

제주도 고산에서의 미량기체 농도변화와 공기괴 특성과의 관계

Variations of Trace Gases Concentrations and Their Relationship with the Air Mass Characteristic at Gosan, Korea

김 인 애¹⁾ · 리 선 란^{1)*} · 김 경 렬^{1,2)}

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾서울대학교 해양연구소

(2008년 6월 20일 접수, 2008년 9월 10일 채택)

Inae Kim¹⁾, Shanlan Li^{1)*} and Kyung-Ryul Kim^{1,2)}

¹⁾School of Earth and Environmental Sciences

²⁾RIO, Seoul National University

(Received 20 June 2008, accepted 10 September 2008)

Abstract

The surface O₃, CO, NO_x, and SO₂ were measured at Gosan in Jeju Island from May 2004 to April 2005. Over this period, the mean concentrations (\pm s.d.) of each gas was 40.06 (\pm 16.01) ppbv for O₃, 264.92 (\pm 115.73) ppbv for CO, 1.98 (\pm 2.73) ppbv for SO₂, and 4.64 (\pm 3.24) ppbv for NO_x. The monthly variations and the diurnal variations of these gases show that the Gosan site is situated in a relatively clean region. However, there were episodic simultaneous peaks in CO and SO₂, especially in winter and early spring. Using cluster analysis with air mass backward trajectory analysis, we suggest that these episodes are due to the influence of transportation of polluted air mass from polluted regions. In the cluster, which was under the dominant influence of clean maritime air mass, low levels of O₃, CO, and SO₂ were observed. The levels of these species were elevated in the other two clusters which had the air mass influenced by polluted continental regions. In addition, ratios of the chemical species such as CO/NO_x, SO₂/NO_x, and CO/SO₂ revealed the somewhat different characteristics of emission sources influencing each cluster. The differences in concentration of trace gases among clusters with different origin and transport pathways imply that Gosan is under the effect of pollution transported from other regions.

Key words : O₃, NO_x, CO, SO₂, Gosan, Long-range transport

1. 서 론

대류권 O₃은 중요한 온실기체이다. NO_x는 O₃의

생성과 제거 기작에 중요한 역할을 하며 SO₂와 함께 산성비의 주원인 물질이기도 하다. CO는 OH 라디칼과 반응하여 대류권의 산화력을 조절하는 데 크게 기여하고 있어 간접적 온실기체라 할 수 있다(Dianov-Klokov and Yugarnov, 1989; Logan *et al.*, 1981). 또한

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-877-6741, E-mail : sun28@snu.ac.kr

Table 1. The specification of analyzers for trace gases (O₃, NO_x, CO, and SO₂) measurements.

Component	Principle	Model	Linearity	Detection limit
O ₃	UV Absorption	TEI 49C	±1% full scale	1.0 ppb
NO _x	Chemiluminescence	TEI 42C trace level	±1% full scale	50 ppt (120 sec avg time)
CO	Infrared absorption	TEI 48C trace level	±1% full scale	0.2 ppm
SO ₂	Pulse U.V. fluorescence	TEI 43C trace level	±1% full scale	0.10 ppb (60 sec avg time)

대류권에서의 체류시간이 수개월에 이르기 때문에 인위적인 오염물 배출의 중요한 추적자로 여겨지고 있다(Parrish *et al.*, 1991).

최근 수십 년 동안 북반구 대류권 O₃의 농도는 증가하고 있다(Vingarzan, 2004; Derwent *et al.*, 1998). 특히 동아시아지역에서는 높은 인구밀도와 급속한 산업화 정책으로 NO_x, SO₂, CO와 같은 1차 오염물질의 배출량이 증가하고 있는 것으로 알려지고 있다(Akimoto *et al.*, 1996).

아시아몬순지역에 속한 한국과 일본은 겨울과 이른 봄철에 북서풍의 영향을 받아 몽골과 중국북부지역의 사막 등지로부터 이동해 온 황사를 경험한다. 이와 같은 몬순은 바람과 기압장의 변화를 일으키는 데 이로 인한 장거리 이동에 따른 결과로 여겨지는 고농도의 CO 피크들이 서태평양지역에서 관찰된 것으로 보고되었다(Liu *et al.*, 2003).

제주도 고산 측정소는 동아시아지역의 배경대기의 측정은 물론 오염물질의 장거리 이동 현상을 관측하는 데 적합한 장소로 알려져 있다. 제주도는 한반도와 약 100 km, 중국 상하이와 500 km, 일본 규슈와는 250 km 정도 떨어져 있고 자체적인 오염원이 거의 없는 청정지역이다. 그리고 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 고산 측정소는 인근에 인위적 오염물의 배출원이 거의 없고, 대륙과 해양의 영향을 모두 받고 있어서 지상관측소로서의 조건을 잘 갖추고 있다(Carmichael *et al.*, 1997). 따라서 제주도 고산 지역에서 O₃, NO_x, SO₂, CO 등의 미량기체를 측정하기 위한 연구는 지역 대기질 변화는 물론 외부로부터 유입되는 오염물질의 장거리 이동 영향을 관찰할 수 있는 중요한 연구라 할 수 있다.

본 연구에서는 2004년 5월부터 2005년 4월까지 제주도 고산에서 측정한 미량기체 (O₃, NO_x, SO₂, CO)의 농도변화를 측정하고, 농도와 공기피 특성과의 상

관관계를 살펴보았다.

2. 실험 방법

2.1 측정장소

관측 장소인 고산은 제주도의 남서쪽(126.16E, 33.29N) 해발 72 m에 위치하고 있다. 북쪽과 남쪽 및 서쪽은 해안과 바로 인접해 있으며 동쪽으로는 제주도의 내륙과 이어져 있다. 한반도 내에서는 육지의 영향을 가장 적게 받는 청정지역이라 할 수 있으며 동아시아 대륙과 북 태평양의 사이에 위치하고 있어 대륙으로부터의 대기 오염물 방출과 이로 인하여 북태평양지역에 미치는 영향을 감시할 수 있는 최적의 장소이다(Carmichael *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1997). 또한 제주도 고산은 ABC (Atmospheric Blown Cloud) 프로젝트의 super-site로 지정되었으며, 2005년 3월부터 4월까지 ABC-EAREX (Atmospheric Blown Cloud-East Asia Regional Experiment)가 진행되었다(송미정 등, 2006; 문광주 등, 2005).

2.2 분석 방법

대기 중 O₃과 NO_x, CO, SO₂는 외부 공기가 테프론 재질 (PFA-Teflon)의 시료채취튜브를 통해 필터를 거쳐 입자상 물질들이 제거된 후 각 분석기에 유입되어 연속적으로 측정이 가능하도록 하였다. 분석기기는 모두 TEI (Thermo Environmental Instruments)사의 제품을 이용하였으며, 모델명 및 기기 사양은 표 1에 제시하였다(김세웅 등, 1999). 모든 관측 자료는 관측소의 컴퓨터에 저장된 뒤 인터넷을 통해 자동으로 서울대 컴퓨터에 실시간으로 전송되었다. 측정기기의 보정은 표준혼합가스와 TEI사의 Model 146C와 model 111를 이용하여 한달에 한번

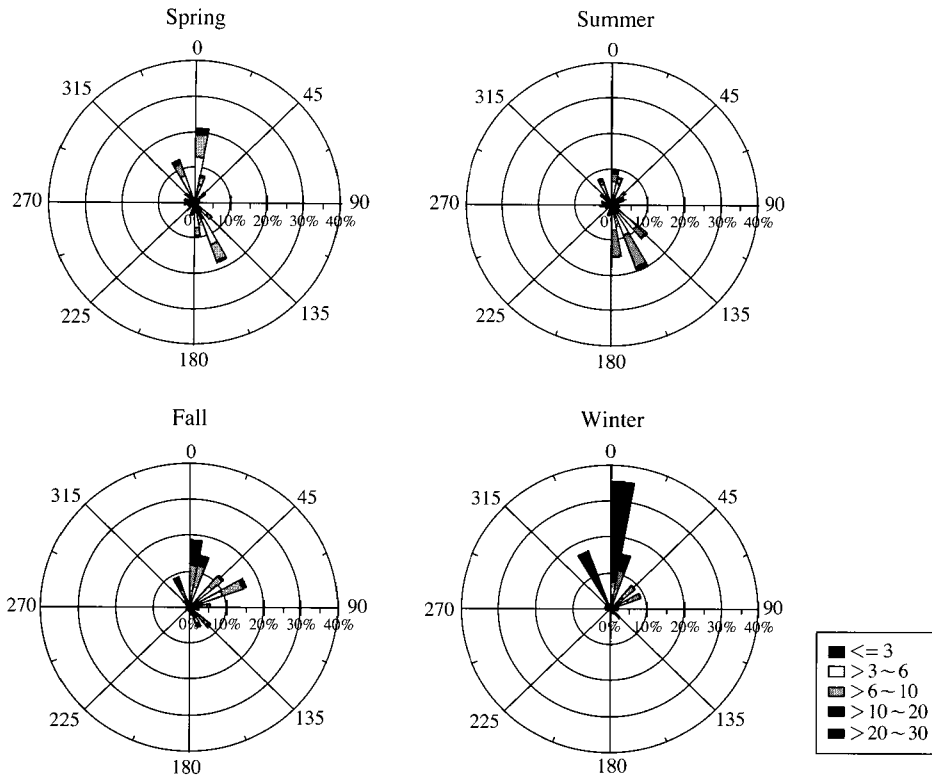


Fig. 1. The wind charts show the percentage of times surface wind flow from a given direction at Gosan from May 2004 to April 2005, The seasons at Gosan were classified as spring (March to May), summer (June to August), fall (September to November), and winter (December to February) respectively.

진행하였으며, zero air 주입을 통해 CO기기의 드리프트(drift)도 점검하였다. O₃은 이와 같은 정기적인 보정 작업 전에 국립환경과학원의 일차표준분광기로 보정을 실시하였다. O₃과 CO의 경우, 2005년에 고산에서 실시한 ABC-EAREX 캠페인 참여 기관의 기기들과 측정값을 상호 비교하는 방법으로 검·교정을 실시하였다(Tanimoto *et al.*, 2004). 본 연구에서는 매 10초마다 측정된 자료를 1분 평균으로 수집하였으며, 이를 1시간 평균으로 처리하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상조건

측정기간 동안 고산의 평균 온도는 15.8°C, 상대습도는 73%였으며 계절별 변화가 뚜렷하게 나타났다.

표층바람분포를 살펴보기 위해 기상청에서 제공한 1시간 평균 풍향, 풍속자료를 이용하여 풍향에 따른 바람의 빈도(frequency)를 도시화하였다(그림 1). 측정기간 중 봄에는 계절의 특성상 바람의 방향이 북풍과 남동풍으로 산재되어 있었다. 여름에는 다른 계절과 비교하여 상대적으로 약한 남풍과 남동풍이 주를 이뤄 바다로부터의 영향을 지배적으로 받는 것을 볼 수 있다. 겨울로 넘어가는 가을철에는 풍속이 증가하며 북서풍의 영향을 받는다. 겨울철에는 20 m/sec 이상의 풍속이 약 5%를 차지하고 평균풍속도 계절 중 가장 높게 나타났다. 바람의 40~50%가 북쪽과 북서쪽에서 상대적으로 높은 속도로 불어와 중국 대륙 등지로부터의 영향을 받았음을 알 수 있다.

일반적으로 고산은 계절풍의 영향으로 봄과 겨울철에는 강한 북서계열의 바람이, 여름에는 남동계열의 바람이 주 풍향을 이루는 것으로 알려져 있다. 하

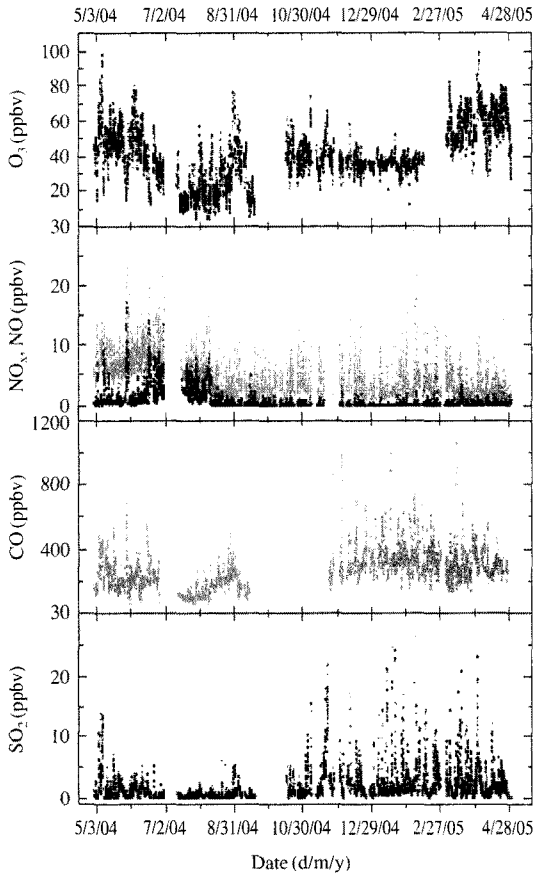


Fig. 2. Time series of trace gases (O_3 , NO_x , NO , CO , and SO_2) at Gosan from May 2004 to April 2005. All analysis were basis on 1 hr-averaged data.

지만 관측기관 중 봄과 겨울철에는 북풍이 보다 우세했던 것으로 나타났다.

3. 2 고산 대기 중의 미량기체 농도

제주도 고산에서 측정된 대기 중 O_3 , NO_x , CO , SO_2 의 시간평균 농도를 도시하였다(그림 2). 분석기간 동안 각 측정화합물의 연평균농도를 살펴보면, O_3 은 $40.06 (\pm 16.01)$ ppbv, NO_x 는 $4.64 (\pm 3.24)$ ppbv, CO 는 $264.92 (\pm 115.73)$ ppbv, 그리고 SO_2 는 $1.98 (\pm 2.73)$ ppbv로 관측되었다.

3. 2. 1 대기 중 미량기체의 농도의 월변화

측정화합물의 월평균 농도변화를 살펴보았다(그림 3). 측정화합물 중 O_3 의 월변화가 가장 뚜렷하게 나

타났으며, 4월에 최고 값, 6월에 최저 값이 관측되었다. 이와 같이 봄에 최고 값을, 여름에 최저 값을 보이는 경향은 북반구 중위도 지역의 많은 청정지역에서의 연구결과에서도 보고된 바 있다(Monks, 2000; Sunwoo *et al.*, 1994).

일반적으로 대류권 O_3 의 주요한 소스로는 성층권으로부터의 유입과 광화학반응으로 인한 생성 및 장거리 이동을 통한 유입으로 나누어 볼 수 있다. 과거에는 이중 성층권으로부터의 유입이 지배적인 소스라 생각되어 왔지만(Fabian and Pruchniewz, 1977; Danielsen, 1968; Junge, 1962), 이후 성층권과 대류권 간의 상호교환에 관한 많은 실험과 모델을 통한 연구들에서 광화학반응에 의한 O_3 생성이 보다 지배적이 제시되고 있다(Crutzen, 1988; Liu *et al.*, 1987; Chameides and Walker, 1973). 이와 같은 O_3 이 봄철에 최고값을 보이는 요인으로는 기단이동의 변화에 따른 영향을 비롯하여 광화학적 반응에 의한 것이라 볼 수 있다. 겨울철 O_3 의 광화학적 수명은 대략 200일 정도로 비교적 길어(Liu *et al.*, 1987), O_3 의 전구물질인 NO_x 와 VOC 등이 축적되고 있다가 봄철 기온이 상승하고 solar intensity가 증가하면서 O_3 생성에 큰 기여를 하게 된다. 게다가 고산은 아시아몬순에 의하여 봄철 북풍 또는 북서풍에 의해 중국 및 한반도로부터 장거리 이동에 의한 영향을 받게 된다. 이와 같이 겨울철 O_3 의 longer lifetime과 longer transport distance가 봄철 O_3 이 최고값을 보이는 주된 요인으로 여겨지고 있다(Sunwoo *et al.*, 1993). 반면 여름철 O_3 의 최저 농도는 여름철 태평양으로부터 깨끗한 기단의 영향이 지배적이고 비가 많이 내리는 조건이며 비에 의한 O_3 scavenging이 영향을 미친 것으로 여겨진다.

NO_x 의 월평균 농도는 4월에 최저 값, 6월에 최고 값을 보였다. 이와는 달리 일반적으로 도심지역에서는 NO_x 의 농도가 겨울에 높고 여름에 낮은 것으로 알려져 있다. 이와 같이 고산의 NO_x 농도가 도심지역과 달리 여름에 높게 나타나는 이유로는 여러 요인이 있을 수 있다. NO_x 는 대류권에서의 체류시간이 비교적 짧아 장거리 이동에 의한 영향이 지배적이라고 보기는 힘들다. 그리고 여름철 이 지역은 남동풍이 우세한데 풍속이 상대적으로 낮아 대기혼합이 활발하게 일어나지 않게 된다. 이와 같은 이유로 NO_x 의 고농도는 제주도의 남쪽 관광지역 등지로부터의

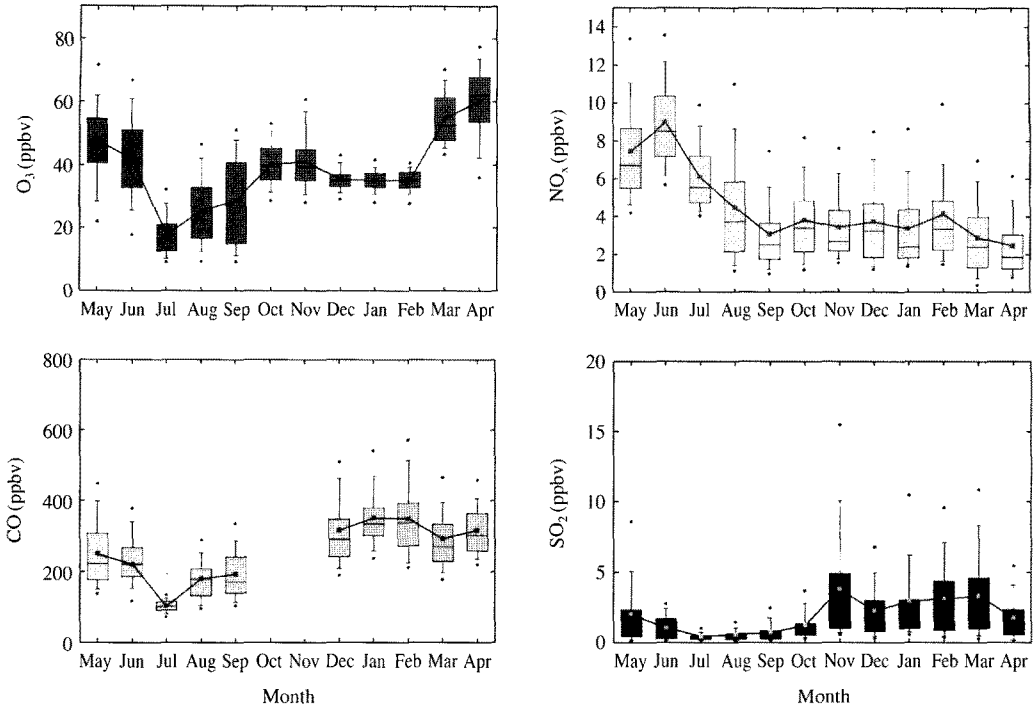


Fig. 3. The monthly variations of O₃, NO_x, CO, and SO₂ at Gosan from May 2004 to April 2005.

영향을 받은 것으로 추측된다. 이밖에도 온도와 일사량의 상승으로 토양미생물의 활동이 활발해진 것이 원인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

박경윤 등(1994) 등의 연구결과에서도 고산에서의 NO가 여름철(8월)에 증가하는 현상이 나타났다. 이와 같이 여름철 NO와 이를 포함한 NO_x가 높게 나타나는 것에 대한 명확한 원인을 규명하는 연구가 향후 필요하다고 판단된다.

CO의 월변화를 살펴보면, 6월에 최저 값을, 2월에 최고 값을 보였다. CO월변화의 경우 OH 반응에 의한 영향이 주된 요인으로 알려져 있다(Holloway and Kasibhatla, 2000; Narita *et al.*, 1999). 여름에 최저값을 보이는 이유로는 여름철 높은 OH라디칼과(Novelli *et al.*, 1992) 서태평양으로부터 깨끗한 기단의 영향을 받고 있는 시기이기 때문이다. 겨울철 높은 CO값을 보이는 요인도 이와 같이 OH 반응에 의한 영향이 주요하지만 이 지역에서의 관측 결과를 살펴보면(그림 2) 겨울철에 CO농도가 자주 높은 값을 나타내는 것으로 보아 이는 OH라디칼의 영향보다는

중국대륙 등의 오염된 지역으로부터 영향을 추가적으로 받고 있는 것으로 여겨진다.

SO₂ 역시 그 월변화 경향이 뚜렷하게 나타나지는 않았지만 CO와 비슷한 경향을 보였다. 이와 같은 SO₂의 월변화는 중국대륙 등의 오염된 지역으로부터의 장거리이동에 의한 영향이 주도적이라고 볼 수 있다.

3. 2. 2 대기 중 미량기체 농도의 일변화

측정화합물의 연평균 일변화를 살펴보았다(그림 4). O₃의 경우 일변화에서 일사량의 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 일반적으로 오염 영향을 직접적으로 받고 있는 도심지역에서의 일변화 폭이 10~20 ppbv 정도이다. 그러나 이에 비해 고산에서의 변화 폭은 10 ppbv 이하로 낮게 나타났다. 이와 같이 고산 지역에서 도심지역에 비해 일변화 폭이 적은 이유는 낮과 밤에 O₃의 생성과 소멸에 관여하는 NO_x의 농도가 낮기 때문이다.

NO_x를 비롯한 CO와 SO₂의 경우 역시 다른 오염된 도시에서 보이는 일변화 양상과 비슷한 경향을

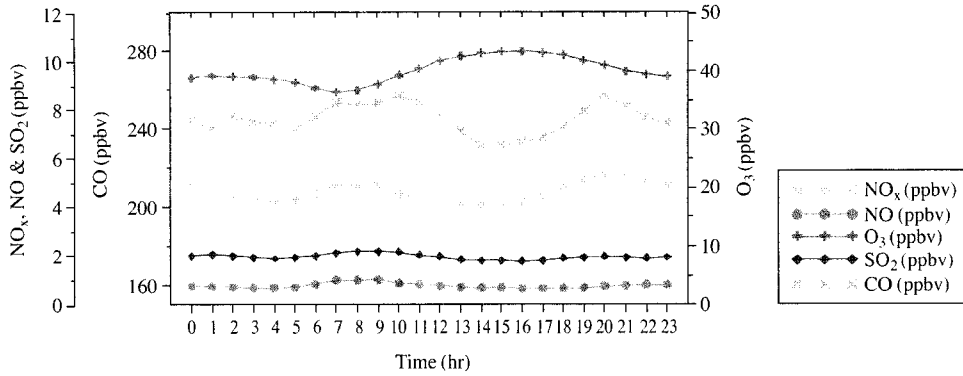


Fig. 4. Diurnal variations of O₃, NO_x, CO, and SO₂ at Gosan from March 2004 to April 2005.

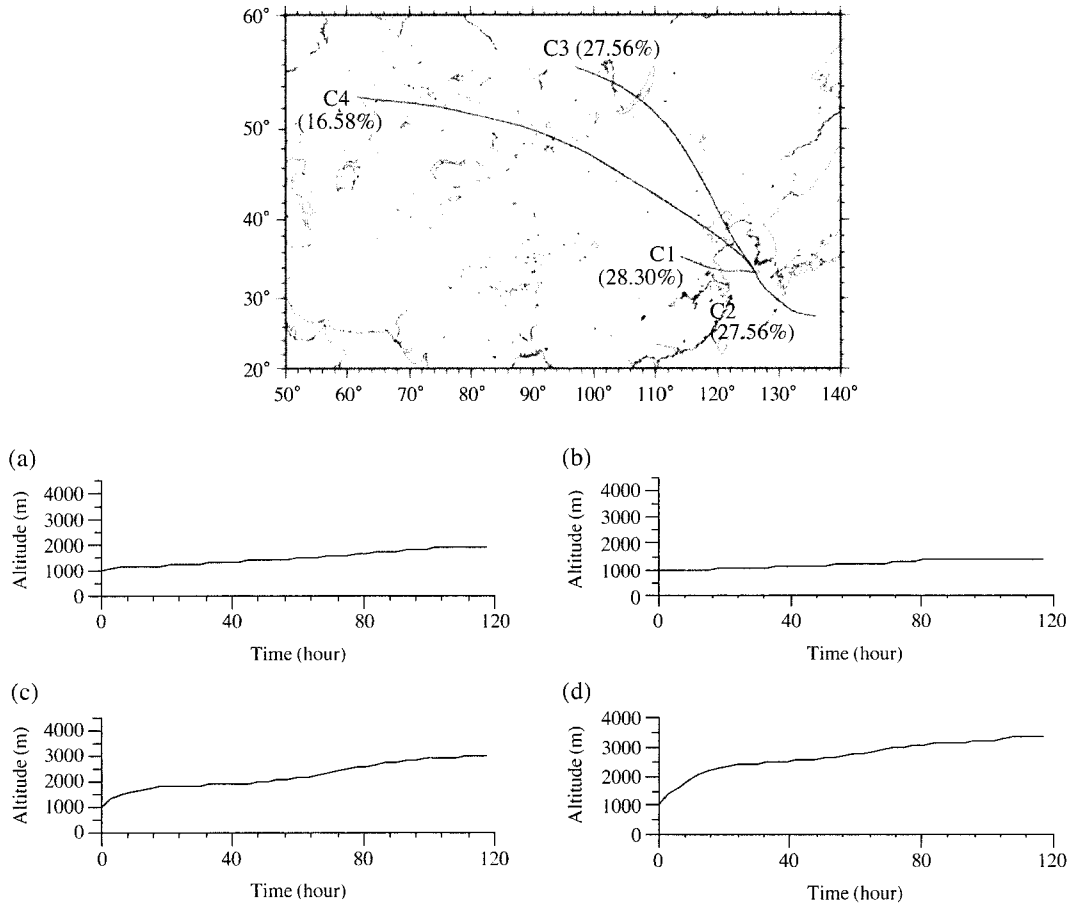


Fig. 5. The major back-ward trajectories at altitude of 1,000 m (AGL) for the four clusters at Gosan, Korea. The percents of trajectories belonging to a particular cluster are shown with the cluster numbers. (a), (b), (c), and (d) are the altitude of average back-ward trajectories for cluster 1, 2, 3, and 4 respectively at Gosan.

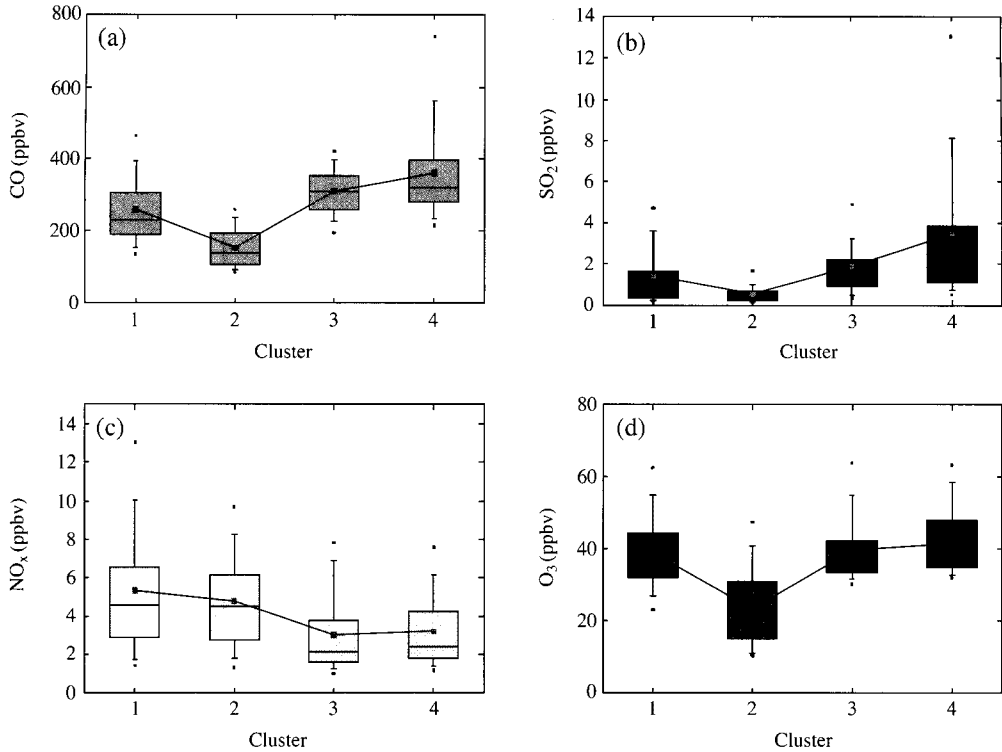


Fig. 6. (a) CO, (b) SO₂, (c) NO_x, and (d) O₃ level classified by each cluster at Gosan from May 2004 to April 2005. It was not used any data of observed trace gases when wind speed less than 3 m/sec to exclude local events before classifying by each cluster.

보이고 있다. 그러나 일변화 폭이 CO의 경우 일반적으로 대도시에서 수 ppbv 가량 나타나는 것에 비해 고산에서는 약 30 ppbv로 나타났고, SO₂의 경우 일반적으로 대도시에서 수십 ppbv 가량 나타나는 것에 비하여 고산에서는 1 ppbv 이하로 관측되어 일변화 폭이 상대적으로 매우 작게 나타났다.

이처럼 O₃, NO_x, CO, SO₂의 일변화가 적게 나타나는 것은 고산이 1차 오염물의 영향을 비교적 적게 받고 있는 청정한 지역임을 의미하는 결과이다.

3.3 대기 중 미량기체의 농도변화와 공기괴 특성과의 관계

3.3.1 역궤적 분석을 이용한 군집분석

측정기간 동안 CO와 SO₂는 이른 봄과 겨울철에 빈번히 농도가 상승하는 현상을 보였다(그림 2). 제주도 고산지역이 청정한 지역임에도 불구하고 이러

한 현상이 나타나는 원인을 규명하기 위하여 측정기간 동안 측정지역으로 도착한 역궤적 분석(backward trajectory analysis)을 실시하였다. 역궤적 분석은 HYSPLIT-4 (Draxier and Hess, 1998)을 이용하여 1,000 m (AGL) 고도에서 6시간 간격으로 수행하였다. 이를 군집분석(Cluster Analysis)을 통해 궤적(trajec-tory)의 이동경로와 속도를 기준으로 통계적 방법에 따라(Brankov *et al.*, 1998) 총 4개로 나누었다(그림 5; Kim, 2007).

3.3.2 대기 중 미량기체의 농도변화와 공기괴 특성과의 관계

공기괴의 군집분석을 이용하여 측정화합물의 농도를 분류하기 전에 국지적인 영향을 제거하기 위하여 바람의 속도가 3 m/sec 이하로 불었을 때의 화합물의 자료는 모두 제거하였다. 이렇게 제거된 자료들은 전체자료의 12.5%를 차지하였다.

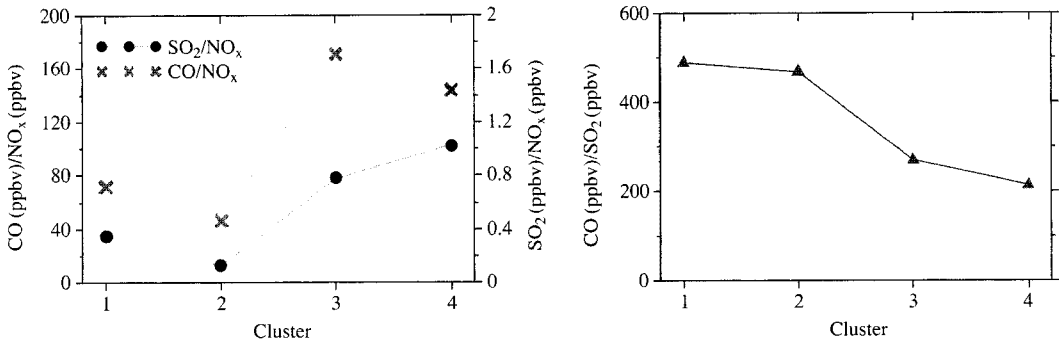


Fig. 7. The chemical ratios of CO to NO_x and SO₂ to NO_x (left) and the chemical ratio of CO to SO₂ (right) in each cluster at Gosan from April 2004 to May 2005.

이러한 제거작업 후 측정화학물질의 농도를 군집 별로 나누어 살펴보았다(그림 6). NO_x를 제외한 모든 화학물질은 각 군집 간에 확연한 농도차이를 보여주고 있으나 NO_x는 군집 간 농도차이가 크지 않은 것뿐 아니라 그 경향도 다른 화학물질과는 다르게 나타났다.

3. 3. 2. 1 Cluster 1

다른 화학물질에서와 달리 Cluster 1에서 NO_x의 평균농도가 가장 높게 나타났다(그림 6).

이러한 요인을 살펴보기 위하여 1차 오염물질의 화학적 조성비를 통해 오염원과 수송형태의 특징을 살펴보았다(그림 7). NO_x는 체류시간이 약 하루 정도로 CO와 SO₂가 각각 몇 개월, 몇 주에 이르는 것에 비하면 상대적으로 짧다. 따라서 CO/NO_x와 SO₂/NO_x비가 높으면 이는 장거리 이동에 의한 영향을 많이 받은 것으로 추정할 수 있다. 주요한 인위적 배출원이 CO는 자동차 등과 같은 수송에 의한 것이고, SO₂는 석탄 연소배출이라고 보았을 때 CO/SO₂비로부터 오염 근원지의 오염물 배출 특성을 유추할 수 있다.

Cluster 1의 경우, CO/NO_x와 SO₂/NO_x의 비가 각각 0.05, 41.77로, 다른 군집에 비하여 상대적으로 낮았고 CO/SO₂의 비는 488.54로 최고 값을 보였다. 이는 장거리 이동에 의한 영향보다는 제주도 인근의 자동차 등 수송에 의한 오염물 배출의 비중이 높고 석탄 등의 사용이 적은 보다 발전된 도심지역으로부터 영향을 받은 것임을 제시한다. 실제로 Cluster 1에서 매우 느리게 한국, 일본, 중국 등지의 인구밀집도가 높고 발전된 도심지역을 지나는 공기체적의 횡수

Table 2. Trajectories number and percentage of different clusters arriving at Gosan in each season (%) from May 2004 to April 2005.

	Spring (%)	Summer (%)	Fall (%)	Winter (%)	Total
Cluster 1	19.18	31.51	28.77	20.55	219
Cluster 2	3.21	71.10	25.69	0.00	218
Cluster 3	19.16	0.93	24.30	55.61	214
Cluster 4	22.76	0.00	15.45	61.79	123

가 많았다.

3. 3. 2. 2 Cluster 2

Cluster 2는 공기가 서태평양에서 기원하여 바다의 영향을 주도적으로 받은 뒤 고산으로 유입된 것으로 보이며(그림 5), 여름에 가장 빈번하게 발생하였다(표 2). 예상대로 CO와 SO₂, O₃의 농도는 다른 군집에 비하여 가장 낮은 평균값을 보였으나 NO_x의 경우 다른 군집에 비하여 비교적 높게 나타났다. 이 역시 NO_x의 상대적으로 짧은 대류권 체류시간 때문인 것으로 여겨진다.

화학물질의 화학적 조성비를 살펴보면, NO_x에 대한 CO와 SO₂의 비가 각각 46.23, 0.13으로 군집 중 최저 값을 보였다. 반면 CO/SO₂의 비는 다른 군집과 비교하여 높은 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 Cluster 1에서와 같이 Cluster 2도 비교적 인근의 자동차의 밀도가 높은 대도시의 영향이 지배적인 것임을 제시한다. 실제로 몇 공기체적들이 한국이나 일본을 거쳐 고산에 유입되었다. 이러한 요인들이 바다의 영향을 주요하게 받아 가장 청정할 것으로 여겨진

Cluster 2에서 NO_x 의 농도가 상대적으로 높고 그 변화폭이 크게 관측된 원인으로 여겨진다.

3. 3. 2. 3 Cluster 3과 Cluster 4

Cluster 3과 4에서는 NO_x 를 제외한 O_3 와 CO , SO_2 가 모두 높은 값을 보였다(그림 6). 이 군집들은 모두 산업화가 활발히 이루어지고 있는 북쪽대륙과 중국의 동쪽연안지역으로부터 영향을 지배적으로 받았고 공기의 이동경로도 비슷한 경향을 보였다(그림 5). 이 군집들의 궤적들은 겨울에 그 발생빈도가 가장 높았는데(표 2), 이 시기는 이들 화합물이 보다 활발히 방출되며 매우 건조한 시기이다.

NO_x 에 대한 CO 와 SO_2 의 비는 각각 Cluster 3에서는 170.67, 0.78, Cluster 4에서는 143.19, 1.02로 모두 다른 군집에 비해서 높게 나타났다(그림 7). CO/SO_2 비는 Cluster 3에서는 269.80, Cluster 4에서는 213.08으로 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과 역시 두 군집이 다른 군집에 비해서 수송수단에 의한 오염보다는 석탄사용 등에 의한 오염이 주요한 산업발전이 활발하게 이루어지고 있는 지역으로부터 장거리 이동에 의해 영향을 받은 것임을 보여준다.

4. 결 론

2004년 5월부터 2005년 4월까지 제주도 고산에서 대기 중 미량기체인 O_3 , NO_x , CO , SO_2 의 농도를 측정하였다.

분석기간 동안 O_3 는 $40.06 (\pm 16.01)$ ppbv, NO_x 는 $4.64 (\pm 3.24)$ ppbv, CO 는 $264.92 (\pm 115.73)$ ppbv, 그리고 SO_2 는 $1.98 (\pm 2.73)$ ppbv로 관측되었다. 이들의 월변화와 일변화양상을 통하여 제주도 고산측정소는 비교적 청정한 지역임을 알 수 있었다.

그러나 겨울과 이른 봄철에 CO 와 SO_2 의 농도가 자주 높게 나타나는 원인을 살펴보기 위하여 측정기간 동안 고산측정소로 유입된 공기의 역궤적 분석을 이용하여 군집분석을 실시하였다.

분류된 군집 중 태평양에서의 영향을 지배적으로 받은 군집에서는 NO_x 를 제외한 모든 화합물이 낮은 값을 보였다. 그리고 북쪽대륙과 중국의 동쪽연안지역으로부터 직접적으로 영향을 받은 것으로 여겨지는 군집들에서는 O_3 , CO , SO_2 가 모두 높은 값을 보였다. 이러한 분석 결과에서 이들 화합물의 화학적

조성비를 통해 오염원과 이동경로의 특징 또한 살펴볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 고산에서의 대기 중 미량기체 (O_3 , NO_x , CO , SO_2)의 농도가 외부지역으로부터 장거리 수송에 의하여 이 지역으로 유입되는 공기괴의 특성에 따라 영향을 받은 것임을 제시한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2004-041-C00414).

참 고 문 헌

- 김세웅, 김기현, 김진석, 이강웅, 김경렬, 문동민, 김필수, 손동현(1999) 현장측정에 기초한 대기오염물질의 측정방식에 대한 비교연구-주요 기준성 오염물질을 중심으로, 한국대기환경학회지, 15(4), 403-415.
- 문광주, 한진석, 공부주, 이민도, 정일록(2005) ABC-EAREX 2005 기간 동안 제주도 고산지역 대기 중 가스상 및 입자상 물질의 분포특성, 한국대기환경학회지, 21(6), 675-687.
- 박경윤, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준(1994) 제주도 고산 측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기환경학회지, 10(4), 252-259.
- 송미정, 이미혜, 문광주, 한진석, 김경렬, 이강웅(2006) ABC-EAREX2005 미세 에어러솔의 화학적 특성, 한국대기환경학회지, 22(5), 604-613.
- Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C. 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, 1999-2010.
- Brankov, E., S.T. Rao, and P.S. Porter (1998) A trajectory-clustering-correlation methodology for examining the long-range transport of air pollutants, Atmospheric Environment, 32, 1525-1534.
- Carmichael, G.R., M.S. Hong, H. Ueda, L.L. Chen, K. Murano, J.K. Park, H.G. Lee, Y. Kim, C. Kang, and S. Shim (1997) Aerosol composition at Cheju Island, Korea, Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 102(D5), 6047-6061.
- Chameides, W.L. and J.C.G. Walker (1973) A photochemical

- theory for tropospheric ozone, *Journal of Geophysical Research*, 78, 8751-8760.
- Chen, L.L., G.R. Carmichael, M.S. Hong, H. Ueda, S. Shim, C.H. Song, Y.P. Kim, R. Arimoto, J. Prospero, D. Savoie, K. Murano, J.K. Park, H.G. Lee, and C. Kang (1997) Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island, South Korea, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 102(D23), 28551-28574.
- Crutzen, P.J. (1988) Tropospheric ozone: A review, in *Tropospheric Ozone*, edited by I.S.A. Isakwen, D. Reidel, Hingham, Mass. 3-32.
- Danielsen, E.F. (1968) Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25, 502-518.
- Derwent, R.G., P.G. Simmonds, S. Seuring, and C. Dimmer (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, *Atmospheric Environment*, 32(2), 145-157.
- Dianov-Klokov, V.I. and L.N. Yugarnov (1989) Spectroscopic measurements of atmospheric carbon monoxide and methane, 2, Seasonal variations and long-term trends, *J. Atmos. Chem.*, 8, 153-164.
- Draxier, R.R. and G.D. Hess (1998) An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition, *Australian Meteorological Magazine*, 47(4), 295-308.
- Fabian, P. and P.G. Pruchniewz (1977) Meridional distribution of ozone in the troposphere and its seasonal variations, *Journal of Geophysical Research*, 82, 2063-2073.
- Holloway, T. and P. Kasibhatla (2000) Global distribution of carbon monoxide, *Journal of Geophysical Research*, 105(D10), 12123-12147.
- Junge, C.E. (1962) Global ozone budget and exchange between stratosphere and troposphere, *Tellus*, 14, 363-377.
- Kim, I. (2007) Variations of trace gases concentrations and the relationship with air mass characteristic at Gosan, Korea, M.Sc. Dissertation, Seoul National University, Korea.
- Klausenn, J. (2007) Direct assessment of international consistency of standards for ground-level ozone: strategy and implementation toward metrological traceability network in Asia, *Journal of Environmental Monitoring*, 9, 1183-1193.
- Liu, H., J. Jacob, I. Bey, R.M. Yantosca, B.N. Duncan, and G.W. Saxe (2003) Transport pathways for Asian pollution outflow over the Pacific: interannual and seasonal variation, *Journal of Geophysical Research*, 108(D20), 8786.
- Liu, S., M. Trainer, D. Fehsenfeld, D. Parrish, E. Williams, D. Fahey, G. Hubler, and P. Murphy (1987) Ozone production in rural troposphere and the implication for regional and global ozone distributions, *Journal of Geophysical Research*, 92, 4191-4207.
- Logan, J.A., M.J. Prather, S.C. Wofsy, and M.B. McElroy (1981) Tropospheric chemistry-A global perspective, *Journal of Geophysical Research*, 86, 7210-7254.
- Monks, P.S. (2000) A review of the observations and origins of the spring ozone maximum, *Atmospheric Environment*, 34(21), 3545-3561.
- Narita, D., P. Pochanart, J. Matsumoto, K. Someno, H. Tanimoto, J. Hirokawa, Y. Kajii, H. Akimoto, M. Nakao, T. Katsuno, and Y. Kinlo (1999) Seasonal variation of carbon monoxide at remote sites in Japan, *Chemosphere: Global Change Science*, 1, 137-144.
- Novelli, P.C., L.P. Steele, and P.P. Tans (1992) Mixing ratios of carbon monoxide in the troposphere, *Journal of Geophysical Research*, 97, 20731-20750.
- Parrish, D.D., M. Trainer, M.P. Buhr, B.A. Watkins, and F.C. Fehsenfeld (1991) Carbon monoxide concentrations and their relation to concentrations of total reactive oxidized nitrogen at two rural US sites, *Journal of Geophysical Research*, 96, 9309-9320.
- Sunwoo, Y., G.R. Carmichael, and H. Ueda (1994) Characteristics of background surface ozone in Japan, *Atmospheric Environment*, 28(1), 25-37.
- Tanimoto, H., H. Mukai, Y. Sawa, H. Matsueda, S. Yonemura, T. Wang, S. Poon, A. Wong, G. Lee, J.Y. Jung, K.R. Kim, M.H. Lee, N.H. Lin, J.L. Wang, C.F. Ou-Yang, C.F. Wu, H. Akimoto, P. Pochanart, K. Tsuboi, H. Doi, C. Zellwegern, and R. Vingarzan (2004) A review of surface ozone background levels and trends, *Atmospheric Environment*, 38(21), 3431-3442.