

도시 숲 산불피해지의 시비에 따른 식재 수목의 성장 및 양분 동태

김춘식^{1,2*} · 백경원²

¹경상국립대학교 환경산림과학부, ²경상국립대학교 농식품바이오융복합연구원

Growth and Nutrient Dynamics of Planted Tree Species Following Fertilization in a Fire-Disturbed Urban Forest

Choonsig Kim^{1,2*} and Gyeongwon Baek²

¹Division of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

²Agri-Food Bio-Convergence Institute, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

요약: 본 연구는 울산광역시에 위치한 봉대산 산불피해지의 식생복원을 위해 2009년에 조림된 4 수종(백합나무, 왕벚나무, 상수리나무, 곰솔)을 대상으로 시비처리 후 임목성장 및 토양특성 변화를 조사하였다. 조림 4년 후인 2013년 4월과 2014년 3월 복합비료(N₆P₄K₁)를 시비하고 2016년 10월까지 매년 임목의 성장과 토양 및 잎의 양분 동태를 조사하였다. 조림목의 흉고직경 성장 증가에 대한 시비구와 대조구 사이의 회귀계수(slope)는 4 수종 모두 유의적인 차이가 있어 시비는 조림목의 흉고직경 성장에 효과가 있었으나, 수고 성장의 회귀계수는 곰솔을 제외하고 유의성이 없었다. 시비 처리에 따른 토양 호흡과 토양 EC 값은 대조구에 비해 유의적으로 높았으나 토양수분 함량, 토양 유기탄소 및 전질소 농도는 대조구에 비해 낮았다. 그러나 토양 유효 인, 교환성 칼슘과 마그네슘은 시비구가 대조구에 비해 높은 값을 보였다. 조림목의 잎 내 질소 및 인 농도는 시비구가 대조구에 비해 증가하였으나, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 농도는 시비의 영향이 뚜렷하지 않았다. 조사한 4 수종 중 왕벚나무와 백합나무는 잎 내 양분 농도가 상수리나무나 곰솔에 비해 높아 토양 양분요구량이 큰 것으로 나타났다. 본 연구 결과에 따르면 도시 숲의 산불피해 복원지에 시비 처리는 조림된 수목의 성장과 토양 양분의 유효도 향상에 효과적이었다.


Abstract: This study was conducted to evaluate the growth and nutrient dynamics in response to fertilization of four tree species (LT: *Liriodendron tulipifera* L.; PY: *Prunus yedoensis* Matsumura; QA: *Quercus acutissima* Carruth; and PT: *Pinus thunbergii* Parl.) planted in a fire-disturbed urban forest in Bongdaesan (Mt.), Ulsan Metropolitan Area, South Korea. The trees were planted in 2009, and compound fertilizers (N₆P₄K₁) were applied in April 2013 and March 2014. Tree growth, soil, and foliage nutrients were examined from March 2013 to October 2016. The regression coefficients for the increment of the diameter at breast height (DBH) significantly differed between the fertilized and unfertilized plots, suggesting the significant effects of fertilization. By contrast, fertilization did not affect the coefficients for height increments. Regarding soil nutrient contents, organic carbon and total nitrogen concentrations were lower in the fertilized plots than in the unfertilized plots, whereas available phosphorus, exchangeable calcium, and magnesium concentrations were higher in the fertilized plots than in the unfertilized plots. In foliage, nitrogen and phosphorus concentrations were higher in the fertilized plots than in the unfertilized plots, whereas potassium, calcium, and magnesium concentrations were not affected by fertilization. Nutrient concentration of foliage among the tree species were higher in LT and PY than in QA and PT. These results suggest that fertilizers may be used to enhance soil fertility and the growth and nutrient status of tree species planted in a fire-disturbed urban forest.

Key words: forest fire, foliage nutrient, vegetation restoration, soil property, urban soil

* Corresponding author
E-mail: ckim@gnu.ac.kr

ORCID

Choonsig Kim  <https://orcid.org/0000-0002-3263-1187>

Gyeongwon Baek  <https://orcid.org/0000-0002-3578-7355>

서 론

도시 숲은 대기오염 저감 및 정화, 열섬 효과 완화, 생물 서식 공간 제공 등 유·무형의 다양한 생태계서비스를 제공한다(Yang et al., 2005; McPhearson et al., 2010; Oldfield et al., 2014). 그러나 도시 숲은 산사태, 산불, 산림병해충 발생 등과 같은 산림 재해 발생에 매우 취약하며, 빈번한 산림 교란에 의해 정상적인 양분 순환이 이루어지지 않아 수목의 생육환경이 열악한 것으로 알려져 있다(McPhearson et al., 2010; Brunetti and Fini, 2017). 예를 들면, 산불에 의해 교란을 받은 생태계는 토양 입단구조가 파괴되거나 양분용탈, 지표면 침식 및 지표 유기수 증가 등에 의해 질소나 인 같은 식물생육 필수 영양분이 감소하고, 식재된 수목의 근계 발육이나 생장이 저해되어 수목활력도가 낮아지기도 한다(Certini, 2005; Agbeshie et al., 2022).

도시 숲 산불피해지가 산불 이전으로 회복되기 위해서는 식생에 의한 입지의 신속한 피복과 지표의 안정화 등이 중요한 생태계 관리 기술로 알려져 있다(National Institute of Forest Science, 2010). 이러한 관리 기술 중 산불 피해지의 효과적인 토양관리는 성공적인 식생 복원에 가장 중요한 기여 인자로 평가되고 있으며(Heneghan et al., 2008), 토양 특성의 개량은 수목의 생육환경을 개선하고 수고 및 직경 성장을 촉진하였다(Pavao-Zuckerman, 2008; Oldfield et al., 2014). 예를 들면 산불 피해지의 식생 복원을 위한 시비 처리는 조립된 소나무의 직경생장을 촉진하였으며(Kim et al., 2014), 하층식생의 피도와 유기물층의 피복도는 무시비구에 비해 약 23.3%와 30% 정도 증가하여 지표면이 빠르게 안정화하였다(Won et al., 2006).

도시지역 산불피해지의 식생 복원은 생태계서비스 증진에 긍정적 효과를 발휘할 수 있다(Thom and Seidl, 2015). 그러나 국내에서 수행된 산불피해지의 식생 복원 관련 연구는 주로 산림지역을 대상으로 실시되었으며(Won et al., 2006; Kim et al., 2014), 입지환경이 상이한 도시지역 산불피해지에서의 연구는 미흡한 편이다(Kim et al., 2015). 본 연구는 다양한 수종이 식재된 도시 숲 산불피해 복원지를 대상으로 시비가 조립목의 생육과 토양환경 변화에 끼치는 영향을 조사하기 위한 목적으로 수행하였다.

재료 및 방법

1. 일반현황

본 연구의 조사지인 봉대산은 울산광역시에 위치하며 2003년부터 2011년 사이 주로 방화에 의한 산불이 약 37회 발생하였다(Kim et al., 2015). 이 지역의 연평균 강수량

과 연평균 온도는 1,293 mm yr⁻¹와 14.4°C이며 산림토양은 화강암을 모재로 생성된 갈색건조산림토양형(B₁)과 갈색약건산림토양형(B₂)이 분포하나 토양단면 발달이 빈약하여 전 토심은 20~30 cm 범위였다.

연구 조사지는 2008년 봄에 산불이 발생하였으며, 산불 발생 1년 후 피해를 대상으로 1-1년생의 백합나무, 왕벚나무, 상수리나무, 곰솔을 식재한 지역이다. 현지조사는 수목 식재 4년 후인 2013년 3월부터 2016년 10월까지 매년 4회(3월, 6월, 8월, 10월) 실시하였다. 조사구 중 왕벚나무, 상수리나무, 곰솔 식재지는 서향이나 남동향의 10° 미만 환경사지역에 식재되었으며, 백합나무는 북향의 경사 15~20° 정도였다. 조사지의 산불발생지와 미발생지의 토양물리·화학적 특성(Kim et al., 2016)과 조사구의 수종별 입분밀도, 평균 흉고직경 및 평균 수고와 시비처리 전 토양 특성 등은 타 연구에 보고되어 있다(Kim et al., 2015).

2. 실험설계

조사구는 백합나무, 상수리나무, 왕벚나무, 곰솔 식재지를 대상으로 5×5 m 크기의 시비처리구와 무시비구를 구획하고 각 처리구 사이에 1 m 완충지대를 2반복 난괴법(completed randomized block design)으로 설계하였다. 본 연구에서 시비 처리는 국내 산불발생지의 권장 시비수준으로 고려되는 복합비료 N₆:P₄:K₁(요소 24 g m⁻¹ yr⁻¹, 용과린 16 g m⁻¹ yr⁻¹, 염화加里 3.6 g m⁻¹ yr⁻¹)로 하였다(Kim et al., 2014). 시비 처리는 4년의 조사기간 중 2회(2013년 4월 5일과 2014년 3월 7일) 광물질 토양층위에 균일하게 살포하였으며, 2015년과 2016년은 시비하지 않았다. 식재된 수목의 성장량은 2013년 3월부터 2016년 10월까지 총 16회 조사하였다.

3. 토양의 물리·화학적 특성

조사구의 토양은 토양채취기(Oakfield soil core sampler)를 사용하여 임의로 선정한 5지점에서 깊이 15 cm까지 채취하였다. 채취한 토양은 풍건 후 2 mm 체(US standard No. 10)와 0.425 mm 체(US standard No. 40)로 토양 물리·화학적 특성 분석 시료를 조제하였다. 조제된 시료는 토양 pH(Model-735, ISTEK, Korea)와 EC 측정기(Thermo Fisher Scientific Orion 3-star, Singapore), 탄소(C) 및 질소(N) 농도는 대용량 원소분석기(Vario Macro cube, Germany)로 측정하였다. 유효 인(P), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 등은 2.5 g의 건조 토양을 암모늄 아세테이트 용액 55mL를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출한(Kalra and Maynard, 1991) 용액을 ICP(Perkin Elmer Optima 5300, USA)로 측정하였다. 토양호흡 및 토양온도 측정은 토양

시료 채취 과정 동안 적외선 가스 분석기 시스템(Model EGM-4 Environmental Gas Monitoring System, PP systems, Hitchin, UK) 및 디지털 토양 온도계(K-type, Summit SDT 200, Seoul, Korea)를 이용하였다. 토양 수분 함량은 105°C의 건조기에서 48시간 동안 건조 후 계산하였다. 토양 무기질소는 토양을 채취한 직후 5g의 토양을 2M KCl 50mL를 첨가하여 용액을 추출한 후(Kalra and Maynard, 1991), 암모니아태(NH₄⁺) 및 질산태(NO₃⁻) 질소를 이온자동 분석기(AQ2 Discrete Analyzer, Southampton, UK)로 측정하였다.

4. 잎 양분 분석

잎 양분분석 시료는 수관의 중간 부위 3~5개소에서 골고루 채취하였으며, 4년 동안 매년 3회(6월, 8월, 10월)씩 총 12회 수집하였다. 잎 시료는 실험실로 운반하고 가지로부터 잎을 분리 후 생중량을 측정하고 65°C에서 48시간 동안 건조하였다. 건조한 잎 시료는 분쇄 후 C와 N 농도는 원소 분석기(Thermo Scientific, Flash 2000, Italy), P, K, Ca, Mg 농도는 0.5 g의 건조한 잎 시료를 470°C로 전기로에서 4시간 동안 회화한 후 HNO₃와 HCl로 희석하고 ICP(Perkin Elmer Optima 5300DV, USA)로 측정하였다.

5. 자료 분석

수집된 자료는 SAS(SAS Institute, 2003)의 반복측정 분

산분석으로 주요인[비료처리(T), 수종[S(T)], 시료 채취시기(M)] 및 상호작용요인(T×M)의 유의성(P<0.05)을 결정하였다. 분산분석 결과 유의한 차이가 있는 경우 평균 간 비교는 Tukey 방법을 이용하였다. 생장특성의 경우 종속 변수로 흉고직경 및 수고 증가량과 독립변수로 측정 시기를 이용한 선형회귀 관계를 조사하였고, 시비처리구와 대조구 사이에 회귀계수의 유의성을 검정하였다(P<0.05).

결 과

1. 흉고직경 및 수고 생장

조사기간 동안 4 수종 모두 측정시기와 흉고직경 생장 증가는 선형 회귀 관계가 있었다(P<0.05). 시비구와 대조구 사이 회귀계수(slope)에 대한 유의성 검정 결과도 4 수종 모두 유의적인 차이가 나타나 흉고직경 생장 증가에 시비효과가 있는 것으로 나타났다(Figure 1). 흉고직경 생장증가에 대한 회귀계수는 백합나무 시비구가 0.2144, 대조구 0.1473, 왕벚나무 시비구 0.1515, 대조구 0.1267, 상수리나무 시비구 0.1339, 대조구 0.1125, 곰솔 시비구 0.0926, 대조구 0.0317 등으로 시비구의 회귀계수가 대조구에 비해 유의적으로 크게 나타났다. 시비구와 대조구 사이 회귀계수의 차는 백합나무가 0.0671 정도로, 곰솔 0.0609, 왕벚나무 0.0248, 상수리나무 0.0214 등에 비해 가장 크게 나타났다. 그러나 시비구와 대조구의 수고 생장

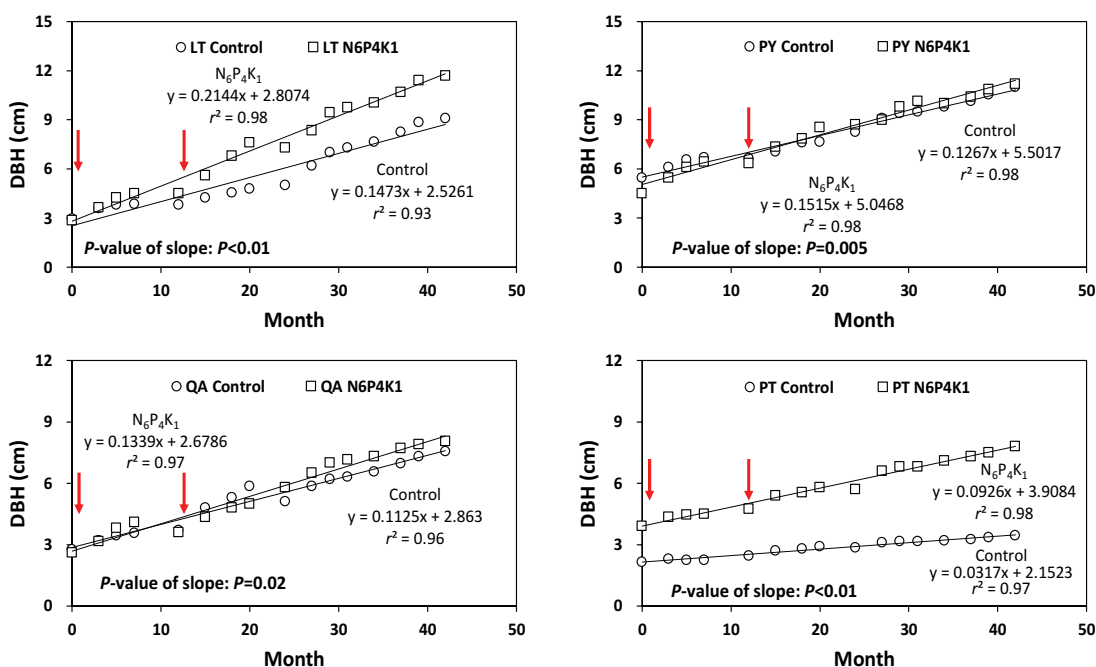


Figure 1. Linear regression between DBH increment and sampling month of four planted tree species (LT: *Liriodendron tulipifera*; PY: *Prunus yedoensis*; QA: *Quercus acutissima*; PT: *Pinus thunbergii*) by control and fertilizer treatment (N₆P₄K₁) in a fire-disturbed urban forest. Red arrows indicate fertilization times.

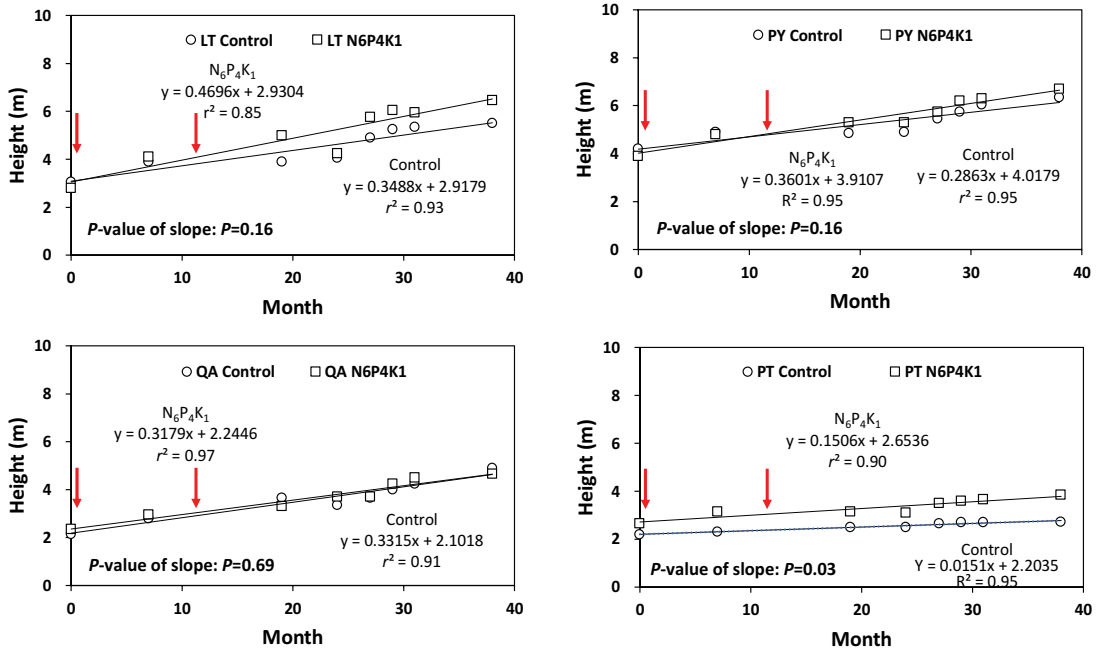


Figure 2. Linear regression between height increment and sampling month of four planted tree species (LT: *Liriodendron tulipifera*; PY: *Prunus yedoensis*; QA: *Quercus acutissima*; PT: *Pinus thunbergii*) by control and fertilizer treatment (N₆P₄K₁) in a fire-disturbed urban forest. Red arrows indicate fertilization times.

증가에 대한 회귀계수는 곰솔을 제외하고 유의적인 차이가 없었다(Figure 2).

2. 토양 특성

토양호흡, 토양수분함량, 토양 pH, 토양 EC는 시비처리, 수종, 측정 시기에 유의적인 차이가 있었다(Figure 3). 시비구의 토양 호흡과 토양 EC는 대조구에 비해 유의적으로 높은 값을 보였으나, 토양수분함량은 대조구에 비해 시비구가 낮게 나타났다. 수종의 경우 백합나무 조림지의 토양 호흡은 상수리나무 조림지에 비해 유의적으로 높았으나, 상수리나무 조림지의 토양수분함량은 타 조림지에 비해 낮았다. 토양 pH와 토양 EC 등도 상수리나무 조림지가 왕벚나무 조림지에 비해 낮은 값을 보였다. 측정시기에 따른 토양호흡은 토양온도 변화와 밀접한 관계를 보였으며, 8월이 가장 높고 3월이 가장 낮았다. 토양수분함량은 3월이 6월과 8월에 비해 높았으며, 토양 pH는 6월과 10월이 3월에 비해 낮았다. 토양호흡, 토양온도, 토양수분, 토양 pH, 토양 EC 등의 경우 시비 처리와 측정시기의 상호작용 요인에 유의성이 없었다($P>0.05$).

토양 유기탄소나 전질소는 시비구가 대조구에 비해 낮은 반면에 유효 인, 교환성 칼슘과 마그네슘은 시비구가 대조구에 비해 높은 값을 보였으며, 조사한 양분 모두 측정 시기와 시비 처리 간 상호작용 요인에 유의성은 나타나

지 않았다(Figure 4). 수종의 경우 백합나무 조림지의 토양 유기탄소, 전질소, 교환성 칼슘과 마그네슘 농도는 상수리나무 조림지에 비해 유의적으로 높은 값을 보였다. 토양 내 무기질소 농도(NH₄⁺, NO₃⁻)는 시비구에서 증가하였고 월별 NH₄⁺와 NO₃⁻ 농도는 시비 후 3개월이 경과한 6월에 가장 높은 농도를 보였으며 8월에는 급격히 감소하였다(Figure 5).

3. 잎 양분 특성

잎 양분 농도는 인을 제외하고 측정시기와 시비처리 사이에 유의적인 상호작용이 나타나지 않았다(Figure 6). 잎의 탄소 농도는 시비구가 대조구에 비해 낮은 반면에 질소와 인 농도는 시비구가 대조구에 비해 높은 값을 보였다. 잎의 칼륨, 칼슘, 마그네슘 농도는 시비구와 대조구 사이에 유의적인 차이가 없었다. 수종별로는 백합나무의 탄소 농도는 곰솔에 비해 유의적으로 낮은 반면에 질소 농도는 활엽수인 백합나무, 왕벚나무, 상수리나무가 침엽수인 곰솔의 신엽과 구엽에 비해 높은 농도를 보였다. 인이나 칼륨은 왕벚나무가 타 수종에 비해 높은 농도를 보였으며, 백합나무와 왕벚나무는 칼슘이나 마그네슘 농도가 타 수종에 비해 높았다. 측정시기별 탄소 및 칼슘 농도는 6월과 8월이 10월에 비해 높았으나, 질소, 인, 칼륨, 마그네슘 농도는 측정시기에 따라 유의적인 차이가 없었다.

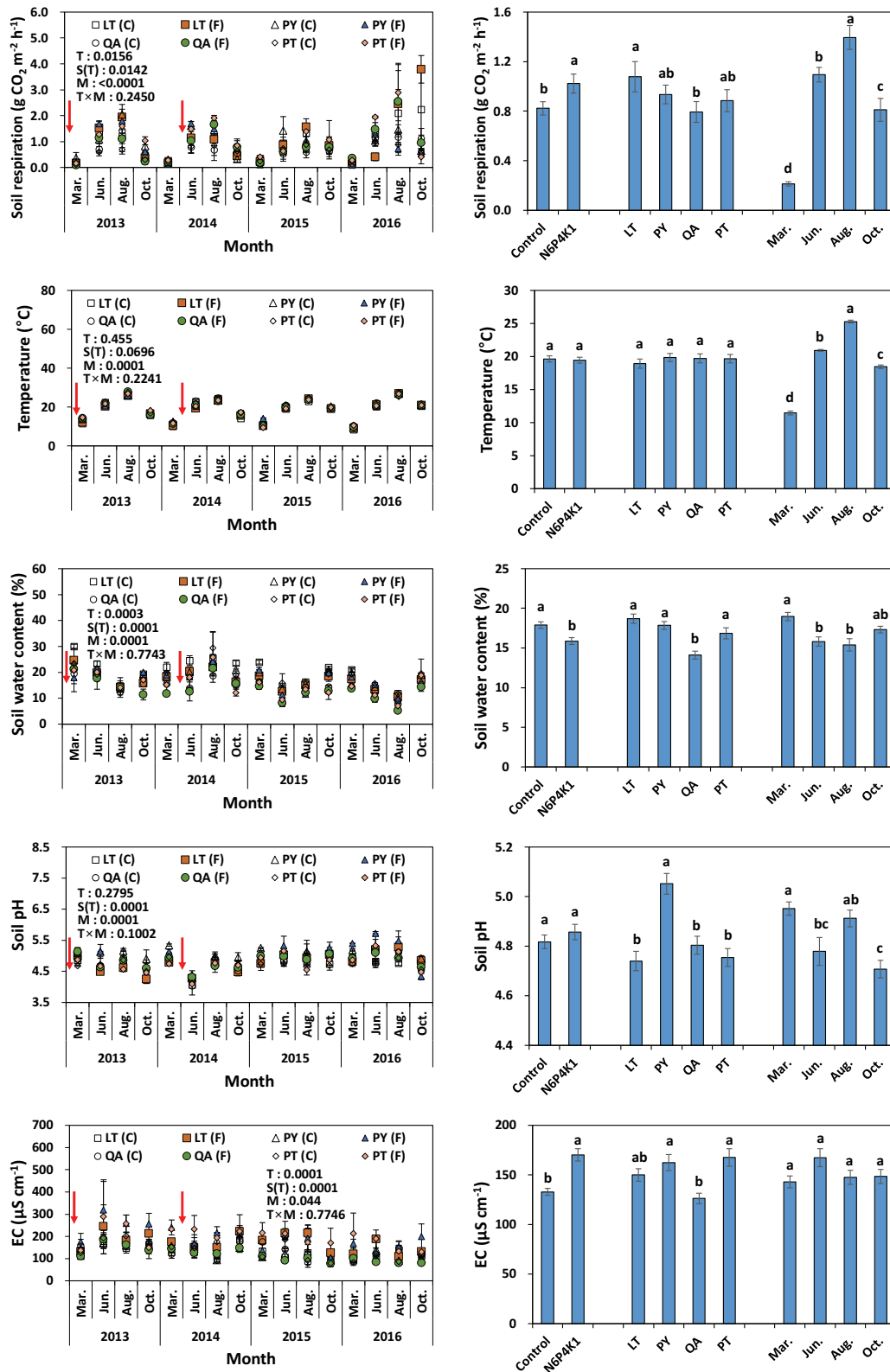


Figure 3. Soil respiration, soil temperature, soil water content, soil pH, and soil EC (mean±standard error) by treatment (C: control; F: fertilization), tree species (LT: *Liriodendron tulipifera*; PY: *Prunus yedoensis*; QA: *Quercus acutissima*; PT: *Pinus thunbergii*), and sampling months in a fire-disturbed urban forest. Red arrows indicate fertilization times. Treatment means with the same lower case letter among the fertilizer treatments, tree species, and sampling months are not significantly different at $P < 0.05$.

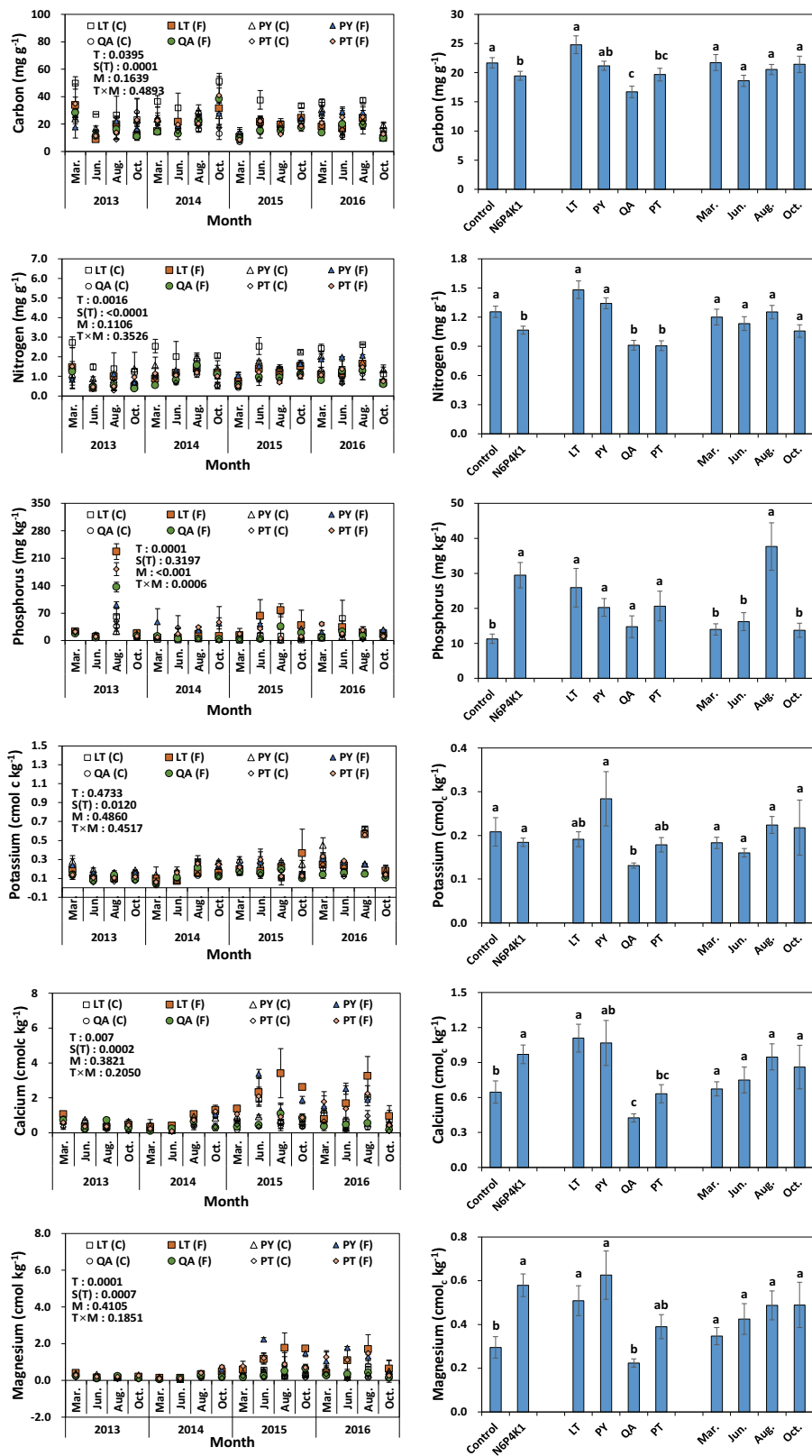


Figure 4. Soil nutrients (mean±standard error) by treatment (C: control; F: fertilization), tree species (LT: *Liriodendron tulipifera*; PY: *Prunus yedoensis*; QA: *Quercus acutissima*; PT: *Pinus thunbergii*), and sampling months in a fire-disturbed urban forest. Red arrows indicate fertilization times. Treatment means with the same lower case letter among the fertilizer treatments, tree species, and sampling months are not significantly different at $P < 0.05$.

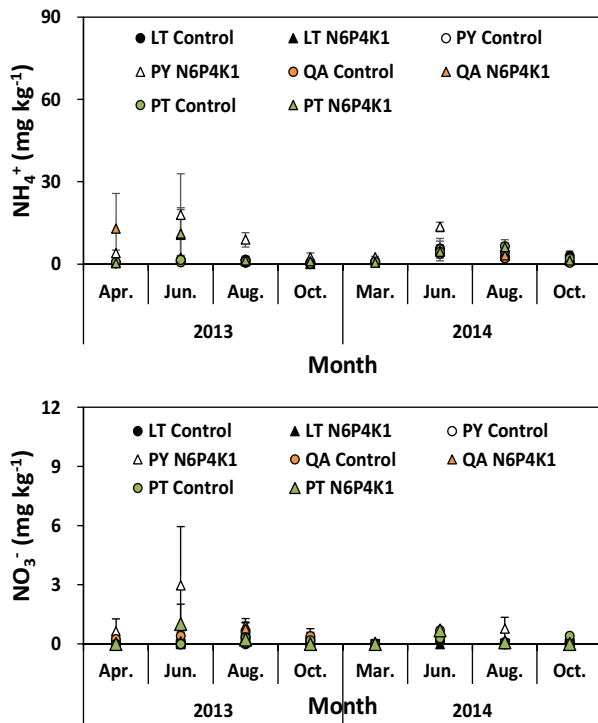


Figure 5. Extractable inorganic nitrogen (NH_4^+ ; NO_3^-) concentration (mean±standard error) by treatment (control; $\text{N}_6\text{P}_4\text{K}_1$), tree species (LT: *Liriodendron tulipifera*; PY: *Prunus yedoensis*; QA: *Quercus acutissima*; PT: *Pinus thunbergii*), and sampling months in a fire-disturbed urban forest.

고찰

1. 조림목의 생장 특성

산불발생지에 식재된 수목의 흉고직경 증가에 대한 회귀계수는 시비구와 대조구 사이에 유의성이 있어 시비효과가 있었다. 일반적으로 토양 양분 유효도는 수목의 생장을 제한하는 가장 중요한 환경 요인(Binkley and Fisher, 2020)으로, 시비구의 흉고직경 증가는 질소, 인산, 칼리질 비료성분의 투입에 따라 토양 양분유효도의 향상이 원인으로(Figure 3, Figure 5) 사료된다. 토양 양분유효도의 변화는 광합성에 관계되는 잎 면적과 잎 무게의 증가에 따른 수관의 광합성 능력 및 수목의 부위별 탄소 할당 패턴과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Hedwall et al., 2014). 흉고직경 증가와는 대조적으로 수고는 시비 처리에 따른 생장 증가 반응이 나타나지 않았다. 이는 본 조사에서의 시비수준이 수고생장 반응을 초래 할 정도로 충분하지 않았거나, 시비된 성분 외 타 영양 원소가 수고 생장을 제한할 가능성, 하층식생과의 광, 수분 및 양분 경쟁(Hedwall et al., 2014; Baek et al., 2023) 등과 같은 요인이 원인일 수 있다.

2. 토양 특성

토양 호흡은 시비구가 대조구에 비해 유의적으로 증가하였으며, 이는 시비에 따른 양분유효도 향상으로 지하부 미생물의 활성이나 뿌리 활력이 증진되어 토양 이산화탄소 방출량이 증가하였기 때문으로 사료된다(Baek and Kim, 2020). 수종별 토양호흡은 생장이 가장 왕성하고 흉고직경과 수고 등이 가장 크게 나타난 백합나무 조림지가 왕벚나무, 상수리나무, 곰솔 조림지에 비해 높은 값을 보였다. 토양수분함량은 시비구가 대조구에 비해 낮은 값을 보였으며, 이는 조림목의 생육이 왕성한 시비구가 증산 작용이 활발하고, 토양수분함량에 가장 크게 영향을 끼칠 수 있는 토양 유기탄소 농도가 시비구에서 낮게 나타났기 때문으로 사료된다.

토양 pH는 시비구와 대조구 사이에 차이가 없었으며, 이는 시비가 초기 2년만 실시되어 토양 pH 변화에 끼치는 시비효과가 크지 않았기 때문으로 사료된다. 그러나 토양 EC는 비료 성분에 포함된 염류성 이온의 증가로 인하여 시비구가 대조구에 비해 높은 값을 보였으며 타 연구에서도 시비처리 후 토양 EC의 증가가 보고된 바 있다(Theresa et al., 2020).

시비처리구의 토양 유기탄소 농도의 감소는 요소 같은 질소질 비료 시비 후 토양 내 C/N율이 낮아지고 그 결과 유기물의 분해가 촉진되었기 때문으로 사료된다. 또한 전질소와 토양 유기탄소 농도 사이는 양의 상관관계를 보이기 때문에 시비구의 전질소 농도의 감소는 토양 유기탄소 농도의 감소가 원인일 수 있다. 토양 내 유효 인의 증가는 용과린 같은 인산질 비료의 시비에 따른 결과로서, 인은 토양층에서 용탈보다는 잔류하는 특성을 보이는 것으로 알려져 있다(Weil and Brady, 2017). 교환성 칼륨 농도는 시비 처리의 영향이 뚜렷하지 않았으나 교환성 칼슘과 마그네슘 농도는 증가하는 경향을 보였다. 이는 인산질 비료인 용과린에 부산물로 포함된 석회(27%)나 고토 성분(2.5%)의 용출이 원인으로 사료된다.

시비구의 토양 내 NH_4^+ 증가는 요소 비료에서 방출되는 질소질 비료의 영향으로 사료되나 시비구와 무시비구 모두 토양 NO_3^- 농도는 거의 증가하지 않았다. 이는 본 조사구의 토양이 질산화작용이 발생하기에는 토양 NH_4^+ 농도가 낮고 낮은 pH는 질산화작용 세균의 생육에 부적합한 환경이 원인일 수 있다. 월별 NH_4^+ 와 NO_3^- 농도는 6월에 시비의 영향으로 증가하였으나 8월에는 농도가 감소하였으며, 이는 식재된 수목이나 하층식생의 흡수 또는 미생물에 의한 부동화 등이 복합적으로 발생하였기 때문으로 사료된다.

3. 잎 양분 반응

시비처리에 따른 잎의 탄소 농도는 대조구에 비해 낮은 값을 보인 것은 잎 내 질소나 인 등과 같은 양분 농도의

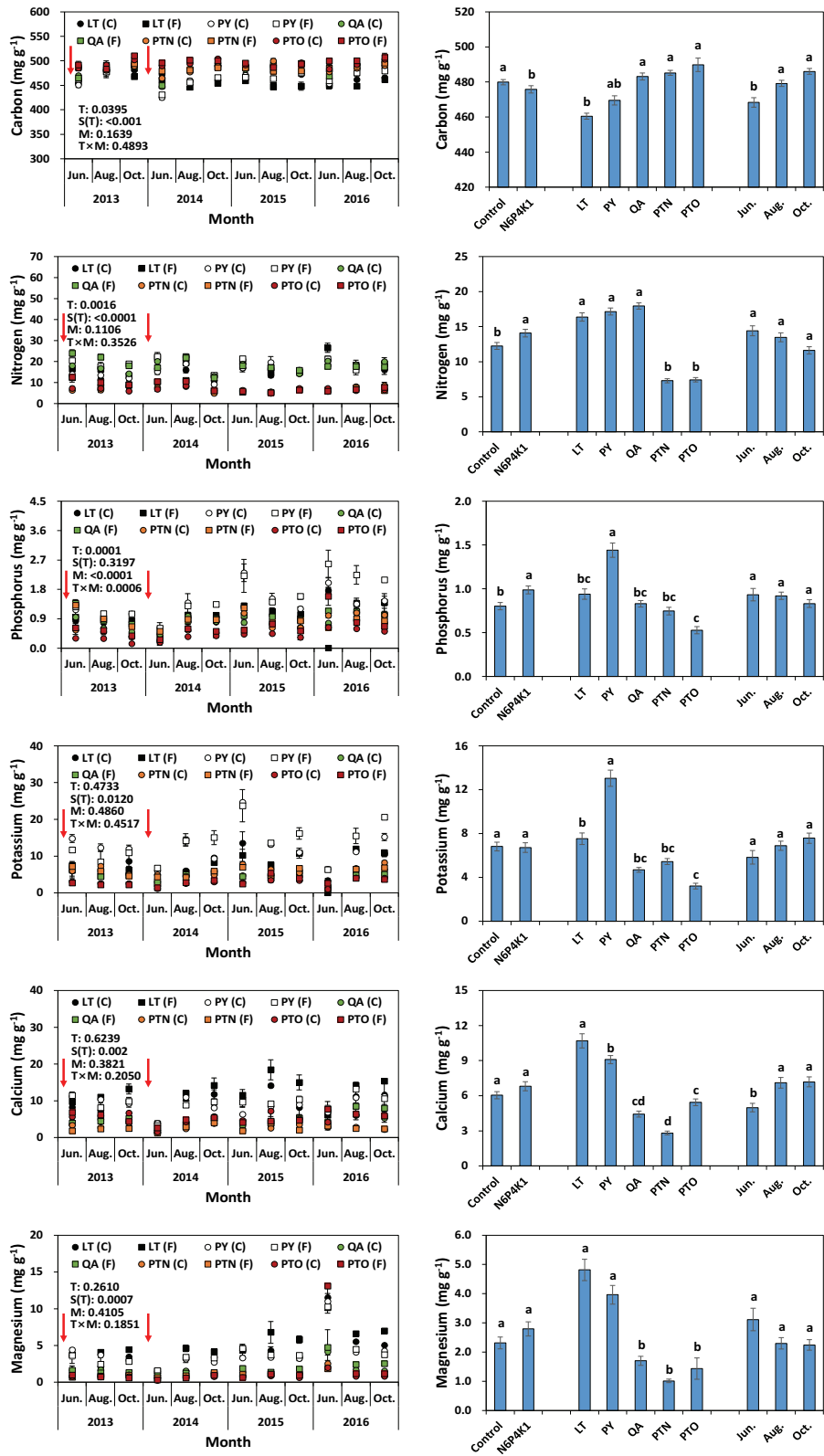


Figure 6. Nutrient concentrations (mean±standard error) of foliage by treatment (C: control; F: fertilization), tree species (LT: *Liriodendron tulipifera*; PY: *Prunus yedoensis*; QA: *Quercus acutissima*; PTN: New needle of *Pinus thunbergii*; PTO: Old needle of *Pinus thunbergii*), and sampling months in a fire-disturbed urban forest. Red arrows indicate fertilization times. Treatment means with the same lower case letter among the fertilizer treatments, tree species, and sampling months are not significantly different at $P < 0.05$.

증가에 따라 탄소 농도가 상대적으로 낮게 나타났기 때문으로 사료된다. 타 연구에서도 잎의 질소 농도와 탄소 농도는 부의 상관관계를 보이는 것으로 보고된 바 있다(Xing et al., 2021). 조림 수종별 잎의 탄소 농도는 백합나무가 왕벚나무, 상수리나무, 곰솔에 비해 낮게 나타나 수종 간 변이가 나타난다는 타 연구 결과와 유사하였다(Thomas and Martin, 2012). 계절별 잎의 탄소 농도는 낙엽 발생 시기인 10월이 6월~7월의 생육기에 비해 높은 경향을 보였으며 이는 양분 재흡수에 따라 잎의 양분 농도의 감소로 인한 상대적인 탄소 농도 증가가 원인으로 제시된 바 있다(Park et al., 2019).

도시 숲의 침엽수와 활엽수 적정 잎 양분 농도는 질소 10~60 mg g⁻¹, 인 2~5 mg g⁻¹, 칼륨 10~40 mg g⁻¹, 칼슘 5.5~15 mg g⁻¹, 마그네슘 2~4 mg g⁻¹로 알려져 있으며(Brunetti and Fini, 2017), 본 조사구의 대조구에 식재된 수목의 잎 양분 농도는 임목 생육을 제한하는 수준에 근접하였다. 이는 도시지역 산불피해지는 유기물층의 소실과 함께 표토의 침식이나 유실이 발생하여 토양으로부터 양분 공급이 충분하지 않아 수목의 생장이 제한되고 있음을 시사한다.

잎의 질소 농도는 시비 후 토양 내 무기태 질소 농도의 증가(Figure 5)와 함께 질소 흡수의 증가가 원인으로 알려져 있다(Kim et al., 2015, Brunetti and Fini, 2017). 수종별 질소 농도는 낙엽활엽수인 백합나무, 왕벚나무, 상수리나무는 유의적인 차이가 없었으나, 침엽수인 곰솔은 낙엽활엽수에 비해 낮았다. 잎의 질소 농도는 10월이 생육기인 6월이나 8월에 비해 낮게 나타나 낙엽 발생 전 양분의 재전류가 발생한 것으로 사료된다.

잎의 인 농도는 시비구에서 증가하여 도시 숲 산불피해지의 조림수목은 토양 내 유효 인이 부족한 지역에서 생육하고 있음을 시사한다. 수종별로는 왕벚나무의 인 농도가 가장 높아 인 요구량이 가장 큰 수종으로 나타났다. 잎의 칼륨 농도는 시비구와 무시비구 사이에 차이가 없었으며, 이는 잎 내 칼륨이온은 강우 시 용탈이 쉽게 발생하여 칼리질 성분의 시비 영향이 크지 않기 때문으로 알려져 있다(Kim et al., 2017). 잎의 칼륨 농도는 왕벚나무가 크고, 백합나무, 상수리나무, 곰솔 순이었다. 한편, 시비구의 토양 내 교환성 칼슘이나 마그네슘은 대조구에 비해 유의적으로 높았으나, 잎 내 칼슘과 마그네슘 농도에 유의적인 차이가 없는 것은 조림목이 아직 유령림 단계로서 토양에서 이들 양분이 충분하게 공급되고 있기 때문으로 사료된다.

결론

도시 숲 산불피해지의 식생복원을 위한 조림목에 시비

처리는 백합나무, 왕벚나무, 상수리나무, 곰솔의 흉고직경 생장 증가에 효과가 있었다. 조사한 4 수종의 흉고직경 생장 증가는 왕벚나무, 백합나무, 상수리나무, 곰솔 순으로 왕벚나무와 백합나무는 흉고직경이 크고 빠른 생장 특성을 보여 산불피해지의 조속한 식생 복원에 효과적인 수종으로 나타났다. 토양 특성 중 유효 인, 교환성 칼슘과 마그네슘 등은 시비구가 대조구에 비해 증가한 반면, 토양 유기탄소나 전질소 함량은 감소하여 토양 양분별 시비 반응에 차이가 있었다. 조림된 수목의 잎 내 질소나 인 농도는 시비구에서 증가하였으며 백합나무와 왕벚나무는 상수리나무와 곰솔에 비해 높은 양분 농도를 보이고 있어 산불피해지 식생 복원을 위한 시비 계획 수립 시 수종별 양분 요구량의 차이를 고려해야 하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산림청 산림과학기술개발 사업(S211212L030320)과 한국연구재단(2020R1A2C1005791)의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 실험을 도와주신 경상국립대학교 산림토양연구실 학생들에게 감사함을 전합니다.

References

- Agbeshie, A.A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., Awuah, R. 2022. A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research* 33: 1419-1441.
- Baek, G. and Kim, C. 2020. Soil CO₂ efflux dynamics in response to fertilization in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(3): 272-280.
- Baek, G., Lim, H., Noh, N.J. and Kim, C. 2023. No impact of nitrogen fertilization on carbon sequestration in a temperate *Pinus densiflora* forest. *Scientific Report* 13: 1743.
- Binkley, D. and Fisher, R. 2020. *Ecology and Management of Forest Soils*. 5th ed., Wiley-Blackwell, USA, pp. 440.
- Brunetti, C. and Fini, A. 2017. Fertilization in Urban Landscape. *Routledge Handbook of Urban Forestry*. pp. 434-448.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143: 1-10.
- Hedwall, P., Gong, P., Ingerslev, M. and Bergh, J. 2014. Fertilization in northern forests – biological, economic and environmental constraints and possibilities. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(4): 301-311.
- Heneghan, L., Miller, S.P., Baer, S., Callahan, Jr M.S.,

- Montgomery, J., Pavao-Zuckerman, M., Rhoades, C.C. and Richardson, S. 2008. Integrating soil ecological knowledge into restoration management. *Restoration Ecology* 16(4): 608-617.
- Kalra, Y.P. and Maynard, D.G. 1991. *Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis*. For. Can., Northwest Reg. North. For. Cent., Edmonton, Alberta, Information Report NOR-X-319. pp. 116.
- Kim, C., Jeong, J., Park, J.H. and Ma, H.S. 2015. Growth and nutrient status of foliage as affected by tree species and fertilization in a fire-disturbed urban forest. *Forests* 6(6): 2199-2213.
- Kim, C., Jo, C.G., Baek, G., Park, S.W., Cho, H.S. and Ma, H.S. 2016. Soil physicochemical properties of tree plantations in a fire-disturbed forest and an undisturbed stands in Ulsan Metropolitan city. *Journal of Korean Forest Society* 105(2): 167-176.
- Kim, C., Baek, G., Park, S.W. and Kim, S. 2017. Inorganic nitrogen dynamics of throughfall following fertilization in a red pine stand. *Forest Science of Technology* 13(4): 187-191.
- Kim, Y.S., Byun, J.K., Kim, C., Park, B.B., Kim, Y.K. and Bae, S.W. 2014. Growth response of *Pinus densiflora* seedlings to different fertilizer compound ratios in a recently burned area in the eastern coast of Korea. *Landscape and Ecological Engineering* 10: 241-247.
- McPhearson, P.T., Feller, M., Felson, A., Karty, R., Lu, J.W.T., Palmer, M.I. and Wenskus, T. 2010. Assessing the effects of the urban forest restoration effort of million trees NYC on the structure and functioning of New York city ecosystems. *Cities and the Environment* 3: 1-21.
- National Institute of Forest Science. 2010. Establishment of Restoration Strategy by Landscape Ecological Techniques in Forest Fire Area. Research Report 10-30. pp. 99.
- Oldfield, E.E., Felson, A.J., Wood, S.A., Hallett, R.A., Strickland, M.S. and Bradford, M.A. 2014. Positive effects of afforestation efforts on the health of urban soils. *Forest Ecology and Management* 313: 266-273.
- Park, S.W., Baek, G., Kim, S., Yang, A.R., Kim, C. 2019. Carbon and nitrogen responses of litterfall components by NPK and PK fertilizers in red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stand. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(1): 21-28.
- Pavao-Zuckerman, M.A. 2008. The nature of urban soils and their role in ecological restoration in cities. *Restoration Ecology* 16: 642-649.
- SAS. 2003. *SAS/STAT User's Guide; Version 9.1*. SAS Institute, Cary, NC. pp. 5136.
- Theresa, T., Shanmugasundaram, R. and Kennedy, J.S. 2020. Effect of varied levels NPK fertilizers on soil reaction and electrical conductivity. *International Journal of Chemical Studies* 8(1): 2632-2636.
- Thom, D. and Seidl, R. 2015. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews* 91(3): 760-781.
- Thomas, S.C. and Martin, A.R. 2012. Carbon content of tree tissues: A synthesis. *Forests* 3(2): 332-352.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J. and Sun, Z. 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forest and Urban Greening* 3(2): 65-78.
- Weil, R.R. and Brady, N.C. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson. pp. 1104.
- Won, H.K., Lee, Y.Y., Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H., Lee, S.W., Jeong, Y.H., Kim, C. and Kim, H. 2006. Fertilization effects on soil properties, understory vegetation structure and growth of *Pinus densiflora* seedlings planted after forest fire. *Journal of Korean Forest Society* 95(3): 334-341.
- Xing, K., Zhao, M., Niinemets, U, Niu, S. Tian, J., Jing, Y., Chen, H.Y., White, P.J., Guo, D. and Ma, Z. 2021. Relationships between leaf carbon and macronutrients across woody species and forest ecosystems highlight how carbon is allocated to leaf structural function. *Frontiers in Plant Science* 12: 674932.

Manuscript Received : February 1, 2024

First Revision : March 2, 2024

Accepted : March 4, 2024