한국환경과학회지 제18권(제3호), 271~281, 2009
Journal of the Environmental Sciences

자료동화의 영향반경과 동화강도가 복잡지형 기상장 수치모의에 미치는 영향

최현정 · 이화운 · 성경희 · 김민정
부산대학교 지구환경시스템학부
(2008년 7월 10일 접수; 2008년 12월 1일 수정; 2009년 1월 22일 채택)

The Effect of Atmospheric Flow Field According to the Radius Influence and Nudging Coefficient of the Objective Analysis on Complex Area

Hyun-Jung Choi, Hwa Woon Lee, Kyoung-hee Sung and Min-Jung Kim
Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 10 July, 2008; revised 1 December, 2008; accepted 22 January, 2009)

Abstract

In order to reduce the uncertainties and improve the air flow field, objective analysis using observational data is chosen as a method that enhances the reality of meteorology. To improve the meteorological components, the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis should perform a adequate value on complex area for the objective analysis technique which related to data reliability and error suppression. Several numerical experiments have been undertaken in order to clarify the impacts of the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on meteorological environments. By analyzing practical urban ground conditions, we revealed that there were large differences in the meteorological differences in each case. In order to understand the quantitative impact of each run, the Statistical analysis by estimated by MM5 revealed the differences by the synoptic conditions. The strengthening of the synoptic wind condition tends to be well estimated when using quite a wide radius influence and a small nudging coefficient. On the other hand, the weakening of the synoptic wind is opposite.

Key Words : MM5, Objective analysis, Site coherence analysis, Radius influence, Nudging coefficient

1. 서 론

복잡한 국지규모의 경우, 지상 관측 바람장은 지형효과나 해양, 육지의 특성의 차이 외에도 지면마찰, 건축물 등 지형지물의 효과로 인하여 매우 다양한 바람장을 나타낸다[1]. 그러므로 기상장 묘사가 어려운 복잡지형에서는 기상모델의 질적 향상을 위해 초기화 방법이나 모수화 방법과 함께 관측자료 내삽을 통한 자료동화과정으로 초기장(the first guess)을 향상시켜 수치모의 시 입력될 분석장을 개선하고 있다[2,3]. 이러한 연구들은 지상 및 상층 관측자료 내삽을 통해서 기온과 바람장 뿐 아니라 오염물의 농도에 지대한 영향을 미치는 혼합층의 고도 또한 실제 관측과 유사하게 개선할 수 있다는 것을 보였

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

으며[4], 진단 및 예단 모델을 통하여 얻어진 각각의 기상장을 이용해 대기질 모델링의 입력자료로서의 그 영향 및 효과를 살펴보기도 했다[5]. 또한 내삽될 지상 관측자료의 질적 향상을 위해 몇몇 관측값을 걸러냄으로서 더 향상된 대기질 수치모의 결과를 제시하기도 하였다[6]. 즉, 초기장을 생산하는 과정에서 바람은 산맥과 같은 거대한 산악지형에 의해 흐름이 저지당할 수 있으며, 가열된 산의 정상부는 국지순환을 발생시킬 수 있는데, 특히 산악 지역에서는 지상 및 고층 관측 자료가 희박하고 관측소의 고도변화는 매우 심하므로 상대적으로 객관 분석된 기상장에 큰 오차를 발생시키는 원인이 될 수 있다[7]. 또한 복잡한 지역에서의 경우 지상관측자료를 동화하여 상세한 기상장을 얻고자 할 때 관측자료의 선별(Quality control)의 중요성이 강조되고 있다[8]. 따라서 한 지역에 적용될 객관분석 과정을 효과적으로 구축하기 위해서는 관측 자료의 적절한 처리기술 개발과 미래에 이용 가능한 잠재적 관측 자료가 자료동화 및 수치 예측에 미치는 영향을 평가해야 한다. 본 연구에서는 복잡지형에서의 기상대 및 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS) 자료에 대한 자료동화 시 적절한 영향 반경과 동화계수를 검증하므로써 국지적 대기 순환, 수렴, 발산 구조 등에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 서울시를 중심으로 복잡한 수도권 지역에 위치하는 기상대 및 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS) 자료의 내삽을 통하여 모델의 해석능력을 향상시키고자 객관분석(objective analysis)을 실시한다. AWS 관측자료는 정규 관측자료와 어느 정도의 상관관계는 유지하지만 지역별로 국지 특성이 강하게 부각되었으며 상세한 바람장을 얻기 위해서는 AWS 자료의 이용을 적극 검토할 만하나 자료의 이상치 점검, 지역 대표성 문제 등 해결되어야 할 부분이 적지 않은 문제점이 있을 수 있으므로[9] 이를 해결하기 위하여 먼저, 종관상태에 따른 AWS 자료의 대표성 조절(quality control) 및 유효성 검증을 실시한다.

검증된 기상대 및 AWS 자료를 중심으로 도시의 대기유동장 묘사에 필요한 3차원 바람장을 높은 해상도로 수치모의 하기위하여 관측값에 의한 자료동화를 지원하고 있는 중규모 기상장 모델인 MM5 (PSU/NCAR mesoscale model)를 이용한다. 종관상태에 따른 자료동화시 대표성과 유효성이 검증된 관측 자료를 중심으로 동화되는 자료의 영향반경과 동화강도가 미치는 영향을 지상 기상요소 및 대기경계층(PBL)에 대한 통계분석을 통해 검증한다.

3. 모델링 수행의 기초자료 및 영역

본 연구에 사용된 모델의 초기 및 경계 입력 자료는 3시간 단위 KMA/RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)자료를 기본 입력 자료로 사용하였다. 또한 기상 모델의 지표경계조건의 향상으로 실제 대기상태에 가까운 기상장 예측을 유도하기 위하여 환경부 지리정보시스템(Korea Ministry of Environment Geographic Information System, EGIS)의 해상도 90 m(3-seconds)인 지형고도자료를 모델 내 안정적으로 내삽하여 수행한다. 이와 함께, 현재 Landsat TM 위성영상과 SPOT 위성영상을 합성하여 환경부에서 제작한 한반도 위성영상지도를 내삽한다. 이는 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 7개 분류항목으로 구성된 지상해상도 30 m급의 대분류 토지피복지도(축척 1:50,000)지도로, 국지규모의 다양한 순환에 대한 수치모의를 가능하게 한다.

모델링 영역과 격자정보는 Fig. 1에 나타내었으며, 사용된 물리과정중 구름 모수화 과정(cloud physics and precipitation processes)과 강수 과정(precipitation processes)은 각각 상승 · 하강운동 그리고 보상운동을 고려하는 모수화 방법[10] 을 사용하였다. 복사과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안(Cloud-radiation scheme)을 사용하였다. 또한 Radiation scheme으로 RRTM long wave scheme[11]을, surface scheme으로는 Pleim-Xiu Land-Surface scheme (Pleim-Xiu Land-Surface Model coupled to the Pleim-Xiu PBL and combined land-surface and PBL model)이 선택되어 졌다. 모델링 수행 기간은 2004년 5월 28일부터 6월 15일까지 이다.

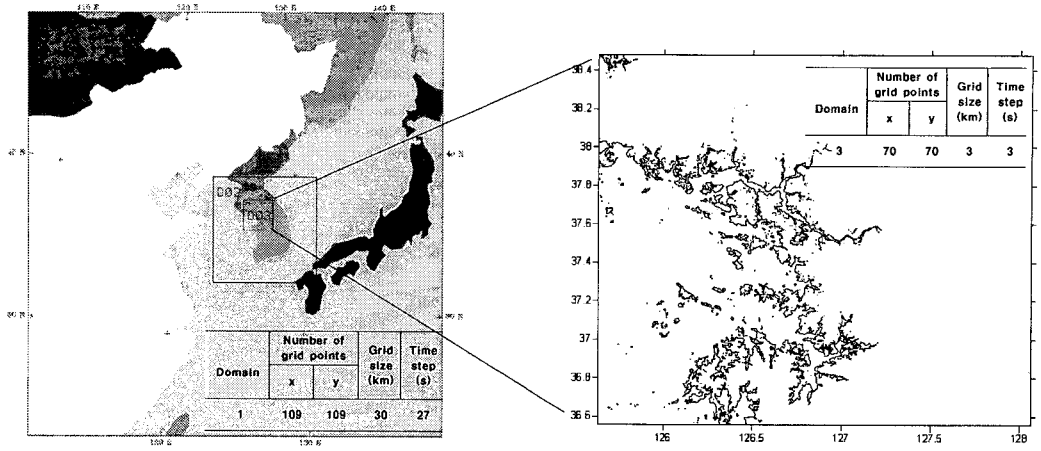

Fig. 1. Modeling area and configurations of MM5 boundary.

4. 자료동화 분석 결과

4.1. 지상관측자료의 대표성 조절(Site coherence analysis)

복잡한 도심지역과 산지에 위치하고 있는 관측자료의 경우 거칠기와 토지이용도(land use)에 의해 다양하게 변화되고 있는 풍계가 모델 격자 내에서 대표성을 갖지 못한 채 오히려 모델과의 오차를 확대하거나 감소하는 경향을 초래할 수 있다[8]. 따라서 도심지역의 경우 대표성 있는 바람자료에 의한 내삽의 효과를 기대하기 위해서는 도심지역의 관측값에 대한 적절한 밀도조정과 자료질 조절이 반드시 필요함을 의미한다. 선행연구에서 AWS를 이용한 서울의 수평기온 분포분석에서, 기온 값이 일변화를 보이는 중 10분 관측 간격동안에 5℃ 이상으로 비정상적으로 증감하는 경우(%)를 이상 자료로 판단하여 제거한 결과 1996년 1월에서 1998년 6월까지의 기온자료 중 약 40%정도를 이상 자료로 판단한 바 있다[12].

본 연구에서는 먼저 대표성 있는 관측자료를 선별하기 위하여 정규 지상관측자료를 기준으로 일정 영향권 안에 있는 AWS 관측자료가 어느 정도의 상관관계(Site coherence analysis)를 유지하고 있으며 복잡한 도심이나, 산지 주위에서 지역별로 어떤 국지 특성이 강하게 부각되어 있는지를 파악하기 위하여 풍속에 대하여 이들 간의 Systematic component of root mean squared differences($RMSD_s$)를 2004년 5월 28일 ~ 6월 15일 자료에 대하여 분석하였다. 이때, D_c (distance of coherence)는 6 km로 하여 정규관측지점(112, 410, 108)으로부터 6 km 내에 존재하는 AWS 지점에 대하여 지상 및 상층 일기도 분석을 통해 종관장의 영향에 따라 정규관측지점과 비교하여 평균의 10% 이내의 유의성을 가지는 지점을 유의성 있게 판단한다. 특히, 종관상태에 따라 그 대표성이 달라지는지 분석하기 위하여 사례일(Fig. 2,3)에 대해, 정규관측지점(Fig. 4)에서 상이한 종관 상태 하에도 대표성을 유지하고 있는 지상 관측지점을 선정하게 된다. 첫 번째 사례일(case 1)인 2004년 5월 28일 ~ 30일은 상층풍은 비교적 강한 종관장의 영향으로 15 m/s이상의 남서(SW)풍계의 영향이 지속적으로 나타나고 있었다. 이어 두 번째 사례일(case 2)인 2004년 6월 3일 ~ 5일은 상층풍은 6 ~ 7m/s의 서남서(WSW)풍 우세하며 , 다소 약한 종관계의 영향으로 국지적인 순환이 표출될 수 있는 가능성이 있는 날로 선정된 사례일이었다. 종관장의 영향이 비교적 강하게 나타났던 사례일(case 1)인 2004년 5월 28일 ~ 30일의 기간과 종관장의 영향이 약했던 사례일(case 2)인 2004년 6월 3일 ~ 5일의 사례에 대해 각각 분석한 결과를 Table 1과 2에 나타내었다.

$$RMSD_s = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \omega_i \mid P_i(t) - O_i(t) \mid^2}{\sum_{i=1}^{n} \omega_i} \right)}$$

이 때, n = station의 개수, ω =가중치, P = 기상대 자료, O = AWS 자료 이다.

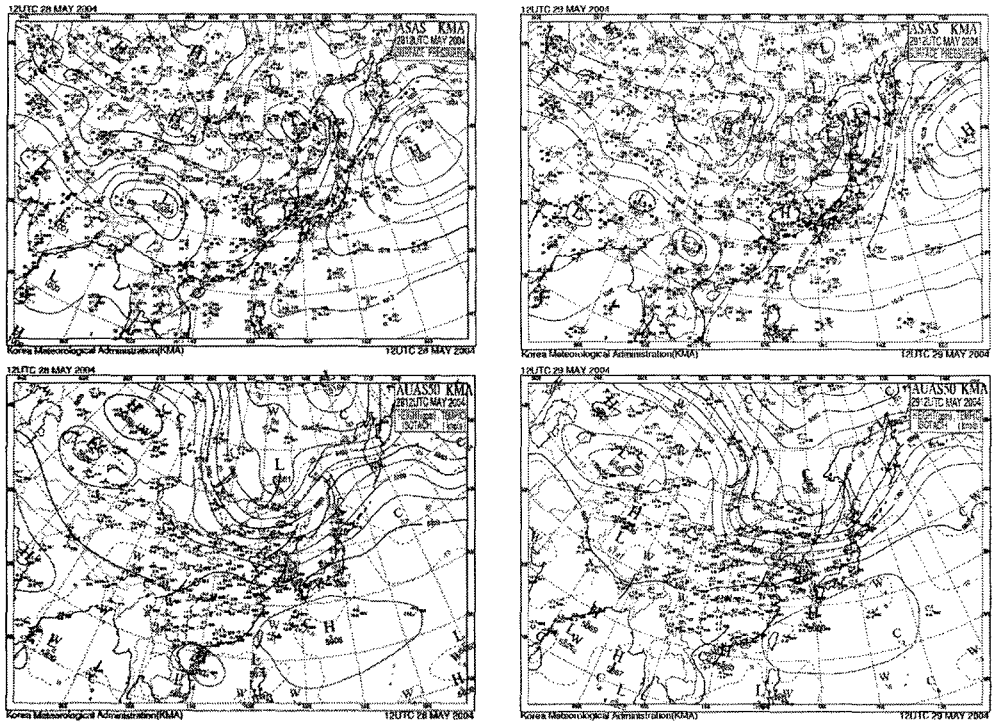

Fig. 2. Surface weather chart for case 1.

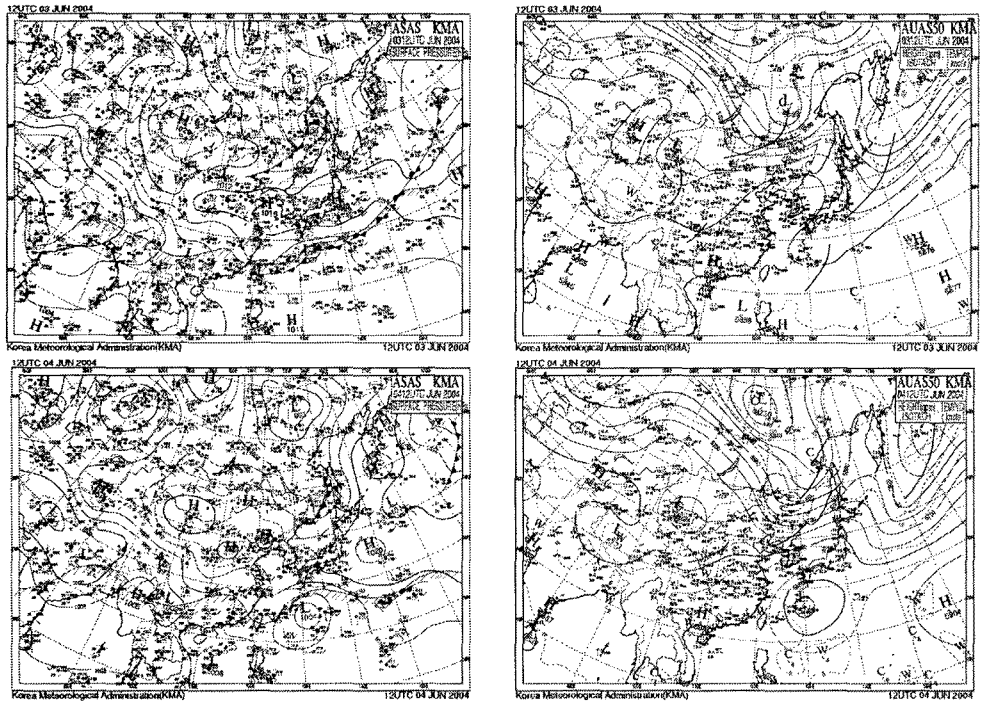

Fig. 3. The same as in Fig. 2 for case 2.

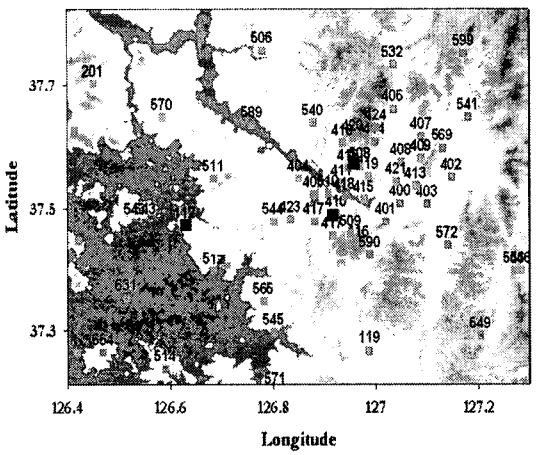

Fig. 4. The site coherence analysis between regular meteorological observation data(■) and AWS data(▒).

$RMSD_s$분석 결과, 강한 종관풍 사례일의 경우, 해안에 위치한 정규관측지점인 112 station(인천) 값과는 511(부평), 512(남동공단), 543지점(영종도) 값이 유의하게 나타났다. 또한 정규관측지점 108 station(서울 송월동) 값과 유의한 상관성을 보이는 AWS 지점은 424지점(강북)을 제외한 전 지점이었고, 정규관측지점 410 station(기상청) 값과 유의한 상관성을 보이는 AWS 지점은 405(양천), 412(서대문), 415(용산), 423(구로), 509(관악), 510(영등포), 590(과천)지점이었다. 또한 약한 종관 사례일에 대한 분석에서 정규관측지점인 112 station(인천)과 상관이 높은 AWS 지점은 511(부평), 512지점(남동공단)이며, 108 station(서울 송월동)과 유의성이 있는 지점은 408(동대문), 411(마포), 412(서대문), 418(한강), 420(북한산), 421(성동), 424지점(강북)이다. 한편, 정규관측지점 410 station(기상청)과 유의한 값을 가지는 AWS 군들은 590지점(과천)의 제외한 전 지점으로 나타나 종관장의 영향에 따라 정규관측지점과의 상관성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 1. $RMSD_s$ distribution at effective radius(2004/05/28 ~ 30)

Station	AWS	$RMSD_s$_WS	Station	AWS	$RMSD_s$_WS	Station	AWS	$RMSD_s$_WS
108	408	**1.33**	410	404	1.64	112	511	**1.28**
	411	**1.12**		405	**1.15**		512	**1.60**
	412	**1.33**		411	1.79		543	**1.57**
	414	**1.39**		412	**1.14**		545	2.12
	415	**1.39**		415	**1.42**			
	416	**1.43**		416	1.74			
	418	**1.28**		417	1.79			
	419	**1.52**		423	**1.35**			
	420	**1.47**		509	**1.30**			
	421	**1.41**		510	**1.47**			
	424	1.65		590	**1.53**			

Table 2. $RMSD_s$ distribution at effective radius(2004/06/03 ~ 05)

Station	AWS	$RMSD_s$_WS	Station	AWS	$RMSD_s$_WS	Station	AWS	$RMSD_s$_WS
108	408	**1.32**	410	404	**1.02**	112	511	**1.12**
	411	**1.55**		405	**1.22**		512	**1.15**
	412	**1.42**		411	**1.29**		543	1.40
	414	1.60		412	**1.09**		545	1.59
	415	1.83		415	**1.20**			
	416	1.87		417	**1.17**			
	418	**1.55**		416	**1.12**			
	419	1.65		423	**1.20**			
	420	**0.98**		509	**0.93**			
	421	**1.50**		510	**1.04**			
	424	**1.38**		590	1.33			

이로써 서울지역 내에 비교적 강한 지형적 영향이 약한 종관 사례일의 경우 국지적인 바람장을 이끌면서 바람장에 있어 그 패턴뿐 만아니라 새로운 풍계를 생성시킬 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 모델링 기간 중 종관상태에 따라 대표성 있는 지점으로는 108 station(서울 송월동), 112(인천), 405(양천), 408(동대문), 410(기상청), 411(마포), 412(서대문), 415(용산), 418(한강), 420(북한산), 421(성동), 423(구로), 509(관악), 510(영등포), 511(부평), 512지점(남동공단)으로 나타났다.

4.2. 자료동화의 영향 반경 조절

자료동화에서 영향반경이란 관측자료가 대표성을 가질 수 있는 거리를 의미한다. 관측자료를 수치모형에 자료동화할 경우 이들 자료의 영향 반경을 정해주고 자료동화를 하여야 한다. 일반적으로 미국 등 넓은 평지가 위치하는 나라에서의 기상 자료동화는 넓은 영향 반경을 취해도 예측정확도에 문제 발생 원인이 적지만, 서울 도심을 포함하는 수도권의 경우 복잡한 산악지형, 해안선, 밀도 높은 도심의 구조물 등의 소재로 영향반경이 작아진다. 각 격자점에서의 초기값을 각 관측 값의 위치에서 일정한 반경을 가지는 관측 값만이 영향을 줄 수 있으며, 따라서 영향반경(radius influence)을 적절히 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 복잡지형의 자료동화에 대한 적절한 영향반경을 고려하기 위하여 Table 3에 나타난 바와 같이 다양한 영향반경을 선정하여 수치모의하기로 하였다. Fig. 5와 6은 영향반경의 차이에 의해 모델링되어진 풍속의 변화를 시계열로 나타내었다. 강한 종관사례일인 case 1의 경우 413(광진), 416(은평)지점은 자료동화를 하지 않은 사례에 비해 관측값과의 유의성은 상당히 높아진 상태를 나타내고 있으며, R4에 비해 R10에서 관측값과의 상관성이 높아진 것을 알 수 있다. 또한 약한 종관사례일인 case 2의 경우 같은 지점에서 R4의 경우 관측값을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 통계분석에서는 자료동화의 영향반경의 차이는 복잡한 도심에서 온도의 경우 강한 종관사례일에는 효과가 거의 나타나지 않으나, 풍속의 경우 복잡한 도심에서 적절한 영향반경이 고려되어야 함을 알 수 있다(Fig. 7, 8).

Table 3. The simulated case by each radius of influence

	Radius of Influence(km)
NF	No_FDDA
R1	1
R2	2
R4	4
R10	10
R250	250

4.3. 자료동화의 동화강도 조절

복잡지형에서의 자료동화 시 동화의 반경 뿐 만 아니라 효율적인 동화강도 계수를 검증하고자 한

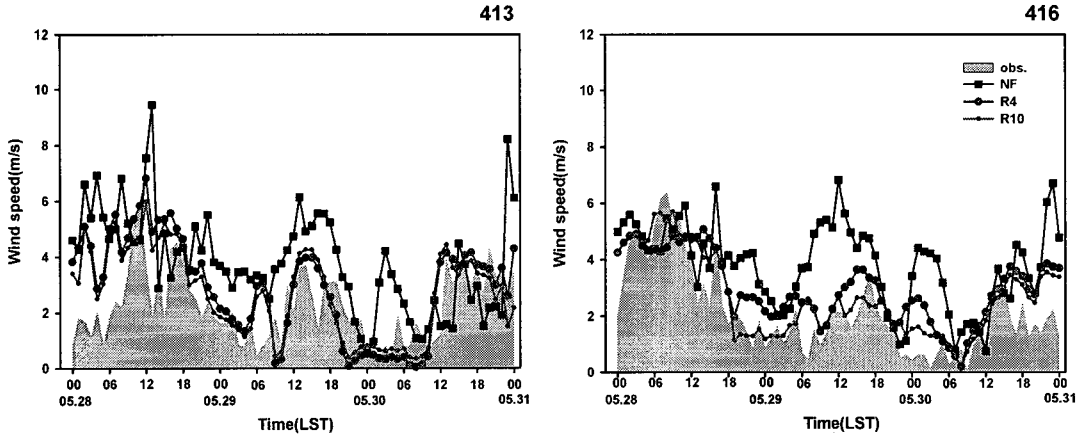

Fig. 5. The diurnal variations of horizontal wind speed by each radius of influence in case 1.

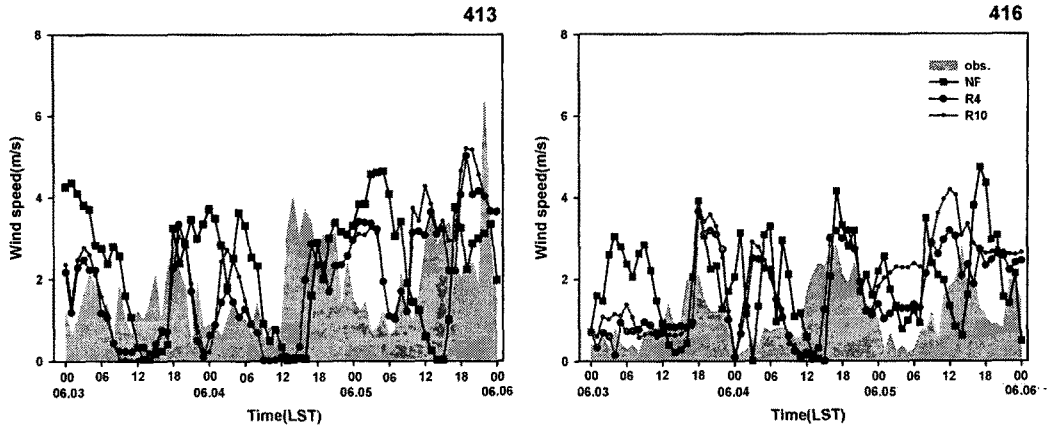

Fig. 6. The same as in Fig. 5 in case 2.

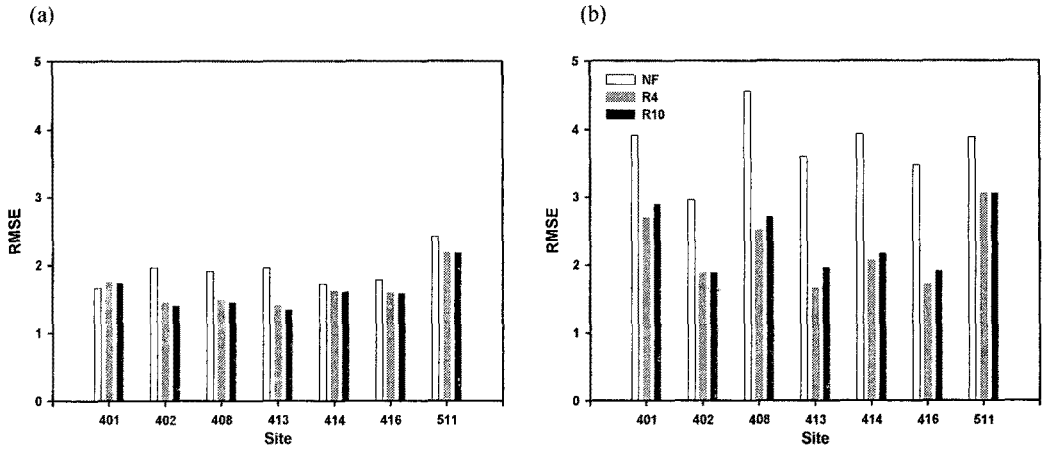

Fig. 7. The RMSE value between simulated by each radius of influence and observed temperature((a):case 1, (b):case 2).

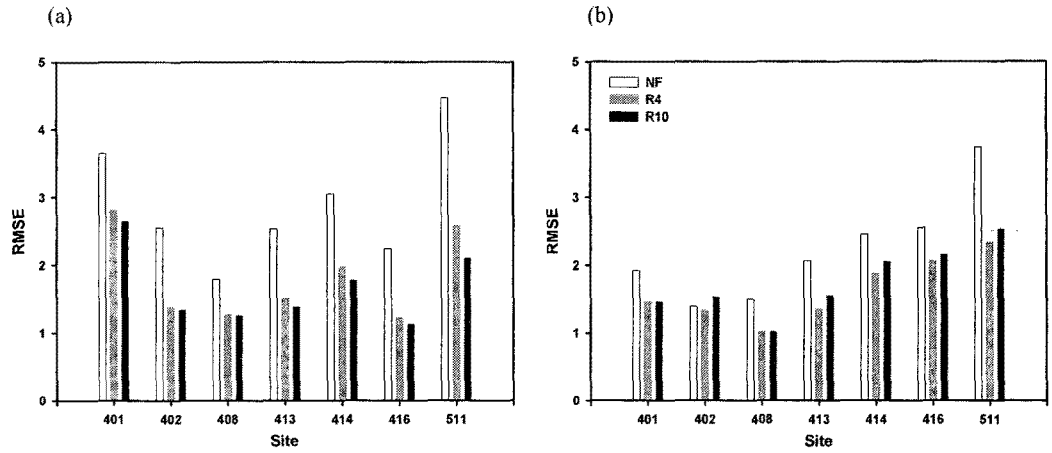

Fig. 8. The same as in Fig. 7 in case of wind speed.

다. 객관분석을 위한 예단 방정식은 flux 형태로 쓰여지며, 비정수 상태일 때 다음과 같다.

$$\frac{\partial^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha,x,t) + G_\alpha \cdot W_\alpha(x,t) \cdot \epsilon(x) \cdot p^*(\hat{\alpha_0} - \alpha)$$

where, $p^* = p_s - p_t, p_s$: surface pressure, p_t: a constant pressure of the top, α: the model's dependent variables, F: model's physical forcing terms, x: the independent spatial variables, t: time, $\hat{\alpha_0}$: the estimate of the observation analyzed to the grid, ϵ: the analysis quality factor, G_α: the nudging factor of the relative magnitude of the term, $W = W_{xy} W_\alpha W_t$: the horizontal, vertical and time weighting function

여기서 물리적 힘(physical forcing)이란 이류와 코리올리 힘 등을 말하며, G_α는 이러한 물리과정과 비교하여 적절한 값을 정의해야 한다. 자료동화 계수인 G_α는 보통 Coriolis parameter의 크기와 유사하게 정의하고 수치계산의 안정성을 위해 항상 $1/\triangle t$ 보다 작아야 한다. 일반적으로 G_α는 $1.0\times10^{-4}s^{-1}$에서 $1.0\times10^{-3}s^{-1}$의 값을 쓰며, G_α가 너무 크면 관측값이 너무 강하게 내삽되어 모델 내에 불균형이 생기며 국지순환의 영향을 손상시킬 수 있으므로 바람직하지 못하다. 반면, G_α가 너무 작으면 모델 내에 반영시킬 수 없다[13]. MM5에서는 기온과 바람에 대해 큰 도메인의 경우 $2.5\times10^{-4}s^{-1}$, 그리고 작은 도메인의 경우 $1.0\times10^{-4}s^{-1}$를 기본값으로 하고 있으며, 본 연구에서는 복잡한 도심에서의 최적의 동화계수를 선정하고자 Table 4와 같이 설계하여 분석하였다. 특히 약한 종관사례일인 case 2에서의 stream line은 자료동화의 강도가 국지적 순환패턴에서 그 수렴의 폭과 위치에 영향을 주고 있음을 알 수 있다(Fig. 9, 10). 관측값과의 분석에서 강한 종관사례일인 case 1의 경우 약한 동화강도, 약한 종관사례일인 case 2의 경우 큰 동화강도를 가지는 것이 유의한 결과를 모사할 수 있음을 나타내고 있다(Fig. 11, 12).

대기경계층(PBL)에서의 바람은 대기의 안정도 및 경압성, 지표면 조도, 풍속 그리고 가속도 효과에 의하여 영향을 받으며, 지표로부터 자유대기로의 열, 운동량, 수분 등의 공급을 결정하므로써 수치모델링에 있어 지상 바람장 예측에 영향을 준다. 동화강도에 따라 연안과 내륙에서의 PBL 높이 차이를 비교하기 위하여 Fig. 4에 나타난 511지점(부평)과

Table 4. The simulated case by each nudging coefficient

	Nudging coefficient (s^{-1})
NF	No_fdda
NC0.5	0.5
NC1	1
NC2	2
NC3	3
NC6	6

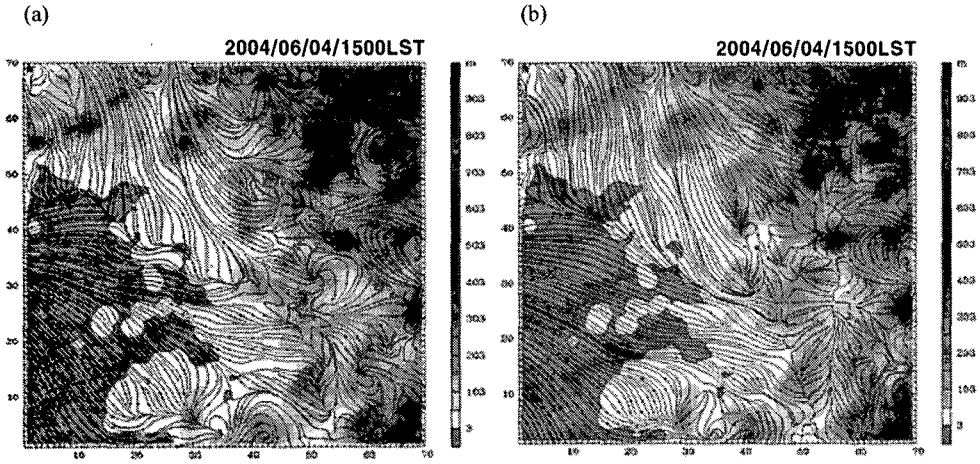

Fig. 9. The horizontal wind stream line in case 2((a):NC0.5, (b):NC6).

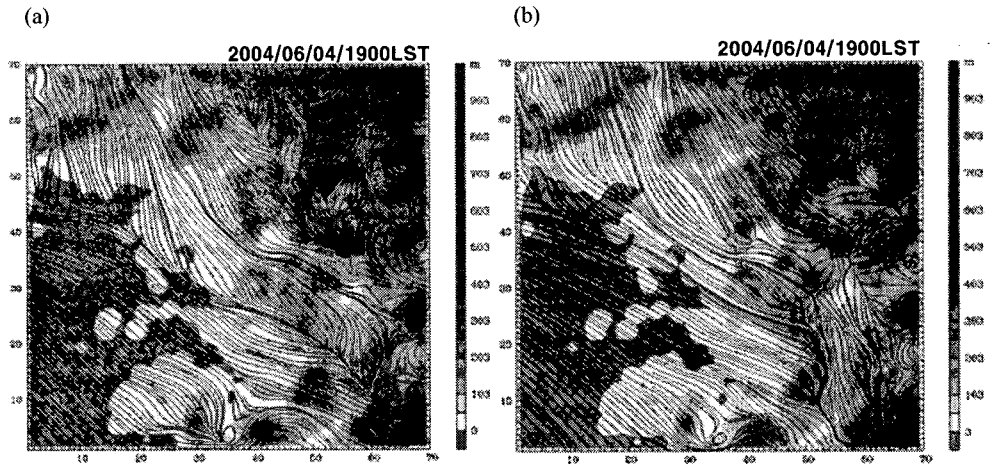

Fig. 10. The same as in Fig. 9.

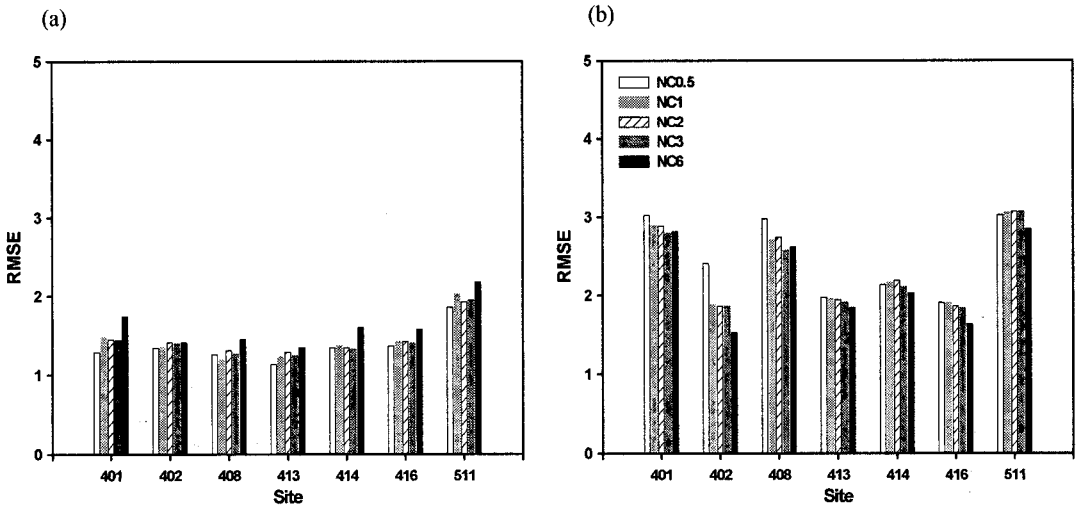

Fig. 11. The difference of horizontal temperature by each nudging coefficient ((a):case 1, (b):case 2).

402지점(강동)을 중심으로 산출된 PBL 높이를 비교하였다.

부평을 중심으로 한 연안지역에서는 1200LST와 1500LST 부근에서는 NC0.5에 의해 산출된 PBL 값이 다소 높게 나타나는 반면, 자정을 지나면서 NC6에 의해 산출된 높이가 높게 나타나고 있다. 내륙으로 들어오면서 강동지점을 중심으로 산출된 이들의 높이 차이는 다소 줄어들고 있다. 따라서 자료동화의 강도는 지표로부터 자유대기로의 열, 운동량, 수분 등의 공급을 결정하는 PBL에서의 차이를 유발하여 수치모델링에 있어 지상 바람장 예측에 영향을 주고 있음을 알 수 있다(Fig. 13).

5. 결 론

적절한 자료의 유효성 검증을 통해 공간적으로 불규칙하게 분포되어 있는 관측 값들을 복잡한 도심지형에 대한 예보모델의 초기 입력 자료로 사용하기 위하여 다양한 객관분석을 통해 정해진 격자체계의 값들로 바꾸어 주는 과정을 고안하였다. 먼저, 복잡지역의 경우 대표성 있는 바람자료에 의한 내삽의 효과를 기대하기 위해서 정규관측지점과의

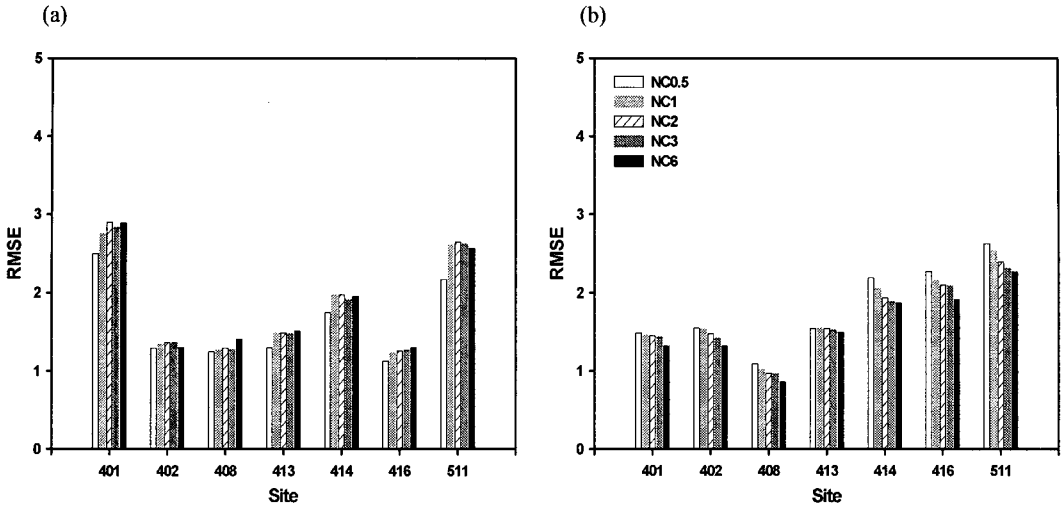

Fig. 12. The same as in Fig. 11 in case of wind speed((a):case 1, (b):case 2).

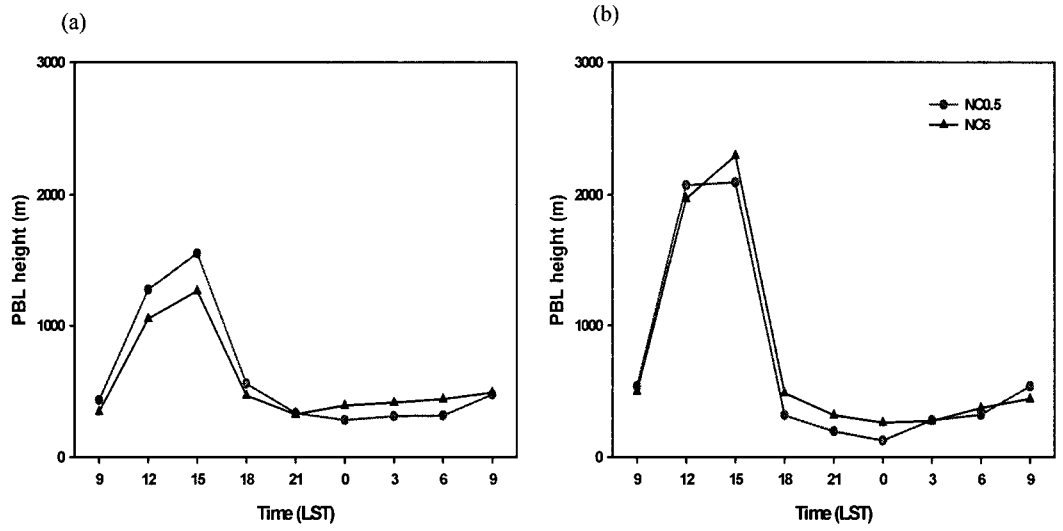

Fig. 13. The diurnal variation of PBL height in case 2((a):coastal area, (b):inland area).

상관성을 통해 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS) 자료의 대표성을 종관상태에 따라 조절(site coherence analysis)하였고, 이 지역의 자료 동화에서의 효율적인 반경과 동화계수를 검증하기 위해 다양한 실험설계를 통하여 분석하였다. 자료 동화의 반경의 경우 복잡지역에서 다소 강한 종관사례일에서는 값이 커지고 있으며, 약한 종관사례일에서는 작은 값이 유의한 결과를 수치모의 하였다. 동화의 강도에서는 강한 종관사례일에서는 작은 동화강도 수치를, 약한 종관사례일에선 큰 동화강도수치를 가지는 것이 지상 바람장 및 연직 PBL의 차이를 유도하여 지상관측값과의 시계열 및 통계분석에서 유의한 결과를 수치모의하고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1) 이화운, 최현정, 이강열, 2005, 객관분석에 의한 복잡지형의 대기유동장 수치 모의와 모델에 의한 자료질 조절효과, 한국대기환경학회지, 21(1), 97-105.
2) Smolarkiewicz P. K., Grell G. A., 1992, A class of monotone interpolation schemes, Journal of Computational Physics, 101, 431-440.
3) Umeda T., Martien P. T., 2000, Evaluation of a data assimilation technique for a mesoscale meteorological model used for air quality modeling, J. Appl. Meteor., 41, 21-29.
4) Lee H. W., Choi H. J., Lee S. H., Kim Y. K., Jung W. S., 2008, The Impact of Topography and Urban Building Parameterization on the Photochemical Ozone Concentration of Seoul, Korea, Atmospheric Environment, 42, 4232-4246.
5) Elbir T., 2003, Comparison of model predictions with the data of an urban air quailty monitoring metwork in Izmir, Turkey, Atmospheric Environment, 37, 2149-2157.
6) Stauffer D. R., Seaman N. L., 1999, Multiscale -four dimensional data assimilation, J. Appl. Meteor., 33, 416-426.
7) 이화운, 최현정, 이강열, 2005, 상세한 하부 경계조건과 관측값 객관분석이 복잡지형의 대기흐름장 수치모의에 미치는 효과, 한국기상학회지, 41(1), 73-87.
8) 이화운, 원혜영, 최현정, 2004, 복잡한 해안지역에서의 지상관측자료를 이용한 대기유동장 수치모의, 한국대기환경학회지, 20(5), 633-645.
9) 김진영, 김영성, 정관영, 2000, 서울 · 인천지역 자동기상관측 바람 자료의 특성 분석, 한국기상학회지, 36(2), 153-166.
10) Grell G. A., Dudhia J., Stauffer D. R., 1995, A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 107.
11) Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., Clough S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J. Geophys. Res., 102(D14), 16663-16682.
12) 부경온, 전영신, 박지용, 조하만, 권원태, 1999, 자동기상관측장치자료를 이용한 서울의 기온수평분포 분석, 한국기상학회지, 35(3), 335-343.
13) National Center for Atmospheric Research, 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.