

대기 중 납의 농도를 조절하는 요인에 대한 고찰

Some Speculations on Mechanisms Controlling the Concentrations of Airborne Lead in the Atmosphere

김 기 현 · 김 동 술¹⁾ · 이 태 정¹⁾

상지대학교 환경과학연구소

¹⁾경희대학교 환경학과 및 환경연구소

(1996년 12월 24일 접수, 1997년 3월 8일 채택)

Ki-Hyun Kim, Dong-Sool Kim¹⁾, Tae-Jung Lee¹⁾

Institute of Environmental Science, Sang Ji University, ¹⁾Department of Environmental Science and Institute for Environmental Studies Kyung Hee University

(Received 24 December 1996; accepted 8 March 1997)

Abstract

To provide better insights into the factors and processes regulating the geochemical behavior of airborne lead (Pb), we have investigated several important aspects of its distribution characteristics using the data collected from the Kyung Hee University-Suwon Campus during 1989 through 1994.

Although the Pb data in the area reflected the effects of many anthropogenic activities ongoing in the area, the data were quite useful to assess the geochemical facets affecting the temporal distributions of lead as well as particulate matter (PM). The analysis of these data indicated that the Pb patterns were characteristic of enriched Pb levels during odd-numbered years relative to even-numbered years, while those of PM were exhibiting pronouncingly different patterns. Despite many similarities and differences found between year-to-year distribution patterns of Pb data, it was possible to discuss the facts associated with relatively high concentrations in the years 1991 and 1993 via normalization of Pb against PM data. According to this procedure, we were able to conclude that relative enrichment in Pb levels during 1991 was due to enhanced input of PM, while that of the year 1993 came from more chemically-oriented processes such as active adsorptive scavenging of Pb onto the PM surface.

Based on our comparative analysis of the size-fractionated PM and Pb data sets, we propose that two distinctive mechanisms that are both of physical (1991) and chemical nature (1993) exerted controls over the observed distribution patterns of airborne Pb in the atmosphere of Suwon.

Key words : lead, particulate matter

1. 서 론

대기 중에 존재하는 납의 농도는 대기오염의 주요 측도로 활용되는데, 이러한 물질의 농도가 지속적으로 경

감되고 있다는 사실은 오염물에 대한 정화노력이 성공한 드문 사례로 인용되기도 한다. 실 예로, Kim and Song (in press)은 강원도 원주지역의 녹지 및 공단지역 등에서 약 5년 가까이 채집된 자료를 분석에 근거하여, 지역의 납농도가 매년 14 (녹지)에서 55 (공단지역)

ng m⁻³ yr⁻¹의 율으로 감소하고 있다는 것을 보여준 바 있다. 계절적 변동양태가 남보다 훨씬 뚜렷한 SO₂ 등과 같은 화합물에서도 이와 같이 뚜렷한 감소의 경향을 발견할 수 있는데(김기현, 1996), 이러한 현상은 인위적 오염원의 활동이 중단 또는 위축되므로 인해 그들로부터 배출되는 오염물들의 지화학적 순환현상이 영향 받는다는 점에서 중요한 의미를 지닌다. 특히, 자연적 오염원과 인위적 오염원과의 상대적 기여도에 관한 관계의 재설정 또는 오염물질의 대기순환주기 변질 등은 이러한 현상의 불가피한 결과라 할 수 있을 것이다.

먼지 등에 결합된 형태로 대기 중에 배출되는 납은 상당히 독특한 분포특성을 보여준다. 물리화학적 관점에서 보면, 거대입자군에 비해 미세입자군에 납의 농도가 밀집되기 때문에(약 3~4배), 원소성 수은(elemental mercury)과 같은 가스상 중금속물질 처럼 여타 중금속에 비해 훨씬 긴 대기체류시간을 유지할 수 있다(Kim and Song, in press). Foltescu *et al.*(1994) 등에 의하면, 여타 중금속들에 비해 납은 가장 느린 전성침적 속도인 0.005에서 1.3 cm s⁻¹대를 유지하는 것으로 밝혀진 바 있다. 이러한 화학적 안정성 때문에, 납의 농도는 광역적으로도 비교적 균질한 상태를 유지할 수 있다(Kim *et al.*, in press). 시간적인 관점에서 보면, 이들의 분포는 기상학적인 요인에 의해 동고하저의 형태를 띄며, 그 양상은 매년 거의 유사하게 반복된다.

납의 대기분포특성과 장주기적인 농도분포 변화상태를 파악하기 위한 노력의 일환으로 경희대학교-수원 캠퍼스에서는 입자상물질(particulate matter)과 이들 물질에 종속된 여타 중금속류의 농도를 80년대 말부터 일상적으로 채집·분석하였다. 이들 자료를 분석한 결과에 따르면, 납의 시간적 농도분포 변화양상이 홀수년에는 상대적으로 증가하되 짝수년에는 감소하는 특이한 주기성을 발견할 수 있었다(그림 1). 관측지점인 경희대 캠퍼스 주변에는 지속적인 아파트건축공사나 경희대시설물의 신축과 같이 여러 형태의 인위적인 활동들이 중단없이 지속되던 상황이란 특수성을 감안할 때, 위에 묘사한 바와 같이 배경적인 분포형태를 띄기보다는 특이한 장주기적 분포형태를 취하는 상황을 받아들일 수 있을 것이다. 그러나 본 연구가 이루어진 수년의 기간 중에도 납의 배경농도가 한반도 전체규모로는 지속적으로 감소했다는 사실은 원주지역의 관측결과에서 처럼 쉽게 확인할 수 있다(Kim and Song, in press). 비록 이들 자료가 배경농도분포의 변화를 파악하는 데는 적절하지 않지만, 주변에서 진행되는 여러 가지 환경변화인자들이 어떻게 납의 농도에 영향을 미칠 수 있는 지 등을 파악하

는데는 여전히 긴요한 단서로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 경희대학교 주변지역의 납 농도가 특별히 증가한 것으로 드러난 1991년과 1993년도의 경우에 대하여 여러 가지 원인분석을 실행하고 이를 토대로 가상적인 메커니즘을 제시해 보았다.

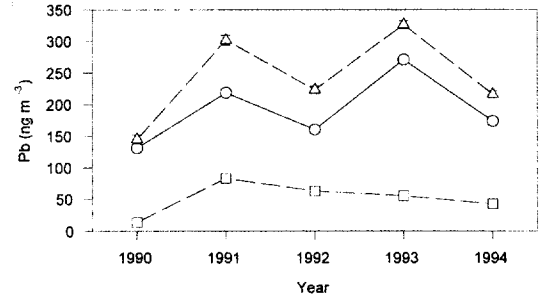


Fig. 1. The plot of annual means for Pb concentrations in both fine and coarse mode. The two months of the year 1989 were excluded for this comparison. Symbols denote fine (○), coarse (□), and total (fine+coarse: △) concentration for Pb.

2. 연구방법

본 연구와 관련한 시료의 채집 및 분석 방법 등은 과거에 발표한 기초분석자료에서 비교적 자세히 다룬 바 있다(이태정 등, 1996). 시료의 포집은 1989년 11월부터 1994년 9월까지 약 5년여의 기간동안 경기도 용인시의 경희대학교 자연과학대학에서 실시하였다. 원래 분진은 9단의 low pressure impactor (LPI)를 사용하여 9단계의 입경별 포집이 이루어졌다. (자료의 해석에 있어, 편의상 직경 3.3µm 이하의 크기로 포집된 PM이나 Pb는 미세입자로 그리고 직경이 이 보다 클 경우 거대입자군으로 분류하였다.) LPI의 유속은 28.3 l min⁻¹으로 약 7일에서 30일의 주기로 시료채집이 이루어졌다. PM의 농도는 시료채집 전후의 무게차와 기록된 유량으로 계산하고, Pb의 농도는 XRF법을 사용하였다(Model 3063, Rigaku Co., Japan). 시료의 정량은 NIST의 표준시료, SRM 1833 (일련번호 1207)을 사용하였다.

3. 결과 및 토론

그림 1에 나타난 결과에서 보듯이, 납의 총농도는 짝

수해에 비해 홀수해에 상대적으로 증가하였다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 농도변화는 미세입자군의 농도 변화에 의해 조절된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 한 가지 흥미로운 사실은 미세입자군의 납이 홀수 해에 상대적으로 증가하는 주기성을 띤다는 사실에 덧붙여 전체 분석 기간동안 꾸준히 증가하는 경향을 띤데 반해, 상대적으로 총농도에 미치는 영향력이 미미한 거대입자군의 농도는 1991년을 정점으로 감소하는 추세를 보인다는 점을 들 수 있다. 납의 시간적 농도변화가 어떠한 요인에 의해 야기되는 가를 이해하기 위해서는 우선 이들 납이 함유되었던 PM (particulate matter: 입자상물질)의 농도가 동기간에 어떻게 변화하였는지를 파악하는 것이 중요하다. 그림 2의 PM 농도 변화양상을 보면, 미세군과 거대군간의 농도차이가 납에 비해 확연하지 않다는 것을 알 수 있다. 이들 자료를 더 구체적으로 보면, 1991년에는 Pb의 경향과 유사하게 나타나지만, 1993년에는 홀수해의 증가경향을 더 이상 발견할 수 없다. 따라서 Pb의 농도와 PM의 농도는 각기 다른 작용에 의해 조절된다는 점을 추론할 수 있을 것이다. 이와 같이 분포특성을 조절하는 인자들에 대한 설명은 Kim *et al.* (in press)이 Pb 및 PM과 주변환경변수들간의 분석을 통해 이미 밝힌 바 있다. Kim *et al.*은 PM의 농도가 풍속과 강한 정상관관계를 보이는 반면, Pb의 농도는 약한 음의 상관관계를 유지한다는 것을 밝힌 바 있다. 따라서 강한 바람이 일 경우, 지표면으로부터 대기로 PM의 유입이 활발하게 진행되지만, 이러한 현상은 Pb의 농도에 직접적으로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 대기안정도의 한 가지 지표로 활용이

가능한 상대적 무풍율(relative frequency of calmness)과 이들 농도의 상관관계를 분석한 결과에 따르면, Pb의 경우 강한 양의 상관관계를 유지하는 반면, PM의 경우에는 강한 음의 상관관계를 띄는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 다음과 같은 방식으로 설명이 가능하다.

미세입자들에 흡착된 Pb의 농도는 대기가 안정될 수록 강한 부유성에 의해 증가하나, 상대적으로 무거운 PM은 강하게 침적되리라는 것을 짐작할 수 있다.

납의 시간적인 농도변화양상을 보다 구체적으로 파악하기 위해, 납의 농도를 PM의 농도로 표준화(normalization)해 보았다(그림 3). 이 결과에 따르면, 1993년의 예외적인 경우를 제외하고는, Pb/PM의 ratio가 미세군에서는 약 2×10^{-3} 에서 4×10^{-3} 사이로 변하고 거대군에서는 약 2×10^{-3} 이하로 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 그림 3의 결과를 바탕으로 각 연도별 납의 농도변화양상을 다음의 요인들과 결부지을 수 있을 것이다. 첫째, 1991년에 기록된 상대적으로 높은 납의 농도는 그 해에 상대적으로 높게 나타난 PM의 농도에 영향을 받은 것이다. (Pb/PM ratio의 경우, 그 해의 수치가 다른 해(1993년을 제외한)에 발견되었던 값과 유사하게 나타났다는 점을 감안하면, 이러한 추론이 무리는 아닐 것이다.) 이에 반해, PM의 유입이 상대적으로 미미했던 것으로 나타난 1993년도에 발견된 높은 Pb 농도의 경우, 예외적으로 높은 Pb/PM ratio가 시사하듯이 Pb의 scavenging이 대단히 효율적으로 일어난테 기인한 것으로 볼 수 있다. 실제 관측이 이루어진 매 해의 농도분포변화를 보다 세세한 관점에서 분석한 그림 4의 결과에 따르면, 1993년의 현상은 가을철 기간에 높은

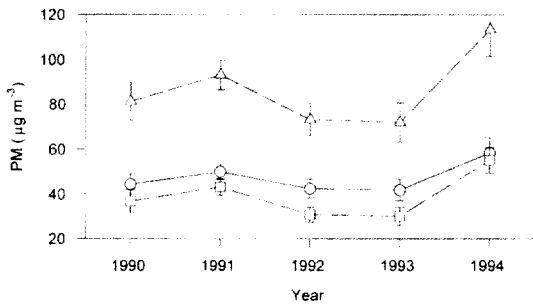


Fig. 2. The plot of annual means for PM concentrations in both fine and coarse mode. The two months of the year 1989 were excluded for this comparison. Symbols denote fine (○), coarse (□), and total (fine+coarse: △) concentration for PM.

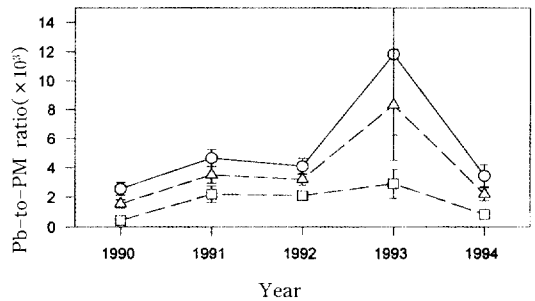


Fig. 3. The plot of PM-normalization (or Pb-to-PM ratio). The Pb concentrations were normalized to the PM content for each respective mode: fine (○), coarse (□), and the sum of the two modes (△).

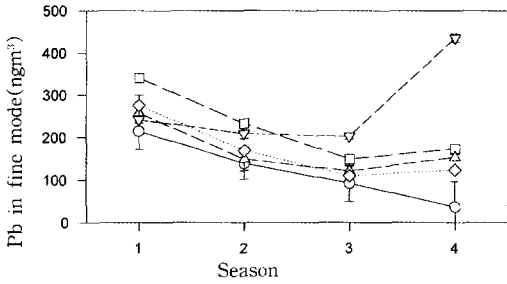


Fig. 4. Inter-annual comparison of seasonal variations in fine-fraction Pb concentrations. Symbols denote the years: 1990 (○), 1991 (□), 1992 (△), 1993 (▽), and 1994 (◇). Numbers 1 through 4 denote winter, spring, summer, and fall.

Pb 농도를 유지하는 미세균의 PM이 집중적으로 유입된 데 결정적인 영향을 받았다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상의 본질적인 원인을 파악하기 위해서는 차후에 이 기간 중 채집된 Pb의 화학적 성상 등을 파악하는 것과 같은 보나 세밀한 연구의 수반이 불가피하나, 현재의 상황에서 이런 분석결과는 화학적인 작용이 납의 농도에 중요한 변수로 작용할 수 있다는 사실을 강하게 시사하고 있다. 따라서 1991년과 1993년 자료의 비교를 통해, 대기 중의 납의 농도가 크게 두 가지 작용에 의해 영향을 받고 있다는 결론에 도달할 수 있다. (1) 1991년의 경우와 같이, 단순히 PM의 증가가 납농도의 증가를 가져왔다는 “물리적(또는 기상학적) 요인”의 중요성을 말할 수 있고, (2) 1993년도의 경우처럼 PM의 농도가 미량임에도 불구하고 Pb의 농도가 상대적으로 증가한 현상은 본질적으로 화학적인 동인에 의해 납의 농도가 변화할 수도 있다는 두 가지 현상의 차이를 발견할 수 있다. 아직까지 어떠한 동인에 의해 두 가지의 이질적인

현상이 야기되는 가에 대한 원인은 뚜렷하게 밝힐 수 없다. 그러나 본 연구의 결과는 이들 두 가지 동인이 뚜렷한 특성의 차이에도 불구하고 다같이 대기 중 납농도의 변화에 강한 영향력을 발휘할 수 있다는 사실을 입증한다.

감사의 글

Contribution No. 97-0101 for the Institute of Environmental Science, Sang Ji University.

참 고 문 헌

김기현(1996) 주요 대기오염물에 대한 농도변화 관측: 원주시 1992~1994년, 한국지구과학회지, 17(6), 437-447.
 이태정, 김성천, 김동술(1996) 수원지역의 대기 중 Pb의 농도 결정, 한국환경과학회지, 4(5), 535-542.
 Foltescu, V.L., I. Isakson, E. Selin, and M. Stikans(1994) Measured fluxes of sulphur, chlorine and some anthropogenic metals to the Swedish west coast, Atmos. Environ., 28(16), 2639-2649.
 Kim, K.H. and D.W. Song(in press) The concentration of lead in urban and nonurban atmospheres of Won Ju city, Korea, Water, Air and Soil Pollut.
 Kim, K.H., D.S. Kim, and T.J. Lee(in press) The temporal variabilities in the concentrations of airborne lead and its relationship to aerosol behavior, Atm. Environ.