한국대기환경학회지 제 31 권 제 1 호
J. KOSAE Vol. 31, No. 1 (2015) pp. 1～14
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.1.001
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

# 풍력 발전 예보 정확도 향상을 위한 국지 기상장 수치모의 개선 방안 연구

# A Study on Effect of Improvement Plan for Wind Energy Forecasting

**정지아 · 이화운* · 전원배[1] · 김동혁[1] · 김현구[2] · 강용혁[2]**
부산대학교 지구환경시스템학부, [1]부산대학교 환경연구원,
[2]한국에너지기술연구원 신재생에너지 지원센터

(2014년 10월 28일 접수, 2015년 2월 12일 수정, 2015년 2월 26일 채택)

**Ji-A Jung, Hwa-Woon Lee*, Won-Bae Jeon[1], Dong-Hyeok Kim[1], Hyun-Goo Kim[2] and Young-Heack Kang[2]**
*Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea*
[1]*Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan, Korea*
[2]*Korean Institute of Energy Research*

(Received 28 October 2014, revised 12 February 2015, accepted 26 February 2015)

## Abstract

This study investigates the impact of enhanced regional meteorological fields on improvement of wind energy forecasting accuracy in the southwestern coast of the Korean Peninsula. To clarify the effect of detailed surface boundary data and application of analysis nudging technique on simulated meteorological fields, several WRF simulations were carried out. Case_LT, which is a simulation with high resolution terrain height and land use data, shows the most remarkable accuracy improvement along the shoreline mainly due to modified surface characteristics such as albedo, roughness length and thermal inertia. Case_RS with high resolution SST data shows accurate SST distributions compared to observation data, and they led to change in land and sea breeze circulation. Case_GN, grid nudging applied simulation, also shows changed temperature and wind fields. Especially, the application of grid nudging dominantly influences on the change of horizontal wind components in comparison with vertical wind component.

**Key words** : Wind energy forecast, High resolution, Land use, RTG SST, Grid nudging

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

신재생에너지원 중 매우 각광받고 있는 풍력발전은 기술신뢰성을 확보하였으며, 환경오염물질이 발생하지 않고 발전 단가가 낮은 장점이 있다(Lee *et al.*, 2010). 그러나 바람의 간헐적인 특성으로 인해 지속적인 발전이 불가능하고, 이는 전력계통의 부하요인이 된다. 정확한 풍력발전량의 예측을 통해 안정적인 순동예비력 확보와 전력수급계획을 수립할 수 있다(Ryu *et al.*, 2009). 따라서 정확한 발전량 예측이 필수적이며, 발전량 예측의 정확도를 높이기 위해서는 국지규모의 상세한 기상 예보자료를 필요로 한다. 하지만 현재의 기상청의 예보자료의 경우 3시간, 5 km의 시공간 해상도를 가지므로 정밀한 예보장을 필요로 하는 풍력발전량 예측에 적용하기에는 한계가 있다. 특히 연안지역에서는 내륙보다 강한 풍속으로 인해 풍력발전에 유리한 이점을 가지고 있지만, 낮은 수심으로 인해 해수면 온도의 변화가 크게 나타나며(Lee, 2003) 복잡한 지형을 가지고 있어 예보의 불확실성이 높아 정확도 개선이 필요하다.

복잡연안지역의 수치모의 정확도 개선방안은 다양한 선행연구를 통해 보고된 바 있다. Lee *et al.* (2008)은 복잡한 해안선을 가지는 광양만을 대상으로 고해상도의 지형 및 토지이용자료를 적용함으로써 상세대기 유동장 수치모의의 정확도가 해안선을 따라 크게 향상됨을 보였으며, Jeong *et al.* (2009)은 상세 토지피복도 적용으로 인한 지표플럭스과 기온분포의 변화로 연안지역의 바람장 변화가 뚜렷하며. 동해안과 비교해 남서해안에서 더 효과가 큼을 나타내었다. 또한 Lee *et al.* (2010)에서는 한반도 남동지역에서 적합한 해수면 온도자료들을 비교하였으며, 고해상도 해수면 온도자료가 국지바람장과 중력자원에 미치는 영향을 정량적으로 나타내었다. Jeong *et al.* (2013)은 서해상의 강설모의에 있어서 해수면의 온도의 변화로 인한 대기장의 영향과 강설의 변화범위를 제시하였다. Liu *et al.* (2012)과 Choi *et al.* (2002)은 자료동화를 통해 수치모의의 정확도를 높일 수 있음을 확인하였다. 그러나 대부분의 연구들은 특정 종관사례를 중심으로 개별적인 개선방안 검증에 집중하거나 지역의 풍계를 장기간 분석하여 풍력자원을 산정하는 연구들(Byon *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2010)에 한정되어 있어, 풍력발전 예보를 위한 기상모델 개선에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 풍력발전량의 정확한 예측을 목적으로 하는 국지규모의 예보정확도 향상을 위해 예보 기상자료에 수치모의 개선 방안들을 적용하고, 그 영향정도를 비교분석하고자 한다.

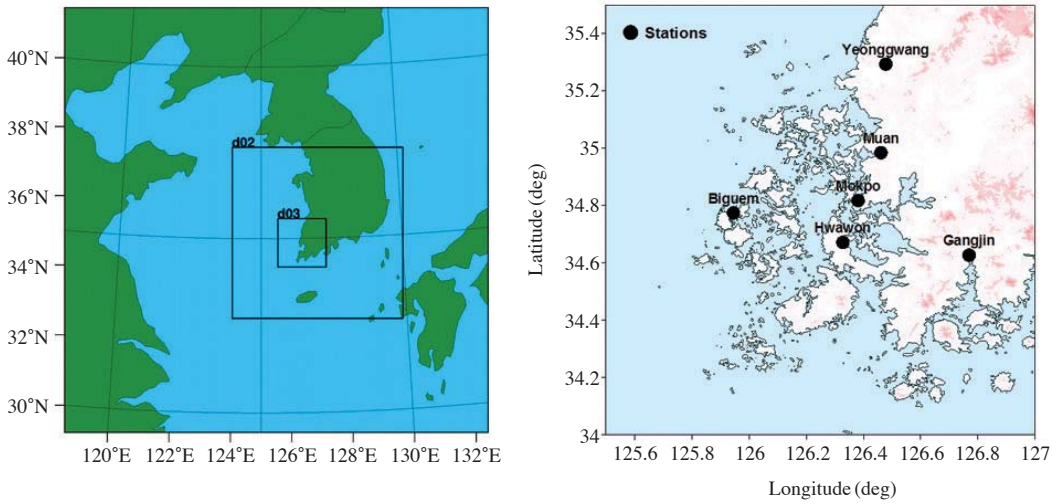


**Fig. 1. Configuration of the coarse and nested grid domains for the WRF simulations. Circles (●) of the right are the observational stations.**

## 2. 연구 방법

### 2. 1 연구대상지역과 사례기간

한반도 남서해안은 내륙지방과 비교하여 평균 풍속과 풍력에너지 밀도가 높아 풍력발전에 유리한 여건을 가지고 있다(Park *et al*., 1990). 따라서 신안(전남 신안군 비금면), 영광(전남 영광군), 영암(전남 영암군)의 풍력단지가 해안선을 따라 입지하고 있다(Jang, 2009; Kim, 2008; Kwun, 2007). 풍력발전의 활성화를 위해서는 상세하고 정확한 풍력자원에 대한 정보가 필수적이다(Byon *et al*., 2010). 그러나 한반도 남서해안은 약 2000개의 섬이 있는 복잡한 지리적 조건으로 국지적인 풍계가 나타난다. 또한 남해나 동해에 비하여 평균 44 m의 낮은 수심으로 인해 태양복사에 의해 해수면 온도가 민감하게 반응하는(Lee, 2003) 등의 요인으로 정확도 높은 국지규모의 상세한 기상 예보자료 생산의 어려움이 있으며, 발전량 예측의 정확도가 낮아 낮은 풍력발전 이용률을 나타내고 있다(KWEIA: Korea Wind Energy Industry Association, 2014). 따라서 국지규모의 예보정확도 향상을 위한 수치모의 개선 방안들의 영향을 분석하기에 적합할 것으로 사료되어 연구대상지역으로 선정하였다.

종관기상장에 따른 수치모의 개선 방안들의 영향을 보기 위하여 본 연구에서는 다른 성질의 종관장이 나타나는 두 기간을 수치모의 기간으로 선정하였다. 각 종관장의 상태는 일기도와 일평균 기온과 풍속자료를 이용하여 선정하였으며, 각 사례기간의 대표 일기도는 그림 2에 나타내었다. 2014년 4월 8일 0900 LST부터 2014년 4월 10일 0900 LST 사례기간에서는 북태평양 고기압이 한반도 전체에 자리하고 있어 맑은 날씨가 나타나 국지규모의 풍계의 발달이 예상되므로 약한 종관장의 사례기간(EP_1)으로 선정하였다. 또한 2013년 9월 30일 0900 LST부터 2013년 10월 2일 0900 LST에서는 일본 동남쪽의 태풍의 영향으로 한반도 전체가 흐렸으며, 이 기간 동안 목포 기상대에서는 평균 6의 운량과 4 mm의 강수가 있었던 것으로 관측되었다. 따라서 종관장의 영향이 두드러질 것으로 예상되어 강한 종관장 사례기간(EP_2)으로 선택하였다.

### 2. 2 모델설정

본 연구에서 사용된 3차원 중규모 기상모델인 WRF(Weather Research and Forecasting Model, version 3.5)는 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 비정역학적 모델로서 중규모 이하의 현상을 모의하기에 적합한 모형이다. 본 연구에서는 한반도 남서해안지역을 중심으로 총 3개의 둥지격자를 이용하여 수치실험을 실시하였으며, 9 km (150×150), 3 km (181×181), 1 km (145×145)의 해상도와 33개의 연직층으로 설정하였다. 그림 1에 계산영역과 격자 구성을 나타내었다. 본 연구에 실험에 앞서 물리과정에 대한 민감도 실험을 수행하여, 각

(a) (b)

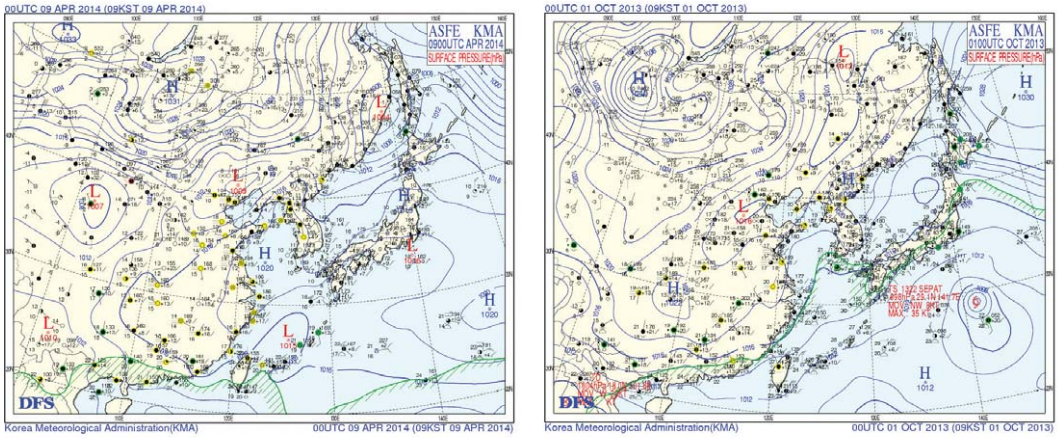


**Fig. 2. Surface weather chart at (a) 0900 LST 09 April 2014 and (b) 0900 LST 01 October 2013.**

**Table 1. Statistics of FNL data between modeled and observed value.**

| Station | Temperature | | | | Wind speed | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | RMSE | IOA | CORR | MB | RMSE | IOA | CORR | MB |
| Mokpo | 2.490 | 0.651 | 0.748 | −0.674 | 1.198 | 0.666 | 0.445 | 0.234 |
| Yeonggwang | 1.652 | 0.956 | 0.925 | 0.252 | 1.092 | 0.861 | 0.739 | 0.125 |
| Gangjin | 2.023 | 0.952 | 0.951 | −0.731 | 1.195 | 0.823 | 0.822 | 0.674 |
| Muan | 1.285 | 0.966 | 0.940 | 0.106 | 1.604 | 0.632 | 0.490 | 0.990 |
| Biguem | 1.718 | 0.853 | 0.769 | 0.564 | 1.169 | 0.601 | 0.399 | 0.547 |
| Hwawon | 3.055 | 0.629 | 0.737 | −0.327 | 1.478 | 0.659 | 0.454 | 0.685 |
| Total | 2.037 | 0.834 | 0.845 | −0.135 | 1.289 | 0.707 | 0.558 | 0.542 |

**Table 2. Same as Table 1, but for GFS data.**

| Station | Temperature | | | | Wind speed | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | RMSE | IOA | CORR | MB | RMSE | IOA | CORR | MB |
| Mokpo | 2.520 | 0.659 | 0.740 | −0.848 | 1.226 | 0.692 | 0.447 | 0.025 |
| Yeonggwang | 1.537 | 0.962 | 0.935 | −0.009 | 1.063 | 0.877 | 0.770 | 0.130 |
| Gangjin | 2.170 | 0.945 | 0.944 | −0.930 | 1.332 | 0.778 | 0.772 | 0.799 |
| Muan | 1.361 | 0.962 | 0.932 | −0.127 | 1.496 | 0.687 | 0.623 | 0.909 |
| Biguem | 1.694 | 0.857 | 0.764 | 0.327 | 1.379 | 0.541 | 0.387 | 0.694 |
| Hwawon | 3.060 | 0.642 | 0.720 | −0.528 | 1.610 | 0.661 | 0.482 | 0.739 |
| Total | 2.057 | 0.838 | 0.839 | −0.353 | 1.351 | 0.706 | 0.580 | 0.549 |

물리과정들을 선택하였다. 행성경계층 모수화 방안으로는 연직 혼합을 고려하는 MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) scheme (Janjic, 1994)을 사용하였으며 미물리과정에는 WSM6 (WRF Single-Moment 6-class scheme) scheme (Hong and Lim, 2006)으로 선택하였다. 복사 모수화 방안으로 장파복사에 관해서는 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) (Malwer *et al*., 1997), 단파복사에 대해서는 Dudhia scheme (Dudhia, 1989)를 사용하였다. 지표 모델에서는 Noah Land Surface Model을 선택하였다.

연구에 사용된 초기 기상 입력장은 GFS (Global Forecast System) 자료를 사용하였다 (Jeong *et al*., 2013; Byun *et al*., 2011). GFS는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 개발된 날씨 예보 모델로써, 4개 하위 모델 (대기모델, 해양모델, 지면/토양 모델, 해빙모델)로 구성되어 있다. 온도, 바람, 강수, 토양수분등을 포함한 12개의 대기와 지면의 변수를 포함하고 있으며, 1°의 공간해상도와 3시간의 시간해상도를 가진다. GFS 자료를 사용하는데 있어 신뢰도 확인을 위해 현재 수치모의에 사용되는 다양한 재분석 기상자료들 가운데 여러 연구를 통해 신뢰도가 검증된 자료인 NCEP에서 제공하는 FNL (final) operational model global tropospheric analyses (Lee *et al*., 2013, 2010; Jeon *et al*., 2011; Fu *et al*., 2006)와 비교검증을 실시하였다. EP_1의 사례기간에서 도메인내의 기상청 관측값 (ASOS)과의 비교 검증했을 때 기온의 전체 IOA가 0.834/0.838, CORR에서 0.835/ 0.839로 나타났으며, 풍속에서는 IOA가 0.707/0.706, CORR이 0.558/0.580으로 나타나는 등 결과가 매우 유사한 것을 확인하였다.

### 2. 3 수치모의 개선 방안 및 실험 설계

한반도 남서해안을 대상으로 예보 정확도 향상을 위한 수치모의 개선 방안들의 영향을 보기위해 표 3와 같이 조건을 달리한 4개의 실험을 설정하였다. BASE CASE는 개선 방안을 적용하지 않는 기본상태의 실험이며, CASE_LT는 고해상도 지형 및 토지이용 자료를 적용하여 모의한 실험이다. CASE_RS는 고해상도 지형 및 토지이용자료와 고해상도 해수면 온도자료를 함께 적용한 실험이며, CASE_GN에서는 앞의 세가지 수치모의 개선 방안과 Grid Nudging을 함께 적용하여 수행하였다.

한반도 남서해안의 복잡한 지형을 모델 내에서 구현하기 위해 NASA (National Aeronautics and Space

Administration)에서 제공하는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3초 지형자료와 환경부에서 제공하는 1초 토지이용자료를 사용하였다. SRTM 3초 지형자료는 미국 NGA (National Geospatial-Intelligence Agency)와 NASA에서 2000년에 수행된 SRTM에 의해 만들어졌으며 DEMs (Digital Elevation Models)형식이다. 1° × 1° 의 위경도에 약 1,200개 격자로 표현되었다. 환경부의 1초 토지이용자료는 Landsat 위성영상을 기본으로 하여 만들어진 약 30 m의 해상도를 가지는 대분류 토지이용자료로써 7개 분류 항목(시가화 건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역)으로 나뉘어 있다. 과거 10년 전에 만들어진 USGS (United States Geological Survey) 30초 자료보다 매우 상세한 지형을 구현가능하다. 그림 3은 BASE CASE와 고해상도 지형 및 토지이용자료가 적용된 CASE_LT의 토지이용분포를 나타낸 것이며, 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. BASE CASE에서는 해안선을 따라 실제로 육지인 부분이 바다로 나타나고 있으며, CASE_LT에서는 실제와 매우 가깝게 해안선을 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 USGS의 자료의 낮은 해상도로 인해 실제 수치모의에서 평준화된 값을 나타냄으로써 나타난 것이며, 남서해안지역의 간척사업으로 인한 해안선 변화, 내륙 토지 확장 등을 잘 표현하지 못하고 있다 (Jeong, 2009). 이러한 차이는 토지의 반사도, 수분량, 거칠기 길이, 지표면 열적관성 등에서 변화가 나타나 남서해안지역의 열환경구조와 국지바람장 모델링에서 변화가 클 것으로 사료된다 (Jeong, 2009; Lee, 2008).

고해상도 해수면 온도자료로는 미국의 NCEP의 현업모델에 이용되고 있는 RTG SST (Real Time Global Sea Surface Temperature)을 이용하였다. RTG SST 자료는 NCEP/MMAB (Marine Modeling and Analysis Branch)에서 AVHRR/NOAA-17의 위성 관측자료와 부이, 선박자료가 자료동화된 것으로 2001년 1월 30일을 시작으로 매일 만들어지고 있다 (Thiébaux *et al.*, 2003). 0.5° 와 0.083° 의 해상도 자료가 있으며, 본 연구에서는 0.083° 의 공간해상도를 가지는 자료를 적용하였다.

그림 4는 BASE CASE와 CASE_RS의 해수면 온도를 각각의 사례기간에 대해 나타낸 것이다. BASE

**Table 3. The experimental designs.**

| Classification | SRTM 3″ EGIS 1″ | RTG SST | Grid Nudging |
|---|---|---|---|
| BASE CASE | | | |
| CASE_LT | ○ | | |
| CASE_RS | ○ | ○ | |
| CASE_GN | ○ | ○ | ○ |

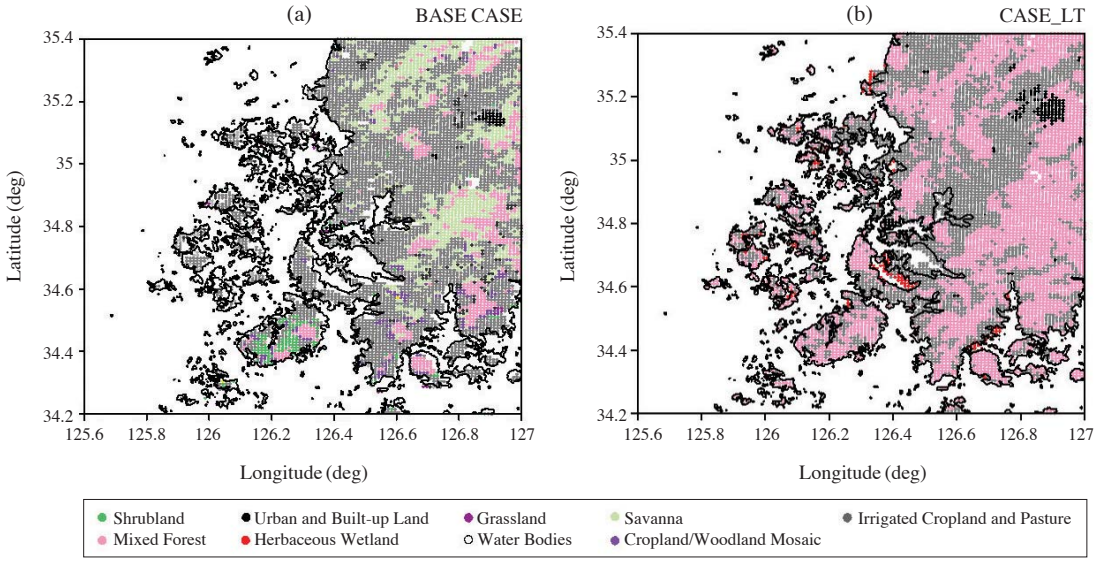


**Fig. 3. Computed topography ((a) BASE CASE, (b) Case_LT) of the fine domain.**

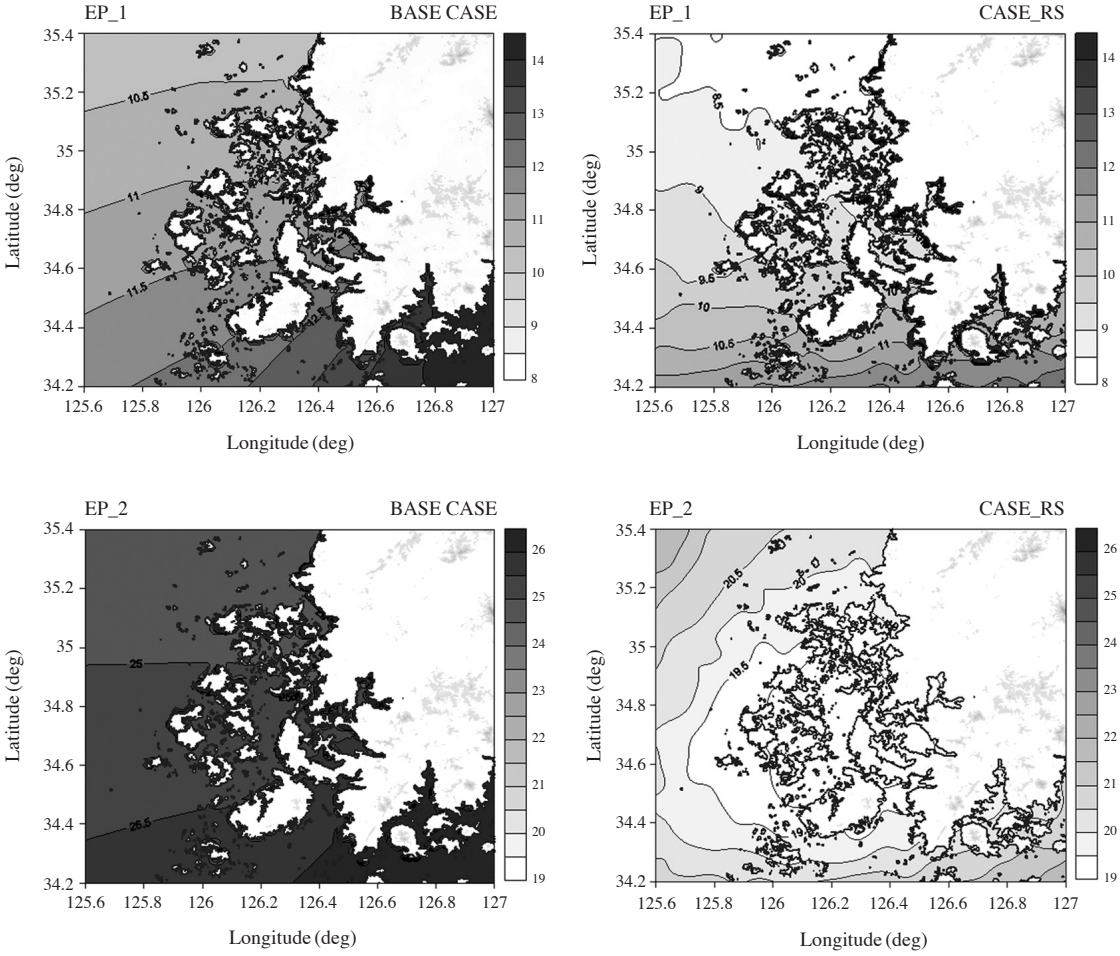


**Fig. 4. Computed sea surface temperature (°C) of the fine domain for two episodes.**

CASE를 보면 지형에 관계없이 해수면 온도가 위도에 따라서만 적용되어, 한반도 남서해안의 복잡한 해수면 온도분포를 나타내 주지 못하고 있지만, CASE_RS에서는 연안지역의 특성을 잘 반영하고 있는 것을 볼 수 있다. 해수면 온도는 해양과 대기예보의 필수적인 요소이다 (Donlon *et al*., 1999). 해수면 온도의 차이는 지표 열속에 변화와 경계층의 열적성질의 변화를 유발한다. 따라서 정확한 예보장을 필요로 하는 풍력 발전량 산정에는 높은 정확도의 해수면 자료의 적용이 요구된다 (Lee *et al*., 2010; Liu *et al*., 2007).

수치모의의 정확도 향상을 위해 FDDA (Four-Dimensional Data Assimilation)를 실시하였다. Grid Nudging은 수치모의의 정확도를 높일 수 있는 가장 효율적인 방법 중 하나이며, 역학적으로 일관성있는 4차원의 자료와 기존 모델보다 향상된 경계 조건을 만들 수 있다. 또한 전 시각의 초기장 및 예측장을 현재 초기장에 가깝게 완화 시켜주기 때문에 모델의 초기장을 개선하여 오차를 줄일 수 있게 한다 (Bowden *et al*., 2012). Grid Nudging과정의 수치모의 정확도 향상효과는 여러 연구에서 제시되고 있다 (Bowden *et al*., 2012; Liu *et al*., 2012). 3시간마다 GFS자료를 WRF 모델에 자료 동화하였으며, 복잡지형의 국지효과를 고려하기 위하여 마지막 도메인에서는 Nudging을 적용하지 않았다.

## 3. 결 과

### 3. 1 BASE CASE 결과

도메인 내의 ASOS와 AWS의 관측 값을 이용하여 모의 결과와의 일 변동 경향을 비교하였다. 선정한 관측지점의 위치는 그림 1에 나타내었다. 그림 5는 EP_1의 대표적인 4지점(목포, 강진, 화원, 무안)의 기온과 풍속 시계열을 나타낸 것이다. BASE CASE의 기온분포는 대체적으로 주간에는 관측 값보다 모델이 평균 3.3°C 과소 모의하는 것으로 나타났으며, 4월 9일 주간에는 그 오차가 감소하였다. 야간에는 평균 1.8°C의 차이를 가지며 과대모의 하였고, 그 차이는 주간보다 작았다. 최대 오차 값은 목포와 화원지점에서 나타났는데, 이 두 지역에서는 일 변동 경향을 전혀 모의하지 못하고 있다. 이는 두 지역이 해안경계지역에 위치해 기존의 USGS 자료에서 바다로 인식되었기 때문인 것으로 사료된다.

풍속의 분포를 보면 경향은 비슷하나 기온분포보다 그 일치도가 현저하게 떨어졌다. 대부분의 지점에서 주간에 나타나는 강한 풍속 대를 과대 모의했으며, 특히 4월 9일 주간에 최대 3.3 m/s로 과대 모의하는 정도가 더 크게 나타났다. 또한 야간에 나타나는 변동성이 큰 풍속 영역대의 모의 시 BASE CASE에서는 변동을 모의하지 못하고 단조롭게 나타내거나 과대예측 되고 있다. BASE CASE의 모의결과는 EP_2에서도 유사하게 나타나 종관장에 따른 차이를 보이지 않았다.

### 3. 2 고해상도 지형 및 토지이용 자료 적용 결과

그림 5에서 고해상도의 지형고도 및 토지 피복도 자료를 적용한 CASE_LT의 기온분포를 보면, 최대 2.4°C의 차이를 보이고 있으며, 4월 9일 주간에서는 무안을 제외하고 오차가 더 감소하였다. 야간의 경우 주간보다 차이가 뚜렷하지 않았으나 BASE CASE보다 정확도가 개선되는 양상을 보였다. 특히 BASE CASE에서 일 변동 분포를 전혀 모의하지 못했던 목포, 화원의 경우 고해상도의 자료가 적용되면서 정확도가 크게 개선되었고, BASE CASE보다 주간에는 최대 5.5°C, 야간에는 1.2°C의 큰 기온차이가 나타나 해안경계지역에서의 상세한 지형 및 지표자료의 적용효과가 큰 것으로 보인다. 풍속 분포의 경우 목포지점을 제외한 대부분의 지점에서 BASE CASE대비 주간에 과대모의의 정도가 감소하였다. 특히 강진과 화원지점의 경우 4월 9일 주간에 평균 3.8 m/s이던 오차가 0.8 m/s로 감소되어 큰 정확도 향상이 나타났다. 또한 야간의 풍속 모의시 목포와 비금, 무안, 영광지점에서 과대모의의 정도가 감소하였으며, 4월 9일 야간의 변동이 심한 풍속 대에서 정확도의 향상이 확인되었다. EP_2에서도 기온과 풍속분포에서 고해상도 지형 및 지표자료의 효과가 크게 나타났으며, 그 정도는 EP_1보다 컸다.

그림 6은 EP_1의 CASE_LT와 BASE CASE의 차이를 나타낸 것이다. 1500LST와 0300LST 모두 도메인 중심의 해안선을 따라 기온변화가 집중되어 있는 것을 볼 수 있으며, 1500LST의 경우 최대 5.4°C 상승하였다. 0300LST 또한 해안선을 중심으로 평균 1.5°C의 기온이 하강하였지만, 낮보다 뚜렷하지 않았다. 1500LST에서 육풍이 강화되어 육지와 바다에서 기온상승 구역을 중심으로 바람이 수렴하고 있다. 기온상승 구역의 중심에 가까워질수록 풍속차이가 커지고 있으며, 특히 남해안 지역에서 큰 풍속을 보였다. 0300LST에서는 1500LST보다는 바람의 큰 흐름이 뚜렷하게 나타나지 않았지만 해안선을 중심으로 바람의 변화 양상이 나타났다. 기온과 바람의 변화가 집중된 부분은 주로 기존 USGS 30초자료에서 바다로 입력되었던 지역으로 상세화된 자료인 고해상도 지형 및 토지이용자료가 입력되면서 육지(Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture)로 바뀌었다. 따라서 알베도가 0.08에서 0.18로 2.25배 증가하였고, 토양수분이 1에서 0.25로 1/4배가 되었다. 또한 표면 거칠기가 1500배 증가되었으며 열적관성(cal $cm^{-2}\,k^{-1}\,s^{-1/2}$)이 0.06에서 0.04로 감소되었다. 이러한 물성치의 변화가 남서해안지역의 내륙과 인근 해양의 기온 분포에 넓게 영향을 주었으며, 지역의 바람장에도 크게 작용한 것으로 사료된다(Jeong *et al.*, 2009).

### 3. 3 고해상도 해수면 온도 자료 적용 결과

고해상도 해수면 온도 자료의 적용 결과 EP_1에서는 기온과 풍속 분포에서 차이를 거의 보이지 않아 CASE_LT의 시계열과 중첩되어 나타났다. 이러한 결과는 그림 4에 나타낸 해수면 온도분포에서도

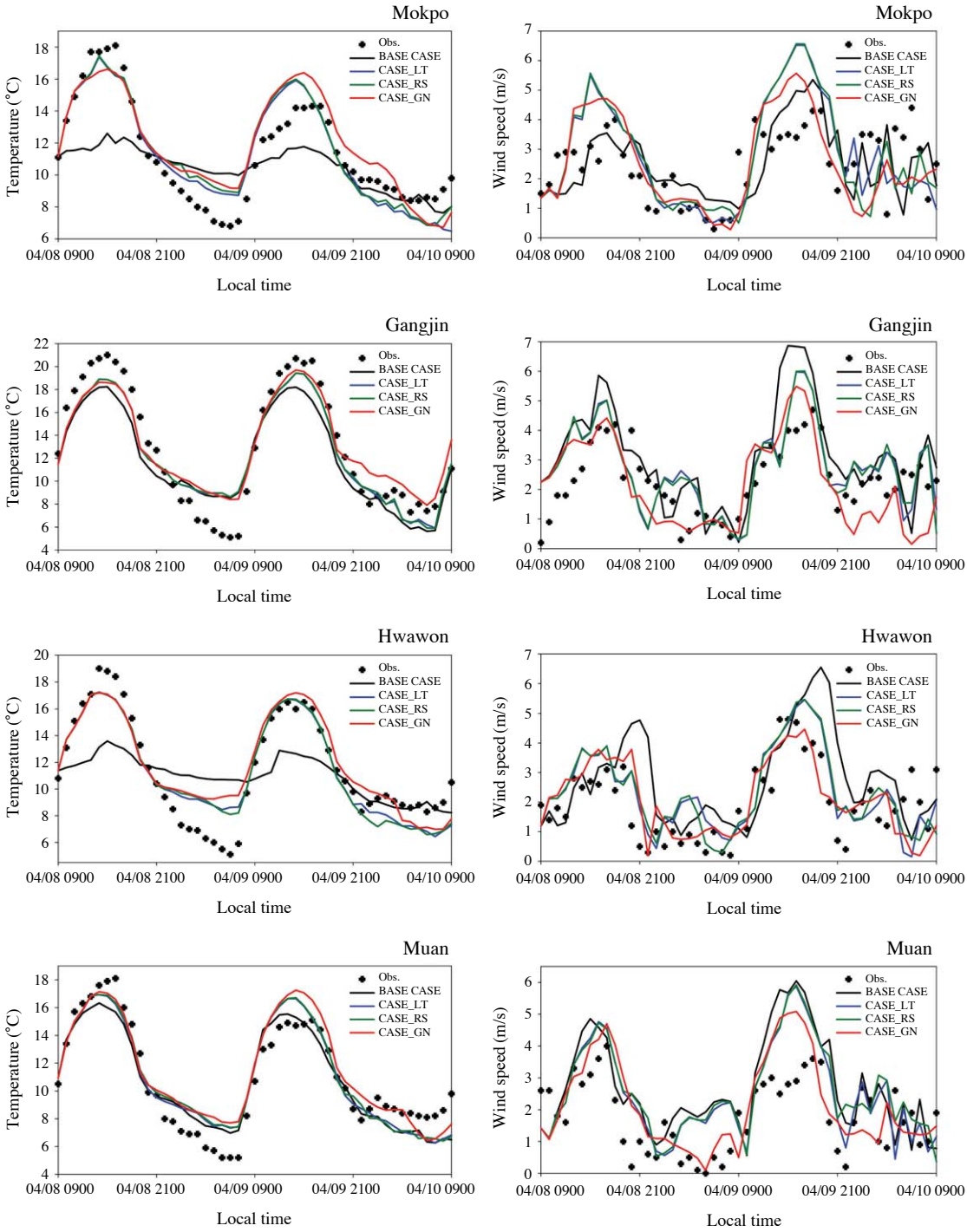


**Fig. 5. Time series of temperature (left panel) and wind speed (right panel) between modeled and observed value of EP_1.**

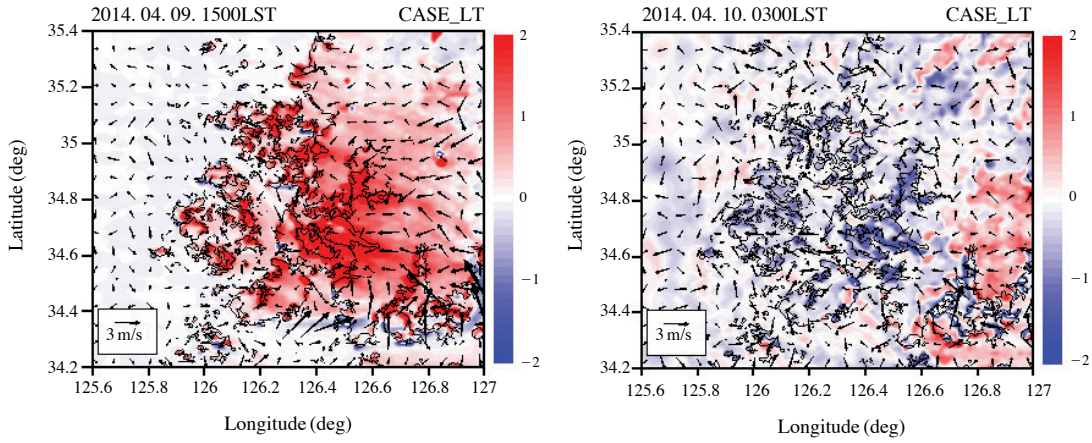


**Fig. 6. The difference map of temperature (°C) and wind speed (m/s) of CASE_LT.**

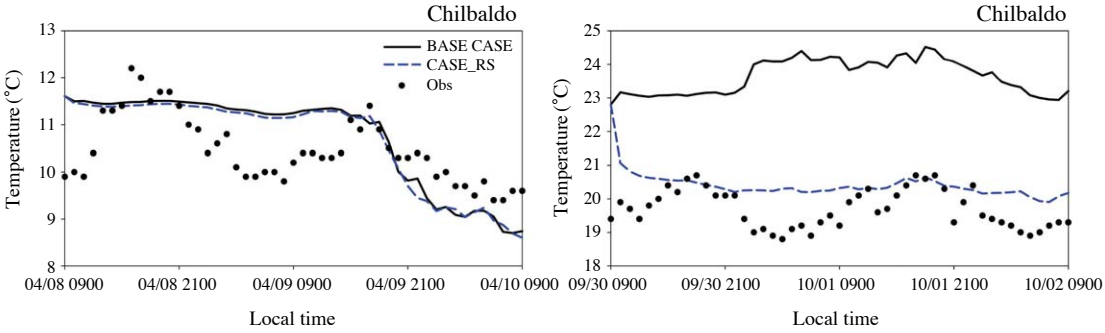


**Fig. 7. Time series of modeled and observed (at Chilbaldo (22202) buoy) sea surface temperature of EP_2.**

보인다. EP_1에서는 두 CASE에서 큰 온도분포차이가 나타나지 않은 반면, EP_2에서는 한반도 남서해안의 국지적인 온도하강역이 나타났다. 실제 자료와의 검증을 위하여 목포시 서쪽 55 km 해상에 위치하고 있는 칠발도 부이(위도 34°47′36″N, 경도 125°46′37″E)자료와 비교하였으며 그림 7에 나타내었다. EP_1에서는 BASE CASE와 CASE_RS의 온도 차이가 크지 않은 반면, EP_2에서는 평균 3.3°C의 차이가 나타났으며 부이자료를 이용한 검증결과 CASE_RS의 결과가 실제값과 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 RTG SST 자료 생산시 위성과 부이, 선박의 관측결과가 자료 동화되었기 때문에 실제적인 해수면 온도분포를 나타낼 수 있는 것으로 사료된다(Lee *et al*., 2010; Thiébaux *et al*., 2003).

그림 8은 EP_2에서 대표적인 두 지점(목포, 비금)의 기온과 풍속 시계열을 나타낸 것이다. 기온의 경우, CASE_LT에서 도메인내의 대부분 관측지점에서 과대모의 되었지만, 고해상도 해수면 자료가 적용되면서 오차가 큰 폭으로 감소되었다. 특히 해안 경계지역에 위치하고 있는 목포, 화원, 비금 세 지점에서 기온 하강 정도가 최대 −5.8°C로 크게 나타났으며 주간보다 야간시간의 정확도가 크게 향상되었다. 풍속의 경우 2100LST 이후에서 과대모의 되고 있던 야간풍속대의 오차가 감소하여 풍속 변화를 잘 모의하였다. 그러나 강진을 제외한 관측지점들에서 나타난 9월 30일 주간의 과대 예측된 값의 오차를 줄이지는 못하는 한계를 보였다.

그림 9는 EP_2의 CASE_RS와 CASE_LT의 차이를 나타낸 것이다. 바다의 기온이 전체적으로 하강된 것을 볼 수 있는데, EP_1에서는 고해상도 해수면 자

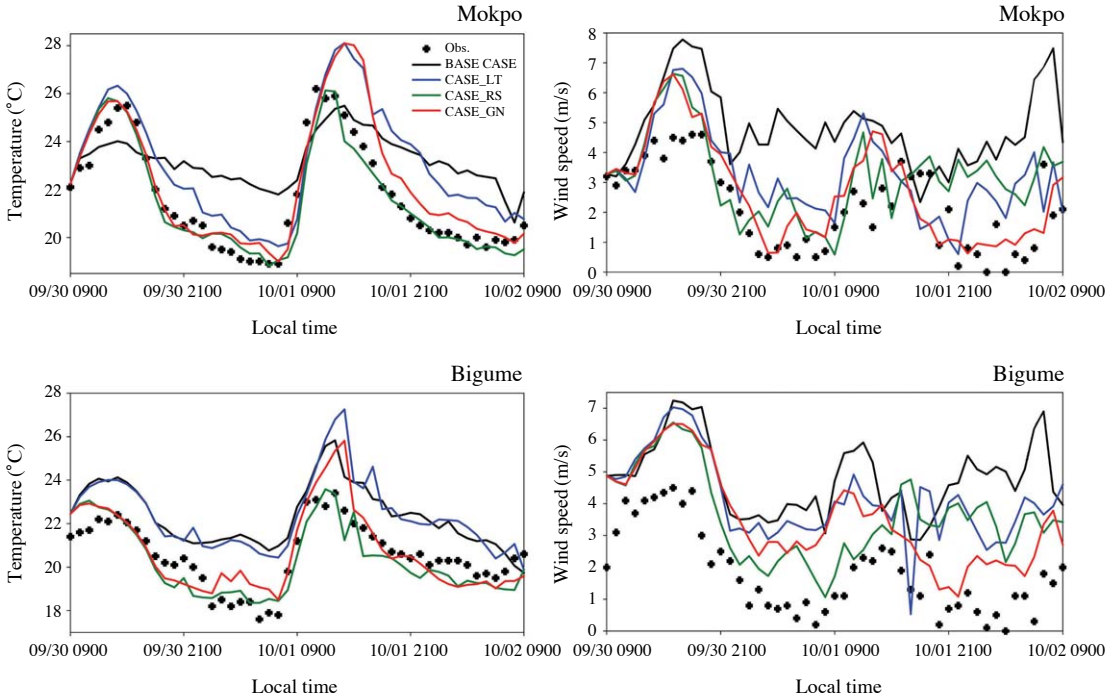


**Fig. 8. Time series of temperature and wind speed between modeled (solid lines) and observed (dots) value of EP_2.**

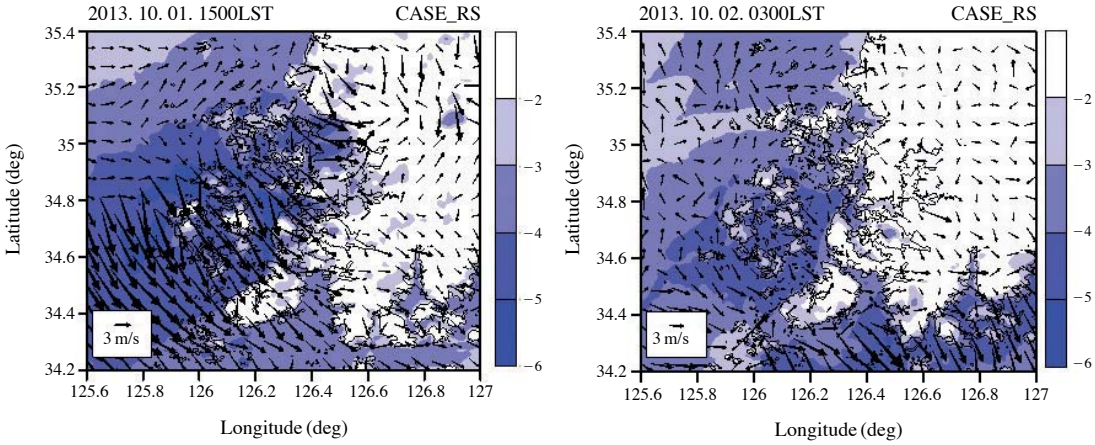


**Fig. 9. The difference map of temperature (°C) and wind speed (m/s) of CASE_RS.**

료의 효과가 두드러지지 않았을 뿐만 아니라 영광앞바다에서 기온이 약 1.9°C이 상승한 구역이 나타난 것과 다른 양상이다(그림 생략). 1500LST에 특히 한반도 남서해안을 중심으로 기온하강효과가 크게 나타났으며, 이 구역을 중심으로 북서풍이 강하게 발달하였고 육풍이 강화되었으며, 최대 10.4 m/s의 고풍속대가 나타났다.

선행연구에 따르면 종관장에 따라 고해상도 자료의 적용효과가 다르게 나타나는데, 이는 종관장이 약할 경우 해안 근처에서 발생하는 국지규모의 바람장

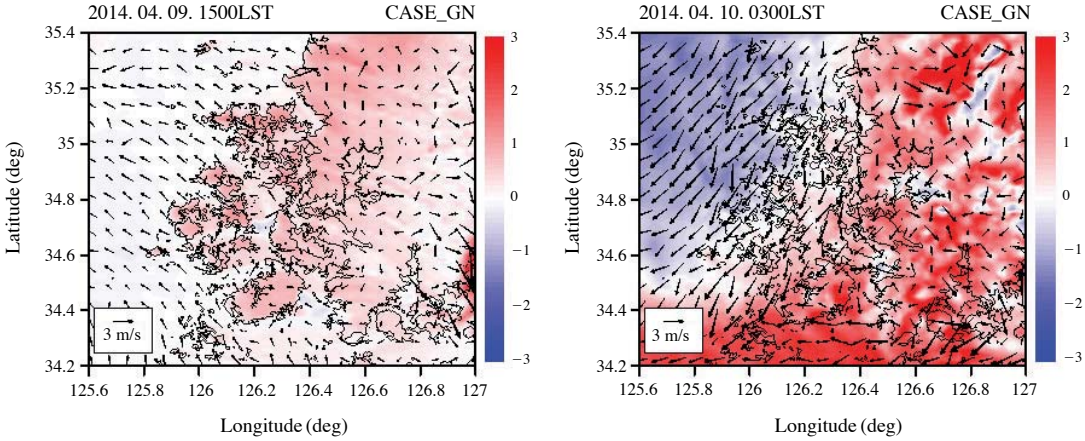


**Fig. 10. The difference map of temperature (°C) and wind speed (m/s) of CASE_GN.**

이 해수면 온도의 영향을 크게 받기 때문이다(Lee *et al*., 2010). 그러나 기존의 남북의 해수면 온도분포에서 벗어나 EP_2와 같이 동서 경도의 복잡한 해수면 분포가 나타날 경우에는 고해상도 해수면 자료의 적용이 수치모의의 정확도를 높이는데 중요한 것으로 생각된다.

### 3. 4 Grid Nudging 적용 결과

Grid Nudging 적용을 통한 온도, 수평바람성분, 수증기량의 자료동화 결과 온도 및 풍속 모의 결과 변화가 나타났으며, 특히 수평바람성분의 개선효과가 상대적으로 크게 나타났다. 먼저 기온의 경우, CASE_RS와 거의 유사한 양상을 보였으나 1500LST 이후로 도메인내의 대부분의 지점에서 과대 모의하는 결과를 보였으며 주간보다 야간의 오차가 크게 나타났다. 풍속의 분포에서는 Grid Nudging의 적용효과가 기온보다 더 효과적으로 과대 모의를 크게 감소시켜 정확도가 상승되었다. 그러나 기온의 결과와 마찬가지로 야간 풍속모의의 오차가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 Grid Nudging에 사용되는 초기 기상장의 오차로 여러 물리과정의 오차가 중첩되어 나타난 것이라 분석되며, 이러한 점은 남서해안과 같은 복잡한 지형에서의 한계를 나타낸다(Lee and Kim, 2009). EP_2에서도 기온과 풍속분포에서 Grid Nudging 효과가 나타났으나, 그 효과는 EP_1보다 상대적으로 작았다.

EP_1의 CASE_GN와 CASE_RS의 차이를 그림 10에 나타내었다. 1500 LST에서 해안경계지역을 중심으로 기온이 상승된 것과 달리 0300 LST에서는 한반도 서해안에서는 최소 1.8°C 기온이 하강되었고, 내륙과 남해안에서는 최대 4.8°C의 기온이 상승되었다. 이를 중심으로 육풍과 해풍 순환계의 변화가 나타났다.

### 3. 5 통계적 검증

모의결과의 검증을 위하여 각 실험의 수치모의 결과와 관측값에 대해 통계적 분석을 실시하였다. 표 4는 두 사례기간에서 도메인 내의 관측지점의 평균적인 RMSE (Root Mean Squared Error), IOA (Index Of Agreement), CORR (Correlation)의 차이를 각 수치모의 개선 방안에 대해 나타낸 것이다. 두 사례기간 모두 고해상도 지형 및 지표이용 자료에 대한 효과는 뚜렷하게 나타났다. 고해상도 해수면 자료의 경우, EP_1에서는 작은 수치이지만 일치정도를 감소시키는 효과를 보였으나 EP_2와 같이 국지적인 해수면 온도 분포가 나타난 사례에서 상대적으로 큰 개선정도를 보였다. 또한, Grid Nudging의 적용으로 상대적으로 풍속모의의 정확도가 크게 향상되었음을 보여주고 있다.

풍력발전은 바람에 의존함으로써, 발전전력의 양과 시스템의 효용성이 풍력자원의 특성에 지배된다. 풍력발전의 성능은 풍속과 상관관계가 크며(Ryu *et al*., 2009), 정확한 풍력발전량을 예측하기 위해서는 풍속

**Table 4. Difference of averaged statistics for each cases between modeled and observed value.**

| | Case | Temperature | | | Wind speed | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RMSE | IOA | CORR | RMSE | IOA | CORR |
| EP_1 | LT-BASE | −0.515 | 0.106 | 0.065 | −0.141 | 0.050 | 0.070 |
| | RS-LT | 0.032 | −0.002 | −0.003 | 0.036 | −0.013 | −0.020 |
| | GN-RS | 0.109 | −0.010 | 0.000 | −0.203 | 0.059 | 0.052 |
| EP_2 | LT-BASE | −0.292 | 0.091 | 0.092 | −0.913 | 0.165 | 0.280 |
| | RS-LT | −0.352 | 0.053 | −0.004 | −0.178 | 0.014 | −0.054 |
| | GN-RS | −0.055 | 0.010 | 0.007 | −0.155 | 0.069 | 0.100 |

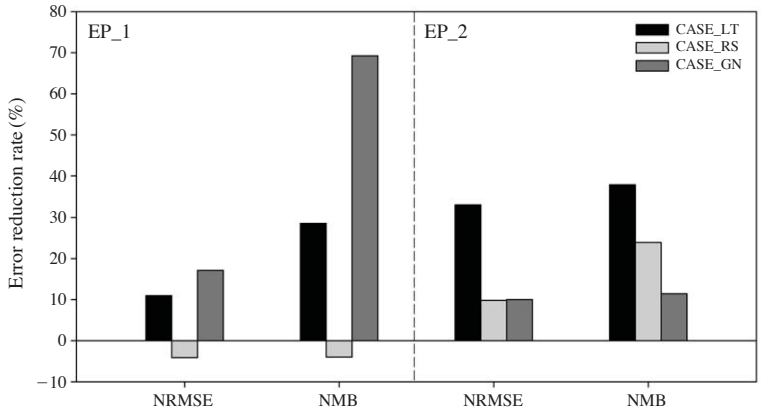


**Fig. 11. Error Reduction Rate (%) of averaged NRMSE and NMB between modeled and observed wind speed.**

예보에서의 높은 정확도가 요구된다. 그림 11은 풍력 발전량 예측 정확도 향상정도를 정량적으로 분석하기 위해 풍속의 NRMSE (Normalized Root Mean Squared Error)와 NMB (Normalized Mean Bias)의 에러감소율 (Error Reduction Rate)을 나타낸 것이다. 에러감소율은 각 개선 방안의 적용으로 인하여 감소한 오차의 비율을 나타내는 것으로, $(STATICS_{PRE} - STATICS_{POST})/STATICS_{PRE} \times 100$으로 계산하였다. EP_1에서는 CASE_GN과 CASE_LT의 정확도 개선 효과가 크게 나타났으며, 특히 CASE_GN은 NMB를 69%의 가장 큰 오차감소율을 보였다. EP_2에서는 CASE_LT가 NRMSE와 NMB를 33%, 37% 감소시켜 가장 뚜렷한 효과를 보이는 것을 확인하였다. 또한 표 4에서 나타낸 통계결과와 마찬가지로 EP_1에서 고해상도 해수면 자료의 에러감소율이 음의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있으나, 이는 Grid Nudging이 전체적인 기상장 개선에 미치는 긍정적인 영향을 고려했을 때 미미한 수치이다. 따라서 전체적인 경향을 판단하기에는 무리가 있으며, 향후 추가적인 분석이 필요하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 복잡한 지형적 특성을 가진 한반도 남서해안을 대상으로 풍력 발전량의 예측 정확도 향상을 목적으로 국지 기상장 수치모의의 개선 방안을 살펴보기 위한 수치실험을 실시하였다.

고해상도 지형 및 토지이용자료의 적용결과 복잡한 해안선의 형태가 모델에 반영되고 실제와 가까운 토지피복을 표현함으로써 토지의 반사도, 수분량, 거칠기 길이 등 물성치가 달라진 해안지역을 중심으로 기온분포에서 실제 관측 값과의 오차가 감소하고, 풍속분포의 과대모의 경향이 감소되어 예보 정확도의 뚜렷한 향상이 확인되었다. 고해상도 해수면온도 자료의 적용 결과 해안 지역을 중심으로 해풍 및 육풍

순환의 변화가 확인되었고, 부이자료를 이용한 검증 시 관측 값과의 일치도가 향상된 것으로 나타났다. 특히 기존의 수치모의에서 나타내지 못했던 한반도 남서해안에 나타난 강한 저온역을 모의하는데 고해상도 해수면 자료의 적용이 중요한 것으로 분석되었다. 한편, Grid Nudging 적용을 통한 자료동화 결과 도메인 전체의 온도 및 풍속 모의 결과 변화가 확인되었고, 특히 수평바람성분에 대한 효과가 온도 및 수증기량에 비해 크게 나타나 풍속모의의 정확도를 크게 향상시켰다. 그러나, 초기 기상장의 오차를 다시 반영시키는 한계가 있었다. 통계분석 결과 또한 BASE CASE보다 수치모의 개선 방안들이 적용되면서 RMSE, IOA, CORR이 개선되었으며, 풍속의 에러 감소율 분석을 통해 각 방안들이 풍력 발전량 예측 정확도 개선에 미치는 영향을 정량적으로 확인하였다. 또한 각 방안들의 효과가 종관장의 성질에 따라 영향정도가 상이한 것을 확인하였다.

이상의 연구결과는 복잡한 지형특성을 가진 연안 지역에서 기상장 수치모의 개선방안들을 적용하면서 뚜렷한 국지 규모의 예보 정확도의 향상을 보였으며, 이는 정확한 풍력 발전량 예측에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구는 특정 사례에 대한 수치모의 연구로써, 수치모의 정확도에 기여할 수 있는 다른 요소들에 대한 분석 및 다양한 사례에 대한 한계가 있어 차후 추가적인 분석이 요구된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국에너지기술연구원의 부처사업인 「신재생에너지자원지도 3.0-표준화 및 예보기술 개발」의 일환으로 수행되었습니다.

## References

Bowden, J.H., T.L. Otte, C.G. Nolte, and M.J. Otte (2012) Examing Interior Grid Nudging Techniques Using Two-way Nesting in the WRF Model for Regional Climate Modeling, American Meteorological Society, 25, 2805-2823.

Byon, J.Y., Y.J. Choi, and B.K. Seo (2010) Characteristics of a Wind Map over the Korean Peninsula Based on Mesoscale Model WRF, Journal of the Korean Meteorological Society, 20(2), 195-210. (in Korean with English abstract)

Byun, U.Y., S.Y. Hong, H. Shin, J.W. Lee, J.L. Song, S.J. Hahm, J.K. Kim, H.W. Kim, and J.S. Kim (2011) WRF-Based Short-Range Forecast System of the Korea Air Force : Verification of Prediction Skill in 2009 Summer, Atmosphere. Korean Meteological Society, 21(2), 197-208. (in Korean with English abstract)

Donlon, C.J., T.J. Nightingale, T. Sheasby, J. Turner, I.S. Robinson, and W.J. Emery (1999) Implication of the Oceanic Thermal Skin Temperature Deviation at High Wind Speed, Geophysical Research letters, 26(16), 2505-2508.

Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model, Journal of the atmosphere sciences, 46(20), 3077-3107.

Fu, G., J. Guo, S.P. Xie, Y. Duan, and M. Zhang (2006) Analysis and high-resolution medeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea, Atmosphere Research, 81, 293-303.

Hong, S.Y. and J.O.J. Lim (2006) The WRF single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), Journal of the Korean Meteological Society, 42(2), 149-151.

Jang, J.K., B.M. Yu, K.W. Ryu, and J.S. Lee (2009) Offshore Wind Resources Assessment around Korean Peninsula by using QuikSCAT Satellite Data, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 37(11), 1121-1130. (in Korean with English abstract)

Janjic, Z.I. (1994) The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Scheme, Americal Meteorological Society, 122, 927-945.

Jeon, W.B., H.W. Lee, S.H. Lee, H.J. Choi, D.H. Kim, and S.Y. Park (2011) Numerical Study on the Impact of Meteorological Input Data on Air Quality Modeling on High ozone Episode at Coastal Region, Journal of Korean Society for Atmosphere Environment, 27(2), 30-40. (in Korean with English abstract)

Jeong, J.H and Y.K. Kim (2009) The Application of High-resolution Land Cover and Its Effects on Near-surface Meteorological Fields in Two Different Coastal Areas, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(5), 432-449. (in Korean with English abstract)

Jeong, J.I. and R.J. Park (2013) A Study of the Effects of SST Deviations on Heavy Snowfall over the Yellow Sea, Atmosphere. Korean Meteorological Society, 23(2), 161-169. (in Korean with English abstract)

Kim, D.W. and H.R. Byun (2008) Spatial and temporal distribution of Wind Resources over Korea, Atmosphere. Korean Meteorological Society, 18(3), 171-182. (in Korean with English abstract)

Korea Wind Energy Industry Association (KWEIA), http://www.kweia.or.kr/.

Kwun, J.H. (2007) Evaluation of Wind Resources in Korea using Wind Map based on the Numerical Modeling, M. S. dissertation, Department of Atmospheric Science, Pusan National University, 81p. (in Korean with English abstract)

Lee, C.B. and J.C. Kim (2009) Evaluation of the CALPUFF Model Using Improved Meteorological Fields in Complex Terrain of East Sea Coast, Journal of Korean Society for Atmosphere Environment, 25(1), 15-25. (in Korean with English abstract)

Lee, H.W., W.B. Jeon, S.H. Lee, and H.J. Choi (2008) Analysis of Numerical Meteorological Fields due to the Detailed Surface Data in Complex Coastal Area, Journal of Korean Sociey for Atmospheric Environment, 24(6), 649-661. (in Korean with English abstract)

Lee, H.W., Y.M. Cha, S.H. Lee, and D.H. Kim (2010) Impact of High-Resolution Sea Surface Temperatures on the Simulated Wind Resources in the Southeastern Coast of the Korean Peninsula, Journal of the Environmental Sciences 19(2), 171-184. (in Korean with English abstract)

Lee, S.H. (2003) Difference of Air Temperature between the West and East Coast Regions of Korea, Asia-Pacific Journal of Atmosphereic Sciences, 39(1), 43-57. (in Korean with English abstract)

Liu, P., A.P. Tsimpidi, Y. Hu, B. Stone, A.G. Russel, and A. Nenes (2012) Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF, Atmospheric Chemistry and Physics, 12(8), 3601-3610.

Liu, W.T. and X. Xie (2007) Ocean-Atmosphere Interaction over Agulhas Extension Meanders, Journal of climate, 20, 5784.

Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Jacono, and S.A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, Journal of Geophysical Research, 102, 16663-16682.

Park, K.H., K.H. Kim, and H.S. Chung (1990) Characteristics Analysis of Domestic Wind Energy Resources, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, 10(2), 3-9. (in Korean with English abstract)

Ryu, G.H., K.S. Kim, J.C. Kim and K.B. Song (2009) A Study on Estimation of Wind Power Generation using Weather Data in Jeju Island, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 58(12), 2349-2353. (in Korean with English abstract)

Thiébaux, J., E. Rogers, W. Wang, and B. Katz (2003) A new high-resolution blended real-time global sea surface temperature analysis, Bulletin of the American meteorological Society, 84(5), 645-656.