

위성관측(MODIS)에서 유도된 수도권 지역의 대류권 오존 및 수치실험

유정문^{1,*} · 박유민¹ · 이석조²

¹이화여자대학교 과학교육과, 120-750, 서울특별시 서대문구 대현동 11-1

²국립환경연구원, 404-708, 인천광역시 서구 경서동 종합환경연구단지내

Tropospheric Ozone over the Seoul Metropolitan Area Derived from Satellite Observations (MODIS) and Numerical Simulation

Jung-Moon Yoo^{1,*} Yoo-Min Park¹ and Suk-Jo Lee²

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

²National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

Abstract: The effect of ozone and surface temperature on the ozone band at 9.7 μm has been investigated from radiative transfer theory together with observations in order to derive empirical methods for remotely sensing ground-ozone concentration. Simultaneous observations of satellite (MODIS Aqua; ECT 13:30) and ground-ozone at 79 stations have been used over the Seoul Metropolitan Area (SMA; 125.7-127.2 E, 37.2-37.7 N) during four ozone-warning days in the year 2003. Cloud effect on the band in the methods was filtered out based on synoptic observations. Upwelling radiance values at 9.6 μm which have been estimated at the given ozone concentration of 327-391 DU depend on surface temperature (T_s) showing 5.52-5.78 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ at $T_s=290$ K, and 9.00-9.57 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ at $T_s=325$ K. Thus, the partitioned contributions of ozone and temperature to intensity of ozone absorption band are 0.26 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/64$ DU and 0.31 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/35$ K, respectively. Here the intensity which has been used to remotely detect ground-ozone concentration from infrared satellite measurement is defined as the difference in brightness temperature between 11 μm and 9.7 μm (i.e., $T_{11-9.7}$). The methods in this study have been applied to estimate ground-ozone from MODIS data in cases that there are significant correlations between the band intensity and ground-ozone. The values of estimated ozone significantly correlate (0.49-0.63) with ground observations at a significance level of 1%. For the improved methods, further study may be required to use tropospheric ozone rather than ground-ozone, considering the variation stratospheric ozone.

Keywords: ground-ozone, remotely sensing, satellite, MODIS, radiative transfer, temperature, Seoul Metropolitan Area

요약: 본 연구에서는 복사전달모델을 통하여 9.7 μm 오존 흡수대에 미치는 오존 및 열적(i.e., 지표 온도) 효과를 각각 조사하였다. 또한 오존주의보가 수도권 지역(37.2-37.7 N, 125.7-127.2 E)에 발령되었던 2003년 4월에 대한 위성(MODIS Aqua; ECT 13:30) 및 지상 오존(79개 관측소)의 동시 관측 자료를 기초로 지상 오존에 대한 원격탐사 방법을 제시하였다. 여기서 구름 효과를 제거하고 오존 연직 분포를 분석하기 위하여 종관기상 자료도 사용하였다. 주어진 오존 농도(327-391 DU)에 대하여 산출된 9.6 μm 에서의 상향 복사휘도는 표면온도 $T_s=290$ K에서 5.52-5.78 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 그리고 $T_s=325$ K에서는 9.00-9.57 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 이었다. 따라서 오존 흡수 세기(i.e., 11 μm 와 9.7 μm 밝기온도 간의 차, $T_{11-9.7}$)를 이용한 오존 원격탐사 시에 세기 변화에 대한 순수한 오존 효과는 0.26 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/64$ DU, 그리고 열적 효과는 0.31 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/35$ K이었다. 본 연구에서는 흡수 세기와 지상 관측 간에 유의적인 상관관계를 보이는 경우에 대하여 적외선 위성 관측에서 지상 오존을 원격탐사하는 경험식을 유도하였다. 유도된 지상 오존 농도와 관측값과의 상관은 49-63%로 유의수준 1%에서 유의미하였다. 경험식을 개선하기 위하여는 지상 오존 대신에 대류권 오존 자료를 사용하고, 성층권 오존 변화도 고려하는 후속 연구가 요구된다.

주요어: 지상 오존, 원격탐사, 위성관측, MODIS, 복사전달, 온도, 수도권

*Corresponding author: yjm@mm.ewha.ac.kr

Tel: 82-2-3277-2710

Fax: 82-2-3277-2684

서론

지상 부근의 오존은 생물권의 자연대기에 20~30 ppb 정도 존재하며(Yap and Chung, 1977), 배출원에서 나온 일차 오염물질이 태양광선의 에너지를 받아 생성되는 것으로 알려져 있다(Blacet, 1952; Haagen-Smit et al., 1953; 권숙표 등, 1976; 정 용 등, 1986). 대기중의 오존은 오존총량(total ozone)의 90%를 차지하는 성층권 오존과 나머지 10%를 차지하는 대류권 오존으로 구성되어 있으나(e.g., 김재환 등, 2001), 대도시에서의 지상(또는 대류권) 오존 농도는 기후학적 그리고 생태학적 관점에서 많은 관심사가 되어왔다. 반면에 성층권 오존은 자외선 흡수를 통하여 열 수지와 생태계에 중요한 역할을 한다(e.g., 조희구 등, 1994). 또한 환경학적 관점에서 성층권 오존의 감소에 따른 자외선의 증가는 오염물질과 함께 대기의 광화학 반응에도 영향을 준다(Herman et al., 1996; Papayannis et al., 1998). 기후학적으로 오존 감소에 따라 지난 20년간 성층권은 냉각되어 왔으며, 이로 인한 복사강제력은 $0.15 \pm 0.1 \text{ Wm}^{-2}$ 정도 감소되었다고 IPCC(2001) 보고서는 밝힌 바 있다(방소영 등, 2004). 따라서 오존 정보에 대한 정확한 진단 및 예측은 인간 활동에 대한 기상 및 환경의 영향 뿐만 아니라 장차의 기후 변화를 이해하는데도 중요하다.

현재 대도시에서의 지상 부근 오존은 19세기 후반에서 20세기 초반에 걸쳐 측정된 것에 비하여 두 배 정도 상승하였다(Cartalis and Varotsos, 1994; Stachelin et al., 1994; Stevenson, 2001; Vingarzan, 2004). 이차 광화학 오염물인 지상 오존 농도의 계절/일변화는 주로 질소화합물(NOx), 탄화수소, 일산화탄소와 같은 일차 오염물의 농도와 기상 조건(기온, 일사량, 풍속, 대기안정도, 역전층 고도 등)에 영향을 받는다(신찬기 등, 1992; Comrie and Yamal, 1992; 서명석 등, 1995). 이러한 조건에 부합되는 시기는 수도권 지역에서 태양 일사량이 강한 5~9월경이다. 또한 지리적 위치(위·경도, 육지 또는 해안가 등) 및 해발 고도도 오존의 농도 변화에 영향을 주는 것으로 보고되었다(Mueller, 1994; Sunwoo et al., 1994; 서명석 등, 1995). 추가하면, 대류권계면 접힘(tropopause folding) 현상 발생시에 다량의 성층권에 오존이 대류권으로 유입되기도 하며(Danielsen, 1980; Uccellini et al., 1985; 김유근 등, 2002), 이 경우에 지면에 도달한 오존은 불안정하여 단기간에 소멸된다(Chung

and Dann, 1985).

수도권 지역의 지상 오존 농도와 관련된 연구에서 김영성(2000)은 오존 오염이 심한 미국의 주요 도시(USEPA, 1998)와 서울의 지상 오존 농도를 비교하였으며, 서울의 오존 농도는 로스엔젤레스나 뉴욕 등 미국의 주요 도시에 근접하고 있다고 보고한 바 있다. 그러나 지상 또는 대류권 오존에 대한 대부분의 기존 관측 정보는 시공간적인 면에서 제한적이므로, 대규모 관측이 가능하고 경제적 효율성이 높은 위성 관측과 같은 원격 탐사를 통한 보완이 필요한 실정이다. 성층권 및 대류권 전체의 오존총량과 관련된 위성관측 자료는 현재 어느 정도 이용가능하지만, 그 정확성은 여전히 불확실하다(Tucker et al., 1985). 오존총량은 시공간적으로 대규모 상태에서는 성층권 오존에 의하여 주로 결정되지만, 도시 규모에서는 단기적으로 대기오염과 관련하여 주로 생성된 지상 부근 오존에 의하여도 상당히 변화할 수 있다. 특히 지상 오존에 대한 절대적인 검증은 관측소 부족 때문에 광범위한 지역의 경우에 어려운 형편이다. 따라서 관측소가 비교적 많은 수도권 지역의 자료를 이용하여 위성관측으로부터 지상(또는 대류권) 오존에 대한 알고리즘을 유도하고 그 타당성을 평가한 후에, 보다 광범위한 지역에 적용하는 것이 합리적이다.

위성에서 관측된 $9.7 \mu\text{m}$ 적외선 영역의 오존 흡수 대에서는 오존총량과 대기 열적 상태에 따라 그 흡수 세기의 강약이 결정된다. 따라서 위성관측을 통하여 오존 정보를 유도하기 위해서는 이들 효과에 대한 정량적인 평가가 수치실험을 통하여 수행되어야 한다. 적도 통과 시간(Equatorial Crossing Time; ECT)이 오전·오후 1시 30분인 Aqua 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imager Spectrometer(MODIS)의 적외선 자료는 $9.7 \mu\text{m}$ 를 비롯한 여러 적외선 채널들을 포함하고 있을 뿐만 아니라, 공간적으로도 고해상도이어서 특정 지역 오존에 대한 시간적 변동을 감지하는데 유용하다. 본 연구의 목적은 오존주의보가 발령된 2003년 4월 기간에 대하여 $9.7\sim 14.2 \mu\text{m}$ (7개 채널) 적외선 영역에서의 MODIS 위성 및 지상 오존 동시관측 자료를 이용하여, 위성관측으로부터 수도권 지역의 지상 오존 분포를 유도하는 방법을 제시하는데 있다. 여기서 위성자료에 함께 내포된 오존 및 열적 정보를 분리하기 위하여 본 연구에서는 복사전달 수치실험을 실시하였다.

자료 및 방법

적외선 위성관측(MODIS)

MODIS는 Earth Observing System 프로젝트의 일환으로 1999년 12월에 발사된 Terra 및 Aqua 위성

에 탑재된 복사계이다. 이 복사계는 36개의 채널과 해상도 250 m, 500 m, 1 km의 기능을 가지고 육상과 해양의 표면 온도, 육상 표면, 구름, 에어러솔, 수증기량, 온도 수직 분포 등을 전구에 대하여 하루나 이틀 사이에 관측할 수 있다(MODIS homepage: <http://>

Table 1. Location of 84 stations for ground-ozone observations in the Seoul Metropolitan Area (SMA; 37.2-37.7 N, 125.7-127.2 E). Five stations which have the symbol of asterisk with station number of the table are excluded in this study, because they are out of range in this study area

Station No.	Name of Station	Lat (N)	Lon (E)	Station No.	Name of Station	Lat (N)	Lon (E)
1	Jeong, Seoul	37.56	126.98	43	Gwangmyeong3, Gwangmyeong	37.48	126.85
2	Hyoje, Seoul	37.57	127.00	44	Gojan, Ansan	37.32	126.83
3	Hannam, Seoul	37.54	127.01	45	Wonsi, Ansan	37.31	126.81
4	Guui, Seoul	37.54	127.10	46	Bonoh, Ansan	37.29	126.87
5	Seoungsu, Seoul	37.55	127.06	47	Wongok, Ansan	37.33	126.80
6	Myonmok, Seoul	37.59	127.08	48	Bugok, Ansan	37.33	126.86
7	Yongdu, Seoul	37.57	127.03	49	Daebu, Ansan	37.32	126.79
8	Gilum, Seoul	37.60	127.03	50	Byeolyang, Gwacheon	37.42	127.00
9	Banghak, Seoul	37.67	127.03	51	Gwacheon, Gwacheon	37.45	127.01
10	Bulgwang, Seoul	37.61	126.93	52	Sutaek, Guri	37.60	127.14
11	Namgajwa, Seoul	37.57	126.92	53	Donggu, Guri	37.61	127.14
12	Daheung, Seoul	37.54	126.95	54	Ohjeon, Uiwang	37.35	126.98
13	Hwagok, Seoul	37.55	126.83	55	Bugok3, Uiwang	37.32	126.95
14	Guro, Seoul	37.48	126.90	56	Jeongwang, Siheung	37.34	126.75
15	Gung, Seoul	37.49	126.84	57	Siwhagongdan, Siheung	37.34	126.73
16	Dangsan, Seoul	37.51	126.89	58	Daeya, Siheung	37.44	126.79
17	Sadang, Seoul	37.49	126.89	59	Gumgok, Namyangju	37.63	127.21
18	Shillim, Seoul	37.45	126.96	60*	Shinpyeong, Pyeongtaek	36.99	127.10
19	Dogok, Seoul	37.49	127.06	61	Haengshin, Goyang	37.62	126.84
20	Bampo, Seoul	37.49	127.00	62	Ilsan, Goyang	37.67	126.78
21	Jamsil, Seoul	37.50	127.09	63	Kimrangjang, Yongin	37.24	127.20
22	Bangi, Seoul	37.52	127.13	64	Sawoo, Gimpo	37.62	126.72
23	Chenho, Seoul	37.54	127.13	65	Gochonmyeon, Gimpo	37.59	126.77
24	Siheung, Seoul	37.45	126.91	66	Tongjinmyeon, Gimpo	37.69	126.60
25	Bun, Seoul	37.63	127.03	67	Dang, Gunpo	37.35	126.87
26	Shinjeong, Seoul	37.52	126.86	68	Sanbon, Gunpo	37.36	126.93
27	Sanggye, Seoul	37.66	127.07	69*	Osan, Osan	37.15	127.07
28	Shinpung, Suwon	37.28	127.01	70	Shinjang, Hanam	37.49	126.79
29	Kwonseon, Suwon	37.26	127.03	71	Shinheung, Incheon	37.45	126.65
30	Wumang, Suwon	37.30	127.03	72	Manseok, Incheon	37.48	126.63
31	Youngtong, Suwon	37.25	127.08	73	Guwol, Incheon	37.45	126.71
32	Cheoncheon, Suwon	37.29	126.98	74	Soongui, Incheon	37.46	126.65
33	Dandae, Seongnam	37.45	127.16	75	Bupyeong, Incheon	37.50	126.73
34	Seongnam, Seongnam	37.43	127.14	76	Yeonhui, Incheon	37.54	126.68
35	Jungjal, Seongnam	37.36	127.12	77	Gyeyang, Incheon	37.57	126.73
36	Sunae, Seongnam	37.38	127.12	78	Nonhyun, Incheon	37.41	126.70
37*	Uijeongbu, Uijeongbu	37.73	127.04	79	Seoknam, Incheon	37.50	126.68
38*	Uijeongbu1, Uijeongbu	37.74	127.05	80*	Songhaemyeon, Incheon	37.76	126.47
39	Anyang, Anyang	37.40	126.92	81	Shimgok, Bucheon	37.49	126.79
40	Burim, Anyang	37.38	126.96	82	Nae-dong, Bucheon	37.52	126.78
41	Hogye, Anyang	37.38	126.96	83	Sang1, Bucheon	37.49	126.76
42	Cheolsan, Gwangmyeong	37.47	126.87	84	Wonjong, Bucheon	37.52	126.81

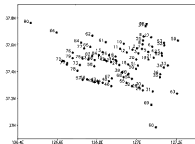


Fig. 1. Location of 84 stations for ground-ozone observations in the Seoul Metropolitan Area, described Table 1. The squares indicate the stations, excluded in this study.

modis.gsfc.nasa.gov).

본 연구에서는 지상 오존을 유도하기 위하여 MODIS 적외선 자료 중에 각기 다른 가중합수를 갖는 9.7-14.2 μm 의 7개 채널을 이용하였다. 오존 흡수대에 위치한 9.7 μm 채널은 오존총량, 그리고 지표면 온도류 반영하는 11 μm 채널은 수분을 측정하는 데 사용된다. 각 채널의 가중합수에 기초를 할 때, 12 μm 채널은 1000 hPa, 13.3 μm 채널은 900 hPa, 13.6 μm 채널은 750 hPa, 13.9 μm 채널은 500 hPa, 그리고 14.2 μm 채널은 300-400 hPa 고도의 온도들을 반영한다.

대부분의 오존주의보는 Aqua 위성의 적도 통과 시간인 오후 1시 30분 부근에서 자주 발생되므로, 이 시가의 MODIS 자료가 본 연구에서 사용되었다. 이들 자료는 연구대상 지역(37.2-37.7°N, 125.7-127.2°E; 수도권 지역: Seoul Metropolitan Area; SMA)에 대하여 오존주의보가 발생한 2003년 기간에 한하여 미국 항공우주국(NASA)의 Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center(DISC)의 Distributed Active Archive Center(DAAC) (<http://daac.gsfc.nasa.gov>)에서 입수하여 사용하였다.

이 연구에서는 위성관측으로부터 지상 오존 농도를 유도하는 물리적인 방법과 통계적인 방법을 제시하기 위하여, 2003년 오존주의보가 발생한 날에 수도권 지역(Table 1, Fig. 1 and Appendix 1)에 대한 Aqua 위성의 MODIS 적외선과 환경부의 지상 오존 농도의 동시관측 자료를 사용하였다. Aqua 위성의 적도 통과 시간은 대략 오전 · 오후 1시 30분이나, 대부분

Table 2. Simultaneous observations of ground-ozone warning with satellite infrared data of the MODIS Aqua over the SMA during 2003

Date	Total occurrence	Time (LST)	Max. O ₃ (ppb)	Aqua Time (LST)
May 4	1	17:00-18:00	122	13:25
May 5	2	17:00-19:00	129	14:10
May 13	13	14:00-20:00	183	13:20
Jun 5	1	14:00-15:00	126	13:25
Jul 15	2	19:00-21:00	129	14:15
Jul 30	2	17:00-18:00	138	13:30
Jul 31	4	14:00-17:00	128	14:15
Aug 9	1	15:00-16:00	120	14:10
Aug 13	1	20:00-21:00	128	13:45

의 오존주의보 발생 시기에 근접한 위성자료만이 이용되었다(Table 2). 구체적으로 수도권 지역의 지상 오존 농도는 위성 통과 시각과 40분 이내에서 관측된 오후 2시 자료를 이용하였다. 여기서 초기 위성 자료는 위성케도로 인하여 비적자 형태이므로, 지상 오존 농도와의 비교 분석을 위하여 0.05° 경도×0.05° 위도 (약 5×5 km) 격자로 변환되었다(Appendix 1). 따라서 본 연구에서는 어느 한 관측소의 지상 오존 농도값이 5×5 km 지역을 대표할 수 있다고 가정하였다.

지상 오존 관측

본 연구에서는 국립환경연구원 2003년에 수도권 지역의 84 지점 관측소에서 실시간 측정된 지상오존 자료를 이용하였다(Table 1). 이 오존 관측망은 서울에 27지점, 경기도에 47지점, 그리고 인천에 10지점으로 구성되어 있다. 이 수도권 지역에는 타 지역에 비하여 고농도 오존, 높은 밀도의 인구 및 차량, 그리고 많은 오존 측정소가 존재한다(김정성, 1996). 이 지역에서의 오존 문제는 1990년 초에 시작되었고 증반과 후반을 지나며 중요한 사회 현안이 되고 있다. 본 연구에서는 연구 대상 지역의 범위에서 벗어나는 5개 관측소의 지상오존 자료를 제외하였다(Table 1).

수도권 지역에서 2003년에 오존주의보(오존 농도 ≥ 120 ppb)가 발생한 경우는 2003년 9월 동안에 27회이었다(Table 2). 이 중에 최고 농도는 과천시 별양동(Table 1에서 관측소 번호 50)에서 5월 13일에 측정된 183 ppb이었다. Table 2에서 2003년 5월 4일의 오존주의보는 예년에 비하여 20일-1달 정도 빠르게 발생되었다. 2003년에 발생 시기가 이른 위원은 한반

도의 상층 기상 상태 및 그 당시 연휴와 연관되어 나타난 배출량의 특성이 광화학 오존을 생성하였다고 보고된 바 있다(환경부, 2003).

오존의 연직분포

9.7 μm 오존 흡수대에 미치는 오존 및 열적 효과를 정량화하는 복사전달 수치실험에서는 대류권 및 성층권에서의 오존의 연직 분포 자료가 필요하다. 이러한 자료를 제공하기 위하여 오존존데(ozonesonde), 라이다(lidar), Dobson 또는 Brewer 분광광도계, 그리고 인공위성에 탑재된 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 등과 같은 기기들에 의한 측정 방법들이 사용되고 있다(김재환 등, 2001). 오존존데는 일반적으로 30 km 고도까지 관측자료를 제공할 수 있다(Komhyr, 1969). 본 연구에서 사용된 위성관측 오존 연직분포 자료는 수치실험의 입력 자료의 참과 뿐만 아니라 지상 부근과 전체 대류권 사이의 오존 농도 관계를 이해하기 위하여 사용되었다.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 극궤도 위성에 탑재된 TOVS(TIROS Operational Vertical Sounder)의 고분해능 적외복사계와 태양광 후방산란 차외선계(SBUV/2: Solar Backscattered UltraViolet/2)는 오존의 연직분포를 제공할 수 있다(기상연구소, 1999). 본 연구에서는 오존 연직분포를 조사하기 위하여 2003년에 수도권 지역을 관측한 NOAA-16 위성관측 자료를 사용하였다.

9.7 μm 채널에서 오존총량의 유도 방법

대기에서의 온도 및 오존농도의 연직분포가 주어질 때, 직하점 방향에서 9.7 μm에서의 위성관측 상향 복사세기($I_{9.7} \uparrow$)는 다음과 같다(Prabhakara et al., 1970).

$$I_{9.7} \uparrow = \underbrace{B_{9.7}(T_0)\tau_{9.7}(0)}_{(a)} + \underbrace{\int_{\tau_{9.7}(0)}^0 B_{9.7}(T_z) d\tau_{9.7}(z)}_{(b)} \quad (1)$$

(1)식에서 (a)항은 대기 상부에 도달하는 지표 방출, 그리고 (b)항은 대기의 상향 방출을 나타낸다. (a)항에서 $B_{9.7}(T_0)$ 는 지면 온도(T_0)에 해당하는 Planck 복사세기, 그리고 $\tau_{9.7}(0)$ 는 지표에서 대기 상부까지의 투과율을 의미한다. (b)항에서 $B_{9.7}(T_z)$ 는 대기의 어느 주어진 고도 z 에서 온도에 해당하는 Planck 복사세기, 그리고 $\tau_{9.7}(z)$ 는 어느 주어진 고도 z 에서 대기 상부까지의 투과율을 나타낸다. 주어진 대기에서 고도에 따

른 $B_{9.7}(T_z)$ 의 평균값을 $\overline{B_{9.7}(T_z)}$ 라고 하면, (1)식은 (2) 식으로 표현될 수 있다.

$$I_{9.7} \uparrow = I_{11} \uparrow \tau_{9.7}(0) + \overline{B_{9.7}(T_z)} \{1 - \tau_{9.7}(0)\} \quad (2)$$

여기서 $B_{9.7}(T_0)$ 는 맑은 날의 경우에 11 μm에서의 상향 복사세기($I_{11} \uparrow$)로 대체될 수 있다. $\overline{B_{9.7}(T_z)}$ 은 투과율($\tau_{9.7}$)에 대하여 가중된 평균으로 구체적으로 (3) 식과 같다.

$$\overline{B_{9.7}(T_z)} = \frac{\int_{\tau_{9.7}(0)}^0 B_{9.7}(T_z) d\tau_{9.7}(z)}{\int_{\tau_{9.7}(0)}^0 d\tau_{9.7}(z)} \quad (3)$$

(2)식을 정리하면 다시 (4)식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{I_{11} \uparrow - I_{9.7} \uparrow}{I_{11} \uparrow - \overline{B_{9.7}(T_z)}} = 1 - \tau_{9.7}(0) - 1 - \exp(-kO_3) \approx kO_3 \quad (4)$$

여기서 k 는 오존 흡수계수이고, O_3 는 대기 기주의 오존총량을 의미한다. 대기오염이 심한 어느 단기간에 성층권 오존이 거의 일정하다고 가정하면, 이 오존총량의 변화는 대류권 오존의 변화를 주로 반영한다. 본 연구에서 (3)식의 $\overline{B_{9.7}(T_z)}$ 는 MODIS의 다섯 개 채널인 12 μm, 13.3 μm, 13.6 μm, 13.9 μm 그리고 14.2 μm의 복사세기(I_i)를 이용하여 모수화(parameterization)되었다.

$$\overline{B_{9.7}(T_z)} = \sum_i I_i W_i \quad (5)$$

여기서 W_i 는 각 채널 복사세기에 대한 가중값이다. (4)식에서 유도된 오존총량(O_3)은 위성관측각과 지표 상태를 고려하면서 보정된다.

오존 흡수대에 대한 오존 및 열적 효과: 수치실험

위성에서 관측된 9.7 μm 오존 흡수대에서의 흡수세기(i.e., 11 μm와 9.7 μm 밝기온도간의 차)는 오존총량(total ozone)과 대기 열적 상태에 따라 변할 수 있다. 본 연구에서는 수치실험을 통하여 9.7 μm 오존 흡수대에 미치는 오존 및 열적 효과를 각각 분리하여 정량화하고자 하였다.

본 연구에서 제시한 위성관측으로부터의 오존 원격탐사 방법은 오존 흡수시에 감소하는 9.7 μm 밝기온도($T_{9.7}$)와 지표면 온도를 반영하는 11 μm 밝기온도(T_{11})간의 차를 이용하여 오존 흡수 세기를 탐지하는 원리에 기초를 두었다. 다시 말해, 단시간에 대기중의 오존 농도가 증가할 경우, 위성관측 적외선 자료

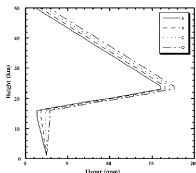


Fig. 2. Four ozone profiles used as an initial condition in numerical simulation of this study. In the profiles, total ozone are A = 327 DU, B = 348 DU, C = 370 DU, and D = 391 DU.

에서는 $11 \mu\text{m}$ 에 비하여 $9.7 \mu\text{m}$ 오존 흡수대가 강화됨에 따라 오존 농도의 변화를 담지할 수 있다. 그러나 일정한 오존농도의 조건 하에서도 태양복사 등의 요인으로 지표면 온도(즉, $11 \mu\text{m}$ 빛기온도)가 열적으로 상승하여 오존 흡수대의 상대적인 길이가 증가할 수 있다. 따라서 $9.7 \mu\text{m}$ 오존 채널을 이용하여 오존 농도를 정확하게 원격탐사하려면, 오존과 열적 효과가 혼합된 위성관측에서 지표 및 대기의 열적 부분을 제거해야 한다.

오존 흡수대에서의 오존 및 열적 효과를 조사하기 위하여, 모델 초기 조건으로 오존과 지표면 온도를 각각 327~391 DU와 290~325 K의 범위 내에서 변화시키면서 복사전달 수치실험을 실시하였다. 초기 조건인 네 종류의 오존 원격분포에서 오존 농도는 지표에서 16 km 고도의 대류권까지는 지표와 많은 차이가 없으나, 이 고도 위에서는 증가한다(Fig. 2). 또한 오존 농도는 23~24 km 고도에서 최대를 보인 후에, 고도 증가에 따라 다시 감소하는 경향을 보인다. 초기 조건에서 온도는 290 K에서 325 K까지 5 K 간격으로 변한다(Fig. 3). 여기서 온도는 고도에 따라 지표에서 14 km까지의 대류권에서 감소하다가, 14 km에서 16 km 부근의 대류권계면에서 일정하고, 성층권에서는 증가한다.

이비 언급한 바와 같이, 주어진 오존 농도의 변화 조건에서도 지표 온도(T_s) 또한 기온이 변하면, 오존 흡수대의 크기(단위; $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 또는 K)가 변할 수 있

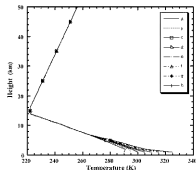


Fig. 3. Eight temperature profiles used as an initial condition in numerical simulation of this study. In the profiles, surface temperatures (T_s) are a = 290 K, b = 295 K, c = 300 K, d = 305 K, e = 310 K, f = 315 K, g = 320 K, and h = 325 K.

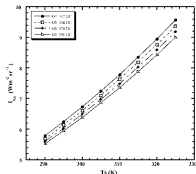


Fig. 4. The change of $9.6 \mu\text{m}$ radiance under the conditions of profiles of total ozone (327~391 DU) and surface temperature (290~305 K).

다. 이를 정량적으로 평가한 수치실험의 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 이 실험에서 주어진 오존 농도의 변화(327~391 DU)에 대하여 $9.6 \mu\text{m}$ 에서의 복사휘도는 $T_s = 290 \text{ K}$ 일 때 $5.52\text{--}5.78 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 그리고 $T_s = 325 \text{ K}$ 에서는 $9.00\text{--}9.57 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 으로 T_s 가 상승함에 따라 증가하였다. 세부적으로, $9.6 \mu\text{m}$ 에서의 복사휘도의 변동폭은 64 DU의 오존 농도 변화에 따라 $T_s = 290 \text{ K}$ 에서 $0.26 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, 그리고 $T_s = 325 \text{ K}$ 에서는 $0.57 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 이었다. 이러한 결과에 비추어, 오존 흡

Table 3. Correlation between ground-ozone observations and satellite data in seven infrared channels of the MODIS Aqua after cloud screening. In addition, the satellite parameters of $T_{11.3}$ and $T_{11.6}$ are also used for the correlation. Here the data, out of range from maximum of $11 \mu\text{m}$ brightness temperature over the SMA by 10 K, are eliminated

Date	No. of OBS	Channel (μm)							$T_{11.3}$	$T_{11.6}$
		9.7	11	12	13.3	13.6	13.9	14.2		
May 4	33	0.28	0.34	0.32	0.22	0.22	0.21	0.29	0.39	0.39
May 5	51	0.10	0.21	0.22	0.13	0.24	0.28	0.23	0.27	0.28
May 13	50	0.22	0.35	0.35	0.42	0.42	0.42	0.43	0.46	0.49
Aug 9	51	0.39	0.40	0.40	0.27	0.03	0.09	0.06	0.41	0.41

Table 4. Same as in Table 3 except for the total data based on composite observations of four days with cloud screening

No. of OBS	Channel (μm)							$T_{11.3}$	$T_{11.6}$
	9.7	11	12	13.3	13.6	13.9	14.2		
185	0.41	0.04	0.14	0.05	0.33	0.40	0.49	0.37	0.39

수대를 이용한 오존 원격탐사에서 $9.6 \mu\text{m}$ 에서의 흡수 세기에 대한 오존량 변화의 효과는 $0.26 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} / 64 \text{ DU}$, 그리고 지표 온도 변화의 효과는 $0.31 \text{ Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} / 35 \text{ K}$ 이었다. 따라서 같은 오존 농도의 변화 상태에서도 지표 온도(즉, 열적 효과)가 상승함에 따라 $9.6 \mu\text{m}$ 에서의 복사휘도 차이가 커짐을 알 수 있다. 다시 말해, 이 결과는 위성관측에서 유도되는 오존 흡수대 세기가 오존 농도 뿐만 아니라 열적 상태의 변화에 의하여 의존함을 정량적으로 보여준다. 그러므로 위성관측 오존 흡수대 세기를 이용한 오존 농도에 대한 원격탐사에서는 오존 및 열적 효과가 혼합된 세기 시그널에서 열적 부분을 제거하는 것이 필요하다.

지상오존 농도에 대한 원격탐사 경험식

오존주의보가 발생한 2003년 9월 기간(Table 2)에 지상 오존 농도와 위성관측 MODIS 각 채널 상관을 계산한 후에, 본 연구 분석에서 최종적으로 사용한 4 일 간의 자료 결과를 Table 3에 제시하였다. 또한 오존총량의 변화는 $9.7 \mu\text{m}$ 오존흡수대의 세기 변화에 영향을 주므로, $T_{11.9.7}$ 이나 $T_{11.6}$ 변수에 대한 지상 오존과의 상관도 구하였다. 여기서 $T_{11.9.7}$ 은 MODIS $11 \mu\text{m}$ 와 $9.7 \mu\text{m}$ 간의 밝기온도 차이, 그리고 $T_{11.6}$ 은 이 차이값을 $11 \mu\text{m}$ 밝기온도로 나누어 정규화(normalization)된 것을 의미한다.

구름은 오존의 원격 탐사에 있어서 오차를 제공하는 요소이므로, 본 연구에서는 상대적으로 맑은 날의 위성관측 및 지상오존 관측 자료를 사용하였다. 이를 위하여 수도권 지역 내에 5개 지점의 종관기상 관측소(서울, 인천, 수원, 김포공항, 인천공항)의 14시 운

량, 일기도, NOAA-16 극궤도 기상위성 영상 자료를 참고하였다. 그러나 완전히 맑은 날의 경우는 드물므로, 오존주의보 발령일 중에서 상대적으로 운량이 적은 날을 택하였다. 그러나 이 경우에도 잔재하고 있는 구름 효과를 제거하기 위하여, 주어진 시간에 수도권 지역의 지표 온도를 반영할 수 있는 $11 \mu\text{m}$ 밝기온도 최대값에서 10 K 이내에 속하는 $11 \mu\text{m}$ 밝기온도를 가지는 해당 자료만을 사용하였다. 예를 들면, 특정 시간에 수도권($37.2\text{-}37.7 \text{ N}$, $125.7\text{-}127.2 \text{ E}$) 내의 전체 T_{11} 자료 중에서 그 최대값이 300 K로 관측되었을 때, 같은 시간에 이 지역에서 $T_{11} < 290 \text{ K}$ 상태로 동시관측된 적외선 자료들(e.g., $T_{9.7}$, T_{11} , T_{12})은 구름의 영향을 받았다고 가정하고 본 연구의 오존 분석에서 제외되었다. 자료 선택에 있어서는 $T_{11.6}$ 변수와 지상오존 관측값과의 상관도 고려되었다. 이러한 두 종류 선택 기준에 근거하여, 총 9일의 오존 발령일 중에서 4일 기간, 다시 말해 5월 4일, 5일, 13일, 그리고 8월 9일 자료를 사용하였다. 구체적으로 발령일 중에서 7월 15일, 7월 30~31일, 8월 13일 경우는 50% 이상의 운량 때문에, 그리고 6월 5일 경우는 낮은 상관 때문에 연구에 포함되지 않았다.

앞서 언급한 구름 효과의 제거 방법을 사용한 후에, 지상 오존 농도에 대한 $T_{11.6}$ 의 상관은 2003년 5월 4일에 39%, 5월 5일에 28%, 5월 13일에 49%, 그리고 8월 9일에 41%이었다(Table 3 and Fig. 5). 이 결과에서 5월 4-5일의 상관값은 유의수준 5%, 그리고 5월 13일과 8월 9일의 경우는 유의수준 1%에서 유의미하였다.

Table 3의 결과를 기초로 4일(5월 4-5일, 13일, 8월

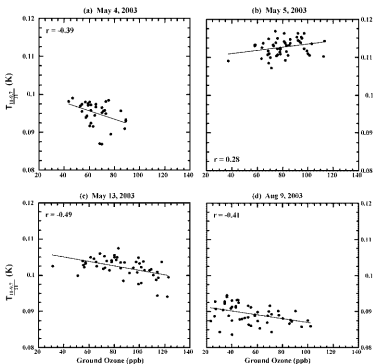


Fig. 5. Correlation between ground ozone observations and satellite data of the MODIS Aqua $T_{11\mu m}$ in (a) May 4, (b) May 5, (c) May 13, and (d) August 9, 2003. The Aqua MODIS data, out of range from maximum of the $11\mu m$ brightness temperature over the SMA by 10 K, are eliminated.

9일) 간의 자료를 통합하여 지상오존 농도와 각 채널 밝기온도 간의 상관을 계산하였다. 4일 간의 전체 자료에서 계산된 위성관측값 $T_{11\mu m}$ 과 지상오존 농도 사이의 상관(39%)은 유의수준 1%에서 유의미하였다 (Table 4 and Fig. 6).

최종 단계에서 위성관측 MODIS 적외선 밝기온도에서 지상오존 농도를 원격탐사하는 경험식을 산출하기 위하여, 복사전달이론을 이용하는 물리적 방법과 다중회귀식을 이용하는 통계적 방법을 사용하였다.

먼저, 물리적 방법의 이론적 근거는 (4)식에 있으며, 이 식에서 오존총량은 $\frac{I_{11}\uparrow - I_{13}\uparrow}{I_{11}\uparrow - CB_{0.9}(T_s)}$ 에 비례함을 알 수 있다. $B_{\lambda}(T)$ 을 유도하기 위하여 $12\mu m$,

$13.3\mu m$, $13.6\mu m$, $13.9\mu m$, $14.2\mu m$ 다섯 채널의 위성관측 밝기온도 평균값이 사용되었으며, 이 값에 상수 C를 곱하여 얻은 물리적 경험식 $\frac{I_{11}\uparrow - I_{\lambda}\uparrow}{I_{11}\uparrow - CB_{0.9}(T_s)}$ 과 지상오존 농도와의 상관을 구하였다. 이러한 상수 도입이 필요한 이유는 본 연구에서 $B_{\lambda}(T)$ 을 얻기 위하여 사용된 다섯 개 채널의 가중함수들이 상부 성층권의 일직 상태를 충분히 반영하지 못하는데 있다. 상수 C는 0에서 ± 1 까지 0.01씩 증가하여 결정되었다. 그 결과, C = 1일 때 최대 상관(0.49)은 유의수준 1%에서 유의미하였다(Fig. 7).

통계적 방법에서는 14일에 관측된 지상 오존 농도

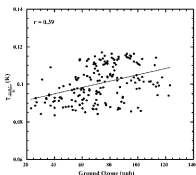


Fig. 6. Correlation in total data (four days in 2003) between ground-ozone concentration and satellite-observed MODIS parameter ($T_{12.25}$) over the SMA.

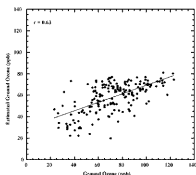


Fig. 8. Same as in Fig. 7 except for MODIS satellite observations with the multiple regression analysis.

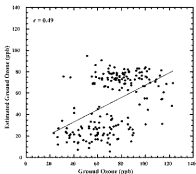


Fig. 7. Correlation between ground-ozone observations and the ozone values derived from MODIS satellite observations with radiative transfer theory over the SMA.

를 종속변수, 그리고 MODIS 적외선 자료의 각 채널 값을 독립변수로 하는 다중 회귀식(multiple regression)을 사용하여 계수들이 결정되었다. 여기서 T_7 은 9.7 μm , T_8 는 11 μm , T_9 는 12 μm , T_{10} 는 13.3 μm , T_{11} 는 13.6 μm , T_{12} 는 13.9 μm , T_{13} 은 14.2 μm 밝기온도(K)라고 할 때, 지상 오존 농도(ppb)를 산출하는 통계적 경험식은 다음과 같다.

$$O_3 = 3083 + 2.2T_7 - 20.6T_8 + 20T_9 - 17.6T_{10} + 41.7T_{11} - 30.6T_{12} - 7.8T_{13} \quad (6)$$

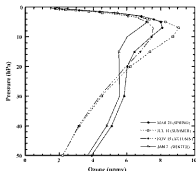


Fig. 9. Ozone profiles over the region (37.0-37.7 N, 125.9-127.3 E) of the Korean peninsula, observed from NOAA-16 satellite during four days of the year 2003.

(6)식에서 유도된 오존 농도와 지상 관측값 사이의 상관(63%)은 유의수준 1%에서 유의미하였다(Fig. 8). 결과적으로 경험식에서 통계적 방법(63%)이 물리적 방법(49%)에 비하여 14% 정도 우수하였다. 그러나 통계적 방법에서 사용된 12-14.2 μm 채널들은 대기 중의 수증기 증압, 그리고 지표와 대기의 열적 상태에 따라서도 변할 수 있으므로, 한 단계에서 지상 오존 유도에 통계적 방법이 더 우수하다고 단정하기 어렵다. 또한 물리적 방법은 이론적 배경에서 제시한 바와 같이 지상 오존보다는 성층권 및 대류권 오존인 오존총량 유도에서 더 정확한 결과를 보일 것

로 예상된다. 본 연구에서는 특정 오존주의보 발령일에 성층권 오존 변동은 무시되었다.

오존의 연직분포

지상오존 농도와 관련하여 대류권 및 성층권의 오존 연직분포를 조사하기 위하여 NOAA-16의 위성관측 자료를 사용하였다. 이러한 오존 연직분포의 자료는 복사전달 수치실험의 오존 초기 조건을 마련하는데 참고되었다. NOAA-16에서 수도권 지역(37.0-37.7 N, 125.9-127.3 E)을 관측한 2003년 4일간의 오존 연직 분포를 Fig. 9에 제시하였다. 4일(5월 29일, 7월 14일, 11월 15일, 1월 7일) 간의 자료가 대체로 계절적 경향을 반영한다고 가정할 때, 이 지역에서 계절적인 오존총량은 봄·여름에 높고, 가을·겨울에 낮았다. 배출원의 영향 및 각종 기상조건이 봄과 가을에 대체로 유사함에도 불구하고, 고농도 오존이 봄철에 나타나는 원인은 성층권 하부 오존의 증가에 있다(Singh et al., 1978; Minzuno and Yoshikado, 1983; 김민영 등, 1989). 다시 말해, 봄철에는 북반구 중위도 지역의 대류권에서 저기압의 발달로 인하여, 상대적으로 고농도 오존을 포함한 성층권 하부 대기가 대류권으로 이동하는 경향이 있다. 성층권 오존 농도는 계절적으로 일조 시간 및 일사 강도, 6~10 km 고도의 층운의 잔류로 인한 빛의 산란, 그리고 미세한 난류현상 등에 의하여도 변화한다(Beekmann et al., 1995).

결 론

본 연구에서는 수치실험을 통하여 9.7 μm 오존 흡수대에 미치는 오존 및 열적 효과를 각각 정량화하였으며, 오존주의보가 있었던 2003년 맑은 날 4일의 동시관측 위성(Aqua; ECT 13 : 30) 및 지상오존 자료를 사용하여 수도권 지역에 대한 지상 오존 원격탐사 방법을 제시하였다. 여기서 해당 자료들은 각각 5 \times 5 km 격자의 MODIS 적외선(9.7~14.2 μm) 위성 관측과 국립환경연구원의 79개 지점 지상 오존 관측에서 수집된 것이며, 오존의 연직분포를 함께 조사하기 위하여 위성관측 NOAA-16 자료도 활용되었다. 오존주의보는 오염 배출원에 의한 오존 광화학 반응으로 인하여 오전보다는 주로 오후(2003년에 9일)에 발령되었다.

복사전달모형을 사용한 수치실험에 의하면, 주어진

오존 농도(327~391 DU)에 대하여 9.6 μm 에서의 복사 휘도는 표면온도(T_s)가 290 K일때 5.52~5.78 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 이었으며, T_s 가 325 K에서는 9.00~9.57 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 이었다. 따라서 9.6 μm 의 이러한 조건하에서 오존 흡수대의 변화를 이용한 원격탐사시에, 오존 흡수 세기(i.e., 11 μm 와 9.7 μm 밝기온도간의 차; $T_{11,9.7}$)에 대한 오존 효과는 0.26 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/64$ DU, 그리고 열적 효과는 0.31 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}/35$ K이었다.

오존 원격탐사 경험식을 마련하기 위하여 물리적, 통계적인 방법들을 사용하였으며, 지상 오존 농도에 대한 적외선 채널 밝기온도의 상관 뿐만 아니라 $T_{11,9.7}$ 의 상관도 조사되었다. 이 과정에서는 위성관측 오존 흡수 세기와 지상 관측간에 유의적인 상관을 보이는 오존주의보 발령일(2003년 5월 4일, 5일, 13일, 8월 9일)이 선택되었으며, 구름 효과를 제거하기 위하여 해당일에 수도권 지역 11 μm 밝기온도 최대값에서 10 K 이내에 속하는 밝기온도 11 μm 밝기온도를 가지는 해당 자료만을 사용하였다. 경험식에서 유도된 지상 오존 농도는 관측값과 물리적 방법에서 49% 상관, 그리고 통계적 방법에서는 63% 상관을 보였으며, 이들 상관은 각각 유의수준 1%에서 유의미하였다. 그러나 장차 연구에서 지상 오존보다는 대류권 전체 오존 농도를 사용한다면, 좀 더 정확한 경험식이 유도되리라고 생각한다. 또한 수치 실험에서 이미 언급된 지표와 대기의 열적 효과, 위성관측자, 지표 상태 그리고 수증기 및 구름 효과도 분리하여 고려되어야 한다. 지상 오존의 원격 탐사는 현 단계에서는 충분히 만족할만한 수준(0.5-0.6 상관)은 아니지만, 관측과 이론이 뒷받침될 때 경제성에 비추어 개선 가능한 중요 과제라 사료된다. 본 연구 결과는 수도권 지역의 지상 오존 농도의 검증이나 결측시에 활용될 수 있으며, 좀 더 정확한 결과를 유도하기 위해서는 성층권 오존 농도의 변화도 함께 고려되어야 한다.

사 사

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 기초과학 연구지원(KRF-2004-015-C00598)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다. 지상 오존 자료 수집에 도움을 준 국립환경연구원의 박일수 박사, 그리고 통계 분석에 도움을 준 미국 항공우주국(NASA/GSFC)의 이준이 박사와 김규명 박사께 감사드립니다. 본 논문

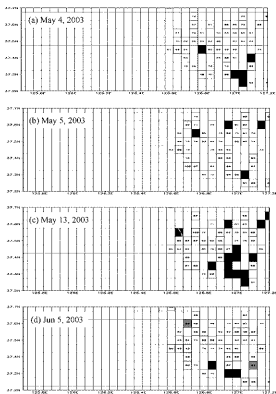
을 위하여 좋은 지적을 해 주신 부산대학교의 김재환 교수와 심사위원께도 감사드립니다.

참고문헌

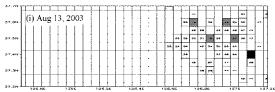
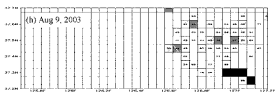
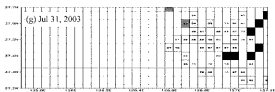
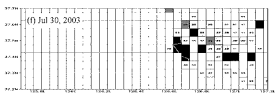
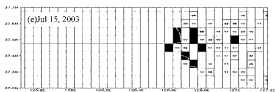
- 권속표, 심상환, 윤명조, 정규철, 조규상, 차철환, 1976, 최신환경위생학. 집현사, 62-64.
- 기상연구소, 1999, 지구 대기 조성 변화 감시. 제 3차년도 연차 보고서, 363-457.
- 김민영, 강희미, 이완종, 이상철, 장봉훈, 박성배, 1989, 오존농도의 동태 및 영향인자에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 5 (2), 55-71.
- 김영성, 1996, 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화. 한국대기보전학회지, 12, 55-66.
- 김영성, 2000, 우리나라의 오존농도 변화 추이와 주요 인자. 한국대기환경학회지, 16 (6), 607-623.
- 김유근, 문윤섭, 송상근, 오인보, 2002, 대류권오존의 연직 수송과 관련한 부산지역 고농도오존 사례 분석. 한국기상학회지, 38 (4), 307-317.
- 김재환, 나선미, 한건희, Newchurch, M., 2001, 원격탐사법을 이용한 대류권 오존 측정과 분석. 대기지, 11 (1), 151-153.
- 방소영, 조경숙, 최재천, 최병철, 김성균, 오성남, 2004, 차등흡수방식의 오존라이다 시스템을 이용한 한반도 성층권 오존농도 관측. 한국기상학회지, 40 (2), 217-228.
- 서명석, 박경운, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성연구. 한국대기보전학회지, 11 (3), 253-262.
- 신찬기, 한진석, 김윤신, 1992, 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구. 대기보전학회지, 8 (4), 213-220.
- 정 용, 장재연, 권속표, 1986, 서울시 대기중 오존의 오염도와 그 영향인자 분석. 한국대기보전학회지, 2 (1), 73-79.
- 조희구, 김해경, 이규태, 1994, 서울의 오존전량 변동과 경향. 한국기상학회지, 30 (2), 219-234.
- 환경부, 2003, 대기환경월보 2003년 5월. 환경부 국립환경연구원.
- Beekmann, M., Ancellet, G., Martin, D., Abonne, C., Duvemeuil, G., Eidelman, F., Bessemoulin, P., Fritz, N., and Gizard, E., 1995, Intercomparison of tropospheric ozone profiles obtained by electrochemical sondes, a ground based lidar and airborne UV-photometer. Atmospheric Environment, 29 (9), 1027-1042.
- Blacet, F. E., 1952, Photochemistry in the lower atmosphere. Industrial & Engineering Chemistry Research, 44, 1339-1348.
- Cartalis, C., and Varotsos, C., 1994, Surface ozone in Athens, Greece, at the beginning and end of the twentieth century. Atmospheric Environment, 28 (1), 3-8.
- Chung, Y. S. and Dann, T., 1985, Observations of stratospheric ozone at the ground level in Regina, Canada. Atmospheric Environment, 19, 157-162.
- Comrie, A. C., and Yarnal, B., 1992, Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburg, Pennsylvania. Atmospheric Environment, 26B, 301-312.
- Danielsen, E. F., 1980, Stratospheric source for unexpectedly large values of ozone measured over the Pacific Ocean during Gametag, August 1977. Journal of Geophysical Research, 85 (C1), 401-412.
- Haagen-Smit, A. J., Bradley, C. E., and Fox, M. M., 1953, Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances. Industrial & Engineering Chemistry Research, 45, 2086-2087.
- Herman, J., Bhartia, P., Ziemke, J., Ahmad, Z., and Larko, D., 1996, UV-B increase (1979-1992) from decreases in total ozone. Geophysical Research Letters, 23, 2107-2110.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001, Third Assessment Report - Climate Change 2001, 43.
- Komhyr, W. D., 1969, Electrochemical concentration cells for gas analysis. Annales Geophysicae, 25, 203-210.
- Minzuno, T., and Yoshikado, H., 1983, On some characteristics of the diurnal variation of O₃ observed in island, urban and rural areas. Atmospheric Environment, 17, 2575-2582.
- Mueller, S. F., 1994, Characterization of ambient ozone levels in the Great Smoky Mountains National Park. Journal of Applied Meteorology, 33, 465-472.
- Papayannis, D., Balis, D., Basis, A., Calpin, B., Durieux, E., Fiorain, L., Jaquet, L., Ziomias, I., and Zerefos, C. S., 1998, Role of urban and suburban aerosols on solar UV radiation over Athens, Greece. Atmospheric Environment, 32 (12), 2193-2201.
- Prabhakara, C., Conrath, B. J., Hanel, R. A., and Williamson, E. J., 1970, Remote sensing of atmospheric ozone using 9.6 μm band. Journal of Atmospheric Sciences, 27, 689-697.
- Singh, H. B., Ludwig, R. L., and Johnson, W. B., 1978, Tropospheric ozone; Concentration and variabilities in dean remote atmosphere. Atmospheric Environment, 12, 2185-2196.
- Stachelin, J., Thudium, J., Buehler, R., Volz-Thomas, A., and Graber, W., 1994, Trends in surface ozone concentrations at Arosa (Switzerland). Atmospheric Environment, 28 (1), 75-87.
- Stevenson, D., 2001, Global influences on future European tropospheric ozone. Proceedings from the Eighth European Symposium on the Physico-Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants 17-20 September, 2001, Torino, Italy; <http://ies.jrc.cec.eu.int/Units/cc/events/torino2001/torinocd/Documents/Urban/UO7.htm>.
- Sunwoo, Y., Carmichael, G. R., and Ueda, H., 1994, Characteristics of background surface ozone in Japan. Atmospheric Environment, 28, 25-37.

- Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M. J., and Ittersum, G. V., 1985, Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, 17, 233-249.
- Uccellini, L. W., Keyser, D., Brill, K. E., and Wash, C. H., 1985, The presidents day cyclone of 18-19 February 1979: Influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 113, 962-988.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1998, National Air Quality and Emissions Trends Report. 1997. EPA 454/R-98-016, Research Triangle Park, NC.
- Vingarzan, R., 2004, A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*, 38 (21), 3431-3442.
- Yap, D. and Chung, Y. S., 1977, Relationship of ozone to meteorological conditions in southern Ontario. Preprints 70th Annual Meeting Air Pollution Control Association Toronto, 14.

2005년 3월 2일 원고 접수
2005년 3월 23일 수정원고 접수
2005년 3월 23일 원고 채택



Appendix 1. Surface ozone distributions (unit: ppb) at 14:00 LST in SMA during the days of ground-ozone warning of the year 2003 on (a) May 4, (b) May 5, (c) May 13, (d) June 5, (e) July 15, (f) July 30, (g) July 31, (h) August 9, and (i) August 13.



Appendix 1. Continued.