

서울지역 대기중 수은변동에 대한 조사

환경조사과

조석주 · 고한성 · 김홍기 · 임성철 · 박창호 · 김광진

Study on Behavior of Atmospheric Mercury in Seoul

Environmental Research Team

**Seog-Ju Cho, Han-Sung Ko, Hong-Gi Kim, Sung-Chul Lim,
Chang-Ho Park, and Kwang-Jin Kim**

Abstract

This study investigated the behavior of atmospheric mercury in Seoul. Atmospheric mercury was measured by a mercury air monitor (Mercury Monitor AM-2). The mercury was measured using gold amalgamation cold vapor atomic absorption spectroscopy. The results were summarized as follows:

1. The concentrations of atmospheric Hg measured at Yangjae-dong were in the range of 0.25 to 30.10 ng/m³. The total average data was 4.99 ± 2.4 ng/m³.
2. Comparing Yangjae-dong with the other sites, it showed that Yangjae-dong had a highest average concentration. That may be that there is some unknown emission source around Yangjae-dong.
3. After raining concentration of Hg had a tendency of decreasing by 76%.

서 론

수은과 그 화합물은 높은 증기압을 갖기 때문에 대기권에서 수은 순환과정은 중요한 역할을 하게 된다. 수은은 인위적 또는 자연적인 요인으로서 대기권, 수권, 토양권 그리고 생물권 등의 무기유기적 환경생태계를 순환하는 가장 움직임이 큰 중금속으로 인식되고 있다.¹⁾ 대기 중에 공급되는 수은은 자연적인 요인과 인위적인 요인으로 구별할 수가 있다. 자연계활동에서 유래하는 수은은 지하의 마그마 활동에서 유래하는 것

으로서 화산가스나 분출가스에 수반하여 방출되는 수은과 토양에서 기화하는 수은이 있다. 토양에서 기화되는 수은량은 토양 중 수은농도, 지온, 통기성, 점토 광물이나 부식물질량, 토양 pH, 미생물활동 등에 의존하는 것으로 알려져 있다.²⁾ 전세계적으로 인위적인 요인으로부터 배출되는 수은의 양은 연간 약 6,000~7,500ton 정도 되는 것으로 보고되고 있다.³⁾ 대기중의 수은은 가스상 및 입자상 형태로서 존재하는데 수은화합물의 높은 휘발성 때문에 인위적 요인으로부터 배출되는 대부분의 수은은 가스상 형태로 대기중에 존재하는 것으로 알려져 있다. 석탄연소 화력발전소는 대기

중의 주요한 수은 발생원이다. 특히 연탄 연소로 인하여 함유되어 있는 수은의 90-98%가 가스상 수은으로 변하는 것으로 보고 되고 있다.^{4,5)} 수은 화합물에 노출되었을 때 중추신경장애와 골장애와 같은 만성중독 증상과 복통, 구토, 순환기장애와 같은 급성 중독을 일으키는 것으로 알려져 있다⁶⁾ 이러한 수은의 대기환경에서의 방출, 지표면에서의 침적, 이동 형태변화, 제거(수권 및 생물권에서의 이동) 등의 과정을 연구할 필요가 있어, 김 등은 토양-대기간에 진행되는 수은의 교환율을 정확하게 파악하기 위하여 수은의 농도구배 측정 및 미기상학적 기법을 동원하여 수은의 교환율을 국내 최초로 실시하였으며⁷⁾, 본 조사에서는 '99년도 양재동 지역에서 측정한 1년간의 수은자료를 가지고 월별 변화, 시간에 따른 변화, 같은 시간대 한남동, 서울대공원과 비교 및 강우전, 후의 농도를 비교하여 wash out에 의한 세정효과 등을 조사하였다.

실험 방법

본 조사지점은 양재동, 한남동, 과천 서울대공원 등 3지점이며, 양재동은 2월을 제외한 99년의 1년간 측정자료, 한남동은 '99년 9월 17일~29일, 10월 25일~11월 19일, 과천 대공원은 10월 1일~11월, 11월 19일, 20일, 27일~12월 6일, 12월 11일~31일에 측정한 자료를 이용하였다. 측정일이 다른 이유는 측정기기 2대를 이용하여 한 대는 양재동에서 상시 측정하고, 나머지 한 대는 과천 및 한남동에 이동 측정하였다. 측정기기는 Mercury Monitor(AM-2/Nippon Instrument사 제품)을 사용하여 60분 단위로 내장된 유량조절계에 의해 0.5 l/min 유속으로 공기시료를 흡입하고 기기 본체와 연결된 흡·탈착장치에 의해 수은시료가 연속으로 채취·분석되는 방식으로 운용되었다. 기기 내부에서 탈착된 수은의 분석은 건조공기를 carrier gas로 사용하는 비분산형 이중빔식(nondispersive double beam), 비프레임화 원자흡광분석법(flameless atomic absorption method)에 의해 253.7nm의 파장에서 검출하였다. 본 기기의 정밀성은 김 등이 수은의 교환율을 측정할 때 분석한 결과 평균 0.64%(범위 : 0.29~1.27%)와 0.35%(0.08~0.64%)의 오차를 보여 정밀성이 대단히 우수하였다⁷⁾. 기타 본 장치의 구성도 및 교정방법은 김 등

의 원보를 참고하였다.⁸⁾

결과 및 고찰

1. 대기중의 수은농도

대기중에 존재하는 수은의 90%이상은 통상 기체상 수은이며 지표부근에서 2~4ng/m³이 background값으로 김 등이 보고한바 있으며, 상공이나 해양 대기 중에는 이보다 낮다고 하였다. 도시 대기에서는 24시간 평균치로서 수~30ng/m³의 측정치가 보고되고 있으며, 일본에서 동경 중심부는 5~34ng/m³(평균 9.8ng/m³), 나라는 1.9~16ng/m³(평균 5.1ng/m³), 미국의 시카고는 5~60ng/m³(평균 22ng/m³), 오타와에서는 4~40ng/m³ 등이 보고되어 있다⁷⁾. Background 지역이라 볼 수 있는 치악산에서의 농도치는 1.33~3.87ng/m³ 수준으로 보고되었다.

Table 1에서 보듯이 양재동 측정소에서 1년간 측정한 총 7000여개의 data를 월별로 구분한 결과 대기 중 평균 수은 농도는 4.99ng/m³±2.4로 전년도 8.00ng/m³±3.7보다는 매우 낮게 나타났다. 이는 양재동지역(연구원내)에서 전년도에는 북쪽에 위치한 지점에서 '99년도에는 남쪽에 위치한 지점에서 시료채취를 실시하였으며, 지표면과의 높이도 3~4m 정도의 차이가 있었으며, 북쪽지역은 수목과 인접한 지점으로 태양광선이 거의 없는 지역이었다. 따라서 같은 지역이라도 여러 가지 환경적인 조건에 따라 수은의 농도

Table 1. Monthly variation of mercury concentration in ambient (Yangjae-dong) (unit : ng/m³)

Month	Mean±S.D.	Min.	Max.
Jan.	3.28±1.9	1.19	14.30
Mar.	4.93±1.9	0.62	14.20
Apr.	4.75±2.2	0.25	20.40
May.	4.35±1.7	1.82	19.85
Jun.	5.91±2.8	2.20	26.60
Jul.	5.30±2.6	1.89	28.38
Aug.	4.42±2.0	1.15	18.20
Sep.	4.04±1.0	1.70	8.91
Oct.	4.26±2.0	1.00	11.00
Nov.	7.07±4.0	1.07	30.10
Dec.	6.62±4.0	1.78	28.00
Ave.	4.99±2.4	0.25	30.10

는 매우 다양하게 변화될 수 있으며, 지표면과 수은의 교환율에도 커다란 차이가 있을 것으로 판단된다. 평균 수은농도 4.99ng/m³는 동경의 9.8ng/m³, 시카고의 22ng/m³보다 훨씬 낮은 농도로 배경농도 값에 가까운 값이다. 월 중 변화는 Fig.1과 같이 11월이 7.07ng/m³로 가장 높았으며, 농도범위도 1.07~30.1ng/m³로 매우 큰 범위를 나타냈다. 최저농도는 1월이 3.28ng/m³±1.94로 나타났으며 농도범위도 1.19~14.3ng/m³ 변화폭이 작게 나타났다. 일반적으로 계절별 농도변화는 기온 및 일사량의 강도에 따라 여름에는 농도가 상승하고, 겨울철에도 계절변동에 따른 연료의 증가와 더불어 연소계 발생원의 영향과 함께 11월부터 형성되는 대기 안정도가 증가하므로써 빈번히 발생하는 지표 역전현상을 크게 받는다. 따라서 계절별로 나누어 비교하면 여름과 겨울에 비교적 높은 농도를 나타내는 경향이 있는데 본 조사에서도 11월을 제외한 계절별 변화에서 과거의 연구 결과와 비슷한 양상을 보였지만 11월에 최고치가 나타난 것은 양재동 주변의 확인할 수 없는 어떤 불규칙한 생성원의 영향으로 사료된다.

2. 수은의 일변화

수은의 일변화는 Fig. 2와 같이 야간 시간대(19시~06시)에 고농도가 지속되는 것이 뚜렷하며 이때의 평균농도는 5.32ng/m³으로 주간인(07시~18시)의 평균농도 4.37ng/m³보다 1.2배나 높게 나타났으며, 하루중 농도가 가장 높은 시간대는 야간인 21시로 5.88ng/m³을, 가장 낮은 시간대는 12시로 4.69ng/m³을 나타냈다. 시간대별 농도 변동폭은 22시대에 0.6~30.1ng/m³으로 가장 큰 변화폭을 보였으며, 6시대에

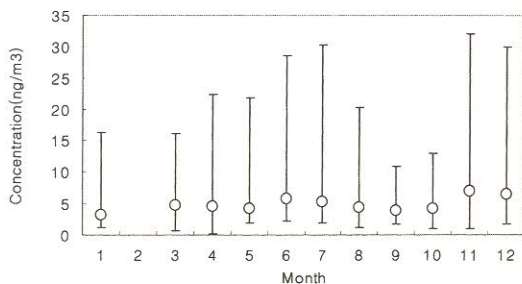


Fig. 1. Monthly variation of mercury concentration in ambient(yangjae-dong)

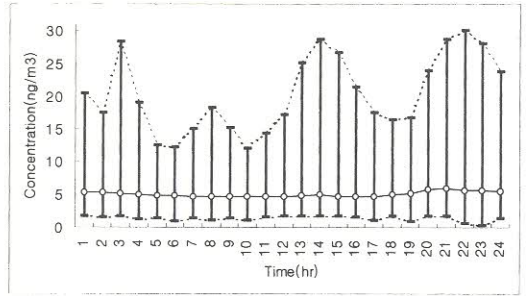


Fig. 2. Diurnal variation of Hg concentration(Yangjae-dong)

0.9~12.0ng/m³ 가장 작은 변화폭을 보였다. 주간의 경우 14시대에 5.1로 주간 농도중 가장 높았으며, 나머지 주간 시간대는 전체 평균농도 보다 저농도를 보였다. 이러한 시간대별 분포는 김 등이 같은 장소에서 조사한 자료와는 거의 동일하나 수은의 농도는 기온이 높거나 일사량이 많은 경우 높아지는 과거의 연구에서 나타나는 일반적인 특성인 낮 시간대에 고농도를 유지하는 경향과는 다른 형태를 보였다. 이에 대해 김 등은 야간에 농도가 높은 원인은 주로 야간에 나타나는 확인 미상의 불규칙한 생성원의 존재를 반영하는 것이라 추정하였다⁹⁾.

Table 2에 양재동과 한남동, 양재동과 과천 서울대 공원에서의 수은농도를 동일기간대에 비교하였다

일반적으로 교통량이 많고 주거밀집지역인 한남동이 양재동보다 높은 농도를 나타낼 것으로 예상되었으나 오히려 양재동이 높은 농도를 보였는데 이는 짧은 기간내 단순 비교이며 양재동 지역에 확인 미상의 수은 발생원이 존재하고 있을 가능성이 높다고 사료된다. 양재동과 과천 서울대공원의 비교는 녹지지역인 서울대공원이 낮은 농도를 나타냈으며, 농도범위에서 서울대공원이 1.02~44.1ng/m³다른 두 지역보다 변화폭이 넓었는데 이는 서울대공원의 측정지점에서 약 50m 정

Table 2. Mercury concentration in yangjae, hannam, kwachoen (unit : ng/m³)

Site	Ave.	Max.	Min.	S.D.	Periods
Yangjae	5.37	28.6	1.69	2.26	9.17~9.29, 10.25~10.31
Hannam	5.26	18.3	2.00	2.75	11.1~11.19
Yangjae	6.23	30.1	1.63	1.97	10.1~10.11, 11.19, 11.20
Kwachoen	5.20	44.1	1.02	2.94	11.27~12.6, 12.11~12.31

도에 소각장이 위치하고 있었으며, 상시 가동하는 소각장은 아니며, 가끔씩 동물의 사체를 소각하는 경우가 있어 높은 농도를 나타내어 변화폭이 크게 나타낸 것으로 사료되었다. 기간은 다르지만 한남동과 서울대공원은 농도는 서울대공원이 약간 낮게 나타났지만 비슷한 농도를 보였는데 수은은 다른 금속에 비하여 높은 휘발성을 갖고 있어 환경유동성이 매우 크므로 도심지 내에서 발생한 수은이 대기중에서 확산과 대기의 순환으로 인하여 비슷한 분포를 보이는 것으로 사료된다. 그러나 양재동의 경우 전자에서도 언급하였듯이 확인할 수 없는 수은 오염원이 존재할 가능성이 커서 다른 지역보다 높게 나타났다.

3. 강우 전 · 후의 농도비교

대기 중의 수은이 제거되는 과정은 몇 가지로 측정될 수 있다. 비나 눈에 수반하여 지표에 침착하는 습성침착(wet deposition)과 먼지등의 강하에 의한 건성침착(dry deposition)은 주된 제거과정으로 생각할 수 있다. 이 중 습성침착에 의해 제거되는 것이 가장 크며 강우 등의 수은농도와 강수량을 곱하여 그 양을 구할 수가 있다. 우수 중의 수은농도 보고치는 연구자에 따라 크게 차이가 있다. 수은 측정기와 동일장소에 설치된 산성우자동측정기에 1mm이상의 강우가 기록된 날을 기준으로 강우 전 · 후의 수은농도를 비교하였다 1.0mm이상의 강우가 기록된 날은 63일이며, 이 중 수은 분석자료가 없는 날을 제외한 50일을 기준으로 강우 전 · 후 농도를 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 강우에 의하여 농도가 감소된 경우는 76% 정도였고, 강우가 있어도 수은농도가 증가한 경우가 24%로 비가 온다고 해서 반드시 수은농도가 감소되는 것은 아니었다. 비가 온 후 수은농도가 감소하지 않는 경우는 보통 비의 양이 적거나, 그 당시 수은 배출원에서의 배출 증가에 기인한 것으로 판단된다. 또한 강우량의 증가에 따른 수은농도 변화를 파악하였으나 통계적인 유의성이 없었으며 일정한 경향을 보이지 않았다. 다른 연구보고서 등에 의하면 비교적 강우량이 높은 여름철에 강우의 세정효과에 의하여 대기중 수은양이 낮아졌지만, 그후에는 재취산하여 농도가 높아지는 것으로 보고 되고 있다.⁶⁾ 이와같이 대기중 수은농도는 기온의 고 · 저, 강우 현상에 의한 세정효과 및 배출량에 따른 연관성이 매우 큰 것으로 사료된다.

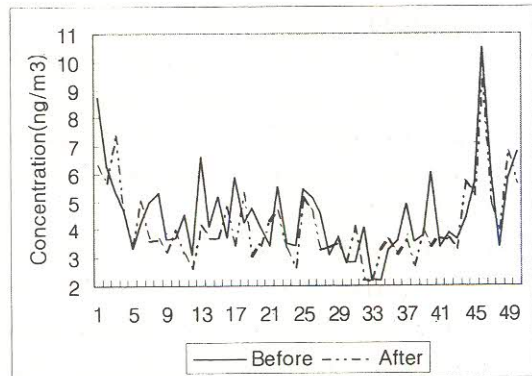


Fig. 3. Variation of concentration in ambient air(before and after the rain)

결 론

수은을 금아말감으로 포집한후 냉원자흡광광도법을 이용하여 서울지역 대기중의 가스상 수은 농도를 연속 측정 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. '99년에 양재동 측정소에서 측정된 대기중 평균 수은 농도는 $4.99 \pm 2.4 \text{ ng/m}^3$ 이었다. 이는 전년 보다 40% 정도 낮아진 농도를 나타냈다. 월별 변화에서는 11월이 전체평균 보다 1.4배 정도 높은 농도로 최고치를 보였다.
2. 양재동과 녹지지역인 서울대공원과 주거 밀집지역인 한남동의 수은농도를 비교한 결과 양재동이 가장 고농도를 보였는데 이는 확인미상의 배출원에 기인한 것으로 판단 된다.
3. 강우에 의한 세정효과를 파악하기 위하여 강우 전 · 후의 수은 농도를 비교한 결과 비가 온후 전체 측정일(강우가 있던 날 기준)의 76%가 감소를 보였다.

참 고 문 헌

1. Schroeder, W.H. and Jackson, R.H.: An Instrumental Analytical Technique for Vapor-Phase Mercury Species in Air, *Chemosphere* 13, pp.1041-1051 (1984)
2. Anderson, A., *Mercury in Soil In : The Biogeochemistry of Mercury in the Environment*, Nriagu, J.O., Elsevier.

- Amsterdam, p 79-112(1984)
3. Mason R.P., W.F. Fitzgerald, F.M.M. Morel: The biochemical cycling of elemental mercury : anthropogenic influences, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(15): 3191(1994)
 4. Billings, C.E., Sacco, A.M., Matson, W.R., Griffin, R.M., Coniglio, W.R., and Harley, R.A.: Mercury Balance on a Large Pluverized Coal-Fired Furnace, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 23, p 773-777(1973)
 5. Kim, M.Y., Park, S.H., and Park, S.B.: Study on the Behavior of Gaseous Mercury and its Influencing Factors in Urban Ambient Air, *J. KAPRA*, 5(1) 11-21(1989)
 6. Tsubaki, T., Irukayama, K., Minamata Disease: Methylmercury Poisoning in Minamata and Nigata Japan, Kodansha, Tokyo(1977)
 7. 김민영: 미기상학적방법에 의한 지표면과 대기간의 수은플럭스 해석, 단국대학교 박사 학위논문 (1998)
 8. 오석률외 7명: 서울지역 대기중 수은의 거동에 관한 연구, 보건환경연구원 논문집 (1998)
 9. 김민영, 정일현, 김기현: 서울시의 주거지역을 중심으로한 토양-대기질간 가스상 수은 의 교환을 측정, 보건환경연구원 논문집(1998)