

PLANT&FOREST

Effect of 16 different (N, P combination) fertilizer treatments on the growth of *Liriodendron tulipifera* seedlings and soil chemical properties in the Nursery Station

Jung Won Park¹, Woo Bin Youn¹, Byung Bae Park^{1,*}, Min Seok Cho^{2,3,*}

¹Department of Environment and Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

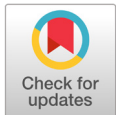
²Research Planning and Coordination Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

³Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11187, Korea

*Corresponding authors: bbpark@cnu.ac.kr, mscho1143@korea.kr

Abstract

Appropriate fertilization methods are required according to species to supply necessary nutrients to plants and prevent soil environmental contamination in nurseries. In this study, the effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the growth of *Liriodendron tulipifera* and soil characteristics were investigated. After 16 fertilization treatments (4 levels of nitrogen × 4 levels of phosphorus) were applied to one-year-old *L. tulipifera* seedlings at the Yongmun Nursery Station of the Korea Forest Service, height, root collar diameter (RCD), biomass, leaf nutrients, and soil characteristics were investigated. The height increased as the amount of nitrogen and phosphorus fertilization increased, and the RCD was the highest in the ×2 treatment. Biomass growth was on average 40.0% higher for the treatment with high nitrogen fertilization compared to the low nitrogen treatment. The seedling quality index was the highest with nitrogen and phosphorus ×2 treatment. Leaf phosphorus and magnesium concentrations decreased when nitrogen fertilization was applied, and leaf potassium concentrations decreased as nitrogen fertilization increased. Soil pH and exchangeable potassium decreased as the amount of phosphorus application increased, and exchangeable magnesium decreased as the amount of nitrogen application increased and increased as the amount of phosphorus application increased. Considering the growth of *L. tulipifera* seedlings and changes in the soil characteristics at the nursery stage, twice the standard fertilization amount is the appropriate fertilization amount for nursery of the Yongmun Nursery Station. It is expected that this study will contribute to improving nursery soil fertilization management technology for healthy seedling production.



OPEN ACCESS

Citation: Park JW, Youn WB, Park BB, Cho MS. Effect of 16 different (N, P combination) fertilizer treatments on the growth of *Liriodendron tulipifera* seedlings and soil chemical properties in the Nursery Station. Korean Journal of Agricultural Science 50:181-192. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20230014>

Received: March 06, 2023

Revised: March 23, 2023

Accepted: March 31, 2023

Copyright: © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Key words: fertilization, nitrogen, nursery system, phosphorus, Yongmun Nursery Station

Introduction

우리나라는 산림면적이 국토의 절반 이상인 62.7%를 차지하고 있지만, 목재자급률은 15.9%로 낮다. 산림청은 최근 ‘산림르네상스 추진전략’을 통해 2027년까지 25%로 향상시키는 것을 목표로 설정하였다(KFS, 2022a, b). 국내 목재자급률을 향상시키기 위해서는 적합한 숲관리가 중요한데, 건전한 우량묘목 생산은 대경재를 생산하는 과정에서 가장 기본이 된다. 임목은 조림부터 벌채까지 생장기간이 길기 때문에 불량한 묘목을 심게 되면 수확까지 장기간 소요되고 가치도 떨어져 많은 손실을 초래한다. 따라서 건전한 우량묘목 생산을 위해서는 포지 토양 특성을 정밀하게 파악하고 진단한 후에 그 결과를 바탕으로 수종에 따라 시비기준 및 토양관리기술을 적용하여 묘목을 생산해야 한다(Byun, 2005; Kim, 2006).

대부분의 묘포는 고정된 곳에서 계속된 연작으로 인해 토양 물리성 및 지력이 점차 악화되어 묘목의 득묘율을 감소시키고, 생장을 불량하게 하여 조림 성공률을 감소시킨다(Byun, 2005; Kim et al., 2012). 특히, 오랫동안 사용된 포지 토양의 물리·화학적 특성은 단일 수종의 연속 생산, 속효성 화학비료의 장기간 사용으로 토양이 척박해질 수 있으므로 토양특성을 고려한 적절한 시비가 요구된다(An et al., 2015; Park et al., 2016).

적절한 시비는 토양에 부족한 양분을 공급하고 묘목의 생장을 향상시키며, 이식하면서 발생하는 스트레스를 감소시켜 초기 활착률을 증가시킨다(Carlson, 1981; Imo and Timmer, 1999; Quoreshi and Timmer, 2000; Han et al., 2016). 그러나 수종마다 양분의 요구량과 흡수량이 다르기 때문에 수종을 고려하지 않는 과도한 비료사용은 오히려 묘목의 생장을 저하시키며, 포지 주변 토양과 지하수를 오염시킬 수 있다(Broschat, 1995; Andersen and Hansen, 2000; Lee et al., 2022). 이를 방지하기 위해서는 수종과 토양환경을 고려한 시비량 사용 기준이 필요하다.

백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)는 뛰어난 적응력으로 우리나라 기후풍토에서 생장이 우수해 2001년부터 조림하기 시작하였으며, 2008년에는 산림청에서 추진한 바이오순환림 조성사업의 주요 수종으로 선정되어 대규모 조림이 실시되었다(KFRI, 2012; KFS, 2021). 그리고 2021년에는 ‘2050 탄소중립’을 위한 기후 수종으로 선정되었다(KFS, 2021). 백합나무는 생장이 빠르고 탄소흡수능력이 우수하며, 대경목으로 가구재와 건축재로 널리 쓰여 국산 목재자급률을 높일 경제수종으로 주목받고 있다(KFRI, 2012).

본 연구에서는 탄소중립 수종이자 경제림 육성 수종인 백합나무를 대상으로 질소와 인 시비량에 따른 묘목의 생장과 토양 및 식물체의 양분 변화를 비교하여 백합나무 양묘에 적합한 시비량을 제시하여 양묘기술 향상에 기여하고자 하였다.

Materials and Methods

연구대상지 및 연구 수종

본 연구는 경기도 양평군에 위치한 북부지방산림청 용문양묘사업소 포지에서 실시되었다(37°49′72″N, 127°57′85″E). 이 지역의 연평균 기온은 11.5°C이고, 연강수량은 1,438 mm이다(KMA, 2011).

실험용 포지 구성을 위해 묘포장을 45 cm 깊이로 경운한 후 동서방향으로 1 m × 20 m 넓이의 묘상을 조성하였다. 조사구 크기는 1 m × 1 m이며, 조사구와 조사구는 1 m 넓이의 완충구역을 두어 분리하였다(Fig. 1). 시비 처리 전 토양 물리성과 화학성을 측정하기 위해 20 m 묘상에서 2 지점을 무작위로 선정하여 0 - 10 cm 깊이에서 토양 시료를 500 g 채취하여 분석하였다(Table 1).

Table 1. Soil texture and chemical properties of nursery soil before fertilization.

Soil properties	Mean	SE ^z
Texture		
Sand (%)	55.75	3.25
Silt (%)	38.00	0.50
Clay (%)	6.25	2.75
Chemical properties		
pH	5.91	0.07
Organic matter (%)	1.74	0.07
Total N ^x (g·kg ⁻¹)	1.44	0.02
Available P ^y (mg·kg ⁻¹)	578.50	32.30
Exchangeable K ⁺ (cmol _c ·kg ⁻¹)	0.29	0.02
Exchangeable Ca ²⁺ (cmol _c ·kg ⁻¹)	3.32	0.20
Exchangeable Mg ²⁺ (cmol _c ·kg ⁻¹)	0.57	0.03
Exchangeable Na ⁺ (cmol _c ·kg ⁻¹)	0.06	0.00
CEC ^y (cmol _c ·kg ⁻¹)	10.00	0.22
EC (dS·m ⁻¹)	0.19	0.01

^x Total N is the sum of organic N and inorganic N.

^y Available P and CEC represent H₂PO₄⁻ and cation exchange capacity, respectively.

^z SE means standard error (n = 2).

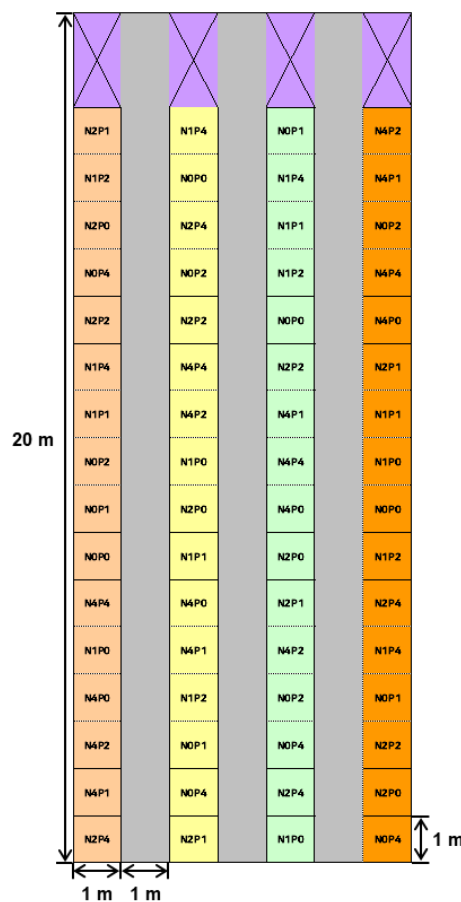


Fig. 1. Layout of the experimental area.

백합나무 묘목은 국립산림과학원 산림유전자원부(수원시 권선구 오목천동)에서 생산된 백합나무 1-0 묘를 사용하였다. 비슷한 간장과 근원경을 가진 묘목을 식재 전에 간장 30 cm, 뿌리 10 cm 길이로 절단하였고 뿌리발달 촉진을 위해 발근촉진제(루튼)를 사용하였다. 묘목은 가로 25 cm, 세로 13 cm 간격(40본·m²)으로 조사구당 16본씩 식재 후 건조 방지를 위해 충분히 관수하였다. 뿌리가 토양에 안정화된 식재 2주 후 지상부에 눈이 1-2개 남겨질 수 있도록 토양으로부터 5 cm 높이에서 줄기를 절단하였다.

시비처리 및 포지관리

시비처리는 질소 4수준과 인 4수준을 조합하여 총 16가지 처리하였다. 시비량은 산림청 종묘사업실시요령 표준 시비량인 요소 30 g·m⁻² N, 용과린 70 g·m⁻² P, 염화加里 15 g·m⁻² K를 표준량으로 산정하였다(Table 2). 이 표준량에서 질소와 인의 양을 무처리(×0), 1배(×1), 2배(×2), 4배(×4)로 늘려 16가지 조합으로 4반복 무작위 배치하였다(Fig. 1; Table 2). 식재 3주 후 조사구에 골고루 시비될 수 있도록 상하, 좌우로 2회에 걸쳐 손으로 흩어뿌려 시비 처리하였다. 시비 처리 후 한 달간 3일 간격으로 관수하였고, 그 후에는 날씨 조건을 고려하여 건조할 때만 관수하였다. 맹아가 15 cm 크기로 자랐을 때 한 개의 맹아를 남기고 나머지는 제거하였다. 실험 기간 동안 제초는 2회 실시하였으며, 살균·살충제를 3회 살포하여 병해충을 방제하였다.

Table 2. Sixteen fertilization treatments and properties of applied fertilizer for 1 m² area.

Treatment	Level		Fertilizer (g·m ⁻²)		
	N	P	Urea	Fused superphosphate	Potassium chloride
N0P0	×0	×0	0	0	15
N0P1	×0	×1	0	70	15
N0P2	×0	×2	0	140	15
N0P4	×0	×4	0	280	15
N1P0	×1	×0	30	0	15
N1P1	×1	×1	30	70	15
N1P2	×1	×2	30	140	15
N1P4	×1	×4	30	280	15
N2P0	×2	×0	60	0	15
N2P1	×2	×1	60	70	15
N2P2	×2	×2	60	140	15
N2P4	×2	×4	60	280	15
N4P0	×4	×0	120	0	15
N4P1	×4	×1	120	70	15
N4P2	×4	×2	120	140	15
N4P4	×4	×4	120	280	15

생장 측정

시비처리 후 4개월이 경과한 9월에 지상부와 지하부 생장을 조사하였다. 각 처리별로 조사구 가장자리를 제외하고 중심부에 위치한 묘목 4본을 선정하여 굴취하였다. 굴취한 묘목은 수고와 근원경을 측정 후, 뿌리를 흐르는 물에 세척하여 뿌리 표면의 토양을 제거하였다. 세척한 묘목은 잎, 줄기, 뿌리로 나누어 65°C 건조기에서 72시간 동안 건조한 후 건조량을 측정하였다.

토양 및 식물체 양분 분석

시비처리에 따른 토양과 묘목의 양분 특성변화를 분석하기 위해 토양 시료와 잎 샘플을 채취하였다. 토양은 조사구에서 무작위로 두 지점을 선정하여 0 - 10 cm 깊이에서 채취하고 처리별로 3반복 분석하였다. 채취된 토양은 실내에서 풍건한 후 토성과 pH, 유기물 함량, 전질소, 유효인산, 치환성 K, Ca, Mg, Na, CEC, 그리고 EC를 측정하였다. 토성은 30°C 항온에서 비중계법으로 측정하였고, 유기물 함량은 습식법인 Tyurin method로 분석하였다. 토양 pH는 토양 10 g을 증류수와 1 : 5로 혼합한 후 pH meter로 측정하였다. 전질소 함량은 토양 1 g을 Micro-Kjeldahl 법으로 측정하였다. 토양 유효인산(P_2O_5)은 Lancaster method로 측정하였고, 치환성 K, Ca, Mg, Na은 1 N NH_4OAc 로 용출한 후 Atomic Absorption Spectrometer (AA280FS, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)로 측정하였다. CEC는 10 g의 토양을 용매 1 N NH_4OAc 와 1 N CH_3COOH 를 이용하여 Brown method로 측정하였다.

식물체 양분분석을 위한 시료는 건중량 측정에 사용된 묘목에서 잎을 채취하여 처리별로 4반복 분석하였다. 식물체 양분 농도를 측정하기 위해 건조한 잎을 Wiley mill로 곱게 분쇄한 후, H_2SO_4 와 $HClO_4$ 혼합용액을 이용하여 Block digester (BD-46, Lachat Inc., Milwaukee, WI, USA) 방법으로 유기물을 분해하였다. 전처리를 마친 시료는 Automated Ion Analyzer (Quik Chem AE, Lachat Inc., Milwaukee, WI, USA)를 이용해 식물체 N, P 농도를 측정하였고, Atomic Absorption Spectrometer를 이용해 식물체 K 농도를 측정하였다.

자료 및 통계분석

묘목의 품질을 측정하기 위해 Dickson의 품질지수(quality index, QI)를 아래와 같이 계산하였다(Dickson et al., 1960; Deans et al., 1989; Bayala et al., 2009).

$$\text{품질지수(quality index)} = SD / (HD + SR) \quad (1)$$

SD (seedling dry weight)는 묘목의 총 건중량(g), HD (height to diameter ratio)는 수고(cm)와 근원경(mm)의 비율, SR (shoot to root ratio)은 지상부 건중량(g)과 지하부 건중량(g)의 비율을 나타낸다.

질소와 인 시비량이 백합나무 묘목의 수고, 근원경, 바이오매스 성장량 그리고 품질지수에 미치는 영향을 알아보기 위해 이원분산분석을 실시하였으며 Duncan의 다중 비교 검정(Duncan's multiple comparison tests)을 이용하여 유의수준 5%에서 통계 분석하였다(R-3.5.1).

Results and Discussion

생장 특성

각기 다른 질소와 인의 시비조합은 백합나무의 수고와 근원경의 생장에 유의한 영향을 미쳤다. 수고는 질소와 인 시비가 증가할수록 높은 생장을 보였다($p < 0.05$; Fig. 2). N4P2 수준에서 142.65 cm로 수고가 가장 높았으며, N4P4 > N4P0 > N2P2 > N2P4 순으로 감소했다(Table 3).

근원경의 생장은 질소를 표준시비량보다 많이 처리한 $\times 2$, $\times 4$ 처리가 무처리와 $\times 1$ 처리보다 유의하게 높았으며($p < 0.001$), N2P2 처리에서 14.70 mm로 가장 높은 생장을 보였다. 이후 N2P4 > N4P2 > N2P0 > N4P1 순으로 생장이 감소하였다(Table 3). 시비 양이 증가할수록 증가한 수고 생장과 달리 근원경은 질소와 인의 양이 2배일 때 생장이 가장 높았으며 시비 양이 4배가 되면 오히려 감소하였다(Fig. 2).

Table 3. Height and root collar diameter (RCD) of *Liriodendron tulipifera* growing under 16 different fertilization treatments.

Treatment	Height (cm)	RCD (mm)	H/D
N0P0	103.47 (4.45) ^z ef	10.87 (0.56) cd	9.67 (0.34) abcd
N0P1	87.83 (6.75) f	10.04 (0.62) d	8.77 (0.43) cd
N0P2	102.84 (6.55) ef	10.16 (0.47) d	10.07 (0.40) abc
N0P4	107.58 (5.07) e	13.01 (0.74) abc	8.42 (0.34) d
N1P0	116.18 (5.22) cde	11.34 (0.75) bcd	10.64 (0.51) ab
N1P1	117.25 (5.21) cde	11.60 (0.74) bcd	10.54 (0.60) ab
N1P2	112.74 (6.07) de	12.45 (0.80) abcd	9.24 (0.43) bcd
N1P4	129.51 (8.21) abcd	12.82 (0.61) abc	10.32 (0.73) abc
N2P0	122.02 (5.13) bcde	13.44 (0.84) abc	9.28 (0.34) bcd
N2P1	127.65 (6.88) abcd	12.94 (0.78) abc	10.09 (0.43) abc
N2P2	139.44 (5.00) ab	14.70 (1.07) a	9.92 (0.52) abcd
N2P4	136.02 (5.71) abc	13.74 (1.05) ab	10.24 (0.48) abc
N4P0	140.43 (5.51) ab	13.16 (0.69) abc	10.85 (0.39) ab
N4P1	135.06 (7.38) abc	13.26 (0.84) abc	10.51 (0.64) ab
N4P2	142.65 (8.69) a	13.48 (0.68) ab	10.67 (0.58) ab
N4P4	142.06 (6.82) ab	13.24 (1.03) ab	11.33 (0.72) a

H/D, height to root collar diameter ratio.

^z Standard errors are in parentheses (n = 16).

a - f: Different letters represent significant differences according to Duncan's multiple range test (p < 0.05).

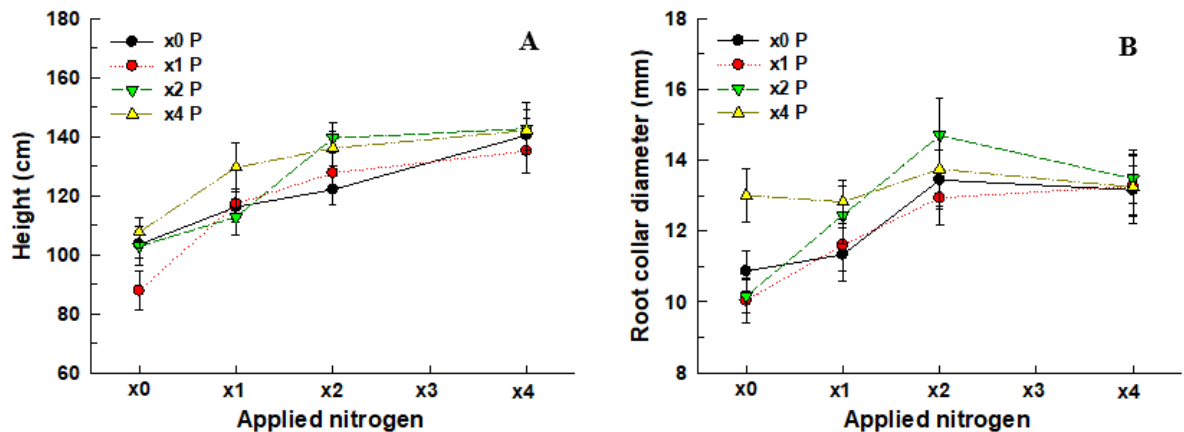


Fig. 2. Height (A) and root collar diameter (RCD) (B) of *Liriodendron tulipifera* growing under 16 different fertilization treatments.

묘목의 건전도를 판단할 수 있는 H/D (height to diameter) ratio는 질소 시비량에 의해 유의한 차이가 나타났으나(p < 0.001), 인 시비량에 의한 차이는 없었다. 질소 ×1 과 ×4 수준에서 10 이상으로 높은 수치를 보여 가늘고 약한 형태의 성장을 했음을 알 수 있고, 대조구와 질소 ×2 수준에서는 10 이하로 감소하여 건전도가 증가함을 알 수 있다. N4P4에서 11.33으로 가장 수치가 높았으며, N2P2에서 9.92로 1.41 감소하여 수고생장에 비해 근원경의 생장이 더 활발했음을 보여준다(Table 3).

백합나무의 총 바이오매스 생장은 인 시비량에 의한 차이는 없었으며, 질소 시비량이 높은 처리에서 유의하게 높은 성장을 보였다(p < 0.001; Fig. 3). 부위별 바이오매스 생장 또한 질소 시비량에 의해 유의한 차이를 보였으나 (p < 0.05), 인 시비량에 의한 차이는 나타나지 않았다. 총 바이오매스는 질소 시비량이 높은 처리는 질소 시비량이 적은 처리에 비해 평균 40.0% 높은 성장을 보였다. 16가지 조합 중 N2P2 처리에서 101.87 g(잎 32.75 g, 줄기 37.72 g, 뿌리 31.39 g)로 가장 높았으며, N0P1 처리에서 53.46 g(잎 17.79 g, 줄기 14.96 g, 뿌리 20.72 g)로 가장 낮았다.

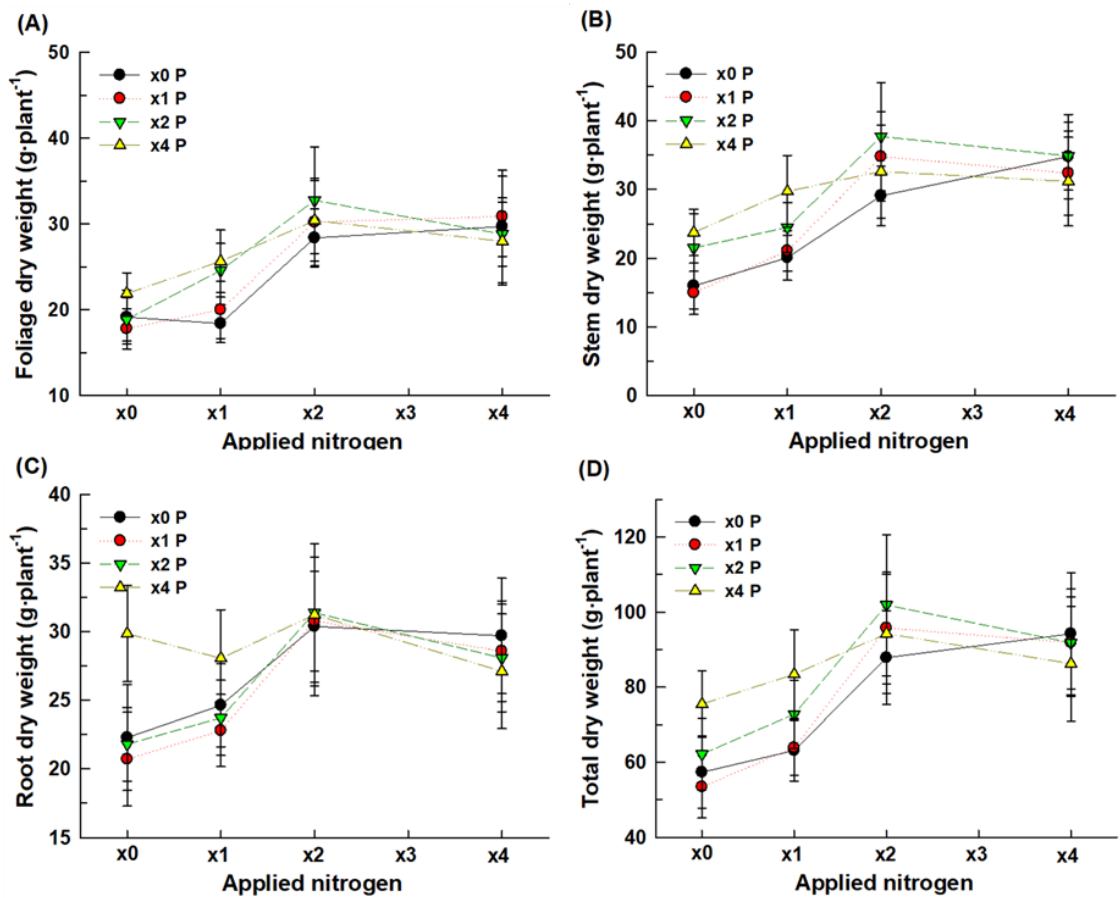


Fig. 3. Biomass production and distribution of *Liriodendron tulipifera* growing under 16 different fertilization treatments. (A) Leaf dry weight, (B) stem dry weight, (C) root dry weight, (D) total dry weight.

백합나무의 품질지수는 질소 시비량 ×2 처리에서 가장 높은 지수 값을 보였으며($p < 0.05$), 무처리, ×1 처리와 유의한 차이가 있었으나, ×4 처리와는 유의한 차이가 없었다(Fig. 4). N2P2에서 9.81로 최고의 품질을 나타냈고, N2P4 > N2P1 > N2P0 > N4P1 순으로 낮아졌다. N4N4에서 7.80로 감소하였으며 N0P2과 N0P1는 각각 5.11과 5.06의 수치를 보이며 최저품질에 속했다.

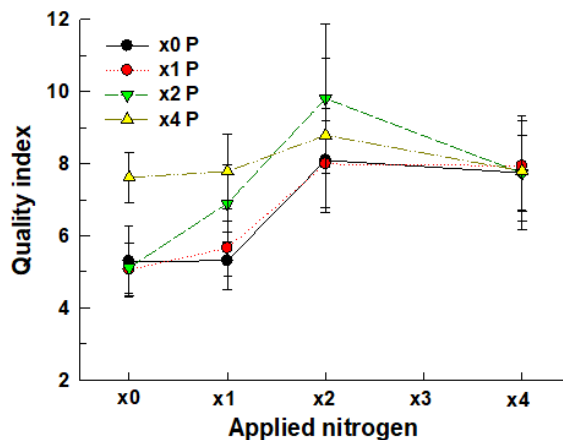


Fig. 4. Quality index of *Liriodendron tulipifera* growing under 16 different fertilization treatments.

토양 특성 및 식물체 양분 특성

토양 pH와 치환성 칼륨은 질소 시비량에 의한 차이는 없었으나, 인 시비량이 증가할수록 유의하게 감소하였다 ($p < 0.05$; Table 4). 토양 내 칼륨은 인 $\times 1$ 처리에서 $0.44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 높고 $\times 4$ 처리에서 $0.26 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 급격하게 감소하여 인의 시비가 칼륨의 흡수를 촉진했을 수 있다. 토양 내 전질소는 질소 시비량에 의해 증가하였지만 처리간에 통계적 차이는 없었다 ($p = 0.075$; Table 4). 토양 내 전질소는 N4P4에서 $1.42 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 높고 N0P4에서 $1.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 낮았으며, 생장이 우수했던 N2P2에서는 $1.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 질소 $\times 1$ 처리보다도 더욱 낮은 수치를 보였다. 토양 가용성 인 또한 인 시비량에 의해 증가하였지만 통계적으로 유의하지 않았다 ($p = 0.053$; Table 4). 치환성 칼슘은 질소 시비량이 증가할수록 감소하였으나 통계적으로 유의하지 않았다 ($p = 0.107$). 치환성 마그네슘은 질소 시비량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며 ($p = 0.020$), 인 시비량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다 ($p = 0.003$). 전기전도도는 인 시비량이 증가할수록 증가하였으나, 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

Table 4. Soil chemical properties after fertilization at nursery bed in Yongmoon Nursery.

Soil properties	Applied nitrogen	Applied phosphorus			
		$\times 0$	$\times 1$	$\times 2$	$\times 4$
pH	$\times 0$	6.01 (0.03) ^z	6.03 (0.04)	5.87 (0.07)	5.68 (0.04)
	$\times 1$	6.02 (0.03)	5.91 (0.01)	5.71 (0.09)	5.70 (0.06)
	$\times 2$	5.98 (0.02)	5.98 (0.07)	5.79 (0.10)	5.64 (0.15)
	$\times 4$	5.87 (0.10)	5.81 (0.03)	5.64 (0.11)	5.42 (0.01)
Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	1.33 (0.04)	1.35 (0.06)	1.32 (0.01)	1.25 (0.09)
	$\times 1$	1.38 (0.06)	1.34 (0.02)	1.38 (0.06)	1.34 (0.04)
	$\times 2$	1.41 (0.01)	1.38 (0.03)	1.35 (0.03)	1.33 (0.00)
	$\times 4$	1.37 (0.01)	1.37 (0.01)	1.37 (0.06)	1.42 (0.02)
Available P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	0.44 (0.17)	0.26 (0.03)	0.30 (0.05)	0.42 (0.08)
	$\times 1$	0.24 (0.04)	0.37 (0.10)	0.41 (0.01)	0.35 (0.05)
	$\times 2$	0.26 (0.00)	0.33 (0.03)	0.37 (0.06)	0.46 (0.01)
	$\times 4$	0.25 (0.03)	0.29 (0.02)	0.34 (0.01)	0.42 (0.01)
Exchangeable K ⁺ ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	0.39 (0.00)	0.44 (0.04)	0.39 (0.09)	0.32 (0.02)
	$\times 1$	0.38 (0.05)	0.40 (0.06)	0.34 (0.05)	0.27 (0.03)
	$\times 2$	0.37 (0.03)	0.38 (0.03)	0.34 (0.04)	0.26 (0.02)
	$\times 4$	0.42 (0.00)	0.32 (0.01)	0.36 (0.02)	0.30 (0.02)
Exchangeable Ca ²⁺ ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	3.20 (0.50)	3.16 (0.21)	3.04 (0.49)	2.68 (0.10)
	$\times 1$	2.98 (0.25)	2.91 (0.13)	2.52 (0.27)	2.97 (0.28)
	$\times 2$	2.89 (0.04)	3.01 (0.75)	2.79 (0.03)	2.44 (0.52)
	$\times 4$	2.48 (0.32)	2.87 (0.06)	2.54 (0.07)	2.02 (0.00)
Exchangeable Mg ²⁺ ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	0.49 (0.03)	0.50 (0.01)	0.53 (0.04)	0.67 (0.06)
	$\times 1$	0.41 (0.02)	0.47 (0.02)	0.51 (0.07)	0.57 (0.07)
	$\times 2$	0.42 (0.01)	0.47 (0.07)	0.51 (0.05)	0.52 (0.06)
	$\times 4$	0.36 (0.02)	0.43 (0.01)	0.48 (0.01)	0.47 (0.02)
EC ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	$\times 0$	0.22 (0.02)	0.23 (0.01)	0.26 (0.03)	0.31 (0.05)
	$\times 1$	0.21 (0.02)	0.25 (0.03)	0.26 (0.02)	0.29 (0.02)
	$\times 2$	0.26 (0.04)	0.39 (0.15)	0.25 (0.00)	0.30 (0.01)
	$\times 4$	0.22 (0.06)	0.22 (0.02)	0.38 (0.08)	0.31 (0.04)

^z Standard errors are in parentheses ($n = 2$).

질소시비가 증가했을 때 잎의 질소 농도는 증가하는 경향을 보였으나, 통계적으로 유의하지 않았다($p = 0.139$; Table 5). 백합나무 잎의 질소 농도는 N4P1에서 $16.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 가장 높았으며 N1P0에서 $12.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 가장 낮았다. 생장이 가장 활발했던 N2P2에서 $13.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 두번째로 낮은 수치를 드러냈는데, 이는 식물체의 생장이 활발하여 바이오매스의 양이 증가하면서 흡수된 질소 농도가 희석되었을 것으로 예상된다. 인 시비가 증가할 때 토양의 가용성 인은 증가하는 경향을 보였으나, 잎의 인 농도에는 영향을 주지 않았다. 잎의 인 농도는 질소 시비처리를 했을 때 질소 $\times 0$ 처리보다 낮게 나타났으며, N0P1에서 $1.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 가장 높았고 N0P0 > N0P4 > N1P2 순으로 감소하다가 N2P2에서 $1.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 가장 낮았다($p < 0.01$). 질소와 마찬가지로 생장이 가장 활발했던 N2P2 처리에서 잎의 인 농도가 가장 낮은 것을 확인할 수 있었다. 잎의 나트륨과 칼슘 농도는 시비 처리에 의한 차이가 나타나지 않았다. 잎의 칼륨 농도는 질소 시비가 증가할수록 감소하였으며($p < 0.05$), 마그네슘 농도는 질소 시비를 했을 때 질소 $\times 0$ 처리보다 감소하였다($p < 0.001$).

Table 5. Leaf nutrient concentrations ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) after fertilization.

Nutrient	Applied nitrogen	Applied phosphorus			
		$\times 0$	$\times 1$	$\times 2$	$\times 4$
N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	14.63 (1.04) ^z	14.55 (0.06)	14.29 (1.25)	13.91 (1.94)
	$\times 1$	12.73 (0.93)	14.39 (0.70)	14.40 (0.61)	15.70 (1.52)
	$\times 2$	15.67 (1.01)	15.32 (1.50)	13.73 (0.59)	15.75 (1.32)
	$\times 4$	15.91 (1.68)	16.86 (1.40)	16.33 (1.13)	14.77 (0.87)
P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	1.58 (0.10)	1.72 (0.27)	1.29 (0.09)	1.51 (0.20)
	$\times 1$	1.14 (0.12)	1.24 (0.07)	1.41 (0.18)	1.18 (0.07)
	$\times 2$	1.33 (0.09)	1.17 (0.12)	1.12 (0.03)	1.14 (0.05)
	$\times 4$	1.23 (0.05)	1.24 (0.05)	1.37 (0.13)	1.20 (0.03)
K ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	11.26 (0.62)	10.31 (0.50)	12.29 (0.90)	11.73 (0.94)
	$\times 1$	9.14 (1.55)	10.32 (0.87)	10.36 (1.29)	10.48 (0.67)
	$\times 2$	9.40 (1.06)	10.16 (1.70)	9.88 (1.23)	9.89 (0.61)
	$\times 4$	9.41 (0.70)	8.68 (0.49)	9.74 (0.94)	9.96 (1.14)
Na ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	0.16 (0.02)	0.15 (0.02)	0.16 (0.02)	0.16 (0.02)
	$\times 1$	0.17 (0.02)	0.15 (0.01)	0.16 (0.01)	0.17 (0.02)
	$\times 2$	0.15 (0.00)	0.18 (0.01)	0.14 (0.00)	0.18 (0.02)
	$\times 4$	0.14 (0.01)	0.13 (0.02)	0.14 (0.02)	0.16 (0.02)
Ca ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	12.42 (2.54)	12.14 (1.53)	12.74 (2.00)	9.62 (0.95)
	$\times 1$	10.72 (1.19)	10.55 (1.36)	10.68 (1.33)	10.87 (1.84)
	$\times 2$	10.86 (0.68)	10.09 (0.75)	10.16 (1.57)	15.21 (2.38)
	$\times 4$	12.84 (0.92)	12.07 (0.76)	10.98 (1.84)	10.78 (0.60)
Mg ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\times 0$	3.20 (0.32)	3.23 (0.31)	2.94 (0.18)	2.86 (0.26)
	$\times 1$	2.42 (0.20)	2.44 (0.34)	2.45 (0.11)	2.56 (0.21)
	$\times 2$	2.97 (0.19)	2.68 (0.23)	2.22 (0.20)	2.29 (0.15)
	$\times 4$	2.37 (0.12)	2.29 (0.13)	2.21 (0.24)	2.11 (0.13)

^z Standard errors are in parentheses ($n = 4$).

여러 다른 연구들이 질소와 인이 식물의 생장에 효과가 있는 주요한 양분요소라고 보고한 것처럼(Ingstad and Ågren, 1992; Marschner, 2011), 본 연구에서도 질소와 인을 시비하였을 때 무처리인 대조구에 비하여 백합나무의 묘목이 높은 생장반응을 보였다.

묘포의 전질소 함량은 Kwon 등(1998)의 연구와 같이 시비처리에 의한 질소함량의 큰 변화가 없었으며, 이러한 결과는 시비된 질소가 식물에 이용되거나, 암모니아나 질산의 형태로 용탈 또는 휘발되며 탈질화되기 때문에 토

양에 남은 질소의 양은 토양이 본래 가지고 있던 전질소의 양에 비해 적어 토양 내 질소 수준에 큰 도움을 주지 못했기 때문이다(Miller, 1981). 질소 시비가 치환성 양이온의 용탈을 초래하여 질소 시비량이 많을수록 치환성 Ca과 Mg의 함량이 감소하는 것으로 나타나며, 토양 내 수소이온을 증가시켜 토양의 pH수준을 낮게 하는 것으로 보인다(Aldrich et al., 1945; Barak et al., 1997). 인산의 경우 시비량이 증가할수록 토양 내 인산 함량은 증가하였으나, 잎의 인 농도에는 영향을 주지 않았는데, 이는 식물체의 느린 인 흡수 속도로 인해 시비에 의해 공급된 인을 식물체가 활용하지 못하고 토양 표층에 집적시킨 결과로 예상된다. 또한 질소와 인 시비량이 증가할수록 길항작용으로 인해 K의 함량이 감소하는 것으로 보인다.

시비량과 잎에서의 질소와 인 농도 변화 사이에 일정한 경향을 보이지는 않았는데, 이는 이전의 다른 연구 결과들과 유사하여 생체량 증가에 따른 양분의 희석효과나 질소와 인의 과소비 현상에 의한 것으로 볼 수 있다(Sikström et al., 1998; Son et al., 1998; Shin et al., 1999; Bak and Lee, 2001; Hwang et al., 2005). 잎의 P, K, Mg는 질소 시비가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 이는 질소와 길항작용으로 인해 나타난 결과로 보인다.

Conclusion

본 연구는 우수한 탄소고정 능력으로 주목받고 있는 백합나무 묘목을 생산할 때 포지에서 질소와 인의 적절한 시비량 조합을 구하고자 수행된 연구이다. 그 결과, 16가지 조합 중 N2P2 즉, 질소 12.2 g·m⁻²와 인 27.6 g·m⁻²의 조합이 백합나무의 근원경과 바이오매스 생장 유의하게 향상시켰으며 대조구에 비해 묘목품질지수를 65.7% 더 높였다. 본 연구는 용문양묘사업소 포지에서 2년생 백합나무를 생산할 때 표준시비량의 2배(N 60 g·m⁻², P 140 g·m⁻²)가 적합하며 그 이상 시비는 불필요함을 보여주고 있다. 시비 효율을 더욱 명확하게 규명하기 위해서는 시비한 질소와 인이 식물체 또는 토양으로 이동된 양을 추적할 수 있는 연구가 추가적으로 필요하다. 이 연구를 통해 백합나무 묘목 생산단계에서 최적의 시비량을 적용함으로써 더욱 경제적, 환경적으로 효율적인 묘목생산이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술 연구개발사업(2021379B10-2323-BD02)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

Authors Information

Jung Won Park, <https://orcid.org/0009-0008-9859-6645>

Woo Bin Youn, <https://orcid.org/0000-0003-4459-072X>

Byung Bae Park, <https://orcid.org/0000-0002-0620-7374>

Min Seok Cho, <https://orcid.org/0000-0003-2847-8412>

References

- Aldrich DG, Parker ER, Chapman HD. 1945. Effects of several nitrogenous fertilizers and soil amendments on the physical and chemical properties of an irrigated soil. *Soil Science* 59:299-312.
- An JY, Park BB, Byun JK, Cho MS, Kim YS, Han SH, Kim SB. 2015. The short-term effects of soil brought and subsoil inversion on growth and tissue nutrient concentrations of *Fraxinus rhynchophylla*, *Pinus densiflora*, and *Pinus koraiensis* seedlings in a nursery. *Journal of Korean Society of Forest Science* 104:43-49. [in Korean]
- Andersen L, Hansen CW. 2000. Leaching of nitrogen from container plants grown under controlled fertigation regimes. *Journal of Environmental Horticulture* 18:8-12.
- Bak JH, Lee KJ. 2001. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the growth, carbohydrate contents and photosynthesis of *Pinus densiflora* seedlings exposed to ozone in an open-top chamber. *Journal of Korean Society of Forest Science* 90:306-313. [in Korean]
- Barak P, Jobe BO, Krueger AR, Peterson LA, Laird DA. 1997. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. *Plant and soil* 197:61-69.
- Bayala J, Dianda M, Wilson J, Ouédraogo S, Sanon K. 2009. Predicting field performance of five irrigated tree species using seedling quality assessment in Burkina Faso, West Africa. *New Forests* 38:309-322.
- Broschat TK. 1995. Nitrate, phosphate, and potassium leaching from container-grown plants fertilized by several methods. *HortScience* 30:74-77.
- Byun JG. 2005. III. Necessity of nursery soil improvement. *Korea Forest Nursery Association* 33:102-119. [in Korean]
- Carlson WC. 1981. Effects of controlled-release fertilizers on the shoot and root development of outplanted western hemlock (*Tsuga heterophylla* Raf. Sarg.) seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 11:752-757.
- Deans JD, Mason WL, Cannell MGR, Sharpe AL, Sheppard LJ. 1989. Growing regimes for bare-root stock of Sitka spruce, Douglas fir and Scots pine. 1. Morphology at the end of the nursery phase. *Forestry* 62:53-60.
- Dickson A, Leaf AL, Hosner JF. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle* 36:10-13.
- Han SH, Byun JK, Cho MS, An JY, Park GS, Kim SB, Park BB. 2016. The effects of 7 fertilizers on the growth and nutrient concentrations of *Fraxinus rhynchophylla*, *Fraxinus mandshurica*, *Pinus koraiensis*, and *Abies holophylla* seedlings. *Journal of Korean Society of Forest Science* 105:177-185. [in Korean]
- Hwang JO, Son YW, Lee MJ, Byoun JK, Jung JH, Lee CY. 2005. Relationship between composition and type of fertilizer and seedling growth II. Nutrient Concentration of Seedling Components. *Forest Bioenergy* 24:13-27. [in Korean]
- Imo M, Timmer VR. 1999. Vector competition analysis of black spruce seedling responses to nutrient loading and vegetation control. *Canadian Journal of Forest Research* 29:474-486.
- Ingestad T, Ågren GI. 1992. Theories and methods on plant nutrition and growth. *Physiologia Plantarum* 84:177-184.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2012. Commercial species 6. *Liriodendron tulipifera*. KFRI, Seoul, Korea. [in Korean]
- KFS (Korea Forest Service). 2021. *Liriodendron tulipifera*, cultivated as a promising climate species leading to carbon neutrality. Korea Policy Briefing. 17 May 2021. Accessed in <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156451898> on 15 September 2022. [in Korean]
- KFS (Korea Forest Service). 2022a. 2022 statistical yearbook of forestry. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]
- KFS (Korea Forest Service). 2022b. Forest renaissance promotion strategy through advanced forest management. KFS, Daejeon, Korea. [in Korean]
- Kim CS. 2006. Nursery soil characteristics and management. *Korea Forest Nursery Association* 34:107-126. [in Korean]
- Kim SJ, Kim YG, Kim YS, Byeon JG, Lee SW. 2012. Development of nursery management technology for healthy seedling production. Korea Forest Research Institute, Seoul, Korea. [in Korean]
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2011. Climatological normals of Korea. p. 678. KMA, Daejeon, Korea. [in Korean]

- Kwon KW, Park GS, Lee DK. 1998. Effects of NPK fertilization on growth of *Betula platyphylla* var. *japonica*, *Fraxinus rhynchophylla*, *Pinus koraiensis*, and *Acer mono* seedlings, and chemical properties of soil. Korean Journal of Agricultural Science 25:160-167. [in Korean]
- Lee CW, Ok JH, Kim YM, Song YS, Park HJ, Hyun BK, Lee YJ, Oh TK. 2022. Effect of soil physical properties on nitrogen leaching during sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivation under lysimeter conditions. Korean Journal of Agricultural Science 49:379-387. [in Korean]
- Marschner H. 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Academic Press, San Diego, USA.
- Miller HG. 1981. Forest fertilization: Some guiding concepts. Forestry: An International Journal of Forest Research 54:157-167.
- Park BB, Byun JG, Cho MS, Han SH, Jung MH, Kim SB, Bae KK. 2016. The effects of soil improvements on growth and tissue nutrient concentrations of *Fraxinus rhynchophylla* and *Pinus densiflora* seedlings in a nursery. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 19:41-54. [in Korean]
- Quoreshi M, Timmer VR. 2000. Early outplanting performance of nutrient-loaded containerized black spruce seedlings inoculated with *Laccaria biocolor*: A bioassay study. Soil Science Society of America Journal 30:744-752.
- Shin JA, Son YW, Hong SG, Kim YK. 1999. Effect of N and P fertilization on nutrient use efficiency of *Pinus densiflora*, *Larix leptolepis*, and *Betula platyphylla* var. *japonica* seedlings. Korean Journal of Environmental Agriculture 18:304-309. [in Korean]
- Sikström U, Nohrstedt HO, Petterson F, Jacobson S. 1998. Stem-growth response of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* to nitrogen fertilization as related to needle nitrogen concentration. Trees 12:208-214.
- Son YW, Kim ZS, Hwang JH, Park JS. 1998. Fertilization effects on growth, foliar nutrients and extract concentrations in ginkgo seedlings. Journal of Korean Society of Forest Science 87:98-105. [in Korean]