

유기질 및 화학비료 처리수준이 어린 백합나무 생장 및 양분농도에 미치는 영향*

한시호¹⁾ · 안지영²⁾ · 최형순³⁾ · 조민석⁴⁾ · 박병배¹⁾

¹⁾ 충남대학교 산림환경자원학과 · ²⁾ 교토대학교 산림생물자원학과
³⁾ 국립산림과학원 난대·아열대산림연구소 · ⁴⁾ 국립산림과학원 산림생산기술연구소

The Effects of Organic Manure and Chemical Fertilizer Application Levels on the Growth and Nutrient Concentrations of Yellow Poplar (*Liriodendron tulipifera* Lin.) Seedlings*

Han, Si Ho¹⁾ · An, Ji Young²⁾ · Choi, Hyung-Soon³⁾
Cho, Min Seok⁴⁾ and Park, Byung Bae¹⁾

¹⁾ Department of Environment and Forest Resources, Chungnam National University,

²⁾ Division of Forest and Biomaterials Science, Kyoto University,

³⁾ Warm-temperate and Subtropical Forest Research Center, Korea Forest Research Institute,

⁴⁾ Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute.

ABSTRACT

Soil nutrient management is important to maintain the constant productivity of seedling production in the nursery for successful forest restoration. This study investigated the effects of organic manure and chemical fertilizer application levels on the growth, soil properties, and nutrient concentrations of yellow poplar seedlings. One-year-old yellow poplar seedlings were treated with the combination of 3 level organic manures(0, 5 Mg/ha, 10 Mg/ha; mixture of poultry manure, cattle manure, swine

* 본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: S211414L010100)’ 및 충남대학교 연구비 지원을 받아 일부 수행되었습니다.

First author : Han, Si Ho, Department of Environment and Forest Resources, Chungnam National University,
Tel : +82-42-821-7837, E-mail : bupleurumhan@gmail.com

Corresponding author : Park, Byung Bae, Department of Environment & Forest Resources, Chungnam National University, College of Agriculture and Life Sciences, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764,
Tel : +82-42-821-5747, E-mail : bbpark@cnu.ac.kr

Received : 7 September, 2015. **Revised** : 27 October, 2015. **Accepted** : 25 October, 2015.

manure, and sawdust) and 3 level nitrogen-phosphorus-potassium(NPK) chemical fertilizers(0, 1x(urea, 30 g/m²; fused superphosphate, 70 g/m²; potassium chloride, 15 g/m²), 2x). Organic manure significantly increased the soil pH and the concentrations of nitrogen, available phosphorous, exchangeable potassium, calcium, and magnesium. In contrast, the NPK chemical fertilizer decreased the soil pH and exchangeable calcium concentration, did not affect the soil concentrations of nitrogen and magnesium, and increased the concentrations of available phosphorous and exchangeable potassium. Both organic manure and NPK chemical fertilizer treatments increased the seedling height, root collar diameter, and dry weight by 39% and 25%, respectively. The treatment with manure 5 Mg/ha and NPK 2x chemical fertilizer mostly increased seedling dry weight by 2.6 times more than that of the control. Compared to the effects of the fertilization treatments on the soil properties, the effects on nutrient concentrations in the leaves were relatively small. These findings indicate that organic manure that was derived from livestock byproducts and sawdust can be utilized with chemical fertilizer to improve seedling production as well as conserving soil quality.

Key Words : *Aboveground biomass allocation, Growth performance, Nutrient treatment, Nursery system, Seedling production.*

I. 서 론

성공적인 산림복원을 위해서는 건전한 묘목을 지속적으로 생산하기 위한 묘포 토양 양분관리가 중요하며, 시비(fertilization)는 짧은 시간 내에 토양 양분을 증가시킬 수 있는 유일한 방법이다. 시비에는 화학비료와 유기질비료가 동시에 이용되고 있으며, 이는 식물생장과 토양에 긍정적 영향과 동시에 부정적 영향을 미친다. 화학비료는 비교적 저렴한 가격이지만 높은 양분 함량과 식물체가 빠르게 흡수하는 장점이 있지만 과잉일 경우 양분 유실, 지표수와 지하수 오염, 토양 산성화 또는 염기성화, 유용 미생물 군집 감소 및 병해충에 민감해지는 부정적 영향을 줄 수 있다(Chen, 2006). 유기질비료는 화학비료와 비교하여 낮은 양분함량, 느린 분해율, 유기질 원료에 따른 상이한 양분 조성과 같은 단점이 있으나, 미량원소를 포함한 균형된 양분 공급, 토양 미생물 활동 증가에 따른 토양 양분의 이용성 증가, 유해 원소 분해, 토양 구조 증

진 및 뿌리 발달, 토양 수분 이용성을 증가시키는 장점이 있다.

농업분야에서는 화학비료의 지속적인 사용으로 인해 발생하는 환경오염과 식물 생산성 감소를 극복하기 위해 축산부산물로 제조된 유기질비료를 이용하여 왔다. 이는 축산업에서 생산된 폐기물을 재활용함으로써 환경오염 방지 및 처리 비용을 절감시키고 유기질비료에 의한 토양 개량 및 농업 생산성을 동시에 향상시킬 수 있었다. 그러나 화학비료와 유기질비료의 동시 사용은 식물 종류나 토양 특성에 따라 다양한 결과를 보이고 있다. Chand et al.(2006)은 NPK 화학비료와 축산 유기질비료 혼합사용이 박하(*Mentha arvensis*)와 겨자(*Brassica juncea*)의 성장을 평균 46% 증가시켰고, 토양 질소, 인, 칼륨을 각각 36, 129, 65% 증가시켰다고 보고하였다. Kaur et al. (2005)은 수수(*Pennisetum glaucum*)와 밀(*Triticum aestivum*) 윤작 농지에서 화학비료 처리 또는 화학비료와 유기질비료 혼합 처리 비교에서 유기질비료가 토양 유기탄소와 토양 질소, 인, 칼륨

의 함량을 증가시켜, 유기물이 부족한 열대지역 농지에서 매우 중요함을 강조하였다. Murmu et al.(2013)은 산성토양에서 토마토(*Lycopersicon esculentum*)와 옥수수(*Zea mays*)를 대상으로 연구한 결과 유기질비료는 화학비료보다 작물의 생산성을 증가시키고, 질소 이용효율과 토양 건강성을 증가시킨다고 보고하였다. 농업 분야에서는 대체적으로 화학비료와 유기질비료의 혼합 사용이 작물 생산성 증대와 함께 화학비료에 의해 발생할 수 있는 토양 질 저감을 감소시키는 것으로 보고되고 있다.

임업분야는 농업분야에 비해 연구가 적은데, 북아메리카 중동부에서 바이오매스 생산을 위한 단벌기 버드나무(*Salix dasyclados*) 조림지에서 완효성화학비료와 유기질 축산비료 처리 연구에서 유기질비료 처리에 의해 버드나무 생장은 더욱 높아졌고, 토양 0-10cm 깊이의 pH는 2 증가, 토양 칼륨, 인, 마그네슘 농도가 확연히 증가하였다고 보고하였다(Adegbi et al., 2003). 그러나 Larcheveque et al.(2011)는 점토 토양의 포플러 조림지에서 축산유기질비료 처리보다 화학비료 처리가 더 높은 성장과 뿌리 발달을 촉진시켰다고 보고하였다.

화학비료와 유기질비료의 혼합 사용이 수목의 성장과 토양 비옥도에 미치는 영향은 시비 조합에 의해 매우 달라질 것이다. 유기질비료의 처리량은 주로 함유된 질소량을 가지고 결정하는데, 질소 외의 다른 양분의 비율이 수목이 요구하는 것과 다를 수 있기 때문이다.

백합나무는 우리나라 기후에 대한 적응력이 높고, 생장이 빨라 목재생산과 조경수로 널리 활용되고 있는 수종이다. 또한 탄소흡수능력이 높아서 화석연료 대체와 탄소배출권 확보를 위한 바이오순환림 조성과 침엽수 벌채 후 인공적인 산림복원 수종으로 선호되고 있다(Ryu et al., 2003; Ryu et al., 2008). 이 연구는 화학비료와 유기질비료의 다양한 처리량에 따른 백합나무 유묘의 성장과 토양에 미치는 영향을 구명하는

것이다. 이 연구를 통해 축산부산물과 톱밥으로 제조된 유기질비료를 화학비료와 혼합하여 백합나무 양묘에 적합한 혼합비율을 제시할 수 있을 것이며, 이는 성공적인 산림복원을 위한 건전한 묘목 생산에 기여할 것으로 판단된다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지 및 공시 수종

이 연구는 2008년 경기도 포천군에 위치한 국립산림과학원 산림생산기술연구소에서 이루어졌다 (37°45'N, 127°09'W). 연평균 기온은 11.3°C이고, 연강수량은 1,365mm이다.

조사구는 포지를 30cm 이상 깊게 경운한 후 동서방향으로 1m×20m크기로 조성한 묘상에 설치하였다. 묘상과 묘상 사이는 50cm거리를 두었으며, 조사구와 조사구 사이에 40cm 이상의 완충구역(buffer zone)을 두었다. 시험 전 토양의 물리성과 화학성을 측정하기 위하여 무작위로 3 지점을 선정하여 토양 깊이 0-10cm, 10-30cm 두 층위에서 토양 500g씩 채취하였다.

연구에 이용된 수종은 국립산림과학원 유전자원부에서 발아된 백합나무 품종 캔터키 유묘를 사용하였다. 굴취한 묘목을 다음날 식재 전까지 그늘진 곳에서 흙과 거적으로 덮고 충분히 관수하여 뿌리의 건조를 방지하였다. 평균 간장 7cm 묘목을 가로 14cm, 세로 14cm 간격 (49본/m²)으로 식재하였다. 초기 뿌리의 활착을 돕기 위해 식재 후 4주 동안 3일 간격으로 관수하였다.

2. 유기질 및 화학비료 처리

본 연구에서는 계분 20%, 우분 10%, 돈분 20%, 그리고 톱밥 50%(생산자 등록번호 제 10-(19)-나-1-5호)로 구성된 축비를 유기질비료로 사용하였다. 두 개의 20kg포대를 임의로 선정하여 수분 함량(47.1%)과 양분 및 중금속 함량을 측정하였다(Table 1). 화학비료로는 질소, 인, 칼륨이 주성분인 비료를 혼합하여 NPK비료(요소,

Table 1. Chemical properties of applied manure compost.

Variables	Concentrations
Chemical properties	
pH (-Log[H ⁺])	6.6 (0.5) ^b
Organic matter (%)	30.3 (0.2)
Total N (g kg ⁻¹) ^a	9.4 (1.6)
P (mg kg ⁻¹)	5.0 (0.1)
K (cmol _c kg ⁻¹)	7.7 (0.5)
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	20.1 (0.1)
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	3.8 (0.1)
Na (cmol _c kg ⁻¹)	1.4 (0.1)
Mn (mg kg ⁻¹)	494.1 (24.5)
Fe (g kg ⁻¹)	1.6 (0.1)
Al (g kg ⁻¹)	3.5 (0.1)
Zn (mg kg ⁻¹)	174.3 (8.1)
Cu (mg kg ⁻¹)	32.9 (0.7)
EC (mS m ⁻¹)	47.3 (13.1)

^aTotal N is the sum of organic N and inorganic N.

^bParenthesis is standard error (n = 2).

30g/m² N; 용과린, 70g/m² P; 가리, 15g/m²)로 이용하였다. 식재 6주 후에 유기질비료와 화학비료를 시비하였다. 유기질비료 무처리(0Mg/ha), 5Mg/ha, 10Mg/ha 3수준과 화학비료 무처리(0x), NPK비료 1배(1x), NPK비료 2배(2x)를 조합 (completely randomized block design with 3×3 factorial)하여 7반복 배치하였다. 묘목 사이에 비료를 손으로 고르게 뿌리고 토양과 잘 섞어주었다. 나무 판재를 조사구 가장자리에 깊이 5cm, 지상 높이 5cm로 테두리를 만들어주어 강수에 의한 비료 유실을 방지하였다.

3. 생장 측정

이른 봄 시비 처리 후 20주 지나서 지상부와 지하부의 생장을 조사하였다. 조사구 가장자리에 식재된 묘목을 제외하고 안쪽에서 5분을 랜덤하게 선정하여 가장자리 효과를 최소화하였다. 굴취시 뿌리 손상을 최소화하기 위하여 가

장자리의 묘목을 먼저 굴취하고 안쪽으로 흙을 조금씩 제거하면서 잔뿌리가 끊어지지 않도록 굴취하였다.

굴취된 묘목의 근원경과 수고를 측정한 후 뿌리를 흐르는 물에 3회 이상 씻어주어 뿌리 표면의 토양을 제거하였다. 지상부는 목질부(줄기와 가지)와 잎으로 나누어 채취하였고 지하부는 직근과 잔뿌리를 분리하지 않고 채취하였다. 채취 시료는 65°C에서 1주일 건조 후에 건중량을 측정하였다.

4. 토양 및 식물체 분석

묘목 굴취 전에 처리에 따른 토양의 화학적 특성을 분석하기 위하여 토양 시료를 채취하였다. 모든 조사구에서 가장자리를 제외한 두 지점을 무작위로 선정한 후 토양 표층의 낙엽을 제거하고 0-10cm 깊이에서 500g 토양을 채취하였다. 샘플링한 후 처리별 2개 또는 3개씩 혼합하여 처리당 3반복의 토양을 분석하였다. 식물체 양분 분석을 위한 시료는 건중량 측정에 이용된 묘목에서 샘플링하여 처리 당 3반복 분석하였다.

토양, 유기질비료 그리고 식물체 시료를 아래와 같이 분석하였다. 채취된 토양은 실내에서 풍건한 후 토성과 pH, 유기물 함량, 전질소, 유효인산, 치환성 K, Ca, Mg, Na, CEC, 그리고 EC를 측정하였다. 토성(soil texture)은 30°C 항온에서 비중계법(Hydrometer method)으로 측정하였고 유기물 함량은 습식법(Wet combustion)인 Tyurin method로 분석하였다. 토양 pH는 토양 10g을 증류수와 1 : 5로 혼합한 후 pH meter로 측정하였다. 전질소 함량은 토양 1g을 Micro-Kjeldahl법으로 측정하였다. 토양 유효인산(P₂O₅)은 Lancaster method로 측정하였고, 치환성 K, Ca, Mg, Na은 1 N NH₄OAc로 용출한 후 Atomic Absorption Spectrometer(AA280FS, USA)로 측정하였다. CEC는 10g의 토양을 용매 1 N NH₄OAc와 1 N CH₃COOH를 이용하여 Brown method로 측정하였다.

Table 2. Soil texture and chemical characteristics of the study site before fertilizer application.

	Soil depth (cm)	
	0-10	10-30
Texture		
Sand (%)	60.4 (2.2) ^c	63.4 (1.1)
Silt (%)	29.5 (1.8)	29.4 (3.5)
Clay (%)	10.1 (4.0)	7.2 (2.4)
Chemical properties		
pH (-Log[H ⁺])	5.3 (0.1)	5.4 (0.2)
Organic matter (%)	2.45 (0.10)	2.14 (0.43)
Total N (g kg ⁻¹) ^a	1.95 (0.08)	0.15 (0.01)
Available P (mg kg ⁻¹) ^b	323.0 (78.2)	53.8 (9.8)
Exchangeable K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.48 (0.11)	0.43 (0.13)
Exchangeable Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2.1 (0.1)	1.5 (0.1)
Exchangeable Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.54 (0.01)	0.29 (0.03)
Exchangeable Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0.12 (0.00)	0.13 (0.01)
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	12.4 (0.1)	13.4 (0.0)

^aTotal N is the sum of organic N and inorganic N.

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

^cParenthesis is standard error (n = 2).

5. 통계 분석

Duncan의 다중 비교 검정(Duncan's multiple comparison tests)을 이용하여 유기질비료와 NPK 화학비료 처리에 따른 토양특성, 식물체 양분 농도와 지상부 물질분배를 유의수준 5%에서 통계 분석(SAS 9.3)하였다. 수고와 근원경, 건중량은 식재 초기 값을 고려한 공분산분석(Covariate analysis)을 유의수준 5%에서 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 성장 반응

유기질비료와 NPK비료 처리조합은 백합나무의 수고 성장에 유의한 상호작용을 미치지 못했다(Figure 1, Table 3). 유기질비료 처리량이

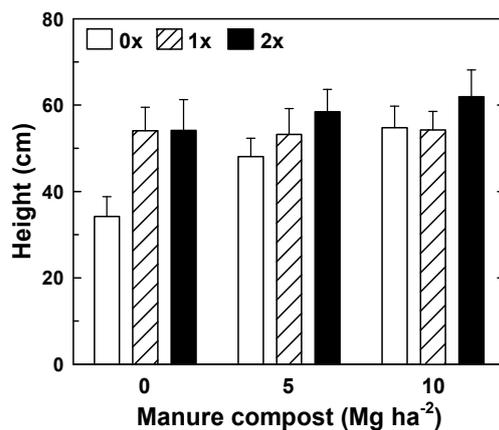


Figure 1. Height growth of *Liriodendron tulipifera* after treatments of manure compost and NPK fertilizer. Vertical bars represent one standard error of the mean (n = 7).

Table 3. ANOVA table for growth parameters.

Source of variable	Degree of freedom	Probability (Pr > F)		
		Height	Root collar diameter	Total biomass
Block	6	<0.01	<0.01	<0.01
Manure	2	0.02	<0.01	0.02
NPK	2	<0.01	<0.01	<0.01
Manure × NPK	4	0.13	0.04	0.29

증가할수록 수고 생장은 증가하는 경향을 보였고, 유기질비료 10Mg/ha처리는 대조구보다 유의하게 높았으나 5 Mg/ha처리와는 유의한 차이가 없었다(Figure 1). NPK비료 1x와 2x 처리 사이에는 수고의 유의한 차이가 없었고 무처리보다 유의하게 높았다(Figure 1, Table 3).

근원경 생장에서 유기질비료와 NPK비료 처리조합은 유의한 상호작용이 있었다(Figure 2, Table 3). 유기질비료 3수준과 NPK비료 3수준 조합의 일변량 사후 다중비교분석 대신에 주요인 효과를 검정하였는데, 유기질비료와 NPK비료 시비는 무처리보다 모두 유의하게 근원경 생장을 증가시켰고, 시비 수준 사이에는 유의한

차이가 없었다(Figure 2).

유기질비료와 NPK비료 조합처리는 백합나무의 줄기 바이오매스 생장에 유의한 상호작용 효과를 미치지 못했다(Figure 3, $P = 0.20$). 유기질비료 처리량이 증가할수록 수고 생장은 유의하게 증가하였고($P = 0.03$), 유기질비료 5Mg/ha 처리는 대조구와 10Mg/ha처리 모두와 유의한 차이는 없었다.

잎의 건중량도 줄기 건중량처럼 유기질비료와 NPK비료의 상호작용 효과는 없었다($P = 0.59$). 잎의 건중량은 5Mg/ha처리에서 가장 높은 값을 보였으나 10Mg/ha처리와는 유의한 차이가 없었고 대조구보다 높았다($P = 0.05$). 잎의 건중량

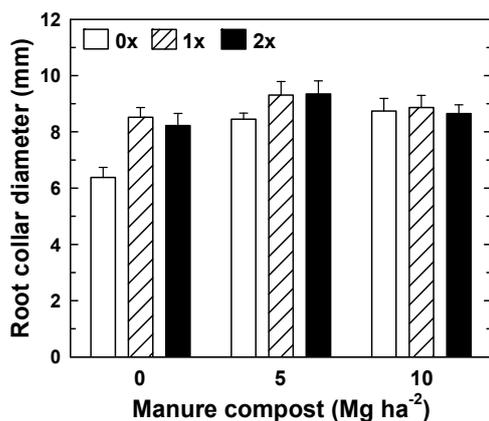


Figure 2. Root collar diameter growth of *Liriodendron tulipifera* after treatments of manure compost and NPK fertilizer. Vertical bars represent one standard error of the mean ($n = 7$).

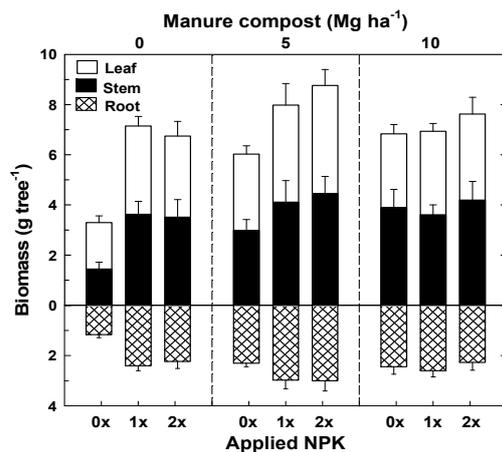


Figure 3. Biomass growth of *Liriodendron tulipifera* after treatments of manure compost and NPK fertilizer. Vertical bars represent one standard error of the mean ($n = 7$).

은 NPK비료 처리가 증가할수록 높은 증가량을 보였다($P < 0.01$).

유기질비료와 NPK비료 처리는 백합나무의 뿌리 바이오매스 생장에 유의한 상호작용을 미치지 못했는데($P = 0.15$), 유기질비료 5Mg/ha와 NPK비료 1x처리가 가장 높은 생장을 보였고, 무처리인 대조구와 유의한 차이가 있고 10Mg/ha와 2x와는 유의한 차이가 없었다. 유기질비료와 NPK비료 처리가 백합나무 바이오매스 생장에 미치는 영향을 정리해보면, NPK비료 1x와 2x 사이에는 유의한 차이가 없었고 대조구에 비해 39%의 바이오매스 증가를 보였으며, 유기질비료 처리는 5Mg/ha에서 가장 높은 효과가 있었는데 무처리에 비해 25%의 바이오매스를 증가시켰다. 유기질비료 5Mg/ha와 NPK비료 2x 처리 조합이 가장 높은 바이오매스 생장을 보였는데, 이는 시비하지 않은 처리에 비해 2.6배의 바이오매스를 증가시켰다(Figure 3, Table 3).

유기질비료 시비량이 증감함에 따라 지하부와 지상부 건중량 비에 미치는 영향은 없었고($P = 0.50$), NPK비료 처리량이 증가함에 따라 뿌리로의 물질 분배량은 감소하는 경향이 있었으나 통계적 유의성은 없었다($P = 0.24$). 지상부 건중량에서 잎 건중량 비율은 유기질비료 처리량이 증가할수록 유의적으로 감소하는 경향이 있었고($P < 0.01$), NPK비료 처리량이 증가할수록 지상부에서 잎 건중량 비율이 감소하였는데 처리 내 높은 변이에 의하여 통계적 유의성은 없었다($P = 0.12$).

모든 시비처리는 백합나무의 생장을 증가시켰고, 예상된 유기질비료와 NPK비료의 상호작용은 확연하게 나타나지 않았다(Figure 3). 본 연구에서 유기질비료에 의해 공급된 질소, 인, 칼륨량은 NPK비료 처리에 의해 공급된 질소, 인, 칼륨량의 각각 34, 41, 20%로 적었다. 그러나 유기질비료 처리에서 비슷한 바이오매스 생장을 보였는데, 이는 질소, 인, 칼륨의 양이 상대적으로 적지만, 그 외의 다른 필수양분을 고르게 공

급하고 간접적으로 pH 증가와 같은 토양의 질을 향상시켜 식물의 양분이용성을 향상시켰을 것으로 추정된다. Murmu et al.(2013)과 Tomati et al. (1988)은 유기질비료인 vermicompost가 식물체에 필수적인 다량원소와 미량원소를 모두 제공할 뿐만 아니라 식물생장조절물질과 부식산(humic acid)을 제공하여 식물의 생장을 촉진시킬 수 있음을 밝혔다. 본 연구는 식물생장의 주요 양분인 질소, 인, 칼륨이 NPK비료보다 적게 함유된 유기질비료 처리를 통해 NPK비료 처리와 유사한 바이오매스 생산을 유지하면서 토양의 질을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

2. 토양 특성 및 식물체 양분 특성

NPK비료 처리량이 증가할수록 토양 pH는 감소되었고, 유기질비료 처리량이 증가할수록 작지만 유의하게 증가하였다(Table 4, 5). 토양 질소는 유기질비료 처리에 따른 효과가 없었고, 작은 차이지만 NPK비료 최대 처리구에서 유의하게 낮은 값을 보였다. 토양 가용성 인은 유기질비료 처리에 의해 증가하였지만 처리간에 통계적 차이가 없었고, NPK비료 처리량이 증가함에 따라 유의하게 증가하는 경향을 보였다(Table 4, 5). 가용성 인처럼 치환성 칼륨은 유기질비료와 NPK비료 처리에 의해 각각 64%와 40% 증가를 보였다. 유기질비료 처리는 토양 칼슘과 마그네슘 농도 모두를 유의하게 증가시켰으나, NPK비료 처리에 의해 치환성 칼슘은 감소하였고, 마그네슘 농도는 변화가 없었다(Table 4, 5). 전기전도도, 토양 알루미늄, 망간 농도는 모든 처리에 따른 유의한 변화가 없었다. 다만 유기질비료 처리 10Mg/ha에서 망간의 농도가 유의하게 다른 처리에 비해 높았다($P < 0.01$).

유기질비료 처리가 토양 pH를 증가시키고, NPK비료와 같은 화학비료 처리가 토양 pH를 감소시킨 본 연구의 결과는 다른 연구와 유사했다(Warren and Fonteno, 1993; Whalen et al., 2000; Liu et al., 2010). 그러나 유기질비료 처리에 의해

Table 4. Soil properties after treatments.

	NPK fertilizer	Manure compost (Mg ha ⁻¹)		
		0	5	10
pH	0x ^a	5.50 (0.02)	5.61 (0.08)	5.83 (0.13)
(-Log[H ⁺])	1x	5.22 (0.04)	5.42 (0.10)	5.77 (0.09)
	2x	5.33 (0.04)	5.39 (0.07)	5.50 (0.06)
N (g kg ⁻¹)	0x	1.95 (0.19)	1.82 (0.10)	2.00 (0.11)
	1x	1.72 (0.07)	1.77 (0.08)	1.85 (0.06)
	2x	1.67 (0.09)	1.70 (0.03)	1.78 (0.01)
Available P (g kg ⁻¹)	0x	0.42 (0.04)	0.52 (0.07)	0.59 (0.04)
	1x	0.59 (0.01)	0.57 (0.05)	0.65 (0.07)
	2x	0.70 (0.02)	0.63 (0.06)	0.66 (0.09)
Exchangeable K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0x	0.27 (0.02)	0.45 (0.02)	0.58 (0.03)
	1x	0.40 (0.03)	0.54 (0.04)	0.65 (0.03)
	2x	0.50 (0.03)	0.59 (0.06)	0.70 (0.06)
Exchangeable Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0x	2.15 (0.17)	2.67 (0.03)	3.45 (0.39)
	1x	1.46 (0.07)	2.20 (0.26)	3.08 (0.29)
	2x	1.65 (0.17)	2.07 (0.25)	2.48 (0.34)
Exchangeable Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0x	0.25 (0.03)	0.47 (0.01)	0.86 (0.07)
	1x	0.24 (0.01)	0.51 (0.10)	0.87 (0.05)
	2x	0.40 (0.02)	0.52 (0.07)	0.72 (0.11)
EC (mS m ⁻¹)	0x	0.30 (0.03)	0.27 (0.01)	0.29 (0.01)
	1x	0.26 (0.01)	0.31 (0.01)	0.28 (0.00)
	2x	0.30 (0.01)	0.30 (0.00)	0.33 (0.03)
Al (g kg ⁻¹)	0x	1.68 (0.03)	1.59 (0.07)	1.64 (0.02)
	1x	1.62 (0.06)	1.73 (0.07)	1.67 (0.08)
	2x	1.80 (0.05)	1.72 (0.13)	1.69 (0.06)
Mn (mg kg ⁻¹)	0x	71.98 (5.24)	75.85 (5.55)	96.40 (6.47)
	1x	73.25 (6.87)	87.00 (5.55)	99.60 (6.96)
	2x	74.11 (5.01)	80.22 (1.60)	84.16 (1.11)

^aStandard errors are in parentheses (n = 3).

Table 5. ANOVA table for soil properties.

Source of variable	Degree of freedom	Probability (Pr > F)								
		pH	N	Available P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	EC	Al	Mn
Manure	2	<0.01	0.19	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	0.59	0.81	<0.01
NPK	2	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.90	0.14	0.24	0.15
Manure × NPK	4	0.02	0.76	0.18	0.70	0.27	0.08	0.30	0.56	0.24

Table 6. Foliage nutrient concentrations after treatments.

NPK fertilizer		Manure compost (Mg ha ⁻¹)		
		0	5	10
N (g kg ⁻¹)	0x ^a	16.92 (1.09)	16.65 (0.64)	16.00 (0.47)
	1x	15.54 (0.45)	15.11 (1.07)	15.65 (0.37)
	2x	15.85 (0.32)	15.85 (0.22)	15.52 (0.31)
P (g kg ⁻¹)	0x	1.95 (0.14)	1.60 (0.08)	1.68 (0.17)
	1x	1.50 (0.05)	1.55 (0.06)	1.51 (0.10)
	2x	1.53 (0.10)	1.49 (0.09)	1.58 (0.05)
K (g kg ⁻¹)	0x	17.84 (1.25)	17.20 (1.07)	21.94 (0.68)
	1x	17.94 (0.78)	17.83 (1.16)	22.36 (0.79)
	2x	18.35 (2.62)	21.02 (3.12)	21.14 (1.59)
Ca (g kg ⁻¹)	0x	9.23 (1.31)	8.43 (0.39)	8.04 (0.42)
	1x	8.80 (0.24)	9.16 (0.86)	7.46 (0.12)
	2x	8.46 (1.02)	8.84 (0.68)	8.27 (0.85)
Mg (g kg ⁻¹)	0x	2.84 (0.10)	2.58 (0.14)	2.42 (0.06)
	1x	2.30 (0.20)	2.00 (0.06)	1.94 (0.19)
	2x	1.81 (0.15)	2.20 (0.06)	2.15 (0.10)
Al (g kg ⁻¹)	0x	0.73 (0.01)	0.89 (0.24)	0.84 (0.16)
	1x	1.00 (0.18)	1.10 (0.32)	0.99 (0.25)
	2x	0.90 (0.13)	0.97 (0.29)	1.01 (0.04)
Mn (g kg ⁻¹)	0x	0.40 (0.02)	0.35 (0.02)	0.41 (0.06)
	1x	0.50 (0.02)	0.64 (0.05)	0.66 (0.02)
	2x	1.03 (0.11)	1.00 (0.01)	1.04 (0.08)

^aStandard errors are in parentheses (n = 3).

토양 pH가 감소된 경우도 있는데, 이는 석회질 토양에서 11년 동안 축산부산물 비료 처리로 표토 pH가 0.3~0.7의 감소를 보였고, 감소폭은 축산부산물 처리량이 높을수록 높았다(Chang et al., 1990). 토양 pH가 5.4인 토양에서도 장기적으로 많은 양의 계분 유기물비료 처리는 pH를 감소시켰다고 보고되었다(King et al., 1990). 일반적으로 축산부산물로 만든 유기질비료가 토양 pH를 증가시키는 역할을 하지만, 유기질비료의 효과는 유기물 원료, 처리량 그리고 토양의 특성에 따라

다름을 보여주고 있다. 본 연구에서는 시비처리 후에 토양의 중탄산염(CaCO₃)을 분석하지 않았지만, 유기질비료 처리에 의해 증가된 CaCO₃이 완충작용(buffering)을 증가시킴으로써 토양 pH를 증가시킨 것으로 판단된다(Eghball, 1999).

다른 연구와 마찬가지로 NPK비료 처리는 토양을 산성화시켰는데, 본 연구에 사용된 질소질 비료인 요소는 식물이 우선적으로 NH₄⁺형태로 질소를 이용하고 토양에 H⁺을 방출하여 토양 pH를 감소시키기 때문이다(Magdof et al., 1997).

Table 7. ANOVA table for foliage nutrient concentrations.

Source of variable	Degree of freedom	Probability (Pr > F)						
		N	P	K	Ca	Mg	Al	Mn
Manure	2	0.76	0.38	0.03	0.27	0.38	0.79	0.37
NPK	2	0.12	0.02	0.68	0.99	<0.01	0.46	<0.01
Manure×NPK	4	0.88	0.30	0.64	0.81	0.03	0.99	0.37

이 과정은 토양 내 대부분의 박테리아와 방선균(Actinomyces) 활동을 감소시키며(Kaur et al., 2005), 장기적으로 토양 양이온 용탈의 원인이 될 것으로 판단된다(Likens et al., 1996; Bailey et al., 2004). NPK비료를 장기간 사용할 경우 결국 다른 필수 양분의 부족을 야기할 수 있고, 토양의 물리·화학·생물적 특성을 악화시킬 것이다.

유기질비료에 함유된 30%의 유기물함량이 토양 내 질소, 인, 칼륨과 주요 양이온 함량을 증가시킨 것으로 판단된다. 유기질비료의 유기물은 느린 분해에 의해 식물이 장기적으로 양분을 활용할 수 있고, 식물이 이용하지 못해 방출되는 손실량을 줄일 수 있을 것이다(Bhandari et al., 2002). 본 연구에서 유기질비료와 화학비료에 의해 토양 내 인의 함량이 증가하였는데, 이는 Singh et al.(2007)이 보고한 것처럼 시비에 의해 공급된 많은 양의 인을 식물체가 활용하지 못하고 토양 표층에 집적시킨 결과로 보인다. 칼륨을 포함하여 주요 양이온은 유기질비료 처리에 의해 증가하였는데, 이는 질소와 인의 증가처럼 유기질비료에 높게 함유되어 있기 때문으로 판단된다.

시비처리는 토양 양분에 큰 영향을 주었지만(Table 4), 식물체의 양분 농도에는 거의 영향을 주지 않았다(Table 6, 7). 잎의 질소 농도는 유기질비료와 NPK비료 처리에 따른 유의한 영향이 없었다. 인의 경우는 유기질비료 처리 사이에 유의한 차이가 없었지만 NPK비료 처리량이 증가함에 따라 감소하였다. 잎의 칼륨 농도는 유기질비료 처리량이 증가함에 따라 감소했고

(P = 0.03), NPK비료 처리 사이에 유의한 차이가 없었다. 칼슘 농도는 시비처리에 따른 반응이 없었고, 마그네슘 농도는 NPK시비 처리에서 감소했다(Table 6, 7). 잎의 알루미늄 농도는 처리에 의한 차이가 없었지만, 망간 농도는 NPK비료 처리량이 증가하면서 유의하게 증가하였는데, 이는 토양 pH변화나 가용량 증가에 의해 흡수가 증가한 것으로 판단된다.

시비처리에 따른 식물체 조직의 양분 농도가 크게 변하지 않은 결과는 다른 연구에서도 나타나고 있다(Park et al., 2012; Park et al., 2013). 이는 시비처리가 토양 내 이용 가능한 양분량을 증가시켰으나, 식물체가 흡수한 양분만큼 바이오매스가 증가하여 식물체 양분 농도가 변하지 않은 것으로, 양분벡터분석의 ‘충분’(화살표 B)에 해당된다(Timmer, 1996). 시비처리에 의해 실제 흡수한 질소량은 매우 높는데, 유기질비료, NPK비료, NPK비료+유기질비료 처리는 대조에 비해 질소 흡수를 각각 191, 224, 198% 증가시켰고, 인과 칼륨도 비슷한 흡수 경향을 보이고 있다.

IV. 결 론

지속적인 생산성 유지와 토양의 질을 동시에 유지하기 위해서는 토양 양분관리에 주의해야 한다. 유기질비료는 토양 pH를 증가시키고 질소와 인 그리고 주요 양이온의 함량을 증가시키면서 NPK비료 처리에 비교할 만큼 백합나무를 성장시켰다. 특히 유기질비료 5Mg/ha와 NPK

비료(요소, 30g/m² N; 용과린, 70g/m² P; 가리, 15g/m²) 조합이 최대 생산성을 보였다. 축산부산물로 제조된 유기질비료를 대면적 산림복원에 이용하기에 앞서 축산부산물 종류에 따른 이질적인 양분 구성, 적용지 토양 특성, 대상 수종의 양분 요구도, 특히 적용 지역 주변의 환경적, 위생적 요인들이 고려돼야 할 것이다. 본 연구는 축산부산물과 톱밥으로 제조된 유기질비료가 어린 백합나무의 성장을 증대시킬 뿐 아니라 토양조건을 개선하는 효과가 있음을 보여주고 있으며, 유기질비료와 NPK비료의 적절한 조합이 생산성 측면에서 최대의 효과를 달성할 수 있음을 보여주고 있으며, 이는 성공적인 산림복원을 위한 묘목 생산과정의 묘포 토양관리에 기여할 것으로 판단된다.

References

- Adegbidi, H. G. · R. D. Briggs · E. H. White · L. P. Abrahamson and T. A. Volk. 2003. Effect of organic amendments and slow-release nitrogen fertilizer on willow stem biomass production and soil chemical characteristics. *Biomass and Bioenergy*. 25(4): 389-398.
- Bailey, S. W. · S. B. Horsley · R. P. Long and R. A. Hallett. 2004. Influence of edaphic factors on sugar maple nutrition and health on the Allegheny plateau. *Soil Science Society of America Journal*. 68(1): 243-252.
- Bhandari, A. L. · J. K. Ladha · H. Pathak · A. T. Padre · D. Dawe and R. K. Gupta. 2002. Yield and soil nutrient changes in a long-term rice-wheat rotation in India. *Soil Science Society of America Journal*. 66(1): 162-170.
- Chand, S. · M. Anwar and D. D. Patra. 2006. Influence of long-term application of organic and inorganic fertilizer to build up soil fertility and nutrient uptake in mint-mustard cropping sequence. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 37(1-2): 63-76.
- Chang, C. · T. G. Sommerfeldt and T. Entz. 1990. Rates of soil chemical changes with eleven annual applications of cattle feedlot manure. *Canadian Journal of Soil Science*. 70(4): 673-681.
- Chen, J. H. 2006. The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. *Proceeding of International Workshop on Sustained Management of the Soil-Rhizosphere System for Efficient Crop Production and Fertilizer Use*.
- Eghball, B. 1999. Liming effects of beef cattle feedlot manure or compost. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 30(19-20): 2563-2570.
- Kaur, K. · K. K. Kapoor and A. P. Gupta. 2005. Impact of organic manure with and without mineral fertilizers on soil chemical biological properties under tropical conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 168(1): 117-122.
- King, L. D. · J. C. Burns and P. W. Westerman. 1990. Long-term swine lagoon effluent applications on 'Coastal' bermudagrass: II. Effect on nutrient accumulation in soil. *Journal of Environmental Quality*. 19(4): 756-760.
- Larcheveque, M. · A. Desrochers and G. R. Larocque. 2011. Comparison of manure compost and mineral fertilizer for hybrid poplar plantation establishment on boreal heavy clay soils. *Annals of Forest Science*. 68(4): 849-860.
- Likens, G. E. · C. T. Driscoll and D. C. Buso. 1996. Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science*.

- 272(5259): 244-246.
- Liu, E. · C. Yan · X. Mei · W. He · S. H. Bing · L. Ding · Q. Liu · S. Liu and T. Fan. 2010. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*. 158(3): 173-180.
- Magdof, F. · L. Lanyon and B. Liebhardt. 1997. Nutrient cycling, transformations and flows: implications for a more sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*. 60: 1-73.
- Murmu, K. · D. K. Swain and B. C. Ghosh. 2013. Comparative assessment of conventional and organic nutrient management on crop growth and yield and soil fertility in tomato-sweet corn production system. *Australian Journal of Crop Science*. 7(11): 1617-1626.
- Park BB · Byun JK · Sung JH and Cho MS. 2013. Study of optimal fertilization with vector analysis in hardwood and softwood seedlings. *Journal of Agriculture and Life Science*. 47(5): 95-107. (in Korean with English abstract)
- Park BB · Cho MS · Lee SW · R. D. Yanai and Lee DK. 2012. Minimizing nutrient leaching and improving nutrient use efficiency of *Liriodendron tulipifera* and *Larix leptolepis* in a container nursery system. *New Forests*. 43(1): 57-68.
- Ryu KO · Jang SS · Choi WY and Kim HE. 2003. Growth performance and adaptation of *Liriodendron tulipifera* in Korea. *Journal of Korean Forestry Society*. 92(6): 515-525. (in Korean with English abstract)
- Ryu KO · Kim UJ · Kim IS · Choi HS · Lee DH and Kim YW. 2008. *Liriodendron tulipifera* L.-Growth characteristics and utilization technique-. Korea Forest Research Institute. Research Note 320: pp. 286. (in Korean)
- Singh, M. · S. R. Reddy · V. P. Singh and T. R. Rupa. 2007. Phosphorus availability to rice (*Oriza sativa* L.)-wheat (*Triticum estivum* L.) in a Vertisol after eight years of inorganic and organic fertilizer additions. *Bioresource Technology*. 98(7): 1474-1481.
- Timmer, V. R. 1996. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. *New Forests*. 13(1-3): 275-295.
- Tomati, U. · A. Grappelli and E. Galli. 1988. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. *Biology Fertility Soils*. 5(4): 288-294.
- Warren, S. L. and W.C. Fonteno. 1993. Changes in physical and chemical properties of a loamy sand soil when amended with composted poultry litter. *Journal of Environmental Horticulture*. 11: 186-190.
- Whalen, J. K. · C. Chang · G. W. Clayton and J. P. Carefoot. 2000. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. *Soil Science Society of America Journal*. 64(3): 962-966.