

한반도 중부지역 조림지 소나무와 곰솔의 장기적 낙엽 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 동태변화

이일환, 조수언¹, 이영상, 원호연*

국립생태원 기후생태연구실 장기생태연구팀, ¹수원시 상수도사업소

The long-term decay rate and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii*

Il-hwan Lee, Soo-un Jo¹, Young-sang Lee and Ho-yeon Won*

National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

¹Suwon-city Water Works Office, Suwon 16290, Republic of Korea

*Corresponding author

Ho-yeon Won

Tel. 041-950-6119

E-mail. hywon@nie.re.kr

Received: 12 August 2021

First Revised: 7 September 2021

Second Revised: 8 September 2021

Third Revised: 14 September 2021

Revision accepted: 14 September 2021

Abstract: In the present study, we analyzed the decay rate and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii* in Gongju for 60 months, from 2014 to 2019. *P. thunbergii* leaf litter decomposed faster than that of *P. densiflora*. The decay constant of *P. densiflora* and *P. thunbergii* leaf litter after 60 months was 3.02 and 3.59, respectively. The initial C/N ratio of *P. densiflora* and *P. thunbergii* leaf litter were 14.4 and 14.5, respectively. After 60 months, C/N ratio of decomposing *P. densiflora* and *P. thunbergii* leaf litter decreased to 2.26 and 3.0, respectively. The initial C/P ratio of *P. densiflora* and *P. thunbergii* leaf litter were 144.1 and 111.3. After 60 months elapsed, the C/P ratio of decomposing *P. densiflora* and *P. thunbergii* leaf litter decreased to 40.1 and 45.8, respectively. After 60 months, the percentage of the remaining N, P, K, Ca, and Mg in decomposing *P. densiflora* leaf litter was 231.08, 130.13, 35.68, 48.58, and 36.03%, respectively. After 60 months, the percentage of the remaining N, P, K, Ca, and Mg in decomposing *P. thunbergii* leaf litter was 143.91, 74.02, 28.59, 45.08, and 44.99%, respectively. The findings of the present study provide an insight into the forest ecosystem function of coniferous forests through the analysis of the amount of nutrient transfer into the soil through a long-term decomposition process; this information is intended to be used as basic data for preparing counter measures for future climate and ecosystem changes.

Keywords: C/N ratio, C/P ratio decay constant, long term ecological research, remaining weight

서 론

산림토양은 식물생장을 위한 영양염류와 물 그리고

물리적인 지지작용을 하는 기질을 제공한다 (Kimmins 1987). 토양의 영양염류는 1차적으로 토양 광물질의 풍화에서 비롯되지만 성숙한 산림생태계의 유지에는 낙엽 분

해를 통해 방출되는 영양염류가 중요하다(Daubenmire 1974). 특히 낙엽의 분해는 광합성으로 고정된 CO₂ 반환의 주요 경로가 되며 탄소 순환의 통로로서 토양 규모와 토양 비옥도 및 영양 상호 작용을 결정하는 지역 규모에서 더 큰 규모로 생태계 기능에 영향을 미친다(Prescott 2010; Cotrufo *et al.* 2013).

식물은 광합성을 통해 유기물을 생산하고 이 중 일부가 낙엽을 통해 임상에 떨어지며, 이것은 토양유기물의 공급원이 되고 있다. 따라서 생태계 유형에 따른 낙엽의 생산량과 분해율은 생태계의 기능을 이해하는 데 매우 중요한 요인이 되고 있다. 낙엽의 유기 화학적 조성은 낙엽의 분해 속도에 큰 영향을 미치며, 낙엽의 분해속도는 온도, 강수량, 미생물의 활동 등에 의해서도 영향을 받는다(Swift *et al.* 1979).

국내외에서 침엽수종의 낙엽분해에 관한 연구는 중국과 일본을 중심으로 다수 이루어졌으나(Hisabae *et al.* 2011; Ono *et al.* 2011; Wang *et al.* 2015), 동일 속에 속하는 종의 한지역에서 이루어지는 장기적 분해율에 관한 연구는 많지 않은 실정므로, 종 간의 낙엽 분해율 비교를 통해 국내 주요 수종인 소나무속의 산림생태계 기능을 밝히는 데 기초자료를 제공하고자 한다. 따라서 본 연구는 한반도의 중부지역인 공주시에 조림된 리기다소나무 조림지에서 국내에 자생하는 대표적인 침엽수종인 소나무와 해안지역 방풍림으로 주로 조림되는 곰솔을 대상으로 영양염류의 양과 낙엽의 분해량을 조사하여 낙엽의 분해과정에 따른 산림생태계 영양염류의 순환 기작 파악을 위한 기초자료를 마련하기 위해, 공주시 신관동 호태산의 리기다소나무 조림지에 소나무와 곰솔 낙엽주머니를 설치하고 2014년 12월부터 2016년 12월까지 3개월 간격, 2017년 6월부터 2019년 12월까지 6개월 간격으로 낙엽주머니를 수거하여 낙엽의 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류의 동태를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 충청남도 공주시 신관동에 위치한 호태산의 해발 약 110 m (N 36°28'3", E 127°8'53")인 북사면에서 실시되었으며, 두 수종의 낙엽 분해율에 조사지의 수종이 가

능한 영향을 미치지 않게 하기 위해 소나무와 곰솔군락을 제외한 *Pinus* 속 군락에서 수행되었다. 조사지의 교목층은 리기다소나무(*Pinus rigida*)가 우점하는 가운데, 관목층에는 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium*)와 굴참나무(*Quercus variabilis*) 등이 낮은 빈도로 분포하였으며, 초본층은 빈약하였다.

조사지소로부터 약 30 km 떨어진 부여 측후소의 자료에 따르면 조사지역의 30년간(1981~2010년) 연평균기온은 12.8°C, 연강수량은 1349.2 mm이었으며, 조사기간(2015~2019년) 동안 연평균기온은 13.3°C, 연강수량은 1106.8 mm이었다.

2. 낙엽주머니 제작 및 설치

낙엽주머니 제작에 사용된 잎은 2014년 12월에 태안의 곰솔군락과 보은의 소나무군락에서 갓 떨어진 신선한 낙엽을 수거하였고, 수거한 잎은 60°C 건조기에서 더 이상 건조하여도 무게가 감소하지 않을 때까지 건조 시킨 후 사용하였다. 낙엽주머니는 mesh size가 2 mm인 나일론 그물을 사용하여 20×25 cm의 크기로 만들어 약 5 g 정도의 낙엽을 넣은 뒤 각각의 주머니에 고유번호와 정확한 낙엽 무게가 기록되어 있는 aluminum tag를 함께 넣은 후 유출되지 않도록 잘 봉합하였다.

제작된 120개의 낙엽주머니는 2014년 12월에 조사지소의 임상에 서로 겹치지 않고 낙엽주머니가 훼손되거나 유실되지 않도록 지면에 못과 끈을 이용하여 고정시켜 놓았다.

3. 낙엽주머니 수거 및 처리

낙엽주머니의 회수는 설치한 뒤 3개월 이후인 2015년 3월부터 3개월 간격으로, 2년 경과 후에는 6개월 간격으로 2019년 12월까지 매번 3개씩 회수하였다. 회수해 온 낙엽주머니에 묻은 흙과 뿌리 등과 같은 이물질 제거 후, 주머니 안의 낙엽을 60°C 건조기에서 더 이상 건조하여도 무게가 감소하지 않을 때까지 건조시킨 후 무게를 잰 샘플은 곱게 갈아 유기탄소 및 영양염류 분석에 사용하였다. 낙엽의 잔존율은 회수 시에 남아있는 잔존량을 초기 무게에 대한 백분율(%)로 표시하였으며, 분해상수(k)는 Olson(1963)의 공식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Mass remaining (\%)} = Mt/M_0 \times 100$$

$$\text{Mass loss (\%)} = 100 - \text{mass remaining (g)}$$

M_t : dry weight at time t

M_0 : initial dry weight ($t=0$)

Olson (1963)의 낙엽 분해식 $Kt = -\ln(M_t/M_0)$

분해율의 차이는 SPSS (SPSS 25, IBM, U.S.A)의 독립표본 t -검정 (two-independent t -test) 통계적 유의성을 검증하였고, 유의수준은 5% 미만이었다 ($p < 0.05$).

4. 낙엽의 영양염류 분석

낙엽의 유기탄소, 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘을 분석하였으며, 화학적 분석은 샘플마다 3반복으로 실시하였다. 유기탄소 함량은 combustion method (Black *et al.* 1965)를 사용하여 측정하였으며, 전질소와 인은 샘플이 들어 있는 Kjeldahl flask에 분해촉진제와 진한 황산을 넣어 390°C block digester에서 120분간 분해시킨 후 상온에서 식힌 다음 증류수를 이용하여 50 mL로 정용한 후 상등액을 자동 분석기 (Quick Chem 8000, Lachat, U.S.A)로 분석하였다. C의 값을 N 그리고 P의 값으로 나누어 각각 C/N비, C/P비를 계산하였다. 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 샘플을 습식분해한 후 유도결합 플라즈마 질량분석기 (ICP-MS, Thermo Fisher, U.S.A)로 분석하였다.

낙엽의 분해과정에 따른 각 영양염류의 잔존율을 다음 식에 따라 계산하였다 (Alhamd *et al.* 2004). 즉, 각 분해단계에 있는 낙엽의 단위 무게당 영양염류 함량에 낙엽의 잔존량을 곱한 값을 각 영양염류의 초기 함량에 대한 백분율 (%)로 나타내었으며, 초기 함량보다 높을 때를 영양염류의 부동화 (immobilization) 기간, 낮을 때를 영양염류의 무기화 (mineralization) 기간으로 간주하였다 (Mun and Pyo 1994). 낙엽의 영양염류 잔존율의 차이는 SPSS (SPSS 25, IBM, U.S.A)의 독립표본 t -검정 (two-independent t -test) 통계적 유의성을 검증하였고, 유의수준은 5% 미만이었다 ($p < 0.05$).

$$\text{잔존율 (\%)} = (L_t C_t / L_0 C_0 \times 100)$$

여기서, L_t = t 시간 경과된 낙엽주머니에 남아있는 건중량

L_0 = 낙엽주머니의 처음 낙엽무게

C_t = t 시간 경과된 낙엽주머니의 영양염류 함량

C_0 = 낙엽의 처음 영양염류 함량

결과 및 고찰

1. 분해율과 분해상수

소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 분해에 따른 무게 잔존율을 Fig. 1에 정리하였다. 두 종 모두 무게가 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 소나무 낙엽의 무게 잔존율은 24개월 경과 후 66.9%이었으며, 60개월 경과 후에는 42.1%로 나타났고, 곰솔 낙엽의 무게 잔존율은 24개월 경과 후 56.2%, 60개월 경과 후에는 35.8%로 곰솔 낙엽의 분해가 소나무 낙엽보다 빠르게 진행되었다 (Fig. 1). 낙엽 분해율의 차이는 주로 낙엽의 영양염류 함량의 차이에서 기인하는 것으로 보고되어 있는데 (Swift *et al.* 1979; Mun and Joo 1994), 본 연구에서 두 수종 낙엽분해율의 차이는, 질소와 인의 함량 및 이에 따른 C/N, C/P비의 차이에서 기인하는 것으로 판단되며, 세부적인 차이의 파악을 위해서는 낙엽 분해 초기에 영향을 주는 요인인 lignin 등의 분석이 필요할 것으로 판단된다.

두 종류의 낙엽 모두 조사 시작 6개월 이후부터 9개월 까지 급격하게 무게가 감소하는 경향을 보이는데, 이 결과는 7~8월 중에 분해가 많이 이루어진다는 Kim and Chang (1989)의 결과와 유사하였다. 분해가 하절기에 집중되는 것은 기온이 상승하고 강수량이 많아 분해자의 활성이 왕성하며, 습한 하절기에 더 많은 수용성 물질이 용해되는

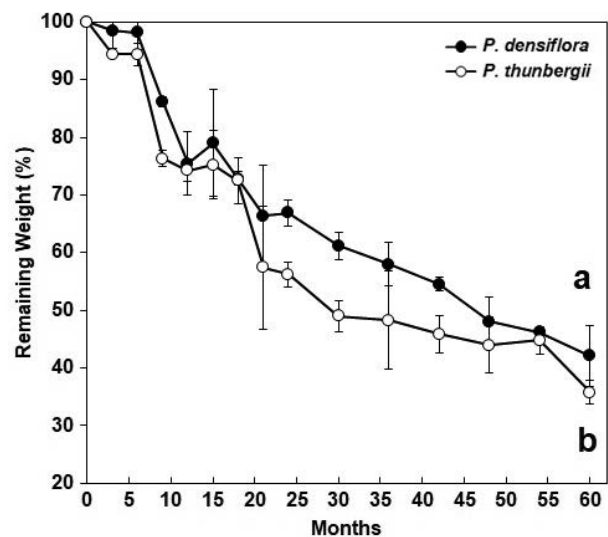


Fig 1. Remaining weight (%) in the decomposing leaf litter of *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii*. Bars indicate standard errors ($n=3$).

데 기인하는 것으로 알려져 있다(Millar 1974; Swift *et al.* 1979; Mun 2009).

소나무 낙엽의 분해에 따른 분해상수(k)는 24, 48, 60개월째에 각각 0.80, 2.20, 3.02이었으며, 곰솔낙엽의 분해상수(k)는 각각 1.15, 2.46, 3.59로 소나무 낙엽에 비해 다소 높게 나타났다.

소나무와 곰솔의 낙엽 분해과정은 대부분 유사한 경향을 보였다. 이는 소나무 속의 낙엽 초기 구성물질 및 영양염류의 함량에서 기인하는 것으로 판단되며, 세부적인 차이의 원인 파악을 위해서는 보다 정밀한 낙엽의 구성요소 및 리그닌의 분석이 필요한 것으로 판단된다. 국내에서는 조림수종의 낙엽분해에 대한 연구가 일부 수행되었으나(Won *et al.* 2018), 자연수종과 조림수종 간의 비교에 관한 연구는 많지 않은 실정이다. 국내 중부지방 주요 구성수종인 소나무와 방풍림으로 주로 활용되는 곰솔의 장기적인 분해과정을 통한 국내 침엽수림의 산림생태계 기능을 파악하여, 향후 기후변화 및 생태계 변화에 따른 대응방안을 마련하는 데 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 분해과정에 따른 C/N, C/P 비의 변화

분해과정에 따른 낙엽의 C와 N 그리고 P의 함량은 분해자의 성장과 증식에 필요한 에너지원과 질소원으로 이들을 이용하기 때문에 낙엽분해에 매우 중요하다. 충분한 질소가 없으면 분해에 참여하는 미생물 개체군이 적어 분해속도가 느려진다(Seereeram and Labender 2003). 소나무와 곰솔 낙엽의 초기 탄소 함량은 각각 44.3%, 43.6%로 소나무 낙엽이 높았으며, 이것은 분해가 진행됨에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 60개월 경과 후 소나무와 곰솔 낙엽의 탄소 함량은 각각 38.1%, 37.1%로 곰솔 낙엽에서 낮았다(Fig. 2A). 소나무와 곰솔 낙엽의 초기 질소 함량은 각각 3.08, 3.02 mg g^{-1} 로 비슷한 값을 보였다. 또한 소나무와 곰솔 낙엽의 초기 인 함량은 각각 0.31, 0.39 mg g^{-1} 로 질소와 마찬가지로 두 수종이 비슷한 값을 보였다.

소나무와 곰솔 낙엽의 초기 C/N비는 각각 14.4, 14.5로 비슷한 값을 보였다. 이것은 소나무와 곰솔 낙엽의 초기 탄소 함량과 질소 함량이 유사하기 때문으로 판단되며, 분해가 진행되는 동안 소나무 낙엽의 C/N비는 감소하여 60개월 경과 후 그 값이 22.6이었다. 이와 마찬가지로 곰솔 낙엽의 C/N비도 분해가 진행됨에 따라 감소하여 60개월 경과 후 그 값이 30.6이었다(Fig. 2B).

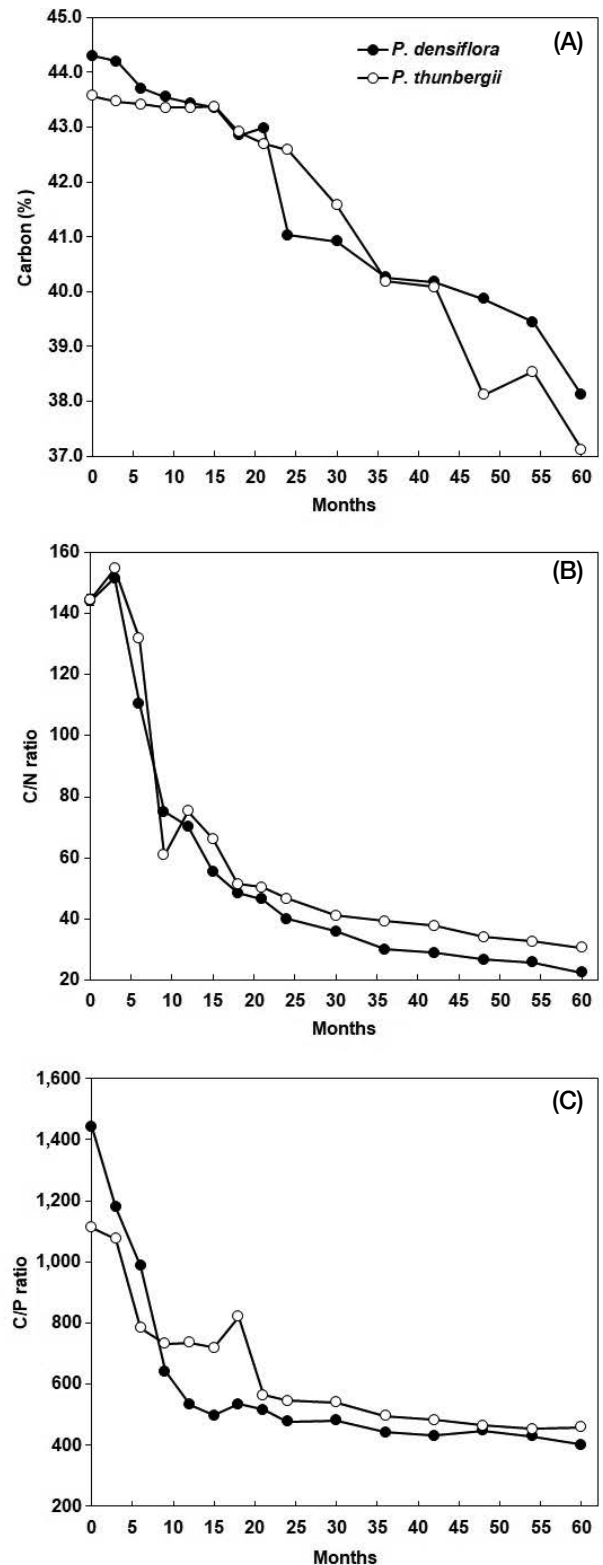


Fig. 2. Changes of carbon % (A), C/N ratio (B), and C/P ratio (C) in the decomposing leaf litter of the *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii*.

낙엽의 분해과정에 따른 C/P비의 양상은 C/N비와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 일반적으로 C/P비는 200~480의 범위를 갖는다고 보고되어 있다(Gozs *et al.* 1973). 그러나 본 연구에서 소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 초기 C/P비는 각각 1440.6, 1112.6으로, 일반적인 범위와 비교하여 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 인 함량이 낮기 때문으로 판단되며, 분해과정에 따른 인의 동태는 종에 따라 매우 다양하다고 보고되어 있다(Gozs *et al.* 1973; Schlesinger 1985; Baker *et al.* 2001). 분해가 진행되는 동안 소나무 낙엽의 C/P비는 점차 감소하여 60개월 경과 후 401.3이었다. 이와 마찬가지로 곰솔 낙엽의 C/P비도 분해가 진행됨에 따라 감소하여 60개월 경과 후 그 값이 458.3이었다(Fig. 2C).

낙엽분해에 영향을 주는 화학성분 중 중요한 것은 lignin, 질소 그리고 인이다. 본 연구에서 낙엽의 구성물질인 질소와 인의 함량 및 분해과정에 따른 변화양상이 유사하여, 두 수종 낙엽의 분해가 유사하게 이루어지는 것으로 나타났다. 낙엽의 분해과정에 따른 탄소 함량, C/N비, C/P 분석을 통해, 침엽수림의 낙엽분해를 통해 토양으로 이입되는 영양염류의 양을 파악하여, 기후변화에 따른 산림 토양의 탄소 축적량 분석에 활용하고자 한다.

3. 분해과정에 따른 영양염류 함량 및 잔존율의 변화

소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 분해과정에 따른 영양염류 함량의 변화를 Fig. 3에 정리하였다. 소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 초기 질소 함량은 각각 3.08, 3.02 mg g⁻¹로 두 수종에서 비슷한 값으로 나타났다. 낙엽의 분해가 진행되면서 두 종 낙엽의 질소 함량은 증가하는 것으로 나타났다. 소나무 낙엽의 경우 분해기간 동안 질소 함량이 계속 증가하여 60개월 경과 후 16.87 mg g⁻¹으로, 초기 함량에 비해 5배 이상 증가하였으며, 곰솔 낙엽의 경우 분해 9개월 후 7.12 mg g⁻¹로 증가하다가, 12개월 후에는 5.76 mg g⁻¹로 감소한 뒤 지속적으로 증가하여 60개월 경과 후에는 12.13 mg g⁻¹로 초기 함량에 비해 4배 이상 증가하였다(Fig. 3A). 분해 중인 낙엽의 질소 함량 증가는 일반적인 현상인데(Berg and staaf 1981; Mellilo *et al.* 1982; Kim *et al.* 2003; Xu *et al.* 2004), 주 원인은 분해 미생물의 증가와 이들에 의한 질소고정, 강우, 먼지, 곤충의 배설물 등이 첨가되기 때문인 것으로 판단된다(Bocock 1964). Mun (2009), Won *et al.*

(2014)이 보고한 소나무 낙엽의 분해에서도 분해과정에 따라 질소 함량이 증가하는 것으로 보고되었다.

분해과정에 따른 질소의 잔존율은 소나무 낙엽의 경우 분해 초기 3개월 동안 무기화가 일어났으나 6개월 경과 후부터는 부동화가 일어났다. 소나무 낙엽의 질소 잔존율은 60개월 경과 후 231.08%로 나타났다. 곰솔 낙엽의 분해과정에 따른 질소의 잔존율은 소나무의 잔존율과 매우 유사한 경향을 나타내어, 분해 초기 3개월 동안 무기화가 진행되었으며, 6개월 경과 후부터는 부동화가 지속되었다. 곰솔 낙엽의 60개월 경과 후 질소의 잔존율은 143.91%로 나타났다(Fig. 3F).

소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 분해과정에 따른 인의 함량 변화는 질소의 경우와 유사하였다. 분해과정에 따른 인 함량의 증가도 일반적으로 보고되는 현상이다(Fahey 1983). 소나무 낙엽의 초기 인 함량은 0.31 mg g⁻¹이었으나 분해 15개월이 경과한 후에는 0.87 mg g⁻¹로 3배 가까이 증가하였고 60개월 경과 후에는 0.95 mg g⁻¹로 소폭 증가하는 경향을 보였다. 곰솔 낙엽의 초기 인 함량은 0.39 mg g⁻¹로 소나무 낙엽과 비슷한 값을 보였다. 분해과정에 따른 인의 함량변화는 분해 15개월 경과 후 0.60 mg g⁻¹까지 서서히 증가하였고, 18개월 경과 후에 0.52 mg g⁻¹로 일시적인 감소 후 분해 60개월 경과까지 지속적으로 증가하여 0.81 mg g⁻¹로 나타났다(Fig. 3B).

낙엽의 분해과정에 따른 인의 동태는 낙엽의 종류에 따라 매우 다양하다고 보고되고 있다(Baker *et al.* 2001). Klemmenson *et al.* (1985)은 분해 중인 소나무 낙엽의 인 함량이 시간이 지남에 따라 감소한다고 보고하였는데, 본 조사에서 소나무 낙엽의 경우에는 이와 상이한 결과를 보였다. Lee *et al.* (2006)은 졸참나무 낙엽에서, Nangung *et al.* (2008)은 굴참나무 낙엽과 소나무 낙엽에서, 그리고 Mun (2009)은 신갈나무 낙엽에서 분해과정에 따른 인 함량의 변화를 조사하였다. 그 결과 분해가 진행됨에 따라 그 값이 증가하는 것으로 보고한 바 있는데, 이는 본 조사의 결과와 유사한 경향이였다.

분해과정에 따른 소나무 낙엽의 인 잔존율은 21개월 경과 후까지 부동화가 일어났으나 15개월경과 이후부터는 잔존율이 점차 감소하는 것으로 보아 점차 무기화가 일어날 것으로 예측되었다. 곰솔 낙엽의 인 잔존율은 분해 초기 3개월까지 무기화가 일어난 후 24개월 경과 후까지 부동화가 일어난 후 30개월 이후부터 지속적인 무기화가 나

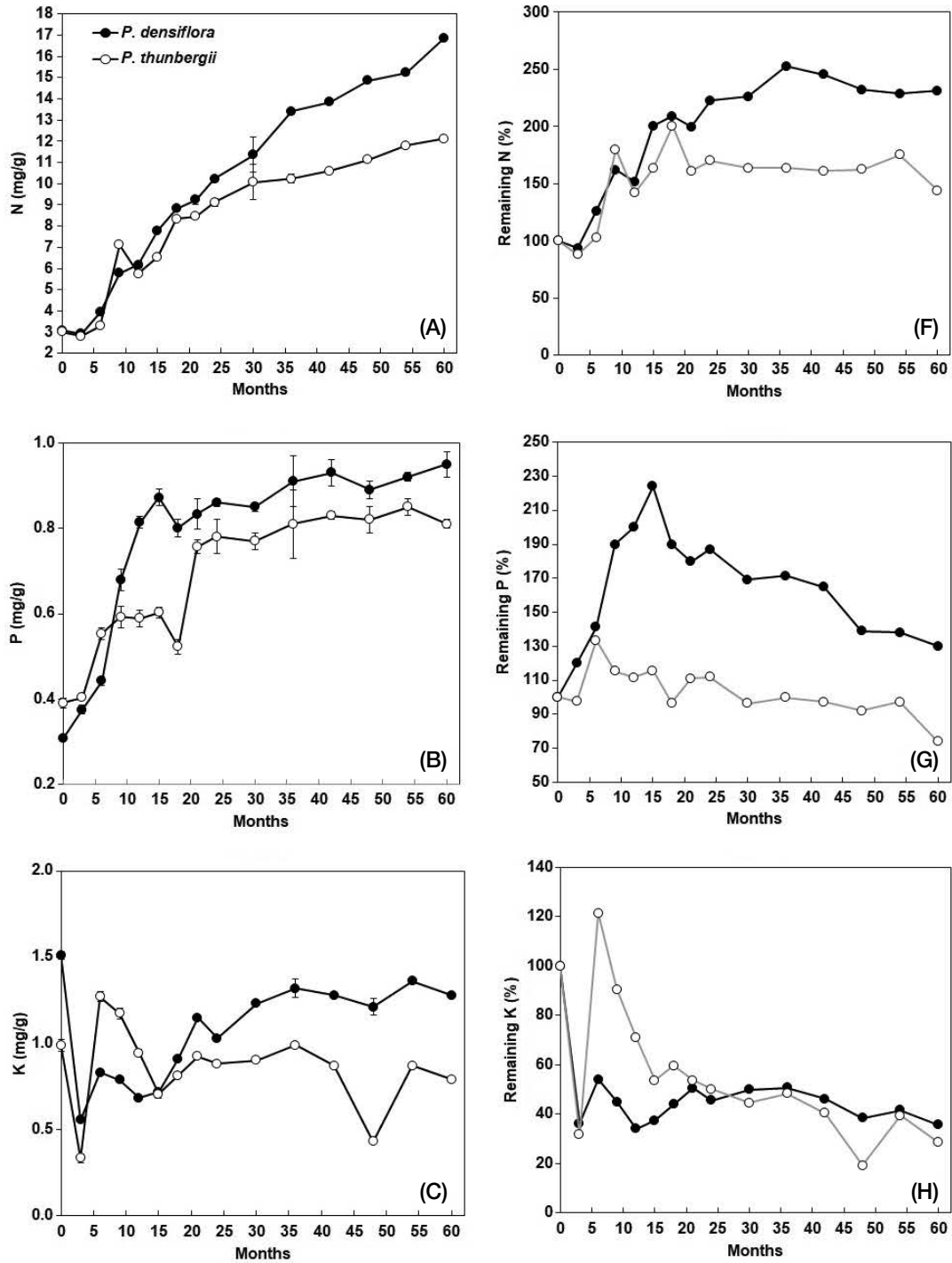


Fig. 3. Changes of N, P, K, Ca, and Mg concentration (A, B, C, D, and E) and the % of the remaining N, P, K, Ca, and Mg (F, G, H, I, and J) in the decomposing leaf litter of *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii*.

타났다(Fig. 3G).

소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 분해과정에 따른 칼륨 함량 변화는 분해 3개월 기간까지 급속하게 감소한 후, 감소

와 증가를 반복하며 분해 60개월 경과 후에는 분해 초기와 칼륨 함량이 큰 차이를 보이지 않았다. 소나무 낙엽의 초기와 60개월 경과 후 칼륨 함량은 각각 1.51, 1.28 mg g⁻¹

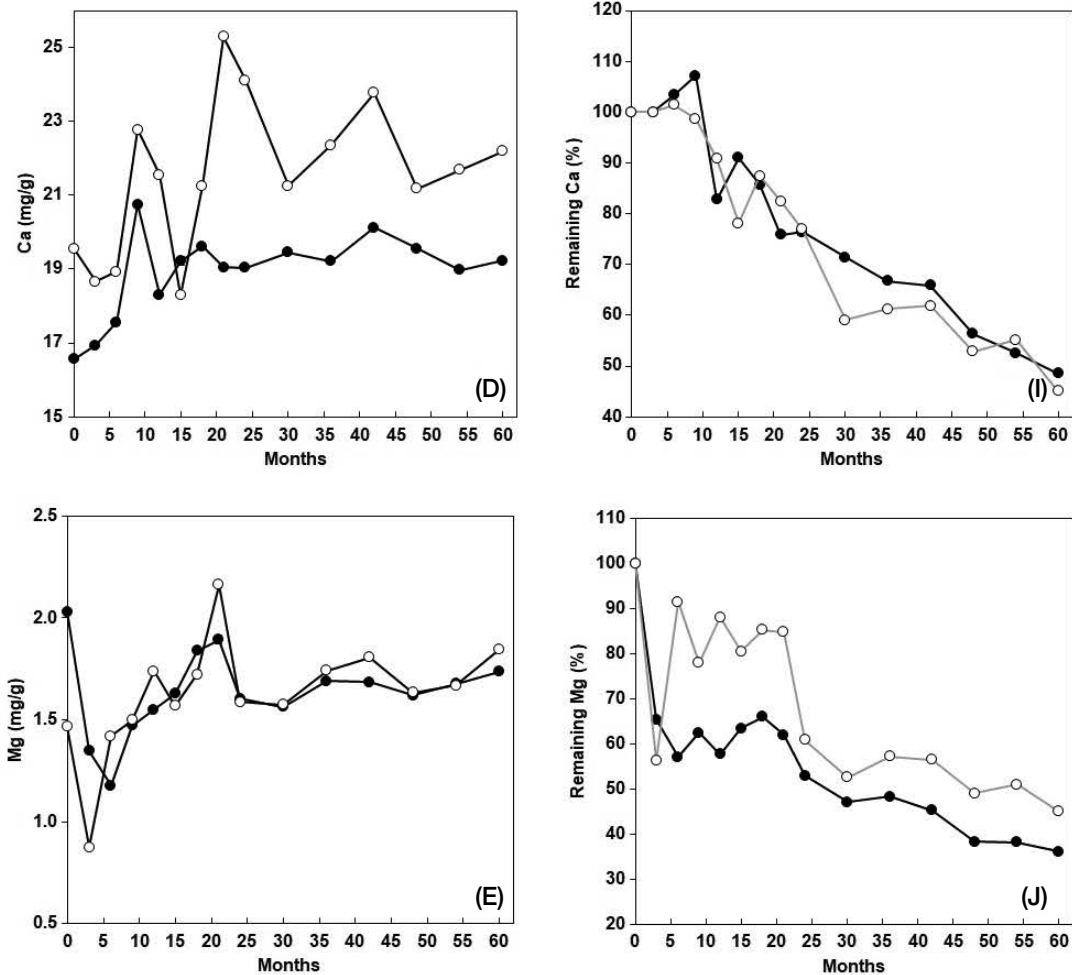


Fig. 3. Continued.

이었으며 곰솔 낙엽의 경우 분해 초기와 60개월 경과후의 칼륨 함량은 각각 0.99, 0.79 mg g⁻¹이었다. 일반적으로 분해 중인 낙엽의 칼륨 함량은 초기에 신속히 감소하는 것으로 보고되고 있는데 (Swift *et al.* 1979; Klemmenson *et al.* 1985; Yoo 1991; Kim *et al.* 2003; Lee *et al.* 2006; Namgung *et al.* 2008; Mun 2009), 이러한 경향은 칼륨이 낙엽의 유기물질 구성요소가 아니므로, 외부의 물리적인 세탈에 의한 영향을 비교적 쉽게 받기 때문으로 판단된다 (Fig. 3C) (Xu *et al.* 2004).

소나무 낙엽의 분해과정에 따른 칼륨의 잔존율은 60개월 경과 후 35.68%로 무기화가 계속되었으며 분해기간 중 부동화 기간은 나타나지 않았다. 곰솔 낙엽의 분해과정에 따른 칼륨의 잔존율은 분해 후 6개월 경과 후 121.27%로 일시적인 부동화 기간을 제외하고 무기화가 계속되어 60

개월 경과 후 잔존율은 28.59%로 조사되었다 (Fig. 3H).

소나무 낙엽의 분해과정 중 칼슘 함량은 초기에 16.56 mg g⁻¹이었으며, 분해 9개월 경과 후 20.75 mg g⁻¹로 증가한 뒤, 12개월 경과 후 18.30 mg g⁻¹로 감소하였다가 18개월 경과 후 19.62 mg g⁻¹로 다시 서서히 증가한 뒤 60개월 경과 후 19.23 mg g⁻¹로 감소하여, 증감의 변동이 있었으나 분해가 진행됨에 따라 칼슘 함량의 변동이 크지 않았다. 곰솔 낙엽의 초기 칼슘 함량은 19.55 mg g⁻¹이었으며, 9개월 경과 후 22.78 mg g⁻¹로 증가하였다가 15개월 경과 후 18.29 mg g⁻¹로 감소하였다. 60개월 경과 후 급격히 상승하여 22.19 mg g⁻¹로 나타나, 초기 함량과 큰 차이를 보이지 않았다 (Fig. 3D). 칼슘은 식물조직(세포벽)의 구성 성분인 관계로 물리적인 세탈로부터 보호를 받기 때문에 다른 성분에 비하여 용출이 적다고 보고된 바 있다 (Edmonds and

Thoma 1995; Kim *et al.* 2003). 그러나 Klemmedson *et al.* (1985)은 *P. ponderosa*의 경우 칼슘의 잔존량이 초기값보다 항상 높으며, 후기 분해단계에서 서서히 방출되는 것으로 보고된 바 있어, 본 조사의 결과와 유사하였다.

분해 중인 낙엽의 칼슘 잔존율을 살펴보면 소나무 낙엽의 경우 분해 후 9개월 경과 후까지 부동화가 일어났고, 60개월 경과 후 48.58%로 나머지 기간은 무기화가 일어났다. 곰솔 낙엽의 칼슘 잔존율의 경우에는 60개월 경과 후 45.08%로 지속적인 무기화가 일어났다(Fig. 3I).

소나무 낙엽의 분해과정 중 초기 마그네슘 함량은 2.03 mg g⁻¹이었으며, 6개월 경과 후 1.18 mg g⁻¹까지 감소하였다가 60개월 경과 후 1.74 mg g⁻¹으로 증가하였다. 곰솔 낙엽의 분해과정 동안 마그네슘 함량은 소나무 낙엽 분해과정의 마그네슘 함량과 매우 유사한 경향을 보였다. 초기 마그네슘 함량은 1.47 mg g⁻¹로 소나무에 비해 다소 낮게 나타났고, 3개월 경과 후 0.88 mg g⁻¹까지 감소한 후 지속적으로 증가하여 60개월 경과 후 1.84 mg g⁻¹로 나타났다(Fig. 3E).

분해기간 중 소나무 낙엽의 마그네슘 잔존율은 부동화 기간 없이 무기화가 지속적으로 진행되어 분해 60개월 경과 후의 잔존율은 36.03%를 나타내었으며, 곰솔의 경우 소나무 결과와 유사하게 지속적으로 무기화가 일어나 60개월 경과 후 잔존율은 44.99%로 나타났다(Fig. 3J).

국내에서 장기적인 낙엽분해에 관한 연구는 Won *et al.* (2018)의 천연림에 관한 연구 등 일부가 수행되었으나, 침엽수종의 직접적인 비교는 많지 않아 정확한 비교는 어렵다. 향후, 국내에 존재하는 다양한 소나무 속의 장기적인 낙엽분해 및 분해과정에 따른 영양염류의 동태연구를 통한 산림생태계의 기능 파악 연구가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

공주지역에 조립된 리기다소나무 군락에서 국내 대표 수종인 소나무와 방풍림으로 주로 조립되는 곰솔 낙엽의 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류의 함량 변화를 파악하였다. 분해 60개월 경과 후 소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 잔존율은 각각 42.12 ± 5.30과 24.79 ± 1.98%로 소나무와 곰솔의 낙엽 분해율은 곰솔 낙엽의 분해가 소나무 낙엽의 분해에 비해 빠르게 일어났다. 60개월 경과 후 소나무 낙

엽과 곰솔 낙엽의 분해상수(*k*)는 각각 3.02과 3.59로 곰솔 낙엽의 분해상수가 다소 높게 나타났다. 소나무 낙엽의 분해과정에 따른 C/N, C/P 비율은 초기에 각각 14.4, 144.1이었으나 60개월 경과 후에는 각각 2.26와 40.1로 점차 감소하였으며, 곰솔 낙엽의 경우 초기 C/N, C/P 비율은 각각 14.4와 111.3로 나타났고, 60개월 경과 후에는 각각 3.06와 45.8로 나타났다. 낙엽의 초기 N, P, K, Ca, Mg 함량은 소나무 낙엽에서 각각 3.07, 0.31, 1.51, 16.56, 2.03 mg g⁻¹, 곰솔 낙엽에서 각각 3.02, 0.39, 0.99, 19.55, 1.48 mg g⁻¹로 소나무 낙엽과 곰솔 낙엽의 질소와 인의 함량은 유사하였다. 60개월 경과 후 N, P, K, Ca, Mg의 잔존율은 소나무 낙엽에서 각각 231.08, 130.13, 35.68, 48.58, 36.03%이었고, 곰솔 낙엽에서 각각 143.91, 74.02, 28.59, 45.08, 44.99%로 나타났다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-전략연구-2021-02).

REFERENCES

- Alhamd L, S Arakaki and A Hagihara. 2004. Decomposition of leaf litter of four tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest, Okinawa Island, Japan. *For. Ecol. Manag.* 202:1-11.
- Baker TT, BG Lockaby, WH Conner, CE Meier, JA Stanturf and MK Burke. 2001. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in four southern forested floodplain communities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1334-1347.
- Berg B and H Staaf. 1981. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. *Ecol. Bull.* 33:163-178.
- Black CA, DD Evans and JL White. 1965. *Methods of Soil Analysis: Chemical and Microbiological Properties.* American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Bocock KL. 1964. Changes in the amount of dry matter, nitrogen, carbon and energy in decomposing woodland leaf litter in relation to the activities of soil fauna. *J. Ecol.* 52:273-284.
- Cotrufo MF, MD Wallenstein, CM Boot, K Denef and E Paul. 2013. The Microbial Efficiency Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob. Change Biol.* 19:988-995.

- Daubenmire RF. 1974. Plant and Environment. 3rd eds. Wiley. New York.
- Edmonds RL and TB Thomas. 1995. Decomposition and nutrient release from green needles of western hemlock and Pacific silver fir in an old-growth temperate rain forest, Olympic National Park, Washington. Can. J. For. Res. 25:1049-1057.
- Fahey TJ. 1983. Nutrient dynamics of aboveground detritus in lodgepole pine (*Pinus contorta* ssp. *latifolia*) ecosystems, southeastern Wyoming. Ecol. Monogr. 53:51-72.
- Gosz JR, GE Likens and FH Bormann. 1973. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. Ecol. Monogr. 43:173-191.
- Hisabae M, S Sone and M Inoue. 2011. Breakdown and macro-invertebrate colonization of needle and leaf litter in conifer plantation streams in Shikoku, southwestern Japan. J. For. Res. 16:108-115.
- Kim CS, JH Lim and JH Shin. 2003. Nutrient dynamics in litterfall and decomposing leaf litter at the Kwangneung deciduous broad-leaved natural forest. Korean J. Agric. For. Meteorol. 5:87-93.
- Kim JK and NK Chang. 1989. Litter production and decomposition in the *Pinus Rigida* plantation in Mt. Kwan-ak. Korean J. Ecol. 12:9-20.
- Kimmins JP. 1987. Forest Ecology. Macmillan Publishing Company. New York.
- Klemmedson JO, CE Meier and RE Campbell. 1985. Needle decomposition and nutrient release in ponderosa pine ecosystems. For. Sci. 31:647-660.
- Lee EK, JH Lim, CS Kim and YK Kim. 2006. Nutrient dynamics in decomposing leaf litter and litter production at the long-term ecological research site in Mt. Gyebang. J. Ecol. Environ. 29:585-591.
- Melillo JM, JD Aber and JF Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. Ecology 63:621-626.
- Millar CS. 1974. Decomposition of coniferous leaf litter. pp. 105-128. In: Biology of Plant Litter Decomposition. Vol 1. Academic Press. London and New York.
- Mun HT and JH Pyo. 1994. Dynamics of nutrient and chemical constituents during litter decomposition. Korean J. Ecol. 17:501-511.
- Mun HT and HT Joo. 1994. Litter production and decomposition in the *Quercus acutissima* and *Pinus rigida* forests. Korean J. Ecol. 17:345-353.
- Mun HT. 2009. Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus mongolica* in Mt. Worak National Park. J. Ecol. Environ. 32:123-127.
- Namgung J, AR Han and HT Mun. 2008. Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* at Mt. Worak National Park. J. Ecol. Environ. 31:291-295.
- Olson JS. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology 44:321-331.
- Ono K, S Hiradate, S Morita, K Ohse and K Hirai. 2011. Humification processes of needle litters on forest floors in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations in Japan. Plant Soil 338:171-181.
- Prescott CE. 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? Biogeochemistry 101:133-149.
- Schlesinger WH. 1985. Decomposition of chaparral shrub foliage. Ecology 66:1353-1359.
- Seereeram S and P Lavender. 2003. Analysis of Leaf Litter to Establish Its Suitability for Compositing to Produce a Commercially Saleable Product. A Report Prepared for SWAP. Aqua Enviro. Wakefield, UK. p. 18.
- Swift MJ, OW Heal and JM Anderson. 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Studies in Ecology Vol 5. University of California Press. Berkeley and Los Angeles. p. 372.
- Wang Z, XYin and X Li. 2015. Soil mesofauna effects on litter decomposition in the coniferous forest of the Changbai Mountains, China. Appl. Soil Ecol. 92:64-71.
- Won HY, DK Kim, KJ Lee, SB Park, JS Choi and HT Mun. 2014. Long term decomposition and nutrients dynamics of *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* leaf litter in Mt. Worak National Park. Korean J. Environ. Ecol. 28:566-573.
- Won HY, YS Lee, SU Jo, IH Lee, SD Jin and SY Hwang. 2018. Decay rate and nutrient dynamics during litter decomposition of *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis*. Korean J. Environ. Ecol. 32:557-565.
- Xu X, E Hirata, T Enoki and Y Tokashiki. 2004. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance. Plant Ecol. 173:161-170.
- Yoo JS. 1991. Weight loss and nutrient dynamics during litter decomposition of *Pinus thunbergii* and *Castanea crenata*. M.S. Dissertation. Kongju National University. Kongju, Korea.