



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

연안 지역 실시간 조간대 토지피복
변화에 따른 기상 및 대기질 예측
영향 연구

高 銀 娥

濟州大學校 大學院

地球海洋融合學部 地球海洋專攻

2024年 2月



연안 지역 실시간 조간대 토지피복 변화에 따른 기상 및 대기질 예측 영향 연구

이 논문을 이학 석사 학위논문으로 제출함

고 은 아

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 지구해양전공

지도교수 송 상 근

고은아의 이학 석사 학위논문을 인준함

2023년 12월

심사위원장

문 재 홍



위 원

송 상 근



위 원

김 태 균



목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
요약	1
제 1 장 서론	3
제 2 장 자료 및 방법	6
2.1. 대상지역 및 자료	6
2.2. 모델 구성 및 입력 자료	9
2.2.1. 기상 및 대기-해양 결합 모델	9
2.2.1. 대기질 모델	16
2.3. 시간별 조간대 면적 산출 및 적용 방법	19
제 3 장 결과 및 고찰	21
3.1. 시간별 조간대 토지피복 변화에 따른 물리적 특성 변화	21
3.2. 시간별 조간대 토지피복 변화에 따른 기상 분석	28
3.3. 시간별 조간대 토지피복 변화에 따른 대기질 분석	46
제 4 장 요약 및 결론	62
참 고 문 헌	64
Abstract	74

List of Tables

Table 1. Details of the grids and the physical options used in a coupled atmosphere-ocean modeling system (WRF, ROMS) and CMAQ model.	12
Table 2. Statistical evaluation of the sea surface height (SSH) and sea surface temperature (SST) between the observed and model-simulated values for the coupled and uncoupled models: results compared at four tidal stations (ICT, SDT, YHT, and DST, Fig. 2) and two buoy sites (ICP and TAP, Fig. 2) throughout the study period (July 4-8, 2020).	24
Table 3. Summary of land surface parameters (albedo, soil moisture, and surface roughness length) of two land-use categories (water bodies (WB) and herbaceous wetland (HW)) in the intertidal zone, at Songdo (SD) and Yeongheung-do (YH) sites, comparing the TIDE and CTRL simulations.	27
Table 4. Contributions (%) of time-varying land cover in the intertidal zone to meteorological conditions (air temperature (Temp), relative humidity (RH), and wind speed (WS)) in the intertidal and inland areas in the 1 km model domain (D4) during the study period (July 4-8, 2020).	43
Table 5. Statistical evaluation of meteorological variables (air temperature, relative humidity, and wind speed) between observed and model-predicted values in TIDE and CTRL simulations during the study period (July 4-8, 2020).	45
Table 6. Contributions (%) of time-varying land cover in the intertidal zone to air quality (PM ₁₀ , PM _{2.5} , and O ₃) in the intertidal and inland areas in the 1 km model domain (D4) during the study period (July 4-8, 2020).	60

Table 7. Statistical evaluation of air quality (PM_{10} , $PM_{2.5}$, and O_3) between observed and model-predicted values in TIDE and CTRL simulations during the study period (July 4-8, 2020). 61

List of Figures

- Fig. 1.** Flow chart of WRF-ARW modeling system. 10
- Fig. 2.** Nested model domains for a coupled atmosphere-ocean model (WRF (blue frame) and ROMS (red frame)) and CMAQ simulations (black dotted frame) and the geographical locations of eight sites for meteorological variables (MET, red circles), six sites for air quality (AQ, yellow circles) four tidal stations for sea surface height (TIDAL, triangles), and two marine buoy sites for sea surface temperature (BUOY, rectangles). 13
- Fig. 3.** CMAQ chemistry-transport model and associated preprocessors. 16
- Fig. 4.** Time series plot of the observed and model-simulated sea surface temperature (SST) at two buoy sites (ICP and TAP, Fig. 2) for the coupled (WRF-ROMS) and uncoupled (ROMS) models throughout the simulation period (July 4-8, 2020). 22
- Fig. 5.** Time series plot of the observed and model-simulated sea surface height (SSH) anomaly at four tidal stations (ICT, SDT, YHT and DST, Fig. 2) for the coupled (WRF-ROMS) and uncoupled (ROMS) models throughout the simulation period (July 4-8, 2020). 23
- Fig. 6.** Temporal and spatial changes in (a) the intertidal zone adjusted using a coupled atmosphere-ocean model and satellite images from high to low tides (20 LST on July 5-05 LST on July 6, 2020) and (b) the intertidal zone captured by Landsate-8 OLI satellite images at high and low tides. 25
- Fig. 7.** Time series plot of the observed and model-simulated meteorological variables ((a) air temperature, (b) relative humidity, and (c) wind speed) at two meteorological sites (SD and YH, Fig. 2), located in the intertidal area, in the TIDE and CTRL simulations throughout the

simulation period (July 4-8, 2020). Black dotted line in the figures indicate low tide during the simulation period. 30

Fig. 8. Time series plot of the observed and model-simulated air temperature at (a) three meteorological sites (IC, SG, and SS, Fig. 2), located in costal areas and (b) the other three sites (SW, SL, and DD, Fig. 2), located in inland areas, for the TIDE and CTRL simulations throughout the simulation period (July 4-8, 2020). Black dotted line indicate low tide times throughout the simulation period. 31

Fig. 9. Same as Fig. 8 except for relative humidity. 32

Fig. 10. Same as Fig. 8 except for wind speed. 33

Fig. 11. Spatial distributions of the differences in air temperature between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low and high tides during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide. 35

Fig. 12. Same as Fig. 11 except for relative humidity. 36

Fig. 13. Spatial distributions of the differences in soil temperature, sensible heat flux, latent heat flux and differences in temperature gradient (soil temperature minus air temperature), between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide. 38

Fig. 14. Same as Fig. 11 except for wind speed. 40

Fig. 15. Spatial distributions of the air temperature in the TIDE and CTRL simulations at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The bold dotted lines at low tide represent the area of the intertidal zone. 41

Fig. 16. Same as Fig. 11 except for planetary boundary layer height (PBLH). 42

Fig. 17. Time series plot of the observed and model-simulated PM_{10} at (a) three air quality monitoring sites (SH, GS, and DM, Fig. 2), located in costal areas and (b) the other three sites (GK, JG, and BS, Fig. 2), located in inland areas, for the TIDE and CTRL simulations throughout the simulation period (July 4-8, 2020). Black dotted line indicate low tide times throughout the simulation period.	47
Fig. 18. Same as Fig. 11 except for $PM_{2.5}$	48
Fig. 19. Same as Fig. 11 except for O_3	49
Fig. 20. Spatial distributions of the PM_{10} in the TIDE and CTRL simulations, and differences in PM_{10} , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.	51
Fig. 21. Same as Fig. 21 except for $PM_{2.5}$	52
Fig. 22. Spatial distributions of the PM_{10} in the TIDE and CTRL simulations, and differences in PM_{10} , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at high tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.	53
Fig. 23. Same as Fig. 23 except for $PM_{2.5}$	54
Fig. 24. Spatial distributions of the wind direction in the TIDE and CTRL simulations at low tide (13 LST on July 7, 2020). The bold red dotted lines at low tide represent the area of the intertidal zone.	55
Fig. 25. Spatial distributions of the O_3 in the TIDE and CTRL simulations, and differences in O_3 , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.	57
Fig. 26. Spatial distributions of the O_3 in the TIDE and CTRL simulations,	

and differences in O_3 , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at high tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide. 58

연안 지역 실시간 조간대 토지피복 변화에 따른 기상 및 대기질 예측 영향 연구

고 은 아

제주대학교 대학원 지구해양융합학부 지구해양전공

요약

본 연구는 2020년 여름(7월 4일~8일)동안 한국 서해안 및 인근 연안 지역을 대상으로 시간별 조간대의 토지피복 변화가 국지 기상 및 대기질 예측에 미치는 영향을 평가하였다. 시간에 따라 변화하는 조간대의 공간적 분포는 대기-해양 결합 모델(COAWST system)과 Landsat-8 OLI 위성영상을 사용하여 산출하였으며, 실시간으로 변화하는 조간대의 토지피복을 적용한 실험(TIDE)와 고정된 토지피복을 적용한 실험(CTRL)으로 구분하여 기상요소(기온, 상대습도, 풍속, PBLH) 및 대기오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3)의 수치모의 결과를 비교하였다.

전반적으로 CTRL 실험과 비교하여 TIDE 실험에서 간조의 주간 조간대 기온(평균 $+6.2^{\circ}C$) 및 대기경계층 높이(PBLH, 평균 $+576$ m)가 크게 증가하였으며, 상대습도는 감소(평균 -29%)하는 모습을 보였다. 이와 반대로 야간에는 조간대의 기온이 평균 $-1.6^{\circ}C$ 감소하고 상대습도는 평균 $+1.4\%$ 증가하였다. 또한 조간대에서 간조의 주간 풍속은 조간대의 기온 상승으로 인한 해양과의 기온 편차 증가로 인해 약간 증가(평균 0.3 m s^{-1})하는 모습을, 야간의 풍속은 지표면 거칠기 길이 증가로 인해 감소(평균 1.3 m s^{-1})하는 모습을 보였다.

이러한 조간대의 기상요소 변화는 대기오염물질 농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. CTRL 실험과 비교하였을 때, 간조 시 조간대에서 TIDE 실험의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 주간의 PBLH와 풍속의 증가로 인한 수직 및 수평 확산의 증가로 각 평균 -10.8 μg m^{-3} , -3.9 μg m^{-3} 감소하는 모습을 보였다. 또한 야간에

는 상대습도와 풍속이 감소하여 각 평균 $0.2 \mu\text{g m}^{-3}$, $1.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 증가하는 모습을 보였다. 조간대의 O_3 농도는 주간과 야간 모두 증가하는 모습을 보였는데, 이는 주간에는 증가한 기온으로 인한 광화학 반응 증가의 영향을, 야간에는 주간의 증가한 O_3 농도 유지 및 풍속 감소의 복합적인 영향에 기인한 것으로 사료된다.

1. 서론

연안 지역에 위치하는 조간대는 해양의 먹이사슬, 조류 서식지 및 해양의 오염 물질 제거 등 해양 생태계 유지와 더불어 폭풍의 방어, 해안선의 안정화 및 대기-해양 열 교환 등 해양 환경에 중요한 역할을 하는 지역이다(Li et al., 2010; Chandrasekar et al., 2013; Kaliraj et al., 2017). 이러한 연안 지역의 토지피복 변화는 지표면 물리 상태(알베도, 토양 수분, 표면 거칠기 길이 등)의 변화를 초래할 수 있으며(Guarini et al., 1997; Cho et al., 2005; Lam et al., 2006), 이는 지표면의 열적 및 역학적 변화에 미쳐 연안 지역의 기상에도 영향을 미칠 수 있다(Joo et al., 2010). 따라서 많은 연구에서 토지피복 변화가 기온, 풍속, 풍향, 강수량 등 지역 기상에 미치는 영향을 연구하였다(Jeong et al., 2012; Bagley et al., 2014; Li et al., 2018).

Jeong et al. (2012)는 고해상도 토지피복 적용(900 m → 90 m)에 따른 해풍 강화가 해안선 근처의 토지피복 변화(바다 → 내륙)에 의한 바다와 내륙의 기온 차이 증가에 기인하는 것을 확인하였으며, Bagley et al. (2014)는 열대우림에서 토지피복 변화(열대우림 → 농경지 및 목초지)로 인한 인근 지역의 강수 패턴의 변화를 연구하였다. 이러한 기상의 변화는 토지피복이 변화된 지역뿐만 아니라 인근 지역에서도 나타났다.

토지피복 변화로 인한 기상 변화는 대기질 모의에도 영향을 미칠 수 있다. 대기질 모델은 대상 지역의 배출량 및 기상 입력장과 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 특히 대기질 모델의 기상 입력장으로 사용되는 기상 모델의 결과는 오염 물질의 확산, 침적, 수송 등 광화학 반응 및 생성에 영향을 미친다. Jeon et al. (2011)은 복잡한 해안지역에서의 기상장 개선이 대기질 모델의 모의 결과 정확도 향상에 미치는 영향에 관해 연구한 바 있으며, Pirovano et al. (2007)은 연안 지역을 대상으로 기상장의 차이가 광화학 수치모의 결과에 미치는 영향에 관해 연구하였다. 또한 Qiu et al. (2023)은 중국 북동 지역에서 경작지에서 도심으로 토지피복이 바뀐 지역에서 기온과 풍속이 증가함에 따라 PM_{2.5}가 도심에서는 감소

하고 주변 지역에서는 증가하는 것을 예측하였다. 이 외에도, Li et al. (2022)은 양쯔강 인근의 토지피복 변화(초원 → 도심)에 인해 기온이 증가하고 상대습도와 풍속이 감소함에 따라 $PM_{2.5}$ 가 감소하고 O_3 이 증가하는 것을 분석하였다. 이 외에도, 조간대는 해염 입자 및 유황 가스와 같은 해양 가스 및 에어로졸 성분이 주로 배출되는 지역으로(Bodenbender et al, 1999; De Leeuw et al, 2000; Azad et al, 2005; Xinhua et al, 2016), 인근의 에어로졸 농도에 영향을 미칠 수 있다(Azad et al., 2005; Lichiheb et al., 2021; Song et al., 2022; Cho et al., 2023). 따라서 최근 몇 년 동안 많은 연구자들이 조간대 지역의 정확한 기상 및 대기질에 관한 연구에 관심을 가져왔다.

조간대는 조석 현상의 영향으로 인해 만조 시 침수되고 간조 시 노출되는 특성상 매시간별 토지피복이 변화하여, 토지피복이 고정되어 수행되는 기상 모델 특성상 정확한 조간대의 기상 모의가 어려운 실정이다. 이는 해당 지역 및 인근 지역 대기질 모의의 어려움 또한 같이 초래한다. 그럼에도 불구하고 지금까지 조간대의 토지피복 및 지표면 물리 상태 변화가 연안 기상 및 대기질에 미치는 영향에 관한 연구는 일부 수행되어 왔다(Lee et al., 2016; An et al., 2017; Lee et al., 2020). An et al (2022)은 기상 모델에 시공간별 조간대 토지피복을 적용하여, 여름철 만조 시 조간대 토지피복의 변화로 인한 지표면 거칠기 길이 감소가 주간 풍속의 증가에 기여하고, 조간대의 현열 및 잠열의 감소에 의한 조간대의 기온 감소가 내륙의 기온 감소에도 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 Kim et al. (2019)는 갯벌에 해당하는 격자에 대하여 서로 다른 지표 토지피복을 적용하여 만조와 간조에 대한 O_3 농도를 모의한 결과, 만조 시 기온의 감소로 인한 대기경계층 높이 감소로 O_3 농도가 증가함을 예측하였다. 그러나 조간대의 기상장 및 대기질이 조석 효과에 의해 시공간적으로 변화하는 조간대의 면적에 영향을 받음에도 불구하고 매시간 변화하는 조간대의 토지피복의 변화가 고려된 기상장을 적용한 대기질 모델링 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 서해 조석현상에 의해 실시간으로 변화하는 조간대의 면적 분포 및 토지피복을 기상 모델에 적용하여 조간대의 시공간별 변화가 국지 기상에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 매시간별로 변화하는 조간대의 토지피복이 적용된 기상장을 대기질 모델에 적용하여 기상장의 변화가 연안 지역의 대기질에 미치는 영향을 분석

하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 지역 및 자료

우리나라의 조간대의 총 면적은 2,842 km²이며, 그 중 서해안에 위치해 있는 조간대는 우리나라 전체 조간대 면적의 약 80%를 차지하는 것으로 알려져있다 (Korea National Park Service (KNPS), 2022). 서해안 조간대 중 경기만 조간대는 완만한 경사와 복잡한 해안선, 수심 50 m 미만의 얕은 수심을 가지고 있어 밀물과 썰물의 조수간만의 차가 100 m에 달해 조간대 면적 변화가 크게 나타나는 지역이다(Yoon and Woo, 2015). 또한, 경기만은 주변에 서울과 인천을 포함한 한국의 수도권과 서쪽으로 인접해있어 경기만 지역의 토지피복 변화는 수도권의 기상과 대기질에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 경기만 조간대와 서울 수도권 지역을 포함한 지역을 연구 대상 지역으로 선정하였다.

본 연구에서는 시간별 변화하는 조간대의 토지피복에 의한 기상 및 대기질 예측 영향 평가를 위해, 최근 10년(2012년~2022년) 동안 가장 큰 조석 효과 영향이 나타나는 음력 15일 전후로 황사와 장마가 나타나지 않은 기간을 선정하였다. 그 중 가장 높은 대기오염물질(PM₁₀, PM_{2.5}, O₃)의 농도가 나타나는 2020년 7월 4일부터 2020년 7월 8일까지를 연구기간으로 선정하였다. 이 기간 동안 평균 조차는 466.4 cm (최고 479.9 cm)로 다른 계절(438.0 ~ 455.9 cm)에 비해 높은 값을 보였으며, 조간대가 드러나는 간조는 주간(12:00 - 16:00 LST)과 야간(00:00 - 03:00 LST)에 발생했다. 연구기간 동안 서해안 조간대에서 시간에 따라 변화하는 토지피복의 영향을 분석하기 위해 시간별로 변화하는 토지피복(TIDE)을 적용하여 수행한 기상 및 대기질 모델 결과와 해양으로 고정된 토지피복(CTRL)을 적용하여 수행한 기상 및 대기질 모델 결과를 분석하였다. 사용된 모델에 대한 자세한 설명은 2.2절에 제시하였다.

토지피복 변화에 의한 경기만 조간대 및 연안 지역에서의 기상(기온, 상대습도, 풍속) 분석을 위해, 서해 연안 지역에 위치한 6개의 종관기상관측 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 지점(인천(IC), 강화(GH), 서산(SS), 수원(SW), 서울(SL), 동두천(DD))과 토지피복이 변화하는 모델 격자에 위치한 2개

의 방재기상관측 AWS (Automated Weather System) 지점인 송도(SD)와 영흥도(YH)의 시간별 기상 관측 자료를 이용하였다. 연구지역에서의 대기질(PM₁₀, PM_{2.5}, O₃) 분석을 위해 6개의 대기질 관측 지점(신흥(SH), 길상(GS), 동문동(DM), 고색동(GK), 중구(JG), 보산동(BS))의 시간별 대기오염물질 농도 자료를 이용하였다. 일반적으로 대기오염물질의 농도는 인근의 기상조건에 크게 영향을 받기 때문에 보다 정확한 분석을 위하여 기상 측정소와 가장 가까이 위치해있는 관측 지점을 선정하였다. 또한 조석 영향에 따른 해수면 높이 및 SST에 대한 모의 정확도를 평가하기 위해 한국 서해안에 위치한 조위 관측소 4개(인천(ICT), 송도(SDT), 영흥도(YHT), 대산(DST))와 부이 관측소 2개(인천항(ICP), 태안항(TAP))의 조위 및 SST 자료를 이용하였다. 각각의 관측자료는 우리나라 기상청 및 해양 국립해양조사원에서 제공하고 있다. 이외에도, 연구대상 지점(8개의 기상 관측 지점, 6개의 대기질 관측 지점, 4개의 조위 관측소, 2개의 해양부이)을 대상으로 기상요소(기온, 상대습도, 풍속) 및 대기오염물질(PM₁₀, PM_{2.5}, O₃), 해면조건(해수면 높이, SST)의 관측값과 모델값에 대해서 통계적 분석(IOA (Index Of Agreement), RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error)을 실시하였다.

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

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

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

여기서 시간별 모델값과 관측값 및 관측값의 평균을 나타내는 M_i , O_i , \bar{O} 과 자료의 개수를 의미하는 N을 통해 계산된다. IOA는 0 ~ 1 사이의 값을 가지고 1에 가까울수록 관측값과 일치도가 높음을 의미하며, RMSE와 MBE는 0에 가까울수록 오차가 작음을 나타내며, 이 중 MBE는 양수(+)의 값을 가질 시 모의값이

관측값보다 높게 예측되었음을 의미(과대모의)하며, 음수(-)의 값을 가질 시 모의 값이 관측값보다 작게 예측되었음(과소모의)을 의미한다.

2.2. 모델 구성 및 입력 자료

2.2.1. 기상 및 대기-해양 결합 모델

본 연구에서는 서해안 조간대 지역의 실시간 토지피복 변화가 조간대 및 연안 지역의 국지 기상 및 대기질에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저, 시간별 토지피복이 연안 기상에 미치는 영향을 평가하기 위해 중규모 기상 모델 WRF-ARW (Weather Reserch & Forecasting model-Advanced Research WRF) 3.8 version을 이용하였다. WRF는 미국 국립 기상연구소 NCAR (National center for Atmospheric Research)와 국립환경예측센터 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 공동으로 개발된 3차원 기상 모델이며, 기상에 관련된 연구와 현업예보 모두 적용될 수 있도록 설계되었다. WRF 모델은 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 모형으로 Arakawa-C의 수평 격자 체계를 사용하며, Eulerian 질량 좌표계(mass-based terrain following coordinate)를 연직 좌표계로 사용한다(Skamarock et al., 2008). 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).

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 모델링의 전반적인 흐름은 Fig. 1에 제시하였다 (ARW, 2017).

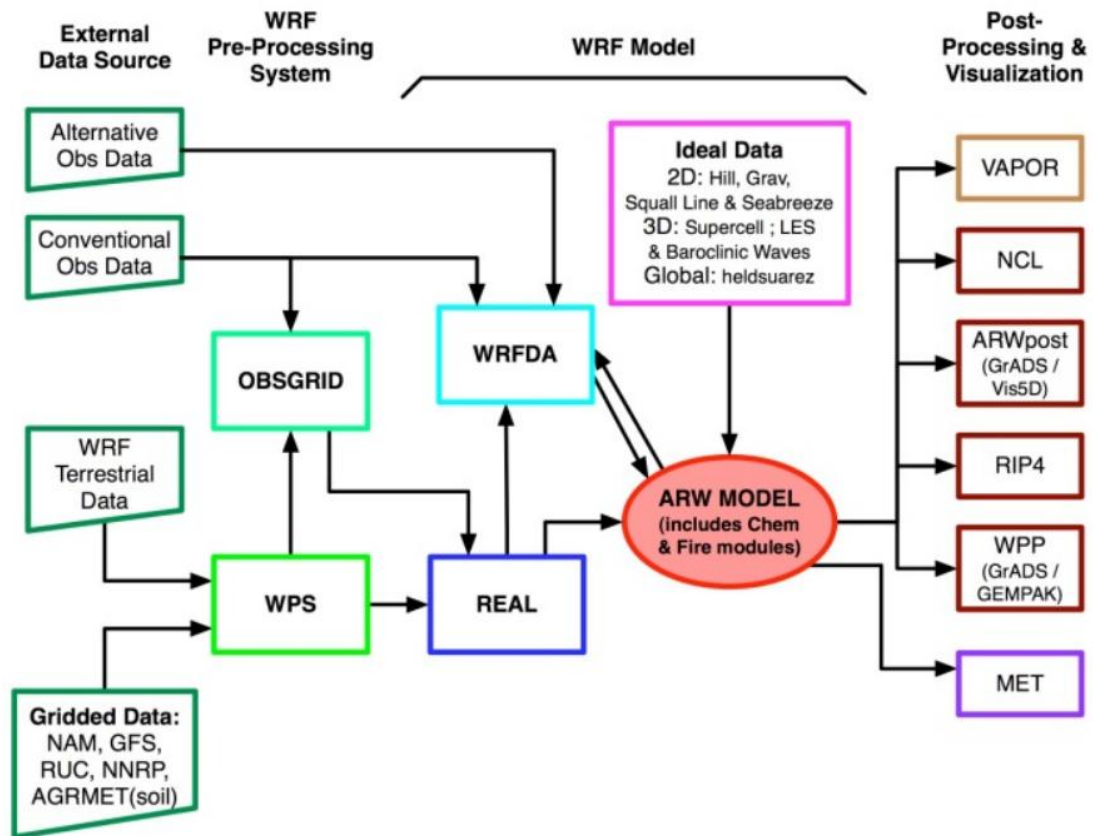


Fig. 1. Flow chart of WRF-ARW modeling system.

WRF 모델을 수행하기 위해 초기 및 경계자료로 NCEP에서 제공하고 있는 GDAS/FNL (Global Data Assimilation System)의 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 수평 해상도 및 6시간 간격 자료를 사용하였다. 모델의 지형고도는 GMTED 2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data) 30초 자료를 이용하였고, 지표면 토지 피복자료로는 24개의 유형을 가진 USGS-24 (Moderate resolution imaging spectroradiometer_international geosphere-biosphere programme)의 landuse 30초를 적용하여 결과를 산출하였다. WRF 모델의 미세물리과정(Microphysics)의 경우, D1에 대하여 WSM3 (WRF Single-Moment 3-class, Hong et al., 2004)를, D2~D4에 대하여 WDM6 (WRF Double-Moment 6-class, Lim and Hong., 2010)를 적용하였으며, 적은 모수화 과정은 Kain-Fritsch 모수화(Kain, 2004), 단파 및 장파 모수화는 각각 Dudhia (Dudhia, 1989)와 RRTM (Rapid Radiative Transfer

Model, Mlawer et al., 1997)을 이용하였다. 마지막으로 대기경계층 모수화는 YSU (Yonsei University, Hong et al., 2006)로 설정하여 수행하였으며, 지표 모델은 Noah-Multiparameterization (Noah-MP) 지표 모델(Niu et al., 2011)을 이용하였다(Table 1).

WRF 모델의 수치모델 영역은 양방향 상호 등지 격자계(two-way interacting nested grid system)를 적용하였으며 첫 번째 영역(D1)은 위도 22.09°N ~ 52.93°N, 경도 100.93°E ~ 148.68°E를 포함하는 121 × 121개의 27 km 격자간격의 수평 해상도로 동아시아 영역을 구성하였다. 두 번째 영역(D2)는 124 × 133개의 9 km 수평해상도의 한반도 영역을, 세 번째 영역(D3)는 139 × 142개의 3 km 수평해상도의 남한 영역을, 마지막 영역(D4)으로는 175 × 151개의 1 km 수평해상도의 서해안 영역으로 설정하였다(Fig. 2).

Table 1. Details of the grids and the physical options used in a coupled atmosphere-ocean modeling system (WRF, ROMS) and CMAQ model.

[A] WRF model

Domain	D1	D2	D3	D4
Horizontal grid	121×121	124×133	139×142	175×151
Horizontal resolution (km)	27	9	3	1
Vertical layers	30	30	30	30
Microphysics	WSM 3-Class (Hong et al., 2004)		WDM 6-Class for D2–D4 (Lim and Hong, 2010)	
Cumulus	Kain-Fritsch scheme for D1 and D2 (Kain, 2004)			
Initial & boundary condition	NCEP Final Analysis (FNL) 0.25 degree			
Land surface	Noah-Multiparameterization (Nui et al., 2011)			
Short wave radiation	Dudhia (Dudhia, 1989)			
Long wave radiation	Rapid radiative transfer model (RRTM) (Mlawer et al., 1997)			
Planetary boundary layer	YSU (Hong et al., 2006)			

[B] ROMS model

Domain	D1	D2	D3
Horizontal grid	234×234	149×173	209×197
Horizontal resolution (km)	9	3	1
Vertical layers	20	20	20
Initial & boundary condition	HYCOM 1/12° GLBv0.08 Analysis (Bleck, 2002)		
Bathymetric data	GEBCO 2020 (Weatherall et al., 2015)		
Tidal data	TPXO7-atlas (Egbert and Erofeeva, 2002)		
Defined minimum depth (m)	1.0		

[C] CMAQ model

Domain	D1	D2	D3	D4
Horizontal grid	118×118	121×130	136×139	172×148
Horizontal resolution (km)	27	9	3	1
Vertical layers	29	29	29	29
Chemical mechanism	CB05_tucl			
Aerosol module	AERO6			
Gas-phase chemistry	Euler Backward Iterative (EBI) solver			
3-D advection	WRF_CONS			
Diffusion (horizontal/vertical)	Multiscale/ACM2			

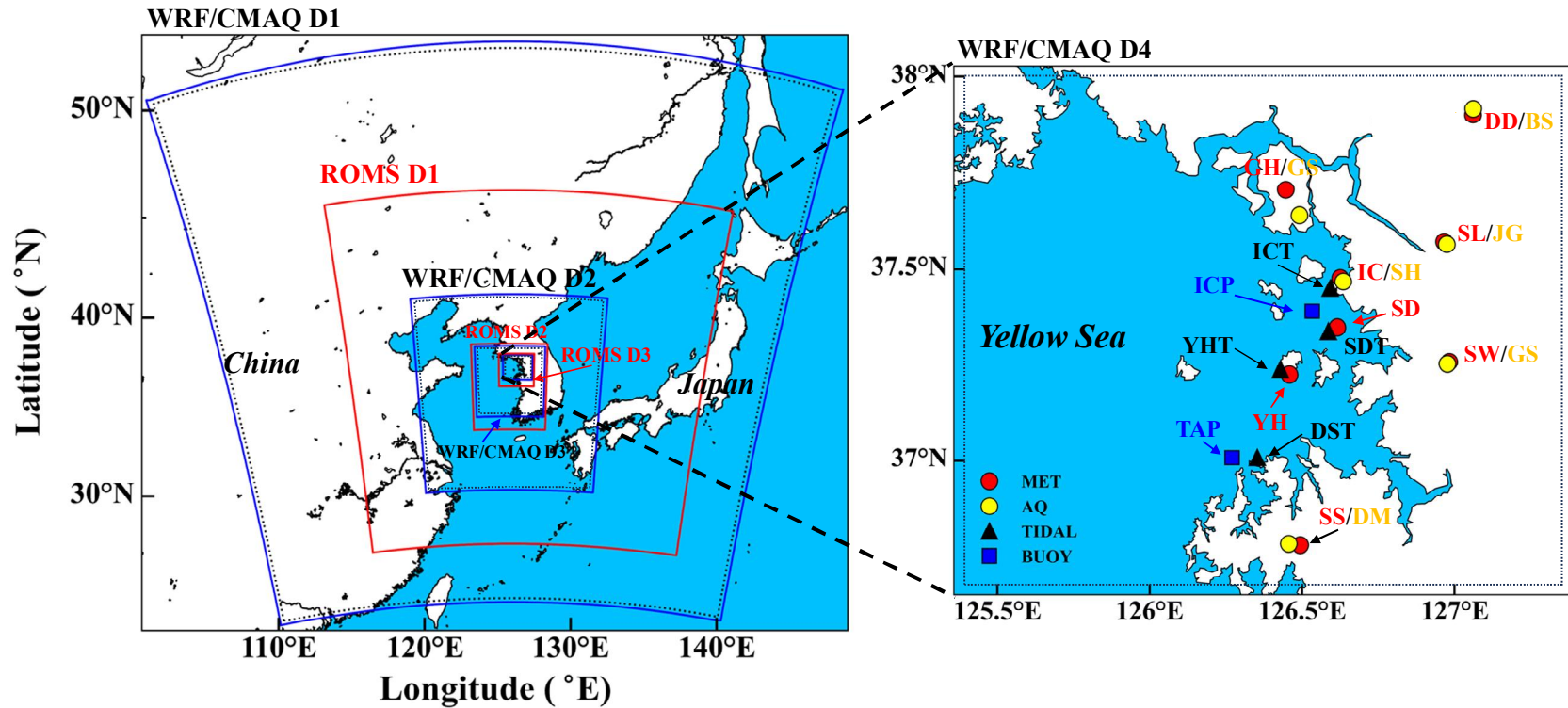


Fig. 2. Nested model domains for a coupled atmosphere-ocean model (WRF (blue frame) and ROMS (red frame)) and CMAQ simulations (black dotted frame) and the geographical locations of eight sites for meteorological variables (MET, red circles), six sites for air quality (AQ, yellow circles) four tidal stations for sea surface height (TIDAL, triangles), and two marine buoy sites for sea surface temperature (BUOY, rectangles).

본 연구에서는 조간대의 시간별 토지피복 변화에 따른 기상 및 대기질의 영향을 평가하기 위해 조간대에 해당하는 격자의 시공간별 변화를 계산하였다. 시공간별 조간대 분포에 영향을 주는 조석 효과를 보다 정확하게 모의하기 위해 COAWST (Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport) 시스템을 사용하였다(<https://code.usgs.gov/coawstmodel/COAWST>, Warner et al., 2010). COAWST 시스템은 기상 모델과 해양 모델, 파랑 모델, 퇴적물 수송 모델로 구성되어, Model coupling toolkit (MCT)를 이용하여 각 모델들의 변수들을 교환한다(Warner et al., 2010). COAWST 시스템의 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 있다. 본 연구에서는 COAWST 시스템에 기상 모델(WRF)과 해양 모델(ROMS, <https://www.myroms.org>)을 결합하여 대기-해양 상호작용을 적용하였다. COAWST 시스템에서 ROMS 해양 모델은 바람, 온도, 습도, 단파 및 장파 복사, 강수량과 같은 대기 외력장 변수를 WRF 모델로부터, WRF 모델은 ROMS 해양 모델에서 SST를 받아와 대기-해양 상호작용을 모의하였다. COAWST 시스템에 적용되는 WRF 모델에 관한 설명은 2.2.1절 앞부분에 나타내었다.

COAWST 시스템에 적용된 ROMS 해양 모델은 Navier-Stokes 방정식에 정역학 근사와 Boussinesq 근사를 적용한 원시 방정식 및 수온과 염분 등에 대한 상태방정식을 사용하는 3차원 해양 순환 모델이다(Shchepetkin and McWilliams, 2005, Moore et al., 2011). ROMS 해양 모델의 수평격자로는 Arakawa-C 격자체계를 사용하여 격자의 중심에서는 해양변수(수온, 밀도, 염분, 수심 등)들을, 격자의 좌우에서는 유속의 동서 성분(u)을, 상하에서는 남북 성분(v)을 계산한다(Arakawa and Lamb 1977). 또한, 연직 격자로는 S-coordinate (Stretched terrain-following coordinate) 좌표계를 사용하여 수직적으로 보다 조밀하게 수심 간격을 계산할 수 있어 수온약층이나 바닥경계층 등의 변화 현상을 자세히 표현할 수 있다(Song and Wright, 1998; Shchepetkin and McWilliams, 2005).

ROMS 해양 모델의 초기 및 경계조건으로는 전지구 해양재분석 자료인 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation)의 $1/12^\circ$ 의 수평 해상도 및 6시간 간격 자료를, 지형자료로는

GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean)를 이용하였다. ROMS 모델에 적용된 조석 분조로는 인공위성 관측을 기반으로 한 TOPEX/POSEIDON (TPXO) 7 자료의 반일조(M2, S2, N2, K2), 일조(K1, O1, P1, Q1), 장주기 조석 고조파 성분(Mm 및 Mf) 등 10개의 조석 성분을 사용하였다(Egbert and Erofeeva, 2002).

COAWST 내의 WRF 기상 모델 영역은 위의 소개된 기상 모델 영역과 동일하게 설정하였으며, ROMS 해양 모델의 수치모델 영역은 기상 모델보다 상대적으로 큰 크기의 한반도 9 km 수평해상도의 영역(234×234 , D1), 남한 3 km 수평 해상도의 영역(149×173 , D2), 서해안 1 km 수평해상도의 영역(209×197 , D3)의 세 개의 영역으로 구성하였다(Fig. 2). ROMS 해양 모델의 상세한 물리 옵션 또한 WRF 기상 모델과 함께 Table 1에 제시하였다.

2.2.2. 대기질 모델

본 연구에서는 대기 중 대기질 수치모의를 위해 미국 환경보호국(US Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 3차원 광화학 수송 모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) 5.0.2 version을 이용하였다. CMAQ 대기질 모델은 기상현상, 광화학 반응을 모델에 반영하여 대류권 내 주요 가스상, 입자상 대기 오염물질을 모의할 수 있으며 다양한 규모 (Multi-scale)에 대한 오염물질(multi-pollutants)을 동시에 모의할 수 있다(Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006). 이 모델은 6개의 주요 전처리 과정과 1개의 화학·수송 모델(CCTM: CMAQ Chemical transport model)으로 이루어지며, 모델의 흐름도는 Fig. 3과 같다. CMAQ 대기질 모델의 전처리 과정은 WRF 기상 모델을 통해 생성된 기상자료를 CCTM 수행에 필요한 입력자료 형식으로 전환하는 MCIP (Meteorology-chemistry interface processor), 광해리율 산출을 위한 JPROC (Photolysis rate processor), 초기농도조건을 생성하는 ICON (Initial conditions processor)과 경계농도조건을 생성하는 BCON (Boundary conditions processor), 해양과 육지에 대한 지표의 형태를 구분하는 OCEAN, 배출량을 의미하는 EMIS (Emission)으로 이루어진다. CCTM은 5가지 전처리 자료(MCIP, JPROC, ICON, BCON, OCEAN)와 EMIS 자료를 입력자료로 하여 오염물질의 화학반응, 수송·이류, 침적 과정을 거쳐 매시간별 대기오염물질 농도를 계산한다 (U.S. EPA, 1999, <https://www.cmascenter.org/cmaq/>).

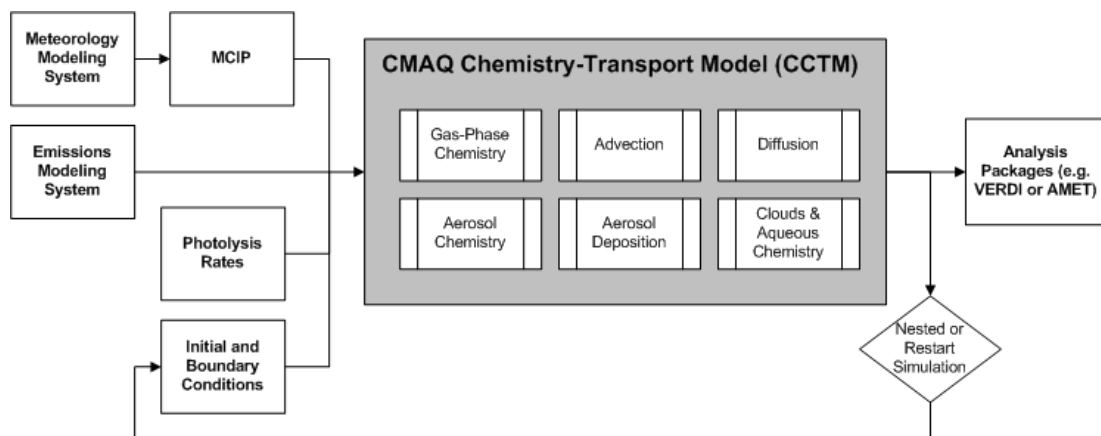


Fig. 3. CMAQ chemistry-transport model and associated preprocessors.

본 연구에서는 각각 TIDE 실험과 CTRL 실험의 WRF 기상 모델 결과를 사용하여 MCIP 전처리를 진행하였다. CMAQ 대기질 모델의 첫 번째 영역(27 km, D1)의 초기 및 경계조건으로는 모델 내 대기오염물질 profile 자료(연직 44개 층에 대해 CO, NO₂, 에어로졸 화학성분 등 200여 종)를 통해 생성되었으며(Wang et al., 2002; Gipson, 1999; Stockwell et al., 1990), 다음 영역부터는 상위 영역의 모델링 결과를 ICON 및 BCON 모듈에 입력하여 각 영역의 초기 및 경계 입력 자료를 생성하였다. 모델링에 사용된 에어로졸 메커니즘은 AERO-06, 화학메커니즘은 CB05_tucl이며, 수평 및 연직확산에는 각각 Multiscale과 ACM2 (Asymmetric Convective Method) scheme을 사용하였다(Table 1).

CMAQ 모델링에서 동아시아 영역의 인위적 배출량은 0.1° × 0.1° 수평해상도를 가지는 EDGER (Emission Database for Global Atmospheric Research) version 6.1 전구 배출목록 자료(CO, NO_x, NMVOC, CH₄, NO₃, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC)를 사용하였다. EDGER 배출량 자료는 GEIA (Global Emissions Inventory Activity) 프로젝트의 일환으로 매년 업데이트 되고 있으며, 국가별 배출량은 국제에너지기구(International Energy Agency)의 에너지 균형 통계와 Beyond Petroleum (BP)의 국가별 활동 데이터 세트에서 도출된다(Crippa et al., 2022). 또한 남한 영역(서해안 포함)의 인위적 배출량은 국립환경과학원에서 제공되는 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2019년 배출 목록 자료(TSP (PM₁₀ 포함), NO_x, SO_x, VOC, CO, NH₃)를 사용하였다. CAPSS 자료는 주로 연료 연소, 생산 공정, 이동 오염원, 폐기물 처리, 산불 및 화재 부문 등의 분류코드(Source Classification Codes, SCC)에 따라 1년 단위로 산정된 배출량(kg year⁻¹)이며, 공간적으로는 전국 1 km × 1 km 격자별로 산출되어있다. 전체 연구 영역에 대한 자연 배출량(Biogenic emissions)은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.1 모델을 이용하여 식생자료 및 기상변화에 따른 시간별 배출량이 산정된 결과를 이용하였다(Guenther et al., 2012).

CMAQ 대기질 모델의 수치모델 영역은 29개의 시그마 연직 층과 4개의 영역으로 구성하였으며, WRF 기상 모델 결과와의 경계 오차를 줄이기 위하여 WRF

영역을 기준으로 상하좌우 모두 3개의 격자를 제거하여 동아시아 27 km 수평 해상도의 영역(118 × 118, D1), 한반도 9 km 수평해상도의 영역(121 × 130, D2), 남한 3 km의 수평해상도의 영역(136 × 139, D3), 서해안 1 km 수평해상도의 영역(172 × 148, D4)으로 구성하였다(Fig. 2). CMAQ 모델의 격자 및 물리적 옵션에 대한 자세한 정보는 Table 1에 표시하였다.

2.3. 시간별 조간대 면적 산출 및 적용 방법

본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 조간대 격자를 산출하기 위해 ROMS 모델 내의 WET_DRY 모듈을 사용하였다. 이 모듈은 Warner et al (2013)이 도입한 식을 이용해 만조 시에는 wet mask (해양 격자), 간조 시에는 dry mask (육지 격자)로 바뀌는 격자를 계산한다. 해양 및 육지 격자의 계산은 총 수심과 최소 수심(D_{crit})을 고려하여 계산되는데, 해당 격자에서 각 시간에 대한 수심(h) 및 자유 표면 변위(η)의 합인 총 수심이 D_{crit} 보다 작으면($h + \eta \leq D_{crit}$) 해당 격자는 육지 격자로, 반대로 총 수심이 D_{crit} 를 초과하면($h + \eta > D_{crit}$) 해당 격자는 해양 격자로 산출된다. 본 연구에서는 ROMS 모델의 안정성을 위해 D_{crit} 의 값을 1.0 m로 설정하였다(Moon, 2022).

보다 정확한 조간대 면적을 산출하기 위해, 대기-해양 결합 모델에서 산출한 매시간별 조간대 영역과 Landsat satellite-8 Operational Land Imager (Landsat-8 OLI) 위성영상의 데이터를 활용하여 매시간별 조간대 영역을 산출하였다. Landsat 위성은 USGS와 NASA가 공동으로 개발한 위성 프로그램으로 1972년 7월부터 운영을 시작했으며, 그 중 Landsat-8 OLI 위성은 2013년 2월부터 현재까지 운영되고 있다. Landsat 8 위성자료는 15 m ~ 100 m의 공간해상도를 가진 총 11개의 밴드로 이루어져 있으며, 이를 이용하여 조간대에 해당하는 식생분포를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 연구기간에 해당하는 위성 이미지가 존재하지 않아 다른 기간의 간조와 만조 때 촬영된 이미지를 사용하였다. 각 위성 이미지 내 조간대 면적은 Tucker (1979), Wang et al. (2020), Yang et al. (2022)의 연구에 따라 임계값이 ≥ 0.2 인 정규화 식생 지수(Normalized Difference Vegetation Index ; NDVI) 값을 기반으로 산출하였다:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (4)$$

위 식에서 ρ_{red} 와 ρ_{nir} 는 각각 적색($0.64 \sim 0.67 \mu m$) 및 근적외선($0.85 \sim 0.88 \mu m$) 대역의 센서에서 얻은 스펙트럼 반사율 측정값을 나타낸다.

시간별 조간대의 토지피복 변화(해양 격자 \rightarrow 육지 격자)를 WRF 모델에 적용

하기 위해, 대기-해양 결합 모델과 위성 영상에서 산출한 시간별 조간대 면적 분포를 WRF 모델의 GEOGRID에 매시간별 적용하였다. 이때 조간대에 해당하는 격자의 LANDMASK는 해양에서 육지로, 토지피복은 기존의 해양 토지피복 (water bodies; WB)에서 일반적으로 조간대와 가장 유사한 토지피복으로 사용되는 herbaceous wetland (HW)로 수정하였다(Kim et al., 2019). 위와 같이 수정된 GEOGRID를 이용하여 2020년 7월 1일 00 UTC부터 7월 9일 00 UTC까지 1시간 간격으로 WRF 모델을 연속적으로 수행하였다. 이때, WRF 모델은 spin-up 시간인 48시간을 포함하여 총 193시간 동안 수행하였으며, 연속적인 모델링 과정에서 현재 모의 시간(예: 00 UTC)의 기상장은 다음 모의 시간(예: 01 UTC)의 초기장으로 사용되었다. 이는 프로그램(Python)을 통해 구축한 자동화 스크립트를 기반으로 모든 모의 시간에 동일하게 적용하였다. 그 다음으로 매시간별 조간대의 토지피복 변화가 적용된 기상장을 CMAQ 모델에 적용하였다. CMAQ 모델 또한 WRF 모델의 수행 기간과 똑같이 2020년 7월 1일 00 UTC부터 7월 9일 00 UTC까지 수행하였다. 시간별 조간대의 토지피복 변화에 따른 기상장의 변화에 따른 배출량 산정 결과, 배출량은 Isoprene (ISOP)의 경우 TIDE 실험에서 CTRL 실험에 비해 평균 $0.00003 \text{ moles s}^{-1}$ (0.02%) 약간 높아진 값을 보였으나, NO (Nitric Oxide)와 CO (Carbon monoxide)의 경우 각각 평균 $-0.000002 \text{ moles s}^{-1}$ (-0.0004%), $-0.000004 \text{ moles s}^{-1}$ (-0.0006%)의 값으로 실험별 차이가 크게 나타나지 않았다. 따라서 TIDE와 CTRL 실험 간의 대기오염물질 농도의 차이는 배출량의 차이보다 시간별 조간대의 토지피복 변화에 의한 기상 변화가 주된 영향이라고 판단하였다.

제 3 장 결과 및 고찰

3.1. 시간별 조간대 토지피복 변화에 따른 물리적 특성 변화

본 연구에서는 시간별 조간대의 토지피복 변화를 보다 정확하게 산출하기 위해 대기-해양 결합 모델의 WET_DRY 모듈과 Landsat-8 OLI 위성 영상을 사용하였다. 이때, 대기-해양 결합모델에서 모의한 시간별 조간대 분포의 정확도를 간접적으로 검증하기 위해 결합(WRF-ROMS; Coupled) 및 단일-ROMS; Uncoupled) 모델에 의해 모의된 SST와 해수면 높이 편차를 각각의 부이 관측소(ICP, TAP)와 조위 관측소(ICT, SDT, YHT, DST)의 관측값과 비교하였다(Figs. 4~5, Table 2).

관측값의 SST와 Coupled와 Uncoupled의 SST 모델값 비교 결과, ICP 지점에서는 Coupled 모델의 SST 값이 20.5 ~ 24.9°C의 범위를, Uncoupled 모델이 20.0 ~ 23.7°C의 범위를 보였고, TAP 지점에서는 Coupled 모델에서 16.0 ~ 20.7°C, Uncoupled 모델에서 17.7 ~ 21.9°C의 범위를 보여 Coupled 모델이 각 지점의 관측값(21.1 ~ 23.1°C (ICP), 16.8 ~ 19.3°C (TAP))에 대해 대체로 가까운 결과를 보였다. 또한 조위 관측소에서 관측된 해수면 편차는 반일주조의 형태로 진동하는 분포로 -431.0(최저) ~ +404.0 cm (최고) 범위를 보였다. Coupled와 Uncoupled 모델은 각각 -479.9 ~ +528.3 cm, -490.5 ~ +535.5cm 범위의 해수면 편차를 보였으며, 두 모델값 모두 관측값보다 큰 진폭이 나타나는 경향을 보였지만 Coupled 모델값이 Uncoupled 모델값보다 관측값에 가까운 범위를 보였다. 이는 대기-해양 상호작용에 의해 개선된 SST가 해수면 편차의 정확도 향상에 영향을 미친 것으로 사료된다.

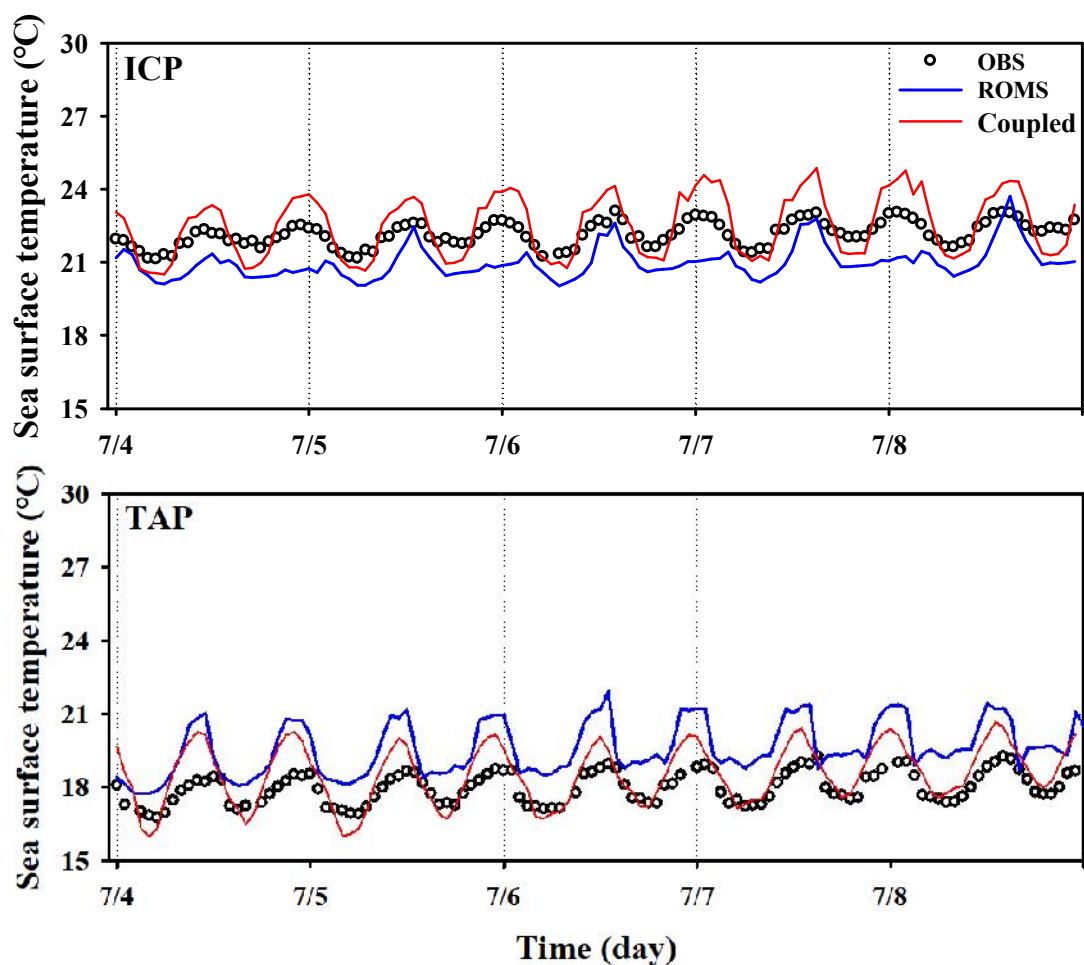


Fig. 4. Time series plot of the observed and model-simulated sea surface temperature (SST) at two buoy sites (ICP and TAP, Fig. 2) for the coupled (WRF-ROMS) and uncoupled (ROMS) models throughout the simulation period (July 4-8, 2020).

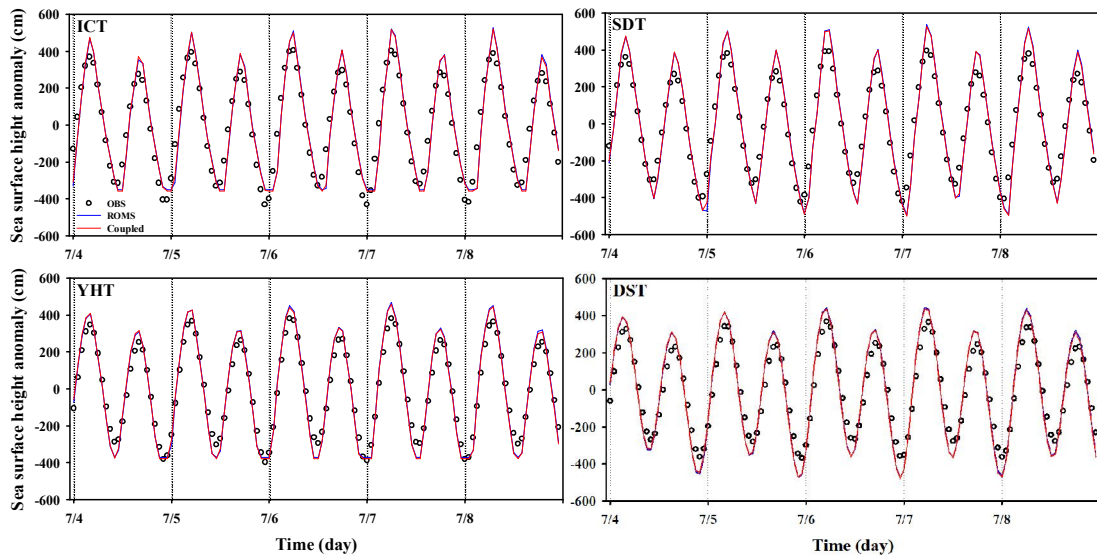


Fig. 5. Time series plot of the observed and model-simulated sea surface height (SSH) anomaly at four tidal stations (ICT, SDT, YHT and DST, Fig. 2) for the coupled (WRF-ROMS) and uncoupled (ROMS) models throughout the simulation period (July 4-8, 2020).

Table 2는 조위관측소 각 지점의 Coupled와 Uncoupled의 SST와 해수면 편차에 대한 통계검증(IOA, RMSE, MBE)을 나타낸다. Coupled 모델의 SST IOA는 모든 지점에서 0.74 이상으로 Uncoupled의 IOA보다 높은 값을 보였으며, Coupled 모델의 해수면 편차 IOA 또한 0.97 이상으로 Uncoupled 보다 높거나 같은 값을 보였으며, 합리적인 IOA 수치를 나타내었다. RMSE는 Coupled 모델에서 각각 0.90 ~ 0.91°C, 62 ~ 85 cm 로, Uncoupled (1.2 ~ 1.7°C, 63 ~ 87 cm) 보다 낮은 값을 나타냈으며, MBE 또한 모든 지점에서 Coupled가 Uncoupled 보다 과대모의 경향이 감소한 모습을 보였다(YHT 지점 제외). 위의 통계변수 분석을 통해 대기-해양 결합 모델이 단일 모델보다 조석 현상에 따른 해수면 변동을 보다 잘 모의하였음을 판단하였으며, 이에 따른 시간별 조건대 분포 또한 합리적이라고 판단하였다.

Table 2. Statistical evaluation of the sea surface height (SSH) and sea surface temperature (SST) between the observed and model-simulated values for the coupled and uncoupled models: results compared at four tidal stations (ICT, SDT, YHT, and DST, Fig. 2) and two buoy sites (ICP and TAP, Fig. 2) throughout the study period (July 4-8, 2020).

Variable	Site	Coupled model			Uncoupled model ^d		
		IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA	RMSE	MBE
SSH (cm)	Incheon (ICT)	0.98	81.34	2.73	0.97	84.62	5.15
	Songdo (SDT)	0.98	77.85	0.99	0.98	80.88	3.59
	Yeongheong-do (YHT)	0.99	61.82	5.64	0.98	63.24	4.54
	Daesan (DST)	0.97	85.13	2.69	0.97	86.84	2.82
SST (°C)	Incheon-Port (ICP)	0.74	0.91	0.37	0.51	1.24	-1.15
	Taeam-Port (TAP)	0.78	0.90	0.57	0.49	1.75	1.62

^a IOA: index of agreement.

^b RMSE: root mean square error.

^c MBE: mean bias error.

^d This means the results simulated without the consideration of atmosphere-ocean coupling.

Fig. 6은 대기-해양 결합 모델과 위성 자료를 결합하여 산출한 조간대 면적의 시공간적 변화를 나타낸 공간장과 만조와 간조의 Landsat-8 OLI 위성 이미지를 나타낸다. 산출된 조간대의 면적은 연구기간 동안 평균 약 1,090 km²를 나타냈으며, 간조 시 해안선에서 조간대의 최대 거리는 약 32 km로 위성영상(30 km)과 전반적으로 비슷한 수치를 보였다. 산출한 조간대 분포와 위성 이미지의 조간대 분포를 비교한 결과, 시공간적 조간대 면적 분포가 대체로 간조와 만조의 위성 이미지와 일치하는 것으로 나타나 시간에 따른 조간대 면적의 시공간적 변화를 잘 모의하였다고 판단하였다. 따라서 대기-해양 결합 모델과 Landsat-8 OLI 위성 이미지를 이용하여 산출한 시공간적 조간대 분포를 WRF 모델에 적용하였다.

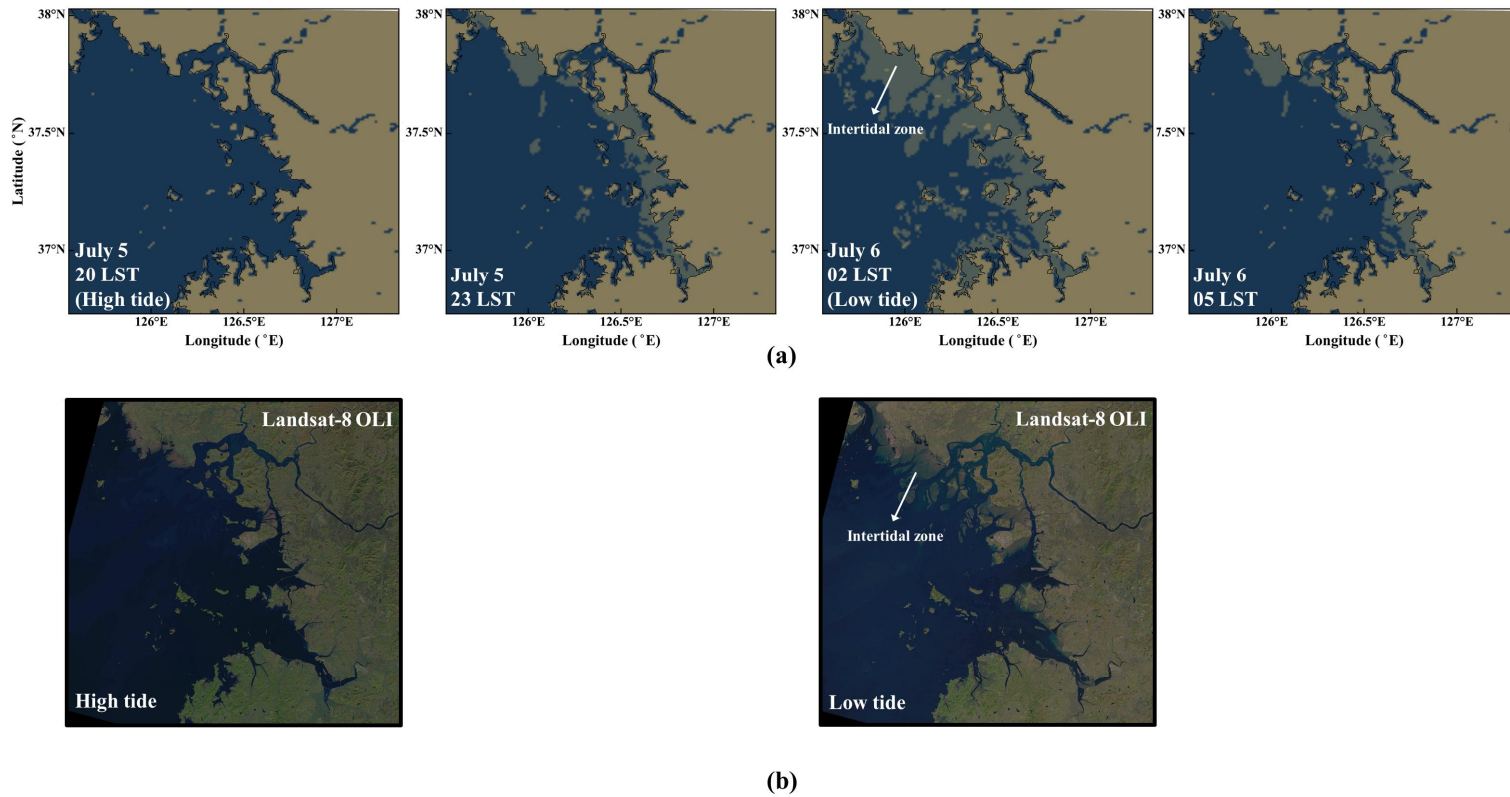


Fig. 6. Temporal and spatial changes in (a) the intertidal zone adjusted using a coupled atmosphere-ocean model and satellite images from high to low tides (20 LST on July 5-05 LST on July 6, 2020) and (b) the intertidal zone captured by Landsat-8 OLI satellite images at high and low tides.

최종적으로 산출한 시공간별 조간대 격자를 적용한 WRF 모델링에서는 조간대 격자의 토지피복이 바뀌며(WB → HW) 지표면 물리 상태(알베도, 토양수분, 지표면 거칠기 길이)가 변화하였다. Table 3는 CTRL과 TIDE 실험의 조간대 격자와 SD와 YH 지점에서의 지표면 물리 변수의 평균값을 나타낸다. CTRL과 TIDE 실험에서 WB의 토지피복을 가질 때 모든 지표면 물리 변수(알베도, 토양수분, 지표면 거칠기 길이)는 각각 0.08, $1.0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $<0.001 \text{ m}$ 로 동일한 값을 가졌다. 반면, TIDE 실험에서 해양 격자가 조간대 격자로 바뀌며 토지피복이 WB에서 HW로 변화하였을 때, 조간대의 평균 알베도는 조간대 격자와 두 조간대 지점(SD와 YH 지점)에서 각 평균 0.18, 0.19로 증가하는 모습을 보였다. 또한 지표면 거칠기 길이는 조간대 격자 및 두 지점에서 평균 0.12 m로 동일하게 증가하는 수치를 보였다. 평균 토양수분은 조간대 전체에서 $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 두 지점에서 $0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 미만으로 감소하는 수치를 보였다.

Table 3. Summary of land surface parameters (albedo, soil moisture, and surface roughness length) of two land-use categories (water bodies (WB) and herbaceous wetland (HW)) in the intertidal zone, at Songdo (SD) and Yeongheung-do (YH) sites, comparing the TIDE and CTRL simulations.

	Albedo		Soil moisture (m ³ m ⁻³)		Surface roughness length (m)	
	CTRL	TIDE	CTRL	TIDE	CTRL	TIDE
WB	0.08	0.08	1.0	1.0	<0.001	<0.001
HW	–	0.19 ^a (0.23/0.15) ^c 0.18 ^b (0.23/0.14) ^c	–	0.05 ^a (0.05/0.04) ^c <0.001 ^b (<0.001/<0.001) ^c	–	0.12 ^a (0.12/0. 0.12) ^b

^a Values represent the average across all grids corresponding to the time-varying land cover of the intertidal zone during the study period (July 4–8, 2020).

^b Values represent the respective averages for two intertidal sites (SD and YH) during the study period (July 4–8, 2020).

^c The values in parenthesis represent the daytime and nighttime averages of land surface parameters (albedo, soil moisture, and surface roughness length) due to the time-varying land cover of the intertidal zone (WB → HW).

3.2. 시간별 조간대 토지피복 변화에 따른 기상 분석

시간별 조간대의 토지피복 변화에 의해 바뀐 지표면 물리 변수 중 알베도와 토양 수분은 복사 매개변수 및 지표면 에너지 균형에 영향을 미칠 수 있으며, 지표면 거칠기 길이는 주로 풍속 및 풍향에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 토지피복의 영향 및 모델의 영향을 평가하기 위해 연구기간(2020년 7월 4일~7월 8일) 동안 8개의 기상 관측소(SD, YH, IC, GH, SS, SW, SL, DD)를 대상으로 기상요소(기온, 상대습도, 풍속)의 TIDE 및 CTRL 실험의 모델값과 관측값을 비교하였다(Figs. 7~10). 해안선으로부터 거리에 따른 시간별 조간대 토지피복 변화의 영향을 파악하기 위하여 기상 관측지점을 3개의 구역으로 나누어 결과를 분석하였다. 토지피복이 직접적으로 변하는 격자에 위치한 2개 지점은 조간대 지점(SD, YH), 변하지 않는 6개 지점 중 해안선으로부터 20 km 내에 위치한 3개 지점은 해안가 지점(IC, GH, SS), 그 외 3개 지점은 내륙 지점(SW, SL, DD)으로 분류하였다. 연구기간 동안 각 날짜에 대하여 주간과 야간에 조간대가 최대로 드러난 시간인 간조는 시계열 내에 검은색 점선으로 표시하였다.

Fig. 7은 조간대 지점에서의 기상요소의 시계열을, Figs. 8~10은 해안가 및 내륙 지점에서의 기상요소의 시계열을 나타낸다. 기상요소의 시계열을 보면, 전반적으로 모든 관측지점에서 CTRL 실험에 비해 TIDE 실험에서 관측값에 더 가까운 시계열을 보였다. 특히 조간대 지점에서는 만조보다 간조에서 기상요소의 변화가 더 뚜렷하게 나타났다. 이러한 차이는 조간대의 토지피복 변화로 인해 간조 시 지표면 물리 변수가 크게 변화하기 때문으로 사료된다(WB → HW, Table 3 참조). 조간대 지점에서의 기온 및 상대습도는 TIDE 실험에서 대체로 주간의 기온 상승 및 상대습도 감소 패턴을 잘 모의하였으며, 특히 간조 시기에 모의 정확도 향상 정도가 크게 나타났다. 각 조간대 지점의 TIDE 실험의 기온은 SD 지점에서 평균 20.3°C (최대 28.3°C), YH 지점에서 평균 19.7°C (최대 27.1°C)로 CTRL (SD 지점 평균 19.5°C (최대 22.1°C), YH 지점 평균 19.6°C (22.7°C))보다 높은 값을 보여 관측값(SD 지점 평균 22.4°C (최대 27.3°C), YH 지점 평균 21.5°C (25.9°C))에 더 가까운 모습을 보였다(Fig. 7(a)). 또한 TIDE 실험의 상대습도는 SD 지점에서 평균 87.3% (최소 42.2%), YH 지점에서 평균 91.4% (최소 53.7%)의 값

으로, CTRL의 SD와 YH 지점의 상대습도(평균 93.6% (최소 80.5%), 평균 93.6% (최소 80.5%))보다 관측값(SD 지점에서 평균 83.9% (최소 58.2%), YH 지점에서 평균 86.0% (66.7%))에 더 근접한 모습을 보였다(Fig. 7(b)). 모든 해안가 및 내륙 지점의 기온과 상대습도 또한 TIDE 실험에서 CTRL 실험보다 개선된 수치를 보였으나 토지피복이 변하지 않아 조간대 지점에 비해 작은 편차를 보였다(Figs. 8~9).

풍속은 CTRL 및 TIDE 실험 모두 관측값보다 과대모의 된 경향을 보였으나, TIDE 실험에서는 경향성이 더 작게 나타났다(Fig. 7(c), Fig. 10). 예를 들면, 조간대 지점인 SD 지점의 평균 풍속은 TIDE 실험에서 2.6 m s^{-1} , CTRL 실험에서 2.9 m s^{-1} 로 나타났으며, YH 지점의 평균 풍속은 TIDE 및 CTRL 실험에서 각각 2.5 m s^{-1} , 2.6 m s^{-1} 로 나타나 TIDE 실험이 관측값(평균 2.2 m s^{-1} (SD), 2.4 m s^{-1} (YH))에 더 가까운 수치를 보였다. 해안가 및 내륙 지점 또한 TIDE 실험(평균 2.3 m s^{-1})에서 CTRL 실험(평균 2.5 m s^{-1})보다 전체적으로 풍속의 과대모의 경향이 감소하는 모습을 보였다.

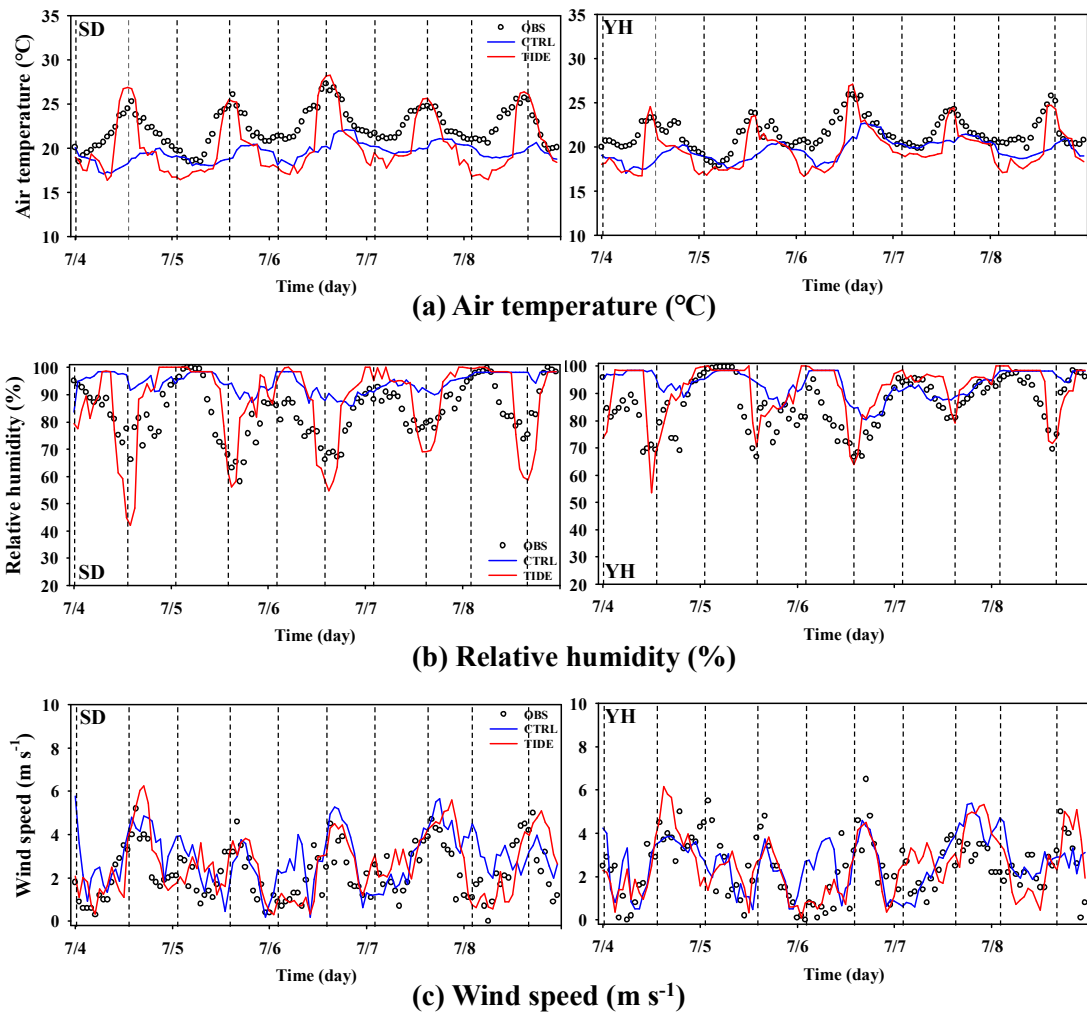


Fig. 7. Time series plot of the observed and model-simulated meteorological variables ((a) air temperature, (b) relative humidity, and (c) wind speed) at two meteorological sites (SD and YH, Fig. 2), located in the intertidal area, in the TIDE and CTRL simulations throughout the simulation period (July 4-8, 2020). Black dotted line in the figures indicate low tide during the simulation period.

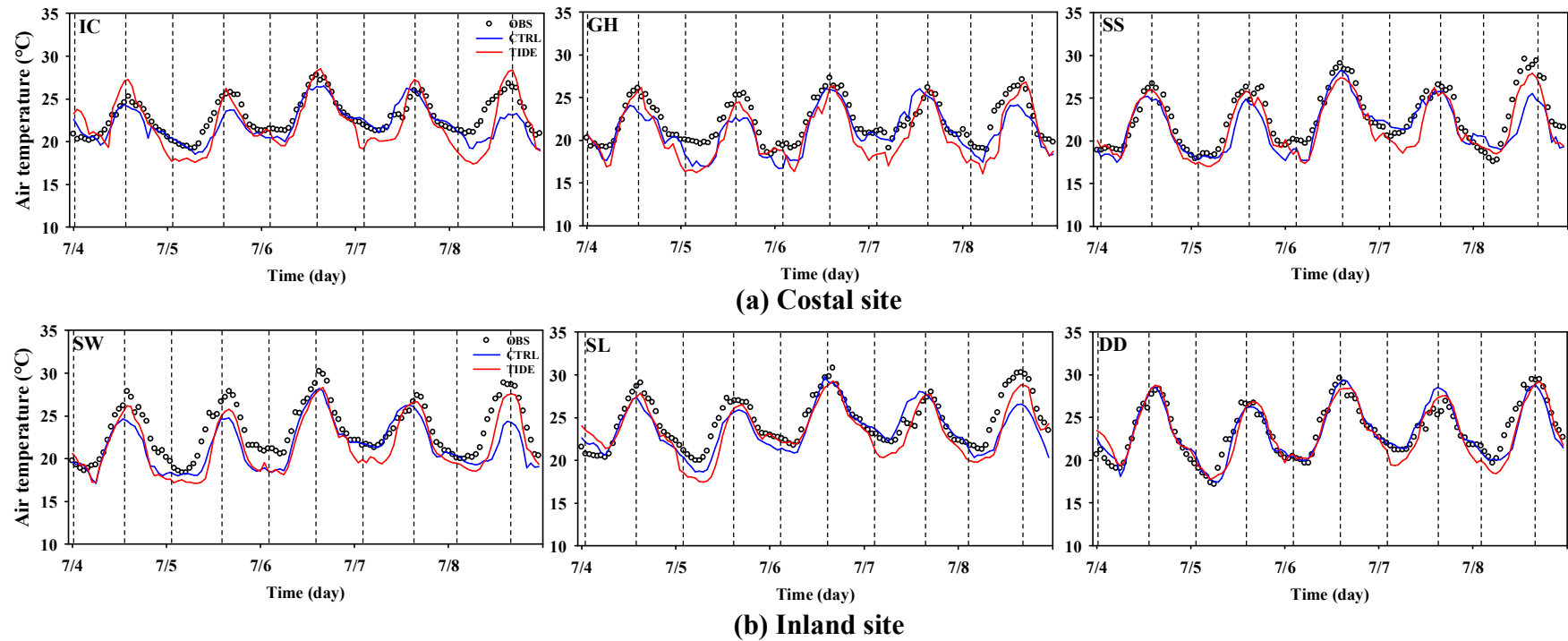


Fig. 8. Time series plot of the observed and model-simulated air temperature at (a) three meteorological sites (IC, SG, and SS, Fig. 2), located in costal areas and (b) the other three sites (SW, SL, and DD, Fig. 2), located in inland areas, for the TIDE and CTRL simulations throughout the simulation period (July 4-8, 2020). Black dotted line indicate low tide times throughout the simulation period.

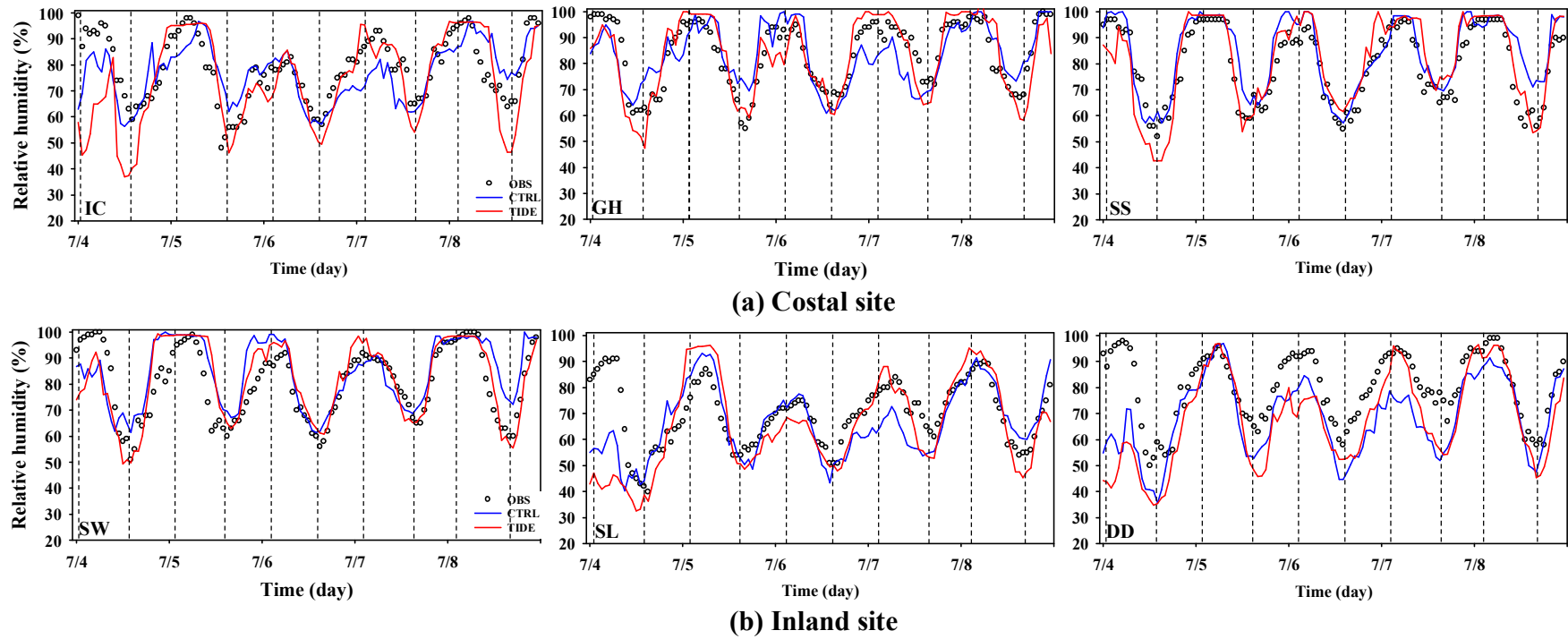


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for relative humidity.

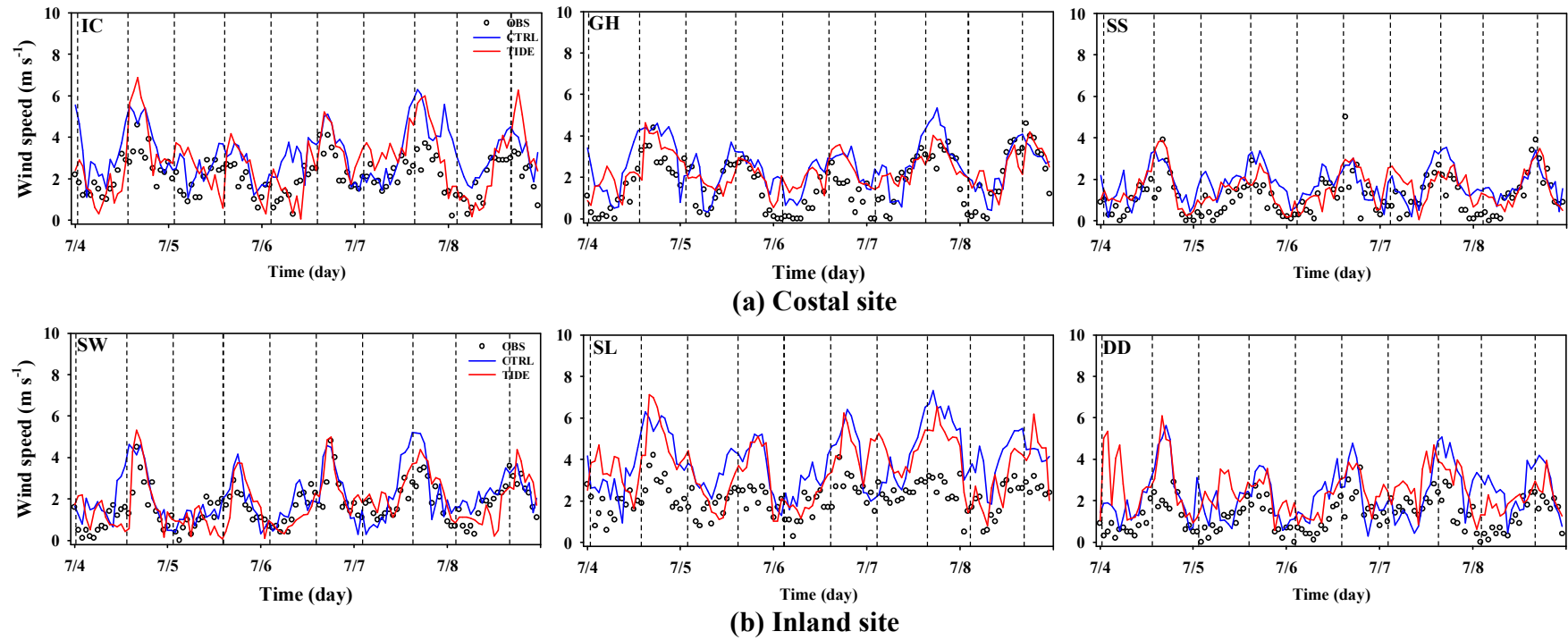


Fig. 10. Same as Fig. 8 except for wind speed.

본 연구에서는 시간별 토지피복 변화가 기상요소에 미치는 영향을 공간적으로 살펴보기 위해, 연구기간(2020년 7월 4일~8일)동안 주간과 야간의 간조와 만조에 대해서 기상요소(기온, 상대습도, 풍속) 및 PBLH의 편차(TIDE - CTRL) 공간장을 비교분석하였다(Figs. 11, 12, 17). Figs. 11과 12는 연구기간 동안의 CTRL과 TIDE 실험 사이의(TIDE - CTRL) 주야간 동안의 간조와 만조의 평균 기온과 상대습도의 차이를 각각 나타낸다. TIDE에서 기온과 상대습도는 간조일 때 큰 편차를 보였으며, 특히 조간대 영역에서 큰 일변화를 보였다. 간조일 때 조간대의 주간 기온은 TIDE 실험에서 CTRL 실험에 비해 최대 8.0°C (평균 6.2°C) 증가했으며 야간 기온은 최대 2.5°C (평균 1.6°C) 감소하였다(Fig. 11). 간조 시 조간대의 상대습도는 기온과 반대로 주간에는 최대 41% (평균 29%) 감소한 모습을, 야간에는 최대 5.8% (평균 1.4%) 증가한 모습을 보였다(Fig. 12). 이러한 간조의 조간대의 기온의 변화는 내륙의 기온 상승(평균 0.9°C, 최고 2.6°C)에 영향을 주었다. 이는 조간대에서 내륙으로 부는 해풍의 영향에 기인한 것으로 사료된다(Song et al., 2010; An et al., 2022). 반면, 만조에서는 조간대와 내륙 모두 두 실험 간의 기온과 상대습도가 주간과 야간에 관계없이 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 만조시 TIDE와 CTRL 실험 모두 조간대에서 서로 간은 토지피복(WB)이 적용되기 때문으로 사료된다.

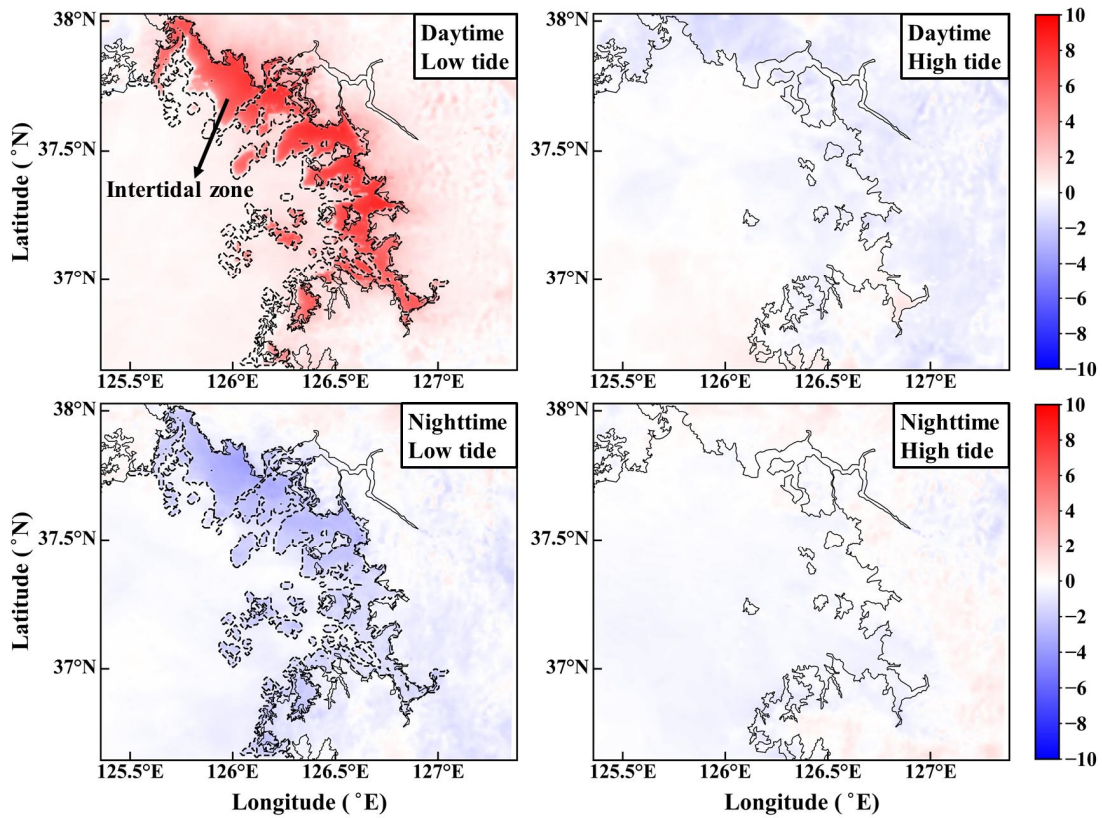


Fig. 11. Spatial distributions of the differences in air temperature between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low and high tides during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.

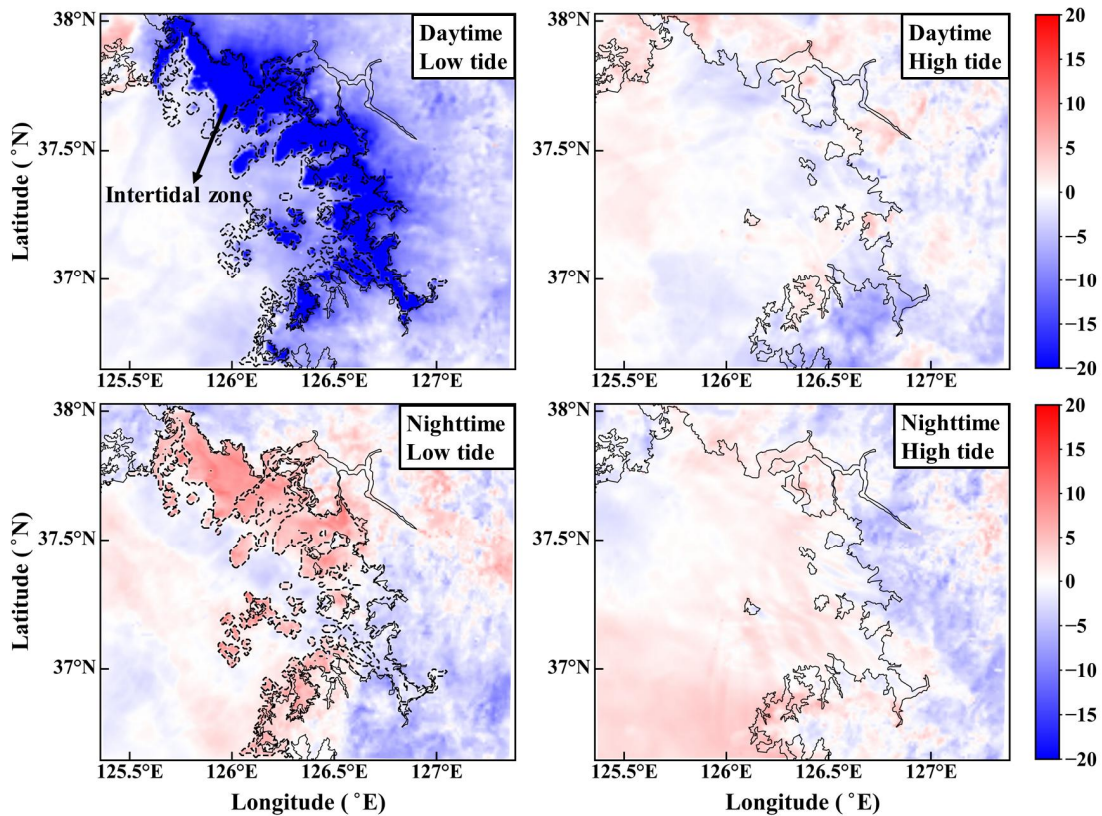


Fig. 12. Same as Fig. 11 except for relative humidity.

Fig.11에 나타난 간조의 기온 및 상대습도 변화에 토지피복 변화(WB → HW)로 인한 지표면 물리 변수의 변화가 미치는 영향을 확인하기 위해서 간조의 토양온도 및 지표열속의 편차(TIDE - CTRL) 공간장을 비교분석하였다. 간조일 때, 조간대에서 주간은 토양온도는 증가하는 모습을, 야간은 토양온도는 감소하는 모습을 보였다. 이는 토지피복 변화에 의한 토양 수분 감소에 의한 토양 비열 감소의 영향을 받은 것으로 보이며, 주간은 기온 증가는 토양 온도 증가의 영향을, 야간은 기온 감소는 토양 온도 감소 및 복사 냉각의 증가의 복합적인 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한 간조에서 주간과 야간의 토양 온도 변화는 주간에는 조간대에서 대기, 야간에는 대기로부터 조간대로 이동하는 열이 증가해 주간에는 현열속이 증가하고, 야간에는 현열속이 감소하였다(Qu et al., 1998). 조간대와 달리 내륙의 현열속은 주간 간조의 편차장에서 감소하는 모습을 보였는데, 이는 내륙의 주간 기온의 상승으로 인해 토양 온도와 기온의 온도 편차(soil

temperature - air temperature)가 감소해 지표에서 대기로 이동하는 열이 감소했기 때문이다(Cellier et al., 1996). 조간대 및 내륙에서 주간 상대습도 감소는 토양 수분 감소에 의한 수증기량 감소의 영향으로 조간대 주변의 잠열속이 감소했기 때문으로 사료된다(Lee et al., 2016; Zhang et al., 2019). 다만, 야간에는 조간대의 잠열속이 감소했음에도 불구하고 상대습도가 상승하였는데, 이는 조간대의 야간 기온 감소로 인한 포화수증기량 감소의 영향이 더 크기 때문이다.

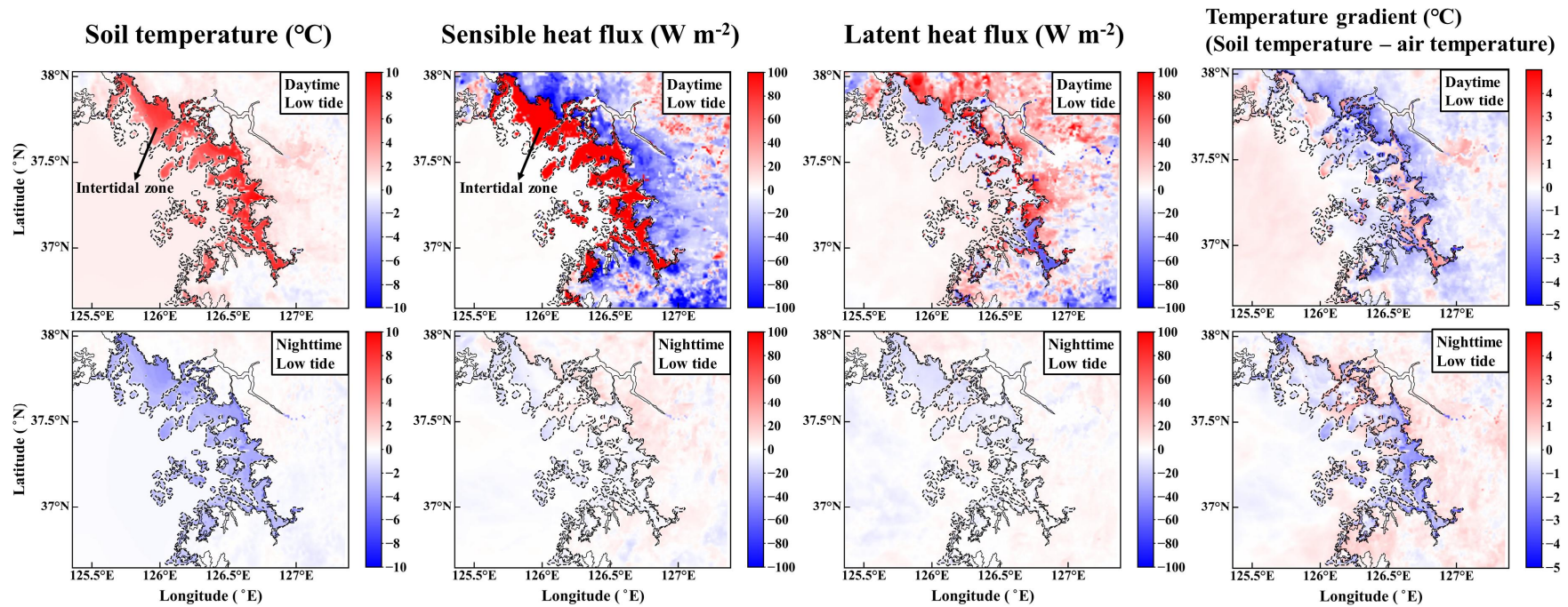


Fig. 13. Spatial distributions of the differences in soil temperature, sensible heat flux, latent heat flux and differences in temperature gradient (soil temperature minus air temperature), between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.

Fig. 14는 연구기간 동안의 CTRL과 TIDE 실험 사이의 주간과 야간의 간조 및 만조의 평균 풍속의 차이를 나타낸다. 풍속은 기온과 상대습도와는 다른 모습의 편차장을 보였다. 조간대에서 간조 시 TIDE 실험의 주간 풍속은 지표면 거칠기 길이의 증가로 인한 마찰력 증가에도 불구하고 증가(평균 0.3 m s^{-1} , 최대 1.5 m s^{-1})하였다. 이는 조간대의 기온 증가로 인한 조간대와 해양의 기온 편차 증가의 영향을 더 크게 받았기 때문으로 사료된다(Fig. 15; Simpson et al., 2008). 또한 조간대에서의 주간 기온 증가는 조간대와 내륙 사이의 기온 편차를 감소시켜 내륙의 풍속 감소(평균 1.0 m s^{-1} , 최대 1.2 m s^{-1})에도 영향을 미친 것으로 판단된다. 주간과 반대로 야간에는 풍속이 감소(평균 1.3 m s^{-1} , 최대 2.8 m s^{-1})하는 모습을 보였는데, 이는 기온 편차보다는 주로 지표면 거칠기 길이 증가에 기인한 것으로 사료된다(Wever, 2012). 다만, 만조에서 주간과 야간의 풍속은 기온 및 상대습도와 같이 조간대 및 내륙(외해 제외)에서 뚜렷한 값의 차이를 보이지 않았는데, 이는 두 실험 모두 조간대에 동일한 토지피복(WB)이 적용되었기 때문이다.

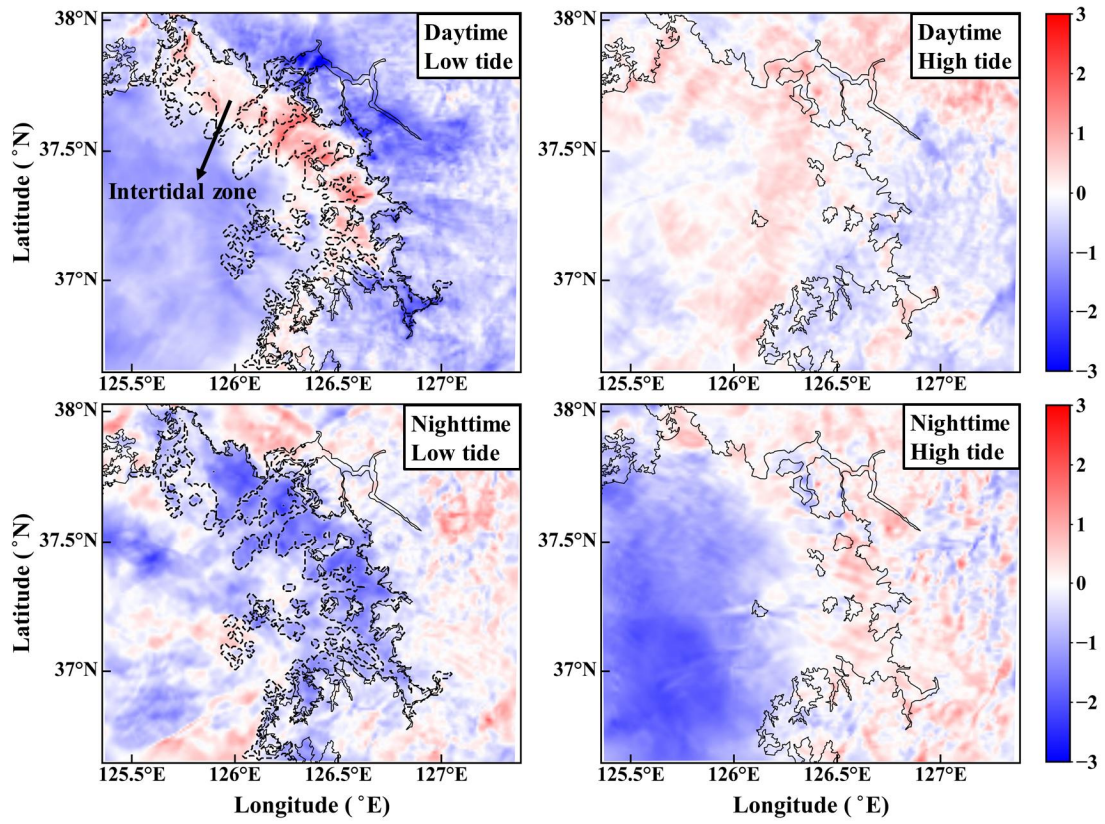


Fig. 14. Same as Fig. 11 except for wind speed.

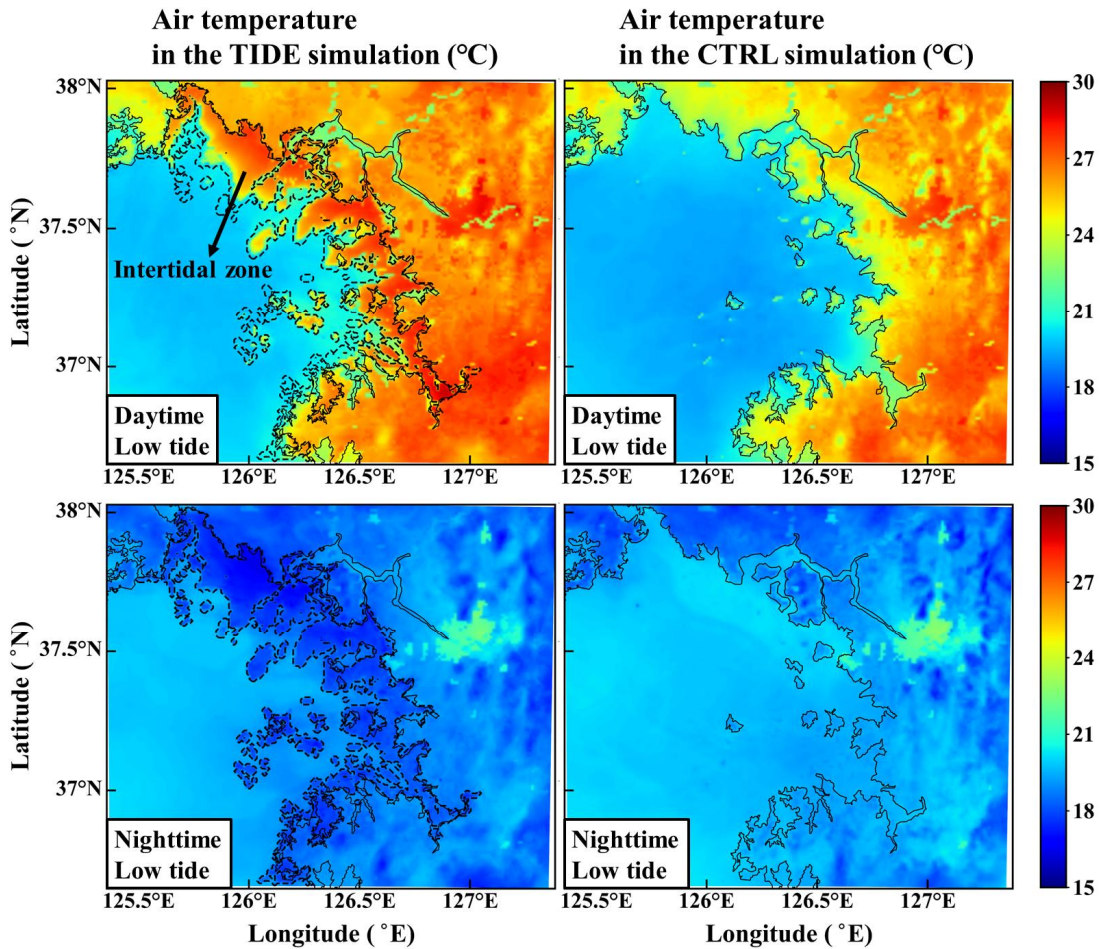


Fig. 15. Spatial distributions of the air temperature in the TIDE and CTRL simulations at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The bold dotted lines at low tide represent the area of the intertidal zone.

일반적으로 대기경계층(PBL)은 지구 표면으로부터 약 1~2km에 위치해있는 대기층으로, 표면의 열적 및 역학적 영향을 직접적으로 받는다(Stull, 1988; Garratt, 1992). 또한 대기경계층에서는 에어로졸 확산, 대류 활동, 구름과 안개의 형성과 같은 대기오염물질의 수송이나 확산에 영향을 미치는 난류 활동이 발생하기 때문에 대기경계층 높이(PBL height, PBLH)는 대기오염물질의 농도에 영향을 미치는 중요한 인자라고 할 수 있다(Deardorf, 1972; Lin et al., 2008; Konor et al., 2009). 따라서 Fig. 16에서 대기경계층 높이에 대하여 공간분포를 분석하였다. 연

구기간 동안의 CTRL과 TIDE 실험 사이의 주간과 야간의 간조 및 만조의 평균 PBLH의 편차는 기온과 유사하게 주간 간조의 조간대(최대 1405 m, 평균 576 m)에서 크게 나타났다. 이는 조간대에서의 기온 및 현열 상승에 의해 조간대 인근 대기의 난류운동이 강화되어 혼합층의 높이가 높아지기 때문이다. 다만, 야간의 간조에서는 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 지표 인근 공기가 야간에서는 CTRL과 TIDE 실험 모두 안정된 값을 보이기 때문으로 사료된다. 또한 만조에서는 기상학의 차이가 크게 나타나지 않아 PBLH 또한 큰 차이를 보이지 않았다.

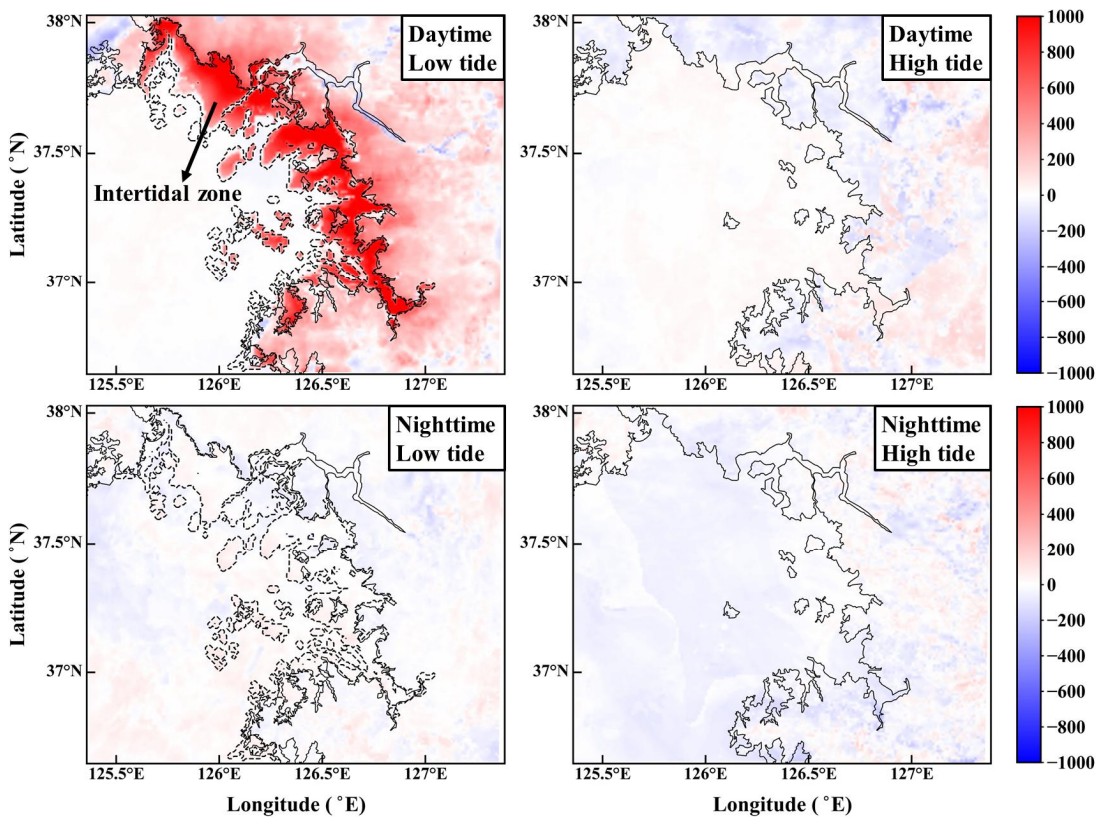


Fig. 16. Same as Fig. 11 except for planetary boundary layer height (PBLH).

연구기간 동안 시간별 조간대 토지피복 변화가 기상학에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해, 시간별 조간대 토지피복 변화가 각 기상요소(기온, 상대습도, 풍속)에 미치는 기여도(%)를 조간대와 내륙으로 나누어 분석하였다(Table 4). 모든 기상요소의 기여도는 주간과 야간에 관계없이 만조보다 간조에서, 내륙보다

조간대에서 더 높은 값을 보였다. 조간대에서 간조 시 시간 변화에 따른 토지피복이 기온 및 풍속에 미치는 영향에 대한 기여도는 주간에 약 25% (기온), 6% (풍속)로 양의 최고값을 나타냈으며, 야간에는 각 10%, 34% 감소하여 음의 최고값을 나타냈다. 상대습도는 주간 간조에서 가장 큰 음의 기여도(27%)를, 야간 간조에서 가장 큰 양의 기여도(4.7%)를 보였다. 이는 시간별 조간대의 토지피복 변화가 간조 조간대의 기상요소에 직접적인 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

Table 4. Contributions (%) of time-varying land cover in the intertidal zone to meteorological conditions (air temperature (Temp), relative humidity (RH), and wind speed (WS)) in the intertidal and inland areas in the 1 km model domain (D4) during the study period (July 4-8, 2020).

	Low tide during the day	High tide during the day	Low tide at night	High tide at night
Temp	24.8/3.4 ^a	-0.8/-2.2	-9.9/-1.6	-1.0/0.2
RH	-27.1/-9.0	-1.1/-1.0	4.7/-1.3	1.0/-1.6
WS	6.0/-19.5	4.0/-0.8	-34.0/1.7	-2.4/2.5

^a Intertidal zone/Inland area.

기상 수치모의에 대한 정량적 검증은 자세히 확인하기 위해, 모든 기상관측지점에서 모델값과 관측값 사이의 통계적(IOA, RMSE, MBE) 분석을 수행하였다 (Table 5). 전반적으로 모든 관측지점에서 CTRL 실험(RMSE: 2.1°C (기온), 11.0% (상대습도), 1.3 m s⁻¹ (풍속))에 비해 TIDE 실험(2.0°C, 10.0%, 1.1 m s⁻¹)이 관측값에 더 가까운 값을 보였다. 특히 TIDE에서의 조간대 지점은 내륙 지점보다 더 높은 기상요소 모의 결과의 개선을 보였는데, 기상요소의 평균 RMSE 개선 (CTRL - TIDE) 수치를 보면 조간대 지점에서 각각 0.39°C (기온), 1.38% (상대습도), 0.13 m s⁻¹ (풍속)로 해안가 및 내륙 지점(각각 0.05°C, 0.83%, 0.18 m s⁻¹)보다 대부분 큰 값을 보여 관측값과의 오차가 더 많이 개선되었음을 보였다. TIDE 실험의 IOA 또한 조간대 지점(각각 0.19 ~ 0.25°C, 0.18 ~ 0.22%, 0.08 ~ 0.12 m s⁻¹)에서 해안가 및 내륙 지점(0.01 ~ 0.05°C, 0.01 ~ 0.08%, <0.001 ~ 0.09 m s⁻¹)

보다 CTRL 실험보다 관측값과 더 잘 일치하는 모습을 보였다. MBE의 경우, CTRL 실험에서 기온의 과소모의(-1.33℃) 경향과 상대습도와 풍속의 과대모의 경향(1.43% (상대습도), 0.68 m s⁻¹ (풍속))을 보였으나, TIDE 실험에서는 그 경향이 감소(-1.28℃, 0.02%, 0.51 m s⁻¹)하는 모습을 보였다.

Table 5. Statistical evaluation of meteorological variables (air temperature, relative humidity, and wind speed) between observed and model-predicted values in TIDE and CTRL simulations during the study period (July 4-8, 2020).

Site		Air temperature (Temp, °C)			Relative humidity (RH, %)			Wind speed (WS, m s ⁻¹)		
		IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
Intertidal site										
Songdo (SD)	CTRL	0.49	3.46	-2.86	0.52	13.51	10.46	0.66	1.41	0.67
	TIDE	0.74	2.89	-2.07	0.74	12.14	3.75	0.78	1.22	0.37
Yeongheong-do (YH)	CTRL	0.53	2.56	-1.90	0.56	11.56	7.58	0.63	1.44	0.19
	TIDE	0.72	2.35	-1.81	0.74	10.17	5.79	0.71	1.38	0.11
Coastal site										
Incheon (IC)	CTRL	0.86	1.51	-0.80	0.80	9.98	-1.65	0.60	1.47	1.08
	TIDE	0.87	1.87	-0.82	0.86	10.58	-2.57	0.69	1.34	0.71
Ganghwa (GH)	CTRL	0.89	1.70	-1.13	0.85	8.92	-0.26	0.76	1.23	0.81
	TIDE	0.90	1.76	-1.35	0.91	7.87	-0.34	0.78	0.98	0.51
Seosan (SS)	CTRL	0.90	1.87	-1.04	0.92	8.35	4.94	0.70	0.99	0.62
	TIDE	0.95	1.45	-1.00	0.93	8.21	2.30	0.76	0.86	0.40
Inland site										
Suwon (SW)	CTRL	0.85	2.34	-1.73	0.85	10.01	4.08	0.78	1.01	0.48
	TIDE	0.90	2.08	-1.74	0.90	8.58	1.70	0.82	0.88	0.21
Seoul (SL)	CTRL	0.90	1.72	-0.88	0.79	11.44	-3.34	0.45	2.13	1.82
	TIDE	0.91	1.76	-1.08	0.87	10.21	-2.22	0.51	1.83	1.44
Dongducheon (DD)	CTRL	0.96	1.15	-0.10	0.76	14.91	-11.71	0.57	1.48	1.02
	TIDE	0.97	1.09	-0.24	0.82	13.36	-10.49	0.61	1.26	1.02
All sites										
	CTRL	0.86	2.12	-1.33	0.83	11.01	1.43	0.81	1.28	0.68
	TIDE	0.90	1.96	-1.28	0.89	9.95	0.02	0.85	1.13	0.51

^a IOA: index of agreement.

^b RMSE: root mean square error.

^c MBE: mean bias error.

3.3. 시간별 조간대 토지피복 변화에 따른 대기질 분석

실시간 조간대의 토지피복 변화에 의한 기상요소의 변화는 대기오염물질의 농도에 상당한 영향을 미쳤다. 시간별 조간대의 토지피복 변화를 적용한 기상장이 대기오염물질의 농도에 미치는 영향을 평가하기 위해 연구기간(2020년 7월 4일~7월 8일) 동안 6개의 대기질 관측소(SH, GS, DM, GK, JG, BS)를 대상으로 대기오염물질 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3)의 TIDE와 CTRL 실험의 모델값과 관측값을 비교하였다(Figs. 17~19). 대기질 관측소 또한 해안선으로부터 20 km 내에 위치한 해안가 3개 지점(SH, GS, DM)과 그 외 내륙 3개 지점(GK, JG, BS)으로 분류하였으며, Figs. 17~19에 표시한 검은색 점선은 연구기간 동안에 나타난 간조 시간을 나타낸다.

Figs. 17~19에 나타나듯이, 대기오염물질의 농도 변화는 모든 지점에서 만조보다 간조에서, 야간보다 주간에 크게 나타났다. 이는 CTRL 실험과 비교하여 TIDE 실험의 기상요소가 주간 간조에서 가장 크게 변화했기 때문으로 판단된다. 주간 간조에서 지점 별 TIDE 실험의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 CTRL 실험보다 평균 $2.5 \mu\text{g m}^{-3}$, $2.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 낮은 값을, O_3 는 4.9 ppb 높은 값을 보였으며, 관측값과 TIDE 모델값의 차이는 $0.5 \sim 23.6 \mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{10}), $0.2 \sim 18.9 \mu\text{g m}^{-3}$ ($PM_{2.5}$), $0.7 \sim 39.0 \text{ ppb}$ (O_3) 범위로 나타나 모든 지점에서 CTRL ($1.1 \sim 32.1 \mu\text{g m}^{-3}$, $0.3 \sim 21.6 \mu\text{g m}^{-3}$, $2.1 \sim 63.5 \text{ ppb}$)보다 작은 값을 보여 관측값에 더 가까운 모습을 보였다. 간조의 TIDE와 CTRL 실험의 각 대기오염물질 농도의 편차(TIDE - CTRL)는 해안선 지점에서 $-15.8 \sim 22.6 \mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{10}), $-13.1 \sim 18.7 \mu\text{g m}^{-3}$ ($PM_{2.5}$), $-13.1 \sim 25.0 \text{ ppb}$ (O_3)의 범위를, 내륙 지점에서 $-19.9 \sim 16.4 \mu\text{g m}^{-3}$, $-17.7 \sim 6.9 \mu\text{g m}^{-3}$, $-14.7 \sim 20.8 \text{ ppb}$ 의 범위를 보였다. 대기오염물질의 농도 변화는 대체로 해안가 지점이 내륙 지점과 비슷하거나 일부 큰 편차 범위를 보였다. 이는 해안가와 내륙 지점 모두 토지피복 변화에 간접적인 영향을 받은 기상장이 적용되었기 때문으로 판단된다.

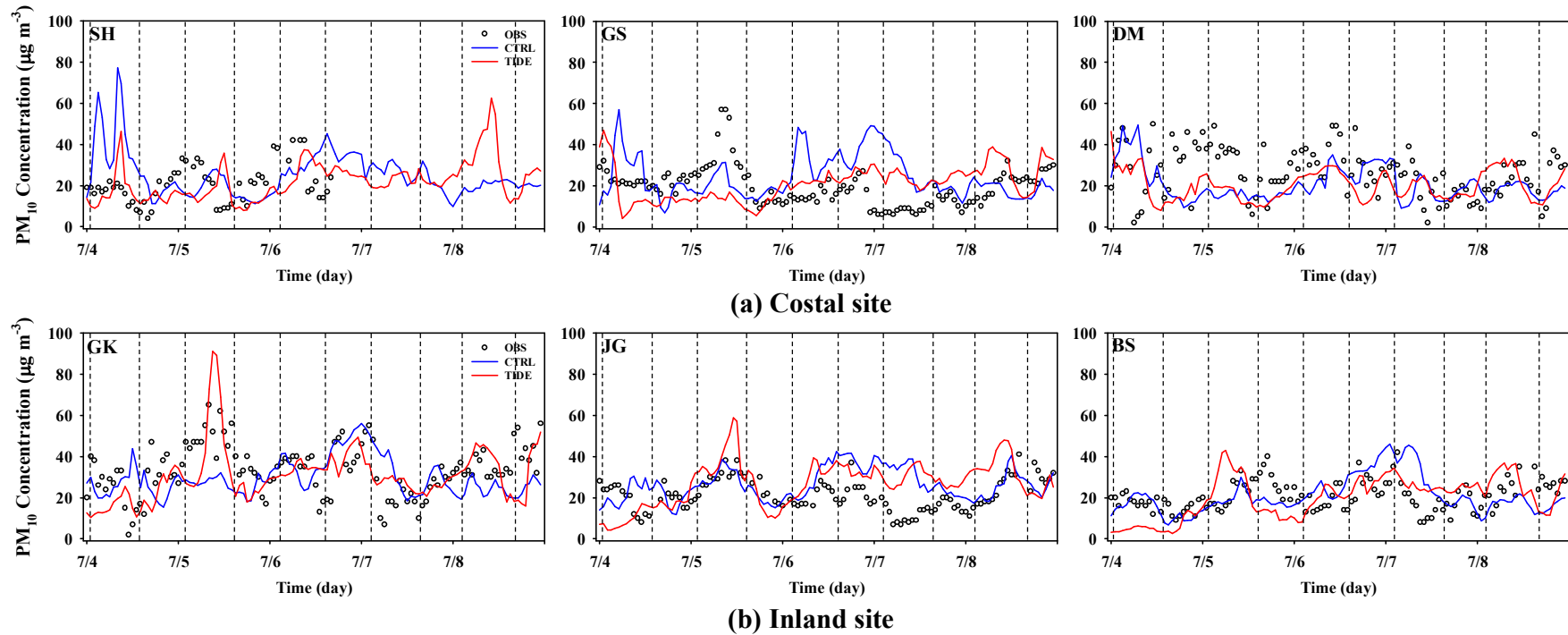


Fig. 17. Time series plot of the observed and model-simulated PM_{10} at (a) three air quality monitoring sites (SH, GS, and DM, Fig. 2), located in coastal areas and (b) the other three sites (GK, JG, and BS, Fig. 2), located in inland areas, for the TIDE and CTRL simulations throughout the simulation period (July 4-8, 2020). Black dotted line indicate low tide times throughout the simulation period.

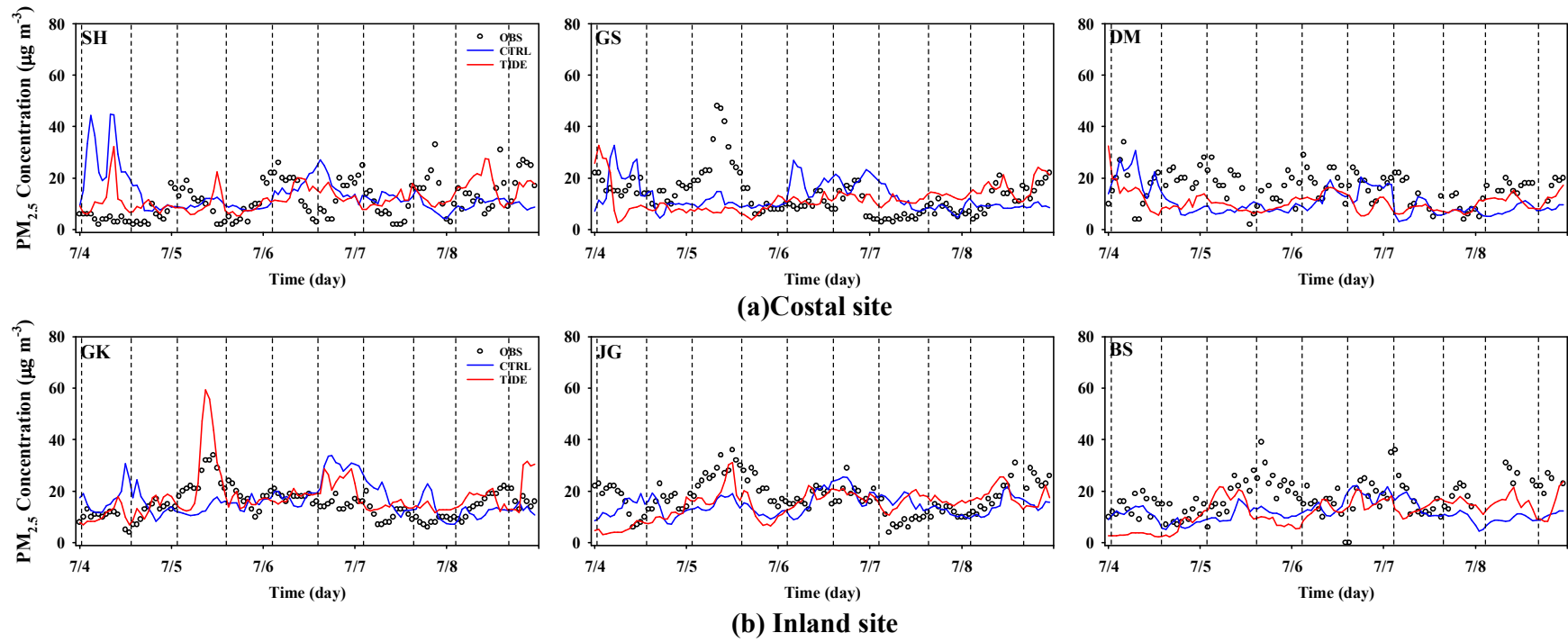


Fig. 18. Same as Fig. 11 except for PM_{2.5}.

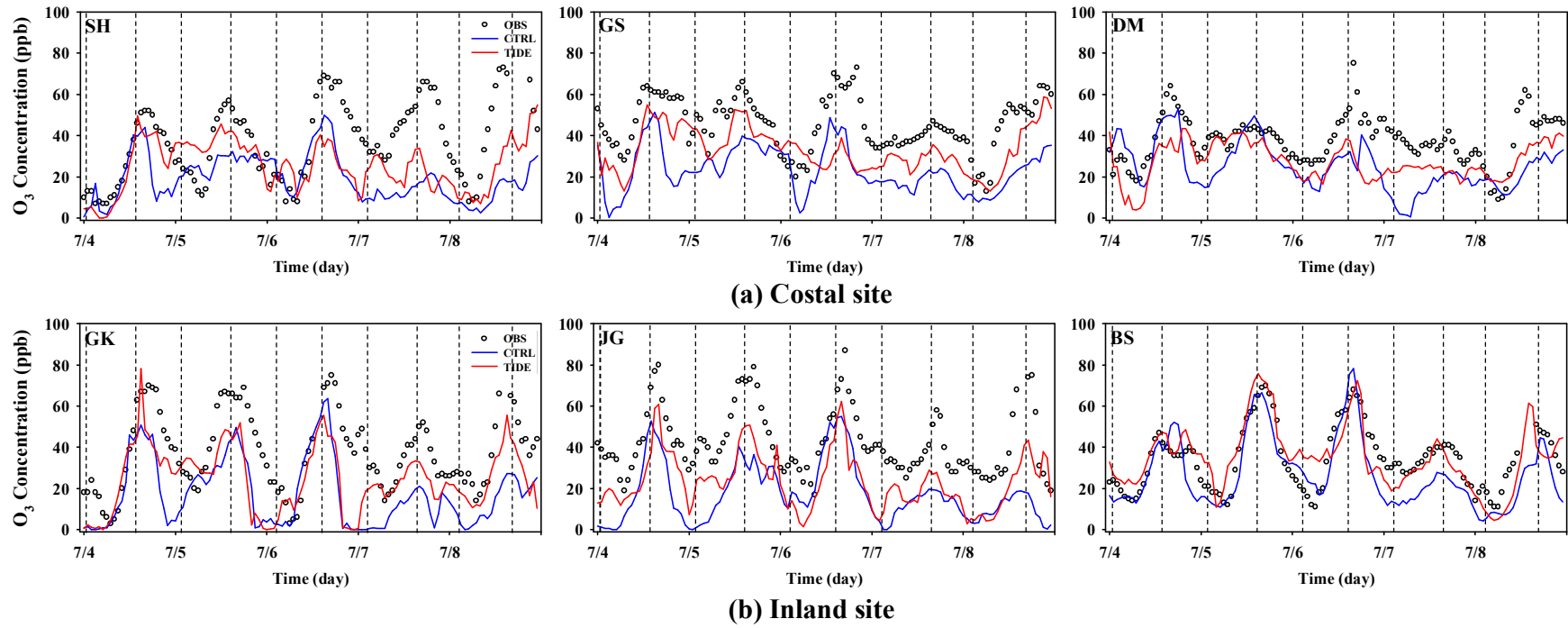


Fig. 19. Same as Fig. 11 except for O₃.

시간별 조간대의 토지피복 변화로 인해 연안 및 수도권 지역에 나타나는 기상 변화가 지역 대기질에 미치는 영향을 분석하기 위해 연구기간(2020년 7월 4일~8일)동안 주간과 야간의 간조 및 만조에 대해서 TIDE와 CTRL 실험의 대기오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3) 농도 및 수평 공간장을 비교분석하였다(Figs 20~26).

Figs. 20~23은 주간과 야간 동안의 간조와 만조에 대해서 TIDE와 CTRL 실험의 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 농도와 TIDE와 CTRL 실험의 모델값 차이(TIDE - CTRL)를 나타낸다. 간조일 때, 전반적으로 조간대의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도는 조간대와 내륙 모두 주간에 감소하는 모습을, 야간에 증가하는 모습을 보였다(Figs. 20~21). 조간대에서 주간의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도 감소(평균 $-10.8 \mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{10}), $-3.9 \mu\text{g m}^{-3}$ ($PM_{2.5}$))는 조간대의 주간 PBLH 및 풍속의 증가로 인해 연직 수송과 수평 수송이 강해졌기 때문으로 사료된다(Wang et al., 2014; Han et al., 2021). 또한 야간 조간대의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 증가(평균 $0.2 \mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{10}), $1.4 \mu\text{g m}^{-3}$ ($PM_{2.5}$))는 야간일 때 조간대에서 증가한 상대습도로 인한 핵화(nucleation) 및 응축(condensation)의 증가와 풍속 감소로 인한 대기 확산의 약화가 주요 원인인 것으로 사료된다(Liu et al., 2019; Cummings et al., 2020., Cho et al., 2023). 내륙의 주간 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 내륙의 주간 PBLH 증가에 의해 감소하는 모습(평균 $-3.2 \mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{10}), $-1.7 \mu\text{g m}^{-3}$ ($PM_{2.5}$))을 보였으나, 조간대와는 달리 내륙의 풍속이 감소하며 조간대보다 작은 농도 감소를 보였다. 또한 야간에는 내륙의 약한 풍속 감소의 영향으로 인한 수평 확산 감소로 인해 평균 $1.2 \mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{10}), $1.5 \mu\text{g m}^{-3}$ ($PM_{2.5}$) 증가하는 모습을 보였다. 만조의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도는 대체로 감소하는 모습을 보였다(Figs. 22~23). 이는 주간에는 간조의 낮은 농도가, 야간에는 일부 약하게 증가한 풍속이 농도 감소에 영향을 미친 것으로 사료된다.

모든 시간대에서 남동쪽에 위치한 배출량이 높게 나타나는 점오염원 인근(blue dotted circle)에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 편차가 크게 나타나는 모습을 보였다. 이러한 농도 편차는 기온 및 상대습도에 대한 변화보다 인근의 풍향 변화에 따른 배출량 확산 흐름 변화에 기인한 것으로 판단된다(Fig. 24). 이는 배출량이 높게 나타나는 지역은 기온, 상대습도, 풍속 및 PBLH과 같은 기상 요소의 변화보다는 풍향에 따른 배출량의 흐름에 의해 농도 변화가 나타나는 것으로 추정된다.

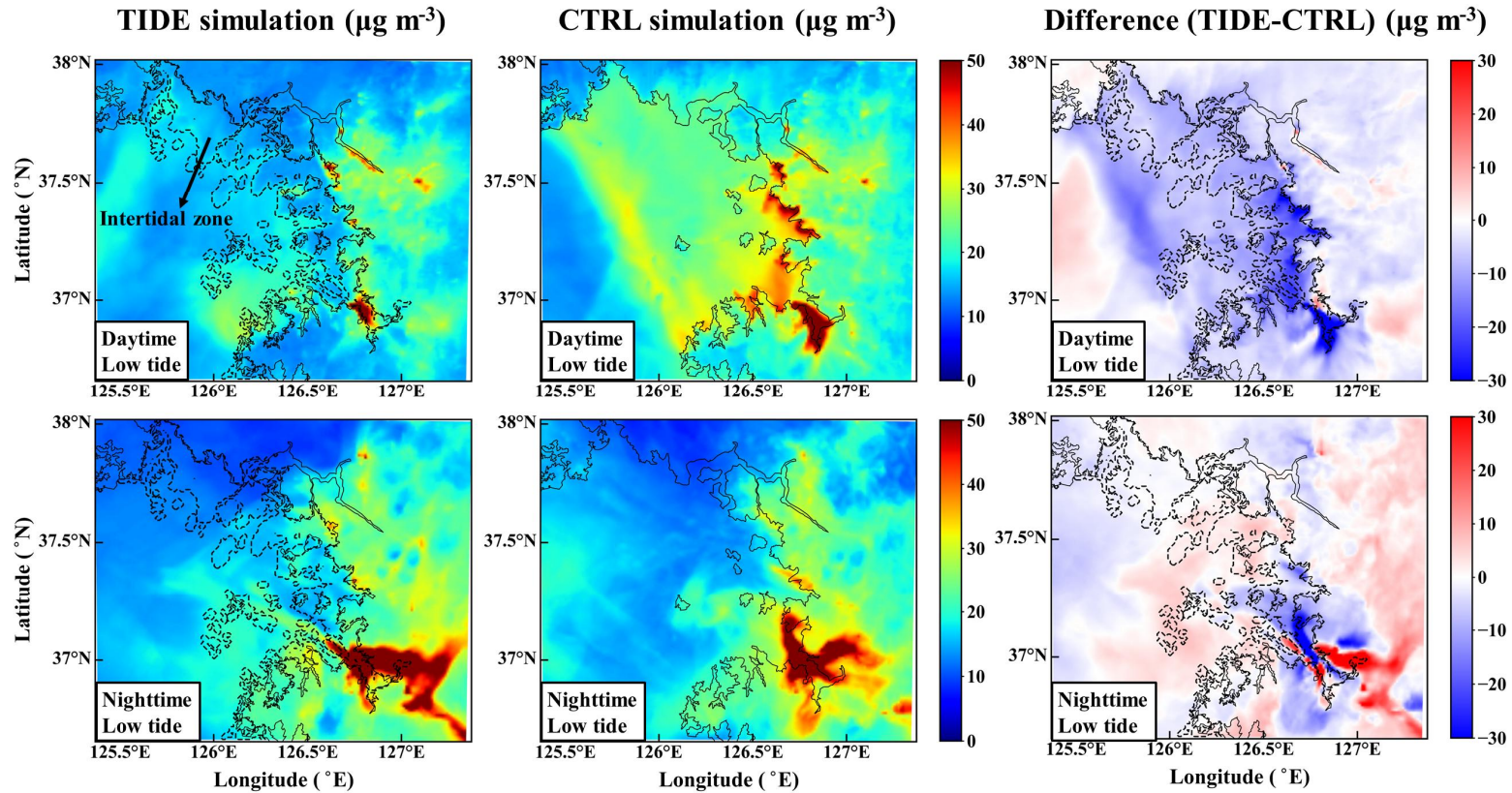


Fig. 20. Spatial distributions of the PM₁₀ in the TIDE and CTRL simulations, and differences in PM₁₀, between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.

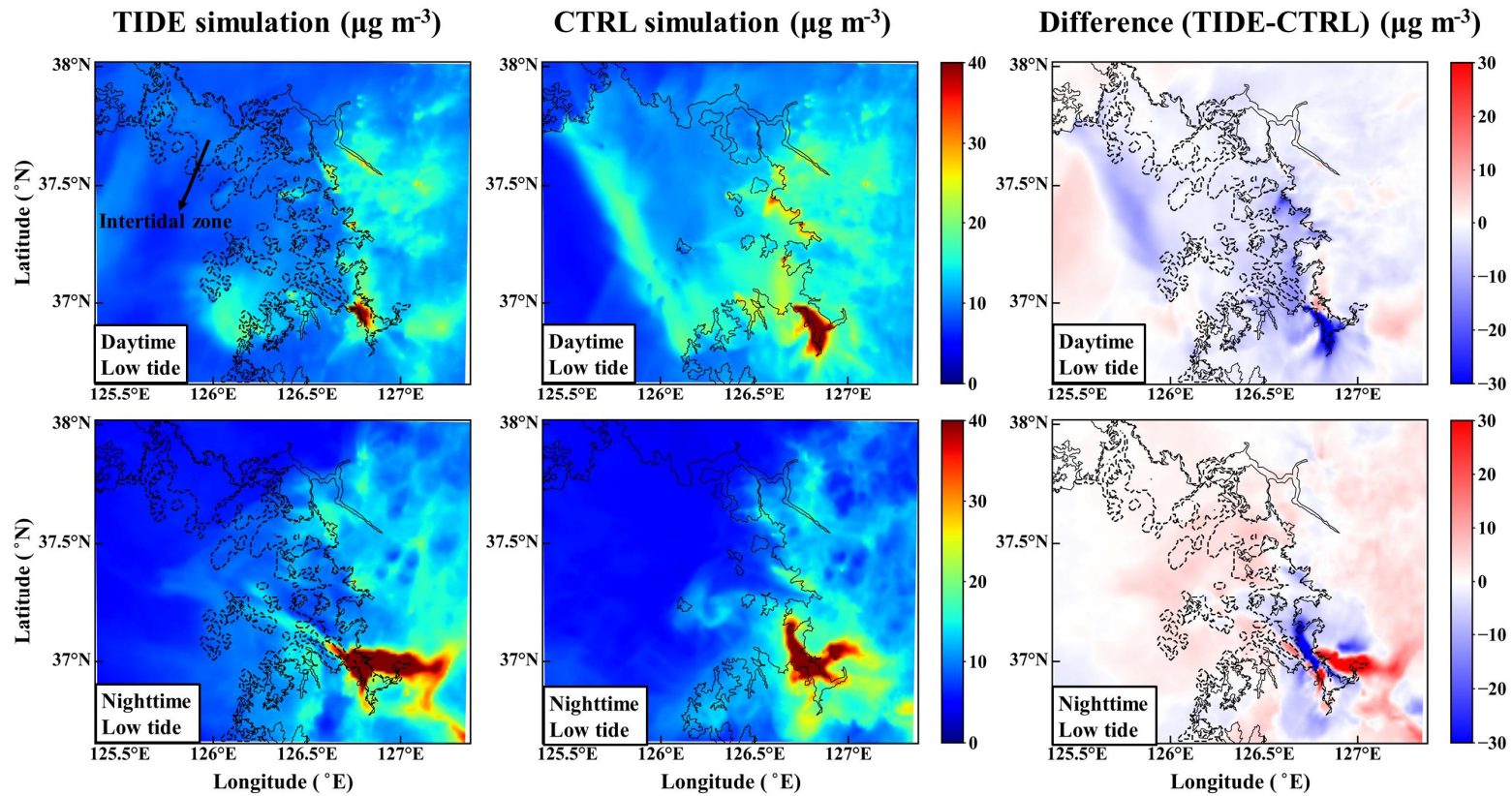


Fig. 21. Same as Fig. 20 except for PM_{2.5}.

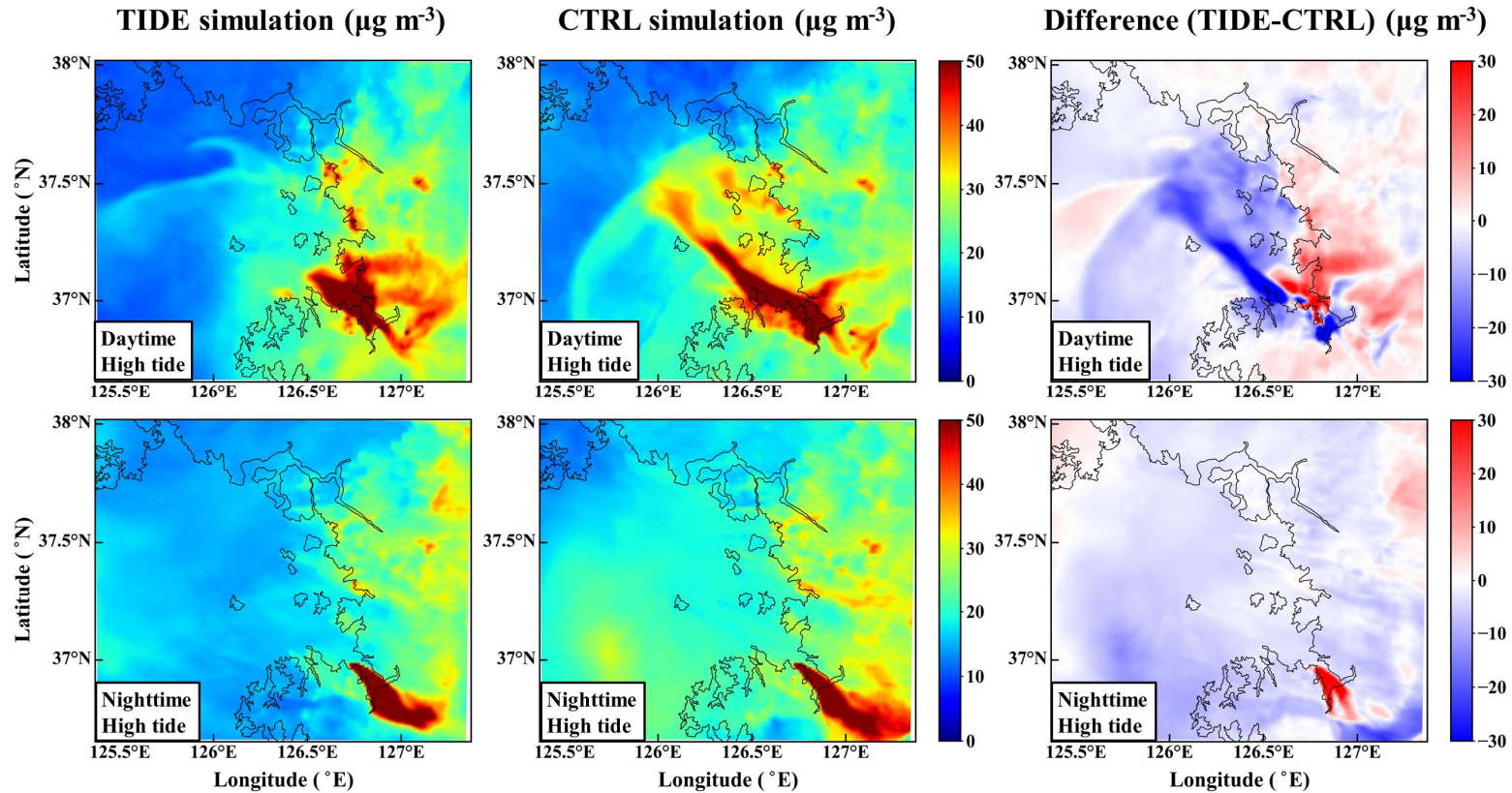


Fig. 22. Spatial distributions of the PM_{10} in the TIDE and CTRL simulations, and differences in PM_{10} , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at high tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.

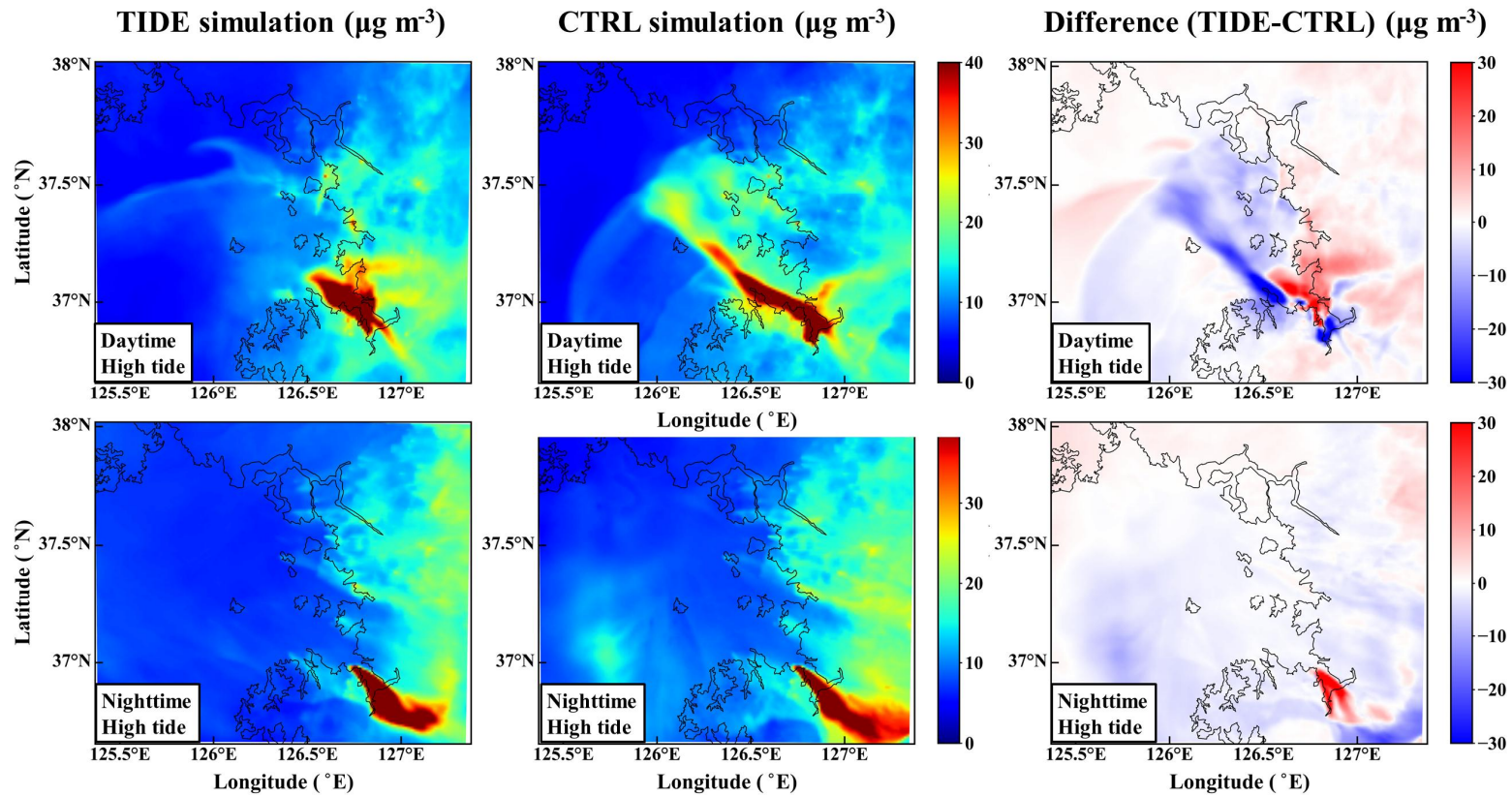


Fig. 23. Same as Fig. 22 except for PM_{2.5}.

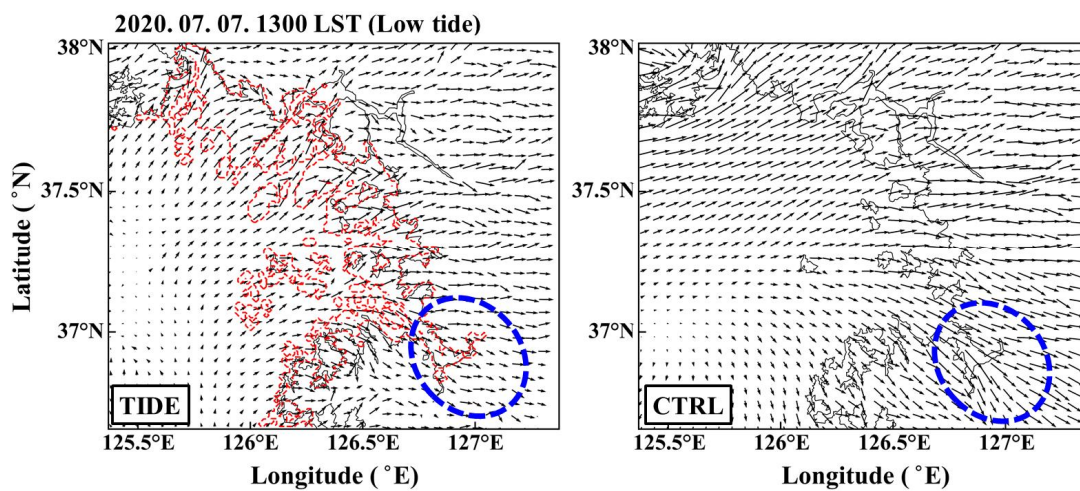


Fig. 24. Spatial distributions of the wind direction in the TIDE and CTRL simulations at low tide (13 LST on July 7, 2020). The bold red dotted lines at low tide represent the area of the intertidal zone.

Figs. 25과 26은 주야간 동안의 간조와 만조에 대해서 TIDE와 CTRL 실험의 O₃의 농도와 CTRL과 TIDE의 모델값 차이(TIDE - CTRL)를 나타낸다. O₃의 농도의 차이는 PM₁₀과 PM_{2.5}와 달리 모든 시간대에 조간대와 내륙 모두 증가하는 모습을 보였다. 간조일 때, 조간대에서 TIDE 실험의 주간 O₃은 조간대의 기온 상승으로 인한 대기 중 광화학 반응 증가로 인해 평균 4.6 ppb가 증가하였으며, 내륙에서는 해풍으로 인한 조간대의 증가한 O₃ 수송에 의해 평균 5.7 ppb가 증가하는 모습을 보였다(Fig. 25). 다른 요소들과 달리, O₃은 내륙에서 모델값의 편차가 더 크게 나타났는데 이는 풍하층에서 고농도가 나타나는 O₃의 특징에 의한 것으로 사료된다(Derwent, 2000). 야간의 O₃은 기온 감소에도 불구하고 증가(평균 2.3 ppb (조간대), 6.0 ppb (내륙))하는 모습을 보였다. 이는 광화학 반응으로 인해 주로 햇빛이 강한 주간에 생성되고 야간에는 NO_x 적정 반응으로 인해 소멸하는 O₃의 특징에 의해, 야간에는 기상요소의 변화로 인한 농도 변화 영향보다 주간 동안의 상승한 O₃의 농도를 유지한 것으로 사료된다. 만조 시 주간과 야간의 O₃은 간조와 동일하게 증가하는 모습을 보였다(Fig. 26). 다만, 만조에서 간조보다 낮은 변화를 보인 기상요소와 달리 조간대에서 주간 만조의 O₃은 간조보다 높은 농도(평균 7.0 ppb)를 보였는데, 이는 간조에서 만조로 변화할 때 PBLH가 낮아지며 지표 부근의 O₃ 농도가 더 높아진 것으로 추정된다.

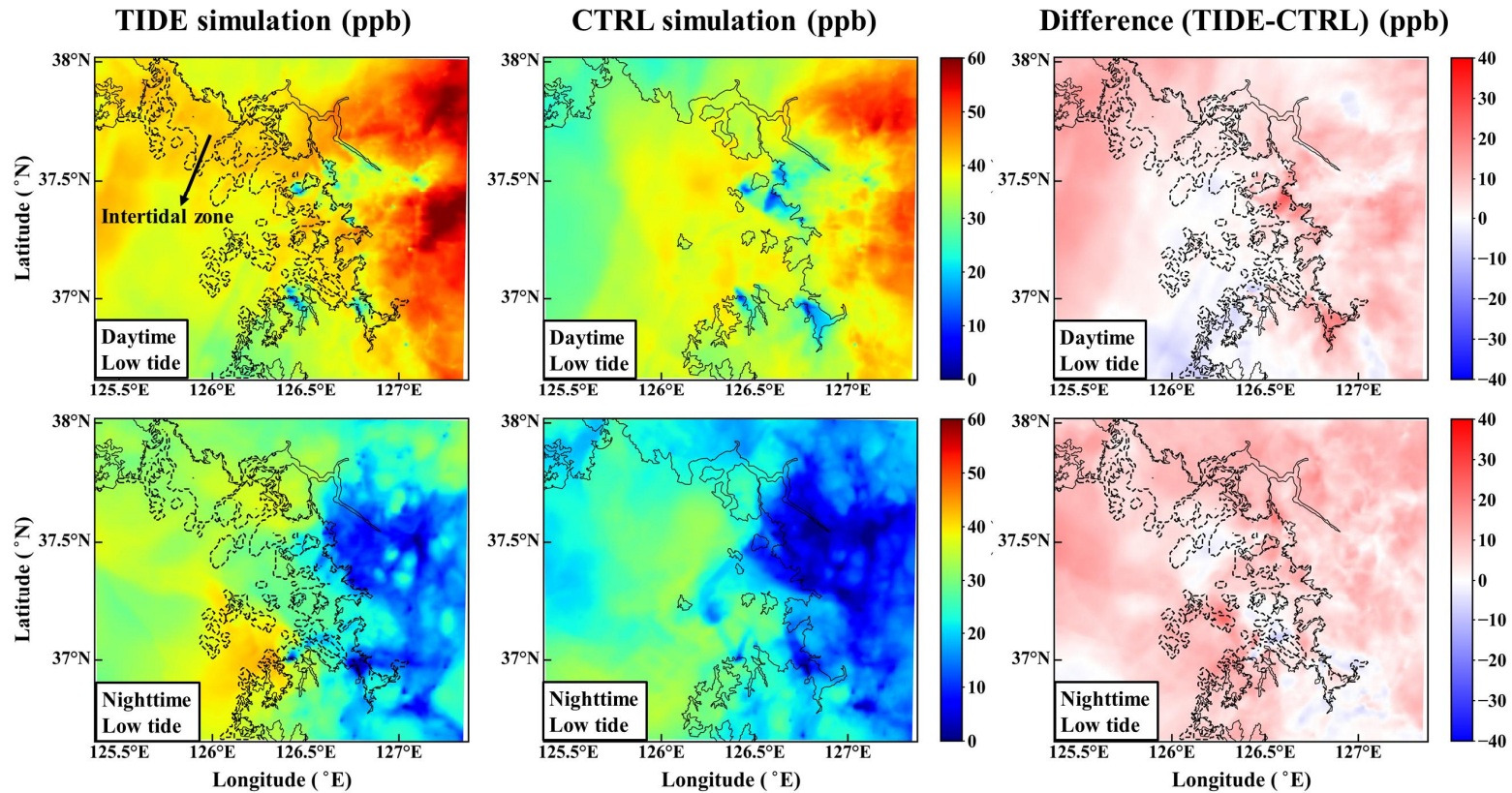


Fig. 25. Spatial distributions of the O_3 in the TIDE and CTRL simulations, and differences in O_3 , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at low tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.

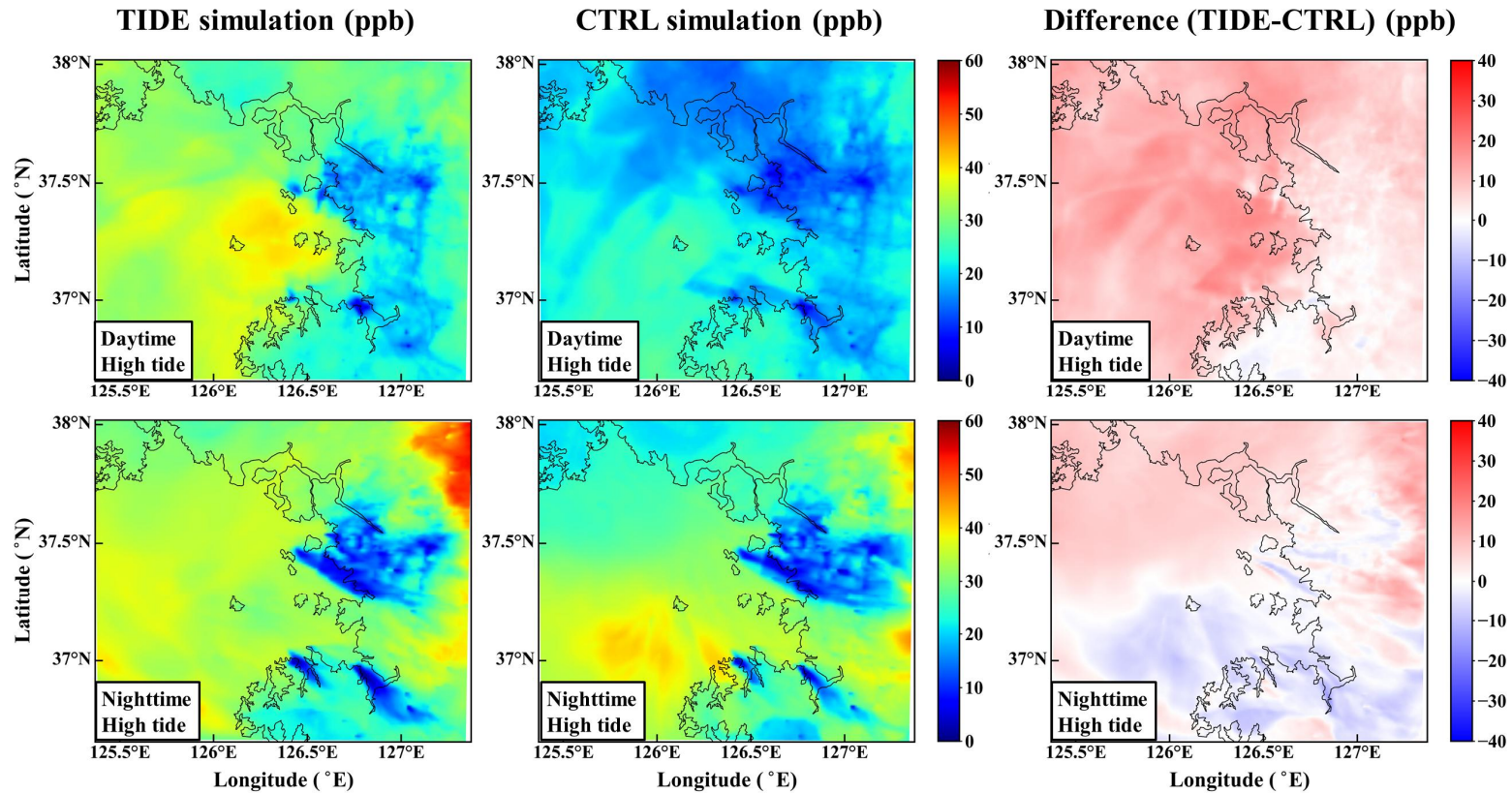


Fig. 26. Spatial distributions of the O_3 in the TIDE and CTRL simulations, and differences in O_3 , between TIDE and CTRL simulations (TIDE minus CTRL) at high tide during the day and night of the simulation period (July 4-8, 2020). The dotted contour lines represent the area of the intertidal zone at low tide.

Table 6는 연구기간 동안 시간별 조간대의 토지피복 변화에 의한 기상 변화가 대기오염물질의 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3)에 미치는 기여도(%)를 나타낸다. 대기오염물질의 기여도는 기상요소와 같이 대부분 만조보다 간조에서, 내륙보다 조간대에서 더 높은 값을 보였다(O_3 제외). 시간별 조간대의 토지피복이 적용된 기상장이 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 에 미친 영향에 대한 기여도는 주간의 조간대에서 간조일 때 음의 최고값(-36% (PM_{10}), -21% ($PM_{2.5}$))을 나타냈다. 이는 조간대에서 간조의 기상요소의 변화가 크게 나타났기 때문으로 사료된다. 다만, 야간의 O_3 기여도는 조간대(36% (간조), 9% (만조))보다 내륙(72%, 12%)에서 더 높은 기여도를 보였는데 이는 주간의 해풍으로 인한 내륙의 O_3 농도 증가가 야간에도 유지됐기 때문으로 사료된다. 또한 주간 간조일 때 O_3 기여도(17% (조간대), 16% (내륙))는 높은 PBLH의 영향으로 농도의 수평 확산으로 인해 주간 만조(60%, 36%)보다 낮은 값을 보였다.

Table 6. Contributions (%) of time-varying land cover in the intertidal zone to air quality (PM₁₀, PM_{2.5}, and O₃) in the intertidal and inland areas in the 1 km model domain (D4) during the study period (July 4-8, 2020).

	Low tide during the day	High tide during the day	Low tide at night	High tide at night
PM ₁₀	-36.4/-14.1 ^a	-21.3/4.2	2.2/5.6	-15.3/-9.7
PM _{2.5}	-21.4/-10.7	-11.6/8.8	25.9/15.9	-5.9/-1.3
O ₃	16.8/16.2	60.4/35.5	35.9/71.5	8.9/11.8

^a Intertidal zone/Inland area.

다음으로 수치모의 기간동안 대기질 관측지점에서 계산한 통계적(IOA, RMSE, MBE) 분석을 보면, 모든 지점에서 대기질 오염물질의 통계적 수치는 CTRL보다 TIDE 실험에서 관측값에 더 가까운 수치를 보였다(Table 7). TIDE 실험의 IOA는 각각 0.6(PM₁₀), 0.5(PM_{2.5}), 0.9(O₃)로 CTRL의 값인 0.5, 0.4, 0.8보다 높은 값을 보였으며, RMSE 또한 8.8 $\mu\text{g m}^{-3}$, 9.2 $\mu\text{g m}^{-3}$, 10.4 ppb로 CTRL (10.9 $\mu\text{g m}^{-3}$, 9.0 $\mu\text{g m}^{-3}$, 15.6 ppb)보다 비슷하거나 낮은 값을 보였다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 MBE는 대부분의 지역에서 과대모의가 감소하는 경향을 보였으며, O₃은 모든 지역에서 과소모의가 감소하였다. 이는 TIDE 실험에서 조석현상에 따른 시간별 조간대의 토지피복 변화를 고려하여 기상 수치모의의 정확도가 향상되었기 때문으로 사료된다. TIDE 실험에서 RMSE의 감소 범위는 조간대와 가까이 위치한 해안가 지점 (0.69 ~ 7.63 $\mu\text{g m}^{-3}$ (PM₁₀), 0.99 ~ 3.72 $\mu\text{g m}^{-3}$ (PM_{2.5}), 2.94 ~ 9.36 ppb (O₃))에서 내륙 지점(-0.96 ~ 3.18 $\mu\text{g m}^{-3}$, -0.26 ~ 2.7 $\mu\text{g m}^{-3}$, 2.39 ~ 6.81 ppb)보다 크게 나타났는데, 이는 조간대 인근에서 기상요소의 개선이 크게 나타났기 때문으로 사료된다. 따라서 연안 지역의 국지 기상 및 대기질을 정확하게 모의하기 위해서는 시간별 조간대의 토지피복 변화(실시간 조간대 변화)를 고려하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

Table 7. Statistical evaluation of air quality (PM₁₀, PM_{2.5}, and O₃) between observed and model-predicted values in TIDE and CTRL simulations during the study period (July 4-8, 2020).

Site		PM ₁₀ (μg m ⁻³)			PM _{2.5} (μg m ⁻³)			O ₃ (ppb)		
		IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
Costal site										
Shinhung (SH)	CTRL	0.19	17.78	5.42	0.17	11.15	1.56	0.57	25.89	-18.62
	TIDE	0.52	10.15	-0.22	0.45	7.43	0.83	0.68	19.20	-11.20
Gilsang (GS)	CTRL	0.27	15.19	4.23	0.35	9.06	-0.09	0.55	23.55	-21.66
	TIDE	0.41	10.88	3.95	0.49	6.98	0.10	0.71	14.19	-10.93
Dongmundong (DM)	CTRL	0.51	14.39	-6.73	0.47	9.05	-5.69	0.57	16.93	-12.26
	TIDE	0.44	13.70	-5.81	0.48	8.06	-5.42	0.65	13.99	-10.43
Inland site										
Gosaek-dong (GK)	CTRL	0.42	15.28	-3.67	0.26	8.81	1.26	0.63	25.67	-21.13
	TIDE	0.66	12.10	-1.04	0.68	6.11	2.18	0.73	18.86	-13.30
Junggu (JG)	CTRL	0.47	11.65	5.46	0.43	7.97	-3.22	0.55	27.32	-24.78
	TIDE	0.53	12.61	7.23	0.49	7.99	-2.59	0.66	20.69	-18.60
Bosan-dong (BS)	CTRL	0.52	10.26	0.32	0.47	9.13	-5.48	0.87	11.58	-7.13
	TIDE	0.54	8.99	1.33	0.49	9.39	-5.64	0.90	9.19	0.17
All sites	CTRL	0.45	10.86	0.54	0.43	9.01	-4.54	0.78	15.60	-10.35
	TIDE	0.55	8.77	0.71	0.50	9.16	-5.29	0.87	10.35	-2.29

^a IOA: index of agreement.

^b RMSE: root mean square error.

^c MBE: mean bias error.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2020년 여름(7월 4일~8일)의 서해안 및 인근 연안 지역을 대상으로 실시간 조간대의 토지피복을 고려한 WRF 모델링을 수행하여 조석현상이 국지 기상 변화에 미치는 영향을 파악하였다. 또한, 실시간 조간대의 토지피복이 고려된 기상장을 이용해 CMAQ 모델링을 수행하여 국지 기상 변화가 대기오염 물질의 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

전반적으로 실시간 토지피복을 적용한 실험에서 기상요소(기온, 상대습도, 풍속) 및 PBLH의 변화가 나타났으며, 이러한 변화는 조간대의 토지피복이 WB로 동일한 만조보다 HW로 변하는 간조에서 더 크게 나타났다. 또한 기상요소는 내륙보다 조간대에서 뚜렷한 시공간적 변화를 보였다. CTRL 실험과 비교하였을 때, TIDE 실험에서 간조의 주간 기온은 조간대에서 평균 6.2°C (+25%의 기여도)로 크게 증가하였으며, 야간 기온은 평균 -1.6°C (-10%의 기여도) 감소하는 모습을 보였다. 주간의 기온 증가는 토양 수분 감소로 인한 주간의 토양 온도 상승에, 야간의 기온 감소는 복사 냉각으로 인한 토양 온도 감소에 기인하였다. 주간의 기온 증가는 대기의 난류운동을 강화시켜 PBLH의 증가(평균 576 m)를 유도하였다. 주간의 조간대 상대습도는 조간대의 토양 수분 감소와 수증기양 감소의 복합적인 영향으로 평균 29% (-27%의 기여도) 감소한 반면, 야간에는 조간대의 기온 감소로 인해 평균 1.4% (+4.7%의 기여도) 증가하는 모습을 보였다. 조간대의 주간 풍속은 조간대와 해양의 기온 편차 증가로 인해 평균 0.3 m s^{-1} (+6%의 기여도) 증가하였으며, 야간 풍속은 조간대의 거칠기 길이 증가로 인해 평균 1.3 m s^{-1} (-34%의 기여도) 감소하는 모습을 보였다. 이러한 조간대의 기상요소 변화는 내륙에도 영향을 주는 모습을 보였다. 다만, CTRL 실험과 토지피복이 동일한 만조 시에는 기상요소가 큰 차이를 보이지 않았다.

위와 같은 기상요소의 변화가 나타난 실시간 조간대 토지피복이 적용된 기상장을 적용한 실험에서 대기오염물질(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3) 농도의 변화가 나타났다. CTRL 실험과 비교하였을 때, 간조 시 조간대에서 TIDE 실험의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 주간에 각 평균 $-10.8\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (-36%의 기여도), $-3.9\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (-21%의

기여도) 감소하는 모습을, 야간에 평균 $0.2 \mu\text{g m}^{-3}$ (2%의 기여도), $1.4 \mu\text{g m}^{-3}$ (26%의 기여도) 증가하는 모습을 보였다. 주간 농도 감소는 조간대의 PBLH와 풍속의 증가로 인한 연직 및 수평 수송 강화에 주로 기인하였다. 또한 야간의 농도 증가는 상대습도 증가에 의한 핵화 및 응축 증가 및 풍속 감소에 의한 것으로 판단된다. 조간대의 O_3 는 주간(평균 4.6 ppb, 17%의 기여도)과 야간(평균 2.3 ppb, 36%의 기여도) 모두 증가하는 모습을 보였는데, 이는 주간에는 증가한 기온으로 인한 광화학 반응 증가의 영향을, 야간에는 주간의 증가한 O_3 농도 유지 및 풍속 감소의 복합적인 영향에 기인한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 실시간 조간대의 토지피복 변화가 조간대 뿐만 아니라 연안의 기상 및 대기질 예측에 상당한 영향을 미치는 것을 파악하였다. 하지만 본 연구는 모델링 기간이 짧아 조석 효과의 장기적인 변화를 식별하지 못하였으며, 조간대의 정밀한 배출량 산정에 어려움이 있었다. 그럼에도 본 연구는 조석효과로 인한 기상변화가 대기오염물질의 농도에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 연구로써 의미있는 연구라고 사료된다. 이러한 한계를 극복하면 시간에 따라 변화하는 토지피복이 연안 지역의 대기질 예측에 미치는 영향을 보다 더 상세하고 정확하게 평가할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 국립공원공단. (2022). 국립공원 조간대 지형도 제작(6차년도). 국립공원공단 국립공원연구원.
- 김성민, 김유근, 안혜연, 강윤희, 정주희. (2019). 서해 조석현상에 따른 국지기상 변화가 수도권 오존농도에 미치는 영향. *한국환경과학회지*, 28(3), 341-356.
- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 김동혁, 박순영. (2011). 기상 입력 자료가 연안지역 고농도 오존 수치 모의에 미치는 영향. *한국대기환경학회지*, 27(1), 30-40.
- 주제영, 최민하, 정성원, 이승오. (2010). 수문기상자료를 이용한 설마천의 토양수분 예측. *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 30(5), 437-444.
- Al-Kayssi, A., Al-Karaghoul, A., Hasson, A., Beker, S. (1990). Influence of soil moisture content on soil temperature and heat storage under greenhouse conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 45, 241-252.
- An, H. Y., Jeong, J. H., Kang, Y. H., Lee, H. J., Kim, Y. K. (2022). Assessing the Meteorological Impacts of Time - Varying Land Cover in the Intertidal Zone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(7), e2021JD034927.
- Arakawa, A., Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *General circulation models of the atmosphere*, 17(Supplement C), 173-265.
- Azad, M. A. K., Ohira, S.-I., Oda, M., Toda, K. (2005). On-site measurements of hydrogen sulfide and sulfur dioxide emissions from tidal flat sediments of Ariake Sea, Japan. *Atmospheric Environment*, 39(33), 6077-6087.
- Bagley, J. E., Desai, A. R., Harding, K. J., Snyder, P. K., Foley, J. A. (2014).

- Drought and deforestation: has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon?. *Journal of Climate*, 27(1), 345-361.
- Bernardet, L., Wolff, J., Nance, L., Loughe, A., Weatherhead, B., Gilleland, E., Brown, B. (2009). Comparison between WRF-ARW and WRF-NMM objective forecast verification scores. Paper presented at the 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction. Omaha, NE. Accessed June.
- Bleck, R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 4(1), 55-88.
- Bodenbender, J., Wassmann, R., Papen, H., Rennenberg, H. (1999). Temporal and spatial variation of sulfur-gas-transfer between coastal marine sediments and the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 33(21), 3487-3502.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999). Science algorithms of the EPA Models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system: US Environmental Protection Agency, Washington, D.C. EPA/600/R-99/030 (NTIS PB2000-100561).
- Byun, D., Schere, K. L. (2006). Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Applied mechanics reviews*, 59(2), 51-77.
- Cellier, P., Richard, G., Robin, P. (1996). Partition of sensible heat fluxes into bare soil and the atmosphere. *Agricultural and forest meteorology*, 82(1-4), 245-265.
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Shon, Z.-H., Moon, S.-H. (2023). Evaluation of air quality simulation with a coupled atmosphere-ocean model: A case study on natural marine and biogenic emissions. *Science of the Total Environment*, 882, 163021.

- Cho, Y.-K., Kim, T.-W., You, K.-W., Park, L.-H., Moon, H.-T., Lee, S.-H., Youn, Y.-H. (2005). Temporal and spatial variabilities in the sediment temperature on the Baeksu tidal flat, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65(1-2), 302-308.
- Chow, T. T., Long, H., Mok, H. Y., Li, K. (2011). Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables. *Energy and Buildings*, 43(12), 3568-3575.
- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Pagani, F., Solazzo, E. (2022). EDGAR v6. 1 global air pollutant emissions.
- Cummings, B. E., Li, Y., DeCarlo, P. F., Shiraiwa, M., Waring, M. S. (2020). Indoor aerosol water content and phase state in US residences: impacts of relative humidity, aerosol mass and composition, and mechanical system operation. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(10), 2031-2057.
- De Leeuw, G., Neele, F. P., Hill, M., Smith, M. H., Vignati, E. (2000). Production of sea spray aerosol in the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D24), 29397-29409.
- Deardorff, J. (1972). Theoretical expression for the countergradient vertical heat flux. *Journal of Geophysical Research*, 77(30), 5900-5904.
- Derwent, R. (2000). Ozone formation downwind of an industrial source of hydrocarbons under European conditions. *Atmospheric Environment*, 34(22), 3689-3700.
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077-3107.
- Egbert, G. D., Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.

- Garratt, J. R. (1994). The atmospheric boundary layer. *Earth-Science Reviews*, 37(1-2), 89-134.
- Gipson, G. L. (1999). The initial concentration and boundary condition processors. Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, US Environmental Protection Agency Report, EPA-600/R-99/030, 12-11.
- Guarini, J.-M., Blanchard, G. F., Gros, P., Harrison, S. (1997). Modelling the mud surface temperature on intertidal flats to investigate the spatio-temporal dynamics of the benthic microalgal photosynthetic capacity. *Marine Ecology Progress Series*, 153, 25-36.
- Guenther, A., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T. a., Emmons, L., Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2. 1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492.
- 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, 129369.
- 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(1), 103-120.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- Jeong, J.-H., Song, S.-K., Lee, H. W., Kim, Y.-K. (2012). Effects of high-resolution land cover and topography on local circulations in two different coastal regions of Korea: a numerical modeling study. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 118, 1-20.

- Joevivek, V., Saravanan, S., Chandrasekar, N. (2013). Coastal vulnerability and shoreline changes for southern tip of India-remote sensing and GIS approach. *J Earth Sci Clim Change*, 4(144), 2.
- Kain, J. S. (2004). The Kain - Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181.
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N., Ramachandran, K., Srinivas, Y., Saravanan, S. (2017). Coastal landuse and land cover change and transformations of Kanyakumari coast, India using remote sensing and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 169-185.
- Konor, C. S., Boezio, G. C., Mechoso, C. R., Arakawa, A. (2009). Parameterization of PBL processes in an atmospheric general circulation model: Description and preliminary assessment. *Monthly Weather Review*, 137(3), 1061-1082.
- 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.
- Lam, J. S. L., Lau, A. K. H., Fung, J. C. H. (2006). Application of refined land-use categories for high resolution mesoscale atmospheric modelling. *Boundary-layer meteorology*, 119, 263-288.
- 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(3), 561-574.
- Li, L., Zhu, A., Huang, L., Wang, Q., Chen, Y., Ooi, M. C. G., Wang, M., Wang, Y., Chan, A. (2022). Modeling the impacts of land use/land cover change on meteorology and air quality during 2000 - 2018 in the Yangtze River Delta region, China. *Science of the Total Environment*, 829, 154669.
- Li, X., Zhu, Z., Yang, L., Sun, Z. (2016). Emissions of biogenic sulfur gases (H

- ^{25}S , COS) from *Phragmites australis* coastal marsh in the Yellow River estuary of China. *Chinese Geographical Science*, 26, 770-778.
- Li, X., Mitra, C., Dong, L., Yang, Q. (2018). Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103, 115-126.
- Li, Y., Zhu, X., Sun, X., Wang, F. (2010). Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China. *Landscape and urban Planning*, 94(3-4), 218-227.
- Lichiheb, N., Heuer, M., Hicks, B. B., Saylor, R., Vargas, R., Vazquez-Lule, A., St. Laurent, K., Myles, L. (2021). Atmospheric Ammonia Measurements Over a Coastal Salt Marsh Ecosystem Along the Mid-Atlantic US. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(5), e2019JG005522.
- 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(5), 1587-1612.
- Lin, J.-T., Youn, D., Liang, X.-Z., Wuebbles, D. J. (2008). Global model simulation of summertime US ozone diurnal cycle and its sensitivity to PBL mixing, spatial resolution, and emissions. *Atmospheric Environment*, 42(36), 8470-8483.
- 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(2), 199-209.
- Liu, Y., Wu, Z., Huang, X., Shen, H., Bai, Y., Qiao, K., Meng, X., Hu, W., Tang, M., He, L. (2019). Aerosol phase state and its link to chemical composition and liquid water content in a subtropical coastal

- megacity. *Environmental science & technology*, 53(9), 5027-5033.
- 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(D14), 16663-16682.
- Moon, S.-H., 2022. Influence of hourly changes in land cover and surface physical conditions due to tides on coastal meteorology in the Yellow Sea. Master's thesis, Jeju National University.
- Moore, A. M., Arango, H. G., Broquet, G., Powell, B. S., Weaver, A. T., Zavala-Garay, J. (2011). The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilation systems: Part I - System overview and formulation. *Progress in Oceanography*, 91(1), 34-49.
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- 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.
- Pirovano, G., Coll, I., Bedogni, M., Alessandrini, S., Costa, M., Gabusi, V., Lasry, F., Menut, L., Vautard, R. (2007). On the influence of meteorological input on photochemical modelling of a severe episode over a coastal area. *Atmospheric Environment*, 41(30), 6445-6464.
- Qiu, J., Fang, C., Tian, N., Wang, H., Wang, J. (2023). Impacts of land use and land cover changes on local meteorology and PM_{2.5} concentrations in Changchun, Northeast China. *Atmospheric Research*,

289, 106759.

- Qu, W., Henderson-Sellers, A., Pitman, A., Chen, T., Abramopoulos, F., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Dickinson, R. (1998). Sensitivity of latent heat flux from PILPS land-surface schemes to perturbations of surface air temperature. *Journal of the atmospheric sciences*, 55(11), 1909-1927.
- 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(4), 347-404.
- Simpson, M., Raman, S., Suresh, R., Mohanty, U. (2008). Urban effects of Chennai on sea breeze induced convection and precipitation. *Journal of Earth System Science*, 117, 897-909.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485.
- 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, 150928.
- Song, S.-K., Shon, Z.-H., Kim, Y.-K., Kang, Y.-H., Oh, I.-B., Jung, C.-H. (2010). Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season. *Atmospheric Environment*, 44(5), 713-723.
- Song, Y. T., Wright, D. G. (1998). A general pressure gradient formulation for ocean models. Part II: Energy, momentum, and bottom torque consistency. *Monthly Weather Review*, 126(12), 3231-3247.
- Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., Tang, X. (1990). The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research*:

- Atmospheres, 95(D10), 16343-16367.
- Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13): Springer Science & Business Media.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Wang, J., Wang, S., Jiang, J., Ding, A., Zheng, M., Zhao, B., Wong, D. C., Zhou, W., Zheng, G., Wang, L. (2014). Impact of aerosol - meteorology interactions on fine particle pollution during China's severe haze episode in January 2013. *Environmental Research Letters*, 9(9), 094002.
- Wang, X., Hu, Y., Russell, A., Mauzerall, D., Zhang, Y. (2002). Using Models3/CMAQ to simulate regional air quality in China. Paper presented at the 2002 Models-3 User's Workshop.
- Wang, X., Xiao, X., Zou, Z., Hou, L., Qin, Y., Dong, J., Doughty, R. B., Chen, B., Zhang, X., Chen, Y. (2020). Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 312-326.
- Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., Zambon, J. B. (2010). Development of a coupled ocean - atmosphere - wave - sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 35(3), 230-244.
- Warner, J. C., Defne, Z., Haas, K., Arango, H. G. (2013). A wetting and drying scheme for ROMS. *Computers & geosciences*, 58, 54-61.
- Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E., Rovere, M., Chayes, D., Ferrini, V., Wigley, R. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and space Science*, 2(8), 331-345.
- Wever, N. (2012). Quantifying trends in surface roughness and the effect on surface wind speed observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D11).
- WRF-ARW V3: User's Guide (2017).

- Yoon, B. I., Woo, S. B. (2015). The along-channel salinity distribution and its response to river discharge in tidally-dominated Han River Estuary, South Korea. *Procedia Engineering*. 116, 763-770.
- Zhang, K., Dong, X., Liu, Z., Gao, W., Hu, Z., Wu, G. (2019). Mapping tidal flats with Landsat 8 images and google earth engine: A case study of the China's eastern coastal zone circa 2015. *Remote Sensing*, 11(8), 924.

Influence of real-time land cover changes in the intertidal zone on meteorological and air quality predictions in coastal areas

Eun-A Ko

Faculty of Earth and Marine Convergence,
Earth and Marine Sciences Major
The Graduate School, Jeju National University

Abstract

In this study, the effect of time-varying land cover within the intertidal zone on meteorological predictions and air quality was evaluated on the west coast of South Korea during the summer of 2020 (July 4-8). Time-varying spatial distributions of the intertidal zone were generated using a coupled atmosphere-ocean model and Landsat-8 satellite data. Simulations were conducted under two land cover conditions: using time-varying (referred to as TIDE) and fixed land cover (referred to as CTRL) within the intertidal zone. The results showed that the significant increase in Temp (average +6.2 °C) and planetary boundary layer height (PBLH; average +576 m) and decrease in RH (-29%) within the intertidal zone occurred during low tide in the daytime. Conversely, during nighttime, the Temp decreased by an average of -1.6 °C and the RH increased by +1.4%. Furthermore, the nighttime WS exhibited the most significant decrease (average -1.3 m s⁻¹), mainly due to an increase in surface roughness length, and daytime WS exhibited the moderate increase (0.3 m s⁻¹), due to an intensified Temp gradient between the intertidal zone and the open sea. These meteorological changes had implications for air

pollution concentrations, including PM_{10} , $PM_{2.5}$, and ozone (O_3). At low tide during the daytime, the decrease in PM_{10} (average $-10.8 \mu\text{g m}^{-3}$) and $PM_{2.5}$ ($-3.9 \mu\text{g m}^{-3}$) concentrations is attributed to the increase in PBLH and WS, leading to increase in vertical and horizontal diffusion. Conversely, the decrease in RH and WS during the nighttime contributed to increased the PM_{10} ($0.2 \mu\text{g m}^{-3}$) and $PM_{2.5}$ ($1.4 \mu\text{g m}^{-3}$) concentrations. The O_3 concentration increased both day and nighttime, distinguished from the PM_{10} and $PM_{2.5}$. This increase might be attributed to enhanced photoreactions of O_3 (4.6 ppb (day), 2.3 ppb (night)) due to increased Temp during the daytime and maintained the increase in concentration at the daytime during the nighttime. This study suggests the meaningful influence of land cover changes within the intertidal zone on meteorological and air quality conditions.