

리기다소나무와 잣나무 낙엽의 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 함량 변화^{1a}

원호연²·이영상³·조수언⁴·이일환⁵·진선덕⁶·황소영^{7*}

Decay rate and Nutrient Dynamics during Litter Decomposition of *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis*^{1a}

Ho-yeon Won², Young-sang Lee³, Soo-un Jo⁴, Il-hwan Lee⁵, Sun-deok Jin⁶, So-young Hwang^{7*}

요약

국가장기생태연구사업의 일환으로 국내 주요 조림수종인 리기다소나무와 잣나무 낙엽의 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류 함량 변화를 파악하였다. 분해 21개월경과 후 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 잔존률은 각각 58.27±4.13, 54.08±4.32%로 잣나무 낙엽의 분해가 리기다소나무 낙엽보다 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 21개월경과 후 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 분해상수(*k*)는 각각 0.95, 1.08로 잣나무 낙엽의 분해상수가 높은 것으로 나타났다. 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 초기 C/N 비율은 각각 64.4, 40.6 이었으나 21개월경과 후에는 각각 41.0, 18.9로 점차 감소하였고, C/P 비율은 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽에서 초기에 각각 529.8, 236.5에서 21개월경과 후 384.1, 205.2로 감소하였다. 낙엽의 초기 N,P,K,Ca,Mg 함량은 리기다소나무 낙엽에서 각각 6.78, 0.83, 2.84, 0.99, 2.59 mg/g 이었으며, 잣나무 낙엽에서 각각 10.90, 1.87, 5.82, 4.79, 2.00 mg/g으로 마그네슘을 제외한 원소의 함량은 잣나무에서 높았다. 21개월 경과 후 N,P,K,Ca,Mg 잔존률은 리기다소나무 낙엽에서 각각 88.4, 77.6, 26.7, 50.5, 44.5% 이었으며 잣나무 낙엽에서 각각 114.4, 61.3, 7.6, 115.2, 72.0%로 나타났다.

주요어: 국가장기생태연구, 잔존률, 분해상수, C/N비, C/P비

ABSTRACT

We examined the nutrient dynamics during the leaf litter decomposition rate and process of *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis* in Gongju for 21 months from December 2014 to September 2016 as a part of National Long-Term Ecological Research Program in Korea. The remaining weight rate of *P. rigida* and *P. koraiensis* leaf litter was 58.27±4.13 and 54.08±4.32%, respectively, indicating that the *P. koraiensis* leaf litter

1 접수 2018년 6월 21일, 수정 (1차: 2018년 8월 22일, 2차: 2018년 10월 8일), 게재확정 2018년 11월 5일

Received 21 June 2018; Revised (1st: 22 August 2018, 2nd: 8 October 2018); Accepted 5 November 2018

2 국립생태원 생태기반연구실 연구원 Division of Basic Research, National Institute of Ecology, Seoecheon City, Korea (hywon@nie.re.kr)

3 국립생태원 생태기반연구실 연구원 Division of Basic Research, National Institute of Ecology, Seoecheon City, Korea (lys90309@nie.re.kr)

4 공주대학교 생명과학과 석사 Department of Biology, Kongju National University, Gongju City, Korea (wnclf2@naver.com)

5 국립생태원 생태보전연구실 연구원 Division of Ecological Conservation, National Institute of Ecology, Seoecheon City, Korea (ilhwan9126@nie.re.kr)

6 국립생태원 생태기반연구실 선임연구원 Division of Basic Research, National Institute of Ecology, Seoecheon City, Korea (withbirds@nie.re.kr)

7 국립생태원 생태조사연구실 연구원 Division of Ecological Monitoring, National Institute of Ecology, Seoecheon City, Korea(hsy8617@nie.re.kr)

a 이 논문은 환경부와 국립생태원의 국가장기생태연구사업의 지원에 의하여 연구되었음

* 교신저자 Corresponding author: hsy8617@nie.re.kr

decomposed faster than *P. rigida* leaf litter. The decay constant (k) of *P. rigida* leaf litter and *P. koraiensis* leaf litter after 21 months was 0.95 and 1.08, respectively, indicating that *P. koraiensis* leaf litter decayed faster than *P. rigida* leaf litter probably due to the difference of nitrogen concentration between the two. The C/N ratio of *P. rigida* and *P. koraiensis* leaf litter was 64.4 and 40.6, respectively, initially, and then decreased to 41.0 and 18.9, respectively, after 21 months. The C/P ratio of *P. rigida* and *P. koraiensis* leaf litter was 529.8 and 236.5, respectively, and then decreased to 384.1, 205.2, respectively, after 21 months. The contents of N, P, K, Ca, and Mg were 6.78, 0.83, 2.84, 0.99, and 2.59 mg/g, respectively, in the *P. rigida* leaf litter and 10.90, 1.87, 5.82, 4.79, and 2.00 mg/g, respectively, in the *P. koraiensis* leaf litter, indicating that the elements except the magnesium showed higher contents in *P. koraiensis*. After 21 months elapsed, remaining N, P, K, Ca, and Mg was 88.4, 77.6, 26.7, 50.5 and 44.5%, respectively, in decomposing *P. rigida*, and 114.4, 61.3, 7.6, 115.2 and 72.0%, respectively, decomposing *P. koraiensis* leaf litter.

KEY WORDS: LONG TERM ECOLOGICAL RESEARCH, REMAINING WEIGHT, DECAY CONSTANT, C/N RATIO, C/P RATIO

서론

산림생태계의 구조와 기능은 에너지 흐름과 영양염류 순환을 통해 유지되는데, 에너지와 영양염류를 모두 포함하고 있는 낙엽의 생산과 분해에 관한 연구는 생태계의 기능을 이해하기 위한 기본적인 과정이다(Bray and Gorham, 1964; Berg and Agren, 1984; Berg *et al.*, 1987). 또한, 낙엽이 분해되는 과정에서 영양염류는 식물이 흡수할 수 있는 가용성 상태로 전환되기 때문에 낙엽 분해는 산림의 1차 생산을 조절하는 중요한 요인이 된다(Cole and Rapp 1981, Meentemeyer *et al.* 1982, Blanco *et al.* 2008). 낙엽의 분해는 산림생태계 내의 물질순환에서 가장 기본적인 과정이라 할 수 있으며, 유기물 분해를 통한 영양염류 방출은 식물 생장에 필요한 영양염류 공급원이기 때문에 생태계 구조와 기능을 결정하는 중요한 요인이 된다(Berg and Agren 1984, Berg and Theander 1984, Kelly and Beauchamp 1987). 낙엽 분해에 영향을 주는 낙엽의 화학성분 중 중요한 것은 초기의 리그닌, 질소 그리고 인의 함량이다. 특히, 낙엽의 초기 리그닌/질소의 비가 낙엽 분해율과 가장 높은 상관관계를 갖는데, 리그닌/질소의 비가 낮을 경우 질소 이용도가 높아 낙엽분해가 빠르다(Swift *et al.*, 1979). 하지만 토양의 질소함량이 높을 경우 미생물이 낙엽의 질소를 이용하지 않기 때문에 이 경우 리그닌 함량이 낙엽 분해율에 더 큰 영향을 미치게 된다(Namgung, 2010). 낙엽의 분해는 수종(Kim and Chang, 1965; Daubenmire, 1953) 및 낙엽의 질 decomposed faster에 따라 분해율에 큰 차이를 나타내는데(Kucera, 1959; Berg *et al.*, 1982; Melillo *et al.*, 1982), 이중 C/N 비율이 분해속 도에 가장 큰 영향을 미치고 있다

(Jensen, 1929; Fogel and Cromack, 1977). 국내에서는 침엽수종의 낙엽과 활엽수종의 낙엽 분해에 관한 연구는 많이 이루어졌지만(Park and Lee, 1981; Mun and Joo, 1994; Lee *et al.*, 2006), 국내에서 조림을 목적으로 하는 수종의 낙엽분해 및 분해과정에 따른 영양염류의 동태에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 우리나라 조림지 삼림에 이용되는 잣나무와 리기다소나무를 대상으로 영양염류의 양과 낙엽의 분해량을 조사하기 위해 공주시 신관동 호태산의 리기다소나무조림지에 리기다소나무와 잣나무 낙엽주머니를 설치하고 2014년 12월부터 2016년 9월까지 3개월 간격으로 낙엽주머니를 수거하여 분해율 및 분해과정에 따른 영양염류의 동태를 조사하였다. 주요 조림수종 낙엽의 분해를 통해 토양에 이입되는 영양염류의 양을 파악하여 삼림 생태계의 물질순환을 밝히는 데 필요한 기초 자료를 얻는데 본 연구의 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 충청남도 공주시 신관동에 위치한 호태산의 해발 약 110m (N 36° 28' 3", E 127° 8' 53")인 북사면에서 실시되었으며(Figure 1), 교목층은 리기다소나무(*Pinus rigida*)가 우점하는 가운데, 관목층에는 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium*)와 굴참나무(*Quercus variabilis*) 등이 낮은 빈도로 분포하였으며, 초본층은 빈약하였다.

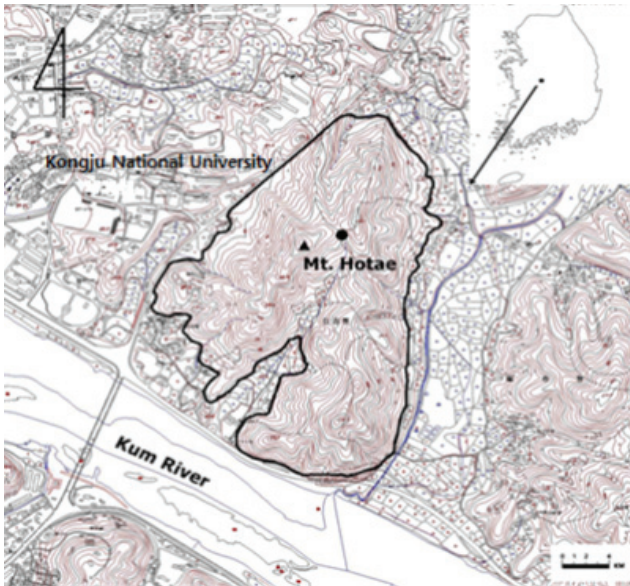


Figure 1. A detailed landscape photograph of the *Pinus rigida* plantation in the study area.

조사지소로부터 약 30km 떨어진 부여 측후소의 자료에 따르면 조사지역의 30년간(1981~2010년) 연평균기온은 12.2℃, 연강수량은 1349.2mm 이었으며, 조사기간(2015~2016년) 동안 연평균기온은 13.3℃, 연강수량은 1038.8mm 이었다.

2. 낙엽주머니 제작 및 설치

낙엽주머니의 제작에 사용된 잎은 2014년 12월에 전라북도 무주군의 덕유산에서 잣나무에 붙어있는 신선한 잣나무 잎을 채취하였고, 충청남도 공주시의 호태산에서 리기다소나무의 잎을 채취하였다. 이 잎은 60℃건조기에서 항량이 될 때까지 건조 시킨 후 사용하였다. 낙엽주머니는 mesh size 2mm인 나일론 그물을 사용하여 20×25cm의 크기로 만들어 약 5g 정도의 잎과 함께 각각의 주머니에 고유번호가 적힌 aluminum tag를 함께 넣은 뒤 잎이 유출되지 않도록 잘 봉합하였다.

제작된 낙엽주머니는 2014년 12월 19일에 공주 신관동 호태산에 있는 조사지소 입상에 서로 겹치지 않고, 낙엽주머니가 훼손되지 않도록 지면에 못과 끈을 이용하여 고정시켜 놓았다.

3. 낙엽주머니 수거 및 처리

낙엽주머니의 회수는 설치한 뒤 3개월 동안 매월 회수하였고, 3개월 이후인 2015년 3월부터 3개월 간격으로(3월,

6월, 9월, 12월) 매번 3개씩 회수하였다. 회수해 온 낙엽주머니에 묻은 흙, 뿌리, 원래 바닥에 있던 낙엽 등과 같은 이물질을 제거한 다음 주머니 안의 낙엽을 60℃건조기에서 48시간 이상 말린 후 무게를 잴으며, 무게를 잰 샘플은 곱게 갈아 유기탄소 및 영양염류 분석에 사용하였다. 분해율은 낙엽의 처음 건조량에 대한 무게 감소량으로 계산하였고, 분해 상수(k)는 Olson(1963)의 공식을 이용하였다.

$$\text{Mass remaining}(\%) = M_t / M_o \times 100$$

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

M_t : dry weight at time t

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

Olson(1963)의 낙엽 분해식 $K_t = -\ln(M_t / M_o)$

리기다소나무와 잣나무 낙엽의 분해율의 차이는 t-test를 통해 통계적 유의성을 검증하였다.

4. 낙엽의 영양염류 분석

초기 잎과 수거한 낙엽주머니는 곱게 갈아 밀폐시켜 보관한 후 유기탄소, N, P, K, Ca, Mg 등을 분석하였다. 모든 분석은 샘플마다 3반복으로 실시하였다.

유기탄소 측정은 combustion method(Black *et al.*, 1965)를 사용하였다. 시료 0.2g을 600℃ 전기로에서 태운 후 무게를 측정하였고, 산화 소실량의 45%를 유기탄소라고 추정하였다(Houghton *et al.*, 1983).

전질소와 인은 샘플이 들어있는 Kjeldahl flask에 분해촉진제와 진한황산을 넣어 390℃ block digester에서 120분간 분해시킨 후 상온에서 식힌 다음 증류수를 이용하여 50 ml로 정용한 후 상등액을 자동분석기(Lachat: Quick Chem 8000)로 분석하였다.

칼륨, 칼슘, 마그네슘은 샘플을 습식분해한 후 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 정량하였다.

낙엽의 분해과정에 따른 각 영양염류의 잔존율은 다음 식에 따라 계산하였다(Alhamed *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 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

리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 분해에 따른 무게 잔존률을 Figure 2에 정리하였다. 두 종 모두 무게가 점차 감소하는 경향을 보여, 리기다소나무 낙엽의 무게 잔존률은 12개월경과 후 $76.8 \pm 1.2\%$ 이었으며, 21개월경과 후에는 $58.3 \pm 4.1\%$ 로 나타났다. 잣나무 낙엽의 잔존률의 경우 12개월경과 후 $67.1 \pm 3.4\%$, 21개월경과 후 $54.1 \pm 4.3\%$ 로 나타나 잣나무 낙엽의 리기다소나무 낙엽에 비해 분해가 빠르게 진행되었다(Figure 2).

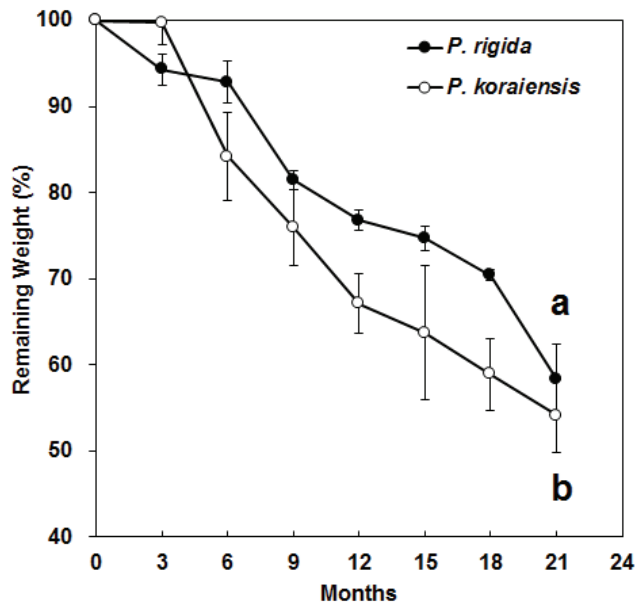


Figure 2. Remaining weight(%) in decomposing leaf litter of *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis* on the study area. Bars indicate SD. Means with different letters are significantly different (t-test, $p < 0.05$)

리기다소나무 낙엽의 경우 여름철의 분해가 빠르게 일어나는 것으로 나타나, 이는 7~8월중에 분해가 많이 이루어진

다는 Kim과 Chang(1989)의 결과와 유사하였는데, 분해가 하절기에 집중되는 것은 기온이 높고 강수량이 많아 분해자의 활성이 왕성하고, 덥고 습한 하절기에 더 많은 수용성 물질이 용해되는데 기인한다고 알려져 있다(Jensen 1974, Millar 1974, Swift *et al.* 1979, Chang and Yoo 1986, Mun 2009). 반면, 잣나무 낙엽의 경우 계절에 관계없이 전체적으로 꾸준히 감소하는 것으로 나타났는데, 이를 확인하기 위해서는 낙엽의 수용성 구성원, 폴리페놀, 왁스, 리그닌과 같은 화학적 구성원의 분석이 필요할 것으로 판단된다(Swift *et al.*, 1979).

리기다소나무 낙엽의 분해에 따른 분해상수(k)는 12, 21개월째에 각각 0.26, 0.95로 나타났고, 잣나무 낙엽의 분해상수(k)는 12, 21개월째에 각각 0.40, 1.08로 잣나무 낙엽의 분해상수가 높은 것으로 나타났다. 이 분해상수를 통해 분석한 리기다소나무와 잣나무 낙엽의 반감기(t_{50})은 각각 2.25, 1.97년으로 나타났으며 99%가 분해되는 시간(t_{99})은 리기다소나무가 16.2년, 잣나무가 14.2년으로 잣나무 낙엽이 완전 분해되는데 소요되는 시간이 리기다소나무에 비해 짧은 것으로 나타났다.

2. 분해과정에 따른 C/N, C/P 비의 변화

일반적으로 넓은 지역적 규모에서는 기후(강수량, 온도)가 분해율을 조정하며, 작은 규모에서는 낙엽 조성의 차이(C/N, N, lignin/N 등)가 분해율을 결정하는 중요한 요인이 된다(Berg *et al.* 1993, Heal *et al.* 1997). 낙엽의 탄소와 질소의 함량은 분해자가 증식과 생장에 필요한 에너지원으로 이용되기 때문에 분해에 매우 중요하다. 충분한 질소가 없으면 미생물 함량이 줄어들어 분해는 느려진다(Seecream and Lavender 2003).

리기다소나무와 잣나무 낙엽의 초기 탄소함량은 각각 43.7%, 44.2%였고 21개월경과 후 42.2%, 43.5%로 큰 차이가 없었다(Figure 3A). 잣나무 낙엽의 초기질소 함량은 10.9mg/g으로 리기다소나무 낙엽의 6.78mg/g에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다(Figure 4A). Berg 등(1984)이 낙엽 분해 초기 단계에서 높은 질소함량을 가지고 있는 Scots pine needle litter의 빠른 분해를 보고한 바와 유사한 결과로, 본 연구에서는 초기 질소의 함량이 높은 잣나무 낙엽의 분해가 더 빠르게 진행되었다.

리기다소나무와 잣나무 낙엽의 초기 C/N 비율은 각각 64.4, 40.6 이었다. 리기다소나무 낙엽의 C/N 비율은 초기 3개월째에 129.2까지 급격히 증가하였으나 시간이 지남에 따라 점차 감소하였고 21개월째 41.0으로 나타났다. 잣나무 낙엽은 서서히 감소하여 21개월째 28.9로 리기다소나무 낙엽과는 상이한 패턴을 나타냈다(Figure 3B). 두 낙엽은 비

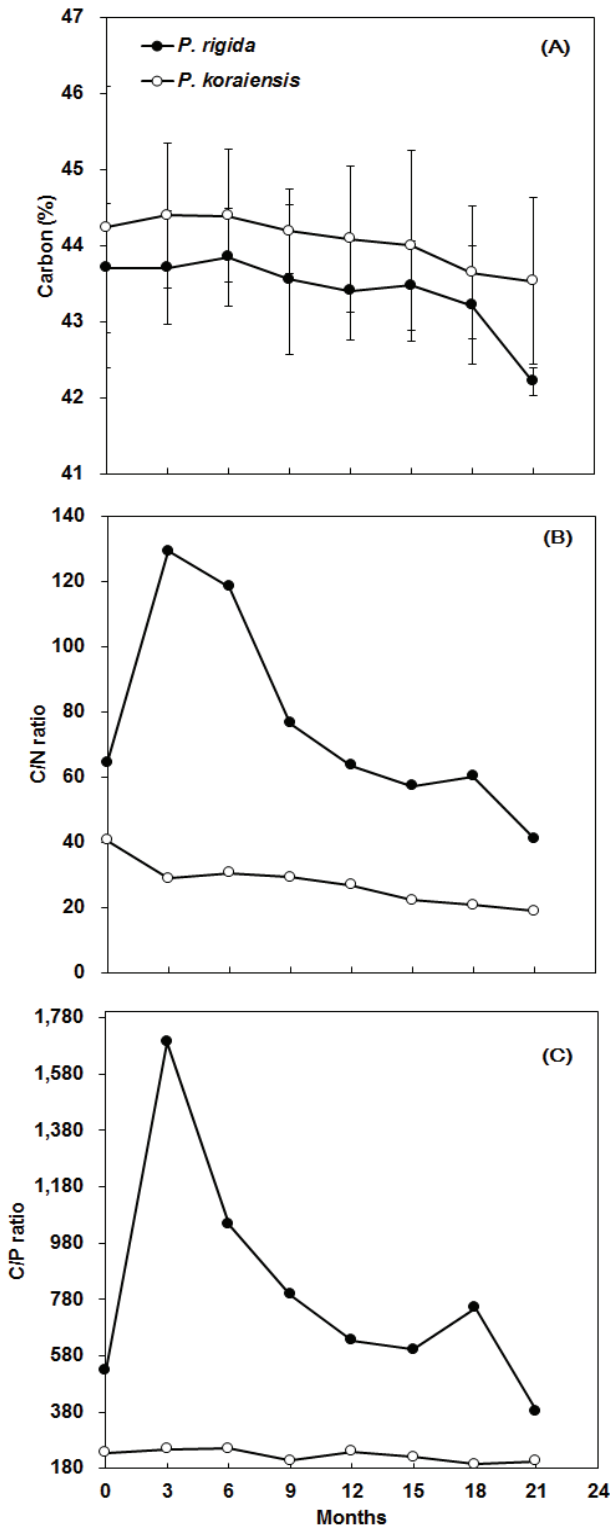


Figure 3. Changes of carbon %(A), C/N ratio(B) and C/P ratio(C) in decomposing leaf litter of the *P. rigida* and *P. koraiensis* on the study area. Bars indicate SD

슷한 탄소함량이지만 질소함량이 비교적 많이 적은 리기다소나무 낙엽의 경우 분해자가 이용할 영양분의 불균형으로 C/N비가 급격히 변한 것으로 보인다. 비교적 탄소와 질소함량이 모두 높은 잣나무낙엽은 분해자의 이용이 용이해 균형을 이뤄 C/N비도 큰 변화가 없이 일정하게 줄어드는 것으로 판단된다.

토양특성상 질소가 풍부하고 인이 제한되어 있기 때문에 낙엽의 질소의 농도보다 인의 농도가 분해율과 더 높은 상관관계를 갖는 것으로 알려지고 있다. 낙엽의 절대적인 질소 농도가 분해율을 결정하는 것은 아니며 토양 내 양분 함량과 그 비율이 중요하다(Liu *et al.* 2010). 토양 내 인이 제한된 환경은 질소결핍환경과 마찬가지로 분해율에 영향을 미친다(Xu and Hirata 2005). 일반적으로 곰팡이 군사가 이동성이 작은 인을 토양에서 낙엽으로 옮겨 낙엽의 인부동화율이 높이게 되는데 분해자의 인요구도는 낙엽이 가지고 있는 양보다 크다(Hobbie and Vitousek 2000). 리기다소나무 낙엽의 초기 C/P비는 529.8이었으며 3개월째에 1693.8까지 급격히 증가하였다가 시간이 경과함에 따라 점차 감소하여 21개월째에 384.1을 나타내었다. 잣나무낙엽은 초기 C/P비 236.2에서 21개월째 205.2로 큰 차이를 보이지 않았다(Figure 3C).

일반적으로 분해 과정에 따른 인의 동태는 종에 따라 매우 다양하다고 보고되어 있다(Gosz *et al.* 1973, Schlesinger 1985, Baker *et al.* 2001).

3. 분해과정에 따른 영양염류 함량 및 잔존물의 변화

리기다소나무와 잣나무 낙엽의 분해과정에 따른 영양염류 함량 변화를 Figure 4에 정리하였다. 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 초기 질소 함량은 각각 6.78, 10.90 mg/g으로 잣나무 낙엽의 초기질소 함량이 리기다소나무 낙엽에 비해 현저히 높았다. 낙엽의 분해가 진행됨에 따라 두 종 낙엽의 질소함량은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 리기다소나무 낙엽의 분해 21개월경과 후 질소 함량은 10.29 mg/g이었으며, 잣나무 낙엽의 경우 21개월경과 후 질소 함량은 23.05 mg/g으로 잣나무 낙엽의 질소 함량 증가 폭이 리기다소나무에 비해 높은 것으로 나타났다(Figure 4A). 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(Olsen, 1932), 강우, 먼지, 곤충의 배설물 등이 첨가되기 때문인 것으로 판단된다(Bocock, 1964). Won *et al.*(2014), Mun(2009), Namsung *et al.*(2008)이 보고한 신갈나무, 굴참나무 그리고 소나무 낙엽의 분해에서도 분해과정에 따라 질소함량이 증가하였다고 보고되었다. 분해과정

에 따른 질소의 잔존률은 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽에서 대조적인 패턴을 보여, 리기다소나무 낙엽의 경우 지속적인 무기화 현상을 보여 21개월경과 후 질소의 잔존률은 88.4%이었으며, 잣나무 낙엽의 경우 이와 반대로 지속적인 부동화 현상을 보여 21개월경과 후 질소잔존률은 114.4%로 나타났(Figure 4F). 수중에 따른 질소 잔존률의 차이는 임상낙엽층과 토양층의 환경요인 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 낙엽의 분해과정에서 질소의 동태는 용탈 위주의 초기감소 단계, 토양 미소동물의 활성을 통한 잔유물이 유입되는 부동화 단계, 낙엽분해에 의해 양분의 절대량이 감소하는 무기화 단계의 3단계로 구분될 수 있다고 보고되어 있는데(Berg and Staaf, 1981), 리기다소나무 낙엽의 경우 초기 세탈이 크게 일어나 초기 무기화가 지속되었으나, 시간이 경과함에 따라 잔유물이 유입되어 부동화 과정이 진행될 것으로 사료된다.

리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 초기 인 함량은 각각 0.83, 1.87 mg/g 으로 질소와 마찬가지로 잣나무 낙엽의 초기 인 함량이 높은 것으로 나타났다. 잣나무 낙엽의 경우 분해가 진행됨에 따라 인의 함량이 점차 증가하여 21개월 후 인의 함량은 2.12 mg/g 이었다. 잣나무 낙엽과는 달리 리기다소나무 낙엽의 경우 분해초기에 일시적으로 감소하여 분해 3개월경과 후 인 함량이 0.26 mg/g 이었으나 이후 잣나무와 마찬가지로 점차 증가하여 21개월경과 후 인의 함량은 1.10 mg/g으로 나타났다(Figure 4B). 이는 Won *et al.*(2012)이 발표한 가시나무 낙엽의 인 함량 변화와 유사하였는데, 분해과정에 따른 인 함량의 증가 또한 질소와 마찬가지로 일반적인 현상으로 보고되어 있으며(Gosz *et al.* 1973; Brinson 1977), 낙엽의 분해과정에 따른 인의 동태는 낙엽의 종류에 따라 매우 다양하다고 보고된 바 있다(Gosz *et al.*, 1973; Baker *et al.*, 2001). 분해과정에 따른 리기다소나무 낙엽의 인 잔존률은 지속적인 무기화가 일어나 분해 21개월경과 후에는 그 값이 88.4%로 나타났고, 잣나무 낙엽의 인 잔존률 또한 지속적인 무기화 추세를 보여 21개월경과 후 인 잔존률은 61.3%로 나타났다(Figure 4G). 그러나 잣나무 낙엽의 경우 지속적인 인 잔존률의 증가경향으로 일정기간이 경과한 후에는 부동화 과정을 나타낼 것으로 판단된다.

리기다소나무 낙엽의 초기 칼륨 함량은 2.84 mg/g 이었고, 질소와 인의 경우와는 다르게 분해 초기부터 지속적으로 감소하여 21개월경과 후 칼륨의 함량은 1.30 mg/g 이었다. 잣나무 낙엽의 경우 초기 칼륨함량은 5.82 mg/g로 리기다소나무에 비해 높았으며 분해초기에 신속히 감소한 후 점차 증가하여 분해 21개월경과 후에는 그 값이 0.82 mg/g 이었다(Figure 4C). 분해 중인 낙엽의 칼륨 함량은 초기에 신속히 감소하는 것으로 보고되고 있는데 (Yoo, 1991; Kim

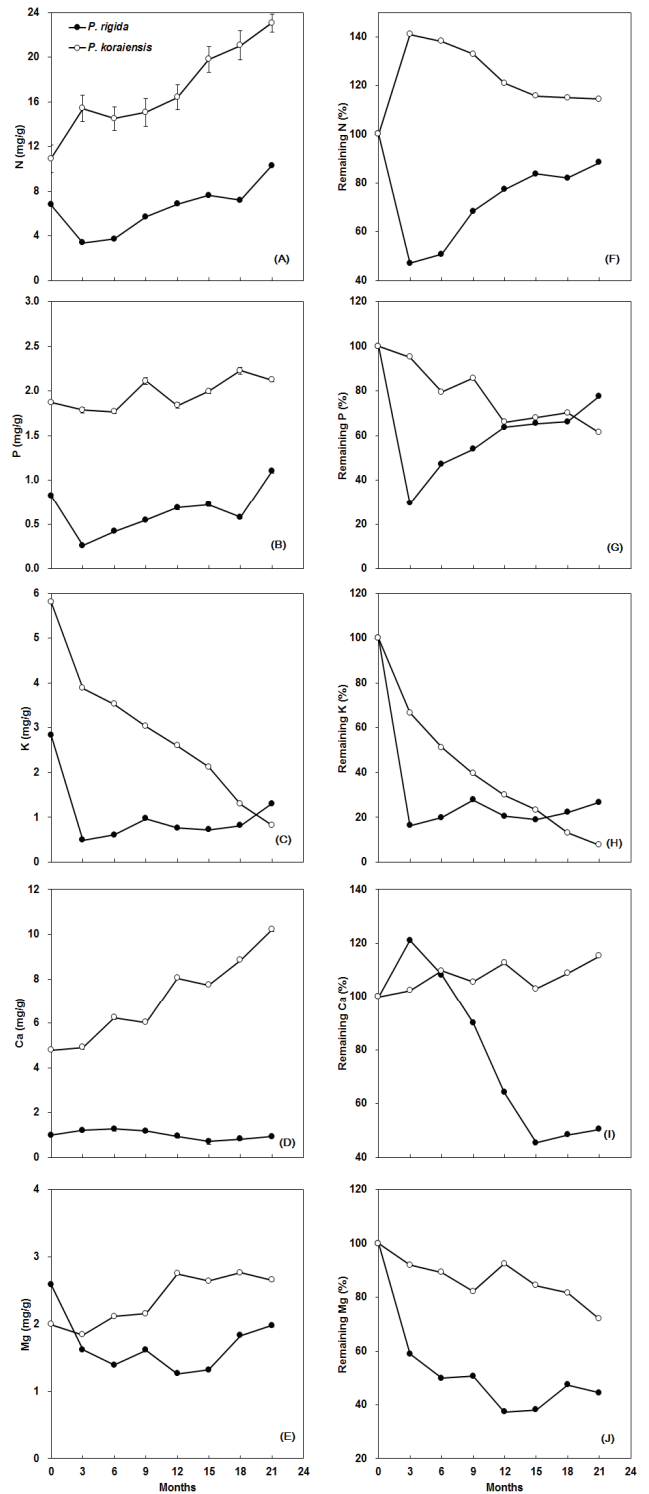


Figure 4. Changes of N, P, K, Ca, Mg concentration(A, B, C, D, E) and % remaining N, P, K, Ca, Mg(F, G, H, I, J) in decomposing leaf litter of *P. rigida* and *P. koraiensis* on the study area. Bars indicate SD

et al., 2003; Lee et al., 2006; Gosz et al., 1973; Brinson, 1977; Swift et al., 1979; Klemmedson et al., 1985; Namgung et al., 2008; Mun, 2009), 이러한 경향은 칼륨이 낙엽의 유기물질 구성요소가 아니기 때문에 세탈에 의한 영향을 비교적 쉽게 받기 때문으로 판단된다 (Gosz et al., 1973; Lousier and Parkinson, 1978; Xu et al., 2004). 분해 과정에 따른 칼륨의 잔존률은 리기다소나무와 잣나무 두 수종에서 모두 급격히 감소하여 21개월경과 후 칼륨의 잔존률은 각각 26.7, 7.6%로 나타났으며 지속적인 무기화 양상을 보였다(Figure 4H).

리기다소나무 낙엽의 초기 칼슘 함량은 0.99 mg/g 이었으며, 분해과정에 따라 일부 증가와 감소를 반복하였으나 초기값과 크게 차이가 나지 않았다. 반면 잣나무 낙엽의 경우 리기다소나무 낙엽과는 다르게 초기부터 지속적인 증가를 보여 초기 칼슘 함량이 4.79 mg/g에서 21개월경과 후 칼슘의 함량은 10.20 mg/g 이었다(Figure 4D). 칼슘은 식물 조직 중 세포벽의 구성성분인 관계로 세탈로부터 보호를 받기 때문에 다른 성분에 비하여 용출이 적다고 보고되어 있어(Edmonds and Thomas 1995; Kim et al. 2003), 본 연구의 리기다소나무 낙엽의 경우 이와 유사한 양상을 보였으나, 잣나무는 다소 상이한 결과를 보여, 잣나무 낙엽의 낙엽분해 과정 중 칼슘함량의 변화에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 리기다소나무 낙엽의 칼슘 잔존률은 분해초기에 일시적인 부동화를 보인 후 지속적으로 감소하여 무기화 양상을 나타내었으며, 잣나무 낙엽의 경우 지속적인 부동화 경향을 보였다. 분해 21개월경과 후 리기다소나무와 잣나무 낙엽의 칼슘 잔존률은 각각 50.5, 115.2 %이었다(Figure 4I).

리기다소나무 낙엽의 초기 마그네슘 함량은 5.59 mg/g이였으며, 분해가 진행되는 동안 감소 후 증가하여 분해 21개월경과 후에는 그 값이 1.98로 다소 감소하였고, 잣나무 낙엽의 경우 지속적으로 마그네슘 함량이 증가하여 초기 2.00 mg/g에서 21개월경과 후 마그네슘의 함량은 2.66 mg/g이었다(Figure 4E). 식물의 분해과정 중 마그네슘의 함량은 초기에는 감소하나 후기에는 소실률이 느리다고 보고되어 있는데(Mun and Pyo 1994, Kelly and Beauchamp, 1987), 본 조사의 리기다소나무 낙엽에서도 이러한 양상을 보였다. 분해기간 중 마그네슘의 잔존률을 분해 기간 중 지속적인 무기화 양상을 보여 리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 21개월경과 후 마그네슘 잔존률은 각각 44.5, 72.0%이었다(Figure 4J).

리기다소나무 낙엽과 잣나무 낙엽의 분해기간 동안 영양염류의 잔존률의 경우, 상록성 침엽수종임에도 불구하고 두 수종 간 분해율 및 영양염류의 잔존률이 다소 상이한 결과를 보였다. 국내에서 조림수종의 낙엽분해에 관한 연구가

전무한 실정으로 두 수종의 차이에 대한 정확한 비교는 어려우나, 향후 산지의 조림 또는 조림지 물질순환의 명확한 파악을 위해서는 이들 조림수종의 장기적인 분해율 및 분해 과정에 따른 영양염류의 동태에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 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. *Forest Ecology and Management* 202(1-3): 1-11.
- Baker, T.T., B.G. Lockaby, W.H. Conner, C.E. Meier, J.A. Stanturf and M.K. Burke(2001) Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in four southern forested floodplain communities. *J. American Socof. Soil Sci.* 65: 1334-1347.
- Berg, B. and G. Agren(1984) Decomposition of needle litter and its organic chemical components; theory and field experiments : long term decomposition in a Scots pine forest 3. *Canadian Journal of Botany* 62: 2880-2888.
- 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.
- Berg, B., M.P. Berg, P. Bottner, E. Box, A. Breymeyer, R.C. De Anta, ... and M. Madeira(1993) Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry*, 20(3): 127-159.
- Berg, B., H. Staaf and B. Wessen(1987) Decomposition and nutrient release in needle litter from nitrogen-fertilized Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands. *Sca. J. For. Res.* 2: 399-415.
- Berg, B., K. Hannus, T. Popoff and O. Theander(1982) Changes in organic chemical components of needle litter during decomposition. In Long-term decomposition in a Scots pine forest. I. *Canadian Journal of Botany* 60: 1310-1319.
- Black, C.A., D.D. Evans and R.C. Dinauer(1965) Methods of soil analysis. *American Society of Agronomy*, Madison, WI.
- Blanco, J.A., J.B. Imbert and F.J. Castillo(2008) Nutrient return via litterfall in two constrating *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.

- Bray, J.R. and E. Gorham(1964) Litter production in forests of the world. *Advance in Ecological Reserch* 2: 101-157.
- Brinson, M.M.(1977) Decomposition and nutrient exchange of litter in an Alluvial swamp forest. *Ecology* 58(3): 601-609.
- Chang, N.K. and J.H. Yoo(1986) Annual fluctuations and vertical distributions of cellulase, xylanase activities and soil microorganisms in humus horizon of a *Pinus rigida* stand. *Korean J. Ecology* 9(4): 231-241.
- 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.
- Daubenmire, R.F.(1953) Nutrient content of leaf litter of trees in the Northern Rocky Mountains. *Eco.* 34(4): 786-793.
- 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.
- Fogel, R. and K. Cromack Jr(1977) Effect of habitat and substrate quality on Douglas-fir litter decomposition in western Oregon. *Can. J. Bot.* 55: 1632-1640.
- Gosz, J.R., G.E. Likens and F.H. Bormann(1973) Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. *Ecological Monographs* 43: 173-191.
- Heal, O.W., J.M. Anderson and M.J. Swift(1997) Plant litter quality and decomposition : an historical overview. In : Cadisch G, Giller KE, eds), *International Wallingford, UK*, pp. 3-45. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. CAB.
- Hobbie, S.E. and P.M. Vitousek(2000) Nutrient limitation of decomposition in Hawaiian forests. *Ecology* 81(7): 1867-1877.
- Jensen, H.L.(1929) On the influence of the carbon:nitrogen ratios of organic material on the mineralization of nitrogen. *J. Agr. Sci.* 19: 71-82.
- Jensen, V.(1974) Decomposition of angiosperm tree leaf litter. In *Biology of plant litter decomposition Vol. 1* (Dickson CH, Pugh GJF, eds). Academic Press, New York. pp. 69-104.
- 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.M. and N.K. Chang(1965) The decomposition rate of litter affecting the amount of mineral nutrients of forest soil in the Korea. *Bull Eco. Soc. Am. Sep.* 14p
- Kim, C.S., J.H. Lim and 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 Meteoro* 5(2): 87-93.
- Kim, J.K. and N.K. Chang(1989) Litter production and decomposition in the *Pinus Rigida* plantation in Mt. Kwanak. *J. Ecol. Field Biol.* 12(1): 9-20.
- Klemmedson, J.O., C.E. Meier and R.E. Campbell(1985) Needle decomposition and nutrient release in ponderosa pine ecosystems. *Forest Science* 31: 647-660.
- Kucera, C.L.(1959) Weathering characteristics of deciduous leaf litter. *Eco.* 40(3): 485-487.
- Lee, E.K., J.H. Lim, C.S. Kim and Y.K. Kim(2006) Nutrient Dynamics in Decomposing Leaf Litter and Litter Production at the Long-Term Ecological Research Site in Mt. Gyeong. *J. Ecol. Field Biol.* 29(6): 585-591.
- Liu, P., J. Huang, O.J. Sun and X. Han(2010) Litter decomposition and nutrient release as affected by soil nitrogen availability and litter quality in a semiarid grassland ecosystem. *Oecologia* 162: 771-780.
- Lousier, J.D. and D. Parkinson(1978) Chemical element dynamics in decomposing leaf litter. *Canadian Journal of Botany* 56: 2795-2812.
- Meentemeyer, V., E.O. Box and R.T. Thompson(1982) World patterns and amounts of terrestrial litter production. *BioScience* 32: 125-128.
- Melillo, J.M., J.D. Aber and J.F. Muratore(1982) Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Eco.* 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.
- Mun, H.T. and J.H. Pyo(1994) Dynamics of nutrient and chemical constituents during litter decomposition. *Korean Journal of Ecology* 17(4): 501-511.
- Mun, H.T. and H.T. Joo(1994) Litter Production and Decomposition in the *Quercus acutissima* and *Pinus rigida* Forests. *J. Eco. Field Bio.* 17(3): 345-353.
- Mun, H.T. and J.H. Pyo(1994) Dynamics of Nutrient and Chemical Constituents during Litter Decomposition. *J. Ecol. Field Bio.* 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.(2010) Production and Nutrient cycling in the *Quercus variabilis* forest at Mt. Worak. Ph. D. thesis, Univ. of Kongju, Gongju, Korea., 58pp. (in Korean with English abstract)
- Namgung, J., A.R. Han and 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.
- Olsen, C.(1932) Studies of nitrogen fixation: nitrogen fixation in

- the dead leaves of forest beds. *Compt Rend Trav Lab Carlsberg*. 19: 36.
- Olson, J.S.(1963) Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Eco*. 44: 321-331.
- Park, B.K. and I.S. Lee(1981) A Model for Litter Decomposition of the Forest Ecosystem in South Korea. *J. Eco. Field Bio*. 4(1-2): 38-51.
- Schlesinger, W.H.(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 composting to produce a commercially saleable product. A Report Prepared for SWAP. *Aqua Enviro*. pp18.
- Song, J.E.(2011). Additive effects of mixing litter on litter decomposition and N, P and C dynamics in a Mongolian oak (*Quercus mongolica*) natural stand and a Korean pine(*Pinus koraiensis*) plantation. Ph. D. thesis, Univ. of Seoul. Seoul, Korea, 25pp. (in Korean with English abstract)
- Swift, M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson(1979) Decomposition in terrestrial ecosystems. *Studies in Ecology Vol 5*. Univ of California Press, Berkley and Los Angeles, 372pp.
- Won, H.Y., D.K. Kim, K.J. Lee, S.B. Park, J.S. Choi and H.T. Mun(2014). Long term decomposition and nutrients dynamics of *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* leaf litter in Mt. Worak National Park. *Korean Journal of Environment and Ecology* 28(5): 566-573. (in Korean with English abstract)
- Won, H.Y., K.H. Oh and H.T. Mun(2012). Decay Rate and Nutrient Dynamics during Litter Decomposition of *Quercus acutissima* in Gongju and Jinju. *Journal of Wetlands Research*, 14. Dynamics of nutrient and chemical constituents during litter decomposition.
- Xu, X., E. Hirata, T. Enoki and 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*. *Kongju University*, 22p. (in Korean with English abstract)