연안지역 지형적 특성에 따른 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과 분석

정주희 · 노소영 · 송상근 · 김유근*

부산대학교 지구환경시스템학부
(2009년 9월 16일 접수; 2010년 1월 11일 수정; 2010년 4월 21일 채택)

The Application of Wind Profiler Data and Its Effects on Wind Distributions in Two Different Coastal Areas

Ju-Hee Jeong, Soyoung Lo, Sang-Keun Song, Yoo-Keun Kim*

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

(Manuscript received 16 September, 2009; revised 1 January, 2010; accepted 21 April, 2010)

Abstract

The effects of high-resolution wind profiler (HWP) data on the wind distributions were evaluated in two different coastal areas during the study period (23-26 August, 2007), indicating weak-gradient flows. The analysis was performed using the Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with a three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system. For the comparison purpose, two coastal regions were selected as: a southwestern coastal (SWC) region characterized by a complex shoreline and a eastern coastal (EC) region surrounding a simple coastline and high mountains. The influence of data assimilation using the HWP data on the wind distributions in the SWC region was moderately higher than that of the EC region. In comparison between the wind speed and direction in the two coastal areas, the application of the HWP data contributed to improvement of the wind direction distribution in the SWC region and the wind strength in the EC region, respectively. This study suggests that the application of the HWP data exerts a large impact on the change in wind distributions over the sea and thus can contribute to the solution to lack of satellite and buoy data with their observational uncertainty.

Key Words : Wind profiler data, Different coastal areas, Data assimilation, Wind distributions, WRF, 3DVAR

1. 서 론

연안지역 활동이 증가하면서 연안지역에서 보다 구체적이고 정확한 기상예측의 요구가 대두되고 있다. 특히 우리나라는 대규모 공단 및 주요 도심지와 원

자력 발전소들이 대부분 연안지역에 위치하고 있기 때문에, 연안지역에서의 국지 순환은 오염물질의 확산과 수송에도 직접적인 영향을 미친다(Kim 등, 2004; Oh와 Ghim, 2001). 또한 연안지역은 해일, 해수범람, 태풍 등에 의한 자연재해가 반복되는 지역으로 잘못된 해양예보의 경제적 손실과 해양재해에 따른 인명피해를 줄이기 위하여 연안 해역과 주변 해양의 예보 정확도 향상, 그 중에서도 연안지역의 바람장 개선에 관한 연구 중요성이 크게 부각되었다(Jeong 등, 2007; Kim 등, 2006; Lee 등, 2004).

*Corresponding Author : Yoo-Keun Kim, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

중규모 기상모델을 이용한 연안지역 바람장 개선을 위해서는 정확한 초기상을 생산하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 다양한 관측자료 확보가 필요하다. 지상관측망은 비교적 상세하게 구축되어 있지만, 상층의 기상상태를 파악할 수 있는 자료는 상대적으로 부족한 실정이다(Kim 등, 2008). 따라서 최근에는 공간 분해능과 시간분해능 두 가지면에서 향상된 고층기상 자료인 윈드프로파일러(wind profiler) 자료의 활용도가 크게 증가하고 있다(Crook과 Sun, 2002). 국내에서도 연안지역을 중심으로 해남, 강릉, 군산, 마산, 울산 등에 상층바람 관측이 이루어지고 있으며, 집중호우와 같은 재해성 기상현상의 실시간 탐지 및 구조 분석 연구에서 그 활용도를 높게 평가하고 있다(Chandrasekar 등, 2003; Won 등, 2006). 선행연구에서 Park 등(2005)은 윈드프로파일러 자료가 존데에서 관측되는 기상요소보다 모델링에 민감하게 영향을 준다고 하였고, Bae 등(2006)은 윈드프로파일러 자료를 적용한 초기장이 복잡한 해안지역에서 좋은 자료동화 효과를 낸다고 밝힌바 있다.

연안지역에 설치되어 있는 윈드프로파일러 자료가 인근 내륙과 해양의 바람장 개선에 기여하는 효과를 분석하는 것은 향후에도 윈드프로파일러 자료가 연안 지역 악기상 관측 등으로 더욱 많은 관측과 활용이 예상되는 바 의미있는 연구라고 사료되어진다. 특히, 한반도는 다양한 지형적 특성을 가지는 연안지역이 존

재하여 연안지역 국지순환이 각 해안의 지형적인 특성에 따라 차이를 보이는 특징이 있다(Jeong과 Kim, 2009). 따라서 본 연구에서는 윈드프로파일러 자료를 이용한 3차 변분 자료동화를 수행하여 중규모 기상모델의 초기장을 향상시키고, 이를 통해 개선된 초기장이 같은 한반도에 위치해 있으면서도 서로 다른 지형적인 특성을 가지는 남서해안과 동해안지역의 수평과 연직 바람장 개선에 미치는 영향을 분석하고 그 차이를 규명하고자 하였다.

2. 대상지역

한반도는 동북고 남서저의 형태로 큰 산맥들이 북부와 동부에 치우쳐 있고 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 같은 한반도에 위치해 있어도 높은 산맥과 복잡한 해안선의 영향이 서로 다르게 나타나는 다양한 연안지역이 존재한다(Jeong과 Kim, 2009). 연안지역에서의 순환은 다소 복잡한 양상을 띠고 있으나 해륙풍의 존재는 전 해안에서 뚜렷이 나타나며, 이들의 발달과 쇠퇴, 지속시간 등은 각 해안의 지형적인 특성에 따라 차이가 존재한다.

본 연구에서는 연안지역의 지형적인 특성에 따른 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과를 분석하기 위하여 서로 상반된 지형적 특성을 보이는 남서해안과 동해안지역을 연구 대상지역으로 선정하였다(Fig. 1).

Fig. 1. Study domains of Southwest and East coastal areas.

남서해안 지역은 바다를 향해 남서쪽으로 돌출된 형태로 해풍 수렴이 용이하고, 복잡한 해안선과 많은 섬들의 존재로 지역에 따라 해풍이 미치는 범위와 그 영향이 다르게 나타난다. 이러한 연안지역 근처 섬들의 존재는 바다와 섬들 사이에 수평적인 불균일성으로 인해 대규모 순환의 강도에 영향을 미쳐 바람장 예측이 쉽지 않다(Kim 등, 2005). 반면 동해안지역은 단조로운 해안선을 이루고 있으나 남북으로 높게 뻗은 태백산맥에 의한 산곡풍과 해륙풍이 결합되어 복잡한 국지현상이 나타나는 지역으로써, 산맥과 해양의 효과를 정확히 고려하여야 산곡풍과 해륙풍의 결합으로 나타나는 연안지역의 바람장을 정확하게 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 해안선과 다양한 섬들의 효과가 주로 나타나는 남서해안지역과 높은 산맥과 해양의 작용이 중요한 역할을 하는 동해안지역을 대상으로 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과를 분석하고 연안지역 지형적인 특성에 따른 바람장 개선 차이와 분포 특성을 확인하였다.

3. 자료 및 방법

3.1. 모델개요

본 논문에서는 WRF(Weather Research and Forecasting) 기상모델을 사용하였다. WRF는 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 사용하며, 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하고 연직 격자로는 높이와 지형에 근거하여 새로 추가된 Eulerian 질량 좌표계(mass-based terrain following coordinate)를 사용한다(Skamarock 등, 2005). 모델링은 10, 3.3, 1.1 km(남서해안지역), 1.1 km(동해안지역)의 수평격자를 갖는 4개의 도메인으로 구성하였으며, 연직격자는 28층을 사용하였다. 초기 및 경계조건은 기상청에서 제공하는 30 km 해상도의 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) 자료와 1도 FNL(Global Final Analysis) 지표자료, 0.5도 SST(Sea Surface Temperature)자료를 이용하였다. 모델에 사용된 물리과정과 도메인의 상세 정보는 Table 1에 제시하였다. 연구 사례일은 강수일을 제외하고 중관장의 영향이 약하여 국지풍의 발달이 뚜렷하게 나

타난 2007년 8월 23일 0000 LST부터 26일 0000 LST로 선정하였으며, 모델 초기조건의 불확실성에 따른 영향을 최소화하기 위하여 첫 하루(24시간)는 spin-up 기간으로 하였다.

Table 1. Domain configuration

	D01	D02	D03	D04
Cells in x-direction	94	187	135	135
Cells in y-direction	94	187	135	135
Z-levels	28	28	28	28
Resolution (km)	10	3.3	1.1	1.1
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch	-	-	-
Planetary Boundary Layer	YSU			
Microphysics	WRF Single-Moment 6-class			
Radiation (long/shortwave)	RRTM/Dudhia			
Surface Layer	MM5 similarity			
Land Surface	Noah LSM			

관측자료를 자료동화하기 위해 사용된 WRF-VAR (WRF Variational Data Assimilation System)는 초기 추정치와 관측값의 양방에 가장 가까운 대기의 상태를 구하기 위하여 비용함수(cost function)를 도입하고, 비용함수의 최소점을 수치적으로 찾아내어 얻어진 최소점을 분석값으로 이용하는 자료동화기법을 말한다(신과 Guo, 2002). 최근까지 가장 많이 사용되어 왔던 3DOI(3D Optimal Interpolation)에 비해서, 변수 간 역학적 관계의 반영 및 분석과 비선형관계를 가지는 관측 자료의 분석도 가능하다는 장점이 있다. WRF-VAR에서 사용되는 비용함수(J)는 아래와 같이 표현할 수 있다(NCAR TECHNICAL NOTE, 2008).

$$J = \frac{1}{2}(X - X^b)^T \mathbf{B}^{-1}(X - X^b) + \frac{1}{2}(Y - Y^o)^T \mathbf{R}^{-1}(Y - Y^o) = J^b + J^o \quad (1)$$

x 은 분석장을 나타내며, x^b 는 초기 배경장, B 는 배경장의 오차 공분산 행렬, Y 는 측정을 어떻게 하나에 따라 시스템에 의해서 변형되는 관측값의 행렬이며,

Y^o 는 관측값의 행렬이며, R 은 관측성과 대표성 오차 공분산 행렬을 나타낸다. 비용함수는 관측값과 관련된 비용함수(J^o)와 초기추정치 비용함수(J^f)로 구분할 수 있으며, 분석장이 실제 대기와 같아질 확률을 최대한으로 하기 위해서는 비용함수를 최소화 하면 된다. 본 연구에서도 사용된 각각의 관측자료들이 WRF-VAR에 안정적으로 동화되었는지 확인하기 위하여 비용함수(cost function, J)와 경도의 놈(norm of the gradient, G) 분석을 실시하였고, WRF-VAR의 입력장으로 들어가는 background error는 가장 널리 쓰이는 NMC 방법으로 산출하였다.

3.2. 자료 및 실험설계

자료동화에 이용된 76개의 지상 관측자료(station data, SD)와 6개의 연직 윈드프로파일러 자료(wind profiler data, WD)의 관측지점 위치는 Fig. 2에 나타내었고, 관측지점별 일 유효관측율 75% 이상인 날만 자료동화에 이용하였다. 이상 지상 관측자료와 연직 윈드프로파일러 자료를 논문에서 SD와 WD라고 표기한다. 자료동화에 이용된 WD는 문산(47099), 군산(47140), 해남(47261), 마산(47155), 울산(47151), 강릉(47105)을 포함한 6지점이며 지상에서부터 약 5 km 고도까지의 자료를 이용하였고, 약 72 m 간격으로 10

Fig. 2. The location of observations used data assimilation in D01(The numbers on domains indicate the observation sites numbers).

Fig. 3. The flow chart of cold start mode and cycling mode for WRF-VAR simulation.

분 간격의 해상도를 갖는다. 3차원 변분 자료동화방법은 변분법의 적용횟수에 따라 cold start 방식과 cycling mode 방식으로 구분되며 자세한 설명은 Fig. 3에 제시하였다. 본 논문에서는 cycling mode 방식을 이용하여 SD에서 생산한 320개의 기상자료 중에서 풍향, 풍속, 기온자료와 WD의 풍향, 풍속자료가 3시간 간격으로 WRF-VAR의 입력값으로 이용되었고, 자료동화 환경은 모델링의 기본 설정인 5 km를 동일하게 적용하였다.

본 연구에서는 같은 연안지역이라도 다른 지형적 특성을 보이는 남서해안지역과 동해안지역을 대상으로 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과를 분석하기 위하여 Table 2와 같은 다양한 실험설계를 하였다. 먼저 관측자료의 자료동화없이 구성된 초기장을 이용한 실험이 EXP0이고 기본적으로 SD의 자료동화 효과를 분석하기 위한 base case로 사용되었다. cycling mode 방식으로 SD만을 이용한 경우가 EXP1이며 WD의 자료동화 효과를 분석하기 위하여 EXP1에 WD를 추가한 실험이 EXP2이다. EXP0과 EXP1 실험은 EXP2의 모델링 결과로부터 WD의 자료동화 효과를 분석하기 위한 base case로 사용되며, 본 연구에서는 지상관측자료와 비교하여 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과를 분석하기 위하여 EXP2 실험 결과를 주요하게 설명하였다.

Table 2. Description of experiment

Experiment No.	Data used in 3DVAR	Mode
EXP0	no data assimilation	-
EXP1	station	Cycling
EXP2	station & wind profiler	Cycling

4. 결 과

4.1. 초기장 개선효과

사용된 각각의 관측자료들이 WRF-VAR에 안정적으로 동화되었는지 확인하기 위하여 Fig. 4에 비용함수와 경도의 놈 분석을 수행하였다(한국학술진흥재단, 2009; Lo, 2009). SD만 적용한 경우는 64회, SD와 WD 자료를 적용한 경우는 66회의 최소화 과정을 거쳐 비용함수와 경도의 놈 값이 모두 0으로 수렴하여 각 관측자료들이 안정적으로 동화되었음을 확인하였다.

한반도 영역에서 SD와 WD의 자료동화 효과를 분석하기 위하여 연직 eta 층에 대해 바람의 동서(u) 성분과 남북(v) 성분의 상관계수(correlation coefficient)와 평균편차(mean bias)를 Fig. 5에 나타내었다(한국학술진흥재단, 2009; Lo, 2009). 분석을 위해 사용한 자료는 2007년 8월 23일 0000LST부터 26일 0000LST동안 한반도영역(D01)에서 3시간 간격으로 자료동화가 수행된 격자별 바람의 동서(u) 성분과 남북(v) 성분 초기장

Fig. 4. Cost function J and norm of the gradient G with respect to the number of iterations. The dashed line is for SD (station data) and the solid line is for WD (wind profiler data).

Fig. 5. Vertical correlation coefficient and bias error of u-component and v-component at initial time. The dashed line is for SD and the solid line is for WD, respectively.

이다. 이와 같은 분석을 통해 모델링 초기장으로 사용된 3시간 간격 SD와 WD자료의 자료동화 특성을 분석할 수 있다. 상관계수는 실험별 상관도를 나타내는 것으로 각 실험결과에 따른 연직 층별 바람장의 차이가 커질수록 관측자료의 자료동화 효과가 강하게 나타남을 의미하고, 상관도는 0에 가까워지고 편차의 평균인 BIAS도 함께 커진다. 반면 자료동화 효과가 작을수록 상관도는 1에 가까워지면서 BIAS도 작아진다. WD는 EXP1과 EXP2 실험을 비교한 것으로 윈드프로파일러 자료의 연직 자료동화 효과를 분석한 결과이고, SD는 EXP0와 EXP1의 실험 결과를 비교한 것으로 WD의 자료동화 효과를 분석하기 위한 base case로 사용되었다.

u-성분 바람의 연직 상관도 분석결과에서 WD는 지상에서 상층으로 갈수록 자료동화 효과가 커지다가

eta 10층(고도 1 ~ 2 km)에서 0.894의 최소 상관도를 보이고 다시 1에 가까워지는 종모양의 가우시안 분포를 나타내고 있다. WD가 u-성분 바람에 영향을 미치는 고도는 지표에서 eta 15층 높이인 약 5 km 고도까지이며 BIAS를 보면 15층 이상의 높이에서도 다소 영향이 있음을 확인할 수 있다. 그러나 SD는 최하층인 eta 1층에서 최소 상관도 0.998을 나타내었으나, 상층으로 갈수록 자료동화 효과가 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. SD는 자료 동화되어진 자료의 수가 WD보다 많음에도 불구하고 지표 부근의 효과 역시 WD보다 약하게 나타나고 있다. v-성분 바람의 경우 u-성분과 비슷한 분포를 보이고 있으나 최대 자료동화 효과를 나타내는 고도와 상관도가 u-성분 바람보다 더 낮게 나타났다. 이는 WD가 본 연구의 사례기간동안 바람의 u-성

분보다는 v -성분에 대해 더 낮은 고도에서 더 큰 자료동화 효과를 나타내고 있음을 보여주는 것이다. 또한 지표 부근에서의 상관도 역시 v -성분 바람의 경우가 u -성분 바람보다 작은 값을 나타내고 있으며, 이는 전체적으로 v -성분 바람에 더 큰 영향이 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 WD자료가 일반적으로 u -성분 바람보다 v -성분 바람에 더 큰 영향을 준다는 의미는 아니며, 다양한 사례일동안의 종관상태에 따라 그 영향은 차별화될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이러한 WD자료의 초기장 특성이 모델링 결과에 어떤 영향을 미치는지를 분석하고자 한 것이다. WD 자료를 이용한 초기장 개선은 SD 자료에 비해 상대적으로 적은 자료임에도 그 효과는 상층은 물론 대기 하층에도 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 통해 서로 다른 지형적 특성을 보이는 남서해안과 동해안지역에 나타나는 모델링의 자료동화 효과를 분석하였다.

4.2. 모델링 결과분석

WD를 이용하여 3차 변분 자료동화를 수행한 초기장이 남서해안(D03)과 동해안(D04)지역의 바람장에 미치는 영향을 내륙과 해양으로 구분하여 분석하였다. spin-up 기간을 제외한 2007년 8월 24일 0000LST부터 26일 0000LST까지 48시간이며, 모델결과인 landmask(0: 해양, 1: 내륙)를 기준으로 내륙과 해양의 풍속을 각각 산출하여 수행하였다. Fig. 6은 남서해안과 동해안지역에 대한 내륙과 해양에서의 WD 효과를 분석하기 위하여 모델링 기간동안 EXP1과 EXP2에 대한 풍속의 산포도와 상관도 분석을 수행한 결과이다. 상관도 값이 낮을수록 WD의 자료동화 효과가 크게 작용하고 있음을 의미한다. 전반적으로 동해안지역이 남서해안지역보다 강한 풍속을 보였고, 두 지역 모두 내륙보다는 해양에서 강한 풍속을 나타냄을 확인할 수 있었다. 해안선이 복잡하고 많은 섬들이 존재하는 남서해안지역은 내륙에서 0.32의 상관도를 보

Fig. 6. Scatter plot and correlation coefficient for wind speed of EXP2 in relation to wind speed of EXP1.

였고, 해양에서는 0.14의 상관도를 보였다. 전체적으로 낮은 상관도를 보인 남서해안지역은 WD 적용을 통한 초기장 개선 효과가 수평바람장 모의에 많이 반영되었다고 추정할 수 있다. 반면 단조로운 해안선을 가진 동해안지역은 내륙에서 0.65의 상관도와 해양에서 0.43의 상관도를 보여, 남서해안지역보다는 WD 효과가 작음을 확인할 수 있었다. 이는 연직적으로 조밀하게 관측되는 자료 특성으로 상층뿐 아니라 지상의 자료까지 보정해주는 역할을 하는 WD 자료가 높은 지형과 지형의 굴곡이 많은 동해안지역보다는 해안선은 복잡하지만 완만한 지형이 주로 분포하는 남서해안지역의 국지순환에 크게 기여함을 확인하였다. 그리고 두 지역 모두 내륙보다는 해양에서 WD의 효과가 더 크게 반영되고 있는 특징이 있었다. 우리나라에서 발생하는 대부분의 기상현상이 해양으로부터 접근하여 해양에서의 정확한 기상상태 분석이 중요함에도 불구하고, 해상 관측자료의 부족으로 정확한 기상 분석에 한계점이 있는 것이 사실이다. 본 결과는 연안 지역의 WD가 해상에서의 자료동화 효과에 크게 기여하고 있음을 제시하는 것으로 앞으로 많은 활용이 요구되는 바이다.

Fig. 7은 spin-up 기간을 제외한 모델링 기간동안 시간별 평균풍속의 일변화 분포를 나타낸 것이다. 풍속구간은 1 ms^{-1} 이하의 무풍과 $1 - 4 \text{ m}^{-1}$, $4 - 7 \text{ ms}^{-1}$, $7 - 9 \text{ ms}^{-1}$, 9 ms^{-1} 이상의 5개 풍속구간으로 나누어 구간별 풍속 빈도분포의 일변화를 조사하였다. 대체적으로 WD의 효과는 낮에서 밤으로 바뀌어 해풍이 육풍으로 바뀌는 시점에서 풍속을 강하게 모의하는 경향이 남서해안과 동해안지역에서 모두 나타났으며, 특히 이러한 현상은 내륙보다 해양에서 더 강하게 나타났다. 반면, 육풍이 해풍으로 바뀌는 오전에는 동해안 지역에서 약한 바람의 빈도가 증가하였다. 동해상에서의 풍속은 15시 이후부터 $7 - 9 \text{ ms}^{-1}$ 의 강한 풍속이 급격히 증가하였고, 이러한 해상에서의 강한 풍속은 비슷한 시간 동해안지역 내륙의 풍속분포에도 영향을 미치고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 연안지역을 따라 분포해 있는 WD가 내륙보다는 해상의 바람을 보다 강하게 모의하면서 해풍과 육풍이 전환되는 시점에서 풍속의 변화에 보다 민감하게 영향을 미치는 것으로 추정된다. 남서해안지역은 복잡한 해안선과 섬들의

존재로 지역에 따라 해풍이 미치는 범위와 영향이 다르게 나타난다. 따라서 WD의 영향이 일 중 고르게 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 반면, 동해안지역은 단조로운 해안선으로 내륙과 해양의 비열차가 뚜렷하여 해륙풍이 뚜렷하게 나타난다. 이러한 지역적인 특성으로 WD가 해륙풍이 전환되는 시간에 특징적으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 남서해안과 동해안지역의 2007년 8월 24일 1500 LST와 8월 25일 0000 LST의 EXP1과 EXP2에 대한 지상 10 m의 수평바람장을 관측자료와 비교한 것이다. 앞서 분석한 WD의 자료동화 효과가 관측자료에 근사하게 작용하였는지를 분석하기 위한 것이다. 8월 24일 1500 LST, 남서해안 지역은 EXP1이 도메인 중심에 위치한 섬인 진도와 목포를 비롯한 복잡 해안가에서의 풍속과 풍향이 관측값과 유사한 바람 벡터를 나타내고 있지만 다른 지역에서의 바람장 모의 정확도가 다소 떨어졌다. WD가 동화된 EXP2는 해안선과 섬들 주변에서 바다로부터 불어 들어오는 해풍의 유입을 잘 모의하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, EXP1에서는 남해상의 해상풍을 강하게 모의한 반면 EXP2에서는 다소 약하게 모의하여 관측값과 유사한 풍속분포를 보이고 있다. 남서해안 지역에서는 WD의 효과로 해상에 위치한 작은 섬들에 의해 복잡하게 생성된 섬 주변의 와류가 수치모의에 잘 반영되는 것을 확인하였다. 동해안지역에서 EXP2는 EXP1에서 약하게 모의되었던 해상풍을 다소 강하게 모의하고 있으며, 특히 해안선을 따라 태백산맥으로 불어 들어오는 해풍의 유입을 잘 모의하고 있다. 또한 관측값에서 강하게 모의된 해안가 근처의 강한 풍속을 EXP2에서 잘 반영하였다. 8월 25일 0000 LST에서는 야간의 약한 풍속을 과대 모의하는 WRF의 단점을 WD가 보완하여 EXP2가 관측값과 유사한 풍속 분포를 보이고 있으나, 풍향분포에서는 모두 관측값과 다소 차이를 보였다. 동해안지역에서는 태백산맥의 높은 지형과 골짜기에 의한 산곡풍을 EXP2에서 보다 뚜렷하게 모의하였다. WD의 영향은 복잡한 남서해안지역에서는 풍향의 변화에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었고, 동해안지역에서는 풍속의 변화에 더 크게 작용한 것으로 나타났다.

Fig. 7. Diurnal variations of wind speed distribution simulated at 10 m AGL. Each section represents the frequency of wind speed.

Fig. 8. Simulated near surface wind vectors (arrows) at 10m AGL at 1500 LST on 24 August, 2007 for EXP1, EXP2 and OBS.

Fig. 9. Simulated near surface wind vectors (arrows) at 10m AGL at 0000 LST on 25 August, 2007 for EXP1, EXP2 and OBS.

5. 결 론

본 연구에서는 윈드프로파일러 자료를 이용하여 3차원 변분 자료동화를 수행하였으며, 이를 통해 개선된 초기장이 같은 한반도에 위치해 있으면서도 서로 다른 지형적 특성을 가지는 남서해안과 동해안지역의 바람장에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

전반적으로 윈드프로파일러 자료는 해상에서 약하게 모의되었던 값들을 더 강하게 보정하는 역할을 하였으며, 육지 내에서의 전체적인 강한 바람을 부분적으로 약하게 모의함으로써 지형에 의한 상세한 바람장 산출에 보다 효과적으로 작용함을 알 수 있었다. 윈드프로파일러 자료의 영향은 단조로운 해안선을 가진 동해안보다는 복잡한 해안선과 많은 섬들로 이루어진 남서해안에서 더 크게 나타났다. 풍향과 풍속의 비교 결과에서는 남서해안지역에서는 풍향분포 개선에 더 큰 기여를 하였으며, 동해안지역에서는 해안선 부근의 풍속 개선에 더 효과적으로 작용하였다. 두 지역 모두 해양에서 윈드프로파일러 자료의 자료동화 효과가 크게 나타났으며, 이는 해상 관측자료의 부족과 상대적으로 관측 오차가 큰 위성자료의 문제점을 보완하는데 윈드프로파일러 자료가 기여할 수 있음을 제시하였다. 이상의 분석결과, 보다 많은 지점에서의 윈드프로파일러 관측과 그 자료가 활용된다면 복잡한 연안지역의 바람장 개선에 크게 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3308)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 신동현, Guo, Y. R., 2002, 3DVAR를 이용한 지상 관측 자료 동화의 효과, 대기, 12(1), 391-393.
- 한국학술진흥재단, 2009, 2007년도 기초연구지원기초과학(단독연구) 최종보고서, 실시간 윈드프로파일러 자료와 수치모델링을 통한 연안지역의 바람장 예측 개선 및 해상풍력자원 평가.
- Bae, J. H., Kim, Y. K., Jeong, J. H., Kweon, J. H., Seo, J. W., Kim, Y. S., 2006, Improvements in the Simulation of Sea Surface Wind Over the Complex Coastal Area - 2: Data Assimilation Using LAPS, Journal of the Environmental Sciences, 15(8), 745-757.
- Chandrasekar, A., Philbrick, C. R., Doddridge, B., Clark, R., Georgopoulos, P., 2003, A comparison study of RAMS simulations with aircraft, wind profiler, lidar, tethered balloon and RASS data over Philadelphia during a 1999 summer episode, Atmospheric Environment, 37, 4973-4984.
- Crook, N. A., Sun, J., 2002, Assimilating Radar, Surface, and Profiler Data for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project, Journal of atmospheric and oceanic technology, 19, 888-898.
- Jeong, J. H., Kim, Y. K., 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.
- Jeong, J. H., Kwun, J. H., Kim, Y. K., 2007, The Effects of Data Assimilation on Simulated Wind Fields Using Upper-Air Observations, Journal of the Environmental Sciences, 16(10), 1127-1137.
- Kim, B. J., Lee, S. J., Cho, C. H., Ryu, C. S., Lee, S. L., Kim, H. K., 2008, A Study on the Feasibility of Automation of Upper-Air Sounding Using Autosonde Installed at Haenam, Korea, Journal of the Environmental Sciences, 17(3), 325-334.
- Kim, Y. K., Jeong, J. H., Bae, J. H., Oh, I. B., Kweon, J. H., Seo, J. W., 2006, Improvement in the Simulation of Sea Surface Wind over the Complex Coastal Area Using WRF Model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(3), 309-323.
- Kim, Y. K., Jeong, J. H., Bae, J. H., Song, S. K., Seo, J. W., 2005, Study on planetary boundary layer schemes suitable for simulation of sea surface wind in the southeastern coastal area, Korea, Journal of the Environmental Sciences, 14(11), 1015-1026.
- Kim, Y. K., Oh, I. B., Kang, Y. H., Hwang, M. K., 2007, Modeling of the Air Pollutant Recirculation using the MM5-CAMx on Ozone Episode in Greater Seoul Area during June, 2004, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(3), 297-310.
- Lee, H. W., Won, H. Y., Choi, H. J., 2004, Numerical Simulation of Atmospheric Flow Fields Using Surface Observational Data in the Complex Coastal

- Regions, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 20(5), 633-645.
- Lo, S., 2009, The effects on improvement of coastal wind simulation using SRTM topography data and wind profiler data assimilation, A M.S. thesis, Division of Earth Environmental System, Pusan National University.
- NCAR TECHNICAL NOTE, 2008, A description of the advanced research WRF Version 3.[NCAR/TN-475+SRT, available from National Center for Atmospheric Research, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000.
- Oh, H. S., Ghim, Y. S., 2001, Numerical study of atmospheric dispersion of a substance released from an industrial complex in the southern coast of Korea, Atmospheric Environment, 35, 3103-3111.
- Park, O. R., Kim, Y. S., Cho, C. H., 2005, The Observing System Experiments, with the Wind-profiler and Autosonde at Haenam, Journal of Korean Meteorological Society, 41(1), 57-71.
- Skamarock, W. C., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., Powers, J. G., 2005, A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468 + STR. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Won, H. Y., Cho, C. H., Baek, S. K., 2006, Classification of Precipitation Type Using the Wind Profiler Observations and Analysis of the Associated Synoptic Conditions: Years 2003-2005, Atmosphere, 16(3), 235-246.