

청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구

A Study on the Characteristics of Rural and Urban Surface Ozone Concentrations

서명석 · 박경윤 · 이호근 · 장광미 · 강창희¹⁾ · 허철구¹⁾ · 김영준²⁾

한국과학기술연구원/시스템공학연구소,

¹⁾제주대학교, ²⁾미국해양기상청

Myoung-Seok Suh, Kyoung-Yoon Park, Ho-Geun Lee, Kwang-Mi Jang,
Chang-Hee Kang¹⁾, Chul-Goo Hu¹⁾, Young-Jun Kim²⁾

Korea Institute of Science and Technology/

Systems Engineering Research Institute,

¹⁾*Cheju National Univ.,*

²⁾*National Oceanic and*

Atmospheric Administration/Air Resources Laboratory

Abstract

A study has been performed on the characteristics of rural and urban surface ozone concentration for the period of March 1992 to February 1993. The monitoring station of rural ozone is located at Kosan, Cheju and other urban monitoring stations are located at Seoul, Pusan and Kwangju. Rural's and urban's ozone data exhibit a distinct features in many ways. First, annual mean of rural ozone concentration is very high(42 ppbv) but urban's are very low(10~15 ppbv). Second, rural ozone data shows a seasonal variation with it's maximum in spring, and minimum in summer, but urban's show a seasonal variation with it's maximum in spring, and minimum in winter. Third, diurnal variation of rural data is very small but that of urban's are very large. Fourth, monthly mean of daily minimum of rural data is not low and shows a large seasonal variation, but those of urban's data are extremely low(<3 ppbv) and have no seasonal variations.

1. 서 론

지상오존(surface ozone)은 2차 광화학 오염물로서 농도의 계절/일변화는 주로 질소화합물(NOx) 및 HC(Hydro-Carbon)와 같은 1차 오염물의 농도와 기상조건(기온, 일사량, 풍속, 대기안정도, 역전층고도 등)에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Comrie and Yarnal, 1992; 신찬기 등, 1992; 김득수, 1994). 또한 지리적 위치(위·경도, 육지 또는 해안가 등) 및

해발고도도 오존의 농도변화에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Mueller, 1994; Sunwoo et al., 1994). 이러한 오존이 지상에서 일정기준 이상으로 증가하게 되면 시정장애, 식물의 성장 장애 및 고무제품의 손상 등을 유발하기 때문에 각국에서는 기준치를 정하여 최고농도를 규제하고 있다(Warneck, 1988). 최근에는 자동차와 같은 내연기관의 증가로 대도시에서 NOx와 같은 1차 오염물의 농도가 급격히 높아지고 있다. 이로 인하여 지상에서 기준치 이상의 오존농도가 발생할 확률이 높아짐에 따라 각국에서는 오존농도를 정규적으로

측정할 수 있는 측정망의 확충과 오존농도를 낮추기 위한 방안을 수립하기 위하여 노력하고 있다. 이러한 노력에는 측정된 오존농도 자료의 특성분석(년/계절/일변화 경향 등)을 포함하여 오존의 농도변화에 영향을 주는 영향인자 또는 요소들과의 관계분석 등이 있다(Chung, 1977; Kato et al., 1990; Mckendry, 1993; Mckendry, 1994; 정 용 등, 1986; 김민영 등, 1989; 정용승과 정재섭, 1991; 신찬기 등, 1992; 김득수, 1994).

한국에서 지상 오존농도의 특성 및 오존농도 변화에 영향을 주는 요소들에 대한 연구의 대부분은 대도시 또는 인접지역에서 측정된 자료를 이용하였다(김민영 등, 1989; 정용승 등, 1991; 신찬기 등, 1992). 이들 연구로부터 대도시에서의 오존농도 변화 특성 및 다른 오염물과의 관계에 대해서는 많은 자료가 축적되었다. 하지만 대도시의 오존농도가 대도시내에서의 생성 및 소멸에만 기인하는 것이 아니고 대기운동과 관련된 수평 및 연직수송에 의한 영향도 중요한 요소임이 많은 연구에서 밝혀져 청정대기상태(인위적 요인에 의하여 최소한 오염된 상태)에서 오존의 배경농도 특성에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다(Angle and Sandhu, 1989; Wakamatsu et al., 1989; Sunwoo et al., 1994; Mueller, 1994; Tateishi et al., 1994). 청정대기하에서의 오존농도(배경농도)에 대한 이해는 대도시에서의 광화학적 오존농도의 이해 및 예측에 중요할 뿐만 아니라 허용기준치의 제정에도 꼭 필요한 것이다. 지상오존의 농도변화가 시·공간적으로 크기 때문에 배경농도 측정 및 분석 또한 이를 수용할 수 있을 정도의 시·공간적 분해능을 갖추어야 할 것이다. 하지만 청정대기하에서의 지상오존 측정 및 분석에 대한 연구는 주로 북미 및 유럽에서 이루어 졌으며 최근에는 일본에서도 연구된 바 있다(Angle and Sandhu, 1989; Lin et al., 1992; Eder et al., 1993; Sunwoo et al., 1994).

본 논문에서는 한국에서 비교적 청정한 지역으로 알려진 제주도 고산에서 1992년 3월 1일부터 1993년 2월 28일까지 측정된 지상오존(이하 오존) 농도자료의 특성을 한반도내 주요 도시의 오존농도자료와 비교 분석하였다.

2. 분석자료

본 연구에서 사용한 도시 지역의 자료는 환경처(현 환경부)에서 운영중인 많은 측정소중에서 분석 기간중 비교적 결측이 적은 서울 광화문 지점(이하 서울), 부산

광복동 지점(이하 부산), 광주 송정동 지점(이하 광주)의 1992년 3월 1일부터 1993년 2월 28일까지의 시간별 지상 오존농도이다. 또한 청정 지역의 자료는 제주도 북제주군 한경면 고산리 해안가에서 시스템공학연구소와 제주대학교에서 매분마다 측정된 지상 오존농도이다(박경운 등, 1994). 측정소의 위치는 고산 고층 레이다 기상대와 인접한 북위 33° 17' N, 동경 126° 10' E에 위치하고 있으며, 해발고도는 약 71m이다(그림 1). 본 측정소 주변은 삼면이 바다이고 육지부분에는 섬 중앙에 한라산(해발고도 1950m)이 있고 북동쪽에 제주시, 남동쪽에 서귀포시가 있으나 지형적인 영향으로 이들 지역의 대기오염원이 본 측정소에 직접적으로 영향을 주는 경우는 많지 않을 것으로 판단된다.

자료처리의 효율성과 여러 지역 자료와의 동시분석을 위하여 매분마다 측정된 고산의 자료는 매시간 단위로 단순평균을 하여 이용하였으며 측정기간은 1992년 3월 1일부터 1993년 2월 28일까지 이다. 고산의 오존농도 측정에 사용된 장비는 미국 NOAA/ERL(Environment Research Laboratory)에서 1년간 임대한 장비(U.V. Photometric Analyzer: TECO Model 49)로 측정 범위는 0~1000 ppbv이며, 오차의 범위는 약 1ppbv이다. 측정기간동안 정전이나 기기고장과 같은 경우를 제외하고는 연속적으로 측정을 실시하였다.

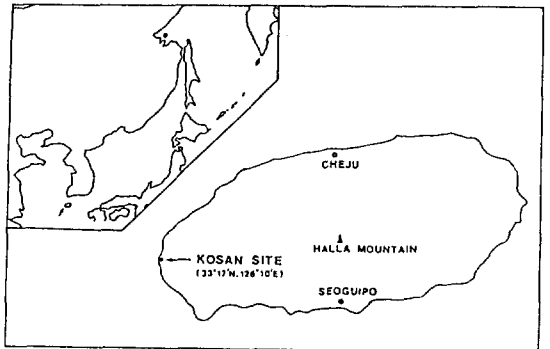


Fig. 1. The Location of the Kosan Station at Cheju-do.

3. 분석결과

3. 1 개요

서울, 부산, 광주 및 고산의 4개 측정소에서 측정된 자료중 각 계절을 대표할 수 있고, 고산에서 결측이 적은 경우인 1992년 4월, 8월, 10월 및 1993년 2월의 오존 농도 시계열을 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 농

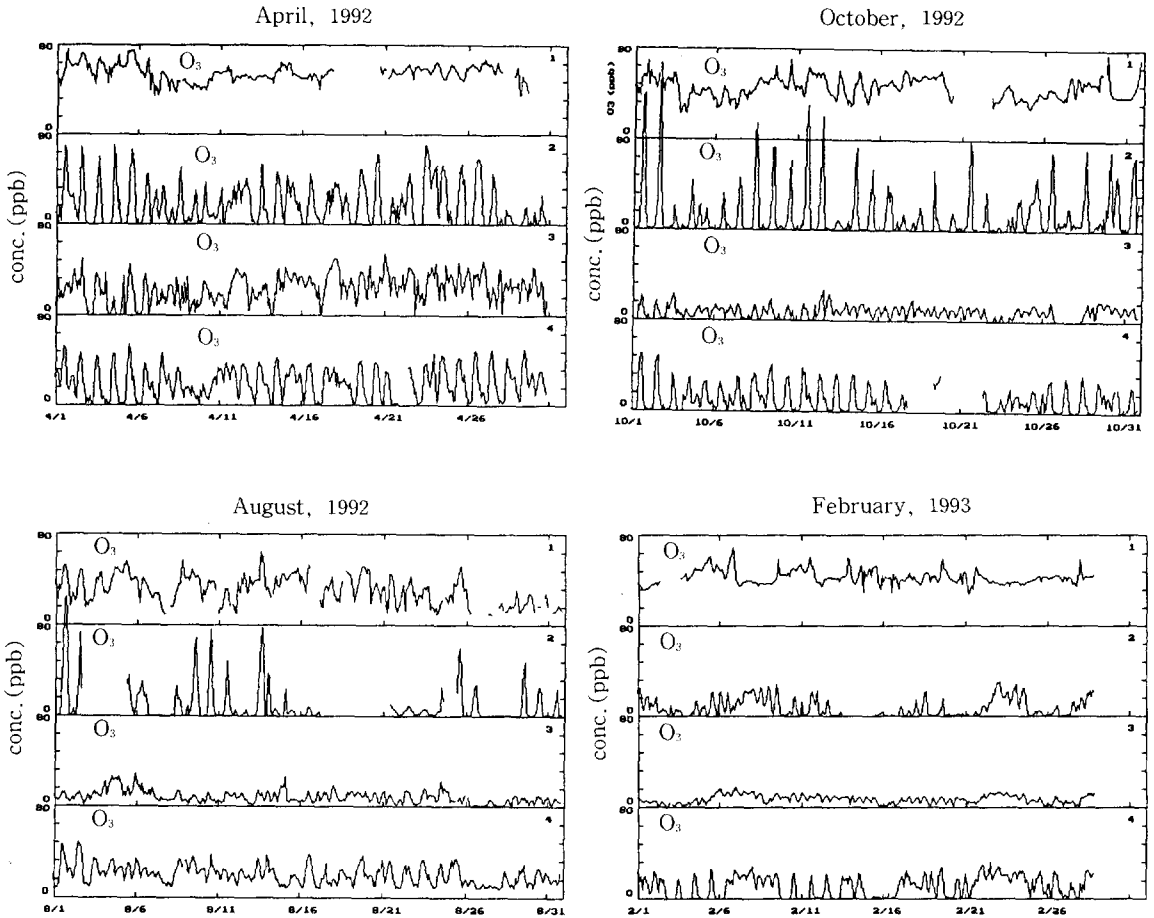


Fig. 2. Time Series of Surface Ozone at Various Stations. 1, 2, 3 and 4 Represent Kosan, Seoul, Pusan and Kwangju, Respectively.

도선이 끊긴 경우는 측정이 안된 경우이며, 측정소가 위치한 지역적 특성에 따라서 변화특성이 다르게 나타나고 있다. 인위적 오염원으로 부터 비교적 멀리 떨어진 고산의 경우에는 오존농도의 일변동폭이 매우 작을 뿐만 아니라 일최저값이 매우 높다. 이는 서울과 광주의 극히 낮고 변동성이 작은 일최저값 분포와 아주 큰 대조를 보이고 있는데 이러한 현상은 이미 많은 연구에서 알려진 바와 같이 대도시가 오존의 sink로 작용한 결과로 판단된다(Chung, 1977; Angle and Sandhu, 1989; Mckendry, 1993).

서울 지역의 오존농도의 특성은 그림 2에서 보는 바와 같이 일최저값이 계절에 관계없이 매우 작을 뿐만 아니라 변동성이 거의 없는 점과 일최고값의 일별/계절별 변동성이 매우 큰 점 등이다. 즉, 서울 지역에서 오존의 소

멸은 계절에 관계없이 일어나고 있으나 오존의 광화학적 생성은 일별/계절별 기상학적 조건에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이 점은 정용승과 정재섭(1991)의 연구에서 정성적으로 밝혀진 바와 같이 늦은 봄, 여름 및 초가을과 같이 기온이 높고 일사량이 많으며 풍속이 약한 경우에는 오존의 생성 및 축적이 강하게 일어나지만, 겨울철과 같이 기온이 낮고 일사량이 작으며 풍속이 강한 경우에는 오존의 생성 및 축적이 거의 일어나지 않는다. 오존 생성량(일최고값)의 일별변동도 같은 원리로 설명이 가능하다. 광주 지역의 일최저값은 다른 지역과는 달리 8월에 높은 농도를 나타내고 있으나 일최고값은 전체적으로 서울에 비하여 낮고 일별/계절별 변동성도 작게 나타났다.

해안가에 위치한 부산은 전체적으로 농도값이 매우 낮

Table 1. Seasonal Mean and Mean Relative Standard Deviations of O₃ at Various Regions.

Region Season	Kosan		Seoul		Pusan		Kwangju	
	mean (ppbv)	r. s. d.	mean (ppbv)	r. s. d.	mean (ppbv)	r. s. d.	mean (ppbv)	r. s. d.
Spring	52.0	0.09	17.1	0.98	19.1	0.50	19.6	0.62
Summer	33.1	0.09	14.7	1.08	10.6	0.57	20.7	0.38
Autumn	41.6	0.18	15.3	1.12	6.9	0.65	10.5	0.94
Winter	38.9	0.12	9.1	0.68	5.9	0.41	9.0	0.92
Total	42.2	0.12	14.1	0.96	10.8	0.54	15.2	0.70

을 뿐만 아니라 4월을 제외하고 일최고농도의 일별/계절별 농도변화도 아주 작게 나타나고 있다. 전병일 등 (1995)에 의하면 비교적 해안가에 위치한 광복동은 부산의 다른 지역에 비해 오존 농도가 낮는데 그 이유로 바다쪽에서 오존 기인 물질이 없는 비교적 청정한 공기가 유입되고 측정소 주변에서 배출된 기인 물질들은 바다쪽에서 불어오는 강한 풍속의 영향으로 희석되거나 내륙쪽으로 이동해 가기 때문에 관측소 주변에서 광화학반응을 하는데 소요되는 시간을 갖지 못하기 때문으로 판단된다.

3. 2 계절변화

고산 측정소와 한반도내 주요 도시에서 측정된 오존농도의 계절 및 연평균, 평균 상대 표준편차(r.s.d.: relative standard deviation)를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 평균 상대 표준편차는 Mizoguchi et al. (1985)가 일본의 오존측정소의 청정도를 분류하기 위하여 사용한 다음식을 이용하여 계산한 값이다. 그들은 인위적 대기오염원이 없는 청정 지역에서 오존과 같은 2차 광화학 오염물의 농도변화는 주로 수평 및 연직방향의 유입/유출의 영향을 받기 때문에 일별 변동성은 대도시에 비해서 상대적으로 작을 수 밖에 없다는 가정하에 다음값을 청정도를 나타내는 지수로 정의하였다.

$$O_{rs} = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{j=1}^N \left(\frac{S}{M} \right)$$

여기서 Ors는 측정소의 청정정도를 나타내는 평균 상대 표준편차이고, N은 측정 일수, S는 일별 표준편차이며 M은 일평균값이다. 윗식을 이용하여 계산한 남극 및 일본내 청정 지역의 평균 상대 표준편차값은 0.03~0.30 정도이다(Mizoguchi et al., 1985). 따라서 일본의 청정 지역, 고산 및 한반도내 주요 도시의 평균 상대 표준편차값과 비교해 볼 때 고산이 청정한 지역임을

알 수 있다.

고산의 오존농도는 전 계절에 걸쳐 국내 다른 지역에서의 농도치보다 매우 높게 나타났으나 다른 나라의 청정 지역에서 측정된 농도치와는 유사한 결과이다(Angle and Sandhu, 1989; Sunwoo et al., 1994). 고산의 오존농도가 국내 다른 지역에 비하여 매우 높게 나타난 것은 오존의 파괴와 관련된 대기오염물질의 농도가 매우 낮아서 야간에 오존의 소멸이 거의 일어나지 않는 것과 관련이 있는 것으로 보인다(그림 2, 3). 계절적으로는 봄철에 최고치를 보이고 있으며 여름과 겨울에 비교적 낮은 농도를 보이고 있다. 청정 지역에서 오존농도의 최고치가 봄철에 나타나는 현상은 많은 연구에서 보고되고 있으며(Wakamatsu et al., 1989; Eder et al., 1993; Sunwoo et al., 1994), 주요 원인으로서는 봄철에 대류권계면의 잦은 folding으로 성층권 오존이 대류권으로의 유입이 자주 일어나는 것과 봄철의 기상조건이 NOx와 같은 인위적 오염성분과의 광화학적 반응으로 오존의 생성에 양호하다는 것이다. 지구상의 어느 지역도 인위적 오염원의 영향으로부터 완전히 벗어날 수는 없지만 고산과 같은 청정 지역(동일 기간의 NO와 NOy의 평균농도=0.8, 3.0 ppbv, 박경윤 등, 1994)은 후자보다는 전자가 봄철에 최고치가 나타나는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단되고, 이점에 대해서는 Kato et al.(1990)이 일본 지역의 지상 및 고층의 오존 측정자료 분석에서 밝힌 바 있다.

여름철의 낮은 농도치는 이 기간에 제주도를 지배하는 기단의 근원지가 주로 저위도 해양 지역인 것과 관련된 것으로 보인다. 이러한 현상은 Sunwoo et al.(1994)이 일본내 청정 지역에서 측정된 오존농도 특성 분석에서 밝힌 바와 같이 저위도 해양 지역이 청정 지역이기 때문에 상대적으로 오존 및 오존의 생성과 관련된 NOx 등의 농도가 낮은 것과 관련이 있다고 본다.

분석 지점들의 월평균, 일별 최고 및 최저농도의 월평균을 그림 3에 나타내었다. 고산 지역의 월평균은 전 기

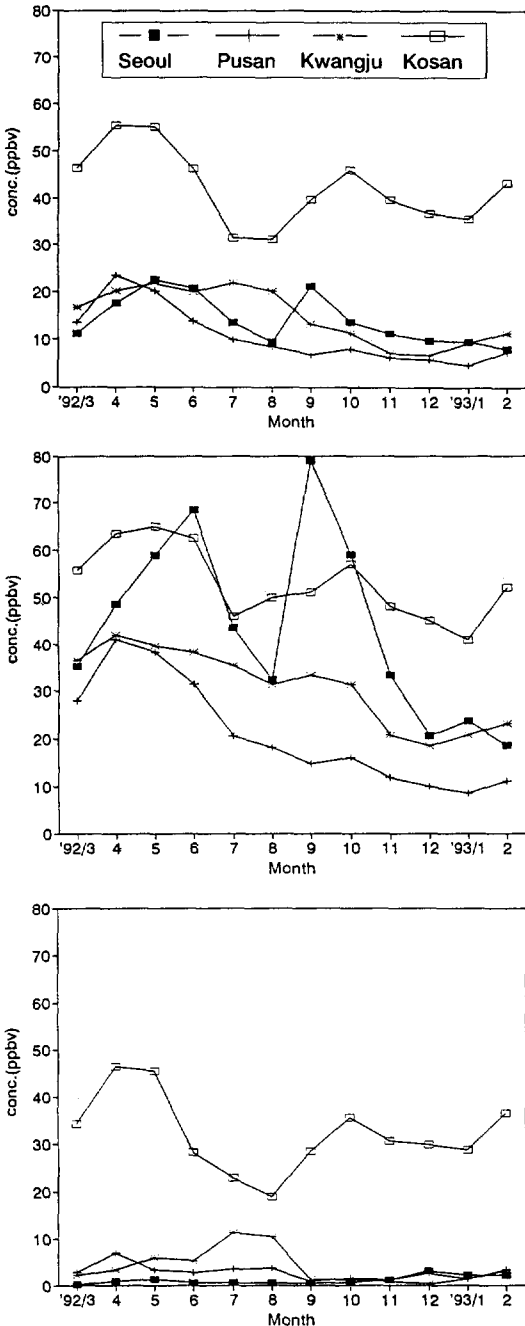


Fig. 3. Monthly Mean(upper) and Monthly Mean of daily Maximum(middle) and Minimum(lower) of Ozone Concentratins at Various Regions.

간에 걸쳐 다른 도시 지역보다 20~30ppbv 정도 높을 뿐만 아니라 계절에 따른 농도 차이도 크게 나타나고 있

다. 4, 5월에는 55ppbv 정도로 매우 높은 값을 보이다가 7, 8월에는 35ppbv 정도로 낮은 값을 보이고 있다. 서울, 부산 및 광주의 월평균은 전체적으로 봄철에 높은 농도를, 겨울철에 낮은 농도를 보였으나 여름철의 경우에는 서로 상이한 농도를 보이고 있다.

그림 3에서 보는 바와 같이 일최고치의 월평균은 측정소가 위치한 지역의 특성(도시규모, 지리적 위치, 기상 특성 등)에 따라 계절변동의 양상이 다르게 나타나고 있다. 고산과 서울 지역에서는 봄과 가을에 최고치가 나타나고 여름과 겨울에 최저치가 나타나고 있으나, 광주와 부산 지역에서는 봄철에 최고치가 나타난 이후 계속하여 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 서울의 경우에는 계절변동이 매우 클 뿐만 아니라 특히 8월에는 매우 낮은 값을, 9, 10월에는 매우 높은 값을 보이고 있다. 8월의 낮은 값은 태풍과 저기압의 통과로 인한 집중호우로 일별 최고농도가 낮게 나타난 것과(중부지방에 집중호우가 있었던 8월 7, 8일, 27, 28일의 일평균 농도는 각각 0.3, 6.5, 1.0, 1.0ppbv 임), 그림 2에서 보는 바와 같이 결측이 많았던 것의 영향이다(결측율: 약 22%). 서울에서 1시간 측정치로써 단기 기준치인 100ppbv를 초과한 고농도가 발생한 경우는 분석기간중 총 62회(시간)였는데 이 중 9월과 10월에 각각 32회, 10회나 발생한 것이 9월과 10월에 높은 값이 나타나게 하였다. 고산의 경우 평균농도는 서울에 비해서 약 30ppbv 이상 높으나 100ppbv 이상의 고농도는 단 1회도 발생하지 않았다.

고산의 일별 최저농도값의 월평균은 한반도내 다른 지역에 비해서 월등히 높은 값을 나타내고 있으며 일별 최고농도의 월평균과 같이 계절변동이 있어 8월에 최소치를 나타내고 있다. 하지만 서울과 부산의 경우에는 뚜렷한 계절변동이 없을 뿐만 아니라 값도 매우 낮는데 이는 야간에 NO와 같은 인위적 대기오염물에 의하여 오존이 소멸되는 현상 즉, 대도시가 오존의 sink로 작용하기 때문으로 판단된다(Chung, 1977; Eder et al., 1993; Mckendry, 1993).

고산과 서울 지역에서의 일정농도 이상(이하)의 오존의 일별 발생 빈도수를 표 2에 나타내었다. 고농도 발생 빈도수의 경우 고산측정소에서는 봄철에 편중되어 있으나 서울은 봄과 가을철에 분산되어 있으며 두 지역 모두 여름과 겨울철에는 발생횟수가 적게 나타났다. 반면에 저농도 발생 빈도수의 경우 고산은 여름철에 편중되어 있으나 서울은 분석기간 전체에 걸쳐 균일하게 나타났다. 즉, 서울에서는 인위적 오염물과의 광화학적 반응에 의한 오존의 생성 및 소멸, 특히 소멸현상이 강하게 일어

나고 있으나(오존의 sink), 고산에서는 오존의 생성 및 소멸현상이 많지 않음을 알 수 있다.

3. 3 일변화

지역별/계절별 오존농도의 일변화를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정소가 위치한 지역의 특성(오염원 특성, 국지기후 등)에 따라 일변화 양상이 서울, 광주 및 부산과 같은 대도시에서는 일변동폭이 크고, 청정 지역인 고산에서는 일변동폭이 계절에 관계없이 매우 작게 나타나고 있다.

고산의 일변동폭이 국내 다른 도시 지역에 비해 상대적으로 작지만 다른 연구결과(Angle and Sandhu,

1989; Sunwoo et al., 1994)에서 보인 청정 지역의 일변동폭 보다는 크게 나타나 고산 지역이 인위적 오염의 영향을 어느 정도는 받고 있음을 알 수 있다. 인위적 오염 물질의 근원지 추적을 하기 위해 기상청에서 제공된 GPV(Grid Point Value) 자료를 이용하여 1992년 4월 한달동안 700hPa와 850hPa 등압면상에서 4일간의 후진유적선들을 분석해 보았다. 그림 5의 후진유적선 분석 결과에 의하면 고산에 영향을 주는 인위적 오염원은 주로 한반도와 중국 등으로 추정되지만 이 점에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

일최고치는 지역에 관계없이 오후 3~4시경에 발생하고 계절변동을 보이고 있으나, 일최저치의 경우에는 지

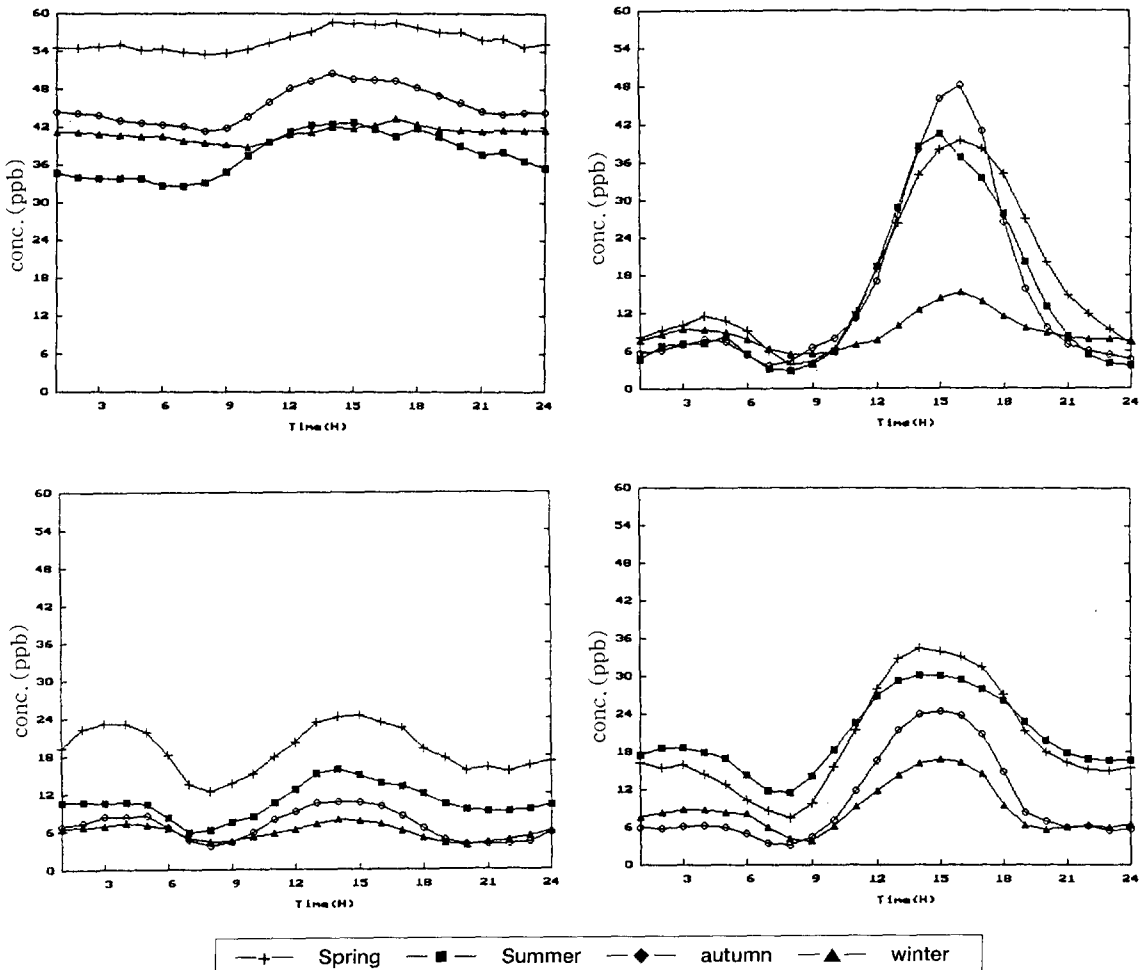


Fig. 4. Diurnal Profiles of Surface Ozone at Various Stations. Upper Left, Right, Lower Left and Right Represent Kosan, Seoul, Pusan and Kwangju, Respectively.

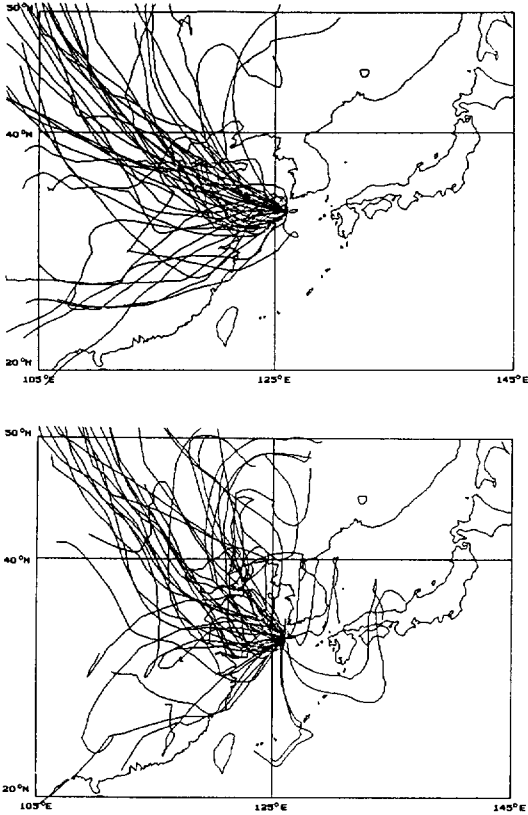


Fig. 5. Backward Trajectories on 700hPa(upper) and 850hPa(lower) Arriving at Kosan(April 1992).

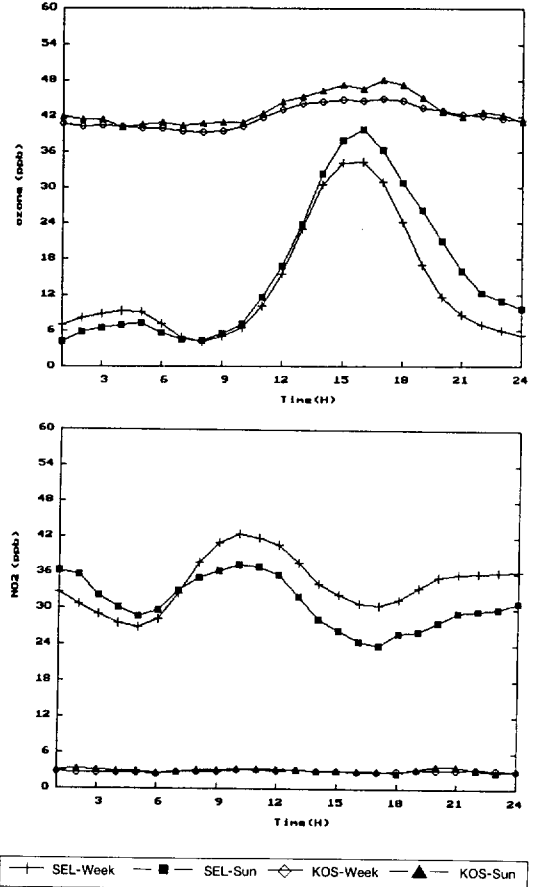


Fig. 6. Diurnal Profiles of Surface Ozone(upper) and NO₂/NO_y(lower) at Seoul and Kosan for Weekdays and Weekend.

Table 2. Monthly Frequency Distribution of the Ozone Occurrence for a Given Condition.

Region	Seoul			Kosan			
	>50 ppbv	<5 ppbv	TotN*	>60 ppbv	<30 ppbv	TotN*	
'92. 3	22	372	735	55	9	703	
	4	57	269	180	1	604	
	5	115	257	741	167	10	607
	6	90	237	638	17	13	167
	7	59	354	718	9	281	565
	8	31	366	576	4	320	672
	9	155	360	720	15	102	615
	10	69	410	736	30	29	682
	11	13	295	720	19	49	720
	12	0	234	744	2	34	456
	'93. 1	14	314	735	3	117	542
		2	0	310	624	11	2

*: Number of total measurement for a given month

역에 따라 다른 양상을 보이고 있다. 즉, 서울지역에서는 일최저치가 계절에 관계없이 거의 일정하게 나타나고 있으나, 해안지방인 고산과 부산에서는 다른 계절에 비해 봄철에 매우 높은 값을 나타내고 있으며 광주에서는 특히 여름철에 높은 값을 보이고 있다. 또한 일최고치 및 최저치가 나타나는 시간도 지역에 관계없이 계절변동(여름철에 다른 계절에 비해 1~2시간 빨리 발생)을 보이고 있는데 이는 일사량 및 교통량의 최고치가 발생하는 시각의 계절변동과 관련이 있는 것으로 판단된다. 대도시의 경우 지역에 따라 다소 차이는 있지만 새벽(3~5 LST)에 2차 최고치가 나타나고 있으나 고산에서는 거의 나타나지 않고 있다. 일반적으로 새벽의 2차 최고치는 야간의 복사냉각 및 풍속의 약화로 인하여 혼합고가 낮아지는 것으로 설명하고 있는데(정용승과 정재섭, 1991)

Table 3. Hourly Frequency Distribution of the Ozone Occurrence for a Given Condition.

Region	Seoul			Kosan		
	>50 ppbv	<5 ppbv	TotN*	>60 ppbv	<30 ppbv	TotN*
1	1	215	349	17	46	296
2	1	203	349	16	50	299
3	3	198	348	15	50	297
4	5	196	348	15	52	296
5	3	200	348	15	49	294
6	2	220	348	19	50	289
7	0	255	348	16	55	291
8	0	250	348	13	57	291
9	1	222	349	17	51	292
10	3	188	348	17	43	294
11	5	125	349	18	34	293
12	14	88	351	19	30	288
13	48	62	352	26	28	285
14	87	52	351	34	27	284
15	111	40	351	32	25	284
16	118	45	353	23	26	282
17	102	56	354	23	24	274
18	64	74	352	26	23	278
19	30	113	352	25	33	288
20	15	142	352	30	40	293
21	6	176	352	26	44	296
22	2	208	352	27	42	297
23	2	214	352	20	43	297
24	2	236	352	23	45	298

*: Number of total measurement for a given time

고산에서 2차 최고치가 나타나지 않는 것은 다른 지역에 비하여 풍속이 강하고 측정소 위치가 해안가여서 복사냉각이 강하지 않기 때문에 야간에 상대적으로 혼합고의 높이가 낮아지지 않기 때문이다.

표 3은 표 2와 같이 고산과 서울 지역에서 주어진 조건에 맞는 오존농도의 시간별 발생 빈도수를 나타낸 것이다. 고산측정소 자료의 경우 고농도 및 저농도가 발생하는 빈도수가 전 시간에 걸쳐 고르게 분포하고 있으나, 서울 지역에서는 고농도는 오후시간대(13~18LST)에 편중되어 발생하고 저농도는 주로 일몰후에서 아침시간대, 특히 출근 시간대(7~9LST)에 편중되어 나타나고 있다. 이러한 현상은 앞의 표 2의 결과와 함께 청정한 지역에서의 오존농도 변화는 주로 그 지역에 유입되는 공기권에 포함된 오존농도에 영향을 주로 받지만, 대도시에서의 오존농도 변화는 주로 인위적 오염물과의 광화학적 반응에 의한 오존의 생성 및 소멸에 영향을 받고 있음을 보여준다고 할 수 있다.

한 주간의 대기오염 변동은 주로 주말(일요일)과 주중

으로 분리하여 변화 경향을 나타내는데 일반적으로 도시 지역의 대기오염은 주로 주중에 심하고 주말에 약한 것으로 알려졌다. 서울의 오존/이산화질소(NO₂)자료와 고산의 오존/NO_y자료를 주중과 주말로 분리하여 일변화 경향을 그림 6에 표시하였다. 고산에서 NO₂의 측정자료가 없기 때문에 NO_y자료를 이용하였다. 서울과 고산의 오존농도는 일반적으로 알려진 바와는 달리 주중보다는 주말에 농도 범위(일최고치-일최저치)가 크게 나타났고 특히 서울의 경우에는 오후 시간대에 주말이 주중보다 매우 높게 나타났다. 반면에 서울의 NO₂ 농도는 새벽부터 이른아침 시간대(0~7LST)를 제외하고는 주말보다 주중에 매우 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 고산의 NO_y 농도는 매우 낮을 뿐만 아니라 일변화 경향도 거의 나타나지 않고 있다. 기상조건은 유사하다는 가정하에서 서울에서 오존의 주중과 주말의 농도차는 그림에서 보는 바와 같이 NO₂의 농도변화와 관련이 있는 것으로 볼 수 있다. 즉, 김민영 등(1989)과 신찬기 등(1992)의 연구에서 밝힌 바와 같이 NO₂와 오존은 음의 상관관계가 있음으로 주중에는 오존의 소멸이 강하게 일어나는 반면 주말에는 소멸강도가 상대적으로 낮게 일어난 결과가 오존농도의 주중과 주말사이의 차를 유발했다고 볼 수 있다.

4. 토의 및 결론

한반도에서 인위적 오염원으로 부터 비교적 떨어진 고산에서 측정된 오존자료와 국내 주요도시에서 측정된 오존자료의 비교분석을 하였다. 분석결과 고산, 서울, 부산 및 광주의 분석기간 동안의 평균 농도값은 각각 42.2, 14.1, 10.8, 15.2ppbv로 나타나 도시 지역에 비하여 청정 지역의 오존농도가 매우 높게 나타났다. 고산에서는 봄과 가을에 높은 농도값을 보인 반면, 도시 지역에서는 봄과 여름에 높은 값을 가을과 겨울에 낮은 값을 보였으며, 특히 부산에서는 가을과 겨울에 매우 낮은 농도를 나타내었다. 오존농도의 지역별 일변동성을 나타내는 상대편차율은 고산, 서울, 부산 및 광주가 각각 0.12, 0.96, 0.54 및 0.70로 도시 지역이 상대적으로 컸고 청정 지역은 작았다.

오존농도 일변화 경향은 측정소가 위치한 지역 및 계절에 따라 다르게 나타나고 있다. 도시 지역에서는 상대적으로 일변동폭이 크게 나타난 반면 청정 지역에서는 일변동폭이 작게 나타났다. 또한 고농도와 저농도의 시간별 발생빈도의 분석결과 대도시에서는 일별 최고치는 주로 오후 시간대에, 최저치는 오전 시간대에 집중되어

있으나, 청정 지역에서는 고농도와 저농도가 거의 전 시간대에 걸쳐 고르게 분포하였다.

지상오존의 지역별 계절변동 및 일별변동의 분석결과 청정 지역 즉, 고산의 오존농도는 이 지역에서의 광화학적 생성 및 파괴(destruction)에 의하여 영향받기 보다는 주로 다른 지역 및 대기 상층에서의 유입에 영향을 받고, 도시지역(서울, 부산, 광주)의 오존농도는 광화학적 생성 및 소멸에 많은 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉, 청정 지역의 경우에는 측정소가 위치한 지역을 지배하는 기단(air mass)의 발원지와 이동경로가 중요하고, 도시 지역의 경우에는 오염현황과 기상조건이 중요하다.

측정소가 위치한 지리적 위치 및 측정기기가 다른 점, 본 연구에서 선택한 측정소가 그 도시를 대표할 수 없는 점 등과, 앞의 서론에서 밝힌 바와 같이 지상오존 농도의 변화에 미치는 요인이 매우 많고 각 요인들 사이의 상호작용 또한 복잡하기 때문에 지역별 오존농도 특성을 정확히 규명하기 위해서는 분석 지점과 분석기간의 확장 및 기상조건등을 포함한 보다 광범위한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 측정소가 원만히 운영될 수 있도록 많은 협조를 해주신 한국전력 제주지부 직원과, 측정소 운영에 많은 협조를 해주신 제주대학교 해양환경공학과 학생들에게 감사드립니다. 또한 고가의 측정장비를 임대 및 교육을 해주신 NOAA/ERL의 담당자분들께도 감사드립니다. 부족한 원고를 끝까지 읽고 교정해 주신 두 심사위원님께도 감사드립니다. 본 연구는 과기처 지원 특정연구과제 “지구대기환경 조사 및 장기변화 예측”의 일부로 이루어진 것이다.

참고 문헌

김득수(1994) Roles of odd nitrogen compounds (NOy) in the photochemical formation of ozone, 시스템공학연구소 세미나.
 김민영, 강희곤, 이완중, 이상철, 장봉훈, 박성배 (1989) 오존농도의 동태 및 영향인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(2), 55-71.
 박경윤, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준(1994) 제주도 고산 측정소에서의 대기 오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.
 신찬기, 한진석, 김윤신(1992) 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구, 한국대기보전학회지, 8

(4), 213-220.
 전병일, 김유근, 이화운(1995) 부산 지역의 오존 농도 특성과 기상인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(1), 45-56.
 정 용, 장재연, 권숙표(1986) 서울시 대기중 오존의 오염도와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회지, 2(1), 73-79.
 정용승, 정재섭(1991) 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기 보전학회지, 7(3), 169-179.
 Angle, R.P. and H.S. Sandhu(1989) Urban and rural ozone concentrations in Alberta, Canada. Atmospheric Environment, 23, 215-221.
 Chung, Y.S.(1977) Ground level ozone and regional transport of air pollutants, J. Appl. Meteor. 16, 1127-1136.
 Comrie, A.C. and B. Yarnal(1992) Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburg, Pennsylvania, Atmospheric Environment, 26B, 301-312.
 Eder, B.K. J.M. Davis and P. Bloomfield(1993) A characterization of the spatiotemporal variability of non-urban ozone concentrations over the eastern united states, Atmospheric Environment, 27, 2645-2668.
 Kato, H., F. Shin-ichi and S. Nishinomiya(1990) Mechanism of spring high oxidant episode-A meteorological analysis in and around the Hokuriku district, Japan, Atmospheric Environment, 24A, 2023-2033.
 Lin, X., O.T. Melo, D.R. Hastie and H. Niki (1992) A case study of ozone production in a rural area of central Ontario, Atmospheric Environment, 26, 311-324.
 Mckendry, I.G.(1993) Ground level ozone in Montreal, Canada, Atmospheric Environment, 27, 93-103.
 Mckendry, I.G.(1994) Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at Vancouver British Columbia, J. Appl. Meteor., 33, 627-641.
 Mizoguchi, T., M.Kunugi and M.Nishikawa (1985) Background air pollutant measurements and selection of background sites in Japan. Res. Rep. Natl. Inst. Environ.

- Study, Japan, No. 79.
- Mueller, S.F.(1994) Characterization of ambient ozone levels in the Great Smoky Mountains National Park, J. Appl. Meteor. 33, 465-472.
- Sunwoo, Y., G.R.Carmichael and H.Ueda(1994) Characteristics of background surface ozone in Japan, Atmospheric Environment, 28, 25-37.
- Tateishi, H., J.W.Bottenheim, A.Sirois, K.A. Brice and A.J.Gallant(1994) Five years of continuous observations of PAN and ozone at rural location in eastern Canada, J. Geophys. Res., 99, 5333-5352.
- Wakamatsu, S., I.Uno, H.Ueda and K.Uehara (1989) Observational study of stratospheric ozone intrusions into lower troposphere, Atmospheric Environment, 23, 1815-1826.
- Warneck, P.(1988) Chemistry of the natural atmosphere. Academic press, Inc. 757p.