

## 대기 에어로졸의 체류시간과 화학조성 II. 부산지역 에어로졸의 체류시간

양한섭·전은주·김영일·옥곤\*  
부경대 해양학과·부경대 대기과학과  
(1998년 3월 6일 접수)

### Residence Times and Chemical Composition of Atmospheric Aerosols II. Residence Times of Aerosols in Pusan

Han-Soeb Yang, Eun-Joo Jun, Young-Il Kim, and Gon Ok\*  
Division of Ocean Science and Earth Environmental Sciences,  
Pukyong National University, Pusan, 608-737, Korea  
(Manuscript received 6 March, 1998)

To estimate the residence times of aerosols in air, the activities of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in aerosols were measured at 4 sites in Pusan. All aerosol samples were collected by a high volume air sampler from January to October 1996. The activities  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in Pusan were varied from 11.77 to 67.57 dpm/1000m<sup>3</sup> and from 2.63 to 15.91 dpm/1000m<sup>3</sup>, respectively. The mean activities were 34.62 dpm/1000m<sup>3</sup> for  $^{210}\text{Pb}$  and 8.24 dpm/1000m<sup>3</sup> for  $^{210}\text{Po}$ . The highest values of the activities of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  were appeared at P3 site and the lowest values at P4 site. During the sampling period, the trends of the activities of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  were similar to total suspended particulate matter(TSP) concentrations. The mean residence times of atmospheric aerosols calculated from  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  activity ratio was about 60~80 days in Pusan. The longest residence time of atmospheric aerosols was in January because of the lack of rainout and washout, but the shortest residence time was in August, largely due to scavenging effect by frequent rains. The activities of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in atmospheric aerosols were different in time and space, which seems that the distribution of  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  activities and scavenging processes in air may be controlled by the local and meteorological conditions.

Key words : aerosols,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ , residence times, local and meteorological conditions

#### 1. 서론

대기중의 에어로졸에 관한 연구는 과거 20~30년 전부터 미국과 일본 등지에서 수행되어 왔으며, 최근에는 우리 나라 및 부근지역에서도 대기 에어로졸의 화학조성에 관한 연구가 보고되고 있다.<sup>1,2)</sup> 한편, 외국에서는 대기 에어로졸의 체류시간에 관한 연구가 많이 보고되어 왔으며, 특히 대기의 안정도를 평가하는데 에어로졸의 체류시간이 좋은 척도로 활용되어 왔다.<sup>3-5)</sup> 그리고, 에어로졸의 체류시간을 평가함에 있어 방사성 핵종을 이용하는 이유는 방사성 핵종들이 고유 반감기를 가지고 있으며, 대부분이 어미핵종으로부터 생성 후 에어로졸에 흡착되기 때문으로 설명되고 있다.<sup>3)</sup>

Tsunogai and Fukuda<sup>3)</sup>는 천연방사성 핵종 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 수직적 농도분포<sup>4)</sup>와 대기 에어로졸의 농도분포<sup>6)</sup>가 상당히 유사함을 발견하여, 이를  $^{210}\text{Pb}$ 의 어미핵종인  $^{222}\text{Rn}$ 기체

가 지구표면으로부터 대기 중으로 방출된 후 아주 짧은 시간(반감기 3.8일)에 에어로졸에 흡착되기 때문이라고 설명하고 있다. 그 후 지금까지 많은 연구자들이 대기 중  $^{222}\text{Rn}$ 의 딸핵종인  $^{210}\text{Pb}$  (반감기 22.3년),  $^{210}\text{Bi}$ (반감기 5일),  $^{210}\text{Po}$ (반감기 138일)의 농도를 측정하였고,  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비를 이용하여 에어로졸의 체류시간을 산정하여 왔다.<sup>3-5)</sup>

한편, Rex and Goldberg<sup>7)</sup>는 북태평양 중앙부의 심해퇴적물에서 대륙지각기원인 석영이 높은 농도로 분포하고 있음을 발견하였고, 그 후 Tsunogai and Nozaki<sup>8,9)</sup>는 태평양의 표면해수 중  $^{210}\text{Pb}$ 과 퇴적물 중 석영의 농도가 거의 같은 위도분포를 하고 있다는 사실을 발견하였다. 이러한 연구결과들로부터 육상의 물질이 해양으로 운반되는 경로로서 하천 이외에 대기권을 경유하여 해면으로 공급되는 경로도 중요하다는 것을 많은 학자들이 인식하게 되

었으며, 현재까지  $^{210}\text{Pb}$ 는 대륙기원 물질의 추적자로서 이용되고 있다. 또한, Sato et al.<sup>10)</sup>는  $^{210}\text{Pb}$ 의 주요 공급원이 대륙지각이기 때문에 표층대기 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 측정지역에서의 지질학적 및 기상학적 배경을 반영한다고 보고한 바 있다.

그밖에, Moore et al.<sup>11)</sup>는 대기 중  $^{210}\text{Po}$ 의 주된 공급원은  $^{210}\text{Pb}$ 의 방사붕괴 뿐만 아니라  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 상당히 높은 성층권으로부터의 유입, 화석연료의 연소, 생물체의 연소(biomass burning), 토양입자 등이라고 주장하였고, 특히 Kuroda et al.<sup>12)</sup>와 Nho et al.<sup>13)</sup>는 화산폭발이 발생하면 다량의  $^{210}\text{Po}$ 이 대기 중으로 공급된다고 설명하였는데, 이는 350 °C 이상의 온도에서 Po과 그 화합물들의 휘발이 매우 높아지기 때문이라고 보고하였다.

이상에서의 연구결과들을 바탕으로 본 연구에서는 부산지역 4개 지점에서 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 시기별·지점별 농도변화를 살펴보고,  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  방사능 비로부터 부산지역 대기 에어로졸의 체류시간을 산정하여 에어로졸의 지화학적 거동을 파악하는 데 목적을 두고 있다.

## 2. 시료의 채취 및 분석방법

### 2.1. 시료 채취

대기 에어로졸 시료의 채집시기와 장소 그리고 채집방법은 양 외<sup>14)</sup>와 동일하다.

### 2.2. 분석 방법

대기 에어로졸 시료 중 천연 방사성 핵종인  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 분석은 양 외<sup>15)</sup>의 방법에 따랐으며, 전처리 과정만 약간 변형하여 사용하였다. 이를테면, 주요이온과 중금속원소 측정에 사용하고 남은 여과지 1/2의 양을 구한 후 이 여과지를 잘게 절단하여 teflon bomb에 옮겼다. 그리고  $^{209}\text{Po}$  표준용액(2.22 dpm)과  $\text{Pb}^{2+}$  carrier용액을 1 ml씩 첨가하였다. 여기에  $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 : \text{HF} = 2 : 2 : 1$ 의 비율로 혼합한 용액을 첨가한 후 분해용기를 밀폐시킨 다음 150°C에서 12시간동안 가열하여 시료를 완전분해시켰다. 이 용액을 증발 건조시킨 다음 진한  $\text{HNO}_3$ 용액 소량을 첨가하여 다시 증발 건조시켜 시료 중에 남아 있는 HF를 제거한 후 잔사를 0.5N HCl용액 약 50 ml로 용해시켰다. 이 용액에 20%  $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 용액 1 ml과 ascorbic acid 약 50 mg을 첨가한 다음 은판(직경 12 mm, 두께: 0.2 mm)을 고정시킨 magnetic stirrer를 넣고, 80~90 °C에서 약 3시간 동안 서서히 교반하면서 시료중의 Po동위체를 은판 위에 전착시켰다. 전착이 완료된 후 은판을 에탄올로 세척 건조한 다음 알파입자를 계수(counting)하였다. 그리고 Po동위체를 전착시키고 난 용액에 별도의 은판을 넣고 약 10일간 실온에서 방치하여 시료 중에 남아 있는 Po동위체를 완전히 제거하였다. 이 용액을 증발 건조시킨 후 묽은 염산 용액으로 100 ml로 정용한 다음 이 용액 1 ml를 취하여 원자흡광광도계로 Pb를 측정하여 Pb의 화학적 회수율을 계산하였다. 나머지 용액 99 ml에  $^{209}\text{Po}$  표준용액 적당량을 첨가하고 밀봉한 다음  $^{210}\text{Pb}$ 을 딸핵종인  $^{210}\text{Po}$ 으로 성장시키기 위해 5개월 이상 방치한 후 어미핵종으로부터 성장한  $^{210}\text{Po}$ 을 상기의 방법과 동일하게 전착하여  $^{210}\text{Pb}$ 의

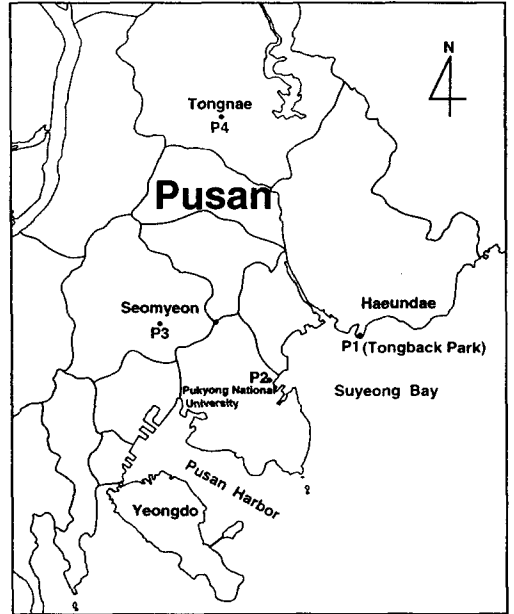


Fig. 1. A map showing the sites collected atmospheric aerosol samples in Pusan.

농도를 계산하였다.

에어로졸 시료 중  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 미리 농도가 알려진  $^{209}\text{Po}$  표준용액과의 계수율비와 흡입한 공기의 총량( $\text{m}^3$ )으로부터 계산하였다.

$$^{210}\text{Po}(\text{dpm}/1000\text{m}^3) = \frac{^{210}\text{Po}(\text{cpm}) \times ^{209}\text{Po}(\text{dpm})}{^{209}\text{Po}(\text{cpm}) \times \text{공기의 총량}(\text{m}^3)} \times 1000$$

여기에서  $^{210}\text{Po}(\text{cpm})$ 과  $^{209}\text{Po}(\text{cpm})$ 은 알파계수율,  $^{209}\text{Po}(\text{dpm})$ 은 첨가한 표준용액의 농도이다.

$^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 Pb의 화학적 회수율과 Pb를 분리한 후 경과된 시간을 보정한  $^{210}\text{Po}$ 의 계수율로부터 계산하였다.

$$^{210}\text{Pb}(\text{dpm}/1000\text{m}^3) = \frac{(\lambda_{\text{Po}} - \lambda_{\text{Pb}})}{\lambda_{\text{Po}}} \times \frac{A_{\text{Po}}}{[1 - \{\exp(-\lambda_{\text{Po}}t)\}]}$$

여기에서,  $\lambda_{\text{Po}}$ 은  $^{210}\text{Po}$ 의 붕괴상수(0.0050217  $\text{day}^{-1}$ ),  $\lambda_{\text{Pb}}$ 은  $^{210}\text{Pb}$ 의 붕괴상수(0.0000863  $\text{day}^{-1}$ ), t는 Po를 제거한 후  $^{210}\text{Pb}$ 으로부터 성장시킨  $^{210}\text{Po}$ 을 측정할 때까지의 시간(day),  $A_{\text{Po}}$ 는  $^{210}\text{Pb}$ 으로부터 성장한  $^{210}\text{Po}$ 의 측정값( $\text{dpm}/1000\text{m}^3$ )이다

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. $^{210}\text{Pb}$ 과 $^{210}\text{Po}$ 의 지점별 농도분포특성

부산지역 4개 지점에서 1996년 1월부터 10월까지 6회에 걸쳐 채집한 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 11.77~67.57  $\text{dpm}/1000\text{m}^3$ 의 범위였고  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 2.63~15.91  $\text{dpm}/1000\text{m}^3$ 의 범위였다. 그리고  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 평균값은 각각 34.62  $\text{dpm}/1000\text{m}^3$ 과 8.24  $\text{dpm}/1000\text{m}^3$ 이었다(Table 1). 이는 Suzuki and Shiono<sup>16)</sup>가 1995년에 4월, 7월, 10월 동안 일본 Honshu의 서쪽 연안(38° 46' N, 139° 44' E)에

서 측정된  $^{210}\text{Pb}$ 의 평균농도보다는 1.4배 정도 높은 값이며,  $^{210}\text{Po}$ 의 평균농도보다는 다소 낮은 값이다. 그리고 Nho *et al.*<sup>13)</sup>가 아프리카 서쪽 Ivory연안에서 1991년에 측정된  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 연평균 농도값과 비교해보면  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 차이가 없으나,  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 약간 높았다. 또한, Sato<sup>10)</sup>가 일본의 과학도시인 Tsukuba에서 1990년 한 해 동안 측정된  $^{210}\text{Pb}$ 의 평균농도와도 거의 유사한 값이다. 이처럼 부산지역 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 다른 육상지역과 비교했을 때 거의 비슷한 수준이었다.

한편, Yokota and Tsunogai<sup>5)</sup>가 북태평양에서 1985년 8월부터 10월까지의 항해 동안 측정된 외양 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 0.38~30.83 dpm/1000m<sup>3</sup>의 범위였고,  $^{210}\text{Po}$ 의 농도범위는 0.55~2.44 dpm/1000m<sup>3</sup>였다. 그리고,  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 평균값은 각각 11.07 dpm/1000m<sup>3</sup>과 1.54 dpm/1000m<sup>3</sup>이었는데, 이는 부산지역에 비해  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 약 1/3 정도이고,  $^{210}\text{Po}$ 은 1/5 정도의 농도이다. 또한, 1985년에 Hawaii 부근에서 측정된 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 일본 Okushiri섬에서 측정된 연평균 농도의 약 1/8 정도였다.<sup>5)</sup> 이처럼 대륙에 인접한 지역과 외양에서 측정된 값이 차이가 나는 것은 지역에 따라 공급량 차이에 따른 결과로 판단된다. 즉, 기체인  $^{222}\text{Rn}$ 은 대부분 육지로부터 공급되며, 단위표면적당 해양으로부터 비산되는  $^{222}\text{Rn}$ 양은 대륙으로부터 비산되는 양의 1% 미만<sup>17)</sup>이기 때문에 대륙에서 멀리 떨어질수록  $^{222}\text{Rn}$ 의 딸핵종인  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 낮아진다고 추정된다.

부산지역에서 시료채취 지점별로 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 평균농도를 비교해보면(Table 1), 지점 P3에서  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 가장 높았고 지점 P4에서 가장 낮았다.  $^{210}\text{Pb}$ 의 경우는 지점 P3에서 다른 지점에 비해 약 1.1~1.5배 정도 높은 농도를 나타내었고  $^{210}\text{Po}$ 은 약 1.1~1.4배 정도 높았다. 지점 P3은 다른 지점에 비해 TSP농도도 가장 높았는데 이는 지점 P3가 부산지역 내에서도 교통량이 상당히 많으며 현재에도 지하철공사가 진행중인 지역이기 때문으로 생각된다. 반면 지점 P4에서  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 다른 지점에 비해 다소 낮게 나타났는데, 이는  $^{210}\text{Pb}$ 은 4월과 5월 동안 그리고  $^{210}\text{Po}$ 은 5월에 다른 지점에 비해 약 1.1~2.0배 정도 낮은 농도를 나타내었기 때문이다. 이처럼 4월과 5월에 지점 P4에서  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 낮은 이유는 이 시기에 TSP농도가 상당히 낮았던 것과 관련이 있을 것으로 사료되며, 특히 4월의 경우에는 지점 P4에서 시료 채취 3일전에 약간(2 mm)의 비가 왔기 때문에 TSP농도가 낮아진 것으로 추정된다.

일반적으로 TSP농도는 보통 황사현상이 강하게 발생하는 4월에 주로 높게 나타나는데<sup>18)</sup>, 1996년 4월에는 부산

지역 관측 전 지점에서 그다지 높은 농도를 나타내지 않았다. 또한 부산시청에서 측정된 자동측정망 자료에서도 1996년 4월보다 5월 동안 TSP의 월평균농도가 높게 나타났다. 이는 다른 해에 비해 1996년에 3월부터 4월까지 총 8회의 많은 강우횟수와 강우량(총 287 mm)으로 인한 세정효과 때문으로 생각된다.

3.2.  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 시기별 농도분포특성

부산지역 4개 지점에서 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 시기별 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. 각 지점에서  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 시기에 따라 상당한 차이를 보였는데, 관측 전기간 동안  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도범위는 지점 P1에서 16.81~46.95, 지점 P2에서 11.77~48.38, 지점 P3에서 30.50~67.57, 지점 P4에서 16.48~44.79로 지점 P2와 P3에서 농도변화폭이 크게 나타났다. 그리고  $^{210}\text{Po}$ 는 지점 P1에서 3.37~14.83, 지점 P2에서 2.63~12.32, 지점 P3에서

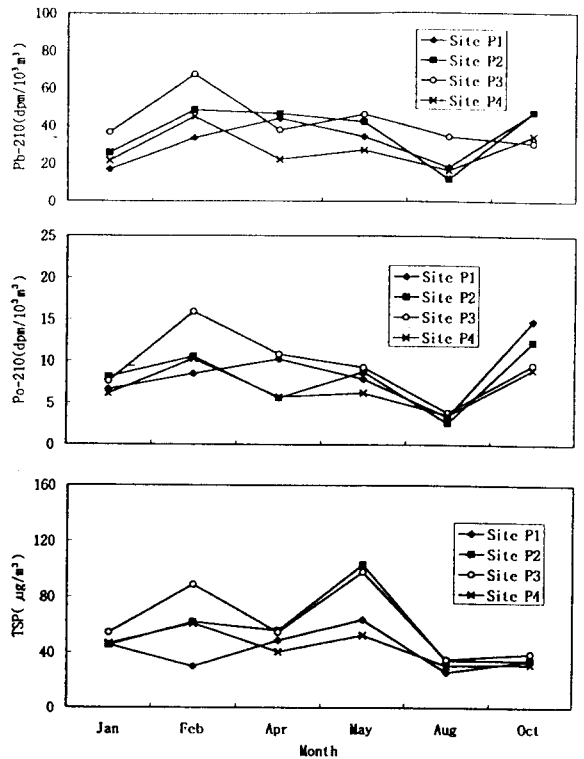


Fig. 2. Temporal variations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  activities and total suspended particulate matter concentrations at 4 sites in Pusan.

Table 1. Range and mean values of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  concentrations(dpm/10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>) in aerosol samples at 4 sites in Pusan

	P1	P2	P3	P4	Total
$^{210}\text{Pb}$	16.81~46.95 (32.14±12.58)	11.77~48.38 (36.59±14.83)	30.50~67.57 (41.91±13.56)	16.48~44.79 (27.66±10.31)	11.77~67.57 (34.62±12.82)
$^{210}\text{Po}$	3.37~14.83 (8.58±3.83)	2.63~12.32 (8.01±3.48)	3.90~15.91 (9.54±3.95)	3.56~10.26 (6.83±2.42)	2.63~15.91 (8.24±3.42)

3.90~15.91, 지점 P4에서 3.56~10.26의 농도범위였고, 농도변화폭은 지점 P3에서 다소 크게 나타났다.

한편, 10월을 제외하고 4개 지점에서 TSP(total suspended particulate matter)와  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도변화는 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 암석이나 토양 중에 존재하는  $^{226}\text{Ra}$ (반감기 1620년)이 방사붕괴되어 생성된 희귀기체인  $^{222}\text{Rn}$ 은 지표에서 항상 방출되고,  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 은  $^{222}\text{Rn}$ 의 방사붕괴에 의해 생성된 후 빠른 시간 내에 에어로졸에 흡착·제거되기 때문이라고 추정된다. 그리고 전 지점에서 다른 시기에 비해 8월에  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 가 상당히 낮은 농도를 나타내었고, TSP농도도 다른 시기에 비해 비교적 낮은 값이었다. 이는 장마기간 동안의 많은 강우량(약 500 mm)으로 인한 강한 세정효과 때문인 것으로 사료된다. 반면, 10월에는 TSP농도가 그다지 높지 않았음에도 불구하고 대부분의 지점에서  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 상당히 높게 나타났으며, 이는 10월 동안의 에어로졸의 포집은 다른 시기와는 달리 강우 직후 실시하였기 때문에 지표면에서 부유된 에어로졸의 양보다는 상대적으로 인위적인 오염에 의한 공급이 많아서 입자의 크기가 적은 에어로졸의 함유량이 높았으리라고 추정된다. 일반적으로 지각의 풍화작용에 의해 생성된 분진은 주로 조대입자를 형성하고 인위적인 연소과정에서는 미세입자를 형성한다고 알려져 있는데, 전보<sup>14)</sup>에서의 농축계수로부터 인위적 오염원으로부터 공급된다고 추정된  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도도 10월에 높게 나타난 점을 미루어 이 시기에 미세입자의 점유율이 높음을 유추할 수 있었다. 따라서 10월에는 입경이 작은 에어로졸의 함유량이 높아서 TSP농도는 낮았지만, 입자의 상대적 표면적이 컸기 때문에  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 더 흡착이 잘 된 것으로 사료된다.

부산지역 4개 지점에서 측정된 전체 자료를 바탕으로 구한 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 상관성은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 상관계수  $r = 0.89$ 로 상당히 높게 나타났다. 이는 이들 핵종( $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ )들의 기원과 운반형태, 제거과정 등이 매우 유사하기 때문일 것이다. 한편,  $^{210}\text{Pb}$ 의 반감기는 22.3년으로 딸 핵종인  $^{210}\text{Po}$ 의 반감기 138일에 비해 상당히 길기 때문에 이들 핵종들이 제거되지 않고 대기 중에서 오래동안 존재한다면 방사평형( $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비가 1이 된다)이 성립될 것이다. 그러나 Fig. 3을 살펴보면  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비가 1보다 매우 적은 값을 알 수 있다. 이는 이들 핵종들이 생성된 후 아주 신속하게 에어로졸에 흡착되어 지표나 해면으로 제거되기 때문으로 설명되고 있다.<sup>4)</sup>

### 3.3. 대기 에어로졸의 체류시간

암석이나 토양 중에 존재하는  $^{226}\text{Ra}$ 이 방사붕괴되어 생성된 희귀기체인  $^{222}\text{Rn}$ 은 지표에서 지속적으로 방출되고 있기 때문에, 만일 대기 중  $^{210}\text{Pb}$  이하의 딸 핵종들이 에어로졸에 흡착·제거되지 않으면  $^{222}\text{Rn}$ 의 붕괴생성물인  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$ 은 대기 중에서 방사평형(방사능비가 1이 된다)이 성립될 것이다. 그러나 실제로는 앞서 설명한 바와 같이 이들 핵종들이 빠른 시간 내에 에어로졸에 흡착되어 지표나 해면으로 떨어지기 때문에 방사능비가 1보다

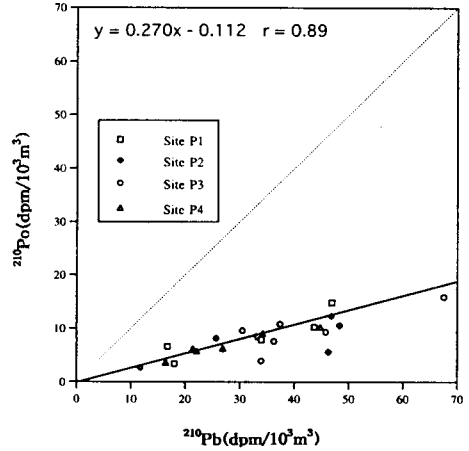


Fig. 3. A plot of  $^{210}\text{Po}$  versus  $^{210}\text{Pb}$  activity in aerosols at 4 sites in Pusan.

매우 적다. 그리고,  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 이 입자에 포집되고 난 후부터 방사붕괴 이외의 공급 또는 제거가 없었다고 가정하면, 입자중의  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비는 시간의 경과를 나타내는 것이다. 따라서 대기 에어로졸 중에서 이 방사능비( $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ )를 측정하면, 에어로졸의 평균체류시간을 구할 수 있다.

부산지역 대기 에어로졸의 평균체류시간 산정에는 연속적 제거모델<sup>3)</sup>을 이용하여 산정하였다. 이 모델은 대기 중 모든 핵종에 대해 공급과 제거가 평형을 유지하는 정상상태라고 가정하고, 에어로졸 중 3개 핵종의 제거상수는 대기 에어로졸의 제거상수( $k$ )와 같다고 가정한다. 또한 이 모델은 에어로졸을 대기 중에서 제거하는 현상은 간혹 있지만, 넓은 지역에서 장기간에 걸쳐 평균을 취한다면 연속적이라고 할 수 있는 모델이다.

$$\frac{dN_1}{dt} = E - \lambda_1 N_1 \text{-----}(1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - (\lambda_2 + k) N_2 \text{-----}(2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - (\lambda_3 + k) N_3 \text{-----}(3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \lambda_3 N_3 - (\lambda_4 + k) N_4 \text{-----}(4)$$

여기서  $N$ 은 단위면적당 원자수, 첨자 1은  $^{222}\text{Rn}$ , 2는  $^{210}\text{Pb}$ , 3은  $^{210}\text{Bi}$ , 4는  $^{210}\text{Po}$ 을 나타낸다. 또한,  $\lambda$ 는 각 핵종의 붕괴상수,  $E$ 는 지표에서 방출되는  $^{222}\text{Rn}$ 의 양,  $t$ 는 시간이다. 이 제거상수  $k$ 의 역수가 평균체류시간( $T_R$ )이 되며, 위 식을 연립하여 얻은 식을 방사능  $A(= \lambda N)$ 로 나타내면,

$$\frac{A_3}{A_2} = \frac{T_R}{(T_R + \tau_3)} \text{-----}(5)$$

$$\frac{A_4}{A_2} = \frac{T_R^2}{(T_R + \tau_3)(T_R + \tau_4)} \text{-----}(6)$$

으로 된다. 여기서  $\tau$ 는  $\lambda$ 의 역수(평균수명)이다.

부산지역 4개 지점에서 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$  농도를 측정하여  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비를 구한 뒤, 위 식에 대입하여 산정한 에어로졸의 체류시간을 Table 2에 나타내었다. 부산지역 대기 에어로졸의 평균체류시간은 지점과 시기에 따라 다르지만 대체적으로 약 60~80일 정도의 범위를 보였고, 북대평양(40 days)과 영국 Chilton(40 days)에서의 체류시간 보다 다소 길었다.<sup>5,19)</sup> 이는 부산지

역 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비가 다른 지역에 비해 다소 높게 측정되었기 때문이다.

지금까지의 연구결과에 의하면 주변환경으로부터의 과잉의  $^{210}\text{Po}$ 공급으로 인해  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비가 높아지는 것으로 보고 되었다.<sup>13,5,4,12)</sup> 특히, 대기 중 과잉  $^{210}\text{Po}$ 의 주공급원으로 알려진 바는 다음과 같다. 첫 번째는 토양으로부터 재부유된 입자로부터의 공급, 두 번째는 성층권으로부터 유입, 세 번째로는 산림연소로부터의 공급, 네 번째로는 생물체의 연소(Biomass burning)로부터 공급, 다섯 번째로는 화산폭발로부터의 공급, 여섯 번째로 화석연료의 연소로부터의 공급 등이다. 한편, 본 연구가 수행된 1996년 부산지역에서 측정된 대기 중 과잉  $^{210}\text{Po}$ 의 공급원은 산림 및 생물체의 연소나 화산폭발이라고 하기보다는 토양에서 재부유된 입자나 화석연료의 연소가 주 공급원으로 추정되며 이를 정확히 규명하기 위해서는 앞으로 좀 더 장기간에 걸친 관측이 필요할 것으로 판단된다.

부산지역 대기 에어로졸 체류시간의 시기별 변화양상을 Table 2에 나타내었다. 지점에 따라 다소 차이는 있지만 대체적으로 1월에 비교적 긴 체류시간을 나타내었고 다른 시기에 비해 8월에 짧았다. 이러한 경향은 Nho *et al.*<sup>13)</sup>의 연구결과에서도 설명되고 있지만, 동계 1월 동안에는 강우량이 적었기 때문에 체류시간이 긴 반면에, 장마기간이 끝난 8월에는 장마기간동안의 강한 세정효과의 영향으로 짧아진 것으로 판단된다. 한편, 10월 동안에 전 지점에서 체류시간이 비교적 긴 것을 알 수가 있는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 입자의 크기가 작은 에어로졸의 함유량이 많았기 때문으로 사료된다.

체류시간의 시기별 변화양상의 지점별 특징을 살펴보면(Table 2), 지점 P1에서 1월을 제외한 체류시간의 평균과 다른 지점에서의 전기간동안 평균한 체류시간은 큰 차이가 없었다. 그러나, 동일한 달에도  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  방사능비를 이용하여 산정한 에어로졸의 체류시간도 지점에 따라 약 10~30일정도의 차이를 나타내었는데, 이는 포집한 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도가 지점에 따라 다소 차이가 있었기 때문이다. 예를 들어, 지점 P1에서 1월에 상당히 긴 체류시간을 나타낸 것은  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도가 다른 지점에 비해 상당히 낮았기 때문이고, 지점 P3에서 1월과 8월에 체류시간이 비교적 짧았던 것은  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도가 다

소 높았기 때문이다. 반면, 지점 P2에서 4월에 체류시간이 짧았던 이유는  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 높은 데 반해  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 낮았기 때문으로 판단된다.

이와 같이  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도가 지점에 따라 다소 차이를 나타낸 것은, Suzuki and Shiono<sup>16)</sup>가 설명한 바와 같이  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  방사능비가 다른 공급원의 기여와 관련이 있을 것으로 사료된다. 따라서, 대기 중  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  방사능비를 좌우하는 다양한 공급원들의 기여정도를 측정하는 것이 앞으로 수행되어야 할 과제라고 생각된다.

4. 결 론

대기 중 에어로졸의 체류시간을 평가하기 위해 부산지역의 4개 지점에서 에어로졸 중  $^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도를 측정하였다. 에어로졸 시료는 high volume air sampler를 이용하여 1996년 1월부터 10월까지 채취하였다.

부산지역 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 의 농도는 11.77~67.57 dpm/1000m<sup>3</sup>의 범위였고  $^{210}\text{Po}$ 은 2.63~15.91 dpm/1000m<sup>3</sup>의 범위로 시기에 따라 상당한 농도차이를 나타내었다. 그리고  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 평균값은 각각 34.62 dpm/1000m<sup>3</sup>과 8.24 dpm/1000m<sup>3</sup>이었다.

각 지점에서 관측 전 기간동안 평균한 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도는 지점 P3에서 가장 높았고 지점 P4에서 가장 낮았다. 그리고 시기별  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도 변화양상은 TSP농도 경향과 비교적 유사하였다.

$^{210}\text{Po}$ 과  $^{210}\text{Pb}$ 의 방사능비를 이용하여 산정한 부산지역 대기 에어로졸의 평균체류시간은 약 60~80일 정도였다. 그리고 대기 에어로졸의 체류시간은 1월에 비교적 길었고, 다른 시기에 비해 8월에 짧았다. 이는 1월에는 강우량이 적었기 때문에 다소 긴 체류시간을 나타내었고, 8월에는 장마기간동안의 빈번한 강우에 의한 강한 세정효과 때문에 짧아진 것으로 사료된다.

이상과 같이 부산지역 대기 에어로졸 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도가 지점과 시기에 따라 차이를 나타낸 것은 대기 중  $^{210}\text{Pb}$ 과  $^{210}\text{Po}$ 의 농도 분포 및 제거과정이 지역적 환경과 기상조건에 의한 영향을 받았기 때문으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Carmichael, G, Y., U. Zhang, L. L. Ghen, M. S.

Table 2. Residence times(days) of atmospheric aerosols for 4 sites in Pusan

Site	Month	Jan	Feb	Apr	May	Aug	Oct	Range (mean value)
P1		107	74	69	69	59	91	59~107 (78)
P2		91	67	40	64	67	77	40~91 (68)
P3		64	72	84	62	40	89	40~89 (69)
P4		84	69	77	69	67	77	67~84 (74)
Range (mean value)		64~107 (87)	67~74 (71)	40~84 (68)	62~69 (66)	40~67 (58)	77~91 (84)	

- 1) Hong, and H. Ueda. 1995, Seasonal variation of aerosol composition at Cheju island, Korea, 29(17), 2407~2416.
- 2) Wakamatsu, S., A. Utsunomiya, J. S. Han, A. mori, I. Uno, and K. Uehara, 1995, Seasonal variation in atmospheric aerosols concentration covering Northern Kyushu, Japan and Seoul, Korea, Atmos. Environ., 29(17), 2343~2354.
- 3) Tsunogai, S. and K. Fukuda, 1974,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  and  $^{210}\text{Po}$  in meteoric precipitation and the residence time of tropospheric aerosol, Geochem. J., 8, 141~152.
- 4) Moore, H. E., S. E. Poet, and E. A. Martell, 1973,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  and  $^{210}\text{Po}$  profiles and aerosol residence times versus altitude, J. Geophys. Res., 78, 7065~7075.
- 5) Yokota, K. and S. Tsunogai, 1991,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ , and  $^{210}\text{Po}$  in atmospheric aerosols over the North Pacific Ocean, Geochemistry, 25, 59~68.
- 6) Junge, C. E, 1963, Air chemistry and radioactivity, Academic Press, New York.
- 7) Rex, R. W. and E. D. Goldberg, 1958, Quartz contents of pelagic sediments of the Pacific Ocean, Tellus, 10, 153~159.
- 8) Tsunogai, S. and Y. Nozaki, 1971, Lead-210 and polonium-210 in the surface water of the Pacific, Geochem. J., 5, 165~173.
- 9) Nozaki, Y. and S. Tsunogai, 1973, Lead-210 in the North Pacific and transport of terrestrial materials through the atmosphere, Earth Planet. Sci. Lett., 20, 88~92.
- 10) Sato, J., T. Doi, T. Segawa, and H. Sugawara, 1994, Seasonal variation of atmospheric concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  at Tsukuba, Japan, with a possible observation of  $^{210}\text{Pb}$  originating from the 1991 eruption of Pinatubo volcano, Philippines, Geochem. J., 28, 123~129.
- 11) Moore, H. E., E. A. Martell, and S. E. Poet, 1976, Sources of polonium-210 in atmosphere, Environ. Sci. Technol., 10, 586~591.
- 12) Kuroda, P. K., J. C. H. Liou, A. D. Banavali, J. D. Akridge, and L. A. Burchfield, 1984, Polonium-210 fallout from the 1980 eruption of Mount St. Helens and the mystery cloud of 1982, Geochem. J., 18, 55~60.
- 13) Nho, E. Y., B. Ardouin, and M. F. LE Cloarec, 1996, Origins of  $^{210}\text{Po}$  in the atmosphere at Lamto, Ivory coast: Biomass burning and Saharan dusts, Atmos. Environ., 30(22), 3705~3714.
- 14) 양한섭, 전은주, 김영일, 옥곤, 1999, 대기 에어로졸의 체류시간과 화학조성, 1.부산지역에서 주요이온과 중금속의 농도, 한국환경과학회지, 8(1), 51~59.
- 15) 양한섭, 김성수, 이재철, 1995, 동태 중부해역에서 Po-210과 Th-234의 순환에 대한 소용돌이의 영향, 한국해양학회지, 30(4), 279~287.
- 16) Suzuki, T. and H. Shiono, 1995, Comparison of  $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$  activity ratio between aerosol and deposition in the atmospheric boundary over the west coast of Japan, Geochem. J., 29, 287~291.
- 17) Wilkening, M. H. and W. E. Clements, 1974,  $^{222}\text{Rn}$  from the ocean surface, J. Geophys. Res., 80, 3828~3830.
- 18) 신웅상, 김희강, 1992, 서울시의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보전학회지, 8(1), 52~57.
- 19) Peirson, D. H., R. S. Cambay and G. S. Spicer, 1996,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  in the atmosphere, Tellus, 18, 427~433.