

질소원 처리에 따른 버드나무류의 생육초기 반응과 양분 흡수 특성*

채승민¹⁾ · 김미자¹⁾ · 김선영¹⁾ · 이창현²⁾

¹⁾ 전북대학교 산림환경과학과 강사 · ²⁾ 전북대학교 산림환경과학과 교수

Early Growth Response and Nutrient Absorption Characteristics of Willows (*Salix* sp.) Treated with Nitrogen Source*

Chae, Seung-Min¹⁾ · Kim, Mi-Ja¹⁾ · Kim, Sun-Young¹⁾ and Lee, Chang-Heon²⁾

¹⁾Dept. of Forest Environmental Science, Jeonbuk National University, Lecturer,

²⁾Dept. of Forest Environmental Science, Jeonbuk National University, Professor.

ABSTRACT

The present study was to investigate the growth response and nutrient absorption in three willow species (*Salix gracilistyla*, *S. koreensis* and *S. chaenomeloides*) treated with nitrogen source ($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ rate; 200:0, 150:50, 100:100, 50:150, 200:0) for a period of 90days. The height, dry weight and chlorophyll contents of three species of willows were found to be highest at 50:150 ($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$) treatment. NO_3^- -N was more effective than NH_4^+ -N in the early growth of three species of willows. The increase in percentage of NO_3^- -N handling, T-N, NO_3^- -N in plant tissue increased. The analysis of C, N and mineral content in various parts revealed that the amounts of C, N, K, Ca and Mg were higher in leaves than those in the stems and the roots. However, the amount of NO_3^- -N and P were higher in roots than those in the leaves and the stems. *Salix koreensis* was excellent, followed by *S. chaenomeloides* and *S. gracilistyla* in absorption of nitrate nitrogen. Higher percentage of NO_3^- -N, the amounts of T-N, NO_3^- -N, P_2O_5 , K, Na, Ca, and pH in soil were decreased.

Key Words : willow species, nitrate, nitrogen, ammonium, nutrients absorb

* 본 논문은 채승민의 전북대학교 박사학위 논문의 일부를 발췌한 것임.

First author : Chae, Seung-Min, Dept. of Forest Environmental Science, Jeonbuk National University, Lecturer,

Tel : +82-63-270-2589, Email : es-csm@hanmail.net

Corresponding author : Lee, Chang-Heon, Dept. of Forest Environmental Science, Jeonbuk National University, Professor, Jeonju 54896, Korea.

Tel : +82-63-270-2589, Email : leech@jbnu.ac.kr

Received : 9 April, 2020. **Revised** : 5 June, 2020. **Accepted** : 25 May, 2020.

I. 서 론

대부분의 고등식물은 주로 질산태 질소를 질소원으로 이용하며, 질산태 질소는 암모늄태 질소와 달리 식물에 독성이 없기 때문에 많은 작물은 암모늄태 질소원보다 질산태 질소를 질소원으로 공급할 때 질소의 흡수율, 생장 및 수확량 등이 더 많다(Runge, 1983). 질산태 질소의 흡수는 식물의 질소요구도(Imssand and Touraine, 1994)와 질산환원과정에서 형성된 carboxylate에 의해 조절되며, carboxylate는 $\text{HCO}_3^-/\text{nitrate}$ 와 $\text{OH}^-/\text{nitrate}$ antiport에 각각 HCO_3^- 과 OH^- 을 제공해 줌으로써 질산태 질소의 흡수를 조절한다고 한다(Touraine *et al.*, 1992).

일반적으로 호기조건에서 유기태 질소는 미생물에 의해 쉽게 무기화되는데, 그 과정은 유기태 질소가 $\text{NH}_4^+-\text{N} \rightarrow \text{NO}_2^--\text{N} \rightarrow \text{NO}_3^--\text{N}$ 으로 형태적 변화가 이루어진다(Bent and Christensen, 1986). 중간생성물인 NO_2^--N 은 토양 내에서 화학적으로 매우 불안정하여 질산태 질소로 빠르게 변화되며, 이러한 질소의 무기화 과정 중 탈질균에 의해 NH_3 와 N_2O 의 형태로 방출되어 질소의 손실이 이루어진다(Aulakh *et al.*, 2000). 토양에 존재하는 무기질 질소의 형태는 크게 질산태 질소, 암모늄태 질소 및 질소분자로 나뉘지만 식물은 질소를 직접 환원하는 효소를 갖고 있지 않기 때문에 토양으로부터 질산태 질소나 암모늄태 질소의 형태로 뿌리에서 흡수한다. 뿌리에 흡수된 암모늄태 질소는 직접 아미노산의 합성에 이용되지만, 질산태 질소는 아미노산으로 합성되기 전에 암모늄태 질소로 환원된다(Beever and Hageman, 1983; Bray, 1983).

잎과 줄기 사이의 질산환원효소의 분포는 초본식물과 목본식물에 있어서 오랫동안 논쟁되어 왔던 문제이다(Beever and Hageman, 1980; Andrews, 1986, Gojon *et al.*, 1994). Edwards와 Horton(1982)은 복숭아 실생묘의 생장이 암모늄

태 질소와 질산태 질소의 비율 50:50과 75:25에서 가장 좋은 반면 질산태 질소 단용구에서 가장 억제됨을 보고하였다. 식물체내 질소의 함량은 식물의 생장(Reed and Hageman, 1980; Shen *et al.*, 1993), 수확량(Shen *et al.*, 1993) 등과 뚜렷한 상관성을 가지므로 포도(Perez and Kliever, 1987), 사과(Lee and Titus, 1992), 복숭아(Bussi *et al.*, 1997) 등에서 질소 시비와 질산환원효소, 생체 내 질소 축적의 관계에 대한 연구 등 주로 과수분야에서 연구가 이루어지고 있으나 일반 수목에 대한 연구는 매우 미진한 상황이다.

버드나무류(갯버들, 버드나무, 왕버들)는 우리나라 하천 주변에서 좋은 생육을 보이며 목본류 중에서도 생장량이 뛰어나 바이오메스 축적량이 높을 뿐만 아니라 유기물로 오염된 수질을 정화하는데 효과적이다.

따라서 본 연구는 버드나무류(갯버들, 버드나무, 왕버들)를 대상으로 무기 질소원 시비가 버드나무류의 생육, 질소 축적, 생리적 반응, 양분 흡수량 및 토양의 화학적 변화 등에 미치는 영향을 조사하여 버드나무류에 알맞는 적정 질소 형태와 비율, 무기 질소원에 따른 생육변화 등을 구명하고자 실시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험재료

1) 식물재료

본 연구에 사용한 버드나무류는 갯버들(*Salix gracilistyla*), 버드나무(*S. koreensis*), 왕버들(*S. chaenomeloides*) 3종이다. 실험 재료인 버드나무류는 전북 지역의 자생지에서 2월 하순에 채취하여 삽수를 10 cm 크기로 조제한 후 완주군 소양면 최고상류 하천에서 채취해 온 모래와 복합비료(상품명: 엔피코탑 원예골드, 생산업체: 주식회사 풍농, 비료종류: 제2종 복합비료(성분 함량: 질소전량 12%, 구용성인산 6%, 수용성칼리 6%, 구용성고토 4%, 수용성붕소 0.1%, 가용

Table 1. Physical and chemical properties of soil used in the experiment(mean±SD).

Chemical properties	
pH (1 : 5)	5.60±0.14
EC _{1.5} (dS/m)	0.04±0.00
OM (g/kg)	4.12±0.06
Avail. P ₂ O ₅ (mg/kg)	8.50±0.09
N (%)	0.01±0.00
NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	17.36±0.41
NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	15.68±0.54
Exch. K (cmol _c /kg)	0.09±0.00
Exch. Na (cmol _c /kg)	0.06±0.00
Exch. Ca (cmol _c /kg)	0.31±0.01
Exch. Mg (cmol _c /kg)	0.76±0.03
Particle size fraction (%)	
Sand	76.0
Silt	9.5
Clay	14.5

Table 2. Temperature and humidity in the greenhouse during growth period of the plants.

Month (2011)	Temperature (°C)			Humidity (%)		
	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.
April	15.8	25.8	8.4	65.1	98.4	20.4
May	24.0	31.3	10.1	72.5	98.3	23.1
June	25.8	38.1	11.8	73.1	99.7	15.4
July	29.4	40.6	21.3	78.8	99.9	35.5

성규산 14%, 가용성석회 20% 이상) 0.05%를 섞은 토양에 삼목하였다. 충분히 발근된 삼목묘를 발근 후 4월 20일 실험포트에 옮겨 심었다.

플라스틱제 포트(지름 35 cm × 깊이 15 cm)에 포트 당 3주씩 식재하여 난괴법으로 5반복하였으며, 지하수를 공급하였고, 군산시 서수면에 소재한 온실(위도 35° 59' 45.28" N, 경도 126° 46' 47.72" E)에서 고르게 햇빛을 받도록 5일에 한번 씩 포트를 이동하면서 재배 실험을 하였다.

2) 토양재료

실험토양은 군산시 성산면(위도 35° 58' 43.30" N, 경도 126° 52' 37.05" E)에서 채취하여,

2 mm 토양체에 통과된 것을 사용하였으며, 토양의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다.

3) 재배 조건

버드나무류의 재배 기간은 4월 20일부터 7월 20일까지 실시하였다. 온실의 조건은 강우를 차단하고, 5월 15일까지는 오전 8시에서 오후 7시까지 온실을 환기시켰고, 오후 7시에서 다음날 오전 8시까지 폐쇄하였으며, 5월 16일부터는 온실을 항상 환기시켰다.

온실 내부의 온·습도는 전자온습도계(TR-72U)를 사용하여 측정하였고, 버드나무류의 재배 실험 기간 동안 온실 내부의 온도는 Table 2에서 보는 바와 같이 최고 40.6°C, 최저 8.4°C이

Table 3. Sources and concentrations of nutrient solution used in the experiment(unit: mM).

Source	Hoagland	NH ₄ ⁺ : NO ₃ ⁻				
		200:0	150:50	100:100	50:150	0:200
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	2.25	-	1.00	1.00	1.00	2.25
KNO ₃	2.15	-	2.15	2.15	2.15	2.15
NaNO ₃	7.64	-	0.5	4.07	7.64	7.64
KH ₂ PO ₄	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
CaCl ₂	-	2.25	1.25	1.25	1.25	-
NaCl	-	7.6	7.05	3.5	-	-
KCl	-	2.17	-	-	-	-
(NH ₄) ₂ ·SO ₄	-	14.28	10.71	7.14	3.57	-

었으며, 습도는 최고 99.9% 이었고 최저 15.4%로 나타났다.

2. 무기 질소원의 처리 방법

질소원 형태가 식물체의 생육, 엽록소, 질소 함량 및 질산환원에 미치는 영향 등을 조사하기 위하여 전질소의 양을 1 L 당 200 mg으로 맞춘 형태에서 암모늄태 질소와 질산태 질소의 함량을 조절하여, 5수준의 NH₄⁺:NO₃⁻ 비율(200:0, 150:50, 100:100, 50:150, 0:200 mg/L)로 조성하였다(Table 3). Hoagland 영양액(Hoagland and Arnon, 1950)을 참고하여 각 원소별 함량을 다량원소와 미량원소를 구분하여 다량원소인 질소 함량은 200 mg/L, 인 함량은 15 mg/L, 칼륨 함량은 102 mg/L, 칼슘 함량은 90 mg/L, 마그네슘 함량은 90 mg/L로 조성하였으며, 미량원소는 H₃BO₃ 46.25 μM, MnCl₂·4H₂O 9.10 μM, ZnSO₂·7H₂O 0.77 μM, CuSO₂·5H₂O 0.32 μM, H₂MoO₃·H₂O 0.01 μM, Na-Fe EDTA 50.00 μM을 사용하여, 붕소 500 μg/L, 망간 500 μg/L, 아연 50 μg/L, 구리 20 μg/L, 몰리브덴 0.96 μg/L, 철 2,795 μg/L으로 영양액을 조제하였고, pH는 6.0으로 조절하였다.

본 연구는 영양물질에 의한 수질이나 토양오염을 버드나무류를 통하여 정화시킬 수 있다는 전제하에 버드나무류 생육 초기의 반응과 생육

후 토양 상태를 비교하였다. 짧은 생육기간이지만 생육속도가 빠르고 영양액 처리에 따른 수종별 처리구별 생육 차이가 현저히 나타났기 때문에 3개월을 실험기간으로 하였다. 조제된 영양액을 시험구별로 식재 15일 후 3일 간격으로 45일간 200 mL 씩 투여하여 1주 당 1 L의 영양액이 공급되었고, 채취 30일 전 투여를 정지하였다.

3. 조사방법

1) 생장량 측정

(1) 수고 측정

영양액에 따른 버드나무류의 생육 초기 반응을 비교하기 위해 각 처리구별 5본을 30일 간격으로 버드나무류의 줄기 길이를 측정하였다.

(2) 건조량 측정

식재 90일 후 각 처리구에서 채취한 식물의 이물질을 제거하고 잎, 줄기, 뿌리로 구분하여 70℃의 건조기에서 72시간 동안 건조한 후 건조량을 측정하였다.

2) 식물체의 성분 분석

식물체 각 부위에 함유되어 있는 무기성분을 조사하기 위해 채취한 버드나무류의 잎, 줄기, 뿌리를 증류수로 세척하고 70℃에서 72시간 건조 후 부위별로 분쇄하여 분석시료로 사용하였

으며, 3반복 분석하였다.

시료 1 g을 500℃에서 4시간 회화한 후, 1 N-HCl 10 mL로 잘 용해하고 No.6 여과지로 여과 후 P는 UV/Vis Spectrophotometer (HP8453 UV-Vis, Agilent)로 470 nm에서 측정하였으며 K, Ca, Mg은 원자흡광광도계(Avanta, GBC)로 측정하였다. 전질소는 CN 원소분석기(Vario Max CN, elementar社)을 사용하여 Dumas법으로 분석하였다.

식물체에 함유되어 있는 질산태 질소는 Miller(1998)에 의한 방법을 변형하여 사용하였다. 시료 200 mg을 50 mL 튜브에 옮기고, 2% 아세트산 20 mL를 첨가하여, 200 rpm으로 30분간 진탕시키고, 0.22 μ m membrane filter를 사용하여 여과하고 이온크로마토그래피(Dionex ICS-1500)를 이용하여 분석하였다.

3) 잎의 엽록소 함량

생리적으로 잎의 질소는 대부분 엽록소에 포함되어 있기 때문에 엽록소 함량과 질소함량과의 상관관계는 높은 것으로 알려져 있다(Park, et al 2007.). 따라서 빠르고 쉽게 잎의 녹색정도를 분별할 수 있는 chlorophyll meter(SPAD-502)를 활용하여 5월부터 7월까지 30일 간격으로 측정하였다. 측정 방법은 신초 가운데 중간의 잎을 좌우 대칭으로 2매를 선정하여 잎의 중간부위를 chlorophyll meter로 5회 측정하였다.

4) 토양 화학성 조사

식재 90일 후 각 처리구에서 채취한 토양을 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법(2000)에 준하여 pH와 EC는 풍건토양과 증류수 1:5(w/v) 비율로 하여 pH Meter(EUTECH COND600)과 EC Meter(EUTECH ECOSCAN)로 각각 측정하였다.

유기물 함량은 Tyurin법으로 토양 0.3 g(200 mesh 통과시료)을 250 mL 삼각플라스크에 정량 후 0.4 N-중크롬산칼륨용액($K_2Cr_2O_7$) 20 mL

를 가하고 200℃의 전열판에서 기포가 발생한 시점부터 정확히 5분간 분해하였다. 분해한 시료에 증류수 50 mL, 85% 인산 5 mL, 지시약 diphenylamine 용액(DPA) 3~4 방울 떨어뜨린 후 0.2 N 황산제일철암모늄으로 적정하여 유기물 함량을 계산하였다.

전질소 함량은 Kjeldahl 증류법으로 풍건 토양 1 g과 conc. H_2SO_4 15 mL 및 황산구리 촉매제를 가하여 420℃에서 50분간 분해한 시료를 냉각시킨 후 Kjeldahl 분해장치(Kjeltec 2400-Analyzer, FOSS)를 이용하여 분석하였다. NO_3^- -N 함량은 MgO를 가하여 NH_4^+ -N를 추출한 후 devarde's alloy를 가하여 증류법에 의해 추출하였다. NH_4^+ -N 함량은 토양입자에 흡착된 NH_4^+ 를 2M KCl 용액으로 치환하여 MgO로 alkali화하여 증류 적정하였다.

유효인산은 Lancaster법으로 토양시료 5 g을 100 mL 삼각플라스크에 취한 후 인산침출액 20 mL를 넣어 10분간 진탕한 뒤 No. 2 여지로 여과하였다. 여액 3 mL와 ammonium paramolybdate 희석혼합용액(조작액) 6 mL, 1-amino-2-naphtol-4-sulfonic acid 용액 0.4 mL를 잘 혼합하여 30℃ 항온기에서 30분간 발색 후 비색계(HP8453 UV-Vis, Agilent)로 720 nm에서 측정하였다.

치환성 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+)은 토양 5 g을 100 mL 삼각플라스크에 취한 후 1 N- CH_3COONH_4 (pH 7.0)를 50 mL 가하고 30분간 진탕한 후 여과 (No.2)하고 유도결합프라즈마 분광광도계(GBC, Integra)를 이용하여 분석하였다 (농업과학기술원, 2000).

4. 통계 분석

통계분석은 SPSS 19.0K 통계패키지를 활용하여 각 식물체 별로 영양액의 조성에 따라 수고, 건중량, 엽록소 함량, 부위별 이온성분과 질소화합물 함량의 유의성 검정을 위해 분산분석을 실시하였고, 사후검정으로 Duncan's test를 실시하였다. 그리고 각 영양액이 식물체와 토양

에 미치는 인자들의 관련성을 알아보기 위해 상관분석과 회귀분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 무기 질소원에 따른 버드나무류의 생육 반응

1) 생장 특성

(1) 수고 생장

식재 후 90일까지 30일 간격으로 각 처리구의 수고를 측정 한 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 갯버들(*Salix gracilistyla*)과 왕버들(*S. chaenomeloides*)은 식재 30일 후부터 수고 생장이 급격하게 증가하였고, 버드나무(*S. koreensis*)는 60일 후부터 생장 속도가 급격히 증가하였다. 3종의 버드나무류의 영양액 처리구별 수고 차이는 식재 후 30일까지 미미했지만 식재 후 60일부터는 처리구별 차이가 나타나기 시작했다. 식재 90일 후 갯버들은 처리구 간의 큰 차이를 나타내지 않았으나, 버드나무와 왕버들의 경우 처리구별 차이가 뚜렷하였다. 이는 버드나무와 왕버들의 수고 생장에 대한 $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 비율의 감응도가 갯버들에 비해 크거나 수중에 따라 생장속도의 차이가 있다는 것을 알 수 있었다(Figure 1).

갯버들은 질산태 질소 100~200 mM 처리구에서, 버드나무는 질산태 질소 150 mM 처리구에서, 왕버들은 질산태 질소 150~200 mM 처리구에서 유의적으로 높은 수고 생장을 보였다. 즉, 질산태 질소 처리량이 증가할수록 생장량이 증가함을 보였다. 이는 암모늄태 질소보다 질산태 질소가 버드나무류 수고 생장에 있어 더 효과적임을 나타냈다(Figure 1).

질산태 질소 0~200 mM 사이의 영양액 처리구별 수고 생장을 회귀 분석한 결과 갯버들의 경우 선형함수는 $f(x) = 0.29x + 13.93$ ($R^2 = 0.370$), 2차 함수 $f(x) = -0.09x^2 + 0.85x + 13.28$ ($R^2 = 0.423$)이었고, 버드나무의 경우 선형함수는 $f(x) = 2.04x + 47.24$ ($R^2 = 0.375$), 2차 함수 $f(x) = -0.90x^2 + 7.42x + 40.96$ ($R^2 = 0.477$)이었으며,

왕버들의 경우 선형함수는 $f(x) = 1.95x + 21.7$ ($R^2 = 0.766$), 2차 함수 $f(x) = -0.02x^2 + 2.10x + 21.48$ ($R^2 = 0.766$)로 나타나 영양액의 질산태 질소 비율 증가와 수고 생장이 선형에 가까운 2차 함수식이 형성되었다.

수고 생장이 가장 높았던 질산태 질소 150 mM 처리구의 경우 타처리구에 비해 30일 이후부터 수고 생장이 급격히 증가해서 버드나무류의 양분 흡수에 대한 효과가 30일 이후부터 나타남을 알 수 있었다(Figure 1).

공통적으로 버드나무류 모두 영양액 처리시 무처리구보다 수고 생장이 우수했으며, 갯버들의 경우 영양액 처리구의 평균 수고는 14.9 cm였으며, 무처리구 13.8 cm에 비해 1.1 cm 높았고, 버드나무의 경우 영양액 처리구의 평균 수고는 53.4 cm였으며, 무처리구 31.5 cm에 비해 21.9 cm 높게 나타났으며, 왕버들의 경우 영양액 처리구의 평균 수고는 27.5 cm였으며, 무처리구 19.5 cm에 비해 8.0 cm 높았다(Figure 1, Photo 1). 이는 본 연구에 사용한 영양액이 버드나무류에 있어 영양분으로서 생장에 모두 긍정적인 영향을 미친 것으로 보인다.

특이한 점은 왕버들과 갯버들의 수고는 무처리구에서 차이가 나지 않았는데, 질산태 질소 0 mM 처리구에서는 2.3 cm, 100 mM 처리구에서는 6.3 cm, 200 mM 처리구에서 10.3 cm 차이가 나타나 질산태 질소의 비율이 높아질수록 수고 생장 차이는 크게 나타났다. 즉 왕버들이 갯버들보다 수고 생장에 있어 질산태 질소의 효과가 더 크게 작용한 것으로 판단된다.

(2) 건물중

식재 후 90일째 건물중을 조사한 결과 모든 처리에서 갯버들의 건물중이 버드나무류 3종 중 가장 낮았고, 무처리구와 질산태 질소 0~50 mM 처리구에서는 버드나무의 건물중이 왕버들보다 높았으며, 질산태 질소 100~200 mM 처리구에서는 왕버들이 버드나무보다 건물중이 높았다(Table 4). 수고 생장의 경우 모든 처리구

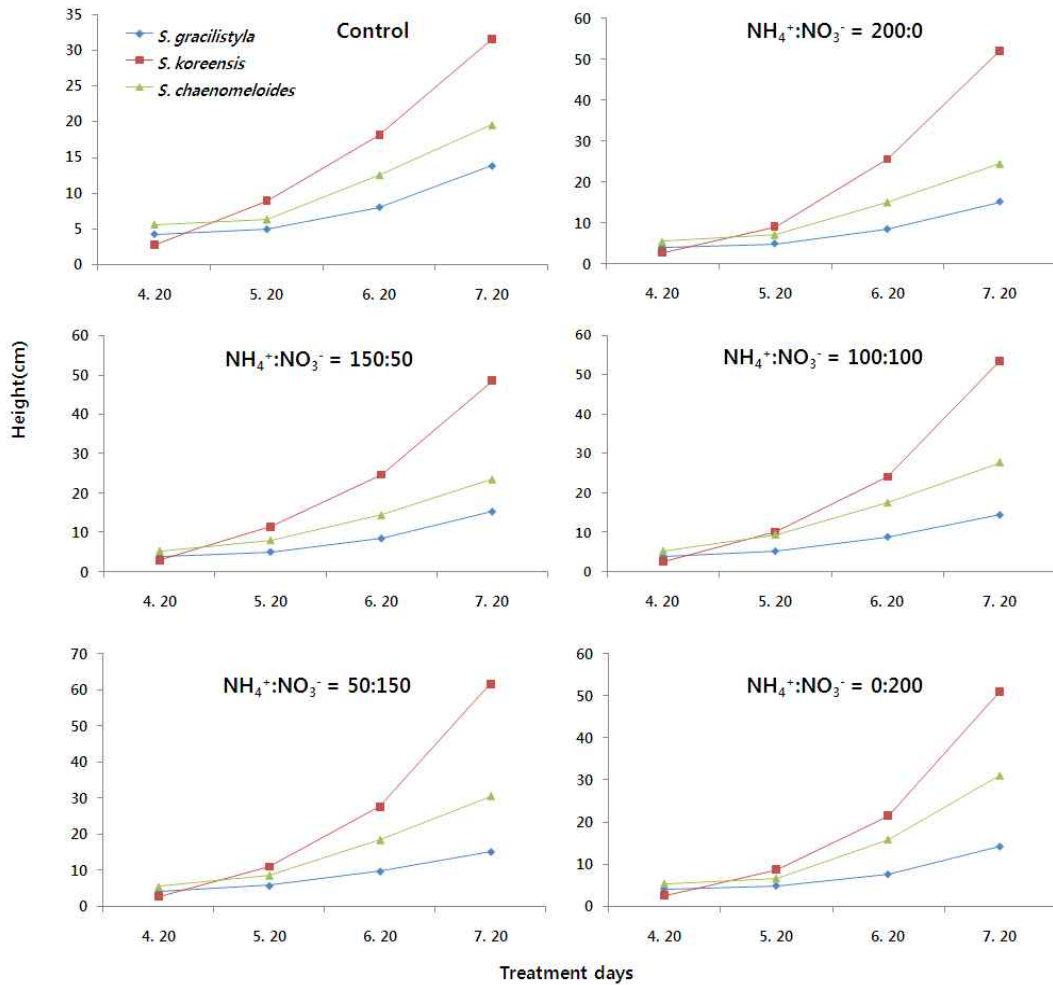


Figure 1. Height growth comparison of three species in 90 days treated with $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (200:0, 150:50, 100:100, 50:150, 0:200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

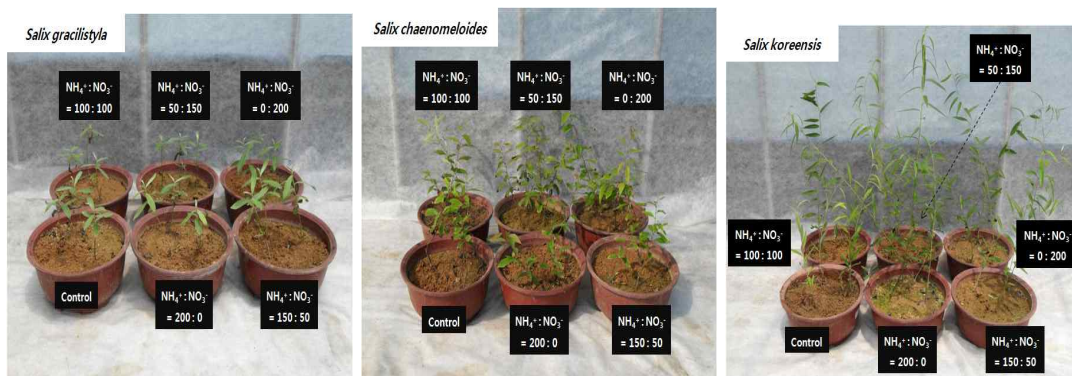


Photo 1. Growth of three species of willows in 90 days treated with $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ (200:0, 150:50, 100:100, 50:150, 0:200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

Table 4. Dry weight of leaf, stem, root of willows in 90 days treated with NH₄⁺:NO₃⁻.

Species	NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻	Leaf (g)	Stem (g)	Root (g)	Total (g)	T/R ratio
<i>Salix gracilistyla</i>	Control	0.42±0.02	1.65±0.08	0.28±0.02	2.34±0.10	7.46
	200: 0	0.43 ^a ±0.02	1.77 ^a ±0.08	0.28 ^a ±0.10	2.48 ^a ±0.11	7.78 ^b
	150: 50	0.43 ^{ab} ±0.03	1.82 ^b ±0.09	0.30 ^b ±0.01	2.54 ^a ±0.10	7.55 ^a
	100:100	0.45 ^{bc} ±0.02	2.03 ^d ±0.08	0.30 ^b ±0.01	2.78 ^{bc} ±0.11	8.34 ^c
	50 :150	0.47 ^d ±0.03	2.10 ^d ±0.07	0.31 ^c ±0.02	2.89 ^c ±0.10	8.23 ^c
	0 :200	0.46 ^d ±0.04	1.93 ^c ±0.12	0.31 ^{bc} ±0.03	2.70 ^b ±0.09	7.77 ^b
<i>Salix koreensis</i>	Control	1.40±0.06	3.68±0.15	0.71±0.04	5.79±0.23	7.15
	200: 0	1.67 ^a ±0.07	4.05 ^a ±0.16	0.93 ^a ±0.04	6.65 ^a ±0.26	6.13 ^c
	150: 50	1.68 ^a ±0.07	4.30 ^b ±0.18	0.99 ^b ±0.05	6.97 ^{ab} ±0.27	6.06 ^b
	100:100	1.70 ^a ±0.06	4.28 ^b ±0.13	1.00 ^b ±0.05	6.99 ^b ±0.28	5.97 ^{ab}
	50 :150	1.96 ^b ±0.08	4.89 ^c ±0.15	1.13 ^c ±0.04	7.98 ^c ±0.25	6.06 ^b
	0 :200	1.78 ^c ±0.07	4.26 ^b ±0.18	1.02 ^b ±0.05	7.06 ^b ±0.28	5.90 ^a
<i>Salix chaenomeloides</i>	Control	1.18±0.05	3.54±0.15	0.65±0.04	5.37±0.24	7.26
	200: 0	1.45 ^a ±0.06	4.30 ^a ±0.16	0.82 ^a ±0.05	6.57 ^a ±0.26	7.01 ^c
	150: 50	1.46 ^a ±0.07	4.31 ^a ±0.17	0.80 ^a ±0.03	6.57 ^a ±0.27	7.21 ^d
	100:100	1.78 ^b ±0.06	4.42 ^a ±0.14	0.96 ^b ±0.04	7.16 ^b ±0.24	6.46 ^a
	50 :150	2.06 ^c ±0.07	5.11 ^b ±0.20	1.10 ^c ±0.06	8.27 ^d ±0.31	6.52 ^a
	0 :200	1.85 ^b ±0.09	4.95 ^b ±0.21	1.01 ^d ±0.05	7.81 ^c ±0.35	6.73 ^b

에서 버드나무의 수고가 높았으나, 건물중의 경우 버드나무와 왕버들이 비슷하거나 왕버들이 더 큰 건물중을 보였는데, 이는 버드나무에 비해 분지가 많은 왕버들의 특성이 수고 측정에 있어서 무시되었기 때문으로 판단된다. 또한 질산태 질소 100~200 mM 처리구에서 왕버들의 건물중이 높게 나타난 이유는 버드나무에 비해 왕버들이 질산태 질소에 대한 생육 반응 감응도가 높은 것으로 생각된다.

질산태 질소 0~200 mM 사이의 영양액 처리구별 건물 생장을 회귀 분석한 결과 갯버들의 경우 선형함수는 $f(x) = 0.08x + 2.44$ ($R^2 = 0.420$), 2차 함수는 $f(x) = -0.05x^2 + 0.35x + 2.12$ ($R^2 = 0.622$)이었고, 버드나무의 경우 선형함수는 $f(x) = 0.18x + 6.58$ ($R^2 = 0.269$), 2차 함수는 $f(x) = -0.11x^2 + 0.83x + 5.83$ ($R^2 = 0.400$)이었으며, 왕버들의 경우 선형함수는 $f(x) = 0.42x + 6.02$ ($R^2 = 0.692$), 2차 함수는 $f(x) =$

$-0.03x^2 + 0.59x + 5.82$ ($R^2 = 0.696$)으로 선형에 가까운 2차 함수식이 형성되었다. 선형함수의 기울기가 갯버들 0.08, 버드나무 0.18, 왕버들 0.42로 회귀분석 결과 왕버들이 질산태 질소 시비 효과가 가장 크게 나타났다.

버드나무류 모두 질산태 질소 150 mM 처리구에서 건물중이 높게 나타나 암모늄태 질소보다 질산태 질소가 건물 생산에 있어서 더 효과적임을 나타냈다(Table 4). 따라서 버드나무류의 초기 생육을 촉진시키기 위해서는 질소 형태와 비율을 조절할 필요가 있다고 판단된다.

공통적으로 버드나무류 모두 영양액 처리시 무처리구보다 건물 생장이 우수했으며(Table 4), 이는 본 연구에 사용한 영양액이 버드나무류에 있어 영양분으로서 생장에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 5. Carbon and inorganic matter content in *Salix gracilistyla* in 90 days treated with NH₄⁺:NO₃⁻.

Parts	NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻	C (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	NO ₃ ⁻ (mg/kg)
Leaf	Control	48.1±1.34	2.12±0.06	50±1.38	1.14±0.03	1.33±0.04	0.30±0.01	65±1.81
	200: 0	48.7 ^a ±1.35	2.21 ^a ±0.06	318 ^b ±8.83	1.18 ^a ±0.02	1.34 ^a ±0.02	0.31 ^a ±0.00	85 ^a ±2.36
	150: 50	49.1 ^a ±1.36	2.45 ^b ±0.08	365 ^c ±10.13	1.36 ^b ±0.03	1.38 ^a ±0.02	0.32 ^a ±0.00	89 ^a ±2.47
	100:100	48.8 ^a ±1.33	2.77 ^c ±0.08	295 ^a ±8.19	1.37 ^b ±0.02	1.36 ^a ±0.03	0.33 ^a ±0.00	88 ^a ±2.44
	50 :150	48.8 ^a ±1.41	2.88 ^{cd} ±0.09	575 ^d ±15.96	1.65 ^c ±0.02	1.61 ^b ±0.02	0.49 ^c ±0.01	95 ^b ±2.64
	0 :200	48.2 ^a ±1.31	2.96 ^d ±0.08	602 ^e ±16.73	1.82 ^d ±0.04	1.80 ^c ±0.03	0.38 ^b ±0.00	112 ^c ±3.11
	Stem	Control	46.5±1.34	1.10±0.06	555±15.42	0.35±0.01	0.66±0.02	0.06±0.00
200: 0		45.8 ^a ±1.39	1.34 ^d ±0.08	627 ^a ±14.64	0.38 ^a ±0.01	0.69 ^a ±0.01	0.08 ^b ±0.00	254 ^a ±3.11
150: 50		45.8 ^a ±1.33	1.38 ^{ab} ±0.09	749 ^b ±20.82	0.47 ^c ±0.02	0.70 ^a ±0.05	0.09 ^c ±0.01	287 ^b ±2.47
100:100		46.9 ^a ±1.35	1.41 ^{ab} ±0.06	1103 ^c ±30.65	0.40 ^b ±0.01	0.74 ^b ±0.04	0.08 ^b ±0.01	291 ^b ±2.36
50 :150		48.2 ^b ±1.51	1.67 ^c ±0.07	2341 ^c ±65.03	0.54 ^d ±0.01	0.88 ^d ±0.05	0.08 ^b ±0.00	324 ^c ±2.64
0 :200		46.7 ^a ±1.31	1.44 ^b ±0.08	2173 ^d ±60.36	0.72 ^e ±0.02	0.80 ^c ±0.05	0.07 ^a ±0.00	312 ^c ±2.44
Root		Control	45.5±1.26	0.80±0.02	1472±40.89	1.18±0.03	0.53±0.01	0.20±0.01
	200: 0	47.0 ^a ±1.19	0.88 ^a ±0.02	1541 ^a ±37.24	1.20 ^a ±0.02	0.57 ^a ±0.01	0.45 ^c ±0.01	420 ^a ±11.67
	150: 50	47.1 ^a ±1.20	0.91 ^a ±0.03	1578 ^a ±40.03	1.25 ^b ±0.03	0.59 ^b ±0.02	0.60 ^d ±0.02	574 ^b ±15.95
	100:100	49.2 ^c ±1.14	0.98 ^b ±0.05	2774 ^c ±96.51	1.29 ^c ±0.01	0.61 ^b ±0.04	0.35 ^b ±0.01	554 ^b ±15.39
	50 :150	49.6 ^c ±1.27	1.01 ^b ±0.03	3061 ^d ±235.04	1.34 ^d ±0.04	0.69 ^d ±0.02	0.35 ^b ±0.01	860 ^d ±23.89
	0 :200	48.4 ^{bc} ±1.23	0.99 ^b ±0.04	2556 ^b ±71.00	1.52 ^e ±0.06	0.65 ^c ±0.02	0.28 ^a ±0.02	796 ^c ±22.11

2) 체내 양분 흡수 특성

버드나무류 모두 체내 C, N, P, K, Ca, Mg 및 질산태 질소 함량은 영양액 처리구가 무처리구에 비해 높게 나타나, 이는 무기물들의 시용이 식물 체내 축적됨을 나타냈다(Table 5, 6, 7).

C 함량은 갯버들이 46.5~49.6%, 버드나무는 40.2~50.9%, 왕버들은 39.4~50.7%로 수중에 따라 큰 차이가 없었고, 또한 잎, 줄기, 뿌리 부위에서 미미한 차이를 보였으며, 영양액에 탄소가 포함되어 있지 않아도 버드나무류 체내에 40% 이상의 탄소가 축적된 것은 탄소동화 작용에 의한 것으로 추측된다.

N 함량은 3종의 버드나무류 모두 잎, 줄기, 뿌리 순으로 높았고(Table 5, 6, 7), 이는 질소동화작용에 의해 잎 부위가 높게 나타난 것으로 보인다. 질산태 질소 100~200 mM 처리구, 특히 150 mM 처리구에서 버드나무류 각 부위 질소 함량이 유의적으로 높게 나타났다.

P 함량은 3종의 버드나무류 모두 뿌리, 줄기, 잎 순으로 높았으며, 질산태 질소 100~200 mM 처리구, 특히 150 mM 처리구에서 버드나무류 각 부위 P 함량이 높게 나타났는데(Table 5, 6, 7), 좋은 생육 상태를 보인 영양액 처리구에서 P 흡수량도 늘어나 버드나무류 생장과 P 흡수량은 비례관계임을 나타냈다.

질산태 질소 함량은 3종의 버드나무류 모두 뿌리, 줄기, 잎 순으로 나타났는데(Table 5, 6, 7), 이는 질산태 질소는 뿌리에서 흡수하여 줄기에 이동시키는 과정에서 많은 양의 질산태 질소가 아미노산이나 환원된 질소의 형태로 도관을 따라 잎으로 이동되는 것으로 판단된다. 질산태 질소 함량은 질산태 질소의 비율이 증가할수록 뚜렷하게 식물의 각 부위별 축적량이 증가한 것은 무기 형태의 질산태 질소를 식물이 그대로 흡수한 것으로 판단된다.

질산태 질소 비율이 높은 처리구일수록 식물

Table 6. Carbon and inorganic matter content in *Salix koreensis* in 90 days treated with $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$.

Parts	$\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$	C (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	NO_3^- (mg/kg)
Leaf	Control	48.0±1.40	2.11±0.19	302±35.48	1.71±0.35	0.66±0.05	0.22±0.01	77±4.27
	200: 0	50.6 ^b ±1.50	3.26 ^a ±0.09	311 ^a ±8.64	1.76 ^a ±0.05	0.73 ^a ±0.04	0.26 ^a ±0.01	99 ^b ±2.75
	150: 50	51.7 ^b ±1.44	3.34 ^{ab} ±0.09	327 ^a ±9.08	1.82 ^b ±0.11	0.70 ^a ±0.02	0.27 ^a ±0.01	93 ^a ±2.59
	100:100	50.9 ^b ±1.41	3.39 ^{ab} ±0.09	399 ^b ±11.10	1.78 ^a ±0.05	0.78 ^b ±0.02	0.28 ^a ±0.01	106 ^c ±2.95
	50 :150	50.1 ^b ±1.39	3.59 ^c ±0.10	477 ^c ±13.26	1.83 ^b ±0.12	1.04 ^d ±0.04	0.45 ^c ±0.01	124 ^d ±3.44
	0 :200	48.6 ^a ±1.24	3.45 ^{bc} ±0.10	479 ^c ±13.30	1.86 ^c ±0.09	0.85 ^c ±0.01	0.31 ^b ±0.01	156 ^c ±4.33
	Stem	Control	47.6±1.34	0.65±0.18	385±49.84	0.94±0.03	0.53±0.06	0.03±0.02
200: 0		48.1 ^a ±1.30	1.05 ^a ±0.03	489 ^a ±13.60	0.60 ^b ±0.02	0.55 ^b ±0.05	0.05 ^a ±0.00	97 ^a ±2.69
150: 50		48.3 ^a ±1.44	1.11 ^b ±0.02	505 ^a ±14.03	0.56 ^a ±0.02	0.54 ^a ±0.02	0.05 ^a ±0.00	110 ^b ±3.06
100:100		48.3 ^a ±1.34	1.26 ^c ±0.02	499 ^a ±13.86	0.71 ^d ±0.03	0.61 ^c ±0.01	0.04 ^a ±0.00	113 ^b ±3.14
50 :150		48.4 ^a ±1.41	1.33 ^d ±0.02	694 ^c ±19.28	0.67 ^c ±0.02	0.62 ^d ±0.07	0.04 ^a ±0.00	174 ^d ±4.83
0 :200		48.2 ^a ±1.32	1.28 ^c ±0.03	630 ^b ±17.49	0.78 ^c ±0.03	0.65 ^c ±0.04	0.04 ^a ±0.00	128 ^c ±3.56
Root		Control	38.5±3.21	0.54±0.13	428±47.34	0.71±0.07	0.49±0.11	0.35±0.02
	200: 0	40.2 ^a ±1.12	0.69 ^a ±0.05	866 ^a ±15.72	0.77 ^a ±0.02	0.56 ^a ±0.02	0.41 ^b ±0.02	259 ^a ±7.20
	150: 50	40.7 ^a ±1.13	0.74 ^a ±0.03	914 ^b ±17.18	0.76 ^a ±0.02	0.56 ^a ±0.06	0.46 ^c ±0.01	485 ^b ±13.46
	100:100	41.9 ^a ±1.16	0.89 ^b ±0.04	927 ^b ±17.62	0.78 ^a ±0.03	0.74 ^b ±0.02	0.37 ^a ±0.01	569 ^c ±15.81
	50 :150	42.3 ^a ±1.18	0.99 ^c ±0.05	929 ^b ±17.46	0.81 ^b ±0.02	0.97 ^c ±0.03	0.39 ^b ±0.03	752 ^d ±20.88
	0 :200	41.1 ^a ±1.14	1.11 ^d ±0.09	918 ^b ±17.18	0.83 ^b ±0.04	0.93 ^c ±0.04	0.37 ^a ±0.01	881 ^c ±24.47

각 부위의 C/N율이 낮아지는 경향을 보여 버드나무류는 암모늄태 질소보다 질산태 질소가 영양생장에 더 도움이 됨을 알 수 있었다.

분산분석 결과 깃버들의 경우 잎과 줄기 부위의 C 함량을 제외하고, 질소, 질산태 질소, P, K, Ca 및 Mg 함량, C/N율, 질소 중 질산태 질소의 비중은 1%의 유의수준에서 차이가 났고, 버드나무와 왕버들의 경우 C 함량을 제외하고, 각 부위의 질소, 질산태 질소, P, K, Ca 및 Mg 함량, C/N율, 질소 중 질산태 질소의 비중은 1%의 유의수준에서 차이가 났다.

영양액 $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 비율 처리에 따른 버드나무류 부위별 성분들 간의 Pearson 상관관계 분석 결과 잎의 경우 질소 함량은 K 함량과 Pearson 상관계수 0.801(*)로 높은 정상관을 나타냈으며, Ca 함량과 -0.792(**)으로 부상관, Mg 함량과 -0.555(**)로 부상관을 보였다. 질산태 질소의 함량은 Mg 함량과 0.596(*)로 중위 정상관을 나타냈

다. Ca 함량은 Mg 함량과 0.866(**)로 높은 정상관을 나타냈다(**: $P<0.01$, *: $P<0.054$).

줄기의 경우 질소 함량은 질산태 질소 함량과 0.562(*)로 중위 정상관을 나타냈다. 질산태 질소 함량은 Ca 함량 0.812(*), Mg 함량과 0.546(**)로 정상관을 나타냈다. K 함량은 Mg 함량과 -0.663(*)로 비교적 높은 부상관을 나타냈다(**: $P<0.01$, *: $P<0.055$).

뿌리의 경우 C 함량은 질소, 질산태 질소, K, Ca 및 Mg 함량과 Pearson 상관계수 0.6 이상으로 정상관을 나타냈다. 질산태 질소 함량은 P 함량과 0.541(*), K 함량과 0.933(**), Mg 함량과 0.741(**)로 정상관을 나타냈다. P 함량과 K 함량과 0.595(*), K 함량과 Mg 함량은 0.841(**)로 정상관을 나타냈다(**: $P<0.01$, *: $P<0.05$).

버드나무류 체내에서의 상관성을 본 결과 잎, 줄기, 뿌리 각 부위 무기 양분별 관계는 다르게 나타났다. 잎 부위에서는 질소와 K이 높은 정상

Table 7. Carbon and inorganic matter content in *Salix chaenomeloides* in 90 days treated with NH₄⁺:NO₃⁻.

Parts	NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻	C (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	NO ₃ ⁻ (mg/kg)
Leaf	Control	48.2±1.34	2.16±0.06	257±7.15	1.37±0.04	1.79±0.05	0.42±0.01	128±3.57
	200: 0	48.6 ^a ±1.52	2.20 ^a ±0.06	269 ^b ±6.63	1.41 ^a ±0.04	1.90 ^a ±0.05	0.50 ^a ±0.02	131 ^a ±3.28
	150: 50	50.7 ^a ±1.45	2.36 ^b ±0.07	330 ^c ±9.16	1.46 ^b ±0.06	1.89 ^a ±0.08	0.51 ^a ±0.01	133 ^a ±4.21
	100:100	50.6 ^a ±1.41	2.25 ^{ab} ±0.06	271 ^a ±4.97	1.42 ^a ±0.04	1.88 ^a ±0.08	0.52 ^{ab} ±0.01	134 ^a ±3.84
	50 :150	49.4 ^a ±1.37	2.39 ^b ±0.07	384 ^d ±10.60	1.50 ^c ±0.04	2.29 ^b ±0.10	0.55 ^c ±0.02	138 ^b ±3.98
	0 :200	48.3 ^a ±1.34	2.38 ^b ±0.11	457 ^e ±12.70	1.63 ^d ±0.05	2.13 ^b ±0.08	0.54 ^{bc} ±0.02	145 ^c ±4.04
	Stem	Control	48.1±1.34	0.98±0.03	594±16.49	1.10±0.03	0.84±0.02	0.05±0.00
200: 0		48.2 ^a ±1.52	1.22 ^a ±0.08	412 ^a ±11.45	1.16 ^a ±0.03	0.88 ^a ±0.02	0.07 ^b ±0.00	141 ^a ±3.92
150: 50		48.5 ^a ±1.32	1.22 ^a ±0.04	529 ^b ±14.69	1.13 ^a ±0.07	0.89 ^a ±0.02	0.07 ^b ±0.00	311 ^b ±8.64
100:100		48.5 ^a ±1.42	1.23 ^a ±0.03	422 ^a ±11.72	1.26 ^b ±0.03	1.00 ^b ±0.03	0.06 ^a ±0.00	358 ^c ±9.95
50 :150		48.6 ^a ±1.35	2.28 ^b ±0.06	952 ^c ±26.45	1.54 ^c ±0.04	1.07 ^c ±0.02	0.06 ^a ±0.00	386 ^d ±10.72
0 :200		48.3 ^a ±1.39	1.24 ^a ±0.03	533 ^b ±14.81	1.51 ^c ±0.05	1.18 ^d ±0.02	0.06 ^a ±0.00	373 ^{cd} ±10.36
Root		Control	38.7±1.08	0.84±0.02	891±24.76	0.97±0.03	0.56±0.02	0.34±0.01
	200: 0	39.4 ^a ±1.09	1.08 ^a ±0.03	935 ^a ±25.98	0.99 ^a ±0.01	0.59 ^a ±0.01	0.72 ^b ±0.03	928 ^a ±25.78
	150: 50	41.5 ^b ±1.15	1.05 ^a ±0.05	1007 ^b ±27.97	1.03 ^{ab} ±0.02	0.65 ^b ±0.01	0.89 ^c ±0.02	1002 ^b ±27.84
	100:100	41.8 ^b ±1.16	1.20 ^b ±0.03	1124 ^c ±31.22	1.07 ^b ±0.02	0.61 ^a ±0.02	0.68 ^b ±0.04	1077 ^c ±29.92
	50 :150	42.1 ^b ±1.17	1.23 ^{bc} ±0.03	1198 ^d ±33.28	1.20 ^c ±0.01	0.73 ^c ±0.02	0.71 ^b ±0.04	1211 ^d ±33.65
	0 :200	40.4 ^a ±1.12	1.26 ^c ±0.04	1038 ^b ±28.85	1.25 ^c ±0.02	0.66 ^b ±0.02	0.48 ^a ±0.01	1282 ^e ±35.62

관을 나타냈는데, 이는 질소의 형태가 대부분 질산태 질소를 포함한 음이온 형태로 존재하고 있을 가능성이 높으며, 반대로 환원된 질소나 양이온의 질소의 형태가 줄어들어 질소와 Ca, Mg이 부상관을 보인 것으로 추측된다.

버드나무류 줄기 부위에서는 질산태 질소와 Ca이 높은 정상관을 보였는데, 이는 체내 음이온이 증가하면 양이온도 증가하는 무기물 상호작용에 의한 결과로 보이고, K과 Mg의 경우 높은 부상관을 나타냈는데, 이는 길항작용에 의한 결과로 판단된다.

뿌리 부위에서는 질산태 질소와 인, 칼륨, 마그네슘과 중위 이상의 정상관을 보였는데, 이는 무기물 상호작용에 의한 결과로 보이고, K과 Mg이 높은 정상관을 보인 것은 길항작용 차원에서 질소 중 암모늄태 질소나 환원된 질소의

형태가 줄었을 것으로 판단된다.

본 연구에 있어 질산태 질소와 무기 양분과의 상관성은 뿌리 부위에서 P, K, Mg과 높은 정상관, 줄기 부위에서 Ca, Mg과 높은 정상관, 잎 부위에서 Mg과 중위 정상관을 나타낸 것과 같이 잎, 줄기, 뿌리 각 부위 무기 양분별 상관관계가 다르게 나타난 것은 앞으로 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

3) 잎의 엽록소 함량 변화

본 실험 결과 버드나무류 잎의 질소 함량과 엽록소 함량의 상관관계가 Pearson 상관계수 0.735(**)로 높은 정상관을 나타냈다(**: $P<0.01$, *: $P<0.05$). 버드나무류 엽록소 함량은 식재 10일 후부터 급격히 증가하였으며, 40일 이후에 다소 완화되었다(Table 8).

Table 8. Chlorophyll content(Chlorophyll Reading Value) of leaves in 70 days treated with NH₄⁺:NO₃⁻.

Species	Treatment (NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻) \ date	5. 1	6. 1	7. 1
<i>Salix gracilistyla</i>	Control	6.2±0.26	18.8±0.78	26.4±1.09
	200: 0	8.3±0.34	21.2±0.87	27.6 ^b ±1.14
	150: 50	8.3±0.34	21.5±0.89	26.2 ^a ±1.08
	100:100	8.1±0.33	24.1±0.99	29.4 ^c ±1.21
	50 :150	8.3±0.38	26.8±1.01	35.7 ^d ±1.33
	0 :200	8.2±0.34	26.7±1.10	35.5 ^d ±1.46
<i>S. koreensis</i>	Control	4.1±0.17	14.7±0.61	19.7±0.81
	200: 0	4.3±0.18	16.8±0.69	22.0 ^a ±0.91
	150: 50	4.6±0.20	19.4±0.80	22.5 ^b ±0.93
	100:100	4.5±0.16	20.8±0.86	24.1 ^c ±0.99
	50 :150	4.7±0.21	22.8±0.94	26.4 ^d ±1.09
	0 :200	4.6±0.19	18.4±0.76	23.3 ^c ±0.96
<i>S. chaenomeloides</i>	Control	6.1±0.25	22.1±0.91	26.5±1.09
	200: 0	6.3±0.28	24.9±1.03	28.5 ^a ±1.18
	150: 50	6.3±0.26	28.0±1.15	30.5 ^b ±1.26
	100:100	6.2±0.27	26.7±1.10	31.2 ^b ±1.29
	50 :150	6.3±0.30	28.9±1.24	34.1 ^c ±1.41
	0 :200	6.4±0.31	24.0±0.99	29.1 ^a ±1.14

각 처리구의 70일 후 엽록소 함량(Chlorophyll Reading Value=crv)을 측정된 결과 버드나무류는 대조구보다 질소원 처리구에서 엽록소 함량이 공통적으로 높았다. 갯버들의 경우 질산태 질소 150~200 mM 처리구에서 35.5~35.7 crv로 가장 높았으며, 그 다음 100 mM, 0 mM, 50 mM 처리구 순이었다. 버드나무의 경우 질산태 질소 150 mM 처리구에서 26.4 crv로 가장 높았으며, 그 다음 100 mM, 0 mM, 50 mM, 200 mM 처리구 순이었다. 왕버들의 경우 질산태 질소 150 mM 처리구에서 34.1 crv로 가장 높았으며, 그 다음 100 mM, 50 mM, 200 mM, 0 mM 처리구 순이었다(Table 8).

버드나무류의 엽록소 함량을 비교해 보면, 질산태 질소 0~100 mM 처리구에서는 엽록소 함량이 왕버들, 갯버들, 버드나무 순으로 높았고, 150~200 mM 처리구에서는 갯버들, 왕버들, 버드나무 순이었다(Table 8). 이는 갯버들이 왕

버들에 비해 잎의 색소 형성에 질산태 질소를 효과적으로 이용하고 있음을 알 수 있었다.

갯버들, 버드나무, 왕버들의 엽록소 함량을 질산태 질소 0~200 mM 처리구 사이의 회귀 분석한 결과 갯버들, 버드나무는 선형에 가까운 2차 함수 방정식이 형성되었으며, 왕버들은 선형함수는 성립되지 않았고, 2차 함수 $f(x) = -1.04x^2 - 6.45x + 22.5$ ($R^2 = 0.529$)의 회귀식이 성립되었다. 분산분석 결과 엽록소 함량은 처리구별 5%의 수준에서 차이를 나타냈다.

영양액의 질산태 질소 비율이 증가할수록 버드나무류 엽록소 함량이 증가하는 경향을 보여 암모늄태 질소보다 질산태 질소 시비가 더 효과적으로 나타나 질소 비율의 관리가 필요하다고 생각된다.

4) 토양 성분 함량 변화

버드나무류 식재 90일 후 토양 분석결과 pH

Table 9. Chemical properties of soil in 90 days treated with nutrient solution.

Species	NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻	pH _{1:5}	EC _{1:5} (ds/m)	OM (g/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex Cation(cmol _c /kg)				T-N (%)	NH ₄ ⁺ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)
						K	Na	Mg	Ca			
Experiment soil		5.6	0.04	4.12	8.5	0.09	0.06	0.31	0.76	0.01	17.36	15.68
<i>Salix gracilistyla</i>	Control	5.7	0.30	1.12	49	0.09	0.06	0.67	1.30	0.05	11.2	12.6
	200: 0	5.3 ^{ab}	0.47 ^{bc}	3.99 ^b	59 ^c	0.27 ^c	0.28 ^c	1.16 ^b	2.02 ^d	0.08 ^b	41.6 ^c	19.6 ^a
	150: 50	5.4 ^b	0.51 ^d	4.22 ^c	79 ^c	0.16 ^c	0.28 ^c	0.87 ^a	2.28 ^c	0.08 ^b	39.2 ^d	37.2 ^c
	100:100	5.3 ^{ab}	0.43 ^a	4.12 ^{bc}	72 ^d	0.14 ^b	0.25 ^a	1.26 ^{cd}	1.48 ^c	0.06 ^{ab}	23.0 ^c	35.0 ^d
	50 :150	5.1 ^a	0.46 ^b	3.50 ^a	55 ^b	0.12 ^a	0.24 ^a	1.31 ^d	1.39 ^b	0.06 ^a	20.7 ^b	32.2 ^c
	0 :200	5.0 ^a	0.49 ^c	3.51 ^a	51 ^a	0.18 ^d	0.27 ^b	1.21 ^{bc}	1.32 ^a	0.06 ^a	15.4 ^a	25.5 ^b
<i>S. koreensis</i>	Control	5.5	0.24	2.14	31	0.10	0.24	1.14	0.68	0.02	8.1	9.0
	200: 0	5.2 ^a	0.75 ^a	3.31 ^b	46 ^c	0.25 ^b	0.75 ^c	1.17 ^{ab}	0.81 ^c	0.03 ^a	30.0 ^c	13.2 ^a
	150: 50	5.0 ^a	0.82 ^b	3.22 ^b	39 ^b	0.24 ^b	0.68 ^b	1.15 ^a	0.86 ^d	0.04 ^b	15.7 ^b	22.7 ^c
	100:100	5.1 ^a	0.84 ^b	2.72 ^a	37 ^b	0.24 ^{ab}	0.60 ^a	1.23 ^b	0.76 ^b	0.03 ^a	15.1 ^b	21.8 ^c
	50 :150	5.0 ^a	0.82 ^b	2.81 ^a	32 ^a	0.24 ^{ab}	0.61 ^a	1.27 ^c	0.69 ^a	0.03 ^a	10.1 ^a	15.8 ^b
	0 :200	5.0 ^a	0.84 ^b	2.70 ^a	33 ^a	0.23 ^a	0.58 ^a	1.22 ^{ab}	0.74 ^b	0.03 ^a	9.8 ^a	15.6 ^b
<i>S. chaenomeloides</i>	Control	5.2	0.60	1.63	8	0.14	0.20	1.06	1.01	0.02	7.4	6.4
	200: 0	4.9 ^a	0.78 ^b	3.76 ^b	92 ^d	0.29 ^d	0.27 ^c	1.25 ^b	1.66 ^c	0.04 ^b	54.3 ^c	23.6 ^b
	150: 50	5.0 ^a	0.79 ^b	5.69 ^d	85 ^c	0.21 ^c	0.24 ^b	1.13 ^a	1.97 ^d	0.05 ^c	19.0 ^d	30.4 ^d
	100:100	5.0 ^a	0.76 ^{ab}	4.62 ^c	72 ^b	0.17 ^b	0.22 ^b	1.26 ^b	1.38 ^b	0.03 ^a	16.0 ^c	27.0 ^c
	50 :150	4.9 ^a	0.72 ^a	2.90 ^a	70 ^b	0.17 ^{ab}	0.23 ^b	1.33 ^c	1.25 ^a	0.03 ^a	12.0 ^b	23.5 ^b
	0 :200	4.8 ^a	0.79 ^b	2.72 ^a	49 ^a	0.16 ^a	0.19 ^a	1.21 ^b	1.28 ^a	0.03 ^a	8.3 ^a	20.4 ^a

는 NH₄⁺:NO₃⁻ 비율 중 질산태 질소의 비율이 커 질수록 공통적으로 낮아지는 경향을 보였으며, 모든 영양액 처리구에서 대조구에 비해 낮게 나타났다(Table 9).

EC는 대조구와 비교했을 때 대조구보다 영양액 처리구에서 높았지만 NH₄⁺:NO₃⁻ 비율에 따른 변화는 미미하였다(Table 9).

갯버들 식재 90일 후 토양 분석 결과 토양 중 잔류 유기물 함량은 질산태 질소 50 mM 처리구에서 4.22 g/kg으로 가장 높았으며, 150 mM 처리구에서 3.50 g/kg으로 가장 낮았다. 전질소 함량은 질산태 질소 0~50 mM 처리구에서 0.08%로 높았고, 100~200 mM 처리구까지 0.06%로 낮았다. 암모늄태 질소의 함량은 질산태 질소 0 mM 처리구에서 41.6 ppm으로 가장 높았고, 200 mM 처리구에서 15.4 ppm으로 가장 낮았다. 질산태 질소 함량은 질산태 질소 50 mM 처리구에서 37.2 ppm

으로 가장 높았고, 0 mM 처리구에서 19.6 ppm으로 가장 낮았다. 유효인산 함량 범위는 51~79 mg/kg, 치환성 K의 함량 범위는 0.15~0.17 cmol_c/kg, 치환성 Na 함량 범위는 0.24~0.28 cmol_c/kg, 치환성 Mg의 함량 범위는 0.87~1.31 cmol_c/kg, 치환성 Ca 함량 범위는 1.32~2.28 cmol_c/kg로 나타났다(Table 9).

갯버들 식재 토양의 경우 치환성 Mg 함량과 C/N율, 전질소 중 질산태 질소의 비중은 질산태 질소의 비율이 증가할수록 높아지는 경향을 보였으며, 유효인산과 치환성 K, Na, Ca 및 암모늄태 질소 함량과 질산태 질소 비중과 전질소 중 암모늄태질소의 비중은 낮아지는 경향을 보였었다(Table 9).

버드나무 식재 토양 분석 결과 토양 중 잔류 유기물 함량은 질산태 질소 0 mM 처리구에서 3.31 g/kg으로 가장 높았고, 200 mM 처리구에

서 2.70 g/kg으로 가장 낮았다. 전질소의 함량은 질산태 질소 50 mM 처리구에서 0.04%로 영양액 다른 처리구보다 0.01% 높게 나타났다. 암모늄태 질소 함량은 질산태 질소 0 mM 처리구에서 30.0 ppm으로 가장 높았으며, 200 mM 처리구에서 9.8 ppm으로 가장 낮았다. 질산태 질소의 함량은 질산태 질소 50 mM 처리구에서 22.7 ppm으로 가장 높았고, 0 mM 처리구에서 13.2 ppm으로 가장 낮았다. 유효인산 함량의 범위는 33~46 mg/kg, 치환성 K 함량 범위는 0.23~0.3 cmol_e/kg, 치환성 Na 함량 범위는 0.58~0.75 cmol_e/kg, 치환성 Mg 함량 범위는 1.15~1.27 cmol_e/kg, 치환성 Ca 함량의 범위는 0.74~0.86 cmol_e/kg로 나타났다(Table 9).

버드나무 식재 토양의 경우 전질소 중 질산태 질소의 비중과 치환성 Mg 함량은 질산태 질소의 비율이 증가할수록 높아지는 경향을 보였으며, C/N율과 암모늄태 질소, 유효인산, 치환성 K, Na 및 Ca 함량과 질산태 질소 비중, 전질소 중 암모늄태질소의 비중은 낮아지는 경향을 보였다(Table 9).

왕버들 식재 토양 분석 결과 토양 중 잔류 유기물 함량은 질산태 질소 0 mM 처리구에서 3.76 g/kg으로 가장 높았고, 200 mM 처리구에서 2.72 g/kg으로 가장 낮았다. 전질소 함량은 질산태 질소 50 mM 처리구에서 0.05%로 가장 높았으며, 100~200 mM 처리구까지 0.03%로 가장 낮았다. 암모늄태 질소 함량은 질산태 질소 0 mM 처리구에서 54.3 ppm으로 가장 높았고, 200 mM 처리구에서 8.3 ppm으로 가장 낮았다. 질산태 질소 함량은 질산태 질소 50 mM 처리구에서 30.4 ppm으로 가장 높았고, 200 mM 처리구에서 20.4 ppm으로 가장 낮게 나타났다. 유효인산 함량의 범위는 49~92 mg/kg, 치환성 K 함량 범위는 0.16~0.29 cmol_e/kg, 치환성 Na 함량 범위는 0.19~0.27 cmol_e/kg, 치환성 Mg 함량 범위는 1.13~1.33 cmol_e/kg, 치환성 Ca 함량의 범위는 1.28~01.66 cmol_e/kg로

나타났다(Table 9).

왕버들 식재 토양의 경우 전질소 중 질산태 질소의 비중과 치환성 Mg 함량은 질산태 질소의 비율이 증가할수록 높아지는 경향을 보였으며, C/N율과 암모늄태 질소, 유효인산, 치환성 K, Na 및 Ca 함량과 질산태 질소 비중과 전질소 중 암모늄태질소의 비중은 낮아지는 경향을 보였다(Table 9).

무처리구에 비해 영양액 처리구에서 조사된 모든 무기물들이 높게 나타나 영양액의 무기물들이 식물체에 모두 흡수하지 못하고 상당부분 남아있게 되는 것으로 보이며, 버드나무류 식재한 토양에서 질산태 질소의 비율을 증가시킬수록 공통적으로 암모늄태 질소, 질산태 질소, 유효인산, 치환성 K, Na 및 Ca 함량은 감소하여 식물 생육에 있어 이러한 무기물들이 식물체로 더 많이 흡수된 결과로 판단된다.

영양액 NH₄⁺:NO₃⁻ 비율 처리에 따른 버드나무류 토양의 화학성분들 간의 Pearson 상관관계 분석 결과 버드나무류 식재 토양의 경우 pH는 EC와 -0.568(*)로 중위 부상관을 나타냈고, 유기물 함량과 0.286으로 낮은 정상관을 나타냈다. 유기물 함량은 질산태 질소 함량과 0.606(*), 유효인산 함량과 0.741(*)로 비교적 높은 정상관을 나타냈고, 전질소 함량은 유효인산 함량과 0.525(*), 치환성 Mg 함량과 -0.535(*)로 상관관계를 나타냈으며, 암모늄태 질소 함량은 유효인산 함량과 0.593(*), Ca 함량과 0.608(*)로 정상관을 보였다. 질산태 질소 함량은 유효인산 함량과 0.644(**), 치환성 K 함량과 -0.663(**), 치환성 Na 함량과 -0.660(*), 치환성 Ca 함량과 0.677(*)로 상관관계를 나타냈고, 유효인산 함량은 치환성 Na 함량과 -0.741(**), 치환성 Ca 함량과 0.809(**)로 상관관계를 나타냈으며, 치환성 K과 치환성 Na 함량은 -0.529(*), 치환성 Na 함량과 치환성 Ca 함량과는 -0.773(**), 치환성 Mg 함량과 치환성 Ca 함량과는 -0.532(*)의 상관관계를 나타냈다(**: P<0.01, *: P<0.05).

뿌리가 이온을 흡수할 때 이온이 서로 다른 이온의 흡수에 영향을 미치는 경우가 많이 있는데, 이 때 이온 상호간에 흡수를 억제하는 것을 길항작용(antagonism)이라 하고 흡수를 촉진하는 것을 상조작용(synergism)이라고 하는데, 본 연구의 영양액 처리구 토양 분석 결과 길항작용과 상조작용이 동시에 일어났다. 특히 K과 Na 함량 간 중위 부상관을 보였는데, 이는 토양 내 K 함량이 낮을 때 K를 많이 시용할수록 Na의 식물체 흡수도 증가하는 흡수 길항작용 중 교호작용의 결과로 판단된다.

IV. 결론

질소원에 따른 생육변화 및 체내성분 함량 특성을 조사한 결과 건물중은 버드나무류 모두 $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 비율 50:150 처리구에서 건물생산이 우수했다. 이는 3종의 버드나무류 모두 암모늄태 질소에 비해 질산태 질소를 양분으로서 더 효과적으로 이용했다고 볼 수 있으며, 비료로서 암모늄태 질소의 시비보다 질산태 질소의 시비가 더 효과적임을 알 수 있었다. ‘신고’ 배에 있어서 생장과 질산환원효소 활성 모두 암모늄태와 질산태 질소 각각 단용구보다 혼용구에서 높았으며 암모늄태와 질산태 질소 50:150의 비율에서 가장 효과적이라 보고했던 Jin과 Choi(2006)의 연구에서도 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

Beever와 Hageman(1980)과 Andrews(1986)는 초본 피자식물의 질산환원 위치를 주로 줄기라고 보고하였고, Wallace(1986)은 콩과식물의 경우 주로 뿌리에서 환원되나 외부로부터 높은 질산을 공급하면 줄기에서 환원을 선호한다고 보고하였다. Pate(1980)와 Bray(1983)는 목본식물에 있어서 질소는 대부분 환원된 질소, 특히 아미노산의 형태로 목부에서 이동되기 때문에 목본식물의 질산환원 위치는 뿌리임을 암시하였고, Bray(1983)과 Runge(1983)는 목본식물의 뿌

리로부터 흡수된 대부분의 질산태 질소는 목부를 통해 위로 이동되기 전에 뿌리에서 환원 또는 대사되어 식물체의 각 기관으로 수송되기 때문에 목부 수액 내에는 매우 적은 양의 질산태 질소가 존재한다고 보고하였다. 본 연구에서 버드나무류의 경우 질산태 질소의 함량이 뿌리가 줄기보다 2~5배까지 높게 나타났는데, 이는 버드나무류의 질산환원 위치가 주로 뿌리 부위에서 일어남을 나타냈으며, 위에서 언급한 Pate(1980), Runge(1983)와 Wallace(1986) 등의 연구가 이를 뒷받침 해주고 있다.

본 연구결과 버드나무류의 줄기에서 질소 중 질산태 질소의 비중이 무처리구와 실험구 대부분 2% 이하, 간혹 갯버들과 왕버들에서 2%를 초과한 실험구($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 비율 200:0, 100:100, 50:150 처리구)에서 최대 3.11%가 나왔는데, 이는 식물이 뿌리에서 질소를 흡수할 때 질산태 질소 형태로 주로 흡수하여 뿌리에서 흡수된 질산태 질소를 아미노산으로 전환한 후 도관으로 이동하기 때문에 줄기에서는 질소의 2%만이 질산태 질소의 형태로 존재한다고 보고한 Moreno와 Garcia-Martinez(1980)의 연구와도 유사하였다.

대부분의 목본식물은 외부에서 고농도의 질산태 질소가 공급되는 것 외에 질산환원효소는 뿌리에서 우세하며, 줄기에서 낮게 발견됨을 보고한 Lee와 Titus(1992)의 보고와 비교해 보면, 본 연구에서 제시한 3종의 버드나무류의 경우 모두 질소 중 질산태 질소의 비중이 줄기에 비해 뿌리에서 최소 2배에서 10배 이상 많게 조사되었는데, 이는 뿌리가 흡수한 질산태 질소가 환원태 질소로 바뀌는 장소이기 때문으로 추측되며, 뿌리에 질산환원효소의 양도 많은 것으로 추측된다. 또한 질산환원효소 활성은 분석 시기와 부위에 따라 차이를 보였고, 줄기보다 뿌리에서 더 높았다고 보고한 Jin과 Choi(2006)의 연구도 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

생리적으로 잎의 질소는 대부분 엽록소에 포

함되어 있기 때문에 엽록소 함량과 질소함량과의 상관관계는 높은 것으로 알려져 있다. Park 등(2007)은 사과 잎의 SPAD 값과 사과 잎의 질소축적과 상관계수는 각각 5월에 0.87, 6월에 0.75, 7월에 0.67로 나타났다고 보고했다. 본 연구에서도 버드나무류의 경우 영양액 처리 시 잎의 엽록소 함량과 잎의 질소 함량과의 Pearson 상관계수가 각각 0.735로 높은 정상관을 나타내, 버드나무류에 있어서 엽록소 함량의 간편한 측정으로 잎의 질소 함량을 추정할 수 있을 것으로 보인다.

References

- Andrews, M. 1986. The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of higher plants. *Plant Cell Environ.* 9 : 511-519.
- Aulakh, M., S. Tejinder, S. Khera, and John W. Doran. 2000. Mineralization and denitrification in upland, nearly saturated and flooded subtropical soil. Effect of nitrated and ammonia nitrogen. *Biol. Fert. Soils.* 31(2) : 162-167.
- Beever, L. and R.H. Hageman. 1980. *The Biochemistry of Plants*, Vol. 5. Academic Press, London. pp. 115-168.
- Beever, L. and R.H. Hageman. 1983. Uptake and reduction of nitrate Bacteria and higher plants. In: A. Lauchili and R. L. Bieleski (Ed.), *Inorganic plant nutrition*. Encyclopedia of plant physiology new series. Vol. 15B. pp. 351-375. Springer-Verlag, New York, NY.
- Bent, T. and B. Christensen. 1986. Ammonia volatilization loss from surface applied animal manure. *Efficient land use of sludge and manure* : 193-203.
- Bray, C.M. 1983. Nitrogen metabolism in plants. Longman, London.
- Bussi, C., A. Gojon, and L. Passama. 1997. *In situ* nitrate reductase activity in leaves of adult peach trees. *J. Hort. Sci.* 729 : 347-353.
- Edwards, J.H. and B.D. Horton. 1982. Interaction of peach seedlings to NO₃:NH₄ ratios in nutrient solution. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107 : 142-147.
- Gojon, A., C. Bussi, and C. Plassard. 1994. Root/shoot distribution of NO₃⁻ assimilation in herbaceous and woody species. In: A whole plant perspective on carbon-nitrogen interactions. Roy, J. and E. Garnier. (Ed.) pp. 131-147. SPB Academic Publishing, The Hague.
- Hoagland, D.R. and Arnon, D.I. 1950. *The Water Culture Method for Growing Plants without Soil*. University of California, Agricultural Experiment Station, Berkley.
- Imsande, J. and B. Touraine. 1994. N demand and the regulation of nitrate uptake. *Plant Physiol.* 105 : 3-7.
- Jin, S.N. and Choi, D.G. 2006. Effects of Different Combinations of Ammonium and Nitrate Nitrogen on Growth, Accumulation, and Nitrate Reductase Activity in Pear (*Pyrus pyrifolia* cv. Niitaka) Seedlings. *Hort. Sci. Technol.* 24(1) : 70-76.
- Lee, H.J. and J.S. Titus. 1992. Nitrogen accumulation and nitrate reductase activity in MM. 106 apple trees as affected by nitrate supply. *J. Hort. Sci.* 67 : 273-281.
- Miller, R O. 1998. Extractable chloride, nitrate, orthophosphate, potassium, and sulfate-sulfur in plant tissue: 2% acetic acid extraction. In *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Kalra, Y.P.(Ed). CRC press. USA.
- Moreno, J. and J.L. Garcia-Martinez. 1980.

- Extraction of tracheal sap from citrus and analysis of its nitrogenous compounds. *Physiol. Plant.* 50 : 298-303.
- Park, J.M., Park, J.G. and Lee, I.B. 2007. Seasonal Diagnosis of Nitrogen Status of 'Fuji'/M.26 Apple Leaves Using Chlorophyll Meter. *Hort. Sci. Technol.* 25(1): 59-62.
- Pate, J.S. 1980. Transport and partitioning of nitrogenous solutes. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31 : 313-340.
- Perez, J.R. and W.M. Kliever. 1987. Nitrate reduction in leaves of grapevine and other fruit trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103 : 246-250.
- Reed, A.J. and R.H. Hagemen. 1980. Relationship between nitrate uptake, flux, and reduction and the accumulation of reduced nitrogen in maize (*Zea mays* L.). I. genotypic variation. *Plant Physiol.* 66 : 1179-1183.
- Runge, M. 1983. Physiology and ecology of nitrogen nutrition. In: O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond, and H. Ziegler (Ed.), responses of the chemical and biological environment. *Encyclopedia of plant physiology new series.* Vol. 12C. pp. 163-200. Springer-Verlag, Berlin.
- Shen, Z., Y. Liang, and K. Shen. 1993. Effect of boron on the nitrate reductase activity in oilseed rape plants. *J. Plant Nutr.* 16 : 1229-1239.
- Touraine, B., B. Muller, and C. Grignon. 1992. Effect of phloem-translocated malate on nitrate uptake by roots of intact soybean plants. *Plant Physiol.* 99 : 1118-1123.
- Wallace, W. 1986. Distribution of nitrate assimilation between the root and shoot of legumes and a comparison with wheat. *Plant. Physiol.* 66 : 630-636.
- 농업과학기술원. 2000. 토양 및 식물체 분석법.