

서울지역 가로수 토양과 은행나무 잎 중의 중금속 원소들의 지구화학적 분산과 오염특성

추미경^{1*} · 김규한¹ · 이진수² · 전효택²

¹이화여자대학교 과학교육과, ²서울대학교 지구환경시스템공학부

Geochemical Dispersion and Contamination Characteristics of Heavy Metals in Soils and Leaves of *Ginkgo biloba* in Seoul Area

Mi-Kyung Choo^{1*}, Kyu-Han Kim¹, Jin-Soo Lee² and Hyo-Taek Chon²

¹Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

²School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

In order to investigate the contamination levels and dispersion patterns of heavy metals such as Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn by urbanization, soils beneath roadside-trees and leaves of *Ginkgo biloba* were collected from Seoul area during October to November in 2001. All tree leaves were grouped into washed and unwashed ones. The pH of most soil ranges from 6 to 9 indicating a weak acidic and alkaline. The element couples of Cd-Co, Cr-Ni and Zn-Cu-Pb have good correlation in soils, and contamination sources of Cd-Co, Cr-Ni and Zn-Cu-Pb could be similar. High correlation coefficients among Pb, Cu and Zn in *G. biloba* indicates that these elements show the similar behavior during the metabolism processes. From the results of pollution index calculation for soils, industrialized and heavy traffic area were severely polluted by heavy metals such as Cd, Cu, Pb and Zn. By the discriminant analysis, industrialized and heavy traffic areas are enriched in the order of Ni > Cr > Pb. Cadmium is useful to discriminate between industrialized and heavy traffic areas, Co and Pb are highly enhanced in heavy traffic area.

Key words : roadside tree, urbanization, industrialization, toxic heavy metals, pollution index, roadside soil

도시화 · 산업화의 인위적 오염원에 의한 중금속 원소들의 분산양상과 오염특성을 파악하기 위하여 서울지역내의 은행나무 잎과 가로수 토양 시료를 채취하여 토양 pH와 Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Cr, Co 등의 중금속 함량을 측정하였다. 서울지역의 대부분의 토양 pH는 6-9의 범위로 약산성 및 약알칼리성을 보였다. 토양에서 Cd-Co, Cr-Ni, Cu-Zn, Pb-Zn는 높은 상관성을 보이고 있어 Cd은 Co와 배출원이 유사하고, Cr은 Ni과 Zn는 Cu, Pb의 배출원이 유사함을 예측할 수 있었다. 가로수 토양과 은행나무 잎 시료에 대한 원소들의 분포특성은 세척하지 않은 은행나무 잎의 Cd과 Pb, Cu와 Zn의 오염양상이 유사하다. 세척하지 않은 은행나무 잎에서 Cr과 Ni이 유사한 분포패턴을 보였다. 토양에 대해 오염지수에 의하면 공단지역과 교통량 밀집지역에서의 오염도가 높고, 특히 Cd, Cu, Zn에 의한 오염이 심하다. 토양시료에 대한 판별분석결과, 주거지역과 전원지역에서보다 공단지역과 교통량 밀집지역에 부화되는 원소는 Ni > Cr > Pb 순이다. 공단지역과 교통량 밀집지역을 구분하는데 가장 큰 설명력을 가지는 원소는 Cd이며, 교통량 밀집지역에서는 다른 원소에 비해 Co, Pb, Zn가 부화되어 있다.

주요어 : 가로수, 도시화, 산업화, 중금속, 오염지수, 도로변 토양

1. 서 론

산업이 발달하고 도시화가 진행됨에 따라 다양한 형

태의 유독성 중금속원소를 비롯한 오염물질들이 인위적으로 생성, 배출된다. 우리나라의 경우 1960년대 이후 산업활동의 결과 괄목할만한 경제성장을 이룩하여

*Corresponding author: nkchoo@kordi.re.kr

왔으나, 부수적으로 환경오염을 가중시켜 이로 인하여 국민 건강영향을 염려하게 되는 새로운 국면을 초래하였다. 특히, 서울의 경우 좁은 면적에 우리나라 인구의 1/4 이상이 밀집되어 있어 환경오염이 매우 심각한 실정이다.

각종 생활환경 중 토양은 대기환경 및 수질환경 오염의 원충작용을 하면서 부분적으로 환경의 정화작용을 담당해 왔다. 그러나 최근 대기나 수질환경의 오염 속도가 매우 빨라서 더 이상 토양이 자연정화작용을 하지 못하고 토양자체가 심각하게 오염되고 있다. 이러한 중금속들이 도시 지표환경으로 유입되는 원인은 건물의 건설과 파괴, 교통량의 증가, 제조산업 및 도시 폐기물의 처리 등 도시화에 따른 여러 근원 때문이며 이것이 광역 규모로 분산된다. 이러한 근원으로부터 배출된 중금속들의 첨가로 인한 토양의 물리화학적 성질의 변화는 직접, 간접으로 환경생태계를 파괴하고 가로수 생육에도 피해를 야기시키고 있다.

국내에서 그동안 도시지역의 토양오염과 관련되어 수행된 연구(전성환, 1984; 박정길 등, 1985; 전효택과 안주성, 1996; 손동헌 등, 1992; 전효택과 최완주, 1992; 김주용과 전효택, 1996; 변희욱 등, 1996)와 도시지역 식물내 중금속 오염에 관한 연구 중 가로수목의 중금속 함량에 관한 연구(김민영 등, 1987; 김면섭과 이광국, 1988; 이경형, 1989; 박기학, 1992; 강주성 등, 1994) 등이 보고된 바 있다. 그러나 이런 연구들에도 불구하고 서울 도시환경의 토양과 가로수목간의 유독성 중금속들의 이동 및 축적 기구에 대한 체계적인 연구가 수행되지 못한 실정이다.

본 연구에서는 인구와 교통량이 많고 여러 형태의 생활활동이 가장 많은 서울시를 대상으로 서울시 전 지역에서 가로수 토양과 은행나무(*Ginkgo biloba*) 잎을 채취하여 유독성 중금속 원소들의 함량을 측정하여, 원소들간의 상관성 및 분포패턴을 조사를 통해 원소들의 분산특성과 오염양상을 규명하고자 하였다. 서울지역을 전원지역, 공단지역, 주거지역, 교통량 밀집지역으로 도시화특성을 나누어 다변량 통계처리 기법을 이용하여 각 집단간의 특성차이를 조사하였다. 또한 은행나무 잎의 세척 전·후의 중금속 원소들의 함량 비교를 통해 서울지역 대기 중의 부유분진의 중금속 함량 분포를 간접적으로 예측하고자 하였다.

2. 서울지역 지질 및 특성

서울 지역의 지질은 주로 선캄브리아기의 편마암류

와 이를 관입한 중생대의 각종 화성암으로 구성되어 있으며, 이들은 부정합으로 덮고 있는 제 4기의 충적층이 분포하고 있다(김남장과 홍승호, 1982).

서울시는 2001년 말 현재 행정 구역 25개 구, 522개 동, 605.52 km²의 면적에 인구는 10,331,000명, 인구밀도 17,061명/km²에 이른다. 자동차 보유대수 총 2,550,441대, 승용차 1,917,947대, 승합차 251,834대, 화물차 378,287대, 특수차 2,373대가 움직이고 있는 거대한 도시이다(서울특별시, 2001). 서울시의 인구밀도는 동대문과 양천구가 가장 높게 나타나고 있으며, 구별 사업체 수 현황을 보면 중구가 67,324개로 전체의 9.28%를 차지하고 있으며, 다음은 강남구, 영등포구, 종로구순이며, 구별 종사자수 현황을 보면 강남구가 549,006명(14.16%), 다음으로 중구, 영등포구 순이며, 강북구는 57,894명(1.49%)으로 종사자수가 가장 적은 것으로 나타났다. 전담(5.73%)과 임야(25.78%)는 도시전체면적에서 낮은 비율을 차지하고 있다.

3. 시료채취 및 분석

서울시 전반에 걸친 중금속들의 분포양상을 평가하기 위하여 서울시 전체를 정방형의 시료 격자망(2.5×2.5 km)을 바탕으로 시료 채취선을 따라 토양 시료를 채취하고 동일 지점 중 비교적 점유율이 높은 은행나무 잎을 2001년 10월 28일에서 11월 4일까지 총 5차에 걸쳐 70개의 은행나무 잎과 토양을 각각 채취하였다(Fig. 1). 비교를 위하여 비교적 오염도가 낮은 곳으로 예상되는 전원지역인 충남 예산지역의 은행나무 잎과 토양을 각각 2개씩 채취하였다.

식물시료는 지상에서 1.5-3 m 부근 은행나무 잎을 각각 4 g 이상 채취하였고, 토양시료는 은행나무 잎의 채취지점과 동일한 지점의 가로수 밑 토양 0-5cm 깊이의 표토층을 채취하였다. 대표성과 균질성을 높이기 위해 1-2 m 간격으로 채취된 10-15개의 부분시료를 하나의 완전시료로 하였다. 채취된 은행나무 잎 시료는 세척한 잎과 세척하지 않은 잎으로 구분하였으며 세척을 위해 증류수로 3~4회 이상 반복하여 최대한 오염물을 제거하였다. 두 시료를 실내에서 자연 건조 시킨 후 식물용 분쇄기(food processor)를 이용하여 분말시료를 만들었다. 분말화된 시료 1 g에 HNO₃ 5 mL를 넣고 10시간 방치 후에 Fuming HNO₃ 15 mL를 넣고 180°C에 완전 건조 한 후 다시 HClO₄ 3 mL를 넣고 180°C에 완전 건조 시킨 다음 5M의 HCl 2 mL를 넣고 70°C에 30분 가열하였다. 여기에 증류수를 가

해 총 15 mL의 용액시료를 제작하였다. 세척한 은행잎 시료는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) (ELAN 6100)를, 세척하지 않은 은행잎 시료는 이화여자대학교 지구과학교육 연구실의 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer) (OPTIMA 3100RL)를 이용하여 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn를 정량하였다.

토양시료는 실내의 통풍이 잘 되는 곳에서 자연 건조한 후, 건조된 토양시료는 pH 측정을 위해 2 mm (-10 mesh)의 표준체로 체질하고 이 시료를 각각 균등량(200 g)을 취하여 시분법에 의해 균일하게 혼합한 시료를 180 µm(-80 mesh) 입도로 체질하여 화학분석용 시료를 준비하였다. 180 µm(-80 mesh)의 토양시료 0.25 g에 1 mL의 HNO₃ 용액과 3 mL의 HCl을 넣어 분해 시킨 후 70°C에서 1시간동안 가열 하였다. 여기에 증류수를 가해 총 10 mL 시료용액을 제작하였으며

ICP-AES를 이용하여 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn 등을 정량하였다. 본 연구에서는 국내·외의 선행 연구된 실험(전효택과 최완주, 1992; 김주용과 전효택, 1996; Kabata-Pendias and Pendias, 1984)결과와 비교하기 위해 국내의 토양오염 공정시험법에서 제시되고 있는 분석법과 달리 외국에서 널리 사용되는 왕수분해법으로 분석하였다. 모든 화학분석 과정에서 중복시료(duplicate sample), 참고시료(reference sample), 공시료(blank sample)를 첨가하여 신뢰성 평가(quality control)를 실시하였다(Ramsey *et al.*, 1987).

본 연구에서는 서울시의 도시화 특성에 따른 중금속들의 오염특성을 규명하기 위해 채취한 시료들은 Table 1과 같이 도시화 특성에 따라 농경지나 큰 산에 인접하며 주변에 큰 도로나 공장이 없는 시료들은 전원 지역(RA: Rural area), 공단 지역에서 채취한 시료들은 공단 지역(IA: Industrialized area), 큰 도로나 공단지역과 인접하지 않는 아파트나 주거단지의 시료들을 주

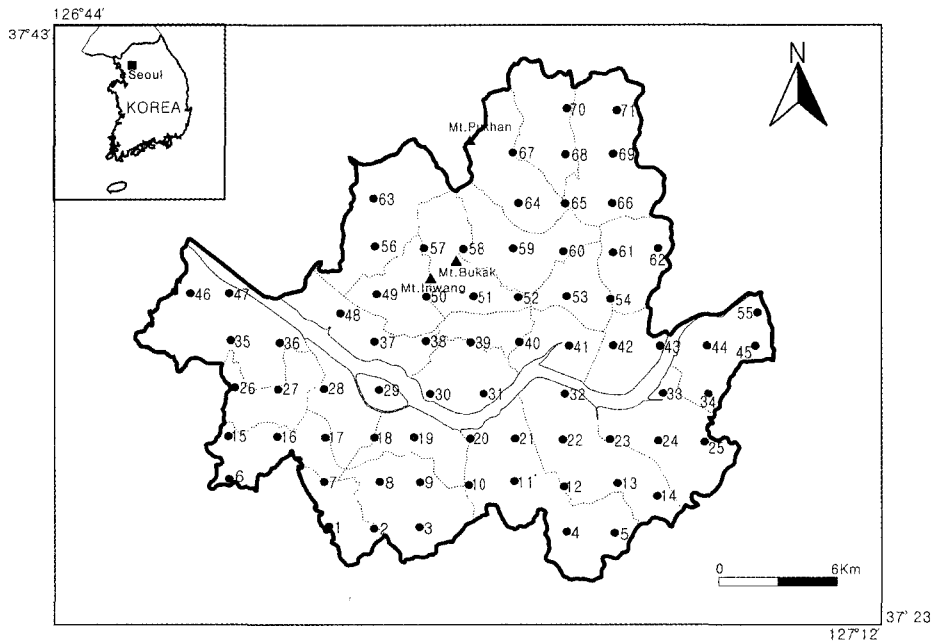


Fig. 1. Sampling location map of soils and tree leaves on the roadside in Seoul area.

Table 1. Classification of soil and *Ginkgo biloba* samples in Seoul area.

| Classification | Sample ID |
|--------------------------|---|
| Rural area (8) | 2, 3, 4, 5, 26, 39, 55, 71 |
| Industrialized area (13) | 6, 7, 12, 16, 17, 23, 27, 28, 47, 48, 53, 56, 60 |
| Residential area (23) | 10, 13, 15, 20, 21, 22, 33, 34, 35, 36, 40, 41, 45, 52, 54, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 69, 70 |
| Heavy traffic area (26) | 1, 8, 9, 11, 14, 18, 19, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 37, 38, 42, 43, 46, 49, 50, 51, 57, 58, 59, 64, 68 |

*Number of samples in parentheses

Table 2. The pH values of the roadside surface soil beneath of *Ginkgo biloba* in Seoul area.

| | Rural area (8) | Industrialized area (13) | Residential area (23) | Heavy traffic area (26) | |
|--------------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|------|
| Soil beneath <i>Ginkgo biloba</i> | Mean | 6.67 | 6.97 | 6.76 | 7.04 |
| | Median | 6.53 | 6.90 | 6.83 | 7.15 |
| | STD | 0.65 | 0.79 | 0.62 | 0.83 |
| | Min. | 6.10 | 5.88 | 5.79 | 5.10 |
| | Max. | 8.11 | 8.77 | 7.87 | 8.49 |

Number of samples in parentheses

STD : standard deviation

Average pH of distilled water used for mixing : 5.85

거지역(RDA: Residential area), 공단 지역을 제외한 지역 중 6차선 이상의 큰 도로에 인접한 지역에서 채취한 시료들은 교통량 밀집 지역(HTA : Heavy traffic area)등 4개의 특성지역의 시료로 세분하였다.

4. 토양 pH 측정 및 결과

토양의 pH는 토양 내 중금속들의 화학적 거동과 다른 토양 내 반응들을 결정하는 중요한 요소로서, 음전하를 띠는 토양 입자 표면과 평형상태를 이루고 있는 토양공극의 토양용액 내 수소이온 농도를 의미한다. 토양 pH에 따라 중금속 원소들은 Fe, Mn 산화물에 흡착되는 능력에 영향을 미치며, 특히 pH의 감소에 따라 Cd, Cu, Zn 등의 중금속 용해도가 증가하여 식물에 의한 흡수 또는 토양에서의 이동성이 증가하여 중금속의 생물흡수도(bioavailability)는 증가하게 되며, 알칼리성 환원 환경에서 금속의 이동성은 제한되어 광물상태나 음이온들과 착화합물을 형성하여 침전된다(환경부, 2002).

연구지역 토양의 pH는 2 mm(-10 mesh) 입도의 건조된 시료 10 g에 증류수 25 mL를 투여하여 1시간 동안 자동진동기로 혼탕시키고, 10분간 방치한 후 Orion사의 290A pH/Ion meter를 이용하여 잔류용액의 pH를 측정하였다(Rump and Krist, 1988).

토양의 pH 측정결과 대부분의 토양은 pH 6-9 사이의 약산성에서 약알칼리성을 나타내고 있다(Table 2). 전원지역, 공단지역, 주거지역, 교통량 밀집지역 등의 시료채취지역에 따른 토양 pH의 평균값은 뚜렷한 차이가 없었다. 대부분 도시림이 산성 강하물로 인하여 산성화가 가속되고 있다는 많은 연구의 결과와는 달리 서울 도심 내부의 도로주변 가로수 토양에서 pH가 높게 나타났다(장관순과 이수옥, 1995; 김동엽 등, 1996; 이충규와 김종갑, 1998). 이와 같이 대부분의 토양 pH 값이 6-9 범위의 값을 나타내는 이유는 제설용으로 살포되고 있는 염화칼슘(CaCl₂)으로 인하여 토양이 알칼

리성으로 변한 원인(김희자, 1983)이나, 도로 포장재의 영향 및 보도블럭에 함유된 시멘트 등의 알칼리성 물질의 용해되어 침투 되었을 것으로 판단된다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 화학분석 결과 및 지구화학적 특성

5.1.1. 토양

연구지역의 원소별 평균값과 중앙값은 Table 3에 제시하였고, 시료 채취시의 주변 환경을 참고로 하여 4개의 특성지역으로 다변량 분산분석(MANOVA)결과를 Fig. 2에 도시하였다.

Cd 평균함량은 2.998 mg/kg(1.344-7.104 mg/kg)이다(Table 3). 표에 제시되어 있지 않지만 서울지역의 Cd 함량은 토양시료 중 38개 시료(54%)는 Kloke (1979)가 제시된 토양오염 허용한계치인 3 mg/kg 이상으로 Cd에 오염되어 있다. 이 결과는 김주용 · 전효택 (1993)의 분석결과와도 유사한 함량을 보였다. Cd은 토양에서는 도시화 특성 간 비슷한 분포 특성을 보였지만, 비교대조지역에서의 Cd 함량보다 높았다. 공단지역과 교통량 밀집지역의 중앙값은 토양오염 허용한계치보다 높아 Cd에 의해 오염되어 있다. 그러나 공단지역과 교통량 밀집지역간의 중앙값의 차이는 뚜렷하지 않았지만 공단지역이 교통량 밀집지역보다 Cd 함량이 높게 나타났다(Table 4).

Cr 평균함량은 69.22 mg/kg(7.20-249.12 mg/kg)이며, 토양시료 중 7개의 시료는 토양오염 허용한계치 100 mg/kg(Kloke, 1979)과 Kabata-Pendias and Pendias(1984)가 제시한 캐나다, 영국, 일본 토양의 함량보다 높아 Cr으로 오염되었다고 볼 수 있는데, 이는 산업지역에의 공구상의 밀집분포와 관계됨을 시사한다.

Table 4에 제시된 토양의 Co, Cr, Cu, Ni의 중앙값은 공단지역 토양에서 가장 높게 나타났다. 이는 공단지역에 공구상 밀집지역과 전자산업, 합금, 철강산업의 산업활동에 의해 주로 이들 원소가 집적된 것으로 사

Table 3. Ranges and mean concentrations of heavy metals in soils and leaves of *Ginkgo biloba* from Seoul area (unit : mg/kg).

| | | Fe | Mn | Pb | Zn | Cu | Cd | Ni | Cr | Co |
|------------------------|----------------------------|-------|------|-------|--------|-------|-----------|-------|--------|-------|
| Washed leaves (N=70) | Mean | 184 | 11 | 1.5 | 7.0 | 2.2 | 0.03 | 1.07 | 0.75 | 0.07 |
| | Median | 172 | 10 | 1.4 | 6.3 | 2.1 | 0.02 | 1.04 | 0.71 | 0.06 |
| | STD | 45 | 4 | 0.7 | 3.2 | 0.7 | 0.02 | 0.32 | 0.49 | 0.02 |
| | Min. | 104 | 6 | 0.0 | 1.6 | 1.1 | 0.00 | 0.52 | 0.04 | 0.04 |
| | Max. | 334 | 27 | 3.4 | 16.4 | 3.8 | 0.15 | 2.85 | 3.77 | 0.14 |
| Unwashed leaves (N=70) | Mean | 613 | 28 | 2.5 | 34.3 | 10.5 | 0.20 | 3.10 | 3.38 | 2.88 |
| | Median | 567 | 27 | 2.2 | 29.8 | 9.5 | 0.18 | 2.91 | 3.04 | 2.69 |
| | STD | 271 | 9 | 1.0 | 19.8 | 4.6 | 0.09 | 1.36 | 1.75 | 1.58 |
| | Min. | 172 | 17 | 0.9 | 9.7 | 4.1 | 0.05 | 1.25 | 1.10 | 0.30 |
| | Max. | 1769 | 59 | 6.1 | 132.8 | 26.4 | 0.55 | 9.84 | 12.34 | 9.39 |
| Soils (N=70) | Mean | 28615 | 569 | 77.9 | 335.5 | 101.2 | 3.00 | 27.43 | 69.22 | 10.82 |
| | Median | 28535 | 562 | 67.8 | 279.6 | 64.1 | 3.07 | 27.63 | 66.48 | 10.54 |
| | STD | 8288 | 141 | 50.0 | 223.9 | 88.9 | 0.91 | 11.52 | 39.35 | 4.70 |
| | Min. | 14927 | 340 | 20.3 | 43.8 | 3.6 | 1.34 | 6.71 | 7.20 | 3.60 |
| | Max. | 66239 | 1253 | 296.1 | 1056.0 | 427.7 | 7.10 | 87.20 | 249.12 | 25.82 |
| Control Area (N=2) | Washed leaves | 130 | 7 | 0.4 | 2.6 | 1.0 | 0.01 | 0.75 | 0.14 | 0.04 |
| | Unwashed leaves | 264 | 16 | 0.6 | 10.5 | 2.7 | 0.06 | 1.04 | 0.91 | 0.60 |
| | Soils | 21623 | 300 | 29.2 | 61.3 | 13.7 | 1.77 | 7.34 | 22.77 | 6.72 |
| Soils ¹⁾ | Canada | | 325 | 20.0 | 57.0 | 22.0 | 0.56 | 20.00 | 50.00 | 12.40 |
| | Great Britain | | 1055 | 29.0 | 80.0 | 23.0 | 1.00 | 23.00 | 69.00 | 17.70 |
| | Japan | | | 35.0 | 86.0 | 34.0 | 0.44 | 28.00 | 50.00 | 10.00 |
| | U.S | | 490 | 26.0 | 73.5 | 26.0 | 0.41-0.57 | 18.50 | | 10.50 |
| | Seoul ²⁾ (N=64) | | | 240.0 | 271.0 | 84.0 | 3.10 | | | |
| Leaves ³⁾ | <i>Ginkgo biloba</i> | 185 | 21 | 17.5 | 24.5 | 4.7 | 1.60 | | 1.26 | |

¹⁾Kabata-Pendias and Pendias(1984)

²⁾Kim and Chon (1993)

³⁾Kim and Lee (1988)

N=No. of Samples

STD : standard deviation

료된다. 상대적으로 Cr, Cu, Ni의 중앙값도 교통량 밀집지역에서 상대적으로 높게 나타났다.

Cu의 총 평균함량은 101.203 mg/kg(3.65-427.78 mg/kg)이고, Table 3에 제시된 과거 서울지역 토양의 평균함량 84 mg/kg(김주용·전효택, 1993)보다는 높게 나타나 서울지역 토양은 점점 Cu의 오염이 증가하고 있는 상태이다. 또한 Kabata-Pendias and Pendias(1984)가 제시된 함량보다 약 5배가량 높게 나타났다(Table 3). 표에는 제시되지 않았지만 연구지역 토양은 70개의 시료 중 24개(34%)가 Kloke(1979)가 제시한 토양오염 허용값 100 mg/kg이상으로 나타났다. Cu의 최대값을 보인 은평구의 역촌동 응암동의 경계지역시료(시료번호 56)는 427.68 mg/kg으로 나타났다. 이는 도로가 삼거리로 주변 교통량이 많으며 주변의 자동차 센터에 의한 영향으로 오염에 상당히 노출되어 있음을 설명해 준다. 토양시료 중 구로구 고척동 시료(시료번호 16)는 358.56 mg/kg으로 공구상과 자동차 공업사 밀집지역에 의 영향을 받았고, 김주용과 전효택(1993) 연구에 의한

이 지역의 시료(Cu 함량: 471 mg/kg)와 비교하면 Cu의 오염은 현재에도 큰 편이다. 전원지역과 주거지역에서의 Cu의 중앙값은 비교대조지역의 함량 13.70 mg/kg에 비해 높게 나타났고, 공단지역과 교통량 밀집지역의 중앙값은 토양오염 허용한계치인 100 mg/kg보다 높아 토양 내에는 Cu로 오염되어 있다(Table 4). 이는 주로 수송수단에 의한 오염으로 자동차 타이어와 브레이크 제동에 의한 마모로 유래된 것으로 사료된다.

Fe의 중앙값은 도시화 특성 간 비슷한 분포로 지역 간의 차이는 크지 않았으며 주로 자연 발생원에 의한 것이 많은데 지역별로 비교대조지역과의 함량차이가 적은 것으로 보아, 주로 토양입자 등과 같은 자연발생원의 영향이 큰 것으로 추정할 수 있다(손동현 등, 1992).

Pb 평균함량은 77.88 mg/kg(20.27-296.07 mg/kg)이며 Table 3에 제시된 캐나다, 영국, 일본, 미국의 토양함량보다 높게 나타났지만 토양오염 허용치 100 mg/kg에 비해 낮았다. 또한 김주용과 전효택(1993)이 연구한

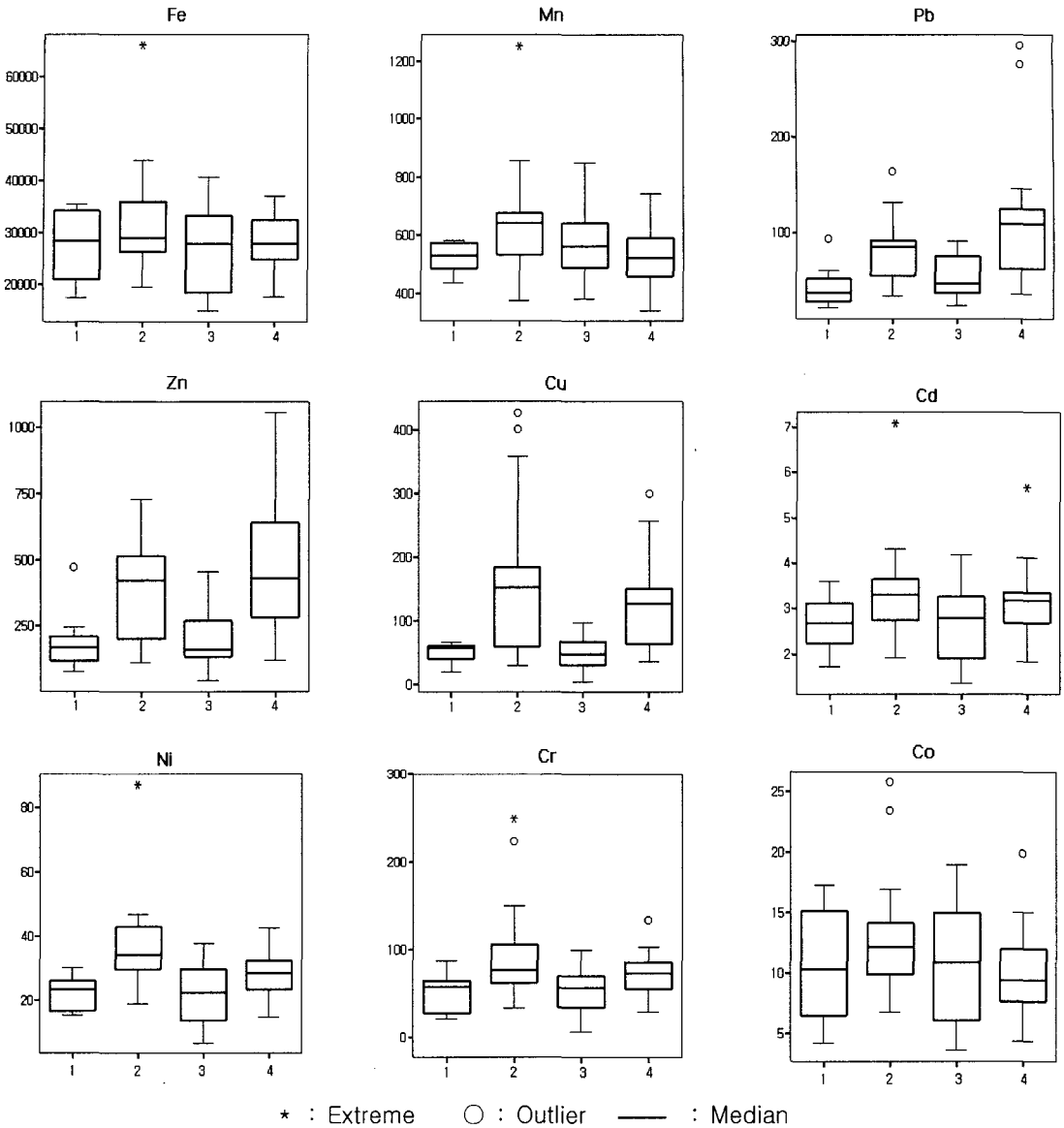


Fig. 2. Boxplots of metal concentrations in soils from Seoul area (1: Rural area, 2: Industrialized area, 3: Residential area 4: Heavy traffic area).

서울지역 평균 Pb 함량과 비교하면 현재 서울지역의 Pb 함량은 낮게 나타났다(Table 3). 또한 Table 4.에 제시된 Pb의 중앙값은 교통량 밀집지역에서 토양의 오염 허용한계치인 100 mg/kg보다 높았다. 공단지역내 Pb의 중앙값이 교통량 밀집지역과 같이 높은 것은 시료채취시 지역적인 특성에 따라 공단지역에서의 Pb 성분을 포함하고 있는 금속제조업 활동이 활발하여 영향을 준 것이라 볼 수 있다. 또한 서울시의 교통량이 많은 지역에서의 높은 함량은 서울시내에는 자동차에서

배출되는 수송부분의 오염물질이 서울시 이외의 지역에 비해 월등히 높아 자동차 배출물질과 관계가 큰 것으로 보인다. 하지만 우리나라에서는 대기환경 개선을 위한 정책으로 1993년부터 유연휘발유 공급 중단과 청정 연료의 보급과 무연휘발유의 사용으로 Pb의 함량은 점차 낮아지고 있다. 그러나 김권래 등(2001)이 지적한 바와 같이 토양 중에는 과거 유연휘발유를 사용했던 전과 이후의 대기 강하분진에 의해서 이동성이 낮은 Pb가 축적되어 현재까지도 토양 중에 남아 검출되는

것으로 판단된다.

Zn 평균함량은 335.47 mg/kg으로 토양의 오염허용한
계치인 300 mg/kg보다 높은 지역은 전체의 약 43%으

로 Zn에 오염되어있다. 평균 Zn의 함량은 김주용·전
효택(1993)이 연구한 Zn의 평균함량보다 높아 Zn의
오염이 증가되고 있음을 알 수 있다(Table 3). 또한

Table 4. Average concentrations of heavy metals in washed and unwashed leaves of *Ginkgo biloba* and soils from the classified groups of Seoul area (unit : mg/kg).

| | | Fe | Mn | Pb | Zn | Cu | Cd | Ni | Cr | Co | |
|------------------------------|---------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Washed leaves (N=70) | RA (N=8) | Mean | 154 | 11 | 0.8 | 5.0 | 1.7 | 0.02 | 1.04 | 0.53 | 0.06 |
| | | Median | 148 | 11 | 0.8 | 4.7 | 1.6 | 0.02 | 1.05 | 0.50 | 0.05 |
| | | Min. | 104 | 8 | 0.0 | 2.9 | 1.2 | 0.00 | 0.76 | 0.09 | 0.04 |
| | | Max. | 213 | 18 | 1.3 | 8.8 | 3.0 | 0.09 | 1.28 | 0.90 | 0.08 |
| | IA (N=13) | Mean | 217 | 13 | 1.9 | 8.4 | 2.5 | 0.03 | 1.28 | 1.12 | 0.09 |
| | | Median | 208 | 12 | 1.8 | 7.1 | 2.4 | 0.02 | 1.11 | 0.82 | 0.07 |
| | | Min. | 152 | 7 | 0.9 | 4.4 | 1.8 | 0.02 | 0.81 | 0.48 | 0.05 |
| | | Max. | 334 | 27 | 3.4 | 16.4 | 3.8 | 0.05 | 2.85 | 3.77 | 0.14 |
| | RDA (N=23) | Mean | 168 | 11 | 1.3 | 5.7 | 1.9 | 0.03 | 1.02 | 0.62 | 0.06 |
| | | Median | 169 | 10 | 1.1 | 5.4 | 1.8 | 0.02 | 1.03 | 0.65 | 0.06 |
| | | Min. | 113 | 6 | 0.4 | 1.6 | 1.1 | 0.01 | 0.52 | 0.04 | 0.04 |
| | | Max. | 252 | 21 | 3.1 | 13.1 | 3.6 | 0.08 | 1.52 | 1.24 | 0.10 |
| HTA (N=26) | Mean | 189 | 10 | 1.7 | 8.0 | 2.4 | 0.03 | 1.03 | 0.76 | 0.06 | |
| | Median | 186 | 10 | 1.6 | 7.7 | 2.3 | 0.02 | 1.03 | 0.81 | 0.06 | |
| | Min. | 134 | 7 | 0.8 | 3.6 | 1.2 | 0.01 | 0.76 | 0.11 | 0.04 | |
| | Max. | 276 | 15 | 3.4 | 15.5 | 3.7 | 0.15 | 1.45 | 1.17 | 0.08 | |
| Unwashed leaves (N=70) | RA (N=8) | Mean | 480 | 26 | 1.7 | 24.3 | 7.5 | 0.15 | 2.50 | 2.42 | 2.11 |
| | | Median | 471 | 27 | 1.6 | 21.8 | 6.6 | 0.16 | 2.57 | 2.47 | 2.30 |
| | | Min. | 172 | 18 | 1.0 | 10.4 | 4.7 | 0.05 | 1.25 | 1.10 | 0.30 |
| | | Max. | 781 | 35 | 2.9 | 42.9 | 13.0 | 0.27 | 3.23 | 3.41 | 4.01 |
| | IA (N=13) | Mean | 735 | 34 | 3.0 | 41.3 | 12.6 | 0.26 | 3.55 | 3.91 | 3.69 |
| | | Median | 718 | 30 | 2.7 | 40.1 | 11.6 | 0.24 | 3.74 | 3.94 | 3.69 |
| | | Min. | 451 | 18 | 1.8 | 22.7 | 7.4 | 0.14 | 1.66 | 2.27 | 1.56 |
| | | Max. | 1198 | 59 | 4.8 | 62.6 | 21.5 | 0.45 | 5.68 | 7.49 | 6.56 |
| | RDA (N=23) | Mean | 486 | 27 | 2.1 | 22.9 | 8.8 | 0.16 | 2.55 | 2.67 | 2.12 |
| | | Median | 436 | 23 | 1.8 | 24.2 | 8.0 | 0.15 | 2.70 | 2.32 | 1.88 |
| | | Min. | 173 | 17 | 0.9 | 9.7 | 4.1 | 0.09 | 1.32 | 1.16 | 0.50 |
| | | Max. | 1015 | 46 | 5.1 | 37.8 | 23.1 | 0.32 | 3.68 | 4.43 | 5.39 |
| HTA (N=26) | Mean | 705 | 27 | 2.8 | 43.9 | 12.1 | 0.22 | 3.55 | 4.03 | 3.40 | |
| | Median | 653 | 27 | 2.6 | 36.4 | 11.6 | 0.22 | 3.08 | 3.22 | 3.17 | |
| | Min. | 283 | 18 | 1.4 | 13.9 | 5.2 | 0.09 | 1.32 | 1.82 | 0.83 | |
| | Max. | 1769 | 53 | 6.1 | 132.8 | 26.4 | 0.55 | 9.84 | 12.34 | 9.39 | |
| Soils (N=70) | RA (N=8) | Mean | 28439 | 520 | 42.4 | 189.1 | 46.9 | 2.74 | 22.74 | 53.02 | 11.24 |
| | | Median | 30935 | 526 | 35.1 | 153.8 | 48.3 | 2.90 | 23.41 | 60.48 | 12.50 |
| | | Min. | 17423 | 434 | 20.3 | 78.7 | 18.8 | 1.73 | 15.44 | 21.70 | 4.18 |
| | | Max. | 35615 | 581 | 93.8 | 471.8 | 65.8 | 3.60 | 30.13 | 86.88 | 17.23 |
| | IA (N=13) | Mean | 33008 | 662 | 81.0 | 385.7 | 173.1 | 3.46 | 38.38 | 102.76 | 13.41 |
| | | Median | 29039 | 643 | 85.4 | 422.9 | 151.7 | 3.31 | 34.26 | 76.32 | 12.14 |
| | | Min. | 19583 | 372 | 32.8 | 112.8 | 28.0 | 1.92 | 19.04 | 34.03 | 6.77 |
| | | Max. | 66239 | 1253 | 164.6 | 729.6 | 427.7 | 7.10 | 87.20 | 249.12 | 25.82 |
| | RDA (N=23) | Mean | 26419 | 571 | 54.0 | 206.9 | 51.0 | 2.69 | 22.20 | 52.14 | 10.14 |
| | | Median | 26015 | 562 | 47.1 | 164.6 | 46.8 | 2.59 | 22.07 | 56.16 | 9.84 |
| | | Min. | 14927 | 379 | 22.4 | 43.8 | 3.6 | 1.34 | 6.71 | 7.20 | 3.60 |
| | | Max. | 40655 | 850 | 90.6 | 456.0 | 97.4 | 4.18 | 37.81 | 98.88 | 18.96 |
| HTA (N=26) | Mean | 28415 | 535 | 108.4 | 469.2 | 126.4 | 3.12 | 28.03 | 72.54 | 9.99 | |
| | Median | 27959 | 521 | 108.4 | 429.1 | 127.0 | 3.17 | 28.60 | 73.44 | 9.38 | |
| | Min. | 17662 | 340 | 35.1 | 119.0 | 34.4 | 1.82 | 14.82 | 28.70 | 4.32 | |
| | Max. | 37055 | 744 | 296.1 | 1056.0 | 301.4 | 5.66 | 42.42 | 134.40 | 19.97 | |

Min. : minimum. Max. : maximum

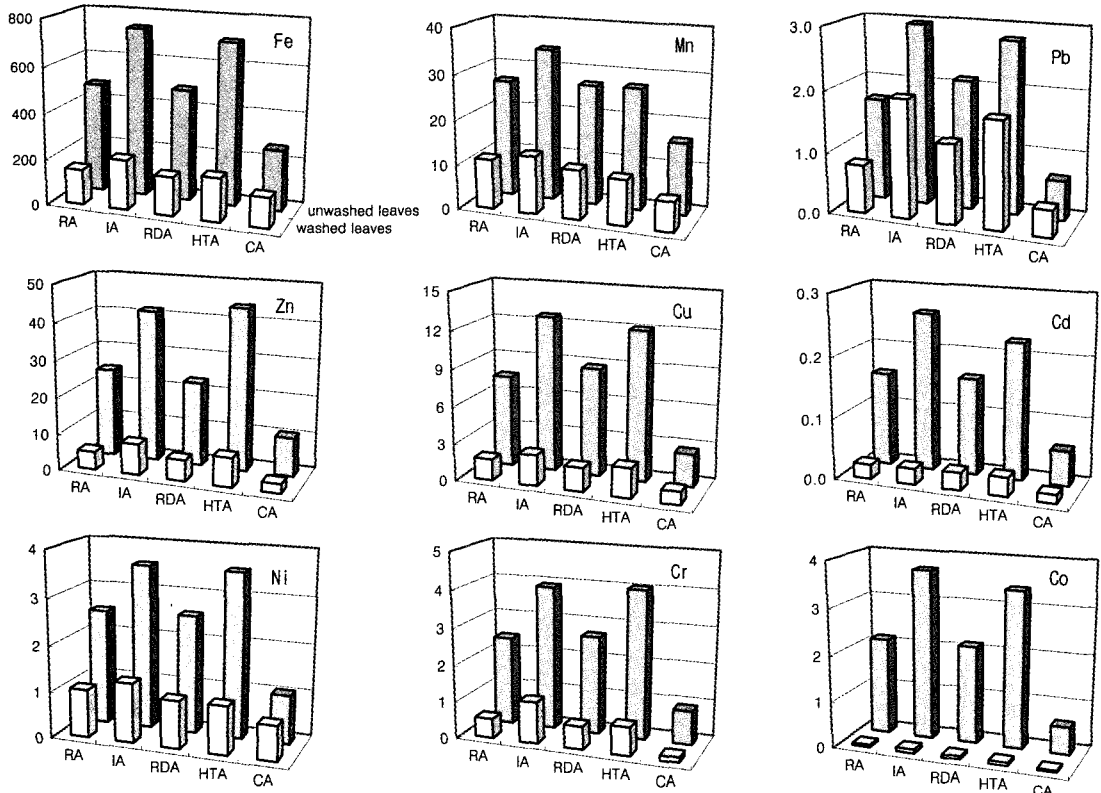


Fig. 3. Heavy metal concentrations (Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Cr and Co) in washed and unwashed leaves of *Ginkgo biloba* in Seoul area (RA; Rural area, IA; Industrialized area, RDA; Residential area, HTA; Heavy traffic area, CA; Control area).

Zn의 증양값은 공단지역과 교통량 밀집지역에서 토양의 오염허용한계치보다 높은 값을 보였다(Table 4). Zn의 증양값은 교통량 밀집지역에서 가장 높은 값이 나타났고 평균값이 교통량 밀집지역에서 높게 나타나 이는 Zn 오염이 공단지역에서 배출된 것이라기보다는 자동차의 타이어가 마모로 발생한 입자, 도로표지판에 사용되는 페인트에 함유되어 있는 ZnO(손동헌 과 이택순, 1988)가 토양에 퇴적되어 교통량이 Zn의 축적에 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

5.1.2. 가로수 잎

세척하지 않은 잎은 대기로부터 유독성 원소들이 식물에 흡수된 양, 대기부유분진들이 표면에 묻어있는 양, 토양에 의해 흡수된 양을 알 수 있다. 그러나 세척한 잎은 잎 표면에 부착되어 있는 대기오염물질이 제거되므로 토양 또는 대기로부터 잎의 기공을 통해 흡수된 원소들의 양만을 알 수 있다. 따라서 세척한 잎과 세척하지 않은 잎내 중금속 원소들의 함량차이로 흡수되지 못하고 잎 표면에 묻어있는 양을 평가할 수 있을 뿐만

아니라 대기 중 부유분진의 양이 식물에 미치는 영향을 간접적으로 평가할 수 있다.

세척한 은행나무 잎의 Cr의 총 평균함량은 0.75 mg/kg, 세척하지 않은 잎에서 3.38 mg/kg으로 나타나 김면섭(1988)연구의 분석결과 1.26 mg/kg보다 약 3배 가량 높게 나타나 Cr의 오염이 증가되었다(Table 3). 세척한 은행나무 잎에서 Cr은 공단지역에서 1.12 mg/kg으로 가장 높게 나타났고 세척하지 않은 잎에서는 교통량 밀집지역에서 4.03 mg/kg으로 가장 높게 나타나 세척한 잎과 세척하지 않은 잎 내 Cr 함량의 차이는 2.91 mg/kg으로 교통량 밀집지역에서 대기 중 침전물이 높게 나타났(Table 4 and Fig. 3). 이는 자동차의 부식과 엔진과 도로에 표시한 노란 페인트에서 유출된 납크롬산염에 의한 것으로 보인다. 또한 전원지역과 주거지역의 세척한 잎에서의 함량은 비교대조지역의 0.14 mg/kg(Table 4)보다 약 3배 정도 높게 나타나 비교적 청정하다고 판단되는 전원지역도 식물에 Cr의 오염이 심각한 편이다.

세척한 은행나무 잎의 Ni 평균함량은 1.07 mg/kg이

며, 세척하지 않은 잎은 3.10 mg/kg이다(Table 3). 세척하지 않은 잎의 최고치는 서대문구 남가좌동의 백련시장부근시료(시료번호 49)로 9.843 mg/kg이고 그 지역의 세척한 잎의 함량은 0.86 mg/kg으로 잎 표면에 흡착된 대기분진량이 주변지역에 비해 많았다.

세척한 은행나무 잎에서의 Cu, Fe, Mn, Ni 함량은 지역적으로 큰 차이는 없지만 비교대조지역에서보다는 다소 높게 나타났다(Table 4 and Fig. 3). 세척하지 않은 잎에서의 Cu의 함량은 공단지역과 교통량 밀집지역에서 각각 12.57 mg/kg과 12.06 mg/kg으로 두 지역 사이에 큰 차이는 없지만 잎 내에 남아있는 대기중의 침전물은 공단지역에서 높게 나타났다. 세척하지 않은 은행나무 잎 내의 Cu 함량은 전원지역(7.46 mg/kg)과 주거지역 간에 큰 차이는 보이지 않았고 비교대조지역의 2.66 mg/kg보다는 약 3배 가량 높게 나타났다(Table 4).

세척한 은행나무 잎내 전원지역(154 mg/kg)과 주거지역(168.33 mg/kg)에서 비슷한 함량을 나타내었고 비교대조지역에서 129.54 mg/kg과는 큰 차이가 없다(Table 4 and Fig. 3). 이는 Fe가 식물에 있어서 필수 원소로 지역간 큰 차이가 없는 것으로 보인다. Mn의 함량은 세척 전과 후 함량 차이가 컸으며 대기 중 물질은 공단지역에서 높게 나타났다(Fig. 3).

세척하지 않은 은행나무 잎에서 Ni 함량은 산업지역과 교통량 밀집지역에서 3.55 mg/kg으로 높게 나타났고(Table 4 and Fig. 3), 이를 두 지역의 세척 잎과 세척하지 않은 잎 사이의 Ni 함량의 차이(공단지역: 2.27 mg/kg, 교통량 밀집지역: 2.52 mg/kg)로 대기 중 침전물이 교통량 밀집지역에서 높게 나타났다(Fig. 3).

세척한 은행나무 잎에서 공단지역의 Pb 함량은 1.93 mg/kg으로 가장 높게 나타났지만 교통량 밀집지역에서 1.74 mg/kg으로 다른 지역에 비해 높게 나타났다(Table 4 and Fig. 3). 세척하지 않은 잎의 경우 공단지역과 교통량 밀집지역의 Pb함량은 비교대조지역(0.64 mg/kg)보다는 약 5배 정도 높게 나타나 Pb의 오염이 상당히 큼을 알 수 있다. 또한 세척 잎과 세척하지 않은 잎의 Pb의 함량 차이로 잎에 남아있는 대기 중의 침전물은 교통량 밀집지역에서 Pb가 1.05 mg/kg 함량으로 더 우세하였다. 은행나무 잎 시료의 Pb 함량은 전원지역과 주거지역이 비교대조지역보다 약 1-3배 정도 높았다. 이는 전원지역과 주거지역이라 하더라도 주변의 공단지역과 교통량 밀집지역에서의 대기상 오염물질의 확산에 의한 것으로 볼 수 있다. 세척한 잎에서 Zn는 지역적인 차이가 다소 적지만 공단지역에서는 높게 나타났다(Fig. 3). 세척하지 않은 잎은 교통량

밀집지역에서 가장 높은 함량을 나타내었다. 세척한 잎과 세척하지 않은 잎 시료간의 Zn 함량 차이로 보면 잎 내에 남아있는 대기 중의 침전물은 교통량 밀집지역에서 높게 나타나 김민영 등(1987)의 연구 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.

5.2. 중금속 원소들의 분산특성 및 오염양상

5.2.1 원소간의 분산특성

본 연구지역인 서울지역은 중금속 원소들이 분산특성이 인위적인 활동에 기인하기 때문에 원소들 간의 상관성을 조사함으로써 원소들의 배출원에 대한 정보를 얻을 수 있다. 토양과 은행나무의 세척 잎과 세척하지 않은 잎 사이에 상관계수를 각각 Table 5, 6, 7에 나타내었으며, 유의한 양의 상관관계를 나타내는 원소들에 대해서는 scatter diagram으로 나타내었다(Fig. 4).

토양 : 연구지역의 토양의 원소별 상관계수 값을 보면(Table 5), Cd은 Co, Cr, Fe, Ni과, Co는 Cr, Fe, Mn, Ni과, Cr은 Fe, Ni과, Cu는 Ni, Zn와, Pb는 Zn와의 상관성이 0.5 이상으로 $p < 0.01$ 에서 유의한 상관성을 보였다. 특히 Cd-Co($r=0.660$), Cr-Ni($r=0.807$), Cu-Ni($r=0.620$), Cu-Zn($r=0.780$), Pb-Zn($r=0.635$)간의 상관계수는 0.6 이상으로 상대적으로 높은 상관성을 나타내었다. 김주용과 전호택(1993) 연구 결과는 Zn와 Cd ($r=0.0078$), Pb와 Cu와의($r=0.1593$) 상관성이 좋지 못했다는 결론과는 상이하게 본 연구에서는 Zn와 Cd은 낮은 상관관계($r=0.290$)를 보였으나 Pb와 Cu와의 상관성($r=0.500$)은 좋게 나타났다.

이런 결과로부터 다양한 오염원이 존재하는 서울지역에서의 Cd은 Co 배출원과 유사하며, Cr은 Ni 배출원과 유사하고 Zn는 Cu, Pb의 배출원과 유사함을 예측할 수 있었다.

가로수 잎 : 세척한 은행나무 잎(Table 6)내의 Co는 Cr, Fe과, Cr은 Ni과, Cu는 Fe, Pb, Zn와, Fe은 Pb, Zn와, Pb는 Zn와의 상관계수가 0.6 이상으로 상관성이 높았으며, 다른 원소들에 대해서는 좋은 상관성을 가지지 못했다.

세척하지 않은 은행나무 잎(Table 7)내 Cd은 Co, Cr, Cu, Fe, Pb, Zn와, Co는 Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn와, Cr은 Ni과, Cu는 Fe, Pb, Zn와, Fe은 Pb, Zn와, Pb는 Zn와의 상관성이 $P < 0.01$ 에서 0.6 이상으로 양의 상관성을 보였다. 이에 대하여 천선희와 김중희(1996) 연구결과에서 은행나무 잎 내에 중금속간의 상관도는 Pb와 Cu($r=0.9449$), Cu와 Zn($r=0.7898$)에서 유의한 양의 상관관계를 지니고 있다는 결론을 보고하였다. 본

Table 5. Correlation between element couples of soil beneath of *Ginkgo biloba* in Seoul area.

| | Cd | Co | Cr | Cu | Fe | Mn | Ni | Pb | Zn |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Cd | 1.000 | | | | | | | | |
| Co | 0.660** | 1.000 | | | | | | | |
| Cr | 0.627** | 0.638** | 1.000 | | | | | | |
| Cu | 0.451** | 0.188 | 0.520** | 1.000 | | | | | |
| Fe | 0.934** | 0.799** | 0.644** | 0.342** | 1.000 | | | | |
| Mn | 0.474** | 0.614** | 0.421** | 0.243* | 0.464** | 1.000 | | | |
| Ni | 0.631** | 0.761** | 0.807** | 0.620** | 0.629** | 0.606** | 1.000 | | |
| Pb | 0.478** | -0.112 | 0.254* | 0.500** | 0.202 | 0.102 | 0.233 | 1.000 | |
| Zn | 0.290* | -0.091 | 0.342** | 0.780** | 0.122 | 0.003 | 0.348** | 0.635** | 1.000 |

**Significant at p=0.01, *Significant at p=0.05

Table 6. Correlation between element couples of washed leaves of *Ginkgo biloba* in Seoul area.

| | Cd | Co | Cr | Cu | Fe | Mn | Ni | Pb | Zn |
|----|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|-------|
| Cd | 1.000 | | | | | | | | |
| Co | 0.051 | 1.000 | | | | | | | |
| Cr | -0.102 | 0.629** | 1.000 | | | | | | |
| Cu | 0.084 | 0.561** | 0.534** | 1.000 | | | | | |
| Fe | 0.076 | 0.798** | 0.496** | 0.614** | 1.000 | | | | |
| Mn | -0.105 | 0.300* | 0.288* | 0.117 | 0.303* | 1.000 | | | |
| Ni | -0.134 | 0.530** | 0.749** | 0.177 | 0.473** | 0.333** | 1.000 | | |
| Pb | 0.195 | 0.595** | 0.469** | 0.747** | 0.633** | 0.190 | 0.176 | 1.000 | |
| Zn | 0.084 | 0.553** | 0.379** | 0.672** | 0.694** | 0.154 | 0.190 | 0.793** | 1.000 |

**Significant at p=0.01, *Significant at p=0.05

Table 7. Correlation between element couples of unwashed leaves of *Ginkgo biloba* in Seoul area.

| | Cd | Co | Cr | Cu | Fe | Mn | Ni | Pb | Zn |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Cd | 1.000 | | | | | | | | |
| Co | 0.960** | 1.000 | | | | | | | |
| Cr | 0.624** | 0.674** | 1.000 | | | | | | |
| Cu | 0.706** | 0.688** | 0.564** | 1.000 | | | | | |
| Fe | 0.927** | 0.975** | 0.648** | 0.683** | 1.000 | | | | |
| Mn | 0.569** | 0.578** | 0.318** | 0.406** | 0.577** | 1.000 | | | |
| Ni | 0.566** | 0.606** | 0.892** | 0.451** | 0.521** | 0.349** | 1.000 | | |
| Pb | 0.717** | 0.709** | 0.576** | 0.970** | 0.713** | 0.442** | 0.432** | 1.000 | |
| Zn | 0.788** | 0.776** | 0.572** | 0.784** | 0.815** | 0.425** | 0.405** | 0.786** | 1.000 |

**Significant at p=0.01, *Significant at p=0.05

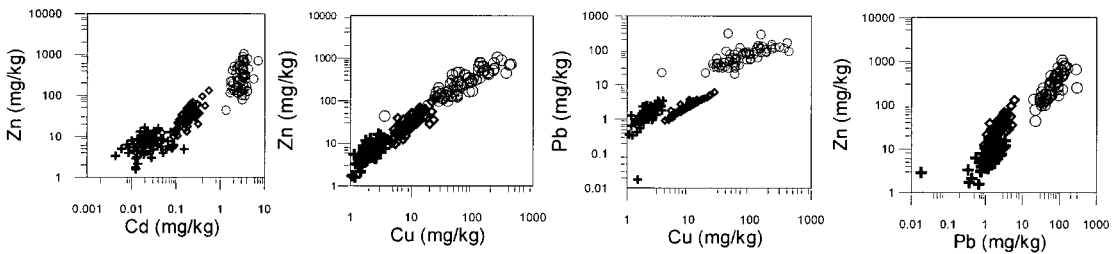


Fig. 4. Scatter diagram showing the relationship between element couples of soil and leaves of *Ginkgo biloba* in the Seoul area (+; soil of *Ginkgo biloba*, O; unwashed leaves of *Ginkgo biloba*, ◇; washed leaves of *Ginkgo biloba*).

연구지역은 위의 연구와 유사하게 Pb와 Cu의 상관성(세척한 은행나무 잎: $r=0.747$, 세척하지 않은 은행나무 잎: $r=0.970$)과 Cu와 Zn의 상관성(세척한 은행나무 잎: $r=0.672$, 세척하지 않은 은행나무 잎: $r=0.784$)이 때

우 높아 Pb와 Cu, Cu와 Zn가 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 또한 Pb와 Zn(세척한 은행나무 잎: $r=0.793$, 세척하지 않은 은행나무 잎: $r=0.786$)의 상관성도 뚜렷하여 식물체내 축적됨을 알 수 있다.

5.2.2. 원소별 분포특성

토양 : 토양에 대한 화학분석 결과를 바탕으로 서울 지역의 토양 시료에 대한 중금속원소에 대한 등함량도를 작성하였다(Fig. 5). Cd의 경우 서울 북동부지역과

성동구지역을 제외하고 전 지역에 3 mg/kg이상의 오염 양상을 보여주고 있다. 특히 종로구, 성북구, 영등포구 일대에서 Cd 함량이 현저히 높다. Co는 구로구 일대에서 20 mg/kg이상으로 높으며, Cr은 구로구, 관

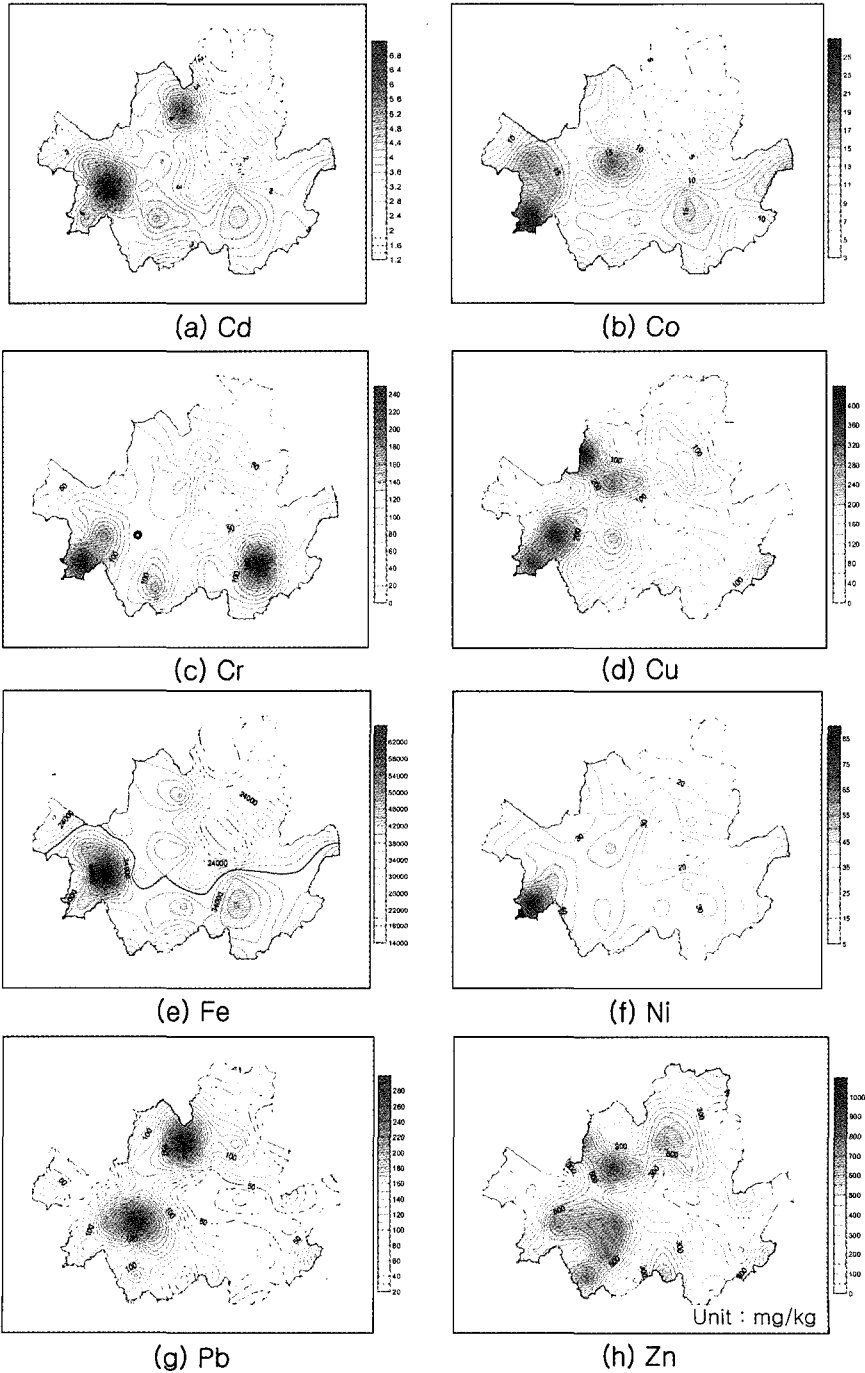


Fig. 5. Contour maps of heavy metals in soils from Seoul area.

악구, 송파구와 강남구 일대에서 100 mg/kg 이상으로 나타났다. Cu는 구로구, 영등포구, 은평구, 서대문구 일대에서 100 mg/kg 이상으로 분산양상을 나타내고 있다. Fe은 양천구와 영등포구 경계부근에서 오염양상을 보

여주었지만 전반적으로 비슷한 양상의 분포를 하고 있다. Ni은 구로구에서 50 mg/kg 이상의 오염양상을 보였고, Pb은 성북구, 종로구, 영등포구 여의도 일대에서 100 mg/kg 이상의 오염양상을 나타내었다. Zn의 오염양

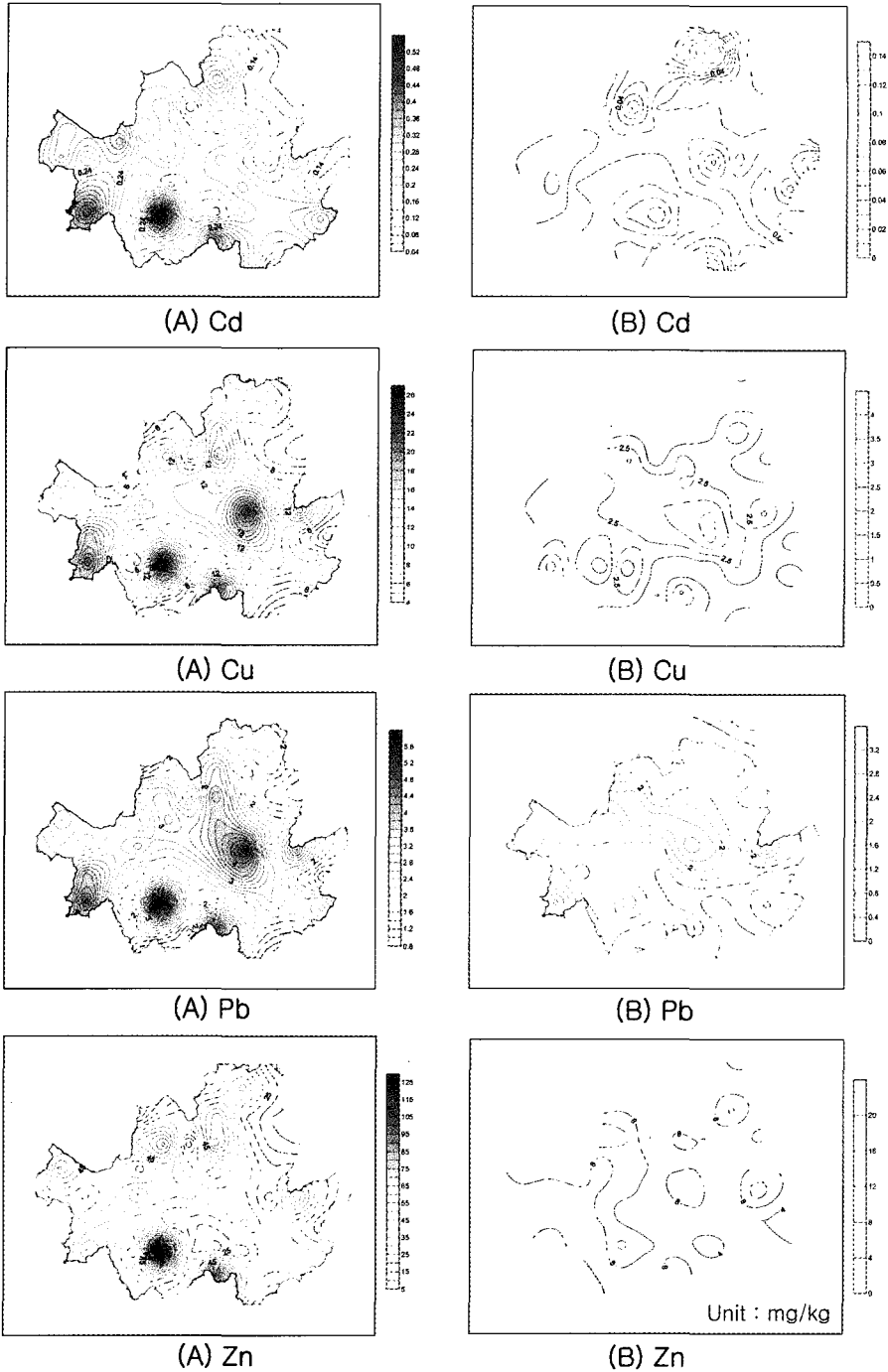


Fig. 6. Contour maps of heavy metals in unwashed(A) and washed(B) leaves of *Ginkgo biloba* from Seoul area.

상은 Cu의 오염양상과 유사하게 서울 전 지역에서 300 mg/kg이상으로 오염양상을 보였다.

은행나무 잎 : 은행나무 잎 내 중금속원소 함량에 대한 등함량도는 Fig. 6과 같다.

세척하지 않은 잎 내의 Cd는 구로구, 동작구, 서초구 일대에서 0.3 mg/kg이상으로 나타났으며, 서울시는 전체적으로 0.04 mg/kg이하이며 노원구 일대에서 0.04 mg/kg이상의 분포패턴이 나타나고 있다(Fig. 6). Cu는 세척하지 않은 잎에서 구로구와 동작구, 성동구 일대에 20 mg/kg이상의 오염양상을 보였고, 세척한 잎에서는 구로구, 성동구에서 3 mg/kg이상의 분포패턴을 보였다(Fig. 6). 이는 높은 교통량 때문으로 판단된다. Pb는 서울의 외곽지역과 전원지역을 제외하고 도심지역에서 3 mg/kg이상의 오염양상을 보였다. Zn는 Pb와 유사한 패턴으로 서울 외곽지역과 전원지역을 제외하고 45 mg/kg이상을 나타내며 동작구, 서초구 일대에서 두드러진 오염양상을 보였다(Fig. 6). Co의 경우 세척하지 않은 잎은 구로구, 마포구, 동작구, 서초구 일대에서 5 mg/kg이상의 오염양상을 보였으며, Cr은 세척하지 않은 잎에서 구로구, 마포구, 서대문구, 동작구 일대에 5 mg/kg이상의 오염양상을 보였으며, 그 외 지역은 전체적으로 0.5 mg/kg이하이다. Mn과 Fe은 식물의 필수원소로 전체적으로 비슷한 분포로 나타났다. 세척하지 않은 잎에서 Ni은 구로구, 서대문구, 동작구 일부지역에서 5 mg/kg이상의 오염양상을 보였고, 세척한 잎은 금천구 일대에 2 mg/kg이상의 양상이지만 전지역에서

1 mg/kg의 분포패턴을 보였다.

위의 중금속 원소별 분포특성의 비교결과 교통량과 배기가스와 관련되는 세척하지 않은 가로수종 잎 내 Cd와 Pb, Cu와 Pb, Zn의 분포양상이 유사하다고 할 수 있다. 산업활동과 관련되는 Cr과 Ni이 세척하지 않은 은행잎 내에서 유사한 분포패턴을 보였다.

5.2.3. 중금속 오염양상

중금속 원소들의 분포특성 결과로 연구지역의 각 원소별 오염양상은 설명할 수 있지만 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn등의 중금속 원소들이 복합된 오염양상을 설명하기는 힘들다. 따라서 중금속 원소들을 결합시켜 복합된 토양오염의 수준과 정도를 지수로서 평가하는 오염지수(Pollution index, P·I)의 도출이 필요하다. 오염지수는 다음과 같은 식에 따라 산출할 수 있다.

$$P \cdot I = \frac{\sum(\text{토양중의 중금속 원소의 함량/허용한계치})}{\text{중금속 원소의 수}}$$

Kloke(1979)가 제시한 토양내 잠재적 독성원소에 대한 최대 토양오염 허용한계치(Cd 3, Cr 100, Cu 100, Ni 50, Pb 100, Zn 300 mg/kg)를 이용하였다. 오염지수가 1.0이상이면 평균적으로 토양 중의 중금속 함량이 허용한계치 이상임을 나타내어 오염지역으로 분류할 수 있다. 한편 1.0이하이면 인위적으로나 자연적인 요인으로 오염되지 않았다고 평가할 수 있다.

서울지역 토양의 오염지수를 등함량 곡선으로 Fig. 7에 도시하였다. 서울지역의 토양의 오염지수는 0.18-2.14

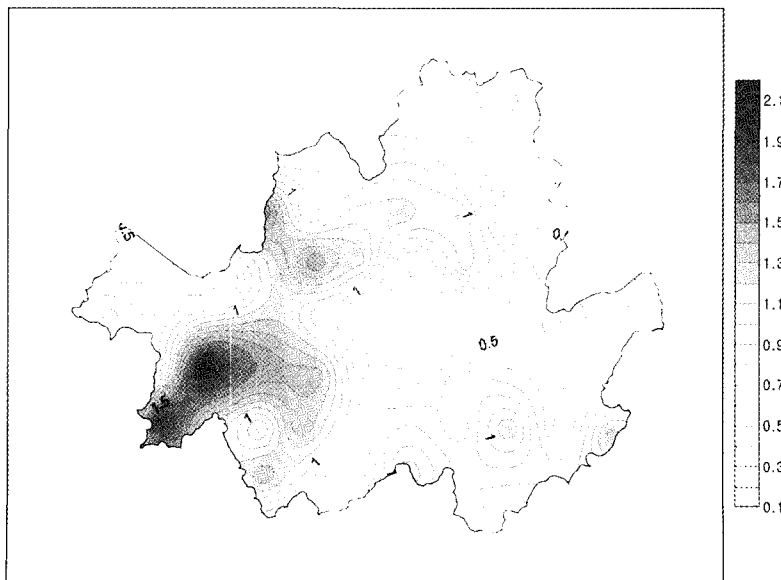


Fig. 7. Pollution index map of soil in Seoul area.

의 범위를 보여주며 서울지역의 토양 중 오염지수가 1.0 이상으로 나타난 지역은 70개 지역 중에 21개 지역으로 나타나 30% 정도가 오염지역으로 볼 수 있다. 이들 오염지역의 구로구, 영등포구, 은평구, 서대문구 일대에서 오염지수가 1.5 이상의 값을 보이며, 특히 영등포구일대는 2.0 이상으로 가장 높은 값을 보이고 있다. 이는 철강산업 활동으로 주변지역이 심하게 오염되어 있음을 알 수 있다. 서울의 북부지역과 서부의 강서구와 성동구지역은 비교적 오염이 진행되지 않은 것으로 나타났다.

5.3. 지역특성별 판별분석에 의한 중금속의 분포특성

서울지역내 오염양상에 따라 네 가지 특성지역이 구분되며, 또한 특성지역간의 각 중금속 원소들의 분포특성에 있어서 차이가 있으므로 7가지 원소들을 변수로 투입하여 네 가지 특성집단을 잘 구별해 주는 원소를 찾기 위해 판별분석을 실시하였다. Table 1과 같이 서울지역 도시화 특성에 의해 구분된 시료들에 대한 판별분석 결과가 Table 8에 나타났다. 판별분석에 고유값(eigenvalue)은 집단간 분산을 집단 내 분산으로 나눈 값으로, 이 값은 0-1의 값을 가지며, 이 값이 클수록 판별함수의 설명력이 크다. 판별식 1은 eigenvalue가 0.638로 58.6%의 분산을 설명하며, 판별식 2는 eigenvalue가 0.446으로 41.0%의 분산을 설명한다. 변수들의 상대적인 중요도를 나타내는 표준정준(standardized canonical) 변수의 절대치를 보면 판별식 1에서 Co, Cd, Ni, Cr, Pb, Cu, Zn의 순으로 나타났다. 그리고 판별식 2에서 Cd, Co, Ni, Pb, Zn, Cr의 순으로 나타났다(Table 8).

판별함수 1에 의해 주거지역, 전원지역과 산업지역,

교통량 밀집지역으로 구분되어지는 것을 알 수 있다. 이 지역을 구분하는데 가장 큰 설명력을 가지는 원소는 Co이며, 다른 지역에서보다 산업지역과 교통량 밀집지역에 부화되는 원소는 Ni>Cr>Pb 순이다. 판별함수 2에 의해 집단간을 구분해 보면 전원지역과 주거지역은 0값 주위에서 나타나는 반면에, 산업지역과 교통량 밀집지역을 구분하는데 가장 큰 설명력을 가지는 원소는 Cd이며, 판별점수가 음의 영역에는 산업지역이, 양의 영역에는 교통량 밀집지역이 치우침을 볼 수 있다. 교통량 밀집지역에서 다른 원소에 비해 Co, Pb, Zn이 부화되어있음을 알 수 있다(Fig. 8).

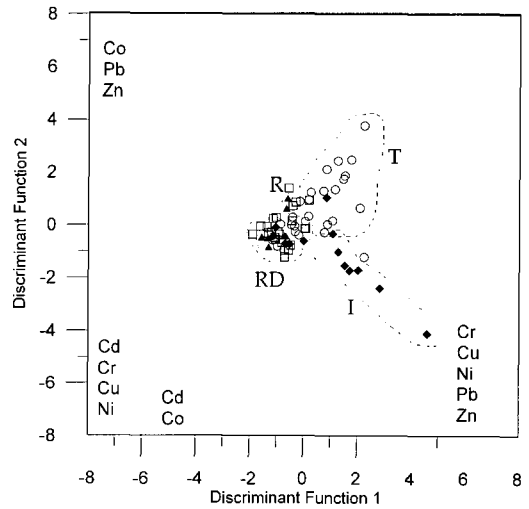


Fig. 8. Plots of scores of on first and second discriminant functions the soils beneath *Ginkgo biloba* (R: Rural area (▲), I: Industrialized area (◆), RD: Residential area (□), T: Heavy traffic area (○)).

Table 8. Discriminant function coefficients, related statistics and classification results.

| Statistics | Discrim. Function 1 | Discrim. Function 2 | | | |
|--------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| Eigenvalue | 0.638 | 0.446 | | | |
| Percentage of variation | 58.60% | 41.00% | | | |
| Coefficients | | | | | |
| Cd | -0.071 | -0.546 | | | |
| Co | -0.1 | 0.202 | | | |
| Cr | 0.008 | -0.006 | | | |
| Cu | 0.003 | -0.011 | | | |
| Ni | 0.063 | -0.067 | | | |
| Pb | 0.007 | 0.017 | | | |
| Zn | 0.001 | 0.006 | | | |
| Classification results | | Predicted group membership | | | |
| (No. of cases) | | Rural area | Industrialized area | Residential area | Heavy traffic area |
| Rural area (8) | | 6 (75.0%) | 0 (0.0%) | 2 (25.0%) | 0 (0.0%) |
| Industrialized area (13) | | 3 (23.1%) | 7 (53.8%) | 2 (15.4%) | 1 (7.7%) |
| Residential area (23) | | 8 (34.8%) | 0 (0.0%) | 11 (47.8%) | 4 (17.4%) |
| Heavy traffic area (26) | | 2 (7.7%) | 2 (7.7%) | 6 (23.0%) | 16 (61.5%) |

6. 결 론

서울지역을 대상으로 도시화·산업화의 인위적 오염원에 의한 중금속 원소들의 분산양상과 오염특성을 파악하기 위하여 은행나무 잎 및 가로수 토양시료를 채취하여 토양 pH와 Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Cr 및 Co의 함량을 측정하였으며, 이들 화학분석자료를 바탕으로 통계분석을 실시하였다.

1. 토양의 전반적으로 pH가 6.9사이의 중성에서 약 알칼리성을 보였으며 전원지역, 공단지역, 주거지역, 교통량 밀집지역 등의 지역간 토양 pH의 평균값의 차이는 나타나지 않았다.

2. 공단지역의 토양에서는 Cd, Co, Cr, Ni 함량이 높고, 교통량 밀집지역에서는 Cu, Zn, Pb의 함량이 높게 나타났다. 이들 원소들의 유래는 산업활동 및 교통량 등의 영향을 반영하고 있다.

3. 은행나무의 세척 전·후 중금속 함량의 차이가 크게 나타나 서울지역의 대기 중의 분진 내 높은 중금속 오염을 예측할 수 있다. 그리고 은행나무 잎에서 세척 후보다 세척 전에 Cu, Cd, Co 함량은 산업지역에서 높았고, Cr, Ni, Pb, Zn 함량은 교통량 밀집지역에서 높았다.

4. 토양의 Cd-Co($r=0.660$), Cr-Ni($r=0.807$), Cu-Zn($r=0.780$), Pb-Zn($r=0.635$)간의 상관계수는 0.6 이상으로 유의한 양의 상관성을 보였으며, 이로부터 다양한 오염원이 존재하는 서울지역에서 Cd는 Co와 배출원이 유사하고, Cr은 Ni과, Zn는 Cu 및 Pb의 배출원이 유사함을 예측할 수 있다. 은행나무 잎은 Pb-Cu와 Cu-Zn 원소간의 상관성이 높았다.

5. 서울지역 토양시료에 대한 원소들의 복합된 오염양상을 평가하기 위해 적용한 오염지수는 대부분 1.0 이상으로 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn등의 중금속으로 오염되어 있는 것으로 나타났다. 특히 산업지역과 교통량 밀집지역에서 중금속의 오염도가 크게 나타났다.

6. 토양시료에 대한 판별분석 결과 주거지역과 전원지역보다 공단지역과 교통량 밀집지역에 부화되는 원소는 Ni>Cr>Pb 순이다. 산업지역과 교통량 밀집지역을 구분하는 원소는 Cd이며, 산업지역에서보다 교통량 밀집지역에서 Co, Pb, Zn이 부화되는 경향이 있다.

사 사

기기분석에 도움을 주신 극지연구소 이종익 박사님과 허순도 박사님께 감사드립니다. 논문심사를 해 주신

이민희 심사위원님과 김재곤 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

강주성, 박석환, 정문식 (1994) 서울시 일부지역에서 재배한 채소류 및 토양중 중금속 함량에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 20권, p. 55-63.

김권래, 류형주, 정종배, 김계훈 (2001) 서울시 주요 도로변의 토양오염 조사-중량구 망우로 주변 토양. 한국농화학회지, 44권, p. 103-108.

김남장, 홍승호 (1975) 지질도폭 설명서-안양 1:50,000. 국립지질광물 연구소.

김동엽, 유정환, 채지석, 차순형 (1996) 대기오염물질의 산업생태계내 유입과 토양의 화학적 특성변화. 한국임학회지, 85권, p. 84-95.

김민영, 강희곤, 길혜경 (1987) 서울지역 은행잎 중 중금속 함량에 관한 연구. 서울시 보건환경연구원보, 23권, p. 353-362.

김연섭, 이광국 (1988) 서울시내 가로수목의 수용성 유황 및 중금속 농도에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 4권, p. 111-120.

김주용, 전효택 (1993) 서울지역 토양과 분진중의 Cu, Pb, Zn, Cd의 지구화학적 분산. 한국자원공학회지, 30권, p. 163-176.

김희자 (1983) 가로수 수피 및 표토의 중금속 오염에 관한 연구. 이화여자대학교 석사학위 논문, 31p.

박기중 (1992) 교통량 과밀 도로주변의 토양과 가로수, 대기중 Pb, Cu, Zn 중금속 농도와 그 상관성에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 18권, p. 19-25.

박청길, 이군자, 유선재 (1985) 도로변 인접 토양중의 납, 카드뮴, 아연 및 구리의 함량분포 특성. 대한환경공학회지, 7권, p. 37-42.

변희옥, 김규한, 전효택 (1996) 서울시 영등포구와 구로구에 소재한 중학교 운동장의 토양과 옥외분진의 중금속 오염. 지구과학교육학회지, 17권, p. 192-204.

서울특별시 (2002) 서울 통계연보 2001 제41회, 712p.

손동현, 정원태, 박종필, 김덕희, 정성윤 (1992) 도시 토사중 중금속 함량. 한국대기보전학회지, v. 8, p. 221-228.

손동현, 이택순 (1988) 서울시 토사중의 중금속 함량에 관한 연구. 약학논총, 2권, p. 21-31.

이경형 (1989) 서울의 지역별 은행나무 낙엽의 납, 카드뮴, 및 유황의 함량측정에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문, 25p.

이충규, 김종갑 (1998) 산림내 강우에 의한 산성강하물의 영향평가. 한국생태학회지, 21권, p. 449-456.

장관순, 이수옥 (1995) 인공산성우의 처리에 따른 소나무와 곰솔 침엽의 염류소형변화(II). 한국임학회지, 84권, p. 103-113.

전성환 (1984) 도시 쓰레기매립지 토양중 중금속함유량에 관한 조사연구. 연세대학교 산업대학원 석사학위논문, 38p.

전효택, 안주성 (1996) 수도권 위성도시의 토양과 분진의 중금속 오염에 대한 연구. 자연환경지질, 29권, p.87-100.

전효택, 최원주 (1992) 도시 및 산업환경 부진 및 토양중의 중금속 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 317-336.

천선희, 김중희 (1996) 마산시 도로주변 은행나무와 양버즘나무의 잎과 수피 및 토양의 중금속 함량. 한국생태

- 학회, 19권, p. 241-249.
- 환경부 (2002) 환경백서. 718p.
- Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil. paper presented at United Nations-ECE Symp.
- Kabata-Pendias, A.K. (1984) Trace elements in soils and plants. CRC press, 315p.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. and Banerjee, E.K. (1987) Realistic assessment of analytical data quality from inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, Anal. Proc., v. 24, p. 260-265
- Rump, H.H. and Krist, H. (1988) Laboratory manual for examination of water, waste water, and soil. VCH Verlagsgesellschaft, 190p.

2004년 12월 1일 원고접수, 2005년 4월 26일 게재승인.