

光州地域에서 主要 樹木의 大氣汚染物質과 重金屬 吸收 淨化機能에 關한 研究^{1*}

曹 熙 料²

The Absorption and Purification of Air Pollutants and Heavy Metals by Selected Trees in Kwangju^{1*}

Hi Doo Cho²

要 約

대기 오염물질인 SO₂, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻가 粉塵이나 강우와 함께 지표에 이르러 토양에 흡수 축적되고 중금속은 생활하수 및 음식 쓰레기, 공장 폐기물, 비료, 살충제 및 살균제, 채광활동 등에서 여러 가지 경로인 물질의 순환과정을 통해서 水圈이나 토양에 축적된다.

대기오염물질인 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻와 중금속은 식물 필수영양소(Co, Cu, Mo, Mn, Ni, V, Zn)와 인체나 동물에 유독성을 갖는 중금속(Cd, As, Pb, Hg, Cr, Se, Mo, Co) 중에서 Se, Mo, Zn, Cd, Pb, Mn, Cr, Co, V, As, Cu, Ni을 분석대상으로 하였고 이들의 도시에서 오염상태를 알기 위하여 도시지역인 광주 시내에 식재되어 있는 가로수 및 녹지대조성 수종과 대조구로서 광주에서 23 km 떨어져 있는 나주시 산포면 산제리 소재 전라남도 산림환경연구소 구내에 생육하고 있는 수종을 대상으로 분석하였다. 분석대상 수종은 은행나무, 상수리나무, 개잎갈나무, 양버즘나무, 아까시나무, 오리나무, 메타세쿼이아, 느티나무, 벚나무, 소나무를 대상으로 하여 뿌리 및 잎 그리고 이들이 생육하고 있는 토양에 함유되어 있는 대기오염물질과 중금속의 함량을 분석 측정된 결과 다음과 같았다.

1. SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻가 도시지역의 토양이 시외지역 토양보다 높은 함량을 보이고 있으며 SO₄²⁻, NO₃⁻이온은 뿌리보다 잎의 함량이 더 높았다.
2. SO₄²⁻, NO₃⁻이온의 흡수량이 은행나무, 아까시나무, 느티나무, 상수리나무, 양버즘나무가 많아 도시 가로수나 녹지대 조성수종으로 적합하다고 생각된다.
3. 토양에 중금속의 함유량은 도시지역이나 시외지역에서 Mn>Zn>V>Cr>Pb>Ni>Cu>Mo>Cd 순이고, Mn, Zn, Pb, V, Cu는 도시토양이 시외지역 토양보다 많은 양이 검출되었는데 이는 각종 오염원으로부터 오염된 결과로 생각된다. 뿌리와 잎에 함유된 중금속의 함유량도 Mn>Zn>Cr>Cu>V>Ni 순으로서 V의 순위가 다를 뿐 토양의 함유량의 크기순서와 같았다.
4. Mn과 Zn은 식물체에 흡수를 서로 방해하는 Antagonism 관계에 있는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 Antagonism을 인정할 수 없었다.
5. Sn, Mo, Cd, Pb는 도시지역이나 시외지역 토양에 축적되어 있으나 수목에 흡수되지 않아 뿌리나 잎에서 검출되지 않았다. 또 Se, Co와 As는 토양, 잎, 뿌리에서 검출되지 않았다.
6. 도시지역이나 시외지역에서 조사된 10개 수종 중 중금속의 흡수력이 특별히 월등하다고 인정할만한 수종이 없었다.

¹ 接受 1999年 8月 5日 Recieved on August 5, 1999.

² 전남대학교 농과대학 임학과 Dept. of Forestry, College of Agriculture, Chonnam National University, Kwangju, Korea.

* 본 연구는 1997년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것임.

ABSTRACT

The air pollutants ; SO₂, SO₄²⁻, NO₃⁻ and Cl⁻ are absorbed into soils through falling with dusts and rain from the atmosphere. The sources of heavy metal contaminants in the environments are agricultural and horticultural materials, sewage sludges, fossil fuel combustion, metallurgical industries, electronics and waste disposal etc.. The soils and hydrosphere can be polluted on the way of the circulation of these heavy metals.

Studied pollutant anions are SO₄²⁻, NO₃⁻ and Cl⁻ and heavy metals are Se, Mo, Zn, Cd, Pb, Mn, Cr, Co, V, As, Cu and Ni which are the elements to be concerned with the essentials for plants, with animal and human health. This study is with the aim of selecting the species of roadside trees and green space trees which have excellent absorption of air pollutants and heavy metals from the atmosphere and the soils in the urban area.

Two areas are designated to carry out this study : urban area ; Kwangju city and rural area ; the yard of Forest Environment Institute of Chollanam-do, at Sanje-ri, Sampo-myum, Naju city, Chollanam-do (23km away from Kwangju).

This study is carried out to understand the movement of anions and heavy metals from the soils to the trees in both areas, the absorption of anions and heavy metals from atmosphere into leaves and the amounts of anions and heavy metals in leaves and fine roots(<1mm dia.) of roadside trees and green space trees in Kwangju and trees in the yard of Forest Environment Institute of Chollanam-do.

The tree species selected for this study in both areas are *Ginkgo biloba*, *Quercus acutissima*, *Cedrus deodara*, *Platanus occidentalis*, *Robinia pseudoacacia*, *Alnus japonica*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Zekova serrata*, *Prunus serrulata* var. *spontanea*, and *Pinus densiflora*. The results of the study are as follows :

1. SO₄²⁻, NO₃⁻ and Cl⁻ concentrations are higher in the soils of the urban area than in those of the rural area, and NO₃⁻ and SO₄²⁻ are higher in the leaves than in the roots due to the absorption of the these pollutants through the stomata.
2. *Ginkgo biloba*, *Robinia pseudoacacia*, *Zekova serrata*, *Quercus acutissima*, and *Platanus occidentalis* can be adequated to the roadside trees and the environmental trees due to their good absorption of NO₃⁻ and SO₄²⁻.
3. Heavy metals in the soils of both areas are in the order of Mn>Zn>V>Cr>Pb>Ni>Cu>Mo>Cd, and in the leaves and roots of the trees in the both areas are in the order of Mn>Zn>Cr>Cu>V>Ni. Both orders are similar ones except V. There are more in the urban soils than in the rural soils in amount of Mn, Zn, Pb, V, Cu.
4. It is supposed that there is no antagonism between Mn and Zn in this study.
5. Se, Co and As are not detected in the soils, the leaves and the roots in both areas. Sn, Mo, Cd and Pb are also not detected in the leaves and roots in spite of considerable amount in the soils of both areas.

Key words : Air pollutants, Heavy metals, Roadside trees, Green space trees, Rural area, Urban area.

緒 論

산업발달과 도시화로 인한 화석연료의 사용과 자동차 수요의 급증은 대도시에서 smog현상 같은 매연에 의한 대기오염을 초래하고 있다. 대기오염 물질들은(SO₂, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻) 각종 중금속이 포함되어 빗물과 함께 지표에 도달하여

심하면 토양이 산성화되고 산성화 토양은 양료 용탈이나 중금속의 흡착기능이 저하되게 된다. 이미 發表된 바이지만 産業선진지역인 유럽이나 북미는 强酸性의 강우가 내리고 있으며 아시아에서도 일본이나 중국도 例外가 아니고 우리 나라도 年降雨量의 90%가 산성우임이 이미 밝혀졌다. 화석연료의 연소와 광물의 제련은 중금속을 대

기에 방출하고 강우와 함께 내려 지표수에 포함되어 오염되고, 생활하수와 공장폐기물 그리고 농림업에 사용되는 비료나 각종 농약은 직접적으로 수계나 토양에 중금속을 공급하며 채광활동으로 불투성 암석은 파쇄되어 물에 노출되거나 황산화합물을 함유한 암석이 산소에 노출되어 급속하게 변질되어 분해되기 때문에 급속으로 방출되어 오염의 원인이 된다. 이처럼 여러 가지 경로로 중금속은 대기내 물질의 순환과정을 통해서 유수와 함께 유출되어 수계나 토양에 저장됨으로써 인간 건강에 미치는 위해가 대단히 크므로 삼림생태계에서 중금속 원소들이 생물학적으로 이용되는 정도와 환경적으로는 유독성에 대한 문제가 앞으로 연구되어야 할 문제라 생각한다.

토양은 풍화산물로 중금속을 포함하게 되는데 Ferruginous chlorites에는 V, Cr, Zn, Cd, Sn, Pb, Illite에는 As, Cd, Sn, Sb, W, Vermiculite에는 V, Cr, Co, Ni, Zn, Cu(조희두와 안기완, 1999)를 많이 함유하고 있는 것으로 보아 토양은 모암에 따라서 중금속의 함량과 종류가 달라진다는 것을 알 수 있다. 토양은 중금속의 공급원이면서 cation exchange site에서 이들 중금속을 흡착하는 성질을 가지고 있어 중금속을 축적하는 보루의 기능이 있다.

토양의 pH가 낮으면 B, F, Mn, Cu, Zn이 결핍된다는 사실이 널리 알려져 있으며 유출수를 정화하는데는 토양의 CEC가 관계있다는 보고도 있다. 예를 들면 New Zealand, Australia, South America의 유기질 토양에서는 Cu, B가 결핍되어 있는 경우가 있으며 Australia에서는 침엽수림 토양에 Zn이 결핍되어 있는 것을 확인하였다는 보고(Pritchett와 Fisher, 1987)가 있는데 이로 미루어 보아 토양의 이화학적 성질에 따라서 토양에 함유되어 있는 중금속의 종류가 달라진다는 것을 알 수 있다.

현실적으로 인간생활에 필요한 식량생산, 섬유생산, 에너지 개발 및 건전한 생활환경 조성을 위하여 전세계적으로 많은 연구가 수행되고 있으나 열대림 파괴로 지구 온난화가 가속되고 중화학공업의 발달 및 도시화로 화석연료의 사용 증가는 대기나 水圈 및 토양환경오염이 심각하여 건전한 생활환경 조성에 어려움이 대단히 많다. 따라서 대기오염물이나 중금속들의 농도가 높아질 때 환경 파괴와 인간생활에 중대한 영향을 미치므로 이들의 이동경로나 중금속과 대기오염물

질의 축적을 파악은 환경개선에 기여토록 하기 위하여 본 연구에 착수하였다.

광주시 가로수 또는 녹지대에 생육하고 있는 10개 수종과 광주시에서 23km 떨어진 나주시 산포면 산재리 소재 전라남도 산림환경연구소 구내에 생육하고 있는 같은 수종을 대상으로 이들의 뿌리, 잎, 토양에 함유되어 있는 대기오염물질과 중금속 함량에 대하여 분석하여 도시 환경림 조성 수종이나 가로수 식재 수종 선정에 기여하고자 한다.

材料 및 方法

1. 대상지역 및 수종

오랜기간 도시화가 진행되어 화석연료나 자동차 매연으로 대기나 토양이 오염되었으리라 생각된 광주시 지역의 가로수 및 녹지대 수목과 광주에서 23km 떨어진 농촌지역인 나주시 산포면 산재리 전라남도 산림환경연구소 구내에 생육하고 있는 은행나무, 상수리나무, 개잎 갈나무, 양버즘나무, 아까시나무, 오리나무, 메타세쿼이아, 느티나무, 벗나무, 소나무를 대상으로 이들의 뿌리, 잎 그리고 이들이 생육하고 있는 토양을 분석하였다.

2. 토양시료 채취 및 토양의 이화학적 성분 분석

대상 수목이 생육하고 있는 지표에서 5-10cm 깊이에서 약 1kg의 토양을 채취하여 풍건시켜 10mesh 체로 체가름한 후 pH(Glass electrode method), 토성(Pipett method), CEC(BaCl₂ method), Exchangeable cations(AAS), 유기물(Tyurin 법)을 측정 분석하였다.

3. 대기오염물질 및 중금속 분석

토양, 잎, 뿌리에 축적된 대기오염물질(NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻)과 중금속을 분석 측정하였다.

- 1) 토양시료를 풍건시켜 40mesh 체로 친 후 Dry oven에서 80℃로 48시간 건조하여 자기절구로 분말 조제하였다.
- 2) 직경 1mm 이하의 細根과 잎을 식물성장이 중지한 10월경에 25g 정도 채취하여 실내에서 2일간 풍건하고 증류수로 2번 세척한 후 0.3N-HCl로 표면 세척하여 Dry Oven에서 80℃로 48시간 건조하여 자기절구로 분말조제하였다.
- 3) 분말로 조제된 토양, 뿌리(細根) 및 잎의 시료

를 Ion chromatography로陰이온인 NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 를 분석하고, ICP-AES(Jobin-Yvon사, JY Plus, France)로 중금속을 분석 측정하였다. 또 NH_4^+ 는 Indolphenol法으로 분석하였다.

4) 중금속 분석

미량원소로 식물 필수영양소(Co, Cu, Mo, Mn, Ni, V, Zn)와 인체에 유독성을 갖는 원소(Cd, As, Pb, Hg, Cr, Se), 동물에 해로운 중금속(Cd, As, Pb, Hg, Cr, Se, Mo, Co)을 대상으로 선정하여 토양, 수목의 뿌리와 잎에 축적된 Sn, Se, Mo, Zn, Cd, Pb, Mn, Cr, Co, V, As, Cu, Ni의 함량을 분석 측정하였다.

結果 및 考察

1. 대기오염 물질 분석

토양은 물리화학적 과정이나 생물학적 과정을 통하여 산성화되는데 대기중에서 H_2CO_3 의 형성과 분해 때문에 비교적 오염되지 않는 지역이라도 강수가 산성화되는 경우가 있으며 강단지역에서는 NO_x , SO_x 같은 산성화 물질에 의해 HNO_3 , H_2SO_4 의 형성으로 강수의 pH가 4.0까지 내려가는 경우가 있다(Aber와 Melillo, 1991).

강수와 함께 강하하여 토양에 축적된 NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 가 식물체에 이용되기도 하나(Prichett와 Fisher, 1987), 강산성陰이온이온으로서 pH를 저하시키는 주요인으로서 식물성장에 필수요소인 Ca, Mg같은 영양염류를 용탈시켜 토양산성화를 촉진시킨다. 질소는 Amonium이온(NH_4^+)과 Nitrate이온(NO_3^-)의 형태로 식물체에 이용되는데(Prichett와 Fisher, 1987), NH_4^+ 는 유기질의 분해로, NO_3^- 는 질산화작용 Bacteria의 산화로 토양중에서 얻어질 수 있으며 또 대기중에서 강수와 함께 이들이 토양에 공급되어 뿌리를 통해서 식물체에 공급되고 강수와 함께 강하도중 잎에서 기공을 통해서 흡수되기도 한다(Raymond와 Roy, 1990).

유황은 질소와 마찬가지로 여러 가지 화학적 형태로 존재하는데, Sulfate이온(SO_4^{2-})으로 식물체에 이용되고 Gypsum($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)과 Pyrite(FeS_2)에서 공급되기도 하고 대기중에 오염된 것이 강수에 포함되어 토양에 축적되며 농약 또는 비료에 포함되어 토양에 공급된다(Raymond와

Roy, 1990). 유황 Bacteria는 유리유황이나 유기 화합물에 들어있는 유황을 Sulfate(SO_4^{2-})나 Sulfuric acid(H_2SO_4)로 바꾸고 유황은 식물체에 의하여 sulfate로 쉽게 흡수되며 식물체가 없는 토양에서 쉽게 용탈된다(Prichett와 Fisher, 1987).

Cl^- 이온은 토양에서 거의 완벽하게 Chloride이온(Cl^-)으로 존재하고 용해와 이동이 쉬운 이온으로서 자연환경에서 쉽게 순환하며 Chloride이온은 화산폭발, 산업폐기물, 除雪作業, 음식폐기물 등에 의해서 공급되기도 한다(Raymond와 Roy, 1990).

Table 3에서 보면 시외지역이나 도시지역에서 토양 pH는 모두 산성이어서 시외지역은 개잎갈나무, 도시지역은 은행나무, 양버즘나무가 생육하고 있는 토양만이 약산성이고 모두 강산성이다. 토양에 함유된 유기물은 2.15 - 7.84%였으며 도시지역(평균 4.05%)이 시외지역(평균 5.13%)보다 낮게 나타났는데 Table 1에서 보면 시외지역의 NH_4^+ 가 평균 10.3ppm으로서 도시지역 평균값(6.1ppm)보다 높게 나타났다. 이것은 유기물에서 NH_4^+ 가 생성되는 것이지만 다른 경로를 통해서 Amonium이온이 토양에 공급되기도 하기 때문에 유기질이 많다고 해서 NH_4^+ 이 반드시 많은 것은 아니라는 것을 알 수 있다.

강수에 가장 많이 함유되어 있는 대기오염 물질은 SO_4^{2-} 인데 특히 자동차 연료의 연소나 겨울철에 난방용으로 사용되는 화석연료에서 SO_2 가 배출되어 대기 중에서 산화되어 SO_4^{2-} 를 생성했기 때문이나(李壽煜과 張寬淳, 1994), 토양 중 SO_4^{2-} 함량이 NO_3^- 나 Cl^- 에 비하여 더 많은 것은 대기 중에 SO_4^{2-} 의 함량이 NO_3^- 나 Cl^- 보다 많고 강수와 함께 내려서 토양에 축적된 결과이며, 대기오염물질들은 이동속도가 $\text{Cl}^- = \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 순으로서(Raymond와 Roy, 1990) Cl^- 과 NO_3^- 보다 SO_4^{2-} 의 이동속도가 더 늦기 때문에 토양의 하부로 용탈하는 속도가 느려 SO_4^{2-} 가 상층토양에 더 많이 함유되어 있는 것으로 생각된다(Table 1). 토양에 함유된 대기오염물질의 평균값은 시외지역이 NO_3^- 가 70.8ppm, SO_4^{2-} 가 251.5ppm, Cl^- 가 93.8ppm 이고 도시지역이 NO_3^- 가 75.0ppm, SO_4^{2-} 가 269.8ppm, Cl^- 가 96.8ppm으로서 NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 이온들은 시외지역 토양보다 도시지역 토양에 더 많았다. 도시지역에서 화석연료의 사용, 질소산화물의 매연, 겨울철의 除雪作業, 음식 폐기물, 산업 폐기물 및 각종 폐기물의 연소 등으로

Table 1. Analyses of a cations and anions(ppm)

Tree species	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻			Cl ⁻		
	soils	soils	leaf	root	soils	leaf	root	soils	leaf	root
Rural										
<i>Ginkgo biloba</i>	1.8	43.7	373.1	204.3	211.9	301	188	87.5	43.8	98.3
<i>Quercus acutissima</i>	2.7	75.2	612.4	115.0	307.6	244	177	75.0	37.7	53.9
<i>Cedrus deodara</i>	2.4	62.2	363.9	292.5	196.8	215	276	117.5	17.2	49.1
<i>Platanus occidentalis</i>	7.2	56.1	282.8	325.7	275.9	453	127	85.0	71.8	59.0
<i>Robinia pseudoacacia</i>	27.9	61.9	219.1	166.7	288.1	325	143	107.5	103.0	65.6
<i>Alnus japonica</i>	15.1	69.6	126.9	90.5	149.0	211	123	85.0	73.2	58.4
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	13.7	21.4	282.9	154.5	89.4	253	197	65.0	104.6	68.5
<i>Zekova serrata</i>	4.0	122.7	359.1	216.0	355.8	286	251	105.0	111.8	89.1
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	7.5	115.5	177.1	169.1	410.5	254	137	110.0	53.6	63.9
<i>Pinus densiflora.</i>	20.2	79.7	211.3	65.1	229.5	190	119	100.0	11.1	56.6
Average	10.3	70.8			251.5			93.8		
Urban										
<i>Ginkgo biloba</i>	2.9	65.0	318.3	70.4	321.8	413	171	95.0	63.3	79.3
<i>Quercus acutissima</i>	11.9	82.9	220.2	68.4	181.7	274	104	77.5	48.8	71.5
<i>Cedrus deodara</i>	2.4	90.3	143.0	117.6	270.4	130	183	142.5	50.2	54.5
<i>Platanus occidentalis</i>	3.5	92.8	207.0	147.8	383.4	269	191	102.5	85.5	59.4
<i>Robinia pseudoacacia</i>	5.3	25.8	274.7	93.3	134.8	281	236	67.5	55.8	112.3
<i>Alnus japonica</i>	2.1	32.8	226.5	81.8	165.1	262	264	70.0	34.4	48.3
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	6.8	104.0	100.6	83.1	279.9	381	132	127.5	138.3	55.2
<i>Zekova serrata</i>	4.0	45.8	340.7	121.7	208.7	266	150	92.5	114.9	54.4
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	12.3	69.6	148.4	99.7	319.0	254	137	67.5	50.1	92.6
<i>Pinus densiflora.</i>	9.4	140.5	257.5	95.2	432.3	250	253	125.0	16.3	88.8
Average	6.1	75.0			269.8			96.8		

NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻가 직접 토양에 축적되거나 또는 대기 중에도 이들 이온들이 공단지역이나 도시지역에서 기타의 지역보다 더 많이 함유되어 있으므로(李壽煜과 張寬淳, 1994) 대기 중에 머물고 있다가 粉塵이나 강수와 함께 내려서 토양에 축적된 것으로 사료된다. Sulfate는 석탄이나 석유를 연소시킬 때 나오기도 하지만 공장에서 대부분 발생하므로 공단지역인 여천지역의 삼림 토양의 Sulfate함량이 552ppm, 울산지역의 것이 310ppm(李壽煜과 閔一植, 1989)으로 높은데 본 연구에서 도시지역(269.8ppm)이나 시외지역(251.5ppm)의 Sulfate함량이 여천지역이나 울산지역보다 낮기는 하나 도시지역인 광주지역과 시외지역은 공단지역이 아닌데도 상당히 높은 값을

나타내고 있다. 도시지역은 각종 오염원으로부터 오염된 결과이며 시외지역은 나주 비료공장에서 약 4km정도 떨어진 곳이어서 비료공장의 매연이 토양에 낙하하여 축적된 결과가 아닌가 사료된다.

도시지역과 시외지역의 수종별 뿌리(細根)와 잎에 함유된 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ 이온이 토양에 많이 함유되어 있다고 반드시 뿌리나 잎에 많지는 않았다(Table 1). 그러나 일반적으로 NO₃⁻, SO₄²⁻ 이온은 수종별로 보면 뿌리보다 잎에 더 많은 양이 함유되어 있었다. 산화질소는 자동차의 매연에서 대기 중에 공급되고 식물체의 질소 공급원이다. 질소는 Chlorophyll, Plant proteins와 Nucleic acids의 구성요소이고 황은 Amino acids

의 구성요소(Raymond와 Roy, 1990)로서 NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} 의 이온형태로 뿌리와 잎을 통해서 흡수되어 이용된다. 그런데 개잎갈나무와 소나무의 8종은 낙엽수이므로 잎이 1년생인데도 뿌리보다 잎이 더 많은 양의 NO_3^- , SO_4^{2-} 이온이 함유되어 있는 것은 대기중의 이들 이온이 잎의 기공을 통해서 흡수되어 잎에 축적되었으며 이들 이온들이 도시지역의 대기 중에 더 많기 때문에 도시지역 수종의 잎에 시외지역의 수종의 잎보다 더 많은 양이 흡수 축적되었다고 생각된다.

Table 1에서 NO_3^- 이온과 SO_4^{2-} 이온의 수종별로 잎에 함유된 함량의 크기 순위를 보면 다음과 같다.

시외지역 NO_3^- : 상수리나무>은행나무>개잎갈나무>느티나무>메타세쿼이아>양버즘나무>아까시나무>소나무>벚나무>오리나무

SO_4^{2-} : 양버즘나무>아까시나무>은행나무>느티나무>벚나무>메타세쿼이아>상수리나무>개잎갈나무>오리나무>소나무

도시지역 NO_3^- : 느티나무>은행나무>아까시나무>소나무>오리나무>상수리나무>양버즘나무>벚나무>개잎갈나무>메타세쿼이아

SO_4^{2-} : 은행나무>메타세쿼이아>벚나무>아까시나무>상수리나무>양버즘나무>느티나무>오리나무>소나무>개잎갈나무

수목이 잎에서 대기오염 물질을 흡수할 때 대기 중에 부유하고 있는 오염물질의 전체 흡수량이 중요하므로 수목의 葉量이 중요하다. 다시 말해서 수세가 강하여 葉量이 많고 單葉의 표면적이 넓어서 기공이 많이 분포하고 있는 수종이 더 많은 양의 오염물질을 흡수할 수 있기 때문이다. 위에서 보면 은행나무 잎은 SO_4^{2-} 가 도시지역에서 1순위로 413ppm을 함유하여 양지역에서 함량의 크기 순위가 1위에 머물고 있으며, NO_3^- 이온이나 SO_4^{2-} 이온의 함량이 양지역에서 모두 300ppm을 초과하고 있다. 상수리나무 잎은 시외지역에서 NO_3^- 이온의 함량이 1순위인 612.4ppm으로서 아주 많은 양을 함유하고 있으나 SO_4^{2-} 는 244ppm, 도시지역에서 NO_3^- 를 220.2ppm, SO_4^{2-} 이온을 274ppm으로서 중간 순위에 해당하고, 양버즘나무의 잎도 시외지역에서 SO_4^{2-} 이온의 함량이 1순위로 453ppm으로서 많은 양을 함유하고 있으나 NO_3^- 와 282.8ppm, 도시지역에서 NO_3^- 를 207ppm, SO_4^{2-} 를 269ppm을 함유하고 있어 중간 순위정도이다. 아까시나무의 잎은 시외지역에서

SO_4^{2-} 함량이 2순위로 325ppm의 높은 함량이나 NO_3^- 를 219.1ppm, 도시지역에서는 NO_3^- 를 274.7ppm, SO_4^{2-} 를 281ppm을 함유하고 있어 3순위, 4순위를 하고 있어 높은 함량이라고 볼 수 있다. 느티나무 잎은 도시지역에서 NO_3^- 의 함량이 1순위로 340.7ppm이나 SO_4^{2-} 의 함량이 266ppm으로서 순위가 7순위이나 시외지역에서 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 가 359.1ppm, 286ppm으로서 상당히 높은 함량으로 4순위이며 NO_3^- 는 도시지역보다 시외지역 것이 더 많음을 알 수 있다. 대전시 가로수인 백합나무, 은행나무, 양버즘나무의 잎에서 1820 - 4340ppm의 S가 검출되었다는 보고(오인혜, 1993)가 있는데 본 연구에서 도시지역이나 시외지역의 유황의 함유량에 비하면 대단히 많은 양이 가로수 잎에서 검출되었다.

Cl^- 의 함량은 SO_4^{2-} , NO_3^- 와는 달리 수종에 따라서 잎에 함유량이 많은 수종이 있는가 하면 뿌리에 함유량이 많은 수종이 있다. 은행나무, 상수리나무, 개잎갈나무, 벚나무, 소나무는 도시지역, 시외지역 다 같이 잎보다 뿌리에 더 많은 함유량을 갖고 있으나 양버즘나무, 메타세쿼이아, 느티나무는 도시지역, 시외지역 다 같이 뿌리보다 잎에 더 많이 Cl^- 이온을 함유하고 있다. 또 시외지역의 아까시나무, 오리나무 잎에 도시지역의 아까시나무, 오리나무는 뿌리에 함유량이 많다. 따라서 Cl^- 이온의 뿌리와 잎의 함량의 순서는 일반성을 찾을 수 없다. 은행나무와 상수리나무가 양 지역에서, 아까시나무가 도시지역에서 Cl^- 이온이 뿌리에 함량이 많으나 수목의 잎에 함유된 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 의 함량을 기준하여서 볼 때 도시 환경수나 가로수로 적합한 수종은 은행나무, 아까시나무, 느티나무, 상수리나무, 양버즘나무(Table 1)로서 이들은 모두 교목이며 수세가 강한 수종이고 葉量이 많은 수종인데 특히 은행나무는 가을 낙엽이 질 때 그 미관이 아름답고 아까시나무는 꽃 향기가 대단히 좋아 독일 등지에서 가로수로 특히 많이 식재되어 있는 수종이다.

2. 중금속 분석

중금속은 微量元素로서 토양이나 植物체에 정상적으로는 비교적 낮은 농도로 Ag^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} 등 2價 또는 3價의 陽이온이나 酸素와 결합해서 AsO_4^{3-} , $B(OH)_4^-$, CrO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , $HSeO_3^-$, SeO_4^{2-} 등

Oxyanion 상태로 존재한다. Co, Cu, Mn, Mo, Ni, V, Zn는 식물체에 필수 영양소인데 반해서 인체에 해를 주는 Cd, As, Pb, Hg, Cr, Se, 동물에 해를 주는 Cd, As, Pb, Hg, Cr, Se, Mo, Co 등이 있어(Pierzynski, 1994), 중금속의 존재가치를 한마디로 단언할 수 없으며 이들이 자연 환경내에서 존재하는 量적인 면과 이동경로를 규명하는 것이 대단히 중요하다고 생각한다.

1) 토양에 함유된 중금속

도시지역은 토성이 오리나무 식재지가 SCL이고 모두 SL로서 전체적으로 모래의 함량이 대단히 높은 반면 시외지역은 은행나무 식재지가 SL, 뽕나무와 소나무 식재지가 L, 개잎갈나무와 양버즘나무 식재지가 CL로서 모래의 함량이 높으나 그외 지역은 모래의 함량이 50%미만으로서 상대적으로 미사나 점토의 함량이 높다(Table 2). 점토는 표면적이 넓고 陰荷電을 띄고 있어서 陽이온을 띤 중금속의 흡착에 기여하기 때문에 토양이 점토함량이 많으면 중금속을 더 많이 함유하게 된다(Ma, 1997, Holmgren, 1993). 중금속이온은 大體로 陽ion으로 토양용액에 존재하므로 토양 교질물질의 표면의 陰이온의 밀도가 높으면 重金屬이 더 많이 吸着되는데(Ma, 1997) Table 3에서 보면 광물토양의 CEC는 7.42 - 22.40이었으며 도시토양보다 시외토양이 CEC값이 높았다. 유기물이 Colloid상태로서 Organo-mineral colloid complex로 결합되어 토양용액내 이온 농도를 지배하는데 중대한 역할을 하는데 시외토양이 도시

토양보다 유기물이 더 적기 때문에 Humic colloids가 더 적으리라 생각된다(Alloway, 1995). pH는 도시지역이나 시외지역을 차별할 수가 없었다. 중금속의 농작물에 이용은 여러 가지 토양 인자중 가장 중요한 것이 pH이며 pH 6.5 - 7을 경계로 하여 중금속의 생물학적 이용도가 감소하는데(Alloway 등, 1991) 본 연구에서 토양이 모두 산성 또는 극산성이어서 토양의 pH로 보아서 중금속 흡착이 어렵고 쉽게 용탈 또는 이동시킬 수 있는 상태이다(Table 3).

유기물이 도시지역 토양에서 약간 많으나 시외 지역 토양이 점토함량이 도시지역보다 많고 CEC가 도시지역 토양보다 높아서 重金屬의 吸着조건이 시외지역 토양이 더 좋았다. 그러나 일반적으로 도시지역 토양에 중금속 함량이 더 많았는데 이는 각종 汚染源이 도시지역이 더 많기 때문으로 사료된다. 토양내 중금속 분석 결과 Se, Co 및 As는 도시지역 토양이나 시외지역 토양에서 전혀 검출되지 않았고 Mo, Cd 역시 양 지역에서 극소량 검출되었다(Table 4, Table 5). Se가 地殼에서 0.05 - 0.09ppm, As가 화성암에서 1 - 15ppm, Mo가 1 - 40ppm, Cd가 화성암에서 0.1 - 0.3ppm, Co가 토양에서 0.05 - 300ppm 함유되어 있다고 보고된 것(Alloway, 1995)으로 보아 본 연구에서 소량 또는 전연 검출되지 않는 것으로 나타난 것은 모암에서 유래된 중금속이 소량인데다 이들 중 중금속으로 토양이 오염되지 않았고 모암에서 유래된 중금속이 하부로 용탈되었

Table 2. Particle size analyses of the soils.

Tree species	Rural				Urban			
	Sand	Silt	Clay	Texture	Sand	Silt	Clay	Texture
	%				%			
<i>Ginkgo biloba</i>	75.89	22.61	1.59	SL	72.76	19.32	7.92	SL
<i>Quercus acutissima</i>	32.39	54.18	13.43	SiL	59.44	24.64	15.92	SL
<i>Cedrus deodara</i>	50.18	23.56	26.26	CL	69.54	17.47	12.99	SL
<i>Platanus occidentalis</i>	49.33	28.03	22.64	CL	55.78	36.70	7.52	SL
<i>Robinia pseudoacacia</i>	17.12	50.35	32.53	SiCL	67.97	12.25	19.78	SL
<i>Alnus japonica</i>	43.82	38.85	17.33	LiC	71.50	5.45	23.05	SCL
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	17.24	51.58	31.18	SiC	64.46	17.11	18.43	SL
<i>Zekova serrata</i>	27.82	19.46	52.72	HC	72.38	20.98	6.64	SL
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	58.73	29.27	12.00	L	75.44	10.71	13.85	SL
<i>Pinus densiflora</i>	42.60	40.71	16.69	L	67.57	17.62	14.81	SL

Table 3. Selected physical and chemical properties of the soils

Tree species	pH(1:5 H ₂ O)	EC mmho/cm	OM %	CEC cmolc kg ⁻¹	Exchangeable cations(ppm)			
					Ca	Mg	Na	K
Rural								
<i>Ginkgo biloba</i>	5.40	0.30	3.44	14.00	0.730	0.185	0.024	0.099
<i>Quercus acutissima</i>	4.53	0.30	3.79	12.32	0.129	0.071	0.128	0.112
<i>Cedrus deodara</i>	6.32	0.60	3.34	22.40	0.234	0.241	0.093	0.252
<i>Platanus occidentalis</i>	4.86	0.35	5.19	10.36	0.325	0.173	0.018	0.414
<i>Robinia pseudoacacia</i>	4.29	0.55	4.59	12.88	0.272	0.043	0.013	0.193
<i>Alnus japonica</i>	4.29	0.45	3.54	13.44	0.315	0.135	0.005	0.151
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	4.99	0.35	3.14	12.32	1.042	0.155	0.026	0.553
<i>Zekova serrata</i>	4.47	0.35	2.15	16.24	0.292	0.091	0.021	0.305
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	4.89	0.30	3.79	10.64	0.446	0.246	0.022	0.480
<i>Pinus densiflora</i>	4.22	0.40	7.54	12.88	0.357	0.069	0.016	0.134
Average			4.05					
Urban								
<i>Ginkgo biloba</i>	6.16	0.70	5.94	7.56	1.465	0.079	0.016	0.228
<i>Quercus acutissima</i>	4.85	0.50	4.99	7.42	0.473	0.119	0.008	0.145
<i>Cedrus deodara</i>	4.82	1.20	6.44	14.28	2.394	0.223	0.067	0.024
<i>Platanus occidentalis</i>	6.78	0.40	7.79	12.46	2.454	0.262	0.036	0.277
<i>Robinia pseudoacacia</i>	4.57	0.30	2.20	7.42	0.160	0.027	0.001	0.162
<i>Alnus japonica</i>	4.56	0.25	2.20	11.20	0.267	0.051	0.017	0.109
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	4.59	0.60	5.74	10.36	1.391	0.128	0.011	0.161
<i>Zekova serrata</i>	5.99	0.30	3.54	7.28	2.281	0.145	0.019	0.107
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	4.71	0.50	6.44	11.20	0.385	0.108	0.018	0.167
<i>Pinus densiflora</i>	4.78	0.30	5.99	8.68	0.435	0.120	0.012	0.113
Average			5.13					

다는 증거이다. Cr, Ni는 도시지역 토양이나 시외지역 토양에서 더 많이 검출되었으나 도시지역 양버즘나무 식재지 토양에 Cr가 217.9ppm 축적되어 있어서 화성암에 100ppm 함유되어 있다는 보고로 미루어 보아(Pierzynski, 1994) Cr로 대단히 오염되어 있다고 생각된다.

Sn을 제외하고는 Mo, Zn, Cd, Pb, Mn, Cr, V, Cu, Ni 모두가 도시지역 토양에서 더 많았다(Table 4, Table 5). 도시지역이나 시외지역은 화강암을 모암으로 하는 토양이어서 모암에서 얻어지는 중금속의 양적인 차이는 양 지역에서 나타나지 않으리라 생각해 볼 때 도시지역 토양이 중금속으로 오염된 결과로 사료된다. 즉 도시지역은 화석연료의 연소, 하수 폐기물 및 생활쓰레

기 연소, Gasoline 및 Diesel 연소 결과 중금속이 대기 중에 浮游하다가 粉塵이나 강수와 함께 강하하여 토양에 축적된 결과로서 도시 환경에서 찾아 볼 수 있는 오염원들에 의해서 오염된 결과이다. 화석연료의 연소에서 Zn, V, Mo, Cr, Cd, Ni가 생활하수 및 쓰레기에서 Se, Mo, Cd, As, Zn, Pb, Cu, 자동차 Brake linings에서 Cr과 내연기관 연소에서 Pb가 공중에 발산되어(Alloway, 1995) 분진이나 강수와 함께 강하한 것이 도시토양에 축적되어 이들의 함량이 많게 나타난 것으로 생각된다. 중금속의 함량은 시외지역 토양이나 도시지역 토양이 Mn>Zn>V>Cr>Pb>Ni>Cu>Sn>Mo>Cd 순이고 Se, Co, As는 전연 검출되지 않았다(Table 4, Table 5).

Table 4. Concentrations of the heavy metals studied in urban area.

Tree species	Samples	Elements of heavy metals(ppm)									
		Sn	Mo	Zn	Cd	Pb	Mn	Cr	V	Cu	Ni
<i>Ginkgo biloba</i>	soils	3.690	2.559	273.11	0.412	69.36	699.59	47.32	84.53	47.32	22.13
	leaf			14.18			23.70			2.05	
	root			123.53			69.30	22.26	8.56	42.41	7.78
<i>Quercus acutissima</i>	soils	5.875	2.404	199.82	0.479	31.06	393.64	30.02	61.13	9.38	13.42
	leaf			39.48			164.55	3.94		5.59	
	root			106.97			24.63	10.11		4.73	
<i>Cedrus deodara</i>	soils	6.547	2.020	289.68	0.495	45.22	778.88	48.10	130.14	21.67	19.52
	leaf			59.70			615.54	4.72		3.58	
	root			45.25			261.24	5.58	0.54	5.86	
<i>Platanus occidentalis</i>	soils	4.394	2.382	268.58	0.523	52.87	843.29	217.90	141.53	53.59	64.87
	leaf			17.82			89.44	7.50		4.22	
	root			31.78			54.09	35.65	6.34	14.39	
<i>Robinia pseudoacacia</i>	soils	7.513	2.484	156.63	0.598	20.23	506.83	30.12	67.48	8.67	15.61
	leaf			22.20			518.53	4.29		4.01	
	root			21.74			52.64	7.81	2.00	4.14	
<i>Alnus japonica</i>	soils	4.404	2.423	54.62	0.520	37.94	404.16	23.96	62.93	7.23	14.00
	leaf			39.50			134.73	3.81		4.69	
	root			27.83			149.41	7.29		6.16	
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	soils	3.557	2.712	97.35	0.664	64.71	578.41	67.48	85.53	27.60	25.09
	leaf			94.00			309.02	4.64		4.59	
	root			116.80			377.07	9.05		7.19	
<i>Zekova serrata</i>	soils	6.278	2.754	67.49	7.103	33.66	880.44	42.33	164.06	13.55	17.26
	leaf			19.36			778.47	4.93		2.27	
	root			110.60			181.32	12.33	21.25	10.81	
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	soils	3.665	2.532	56.85	0.480	50.13	472.54	26.84	65.74	8.67	12.37
	leaf			35.30			118.07	4.27		4.48	
	root			69.35			81.00	3.94		3.12	
<i>Pinus densiflora</i>	soils	4.080	2.698	175.88	0.548	32.42	434.52	31.48	64.89	9.62	14.38
	leaf			100.13			593.71			2.90	
	root			110.26			118.00	41.92		19.56	15.58
Average in soils		5.83	2.94	164.00	1.63	43.8	599.23	56.55	86.2	20.7	21.7

* Se, Co, As ; nd

따라서 토양에 중금속의 함량 순위는 시외지역이 나 도시지역이 같았으며 Zn이나 Mn이 도시지역이나 시외지역에서 많은 양이 검출되었는데 모암에 함유량이 많기 때문으로 생각되며 도시지역이 Mn과 Zn이 더 많았다. 토양에는 일반적으로 Zn과 Mn이 다량 함유되어 있는데(李承雨와 李壽燦, 1995) 모암에서 유래된 것으로 생각할 수 있는데 이와 같이 많은 양이 모암에서 유래된 것으로 생각할 수 있는 것은 Zn이 토양에서 10-300ppm, Mn이 화성암이나 변성암에서 200-1,000ppm과 같이 많이 함유되었다는 보고(Alloway, 1995)에서 입증된다. Kaolinite나 Mont-

morillonite는 수착력의 크기가 $Cd \geq Zn > Ni$ 의 순위라는 보고(Puls, 1988)에서 Cd와 Zn의 수착력은 거의 같다는 것을 알 수 있고 Zn과 Cd는 지구 화학적인 관련이 있어 Zn에 오염되어 있는 토양은 Cd에도 오염되며 Cd는 디젤연료의 연소에서 Zn과 Cd는 자동차의 타이어의 마모에서 유래되기도 하는데(Pierzynski, 1994) 본 연구에서는 Cd가 도시지역이나 시외지역에서 함량이 미량인 것으로 보아 Cd가 모암의 함량이 화성암에서 0.1-0.3ppm으로 적기 때문으로 생각된다.

2) 뿌리와 잎에 함유된 중금속

Soil-plant system은 외부로부터 汚染물질의

Table 5. Concentrations of the heavy metals studied in rural area.

Tree species	Samples	Elements of heavy metals (ppm)									
		Sn	Mo	Zn	Cd	Pb	Mn	Cr	V	Cu	Ni
<i>Ginkgo biloba</i>	soils	12.554	3.511	118.83	2.116	20.92	479.14	21.53	6.30	6.25	10.15
	leaf						38.55	6.91			3.35
	root			112.19			201.15	6.04	4.51	41.72	
<i>Quercus acutissima</i>	soils	4.072	2.073	70.63	0.704	11.48	349.82	36.77	6.32	7.92	14.34
	leaf			13.34			2578.0	2.87		5.72	3.57
	root			14.14			152.44	8.61	3.41	5.99	
<i>Cedrus deodara</i>	soils	5.195	1.641	187.34	0.488	35.66	470.54	38.10	56.09	10.76	16.60
	leaf			15.97			1069.0	5.56		2.26	3.56
	root			20.59			91.40	7.49	7.27	9.89	
<i>Platanus occidentalis</i>	soils	9.654	2.888	227.34	1.758	2.99	282.29	38.59	81.09	8.28	16.39
	leaf			18.82			958.37	8.18		4.58	6.29
	root			50.99			284.44	6.46	4.54	7.91	
<i>Robinia pseudoacacia</i>	soils	4.368	2.753	54.12	0.502	23.69	296.06	54.65	55.61	8.78	18.06
	leaf			12.35		3.82	611.32	6.19		2.56	3.82
	root			61.24			96.35	6.78	2.97	6.36	
<i>Alnus japonica</i>	soils	5.074	3.457	51.62	0.644	11.48	361.94	44.66	60.98	8.30	15.29
	leaf			45.72			2511.0	5.49		11.59	5.43
	root			36.56			285.03	7.57	5.00	4.55	
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	soils	5.498	3.234	270.19	1.866	21.99	630.60	81.18	87.77	12.63	25.51
	leaf			20.10			2095.3	7.21		1.91	4.31
	root			23.65			281.69	12.78	3.64	9.02	2.67
<i>Zekova serrata</i>	soils	3.750	2.722	126.17	0.559	14.85	279.89	71.95	54.97	11.98	23.35
	leaf			12.82			559.41	5.17		2.57	
	root			24.86			181.08	8.52	4.02	9.06	4.99
<i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i>	soils	3.491	2.153	57.72	0.357	11.00	439.30	43.89	74.64	8.73	17.14
	leaf			11.90			1106.6	4.39		4.44	3.62
	root			64.07			100.72	7.42	5.51	6.42	
<i>Pinus densiflora</i>	soils	5.383	2.724	62.12	0.567	31.95	693.15	48.80	46.04	8.67	17.89
	leaf			16.96			1620.4	3.82		2.14	2.94
	root			18.10			230.57	4.64	1.51	5.88	3.46
Average in soils		5.90	2.72	122.61	0.96	18.6	428.27	48.00	52.9	9.23	17.47

*. Se, Co, As ; nd

유입, 비료, 농약의 사용을 통해서 중금속이 토양에 유입하고 식물의 수확, 溶脫, 浸蝕, 취발에 의해서 중금속이 토양으로부터 流失되는 開放된 생태계이다. 식물체에 흡수되는 오염물질이나 중금속은 토양으로부터 뿌리를 통해서 흡수되기도 하나 잎의 기공을 통해서 흡수되기도 한다. 이들의 흡수는 수종, 용질의 상태, 上皮층의 두께, 잎의 연령, 영양 상태, Stomata guard cell의 존재, 잎 표면의 습도, 용질의 성질 등에 따라 다르다(Alloway, 1995). 토양 용액내에 함유된 모든 원소나 분자는 Mass flow diffusion과 Root interception 중 어떤 Mechanism이건 간에 이들

이 뿌리 표면에 이르러서 흡수되어 식물체에 공급되는데 토양용액에 있는 가동성 이온의 양과 농도와 더욱이 뿌리의 양이 식물체의 흡수력을 대체로 결정한다고 보고(Alloway, 1995)하고 있는데 본 연구에서도 토양에 많은 Mn과 Zn이 뿌리나 잎에도 그 함량이 많은 것은 이를 입증한다고 할 수 있다(Table 4, Table 5). 뿌리에 의한 중금속의 흡수는 Passive uptake와 Active uptake로 나누어지는데 Passive uptake는 Ions의 Diffusion으로서 토양용액에서 뿌리의 Endodermis에 Diffusion되는 경우로서 Pb가 Passive uptake에 속하며 Cu, Mo, Zn이 Active meta-

bolic uptake와 Passive uptake에 속한다(Alloway, 1995). 식물체가 뿌리에서 중금속을 흡수할 때 Antagonism과 Synergism이 있는데 Mn과 Zn은 서로 Antagonism관계에 있어 뿌리에서 흡수를 서로 방해한다는 보고(Alloway, 1995)와는 달리 Zn과 Mn은 토양에 함량이 많기도 하지만 뿌리나 잎에 함유량이 많은 것으로 보아(Table 4, Table 5) 본 연구에서는 Mn과 Zn의 Antagonism이 있다고 볼 수는 없다.

토양에 함유된 중금속 양의 크기는 도시지역이나 시외지역에서 $Mn > Zn > V > Cr > Pb > Ni > Cu > Sn > Mo > Cd$ 의 순서이며, 뿌리나 잎에 축적된 순위를 보면 $Mn > Zn > Cr > Cu > V > Ni$ 로 Mn과 Zn은 뿌리나 잎에 다량 축적되어 있고, V의 순위가 잎에서는 토양에서 보다 하위로 되고 다른 중금속은 토양에 함유된 순위와 같았다. Ni는 시외지역에서 은행나무, 상수리나무, 개잎갈나무, 양버즘나무, 아까시나무, 오리나무, 뽕나무 잎에서만 축적량이 검출되고 뿌리에서는 검출되지 않았으며 메타세쿼이아, 소나무는 잎과 뿌리에서 검출되었다. 도시지역에서는 은행나무와 소나무 뿌리에서 Ni가 검출되었고 다른 나무들의 잎이나 뿌리에서는 전연 검출되지 않았다(Table 4, Table 5). V은 도시지역의 상수리나무, 오리나무, 메타세쿼이아, 뽕나무, 소나무의 잎이나 뿌리에서 전연 검출되지 않았으나, 도시지역의 은행나무, 개잎갈나무, 아까시나무, 느티나무, 상수리나무, 오리나무, 메타세쿼이아와 시외지역의 전 수종의 뿌리에서는 상당량의 V이 검출되었으나 잎에서는 전연 검출되지 않았다. 따라서 V은 잎에서는 전연 흡수되지 않고 뿌리에서 흡수된 것이 V이 식물체의 상부까지 이동되지 않기 때문에 잎에서는 V이 검출되지 않은 것으로 생각된다.

Se, Co와 As는 도시지역이나 시외지역의 토양에 전연 함유되지 않았고 뿌리나 잎에서도 검출되지 않았다. 그러나 토양 내에 상당량 축적되어 있거나 미량이지만 축적되어 있는 Sn, Mo, Cd, Pb, Co는 시외지역이나 도시지역의 토양에는 함유되어 있어도 뿌리나 잎에서 검출되지 않았다(Table 4, Table 5). 대전시 가로수 은행나무, 백합나무, 양버즘나무의 잎에서 Pb가 1.95 - 246.80ppm, Cd가 2.00 - 20.50ppm이 검출되었다는 보고(오인혜, 1993)가 있는데 본 연구에서는 Pb나 Cd가 뿌리나 잎에서 전연 검출되지 않았다. 이들의 토양에 축적된 평균 함량을 보면 시

외지역에서 평균값이 Pb 18.6ppm, Sn 5.90ppm, Co 3.88ppm, Mo 2.72ppm, Cd 0.96ppm, 도시지역에서 평균값이 Pb 43.8ppm, Sn 5.83ppm, Mo 2.94ppm, Cd 1.63ppm으로 Pb는 축적량이 많은 양인데도 식물체가 흡수하지 않았다. 특히 Mo는 식물체의 미량원소인데 뿌리나 잎에서 검출되지 않았으며, Pb의 축적량을 도시지역과 시외지역을 비교해 보면 시외지역 토양에 축적된 Pb양의 235.5%가 도시지역 토양에 축적되어 있는데 일본에서 1972년 무연 휘발유를 시판한 이래 Gasoline에 Pb의 함량이 적게 함유되어 있으나 소량이지만 Pb가 함유되어 있어(Nriagu, 1990) Gasoline의 연소에 의한 축적으로 생각되며 Pb는 토양에 축적되면 이동성이 거의 없고 식물체에 흡수나 순환이 되지 않는다는 보고(Verry와 Verinett 1991; 金樾堦 등, 1999)가 있는데 본 연구에서도 Pb가 토양에 축적량이 많으나 뿌리나 잎에서 검출되지 않은 것으로 보아 Pb가 흡수되지 않은 것으로 생각된다. 또 Sn, Co, Mo, Cd도 역시 도시, 시외지역에서 본 연구에 사용된 10여 수종의 뿌리나 잎에 없는 것으로 보아 수목의 뿌리에 흡수가 어려운 중금속으로 생각된다.

식물체내에서 금속이온의 이동량이나 범위는 중금속에 따라 다르고 식물의 기관과 식물체의 연령에 따라 다른데(Alloway, 1995), 잎과 뿌리에 함유되어 있는 중금속은 Zn, Mn, Cr, Cu인데(Table 4, Table 5) 특이한 것은 시외지역이 은행나무 잎에 Zn, Cu가 검출되지 않았다. Zn, Cu, Cr는 잎에 보다 뿌리에 축적량이 많고 Mn은 뿌리보다 잎에 더 많은 것으로 보아 Mn은 잎에서 흡수도 하겠지만 뿌리에서 흡수된 것이 식물체의 상부까지 쉽게 이동할 수 있는 것으로 생각되는데 이에 대한 더 깊은 연구가 요청된다. Mn, Zn, Cd, Se는 식물체의 상부까지 쉽게 이동되고 Ni, Co와 Cu는 이동성이 중간정도이며 Cr, Pb, Hg는 이동성이 극히 낮다는 Chancy와 Giordano의 보고(Alloway, 1995)와 거의 일치한다. 다만 본 연구에서는 Cd가 이동성이 높는데도 토양에는 함유되어 있는데 수목의 뿌리나 잎에는 전연 검출되지 않았다.

結 論

광주시 가로수나 녹지대 조성수종인 은행나무, 상수리나무, 개잎갈나무, 양버즘나무, 아까시나

무, 오리나무, 메타세쿼이아, 느티나무, 뽕나무, 소나무와 대조구로서 광주에서 23km 떨어진 전남 나주시 산포면 산재리 소재 전라남도 산림환경연구소 구내에 생육하고 있는 같은 수종의 뿌리, 잎 그리고 이들이 생육하고 있는 토양에 함유된 대기오염물질인 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 과 중금속인 Se, Mo, Zn, Cd, Pb, Mn, Cr, Co, V, As, Cu, Ni를 측정 비교 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토양에 함유된 대기오염물질의 평균값은 시외 지역 NO_3^- 가 70.8ppm, SO_4^{2-} 가 251.5ppm, Cl^- 가 93.8ppm이고 도시지역의 NO_3^- 가 75.0ppm, SO_4^{2-} 가 269.8ppm, Cl^- 가 96.8ppm으로서 도시지역의 토양에 이들 음이온이 더 많이 함유되어 있는데 이는 화석연료의 연소와 자동차 등에서 배출되는 질소산화물, 음식폐기물, 산업폐기물, 각종 폐기물의 연소로 직접적으로 토양에 축적되거나 대기에 머물고 있다가 강하하여 토양에 축적된 결과로 사료된다.
2. SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 이온들은 토양에 많이 함유되어 있다고 해서 수목의 뿌리나 잎에 많이 함유되어 있지 않다.
3. SO_4^{2-} , NO_3^- 이온의 함유량은 뿌리보다 잎에 더 많다. 개잎갈나무, 소나무를 제외한 8수종 모두 1년생 이인데도 뿌리보다 잎에 많은 것은 대기 중의 SO_4^{2-} , NO_3^- 가 잎의 기공을 통해서 흡수 축적되었으리라 생각된다. 또 도시지역의 대기 중에 이들의 함량이 더 많기 때문에 도시지역 수종의 잎에 함량이 더 많다.
4. Cl^- 이온은 은행나무, 상수리나무, 개잎갈나무, 뽕나무, 소나무에 있어서 도시지역과 시외지역 다 같이 잎보다 뿌리에 더 많은 함량을 갖고 있는데 나머지 5개 수종 중 양버즘나무, 메타세쿼이아, 느티나무는 도시지역과 시외지역 다 같이 잎에 더 많이 함유되어 있다. 따라서 Cl^- 이온의 뿌리와 잎의 함량 크기는 일반성이 없다.
5. SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 이온의 흡수량은 도시지역이나 시외지역에서 은행나무, 아까시나무, 느티나무, 상수리나무, 양버즘나무가 우세하며 이들은 모두 교목이며 수세가 강한 수종이고 열량이 많은 수종이므로 대기오염물질의 흡수량도 많으리라 생각되므로 도시 가로수나 환경수로 적합하다고 생각된다.
6. Se, Co와 As는 도시지역이나 시외지역 토양

에서 전연 검출되지 않았으며 Mo, Cd는 양 지역에서 微量검출되었다. 토양에 함유된 중금속 함유량의 크기는 도시지역이나 시외지역에서 다 같이 $Mn > Zn > V > Cr > Pb > Ni > Cu > Sn > Mo > Cd$ 의 순이다. 도시지역이나 시외지역에서 Mn과 Zn이 많이 검출되었는데 모암에 함량이 많기 때문으로 사료된다.

7. Zn, Cd, Mn, Pb, Cr, V, Cu, Ni은 Sn을 제외하고 도시토양에서 더 많은 양이 검출되었는데 도시지역이나 시외지역이 화강암을 모암으로 하고 있고 모암이 같기 때문에 화석연료의 연소, 생활하수, 음식물 쓰레기, 내연기관의 연소, 자동차 Brake linings에 의한 오염의 결과로 사료된다.
8. 뿌리와 잎에 축적된 중금속의 순위는 $Mn > Zn > Cr > Cu > V > Ni$ 로서 V가 토양의 함량순위보다 하위로 떨어지고 다른 중금속은 토양의 순위와 같다. Mn과 Zn은 토양에서와 같이 뿌리나 잎에 함량이 많아 본 연구에서는 Mn과 Zn 사이에 흡수를 서로 방해하는 Antagonism을 인정할 수 없다.
9. Sn, Mo, Cd, Pb는 도시지역이나 시외지역에서 상당량되는데 뿌리나 잎에서 검출되지 않는 것은 Pb는 이동성이 거의 없고 흡수성이 낮음을 알 수 있으며 Sn, Mo, Cd도 흡수가 어려운 중금속으로 생각된다. 그러나 Mo는 식물체의 미량원소인데 뿌리나 잎에서 검출되지 않았는데 추후 연구과제라고 생각한다.
10. 뿌리와 잎에 함유되어 있는 중금속 중 Zn, Cr, Cu는 잎보다 뿌리에 축적량이 많고 Mn은 뿌리보다 잎에 더 많은 것은 Mn은 잎에서 흡수도 하겠지만 뿌리에서 흡수된 것이 상부까지 쉽게 이동하여 잎에 축적된 것으로 사료되며 이에 대한 확실한 Mechanism의 구명이 요청된다.
11. V은 도시지역의 상수리나무, 오리나무, 메타세쿼이아, 뽕나무, 소나무의 뿌리와 잎에서 전연 검출되지 않았으나 은행나무, 개잎갈나무, 양버즘나무, 아까시나무, 느티나무, 그리고 시외지역 전 수종의 뿌리에서 상당량의 V이 검출되었으나 잎에서는 검출되지 않았다. 따라서 V은 잎에서 흡수되지 않고 뿌리에서 흡수된 것이 식물체의 상부까지 이동되지 않은 결과로 생각된다.

12. 도시지역이나 시외지역의 수목의 뿌리와 잎에 흡수되어 분석 검출된 중금속은 Mn, Zn, Cr, Cu, V, Ni인데 중금속의 흡수력이 특별히 월등한 수종을 인정할 수 없었다.

引用 文 獻

1. 金榕埴·柳鼎煥·邊載京·鄭鎮炫·李鳳洙. 1999. 서울시 산림토양내 중금속 분포. 한국임학회지. 88(1) : 111-116.
2. 오인혜. 1993. 가로수 잎의 S 및 중금속 함량에 대한 대기오염도 추정. 한국생태학회지. 16(2) : 199-208.
3. 李壽煜·閔一植. 1989. 대기오염 및 산성우가 산림생태계의 토양산도 및 양료 분포에 미치는 영향. 한국임학회지. 78(1) : 11-25.
4. 李壽煜·張寬淳. 1994. 산성우에 대한 산림생태계의 민감도 및 자정기능(1) - 강우의 산성 화도와 식생 활력도(TVI)를 중심으로 -. 한국임학회지. 83(4) : 460-472.
5. 李承兩·李壽煜. 1995. 울산 공단주변 산림토양 산성화가 산림생태계의 양료와 중금속 분포에 미치는 영향. 한국임학회지. 84(3) : 286-298.
6. 曹熙料·安起完. 1999. 삼림토양에서 생성된 Chlorites와 여러 가지 Sillicate Clays의 微量 元素의 濃度에 關한 研究. 전남대 연습림 보고. 15 : 23-42
7. Aber, J.D and J.M. Melillo. 1991. Terrestrial Ecosystems. Saunders College Publishing. USA. 429pp.
8. Alloway, B.J. and A.P. Jackson. 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludge amended soils. The Science of the Total Environment 100 : 151-176.
9. Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic & Professional. Glasgow. UK. 368pp.
10. Holmgren, G.G.S., M.W. Meyer, R.L. Chaney and R.B. Daniels. 1993. Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America. J. Environ. Qual. 22 : 335-348.
11. Ma, L.Q., F. Tan and W.G. Harris. 1997. Concentrations and distributions of eleven metals in Florida soils. J. Environ. Qual. 26 : 796-775.
12. Nriagu. J.O. 1990. The rise and fall of leaded gasoline. The Science of Total Environment. 92 : 13-28.
13. Pierzynski, G.M., J.T. Sims and G.F. Vance. 1994. Soils and Environmental Quality. Lewis Publishers. Florida. USA. 313pp.
14. Plus, R.W. and H.L. Bohn. 1988. Sorption of cadmium, nickel, and zinc by kaolinite and montmorillonite suspensions. Soil Sci. Soc. Am. J. 52 : 1289-1292.
15. Pritchett, W.L. and R.L. Fisher. 1987. Properties and Management of Forest Soils. John Wiley & Sons. New York. 494pp.
16. Raymond, W.M. and L.D. Roy. 1990. Soils (6th ed.) : An Introduction to Soils and Plant Growth. Prentice-Hall. USA. 768pp.
17. Verry, E.S. and S.J. Vermette. 1991. The deposition and fate of trace metals in our environment. USDA-Forest Service North Central Forest Experiment Station. General Technical Report. 1-8.