

## 器 내에서 培養된 5樹種의 Populus類에 對한 Aluminium 耐性比較<sup>1</sup>

鄭慶鎭<sup>2</sup> · 全瑛宇<sup>2</sup>

### Variation in Aluminium Tolerance Among 5 Species of In Vitro Cultured Populus

Kyung Ho Chung<sup>2</sup> and Young Woo Chun<sup>2</sup>

#### 要 約

器 내에서 培養된 5樹種의 Populus 類(*P. davidiana*, *P. maximowiczii*, *P. nigra*, *P. alba* x *P. glandulosa*, *P. nigra* x *P. maximowiczii*)의 줄기를 Aluminium-EDTA가 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0mM 씩 添加된 培地에 培養시켜 뿌리, 줄기, 잎의 生育상태를 調査하여 aluminium 耐性を 비교 분석하였다.

樹種間 Aluminium耐性の 差異는 比較的 甚하게 나타났고, 調査한 5樹種中 사시나무가 가장강한 耐성을 지닌것으로 나타났다. Al-EDTA가 낮은 濃度로 添加된 培地에서는 줄기와 뿌리생장에 촉진효과를 나타내는 種도 있었다. 1.0mM의 高濃度에서는 사시나무 이외의 樹種에서는 發根이 억제되었다. 양버들, 황철, 현사시와 같은 耐성이 弱한 樹種에서는 0.1mM의 낮은 濃度에서도 잎과 줄기에 形態의인 변이현상이 나타났다. 양황철은 그 兩親인 양버들이나 황철보다 줄기生長에서 耐성이 증가했다.

#### ABSTRACT

The relative aluminium tolerance of 5 Populus species (*Populus davidiana*, *P. mximowiczii*, *P. nigra*, *P. alba* x *P. glandulosa*, and *P. nigra* x *P. maximowiczii*) was evaluated on Murashige and Skoog medium with 5 levels of aluminium-EDTA concentration (0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0mM). The number of root initiation of 5 Populus species was significantly affected by the medium containing various levels of aluminium concentration. The native poplar, *P. davidiana* showed the highest aluminium tolerance among 5 species and even stimulated shoot and root growth on the medium containing at the low levels aluminium, 0.1 to 0.2 mM concentrations. The medium containing 1.0 mM aluminium inhibited root initiation from plantlets of all species except *P. davidiana*. Plantlets cultured on the medium with more than 0.5 mM aluminium exhibited retarded growth and abnormal leaf shape. *P. nigra* x *P. maximowiczii* exhibited significantly higher aluminium tolerance than its parental species. Silvicultural aspects associated with aluminium tolerance of *Populus* are also discussed.

Key Words : *Populus*, Aluminium-EDTA, Aluminium tolerance, in vitro Selection

<sup>1</sup> 接受 1989年 12月 15日 Received on December 15, 1989

<sup>2</sup> 國民大學校 林業大學 Collage of Forestry, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

## 緒 論

Aluminium 毒성은 酸性土壤에서 植物生長을 저해하는 主要 요인이며(Foy等 1978), 林木을 衰弱하게하고 枯死시켜 生態系를 위협하기도 한다(Kleim 1982, McLaughlin 1985).

1918年 Hartwell과 Pember가 酸性土壤에서 보리와 귀리의 뿌리生長 장애는 Aluminium과 관계 있다고 報告한후, 植物生態學者들은 Aluminium을 植物生長저해의 主要 原因으로 주목하게 되었고(Clarkson 1963, Clymo 1962, Hakett 1964, Rorison 1960), 몇몇 樹種의 針葉樹(Hutchinson, 1985)를 포함한 사탕단풍(Thornton等 1986), 포플러(Steiner 等 1984)에서 피해를 報告한바 있다.

특히 포플러는 다른 林木樹種보다 酸性土壤이나 可溶性 Aluminium의 濃도가 높은 土壤에 약한데도(Boyce와 Neebe 1959, Hart와 Byrnes 1960, Lorio와 Gatherum 1965, Thimble 1963, McCormick와 Steiner 1978, Steiner 등 1984) 꾸준히 酸性土壤이나 酸性岩盤으로 형성된 土壤에 造林되어왔다(Steiner 1984).

더구나 우리나라의 경우 土壤學的 調査없이 無分別한 포플러 造林이 계속되어 상당한 면적의 실패를 경험했다(Noh等 1984).

一般的으로 Aluminium 耐성은 植物의 種이나 遺傳型에 따라 다른데(Foy 1974), 種間의 Aluminium耐성을 比較하기 爲하여 Aluminium을 水溶液 상태로 植物에 공급하는 方法이 쓰여져왔고(McCormick와 Steiner 1978, Steiner 等 1984), 人工培地에서 植物生長에 피해를 줄 수 있는 형태의 Aluminium添加는 토마토(Meredith 1978), 당근(Ojima와 Ohira 1985), 담배(Conner와 Meredith 1985) 등에서 Aluminium耐성을 가진 돌연변이세포를 선발하기 위하여 Al-EDTA (Ethylene diaminetetra acetic acid)로 人工培地에 添加해 使用했음을 報告했다.

本 研究에서는 現在 우리나라의 造林獎勵樹種 이거나, 많은 면적의 自生地 또는 造林地를 가진 포플러 5個種(Noh等 1984)을 對象으로 濃度別 Aluminium을 添加한 培養培地에 生長시켜 그 피해와 耐성의 정도를 比較함으로써 우선 强酸性土

壤에 植栽했을때 피해가 적어질 포플러樹種을 선정하는데 目的을 두었고, 다음으로 Aluminium이 添加된 培地에서 生育障害를 입은 個體들의 形態의 特性을 調査하여, 林地에서 Aluminium피해조사나 Aluminium에 耐성을 가진 個體의 育成等 其他 造林學的 研究에 基礎資料를 제공하는데 목적을 두었다.

## 材料 및 方法

本 研究에 使用한 포플러 樹種은 우리나라 山地에 自生하는 樹種인 *Leuce* 節의 사시나무(*Populus davidiana*)와 *Tacamahaca* 節의 황철나무(*P. maximowiczii*) 그리고 外國에서 導入되어 가로수로 흔히 쓰여온 *Aegeiros* 節의 양버들(*P. nigra*), 1960年代부터 林木育種研究所에서 育成普及 하고 있는 *Leuce* 節內 交雜種 현사시(*P. alba* x *P. glandulosa*)와 *Aegeiros* 節과 *Tacamahaca* 節間의 交雜種인 양황철(*P. nigra* x *P. maximowiczii*)를 利用했다.

以上の 5種은 無菌狀態로 MS(Murashige와 Skoog, 1962) + BA(Benzyle adenine) 0.9 $\mu$ M 培地에서 1年以上 계대배양 한것으로 2.5cm 정도의 줄기를 임의로 선정하여 Aluminium의 濃도에 對한 生育상황을 시험하였다.

實驗에 使用한 培地는 MS基本培地에 IBA (Indole Butric Acid) 1.5 $\mu$ M를 添加하고 Al-EDTA 형태의 Aluminium이 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 mM濃도가 되도록 넣어 pH를 5.7이 되도록 0.5M의 KOH와 HCl로 調整한 후 1.2kg/cm<sup>2</sup>에서 15分間 고압증기멸균 했다.

직경5.5cm 높이 8cm 배양용기에 5本씩을 하나의 실험단위로 하여 이식하였고, 수종별 Al농도별로 3반복씩 실험하였으며, 통계분석방법은 Mize와 Chun(1988)의 방법을 이용했다. 1600Lux의 백색형광등을 16시간 日長 조건으로 25 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C의 生長조절실에서 生長시켰다.

各各의 濃度에서 8週間 生長한 個體에서 뿌리의 發生數와 뿌리길이를 調査하고 形態적으로 나타나는 Aluminium 피해상태를 比較했다. 줄기의 길이를 測定하여 Aluminium이 添加되지 않은 培地에서 生長한 個體와 比較될 수 있도록 2平均을 가지고 各농도에서 다음공식에 의해 피해지수를 산

출했다.

$$\text{Aluminum 피해지수} = \frac{\text{Aluminium이 첨가된 배지에서 생육한 개체의 평균 줄기 길이} - \text{Aluminium이 첨가되지 않은 배지에서 생육한 개체의 평균줄기 길이}}{\text{Aluminium이 첨가되지 않은 배지에서 생육한 개체의 평균 줄기 길이}} \times 100$$

앞에서 나타나는 Aluminium 피해현상은 정상적인 것과 비교해서 그 크기와 색, 형태등을 조사했다.

**結果 및 考察**

**1. 뿌리의 Aluminium 피해현상과 생장**

Aluminium이 添加된 培地에서 뿌리의 피해현상과 생장은 樹種間에 아주 다양하게 나타났으며 피해현상은 주로 뿌리 發生數와 生長에서 나타났고 0.1mM 혹은 0.2mM 濃度까지 피해현상이 전혀 없거나 오히려 生長에 도움을 주는 경우와 발생수는 많으나 길이 生長이 안되는 異常形態가 생기는 경우도 있었다.

各各의 濃度에서 5個樹種의 平均 뿌리 發生數는 표 1과 같다. 사시나무의 경우 1.0mM의 高濃度까지 거의 均一한 發生數를 보여 가장 큰 耐性을 가진 것으로 나타났다. 황철나무가 1.0mM에서 小數 發根되는 것을 제외하고 나머지 3種에서는 發根

이 관찰되지 않았다.

뿌리생장에서 Aluminium의 영향은 표1에서 보는 것과 같이 사시나무를 제외하고 0.2mM에서 강한 장애를 나타냈다. 發生數에서 다소 耐性을 가지던 황철나무도 生長에서는 0.1mM부터 피해가 생겼다. 사시나무가 0.1mM이나 0.2mM에서 生長장애를 받지 않거나 多小의 生長촉진 效果를 보인 것은, Medappa와 Pana가(1968) 덩굴월귤 (*Vaccinium macrocarpon*) 실험에서 pH3.5에서 2.5ppm Aluminium을 주었을 때 뿌리의 生長촉진 效果가 있음을 報告한 경우와 비슷하며, Roy等(1988)은 이 原因을 미량원소의 흡수 촉진 또는 毒性物質의 흡수방해 등으로 分析한바 있다. 뿌리 生長에서 Aluminium濃度別로 전형적인 피해현상을 보인 황철나무의 뿌리모양은 그림1와 같다.

Aluminium을 添加한 培地에서 형태의 異常을 보인 것은 황철나무가 0.1mM처리한 培地에서 뿌리 發生數는 차이가 없으나 生長에 지장을 주어 Host와 Goppel(1986)이 *Vicia faba*를 포함한 3種에서 調査한 結果와 一致하는 현상을 보였고 0.5 mM의 Al-EDTA가 첨가된 培地에서 짧고 뭉뚱한 小數의 뿌리모양을 보여 Bori(Foy 1974)에서 報告된바있는 이상형태를 보였다.

양황철은 比較的 地下部에서 피해가 地上部보다

**Table 1.** Effect of increasing Al-EDTA levels in MS medium containing IBA 0.3mg/l on initiation and relative growth of roots.

Populus species/ Numbers of induced root/ Relative elongation	Aluminium levels (mM)				
	0	0.1	0.2	0.5	1.0
<i>Populus davidiana</i>					
Numbers of induced root	3.0±0.4**	2.3±0.3 <sup>a</sup>	2.6±0.5 <sup>a</sup>	2.5±0.4 <sup>a</sup>	2.8±0.7 <sup>a</sup>
Relative elongation	+++*	++++	+++	++	++
<i>Populus maximowiczii</i>					
Numbers of induced root	3.9±0.3 <sup>ab</sup>	4.1±0.5 <sup>a</sup>	3.4±0.2 <sup>b</sup>	2.7±0.4 <sup>c</sup>	0.9±0.4 <sup>d</sup>
Relative elongation	+++	++	+	+	-
<i>Populus nigra</i>					
Numbers of induced root	4.3±0.3 <sup>a</sup>	3.2±0.7 <sup>b</sup>	1.5±0.4 <sup>c</sup>	1.3±0.2 <sup>c</sup>	0 <sup>c</sup>
Relative elongation	+++	++	+	+	-
<i>Populus alba x P. glandulosa</i>					
Numbers of induced root	6.0±0.6 <sup>a</sup>	4.3±0.3 <sup>b</sup>	1.2±0.5 <sup>c</sup>	1.7±0.6 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>
Relative elongation	+++	+++	++	++	-
<i>Populus nigra X P. maximowiczii</i>					
Numbers of induced root	2.0±0.4 <sup>a</sup>	1.4±0.3 <sup>ab</sup>	1.8±0.9 <sup>a</sup>	0.9±0.4 <sup>bc</sup>	0 <sup>c</sup>
Relative elongation	+++	++	+	-	-

\* Means with same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test (p=0.05). Each mean represents 3 replications and the standard error=±0.60.

\*\*-++++: very good, ++++: good, ++: moderate, +: bad, -: dead

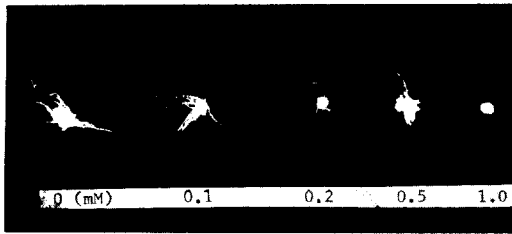


Fig. 1. The *in vitro* response of *P. maximowiczii* roots on MS medium containing various levels of Al-EDTA.

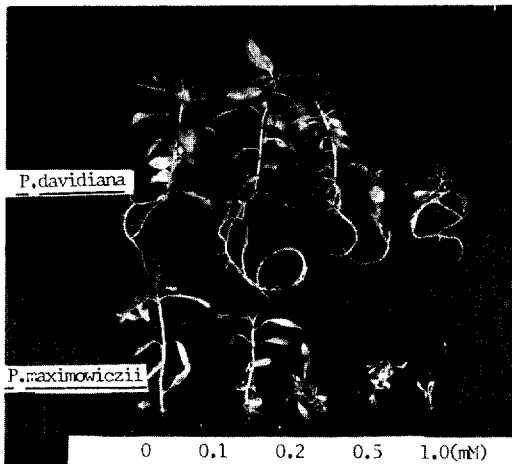


Fig. 2. Differential aluminium tolerance of *P. davidiana* and *P. maximowiczii* on the rooting medium (MS + IBA 0.3mg/l) containing various levels of Al-EDTA after 4 weeks culture

심했고 현사시는 地上部에서 피해가 더 심하게 나타났다(표 1 그림 3).

직접적으로 酸性土壤에서 Aluminium에 노출되어지는 뿌리는 포플러 種間에 상당한 耐性的의 差異를 보여, 포플러 造林에서 造林地의 선택과 樹種 선택에서 고려해야할 主要한 問題로 사료된다.

## 2. 줄기生長에서 Aluminium 效果

직접 Aluminium배지에 닿지 않은 줄기에서도 점증 2주후부터 피해현상이 나타나기 시작해 생장이 감소하거나 줄기가 총생하는 형태를 보였다.

점증후 8주간 생장시킨 줄기에서 피해지수를 도해한 그래프는 그림 3과 같다. 사시나무는 뿌리에서와 같이 가장 내성이 강한것으로 나타났고 0.2 mM까지의 濃度에서는 生長이 촉진되었다. Borkenhagen과 Iyer(1972)는 질소질이 풍부한 토

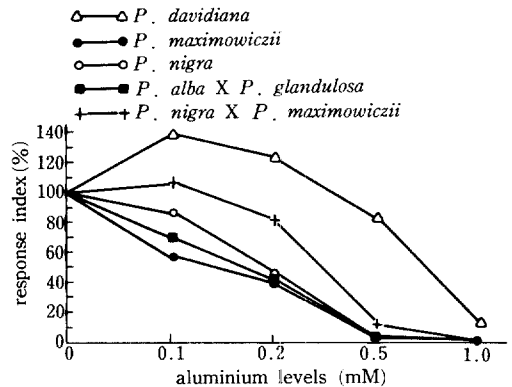


Fig. 3. Response index of shoot growth for differential treatment of Al-EDTA levels on 5 *Populus* species.

양에서 불필요한 생장을 억제시킴으로 생장을 안정되게하는 Aluminium의 효과를 설명했고, 生長에 不必要한 成分이 될 수 있는 P(Clark 1977), Cu(Liebig等 1942), Mn(Rees와 Sidrak 1961) 등을 제거 함으로 植物生長에 유익할 수 있다고 보고한바 있다. 또한 Foy等(1978)도 Aluminium이 저농도 일때 種에 따라서 유익할 수 있음을 고찰한 바 있다. 사시나무의 줄기生長에서 촉진효과는 이들의 원인에 기인한 것으로 생각된다. 比較的 Aluminium에 耐性을 가진 사시나무와 피해가 극심한 황철나무를 各 濃度의 培地에서 4주간 生長시킨 줄기의 형태는 그림 2와 같다. 양황철나무도 0.1mM에서는 다소의 촉진효과가 보였다. 뿌리에서 비교적 강했던 현사시나무도 0.1mM부터 심한 저해현상을 나타냈고 양버들나무이나 황철나무도 0.5mM以上에서 거의 生長하지 못하고 황변하여 枯死했다. 0.1mM濃度에서 8주후까지 생존하는 種은 사시나무 밖에 없었다.

줄기의 形態의 異常을 보인것은 사시나무를 제외하고 0.1~0.2mM濃度에서 줄기가 叢生하고 마디사이가 짧아지는 모양을 보였다. 사시나무는 0.5mM濃度에서 부터 몇개의 줄기가 叢生했다.

Aluminium은 토양중의 뿌리에서 뿐만아니라 줄기에서도 상당한 영향을 줌으로 Biomass 生産量에 커다란 불이익을 줄 수 있음을 고려할 때 포플러 造林地 선택에서 배제될 수 없는 인자로 사료된다.

### 3. 잎의 형태에서 Aluminium 효과

Aluminium이 添加된 培地에서 8주간 生長시켰을 때 耐性이 약한 樹種은 새로 發生되는 잎의 크기가 작아지거나 移植前에 發生되었던 잎은 葉緣으로부터 白化되기 시작해 1/3까지 퍼져서 죽게 되었다.

잎에서도 뿌리나 줄기와 마찬가지로 사시나무가 가장 강해서 0.2mM濃度까지는 接種하기전 붙어 있던 잎에서 별다른 피해가 없었고 새로 발생되는 잎이 조금씩 크기가 작아졌다(그림4). 양황철나무도 비교적 강한 耐性을 나타내 0.2mM까지 피해가 거의 없다가 0.5mM부터 잎이 작아지고 白化되는 것들이 급격히 많아졌다. 나머지 Aluminium에 耐性이 약한 현사시 양버들 황철나무 3樹種은 0.1 mM부터 새로 發生되는 잎은 크기가 작아지고 기존의 잎들은 白化되어 생존하지 못했다. 이러한 Aluminium土壤에서 잎의 白化現象은 Pavan과 Bingham(1982)이 coffee에서 관찰했고 Mryazawa等(1981)은 벼에서 관찰 보고한바 있다.

이처럼 Aluminium은 植物의 生長이나 形態의 變化로 피해를 주는 것 이외에 農作物의 生産量에도 영향을 미치고 (Sarkunan等 1984, Miyazawa等 1981, Blamey 1983, Fagria 1982), 광합성 (Sarkunan等 1984), 호흡작용(Bennet等 1985, Clarkson 1969), 그 밖의 生理作用등(Barber 1974, Sarkunan等 1984)에도 피해를 주는 것으로

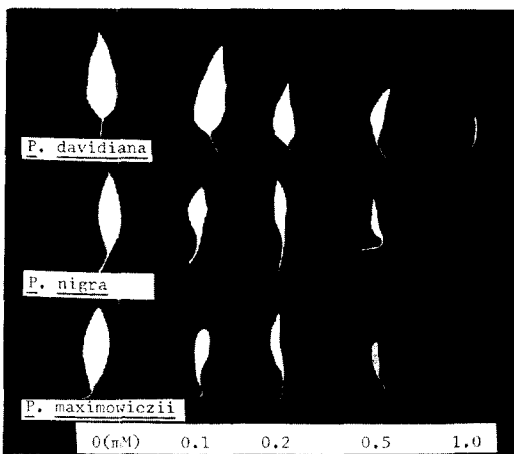


Fig. 4. Various leaf morphology of *P. davidiana*, *P. nigra* and *P. maximowiczii* derived from upper part of the shoot cultures on the rooting medium (MS+IBA 0.3mg/l) with various concentrations of Al-EDTA

알려져 있다.

더구나 産業化로 생겨나는 酸性雨등으로 山地의 酸性化가 甚해짐을 감안할 때 Aluminium이 주는 피해조사나 내성을 가진 종의육성 등의 방법으로 신중히 대처해야할 과제로 사료된다.

### 結 論

우리나라에 自生하는 사시나무와 황철나무, 가로수로 심겨진 양버들 그리고 主要造林樹種인 현사시와 양황철, 이상 5種을 Aluminium이 濃度別로 添加된 培地에 生長시켜 그 耐性和 피해정도를 比較한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 5樹種間 상당한 耐性的 差異가 있고 山地 自生種인 사시나무가 뿌리와 줄기生長에 가장 높은 耐性을 가져 비교적 Aluminium에 강한 것으로 나타났다.
2. Aluminium은 포플러류의 뿌리 生長을 억제하고 고농도에서 뿌리 發生을 억제시켜 枯死시켰다.
3. 耐性이 弱한 樹種인 현사시, 양버들, 황철나무는 낮은 濃度에서도 줄기가 叢生하고 잎이 變形되었다.
4. 현사시는 Aluminium에 노출되었을 때 줄기部分보다 뿌리部分이 强하고 양황철은 그 반대였다.

### 引 用 文 獻

1. Barber, S.A. 1974. Influence of the plant root an ion movement in soil. Pages 525-564 in Carson, E.W. ed. The plant root and environment. Univ. Press.
2. Bennet, R.J., C.M. Breen, and M.V. Fey. 1985. Aluminium uptake sites in the primary root of *Tea mays* L.S. Afr. J. Pl. Soil. 2 : 1-7.
3. Blamey, F.P.C. 1983. Acid soil infertility : Effects on peanut yield and yield components. Commun. Soil Sci. Pl. Anal. 14 : 373-386.
4. Borkenhagen, J.E., and J.G.Iyer. 1972. Aluminium sulfate as a stabilizer of nursery stock development. J. Forestry 70 : 33-34.

5. Boyce, S.G., and D.J. Neebe. 1959. Trees for planting on strip-mined land in Illinois. USDA For. Serv. Cent. States Forest Exp. Station Tech. Rep. 164. 33p.
6. Clark, R.B. 1977. Effect of aluminium and on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant Soil* 47 : 653-662.
7. Clarkson, P.T. 1963. Some comparative aspects of the mineral nutrition of species in the genus *Agrostis* with special reference to *Agrostis setacea*. Ph. D. Dissertation, Univ. of Exeter.
8. Clarkson, P.T. 1969. Metabolic aspects of aluminium toxicity and some possible mechanisms for resistance. Pages 381-397 in Rorison, I.H. ed. Ecological aspects of mineral nutrition in plants. Symp. Brit. Ecol. Soc. Np. 9. Blackwell Sci. Publ., Oxford.
9. Clymo, R.S. 1962. An experimental approach to part of the calcicole problem. *J. Ecol.* 50 : 707-731.
10. Conner, A.J., and C.P. Meredith. 1985. Large scale selection of aluminium-resistant mutants from plant cell culture: expression and inheritance in seedlings. *Theo. Appl. Gen.* 71 : 159-165.
11. Fagria, N.K. 1982. Differential tolerance of rice cultivars to aluminium in nutrient solution. *Pesq. Agropecu. Bras.* 17 : 1-9.
12. Foy, C.D. 1974. Effect of aluminium on plant growth. Page 601-642. in Carson, E.W. ed. *The plant root and its environment*. Univ. Press of Virginia, Charlottesville.
13. Foy, C.D., R.L. Chaney, and M.C. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 29 : 511-566.
14. Hackett, C. 1964. Ecological aspect of the nutrition of *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. I. The effect of aluminium, manganese and pH on germination. *J. Ecol.* 52 : 159-168.
15. Hart, G.E., and W.R. Byrnes. 1960. Trees for strip-mined lands. USDA Forest Serv. Northeast Forest Exp. Station Paper 136, 36 p.
16. Hartwell, B.C., and F.R. Pember. 1918. The presence of aluminium as a reason for the difference in the effect of so-called acid soil on barley and rye. *Soil Sci.* 1 : 345-373.
17. Host, W.J., and H. Goppel. 1986. Aluminium-Toleanz von Ackerbohne (*Vicia faba*), Lupine (*Lupinus luteus*), Gerste (*Hordeum vulgare*) und Roggen (*Secale cereale*). II. Mineralstoff gehalte in SproBe b und Wurzeln in Abhangigkeit vom Aluminium-Angebot. *Z. Pflantenernaehr Bodenk.* 149 : 94-109.
18. Hutchinson, T.C. 1985. A comparative study of the toxicity of aluminium to seedlings of five conifer species. Report to the Canadian Forestry Service. Univ. of Toronto, Ontario, Canada.
19. Klein, R.M. 1982. Ecosystems approach to the acid rain problem. *Acid Precip. Ser.* (Proc. Symp. Acid Precip. Am. and Chem. Soc. Meet.). Linthurst, R.A. ed. page 1982. Publ. May 1-11, 1984. Butterworth, Boston.
20. Liebig, G.F., A.P. Vanselow, and H.P. Chapman. 1942. Effect of Al on Cu toxicity as revealed by solution culture and spectrographic studies of Citrus. *Soil Sci.* 53 : 341-359.
21. Lorio, P.L., Jr., and G.E. Gatherum. 1965. Relationship of tree survival and yield to coal-spoil characteristics. *Iowa State Univ. Agric. and Home Econ. Exp. Station Res. Bull.* 535 : 394-403.
22. McCormick, P.H., and K.C. Steiner. 1978. Variation in aluminium tolerance among six genera of trees. *For. Sci.* 24 : 565-568.
23. McLaughlin, S.B. 1985. Effects of air pollution on forests-A critical review. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 35 : 512-534.
24. Meredith, C.P. 1978. Selection and characterization of aluminium-resistant variants from tomato cell cultures. *Plant Sci. Lett.* 12 : 25-34.
25. Medappa, K.C., and M.N. Dana. 1968. Influence of pH, calcium, iron and aluminium on the uptake of radiophosphorus by cranberry plants. *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.* 32 :

- 381-383.
26. Miyazawa, A., N. Maeda, and A. Kitawa. 1981. Aluminium toxicity on the growth of rice plants. *Miyagi-Ken Nogyo Senta Kenkyu Hokoku* 48 : 43-58.
  27. Mize, C.W., and Y.W.Chun. 1988. Analysing treatment means in plant tissue culture research. *Plant Cell Tissue Organ Culture* 13 : 201-217.
  28. Murashige, T., and F. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture. *Physiol. Plant.* 15 : 473-479.
  29. Noh, E.R., S.K. Hyun, J.M. Jo, R.M. Choi, S.K. Lee, J.K. Ann, and J.J. Kim. 1984. Activities related to poplar breeding, cultivation, exploitation and utilization (1980-1984). *Inst. For. Genet. Res. Paper* 20 : 10-45.
  30. Ojima, K.H. Abe, and K. Ohira. 1985. Release of citric acid into the medium by aluminium-tolerant carrot cells. *Plant Cell Physiol.* 25 : 855-858.
  31. Pavan, M.A., and F.T. Bingham. 1982. Aluminium toxicity in coffee seedlings in relation to calcium nutrition. *Rev. Bras. Ci. Solo* 6 : 209-213.
  32. Rees, W.J., and G.M. Sidrak. 1961. Interrelationships of aluminium and manganese toward plants. *Plant Soil* 14 : 101-117.
  33. Rorison, I.H. 1960. The calcicole-calcifuge problem. II. The effects of mineral nutrition on seedling growth in solution culture. *J. Ecol.* 48 : 679-688.
  34. Roy, A.K., A. Sharma, and G. Talukder. 1988. Some aspects of aluminium toxicity in plants. *Bot. Rev.* 54 : 144-178.
  35. Sarkunan, V., C.C. Biddappa, and S.K. Nayak. 1984. Physiology of Al-toxicity in rice. *Curr. Sci.* 53 : 822-824.
  36. Stiner, K.C., J.R. Barbour, and L.H. McCormick. 1984. Response of *Populus* hybrids to aluminium toxicity. *Forest Sci.* 30 : 404-410.
  37. Thornton, F.C., M. Scheadle, and D.J. Raynal. 1986. Effect of aluminium on the growth of sugar maple in solution culture. *Can. J. For. Res.* 16 : 892-896.
  38. Trimble, E.E., Jr. 1963. Hybrid poplar grows poorly on acid spoil banks at high elevations in west Virginia. *USDA For. Res. Note NE-7*, 4p.