

## 蔚山 工團周邊 山林土壤의 酸性化가 山林生態系의 養料과 重金屬 分布에 미치는 影響<sup>1</sup>

李承雨<sup>2</sup> · 李壽煜<sup>2</sup>

### The Effect of Soil Acidification on the Distribution of Nutrients and Heavy metals in Forest Ecosystem near Ulsan Industrial Estate<sup>1</sup>

Seung Woo Lee<sup>2</sup> and Soo Wook Lee<sup>2</sup>

#### 要 約

본 연구는 山林土壤의 酸性化가 토양내 치환성 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) 및 중금속(Cu, Zn, Mn, Pb, Cd) 分布에 미치는 영향을 평가하고, 이러한 토양내 화학적 특성과 임목의 세근과 엽내 양료 및 중금속 분포와의 關係를 파악하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 蔚山과 溫山工團 주변의 6개 조사구와 開發制限地域內 2개 조사구를 대상으로 토양 pH의 長期的 變化와 土壤, 細根 및 葉내 養料과 重金屬 含量을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 울산지역 산림의 토양 pH(A층)는 1987년에 闊葉樹林과 針葉樹林에서 각각 4.45와 4.78이었던 것이 1994년에는 각각 3.73과 3.86으로 감소하여 土壤酸性化의 정도가 심화되었다. 1994년 현재 개발제한지역내 침엽수림인 동천이 4.57로 가장 높은 반면 온산공단에 인접한 당월의 활엽수림이 3.19로 가장 낮았다.
2. 工團地域에 비해 토양 pH가 높았던 개발제한지역 산림의 토양내 置換性  $\text{Ca}^{2+}$  함량은 공단지역보다 활엽수림에서 3.5배, 침엽수림에서 11배나 높았고, 置換性  $\text{Mg}^{2+}$  함량 또한 각각 4.5배와 5배나 높았다. 그러나 공단지역에서 높을 것으로 예상되었던 置換性  $\text{Al}^{3+}$  함량은 오히려 개발제한지역에서 높게 나타났다.
3. 細根內 Ca과 Mg 함량은 개발제한지역이 공단지역보다 활엽수(물오리나무, 상수리나무)의 경우 각각 3.6배와 1.7배 높았고 침엽수(리기다소나무, 곰솔)에서는 각각 4.6배와 1.5배 높았다. 葉에 있어서도 개발제한지역 산림의 활엽수가 공단지역보다 각각 1.1배와 2.2배 높았고, 침엽수는 각각 1.8배와 2.3배나 높았다. 그리고 세근과 엽내 Al 함량 역시 토양에서와 같은 경향을 보였다.
4. 土壤酸性化度와 林木에 대한 Al 毒性을 평가하기 위한 토양과 세근내 Ca/Al 몰비가 동천을 제외한 모든 조사구의 토양과 세근에서 1 이하로써 토양산성화에 민감할 뿐만 아니라 養料吸收 및 根系發達의 被害가 예상되었다. 針葉樹林의 경우 토양 pH와 토양 및 세근내 Ca/Al 몰비간에 서로 高度의 相關을 보였다.
5. 토양, 세근 및 엽내 Cu, Zn, Pb 함량은 활·침엽수림 모두에서 工團地域이 開發制限地域보다 전체적으로 높았지만, 토양중 Mn과 Cd 함량은 반대로 개발제한지역이 더 높았다.

接受 1995年 4月 19日 Received on April 19, 1995.

<sup>2</sup> 忠南大學校 農科大學 山林資源學科 Department of Forest Resources, College of Agriculture, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea.

## ABSTRACT

This study was carried out to investigate the effect of forest soil acidification on the distribution of exchangeable cations( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) and heavy metals(Cu, Zn, Mn, Pb, Cd) in soil, and to understand the relation of the soil chemical properties and the distribution of nutrients and heavy metals in fine root and foliage. The results through survey on the long-term change of soil pH and the contents of nutrient and heavy metal in soil, fine root and foliage by 6 sites near Ulsan-Onsan industrial estate and 2 sites in limited development district are summarized as follows :

1. The average forest soil pH(A horizon) in Ulsan had been proceeded down to 3.73 in deciduous forest and 3.86 in coniferous forest in 1994 from 4.45 and 4.78 in 1987, respectively, which indicated serious soil acidification. As comparing soil pH among sites, Dongcheon coniferous forest(pH 4.57) in limited development district showed the highest values and Dangwol deciduous forest(pH 3.19) near Onsan industrial estate showed the lowest values in 1994.
2. Contents of exchangeable calcium in forest soils of limited development district where showed much higher soil pH than industrial estate were 3.5 times more in deciduous forest soil and 11 times more in coniferous forest soil than in industrial estate, and contents of exchangeable magnesium were also 4.5 and 5 times more in limited development district than in industrial estate, respectively. However contents of exchangeable aluminium which had been supposed more in forest soil of industrial estate were more in limited development district.
3. Contents of calcium and magnesium in fine root of deciduous trees(*A. hirsuta*, *Q. acutissima*) were 3.6 and 1.7 times more in limited development district than in industrial estate, respectively, and those of coniferous trees(*P. rigida*, *P. thunbergii*) were 4.6 and 1.5 times more in limited development district than in industrial estate, respectively. Also contents of calcium and magnesium in foliage of deciduous trees were 1.1 and 2.2 times more in limited development district than in industrial estate, respectively, and those of coniferous trees were 1.8 and 2.3 times more in limited development district, respectively. And contents of aluminium in fine root and foliage were nearly as same as in soil.
4. Ca/Al molar ratios in soil and fine root, which could be related with the degree of soil acidification and Al toxicity on trees, were less than 1 in all sites except Dongcheon, suggesting that the soil and fine root in the sites have high sensitivity to soil acidification and the decrease in nutrient uptake and root enlargement. The Ca/Al molar ratios in soil and fine root in coniferous forest were highly correlated with the soil pH one another.
5. Contents of Cu, Zn and Pb in soil, fine root and foliage were more in industrial estate than in limited development district in both deciduous and coniferous forests, however, oppositely contents of Mn and Cd in soil were more in limited development district than in industrial estate.

*Key Words*: Soil Acidification, Ulsan-Onsan Industrial estate, Forest Ecosystem, Nutrient Distribution, Heavy Metals, Fine Root, Foliage.

## 緒 論

근세기에 들어 고도의 産業化와 都市化로 인한 化石燃料의 수요급증과 광범위한 汚染物質의 擴散 등은 그 정도와 복잡성이 매우 심화된 大氣汚染의 문제를 초래하게 되었다.  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$  등과 같은 각종 대기오염물질로 인한

自然生態系の 오염은 일차적으로 土壤 및 水棲生態系の 酸性化(Bache, 1980; Freedman, 1989)를 가져오게 되었으며, 그 이후에 여러 생물학적인 반응과 함께 이차적인 衰退現狀을 초래하게 되었다. 특히 산림생태계에 있어서 대기오염물질에 의한 지상부의 직접적인 피해와 함께 土壤酸性化에 따른 토양내 2차적인 반응 또한 중요성을 갖는다.

토양 pH의 감소는 유기물 분해시 생성되는 有機酸(Hue 등, 1986) 또는 토양내  $\text{CO}_2$ 와 물의 반응시 생성되는 炭酸(Bache, 1980)에 의한 자연발생적인 것과 酸性降下物(Ulrich 등, 1980)에 의한 인위적인 것으로 크게 구분되는데, 특히 山林衰退와 관련해서 인위적 인자에 의한 토양 pH 감소는 養料溶脫 및 有毒性 重金屬의 이동을 증가와 밀접한 관련성이 있다. 일반적으로 토양산성화는 유기물축적과 같이 陰電荷數를 증가시키는 작용과 산성 음이온과 결합한 양료의 용탈과 같이 營養鹽類의 流失量을 증가시키는 작용에 의해 발생한다(Krug와 Frink, 1983). Ulrich(1983, 1989)는 酸性降下物에 의한 산림토양의 化學的 性質의 變化와 林木의 枯死간의 관계에 대하여 광물질 풍화에 의한 緩衝率을 초과하는 酸性降下物의 유입으로 토양산도가 증가하게 되면 토양내 교환성 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ )의 溶脫과 토양 용액으로의  $\text{Al}^{3+}$  및 중금속 용출량이 늘어나며, 결국 이러한 土壤條件은 養料 不均衡과 임목의 細根系 및 地上部 被害를 초래하게 된다고 하였다. 일반적으로 토양내 중금속의 환경적 영향은 이들 원소의 溶解度와 밀접한 관련이 있으며, 이러한 용해도는 주로 土壤 pH와 土壤 構成成分에 의해 결정된다(Brummer와 Ulrich, 1983; Ulrich, 1983). 산림생태계에 集積된 대부분의 중금속은 有機化合物의 형태로 腐植層에 축적되는데, 이때 土壤酸性化는 축적된 중금속의 이동을 촉진시켜 토양생물과 식물체 뿌리는 물론 地中 水質에도 영향을 미친다(Huettl, 1988). Tyler(1978)는 오염지역 산림토양과 비오염지역 산림토양을 대상으로 pH 2.8, 3.2 및 4.2의 인공산성우를 각각 처리한 후 여러 중금속의 溶脫率을 조사하였는데, 각 pH 별 중금속 용탈량은 오염지역 산림토양에서 현저히 높았다. 한편 Bergkvist(1986)는 土壤酸度를 인위적으로 높였을 때 Al, Fe, Cu 및 Pb의 용출량이 오히려 감소하였음을 보고하면서, A층에서의 이들 중금속의 용출은 水溶性 有機炭素(DOC)의 용출과 매우 밀접한 관련이 있음을 강조하였다. Cd는 오존에 의한 식물체의 피해를 가속화시키는 上昇役割을 하며(Czuba와 Ormrod, 1981), 토양과 식물체내 고농도로 축적된 Pb는 식물체와 미생물의 致死와도 깊은 관련이 있다(Bauch, 1983). 산림의 피해가 여러 복합적인 인자들로 인한 것임을 고려할 때, 특히

외부로부터 상당량의 중금속 유입이 예상되는 특정 산림지역에 있어서 토양내 중금속 축적량이 산림퇴퇴의 가속화를 초래할 만큼 유해수준에 도달할 수 있음을 주지해야 할 것이다. 토양내 중금속의 動態는 곧 식물체내의 蓄積과 移動에 직접적인 영향을 미치게 되므로 토양은 물론 식물체내 중금속의 定量化는 土壤酸性化에 따른 산림피해의 정도를 추정하는데 필수적이라 할 수 있다.

본 연구의 조사지인 울산은 1970년을 전후해 石油化學工業과 鐵鋼産業 등이 정책적으로 집중 육성되어 왔으며, 최근들어 공업단지의 규모확대에 따른 기존 산림지역의 상대적인 축소와 각종 오염물질의 배출로 인한 환경오염이 심각한 사회적 문제로 대두되면서 環境의 安定性의 기초가 되는 산림생태계의 질적 손상이 극심할 것으로 예상되는 지역이다. 李壽煜과 閔一植(1989)은 울산을 포함한 4개 지역의 토양 pH가 1986~1989년간 계속적으로 감소하였다고 보고하면서, 大氣 汚染 및 酸性雨에 의한 삼림 토양산성화의 심각성을 강조하였다. 그 밖에도 울산 공단지역을 대상으로 酸性降下物이 산림토양에 미치는 영향에 관한 조사(李興在 등, 1992)와 인공산성우가 삼림토양의 緩衝能에 미치는 영향에 관한 연구(閔一植과 李壽煜, 1990) 등을 통하여 이미 울산지역 산림에 있어서 土壤酸性化의 심각성이 지적된 바 있다. 金泰旭 등(1982)은 울산공단에서 汚染源을 중심으로 거리별 삼림식생의 오염에 의한 생태적 변화를 조사한 결과 국소오염원에 인접한 일부 삼림에서는 몇몇 耐性 樹種만이 생육할 정도로 피해가 심했음을 보고하였다. 그밖에도 울산지역의 환경오염과 산림생태계에 관하여 울산과 온산지역의 綠地自然度, 植物相, 現存植生, 潛在植生 및 植生の 變化에 대한 조사 보고(姜寅求, 1986)와 溫山工團을 중심으로 汚染現況과 植物群集構造에 대한 조사 보고(韓相旭 등, 1989) 등이 있다. 그러나 토양산성화으로 인하여 발생되는 직·간접적인 영향인자와 산림피해와의 관계를 검토하기 위한 조사나 연구가 아직까지 미흡한 단계에 있다.

따라서 본 연구는 일부 가시적 쇠퇴증상이 나타나는 울산의 공업단지와 개발제한지역내 활엽수림과 침엽수림을 대상으로 토양 pH의 長期的 變化를 조사하고 토양 pH 등 토양화학적 특성이

각기 다른 조사구별로 토양, 세균 및 엽내 養料와 重金屬 分布을 비교, 분석함으로써 토양산성화가 토양, 세균 및 엽내 화학적 특성에 미치는 影響과 임상별 피해도를 밝히기 위한 기초자료를 제공하고자 수행되었다.

### 材料 및 方法

#### 1. 試驗地 概況

##### (1) 調査區 設定 및 概況

土壤酸性化도에 따른 토양, 세균 및 엽내 양료와 중금속 분포의 변화를 평가하기 위하여 溫山工團에 인접한 당월, 화산 및 덕신과 蔚山石油化學工團과 火力發電所에 인접한 용연을 공업단지 조사구로 설정하고 對照區로는 1973년 6월 開發 制限地域으로 지정도시된 두왕과 동천을 설정하였다. 대부분의 침엽수림 조사구에서는 우점종 처수의 분포가 거의 없었고 조사목인 리기다소나무와 곰솔의 細根發達이 微弱하였으며, 砂防造林地로 조성된 활엽수림 조사구에서는 조사목인 물오리나무와 상수리나무의 세균발달이 우수하였고 기존의 산촌 침엽수들은 枯死 또는 勢弱해 있었다. 1994년 울산지역의 대기중 堿性 亞硫酸가

스 농도는 15ppb이며, 잎내 酸性이온의 流入量은  $SO_4^{2-}$  (78.2kg/ha),  $NO_3^-$  (37.0kg/ha),  $Cl^-$  (38.7kg/ha)이었다(金泰旭 등, 1994). Fig. 1은 울산 및 온산공단의 분포와 각 조사구의 위치를, Table 1은 조사목의 생육상 및 해당 잎분의 특성을 나타내고 있다.

#### 2. 供試試料의 採取 및 分析

수분과 양료의 흡수가 생리적으로 왕성한 1994년 5월에 토양 증위별(A,B 또는 C층)로 1점씩의 土壤試料을 채취하였고, 조사목인 물오리나무, 상수리나무, 리기다소나무 및 곰솔의 細根을 토양시료를 채취한 장소에서 뿌리의 직경이 1cm 이하의 것으로 다른 관목류나 초본류의 뿌리와 구별하여 채취하였으며, 葉은 각 조사목의 하층 수관부에서 방충해가 없는 것으로만 일정량 채취하였다. 供試土壤은 실내에서 2일간 풍건, 분쇄한 후 2mm 체를 통과한 것을 사용하였다. 細根과 葉試料은 오염물 제거를 위해 증류수로 충분히 세척한 후 0.3N HCl로 가법계 표면적적으로 Pan oven에서 80℃로 48시간 건조시킨 후 금속물질에 의한 汚染을 방지하기 위하여 磁器질기로 분말, 조제하였다. 토양 pH(soil : water 1 : 5)는 pH meter로 측정하였고, 置換性  $Ca^{2+}$ 과  $Mg^{2+}$ 은 1N  $NH_4OAc$ (pH 7.0)로, 置換性  $Al^{3+}$ 은 1N  $KCl$ 로 처리한 침출용액을 적정 비율로 희석하여 ICP-AES로 분석, 정량하였다. 토양, 세균 및 엽내 重金屬(Cu, Zn, Mn, Pb, Cd)과 세균 및 엽내 Ca, Mg, Al은  $HNO_3-H_2SO_4-HClO_4$ 로 濕式分解하여 ICP-AES로 측정하였다(金東秀, 1988).

### 結果 및 考察

#### 1. 土壤 pH

1987~1994년간 울산지역 산림내 A층(토심 : 10~20cm) 토양의 pH 변화를 보면 1987년에 활엽수림과 침엽수림이 각각 4.45와 4.78이었던 것이 1994년에는 3.73과 3.86으로 급격히 감소하였다(Fig. 2). 이는 과거 울산지역 산림토양이 이미 酸性이었고, 특히 최근 몇년 동안에 土壤酸性化가 더욱 현저히 진행되고 있음을 보여주고 있어 이 지역 산림의 토양산성화로 인한 피해가 우려된다.

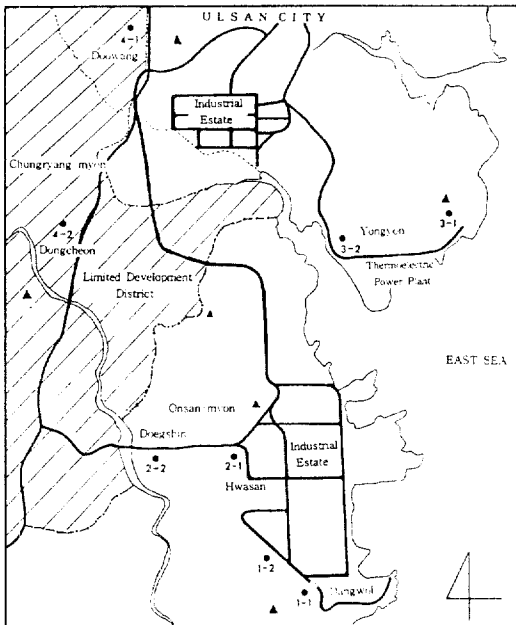


Fig. 1. Sampling sites in Ulsan industrial estate and limited development district.

Table 1. Sample trees and forest composition by site.

Site	Dominant Species	Age	D.B.H	Tree height	Understory Vegetation
Dangwol	<i>Alnus hirsuta</i>	21	10/8 - 28	6/5 - 10	<i>Quercus serrata</i> , <i>Robinia pseudo-acacia</i>
	<i>Pinus rigida</i>	29	25/15 - 50	14/8 - 16	<i>Rhododendron yedoense</i> var. <i>poukhanense</i> , <i>Miscanthus sinensis</i>
Hwasan	<i>Alnus hirsuta</i>	23	12/10 - 24	8/4 - 12	<i>Quercus serrata</i> , <i>Robinia pseudo-acacia</i> , <i>Castanea crenata</i>
Deogshin	<i>Pinus rigida</i>	25	18/6 - 26	15/8 - 16	<i>Q. serrata</i> , <i>Q. mongolica</i> <i>Q. aliena</i> , <i>Q. acutissima</i>
Yongyon	<i>Alnus hirsuta</i>	19	8/6 - 10	5/4 - 6	<i>Robinia pseudo-acacia</i> , <i>Miscanthus sinensis</i> , <i>Rhododendron yedoense</i> var. <i>poukhanense</i>
	<i>Pinus thunbergii</i>	28	12/6 - 30	7/5 - 9	<i>Quercus serrata</i> , <i>Rhododendron yedoense</i> var. <i>poukhanense</i> , <i>Smilax china</i>
Doowang	<i>Quercus acutissima</i>	22	10/6 - 28	13/10 - 15	<i>Quercus serrata</i> , <i>Alnus hirsuta</i> , <i>Prunus sargentii</i>
Dongcheon	<i>Pinus rigida</i>	21	12/8 - 24	9/7 - 12	<i>Quercus serrata</i> , <i>Miscanthus sinensis</i> , <i>Zanthoxylum schinifolium</i>

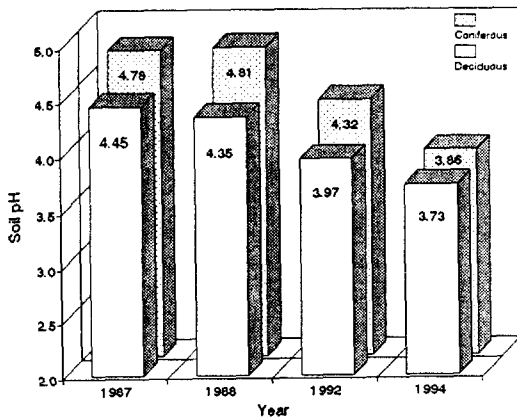
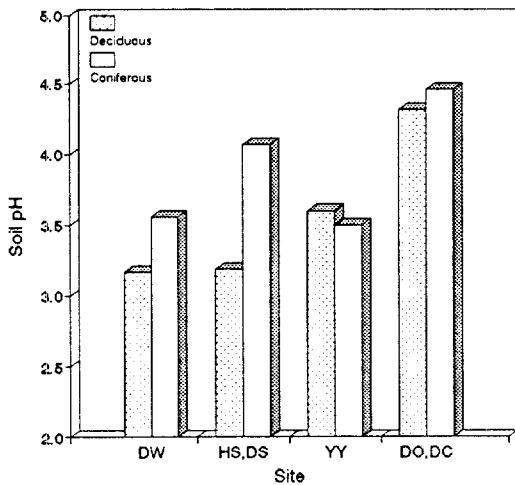


Fig. 2. Forest soil pH(A horizon) in Ulsan during 1987~1994.

重工業團地가 조성된 溫山의 당월, 화산 및 덕신, 石油化學團地가 조성된 울산의 용연, 그리고 공단지역과 대조구인 개발제한지역내 두왕과 동

천의 토양 pH 비교는 당월의 활엽수림과 침엽수림이 각각 3.19와 3.70, 화산의 활엽수림이 3.23, 덕신의 침엽수림이 4.12, 용연의 활엽수림과 침엽수림이 각각 3.60과 3.51로 공단지역 토양 평균 pH가 林相別로 3.38과 3.85인 반면, 개발제한지역인 두왕과 동천은 각각 4.33과 4.57로 두 지역간에 현저한 차이를 보였다(Fig. 3). 이는 오랜 기간 동안 각종 酸性降下物과 重金屬의 유입으로 인하여 土壤緩衝作用에 기여하는  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$  등 치환성 양이온의 용탈량이 개발제한 지역의 산림보다 공단지역에 인접한 산림에서 많았기 때문으로 사료된다. 그러나 개발제한지역의 산림토양 역시 酸性임을 고려할 때 공단지역에 인접한 산림뿐만 아니라 공단지역으로 부터 15km 이상 떨어진 산림에 까지도 산성강하물이 장기간에 걸쳐 擴散, 集積되므로써 나타나는 결과라고 사료된다. 또한 주로  $Ca^{2+}$ 에 의한 土壤緩衝作用은 토양 pH가 4.2~5.0인 경우에 활발하며,



**Fig. 3.** Average forest soil pH by site in 1994  
 DW, HS, DS, YY : Dangwol, Hwasan, Doegshin, and Yongyon, sites near industrial estate  
 DO, DC : Doowang and Dongcheon, sites in limited development district

토양 pH가 2.8~4.2 수준에 달하면  $Al^{3+}$ 에 의한 완충작용이 주도하여 이때 치환성  $Al^{3+}$ 은 이온화 및 가수화반응을 통해 전체 토양酸도의 증가를 촉진(Reuss와 Johnson, 1985; Ulrich, 1983)시킨다는 점에서 개발제한지역을 제외한 공단지역의 당월, 화산, 덕신 및 용연이 Ex -  $Ca^{2+}$ 에 의한 완충범위를 지나 Ex -  $Al^{3+}$ 에 의한 완충범위에 있음을 알 수 있다.

**2. 土壤內 置換性  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  및  $Al^{3+}$**

산림토양내 치환성  $Ca^{2+}$ 은 開發制限地域이 공

團地域보다 활엽수림에서 3.5배, 침엽수림에서 11배나 높았고,  $Mg^{2+}$  또한 각각 4.5배와 5배나 높게 나타나 두 지역간에 현저한 차이를 보였다 (Tables 2,3). 이는 공단지역 산림의 경우 토양산도가 증가함에 따라 토양내 치환성  $Ca^{2+}$ 과  $Mg^{2+}$ 이 多量 溶脫된 결과로 사료된다. 임상별로는 치환성  $Ca^{2+}$ 과  $Mg^{2+}$  모두 용연을 제외한 나머지 조사구에서 針葉樹林 토양이 闊葉樹林 토양보다 높은 함량을 보였으며, 이는 토양 pH의 임상별 비교(Fig. 3)에서 활엽수림이 침엽수림보다 토양산도가 높다는 결과에 기인한다고 본다. 이상의 결과를 통하여 토양 pH와 토양내 치환성  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$ 과는 분명한 관련성이 있음을 알 수 있으며, 결국 토양내  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$  함량이 현저히 낮은 공단지역 산림토양에 있어서 土壤酸性化가 계속 심화될 경우 뿌리를 통한 養料吸收量の 부족과 함께 養料缺乏으로 인한 山林被害의 가능성이 높을 것으로 사료된다.

토양내 치환성  $Al^{3+}$ 에 있어서는 토양 pH와 치환성  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$  함량이 낮은 공단지역에서 높은 것으로 예상되었으나 오히려 개발제한지역에서 높게 나타났으며, 이같은 결과는 토양산도가 증가함에 따라  $Al^{3+}$ 의 농도 역시 증가한다는 기존의 연구 결과(金俊鎬, 1991; 閔一植과 李壽燮, 1990; Krug와 Frink, 1983; Noble 등, 1988)와 일치하지 않았다. 그러나 기존 연구의 대부분이 人工酸性雨 처리를 통한 室內實驗의 결과라는 점에서 現地調査를 통한 본 연구 결과와의 관계를 규명하기 위해서는 두가지 조사를 병행한 연구가 필요하겠다.

**Table 2.** Soil pH and exchangeable cation contents in different soil horizons of deciduous forest.

Site	Soil horizon	Soil depth	Soil texture	Soil pH (1:5)	Exch - Cation(meq/100g)		
					$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Al^{3+}$
Dangwol	A	0 - 10	LS	3.04	0.670	0.199	63.3
	C	10 - 50	SL	3.30	0.269	0.021	51.1
Hwasan	A	0 - 15	SiL	3.01	0.900	0.384	54.4
	C	15 - 50	L	3.37	0.495	0.116	39.4
Yongyon	A	0 - 15	L	3.56	1.485	0.426	113.8
	B	15 - 50	CL	3.63	0.505	0.112	207.0
Doowang	A	0 - 15	LS	4.20	2.460	0.686	145.4
	B	15 - 50	LS	4.43	3.265	1.164	111.0

Dangwol, Hwasan and Yongyon are sites near industrial estate.  
 Doowang is a site in limited development district.

**Table 3.** Soil pH and exchangeable cation contents in different soil horizons of coniferous forest.

Site	Soil horizon	Soil depth	Soil texture	Soil pH (1:5)	Exch - Cation(meq/100g)		
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
<u>Dangwol</u>	A	0 - 20	SiCL	3.31	1.445	0.587	73.2
	B	20 - 45	SiCL	3.81	1.035	0.593	53.3
	C	45 -	CL	3.81	0.920	0.503	120.4
<u>Doegshin</u>	A	0 - 10	SiCL	4.02	2.020	0.795	19.4
	B	10 - 30	SiCL	4.12	0.700	0.380	35.0
	C	30 - 50	C	4.19	0.635	0.456	98.9
<u>Yongyon</u>	A	0 - 20	L	3.42	0.630	0.151	112.1
	B	20 - 60	CL	3.58	0.307	0.125	92.1
<u>Dongcheon</u>	A	0 - 15	LS	4.15	6.500	1.312	283.6
	B	15 - 50	LS	4.78	15.650	2.895	44.4

Dangwol, Doegshin and Yongyon are sites near industrial estate.  
Dongcheon is a site in limited development district.

**Table 4.** Contents of Ca, Mg and Al in fine root and foliage.

Site (species)	Fine root(ppm)			Foliage(ppm)		
	Ca	Mg	Al	Ca	Mg	Al
<u>Deciduous Forest</u>						
Dangwol ( <i>A. hirsuta</i> )	1,633	723	1,667	8,799	2,843	277
Hwasan ( <i>A. hirsuta</i> )	1,799	919	3,217	8,833	2,933	303
Yongyon ( <i>A. hirsuta</i> )	1,599	837	4,467	8,699	2,710	367
Doowang ( <i>Q. acutissima</i> )	5,899	1,417	6,400	10,066	6,400	517
<u>Coniferous Forest</u>						
Dangwol ( <i>P. rigida</i> )	1,333	833	3,767	6,066	2,050	343
Doegshin ( <i>P. rigida</i> )	2,999	974	3,633	6,833	2,886	190
Yongyon ( <i>P. thunbergii</i> )	966	678	2,693	1,899	1,833	220
Dongcheon ( <i>P. rigida</i> )	8,266	1,241	2,200	8,633	5,103	550

Dangwol, Hwasan, Doegshin and Yongyon are sites near industrial estate.  
Doowang and Dongcheon are sites in limited development district.

### 3. 細根과 葉內 Ca, Mg 및 Al

세근내 Ca과 Mg 함량은 Table 4에서 보는 바와 같이 토양 pH와 토양내 치환성 Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup> 모두가 공단지역에 비해 높았던 개발제한

지역이 공단지역보다 활엽수(물오리나무와 상수리나무)의 경우 Ca과 Mg이 각각 3.6배와 1.7배 높았고, 침엽수의 경우 각각 4.6배와 1.5배 높았다. 또한 葉에 있어서도 개발제한지역 산림의 활

염수가 공단지역보다 Ca과 Mg이 각각 1.1배와 2.2배 높았으며, 침엽수는 1.8배와 2.3배나 높아 두 지역간에 세근과 엽내 양료함량의 현저한 차이를 볼 수 있었다. 이처럼 본 연구에서의 토양내 치환성  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$  함량의 지역간 차이와 세근과 엽내 Ca 및 Mg 함량의 지역간 차이가 일치함은 토양산성화에 따른 土壤內 營養鹽類의 특성이 細根과 葉內 養料分布量에 직접적인 영향을 미치기 때문으로 추정된다. 이는 본 조사와 수종은 다르지만 red spruce와 norway spruce의 세근 및 엽내 Ca 및 Mg 함량이 토양내 치환성  $Ca^{2+}$  및  $Mg^{2+}$  함량과正的 相關關係를 보인 결과(Joslin 등, 1988)와 일치하였다.

공단지역과 개발제한지역간에 나타난 세근과 엽내 Ca과 Mg 함량의 현저한 차이와는 달리 세근내 Al 함량은 두 지역간에 유의적인 차이가 나타나지 않았으며, 엽내 Al 함량은 오히려 개발제한지역에서 높게 나타났다. 본 조사의 결과를 인위적인 酸處理 또는 Al 處理 後에 세근과 엽내 Ca 및 Mg이 감소하는 반면 Al은 증가했던 기존의 연구 결과(Stienen과 Bauch, 1988)와 비교할 때, 본 조사에서 토양 pH의 지역간 차이에 따른 세근과 엽내 Ca과 Mg 함량의 분포 경향과는 일치하지만 세근과 엽내 Al의 분포 경향과는 상이하였다. 그러나 white pine 엽분석을 통해 엽내 Al 농도가 산성토양에서 더 낮았다는 연구 보고(Reich 등, 1988)와 산림퇴화가 뚜렷한 지역의 세근내 Al 함량이 오히려 감소했던 결과(Johnson, 1983)도 있음을 보면 土壤酸性化도와 樹體內 Al 함량과는 항상 일정한 負의 相關을 갖게 되지 않음을 알 수 있다. 따라서 토양산성화에 따른 Al의 양료흡수 차단 또는 Al 毒성에 대한 징후를 단순히 식물체내 Al 함량만으로 단정지을 수는 없을 것으로 판단된다.

4. 土壤과 細根內 Ca/Al 몰비

산성토양에 있어서 Al 毒성은 식물생장의 제한인자로 작용할 수 있으며, 이러한 토양내 Al 독성을 평가하기 위해서는  $Al^{3+}$  농도 자체보다는 Ca/Al 또는 Mg/Al ratio와 밀접한 관련이 있으며(Abrahamsen, 1983), 細根의 疾病과 致死 그리고 주요 양료의 吸收 遮斷 역시 세근내 높은 Al/Ca 비율과 관련한다(Matzner와 Ulrich, 1985). Ulrich(1983)는  $Al^{3+}$  毒성을 규명하는데 있어 토

양내 치환성  $Al^{3+}$ 과  $Ca^{2+}$  간의 상호작용을 강조하면서, 토양용액과 세근내 Ca/Al molar ratio가 1 이하인 경우에  $Al^{3+}$  독성으로 인한 뿌리의 피해가 있을 수 있다고 하였다. 축적된 독성 Al이 뿌리에 미치는 직접적인 영향에는 1)DNA의 Al의 결합으로 인한 세포분열의 저하, 2)세포신장의 장애로 인한 뿌리생장 감소, 3)표피세포와 피층세포의 파괴 등(Schier, 1985; Tepper 등, 1989; Wallace와 Anderson, 1984)이 있으며, 간접적인 영향으로는 Ca, Mg, K, P 등 필수원소의 흡수와 전이과정에 미치는 장애효과를 들 수 있다(Cronan 등, 1989; Godbold 등, 1988).

본 연구에서는 지역간의 土壤酸性化도와 임목에 대한 Al 毒성을 추정하기 위하여 토양과 세근내 Al 함량에 대한 Ca 함량의 相對的 比率를 나타내는 토양과 세근내 Ca/Al 몰비를 이용하였다. 비록 토양 pH의 지역간의 현저한 차이에도 불구하고 조사구간에 토양과 세근내 Al 함량의 유의적인 차이는 없었지만, 토양과 세근내 Ca/Al 몰비가 상대적으로 낮은 공단지역에 있어서 토양산성화와 Al 독성에 의한 임목의 피해 정도는 높을 것으로 추정되었다. 또한 본 조사에서의 토양과 세근내 Ca/Al 몰비를 Ulrich(1983)의 연구결과와 비교할 때 토양과 세근내 Ca/Al 몰비가 임상에 관계없이 개발제한지역의 동천을 제외

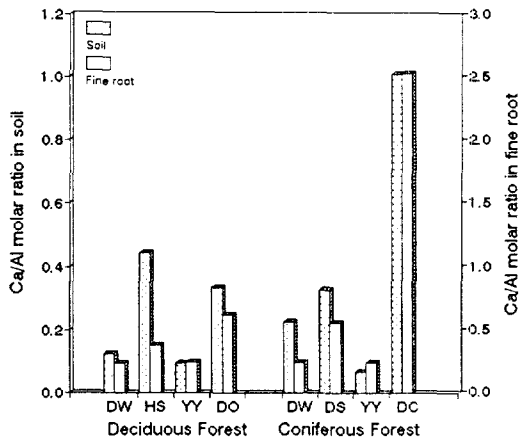


Fig. 4. Ca/Al molar ratio in different soils and fine roots. DW, HS, DS, YY: Dangwol, Hwasan, Doegshin, and Yongyon, sites near industrial estate DO, DC: Doowang and Dongcheon, sites in limited development district



**Table 5.** Correlation matrix among soil pH and Ca/Al molar ratio in soil and fine root.

Item	Soil pH	Soil Ca/Al	Fine root Ca/Al	Soil pH	Soil Ca/Al	Fine root Ca/Al
	Deciduous Forest			Coniferous forest		
Soil pH	1.000			1.000		
Soil Ca/Al	.155	1.000		.944**		
Fine root Ca/Al	.824	.653	1.000	.903**	.985**	1.000

n=4

\*\* : Significant at 1 % level

**Table 6.** Contents of heavy metals in different soil horizons of deciduous forest.

Site	Soil horizon	Heavy metal(ppm)				
		Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
<u>Dangwol</u>	A	81.67	82.00	204.67	67.63	4.67
	C	40.33	80.33	346.67	24.63	5.10
<u>Hwasan</u>	A	85.33	105.67	446.67	39.00	4.70
	C	35.00	78.67	423.33	25.13	5.37
<u>Yongyon</u>	A	47.67	112.67	513.33	45.40	5.53
	B	34.00	109.33	306.67	50.27	6.50
<u>Doowang</u>	A	40.00	100.00	940.00	21.20	6.01
	B	38.00	85.00	973.33	18.30	6.30

Dangwol, Hwasan and Yongyon are sites near industrial estate.

Doowang is a site in limited development district.

한 모든 조사구가 1 이하로써 임목의 根界發達에 피해를 줄 수 있는 수준을 훨씬 초과하였다(Fig. 4).

Table 5는 토양 pH와 토양과 세근내 Ca/Al 몰비간의 관계를 밝히기 위한 相關行列이다. 침엽수림의 경우 토양 pH와 토양 및 세근내 Ca/Al 몰비간에 고도의 상관관계를 보이고 있어, 土壤酸度가 토양과 세근내 Ca/Al 몰비의 변화에 밀접히 관여하고 있음을 알 수 있다. 즉 토양중에 양료공급량의 감소가 세근에 의한 양료흡수량의 저하를 초래하는 직접적인 영향 인자로 작용한다고 볼 수 있으며, 특히 工團地域의 경우 토양산성화가 가속화될 경우 근계발달의 저해와 이로 인한 양료결핍 및 수분부족 현상이 초래될 가능성이 높을 것으로 판단된다.

### 5. 土壤內 重金屬

토양내 Cu, Zn 및 Pb 함량은 두 임상 모두에서 공단지역이 개발제한지역보다 높은 반면, Mn과 Cd 함량은 반대로 개발제한지역에서 더 높게

나타났다. 임상별로 보면 Cu, Zn 및 Mn은 공단지역과 개발제한지역 모두에서 針葉樹林 土壤이 闊葉樹林 土壤보다 높았으나, Pb는 두 지역 모두에서 활엽수림 토양이 높았으며 Cd는 임상별로 거의 차이가 없었다(Tables 6,7). 결과적으로 工團地域 산림토양이 Cu, Zn 및 Pb에 의한 피해가 클 것으로 예상되며, 또한 토양산성화와 함께 이들 중금속들간의 上昇效果로 산림피해의 정도는 더욱 심화될 것으로 보인다. Cu, Zn, Pb의 토양층위별 중금속 함량은 B층 또는 C층보다 A층에서 높은 함량을 보였는데, 이는 대기로부터 유입된 Cu, Zn 및 Pb가 유기물층과 A층을 포함한 표토에 다량으로 集積된 결과로 보여진다. 그러나 Cd는 A층보다 B층이나 C층에서 다소 높게 나타났으며, Mn은 층위별로 유의적인 차이가 없었다.

### 6. 細根과 葉內 重金屬

개발제한지역에 비해 토양내 Cu, Zn 및 Pb 함량이 높았던 공단지역은 임목의 細根과 葉에

**Table 7.** Contents of heavy metals in different soil horizons of coniferous forest.

Site	Soil horizon	Heavy metal(ppm)				
		Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
<u>Dangwol</u>	A	94.33	130.33	696.67	43.20	5.05
	B	36.33	125.00	840.00	31.60	5.53
	C	38.00	114.00	636.67	48.70	5.43
<u>Doegshin</u>	A	72.00	85.33	516.67	24.43	5.63
	B	64.00	60.33	433.33	13.30	5.72
	C	58.67	57.33	363.33	11.17	5.63
<u>Yongyon</u>	A	86.00	189.67	360.33	36.84	5.24
	B	47.33	84.33	443.33	28.83	5.34
<u>Dongcheon</u>	A	44.33	104.33	1043.33	14.27	6.01
	B	38.00	68.33	776.67	8.17	6.16

Dangwol, Doegshin and Yongyon are sites near industrial estate.  
Dongcheon is a site in limited development district.

**Table 8.** Contents of heavy metals in fine root and foliage.

Site (species)	Fine root(ppm)					Foliage(ppm)				
	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
<u>Deciduous Forest</u>										
Dangwol ( <i>A. hirsuta</i> )	70	170	80	17	1	43	87	453	30	1
Hwasan ( <i>A. hirsuta</i> )	40	217	123	20	2	17	40	607	17	1
Yongyon ( <i>A. hirsuta</i> )	27	337	203	30	7	23	117	853	7	1
Doowang ( <i>Q. acutissima</i> )	10	37	247	7	1	13	33	310	7	1
<u>Coniferous Forest</u>										
Dangwol ( <i>P. rigida</i> )	17	50	413	10	1	10	37	637	7	1
Deogshin ( <i>P. rigida</i> )	23	97	213	10	1	3	27	210	7	1
Yongyon ( <i>P. thunbergii</i> )	23	50	197	27	1	10	30	807	7	1
Dongcheon ( <i>P. rigida</i> )	7	27	143	7	1	7	10	187	7	1

Dangwol, Hwasan, Doegshin and Yongyon are sites near industrial estate.  
Doowang and Dongcheon are sites in limited development district.

있어서도 같은 양상을 보였다(Table 8). 세근과  
엽내 Mn은 두왕의 상수리나무 세근을 제외하고  
공단지역이 개발제한지역보다 세근과 엽 모두에

서 높았고, 다른 중금속들과는 달리 세근보다 엽  
내 함량이 높게 나타났으며, Cd는 용연의 물오  
리나무 세근을 제외하고 수종과 조사구별 모두에

서 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 전체적으로 침엽수에 비해 다소 높은 중금속 함량을 보인 활엽수의 경우 같은 기간내 뿌리를 통한 흡수량과 건·습퇴적의 형태로 직접 업조적내 축적된 양이 많았을 것으로 보인다. 전체적인 중금속 함량은 토양에서와 같이  $Mn > Zn > Cu > Pb > Cd$ 의 순으로 분포하였다.

이상의 공단지역 산림의 임목에서 높게 나타난 세균과 엽내 중금속 함량의 결과가 대기로부터의 流入量 차이에 의한 것인지 또는 土壤酸性化度の 지역간 차이로 인한 중금속 吸收와 蓄積의 容易度 차이에 의한 것인지는 보다 면밀한 조사를 통하여 밝혀져야만 하겠지만, 조사 대상지역의 산림에 대기로부터의 중금속 유입량이 일정하다고 가정할 때 공단지역에 있어서 토양산도의 증가로 중금속의 流動性이 늘어나면서 토양내 水溶性 重金屬함량과 뿌리를 통한 흡수량이 증가하게 된 결과라고 추정된다.

## 結 論

이상의 결과들을 종합할때 울산지역 산림에 있어서 土壤酸度가 높은 지역일수록 토양, 세균 및 엽내 Ca과 Mg 함량은 낮은 반면 Cu, Zn, Pb의 함량은 높게 나타나 土壤酸性化가 이 지역 산림생태계의 토양, 세균 및 엽내 養料의 不均衡과 有毒性 重金屬의 流動 및 蓄積을 유발시키고 있는 것으로 추정된다. 특히 工團地域의 擴張과 이에 따른 각종 산성강하물의 放出과 擴散의 증가를 예상해 볼 때 울산지역 산림에 있어서 토양산성화로 인한 山林被害를 최소화하기 위해서는 근본적으로 汚染物質의 방출을 억제시켜야 하며, 동시에 Calcite( $CaCO_3$ ) 또는 Dolomite( $CaMg(CO_3)_2$ ) 등의 施用으로 土壤酸度를 矯正시키게 되면 토양과 임목간에 營養鹽類의 均衡을 유지시키고, 유독성 중금속의 토양내 吸着性을 높이는 반면 流動性은 감소시키는 역할을 하게 되어 土壤酸性化로 인한 산림생태계의 被害 因子를 감소시킬 수 있을 것으로 보인다.

## 參 考 文 獻

1. 姜寅求, 1986. 工業 都市化에 따른 蔚山·溫山地區의 環境과 植生의 變化에 關한 研究.

- 東國大學校大學院 博士學位論文, 101p.
2. 金東秀, 1988. 土壤化學分析法, 農村振興廳, 農業技術研究所, 450p.
  3. 金俊鎬, 1991. 環境汚染에 의한 都市林의 衰退徵候群, 都市, 山林, 環境 심포지움, 서울 시립대학교, pp.3 - 25.
  4. 金泰旭·朴仁協·李景宰, 1982. 環境汚染에 의한 蔚山地域의 森林生態學的 變化에 關한 研究, 韓國林學會誌, 58 : 60 - 69.
  5. 金泰旭 외 7名, 1994. 환경오염이 산림생태계에 미치는 영향, 대기오염에 의한 산림 토양 양료 및 독성물질 동태, 과학기술처, 산림청 임업연구원, pp.55 - 91.
  6. 閔一植·李壽煜, 1990. 人工酸性雨が 森林土壤의 緩衝能에 미치는 영향, 韓國林學會誌, 79(4) : 376 - 387.
  7. 李壽煜·閔一植, 1989. 大氣汚染 및 酸性雨が 森林生態系의 土壤酸度 및 養料分布에 미치는 影響, 韓國林學會誌, 78(1) : 11 - 25.
  8. 李興在·李敏孝·金東昊·金相敦, 1992. 大氣汚染과 산성비에 의한 被害調査 및 評價에 關한 研究(Ⅱ-4) - 산성비 被害 豫想地域 土壤에 대한 影響을 中心으로 - 國立 環境研究院報, 14 : 255 - 263.
  9. 韓相旭 외 9人, 1989. 大氣汚染에 의한 植物群集의 被害評價 및 維持方案에 關한 研究(Ⅰ) - 溫山工團 周邊地域의 植生을 中心으로 - 國立環境研究院報, 11 : 185 - 206.
  10. Abrahamsen, G. 1983. Sulfer pollution : Ca, Mg and Al in soil and soil water and possible effects on forest trees. Pages 207 - 218 in Hutchinson, T.C. and M. Havas, ed. Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York and London.
  11. Bache, B.W. 1980. The acidification of soil. Pages 83 - 202 in Hutchinson, T.C. and M. Havas, ed. Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press, New York and London.
  12. Bauch, J. 1983. Biological alterations in the stem and root of fir and spruce due to pollution influence. Pages 377 - 386 in Ulrich, B and J. Pankrath, ed. Effects of Accumu-

- lation of Air Pollutants in Forest ecosystems. D. Reidel Publishing Company.
13. Bergkvist, B. 1986. Leaching of metals from a spruce forest soil as influenced by experimental acidification. *Water Air Soil Pollut.* 31: 901-916.
  14. Brummer, G. and B. Ulrich. 1983. Influence of soil reaction and organic matter on the solubility of heavy metals in soils. Pages 233-243 in Ulrich, B. and J. Pankrath, ed. *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems*. D. Reidel Publishing Company.
  15. Cronan, C.S., R. April, R.J. Bartlett, et al., 1989. Aluminum toxicity in forests exposed to acidic deposition. *Water Air Soil Pollut.* 48: 181-192.
  16. Czuba, M. and D.P. Ormrod. 1981. Cadmium concentrations in cress shoots in relation to cadmium enhanced ozone phytotoxicity. *Environ. Pollut.* 25: 67-76.
  17. Freedman, B. 1989. *Environmental Ecology*. Academic Press, Inc. San Diego. 424p.
  18. Godbold, D.L., K. Dictus, and A. Huttermann. 1988. Influence of aluminium and nitrate on root growth and mineral nutrition of Norway spruce(*Picea abies*) seedlings. *Can. J. For. Res.* 18: 1167-1171.
  19. Hue, N.V., G.R. Craddock, and F. Adams. 1986. Effects of organic acids on aluminium toxicity in subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 28-34.
  20. Huettl, R.F. 1988. "New Type" forest declines and restabilization/revitalization strategies. *Water Air Soil Pollut.* 41: 95-111.
  21. Johnson, A.H. 1983. Red spruce decline in the northeastern U.S.: hypothesis regarding the role of acid rain. *Environ. Sci & Technol.* 17: 294A-305A.
  22. Joslin, J.D., J.M. Kelly, M.H. Wolfe, and L.E. Rustad. 1988. Elemental patterns in roots and foliage of mature spruce across a gradient of soil aluminium. *Water Air Soil Pollut.* 40: 375-390.
  23. Krug, E.C. and C.R. Frink. 1983. Acid rain on acid soil: A new perspective. *Science* 221: 520-525.
  24. Matzner, E. and B. Ulrich. 1985. Implications of the chemical soil conditions for forest decline. *Experientia* 41: 578-584.
  25. Noble, A.D., M.E. Summer, and A.K. Alva. 1988. The pH dependency of aluminum phytotoxicity alleviation by calcium sulfate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1398-1402.
  26. Reich, P.B., A.W. Schoettle, H.F. Stroy, and R.G. Amundsen. 1988. Effects of ozone and acid rain on white pine(*Pinus strobus*) seedlings grown in five soils. *Can. J. Bot.* 66: 1517-1531.
  27. Reuss, J.R. and D.W. Johnson. 1985. Effects of soil processes on the acidification of water by acid precipitation. *J. Environ. Qual.* 14: 26-31.
  28. Schier, G.A. 1985. Response of red spruce and balsam fir seedlings to aluminum toxicity in nutrient solutions. *Can. J. For. Res.* 15: 29-33.
  29. Stienen, H. and J. Bauch. 1988. Element content in tissues of spruce seedlings from hydroponic cultures simulating acidification and deacidification. *Plant Soil* 106: 231-238.
  30. Tepper, H.B., C.S. Yang, and M. Schaedle. 1989. Effect of aluminum on growth of root tips of honey locust and loblolly pine. *Environ. Exp. Bot.* 29: 165-173.
  31. Tyler, G. 1978. Leaching rates of heavy metal ions in forest soil. *Water Air Soil Pollut.* 9: 137-148.
  32. 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.
  33. Ulrich, B. 1983. Soil acidity and its relations to acid deposition. Pages 127-146 in Ulrich, B. and J. Pankrath, ed. *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems*. D. Reidel Publishing Com.

34. Ulrich, B. 1989. Forest decline in ecosystem perspective. Pages 21-41 in Ulrich, B., ed. Proceedings International Congress On Forest Decline Research.
35. Wallace, S.V. and I.C. Anderson. 1984. Aluminum toxicity and DNA synthesis in wheat roots. *Agronomy. J.* 76:5-8.