

대기-P14 미국 오레곤주 Crater Lake의 에어로졸 농도에 미치는 수송의 역할

전병일*, Daniel Jaffe¹

신라대학교 바이오환경공학부,

¹Environmental Sciences, University of Washington

1. 서 론

미국은 1977년에 국립공원(National Park)과 1등급 황야지역(wilderness areas as class I)의 시정을 보호하여야한다는 공기청정법(Clean Air Act)을 제정되었다. 국립공원협회(National Park Service)는 1982년에 stacked filter unit(SFU) 샘플러를 이용하여 입자상물질의 측정과 함께 시정모니터링 프로그램을 만들어 미국 전역으로 확대하였고, 1988년에는 입자상 모니터링 프로그램을 다시 확대하여 IMPROVE(Interagency Monitoring of Protected Visual Environments)로 발전하였다. IMPROVE의 주요목적은 시정감소에 영향을 미치는 미세입자의 시·공간적인 경향에 대한 모니터링이며, 입자농도의 경향에 영향을 미치는 인자로서는 (1) 종관기상에 따른 단기적인 변화와 장거리수송 (2) 황이나 토양인자와 같은 변수 (3) 다년간 주기의 기상패턴이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 미국의 오레곤 주 Crater Lake 국립공원에서 측정된 IMPROVE 에어로졸 자료를 이용하여 미국내륙에서 발생한 오염물질과 태평양의 해양성 공기와 아시아지역에서 인공적으로 배출된 물질이 이 지역의 에어로졸농도에 어떠한 영향을 미치는지 trajectory 분석을 통해 고찰하였다.

2. 자료 및 방법

IMPROVE 프로그램은 미국환경보호청(EPA)과 4개의 미연방육지관리국(FLMs)인 미국국립공원협회(NPS), 미국산림협회(FS), 미국어업야생동물협회(FWS), 미국육지관리국(BLM)과 미국해양대기국(NOAA) 그리고 주정부 대기질 기구로 구성된 협동위원회에서 시정감소에 중요한 인자인 미세입자의 지리적 및 시간적 경향에 대한 모니터링을 위한 일환으로 수립되었다. 또한 자동카메라시스템에 의한 haze의 특성, transmissometer와 nephelometer에 의한 광흡수(optical extinction)의 측정을 포함하고 있다. 본 연구에 사용된 자료는 1988년 3월 2일부터 1999년 5월 29일까지 12년 2개월 간이며, 일주일에 2회(수요일, 토요일) 측정되었으며, 총 사용된 자료는 1013개이다.

trajectory 분리는 먼저 미국 북부 내륙의 영향이 있는지를 먼저 결정하고, trajectory가 아시아로부터의 영향이 있는지를 알아본 뒤, 미국 북부 내륙과 아시아의 영향이 아니면 북태평양기원으로 취급하였다. 구체적으로 보면, Crater Lake에 도달하기 전 3일 동안 공기괴가 $0^{\circ} \sim 125^{\circ}W$ 에 존재하고 있었다면 local trajectory라고 명명하였다. 그렇지 않고

Crater Lake에 도달하기 3일 전의 공기가 위도 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 과 경도 $100^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 에 있었다면 아시안 trajectory라고 명명하였다. 그 외 local trajectory와 아시안 trajectory에 속하지 않으면 북태평양 trajectory라고 명명하였다.

3. 결과 및 고찰

1988년 3월부터 1999년 5월까지 측정된 1013일에 대해 3시간 간격의 10일 등온위 trajectory를 1일 두 번 분석하였다. Table 3에 분석된 trajectory 발생빈도를 나타내었다. 하루에 두 번(00UTC, 12UTC) 모두 Crater Lake에 도달하기 전 3일 동안 공기괴가 $0^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{W}$ 에 존재하고 있을 때를 local trajectory이라 하였고, 그 외는 모두 marine trajectory이라 하였으며, marine trajectory 중에서 Crater Lake로부터 3일 전의 공기가 위도 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 과 경도 $100^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 에 있었으면 아시안 trajectory이라 하였다. 그리고 00UTC와 12UTC 중 한번이라도 local trajectory이면 mixed trajectory이라 하였다.

Table 1. Number of samples per month at Crater Lake during 1988. 3~1999. 5.

| Type Month | Local | Marine | Asian | Mixed |
|---------------|-------|--------|-------|-------|
| 1 | 21 | 41 | 8 | 14 |
| 2 | 31 | 40 | 10 | 11 |
| 3 | 29 | 45 | 11 | 25 |
| 4 | 31 | 50 | 5 | 9 |
| 5 | 25 | 46 | 3 | 14 |
| 6 | 25 | 43 | 1 | 18 |
| 7 | 32 | 36 | 3 | 26 |
| 8 | 32 | 31 | · | 27 |
| 9 | 35 | 26 | · | 16 |
| 10 | 24 | 31 | · | 13 |
| 11 | 19 | 50 | 8 | 15 |
| 12 | 31 | 39 | 4 | 12 |
| Total | 335 | 478 | 53 | 200 |

local trajectory는 335회로 전체의 33.1%을 나타내었으며, marine trajectory는 478회로 전체의 47%을 차지하였다. 따라서 Crater Lake는 태평양상의 해양성 공기에 의해 더 많은 영향을 받고 있다는 것을 시사하고 있다. 또한 아시아 trajectory가 53회(5.2%)로 나타나 인위적인 오염물질이 본 연구지역에 도달될 수 있음이 판명되었으며, 주로 11월부터 3월 사이의 한후기에 많은 발생빈도가 있음을 알 수 있다. 또한 marine과 local trajectory가 혼합되어 나타난 날이 200회로서 전체의 19.7%을 차지하였다.

Fig. 1은 Crater Lake에서 연구기간 중 local과 marine trajectory일 때의 미세분진과 유기탄소(OC) 및 광흡수탄소(LAC)의 월별변화를 나타낸 것이다. 미세분진과 유기탄소는 빛의 흡수에 매우 중요한 역할을 하므로 시정악화에 큰 기여를 하는 요소이다. 특히 유기탄소는 연소의 주요생성물이며 생체연소(biomass burning)의 주요 구성물질로 haze를 유

발시킨다²⁹⁾. 따라서 trajectory에 따른 미세먼지와 유기탄소 농도를 고찰한다는 것은 시정 악화에 미치는 오염물질의 발생기원을 찾는 데 중요하다고 할 수 있다. 미세분진을 비롯한 유기탄소의 농도는 marine trajectory보다 local trajectory 일 경우에 더 높은 값을 나타내었으며, 동계에는 두 trajectory에 의한 농도차이는 매우 작았다. 그러나 미세분진의 경우 4월부터 9월 사이에 두 trajectory간의 농도차가 매우 크게 나타났으며, 유기탄소와 광흡수탄소의 경우는 9월과 10월에 크게 나타나는 경향이 있었다. 특히 시정에 영향을 미치는 미세분진과 유기탄소는 8월에 높은 농도를 나타내었고 해양의 영향보다도 내륙의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

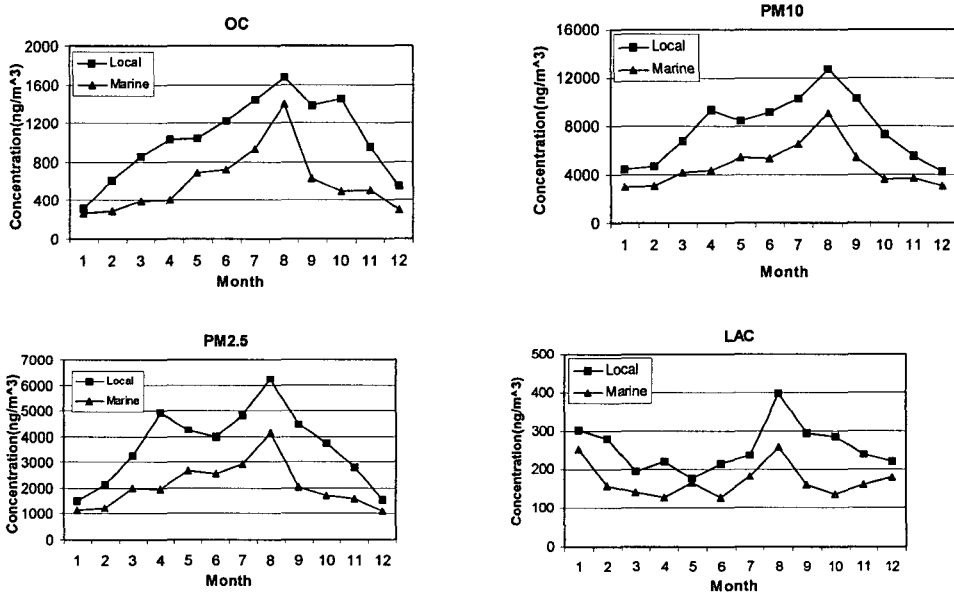


Fig. 1. Monthly mean values of PM2.5, PM10, OC and LAC at Crater Lake during 1988. 3~1999. 5 for trajectory type.

Table 2는 Crater Lake에서 측정된 에어로졸과 nss SO_4^{2-} , nss S의 평균농도를 local 과 marine trajectory에 따라 나타낸 것이다. 해양성공기의 영향을 받을 경우에 더 높은 농도를 나타낸 것은 Cl^- , Na 그리고 Mg이었으며, Cl^- 의 경우는 2배 정도나 높았으며, Mg의 경우는 미미하였다. 그 외의 물질은 모두 local trajectory일 때가 marine trajectory 일 때 보다 더 높은 농도를 나타내었다. 특히 NO_3^- 와 nss SO_4^{2-} 은 2배 이상이었으며, 그 외 물질은 1.8배 정도였다. 따라서 Crater Lake에서는 주로 내륙기원의 오염물질에 의해 많은 영향을 받는다고 할 수 있으며, 해양성 공기피가 유입될 때 해염에 의한 영향을 상당히 받는다고 할 수 있다. 에어로졸농도에 가장 큰 기여를 한다는 SO_4^{2-} 의 농도는 local trajectory인 경우에 $453.3ng/m^3$ 로 marine trajectory의 $241.9ng/m^3$ 에 비해 월등히 높은 농도를 나타내었고, 또한 local trajectory의 nss SO_4^{2-} 농도는 $444.9ng/m^3$ 로 SO_4^{2-} ($453.3ng/m^3$)중의 nss SO_4^{2-} 의 비가 98%로 nss SO_4^{2-} 이 대부분이 차지함을 나타내

었다. marine trajectory의 경우 SO_4^{2-} ($241.9\text{ng}/\text{m}^3$) 중의 nss SO_4^{2-} ($218.8\text{ng}/\text{m}^3$)의 비는 90.5%로 SO_4^{2-} 중에 어느 정도 해염성분이 포함되어 있다는 것을 나타내었다. 제주도 고산지역의 nss SO_4^{2-} 은 $6,530\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 본 연구지역에 비해 월등히 높은 값을 나타내었으며, SO_4^{2-} 중 nss SO_4^{2-} 의 비는 약 95%을 나타내었다³⁰⁾. 따라서 Crater Lake는 에어로졸의 대부분을 차지하는 SO_4^{2-} 이 육지기원에 의해 영향을 받고 있다고 할 수 있다.

Table 2. Mean concentration(ng/m^3) each element at Crater Lake for trajectory type.

| Species \ Type | All | Local | Marine |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| Cl^- | 31.9 | 21.7 | 43.7 |
| NO_3^- | 93.7 | 124.9 | 58.8 |
| SO_4^{2-} | 340.5 | 453.3 | 241.9 |
| Ca | 22.3 | 30.1 | 16.2 |
| K | 24.5 | 32.4 | 17.4 |
| Mg | 5.6 | 4.8 | 5.9 |
| Na | 37.8 | 32.5 | 41.1 |
| PM2.5 | 2864.3 | 3752.7 | 2076.5 |
| PM10 | 6280.3 | 8079.6 | 4671.8 |
| S | 116.4 | 152.6 | 84.4 |
| nss- SO_4^{2-} | 330.8 | 444.9 | 218.8 |
| nss-S | 113.2 | 149.8 | 80.9 |

Fig. 2는 marine trajectory일 때, 봄철의 nss SO_4^{2-} 와 nss S 농도와 변화경향을 나타낸 것이다. 봄철을 제외한 타 계절의 농도는 감소하는데 비해 봄철의 농도만 증가하는 추세를 나타내고 있다. 이는 동아시아에서 배출된 오염물질이 태평양을 건너 미국 서해안에 영향을 미치고 있다는 것을 간접적으로 시사하고 있다. 또한 봄철에는 동아시아에서 출발한 기류의 속도가 빠르기 때문에 미국 서해안 도달하는 기간이 짧아 태평양에 침적되지 않고 건너오는 배출량이 많을 수도 있다. 그러나 대륙에서 영향을 미치는 절대적인 양에 비해 해양을 건너오는 것이 많지 않기 때문에 이를 입증하기 위해서는 정밀한 측정이 장기간 실시되어야 할 것으로 믿는다.

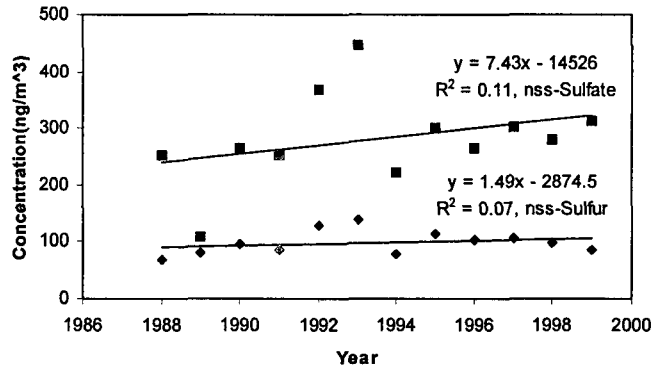


Fig. 2. Annual variation and trend of springtime nss SO_4^{2-} 와 nss S at Crater Lake for marine trajectory.

4. 결론

1988년 3월 2일부터 1999년 5월 29일 까지 미국 오레곤 주 Crater Lake에서 측정된 IMPROVE 자료를 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 10일 후진 trajectory 분석 결과 local trajectory는 335회로 전체의 33.1%, marine trajectory는 478회로 전체의 47%, 아시아 trajectory가 53회로 전체의 5.2%를 나타내었다.

(2) nss SO_4^{2-} , nss S, NO_3^- , K, C의 월변화는 4~5월과 8~9월에 높은 double peak 형태를 취하고, 동계에 최저농도를 나타내었다.

(3) Cl^- , Na, Mg를 제외한 물질의 농도는 marine trajectory보다 local trajectory일 경우에 더 높았으며, marine trajectory일 때 SO_4^{2-} 중의 nss SO_4^{2-} 의 농도는 90.5%이었고, local trajectory일 때 98%로 해염의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

(4) nss SO_4^{2-} 과 nss S의 연평균 농도는 점차 감소하고 있으나, 봄철의 농도는 증가하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- Eldred, R. A. and T. A. Cahill, 1994, Trends in elemental concentrations of fine particles at remote sites in the United States of America, *Atmos. Environ.*, 28, 1009-1019.
- 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.
- Malm, W. C., J. F. Sisler, D. Huffman, R. A. Eldred and T. A. Cahill, 1994, Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States, *J. Geophys. Res.*, 99, 1347-1370.