

Passive Sampler를 이용한 SO₂ 공간농도분포 조사와 토양오염 상관성 연구

송 영 배[†]

성균관대학교 건축조경토목공학부 건설환경연구소

(2005년 5월 16일 접수, 2005년 10월 18일 채택)

A Study on Correlations between Distribution of Sulfur Dioxide Concentration and Soil Environments by Using Passive Samplers

Young-Bae Song[†]

School of Architecture, Landscape Architecture and Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University, Korea

ABSTRACT : A simple analysis of atmospheric sulfur dioxide(SO₂) pollution in industrial region was investigated using badge type passive samplers. It were set up in 76 locations and the SO₂ distribution evaluated along the boundary of land use type. It changed considerably both monthly and seasonally. Soil samples were also collected in 120 locations to investigate influence of sulfur dioxide pollution on soil and heavy metal distribution in the study area, where the sulfur dioxide pollutants from industrial area could affect the soil environment of near residential and green areas.

The relationship between the SO₂ concentrations in the atmosphere and heavy metal (Cu, Pb) concentrations in the soil were analyzed, by using the correlation coefficient values and the results were 0.17 and 0.08 in industrial area. And this study indicated that the atmospheric pollution in industrial region affect the level of the soil pollution adjacent to the residential and green area. The study result may be used to define correlativity for establishing an exposure index. It will subsequently be used for a more precise assessment measuring the exposure of plants and inhabitants, for the purposes of a study on effects on health.

Key Words : Sulfur Dioxide Pollution, Heavy Metal Pollution, Passive Sampler, Shihwa Industrial Complex

요약 : 공단지역에서 아황산가스의 오염농도와 공간분포를 조사하기 위해 토지이용 유형별로 약 500 m 격자망을 구성하여 76개의 지점에 패시브샘플러를 설치하여 분석을 수행하였다. 또한 아황산가스를 비롯한 대기오염물질이 공업단지, 주거지 및 녹지지역의 토양에 미치는 오염영향을 파악하기 위해 120개 지점에서 토양시료를 채취하여 토성과 중금속 농도를 분석하였다. 분석결과 아황산가스 농도와 Cu 및 Pb와의 상관도는 0.05 및 0.04로 낮게 도출되었으나, 공업지역만을 대상으로 분석하였을 경우 상관도는 0.17 및 0.08로서 각각 3.3배와 2배 증가한 것으로 분석되었다.

위 연구결과는 대기오염농도의 공간분포 및 토양오염과의 상관성을 파악할 수 있도록 공업지역, 주거지역 및 녹지지역으로 구분하여 도면에 표시하였으며, 연구결과는 인간, 동·식물이 장기간 오염환경에 노출정도와 대기위생 및 공중보건 위험성평가를 위한 자료로 활용될 수 있다.

주제어 : 아황산가스, 중금속오염, 패시브샘플러, 시화공단

1. 연구의 배경 및 목적

시화·반월공업지역은 한국의 3대 공업단지 중의 하나로서 서쪽으로 해안에 인접해 있으며, 동쪽으로는 주거지역과 접해 있다. 연구 대상지에는 약 2,914개의 산업체가 입주하고 있다. 입주업체는 대부분 영세 중소기업으로 산업폐기물을 처리하는 소각장과 화학업체 등의 다양한 업종으로 구성되어 있다. 특히, 연구대상지는 대기오염 관리지역으로서 2004년을 기준으로 시화반월지구의 SO₂ 농도는 국지적으로 높은 분포를 나타내고 있으며, 특히 시화공단과 반월공단의 접도구역

은 SO₂의 농도가 환경부 대기오염기준치를 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 이와 함께 VOC 오염 등이 국지적으로 증가하는 추세를 보이는 것으로 조사되었다.¹⁾ 연구대상지의 대기오염도가 높은 이유는 해안에 공업시설이 위치하고 있기 때문에 해풍의 지속적 영향을 받으며, 따라서 공업시설에서 배출된 대기오염물질이 동쪽의 주거지역, 녹지지역으로 확산되는 것으로 분석되었다.²⁾ 따라서 지형 및 입지특성으로 인해 대기오염 영향에 대한 지리적 취약성을 갖고 있다.

대기오염물질이 토양오염에 미치는 영향에 대한 연구는 주로 산성강하물과 토양 pH를 중심으로 이루어졌으며,³⁾ 도로 교통에 의한 토양오염 수준에 관한 연구가 이루어졌다.⁴⁾ Holm 등은 토양 pH와 카드뮴(Cd)의 확산분포에 대한 상관성 연구를 수행하였다.⁵⁾

본 연구는 대상지에 Passive sampler를 설치하여 대기 중의

[†] Corresponding author
E-mail: ybs2000@empal.com
Tel: 031-290-7853

Fax: 031-290-7850

SO₂ 농도를 조사하고, 토양을 채취하여 토양 중금속 함량을 조사함으로써 대기오염물질의 확산농도와 토양 중금속 상관 분석을 수행하고, 이를 통해 공업지역, 주거지역 및 녹지지역 내에서 대기 및 토양오염 영향여부 및 특성을 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

대상지역은 공업시설에서 발생하는 대기오염물질로 인해 지속적으로 악영향을 받고 있는 것으로 조사⁶⁾된 시흥시 시화공단지역과 인접한 도시 및 녹지지역을 선정하였다.

2.1. 대기오염 농도 측정

패시브 샘플러(Envors, SOB-P01)를 이용한 아황산가스의 측정은 대기오염물질의 공간분포 분석을 위해 매우 유용한 방법으로 활용되고 있다.⁷⁻¹¹⁾ Passive sampler를 이용한 대기오염물질의 농도측정은 분자확산 현상을 이용하는 것으로서, 공기의 흐름을 최소화시키는 가운데 passive sampler의 경계층을 통과한 오염물질이 분자확산에 의해 흡수액이 묻어있는 흡착제에 포집되도록 하는 것이다.⁸⁾

대기오염도 조사는 SO₂ 오염측정을 위해 passive sampler를 공업지역, 주거지역 및 녹지지역에 지상으로부터 높이 2 m에 설치하였으며, 주변 공기가 자유롭게 유통되기 위해 지지대로부터 약 8 cm의 간격을 유지하였다. 각 샘플러는 30일 동안 대기 중에 노출시켰으며, 설치기간은 2003년 4월부터 10월까지 7개월간 매일 가중평균농도를 측정하였다.

2.2. 토양시료 채취 및 분석

대기오염물질의 확산과 건성침착에 의한 토양오염 간의 상관성을 분석하기 위해 토양오염도 조사는 대상지역의 토지이용 유형을 3가지로 구분하여 수행하였다. 토양시료의 채취는 대상지역을 공업지역, 주거지역, 녹지지역으로 구분하여 각 구역별로 33개, 47개, 40개 지점에서 토양시료를 채취하였다(Fig. 1). 채취시기는 2002년 6월부터 8월말까지였

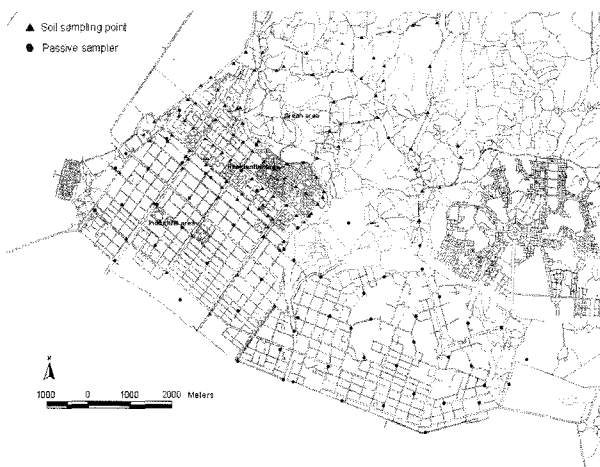


Fig. 1. Sampling point of investigation area.

다. 채취방법은 환경부 토양오염공정시험방법¹²⁾에 의거 주변 4 방위의 5~10 m 거리에 있는 1개 지점씩을 선정하여 총 5개의 부시료를 하나의 혼합시료로 하는 방법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대기 중 SO₂ 농도

2003년 4월부터 10월까지 공업지역, 주거지역, 녹지지역의 SO₂의 평균농도는 21.8, 14.3, 10.4로 Table 1에 나타내었다. 월별 평균농도는 5월에 가장 높았으며, 6월부터 낮아지다가 7월에 가장 낮은 값을 보였다. 그 이유는 이 기간에 집중적으로 발생하는 장마의 영향인 것으로 판단되며, 오염도는 9월부터 다시 증가하는 것으로 나타났다.

3.2. 토양 중금속 농도

연구대상지의 공업지역, 주거지역 및 녹지지역 토양의 중금속 오염농도를 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다.

조사대상 지역의 9개 중금속 함량은 토양환경보전법의 토양오염우려기준치 이하로 나타났다(As: 6, Cd: 1.5, Co: no standard, Cr: 4, Cu: 50, Hg: 4, Ni: 40, Pb: 100, Zn: 300 mg/kg).¹³⁾ 그러나 한국의 전국 평균 중금속 함량보다 높은 수준인 것으로 분석되었다.¹⁴⁾ 특히, 중금속 함량은 주거지역이나 농경지 및 녹지지역보다 공업지역의 토양에서 크게 나타나는 것으로 보고되었다.¹⁵⁾

Table 1. Monthly SO₂ concentration of atmosphere in study area

| site | (ppb) | | | | | | | | |
|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| | Apr. | May. | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Mean | Std.Dev |
| Industrial area | 23.6 | 35.6 | 32.1 | 13.0 | 15.0 | 15.7 | 17.9 | 21.8 | 8.9 |
| Residential area | 19.7 | 20.5 | 17.4 | 8.9 | 11.6 | 8.9 | 12.1 | 14.3 | 5.0 |
| Green area | 13.7 | 18.2 | 12.1 | 5.9 | 8.1 | 5.9 | 9.1 | 10.4 | 4.5 |

Table 2. Heavy metal contents of soils in Shi-Hwa industrial complex region

| Sites | Values | (mg/kg) | | | | | | | | |
|------------------|--------|---------|------|------|------|--------|------|-------|-------|--------|
| | | As | Cd | Co | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn |
| Industrial area | Min. | 0.97 | 0.09 | 0.54 | 0.08 | 1.94 | 0.31 | 0.30 | 3.43 | 5.96 |
| | Max. | 3.81 | 0.91 | 6.33 | 1.86 | 110.27 | 1.17 | 10.59 | 86.48 | 212.65 |
| | Mean | 2.33 | 0.30 | 2.49 | 0.62 | 16.61 | 0.67 | 1.47 | 14.75 | 37.74 |
| Residential area | Min. | 0.58 | ND* | 0.20 | ND | 0.44 | ND | 0.06 | 1.42 | 1.83 |
| | Max. | 3.32 | 0.25 | 3.22 | 0.44 | 46.68 | 0.61 | 1.47 | 24.70 | 35.57 |
| | Mean | 1.90 | 0.02 | 1.38 | 0.13 | 5.85 | 0.21 | 0.56 | 7.44 | 13.33 |
| Green area | Min. | 0.86 | ND | 0.15 | ND | 0.14 | ND | 0.04 | 1.16 | 2.37 |
| | Max. | 3.28 | 0.32 | 4.40 | 0.40 | 31.97 | 0.78 | 2.18 | 48.51 | 33.80 |
| | Mean | 2.05 | 0.04 | 1.20 | 0.11 | 6.28 | 0.49 | 0.72 | 8.26 | 12.76 |

ND: not detected

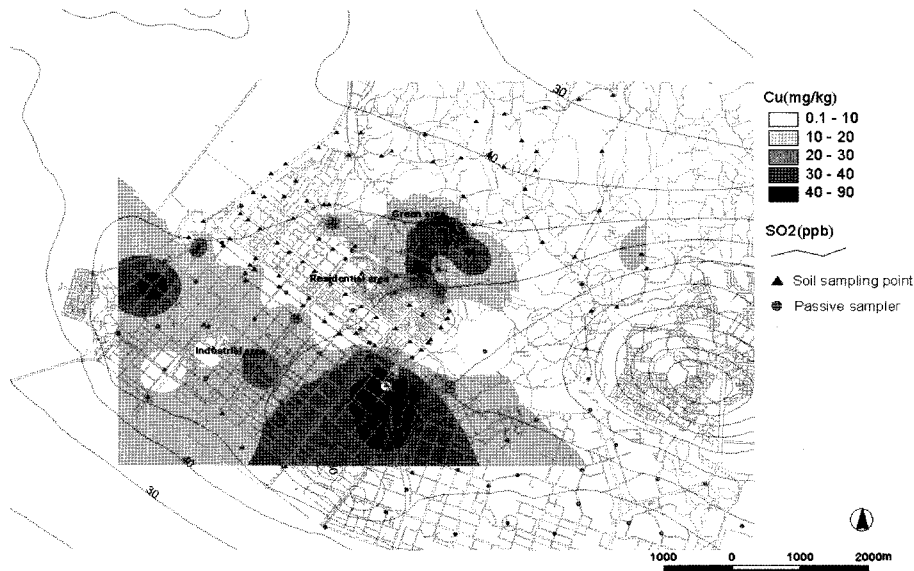


Fig. 2. Distribution of Cu contents of soils and isometric line of SO₂ in investigation area.

위와 같이 공업지역에서 토양오염도가 다른 지역에 비해 크게 평가된 이유는 공업지역의 토양이 공장의 배출가스와 화물 운송용 자동차 및 폐기물 등 오염원에 대한 노출이 심하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한 산업시설에서 배출된 중금속이 강우를 통해 토양유입 및 축적이 촉진되어 토양오염을 더욱 가중시키는 것으로 나타났다.¹⁶⁾

3.3. 토양중금속 및 대기오염도 상관성 분석

토양중금속 오염 분석결과와 대기오염물질의 공간분포를 비교하여 분석한 결과는 다음과 같다.

대기오염물질(SO₂)의 확산농도는 공업지역에서 90 ppb로 가장 높게 나타났으며, 주거지역으로 진행하면서 낮아졌다. 또한 해풍인 북서풍의 영향으로 북서지역의 대기오염농도는 30~40 ppb로서 비교적 낮게 나타났으며, 남동쪽으로 진행할수록 80~90 ppb의 비교적 높은 농도가 나타났다(Fig. 2).

3.3.1. Cu 오염도와 SO₂의 상관성

Cu 함량은 전 지역에서 0.14~110.27 mg/kg의 범위로서 지역별로 큰 차이를 나타내었다(Fig. 2). 공업지역, 주거지역 및 녹지지역의 평균값은 16.61, 5.85 및 6.28 mg/kg으로서 공업지역이 주거 및 녹지지역에 비하여 약 3배 정도 높았으며, 주거 및 녹지지역은 비슷한 값을 나타내었다. 공업지역의 33지점 중 2지점에서 각각 55.63 및 110.27 mg/kg으로서 비교적 높은 오염도를 나타내었다. 위 지역에는 주로 금속, 철강 가공업체들이 위치해 있으며, 따라서 Cu의 오염은 이에 의한 영향이 큰 것으로 판단되었다.

대기오염물질(SO₂)의 확산경향과 토양오염 분포(Cu)는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 대기오염물질의 오염도가 높게 나타난 지역에서 Cu의 농도가 비교적 높은 분포를 보였다. 전체 연구대상지에서 대기오염도와 토양오염도의 상관성은 약 R² = 0.05으로 나타났으며(Fig. 3), 공업지역에서의 상관성은 약

R² = 0.17으로서 전체지역에 비해 3배 이상 높게 나타났다(Fig. 4). 이는 대기오염도가 심한 지역에서 토양오염도가 높은 것으로 판단된다. 따라서 대상지역의 토양오염 중 공업지역에서의 토양 중금속 오염은 공장시설과 도로교통에 의해 배출된 오염물질이 대기확산과 표면유출을 통해 연구대상지의 토양에 직접적인 오염을 유발시켰다고 판단된다.

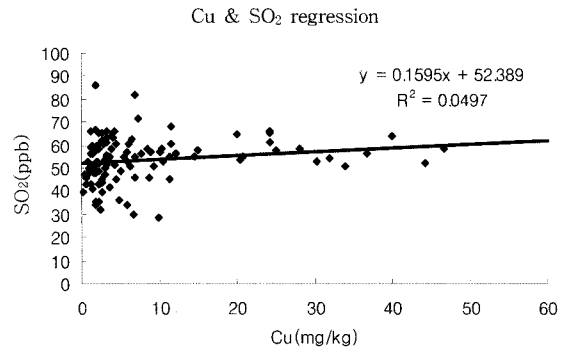


Fig. 3. Regression of Cu contents of soils and SO₂ concentration of atmosphere in whole investigation area.

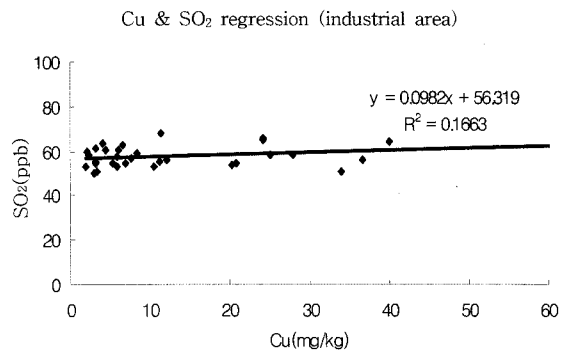


Fig. 4. Regression of Cu contents of soils and SO₂ concentration of atmosphere in industrial area.

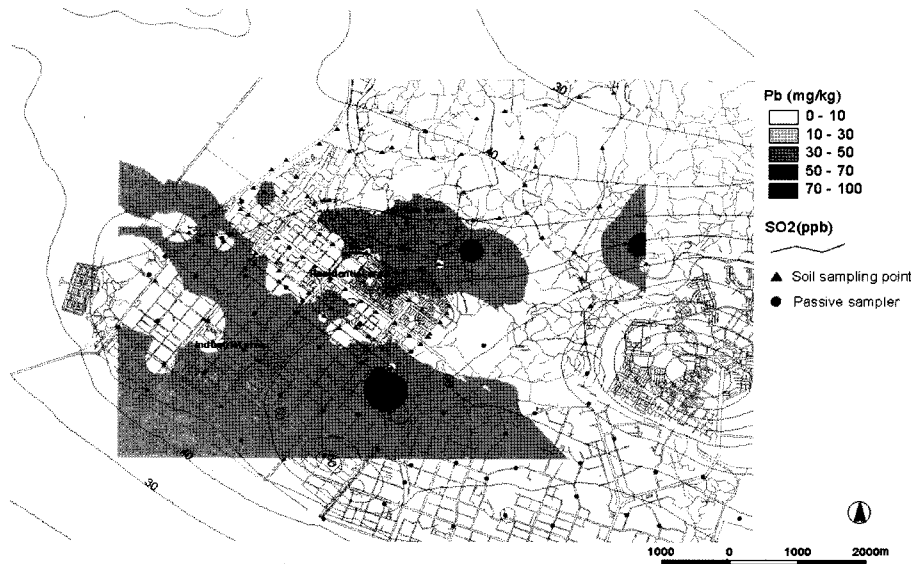


Fig. 5. Distribution of Pb contents of soils and isometric line of SO₂ in the investigation area.

3.3.2. Pb 오염도와 SO₂의 상관성

Pb는 자동차 매연, 광산폐수 및 제련소 분진, 페인트 등에서 주로 발생된다.¹⁷⁾ 특히, 연구대상지에는 페인트 등을 생산하는 공장시설과 디젤을 사용하는 화물차량 통행이 매우 빈번하여 Pb 함유물이 대기확산과 표면유출을 통해 토양에 직접 방출될 가능성이 있다. 따라서 방출된 Pb는 토양에 집적될 수 있다.¹⁸⁾

Pb 함량은 Table 2와 같이 전 지역에서 1.16~86.48 mg/kg의 범위이다. 공업지역의 평균 Pb 함량은 14.75로서 주거 및 녹지지역에 비하여 약 2배 정도 높았으며, 주거 및 녹지지역은 비슷한 값을 나타내었다. 일부지역의 최대값은 86.48 mg/kg으로서 토양오염 우려기준인 100 mg/kg에 근접하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

Fig. 5는 대기오염물질의 확산농도와 Pb의 토양오염 분포이다. 대기오염물질의 오염도가 높게 나타난 지역 중에서 특히 공업지역의 경우 Pb의 농도가 비교적 높은 분포를 보이고 있다. 전체 연구대상지에서 대기오염물질과 Pb 오염도의 상관성은 약 R²=0.04으로 낮게 나타났으며(Fig. 6), 공업지역에서의 상관성은 약 R²=0.08으로 2배 이상 상관도가 높은 것으로 나타났다(Fig. 7).

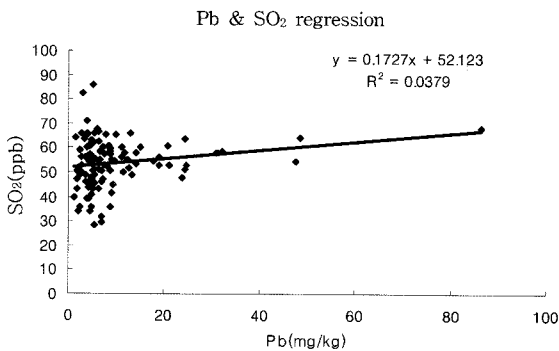


Fig. 6. Regression of Pb contents of soils and SO₂ concentration of atmosphere in whole investigation area.

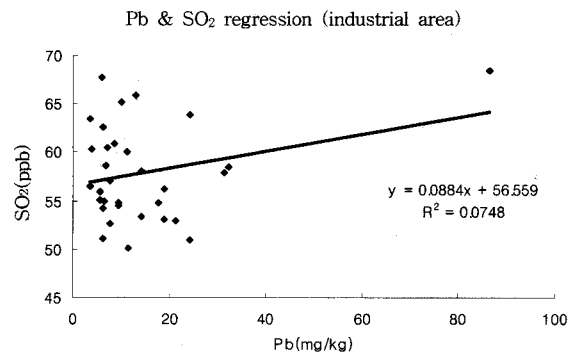


Fig. 7. Regression of Pb contents of soils and SO₂ concentration of atmosphere in industrial area.

4. 결론

연구대상지의 토양오염도에 직접적으로 영향을 미치는 오염발생원은 공단에서 발생하는 대기, 토양 및 수질오염, 도로교통에 의한 대기오염, 주거지에서 발생하는 오염원 등으로 구분할 수 있다. 그러나 토양시료는 공장부지 외부에서 채취하였기 때문에 공장시설에 의한 직접적인 오염영향은 미비할 것으로 예상된다.

연구대상지의 토양의 Pb, Cu, Zn, 및 Ni 등의 평균 함량을 근거로 할 때, 토지이용 유형별 토양 중금속 함량은 공단지역에서 가장 높게 나타났으며, 주거지역과 녹지지역은 비슷한 경향이였다. 특히, 공단지역의 몇 지점에서는 토양환경보전법¹³⁾의 토양오염 우려기준이나 식물독성 유발기준¹⁸⁾을 초과하는 것으로 나타났다. 특히, Cu, Pb는 공업지역이 다른 지역보다 상대적으로 크게 오염되고 있는 것으로 나타났는데, 이는 Passive Sampler에 의한 대기오염물질의 측정 결과에서 나타난 바와 같이 공업단지의 오염물질 배출, 화물운송차량 및 폐기물 등에 의해 대기오염물질이 건성침착에 의해 토양오염에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

대기오염물질의 확산경향은 대상지의 북서쪽에서 남동쪽으

로 진행되어 대기오염도가 높아지는 경향을 보이고 있다. 이는 북서풍과 서풍의 바람에 의한 대기오염물질의 확산과 누적의 결과로 판단된다. 특히, 토양중금속의 분포는 공업지역에서 대기오염물질의 확산경향과 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 거리에 따른 대기오염물질의 확산농도와 토양중금속 축적 사이의 상관성 분석에서 주거지역보다는 공업지역에서 비교적 높게 나타남으로서 입증되었다고 판단된다.

본 연구에서 조사된 시화공업단지 주변 토양의 중금속 함량 분포는 결국 공업단지에서 배출된 대기오염물질이 바람에 의해 주변지역으로 확산되었을 가능성과 함께 폐기물 등이 빗물 등과 함께 토양에 집적된 것으로 판단되었다. 조사 결과 대기와 토양오염 간의 상관성은 낮게 나타났으나, 전체 지역에 비해 공업지역으로 분석영역을 축소하였을 경우 오염도 상관성이 크게 높아지는 것으로 나타났으며, 중금속 오염물질은 토지이용 유형에 따라 주로 발생지 중심으로 분포되었다고 판단되었다.

참고문헌

- 서만철, 송영배, 시화지구의 대기오염도 및 시화공단의 영향도 조사, 시흥환경기술개발센터(2004).
- 한국수자원공사, 시화반월지구 대기오염 저감방안 수립 연구보고서(2003).
- 손요환, "대기오염과 산림생태계: 1.산성강하물이 산림토양에 미치는 영향," 자연자원환경연구, **2**(1), 12~28(1994).
- 이진하, 박기혁, 정명도, "도로변 대기오염도와 토양오염 수준의 관계," 한국환경농학회지, **15**(4), 494~499
- Holm, P., Rootzen, H., Borggaard, O., Moberg, J., and Christensen, T., "Correlation of Cadmium Distribution Coefficients to Soil Characteristics," *J. of Environmental Quality*, **32**(1), 138~145(2003).
- 환경부, 환경연감(2003).
- Bernard, N., Astre, C., Vuillot, B., Saintot, M., and Gerber, M., "Measurement of background urban nitrogen dioxide pollution levels with passive samplers in Montpellier, France," *J. of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **7**(2), 165~178(1997).
- 김선태, 김성근, 김학민, 정의석, "Passive Sampler를 활용한 공단지역의 대기질 평가," 대전대학교 환경학연구소 논문집, **5**(1), 67~81(2001).
- 박정호, 전기일, 서정민, "Passive Sampler를 이용한 진주시 NO₂ 농도분포," 진주대학교 농업기술연구소 논문집, **13**(1), 215~219(2000).
- Yamada, E., "Simple Analysis of Atmospheric NO₂, SO₂, and O₃ in Mountains by Using Passive Samplers," *Environmental science & technology*, AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, USA, **33**(23), (1999).
- Varshney, C. and Singh, A., "Passive Samplers for NO_x Monitoring: A Critical Review," *Environmetnalist KEW*, **23**(2), 127~136(2003).
- 환경부, 토양오염공정시험방법(2002).
- 환경부, 토양환경보전법(1999).
- Cho, H. D., "The absorption and purification of air pollutants and heavy metal by selected trees in Kwangju," *J. of Korean Forest Society*, **88**(1), 510~522(1999).
- Lee, C. K. and Kim J. K., "Studies on the relation of heavy metals between rainfall and soil in the forest." *J. of Korean Forest Society*, **87**(1), 584~589(1998).
- Pierzynski, G. M., Sims, J. T., and Vance, G. F., *Soils and environmental quality*. Lewis Publishers, USA(1994).
- Lindsay, W. L., *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons Inc, USA(1979).
- Kabata-Pendias A. and Pendias H, *Trace elements in soils and plants*, CRC Press, USA(1992).