

경기만 갯벌의 지표면 토지피복 변화가 국지기상에 미치는 영향 평가

안혜연¹⁾ · 김유근²⁾ · 정주희^{2)*}

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부, ²⁾부산대학교 대기환경과학과

(접수일: 2017년 8월 7일, 수정일: 2017년 10월 27일, 게재확정일: 2017년 11월 26일)

Impacts of Land Cover Change of Tidal Flats on Local Meteorology in Gyeonggi Bay, West Sea of Korea

Hye Yeon An¹⁾, Yoo-Keun Kim²⁾, and Ju-Hee Jeong^{2)*}

¹⁾Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

²⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 7 August 2017; revised 27 October 2017; accepted 26 November 2017)

Abstract The impact of land cover changed by tidal flats on local meteorology in Gyeonggi Bay was quantitatively evaluated based on a numerical modeling approach during 18 days (21 June to 9 July 2013). The analysis was carried out using three sets of simulation scenarios and the land cover of tidal flats for each simulation was applied as follows: (1) the herbaceous wetland representing coastal wetlands (i.e., EXP-BASE case), (2) the barren or sparsely vegetated representing low tide (i.e., EXP-LOW case), (3) the water bodies representing high tide (i.e., EXP-HIGH case). The area of tidal flats was calculated as about 552 km² (the ratio of 4.7% for analysis domain). During the daytime, the change (e.g. wetlands to water) of land cover flooded by high tide indicated the decrease of temperature (average 3.3°C) and the increase of humidity (average 13%) and wind speed (maximum 2.9 m s⁻¹). The changes (e.g. wetlands to barren or sparsely vegetated) of land cover induced by low tide were smaller than those by high tide. On the other hands, the effects of changed land cover at night were not apparent both high tide and low tide. Also, during the high tide, the meteorological change in tidal flats affected the metropolitan area (about 40 km from the tidal flat).

Key words: Tidal effect, local meteorology, numerical modeling, land use, tidal flat

1. 서 론

우리나라 서해안은 해안선의 드나들이 복잡하여 만, 반도, 곶, 섬 등이 많고, 지형 경사가 완만하고 조차가 심하여 넓은 갯벌이 발달되어 있다. 조석현상에 따른 밀물과 썰물 조건에 의해 갯벌은 하루에 두 번씩 대기와 해수에 반복적으로 접하게 됨으로써 지표 특성이 현저히 변화한다. 또한 달라지는 지표상태에 따

라 지표의 물리적 성질(알베도, 토양 열용량, 거칠기 길이 등)이 달라지고(Lam et al., 2006), 이는 갯벌뿐만 아니라 서해안지역에 인접해 있는 수도권지역의 기상변화를 초래할 수 있다.

기존의 조석현상이 갯벌환경에 미치는 영향에 대한 연구를 통해 연안지역에서의 조석효과는 기상조건외 특징적인 변화를 초래할 수 있음을 확인할 수 있다. Lee et al. (2016)은 간석지 효과를 고려한 지면 모수화 모델을 중규모 모델에 접합하여 간석지 효과가 기상상에 미치는 영향을 분석한 결과, 간석지 매개화가 고려된 실험에서 기준 실험에 비해 간조 때 현열 및 잠열 플럭스의 일변화가 증가함을 확인하였고, Jung (2016)은 조석효과를 고려한 대기-해양 결합 모델링을

*Corresponding Author: Ju-Hee Jeong, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63geon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-583-2652, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: jeongjuhee@pusan.ac.kr

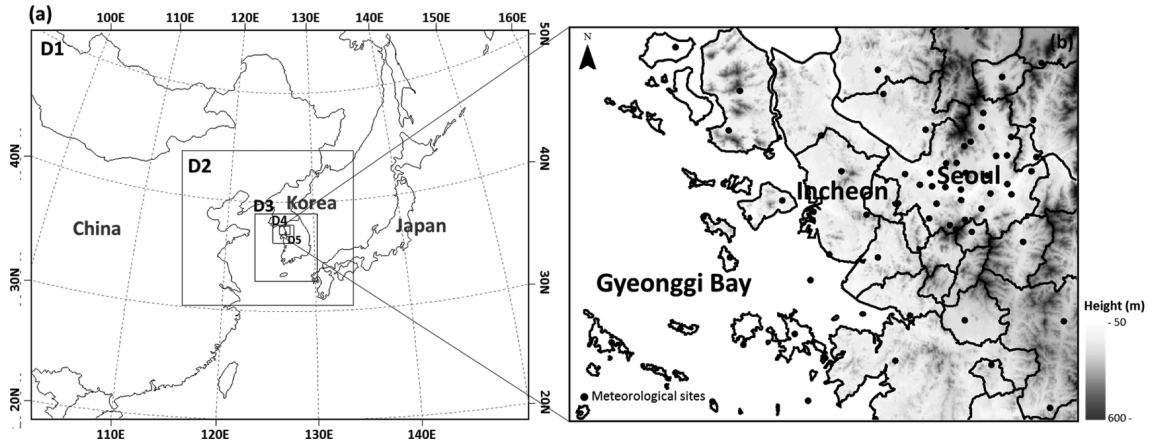


Fig. 1. The nested model domains for WRF simulation. Right figure is a zoom of the target area of D5. Black circles indicate meteorological sites and the filled contour represents the elevation above sea level.

통해 해수면의 변동 특성을 분석한 결과, 조석효과 반영 유무에 따라 수온변동으로 인한 잠열이 최대 20 W m^{-2} 의 차이를 보여 안개강도변화에 영향을 주는 것을 확인하였다. 또한, 국내에서는 토지피복 변화가 기상에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔다. 예로 Jung and Do (2012)는 도심지 하천의 복원에 따른 토지 피복의 변화가 도시지역 기온변화에 미치는 영향을 분석하였고, 하천복원지역을 중심으로 $0.34\text{--}2.01^\circ\text{C}$ 의 기온하강효과를 확인하였다. Park and Kim (2011)은 시화호 개발 간척사업으로 인한 지역의 토지 이용 변화에 의한 지역 기상장의 변화를 상세하게 파악하였다. 하지만 우리나라 갯벌의 경우 복잡한 해안선의 드나들, 크고 작은 섬들, 하루에 두 번씩 토지피복의 상태가 육지에서 해수로 변하는 조석 효과는 수치모델에서 현실과 똑같이 재현할 수 없다. 최근 컴퓨터의 성능이 급격히 향상되어 수 km 이하의 수평해상도가 가능해짐에 따라 복잡한 지형조건에 대한 오차는 줄어들고 있으나, 갯벌의 지표변화에 따른 기상영향에 대한 모델링연구는 여전히 부족한 실정이다. 이러한 현실에서 갯벌의 지표변화에 따른 기상영향을 이해하기 위해서는 상세 기상장을 재현할 수 있는 3차원 초고해상도 기상모델의 적용이 매우 필요하다.

지금까지 갯벌과 관련한 대부분의 선행연구는 1) 관측을 통한 갯벌 퇴적물의 시공간적 변화와 열수지 특성 연구(Alexander et al., 1991; Koh, 1997; Kim et al., 2007; Park et al., 2009; Han and Peng, 2012), 2) 원격탐사자료를 이용한 갯벌의 지형 변화에 관한 연구(Ryu et al., 2002; Zhao et al., 2008; Murray et al., 2012; Ryu et al., 2014), 3) 조위 예측모델이나 순환 모델을 통한 조위를 포함한 해수면 변화 연구(Chen

et al., 2008; Warner et al., 2013)에 집중되어 있다. 하지만 지금까지의 연구들은 주로 갯벌의 공간적인 지형변화의 탐지에만 중점을 두었고 지형변화가 일어난 곳의 환경특성을 분석하는 연구는 거의 시도되지 않았다.

본 연구에서는 서해안에서도 가장 규모가 큰 갯벌 분포를 갖는 경기만을 포함하는 수도권지역을 대상으로, 지표변화를 분석하고, 갯벌의 토지피복 변화에 따른 기상모델링을 수행하여 간/만조 변화에 따른 기상 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역 및 모델링기간의 선정

Figure 1은 본 연구의 대상지역인 경기만과 주변 지형을 제시한 것이다. 경기만은 한반도 서해 중부에 위치한 해역으로 해안선의 굴곡이 심하여 만과 갯이 많고, 크고 작은 130여 개의 섬들이 있고, 수심이 50 m 이내로 얕다. 또한 조차가 8~10 m로 심하여 넓은 간석지가 발달하고 있으며, 서해안으로 유입되는 하천 중 유역분지가 가장 넓은 하천인 한강 하구와 경기만의 연안에는 수도권이 위치해 있다.

경기만 인근에 위치한 수도권의 기상조건에 미치는 갯벌의 지표변화 효과를 평가하기 위해 WRF v.3.8 (Weather Research and Forecasting) 기상모델을 사용하였고 모델링 기간은 2013년 6월 21일부터 7월 8일까지 총 18일로 선정하였다. 2013년은 기상모델의 입력 자료인 최신의 환경부 환경공간정보서비스 중분류 토지피복도(EGIS, Environmental Geographic Information System)가 3차 갱신된 해이고, 선정된 모델링 기간 동안은 장마와 태풍이 존재하지 않았다(Korea Meteorological Administration, 2013).

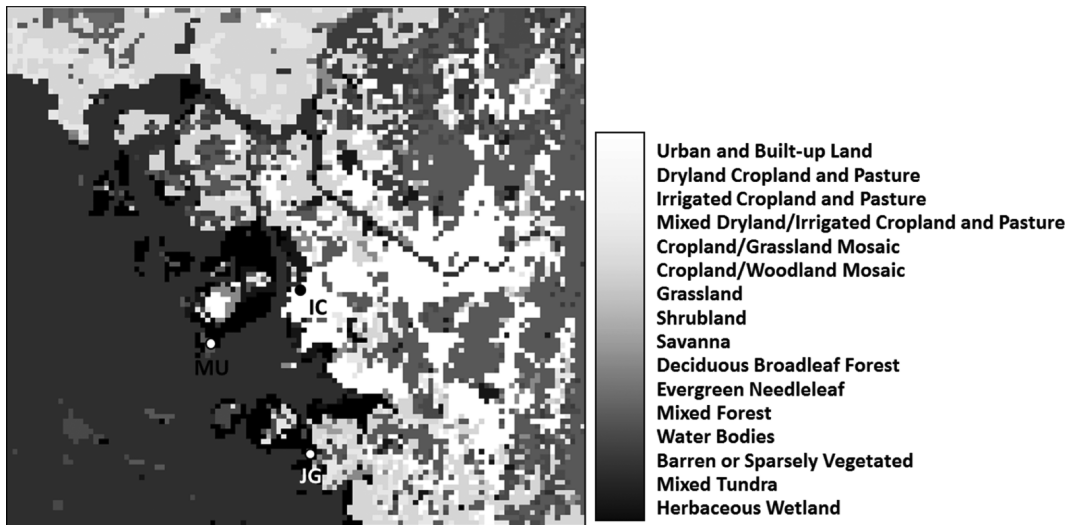


Fig. 2. Dominant land-use at 1 km resolution from EXP-BASE. The MU, JG and IN indicate the Mueuido, Jeongok Port and Incheon meteorological observation station.

2.2 토지피복 입력자료 및 실험설계

토지피복자료에 사용된 입력자료는 WRF 모델링에 반영하기 위해 모델에 입력가능한 토지피복분류 종류(24항목)와 수평해상도를 고려하여 우리나라 환경부 환경공간정보서비스(EGIS, <http://egis.me.go.kr>)에서 구축한 1/25,000 축적의 중분류 토지피복자료를 사용하였다. 중분류 토지피복도는 2000~2004년도에 구축된 이후 2007년도에 전국을 대상으로 1차 갱신되었고, 2009년에 수도권과 충청일부를 대상으로 2차 갱신되었다. 최근 2013년도에는 경상권을 제외한 전국을 대상으로 3차 갱신되었다. 본 연구에서는 최근 갱신된 자료들을 종합한 중분류 토지피복자료를 이용하였으며 WRF에 입력하기 위해 USGS (U.S. Geological Survey) 자료의 토지피복 항목에 맞게 재분류하였다.

경기만 인근 지역의 조석효과에 따른 지표변화를 확인하기 위해 3개의 실험을 구성하였고, 실험은 (1) 만조와 간조 사이에 수심 0~6 m의 지표상태(EXP-BASE), (2) 바다에서 조수가 빠져나가 해수면이 가장 낮아진 때로 수심 0 m 이하의 지표상태인 간조(EXP-LOW), (3) 밀물이 가장 높은 해면까지 짝 차게 들어와 해수면이 가장 높을 때로 수심 6 m 이상의 지표상태인 만조(EXP-HIGH)로 설계하였다. EXP-BASE는 깃별 격자에 보편적으로 연안습지를 대표하는 USGS 토지피복 항목 중 Herbaceous Wetland (HW)의 토지피복도를 적용하였고, EXP-LOW는 Barren or Sparsely Vegetated (BSV)의 토지피복도, EXP-HIGH는 Water Bodies (WB)의 토지피복도를 적용하였다.

2.3 WRF 모델링

기상 모델링의 경우, 3차원 기상모델인 WRF 모델을 이용하였으며, WRF 모델은 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 모델로 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며, 연직격자로는 오일러리안 질량좌표계를 사용한다(Skamarock et al., 2008). WRF 모델의 연직층은 43개의 σ 층으로 대기 경계층 내의 기상현상을 정확히 재현하기 위해 지상에서 1 km까지 11개 층의 조밀한 격자로 구성하였다. 모델링 영역은 5개의 영역으로 동아시아 영역($61 \times 47, 81$ km 격자), 한반도 영역($64 \times 58, 27$ km 격자), 남한 영역($70 \times 76, 9$ km 격자), 수도권 영역($82 \times 82, 3$ km 격자), 최종 분석영역인 1 km 수평해상도의 조건대 영역(115×103)으로 설정하였다. 초기 및 경계조건은 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 6시간 간격의 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 해상도를 갖는 FNL (Final) 재분석 자료를 이용하였고, 이와 함께 모델의 오차를 줄이기 위하여 객관분석기법인 OBSGRID 프로그램을 이용한 자료동화를 수행하였다. 자료동화에 사용된 자료는 NCEP에서 제공하는 지상(rda.ucar.edu/datasets/ds461.0)과 고층(rda.ucar.edu/datasets/ds351.0) 관측자료이다. WRF 모델의 물리옵션은 NIER (National Institute of Environmental Research, 2014)를 참고하여 미세물리 모수화 방안은 D1과 D2에 대해 WSM3 (Hong and Lim, 2006)를, 나머지 도메인에 대해 WDM6 (Lim and Hong, 2010)를 적용하였고, 적운 모수화 방안은 D1과 D2에 대해 KF (Kain, 2010)를 사용하였다. 또한 장파/단파 복사 모수화 방안은 전 영

Table 1. Percentage of dominant land-use categories for study domain (D5).

Land-use category	Pixels	Percent
Urban and built-up land	1619	13.9
Dryland cropland and pasture	561	4.8
Irrigated cropland and pasture	1689	14.5
Mixed dryland/irrigated cropland and pasture	43	0.4
Cropland/grassland mosaic	7	0.1
Cropland/woodland mosaic	10	0.1
Grassland	184	1.6
Shrubland	3	0.0
Savanna	59	0.5
Deciduous broadleaf forest	1831	15.7
Evergreen needleleaf	504	4.3
Mixed forest	474	4.1
Water bodies	3894	33.5
Herbaceous wetland	552	4.7
Barren or sparsely vegetated	196	1.7
Mixed tundra	2	0.0

역에 대해 RRTMG (Mlawer et al., 1997; Skamarock et al., 2008)를 적용하였고, 대기경계층 모수화 방안은 YSU (Hong et al., 2006)를 사용하였다. 지표 플럭스와 PBL 과정에 영향을 미칠 수 있는 토양온도와 수분을 보다 정확하게 모델링하기 위해 Noah-LSM (Land Surface Model) (Chen and Dudhia, 2001)을 수행하였다.

지표변화에 대한 차이를 모델링하기 위해 갯벌 격자에 대해 2.2장에서 언급한 EXP-BASE, EXP-LOW, EXP-HIGH를 대표하는 토지피복 입력자료를 각각 다르게 입력하였다. 3개의 모델링 결과의 차이를 근거로 조석효과를 정량적으로 평가하였다.

3. 갯벌의 토지피복 변화 및 기상영향 평가

3.1 갯벌의 토지피복 변화

대상영역의 조석효과로 인한 토지피복의 변화를 확인하기 위해 WRF 모델링에 입력된 1 km 격자별 EXP-BASE를 Fig. 2에, 주요 토지피복 항목별 비율을 Table 1에 제시하였다. 지표상태가 갯벌인 격자는 총 552개로 전체 면적의 4.7%를 차지하였다. 이후 본 연구에서는 대상영역 내 조석효과를 평가하기 위해 실험별

Table 3. Model performance statistics calculated for temperature, relative humidity and wind speed.

Statistic	Temperature	Relative humidity	Wind speed
IOA	0.85	0.77	0.77
MBE	1.52	-13.05	-0.53
RMSE	1.92	14.24	1.25
MAGE	1.55	12.50	0.88

로 갯벌 격자의 토지피복도를 변화시켜 기상모델링 결과를 분석하였다.

토지피복 파라미터는 지표 토지피복 특성에 따라 정의된 물리적 성질을 나타내는 값으로 WRF 모델은 24개의 토지피복 카테고리에 따른 7개 종류의 토지피복 파라미터(알베도, 지표 수분함량, 방사율, 거칠기 길이, 열적 관성, 토양 열용량, 눈 효과)를 정의하고 있고, 이 중 실험에 사용된 3개의 지표 피복에 해당되는 HW, BSV, WB에 해당되는 값을 Table 2에 제시하였다.

지표의 열용량은 모델 내에서 가열과 냉각의 변화를 가져오고 지표기온에 직접적인 영향을 미친다(Lam et al., 2006). 열용량 증가는 기온 변화의 감소를 유도하며, 열이 수증기의 형태로 배출됨에 따라 습도 증가를 유도하게 된다. 지표상태가 갯벌로서 실험별로 바뀐 격자의 토양 열용량 차이는 EXP-LOW와 EXP-HIGH가 EXP-BASE에 비해 각각 $1.72 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ 감소, $9.0 \times 10^{25} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ 증가하였다. 거칠기 길이는 EXP-BASE와 EXP-LOW, EXP-HIGH의 비교에서 EXP-LOW는 19 cm 감소, EXP-HIGH는 19.99 cm 감소한 것으로 나타났다. 알베도 증가는 태양으로부터 오는 빛을 반사하는 정도의 증가를 의미하며, 이에 따라 대기가 가지는 에너지 감소로 기온 하강을 유도하게 된다. 알베도는 다른 토지피복 파라미터보다는 조석효과로 인한 변화가 상대적으로 작게 나타났다. EXP-BASE에 비해 EXP-LOW는 11% 증가, EXP-HIGH는 6% 감소하였다.

3.2 모델검증

EXP-BASE 결과의 신뢰성을 평가하기 위해 Table 3에 대상영역(D5) 내 ASOS (Automatic Synoptic Observation System)에서 관측된 기상요소(기온, 상대 습도, 풍속)와의 통계분석 결과를 제시하였다. 기온의

Table 2. Land-use parameter corresponding to herbaceous wetland, barren or sparsely vegetated and water bodies categories.

WRF USGS vegetation categories	Albedo	Soil moisture	Emissivity	Roughness	Thermal inertia	Soil heat capacity
Herbaceous wetland	14	60	0.95	20	6	29.2×10^5
Barren or sparsely vegetated	25	0.02	0.9	1	2	12.0×10^5
Water bodies	8	1.0	0.98	0.01	6	9.0×10^{25}

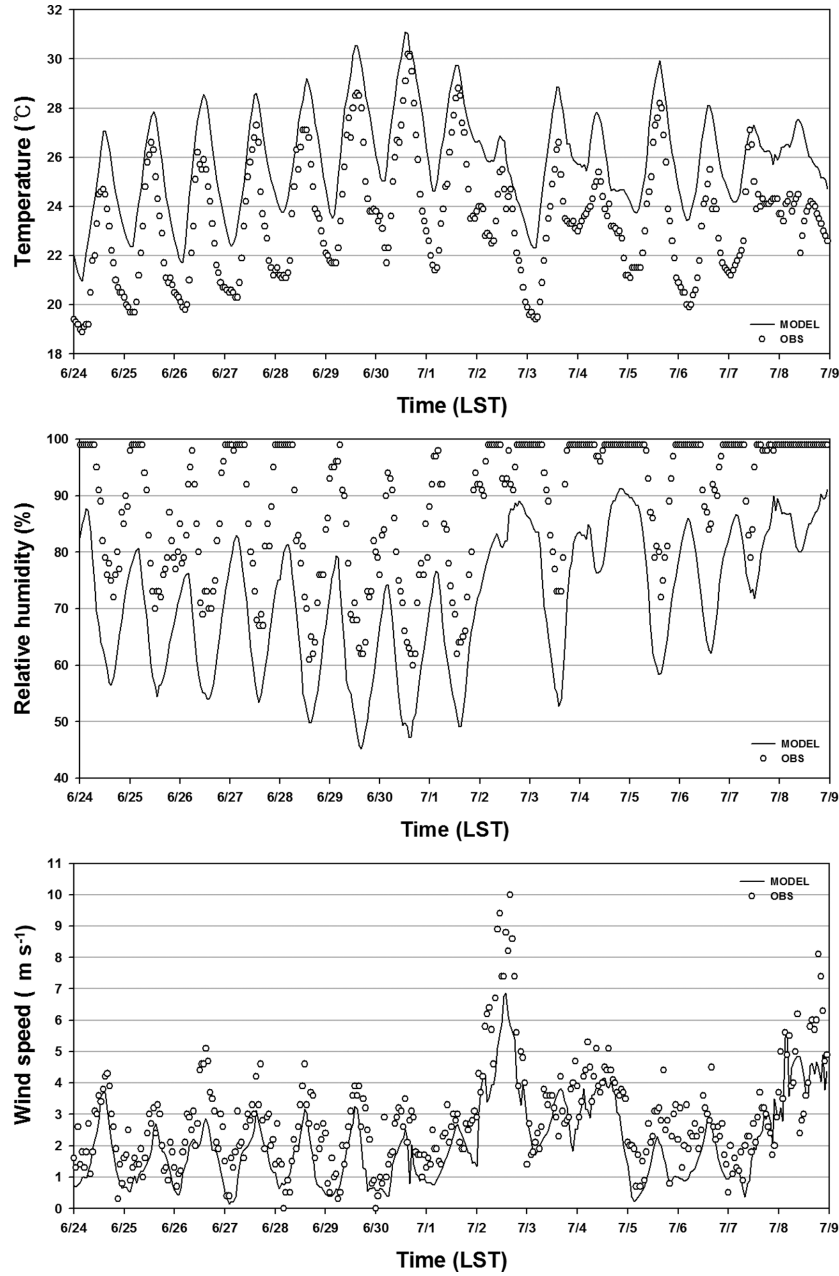


Fig. 3. Temporal variations of observed and simulated surface temperature (top panel), relative humidity (middle panel) and wind speed (bottom panel) at Incheon ASOS site.

경우 MBE (Mean Bias Error) 값이 1.5°C로 모델이 과대 모의하는 경향을 보였고, 상대습도와 풍속은 MBE 값이 각각 -13%, -0.5 m s⁻¹로 모델이 약간 과소 모의하는 경향을 보였다. 다소의 통계치 차이는 존재하나 전반적으로 기온, 상대습도, 풍속과의 차이가 작고 [기온 RMSE (Root Mean Square Error) 1.9°C, 상대습도

도 RMSE 14%, 풍속 RMSE 1.3 m s⁻¹], 일치도는 높게 계산되어 [기온 IOA (Index Of Agreement) 0.85, 상대습도 IOA 0.77, 풍속 IOA 0.77] WRF 모델링 결과가 유의한 수준으로 평가되었다.

관측값과 WRF 모델링 결과를 비교, 분석하기 위하여 인천 ASOS 지점에서 관측된 기온, 상대습도, 풍

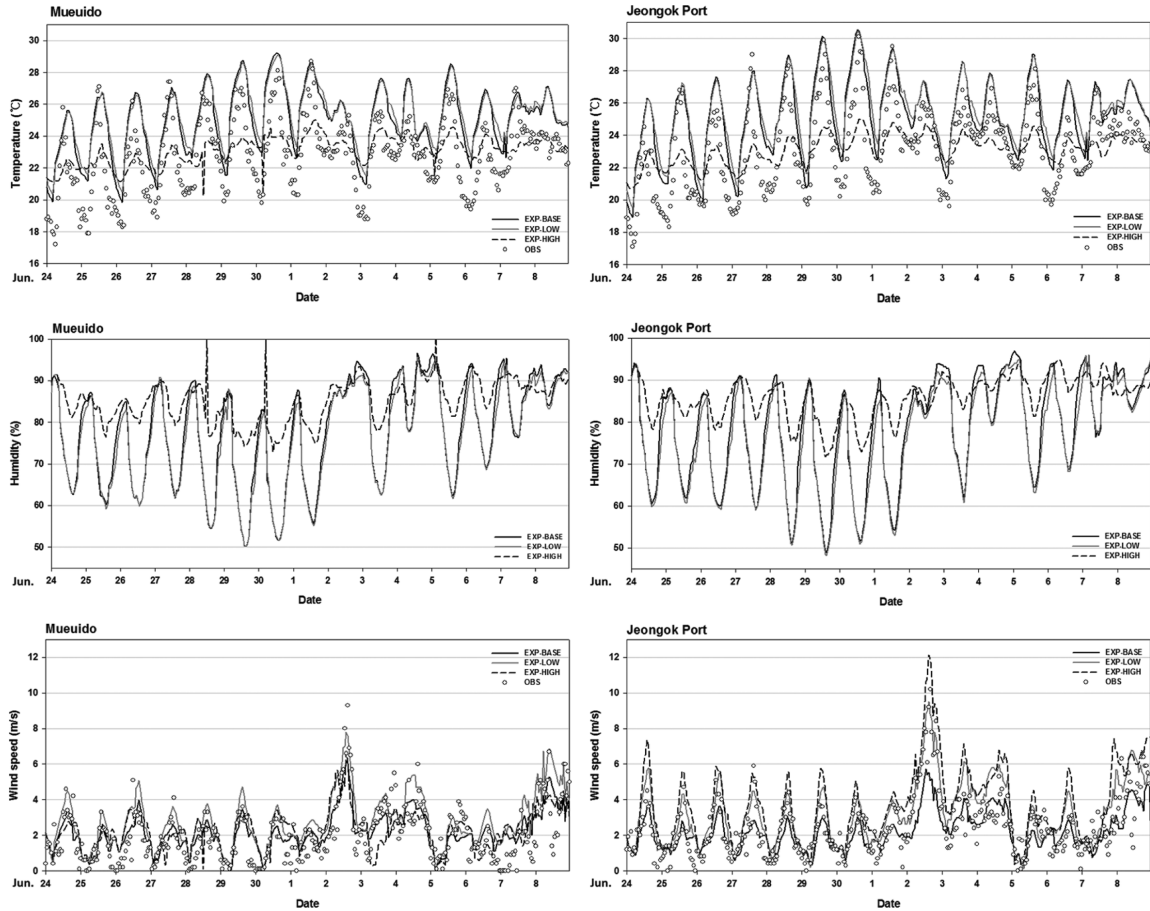


Fig. 4. Diurnal variation of observed and simulated temperature, humidity and wind speed at Mueuido (left panel) and Jeongok Port (right panel) station in D5.

속의 시계열을 Fig. 3에 제시하였다. 기온은 18~32°C 범위에 분포하고 평균기온 23.4°C, 최고/최저기온 30.2°C/18.9°C로 관측되었다. 기온의 경우 다소의 단기적 오차(일 최저기온을 최대 5.3°C 높게 모의)가 존재하나 전반적으로 관측값의 기온 일변화 경향을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다. 상대습도는 모델결과가 관측값에 비해 4~29% 낮게 모의하는 경향이 있다. 풍속은 평균풍속 2.9 m s⁻¹, 최고풍속 10.0 m s⁻¹가 관측되었고, WRF 모델링 결과 풍속의 일변화 경향과 범위를 잘 모의하고 있으나, 낮 시간의 풍속을 전반적으로 과소모의하는 경향을 보인다. 이상의 결과에서 WRF 모델링 결과가 다소의 단기적 오차가 존재하나 관측값의 시, 공간적 변화경향을 잘 재현하는 등 전반적으로 충분한 신뢰성이 있음을 확인하였다.

3.3 기상변화

갯벌에서의 간조와 만조에 따른 지표상태 변화로

인한 기상영향을 확인하기 위해 대상지역 내 갯벌로 계산된 격자와 인접한 기상관측소를 기준으로 기온, 풍속, 습도의 시계열을 살펴보았다(Fig. 4). 기상관측소는 무의도와 전곡항 관측소를 기준으로 분석하였다. 기온과 습도의 경우, EXP-BASE와 EXP-LOW의 실험에서는 유사한 시계열이 나타난 반면, EXP-HIGH는 뚜렷한 기온 감소(EXP-BASE에 비해 평균 2.0°C 감소)와 습도 증가(평균 8% 증가)가 나타났다. 이는 만조일 때의 지표상태는 물로써 열용량의 증가가 직접적인 원인으로 작용한 것으로 해석된다. 풍속의 경우, 무의도 관측소에서는 EXP-LOW에서 상대적으로 강한 풍속(EXP-BASE에 비해 0.6 m s⁻¹ 증가)이 계산되었고, 전곡항 관측소에서는 EXP-HIGH (EXP-BASE에 비해 1.5 m s⁻¹ 증가)에서 뚜렷한 기온 상승이 계산되었다. 이러한 결과는 간조/만조일 때의 지표상태에 따른 거칠기 길이 감소에 따른 결과로 해석된다. 조석현상에 따른 기상변화를 정량적으로 확인하기

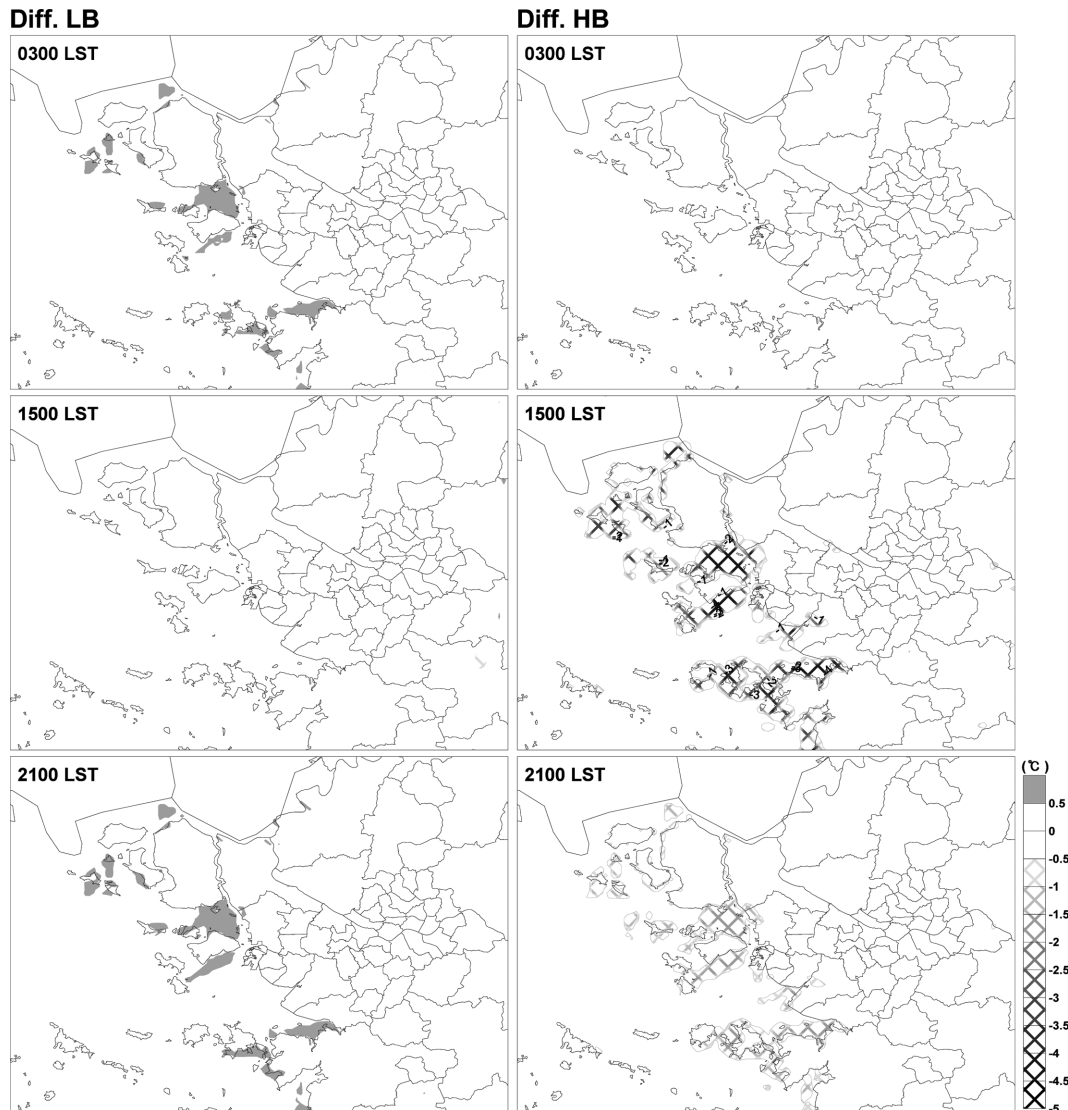


Fig. 5. Horizontal distributions of surface temperature at 0300, 1500 and 2100 LST. Diff. LB (left panel) means difference of EXP-BASE and EXP-LOW (EXP-LOW minus EXP-BASE) and Diff. HB (right panel) means difference of EXP-BASE and EXP-HIGH (EXP-HIGH minus EXP-BASE).

위하여 EXP-LOW와 EXP-BASE, EXP-HIGH와 EXP-BASE 모델링 결과 중 세 시점(0300, 1500, 2100 LST)에 대하여 평균된 기온(지상 2 m)과 상대습도(2 m), 풍속(10 m)의 차이를 Figs. 5, 6, 7에 제시하였다. 주간(1500 LST)의 경우 일중 사례기간동안 평균적으로 최고기온, 최저습도, 최고풍속이 나타난 시간대이고, 주간과는 정반대의 갯벌의 지표변화 효과를 살펴보기 위해 야간(0300 LST) 시간대에 대해 분석하였다. 또한, 최고기온이 나타난 이후 큰 열용량이 적용되는 EXP-HIGH의 기상효과가 저녁 시간대까지 미치는 영

향을 살펴보기 위해 주간의 6시간 후인 저녁(2100 LST) 시간대를 추가 분석하였다. 본 논문에서는 EXP-LOW와 EXP-BASE의 차이는 Diff. LB, EXP-HIGH와 EXP-BASE의 차이는 Diff. HB로 명명하였다.

전반적으로 상대적으로 넓은 갯벌이 분포하고 있는 강화남단 및 영종-용유-무의도 갯벌에서 실험별 뚜렷한 차이가 나타났다. 기온과 습도의 경우, Diff. LB와 Diff. HB가 상반된 결과를 보였다. EXP-LOW는 연안 습지에서 야간과 저녁에 기온 상승(야간: +0.6°C, 저녁: +0.6°C), 주간에 기온 하강(-0.1°C)이 나타났고, 습

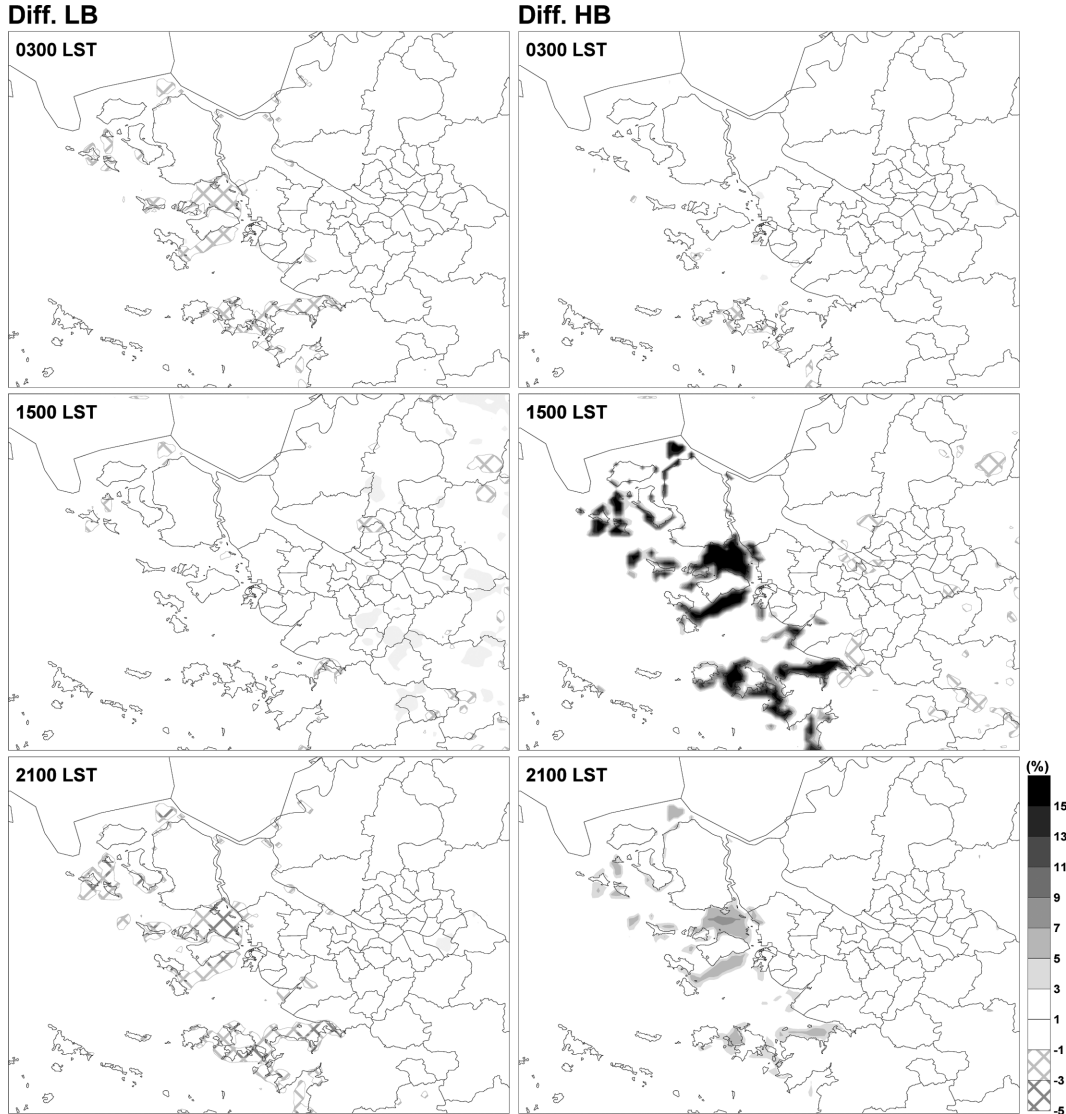


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for relative humidity.

도는 모든 시간대에 낮게 계산되었다(야간: -2% , 주간: -1% , 저녁: -3%). 이는 주간의 알베도 증가로 인하여 주간의 기온 상승이 나타났고, 열용량 감소로 인하여 전반적인 습도 하강이 나타난 것으로 판단된다. 반면 EXP-HIGH는 EXP-BASE에 비해 연안 습지에서 주간과 저녁의 낮은 기온(주간: -3.3°C , 저녁: -1.3°C)과 높은 습도(주간: $+13\%$, 저녁: $+5\%$), 야간의 높은 기온($+0.1^{\circ}\text{C}$)과 낮은 습도(-1%)가 계산되었다. 이는 뚜렷한 열용량 증가에 따라 건조에 비해 EXP-BASE와의 뚜렷한 기온 변화가 나타났고, 전반적인 습도 상승이 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결

과를 통해 조석효과로 인한 지표면의 열용량과 알베도의 변화가 건조와 만조 때의 지표 기온과 습도 변화에 직접적인 원인으로 작용한 것을 확인하였다. 풍속의 경우, EXP-BASE에 비해 EXP-LOW와 EXP-HIGH에서 모두 거칠기 길이가 감소함에 따라 갯벌에서의 풍속증가가 확인되었고, 그 증가폭은 바람이 강하게 나타나는 주간에 뚜렷하게 나타났다(Diff. LB: $0.2\sim 2.0\text{ m s}^{-1}$, Diff. HB: $-1.1\sim 2.9\text{ m s}^{-1}$). 2100 UTC에는 Diff. LB를 분석한 결과, 모델링영역 평균값이 0.1 m s^{-1} 증가(최소 -0.4 m s^{-1} , 최대 1.4 m s^{-1})하였고, Diff. HB를 분석한 결과, 평균값이 0.1 m s^{-1} 증

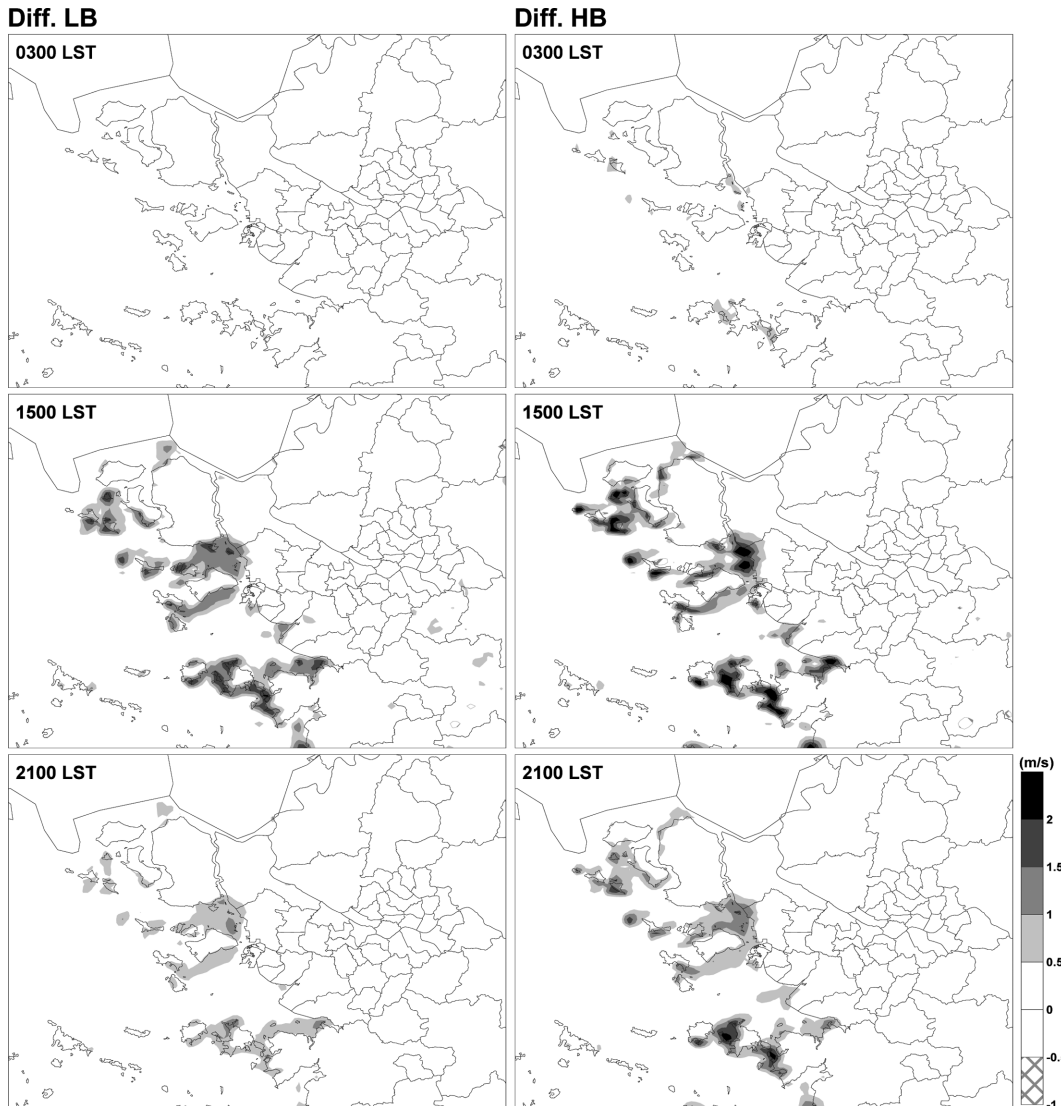


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for wind speed.

가(최소 -0.5 m s^{-1} , 최대 2.3 m s^{-1})하였다. 이는 만조 시 간조에 비해 약 100배의 작은 거칠기 길이가 적용됨에 따라 큰 풍속 차이가 계산된 것으로 사료된다.

시·공간에 따라 기상변화의 차이가 존재하였으나 전반적으로 정리하면, 조수가 빠지기 시작하여 해수면이 가장 낮아진 상태인 간조가 될 때에는 기온 상승, 습도 하강, 풍속 증가가 확인되었고, 조석 현상에 의해 해수면이 하루 중에서 가장 높아졌을 때인 만조가 될 때에는 기온 하강, 습도 상승, 풍속 증가가 확인되었다. 이러한 결과를 통해 조석효과로 인한 토지 피복이 만조와 간조 사이에서 완전한 간조 또는 만조

상태로 변할 경우 시간에 따른 기상변화를 유도하였고 갯벌을 기준으로 연안지역에서 영향이 뚜렷함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 경기만을 대상으로 조석효과로 인한 지표변화 효과가 지역의 기상조건에 미치는 영향을 18일간의 WRF 모델링을 통해 분석하였다. 대상영역 내 갯벌격자(총 552개, 전체면적의 4.7%)에 대해 HW, BSV, WB를 적용한 EXP-BASE, EXP-LOW, EXP-

HIGH 실험결과, EXP-BASE를 기준으로 갯벌에서 세 시점(0300, 1500, 2100 LST)에 평균기온이 간조의 경우 각각 0.6°C 상승, 0.1°C 하강, 0.6°C 상승하였고, 만조의 경우 각각 0.1°C 상승, 3.3°C 하강, 1.3°C 하강하였다. 또한 평균습도는 간조시 2%, 1%, 3% 하강, 만조시 1% 하강, 13%, 5% 상승하였고, 풍속은 간조와 만조시 모두 주간에 뚜렷한 풍속 상승이 나타났다(간조시: 0.2~2.0 m s⁻¹, 만조시: -1.1~2.9 m s⁻¹). 내륙의 경우, 주간에 간조와 만조시 모두 -3~3%의 습도차이가 나타난 반면, 다른 기상인자의 경우 큰 변화가 나타나지 않았다. 이 같은 효과는 조수가 빠지기 시작하여 해수면이 가장 낮아진 지표상태인 간조가 될 경우에는 알베도 11% 증가, 열용량 1.72+06 Jm⁻³ K⁻¹ 감소, 거칠기 길이 19 cm 감소가 기온 상승, 습도 하강, 풍속 상승을 유도한 것으로 판단된다. 조석 현상에 의해 해수면이 하루 중에서 가장 높아졌을 때인 만조가 될 경우에는 알베도 6% 감소, 열용량 9.0 × 10²⁵ Jm⁻³ K⁻¹ 증가, 거칠기 길이 19.99 cm 감소가 기온 하강, 습도 상승, 풍속 상승의 원인으로 사료된다. 전반적으로 간조와 만조 상태로 지표변화가 나타날 경우 모두 주간에 기상변화가 뚜렷하게 나타났고, 간조일 때보다 만조일 때 기상변화가 갯벌을 포함한 풍하측 영역까지 확대되어 나타남을 확인하였다.

본 연구는 갯벌에서 나타나는 조석효과가 연안지역의 기상조건을 복합적으로 변화시킬 수 있음을 보여준다. WRF 모델의 경우, 현재 토지피복에 관한 값(LU_INDEX, LANDUSEF, LANDMASK)이 초기조건으로 고정된 값이 적용되기 때문에 시간에 따른 토지피복의 변화를 모의하는데 한계가 있다. 또한 습지의 경우 크게 수변식생이 존재하는 지역인 내륙습지와 갯벌 및 염전과 같은 연안습지로 구분이 되고, 그 토지피복에 따른 물리적 성질이 크게 다르다. EGIS를 WRF에 입력하기 위해서는 USGS 자료의 토지피복 항목에 맞게 재분류해야하고, EGIS의 내륙습지는 USGS 자료의 토지피복 항목 중 나무습지로, EGIS의 연안습지는 USGS의 풀습지로 재분류된다. 하지만 우리나라의 내륙습지와 연안습지의 물리적 성질은 USGS에서 정의하는 나무습지와 풀습지의 물리적 성질과 다소 차이가 있어 풀습지가 갯벌을 100% 대표한다고 보기는 어렵다. 갯벌의 조석효과를 모의하는데 있어 이러한 한계가 존재하지만 본 연구에서는 현재 기상모델을 통한 조석효과에 따른 지표변화를 모의할 수 있는 방안을 적용하여 간조와 만조의 지표변화로 인한 기상변화를 정량적으로 평가한 연구로써 큰 의미가 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 향후 WRF 모델 내 토지피복의 시간변화를 모의할 수 있도록 모듈 수정 및 관측을 통한 갯벌 토지피복의 물리적 성질에 대한 연구가 추가적으로 수행된다면 보다 상세하고

정확한 조석현상의 재현 및 기상효과를 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(NRF-2015R1A2A1A10053971), 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2017RID1A1B03034592).

REFERENCES

- Alexander, C. R., C. A. Nittrouer, D. J. Demaster, Y.-A. Park, and S.-C. Park, 1991: Macrotidal mudflats of the southwestern Korean coast: A model for interpretation of intertidal deposits. *J. Sediment. Res.*, **61**, 805-824, doi:10.1306/D42677DA-2B26-11D7-8648000102C1865D.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part II: Preliminary model validation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 587-604.
- Chen, C., J. Qi, C. Li, R. C. Beardsley, H. Lin, R. Walker, and K. Gates, 2008: Complexity of the flooding/drying process in an estuarine tidal-creek salt-marsh system: An application of FVCOM. *J. Geophys. Res.*, **113**, C07052, doi:10.1029/JC004328.
- Han, Z., and F. Peng, 2012: Soil moisture quantitative study of the Nanhui tidal flat in the Yangtze River Estuary by using ENVISAT ASAR data. *2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)*, Yantai, 2188-2192, doi:10.1109/ICSAI.2012.6223485.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF Single-Moment 6-class Microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- _____, Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of the entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Jung, J.-A., 2016: A Numerical Study using Coupled Model on Cold Water Region and Fog Occurrence over the Southwest Coast of the Korean Peninsula. Master Dissertation, Pusan National University, 68 pp (in Korean with English abstract).
- Jung, W.-S., and W.-G. Do, 2012: An analysis of the temperature change effects of restoring urban streams in Busan area. *J. Env. Sci. Intern.*, **21**, 939-951, doi: 10.5322/JES.2012.21.8.939 (in Korean with English abstract).

- Kain, J. S., 2010: The Kain-Fristch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 170-181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
- Kim, T.-W., Y.-K. Cho, and E. P. Dever, 2007: An evaluation of the thermal properties and albedo of a macrotidal flat. *J. Geophys. Res.*, **112**, C12009, doi:10.1029/2006JC004015.
- Koh, C.-H., 1997: Korean meta-tidal environments and tidal power projects: Korean tidal flats-biology, ecology and land uses by reclamations and other feasibilities. *La Houille Blanche*, **3**, 66-78, doi:10.1051/lhb/1997018.
- Korea Meteorological Administration, 2013: Annual climatological report. 11-1360000-000011-10, 438 pp.
- Lam, J. S. L., A. K. H. Lau, and J. C. H. Fung, 2006: Application of refined land-use categories for high resolution mesoscale atmospheric modeling. *Bound.-Layer Meteorol.*, **119**, 263-288.
- Lee, Y.-H., K.-D. Ahn, and Y. H. Lee, 2016: Parametrization of the tidal effect for use in the Noah land-surface model: Development and validation. *Bound.-Layer Meteorol.*, **161**, 561-574, doi:10.1007/s10546-016-0178-1.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validate correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682.
- Murray, N. J., S. R. Phinn, R. S. Clemens, C. M. Roelfsema, and R. A. Fuller, 2012: Continental scale mapping of tidal flats across East Asia using the Landsat archive. *Remote Sens.*, **4**, 3417-3426, doi:10.3390/rs4113417.
- National Institute of Environmental Research, 2014: Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling. NIER-SP2013-210, 280 pp.
- Park, S. K., and J.-H. Kim, 2011: A study on changes in local meteorological fields due to a change in land use in the lake Shihwa region using synthetic land cover data and high-resolution mesoscale model. *Atmosphere*, **21**, 405-414 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-E., W. M. Moon, and D.-J. Kim, 2009: Estimation of surface roughness parameter in intertidal mudflat using airborne polarimetric SAR data. *IEEE T. Geosci. Remote*, **47**, 1022-1031.
- Ryu, J.-H., J.-S. Won, and K. D. Min, 2002: Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat. A case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sens. Environ.*, **83**, 442-456.
- _____, J.-K. Choi, and Y.-K. Lee, 2014: Potential of remote sensing in management of tidal flats: A case study of thematic mapping in the Korean tidal flats. *Ocean Coast. Manage.*, **102**, 458-470, doi:10.1016/j.ocecoaman.2014.03.003.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, 113 pp.
- Warner, J. C., Z. Defne, K. Haas, and H. G. Arango, 2013: A wetting and drying scheme for ROMS. *Comput. Geosci.-UK*, **58**, 54-61, doi:10.1016/j.cageo.2013.05.004.
- Zhao, B., H. Guo, Y. Yan, Q. Wang, and B. Li, 2008: A simple waterline approach for tidelands using multi-temporal satellite images: A case study in the Yangtze Delta. *Estuar. Coast. Shelf S.*, **77**, 134-142, doi:10.1016/j.ecss.2007.09.022.