

강릉과 원주지역의 야간 오존 변화에 대한 분석

김현숙¹ · 김재환^{2,*} · 이현진²

¹이화여자대학교 과학교육과, 120-750, 서울시 서대문구 대학동 11-1

²부산대학교 대기환경학과, 609-735, 부산시 금정구 장전동

The Analysis of the Nocturnal Ozone Variations over Kangreung and Wonju

Hyun Sook Kim¹, Jae Hwan Kim^{2,*}, and Hyun Jin Lee²

¹Department of Earth Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

²Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: This paper analyzed the characteristics of daily ozone variations over Kangreung and Wonju. It was found that the diurnal cycle of ozone over Wonju has a primary ozone peak in the afternoon and a minimum around sunrise, which is a typical diurnal ozone cycle observable in the urban area. However, the cycle over Kangreung shows a primary peak in the afternoon and secondary peak around 3 a.m. The amounts of ozone in the secondary peak is occasionally higher than that in the primary peak. This nocturnal ozone peak is frequently observed year-round, and the highest frequency and extent are observed in spring. The possible cause of this nocturnal ozone increase was investigated using meteorological parameters and the HYSPLIT trajectory model. It was found that the nocturnal ozone peak is highly correlated with strong wind speed, which has led to positive temperature anomaly. The trajectory model revealed that when the secondary peak occurred, the air was originated from the west and a sinking motion subsequently followed. These findings suggested that when the westerly wind is strongest in spring, the polluted airs from urban areas are transported to the upper boundary layer over Kangreung area. In the case of strong wind during the night, nocturnal ozone peaks were produced by active vertical mixing between lower boundary and upper boundary layers.

Keywords: tropospheric ozone, nocturnal ozone increase, vertical mixing, transport, meteorological factors

요약: 이 논문은 강릉과 원주지방의 오존의 일변화의 특성을 분석하였다. 원주지방의 오존의 일변화는 대도시 지역에서 관측되어지는 오후에 최대치, 일출부근에 최소치를 보여주고 있다. 그러나 강릉지방의 일변화에서는 오후에 최대치를 보여주나 새벽 3시경이 2차 극값이 관측되어졌다. 2차 극값의 경우 오후 최대 값보다 높은 값이 종종 관측되어졌다. 이와 같은 새벽에 발생하는 오존 상승은 일년 내내 관측되어졌으나 그 양과 범위에서 봄철이 가장 뚜렷하였다. 이와 같은 새벽 오존 상승에 대한 원인을 알아보기 위하여 기상인자와 오존의 상관관계와, HYSPLIT 모델을 이용하여 공기의 기원을 조사하였다. 새벽 오존 농도 상승이 나타나는 날은 바람이 강하고 온도가 상대적으로 높은 날이었다. 새벽 오존 농도 상승이 일어날 때 모델을 이용한 공기의 기원을 분석해본 결과 서풍이 불면서 하강운동이 동반한 경우였다. 이러한 분석결과는 편서풍이 강하게 부는 봄철에 대도시가 밀집한 강릉의 서쪽 지역에서 이동되어온 오존의 영향에 의한 것으로 사료되어진다. 이런 경우 밤에도 바람이 강하게 불어 강력한 혼합현상에 의해 오존이 풍부한 대기 상층의 공기가 하부로 유입되면서 지표 부근 오존의 양이 증가한 것으로 보인다.

주요어: 대류권오존, 야간오존상승, 수직혼합, 수송, 기상인자

*Corresponding author: jaekim@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-510-2172

Fax: 82-51-515-1689

서 론

대기 중 전체 오존의 약 10%를 차지하고 있는 대류권 오존은 대류권의 화학구성을 조절하고 온실기체로써 지구의 기후를 조절하기도 하며 오염물질로 인체와 식물에게 영향을 끼친다. 대류권 오존은 오존이 밀집되어있는 성층권에서 유입되거나 NO_x와 탄화수소의 광화학 반응으로 인해 생성되고, 지표면 흡착에 의해 소멸되거나 야간에는 질소산화물과의 반응에 의해 소멸된다(Logan, 1985). 이러한 대류권 오존은 우리나라를 비롯해 일본과 중국에서 일반적으로 다음과 같은 특징을 보인다. 봄에는 겨울동안 축적된 오존의 전구물질들이 활발하게 반응하고 대류권계면의 불안정으로 인해 성층권 공기의 유입이 활발하게 일어나므로 고농도의 대류권 오존이 나타난다(Logan, 1985; Kajii et al., 1998; Pochanart et al., 1999; Ghim and Chan, 2000; 설동일, 2001). 그러나 여름에는 아시아 몬순의 영향으로 해양에서 깨끗한 공기가 유입되므로 다른 계절에 비해 오존의 농도가 낮아진다(Mauzerall et al., 2000; Sunwoo et al., 1994; Pakpong et al., 1999). 가을과 겨울에는 중국 대륙에 저기압이 형성되는 아시아 몬순의 영향으로 중국 대륙에서부터 오존과 오존의 전구물질들이 우리나라로 유입된다. 그러나 겨울에는 일사량이 적으므로 광화학 반응으로 인한 대류권 오존 생성이 적으므로 가을에 대류권 오존 농도가 더 높게 나타난다. 주로 광화학 반응에 의해 생성되는 지표면 오존은 기온이 높고 일사량이 많은 오후에 가장 높고 새벽에 가장 낮은 일변화를 보인다(Otlmans and Levy, 1994; 김민영 외, 2002). NO 농도가 높은 오염지역 일수록 주간에 광화학 반응에 의한 오존의 생성과 야간에 오존의 소멸반응이 활발하게 일어나므로 최고농도와 최저농도의 일변화 차이가 크다(Ghim, 2000). 반면 오염원이 없는 청정 지역은 광화학 반응에 의한 오존의 생성이 적고 소멸반응도 활발하지 않으므로 오염지역보다 최고농도는 낮고 일변화 차이도 작다(Fuentes and Dann, 1994). 그러나 일부 청정 지역에서는 대도시나 공단의 오염원으로부터 바람에 의한 오존 및 오존의 전구물질들이 장거리 수송으로 인하여 오존 농도가 높게 나타나는 것으로 밝혀졌다(Sunwoo et al., 1994; Tulet et al., 1999). 반면 일부 지역에서는 일몰 이후에 감소하던 오존농도가 새벽에 다시 증가하였다가 감소하는 경향을 보인다(Ghim and Chan, 2000).

Reitebuch et al.(2000)은 지역에 따라 원인이 다를 수 있으나 대류권계면의 하강으로 인하여 성층권 오존이 유입되거나 혼합고 상층의 고농도 오존이 야간에 대기의 연직 혼합에 의해 유입되기 때문이라고 하였다. 1989년 8월에 서울 성수동에서 발생한 새벽의 2차 최고 농도는 약한 풍속으로 인한 혼합고 높이의 감소로 오존의 수직교환이 활발하게 일어나지 않아서 발생하였다(정용승과 정재섭, 1991). 부산 지역에 새벽 2시부터 5시 사이에 나타나는 2차 최고 농도는 강한 풍속으로 인한 상층대기의 연직 혼합과 인접지역으로부터의 수평 수송에 의해 나타난다고 한다(전병일 외, 1995). 또한 김유근과 홍정혜(1998)는 부산지역에서 야간의 오존 농도 상승은 풍속과 높은 상관관계를 보이며 기압골이나 저기압의 기상장이 존재할 때 야간의 고농도 오존이 발생한다고 하였다. 해발 3580 m에 위치한 청정지역인 스위스의 융프라우요흐(Jungfrau)에 있는 관측소에서는 상층의 기압골과 제트기류에 의한 대기의 연직혼합에 의해 오존농도의 일변화가 매우 적으며 야간에 뚜렷한 농도의 상승이 일어난다고 한다(Schuepbach et al., 1999). 이처럼 야간의 고농도 오존 상승은 그 지역의 특성과 기상장과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료되나 뚜렷한 원인에 대해서는 알려져 있지 않다.

본 연구의 관측 지점인 강릉과 원주의 지표면 오존 농도의 일변화를 살펴보면 야간에 지표 오존의 농도가 상승하고 있다. 본 연구에서는 1996년부터 1998년까지 3년 동안 강릉과 원주의 지표 오존 농도를 비교하여 야간 오존농도 상승의 경향을 분석하고 기상인자가 미치는 영향을 분석하여 야간 오존농도 상승의 원인을 밝히고자 한다.

자료 및 분석 방법

본 연구에서는 강릉과 원주의 지표 오존 특성을 분석하기 위해 환경부 및 지방자치단체에서 운영하고 있는 측정소에서 관측된 1시간마다 평균한 자료를 사용하였다. 또한 지표에서 오존과 기상인자와의 관계를 알아보기 위해 강릉(37° 45' N)과 원주(37° 20' N)의 기상청에서 관측한 기상자료를 사용하였다. 상층의 기상 자료는 오산 공군기지에서 관측한 로원존데 자료를 사용하였다. 오산과 포항은 본 연구의 대상지점인 강릉과 원주와 많이 떨어져 있으나 강릉과 원주 주변의 종관 기상장 분포를 알아보기 위해 사

용하였다.

본 연구의 목적인 야간의 오존 농도 상승을 알아보기 위한 야간 오존 농도 상승일은 지표에서 최저 농도가 가장 많이 발생하는 시간대인 밤 9시부터 새벽 6시까지 9시간 동안의 최고 농도와 최저 농도의 차이가 월평균 차이보다 큰 날로 정의하였다. 그러나 10개의 관측값 중에서 60% 이상 결측이 있었던 날은 대표값으로 사용할 수 없으므로 분석에서 제외하였다. 3년 동안의 평균 결측률은 7%로써 분석을 하기에는 무리가 없었으나 월별로 편차가 있으므로 야간의 오존 농도 상승일을 분석대상 일수에 대한 비율로 나타내었다. Table 1은 96년부터 98년까지 강릉에서 발생한 야간 오존농도 상승의 발생 빈도를 나타낸 것이다. 96년 가을부터 98년 봄까지 야간의 오존농도 변화가 비교적 컸으므로 본 연구에서는 야간의 오존 농도 변화가 크면서 계절 변화를 살펴볼 수 있도록 1997년 일년 동안의 자료를 기상인자와 비교해보았다. 지표의 기상관측 자료는 결측이 거의 없었으나 온도와 상대습도는 3시간 간격, 풍속과 풍향은 매시간 마다 측정되었으므로 오존농도와 기상인자들간의 상관관계를 매 시간 비교할 수는 없었다. 특히 오산의 상층 기상 관측 자료는 6시간 간격으로 하루에 4회만 관측이 이루어져 분석 대상 시간인 밤 9시부터 다음 날 새벽 6시 사이 단 2회의 측정값만을 사용할 수 있었다. 사례 분석시 공기의 이동 경로를 알아보고 오존의 근원 지역을 알아보기 위해 Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) 모델을 사용하였다. HYSPPLIT 모델은 공기계의 복잡한 분산과 침적을 고려해 지나온 경로(backward trajectory)와 앞으로 지나갈 경로(forward trajectory)를 알 수 있다. 본 연구에서는 야간의 오존 농도 상승이 나타나는 새벽 4시에 100 m 상공에서 등온위(isentropic) 조건으로 24시간 전의 경로를 추정하는데 사용하였다. 그러나 격자 간격이 180 km×180 km이므로 태백산맥의 영향이 뚜렷하게 보이지 않았다. 또한 공기가 단열변화를 한다는 가정 하에 공기의 이동경로를 추정하므로 공기의 움직임이 작은 국지적인 지역에서 사용할 때에는 오차가 많아 대략적인 경로만을 추정할 수 있다(Oltmans et al., 1996).

이러한 자료를 토대로 본문에서는 강릉과 원주의 계절별, 일별 오존 농도 변화를 살펴본 후 야간의 고농도 오존이 나타날 때 지표 기상인자를 분석해 보겠다. 또한 상층의 기상 인자가 야간의 고농도 오존

에 미치는 영향을 알아본 후 사례 분석을 통해 야간의 오존 농도 상승의 원인에 대해 알아보도록 하겠다.

결과 및 고찰

강릉과 원주의 오존 농도

일반적으로 오염지역에서 광화학 반응에 의해 생성되는 지표 오존은 주간에는 오존의 생성이 활발하고 야간에는 소멸 반응이 활발하게 일어나므로 일변화가 크게 나타난다(Oltmas and Levy, 1994). 우리나라에서 대표적 오염지역인 서울의 경우 높은 온도와 강한 일사량, 낮은 상대습도와 약한 바람이 존재할 때 80 ppb 이상의 고농도 오존이 생성되었다(Heo and Kim, 2002). 서명석 외(1995)는 일평균 상대 표준편차를 이용하여 일평균 상대 표준편차가 0.96인 서울의 경우 0.12인 제주도 고산보다 오염된 지역이라고 하였다. 그에 반해 본 연구 지점인 강릉과 원주의 일평균 상대 표준편차는 강릉이 0.43, 원주가 0.73으로 원주에 비해 강릉이 낮으므로 비교적 청정한 지역으로 사료된다.

Fig. 1-a와 1-b는 97년 강릉과 원주에서의 연 평균 오존농도의 일변화와 월 평균 오존농도의 변화를 나타낸 것이다. 원주의 지표 오존은 기온이 높고 일사량이 많은 14시에서 16시 사이에 가장 높고 새벽에 가장 낮은 광화학 반응에 의해 생성되는 오존의 전형적인 일변화를 뚜렷하게 보인다. 청정 지역인 강릉에서는 연 평균 최고농도가 15시에 31 ppb로 원주의 35 ppb보다 낮지만 최저농도는 원주의 7 ppb보다 현저하게 높은 18 ppb를 기록하였다. 그러나 강릉에서는 1차 최고농도 이후 감소하던 오존이 21시부터 다시 증가하기 시작하여 새벽 3~4시에 2차 최고농도가 나타나며, 야간의 높은 농도로 인하여 강릉의 월 평균 오존농도는 원주에서보다 높게 나타난다. 이것은 오염된 대도시의 오존 농도가 광화학 반응에 의해 최고 농도는 높지만 평균 농도는 전원지역보다 오히려 낮을 수 있다는 선행연구와도 일치한다(Fuentes and Dann, 1994).

강릉의 새벽에 관측되는 오존 농도를 살펴보면 주간의 농도가 야간의 소멸반응 지연으로 인해 서서히 감소하거나, 1차 최고 농도 이후 낮아지던 오존농도가 밤 9시 이후에 다시 증가하였다가 감소하는 날, 그리고 오존농도의 일변화가 거의 없는 세 가지 경우로 나타난다. 그러나 본 연구의 목적은 야간에 발

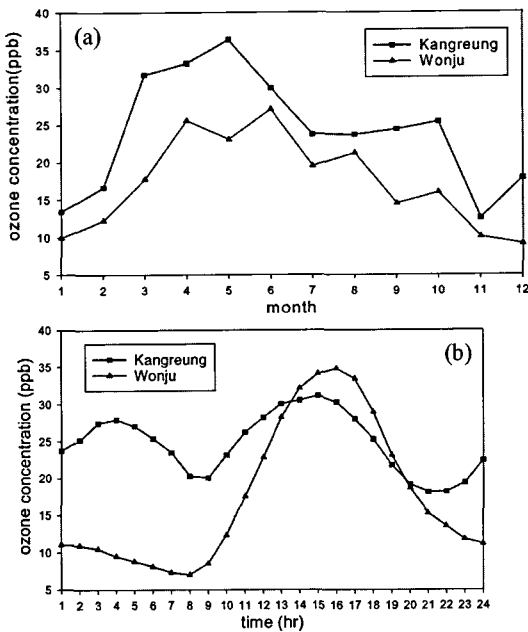


Fig. 1. Monthly (a) and diurnal (b) variations of annual averaged ozone concentration at surface over Kangreung and Wonju during 1997.

생하는 고농도 오존의 원인을 알아보는 것이므로 야간에 오존의 농도가 증가하는 날만을 분석 대상으로 하였다. 앞서 언급한 96년부터 98년까지 강릉에서 발생한 야간의 오존농도 상승의 발생 빈도를 살펴보면 계절에 따라 차이가 없이 꾸준히 발생하고 있다 (Table 1). 그러므로 강릉에서 야간의 오존농도 상승은 계절에 따른 특정한 기상조건 변화 때문이 아니

라 연중 발생하는 보편적인 현상으로 사료된다. 오존 농도의 최대값과 최소값의 차이는 봄에 증가하고 여름에 감소한 후 가을에 다시 증가하는 우리나라의 대류권 오존의 계절 변화와 일치하고 있다. 또한 봄에 고농도 대류권 오존의 발생으로 인해 야간 오존 농도의 최대값과 최소값 차이가 봄에 가장 크게 나타나는 것으로 사료된다. 3, 4, 5월 동안 야간에 오존의 최고농도는 월 평균 농도보다 높은 46~51 ppb이었으며 60 ppb 이상인 날도 16일이나 되었다. 그러나 1, 2월과 11, 12월에는 상순한 2차 최고농도가 대부분 20 ppb 이하의 낮은 값을 보였으며 40 ppb 이상인 날은 4개월 동안 단 2번에 불과하였다. 이러한 봄철의 야간 고농도 상승은 주간의 최고농도보다 높은 경우가 많으며 밤 9시 전후에 관측된 최저농도보다 30~40 ppb 정도의 뚜렷한 상승이 있다. 그러므로 야간의 고농도 오존은 소멸반응의 지연이 주원인이 아닌 것으로 사료된다. 야간 고농도 오존의 다른 원인을 살펴보기 위해 오존과 기상인자와의 관계를 살펴보았다.

강릉과 원주에서 지표 기상인자와 오존의 특성

먼저 강릉과 원주의 지표 기상인자들을 살펴보았다. 강릉의 경우 15시에 나타나는 일 최고 연평균 기온은 원주에서와 비슷하지만 일 최저 연평균 기온은 10.9°C로 원주보다 4°C 이상 높게 나타났다(Fig. 2a). Fig. 2b는 강릉과 원주의 97년 연평균 풍속의 일변화를 나타낸 것이다. 원주의 경우 새벽에는 0.5 m/s 이하의 약한 바람이 불지만 강릉에서는 야간의 평균풍

Table 1. Frequency of nocturnal ozone concentration increase days; max-min denotes differences of nocturnal maximum and minimum of monthly mean ozone concentration, number of days denotes number of nocturnal ozone concentration increase days and the numbers in the parenthesis denote the total number of days for analysis and ratio denotes the percentage of number of days in table with the numbers in the parenthesis

Year	month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
96	max-min	6.7	10.3	6.5	10.3	9.9	7.2	6	10	11.9	14	11.4	14	9.9
	number of days	18(28)	17(27)	20(30)	19(21)	16(23)	21(29)	21(31)	22(31)	21(30)	19(30)	15(24)	19(29)	228(333)
	ratio (%)	64	63	67	91	70	72	68	71	70	63	63	66	69
97	max-min	7.9	6.8	11.4	20.5	13.6	11.9	11	5.4	15	13.5	9.4	7.9	11
	number of days	17(27)	19(27)	24(30)	16(23)	18(30)	22(25)	19(31)	18(30)	20(29)	16(29)	19(24)	23(30)	231(335)
	ratio(%)	63	70	80	70	60	88	61	60	69	55	79	77	69
98	max-min	6.5	11.6	10	8.8	10.6	7	6.7	3.1	5.6	4.1	6.2	5.2	7.1
	number of days	21(28)	20(28)	21(29)	19(30)	16(30)	23(30)	22(31)	18(31)	21(30)	21(28)	15(26)	22(29)	239(350)
	ratio	75	71	72	63	53	77	71	8	70	75	58	76	68

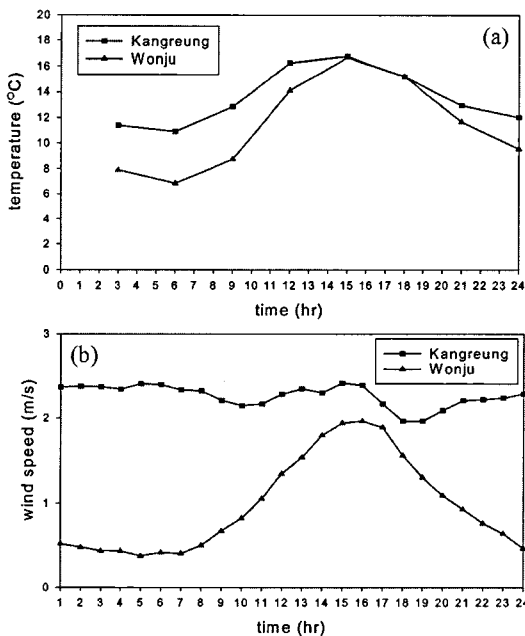


Fig. 2. Daily variations of average annual temperature (a) and wind speed (b) at surface over Kangreung and Wonju during 1997.

속이 1.5~3.5 m/s로 주간과 비교했을 때 상대적으로 강하다. 강릉에서는 주간에 해풍인 동풍계열의 바람이 우세하며 해풍의 발생비율은 연중 70~80%로 여름철에 발생 비율이 높았다. 그러나 야간에는 바람이 없었던 9일간을 제외하고는 연중 대부분 육풍인 서풍계열의 바람이 불었다. 야간에 풍속이 매우 높게 나타났는데 육풍과 동시에 태백산맥에서 불어 내려오는 산풍의 영향에 의한 것으로 보여 진다. 이로 인해 야간에 지표부근의 온도가 낮아지지 않고 일시적인 온도의 상승이 빈번하게 발생하였다. 또한 낮에 동풍계열의 해풍이 발생하지 않는 날에도 밤에는 서풍이 지속적으로 불었고 서풍이 2~3일간 계속되는 경우도 있었다. 특히 10월에는 주간의 동풍 계열의 바람보다 야간의 서풍 계열의 풍속이 강하게 나타나는데 이것은 10월에도 야간 농도 상승일의 최고농도가 비교적 높게 발생하는 것과 상관관계가 높게 나타났다. 강릉에서 야간에 지속적으로 부는 바람은 지표면 부근의 기온 역전을 잘 발달시키지 못하고 상대적으로 높은 온도를 보여주는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 야간의 오존농도 상승일 중에서 야간의 최고 농도가 40 ppb 이상으로 고농도의 오존이 나타난 날을 대상으로 지표의 기상인자와의 상관관계

를 분석해보았으며 기상 조건의 변화가 많은 강수일은 분석 대상에서 제외하였다. 봄철을 대표하는 4월 중에 배경농도인 40 ppb 이상의 2차 최고농도가 나타난 날의 시간별 온도변화에 따른 오존농도의 변화를 분석해 보았다. 온도 측정이 3시간 간격으로 이루어졌으므로 온도변화에 따른 21시와 24시, 24시와 3시, 3시와 6시의 오존농도의 변화를 분석하였다. 지표면 온도와 오존농도는 직접적인 상관성이 나타나지 않았으나 온도의 변화에 따른 오존 농도의 변화는 대체로 높은 상관관계를 나타냈다($r=0.57$). 그러나 야간의 온도 변화에 따른 오존 농도의 변화는 고농도가 많이 관측된 3, 4월에만 높은 상관을 보이므로 연중 발생하는 오존농도 상승의 근본적인 원인으로 해석될 수 없다. 야간의 고농도 상승이 많은 4월과 10월의 농도 상승일 중에서 상승한 최고농도가 40 ppb 이상인 날에 대해 지표의 풍속과 1시간 이후에 측정된 오존농도와의 상관관계를 분석해본 결과, 4월에 지표 풍속과 오존농도의 상관 계수는 0.41인데 반해 지표 풍속과 1시간이후의 오존농도와의 상관계수는 0.52로 상관성이 더 높게 나타났다. 2시간 혹은 그 이상의 시차가 발생하는 경우도 있으나 일반적으로는 1시간 이후 측정된 오존과 가장 높은 상관을 보였는데 대기의 혼합에 시간이 요구되어지기 때문에 지표 풍속과 시간이 지난 이후의 오존 농도와 상관관계가 높은 것으로 사료된다. 지표 풍속과 1시간 이후 측정된 오존농도는 10월에도 상관계수 0.51로 다른 계절에 비해 비교적 높게 나타났다. 오존농도는 단조로운 선형적 변화를 보이는데 비해 풍속의 변화는 매우 불규칙하여 강약이 되풀이되는 것임을 고려할 때 실제 풍속과 오존농도와의 상관관계는 이것보다 높을 것으로 사료된다.

야간의 오존농도 상승과 대류권 상층의 기상인자와의 관계

지표에서 야간의 고농도 오존과 대류권 상층부의 바람의 관계를 알아보기 위하여 오산 공군기지에서 관측한 상층 기상자료를 분석하였다. 강릉과 오산은 지역적으로 멀리 떨어져 있으며 기상패턴이 다르지만 상층은 지표부근의 영향이 매우 적으므로 850 hPa(약 1.4 km), 700 hPa(약 3 km)에서의 풍향과 풍속이 야간 오존농도 상승에 미치는 영향을 분석하였다. 상층의 풍향과 풍속은 6시간 간격으로 측정된 것이어서 밤 9시와 다음날 새벽 3시의 자료를 비교분석 하였다.

강릉에서 야간의 고농도 오존이 발생하였을 때 상층의 풍속이 서풍계열(280°~320°)이며 오후 3시보다 밤 9시나 새벽 3시에 강하게 나타났다. 강릉에서 발생한 야간 오존농도 상승이 상층 풍속과 관계가 있다면 상층 풍속을 측정할 오산 근처의 원주에서도 오존농도 상승이 일어나야 한다. 그러므로 3월부터 10월까지의 기간 중 강릉뿐 아니라 원주에서도 뚜렷한 농도의 상승이 있었던 날들에 대해 850 hPa, 700 hPa에서의 풍속을 분석해 보았다. 강릉과 원주 두 지역에서 동시에 야간 오존 농도 상승이 있었던 날은 3월에 8일, 10월에 6일간이었는데 이 날들은 모두 850 hPa, 700 hPa에서 야간에 풍속이 증가한 날들이었으며 4월에는 5일 중 4일이, 5월에는 4일 모두가 상층의 강한 풍속과 일치하는 것으로 나타났다. 또한 3월부터 10월까지 원주에서 야간 오존농도 상승이 일어났던 날은 모두 강릉에서도 상승이 일어났으며 특히 상층의 바람이 강하면서 밤 9시나 새벽 3시에 풍속이 증가한 날은 모두 강릉의 2차 최고농도가 전일 강릉이나 원주에서 나타난 1차 최고농도 보다 높은 날이었다. 특히 봄철에 야간의 지표 오존농도 변화가 크고 절대값도 다른 계절에 비해 크게 나타난다. 이것은 상층까지 이어지는 강한 바람으로 인하여 대기의 연직 혼합이 활발하게 일어날 때 봄철 상층의 오존 농도가 지표 오존농도 상승에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 그리고 지표 오존의 광화학 생성이 활발한 날 수도권지역에서 형성된 고농도 오존이 강한 편서풍의 영향으로 강릉지역의 대류권 상층에 머물다가 강한 바람에 의해 대기가 혼합되면서 대류권 상층 오존이 지표면 부근으로 유입되는 것으로 사료되며 서울 지역에서 편서풍의 바람이 불 때 고농도의 오존이 나타난다는 선행연구와도 일치한다(Heo and Kim, 2002).

일반적으로 강수일에는 일사량의 감소와 강수로 인한 오염물질의 제거로 광화학 반응에 의한 오존의 생성이 활발하지 않고 풍속이 강하므로 대류권계면 고도가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그러나 강수일에도 강릉의 지표 오존 일변화와 그렇지 않은 날의 일변화가 서로 유사하게 나타나므로 연중 바람이 강한 강릉에서의 오존이 혼합층 위 상층대기의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 야간에 지표의 풍속이 약한 원주에서는 상층 풍속이 지표까지 영향을 미치지 못하고 역전층이 형성된 지표부근에서 오존의 소멸만이 진행되므로 일출 직전에 매우 낮은

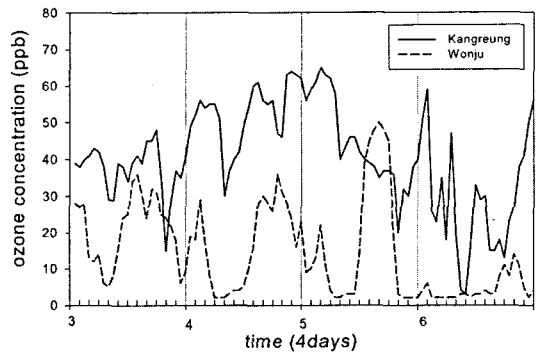


Fig. 3. Daily variations of ozone concentration at surface over Kangreung and Wonju during 3 to 6 March 1997 (case 1).

최저농도가 나타나는 것으로 사료된다.

사례 분석

강릉에서 야간에 고농도의 오존 상승이 나타난 날의 지표면 기상 상태, 상층의 온도와 풍속을 살펴보았다. 또한 비슷한 위도대에 위치한 원주에서 발생한 오존농도 상승과도 비교해보았다. 원주에서는 야간에 오존 농도 상승이 자주 발생하지 않았지만 최저농도 관측된 시각 이후에 20 ppb 이상의 상승을 보이는 날이 드물게 관측되었다. 그러므로 사례 분석에서는 강릉의 야간 오존 농도 상승이 고농도로 발생한 날 중에서 원주에서도 오존농도의 상승이 있었던 기간을 사례 1로, 강릉에서는 농도의 상승이 일어났지만 원주에서는 발생하지 않은 날을 사례 2로 선택하였다.

1) 사례 1(1997년 3월 3~6일)

3월 3일부터 5일까지 우리나라는 전반적으로 이동성고기압의 영향을 받으며 맑은 날씨가 계속되었고 6일에는 기압골이 통과하면서 전국적으로 비가 내렸다. 3일과 4일은 고기압의 영향을 받는 맑은 날씨로 광화학 반응에 의한 지표 오존 생성에 유리한 조건으로 사료된다. Fig. 3은 3월 3일부터 6일까지 원주와 강릉에서 시간별 오존농도의 평균을 나타낸 것이다. 3일 밤부터 6일까지 강릉에서는 야간의 고농도 오존이 발생하였으며 원주에서도 3일과 4일에는 20 ppb 이내의 농도 상승이 새벽에 발생하였다. 5일 새벽 4시에 강릉에서는 65 ppb의 최고 농도를 기록했는데 이 기간 동안 주간에 발생한 원주의 최고농도인 50 ppb보다 15 ppb나 높았다. 14 mm의 강수가 있었던 6일 원주에서의 오존농도는 일 최고 10 ppb

이하의 매우 낮은 값이었다. 그러나 1.3 mm의 강수가 있었던 강릉에서는 낮 동안에 10~40 ppb까지의 불규칙한 변화를 보였으며 야간에 농도의 상승이 일어나 7일 새벽에는 62 ppb의 높은 값을 기록하였다.

사례기간 중의 매시간 평균 오존농도와 풍속, 온도와의 관계를 살펴보았다. 3일 밤부터 6일 새벽까지 강릉에서는 낮에도 동풍계열인 해풍의 발생이 없이 남서풍이 평균 6~7 m/s로 강하게 불었다. 특히 이 기간에는 다른 날에 비해 비교적 높은 온도가 계속되었고 야간에도 온도가 많이 낮아지지 않았으며 전반적으로 습도가 매우 낮았다. 김용상과 홍성길(1996)은 늦봄에서 초여름에 걸쳐 강릉지역에서 태백산맥을 넘어오는 공기에 의해 “유사 편현상”이 발생하여 고온 건조현상이 수일동안 지속된다고 하였다. 이 기간 동안 강릉에서는 낮 동안 바람이 강하게 불면서 고농도 오존이 발생하였으며 밤에도 오존농도가 감소하지 않은 채 높은 농도를 유지하였다. 오산에서 측정된 3월 2일과 3일의 연직 온도를 분석한 결과 사례기간의 하루 전인 2일에 비하여 3일에는 대류권계면이 약 9 km로 크게 낮아졌다. 이러한 기상 상태에 수반되는 강한 바람은 대기의 연직 혼합을 용이하게 하여 상층 대기에 풍부하던 오존을 지표 부근까지 수송할 것으로 사료된다. 이 기간 중에 상층의 풍속은 850 hPa, 700 hPa에서 새벽 3시에 일 최고를 기록하였으며 40 ppb 이상의 농도상승이 일어났던 6일 밤에는 700 hPa에서의 풍속이 25 m/s로 매우 강한 바람이 불었다. 이러한 상층의 강한 바람과 지표부근의 바람이 이 기간에 오존농도의 상승을 일으킨 주원인으로 작용하였다. 또한 지표의 바람이 밤 10시의 0.3 m/s에서 밤 11시에 1.7 m/s로 증가한 3일 밤에는 원주에서도 20 ppb 정도로 적은 양의 오존농도 상승이 발생하였다. 온도의 변화에 따른 오존농도의 변화는 상관관계가 나타나지 않았으나 야간의 풍속과 1시간 이후의 오존농도는 상관계수 0.47로 나타났고, 하루 중 풍속과 오존의 상관은 $r=0.67$ 로 매우 높게 나타났다. 광화학 반응에 의한 오존의 발생은 바람이 약하고 온도가 높을 때 활발하게 일어난다는 Weston 등(1989)의 연구결과와 일치한다. 그러나 이 기간에 일 중 오존농도와 온도의 상관관계가 높지 않게 나타난 반면, 오존농도와 풍속이 높은 상관을 보이는 것은 이 기간 중 오존이 광화학 반응에 의해 생성된 것이 아님을 의미하는 것으로 일 중 계속 되었던 강한 바람으로 인한 대기의 연직 혼합에 의해 이동되

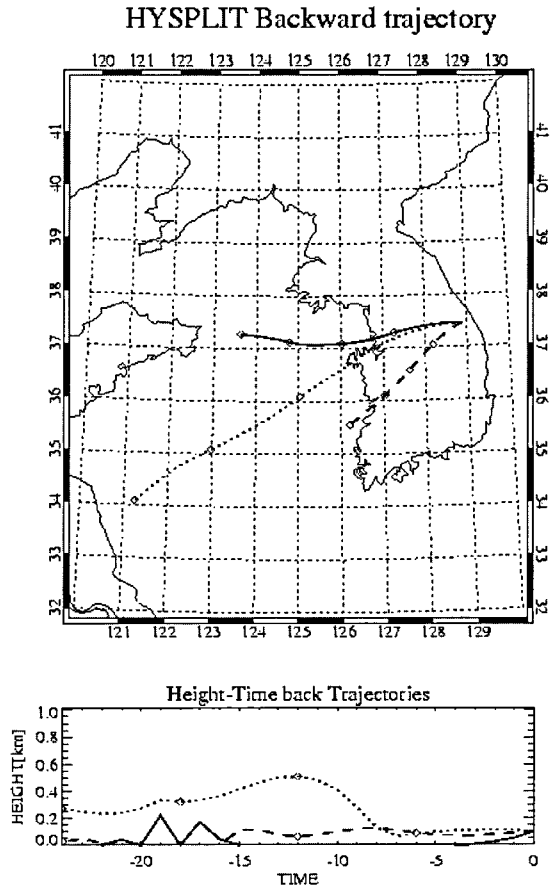


Fig. 4. Backward trajectories calculated by HYSPLIT over Kangreung during 24 hours at 04LST on 4 March (solid line), 5 March (dotted line), and 6 March (dashed line) 1997.

어 왔을 것으로 사료된다. 공기의 이동 경로를 좀 더 자세히 알아보기 위해서 HYSPLIT 모델을 사용하였다(Fig. 4). 4일과 5일, 6일 모두 야간의 고농도의 오존이 발생할 때 나타나는 편서풍의 이동경로를 가지고 있다. 또한 HYSPLIT 모델은 공기의 이동경로를 대략적으로 표현하므로 4일과 6일의 경우 상층에서의 공기 유입은 뚜렷하게 나타나지 않았지만 공기의 기원이 편서풍의 영향을 받는 것을 잘 보여준다. 그러나 야간의 오존 농도가 가장 높은 5일의 경우 뚜렷하게 상층에서부터 하층으로 공기의 궤적이 움직이는 것을 알 수 있다.

2) 사례 2(1997년 4월 18~21일)

4월 18일 오후부터 20일까지 지표에서는 이동성

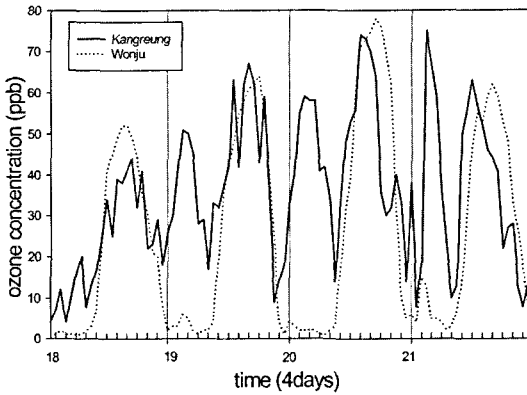
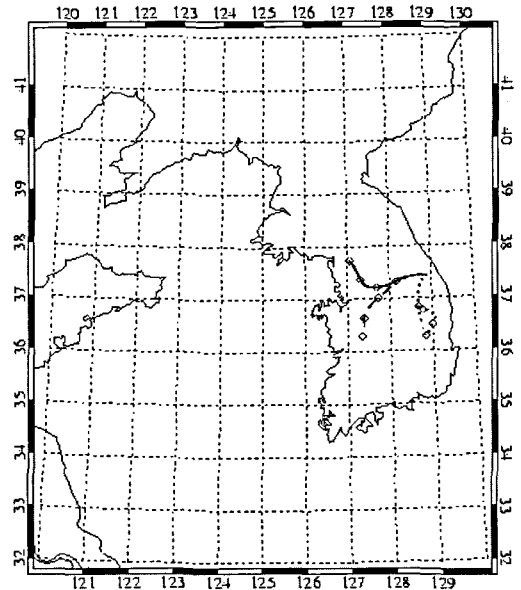


Fig. 5. The same as in Figure 3 except for during 18 to 21 April 1997 (case 2).

고기압이 정체되어 맑고 따뜻한 날씨가 계속되었고 지표에 정체된 고기압은 오존의 생성을 용이하게 한다. 강릉과 원주에서는 주간의 1차 최고농도가 60~80 ppb로 높게 발생하였으며 원주는 15시에 최고, 일출 직전 최저라는 전형적인 광화학적 오존의 일변화 패턴을 나타냈다(Fig. 5). 이 기간 중 강릉에서는 야간의 오존농도 상승이 매우 크게 발생하였으며 21일 새벽 2차 최고농도는 70 ppb 이상으로 높아졌다. 사례 기간 중 강릉에서는 주간에 해풍인 동풍~남동풍이 불었으며 야간에는 육풍인 남서풍이 3~6 m/s로 비교적 강하게 불었다. 원주에서는 3일 밤에 2 m/s의 동풍이 불었으나 4일과 5일 밤에는 1 m/s 이하의 약한 바람이 불었다. 4월 19일 고농도의 오존은 강한 바람과 일치하여 나타나지만 21일 새벽에는 바람이 다소 약한데도 오존농도가 매우 높게 나타났다. 대기 중 고농도의 오존이 존재하므로 풍속이 약함에도 불구하고 오존의 농도가 높게 나타나는 것으로 사료된다. 공기의 이동 경로를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 사례 1처럼 HYSPLIT 모델을 사용하였다(Fig. 6). 사례 2의 경우 사례 1보다 이동 경로도 짧게 나타나며 한반도내의 오염물질의 영향을 받는 것을 보여준다. 또한 19일, 20일 21일 모두 상층에서부터 공기가 유입되는 궤적을 보여주고 있다. 특히 이 기간 중에는 새벽에 지표면 온도의 일시적인 상승이 일어났는데 온도의 상승 시간과 오존 농도 상승 시간이 일치하였으며(Fig. 7), 온도의 변화와 오존 농도의 상관계수가 0.55로 비교적 높았다. 이와 같이 강릉에서 야간의 온도 상승은 고농도 오존의 발생과 높은 상관관

HYSPLIT Backward trajectory



Height-Time back Trajectories

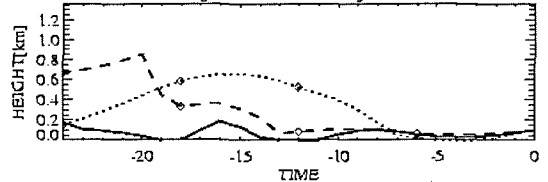


Fig. 6. The same as in Figure 4 except for 19 April (solid line), 20 April (dotted line), and 21 April (dashed line) 1997.

계를 가지고 있다. 이 기간 중에는 야간의 풍속과 1 시간 후 관측된 오존 농도와의 상관성이 $r=0.45$, 하루 중 풍속과 1시간 이후 관측된 오존농도와의 상관성이 $r=0.49$ 로 나타났는데 $r=0.67$ 인 사례 1과 비교해 다소 낮다. 반면에 하루 중 온도와 오존과의 상관계수가 0.59로 높게 나타났는데 이것은 이 기간동안 사례 1의 경우와는 달리 광화학 반응으로 인한 오존생성을 의미한다. 야간의 온도변화에 따른 오존농도의 변화도 $r=0.55$ 의 높은 상관성을 나타냈다. 그러므로 이 기간 동안 강릉에서 고농도의 오존과 야간의 오존 농도 상승은 주간에 생성되어 상층으로 이동해있던 오존이 야간의 강한 풍속으로 인해 대기 혼합으로 인해 지표까지 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 지표의 풍속이 약한 원주에서는 2차 상승이 일어나지 않았다는 사실은 이러한 견해를 뒷받침한다.

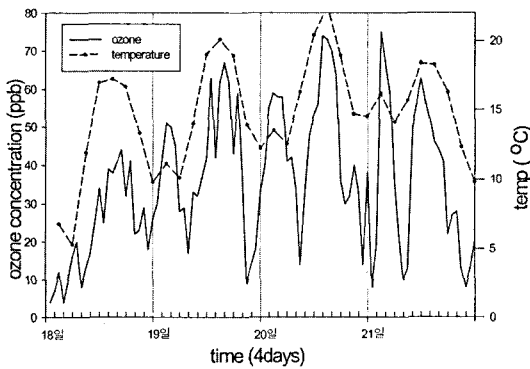


Fig. 7. Daily variations of ozone concentration and temperature at Kangreung during April 18 to 21 1997.

결론

강릉의 야간 오존농도 상승은 연중 높은 비율로 발생하였으며 강수일에도 비교적 높은 농도 상승이 일어났다. 야간의 오존농도 상승은 야간의 온도변화, 풍속과 높은 상관관을 보였다. 강릉은 해안지역이면서 태백산맥과 인접하고 있으므로 야간에 지표의 기온이 충분히 낮아지지 않으며 계절에 따른 차이 없이 연중 서풍계열의 바람이 강하게 분다. 그리고 야간의 높은 온도와 강한 바람은 역전층을 발달시키지 못하므로, 대기의 연직 혼합을 활발하게 한다. 그러므로 강릉에서 연중 계속되는 야간의 강한 바람에 의한 연직 혼합은 대류권 상층에 있는 고농도의 오존을 지표로 수송하고 있다. 강릉과 비슷한 위도인 원주에서도 드물기는 하지만 야간에 오존농도의 상승이 발생하였다. 원주에서의 야간 농도 상승일은 강릉에서도 같은 현상이 관측된 날이었다. 이것은 강릉의 오존농도 상승이 지역적, 계절적 원인으로 발생하는 현상이 아니라 동일한 중관 기상계, 즉 지표에 정체되어 있던 고기압에 의해 발생되었음을 의미한다. 이런 경우, 강릉에서 오존농도의 상승이 고농도로 발생한 날은 상층(850 hPa, 700 hPa)에서 서풍계열의 바람이 강하게 불었거나 주간에 비해 야간인 밤 9시나 새벽 3시에 풍속이 증가한 날이었다. 그러나 원주에서 풍속이 약하게 나타날 때는 야간 오존 농도는 상승하지 않는다. 그러므로 대류권에 고농도의 오존이 존재하거나 광화학 반응으로 생성된 오존이 수송되어 강릉에서는 상층 대기가 불안정하고 상층과 지표 부근의 강한 바람으로 연직 혼합이 일어날 때 고농도의 오존이 발생하는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 지원(KOSEF-R05-2003-000-10350-0)에 의해 이루어졌습니다.

참고 문헌

- 김민영, 최여진, 김기현, 2002, 오존의 환경기준 초과양상에 대한 연구. 한국지구과학회지, 23 (8), 683-696.
- 김용상, 홍성길, 1996, 늦봄 또는 초여름에 영동지방에서 나타나는 "유사핀" 현상에 관한 연구. 한국기상학회지, 32 (4), 593-600.
- 김유근, 홍정혜, 1998, 야간 지표 고농도 오존에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 14 (6), 545-554.
- 서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존 농도 특성 연구. 한국대기보전학회지, 11 (3), 253-262.
- 설동일, 2001, 대류권-성층권 평균자오면순환의 장기변동. 한국지구과학회지, 22 (5), 415-422.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1995, 부산지역의 오존농도 특성과 기상인자에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 11 (1), 45-56.
- 정용승, 정재섭, 1991, 서울 수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 7 (3), 169-179.
- Fuentes, J.D. and Dann, T.F., 1994, Ground-level ozone in eastern Canada: seasonal variations, trends, and occurrences of high concentrations. Journal of the Air and Waste Management Association, 44, 1019-1026.
- Ghim, Y.S. and Chan, Y.S., 2000, Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990-1995. Journal of Geophysical Research, 105, 8877-8890.
- Heo, J.S. and Kim, D.S., 2002, The characterization of surface ozone concentrations in Seoul, Korea. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 18, 129-142.
- Kajii, Y., Someno, K., Tanimoto, H., Hirokawa, J., Akinoto, H., Katsumo, T., and Kawara, J., 1998, Evidence for the seasonal variation of photochemical activity of tropospheric ozone: Continuous observation of ozone and CO at Happo, Japan. Geophysical Research Letters, 25, 3505-3508.
- Logan, J.A., 1985, Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence. Journal of Geophysical Research, 90, 10463-10482.
- Mauzerall, D.L., Daiju, N., Hajime, A., Larry, H., Stacy, W., Didier, A.H. and Guy, B., 2000, Seasonal characteristics of tropospheric ozone production and mixing ratios over East Asia: A global three-dimensional chemical transport model analysis. Journal of Geophysical Research, 105, 17,895-17,910, 2000.
- Oltmans, S.J. and Levy, H. II, 1994, Surface ozone mea-

- surements from a global network. *Atmospheric Environment*, 28, 9-24.
- Oltmans, S.J., Levy, H. II, Harris, J.M., Merrill, J.T., Moody, J.L., Lathrop, J.A., Cuevas, E., Trainer, M., O'Neill, M.S., Prospero, J.M., Vomel, H., and Johnson, B.J., 1996, Summer and spring ozone profiles over the North Atlantic from ozonesonde measurements. *Journal of Geophysical Research*, 101, 29,179-29,200.
- Pakpong, P., Hirokawa, J., Kajii, Y., Aikmoto, H. and Nakako, M., 1999, Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed at Oki, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 104, 17895-17910.
- Pochanart, P., Hirokawa, J., Kajii, Y., Akimoto, H., and Nakao, M., 1999, Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and its precursors observed at Oki, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 104, 3621-3631.
- Reitebuch, O., Strassburger, A., Emeis, S., and Kuttler, W., 2000, Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements. *Atmospheric Environment*, 34, 4316-4329.
- Schuepbach, E., Davies, T.D., and Massacand, A.C., 1999, An unusual springtime ozone episode at high elevation in the swiss Alps: contributions both from cross-tropopause exchange and from the boundary layer. *Atmospheric Environment*, 33, 1735-1744.
- Sunwoo, Y., Carmichael, G.R., and Ueda, H., 1994, Characteristics of background surface ozone in Japan. *Atmospheric Environment*, 28, 25-37.
- Tulet, P., Maalej, A., Crassier, V., and Rosset, R., 1999, An episode of photooxidant plume pollution over the Paris region. *Atmospheric Environment*, 33, 1651-1662.
- Weston, K.J., Kay, P.J.A., Fowler, D., Martin, A., and Bower, J.S., 1989, Mass budget studies of photochemical ozone production over the U.K. *Atmospheric Environment*, 23, 1349-1360.

2004년 4월 2일 원고 접수
 2004년 7월 15일 수정원고 접수
 2004년 7월 16일 원고 채택