

소나무 苗木의 生長, 營養狀態 및 가스交換速度에 미치는 Al과 Mn의 影響¹

李志和^{2*} · 陳鉉五³ · 金映傑²

Effects of Al and Mn on the Growth, Nutrient Status and Gas Exchange Rates of *Pinus densiflora* Seedlings¹

Choong Hwa Lee^{2*}, Hyun-O Jin³ and Young-Kul Kim²

要 約

Al과 Mn을 여러가지 농도로 조정한 배양액을 채운 포트에 소나무(*Pinus densiflora*) 2년생 묘목을 이식하여 수경재배법에 의해 90일간 온실내에서 육성한 후 소나무 묘목의 성장, 영양상태 및 가스교환 속도에 미치는 Al과 Mn의 영향을 조사하였다. 배양액의 Al농도는 4수준(0, 10, 30, 60ppm)으로 처리하였으며, 이들 각각의 Al처리에 Mn농도를 3수준(0, 30, 60ppm)으로 처리하여 총 12처리구의 2요인배치법(two-factor design)의 실험을 실시하였다.

Al과 Mn은 소나무 묘목의 건물생장에 상호작용효과(interaction effects)를 나타내지 않았으나, 소나무 묘목의 건물생장에 대한 Al과 Mn의 각각의 단독영향(main effects)은 유의적인 차이가 나타났다. 소나무 묘목의 건물생장은 Al은 10ppm이상, Mn은 60ppm의 농도에서 성장저하를 초래하였으며, 이는 소나무 묘목의 건물생장에 대한 Al의 독성이 Mn에 비해 클 수 있음을 시사한다. 뿌리의 압축속도는 Al의 경우 60ppm에서, Mn의 경우는 30ppm이상의 농도에서 저하하였다. 또한, 크로로필함량에 있어서는 Al의 영향은 인정되지 않았으나, 60ppm의 Mn처리구에서 낮아지는 경향을 보였다. 배양액의 Al과 Mn농도가 증가함에 따라서 소나무 묘목의 상대성장율(RGR) 및 순동화율(NAR)이 저하하였으며, 이는 광합성 효율의 감소가 원인으로 생각된다. 비록 본 연구결과는 수경재배법에 의하여 얻어진 결과이지만, 장래 우리나라에서 실제로 발생할 수 있는 산성강하물에 의한 수목피해 예측 및 산성화된 토양의 입지에서 이와 유사한 현상이 발생될 수 있음을 시사하고 있다.

ABSTRACT

The effects of Al and Mn concentration on dry weight growth, nutrient status and gas exchange rates of 2-year-old Japanese red pine(*Pinus densiflora*) seedlings grown in a nutrient culture solution were investigated. Al was added as aluminum chloride at 0, 10, 30 or 60ppm, and Mn was added as manganese chloride at 0, 30 or 60ppm to the nutrient culture solution. The pH of the solution was maintained at 4.0 by adding HCl or NaOH solution. The seedlings were transplanted into the nutrient culture solution, then they were grown in a greenhouse for 90 days.

The interactive effects of Al and Mn on the dry weight growth of the seedlings were not significant. There were a main effect of Al or Mn on the dry weight growth and element concentrations of the seedlings. The treatment with Al of ≥ 10 ppm or that with Mn of 60ppm induced a significant reduction in the dry weight growth, which indicates that the effect of Al is stronger

¹ 接受 2000年 11月 21日 Received on November 21, 2000.

審査完了 2000年 12月 9日 Accepted on December 9, 2000.

² 林業研究院 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea.

³ 慶熙大學校 林學科 Department of Forestry, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea.

* 連絡처자 E-mail : hwa21@foa.go.kr

than that of Mn. The chlorophyll content of needles was not affected by Al treatment, but was significantly reduced by treatment with Mn of 60ppm. Furthermore, the treatment with Al of 60ppm or that with Mn of ≥ 30 ppm caused a significant reduction in the dark respiration rate of the roots. The net photosynthetic rate of the seedlings reduced with increasing the concentration of Al or Mn in the nutrient culture solution, which suggests that Al or Mn induced reductions in the relative growth rate(RGR) and net assimilation rate(NAR) of the seedlings were mainly due to the decrease of net photosynthesis.

Key words: Al and Mn, dry weight, gas exchange rates, nutrient status, Japanese red pine(Pinus densiflora) seedlings

緒 論

산림생태계에 있어서 산성우 등과 같은 산성강하물의 영향의 하나로서 토양산성화가 지적되고 있다(Krause 등, 1986; 野内, 1990). SO_x 및 NO_x와 같은 토양산성화 물질이 토양에 침투·침착하는 과정의 초기단계에서는 염기와의 교환반응에 의해 H⁺은 토양에 잔류하고 Ca, Mg과 같은 식물필수영양원소가 토양으로부터 용탈되게 된다(吉田과 川畑, 1988). 토양산성화가 심화되면, 토양중에 Al, Mn과 같은 식물유해금속의 유효도(availability)가 증가하게 된다(Ulrich 등, 1980). 토양내 Al은 식물의 세근발생이나 신장생장을 억제하여 식물필수영양원소나 수분의 흡수를 저해한다고 보고되고 있다(Rengel, 1992). 따라서 산성우 등의 산성강하물에 의해서 산성화된 토양에 생육하고 있는 수목은 염기용탈로 인한 식물영양상태의 악화와 Al 등의 식물유해금속의 복합적인 영향을 받을 것이 예상되고 있다.

산림지역은 다양한 입지환경을 가지며 산림토양내 존재하는 유기물, 점토 등은 산성화 물질의 유입으로부터 완충작용을 하여 산림지역에서 직접적인 실험은 어려운 실정이기 때문에, 많은 연구들이 수정배배법을 통하여 식물의 생장과 산성화물질 유입과의 기작을 구명하고 있다(Andersson, 1988; 三宅 등, 1991; 北尾 등, 1993; Izuta 등, 1995). 수정배배액중에 다량의 Al이 존재할 경우, 뿌리로부터 Ca, Mg 등의 식물필수영양원소의 흡수 및 식물체내의 이행이 저해되어 최종적으로는 성장감소를 유발시킨다고 보고하고 있다(Hecht-Buchholz 등, 1987; 三宅 등, 1991). 또한, Andersson(1988)은 농작물이나 초본류의 경우, 수정액이나 토양의 Al농도가 10ppm 이하에서도 성장저해 반응이 나타난다고 보고하고 있다. 그러

나, 실험조건이나 식물재료에 따라서 영향을 미치는 Al농도는 다르게 반응하고 있다(Hutchinson 등, 1986; Keltjens and Loenen, 1989).

식물에 대한 Mn의 과잉저해에 관한 연구는 농작물에 있어서는 많이 보고되어 있으나(Kohno 등, 1984; Nable 등, 1988; Macfie and Taylor, 1992), 수목의 생장, 영양상태 및 생리기능에 대한 연구는 극히 제한되어 있다(Hecht-Buchholz 등, 1987; 北尾 등, 1993; Izuta 등, 1995).

본 연구는 우리나라 전 지역에 분포하고 있는 소나무를 대상으로 수정배배법에 의하여 묘목의 생장, 영양상태 및 가스교환속도에 미치는 Al과 Mn의 영향을 조사하여, 산성강하물에 의한 토양산성화에 따르는 산림피해 방지대책에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

材料 및 方法

1. 소나무 묘목의 육성

본 연구에서 수정배배시 사용한 배양액은 Table 1과 같이, 식물생장에 필요한 영양원소를 함유하고 있으며 수정배배시 Al과 Mn 등의 영향을 조사하기 위해 일반적으로 사용하는 배양액이다(Akama, 1989). 배양액의 Al농도가 0, 10, 30 및 60ppm이 되도록 AlCl₃를, Mn농도가 0, 30 및 60ppm이 되도록 MnCl₂를 첨가하여 Al첨가 4처리구와 Mn첨가 3처리구와의 조합에 의한 총 12처리구의 2요인 배치법의 실험을 실시하였다. 묘고가 약 10cm인 소나무 2년생을 약 3.5L의 배양액을 채운 1/5000a포트(4L)에 각각 8개체씩 定植하였다. 직경이 2cm의 구멍을 동일한 간격으로 8개소 설치한 염화비닐판(두께 4mm)을 포트의 뚜껑으로써 빛을 차단함과 동시에 스폰지마개를 이용하여 식물체를 고정하였으며 각 처리구당 2포트씩 합계

24포트를 사용하였다.

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

| Salt | Concentration(mg · L ⁻¹) |
|--|--------------------------------------|
| (NH ₄) ₂ SO ₄ | 132.14 |
| CaCl ₂ · 2H ₂ O | 147.03 |
| KH ₂ PO ₄ | 34.02 |
| MgSO ₄ · 7H ₂ O | 123.24 |
| KCl | 37.28 |
| H ₃ BO ₃ | 2.86 |
| ZnSO ₄ · 7H ₂ O | 0.22 |
| CuSO ₄ · 5H ₂ O | 0.08 |
| Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O | 0.13 |
| Fe-EDTA | 7.55 |

배양액의 pH는 HCl 또는 NaOH용액으로 pH 4.0(±0.2)로 조절하였다. 한편, 배양액의 pH는 매일 1회 재조정하는 한편, 증발이나 증산 및 흡수에 따른 배양액의 감소를 방지하기 위하여 pH 조정 전후에 증류수(deionized water)로 초기의 액량까지 보급하였다. 본 연구에 사용한 증류수는 이온교환수지를 통과시켜 pH가 6.5±0.5, 전기전도도가 2 μS · cm⁻¹ 이하로 조정된 것을 사용하였다.

1996년 4월 22일부터 약 2주간에 걸쳐서 Al 및 Mn 무첨가의 배양액에서 육성하여 수경재배에 순화시켰으며, 그 후 5월 8일부터 8월 6일까지 90일간 소정의 Al 및 Mn농도로 설정한 배양액에서 東京都 府中市 東京農工大學 온실내에서 육성하였다. 육성기간 중 온실내의 일평균기온, 평균상대습도 및 적산일사량은 각각 25.1℃, 74% 및 846MJ · m⁻²였다. 한편, 배양액은 항상 공기펌프에 의해 통기시켰으며(1.5L · m⁻¹ · pot⁻¹), 주당 2회 전량을 교환하였다.

2. 생장해석

Al 및 Mn처리 개시시(1996년 5월 8일)에 무작위로 10개체를, 그리고 90일간의 육성종료시(1996년 8월 6일) 각 처리구당 건물량 측정 및 식물체내 양분농도를 분석하기 위해 6개체의 묘목을 임의로 선정하였다. 표본추출한 묘목은 각 식물기 관별(잎, 수간+가지, 뿌리)로 생중량을 측정한 후, 60℃에서 5일간 열풍건조하여 건중량을 측정하였다.

Al 및 Mn처리 개시 및 종료시의 건중량을 기

초로 하여 육성기간중의 개체건물생장의 상대성장율(relative growth rate: RGR), 순동화율(net assimilation rate: NAR), 엽건중비(leaf dry weight ratio: LWR) 및 지상부와 지하부의 건중비인 T/R비를 산출하였다(Hunt, 1978).

3. 식물체내 성분분석

육성종료시에 각 처리구의 소나무 묘목중, 무작위로 4개체씩 선정하여, 습식분해하여(Hach Co, Digesdahl Co, 23130-20) 원자흡광광도계(Shimadzu Co, AA-670)로 식물체내의 Ca, Mg, K, Al 및 Mn 농도를 분석하였다. 크로모필함량은 당년생 잎을 아세톤:에탄올:증류수의 비율이 45:45:10의 추출액에 침적하여 25℃의 항온실에서 추출하여, 645nm 및 663nm의 흡광도를 분광광도계(Shimadzu Co, UV-1200)로 측정하여, 크로로필함량을 산출하였다(Arnon, 1949).

4. 가스교환속도 측정

육성종료시에 각 처리구의 소나무 묘목을 무작위로 4개체씩 선정, 순광합성속도 및 뿌리와 수간의 암호흡속도를 산소전극장치(Hasatech Co, LD2, CB1-D)로 측정하였다(Delieu and Walker, 1981). 이때 온도제어기기(Tokyo rigaku Co, Cool Ace CA-111)로 물을 순환시켜 챔버내의 온도를 20±0.5℃로 제어하였으며, 광원은 테크노라이트(Keno Co, Tokyo)를 사용하였다. 순광합성속도 측정시 챔버내에 최상부의 광합성유효방사속밀도를 650 μE · m⁻² · s⁻¹로 제어하였다.

5. 통계처리

각 처리구에서 육성한 소나무 묘목의 건중량에 대한 배양액의 Al 및 Mn농도의 2가지 요인에 관한 2요인배치 분산분석(朴廷憲과 尹英鮮, 1993)을 실시하였다. 또한, Al 또는 Mn처리구별로 얻은 소나무 묘목의 건중량, 식물체내의 성분 및 가스교환속도의 평균치를 Duncan's new multiple range test(石居, 1975)를 이용하여 검정하였다.

結果 및 考察

1. 소나무 묘목의 생장에 미치는 Al과 Mn의 복합영향

육성종료시 소나무 묘목의 건중량, T/R비 및 분산분석(ANOVA)의 결과를 Table 2에 나타내

었다. 각 식물기관별 건중량과 개체전체의 건중량에 대한 Al과 Mn의 상호작용효과(interaction effects)는 인정되지 않았다. 그러나, Al 0ppm×Mn 0ppm구의 묘목의 건중량을 대조치로 할 경우, Al 60ppm×Mn 60ppm구의 개체전체의 건중량의 감소율은 41%로서, 이 감소율은 Al 0ppm×Mn 60ppm구의 감소율 12%와 Al 60ppm×Mn 0ppm구의 감소율 33%와의 합(45%)과 유사한 감소율을 나타내었다. 이것은 소나무 묘목의 건물생장에 대하여 Al과 Mn이 상가적인 영향을 미쳤다고 사료된다. 이것에 비하여 건중량 및 T/R비에 대한 Al의 단독영향이 인정되었다. 또한, 수

간+가지(이하 수간이라 표시), 뿌리 및 개체전체의 건중량에 대한 Mn의 단독영향이 인정되었다.

이상과 같이, 소나무 묘목의 건물생장에 대하여 Al과 Mn의 상호작용효과는 인정되지 않았으나, 각각의 단독영향이 인정되었기 때문에 Al처리구별 또한 Mn처리구별로 건중량과 T/R비의 성적을 합하여 분석을 실시하였다.

2. 소나무 묘목의 생장에 미치는 Al의 영향

육성종료시 소나무 묘목의 건중량 및 T/R비에 대한 Al의 영향은 10ppm이상의 Al을 처리한 소나무 묘목의 잎, 뿌리 및 개체전체의 건중량은

Table 2. Dry weights and top/root ratio(T/R) of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days in the nutrient culture solution containing Al and/or Mn. Each value is the mean of 6 seedlings, and the standard deviation is shown in parentheses.

| Treatment (ppm) | | Needle (g) | Trunk (g) | Root (g) | Whole-plant (g) | T/R |
|-----------------|---------|------------|------------|------------|-----------------|------------|
| Mn 0 | Initial | 0.79(0.27) | 0.27(0.06) | 0.23(0.13) | 1.29(0.44) | 4.61(1.02) |
| | Al 0 | 5.44(0.68) | 1.61(0.24) | 1.58(0.32) | 8.63(1.10) | 4.58(0.81) |
| | Al 10 | 4.55(0.53) | 1.64(0.24) | 1.24(0.22) | 7.42(0.76) | 5.26(1.12) |
| | Al 30 | 4.45(1.01) | 1.53(0.40) | 0.84(0.20) | 6.83(1.21) | 7.03(0.67) |
| | Al 60 | 3.72(0.57) | 1.27(0.30) | 0.78(0.21) | 5.78(1.05) | 6.42(0.95) |
| Mn30 | Al 0 | 5.07(0.74) | 1.36(0.13) | 1.23(0.27) | 7.66(0.99) | 5.37(0.84) |
| | Al 10 | 4.59(0.88) | 1.48(0.38) | 1.11(0.17) | 7.18(1.17) | 5.45(0.94) |
| | Al 30 | 4.20(0.86) | 1.23(0.35) | 0.93(0.24) | 6.37(1.24) | 5.91(0.60) |
| | Al 60 | 3.57(0.76) | 0.98(0.26) | 0.87(0.19) | 5.42(1.09) | 5.24(0.74) |
| Mn 60 | Al 0 | 4.88(0.80) | 1.51(0.43) | 1.17(0.26) | 7.55(1.46) | 5.54(0.50) |
| | Al 10 | 4.04(0.32) | 1.31(0.49) | 1.00(0.23) | 6.34(0.58) | 5.54(0.67) |
| | Al 30 | 3.21(0.52) | 0.08(0.16) | 0.65(0.16) | 4.85(0.76) | 6.54(0.84) |
| | Al 60 | 3.30(0.57) | 1.08(0.41) | 0.69(0.17) | 5.08(1.13) | 6.35(0.88) |

ANOVA¹⁾

| | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Al | *** | * | *** | *** | *** |
| Mn | * | * | ** | * | n.s |
| Al×Mn | n.s | n.s | n.s | n.s | n.s |

¹⁾ Two-factor ANOVA result : n.s, not significant ; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$.

Table 3. Effects of Al on dry weights and T/R ratio of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days in the nutrient culture solution. Because the interactive effects of Al and Mn were not significant, as shown in Table 2, the data of dry weight and T/R ratio were pooled across the Mn treatment.

| Al concentration (ppm) | Needle (g) | Trunk (g) | Root (g) | Whole-plant (g) | T/R |
|------------------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|--------------|
| 0 | 5.13(0.74) c | 1.49(0.29) b | 1.33(0.33) c | 7.95(1.23) c | 5.16(0.81) b |
| 10 | 4.39(0.71) b | 1.47(0.30) b | 1.11(0.25) b | 6.98(1.18) b | 5.41(1.10) b |
| 30 | 3.95(0.81) ab | 1.25(0.34) ab | 0.81(0.26) a | 6.01(1.91) ab | 6.49(0.81) a |
| 60 | 3.53(0.68) a | 1.11(0.28) a | 0.78(0.24) a | 5.42(1.70) a | 6.00(1.10) a |

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($p < 0.05$).

0ppm의 Al을 처리한 개체에 비하여 감소하였으며 60ppm의 Al을 처리한 수간의 건중량은 0 및 10ppm의 Al을 처리한 개체에 비하여 감소하였다 (Table 3). 또한, 30 및 60ppm의 Al을 처리한 개체의 T/R비는 0 및 10ppm의 Al을 처리한 개체에 비하여 감소하였다.

개체건물생장의 RGR, NAR 및 LWR에 대한 Al의 영향을 분석한 결과(Figure 1), 배양액에 Al첨가량이 증가함에 따라서 소나무 묘목의 RGR

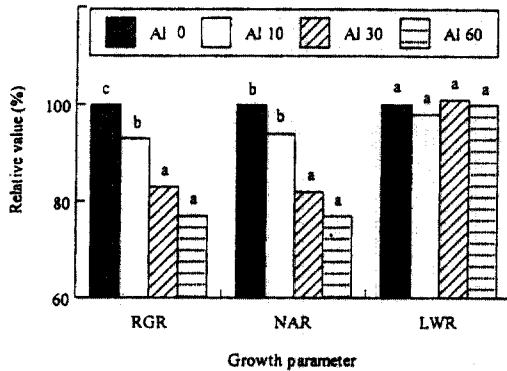


Figure 1. Effects of Al on relative growth rate (RGR), net assimilation rate(NAR) and leaf weight ratio(LWR) of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days. Bars followed by the different letters are significantly different according to Duncan's new multiple range test($p < 0.05$).

및 NAR은 저하하였으나, LWR에 대한 Al의 영향은 인정할 수 없었다.

육성종료시 체내 원소농도에 대한 Al의 영향 (Table 4)은 60ppm의 Al을 처리한 각 기관의 Ca, Mg농도는 0 및 10ppm의 Al을 처리한 개체에 비하여 저하하였으나, 30 및 60ppm의 Al을 처리한 각 기관의 Al농도는 0 및 10ppm의 Al을 처리한 개체에 비하여 증가하였다. 한편, 모든 기관의 K 및 Mn농도에 대한 Al의 영향은 나타나지 않았다. 또한, 당년생 잎의 크로로필함량에 대한 Al의 영향은 배양액에 첨가한 Al농도의 증가에 대하여 유의적인 영향이 인정되지 않았다.

육성종료시 소나무 묘목 잎의 순광합성속도 및 수간과 뿌리의 암호흡속도에 대한 Al의 영향을 Table 5에 나타내었다. 30 및 60ppm의 Al을 처리한 소나무 묘목의 순광합성속도는 0 및 10ppm의 Al을 처리한 개체에 비하여 저하하였다. 60ppm의 Al을 처리한 뿌리의 암호흡속도는 30ppm이하의 Al을 처리한 개체에 비하여 저하하였으나, 수간의 암호흡속도는 Al처리에 의한 유의적인 영향은 인정되지 않았다.

이상과 같이 소나무 묘목의 건물생장은 10ppm 이상의 Al처리에 의해 유의적으로 감소하였다 (Table 3). 생장해석 결과(Figure 1), 건물생장의 RGR 및 NAR은 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 저하하였다. 이것에 비하여, LWR는 Al의 영향을 거의 받지 않았다. 이들의 결과는 배양액의 Al농도 증가에 의한 잎의 건물생산효율이 저하되었

Table 4. Effects of Al on element concentrations in needle, trunk and root of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days.

| Plant organ | Al concentration (ppm) | Ca ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | Mg ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | K ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | Al ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | Mn ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | Chl. a+b ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$) |
|-------------|------------------------|--|--|---------------------------------------|--|--|---|
| Needle | 0 | 3.15(0.70)b | 1.13(0.25)b | 10.14(1.15)a | 0.25(0.12)a | 1.38(1.08)a | 0.74(0.12)a |
| | 10 | 3.19(0.88)b | 1.02(0.20)b | 9.49(1.28)a | 0.38(0.12)b | 1.47(1.02)a | 0.75(0.09)a |
| | 30 | 3.03(0.73)ab | 1.01(0.19)b | 10.62(1.41)a | 0.72(0.36)c | 1.54(0.96)a | 0.72(0.09)a |
| | 60 | 2.56(0.43)a | 0.83(1.17)a | 11.21(0.97)a | 0.80(0.34)c | 1.48(0.93)a | 0.68(0.10)a |
| Trunk | 0 | 1.61(0.28)b | 0.91(0.20)c | 5.64(0.80)a | 0.24(0.08)a | 0.54(0.33)a | - |
| | 10 | 1.61(0.32)b | 0.79(0.10)bc | 5.69(0.65)a | 0.38(0.09)b | 0.48(0.30)a | - |
| | 30 | 1.53(0.18)ab | 0.72(0.14)ab | 6.31(0.86)a | 0.69(0.28)c | 0.45(0.28)a | - |
| | 60 | 1.39(0.21)a | 0.63(0.10)a | 6.02(1.38)a | 1.00(0.39)c | 0.46(0.29)a | - |
| Root | 0 | 1.71(0.46)b | 0.74(0.13)c | 5.52(0.96)a | 0.31(0.24)a | 0.45(0.36)a | - |
| | 10 | 1.77(0.50)b | 0.66(0.16)bc | 5.42(1.24)a | 2.47(0.89)b | 0.41(0.25)a | - |
| | 30 | 1.46(0.48)ab | 0.52(0.19)ab | 4.80(1.16)a | 4.54(1.23)c | 0.48(0.32)a | - |
| | 60 | 1.30(0.35)a | 0.47(0.16)a | 4.99(0.89)a | 5.46(1.55)c | 0.50(0.31)a | - |

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($p < 0.05$).

다는 것을 시사하고 있다. 그리고, 가스교환속도를 측정된 결과(Table 5), 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 순광합성속도는 저하하였다. 따라서, Al처리에 의한 소나무 묘목의 NAR저하의 원인으로서 순광합성속도의 저하를 생각할 수 있다.

많은 식물에서 Al처리에 의하여 Ca 등과 같은 식물필수영양원소의 吸收·移行이 저해된다고 보고되고 있다(Arovaara and Ilvesniemi, 1990 ; Göransson and Eldhuset, 1991). 본 연구에서도, 소나무 묘목의 각 기관의 Ca 및 Mg농도가 Al처리에 의해 저하하였다(Table 4). 이때 배양액의 Al농도가 증가함에 따라서 소나무 묘목의 지하부의 Al농도가 증가하였다(Table 4). 한편, 뿌리의 암호흡속도는 60ppm의 Al처리에 의해서 유의적으로 저하하였다(Table 5). 이들의 결과는 Al처리한 소나무 묘목에 있어서는 지하부에 축적된 Al에 의해서 뿌리의 생리기능이 저하되어 양분흡수 능력이 떨어져, 최종적으로는 식물체내의 Ca 및 Mg농도가 감소되었다는 것을 시사하고 있다. 따라서, Al처리에 의한 소나무 묘목의 건물생장이나 광합성속도의 저하 원인의 하나로서 식물필수원소의 농도저하를 생각할 수 있다.

3. 소나무 묘목의 생장에 대한 Mn의 영향

육성종료시 건중량 및 T/R비에 대한 Mn의 영

향(Table 6)은 60ppm의 Mn을 처리한 소나무 묘목의 각 기관 및 개체전체의 건중량은 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 감소하였으나, T/R비에 있어서는 Mn처리에 의한 유의적인 영향은 인정되지 않았다.

소나무 묘목의 RGR, NAR 및 LWR에 대한 Mn의 영향(Figure 2)은 60ppm의 Mn을 처리한 개

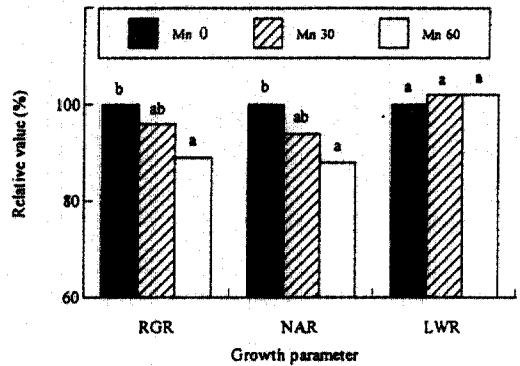


Figure 2. Effects of Mn on relative growth rate (RGR), net assimilation rate(NAR) and leaf weight ratio(LWR) of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days. Bars followed by the different letters are significantly different according to Duncan's new multiple range test($p < 0.05$).

Table 5. Effects of Al on net photosynthetic rate, dark respiration rate of trunk and root of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days.

| Al concentration (ppm) | Net photosynthetic rate ($O_2 \text{ nmol} \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$) | Respiration rate($O_2 \text{ nmol} \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$) | |
|------------------------|--|--|--------------|
| | | Root | Trunk |
| 0 | 37.72(7.83) b | 16.35(4.74) b | 3.94(1.28) a |
| 10 | 34.26(7.30) b | 17.53(5.82) b | 4.81(2.19) a |
| 30 | 27.77(7.95) a | 17.28(4.95) b | 3.73(1.82) a |
| 60 | 26.42(6.64) a | 13.52(3.13) a | 4.21(1.35) a |

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($p < 0.05$).

Table 6. Effects of Mn on dry weights and T/R ratio of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days in the nutrient culture solution. Because the interactive effects of Al and Mn were not significant, as shown in Table 2, the data of dry weights and T/R ratio were pooled across the Al treatment.

| Mn concentration (ppm) | Needle (g) | Trunk (g) | Root (g) | Whole-plant (g) | T/R |
|------------------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|
| 0 | 4.54(1.21) b | 1.51(0.40) b | 1.11(0.42) b | 7.16(1.87) b | 5.16(1.35) a |
| 30 | 4.36(1.18) ab | 1.27(0.36) a | 1.03(0.28) ab | 6.66(1.76) ab | 6.49(0.78) a |
| 60 | 3.86(0.97) a | 1.22(0.43) a | 0.88(0.29) a | 5.95(1.57) a | 6.00(1.01) a |

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($p < 0.05$).

체의 RGR 및 NAR은 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였으나, LWR은 Mn처리에 의한 영향을 거의 받지 않았다.

육성종료시 소나무 묘목의 체내 원소농도에 대한 Mn의 영향(Table 7)은 60ppm의 Mn을 처리한 수간 및 뿌리의 Ca농도의 경우는 0 및 30ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였으며, 60ppm의 Mn을 처리한 수간의 Mg농도는 0 및 30ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였다. 한편, 30 및 60ppm의 Mn을 처리한 잎의 Al농도는 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 증가하였다. 또한, 30 및 60ppm의 Mn을 처리한 각 기관의 Mn농도는 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 증가하였다. 그러나, 모든 기관의 K농도는 Mn처리의 의한 유의적인 영향은 인정되지 않았다. 육성종료시 당년생 잎의 크로로필함량에 대한 Mn의 영향은 60ppm을 처리한 소나무 묘목에서 0 및 30ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였다.

육성종료시 순광합성속도 및 수간과 뿌리의 암호흡속도에 대한 Mn의 영향(Table 8)은 30 및

60ppm의 Mn을 처리한 개체에 대한 순광합성속도 및 뿌리의 암호흡속도는 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였으나, 수간의 암호흡속도는 Mn처리에 의한 유의적인 영향은 인정되지 않았다.

이상과 같이 건물생장은 60ppm의 Mn처리구에서 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 유의적으로 감소하였다(Table 6). 생장해석 결과(Figure 2), 소나무 묘목의 RGR 및 NAR은 배양액의 Mn농도가 증가함에 따라서 저하하였다. 이것에 비하여 LWR은 배양액의 Mn농도 증가에 따른 영향을 거의 받지 않았다.

일반적으로 식물을 Mn농도가 높은 토양이나 수경액에 육성하면, 식물체내에 흡수된 Mn은 빠른 속도로 지상부에 이동하여 잎 등에 축적된다(Izuta 등, 1995). 지상부의 Mn의 과잉축적은 광합성저해 등을 유발하여(北尾 등, 1993), 건물생장을 감소시킨다고 보고하고 있다(Nable 등, 1988; Macfie and Taylor, 1992). 본 연구에서도 배양액의 Mn농도가 증가함에 따라서 소나무 묘목 잎의 Mn농도가 유의적으로 증가하였다(Table 7). 또한, 60ppm

Table 7. Effects of Mn on element concentration in needle, trunk and root of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days.

| Plant organ | Mn concentration (ppm) | Ca (mg · g ⁻¹) | Mg (mg · g ⁻¹) | K (mg · g ⁻¹) | Al (mg · g ⁻¹) | Mn (mg · g ⁻¹) | Chl. a+b (mg · g ⁻¹ FW) |
|-------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Needle | 0 | 2.79(0.58)a | 1.06(0.18)a | 10.55(1.22)a | 0.39(0.20)a | 0.47(0.18)a | 0.74(0.09)b |
| | 30 | 3.29(0.74)b | 0.95(0.19)a | 10.43(1.22)a | 0.76(0.48)b | 1.50(0.26)b | 0.77(0.10)b |
| | 60 | 2.87(0.79)ab | 0.98(0.28)a | 10.13(1.59)a | 0.47(0.13)b | 2.44(0.78)c | 0.66(0.08)a |
| Trunk | 0 | 1.68(0.31)b | 0.85(0.22)b | 5.66(1.14)a | 0.45(0.31)a | 0.09(0.02)a | - |
| | 30 | 1.64(0.21)b | 0.80(0.12)b | 5.75(0.82)a | 0.60(0.40)a | 0.58(0.10)b | - |
| | 60 | 1.28(0.15)a | 0.64(0.08)a | 6.33(0.83)a | 0.69(0.47)a | 0.77(0.07)c | - |
| Root | 0 | 1.78(0.43)b | 0.62(0.21)a | 5.28(1.12)a | 3.43(2.40)a | 0.08(0.05)a | - |
| | 30 | 1.66(0.51)b | 0.58(0.17)a | 5.02(1.02)a | 3.58(2.54)a | 0.51(0.20)b | - |
| | 60 | 1.24(0.39)a | 0.59(0.19)a | 5.25(1.25)a | 2.56(2.45)a | 0.79(0.24)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($p < 0.05$).

Table 8. Effects of Mn on net photosynthetic rate, dark respiration rate of trunk and root of *P. densiflora* seedlings grown for 90 days.

| Mn concentration (ppm) | Net photosynthetic rate (O ₂ nmol · g ⁻¹ · s ⁻¹) | Respiration rate(O ₂ nmol · g ⁻¹ · s ⁻¹) | |
|------------------------|--|--|--------------|
| | | Root | Trunk |
| 0 | 36.15(8.77) b | 19.72(4.74) b | 4.76(2.71) a |
| 30 | 29.99(6.33) a | 15.09(3.25) a | 4.40(1.81) a |
| 60 | 28.50(5.76) a | 13.70(4.52) a | 3.33(1.09) a |

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($p < 0.05$).

의 Mn을 처리한 크로로필함량은 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였다(Table 7). 한편, 순광합성속도는 30 및 60ppm의 Mn을 처리한 개체에서 0ppm의 Mn을 처리한 개체에 비하여 저하하였다(Table 8). 따라서 Mn을 처리한 소나무 묘목에 있어서는 잎에 다량으로 축적된 Mn에 의해서 크로로필 함량이 저하되어, 그 결과 순광합성속도가 억제되어 최종적으로 건물생장이 감소하였다고 생각된다.

수목을 Mn농도가 높은 수경액에 육성하면, 식물체내의 Ca, Mg농도가 감소한다고 보고하고 있다(Hecht-Buchholz 등, 1987). 본 연구에서도 체내원소농도에 대한 Mn의 영향을 조사한 결과(Table 7), 60ppm의 Mn을 처리한 소나무 묘목의 수간 및 뿌리의 Ca 및 Mg농도는 감소하였다. 또한, 식물체내의 Mn농도는 뿌리에 비하여 잎에 3배 정도 높은 함량을 나타내었다. 이상과 같은 결과는 뿌리의 양분흡수저해 및 뿌리로부터 잎으로 이행된 Mn과잉에 의한 광합성저해가 최종적으로 소나무 묘목의 건물생장이 저해되었다고 생각된다.

結 論

소나무 묘목의 건물생장에 대한 배양액에 첨가한 Al과 Mn의 상호작용효과는 인정되지 않았으나, Al과 Mn의 단독영향은 인정할 수 있었다. 또한 소나무 묘목의 건물생장을 감소시키는 Al농도와 Mn의 농도는 다르게 나타났으며, Al은 10ppm이상, Mn은 60ppm의 농도에서 건물생장 저하가 나타나, 소나무 묘목의 건물생장에 대한 Al의 독성이 Mn에 비해 크다고 생각된다. 현재, 우리나라에 생육하고 있는 수목의 생장에 대한 토양산성화, 식물필수영양원소 및 식물유해금속의 영향에 대해서 거의 밝혀지지 않고 있다. 비록 본 연구결과는 수경재배법에 의하여 얻어진 결과이지만, 장래 우리나라에서 실제로 발생할 수 있는 산성강하물에 의한 수목피해 예측 및 산성화된 토양의 입지에서도 이와 유사와 현상이 발생할 수 있음을 시사하고 있다. 또한 Al 및 Mn에 대한 감수성이 수종 및 품종사이에 차이가 인정되고 있기 때문에(Schaedle 등, 1989), 금후 산림생태계 내 산성강하물의 영향을 정확히 평가하기 위해서 주요 수종의 생장, 영양상태 및 생리기능 등에 대한 토양산성화나 Al, Mn 등의 영향을 자세히 조사할 필요가 있다.

引 用 文 獻

1. 박정식·윤영선, 1993. 현대통계학. 다산출판사. pp. 395-414.
2. 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.
3. 北尾光俊·田淵隆一·藤村好子·小池孝良, 1993. マンガン過剰がシラカンバ苗木の成長に及ぼす影響. 日林學會北海道論集 41 : 214-216.
4. 三宅 博·龜井信一·伊豆田 猛·戸塚 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.
5. 石居 進, 1975. 生物統計學入門. 培風館. pp. 157-212.
6. 野内 勇, 1990. 酸性雨の農作物および森林木への影響. 大氣汚染學會誌 25 : 295-312.
7. Akama, A. 1989. Changes of some nutrient in Japanese red pine(*Pinus densiflora*) seedlings in the early stage of a grown season. Journal of Japanese Forestry Society 71 : 10-14.
8. Andersson, M. 1988. Toxicity and tolerance of aluminum in vascular plant : A literature review. Water, Air and Soil Pollution 39 : 439-462.
9. Amon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts, Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology 24 : 1-15.
10. Arovaara, H. and H. Ilvesniemi. 1990. Effects of soluble inorganic aluminum on the growth and nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. Scandinavian Journal of Forest Research 5 : 49-57.
11. Delieu, T. and D. A. Walker. 1981. Polarographic measurement of photosynthetic oxygen evolution by leaf disks. New Phytologist 89 : 165-178.
12. 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.
13. 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. Journal of Plant Nutrition 10 : 1103-1110.

14. Hunt, R. 1978. Plant Growth Analysis. Edward Arnold Publishers Ltd., pp. 8-22.
15. 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.
16. Izuta, T., K. Noguchi, M. Aoki and T. Totsuka. 1995. Effects of excess manganese on growth, water content and nutrient status of Japanese cedar seedlings. *Environmental Sciences* 3 : 209-220.
17. 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.
18. Kohno, Y., C. D. Foy, A. L. Fleming and D. T. Krizek. 1984. Effect of Mn concentration on the growth and distribution of Mn and Fe in two bush bean cultivars grown in solution culture. *Journal of Plant Nutrition* 7 : 547-566.
19. 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.
20. Macfie, S. M. and G. J. Taylor. 1992. The effects of excess manganese on photosynthetic rate and concentration of chlorophyll in *Triticum aestivum* growth in solution culture. *Physiologia Plantarum* 85 : 467-475.
21. Nable, R. O., R. L. Houtz and G. M. Cheniae. 1988. Early inhibition of photosynthesis during development of Mn toxicity in tobacco. *Plant Physiology*. 86 : 1136-1142.
22. Rengel, Z. 1992. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytologist* 121 : 499-513.
23. Schaedle, M., F. C. Thornton, D. J. Raynal and H. B. Tepper. 1989. Response of tree seedlings to aluminum. *Tree Physiology* 5 : 337-356.
24. 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.