

이에도 해양과학기지의 오존농도의 계절변화와 일변화 특징

Seasonal and Diurnal Variations of Surface Ozone at Ieodo in the East China Sea

신범철 · 이미혜* · 이재학¹⁾ · 심재설²⁾

고려대학교 지구환경과학과, ¹⁾한국해양연구원 해양환경연구본부

²⁾한국해양연구원 연안개발연구본부

(2005년 12월 31일 접수, 2007년 10월 2일 채택)

Beomcheol Shin, Meehye Lee*, Jaehak Lee¹⁾ and Jae Seol Shim²⁾

Department of Earth & Environmental Sciences, Korea University

¹⁾*Division of Climate and Environment Research, Korean Ocean Research
and Development Institute*

²⁾*Division of Coastal and Harbor Engineering Research, Korean Ocean Research
and Development Institute*

(Received 31 December 2005, accepted 2 October 2007)

Abstract

We examined diurnal and seasonal variations of ozone (O₃) concentrations and its relation to meteorological parameters observed at the Ieodo Ocean Research Station (32.07° N, 125.10° E, 36 m above sea level) during June 2003 and May 2005. Over the 2-year period, the mean ozone concentration was 49.5 ± 15.5 ppbv. Ozone concentrations show great variability with a monthly mean up to 68.2 ppbv in May 2005 and seasonal variations with being highest in spring and fall, and lowest in summer. However, the amplitude of diurnal variation was less than ~4 ppbv with a maximum at 3~4 p.m. and minimum at 7~8 a.m. HYSPLIT backward air trajectory indicated that the air masses with higher ozone came from the north or northwest and those with lower ozone arrived mainly via southerly or southeasterly. Ozone distributions at Ieodo Ocean Research Station were observed to be significantly impacted by long-range transport and regional scale air circulation.

Key words : Ieodo, Ozone, Marine boundary layer, Long-range transport

1. 서 론

오존은 OH를 생성하여 대류권 화학작용의 시발점

이 되며, 또한 그 자체가 산화제로 작용하기도 한다. 따라서 기체와 에어로졸의 화학적 변화에 영향을 미쳐 대기 조성을 좌우하는 중요한 역할을 한다. 또한 오존은 중요한 온실기체로 대류권에서의 농도 증가는 기후 변화에도 영향을 미칠 수 있다. 뿐만 아니라

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-3290-3178, E-mail : meehye@korea.ac.kr

인체에 직접적으로 해로운 영향을 주며 농작물이나 생물의 성장에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Seinfeld and Pandis, 1998). 그러므로 대류권 오존의 생성과 소멸, 시공간적 분포, 그리고 이를 결정하는 과정을 이해하는 것은 대기화학의 주요한 과제가 되어왔다 (Fishman and Brackett, 1997).

지난 수십 년간 북태평양 중위도 지역의 청정 해양경계층에서 오존은 봄철에 뚜렷한 최고농도를 보였다 (Pochanart *et al.*, 1999; Parrish *et al.*, 1998; Oltmans and Levy III, 1994; Sunwoo *et al.*, 1994). 중위도 지역에서 봄철에 오존농도가 증가하는 원인에 대해서는 많은 논란이 있다 (Monks *et al.*, 2000). 성층권에서 유입되는 오존의 양이 증가한 결과라는 것과 (Oltmans and Levy III, 1994), 대류권 내에서 광화학적 생성에 의한 것이라는 의견이다 (Monks *et al.*, 2000). Penkett *et al.* (1993)은 겨울철에 생성되는 CO나 NMHCs와 같은 미량기체들의 광화학 반응이 봄철 오존 생성을 가속화시킬 수 있다고 주장했다. 또한 Kajii *et al.* (1998)은 미량기체와 오존의 동시 측정을 통해 봄철 오존의 농도증가가 성층권으로부터의 유입보다는 대류권 내에서의 광화학적 생성에 의한 결과라는 것을 보였다. 하지만, 봄철 오존 증가를 가져오는 기작에 대한 설명은 대류권 화학에서 여전히 중요한 문제로 남아있다 (Monks *et al.*, 2000). Derwent *et al.* (1998)은 Mace Head에서 오존과 대류기원의 미량기체들 (N_2O , CO, CO_2)의 측정을 통해 청정 해양경계층에서 봄철 오존농도에는 그 기원과 관계 없이 오염지역에서의 광화학반응과 이동 과정이 중요한 영향을 미친다고 주장했다. 한편, 봄철 오존 증가의 원인을 규명하기 위해 많은 3차원 모델을 적용해왔다. Roelofs *et al.* (1997)은 봄철 오존 증가가 오염지역에서 생성된 오존이 여름철보다는 봄철에 수명이 상대적으로 길어져 청정지역까지 이동했기 때문이라고 설명했다. Lelieveld and Dentener (2000) 또한 봄철 오존 증가에 원인지역으로부터 이동한 오염물질이 중요함을 강조했다. 국내 연구결과에서도 오존은 봄철에 최고농도를 보이는 것으로 관찰되었다 (김영성, 1996; 김용표 등, 1996; 박경윤 등, 1994).

대류권 측정결과 오존은 계절변화를 하는 것으로 나타났다. 유럽, 북아메리카, 오스트레일리아에서 측정된 지표 오존 및 산화제의 농도 역시 뚜렷한 계절변화를 보여주고 있다 (Oltmans and Levy III, 1994;

Oltmans and Komhyr, 1986). 최근에는 국내에서도 대기오염 물질들의 배경농도에 대한 관심이 증가되어, 박경윤 등 (1994)은 제주도 고산지역 측정소에서 주요 대기오염물질 (SO_2 , NO, NO_x , O_3) 들을 측정하고, 오존이 봄철에 최고농도가, 여름철에 최저농도가 나타나 뚜렷한 계절변화를 하고 있음을 보였다. 이러한 현상은 일본 청정지역의 오존농도의 계절변화에서도 잘 나타나고 있다 (Sunwoo *et al.*, 1994). 대류권 오존의 계절적 변동은 지역적인 현상들뿐만 아니라 광역적 규모에서 일어나는 현상들 모두를 포함한 복잡한 과정에 의한 결과이다. 그러므로 오존농도변화를 이해하기 위해서는 화학적 작용과 물리적 침적작용 및 이동이 모두 고려되어야 한다 (Monks *et al.*, 2000).

이어도 해양과학기지는 한반도 주변에 설치된 우리나라 최초의 해양과학기지로써 우리나라와 중국, 일본의 가운데 위치하며, 주변지역으로부터 충분히 멀리 떨어져있기 때문에, 지역적인 영향을 받지 않고 아시아 대륙에서 배출되는 대기 오염물질의 장거리 이동을 관찰하기에 적합한 곳이다. 본 연구는 이어도 해양과학기지에서 오존농도변화를 관측하고 오존농도분포를 결정하는 요인을 규명하기 위하여 수행되었다.

2. 실험 방법

이어도 해양과학기지 ($32.07^\circ N$, $125.10^\circ E$, 36 m above sea level)는 제주도 남쪽의 마라도에서 149 km, 일본의 가고시마 (Kagoshima)에서 514 km, 중국의 상하이 (Shanghai)에서 362 km 떨어진 곳에 위치하고 있다 (그림 1). 오존분석기 (Model 49C Analyzer, Thermo. Inc)는 해수면으로부터 29 m 높이에 위치한 중앙 갑판의 연구실 안에 설치하였고, 10분 동안 평균한 값이 중앙 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 외부의 공기는 중앙 갑판 바로 아래에 설치된 공기주입구로부터 PFA (Perfluoroalkoxy) tubing을 통하여 오존분석기에 채집되었다. 오존분석기의 검출한계와 정확도는 모두 1 ppbv이다. 오존분석기는 한 달 내지 두 달에 한 번 정도 기지를 방문할 때마다 내장된 오존발생기를 이용하여 보정하였다. 또한 오존의 1차 표준 물질을 이용해 보정한 동일 기종의 오존분석기에서 생성된 일정 농도의 오존을 이어도 기지의 오존분석

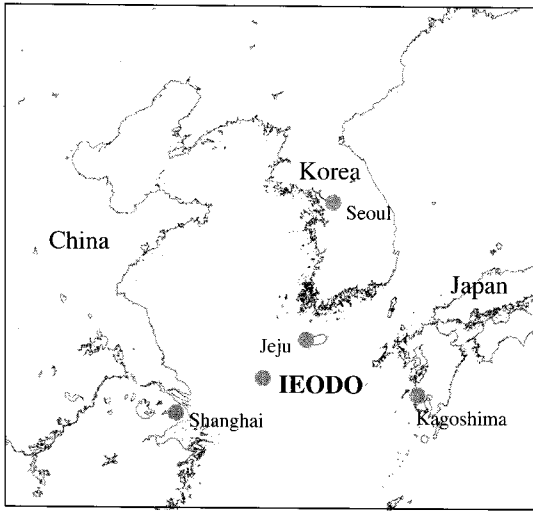


Fig. 1. The location of Ieodo Ocean Research Station.

기로 측정된 후 두 기계에서 측정된 결과를 비교하여 표준화하였다.

2003년 6월부터 2005년 5월까지 2년 동안 측정된 오존 자료는 한국표준시를 기준으로 1시간 단위로 평균하였다. 10분 평균한 오존자료를 1시간 단위로 평균할 때, 앞뒤 각각 5개씩 10개 자료에 대한 평균 (\bar{x})과 표준편차 (σ)를 구하여 $\bar{x} \pm 2\sigma$ 보다 큰 값은 포함시키지 않았다. 이어도 기지의 정전이나 기기를 보정할 때 자료도 포함시키지 않았다. 이러한 방법은 측정소 자체에서 발생할 수 있는 오차를 제거하는 효과적인 방법이다 (Cvitaš *et al.*, 2004).

기상변화는 오존뿐만 아니라 오존 전구물질들의 이동에도 영향을 주기 때문에 오존의 농도변화를 이해하기 위해서는 기상인자들 또한 함께 분석할 필요가 있다. 따라서 같은 기간 동안 이어도 기지에서 측정된 10분 평균 기상자료 (풍향, 풍속, 온도, 습도, 강우, 기압, 일사량)를 1시간 단위로 평균하였다. 또한 오존의 농도변화를 해석하기 위하여 미국 NOAA에서 개발된 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델 (Draxler and Rolph, 2003)을 이용하여 측정기간 동안 00시, 06시, 12시, 18시 이렇게 하루에 4개씩, 각 궤적마다 1시간 간격의 5일 동안의 궤적을 100 m와 1500 m 상공에 대해서 역궤적을 계산하여 공기의 이동경로를 추적하였다.

Table 1. Statistics for the ozone concentrations observed at Ieodo from June, 2003 to May, 2005.

Season	Number of data*	Mean (ppbv)	Median (ppbv)	STD (ppbv)
2003				
Summer (Jun. ~ Aug.)	8850	37.6	35.0	17.2
Fall (Sep. ~ Nov.)	13104	47.2	46.7	14.4
Winter (Dec. ~ Feb.)	12920	50.5	49.6	8.0
2004				
Spring (Mar. ~ May)	13248	51.1	52.1	12.4
Summer (Jun. ~ Aug.)	13248	33.1	30.7	13.7
Fall (Sep. ~ Nov.)	13104	58.8	59.8	14.8
Winter (Dec. ~ Feb.)	12773	50.8	50.5	6.9
2005				
Spring (Mar. ~ May)	13248	63.4	64.5	13.9
Total	100495	49.5	50.4	15.6
Spring (Mar. ~ May)	26496	56.7	56.9	13.9
Summer (Jun. ~ Aug.)	22098	33.8	30.9	14.5
Fall (Sep. ~ Nov.)	26208	52.4	52.7	15.7
Winter (Dec. ~ Feb.)	25693	50.6	50.0	7.6

*1-hour average data

3. 결과 및 고찰

이어도 기지에서 2003년 6월부터 2005년 5월까지 2년 동안 측정된 오존의 1시간 평균농도는 49.5 ± 15.5 ppbv이었으며, 가장 높은 월별 평균 농도는 2005년 5월의 68.2 ppbv이고, 가장 낮은 농도는 2003년 7월의 24.5 ppbv이었다. 표준편차는 여름과 가을이 크고 겨울이 낮았다 (표 1). 2년 동안의 월별 변화를 살펴보면 1월은 49.6 ppbv 정도의 비교적 높은 농도를 보이고 3월까지 농도가 증가하여 61.0 ppbv의 최고값을 보인다. 이후 7~8월까지 농도가 하강하여 25.1 ppbv의 최저값을 보이고, 다시 급격히 상승하여 10월쯤 58.5 ppbv까지 농도가 상승한 뒤 다시 1월까지 하강하는 양상을 반복한다 (그림 2). 여름을 제외한 모든 계절 동안 50 ppbv 이상의 높은 농도를 보이며 그 변화폭 역시 상당히 크다. 계절별로 보았을 때 봄철 (3~5월)은 오존농도가 가장 높고 여름철 (6~8월)은 오존농도가 가장 낮으며 가을철 (9~11월)부터 농도가 다시 증가하여 봄철과 함께 최고농도를 보이고, 겨울철 (12~2월)은 약간 농도가 낮아지지만 전체적으로 높은 농도를 유지한다.

2년 동안 이어도 기지의 기상 측정 결과, 비는 지속적으로 않고 간헐적으로 내리서 하루 최고 103

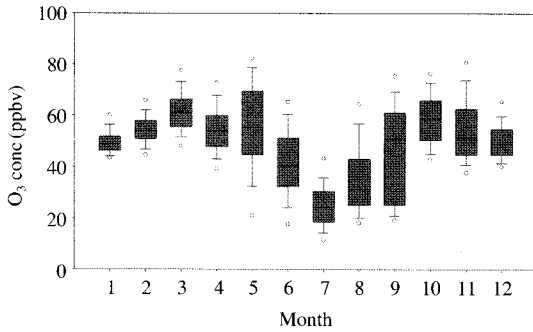


Fig. 2. Monthly distribution of ozone concentrations from June 2003 to May 2005.

mm의 강우량을 보였으며, 2004년 5월에는 봄철임에도 불구하고 많은 비가 내렸던 것이 특징이다(전체 강우량 13,019 mm 중 3,636 mm). 연평균 온도는 16.4 °C로 비교적 온난하였고, 상대습도는 측정기간 내내 60% 이상으로 다습하였으며, 연평균 풍속은 8.5 m/s로 바람이 강하게 불었다(그림 3).

앞에서도 언급했듯이 중위도 지역에서는 일반적으로 봄철에 오존농도가 최고값을 보인다(Pochanart *et al.*, 1999; Parrish *et al.*, 1998; Sunwoo *et al.*, 1994). 이어도 기지 역시 봄철 오존농도가 높게 나타났는데 이에 대한 정확한 원인규명을 위해서는 오존 전구물질의 동시 측정이 필요하다. 여름철에 최저 농도가 나타나는 것은 청정 해양경계층에서 관찰되는 전형적인 양상이다(Oltmans and Levy III, 1994; Winkler, 1988). 공기가 저위도 지역에서 불어올 때 오존농도는 대체로 감소하는 경향을 보이는데(Oltmans and Levy III, 1994), 이어도에서도 여름철 태평양에서 바람이 불어왔을 때 오존농도가 낮게 나타났다.

북태평양 지역의 다른 측정소들과 비교한 결과, 이어도와 가장 가까운 Yonagunijima (24.28° N, 123.10° E)에서는 여름에 가장 낮고 봄과 가을, 그리고 겨울에 높은 농도를 보여 이어도 기지와 유사한 경향을 보였다(그림 4-a). 중앙 태평양에 위치하는 Minamitorishima (24.18° N, 153.58° E)에서도 여름에 역시 가장 낮은 농도를 보였지만 2월이 가장 높은 농도를 보여 북태평양 지역의 전형적인 패턴(Monks *et al.*, 2000)을 보였다(그림 4-b). Trinidad Head (41.05° N, 124.15° W)와 Ryori (39.02° N, 141.50° E)는 여름에 낮고 봄에 뚜렷한 최고 농도를 보였지만 가을과 겨

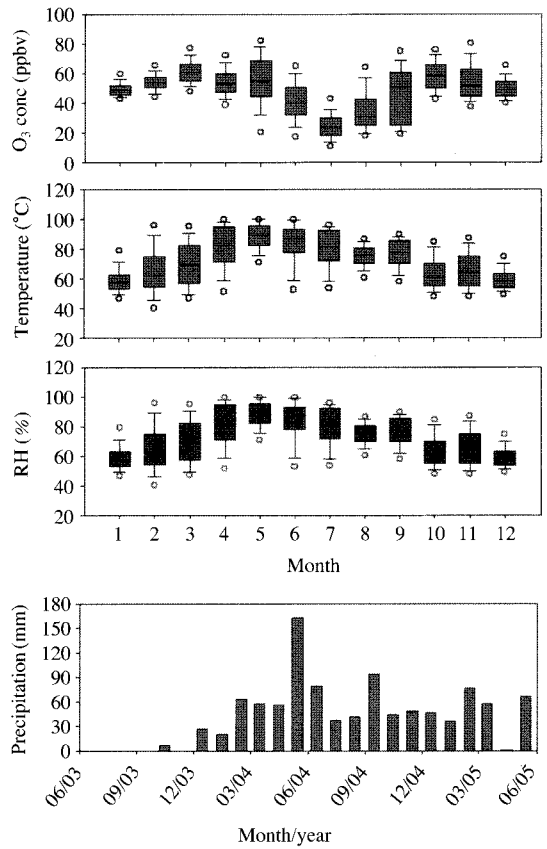


Fig. 3. Monthly distributions of meteorological parameters at leodo from June 2003 to May 2005.

울엔 농도가 높지 않았다(그림 4-c, d). 이는 북반구 중위도 지역의 청정 해양경계층에서 보여주는 일반적인 양상이다. 하와이의 Mauna Loa (19.54° N 155.58° W)는 봄철에 다른 계절에 비해 수 ppbv 정도 높은 값을 보이지만(Ridley *et al.*, 1998) 뚜렷한 계절별 경향성을 보이지 않았다(그림 4-e). 이로써 북태평양 지역의 오존농도는 일반적으로 여름에 낮고 봄이나 가을에 농도가 높게 나타나 이어도 기지와 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다. Yonagunijima는 Minamitorishima와 동위도 상에 위치하지만 일반적으로 Yonagunijima의 오존농도가 Minamitorishima보다 높게 나타나며, 가을부터 이른 봄까지의 오존농도는 Ryori보다도 높은데, 이는 아시아 대륙으로부터의 오염물질에 의한 영향을 받고 있음을 말해준다. 2003년 6월부터 2004년 12월까지의 평균 오존농도는 각

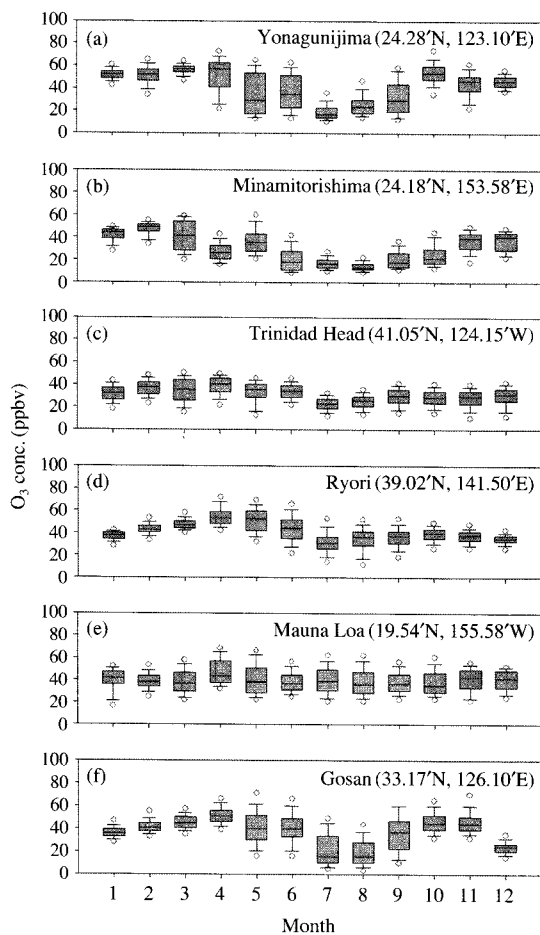


Fig. 4. Monthly distributions of ozone concentrations from June 2003 to December 2004 at (a) Yonagunijima (Japan), (b) Minamitorishima (Japan), (c) Trinidad Head (USA), (d) Ryori (Japan), (e) Mauna Loa (Hawaii, USA), and (f) Gosan (South Korea).

각 Yonagunijima가 39.7 ppbv, Minamitorishima가 27.9 ppbv, Trinidad Head가 30.0 ppbv, Ryori가 38.4 ppbv, 그리고 Mauna Loa가 39.7 ppbv로 나타났다. 같은 기간 동안 이에도 기지의 평균 오존농도는 48.0 ppbv로 비교한 다른 측정소들보다 10~20 ppbv 정도 높게 나타났다. 이로써 이에도 기지는 아시아 대륙으로부터 배출되는 대기 오염물질의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히 제주도 서쪽 끝 해안에 위치한 고산 (33.1°N, 126.1°E, 60 m above sea level)에서 측정된 월별로 평균한 오존 자료와 비교하였다(그림 4-f). 두 측정소 모두 봄부터 이른 가을(3월~10월)

까지의 농도변화가 크며 늦은 가을부터 겨울(11월~2월)까지는 크게 변하지 않는 유사한 양상을 보인다. 하지만 이에도의 오존농도가 고산 오존농도보다 대략 14 ppbv 정도 높았다. 위치적 특성을 고려할 때에는 이에도 기지가 아시아 대륙의 영향을 좀 더 직접적으로 받고 있음을 말해준다.

2년 동안의 측정결과를 계절별로 나누어 농도별 빈도분포를 살펴보았다(그림 5). 봄(3~5월)에는 10~90 ppbv 범위에서 정규분포와 유사한 농도분포를 보였으며 50~70 ppbv의 높은 농도에서 최대빈도가 나타났다. 여름(6~8월)은 20~30 ppbv의 낮은 농도가 대부분을 차지했으며, 가을(9~11월)은 40~60 ppbv 사이의 넓은 범위에서 최대빈도가 나타났다. 봄부터 가을까지는 10~90 ppbv의 넓은 구간에서 다양한 농도분포를 보인 반면 겨울(1~2월)은 40~70 ppbv까지 좁은 구간에 농도분포를 보였으며 50 ppbv 근처에서 분명한 최대빈도를 보였다. 서울/수도권 지역처럼 국지배출에 의하여 오존농도가 상승할 때에는 밤에는 동일지역의 NO에 의해 오존이 파괴되어 0 가까이 떨어지므로 아래로 불룩한 형태를 취한다(Ghim and Chang, 2000; 김영성, 1996). 이동의 영향이 클수록 고농도와 저농도가 함께 줄어들어 위로 불룩하게 되며 결국에는 인위적인 배출의 영향에 따라서 어느 농도 범위로 수렴하게 된다. 앞으로 살펴볼 일변화 경향에서 더 명확히 알 수 있겠지만 이에도의 농도별 빈도분포 또한 위로 불룩한 형태를 취하고 있어서 이동에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 봄과 겨울에는 최대빈도가 하나인 정규분포에 가까운 분포를 보인 반면 여름과 가을에는 각각 50 ppbv와 20 ppbv 부근에서 2차 최고농도가 나타나는 쌍봉분포(bimodal distribution)를 보였다. 2년 동안 4개 방향에서의 풍향에 대한 빈도수를 살펴보면 여름~가을동안 주된 풍향이 북서에서 남동으로, 그리고 다시 북풍으로 바뀌는데(그림 6), 이러한 풍향의 변화로 인해 오존농도분포에 태평양 지역과 아시아 대륙 모두의 영향이 함께 나타나는 것으로 보인다.

그림 7은 각각 왼쪽에 풍향별 빈도수와 평균 오존농도를, 오른쪽에 HYSPLIT4 모델을 활용한 역적 분석결과 각 계절별로 나타난 주된 궤적을 보여준다. 봄철은 대체로 북서쪽에서 바람이 불어오며 높은 오존농도를 보인다. 또한 봄철 고농도의 오존은 몽골을

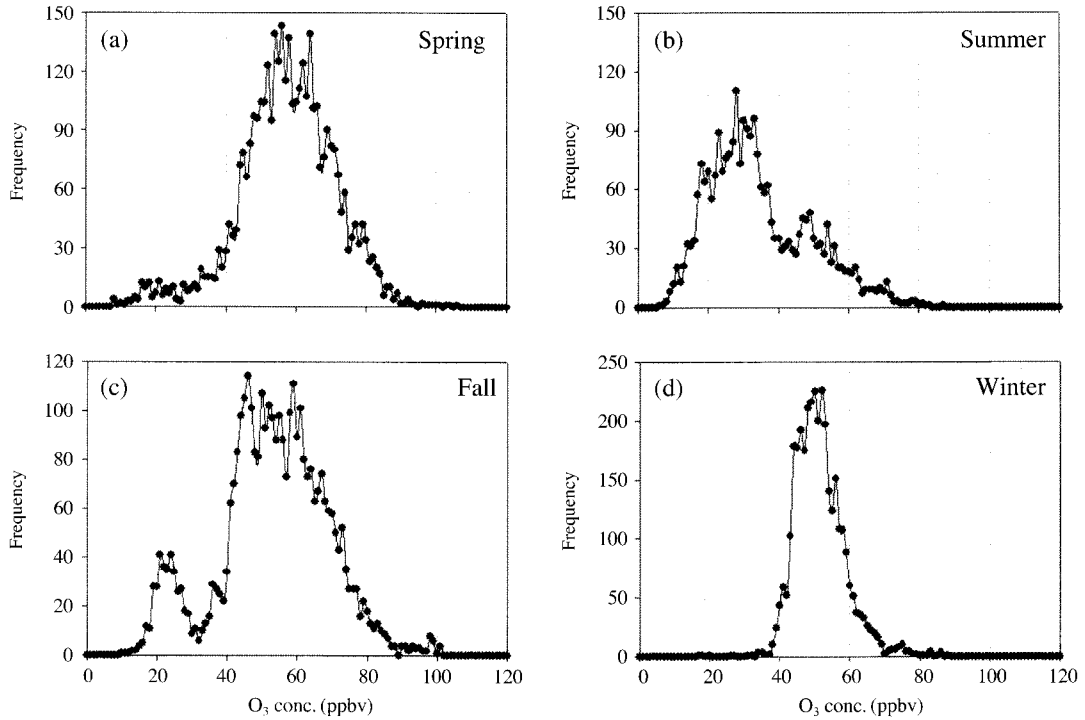


Fig. 5. Frequency distributions of ozone concentrations at leodo in (a) spring (March~ May), (b) summer (June~ August), (c) fall (September~ November), and (d) winter (December~ February).

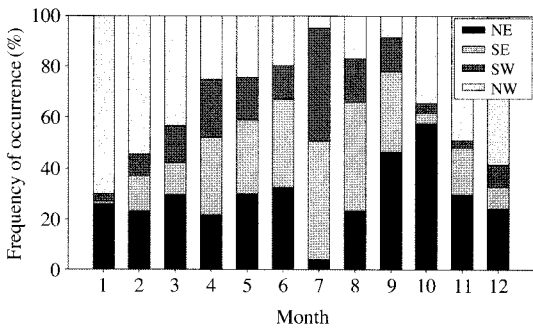


Fig. 6. Frequency distribution of wind direction sorted into four directional zones.

지난 공기가 중국의 베이징을 중심으로 한 화북 공업지역을 거쳐 도달할 때 나타나는 것으로 보인다 (그림 7-a). 여름철에는 남풍 내지 남동풍이 우세한데 이때의 오존농도는 매우 낮다. 이러한 여름철 낮은 농도의 오존은 태평양으로부터 기원하는 것으로 나타났다(그림 7-b). 가을철은 북서풍 내지 북동풍이

불어 이때의 오존농도는 매우 높게 나타난다. 가을의 경우 중국의 길림성을 중심으로 한 동베이 공업지역과 북한을 지난 공기가 황해를 거쳐 도달하였다 (그림 7-c). 겨울은 대체로 북서풍이 부는데 풍향에 따른 오존의 변화가 뚜렷하지 않다. HYSPLIT에서도 겨울은 중국으로부터 빠르게 공기가 이동해왔다(그림 7-d). 풍향 및 풍속 자료와 오존농도의 분석결과 고농도 오존은 늦은 가을에서 이른 봄(11~3월)까지 북쪽 및 북서쪽에서 바람이 불어올 때 나타나는 것으로 보였다.

1시간 평균한 값을 이용하여 2년 동안의 일변화와 계절에 따른 일변화를 그림 8에 비교하였다. 북태평양 지역에서 측정된 오존의 일변화는 여름과 겨울 모두 3~4 ppbv 정도이며 (Watanabe *et al.*, 2005; Jaffe *et al.*, 1996), 이어도 기지의 전체 평균 일변화 역시 계절에 관계없이 4 ppbv 정도로 매우 작게 나타났다. 그러나 일반적인 청정 해양경제층에서 관측되는 것과는 다르게 낮 동안 오존농도는 감소하지 않고 증

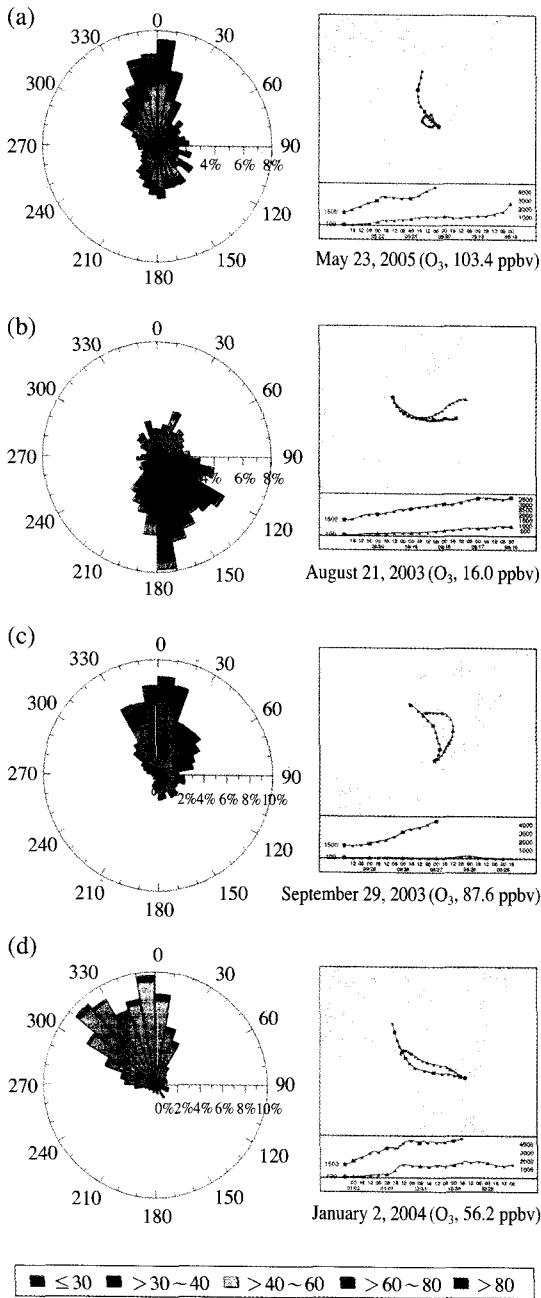


Fig. 7. Averaged ozone concentrations as a function of wind directions and typical trajectories of air masses in (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter.

가하였다. 청정 해양경계층에서 오존농도는 낮보다 밤에 더 높게 나타나는 경향이 있다(Bremaud *et al.*,

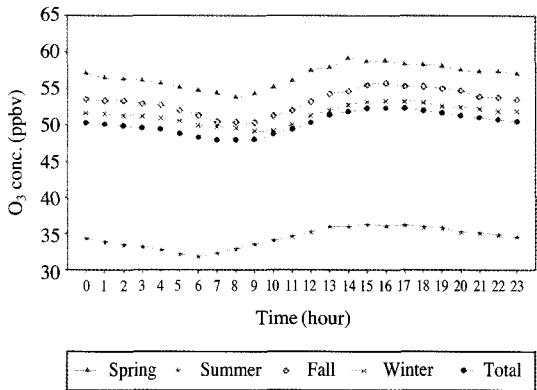


Fig. 8. Mean diurnal distributions of ozone concentrations in each season from June 2003 to May 2005.

1998; Ayers *et al.*, 1997). 낮 동안 오존은 광분해되거나 HO_x와의 촉매반응에 의해 농도가 감소한다. 그리고 밤 동안 소멸작용이 없어지며 자유대류권으로부터 오존이 직접 유입되어 농도가 다시 증가하는 것으로 알려져 있다(Bremaud *et al.*, 1998; Ayers *et al.*, 1997). 그러나 이어도 기지는 계절에 관계없이 오전 7~8시에 가장 낮고 오후 3~4시에 가장 높아 다른 청정 해양경계층에서 보이는 일변화와는 다른 경향을 보였다. 낮 동안 오존농도가 상승하는 것은 전구물질에 의해 광화학적으로 소멸되는 양보다 광화학적으로 생성되는 양이 많기 때문이다. 한편 밤에는 광화학적 작용은 멈추지만 해수면으로의 침적과정 때문에 일출 전까지 농도는 계속 줄어드는 것으로 보인다. 그런데, 각 계절별 일변화의 오존농도분포 범위는 봄, 가을, 겨울, 그리고 여름의 순으로 확연하게 나뉘며 그 차이는 ~20 ppbv 정도로 일변화양(~4 ppbv)에 비해 매우 크다. 따라서 이어도 기지는 대기 오염물질의 장거리 이동에 의한 영향을 가장 크게 받고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이어도 해양과학기지는 중국과 한국, 일본 사이에 위치하여 아시아 대륙에서 배출되는 대기 오염물질의 이동과 그 영향을 연구하는데 적합한 곳이다. 계절별 평균농도는 다른 북태평양 주변의 중위도 지역에서 보이는 것처럼 여름에 최저, 봄에 최고값을 보

였다. 계절별 오존농도의 빈도분포에서 이어도 지역은 대기 오염물질의 장거리 이동에 의한 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며, 특히 여름과 가을은 풍계가 변화하면서 아시아 대륙과 태평양의 영향이 함께 나타남을 알 수 있었다. HYSPLIT4를 이용한 역궤적 분석결과, 영향을 주는 원인지역이 변화하면서 오존농도의 계절변화가 나타남을 확인할 수 있었다. 일변화는 오후 늦게 최대 농도가 나타나지만 그 변화가 4 ppbv 이하로 매우 작았다. 이로써 이어도에서 관측된 오존의 농도분포는 공기의 역궤적 분석과 기상자료를 종합해볼 때, 한반도를 포함한 아시아 주변 대륙의 영향이 큰 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김영성 (1996) 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, 한국대기보전학회지, 12(1), 55-66.
- 김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경윤, 허철구 (1996) 고산에서의 1994년 3~4월 측정연구 : (II) 기체상 대기오염물질의 특성, 한국대기보전학회지, 12(1), 91-99.
- 박경윤, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준 (1994) 제주도 고산 측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.
- Ayers, G.P., H. Granek, and R. Boers (1997) Ozone in the marine boundary layer at Cape Grim Model simulation, *J. Atmos. Chem.*, 27, 179-195.
- Bremaud, P.J., F. Taupin, A.M. Thomson, and N. Chaumerialiac (1998) Ozone nighttime recovery in the marine boundary layer: measurements and simulation of the ozone cycle at Reunion Island, *J. Geophys. Res.*, 103, 3463-3473.
- Cvitaš, T., M. Furger, R. Girgzdiene, L. Haszpra, N. Kezele, L. Klasinc, A. Planinšek, M. Pompe, A.S.H. Prevot, H.E. Scheel, and E. Schuepbach (2004) Spectral analysis of boundary layer ozone data from the EUROTRAC TOR network, *J. Geophys. Res.*, 109, D02302, doi:10.1029/2003JD003727.
- Derwent, R.G., P.G. Simmonds, S. Seuring, and C. Cimmer (1998) Observation and interpretation of the seasonal cycles in the surface concentrations of ozone and carbon monoxide at Mace Head, Ireland from 1990 to 1994, *Atmos. Environ.*, 32, 144-157.
- Draxler, R.R. and G.D. Rolph (2003) HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY. Website <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Fishman, J. and V.G. Brackett (1997) The climatological distribution of tropospheric ozone derived from satellite measurements using version 7 Total Ozone Mapping Spectrometer and Stratospheric Aerosol and Gas Experiment data sets, *J. Geophys. Res.*, 102, 19275-19278.
- Ghim, Y.S. and Y.-S. Chang (2000) Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990-1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.
- Jaffe, D.A., R.E. Honrath, L. Zhang, H. Akimoto, A. Shimizu, H. Mukai, K. Murano, S. Hatakeyama, and J. Merrill (1996) Measurements of NO, NOy, CO and O₃ and estimation of the ozone production rate at Oki Island, Japan, during PEM-West, *J. Geophys. Res.*, 101, 2037-2048.
- Kajii, Y., K. Someno, H. Tanimoto, J. Hirokawa, H. Akimoto, T. Katsuno, and J. Kawara (1998) Evidence of the seasonal variation of photochemical activity of tropospheric ozone: continuous observation of ozone and CO at Happo, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3305-3508.
- Lelieveld, J. and F.J. Dentener (2000) What controls tropospheric ozone?, *J. Geophys. Res.*, 105, 3531-3551.
- Monks, P.S., G. Holland, G. Salisbury, S.A. Penkett, and G. P. Ayers (2000) A seasonal comparison of ozone photochemistry in the remote marine boundary layer, *Atmos. Environ.*, 34, 2547-2561.
- Oltmans, S.J. and W.D. Komhyr (1986) Surface ozone distributions and variations from 1973-1984 measurements at the NOAA geophysical monitoring for climatic change baseline observatories, *J. Geophys. Res.*, 91, 5229-5236.
- Oltmans, S.J. and H. Levy III (1994) Surface ozone measurements from a global network, *Atmos. Environ.*, 28, 9-24.
- Parrish, D.D., M. Trainer, J.S. Holloway, J.E. Yee, M.S. War-

- shawsky, and F.C. Fehsenfeld (1998) Relationships between ozone and carbon monoxide at surface sites in the North Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 103(D11), 13357-13376.
- Penkett, S.A., N.J. Blake, P. Lightman, A.R.W. Marsh, P. Anwyl, and G. Butcher (1993) The seasonal variation of non-methane 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.
- Pochanart, P., J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto, and M. Nakao (1999) The influence of regional-scale anthropogenic activity in the northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and its precursors observed at Oki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 104, 3621-3632.
- Ridley, B., J. Walega, G. Hübler, D. Montzka, E. Atlas, D. Hauglustaine, F. Grahek, J. Lind, T. Campos, R. Norton, J. Greenberg, S. Schauffler, S. Oltmans, and S. Whittlestone (1998) Measurements of NO_x and PAN and estimates of O₃ production over the seasons during Mauna Loa Observatory Photochemistry Experiment 2, *J. Geophys. Res.*, 103, 8323-8339.
- Roelofs, G.-J., J. Lelieveld, and R. van Dorland (1997) A three-dimensional chemistry/general circulation model simulation of anthropogenically derived ozone in the troposphere and its radiative climate forcing, *J. Geophys. Res.*, 102, 23389-23401.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, J. Wiley & Sons, New York, 1326 pp.
- Sunwoo, Y., G.R. Chamichael, and H. Ueda (1994) Characteristics of background surface ozone in Japan, *Atmos. Environ.*, 28, 25-37.
- Watanabe, K., Y. Nojiri, and S. Kariya (2005) Measurements of ozone concentrations on a commercial vessel in the marine boundary layer over the northern North Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 110, D11310, doi :10.1029/2004JD005514.
- Winkler, P. (1988) Surface ozone over the Atlantic, *J. Atmos. Chem.*, 7, 73-91.