

## 풍력자원 평가를 위한 바람자료 동화 특성 평가

### Investigation of the Assimilated Surface Wind Characteristics for the Evaluation of Wind Resources

이화운 · 김민정\* · 김동혁 · 김현구<sup>1)</sup> · 이순환<sup>2)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부

<sup>1)</sup>한국에너지기술연구원

<sup>2)</sup>부산대학교 BK21 연안환경시스템 사업단

(2008년 2월 29일 접수, 2009년 2월 17일 채택)

Hwa Woon Lee, Min-Jung Kim\*, Dong-Hyeuk Kim, Hyun-Goo Kim<sup>1)</sup>  
and Soon-Hwan Lee<sup>2)</sup>

*Department of Earth Environment System, Pusan National University*

<sup>1)</sup>*Korea Institute of Energy Research*

<sup>2)</sup>*BK21 Coastal Environment System School, Pusan National University*

(Received 29 February 2008, accepted 17 February 2009)

#### Abstract

Wind energy has been recognized as one of the most important and fastest growing energy resources without emission of air pollutant. Thus, it is necessary to predict wind speed and direction accurately both in time and space toward the efficient usage of wind energy.

Numerical simulation experiments using the Fifth-Generation Mesoscale Model (MM5) are carried out to clarify the impact of surface observation data assimilation on the estimation of wind energy resources. The EXP\_Radius run was designed with respect to the radius of influence in the Four-Dimensional Data Assimilation (FDDA), and the EXP\_Impact run was made by changing the nudging coefficient that determines the relative magnitude of the nudging term. The simulation period covers a clear-sky event on 3~5 June 2007 and another is on 2~4 December 2006.

It is found that the simulated results are very sensitive to the radius of influence and nudging parameters in the FDDA. The further analysis of the results shows that the impact of the radius of influence tends to be stronger in weak synoptic flow episode than that in strong synoptic flows episode. The nudging factor is also sensitive to the intensity of the synoptic flows.

**Key words** : Wind energy, MM5, Data assimilation, Radius of influence, Nudging coefficient

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : kmj01love@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

고도화된 산업 사회에서 에너지 자원의 확보는 매우 중요한 요소이다. 특히 화석연료의 고갈에 따른 대체에너지 자원의 개발에 관심이 집중되고 있다. 우리나라 역시 2011년까지 총에너지 생산량의 5%를 신재생에너지로 공급하며, 신재생에너지 중 기술숙련도가 높고 경제성이 뛰어난 풍력에너지는 전체발전량의 9.4%를 확보한다는 목표를 설정하였다(이순환 등, 2007a; 김현구와 최재우, 2002).

이러한 한반도의 풍력자원 평가를 위해서는 먼저 한반도의 바람장을 정확히 산정하여야 한다. 그러나 한반도는 높은 산악구조와 복잡한 해안선이 혼재하여 다양한 풍계가 결합되어 나타나기 때문에 한정된 지역의 바람 관측을 통하여 전체지역의 바람장으로 일반화시키기가 어려우며, 또한 한반도 전역을 동일한 정확도로 관측하는 것 역시 매우 어렵다(류찬수 등, 2004). 그러므로 비교적 정확한 바람장을 산정하기 위하여 대기수치모형을 이용한다. 대기수치모형은 물리역학적인 자연 방정식을 바탕으로 바람을 형성하는 요인과 그 강도를 예측하여 지역적으로 생성되는 바람을 도출한다. 이렇게 생성된 자료를 바탕으로 한반도 풍력자원을 평가할 수 있다.

그러나 수치모형을 이용한 바람의 평가는 수치해석의 근본적인 불확실성에 의하여 정확한 바람의 평가는 불가능하다(Pielke, 2002). 이러한 불확실성을 줄이기 위하여 원격 탐사자료를 비롯한 다양한 관측 자료를 수치모형에 동화시켜 바람을 비롯한 기상장을 평가한다(Lindskog, 2004; Talagrand, 1997). Lee *et al.* (2008)은 한반도 풍력에너지를 평가하기 위하여 인공위성에서 생산된 해상풍자료를 동화하여 한반도 바람장의 예측정확도를 향상시킬 수 있음을 보였으며, 이화운 등(2005)은 지상관측자료의 동화방법의 차이에 따라 바람장과 오염장 예측이 달라질 수 있음을 보였다.

그리고 다양한 자료의 동화 효율성 뿐 아니라 관측자료가 가지는 정확도 역시 수치예측에 중요하다. Lee *et al.* (2007)은 부산지역의 바람과 온도 관측 자료를 이용한 수치동화 실험에서 온도자료 동화의 정확도 편차는 바람관측 자료에 비하여 크지 않음을 보였으며, 김철희와 송창근(2002)은 4차원 변분법을

이용하여 연안지역의 바람장의 정확도가 개선되는 것을 확인하였다. 그리고 이순환 등(2007b)은 관측자료의 대표성을 확인하기 위하여 바람장 자료를 비롯한 기상자료의 대표반경, 즉 영향반경에 대한 분석이 선행되어야 한다고 하고 광양지역 내 기상대급 관측바람과 온도의 대표 반경을 통계적인 방법을 통하여 분석하였다.

이러한 연구는 관측자료의 동화가 바람장 예측정확도를 높이는 주요한 도구로 사용될 수 있으며, 관측자료의 대표성을 확보하는 것도 중요한 요소임을 나타낸다.

그러나 이러한 관측자료를 적용한 수치동화과정에 대한 구체적인 연구는 거의 이루어지지 않았다. 즉 관측자료의 동화 시간 간격, 영향 반경, 동화 계수 등 동화강도에 관한 연구는 관측자료의 정확도 못지않게 중요한 요소이다. 본 연구는 복잡한 해안선과 산악지역을 포함하는 광양만 지역을 대상으로 수치모형에 적용되는 관측자료 동화강도에 따른 예측정확도를 정량적으로 평가하고 이를 바탕으로 한반도 풍력자원 평가의 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 광양만권역을 포함하는 전라남도 동부 남해안 일대로 하였다. 광양만권은 한반도의 남쪽 서남해안에 위치한 권역으로서 전라남도의 여수시, 광양시, 순천시, 경상남도의 하동군, 남해군을 포함하고 있으며 서울로부터 직선으로 320 km 떨어진 곳에 위치하고 있다.

광양지역은 전라남도 동부 연안지역에 위치한 인구 80만의 대표적인 산업단지이며, 광양제철소를 비롯한 에너지 소비가 많은 공업시설이 다수 입주하고 있다. 그러므로 풍력에너지 등 신·재생에너지의 이용을 통한 에너지 효율을 극대화할 필요가 있으며, 대기 환경 보존의 측면에서도 정확한 바람장의 평가가 요구되는 지역이기도하다.

지형적으로 광양만권은 해발 200 m 초과지역이 전체 48%인 235 km<sup>2</sup> 정도로 지리산과 백운산을 끼고 있는 산악지역이다. 광양 후방으로 지리산, 백운산, 불암산 등이 있어서 남쪽으로 급경사를 이루고 있기 때문에 국지 순환 형성에 있어서 강한 지형강제력이

작용한다. 그리고 광양의 전면으로 해안선이 위치한 전형적인 배산입수형의 지형을 이룬다. 이러한 지형으로 중관적 순환계 뿐 아니라 연안 및 산악 지역의 지형적 특성으로 인해 형성되는 해륙풍, 산곡풍과 같은 국지 순환계까지도 매우 복잡하게 표출되어 그 지역만의 고유 기상장을 형성하기도 하므로 기상장 수치 모델링에 있어서 어려움이 있으며 이러한 지형적 특성이 반영된 기상장의 수치모의가 필수적이라고 할 수 있다.

중관기상장에 따른 자료동화의 영향을 보기 위하여 중관장의 강도가 다른 두 날을 수치실험의 대상으로 설정하였다. 첫 번째 사례일은 2007년 6월 4일이다. 4일 서해상에 위치하는 이동성 고기압이 빠른 속도로 일본 남쪽으로 이동하고 있기 때문에 광양지

역은 고기압의 연변에 위치하여 풍속이 약한 남서풍의 영향을 받고 있고 중규모 기류가 발생할 가능성이 높다. 반면 두 번째 사례일인 2006년 12월 2일과 3일에는 차가운 대륙성 고기압이 확장하면서 우리나라는 대체로 맑고 차가운 날씨를 나타내고 있으며, 북서풍 또는 북풍의 강한 바람이 불었다. 따라서 중규모 기류가 아닌 중관장의 영향이 크게 나타난다 (그림 1).

### 3. 수치모형 및 자료동화

#### 3.1 수치모델

바람장 분석을 시행하기 위해서 본 연구에서 사용

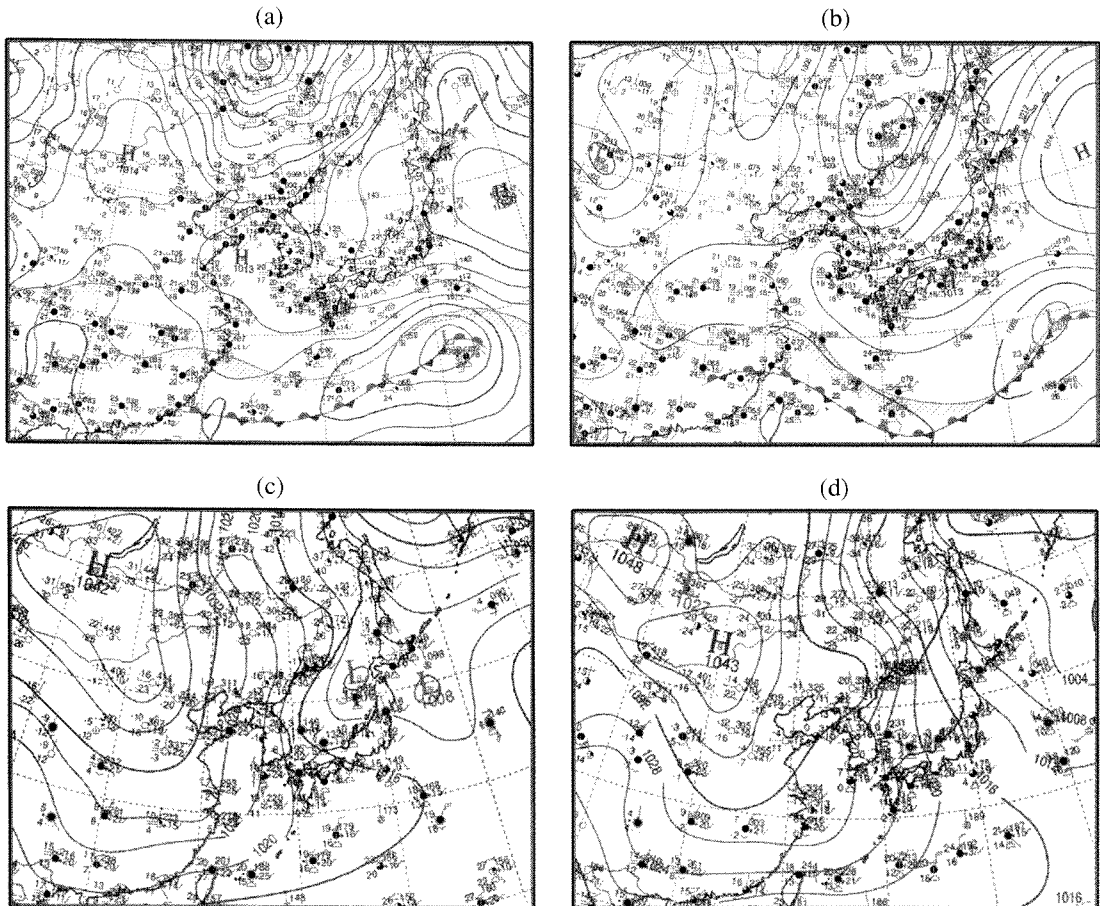


Fig. 1. Surface weather maps at (a) 0900 LST on 4 June 2007, (b) 0900 LST on 5 June 2007, (c) 0900 LST on 2 December 2006, (d) 0900 LST on 3 December 2006.

한 모델은 3차원 중규모 기상 모델인 MM5(The Fifth-Generation Mesoscale Model)로 미국기상센터(National Center for Atmospheric Research)와 펜실베이니아 주립대학이 공동 개발한 후 지속적으로 개선되어온 모델이다. 현재 이 모델은 세계 각국의 여러 대학과 연구소에서 사용되고 있으며, 한국 기상청에서 현업모형으로 사용하고 있는 모형으로 많은 선행 연구에 의하여 안정성과 신뢰성을 확보하였다.

본 모형은 비 압축성 비 정수계(Non-compressible non-hydrostatic) 방정식계를 사용하며 Arakawa B 격자망으로 구성되어 온도, 비습 등의 스칼라 변수는 각 격자의 중심점에서 동서바람성분과 남북바람성분은 각 격자의 모서리점에서 정의된다. 연직 격자로는 지형을 따르는 시그마 좌표계( $\sigma$ -coordinate)를 사용하며 다중격자체계의 운용과 비정수 역학 및 4차원 자료동화(Four-Dimensional Data Assimilation)가 가능하다(NCAR, 2003).

그림 2는 본 연구에서 사용한 수치모형의 계산영역을 나타낸 것이다. 수평격자간격이 각각 27, 9, 3, 1 km인 4개의 계산구역으로 설정하였다. 1 km 격자의 최종도메인은 115×118의 격자수로 구성되어 있으며, 광양만 권역을 비롯한 복잡한 연안지역이 포함되도록 하였다. 연직으로는 4개 도메인 모두 33개의 층으로 구성되었으며, 최하층의 높이는 30m로 하고 연직적으로 지표면에 가까울수록 해상도를 높게 설정하였다. 그리고 각 도메인의 격자수 및 모델링에 사용된 물리적과정은 표 1에 자세히 나타내었다.

모델 수행시 사용된 물리과정 중 적은 모수화 과정은 격자크기가 10~30 km인 중규모에서 적합한 Grell cumulus Scheme을 사용하였다(Grell *et al.*, 1994). PBL 경계층에 대한 물리과정은 Hong and Pan (1996)에 의해 제안된 것으로 MRF PBL Scheme을 사용하였다. 미세물리 과정은 Reisner *et al.* (1998)에서 제안한 Mixed-Phase Scheme을 적용하였다. 그리고 복사과정으로 사용한 RRTM 장파복사 방법은 높은 정확도와 효과적인 방법으로 수증기, 이산화탄소, 오존등의 상세한 흡수스펙트럼의 효과를 나타낸다(Mlawer *et al.*, 1997).

본 연구에서 사용된 모델의 초기 및 경계 입력 자료는 미국 환경 예보국(National Center of Environment Prediction)에서 제공하는 CDAS (Climate Data Assimilation System) 전 지구 재해석 자료이다.

### 3. 2 자료동화

관측자료를 수치모형에서 제시된 분석장과 결합하는 과정을 통하여 모형의 오차를 줄이게 된다. 이러한 자료동화의 일부로 관측자료의 가중치를 계산하여야 한다. 이러한 가중치는 격자와 관측값의 거리, 자료의 신뢰도 등 여러 가지 요소가 고려되는데 본 연구에서는 거리의 함수로 설정하였다. 본 연구에서는 Cressman 방법을 선택하였으며, 이에 대한 모식도는 그림 3에 나타내었다. Cressman 방법은 각 관측값

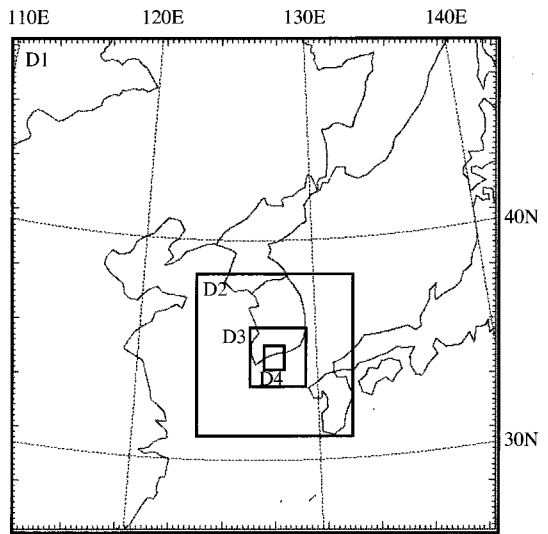


Fig. 2. Map depicting the four horizontal MM5 domains.

Table 1. The configuration of MM5 modeling.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal grid	91 × 91	91 × 91	91 × 91	115 × 118
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	33 Layers			
Physical options	MRF PBL scheme Grell cumulus scheme Mixed phase scheme RRTM longwave scheme Five-layer soil scheme			
Initial data	NCEP/NCAR CDAS Reanalysis Data			
Time period	2006.12.02.0000 UTC ~ 2006.12.04.0000 UTC 2007.06.03.1200 UTC ~ 2007.06.05.1800 UTC			

의 위치에서 일정한 반경을 가지는 관측지점(O)과 격자점(P)이 있을 때 격자점의 초기장에 영향을 미치는 관측값을 이용해 완화시키는 방법으로 각 격자점에서 초기장과 관측값의 차이가 계산되어지면 격자점과 관측지점의 거리에 따른 가중치를 두어 평균화된 값이 초기장에 더해진다. 가중치( $W_i$ )는 아래식에 의해서 결정된다.

$$W_i = \begin{cases} \frac{R^2 - d_i^2}{R^2 + d_i^2} & \text{if } d_i < R \\ 0 & \text{if } d_i \geq R \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $R$ ,  $d_i$ 는 각각 영향반경과 수치모형의 격자와 관측값의 거리를 의미한다. 그러므로 관측자료가 영향 반경내에 존재하여야만 동화효과를 나타낸다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 격자점 P는 관측값  $O_1, O_2$ 에 의해 영향을 받지만  $O_3$ 의 영향 반경 밖에 위치하므로  $O_3$ 의 영향을 받지 않는다.

영향 반경  $R$ 의 값은 초기장에 의해 달라진다.  $R$ 의 값이 너무 큰 경우에 분석장이 너무 평준화되고,  $R$ 의 값이 너무 작은 경우에 바람직하지 않은 정보가 발생한다. 따라서 영향 반경( $R$ )을 정확히 분석하여야만 수치예측 정확도를 높일 수 있다. 그리고 관측자료의 가중치가 결정되면, 가중치를 바탕으로 관측자료와 수치모형의 자료를 결합시키게 된다. 이러한 객관분석을 위한 예단 방정식은 flux 형태로 쓰여지며, 비정

수 상태일 때 다음과 같다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = F(S, \tilde{x}, t) + GW(S_0 - S) \quad (2)$$

$S$ 는 모형변수,  $S_0$ 는 관측값,  $F$ 는 모형의 강제항,  $\tilde{x}$ 는 독립공간변수,  $t$ 는 적분시간 그리고  $G$ 는 동화계수(nudging coefficient)를 나타낸다. 관측자료의 모형내의 반영비를 의미하는 동화계수의 값이 너무 크면 관측값이 너무 강하게 내삽되어 모델 내에 불균형이 생기며 국지 순환의 영향을 손상 시킬 수 있으므로 바람직하지 못하다. 반면 동화계수가 너무 작으면 모델 내에 반영시킬 수 없다(NCAR, 1994). 그러므로 적절한 강도를 설정하는 것이 매우 중요하다.

### 3.3 수치실험 설계

본 연구에서는 관측자료의 동화능력을 평가하기 위하여 자료동화에서 고려되어지는 영향반경과, 동화계수에 관한 민감도 실험을 실시하였다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 자료동화에서 관측자료의 영향반경이란 관측자료가 대표성을 가질 수 있는 거리를 의미한다. 관측자료를 수치예측모형에 자료동화를 할 경우 관측자료의 영향반경을 정해주고 자료동화를 실시하여야 한다. 일반적으로 미국 등 넓은 평지가 위치하는 나라에서의 기상 자료동화는 넓은 영향반경을 취해도 예측정확도에 문제발생의 소지가 적지만, 우리나라와 같이 산이 많고 해안선이 복잡한 지형의 경우 보다 작은 영향반경을 고려해야 한다.

동화계수의 값은 보통 Coriolis parameter의 크기와 유사하게 정의하고 수치 계산의 안정성을 위해 항상  $1/\Delta t$  보다 작아야 한다. 그러나 이 값의 변화에 따라 모형내에 적용되는 관측값의 강도가 달라진다.

따라서 본 연구에서는 자료동화 시 매개변수로 사용되는 영향반경과, 동화계수에 대한 실험 설계를 통하여 각각의 실험이 수치모의에 어떻게 영향을 미치는지 알아보려고 한다. 각 실험의 설계에 대해서는 Table 2에 자세히 나타내었다. 영향반경을 변화시킨 실험(Exp\_Radius)에서는 5 km에서 250 km까지 다양한 영향반경을 설정하였으며, 동화계수를 변화시킨 실험(Exp\_Impact)에서는  $5.0E-5 \text{ s}^{-1}$ 에서  $6.0E-4 \text{ s}^{-1}$ 까지 5단계의 값을 설정하였다. 그리고 이들의 종관 기상장에 따른 자료동화 영향을 분석하기 위하여 종관장이 약한 6월 5일과 종관장이 강한 12월 3일을 대

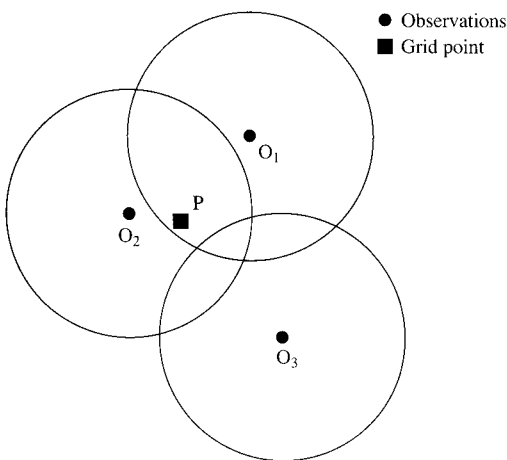


Fig. 3. Diagrams of data assimilation systems for Cressman scheme. Closed circles and rectangular indicate observation and modeled-estimated points, respectively.

**Table 2. The experimental designs.**

Individual experiment name in EXP_Radius	Radius of influence (km)
Case NF	No FDDA
Case R05	5
Case R10	10
Case R25	25
Case R50	50
Case R100	100
Case R150	150
Case R250	250

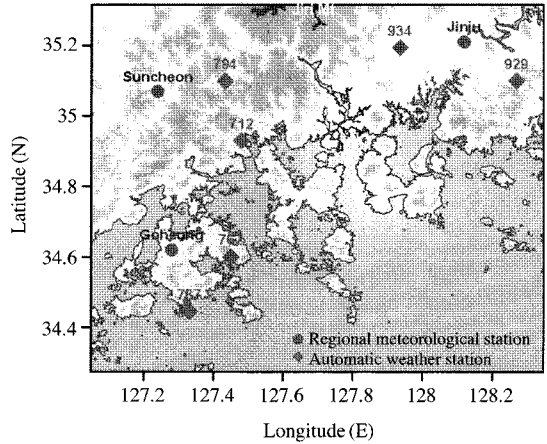
  

Individual experiment name in EXP_Impact	Nudging coefficient (s <sup>-1</sup> )
Case NC0.5	5.0E-5
Case NC1	1.0E-4
Case NC2	2.0E-4
Case NC3	3.0E-4
Case NC6	6.0E-4

상으로 각각 수치실험을 실시하였다.

그리고 자료동화에 적용된 것은 신뢰성이 높으며, 유인관측이 가능한 고흥, 순천, 진주의 기상대급 자료를 적용하였다. 그리고 이들 자료의 동화효과를 검증하기 위하여 최종 도메인내의 자동관측장비(Automatic Weather System) 관측자료 중 신뢰성이 검증된 높은 내륙 평지 지역의 4지점과 도서 연안의 2지점을 택하여 풍속에 대한 시계열과, 통계분석을 실시하였다(이순환 등, 2007a). 기상대에서는 풍향, 풍속, 온도, 복사, 운량, 일조 등 전반적인 기상자료 자료의 측정이 이루어지며 자동 기상관측장비에서는 풍향, 풍속, 온도, 습도, 기압 등 5개의 주요 요소의 관측이 이루어진다. 관측시간 간격은 각각 10분 평균자료를 이용하였다. 각각 기상대와 검증에 사용된 AWS의 위치는 그림 4에 나타내었다.

각각의 결과들의 통계적 분석 및 평가를 하기 위해 각 관측소 지점별로 모델값과 관측값의 오차(error) 정도나 일치도 및 상관정도를 살펴보았다. 분석에 사용된 통계치는 모델로 예측된 값이 관측값과 평균적으로 얼마 정도의 차이(error)를 나타내는 Root Mean Squared Error (RMSE)와, 관측값과 예측값의 변화 정도의 일치도를 나타내는 Index Of Agreement (IOA), 두 변수간의 증가 혹은 감소 등의 상관관계를 나타내는 상관계수(R)를 사용하였으며 그들의 계산식은 아래와 같다.

**Fig. 4. The location of AWS in the using for time series and statistical analysis.**

$$RMSE = \sqrt{\overline{|P_i - O_i|^2}} \quad (3)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\overline{(P_i - \bar{P}) \times (O_i - \bar{O})}}{\sqrt{\overline{(P_i - \bar{P})^2}} \times \sqrt{\overline{(O_i - \bar{O})^2}}} \quad (5)$$

( $P_i$  : Prediction,  $O_i$  : Observation,  $\bar{P}$  : Averaged prediction,  $\bar{O}$  : Averaged observation)

## 4. 결 과

### 4.1 바람장 분석

일반적으로 종관장과 중규모 기상장의 역학적인 강도는 크게 차이가 난다. 즉 종관장의 강도는 일반적으로 중규모 기상장보다 크기 때문에 종관장이 강한 날에는 중규모 기류의 발현이 어렵다. 그러므로 복잡한 해안 구조를 가진 연구 대상지역에서 종관장에 따른 중규모 기류를 살펴보았다.

연안지역의 중규모 기류에 미치는 종관장의 영향을 보기 위하여 중규모의 역학이 가장 강하게 나타나는 15시 바람장을 보았다. 그림 5는 6월 5일과 12

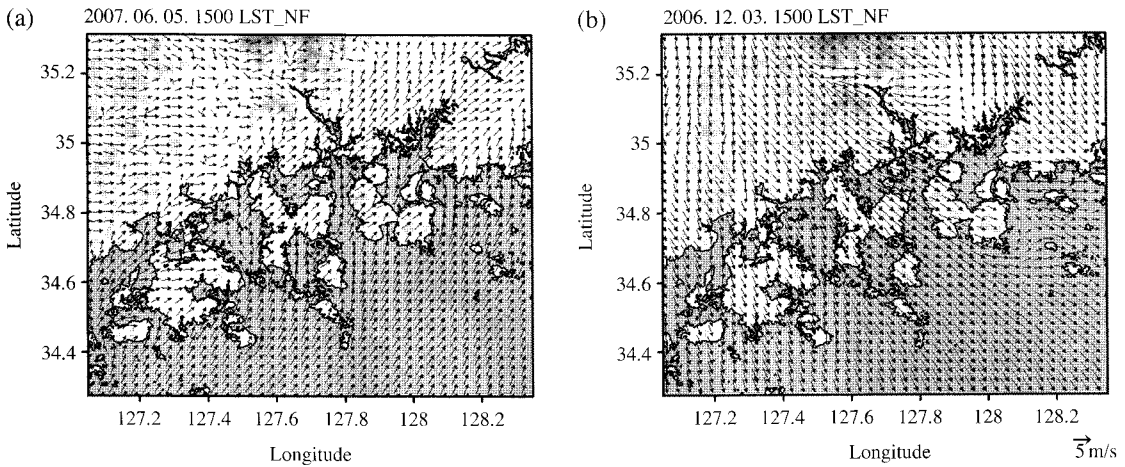


Fig. 5. Horizontal distributions of the simulated wind speed in (a) 1500 LST on 5 June 2007 and (b) 1500 LST on 3 December 2006.

월 3일의 지상 바람장을 나타낸 것이다. 종관장이 상대적으로 약한 6월 5일의 경우 복잡한 해안선과 연안을 따르는 해풍의 형태가 매우 명확히 나타나는 것을 볼 수 있다.

반면 고기압이 일본 남쪽에 위치하고 기압골이 접근하는 12월 3일의 경우 육지의 산악과 해안선의 복잡성 유무와 상관없이 일정한 풍향을 가진 강한 바람이 불고 있다. 그러므로 종관장의 강도는 중규모 기류장에 직접적으로 영향을 미치며, 약한 종관장에서 중규모 기류 특성이 명확히 나타나고 있음을 볼 수 있다.

또한 그림으로 나타내지는 않았지만 야간 역시 종관기류가 약한 6월 5일 육풍의 형태가 명확히 나타났으며, 해안 도서지형을 따르는 기류형태가 나타났다.

#### 4.2 영향반경 민감도 분석

4.1에서 본 바와 같이 중규모 기류는 종관장의 강도와 밀접한 관계를 가진다. 이러한 다양한 종관상태 하에서 자료동화의 영향반경이 미치는 영향을 살펴 보았다. 그림 6은 고기압이 강하게 작용하는 6월 5일의 자료동화를 실시하지 않은 경우(Case NF)와 영향반경을 5 km (Case R05), 10 km (Case R10)로 적용한 경우에 계산된 09시의 바람장을 나타낸 것이다. 그림은 각각 여수와 고흥 기상대 자료를 중심으로 한 바람장을 표현하였다. 굵은 화살표는 각 기상대의 관측

자료를 의미한다.

먼저 여수 지점(그림 6-a)을 중심으로 비교를 했을 때, 자료동화를 하지 않은 경우에는 풍속의 변화가 크지 않고 동풍 계열의 바람이 나타났으나, 자료동화를 통하여 R05와 R10에서는 풍속의 변화가 지역에 따라 나타나고 있으며, 풍향 또한 관측값을 잘 따르고 있는 것으로 나타났다.

그리고 고흥 지점(그림 6-b)을 중심으로 살펴본 바람장에서, 자료동화를 하지 않아 왜곡되었던 남풍 계열의 바람이 자료동화를 통하여 Case R05와 Case R10에서 잘 나타나고 있으며 관측값을 잘 따르고 있는 것을 살펴 볼 수 있었다. 그리고 풍속 역시 관측자료의 동화를 통하여 약간 감소한 것을 볼 수 있다.

각 지점의 바람 예측 정확도를 정량적으로 분석하기 위하여 자료동화에 사용되지 않은 AWS 관측자료를 바탕으로 통계분석을 실시하였다. 그림 7과 그림 8은 각각 풍속에 대한 시계열의 분포와 RMSE, IOA, R의 값을 나타낸 것이다.

종관장이 약한 6월 5일의 경우 자료동화 영향반경의 차이에 대한 기상장의 변화가 매우 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 시계열의 경우 자료동화를 하지 않은 Case NF에서 관측값과 가장 큰 차이가 나타났다. 특히 오후시간대의 고품속 영역에서 차이가 확대됨을 볼 수 있다. 이러한 시계열 분포 결과는 통계치를 이용하여 정량적으로 나타내었다.

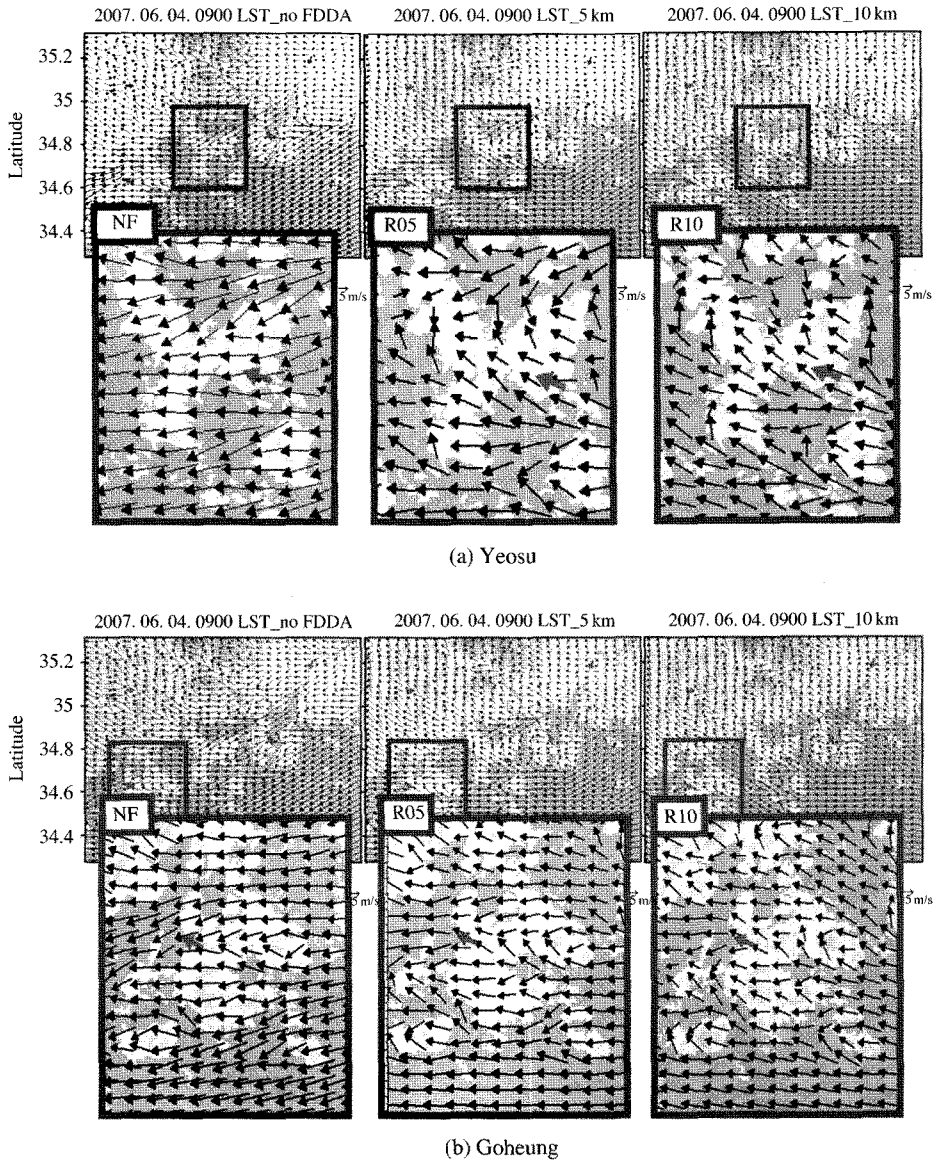


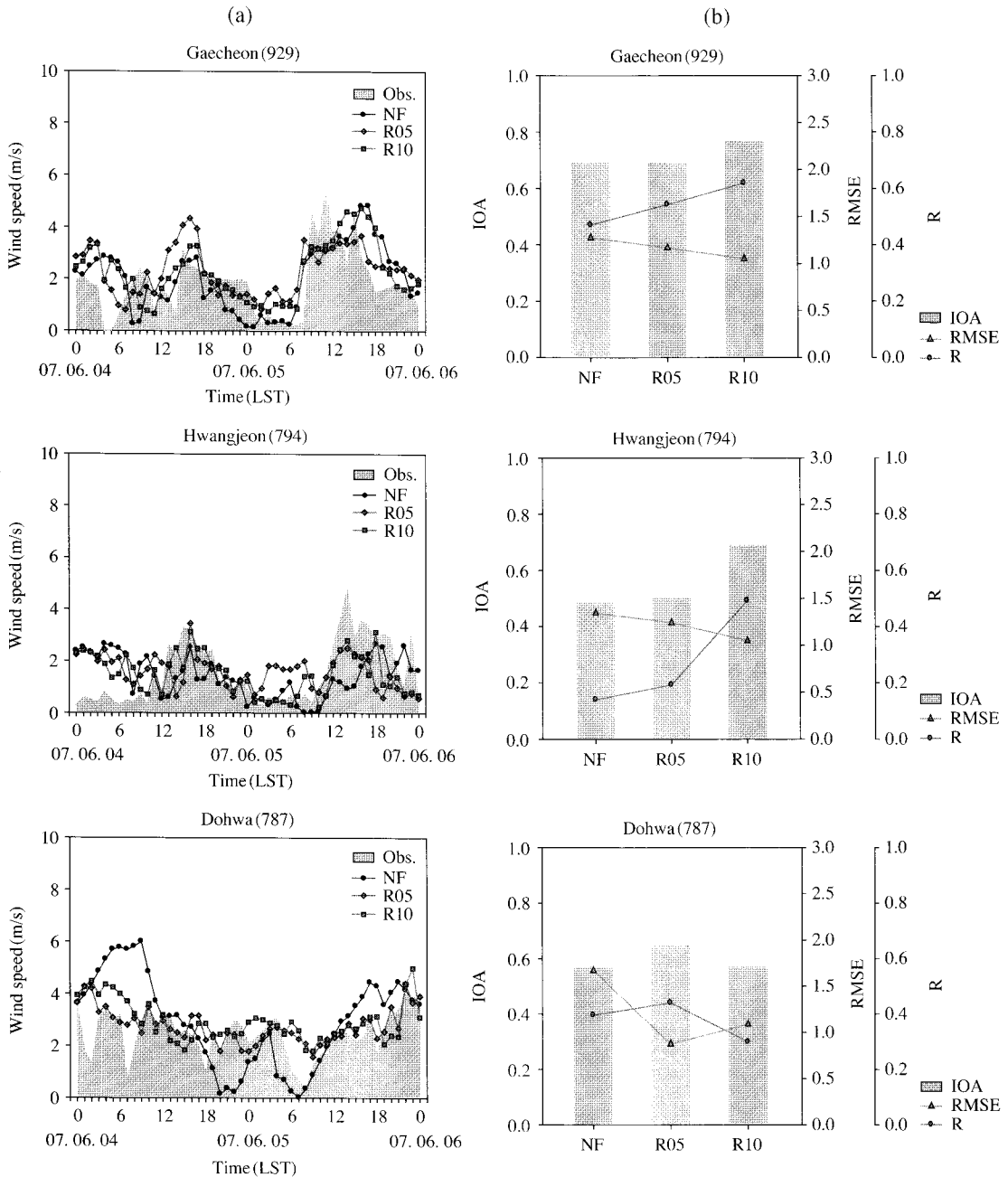
Fig. 6. Horizontal distributions of the simulated wind speed about Exp\_Radius (4 June, 2007).

진주와 순천을 중심으로 하는 내륙 평지에 위치한 개천(929)과 황전(794)지점은 영향반경을 10 km로 자료동화를 했을 때 0.7 이상의 높은 IOA 값을 나타내었으며, RMSE 값에 있어서도 1.1 m/s로 다른 영향반경에 비하여 높은 정확도로 바람을 묘사하였다. 이는 관측바람장의 영향반경이 크기 때문에 일정정도 이상으로 설정하여도 유의한 값을 얻을 수 있다는

것을 의미한다.

반면 고흥 지점을 중심으로 하는 연안 지역에 위치한 도화(787)지역에서는 5 km의 영향반경을 통한 자료동화에서 RMSE 값은 1.0 정도로 낮은 값을 나타내었고, IOA 값은 0.71의 높은 값을 나타내면서, 관측값을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다. 반면 개천과 황전 지역에서 가장 좋은 동화효율을 나타낸





**Fig. 7. (a) Time series of wind speed for the surface station at Dohwa, Hwangjeon and Gaecheon in the day of weak synoptic flow as a results of EXP\_Radius (b) Meteorological factors statistics calculated for EXP\_Radius at Dohwa, Hwangjeon and Gaecheon in the day of weak synoptic flow.**

10 km 영향반경실험 (Case R10)에서는 5 km 영향반경 실험 (Case R05)보다 예측 정확도가 떨어지는 것을

확인할 수 있다.

이는 선행연구인 이순환 등 (2007a)의 연구에서 밝

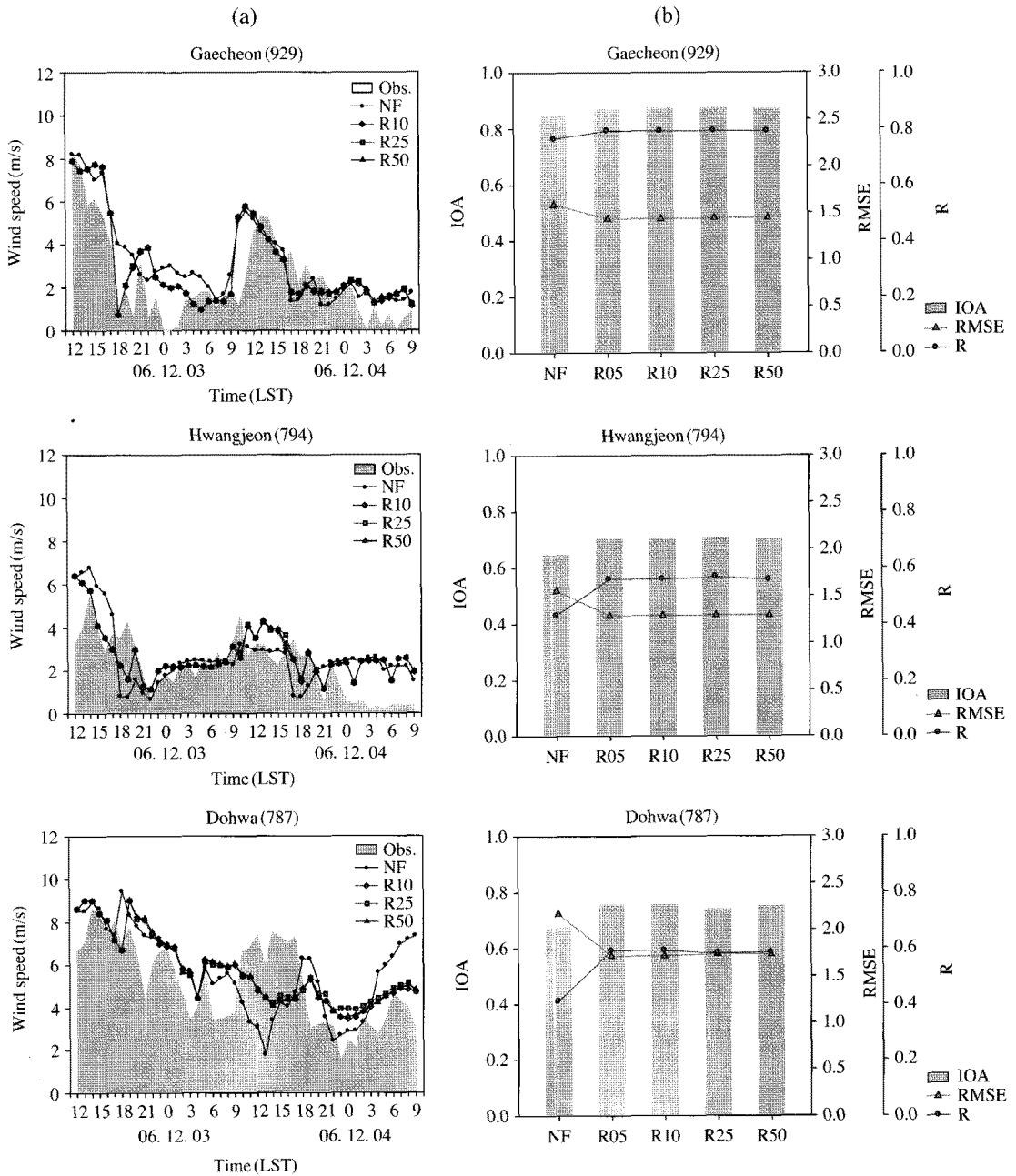


Fig. 8. Same as Fig. 5 except for the day of strong synoptic flow.

혀진 바와 같이 관측치의 영향반경은 지형의 기복과 연안 해안선의 위치 등에 따라 달라진다. 즉 일정한 지표 상태를 가진 평지의 경우 관측자료가 상대적으로

로 넓은 지역을 대표할 수 있지만, 지형의 기복이 심한 지역이나 해안선이 복잡한 도시지역의 경우 관측자료가 가지는 영역 대표성에 한계가 있다. 그러므로

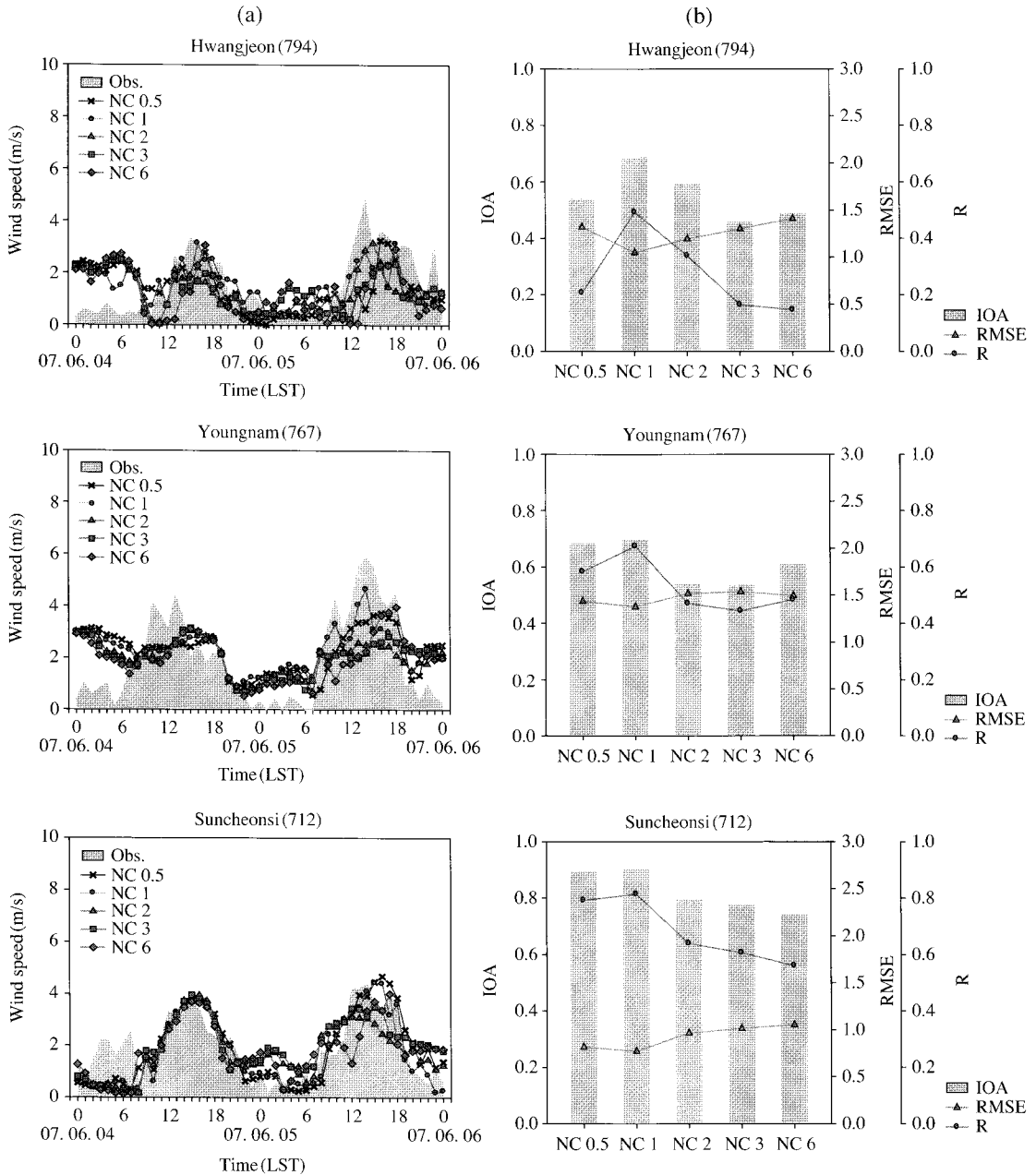


Fig. 9. (a) Time series of wind speed for the surface station at Suncheonsi, Youngnam and Hwangjeon in the day of weak synoptic flow as a results of EXP\_Impact (b) Meteorological factors statistics calculated for EXP\_Impact at Suncheonsi, Youngnam and Hwangjeon in the day of weak synoptic flow.

이러한 통계분석 결과는 수치실험을 통한 관측자료 동화 영향반경이 평탄한 내륙지역인 개천 보다 도서 연안 지역인 도화에서 보다 더 작은 영향반경을 설

정해야 한다는 것을 반영한 것이라고 볼 수 있다.

그림 8은 종관장이 강하게 작용하는 12월 3일에 대한 개천, 황전, 도화의 3지점의 바람장에 대한 통계

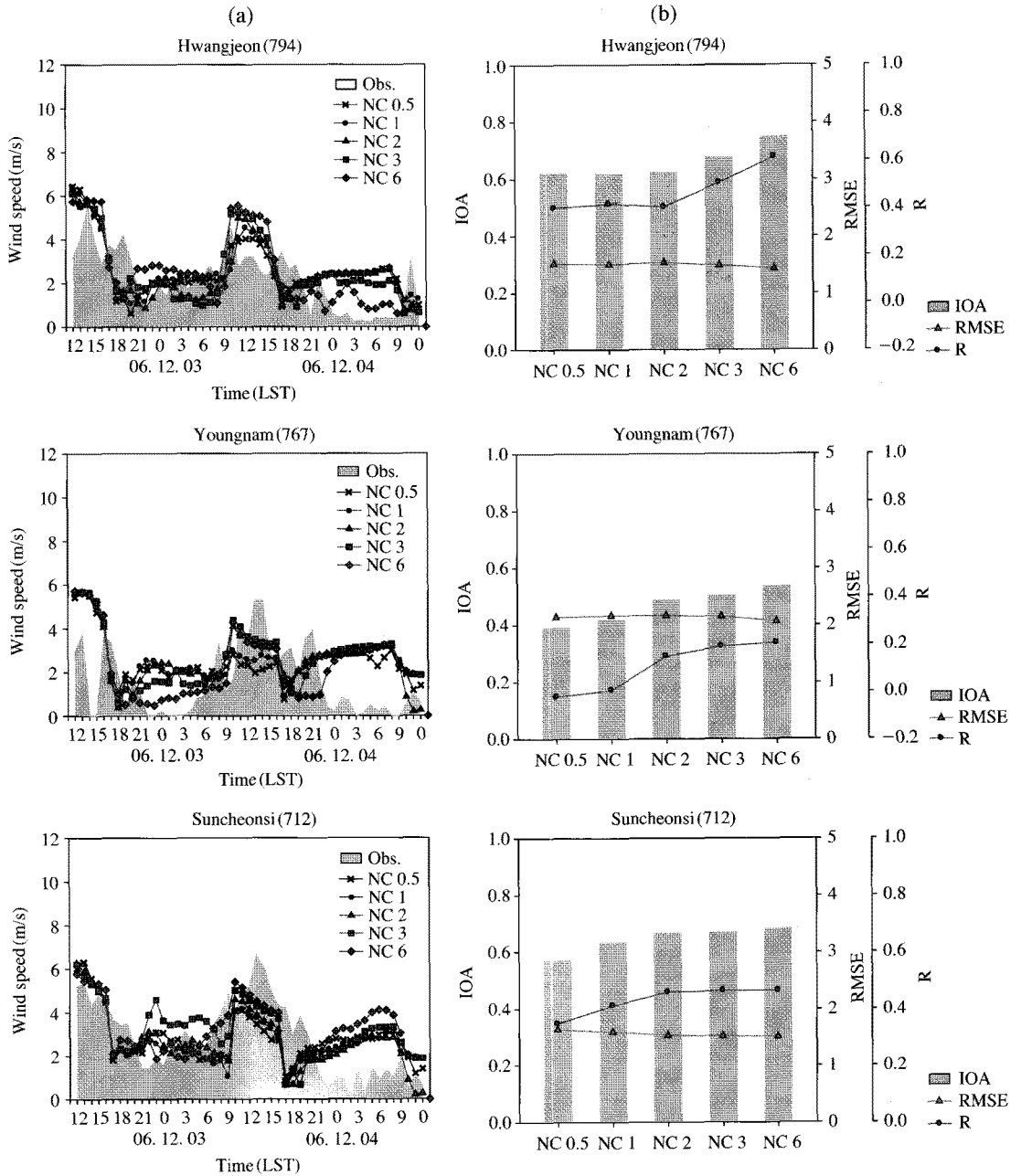


Fig. 10. Same as Fig. 9 except for the day of strong synoptic flow.

적 분석결과이다. 전체적으로 자료동화를 실시하지 않은 Case NF보다 자료동화를 실시한 수치실험에서 좋은 바람장 예측결과를 나타낸다. 풍속의 시계열 역

시 자료동화에 따른 예측정확도의 향상을 볼 수 있다. 그러나 그림 7과 달리 자료동화 영향반경에 따른 차이는 크지 않다. 이러한 경향은 평탄한 내륙지역인

개천과 황전지역이나 연안에 위치한 도화지역 모두 나타난다. 그러므로 종관장의 영향이 강하게 나타나는 날의 경우, 자료동화유무에 따른 유용성은 확인되었으나, 관측 자료동화의 영향반경이 수치적 예측 바람장에 미치는 영향이 크지 않음을 의미한다. 이는 종관장의 강도가 국지지역의 자료동화 영향반경을 설정하는데 관계가 있다는 것을 의미한다.

### 4.3 동화 강도 영향 분석

서로 종관장의 영향이 달랐던 각각의 사례에 대해서 동화계수에 따른 실험 설계를 통한 수치모의의 결과를 관측값 비교를 통한 통계분석으로 살펴보았다. 앞 절에서 EXP\_Radius를 통해 5 km 영향반경과, 10 km 영향반경의 자료동화가 지형의 특성에 따라서 차이를 나타내고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 같은 영향반경 아래서 동화계수의 영향을 보고자 하였기에 내륙 평지 지역에서 보다 더 최적화된 결과를 나타낸, 10 km의 영향반경으로 실험을 통제하여 표 2에서 제시한 서로 다른 5개의 동화계수에 대한 바람장의 예측 정확도를 분석하였다.

그림 9는 종관장이 약한 6월 5일의 관측값 비교를 통한 시계열과 통계분석을 나타낸 것이다. 내륙 평지와 도서 연안 지점으로 나누어 살펴본 모든 지점에서 Case NC1에서 가장 낮은 RMSE 값을 가지고 IOA와 R에 있어서 가장 높은 값을 보인다. 이는 Case NC1에서 사용한  $1.0E-4 \text{ s}^{-1}$ 가 이 지역의 동화계수로 가장 유의하다는 것을 의미한다. 그리고 이보다 더 작은 값인 Case NC0.5에서 다른 실험들(Case NC2, NC3, NC6)과 차이가 나게 높은 IOA 값을 나타낸 것으로 보아 작은 동화계수의 값이 모델 내에 반영될 때 보다 향상된 수치모의 결과를 얻을 수 있었다. 그림 10은 종관장이 강하게 작용하는 12월 5일의 관측값과의 분포와 통계분석의 결과값을 나타내었다. 종관장이 강하게 작용한 경우, Case NC6의 결과에서 가장 유의한 통계값을 나타내었다.

이는 자료동화 강도는 자료가 가지는 정확도에 대한 요소로 판별할 수 있는데, 종관장이 약한 경우, 국지적인 관측자료는 상대적으로 낮은 운동에너지를 표현하는 것으로 오차 발생확률이 높다. 그러므로 관측자료 동화강도도 높은 오차발생확률 때문에 낮은 값에서 유의하게 된다. 그러나 종관장이 강한 경우, 높은 대기 운동에너지에 의하여 중규모기류의 관측

오차 발생확률이 상대적으로 낮아진다. 이에 따라 관측자료에 높은 가중치적용이 가능한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

풍력자원 평가를 위해 국지적 바람장을 정확히 묘사하는 것은 매우 중요하다. 본 연구는 수치자료동화 민감도에 영향을 미치는 영향반경과 동화계수를 달리하여 복잡한 해안선과 지형을 가진 광양만권의 바람장 평가에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 본 연구에 사용된 모형은 대기역학 기상장 모형인 MM5를 사용하였다. 그리고 바람장 예측에 종관장의 강도가 미치는 영향을 평가하기 위하여 종관장이 다른 사례일을 선정하였다. 종관장이 약하게 작용한 2007년 6월 5일과 저기압이 접근하며 강한 바람이 나타난 2006년 12월 3일을 사례일로 설정하였다. 첫째는 본 연구의 대상지역에서 대표성을 나타내는 지점을 중심으로 영향반경을 다르게 설정한 자료동화 영향반경에 대한 실험에서는 종관장이 약하여 국지적인 지역의 효과가 반영된 사례일에서 뚜렷한 영향반경의 차이를 나타내었다. 내륙 평지에 위치한 지점의 경우 관측자료의 영향반경을 상대적으로 넓게 설정하는 것이 더욱 높은 정확도의 바람장을 도출할 수 있다. 반면, 복잡한 해안선에 산재한 지역에서는 관측자료의 영향반경을 작게 설정해야 한다. 본 연구 대상지역인 광양만권의 경우 상대적으로 내륙 평지에 위치한 진주, 순천지역의 경우 10 km의 영향반경 실험에서 IOA 0.82로 가장 유의한 결과를 보였으며, 반도지형인 고흥에서는 이보다 작은 5 km에서 가장 정확한 바람장이 산출되었다.

강한 종관장이 작용한 12월 3일의 경우 자료동화 유무에 따른 차이는 크게 나타나지만, 지역에 따른 영향반경 민감도 특성의 차이는 크지 않다. 이상의 실험을 통해서 종관장이 약하여 지역에 따른 국지풍의 효과가 반영될 때에는 지형의 특징을 고려한 영향반경의 설정이 중요함을 잘 나타내 주었다.

둘째 동화계수의 민감도 실험의 경우, 종관장이 약한 경우 동화계수의 가중치는 Case NC1 ( $G=1.0E-4 \text{ s}^{-1}$ )이 가장 유의한 값을 가지고 있으며, 계수가 작은 경우에서 보다 높은 정확도를 보였다. 반면 종관장이

강한 경우 동화계수가 큰 Case NC6이 바람예측에 가장 유의한 값을 나타내며, 전체적으로 동화계수가 큰 경우 예측정확도가 높아지는 경향을 나타내었다. 그러므로 동화계수는 지역적인 차이보다는 중관장의 상태가 주요한 요인으로 작용한다.

본 연구는 최근 신재생 에너지의 하나로 각광받고 있는 풍력에너지의 풍력 자원 조사를 위한 수치모의의 정확도를 향상시키기 위해서는 관측자료 동화의 필요성을 제시하였다. 특히 본 연구 결과는 자료동화 과정에서 정형화된 영향반경값과 동화계수값을 이용하는 것 보다 지형적인 요인과 중관적인 상태에 따라 이들 값들을 달리 하여야 한다는 것을 의미한다. 그러므로 풍력 발전의 기초가 되는 풍력자원 지도 작성에 있어서 관측지의 정보와 다양한 형태의 중관 상태를 바탕으로 제시된 자료동화과정이 대기유동장 예측에 포함되어야 하며, 이러한 과정을 통하여 정확한 풍력에너지를 산정할 수 있을 것으로 기대되어 진다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업 내 “한반도 해역 해상풍 분석시스템 개발 및 해상 풍력자원지도의 기상학적 검증” 사업의 지원으로 이루어졌습니다.

### 참 고 문 헌

김철희, 송창근 (2002) 4차원 자료동화 기법을 이용한 해안가 대기 순환의 수치 실험, 한국환경영향평가학회지, 11(2), 79-93.

김현구, 최재우 (2002) 풍력에너지 이용 및 개발현황, RIST 연구논문, 16(4), 479-485.

류찬수, 신유미, 이순환 (2004) 해안지형 복잡성이 중규모 순환장에 미치는 영향에 관한 수치실험, 한국기상학회지, 40(1), 71-86.

이순환, 김민정, 이화운 (2007a) 국지규모 풍력에너지 평가를 위한 기상 관측 자료의 영향 반경 특성, 한국대기환경학회지, 23(5), 585-595.

이순환, 이화운, 김동혁, 김현구 (2007b) 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석, 한국대기환경학회지, 23(6), 653-665.

이화운, 원혜영, 최현정, 김현구 (2005) 광양만권에서의 자료

동화된 대기유동장이 대기오염 물질의 확산장에 미치는 영향에 관한 수치모의, 한국대기환경학회지, 21(2), 169-178.

Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1994) A description of the fifth-Generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+ST, 117pp.

Hong, S.-Y. and H.-L. Pan (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model. Mon. Wea. Rev., 124, 2322-2339.

Lee, S.-H., Y.-K. Kim, H.-S. Kim, and H.-W. Lee (2007) Influence of dense surface meteorological data assimilation on the prediction accuracy of ozone pollution in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula, Atmospheric Environment, 41, 4451-4465.

Lee, S.-H., D.-H. Kim, and H.-W. Lee (2008) Satellite-based assessment of the impact of sea-surface winds on regional atmospheric circulations over the Korean Peninsula, International Journal of Remote Sensing, 29(2), 331-354.

Lindskog, M. (2004) Doppler radar wind data assimilation with HIRLAM 3DVAR, Mon. Wea. Rev., 132, 1081-1092.

Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere : RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, Journal of Geophysical Research, 102(D14), 1663-1682.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) (1994) Terrain and Land Use for the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Modeling System (MM5) Program TERRAIN, NCAR Technical Notes, NCAR/TN-397+IA.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) (2003) PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial class notes and user's guide : MM5 modeling system version 3.

Pielke, R.A., Sr. (2002), Mesoscale Meteorological Modeling, 2nd ed., 676 pp., Elsevier, New York.

Reisner, J., R.J. Rasmussen, and R.T. Bruintjes (1998) Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124B, 1071-1107.

Talagrand, O. (1997) Assimilation of observation, an introduction, J. Meteo. Soc. Japan, 75(1), 191-209.