

山林內 降雨 및 土壤 重金屬의 關聯性에 關한 研究*

李總授¹ · 金鍾甲²

Studies on the Relation of Heavy Metals between Rainfall and Soil in the Forest*

Chong-Kyu Lee¹ and Jong-Kab Kim²

要 約

대기중의 오염물질의 영향에 의한 산림내 강우와 토양의 중금속 분석을 공단지역, 도시지역, 일반 지역으로 구분하여, 강우와 토양 중금속의 관련성을 평가하기 위한 목적으로 수행하였다. 해송림과 참나무림에 있어서 임외우, 수관통과우, 수간류의 중금속 함량은 공단지역이 Zn>Cu>Pb>Cd 순이었고, 도시지역이 Zn>Pb>Cu>Cd 순으로 분석되었다. 공단지역은 모든 중금속이 높게 검출되었고, 강우별로 수간류에서 높게 조사되었다. 수간으로부터 거리별 토양의 중금속은 수간으로부터 20cm 이내의 토양에서 가장 높았고, 지역별로 공단지역이 Zn>Cu>Pb>Cd 순이었고, 도시지역은 Zn>Pb>Cu>Cd 순으로 검출되었다.

강우와 토양의 성분은 정의 상관이었고, 회귀식은 Zn이 $Y=7.79+4.78X(r=0.8685^{**})$, Pb는 $Y=7.90+4.53X(r=0.7242^*)$ 였고, 그리고 Cu는 $Y=3.89+3.91X(r=0.8658^{**})$ 로 추정되었다.

ABSTRACT

The study was carried out to investigate heavy metals of rainfall and soil at industrial, urban and rural area, and to estimate the relationship between rainfall and soil. Heavy metals of stemflow, throughfall and rainfall in *Pinus thunbergii* and *Quercus* spp were ordered Zn>Cu>Pb>Cd in industrial area, and Zn>Pb>Cu>Cd in urban area.

All heavy metals were detected high in industrial areas, and especially those of industrial area were high in stemflow. Heavy metals in soil by distance from stem were highest in 20cm distance from stem. Soil heavy metals in survey sites were the same order as those of rainfall. The correlation of heavy metals between rainfall and soil were positive, the regression obtained was as follows; Zn was $Y=7.79+4.78X(r=0.8685^{**})$, Pb was $Y=7.90+4.53X(r=0.7242^*)$ and Cu was $Y=3.89+3.91X(r=0.8658^{**})$.

Key word : heavy metals, stemflow, throughfall, rainfall, *Pinus thunbergii*, *Quercus spp*

緒 論

인구의 증가와 함께 중화학 공장의 가동, 교통 수단, 난방, 취사에 의한 오염물질 배출이 점차

심각한 문제로 대두되고 있으며, 대기오염은 대기 중 SOx, NOx, O₃ 등 분진의 농도와 강우의 산성화에 의한 토양의 산성화, 토양의 중금속 농도의 증가로 인하여 인간과 동식물, 건축물의 부식 등으로 인간의 생존과 생태계의 황폐화에 위협을

* 接受 1998年 8月 14日 Received on August 14, 1998.

¹ 慶尙南度山林環境研究院 Forest Environment Research Institute of Gyeongsangnam-do, Chinju, 660-870, Korea.

² 慶尙大學校 山林科學部 Faculty of Forest Science, Gyeongsang Nat'l Univ., Chinju, 660-701, Korea.

주고 있다. 오염원은 크게 공장의 배출물, 자동차 배기가스, 생활 활동의 결과로 배출되는 오물 및 가스들로 분류될 수 있다(Ichiro and Kitagishi, 1982). 공장과 자동차 배기가스로부터 발생하는 납, 유황과 타이어의 마모 잔유물에서 나오는 카드뮴은 생물에 큰 피해를 주며(Lagerwerff and Specht, 1970), 가로수의 잎과 그 표토에는 Pb, Zn, Cu, Cd 등이 비교적 높은 농도로 축적되어 있다(辰己, 1973). 대기중 중금속은 강우에 의해 운반되어 토양내 축적되었다가 식물체에 흡수되거나, 또는 직접 흡수되면 세포내 원형질의 단백질과 결합하여 세포를 파괴시키고, 효소의 작용을 억제하며, 호흡과 관련된 여러 가지 생리적 작용을 저해하며(Cha and Kim, 1975), 토양, 식물 및 동물에 축적된 Pb와 Cd 등 중금속이 생물체에 미치는 영향에 대해서 계속 연구되고 있다(金鍾甲, 1992; 金点秀, 1990; Park and Kim, 1983). 또한 산성 토양에서의 식물의 생육 저하는 토양에 생성된 중금속 성분의 식물체내 과도한 흡수가 생육 저하의 원인이며(茅野, 1982), 토양의 산성화는 토양내 존재하는 식물생장에 유해한 중금속이 용출되며(伊豆田, 1992), 식물에 흡수되는 중금속은 토양 pH가 낮은 경우에 많이 나타난다(洗等, 1988).

토양의 중금속 연구(유정환 등, 1995; 李承雨와 李壽煜, 1995; 李瑞來와 宋基俊, 1985; 1986; 伊豆田, 1992; Ulrich et al, 1980), 토양과 관련된 수목, 수피, 엽 등의 식물체 중금속 연구(오인혜, 1993; 韓康完과 崔賢玉, 1992; 張楠基等, 1990; 김면섭과 이광국, 1988)가 있고, 동물의 중금속 연구(崔在植, 1991; 이해병과 정완호, 1987)를 수행하였지만 강우에 의한 토양 중금속의 관련성에 관한 연구 수행이 없었다.

본 연구는 대기중의 오염물질의 영향으로 산성비의 영향을 받고 있는 산림에 대하여 공단지역, 도시지역, 일반지역으로 구분하여 해송림과 참나무림에 내리는 강우를 수관통과우, 수간류, 임의우에 대한 중금속 성분과 토양중에 함유된 중금속 분석을 실시하여 관련성을 구명하고 산림생태계 피해대책 수립에 필요한 기초자료로 활용코자 실시하였다.

材料 및 方法

1. 조사지 선정

조사지역으로 공단지역은 대기오염에 의한 산

림생태계에 심각한 영향을 주어 산림내 수목과 초본류의 파괴가 진행되고 있는 울산광역시 온산공단지역 산림을 선정하였고, 도시지역은 인구과 밀과 최근 들어 자동차의 증가로 심각한 교통체증이 발생하여 대기오염의 배출이 극심한 지역으로서 지금까지 산림내 산성강하물의 조사가 없는 부산광역시 사하구 산림을 선정하였다. 이들 오염지역과 비교 분석하기 위하여 대조지역으로서 경상남도산림환경연구원 시험림을 일반지역의 대상으로 선정하였다.

2. 조사수종 선정

수관통과우와 수간류의 조사를 위한 공시수종으로 침엽수는 해송(*Pinus thunbergii*)을 활엽수는 참나무류(*Quercus spp*)를 선정하였다.

조사구모는 산림내 수목의 수관에 1차적으로 차단된 후 임지내로 유입되는 수관통과우는 지역별, 수종별 3반복으로 18개소에 설치하였고, 수목의 수관에 차단된 후 수간을 타고 임지내로 유입되는 수간류는 해송림과 참나무림 중에서 수고와 흉고직경이 평균에 해당되는 수목을 지역별, 수종별 3반복으로 18본을 선정하였다.

3. 강우의 채취 및 분석

강우의 채취 방법은 산성우조사법(環境廳, 1993)에 의거 포집하였는데, 수관통과우와 임의우는 20ℓ의 폴리에틸렌 용기에 이물질의 유입을 막기 위하여 그물 망을 씌워 이용하였고, 임의우는 주위에 건물이나 수목 등의 장애물이 없는 곳에서 채취장치를 지상 60cm 높이에 철근으로 고정하였다. 수간류는 수목에 거즈를 둘러 채취하는 거즈식으로 지상 2m의 높이에서 거즈를 아래로 향하여 잡아 거즈 끝을 고무호스로 연결하여 폴리에틸렌 용기에 접속하고 외부의 이물질 유입을 막기 위하여 실리콘으로 고무호스와 용기의 연결부위를 밀봉하여 채취하였다.

조사기간은 1997년 1월부터 12월까지 3월, 6월, 8월, 12월의 4회의 강우를 해송림과 참나무림을 구분하여, 수관통과우, 수간류, 임의우는 익일에 강우시료를 200ml씩 채취하였다. 채취 시료는 화학성분의 변화를 최소화하기 위하여 실험용으로 제작된 플라스틱 용기에 담아 실험실로 옮겨서 냉장고(4℃ 이하)에 보관하여 여과후 분석용 시료로 하였다. 채취된 강우의 중금속분석은 ICP-AES로 측정하였다.

4. 토양의 중금속 분석

조사지역과 수종별로 산성강하물이 토양에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수목의 수간을 중심으로 20cm 이내의 토양, 1m의 토양, 수관폭의 끝 토양 그리고 조사지점 주위의 수목이 생립하지 않는 임지의 토양을 A, B층을 혼합하여 500g씩 채취하여 ICP-AES로 중금속을 분석하였다(金東秀, 1988).

5. 통계처리

조사된 자료의 통계처리는 통계 package SAS system을 이용하여 토양 및 강우의 중금속 함량의 차이를 검정하기 위하여 ANOVA를 실시하고 유의차가 인정되면 각 조사지의 평균값의 차이를 Alpha=0.05의 범주에서 Duncan's multiple range test에 의하여 비교하였고, 강우와 토양 중금속간의 상관관계를 분석후 회귀분석을 실시하여 회귀식을 추정하였다.

結果 및 考察

1. 수관통과우, 수간류, 임외우의 중금속 분석

Fig. 1은 조사지역별, 수종별로 채취한 수관 통과우, 수간류, 임외우의 중금속을 분석한 결과로서, Zn의 농도는 공단지역에서 높았고, 도시지역, 일반지역 순서였다. 수종별 농도는 해송림의 수간류에서 모든 지역이 높았으나, 참나무림에서는 낮았다. 이것은 대기중 중금속 성분이 수목의 잎과 줄기에 부착되어 있다가 강우시 씻겨 토양으로 유입된다(辰己, 1973)는 결과에 기인한다. Pb, Cd, Cu는 공단지역에서 높은 농도로 검출되었지만 도시지역과 일반지역은 낮은 농도였으며, 유의차가 인정되었다(P<0.05). 그러나 Cd은 일반지역 강우에서는 검출되지 않았다.

강우분석에 의한 중금속 농도는 공단지역에서 Zn>Cu>Pb>Cd 순이었고, 도시지역에서 Zn>

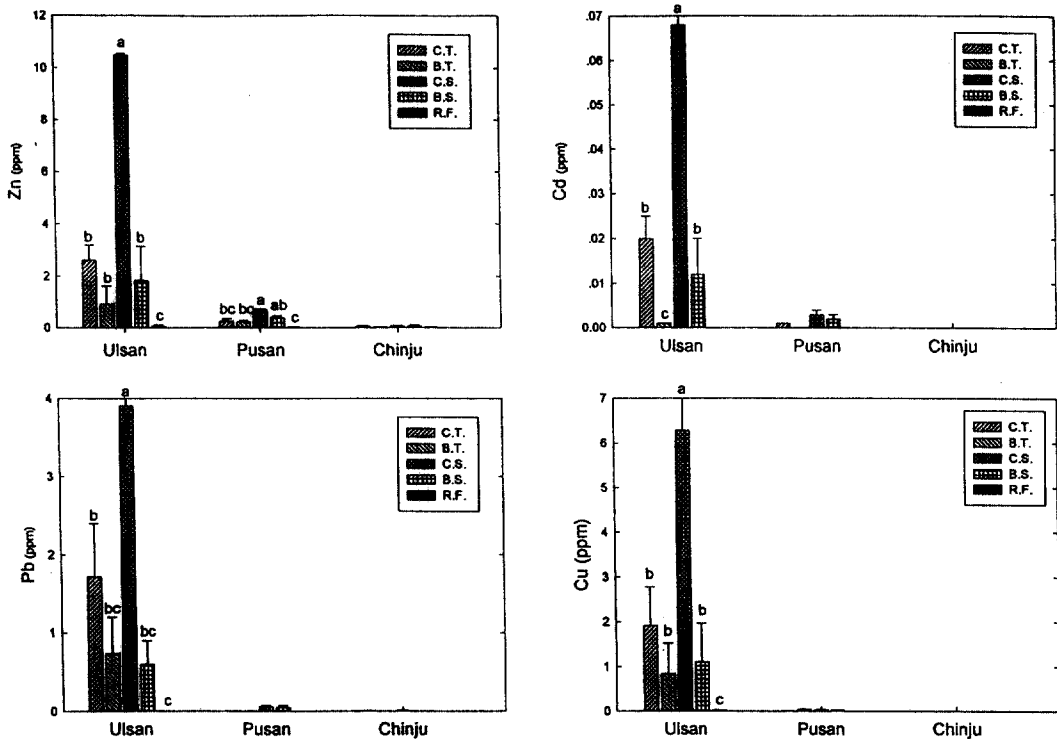


Fig. 1. Changes of heavy metal concentration by rainfall at survey sites.

Note C.T. : coniferous throughfall, B.T. : broad-leaved throughfall, C.S. : coniferous stemflow
B.S. : broad-leaved stemflow, R.F. : rainfall

* Means with the same letter are not significantly different at the 5% level for Duncan's multiple range test.

Pb>Cu>Cd 순이었다. 특히 수목의 수간을 벗어나 유입되는 수간류의 경우 중금속 농도가 높은 결과는 앞으로 토양의 중금속 축적을 더욱 증가시킬 것으로 사료되었다.

2. 수간으로부터 거리별 토양의 중금속 분석

토양의 중금속 분석의 수행은 강우와 관련성을 추적하기 위하여 수목의 수간을 중심으로 20cm 토양, 1m 지점의 토양, 수관폭의 끝지점 그리고 동일지역에서 수목이 생립하지 않는 산림의 토양을 채취하여 분석한 결과(Fig. 2)에서, Zn의 경우 공단지역의 농도가 도시지역의 1.3배, 일반지역의 10배 높게 나타나므로 대기오염물질이 강우에 의해 토양으로 유입되는 것으로 생각되며, 수종별로는 Zn의 농도가 공단지역에서는 해송림에서 높았고, 도시지역에서는 참나무림에서 높았다. Pb은 농도는 도시지역의 토양에서 높게 나

타났다. 도시의 자동차 타이어 등에 의한 자동차 배기가스로부터 발생하는 납은 토양에 축적되어 식물에 큰 피해를 준다(Patal et al, 1976)는 연구결과와 일치하였으며, 또한 Pb은 토양의 거리별로 유의차가 인정되었다(P<0.05). Cd은 조사지역 모두에서 Zn, Pb, Cu의 농도보다 낮게 검출되었는데, 그러나 Cd 농도는 공단지역과 도시지역에서 높았고, 일반지역에서는 농도가 낮게 검출되었으며, 수종별 Cd 농도는 공단지역의 해송림과 도시지역의 참나무림에서 높게 검출되었다. Cu의 농도는 공단지역에서 높았는데, 도시지역의 3.3배, 일반지역의 13배 높았고, 수종별 Cd 농도와 동일하였다. 본 조사에서 수간류에 의하여 토양의 중금속 축적량이 영향을 받을 것 을 알 수 있었는데, 조사지역 모두 수간에서 가까운 20cm이내의 토양에서 중금속이 높게 검출되었고, 거리별 1m, 수관폭 끝, 그리고 임외토양

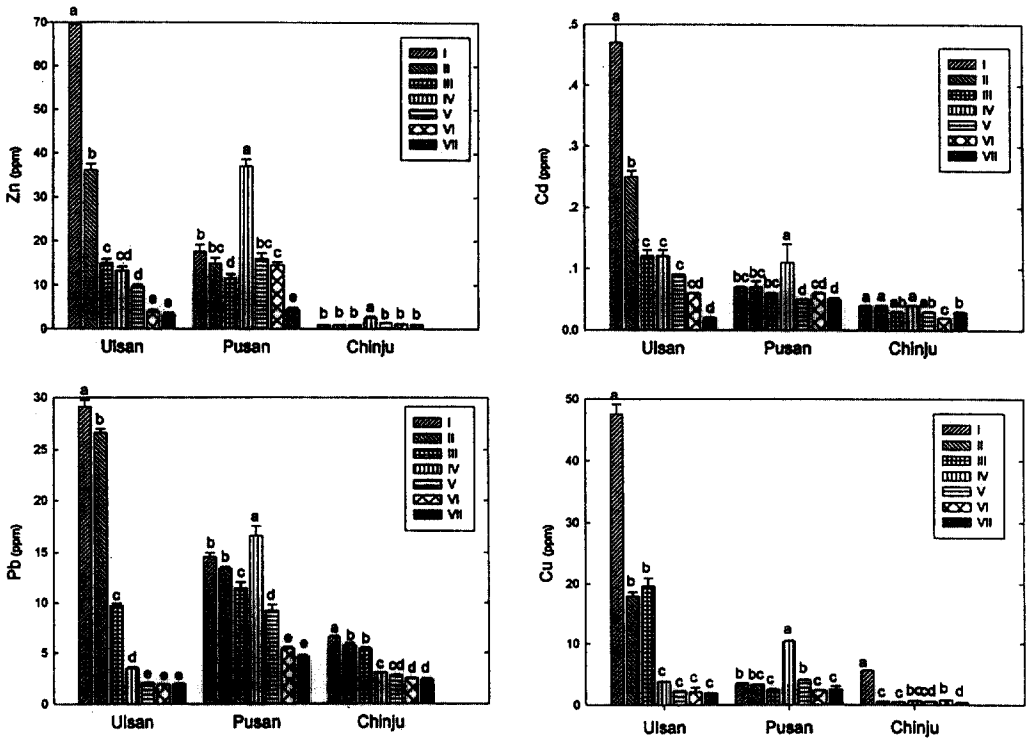


Fig. 2. Changes of heavy metal concentration in soil by distance from stem at survey sites.

Note I-III : coniferous, IV-VI : broad-leaved. VII : out of the forest.

I : soil of 20cm a part from stem. II : soil of 1m a part from stem. III : soil of end from crown.
 IV : soil of 20cm a part from stem. V : soil of 1m a part from stem. VI : soil of end from crown.
 VII : soil of out from the forest.

* Means with the same letter are not significantly different at the 5% level for Duncan's multiple range test.

으로 유의차가 인정되어($P < 0.05$), Duncan 검증을 실시한 결과 차이가 증명되었고, 또한 Mahendrapa(1982)는 대기중 중금속을 포함한 침착물질이 산림수목의 수관과 줄기에 부착되어 잎의 변색 및 세포조직에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라, 강우에 의한 침착물질의 유출은 수간 바로 아래의 토양에 큰 영향을 미치고 있다고 지적하였는데, 본 연구와 일치하는 결과였다. 토양분석에 의한 중금속 농도는 공단지역에서는 $Zn > Cu > Pb > Cd$ 순이었고, 도시지역은 $Zn > Pb > Cu > Cd$ 순으로 검출되었는데, 강우분석 결과와 일치하는 결과였다.

3. 강우와 토양의 중금속의 관계

지역별 강우와 토양의 중금속을 분석한 결과에 의하여 성분별로 강우의 중금속 함량이 토양의 함량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 분석자료를 이용하여 상관분석을 실시한 결과(Fig. 3), 유의차($P < 0.05$)가 인정되므로, 독립변수(X)를 강우의 중금속 성분, 종속변수(Y)를 토양의 중금속 성분으로 하고, 회귀분석을 실시하여 회귀식을 추정하였는데, Cd를 제외한 Zn, Pb, Cu에서 정 상관으로 설명력이 있었고, 회귀식은 Zn은 $Y = 7.79 + 4.78X (r = 0.8685^{**})$, Pb은 $Y = 7.90 + 4.53X (r = 0.7242^*)$ 였고, 그리고 Cu는 $Y = 3.89 + 3.91X (r = 0.8658^{**})$ 였다. 따라서 대기중에 존재하는 중금속 성분이 다시 강우에 의하여 토양으로 유입되는 것이 밝혀졌고, 토양의 중금속 성분은 강우의 성분에 영향을 받으며, 앞으로 산림생태계는 피해가 계속 진행될 것으로 사료되었다.

結 論

대기중의 오염물질의 영향으로 산성비의 영향을 받고 있는 산림에 대하여 공단지역, 도시지역, 일반지역으로 구분하여 해송림과 참나무림에 내리는 강우를 임외우, 수관통과우, 수간류에 대한 중금속 성분과 수간에서 거리별 토양중에 함유된 중금속 분석을 실시한 결과, 강우의 중금속 농도는 공단지역에서 $Zn > Cu > Pb > Cd$ 순이고, 도시지역에서 $Zn > Pb > Cu > Cd$ 순으로 분석되었다. 지역별로는 공단지역에서 모든 중금속의 농도가 높게 검출되었고, 강우별로는 수간류가 가장 높았으며, 다음으로 수관통과우, 임외우 순이었다. 수종별로는 중금속 농도는 공단지역은 해

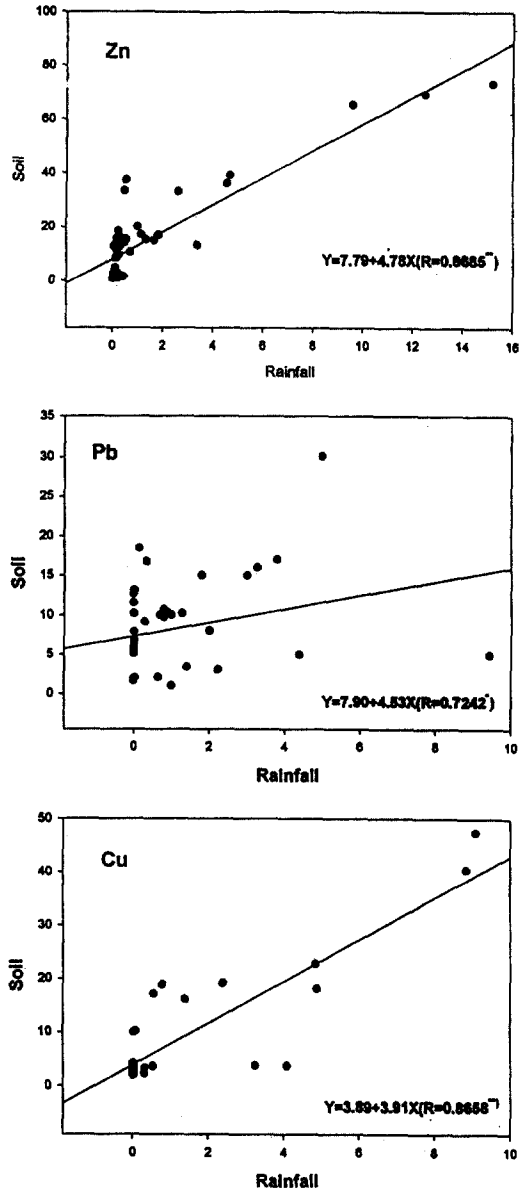


Fig. 3. Regression of heavy metals between rainfall and soil concentration.

송림에서 도시지역은 참나무림에서 높은 결과였다. 수간에서 거리별 토양의 중금속 분석 결과 수간에서 거리별 차이가 인정되어 대기오염으로부터 유입되는 중금속을 뒷받침하였다. 강우와 토양의 중금속을 상관분석한 결과, 성분 상호간 정 상관이 있어, 강우의 중금속이 산림토양에 영향을 하는 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 강우가 대기 중 중금속 물질

을 산림내로 유입시켜 토양내 중금속 축적 등 토양오염을 가중시키는 것으로 관련성이 밝혀졌으며, 앞으로 공단과 도시지역의 산림생태계는 계속해서 피해가 나타날 것으로 사료된다.

引用 文 獻

1. 金東秀. 1988. 土壤化學分析法. 農村振興廳, 農業技術研究所 450p.
2. 김면섭 · 이광국. 1988. 서울시내 가로수목의 수용성 유황 및 중금속 함량에 관한 연구. 한국대기보전학회지 4(1) : 1-12.
3. 金点秀 1990. 都市 街路樹의 環境汚染에 관한 研究 -慶南地域을 中心으로-慶尙大學校碩士學位論文 1-20.
4. 金鍾甲. 1992. 溫山工團周邊의 大氣汚染이 森林植生에 미치는 影響. 慶尙大學校博士學位論文 1-108.
5. 李瑞來 · 宋基俊. 1985. 溫山工團 周邊 土壤의 重金屬 濃度調查. 環境農學會誌 4(2) : 88-94.
6. _____ · _____. 1986. 溫山工團 周邊 農作物의 重金屬 濃度調查. 環境農學會誌 5(1) : 43-47.
7. 李承雨 · 李壽煜. 1995. 蔚山 工團周邊 山林土壤의 酸性화가 山林生態系의 養料와 重金屬 分布에 미치는 影響. 韓國林學會誌 84(3) : 286-298.
8. 오인혜. 1993. 가로수 잎의 S 및 중금속 함량에 의한 대기오염도 추정. 한국생태학회지 16(2) : 199-208
9. 유정환 · 가강현 · 박 현. 1995. 여천공단의 대기오염이 토양의 화학적 특성, 지의류, 탈질균 및 황산환원균에 미치는 영향. 한국임학회지 84(2) : 178-185.
10. 이해병 · 정완호. 1987. 高速道路로부터의 距離에 따른 樹의 器官內 납과 카드뮴 含量. 韓國生態學會誌 10(1) : 1-6.
11. 張楠基 · 裴眞浩 · 金承喆. 1990. 서울 地域의 大氣汚染이 降水와 生物에 미치는 影響 4. 地域別 소나무 樹皮의 Pb와 Cd의 含量變化. 環境農學會誌. 13(3) : 173-179.
12. 崔在植. 1991. 寒國產 山林鳥類의 棲息生態와 重金屬 蓄積. 慶尙大學校博士學位論文 1-76.
13. 韓康完 · 崔賢玉. 1992. Peat에 의한 重金屬 Cd, Cu, Zn의 吸着. 環境農學會誌 11(3) : 195-200.
14. 環境廳. 1993. 酸性雨調查法. 日本酸性雨調查研究會 156-178.
15. 洗 幸夫 · 本間 慎 · 久野 勝治. 1988. 土壤中 交換性重金屬濃度와 桑吸收重金屬量 關係. 日菑雜 57 : 481-488.
16. 辰己 修三. 1973. 重金屬と樹木. 公害對策 9(9) : 1-12.
17. 伊豆田 猛. 1992. 酸性雨等による植物衰退現象實態 / 足尾銅山被害 跡地土壤汚染. 資源環境 對策 28(14) : 1321-1327.
18. 茅野 充男. 1982. 土壤pH의異常と作物の生育, 田中明編作物比較營養生理, 學會出版センター 77-89.
19. Cha, J.W. and B.W. Kim. 1975. Ecological studies of plants for the control of environmental pollution. VI. Growth of various plant species as influenced soil applied cadimium, Korean J. Bot 18 : 23-30.
20. Ichiro, Y. and K. Kitagishi. 1982. Heavy metal pollution in soil of Japan. Japan Scientific Societies Press. Tokyo 10-20.
21. Lagerwerff J.V. and A.W. specht. 1970. Contamination of roadside and vegetation with cadmium, nikel, lead and zinc. Enviro. Soci. & Technol 4 : 583-596.
22. Park, B.K. and O.K. Kim. 1983. Ecological effect of zinc and lead on plants. Korea J. Ecol. 6 : 98-105.
23. Ulrich, B., R. Mayer and P.K. Khanna. 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a loess derived soil in central Europe. Soil Science 130 : 193-199.