

MM5-CAMx를 이용한 대기오염물질의 재순환현상 모델링: 2004년 6월 수도권 오존오염 사례연구

Modeling of the Air Pollutant Recirculation using the MM5-CAMx on Ozone Episode in Greater Seoul Area during June, 2004

김유근* · 오인보¹⁾ · 강윤희 · 황미경
부산대학교 대기과학과, ¹⁾미국 휴스턴 대학 IMAQS 연구소
(2007년 1월 9일 접수, 2007년 5월 31일 채택)

Yoo-Keun Kim*, In-Bo Oh¹⁾, Yoon-Hee Kang and Mi-Kyoung Hwang
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
¹⁾*Institute for Multi-dimensional Air Quality Studies, University of Houston,*
Houston, TX 77204, USA

(Received 9 January 2007, accepted 31 May 2007)

Abstract

Recent evidence has demonstrated that the pollutant recirculation can play an important role in leading to high ozone (O₃) concentrations. In this study, the MM5-CAMx air quality modeling system was applied to simulate the pollutant recirculation and identify the transport of pollution during the high O₃ event (the maximum O₃ of 195 ppb) observed in the Greater Seoul Area (GSA) on 1~4 June in 2004. The results showed a weak northeasterly synoptic wind during the night and early morning moved the air parcels containing the locally emitted urban pollution to the coast, which contributed to enhance O₃ formation in the southwest part of the GSA. As the sea breeze developed and started to penetrate inland in the late afternoon, the rapid build-up of O₃ concentration was found in the southwest coastal area due to the recirculation of the polluted air loaded with high level O₃. The simulated backward trajectories and observations at coastal sites confirmed the recirculation of pollutant with the late sea breeze is the dominant factor affecting the occurrence of high O₃ concentrations in the southwestern GSA.

Key words : Ozone, MM5-CAMx, Sea breeze, Recirculation

1. 서 론

2004년 우리나라의 오존오염은 아주 심각한 수준

이었다. 전국적으로 156회에 달하는 오존주의보가 발령되었고 이는 최근 통계치(2001년 29회, 2002년 45회, 2003년 48회, 2005년 84회)와 비교해 볼 때 월 등히 높은 수치임을 알 수 있다(환경부, 2006). 특히 이 중 6월 한 달간 수도권지역에서만 74회(서울 7

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : kimyk@pusan.ac.kr

회, 인천 5회, 경기 62회)가 집중되는 특징은 크게 주목할 만하다.

따라서 오존오염 제어 및 예측의 필요성이 크게 요구되는 지금, 2004년 6월과 같은 심각한 수준의 오존오염 사례를 대상으로 한 현상 진단과 원인 분석에 대한 연구의 필요성은 매우 크다. 특히 배출원이 집중되어 있는 서울보다 경기지역에서 탁월하게 오존농도가 높게 나타난 점을 고려해 본다면 2004년 6월 사례에 대한 분석은 지역 내 대기오염물질 수송에 기여하는 기상적 역학적 효과를 파악할 수 있는 연구로 중요한 의미가 있다.

그동안 발표된 다수의 서울 및 수도권지역 고농도 오존 사례연구들을 통해 오존분포특징과 고농도현상의 주요 원인이 제시되었다. 대부분이 약한 풍속조건하에 국지배출의 영향으로 서울을 중심으로 한 고농도분포가 나타나고 해풍의 역할이 지역의 오존오염 현상을 심화시키는 주된 원인으로 분석되었다(김영성과 오현선, 1999; 오현선과 김영성, 1999; 정용승과 정재섭, 1991). 하지만 종관풍과 결합된 지상의 바람

특성에 따라 수도권의 오존 고농도역이 다르게 분포하며(김철희 등, 1999), 고농도 현상이 서울에 국한되지 않고 다양한 패턴으로 나타날 수 있음이 최근 확인되었다(오인보 등, 2005; 국립환경과학원, 2004). 이는 수도권 오존오염현상을 이해하기 위해서는 도시/지역규모의 대기오염물질 수송과 대기질 변동을 정확히 파악해야 함을 의미한다. 결과적으로 대상지역 내 기상/대기질 관측 자료와 관측 자료의 한계를 보완해줄 신뢰성 있는 상세 모델링으로 특징 있는 오존오염 사례들의 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 현재 미국과 유럽지역을 중심으로 대기질 평가를 위해 폭넓게 활용되고 있는 광화학 모델인 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) (Zunckel *et al.*, 2006; ENVIRON, 2005; Chen *et al.*, 2003)와 기상장 모델인 MM5 (NCAR/PSU Fifth Generation Mesoscale Model) (NCAR, 2005; Dudhia, 1993)를 사용하여 2004년 6월 수도권지역에 나타난 대기오염물질 재순환현상과 오존오염 사례를 수치모의하였고, 대기오염물질의 수

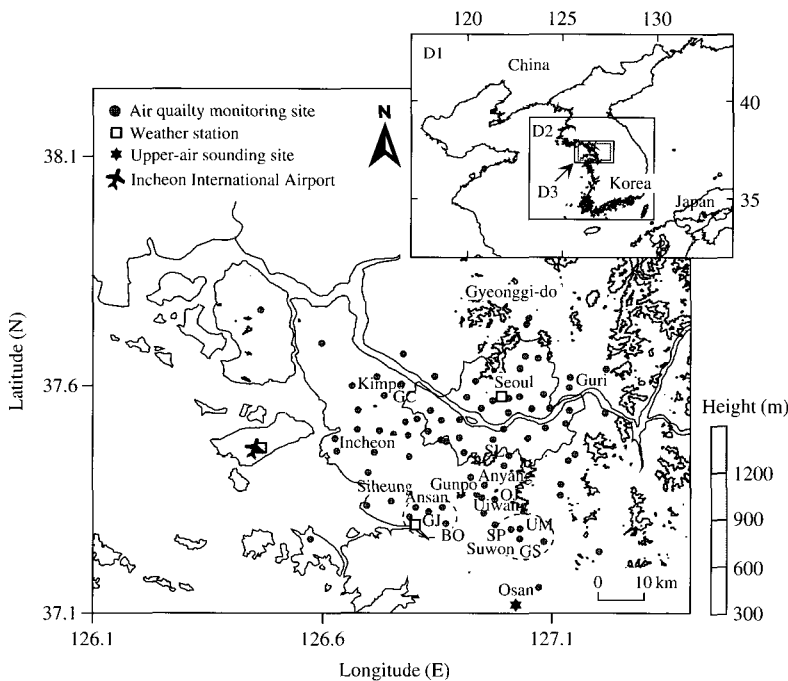


Fig. 1. Three nested domains in MM5 (black rectangles), one domain in CAMx (gray rectangle) and map of the Greater Seoul Area (GSA) showing the location of observation sites and topographical features. GC, SL, OJ, BO, GJ, UM, SP, and GS indicate Gochon, Silim, Ojeon, Bono, Gojan, Uman, Sinpung, and Gwonseon, respectively.

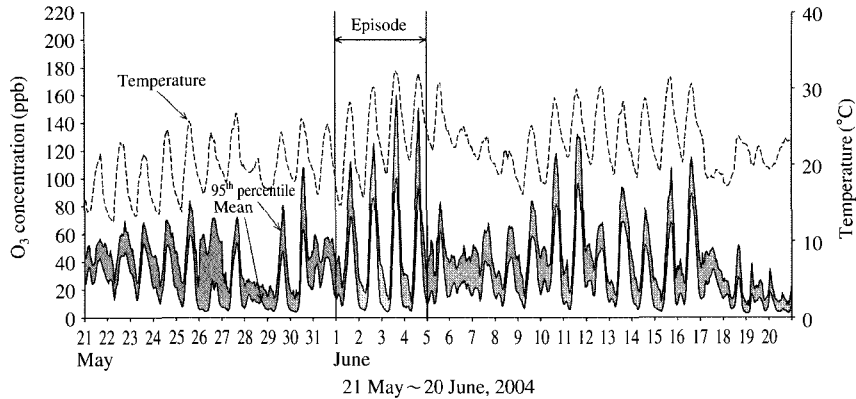


Fig. 2. Hourly variations in mean and 95th percentile O₃ concentrations and temperatures from 21 May to 20 June, 2004.

Table 1. Ozone statistics during ozone episode (June 1 ~ 4, 2004).

Date (m/d)	Averaged daily max. O ₃ concentration (ppb)	Daily max. O ₃ concentration ^a (ppb)	Percentage of sites exceeding standard levels ^b	
			> 100 ppb	> 120 ppb
6/1	85.3 ± 20.1	131 (Sillim, Seoul)	19.5	5.2
6/2	93.3 ± 21.0	138 (Pyeongteak, Gyeonggi)	36.8	13.2
6/3	109.9 ± 32.2	195 (Ansan, Gyeonggi)	57.5	35.0
6/4	104.6 ± 29.5	173 (Gimpo, Gyeonggi)	51.3	28.8

^aThe name of monitoring sites where the highest O₃ level was observed in GSA area is in parenthesis.

^bThe number of available sites are varying from 76 to 80.

송현상과 심각한 오존오염을 유발시킨 주요 원인을 분석하였다. 주요 내용으로는 선정된 사례기간의 수도권지역 오존분포 및 주요 기상조건을 전반적으로 조사하였고, 후방궤적 분석과 함께 수평 바람장 및 오존분포를 모델결과를 중심으로 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 사례기간의 선정

본 연구에서는 수도권지역을 대상으로(그림 1), 6월 중 최고 오존농도(195 ppb, 경기도 안산 분오동)가 기록된 6월 3일을 전후로 4일간(1~4일)을 사례기간으로 선정하였다. 그림 2는 2004년 5월 21일부터 6월 20일까지 서울을 포함한 수도권 대기질 측정망에서 기록된 오존농도(측정소 전체평균과 95 percentile)와 동일기간 과거 서울기상청 AWS에서 관측된 기온의 시간별 변화를 나타낸 것으로 사례기간

전후의 오존농도 증감 모습과 기온과의 전반적인 관계를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 사례기간인 6월 1일부터 오존농도의 상승이 뚜렷하며 3일 오후에는 평균농도가 109.9 ppb로 환경기준치(1시간 평균 100 ppb)를 초과하는 심각한 오존오염현상이 나타났다.

사례기간동안 오존농도의 일중 뚜렷한 정점과 큰 폭의 일변화 경향을 볼 수 있는데, 이는 사례기간에 나타난 높은 기온조건과 함께 광화학적 오존생성이 활발히 일어났음을 의미한다. 사례기간의 오존농도 수준은 표 1에서 제시된 평균농도와 최고값, 기준치 초과 측정소 백분율을 통해 보다 자세히 살펴볼 수 있다. 특히, 3일은 전체 측정소 중 35%가 오존주의보 수준(1시간 평균 120 ppb)을 초과하여 넓은 지역에 걸쳐 심각한 고농도 현상이 나타났다.

사례기간 이후 좋지 못한 기상조건(운량증가, 풍속 증가 등, 여기서는 제시되지 않음)으로 급격히 오존농도가 감소하였고, 6월 중·하순에는 사례기간의

Table 2. The grid settings and physical options used in the MM5 and CAMx.

Model	Item	Option		
		DM1	DM2	DM3
MM5	Grid size (km)	27	9	3
	PBL scheme	MRF	MRF	MRF
	Cumulus scheme	Grell	-	-
	Radiation scheme	RRTM	RRTM	RRTM
	Moisture scheme	mix phase	mix phase	mix phase
CAMx		DM1		
	Grid size (km)	3		
	Horizontal advection	PPM		
	Vertical advection	Implicit		
	Gas-phase chemistry	CB4 with updated isoprene chemistry		
	Gas-phase chem. solver	CMC fast solver		

수준에는 못 미치지만 몇 차례 높은 농도가 다시 기록되었다. 또한 그림 2를 통해 일 최고기온의 상승이 오존농도 상승과 통계적으로 유의한 높은 상관($R=0.782, p<0.05$)을 보여 수도권지역의 오존오염이 전반적으로 광화학 오존 생성 정도와 관련함을 알 수 있다. 하지만 기온수치만으로는 오존농도의 다양한 시간변화를 설명할 수 없음을 그림에 나타난 두 인자간의 정량적인 비교를 통해 확인할 수 있었다.

2.2 모델의 적용

본 연구에서 사용된 모델은 중규모 기상모델인 MM5 (v.3.6)와 광화학모델인 CAMx (v.4.2)이며, 각 모델에서 사용한 물리·화학 조건은 표 2에 나타내었다. MM5 모델링은 사례기간에 대해 3번의 Nesting (수평 격자간격: 27 km, 9 km, 3 km)을 거쳐 수행되었다. 연직으로는 30개의 층을 가지고, 첫 번째 모델링 영역은 37.52°N, 126.00°E을 중심으로 60×48 격자, 두 번째와 세 번째 모델링 영역은 각각 64×61, 67×49 격자로 구성되어 중규모순환과 대기오염물질 수송을 충분히 설명할 수 있도록 설정하였다(그림 1 참고). 초기 및 경계조건으로는 기상청에서 제공하는 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) (기상청, 2002)를 사용하였으며 대상지역 내 존재하는 AWS의 3시간 간격 자료와 6시간 간격의 오산 상층관측자료를 이용하여 기온, 풍향, 풍속에 대하여 관측치 nudging을 수행하였다.

CAMx는 3차원 다중격자 오일리안 광화학 확산모

델로 도시규모에서 지역규모까지의 대기오염 현상을 평가할 수 있다. 모델의 구성은 지형조건, 화학반응 계산, 기상 입력 과정, 초기 및 경계조건 계산, 배출량 입력과정과 농도 계산과정으로 이루어져 있다(ENVIRON, 2005). 화학 메커니즘에서는 CB4와 SAPRC99 중 사용자가 선택할 수 있다는 장점 외에도, NCAR (The National Center of Atmospheric Research)에서 개발한 TUV 광분해모델과 RADM (the Regional Acid Deposition Model)을 이용하여 광분해에 영향을 미치는 구름효과를 좀더 상세하게 제공함으로써 모델의 예측능력을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 사례기간 중 가장 심각한 오존오염을 나타내었던 6월 3일을 포함하여 3일동안 모델링이 수행되었고, 첫날 24시간은 초기적응 시간으로 사용되었다. 모델링 영역은 59×44 격자(수평 격자간격 3 km)로 구성되었으며(그림 1 참고), 연직적으로는 3 km 고도 이하 8개 층(0.999, 0.988, 0.973, 0.945, 0.910, 0.840, 0.760, 0.680)을 설정하였다.

기상입력자료는 MM5의 마지막 영역(3 km 격자간격)의 모델링 결과에서 추출한 시간별 기상요소(기온, 바람, 습도, 고도별 기압, 연직 확산계수, 운량/강수)를 사용하였다. 모델의 초기조건과 경계조건은 기본적으로 ENVIRON (2005)에서 제공하는 물질별 농도수치를 근간으로 생성하였다. 지상 관측 자료가 존재하는 물질(오존, NO₂, CO)의 경우, 모델 최하층 초기조건은 관측치를 격자에 맞게 내·외삽된 농도를 사용하였고, 경계조건은 모델영역 경계에 인접한 관측치와 ENVIRON (2005) 자료에 제공된 연직변화를 고려하여 생성시켰다. 모델링에 사용된 화학 메커니즘은 CB4 메커니즘(96개의 화학반응, 37개 물질 고려)이고, ENVIRON (2005)에서 개발된 CMC 솔버 (Chemistry solver)를 사용하여 계산하였다.

배출량 입력자료는 2001년 대기보전 정책지원시스템(CAPSS)의 일환으로 산정된 배출량을 사용하였다(국립환경과학원, 2004). CAPSS 배출량은 전국을 대상으로 1 km × 1 km 격자로 되어 있으며 배출원을 크게 10개의 대분류로 나누고, 각 대분류는 다시 중분류 및 소분류로 나누어 산정하고 있다. 모델에서 요구하는 시간별 배출량 입력자료를 생성하기 위해, 국립환경과학원(2004)에서 제시한 월별, 요일별, 시간별 분배계수를 사용하여 사례기간동안의 배출량을 계산하였으며 구체적인 산출과정 및 방법은 국립환

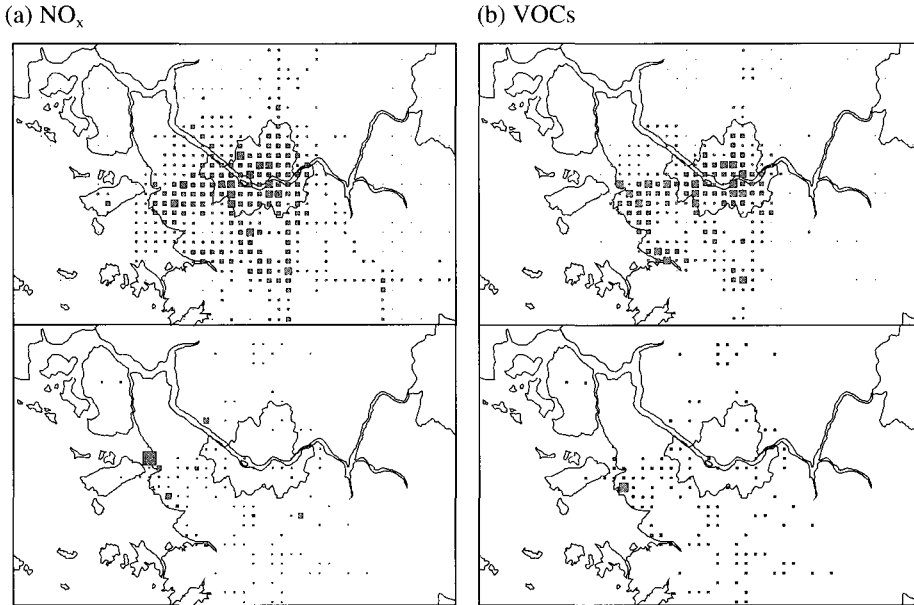


Fig. 3. Distributions of annual total amount of (a) NO_x and (b) VOCs emissions ($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$). Top two panels are area/line emissions and bottom two panels are point emissions. The size of shaded rectangles are proportional to the emission amount. The largest area/line emission is $2,702 \text{ ton yr}^{-1}$ for NO_x and $4,166 \text{ ton yr}^{-1}$ for VOCs, and the largest point emission is $6,776 \text{ ton yr}^{-1}$ for NO_x and $2,088 \text{ ton yr}^{-1}$ for VOCs.

경과학원(2004)에 제시되어 있다. 그림 3은 대상지역 내 위치하는 면/선오염원 및 점오염원의 NO_x 와 VOCs의 연간 분포를 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 격자단위로 배분해서 나타낸 것으로 서울과 인천, 경부고속도로와 시흥, 안산지역의 산업/공업단지가 위치한 연안에서의 높은 수치가 특징이다.

3. 사례기간의 오존농도 분포와 기상조건

그림 4와 5를 통해 사례기간동안의 전반적인 농도 분포와 종관규모의 기상조건을 제시하였다. 먼저 그림 4는 2004년의 일 최고 오존농도의 연평균 수평분포와 6월 1일부터 4일까지의 일 최고 오존농도의 수평분포를 나타낸 것으로 사례기간의 농도분포 특징을 알 수 있다. 공통적으로 서울의 중심보다는 외곽과 경인지역에서 오존농도가 높게 나타나는 분포를 보인다. 이는 NO_x 가 풍부한 도심 보다는 인근 풍하 지역에서 광화학적 오존축적이 잘 나타남을 의미한다. 하지만 연평균 분포에서는 상대적인 고농도가 서

울의 외곽과 경인지역에 비교적 고르게 분포함에 반해, 사례기간에는 안산, 수원, 군포, 의왕을 포함한 수도권 남서쪽 지역에서 집중적인 고농도가 나타나는 특징을 보인다. 이와 같은 특징은 최고농도가 나타난 3일에 가장 뚜렷하며 안산 본오동(195 ppb), 수원 신풍동(174 ppb), 수원 권선동(174 ppb), 수원 우만동(167 ppb), 의왕 오전동(166 ppb) (그림 1 위치 참고) 순으로 일 최고 오존농도가 높게 기록되었다. 이러한 사례기간의 특징 있는 농도분포는 상당부분 오염물질 수송에 의한 가능성을 보여준다.

사례기간 기상조건은 경우, 지상일기도에 제시된 기압배치는 큰 변화 없으며, 수도권지역이 고기압의 지속적인 영향을 받으며 맑은 날씨가 나타났음을 보여준다(그림 5 참고). 즉 높은 기온과 함께(그림 2 참고) 오존의 광화학적 생성에 좋은 기상조건이 형성되었음을 알 수 있다. 하지만 우리나라 서쪽에 위치한 지상 고기압의 약한 움직임은(1일 한반도 남서해상에 위치한 고기압 중심이 다소 북상하여 2일 이후 수도권 북서해상에 위치함) 종관풍계의 변화(서풍계열에서 북풍계열)를 예상할 수 있는 부분이다.

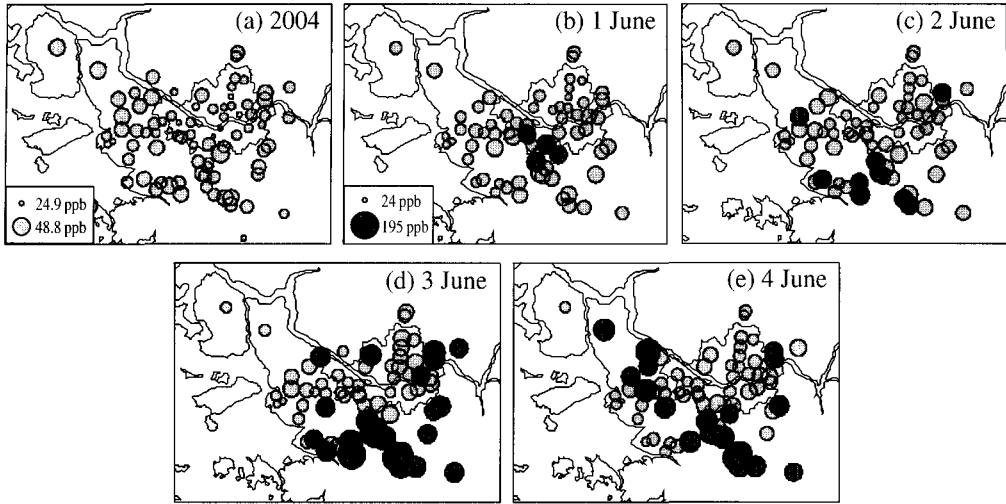


Fig. 4. Horizontal distributions of the averaged daily maximum 1-h O_3 concentrations during (a) 2004 and (b~e) 1~4 June, 2004. Dark gray circles indicate the concentrations exceeding 120 ppb.

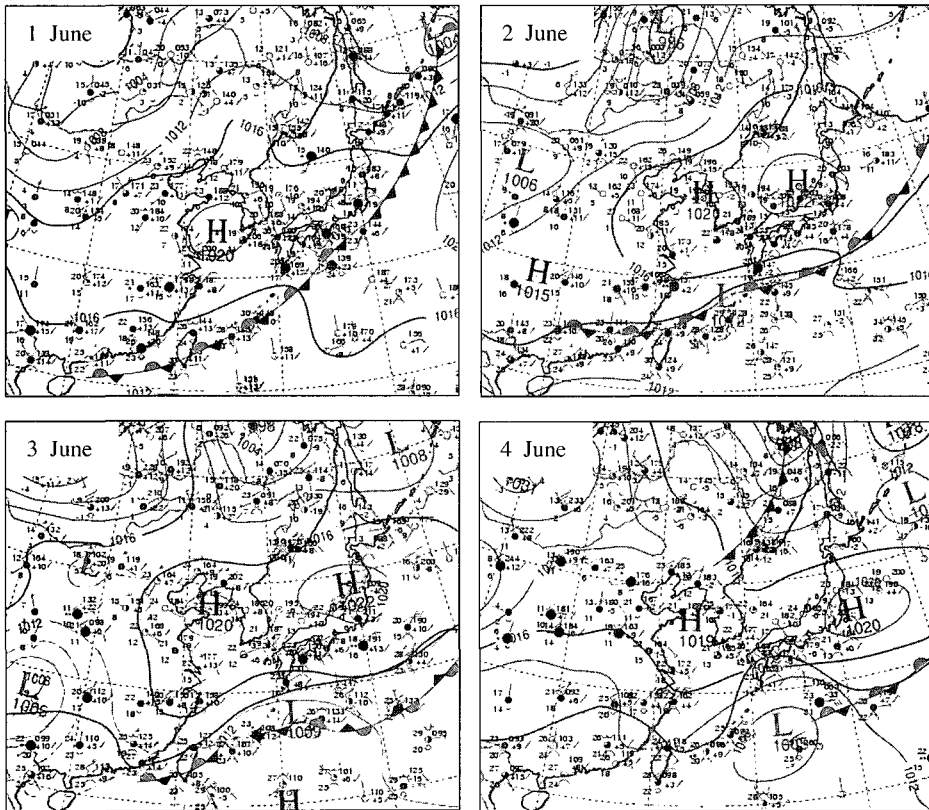


Fig. 5. Surface weather maps at 0900 LST for 1~4 June, 2004.

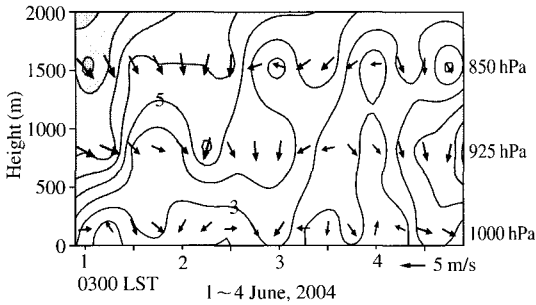


Fig. 6. Vertical profiles of winds with height (1,000 hPa, 925 hPa, and 850 hPa) observed at Osan upper air site for 1~4 June, 2004. Shade levels with contours represent wind speed.

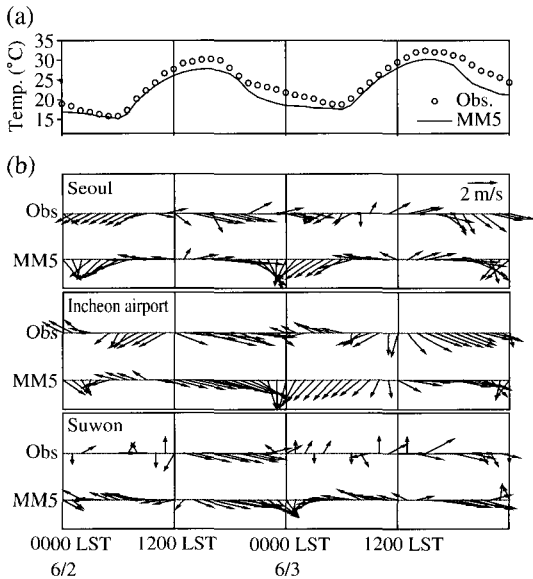


Fig. 7. Hourly observed and simulated (a) temperature at Seoul weather station and (b) wind vectors at three sites in GSA for 2~3 June, 2004.

그림 6은 사례기간동안 경기도 오산에서 6시간 간격으로 관측된 상층바람의 변화를 나타낸 것으로 수도권지역 대기하층의 연직적 풍계변화를 파악할 수 있다. 1,000 hPa 고도(평균 149 m)에서는 지상의 국지풍(주로 해륙풍)의 발달로 인해 주야간의 풍향 변화가 크지만 전반적으로 북풍계열의 바람이 탁월하다. 이는 앞서 제시된 지상일기도의 기압배치를 잘 설명한다. 북풍계열의 바람은 비교적 지상마찰의 영

향이 적은 925 hPa(평균 823 m)와 850 hPa(평균 1,543 m)의 바람에서 보다 뚜렷하다. 특히 2일 야간부터 3일 오전까지 나타난 북 내지 북동풍은 3일 오후 경기도 남서/남쪽 고농도오존 현상의 중요한 원인으로 이후 분석에서 알 수 있다.

종관풍의 영향은 지상바람 분포에서 확인된다. 인천국제공항 AWS(연안에 위치하며 주변 지형의 영향이 적음)에서 관측된 2일과 3일의 지상바람의 경우(그림 7), 전반적으로 풍계의 순환이 나타났고 특징적으로 3일 오전에는 종관풍과 육풍이 결합된 북동계열의 바람이 지배적임을 볼 수 있다. 또한 3일 낮, 풍향의 전환(북동에서 북서) 시점이 정오 이후에 관측되어 해풍발생을 억제시키는 종관풍의 영향을 반영하고 있다.

결과적으로 사례기간 나타난 종관규모의 기류변화와 결합된 특징적인 지상풍은 대기오염물질의 수송에 영향을 주고, 상기 언급한 특징 있는 오존분포를 형성시키는 중요한 원인으로 작용할 수 있다.

4. MM5-CAMx 모델링 결과

수도권지역에서 심각한 오존오염 현상이 나타난 6월 3일을 대상으로 그 현상과 원인에 대해 상세히 분석하였다. 먼저 MM5 모델링을 통해 얻어진 종관 기류/지상 바람장과 후방궤적을 분석하였고, 아울러 CAMx에서 계산된 오존과 NO₂의 수평분포의 시간적 변화를 통해 대기오염물질의 재순환현상을 파악하였다.

4.1 모델검증

모델링 결과 분석에 앞서, MM5와 CAMx 모델링 결과에 대한 신뢰성을 관측치와의 비교를 통해 평가하였다. 표 3은 MM5에서 계산된 최하층(Sigma level = 0.999) 기온 및 바람(u, v) 값에 대한 평가로, 대상 지역의 주요 세 지점(서울기상청 AWS, 인천공항 AWS, 수원기상청 AWS)에서 모델링기간 동안 관측된 수치와 비교하여 계산된 통계치이고, 그림 7은 동일지점에서 2일과 3일 동안의 모델값과 관측값의 시간별 변화를 보여준다.

전반적으로 모델이 기온과 바람에 대해 다소 과소 평가하는 결과를 보였으나(표 3의 mean bias 참고)

Table 3. Model performance statistics calculated for temperature and wind.

Variables	Temperature	Wind (Wind speed $\geq 0.5 \text{ m s}^{-1}$)		
		Wind speed	U-component of wind	V-component of wind
Mean obs.	22.41	2.10	1.05	-0.32
Mean sim.	21.45	2.01	0.78	-0.47
Mean bias	-0.96	-0.09	-0.27	-0.15
R	0.96	0.41	0.70	0.15

모델값이 관측값의 변화패턴을 비교적 잘 설명함을 그림 7에서 알 수 있다. 상관도의 경우, 기온은 0.96의 높은 수치가 나타난 반면, 풍속과 u 성분은 각각 0.41, 0.70의 상관도를 각각 나타내었다. 비교적 낮은 풍속 상관도는 일반적으로 모델이 지상 바람에 영향을 주는 복잡한 지형 및 건물 효과 등을 고려하지 못하기 때문으로 해석된다(오현선 등, 2002; Hogrefe *et al.*, 2001). v 성분의 경우, 0.15의 매우 낮은 상관도를 보였는데, 이는 v 성분 풍속이 매우 약하기 때문에 방향에 대한 상관성은 큰 의미가 없다.

CAMx에서 계산된 6월 3일의 시간별 오존농도를 84개 대기질 측정망에서의 관측값과 비교한 결과, 0.67의 유의한 상관관계를 보였다. 그림 8은 각 지점별 3일의 일 최고 오존농도의 모델결과와 관측치를 비교한 것으로 대체적으로 모델값이 관측값보다 낮지만 비교적 양호한 상관도를 보였다(slope=0.42, R=0.51). 또한 US EPA (1991)에서 권장하는 모델 평가 통계값인 UPA (Unpaired Peak Prediction Accuracy)의 경우 -17%로 기준인 (\pm)15~20%를 만족하여 모델의 결과를 바탕으로 한 현상 해석이 가능하리라 판단된다.

4. 2 지상바람과 궤적 분석

사례기간 중 6월 3일에 기록된 매우 높은 오존농도와 특징적인 공간적 분포를 이해하기 위해서는 모델 결과를 바탕으로 한 시·공간적 바람 분포의 변화와 기류특징에 대한 이해가 필요하다. 그림 9는 주요 시간대(0400, 1200, 1500, 1800 LST)를 대상으로 MM5 모델링 결과 산출된 한반도 중심의 기류패턴과 수도권지역의 지상 바람장 및 풍속(모델 최하층 고도 $\sigma=0.999$)을 나타낸 것이다. 새벽인 0400 LST의 경우, 전반적으로 북동기류가 수도권 상공에 지배

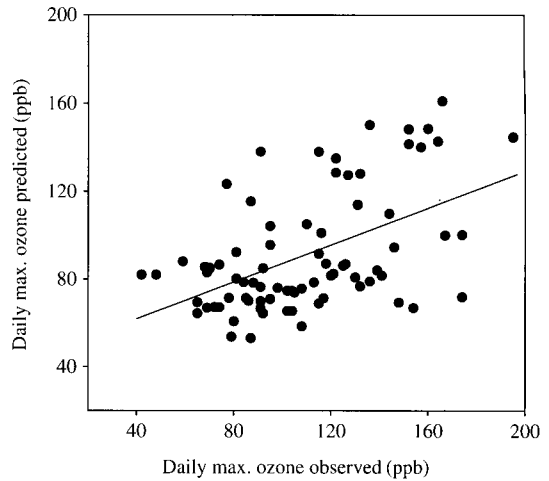


Fig. 8. Comparison of the observed and simulated peak O₃ concentrations at monitoring sites in the GSA on 3 June, 2004. The dashed line indicates the linear regression.

적임을 볼 수 있다. 지상 바람의 경우, 내륙에는 지형 효과(그림 1 참고)를 반영하는 다소 복잡한 바람분포가 나타나나 영역 전반에 걸쳐 북 내지 북동계열의 바람이 우세하다. 지상 마찰이 적은 해상에서의 바람은 큰 규모의 기류방향과 잘 일치한다. 이는 배출이 풍부한 서울과 인천지역의 오염공기괴가 탁월한 북동기류를 따라 풍하측인 인근지역과 서해로 이동함을 예상할 수 있다.

1200 LST에는 한반도 서쪽 연안에서 북 내지 북서계열의 기류로 전환되고 수도권지역 지상풍에서는 서해 연안을 따라 상당한 기류 변화가 있음을 볼 수 있다. 이는 해풍의 발달이 주된 원인으로, 특히 경기만 연안에서 나타나는 풍향반전(backing)현상은 바다상에 축적된 오존을 연안으로 수송시키는 역할을 할 수 있다. 내륙에서는 이전시간과 비교해 전체적으로 풍향의 전환이 나타났고, 서울의 서쪽과 인천지역은 종관풍(북 내지 북동기류)의 영향을 받아 해풍의 발달이 억제되고 있음이 알 수 있다.

1500 LST의 경우, 수도권은 전반적으로 북서기류의 영향을 받고 있으며 연안으로부터 내륙으로 해풍 침투가 시작되는 모습이다. 특히 수도권 남서쪽 시화, 반월공단이 위치한 저지대를 중심으로 뚜렷하다. 해풍의 발달시기를 고려해 볼 때, 강한 일사와 높은

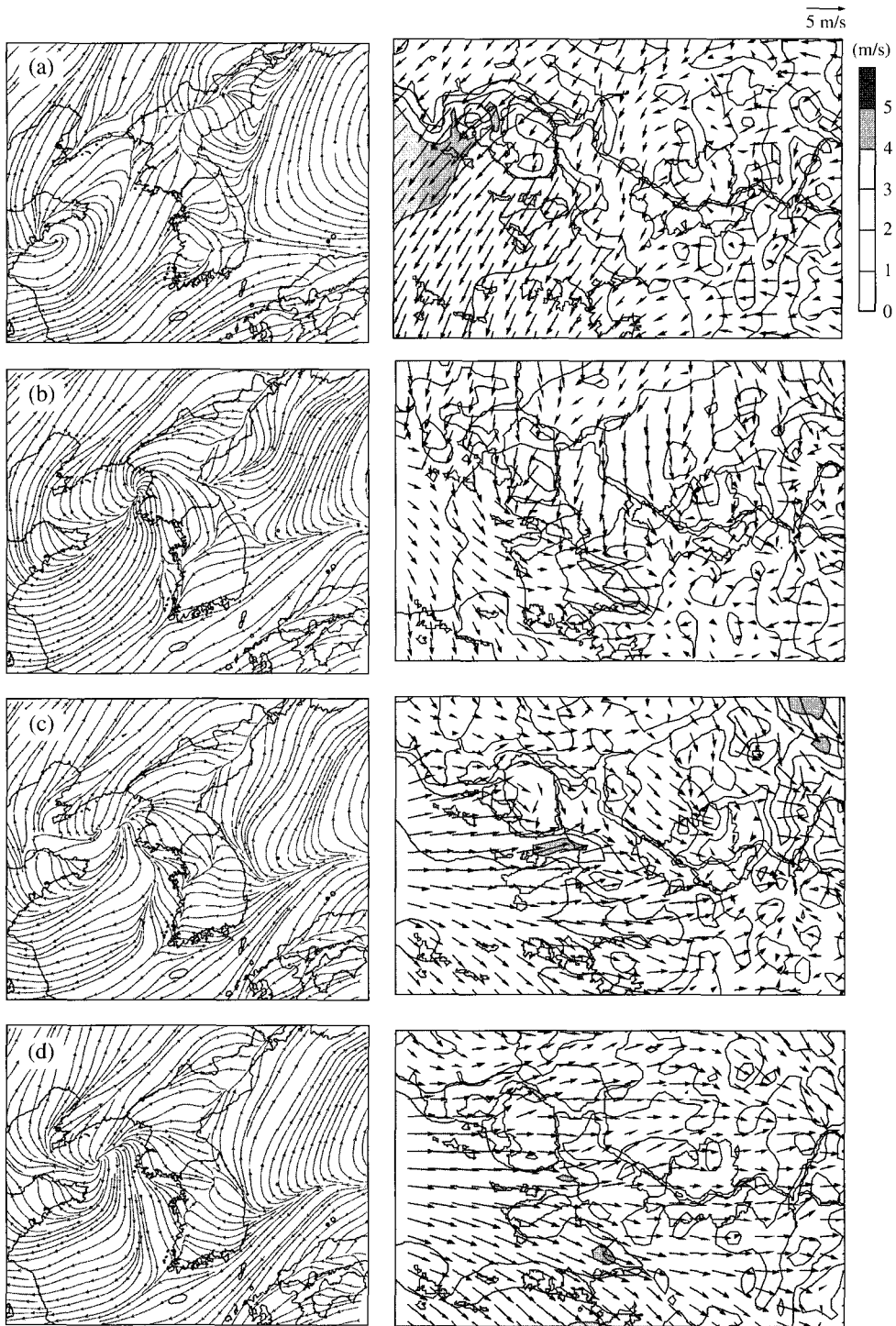


Fig. 9. Surface streamlines (left panels) and wind fields (right panels) with the shaded horizontal wind speed as the background from MM5 at (a) 0400, (b) 1200, (c) 1500, (d) 1800 LST on 3 June, 2004.

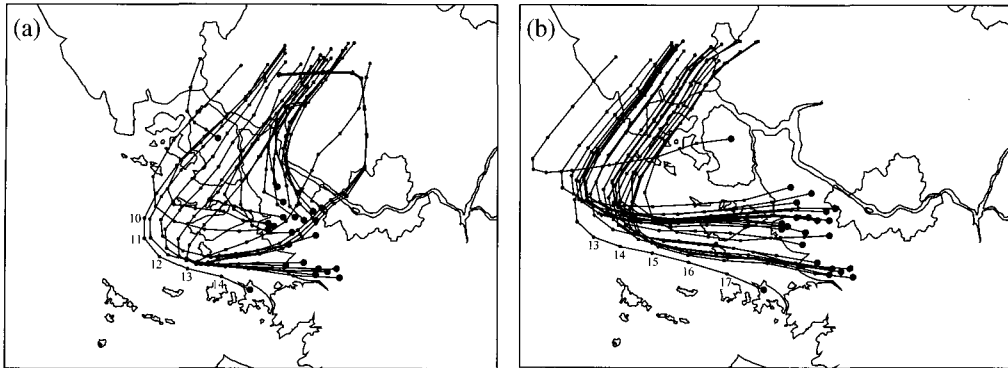


Fig. 10. Simulated 20-h backward trajectories (1-h interval) from MM5-HYSPLIT4 arriving at the coastal area (large dots) at (a) 1500 LST, (b) 1800 LST on 3 June, 2004. The small dots and numbers along the trajectories indicate hourly locations and hours (LST), respectively.

기온조건하에 발달된 해풍은 상당수준의 오존을 포함한 오염된 공기피임을 예상할 수 있다. 또한 수도권 서쪽에는 해풍에 의해 이전 시간보다 강해진 서풍 내지 북서풍을 볼 수 있는데, 이 역시 이전 시간대의 바람분포와 함께 고려해보면 서울의 서쪽과 인천의 오염공기피가 서울의 남쪽으로 이동할 수 있음을 시사한다. 이는 지상으로 제한되지 않으며 1~2 km의 대기경계층 내의 오염공기피 이동을 고려할 수 있다.

1800 LST가 되면서 서 내지 북서기류가 탁월해졌고 지상 바람장에서는 영역 전반으로 서풍이 지배적인 모습이다. 이는 이전 시간대와 비교해 해풍유입이 내륙으로 보다 깊숙이 이루어졌기 때문이며 이로 인해 연안의 오염공기피가 풍하측인 수도권지역의 동쪽으로 이동함을 예상할 수 있다. 이상과 같은 결과는 3일에 나타난 수도권 남서지역에서의 오존고농도 현상(그림 4 참고)이 종관규모의 기류 흐름과 지상 바람장의 상호 작용에 의해 설명될 수 있음을 보여준다.

보다 명확한 진단을 위해 MM5 모델결과를 입력 자료로 하여 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 수행하였고, 그 결과 계산된 주요 시간대의 후방궤적을 분석하였다. 각 궤적의 출발은 10 m 지상고도에서 시작되었고 20 시간 동안(1시간 간격) 계산하였다. 그림 10은 6월 3일 최고 오존농도를 기록하였던 안산을 포함해 연안에 위치한 대기질 측정망을 대상으로 각각 1500

LST와 1800 LST에 출발한 후방궤적을 나타낸다. 앞서 분석된 주요 시간대의 지상 바람장 변화에서 예상할 수 있듯이 1500 LST와 1800 LST에 출발시점에 영향을 미치는 기류의 기원이 다름을 알 수 있다.

1500 LST에서는 3일 새벽과 오전시간대에 나타났던 북동 계열의 풍계로 인해 북동쪽에서 시작된 기류가 남쪽으로 이동한 후 해풍의 발달과 함께 내륙으로 재순환(recirculation)되는 모습이다. 특히 심각한 고농도가 나타났던 안산지역은 수도권 서쪽의 오염된 공기피가 인근 해양으로 나가고 이후 해풍발달과 함께 해상에서 축적된 오존이 영향을 미칠 수 있음을 그림에서 확인할 수 있다. 이러한 오염물질의 재순환과정은 여러 연구에서 연안지역 오존농도 상승의 주요 원인으로 제시된 바 있다(Oh *et al.*, 2006; Alper-Siman Tov *et al.*, 1997). 이 후 1800 LST에는 기류의 기원이 달라지며 상대적으로 청정한 해양공기의 영향이 궤적출발지점에 미침을 알 수 있다. 이는 이후 분석될 1800 LST 오존농도 분포에서 나타난 안산지역의 농도감소를 잘 뒷받침해준다.

수평바람장과 후방궤적분석을 통해 확인된 오염공기피의 재순환과정은 연안지역 대기질 자료분석을 통해 그 영향을 파악할 수 있다. 그림 11은 3일 안산 AWS에서 측정된 바람 일변화와 고잔 측정소(그림 1 참고)에서 사례기간동안 관측된 주요 대기오염물질의 일변화를 6월 평균된 하루 시간별 변화와 함께 나타낸 것이다. 고잔 측정소는 안산에 위치한 대기질 측정소 중 공단지역을 제외하고 연안과 가장 인접해

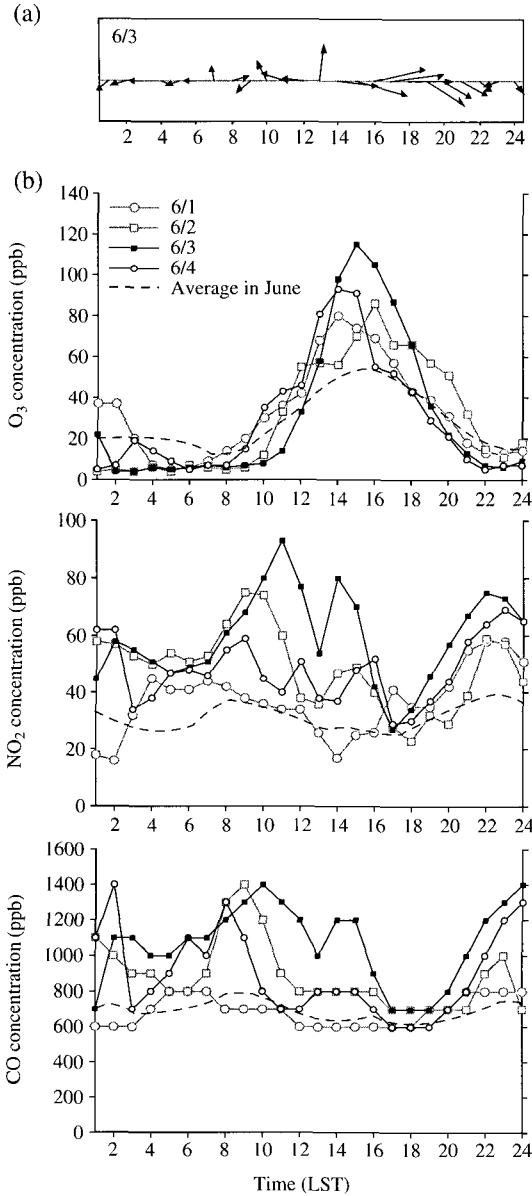


Fig. 11. Diurnal variation of (a) wind vectors observed at Ansan weather station on 3 June and (b) O₃, NO₂ and CO concentrations observed at Gojan site in Ansan for 1~4 June, 2004. Dick dashed lines indicate the averaged concentrations during June, 2004. Maximum wind vector corresponds to 5.5 m s⁻¹.

있으며 재순환되어 오는 기류의 영향을 잘 파악할 수 있는 곳이다.

그림에서 전반적으로 사례기간의 모든 오염물질 농도가 높게 나타났다. 이는 사례기간에 수일간 지속된 해륙풍 순환계에 영향을 반영하는 결과로 예상된다(그림 7 참고). 특히 3일의 경우, 6월의 평균과 큰 차이로 높은 대기오염물질 농도가 나타나며 해풍의 영향이 시작되는 시점으로 농도상승을 뚜렷이 볼 수 있다. 측정소 위치의 한계로 인해 연안에 위치한 반월산업단지, 시흥공업단지에서 배출된 대기오염물질의 영향을 완전히 배제할 수는 없다. 하지만 6월 평균된 농도와는 달리 1300~1700 LST 사이에 나타난 NO₂, CO의 높은 농도는(특히 해풍유입 시간에 나타난 CO 농도의 상승) 앞서 기술한 수도권 서쪽으로부터 배출된 오염공기괴의 재순환과정을 잘 뒷받침해 준다.

4.3 오존 모델링

6월 3일에 나타난 남서지역 오존고농도 현상을 CAMx 모델링을 통해 재현하고 그 결과를 분석하였다. 그림 12는 수도권내 대기질 측정망에서 관측된 1시간 평균 오존농도와 CAMx에서 계산된 오존 및 NO₂의 수평분포를 나타낸 것이다. 앞서 제시된 MM5 모델링 결과와 마찬가지로 주요시간대인 0400, 1200, 1500, 1800 LST의 농도분포 특징을 중심으로 기술하였다.

새벽인 0400 LST의 경우, 대부분의 지역에서 20 ppb 이하의 낮은 오존농도 분포가 관측되었으며, 서울 및 서울의 서쪽과 인천, 그리고 서울외곽 남쪽으로 보다 뚜렷하다. 이러한 패턴은 CAMx 모델링 결과와 일치하는 것으로 오존의 화학적 소멸에 관여하는 NO 배출과 복동기류(그림 9 참고)에 의한 수송의 영향으로 해석된다. NO₂ 모델링 결과는 이를 뒷받침한다.

1200 LST의 경우, 관측된 오존농도는 김포와 구리 지역(그림 1 위치 참조)에서 95 ppb가 기록되었고 NO 배출이 풍부한 서울과 서울외곽 서쪽에 비해 타 지역의 오존농도가 상대적으로 높은 분포이다. 이러한 분포는 오존의 광화학적 축적이 배출원의 인근 지역에서 나타나는 일반적인 모습이다(MacDonald *et al.*, 2001; Mckendry, 1993). 모델결과는 김포지역의 농도가 다소 과소평가되었으나 이 지역을 제외하고는 관측치 패턴을 잘 재현하고 있다. 특히 수도권 남서해상에 나타난 높은 NO₂ 농도 분포는 이전시간 연

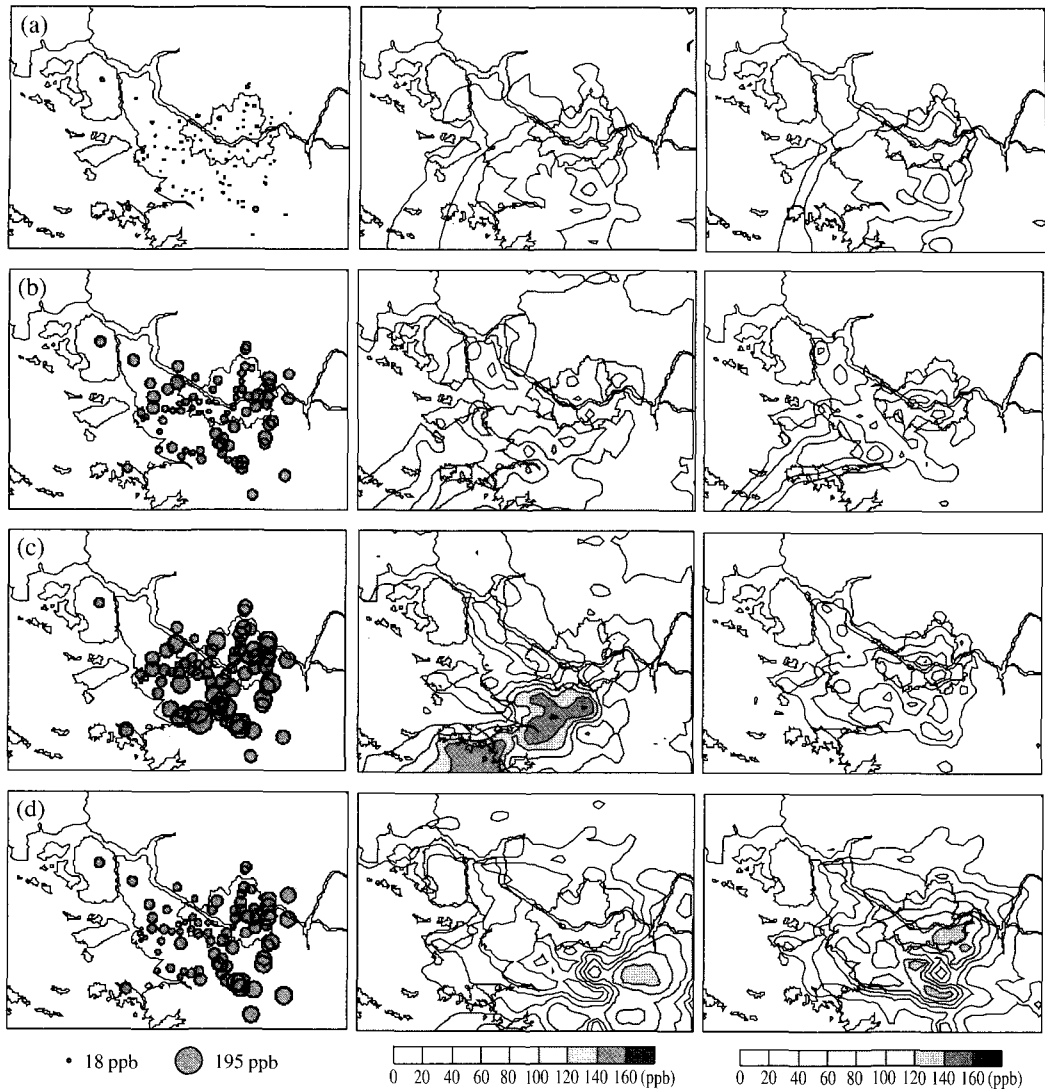


Fig. 12. Horizontal distributions of the observed 1-h average O_3 (left panels) and the simulated O_3 (middle panels) and NO_2 (right panels) concentrations from CAMx in GSA at (a) 0400, (b) 1200, (c) 1500, (d) 1800 LST on 3 June, 2004.

안지역 오염물질의 이동을 의미하며, 이 후 풍부한 일사조건에서 오존이 축적되고 해풍의 발달과 함께 내륙으로 수송될 수 있음을 보여준다.

1500 LST 관측치 분포에서는 수도권 남서지역을 중심으로 고농도오존 현상이 뚜렷하고, 특히 안산지역에서는 195 ppb의 매우 높은 오존농도가 기록되었다. 모델링 결과는 서울과 인천지역 농도가 다소 과소평가되었으나 수도권 남서지역의 고농도는 잘 재

현하였다. 이는 해풍이 수도권 남서쪽 저지대를 중심으로 발달하고 그 기류의 수렴이 존재하는 곳에서 오존농도가 상승하는 결과로서 해풍에 의해 유입된 공기괴가 풍부한 오존 및 전구물질들을 포함하고 있음을 의미한다. 즉 이전 시간 해상에서 축적된 풍부한 오존을 포함한 오염공기괴가 내륙으로 재순환됨에 따라 연안지역의 오존농도 상승이 급격히 일어난 것이다.

물론 이러한 고농도현상의 원인에 있어 안산지역 풍상측에 위치한 공단의 국지적 영향을 배제할 수는 없다. 하지만 최근 3년간(2002~2004년) 6월중 안산 AWS(그림 1 참조)에서 관측된 자료를 바탕으로 해 풍일(51일, 15h 풍향이 2 m s^{-1} 이상의 서풍이 기록된 날)의 평균적인 오존농도(64 ± 25.9 ppb, 5개 지점 일 최고농도 평균)와 비교해 볼 때 6월 3일에 나타난 농도수준은 인근 공단의 영향만으로 설명되기 어렵다.

이후 1800 LST가 되면서 연안지역에서 관측된 오존농도는 상당 수준 감소한 것에 비해 내륙 풍하측의 경우는 여전히 고농도가 유지되거나 농도가 상승함을 알 수 있다. 모델링된 오존농도에서도 MM5 모델링 한계에 의해 고농도역이 관측값과 비교해 다소 동쪽에서 나타나긴 하나, 이전 시간대에 남서쪽에서 나타났던 고농도역이 동쪽으로 이동하는 모습을 잘 재현하고 있다. 이는 연안지역의 경우, 해풍의 지속시간이 길어질수록 보다 먼 바다로부터 이동해온 해상 공기(초기 해풍보다는 상대적으로 오염되지 않은 공기)의 영향을 받기 때문이다(그림 10 참고). 하지만 내륙 풍하측에서 유지된 오존농도는 해풍과 함께 오존을 포함한 오염공기괴가 풍하측으로 수송됨을 의미한다. 이는 국지배출이 매우 적은 지역 배경농도 측정망인 이천지역(안산으로부터 동쪽으로 약 50km 풍하측에 위치)의 대기질 변화를 통해서도 확인된다. 이른 저녁 오존, NO_2 , CO 농도의 상승이 나타났고(오존농도의 경우 2100 LST에 127 ppb가 기록됨), 수 시간 지속되는 모습을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 관측자료, MM5-CAMx 모델링과 궤적 분석을 통해 약한 종관풍과 결합된 늦은 해풍 발달이 수도권 대기오염물질 수송에 크게 관여하며 상대적으로 배출량이 적은 수도권 남쪽과 남서 연안 지역에 고농도오존을 발생시키는 주요 원인임을 보여 주었다.

특히 최고 오존농도를 기록한 2004년 6월 3일(195 ppb, 안산)의 경우, 바다를 경유하는 수도권 대기오염물질의 재순환과정이 남서 연안지역의 오존농도를 상승시키는 주요 과정임을 수치모델링 결과를

통해 알 수 있었다. 이른 오전시간, 수도권지역에 탁월했던 북동기류는 서울과 인천지역에서 배출된 대기오염물질을 풍하측인 인근 남서지역과 서해로 수송시켰고, 이후 오후에 발달된 늦은 해풍에 의해 축적된 오염물질이 내륙으로 유입됨에 따라 수도권의 남서 연안지역의 오존농도가 급격히 상승하는 결과를 보였다.

결론적으로 종관풍과 늦은 해풍에 의해 발생한 대기오염물질 수송과 재순환현상이 2004년 6월 초 수도권지역에 나타난 오존오염의 높은 수준과 특징적인 분포를 가능하게 했던 중요한 기상학적 과정임을 본 수치모델링 연구를 통해 진단되었다. 향후 상세 지형효과를 고려한 기상장 모델링과 함께 보다 정확한 격자배출량 정보 및 3차원 관측자료를 기초로 한 모델 초기, 경계치정보 활용이 이루어진다면 광화학 수치모델링을 통한 도시/지역규모 대기오염물질 수송과 연계된 오존 대기질의 정확한 평가와 원인 진단이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원(2004) 대도시 대기질 관리방안 조사연구-광화학대기오염 생성과정 규명과 저감대책 수립.
김영성, 오현선(1999) 1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15(3), 267-280.
김철희, 송창근, 박순용(1999) 종관 바람장에 따른 경인지역에서의 지상 오존 농도 분포 모의, 한국기상학회지, 35(3), 441-456.
기상청(2002) 기상청 수치예보과 기술보고서 2002~3, 2001년도 지역 예보시스템 개선사항.
오인보, 김유근, 황미경(2005) 수도권 오존오염 패턴과 기상학적 특성, 한국대기환경학회지, 21(3), 357-365.
오현선, 김영성(1999) 서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 종관기상 특성, 한국대기환경학회지, 15(4), 441-455.
오현선, 김영성, 김용준(2002) 우리 나라 국지 대기순환 모델 결과의 검증에 관한 고찰, 한국대기환경학회지, 18(1), 59-65.
정용승, 정재섭(1991) 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.
환경부(2006) 대기환경연보(2005).
Alper-Siman Tov, D., M. Peleg, V. Matveev, Y. Mahrer, I. Seter, and M. Luria(1997) Recirculation of pollut-

- ed air masses over the east mediterranean coast, Atmos. Environ., 31(10), 1441-1448.
- Chen, K.S., Y.T. Ho, C.H. Lai, and Y.-M. Chou (2003) Photochemical modeling and analysis of meteorological parameters during ozone episodes in Kaohsiung, Taiwan, Atmos. Environ., 37, 1811-1823.
- 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.
- ENVIRON (2005) User's guide for the Comprehensive Air Quality Model with Extensions, ENVIRON International Corporation.
- Hogrefe, C., S.T. Rao, P. Kasibhatla, W. Hao, G. Sista, R. Mathur, and J. McHenry (2001) Evaluating the performance of regional-scale photochemical modeling systems: Part II-ozone predictions, Atmos. Environ., 35, 4175-4188.
- MacDonald, C.P., P.P. Roberts, H.H. Main, T.S. Dye, D.L. Coe, and J. Yarbrough (2001) The 1996 Paso del Narte Ozone Study: analysis of meteorological and air quality data that influence local ozone concentrations, Sci. Total Environ., 276, 93-109.
- Mckendry, I.G. (1993) Ground-level ozone in Montreal, Canada, Atmos. Environ., 35, 3217-3228.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR) (2005) PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 modeling system Version 3.
- Oh, I.B., Y.K. Kim, H.W. Lee, and C.H. Kim (2006) An observational and numerical study of the effects of the late see breeze on ozone distributions in the Busan metropolitan area, Korea, Atmos. Environ., 40, 1284-1298.
- US EPA (1991) Guideline for regulatory application of the Urban Airshed Model, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Zunckel, M., A. Koosailee, G. Yarwood, G. Maure, K. Venonoka, A.M. van Tienhoven, and L. Otter (2006) Modelled surface ozone over southern Africa during the Cross Border Air Pollution Impact Assessment Project, Environmental Modelling & Software, 21, 911-924.