가까운 경향을 보였고, 겨울철에 상대적으로 뚜렷하게 향상되지 않았던 TA와 PT지점에서도 봄철에서는 보다 더 향상된 모습을 볼 수 있었다. 추가적으로, 봄철을 대상으로 또한 COAWST\_WRFDA에서의 수치모의 결과와 COAWST\_DA에서의 수치모의 결과 비교를 분석하였을 때, DJ, TA, PT지점에서 3월 21일 이후 시간부터 COAWST\_DA가 COAWST\_WRFDA에 비해 관측값의 편차가 더 감소한 결과가 나타났다(평균 약 0.2, 1.7, 0.5°C). IC 지점 또한 관측값의 최고값을 특정 시간대(3월 18일~3월 22일)에서 COAWST\_WRFDA가 더 향상된 모습을 보였음을 통해, 자료동화를 모두 적용한 COAWST\_DA 실험에서 수치모의가 가장 향상되었음을 확인하였다.

겨울철에 대한 해수면온도 수치모의 결과를 살펴보면(Fig. 21), 전반적으로 자료동화를 모두 적용하여 수행한 결합모델(COAWST\_DA)이 결합하지 않은 모델(COAWST\_BASE)에 비해 관측값에 더 향상되었다. 또한, 앞선 기상모델만 자료동화한 실험(COAWST\_WRFDA)과 모두 자료동화한 실험(COAWST\_DA)간의 수치모의 결과를 비교하였을 때, COAWST\_WRFDA에서는 뚜렷하게 향상되지 않았던 지점들도 COAWST\_DA는 향상되었으며, 모든 지점에서 COAWST\_WRFDA에 비해 COAWST\_DA가 향상되었음을 확인할 수 있었다.

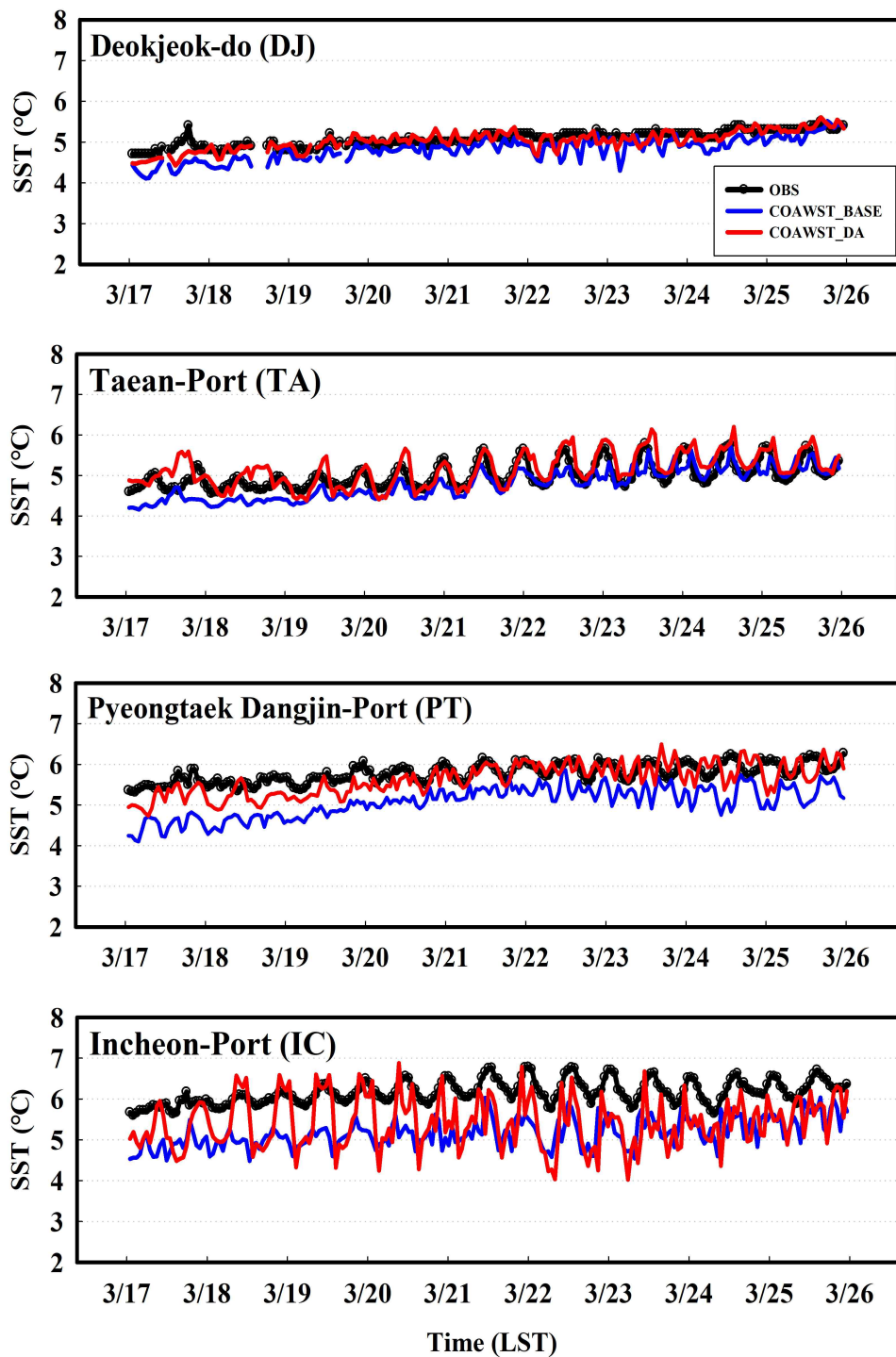


Fig. 20. Time series of the observed and simulated sea surface temperature (SST) at several marine buoy monitoring sites for COAWST\_BASE and COAWST\_DA during the study period (March 17-26, 2019).



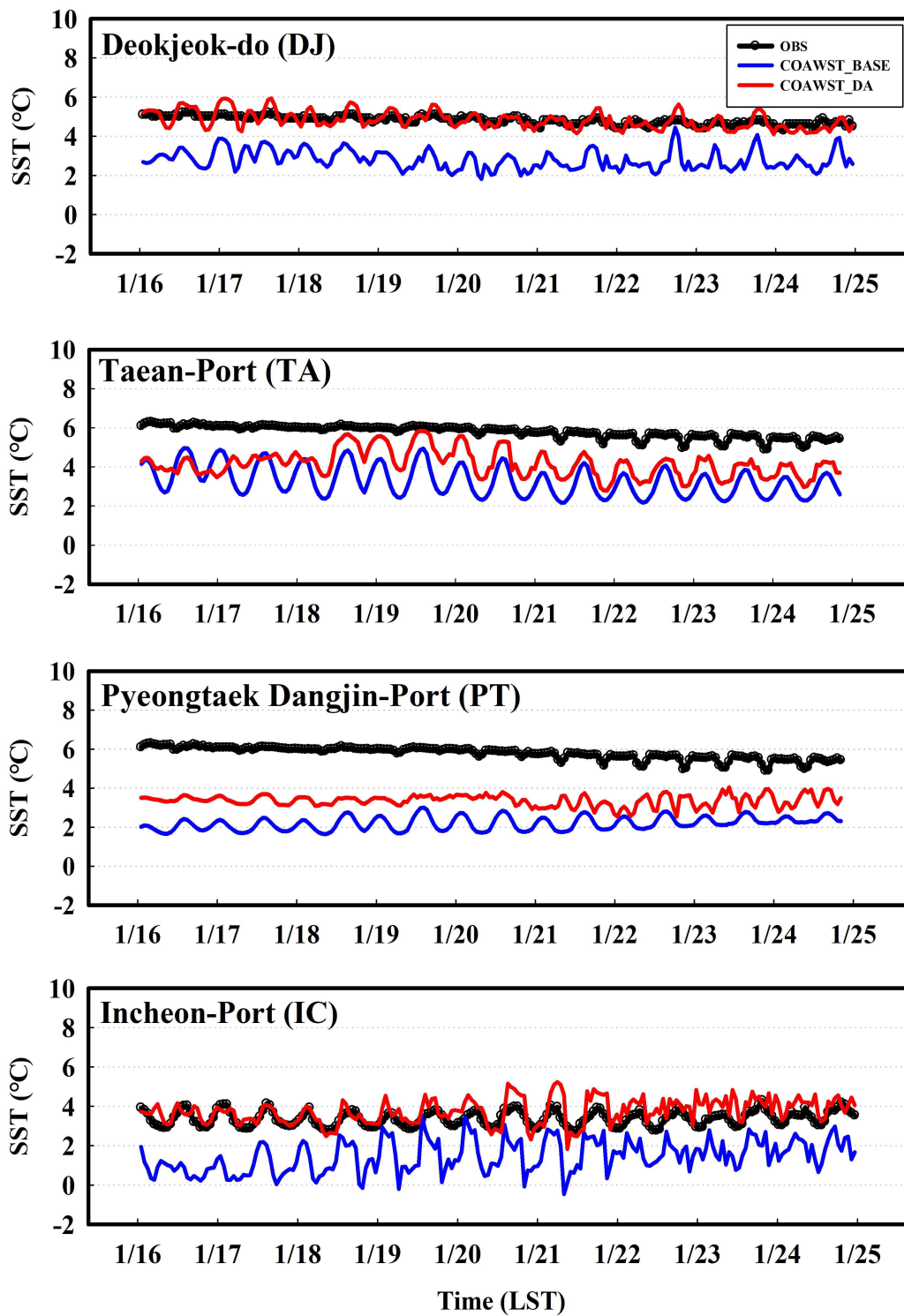


Fig. 21. Same as Fig. 20 except for the study period (January 16-25, 2019).

Fig. 22~27은 연구사례기간 중 겨울철을 대상으로 기상요소의 자료동화 효과를 파악하기 위해, 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)과 기상 및 해양모델 모두 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_DA)으로 구분하였고, 마찬가지로 같은 기상요소 지점(YJ, AS, SH, HS, DS, DJ)에서의 기상요소(기온, 풍속, 상대습도) 관측자료와 모델값들의 결과를 나타낸다. 봄철과 겨울철에서의 기온의 경우(Fig. 22, Fig. 25), 앞선 기상모델만 자료동화한 실험과 마찬가지로, COAWST\_DA가 COAWST\_BASE에 대부분 향상된 모습을 보였다. 그 중, 대부분 지점에서 관측값의 최고값을 COAWST\_DA 실험이 관측값에 더 가깝게 모의된 것을 확인할 수 있었으며(평균 약 1.2°C, 평균 약 1.1°C), 겨울철의 AS, SH 지점을 제외하고 나머지 지점에서 관측값의 최저값도 잘 모의하는 경향을 볼 수 있었다. 특히, 겨울철 기상모델만 자료동화한 실험(COAWST\_WRFDA)에서는 DS 지점에서의 모의결과가 COAWST\_BASE에서 더 향상되었지만, 자료동화를 모두 적용한 실험(COAWST\_DA)에선 COAWST\_DA가 COAWST\_BASE에 비해 뚜렷하게 향상된 모습을 보였다. 반면, 풍속과 상대습도의 경우에는(Fig. 23, Fig. 26, Fig. 24, Fig. 27), 풍속과 상대습도 모두 앞선 실험들과의 비슷한 경향을 보였으며 특정 시간대에서 COAWST\_DA가 관측값과 유사한 수치모의 결과가 나타났으나, 시계열 그래프만으로 해석하는데 한계가 있었으며 더 정량적인 실험 간 수치모의 수치비교 값의 필요성을 나타내었다. 또한, 앞선 COAWST\_WRFDA에서는 특정 기간에 해수면온도를 잘 모의하지 못하였고, 기상요소에 영향을 미쳐 기상요소 또한 수치모의 결과가 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)에서 향상된 모습을 보였지만, COAWST\_DA 실험에서는 COAWST\_WRFDA 보다 해수면 온도 수치모의 결과가 더 개선되었으며, 이러한 영향으로 인해 기상요소도 특정 지점에서 더 개선된 모습을 보인 것으로 사료된다.

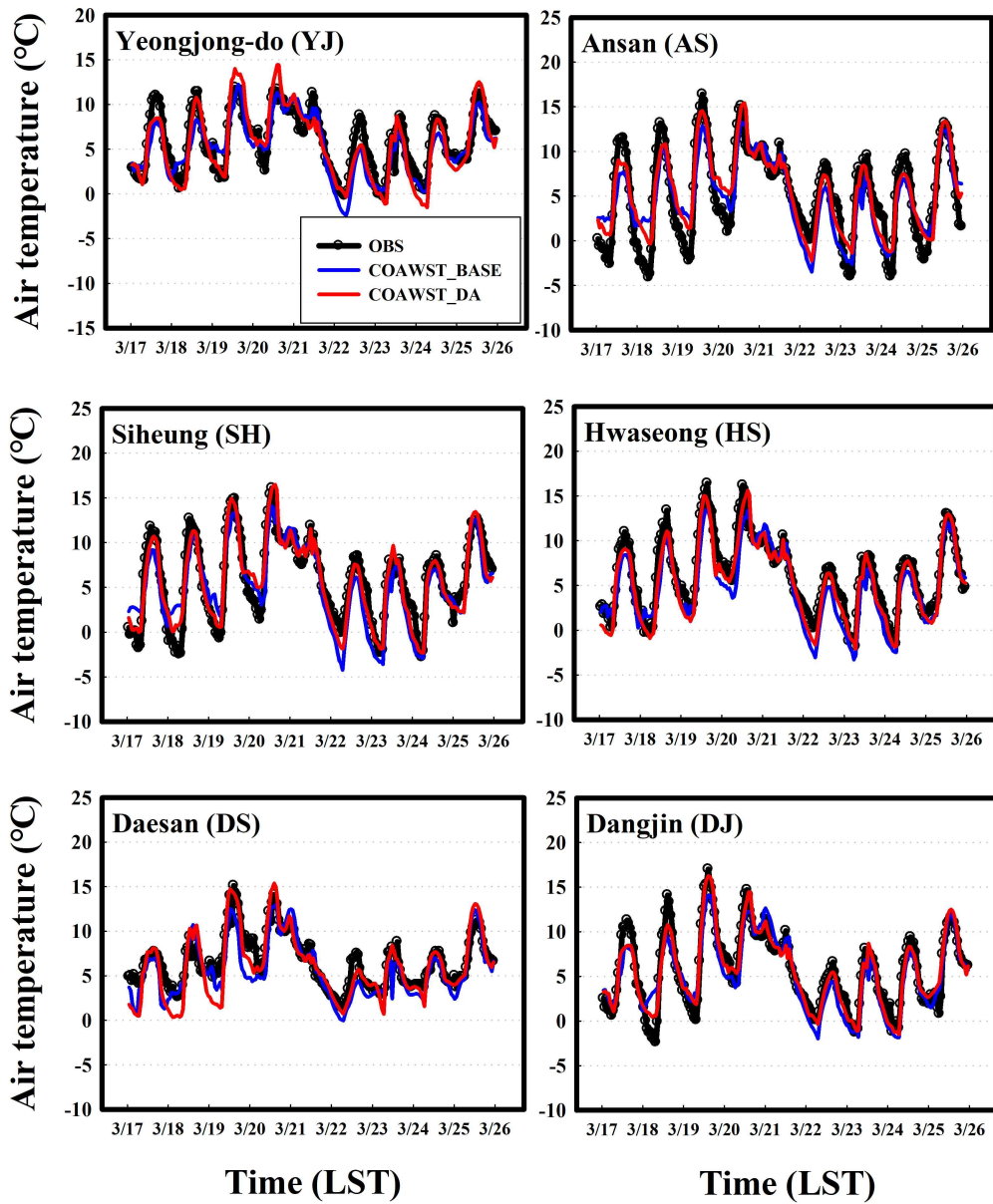


Fig. 22. Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for COAWST\_BASE and COAWST\_DA during the study period (March 17-26, 2019).

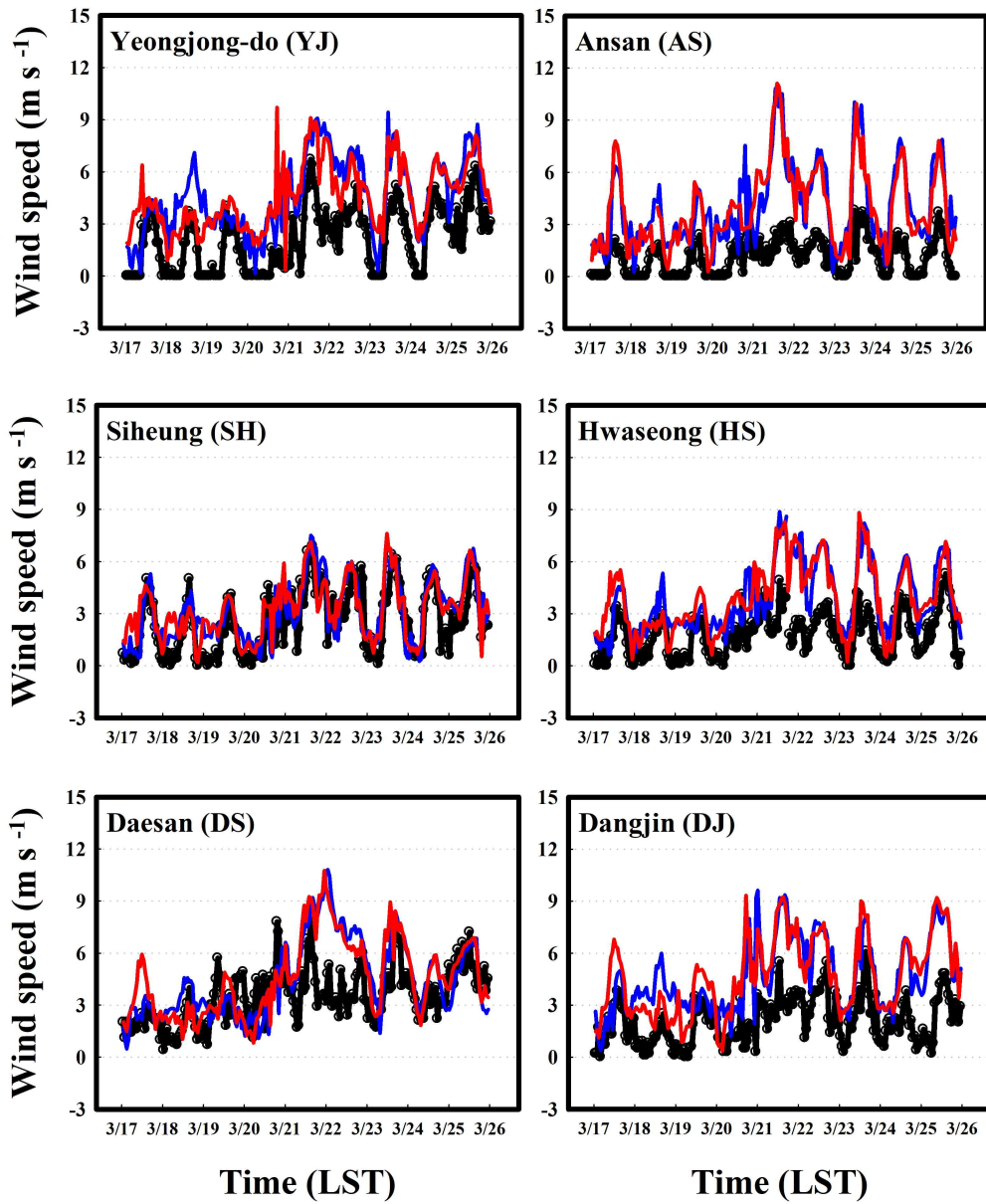


Fig. 23. Same as Fig. 22 except for wind speed.

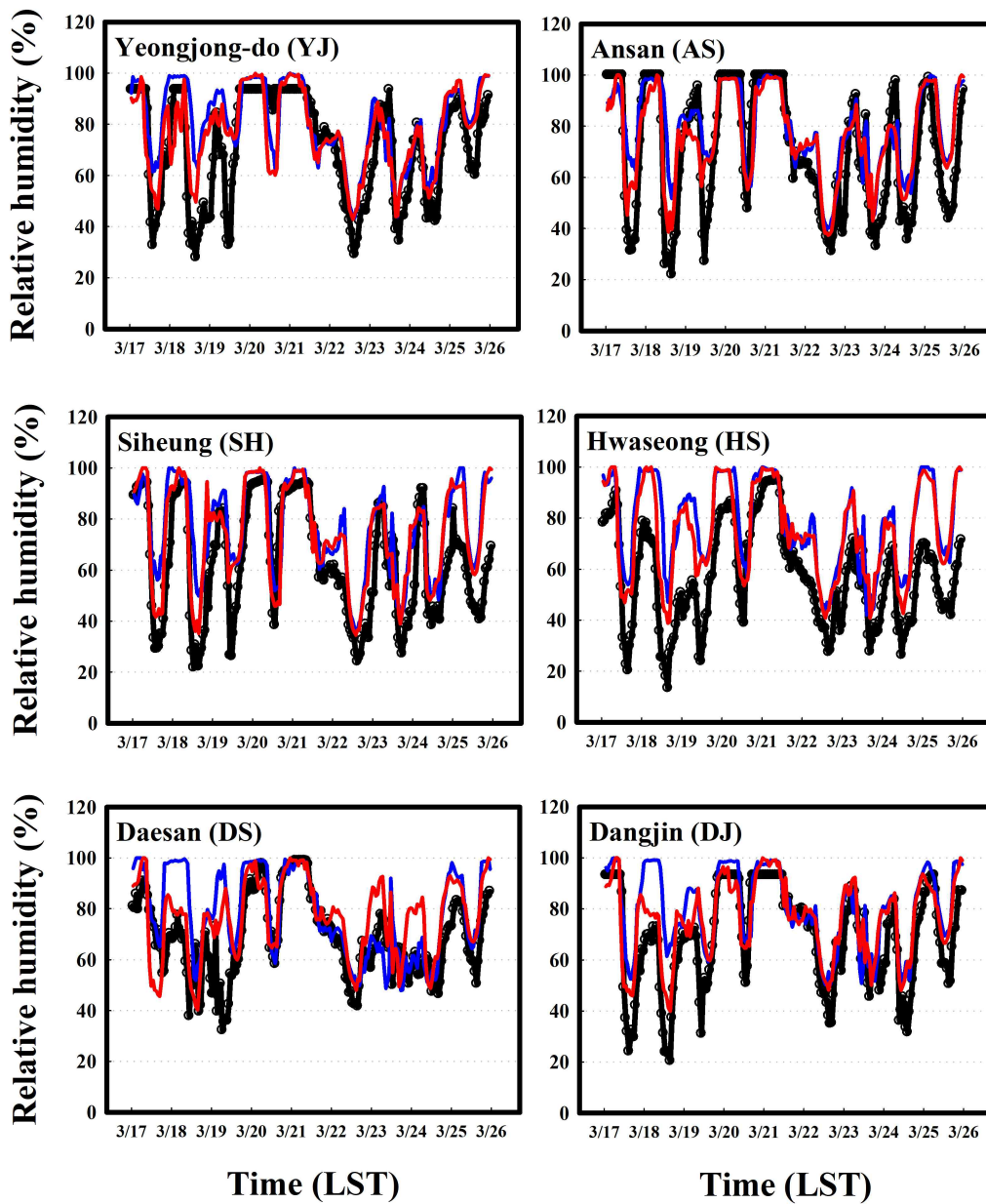


Fig. 24. Same as Fig. 22 except for relative humidity.



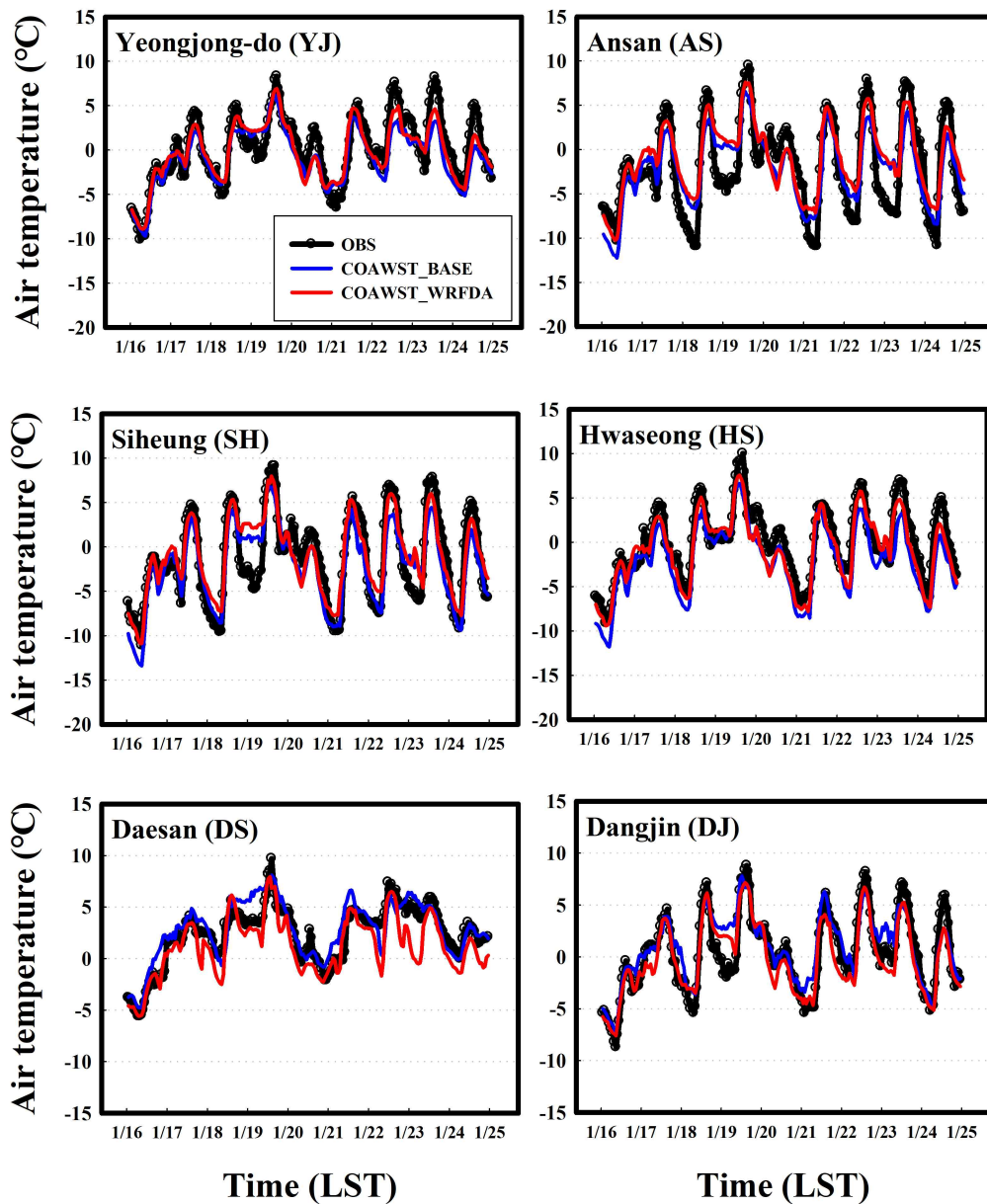


Fig. 25. Time series of the observed and simulated at six meteorological monitoring sites for COAWST\_BASE and COAWST\_DA during the study period (Winter 16-25, 2019).

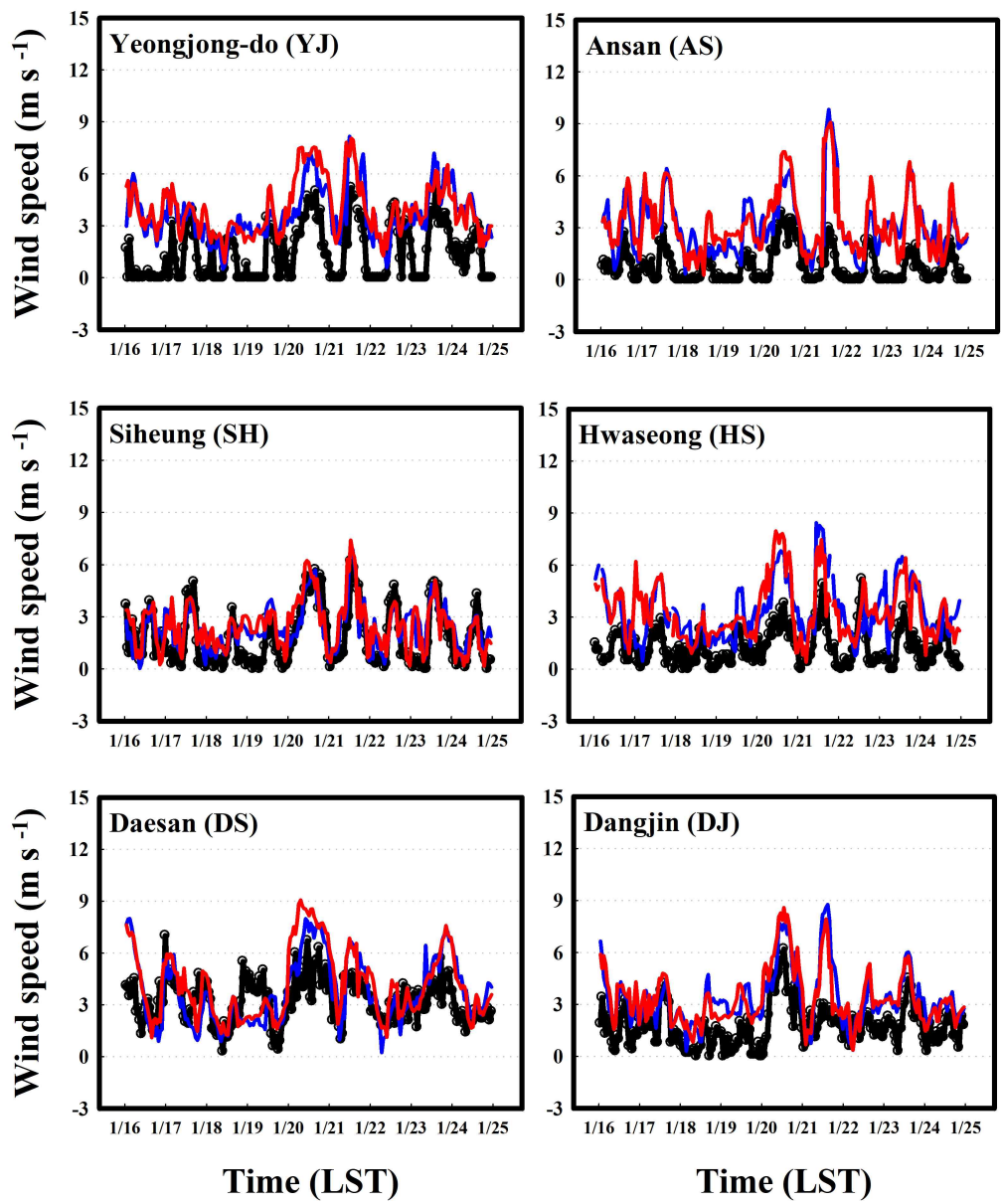


Fig. 26. Same as Fig. 25 except for wind speed.



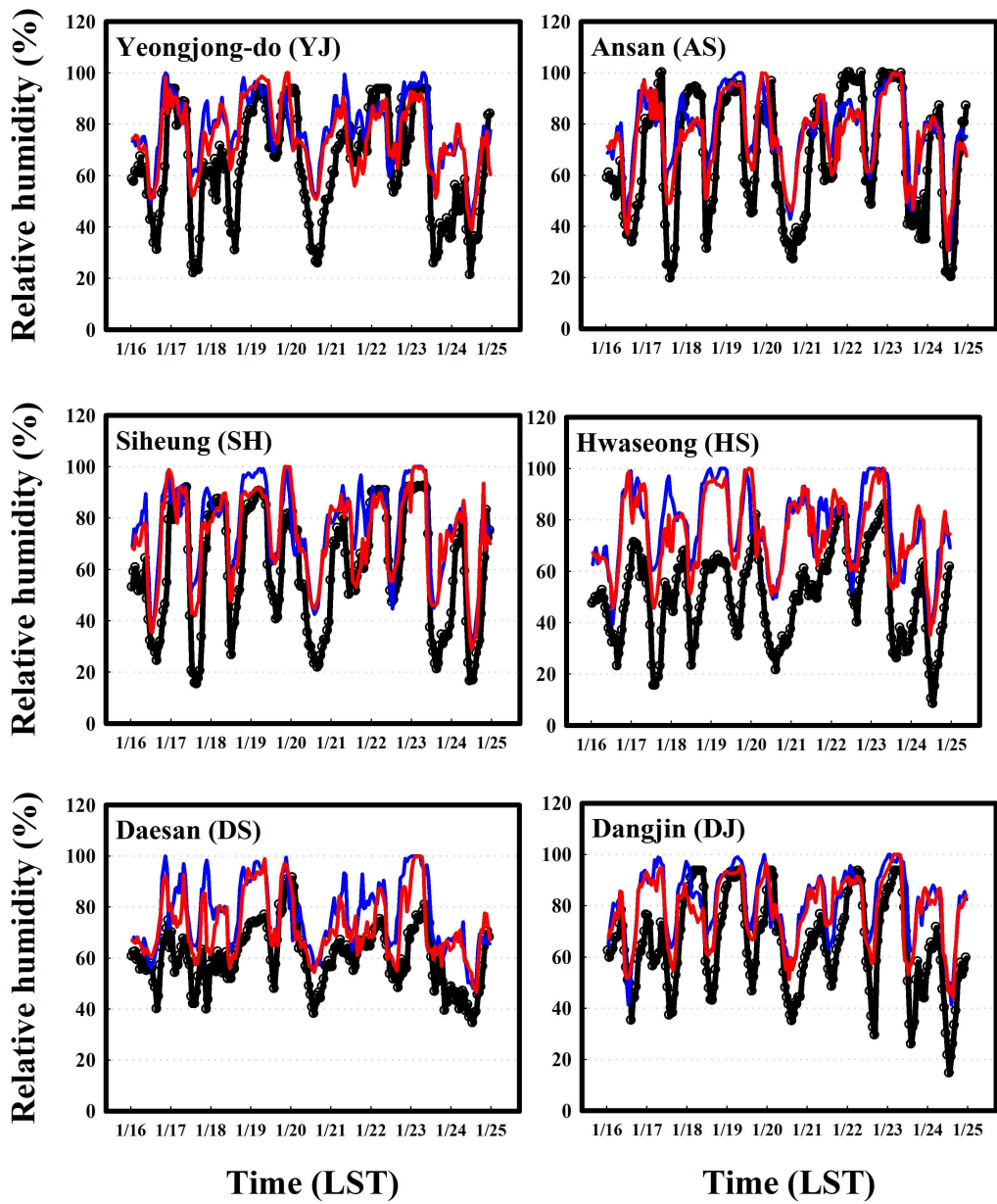


Fig. 27. Same as Fig. 25 except for relative humidity.

\_ 앞선 시계열 그래프로 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_DA)이 전반적으로 더 향상된 경향을 보였으나, 차이가 크지 않아 보다 정량적으로 파악하는데 한계가 존재하였다. 이에 따라, Table 5는 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)과 기상 및 해양모델 모두 자료동화를 적용한 실험(COAWST\_DA)으로 구분하여 마찬가지로 같은 6개의 기상요소 지점에서의 기상요소(기온, 풍속, 상대습도) 관측자료와 모델값들의 편차 결과(EXP\_DA(COAWST\_DA - OBS), EXP\_BASE(COAWST\_BASE - OBS))를 제시하였다. 봄철과 겨울철 모두 COAWST\_DA가 COAWST\_BASE에 모든 지점에서 기온, 풍속, 상대습도 모두 편차가 감소하였으며, 특히, 풍속에 비해 기온과 상대습도가 뚜렷하게 향상된 수치모의 결과(0.03~0.57°C, 1.97~5.40%)가 나타났다. 또한, 기상모델만 자료동화하여 수치모의 결과 편차를 비교한 실험과 비교하였을 때(Table 4), 앞선 실험에서 EXP\_BASE 실험이 더 향상된 지점들이 존재하였으나, 해양모델까지 자료동화한 실험에서는 이러한 지점들도 EXP\_DA가 향상되었고, 대부분 지점에서 모든 기상요소가 EXP\_WRFDA에 비해 EXP\_DA에서 편차가 더 감소하여 나타나 해양모델까지 자료동화하였을 때 더 관측값에 가까운 수치모의 결과를 보였다.

Table 5. The deviation of three meteorological variables between two model-simulated values (COAWST\_DA and COAWST\_BASE) and observations at six monitoring sites during the study period.

[A] Spring

| Site              | Variable | EXP_DA (COAWST_DA - OBS) | EXP_BASE (COAWST_BASE - OBS) |
|-------------------|----------|--------------------------|------------------------------|
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | 0.037                    | -0.614                       |
|                   | WS       | -1.229                   | -1.179                       |
|                   | RH       | 5.848                    | 9.450                        |
| Ansan (AS)        | TEMP     | -0.219                   | 0.360                        |
|                   | WS       | -1.059                   | -1.107                       |
|                   | RH       | 5.066                    | 8.050                        |
| Siheung (SH)      | TEMP     | -0.077                   | -0.620                       |
|                   | WS       | -2.585                   | -2.652                       |
|                   | RH       | 10.590                   | 13.130                       |
| Hwaseong (HS)     | TEMP     | -0.656                   | -1.218                       |
|                   | WS       | -2.137                   | -2.222                       |
|                   | RH       | 17.780                   | 20.960                       |
| Daesan (DS)       | TEMP     | -0.449                   | -0.837                       |
|                   | WS       | -1.904                   | -1.964                       |
|                   | RH       | 7.267                    | 9.240                        |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | -0.040                   | -0.510                       |
|                   | WS       | -0.929                   | -0.990                       |
|                   | RH       | 7.625                    | 10.850                       |

[B] Winter

| Site              | Variable | EXP_DA (COAWST_DA - OBS) | EXP_BASE (COAWST_BASE - OBS) |
|-------------------|----------|--------------------------|------------------------------|
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | -0.304                   | -0.314                       |
|                   | WS       | 2.219                    | 2.220                        |
|                   | RH       | 10.634                   | 13.585                       |
| Ansan (AS)        | TEMP     | -1.179                   | -1.201                       |
|                   | WS       | 2.213                    | 2.290                        |
|                   | RH       | 7.306                    | 9.547                        |
| Siheung (SH)      | TEMP     | -0.533                   | -0.790                       |
|                   | WS       | 0.546                    | 0.661                        |
|                   | RH       | 12.724                   | 15.779                       |
| Hwaseong (HS)     | TEMP     | -0.015                   | 0.210                        |
|                   | WS       | 1.841                    | 2.063                        |
|                   | RH       | 24.148                   | 26.934                       |
| Daesan (DS)       | TEMP     | 0.218                    | -0.872                       |
|                   | WS       | 0.551                    | 0.830                        |
|                   | RH       | 12.097                   | 16.393                       |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | -0.052                   | -0.279                       |
|                   | WS       | 1.560                    | 1.724                        |
|                   | RH       | 10.348                   | 15.757                       |

자료동화 적용에 따른 수치모의 결과 시계열 분석 및 편차 및 통계적 검증등을 통해 해수면온도 및 기상요소가 연구 대상 지점에서 뚜렷하게 향상되었음을 확인할 수 있었다. 그 중 단일모델과 결합모델의 상대습도 원인 분석(Fig. 12, Fig. 13)과 마찬가지로, Fig. 28과 Fig. 29는 자료동화로 인해 개선된 기상요소 중 상대습도 결과에 대해 보다 자세하게 해석하기 위해, 자료동화를 모두 적용한 COAWST\_DA 실험을 포함한 상대습도에 영향을 준 인자(기온, 풍속, 상대습도)들의 관측값과 모델값들의 편차(Uncoupled - OBS, Coupled - OBS, DA - OBS)로 제시하였다.

먼저 봄철에서의 상대습도와 기온, 풍속, 기압의 변화에 대해 살펴보았을 때, 대부분 시간대에 실험들 모두 비슷한 경향을 보였고, 특히 모델 초반부 시간대인 3월 18일과 3월 19일에서 단일모델이 결합모델보다 관측값과 더 가깝게 모의된 결과가 나타났는데, 자료동화를 적용하였을 때 수치모의 결과가 더 향상되었다(Fig. 28). 마찬가지로 3월 23일에서도 DA 실험이 뚜렷하게 향상되었으며, 기압 편차 또한 다른 시간대에 비해 가장 편차가 감소하였음을 알 수 있었다. 겨울철 상대습도 마찬가지로 특정 시간대(1월 19일, 1월 22일~23일)에 상대습도 수치모의가 DA에서 뚜렷하게 관측값에 가깝게 모의하는 것을 볼 수 있었으며, 이 시간에 Uncoupled, Coupled 보다 DA가 기압의 편차도 가장 감소하였고 차이가 크게 나타났다(Fig. 29). 두 사례별 기온과 풍속의 편차에 대해 살펴보았을 때, 겨울철이 봄철에 비해 더 감소하였으며, 사례 모두 DA에서 편차가 가장 낮게 나타났는데, 이를 통해 기온과 풍속의 개선으로 인해 기압의 개선효과가 뚜렷하였으며, 결과적으로 상대습도 까지 향상되는 결과가 나타난 것으로 사료된다.

[A] Spring

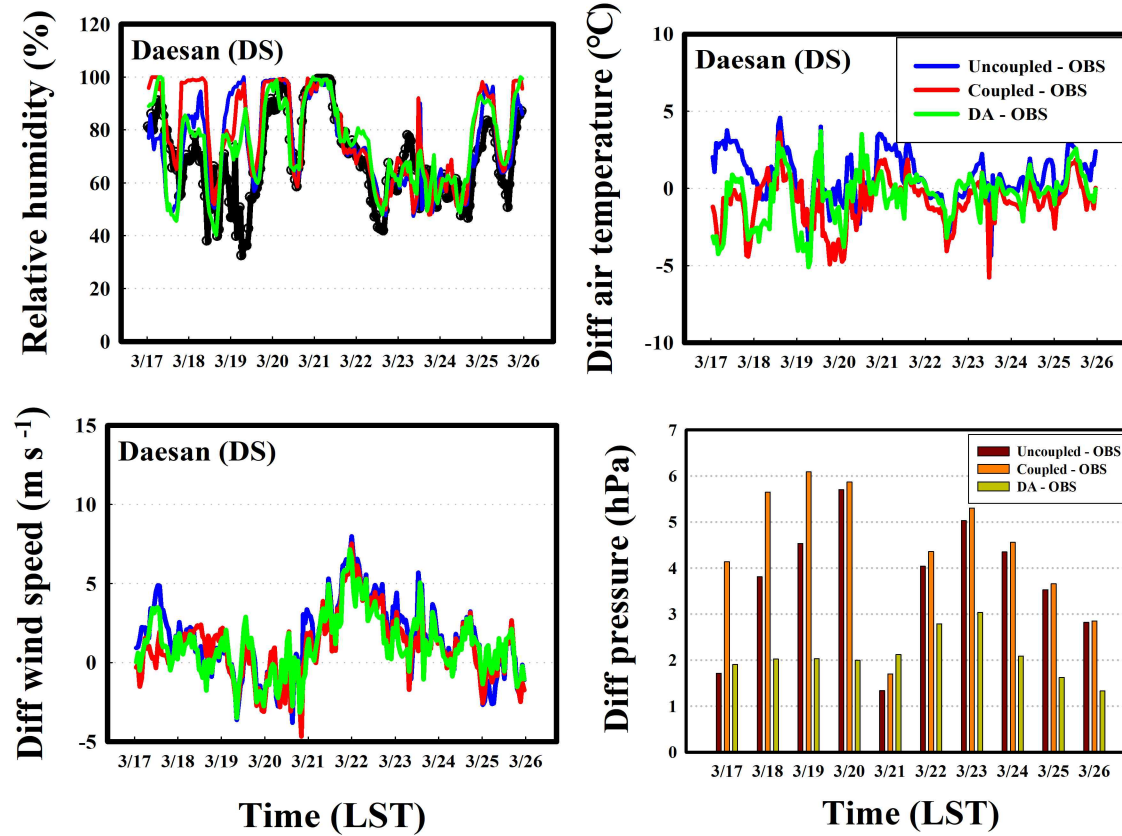


Fig. 28. Time series plot of meteorological variables deviation (air temperature, wind speed, pressure) for the observed and model-simulated at several monitoring site for the study period (March, 17-26, 2019).

[B] Winter

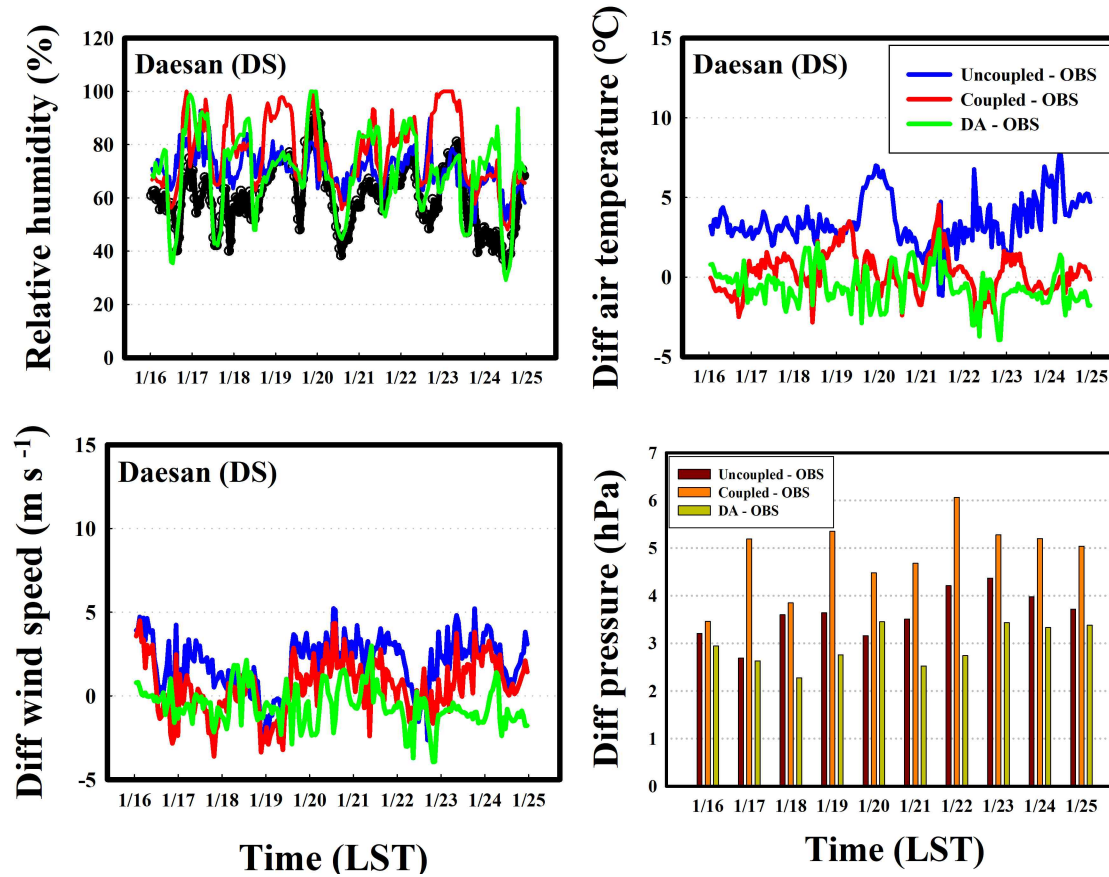


Fig. 29. Same as Fig. 28 except for the study period(January, 16-25, 2019).

앞선 기상요소 시계열 그래프(Fig. 22~27)를 통해, 자료동화를 적용하지 않은 실험(COAWST\_BASE)과 자료동화 적용 실험들(COAWST\_WRFDA, COAWST\_DA) 간의 경향이 유사하여 자세한 비교 및 분석을 실시하는데 제한이 있었다. 이에 따라, 연구기간 동안 자료동화 적용에 따른 해수면온도 및 기상요소 수치모의 결과의 통계분석을 제시하였다(Table 6). 먼저 해수면온도에 대해 살펴보았을 때, 상대적으로 기상모델만 자료동화한 COAWST\_WRFDA에서는 자료동화를 적용하지 않은 COAWST\_BASE 보다 겨울철, 봄철 모두 RMSE 및 MBE가 더 감소하여 향상되었지만, 특정 지점에서는 COAWST\_BASE에서 더 향상된 지점들도 존재하였다. 반면, 자료동화를 모두 적용한 COAWST\_DA는 COAWST\_BASE 및 COAWST\_WRFDA에 비해 모든 지점에서 RMSE 및 MBE가 비슷하거나 모두 감소하였음을 볼 수 있었다 (RMSE : 약 0.15 ~ 2.3°C , MBE : 0.06 ~ 2.1°C). 반면, COR의 경우 COAWST\_DA가 대부분 지점에서 가장 개선되었으나, 개선되지 않은 지점도 있어 지역마다 다르게 나타났다.

기상요소 간 통계적 검증 결과에서는, 겨울철 및 봄철 모두 기온과 풍속은 대부분 지점에서 COAWST\_BASE에 비해 COAWST\_WRFDA, COAWST\_DA가 IOA 및 RMSE 결과들이 향상되었으며, 특히 COAWST\_DA 실험에서 COAWST\_WRFDA 보다 비슷하거나 더 향상된 수치결과가 나타났으며, (IOA : 약 0.01 ~ 0.08, RMSE : 0.001 ~ 3.1°C) MBE 또한 감소되었음을 확인할 수 있었다. 상대습도에서 또한, 통계적 검증값들이 감소하여 앞선 단일모델과 결합모델 실험에서 보다 보완된 수치모의 결과들이 나타났다.



Table 6. Statistical evaluation of sea surface temperature and meteorological variables for the observed and model-simulated values (COAWST\_BASE, COAWST\_WRFDA and COAWST\_DA) at the monitoring sites during the study period.

[A] Spring

| Site                         | COAWST_BASE |        |       | COAWST_WRFDA |        |       | COAWST_DA |        |       |
|------------------------------|-------------|--------|-------|--------------|--------|-------|-----------|--------|-------|
|                              | RMSE        | MBE    | COR   | RMSE         | MBE    | COR   | RMSE      | MBE    | COR   |
| Deokjeok-do (DJ)             | 0.306       | -0.25  | 0.755 | 0.227        | -0.25  | 0.825 | 0.161     | -0.036 | 0.785 |
| Taeam-Port (TA)              | 0.341       | -0.212 | 0.707 | 0.46         | 0.349  | 0.74  | 0.312     | 0.151  | 0.741 |
| Pyeongtaek dangjin-Port (PT) | 0.774       | -0.689 | 0.517 | 0.34         | -0.15  | 0.561 | 0.34      | -0.145 | 0.564 |
| Incheon-Port (IC)            | 1.038       | -0.997 | 0.576 | 0.916        | -0.739 | 0.441 | 0.916     | -0.734 | 0.429 |

| Site              | Variable | COAWST_BASE      |                   |                  | COAWST_WRFDA     |                   |                  | COAWST_DA        |                   |                  |
|-------------------|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                   |          | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> |
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | 0.932            | 1.684             | -0.614           | 0.951            | 1.491             | -0.255           | 0.953            | 1.378             | 0.037            |
|                   | WS       | 0.647            | 2.847             | 2.476            | 0.640            | 2.743             | 2.460            | 0.667            | 2.600             | 2.336            |
|                   | RH       | 0.779            | 17.180            | 9.448            | 0.830            | 15.195            | 5.944            | 0.832            | 14.550            | 5.848            |
| Ansan (AS)        | TEMP     | 0.915            | 2.560             | -0.219           | 0.951            | 2.080             | 0.206            | 0.952            | 2.004             | 0.360            |
|                   | WS       | 0.436            | 3.390             | 2.900            | 0.436            | 3.335             | 2.908            | 0.439            | 3.346             | 2.904            |
|                   | RH       | 0.841            | 16.020            | 8.042            | 0.891            | 13.481            | 4.933            | 0.891            | 13.490            | 5.060            |
| Siheung (SH)      | TEMP     | 0.938            | 2.172             | -0.620           | 0.974            | 1.445             | -0.131           | 0.975            | 1.428             | -0.077           |
|                   | WS       | 0.851            | 1.355             | 0.637            | 0.838            | 1.399             | 0.714            | 0.864            | 1.288             | 0.611            |
|                   | RH       | 0.806            | 18.440            | 13.090           | 0.846            | 16.977            | 11.285           | 0.851            | 16.320            | 10.490           |
| Hwasong (HS)      | TEMP     | 0.949            | 1.864             | -1.218           | 0.977            | 1.282             | -0.731           | 0.978            | 1.241             | -0.656           |
|                   | WS       | 0.568            | 2.465             | 2.010            | 0.560            | 2.540             | 2.095            | 0.574            | 2.458             | 2.024            |
|                   | RH       | 0.687            | 24.210            | 20.950           | 0.745            | 21.623            | 18.530           | 0.751            | 20.800            | 17.680           |
| Daesan (DS)       | TEMP     | 0.914            | 1.747             | -0.837           | 0.928            | 1.715             | -0.515           | 0.932            | 1.665             | -0.449           |
|                   | WS       | 0.617            | 2.276             | 1.029            | 0.647            | 2.184             | 1.060            | 0.652            | 2.182             | 1.081            |
|                   | RH       | 0.740            | 16.860            | 9.166            | 0.776            | 15.291            | 7.114            | 0.784            | 15.260            | 7.142            |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | 0.955            | 1.710             | -0.510           | 0.981            | 1.124             | -0.078           | 0.981            | 1.123             | -0.040           |
|                   | WS       | 0.524            | 3.048             | 2.569            | 0.550            | 2.990             | 2.556            | 0.533            | 3.084             | 2.629            |
|                   | RH       | 0.792            | 16.260            | 10.850           | 0.866            | 12.605            | 8.280            | 0.872            | 12.570            | 7.607            |

[B] Winter

| Site                         | COAWST_BASE |        |        | COAWST_WRFDA |        |       | COAWST_DA |        |        |
|------------------------------|-------------|--------|--------|--------------|--------|-------|-----------|--------|--------|
|                              | RMSE        | MBE    | COR    | RMSE         | MBE    | COR   | RMSE      | MBE    | COR    |
| Deokjeok-do (DJ)             | 2.068       | -2.025 | 0.47   | 2.610        | -2.571 | 0.037 | 0.34      | 0.021  | 0.684  |
| Tacan-Port (TA)              | 2.566       | -2.482 | 0.558  | 3.196        | -3.145 | 0.664 | 1.711     | -1.611 | 0.556  |
| Pyeongtack dangjin-Port (PT) | 3.623       | -3.592 | -0.123 | 3.9241       | -3.897 | 0.332 | 2.453     | -2.415 | -0.212 |
| Incheon-Port (IC)            | 2.205       | -2.119 | 0.619  | 2.037        | -1.906 | 0.483 | 0.634     | 0.389  | 0.605  |

| Site              | Variable | COAWST_BASE      |                   |                  | COAWST_WRFDA     |                   |                  | COAWST_DA        |                   |                  |
|-------------------|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                   |          | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> | IOA <sup>a</sup> | RMSE <sup>b</sup> | MBE <sup>c</sup> |
| Yeongjong-do (YJ) | TEMP     | 0.901            | 2.258             | -1.614           | 0.917            | 1.986             | -0.940           | 0.948            | 1.582             | -0.324           |
|                   | WS       | 0.554            | 2.704             | 2.206            | 0.548            | 2.887             | 2.469            | 0.581            | 2.639             | 2.246            |
|                   | RH       | 0.709            | 19.942            | 13.585           | 0.707            | 19.146            | 11.657           | 0.757            | 17.683            | 10.633           |
| Ansan (AS)        | TEMP     | 0.893            | 2.887             | -0.130           | 0.879            | 2.999             | 0.438            | 0.896            | 2.869             | 0.932            |
|                   | WS       | 0.472            | 2.663             | 2.290            | 0.463            | 2.793             | 2.402            | 0.476            | 2.790             | 2.265            |
|                   | RH       | 0.785            | 18.368            | 9.547            | 0.789            | 17.978            | 8.294            | 0.815            | 16.874            | 7.306            |
| Siheung (SH)      | TEMP     | 0.928            | 2.466             | -0.857           | 0.929            | 2.464             | -0.283           | 0.936            | 2.282             | 0.359            |
|                   | WS       | 0.809            | 1.280             | 0.481            | 0.799            | 1.362             | 0.661            | 0.806            | 1.353             | 0.668            |
|                   | RH       | 0.778            | 20.815            | 15.767           | 0.793            | 19.680            | 14.056           | 0.812            | 18.577            | 12.724           |
| Hwaseong (HS)     | TEMP     | 0.912            | 2.392             | -1.976           | 0.933            | 2.003             | -1.409           | 0.959            | 1.582             | -0.889           |
|                   | WS       | 0.749            | 2.536             | 2.094            | 0.761            | 2.437             | 2.028            | 0.767            | 2.434             | 2.006            |
|                   | RH       | 0.561            | 29.600            | 26.934           | 0.569            | 28.354            | 25.728           | 0.592            | 26.798            | 24.148           |
| Daesan (DS)       | TEMP     | 0.931            | 1.452             | 0.569            | 0.821            | 2.593             | -2.092           | 0.905            | 1.761             | -1.107           |
|                   | WS       | 0.684            | 1.722             | 0.553            | 0.652            | 1.876             | 0.830            | 0.684            | 1.742             | 0.930            |
|                   | RH       | 0.587            | 19.555            | 16.393           | 0.590            | 18.302            | 15.003           | 0.676            | 15.267            | 12.097           |
| Dangjin (DJ)      | TEMP     | 0.936            | 1.725             | 0.516            | 0.928            | 1.902             | -0.910           | 0.954            | 1.503             | -0.517           |
|                   | WS       | 0.622            | 1.978             | 1.561            | 0.600            | 2.137             | 1.724            | 0.640            | 1.967             | 1.609            |
|                   | RH       | 0.690            | 20.040            | 15.757           | 0.701            | 18.762            | 13.731           | 0.720            | 18.123            | 12.871           |

앞선 기상모델만 자료동화한 실험에서의 공간분포와 마찬가지로(Fig. 18, Fig. 19), Fig. 30, Fig. 31은 기상 및 해양모델의 자료동화 효과에 따른 해수면온도 및 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)의 수치모의 결과를 공간적으로 파악하기 위해 연구기간동안 해수면온도 기온, 풍속, 상대습도의 실험 간 수치모의 차이(COAWST\_DA - COAWST\_BASE)의 평균장을 나타내었다.

겨울철의 해수면온도에서는, 전반적으로 COAWST\_WRFDA의 공간분포 결과와 유사한 공간분포를 보였고, 미세한 차이는 있었으나 COAWST\_WRFDA와 COWAST\_DA 두 실험간 수치모의 차이가 뚜렷하게 나타나진 않았다. 기상요소에 대해서 살펴보면, 기온, 풍속, 상대습도 모두 COAWST\_WRFDA와 다른 공간분포를 보였는데, 먼저 기온의 경우, COWAST\_DA, COAWST\_BASE 실험의 차이에서는 OAWST\_WRFDA와 COAWST\_BASE의 차이보다 더 뚜렷한 공간분포가 나타났다. 특히, COWAST\_DA에서 육지지역 보다 해양지역 및 연안지역에서 뚜렷한 차이를 보여(약 +1.3℃), COWAST\_WRFDA보다 더 큰 과대모의 경향성을 볼 수 있었다. 풍속에서는, 특정 지역에서 COAWST\_DA가 COWAST\_WRFDA에 비해 과소모의 하는 경향이 나타났으며, 상대적으로 해양에서는 뚜렷한 과대모의를 보였다. 이외에도 COWAST\_DA에서 COWAST\_WRFDA 보다 위도 37.6°N을 기준으로 낮은 위도의 연안지역에서 더 뚜렷한 과대모의 경향이 나타났다. 마지막으로 상대습도는 기온과 풍속과 달리 대체로 COAWST\_DA가 과소모의 하였고, COWAST\_WRFDA 실험과 비교하였을 때, COWAST\_DA에서 더 큰 과소모의가 나타났으며, 또한 앞선 실험 간 기온비교 결과처럼 상대습도는 해양에서 더 뚜렷하게 과소모의 하였다.

[A] Spring (DA - BASE)

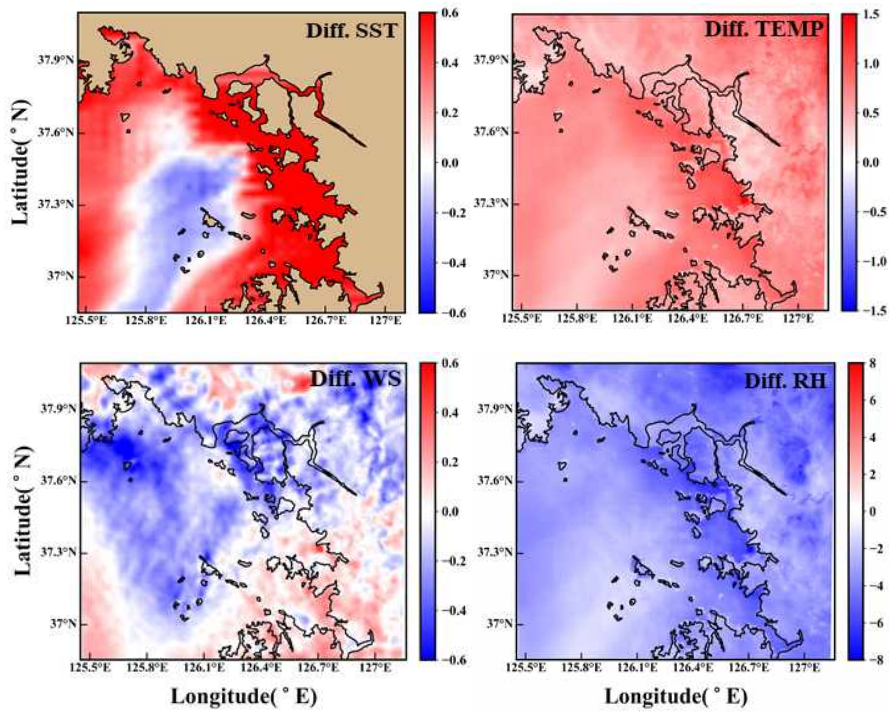


Fig. 30. Mean differences of sea surface temperature and meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) between two simulation experiments (COAWST\_DA and COAWST\_BASE) during the study period (March 17-26, 2019).

[B] Winter (DA - BASE)

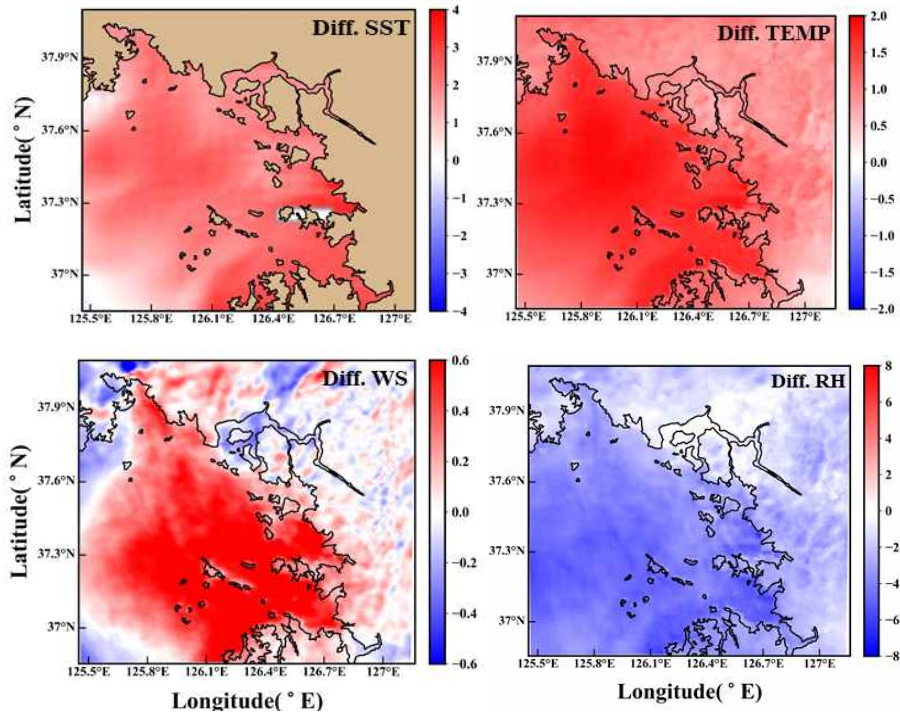


Fig. 31. Same as Fig. 30 except for the study period (January 16-25, 2019).

일반적으로, 해수면온도의 변화는 인근 기상장 변화에 영향을 주게 되고, 해수면 인근 해양기상에도 직접적인 영향을 미친다(Jeong et al., 2015; Lee et al., 2010). 해수면에서 바람이 강하게 불 때, 해수의 심층과 표층 간 서로 혼합되어 해수면온도가 낮아지게 되고, 이러한 바람의 세기에 따라 나아가 지상 기압의 변화에도 원인이 되기 때문에 이를 분석해야 할 필요성이 있다. 이에 따라, Fig. 32, Fig. 33은 해수면온도가 해상풍에 미치는 영향을 파악하기 위해, 연구기간 동안 해양부이(DJ, TA, PT, IC)에서의 해수면온도 자료들(관측값, 모델값)과 이들의 지점에서 가장 인접한 조위관측소(DJ, TA, DS, IC)에서의 해상풍 자료들(관측값, 모델값)을 이용하였으며, 이들의 모델값과 관측값 간의 편차 시계열을 나타낸다. 또한 두 실험 모두 해수면온도 결과에 따른 해상풍의 변화가 잘 나타나는지 확인하기 위해, COAWST\_DA, COAWST\_BASE로 나눠 분석하였다.

봄철에 대해 살펴보았을 때(Fig. 32), DJ 지점에서는 특정 기간(3월 18일 ~ 20일)을 제외하고 해수면온도 편차 과소모의에 따른 해상풍 과대모의 경향을 잘 나타냈으며, IC 지점 또한 모든 시간대에서 이러한 경향을 잘 모의하였다. 한편 TA, PT 지점의 경우, COAWST\_BASE 실험에서는 대부분 시간대에서 이와 같은 경향을 확인할 수 있었으나, 두 지점 모두 COAWST\_DA 실험의 해수면온도 편차가 대부분 과대모의 하여 반대되는 결과를 볼 수 있었다.

Fig. 33에서 볼 수 있듯이, 전반적으로 겨울철에서 1월 20일부터 1월 22일에 해상풍의 풍속 편차(모델값과 관측값)들이 평균적으로 가장 크게 나타나는 모습을 보였으며, 앞선 Fig. 26의 풍속결과와 유사하게 나타났다. TA 지점과 PT 지점에서는 두 실험 모두 대부분 시간대에 해상풍이 양(+의 편차를 나타내 과대모의 경향을 보였으나, 해수면온도는 반대로 모든 시간대에 음(-)의 편차를 나타내어 관측값에 과소모의 경향을 보였다. 이는 풍속이 강하게 나타나 해수면온도의 감소를 모델에서 잘 반영한 것으로 판단된다. 반면, DJ 지점은 앞선 지점들과 유사하였으나 COAWST\_DA 해수면온도 편차에서 과대모의 경향을 나타낸 특정 시간대가 존재하였으며, 해상풍의 경우에도 과대모의 경향을 보였고, 특히 IC 지점의 경우 이러한 경향들이 대부분 시간대에서 확인할 수 있어 TA, PT 지점에서의 실험 결과와 다른 모습을 나타냈다.



[A] Spring

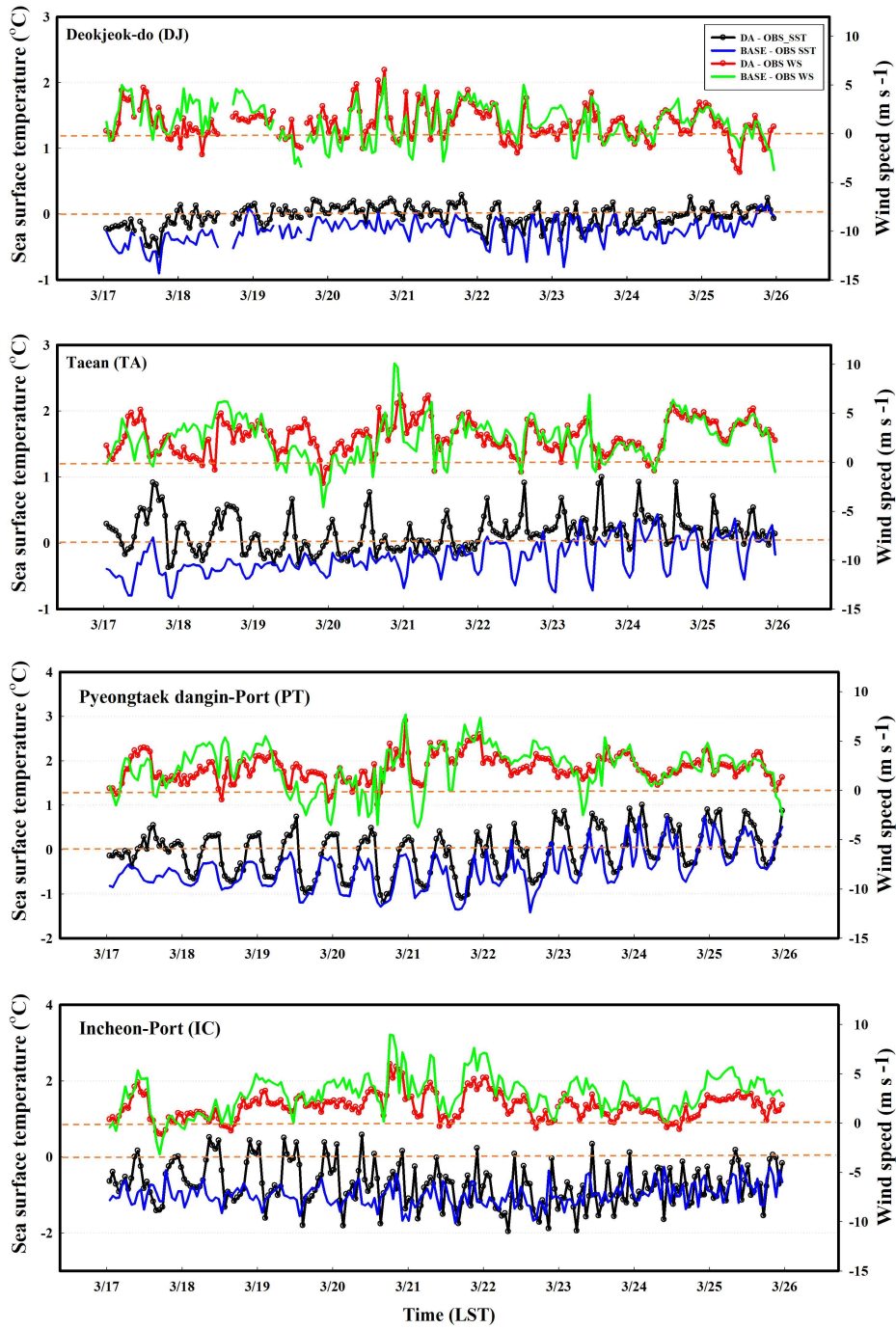


Fig. 32. Time series of the deviation of sea surface temperature (SST) and sea surface wind speed between observations and model-simulated values at four monitoring sites the study period (March 17-26).



[B] Winter

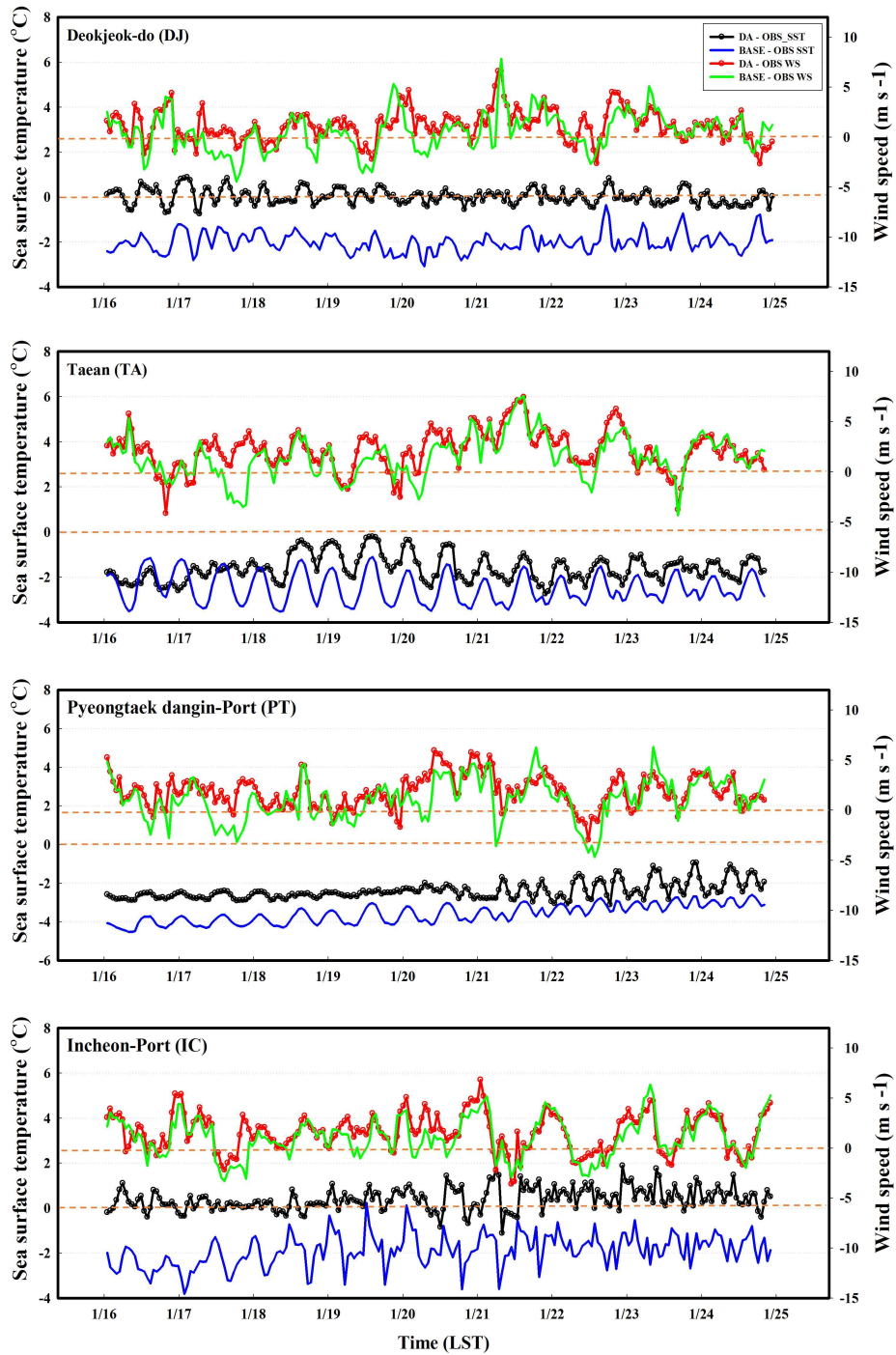


Fig. 33. Same as Fig. 32 except for the study period (January 16-25, 2019).

추가적으로, 해수면온도가 인근 국지기상에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 34와 Fig. 35는 지역 내 해수면온도와 다른 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)간의 상관관계를 나타낸다. 해수면온도 및 나머지 기상요소 관측값 간의 상관관계를 먼저 분석한 후, COAWST\_BASE, COAWST\_DA의 상관관계를 각각 분석하여 관측값과 모델값 간의 간접 비교도 함께 진행하였다. 겨울철 및 봄철 모두 전반적으로 기온과 풍속은 양의 상관관계를, 상대습도는 이와 반대인 음의 상관관계를 보였으며, 기온, 풍속, 상대습도 모두 겨울철 상대습도를 제외하고 COAWST\_DA에서 COAWST\_BASE 보다 관측값에 더 유사한 상관관계 값을 나타냈다. 겨울철에서의 상대습도를 살펴보았을 때, COAWST\_BASE에서 약 0.05로 더 높은 상관성을 보였으나, 겨울철 및 봄철 연구사례를 대상으로 기온의 경우 약 0.11~0.15, 풍속은 0.02~0.05, 마지막으로 상대습도는 0.01 높은 상관성을 나타냈다. 그 중, 두 사례 모두 기온과 상대습도에 비해 풍속에서 상관관계가 더 높았으며, 이를 통해 해수면온도는 상대적으로 기온 및 상대습도에 비해 풍속과 밀접한 연관성이 있으며, 자료동화를 적용하였을 때 수치모의 결과가 보다 향상되게 모의한다는 것을 알 수 있었다.

[A] Spring

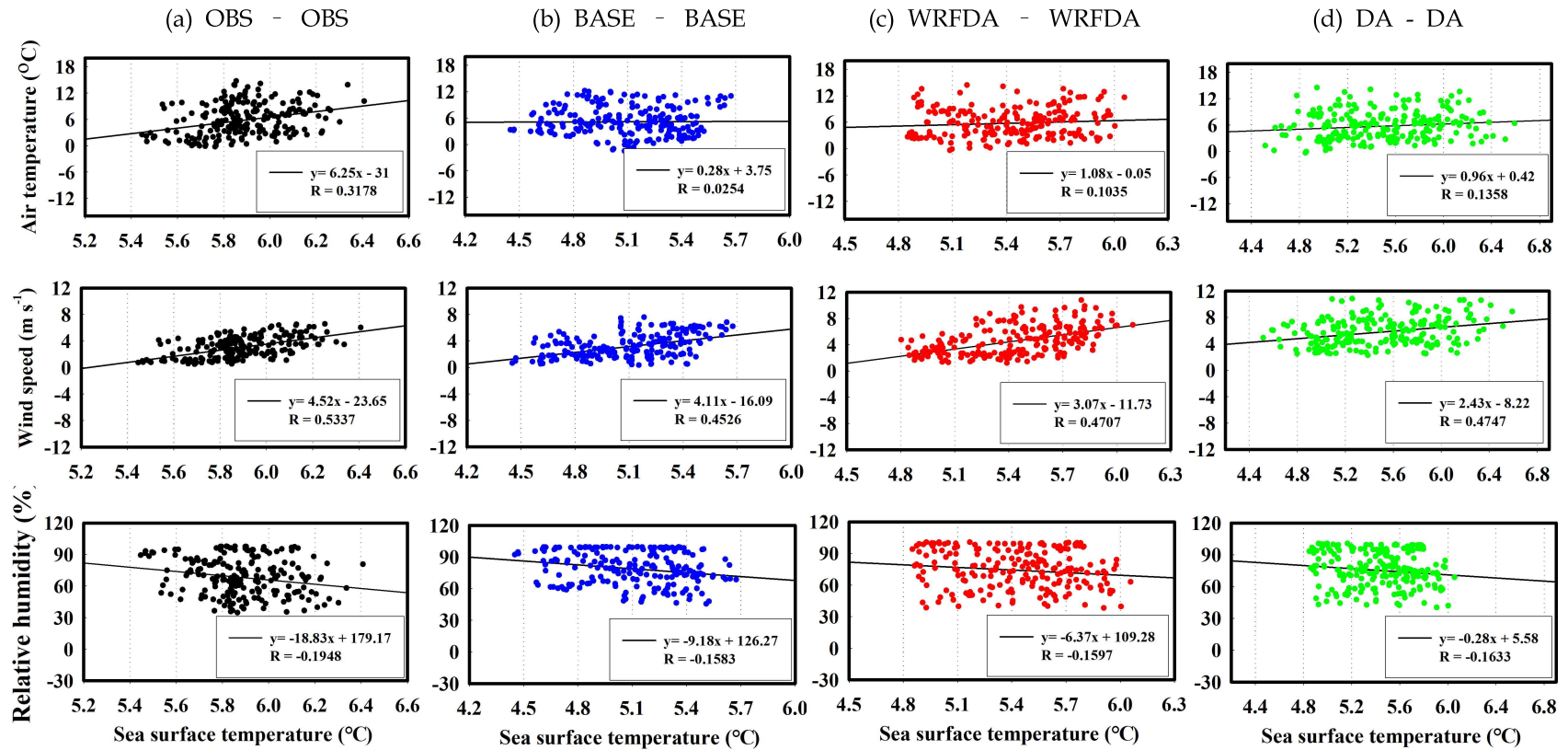


Fig. 34. Correlation between sea surface temperature and three meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) for observations and two simulation experiments during the study period (March 17-26, 2019).

[B] Winter

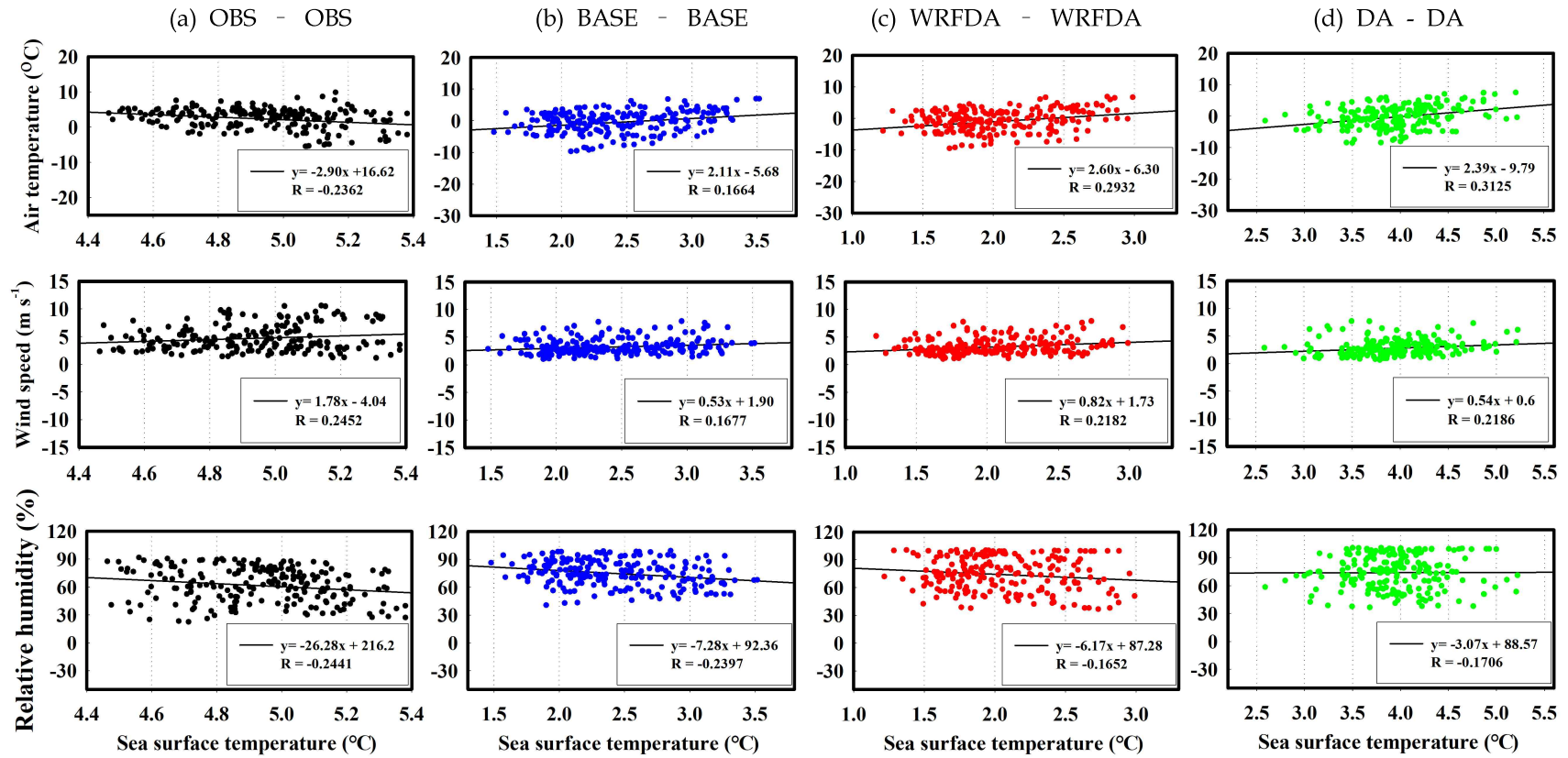


Fig. 35. Same as Fig. 34 except for the study period (January 16-25, 2019).

## 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 전 세계적으로 조차가 큰 해역 중 하나인 우리나라 서해안 지역에서 최근 조석현상이 비교적 크게 일어났던 2019년 봄철(3월 17일~26일) 및 겨울철(1월 16일~25일)을 대상으로 대기-해양 상호작용이 반영된 결합모델의 예측성능을 평가하고 추가적으로 이러한 결합모델의 자료동화 효과에 따른 주변 국지기상의 변화를 살펴보았다.

먼저, 해수면온도에 대한 결합하지 않은 단일모델(Uncoupled)과 결합모델(Coupled)의 수치모의 결과를 비교하였을 때, 전반적으로 Coupled 실험이 봄철 및 겨울철에서 대부분 지점이 관측값에 향상된 경향을 볼 수 있었으나, 특정 지점(PT, IC)에서 Uncoupled 수치모의 결과가 더 관측값에 가까운 모의결과(평균 약  $0.78^{\circ}\text{C}$ ,  $0.80^{\circ}\text{C}$ )를 보였다. 추가적으로, 단일모델과 결합모델 간 기상요소의 수치모의 결과를 분석에서도, 봄철 및 겨울철 모든 사례에서 Coupled가 Uncoupled에 비해 기온과 풍속이 향상된 지점들이 많았지만, 상대습도는 거의 모든지점에서 Uncoupled가 더 향상된 수치모의 결과를 보여 다른 수치모의 결과가 나타났다(평균 약 2.3%). 상대습도에 대해 결합모델의 예측 정확도가 다소 낮게 나타난 원인을 규명하기 위해, 상대습도 산정에 필요한 핵심 요소들(기온, 혼합비, 기압)의 변화에 대해 보다 자세하게 분석하였다. Uncoupled에서의 기온 및 기압의 변화가 Coupled에 비해 관측값에 더 향상되었으며, 상대습도 수치모의에 영향을 준 것으로 추정되며, 이를 통해 상대습도는 다른 요소들에 비해 상대적으로 대기-해양 간 수증기 교환에 더 민감한 반응을 보이기 때문에 결합모델 수행 시 이와 관련된 과정들을 계산하는데 보완할 필요성이 존재하였다.

앞선 단일모델과 결합모델 실험에서 언급하였듯이, 결합모델의 수치예측을 평가하기 위해 단일모델과 결합모델의 수치모의 결과를 비교하였을 때, 결합모델이 대부분 지점에서 해수면온도 및 기상요소(기온, 풍속) 수치모의를 더 향상된 결과를 보였으나, 다소 상반되는 결과가 나타난 지점들도 존재하였으며 특히 기상요소 중 상대습도에 대해 잘 모의하지 못하는 경향을 볼 수 있었다. 이러한 결과들을 보완하기 위해, 본 연구에서는 현재 기상 및 해양 수치모의를 향상시키기



위해 모델의 초기 및 경계조건을 개선시키는 방법 중 자료동화 기법(기상모델만 자료동화한 실험, 기상 및 해양모델 모두 자료동화한 실험)을 모델에 적용하여 보다 향상된 수치모의 결과를 분석하였다.

결합모델의 자료동화 효과를 파악하기 위해, 먼저 기상모델만 자료동화를 한 실험(COAWST\_WRFDA)과 자료동화를 적용하지 않은 실험(COWAST\_BASE)으로 나눠 관측값 자료들(해수면온도, 기상요소)과 수치모의를 비교하였다. 봄철에서는 모든 지점에서 COAWST\_WRFDA 실험이 관측값과 더 유사한 수치모의 결과를 보였으나, 겨울철에서는 오히려 COAWST\_BASE에서 더 향상된 지점들이 존재하였으며 그 중 TA지점에서 평균 약  $0.66^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높은 수치를 보였다. 또한 기상요소들 경우, 기온 및 풍속 모두 COWAST\_WRFDA에서 개선된 수치모의 결과를 볼 수 있었다. 특히, 앞의 단일모델과의 실험에서 결합모델이 상대습도를 잘 모의하지 못하는 수치모의 경향을 COWAST\_WRF가 뚜렷하게 개선된 경향을 보였다(평균 약 2.5%).

마지막으로, 해양모델까지 자료동화를 적용(COWAST\_DA)하여 자료동화를 적용하지 않은과의 실험을 비교하였을 때, 겨울철 및 봄철 모든 사례에서 해수면온도와 기상요소 모두 모든 지점에서 뚜렷하게 향상되었으며 관측값의 편차가 감소한 결과가 나타나 자료동화의 효과로 인한 수치모의 개선을 확인할 수 있었다. 추가적으로, 자료동화 실험에서 개선된 상대습도 수치모의 결과 및 산정에 영향을 주는 인자(기온, 풍속, 기압)들의 변화 또한 분석하였으며, 기온, 풍속, 기압이 사례일 모두 COAWST\_DA에서 뚜렷하게 향상되어 상대습도 또한 향상되었음을 확인할 수 있었다.

이러한 자료동화를 통한 개선된 해수면온도가 국지기상에 미치는 영향을 파악하기 위해, 해수면온도와 3가지 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)와의 상관관계 분석을 실시하였으며, 최종적으로 모두 자료동화한 COAWST\_DA가 COAWST\_BASE, COAWST\_WRFDA에 비해 상관관계가 더 높게 나타났으며(특히, 풍속) 이외에도, 해수면온도와 해상풍 변화 분석을 통해 결합 자료동화로 인해 개선된 해수면온도가 인근 지역 국지기상에 미치는 영향이 컸음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 문수환, 송상근, 2021, 조석현상에 의한 시간별 토지피복 변화가 연안기상에 미치는 영향 평가에 관한 새로운 접근 방법. 한국기상학회 학술대회논문집, 287-287.
- 박근영, 모선진, 우종택, 류찬수, 2005, 해수온도가 호남서해안 지방의 기후에 미치는 영향. 한국지구과학회: 학술대회논문집, 356-364.
- 안혜연, 김유근, 정주희, 2017, 경기만 갯벌의 지표면 토지피복 변화가 국지기상에 미치는 영향 평가. 대기, 27(4), 399-409.
- 조성빈, 송상근, 문수환, 2021, 2019년 수도권 연무사례시 기상모델의 분석 넷징 자료동화가 PM<sub>2.5</sub> 농도 모의에 미치는 효과. 한국대기환경학회지, 37(2), 231-247.
- 한승범, 송상근, 문수환, 2022, 2019년 서울지역 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례의 농도 특성 및 물리·화학적 생성 기여도 분석. 한국대기환경학회지, 38(2), 220-236.
- Arakawa, A., Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. In *Methods in Computational Physics*, 17, Academic Press, New York, 173-265.
- Balmaseda, M., Anderson, D. (2009). Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill. *Geophysical Research Letters*, 36, L011701.
- Barker, D. M., Huang, W., Guo, Y. R., Bourgeois, A. J., Xiao, Q. N. (2004). A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results. *Monthly Weather Review*, 132, 897-914.
- Burls, N., Reason, C. J. C. (2008). Modelling the sensitivity of coastal winds over the Southern Benguela upwelling system to different SST forcing. *Journal of Marine Systems*, 74, 561-584.



- Carrier, M. J., Ngodock, H., Smith, S., Jacobs, G., Muscarella, P., Ozgokmen, T., Brian, H., Lipphardt, B. (2014). Impact of assimilating ocean velocity observations inferred from Lagrangian drifter data using the NCOM-4DVAR. *Monthly Weather Review*, 142, 1509-1524.
- Choi, W., Lee, J. G., Kim, Y. J. (2012). Sensitivities of WRF simulations to the resolution of analysis data and to application of 3DVAR: a case study. *Atmosphere*, 22, 387-400.
- Courtier, P., Thépaut, J. N., Hollingsworth, A. (1994). A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120, 1367-1387.
- 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, 1617-1632.
- Desroziers, G., Ivanov, S. (2001). Diagnosis and adaptive tuning of observation error parameters in a variational assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(574), 1433-1452.
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3107.
- Dudhia, J. (1996). A multi-layer soil temperature model for MM5. *The Sixth National Center for Atmospheric Research*, 22-24.
- Edwards, C. A., Moore, A. M., Hoteit, I., Cornuelle, B. D. (2015). Regional ocean data assimilation, *Annual Review of Marine Science*, 7, 21-42.
- Egbert, G. D., Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 183-204.
- Ha, J. H., Kim, H. W., Lee, D. K. (2011). Observation and numerical simulations with radar and surface data assimilation for heavy rainfall over central Korea. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28, 573-590.

- Han, S. B., Song, S. K., Shon, Z. H., Kang, Y. H., Bang, J. H., Oh, I. (2021). Comprehensive study of a long-lasting severe haze in Seoul megacity and its impacts on fine particulate matter and health. *Chemosphere*, 268, 1-12.
- Han, Y. H., Jeong, J. S. (1991). On the effects of sea surface temperature to temperature and humidity of Western Region of Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 27, 197-203.
- Heo, K. Y., Ha, K. J. (2010). A coupled model study on the formation and dissipation of sea fogs. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1186-1205.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S. H. (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103-120.
- Hong, S. Y., Lim, J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42, 129-151,
- Janeković, I., Powell, B. S., Matthews, D., McManus, M. A., Sevdjian, J. (2013). 4D-Var data assimilation in a nested, coastal ocean model: a Hawaiian case study. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 5022-5035.
- Jung, T. S., Jeong, J. K. (2013). Spatial distribution and time variation of m2 tide and m4 tide in the western coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25, 255-265.
- Kang, Y. Q., Jin, M. S. (1984). Seasonal variation of surface temperatures in the neighbouring seas of Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 19, 31-35.
- Kumar, N., Voulgaris, G., Warner, J. C., Olabarrieta, M. (2012). Implementation of the vortex force formalism in the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system for inner shelf and surf zone applications. *Ocean Modelling*, 47, 65-95.

- Laloyaux, P., Balmaseda, M., Dee, D., Mogensen, K., Janssen, P. (2016). A coupled data assimilation system for climate reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694), 65-78.
- Lee, C. I., Lee, J. H., Kim, D. S. (2007). Effects of meteorological factors on water temperature, salinity in the West Sea of Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Energy*, 13, 29-37.
- Lee, H. W., Kim, Y. K., Jung, W. S. (2000). A numerical simulation for an effect of terrain on the onset of a sea breeze over the complex coastal area. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 36, 561-572.
- Lee, H. W., Won, H. Y., Choi, H. J., Lee, K. Y. (2005). Numerical simulation of effect on atmospheric flow field using high resolution terrain height data in complex coastal regions. *Journal Korean Society for Atmospheric Environment*, 21, 179-189.
- Lee, J. H., Kim, T. K., Pang, I. C., Moon, J. H. (2018). 4DVAR data assimilation with the regional ocean modeling system (ROMS): impact on the water mass distributions in the Yellow Sea. *Ocean Science Journal*, 165-178.
- Lee, J. H., Moon, J. H., Choi, Y. J. (2020). Comparison of data assimilation methods in a regional ocean circulation model for the Yellow and East China seas. *Ocean and Polar Research*, 42, 179-194.
- Lee, S. H., Chun, J. H. (2003). The distribution of snowfall by Siberian High in the Honam region. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 173-183.
- Lee, Y. H., Ahn, K. D., Lee, Y. H. (2016). Parametrization of the tidal effect for use in the Noah land-surface model: development and validation. *Boundary-Layer Meteorology*, 161, 561-574.
- Lim, E. H., Kim, Y. H., Lee, C. W. (2003). The assimilation effect of radar gaze velocity data in 3D variational data assimilation for regions. *Atmosphere*, 13, 94-97.

- Lim, K. S. S., Hong, S. Y. (2010). Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, 138, 1587-1612.
- Liu, N., Ling, T., Wang, H., Zhang, Y., Gao, Z., Wang, Y. (2015). Numerical simulation of Typhoon Muifa (2011) using a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Journal of Ocean University of China*, 14, 199-209.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102, 16663-16682.
- Moore, A. M., Arango, H. G., Broquet, G., Powell, B. S., Weaver, A. T., Zavala-Garay, J. (2011a). The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems: Part I - System overview and formulation. *Progress in Oceanography*, 91, 34-49.
- Moore, A. M., Arango, H. G., Broquet, G., Edwards, C., Veneziani, M., Powell, B., Robinson, P. (2011b). The regional ocean modeling system (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems: part II - performance and application to the California Current System. *Progress in Oceanography*, 91, 50-73.
- Murphy, J., Kattsov, V., Keenlyside, N., Kimoto, M., Meehl, G., Mehta, V., Smith, D. (2010). Towards prediction of decadal climate variability and change. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 287-304.
- Ninomiya, K. (1974). Influence of the sea surface temperature on the stratification of air mass and the cumulus activity over the East China Sea in the Baiu season. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 25, 159-175.
- Olabarrieta, M., Warner, J. C., Armstrong, B., Zambon, J. B., He, R. (2012).

- Ocean - atmosphere dynamics during Hurricane Ida and Nor'Ida: an application of the coupled ocean - atmosphere - wave - sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 43, 112-137.
- Parrish, D. F., Derber, J. C. (1992). The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, 120, 1747-1763.
- Phadnis, M. J., Robe, F. R., Klausmann, A. M., Scire, J. S. (2003). Importance of the spatial resolution of sea-surface-temperature data in meteorological modeling. In *Proceedings of the 13th PSU/NCAR Mesoscale Model User's Workshop*, Boulder, CO, USA, 11.
- 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, 767-776.
- Routray, A., Mohanty, U. C., Niyogi, D., Rizvi, S. R. H., Osuri, K. K. (2010). Simulation of heavy rainfall events over Indian monsoon region using WRF-3DVAR data assimilation system, *Meteorol. Atmospheric Chemistry and Physics*, 106, 107-125.
- 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*, 85, 349-358.
- Shafran, P. C., Seaman, N. L., Gayno, G. A. (2000). Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39, 412-426.
- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean modelling*, 9, 347-404.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric

- model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 227, 3465-3485.
- Smith, P. J., Fowler, A. M., Lawless, A. S. (2015). Exploring strategies for coupled 4D-Var data assimilation using an idealised atmosphere - ocean model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 67, 27025.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Bae, M. S., Cho, S. B., Moon, S. H., Kim, H. S., Son, Y. B., Lee, C. R. (2022). Effects of natural and anthropogenic emissions on the composition and toxicity of aerosols in the marine atmosphere. *Science of The Total Environment*, 806, 1-14.
- Talagrand, O. (1997). Assimilation of observations, an introduction (special issue on data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 75(1B), 191-209.
- 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, 230-244.
- WRF-ARW V3: User's Guide (2017).
- 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, 463-482.
- Yoon, H. J., Park, H. S., Kim, B. S., Park, J. H., Lim, J. O., Boo, K. O., Kang, H. S. (2019). Application of weakly coupled data assimilation in global NWP System. *Atmosphere*, 29, 219-226.

A study on local meteorological analysis in the  
west coastal region of Korea using a coupled  
atmosphere-ocean model: prediction performance  
evaluation and data assimilation effect

Sung-bin Lee

*Department of Earth and Marine Sciences, Graduate  
School, Jeju National University, Jeju, Korea*

Abstract

In this study, the analysis of meteorological predictions performance and data assimilation (WRFDA, DA) on the meteorological prediction in the west coast of Korea was evaluated using a coupled atmosphere-ocean model (e.g., COAWST) in the winter (January 16-25) and spring (March 17-26) of 2019. We performed two sets of simulation experiments: (1) with the coupled (i.e., COAWST) and without the coupled (i.e., WRF and ROMS), (2) the coupled data assimilations (i.e., COAWST\_WRFDA, COAWST\_DA), and without the



coupled data assimilation (i.e., COAWST\_BASE). Overall, compared with the WRF and ROMS simulation, the COAWST simulation showed good agreement in the spatial and temporal variations of meteorological variables (sea surface temperature, air temperature and wind speed) with those of the observations, but other variable (relative humidity) was opposited result. To improve this result (relative humidity), an additional data assimilation experiment was conducted, finally the COAWST\_DA simulation showed the most improved numerical simulation results. This might be primarily due to the prediction improvement of the sea surfcae temperature resulting from the coupled DA in the study area. In addition, the improvement of meteorological prediction in COAWST\_DA simulation was also confirmed by the comparative analysis between sea surface temperature and other meteorological variables (sea surface wind speed).