

인위적인 토양산성화에 대한 사방오리나무와 물오리나무 묘목의 생리반응 및 성장특성

최동수 · 토다 히로토

일본 동경농공대학교 농학연구과

Physiological Responses and Growth Performance of *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* Seedlings to Artificial Soil Acidification

Choi, Dongsu and Toda Hiroto

Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

ABSTRACT

To obtain basic information for evaluating resistance of soil acidification for growth, net photosynthesis, N₂ fixation rate and nutrient status of *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings grown in brown forest soil acidified with H₂SO₄ or HNO₃ solution were investigated (control (pH=5.9), LN (pH=5.0; Low levels of Nitric acid), HN (pH=4.0; High levels of Nitric acid), LS (pH=5.0; Low levels of Sulfuric acid), and HS (pH=4.0; High levels of Sulfuric acid)). The shoot dry weight of *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* and the root dry weight of *Alnus hirsuta* seedlings grown in the HN, LS and HS were significantly less than that of the seedlings grown in the control. The Chlorophyll a/b ratio in leaves of *Alnus firma* at LN, LS and HS was significantly lower than that of control. The concentration of N in leaves of *Alnus hirsuta* at HS was significantly higher than that of control. The net photosynthetic rate of *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings at LN and HN was higher than that of control. Based on the results, we concluded that the negative effects of soil acidification due to sulfate deposition are greater than those of soil acidification due to nitrate deposition on growth, net photosynthesis and

First author : Dongsu Choi, Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8589, Japan,
Tel : +81-42-367-5241, E-mail : dongsu3721@gmail.com

Corresponding author : Dongsu Choi, Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8589, Japan,
Tel : +81-42-367-5241, E-mail : dongsu3721@gmail.com

Received : 13 August, 2012. **Revised** : 4 October, 2012. **Accepted** : 4 October, 2012.

N₂ fixation rate of *Alnus firma* more than *Alnus hirsuta*.

Key Words : *Soil acidification, Alnus firma and Alnus hirsuta, Net photosynthesis, Chlorophyll content, N₂ fixation rate.*

I. 서 론

산업화와 자동차 보급의 확대로 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx)과 같은 산화물이 대기 중으로 대량 방출되고 있다. 이러한 산화물은 대기 중에서 질산(HNO₃) 혹은 황산(H₂SO₄)과 같은 강산으로 변해, 질산이온, 황산이온 등 산성 음이온이 다량 함유된 산성비 등과 같은 산성강하물의 형태로 지표면에 떨어져 토양을 산성화시킨다(Ulrich, 1989). 토양에는 산성을 중화 시키는 산중화능(acid neutralization capacity; ANC)이 있지만, 토양이 가지고 있는 산중화능 이상의 산성물질이 토양에 유입되면 토양은 급격히 산성화가 진행된다(Fisher and Binkley, 2000). 산성화가 진행된 토양에서 성장한 식물은 염기 용탈로 인한 영양상태 악화와 광합성 속도 저하, 그리고 토양으로부터 용출된 Al, Mn 등에 의한 식물의 세균 발생이나 신장생장이 억제되는 등의 복합적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2008; Izuta et al., 2001; Krause et al., 1986; Larcher, 2003; Tesche et al., 1993).

특히, 우리나라 산림의 대부분은 급격한 지형이며, 연간 강우량의 60% 이상이 여름철에 집중되는 등 침식작용 및 산사태와 같은 토사재해가 발생하기 쉽다. 이러한 침식작용 및 토사재해가 발생하면 낙엽층과 식생이 소실될 뿐만 아니라 지표면의 비옥한 토양이 유실돼, 토양의 산중화능이 저하되고 산성강하물에 의한 토양 산성화가 발생하기 쉬운 상태가 된다.

이러한 급격한 환경변화로 인해 쇠퇴한 산림 생태계나 사방조립 지역에 식재하는 오리나무속은 공생적 질소고정균(*Frankia* spp.)과 상리공생 관계를 형성한다. 질소고정균과 공생(symbiosis)

관계를 형성한 수목은 광합성물질을 질소고정균에 제공하고, 질소고정균은 광합성물질을 이용해 수목이 이용불가능한 대기중 질소를 고정해 수목에 공급한다(Huss-danell and Sellstedt, 1985; Lambers et al., 2008). 이러한 특징을 가지고 있는 오리나무속은 통상 수목이 생육하기 힘든 척박한 토양에서 생육가능하며, 잎내 질소 농도가 다른 수종에 비해 높아 토양의 지력회복에 효과적인 것으로 알려져 있다(Arnone III and Gordon, 1990; Huss-danell and Sellstedt, 1985; Lambers et al., 2008).

본 연구에서는 질산과 황산 등 토양 산성화의 원인 물질의 차이 및 토양 산성화가 정도가 서로 다른 환경에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무의 광합성, 성장, 양분상태, 그리고 공생균의 질소 고정능력 등을 측정해, 산성 토양에 대한 오리나무류의 저항성 및 특성을 평가함으로써 토양 산성화로 피해가 예상되는 산림생태계의 관리 및 복원에 필요한 기초자료를 제공하고자 실시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 공시수종 및 실험구 조성

공시수종은 일본 동경농공대학교 부속 연습림에서 생육시킨 사방오리나무(*Alnus firma* Siebold et Zucc.)와 물오리나무(*Alnus hirsuta* Turcz.) 2년 생 실생묘를 사용하였다. 공시토양은 일본 동경농공대학교 부속 연습림 일대에 분포하는 침엽수와 활엽수 혼효림 임분에서 낙엽층을 제거하고 표토층(0~10cm) 토양을 채취하였다. 시료 채취 후 토양은 5mm 체로 자갈이나 식물뿌리 등을 제거하여 실내에서 2주 동안 건조 하였다. 실험구

조성은 풍건 토양에 각각 질산(HNO₃)과 황산(H₂SO₄) 희석액을 첨가하고 3주간 안정화시켜, 저농도 질산 첨가구(pH=5.0; Low levels of Nitric acid : LN), 고농도 질산 첨가구(pH=4.0; High levels of Nitric acid : HN), 저농도 황산 첨가구(pH=5.0; Low levels of Sulfuric acid : LS), 고농도 황산 첨가구(pH=4.0; High levels of Sulfuric acid : HS) 및 대조구(pH=5.9; control)를 설정했다. 대조구 및 각 처리구의 산성 토양은 약 3주간 안정화 시켰다. 대조구 및 조제한 각각의 산성 토양을 4.5L 포트(직경 18cm, 높이 18cm)에 채워 사방오리나무와 물오리나무 묘목을 식재해 주 1-2회 이온 교환수를 관수했다. 식재된 묘목은 유리 온실에서 2월말부터 10월말까지 8개월간 생육했다.

2. 광합성 속도

각 실험구별 광합성속도는 광 환경에 따른 광합성물의 반응 곡선(광-광합성 곡선)으로 측정하였다. 광합성속도는 각 실험구 내 건진목 5개체씩 선정하고 개체당 가시적인 피해가 없는 잎을 대상으로 오전 9시부터 오후 3시까지 open gas exchange system(LI-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)을 이용해, 잎 온도 25°C, 상대습도 60~70%를 유지하며 측정했다. 광량자속밀도(photo-synthetic photon flux density; PPF)는 2,000, 1,500, 1,000, 500, 100, 0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 광합성률 변화를 측정하였다(Choi et al., 2006). 순 광합성량 곡선은 얻어진 데이터로부터 Thornley의 광-광합성 모델을 이용하여 계산했다(Thornley, 1976).

3. 잎내 클로로필 및 질소 함유량

잎 내 클로로필 및 질소 함유량은 광합성 속도 측정 후, 각 개체에서 채취한 잎으로 분석하였다. 잎 내 클로로필 a와 b 함량은 DMSO(dimethyl sulfoxide) 추출법에 의해 추출한 후에 분광광도계(Type 100-50, Hitachi, Tokyo, Japan)를 이용하

여 흡광도를 측정하였다(Barnes et al. 1992).

$$\text{Chl a } (\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}) = (14.85 \times A_{665} - 5.14 \times A_{648}) \times (a/b)$$

$$\text{Chl b } (\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}) = (25.48 \times A_{648} - 7.36 \times A_{665}) \times (a/b)$$

A₆₆₅ : 665nm의 흡광도

A₆₄₈ : 648nm의 흡광도

a : DMSO용액(mL)

b : 엽건중량(mg⁻¹)

남은 잎은 1주일간 60°C로 건조시킨 후, 분쇄기(Wonder Blender, Osaka Chemica Co., Japan)를 사용하여 분쇄시켜 CN 분석시스템(NC-900, Shimadzu, Kyoto, Japan)을 이용하여 잎 내 질소 농도를 측정하였다.

4. 질소 고정 능력

사방오리나무 및 물오리나무와 공생하는 질소 고정균(*Frankia* spp.)의 질소 고정 능력은 acetylene(C₂H₂)을 ethylene(C₂H₄)으로 환원시키는 아세틸렌 환원법(Acetylene reduction assay - ARA)을 이용하여 측정하였다(Hardy et al., 1968). 시료목에 감염되어 있는 질소 고정균을 약 10cm의 뿌리와 함께 채취 해 120 mL vial에 넣고 vial에서 10%의 공기를 뽑아 낸 후, 다시 10%의 아세틸렌(99.9%)을 주입하였다. 이후 토양속에서 1시간 동안 배양 후, 환원되어 나오는 에틸렌가스를 gas chromatography(G-3000, Hitachi, Tokyo, Japan)로 분석했다.

5. 생장량 측정 및 생장분석

생장량 측정은 실험 개시전 무작위로 각 수종별로 30개체 그리고 실험 종료시에 각 실험구당 6개체를 선정하여 수고, 근원직경 및 각 기관의 건중량을 측정했다.

6. 통계 분석

수집된 자료는 SAS(Version 9.1, SAS Institute

Inc., Cary, NC, USA) 프로그램을 이용해 기본 통계량을 분석하고, 분석 및 측정 결과의 유의성 검정을 Turkey's Studentized Range test를 사용해 오차범위 0.05% 미만에서 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 생장반응

대조구 및 각 처리구에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무의 생장량을 측정한 결과를 Table 1에 나타냈다. LN 및 HN 처리구에서 자란 사방오리나무의 수고 및 근원경 생장은 대조구와 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 하지만, LS 및 HS 처리구에서 자란 사방오리나무의 수고 및 근원경 생장은 대조구 및 질소 첨가구와 비교해 유의적인 생장 저하가 관측되었다($p<0.05$). 특히, HS 처리구에서 자란 개체의 수고 생장은 대조구에 비해 50% 이상 저하했다.

대조구 및 각 처리구에서 자란 물오리나무의 수고 생장은 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만, LN 및 HN 처리구에서 자란 물오리나무는 대조

구에서 자란 개체에 비해 근원경 생장이 유의적으로 저하했다($p<0.05$). 또한, LS 및 HS 처리구에서 자란 물오리나무의 근원경 생장은 대조구 및 질소 첨가구와 비교해 유의적인 생장 저하가 관측되었다($p<0.05$).

사방오리나무와 물오리나무의 물질생산 증가량을 조사한 결과, 사방오리나무 및 물오리나무의 지상부 물질생산량은 HN, LS 및 HS 처리구에서 자란 개체에서 대조구에서 자란 개체에 비해 유의적으로 감소했다. 하지만 지하부 물질생산량은 HN, LS 및 HS 처리구에서 자란 물오리나무에서 급격히 감소했다($p<0.05$).

지상부와 지하부의 건중량의 비(T/R)와 질소 고정균의 건중량은 사방오리나무와 물오리나무 간에 큰 차이를 나타냈다. HN, LS 및 HS 처리구에서 자란 사방오리나무의 T/R비는 감소하고 질소 고정균의 건중량은 유의적으로 증가했다($p<0.05$). 반면, HN, LS 및 HS 처리구에서 자란 물오리나무의 T/R비는 대조구와 큰 차이를 나타내지 않았으며, 질소 고정균의 건중량은 유의적으로 감소하였다($p<0.05$).

Table 1. The biomass production of *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings at different treatments.

Species	Treatments	Height (cm)	Root collar diameter (mm)	H/D ratio	Dry weight(g)			T/R ratio
					Shoot	Root	Mycorrhiza	
<i>Alnus firma</i>	control	92.0 a	11.0 a	83.6	18.4 a	5.0 a	0.48 b	3.7 a
	LN	81.6 a	10.7 a	76.3	11.5 ab	3.9 a	0.41 b	3.0 ab
	HN	92.1 a	13.5 a	68.2	10.3 b	6.9 a	0.67 a	1.5 c
	LS	65.7 b	9.8 b	67.0	10.1 b	5.6 a	0.57 ab	1.8 bc
	HS	43.5 c	8.0 b	54.4	10.0 b	5.5 a	0.71 a	1.8 c
<i>Alnus hirsuta</i>	control	56.6 a	10.8 a	52.4	16.3 a	4.4 a	0.45 ab	3.7 ab
	LN	60.3 a	8.7 b	69.3	16.2 a	5.6 a	0.54 a	2.9 b
	HN	54.1 a	8.1 b	66.8	5.6 b	2.4 b	0.18 c	2.3 b
	LS	59.5 a	6.1 c	97.5	8.2 b	2.2 b	0.30 bc	3.7 a
	HS	54.8 a	6.5 c	84.3	7.5 b	2.0 b	0.28 bc	3.7 a

Mean of six seedlings grown under each control (pH=5.9), LN (pH=5.0; Low levels of Nitric acid), HN (pH=4.0; High levels of Nitric acid), LS (pH=5.0; Low levels of Sulfuric acid), and HS (pH=4.0; High levels of Sulfuric acid) treatment. Different letters in the table are significantly different ($p<0.05$).

2. 잎내 클로로필 및 질소 함유량

잎내 크로로필 및 질소 함유량은 수목의 광합성 능력과 밀접한 관계가 있다(Lambers et al., 2008; Larcher, 2003). 당년생 사방오리나무 및 물오리나무의 잎내 클로로필 함유량(Chl a+b 및 Chl a/b)을 분석한 결과를 Figure 1에 표시했다. 사방오리나무 및 물오리나무의 Chl a+b 함유량은 대조구(4.94 및 4.85 $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$)에 비해 각 처리구에서 감소 경향을 나타냈지만, 유의적인 차이는 나타나지 않았다.

사방오리나무의 Chl a/b 함유량은 대조구에 비해 각 처리구에서 유의적으로 감소했지만($p < 0.05$), 물오리나무의 Chl a/b는 대조구와 각 처리구에서 자란 개체간의 유의적인 차이는 나타나지 않았

다. 특히, 물오리나무에 비해 사방오리나무의 Chl a/b 함유량이 크게 낮아 졌다.

각 처리구에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무의 잎내 전 질소(N) 함유량을 Figure 2에 표시했다. 사방오리나무의 잎내 전 질소 함유량은 LN 처리구를 제외한 각 처리구에서 자란 개체간의 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 하지만, LN 처리구에서 자란 사방오리나무의 잎내 전 질소 함유량은 대조구에 비해 유의적으로 감소했다($p < 0.05$). 물오리나무의 잎내 질소함유량은 HS 처리구를 제외한 각 처리구에서 대조구와 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 하지만, HS 처리구에서 자란 물오리나무의 잎내 질소 함유량은 대조구에 비해 유의적으로 증가하였다($p < 0.05$).

뿌리에서 흡수한 질소는 잎에서 빛을 흡수하는 클로로필(집광계), 대기중 CO_2 를 흡수하는 Rubisco(탄소 고정계), 흡수한 빛을 전달하는 전자전달계 및 가용 단백질로 이용된다(Kitaoka and Koike, 2004). 물오리나무의 HS 처리구는 대조구와 비교해 잎내 질소 함유량이 유의적으로 증가했음에도 불구하고, 잎내 클로로필 함유량은 감소 경향을 나타냈다. 이상의 결과에서, HS 처리구에서 자란 물오리나무는 잎내 질소 이용패턴을 변화시킨 것을 알 수 있다. 즉, 대조구에서 자란

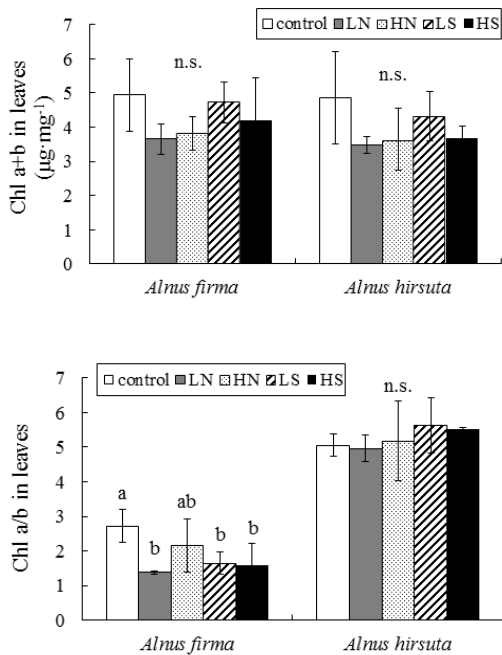


Figure 1. The concentration of chlorophyll a+b and chlorophyll a/b ratio in the current year leaves grown at the control, LN, HN, LS and HS treatments for *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings. The values are the means (\pm SD) of fifteen measurements. Bars with different letters are significantly different ($p < 0.05$). "n.s." indicates not significant at $p \geq 0.05$.

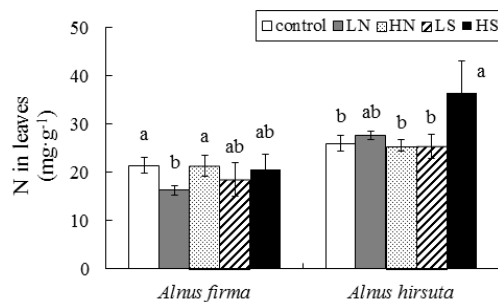


Figure 2. The concentration of nitrogen in the leaves in the current year leaves grown at the control, LN, HN, LS and HS treatments for *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings. The values are the means (\pm SD) of fifteen measurements. Bars with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

개체에 비해 HS 처리구에서 자란 물오리나무는 보다 적은 양의 잎내 질소를 클로로필에 사용한 것으로 생각된다.

3. 광합성 속도

수목의 광합성 능력은 수목의 성장과 밀접한 관계를 가지고 있을 뿐만 아니라 수목의 생리활성 지표로도 이용된다(Lambers et al., 2008; Larcher, 2003). Figure 3에 각 처리구에서 성장한 사방오리나무 및 물오리나무의 광-광합성곡선을 나타냈다. 대조구에서 자란 사방오리나무의 광포화시 최대 광합성속도는 $6.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 부근이었으나, LN 처리구에서 자란 사방오리나무의 최대 광합성속도는 $8.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 부근까지 증가했다. 반면, HS 처리구에서 자란 사방오리나무의 최대 광합성 속도는 $5.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 부근까지 저하했다. 대조구에서 자란 물오리나무의 최대

광합성속도는 $5.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 부근이었으나, LN 처리구에서 자란 물오리나무의 최대 광합성 속도는 $8.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 부근까지 약 80% 증가하는 등, 모든 처리구에서 자란 물오리나무의 최대 광합성 속도가 대조구에 비해 증가했다.

특히, 대조구에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무의 최대 광합성 속도는 각각 6.3 및 $5.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 부근이었지만, LN 처리구에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무의 최대 광합성 속도 증가율은 각각 40%와 80%로 물오리나무의 최대 광합성 속도 증가율이 사방오리나무에 비해 2배 이상 높았다. 또한, 사방오리나무는 저농도 및 고농도 황산 처리가 광합성 능력에 악영향을 끼쳤지만, 물오리나무에는 큰 영향을 미치지 않았다.

4. 질소 고정 능력

질소는 식물의 3대 영양소 중 하나로 대기 중의 80%를 질소가스(N_2)의 형태로 존재하지만, 매우 안정된 구조를 이루고 있어서 식물이 스스로 이용할 수 없고, 식물은 토양내 존재하는 질산태 질소 혹은 암모니아태 질소를 흡수해 이용한다(Lambers et al., 2008). 토양 산성화로 인한 생태적 악영향은 영양염류의 결핍과 식물 유해금속인 Al, Mn 등을 용출시켜 식물의 세균발생이나 신장생장을 억제하여 식물의 양분흡수를 저해한다(Ulrich et al., 1980). 토양 중 질소양분 결핍 현상은 산림 생태계의 회복 및 재생을 지연시키는 요인이며, 이 때문에 질소는 산림 생태계의 회복 및 재생을 위해서는 필수 불가결한 영양분이라 할 수 있다(Fisher and Binkley, 2000; Lambers et al., 2008). 사방오리나무 및 물오리나무와 공생하는 질소고정균(*Frankia* spp.)은 대기 중 질소가스를 고정해 이용할 수 있는 질소고정능력을 가지고 있어, 산림생태계의 회복 및 재생을 위해 매우 중요한 수종이다. Figure 4에 사방오리나무 및 물오리나무와 공생하는 질소고정균의 질소고정능력을 표시했다. 사방오리나무와 공생하는 질소 고정균의 질소고정능력은 HN 및 HS 처리구에서

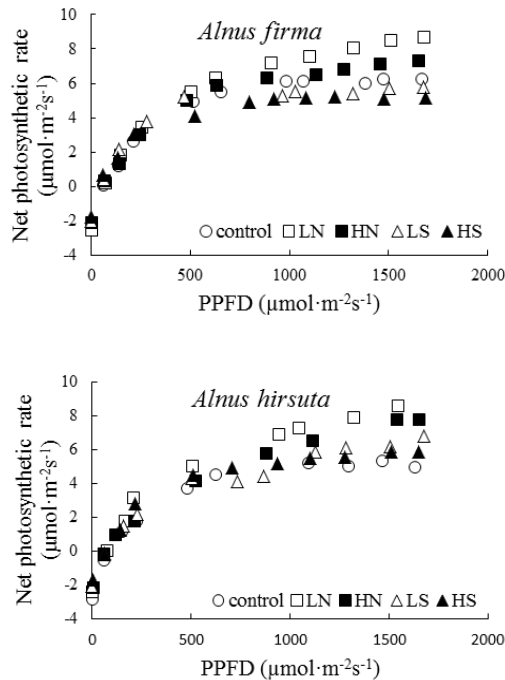


Figure 3. Photosynthetic light response curves of current year leaves grown at the control, LN, HN, LS and HS treatments for *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings.

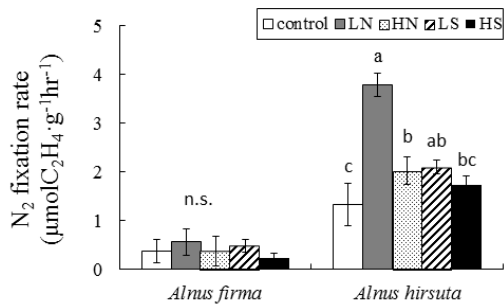


Figure 4. The N₂ fixation rate of *Alnus firma* and *Alnus hirsuta* seedlings grown at the control, LN, HN, LS and HS treatments. The values are the means (\pm SD) of five measurements. Bars with different letters are significantly different ($p < 0.05$). "n.s." indicates not significant at $p \geq 0.05$.

대조구에 비해 감소했지만, 각 처리구에서 자란 개체간의 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 하지만, 물오리나무와 공생하는 질소고정균의 질소 고정능력은 LN 처리구에서 대조구에 비해 3배 이상 증가 하는 등, 각 처리구에서 자란 개체의 질소 고정 능력이 대조구에서 자란 개체의 질소 고정능력에 비해 유의적으로 증가했다($p < 0.05$). 특히, 물오리나무와 공생하는 질소 고정균의 질소 고정능력은 사방오리나무에 비해 크게 높은 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

질산 및 황산에 의해 산성화된 토양에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무는 묘목의 생장 및 생리활성 그리고 질소고정균의 질소고정능력의 영향을 크게 받는 것으로 밝혀졌다. 사방오리나무는 토양 pH가 5.0에서 4.0으로 산성화가 진행될수록 질소고정균의 질소고정능력이 저하되는 경향을 보인 반면, 뿌리 및 질소고정균의 건중량은 증가하고, T/R비는 감소하였다. 특히, 질산 처리구에서 자란 묘목에 비해 황산 처리구에서 자란 묘목의 생장 및 광합성 속도가 크게 저하되었다. 반면, 물오리나무는 각 처리구에서 대조구에

비해 질소고정균의 질소고정능력이 유의적으로 증가했다. 하지만, 뿌리 및 질소고정균의 건중량이 감소하고, T/R비가 증가하였다. 이상의 결과에서 사방오리나무는 토양 산성화에 대해 뿌리생장을 증가시키고 질소 고정균과의 공생관계를 증가시키지만, 물오리나무는 공생하고 있는 질소고정균의 질소 고정능력을 증가시키는 것으로 밝혀졌다.

또한, 황산 처리구에서 자란 사방오리나무의 잎내 chl a/b 함유량은 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$ 이하로 저하하고, 대조구에 비해 광합성 속도가 낮아져 사방오리나무는 황산 처리로 인해 큰 스트레스를 받고 있는 것으로 생각된다. 하지만, 황산 처리구에서 자란 물오리나무의 잎내 chl a/b 함유량은 대조구에 비해 증가하고, 광합성 속도 또한 대조구에 비해 증가했다. 사방오리나무가 물오리나무에 비해 황산에 의해 산성화된 토양에 대한 민감도가 더 큰 것으로 생각된다. 질산 처리구에서 자란 사방오리나무 및 물오리나무의 생장 및 생리활성은 큰 영향을 받지 않았다. 이는, 질산 처리구에 첨가한 질산이 토양을 산성화시킴과 동시에 수목의 양분으로 이용되었을 것으로 생각된다.

토양 산성화에 대한 두 수종의 반응 결과를 종합해 볼 때, 토양 pH가 5.0 이하인 산림 토양에서는 뿌리 생장을 증가시키고 질소고정균과의 공생관계를 촉진시키는 사방오리나무가 더 잘 적응할 것으로 생각된다. 하지만, 황 산화물로 인해 산성화가 진행된 지역이나, 산사태 등으로 인해 토양심이 얕아 뿌리생장이 적당하지 않은 곳에는 뿌리생장을 억제하며 공생하고 있는 질소고정균의 질소고정능력을 증가시키는 물오리나무가 더 잘 적응할 것으로 생각된다. 산성화된 산림 생태계의 보전 및 복원을 위해 사방 조림 수종의 특성을 파악함과 동시에, 산성토양에서 용출되는 식물 독성물질인 Al과 Mn의 영향을 복합적으로 파악하여, 수종선발의 효율성을 높이는데 기여 할 수 있는 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 Improvement of Research Environment for Young Researchers project of MEXT Japan의 지원을 받아 수행 되었습니다. 샘플링 및 분석을 도와준 이다 유이치로씨에게 감사의 말씀을 전합니다.

인용 문헌

- Arnone III, J.A. and Gordon, J.C. 1990. Effect of nodulation, nitrogen fixation and CO₂ enrichment on the physiology, growth and dry mass allocation of seedlings of *Alnus rubra* Bong. *New Phytologist* 116 : 55-66.
- Barnes, J.D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S. and Davison, A.W. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 32 : 85-100.
- Choi, D.S., Kayama, M., Jin, H.O., Lee, C.H., Izuta, T. and Koike, T. 2006. Growth and photosynthetic responses of two pine species (*Pinus koraiensis* and *Pinus rigida*) in a polluted industrial region in Korea. *Environmental Pollution*. 139 : 421-432.
- Choi, D.S., Jin, H.O., Chung D.J., Sasa, K. and Koike, T. 2008. Growth and physiological activity in *Larix kaempferi* seedlings inoculated with ectomycorrhizae as affected by soil acidification. *Trees*. 22 : 729-735.
- Fisher, R.F. and Binkley, D. 2000. Ecology and management of forest soils. John Wiley & Sons, New York. 489pp.
- Hardy, R.W.F., Holsten, R.D., Jackson, E.K. and Burns, R.C. 1968. The acetylene ethylene assay for N₂ fixation; Laboratory and field evaluation. *Plant Physiology* 43 : 1185-1207.
- Huss-danell, K. and Sellstedt, A. 1985. Nitrogenase activity in response to darkening and defoliation of *Alnus incana*. *Journal of Experimental Botany* 36 : 1352-1358.
- Izuta, T., Yamaoka, T., Nakaji, T., Yonekura, T., Yokoyama, M., Matsumur, H., Ishida, S., Yazaki, K., Funada, R. and Koike, T., 2001. Growth, net photosynthetic rate, nutrient status and secondary xylem anatomical characteristics of *Fagus crenata* seedlings grown in brown forest soil acidified with H₂SO₄ solution. *Water, Air and Soil Pollution*. 130 : 1007-1012.
- Kitaoka, S. and Koike, T. 2004. Invasion of broad-leaf tree species into a larch plantation : seasonal light environment, photosynthesis and nitrogen allocation. *Physiologia plantarum*. 121 : 604-611.
- Krause, G.H.M., Arndt, U., Brandt, G.J., Bucher, J., Kent, G. and Matzner, E. 1986. Forest decline in Europe : Development and possible causes. *Water, Air and Soil Pollution* 31 : 647-668.
- Lambers, H., Chapin III, F.S. and Pons, T.L. 2008. *Plant physiological ecology*. Springer. New York. 604pp.
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology*. 4th ed, Springer-Verlag, New York. 506pp.
- Tesche, M., Wienhaus, O., Codzik, St. and Materna, J. 1993. Stress and decline in air-polluted forest ecosystems of some countries in the eastern parts of central Europe. p59. In, Abstracts of the XV International Botanical Congress.
- Thornley, J.H.M. (1976) : *Mathematical models in plant physiology*. - Academic Press. London. 318pp.

- Ulrich, B, Mayer, R. and Khanna, P.K. (1980) Chemical changes due to acid precipitation in a loss-derived soil in Central Europe. *Soil Science*. 130 : 193-199.
- Ulrich, B. 1989. Effect of acidic precipitation on forest ecosystems in Europe. In Adriano, D.C. and A.H. Johnson (eds.), *Acid precipitation Vol. 2 : Biological and Ecological Effect*. Springer-Verlag, 189-272.