

## 서울지역 연직 오존 분포: 2003년 6월 6~9일 오존존데 관측

### Vertical Ozone Distribution over Seoul: Ozonesonde Measurements During June 6~9, 2003

황미경 · 김유근\* · 오인보<sup>1)</sup> · 송상근 · 임윤규<sup>2)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부,

<sup>1)</sup>미국 Houston 대학교 IMAQS 연구소, <sup>2)</sup>K-weather (주)

(2007년 9월 6일 접수, 2008년 1월 25일 채택)

Mi-Kyoung Hwang, Yoo-Keun Kim\*, In-Bo Oh<sup>1)</sup>,  
Sang-Keun Song and Yun-Kyu Lim<sup>2)</sup>

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University,*

<sup>1)</sup>*Institute for Multi-dimensional Air Quality Studies, University of Houston, USA,*

<sup>2)</sup>*K-weather Co., Ltd.*

(Received 6 September 2007, accepted 25 January 2008)

### Abstract

Variability in vertical ozone and meteorological profiles was measured by 2Z electrochemical concentration cells (ECC) ozonesonde at Bangyi in Seoul (37.52°N, 127.13°E) during June 6~9, 2003 in order to identify the vertical distribution of ozone and its relationship with the lower-atmospheric structure resulted in the high ozone concentrations near the surface. The eight profiles obtained in the early morning and the late afternoon during the study period clearly showed that the substantial change of ozone concentrations in lower atmosphere (~5 km), indicating that it is tightly coupled to the variation of the planetary boundary layer (PBL) structure as well as the background synoptic flow. All profiles observed early in the morning showed very low ozone concentrations near the surface with strong vertical gradients in the nocturnal stable boundary layer due to the photochemical ozone loss caused by surface NO titration under very weak vertical mixing. On the other hand, relatively uniform ozone profiles in the developed mixing layer and the ozone peaks in the upper PBL, were observed in the late afternoon. It was noted that a significant increase in ozone concentrations in the lower atmosphere occurred with the corresponding decrease of the mixing height in the late afternoon on June 8. Ozone in upper layer did not vertically vary much compared to that in PBL but changed significantly on June 6 that was closely associated with the variation of synoptic flows. Interestingly, heavily polluted ozone layers aloft (a maximum value of 115 ppb around 2 km) were formed early in the morning on 6 through 7 June under dominant westerly synoptic flows. This indicates the effects of the transport of pollutants on regional scale and consequently can give a rise to increase the surface ozone concentration by downward mixing processes enhanced in the afternoon.

**Key words :** Vertical ozone, Ozonesonde, Mixing layer, Regional transport

\*Corresponding author.

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

## 1. 서 론

도시지역 하층대기의 연직적 오존분포는 지표부근의 NO<sub>x</sub> 배출 영향과 대기경계층의 일변화 및 구조적 특성에 의해 시·공간적으로 크게 변화한다(Berkowitz *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 1998; Pisano *et al.*, 1997; McElroy and Smith, 1993). 일반적으로 야간에 역전층 내 NO와 적정반응에 의해 오존농도가 감소하며, 잔류층의 오존농도 수준은 지표안정층에 비해 높은 농도를 나타낸다. 그리고 일출 후에는 안정층 파괴와 혼합고 성장에 의해 지표면 오존농도가 상승하며, 연직으로 비교적 일정한 농도를 보인다. 특히 경계층 상부의 오존층과 연직 혼합과정은 지표 오존오염과 관련이 크다(Gerasopoulos *et al.*, 2006). 따라서 경계층을 포함한 대기하층의 연직적 오존분포의 변화를 관측을 통해 정확히 파악하는 것은 도시지역 오존수치 및 지표 고농도현상을 이해하는 데 매우 중요하다.

국외의 경우, 오존의 3차원 시·공간적 거동을 정량적으로 분석하고자 북미와 유럽지역을 중심으로 야외 관측연구(field study)가 수행되었다. 예로 1987년부터 LMOS (Lake Michigan Ozone Study), EMEP (European Model Evaluation Study), NARSTO (North American Research Strategy for Tropospheric Ozone) 등 30여 개 이상의 다양한 야외 관측연구가 이루어졌고, 이를 통해 얻어진 3차원 관측 자료는 고농도오존 발생원인 규명 및 대책수립에 적극 활용되었다(Solomon *et al.*, 2000). 최근 미국 텍사스 지역에서는 TexAQs (The Texsa Air Quality Study) 프로그램을 통해 광범위한 3차원 관측과 광화학 모델링을 통한 오존오염 연구가 이루어지고 있다(TCEQ, 2007). 하지만 국내의 경우 대부분의 관련 연구가 3차원 관측 자료의 부족으로 오존분포의 정확한 해석이 되지 않고 있는 실정이다. 특히 지표 부근 오존오염이 심각한 서울의 경우, 그 원인의 정확한 진단과 모델링결과의 개선을 위해서 관측을 통한 연직 오존 분포 변화가 파악되어야 할 것이다. 본 연구에서는 서울지역에서 수일간(2003년 6월 6~9일) 수행된 오존존데 관측 결과를 통해 얻어진 연직 오존 분포를 제시하였고, 오존 분포 변화와 대기경계층 구조의 관계를 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연직 오존 관측

서울지역 방이동 올림픽공원 내에서 2003년 6월 6일부터 9일까지 4일 동안 하루 2회씩(주·야간) 총 8회로, 오존 및 기상인자의 연직관측을 수행하였다(그림 1). 관측시간은 일 중 야간안정층 및 혼합층이 충분히 발달하는 시각인 각각 0400 LST(Local Standard Time)와 1500 LST 전후로 하였다.

관측 시 기상측정센서(Vaisala radiosonde)가 부착된 오존존데(2Z electrochemical concentration cells (ECC) ozonesonde, EN-SCI Corp. USA)를 부양시켜 오존농도 및 기상자료를 수집하였다. 오존존데는 대기의 오존농도를 측정하는 오존관측 센서 부분과 기온, 기압, 습도를 측정하는 기상관측센서 부분으로 구성되어 있다. 오존농도의 관측원리는 반응 셀 안에서 KI (potassium iodide) 용액과 흡입된 공기 안에 있는 오존 분자의 반응으로 발생된 전류량을 측정하여 대기 중 오존량을 계산하도록 되어있다. 이 때 부양되는 오존존데의 무게는 약 1.03 kg이며, 대기 중에 부양된 오존존데에서 측정된 제반 요소의 정보는 전용 수신기를 사용하여 라디오주파수 영역인 403 MHz와 0.25 Watts 세기로 수신하였다. 최대도달고도는 약 35 km이며, 부양한 존데의 상승속도는 약 5 m s<sup>-1</sup> 정도 이고, 최대고도에 도달한 후 하강할 때의 하강속도는 약 10 m s<sup>-1</sup>이다. 본 연구에서는 도심지역 하층대기에서 연직 오존분포 변화를 대기경계층의 일변화와 함께 분석하기 위해 고도 약 5 km까지의 자료를 집중적으로 분석하였다.

아울러 연직 오존 거동을 이해하기 위하여 관측 기간에 2시간 간격으로 하루 8회(0700~2100 LST)에 걸쳐 측풍기구(Pibal: Pilot balloon)를 사용하여 상층풍을 관측하였다. 관측 자료는 매회 30초 간격으로 기록하였다. 그러나 6월 6일의 2100 LST는 구름이 많아 관측이 실시되지 않았다.

### 2.2 자료 및 기상모델링

집중관측기간의 기상 특성은 서울기상청에서 관측된 기상(일사, 기온, 풍향, 풍속, 운량, 강수) 자료를 분석하였다. 또 종관기류 특성은 오산의 850 hPa 상층바람 자료를 이용하였다(그림 1). 이와 함께 오존 농

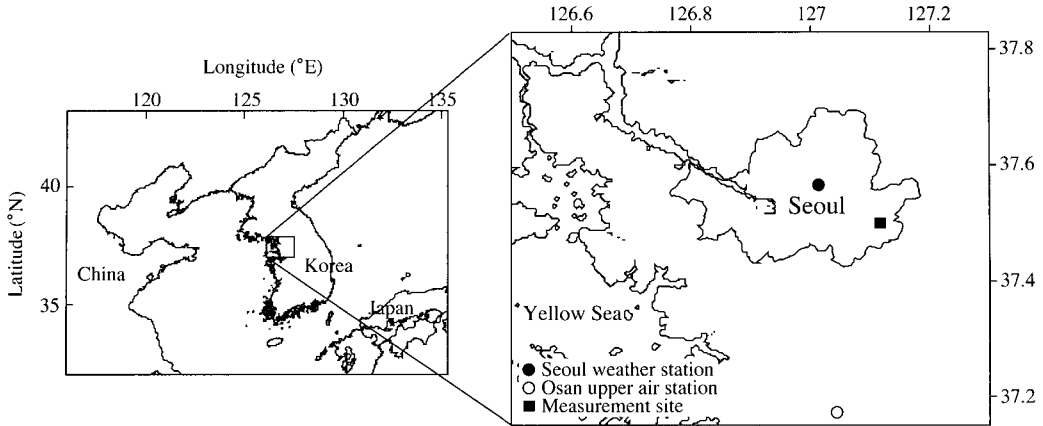


Fig. 1. The domains with the resolution of 27 km for MM5 simulations (left) and the location of the measurement site, Seoul weather station and Osan upper air station used in this study (right).

도자료는 수도권지역에 산재되어 있는 환경부 산하 83 지점의 매시간별 대기질 자료를 이용하여 관측기간의 대기질 현황을 조사하였다. 이 때 기상 및 오염물질 자료의 신뢰성을 위해 유효자료는 일 중 75% (1시간 평균자료 기준) 이상 측정된 것을 대상으로 분석하였다(환경부, 2006).

중규모 기상모델인 MM5 (v.3.6)를 이용하여 관측기간을 포함한 2003년 6월 5일부터 9일까지 중관장을 수치모의 하였으며, 첫날 24시간은 초기적응시간으로 분석에서 제외되었다. 연직으로는 30개의  $\sigma$ 층을 가지고 모델링 영역은 37.52°N, 126.00°E를 중심으로 60×48 격자로, 격자간격은 27 km로 하여 수행하였다. 초기 및 경계조건으로는 기상청에서 제공하는 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)를 이용하고, grid nudging을 수행하였다. 적운 모수화 과정은 Grell cumulus parameterization을 적용하고(Grell *et al.*, 1994), 복사과정, 미세물리과정은 전 영역에 대하여 각각 RRTM raditional schemes (Mlawer *et al.*, 1997), Mixed-Phase scheme (Reisner *et al.*, 1998)을 이용하여 수치모의 하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 전반적 기상조건 및 지상 오존농도

표 1에 관측기간의 서울지역 기상 특성을 나타내

Table 1. Meteorological conditions at Seoul weather station during June 6~9, 2003.

Date	Solar radiation (MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup> )	Max. temp. (°C)	Cloud amount	Precipitation (mm)
6 June	7.2	22.6	7.0/10	35
7 June	22.4	26.8	3.6/10	0
8 June	23.2	30.5	4.9/10	0
9 June	23.3	31.1	4.4/10	0

었고, 그림 2에 MM5를 통해 수치모의한 관측기간의 중관기류 변화를 제시하였다. 6월 6일은 중국 대륙 동안의 저기압의 영향으로 한반도는 기압골에 위치하여 남 내지 남서풍이 유입되었다. 그리고 오후 한차례 약한 강수와 함께 약 23°C의 상대적으로 낮은 일최고 기온을 보였다. 이후 중국 동안에 위치했던 저기압의 동진과 함께 한반도 동쪽으로부터 오즈크해 고기압계가 발달하기 시작하였고, 기온 상승과 함께 비교적 맑은 날씨가 지속되었다. 8일의 경우, 동해상에 위치한 오즈크해 고기압의 기압능 영향하에 한반도는 약한 풍속의 기상조건이 형성되었다. 이는 오산 상층관측 자료를 통해서 재확인할 수 있었다(남동풍, 5.5 m s<sup>-1</sup>). 9일은 오호츠크해 고기압의 남하로 일본 북동쪽 해상에 고기압계의 중심이 위치하였고, 이 영향으로 한반도 상공은 뚜렷한 동풍(오산, 10 m s<sup>-1</sup>)이 나타났다. 관측 기간 중, 8일과 9일은 30°C 이상의 높은 일최고 기온과 함께 강한 일사를 나타내

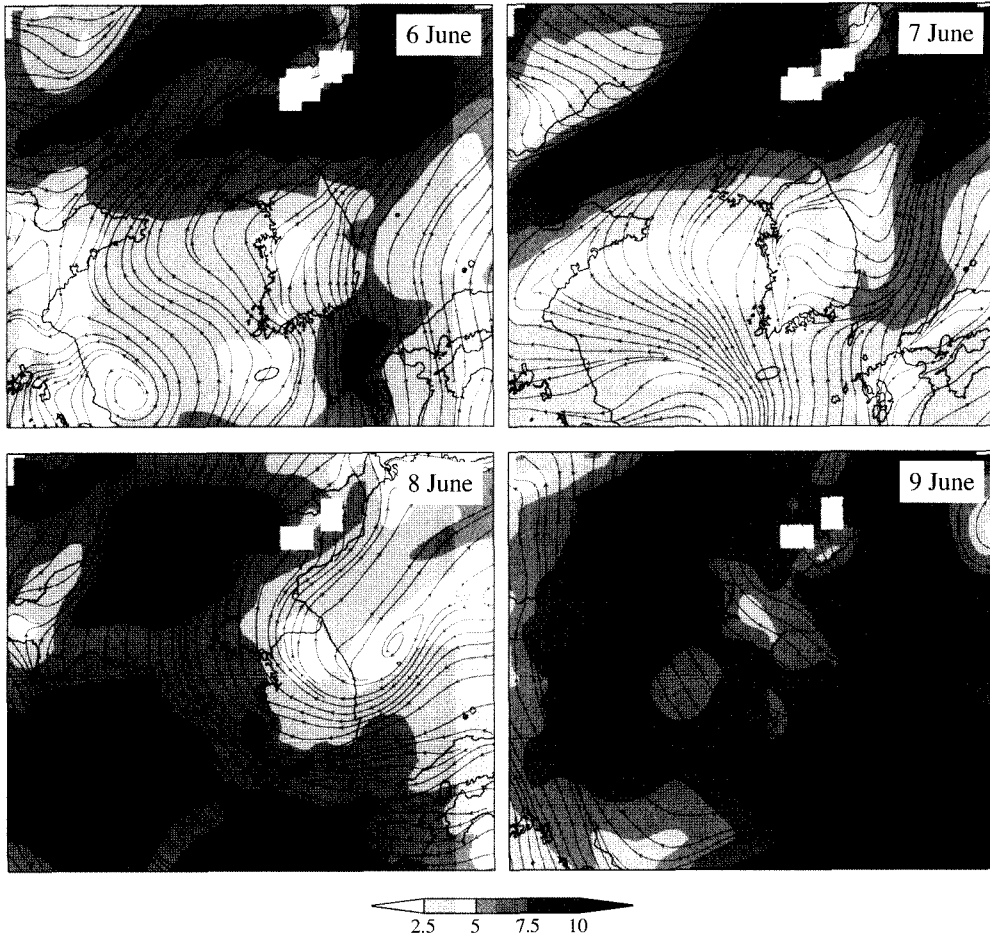


Fig. 2. Simulated 850 hPa streamlines with the horizontal wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ ) at 1500 LST during June 6~9, 2003. Shaded contour represents wind speed. White rectangle areas correspond to no-data grid-cells because of terrain intersection.

어 고농도 오존 발생에 좋은 기상조건이 형성되었다 (Olszyna *et al.*, 1997; Sillman and Samson, 1995).

관측 기간의 서울·수도권지역의 오존오염 특성을 표 2에 나타내었다. 6일부터 8일까지 일최고 오존농도가 점차 증가함을 확인할 수 있다. 특히 8일은 용인(115 ppb)을 비롯한 11개 지점에서 환경기준치(1시간 기준 100 ppb 이상)를 초과하여 서울을 비롯한 수도권 전역에서 광범위하게 고농도가 발생하였다. 하지만 9일은 8일과 유사한 기상조건이 만족되었음에도 불구하고, 인천 강화지점에서 환경기준치를 초과하여, 지표오존농도 분포 및 수준이 8일과 비교해 뚜렷한 차이를 보였다.

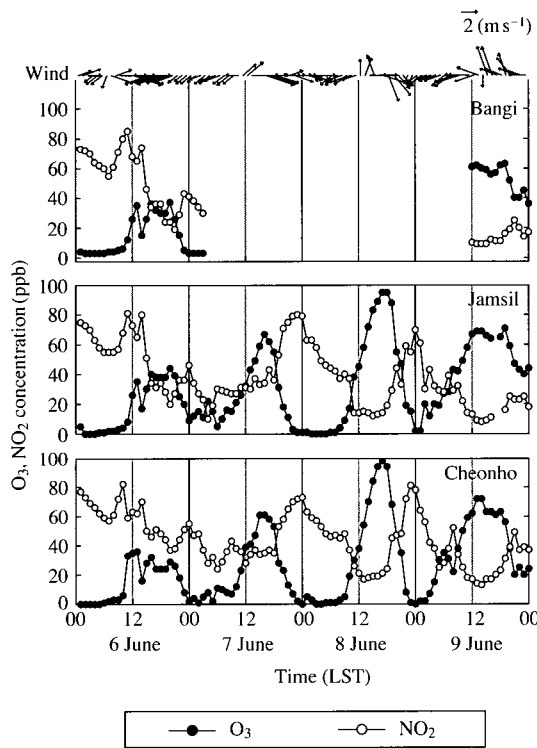
그림 3은 서울기상청의 바람과 방이동을 비롯한 인근 지표관측지점(잠실, 천호동)의 오존 및  $\text{NO}_2$  농도의 일변화를 나타낸 것이다. 여기서 연직관측이 실시되었던 방이동 대기질자료의 경우, 관측기간 동안 다수의 결측자료가 존재하여 자료의 신뢰성을 뒷받침하기 위해 인근지역인 잠실과 천호동의 농도변화를 함께 제시하였다. 가장 심각한 오존오염이 발생한 8일의 일변화를 살펴보면 일출과 함께 급격히 오존농도가 증가하기 시작하여 늦은 오후(1700~1800 LST)에 95 ppb의 높은 농도를 기록하고 이후 급격한 농도 감소를 보였다. 이러한 오존농도의 일변화는 7일 야간부터 8일 새벽 동안 상당히 높게 나타난  $\text{NO}_2$

**Table 2. Statistics of ozone concentrations during June 6~9, 2003.**

Date	Averaged daily max. O <sub>3</sub> concentration (ppb)	Daily max. O <sub>3</sub> concentration <sup>a</sup> (ppb)	Number of sites exceeding 1-h standard 100 ppb <sup>b</sup>
6 June	49.4±11.2	74 (Anyang/Ansan, Gyeonggi)	0/80
7 June	64.7±15.4	95 (Suwon/Anyang, Gyeonggi)	0/82
8 June	81.7±14.9	115 (Yongin, Gyeonggi)	11/82
9 June	74.4±12.0	110 (Ganghwa, Incheon)	1/82

<sup>a</sup>The name of monitoring site where the highest O<sub>3</sub> level was observed in Seoul metropolitan area in parenthesis

<sup>b</sup>The number of available sites



**Fig. 3. Time series of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> concentration at surface sites and wind vector at Seoul weather station during June 6~9, 2003.**

농도(최고 80 ppb)와 관련된 것으로 분석된다. 다시 말해 NO<sub>x</sub> 적정작용이 지표부근에서 활발히 일어났음을 추정할 수 있으며, 더불어 이른 오후(0700~1300 LST)까지 지속된 대기 정체(서울기상청, 1.3 m s<sup>-1</sup>)로 오염물질의 국지적 축적 및 활발한 광화학 반응으로 서울지역의 고농도 발생을 예상할 수 있다(오인보 등, 2005). 반면 9일의 경우, 전반적인 기상조건은 8일의 경우와 유사하였으나, 앞서 제시한 종관

장의 변화에 따라 풍계 특성에서 뚜렷한 차이를 보였다. 즉 종관적으로 강한 동기류 영향하에, 지상에서는 지속적인 동풍이 관측되어 서울지역으로 해풍 침투가 제한되는 특징을 보였다. 이러한 바람장의 영향으로 지표 관측치는 8일과 비교해 방이동의 인근 두 지점에서 약 70 ppb에 머물렀다.

**3.2 연직 오존 분포**

2003년 6월 6일부터 9일까지 주·야간에 관측된 기상 및 오존 프로파일 자료를 이용해 연직 오존분포와 대기경계층 일변화를 분석하였다. 그림 4와 5는 오존과 온위의 연직분포를, 그림 6은 상층풍 관측 결과를 보여준다. 전반적으로 주·야간의 뚜렷한 대기 경계층 일변화와 함께 뚜렷한 연직 오존분포 변화가 나타났다. 해풍 발생 시, 관측지점이 서울의 풍하측에 위치함을 고려한다면, Zhang et al. (1998)의 비행기 관측결과에서 확인된 풍하측의 큰 일변화 경향과 유사하다.

연직 오존분포의 특징을 전반적으로 살펴보면 다음과 같다. 야간(0400 LST) 관측의 경우, 지표 부근은 0에 가까운 저농도가 존재하고 고도에 따라 증가하여 1~3 km에서 고농도층과 최고농도와 함께 관측되었다. 이러한 분포는 1 km 이하 지표부근에 형성된 대기 안정층(연직 온도구배가 10 K 이상, 그림 5 참고) 내에 NO<sub>x</sub> 적정효과와 야간 잔류층에 남은 전날 높은 수준의 오존농도 영향으로 추정된다. 단, 6일과 7일 새벽의 상층 고농도는 국지적 화학과정과 대기 경계층 변화로 설명되기 어렵다(이후 다시 설명). 오후(1500 LST 전후) 관측의 경우, 대기하층의 급격한 농도 변화 및 증가와 혼합층 내에 비교적 균일한 농도 분포가 관측되었다. 이는 광화학적 오존 생성뿐만 아니라 혼합층 발달에 따른 오존 하향수송 역시 중요한 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

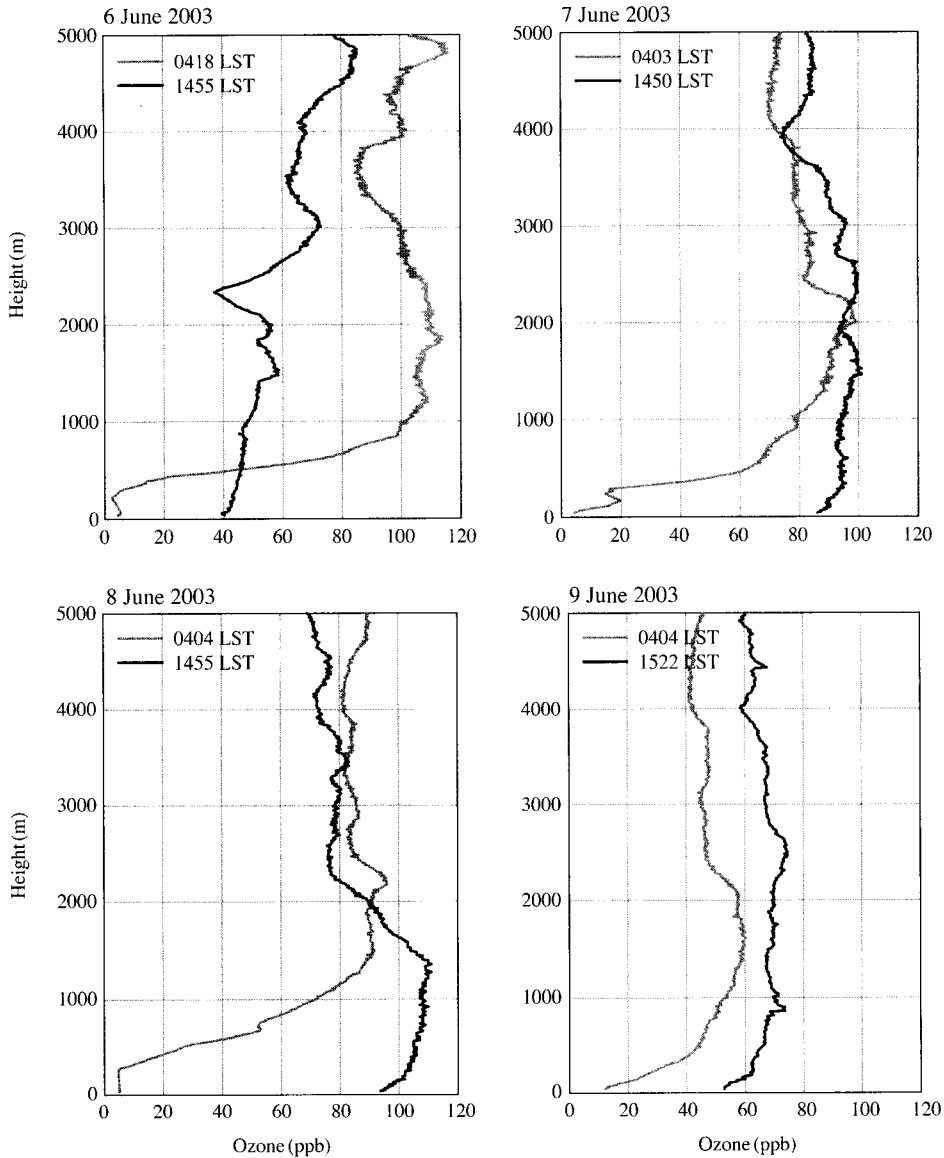


Fig. 4. Vertical profiles of O<sub>3</sub> concentrations observed at Bangi during June 6~9, 2003.

6일부터 9일까지 오존분포의 변화 특징과 원인을 정리하면 다음과 같다. 6일 새벽의 경우, 1 km 이하 대기 하층과 상층의 농도가 가장 큰 차이를 보였고, 약 2 km에서 오존의 농도가 115 ppb까지 상승하였다. 전 시간 관측자료의 한계로 이에 대한 정확한 원인분석은 힘들지만 기상 및 계절분석을 통해 지역규모 수송효과로 추정된다(Oh *et al.*, 2005). 6일 오후의

경우, 당일 새벽과 비교해 1~3 km 부근의 농도 감소가 뚜렷하게 나타났다. 이는 약한 기압골의 영향하에 10에 가까운 운량과 강수현상이 그 원인으로 분석된다. 또한 한랭전선 통과 후 나타난 북서계열의 상층 풍 역시 새벽에 존재했던 높은 수준의 상층 오존을 이동시켜 관측지점에 낮은 농도가 관측된 것으로 분석된다(Oh *et al.*, 2005). 이러한 오존 농도분포는

New York에서 관측된 한랭전선 통과 후의 연직오존 분포와 유사하다(Zhang *et al.*, 1998).

7일 새벽 관측결과, 특징적으로 6일 새벽 연직분포와 유사하게 2 km 부근에서 100 ppb 이상의 고농도가 관측된 것이 주목할 만하다. 전날 오후 대기하층의 오존농도가 약 40~60 ppb에 머무른 것과 6일 늦은 오후(1700 LST)부터 고도 1 km 이상 부근에서 강한 서풍이 존재한 점을(그림 6) 고려해 본다면, 2 km 부

근의 뚜렷한 농도 상승은 6일 새벽의 경우와 마찬가지로 도시규모 이상의 수송효과로 추정된다. 이를 뒷받침하기 위해 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델링 수행을 통해 7일 0400 LST에 도달하는 궤적을 분석한 결과(48시간 동안 1시간 간격, 고도 2 km), 6월 5일 0900 LST 중국의 동부 연안(장쑤성 부근)의 산업지대가 기류의 기원으로 분석되었다(그림 7). 이 지역은 중국 동

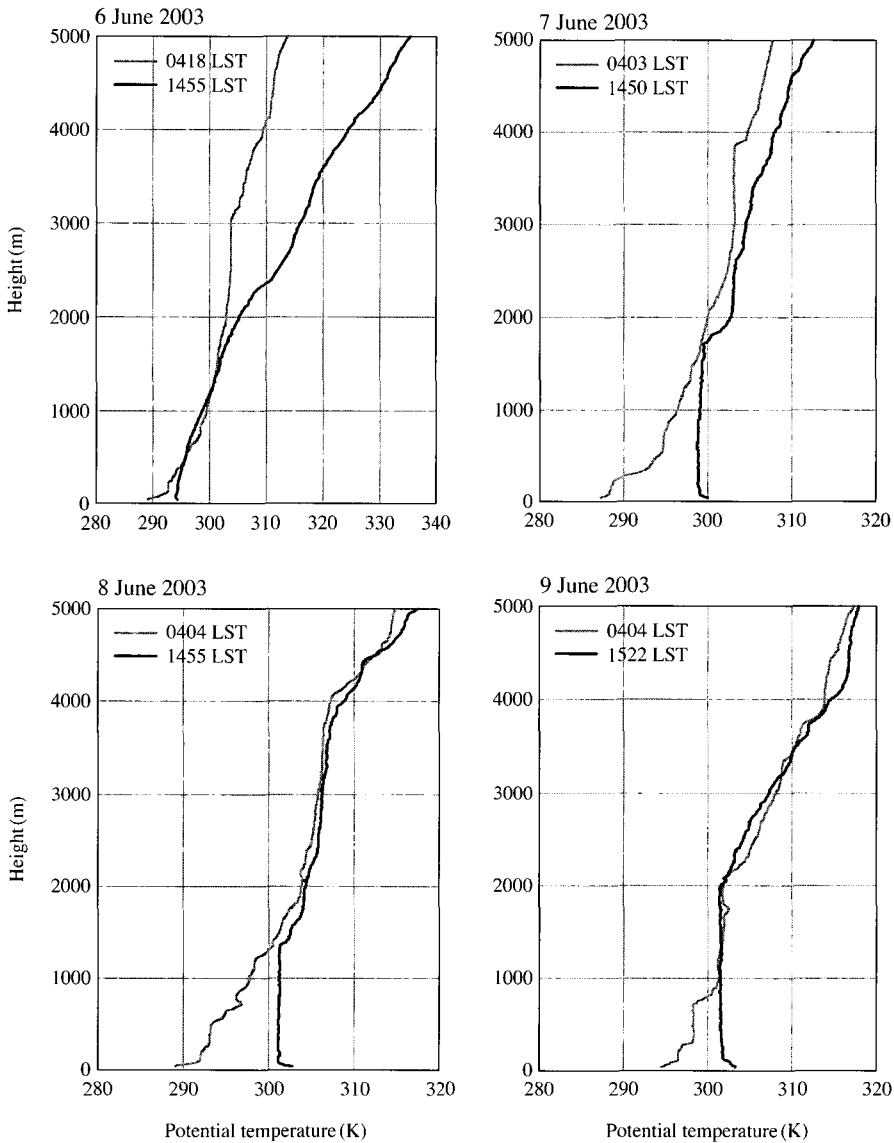


Fig. 5. As in Fig. 4, but for potential temperature.

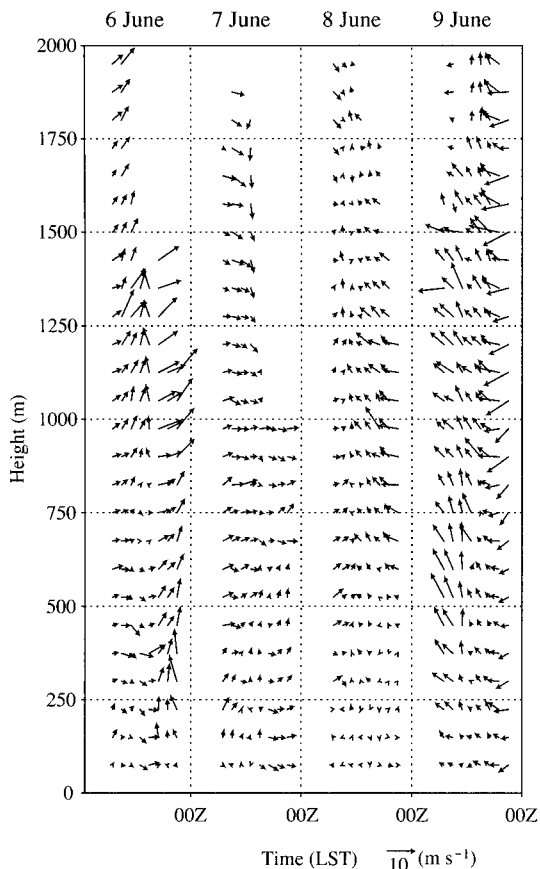


Fig. 6. Horizontal wind vector field based on wind profiler observation at Bangi during June 6~9, 2003.

쪽 연안의 대표적인 대기오염물질 배출원지역으로 (Streets *et al.*, 2003), 모의된 기류를 따라 관측지점에서의 오염공기과 수송을 추정할 수 있다. 오산에서 6일 야간(2100 LST)부터 7일 오전(0900 LST)까지 고도 1.5 km 부근에서 관측된 강한 서풍(평균 12.6 m s<sup>-1</sup>) 또한 수송효과에 대한 강한 가능성을 뒷받침한다. 하지만 이에 대한 정확한 해석을 위해서는 신뢰성 있는 광화학 모델링을 통한 추가적인 분석이 요구된다. 7일 오후의 경우, 지표부근 오존농도가 광화학 생성에 의해 상승하여(주된 원인) 대기경계층 내에 비교적 일정한 농도분포가 나타나며 2 km 이상의 고도에서는 새벽의 농도와 비교해서 큰 차이가 없는 모습이다.

8일 새벽의 경우, 7일 오후의 대기상층 농도수준은

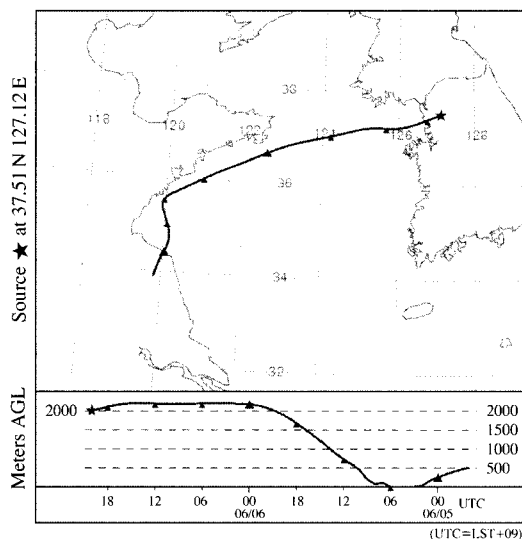


Fig. 7. Simulated 48-hour backward trajectories from HYSPLIT4 arriving at the Bangi at 0400 LST on June 7, 2003.

그대로 유지되면서 지표부근의 농도가 급격히 감소하는 전형적인 도시지역 연직분포를 보여준다. 관측 기간 중 가장 심각한 오존오염이 나타난 8일 오후의 경우, 대기경계층 내의 오존농도(약 110 ppb)도 급격히 증가하였다. 이는 기상조건으로 볼 때, 오존의 활발한 광화학 생성과 함께 대기혼합고의 감소가(7일, 9일과 비교시 약 25% 감소) 주된 원인으로 설명된다. 온위 분포에서 알 수 있듯이 고도 1.5~2 km 부근에 안정층이 관측되었으며, 이는 오후의 대기혼합층 발달을 억제시킨 것으로 분석된다. 결과적으로 제한된 혼합고 발달은 오존 및 전구물질의 희석작용 약화를 유도하여 대기경계층 내 고농도 오존발생에 기여한 것으로 볼 수 있다(Sanchez-Ccoyllo *et al.*, 2006; MacDonald *et al.*, 2001). 아울러 오존농도 상승의 또 다른 원인으로, 7일 새벽에 나타난 지역규모의 수송영향과 대기경계층 발달에 따른 오존 하향수송의 가능성을 들 수 있다(Oh *et al.*, 2005). 여러 선행 연구에서도 대기경계층 구조변화와 오존의 연직수송은 지표 농도상승에 중요한 역할을 할 수 있음을 보여주었다(Zhang and Rao, 1999; Berkowitz *et al.*, 1998; Ryan *et al.*, 1998). 특히 Neu *et al.*(1994)은 야간 잔류층의 오존농도가 오후 지표 오존농도 증가에 50~



70% 기여함을 관측 및 모델링을 통해 제시한 바 있다.

9일 새벽의 경우, 동풍이 탁월해지면서(그림 6) 전반적인 오존농도 감소가 뚜렷하다. 즉 비교적 덜 오염된 기류가 서울로 유입되면서 농도감소가 나타나는 것으로 볼 수 있다. 오후의 경우, 8일과 유사한 기상조건이 형성되었음에도 불구하고 전 고도에서 상대적으로 낮은 농도수준(최고 74 ppb)이 관측된 것이 특징이다. 이 역시 동풍계열의 종관풍 영향으로 해석된다.

이상과 같은 4일간의 관측결과에서 대기경계층 내의 연직 오존분포는 상당한 폭의 일변화를 나타내었고, 종관풍을 비롯한 대기경계층 내의 안정도나 혼합층의 발달 등이 지표 오존농도 상승 및 감소에 깊은 연관이 있음을 보여주었다. 또한 경계층 상부의 오존분포는 종관기류 변화에 따라 상당 폭의 변화를 보여주어 지역규모 이상의 수송효과를 가늠할 수 있었다.

#### 4. 요약

오존 농도와 기상 인자의 연직관측을 수행하여 오존분포와 하부 대기구조와의 관계를 분석하였다. 관측은 서울 방이동에서 2003년 6월 6~9일에 하루 2회씩(주·야간) 총 8회에 걸쳐 이루어졌으며, 고도 5 km 이내의 관측결과를 중심으로 대기경계층 일변화와 연직 오존농도 변화를 집중분석하였다. 관측 결과, 대기경계층 내 야간안정층 및 혼합층 발달에 따라 큰 오존농도 분포변화를 확인할 수 있었다. 야간에는 안정층 내에서  $\text{NO}_x$  적정반응으로 0에 가까운 낮은 오존농도를 나타내었다. 한편 오후에는 혼합층 내에서 비교적 일정한 오존농도 분포를 나타내며, 대기경계층 상부에서 100 ppb 이상의 최고 농도가 관측되었다. 특히 지표부근 오존농도가 높았던 6월 8일의 관측결과를 통해, 오존의 생성·소멸과 관련한 국지효과뿐만 아니라 제한된 혼합층 발달이 고농도 오존 발생에 중요한 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 또한 관측 기간 중, 국지규모 이상의 수송효과에 의한 대기경계층 상부의 농도 상승과 종관기류 변화에 따른 수송 효과가 간접적으로 확인되었다.

연직 오존분포 분석에 있어 충분치 않은 관측 자

료로 인해 정확한 시간적 변동을 고찰할 수 없는 한계를 보였다. 하지만 본 연구를 통해 서울지역 대기 하층의 오존 분포 변화와 기상학적 특징을 살펴봄으로써 고농도오존 현상의 역학적인 이해를 도울 것으로 생각되며, 관측 결과는 도시 오존제어를 위한 광화학 수치모델링의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 환경부 과제 '대도시 대기질 관리방안 조사 연구' 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고 문헌

- 오인보, 김유근, 황미경 (2005) 수도권 오존오염 패턴과 기상학적 특성, 한국대기환경학회지, 21(3), 357-365.
- 환경부(2006) 대기오염측정망 설치·운영지침, 12 pp.
- Berkowitz, C.M., J.D. Fast, S.R. Springston, R.J. Larsen, C.W. Spicer, P.V. Doskey, J.H. Hubbe, and R. Plastridge (1998) Formation mechanisms and chemical characteristics of elevated photochemical layers over the northeast United States, *Journal of Geophysical Research*, 103, 10631-10647.
- Gerasopoulos, E., G. Kouvarakis, M. Vrekoussis, C. Donoussis, N. Mihalopoulos, and M. Kanakidou (2006) Photochemical ozone production in the Eastern Mediterranean, *Atmospheric Environment*, 40, 3057-3069.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1994) A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR technical Note TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- MacDonald, C.P., P.T. Roberts, H.H. Main, T.S. Dye, D.L. Coe, and J. Yarbrough (2001) The 1996 Paso del Norte Ozone Study: analysis of meteorological and air quality data that influence local ozone concentrations, *The Science of The Total Environment*, 276, 93-109.
- McElroy J.L. and T.B. Smith (1993) Creation and fate of ozone layers aloft in Southern California, *Atmospheric Environment*, 27A, 1917-1929.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and

- S.A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research*, 102, 1663-1682.
- Neu, U., T. Kunzle, and H. Wanner (1994) On the relation between ozone storage in the residual layer and daily variation in near-surface ozone concentration - a case study, *Boundary Layer Meteorology*, 69, 221-247.
- Oh, I.B., Y.K. Kim, H.W. Lee, C.H. Kim, S.K. Song, M.K. Hwang, Y.K. Lim, and Y.H. Kang (2005) Regional influence on vertical ozone distributions over Seoul in Korea, *The 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area*, Tokyo, Japan, 165.
- Olszyna, K.J., M. Luria, and J.F. Meagher (1997) The correlation of temperature and rural ozone levels on southeastern U.S.A., *Atmospheric Environment*, 31, 3011-3022.
- Pisano, J.T., I. McKendry, D.G. Steyn, and D.R. Hastie (1997) Vertical nitrogen dioxide and ozone concentrations measured from a tethered balloon in the Lower Fraser Valley, *Atmospheric Environment*, 31, 2071-2078.
- Reisner, J., R.J. Rasmussen, and R.T. Bruintjet (1998) Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124B, 1071-1107.
- Ryan, W.F., B.G. Doddridge, R.R. Dickerson, R.M. Morales, K.A. Hallock, P.T. Roberts, D.L. Blumenthal, J.A. Anderson, and K.L. Civerolo (1998) Pollutant transport during a regional O<sub>3</sub> episode in the Mid-Atlantic states, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48, 786-797.
- Sanchez-Ccoyllo, O.R., R.Y. Ynoue, L.D. Martins, and M.F. Andrade (2006) Impacts of ozone precursor limitation and meteorological variables on ozone concentration in Sao Paulo, Brazil, *Atmospheric Environment*, 40, 552-562.
- Sillman, S. and P.J. Samson (1995) Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, polluted rural and remote environments, *Journal of Geophysical Research*, 100, 11947-11958.
- Solomon, P., E. Cowling, G. Hidy, and C. Furiness (2000) Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe, *Atmospheric Environment*, 34, 1885-1920.
- Streets, D.G., T.C. Bond, G.R. Carmichael, S.D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S.M. Nelson, N.Y. Tsai, M.Q. Wang, J.-H. Woo, and K.F. Yarber (2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8809.
- TCEQ (Texas Commission on Environmental Quality) (2007) [http://www.tceq.state.tx.us/implementation/air/airmod/texaq-files/TexAQS\\_II.html#Introduction](http://www.tceq.state.tx.us/implementation/air/airmod/texaq-files/TexAQS_II.html#Introduction).
- Zhang, J. and S.T. Rao (1999) The Role of vertical mixing in the temporal evolution of ground-level ozone concentrations, *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1674-1691.
- Zhang, J., S.T. Rao, and S.M. Dagguptay (1998) Meteorological processes and ozone exceedances in the northeastern United States during the 12~16 July 1995 episode, *Journal of Applied Meteorology*, 37, 776-789.