

미국 서북부 Cheeka Peak에서의 수송에 따른 봄철 CO와 O₃의 특성

전 병 일
신라대학교 바이오환경공학부
(2002년 3월 19일 접수; 2002년 6월 18일 채택)

Characteristics of Springtime CO and O₃ according to Transport at Cheeka Peak Observatory(CPO), Northwest of USA

Byung-II Jeon
Dept. of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
(Manuscript received 19 March, 2002; accepted 18 June, 2002)

Cheeka Peak is a unique site for monitoring the background chemistry and aerosol contents of pristine marine air at mid-latitude. During long-range onshore winds that occur frequently throughout the year, it is predicted to have the cleanest air in the northern hemisphere. Measurements of CO and O₃ were conducted at Cheeka Peak Observatory(CPO) on the northwestern tip of Washington state, USA during March 6 ~ May 29, 2001. The data have been segregated to quantify the mixing ratio of these species in the Pacific marine atmosphere. Also the marine air masses were further classified into four categories based on 10-day backward isentropic trajectories; high, mid, and low latitude and those which had crossed over the Asian industrial region. The diurnal variation of CO and O₃ at CPO showed a similar tendency of background measurement site. When marine air mass flowed to CPO, CO concentration was lower and O₃ was similar or higher than those of total data. The westerly flow from ocean, not easterly from continent occurred the high concentration of CO and O₃ at CPO. Using the trajectory segregation of marine air mass, the comparison of concentration according to latitude calculated. the CO concentration of Asian trajectory was lower than other latitudes, O₃ concentration was higher.

Key words : Cheeka Peak Observatory, backward isentropic trajectory, marine air mass

1. 서론

일산화탄소와 오존은 자연적 및 인위적인 원인에 의해 발생하며, 대류권의 산화화학(oxidation chemistry)에서 중요한 역할을 한다. 일산화탄소는 화석 연료연소, 산불, 비메탄탄화수소류와 메탄의 산화에 의해 생성된다. 인위적인 오염은 주로 거대한 산업 단지와 관련되어 발생하는데 비해, 자연적인 오염은 메탄의 산화와 같이 간접적으로 발생한다.¹⁾ 또한 일산화탄소는 생애주기가 1~2개월 정도로 길기 때문에 대륙이나 대륙간을 이동할 수 있다. 오존은 대류

권화학에서 중요한 역할을 하며, 대류권에서 가장 중요한 산화제인 OH 라디칼을 생성하는 일차적인 원인물질이며, 성층권 오존의 유입이나 광화학적 반응에 의해 생성된다.²⁾ 대류권의 광화학적 오존 생성은 질소산화물, 탄화수소류와 자외선이 필요하고, 대류권 대부분 지역에서 오존생성의 기인물질은 질소산화물이다. 질소산화물의 인위적인 배출의 증가에 의해, 대류권의 오존은 산업화 이전의 농도보다 증가되었다.³⁾ 특히 질소산화물 배출이 급속하게 증가된 동아시아의 오존농도는 눈에 띄게 증가하였다.^{4,5)}

배경지역에서 CO와 비메탄탄화수소(NMHC)를 비롯한 많은 오염물질의 농도가 봄철에 가장 높은 값을 나타내었다.^{6~8)} 겨울철의 CO는 OH와의 반응에 의해 농도가 감소하고, 부분적으로 오염지역으로부터

Corresponding Author : Byung-II Jeon, Dept. of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone : +82-51-309-5056
E-mail : bijeon@silla.ac.kr

터 빠른 수송에 의한 것이라 할 수 있다.^{9~11)} 인위적인 배출물에 의한 광화학 반응의 결과로 CO와 O₃은 때때로 거대한 인위적 배출원의 하향지역에서 높은 상관관을 보이는 경우도 있다.¹²⁾ Parrish¹²⁾와 Parrish *et al.*¹³⁾은 미국 북미 연안에서 측정된 자료로부터 CO와 O₃사이의 중요한 상관관이 있음을 통계적으로 밝혔다. 또한 Jaffe *et al.*¹⁴⁾은 일본의 Oki섬에서 관측한 자료에서 CO와 O₃사이의 약하나마 통계적으로 유의한 상관관을 보였다. 그러나 CO와 O₃사이의 항상 정상관이거나 통계적으로 유의한 관계가 있는 것은 아니다. 정상관은 CO와 NO_x가 동시에 배출되는 지역이나 O₃이 광화학적으로 생성되는 지역에서 발생할 수 있다. 겨울철에 NO에 의한 O₃의 회식에 의해 CO와 O₃에 역상관이 관측되었으나, 봄과 가을에는 약하거나 존재하지 않았으며, 해양지역에서 CO와 O₃의 관계는 따뜻한 기간이나 중요한 CO와 O₃오염원이 있는 하향지역에서만 기대될 수 있다.¹²⁾

미국 북서부 태평양지역에서의 대기오염물질은 NASA에 의해 실시된 PEM-West(Pacific Exploratory Mission-West) 캠페인에서 오존 및 관련된 여러 오염물질을 광범위하게 측정된 바 있다.¹⁵⁾ Jaffe *et al.*¹¹⁾은 Cheeka Peak에서 1997년 봄철에 관측된 CO, PAN, NMHCs, 등에 의해 동아시아에서 배출된 인위적인 오염물질이 적어도 5일만에 워싱턴주에 수송될 수 있다는 것을 보였다. 미국 북서부에 도달하는 공기에 포함된 오존농도에 미치는 아시아 오염물질의 영향은 모델 연구에 의해서도 밝혀진 바 있다.^{16,17)} Jaffe *et al.*¹⁸⁾은 PHOBEA(Photochemical Ozone Budget of Eastern North Pacific Atmosphere) 캠페인에서 CO, O₃, NO_x, PAN, NMHC, Rn, 에어로졸을 관측하여 동아시아로부터의 영향을 체계적으로 분석한 바 있다.

최근 배경대기관측소에 영향을 미치는 대기오염물질을 추적하기 위해 trajectory를 이용하여 그 오염원을 찾는 연구가 많이 수행되고 있다. backward isentropic trajectory는 측정지역에 미치는 공기괴의 오염지역을 결정하기 위해서 사용되며, 주로 동아시아의 대기오염물질이 태평양 상공이나 미국 서해안에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하기 위해 많이 사용되었다. 태평양 하와이에 있는 Mauna Loa 관측소에 영향을 주는 공기괴를 고찰하기 위한 연구^{8,19,20)}와 일본의 Oki 섬에 대한 연구^{14,21~23)} 그리고 미국 서북부인 CPO에 대한 연구^{11,18,24,25)}을 들 수 있다.

본 연구에서는 미국 워싱턴주 북서 연안에 있는 Cheeka Peak Observatory(이하 CPO)에서 2001년

봄철에 관측한 CO, O₃을 이용하여 배경지역의 특성을 알아보고, 이 지역에서 측정된 1997, 1998년의 봄철 자료와 비교하였다. 또한 고농도 CO, O₃ 발생에 대한 원인을 기상학적으로 규명하고, 해양성 공기에 대한 backward isentropic trajectory 분리를 통하여 위도에 따른 영향을 고찰하였다.

2. 측정 및 연구방법

CO와 O₃의 측정은 미국 북서부 워싱턴주의 CPO에서 2001년 3월 6일부터 5월 29일까지 약 3개월간 실시되었다. CPO는 위도 48.3°N, 경도 124.6°W, 해발고도 460m에 있으며, 태평양과 접해있는 올림픽 반도 북서단에 위치하고, 관측소 주변에는 주택이나 교통량이 전혀 없다(Fig. 1 참조). 워싱턴주의 가장 큰 도시인 시애틀은 서남서방향으로 200km지점에, 캐나다의 밴쿠버시는 북서쪽 150km에 위치하여 있으나, 관측지점에 영향을 줄 정도는 아니다. 그러나 서풍계의 바람이 불 때는 깨끗한 해양대기의 공기괴의 영향을 받고, 동풍계의 바람이 불 때에는 오염된 대륙공기의 영향을 받는다.²⁴⁾ 관측기간 동안 CPO에서의 바람자료를 이용하여 그린 바람장미를 보면(Fig. 2참조), 봄철의 경우, 서풍류가 가장 탁월하게 나타났고 다음으로 서남서풍, 남서풍 그리고 동풍 순으로 탁월하였다. 3월에는 동풍이 서풍보다 더 탁월하였고, 남서풍계열의 바람도 우세하였다. 4월에는 서풍이 가장 탁월하였고 남서풍과 남풍이 그 다음이었으며, 5월에는 서풍이 월등히 우세하였으며, 서남서풍이 그 다음이었으며, 이 두 풍향을 제외한 바람은 거의 없었다. 따라서 본 측정지점에는 주로 해양성공기인 서풍이 탁월한 것으로 나타났다.

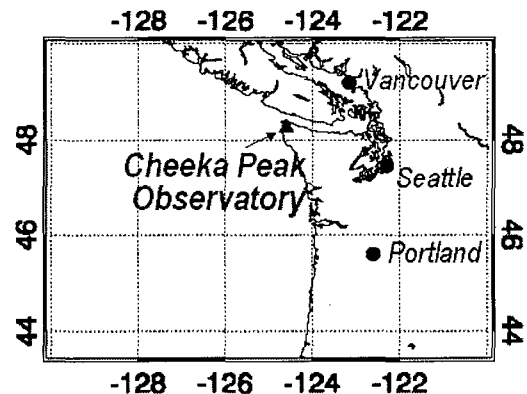


Fig. 1. Map showing the location of the Cheeka Peak Observatory and the Strait of Juan de Fuca, which separates Washington State from British Columbia, Canada.

미국 서북부 Cheeka Peak에서의 수송에 따른 봄철 CO와 O₃의 특성

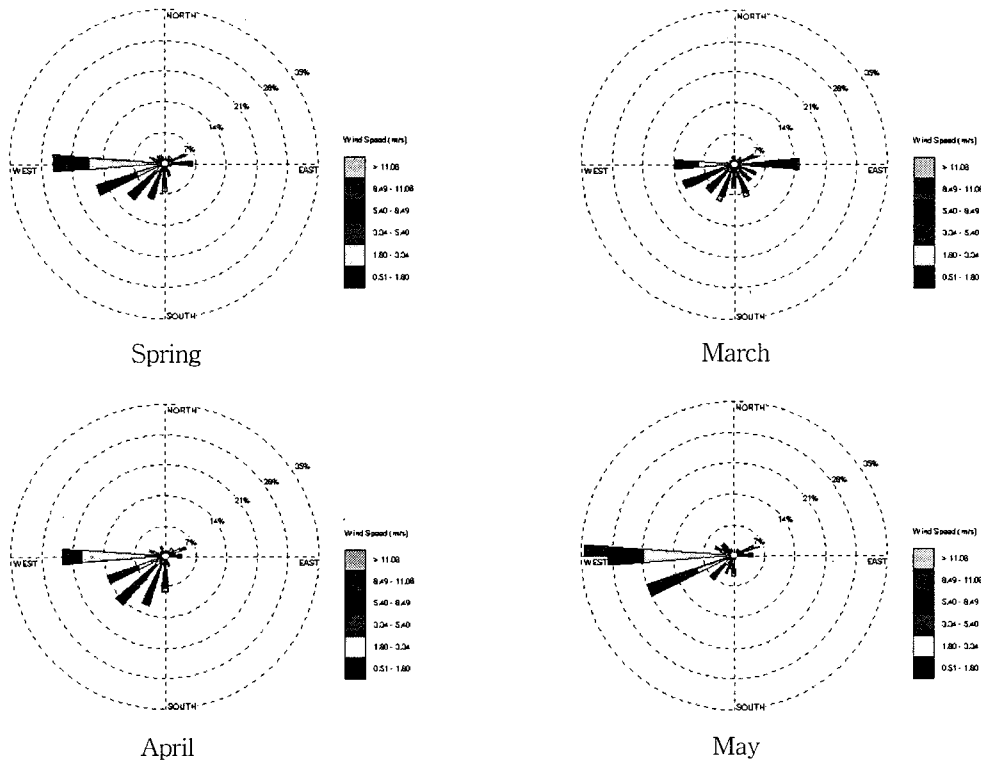


Fig. 2. Wind rose of CPO for springtime, 2001.

또한 이 관측소는 중위도에서 오염되지 않은 해양 공기의 배경대기화학이나 에어로졸 성분을 모니터링 하는데 아주 귀중한 장소이며, 지난 15년간 여러 과학자에 의해 대기화학이나 에어로졸연구를 위하여 사용되어 왔으며, NOAA(National Oceanic & Atmospheric Administration)의 CMDL(Climatic Monitoring & Diagnostics Laboratory)은 매일 두 번씩(00UTC, 12UTC) 두 고도(500m, 1000m)에서 후진 등온위면 trajectory를 제공하여, 이 지역에 영향을 주는 공기괴를 연구하는데 도움을 주고 있다.

CPO에서의 CO측정은 검출한계를 향상시키고 수증기 간섭을 줄인 commercial nondispersive infrared absorbance instrument(API-300, Advanced Pollution Instruments, San Diego, California)를 이용하여 측정하였으며, 시간별 평균 CO농도의 전반적인 불확실성은 6% 또는 9ppbv(150ppbv에 대해서)로 추정된다. 그리고 O₃은 commercial ultraviolet absorption instrument(Dasibi 1008 RS)를 이용하여 측정하였다¹⁾. 이 기기는 측정하기 전에 standard ozone calibrator(Columbia Scientific Inc.)를 이용하여 보정하였고, 오존농도 측정의 정확도는 1ppbv이고 전체 불확실성(total uncertainty)은 30ppbv에서 대략

2%로 추정된다. 측정자료는 미국 태평양표준시간(Pacific Standard Time)으로 기록되었으며 UTC보다 8시간 느리다.

후진 등온위 trajectory는 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecasts)자료와 Harris *et al.*²⁶⁾이 제시한 방법을 이용하여 관측 기간동안 매일 두 번(00, 12UTC)계산되었으며, Jaffe *et al.*^{11,18)}은 후진 등온위 trajectory를 이용하여 CPO로 수송되는 오염물질에 대해 분석한 바 있다. 등온위면 trajectory는 단열대기의 연직운동을 설명함에 있어 공기괴의 현실적인 운동을 더 반영하기 때문에 등압면(isobaric type)보다 더 많이 사용된다.²⁰⁾ 그러나 trajectory 모델은 빈약한 기상자료의 내삽, 연직수송과 관련된 가정, 관측오차, 아격자현상, 난류, 대류, 증발 그리고 응결로 발생하는 불확실성을 내포하고 있다.²⁶⁾

3. 측정 결과 및 고찰

3.1 CO와 O₃의 특성

Table 1은 CPO에서 측정된 CO와 O₃의 결과를 나타낸 것이다. 2001년의 경우는 3월 6일부터 5월 29일까지(day of year(DOY) 65~146)의 자료이며,

1997년은 3월 9일부터 4월 29일까지(DOY 68~119), 1998년은 3월 1일부터 4월 30일(DOY 60~120)이다. 1997년과 1998년의 자료는 Jaffe *et al.*¹⁸⁾이 PHOBEA 캠페인에서 관측한 자료를 이용하였다. 3년 모두 봄철에 관측하였으며, 1997과 1998년은 5월의 자료가 빠져 있으나, 대체로 이 지역에서의 봄철을 대표한다고 할 수 있겠다. 1997년과 1998년의 CO와 O₃의 농도는 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 2001년의 경우, CO의 농도는 143ppbv로 1997년(160ppbv)과 1998년(178ppbv)에 비해 낮은 값을 나타내었는데, 이는 5월의 농도가 3, 4월에 비해 월등히 낮았기 때문으로 판단된다(Fig. 3(위) 참조). 2001년의 O₃농도

는 48ppbv로 1997년(43ppbv)과 1998년(44ppbv)에 비해 높은 농도를 나타내었다. 비슷한 위도대의 배경지역인 알래스카 Shemya¹⁾에서 측정된 시간별 평균 CO농도(1994. 6~1995. 5)는 149ppbv로 본 연구의 2001년 농도(43ppbv)와 비슷하였으며, 시간별 평균 O₃농도(1995. 2~5)는 42ppbv로 본 연구의 1997년(43ppbv)과 1998년(44ppbv)의 농도와 비슷하였다.

CPO와 같은 배경대기관측소는 자연적 및 인위적인 오염원에 의해 농도에 영향을 미칠 수 있다. 이들 오염원과 수송이 매년 일정하다고는 볼 수 없으므로, 농도변화에 기여할 수 있는 요인을 찾아내는 것도 매우 중요하다고 할 수 있다.²⁵⁾ 따라서 관측소 주변의 국지적인 요인에서부터 장거리수송에 의한 영향에 까지 그 연구범위가 확대되는 추세이다.²²⁾ 1998년 봄철의 몽골지방과 바이칼 호수 주변의 중부 시베리아에서의 대형화재에 의한 CO의 대량 방출은 이 당시의 CO농도에 상당한 영향을 미쳤다고 할 수 있다.¹⁸⁾

CPO의 지역적 특성을 고찰하기 위해 평균상대표준편차(r.s.d: relative standard deviation)를 이용하여, 우리나라의 해안에 위치한 측정소와 비교하여 보았다. 평균상대표준편차는 일본에서 오존측정소의 청정도를 분류하기 위해서 Mizoguchi *et al.*²⁷⁾이 사용한 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

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

여기서 Ors는 측정소의 청정도를 나타내는 평균상대표준편차이고, N은 측정일수, S는 일별 표준편차이며 M은 일평균값이다. 위 식을 사용하여 남극 및 일본내의 청정지역의 평균상대표준편차는 0.03~0.30²⁷⁾ 정도였으며, 제주도 고산은 0.09로 비교적 청정한 지역으로 분류되었다.²⁸⁾ CPO의 봄철의 평균상대표준편차는 0.069로 매우 청정한 지역으로 분류되었으며, 농도의 일변화가 거의 없는 배경지역의 특성을 나타내었고 동아시아로부터의 대기오염물질 장거리수송과 관련된 연구를 하는데 매우 적당한

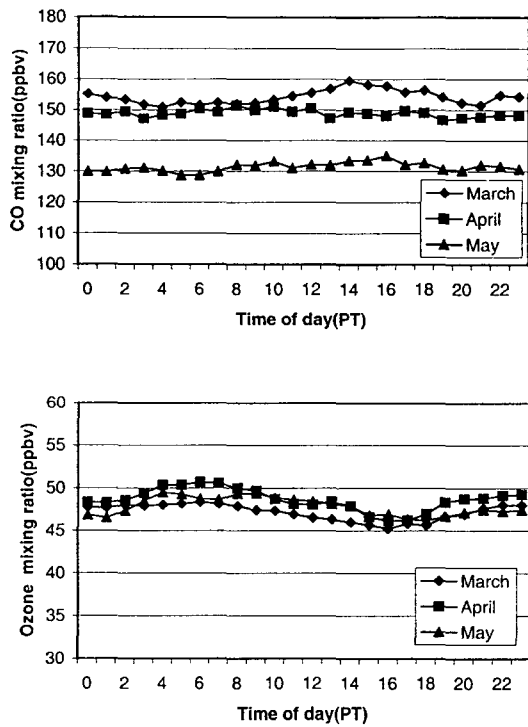


Fig. 3. Diurnal variation of spring(2001) CO(upper) and O₃(lower) mixing ratio(ppbv) at CPO.

Table 1. Complete data set for 1997^{a)}, 1998^{a)} and 2001 CPO observation, hourly averages. The values in parentheses are from March 9 ~ April 29

	Mean			s.d.			N(hours)			5 th Percentile			95 th Percentile		
	1997	1998	2001	1997	1998	2001	1997	1998	2001	1997	1998	2001	1997	1998	2001
CO (ppbv)	160	178	143 (150)	22	22	17 (15)	1319	1388	1721 (1100)	132	154	109	201	220	183
O ₃ (ppbv)	43	44	48 (48)	5	6	6 (6)	1327	1407	1892 (1268)	34	34	33	50	54	59

^{a)}From Jaffe *et al.*¹⁸⁾

관측소라고 할 수 있다.¹⁾

Table 2. Spring mean and relative standard deviation of O₃ at CPO, Kosan²⁸⁾ and Dongsamdong²⁹⁾

	CPO(USA)	Kosan(Jeju)	Dongsamdong (Busan)
Mean (ppbv)	48	52	35
r.s.d	0.069	0.09	0.39

Fig. 3은 CPO에서 2001년 봄철(3, 4, 5월)에 관측한 CO와 O₃의 일변화를 나타낸 것이다. CO의 경우를 보면(Fig. 3(위) 참조), 3월에 가장 높은 농도를 나타내었고, 5월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 일변화 경향은 새벽과 오전에 고농도, 오후에 저농도를 나타내는 전형적인 도시형³⁰⁾과는 달리, 농도의 일교차가 10ppbv 미만의 아주 작은 변화를 나타내고 있다. 비교적 배경지역이라고 일컫는 일본의 Oki 섬의 CO 일변화도 오전과 늦은 오후와 이른 저녁에 걸쳐 최대농도를 나타내었고 일농도차가 15ppbv 이상이었다.¹⁴⁾ 3, 4월에 비해 5월의 농도가 20ppbv 정도 낮은 것은 바람장미의 분석에서 보듯이(Fig. 2 참조) 5월의 바람이 CO농도에 영향을 미치는 대륙 영향의 동풍류가 거의 없고 오염원이 없는 해양의 영향을 받는 서풍류가 대부분을 차지하기 때문이라고 판단된다. O₃의 경우를 보면(Fig. 3(아래) 참조), 도시지역에서 나타내는 일변화 경향과 전혀 다른 분포를 나타내고 있다. 대체로 도시에는 정오 경에 최대농도를 나타내고 이른 아침에 최소농도를 나타내고 농도의 일교차가 매우 큰 것이 일반적 특징이다.³¹⁾ 오히려 도시의 경우와는 반대로 새벽 5~7시 경에 최고농도를 나타내고 오후 5~6시경에 최소농도를 나타내고 있으나, 그 폭은 5ppbv 미만으로 매우 작았다. 3, 4, 5월 모두 비슷한 일변화 경향을 나타내었으며 농도의 차이는 크지 않지만, 4월이 가장 높은 농도를 나타내었고, 3월에 가장 낮은 농도를 나타내었다.

CPO에서 측정된 대부분의 고농도는 관측지점의 동쪽에 교통량이 많은 Vancouver, Seattle, Tacoma 등과 같은 도시가 있기 때문에 동풍류가 불 때 나타난다.¹⁸⁾ 본 연구는 북태평양 대기환경의 대기화학의 특성 파악에 있으므로, 미국 북부지방으로부터 대기 오염물질의 영향을 받지 않은 기간을 고려하기 위해 관측자료를 다음과 같이 분리하였다. 적어도 과거 3일 동안 미국북부지방에 의해 영향을 받지 않았거나, 그 지역을 지나오지 않은 공기를 “해양성”이라고 명명하고, 미국북부의 영향을 조금이라도 받은 공기를 “대륙성”이라고 명명하였다. 해양성 공기는 장거리수송의 결과인 인위적으로 배출된 아시아 대륙의 공기를 포함할 수 있다.¹¹⁾

해양성공기와 대륙성공기를 분리하기 위해서 CPO에서 관측한 풍향, 풍속과 NOAA의 CMDL에서 제공한 10일 후진 등온위면 trajectory를 이용하였다. 해양성 공기는 (1) 풍향이 150°~300°일 때 (2) 풍속이 2m/s이상일 때 (3) trajectory가 CPO에 도달하기 전, 적어도 3일 동안 육지와 접촉한 사실이 없을 때로 하였다. 그 분석결과, 2001년의 경우, CO는 1721시간 중 942시간(55%), O₃은 1892시간 중 1007시간(53%), 1998년의 경우, CO는 1388시간 중 565시간(41%), O₃은 1407시간 중 556시간(40%), 1997년의 경우, CO는 1319시간 중 743시간(56%), O₃은 1327시간 중 746시간(56%)이 해양성으로 분류되었다. Table 3은 해양성으로 분류된 기간 중 CO와 O₃의 평균과 표준편차, 5%, 95%평균을 나타내었다. Table 1의 전체 자료와 비교하면, 2001년의 경우, CO농도는 해양성공기일 때 138ppbv로 전체의 143ppbv보다 5ppbv낮게 나타났고, O₃농도는 변함없이 48ppbv로 동일하게 나타났다. 1997과 1998년의 경우도 CO농도는 해양성공기일 때가 낮게 나타났고 O₃농도는 1ppbv높게 나타났다.

CPO에서 해양성 공기의 영향으로 분류된 농도를 북반구의 해양관측소에서 측정된 농도와 비교해 보는 것도 의미가 있다. 예를 들어 하와이의 Mauna Loa에서의 봄철 평균 CO농도는 100~120ppbv이고, 알래스카의 Shemya와 Barrow 같은 고위도에서는

Table 3. Summary of the 1997^{a)}, 1998^{a)} and 2001 CPO marine data

	Mean			S.D.			N(hours)			5 th Percentile			95 th Percentile		
	1997	1998	2001	1997	1998	2001	1997	1998	2001	1997	1998	2001	1997	1998	2001
CO (ppbv)	151	170	138	14	11	13	743	565	942	128	152	113	176	188	162
O ₃ (ppbv)	44	45	48	4	5	6	746	556	1007	36	38	34	50	52	57

^{a)}From Jaffe *et al.*¹⁸⁾

평균 180~200ppbv이다.^{7,8)} 이들 농도에 비교하여 CPO의 봄철 CO농도는 2001년에 138ppbv, 1998년에 170ppbv, 1997년에 151ppbv로 아주 정상적인 값을 나타내었다.

3.2. 고농도 사례 연구

Fig. 4는 CPO에서 2001년 3월 6일(DOY 65)부터 5월 29일(DOY 146)까지 측정된 CO와 O₃농도 시계열을 나타낸 것이다. CO의 경우 80~233ppbv 농도 분포를 나타내고 있으며, 5월로 갈수록 농도가 낮아지고 있다. O₃의 경우 30~70ppbv 정도의 분포를 보이며 계절에 따른 편차는 크게 나타나지 않았다. 측정기간 중 CO와 O₃의 측정이 동시에 이루어진 1720시간에 대한 상관계수는 0.32로서 높지 않은 상관관을 나타내었다. 본 연구에서는 측정기간 중 CO농도가 가장 높게 나타난 날(DOY 83)과 O₃이 가장 높게 나타난 날(DOY 132)을 선택하여 고농도가 발생한 이유를 CPO에서 관측한 관련기상인자를 이용하여 분석하였다.

Fig. 5는 CO에 대한 고농도 사례를 나타낸 것이다. 고농도 CO의 사례일인 DOY 83(3월 24일) 11시부터 18시까지 200ppbv를 초과하는 농도를 나타내었으며, 15시에 가장 높은 235.1ppbv를 나타내었다. 전날인 DOY 82의 15시~16시에도 200ppbv를 초과하는 농도를 나타내었다. Fig. 5(위)에서 보듯이 CO가 고농도로 나타낼 경우에는 O₃농도는 상대적으로 낮게 나타나는 반비례의 관계를 나타내었다. 고농도 사례일이 아닌 날에는 두 오염물질이 비슷한 변화 경향을 나타내었다. 고농도가 나타난 시각의 풍향은 90° 방향의 동풍류가 불었으며, 풍속은 8m/s 이상의 강풍이 불었다(Fig. 5(중간)). 또한 이때의 기온은 당일 최저기온에 가까운 6°C 정도의 낮은 온도에서 점차 증가하는 추세를 나타내었으며, 상대습도는 기온과 반대의 경향을 나타내었다(Fig. 5(아래)). 따라서 고농도의 CO는 낮은 오존농도, 동풍의 강한 바

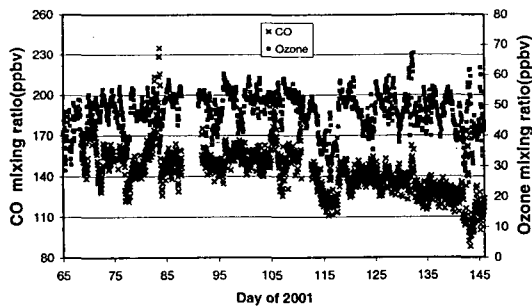


Fig. 4. Time series of the 2001 springtime data for CO and O₃ mixing ratio(ppbv) at CPO.

람, 그리고 낮은 온도와 높은 습도상태에서 발생하였다. 즉 해양이 아닌 대륙에서 공기가 CPO로 유입되었다는 것을 강하게 시사하고 있다.

Fig. 6은 O₃에 대한 고농도 사례를 나타낸 것이다. 고농도 O₃의 사례일은 DOY 132(5월 15일)로 새벽 1시부터 오전 10시까지 60ppbv를 초과하는 고농도가 10시간 동안 지속하여 나타났으며, 1시간 뒤인 11시부터는 20ppbv정도가 낮은 농도로 급격히 하락하였다(Fig. 6(위)). 고농도 O₃ 발생시 CO와 비교하면, 고농도 CO 사례와는 달리 서로 비슷한 변화 경향을 나타내었다. 풍향은 45°~110°사이로 북동풍에서 남동풍인 동풍류가 불었으며, 풍속은 4m/s 정도의 바람이었으며(Fig. 6(중간)), 기온은 10°C~13°C

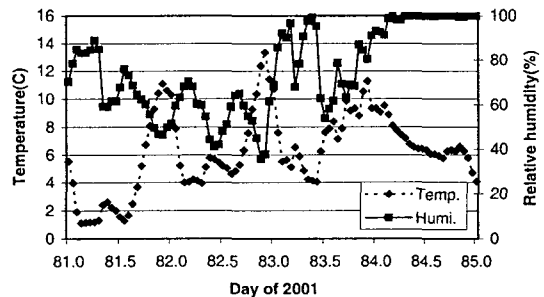
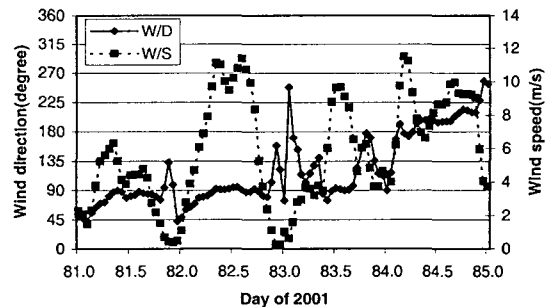
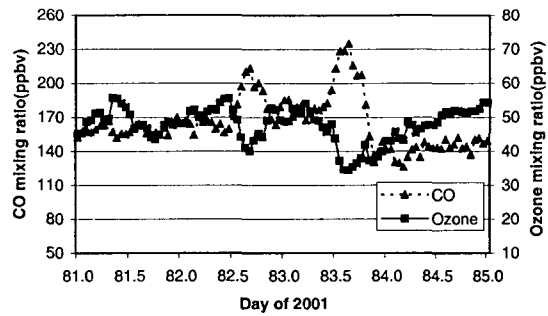


Fig. 5. Hourly data for CO and O₃(upper), wind direction and wind speed(mid), temperature and relative humidity(lower), case study for high CO.

로 전날 야간보다 낮았으며 습도는 약 50%정도 값을 나타내었다(Fig. 6(아래)). 따라서 고농도의 O₃도 고농도 CO와 같이 동풍류의 바람이 불 때 나타났다고 할 수 있다.

Fig. 7은 풍향과 고농도와의 관계를 알아보기 위해 풍향에 따른 농도분포를 나타낸 것이다. CO의 경우, 180ppbv 이상의 고농도는 동풍류가 불 때 나타났으며, 120~160ppbv사이의 농도는 남동풍(135°)~서풍(270°)에서 주로 발생하였다(Fig. 7(위)). O₃의 경우, 50ppbv가 넘는 고농도는 동풍류와 서풍류에서 발생하였으며 50ppbv를 넘는 것은 남서풍계열이 불 때 우세하였다(Fig. 7(아래)). 따라서 CPO에서 고농도 CO와 O₃은 주로 대륙에서 불어오는 동풍류

가 있을 때 발생하고 해양성 공기가 있을 때는 배경 지역과 같은 농도를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 1에서 보듯이 CPO의 동쪽에는 캐나다의 밴쿠버와 미국의 시애틀의 대도시가 있고, Puget Sound 주변지역에는 인공적인 배출원이 산재하여 있다. 또한 Juan de Fuca 해협을 통과하는 수많은 해상선박이 배출하는 오염물질도 상당하다고 알려져 있다.^{32),33)} 따라서 이들 오염원에 의해 배출된 오염물질이 동풍이 불 때 수송되어 이 지역의 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3 trajectory에 의한 분리

CPO에 영향을 미치는 해양성 공기를 더욱 더 세분하기 위해 10일 후진 등온위면 trajectory를 이용하여 위도별로 분리하였다. CPO에서의 trajectory 연구를 보면, Jaffe *et al.*¹¹⁾이 동아시아지역에서의 오염물질이 이 지역에 미치는 영향을 고찰하기 위해 아시아 trajectory과 비아시아 trajectory 두 가지로 나누어 오염물질의 장거리 수송을 연구한 바 있다. Kotchenruther *et al.*²⁵⁾은 항공기관측자료를 5일 후진 등온위면 trajectory에 따라 세가지 범주로 나누어 연구한 바 있다. 본 연구에서는 Jaffe *et al.*¹⁸⁾이 PHOBEA 집중관측시 행하였던 방법을 사용하여 분석하였다. 위에서 설명한 대로 해양성으로 분류한

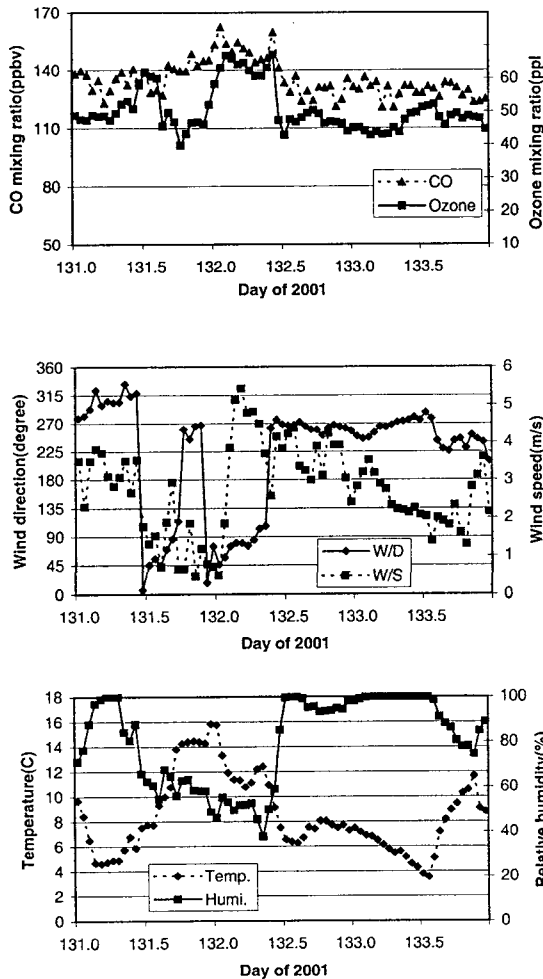


Fig. 6. Hourly data for CO and O₃(upper), wind direction and wind speed(mid), temperature and relative humidity(lower), case study for high O₃.

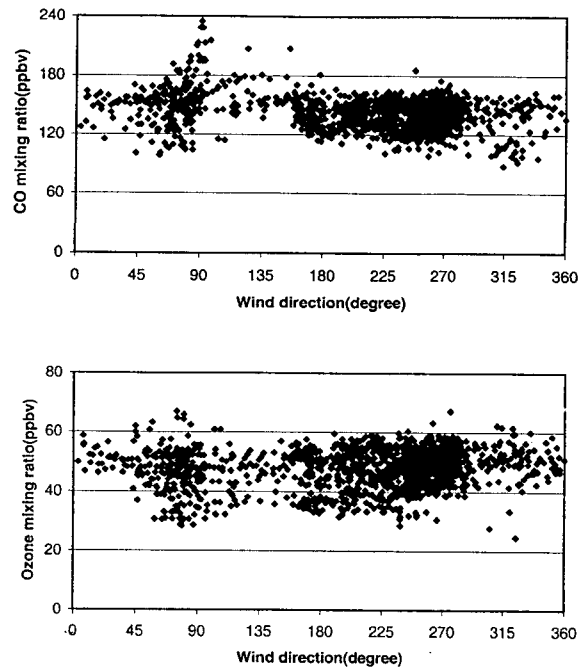


Fig. 7. Scatterplots of hourly averaged CO(upper) and O₃(lower) mixing ratio versus wind direction at CPO.

전 병 일

것 중에서 (1)중위도 (2) 고위도 (3) 저위도 (4) 아시아 대륙으로 나누었다(Fig. 8). 각 trajectory를 구분하기 위해, 먼저 10일간 수송이 아시아 대륙($0^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$)을 통과하였는지를 고려한다. 이들 trajectory가 아시아 산업지역을 통과한 것은 “아시안(Asian)”으로 분류한다. 다음단계로 5일전의 공기가 35°N 아래에 있으면 저위도, 55°N 위에 있으면 고위도 그 사이에 있으면 중위도라고 정의하였다. 중위도와 아시안 trajectory는 같은 방향이며, 그 차이는 이동속도이다. 아시안 trajectory일 때의 종관 상태는 알래스카반도 근처에 정체성 저기압이, 35°N 과 160°W 부근에 고기압이 있는 기압배치를 하는

경우가 많으며, 700hPa에서의 풍속은 대략 30m/s의 강풍이 나타나는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 이런 강한 바람은 대기오염물질이 대기층에서 분산되거나 아래로 침강되는 현상이 억제되고 계속해서 이동될 수 있는 조건으로 작용될 수 있다.³⁴⁾

trajectory는 하루에 두번(00UTC, 12UTC)의 자료를 사용하였으며, 각 trajectory일 때의 농도는 00UTC와 12UTC 중심으로 ± 6 시간을 하여 12시간 평균농도를 구하였다. Table 4는 trajectory 분류에 의해 CO와 O₃농도를 나타내었고, 1998년과 1997년의 자료는 Jaffe *et al.*¹⁸⁾의 결과를 이용하였다. 1997년의 경우, 아시아로부터의 수송에 따른 영향과 위

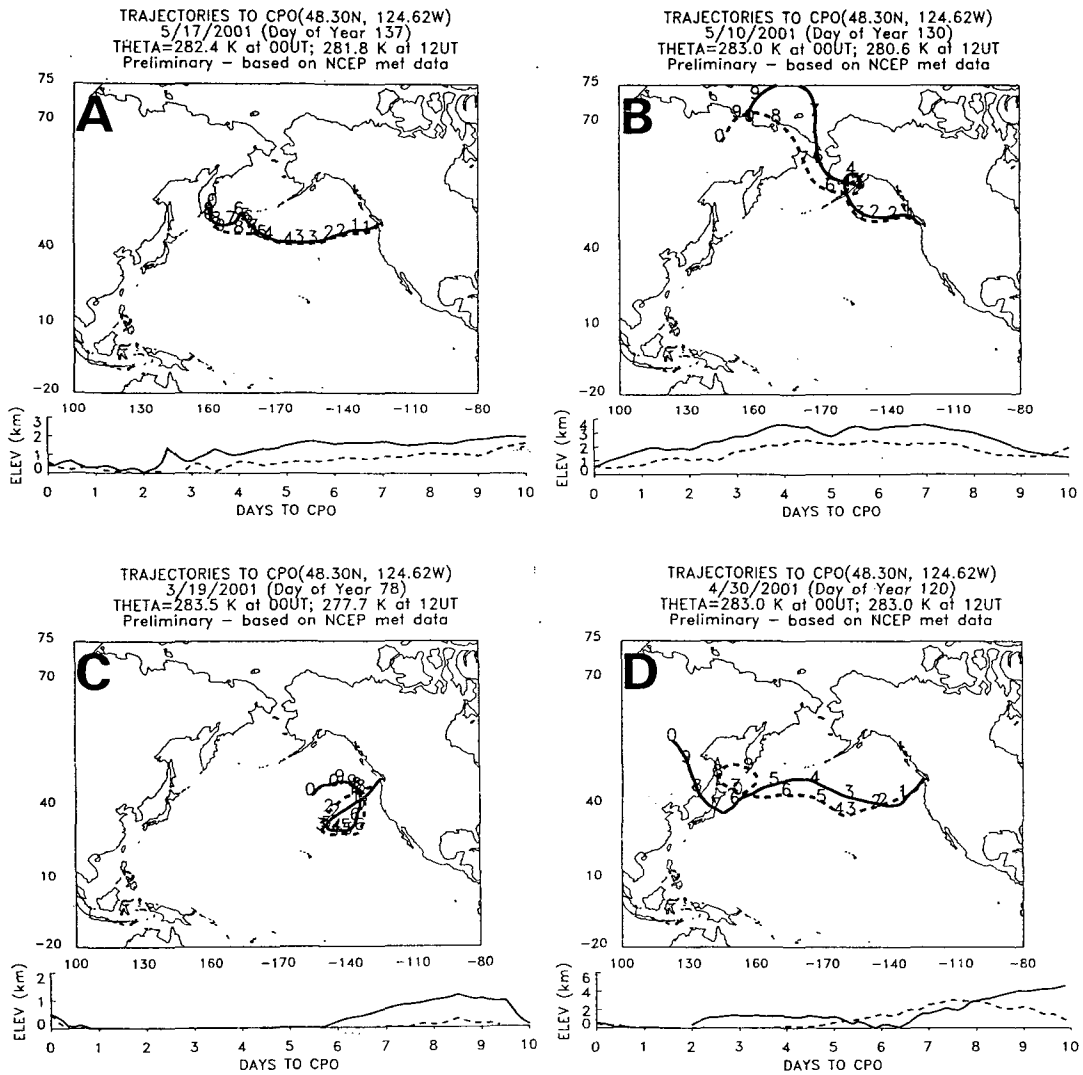


Fig. 8. The classification of backward isentropic trajectories arriving at CPO. (A) mid latitude type (B) high latitude type (C) low latitude type (D) Asian type

미국 서북부 Cheeka Peak에서의 수송에 따른 봄철 CO와 O₃의 특성

Table 4. Marine data(12 hour average) segregated by trajectory classification at CPO

	Mid latitude			High latitude			Low latitude			Asian		
	Mean	s.d.	N	Mean	s.d.	N	Mean	s.d.	N	Mean	s.d.	N
1997 ^{a)}												
CO(ppbv)	150.7	11.1	39	150.2	6.8	12	146.3	9.6	17	165.7	10.0	9
O ₃ (ppbv)	44.1	3.2	39	43.2	3.2	12	44.5	5.2	17	44.1	2.7	9
1998 ^{a)}												
CO(ppbv)	171.4	8.1	26	172.5	4.3	13	166.7	10.3	9	170.9	9.1	11
O ₃ (ppbv)	44.6	4.3	27	44.2	3.0	13	46.8	2.6	8	46.7	3.5	10
2001												
CO(ppbv)	138.8	17.2	78	145.8	11.6	33	132.7	13.2	6	135.3	8.1	4
O ₃ (ppbv)	47.7	6.5	78	50.1	4.0	33	42.9	7.3	6	53.1	2.1	4

^{a)}From Jaffe *et al.*¹⁸⁾

도에 따라 차이가 있다는 것을 보여주고 있다. 특히 아시아 trajectory일 때의 CO는 165.7ppbv로 저위도 trajectory(146.3ppbv)보다 19.4ppbv 높은 농도를 나타내었고, 중위도 trajectory(150.7ppbv)와 고위도 trajectory(150.2ppbv)보다 15ppbv정도 높게 나타났다. 그러나 1998년과 2001년의 경우, 아시아의 trajectory일 때가 각각 170.9ppbv와 135.3ppbv로 중위도 trajectory(138.8ppbv)와 고위도 trajectory (145.8ppbv)보다 오히려 낮은 농도를 나타내었다. 2001년 O₃의 경우는 아시아 trajectory일 때가 53.1ppbv로 다른 위도의 trajectory(중위도:47.7ppbv, 고위도: 50.1ppbv, 저위도:42.9ppbv)보다 높은 농도를 나타내었다. 대체로 아시아 trajectory일 때 PAN, Rn, 에어로졸 산란, 에어로졸 흡수는 다른 위도 trajectory일 때 보다 상당히 높은 값을 나타내었다는 보고가 있으나¹⁸⁾, 오염물질의 종류에 따라 상당한 차이를 나타내는 것으로 보인다.

4. 결론

2001년 3월 6일부터 5월 29일까지 미국 서북부 워싱턴주 Cheeka Peak Observatory에서 측정된 CO, O₃자료를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CO와 O₃은 도시지역과 다른 일변화 경향을 나타내었고 배경지역과 비슷한 경향과 농도분포를 나타내었다.
2. 해양성으로 분류된 공기가 유입될 때 CO농도는 낮았고 O₃농도는 비슷하거나 약간 높았다.
3. 이 지역에서의 고농도 CO와 O₃은 해양에서 부는 서풍류가 있을 때보다는 대륙에서 불어오는 동풍류가 있을 때 발생하였다.
4. 봄철 해양성 공기의 trajectory 분리를 이용하

여 위도별 농도비교를 한 결과, 아시아 trajectory일 때의 CO농도는 다른 위도 trajectory에 비해 낮게 나타났고, O₃은 높게 나타났다.

감사의 글

본 연구에 있어서 자료를 제공해 주신 University of Washington의 Jaffe 교수에게 진심으로 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 1) Jaffe, D. A., L. Yurganov, E. Pullman, J. Reuter, and A. Mahura, 1998, Measurements of CO and O₃ at Shemya, Alaska, *J. Geophys. Res.*, 103, 1,493-1,502.
- 2) Crutzen, P. J., 1988, Tropospheric ozone: An overview, in *Tropospheric Ozone Regional and Global Scale Interactions*, edited by I.S.A. Isaken, NATO ASI, Ser., Ser. C, 227, 3-32.
- 3) Volz, A. and D. Kley, 1988, Evaluation of the Montsouris series of the ozone measurements made in the nineteenth the century, *Nature*, 332, 240-242.
- 4) Logan, J. A., 1994, Trends in the vertical distribution of ozone: An analysis of ozone-sonde data, *J. Geophys. Res.*, 99, 25,553-25,585.
- 5) Lee, S. H., H. Akimoto, H. Nakane, S. Kurnosenko, and Y. Kinjo, 1998, Lower tropospheric ozone trend observed in 1989-1997 at Okinawa, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1,637-1,640.
- 6) Blake, D. R. and F. S. Rowland, 1986, Global

- atmospheric concentrations and source strength of ethane, *Nature*, 321, 231-233.
- 7) Novelli, P. C., L. P. Steele, and P. P. Tans, 1992, Mixing ratios of carbon monoxide in the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 97, 20,731-20,750.
 - 8) Jaffe, D. A., A. Mahura, J. Kelley, J. Atkins, P. C. Novelli, and J. Merrill, 1997, Impact of Asian emissions on the remote North Pacific Midway, and Mauna Loa, *J. Geophys. Res.*, 102, 28, 627-28,636.
 - 9) Duce, R. A., C. K. Unni, B. J. Ray, J. M. Prospero, and J. T. Merrill, 1980, Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability, *Science*, 209, 1522-1524.
 - 10) Prospero, J. M. and D. L. Savoie, 1989, Effect of continental sources of nitrate concentrations over the Pacific Ocean, *Nature*, 339, 687-689.
 - 11) Jaffe, D. A., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karlsdottir, D. Blake, J. Harris, G. Carmichael and I. Uno, 1999, Transport of Asian air pollution to North America, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 711-714.
 - 12) Parrish, D. D., 1993, Carbon monoxide and light alkanes as tropospheric tracers of anthropogenic ozone, in *The Tropospheric Chemistry of Ozone in the Polar Regions*, edited by H. Niki and K. H. Becker, Springer-Verlag, New York, 155-169pp.
 - 13) Parrish, D. D., J. S. Holloway, M. Trainer, P. C. Murphy, G. L. Florbes, and F. C. Fehsenfeld, 1993, Export of North American ozone pollution to the North Atlantic Ocean, *Science*, 259, 1436-1439.
 - 14) Jaffe, D. A., R. E. Honrath, L. Zhang, H. Akimoto, A. Shimizu, H. Mukai, K. Murano, S. Hatakeyama, and J. Merrill, 1996, Measurement of NO, NO_x, CO and O₃ and estimation of the ozone production rate at Oki Island, Japan, during PEM-West, *J. Geophys. Res.*, 101, 2,037-2,048.
 - 15) Hoell, J. M., D. D. Davies, S. C. Liu, R. Newell, H. Akimoto, R. J. McMeal, and R. J. Bendura, 1997, Pacific Exploratory Mission-West Phase B: February-March 1994, *J. Geophys. Res.*, 102, 28, 223-28, 239.
 - 16) Berntsen, T. K., S. Karlsdottir, and D. A. Jaffe, 1999, Influence of Asian emissions on the composition of air reaching the north-western United States, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2171-2174.
 - 17) Jacob, D. J., J. A. Logan and P. P. Murti, 1999, Effect of rising Asian emission on surface ozone in the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2175-2178.
 - 18) Jaffe, D. A., T. Anderson, D. Covert, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, D. Blake, J. Harris and D. Street, 2001, Observation of ozone and related species in the northeast Pacific during the PHOBEA campaigns: 1. Ground-based observations at Cheeka Paek, *J. Geophys. Res.*, 106, 7,449-7,462.
 - 19) Miller, J. M., 1981, A five-year climatology of back trajectories from the Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Atmos. Environ.*, 15(9), 1553-1558.
 - 20) Harris, J. M. and D. Kahl, 1990, A descriptive atmospheric transport climatology for the Mauna Loa Observatory, using clustered trajectories, *J. Geophys. Res.*, 95, 13651-13667.
 - 21) Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C. M. Liu, M. Buhr, K. J. Hsu, D. A. Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J. T. Merrill and R. E. Newell, 1996, Long range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region, *J. Geophys. Res.*, 101, 1,999-2,010.
 - 22) Kajii, Y., H. Akimoto, Y. Komazaki, S. Tanaka, H. Mukai, K. Murano and J. Merrill, 1997, Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and acidic trace gases at Oki Island, Japan, during PEM-WEST B/PEACAMPOT B campaign, *J. Geophys. Res.*, 102, 28,637-28,649.
 - 23) Pochanart, P., J. Hirokawa, Y. Kajii and H. Akimoto, 1999, Influence of regional-scale anthropogenic activity in northeast Asia on seasonal variations of surface ozone and carbon monoxide observed at Oki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 104, 3621-3631.
 - 24) Anderson, T. L., D. S. Covert, J. D. Wheeler, J. M. Harris, K. D. Perry, B. E. Trost and D.

미국 서북부 Cheeka Peak에서의 수송에 따른 봄철 CO와 O₃의 특성

- A. Jaffe, 1999, Aerosol backscatter fraction and single scattering albedo: Measured values and uncertainties at a coastal station in the Pacific Northwest, *J. Geophys. Res.*, 104, 26, 793-26,807.
- 25) Kotchenruther, R. A., D. A. Jaffe, H. J. Beine, T. L. Anderson, J. W. Bottenheim, J. M. Harris, D. R. Blake and R. Schmitt, 2001, Observation of ozone and related species in the northeast Pacific during the PHOBEA campaigns: 2. Airborne observations, *J. Geophys. Res.*, 106, 7,463-7,481.
- 26) Harris, J. M., P. P. Tans, E. J. Dlugokencky, K. A. Masarie, P. M. Lang, S. Whittlestone and L. P. Steele, 1992, Variations in atmospheric methane at Mauna Loa Observatory related to long-range transport, *J. Geophys. Res.*, 97, 6,003-6,010.
- 27) Mizoguchi, T., M. Kunugi and M. Nishikawa, 1985, Background air pollutant measurement and selection of background sites in Japan, *Res. Rep. Natl. Environ. Study. Japan*, 79.
- 28) 서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구, *한국대기보전학회지*, 11(3), 253-262.
- 29) 전병일, 2000, 부산 해안지역의 고농도 오존 발생 특성에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 9(4), 295-302.
- 30) 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기오염농도에 미치는 영향, *한국환경과학회지*, 3(4), 357-365.
- 31) 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 박사학위논문, 119pp.
- 32) Lawrence, M. G. and P. J. Crutzen, 1999, Influence of NO_x emissions from ships on tropospheric photochemistry and climate, *Nature*, 402, 167-170.
- 33) Corbett, J. J., P. S. Fischbeck and S. N. Pandis, 1999, Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships, *J. Geophys. Res.*, 104, 3457-4370.
- 34) 전종갑, 예상옥, 곽용문, 정용승, 2000, 한반도에서 관측된 1998년 4월 황사의 특성 및 장거리 수송 패턴 분석, *한국기상학회지*, 36(3), 405-416.