

고해상도 해수면온도자료가 한반도 남동해안 풍력자원 수치모의에 미치는 영향

이화운·차영민*·이순환¹⁾·김동혁

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경문제연구소
(2009년 9월 25일 접수; 2009년 10월 27일 수정; 2010년 1월 6일 채택)

Impact of High-Resolution Sea Surface Temperatures on the Simulated Wind Resources in the Southeastern Coast of the Korean Peninsula

Hwa-Woon Lee, Yeong-Min Cha*, Soon-Hwan Lee¹⁾, Dong-Hyeok Kim

Department of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁾*Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Manuscript received 25 September, 2009; revised 27 October, 2009; accepted 6 January, 2010)

Abstract

Accurate simulation of the meteorological field is very important to assess the wind resources. Some researchers showed that sea surface temperature (SST) plays a leading role on the local meteorological simulation. New Generation Sea Surface Temperature (NGSST), Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA), and Real-Time Global Sea Surface Temperature (RTG SST) have different spatial distribution near the coast and OSTIA shows the best accuracy compared with buoy data in the southeastern coast of the Korean Peninsula. Those SST products are used to initialize the Weather Research and Forecasting (WRF) Model for November 13-23 2008. The simulation of OSTIA shows better result in comparison with NGSST and RTG SST. NGSST shows a large difference with OSTIA in horizontal and vertical wind fields during the weak synoptic condition, but wind power density shows a large difference during strong synoptic condition. RTG SST shows the similar patterns but smaller the magnitude and the extent.

Key Words : Sea surface temperature, Coastal sea, Wind resources, WRF

1. 서론

재생 가능 에너지원 중, 풍력은 상대적으로 뛰어난 경제성과 높은 기술력과 함께 기후변화 협약에 의한 온실가스 방출의 억제가 맞물려 좋은 대체 에너지원으로 각광 받고 있다(김과 최, 2002). 향후 국내에서도

실질적인 정부 지원책이 활성화되고 기반 시설이 정비되면, 육상 풍력 발전 시스템의 보급은 가속화될 것으로 예상되고 있다. 하지만 육상에서의 풍력단지 조성은 계획 시 발생할 수 있는 부지사용, 소음, 시계, 전파 등의 거주 환경 및 민원 문제와 같은 많은 한계가 있다. 이에 비해 해상 풍력은 높은 풍력밀도와 고른 풍속-풍향 분포, 초대형 풍력 발전 시스템 건설 가능성 등 육상 풍력단지 조성 시에 발생하는 많은 제약 조건이 없어 좋은 대안이 되고 있다(경 등, 2003).

산악 지역과 바다에 인접한 지역은 비교적 높고 고

*Corresponding Author : Yeong-Min Cha, Department of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Phone: +82-(0)51-583-2651

E-mail: eineinsc@gmail.com

른 풍력밀도를 보인다. 이러한 풍력밀도는 해당 지역의 풍계에 영향을 받는데, 바람장 발달에 있어 산악 지역은 지형에 의한 영향이 크고 해안 지역은 바다에 의한 영향이 크게 작용한다. 특히, 한반도는 3면이 바다로 둘러싸여 있어 바다의 영향을 크게 받는 지역이 많다. 하지만 여태껏 육상과 해상에서의 풍력자원 평가에 대해 따로 연구된 바는 있지만(경 등, 2003; 김 등, 2005), 육지와 바다가 영향을 주고 받는 경계 지역에서의 평가는 제대로 이루어지지 않고 있다.

한반도 남동 지역 인근 해역을 살펴보면, 남해는 수심이 낮아 해상 풍력단지 조성에 적합하지만(김, 2008), 동해는 수심이 깊어 해상 풍력단지 조성에는 무리가 있다. 하지만 동해 인근 해안은 관측값을 토대로 구한 평균 풍속이 높아 육상 풍력단지 조성에 적합할 것으로 보인다(김 등, 2005). 이런 특성을 보이는 남동 해안은 남으로부터 쓰시마 난류의 영향과 북으로부터는 북한 한류의 영향을 동시에 받고 있다. 쓰시마 난류는 쿠로시오 해류의 지류가 북상하여 남해를 지나 대한해협을 지나며 만들어지는데, 주류는 쓰시마 섬 동쪽을 지나 혼슈 연안을 따라 북상하고, 일부는 쓰시마 섬 서쪽을 지나 한반도 동안을 따라 북상하는 동한해류가 된다. 북한 한류는 리만 해류의 연장선상에 있는 한류로 동해의 서쪽을 흐르는 한류계 중 가장 명료하다. 이렇게 쓰시마 난류와(Cho와 Kim, 2000; Katoh, 1994) 북한 한류가 만나는 한반도 남동 인근 해역은 사공간적으로 매우 복잡한 해수면 온도 분포를 보이고 있다.

Burls와 Reason(2008)은 바다와 인접한 지역에서 낮은 고도의 바람과 지표의 플럭스에 대한 수치모의를 향상시키는데 있어 해수면 온도 자료가 중요한 역할을 함을 보였다. LaCasse 등(2007)에 따르면, 고해상도 해수면 온도 자료가 플로리다 난류를 구조적으로 좀 더 상세히 표현하며, 수치모의에 이용하였을 경우 해양에서의 경계층을 좀 더 정확하게 모의함을 보였다. Skillingstad 등(2007)은 LES를 이용하여 중규모의 해수면 온도 전선을 가정하여 해양 경계층의 운동에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 하지만 남동해안과 같이 폭이 좁고 복잡한 구조의 난류가 가지는 해수면 온도가 육지와 바다의 경계 지역에 미치는 영향에 관한 수치모의 연구는 부족한 실정이다.

정확한 바람장을 수치모의 하는 것은 정확한 풍력

자원 산정에 영향을 주고 풍력에너지 사업의 경제적 측면에 있어 매우 중요하다. 한반도 남동 해안은 풍력단지 조성에 적합하며 복잡한 해수면 온도 분포를 가지고 있다. 선행 연구에 의하면, 고해상도 해수면 온도 자료를 바다에서의 하부 경계 조건으로 이용하는 것이 인근 지역의 바람장 수치모의에 향상을 시킴을 보였다. 따라서 본 연구에서는 해당 지역에 적합한 해수면 온도 자료들을 비교하고, 이를 이용하여 한반도 남동 지역의 대기유동장을 Weather Research and Forecasting (WRF) 모형으로 수치모의하여 고해상도 해수면 온도 자료가 국지 바람장과 풍력 자원에 미치는 영향을 비교·분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 해수면 온도 자료

연구에 사용된 해수면 온도 자료는 0.05° 의 높은 공간 해상도를 가지는 두 개의 해수면 온도 자료와 상대적으로 낮은 해상도를 가지는 해수면 온도 자료를 이용하였다. 두 고해상도 해수면 온도 자료 중 하나는 동아시아를 중심으로 북서 태평양을 중심으로 생산되는 해수면 온도 자료로 우리나라에서 주로 쓰이는 일본의 Tohoku University의 New Generation Sea Surface Temperature (NGSST)이고, 다른 하나는 한반도 인근 해역에서 가장 좋은 신뢰도를 보이는 자료로 영국의 Met-office에서 생산되는 Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) 이다(Xie 등, 2008). 위의 두 자료에 비해 해상도가 낮은 자료로는 미국의 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 현업 모형에 이용되고 있는 Real-Time Global Sea Surface Temperature (RTG SST) analyses 이다.

NGSST는 Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE)의 Group for High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project (GHRSSST-PP)의 일환으로 일본의 Tohoku University에서 2003년 9월부터 실시간으로 분석되고 있는 고해상도 해수면 온도 자료이다(Sakaida 등, 2005). 이 해수면 온도 자료는 북서태평양과 오호츠크해, 동해, 황해, 동중국해 전 지역에 대해($13-63N$, $116-166E$) 0.05° 의 공간 해상도로 1000×1000 개의 격자로 하루에 한 번씩 만들

어지고 있다. 자료 생산을 위해 적외 복사 채널인 AVHRR/NOAA, MODIS/Terra and Aqua와 극초단파 복사 채널인 AMSR-E/Aqua이 사용된다(Sakaida 등, 2005). 구름의 영향을 받지 않는 10일간의 AMSR-E SST 합성 자료와 비교를 통해 구름의 영향을 받는 격자값을 제거하고, AMSR-E 자료가 존재하지 않는 해안지역은 이전의 통합 해수면 온도 자료를 이용해 quality control 한 다음, 당일을 포함한 5일간의 위성 해수면 온도 자료를 최적 내삽법을 통해 객관적으로 통합하여 NGSST를 생산하게 된다(Sakaida 등, 2005). 2002년 7월부터 2004년 10월까지의 부이와의 자료 검증은 한 결과, 396,254곳의 지점에서 -0.15°C 의 bias와 0.85°C 의 RMSE 값을 보이고 있다(Sakaida 등, 2005).

OSTIA는 영국의 Met office에서 개발된 고해상도 해수면 온도 자료로, 지구 규모의 수치 기상 예보나 현업 해양 모형과 같은 고해상도 시공간 규모의 모의에의 적용과 미래의 고해상도 지구 또는 지역 규모의 예보 체계를 준비하기 위해 위의 NGSST와 마찬가지로 GHRSSST-PP의 일환으로 고안되었다(Stark 등, 2007). 이 자료는 지구 전체의 해수면 온도와 해빙 농도에 대해 거의 실시간으로 0.05° 의 공간 해상도로 하루에 한번씩 만들어지고 있다. OSTIA는 온도와 염분의 현장 관측 자료와 SSM-I/DMSF의 극초단파와 AATSR/EnviSat, AVHRR-LAC/NOAA 17 and 18, AVHRR-GAC/NOAA 18, SEVIRI/MSG1의 적외 복사 채널과 AMSR-E/Aqua, TMI/TRMM의 극초단파 복사 채널로부터 나온 위성 자료를 최적 내삽법을 통해 bias를 보정하여(Stark 등, 2007), 온도의 일 변화에 독립적인 해수면 온도 자료인 foundation SST와 해빙 자료를 만든다(Donlon 등, 2007). 자료의 검증은 매일 정기적으로 이루어지고 있다. 열대 대서양에서 실시된 EGEE/AMMA 실험에서 나온 M-AERI 복사계의 관측 자료와 비교 한 결과, OSTIA는 -0.17°C 의 bias와 0.39°C 의 RMSE 값을 보이고 있으며(Stark 등, 2008) 최근에는 더 낮은 bias를 보이고 있다(Stark 등, 2007).

RTG SST는 NCEP Marine Modeling and Analysis Branch에서 현행 수치 기상 예보에 사용하기 위해 2차원 변분 자료 동화를 이용하여 2001년 1월 30일 이후로 매일 만들어지고 있다(Thiébaux 등, 2003). RTG

SST는 0.5° 와 0.083° 의 공간 해상도를 가지는 두 자료가 생산된다. 0.083° 자료의 경우 연구 대상 지역에서는 자료가 생산되지 않기 때문에 본 연구에서는 0.5° 의 공간 해상도를 가지는 자료를 이용하였다. 자료 생성에는 현재 NOAA-17 위성의 AVHRR 센서 자료와 배, 부이에서의 가장 최근 관측 자료가 각 격자마다 24시간 평균된다(Thiébaux 등, 2003). 0.5° 의 해상도를 가지는 자료를 부이 값과 비교했을 때 남위, 30° 에서 북위 30° 에서 $0.4\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE 값을 보이며 북위 30° 에서 북위 90° 의 범위에서는 $0.6\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 의 RMSE 값을 가진다(Thiébaux 등, 2003).

2.2. 해수면 온도 자료의 검증과 비교

한반도 남동 인근 해역의 해수면 온도 자료의 정확도를 평가하기 위해, 부이 자료를 이용하였다. Fig. 1은

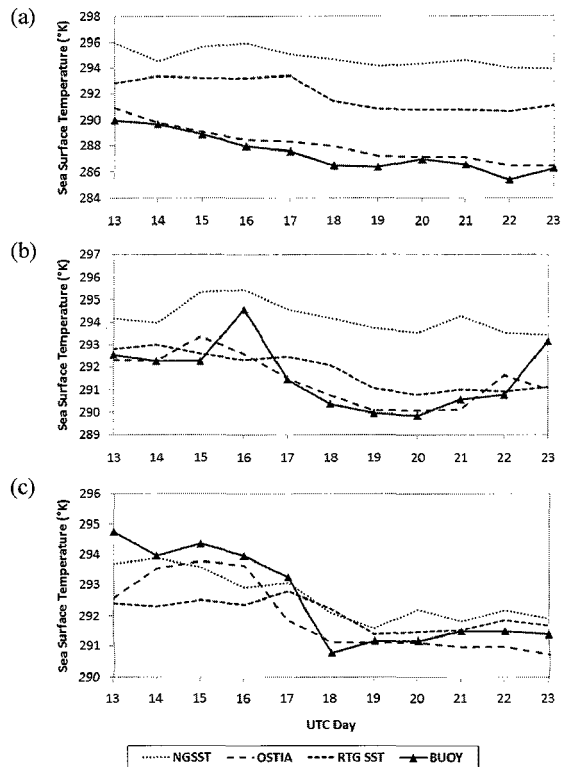


Fig. 1. Time series of sea surface temperatures ($^{\circ}\text{C}$) at (a) Geomun island (22103), (b) Geoje island (22104), and (c) Pohang (22106) buoys. NGSST, OSTIA, RTG SST, and buoy SST are shown. Locations are shown at Fig. 2.

모의 기간동안 NGSST, OSTIA, RTG SST와 부이 자료의 해수면 온도 시계열이다. 부이 자료는 최하위 도메인 영역 안에 들어 있는 거문도, 가덕도, 포항 앞 바다에서 관측된 자료이다. 거문도 부이에서의 시계열을 보면 시간의 흐름에 따라 해수면 온도의 큰 변화가 없지만 OSTIA가 가장 부이의 시계열과 비슷한 모습을 보이고 있고 NGSST의 경우 해상도가 낮은 RTG SST 보다 정확도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 여기서 보이지 않았지만 NGSST의 경우 7.3°C 의 bias와 7.4°C 의 RMSE를 보이고 있고, OSTIA의 경우 0.62°C 의 bias와 0.75°C 의 RMSE를, 해상도가 상대적으로 낮은 RTG SST의 경우 4.5°C 의 bias와 4.6°C 의 RMSE를 보여 위의 시계열을 잘 설명해 주고 있다. 가덕도 부이의 시계열을 보면 거문도에 비해 시계열의 변화가 크게 나타나는데 역시 OSTIA가 부이 자료와 가장 유사한 모습을 보이고 있으며 NGSST의 정확도가 가장 떨어진다. 통계치는 NGSST의 경우 2.6°C 의 bias와 2.8°C 의 RMSE를, OSTIA의 경우 -0.19°C 의 bias와 0.99°C 의 RMSE를, RTG SST의 경우 0.22°C 의 bias와 1.2°C 의 RMSE를 보이고 있다. 포항 부이는 앞의 두 부이 지점에 비해 전체적으로 위성의 해수면 온도 자료가 부이 값과 비슷한 값을 보이고 있다. 하지만 OSTIA가 역시 부이의 해수면 온도와 가장 유사한 시계열 변화를 보여주고 있다. 통계치는 NGSST의 경

우 0.12°C 의 bias와 0.79°C 의 RMSE를, OSTIA의 경우 -0.57°C 의 bias와 0.87°C 의 RMSE를, RTG SST의 경우 -0.47°C 의 bias와 1.2°C 의 RMSE를 보이고 있다. OSTIA의 경우 전 지점에서 대체적으로 부이 자료와 유사한 값을 보이지만, NGSST의 경우 거문도에서는 부이 자료 매우 큰 차이를 보이고 포항에서는 큰 차이를 보이지 않는다. OSTIA는 해수면 온도를 생산할 때 일 변화하는 복사 효과를 제거하여 만드는 반면, NGSST는 반대다. 한반도 서해안과 남해안은 수심이 낮은 지역으로 해수면 온도의 일변화가 크게 나타나 NGSST의 포항에서의 높은 온도에 보여주는 것으로 보인다(Guan과 Kawamura, 2004; Sakurai 등, 2005).

비교 관측 자료의 적은 표본 수로 인해 OSTIA가 가장 정확한 값을 가진다고 보기는 어렵다. 하지만 자료간의 비교를 위해 최하위 도메인 내에서 정확도가 가장 높은 OSTIA와 다른 두 해수면 온도 자료의 온도 차이를 모의 기간 동안 평균하여 수평 공간 분포를 그려 보았다(Fig. 2). NGSST의 경우 OSTIA에 비해 전체적으로 높은 해수면 온도 차이를 보이고 있는데 특히 해안선 가까이 질수록 온도 차이가 많이 나고 있으며, $2\sim 6^{\circ}\text{C}$ 의 온도 차이를 보이고 있다. 이는 앞의 거문도에서의 NGSST의 높은 해수면 온도를 잘 보여주고 있다. RTG SST의 경우도 NGSST와 마찬가지로 해안선 가까이에서 가장 큰 온도 차이를 보이고 있지

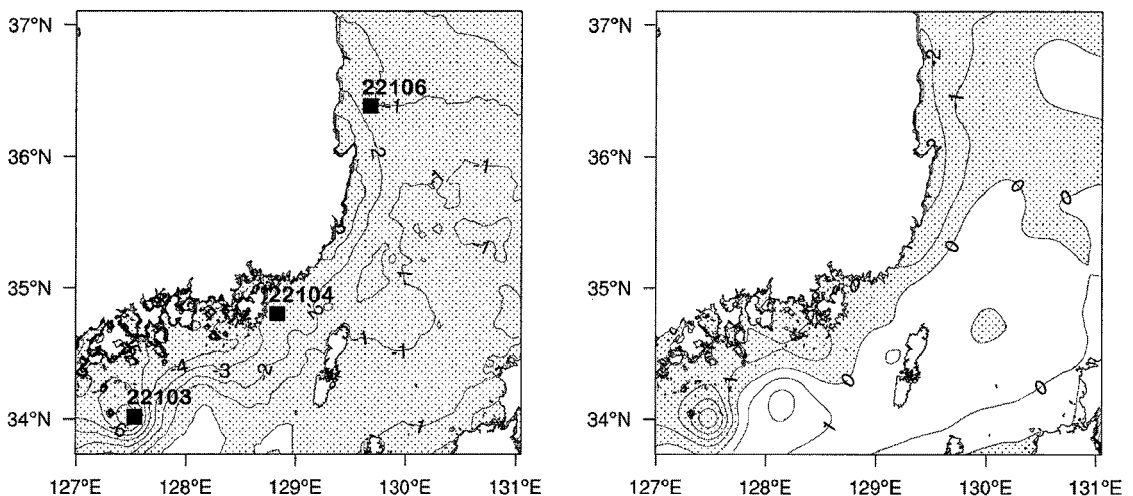


Fig. 2. Mean differences (contours, every 1°C ; dotted area, negative) of sea surface temperature (left) between OSTIA and NGSST, and (right) between OSTIA and RTG SST during 10 days at domain 3. Domain information is shown at Fig. 3. Squares on the left indicate locations of buoys used for data validation.

만, 그 크기와 범위는 NGSST보다는 작다.

2.3. 실험 설계

본 연구에 사용된 대기 모형은 WRF의 연구용 모형인 ARW (version 3.1)(Skamarock 등, 2008)로 완전 압축성, 오일러 비정역학적 (fully compressible, Eulerian and nonhydrostatic) 방정식계를 사용하며 스칼라 변수에 대해 보존적이다. 지형을 따르는 정역학적 기압연직 좌표계와 Arakawa C-grid staggering을 수평 격자로 사용한다. 모형에 사용되는 시간 적분에는 2차 또는 3차 Runge-Kutta scheme이 수평과 연직의 공간으로는 2차에서 6차까지 discretization이 가능하다. 연구에 사용된 물리과정은 다음과 같다. 미물리에는 WRF Single-Moment 6-class (WSM-6) scheme, 장파 복사에는 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) scheme, 단파복사에는 Dudhia scheme, 지표면 모형은 Noah Land Surface Model, 경계층에는 Yonsei University (YSU) scheme, 구름 모수화에는 Grell 3d ensemble cumulus scheme이 사용되었다.

WRF 모의의 계산 영역은 Fig. 3과 같이 한반도 남동 지역을 중심으로 3개의 도메인을 각각 84×84 , 94×94 , 127×127 개의 수평 격자점과 27 km, 9 km, 3 km의 해상도, 그리고 모두 35개의 연직 층으로 구성되어 있다. 모형의 모의 기간은 2008년 11월 13일 0900 LST부터 23일 0900 LST까지 10일간으로 기간을 선정했다. 이 기간을 모의 기간으로 선정한 이유는 비교적 약한 종관장과 강수가 거의 없는 건조하고 맑은 날이기 때문이다. 이런 날은 바람장 형성에 있어 해수면 온도의 역할이 주도적으로 작용한다. 건조한 기간을 선택한 추가적인 이점은 해수면 온도 자료의 질에 있어 구름으로 인한 오류의 정도가 작으며, 약한 종관장으로 인해 큰 규모의 강제력에 의해 발생하는 잘못된 경계값 문제를 고려하지 않고 독립적이고 계산적으로 효율적인 모형의 격자를 구성할 수 있게 하기 때문이다(Cho와 Kim, 2000). 연구에 사용된 초기 및 경계 입력 자료는 NCEP에서 제공하는 FNL (Final) Operational Model Global Tropospheric Analyses 자료를 사용하였다. 이 자료는 1° 의 공간 해상도와 6시간의 시간 해상도를 가진다.

풍력자원 평가에 있어 바람의 정확한 예측은 매우 중요하다. 본 연구에서 살펴보고자 하는 해수면 온도

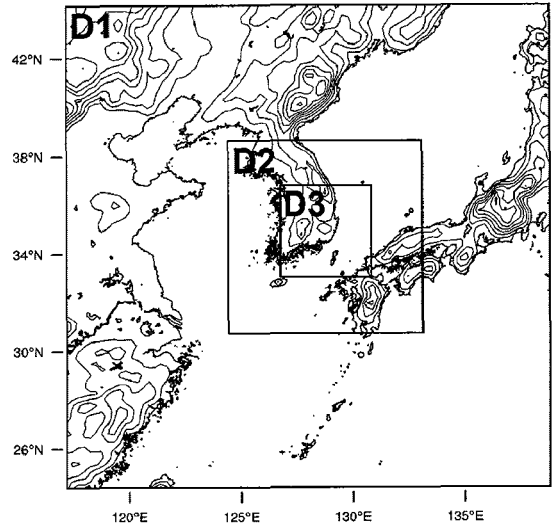


Fig. 3. Simulated WRF domain. Domain 1 (D1) has 84×84 horizontal grids and 27 km resolution. Domain 2 (D2) has 94×94 grids and 9 km resolution. Domain 3 (D3) has 127×127 grids and 3 km resolution.

자료에 의해 바람에 영향을 미치는 과정은 다음과 같다. 해수면 온도의 차이는 지표 열속에 변화를 주고, 바로 위 경계층의 열적 성질을 변화시킨다. 따뜻한/차가운 해수면 온도는 해면 기압을 낮추고/높이고, 기압 경도를 변화시킴으로서 지표 바람을 가속/감속시킨다. 하지만 바람이 형성되는 단계적 과정보다는 풍력에 있어 가장 중요한 바람에 초점을 맞추어 수평과 연직으로 살펴보고, 이를 토대로 풍력에너지를 산정하였다.

기상장의 성질은 종관장의 영향을 크게 받는다. 바람에 기여하는 해수면 온도 자료의 영향 또한 종관장의 강도에 따라 달라진다. 종관장이 약한 날에는 바람에 기여하는 해수면 온도의 영향이 크지만, 강한 종관장은 해수면 온도가 바람의 형성에 기여하는 영향보다 훨씬 크기 때문에 그 영향력이 감소한다. 그러므로 본 연구에서는 종관장이 약한 날과 강한 날을 분리하여 해수면 온도가 미치는 영향을 분석하였다. 종관장의 상태는 일기도와 일평균 풍속 자료를 토대로 하여 선정하였다. Fig. 4의 일기도는 종관장이 약한 날과 강한 날의 대표일이다. 2008년 11월 15일은 약한 종관장의 대표일로서 저기압이 한반도 북부에 자리 잡고 있지만 위치가 멀고 등압선 간격이 넓어 약한 종관풍

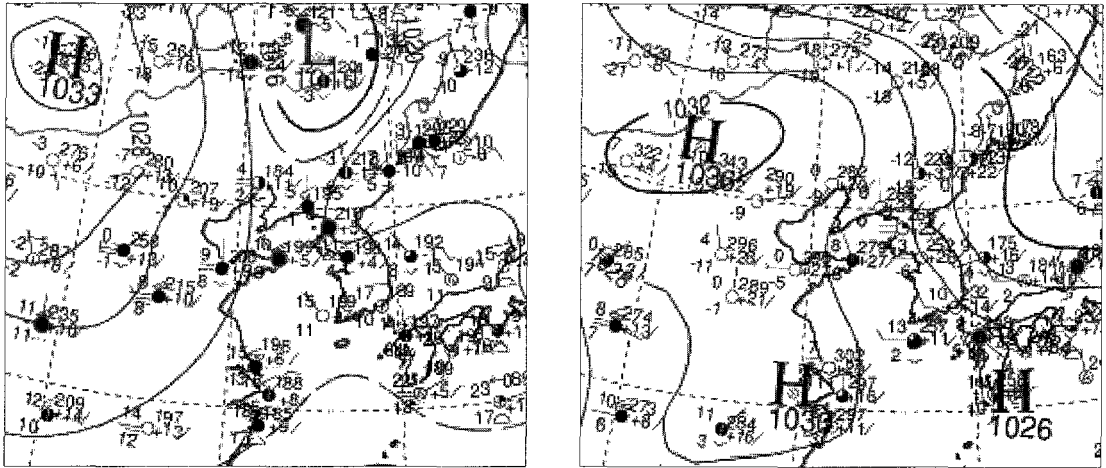


Fig. 4. Surface weather charts on (left) 0900 LST 15 November 2008 and (right) 0900 LST 21 November 2008.

과 중규모 국지풍의 발달이 예상된다. 2008년 11월 21일은 중국 북동부의 고기압의 발달로 등압선 간격이 좁아져 강한 종관풍이 예상된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모의 결과 검증

수치 모의 결과를 통계적으로 검증하기 위해, 앞에

서 보았던 종관장이 약한 날과 강한 날에 대해 지상으로부터 2 m 높이의 온도와 10 m 높이의 풍속을 관측 자료와 비교하여 ME (Mean error), RMSE (Root mean square error), IOA (Index Of Agreement)를 구하였다. Table 1은 앞에서 보인 종관장이 약한 날과 강한 날의 대표일에 대하여, 해수면 온도 자료를 이용한 세 경우의 모형 결과 값과 해안에서 가까운 11개 지점

Table 1. Statistics of ME, RMSE, and IOA between simulated model results (temperature and wind speed) using three sea surface temperature data and meteorological observation data at (a) 0900 LST 15 November 2008 and (b) 0900 LST 21 November 2008 at domain 3.

(a)		NGSST	OSTIA	RTG SST
Temperature	ME	-0.25	-0.60	-1.05
	RMSE	1.77	1.73	1.94
	IOA	0.99	1.00	0.99
Wind speed	ME	1.57	0.47	1.30
	RMSE	2.41	1.74	2.25
	IOA	0.75	0.79	0.77
(b)		NGSST	OSTIA	RTG SST
Temperature	ME	-0.56	-1.01	-0.82
	RMSE	2.23	2.27	2.21
	IOA	0.97	0.97	0.97
Wind speed	ME	0.97	0.93	0.98
	RMSE	2.28	2.29	2.32
	IOA	0.92	0.91	0.91

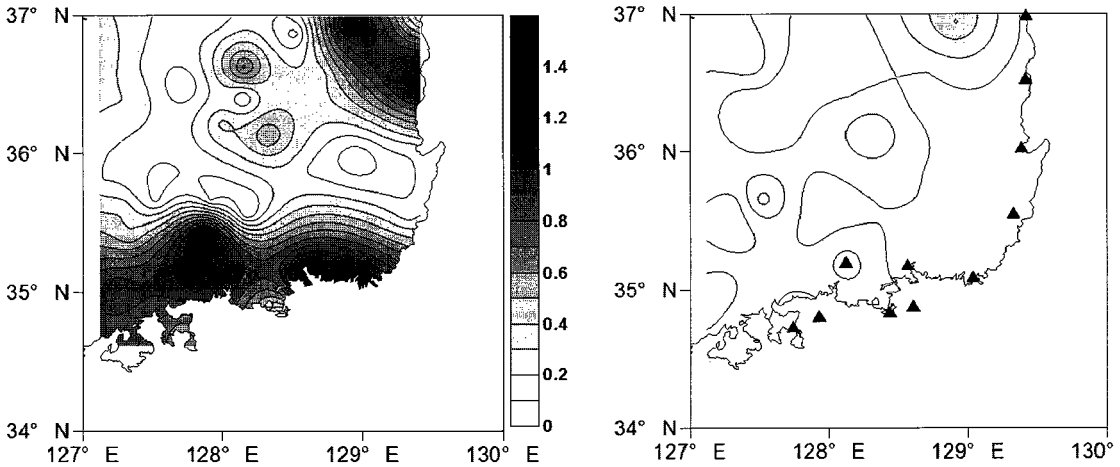


Fig. 5. RMSE difference (contours, every 0.1) of wind speed between OSTIA and NGSST on (left) 15 November 2008 and (right) 0900 LST 21 November 2008. Triangles of the right are meteorological observatory using in Table 1.

의 기상대에서 관측한 값을 비교하여 구한 값이다. 기상대 지점은 Fig. 5에 나타내었다. 종관장이 약한 날은 전체적으로 종관장이 강한 날에 비해 자료간 통계값 차이가 더 크게 난다. 종관장이 강한 날의 경우 온도와 풍속의 ME, RMSE, IOA 모두 모의에 있어 우수한 결과를 보이는 해수면 온도 자료는 보이지 않는다. 하지만 종관장이 약한 날의 경우 온도는 큰 차이를 보이지 않지만, 풍속은 그 차이가 두드러지게 나타난다. ME는 OSITA, RTG SST, NGSST가 각각 0.47, 1.3, 1.57의 값을, RMSE는 각각 1.74, 2.25, 2.41의 값을, IOA는 0.79, 0.77, 0.75를 보여 OSTIA가 가장 좋은 결과를 보이고 의외로 NGSST가 가장 좋지 않은 결과를 보이고 있다. 이는 앞의 해수면 온도 자료와 부이 관측값 비교 결과와도 잘 일치한다.

해수면 온도 차이에 따른 풍속의 RMSE 차이를 좀 더 자세히 보기 위해 수평적으로 그려 보았다 (Fig. 5). 그림을 보면 전체적으로 해안 가까이에서 RMSE 차이가 크게 나고 내륙으로 갈수록 그 차이가 작아지는 것을 볼 수 있다. 내륙에서도 RMSE가 크게 나는 것을 볼 수 있는데, 이 지역들은 제곱과 같이 바람이 지나다니는 통로로 그 영향이 내륙까지 미치기 때문인 것으로 보인다.

3.2. 기상장 차이 분석

Fig. 6은 지표로부터 10 m에서의 풍속을 종관장이 약한 날과 강한 날의 대표일에 대해 하루의 일변화를 나타낸 것이다. Fig. 6의 왼쪽 그림은 약한 종관 상태

일 때의 일변화이며, 오른쪽 그림은 강한 종관 상태일 때의 일변화이다. 포항의 경우 종관장이 약한 8월 15일의 경우 자료간 시간별 표준 편차 평균이 1.47이 나왔고, 종관장이 강한 8월 21일에는 0.48로 차이가 거의 나지 않았다. 부산의 경우에는 15일에는 1.4, 21일에는 0.53이 나왔고, 통영의 경우에는 1/0.3, 여수의 경우에는 1.22/0.29, 남해의 경우에는 1.24/0.4의 값이 나왔다. 전체적으로 종관장이 약한 15일의 자료간 풍속 차이가 크게 나타나고, 종관장이 강한 21일은 자료에 상관없이 대체적으로 유사한 모습을 보이고 있다. 이는 종관장이 약할 경우 해안 근처에서 발생하는 국지규모의 바람장이 해수면 온도의 영향을 크게 받기 때문이다. 또한 남해에 인접한 통영, 여수, 남해에서 NGSST에 의해 모의된 야간의 풍속이 크게 나타난다. 이는 앞서 해수면 온도 자료 검증에서 보았듯이 남해에서 NGSST가 높은 값을 가지므로 야간에 육지와 바다의 온도차가 다른 두 자료에 비해 더 크게 나타나고 이는 육풍의 강도를 더 강화시켰기 때문인 것으로 보인다. 또 특이할 점은 OSTIA의 경우 차이는 있지만 정오를 중심으로 풍속이 거의 0에 가까워졌다가 다시 강화되는 시점이 생기는데 이는 다른 두 자료에 비해 더 확실하게 나타난다. 특히, 이 시간대의 자료간 풍속 차이가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 앞서 검증에서 보았듯이 가장 정확도가 높은 OSTIA를 해수면 온도 입력 자료로 사용하여

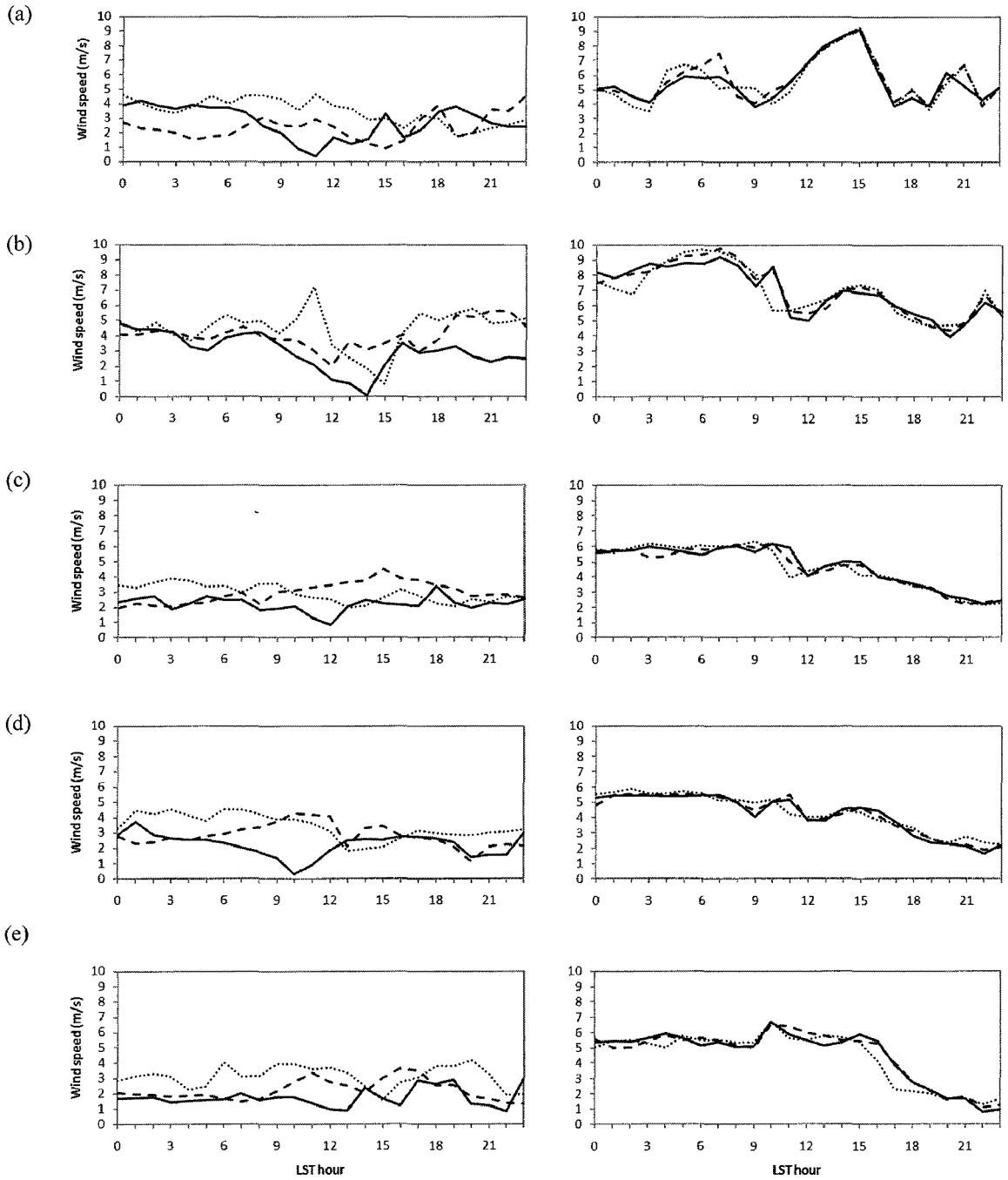


Fig. 6. Diurnal variations of wind speed using NGSST (circular dotted line), OSTIA (solid line), and RTG SST (dashed line) at 10m height as a result of simulation at (a) Pohang (138), (b) Busan (159), (c) Tongyeong (162), (d) Yeosu (168), and (e) Namhae (295) on (left) 15 November 2008 and (right) 21 November 2008.

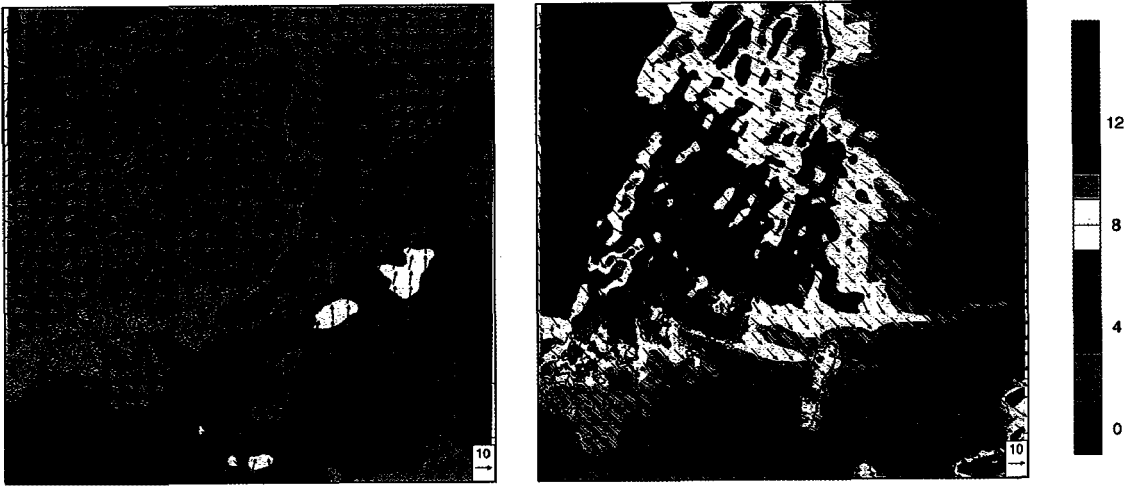


Fig. 7. Mean wind field (contours, every 1 ms^{-1}) at 10m height using OSTIA on (left) 1200 LST 15 November 2008 and (right) 1200 LST 21 November 2008 at domain 3.

모의한 결과를 종관장의 상태에 따른 대표일의 12 LST의 바람장을 나타낸 것이다. 종관장이 약한 15일 12 LST의 바람장을 살펴보면, 육지에서는 일사에 의해 국지 바람이 주를 이루고 $0\sim 3 \text{ ms}^{-1}$ 의 약한 풍속을 가진다. 바다에서 또한 일정한 방향의 바람이 아닌 국지적인 모습을 보이고 있다. 특히 부산 동쪽 앞 바다에서 나타나는 약한 풍속대와 수렴하는 바람 벡터는 쓰시마 난류에 의한 것으로 보인다. 이는 해수면 온도에 따라 달라질 수 있는 쓰시마 난류의 크기나 온도가 인

근 연안 바람장 형성에 영향을 줄 것으로 예상된다. 풍속은 $3\sim 7 \text{ ms}^{-1}$ 의 크기를 가진다. 종관장이 강한 21일 12LST의 바람장은 전체적으로 강한 북서풍 계열의 종관풍이 부는 것을 확인할 수 있다. 육지에서는 풍속이 4 ms^{-1} 에서 최대 13 ms^{-1} 의 크기를 가지고 바다에서는 6에서 최대 13 ms^{-1} 이상의 풍속을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 OSTIA를 사용하여 모의한 고도 10 m에서의 풍속에 대하여 NGSST와 RTG SST를 사용하여 모의한 풍속과의 차이를 종관장이 약한 15일

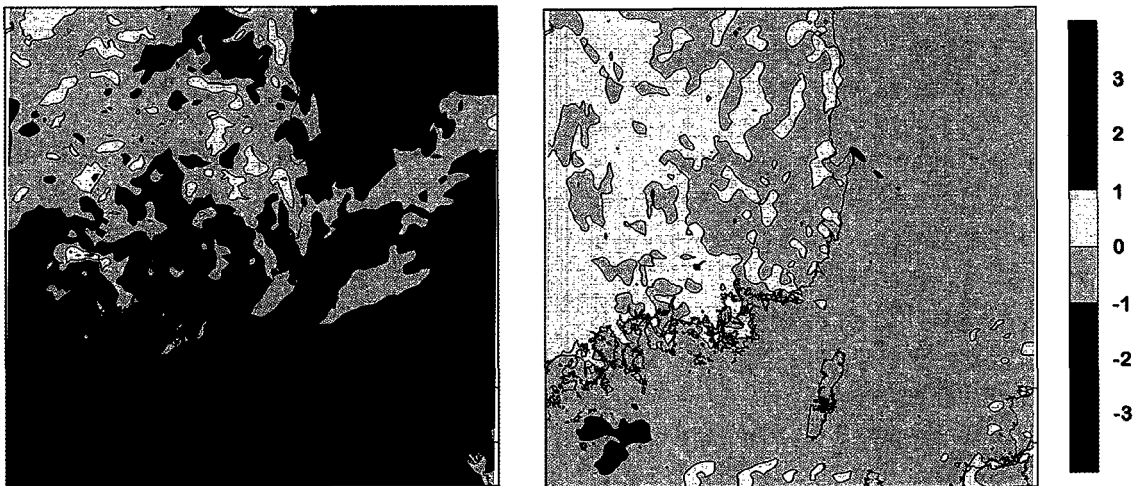


Fig. 8. Difference (contours, every 1 ms^{-1}) of averaged wind speed (ms^{-1}) at 10 m height between OSTIA and NGSST on (left) 15 November 2008 and (right) 21 November 2008.

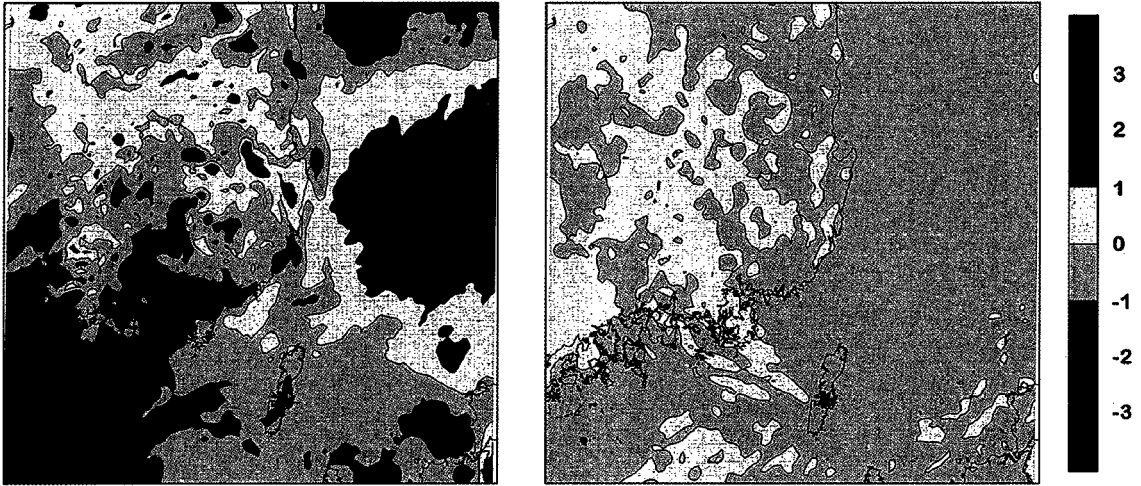


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for difference between OSTIA and RTG SST.

과 종관장이 강한 21일에 대하여 평균하여 나타낸 그림이다. 먼저 Fig. 8을 보면 종관장이 약한 15일의 평균 풍속 차이가 종관장이 강한 21일의 평균 풍속 차이보다 크게 나는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 살펴 본 결과들과 잘 일치한다. 공간적으로 살펴보면, 15일은 해수면 온도의 영향을 직접적으로 받는 바다에서 그 차이가 더 크게 나타나는 반면 21일은 해수면 온도 차이가 육지와 바다에서 별 차이가 없다. 풍속 차이가 많이 나는 15일을 집중적으로 살펴보면, NGSST는 도메인 영역 내의 거의 모든 지역에서 더 강한 바람을 모의하고 있다. 11월의 15일의 육지 온도는 정오에도 바다보다 낮은 온도 분포를 보이고 NGSST의 경우 바다에서 더 높은 온도 분포를 보이고 있다 (나타내지 않음). 그러므로 육지와 바다간의 온도 차이가 더 큰 NGSST의 경우 더 강한 바람을 모의한 것으로 보인다. 21일에도 이러한 조건은 유효하지만, 종관장이 바람장 형성에 더 주도적인 역할을 함으로 인해, OSTIA와 NGSST의 풍속 차이는 크지 않다.

Fig. 9를 보면 RTG SST를 사용한 경우 전체적으로 NGSST의 경우와 비슷한 결과를 보이고 있다. 종관장이 강한 21일의 경우 풍속의 차이가 크지 않은데 비해, 종관장이 약한 15일의 경우 풍속 차이가 상당히 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 다른 점은 RTG SST의 경우 동해에서 OSTIA보다 약한 바람을 모의하고 있는데, 이 역시 해수면 온도에 의한 것이다. 이 날의 포항

앞바다의 RTG SST의 해수면 온도는 OSTIA보다 높은 온도 분포를 보여, RTG SST의 육지와 바다간의 온도 차이가 OSTIA보다 작기 때문이다.

이러한 바람의 수평차이를 연직적으로 알아보기 위해 포항에서의 연직 평균 풍속을 종관장이 약한 15일과 종관장이 강한 21일에 대하여 구해 보았다 (Fig. 10). 15일은 일정 고도 이상에서 공기의 혼합으로 인한 일정한 풍속 잘 보여 주고 있고, 해수면 온도마다 일정 고도까지 풍속 차이가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 21일은 고도에 따라 증가하는 풍속을 보이고 있지만, 해수면 온도에 따른 풍속의 차이는 크지 않다.

3.3. 풍력밀도 차이 분석

풍속의 분포는 해수면 온도에 따라 다르게 나타났으며, 이 차이는 연직적으로도 차이가 나는 것을 보았다. 특히, 메가 와트(Mega Watt)급의 대형 풍력발전기가 설치 가능한 높이인 100 m 고도에서도 유효한 것으로 나타났다. Fig. 11과 Fig. 12는 종관 상태에 따라 고도 100 m에서 OSTIA와 NGSST, RTG SST 각각에 대해 풍력밀도 차이를 모의 기간에 대해 종관풍이 약한 날과 강한 날을 구분하여 평균하여 구한 것이다. 풍력밀도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$WPD(Wm^{-2}) = \frac{1}{2} \rho V^3$$

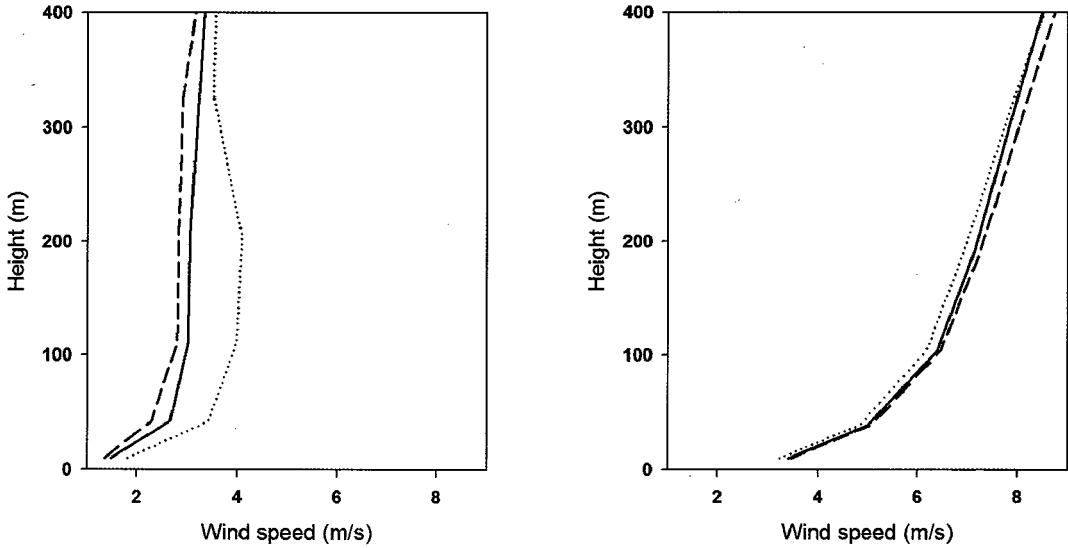


Fig. 10. Mean wind speed (ms^{-1}) profiles using NGSST (circular dotted line), OSTIA (solid line), and RTG SST (dashed line) on (left) 15 November 2008 and (right) 21 November 2008 at Pohang.

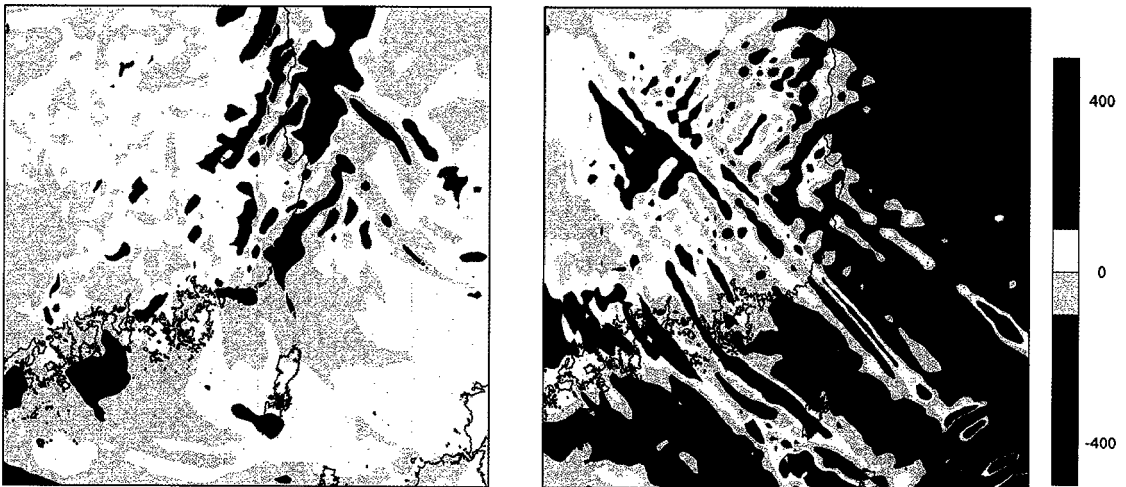


Fig. 11. Difference of wind power density (Wm^{-2}) at 100 m height between OSTIA and NGSST under weak synoptic condition (left) and strong synoptic condition (right).

$$\begin{aligned} WPD(\text{Wm}^{-2}) &= \frac{1}{2} \left(\frac{P}{R_d T_v} \right) V^3 \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{P}{R_d (1 + 0.61q) T} \right) V^3 \end{aligned}$$

여기서 식 (1)의 ρ 는 공기의 밀도, V 는 수평 풍속이고, 식 (2)의 P 는 기압, R_d 는 건조공기의 기체상수, T_v

는 가온도 그리고 q 는 비습을 나타낸다. 식 (2)는 식 (1)에서 수증기를 고려하기 위해 이상기체 방정식을 사용하여 나타낸 것으로 보다 정확한 풍력에너지를 산출하게 한다.

Fig. 11의 종관장이 약한 날 OSTIA와 NGSST 경우의 차이를 보면, 동해의 해안 경계에서 집중적으로

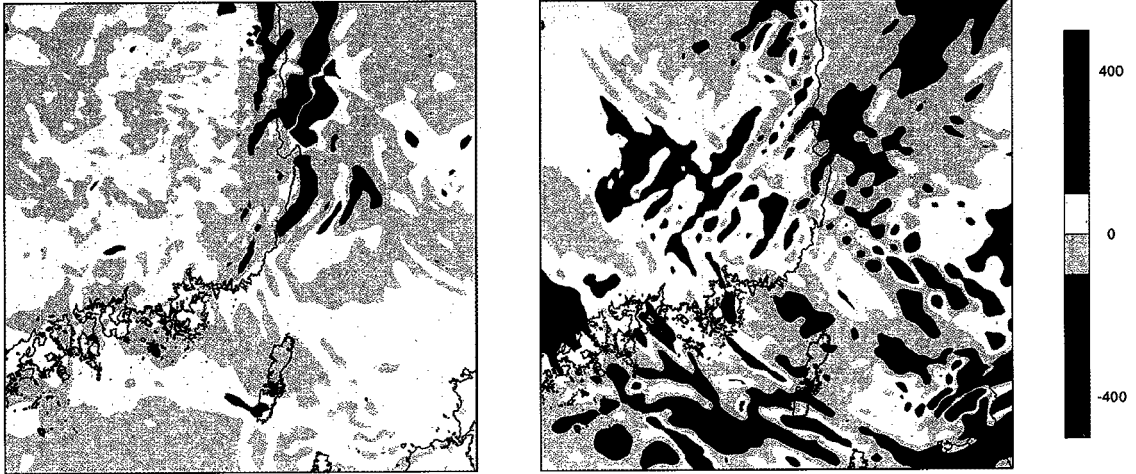


Fig. 12. Same as Fig. 11 except for difference between OSTIA and RTG SST.

크게는 400 Wm^{-2} 이상의 큰 에너지 밀도 차이를 보이고 있다. 평균 풍속의 경우 남해 부근에서 더 넓은 범위에서 더 큰 차이를 보였지만, 에너지 밀도의 경우 동해에서 더 큰 차이를 보이는 이유는 위 식에서 확인할 수 있다. 동해에서의 평균 바람의 크기가 동해에서 더 크게 나타내기 때문에 (나타내지 않음) 풍속의 3승을 하였을 경우 바람이 강해질수록 그 차이는 더 커진다. 이 차이는 종관장이 강한 날의 경우에서 다시 확인할 수 있다. 종관장이 강한 날의 평균 풍속 차이는 약한 날보다 작았지만 에너지 밀도 차이는 전 지역에 걸쳐 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 에너지 밀도에 있어 평균 풍속 차이보다는 그 크기가 더 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있다. 종관장이 강한 날, 에너지 밀도 차이의 등치선이 북서에서 남동 방향으로 그려져 있는 것은 산악 지형에 기인한 것으로 보인다. 강한 바람이 산악을 지날 때 형성되는 중력파가 육지 내륙에서 형성되어 바다까지 이어지고 있다.

Fig. 12의 OSTIA와 RTG SST 경우의 풍력밀도 차이도 NGSST의 경우와 크게 다르지 않지만, 더 낮은 해상도를 가지고 있음에도 NGSST의 경우보다 오히려 OSTIA와 에너지 밀도의 크기와 범위에 있어 차이가 작다.

4. 결 론

풍력 자원 산정에 있어 바람장의 정확한 수치모의

는 매우 중요하다. 본 연구는 풍력단지 조성에 적합하며 복잡한 해수면 온도 분포를 보이는 한반도 남동해역의 해수면 온도 자료를 비교하고, 해수면 온도 자료의 차이가 바람장과 풍력에너지 산정에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에 살펴본 해수면 온도 자료는 0.05° 의 공간 해상도를 가지는 NGSST, OSTIA와 0.5° 의 공간 해상도를 가지는 RTG SST다. 바람장 수치 모의를 위해 WRF를 사용하였으며, 해양의 바닥 경계 자료로 앞의 세 해수면 온도 자료를 이용하였다. 모의 기간은 2008년 11월 13일 0900 LST부터 23 09 LST까지 10일간이다.

수치모의에 앞서 해수면 온도 자료를 부이 관측값과 비교한 결과 OSTIA가 가장 좋은 결과를 보였으며, 해상도가 낮은 RTG SST가 NGSST보다 오히려 좋은 결과를 보였다. 특히 남해에서 자료간 해수면 온도 차이가 큰 것은 자료 생성시 해수면 온도의 일 변화 제거 유무와 관련이 있다. 정확도가 높은 OSTIA를 기본으로 하여 NGSST와 RTG SST를 비교하였을 때, 두 자료 모두 해안에 가까울수록 OSTIA보다 높은 해수면 온도를 가졌고 NGSST가 RTG SST보다 차이의 범위와 크기가 컸다.

모의 결과를 분석함에 있어 종관장의 강도에 대표일을 선정하여 따로 분석하였다. 종관장이 약한 날의 대표일은 2008년 11월 15일이고 강한 날은 2008년 11월 21일이다. 종관장이 강한 날의 경우 통계 검증에

있어 자료간의 큰 차이는 없었다. 종관장이 약한 날은 온도에 있어서는 큰 차이가 없지만, 풍속의 경우 OSTIA가 ME, RMSE, IOA 모두 가장 좋은 결과를 보였고, 해상도가 낮은 RTG SST가 NGSST보다 더 좋은 결과를 보였다. 이러한 차이는 해수면 온도가 바람장에 직접적으로 영향을 주는 해안 근처에서 더 크게 나타났다. 대표일에 대하여 다섯 지점에서 시계열을 비교하였을 때 역시 종관장이 강한 날은 자료별 큰 차이가 없었지만, 종관장이 강한 날은 큰 차이를 보였다. 특히 NGSST의 경우 남해에서 야간에 높은 풍속을 보이고 있는데, 이는 NGSST의 높은 해수면 온도로 인한 육지와 바다간의 온도 차이가 크기 때문인 것으로 보인다. OSTIA를 기준으로 하여 NGSST와 RTG SST의 대표일의 평균 풍속 차이를 보면 둘 모두 종관장이 강한 날은 큰 차이가 없는 것으로 나왔다. 종관장이 약한 날의 경우 NGSST는 전 지역에 풍속을 더 크게 모의하는 것으로 나타났는데 이는 전체적으로 해안 근처에서 높은 해수면 온도 분포가 육지와 바다간의 온도 차이를 크게 만들어 국지 바람장을 강화시킨 것으로 보인다. RTG SST의 경우 해수면 온도가 높은 남해에서는 풍속을 크게 모의하고, 해수면 온도가 낮은 동해에서는 풍속을 작게 모의해 바람장이 해수면 온도 분포에 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 이러한 자료별 차이는 연직적으로도 유효한 것으로 보인다.

풍력에너지 산정을 위해 종관장이 약한 날과 강한 날을 평균하여 풍력밀도를 산정하였다. 풍력에너지는 바람장의 분석 결과와는 반대로 종관장이 강한 날 그 차이가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 풍력밀도를 구하는 식에서 확인할 수 있다. 종관장이 약한 날 해수면 동해에서 해수면 온도 차이가 작음에도 불구하고 에너지 밀도 차이가 많이 나는 것 역시 풍속이 강하기 때문이다. 종관장이 약한 날은 해수면 온도 차이가 나는 곳을 중심으로 풍력밀도 차이가 많이 보이고 있고, 종관장이 강한 날에는 전 지역에 걸쳐 차이가 상당하며 크게는 400 Wm^{-2} 이상의 에너지 밀도 차이를 보이고 있다. 고해상도임에도 불구하고 NGSST는 RTG SST보다 OSTIA와 더 큰 에너지 밀도 차이를 보이고 있다.

이상의 연구결과는 해수면 온도 자료가 국지적 바람장뿐만 아니라 풍력밀도 산정에 있어서도 상당한

영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 적절한 해수면 온도 자료의 사용은 정확한 풍력에너지를 산정하는데 기여할 수 있을 것으로 기대되며 해수면 온도 자료의 해상도보다는 정확도가 더 중요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 2003, 한반도해역의 해상 풍력자원 평가, 한국태양에너지학회 논문집, 23(2), 35-41.
- 김현구, 2008, 남한 풍력자원 잠재량의 예비적 산정, 한국태양에너지학회 논문집, 28(6), 1-7.
- 김현구, 이화운, 정우식, 2005, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력자원 평가, 한국대기환경학회지, 21(1), 63-72.
- 김현구, 최재우, 2002, 풍력에너지 이용 및 개발현황, RIST 연구논문, 16(4), 479-485.
- Burls, N., Reason, C. J. C., 2008, Modelling the sensitivity of coastal winds over the Southern Benguela upwelling system to different SST forcing, *Journal of Marine Systems*, 74(1-2), 561-584.
- Cho, Y. K., Kim, K., 2000, Branching Mechanism of the Tsushima Current in the Korea Strait, *Journal of Physical Oceanography*, 30(11), 2788-2797.
- Donlon, C., Robinson, I., Casey, K. S., Vazquez-Cuervo, J., Armstrong, E., Arino, O., Gentemann, C., May, D., LeBorgne, P., Piollé, J., Barton, I., Beggs, H., Poulter, D. J. S., Merchant, C. J., Bingham, A., Heinz, S., Harris, A., Wick, G., Emery, B., Minnett, P., Evans, R., Llewellyn-Jones, D., Mutlow, C., Reynolds, R. W., Kawamura, H., Rayner, N., 2007, The Global Ocean Data Assimilation Experiment High-resolution Sea Surface Temperature Pilot Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(8), 1197-1213.
- Guan, L., Kawamura, H., 2004, Merging satellite infrared and microwave SSTs: methodology and evaluation of the new SST. *Journal of Oceanography*, 60(5), 905-912.
- Katoh, O., 1994, Structure of the Tsushima Current in the southwestern Japan Sea, *Journal of Oceanography*, 50(3), 317-338.
- LaCasse, K. M., Splitt, M. E., Lazarus, S. M., Lapenta, W.

- M., 2008, Impact of High-Resolution Sea Surface Temperatures on the Simulated Nocturnal Florida Marine Boundary Layer, *Monthly Weather Review*, 136(4), 1349-1372.
- Sakaida, F., Takahashi, S., Shimada, T., Kawai, Y., Kawamura, H., Hosoda, K., Guan, L., 2005, The production of the new generation sea surface temperature (NGSST-O Ver.1.0) in Tohoku University, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International 4*, 2602-2605.
- Sakurai, T., Yukio, K., Kuragano, T., 2005, Merged satellite and in-situ data global daily SST. *geoscience and remote sensing symposium, 2005, IGARSS'05. Proceedings of the 2005 IEEE International, 4*, 2606-2608.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang W., Powers, J. G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR/TN - -475+STR NCAR TECHNICAL NOTE, 125.
- Skyllingstad, E. D., Vickers, D., Mahrt, L., Samelson, R., 2007, Effects of mesoscale sea-surface temperature fronts on the marine atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 123, 219-237.
- Stark, J. D., Donlon, C. J., O'Carroll, A., 2008, Determination of AATSR Biases Using the OSTIA SST Analysis System and a Matchup Database, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(7), 1208- 1217.
- Stark, J. D., Donlon, C. J., Martin, M. J., McCulloch, M. E., 2007, OSTIA : An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system, *OCEANS 2007 - Europe*, 1-4.
- Thiébaux, J., Rogers, E., Wang, W., Katz, B., 2003, A new high-resolution blended real-time global sea surface temperature analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(5), 645-656.
- Xie, J., Zhu, J., Li, Y., 2008, Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China, *Continental Shelf Research*, 28(10-11), 1286-1293.