비균질 자료의 변분자료동화를 적용한 남서해안 풍력자원평가 및 예측에 관한 수치연구

박순영 · 이화운* · 김동혁 · 이순환¹⁾

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경문제연구소
(2010년 4월 23일 접수; 2010년 6월 3일 수정; 2010년 6월 30일 채택)

Numerical Study on Wind Resources and Forecast Around Coastal Area Applying Inhomogeneous Data to Variational Data Assimilation

Soon-Young Park, Hwa Woon Lee*, Dong-Hyeok Kim, Soon-Hwan Lee¹⁾

Division of Earth Environment System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

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

(Manuscript received 23 April, 2010; revised 3 June, 2010; accepted 30 June, 2010)

Abstract

Wind power energy is one of the favorable and fast growing renewable energies. It is most important for exact analysis of wind to evaluate and forecast the wind power energy. The purpose of this study is to improve the performance of numerical atmospheric model by data assimilation over a complex coastal area. The benefit of the profiler is its high temporal resolution and dense observation data at the lower troposphere. Three wind profiler sites used in this study are inhomogeneously situated near south-western coastal area of Korean Peninsula. The method of the data assimilation for using the profiler to the model simulation is the three-dimensional variational data assimilation (3DVAR). The experiment of two cases, with/without assimilation, were conducted for how to effect on model results with wind profiler data. It was found that the assimilated case shows the more reasonable results than the other case compared with vertical observation and surface Automatic Weather Station(AWS) data. Although the effect of sonde data was better than profiler at a higher altitude, the profiler data improves the model performance at lower atmosphere. Comparison with the results of 4 June and 5 June suggests that the efficiency with hourly assimilated profiler data is strongly influenced by synoptic conditions. The reduction rate of Normalized Mean Error(NME), mean bias normalized by averaged wind speed of observation, on 4 June was 28% which was larger than 13% of 5 June. In order to examine the difference in wind power energy, the wind power density(WPD) was calculated and compared.

Key Words : Wind power, Wind profiler, Variational data assimilation

1. 서론

다양한 종류의 신·재생에너지 중 풍력 에너지는 저가의 청정에너지를 확보할 수 있는 가장 유망한 대안의 하나로 부상하고 있다. 국내에서는 현재 강원도의 육상풍력과 황해와 제주도의 해상풍력을 시작으로 2008년 현재 총 설비 용량은 304 MW이며 이는 향후

*Corresponding author : Hwa Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-583-2651
E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

예정된 풍력발전 단지를 고려하면 1,625 MW로 확대 될 예정이다(방 등, 2007; 에너지관리공단, 2009).

국외에서는 이미 풍력 에너지와 관련한 연구가 여러 분야에서 진행 중이다. 덴마크(Skjold, 1996; EMD, 2001)와 미국(Elliott, 1986)을 선두로 하여 유럽을 중심으로 독일(Michael, 2002)과 중동에 이르는 많은 나라들이 각국의 풍력 발전에 가능성과 관련한 연구를 진행해 왔고 풍력 자원 지도(Wind Resource Map) 또한 구축한 상태이다(Manwell 등, 2002; Rehman 등, 2007; Emilio 등, 2007). 그러나 국내의 연구는 국외에 비해 초기단계이며 그 저변이 넓지 않다. 김 등(2006)은 지면 관측 자료에 근거한 전남지역 남해안의 풍력 자원조사에 관한 연구를 하였고 고 등(2008)은 제주 지역의 풍력에너지 특성을 지상 자동관측 자료인 Automatic Weather Station(AWS)을 사용하여 설명한 바 있다. 그러나 이상의 연구들은 풍력발전이 이루어지는 상층의 바람이 아닌 지표 자료를 근거로 특정 고도의 바람을 산출하기 위해 단순히 먹법칙을 사용하여 설명하였다. 이러한 연구는 대기의 상태가 중립임을 가정한 것으로 실제 대기의 상태를 정확히 반영하지 못한 것이다. 그러므로 수치모의를 통해 대기의 입체적인 흐름을 살펴보는 것은 매우 중요하다. 이에 김 등(2006a)은 한반도 바람지도 구축에 관한 연구에서 위성자료를 이용하여 육·해상의 풍력자원분포를 파악하는 종관 바람지도를 작성하였고 이를 토대로 수치바람모의에 의해 저해상도 바람지도를 구축한 바 있다. 나아가 이 등(2007)은 수치모의를 통한 풍력 자원평가에 있어서 초기 공간 해상도와 해상의 위성 자료 동화를 고려하여야 함을 제시하였다. 이 등(2009a)은 국지 풍력에너지 산정을 위한 정확한 바람장 평가를 위해 수치모형에 관측 자료가 동화되어야 함을 보였다. 특히 자료동화의 영향반경과 동화강도를 지형과 종관장의 영향에 따라 달리 적용하여야 함을 제시하였다. 그러나 이러한 수치예보를 활용한 연구는 아직 저해상도에 그치고 있으며 자료동화에 활용한 관측 자료는 연직자료가 아닌 해수면 및 지상의 풍속으로 연직 바람분포에 관한 자료는 사용하지 않았다.

풍속은 지형과 장애물의 영향을 쉽게 받고 그러한

영향으로 고도에 따라 달라지므로 바람의 불규칙적인 특징을 예측하는 것은 매우 중요하다. 특히 연안지역은 해안선이 복잡하고 육지와 바다라는 열적 특성이 크게 전환되는 곳으로 국지풍계가 발달하기 쉽고 입체적인 바람의 특성이 복잡하게 나타난다. 이러한 연안지역의 바람특성 때문에 기존의 다른 전력원에 비해 풍력 발전은 안정적인 전력공급이 어려울 수 있다(Alexandre, 2008). 김 등(2006b)은 향후 풍력보급이 확대 될 경우 이러한 풍력의 간헐적인 특성을 사전에 예측할 수 있는 예보 모형이 개발되어야 함을 시사하고 통계적 방법으로 예보모형을 제시한 바 있다. 최근에는 종관규모의 기상현상을 반영하는 수치모형을 사용하여 통계적 방법과 함께 활용하고 있으나(김 등, 2006c; Kariniotakis 등, 2003) 종관규모보다 작은 규모의 대기운동에 대한 현상을 반영하기 위해서는 수치모형에 연직 관측 자료가 반영되어야 한다.

윈드프로파일러(이하 프로파일러)는 하층 대기의 흐름을 연직으로 관측하기 때문에 풍력을 연구하기 위해서는 매우 중요한 자료이다. 매 10분마다 자료가 생성되기 때문에 높은 시간 해상도를 가져 짧은 기간 발생하는 풍력에너지의 변동성을 예측하기 위해 활용이 가능하다. 박 등(2005)은 프로파일러 자료를 이용한 관측시스템 실험을 실시하여 단시간 강수예측의 정확도가 높아짐을 보였다. 강수예측을 위한 관측 자료 활용에 대한 연구는 많이 이루어 졌으나 풍력에너지의 평가와 단기 예측을 위한 연구는 없었다. 특히 본 연구에서는 프로파일러의 시간해상도를 활용하기 위해 1시간 간격의 자료동화를 실시하였다. 수치모형에 반영하기 위한 자료동화 방법은 3차원 변분자료 동화 방법(Variational Data Assimilation)으로 직접 관측 된 기상 자료뿐 아니라 레이더 예코자료와 위성의 지표복사자료까지 사용이 가능하고 변수들 사이의 역학 법칙과 오차통계까지 고려할 수 있는 장점이 있다(UCAR, 2001; Mike, 2001). 따라서 본 연구에서는 남·서 연안지역에 위치한 군산, 해남, 마산의 프로파일러 자료를 변분자료동화 방법으로 모형에 반영하여 연안지역의 풍력자원평가와 에너지예보의 정확도 향상에 기여하는 정도와 특성을 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상지역과 관측지점

수치모의에 근거한 한반도 풍력자원 잠재량을 살펴 보면(풍력발전연구센터, 2009) 해상의 풍속 및 풍력자원은 남서해안이 우수하고 발전가능성이 높은 것으로 나타난다. 남동연안지역이 풍속은 가장 우수하지만 수심이 깊어 풍력단지를 설계하기에는 현 기술로는 어려운 점이 있다. 그러므로 본 연구에서 살펴보고자 하는 영역은 우리나라 황해와 남해를 대부분 포함하는 영역으로 설정하여 연안지역 관측 자료가 해상의 바람 분포에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다(Fig. 1).

관측 자료는 프로파일러, 라디오존데(이하 존데), AWS자료가 사용되었다. 프로파일러는 바람장의 연직 구조를 관측할 수 있는 도플러 레이더의 일종으로 시간과 연직에 대해 고해상도의 바람장을 지속적으로 관측할 수 있기 때문에 짧은 시간 동안 작은 공간 규모에서 발생하는 악기상의 관측에 매우 유용하다. 특히, 중관규모 이하의 기상현상들은 짧은 시간에 다양하고 복잡하게 나타나기 때문에 이러한 현상을 관측하기에 적합하다. 그리고 무인 원격탐사 방법을 이용하기 때문에 저렴한 비용으로 안정적이고 항시적인 관측이 가능하며 거의 모든 기상조건에서 관측할 수 있다. 또한 관측 지점에서 바로 상층의 바람이 관측되고 수평 바람뿐만 아니라 연직속도도 관측되며 Radio Acoustic

Sounding System(RASS)과 연계 시에는 연직 기온의 관측도 가능하다. 남서해안의 풍속변화를 살펴보고자 남해와 황해의 연안지역에 인접한 군산, 해남 그리고 마산지점을 선택하였다(Fig. 1). 해상은 연직 바람분포에 대한 자료가 없기 때문에 이러한 연안지역의 연직 관측 자료는 자료동화를 통해 해상의 연직 바람분포를 개선시킬 수 있을 것이다. 그중 해남지역의 프로파일러 기기특징을 Table 1(기상연구소, 2003)에 인용하였다. 두 번째로 자료동화에 사용된 존데 위치와 자료동화에 사용되지 않고 결과 비교에 사용된 존데 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 자료동화에 사용된 광주와 흑산도 지점은 프로파일러와 마찬가지로 서남해안에 인접한 상층 관측 자료이고 제주도 고산과 광양의 존데 자료는 연안지역에서 관측한 자료의 자료동화 효과를 비교하기 위해 사용되었다. 광주지점의 자료는 6시간 간격으로 관측을 실시하며 흑산도와 고산의 경우는 12시간 간격으로 관측을 실시한다. 광양의 특별관측 자료는 3시간 간격으로 실시되었다. 끝으로 지상 AWS자료는 풍력 발전에 적합한 고도 80 m이상의 관측 자료가 거의 없기 때문에 자료동화 효과를 검증하기 위한 자료로 활용되었다. 프로파일러와 존데 자료를 사용한 지점 주변으로 33개의 기상대 유인관측소 자료를 사용하였다.

Fig. 1. Map depicting the two horizontal WRF domains and the location of wind profiler (▲) and radio sonde (×) sites used in data assimilation. The black dot (●) indicates radiosonde sites used for comparison with model results.

Table 1. Characteristics of the wind profiler at Haenam

Frequency	1.290 GHz
Vertical range	100-9000m
Vertical resolution	100m
Time resolution	1minute
Installation Place	Haenam Observatory (33.55°N, 126.57°E)
Installation Date	December 2002

2.2. 기상모델 및 변분자료동화

본 연구에 사용된 수치모형은 WRF(Weather Research and Forecasting model) V3.0 (Skamarock 등, 2008) 이고 수평으로는 Arakawa-C 격자체계를 사용하는 압축성 비정수 모형이다. 모델의 도메인 설정은 Fig. 1에 나타내었다. domain 1은 한반도를 중심으로 한 동북아시아 일부를 포함하는 수평 격자 9 km의 영역이고 격자수는 249×249이다. 1 way nesting을 통해 domain 2의 초기장과 경계 자료를 얻을 수 있었으며 domain 2의 수평 해상도와 격자수는 3 km와 250×250이다. 연직 층수는 35개의 층으로 설정하였다. 모델의 초기장과 경계 자료에 사용된 입력 자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 FNL(Final Analysis)자료이며 6시간 간격의 1°×1°자료를 사용하였다. 자세한 모델 구성은 Table 2에 정리 하였다.

Table 2. Configuration of WRF modeling

	Domain 1	Domain 2
Horizontal Grid	249 × 249	250 × 250
Horizontal resolution	9km	3km
Vertical layers	35	
Physical options	WSM5 scheme	
	Kain-Fritsch scheme	
	Noah LSM	
	Yonsei University PBL	
	RRTM Longwave	
Initial data	Dudhia Shortwave	
	NCEP FNL data	
Time period	2007.06.03.00UTC ~	
	2007.06.06.00UTC	

여러 자료동화 기법 중 관측 내삽, nudging, 최적내삽(Optimal Interpolation)과 같은 방법보다 정교하고 변수들 간 역학법칙까지 고려하는 변분자료동화를 본 연구에 사용하였다. 변분자료동화는 비용함수(cost-

function)에 대한 반복 연산해(iterative solution)를 통하여 각 분석 시간의 최적의 대기상태를 판단하는 자료동화 방법의 하나이다. 비용함수의 식은 다음과 같다(Ide 등, 1997).

$$J(X) = J_b(X) + J_o(X) = \frac{1}{2}(X - X^b)^T B^{-1}(X - X^b) \quad (2-1) \\ + \frac{1}{2}(Y - Y^0)^T (E + F)^{-1}(Y - Y^0)$$

변분문제는 $J(X)$ 를 최소로 하는 분석 상태인 X 를 찾기 위한 (2-1)식의 반복적인 최소화 과정으로 요약할 수 있다. 이러한 해법에 사용되는 두 종류의 자료는 배경장 또는 초기추측장(background or first guess) X^b 와 관측자료 Y^0 이고 배경장은 분석 시간에서 자료동화가 되기 전의 모델 결과를 의미한다. 또한 (2-1)의 식에서 B , E 그리고 F 는 각각 배경오차(background error), 관측기기오차(instrumental error), 대표성오차(representivity error)의 정보를 가진 공분산 행렬을 나타낸다. B 는 주어진 도메인영역에서 모델이 가질 수 있는 오차에 관한정보를 의미하고 E 는 여러 종류의 관측기기들이 가지는 기기상의 오차정도를 포함하고 있다. 격자화 되어있는 모델 분석결과인 X 를 관측 공간 $Y = H(X)$ 에 대응시키기 위해 관측 연산자(observation operator) H 가 사용되는데 F 는 이러한 H 의 부정확성에서 기인하는 오차이다(NCAR, 2008). 이러한 접근방법으로 관측값, 배경장, 관측오차, 배경오차 그리고 물리 법칙들이 모두 고려되어 분석 증분(analysis increments) X^a 를 계산하는 것이다. X^a 은 배경장 X^b 에 더해져서 향상된 분석장을 제공함으로써 자료동화가 이루어진다.

WRF-Var의 자료동화는 Barker 등(2004)에서 설명한 과정을 따르고 있다. 특히 배경오차 공분산 행렬 B 는 흐름도(Fig. 2) 밖에서 미리 구해져야하는 과정으로 다음과 같이 정의된다.

$$B = \overline{\epsilon\epsilon^T} \simeq \overline{X'X'^T} \quad (2-2)$$

정확한 배경오차 ϵ 는 실제에서는 알 수 없지만 모델 결과의 편차(perturbation) X' 에 의해 통계적으로 잘 표현되는 것으로 가정하여 구해진다. 본 연구에서는 NMC-method(Parrish and Derber, 1992)를 사용하여 6월 한 달에 대해 12시간과 24시간 예보 값들을 구하여 배경오차를 구할 수 있었다. NMC-method를 통한 배경오차를 구하는 식은 다음과 같다.

$$B = \epsilon \epsilon^T = (X^b - X^t)(X^b - X^t)^T \simeq [X^f(T+24) - X^f(T+12)][X^f(T+24) - X^f(T+12)]^T \quad (2-3)$$

Fig. 2. Sketch showing the relationship between datasets (circles), and the algorithms (rectangles) of the ARW system (by NCAR, 2008).

Fig. 2에 WRF-Var와 다른 자료들 그리고 모델의 구성요소간의 흐름도를 나타내었다. 변분자료동화를 초기장 뿐 아니라 모델 적분기간 동안 cycling모드를 통해 자료동화과정을 실시하였다. 매 분석 시간마다 자료동화가 이루어지기 전의 계산결과인 배경장 X^b 과 그 시간에 해당하는 관측 값인 Y^o , 관측 오차 R , 배경오차 B_0 가 WRF-Var 과정을 통해 자료동화가 되고 그 결과인 분석장 X^a 는 새로운 초기장이 되어 새로운 모델계산이 실시되는 순서를 반복하는 것이다. domain1에서 얻어진 경계자료 X^{lbc} 는 자료동화를 실시한 새로운 초기장과 균형을 맞추기 위해다음 시간의 모델 계산을 위한 경계 자료로 갱신된다.

2.3. 사례일 종관분석 및 실험설계

선정된 사례일은 종관 기압장의 영향이 대비되어 연속적으로 나타난 날을 택하였다(Fig. 3). 6월 4일과 5일은 저위도에 위치한 장마전선이 북상하기 전의 전형적인 초여름 날씨를 보였다. 두 날 모두 맑은 날이었으나 종관 기압분포의 영향이 대조적이었다. 4일 우리나라는 일본 동쪽해상의 북태평양 고기압의 영향에 의한 고기압의 중심에 위치하고 있다. 이에 따라 맑은 날씨와 함께 등압선 간격이 넓어 종관장의 영향이 약해지고 해륙풍, 산곡풍과 같은 국지풍계가 발달하기 쉬운

종관상태를 보였다. 반면 한반도 북쪽에 위치하였던 저기압이 4일 야간부터 남동쪽으로 장출하여 둘째 날인 5일의 경우 4일에 지배적이었던 고기압 세력을 쇠퇴시켰다. 이에 따라 등압선 간격이 좁아지고 기압경도력이 커지면서 강한 종관풍이 발생할 수 있는 기압분포를 나타냈다. 그러므로 4일은 약한 종관장의 영향을 받았고 5일은 강한 종관장의 영향을 받았음을 알 수 있다. 지상 및 연직 관측으로 나타난 이 두 날의 종관상태의 특징은 이 등(2009b)에서 자세히 설명하였다.

프로파일러를 자료동화하여 나타나는 모형의 개선 효과와 예측성을 살펴보기 위해 Table 3과 같이 실험을 설계하였다. 관측 자료를 사용하지 않고 초기장과 경계 자료만을 사용하여 수치실험을 한 경우를 not assimilated로 하였고 기존의 자료동화에 널리 사용 중인 존테와 함께 프로파일러를 자료동화한 경우를 assimilated로 하여 두 가지 실험을 실행하였다. 특히 프로파일러는 높은 시간해상도를 가지기 때문에 이러한 장점을 극대화 시키고자 1시간 간격으로 자료동화하여 기존의 6시간 간격으로 동화되는 존테 자료와 함께 나타나는 효과를 살펴보고자 하였다.

Fig. 3. Surface weather chart on 4 (a) and 5 (b) June 2007.

Table 3. Experimental design of this study

	not assimilated	assimilated
Data assimilation (interval)	X	wind profiler (1 hour) radio sonde (6 hour)

3. 결과 및 고찰

각 실험의 결과들을 살펴보기에 앞서 사례일에 관측된 프로파일러 결과를 분석한 후 실험 결과를 관측값과 비교하여 자료동화 효과를 살펴보았다. 연직 결과비교를 위해 자료동화를 실시한 지점에서와 함께 존데 특별관측을 실시한 광양의 관측값과 비교를 하였다. 또한 연직 자료동화 효과가 지표면 부근 즉, 대기하층에서 나타나는 영향을 정량적으로 살펴보기 위해 33개의 AWS지점의 풍속 값과 통계분석을 실시하였다. 연구에 사용된 통계분석 방법을 Table 4에 정리

하였다. MB를 통해 풍속의 과대 또는 과소 예측을 살펴보고 전체적인 오차는 ME와 RMSE를 통해 확인 가능하다. 또한 풍속의 시간변화에 대한 모의정도를 평가하기 위해 IOA와 CORR을 분석하였다.

3.1. 프로파일러 관측결과

중관장이 약하였던 6월 4일과 강하였던 6월 5일에 관측된 군산, 해남, 마산의 프로파일러 자료를 Fig. 4에 나타내었다. 프로파일러는 매 10분마다 자료가 생성되지만 한 시간 간격으로 연직 바람 분포의 시간변화를 나타내었다. 앞서 중관 일기도에서 살펴본 바와 같이 두 날의 대조적인 중관적 특성이 관측결과에 나타났다. 중관 기압계의 영향이 적었던 4일의 경우 시간적인 풍향과 풍속의 변화가 뚜렷했다. 이는 중관적 영향이 약해짐에 따라 각 관측 지점의 국지순환계가 발달하였음을 보여주는 관측 결과이다. 관측 고도 하층에서 해륙풍 순환 등이 연안지역에 발달하면서 연

Table 4. Performance statistics of modeled result

Description	Variables	Statistic definition [*]
Mean obs.	$\bar{O}$	$(1/N) \sum_1^N C_o$
Mean model	$\bar{M}$	$(1/N) \sum_1^N C_m$
Mean Bias	MB	$(1/N) \sum_1^N (C_m - C_o)$
Normalized Mean Bias	NMB(%)	$(1/N) \sum_1^N (C_m - C_o) / \bar{O} \times 100\%$
Mean Error	ME	$(1/N) \sum_1^N C_m - C_o $
Normalized Mean Error	NME(%)	$(1/N) \sum_1^N C_m - C_o / \bar{O} \times 100\%$
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{(1/N) \sum_1^N (C_m - C_o)^2}$
Index Of Agreement	IOA	$1 - \sum_1^N (C_m - C_o)^2 / \sum_1^N (C_m - \bar{O} + C_o - \bar{O})^2$
Correlation	CORR	$(1/N) \sum_1^N (C_m - \bar{M}) + (C_o - \bar{O}) / \sigma_m \sigma_o$

직적인 바람의 변화가 둘째 날에 비해 크게 발생하였다. 반면 6월 5일의 경우 강한 종관장의 영향으로 일 중 남서풍과 서풍의 바람이 불고 있고 풍속 또한 4일에 비해 높았다. 연직으로도 큰 패턴의 바람변화만 나타났고 국지순환에 의한 복잡한 변화는 발생하지 않았다. 연속된 두 날의 종관 기압장의 차이로 경계층 규모 이하의 국지 순환장 발생이 대조적으로 발생하였고 프로파일러관측 결과는 이러한 특성을 잘 나타내주고 있다. 참고로 6월 4일 마산에서 관측된 고도 약 3.5 km의 강한 풍속은 WRF-Var의 관측자료 품질검사(NCAR, 2008) 단계에서 제거되었다.

3.2. 지상풍속결과 및 통계분석

각 실험 결과의 4일과 5일의 풍속 시계열을 지상 AWS와 비교하였다(Fig. 5). 프로파일러 관측 지점의 지상 관측 자료인 군산, 해남, 마산의 자료와 존데 관측지점인 광주의 지상 자료가 비교되었고 4지점 모두 연직 자료동화가 실시된 지점으로 자료동화로 인한 지상의 풍속결과를 정성적으로 살펴 볼 수 있었다. 모든 지점에서 주간에 풍속이 강하게 나타나는 뚜렷한 일변화를 보였으며 4일에 관측 풍속이 4~5 m/s인 반면 5일에 5~6 m/s로 풍속이 관측되어 4일에 비해 5일에 강한 종관장으로 풍속이 강하게 발생하였음을 알

수 있다. 자료동화를 실시하지 않은 경우 전반적인 일변화를 잘 모의하고 있지만 야간에 대기가 안정하여 지표풍속이 약해지는 현상을 잘 모의하지 못하였고 4일 주간 최고 풍속을 과대 또는 과소 모의하는 경향이 나타났다. 그러나 군산과 마산의 5일 새벽을 보면 자료동화를 한 경우 크게 풍속을 약화시켜 야간 저 풍속을 잘 모의하고 있으며 광주의 5일 주간의 최대 풍속인 4.6 m/s를 자료동화 하지 않은 경우 6 m/s로 과대 모의 했으나 자료동화를 통해 5.0 m/s로 모의하여 결과를 개선시켰다. 또한 풍속의 일변화에 있어서도 4일 해남의 약한 종관장에 의한 국지풍계형성으로 인한 풍속변화를 자료동화를 실시하지 않은 경우 주간의 풍속이 거의 변하지 않고 있지만 자료동화를 실시하여 잘 모의하고 있다. 4일 마산에서 나타난 최대풍속시간을 보면 자료동화를 하지 않은 경우에는 늦은 오후시간에 발생하지만 자료동화를 하여 이른 오후 시간으로 모의하여 관측과 일치되고 있다. 특히, 프로파일러 관측 지점인 군산, 해남, 마산에 비해 존데관측 지점인 광주의 지상결과에서 상대적으로 개선효과가 뚜렷하게 발생하지 않은 점은 프로파일러가 대기 하층을 집중 관측하여 1시간 간격으로 자료 동화되어 지표부근의 모의능력을 향상시킨 정도가 더 크

Fig. 4. Time variation of wind profile observed at (a) Gunsan, (b) Haenam, and (c) Masan by wind profiler for 4 and 5 June.

(a) Gunsan

(b) Haenam

(c) Masan

(d) Gwangju

Fig. 5. Diurnal variation of surface wind speed for measured (dashed line), assimilated (solid line with filled circle), and not assimilated (solid line with open circle) results at (a) Gunsan, (b) Haenam, (c) Masan, and (d) Gwangju.

기 때문이다.

정량적인 풍속 모의능력을 평가하기 위해 자료동화를 실시한 지점 주변으로 33개 지상 AWS에서 관측된 풍속과 실험 결과와의 통계분석을 실시하였다 (Table 5). 특히, 종관장의 영향에 따라 프로파일러의 자료동화 효과가 다르게 나타나 4일과 5일을 구분지어 통계 값을 구하였다. 평균풍속에서 5일에 2.38 m/s로 4일 1.53 m/s로 보다 약하여 종관장의 영향이 나타났음을 알 수 있고 자료동화를 통해 과대 모의된 풍속을 평균풍속에 가깝게 모의하고 있다. 하지만 여전히 MB가 양의 값을 나타내며 풍속을 높게 모의하고 있다. 자료동화를 통해 향상된 정도를 관측 평균 풍속으로 정규화 된 NMB의 감소를 통해 살펴보면 4일 약 37.79%의 오차감소를 보인 반면 5일에는 약 14.72% 감소하였다. 전체적인 오차감소

를 보인 가운데 두 날의 감소폭이 대조되는 이유는 4일 나타난 국지순환에 따른 풍속변화를 1시간 간격의 프로파일러 관측을 자료동화하여 잘 모의하였기 때문이다. 시간변화를 잘 모의할수록 수치가 증가하는 IOA와 CORR를 보면 자료동화를 통해 양일 모두 결과가 향상되었지만 자료동화를 실시하지 않은 4일의 결과는 5일에 비해 낮은 수치를 보였음에도 자료동화를 통해 더 높은 값을 보이며 향상 정도가 더 높게 나타났다. 풍속의 일변화를 모의하는 정도를 개선시킨 효과가 종관장이 강한 5일보다 종관장이 약한 4일에 더 컸음을 보여주는 결과이다.

Table 5. Statistics of surface wind speed results on the condition of weak synoptic (left) and strong synoptic (right)

	4 June			5 June		
	not assimilated	assimilated	obs	not assimilated	assimilated	obs
Mean	2.56	1.99	1.53	3.57	3.04	2.38
MB	1.23	0.65		1.17	0.82	
NMB	80.16	42.37		49.31	34.59	
Me	1.47	1.04		1.76	1.45	
NME	95.72	67.71		73.89	60.79	
RMSE	1.90	1.33		1.95	1.69	
IOA	0.69	0.82		0.73	0.80	
CORR	0.42	0.67		0.57	0.60	

Fig. 6은 6시간 간격으로 RMSE와 IOA를 공간 평균하여 살펴본 통계값의 시간변화를 나타낸 것으로 두 날의 종관장의 영향에 따라 자료동화의 효과가 다르게 나타남을 보여준다. RMSE시간변화를 먼저 보면 4일 새벽과 주간에 1.5~2.0 m/s RMSE를 자료동화를 통해 1.0~1.5 m/s로 감소시켰고 5일 종관풍이 강해지면서 전체적인 풍속이 증가한 가운데 RMSE값도 증가하였지만 자료동화를 통해 오차를 감소시켰음을 알 수 있다. IOA 시계열에서는 주간에 값이 높아지고 야간에 낮아지는 경향을 보여 야간 풍속모의능력이 떨어짐을 알 수 있다. 자료동화를 실시하여도 그러한 일변화는 여전히 보이고 있으나 전체적인 IOA를 증가시켰고 종관장이 약한 4일의 증가폭이 5일의 증가폭보다 크게 나타남을 보여 약한 종관장일 때 프로파일러의 효과가 더 크게 발생함을 보여준다.

3.3. 연직풍속결과 및 풍속예보 평가

앞서 지상관측결과와 비교를 통해 자료동화의 효과를 살펴보았다. 풍력에서는 경계층 이하의 연직 풍속분포가 매우 중요하기 때문에 연직관측 자료와의 비교를 통해 자료동화의 효과를 살펴보고자 한다.

먼저 자료동화에 사용된 프로파일러 관측지점인 군산, 해남, 마산의 관측과 실험결과의 비교를 Fig. 7에 나타내었다. 연직 관측 결과에서도 4일에 비해 5일의 풍속이 더 강하게 관측되었다. 해남의 고도 1 km이하의 관측 풍속은 4~5 m/s이지만 자료동화를 하지 않은 경우 1.5~2.5 m/s로 낮게 모의하지만 자료동화를 통해 거의 관측과 일치하는 연직 풍속분포를 보이고 있다. 군산의 4일 결과에서도 자료동화를 통해 고도 1.5 km부근의 강한 풍속을 자료동화를 하지 않은 결과보다 잘 모의하면서 연직 풍속분포 경향을 따라가는 결과를 보였다. 5일의 결과에서 해남의 경우 자료동화를 하지 않은 경우에도 관측값을 잘 모의하여 자료동화 효과는 크게 나타나지 않았으나 군산과 마산에서 과대모의 된 1.5 km이하의 풍속을 자료동화를 통해 완화시켜주는 효과가 나타났다. 프로파일러는 연직으로 높은 해상도로 자료가 수집되어 층간 풍속 분포가 급변하는 구간이 많이 발생한다. 이러한 자료가 자료동화를 통해 수치모의에 반영되어도 모형은 기존에 가지고 있는 역학적인 관계나 연직 일관성(consistency)을 유지하기 때문에 그러한 급변하는 풍속분포는 실험결과에서는 나타나지 않았다.

Fig. 6. Time variations of RMSE and IOA for assimilated (filled circle) and not assimilated (open circle).

Fig. 7. Vertical wind speed distribution for measured (gray line), assimilated (solid line with filled circle) and not assimilated (solid line with open circle) results at (a) Haenam, (b) Gunsan, and (c) Masan.

자료동화에 사용된 자료와 직접 비교를 통하여 수치모의 개선 효과를 전부 말하기는 무리가 따른다. Fig. 8에 자료동화에 사용되지 않은 광양에서 실시한 존데 특별관측과의 비교를 나타내어 그 효과를 살펴 보았다. 특히, 존데는 풍속뿐 아니라 습도 관측이 가능하여 혼합비를 함께 비교하였다. 혼합비 모의가 정확해야 하는 이유는 풍력에너지가 풍속에 크게 좌우되지만 공기의 밀도 또한 중요하기 때문이다. 풍속에 비해 가중치는 낮으나 밀도 변화에 의한 에너지 차이가 나타나는 것은 분명하고 수증기는 이러한 밀도변화에 영향을 주기 때문에 혼합비와 같은 수증기 변수를 정확히 모의해야 하는 것이다. 혼합비를 먼저 살펴보면 4일의 자료동화 효과는 낮은 풍속으로 인해 그 개선 정도가 뚜렷하지 않으나 풍속이 강해지기 시작한 5일 00LST에는 1 km~2.5 km고도에서 그 개선효과가 크게 나타났고 5일 15LST에는 2.5 km고도 이하에서 약 1~2 g/kg의 오차를 줄여주는 효과가 나타났다. 프로

파일러는 바람만 관측하여 1시간 간격으로 자료동화 되었지만 이렇게 혼합비 결과에서 개선효과가 나타나는 것은 경계층 하층의 바람장 개선효과가 수증기 이류에 영향을 주었기 때문이다. 특히 풍속이 강한 5일에는 수증기 이류에 대한 개선효과가 더 컸음을 보여 준다. 박 등(2005)의 연구에서 프로파일러 자료의 반영으로 수증기 이류가 정확해져 강수예측의 정확도가 향상된 결과와 일치한다. 연직 풍속분포에서는 4일 2 m/s이하의 약한 풍속을 4 m/s이상로 과대 모의하였지만 자료동화를 통해 풍속을 감소시켰으며 5일에 나타난 하층의 강한 풍속을 자료동화를 하지 않은 경우 크게는 4 m/s씩 과소 모의하였지만 자료동화를 통해 관측 값을 잘 모의하였다. 광양지역은 해남과 마산의 가운데 위치하여(Fig. 1) 프로파일러의 자료동화 효과가 효율적으로 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 8. Vertical mixing ratio (upper panel) and wind speed (lower panel) distribution for measured (gray line), assimilated (solid line with filled circle) and not assimilated (solid line with open circle) at Gwangyang.

연직 관측 자료와 비교를 통해 자료동화의 효과를 살펴볼 수 있었으나 특정고도에서 여전히 불일치되는 부분은 남아있다. 이것은 모델의 수평과 연직해상도가 낮기 때문이며 경계층이하의 연직 확산을 모수화를 통해 모의하는 것 또한 이유가 된다. 이러한 모델 자체의 오차에도 불구하고 관측자료와의 정성적인 비교를 통해 자료동화 효과를 확인할 수 있었다.

정량적인 풍속 예보 정확도를 살펴보기 위해 WRF-Var의 cycling mode에서 발생하는 prior와 posterior 결과로 나누어 설명하였다(Fig. 9). prior는 변분자료동화의 cycling mode에서 한 cycle이 끝나고 다음 cycle을 위해 자료동화가 실시되기 전의 결과(background)이고 posterior는 그 시간대의 prior에 자료동화가 되어 다음 cycle의 초기장이 되는 결과이다. 이러한 방법에서 prior의 결과를 살펴봄으로써 풍속예보의 향상정도를 파악할 수 있다. 그러므로 prior의 향상정도를 살펴보는 것은 풍력 에너지 예보의 정확도 향상을 알아볼 수 있는 분석방법이 된다. Fig. 1에 나타난 모든 연

직 관측지점의 기준고도의 값들과 실험결과를 사용하여 통계분석을 실시하였다.

풍력에너지에서 중요한 고도는 약 80~120 m정도이나 700 hPa(약 3 km)의 상층까지 살펴보는 이유는 상층의 운동량 전달 등으로 인해 하층에서 그 영향을 받기 때문이다. 그러므로 상층에서의 수치모의 향상은 하층의 결과에도 영향을 줄 수 있다. 그 결과를 Fig. 10에 나타냈었고 왼쪽은 기준고도별 연직 RMSE분포이고 오른쪽은 모든 층의 결과에 대해 12시간 간격으로 구한 RMSE의 시간변화를 나타낸 것이다. 먼저 왼쪽의 연직 RMSE분포를 보면 상층의 풍속은 지상보다 크기 때문에 자료동화를 하지 않은 경우의 결과 700 hPa에서 3.7 m/s, 1000 hPa에서 3.3 m/s로 큰 값을 보였다. 자료동화를 통해 6시간마다 생성되는 prior와 posterior에서 posterior의 RMSE가 prior보다 모든 기압고도에서 낮았으며 1000 hPa에서 2.2 m/s로 약 1.1 m/s의 RMSE를 감소시켰다. 각 6시간마다 prior의 결과에 프로파일러와 존데 관측 자료가 반영이 되어

Fig. 9. Schematic flow chart of WRF-Var cycling mode.

posterior가 나온 것으로 prior보다 RMSE가 낮은 것은 당연한 결과이다. 하지만 prior의 결과에 초점을 맞추어 볼 때도 자료동화를 하지 않은 결과보다 RMSE가 낮아졌다는 것은 풍속 예측능력이 향상되었다고 말할 수 있다. 특히 여기서는 단기 풍속예보의 정확도가 높아진 것이며 1000 hPa에서 RMSE를 0.7 m/s 감소시켰다. 연직적으로 살펴 볼 때 700 hPa에서 0.3 m/s의 RMSE 감소에 비해 1000 hPa에서 0.7 m/s로 감소폭이 더 크게 발생하였고 이는 하층에 집중된 프로파일러의 자료가 1시간 간격으로 자료동화 되었기 때문이다. 오른쪽의 연직 RMSE의 시간변화를 보면

(Fig. 10. (b)) 종관장의 영향으로 풍속이 강한 5일에 RMSE가 크게 발생하였고 각 기준고도별 RMSE를 평균하여 나타내었기 때문에 5일 21LST의 경우 4.2 m/s의 높은 오차가 발생하였다. 그러나 자료동화를 통해 그 정도를 감소시켰고 연직 RMSE분포 결과와 마찬가지로 posterior결과에서 prior결과보다 낮은 RMSE가 나타났다. 하지만 prior의 4일 09LST의 RMSE 감소는 2.7 m/s에서 1.8 m/s로 0.9 m/s감소시켜 예측성을 향상시켰으며 종관장이 강해지는 4일 야간부터는 RMSE 감소폭은 줄어들었으나 여전히 자료동화를 실시하지 않은 결과에 비해 낮은 값이 나타났다

Fig. 10. Time averaged vertical RMSE distribution comparing vertical observation with OBS-EXP (a) and INT-EXP (b) results. The dotted line and solid line indicate posterior and prior respectively.

다. 4일 주간의 RMSE 감소폭이 가장 컸던 이유는 지상관측과의 검증에서 나타난 것과 마찬가지로 종관장이 약해졌을 때 나타나는 국지순환을 프로파일러 관측으로 모형에 반영하였기 때문이다.

3.4. 풍력에너지밀도 분포

이상에서 살펴본 바와 같이 프로파일러자료를 이용하여 기상수치모의를 향상시키는 정도와 종관적 특징에 따라 효과가 달리 나타난다는 점을 확인하였다. 본 절에서는 실제 풍력에너지 척도인 풍력에너지밀도를 계산하여 그 차이를 분석하였다. 풍력에너지를 산정하는 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중 발전기 기종이 선정되기 전에 자연적인 풍속만을 고려하여 평가하는 기준은 풍력에너지밀도이다. 밀도가 높은 공기는 풍력발전기를 더 효과적으로 가동시키기 때문에 수식에 밀도가 사용되었다. 이식의 단위는 단위면적당 에너지이므로 풍력발전기 기종에 따라 날개가 그리는 면적이 달라지고 산출되는 에너지가 다르게 나타난다. 이러한 특징을 모두 담고 있기 때문에 풍력에너지밀도라고 한다. 풍력에너지밀도를 구하는 식은 다음과 같다.

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

여기서 $\rho(kgm^{-3})$ 는 공기의 밀도, $V(m/s)$ 는 수평풍속이다. 식 (3-1)을 수증기를 고려한 이상기체 방정식을 사용하여 ρ 를 표현하면,

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

으로 표현 가능하다. 여기서 P 는 기압, R_d 는 건조공기의 기체상수 $287J K^{-1}kg^{-1}$, T_v 는 가온도 그리고 q 는 비습을 나타낸다. 기존의 지표자료만을 사용하여 계산할 때는 대기를 중립으로 가정하고 풍속은 지표 풍속으로 추정하였으며 밀도를 표준상태의 $1.293 kgm^{-3}$ 을 사용하였다. 그러나 식 (3-2)을 사용하면 해당고도의 기압과 온도 그리고 습도까지 고려하여 계산을 하기 때문에 보다 정확한 풍력 에너지를 산출하는 것이 가능하다.

Fig. 11은 자료동화를 실시한 결과에서 산출한 풍력밀도에너지를 자료동화를 실시하지 않은 결과 값을 뺀 결과를 고도 10 m와 100 m에 대해 각각 나타낸 그림이다. 10 m의 결과는 지표에서의 풍력에너지를 계산한 것이고 100 m의 결과는 메가와트 급의 대형 풍력발전기가 세워졌을 때 풍력발전기 허브가 위치하게 되는 높이로 실제 풍력에너지 계산에 필요한 높이이다. WPD의 분포만을 나타낸 그림은 생략하였으나 약한 종관일인 4일 낮 12시의 10 m WPD분포에서 자료동화를 실시하지 않은 경우 목포 앞바다와 제주도 사이에서 약 $300 Wm^{-2}$ 의 풍력에너지를 보이고 한반도의 남해안 전체에서 $100 Wm^{-2}$ 가 조금 넘는 에너지가 분포하고 있지만 자료동화를 실시한 경우 제주 북쪽 해상의 $600 Wm^{-2}$ 의 WPD가 나타났으나 남해안지역에서는 낮은 에너지를 보였다(그림 생략). 차이를 나타낸 Fig. 11. (a)를 보면 한반도 남해안에서 자료동화를 실시하지 않았던 경우 풍력에너지가 과대 예측되었으나 자료동화를 통해 보다 낮게 예측함을 알 수 있다. 같은 시간의 100 m에서 풍력에너지밀도를 비교하면 10 m에서의 차이보다 더 크게 나타나고 있다. 에너지 차이뿐만 아니라 차이가 나는 분포에서도 큰 차이가 있는데 이것은 지표의 값을 먹방칙에 의해 구하게 되면 10 m에서의 차이와 같아지지만 수치모형을 통해 100 m에서의 대기상태를 그대로 반영하여 풍속분포뿐 아니라 수증기분포에 의한 밀도 분포 또한 정확하게 모사될 수 있음을 말해준다. 100 m에서 남해안일대에 나타나는 차이는 최대 약 $300 Wm^{-2}$ 로 20 Wh 용량의 탁상용 스탠드를 15시간 동안 켤 수 있는 전력이다. 풍력에너지 밀도에서 단위면적은 풍력발전기의 날개인 블레이드(blade)가 그리는 면적의 단위면적이므로 블레이드 길이에 따라 풍력발전기가 가동될 경우에는 더 큰 차이가 발생함을 말해준다. Fig. 11. (b)의 강한 종관일의 결과는 10 m에서 서해안에서 에너지의 감소를 남해안에서는 에너지의 증가가 나타났다. 마찬가지로 100 m에서의 그 차이는 훨씬 컸으며 분포도 다르게 나타났다. 특히 약한 종관일의 결과에 비해 내륙에서의 차이가 두드러졌다. 이것은 자료동화 된 지점의 풍하측에서 그 효과가 크게 나타나기 때문이다(Stanley, 2004). 약한 종관일의 경우 남해안일대의 풍향이 동풍 및 북동풍으로 남해안은 해안에 인

Fig. 11. Calculated 10 m (left) and 100 m (right) wind power density difference at 12LST on the condition of weak synoptic effect (4 June, (a)) and strong synoptic effect (5 June, (b)). The dashed lines indicate negative values.

접한 연직 관측지점의 풍하측이 되어 남해안과 제주 남쪽 해상으로 큰 차이를 보였다. 반면 5일 12LST에는 지배적인 종관풍인 서풍 및 남서풍의 바람이 불었기 때문에 남서해안 연안에 집중된 관측지점의 풍하측인 내륙에서 그 차이가 크게 나타난 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 풍력자원의 정확한 평가와 에너지 예보의 정확도를 높이기 위한 방법으로 3차원 변분자료동화 방법을 통한 수치모형의 활용방법을 제시하였다. 자료동화에 사용되는 자료에는 대기 하층의 연직 관측이 상세히 이루어지고 시간해상도 또한 뛰어난 프로파일러 자료가 사용되었다. 남서해안의 연안지역

에 가장 인접한 군산, 해남, 마산의 자료를 활용하여 남서해안의 풍력에너지에 대한 영향을 살펴보고자 하였다. 사용한 수치모형은 WRF-ARW를 사용하였으며 자료동화는 WRF-Var를 이용하였다.

먼저 6월 4일과 5일에 관측된 프로파일러의 연직 바람분포를 분석한 결과 프로파일러는 약한 종관장의 영향을 받은 4일에는 시간에 따른 국지순환을 잘 표현하였으며 연직으로도 바람변화가 다양하게 나타났으나 강한 종관장이 발생한 5일에는 전날에 비해 일중 거의 바람의 변화가 거의 없었으며 풍속은 더 강하게 관측되었다. 지상의 관측 결과와 비교를 통해 자료동화의 효과를 살펴본 결과 각 관측 지점에서 야간에 과대 모의되었던 풍속을 자료동화를 통해 풍속을 약화시키며 전반적인 일변화 경향을 잘 모의하였다. 종관

장의 영향에 따라 프로파일러의 자료동화 효과는 다르게 나타났다. 통계분석을 실시한 결과 4일의 NMB의 감소폭은 37.79%로 5일의 14.72% 보다 높았으며 IOA와 CORR의 일변화를 통해서도 강한 종관일 보다는 약한 종관일에 더 높은 값이 나타남을 확인하였다. 이것은 4일에 발생하는 국지순환에 의해 시간과 연직으로 급변하는 풍속변화가 발생하였는데 이를 상세히 관측하는 프로파일러가 수치모의에 반영된 결과이고 상대적으로 국지풍계가 발달하지 않은 5일에 비해 그 영향이 탁월하게 나타난 것이다. 연직 풍속분포를 모의하는 정도를 살펴보기 위해 자료동화를 실시한 프로파일러 관측지점의 결과와 직접 비교를 실시한 결과 연직으로 높은 해상도로 관측하는 프로파일러의 풍속변화를 그대로 반영하지는 못하였지만 자료동화를 통해 모형의 일관성을 유지하면서 과소 모의하거나 과대 모의하였던 풍속을 관측에 보다 가깝게 모의하였다. 이러한 결과 향상은 자료동화를 실시하지 않은 광양의 존데 결과와 비교를 통해서도 나타났으며 풍속결과뿐 아니라 존데관측으로 얻어지는 혼합비 결과에도 영향을 주어 밀도에 영향을 받는 풍력에너지 예측에 정확도를 높일 수 있음을 확인하였다. 풍속예보 정확도 측면을 살펴보고자 WRF-Var의 수행 단계에서 나타나는 prior와 posterior 결과를 각각 분석하였다. 연직 RMSE분포를 살펴본 결과 모든 기압고도에서 posterior의 결과는 prior의 결과보다 낮은 RMSE를 보였으며 특히 prior의 RMSE 감소정도는 상층에서 0.3 m/s이고 하층에서 0.7 m/s로 나타났다. 프로파일러의 하층에 집중된 관측 결과가 1시간 간격으로 반영된 결과 풍속예측정도는 상층에 비해 하층이 더 우수하였다. 지상관측과의 비교에서 나타난 결과와 마찬가지로 연직 통계값 결과에서도 종관장이 약한 4일에 더 큰 폭으로 오차가 감소하였다. 실제 풍력에너지밀도를 계산하고 그 차이를 살펴본 결과 자료동화를 실시하여 에너지 분포차이가 크게 발생하였다. 특히 약한 종관일에 남서해안이 내륙의 자료동화 지점의 풍하층이 되어 그 차이는 더 컸으며 최대 300 Wm^{-2} 이상 발생하였다. 강한 종관일은 내륙이 풍하층이 되어 큰 차이가 발생하였으나 여전히 남서해안에

서도 차이가 발생하였다. 또한 10 m에서의 그 차이보다 풍력에너지 관심고도인 100 m에서는 훨씬 큰 에너지 차이가 발생하였고 그 분포 또한 10 m에서와 달리 나타나 수치모의를 통해 풍력발전 관심고도의 대기상태를 보다 정확히 나타냄을 알 수 있었다.

이상의 결과들을 통해 풍력자원평가와 에너지예보에서의 프로파일러자료에 대한 중요성을 발견하였고 보다 정확한 수치모의를 위해 변분 자료동화에 대한 필요성을 제시하였다. 이러한 방법은 풍력에너지와 관련한 수치모형 사용에 적극 활용될 것으로 기대된다. 3차원 변분자료동화는 많은 관측 자료가 활용될수록 좋은 결과를 가져온다. 그러므로 향후 레이더와 인공위성과 같은 원격탐사자료 등을 활용하면 수치모델의 성능을 더욱 향상시킬 것이다. 또한 보다 많은 사례일과 장기간의 수치모델을 통해 모델의 정확도에 대한 평가가 있어야 하며 실제 운영 중인 풍력단지에서 산출된 에너지와의 비교 또한 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 에너지기술연구원 신재생에너지기술개발사업인 「풍력자원의 장기변동성 불확도 평가」 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소, 2003, 한반도 악기상 집중 관측 사업(III) 3, 25-45.
- 방형준, 2007, 풍력발전기술의 현황과 전망, 한국태양에너지학회, 6(2), 3-12.
- 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2009, 신·재생에너지 보급통계(2009년 판), 14-15.
- 풍력발전연구센터, 2009, 국가바람지도, <http://www.kier-wind.org/sub24.html>.
- Alexandre, C., Crespo, A., Navarro, J., Lizcano, G., Madsen, H., Feitosa, E., 2008, A review on the young history of the wind power short-term prediction, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 1725-1744.
- Barker, D. M., Huang, W., Guo, Y. R., Bourgeois, A., Xiao, X. N., 2004, A Three-Dimensional Variational Data Assimilation System for MM5: Implementation and Initial Results, Mon. Wea.

- Rev., 132, 897-914.
- Elliott, D. L., Holladay, C. G., Barchet, W. R., Foote, H. P., Sansusky, W. F., 1986, Wind Energy Resource Atlas of the United States, Pacific Northwest Laboratory, U. S. Department of Energy.
- EMD(Energi-og Miljodata), 2001, The Danish Wind Resource Map with Data Export to GIS-Format, <http://www.emd.dk/>
- Emilio, M., Crespo, A., Jimenez, A., Garcia, J., Manuel, F., 2007, Wind energy resource assessment in Madrid region, *Renewable Energy*, 32, 1467-1483.
- Ide, K., Courtier, P., Ghil, M., Lorenc, A. C., 1997, Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational, *J. Met. Soc. Japan*, 75, 181-189.
- Kariniotakis, G., Mayer, D., Moussafir, J., Chevallaz-Perrier, R., Usaola, J., Sánchez, I., 2003, ANEMOS: development of a next generation wind power forecasting system for the large-scale integration of onshore & offshore wind farms. In *Proceedings of European wind energy conference*, Madrid.
- Kim, Y. C., Chung, C., Lee, E. C., Chun, Ch-H., Han, K. S., Kim, Y. W., 2006, Analysis of wind resources of the South seashore of Jeonnam province, *Proceedings of the Korean Soc. for New and Renewable Energy*, Autumn, 281-285.
- Kim H. G., Jang, M. S., Kyong, N. Ho., Lee, H. W., Choi, H. J., Kim, D. H., 2006a, Establishment of the low-resolution national wind map by numerical wind simulation, *J. of the Korean Solar Energy Soc.*, 26(4), 31-38.
- Kim, H. G., Lee, Y. S., Jang, M. S., Kyong, N. H., 2006b, A study on development of a forecasting model of wind power generation for Walryong site, *J. of the Korean Solar Energy Soc.*, 26(2), 27-34.
- Kim, H. G., Lee, Y. S., Jang, M. S., Kyong, N. H., 2006c, Development of the wind power forecasting system, KIER forecaster, *J. of The Korean Soc. for New and Renewable Energy*, 2(2), 37-43.
- Ko, K. N., Kim, K. B., Huh, J. C., 2008, Characteristics of wind for long-term period (10 years) at Seoguang site on Jeju iland, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 28(3), 45-52.
- Lee, H. W., Kim, M. J., Kim, D. H., Kim, H. G., Lee, S. H., 2009a, Investigation of the assimilated surface wind characteristics for the evaluation of wind resources, *Korean J. of Atmos. Environ*, 25(1), 1-14.
- Lee, H. W., Park, S. Y., Lee, S. H., Lim, H. H., 2009b, Characteristics of ozone advection in vertical observation analysis around complex coastal area, *Korean J. of Atmos. Environ*, 25(1), 57-74.
- Lee, S. H., Lee, H. W., Kim, D. H., Kim, H. G., 2007, Analysis of the relation between spatial resolution of initial data and satellite data assimilation for the evaluation of wind resources in the Korean Peninsula, *Korean J. of Atmos. Environ*, 23(6), 653-665.
- Manwell, J. F., Rogers, A. L., McGowan, J. G., Bailey, B. H., 2002, An offshore wind resource assessment study for New England, *Renewable Energy*, 27, 175-187.
- Michael, K., 2002, A new wind zone map of Germany, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1271-1287.
- Mike, F., 2001, Assimilation technique (3): 3dvar, ECMWF, Meteorological Training Course Lecture Series.
- NCAR, 2008, A description of the advanced Research WRF version 3.
- Park, O. R., Kim, Y. S., Cho, C. H., 2005, The Observing System Experiments with the Windprofiler and Autosonde at Haenam, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41(1), 57-71.
- Parrish, D. F., Derber, J. C., 1992, The National Meteorological Center's Spectral Statistical Interpolation analysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747-1763.
- Rehman, S., El-Amin, I. M., Ahmad, F., Shaahid, S. M., Al-Shehri, A. M., Bakhshwain, J. M., 2007, Wind power resource assessment for Rafha, Saudi Arabia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 937-950.
- 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 Technical Note, NCAR/TN-475+STR.
- Skjold, R. N., 1996, Wind Energy Planning in Denmark, WREC 1996.
- Benjamin, S. G., Schwartz, B. E., Szoke, E. J., Koch, S. E., 2004, The value of wind profiler data in U.S. weather forecasting, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 1871-1886.
- UCAR, 2001, Understanding Data Assimilation: How Models Create Their Initial Conditions, www.meted.ucar.edu.