

## 포항지역 오존의 수직분포 특성

김지영<sup>1</sup> · 윤용훈<sup>2</sup> · 송기범<sup>1</sup> · 김기현<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 지구과학과 대기환경연구소, 143-747, 서울특별시 광진구 군자동 98

<sup>2</sup>기상연구소 해양기상연구소, 156-720, 서울특별시 동작구 신대방동 460-18

## Characteristics of Vertical Ozone Distributions in the Pohang Area, Korea

Ji-Young Kim<sup>1</sup> · Yong-Hoon Youn<sup>2</sup> · Ki-bum Song<sup>1</sup> · Ki-Hyun Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Atmospheric Environment Laboratory, Department of Earth Sciences, Sejong University,  
Seoul 143-747, Korea

<sup>2</sup>Marine Meteorology Laboratory, Meteorological Research Institute,  
Seoul 156-720, Korea

**Abstract:** In order to investigate the factors and processes affecting the vertical distributions of ozone, we analyzed the ozone profile data measured using ozonesonde from 1995 to 1997 at Pohang city, Korea. In the course of our study, we analyzed temporal and spatial distribution characteristics of ozone at four different heights: surface (100m), troposphere (10km), lower stratosphere (20km), and middle stratosphere (30km). Despite its proximity to a local, but major, industrial complex known as Pohang Iron and Steel Co. (POSCO), the concentrations of surface ozone in the study area were comparable to those typically observed from rural and/or unpolluted area. In addition, the findings of relative enhancement of ozone at this height, especially between spring and summer may be accounted for by the prevalence of photochemical reactions during that period of year. The temporal distribution patterns for both 10 and 20km heights were quite compatible despite large differences in their altitudes with such consistency as spring maxima and summer minima. Explanations for these phenomena may be sought by the mixed effects of various processes including: ozone transport across two heights, photochemical reaction, the formation of inversion layer, and so on. However, the temporal distribution pattern for the middle stratosphere (30km) was rather comparable to that of the surface. We also evaluated total ozone concentration of the study area using Brewer spectrophotometer. The total ozone concentration data were compared with those derived by combining the data representing stratospheric layers via Umkehr method. The results of correlation analysis showed that total ozone is negatively correlated with cloud cover but not with such parameter as UV-B. Based on our study, we conclude that areal characteristics of Pohang which represents a typical coastal area may be quite important in explaining the distribution patterns of ozone not only from surface but also from upper atmosphere.

Key words: surface, troposphere, stratosphere, ozonesonde, coastal

**요약:** 본 연구진은 포항지역을 중심으로 1995년부터 1997년의 3년간 오존존데로 관측한 고도별 오존농도 및 오존전량 자료를 이용하여 오존의 수직분포특성에 대한 연구를 수행하였다. 오존의 수직분포를 체계적으로 밝히기 위해, 지상(100m), 대류권(10km), 하부 성층권(20km), 중부 성층권(30km)을 대표 고도로 설정하여 오존농도의 시·공간적 분포특성에 대한 비교 분석을 시도하였다. 지상(100m) 오존의 경우, 포항제철이 인접해 있음에도 불구하고, 전반적으로 청정지역에서와 유사한 농도분포를 유지하였다. 봄과 여름에 높고 가을과 겨울에 낮은 농도분포는 기상인자들과의 상관성을 고려할 때, 대체로 광화학 반응에 의한 결과로 보여진다. 대류권(10km) 및 하부 성층권(20km)의 경우 춘고하저(春高夏低)의 전형적인 북반구 대류권 오존의 시간적 경향성을 나타내었다. 이는 고도별 오존농도간의 분석결과 성층권 오존의 대류권 이동 및 광화학 반응과 역전층 형성에 의한 결과로 추정된다. 중부 성층권(30km) 오존의 경우 지상 오존의 농도분포 경향과 매우 유사한 월주기 및 계절주기를 취하였다. Brewer 분광광도계에 의한 오존전량은 성층권 오존량(Umkehr 법)에 의해 크게 좌우되며, 오존전량은 유해자외선(UV-B)과의 상관성은 미미하나, 운량과는 음의 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과 지상권뿐만 아니라 대류권 및 성층권 오존의 시간적 특성을 이해하는데 있어 포항이 해안도시라는 지리학적인 요인이 매우 중요하다는 점을 확인할 수 있다.

주요어: 지상권, 대류권, 성층권, 오존존데, 해안지역

## 서론

대류권과 성층권에 존재하는 오존은 서로 상반된 영향력을 미치는 것으로 잘 알려져 있다(Lu *et al.*, 1997). 먼저 성층권의 오존은 약 25~30km 상공에서 최고농도대를 형성하며, 태양으로부터 오는 유해한 자외선을 막아주는 역할을 한다. 그러나 오존이 대류권에서 높은 농도로 존재할 경우, 산화제로 작용하여 인간에게 뿐만 아니라 식물과 건물 등에도 여러 유형의 악영향을 미치게 된다. 따라서 대기환경에 대한 오존의 역할은 대기 과학자들에게 매우 커다란 관심의 대상이 되어왔다.

1957년 국제지구물리관측년(IGY: International Geophysical Year) 계획 이래 대기 중의 오존전량과 대기 중의 수직 층별 오존량의 측정을 위해 본격적으로 전세계적 오존 관측망이 운영되기 시작하였다. 이 시점을 기준으로 오존에 관한 연구는 전지구적인 총오존량의 감소경향과 남극상공 성층권에서의 오존량 파괴에 집중되어 왔다(e.g. World Meteorological Organization, (WMO), 1995). 그러나 대기 중 오존의 행태를 더 정확히 이해하고, 각각의 대기권이 서로의 오존량에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 대기 중 오존의 수직분포에 관한 연구가 대단히 중요하다. 이를 위해 오존존데(ozonesonde), 라이다(lidar), Dobson 또는 Brewer 분광광도계(Umkehr 법) 등과 같은 여러 종류의 측정방법들이 사용되고 있다. 그외 지상에서 벗어난 권역에서 인공위성 센서를 이용하여 측정하는 방식도 있다(McCormick, 1987; McCormick *et al.*, 1992; Russell *et al.*, 1993).

그 중에서도 오존존데를 사용하는 방법은 대서양 지역에서의 biomass burning으로 인한 대류권내 오존농도의 증가에 관한 연구(e.g., Kirchhoff and Marinho, 1994; Nganga *et al.*, 1996; Olson *et al.*, 1996; Kirchhoff *et al.*, 1996), 1991년 필리핀의 Pinatubo화산의 분화로 인한 성층권내 오존농도의 감소에 관한 연구(e.g. Hofmann *et al.*, 1993; Ansmann *et al.*, 1996), 지상 오존의 농도변화에 관한 연구(e.g., Oltmans, 1981; Oltmans and Komhyr, 1986) 등에 빈번하게 이용되었다. 그러나 실제로는 대부분의 오존존데를 이용한 연구들이 일부 지역에 편중되었으며, 동아시아 지역을 중심으로 시행된 연구결과는 상대적으로 빈곤한 형편이다. 예를 들어, 일본에서는 지난 30년간 오존존데를 이용한

여 4개의 지점에서 오존의 수직분포를 조사해왔다. 태국은 1992년 7월부터 오존존데를 이용한 오존관측을 시작하였으며, 중국은 1995년 10월부터 1996년 7월까지 Qinghai 지역의 Xining(36° 02'N, 100° 05'E)에서 50개의 오존존데를 띄워 보냈다(Chan *et al.*, 1998). 우리나라에서는 경북 포항 (36° 02'N, 129° 24'E)에서 1994년부터 대략 매주 1 회 간격으로 오존의 수직분포를 관측하고 있다.

본 연구에서는 1995년 1월부터 1997년 12월까지 포항에서 관측한 오존존데 자료를 중심으로 대류권과 성층권 각각에서 오존의 분포 특성 및 계절적 변화추이를 분석하였다. 본 연구의 결과는 동아시아 지역의 다른 나라의 연구와 더불어 이 지역 오존의 수직 및 수평 분포의 특성 및 시간적 변화추이를 파악하는 데 유용한 정보를 제공할 것으로 사료된다.

## 연구 방법

### 측정지점

본 연구에서 사용된 오존자료와 기상자료는 기상청의 상시측정소 중 하나인 포항의 포항기상대에서 관측한 것이다. 포항은 지리적으로 한반도 남단의 동남부인 영일만을 끼고 위치해 있으며, 극동은 129° 23' 05"E(일월동), 극서는 129° 20' 22"E(득량동), 극남은 35° 59' 15"N(효자동), 극북은 36° 02' 52"N(양덕동)이다. 측정소인 포항기상대(36° 02'N, 129° 23'E)는 해안가에서 약 200m 정도 떨어진 곳에 위치하며, 해발고도는 약 6m에 달한다. 도심과는 2~3km 정도 거리에 있고, 남쪽으로 1km 후방에는 포항제철이 위치한다.

### ECC 오존존데

본 연구에 사용된 오존의 수직 농도 분포 자료는 ECC 오존존데 (Model 5A, 미국 Science Pump사)를 이용하여 측정하였다. 관측기간은 1995년 1월부터 1997년 12월까지로 세계기상기구의 권고에 따라 주 1 회의 관측주기를 설정하여 매주 수요일 06UTC 전후에 맑은 날을 택하여 관측을 실시하였다.

오존존데(Komhyr, 1969)는 미국 해양기상청(NOAA)에서 개발한 1200~2000g 정도의 작은 기구로 일반적으로 30km 이상 올라갈 수 있다. 그 측정원리는 다음과 같다. 펌프를 통해 흡입된 공기 중에 포함된 오존과

셀내 요오드화칼륨용액이 반응하면 전류가 발생한다. 이때 나타나는 반응전류의 강약으로 오존량을 측정하는 것이다. 오존존데는 센서의 종류에 따라 측정값의 차이가 나타나는 것으로 알려져 있다(Harris *et al.*, 1997). 본 연구의 측정에 사용된 ECC 센서는 이전부터 널리 사용되어 왔으며, 다른 측정방법들과 광범위하게 비교 시험된 바 있다. ECC 오존존데는 비교적 간단한 외부구조에도 불구하고, 5~7%의 정확도와 3~10%의 재현성을 가지며 (Komhyr *et al.*, 1995), 검출한계는 ~1~2ppb 이하를 유지한다. 그러나 10ppb 이하의 매우 낮은 농도에서는 셀내 배경전류로 인한 불확실성이 거의 10%까지 증가할 수도 있다(Oltmans *et al.*, 1996). 오존존데는 기압과 온도 및 상대습도, 기구내 온도 등을 측정하기 위한 래디오존데(Mark II, 미국 VIZ사)와 함께 발사되는데, 측정된 전류값과 기압, 기구내 온도에 의해 계산된 오존분압 등이 지상의 수신기(W-9000OZ, 미국 VIZ사)에 기록된다.

본 연구에서 고도는 측정된 기압과 온도로부터 계산하고, 오존의 수직분포 농도(단위 ppbv)는 기압과 오존분압으로부터 구하였다. 기압과 온도 자료의 불확실성은 고도 25km 이하에서 최고 100m까지 오차를 유발할 수 있다(G rsdorf *et al.*, 1993). 고도에 따른 오존 농도 자료는 매 100m 간격으로 정리한 다음, 오존 농도와 온도 및 상대습도 각각에 대하여 월평균과 표준오차를 계산하였다.

### Brewer 분광광도계

본 연구에 사용된 오존전량(mean daily total direct ozone) 자료와 Umkehr 관측방법에 의한 층별오존량 자료는 모두 Brewer 분광광도계(#095, 캐나다 SCI-TEC 사)로 측정하였다. 오존전량의 관측기간은 1995년 1월부터 1997년 12월까지이고 Umkehr 법에 의한 자료는 1996년 1월부터 1997년 12월까지이다. Brewer 분광광도계는 직사광선 흡수를 이용하여 층별 오존량을 계산하는데 필요한 자외선량을 정확하게 측정하기 위해 캐나다의 대기환경국(Atmospheric Environmental Service)에서 고안한 것으로, 분해능이 약 0.6nm에 이른다(Kirchhoff *et al.*, 1997).

오존전량 (단위 DU)은 관측일 중 총 관측회수에 대한 모든 관측자료 중 실제 사용 가능한 자료를 선택하여 이에 대한 일평균을 구하고 표준편차를 제시하였다.

Umkehr 법에 의한 층별 오존량(단위 DU)은 기상상태에 따라 하루 중 오전이나 오후 한 번만 측정되거나, 맑은 날에는 오전과 오후에 모두 측정하였다. 이 때 연직을 10층으로 구분하여 각 층별 오존량과 각 층값의 오차율(%)을 제시하였다. 각층의 고도범위는 다음과 같다: 1층 47.9km 이상, 2층 42.6~47.9km, 3층 37.5~42.6km, 4층 32.6~37.5km, 5층 28.0~32.6km, 6층 23.5~28.0km, 7층 19.1~23.5km, 8층 14.7~19.1km, 9층 10.3~14.7km, 10층 지상~10.3km.

### UV-Biometer

유해자외선(UVB; ultraviolet radiation B)은 280~320nm의 파장범위를 갖는 자외선으로, UV-Biometer (Solar Light 사, model 501)로 관측하였다. 측정원리를 간단히 설명하면, 태양광선 중 가시광선영역을 배제하는 필터를 통과한 광선에 의해 인(phosphor)이 연기상태가 되어 가시광선을 방출한다. 방출된 가시광선은 칼륨-비소 다이오드에 의해 감지되어 기록된다. 측정값의 단위는 MED/HR(Minimum Erythema Dose per Hour)이며, 1 MED/HR는 1시간 동안 태양복사를 받은 후에 평균적으로 피부에 최소한의 홍반을 일으키는 효과를 수치로 나타낸 것이다. 측정은 매 30분 간격으로 하루 동안 수차례 이루어졌으며, 일대표값으로 적산값을 사용하였다.

### 기상자료

오존농도와 관련하여 기상상태를 분석하기 위하여 1995년 1월부터 1997년 12월까지의 포항의 기상자료를 이용하였다. 기상자료는 기온(C), 상대습도(%), 일사량(MJ), 대기압(hPa), 강우량(mm), 풍속(m/s), 풍향(°), 운량을 이용하여, 각각에 대해 일평균과 표준오차를 계산하였다.

## 결과 및 토의

### 기상조건 및 지리적 위치와 지상 오존농도의 관계

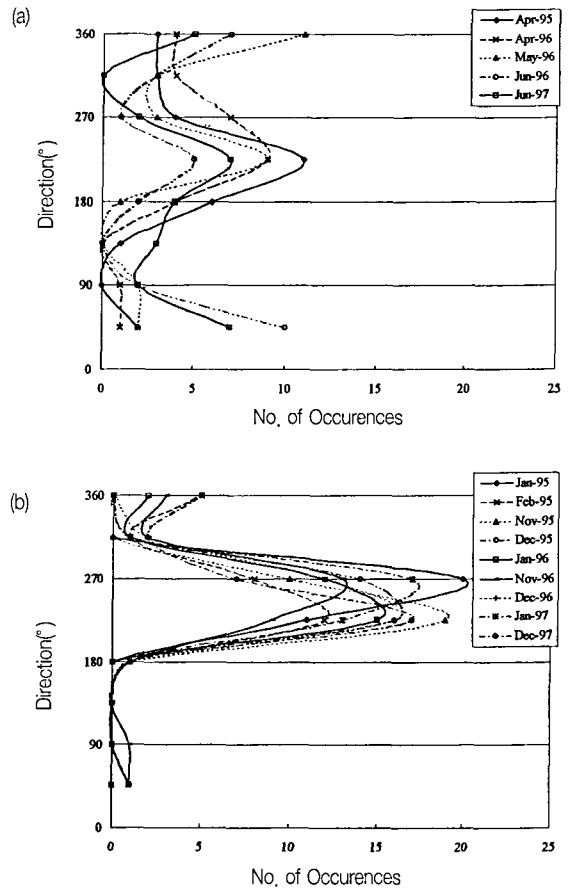
연구대상 기간 중 기상조건의 변화를 계절별로 살펴보면 다음과 같다(Table 1). 기온의 경우 여름철인 8월에 가장 높고 가을, 봄, 겨울의 순으로 점차 감소한다. 일사량은 계절별 차이를 거의 볼 수 없으나, 다른 계절

**Table 1.** A summary of seasonal distribution of ozone and meteorological parameters measured from Pohang during 1995-1997.

year	season	Ozone(ppb)	Temp.(C)	IR(mJ)	Wspeed(m/s)	RH(%)	RF(mm)
		Mean±SD(N)					
1995	spring	45.8±15.7 (10)	13.2±5.0(92)	1.2±0.5(92)	2.8±0.7(92)	54.5±48.9(92)	0.9±1.2(36)
	summer	40.6±12.2(10)	24.6±4.6(92)	1.1±0.5(92)	2.3±0.8(92)	72.2± 0.8(92)	1.4±2.2(42)
	fall	36.6±10.0(12)	15.7±5.3(91)	1.0±0.3(91)	2.6±0.8(91)	58.1±14.5(91)	0.6±0.7(21)
	winter	24.3± 8.2(9)	3.1±2.8(90)	0.9±0.3(90)	2.8±0.7(90)	44.7±14.2(90)	0.4±0.6(19)
1996	spring	51.0± 8.9(13)	12.5±5.7(92)	1.2±0.5(92)	2.7±0.7(90)	55.3±20.2(92)	1.6±2.1(29)
	summer	41.6±18.0(10)	23.6±4.4(92)	1.0±0.5(92)	2.4±0.1(92)	78.8±10.3(92)	1.1±1.7(43)
	fall	37.7±17.4(12)	16.0±5.6(91)	0.9±0.4(91)	2.3±0.8(91)	66.5±15.3(91)	0.6±1.0(30)
	winter	27.7± 8.9(13)	3.1±3.9(91)	0.9±0.3(91)	2.8±0.9(91)	45.0±17.1(91)	1.2±1.6(14)
1997	spring	46.2±10.7(13)	14.0±5.0(92)	1.1±0.5(92)	2.8±0.8(92)	57.9±19.2(92)	0.7±0.9(37)
	summer	45.3±19.0(13)	24.7±3.0(92)	1.1±0.5(92)	2.0±0.9(92)	72.5±11.9(92)	1.2±1.4(41)
	fall	36.1±10.1(12)	16.2±5.2(91)	1.0±0.4(91)	2.4±1.2(91)	62.5±14.4(91)	1.3±1.8(23)
	winter	29.8± 7.3(15)	3.6±3.6(90)	0.8±0.3(90)	3.0±0.9(90)	50.4±16.0(90)	0.7±1.4(22)

에 비해 봄과 여름에 높은 편이다. 상대습도는 여름철에 가장 높고 가을, 봄, 겨울 순으로 감소하는데, 기온과 매우 유사한 계절적 변화경향을 띠고 있다는 것을 알 수 있다. 풍속은 평균적으로 2.0m/s 대의 값을 가지며 비교적 봄과 겨울철에 높은 값을 나타낸다. 이제까지 언급한 기상인자들이 매년 일관된 계절적 변화경향을 보인 반면, 강수량의 계절적 경향성은 매년 다르다. 즉 1995년과 1997년에는 여름철에 많고 겨울철에 적으나, 1996년에는 봄철에 가장 많고 다음으로 겨울철이 여름철과 비슷한 강수량을 보였다.

지상 오존 농도는 일반적으로 기상인자에 의해 상당히 좌우되지만, 해발고도와 위·경도를 비롯한 지리적 위치 또한 중요한 인자로 작용한다는 점이 확인된 바 있다(Mueller, 1994; Sunwoo *et al.*, 1994). 이는 (뒤에 언급할) 월주기 경향에서도 어느 정도 파악할 수 있다. 본 연구의 측정 지점인 포항기상대는 비교적 규모가 큰 도시인 포항에 위치한다. 그러나 해안에서 대략 100m 정도 떨어진 곳에 자리잡고 있어, 지상(100m) 오존의 경우 오염되지 않은 전원지역에 가까운 특성을 유지할 것으로 짐작할 수 있다. 단 본 측정 지점으로부터 약 1km 남쪽에 포항제철이라는 대규모 시설물이 있다는 점을 간과할 수 없다. 따라서 포항제철에서 배출된 대기오염물질의 광화학 반응이 이 지역의 주된 오존 생성원으로 작용할 수 있는가의 여부를 밝히기 위한 한 가지 방편으로 지상(100m) 오존농도와 풍향의 관계를 살펴보았다. Fig. 1a에는 오존농도 50ppbv 이상의 높은



**Fig. 1.** Plots of frequency distribution for wind direction measured during the episodes of both (a) high (>50 ppb) and (b) low (<30 ppb) ozone concentration.

월평균치를 갖는 1995년 4월과 1996년 4, 5, 6, 7월, 1997년 6월에 대하여 발생한 풍향의 빈도를 제시하였다. Fig. 1b에는 30ppbv 이하의 저농도를 보이는 겨울철에 대해 풍향의 빈도수를 나타내었다. 저농도의 경우 주로 서풍과 남서풍이 잦았는데 비해, 고농도의 경우 남서풍 또는 북풍의 영향권에서 주로 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 유사한 방향에서 동시에 높고 낮은 농도가 나타나는 결과를 감안하면, 특별히 남쪽에 위치한 제철소가 오존의 농도에 큰 영향을 미친다고 할 수 없을 것으로 보인다. 이는 이 지역에서 지상 오존의 농도가 대기오염 물질의 광화학 반응과 같은 요인보다는 해안이라는 지리적인 특성으로 인해 기압 등 기상학적 요인들이 복합적으로 작용하는데 따른 결과로 간주할 수 있을 것으로 보인다.

**전체적 경향**

본 연구의 측정지점인 포항지역의 대류권과 성층권의 경계인 대류권계면은 약 9~15km에 위치하며 이는 이전의 연구결과(Steinbrecht *et al.*, 1998)와도 일치한다. 그리고 성층권내에 집중적으로 고농도의 오존이 분포하는 오존층은 대략 25~30km에 자리잡고 있다. 자료 해석의 편의성을 도모하기 위하여, 이전의 연구결과(Harris *et al.*, 1997)를 참고로 대류권과 성층권을 고도에 따라 상중하로 구분하였다. 본 연구에서는 고도별 오존의 농도 경향을 살펴보기 위하여, 4개의 고도를 기준으로 설정하였다. [1] 지상권을 대표하기 위한 고도로서 어느정도 오존존데로부터 관측되는 자료의 안정성을 확보할 수 있는 높이로 100m를 설정하여 지상(surface) 오존이라 하였다. 참고적으로 본 연구에서는 상시관측소에서 관측한 지표(ground-level) 오존과 이를 구분하지 않고 비교하였다. [2] 상부 대류권(upper troposphere)에 대해서는 10km를, [3] 하부 성층권(lower stratosphere)에 대해서는 20km를 대표치로, [4] 중부 성층권(middle stratosphere)을 대표하기 위해 오존존데의 관측가능고도인 30km를 설정하였다.

연구대상 기간 중(1995년 1월~1997년 12월) 지상(100m) 및 대류권(10km) 오존량의 뚜렷한 증가나 감소 경향은 볼 수 없지만, 성층권 오존량을 대표하는 20km와 30km의 경우 평균농도는 매년 조금씩 증가하는 추세를 보였다(Fig. 2, Table 1). 지상(100m)과 30km 오존의 경우에도 최고 농도는 매년 증가하였다. 그리고 모

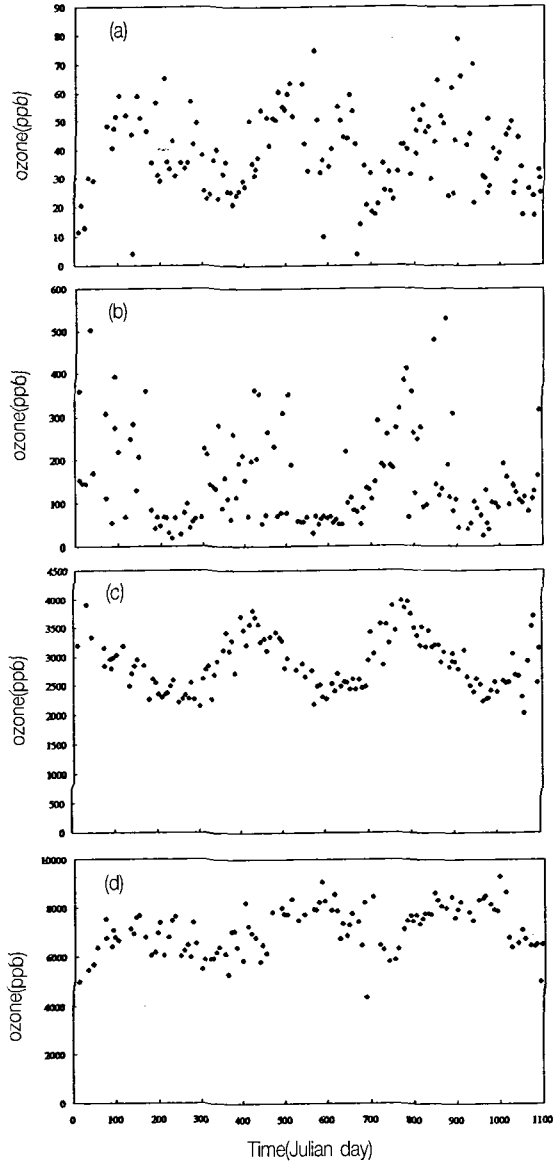


Fig. 2. Changes in the daily mean concentrations of ozone at altitudes of (a) 100m, (b) 10km, (c) 20km, and (d) 30km. Measurements were made during Jan. 1995 through Dec. 1997.

든 고도에 대하여 1997년에 최고 농도가 출현하였다는 점을 감안하면, 모든 고도에서 오존 농도는 대체로 잠재적인 증가추세에 있음을 추정해 볼 수 있다. 그러나, 총 연구대상기간이 3년에 불과하므로, 이와 같은 추세를 확인하기 위해서는 좀 더 지속적인 감시가 요구된다고 할 수 있겠다.

덧붙여 Brewer 분광광도계로 관측한 오존전량의 경

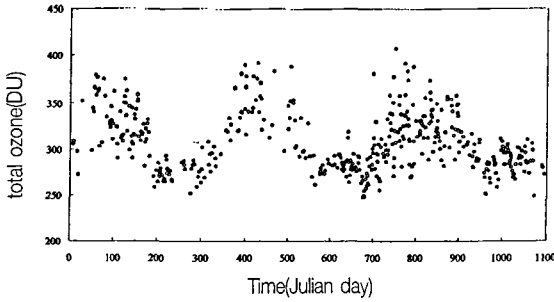


Fig. 3. The temporal trend of total ozone using daily distribution data obtained by Brewer Technique during Jan. 1995 through Dec. 1997.

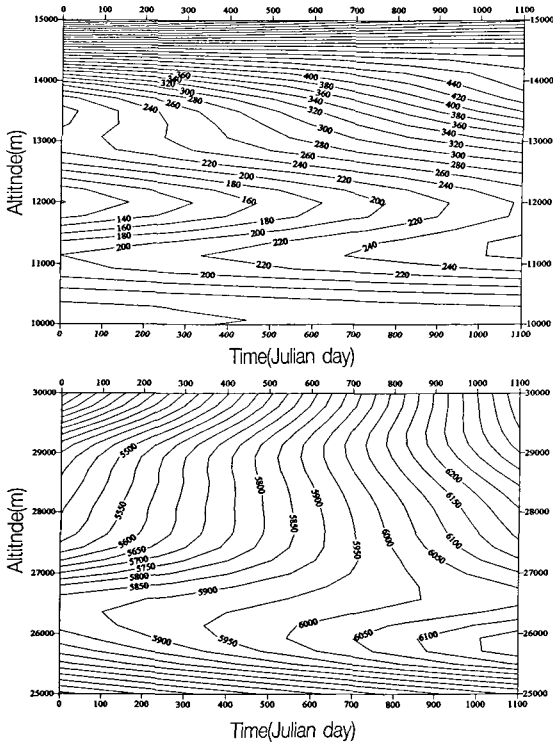


Fig. 4. The composite time-height cross sections of ozone mixing ratio(ppbv) at Pohang during 1995-1997. (a) 10~15km and (b) 25~30km.

우에도 명확한 증가나 감소 추세로 설명할 수는 없으나, 최고 농도는 매년 증가하고 있다. 따라서 위의 층별 오존농도의 경향과도 크게 다르지 않으리라는 점을 추정할 수 있다(Fig. 3).

시간 및 고도에 따른 오존 농도의 변화를 알아보기 위해 100m 간격으로 정리된 오존자료를 이용하여 그린 등농도곡선을 Fig. 4에 제시하였다. 비교적 뚜렷한 농도

Table 2. A summary of seasonal mean ozone concentrations(ppb) from each altitude during 1995-1997.

season	Altitude				
	100m	10km	15km	20km	30 km
	Mean±SD(N)				
spring	47,8±11,7 (36)	215±123 (37)	729±307 (36)	3185±303 (35)	7392±680 (30)
summer	42,7±16,5 (33)	79,8±69,3 (34)	464±117 (32)	2575±254 (33)	7636±779 (26)
fall	36,8±12,6 (36)	105±50,3 (38)	540±179 (37)	2503±216 (37)	6949±1050 (32)
winter	27,7± 8,2 (37)	199±105 (36)	755±312 (32)	3369±379 (29)	6479±857 (28)

변화를 보이는 상층 대류권인 11~13km에서는 12km를 중심으로 왼쪽에서 오른쪽으로 혀모양을 하고 있으며, 대류권 전반에 걸쳐 매년 농도가 증가하고 있음을 볼 수 있다. 성층권 내에서도 26km를 중심으로 오른쪽에서 왼쪽으로 혀모양을 형성하며, 오존 농도는 대류권과 마찬가지로 전반적으로 증가하는 양상을 보인다.

Chan *et al.* (1998)은 봄철의 경우 성층권 오존이 상부 대류권으로부터 침입하여 점차 하부 대류권으로 이동하므로, 봄철 대류권의 오존 농도는 대류권 전체에 걸쳐 높은 농도를 나타낸다고 하였다. 그러나, 여름철의 경우 오존 농도의 감소는 하부 대류권에서 시작하여 중부 대류권까지 이어지므로 성층권으로부터 대류권으로의 이동이 줄어들었다기 보다는 대류권내에서의 광화학적 파괴반응이 중요한 역할을 하는 것으로 여겨진다고 추정하였다. Fig. 4를 근거로 그러한 추정을 입증하기에는 부족하나, 다음의 결과로 간접적으로 추정해 볼 수 있다. 즉 극상층 대류권(~15km)에서 봄철과 여름철의 오존 농도 차이가 다른 고도 (e. g., 10km)에 비해 상대적으로 작게 나타나는 것을 통해서도 봄철 성층권 오존의 대류권 침입을 짐작할 수 있다. Table 2에 제시된 고도별 오존의 평균농도치를 비교하면, 15km에서 봄의 경우 729ppb, 여름의 경우 464ppb로 나타났다. 그런데 10km에서는 봄에는 215ppb, 여름에는 79.8ppb로 나타난다. 따라서 10km에서는 봄/여름 비가 약 2.7로 높지만, 15km에서는 그 비가 크게 줄어들고, 20km에서는 더 적어짐을 볼 수 있다.

월주기에 따른 고도별 오존농도의 변화경향

지상(100m) 오존: 월별 평균농도의 범위는 15.0~56.8ppbv, 평균과 표준편차는  $38.9 \pm 10.4$ ppbv로 나타났다. 이러한 농도는 청정지역을 대표하는 제주도 고산지역의 월평균 오존농도와 비슷한 수준(30~58ppbv)으로 보인다(서명석 등, 1995). 오염된 대도시의 경우 최고농도는 매우 높게 나타나고, 기준치를 초과하는 값 또한 빈번하게 출현한다. 그러나 1차 대기오염 물질과의 반응에 의해 오존이 파괴되므로, 그 평균농도는 전원지역보다 낮은 것이 특징이다(Fuentes and Dann, 1994). 본 측정지점의 오존 농도는 절대값으로는 적은 수치라고 볼 수 없으나, 우리나라 환경기준 8시간 평균치인 60ppbv를 초과하지 않고 일반적인 배경농도인 40ppbv에 매우 근접하므로, 비교적 청정지역의 농도에 가까운 것으로 보인다.

Fig. 5에는 모든 측정자료를 이용하여 각각의 고도에 대해서 오존의 월별 평균농도를 나타내었다. 지상 오존의 월별 분포 경향을 살펴보면 3월에서 7월까지 대체적으로 고농도를 유지하다가 8월에 급격히 감소하고 9~10월에 증가하다가 11월 이후로는 매우 낮은 농도를 보인다(Fig. 5a). 지상 오존 농도의 주된 생성메커니즘이 광화학 반응을 고려할 때 겨울철에 해당하는 11월에서 2월 사이에 저농도를 나타내는 것은 충분히 예상할 수 있다. 그러나 높은 기온과 일사량으로 광화학 반응에 유리한 8월에는 거의 규칙적으로 낮은 농도를 보인다. 1995년의 경우 8월에 평균 강수량뿐만 아니라 최고 강수량이 집중적으로 발생한 결과 강우에 의한 세정효과로 인해 오존 농도가 일시적으로 감소한 것으로 볼 수 있다. 그러나 이러한 경향이 1996년과 1997년에는 다시 나타나지 않으므로 단순히 강수량의 영향만으로 설명할 수는 없다(Fig. 6, Table 1). 또한 김영성(1996)에 의하면 우리나라의 해안도시인 부산, 여천, 울산에서도 이와 유사한 경향성을 보이는데, 즉 오존농도는 3, 4월에 가장 큰 피크를, 9, 10월에는 작은 피크를 보이며 7, 8월에는 상당히 낮아진다. 이러한 형태의 월주기는 7, 8월에도 지속적으로 고농도를 보이는 서울을 비롯한 내륙의 대도시와는 판이하게 다르므로 해안도시의 특징이라고 볼 수 있다.

대류권(10km) 및 성층권(20km, 30km) 오존: Fig. 5b와 5c에 의하면 10km와 20km에서 오존의 전반적인 월주기

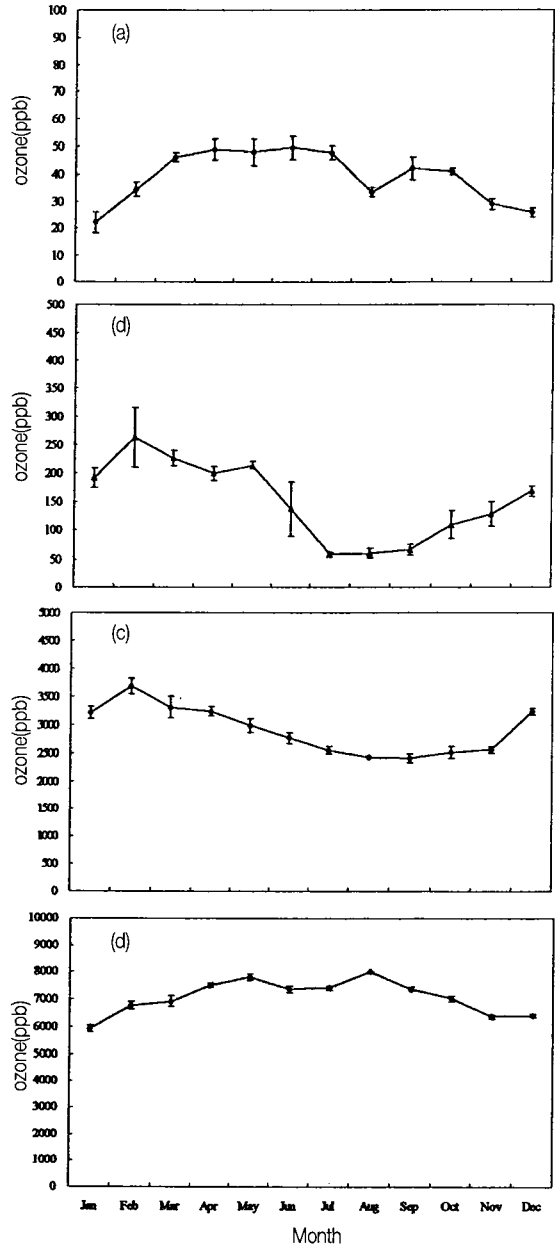


Fig. 5. The monthly mean concentrations of ozone from each altitude: (a) 100m, (b) 10km, (c) 20km, and (d) 30km.

경향이 어느 정도 유사성을 띠는 것으로 나타난다. 즉 대류권과 하부 성층권에서 오존 농도는 모두 2월에 최고치를 나타내며, 7~9월중 최저 농도를 보인다. 이들 고도에서 오존의 생성이 주로 광화학 반응에 의한 것이라고 가정한다면, 이렇듯 뚜렷한 월주기 경향은 고도에

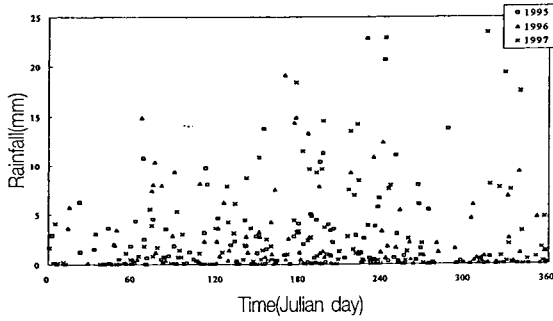


Fig. 6. Rainfall records during 1995-1997.

따른 온도나 상대습도와 같은 기상요소들의 변화만으로는 설명이 곤란하다. 따라서 이는 하부 성층권에서 상부 대류권으로 오존의 이동에 의한 결과로도 유추해 볼 수 있겠다. 이와 관련된 내용은 오존농도의 계절별 경향성을 분석한 다음 절에서 자세히 언급하겠다. 그러나 같은 성층권대에 속해있는 20km와 30km의 오존 농도는 서로 상반되는 계절 및 월주기 경향을 보여준다. 30km의 오존은 여름철인 8월에 최고 농도를, 겨울철(주로 1, 2월)에 최저 농도를 보인다. 이러한 결과는 오히려 지상권의 경향과 유사하게 보인다.

**계절주기에 따른 고도별 오존농도의 변화경향**

지상(100m) 오존: 계절별 경향을 살펴보면 대체로 봄에 가장 높은 농도를 나타내며, 여름, 가을, 겨울로 갈수록 점점 감소하여 겨울에 최저값을 보이는 경향이 지속적으로 반복되었다(Fig. 7a). (이미 앞의 월주기 경향에 대한 분석에서 광화학 반응에 유리한 조건인 여름철보다 오히려 봄철에 높은 오존농도가 유지된다는 점이 확인되었다.) 이는 이전의 여러 연구들에서 지적한 바와 같이, 오염이 적은 전원지역의 경우(오존의 대기 중 체류시간이 여름철보다 상대적으로 긴) 겨울 동안에 점차적으로 축적된 오존의 영향이 봄철 고농도로 이어진 결과임을 추측할 수 있다(Liu et al., 1987). 이는 오염이 적은 지역일수록 봄에 월평균이 가장 높고, 오염이 심할수록 봄철의 농도는 낮아지는 대신 여름철 농도가 상대적으로 높아진다는 과거의 연구결과와도 일치한다(Lefohn et al., 1992; Sunwoo et al., 1994; Fuentes and Dann, 1994). 정용승과 정재섭(1991)의 연구에 따르면 겨울철 지상오존의 최저치는 일반적으로 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 기온과 일사량 및

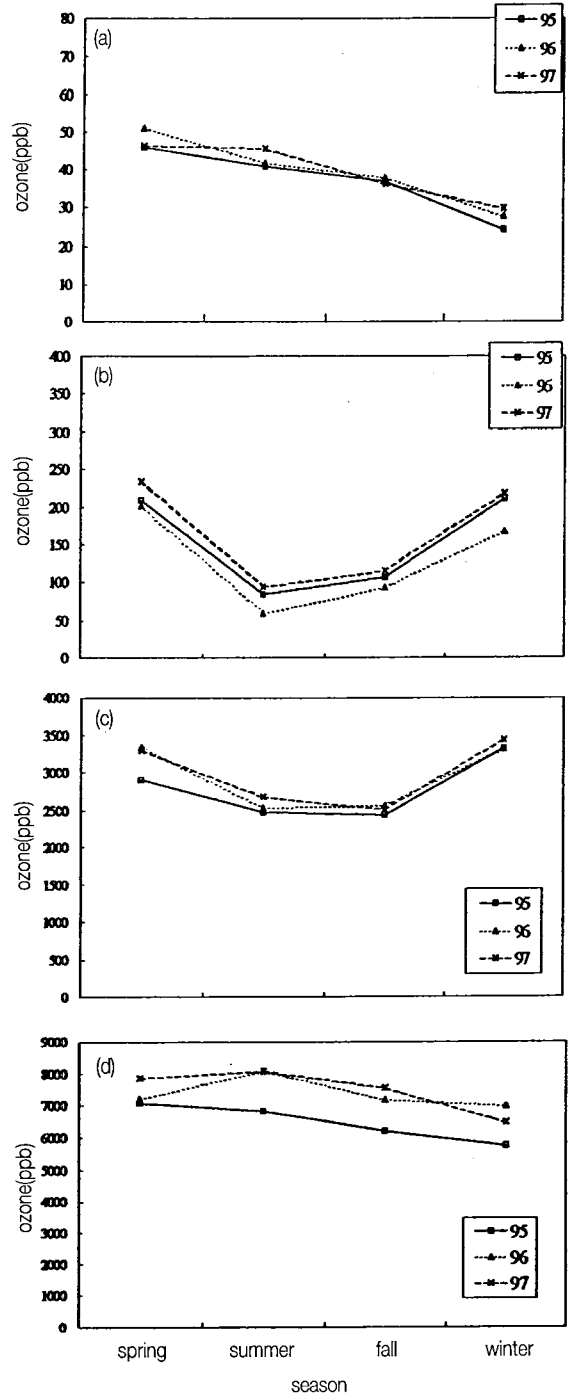


Fig. 7. The seasonal distribution trends of ozone during 1995-1997: (a) 100m, (b) 10km, (c) 20km, and (d) 30km.

빠른 풍속 등과 관련된 것으로 볼 수 있다. 그러나, Table 1에 나타난 바와 같이 본 측정 지점의 경우 계절에 따른 일사량과 풍속의 차이는 작은 반면, 기온은 여



름과 다른 계절과의 차이가 평균적으로 10에서 20℃까지 벌어져 기온이 주된 영향인자로 작용할 수 있다는 점을 알 수 있다.

대류권(10km) 및 하부 성층권(20km) 오존: 대류권 오존량과 하부 성층권 오존량은 봄과 겨울에 높고 여름과 가을에 낮게 나타나서, 지상오존과는 다른 계절적 특성을 보여주었다(Fig. 7b, 7c). 이제까지의 여러 연구결과에 따르면, 북반구에서의 대류권 오존은 주로 봄철에 최고 농도를 보여주고 있으며(Singh *et al.*, 1978; Ogawa and Miyata, 1985; Logan, 1994) 이는 본 연구의 결과와도 일치한다. 봄철에 대류권의 오존량이 높게 나타나는 이유는 크게 두 가지로 설명할 수 있다. 먼저 하부 성층권의 오존을 포함한 공기가 아래의 대류권으로 이동하는 경우가 있는데, 특히 다른 계절에 비해 봄철에 이러한 이동현상의 빈도가 높게 나타났다(Danielsen, 1968; Chung and Dunn, 1985; Kato *et al.*, 1990). 성층권 오존의 대류권 유입은 일반적으로 대류권 오존량의 약 50% 이상이 성층권에서 기인한다고 추정(Lelieveld and Crutzen, 1994)하는 만큼, 매우 중요한 현상으로 보아야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 아직까지 유입 규모를 정량적으로 파악하는 것이 매우 불확실한 실정이다.

또 다른 메커니즘으로는(여름철에 비해 오존과 그 전구물질의 대기 중 체류시간이 상당히 긴) 겨울철에 이러한 물질들이 지속적으로 생성·축적됨으로서 봄철에 오존 농도가 가장 높게 나타나는데 일조한다는 것을 들 수 있다(Liu *et al.*, 1987; Penkett *et al.*, 1993). 이는 지상오존의 주요 생성 메커니즘으로 더 잘 알려져 있다. 이와 같은 메커니즘을 설명할 수 있는 부수적인 증거의 하나로 역전층의 영향을 간과할 수 없다. Fig. 8 에는 고도에 따른 온도의 수직분포를 나타내었는데, 1997년의 경우 1월과 3월에는 뚜렷한 역전층이 10km 부근에서 형성되었으며 10월에는 약한 역전층이 이 부근에 형성되었다. 매년 여름철인 6, 7, 8월을 제외한 모든 달에 역전층이 발견되었다. 역전층이 형성되면 대기중에 존재하는 물질이 일정기간 그 안에 갇히므로 이동에 제한을 받을 수 있다. 따라서 여름이나 가을에 비해 역전층이 강하게 발생하는 계절인 겨울과 봄에 오존의 농도가 높게 나타날 수 있는 것이다.

여름철에 대류권 오존량이 최소치를 보이는 현상 또한 위의 두 가지 메커니즘으로 설명이 가능하다. 즉 여

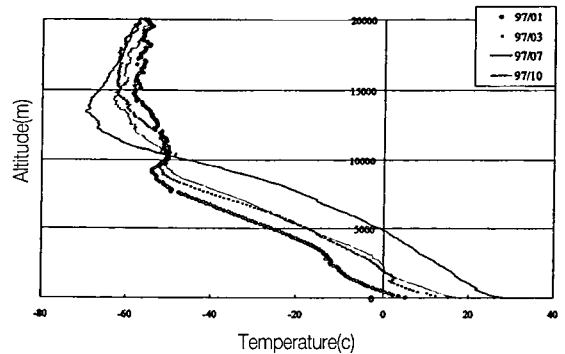


Fig. 8. A plot of vertical temperature profiles of Pohang area during Jan., Mar., Jul., and Oct. 1997.

름철의 낮은 오존농도는 광화학 파괴반응에 의한 것이거나 아니면 성층권으로부터의 이동이 줄어들었기 때문이다(Ogawa and Miyata, 1985).

대류권 오존의 춘고하저(春高夏低) 경향은 동아시아 지역내의 홍콩과 일본은 물론 케네디봉(Cape Kennedy, 28.5° N) 을 비롯한 북반구의 여러 지역에서 관찰되고 있다(Chan *et al.*, 1998; Sunwoo *et al.*, 1992, 1994; Tsutsumi *et al.*, 1996; Chatfield and Harrison, 1977). 이들 측정지역들은 모두 해안도시에 위치하고 있어, 지형적인 특성으로 인한 기류 및 해류의 움직임을 포함한 기상조건 등이 지상 오존뿐만 아니라 대류권 오존에도 지대한 영향을 미치고 있다는 점을 추정할 수 있다.

중부 성층권(30km) 오존: 대기권에서 가장 고농도로 오존이 분포된 고도는 평균적으로 28~29km로 본문에서는 오존존데 측정의 특성상 30km를 중부 성층권을 대표하는 고도로 설정하였다. 30km의 경우 지상의 농도 분포 경향과 유사하게 여름철에 최고 농도를 보이고, 그 다음으로 봄, 가을 순으로 감소하여 겨울철에 최저 농도를 보인다(Fig. 7d). 여름철 지상오존의 생성은 기상학적 인자들이 중요하게 작용하는 광화학 반응에 주로 기인한다. 성층권(30km) 오존의 경우 또한 이러한 계절적 경향성이 온도 등과 같은 요인들의 영향을 받은 결과로 볼 수도 있다.

본문에서는 오존존데 및 레디오존데 관측자료를 이용하여 10, 20, 30km 고도에 따른 오존농도와 온도의 관련성을 살펴보았다. 그 결과 20km에서는 계절에 따른 온도의 변화가 그리 두드러지지 않았으며, 10km에서는 여름철에 평균기온이 가장 높게 나타났으나 오존

농도는 가장 작게 나타났다. 그러나 30km의 경우 평균 온도가 봄과 여름이 비슷하게 높고 가을, 겨울로 가면서 점점 감소하는 추세를 보인다. 따라서 이미 위에서 설명한 바 있는 오존농도의 계절별 경향성과 가깝게 나타나므로, 광화학 반응 또는 그와 유사한 요인에 따른 결과라고 추정해 볼 수도 있을 것이다. 그러나 다른 인자들을 제외한 온도와의 관계 등으로 이러한 결론을 내리기에는 미흡하고, 그외의 다른 가능성들에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

**고도별 오존농도를 조절하는 요인에 대한 고찰**

지상(100m) 오존농도와 기상요소와의 상관분석: 지상권에서 오존의 농도변화를 설명하기 위해서 Table 3에는 총 연구기간에 대하여 일평균 지상 오존 농도와 기상요소들(기온, 일사량, 풍속, 상대습도, 강수량, 기압) 사이의 상관분석을 실시한 결과를 나타내었다. 상관분석결과 지상 오존은 기온 및 일사량과 높은 양의 상관성을 보였다( $P < 0.0001$ ). 그 중에서도 일사량과의 상관계수가 0.437로 가장 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 10km

의 오존에 대해서도 같은 상관분석을 실시하였으나 기온과 상대습도에 대해서는 강한 음의 상관성을, 일사량에 대해서는 약한 상관성을 나타내었다. 이는 지상오존의 경우 광화학 반응에 의한 생성이 오존의 농도분포에 중요한 역할을 하는데 반해, 10km 고도의 오존은 광화학 반응에 직접적인 영향을 받을 가능성이 작다는 것을 의미한다.

고도별 오존농도간의 상관분석: 성층권 오존의 분포특성을 세밀히 분석하기 위해, 기존의 4개 대표고도(100m, 10km, 20km, 30km) 외에도 15km, 20km의 두 고도를 추가하여 전체 연구기간에 대하여 각 고도별 분포의 상관분석을 실시하였다(Table 4). 그 결과를 보면, 20km와 15km, 20km와 10km, 15km와 10km의 오존 농도가 매우 높은 양의 상관관계를 가짐을 알 수 있었다( $P < 0.0001$ ). 이 중에서 20km와 15km, 15km와 10km 고도의 오존 농도간의 높은 상관성은 두 고도의 차이가 비교적 작아 굳이 오존의 이동이 있는 것으로 보기 어렵다. 25km와 30km 고도의 오존 농도간에 발견되는

**Table 3.** Results of correlation analysis between surface(100m) ozone concentrations and meteorological parameters on the daily mean basis during 1995~1997.

	Ozone	Temp.	RF	Wspeed	RH	IR	Pres.
Ozone	(142)						
Temp.	0.424*(142)	(1094)					
RF	-0.144(18)	0.072(279)	(279)				
Wspeed	-0.174(142)	-0.294*(1094)	-0.043(279)	(1096)			
RH	0.133(142)	0.518*(1094)	0.204(279)	-0.371*(1096)	(1096)		
IR	0.437*(142)	0.259*(1094)	-0.111(279)	0.022(1096)	-0.411*(1096)	(1096)	
Pres.	-0.31(142)	-0.706*(1094)	-0.124(279)	0.123*(1096)	-0.423*(1096)	-0.084(1096)	(1096)

\* denotes the cases in which correlation between two parameters is not significant at  $P(0.0001$  (or 99.99%). Numbers in parenthesis denote cases of paired data sets.

**Table 4.** Results of correlation analysis of daily mean ozone among different altitudes during 1995~1997.

	100m	10km	15km	20km	25km	30km
100m	(142)					
10km	-0.038(136)	(145)				
15km	0.021(129)	0.392*(134)	(137)			
20km	-0.018(127)	0.525*(131)	0.403*(130)	(134)		
25km	0.082(120)	0.102(125)	0.116(122)	0.208(124)	(128)	
30km	0.289(109)	-0.123(113)	-0.135(110)	-0.103(112)	0.471*(112)	(116)

\* denotes the cases in which correlation between two parameters is not significant at  $P(0.0001$  (or 99.99%). Numbers in parenthesis denote cases of paired data sets.

높은 상관성도 그렇다. 그러나 20km와 10km 고도의 오존 농도간에 상관성이 높다는 것은 하부 성층권인 20km의 오존이 상부 대류권인 15km에서 10km 까지 이동함으로써, 하부 성층권의 오존 농도가 상부 대류권의 오존농도에 영향을 미칠 수 있다는 가능성을 시사하는 것으로 보인다.

**오존과 유해자외선(UV-B)의 관계**

오존전량과 성층권 오존량(Umkehr 법)의 관계: Fig. 9에는 Brewer 분광광도계를 이용하여 측정된 오존전량 자료 및 층별 오존량 자료(Umkehr 법)를 이용하여 계산한 성층권 및 대류권 오존량의 변화를 제시하였다. 대류권 오존량은 지상에서 약 19km 까지의 층별 오존량을 더해, 성층권 오존량은 19km 이상에서 50km의 범위에 속하는 층별 오존량을 더해 얻은 값이다. 기간은 비교적 결측이 적은 1997년도를 대상으로 하였으나, 층별 오존량의 경우 10, 11, 12월을 제외하곤 평균 관측횟수가 월 4회에 불과하며 특히 여름철에 해당하는 7월에는 아예 관측치가 없다. 그러나 지상에서 50km 고도까지의 층별 오존량의 총합과 오존전량을 비교하면, 평균과 표준편차가 각각  $300 \pm 29.3(N=66)$ 과  $308 \pm 28.7(N=208)$ 로 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 층별오존량의 관측치가 없는 7월을 제외하고는 월평균치 및 월주기 또한 거의 일치함을 알 수 있다(Fig. 10). 오존자료들 간의 유의성을 조사하기 위한 방법으로 z-statistics를 실시한 결과, 신뢰구간 99%에서 층별오존량의 총합과 오존전량이 서로 다르다고 할 수 없다는 결론에 이르렀다.

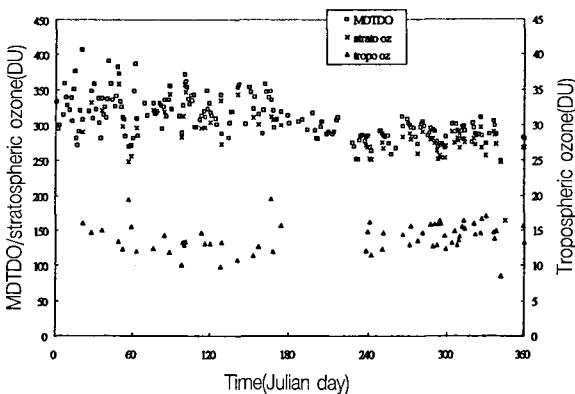


Fig. 9. The distribution of mean daily total direct ozone (MDTDO), stratospheric, and tropospheric ozone concentrations during 1997.

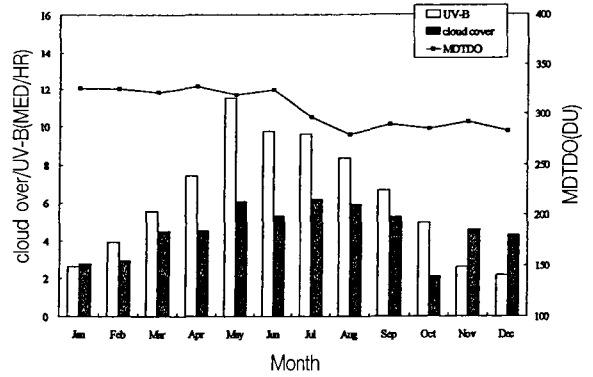


Fig. 10. The monthly mean of daily averaged total direct ozone (MDTDO), UV-B, and cloud cover during 1997.

이는 오존전량의 시간적 변이 특성을 토대로 층별 오존량의 월주기 및 계절주기의 파악에 접근할 수 있음을 시사한다.

층별 오존량 자료 중 성층권 오존량의 월주기 경향은 오존전량의 그것과 거의 일치한다. 즉 1월에서 6월까지 지속적으로 고농도를 유지하고, 8월에서 12월까지 약간의 증감을 반복하며 저농도를 유지한다. 계절적으로는 봄에 최고치를 나타내며, 봄과 여름이 가을과 겨울에 비해 고농도를 보인다. 오존전량은 월주기의 경우 Fig. 5에서 제시한 고도별 오존농도 중 근사한 것을 찾기는 어려우나, 계절주기의 경우 30km 고도의 그것과 유사한 편이다. 이는 오존전량이 성층권 오존량에 의해 크게 영향받는데 따른 결과로 보여지며, Table 5에서 제시한 오존전량과 성층권 오존량 사이의 높은 양의 상관계수(0.993)를 통해서도 유추할 수 있다. Fig. 9의 대류권 오존량의 월주기 경향 또한 Fig. 5에서 제시한 각 고도별 오존농도의 그것과는 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 제시한 대류권 오존량은 지상에서 19km 고도까지 층별로 구분된 자료의 합을 더하여 얻은 결과이므로 대류권의 특정 고도에서 관측한 값과 다를 수 있다.

유해자외선과 오존의 관계: 자외선은 그 파장영역에 따라 UV-A(320~400nm), UV-B(280~320nm), UV-C(100~280nm)로 분류할 수 있다. 그 중 생물학적 효과면에서 가장 중요한 광선의 범위는 280nm 이상이다. UV-A는 오존에 의해 흡수되지 않으며 전량이 지표에 도달한다. 가장 유해한 자외선인 UV-C의 경우 대부분 대기 상

**Table 5.** Results of correlation analysis between mean daily total direct ozone(MDTDO), stratospheric ozone (Umkehr method), UV-B, and cloud over on the daily mean basis during 1997.

	MDTDO	Strato, Ozone	UV-B	Cloud Over
MDTDO	(208)			
Strato, Ozone	0.993*(65)	(66)		
UV-B	-0.026(192)	0.318*** (62)	(342)	
Cloud Over	-0.1982**(208)	-0.270*** (66)	-0.102(342)	(365)

\* denotes the cases in which correlation between two parameters is not significant at  $P < 10^{-6}$  (or 99.9999%).

\*\* denotes the cases in which correlation between two parameters is not significant at  $P < 0.001$  (or 99.9%).

\*\*\* denotes the cases in which correlation between two parameters is not significant at  $P < 0.005$  (or 99.5%).

Numbers in parenthesis denote cases of paired data sets.

층의 오존과 다른 기체들에 의해 흡수되어 지표 및 생물에 대한 영향이 적다. 그러나 UV-B의 경우 오존에 의해 상당부분 흡수되긴 하나, UV-C에 비해 상대적으로 투과율이 높기 때문에 오존량의 변화에 따라 지표에 도달하는 양이 크게 변하므로 가장 주시하는 자외선 영역이다(EPA, 1999).

구름이 없는 맑은 하늘의 경우 지표에 도달하는 UV-B량은 성층권 오존에 의해 가장 크게 영향받으며, 잠재적인 UV-B량의 증가가 성층권 오존량을 감소시키는 원인으로 작용할 수 있다는 증거는 충분히 제시되고 있다(Bais *et al.*, 1993; Kerr and McElroy, 1993; Booth and Madronich, 1994; Bojkov *et al.*, 1995; Hofmann *et al.*, 1996; Taalas *et al.*, 1997). 이외의 인자로는 운량, 에어로졸, 대류권 오존량 및 가스상 물질, 측정지점의 위도 및 고도, albedo 등이 있다(UNEP, 1998).

Fig. 10에는 1997년도의 오존전량과 UV-B, 운량의 월 주기를 제시하였다. UV-B량은 5월에 최고치를, 12월에 최저치를 보이고, 5월에서 8월까지 높은 값을 유지하며, 9월에 최저치를 기록하였다. 대체로 운량과 UV-B량의 월 주기 경향은 크게 다르지 않으며, 계절주기는 매우 유사하게 나타난다. 즉 여름, 봄, 가을, 겨울의 순으로 감소하는 계절적 특성을 갖는다.

본문에서는 오존과 UV-B량 및 운량이 서로 어떠한 관련성을 갖는지 알아보기 위해, 오존전량, 성층권 오존량(층별 오존량을 더한 값), UV-B, 운량에 대하여 상관

분석을 실시하였다. Table 5에 따르면 오존전량과 성층권 오존량(층별 오존량을 더한 값)은 강한 양의 상관성을 보였으나, 층별 오존량의 경우 7월 관측치가 전혀 없으므로 보다 정확한 해석을 위해 모든 경우의 대하여 상관분석을 수행하였다. 먼저 오존전량은  $P < 0.01$ 의 유의수준에서 운량과 음의 상관관계를 나타내었으며, UV-B량과의 상관성은 미미한 것으로 나타났다. 다음으로 성층권 오존량(층별 오존량을 더한 값)은  $P < 0.05$ 의 유의수준에서 운량과 음의 상관성을, UV-B량과 강한 양의 상관성을 보였다. 이러한 결과는 성층권 오존량과 UV-B량이 서로 음의 상관성이 있음을 시사한 앞의 연구결과와는 일치하지 않는다. 여기에는 다음과 같은 차이가 있기 때문이다. 첫째, 이전의 연구들에서는 구름이 없는, 즉 운량이 0 인 경우에 제한적으로 그렇다고 하였다. 둘째, 7월 관측치가 없는 것을 비롯하여 전반적으로 자료의 수가 부족하다. 따라서 본 연구의 결과가 실제 포항지역의 오존과 UV-B량의 관계를 밝힌다고 보기에는 무리가 있다. 다시 말해 포항지역에서의 오존과 UV-B량과의 관계를 정확하게 파악할 수 없다고 보는 것이 좀 더 확실한 결론일 것이다. 오존전량과 운량 그리고 성층권 오존량(층별 오존량을 더한 값)과 운량은 모두 강한 음의 상관성을 보였다. 그러나 그 원인에 대해서는 이전의 연구가 없어 이러한 경향이 포항지역의 지리적, 기상학적 혹은 그외 여러 다른 특성과 관련된 것인지에 대해서는 명확히 결론지을 수 없다. 마지막으로 상관분석 결과 확률변수 P값이 0.05 이하에서 UV-B량과 운량 사이의 상관성은 약하게 나타났다. 일반적으로 운량은 지표면에 도달하는 자외선(UV)을 감소시킨다고 알려져 왔다. 그러나, 지금까지 수행된 자외선(UV)와 운량에 대한 통계적 상관분석에 의하면(e.g. Paltridge and Barton, 1978; Cutchis, 1980; Josefsson, 1986; Ilyas, 1987; Ito, 1993; Bjorn and Homgren, 1996; Estupinian *et al.*, 1996; Schafer *et al.*, 1996; Gillotary *et al.*, 1997), 공간적 및 시간적 차이를 비롯하여 구름 입자의 크기분포 등 구름 자체의 여러 특성에 영향받으므로 그 상관성을 명확히 정의하기는 어렵다(UNEP, 1998).

## 결론

최근까지 우리 나라에서 오존에 대한 연구는 광화학 오염을 중심으로 한 지상오존의 수평분포에 치우친 반

면, 수직적인 분포 특성에 관한 연구는 상대적으로 희소한 실정이다. 성층권 오존의 변화를 감시하는 동시에 지상과 대류권 오존의 농도를 파악하고, 각 권역별 오존농도간의 관련성을 알아보는데 있어 오존의 수직분포를 조사하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 1995년부터 1997년까지 3년간 포항지역의 오존존데 자료를 이용하여 각 고도별 오존농도 및 오존전량의 분포 특성을 심층적으로 비교분석하였다. 다음은 관측 고도를 토대로 한 결과이다.

- [1] 지상(100m) 오존의 경우 전체적으로 청정지역에 가까운 농도범위에 머물렀으며, 계절적으로는 봄, 여름에 높고 가을, 겨울에 낮은 농도분포를 보였다. 관측지점의 지리적인 특성을 고려하면, 결과적으로 포항제철에 의한 영향은 미미하다고 볼 수 있는데 이는 관측지점이 해안에서 인접해 위치해 있음으로써 해양의 영향이 크게 작용한 탓으로 여겨진다.
- [2] 대류권(10km) 및 하부 성층권(20km) 오존의 경우 전형적인 춘고하저(春高夏低)의 북반구 대류권 오존의 계절적 특징을 보이며 월주기 경향성 또한 매우 유사하다. 그 원인을 명확히 규명하기에는 아직 부족한 점이 있으나, 본 연구자료의 결과는 성층권 오존의 대류권 이동, 계절별 역전층의 형성경향, 광화학 반응 등과 같은 요인들이 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 확인시켜준다.
- [3] 중부 성층권(30km) 오존의 경우 지상 오존의 농도 분포 경향과 매우 유사한 월주기 및 계절주기를 보였다. 온도와 같은 요인의 잠재적 역할을 추정해 볼 수 있으나, 아직까지 이러한 현상의 원인에 대해서 밝혀진 바는 없다.
- [4] 오존전량은 성층권 오존량에 의해 크게 좌우되며, 유해자외선(UV-B)과의 상관성은 불확실하나 운량과는 음의 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 이전의 연구결과와는 다소 다른 양상인데, 유해자외선과 운량을 포함한 여러 인자들의 복합적인 영향으로 추정해 볼 수 있다.

각 고도별 오존 농도를 해석하는데 있어 포항이 해안 도시라는 지리학적 요인이 큰 변수로 작용했으리라고 추정된다. 특히 대류권 오존과 성층권 오존사이의 상관성이 있는지를 밝히는데 있어, 주변의 기압골 및 대기의 흐름을 중심으로 한 시간에 따른 기상학적 조건의

변화가 보다 자세히 파악되어야 할 것이다. 덧붙여 포항제철에서 발생하는 에어로졸을 비롯한 오존의 여러 전구물질들의 농도 규모에 대한 지속적인 관측이 함께 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

김영성, 1996, 1991-1993년 사이 우리나라의 오존농도 변화. 한국대기보전학회지, 12, 55-66.

서명석 · 박경윤 · 이호근 · 장광미 · 강창희 · 허철구 · 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구. 한국대기보전학회지, 11, 253-262.

정용승 · 정계섭, 1991, 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 2, 73-79.

Ansman, A., Wagner, F., Wandinger, U., Mattis, I., Górsdorf, U., and Dier, H., 1996, Pinatubo aerosol and stratospheric ozone reduction: Observations over central Europe. *J. Geophys. Res.*, 101, 1877-18785.

Bais, A. F., Zerefos, C. S., McIeti, C., Ziomas, I. C., Tourpali, K., Karaouza, V., and Balis, D., 1993, Variability of solar UV-B radiation at high and middle latitudes during EASOE 1991/92. *J. Geophys. Res.*, 98, 5199-5204.

Bjorn, L. O. and Holmgren, B., 1996, Monitoring and modelling of the radiation climate at Abisko. *Ecological Bulletin*, 45, 204-209.

Bojkov, R. D., Fioletov, V. E., and Diaz, S. B., 1995, The relationship between solar UV irradiance and total ozone from observations over southern Argentina. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1249-1252.

Booth, C. R. and Madronich, S., 1994, Radiation amplification factors - improved formulation accounts for large increases in ultraviolet radiation associated with Antarctic ozone depletion. In *Ultraviolet Radiation in Antarctica: Measurement and Biological Effects*, Weiler, C. S. and Penhale, P. A. (eds.), AGU Antarctic Research Series, 62, American Geophysical Union, Washington, DC, 39-42.

Chan, L. Y., Liu, H. Y., Lam, K. S., Wang, T., Oltmans, S. J., and Harris, J. M., 1998, Analysis of the seasonal behavior of tropospheric ozone at Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 32, 159-168.

Chatfield, R. and Harrison, H., 1977, Tropospheric ozone 2 Variation along a meridional band. *J. Geophys. Res.*, 82, 5969-5976.

Chung, Y. S. and Dunn, T., 1985, Observation of stratospheric ozone at the ground level in Regina, Canada. *Atmospheric Environment*, 19, 157-162.

Cutcher, P., 1980, A Formula for Comparing Annual

- Damaging Ultraviolet (DUV) Radiation Doses at Tropical and Mid-Latitude Sites. Federal Aviation Administration Report-FAA-EE 80-21, U. S. department of Transportation, Washington, DC.
- Danielsen, E. F., 1968, Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 25, 502-518.
- EPA, 1999, Ozone depletion, <http://www.epa.gov/ozone/defns.html>.
- Estupinan, J. G., Raman, S., Crescenti, G. H., Streicher, J. J., and Barnard, W. F., 1996, The effects of clouds and haze on UV-B radiation. *J. Geophys. Res.*, 101, 16807-16816.
- Fuentes, J. D. and Dann, T. F., 1994, Ground-level ozone in eastern Canada: seasonal variations, trends and occurrences of high concentrations. *J. Air and Waste Management Association*, 44, 1019-1026.
- Gillotary, D., Mller, J. F., Walravens, B., and Simon, P. C., 1997, The influence of different types of cloud layers on the UV climatology in Uccle, Belgium. In *IRS '96: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Smith, W. L. and Stamnes, K. (eds.), Proceedings of the International Radiation Symposium, Fairbanks, Alaska 19-24 August 1996, Deepak Publishing, Ilampton Virginia, 921-924.
- Görsdorf, U., Gemandt, H., and Peters, G., 1993, Vertikale Ozonsondierung mit den Ozonsonden OSE-4 und ECC-5a am Meteorologischen Observatorium Lindenberg, Dtsch. Wetterdienst, Meteorol. Obs. Lindenberg, Lindenberg, Germany.
- Harris, N. R. P., Ancellet, G., Bishop, L., Hofman, D. J., Kerr, J. B., McPeters, R. D., Prendez, M., Randel, W. J., Staehelin, J., and Subbaraya, B. H., 1997, Trends in stratospheric and free tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 102, 1571-1590.
- Hofmann, D. J., Oltmans, S. J., Harris, J. M., Komhyr, W. D., Lathrop, J. A., Defoor, T., and Kuniyuki, D., 1993, Ozonesonde measurements at Hilo, Hawaii following the eruption of Mt. Pinatubo. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1555-1558.
- Hofmann, D. J., Oltmans, S. J., Bodhaine, B. A., Koenig, G. L., Illaris, J. M., Larthrop, J. A., Schnell, R. C., Barnes, J., Chin, J., Kuniyuki, D., Ryan, S., Uchida, R., Yoshinaga, A., Ncale, P. J., Haycs, D. R., Goodrich, R., Komhyr, W. D., Evans, R. D., Johnson, B. J., Quincy, D. M., and Clark, M., 1996, Record low ozone over Maura Loa observatory, Hawaii during the winter of 1994-1995. *Geophysical Research Letters*, 23, 1533-1536.
- Ilyas, M., 1987, Effect of cloudiness on solar ultraviolet radiation reaching the surface. *Atmospheric Environment*, 21, 1483-1484.
- Ito, T., 1993, UV-B observation network in the Japan Meteorological Agency. In *Frontiers of Photobiology*, Shima et al. (eds.), Elsevier Science Publishers.
- Josefsson, W., 1986, Solar Ultraviolet Radiation in Sweden. National Institute of Radiation Protection in Stockholm, SMI II Report-53, Norrkoping, Sweden.
- Kato, H., Fujita, S. and Nishinomiya, S., 1990, Mechanism of spring high oxidant episode-A meteorological analysis in and around the Hokuriku District, Japan. *Atmos. Environ.*, 24A, 2023-2033.
- Kerr, J. B. and McElroy, C. T., 1993, Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, 262, 1032-1034.
- Kirshhoff, V. W. J. H. and Marinho, E. V. A., 1994, Layer Enhancements of tropospheric ozone in regions of biomass burning. *Atmos Environ.*, 28, 69-74.
- Kirshhoff, V. W. J. H., Schuch, N. J., Pinheiro, D. K., and Harris, J., 1996, Evidence for an ozone hole perturbation at 30o South. *Atmospheric Environment*, 30, 1481-1488.
- Kirshhoff, V. W. J. H., Sahai, Y., Casiccia, C. A. R., Zamorano B., F. and Vaiderrama V., V., 1997, Observations of the 1995 ozone hole over Punta Arenas, Chile. *J. Geophys. Res.*, 102, 16109-16120.
- Komhyr, W. D., 1969, Electrochemical cells for gas analysis. *Annals of Geophysics*, 25, 203-210.
- Komhyr, W. D., Barnes, R. A., Brothers, G. B., Lathrop, J. A., and Opperman, D. P., 1995, Electrochemical concentration cell ozonesonde performance evaluation during STOIC 1989. *J. Geophys. Res.*, 100, 9231-9244.
- Lefohn, A. S., Shadwick, D. S., Feister, U., and Mohnen, V. A., 1992, Surface-level ozone: Climate change and evidence for trends. *J. Air and Waste Management Association*, 42, 136-144.
- Lelieveld, J., abd Crutzen, P. J., 1994, Role of deep convection in the ozone budget of the troposphere. *Science*, 264, 1759-1761.
- Liu, S. C., Trainer, M., Fehsenfeld, F. C., Parrish, D. D., Williams, E. J., Fahey, D. W., Hubler, G., and Murphy, P. C., 1987, Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions. *J. Geophys. Res.*, 92, 4191-4207.
- Logan, J. A., 1994, Trends in the vertical distribution of ozone: An analysis of ozonesonde data. *J. Geophys. Res.*, 99, 15553-15585.
- Lu, J., Mohnen, V. A., Yue, G. K., Atkinson, R. J., and Matthews, W. A., 1997, Intercomparison of stratospheric ozone profiles obtained by Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II,

- Halogen Occultation Experiment, and ozonesondes in 1994-1995. *J. Geophys. Res.*, 102, 16137-16144.
- McCormick, M. P., 1987, SAGE II: An overview. *Advances in Space Research*, 7, 219-226.
- McCormick, M. P., Veiga, R. E., and Chu, W. P., 1992, Stratospheric ozone profile and total ozone trends derived from the SAGE I and SAGE II data. *Geophysical Research Letters*, 19269-19272.
- Mueller, S. F., 1994, Characterization of ambient ozone levels in the Great Smoky mountains National Park, *J. Appl. Meteorol.*, 33465-33472.
- Nganga, D., Minga, A., Cros, B., Biona, C. B., Fishman, J., and Grant, W. B., 1996, The vertical distribution of ozone measured at Brazzaville, Congo during TRACE A. *J. Geophys. Res.*, 101, 24095-24103.
- Ogawa, T. and Miyata, A., 1985, Seasonal variation of the tropospheric ozone: A summer minimum in Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 63, 937-946.
- Olson, J. R., Fishman, J., Kirchhoff, V. W. J. H., Nganga, D., and Cros, B., 1996, Analysis of the distribution of ozone over the southern Atlantic region. *J. Geophys. Res.*, 101, 24083-24093.
- Oltmans, S. J., Hofmann, D. J., Lathrop, J. A., Harris, J. M., Komhyr, W. D., and Kuniyuki, D., 1996, Tropospheric ozone during Mauna Loa Observatory Photochemistry Experiment 2 compared to long-term measurements from surface and ozonesonde observations. *J. Geophys. Res.*, 101, 14569-14580.
- Oltmans, S. J., 1981, Surface ozone measurements in clean air. *Journal of Geophysical Research*, 86, 1174-1180.
- Oltmans, S. J., and Komhyr, W. D., 1986, Surface ozone distributions and variations from 1973-1984 measurements at the NOAA Geophysical Monitoring for Climate Change baseline observations. *J. Geophys. Res.*, 91, 5229-5236.
- Oltmans, S. J., Levy II, H., 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. *J. Geophys. Res.*, 101, 29179-29200.
- Paltridge, G. W. and Barton, I. J., 1978, Erythemal Ultraviolet Radiation Distribution over Australia-the Calculations, Detailed Results and Input Data Including Frequency Analysis Observed Australian Cloud Cover. Division of Atmospheric Physics, Technical Paper-33, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia.
- Penkett, S., Blake, N., Lightman, P., Marsh, A., Anwyl, P., and Butcher, G., 1993, The seasonal variation of nonmethane hydrocarbons in the free troposphere over the North Atlantic Ocean: Possible evidence for extensive reaction of hydrocarbons with the nitrate radical. *J. Geophys. Res.*, 98, 2865-2885.
- Russell, J. M., Gordley, L. L., Park, J. H., Drayson, S. R., Hesketh, W. D., Cicerone, R. J., Tuck, A. F., Frederick, J. E., Harris, J. E., and Crutzen, P. J., 1993, The Halogen Occultation Experiment. *J. Geophys. Res.*, 98, 10777-10797.
- Schafer, J. S., Saxena, V. K., Wenny, B. N., Bamard, W., and De Luisi, J. J., 1996, Observed influence of clouds on ultraviolet-B radiation. *Geophysical Research Letters*, 23, 2625-2628.
- Singh, H. B., Ludwig, F. L., and Johnson, W. B., 1978, Tropospheric ozone: Concentrations and variabilities in clean remote atmosphere. *Atmospheric Environment*, 12, 2185-2196.
- Steinbrecht W., Claude, H., Köhler, U., and Hoinka, K. P., 1998, Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes. *J. Geophys. Res.*, 103(15), 19183-19192.
- Sunwoo, Y., Kotamarthi, V. R., and Carmichael, G. R., 1992, The regional distribution of tropospheric ozone in east Asia from satellite-based measurements. *J. Geophys. Res.*, 14, 285-295.
- Sunwoo, Y., Carmichael, G. R., and Ueda, H., 1994, Characteristics of background surface ozone in Japan. *Atmospheric Environment*, 28, 25-37.
- Taalas, P., Damski, J., Kyro, E., Ginzberg, M., and Talamoni, G., 1997, Effect of stratospheric ozone variations on UV radiation and on tropospheric ozone at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 102, 1533-1539.
- Tsutsumi, Y., Makino, Y., and Jensen, J., 1996, Aircraft measurements of tropospheric ozone over the western Pacific Ocean. *Atmospheric Environment*, 30, 1763-1772.
- UNEP(United Nations Environmental Programme), 1998, Environmental Effects of Ozone Depletion: 1998 Update, van der Leun, J. C., Tevini, M., Tang, X., and Worrest, R. C. (eds.), United Nations Environment Programme, Nairobi.
- World Meteorological Organization(WMO), 1995, Scientific assessment of ozone depletion:1994. WMO Ozone Rep., 37, Geneva.