한국대기환경학회지 제 20 권 제 4 호
J. KOSAE Vol. 20, No. 4 (2004) pp. 523 ~ 537
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

복잡 지형의 대기질 예측을 위한 지상자료동화의 효용성에 관한 수치연구

Numerical Study on Surface Data Assimilation for Estimation of Air Quality in Complex Terrain

이 순 환* · 김 헌 숙[1] · 이 화 운[1]
조선대학교 아시아몬순기후환경연구센터 광주광역시 동구 서석동 375번지
[1]부산대학교 대기과학과 부산광역시 금정구 산 30번지

(2004년 2월 24일 접수, 2004년 7월 29일 채택)

Soon-Hwan Lee*, Heon-Sook Kim[1] and Hwa-Woon Lee[1]
Center for Asia Monsoon & Climate Environment Research, 375 Seosuk-don Dongu Gwangju, Korea
[1]Department of Atmospheric Science, 30 Jangjun-dong Kumjung-Gu Busan, Korea

(Received 24 February 2004, accepted 29 July 2004)

Abstract

In order to raise the accuracy of meteorological data, several numerical experiments about the usefulness of data assimilation to prediction of air pollution was carried out. Used data for data assimilation are surface meteorological components observed by Automatical Weather System with high spatial density.

The usage of surface data assimilation gives changes of temperature and wind fields and the change caused by the influence of land-use on meterological simulation is more sensitive at night than noon. The data quality in assimilation is also one of the important factors to predict the meteorological field precisely and through the static IOA (Index of Agreement), simulated meteorological components with selected limited surface data assimilation are agree well with observations.

Key words : Objective analysis, Quality control, Complex terrain, AWS, MM5

1. 서 론

대기질 예측연구는 최근 10년간 급격한 발달을 이루어 왔다. 이러한 발달은 배출원이 되는 자료의 정보화와 배출량의 정확한 산정기술등의 발달에 힘입은 바 크다. 그러나 이와 더불어 수치기상학의 발달에 따른 기상장의 정확한 산정도 대기질 예측의 정확도를 높이는 데 중요한 요인으로 작용하였다. Hanna *et al.* (2001)은 UAM (Urban Airshed Model)의 도시지역 오존 예측에 있어서 풍향, 풍속, 습도와 운량 등 기상요소가 많은 영향을 미치며, 오존량 예측

* Corresponding author
Tel : +82-(0)62-230-7714, E-mail : leesh@chosun.ac.kr

의 불확실성을 유발하는 주된 요소로 설명하고 있다. 그리고 Biswas and Rao (1999)는 바람과 혼합고가 지표 오존 농도에 많은 영향을 미치며, 일최고 오존 농도가 기상 자료에 아주 민감하게 반응하여 대기질 예측에서 불확실성을 유발할 수 있는 가능성을 설명하였다. Seaman (2000)은 오존은 기상과 배출량, 화학반응의 상호작용에 의해서 생성되어지지만, 화학 반응에 영향을 주는 주된 요소로 기상을 설명하고 있으며, 이런 기상의 불확실성을 줄여 대기질 예측의 향상을 가져올 수 있음을 제시하였다. 그리고 Lee and Kimura (2001)는 지표면 변화에 의해 형성되는 국지적인 기상장이 지형에 의한 바람장과 같은 강도로 발생할 수 있음을 수치실험을 통하여 보였으며 이러한 바람장은 도시의 대기이동에 중요한 요소로 작용할 수 있음을 지적하였다. 이순환 등(2002)은 대기확산 모형의 수치실험을 통하여 한반도 남서해안의 도시화에 따른 지표대기의 변화가 오염물질 확산장에 영향을 준다는 것을 보였다. 그리고 확산장의 변화에 따라 급격한 대기질의 변화를 가져올 수 있다는 것을 보고하였다. 이들의 연구를 통하여 기상장의 정확한 예측은 대기오염 등 대기질 예측에 절대적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Barna and Lamb (2000)는 세 가지의 다른 기상장(객관 분석을 사용하지 않은 MM5의 기상장, 객관 분석을 사용한 MM5의 기상장, 진단 모델인 CALMET의 기상장)을 사용하여 대기질 수치실험을 한 결과, 객관 분석을 사용한 기상장을 사용한 경우가 기상장과 오존 예측에 있어서 관측치를 가장 잘 묘사하는 것을 보였다. 그리고 대기질의 정확한 예측은 정확한 초기 기상장 예보와 관련성을 가지고 있다고 지적하였다.

수치모형을 통한 기상장의 정확한 산정을 위하여 모델의 초기조건과 경계조건을 정확히 표현하여야 한다. 이러한 초기조건과 경계조건의 산정을 위하여 여러 가지 종관, 비종관 관측자료의 동화과정에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 한국기상연구소는 미국 예보연구시스템연구소(FSL)가 개발한 LAPS (Local and Prediction System)를 이용하여 방대한 양의 관측자료를 체계적이고 종합적으로 분석하여 실시간 예보를 위한 다양한 변수를 생산하고 있다(김용상 등, 2002). 기상청의 루틴관측과 더불어 비종관 자료인 레이더와 기상 및 환경관측위성으로부터 수신되는 위성자료의 이용가능성이 제시되고, 기초적인 단계에서 이용하고 있다. 그러나 현재 관측밀도가 가장 높은 AWS는 자료의 내재적인 가치에 비하여 자료동화의 효용성이 낮고, 일반적인 관측자료의 검증에만 사용되고 있다. 그리고 다양한 관측시스템의 모사실험을 이용하여 종관, 비종관 관측자료의 영향을 평가한 예는 있으나, 한반도지역에 관한 체계적인 연구는 많지 않다. 특히 복잡지형의 국지적인 대기질 예측과 관련하여 meso-β규모의 기상장을 평가한 예는 거의 없다.

본 연구에서는 산악지역과 해안지역이 혼재하고 있는 한반도 남서지역을 대상으로 지상자동관측장비를 이용한 자료동화의 이용가능성과 관측치 내삽에 사용되어질 자료의 검증(Quality Control)에 따른 기상장의 개선 정도를 파악하였다.

2. 수치 모형 및 자료

2.1 수치 모형

본 수치실험에 사용한 중규모 기상 모형은 3차원 비정수계 모형인 MM5 (the Fifth-Generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model) 이다 (Dudhia *et al.*, 2000) 연직 좌표계는 지표면에서 지형고도를 따르는 기압을 기준으로 하고, 상층으로 갈수록 평형을 이루는 기압준거좌표계로 이루어져 있다.

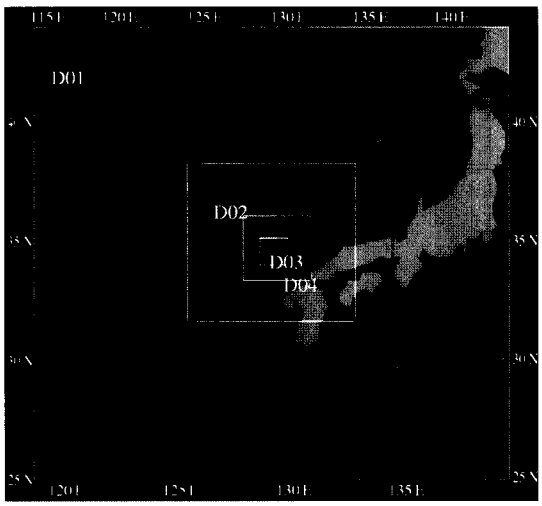

Fig. 1. Nested model domains used in this study.

수치모형은 4개의 둥지격자를 가지고 있으며, 각 영역의 수평 해상도는 54, 18, 6, 2 km이다(그림 1). 연직격자는 23층으로 두었다. 일반적으로 지표경계층내의 대기현상은 공간규모가 작기 때문에, 지표에 가까운 층을 고해상도로 설정하였다. 고기압이 지배적인 여름날을 대상으로 모형 내의 각 영역별 설정은 표 1에 나타내었다. 복사과정은 구름의 존재 여부를 판단하여 복사량이 결정되는 Cloud-radiation 방안이고, 경계층의 물리과정은 Medium Range Forecast Model (MRF)을 사용하였으며, 경계층의 물리량이 상층의 이동을 원활히 하기 위하여 천층대류과정(Shallow convective process)을 적용하였다. 지표면 열수지 과정은 Land Surface Model로 4층의 지중층과 1층의 식생층이 포함되어 있어서, 지표면 온도뿐 아니라 식생의 온도도 계산되어진다. 격자 5 km이하의 경우, 미물리 과정만으로 강수를 표현할 수 있으나, Dudhia *et al.* (2000)에 의하면 meso-gamma규모의 격자라고 하더라도 미물리 과정만으로 강수를 표현하는데 부족하다고 제시하였다. 그러므로 본 연구에서는 적운과정으로 변형 Kuo모수화를 적용하였다(Grell *et al.*, 1991)

실험에 사용된 모형의 초기 및 경계자료는 NCEP/NCAR의 전 지구 2.5° 간격의 6시간 재분석 자료를 사용하였고, 사례일을 포함하여 60시간동안 적분하였다. 이 모형에는 2가지의 자료동화방법이 제공되고 있다. 하나는 종관장을 따르는 관측치를 이용하여 경계 조건을 변화시키고 격자형태로 내삽하는 analysis nudging이 있고, 관측치를 직접 내삽하는 observational nudging이 있다(Shafran *et al.*, 2000). 본 논문에서는 Cressman scheme을 사용하여 경계 조건을 변화시키고, 관측치를 3시간 간격으로 내삽하는 analysis nudging을 사용하였다(Dudhia *et al.*, 2000).

관측치 내삽시 사용되어지는 상관계수는 계산상의 안정성을 고려하여 정하는데, 상관계수가 너무 크면 지역적인 관측치의 영향이 커져서 대표성을 띠기 어려운 지역적 자료가 기상장에 영향을 줄 수 있고, 반대로 너무 작으면 모형의 phase and amplitude errors를 제어하는 효과가 작아지게 되어 기상장 개선에 효과적이지 못하다(Stauffer and Seaman, 1994). 그러므로 본 논문에서 관측치 내삽시 사용되어지는 상관계수는 선행 연구에 따라 수평 격자를 고려하여 첫 번째 영역의 기온과 바람의 상관계수는 $2.5\times10^{-4}s^{-1}$로 하고, 수분의 상관 계수는 $1.0\times10^{-5}s^{-1}$로 하였다.

Table 1. Nested model configurations.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
PBL scheme	MRF scheme			
Cumulus scheme	Anthes-Kuo scheme			
Explicit moisture scheme	Mixed phase scheme			
Radiation scheme	RRTM longwave scheme			
Vertical grid	23 layer			
Horizontal grid	41×41	43×43	52×52	64×64
Horizontal resolution	54 km	18 km	6 km	2 km
Time step	50s	17s	6s	2s
Time period	60 hour			

2.2 관측자료

자료동화에 사용되어지는 비종관 자료로는 레이더, 윈드프로파일러와 지상 관측 자료등이 있다. Stauffer *et al.* (1990)은 수치실험을 통하여 3차원의 관측 자료를 사용하는 것이 기상장 개선에 가장 효과적이지만, 2차원의 지상 자료만으로 적용 가능한 신뢰도를 가진 자료의 생산이 가능하다는 것을 보였다. 그리고 본 연구는 관측분해능이 가장 높은 자동관측장치의 자료동화 예측효율성을 보는데 주안점을 두고 있기 때문에 가장 조밀한 네 번째 영역에 포함되어지는 34개의 지상 자료를 기상장 자료동화에 사

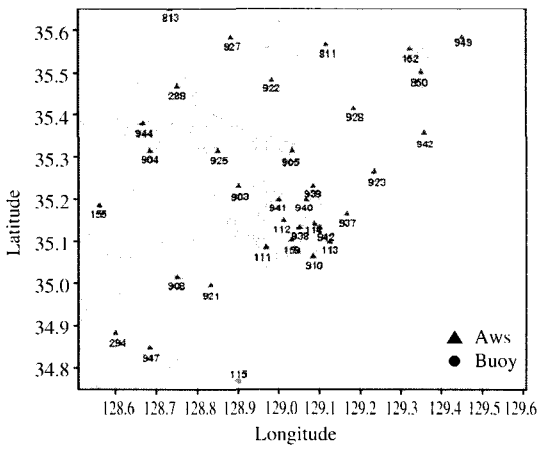

Fig. 2. Topography of finest domain and location of surface observation and buoy. The number indicate station identification (Table 2). The interval of contour lines is 300 m.

Table 2. The location name of AWS station shown in Fig. 2.

Manifestation	Site name
111	Sinpyeong_PNU
112	Gaegeum_PNU
113	Yongho_PNU
114	Suyeong_PNU
159	Daechung
910	Yeongdo
923	Ilgwang
937	Haeundae
938	Busanjin
939	Kumjung
940	Dongnae
941	Bukgu
942	Daeyeon

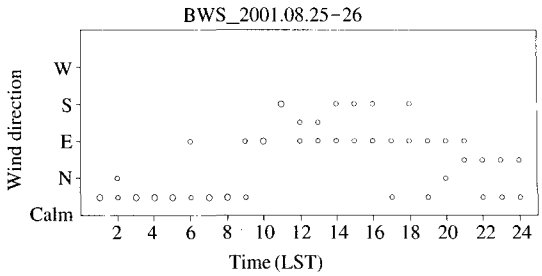

Fig. 3. Frequency of wind direction for episode day in Busan Regional Meteorological Office. The size of circle represents the wind direction frequency for 2 days. Calm zone is when wind speed is less than 1 ms^{-1}.

용하였다(그림 2). 34개의 지상 자료 중 대부분이 AWS (Automatic Weather System) 자료이고, 1개의 해상 부이(buoy) 자료가 포함되어 있다. 자료의 지명은 표 2에 나타내었다. 그리고 자료해석을 위한 동래와 영도의 자료는 동화에 직접적으로 관계하지 않으며, 계산결과의 검증에 사용하였다.

3차원 모형에 사용하기에는 2차원의 지상 자료의 한계점이 물론 있다. 적분 시간과 공간에 대한 단층의 자료만으로는 3차원 모형에서 유발되는 오차를 제어하기 어려울 뿐 만 아니라, 지상 자료가 그 지역의 대표성을 띠기보다는 주변 건물 등의 국지적인 효과를 내포하고 있으므로 이를 제거하지 않은 자료를 사용한다면 기상장의 향상을 기대하기는 어려울 것이다(Stauffer *et al.*, 1990). 그러나 2차원 자료를 사용하더라도, 지상 자료의 고도와 기압, 해면 기압이 입력 자료로 사용되어 연직으로 지상으로부터 몇 층은 모형의 오차를 제어할 수 있다. 그리고 지역의 대표성이 약한 곳에 위치한 관측소의 자료에 의하여 계산오차가 발생할 가능성이 있다. 자료의 불확실성을 제거하기 위하여 자료 전처리 작업을 실시하였다.

3. 수치모의 설계

3.1 사례일 선정

사례일로 한반도 남동해안지역에서 가장 평이한 바람이 불면서 고농도 오존이 있었던 날을 선정하였으며, 부산 지역의 주풍향 분석을 통하여 2001년 8월 26일을 사례일로 정하였다. 1998년부터 2002년까지의 여름철(6~8월) 부산 지방기상청의 지상 관측 자료를 대상으로 결합빈도함수(MJFF)를 사용하여 분석한 결과, 부산 지역의 여름철에는 동풍 계열의 바람이 우세한 것을 볼 수 있었다. 그러므로 사례일은 동풍 계열의 바람이 불면서 고농도 오존이 발생된 날로 선택하였다. 고농도 오존일은 8시간 평균 농도인 60 ppb를 초과하는 관측소가 3곳, 1시간 평균 80 ppb를 초과하는 관측소가 3곳 이상인 날로 한정하였다.

부산 지방기상청의 자료분석을 통하여 사례일로 선정된 2001년 8월 26일 시간별 풍향을 조사한 결과, 사례일은 동풍이 우세한 날이며, 850 hPa과 지상 일기도의 기압배치에서도 동풍성향의 바람이 지배적으로 나타난다(그림 4). 이 날의 낮 평균 기온은 25°C 이상, 일출 후 누적 일사량이 6.4 MJm^{-2} 이상, 풍속이 약한 날로 일최고 오존 농도가 102 ppb로 1시간 평균 기준 농도를 초과하였다.

3.2 실험 설계

본 연구의 주된 목적은 지표면 자료동화의 효율성을 검증하는 것으로, 전체적인 실험설계는 표 3과 같다. 대기의 종관장에 따른 자료동화를 실행할 경우에는 두 가지의 실험, 즉 지상자료를 동화시키지 않은 경우(Run 0)와 자료동화를 실시한 경우로 나누었다. 자료동화를 실행한 경우에는 다시 지표면의 바람장 등 주요 요소가 종관 요소와 유사한 경향성을 갖는

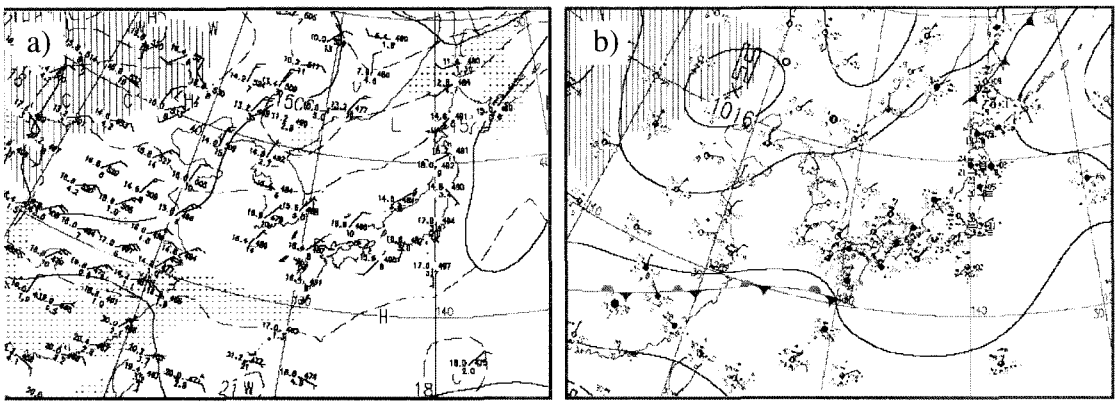

Fig. 4. Weather maps of 850 hPa (a) and surface (b) for 0000UTC 26 August 2001.

Table 3. Design of numerical experiments.

Experiment	Analysis nudging	Quality control
Run 0	–	–
Run 1-1	u, v, T, q	S[a], M[b]
Run 1-2	u, v, T, q	–
Run 2-1	T	–
Run 2-2	u, v, T, q	M

[a] surface data following synoptic field
[b] surface data removed for mechanic error.

자료만 사용한 경우(Run 1-1)와 종관장에 상관없이 모든 지상 자료를 고려하는 경우(Run 1-2)로 나누어 수치실험을 실시하였다. 이 실험을 통하여 지상관측 자료의 정확도와 유용성을 평가할 수 있다. AWS가 가지는 자료의 불확실성을 제거하기 위한 자료의 전처리 과정을 수행하였다. Run 1-1에 사용되어지는 지상 자료는 종관장의 풍속에 대하여 AWS 풍향이 좌우 45도 내의 값만을 채택하였으며, 1 ms^{-1} 이하의 풍속은 풍향의 기계적 오차를 포함하므로 풍향과 풍속을 고려하지 않는 전처리 과정(QC)을 거친 것이다. 이것은 실제 종관풍과 다른 지형적인 특성을 반영하는 바람장을 과소평가할 가능성이 있으나, 본 연구에서는 부산지역의 중규모적인 바람장과 온도장의 동화효과에 초점을 두기 때문에 위와 같은 전처리 과정을 수행하였다.

그리고 자료동화를 기상요소별로 단독적 수행할 경우에 모사되는 대기예측정확도의 차이를 보기 위하여 지상관측장비의 온도만을 동화시킨 경우(Run 2-1)와 풍향, 풍속 등 바람장 정보만을 자료동화에 이용한 경우(Run 2-2)로 나누어 실험을 실시하였다.

4. 결과 및 분석

본 연구에서 2001년 8월 24일 1800 UTC에서 27일 0000 UTC동안 총 60시간 적분하였고, 지상관측치는 3시간 간격으로 내삽된다. 초기 수치대기를 안정화시키는데 필요한 12시간을 제외한 48시간의 계산자료를 분석에 이용하였다.

Run 0을 제외한 각 실험 결과는 지상관측자료동화를 시행하지 않은 실험과의 차이를 설명하기 위해서 0400LST와 1600LST에 대한 기온과 풍속의 difference map으로 제시하였다. 자료동화를 통하여 얻은 결과의 기온(풍속)이 Run 0보다 높게(크게) 나타난 것은 음의 값을 가지도록, 낮게(작게) 나타난 곳은 양의 값을 가지도록 모든 실험에 대해 동일하게 표시하였다.

4.1 자료신뢰도에 따른 동화의 영향분석

그림 5는 지상관측 자료동화를 시키지 않은 RUN 0에서 계산된 2001년 8월 26일 0400LST와 1600 LST의 온도장과 바람장을 나타낸 것이다. 0400LST의 경우, 지상일기도(그림 4)에서와 같이 전체적으로 동풍계열의 바람이 불고 있다. 이러한 동풍계열의 바람은 해상에서 뚜렷이 나타난다. 그러나 내륙의 경

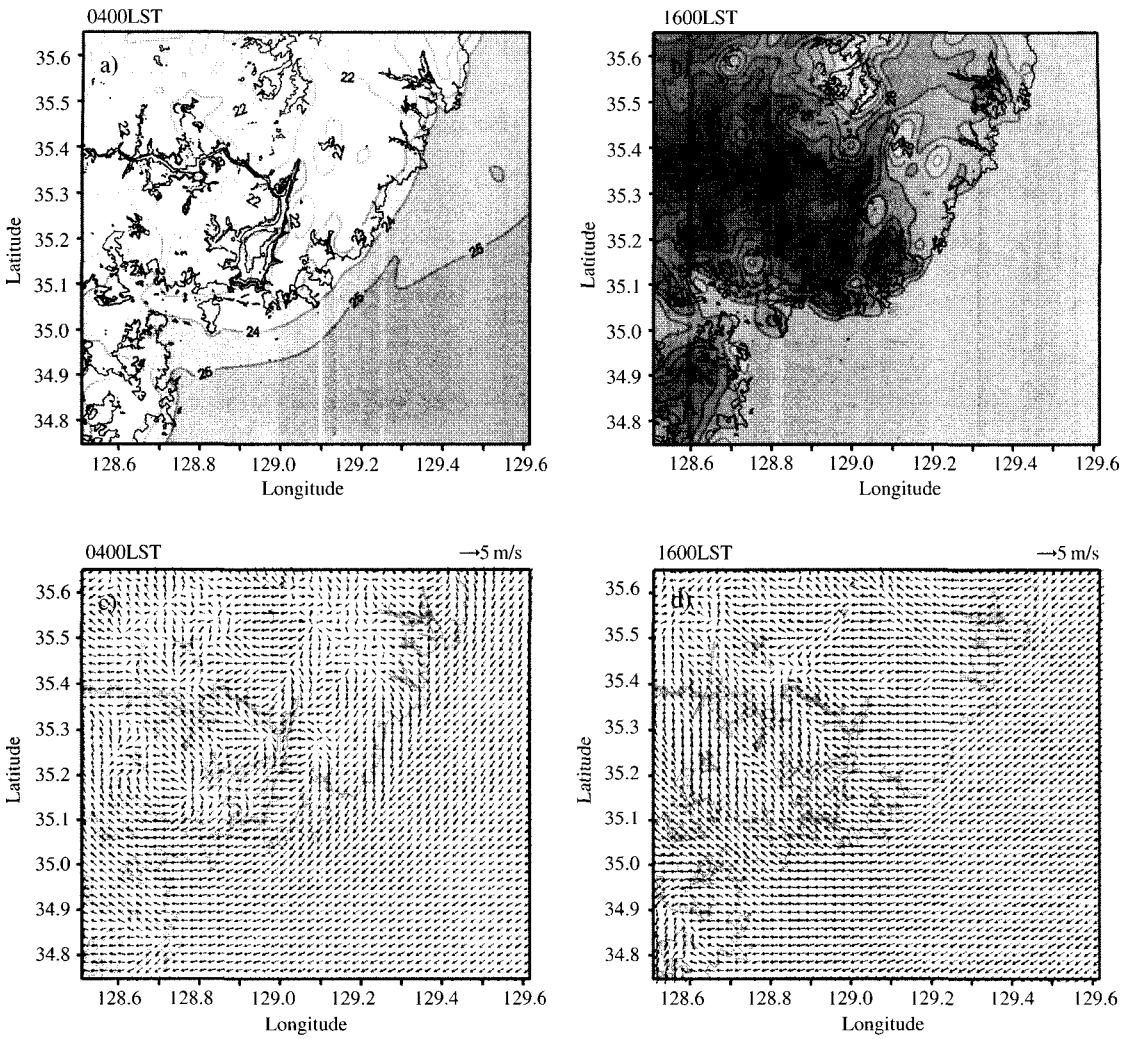

Fig. 5. Surface meteorological fields of Run 0 at 0400LST and 1600LST 26 August 2001. Temperature fields are shown (a) and (b), wind fields are shown (c) and (d).

우 복잡한 양상을 나타낸다. 즉 산악을 중심으로 산풍이 형성되고 있음을 알 수 있다. 이것은 내륙의 지형에 기인한 것으로 이 지역이 지형적인 영향을 강하게 받고 있다는 것을 보여준다. 그리고 해상에서와 같은 동풍이 형성되지 않는 것은 지형 등에 의해 형성된 국지 기상장이 종관장보다 강하게 작용하고 있다는 것을 의미한다. 이때 온도장의 경우, 해안에서 상대적인 고온역이 존재하고, 산지가 있는 내륙에서 저온역이 존재하고 있다. 그러나 그 차이는 크지 않다.

그러나 일사에 의한 에너지의 축적이 최대가 되는 1600LST의 경우, 종관장의 동풍과 더불어 강한 해풍이 바다에서 육지로 유입되고 있다. 동해안에서 유입되는 바람은 가지산 등 태백산맥의 말단부에 위치한 산악에 의하여 차단되고 있으나 남해안에서 유입된 해풍은 낮은 지형에 의하여 내륙 100 km지점까지 유입되고 있음을 알 수 있다. 그리고 육지내에서도 온도차가 크게 나타나는데 이것은 산악에 의한 것으로 곡풍의 발생원인이 된다. 그러나 강한 해풍과 동풍계열의 종관장에 의하여 뚜렷이 나타나지는 않는다.

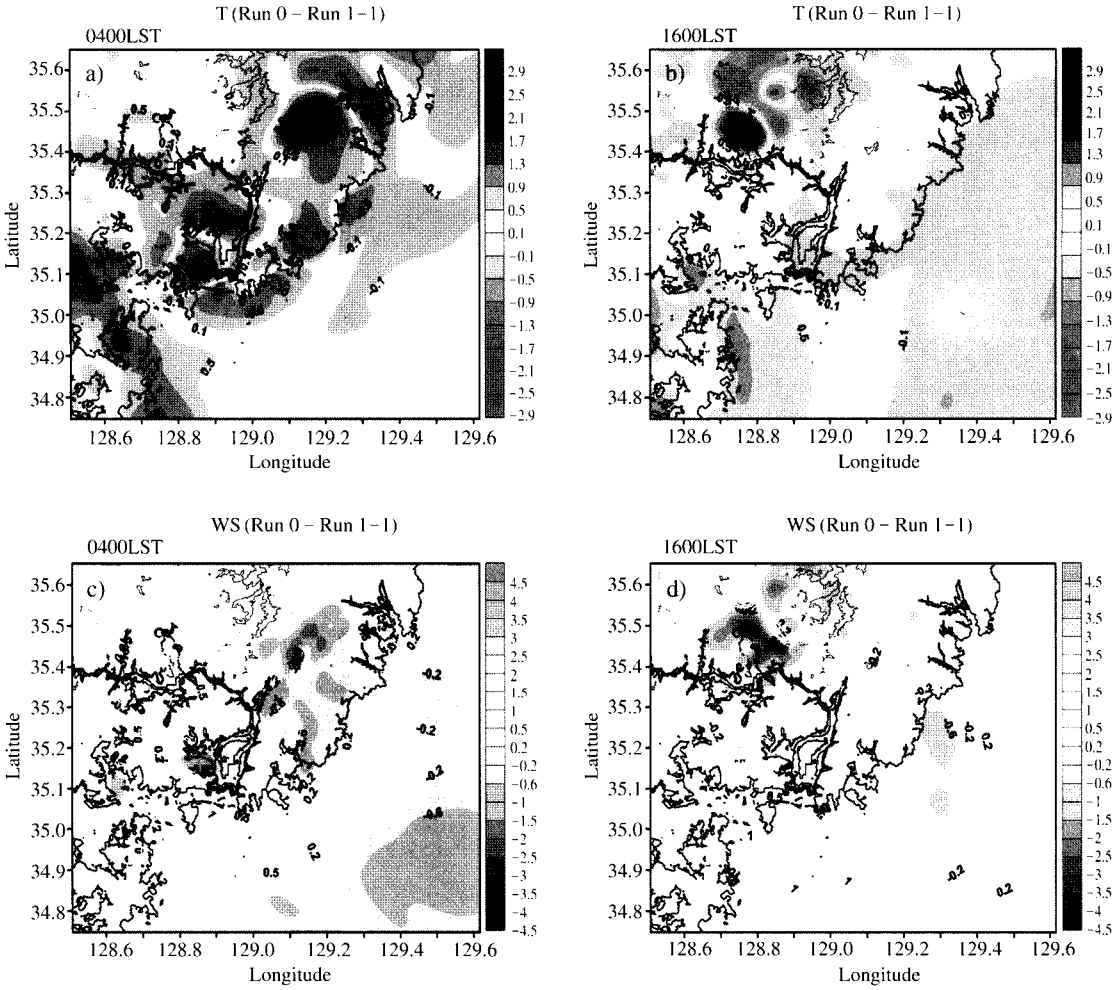

Fig. 6. Differences of estimated meteorological components from Run 0 and Run 1-1. Positive values indicate that the results of Run 0 are larger than Run 1-1.

그림 6은 종관장을 따르는 자료와 관측기기의 기계적 오차를 제거한 자료를 사용한 Run 1-1에서 계산된 온도장과 바람장을 기준계산인 Run 0에서 산출된 온도장과 바람장의 차이를 나타낸 것이다. Run 1-1은 종관장을 따르며 기계적 오차를 제거한 자료를 사용하여 그 지역의 대표성을 띠지 못하는 관측치를 동화자료로 사용하지 않았다. 그 외의 계산조건은 Run 0와 동일하다.

야간인 0400LST의 경우, 부산 지역에서는 공단 지역인 신평과 해안에 인접한 영도 지역을 제외한 대부분의 지역에서 관측자료동화를 통하여 기온이 감소하는 경향을 나타냈다. 이것은 한반도 남동해안지역의 토지이용도를 반영한 결과로 보인다. 즉 토지이용에 따른 야간 현열의 차이가 지상관측자료를 통하여 반영된 것으로, 기준계산인 Run 0에서는 육지를 모두 동일한 조건의 토지로서 계산을 수행한다. 그러나 Run 1-1에서도 육지는 모두 동일한 조건의 토지라고 가정하고 계산하였으나, 지상관측자료의 동화과정을 통해서 지역의 토지이용상태의 차이가 어느 정도 계산에 반영된 것이다.

대연동과 같은 주거 지역은 일반적으로 활동 시간대가 지나면 인공적인 에너지원이 사라지게 되므로

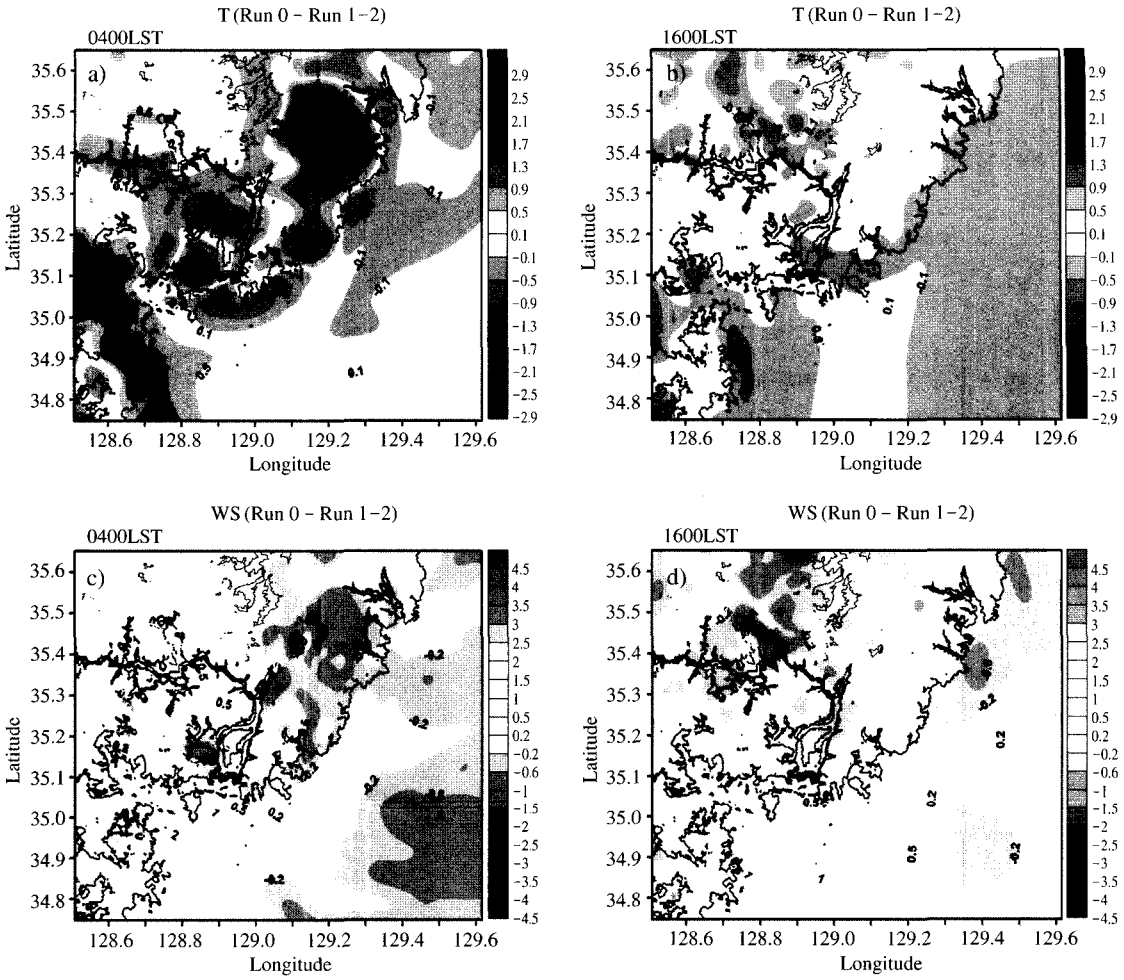

Fig. 7. The same as Fig. 6 except for components between Run 0 and Run 1-2.

현열이 감소하며, 반대로 신평과 같은 공단 지역은 지속적인 에너지원의 방출로 인해 현열의 감소폭이 주거 지역에 비해 작게 나타난다. 그리고 이러한 지역간 현열속의 차이가 지표면 열수지에 미치는 영향은 주간 보다 야간일 때 크게 작용한다. 그러므로 야간의 주거 지역과 공단 지역간 토지이용의 차이를 반영하는 지상 자료의 동화과정이 계산에 포함된 Run 1-1과 동화과정이 없는 Run 0의 온도 및 풍속에는 큰 차이가 나타난다.

주간의 1600LST의 경우, 일사가 축적되는 시간으로 주거 지역과 공단 지역 모두 관측치 자료동화를 실시한 Run 1-1에서 기온이 높게 나타났다. 이는 도심의 아스팔트로 인해 현열이 증가하여 나타난 결과로 이 역시 부산의 토지 이용이 고려되어 나타난 결과이다. 그러나 주간의 토지 이용도에 따른 불균등한 현열의 증가는 일사의 영향으로 인해 야간에 비해 열수지에 크게 작용하지 않는다. 그러므로 야간에 비하여 주간의 풍향과 풍속의 변화는 크게 나타나지 않았다. 또한 이것으로 자료동화는 아격자규모의 토지이용에 관한 영향을 반영한다고도 볼 수 있다.

그러나 자료동화에서 관측 자료의 개체수가 많으면 좋은 계산이 될 가능성이 크지만, 단순한 개체수의 증가가 반드시 정확한 기상장의 예측을 가능하게 한다고 볼 수 없다. 이것은 관측자료의 신뢰성의 문

제이다. 그러므로 지상관측자료의 신뢰성을 검증하여야 할 필요가 있다. 그래서 대상지역내의 모든 지상관측자료를 동화과정에 포함하는 Run 1-2를 통하여 한반도 남동해안지역에서 관측된 지상관측자료의 신뢰성을 검증하였다.

Run 1-2는 대표성을 띠는 자료만 선별 사용한 Run 1-1에 비해 자료의 개체수 증가에 따른 대기장 예측성 증가와 더불어 검증되지 않은 관측치로 인한 또 다른 불확실성을 유발할 수 있는 개연성을 가진다. 그림 7은 Run 1-2에서 계산된 바람장 및 온도장과 기준계산(Run 0)에서 산출된 바람장과 온도장의 차이를 나타낸 것이다. 그림 6과 비교하여 기온과 풍속의 경향성은 비슷하게 나타난다. 그러나 야간 기온의 감소 지역이 확장되고 그 감소폭도 커진다. 기온에 따라 야간 풍속이 증가하는 지역도 넓어진다. 이는 Run 1-1보다 지역적인 성향이 Run 1-2에서 더 많이 드러난 것으로 생각된다.

수치모의에 있어서 동화자료가 가지는 국지적인 특성에 의하여 발생하는 불확실성을 분석하기 위하여 계산된 기상자료와 부산지역의 실제 관측자료를 비교하였다. 그림 8은 부산의 해안에 위치한 영도와 내륙에 위치한 동래의 실제 관측치와 각 실험의 기온과 풍속, 풍향의 일변화를 나타낸 것이다. Run 1-1에서 계산된 온도의 일변화는 8월 26일 새벽을 제외하고는 관측치의 일변화를 잘 표현하고 있다.

해안가에 위치한 영도와 수영, 일광 지역에서 야간 기온 감소폭도 Run 0에 비하여 자료동화를 실시한 Run 1-1에서 관측치와 잘 일치한다(그림 8a). 그리고 해안가에 위치한 지역에서 Run 1-1과 Run 1-2의 기온차이는 크게 나타나지는 않는다.

주거지역인 개금, 금정구와 동래는 자료동화를 사용한 Run 1-1의 8월 26일 새벽 기온이 많이 감소되는 것을 보이는데 이는 앞서 설명한 것과 같이 야간 현열의 감소폭이 다른 지역에 비해 크기 때문이다(그림 8b). 자료동화를 사용함에 따라 주간의 일최고 기온을 거의 유사하게 예측할 수 있으므로 일최고 오존 농도가 나타나는 시간과 그 농도를 예측하는 대기질 수치모의에도 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

각 실험에서 계산된 풍속은 모두 관측치와 비슷한 경향을 나타낸다. 영도와 같이 해안가에 위치한 지역은 주간의 풍속이 다소 과대평가되고, 야간에는 과소평가되고 있다. 해안 지역 풍속의 경우, 관측치와 계산치의 풍속차이는 26일 20시 부근에서 가장 크게 나타나고, Run 1-1에 비해 Run 1-2에서 과소평가 정도가 더욱 크다. 그러므로 해안지역에서 동화자료의 신뢰도에 따른 민감도가 크게 나타나고 특히 야간에 크게 나타난다고 볼 수 있다(그림 8c). 동래와 같은 내륙의 주거지역에서 풍속변화가 해안지역보다 실제 관측된 풍속변화를 잘 모사하고 있다(그림 8(d)). 그러나 전체적으로 새벽의 저풍속을 모사하기에는 한계를 보이고 있으며, 내륙 지역의 Run 1-1과 Run 1-2는 차이를 보이지 않고 있다.

풍향을 살펴보면, 실험조건에 관계없이, 계산된 풍향은 실제 관측된 풍향과 다소 차이가 나타난다. 주간에는 모든 실험에서 비슷한 경향의 풍향변화가 나타나지만, 야간 시간에 Run 0과 자료동화를 사용한 것(Run 1-1, Run 1-2)과는 근소한 차이가 나타난다. 복잡한 해안가에 위치한 영도의 경우는 야간에 지상자료동화에 의한 차이를 나타내고 있고, 내륙에 위치한 동래의 경우는 8월 25일 야간에 자료동화에 사용된 자료의 전처리 과정에 의한 차이를 보여주고 있다(그림 8(e), (f)).

대기질 수치모의에 있어서는 사례일의 오염물질에 대한 최고 농도와 그 시간을 예측하는 것이 중요하기 때문에 주간에 대한 예측 정확도를 파악하는 것이 중요하다. 각 실험에 대한 주간의 결과를 살펴보면, 기온의 경우는 Run 1-1의 결과가 다른 결과에 비해 좋은 결과를 나타낸다. 풍속 또한 비슷한 결과를 보였다. 그러나 풍향의 경우, 검증을 거치지 않은 자료를 이용하여 자료동화를 시행한 Run 1-2의 결과가 객관 분석을 사용하지 않은 Run 0의 결과보다 관측치에 대한 상관도가 낮게 나타났다. 이것은 대부분 지상관측지에서 측정된 온도는 실제온도에 대하여 일정 정도 대표성을 띠고 있지만, 바람장의 경우 대표성을 띠는 정도가 약하다는 것을 의미한다. 특히 Run 1-2의 경우 동화에 사용되는 개체 수는 많지만 풍향의 실제 관측치와의 상관도가 가장 낮은 것이 그 한 예이다. 그러므로 지상관측이 실시되는 위치가 지역을 얼마나 대표하느냐에 따라 자료동화의 효율이 결정된다고 볼 수 있다.

4.2 기상요소별 자료동화의 효율성

관측치의 신뢰성에 따라 자료동화의 효과가 좌우

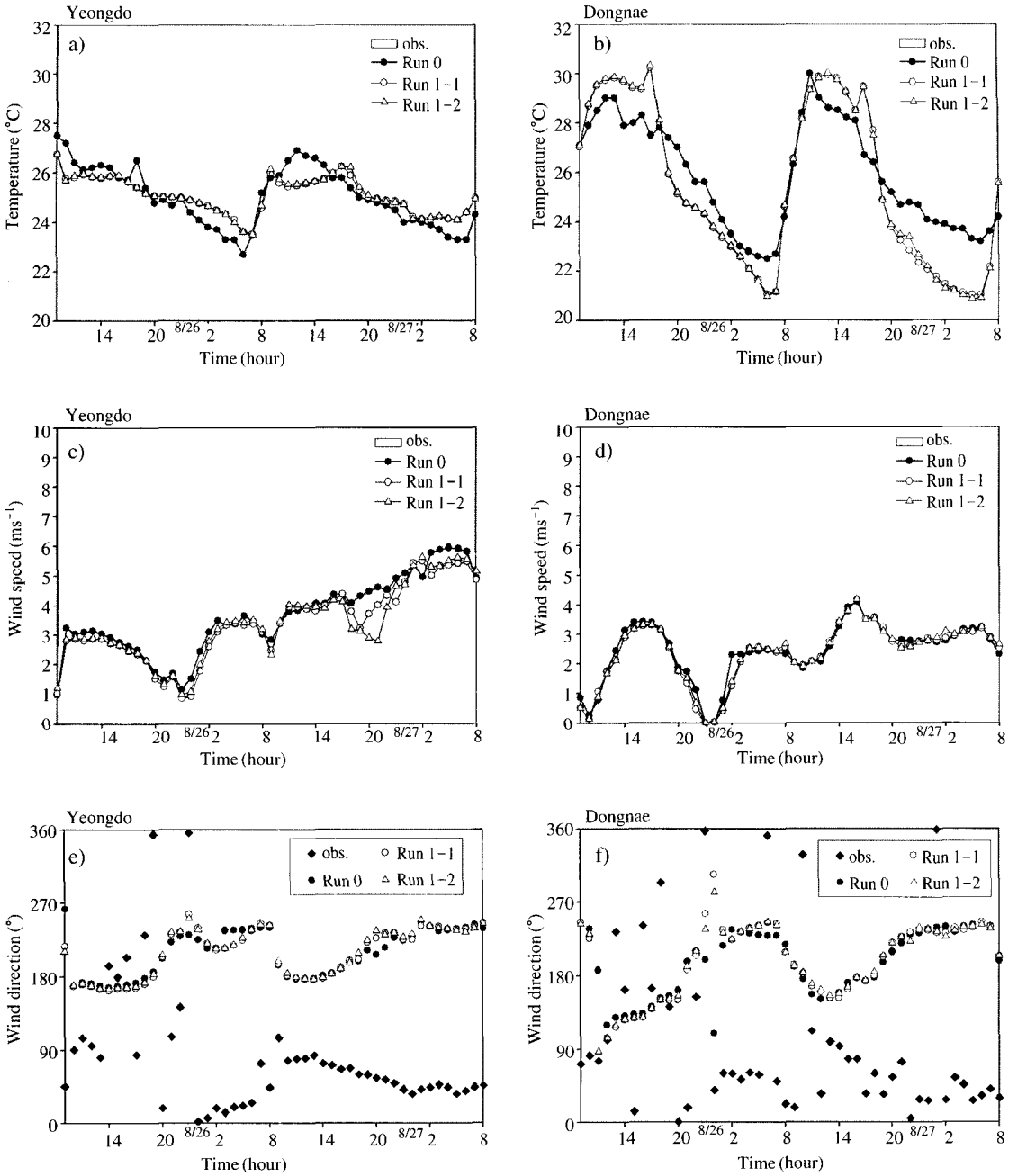

Fig. 8. Diurnal variations of the observed and simulated temperature, wind speed and wind direction in Yeongdo and Dongnae. Simulated components are calculated by Run 0, Run 1-1, and Run 1-2. Yeongdo and Dongnae represent the coastal regions and inland regions, respectively.

된다고 볼 때, 종관적인 기상장을 알고 있을 경우, 종관장 자료를 지상관측자료의 신뢰성을 판단할 수 있는 자료로 사용할 수 있으나, 실제 기상장 및 오염장의 예보적인 차원에서 보면 종관장에 대한 정확한

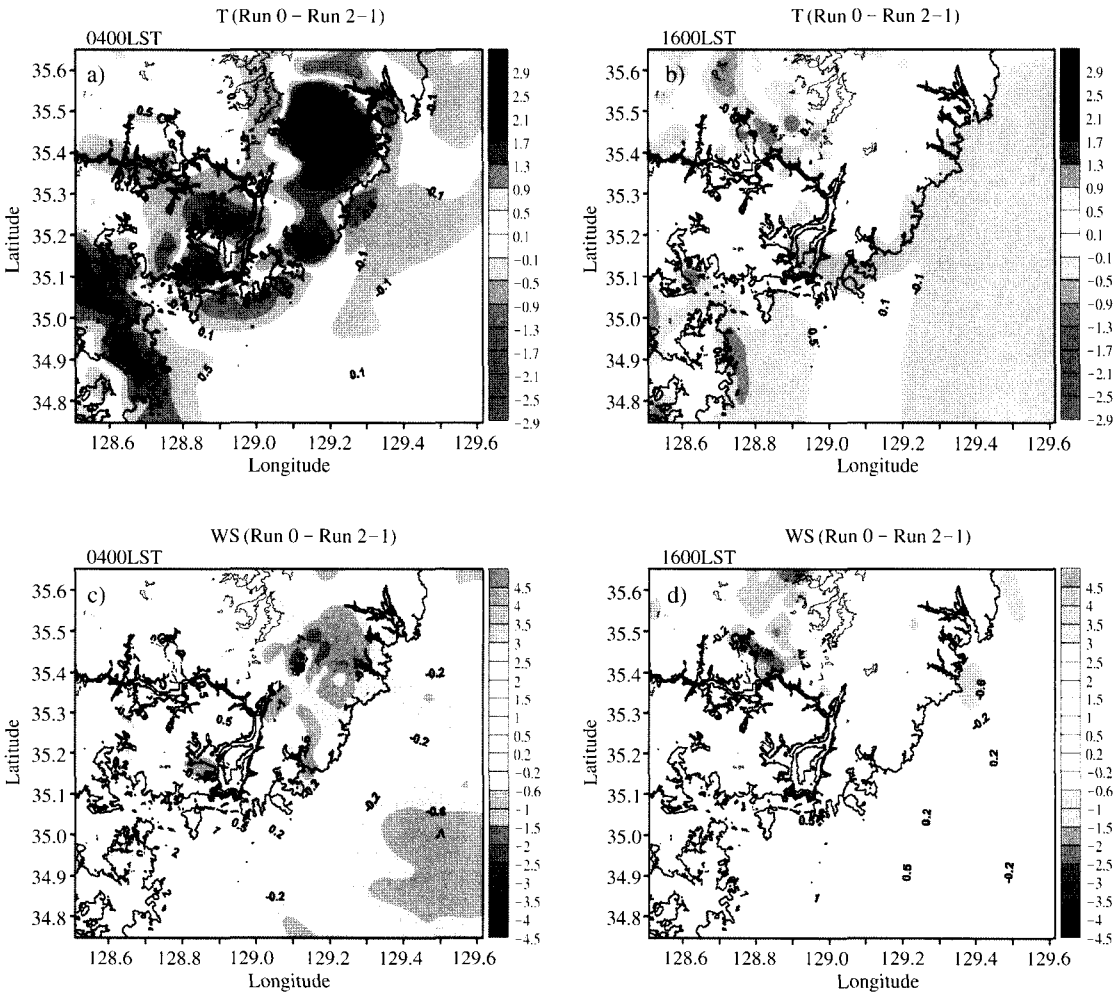

Fig. 9. The same as Fig. 6 except for components between Run 0 and Run 2-1.

정보가 제공되지 않는다. 이 경우 기상상태에 따른 관측지점만의 특수성이 더 많이 고려된 자료를 사용하면, 수치모의에서 오히려 불확실성을 일으킬 수 있다. 이 경우 가능하면 지역의 대표성을 강하게 가지는 요소를 자료동화에 사용하는 것이 계산의 불확실성을 줄이는 하나의 방편이 된다.

그러므로 본 연구에서는 각 요소별 자료동화효율을 살펴보고, 요소별 독자적인 자료동화의 수행가능성을 분석하기 위해 두 가지 수치실험을 실시하였다. Run 2-1은 실험 영역에 위치한 모든 관측치의 온도 자료만을 동화시켜서 계산하였다. 그림 9는 Run 2-1에 의하여 계산된 온도 및 바람장과 기본 계산(Run 0) 값들과의 차이를 나타낸 것이다. 온도장은 Run 1-1과 비슷한 분포를 나타내고 있으나, 온도의 자료동화를 통하여 야간의 부산 지역에서 기온은 내륙을 중심으로 많이 감소되어지는 경향을 보이며, 전체적으로 계산영역내의 온도차가 Run 1-1(그림 5)에 비하여 크게 나타난다. 주간의 경우, Run 2-1이 해안가를 따라 기온이 약한 증가 경향을 보이고 있으나, 풍속 변화가 미약한 것으로 보아 해안지역의 기온증가가 주간의 열수지에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

그림 10은 기계적 오차만 제거한 모든 자료를 객관 분석에 사용한 Run 2-2의 결과이다. 전체적으로 Run 2-1의 결과보다는 기준계산과 차이가 작게 나

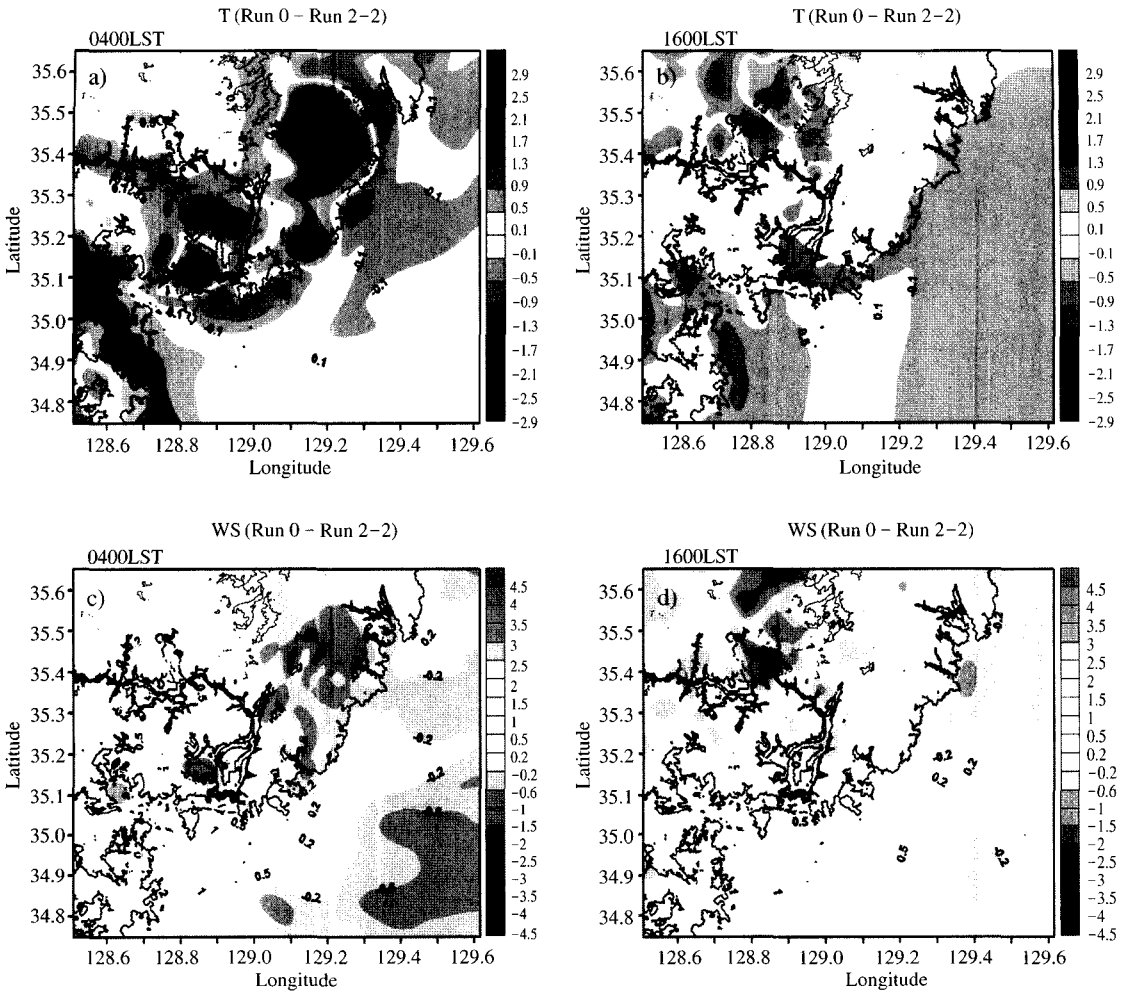

Fig. 10. The same as Fig. 6 except for components between Run 0 and Run 2-2.

타나고 있다. Run 2-1에 비해 야간 기온의 감소 구역이 작아지는 것이 보이고, 주간의 해안가의 기온 증가 구역도 좀 더 해안가에 위치한 것으로 주야간 모두에서 Run 2-1이 Run 0과의 변화폭이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 풍속의 경우, Run 0에 대한 Run 2-1과 Run 2-2의 변화폭이 거의 비슷하게 나타난다.

수치실험에서 계산된 기온과 풍속, 풍향과 영도와 동래 지역에서 실제 관측된 기온과 풍속, 풍향의 일변화를 그림 11에 제시하였다. 기온의 경우, 모든 계산에서 관측치를 잘 묘사하고 있다. Run 2-1과 Run 2-2의 결과 역시 Run 0의 야간 기온 감소폭이 큰 것을 보완하는 역할을 하였다. 영도의 경우, 종관장을 고려하지 않고 자료동화를 사용한 두 실험 모두 일최고 기온이 종관장을 고려한 것(그림 5)에 비해 과대평가되었다(그림 11 (a)). 내륙의 동래 지역은 앞 절의 보인 것과 동일하게 야간 열수지에 의하여 기온의 감소폭이 커진 것을 알 수 있다(그림 11 (b)). 풍속 역시 비슷한 경향성을 나타낸다.

각 실험에서 나타난 예측정확도를 정량적으로 판단하기 위하여 통계적인 분석을 실시하였다. 그림 12는 각 실험의 48시간에 대한 결과와 부산 내에 위치한 13개 관측소의 결과를 비교하여 IOA (Index of Agreement)의 통계 지수를 구한 것이다. 온도와 풍향, 풍속등 전반적인 기상요소에서 Run 0의 정확도

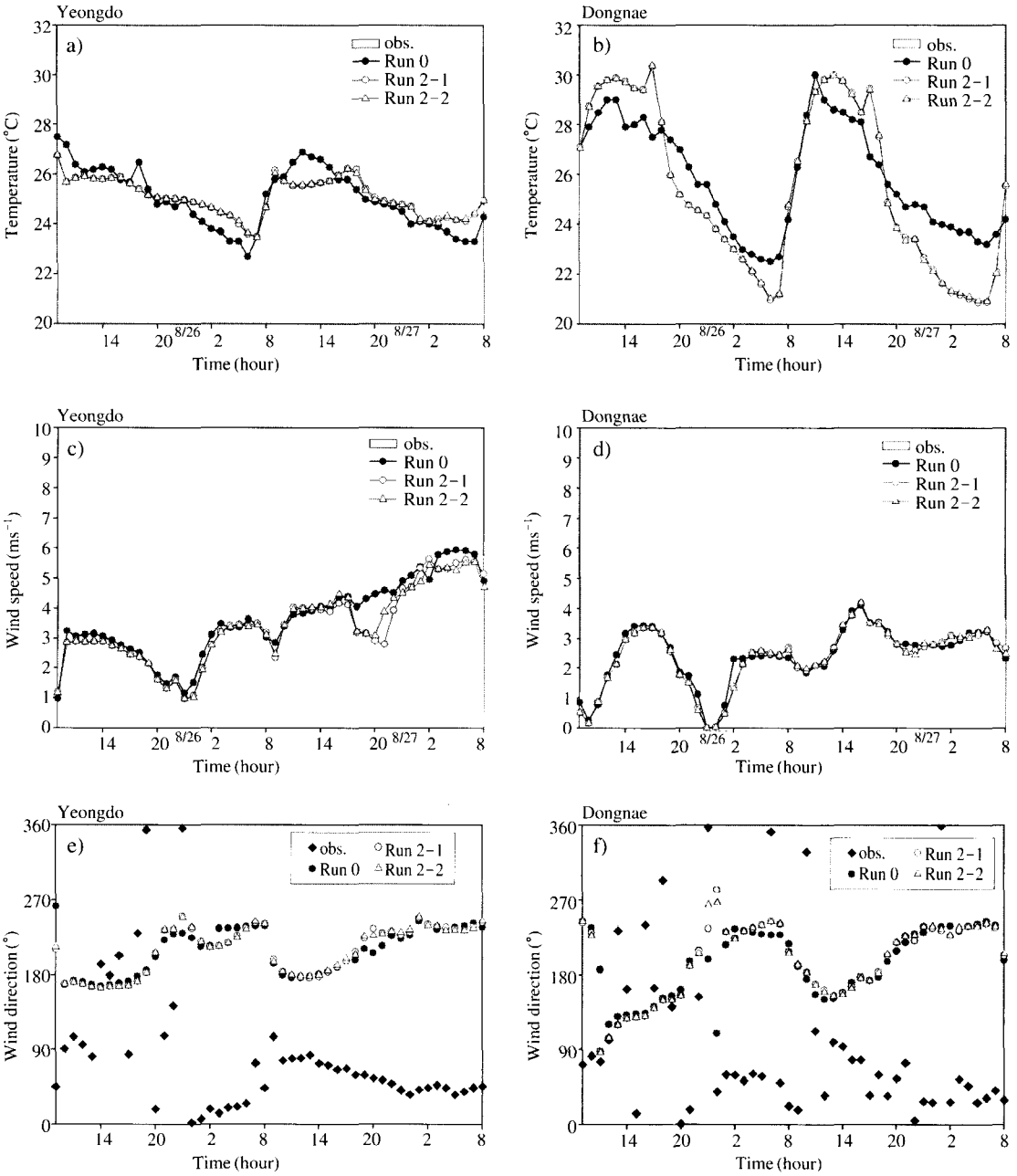

Fig 11. The same as Fig. 8 except for the usage of Run 0, Run 2-1, and Run 2-2.

가 가장 떨어지고 있다. 이것은 자료동화의 방법론에 상관없이 자료동화수행을 통하여 예측정확도가 증가하였다는 것을 의미하며, 자료동화의 효율성을 보여주는 것이다. 그리고 특히 Run 1-1과 Run 2-1의 IOA값이 높게 나타나는데 이것은 자료검증을 통하여 선별적으로 사용하여 계산한 것이 검증을 거치지

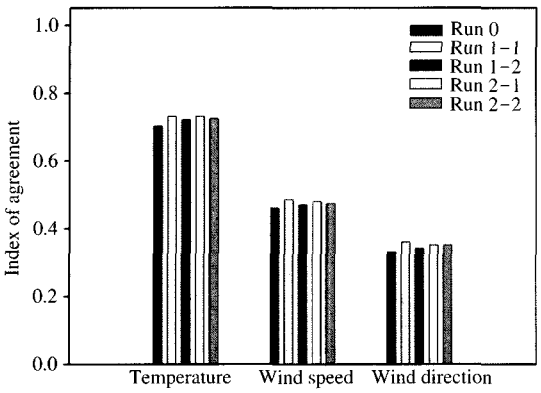

Fig. 12. Index of agreement derived from the experiments of simulation and observation data at 13 surface stations.

않은 다량의 관측자료를 동화한 결과보다 좋다는 것을 의미한다.

풍향과 풍속의 경우는 자료동화를 사용하여 다소 향상되는 것을 볼 수 있는데, 풍속의 기계적 오차만을 제거한 자료를 사용한 Run 2-2의 결과는 Run 0과 Run 2-1에 비해 개선된 것으로 보이나, Run 1-1과 비교하여 IOA값이 낮게 나타난다. 그러므로 단순한 계산기 오차의 제거보다는 물리적으로 의미있는 자료의 보정이 더욱 중요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 복잡 지역의 대기질 예측에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 기상장의 정확도를 향상시키기 위하여, 자료동화에 따른 예측효율성을 분석하였다. 본 연구에 사용된 동화자료는 관측밀도가 높고 국지적인 기상현상을 잘 표현하는 지상관측장치(AWS)를 이용하였다.

자료동화는 야간과 주간 온도장의 예측에 영향을 미치고 특히 야간의 온도변화에 민감하게 반응하였다. 해안과 내륙에서도 자료동화에 의한 온도 변화가 나타났다. 그리고 자료동화는 실제 관측된 온도 자료를 통한 통계분석에서 예측정확도를 향상시키는 역할을 한다. 일반적인 기상장 예측에 사용되어지는 수치모형 실험조건이 단순한 위경도와 동일한 지표상태하에서 계산된다. 그러나 밀도가 높은 AWS의 자료동화를 통해 보다 현실적인 토지이용의 요소가 계산에 반영되기 때문에 예측된 기상장 역시 일반적인 수치계산보다 현실적으로 모사되어진다. 자료동화의 영향이 야간에 크게 나타나는데 이것은 자료동화에 따른 현열의 개선효과가 야간에 더욱 두드러지기 때문이다.

부산 지역의 경우, 종관장을 따르며 기계적 오차를 제거한 자료를 이용한 Run1-1의 IOA가 가장 높게 나타났다. 그러므로 Run 1-1의 조건이 기상장 수치모의의 오차 제어에 가장 효과적이다. 그리고 종관장에 대한 정보가 없을 경우에는 풍속의 기계적 오차만 제거한 자료만을 사용하여도 어느 정도의 기상장 수치모의의 오차를 제어할 수 있음도 보였다. 풍향의 경우, 검증을 거치지 않은 자료를 모두 사용하여 자료동화를 수행한 결과가 자료동화를 사용하지 않은 결과보다 실제 관측치와의 상관도가 떨어진다. 그러므로 객관 분석시 사용되어지는 관측치 검증이 풍향 예보에는 필수적인 요인의 하나이다.

자료동화에 사용되어지는 자료의 검증이 좀 더 통계적으로 처리되고, 그 지역의 건물의 효과나 지면상태에 대한 국지적인 특성을 내는 관측치의 여과가 이루어진다면, 본 논문에 제시된 결과보다 더 좋은 결과가 예상된다. 이는 대기질 예측에서 일 최고 오존 농도와 그 값이 나타나는 시간, 그리고 그 위치를 예측하는데 긍정적인 영향을 줄 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

김용상, 박옥란, 황승언(2002) 기상연구소의 국지규모기상분석 및 예측시스템(KLAPS)의 실시간운영, 한국기상학회지, 38(1), 1-10.

이순환, 이화운, 김유근(2002) 복잡지형에서 도시화에 따른 대기확산에 관한 수치시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.

Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, Atmospheric Environment, Vol. 34, 2231-2259.

Barna, M., and B. Lamb (2000) Improving ozone modeling in regions of complexterrain using observational nudging in a prognostic meteorologicalmodel, Atmospheric Environment, Vol. 34, 4889-4906.

Biswas, J. and S. Trivikrama Rao (2001) Uncertainties in episode ozone modeling stemming from uncertain-

ties in the meteorological fields, Journal of Applied Meteorology, Vol 40, 117-136.

Dudhia, J., D. Gill, Y-R. Guo, K. Manning, and W. Wang (2000) PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class note and users guide, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR, 5-12.

Grell, G.A., Y-H. Kuo, and R. Pasch, (1991) Semiprognostic test of cumulus parameterization, Mon. Wea. Rev., 119, 5-31.

Hanna, S.R., Z. Lu, H. Christopher Frey, N. Wheeler, J. Vukovich, S. Arunachalam, M. Rernau, and D. Alan Hansen (2001) Uncertainties in predicted ozone concentrations due to input uncertainties for the UAM-V photochemical grid model applied to the July 1995 OTAG domain, Atmospheric Environment, Vol. 35, 891-903.

Lee, S-H., and F. Kimura (2001) Comparative studies in the local circulation induced by land-use and by topography, Boundary Layer Meteorology. 101, 157-182.

Shafran, P.C., N.L. Seaman, and G.A. Gayno (2000) Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study, Journal of Applied Meteorology, Vol. 39, 412-426.

Stauffer, D.R., and L.N. Seaman (1990) Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: experiments with synoptic-scale data, Monthly Weather Review, Vol. 118, 1250-1277.

Stauffer, D.R. and L.N. Seaman (1994) Multiscale four-dimensional data assimilation, Journal of Applied Meteorology, Vol. 33, 416-434.