

봄철 서울지역 야간 오존농도 상승에 미치는 장거리 수송의 영향

The Influence of Long-range Transport on Springtime Nocturnal Ozone Enhancement in Seoul

오 인 보* · 김 유 근

부산대학교 대기과학과

(2003년 1월 26일 접수, 2004년 6월 14일 채택)

In-Bo Oh and Yoo-Keun Kim

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 26 January 2003, accepted 14 June 2004)

Abstract

In Seoul metropolitan area, nocturnal variation of surface ozone concentrations observed at 27 monitoring sites from 1998 to 2002 showed that high ozone levels occurred frequently during the spring. Frequency distributions for nighttime ozone indicated that elevated concentrations in spring were influenced by advection of different air mass compared to other seasons. Surface wind analysis during the spring revealed that relatively strong southwesterly winds were associated with nocturnal ozone enhancement, which can be attributed to the regional transport of ozone. In order to identify the origin of nocturnal ozone enhancement in spring, 3-day backward trajectories were calculated by HYSPLIT 4 for the episode days and then classified. The results showed that NW, W, and SW flows, indicating influence of polluted air masses from the China continent, have 51% in all the episode days, which suggest that the nocturnal ozone enhancement can occur under the effect of long-range transport of ozone-laden air mass on a regional scale.

Case study of nocturnal ozone maxima associated with long-range transport was discussed in more detail in the light of meteorological conditions. Southwesterly synoptic flow along the outer edge of moving high-pressure system was found to be the important cause of nocturnal ozone maxima in Seoul. This flow could lead to be long-range transport of ozone that had effectively accumulated in the stagnating portion of the system located eastern coast of China. Low atmosphere soundings, backward trajectories, and elevated ozone and CO levels at the background sites gave evidence for regional effects on nocturnal ozone enhancement in Seoul.

Key words : Nocturnal ozone enhancement, Backward trajectories, Long-range transport, Southwesterly synoptic flow

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

1. 서 론

오존은 뚜렷한 일 변화 패턴을 가지는 도시지역의 대표적인 대기오염물질이다. 일반적으로 전구물질들(NO_x 와 VOCs 등)의 광화학반응을 통해 오후에 최고농도가 나타나고, 야간에는 NO 와의 반응(NO_x titration)으로 농도가 감소하게 된다. 하지만 이러한 농도변화 패턴은 지역의 배출환경과 기상조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 특히 기상의 역학적 효과가 큰 기여를 하게 되는데, 야간에 나타나는 오존농도의 상승은 이와 관련된 하나의 현상으로 볼 수 있다.

야간 오존농도 상승의 주요 원인으로는 대기안정층 파괴와 결부되어 나타나는 상층 오존의 연직 혼합과정을 들 수 있다. 도시지역에서는 일반적으로 잔류층내에 존재하는 풍부한 오존이 역전층 상부의 풍속 증가에 의한 안정층 파괴와 함께 하향수송되어 지상의 오존농도를 상승시킬 수 있다(Eliasson *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 1990; Samson, 1978). 또한 야간 하층 제트(Low-level Jets, LLJ)의 발달과 전선통과에 의한 연직적인 바람쉬어를 통해 나타나기도 한다(Salmond and McKendry, 2002; Reitebuch *et al.*, 2000; Corsmeier *et al.*, 1997). 아울러 지역 고유의 국지풍 역시 야간 오존농도 상승에 기여하게 되는데, 산곡풍 순환이 그 역할을 하며(Baumbach and Vogt, 1999) 발달된 해풍의 침투에 의해서도 나타난다(Ueda *et al.*, 1988).

이와 함께, 최근 전 지구적인 경제발전과 배출원 증가로 인해 지역규모 이상의 대기오염물질 수송에 의한 영향을 주목할 수 있다. 여러 선행 연구에서 오존을 포함한 대기오염물질 장거리 수송이 지역 오존농도의 상승과 관련함을 제시하였고(Jaffe *et al.*, 2003; Lam *et al.*, 2001; Chan and Chan, 2000), 특히 중국을 포함한 동북아시아 지역에서의 배출원 환경과 기상조건은 풍하측에 위치한 우리나라와 일본지역의 오존농도 상승에 기여할 수 있음을 보여주었다.(Pochanart *et al.*, 2002; Pochanart *et al.*, 1999; Akimoto *et al.*, 1996; 김용표 등, 1996). 물론 이러한 연구들은 야간 오존농도 상승과 직접적으로 관련해 수행되지는 않았지만 수송경로인 해양 위에서의 상대적으로 긴 오존 잔류시간을 고려해 볼 때, 적절한 기상조건이 만족된다면 장거리 수송의 영향이 야간

오존농도 상승에 기여할 가능성은 충분하다.

상기 원인들로 나타날 수 있는 야간의 지표 오존농도 상승은 오후에 나타나는 고농도 수준과는 상당한 차이가 있다. 하지만 그 발생이 다양한 규모의 대기운동에 따른 주위지역의 영향을 반영한다는 점에서 중요한 현상이다. 아울러 이에 관한 연구는 도시상공에 존재할 수 있는 오존층(ozone layer)의 간접적인 확인과 주간 고농도오존 현상의 기원 파악에 기여할 수 있다는데 그 의미가 있다. 이러한 점에서 야간의 농도분포 특징을 정확히 이해하고 농도상승의 원인에 대한 다양한 접근 연구가 필요하며, 특히 장거리 수송효과와 결부된 연구는 우리나라 환경특성에 따른 오존오염 패턴을 이해하는 중요한 부분으로 고려할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 서울지역을 대상으로 수년간 야간에 측정된 오존농도 분포 특성을 파악하고, 봄철에 보다 뚜렷한 농도상승에 기여하는 장거리 수송의 영향을 기상학적인 관점에서 진단하였다. 이를 위해 야간 오존농도의 변화와 빈도분포 분석, 지상 풍계와의 관계, 후방궤적 분석을 통한 기원 파악 등의 연구를 수행하였으며 대표적인 사례를 통해 기상조건과 수송과정을 구체적으로 분석하였다.

2. 연구 및 방법

본 연구에 사용된 오존농도 자료는 최근 5년 간(1998~2002년) 서울지역 지상에 위치한 27개 지점의 대기질 측정망에서 수집된 시간별 측정자료이다. 모든 자료는 환경관리청의 자료검증을 거친 것이며 신뢰성 있는 분석을 위해 각각의 측정지점을 대상으로 하루 중 75% 이상 측정된 날의 자료만을 유효하게 처리하였다(환경부, 2002). 오존농도와 지상 풍계와의 관계를 조사하기 위해 서울 기상청 AWS에서 동일기간에 관측된 시간별 풍향, 풍속자료를 사용하였다. AWS의 경우 해발고도 85.5 m(풍향·풍속계의 지상고도는 10.6 m)에 설치되어 있으며 인근 지형으로부터의 영향을 크게 받지 않는 지역으로 서울의 풍계를 대표할 수 있는 곳으로 볼 수 있다(김진영 등, 2000). 오존 측정망 및 AWS의 위치는 그림 1에 제시되었다.

봄철 야간 오존농도 상승에 미치는 장거리 수송의

영향을 파악하기 위해 고농도일을 선정하고(이후 상세히 제시하였음), 봄철과 고농도일을 대상으로 후방 궤적 분석을 수행하여 지역규모의 기류특성을 비교 분석하였다. 후방궤적은 HYSPLIT 4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 모델을 사용하여 계산하였는데, 모델 수행은 미국 NOAA/ARL(National Oceanic and Atmospheric Administration/Air Research lab.)의 웹상(<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>)에서 이루어졌다. 사용된 입력자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 GDAS(Global Data Assimilation System) FNL(Final) Run자료이고 등온위면에서의 후방궤적 계산 방법을 선택하였다. 궤적은 서울 중심(37.60°N, 126.97°E)에서 출발시켰으며 시작점의 고도는 약 850 hPa의 등압면으로서 LLJ가 존재하고 오염물질의 장거리 수송을 잘 파악할 수 있는 높이인 1,500 m로 하였다(Lee *et al.*, 2002). 모델수행의 시작 시간은 평균적인 야간 고농도 발생시간인 0400 LST로 하였고, 3일간(72시간)의 기류 이동경로를 계산하였다.

사례분석에서는 종관조건과 기류분석을 위해 일본 기상청 발행 수치일기도와 중규모 기상모델인 MM5 모델(버전 3.5)로 계산된 유선이 사용되었다. MM5 초기 기상장 입력은 NCEP/GDAS(6시간 간격, 연직

17층, 수평 2.5° 간격) 자료를 사용하였고, 서울을 중심으로 54 km 간격의 81×63의 영역을 대상으로 모델링을 수행하였다. 또한 대기상층의 바람 분석을 위해 서울 인근에 위치한 오산(37.10°N, 127.03°E)에서 6 시간 간격으로 관측된 상층 풍향, 풍속자료를 사용하였다. 아울러 사례일 중심으로 장거리 수송의 영향을 보다 정확히 진단하기 위해 우리나라 서쪽해안에 위치한 배경 측정지점인 강화와 태안(각각 해발고도 100 m, 23 m)(그림 1)에서 측정된 오존과 CO의 1시간 평균 농도자료를 분석하였다.

3. 야간 오존농도 분포 특성

3.1 일 중 변화

그림 2는 5년 간 서울 전 유효측정지점에서 산출된 오존농도의 시간별 95th percentile을 사용하여 일 중 변화를 계절별로 나타낸 것이다. 계절별 다소의 차이는 있으나 전반적으로 오후에 뚜렷한 농도 상승이 나타나는 반면 야간에는 상당한 차이로 낮은 농도가 분포하였다. 특히 여름철의 경우 오후의 높은 수치(최고 88 ppb, 1500 LST)와 큰 일변화 폭(61 ppb)이 나타났는데, 이는 일 중 화학반응에 의한 활발한 오존생성과 소멸 현상으로 해석될 수 있다.

겨울을 제외하고는 저녁시간에 오존농도가 감소하였다가 새벽에 다시 상승하는 모습이 뚜렷하다. 이는 야간 냉각의 강화와 함께 발달하는 국지풍에 의한

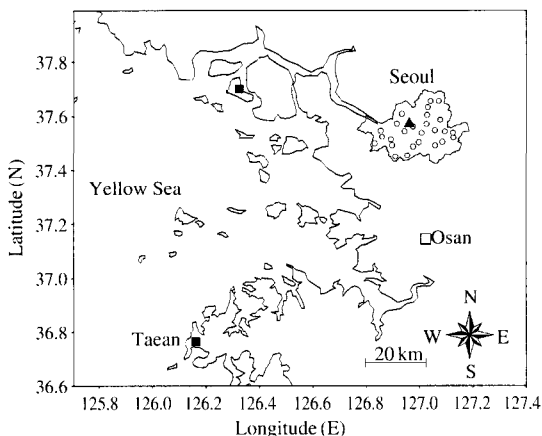


Fig. 1. Map of middle-western Korea showing locations of surface meteorological station (▲) and ozone monitoring sites (○) in Seoul, background ozone monitoring sites at Kanghai and Tae'an (■), and upper air station at Osan (□).

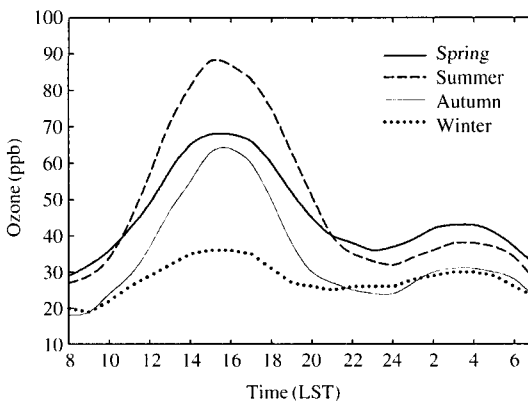


Fig. 2. Diurnal variation of averaged 95th percentile ozone at all sites in Seoul of different seasons, 1998~2002.

영향으로, 상대적으로 높은 농도가 유지될 수 있는 대기상층과 외부로부터의 오존수송에 의한 결과로 설명될 수 있다. 특히 서울의 지리적 위치를 고려해 볼 때, 야간의 강한 서풍(onshore wind)은 서해상으로부터 상당 수준의 배경 오존을(Kim *et al.*, 2003) 서울지역으로 유입시켜는 역할을 함으로써 야간의 오존농도 상승에 기여할 수 있다.

봄철의 경우, 타 계절과 비교해 외부의 영향을 반영하는 특징적인 농도분포를 파악할 수 있다. 오후에 나타난 넓은 폭의 정점과 야간의 상대적인 고농도가 주목할 만 하다. 이러한 분포특성은 주로 연안지역에 나타날 수 있는 모습으로(Wang *et al.*, 2001) 외부 수송의 영향을 간접적으로 보여주는 것이다. 특히 야간의 경우 사계절 중 가장 높은 농도가 나타나, 여름철과 비교해 전일 오후의 오존농도가 오히려 낮다는 것을 고려해 본다면 연직 혼합과정 또는 외부의 영향이 보다 크다는 것을 시사한다.

3. 2 빈도분포

상기 제시된 야간 오존농도 변화의 계절별 차이와 봄철 고농도 원인 파악을 위한 다른 접근으로 농도 구간별 빈도분포를 조사하였다. 빈도분포 조사는 대상지역 농도변화와 관련한 국지효과와 수송의 영향을 판단할 수 있다(Lam *et al.*, 2001; Ghim and Chang, 2000). 그림 3은 5년 간 0100~0600 LST 동안에 측정된 최고농도 값의 발생 빈도분포를 농도구간(5 ppb 간격)에 따라 계절별로 나타낸 것이다. 여기서

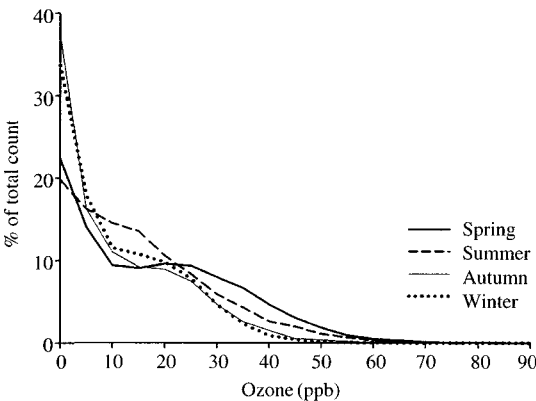


Fig. 3. Frequency distributions of nocturnal ozone maxima in different seasons at intervals of 5 ppb, 1998~2002.

선택한 시간구간은 대부분의 야간 고농도가 나타나는 시기이며, 일몰 후 저녁 늦게까지 지속되는 오후 고농도의 영향을 배제하기 위한 것이다. 사실 지역규모 이상의 수송에 의한 영향은 시간에 관계없이 나타날 수 있으므로 시간구간 설정에 대한 분석은 다소 존재할 수 있다.

전반적으로 볼 때 10 ppb 이하의 구간에서 상대적으로 높은 빈도(사계절 평균 22.2%)가 나타나고, 높은 농도구간으로 갈수록 점차 그 빈도가 감소함을 그림 3에서 볼 수 있다. 이러한 분포경향은 국지배출이 풍부한 도시지역에서 나타나는 전형적인 형태로, 야간 NO배출에 의한 오존소멸의 결과이다(Fuentes and Dann, 1994). 하지만 봄철의 경우 타 계절과는 다소 다른 분포를 볼 수 있는데, 10 ppb 이하의 저농도 구간의 빈도가 감소하고 25 ppb 부근으로 2차 정점의 모습이 뚜렷하다. 이는 성질이 다른 기류의 영향이 있음을 의미하며 외부로부터의 오존수송에 의한 결과로 해석할 수 있다.

3. 3 풍향 · 풍속과의 관계

농도 변화와 빈도분포 분석을 통해 야간 오존농도 상승이 봄철에 뚜렷하고, 이러한 상승의 중요한 원인으로 외부 수송의 영향을 고려할 수 있었다. 보다 구체적인 기원파악을 위해서는 오존분포 변화와 관련한 풍계 특성을 고찰할 필요가 있으며, 이를 통해 잔류층 내의 풍부한 오존의 연직적 혼합과정과 수평수송의 영향을 간접적으로 파악할 수 있다.

그림 4는 5년간 봄철 야간 시간대(0100~0600 LST)의 주 풍향에 대한 야간 최고 오존농도의 평균 값 분포와 평균 풍속을 나타낸 것이다. 풍향의 구분은 16방위로 하였으며, 분석 수치의 신뢰성을 위해 빈도수 3회 미만인 주 풍향의 경우는 농도와 풍속 평균에서 제외하였다. 그림을 통해 나타난 뚜렷한 특징은 상대적으로 강한 남서계열의 바람(SW, SSW)이 오존농도 상승과 크게 관련한다는 점이다. SW, SSW 풍향의 경우 각각 30.7 ppb와 31.3 ppb로 타 풍향에 비해 높은 농도를 보였고, 일부 풍향 및 정체조건 시와 비교해 상당한 차이를 나타내었다. 이러한 남서계열의 바람은 분석된 풍향시점이 야간임을 고려해 볼 때 국지풍의 모습으로 보기 힘들며, 이는 상대적으로 강하게 나타난 풍속에서 알 수 있다. 또한 바람관측의 지점이 지상마찰의 영향을 받는 고도임

을 감안한다면 풍속에 따른 차이가 존재하지만 전반적으로 서 내지 남서계열의 종관풍이 비교적 강하게 불 때 오존농도가 상승함을 보여주는 결과이다.

아울러 그림 4에서 ENE 풍향에서도 24.7 ppb의 비

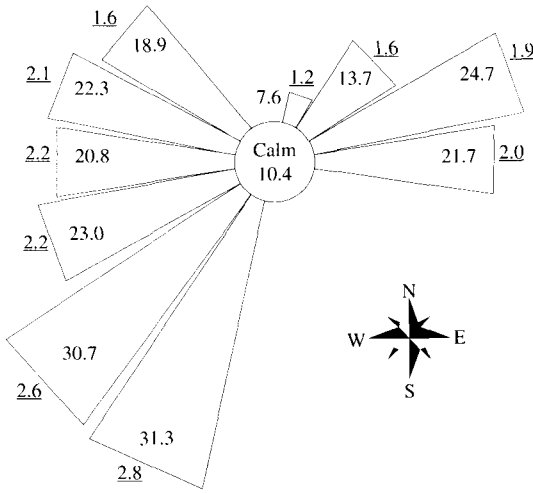


Fig. 4. Nocturnal maximum ozone distributions for a given wind direction observed at meteorological station (37.56° N, 126.97° E) in Seoul during the spring, 1998~2002. Cases below 3 days are excluded and calm within the circle indicates condition of $\leq 1 \text{ ms}^{-1}$. Underline values are mean wind speed for each case.

교적 높은 농도를 볼 수 있는데, 이는 육풍발달에 의한 오존의 재순환과정에 의한 영향으로 추정된다. 또한 여기서는 제시되지 않았지만 풍향에 관계없이 풍속이 증가할수록 오존농도가 상승하는 현상(1 ms^{-1} 이하: 9.8 ppb, 3 ms^{-1} 이상: 32.3 ppb)이 뚜렷이 나타나 풍속증가에 의한 연직혼합 효과의 영향이 존재함을 확인할 수 있었다. 결과적으로 봄철에 나타나는 비교적 강한 남서풍이 야간 오존농도 상승과 깊은 관련이 있음을 감안해 본다면, 서울의 풍상축에 위치한 중국과 서해로부터 오염공기괴의 장거리 수송효과가 야간 고농도현상에 기여함을 알 수 있다. 물론 분석된 오존농도자료가 전체지점 평균값이기 때문에 특정 지점에 나타난 상당수준의 고농도를 해석할 수 없으며, 지상의 풍계만을 가지고 오존농도 변화와의 관계를 정확히 파악하는 것 역시 적지 않은 불확실성이 존재한다. 하지만 특정 풍계에서 나타난 농도분포 경향은 상기 언급한 장거리 수송의 영향이 존재할 가능성이 충분함을 보여준다.

4. 후방계적 분석을 통한 장거리 수송의 영향

장거리 수송의 영향을 보다 명확히 파악하기 위해 5년 동안 봄철과 야간 고농도 사례일을 대상으로 후

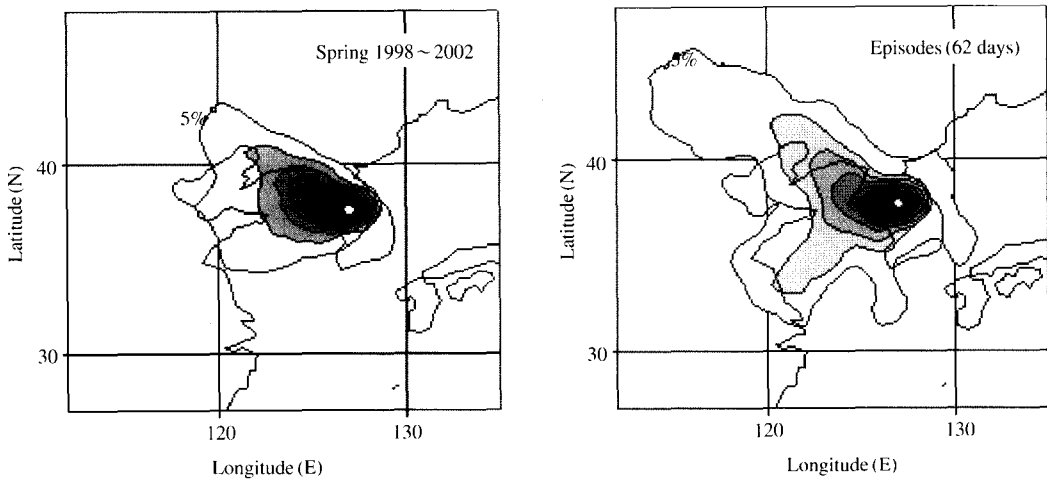


Fig. 5. 3-day Back trajectory probability density plots for all days and nocturnal ozone episode days in spring, 1998~2002. Relative probability, representing the likelihood of trajectories having crossed the underlying regions, are contoured with intervals of 5%.

Table 1. Flow patterns for nocturnal ozone episode days (62 days) in spring, 1998~2002.

Flow pattern	Origin of trajectory	Characteristics	% of total trajectories
NW-D	Northeast China continent	Descending motion, rapid moving	19.7
NW	Northeast China coast	Polluted air mass	14.8
W	East China coast or Yellow Sea	Polluted air mass, long time over Yellow Sea	9.8
SW	East or southeast China coast	Polluted air mass, moderate ascending motion, long time over southeast China coast	26.2
S	East China Sea	Relatively unpolluted marine air mass	4.9
E/SE	East Sea	Passing over the Korean peninsula	6.5
Local	-	Stagnation surrounding area of Korea	6.6
Unclassified	-	-	11.4

방패적을 계산하였다. 대상 사례일은 봄철 야간에 오존농도가 뚜렷이 상승한 날로 선정하였는데, 0100~0600 LST 사이에 유효 관측지점 평균치가 10 ppb 이상의 상승폭을 가지며 최고 값이 30 ppb 이상이 나타날 때를 기준으로 하였다. 이는 신뢰성 있는 분석을 위해 충분한 대상일의 확보와 도시 전반의 농도상승을 함께 고려한 것이다. 기준에 따라 선정된 날은 총 62일(3월: 14일, 4월: 25일, 5월: 23일)이며, 0400 LST를 중심으로 최고 값 발생시간이 분포하였다.

그림 5는 봄철 전체와 사례일 62일의 0400 LST를 시점으로, 서울지역 1500 m 상공에 도달하는 후방계적을 HYSPLIT 4 모델로 계산하여 영역별(1도×1도) 확률분포로 나타낸 것이다. 우선 봄철 전체를 대상으로 한 평균적인 기류분포의 경우, 북서 내지 서쪽으로부터 유입되는 기류가 탁월하다. 이는 편서풍과 이른 봄철의 계절풍 영향으로 해석된다. 대체로 높은 빈도의 기류가 중국 북동 연안과 랴오둥 반도를 거쳐 서울 북서쪽 서해로부터 유입되는 모습이다. 하지만 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 기류의 이동 규모가 크지 않음을 확인할 수 있는데, 이는 궤적의 시작고도가 편서풍의 지배적인 영향을 반영할 수 없는 자유대기의 최저고도인 점과 봄철 나타나는 빈번한 이동성 고·저기압의 한반도 통과가 주요 원인으로 해석할 수 있다. 반면, 사례일의 경우 봄철과 비교해 서쪽기류의 유입이 탁월함은 유사하나, 중국 내륙 북동지역으로부터 큰 이동규모의 북서기류 패턴과 중국 동쪽 연안에서부터 우리나라 서해안을 거쳐 유입되는 남서기류 패턴이 보다 뚜렷이 나타나는 것이 특징이다.

사례일 계산된 궤적의 특성을 보다 구체적으로 파악하기 위해 62개의 궤적을 기류 특성별로 분류하여

표 1에 나타내었다. 분류과정에 있어서는 3일전 공기괴의 위치와 서울에 도달하기까지의 궤적의 방향, 고도차이 및 체류시간이 고려되었다. 그 결과 서쪽으로부터 도달하는 기류패턴(NW-D, NW, W, SW)이 높은 빈도(70.5%)로 나타났고, 특히 남서기류(SW) 패턴이 가장 높은 빈도(26.2%)를 보여 서울지역 야간 오존농도 상승과 크게 관련함을 보여 주었다.

SW 패턴의 경우 전반적으로 서울에 도달하기 전 1~2일 동안 중국 동쪽 또는 남동연안에 기류가 머물다가 비교적 빠르게 서울로 유입되는 형태를 가졌다. 여기서는 제시되지 않았지만 일기도 분석을 통해 궤적 계산시간 동안 고기압 중심이 오염원이 풍부한 중국 동쪽 연안(Streets and Waldhoff, 2000)에 정체되었다가 동진 하는 형태를 다수 확인할 수 있었고, 아울러 기압골의 접근과 함께 남동-북서방향으로 비교적 강한 기압경도력이 형성되는 종관조건이 나타나 SW 패턴의 궤적을 잘 설명해 주었다.

즉, 이러한 고·저기압의 이동과 함께 나타나는 SW 패턴은 중국 동쪽/남동쪽 연안에 축적된 오존이 고기압 가장자리 또는 기압골 전면을 따라 우리나라로 유입되는 과정을 예상할 수 있다. 특히 고기압 가장자리를 따라 나타나는 오존의 장거리 수송 현상은 NARSTO (2000) 등의 연구에서 지역 오존오염의 중요한 기상학적 메커니즘으로 언급된 바 있다. 아울러 SW 패턴의 대부분 궤적들이 이동 중에 상승하는 모습을 보여 중국연안 대기경계층 내의 오염물질 수송을 예상할 수 있는 부분이다. 결과적으로 야간 고농도일에 나타난 탁월한 SW 패턴은 상기 지상 풍계 분석에서 제시된 결과와 함께 오존의 장거리 수송에 기여하는 특징적인 기류형태로 해석될 수 있다.

SW 패턴 다음으로 높은 빈도를 나타낸 것은 북서

하강기류(NW-D)패턴(19.7%)으로, 이는 대류권 중·상부로부터의 상대적으로 풍부한 오존을 포함한 공기괴의 이동과 연관된다. 기류의 이동속도가 빠르며 지상에 강한 풍속이 관측되는 것이 특징이다. 대부분의 기류가 전선통과와 관련하며 봄철 중위도 지역에서 빈번히 경험하는 상층대기로부터의 직접적인 오존수송을 예상할 수 있다(Copper and Moody, 2000). 아울러 북서기류(NW)와 서기류(W)패턴(각각 14.8%, 9.8%) 역시 적지 않은 빈도분포를 볼 수 있는데, SW 패턴과 마찬가지로 오염공기괴의 수송이 가능한 기류형태로 중국으로부터의 영향으로 평가될 수 있다. 이외에 상대적으로 깨끗한 공기괴의 유입을 예상할 수 있는 남기류(S)와 동 내지 남동기류(E/SE)패턴이 상대적으로 적은 빈도로 나타났고, 기류정체가 나타난 Local 패턴 역시 6.6%의 빈도를 보여 국지효과(해륙풍 순환 등)에 의한 야간농도 상승이 나타날 수 있음을 보여준다.

이상과 같은 결과를 통해, 대기상층의 연직적인 하향수송과 관련한 NW-D 기류의 영향을 배제한다면 50.8%(NW, W, SW)의 야간 오존농도 상승일이 중국으로부터 직·간접적인 영향을 받는다고 볼 수 있다. 물론 이러한 해석에 있어, 대상지역인 서울이 국지배출이 풍부한 대도시임을 고려한다면 전일 오후에 생성되어 잔류되어 있던 오존의 영향과 기류의 기원이 되는 중국지역의 기상조건 역시 중요하게 고려되어야 할 부분이다.

5. 사례분석

서울지역 야간 고농도오존 현상에 기여하는 장거리 수송의 영향을 보다 구체적으로 파악하기 위해 SW 패턴의 대표적인 사례를 통해 기상조건과 수송 과정을 분석하였다. 사례일은 2000년 4월 18일로 고기압의 이동과 함께 그 가장자리를 따라 중국 동쪽 연안으로부터 오존을 포함한 오염된 공기괴의 수송이 일어났다.

5.1 오존농도 변화

그림 6은 사례일을 중심으로 6일간 서울 27개 지점의 오존농도 변화를 나타낸 것이다. 17일 새벽까지는 큰 폭의 농도변화와 함께 전형적인 도시지역 일변화 패턴을 보이다가, 17일 저녁부터 오존농도 감소

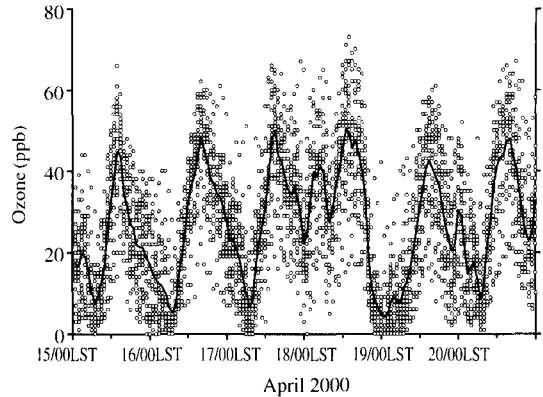


Fig. 6. Hourly time series of ozone concentrations from the 27 monitoring sites in the Seoul for 15~20 April 2000. Open circles and thick line denote the measurement at individual sites and the hourly mean concentrations, respectively.

가 약해지고 18일 새벽에는 대부분의 지점에서 오존농도가 뚜렷이 상승하는 현상이 나타났다. 0500 LST를 정점으로 다수의 측정망에서 60 ppb에 가까운 높은 농도가 측정되었고, 최고 65 ppb의 농도(신림, 0600 LST)가 기록되었다. 이와 같은 야간의 농도분포는 광화학 생성의 결과로 해석할 수 없으며 오존의 직접적인 수송이 기여하였음을 시사한다.

5.2 기상조건

사례일 오존수송 과정을 상세히 고찰하기 위해 사례일 전후의 다양한 기상조건을 분석하였다. 그림 7은 4월 16일과 17일 1500 LST, 그리고 사례일인 18일 0300 LST의 지상일기도를 나타낸 것으로 고기압 시스템이 한반도에 영향을 주며 중국으로부터 동진하는 모습을 볼 수 있다. 16일 중국 남동연안에 위치한 고기압의 중심이 서행하여 24시간 후 동중국해에 위치하는 모습이다. 이러한 기압배치는 중국 동쪽 연안지역이 16일과 17일 고기압 중심과 그 후면에 위치하게 되어 풍부한 배출원이 존재하는 이 지역에 활발한 광화학적 오존생성과 축적을 예상케 한다 (Carmichael *et al.*, 1998). 12시간 후 고기압 중심은 점차 일본 남쪽 해상으로 동진하였고, 우리나라는 고기압의 가장자리에 위치하며 중국 대륙의 저기압과 마주하게 된다. 즉, 고기압중심의 이동과 함께 17일 오후부터 중국 동쪽 연안의 공기괴가 우리나라로 유입되

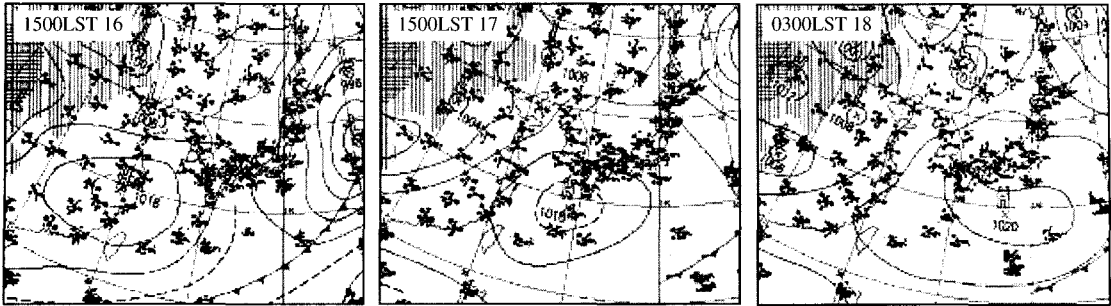


Fig. 7. Surface weather maps at 1500 LST 16~17 and 0300 LST 18 April 2000.

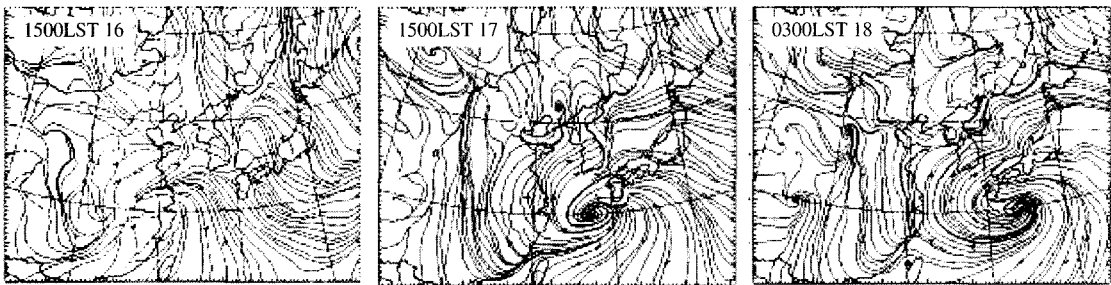


Fig. 8. Streamline charts from MM5 at the 1000 hPa surface for 1500 LST 16~17 and 0300 LST 18 April 2000.

는 종관조건이 형성되었고, 이는 16, 17일 고기압 하에 축적된 오존과 오염된 공기괴의 장거리 수송을 가능하게 함을 보여준다.

그림 8은 MM5로 계산된 유선도로서 고기압 시스템 이동에 따른 종관기류 변화를 보다 상세히 고찰할 수 있다. 16일 1500 LST에는 고기압 중심에서 나타나는 대기정체현상을 뚜렷히 볼 수 있으며, 17일 1500 LST의 경우 중국 동쪽 연안으로부터 고기압 가장자리를 따라 북동쪽으로 기류가 이동하는 모습이다. 이후 사례일 0300 LST에도 우리나라 서해상으로 남서기류가 유입되고 서울이 그 영향 하에 있음을 확인할 수 있다.

상기 제시된 종관기압패턴과 기류특성에서 사례일 새벽과 그 전으로 남서기류가 탁월하게 나타났음을 알 수 있었다. 이러한 기상조건은 지상과 상층에서 관측된 풍계자료에서도 확인할 수 있는데, 서울지역 기상청 AWS의 지상 풍계와 인근 오산(그림 1 참조)에서 관측된 상층 풍계 변화는 이를 잘 보여준다(그림 9, 10). 지상 풍계의 경우 17일 오후부터 강한

남서풍(최고 6.7 ms^{-1} , 1600 LST)이 불기 시작하였고, 이후 풍속은 다소 감소하였으나 18일 새벽까지 거의 동일한 풍계가 유지됨을 볼 수 있다. 특히 18일 새벽 0100 LST에 뚜렷한 풍속의 정점(4.1 ms^{-1})이 나타나 동일시간 평균(1998~2002년)인 1.8 ms^{-1} 와 비교해 상당한 차이의 강한 풍속임을 알 수 있다. 이후 18일 오전까지 점차 풍속이 약해지며 풍향 역시 남풍으로 전환되었다. 아울러 여기서는 제시되지 않았지만 다른 날에 비해 17일 야간과 18일 새벽에 뚜렷한 기온 상승이 나타나 남서풍의 온난이류를 확인할 수 있었다. 그림 10에 제시된 6시간 간격의 상층 풍속 변화의 경우, 17일 야간과 사례일 새벽 대기하층에 강한 남서풍이 뚜렷하다. 특히 18일 0300 LST를 중심으로 920 hPa, 850 hPa고도에서 10 ms^{-1} 이상의 강한 남서풍을 볼 수 있으며, 이는 고기압의 이동과 함께 나타나는 종관풍을 잘 설명해 주고 있다.

결과적으로 사례일을 중심으로 분석된 상기 기상 조건은 중국 동쪽 연안으로부터 오존을 포함한 오염된 공기괴의 장거리 수송을 가능케 하는 것으로, 고

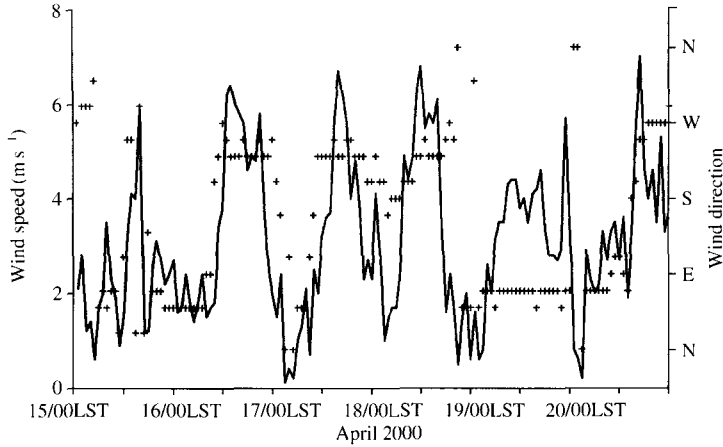


Fig. 9. Hourly time series of wind speed and direction observed at meteorological station in Seoul for 15-20 April 2000. Crosshair and thin line denote wind direction and wind speed, respectively.

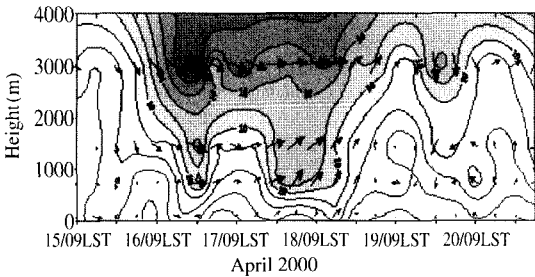


Fig. 10. Vertical profile of wind field with height (1000 hPa, 920 hPa, 850 hPa, and 500 hPa) observed at Osan weather station (37.10° N, 127.03° E) for 15-20 April 2000. Shade level with contours represent wind speed.

기압 시스템의 이동과 함께 강한 남서기류가 우리나라 서쪽으로 유입되는 것이 특징적이다.

5.3 수송경로

그림 11은 사례일 새벽 오존농도가 뚜렷이 상승하기 시작한 0300 LST를 기점으로 3일간(72시간) 500, 1500, 3000 m 고도에서의 후방궤적을 계산한 결과로서, 농도상승에 기여한 공기괴의 수송경로를 파악할 수 있다. 서울에 도달하기 이전의 공기괴는 16일 오후 이전까지 중국대륙의 동부연안에 정체되었고, 17일 새벽부터 빠른 속도로 북동진하여 한반도 서해안을 통해 서울로 유입됨을 볼 수 있다. 이러한 기류패턴은 세 고도에서 큰 차이를 보이지 않아 발달된 고

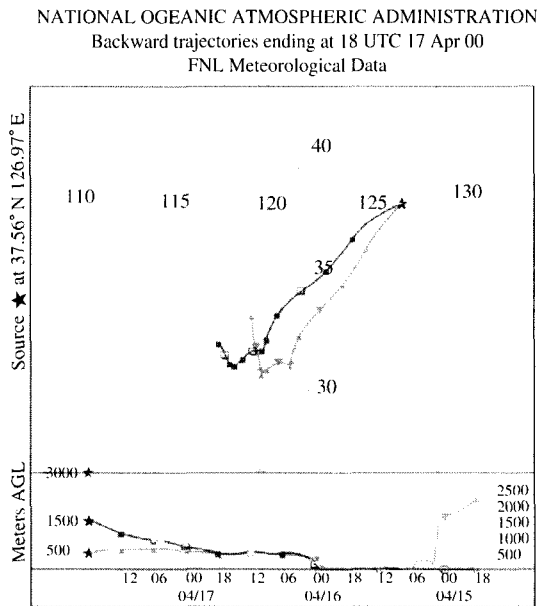


Fig. 11. Three-day backward trajectories of the air mass arrived at Seoul at 0300 LST on 18 April 2000 on the isentropic surface.

기압의 이동과 함께 대기하층의 강한 풍속을 예상케 하는 부분이다. 또한 서울에 도달하는 기류가 16일 0900 LST부터 약하게 상승하는 모습을 보였으며, 특히 500 m와 1500 m에 도달한 기류는 대기경계층 내를 이동해서 온 것임 알 수 있다. 결과적으로 한반도

로 유입되기 약 이틀 전부터 중국 동쪽연안에서 정체된 공기 중에 오존 및 전구물질이 축적되었고, 이후 육지보다 매우 적은 오존의 전성침적조건이 형성되는(Wesely, 1989) 해상 위를 빠르게 이동하면서 서울지역에 그 영향을 준 것으로 해석된다.

또 다른 관점에서, 해상 위를 통과하여 우리나라 서쪽 내륙에 도달한 풍부한 오존을 포함한 공기괴가 내륙을 통해 이동하면서 전성침적과 국지적배출의 영향을 받아 그 성질이 일부 변질되었을 가능성이 있으며, 특히 대상지역이 NO 배출이 풍부한 대도시임을 감안한다면 지상에 나타난 농도상승 보다 일정고도 이상에서의 뚜렷한 오존층(ozone layer)의 존재를 예상할 수 있는 부분이기도 하다. 하지만 이에 대한 정확한 해석은 상층 대기질/기상의 관측자료의 활용이 병행되어야 가능하리라 본다.

5.4 배경 오존 및 CO 농도 변화

서해안에 위치한 배경지역의 오존 및 CO 농도 변화는 상기 언급한 서울지역 야간 오존농도 상승이 장거리 수송의 기여임을 재확인 시켜주며, 우리나라에 유입된 오염공기괴의 오존농도 수준을 파악할 수 있게 한다.

그림 12는 우리나라 국가배경농도 측정지점이며 서울과 비교적 가까운 위치에 있는 강화와 태안(그림 1 참조)의 오존 및 CO 농도(태안의 경우 CO 농도 결측) 변화를 사례일 중심으로 나타낸 것으로, 두 지역의 지리적 위치와 주위환경의 차이로 인해 농도 수준 및 변동의 차이가 다소 존재하지만 17일 야간

부터 농도 상승 경향이 확연하다. 오존의 경우, 80 ppb를 초과하는 높은 수준의 농도(최고 91 ppb)가 17일 야간부터 두 지역에서 측정되어 외부 수송의 영향이 상당함을 보여 주었고, 이러한 고농도현상은 장시간 지속되어 서울지역에 나타난 고농도의 모습과는 비교할 만 하다.

강화지역에 나타난 CO 농도패턴의 경우, 외부로부터 오염 공기괴의 영향이 뚜렷함을 잘 뒷받침해준다. 일반적으로 CO는 대류권내 체류시간이 상대적으로 길기 때문에(Pochanart *et al.*, 1999) 여러 연구에서 대기오염물질의 장거리 수송효과 진단에 대표적인 추적물질로 사용된다. 그림 12에서는 강화지역의 CO 농도가 오존의 변동과 유사하게 17일 야간과 18일 새벽을 중심으로 뚜렷한 상승을 나타내었다. 이와 같이 배경지역에 나타난 오존과 CO 농도가 함께 증가하는 현상은 오염된 공기괴와 광화학반응으로 생성된 오존의 수송 영향으로 평가될 수 있다(Parrish *et al.*, 2000). 결과적으로 거리 등의 차이로 인해 나타나는 불확실성은 있으나, 상기 분석된 기상조건을 함께 고려해 볼 때 서울지역에 나타난 야간의 오존농도 상승은 오존을 포함한 오염공기괴의 장거리 수송 영향으로 설명된다.

6. 결 론

본 연구를 통해 서울지역 야간에 나타나는 오존농도의 상승은 봄철에 뚜렷하고, 장거리 오존수송에 의

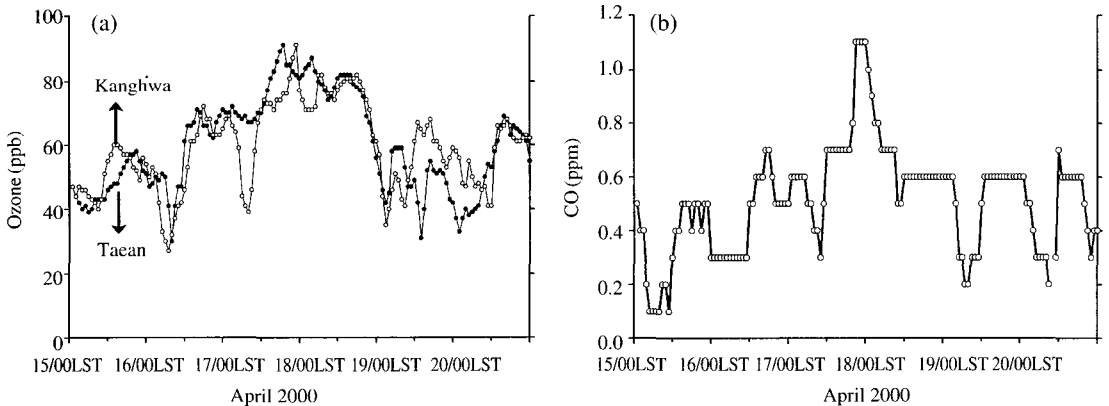


Fig. 12. Hourly time series of ozone concentrations at background monitoring sites (Kanghwa and Taean) (a) and CO concentrations at Kanghwa (b) for 15~20 April 2000.

한 외부효과가 중요한 기여 원인으로 분석되었다.

야간의 오존농도 변화와 빈도분포에서는 수송효과의 영향을 반영하는 특징적인 모습을 봄철에 보여주었으며, 지상의 특정 풍계(SW, SSW)가 봄철 야간 오존농도 상승과 깊이 관여함이 파악되었다. 후방케적 분석결과, 전체 야간 고농도일의 절반 이상이 서쪽으로부터의 공기괴가 유입되는 NW, W, SW 패턴에서 나타났고, 무엇보다 중국 동쪽연안으로부터 이동해 오는 SW 패턴이 가장 높은 빈도(26.2%)를 보였다. 이는 중국으로부터 오존수송을 예상할 수 있는 결과로 봄철 야간 오존농도 상승의 중요한 원인으로 외부영향을 지목하기에 충분하다.

SW 패턴의 전형적인 사례일(2000년 4월 18일) 분석을 통해 야간 고농도현상에 기여하는 장거리 수송의 기상학적 메카니즘이 파악되었고, 수송경로 및 오존수송의 영향을 정성적으로 고찰할 수 있었다. 사례일의 기압패턴 및 유선 분석결과 중국동쪽 연안에 정체된 고기압이 동진하게 되면서 고기압 가장자리를 통해 지역에 축적된 오존 및 전구물질이 장거리 수송될 수 있는 기상조건이 형성됨을 보여 주었고, 실제 후방케적과 배경지역 농도변화 분석 결과 오염된 공기괴의 수송을 확인할 수 있었다. 결과적으로 중국 동쪽연안과 서해를 경유하여 서울로 유입되는 강한 남서기류의 형성은 오존을 장거리 수송시키며 이는 광화학적 오존생성이 존재하지 않는 야간에 지표오존농도를 상승시키는 원인으로 분석되었다.

본 연구에서 분석된 결과를 종합해 볼 때 중국으로부터 오염된 공기괴의 수송이 서울지역 야간 지표오존농도 상승에 상당부분 기여함은 사실이다. 아울러 이러한 외부효과는 지표부근 보다는 일정고도에서 보다 크게 나타날 가능성 크며, 대기혼합과정을 통해 오후의 지표 고농도발생에도 영향을 미칠 수 있음이 추정된다. 하지만 화학측정자료와 연직적인 기상 및 대기질 정보가 충분치 않은 현 실정에서 장거리 수송의 영향이 지표 오존농도 상승에 미치는 직접적인 영향을 정확히 해석하기 불가능하며, 서론에서 제시한 야간 오존농도상승에 관여하는 여러 역학적 효과의 기여를 배제할 수 없다.

따라서 외부효과에 대한 보다 정확한 해석을 위해서는 적절한 지점에서의 기상 및 주요 대기오염물질 농도의 연직관측이 봄철 특징기간에 한해서 만이라도 지속적으로 수행되어야 하고, 관측자료로부터 얻어

진 다양한 역학적 인자들과 오염물질 농도와의 관계 분석이 필수적이다. 아울러 추적자 확산실험과 광화학 수송모델링을 통한 수송메카니즘 파악과 정량적인 분석연구가 병행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경운, 허철구(1996) 고산에서의 1994년 3~4월 측정연구: (II) 기체상 대기오염물질의 특성, 한국대기보전학지, 12(1), 91-99.

김진영, 김영성, 정관영(2000) 서울·인천지역 자동차상관측 바람 자료의 특성 분석, 한국기상학회지, 36(2), 153-166.

환경부(2002) 대기환경연보(2001), 부록 20.

Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.M. Liu, M. Buhr, K.J. Hsu, D.A. Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J.T. Merrill, and R.E. Newell (1996) Long range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region. *J. Geophys. Res.*, 101, 1999-2010.

Baumbach, G. and U. Vogt (1999) Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg. *Atmos. Environ.*, 33, 4017-4027.

Carmichael, G.R., I. Uno, M.J. Phadnis, Y. Zhang, and Y. Sunwoo (1998) Tropospheric ozone production and transport in the springtime in east Asia. *J. Geophys. Res.*, 103 (D9), 10649-10671.

Chan, C.Y. and L.Y. Chan (2000) The effect of meteorology and air pollution transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong Kong. *J. Geophys. Res.*, 105, 20707-20724.

Cooper, O.R. and J.L. Moody (2000) Meteorological controls on ozone at an elevated eastern United States regional background monitoring site. *J. Geophys. Res.*, 105, 855-868.

Corsmeier, U., N. Kalthoff, O. Kolle, M. Kotzian, and F. Fiedler (1997) Ozone concentration jump in the stable nocturnal boundary layer during a LLJ-event. *Atmos. Environ.*, 31 (13), 1977-1989.

Eliasson, I., S. Thorsson, and A.S. Yvonne (2003) Summer nocturnal ozone maxima in Goteborg, Sweden. *Atmos. Environ.*, 37, 2615-2627.

Fuentes, J.D. and T.F. Dann (1994) Ground-level ozone in eastern Canada: seasonal variations, trends, and

- occurrences of high concentrations, *Air & Waste Manage. Assoc.*, 44, 1019-1026.
- Ghim, Y.S. and Y.S. Chang (2000) Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990~1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.
- Jaffe, D., I. McKendry, T. Anderson, and H. Price (2003) Six 'new' episodes of trans-Pacific transport of air pollutants, *Atmos. Environ.*, 37, 391-404.
- Kim, Y.K., H.W. Lee, I.B. Oh, Y.S. Moon, and S.K. Song (2003) Seasonal characteristics of surface ozone associated with flow patterns at Kanghwa background monitoring site in the western Korea, *Proceeding of the 8th International conference on ASAAQ*, 286 pp
- Lam, K.S., T.J. Wang, L.Y. Chan, T. Wang, and J. Harris (2001) Flow patterns influencing the seasonal behavior of surface ozone and carbon monoxide at a coastal site near Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 35, 3121-3135.
- Lee, Y.C., G. Calori, G., Hills, P., and G.R. Carmichael (2002) Ozone episodes in urban Hong Kong 1994~1999, *Atmos. Environ.*, 36, 1957-1968.
- Liu, C.M., S.C. Liu, and S.H. Shen (1990) A study of Taipei ozone problem. *Atmos. Environ.*, 24A, 1461-1472.
- NARSTO (North American Research Strategy for Tropospheric Ozone) (2000) an assessment of tropospheric ozone pollution—a North American perspective, C3-34.
- Parrish, D.D., J.S. Holloway, R. Jakoubek, M. Trainer, T.B. Ryerson, G. Hubler, and F.C. Fehsenfeld (2000) Mixing of anthropogenic pollution with stratospheric ozone: A case study from the North Atlantic wintertime troposphere, *J. Geophys. Res.*, 105, 24363-24374.
- Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kinjo, and H. Tanimoto (2002) Surface ozone at four remote island sites and the preliminary assessment of the exceedances of its critical level in Japan, *Atmos. Environ.*, 36, 4235-4250.
- Pochanart, P., J. Hirokawa, Y. Kajii, and H. Akimoto (1999) Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed Oki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 103, 3621-3631.
- Reitebuch, O., A. Strassburger, S. Emeis, and W. Kuttler (2000) Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements, *Atmos. Environ.*, 34, 4315-4329.
- Salmond, J.A., and I.G. McKendry (2002) Secondary ozone maxima in a very stable nocturnal boundary layer: observations from the Lower Fraser Valley, BC, *Atmos. Environ.*, 36, 5771-5782.
- Samson, P.J. (1978) Nocturnal ozone maxima, *Atmos. Environ.*, 12, 951-953.
- Streets, D.G. and S.T. Waldhoff (2000) Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO, *Atmos. Environ.*, 34, 363-374.
- Ueda, H., S. Mitsumoto, and H. Kurita (1988) Flow mechanism for the long-range transport air pollutants by the sea breeze causing inland nighttime high oxidants, *J. Appl. Met.*, 27, 182-187.
- Wang, T., Y.Y. Wu, T.F. Cheung, and K.S. Lam (2001) A study of surface ozone and the relation to complex wind flow in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 35, 3203-3215.
- Wesely, M.L. (1989) Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional scale numerical models, *Atmos. Environ.*, 23, 1293-1304.