

## 위성자료를 이용한 MM5 4차원자료동화가 광화학모델의 정확도에 미치는 영향 고찰

### Effects Study on the Accuracy of Photochemical Modeling to MM5 Four Dimensional Data Assimilation Using Satellite Data

이 종 범 · 김 재 철 · 천 태 훈\*

강원대학교 환경과학과

(2009년 1월 20일 접수, 2009년 5월 12일 수정, 2009년 7월 23일 채택)

Chong Bum Lee, Jea Chul Kim and Tae Hun Cheon\*  
*Kangwon National University, Department of Environmental Science*

(Received 20 January 2009, revised 12 May 2009, accepted 23 July 2009)

#### Abstract

Concentration of Air Quality Models (CMAQ) has a deep connection with emissions and wind fields. In particular the wind field is highly affected by local topography and plays an important role in transport and dispersion of contaminants from the pollution sources.

The purpose of this study is to examine the impact of interpolation on Air quality model. This study was designed to evaluate enhancement of MM5 and CMAQ predictions by using Four Dimensional Data Assimilation (FDDA), the SONDE data and the national meteorological station and the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The alternative meteorological fields predicted with and without MODIS data were used to simulate spatial and temporal variations of ozone in combined with CMAQ on June 2006.

The result of this study indicated that data assimilation using MODIS data provided an attractive method for generating realistic meteorological fields and dispersion fields of ozone in the Korea peninsular, because MODIS data in 10 km domain are grid horizontally and vertically. In order to ensure the success of Air quality model, it is necessary to FDDA using MODIS data.

**Key words** : Air Quality Models (CMAQ), MODIS, FDDA

#### 1. 서 론

자료동화는 기상모델의 오차를 개선하는 중요한

방법이다 (Stauffer and Seaman, 1994). 자료동화에 이  
용될 수 있는 기상측정 자료는 기상관측소 자료와  
무인기상 관측소 (Automatic Weather Station: AWS),  
SONDE로 측정되는 상층기상자료 등이 있으며, 최  
근 위성자료를 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다.  
위성자료의 가장 큰 특징 중 하나는 측정지점에

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-250-8571, E-mail : cth08@kangwon.ac.kr

다른 공간적 제약을 받지 않는다는 것이다. 특히 관측자료가 미비한 해상에서의 측정자료를 보완할 수 있으며, 대기오염의 확산 및 수송에 중요한 영향을 미치는 연직적 기상성분의 자료동화가 격자별로 가능한 장점이 있다(Shin and An, 2007; Nishida *et al.*, 2003). 선행연구의 결과 MODIS 자료와 sonde 자료를 지역규모 기상모델의 자료동화 입력자료로 사용한 기상장 결과가 MODIS 자료를 사용하지 않은 결과보다 향상된 결과를 보였다(Xavier *et al.*, 2006). 이순환 등(2007)도 위성자료를 통해 산출된 기상요소를 중규모 수치예보 모델링의 내삽자료로서 자료동화 과정에까지 사용하였다. Lin *et al.* (2004)은 지역적 배출량을 파악하고 조절함으로써 주변지역의 오존농도를 제어할 수 있었고, 대상지역의 기상특성을 파악하여 기상에 의해 대상지역의 오존농도를 분석하였다(Appel, *et al.*, 2007; 이종범과 송은영, 2006). 또한 확산모델의 경우 3차원 기상모델의 자료동화 유·무에 따라 오염원에서 발생하는 puff 확산 현상이 실제와 큰 차이를 나타낼 수 있음을 보였다(이종범과 김재철, 2009).

최근 대규모 공단과 발전시설 대부분이 대도시 및 해안 인근에 분포하고 있으며, 이는 기상상태에 따라 주변지역의 대기질 농도에 큰 영향을 미치는 중요한 요소가 되었다. 이러한 오염가능성 있는 지역의 대기질을 예측 및 평가하기 위해 사용하는 광화학모델은 배출량과 지역적 기상 특징에 따라 대기오염 농도에 큰 영향을 미친다. 현재 대상지역에 따른 배출량을 산출하고, 배출량에 대한 민감도를 분석한 연구와 기상모델의 개선을 위하여 위성자료에서 산출된 기상인자를 자료동화에 이용하는 연구는 활발히 진행되고 있지만, 광화학모델의 실행에 상세 기상모델의 자료동화에 따른 대기오염모델 결과를 평가한 연구는 드물다.

따라서 본 연구에서는 한반도를 포함한 동아시아 지역 99개소의 SONDE 상층관측 자료와 기상대 자료를 기상모델(Mesoscale Meteorological Model Version5: MM5)의 자료동화(Analysis nudging)에 이용하였고, 격자화된 MODIS 자료를 MM5의 Observation nudging의 입력자료로 사용하여 위성자료동화에 따른 기상장 개선효과를 모사하였다. 또한 MM5의 기상자료를 바탕으로 3차원 광화학모델인 CMAQ을 실행하여, 기상모델의 자료동화에 따른 2차 오염물질

인 오존의 격자영역별 모델결과를 실측값과 비교하였으며, 기상변화에 따른 한반도 오존의 수평·연직적인 변화를 시·공간적으로 파악하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 대상지역

본 연구의 대상영역은 그림 1과 같이 Lambert-conformal 격자투영법을 사용하였으며, 기상모델 및 광화학모델의 격자 중심은 한반도 북위 38°, 동경 126°로서 중국, 일본을 포함하는 30km 격자를 설정하였다. 또한 nesting 과정을 거쳐 한반도 중부와 남부를 포함하는 10km 모델영역을 설정하였다. 광화학모델의 경우 MM5 격자에서 6격자 적은 영역으로 30km와 10km 영역을 각각 동일하게 설정하였다. 또한 한반도에서 고농도 오존이 관측된 2006년 6월 한 달을 대상기간으로 MM5와 CMAQ 모델을 실행하였다.

### 2.2 Model 입력자료

#### 2.2.1 기상모델 및 입력자료

기상모델은 MM5 version 3.7을 사용하여 대상기간 동안의 기상자료를 산출하였다. MM5의 domain은 기상청에서 사용하는 30km 격자크기 domain을 INTERP\_B 과정을 거쳐 LITTLE\_r에서 상층 기상자료와 기상대 자료를 내삽하였다. 위성자료의 경우 MM5의 observational nudging 과정을 통하여 10km domain 격자영역의 기상현상을 세밀하게 모사하도록 하였다(표 1).

본 연구에 사용된 위성자료는 NASA의 기상위성인 MODIS의 Aqua와 Terra 위성 센서로서 각각 하루 2회 관측된 자료에서 구름이 끼지 않은 맑은 날을 선택하여 5km 해상도의 MODIS 기상자료(Temperature)를 MM5 10km 격자영역 내의 격자화하여 Observational nudging에 사용하였다. MODIS에서 사용된 기상 요소는 기온 자료로서 지표 1,000mb부터 상층 700mb 높이의 연직자료를 10km 격자영역에 수평 및 연직 내삽하였다. 또한 기상관측자료의 경우 지상기상관측소 국내 72개소와 상층기상대 99개소(국내 6개, 국외 93개소)의 자료를 각각 이용하였다(그림 1). 표 2는 기상모델의 자료동화 유·무에

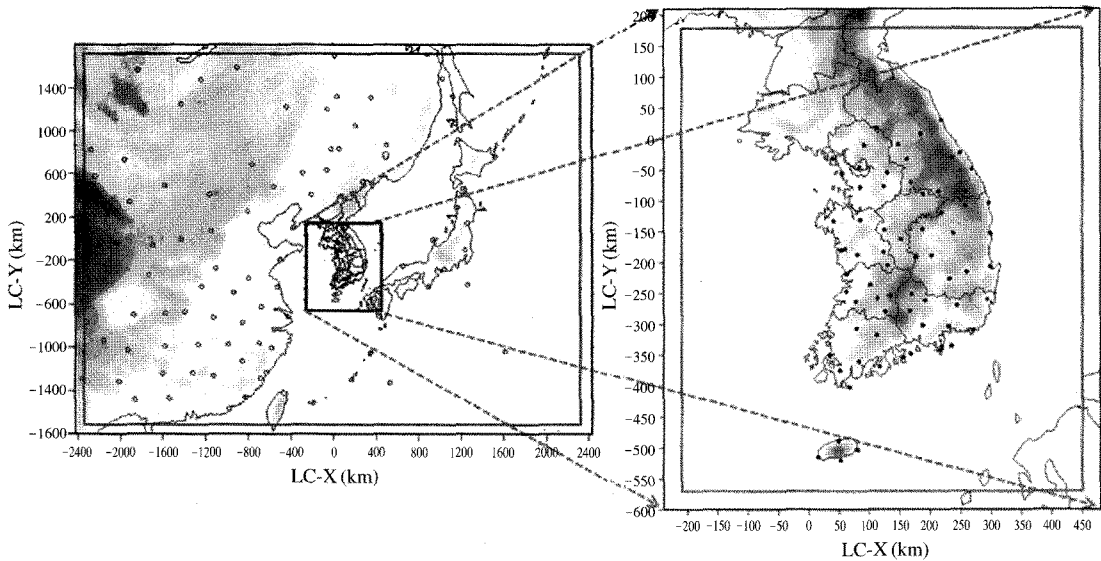


Fig. 1. Domain architecture for MM5-CMAQ used for this application. MM5 domain 1: size=162 × 50 grid cells and resolution=30 km. MM5 domain 2: size=72 × 81 grid cells and resolution=10 km. CMAQ domains are six grid cells smaller in each size. Modeling domain of MM5, sonde observation stations (left) and surface meteorological stations (right).

Table 1. The grid system of MM5 and CMAQ modelling.

Domain	Grid size (km)	Number of grid		Projection origin	
		X	Y	LAT (deg.)	LON (deg.)
MM5_30	30	138	114	20.52	106.97
CMAQ_30	30	117	102	21.45	107.58
MM5_10	10	72	81	32.47	123.42
CMAQ_10	10	66	75	32.75	123.73

\* Map center: 126°E, 38°N

다른 입력 parameter를 나타낸 것으로서 자료동화한 경우 위성자료(10km 도메인 전체의 격자에 자료동화 사용)에 기상대 지점을 포함하여 모델을 실행하였다.

### 2.2.2 배출량 자료

배출량 입력자료는 네 가지 자료를 병행하여 광화학모델의 입력자료로 사용하였다. 30 km 격자영역의 경우 NASA의 INTEX-B(2006) 과제의 지원으로 개발된 배출량 자료로서 아시아지역 배출량을 사용하였다. 이 배출량 자료는 CGRER(Center for Global and Regional Environmental Research)에서 운영하는 Asia inventory dataset ([http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION\\_DATA\\_new/index\\_16.html](http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA_new/index_16.html))에서 대기오염물질

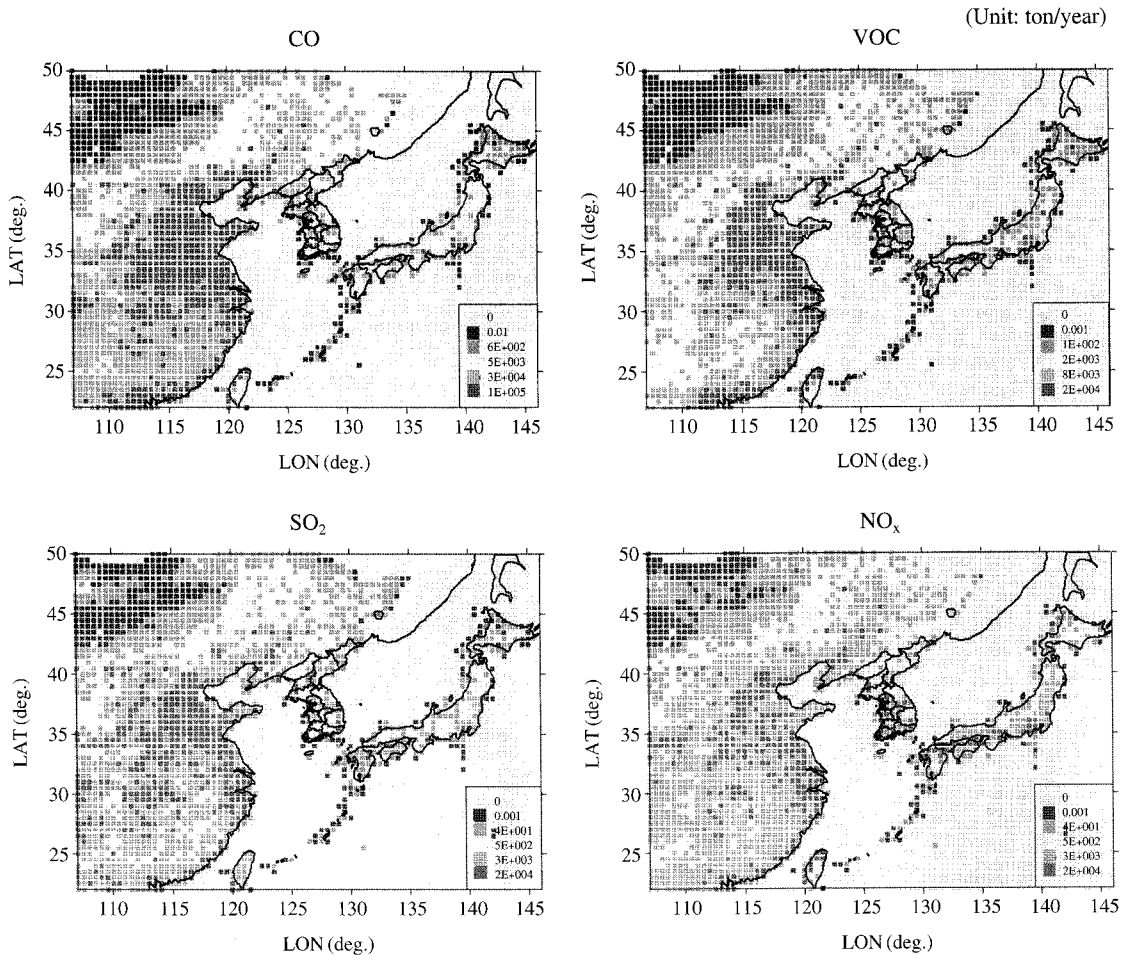
별 자료를 다운로드 받아 사용하였다. Asia inventory dataset은 격자 크기 0.5° × 0.5°의 해상도를 가진 2006년도의 배출량 자료로서 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOC, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, BC(Black Carbon), OC(Organic Carbon) 등 총 8가지 대기오염물질자료를 발전소, 산업, 주거, 수송 등 4개의 분야로 구분하고 있으며, 인위적 배출량 자료를 제공하고 있다(홍낙기, 2008). 하지만 INTEX-B의 자료에 자연배출량은 포함되지 않았기 때문에 ACE-Asia(2002)에서 작성된 자연배출량을 30 km 격자영역의 배출량 자료로 이용하였다. 그림 2는 오존 전구물질인 NO<sub>x</sub>와 VOC를 포함한 30 km 격자영역의 INTEX-B 배출량 결과를 나타낸 것으로서 중국 대도시와 동부 해안을 중심으로 대부분의 오염물질 농도가 높은 분포를 보이고 있으며, 한국과 일본 역시 대도시를 중심으로 높은 농도를 보이고 있다.

10 km 격자영역의 경우 2004년도 대기보전 정책수립 지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS)에서 전국을 1 km × 1 km 해상도로 산출한 인위적 배출량 자료와 BEIS(Biogenic Emission Inventory System) 모델에서 산출한 자연배출량을 10 km 격자영역의 배출량 입력자료로써 사용하였다(박수갑, 2008).

**Table 2. Details of the physics options used in the MM5 model.**

MM5 V3.7	NO_FDDA	MODIS_FDDA
Horizontal resolution	30 km, 10 km	
Vertical layers	35 layers (top: 50 hpa)	
PBL scheme	MRF (Hong and Pan, 1996)	
Radiation scheme	RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)	
Initial and boundary data	RDAPS (3 hourly)	FDDA (1 hourly)
Nudging coefficients	None	$G_o: 1 \times 10^{-4} s^{-1}$ , $G_a: 1.5 \times 10^{-4} s^{-1}$
FDDA data	None	30 km: Met-data. (72), Sonde (85) 10 km: Met-data. (72), Sonde (6) MODIS data (72 × 81)

※  $G_o$ : obs nudging coefficient,  $G_a$ : analysis nudging coefficient, Met-data: Meteorological surface observation data, RDAPS: Regional Data Assimilation and Prediction System



**Fig. 2. Emission distribution of CO, VOC, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in Asia, 2006.**

### 2.2.3 광화학모델

CMAQ은 오일러리안 모델에 기초한 3차원 광화학 대기오염모델로서 대류권 오존, 산성강하물, 먼지, 시정, 독성물질 같은 대기오염물질을 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한 여러 가지 기상장모델의 결과를 일반화된 격자체계(Arakawa C-grid)를 이용하여 나타낼 수 있다. CMAQ은 도시 크기부터 지구적인 규모까지 대기 오염물질 사이의 복잡한 반응을 하나의 대기 개념을 적용하여 다양한 대기질 문제로 나타낼 수 있다(Byun and Ching, 1999).

또 CMAQ은 모듈 구조라는 특징으로 각 서브프로그램 간 그리고 각 전처리 단계 간의 상호 호환이 쉬워서 기존 모델처럼 동일하거나 유사한 부 프로그램을 필요한 단계마다 다시 만들어야 하는 비능률적 측면이 지양되었다. CMAQ의 구조는 5개의 전처리 과정과 1개의 화학수송모델(CCTM: CMAQ Chemical Transport Model)로 되어 있다. 전처리 과정은 초기조건을 형성하는 ICON (Initial CONditions processor)과 경계조건을 생성하는 BCON (Boundary CONditions processor), 그리고 기상장 전처리 과정인 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Model), 배출량 전처리 과정인 ECIP (Emission-Chemistry Interface Model), 광해리울 산출 과정인 JPROC으로 구성되어 있으며, 5개의 전처리 과정을 통해 산출된 자료는 CCTM에 입력된다. CCTM은 화학수송모델로서 전처리 과정을 통해 산출된 자료를 aqueous-phase 반응 및 cloud mixing, 에어로졸 역학과 크기분포, 플룸 화학반응 효과 등을 고려할 수 있으며, 수평·수직적인 이류(horizontal·vertical advection & diffusion), 수평·수직 확산, 가스상 화학반응, 에어로졸의 침적속도 추정, 광해리울, 기여도 분석 등을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 MCIP V3.2와 CMAQ V4.6을 이용하여 모델결과를 실측농도와 비교·평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 자료동화에 따른 기상장 결과

대장기간 동안 전국 72개 종관기상관측소 기상자료를 기상관측소 위치의 자료동화에 따른 모델결과와 비교하여 나타내었다. 그림 3은 종관기상관측소의

자료와 MODIS 위성자료를 격자화하여 자료동화한 결과와 자료동화를 시행하지 않은 결과를 통계분석하여 나타내었다.

그림의 (A)와 (B)에 온도와 풍속을 각각 나타내었다. 위성자료를 10km 격자 전체에 격자화하여 자료동화한 기상결과가 전자에 비하여 확연히 좋아진 상관 값을 보이고 있다. 특히 온도의 경우 격자자료동화 후 내륙과 중부지방을 중심으로 향상된 결과를 보이고 있다. 풍속 역시 강원도 지역을 제외한 대부분 지역에서 향상된 결과를 보였다. 그림 4는 온도와 풍속에 대한 지점별 표준화 평방근오차(RMSE)를 (A)와 (B)에 각각 나타내었다.

위성자료를 격자화하여 자료동화한 모델결과가 대부분 기상대를 통하여 오차 값이 줄어드는 결과를 보이고 있으며, 풍속의 오차가 온도보다 큰 폭으로 줄어드는 결과를 나타내었다. 하지만 강원 영동지역의 바람장 모델결과 상관 값이 작고 오차가 큰 이유는 백두대간의 높은 해발고도와 동해안 방향의 경사도가 큰 지형적 특징으로 인하여 불확실성이 큰 상관분포를 나타내고 있다. 또한 지형적으로 복잡한 대상지역이나 해안 인접 지역을 10km 모델 격자에 나타내며 생기는 오차는 nesting을 이용한 고해상도의 모사가 필요할 것으로 사료된다. 또 복잡한 지형과 해안기후에 따른 불규칙한 기상 모사의 경우 부의 자료나 해안선 정보 등의 보다 정확한 자료와 위성 자료의 온도 이외에 바람장 내삽을 통한 기상 개선이 요구된다.

## 3.2 광화학모델 결과

### 3.2.1 오존의 시계열 결과 비교

자료동화 유·무에 따른 광화학모델의 결과 차이를 비교하기 위하여 10km 격자 영역 내에 위치한 대기오염측정 지점 측정농도와 CMAQ 해당 격자의 시간별 모델농도 변화를 비교하여 나타내었다.

시계열의 경우(그림 5) 해당 격자지점의 모델결과를 평균하였으며, 실측의 경우 격자 내에 포함된 측정소의 측정결과를 평균하여 비교하였다. 모델결과 수도권과 울산의 경우 대도시의 특징인 오존의 일주기를 비교적 잘 모사하고 있으며, 위성자료동화를 사용한 모델결과(MODIS\_FDPA)가 자료동화하지 않은 결과(NO\_FDPA)에 비하여 일 최고오존농도를 과소평가하고 있다. 원주의 경우 야간 오존농도가 대

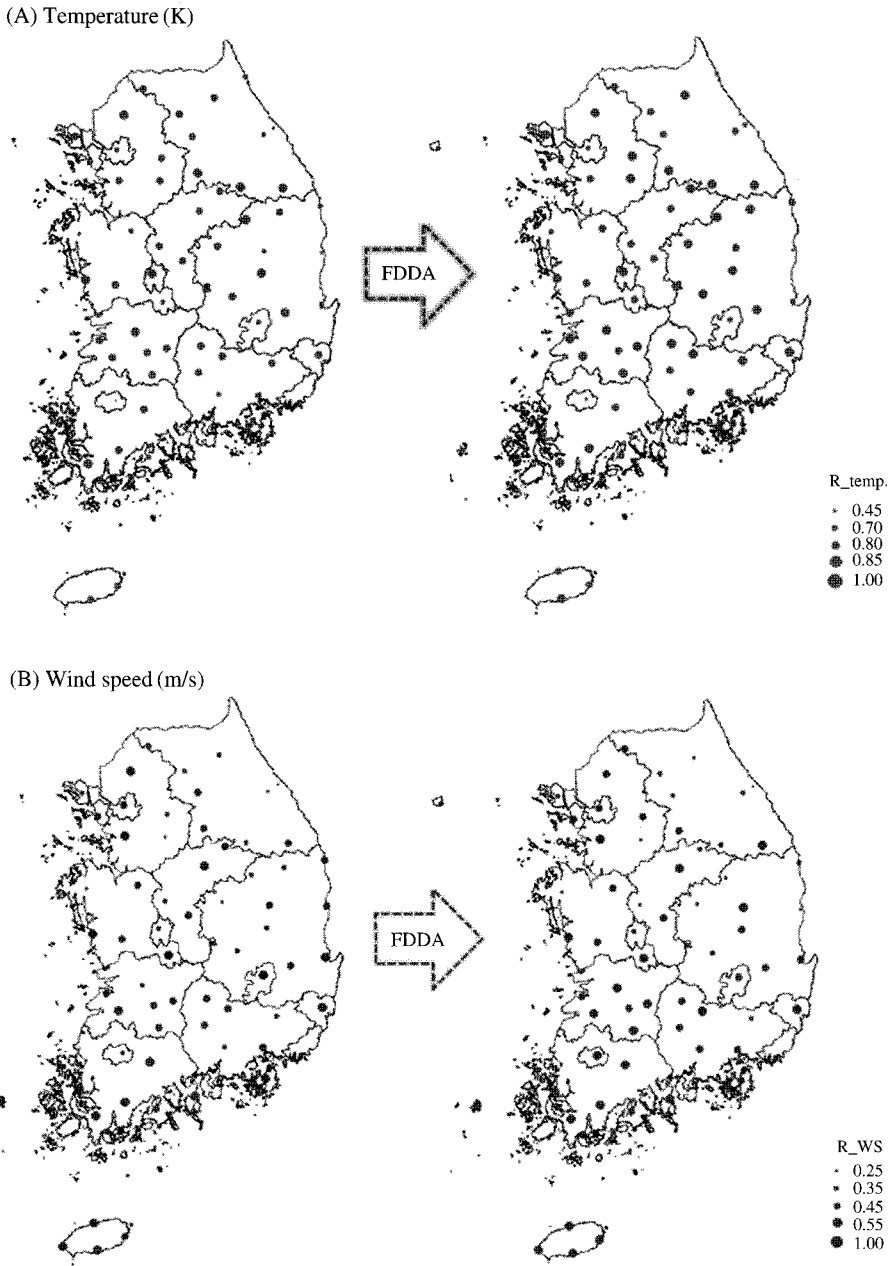


Fig. 3. Maps showing distribution of Correlation coefficient ( $r$ ) between weather station and MM5. Size of each circle scaled from the minimum to the maximum values for each map.

도시에 비하여 비교적 높은 농도를 나타내었다. 반면 교외지역에 해당하는 고성외의 경우 대도시와 대조적으로 야간에도 오존농도가 낮아지지 않는 결과를 보

이고 있는데, 이는 도시규모가 작아질수록  $\text{NO}_x$  농도가 낮아서  $\text{NO}_x$ 에 의한 오존 파괴가 일어나지 않기 때문으로 사료된다. 모든 지역에서 6월 11일의 농도

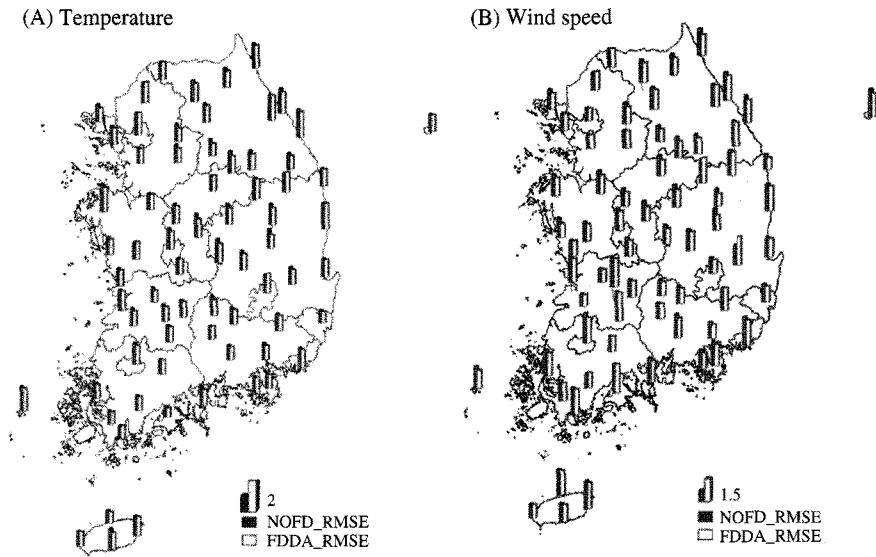


Fig. 4. Maps showing distribution of Root Mean Square Error (RMSE) between weather station and MM5. Size of each bar scaled from the minimum to the maximum values for each map. NOFD\_RMSE which does not use FDDA.

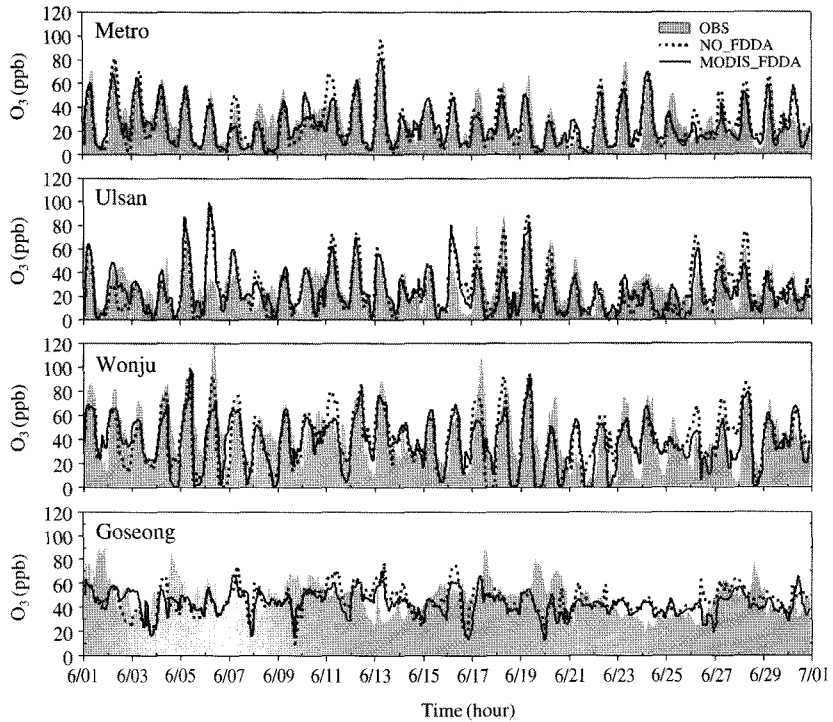


Fig. 5. Time series plot of simulated versus observed  $O_3$  concentrations (at cities of Metro, Ulsan, Wonju and Goseong) during the entire study period. Legends, OBS (shaded area), NO\_FDDA (.....) and MODIS\_FDDA (—) in the figure indicate the observed  $O_3$  concentrations and  $O_3$  concentrations simulated with and without the MODIS data of 10 km domain, respectively.

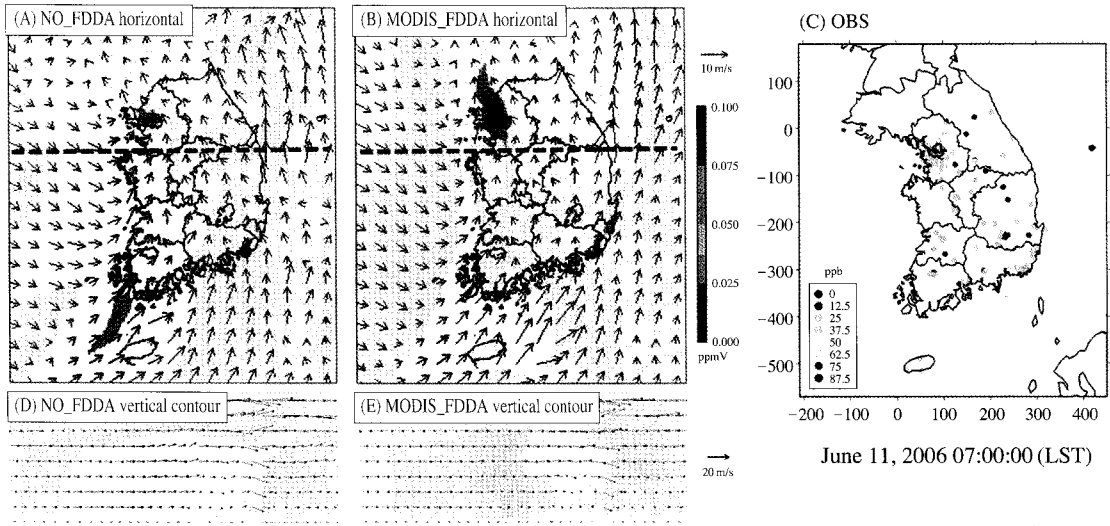


Fig. 6. Horizontal distribution of surface wind field and ozone concentration (A, B) simulated by CMAQ, observed concentration (C) at air quality monitoring stations. Vertical distribution of surface wind field and ozone concentration (D, E) simulated by CMAQ.

를 MODIS\_FDDA의 결과가 잘 모사하며, 울산은 MODIS\_FDDA의 결과가 대부분 과소평가 되고 있다.

### 3.2.2 오존의 수평·연직분포 비교

기상장 변화에 따른 한반도 영역의 오존분포를 평가하기 위하여 대기오염측정소지점 오존의 등농도 분포와 10km 격자 영역의 CMAQ 모델결과를 그림 6에 나타내었다. 대상일은 한반도 지역에 실제 오존 농도가 높게 나타나지 않았지만 모델결과가 과대평가되었던 CASE를 선정하고, 기상 및 배출량이 해당 지역의 수평·연직적인 오존농도에 미치는 결과를 분석하였다.

자료동화를 실행하지 않은 기상장(NO\_FDDA)을 사용한 CMAQ 모델결과 중국에서 수송되는 오존이 많게 계산되었으며(그림 6(A)), 자료동화를 사용한 기상장(MODIS\_FDDA)을 이용한 CMAQ 결과를 보면 그림 6의 (B)와 같이 중국의 수송량은 현저히 감소되는 결과를 보이는 반면, 지역적인 오존농도가 높게 나타나고 있다. 실제 그림 6의 (C) 경우처럼 전국 대기오염 측정소 위치의 오존농도는 서해안지역이 높지 않게 측정되면서 자료동화를 이용한 모사결과가 실제의 오존 분포에 더 유사한 분포를 나타내고

있다. 연직 오존농도 분포의 경우(그림 6의 (D), (E)) 오산 상층 기상대 위치의 중단면을 CMAQ 모델의 17층 높이까지 연직적으로 표현하였다. 연직분포 역시 서해안 지역에 높은 고농도 오존이 나타난 영역을 중심으로 고농도를 보이고 있으며(그림 6의 (D)), 그림 6의 (E)는 (C)의 실제 측정지점의 수평분포와 유사하게 낮았던 실제 지표의 오존농도를 지역에 따라 유사한 분포로 모사하였다.

### 3.3 통계결과

대기질 모델의 평가에는 경우에 따라 여러 가지 통계적 방법이 모델을 평가하기 위하여 사용된다 (Song *et al.*, 2006). 본 연구에서는 표 3에서 제시한 6가지의 방법을 이용하여 기상모델과 CMAQ 모델을 평가하였다(이종범 등, 2007).

표 4에서는 그림 3과 4에 나타난 72개소 기상측정 지점 중 6지점의 온도와 풍속의 자료동화 전·후의 결과를 각각 before와 after로 표현하여 나타내었다. 온도의 경우 자료동화 전(before) 대부분 지역의 r 값이 0.7 이상 상관 값을 보이고 있고, 자료동화 후(after) 부산지역을 제외한 대부분의 지역이 0.8 이상의 높은 상관 값을 나타내었다. 특히, 서울의 온도는 자료동화 후 약 0.12의 차이를 보이며 가장 크게 향상되었다.



풍속의 경우 대전의 상관 값이 자료동화 전·후 가장 낮게 개선된 반면, 부산의 경우 자료동화 후 r 값이 0.12의 차이를 보이며 가장 크게 향상되었다. 대부분 지역에서 자료동화 후 풍속 모델결과가 개선되었다. 또한 온도와는 다르게 서울을 제외한 모든 지

역에서 모델결과가 실측을 과대평가하고 있다.

표 5는 표 4에서 비교된 지역을 중심으로 해당 격자의 모델결과와 격자 내에 분포한 측정지점들의 오존농도를 평균하여 매 시간별 통계분석을 이용하여 나타내었고, 측정지점명의 괄호안의 숫자는 해당격자에 위치한 대기오염측정소의 개수를 나타내었다. 그 결과 r 값의 경우 서울지역 평균 농도가 0.73으로 가장 좋은 상관성을 나타내었다. 반면 강릉은 오히려 자료동화 후 상관도가 낮아지는 결과를 보이고 있다. 이것은 크게 개선되지 못한 기상결과와 더불어 지형적인 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다.

**Table 3. Definition of the traditional evaluation statistical measures.**

Correlation coefficient (r)	$r = \frac{(C_o - \bar{C}_o)(C_p - \bar{C}_p)}{\sigma_{C_o} \sigma_{C_p}}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_p - C_o)^2}$
Fractional Bias (FB)	$FB = \frac{1}{2} \frac{\bar{C}_p - \bar{C}_o}{(\bar{C}_p + \bar{C}_o)}$
Mean Bias (MB)	$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_p - C_o)$

C<sub>p</sub>: predicted concentration, C<sub>o</sub>: observed concentration

Bias (FB, MB)의 경우 모델결과가 전체적으로 실측에 과소평가하고 있지만 자료동화 후 그 차이가 감소하였다. 또한 측정지점 수에 있어서 강릉과 제주처럼 적은 지점의 실측과 모델비교는 모델결과 해석에 어려움을 주고 있다. 그림 7은 자료동화 전·후의 대기오염관측소의 실측 값과 해당 격자의 모델결과

**Table 4. Statistical performance for meteorological parameters during the period of 2006 in Korea Peninsula.**

Weather stations	r		RMSE		FB		MB		No. of data	
	before	after	before	after	before	after	before	after		
Temp. (K)	Gangneung	0.686	0.737	3.637	3.134	0.006	0.005	0.010	1.370	718
	Seoul	0.788	0.800	3.156	3.097	0.004	0.004	0.008	1.385	
	Daejeon	0.805	0.810	2.861	2.501	0.004	0.001	0.007	0.501	
	Daegu	0.792	0.849	2.632	2.315	-0.002	-0.001	0.007	-0.393	
	Gwangju	0.786	0.851	2.392	2.027	0.001	0.001	0.007	0.184	
	Busan	0.650	0.773	3.035	2.384	-0.0011	-0.0021	-0.3350	-0.6152	
	Jeju	0.741	0.851	1.841	1.620	-0.002	-0.001	-0.553	-0.247	
WS (m/s)	Gangneung	0.441	0.451	1.232	1.245	0.067	-0.008	1.216	1.203	718
	Seoul	0.452	0.458	1.216	1.203	1.308	1.028	2.667	2.359	
	Daejeon	0.342	0.349	0.843	1.067	0.961	0.363	1.650	1.302	
	Daegu	0.433	0.494	1.565	1.718	-0.242	-0.255	1.544	1.461	
	Gwangju	0.414	0.482	0.707	0.651	0.809	0.562	1.549	1.341	
	Busan	0.444	0.403	2.901	2.157	0.498	0.627	2.057	1.523	
	Jeju	0.572	0.665	2.443	2.287	-0.167	-0.231	-0.850	-0.105	

**Table 5. Statistical performance for hourly ozone concentrations during the period of 2006 in Korea Peninsula.**

Site name (No. of site)	r		RMSE		FB		MB		No. of data
	before	after	before	after	before	after	before	after	
Gangneung (1)	0.225	0.170	20.15	20.17	0.074	0.048	3.124	2.002	718
Seoul (100)	0.730	0.730	13.20	12.51	-0.035	-0.082	-0.916	-2.099	
Daejeon (7)	0.646	0.657	16.60	14.88	0.180	0.099	5.257	2.786	
Daegu (13)	0.618	0.614	18.52	18.49	-0.214	-0.215	-5.778	-5.816	
Gwangju (9)	0.452	0.514	18.42	17.21	-0.004	-0.053	-0.127	-1.635	
Busan (10)	0.460	0.451	17.42	17.25	-0.360	-0.387	-7.338	-7.811	
Jeju (1)	0.370	0.490	15.91	15.84	0.208	0.250	8.072	9.919	

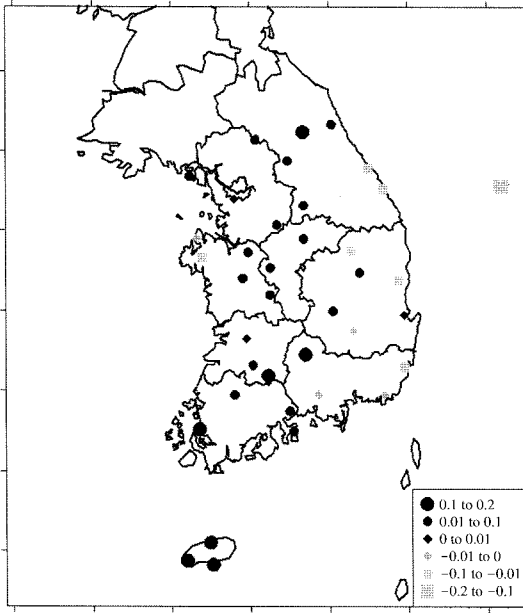


Fig. 7. Maps showing distribution of Correlation coefficient ( $r$ ), difference with and without MODIS data.

의 상관분포 차이를 나타낸 것이다. 그림의(◆)을 기준으로 내륙지방의 상관분포는 자료동화 후 향상된 모델결과를 보이고 있다.

하지만 동남해안 일부 지역에서는 자료동화에 의한 기상장이 개선되었음에도 불구하고 오존농도는 자료동화를 적용한 기상장을 사용한 광화학모델의 결과가 오히려 큰 오차를 나타내었다. 오존농도는 광역적으로 이동하면서 생성되는 물질로서 그 지역의 오존농도는 이외 지역으로부터 이류 등의 복잡한 과정에 의해 일어나므로 기상개선의 영향에는 한계가 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 3차원 기상모델의 자료동화를 통하여 개선된 기상장이 광화학모델인 CMAQ에 입력자료로서 대기오염물질인 오존의 농도에 미치는 영향을 파악하였다. 그 결과 자료동화 기법을 사용하지 않은 NO<sub>x</sub>FDDA의 결과보다 기상대 자료에 MODIS 자료를 격자화하여 사용한 MODIS\_FDDA의 기상장이 실제 관측소의 측정 결과와 유사한 패턴을 보이고

있다. 또한 각각의 기상장을 이용하여 실행한 광화학 모델의 결과 역시 위성자료를 격자화하여 자료동화한 오존의 결과가 실측 값에 유사한 패턴을 보였고, 수평·연직 분포에서도 실측보다 높게 모사되던 오존 농도가 위성자료동화 후 기상장이 배출량에 영향을 주어 낮아지는 농도를 확인할 수 있었다. 또 연직 오존 농도 분포를 통해 기상에 따른 연직적인 오존 형성과 분포를 파악할 수 있었다.

하지만 위성자료동화 후에도 해안지역 및 복잡한 지형의 기상장 개선이 미비한 결과를 보였는데 이는 앞으로 위성자료의 기온 이외의 바람장 성분을 자료동화에 적용한다면 개선될 수 있을 것이다. 향후 광화학모델의 결과인 오존 이외에 수은과 PM<sub>10</sub> 등의 오염물질을 통해 기상장 개선에 따른 오염물질의 중·장거리 이동 및 확산을 규명할 수 있을 것이다.

본 연구는 기상장 개선 효과가 광화학모델의 농도에 미치는 영향을 분석한 것으로서 위성자료를 이용한 대기오염모델의 발전에 이바지 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 한국환경기술진흥원(2007-1200-0050-1)의 “차세대 핵심 환경기술 개발 사업”의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 박수갑(2008) Model3-CMAQ을 이용한 자연배출 VOC가 오존농도에 미치는 민감도 분석, 강원대학교 대학원 석사학위논문.
- 이순환, 이화은, 김동혁, 김현구(2007) 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계 분석, 한국대기환경학회지, 23(6), 653-665.
- 이종범, 송은영(2006) CMAQ을 이용한 수도권 풍하지역의 고농도 오존 현상 모사, 환경영향평가학회지, 15(3), 193-206.
- 이종범, 김재철, 이강웅, 노철언, 김혜경(2007) 추적기체의 확산 특징과 CALPUFF 모델에 의한 모사, 한국대기환경학회지, 23(4), 405-419.
- 이종범, 김재철(2009) 동해안의 복잡지형에서 기상장 개선에 따른 CALPUFF 모델의 평가, 한국대기환경학회지, 25(1), 15-25.
- 홍낙기(2008) CMAQ 모델링을 이용한 한반도지역 식물의

- 오존 위해도 평가에 관한 연구, 강원대학교 박사 학위논문.
- Appel, K.W., A.B. Gilliland, G. Sarwar, and R.C. Gilliam (2007) Evaluation of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 4.5: Sensitivities impacting model performance Part I-ozone, *Atmospheric Environment*, 41, 9603-9615.
- Byun, D.W. and J.K.S. Ching (eds.) (1999) Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System US EPA report-No.EPA/600/R-99/030, Office of research and Development, Washington, DC.
- 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.
- Lin, C.J., T.C. Ho, H. Chu, H. Yang, and S. Chandru (2004) Sensitivity analysis of ground-level ozone concentration to emission changes in two urban regions of southeast Texas, *Journal of Environmental Management*, 75, 315-323.
- Nishida, K., R.R. Nemani, S.W. Running, and J.M. Glassy (2003) An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation, *Journal of Geophysical Research* 108,D9,4270,doi:10.1029/2002JD002062.
- Shin, S. and T. An (2007) Development of estimating method for areal evapotranspiration using satellite data, *Korean Journal of Geographic Information Studies*, 10(2), 70-80.
- Song, Y., M. Zhang, and X. Cai (2006) PM<sub>10</sub> modeling of Beijing in the winter, *Atmospheric Environment*, 40, 4126-4136.
- Stauffer, D.R. and N.L. Seaman (1994) Multiscale four-dimensional data assimilation, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 416-434.
- Xavier, V.F., A. Chandrasekar, R. Singh, and B. Simon (2006) The impact of assimilation of MODIS data for the prediction of a tropical low-pressure system over India using a mesoscale model, *International Journal of Remote Sensing*, 27(20), 4655-4676.