

연구논문

## 기상 모델의 초기장 및 자료동화 차이에 따른 수도권 지역의 CMAQ 오존 예측 결과

- 2007년 6월 수도권 고농도 오존 사례 연구 -

이대균\* · 이미향\* · 이용미\* · 유철\* · 홍성철\*\* · 장기원\* · 홍지형\*

\*국립환경과학원 대기공학연구과, \*\*국립환경과학원 기후변화연구과  
(2013년 9월 9일 접수, 2013년 11월 19일 승인)

An impact of meteorological Initial field and data assimilation on  
CMAQ ozone prediction in the Seoul Metropolitan Area during June, 2007

Dae-Gyun Lee\* · Mi-Hyang Lee\* · Yong-Mi Lee\* · Chul Yoo\* · Sung-Chul Hong\*\* ·  
Kee-Won Jang\* · Ji-Hyung Hong\*

\*Atmospheric Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research

\*\*Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research

(Manuscript received 9 September 2013; accepted 19 November 2013)

### Abstract

Air quality models have been widely used to study and simulate many air quality issues. In the simulation, it is important to raise the accuracy of meteorological predicted data because the results of air quality modeling is deeply connected with meteorological fields. Therefore in this study, we analyzed the effects of meteorological fields on the air quality simulation. This study was designed to evaluate MM5 predictions by using different initial condition data and different observations utilized in the data assimilation. Among meteorological scenarios according to these input data, the results of meteorological simulation using National Centers for Environmental Prediction (Final) Operational Global Analysis data were in closer agreement with the observations and resulted in better prediction on ozone concentration. And in Seoul, observations from Regional Meteorological Office for data assimilations of MM5 were suitable to predict ozone concentration. In other areas, data assimilation using both observations from Regional Meteorological Office and Automatical Weather System provided valid method to simulate the trends of meteorological fields and ozone concentrations. However, it is necessary to verify the accuracy of AWS data in advance because slightly overestimated wind speed used in the data assimilation with AWS data could result in underestimation of high ozone concentrations.

Keywords : RDAPS, FNL, Data assimilation, CMAQ, MM5

## I. 서론

최근 우리나라의 대도시에서는 급격한 인구증가로 인한 경제와 산업의 발달로 대기질이 악화되는 광역 오염현상이 두드러지게 나타나고 있다. 특히, 수도권 지역은 이동오염과 산업, 발전, 난방 등의 고정배출원에 의한 영향으로 오존, 질소산화물, 미세먼지 등과 같은 오염현상이 두드러지고 있다(김운수, 2002). 이러한 대기질의 현상을 이해하기 위해서 다양한 시·공간적인 모의가 가능한 3차원 대기화학 모델이 널리 사용되어오고 있으며, 그 결과의 신뢰성을 향상시키는 중요한 과정으로 입력 자료의 개선이 요구되고 있는 실정이다(Liu *et al.*, 2001).

선행 연구들에 의하면 수도권과 같이 해안선을 포함하는 복합지형의 경우에는 기상장 모사에 많은 불확실성이 존재함에 따라, 대기질 예측 결과에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져있다(김유근 등, 2007; 이화운 등, 2005). 따라서 대기질 예측 결과의 정확도를 높이기 위해서는 기상장 모사 결과의 정확도 향상 연구가 선행되어야한다(황미경 등, 2010; 이종범 등, 2009). 하지만 국내의 많은 대기질 예측 연구에 있어서 기상 모델 적용시 서로 다른 해상도와 산출 방식을 가지는 초기 자료를 활용하고 있다. 수도권 지역과 같은 도시규모의 기상 모델의 초기 자료로는 우리나라의 기상청(Korea Meteorological Administration; KMA)의 지역 예보 모델인 Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) 뿐만 아니라 미국 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 Final Operational Global Analysis (FNL) 자료와 NCEP의 Reanalysis 자료 등이 혼재되어 사용되고 있다(이종범 등, 2012; 김순태, 2011; 황미경 등, 2010; 정주희 등, 2007; 김유근 등, 2007). 또한 기상장 예측의 오차를 줄이기 위한 자료 동화에는 기상대 및 자동기상측정관측망(Automatic Weather Station: AWS)의 지점별 지상관측자료와 SONDE 및 위성관측 자료와 같이 다양한 상층 자료가 활용되고 있다(이종범 등, 2009; 김유근 등, 2007; 이화운 등, 2005). 이렇듯 국내 대기질 전망에 있어서 연구자들마다 각기 다른 기상 입력 자료를 사용하고 있

며, 이러한 자료의 선택이 전망 결과에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구는 비교적 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수도권 지역을 대상으로 초기장 및 자료동화에 사용되는 지상관측자료의 차이에 따른 수치 실험을 실행하였으며, 그 결과 고농도 오존 모의에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 살펴보고자 하였다. 연구를 위해 사용된 모델은 국내·외에서 대기질 예측 및 평가에 널리 이용되고 있는 Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5)(Dudhia, 1993)과 Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ)를 활용하였다(Byun and Ching, 1999). 초기 자료로는 2010년 초까지 산출된 기상청의 지역 예보모델인 RDAPS 자료와 이와 가장 유사한 해상도를 보이는 NCEP의 FNL 자료를 우선적으로 선정하여 적용하였다. 또한 자료동화에 따른 차이를 분석하기 위해 비교적 사용자 접근 및 활용이 용이한 기상대(3개) 및 AWS(88개)의 지상관측자료를 활용하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 사례일 선정 및 모델링 영역

본 연구는 기상 모델의 입력 자료 변경에 따른 기상 및 오존 예측 결과의 차이를 분석하기 위해 2007년도를 대상으로 고농도 오존 사례일을 분석하였다. 2007년의 오존 주의보 및 경보 발령 횟수는 서울 23회, 인천 11회, 경기 16회로 이 중 연속된 고농도 오존 사례일인 2007년 6월 18일과 19일을 중심으로 3일간의 스핀업(spin-up) 기간을 포함하여 2007년 6월 10일 12:00 UTC에서 2007년 6월 25일 00:00 UTC까지를 모델링 사례일로 선정하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 모델의 도메인 영역을 나타낸 것이다. 첫 번째 모델링 영역(domain)은 동북아시아를 포함하도록 구성 하고 2개의 동지격자를 구성하여 수도권 영역을 충분히 포함하도록 마지막 도메인을 설정하였다. 계산 영역은 Lambert Conformal (LC) 격자 투영법을 이용하였으며 모델영역을 수평적으로 27 km, 9 km, 3 km로 동지화(nesting)하여

Table 1. Characteristics and Observation number by subregions of Seoul Metropolitan Area

Domain3	AWS	RMO	AQM	Charateristics
Seoul	27	1	25	Urban
Incheon	19	1	7	Costal
S. Gyeonggi	22	1	35	Rural and Urban (Mixed)
N. Gyeonggi	23	0	11	Rural and Urban (Mixed)

\* RMO : Regional Meteorological Office, AWS : Automatic Weather Station, AQM : Air Quality Monitoring Station

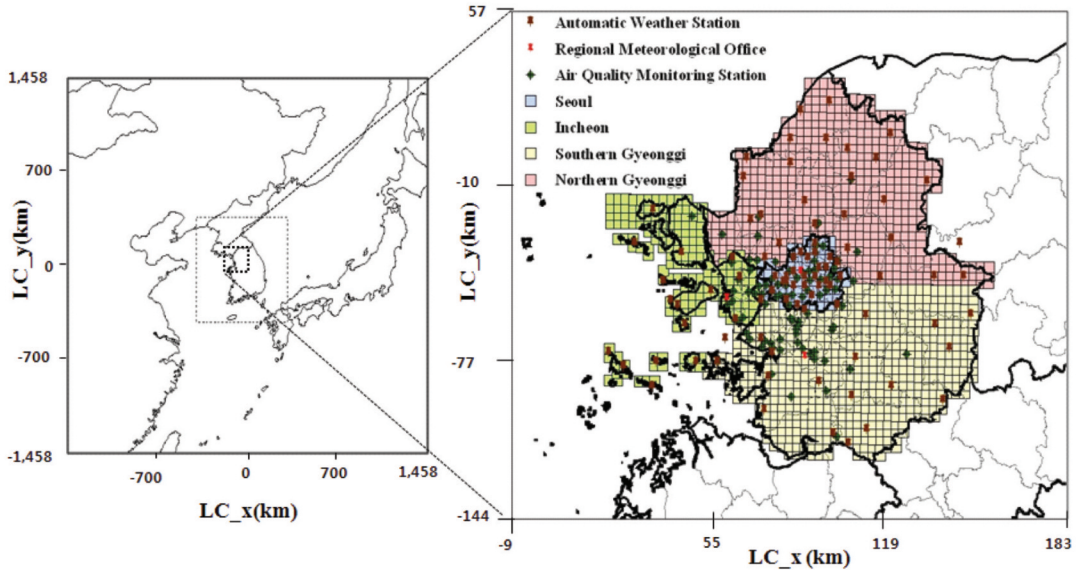


Fig 1. Modeling Domains, Air Quality Monitoring Station and Automatic Weather Station

대규모 영역부터 관심영역까지 계산하였다. 또한 상위 도메인과 하위 도메인 간의 피드백(feedback)을 고려한 two-way interacting nested grid system을 적용 하였다. 분석을 위하여 수도권의 지역 특성에 따라 네 개의 영역(서울, 인천, 경기 남부, 경기 북부)으로 나누었으며, 수치 실험 결과와 비교를 위해 사용된 기상대 및 자동기상측정소와 대기질자동측정망의 관측 지점에 대한 정보는 Fig 1과 Table 1에 제시하였다.

## 2. 모델 수행 조건

본 연구에서 사용된 기상 모델은 MM5 version 3.7을 이용하였다. 연직으로는 지표 근처의 세밀한 모사를 위하여 43개의 시그마 층으로 세분화 하였으며, 최상층의 압력은 50 hPa로 설정하였다. 모델에 사용된 물리 과정 및 기본 설정에 관한 내용은 Table

2에 제시하였다. 우선, 물리 과정 중 적은 모수화 과정은 Grell cumulus scheme, 복사과정은 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave scheme을 사용하였다. 대기 경계층에 대한 물리 과정은 현열, 잠열, 그리고 운동량에 대한 연직 플럭스를 계산하기 위해 비국지적 연직확산을 고려하는 Eta PBL Scheme을 사용하였다. 지표면 물리 과정은 연직적으로 5개 (1, 2, 4, 8, 16 cm)층에 대한 확산 방정식을 통해 계산되어지는 온도를 사용하여 지표면 온도의 일변화를 빠르게 모의하는 Five-Layer soil scheme을 선택하였다(Dudhia, 1996). 또한 기상 모델의 예측 능력 향상 위해 환경부 자료를 이용한 지형자료 및 토지이용도 개선 방법은 이화운 등 (2005) 및 홍지형 등(2008)을 따른다.

Table 3은 본 연구를 위해 수행되는 배출처리 시스템 Sparse Matrix Operator Kernel for Emissions

Table 2. The configuration of MM5

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal Grid	109×109	82×85	64×67
Grid Center(km)	-1,458×-1,458	-243×-540	-9×-144
Resolution (km)	27	9	3
Vertical Grid	43 Layers		
Physical option	Grell cumulus parameterization Eta PBL scheme Mixed phase scheme(Reisner) RRTM Longwave scheme Five-Layer Soil Model Surface scheme		
Initial data	Final Analysis Data (NCEP FNL Data), Regional Data Assimilation and Prediction System (KMA, RDAPS)		
Time period	Ozone episode 2007. 06. 10. 12UTC - 2007. 06. 25. 00UTC		

\* Lambert-Conformal, Map center : 38.0N, 126.0E

Table 3. The physical and chemical configuration for CMAQ and SMOKE

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal Grid	98×98	76×79	58×61
Grid Center(km)	-1,323×-1,323	-216×-513	0×-135
Resolution (km)	27	9	3
Vertical Grid	23 Layers		
CMAQ Chemical Option	Carbon Bond Mechanism 4, AERO3 (33 species, 81 reaction) Lumped organic chemistry(15 organic species) Yamartino scheme (advection), ACM2(Asymmetric Convective Model version 2 : vertical diffusion)		
SMOKE input data	Asia Emission : INTEX - B project(0.5°×0.5°) National Emission : CAPSS (1km×1km) Biogenic emission : GloBEIS3 (BEIS2)		
Time period	Ozone episode 2007. 06. 10 12UTC - 2007. 06. 25 00UTC		

\* Lambert-Conformal, Map center : 38.0N, 126.0E

version 2.1 (SMOKE v2.1)과 대기화학모델 (CMAQ v4.6)에 대한 개요를 나타낸 것이다. 배출모델의 입력자료 중 인벤토리 자료는 27 km 도메인의 경우 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 INTEX-b Project에서 도출된 0.5°×0.5°의 격자 단위의 동아시아 및 북태평양 일대 최신 자료(2006년)를 활용하였으며, 9 km와 3 km에 대한 도메인에서는 CAPSS의 2007년 배출량 자료를 활용하였다. 자연배출량의 경우는 기상자료 및 CAPSS의 식생 분포 자료를 활용하여 Global Biosphere Emission and Interaction System (GloBEIS3)의 Biogenic Emission Inventory System ver.2 (BEIS2) 옵션을 이용하였다. 2007년 CAPSS 배출량은 SMOKE 모델의 구동을 위하여 배출량 변환, SCC mapping 및

프로파일 추가 과정을 수행하였다(김지영 등, 2008).

대기질 오존을 모의하기 위하여 사용된 지역규모 대기화학모델은 미국 Environmental Protection Agency (EPA)에서 개발한 CMAQ v4.6을 이용하였다(Byun and Ching., 1999). 모델에 사용된 메커니즘은 수평과 수직적 이류 계산에는 Yamartino scheme을 활용하였다. 수평 확산 모듈로는 지역적 바람을 변형하는 분산 계수를 활용하였고, 수직 확산 모듈로는 Asymmetric Convective Model version 2 (ACM2)를 활용하였다. 광해리울 산정과정은 clear-sky 모듈과 운량 보정을 통해 광해리울을 내삽하여 산정하였다. 또한 가스상 화학 반응 모듈로는 33여개의 화학종과 81개의 화학반응으로 이루어진 Carbon-Bond Chemical Mechanism Version IV

(CB4)를 사용하였으며, 입자상 산정 모듈로는 3rd generation CMAQ aerosol module (Aero3) 모듈을 이용하였다. 배출모델과 대기질 모델링의 환경 설정 및 물리·화학적 모듈에 관해 정리한 내용은 Table 3과 같다.

### 3. 수치실험 및 자료

본 연구에서는 기상 모델의 입력 자료 차이에 따른 영향을 파악하기 위하여 두 종류의 초기장과 두 종류의 지상관측자료를 이용하여 6개의 사례에 따른 수치 실험을 수행하였다(Table 4). CASE1과 CASE2와 경우, 자료 동화를 활용하지 않은 초기장의 차이를 확인하기 위한 사례이며, CASE3~CASE6은 초기장의 차이와 자료 동화에 활용되는 지상 관측 자료의 차이에 따른 영향을 각각 알아보고자 선정하였다.

기상 모델에 사용된 초기 자료를 살펴보면, RDAPS의 경우는 기상청의 동아시아 영역의 지역예보를 위하여 MM5 모델을 기반으로 예보 영역은 30km 격자 간격으로 201×250개의 격자수로 이루어져있으며, 시그마면의 연직층은 모두 33층으로 구성되어있다. 기상청의 RDAPS 자료의 출력은 하루 2번으로 00UTC와 12UTC이며, 총 66시간 예보자료를 포함하고 있다(www.kma.go.kr). 현재 기상청에서는 2010년 이후 영국 통합수치예보시스템(UM/VAR)를 이용한 예보시스템을 개발하였으나 본 연구의 사례 기간인 2007년의 경우에는 기존의 지역예보자료인 RDAPS 자료만이 제공되어 본 자료를 활용하였다. 다음으로 NCEP의 FNL 자료는 Global Forecast System (GFS)를 통한 초기조건을 Global Telecommunications

System (GTS)와 수집된 관측자료를 활용하여 Global Analysis Data는 Global Data Assimilation System (GDAS)을 통해 산출된 분석장이다. FNL 자료는 전 지구 영역에서 걸쳐 1.0°×1.0° 간격의 수평 해상도로 산출되며, 연직적으로는 10 hPa에서 1000 hPa까지 총 26개의 기압면으로 구성되어있다. 이 분석 자료는 6시간 간격의 자료로 하루 4번 00UTC, 06UTC, 12UTC와 18UTC에 생성된다(http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2).

본 연구에서 활용된 자료 동화 기법은 관측값을 내삽하여 기상 모델의 오차를 개선하는 중요한 방법으로(이종범 등, 2009; 이화운 등, 2005; Stauffer and Seaman, 1994), 관측값을 이용하여 본 모델의 예측 방정식에 인위적 항을 추가하여 모델의 오차를 줄이는 자료 동화(analysis nudging)을 활용하였다(Grell *et al.*, 1994). 자료동화에 활용하는 지상관측자료는 관심대상 지역인 도메인3 영역 내에 존재하는 3개의 기상대 자료와 내륙의 88개의 자동기상 관측망 자료를 활용하였다. 관측 자료를 바탕으로 MM5의 Little\_r에서 다중2차 내삽법(Multiquadric interpolation)의 방법을 통해 3시간 간격으로 내삽하였다(Nuss and Titley, 1994). 이와 같은 지상 관측 자료만을 활용한 자료 동화시 한계점이 존재하나 연직적으로 지상 인근 층의 모사에는 신뢰성을 갖는 것으로 알려져 있다(이순환 등, 2004).

### 4. 통계적 분석 방법

수도권 지역의 기상 및 대기질 예측결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 기상대 3개(서울: 1, 인천: 1, 경

Table 4. Modeling cases for MM5 and CMAQ

CASE	Initial and Boundary input data	Observations utilized in data assimilation
CASE1	KMA RDAPS	no observation
CASE2	NCEP FNL	no observation
CASE3	KMA RDAPS	3 RMO
CASE4	KMA RDAPS	3 RMO and 88 AWS
CASE5	NCEP FNL	3 RMO
CASE6	NCEP FNL	3 RMO and 88 AWS

1) Regional Meteorological Office

2) Automatic Weather Station

기 남부: 1) 및 기상자동측정망 88개(서울: 26, 인천: 18, 경기 북부: 24, 경기 남부: 20)의 자료와 국가 대기오염정보관리시스템(National Ambient air Monitoring Information System, NAMIS)의 89개(서울: 25, 인천: 7, 경기 남부: 35, 경기 북부: 11)의 자료를 이용하여 비교 분석하였다(Fig. 1). 특히 기상 및 대기질 결과의 상세한 분석을 위하여 대표 측정소를 선정하여 보다 상세한 통계 분석을 수행하였다. 관측값과 각 사례에 따른 모델링 결과의 차이를 정량적으로 판단하기 위하여 상관계수(R), 일치도 지수(Index of Agreement: IOA)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error: RMSE) 등의 다양한 통계적 방법을 사용하였다(김철희 등, 2003; Hurley *et al.*, 2001; Pielke, 1984).

### III. 연구 결과

#### 1. 기상 모사 결과

오존 농도 상승에 영향을 미치는 기상요소 중 고농도 오존 발생에 크게 기여하는 것으로 알려진 기온과 풍속에 대한 분석을 실시하였다(Korsog and Wolff, 1991; Chock *et al.*, 1982). 우선, 각 사례별 온도 모사 결과는 Table 5와 같다. 각 지역의 예측 평균 온도는 FNL 자료를 초기장으로 사용할 경우 자료 동화 여부와 상관없이 관측값과 가깝게 모사되었다. 또한 RDAPS 자료를 사용할 경우 FNL 자료 사용시에 비해 평균 1℃이상의 온도를 저평가하는 것으로 분석되었다. 통계적인 경향 역시 FNL 자료를 활용한 세 가지 사례 간에는 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으나 RDAPS 자료를 활용할 경우에 비해 관측값과의 일치

Table 5. Statistical performance of observed and predicted temperature according to modeling cases

Region	CASE	Average of Observations	Average of Predictions	IOA	BIAS	Gross Error
Seoul	CASE1	25.9	21.3	0.70	-4.58	4.58
	CASE2		22.6	0.80	-3.28	3.33
	CASE3		21.4	0.71	-4.48	4.49
	CASE4		21.7	0.72	-4.23	4.24
	CASE5		22.9	0.83	-3.03	3.09
	CASE6		22.8	0.83	-3.07	3.13
Incheon	CASE1	22.4	19.4	0.88	-3.04	3.30
	CASE2		20.9	0.93	-1.59	2.34
	CASE3		19.5	0.88	-2.96	3.22
	CASE4		19.7	0.89	-2.76	3.06
	CASE5		20.7	0.92	-1.73	2.47
	CASE6		20.8	0.93	-1.68	2.44
Southern Gyeonggi	CASE1	24.2	20.7	0.79	-3.50	3.73
	CASE2		22.1	0.87	-2.10	2.59
	CASE3		20.9	0.79	-3.27	3.55
	CASE4		21.0	0.81	-3.19	3.46
	CASE5		22.0	0.88	-2.12	2.58
	CASE6		22.1	0.88	-2.09	2.59
Northern Gyeonggi	CASE1	23.9	21.1	0.84	-2.73	3.42
	CASE2		22.3	0.89	-1.59	2.64
	CASE3		21.2	0.83	-2.68	3.46
	CASE4		21.5	0.85	-2.39	3.23
	CASE5		22.3	0.90	-1.52	2.60
	CASE6		22.4	0.89	-1.43	2.64

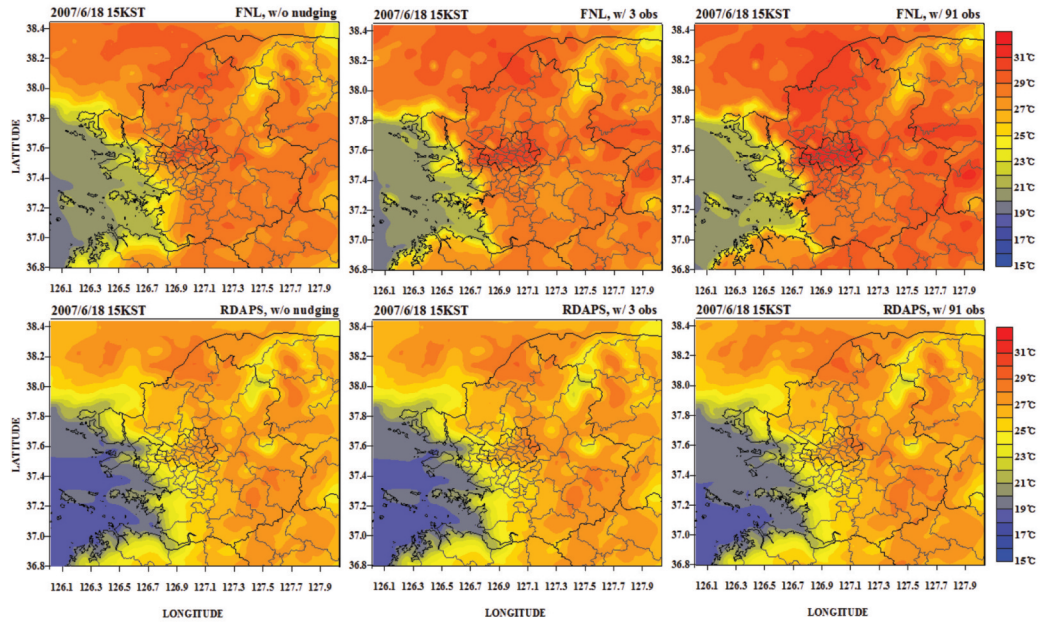


Fig. 2. Surface Temperature fields by different modeling cases at 15:00 KST 15 June 2007

도가 향상되었다. 또한 초기장으로 FNL 자료를 사용할 경우 편차와 총 오차(Gross error)로 본 오차값 역시 감소하는 것으로 분석되었다.

따라서 오존 증가와 높은 상관성을 갖는 한낮의 온도 변화를 통해 각 사례의 차이를 분석해보고자 하였다. 지금까지 선행연구를 통해 김영진(2000)은 낮기온이 5°C 증가할 경우 일 최고 오존 농도의 50% 내외 그리고 10°C 증가시에는 오존 농도의 100% 이상 증가한다고 밝힌 바 있다. 또한, 김유근 등(2002) 역시 서울에서 25°C 이상 온도에서 기온이 증가함에 따라 고농도 오존 발생 확률이 높아지며, 30°C 이상의 고온역에서는 고농도 오존 발생률이 급증하는 것으로 밝힌 바 있다. 따라서 본 연구에서 고농도 오존이 발생한 6월 18일 1500 KST에 사례별 온도 모사결과를 Fig. 2와 같이 나타냈다. 이 결과, FNL 자료를 초기장으로 사용한 경우 RDAPS 자료를 사용한 사례들과의 수도권 전반의 온도 차이는 5°C 내외로 나타났다. 특히, AWS 자료를 활용한 경우 산지를 포함한 경기 북부 지역의 고온역이 보다 뚜렷하게 나타나는 것으로 분석되었다. 고농도 오존이 발생하는 1500 KST에 사례별 예측값의 차이를 살펴본 결과, 초기장

으로 RDAPS 자료를 사용한 사례와 관측값과의 평균 차는 6.17–6.42°C였으나, FNL 자료를 사용한 결과와의 차는 3.11–4.46°C로 FNL을 사용할 경우 최대 3°C 이상 높게 모사하는 것으로 분석되었다. 자료 동화의 차이에 따라 일부 상이한 결과를 나타내고 있었으며, 특히 18일의 경우 기상대와 AWS 자료를 활용할 경우 수도권 전반을 30°C 정도의 고온역으로 모사하고 있었다.

Fig. 3는 온도 모사 결과를 보다 상세히 살펴보기 위해서 4개 지역의 대표 지점의 6가지 사례에 대해 온도 시계열 자료를 분석한 것이다. 이때, 지점별 자료는 기상 및 대기질 관측 지점이 동시에 위치하는 격자를 중심으로 분석을 실시하였다. 시계열 결과 역시 Fig. 3(b)의 FNL 자료를 활용한 경우, Fig. 3(a)의 RDAPS 자료를 사용한 사례에 비해 한낮의 기온을 잘 모사하는 것으로 분석되었다. 하지만 서울과 인천의 FNL 자료 사용시, 고농도 오존이 나타나는 19일 오후에 AWS 관측값을 활용한 자료 동화 사례인 CASE6에서 급격한 온도 감소 현상이 나타나고 있었다. 이러한 현상은 아래 지역 외에도 서울과 인천의 일부 지역에서 나타나고 있었으며, 이것은 3차

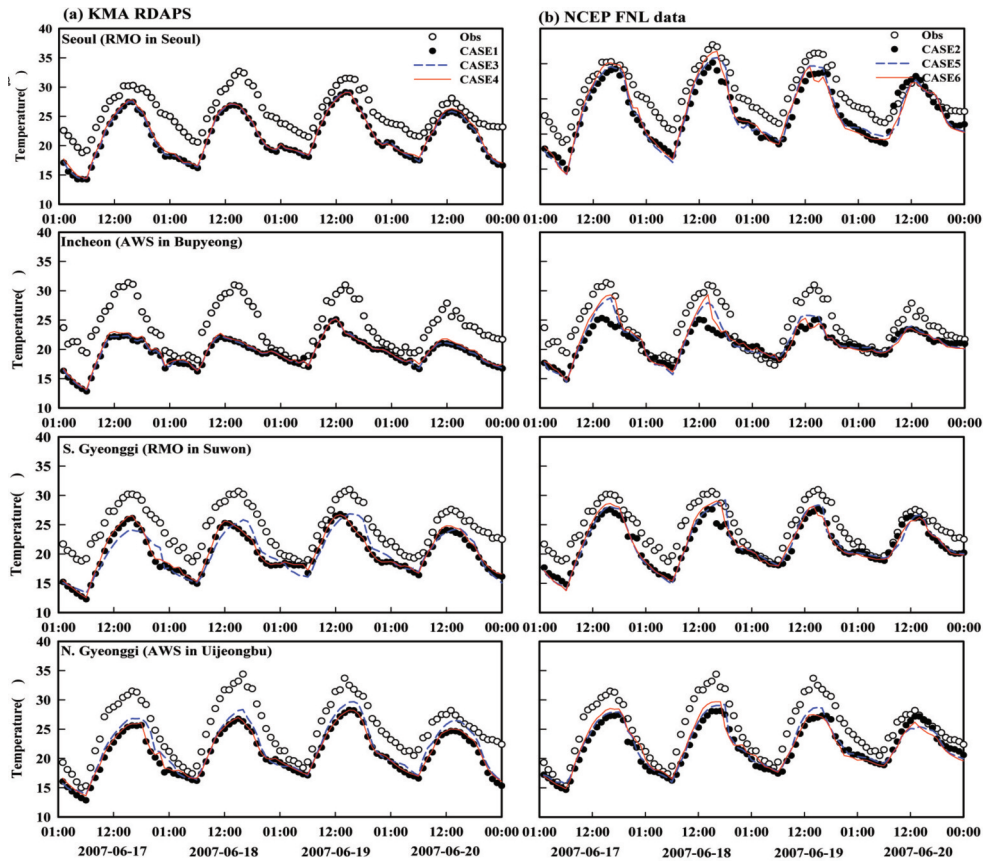


Fig. 3. Time series of observed and predicted temperature according to modeling cases

원 모형에서 지상 자료를 이용한 자료 동화시 국지적 효과에 의한 불확실성에 의한 것으로 사료된다(이순환 등, 2004). 따라서 이러한 국지적 영향을 배제하기 위해서는 서울과 같은 도심지역이나 인천과 같은 해안 및 복합 지형에서는 지역적 대표성을 고려한 지상자료 선택이 중요하다 하겠다. 경기 남부와 북부의 경우 FNL 자료를 활용한 경우, 온도의 일변화와 고온역을 잘 모사하는 것으로 분석되며 자료 동화에 따라 일부 차이만을 나타내는 것으로 분석되었다.

다음으로는 지역별 풍속의 예측 결과를 Table 6과 같이 살펴보았다. 우선 수도권 전반에서의 예측된 평균 풍속은 FNL 자료를 초기장으로 이용하여 자료동화를 수행하지 않은 CASE2가 관측값과 가깝게 모사되었다. 통계적인 수치로 살펴보면, 서울, 경기 남부 및 북부 세 지역에서 일치도 지수는 CASE6을 활용한 경우 가장 높았고 이에 따라 관측값의 패턴과 적

정 수치를 잘 모사하는 것으로 분석되었다. California Air Resources Board and South Coast Air Quality Management District (CARB/SCAQMD, 2006)에서는 기상 모델을 활용한 풍속 모사 결과의 분석을 위한 통계적 평가 지수 중 총 평균제곱근오차(RMSE) 값을  $2\text{m/s}$  이하로 권고하고 있다. 이에 따라 세 지역의 총 평균제곱근오차를 살펴본 결과, 인천을 제외하고 FNL 자료를 이용한 초기장을 사용하고 자료동화를 실시한 CASE5와 CASE6이 가장 낮은 오차를 나타내며 CARB/SCAQMD의 기준값을 모두 만족하는 것으로 분석되었다. 따라서, FNL 자료를 초기장으로 활용시 풍속 모사 결과가 향상되는 것으로 판단되나 자료 동화시 일변화 경향을 보다 잘 모사하는 것으로 판단된다. 인천의 경우 CASE2를 활용한 풍속 모사 결과, 관측값에 가장 유사하게 모사하였으나 일치도 지수로 살펴본 관측값과의 상관성은 CASE2와

Table 6. Same as Table 5, but windspeed

Region	CASE	Average of Observations	Average of Predictions	IOA	RMSE	BIAS
Seoul	CASE1	1.61	2.50	0.46	1.80	0.89
	CASE2		2.06	0.46	1.59	0.45
	CASE3		2.52	0.45	1.81	0.91
	CASE4		2.51	0.46	1.78	0.90
	CASE5		2.16	0.55	1.22	0.55
	CASE6		2.21	0.58	1.23	0.60
Incheon	CASE1	1.98	4.13	0.58	2.80	2.15
	CASE2		3.55	0.59	2.46	1.57
	CASE3		4.11	0.58	2.79	2.12
	CASE4		3.98	0.59	2.69	2.00
	CASE5		3.64	0.55	2.55	1.66
	CASE6		3.58	0.57	2.50	1.60
S.Gyeonggi	CASE1	1.43	2.50	0.54	1.93	1.07
	CASE2		2.30	0.53	1.84	0.87
	CASE3		2.50	0.54	1.93	1.06
	CASE4		2.47	0.54	1.90	1.03
	CASE5		2.57	0.58	1.74	1.14
	CASE6		2.57	0.61	1.69	1.13
N.Gyeonggi	CASE1	1.13	2.13	0.44	1.94	0.99
	CASE2		2.09	0.32	2.08	0.95
	CASE3		2.13	0.44	1.95	1.00
	CASE4		2.14	0.44	1.94	1.01
	CASE5		2.16	0.45	1.69	1.03
	CASE6		2.17	0.49	1.63	1.04

함께 RDAPS자료를 활용한 사례에서 비교적 높게 나타났다. 따라서 인천과 같은 복잡한 지형 조건에서는 고해상도의 RDAPS 초기장 사용으로 풍속의 모사 성능이 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 인천의 경우 CARB/SCAQMD에서 정한 2 m/s 이하의 오차 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타나 풍속 모사에 불확실성이 큼에 따라 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

풍속의 경우 지역적, 시간적 차이가 큰 만큼 대표 지점의 풍속 변화를 Fig. 4와 같이 살펴보았다. 대표 지점에서 MM5 모델을 활용한 풍속 예측값은 전반적으로 실제 풍속에 비해 과대평가하는 것으로 분석되었다. 수도권 네 지점 모두 FNL 자료를 사용한 경우 과대평가된 풍속이 관측값의 일변화를 보다 잘 모사하였다(Fig. 4). 하지만 자료 동화시 AWS 관측값을 활용할 경우 낮은 풍속을 잘 모사하는 반면에 강한

풍속은 과대 모사하는 경향이 나타남에 따라 고농도 오존을 과소 모사할 가능성이 있을 것으로 판단된다.

풍향과 풍속을 모두 고려하기 위해 오존 고농도 사례가 나타난 6월 18일과 19일을 포함하는 4일간의 대표지점에서의 시간별 바람 벡터를 Fig. 5와 같이 나타냈다. 이 결과 서울과 인천과 같은 복잡한 지형에서는 고해상도의 RDAPS 자료를 활용한 초기장이 관측값에 가깝게 바람벡터를 모사하는 것으로 판단되며, 경기 남부와 북부 지역은 일별로 약간의 차이는 있으나 FNL 자료를 활용한 결과 관측값과 유사한 패턴을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 자료 동화 역시 서울과 인천의 경우 자료동화를 하지 않은 CASE1과 CASE2의 경우 보다 가까운 경향을 나타내고 있으며, 경기 남부 및 북부의 경우 자료동화를 수행한 CASE5, CASE6이 가장 관측값에 가깝게 모사하는 것으로 판단된다. 따라서 지형에 따라 자료동화

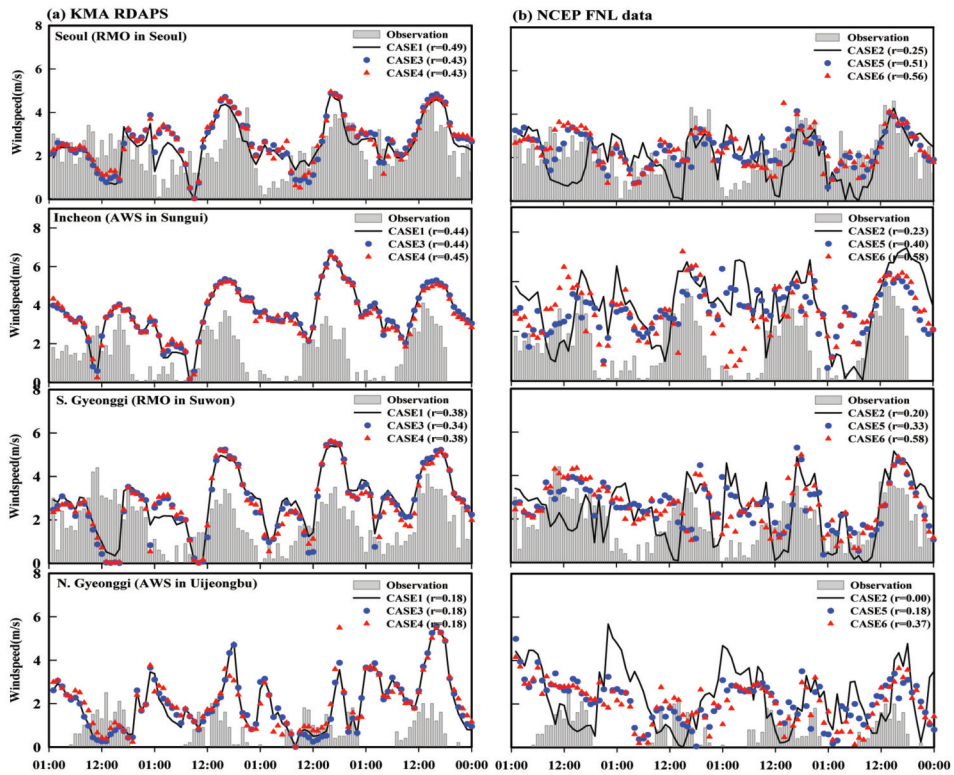


Fig. 4. Same as Figure 3, but wind speed

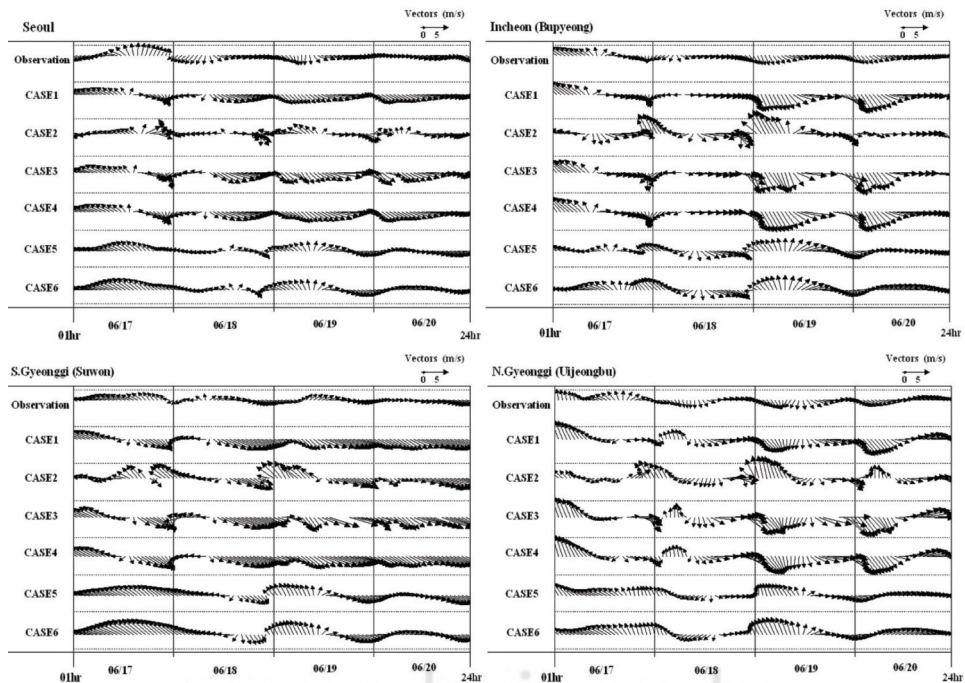


Fig. 5. Same as Figure 3, but wind vector

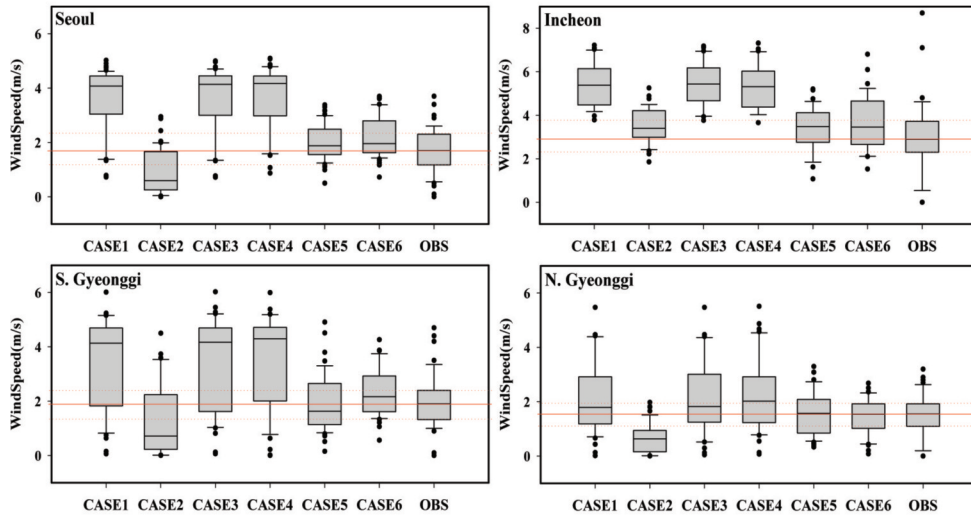


Fig. 6. Boxplot of observed and predicted wind speed at 15:00 KST by modeling cases

여부와 자료 선택에 유의가 필요하다 하겠다.

본 연구에서는 오존 축적과 수송을 평가하는 지표로 일최고 오존농도가 나타나는 15시의 기상측정망별 풍속 분석을 통해 오존 생성에 미치는 영향을 간접적으로 평가하였다(김유근 등, 2002). Fig. 6는 수도권 지역의 고농도 오존이 발생한 18일과 19일 15시에 나타난 평균 풍속 분포를 사례별로 나타낸 것이다. 이 결과 양쪽 5퍼센타일의 이상치(outlier)를 제외하고 수도권 대부분의 지역에서 FNL 자료와 3개의 기상대 자료를 활용한 풍속 모의가 가장 관측값에 가깝게 모사되었다. 그러나 경기 남부의 경우 CASE6이 관측값과 가장 가까운 분포를 나타냈다.

## 2. 대기질 모사 결과

대기질 모사 결과를 확인하기 위하여 78개의 NAMIS

자료와의 비교 분석을 수행하였다. 이때, 기상 자료 분석 방법과 동일하게 기상 및 대기질 측정망 자료가 함께 위치하는 격자에 대한 지점별 분석을 실시하였다.

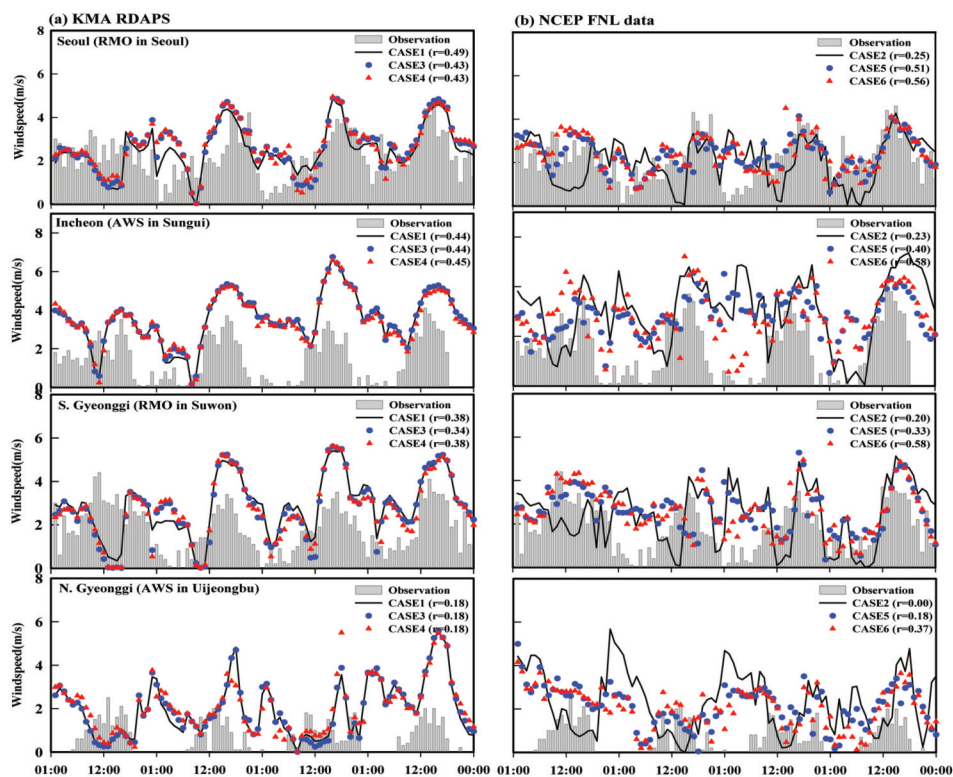
우선, 기상장의 차이에 따른 일차적인 대기오염물질의 농도 변화를 살펴보기 위해 78개 지점에서 NO<sub>2</sub>에 대한 통계적 분석을 실시한 결과는 Table 7과 같다. 모든 지역에서 기상청의 RDAPS를 초기장으로 사용한 사례에 비해 FNL 자료를 초기장으로 사용한 사례가 관측 평균 농도와 가장 유사하게 나타났으며, 관측값과의 상관성역시 향상되는 것으로 분석되었다. 특히, 인천을 제외하고는 FNL 자료와 91개의 관측값을 활용할 경우 상관계수와 일치도 지수가 가장 높게 나타났으며, 오차도 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 NO<sub>2</sub> 농도의 예측 결과는 온도 및 풍속 등의 기상 모사 결과와 유사한 경향을 나타내고 있었다.

Table 7. Statistical performance of observed and predicted NO<sub>2</sub> concentration according to modeling cases.

Region	CASE	Average of Observations	Average of Predictions	R	IOA	Gross Error
Seoul	CASE1	41.38	39.23	0.30	0.59	19.25
	CASE2		44.10	0.33	0.60	19.16
	CASE3		37.56	0.29	0.58	18.89
	CASE4		39.30	0.30	0.59	19.19
	CASE5		39.23	0.29	0.58	18.42
	CASE6		40.94	0.39	0.64	17.09

Table 7. Continued

Region	CASE	Average of Observations	Average of Predictions	R	IOA	Gross Error
Incheon	CASE1	31.41	22.73	0.29	0.58	18.27
	CASE2		29.81	0.44	0.68	15.51
	CASE3		22.29	0.29	0.58	17.97
	CASE4		23.45	0.29	0.59	18.15
	CASE5		30.42	0.38	0.64	16.36
	CASE6		29.75	0.43	0.66	15.99
S.Gyeonggi	CASE1	32.71	32.09	0.34	0.62	17.61
	CASE2		33.02	0.34	0.61	17.99
	CASE3		30.90	0.35	0.62	17.10
	CASE4		32.33	0.34	0.62	17.62
	CASE5		28.00	0.38	0.63	16.61
	CASE6		29.49	0.44	0.68	15.73
N.Gyeonggi	CASE1	30.80	18.46	0.29	0.53	18.89
	CASE2		25.71	0.34	0.60	16.00
	CASE3		18.03	0.29	0.53	18.95
	CASE4		18.80	0.30	0.54	18.63
	CASE5		24.42	0.33	0.58	15.89
	CASE6		24.77	0.37	0.61	15.41

Fig. 7. Time series of observed and predicted NO<sub>2</sub> concentration according to 6 cases in representative sites of Seoul Metropolitan Area

인천의 경우 국지적 영향을 갖는 관측값을 반영하지 않은 CASE2가 가장 유의한 상관관계를 나타냈으며, 총 오차 역시 CASE2가 가장 낮게 모사되었다.

NO<sub>2</sub> 모사 결과와 관측값 간의 보다 상세한 분석을 위해 대표 지점의 사례별 시계열 결과를 Fig. 7과 같이 제시하였다. Fig. 7에서도 전반적인 시계열 패턴은 FNL 자료를 초기장으로 사용할 경우 관측값과 유사한 것으로 나타났다. RDAPS 자료의 경우 자료 동화에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났으며, 서울과 인천에서는 두 가지 초기장 모두 19일 NO<sub>2</sub> 농도가 크게 저평가 되고 있었다. 하지만 서울의 경우 FNL 자료를 초기장으로 사용할 경우 일변화를 가장 잘 모사하고 있었으며, 91개의 관측값을 활용한 자료 동화를 통해 일부 과대 모사 현상이 감소하는 것으로 분석되었다. 인천의 경우는 FNL 자료와 자료 동화를 통해 19일과 20일 사이의 NO<sub>2</sub> 농도가 급감하는 현상이 일부 개선되었으나 일변화에 여전히 큰 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

다음으로는 78개 지점에서의 사례별 오존 예측 농도와 관측값과의 상관관계를 분석한 결과는 Fig. 8

및 Table 8과 같다. 전 지점의 오존 모사 농도는 관측값에 비해 저평가되었다. 그러나 수도권 전체에서 FNL 자료를 이용한 대기질 예측시 관측값과 통계적으로 보다 유의한 결과를 나타냈으며, FNL 자료를 이용한 사례 중 3개의 관측값을 사용한 자료동화시 관측값과 가장 유의한 상관성을 나타냈으나 자료 동화에 따른 차이는 비교적 적은 것으로 분석되었다.

지역별로 살펴보면(Table 8), 모든 지역에서 오존의 평균농도는 RDAPS 자료를 초기장으로 사용한 경우 관측값과 비교적 가깝게 모사되었다. 통계적 지수를 통해 살펴본 결과, 서울의 경우 FNL 자료를 사용한 CASE2와 기상대 자료를 활용한 CASE5의 상관계수가 각각 0.71과 0.70으로 다른 사례에 비해 상관계수가 0.05이상 증가한 것으로 분석되었으나 U.S. EPA에서 제시하는 총 오차(35이하)나 Normalized Bias(±15%이하) 등에는 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다(홍지형 등, 2008a). 또한 경기 남부 역시 CASE2와 CASE5가 가장 유의한 상관관계로 다른 사례에 비해 상관계수 값이 높았으며, 오차의 경우 뚜렷한 차이가 없는 것으로 분석되었다. 또한 인천과

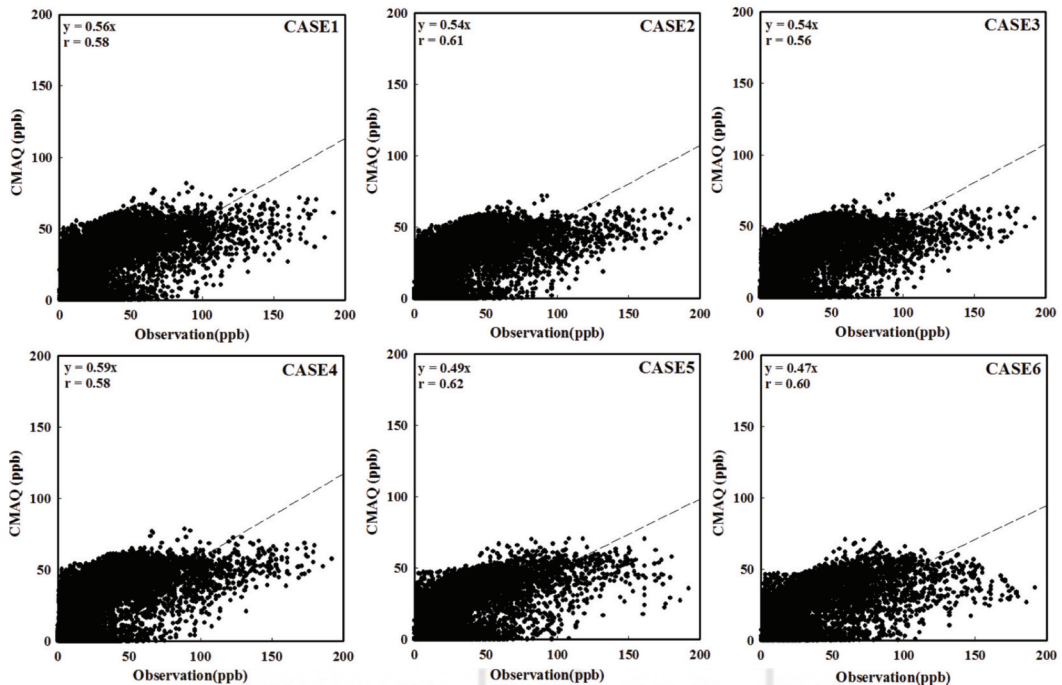


Fig. 8. Correlation between CMAQ output and observation in the Seoul Metropolitan Area

Table 8. Same as Table 7, but Ozone concentration

Region	CASE	Average of Observations	Average of Predictions	R	Gross error	NBIAS
Seoul	CASE1	35.15	22.13	0.65	19.36	-0.11
	CASE2		17.89	0.71	20.08	-0.21
	CASE3		20.09	0.64	20.09	-0.19
	CASE4		21.98	0.65	19.47	-0.12
	CASE5		16.67	0.70	20.32	-0.30
	CASE6		15.41	0.65	20.94	-0.46
Incheon	CASE1	38.03	32.62	0.49	19.12	0.45
	CASE2		23.97	0.63	19.08	-0.27
	CASE3		29.92	0.47	19.56	0.33
	CASE4		32.19	0.49	19.28	0.43
	CASE5		20.96	0.54	21.47	-0.33
	CASE6		22.01	0.56	20.63	-0.28
S.Gyeonggi	CASE1	34.16	25.38	0.57	19.00	0.33
	CASE2		23.06	0.60	19.58	0.35
	CASE3		23.20	0.55	19.39	0.20
	CASE4		25.16	0.58	19.07	0.30
	CASE5		22.50	0.61	19.03	0.28
	CASE6		21.42	0.59	19.16	0.10
N.Gyeonggi	CASE1	36.27	36.07	0.54	19.22	1.13
	CASE2		27.80	0.66	16.88	0.46
	CASE3		33.34	0.52	19.27	0.96
	CASE4		35.86	0.54	19.21	1.13
	CASE5		25.50	0.59	18.28	0.28
	CASE6		25.46	0.59	18.06	0.25

경기 북부의 경우 FNL 자료를 사용한 CASE2가 관측값과 가장 큰 상관성을 나타냈으며, 오차 역시 FNL 자료를 활용할 경우 감소하는 것으로 분석되었다.

전반적인 일변화 분포를 살펴보기 위해 Fig. 9와 같이 대표 지점에서의 오존의 시계열을 제시하였다. 그 결과, RDAPS를 이용한 CASE3과 4의 경우 오존 고농도 날짜를 제대로 모사하지 못하며 고농도 오존 사례일이 아닌 20일의 오존을 과대 모사하는 경향을 나타냈다. 하지만 FNL 자료를 사용할 경우, 다른 날에 비해 고농도 오존일인 18일과 19일의 오존 농도를 보다 높게 모사하여 관측값과 유사한 패턴을 나타내고 있었다. 특히 모든 지역에서 CASE2를 활용할 경우 오존의 일변화를 보다 정확하게 모사하는 것으로 분석되었다.

지금까지 초기장인 FNL 자료를 이용할 경우, 대

기질 모사 결과가 향상되는 것을 확인 할 수 있었으나 자료 동화에 따른 차이가 나타남에 따라 고농도 오존에 대한 모사 능력에 미치는 영향을 보다 상세히 살펴보고자 고농도 오존일인 18일과 19일의 8시간 최대 평균 오존 농도 값의 분포를 Fig. 10에서 제시하였다. 또한 사례별 모사결과와 관측값 간의 공간적 분포의 상관성을 분석한 결과는 Table 9와 같다. 이 두 결과에 따라 수도권에서 8시간 최대 평균 오존 농도를 모사하는데, CASE2가 가장 유용할 것으로 판단된다. 또한 Table 9의 상관계수에 따라 수도권의 전반적인 농도 분포 모사에도 CASE2가 가장 유용할 것으로 분석되었다. 하지만 지역별로 나누어 살펴본 결과, 서울과 경기 남부 지역에서는 FNL 자료만을 활용한 CASE2가 관측값의 패턴을 모사하는데 가장 유용하게 나타났고 경기 북부의 경우 FNL 자료와 자

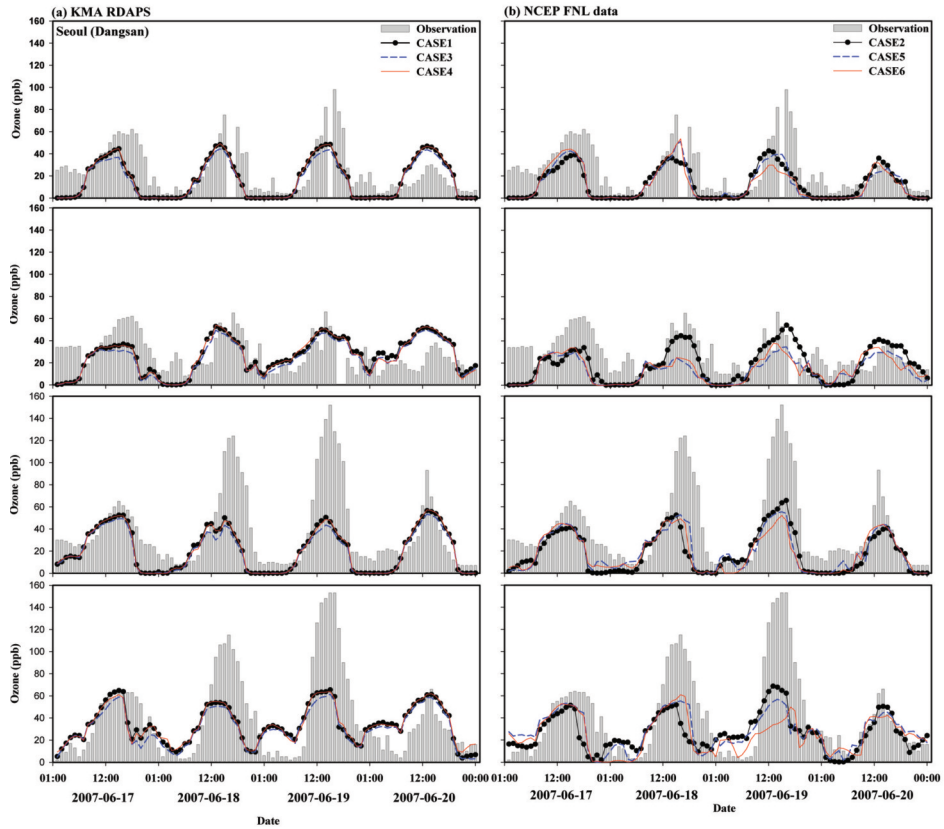


Fig. 9. Time series of observed and predicted ozone concentration according to 6 cases in representative sites of Seoul Metropolitan Area

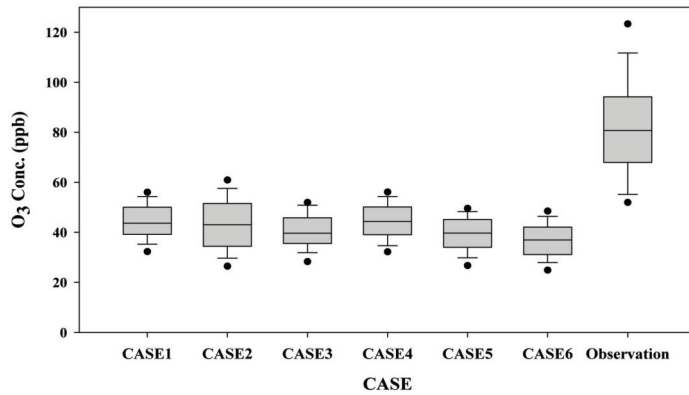


Fig. 10. Box plot of observed and predicted mean daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations by modeling cases

료동화를 통한 CASE5가 가장 유용할 것으로 분석되었다. 하지만 인천의 경우 RDAPS 자료의 경우 보다 고해상도의 자료를 활용한 CASE1이 고농도 분포를 잘 모사하는 것으로 분석되어 다른 지역과는 상이한

결과를 나타내고 있었다. 이것은 복잡한 해안 지형의 인천에서는 바람 모사에 있어 FNL 자료에 비해 비교적 고해상도 초기장인 RDAPS자료가 고농도 오존 모사에 긍정적 영향을 주는 것으로 판단할 수 있겠다.

Table 9. Correlation coefficients between predicted and observed mean daily maximum 8-hour averaged surface ozone concentrations.

Region	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
Seoul Metropolitan Area	0.19	0.38	0.11	0.18	0.35	0.06
Seoul	0.60	0.66	0.53	0.58	0.29	-0.19
Incheon	0.62	0.50	0.61	0.60	0.56	0.55
S. Gyeonggi	0.28	0.58	0.23	0.30	0.52	0.45
N. Gyeonggi	-0.09	-0.08	-0.11	-0.11	0.46	0.40

#### IV. 결론

우리나라의 수도권과 같은 복합 지형에 대한 대기 화학모델링 연구에 있어서 기상장 모사에 많은 불확실성이 존재함에 따라 대기질 현상을 이해하고 이에 대한 올바른 정책을 마련하는데 어려움이 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 모델링 결과의 신뢰성 및 활용성을 제고하기 위하여 대기질 예측 결과의 중요한 요소인 기상 모델의 초기장 및 자료 동화에 따른 예측 결과를 비교하였다.

본 연구에서는 2007년 고농도 오존이 발생한 6월에 기상 모델의 입력 자료 변경이 기상 및 오존 농도의 예측 결과에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 수도권의 78개 관측지점을 활용한 통계적 분석 결과, FNL 자료를 초기장으로 활용하고 다수의 관측값을 자료동화에 활용한 경우 온도 및 풍속 모사 결과가 향상되는 것으로 판단되었다. 특히, 서울의 경우 도심 고층 건물에 의한 영향으로 자료동화를 통한 국지적 효과에 의하여 온도 및 바람벡터에 악영향을 미칠 수 있는 것으로 판단됨에 따라 관측자료의 선택에 주의가 필요하다 할 수 있다. 또한 인천의 경우 해안 및 도심의 복합적인 지형에 따라 온도 및 풍속의 경우 FNL 자료를 활용할 경우 모사 능력을 향상시킬 수 있으나 여전히 바람벡터의 모사에는 고해상도의 RDAPS자료가 유용함을 확인할 수 있음에 따라 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

이러한 기상 모사 결과를 토대로 대기질 모사에 미치는 영향을 살펴보기 위해 NO<sub>2</sub> 및 오존 등의 대기질 모사를 실시하였다. 우선 기상 수치 모의에 따른 일차적 효과를 분석하기 위해 NO<sub>2</sub> 예측 농도를 분석한 결과, 인천을 제외하고 FNL 자료와 91개의 관측

값을 이용한 자료 동화를 수행한 경우 관측값과 가장 유의한 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 인천의 경우 NO<sub>2</sub> 모사를 위해 자료 동화를 수행하지 않은 CASE2와 다량의 관측값을 활용한 CASE6이 관측값과 가장 유사한 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 그러나 여전히 서울과 인천 등의 지역에서는 고농도 오존일인 19일의 NO<sub>2</sub>의 저평가 문제가 존재함에 따라 대기질 모사의 정확도 향상을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 분석된다. 오존 예측시에는 수도권 전체 모사 결과, FNL 자료를 초기장으로 활용한 CASE2와 CASE5가 가장 유용할 것으로 판단되었다. 지역별로도 서울과 경기 남부에서는 CASE2와 CASE5가 관측값의 변화를 잘 모사하는 것으로 판단되었고 인천과 경기 남부의 경우 CASE2가 가장 관측값에 가까운 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 고농도 오존의 경우 지역별로 상이한 결과를 나타냈으며, 특히 8시간 최대 평균 오존 농도를 살펴본 결과, 인천의 경우 RDAPS 자료를 활용할 경우 보다 향상된 결과를 나타냈으며, 서울과 경기 남부는 CASE2 그리고 경기 북부는 CASE5가 가장 유용한 것으로 분석되었다.

본 연구를 통해 기상 모델의 초기장의 선택과 자료 동화에 활용되는 지상 관측 자료의 차이에 따라 모델의 예측 능력에 차이를 확인할 수 있었다. 특히, 고농도 오존의 정확한 예측을 위해서는 초기장에 선택이 중요하며, 지역별로 자료동화에 필요한 관측 자료 선택에 따라 다른 영향을 주는 것을 확인하였다. 그러나 이러한 기상 입력 자료의 선택만으로는 여전히 대기질 예측을 위한 많은 제한점이 남아 있음에 따라 우리나라 수도권과 같이 복합 지형조건에 적합한 고해상도의 초기 입력 자료와 다양한 모델 실험을 통한

양상블 결과가 요구된다. 그리고 누구나 접근하기 쉽고 사용하기 쉬운 관측 자료의 구축이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 향후 현재 구축된 기상청의 통합수치예보모델과 NCEP의 재분석 자료 등의 추가적인 초기 자료의 비교 연구 뿐만 아니라 상층 관측 자료와 위성자료 등의 4차원자료동화 그리고 MM5, WRF 등의 여러 기상 모델에 따른 성능 평가 연구 등 추가적 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- 김순태, 2011, 2007년 6월 수도권 오존모사 I - 광화학측정자료를 이용한 SAPRC99 화학종별 휘발성유기물질 배출량 입력자료 평가, 한국대기환경학회지, 27(5), 580-602.
- 김영진, 2000, 이층 상자모델을 이용한 서울지역 고농도 오존 발생 주요 원인분석, 서울대학교 석사학위 청구논문
- 김운수, 2002, 수도권 대기오염의 공간분포 특성을 고려한 지속가능한 개발방향과 과제, 경기논단, 69-89.
- 김유근, 문운섭, 오인보, 황미경, 2002, 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표 고농도 오존 발생에 미치는 영향, 한국기상학회지, 38(4), 319-331.
- 김유근, 오인보, 강윤희, 황미경, 2007, MM5-CAMx를 이용한 대기오염물질의 재순환현상 모델링: 2004년 6월 수도권 오존오염 사례연구, 2004, 한국대기환경학회, 23(3), 297-310.
- 김지영, 김정수, 홍지형, 정동일, 반수진, 이용미, 2008, SMOKE 모델의 입력 모듈 변경에 따른 영향 분석, 한국대기환경학회지, 24(3), 284-299.
- 김철희, 나진균, 박철진, 박진호, 임차순, 윤 이, 김민섭, 박춘화, 김용준, 2003, 유해화학물질 대기확산 예측을 위한 RAMS 기상모델의 적용 및 평가 및 CARIS의 바람장 모델 검증, 한국대기환경학회지, 19(5), 595-610.
- 이순환, 김현숙, 이화운, 2004, 복합지형이 대기질 예측을 위한 기상자료동화의 효용성에 관한 수치연구, 한국대기환경학회지, 20(4), 523-537.
- 이용미, 이현주, 유철, 송정희, 김지영, 홍지형, 2009, 수도권 지역에서 대기질 측정망 자료를 이용한 광화학모델의 이동오염원 배출량 검증, 한국대기환경학회, 25(5), 369-381.
- 이종범, 김재철, 천태훈, 2009, 위성자료를 이용한 MM5 4차원자료동화가 광화학모델의 정확도에 미치는 영향 고찰, 한국대기환경학회지, 25(4), 264-274.
- 이종범, 김재철, 장운정, 2012, 관측과 기상모델을 이용한 춘천지역의 도시열섬현상 연구, 한국대기환경학회지, 28(2), 119-130.
- 이화운, 최현정, 이강열, 2005, 상세한 하부 경계 조건과 관측값 객관분석이 복잡지형의 대기 흐름장 수치모의에 미치는 효과, 한국기상학회지, 41(1), 73-87.
- 정주희, 김유근, 문운섭, 황미경, 2007, 수도권지역 대기질 예측을 위한 기상장 모델의 바람장과 온도장 비교 연구, 한국대기환경학회지, 23(6), 640-652.
- 홍지형, 김지영, 김대곤, 이원석, 강정희, 이수빈, 이용미, 이현주, 송정희, 2008, 대기질 모델을 이용한 수도권지역 배출량 변화에 따른 민감도 분석 연구, 국립환경과학원, 30-39.
- 홍지형, 김지영, 이용미, 이현주, 송정희, 문난경, 문운섭, 이화운, 변대원, 김순태, 2008a, MM5-SMOKE-CMAQ 시스템을 이용한 대기오염 예측 모델링 편람, 국립환경과학원, 6-19.
- 황미경, 김유근, 오인보, 강윤희, 2010, 건물효과를 고려한 연안도시지역 고해상도 기상모델링, 한국대기환경학회지, 26(2), 137-150.
- Byun, D. W. and Ching, J. K. S., 1999, Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality

- (CMAQ) Modeling System, EPA Report, EPA/600/R-99/030, NERL, Research Triangle Park, NC.
- Byun, D. W., Kim, S. T. and Kim, S. B., 2007, Evaluation of air quality models for the simulation of a high ozone episode in the Houston metropolitan area, *Atmospheric Environment*, 41, 837-853.
- Chock, D. P., Kumar, S. and Herrmann, R. W., 1982, An Analysis of trends in oxidant air quality in the south coast air basin of California, *Atmospheric Environment*, 16, 2615 ~ 2624.
- Dudhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1513.
- Dudhia, J., 1996, A multi-layer soil temperature model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, Colorado, 49-50.
- Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer, D. R., 1994, A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR.
- Hurley, P. J., Blockley, A. and Rayner, K., 2001, Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia, *Atmospheric Environment*, 35, 1871-1880.
- Korsog, P. E. and Wolff, G. T., 1991, An examination of urban ozone trends in the Northeastern U.S.(1973-1983) using a robust statistical method, *Atmospheric Environment*, 25(1), 47-57.
- Liu, T. H., Jeng, F. T., Huang, H. C., Berger, E. and Chang, J. S., 2001, Influences of initial condition and boundary conditions on regional and urban scale Eulerian air quality transport model simulations, *Chemosphere-Global Change Sci.*, 3, 175-183.
- Nuss, W. A., and Titley, D. W., 1994, Use of mutiquadric interpolation for meteorological objective analysis, *Mon. Wea. Rev.* 122, 1611-1631.
- Pielke, R. A., 1984, *Mesoscale Meteorological modeling*, Academic Press Inc., 612.
- Stauffer, D. R., and Seaman, L. N. ,1990, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I : experiments with synopticscale data, *Monthly Weather Review*, 118, 1250-1277.
- Stauffer, D. R. and Seaman, L. N., 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 416-434.