

항공기를 이용한 남해안 지역의 오존 공간분포 조사 (2009년, 여름철)

The Analysis of Spatial Distribution of Ozone in the Southern Coast of Korea using the Aircraft (2009, Summer)

서석준 · 김소영* · 이민도 · 최진수 · 김수연 · 이석조¹⁾ · 김정수²⁾ · 이강웅³⁾
국립환경과학원 대기환경연구과, ¹⁾국립환경과학원 기후대기연구부,
²⁾국립환경과학원 교통환경연구소, ³⁾한국외국어대학교 환경학과
(2011년 7월 28일 접수, 2011년 11월 28일 수정, 2012년 1월 26일 채택)

Seok-Jun Seo, So-Young Kim*, Min-Do Lee, Jin-Soo Choi, Su-Yeon Kim,
Seok-Jo Lee¹⁾, Jeong-Soo Kim²⁾ and Gang-Woong Lee³⁾

Department Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Climate and Air Quality Research, National Institute of Environmental Research*

²⁾*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*

³⁾*Hankuk University of Foreign Studies Department of Environmental Science*

(Received 28 July 2011, revised 28 November 2011, accepted 26 January 2012)

Abstract

The purpose of this study is to understand distribution of ozone concentration in the south coastal region of Korea by evaluating ozone spatial distribution in the upper air using aircraft. Sampling was carried out from May to August in 2009. The average concentration of ozone in the upper air was ranged from 32.3~90.8 ppb with its maximum concentration of 132 ppb. When it comes to the spatial distribution of ozone, ambient concentration was high in the air, 1,000 m and 500 m above the southern sea near the Gwangyang Bay area and emission sources, respectively. Daily mean concentration of NO_y was 6.7~24.2 ppb and that of CO was 0.152~0.487 ppm. In addition, the concentration was appeared to be relatively high in the upper air of industrial regions and the southern seas. Meanwhile, the concentration of both NO_y and CO was high in the upper air of the emission sources regardless of latitude. As for PAN, its daily mean concentration ranged between 0.1 and 0.6 ppb with overall mean concentration of 0.2 ppb. The average concentration of VOCs was 48 ppb, and the concentration of toluene and *m,p*-Xylene were higher than other components.

Key words : Aircraft, Ozone, NO_y, CO, PAN, VOC, Gwangyang Bay region

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7267, E-mail : air3500@korea.kr

1. 서 론

광양만은 광양, 순천, 여수, 남해, 하동으로 둘러싸인 폐쇄된 지형의 협소한 내만이다. 이 협소한 내만에 광양제철소와 연관단지, 여천 석유화학단지, 울촌 산업공단, 여수화력발전소, 호남화력발전소, 삼천포화력발전소, 광양제철소 등 대형 사업장이 집중되어 있다. 이러한 산업단지에서 배출되는 대기 오염물질로 대기질의 악화가 심화되고 있다. 지자체와 사업체의 노력으로 1차 대기오염물질인 SO₂와 PM₁₀은 꾸준히 감소하는 추세를 보이고 있으나 광양만권에서 발생되는 주요 오존 전구물질인 NO_x와 VOCs의 배출량은 다른 지역에 비해 높고 증가하는 추세이며 이에 따른 오존의 고농도 출현 빈도 또한 증가하는 실정이다(전라남도, 2004). 2003년부터 2008년까지 6년간 오존주의보 발생일수를 보면 최근에 2000만 명 이상의 인구가 밀집된 수도권보다도 오히려 광양만 지역의 오존주의보 발령횟수가 많았다. 특히 여수와 순천, 광양지역에는 2006년 5차례, 2007년 22차례에 걸쳐 오존주의보가 발령되었다(환경부, 2007, 2006).

광양만권의 고농도 오존의 발생은 주로 여름철에 발생하고 있으며 고농도 오존의 발생인자에 대하여는 국내외에서 많은 연구가 이루어졌다. 국립환경과학원(2006)의 광화학대기오염물질 생성과정 규명연구에 따르면 오존발생의 주요 인자는 기온과, 일사량, 운량, 풍속이며 비슷한 기상조건에서는 NO_x와 VOCs의 농도가 높을 때 고농도 오존 생성이 유리한 것으로 나타났다. 또한 광양만권과 같은 연안지역인 부산의 연구에서는 연안지역의 해풍이 지연되는 이른 오후 시간대에 오존농도의 상승과 고농도 발생 빈도를 증가시키는 결과를 보여준다(Oh *et al.*, 2004). 또한 오존의 발생은 지표에만 국한되는 것은 아니며 인근지역에서 이루어지거나 혼합층에서 생성된 오존의 연직

수송의 영향도 크게 작용하는 것으로 알려져 있어 이에 따른 연직분포 특성 및 이류 특성을 위한 연구도 진행되었다(Lee *et al.*, 2009; Helmig *et al.*, 2002).

국내 광양만권의 오존 연구는 Ha *et al.* (2006) 등의 연구와 같이 지상 측정결과에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으나 항공기를 이용하여 광양만권 일대 및 배경지역을 포함한 큰 공간의 측정은 거의 전무하여 본 연구에서는 항공기를 이용하여 광양만 및 주변 지역의 오존 및 오존 전구물질의 공간분포를 측정하여 이들의 다양한 위·경도 및 지역에 따른 오존 및 전구물질의 분포를 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 항공측정

본 연구에 사용된 항공기는 Han *et al.* (2006)에 사용한 동일한 기종의 항공기로 (주)창운항공 소유의 미국 Piper사의 Chieftain PA 31-350 고정의 쌍발 프로펠러 기종이다. 항공기 내부에는 가스상 측정기(O₃, NO_y, CO, THERMO사-Trace level)와 VOCs 채취를 위한 Tedlar bag을 탑재하였다. 또한 비행고도가 변화하는 경우 생길 수 있는 흡입유량의 변동을 제거하기 위하여 가스상 측정기에 각각 자동유량조절시스템(Automatic Mass Flow Control System)을 설치하였다. 또한 광화학반응에 의해 2차적으로 생성되는 HNO₃, PAN 등을 측정하기 위해 자동시료채취기를 탑재하였다.

항공기를 이용한 남해안 상공의 측정항목을 표 1에 나타내었다. 오존 및 NO_y, CO는 연속으로 측정하였으며 기기의 보정은 항공기에 설치하는 조건과 동일하게 하여 관측 전후로 실험실 혹은 현장에서 이루어졌으며 기기를 작동시킨 후 약 2~3시간 동안 warming up을 하여 안정된 후, 먼저 zero gas를 흘려 배경

Table 1. Description of relevant Instruments equipped on the aircraft.

Species detected	Technique	Range	Response time	Precision
O ₃	UV Photometric/TEI(Trace Level 49C)	< 100 ppb	20 sec (10 sec ave.)	1 ppb
NO _y	Chemiluminescence/TEI(Trace Level 42C)	< 100 ppb	60 sec (10 sec ave.)	0.05 ppb
CO	NDIR/TEI(Trace Level 48C)	< 10 ppm	60 sec (10 sec ave.)	0.04 ppm
PAN	PMT (GC-Luminol)	30 ppt	3 min	-
HNO ₃	Auto sampler/DI water	-	5 min	-
SO ₄ ²⁻	Auto sampler/DI water	-	5 min	-
VOCs	GC-FID/Perkin-Elmer	-	-	-

농도 값을 정하였다. 오존의 경우 표준과학기술원에서 제작한 오존발생기를 이용하여 0~200 ppb 사이에서 7 포인트 이상의 농도를 맞추어 교정하였다.

오존 생성의 전구물질로 중요한 역할을 하는 VOCs를 측정하기 위해 정해진 비행경로에서 상층의 VOCs 농도수준을 잘 알 수 있는 지역(point)을 선정하여 Teflon bag으로 시료채취를 하였으며 1회 비행당 10여개의 시료를 채취하였다. 채취 된 시료는 빠른 시간 내에 실험실로 이송하여 ATD-GC/FID (Markes Unity, Varian 450GC/FID)로 정량 분석하였다. FID 검출기로 구분이 힘든 일부 VOC 물질은 ATD-GC/MS (Markes Unity2, Shimadzu GC17A/QP5050A)로 분석하여 정성하였다.

또한, 광화학반응과 반응 경로를 평가할 수 있는 광화학 지시종(photochemical key indicators)인 PAN와 HNO₃, SO₄²⁻의 측정을 수행하였다. PAN이 Luminol과 접촉하면 425 nm의 파장이 가장 강하게 발생하는 화학발광법을 이용하였으며 PMT (PhotoMultiplier, 광증폭장치)를 사용한 측정 장비를 제작하여 사용하였다. 이 방법은 분석시간이 2분 이내로 GC/ECD에 소요되는 시간에 비하여 높은 분석 해상도를 가지고 있다(Graffney *et al.*, 1998). HNO₃, SO₄²⁻는 흡수액을 사용하여 시료채취 하였다. 실린지가 X, Y 축으로 이동하며 연속으로 vial에 저장할 수 있는 시스템을 제작하여 채취된 시료를 보관하였다. 채취가 끝난 시료는 실험실로 이송하여 IC로 분석을 수행하였다.

2.2 측정기간 및 항공관측 경로

남해안 지역 항공측정은 '09.5.25~6.15와 '09.7.25~8.15 두 기간에 걸쳐 항공측정이 가능한날 수행하였으며 총 10회 비행하였다. 남해안 지역에서 발생하는 고농도 오존 현상을 분석하기 위해 비행 전에 일기도 및 상층 및 지상의 기상상태를 파악하고 지상 오존 농도를 모니터링 하여 고농도 오존 발생 가능성이 높은 날을 선택하여 항공관측을 실시하였다. 일부 측정일은 오전과 오후의 농도 변화를 보기 위해 1일 2회 수행하기도 하였다.

주요 항공 경로는 그림 1에 나타내었으며 주 측정 경로는 광양만권 일대의 동서로 가로지르는 세 경로로 하였다. 경로 1의 경우 광양만에서 해풍을 타고 이동하는 오존 및 전구물질의 이동을 보기 위함이 주요 이유이며, 주요 배출원이 밀집되어있는 경로 2의

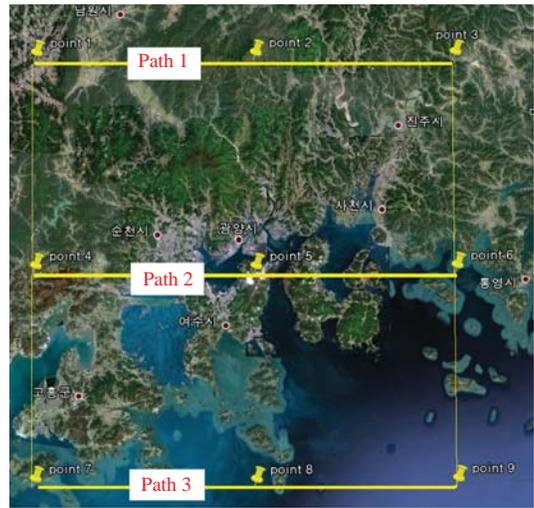


Fig. 1. Aircraft flight paths for the period.

Table 2. Summary of flight track.

Aircraft flight paths	Point	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Path 1 (Point 1 ↔ 3)	Point 1	35° 19'N	127° 10'E	1000, 1500
	Point 2	35° 19'N	127° 44'E	1000, 1500
	Point 3	35° 19'N	128° 15'E	1000, 1500
Path 2 (Point 4 ↔ 6)	Point 4	34° 52'N	127° 10'E	500, 1000
	Point 5	34° 52'N	127° 44'E	500, 1000
	Point 6	34° 52'N	128° 15'E	500, 1000
Path 3 (Point 7 ↔ 9)	Point 7	34° 25'N	127° 10'E	500, 1000
	Point 8	34° 25'N	127° 44'E	500, 1000
	Point 9	34° 25'N	128° 15'E	500, 1000

경우 여수 산단 및 제철소 등에서 배출되는 오존 전구물질 및 오존의 배출 및 분포현상을 관측하기 위한 목적을 가지고 있다. 경로 3은 오존 및 오존 전구물질의 해상이동과 생성의 현상을 보기 위해 경로를 설정하였다. 비행고도는 500m와 1,000m를 기준으로 하였으나 경로 1의 경우 산악지형의 제약으로 인해 1,000m, 1,500m의 비행고도로 하였다. 전체 경로에 대한 자세한 사항은 표 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 측정기간 중 기상 및 기류분석

항공측정 기간 동안 지상의 기상 상태를 보기 위

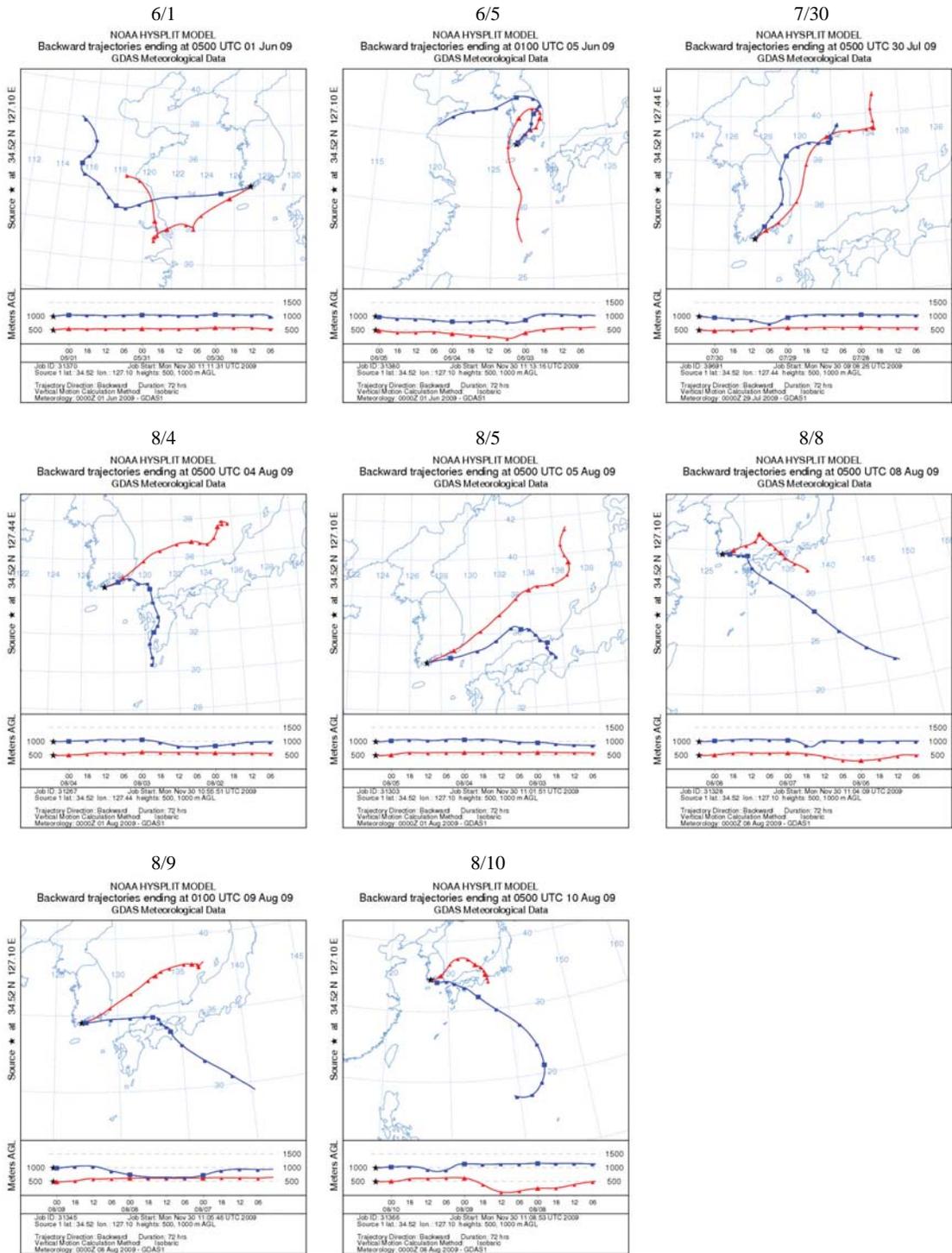


Fig. 2. Result of 850 hPa weather chart, satellite photograph and backward trajectory for sampling period.

Table 3. Meteorological condition at weather station during sampling period.

	6/1	6/5	7/30	8/4	8/5	8/8	8/9	8/10
Mean Temp(°C)	20.0	20.3	24.1	24.0	24.8	25.9	25.9	25.9
Max Temp(°C)	26.7	26.3	29.7	29.1	29.4	31.0	29.1	29.7
RH(%)	65.0	76.3	79.2	75.5	68.8	80.1	76.1	77.2
Sunshine(hr)	11.8	8.6	6.9	7.2	9.7	6.4	3.7	0.8
Wind speed(m/s)	2.2	1.6	1.3	1.8	2.3	1.8	2.6	2.1
Cloud cover	1.2	5.1	5.7	6.5	3.9	5.9	6.7	9.3

해 비행경로 주변에 위치한 기상대의 자료를 조사하였으며 항공 측정지역에 위치한 여수, 순천, 진주, 통영, 남해, 고흥 6개 지점의 자료를 사용하였다. 항공 관측일에 대한 자료의 평균값을 표 3에 나타냈으며 측정기간의 평균기온은 20.0~25.9°C, 최고 기온은 31.0°C였다. 상대습도는 65~80%였으며 1~2 m/s 정도의 평균 풍속을 보였다.

광양만 지역의 기류 이동 경로를 보기 위해 항공관측 기간 동안 역계적 분석을 실시하였다. 역계적 분석은 미국의 해양대기청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 개발한 HYSPLIT4 모델을 이용하였다. 사용한 기상자료는 NOAA의 FNL(Final run at NCEP)자료를 이용하였으며 경로 2의 가운데지점에서 고도 500 m, 1,000 m를 기준으로 72시간 역계적 분석하였다. 항공관측 기간 동안의 역계적 분석결과(그림 2) 6월 1일은 중국의 하북 지방과 산둥지방을 거쳐 기류가 이동되어 왔으며 8월 측정기간에는 태풍(모라푫)의 영향으로 대체적으로 동해나 일본을 통해 기류가 이동되어 오는 것으로 나타났다

3. 2 남해안 지역 상층 오존 및 전구물질 측정결과

여수 및 광양 지역의 항공관측 기간 동안 측정된 각 일별 오존, NO_y, CO, VOCs, PAN, HNO₃, SO₄²⁻ 등의 평균 농도를 표 4, 5에 나타내었다.

오존 평균 농도는 32.3~90.8 ppb의 분포를 보였으며 항공관측 중 최대 오존 관측농도가 100 ppb 이상인 날은 6월 1일, 7월 30일, 8월 4일로 총 3일 나타났으며 최대 오존 농도가 50 ppb 미만인 날도 하루(8월 9일) 나타났다. 전체 측정기간 중 7월 30일에 오존의 농도가 142.5 ppb로 최고농도를 보였으나 주 경로가 아닌 point 7에서 point 4 이동 경로에서 발생하였다. 주 경로상에서 나타난 최고농도는 6월 1일 경로

3지역의 500 m 상공에서 최대 132 ppb의 고농도를 보였으며 관측기간 전체 오존 평균 농도는 60.5 ppb로 이 기간 동안 지상 측정소의 오존 농도와 비교하면 배경대기 평균농도 43 ppb(국립환경과학원 대기환경연보, 2009)와 수도권 지역(서울, 인천, 경기)의 평균농도 30 ppb보다도 높은 수준으로 나타났다. 지상 오존농도와 고도별 오존의 분포를 비교하기 위해 향후 본 연구의 결과와 동 시간에 진행되었던 지상 측정값과 오존존테를 사용한 오존의 수직 분포 자료를 추가하여 해석이 필요할 것으로 판단된다. 항공관측의 오존측정의 외국사례에서는 미국 동부의 연안지역인 텍사스의 2005년 항공측정에서는 고도 550~2,600 m에서 35~130 ppb의 오존 농도를 보인 적이 있다(Luria *et al.*, 2008). NO_y는 6.7~24.2 ppb의 분포를 보여 지상측정(국립환경과학원, 2010)에 비하여 낮게 관측되었으나, 8월 1일에 최대 125.6 ppb의 고농도를 나타내었다. CO는 평균 0.152~0.487 ppm의 분포를 보였고 8월 9일에 최대 2.138 ppm까지 상승하였다. 대체로 오존과 CO의 농도가 높은 지역에서 높게 분포하는 특성을 보였으며 높은 농도를 보인 경로는 경로 2로 주요 산업시설이 위치해 있는 지역의 상공에서 나타났다.

VOCs의 경우 오존과 같이 연속측정이 불가하여 경로별로 1~3개 채취한 시료를 분석하였다. 측정값은 개별 측정된 VOCs의 합으로 나타내었다. 항공관측 기간 동안 일평균 값은 23.8~75.4 ppb의 분포를 보였으며 8월 9일 오전 비행에 324.1 ppb로 최고농도를 나타내었다. NO_y와 CO의 결과와 유사하게 경로 2의 석유화학단지가 밀집된 곳에서 채취한 시료의 농도가 대부분 가장 높은 농도를 보였다. 자동시료 채취 장치로 PAN, HNO₃, SO₄²⁻를 측정하여 분석한 결과는, PAN의 평균농도는 0.3 ppb로 여수 묘도 지상에서 측정값(0.28 ppb)과 유사한 것으로 나타났으나 HNO₃의 경우 관측기간 동안의 평균농도가 2.0 ppb로 지상 측정값(0.16 ppb)과 비교하여 높은 수준으로 나타났다(국립환경과학원, 2010).

3. 3 공간별(고도별·위도별) 오존 및 전구물질 농도분포

항공관측을 통한 오존과 NO_y, CO의 농도를 공간적인 분포를 보기위해 전체 데이터에 대해 고도별과 위도별로 그림 3에 나타내었다. 전체적인 고도는 500

Table 4. Summary of aircraft measurement data for sampling period (I).

Flight date	Flight path (time)	Altitude (m)	O ₃ (ppb) mean (max)	NO _y (ppb) mean (max)	CO (ppm) mean (max)	Temp. (°C)	RH (%)
6/1	13:29 ~ 15:20		90.8 (132.0)	24.2 (48.5)	0.487 (0.733)	-	-
	Path 1 (13:37 ~ 14:10)	1000	83.2 (97.3)	23.0 (28.8)	0.540 (0.662)	-	-
	Path 3 (14:42 ~ 15:03)	500	109.7 (132.0)	24.7 (28.6)	0.490 (0.560)	-	-
6/5	10:37 ~ 12:27		63.7 (77.9)	14.3 (27.9)	0.375 (0.753)	32.4 (34.8)	16.7 (23.9)
	Path 1 (10:37 ~ 11:05)	1500	58.9 (69.9)	11.4 (15.9)	0.584 (0.753)	30.4 (30.6)	19.4 (23.9)
	Path 2 (11:16 ~ 11:35)	1000	66.1 (69.8)	16.6 (27.9)	0.376 (0.428)	31.9 (32.6)	18.6 (20.7)
	Path 3 (11:45 ~ 12:08)	1000	66.4 (74.9)	13.6 (19.1)	0.244 (0.323)	33.7 (34.1)	14.4 (17.5)
6/5	14:42 ~ 16:25		67.2 (94.0)	7.7 (13.2)	0.183 (0.318)	31.6 (33.1)	16.7 (21.1)
	Path 3 (15:12 ~ 15:31)	1000	67.7 (78.5)	5.6 (7.5)	0.171 (0.201)	31.1 (31.4)	14.5 (19.0)
	Path 2 (15:42 ~ 16:25)	1000	69.5 (94.0)	10.2 (13.2)	0.149 (0.282)	31.6 (32.0)	18.8 (21.1)
7/30	13:28 ~ 15:14		77.8 (142.5)	22.5 (61.8)	0.404 (1.318)	23.0 (25.8)	67.6 (74.7)
	Path 2 (13:28 ~ 13:40)	500	66.1 (74.0)	27.6 (61.8)	0.592 (1.275)	-	-
	Path 3 (13:49 ~ 14:10)	500	85.0 (93.1)	21.6 (29.2)	0.398 (0.566)	23.0 (23.7)	68.8 (72.7)
	Path 2 (14:18 ~ 14:39)	1000	64.0 (76.4)	21.7 (37.3)	0.393 (1.318)	23.5 (25.6)	67.0 (74.5)
	Path 3 (14:48 ~ 15:06)	1000	76.7 (92.7)	18.5 (21.0)	0.269 (0.305)	21.8 (22.5)	68.6 (74.7)
8/4	13:22 ~ 16:35		62.5 (118.3)	13.8 (69.1)	0.402 (1.457)	22.4 (25.6)	63.8 (77.0)
	Path 2 (13:22 ~ 13:43)	500	60.1 (77.0)	27.0 (69.1)	0.863 (1.457)	23.8 (24.3)	64.3 (67.0)
	Path 3 (13:52 ~ 14:17)	500	65.8 (80.5)	10.7 (13.0)	0.458 (1.007)	23.0 (23.8)	64.5 (67.2)
	Path 2 (14:26 ~ 14:52)	1000	59.2 (74.0)	16.4 (63.0)	0.390 (0.541)	20.9 (25.2)	70.9 (76.4)
	Path 3 (15:01 ~ 15:25)	1000	47.2 (63.2)	7.2 (8.2)	0.218 (0.236)	21.9 (22.8)	58.7 (64.2)
	Path 2 (15:33 ~ 16:03)	500	76.1 (118.3)	17.5 (44.4)	0.390 (1.107)	24.0 (25.6)	63.1 (74.5)
	Path 1 (16:11 ~ 16:03)	1500	51.8 (62.7)	8.0 (11.2)	0.192 (0.292)	20.0 (23.9)	60.0 (77.0)
8/5	12:47 ~ 15:51		57.4 (81.4)	11.2 (36.7)	0.227 (0.808)	-	-
	Path 2 (12:47 ~ 13:11)	500	57.1 (68.6)	19.6 (36.7)	0.291 (0.511)	-	-
	Path 3 (13:20 ~ 13:42)	500	61.4 (68.5)	10.2 (11.5)	0.280 (0.325)	-	-
	Path 2 (13:52 ~ 14:16)	1000	57.7 (68.6)	13.8 (35.8)	0.265 (0.808)	-	-
	Path 3 (14:27 ~ 14:45)	1000	42.2 (66.4)	6.6 (8.1)	0.172 (0.203)	-	-
	Path 2 (14:54 ~ 15:19)	500	64.8 (75.8)	11.9 (23.9)	0.222 (0.693)	-	-
	Path 1 (15:31 ~ 15:51)	1500	47.0 (51.4)	6.4 (7.8)	0.161 (0.196)	-	-
8/8	14:41 ~ 16:55		51.3 (87.8)	11.2 (69.8)	0.152 (0.153)	25.0 (28.1)	66.9 (77.8)
	Path 2 (14:41 ~ 15:05)	500	55.0 (71.8)	19.7 (69.8)	0.152 (0.153)	27.0 (28.1)	64.3 (69.2)
	Path 3 (15:15 ~ 15:35)	500	60.3 (82.7)	9.4 (11.5)	0.152 (0.152)	25.4 (25.9)	67.1 (70.4)
	Path 2 (15:48 ~ 16:08)	1000	44.7 (53.0)	10.5 (19.4)	0.152 (0.152)	24.1 (24.3)	64.6 (68.3)
	Path 3 (16:21 ~ 16:41)	1000	42.2 (49.8)	7.0 (7.7)	0.153 (0.153)	23.6 (24.5)	71.2 (77.8)
8/9	10:10 ~ 13:06		32.3 (43.4)	6.7 (46.8)	0.354 (2.138)	22.9 (26.3)	66.9 (91.8)
	Path 2 (10:10 ~ 10:32)	500	24.9 (27.6)	11.0 (46.8)	0.885 (2.138)	24.0 (24.8)	68.3 (71.5)
	Path 3 (10:44 ~ 11:03)	500	34.1 (36.2)	6.9 (8.7)	0.414 (0.456)	23.7 (25.2)	72.2 (75.5)
	Path 2 (11:14 ~ 11:37)	1000	35.7 (42.5)	5.4 (6.1)	0.248 (0.278)	22.7 (24.7)	66.6 (85.9)
	Path 3 (11:48 ~ 12:06)	1000	31.7 (42.3)	5.1 (5.6)	0.194 (0.213)	23.2 (24.6)	62.9 (73.0)
	Path 2 (12:16 ~ 12:36)	500	34.5 (43.4)	9.1 (31.5)	0.296 (0.916)	23.7 (26.3)	70.0 (91.6)
	Path 1 (12:48 ~ 13:06)	1500	32.9 (93.5)	4.2 (5.0)	0.158 (0.193)	20.8 (22.0)	57.5 (70.1)
8/9	15:09 ~ 17:18		38.8 (50.9)	7.7 (66.4)	0.187 (0.509)	24.0 (26.9)	72.5 (90.8)
	Path 2 (15:09 ~ 15:31)	1000	35.0 (40.3)	9.0 (32.6)	0.272 (0.509)	22.9 (23.1)	75.5 (77.2)
	Path 3 (15:42 ~ 15:58)	1000	41.7 (46.1)	5.6 (6.2)	0.157 (0.173)	22.6 (23.8)	78.1 (87.8)
	Path 2 (16:10 ~ 16:32)	500	33.5 (37.0)	10.1 (66.4)	0.188 (0.398)	25.5 (26.9)	66.2 (72.4)
	Path 3 (16:46 ~ 17:06)	500	42.8 (48.0)	6.0 (7.7)	0.150 (0.152)	24.3 (25.2)	71.9 (76.8)
8/10	12:38 ~ 15:53		44.0 (73.4)	9.1 (63.4)	0.258 (1.736)	25.3 (26.9)	68.1 (72.7)
	Path 2 (12:38 ~ 12:58)	500	35.5 (45.5)	10.6 (28.5)	0.413 (0.885)	25.2 (26.4)	68.1 (72.7)
	Path 3 (13:12 ~ 13:29)	500	43.3 (48.2)	5.0 (5.6)	0.212 (0.236)	24.9 (25.5)	69.1 (70.7)
	Path 2 (13:41 ~ 14:02)	500	37.2 (60.6)	17.4 (63.4)	0.460 (1.736)	25.3 (26.6)	68.2 (71.3)
	Path 3 (14:15 ~ 14:36)	500	44.4 (57.3)	4.4 (5.5)	0.162 (0.198)	25.0 (25.3)	69.3 (71.4)
	Path 2 (14:48 ~ 15:08)	500	39.5 (49.4)	16.5 (59.0)	0.261 (0.915)	25.6 (26.4)	68.3 (72.1)
	Path 3 (15:21 ~ 15:41)	500	40.0 (59.2)	3.5 (4.8)	0.152 (0.165)	24.5 (25.9)	67.3 (68.9)

Table 5. Summary of aircraft measurement data for sampling period (II).

Flight date	Flight time	VOCs (ppb) mean (max)	PAN (ppb) mean (max)	HNO ₃ (ppb) mean (max)	SO ₄ ²⁻ (ppb) mean (max)
6/1	13:29 ~ 15:20	39.8 (64.9)	—	—	—
6/5 AM	10:37 ~ 12:27	61.2 (127.1)	—	—	—
6/5 PM	14:42 ~ 16:25	23.8 (33.9)	—	—	—
7/30	13:28 ~ 15:14	65.2 (130.2)	0.6 (1.0)	2.7 (27.9)	1.9 (5.5)
8/4	13:22 ~ 16:35	30.1 (54.4)	0.4 (0.9)	0.8 (2.0)	2.0 (5.3)
8/5	12:47 ~ 15:51	38.7 (79.1)	0.2 (0.4)	2.7 (5.4)	3.1 (7.4)
8/8	14:41 ~ 16:55	66.7 (93.9)	0.3 (1.0)	3.2 (38.2)	1.1 (7.8)
8/9 AM	10:10 ~ 13:06	75.4 (324.1)	0.2 (0.3)	1.3 (4.3)	1.4 (3.8)
8/9 PM	15:09 ~ 17:18	34.7 (74.8)	0.1 (0.5)	1.0 (7.1)	1.4 (5.3)
8/10	12:38 ~ 15:53	56.2 (166.1)	0.2 (0.4)	—	—

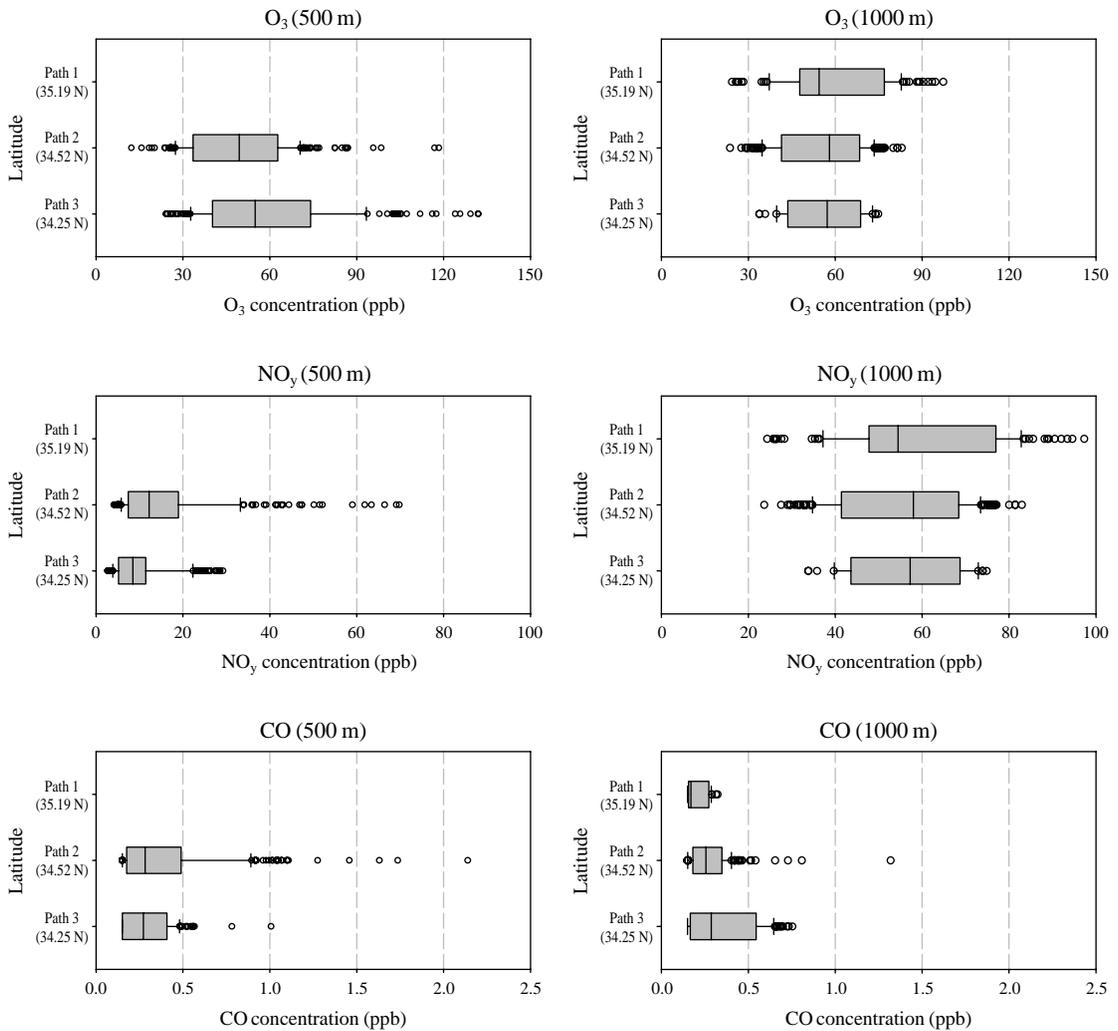


Fig. 3. Latitudinal and altitude distributions of O₃, NO_y, CO concentration.

~1,500 m 사이에서 이루어졌으며 경로 2와 3의 경우 500 m와 1,000 m의 데이터를 사용하여 비교하였으며, 지형적인 제약이 있는 경로 1의 경우 500 m의 데이터가 없어 1,000 m와 1,500 m의 데이터에 합하여 타 경로의 1,000 m와 비교하였다.

우선 고도별 경로에 따른 농도 분포 양상은 500 m 고도의 오존 농도의 분포는 해상인 경로 3의 농도가 경로 2보다 중앙값, 최대값 모두 높게 나타났으며 NO_y와 CO는 주 배출원이 밀집되어 있는 경로 2의 농도가 높게 나타났다. 1,000 m 고도의 오존 농도는 경로 2와 3은 비교적 유사하게 나타났다. 다만 경로 1의 오존 농도가 중앙값의 경우 경로 2와 3에 비해 비교적 낮게 조사되었으나 고농도의 출현은 두 경로보다 빈번한 것으로 나타났다. NO_y 또한 오존과 유사한 분포를 보였으나 CO는 반대의 분포 양상을 보였다. 경로 1 지점에 특별한 배출원이 없는 것을 볼 때 낮 시간 해풍에 의해 오존전구물질과 생성된 오존의 이송 혹은 산림지역의 오존 생성 등에 의해 높은 농도가 나타나는 것으로 판단된다.

동일 위도에서 고도별 농도 분포에서 오존의 농도는 경로 2와 경로 3 모두 1,000 m에서 관측된 중앙값이 500 m보다 약간 높은 것으로 나타났다. 다만 90th percentile 이상의 값들의 분포는 500 m에서 더 높고 넓은 양상으로 큰 편차의 오존 농도를 보였으며 최고농도의 출현 빈도 또한 많았다. NO_y는 경로 2, 3 모두 1,000 m 고도에서 관측된 중앙값, 최대값 모두 높게 나타나 오존과 다른 분포를 보였다. 이는 배출원에서 발생한 NO_y의 다른 분포 양상을 보여주는 한

사례로 판단되며 모델 등을 통한 해석으로 NO_y의 이동 및 분포에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 4 VOC 성분분포

광양만권 상공에서 채취한 VOCs는 총 56종의 오존 전구물질을 분석하였으며 표 6에 분석된 VOCs의 평균값을 날자별로 농도 순으로 나열하였다. 높은 농도를 보인 VOCs 물질로는 Toluene, *m,p*-Xylenes, 2,2,4-Trimethylpentane 등으로 나타났다. 이중 Toluene은 11.1~41.5 ppb로 나타나 다른 VOCs 물질과 비교하여 가장 높은 농도를 보였으며 다음으로는 *m,p*-Xylenes의 농도가 타 물질에 비해 비교적 높은 농도를 보였다.

연속측정이 이루어지지 못한 VOCs의 농도가 전체를 대변하기에는 어려움이 있으나 측정경로의 전반적인 VOCs의 농도와 VOCs 개별 물질의 농도를 통해 오존 농도에 영향을 미치는 물질의 추정 가능성이 높을 것으로 판단된다. 측정된 VOCs 물질에 대해 POCP (Photochemical Ozone Creation Potential, Derwent *et al.*, 2007)을 고려한 오존 생성 기여율을 구한 후, 이 값들을 표 7에 나타내었다. 측정기간 동안 전반적으로 Toluene과 *m,p*-Xylenes의 오존 생성 기여율이 약 60~80%로 가장 크게 나타났고, 이 밖에도 1,2,4-Trimethylbenzene, Ethylbenzene, Hexane 등의 물질들이 광양만 상층의 오존 생성에 주요한 기여를 한 것을 알 수 있었다. 특히, 6월 5일 오전에 측정된 Toluene의 경우 기여율이 전체 물질의 약 80%를 상회하였고, 8월 4일에는 *m,p*-Xylenes이 약 42%로 Toluene의 기

Table 6. Rank of VOCs concentration for sampling period (ppb).

	6/1	6/5 (am)		6/5 (pm)		7/30		8/4		
1	Toluene	21.0	Toluene	36.3	Toluene	14.9	Toluene	34.5	Toluene	7.2
2	224-TMPT	3.6	224-TMPT	11.9	<i>m,p</i> -Xylenes	2.0	<i>m,p</i> -Xylenes	4.7	<i>m,p</i> -Xylenes	6.0
3	n-Butane	3.1	234-TMPT	4.6	Propane	1.0	224-TMPT	3.8	Hexane	2.9
4	<i>m,p</i> -Xylenes	2.0	<i>m,p</i> -Xylenes	1.6	224-TMPT	0.9	234-TMPT	3.0	Ethane	1.3
5	n-Dodecane	1.7	Isopentane	1.4	n-Dodecane	0.8	n-Dodecane	3.0	2-MTPT	1.0
	8/5	8/8		8/9 (am)		8/9 (pm)		8/10		
1	Toluene	11.1	Toluene	41.5	Toluene	28.9	Toluene	11.7	Toluene	20.1
2	<i>m,p</i> -Xylenes	4.3	<i>m,p</i> -Xylenes	5.3	224-TMPT	7.8	<i>m,p</i> -Xylenes	4.6	Hexane	6.0
3	Ethane	2.1	n-Dodecane	2.1	Hexane	6.0	Hexane	2.3	<i>m,p</i> -Xylenes	5.7
4	224-TMPT	1.8	Ethane	2.1	<i>m,p</i> -Xylenes	4.7	n-Dodecane	1.9	2-MTPT	2.2
5	2-MTPT	1.5	224-TMPT	1.9	234-TMPT	3.8	2-MTPT	1.8	224-TMPT	2.1

* 2,2,4-Trimethylpentane: 224-TMPT, 2,3,4-Trimethylpentane: 234-TMPT, 2-Methylpentane: 2-MTPT

Table 7. Rate of ozone creation contribution of VOCs.

6/1	Rate (%)	6/5 AM	Rate (%)	6/5 PM	Rate (%)	7/30	Rate (%)	8/4	Rate (%)
Toluene	56.1	Toluene	80.0	Toluene	59.7	Toluene	61.3	<i>m,p</i> -Xylenes	41.1
<i>m,p</i> -Xylenes	10.6	<i>m,p</i> -Xylenes	7.0	<i>m,p</i> -Xylenes	16.0	<i>m,p</i> -Xylenes	16.4	Toluene	24.7
Cyclopentane	6.9	1,2,4-TMB	4.2	1,2,4-TMB	13.7	1,2,4-TMB	4.7	1,2,3-TMB	8.6
Isoprene	6.2	Isoprene	2.1	Propane	1.4	Ethylbenzene	1.7	Hexane	8.5
n-Butane	3.8	Isopentane	1.3	Isopentane	0.9	1,3,5-TMB	1.6	Ethylbenzene	2.9
8/5	Rate (%)	8/8	Rate (%)	8/9 AM	Rate (%)	8/9 PM	Rate (%)	8/10	Rate (%)
Toluene	36.3	Toluene	68.1	Toluene	51.7	Toluene	38.3	Toluene	42.5
<i>m,p</i> -Xylenes	27.6	<i>m,p</i> -Xylenes	17.4	<i>m,p</i> -Xylenes	16.6	<i>m,p</i> -Xylenes	29.8	<i>m,p</i> -Xylenes	23.8
1,3,5-TMB	5.0	Isopentane	1.31	Hexane	9.1	Hexane	6.4	Hexane	10.8
1,2,3-TMB	4.6	1,2,4-TMB	1.1	1,3,5-TMB	4.6	1,2,4-TMB	4.5	1,2,4-TMB	3.8
Ethylbenzene	3.8	Ethylbenzene	1.1	1,2,4-TMB	3.0	Ethylbenzene	2.5	Ethylbenzene	2.2

※ 1,2,3-Trimethylbenzene: 1,2,3-TMB, 1,3,5-Trimethylbenzene: 1,3,5-TMB, 1,2,4-Trimethylbenzene: 1,2,4-TMB

여울보다 더 높았다. 이는 광양만권 내 묘도에서 관측된 VOCs 지상결과와 유사한 것으로 나타났다(국립환경과학원, 2010). 따라서 광양만 상층의 VOCs 농도는 대체적으로 여수 산단 등 광양만권 내의 국지적 배출원의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

항공기를 이용, 상층의 오존 및 오존 전구물질을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 항공관측 중 상층의 오존, NO_y, CO, VOCs 일평균 농도를 보면 오존 평균 농도는 32.3~90.8 ppb의 분포를 보였으며 측정 경로 상 최고농도는 132 ppb로 나타났다. 우리나라 오존의 배경대기 평균농도 43 ppb와 수도권 지역(서울, 인천, 경기)의 평균농도 30 ppb보다도 높은 수준으로 나타났다. 항공관측동안 고도별 측정결과를 비교해 보면 오존의 경우 1,000 m에서 관측값이 500 m보다 약간 높은 것으로 나타났으나 최대 오존 값은 500 m에서 더 많이 관측되었다.

NO_y는 6.7~24.2 ppb의 분포를 보였으며, CO는 평균 0.152~0.487 ppm의 분포를 보였고 공단지역의 상공 및 남쪽 해양의 농도가 높게 나타났다. PAN의 측정기간 전체 평균농도는 0.1~0.6 ppb의 분포를 보였으며 관측기간 전체 평균값은 0.2 ppb를 나타내었다. 측정기간 중 최대 농도가 나타난 시점은 대체적으로 오존과 유사하여 광화학반응의 영향으로 생성되는 것으로 판단된다.

VOCs 측정결과 관측기간 중 VOCs 평균 농도는

48 ppb로 나타났으며 높은 농도를 보인 물질로는 Toluene, *m,p*-Xylene 등으로 나타났으며 오존생성의 기여도에서도 많은 비중을 차지하는 물질로 조사되었다. 광양만 상층의 VOCs 농도는 대체적으로 여수 산단 등 광양만권 내의 국지적 배출원의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 광양만권의 고농도 오존 발생원인 규명을 위한 연구조사로 하나로 진행되어 공간적인 오존 및 오존 전구물질의 분포 특성을 연구하였다. 향후, 본 연구의 측정결과를 토대로 광양만권의 오존의 특정 사례를 대상으로 지상 측정망 및 기상, VOCs 등과 같은 전구물질 측정, 오존존데, 테터존데 등의 결과와 연계하여 오존의 생성 및 이송에 대한 정확한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (2006) 고농도 오존 발생시 오존전구물질 및 기상인자 연구.
 국립환경과학원 (2010) 고농도 오존 발생 원인규명을 위한 정밀조사 (I).
 전라남도 (2004) 광양만권 대기환경규제지역 지정에 따른 실천계획수립.
 환경부 (2006, 2007, 2008, 2009) 국립환경과학원 대기환경연보.
 Derwent, R.G., M.E. Jenkin, N.R. Passant, and M.S. Pilling (2007) Reactivity-based strategies for photochemical ozone control in Europe, *Environmental Science & Policy*, 10(5), 445-453.

- Gaffney, J.S., R.M. Bornick, Y.H. Chen, and N.A. Marley (1998) Capillary gas chromatographic analysis of nitrogen dioxide and PANs with luminol chemiluminescent detection, *Atmos. Environ.*, 32(8), 1445-1454.
- Ha, H., S.D. Lee, J.K. Lee, C.O. Park, and T.R. Mun (2006) On Characteristics of Surface Ozone Concentration and Temporal · Spatial Distribution in Kwangyang-Bay, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(5), 642-652. (in Korean with English abstract)
- Han, J.S., Y.M. Kim, J.Y. Ahn, B.J. Kong, J.S. Choi, S.U. Lee, and S.J. Lee (2005) Spatial Distribution and Variation of Long-range Transboundary Air Pollutants Flux During 1997-2004, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(1), 99-106. (in Korean with English abstract)
- Helmig, D., J. Boulter, D. David, J.W. Birks, N.J. Cullen, K. Steffen, B.J. Johnson, and S.J. Oltmans (2002), Ozone and meteorological boundary-layer condition at Summit, Greenland, during 3-21 June 2000, *Atmos. Environ.*, 36, 2595-2608.
- Lee, H.W., S.Y. Park, S.H. Lee, and H.H. Leem (2009) Characteristics of Ozone Advection in Vertical Observation Analysis Around Complex Coastal Area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(1), 57-74. (in Korean with English abstract)
- Luria, M., R.J. Valente, S. Bairai, W.J. Parkhurst, and R.L. Tanner (2008) Airborne study of ozone formation over Dallas, Texas, *Atmos. Environ.*, 42, 6951-6958.
- Oh, I.B., Y.K. Kim, and M.K. Hwang (2004) Effects of Late Sea-breeze on Ozone Distributions in the Coastal Urban Area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(3), 345-360. (in Korean with English abstract)