

월악산 국립공원에서 신갈나무와 소나무 낙엽의 장기적 분해 및 영양염류 동태^{1a}

원호연² · 김덕기³ · 이규진⁴ · 박상봉² · 최중석² · 문형태^{2*}

Long term decomposition and nutrients dynamics of *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* leaf litter in Mt. Worak National Park^{1a}

Ho-Yeon Won², Deok-Ki Kim³, Kyu-Jin Lee⁴, Sang-Bong Park², Joong-Suk Choi², Hyeong-Tae Mun^{2*}

요 약

국가장기생태 연구사업의 일환으로 낙엽활엽수인 신갈나무와 상록침엽수인 소나무 낙엽의 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 함량 변화를 파악하였다. 이를 위해 2005년 12월 월악산의 신갈나무림과 소나무림에 낙엽주머니를 설치하고 2006년 3월부터 2011년 9월까지 69개월간 3개월 간격으로 낙엽주머니를 수거하여 분해율, 분해상수(k), 그리고 분해과정에 따른 C/N비, C/P비의 변화와 영양염류의 동태를 조사하였다. 분해 69개월경과 후 신갈나무와 소나무 낙엽의 잔존률은 각각 35.4±2.3%와 16.1±1.3%로 소나무 낙엽의 분해가 신갈나무 낙엽의 분해보다 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 분해 69개월경과 후 신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 분해상수(k)는 각각 5.97과 10.50으로 소나무 낙엽의 분해상수가 높게 나타났다. 신갈나무 낙엽의 분해과정에 따른 C/N, C/P 비율은 초기에 각각 43.1, 543.9이었으나 69개월경과 후에는 각각 8.7과 141.2로 점차 감소하였으며, 소나무 낙엽의 경우 초기 C/N, C/P 비율은 각각 151.2와 391.4로 나타났고, 분해 69개월경과 후에는 각각 22.9와 136.5로 나타났다. 낙엽의 초기 N, P, K, Ca, Mg의 함량은 신갈나무 낙엽에서 각각 9.30, 0.23, 2.36, 3.14, 1.11mg/g, 소나무 낙엽에서 각각 3.02, 0.09, 1.00, 3.84, 0.62mg/g으로 신갈나무 낙엽에서 질소와 인의 함량이 현저히 높았다. 분해 69개월경과 후 N, P, K, Ca, Mg의 잔존률은 신갈나무 낙엽에서 각각 73.8, 60.9, 17.2, 20.3, 35.1%, 소나무 낙엽에서 각각 69.5, 75.3, 12.3, 10.9, 10.8%로 나타났다.

주요어: 잔존률, 분해상수, C/N비, C/P비, 분해율

ABSTRACT

Decay rate and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of deciduous broad leaf *Quercus mongolica* and evergreen needle leaf *Pinus densiflora* were investigated for 69 months from December 2005 to September 2011 in Mt. Worak National Park as a part of National Long-Term Ecological Research Program in Korea. Percent remaining weight of *Q. mongolica* and *P. densiflora* leaf litter after 69 months elapsed was

1 접수 2014년 8월 25일, 수정 (1차: 2014년 10월 13일, 2차: 2014년 10월 20일), 게재확정 2014년 10월 21일

Received 25 August 2014; Revised (1st: 13 October 2014, 2nd: 20 October 2014); Accepted 21 October 2014

2 공주대학교 생명과학과 Dept. of Life Science, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea (devilkin84@kongju.ac.kr)

3 국립생태원 위해생물연구팀 Ecological Safety Research Team, National Institute of Ecology, Seoecheon 325-813, Korea

4 생태계 순환 연구소 Ecosystem Cycle Institute, Namyangju 472-060, Korea

a 이 논문은 국가장기생태연구사업에 의하여 연구되었음

* 교신저자 Corresponding author : htmun@kongju.ac.kr

35.4±2.3 % and 16.1±1.3 %, respectively. Decomposition of *P. densiflora* leaf litter was significantly faster than that of *Q. mongolica* leaf litter. Decay constant (k) of *Q. mongolica* and *P. densiflora* leaf litter after 69 months elapsed was 5.97 and 10.50, respectively. Initial C/N and C/P ratio of *Q. mongolica* leaf litter was 43.1 and 543.9 respectively. After 69 months elapsed, C/N and C/P ratio of decomposing *Q. mongolica* leaf litter decreased to 8.7 and 141.2, respectively. Initial C/N and C/P ratio of *P. densiflora* leaf litter was 151.2 and 391.4, respectively. After 69 months elapsed, C/N and C/P ratio of decomposing *P. densiflora* leaf litter decreased to 22.9 and 136.5, respectively. Initial concentration of N, P, K, Ca and Mg in leaf litter was 9.30, 0.23, 2.36, 3.14, 1.11 mg/g in *Q. mongolica*, and 3.02, 0.09, 1.00, 3.84, 0.62 mg/g in *P. densiflora*, respectively. Initial concentration of N and P in *Q. mongolica* leaf litter was significantly higher than those in *P. densiflora*. After 69 months elapsed, remaining N, P, K, Ca and Mg in decomposing leaf litter were 73.8, 60.9, 17.2, 20.3, 35.1 % in *Q. mongolica*, and 69.5, 75.3, 12.3, 10.9, 10.8 % in *P. densiflora*, respectively.

KEY WORDS: REMAINING WEIGHT, DECAY CONSTANT, C/N RATIO, C/P RATIO, NUTRIENTS

서론

산림생태계의 두 가지 중요한 기능은 에너지 흐름과 물질 순환인데, 에너지와 물질을 동시에 포함하고 있는 낙엽의 생산과 분해는 생태계의 구조와 기능을 유지하기 위한 기본적인 과정이다. 산림생태계에서 낙엽의 형태로 임상에 이입된 유기물질의 영양염류는 분해과정을 통하여 토양에 이입되어 식물에 의해 재흡수가 일어난다. 낙엽은 종류에 따라 화학적 구성성분과 물리적 특성이 다르기 때문에 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류의 방출 양상도 다르다(Melillo *et al.*, 1982; Taylor *et al.*, 1989; Moretto *et al.*, 2001).

낙엽의 분해 초기에는 수용성 물질이 먼저 소실되고, 무계감소와 함께 분해중인 낙엽의 질소함량은 증가한다. 그리고 분해 후반부에서는 낙엽의 난분해성 물질들이 소실된다. 또한 나트륨, 칼륨 등과 같은 영양염류는 분해초기에 쉽게 용탈되는 것으로 알려져 있다(Swift *et al.*, 1979; Bockheim *et al.*, 1991; Laskowski *et al.*, 1995). 낙엽은 떨어지는 시기에 따라 영양염류의 함량이 다르며, 떨어진 낙엽은 토양 미생물에 의해 분해되고 그 과정에서 탄소는 CO₂의 형태로 방출된다. 이 과정에서 영양염류는 식물이 흡수할 수 있는 가용성 상태로 전환되기 때문에 낙엽 분해는 산림의 1차생산을 조절하는 중요한 요인이 된다(Cole and Rapp 1981, Meentemeyer *et al.* 1982, Blanco *et al.*, 2008).

낙엽 분해에 영향을 주는 화학성분 중 중요한 것은 낙엽의 목질소(lignin), 질소 그리고 인이다. 특히, 낙엽의 초기 lignin/N 비, C/N 비가 낙엽 분해율과 가장 높은 상관관계를 갖는데, 이들의 비가 낮을 경우 질소 이용도가 높아 낙엽분해가 빠르다(Berg and Theander 1984, Kelly and Beauchamp

1987). 하지만 토양의 질소함량이 높을 경우 미생물이 낙엽의 질소를 이용하지 않기 때문에 이 경우 리그닌 함량이 낙엽 분해율에 더 큰 영향을 미치게 된다. 특히, 낙엽의 분해는 수종 및 낙엽의 질에 따라 분해율에 큰 차이가 있는데 (Melillo *et al.*, 1982), 이중 C/N 비율이 가장 큰 영향을 주며(Fogel and Cromack 1977), 낙엽의 분해는 대부분 토양 미생물에 의해 진행되기 때문에 온도의 영향이 크다 (Swift *et al.*, 1979).

국내에서는 침엽수종의 낙엽과 활엽수종의 낙엽 분해에 관한 연구는 많이 이루어졌지만(Mun and Joo 1994; Mun and Pyo 1994; Lee *et al.*, 2006), 두 수종간의 비교에 관한 연구는 전무한 실정이다. 본 연구는 낙엽활엽수인 신갈나무(*Quercus mongolica*)와 상록침엽수인 소나무(*Pinus densiflora*) 낙엽의 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 동태를 비교하기 위한 것으로, 이를 위해 2005년 12월에 신갈나무와 소나무의 낙엽주머니를 준비하여 월악산의 신갈나무림과 소나무림에 각각 설치하고, 2006년 3월부터 2011년 09월까지 3개월 간격으로 낙엽주머니를 수거하여 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류의 동태를 조사하였다. 낙엽활엽수와 상록침엽수 낙엽의 분해를 통해 토양에 이입되는 영양염류의 양을 파악하여 삼림 생태계의 물질순환을 밝히는 데 필요한 기초자료를 얻는데 본 연구의 목적이 있다.

연구방법

1. 조사지 개황

본 조사는 월악산 국립공원 내의 신갈나무림과 소나무림에서 실시되었다. 신갈나무림은 충청북도 제천시 덕산면 선

고리 일원의 남서사면으로써, 경사는 26.7°이며, 문수봉과 매두막 사이의 해발 900m(N 36° 51' 34", E 128° 12' 53")에 위치하고 있다. 신갈나무림의 교목층에는 신갈나무(*Quercus mongolica*)가 우점하였고, 관목층에는 생강나무(*Lindera obtusiloba*)와 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*)가 낮은 피도로 분포하였으며, 초본층은 더덕(*Codonopsis lanceolata*), 참취(*Aster scaber*)가 매우 낮은 피도로 분포하였다(Shin *et al.*, 2011). 소나무림은 월악산 송계계곡 남서사면, 경사도 17°, 해발고도 380m에 위치하고 있다(N 36° 51' 17", E 128° 64' 41"). 소나무림의 관목층은 굴참나무(*Quercus variabilis*), 쇠물푸레(*Fraxinus siebold*), 땅비싸리(*Indigofera kirilowii*) 등이 낮은 피도로 분포하고 있고, 초본층은 고사리(*Pteridium aquilinum*)와 억새(*Miscanthus sinensis*) 등이 분포하고 있는 것으로 조사되었다(Lee *et al.*, 2013).

조사지소로부터 약 20km 떨어진 제천 측후소의 자료에 따르면 조사지역의 30년간(1982-2011년) 연평균기온은 10.2°C, 연평균 강수량은 1,419.6mm 이었으며, 조사기간(2006-2011년) 동안 연평균기온은 10.4°C, 연평균 강수량은 1,621.0mm 로, 연평균 기온은 비슷하였으나 조사기간 동안의 연평균 강수량은 30년 평균치보다 높게 나타났다.

2. 낙엽주머니 제작 및 설치

낙엽주머니의 제작에 사용된 낙엽은 2005년 10월에 월악산의 신갈나무림과 소나무림에서 갓 떨어진 신선한 낙엽을 수거하여 낙엽주머니를 제작한 다음 60°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조 시킨 후 사용하였다. 낙엽주머니는 mesh size가 2mm인 나이론 그물을 사용하여 20 × 25cm의 크기로 만들어 약 5g 정도의 낙엽을 넣은 뒤 각각의 주머니에 고유번호와 정확한 낙엽 무게가 기록되어 있는 aluminum tag를 함께 넣은 후 유출되지 않도록 잘 봉합하였다. 제작된 낙엽주머니는 2005년 12월에 신갈나무림의 임상에 신갈나무 낙엽주머니 150개를, 소나무림 임상에 소나무 낙엽주머니 150개를 낙엽주머니들이 겹치지 않고 훼손되거나 유실되지 않도록 지면에 못과 나일론 끈을 이용하여 고정시켜 놓았다.

3. 낙엽주머니 회수 및 처리

낙엽주머니의 회수는 설치한 뒤 3개월 이후인 2006년 3월부터 33개월까지는 3개월 간격으로, 이후 69개월까지는 6개월 간격으로 매번 각각 5개씩 회수하였다. 회수해 온 낙엽주머니는 겉에 묻은 흙과 주머니 안쪽으로 침투한 식물의 뿌리 등을 제거한 후, 주머니 안의 낙엽을 60°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후 칭량 하였다. 칭량이 끝난

샘플은 mixer를 이용하여 곱게 갈아 유기탄소 및 영양염류 분석에 사용하였다. 분해 중인 낙엽의 무게 잔존률은 회수 시에 남아있는 잔존량을 초기 무게에 대한 백분율(%)로 표시 하였으며, 분해상수(k)는 Olson (1963)의 공식을 이용하여 계산하였다.

$$X_t = X_0 e^{-kt}$$

여기서, X_0 = 낙엽의 처음 무게,

X_t = 시간 t 가 경과된 후의 잔존 무게,

t = 시간 (년으로 계산)

신갈나무와 소나무 낙엽의 분해율의 차이는 t-test를 통해 통계적 유의성을 검증하였다.

4. 낙엽의 영양염류 분석

낙엽의 유기탄소, 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘을 분석하였으며, 화학적 분석은 샘플마다 3반복으로 실시하였다. 유기탄소는 Elemental Analyzer(EA1112, Thermo Fisher Scientific Inc.)를 사용하여 분석하였으며, C의 값을 N 그리고 P의 값으로 나누어 각각 C/N비, C/P비를 계산하였다.

전질소와 인은 샘플이 들어 있는 Kjeldahl flask에 분해촉진제와 진한 황산을 넣어 390°C의 block digester에서 120분간 분해시킨 후 상온에서 식힌 다음 증류수를 이용하여 50ml로 정용한 후 상등액을 자동분석기(Lachat: Quick Chem 8000)로 분석하였다. 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 샘플을 습식분해한 후 원자흡수분광광도계(Perkin-Elmer 3110)로 정량하였다.

낙엽의 분해과정에 따른 각 영양염류의 잔존률은 다음 식에 따라 계산하였다(Alhamd *et al.*, 2004). 즉, 각 분해단계에 있는 낙엽의 단위 무게 당 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).

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

여기서, L_t = t 시간 경과된 낙엽주머니에 남아 있는 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

신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 분해에 따른 무게 잔존률을 Figure 1에 정리하였다. 두 종 모두 무게가 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 신갈나무 낙엽의 무게 잔존률은 30개월경과 후 52.4%이었으며, 분해 69개월경과 후에는 35.4±2.3%로 나타났고, 이에 비해 소나무 낙엽의 무게 잔존률은 30개월경과 후 53.5%, 분해 69개월경과 후에는 16.1±1.3 %로, 분해 30개월까지는 두 수종은 낙엽분해 속도가 비슷하였으나 30개월경과 후부터는 소나무 낙엽의 분해가 신갈나무 낙엽보다 빠르게 진행되었다(Figure 1).

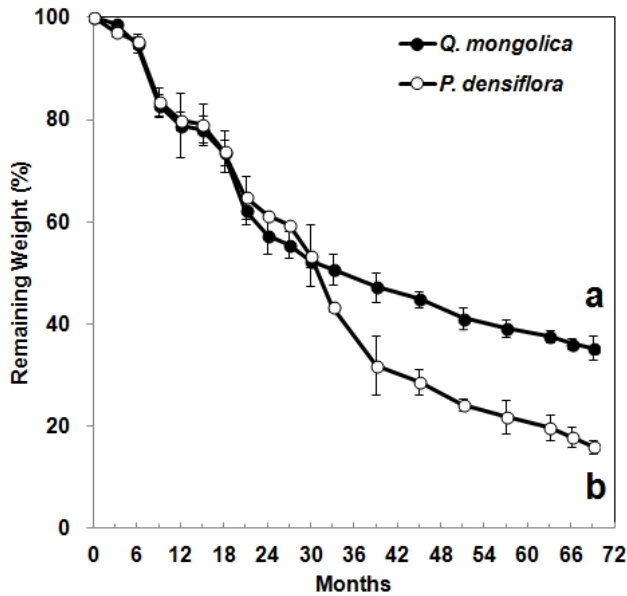


Figure 1. Remaining weight (%) in decomposing leaf litter of *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* in the study area. Bars indicate SD. Means with different letters are significantly different (t-test, $p < 0.05$)

두 종류의 낙엽 모두 분해가 시작된 후 1년이 지난 후부터 분해율이 낮아지고 있는데, 이는 분해 초기단계에서 수용성 물질이 빠르게 용탈된 후 리그닌과 같은 난분해성 물질이 낙엽분해의 제한요인으로 작용하고 있기 때문으로 판단되며(Fogel and Cromack 1977; Swift *et al.*, 1979), 두 수종에서 모두 여름철의 분해가 빠르게 일어나는 것으로 나타났다. 이 결과는 7~8월 중에 분해가 많이 이루어진다는 결과와 유사하였는데, 분해가 하절기에 집중되는 것은 기온이 상승하고 강수량이 더 많아 분해자의 활성이 왕성하

며, 습한 하절기에 더 많은 수용성 물질이 용해되는데 기인하는 것으로 알려져 있다(Millar 1974, Swift *et al.*, 1979, Mun 2009).

신갈나무 낙엽의 분해에 따른 분해상수(k)는 12, 30, 69개월째에 각각 0.24, 1.62, 5.97 로 Park과 Lee(1981)가 지리산에서 조사한 21개월경과 후의 상수리나무 낙엽의 분해상수(k) 0.32보다 높았고 원 등(2012)이 충남 공주에서 조사한 33개월경과 후의 0.39, 진주지역에서 33개월경과 후의 0.61보다 본 연구의 30개월경과 후의 분해상수(k)가 더 높았다. 소나무 낙엽의 분해상수(k)는 12, 30, 69개월째에 각각 0.23, 1.56, 10.50로 69개월경과 후에는 신갈나무 낙엽에 비해 더 높게 나타났으며, 원 등(2012)가 조사한 가시나무의 24개월경과 후 분해상수(k)인 0.61 보다 본 연구의 30개월경과 후 분해상수(k)가 더 높았다. 분해 30개월까지는 신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 분해율이 유사하였으나, 그 이후로 소나무 분해율이 높아지는데 이는 위에서 언급한 바와 같이 리그닌과 같은 난분해성 물질이 제한요인으로 작용하고 있고, 또한 각 수종의 조사지소의 해발고도 차이 때문으로 판단되며, 이를 확인하기 위해서는 낙엽의 수용성 구성원, 폴리페놀, 왁스, 리그닌과 같은 화학적 구성원의 분석이 필요할 것으로 판단된다(Swift *et al.*, 1979). 또한 조사기간 중 조사지소의 수분함량은 신갈나무림에서 37.1%, 소나무림에서 13.9%로 신갈나무 낙엽이 설치된 지소의 토양 수분함량이 높아, 일반적으로 수분함량이 높은 곳에서 낙엽의 분해가 빠르게 일어나는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 다소 상이한 결과를 보였는데, 이는 전술한바와 같이 각 수종의 조사지소의 해발고도 및 외부 환경요인 때문으로 판단된다.

2. 분해과정에 따른 C/N비, C/P비의 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 Lavender 2003). 신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 초기 탄소 함량은 각각 45.7%, 50.5%로 유사하였으며, 이것은 분해가 진행됨에 따라 감소하는 것으로 나타났다(Figure 2A). 분해 69개월경과 후 신갈나무와 소나무 낙엽의 탄소함량은 각각 27.3%, 39.2%로 신갈나무 낙엽에서 낮았다. 신갈나무와 소나무 낙엽의 초기 질소함량은 각각 9.30, 3.02 mg/g으로 신갈나무 낙엽의 질소함량이 3배 이상 높았다. 또한 신갈나무와 소나무 낙엽의 초기 인 함량은 각각 0.23, 0.09 mg/g으로 질소와 마찬가지로 신갈나무 낙엽에서 2배 이상 높았다.

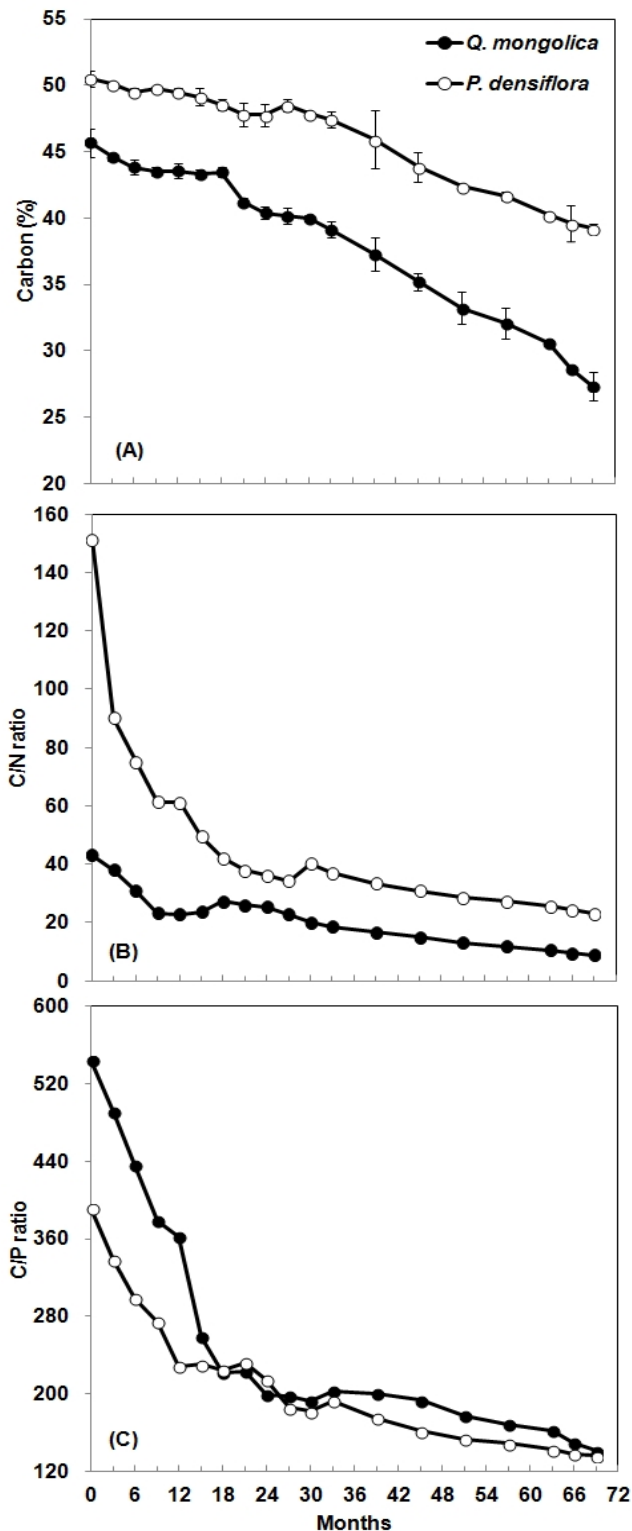


Figure 2. Changes of carbon % (A), C/N ratio (B) and C/P ratio (C) in decomposing leaf litter of the *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* in the study area. Bars indicate SD

신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 초기 C/N비는 각각 43.1, 151.2으로 소나무 낙엽이 신갈나무 낙엽에 비해 현저히 높았다. 이것은 소나무 낙엽의 질소함량이 신갈나무에 비해 현저히 낮기 때문이다. 분해가 진행되는 동안 신갈나무 낙엽의 C/N 비는 감소하여 69개월경과 후 그 값이 8.7이었다. 소나무 낙엽의 C/N비의 경우에도 분해가 진행됨에 따라 감소하였으나 분해초기에 신갈나무 낙엽보다 빠르게 감소하였고, 9개월경과 후부터 감소가 완만해져 69개월경과 후 소나무 낙엽의 C/N비는 22.9이었다(Figure 2B).

낙엽의 분해과정에 따른 C/P비의 양상은 C/N 비와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 본 연구에서 신갈나무 낙엽의 경우 초기 C/P비는 543.9로 일반적으로 보고된 200~480 범위 보다 다소 높은 것으로 나타났으나 소나무 낙엽의 경우는 초기의 C/P비는 391.4로 일반적인 C/P비의 범위와 유사한 것으로 나타났으나 신갈나무 낙엽에 비해 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 이는 신갈나무 낙엽의 인 함량이 소나무 낙엽에 비해 현저히 높기 때문으로 판단된다. 낙엽의 분해과정에 따른 C/P비의 변화는 신갈나무 낙엽의 경우 C/N비의 변화패턴과 유사하였으나 신갈나무 낙엽의 초기 C/P비의 감소폭이 더 높은 것으로 나타났다. 분해가 69개월경과된 신갈나무와 소나무 낙엽의 C/P비는 각각 141.2, 136.5로 유사한 것으로 나타났다(Figure 2C)

3. 분해과정에 따른 영양염류 함량의 변화

신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 분해과정에 따른 영양염류 함량의 변화를 Fig. 3에 정리하였다. 신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 초기 질소함량은 각각 9.30, 3.02mg/g으로 낙엽 활엽성인 신갈나무 낙엽의 질소함량이 상록침엽성인 소나무 낙엽에 비해 현저히 높았다. 낙엽의 분해가 진행되면서 두 종 낙엽의 질소함량은 증가하는 것으로 나타났다. 소나무 낙엽의 경우 27개월경과 시 질소함량이 12.5mg/g으로 최대를 보인 후 감소하여 69개월경과 시에는 그 값이 10.5mg/g이었다. 신갈나무 낙엽의 경우 분해기간 동안 질소함량이 계속 증가하여 69개월 후에는 20.4mg/g인 것으로 나타났다(Figure 3A). 분해 중인 낙엽의 질소함량 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), Namsung 등 (2008)이 보고한 신갈나무, 굴참나무 그리고 소나무 낙엽의 분해에서도 분해과정에 따라 질소함량이 증가하였다.

분해과정에 따른 질소의 잔존률은 소나무 낙엽의 분해 초기 부동화 기간이 신갈나무 낙엽에 비해 긴 것으로 나타

났다(Figure 3F). 소나무 낙엽의 질소 잔존률은 분해 36개월까지는 부동화 현상을 보였으며 36개월경과 후 무기화가 진행되어 69개월경과 후 그 값은 69.5%이었다. 이에 비해 신갈나무 낙엽은 분해 초기에 부동화가 진행되어 12개월경과 후 그 값이 108.5%이었으며, 그 이후 무기화가 진행되어 69개월경과 후의 질소 잔존률은 73.8%로 나타났다.

신갈나무 낙엽과 소나무낙엽의 분해과정에 따른 인의 함량변화는 질소의 경우와 유사하였다(Figure 3B). 분해과정에 따른 인 함량의 증가도 일반적으로 보고되는 현상이다 (Fahey 1983). 신갈나무 낙엽의 초기 인 함량은 0.23mg/g이었으나 분해 27개월이 경과한 후에는 0.57mg/g으로 2배 이상 증가하였으며, 이후 소폭으로 감소하여 69개월경과 후에는 그 값이 0.52mg/g으로 나타났다. 소나무 낙엽의 초기 인 함량은 0.09mg/g으로 신갈나무에 비해 현저히 낮았다 (Figure 3B). 그러나 소나무 낙엽의 인 함량변화도 신갈나무 낙엽의 인 함량변화와 비슷한 경향을 보여 분해 27개월째에 0.43mg/g으로 최대치를 보인후 이후 소폭 감소하여 69개월경과 후에는 그 값이 0.38mg/g으로 나타났다.

낙엽의 분해과정에 따른 인의 동태는 낙엽의 종류에 따라 매우 다양하다고 보고되어 있다 (Baker et al., 2001). Klemmedson 등(1985)은 분해 중인 소나무 낙엽의 인 함량이 시간이 지남에 따라 감소한다고 보고하였는데, 본 조사에서 소나무 낙엽의 경우에는 이와 상이한 결과를 보였다. Mun(2009)은 신갈나무 낙엽에서, Lee 등 (2006)은 졸참나무 낙엽에서, 그리고 Namgung 등(2008)은 굴참나무 낙엽과 소나무 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 신갈나무 낙엽의 인 잔존률은 분해 초기부터 지속적인 부동화가 일어나 분해 39개월경과 후에 103.7%로 나타났고 이후 무기화가 지속적으로 진행되어 69개월경과 후에는 인의 잔존률이 30.9%로 나타났다. 소나무 낙엽의 인 잔존률은 질소에서처럼 분해 초기의 부동화 기간과 부동화율이 높은 것으로 나타났으며, 분해 45개월이 경과한 후의 인 잔존률은 119.1%이었고, 이후 무기화가 지속되어 분해 69개월경과 후에는 그 값이 75.3%로 나타났다 (Figure 3G).

신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽의 분해과정에 따른 칼륨 함량 변화는 질소나 인과는 다르게 분해 초기단계에서 감소하는 것으로 나타났다(Figure 3C). 신갈나무 낙엽의 경우 초기 칼륨 함량은 2.36mg/g이었으나 분해가 진행됨에 따라 감소하여 15개월째에는 0.86mg/g이었다. 이 후 분해 27개월째에 1.81mg/g 까지 증가하였고 그 이후에는 큰 변화가 없어 69개월경과 후에는 그 값이 1.53mg/g으로 나타났다. 소나무 낙엽의 초기 칼륨 함량은 1.00mg/g으로 신갈나무

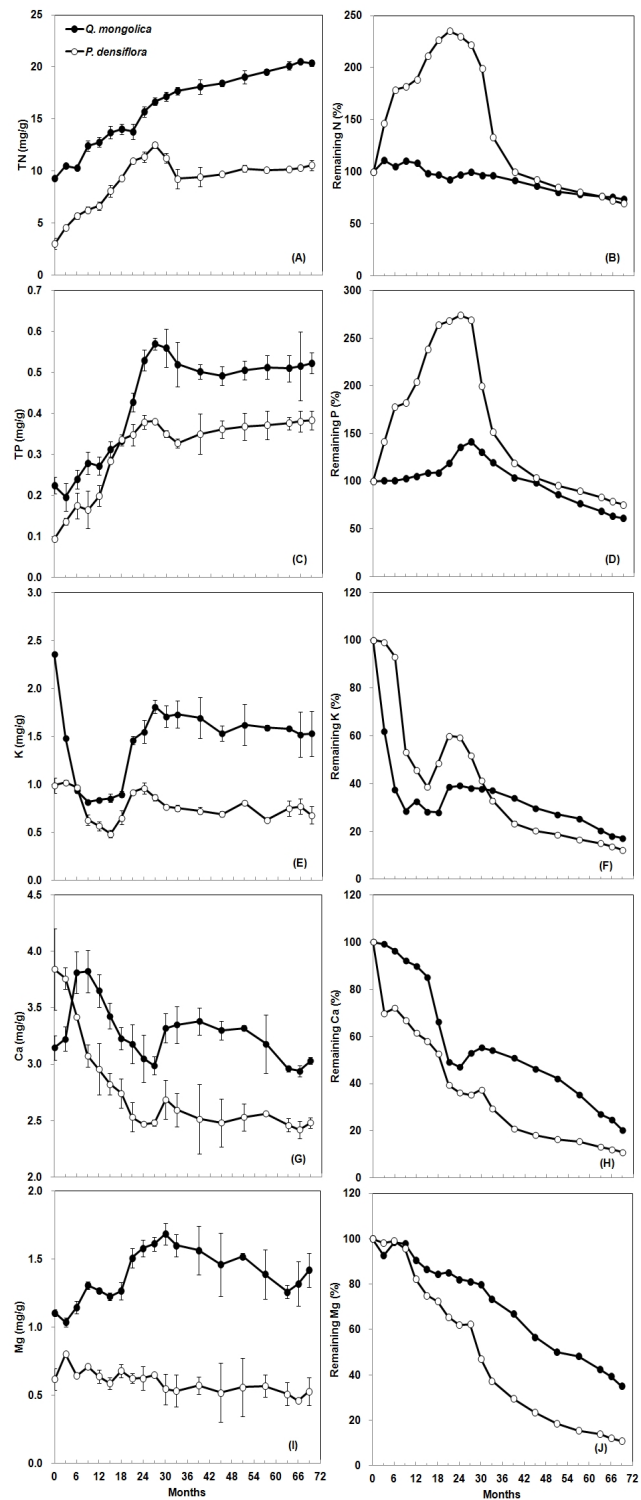


Figure 3. Changes of N, P, K, Ca, Mg concentration (A, B, C, D, E) and % remaining N, P, K, Ca, Mg (F, G, H, I, J) in decomposing leaf litter of *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* in the study area. Bars indicate SD

낙엽보다는 낮게 나타났으며, 15개월째에 0.48mg/g 으로 감소한 이후 그 값이 증가하였다. 분해 중인 낙엽의 칼륨 함량은 초기에 신속히 감소하는 것으로 보고되고 있는데 (Yoo 1991; Kim *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2006; Swift *et al.*, 1979; Klemmedson *et al.*, 1985; Namsung *et al.*, 2008; Mun 2009), 이러한 경향은 칼륨이 낙엽의 유기물질 구성요소가 아니기 때문에 세탈에 의한 영향을 비교적 쉽게 받기 때문으로 판단된다(Xu *et al.* 2004).

신갈나무 낙엽의 분해과정에 따른 칼륨의 잔존률은 초기 단계에서 급격히 감소하여 69개월경과 시 잔존률이 17.2% 이었다. 소나무 낙엽의 칼륨 잔존률도 분해가 진행됨에 따라 감소하여 69개월경과 후 잔존률이 12.3%이었다. 칼륨은 분해 초기단계에서부터 신속하게 무기화가 진행되었다 (Figure 3H).

신갈나무 낙엽의 초기 칼슘함량은 3.14mg/g 이었으며, 분해과정에 따라 변동은 있었지만 초기값과 크게 차이가 나지 않았다(Figure 3D). 소나무 낙엽의 초기 칼슘 함량은 3.84mg/g으로 신갈나무 낙엽의 초기값과 비슷하였지만 Figure 3D에서 보는 바와 같이 분해가 진행되는 동안 계속 감소하여 69개월경과 시 그 값이 2.48mg/g이었다. 칼슘은 식물조직(세포벽)의 구성 성분인 관계로 세탈로부터 보호를 받기 때문에 다른 성분에 비하여 용출이 적다고 보고된 바 있다(Edmonds and Thomas 1995; Kim *et al.* 2003).

분해 중인 낙엽의 칼슘 잔존률을 살펴보면 신갈나무와 소나무 낙엽 모두 조사기간 동안 부동화가 일어나지 않는 것으로 조사되었다. 칼슘의 잔존률은 신갈나무 낙엽의 경우 69개월경과 후 20.3%로 지속적인 무기화가 일어났으며, 소나무 낙엽의 칼슘 잔존률의 경우에도 69개월경과 후 10.9%로 지속적인 무기화가 일어났다 (Figure 3I).

신갈나무 낙엽의 초기 마그네슘 함량은 1.11mg/g이었으며, 칼슘과 유사한 경향을 보여 분해과정에 따른 변동은 있었지만 초기값과 큰 차이를 보이지 않았고, 69개월경과 후 마그네슘의 함량은 1.42mg/g이었다(Figure 3E). 소나무 낙엽의 초기 마그네슘 함량은 0.62mg/g으로 신갈나무 낙엽에 비해 낮았으나, 신갈나무 낙엽과 유사한 경향을 보여 분해 초기값과 큰 차이를 보이지 않아 69개월경과 후의 값이 0.10mg/g으로 나타났다. 분해기간 중 신갈나무와 소나무 낙엽의 마그네슘은 칼륨, 칼슘에서와 같이 부동화 기간이 없이 무기화가 지속적으로 진행되었다. 분해 69개월경과 후 신갈나무와 소나무 낙엽의 마그네슘 잔존률은 각각 35.1%, 10.8%이었다(Figure 3J).

신갈나무 낙엽과 소나무 낙엽 모두 분해과정 중 질소와 인이 부동화 현상을 보였지만, 낙엽활엽성인 신갈나무 낙엽에 비해 상록침엽성인 소나무 낙엽에서 부동화 과정이 더 긴 것으로 나타났다. 양이온인 칼륨, 칼슘, 마그네슘의 경우

에는 두 수종에서 모두 부동화 기간이 없이 순 무기화를 보였다. 국내에서 장기적인 낙엽분해에 관한 연구결과가 많지 않아 정확한 비교는 어렵지만 한반도의 산림에 주로 분포하고 있는 낙엽활엽수와 상록침엽수의 물질순환을 파악하기 위해서는 이들 활엽수와 침엽수종의 장기적인 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류의 동태에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “국가장기생태연구사업”의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Baker T.T., B.G. Lockaby, W.H. Conner, C.E. Meier, J.A. Stanturf, M.K. Burke(2001) Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in four southern forested floodplain communities. *J American Soc of Soil Sci* 65: 1334-1347.
- Berg B. and H. Staaf(1981) Leaching accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. *Ecological Bulletin* 33: 163-178.
- Berg B. and O. Theander(1984) Dynamics of some nitrogen fraction in decomposition Scots pine needle litter. *Pedobiologia* 27: 264-267.
- Blanco J.A., J.B. Imbert, F.J. Castillo(2008) Nutrient return via litterfall in two constricting *Pinus sylvestris* forests in the Pyrenees under different thinning intensities. *Forest Ecology and Management* 256: 1840-1852.
- Bocock K.L.(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. *Eco.* 52: 273-284.
- Bockheim J.G., E.A. Jepsen, D.M. Heisey(1991) Nutrient dynamics of decomposing leaf litter of four tree species on soil in northern Wisconsin. *Can J For Res* 21: 803-812.
- Cole D.W. and M. Rapp(1981) Elemental cycling in forest ecosystems. In *Dynamic properties of forest* (Reiche DE, eds). International Biological Programme 23. Cambridge University Press, Cambridge. pp 341-409.
- Edmonds R.L. and T.B. 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 T.J.(1983) Nutrient dynamics of aboveground detritus in lodgepole pine (*Pinus contorta* ssp. *latifolia*) ecosystems, southeastern Wyoming. *Ecological Monographs* 53(1): 51-72.
- Fogel R. and K. Cromack Jr.(1977) Effect of habitat and substrate

- quality on Douglas-fir litter decomposition in western Oregon. Canadian Journal of Botany 55: 1632-1640.
- Kelly J.M. and J.J. Beauchamp(1987) Mass loss and Nutrient changes in decomposing upland oak and mesic-mixed hardwood leaf litter. Soil Sci Soc Am J 51: 1616-1622.
- Kim C.S., J.H. Lim, J.H. Shin(2003) Nutrient dynamics in litterfall and decomposing leaf litter at the Kwangneung deciduous broad-leaved natural forest. Kor Jour of Agri Forest Meteorology 5(2): 87-93. (in Korean with English abstract)
- Klemmedson J.O., C.E. Meier, R.E. Campbell(1985) Needle decomposition and nutrient release in ponderosa pine ecosystems. Forest Science 31: 647-660.
- Lee E.K., J.H. Lim, C.S. Kim, Y.K. Kim(2006) Nutrient dynamics in decomposing leaf litter and litter production at the long-term ecological research site in Mt. Gyeonggi. J Ecol Field Biol 29(6): 585-591.
- Lee J.Y., D.K. Kim, H.Y. Won, H.T. Mun(2013) Organic carbon distribution and budget in the *Pinus densiflora* forest at Mt. Worak national park. Kor. J. Env. Ecol. 27(5) : 561-570. (in Korean with English abstract)
- Laskowski R, M. Niklinska, M. Maryanski(1995) The dynamics of chemical elements in forest litter. Ecology 76(5): 1393-1406.
- Meentemeyer V, E.O. Box, R.T. Thompson(1982) World patterns and amounts of terrestrial litter production. BioScience 32: 125-128.
- Melillo J.M., J.D. Aber JD, J.F. Muratore(1982) Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. Ecology 63: 621-626.
- Millar C.S.(1974) Decomposition of coniferous leaf litter. In Biology of plant litter decomposition (Dickson CH, Pugh GJF, eds). Vol 1. Academic Press, New York. pp 105-128.
- Moretto A.S., R.A. Distel, N.G. Didoné(2001) Decomposition and nutrient dynamic of leaf litter and roots from palatable and unpalatable grasses in a semi-arid grassland. Applied Soil Ecology 18(1): 31-37.
- Mun H.T. and H.T. Joo(1994) Litter production and decomposition in the *Quercus acutissima* and *Pinus rigida* forests. J Ecol Field Biol 17(3): 345-353.
- Mun H.T. and J.H. Pyo(1994) Dynamics of nutrient and chemical constituents during litter decomposition. J Ecol Field Biol 17(4): 501-511.
- Mun H.T.(2009) Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus mongolica* in Mt. Worak National Park. J Ecol Field Biol 32(2): 123-127.
- Namgung J., A.R. Han, H.T. Mun(2008) Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* at Mt. Worak National Park. J Ecol Field Biol 31(4): 291-295.
- Olson J.S.(1963) Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology 44: 321-331.
- Seereeram S. and P. Lavender(2003) Analysis of leaf litter to establish its suitability for composting to produce a commercially saleable product. A Report Prepared for SWAP. Aqua Environ. pp 18.
- Shin C.H., H.Y. Won, H.T. Mun(2011) Litter production and nutrient input via litterfall in *Quercus mongolica* forest at Mt. Worak national park. J Ecol Field Biol 34(1): 107-113.
- Swift M.J., O.W. Heal, J.M. Anderson(1979) Decomposition in terrestrial ecosystems. Studies in Ecology Vol 5. Univ of California Press, Berkeley and Los Angeles. 372p.
- Taylor B.R., D. Parkinson, W.F.J. Parsons(1989) Nitrogen and lignin content as predictor of litter decay rates: A microcosm test. Ecology 70: 97-104.
- Won H.Y, K.H. Oh, H.T. Mun(2012) Decay rate and nutrient dynamics during litter decomposition of *Quercus acutissima* in Gongju and Jinju. J. of Wetland Reserch 14(4): 537-545. (in Korean with English abstract)
- Won H.Y, K.H. Oh, J.H. Pyo, H.T. Mun(2012) Decay rate and nutrient dynamics during litter decomposition of *Quercus acutissima* and *Quercus mysinaefolia* Kor. J. Env. Ecol. 26(1) : 74-81. (in Korean with English abstract)
- Xu X., E. Hirata, T. Enoki, Y. Tokashiki(2004) Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical forest after typhoon disturbance. Plant Ecology 173: 161-170.
- Yoo J.S.(1991) Weight loss and nutrient dynamics during litter decomposition of *Pinus thunbergii* and *Castanea crenata*. M.S. Dissertation, Kongju University. 22p. (in Korean with English abstract)