

우리 나라 배경농도지역의 1996~1997년 미세입자상 탄소성분 측정 결과

Measurement of Carbonaceous Species in Fine Particles at the Background Sites in Korea During 1996 and 1997

김용표¹⁾ · 이종훈^{1),2)} · 문길주¹⁾ · 김희강²⁾ · 이종범³⁾

¹⁾한국과학기술연구원 지구환경연구센터

²⁾건국대학교 환경공학과, ³⁾강원대학교 환경학과

(1998년 8월 3일 접수, 1998년 10월 12일 채택)

Yong Pyo Kim¹⁾, Jong Hoon Lee^{1),2)}, Kil-Choo Moon¹⁾,
Hui-Kang Kim²⁾ and Chong Bum Lee³⁾

¹⁾Global Environmental Research Center, Korea Institute of Science and Technology

²⁾Department of Environmental Engineering, Konkuk University

³⁾Department of Environmental Science, Kangwon National University

(Received 3 August 1998; accepted 12 October 1998)

Abstract

The concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in fine aerosols were determined from the samples collected at the two background sites of Kosan in Cheju Island and Kangwha. Samplings were carried out during the spring and winter of 1996 and the fall and winter of 1997. PM_{2.5} particles were collected on the pre-fired quartz filters for 24 hours and analyzed by the selective thermal oxidation method. The concentrations of OC at the sites were higher than those commonly observed from clean areas around the world, but those of EC at both sites were lower than, or comparable to, other clean areas in the world. Both the OC and EC levels at Kangwha were higher than those at Kosan. According to backward trajectory analysis, most air pollutants collected at the two sites were from China. It was found that the OC and EC concentrations in air masses from southern China were higher than those from northern China.

Key words : PM_{2.5}, carbonaceous species, background sites, long-range transport

1. 서 론

대기 중 입자상 탄소성분 (total carbon, TC)은 유기탄소 (organic carbon, OC)와 원소탄소 (elemental carbon, EC), 그리고 탄산염 (carbonates)으로 나눌 수

있다. 유기탄소는 인위적, 자연적 발생원에서 직접 배출되거나, 대기 중에서 기체상 유기화합물이 광화학 반응 등에 의해 입자로 변환되어 생성된다. 원소탄소는 대부분 화석연료의 연소에 의해 대기 중으로 직접 배출되는 일차 오염물질이다. 탄산염은 토양 등 지각성분에서 발생하며 대부분이 2 μ m 이상

거대입자에 포함되어 있으며, 전체 입자 무게 농도의 1% 이하로 존재하기 때문에 일반적으로 입자상 탄소성분으로 고려하지 않는다(이종훈 등, 1997a).

도심지역과 같은 오염지역의 경우 입자상 탄소성분은 전체입자(TSP) 무게농도의 10~20%를, 미세입자(PM_{2.5}) 무게농도의 40%를 차지하는 입자상 물질의 주요 구성성분이다(백남준 등, 1996). 한편 청정지역에서의 유기탄소와 원소탄소의 농도는 각각 미세입자 무게농도의 11%와 0.3% 정도를 차지하는 것으로 알려져 있다(Heintzenberg, 1989). 유기탄소는 입자상 탄소성분의 대부분을 차지하는데, 오염지역의 경우에는 주로 대기 중에서의 기체상 유기화합물의 반응에 의해 생성되는 이차 유기탄소로 추정된다(Chow *et al.*, 1994). 따라서, 대기 중 탄소성분에 대한 원소탄소의 농도비(TC/EC)를 계산함으로써 대기의 유기탄소가 일차 유기탄소인지 이차 생성물인지를 가늠하는 방법이 널리 쓰이고 있다(Turpin and Huntzicker, 1995). 즉, 대기 중의 TC/EC가 일차 배출 입자의 TC/EC보다 크면 이차 유기탄소가 존재한다는 것이다. 한 예로, 미국 Los Angeles의 경우 지역내의 여러 지역과 다양한 대기조건에서 수행된 연구결과로부터 구한 일차배출입자의 TC/EC 값은 2.4~3.4의 범위에 있다(Turpin *et al.*, 1991). 그러나 일차 유기탄소와 이차 유기탄소의 존재비율은 해당 지역의 발생원 특성과 계절적 요인에 따라 다르며 여기에 대해서는 많은 논란이 있다(Turpin *et al.*, 1991). 이종훈 등(1997a)이 제주도 고산에서 1994년과 1995년에 미세입자의 탄소성분을 측정된 결과에 의하면, TC/EC 값은 북태평양에서 깨끗한 공기가 이동하였을 때 오히려 높고, 한반도와 일본에서 오염된 공기가 이동하였을 때 낮은 것으로 나타났다. 따라서, TC/EC 값의 변화 추이는 청정지역의 경우와 오염지역의 경우가 다를 것으로 보인다.

고산과 강화측정소는 우리나라의 대표적인 청정지역인 제주도와 강화도에 있는 측정소로 한반도 지역의 배경 농도와 동북아시아 지역에서의 대기오염물질의 이동을 연구하는 데 좋은 조건을 갖추고 있다(이종훈 등, 1997b; 김용표 등, 1996b). 한국과학기술연구원(KIST) 지구환경연구센터는 건국대학교, 강원대학교 연구팀과 공동으로 1996년과 1997년의 봄, 가을, 겨울철에 고산과 강화측정소에서 미세입자

에 함유된 탄소성분을 측정하고, 역계적분석을 통하여 탄소성분의 이동여부를 검토하였다. 이 논문에서는, 1) 미세입자(PM_{2.5}) 중 탄소성분을 여름철을 제외한 계절에 측정한 결과를 다른 지역에서 행한 측정결과와 비교함으로써 두 배경농도 측정소의 입자상 탄소성분의 농도경향을 검토하고, 2) 입자상 탄소성분의 장거리이동 여부를 살펴보았다.

2. 측정/분석 및 역계적분석

2.1 탄소성분 측정/분석

입자상 탄소성분의 측정은 1996년 2월 28일~3월 13일(14일), 12월 10일~16일(7일), 1997년 1월 8일~20일(13일), 9월 26일~10월 6일(11일), 12월 11일~22일(11일) 동안의 5회에 걸쳐 수행하였다. 측정을 수행한 고산과 강화측정소의 지리적 정보와 국지오염원의 영향에 대해서는 이종훈 등(1997b)에 자세히 기록하였다. 측정소를 간단히 소개하면, 고산측정소는 제주도의 서쪽 끝에 있으며, 해변에서 70 m 높이의 절벽 위에서 측정하였다. 이 측정소에서는 1992년부터 여러 종류의 대기오염물질을 측정하고 있다. 강화측정소는 강화도 서쪽 해안선에서 약 150 m 안쪽에 있으며, 1989년부터 대기오염도를 측정하고 있다. 그림 1에 두 측정소의 위치를 나타내었다.

탄소성분 분석을 위한 미세입자는 입경 2.5 μm

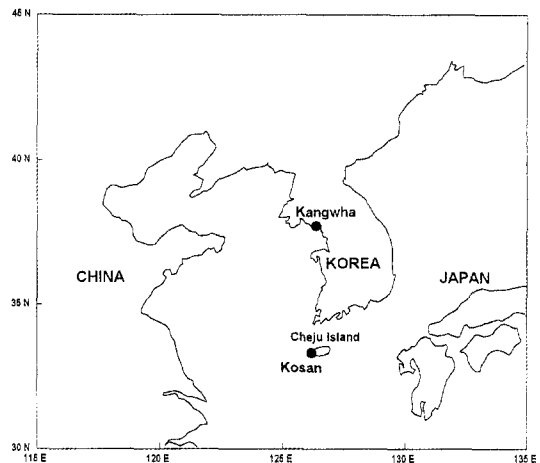


Fig. 1. Location of the monitoring sites.

분급의 크기를 갖는 사이클론(미국 URG사, URG-2000-30EN)에 47mm 석영섬유(quartz fiber) 거름종이(영국 Whatman사, QM-A)를 삽입한 테플론제 필터홀더(미국 Saville사)를 장착하여, 오전 9시부터 다음날 오전 9시까지 24시간 동안 채취하였다. 유량의 조절은 분당 16.7l의 유속으로 공기가 통과하도록 제작된 임계 오리피스(critical orifice, 미국 BGI사)를 사용하였다.

유기탄소는 온도, 보관기간 등 환경조건에 따라 기체상 유기물질이 채취입자로 흡착하거나(positive artifacts), 채취입자 중의 반휘발성 유기물질이 휘발에 의해 손실될 수 있으므로(negative artifacts)(이종훈 등, 1997a), 탄소성분 분석용 거름종이의 준비와 보관에 주의하여야 한다. 탄소분석용 거름종이는 석영섬유로 만든 것이며, 850°C의 로(furnace)에서 1시간 30분 동안 태워서, 거름종이에 포함된 각종 유기물질을 연소시킨 후, 오염되지 않은 깨끗한 페트리디쉬에 넣어 테플론 테이프로 봉하고, 알루미늄 호일로 싸서 실험실에서는 실리카겔(silica gel)을 넣은 데시케이터, 그리고 현장에서는 -18°C 이하의 냉동실에 보관하였다. 입자 채취가 끝난 거름종이는 원래의 페트리디쉬에 넣고 밀봉 테이프로 봉한 뒤, 알루미늄 호일로 싸서 -18°C 이하의 냉동실에 보관하였다가 KIST 지구환경연구센터에 있는 냉동실로 옮겨 분석 때까지 보관하였다. 분석을 위한 시료는 얼음(Blue ice)을 채운 보온상자에 넣어 미국 분석전문기관인 Atm AA사로 옮겨, 분석하였다.

분석방법은 선택성 열산화법(selective thermal oxidation method)이며 산화촉매로서 MnO_2 를 이용한다(Fung, 1990). 자세한 분석방법은 이종훈 등(1997a)에 제시되어 있다. 분석방법을 간단히 요약하면, 시료 거름종이를 0.07 cm²의 면적으로 잘라내어 1~3개의 시료를 만들고, 이를 platinum boat에 넣어 MnO_2 와 접촉하게 한 후, 0.02 N HCl 30 μ l를 가하고 120°C에서 시료에 포함된 CO₂, 수분, 기타 소량의 휘발성 유기물질을 휘발시킨다. 그 후 시료를 525°C까지 가열하여 유기 탄소를 산화시키고 다시 850°C에서 원소상 탄소를 MnO_2 를 이용하여 완전히 산화시킨다. 각 산화단계에서 발생하는 CO₂는 CH₄로 전환되고 이것을 FID(Flame Ionization Detector)가 장착된 Dohrmann carbon analyzer로 측정

한다. 따라서, 이 방법에서는 휘발성 유기물질은 OC를 분석하기 전에 제거되므로 양의 오차(positive artifacts)를 없앨 수 있다. 이 분석방법의 정밀도(precision)를 나타내는 표준편차는 OC와 EC에 대해 각각 0.57 및 0.62 μ g/cm²이었다. 정확도(accuracy)는 거름종이의 단위 cm² 당 0.3 μ g인데, 실제 대기 중의 탄소를 포함한 경우, 거름종이의 포집면이 불균일(non-homogeneous)하기 때문에, 정확도의 범위는 이 보다 더 커질 수 있다. 기기의 검출한계는 0.03 μ g이고, 실제 대기시료의 검출한계농도는 0.02 μ g/m³이었다.

2.2 역궤적 분석

측정소에서 측정된 입자가 속해 있는 공기의 궤적을 추적하기 위해 역궤적분석을 수행하였다. 사용한 모델은 등온위면 궤적 모델(isentropic trajectory model)로서 최근에 미국 해양대기국(NOAA)에서 개발한 Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HY-SPLIT) version 3.0을 이용하였다. 이 모델의 중요한 특징으로는 추적 방식(forward trajectory)의 경우는 이동경로 뿐 아니라 배출된 오염물질이 이동하는 동안에 난류에 의하여 확산되어 희석되는 효과를 고려하여 농도를 구하는 기능도 가지고 있다. 또한 확산에 따라 퍼프(puff)의 크기가 너무 커질 경우 몇 개의 퍼프로 분할하여 각각의 퍼프를 별도로 추적함으로써 일반적인 퍼프 모델의 문제점을 보완하였다. 여기서는 원하는 시각에 원하는 지점의 공기가 지나온 경로를 시간을 거슬러 가면서 역추적하는 방식을 이용하였다. 역궤적을 구하기 위한 우리 나라와 일본, 중국을 포함하는 반경 약 2000 km 이내 3차원 공간의 각 위치에서의 풍향과 풍속자료는 우리 나라 기상청의 전지구 기상모델인 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 실행결과를 입수하여 사용하였다. GDAPS 결과의 수평격자는 위도와 경도 각각 1.875° 간격이며 연직적으로는 1000 hPa~10 hPa까지의 15층의 격자별로 수록되어 있으며, 매일 00시와 12시 GMT의 자료가 있다. HY-SPLIT 모델 실행에 필요한 3차원 바람장 입력자료로 변환하기 위해 3차원 공간의 격자점에서의 풍향 풍속을 내삽에 의해 구하고 시간변화도 각 격자점별로 시간에 대해 내삽하는 전처리 프로그램(WT2GRID, FOR)을

이용하였다. 대상기간은 각 측정기간의 전 측정일이다. 각 측정지점에서 공기의 역추적 출발시점의 고도는 1000m와 2000m로 하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 기간별 탄소 농도

고산과 강화에서의 OC 및 EC 측정결과를 1994년과 1995년 여름 고산에서 측정한 결과(이종훈 등, 1997a; Kim *et al.*, 1997)와 외국의 다른 지역에서 측정한 OC 및 EC 측정결과(Hatakeyama, 1995, 1993; Chow *et al.*, 1994; Malm *et al.*, 1994)와 비교하여 그림 2와 3에 각각 실었다. 그림에서 원(circle)은 평균농도(mean), 바(bar)는 농도평균값의 표준편차(standard error)를 나타낸다. 1994년 8월과 1995년 7월은 북태평양에서 이동한 해양청정기단의 배경농도로 생각되며, 1994년 7월 결과는 한반도와 일본에서 이동한 오염된 공기를 측정한 결과이다(Kim *et al.*, 1998a).

1996년과 1997년에 OC의 경우 고산은 각 기간의 평균농도가 2.6~4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 강화는 각 기간

의 평균농도가 4.3~11.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 강화에서 측정한 OC의 농도가 고산보다 높을 뿐만 아니라, 기간별 평균농도의 변화폭도 크다. EC의 경우에도 고산은 각 기간의 평균농도가 0.2~0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 강화는 각 기간의 평균농도가 0.6~2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화에서 측정한 EC의 농도가 고산보다 높고, 기간별로 평균농도의 변화폭이 컸다. 강화가 고산보다 높은 대기오염물질 농도를 보이는 것은 1996년 봄에 측정한 미세먼자 중 이온성분의 경우에도 관측되었으며(이종훈 등, 1997b), 이는 이종훈 등(1997b)이 지적하였듯이 국지오염원에 의한 영향이 강화에서 더 크게 나타나는 것과, 중국에서 강화까지의 이동거리가 고산보다 짧기 때문에 중국에서 이동한 대기오염물질의 침적에 의한 제거정도가 낮기 때문으로 보인다. 미세먼자($\text{PM}_{2.5}$) 중 탄소성분의 질량분율은 고산에서는 OC가 16~21%, EC가 1.5~2.5%였고, 강화에서는 OC가 20~29%, EC가 2.2~4.7%여서 분율에 있어서도 강화가 고산 보다 높게 나타났다. 이러한 분율은 1장에서 언급한 청정지역에서의 OC 및 EC의 분율에 비하면 매우 큰 것이며, 강화와 고산이 탄소성분 오염원에 의해 영향받고 있음을

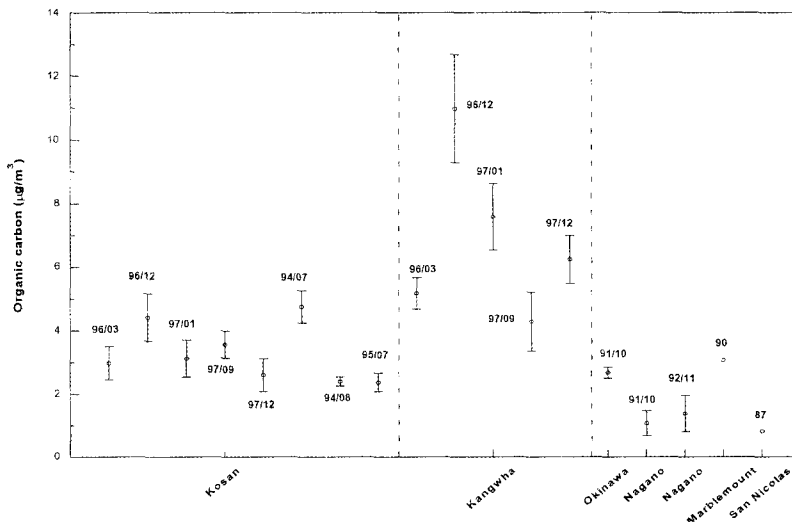


Fig. 2. Comparison of organic carbon concentrations. Numbers in parentheses are the year and month of the measurement period. Circle and bar represent the mean concentration and the standard error, respectively. Aerosols size cut at all measurement sites are $\text{PM}_{2.5}$, except Okinawa and Nagano where TSP were collected (Kosan and Kangwha in 1996 and 1997: this study; Kosan in 1994 and 1995: Lee *et al.*, 1997a (in Korean); San Nicolas, USA: Chow *et al.*, 1994; Marblemount, USA: Malm *et al.*, 1994; Okinawa and Nagano, Japan: Hatakeyama, 1993, 1995).

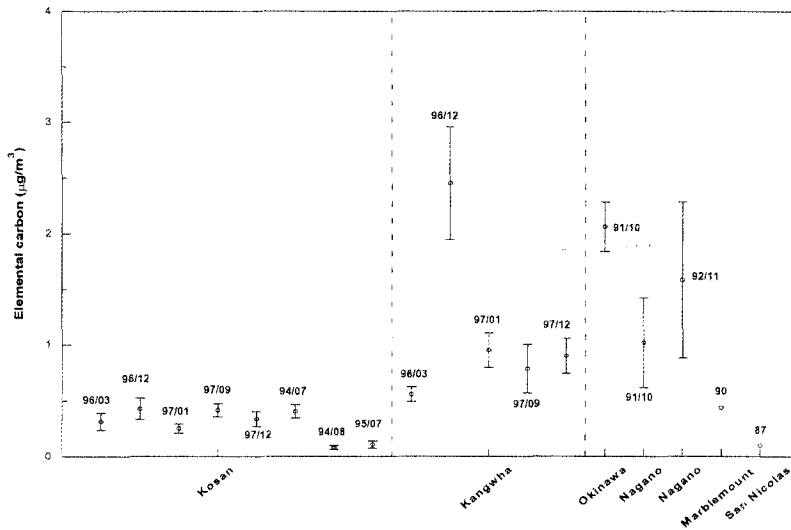


Fig. 3. Comparison of elemental carbon concentrations. Notations are the same as in Fig. 2.

나타내는 결과이다.

3.2 다른 결과와의 비교

고산과 강화의 측정결과를 고산의 다른 기간의 결과와 외국 다른 청정지역의 결과와 비교하였다. 입자상 탄소성분의 결과를 비교할 때 우선 고려하여야 할 것은 측정, 분석방법에 따른 차이이다. 여기에서 사용한 MnO_2 를 이용한 선택적 산화방법은 열-광학적 반사도법 (thermal-optical reflectance method)에 비해 TC 값은 비슷하지만, EC 값은 약간 낮은 것(OC 값이 약간 높은 것)으로 알려져 있다 (Chow *et al.*, 1993). 또한 입자의 채취시 조건에 따라 기체상의 유기성분이 석영거름종이에 흡착하거나, 거름종이에 채취된 입자상의 유기성분이 휘발할 수도 있으며, 또 입자의 크기에 따른 결과 차이도 있을 수 있다. 우선 입자의 크기에 따른 영향을 검토하면, 일본 측정결과를 제외하고는 모두 $PM_{2.5}$ 입자의 탄소성분을 분석하였다. 그러나 Appel *et al.* (1983)은 입자상 탄소성분은 주로 입경 $3.5\mu m$ 이하로 존재하며, 그 중에서도 대부분이 $1\mu m$ 이하인 것으로 추정하였다. 따라서, 일본 Okinawa와 Nagano에서 측정된 TSP 중 OC 및 EC는 $PM_{2.5}$ 중 OC와 EC와 비슷할 것으로 판단하고, 그 농도를 비교하였다. 채취, 분석방법은 고산, 강화와 미국 San Nicolas

는 같은 종류의 측정장치와, 분석방법을 이용하였고, 미국 Marblemount의 측정에 쓰인 측정장치는 이번 연구와 비슷하지만, 분석방법은 열-광학적 반사도법을 이용하였다 (Malm *et al.*, 1994). 그러나, 고산과 강화의 OC 농도가 Marblemount의 TC 농도와 비슷하거나 높기 때문에, 분석방법의 차이에 의한 오차를 고려하더라도, 비교결과는 유효할 것으로 보인다. 일본 자료는 총탄소분석기를 이용하여 TC와 EC를 산출하고, 그 차이에서 OC를 산출하였다 (Hatakeyama, 1995, 1993). EC의 산출기준온도, 조건 등이 Nagano와 Okinawa가 서로 다르기 때문에 분석방법의 차이에 따른 오차는 명확하지 않으며, 따라서 일본결과는 오차범위에 대한 고려없이 그대로 이용하였다.

1996년과 1997년 결과를 그림 2에서 보듯이 고산의 각 기간의 OC 농도는 미국 청정지역인 Marblemount에서 여름에 측정된 결과 ($3.06\mu g/m^3$)와 비교하여 비슷하거나 높았으며, 일본의 해양지대인 Okinawa ($0.78\mu g/m^3$), 산악지대인 Nagano (1991년 1.07 , 1992년 $1.38\mu g/m^3$) 및 미국의 San Nicolas 섬 ($0.81\mu g/m^3$) 보다 높았다. 이 기간의 결과는 같은 장소에서 배경농도를 관측한 1994년 8월과 1995년 7월 결과보다는 높았지만, 오염농도를 관측한 1994년 7월보다는 낮았다. 이 기간에 강화는 앞의 외국

청정지역이나 고산보다 OC의 농도가 높았다. 특히 1996년 12월에는 기간 평균값이 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘어 1994년 여름에 서울에서 측정된 결과와 비슷한 정도였다(이종훈 등, 1997a).

Marblemount는 미국 청정지역인 Washington주의 녹지지역인 North Cascade National Park 근처 해발 250 m인 곳이며, San Nicolas 섬은 미국 남부 California지역의 대기질 배경농도 측정지역으로, 해안에서 서쪽으로 100 km 이상 떨어져 있고 주위에 자동차 등에 의한 배출이 없으며, 오염지역인 Los Angeles의 풍상지역인 청정지역이다. 일본의 Nagano는 중부 일본 산악지대에 있으며, 특히, 측정지역의 지리적 특성과 주위에 입자상 오염물질의 발생원이 별로 없다는 점에서 제주도 고산측정소와 좋은 비교가 된다. Okinawa는 일본에서 남쪽에 있는 관광지이다.

그림 3에서 보듯이 고산의 각 기간의 EC 농도는 일본의 Okinawa ($1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 Nagano (1991년 1.02 , 1992년 $1.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮은 값을, 미국 San Nicolas 섬 ($0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)나 미국의 Marblemount ($0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와는 비슷하거나 약간 높은 수준을 보이고 있다. 또 같은 장소에서 배경농도를 관측한 1994년 8월과 1995년 8월 결과보다는 높고, 오염농도를 관측한 1994년 7월과는 비슷한 수준이었다. 강화의

EC 농도는 고산이나 미국의 청정지역에 비해 상당히 높은 범위를 보이고 있으나, 1996년 12월을 제외하고는 일본의 청정지역보다는 낮은 경향을 보이고 있다.

3.3 TC/EC 비

입자상 유기성분의 기원을 밝히는 방법의 하나는 EC와 OC의 합인 TC와 EC의 비를 검토하는 것이다. 1장에서 설명하였듯이 이 비는 오염지역에서 입자상 탄소성분이 일차 오염원의 영향을 주로 받는 지 아니면 광화학반응 등에 의해 이차적으로 생성된 것인지를 가늠할 수 있는 지표로 사용되었다. 그림 4에 이번 측정에 의한 TC/EC 값을 고산 1994~1995년 결과 및 다른 지역 측정결과와 비교하였다.

이번 측정기간 중 고산의 평균 TC/EC 값은 10 전후이며, 강화의 경우에는 5~10 사이였다. 그러나 고산에서 북태평양 청정기단을 측정하였던 1994년 8월과 1995년 7월의 TC/EC 값은 50부근으로 이번 측정기간중의 값들보다 훨씬 높으며, 오염기간이었던 1994년 7월의 TC/EC 값이 이번의 고산 결과와 비슷하다. 이의 원인은 청정기단을 측정할 기간에는 그림 2와 3에서 보듯이 OC 농도도 다른 때에 비해 낮았지만, EC 농도가 다른 기간에 비해 매우 낮았기 때문이다. 즉, 오염지역에서는 TC/EC의 값이 이

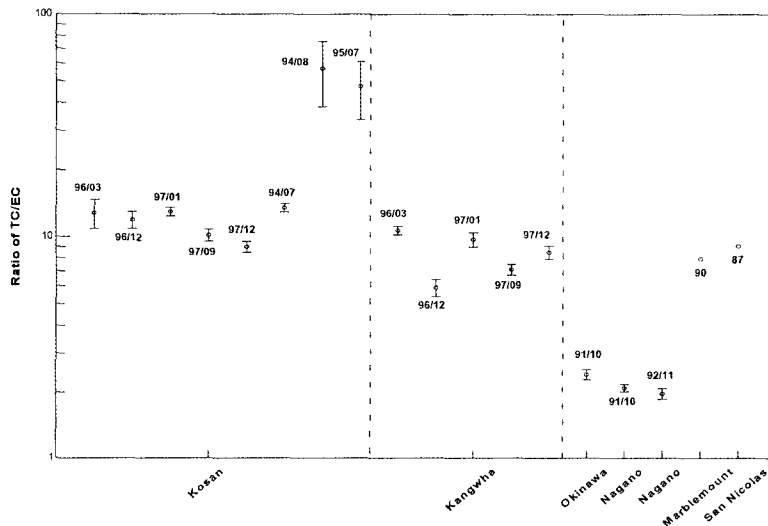


Fig. 4. Comparison of the ratio of total carbon to elemental carbon (TC/EC). Notations are the same as in Fig. 2.

차유기물질의 생성에 따른 TC 값 증가에 의해 주로 좌우되지만, 청정지역에서는 TC/EC 값이 일차적으로는 인위적 오염원에 의해 발생, 이동한 EC의 농도에 좌우되며, 이와 함께 측정소 주위에서 발생하는 자연적 기원의 OC의 양과 EC와 함께 발생, 이동한 OC의 농도에 의해 좌우되는 것으로 보인다. 따라서 청정지역에서는 TC/EC 값만으로는 현상을 정확히 이해하기 힘들며, EC와 OC 농도를 함께 검토하여야 대기오염현상을 정확히 파악할 수 있다.

일본의 청정지역인 Okinawa나 Nagano는 OC와 EC의 농도가 크게 다르지 않고, EC의 농도가 청정 지역으로는 매우 높아서(그림 2, 3 참조), TC/EC가 약 2.0~2.5 정도였다. 따라서 이들 지역은 국지오염원인지, 외부에서 이동한 오염원인지는 확실하지 않으나, 일차 오염원의 영향을 강하게 받았다고 보인다. 미국 Marblemount와 San Nicolas섬의 TC/EC 값은 8~10으로 강화와 비슷하지만, 두 지역 모두 강화보다 EC와 OC 농도가 모두 낮아서 비슷한 비를 보인 것이다. 따라서, 이 두 곳의 오염정도는 강화에 비해 낮은 것으로 보인다.

고산과 강화의 TC/EC 값을 비교하면, 강화의 경우가 더 낮은 값을 보이는데, 이는 강화의 EC와 OC 값이 모두 고산에 비해 높지만, EC 값이 특히 높아, TC/EC 값이 낮아진 것이다. 이는 강화가 고산

Table 1. Comparison of correlation (r) between the concentrations of organic carbon and elemental carbon at Kosan and Kangwha.*

Period	Kosan	Kangwha
96/03	0.853 (P<0.005)	0.911 (P<0.005)
96/12	0.998 (P<0.005)	0.859 (P<0.025)
97/01	0.966 (P<0.005)	0.907 (P<0.005)
97/09	0.904 (P<0.005)	0.991 (P<0.005)
97/12	0.980 (P<0.005)	0.959 (P<0.005)

* Numbers in parentheses are confidence level of the correlation coefficient values.

에 비해 일차 오염원의 영향을 더 받는 것을 의미한다. 고산과 강화에서 측정된 OC가 EC와 같이 발생, 이동한 것인지, 국지적으로 식물체 등에 의해 발생한 것인지를 알아보기 위해 OC와 EC의 상관관계를 살펴보았다. 그림 5에 전체 측정기간의 OC와 EC 결과의 상관관계를 보였고, 표 1에 각 측정기간의 두 물질사이의 상관관계를 구하였다. 그림 5와 표 1에서 보듯이, 측정기간 OC와 EC의 일평균농도의 변화는 서로 상관관계가 매우 높았다. 이는 OC와 EC의 발생원, 또는 이동경로가 같다는 것을 의미하며, OC가 EC와는 무관하게 국지적으로 자연적으로 발생한 것은 아님을 보여준다. 이번 측정기간이 주로 겨울철로 식물체의 활동이 여름만큼 활발하지 않은 계절인 것도 이와 같은 결론을 뒷받침해

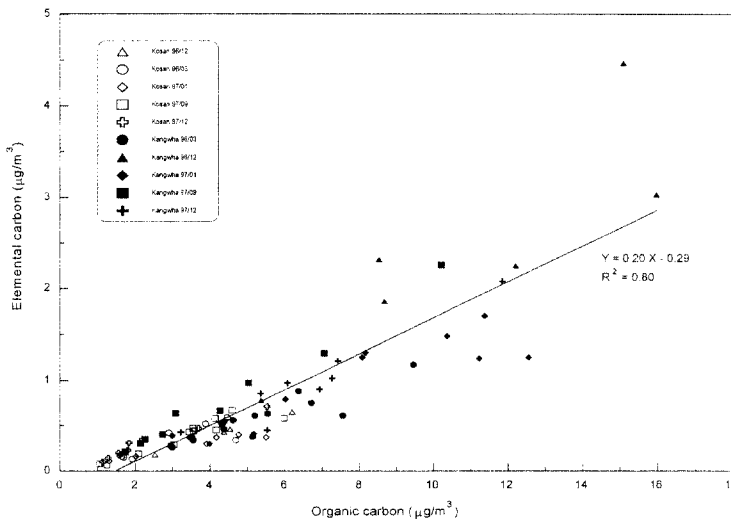


Fig. 5. Relationship between organic and elemental carbon concentrations measured at Kosan and Kangwha between 1996 and 1997.

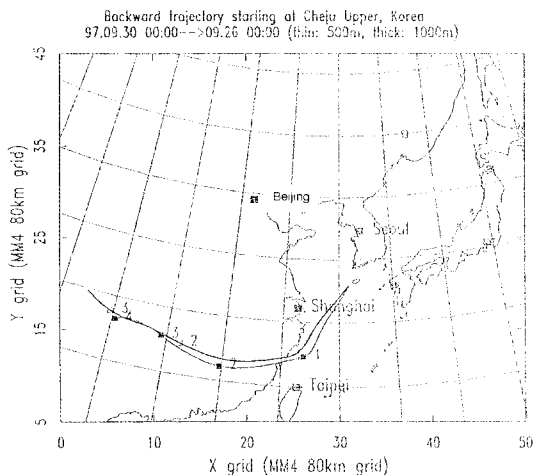


Fig. 6. Typical backward trajectories moved from southern China in Kosan.

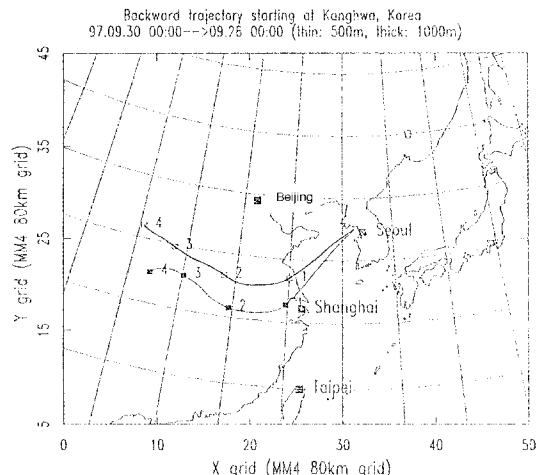


Fig. 7. Typical backward trajectories moved from southern China in Kangwha.

Table 2. Concentrations of organic and elemental carbon based on air trajectories.

Site	Trajectories	Organic carbon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Elemental carbon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Number of days
Kosan	Northern China	2.49	0.28	18
	Southern China	3.93*	0.42	17
Kangwha	Northern China	5.84	0.83	37
	Southern China	6.93	1.36	8

*Number of days for organic carbon is 16 due to analytical problems

주고 있다.

3.4 공기 궤적별 탄소 농도

고산과 강화에서의 측정된 OC 및 EC의 발생 및 이동경로를 검토하기 위해 역궤적분석을 수행하였다. 북위 35°를 기준으로 중국 북부와 남부를 나누어서 검토한 결과, 고산의 경우에는 중국 북부와 남부에서 거의 반반씩 공기가 이동하였으며, 강화의 경우에는 중국 북부에서 약 70%, 남부에서 약 20%가 이동하였다. 나머지 경우는 1997년 9월 26일에는 한반도에서 이동하였으며, 그 외에는 경로가 확인되지 않았다. 경로가 확인되지 않은 경우는 등온 위면 역궤적분석의 특성상 궤적이 해상이나, 지상에 충돌한 경우이며, 이런 경우에도 궤적은 중국 쪽에서 이동한 것이었다. 그림 6과 7에 강화와 고산에서 역추적한 공기 궤적의 예를 보였다. 표 2에 공기 궤

적이 중국 북부와 남부인 경우의 OC와 EC의 평균 농도를 실었다. 중국 남부에서 공기가 이동한 경우가 북부에서 이동한 경우보다 두 성분 모두 높은 농도를 보였다. 이러한 결과는 고산에서는 지금까지 관찰된 것과 같은 경향이며 (Kim *et al.*, 1998b; 이종훈 등, 1997b; 김용표 등, 1996a), 강화에서도 고산과 같은 경향을 보여주는 것이다. 이는 중국 남부에서 이동한 공기에 인위적 대기오염물질의 농도가 북부에서 이동한 공기에 비해 더 높기 때문이다 (김용표 등, 1996a).

4. 결 론

우리 나라의 청정지역인 제주도 고산과 강화도에서 미세입자의 탄소성분농도를 측정하여 동북아시아지역의 대기오염물질 장거리이동 특성을 파악하

고자 하였다. 측정은 1996년과 1997년 봄, 가을, 겨울철로, 대기오염물질이 중국으로부터 우리 나라로 이동할 가능성이 높은 기상조건이 자주 발생하는 계절을 선택하였다. 각 측정기간 중 OC 및 EC의 일 평균 농도의 평균값은 OC의 경우 고산은 2.6~4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강화는 4.3~11.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. EC는 고산은 0.2~0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 강화는 0.6~2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 강화에서 측정된 OC와 EC의 농도가 고산보다 높을 뿐만 아니라, 기간별 평균농도의 변화폭도 컸다.

고산의 OC 농도는 미국 청정지역인 Marblemount와 비교하여 비슷하거나 높았으며, 일본의 Okinawa, Nagano, 미국의 San Nicolas섬보다 높았다. 강화는 앞의 외국 청정지역이나 고산보다 OC의 농도가 높았다. 고산의 EC 농도는 일본의 Okinawa나 Nagano보다 낮은 값을, 미국 San Nicolas 섬과 Marblemount와는 비슷하거나 약간 높은 수준을 보이고 있다. 강화의 EC 농도는 고산이나 미국의 청정지역에 비해 상당히 높은 범위를 보이고 있으나, 1996년 12월을 제외하고는 일본의 청정지역보다는 낮은 경향을 보이고 있다. 1994년 8월과 1995년 7월의 고산 측정 결과를 한반도의 배경농도로 생각하면, OC와 EC의 상관관계가 좋은 것으로 보아 이번 측정기간에 관측한 고산과 강화의 OC, EC 농도는 측정지 외부에서의 대기오염물질의 이동에 의해 발생한 것으로 보인다.

오염지역에서 이차 유기물의 생성여부를 판단하는 기준의 하나인 TC/EC 값으로는 청정지역에서의 현상을 정확히 이해하기 힘들며, EC와 OC 농도를 함께 검토하여야 대기오염현상을 파악할 수 있다는 것을 확인하였다.

측정소에 측정된 오염물질의 이동경로를 파악하기 위해 역궤적분석을 수행한 결과 고산의 경우에는 중국 북부와 남부에서 반반씩 공기가 이동하였으며, 강화의 경우에는 중국 북부에서 약 70%, 남부에서 약 20%가 이동한 것으로 나타났다. 또한 중국 남부에서 공기가 이동한 경우가 북부에서 이동한 경우보다 OC, EC 모두 높은 농도를 보였다. 이는 고산에서는 지금까지 관찰된 것과 같은 경향이며 중국 남부에서 이동한 공기에 인위적 대기오염물질의 농도가 북부에서 이동한 공기에 비해 더 높기 때문으로 보인다.

사 사

이 연구는 국립환경연구원의 지원으로 이루어졌습니다. 측정에 도움을 주신 제주대학교 허철구, 강창희 교수 팀에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김용표, 박세욱, 김진영, 심상규, 문길주, 이호근, 장광미, 박경윤, 강창희 (1996a) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구: (I) 입자상 오염물질의 이동, 한국대기보전학회지, 12(1), 79-90.
- 김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경윤, 허철구 (1996b) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구: (II) 기체상 대기오염물질의 특성, 한국대기보전학회지, 12(1), 91-99.
- 백남준, 이종훈, 김용표, 문길주 (1996) 1994년 6월 서울지역 시정장애의 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 12(4), 407-420.
- 이종훈, 백남준, 심상규, 김용표, 문길주 (1997a) 제주도 고산에서의 1994~1995년 여름 입자상 탄소농도 측정, 한국대기보전학회지, 13(3), 179-191.
- 이종훈, 김용표, 문길주, 김희강, 정용승, 이종범 (1997b) 우리 나라 청정지역에서 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 입자의 특성, 한국대기보전학회지, 13(6), 439-450.
- Appel, B.R., Y. Tokiwa, and E.L. Kothny (1983) Sampling of carbonaceous particles in the atmosphere, Atmos. Environ., 17, 1787-1796.
- Chow, J.C., J.G. Watson, D.H. Lowenthal, P.A. Solomon, K.L. Magliano, S.D. Ziman, and L.W. Richards (1993) PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ compositions in California's San Joaquin Valley, Aerosol Sci. and Tech., 18, 105-128.
- Chow, J.C., J.G. Watson, E.M. Fujuta, Z. Lu, and D.R. Lawson (1994) Temporal and spatial variations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} aerosol in the southern California air quality study, Atmos. Environ., 28, 2061-2080.
- Fung, K. (1990) Particulate carbon speciation by MnO_2 oxidation, Aerosol Sci. and Technol., 12, 122-127.
- Hatakeyama, S. (Ed.) (1993) Data of '91 IGAC/APARE/PEA-CAMPOT Survey, National Institute for Environmental Studies, Japan.
- Hatakeyama, S. (Ed.) (1995) Data of '92 IGAC/APARE/PEA-CAMPOT Survey, National Institute for Environmental Studies, Japan.
- Heintzenberg, J. (1989) Fine particles in the global troposphere: A review, Tellus, 41B, 149-160.

- Kim, Y.P., J.H. Lee, S.-G. Shim, K.C. Moon, and N.J. Baik (1997) Measurement of carbonaceous species in fine particles at Cheju Island, Korea between 1994 and 1996. Presented at AWMA 90th Annual Meeting, Paper No. 97-WP68B.03.
- Kim, Y.P., J. H. Lee, N.J. Baik, J.Y. Kim, S.-G. Shim, and C.-H. Kang (1998a) Summertime characteristics of aerosol composition at Cheju Island, Korea. *Atmos. Environ.*, 3905-3915.
- Kim, Y.P., S.-G. Shim, K.C. Moon, C.-G. Hu, C.H. Kang, and K.Y. Park (1998b) Monitoring of air pollutants at Kosan, Cheju Island, Korea during March-April, 1994. *J. Appl. Meteor.*, 37, 1117-1126.
- Malm, W.C., K.A. Gebhart, J. Molenaar, T. Cahill, R. Eldred, and D. Huffman (1994) Examining the relationship between atmospheric aerosols and light extinction at Mount Rainier and North Cascade National Parks. *Atmos. Environ.*, 28, 347-360.
- Turpin, B.J. and J.J. Huntzicker (1995) Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmos. Environ.*, 29, 3527-3544.
- Turpin, B.J., J.J. Huntzicker, S.M. Larson, and G.R. Cass (1991) Los Angeles summer midday particulate carbon : Primary and secondary aerosol. *Environ. Sci. Technol.*, 25, 1788-1793.