

# 알루미늄 농도에 따른 소나무 묘木の 生長, 營養狀態 및 光合成速度에 미치는 影響<sup>1</sup>

李忠和<sup>2</sup> · 陳鉉五<sup>3</sup> · 伊豆田猛<sup>4</sup>

## Growth, Nutrient Status and Net Photosynthetic Rate of *Pinus densiflora* Seedlings in Various Levels of Aluminum Concentrations<sup>1</sup>

Choong Hwa Lee<sup>2</sup>, Hyun O Jin<sup>3</sup> and Takeshi Izuta<sup>4</sup>

### 要 約

여러 가지 Al농도가 소나무 묘木の 生長, 營養상태 및 광합성속도에 미치는 영향을 수경재배법에 의하여 조사하였다. 배양액의 Al농도는 0(대조구), 10, 30 및 60ppm의 4처리구로서 1/5000a 포트에 배양액의 pH를 4.0으로 조절한 후, 소나무(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 2년생 묘木을 배양액에 이식하여 1996년 5월 8일부터 8월 6일까지 90일 동안 온실에서 생육시켰다.

소나무 묘木은 10ppm 이상의 처리구에서 건물생장의 감소를 초래하였다. 소나무 묘木의 상대생장율(RGR) 및 순동화율(NAR)은 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 Al농도가 증가함에 따라서 순광합성속도도 저하되었다. 이는 Al처리에 의한 소나무 묘木의 RGR 및 NAR저하는 광합성저해가 원인이라고 생각된다. 또한, 60ppm 처리구에서 잎의 Ca 및 Mg농도는 대조구 및 10ppm 처리구에 비하여 감소하였으며 식물체 각 기관의 Al농도는 10ppm 이상의 처리구에서 대조구에 비하여 증가하였다. 이것은 지하부에 축적된 Al에 의해서 뿌리의 생리기능이 저하되어, 양분흡수 능력이 떨어져 결과적으로 지상부의 Ca 및 Mg와 같은 식물생육 필수원소의 농도가 감소되었음을 시사하고 있다.

### ABSTRACT

The effects of various levels of Al concentration on growth, nutrient status and net photosynthetic rate of 2-year-old *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. seedlings grown in a nutrient culture solution were investigated. Al concentrations were added as aluminum chloride( $AlCl_3$ ) at 0(control), 10, 30 and 60ppm to the nutrient culture solution. The nutrient culture solution was maintained at pH 4.0 by adding HCl or NaOH solution. The seedlings were transplanted into the nutrient culture solution and grown in a greenhouse for 90 days from May 8 to August 6, 1996.

The treatment above 10ppm of Al concentrations induced a significant reduction on the dry weight growth of the seedlings. The relative growth rate(RGR), net assimilation rate(NAR) and net photosynthetic rate of the seedlings were reduced with increasing of Al concentrations in the nutrient culture solutions. This result suggests that reductions in the RGR and NAR of the seedlings were mainly due to the inhibition of net photosynthesis. In addition, the increase of Al concentrations in a nutrient culture

<sup>1</sup> 接受 1999年 2月 2日 Received on February 2, 1999.

<sup>2</sup> 林業研究院 Forestry Research Institute, Seoul 130-012, Korea.

<sup>3</sup> 慶熙大學校 林學科 Department of Forestry, Kyunghee University, Suwon 449-701, Korea.

<sup>4</sup> 東京農工大學 農學部 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan.

solution decreased the concentration of essential mineral elements such as Ca and Mg in the needle of the seedlings. However, the concentrations of Al of each plant organ increased in the treatment above 10ppm of Al concentrations in the nutrient culture solutions. This result suggests that the increased Al concentration in the belowground part resulted from the decreased concentration of essential mineral elements in the aboveground part of the seedlings.

*Key words* : Aluminum, dry weight, net photosynthetic rate, nutrient culture solution, nutrient status, Pinus densiflora seedlings

## 緒 論

최근 도시화·산업화의 발달과 함께 산림생태계내 토양산성화는 산성우 등과 같은 산성강하물의 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Krause 등, 1986; Likens, 1989). 산성강하물이 토양으로 침착·침투하는 초기단계에서는 H<sup>+</sup>와 염기와의 교환반응에 의해 Ca, Mg 등과 같은 식물생육 필수원소가 토양으로부터 용탈되나(吉田과 川畑, 1988), 토양산성화가 계속 진행되면, 토양중에 Al, Mn 등과 같은 식물 유해금속을 용출시킨다(Ulrich 등, 1980; 吉田과 川畑, 1988). 토양내에 용출된 Al은 식물의 세근 발생이나 신장생장을 억제하여 식물생육 필수원소나 수분의 흡수를 저해한다(Foy 등, 1978; Rengel, 1992). 따라서 산성강하물에 의해서 산성화된 토양에 생육하고 있는 수목은 염기용탈로 인한 식물 영양상태의 악화와 Al 등과 같은 식물 유해금속의 복합적인 영향을 받을 것이 예상되고 있다.

수경재배액 중에 과잉의 Al이 존재할 경우, 뿌리로부터 Ca, Mg 등과 같은 식물생육 필수원소의 흡수 및 식물체내의 이행이 저해되어 최종적으로는 성장감소를 초래하며(Hecht-Buchholz 등, 1987; Taylor, 1989), 농작물이나 초본류의 경우, 수경액이나 토양용액의 Al농도가 10ppm 이하에서도 나쁜 영향을 미치는 경향이 있다고 보고하고 있다(Andersson, 1988). 그러나, 실험조건이나 식물의 종이 달라지면, Al의 영향은 다르게 반응하는 것으로 알려져 있으나(Hutchinson 등, 1986; Keltjens와 Loenen, 1989), 동아시아 지역에 생육하고 있는 수목의 성장 및 영양상태 등에 대한 Al의 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다(三宅 등, 1991; Izuta 등, 1996).

본 연구에서는 여러 가지 Al농도가 소나무 묘木の 生長, 영양상태 및 광합성속도에 미치는 영향을 수경재배법에 의한 연구결과로서, 산성화된 토양에 생육하고 있는 수목의 성장 및 생리적인

변화에 대한 기초자료를 제공하기 위하여 실시되었다.

## 材料 및 方法

### 1. 소나무 묘木の 육성

본 연구에서는 일반적으로 소나무 묘木の 수경재배에 이용되는 배양액(Table 1)을 사용하였다(Akama, 1989). 배양액 내 Al농도는 0(대조구), 10, 30 및 60ppm이 되도록 AlCl<sub>3</sub>를 첨가하여 조절하였다. 소나무(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 2년생을 약 3.5L의 배양액을 채운 1/5000a 와그

**Table 1.** Concentrations of salts and elements in Akama's nutrient culture solution.

Salt	Concentration(mg · L <sup>-1</sup> )
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	132.14
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	147.03
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	34.02
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	123.24
KCl	37.28
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	3.60
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.22
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.08
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.13
Fe-EDTA	7.55
Element	Concentration(mg · L <sup>-1</sup> )
N	28.50
P	7.70
K	29.40
Ca	40.10
Mg	12.20
Mn	1.00
B	0.50
Zn	0.05
Cu	0.02
Mo	0.05
Fe	1.00

너 포트에 각각 8개체씩 이식하였으며, 묘목을 고정시키기 위하여 직경이 2cm인 구멍을 같은 간격으로 8개소 설치한 염화비닐판(두께 4mm)으로 포트의 뚜껑으로써 빛을 차단함과 동시에 스폰지마개를 이용하여 묘목을 고정하였다. 배양액의 pH는 HCl 또는 NaOH 용액으로 pH 4.0(± 0.2)으로 조절하였으며, 매일 1회 설정 범위 내에 들도록 재조정하였다. 또한, 증발이나 묘목에 의한 증산 및 흡수에 따른 배양액의 감소를 방지하기 위하여 pH조정 전후에 이온정제수(deionized water)를 초기의 수준까지 공급하였다. 이온정제수는 수도물을 이온교환수지를 통과시켜 pH가 6.5±0.5, 전기전도도가 2μS·cm<sup>-1</sup>이하로 조정된 후 사용하였다.

1996년 4월 22일부터 약 2주간 A1을 첨가하지 않은 배양액에서 소나무 묘목을 생육시켜 수정배를 위해 적응시켰으며, 5월 8일부터 8월 6일까지 90일간 각 처리구의 배양액에서 日本 東京都府中市에 위치한 東京農工大學 온실에서 생육시켰다. 생육기간 중 온실내의 일평균기온, 평균상대습도 및 적산일사량은 각각 25.1℃, 74% 및 846MJ·m<sup>-2</sup> 이었다. 한편, 배양액은 공기펌프에 의해 항시 통기시켰으며(1.5L·min<sup>-1</sup>·pot<sup>-1</sup>), 일주일에 2회 전량 교환하였다.

**2. 生長解析 및 식물체내의 성분분석**

각 처리별 묘목은 90일간 배양액에서 생육시킨 후, 각 처리구당 6개체의 묘목을 임의로 선정하여 표본 추출하였으며, 각 기관별(잎, 수간+가지, 뿌리)로 생중량을 측정하고 60℃에서 5일간 열풍 건조하여 건중량을 측정하였다. 시험시작 및 종료시의 건중량을 이용하여 90일간의 개체건물생

장의 상대생장율(relative growth rate : RGR), 순동화율(net assimilation rate : NAR) 및 엽건중비(leaf dry weight ratio : LWR)를 산출하였다(Hunt, 1978).

건중량을 측정된 각 처리구의 묘목은 식물기관별로 분쇄한 후, 분해기(Hach Co, Digesdahl Co, 23130-20)로 황산과 과산화수소수로 습식 분해하였다. 이 분해액을 원자흡광광도계(Shimadzu Co, AA-670)로 식물체내의 Ca, Mg, K, Al 및 Mn 농도를 분석하였다.

**3. 광합성속도의 측정**

소나무 묘목의 순광합성속도는 산소전극장치(Hansatech Co, LD2, CB1-D)를 이용하여 시험종료시 측정하였으며(Delieu와 Walker, 1981), 이때 온도제어기(Tokyo Rigaku Co, Cool Ace CA-111)로 챔버내의 온도를 20±0.5℃로 제어하였고 광원은 테크노라이트(Kenko Co, Tokyo)를 사용하였다. 순광합성속도 측정시 챔버내 묘목 최상부의 광합성 유효방사속밀도를 650μE·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 제어하였으며, 순광합성속도는 잎의 건중량 단위로 환산하였다.

**結果 및 考察**

90일 동안 온실에서 생육시킨 소나무 묘목의 건중량에 미치는 A1의 영향은 Table 2와 같다. 10, 30 및 60ppm 처리구의 잎, 뿌리 및 개체 전체의 건중량은 대조구에 비하여 유의적으로 감소하였다. 또한 60ppm 처리구의 수간의 건중량은 대조구 및 10ppm 처리구에 비하여 유의적으로 감소하였다. 이 결과는 삼나무 묘목을 60일 동안

**Table 2.** Effects of Al on dry weight of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days in the nutrient culture solution. The value is the mean of 6 determinations, and the standard deviation is shown in parentheses.

Al concentration (ppm)	Needle (g)	Trunk (g)	Root (g)	Whole-plant (g)
Initial	0.79(0.27)	0.27(0.06)	0.23(0.13)	1.29(0.44)
0	5.44(0.68) a	1.61(0.24) a	1.58(0.32) a	8.63(1.10) a
10	4.55(0.53) b	1.64(0.24) a	1.24(0.22) b	7.42(0.76) b
30	4.45(1.01) bc	1.53(0.40) ab	0.84(0.20) c	6.83(1.21) bc
60	3.72(0.57) c	1.27(0.30) b	0.78(0.21) c	5.78(1.05) c

Values followed by the different letters within a column for each plant organ are significantly different according to the Duncan's new multiple range test(*p*<0.05).

Al처리한 실험에서 지하부의 건중량이 30ppm 처리구에서 유의적으로 감소한 결과(三宅 등, 1991)와 상이한 것으로, 실험조건이나 대상 수종이 달라지면 Al의 영향은 다르게 반응하며, 또한 소나무는 Al에 대한 감수성이 삼나무에 비하여 크다고 생각된다.

생장해석 결과(Fig. 1), 소나무 묘木의 개체 건물생장의 RGR 및 NAR은 배양액에 Al첨가량이 증가함에 따라서 저하하였으나, LWR에 대한 Al의 영향은 인정할 수 없었다. 이들의 결과는 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 의한 잎의 건물 생산효율이 저하되었다는 것을 시사하고 있다.

한편 잎의 건물 생산능력을 나타내는 지표인 NAR은 주로 순광합성속도에 의해서 결정된다고 보고하고 있다(戶塚, 1984). 따라서 건물 생산효율 저하의 원인을 밝히기 위하여, 소나무 묘木의 순광합성속도를 측정된 결과(Fig. 2), 10ppm 이상의 처리구에서 대조구에 비하여 유의적으로 낮

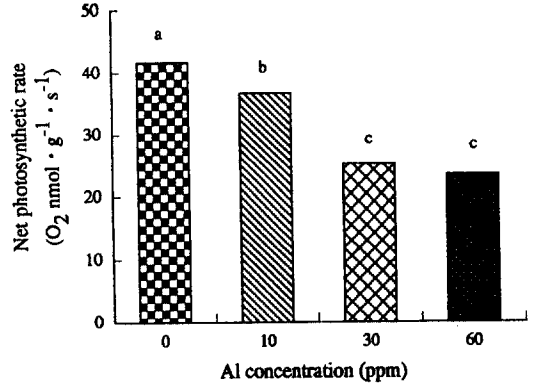


Fig. 2. Effects of Al on net photosynthetic rate of *P. densiflora* seedlings during the growth period of 90 days in the nutrient culture solution. During the measurement of net photosynthetic rate, air temperature and photosynthetic photon flux density(PPFD) were maintained at  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  and  $650 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. Each value is 4 determinations. Values are expressed on the basis of dry weight. Bars followed by the different letters are significantly different according to Duncan's new multiple range test ( $p < 0.05$ ).

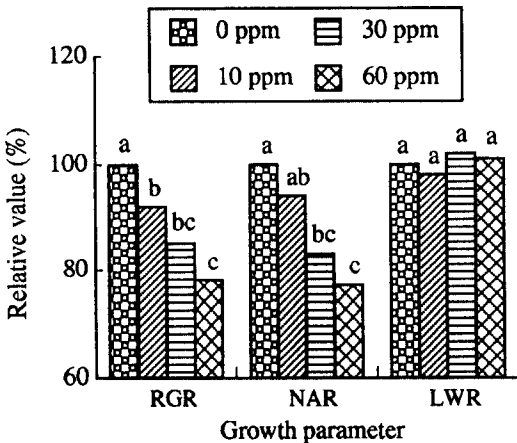


Fig. 1. Effects of Al on RGR, NAR and LWR of *P. densiflora* seedlings during the growth period of 90 days in the nutrient culture solution. The growth parameters were calculated from the needle and the whole-plant dry weight of the seedlings at initial and final harvests(Table 2). The RGR, NAR and LWR of the seedlings in the control were  $2.10(10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1})$ ,  $3.37(10^{-2} \text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1})$  and 62.5%, respectively. Each value is 6 determinations. The growth parameters are shown as the percentage of the control. Bars followed by the different letters are significantly different according to Duncan's new multiple range test ( $p < 0.05$ ).

아졌다.

본 연구결과, 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 RGR 및 NAR은 저하하였으며, 또한 순광합성속도도 저하하였다. 이들의 결과는 Al처리에 의한 소나무 묘木의 NAR저하의 원인으로 순광합성속도의 저하를 시사하고 있다.

여러 식물에서 Al처리에 의하여 Ca, Mg 등과 같은 식물생육 필수원소의 흡수·이행이 저해된다고 보고하고 있다(Göransson과 Eldhuset, 1991). 본 연구의 식물체내 원소 농도에 대한 Al의 영향을 분석한 결과(Table 3), 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 잎과 수간의 Ca 및 Mg농도는 감소하였다. 이에 반하여 30 및 60ppm 처리구의 각 기관의 Al농도는 대조구 및 10ppm 처리구에 비하여 유의적으로 증가하였다. 한편, 모든 기관의 K 및 Mn농도에 대한 Al의 영향은 인정되지 않았다. 이것은 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 지하부 및 지상부의 Al농도는 증가하였으나, 역으로 Ca, Mg농도는 감소하였음을 나타내어, 배양액의 Al증가가 Ca 및 Mg 등과 같은 식물생육 필수원소의 흡수를 방해한 결과라고 생각된다.

**Table 3.** Effects of Al on element concentrations in needle, trunk and root of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days in the nutrient culture solution. Each value is the mean of 4 determinations, and the standard deviation is shown in parentheses. Values are expressed on the basis of dry weight of each plant organ.

Plant organ	Al concentration (ppm)	Ca (mg · g <sup>-1</sup> )	Mg (mg · g <sup>-1</sup> )	K (mg · g <sup>-1</sup> )	Al (mg · g <sup>-1</sup> )	Mn (mg · g <sup>-1</sup> )
Needle	0	3.33(0.24) a	1.17(0.22) a	10.48(1.14) a	0.12(0.06) c	0.34(0.03) a
	10	3.10(0.23) a	1.12(0.11) a	10.52(0.93) a	0.37(0.11) b	0.42(0.05) a
	30	3.00(0.87) ab	1.04(0.22) ab	9.73(1.37) a	0.51(0.13) ab	0.46(0.10) a
	60	2.25(0.34) b	0.90(0.12) b	11.45(1.20) a	0.56(0.11) a	0.45(0.11) a
Trunk	0	1.80(0.06) a	1.07(0.20) a	5.38(1.07) a	0.15(0.05) c	0.10(0.01) a
	10	1.98(0.27) a	0.88(0.12) a	5.92(0.94) a	0.30(0.06) b	0.09(0.01) a
	30	1.61(0.11) b	0.80(0.17) ab	5.79(1.11) a	0.66(0.26) a	0.08(0.02) a
	60	1.32(0.32) b	0.63(0.16) b	5.30(1.89) a	0.67(0.37) a	0.08(0.01) a
Root	0	1.91(0.43) a	0.73(0.04) a	5.85(0.50) a	0.31(0.06) c	0.10(0.03) a
	10	1.82(0.48) a	0.66(0.25) ab	5.95(0.77) a	3.04(0.63) b	0.11(0.05) a
	30	1.76(0.68) a	0.58(0.25) ab	5.38(1.76) a	4.94(1.82) a	0.10(0.06) a
	60	1.64(0.09) a	0.48(0.23) b	4.92(0.87) a	5.50(1.62) a	0.12(0.05) a

Values followed by the different letters within a column for each plant organ and element concentration are significantly different according to the Duncan's new multiple range test( $p < 0.05$ ).

소나무 묘목의 뿌리의 Al농도는 잎에 비해 10배정도 높은 함량을 나타내어(Table 3), Al은 주로 지하부에 축적되어 지상부로의 이동이 상대적으로 적은 원소라고 생각된다. 이들의 결과는 Al처리한 소나무 묘목에 있어서는 지하부에 축적된 Al에 의해서 뿌리의 생리 기능이 저하되어 양분흡수 능력이 떨어져, 결과적으로는 식물체내의 Ca 및 Mg농도가 감소되었다는 것을 시사하고 있다(三宅 등, 1991). 따라서, Al처리에 의한 소나무 묘목의 건물 생장이나 광합성속도의 저하의 원인의 하나로서 식물생육 필수원소의 감소를 생각할 수 있다.

引用文獻

1. 吉田 稔·川畑洋子. 1988. 酸性雨の土壤による中和機構. 日本土壤肥料學雜誌 59 : 413-415.
2. 三宅 博·龜井信一·伊豆田 猛·戶塚 績. 1991. 水耕栽培におけるスギ苗の成長に對するアルミニウムの影響. 人間と環境 17 : 10-16.
3. 戶塚 績. 1984. 植物の成長に及ぼす大氣汚染ガスの影響. 國立公害研究所研究報告 64(R-64-'84) : 99-119.
4. Akama, A. 1989. Changes of some nutrient in Japanese red pine(*Pinus densiflora*) seed-

- lings in the early stage of a grown season. J. Jpn. For. Soc. 71 : 10-14.
5. Andersson, M. 1988. Toxicity and tolerance of aluminum in vascular plant : A literature review. Water, Air and Soil Pollution 39 : 439-462.
6. Delieu, T. and D.A. Walker. 1981. Polarographic measurement of photosynthetic oxygen evolution by leaf disks. New Phytol. 89 : 165-178.
7. Foy, C.D., R.L. Chaney and M.C. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Ann. Rev. Pl. Physiol. 29 : 511-566.
8. Göransson, A. and T.D. Eldhuset. 1991. Effects of aluminum on growth and nutrient uptake of small *Picea abies* and *Pinus sylvestris* plants. Trees 5 : 136-142.
9. Hecht-Buchholz, C., C.A. Jorns and P. Keil. 1987. Effect of excess aluminum and manganese on Norway spruce seedlings as related to magnesium nutrition. J. Plant Nutr. 10 : 1103-1110.
10. Hunt, R. 1978. Plant Growth Analysis. Edward Arnold Publishers Ltd., pp. 8-22.
11. Hutchinson, T.C., L. Bozic and G. Munoz

- Vega. 1986. Responses of five species of conifer seedlings to aluminum stress. *Water, Air and Soil Pollution* 31 : 283-295.
12. Izuta, T., A. Yamada, M. Miwa, M. Aoki and T. Totsuka. 1996. Effects of low pH and excess Al on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. *Environmental Sciences* 4 : 113-125.
  13. Keltjens, W.G. and E.V. Loenen. 1989. Effects of aluminum nutrient on growth and chemical composition of hydroponically grown seedlings of five different forest tree species. *Plant and Soil* 119 : 39-50.
  14. Krause, G.H.M., U. Arndt, G.J. Brandt, J. Bucher, G. Kenk and E. Matzner. 1986. Forest decline in Europe : Development and possible causes. *Water, Air and Soil Pollution* 31 : 647-668.
  15. Likens, G.E. 1989. Some aspects of air pollutant effects on terrestrial ecosystems and prospects for the future. *AMBIO* 18 : 172-178.
  16. Rengel, Z. 1992. Role of calcium in aluminum toxicity. *New Phytol.* 121 : 499-513.
  17. Taylor, J.G. 1989. Aluminum toxicity and tolerance in plants. In : D.C. Adriano and A.H. Johnson Eds. : *Acidic Precipitation, Volume 2 : Biological and Ecological Effects*. Springer-Verlag, New York, pp. 327-361.
  18. Ulrich, B., R. Mayer and P.K. Khanna. 1980. Chemical changes due to acid precipitation in a Loess-derived soil in Central Europe. *Soil Sci.* 130 : 193-199.