J. Ecol. Field Biol. 29 (6): 585 ~ 591, 2006

계방산 장기생태조사지의 낙엽 생산량 및 낙엽 분해에 따른 양분 동태

이임균[1]*· 임종환[1]·김춘식[2]·김영걸[1]
[1]국립산림과학원 산림환경부, [2]진주산업대학교 산림자원학과

Nutrient Dynamics in Decomposing Leaf Litter and Litter Production at the Long-Term Ecological Research Site in Mt. Gyebangsan

Lee, Im Kyun[1]*, Jong Hwan Lim[1], Choonsig Kim[2] and Young Kul Kim[1]
[1]*Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea*
[2]*Department of Forest Resources, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea*

ABSTRACT: We measured the litterfall quantity and investigated the nutrient dynamics in decomposing litter for three years at the LTER sites installed in a deciduous broadleaf natural forest in Mt. Gyebangsan, South Korea. Litterfall production was significantly different among the sampling dates, whereas it was not significantly different among the years. The total annual mean litterfall production for three years was 6,593 kg ha^{-1} yr^{-1} and leaf litter accounted for 82.6% of the litterfall. The leaf litter quantity was highest in *Quercus mongolia*, followed by leaf of other species, *Betula schmidtii*, *Kaplopanax pictus*, *Acer pseudo-sieboldianum*, etc., which are dominant tree species in the site. The mass loss from the decomposition of leaf litter was fastest in *Cortinus controversa* (100%), followed by *A. pseudo-sieboldianum*, *K. pictus*, and *B. schmidtii*. 100% of litter for *C. controversa*, 96.1% for *A. pseudo-sieboldianum*, 92.8% for *K. pictus* decomposed, while 66.2% of litter for *Q. mongolia* decayed for 1,003 days. The lower rate of the mass loss in the litter of *Q. mongolia* may be attributed to the difference in substrate quality, such as lower nutrient concentrations compared with those of other tree species. The concentrations of N, P, and Ca for five litter types increased over time, while the concentrations of K and Mg decreased over time. Compared with the nutrients in the litter of *Q. mongolia*, the nutrients (N, P, K, Ca, Mg) in the litter of other species, *C. controversa, A. pseudo-sieboldianum,* and *K. pictus,* were released more rapidly. The results showed that the mass loss and the nutrient dynamics in the litter are variable depending on the tree species even in the same site conditions.

Key words: Litter decomposition, Litterfall, LTER, nutrient dynamics

서 론

대부분의 산림 생태계에 있어서 낙엽은 지상부 임목의 구성 성분으로부터 토양 표면으로 이동되는 양분들과 에너지의 주요 경로라 할 수 있으며(이와 손 2006), 산림 생태계에서 낙엽 낙지의 유입과 유입된 낙엽 낙지의 분해는 산림의 주요한 탄소 및 양분의 공급원이다(Kim et al. 2003).

낙엽의 생산량은 기온, 강우량 및 곤충 등에 의해 결정되며(Lousier and Parkinson 1975), 산림이 평형 상태에 도달하게 되면 생산량 또한 일정하게 유지된다(Turner and Lambert 1986). 박 등(1970)과 이(1980)는 기후와 고도가 같은 경우, 잎의 현존량은 침엽수림이 활엽수림보다 많지만 낙엽의 생산량은 활엽수림이 침엽수림보다 많다고 보고한 바 있다. 또한 Twilley 등(1986) 그리고 Sharma와 Ambasht (1987)는 낙엽의 생산량은 계절적으로는 각기 다른 양상을 나타내는데 비해 연간 비교에 있어서는 해마다 같은 경향이 유지되고 있다고 보고하였다. 따라서 연간 낙엽량은 1차 생산성의 표지자라 할 수 있으며(Bray and Gorham 1964, Vogt et al. 1986), 낙엽 내 양분 농도는 해당 임분의 양분 이용 효율 지수로서 이용될 수 있다(Vitousek 1982).

또한 산림 생태계에서 매년 낙엽이나 낙지로 토양에 환원되는 유기물의 분해 생성물은 임목에 필요한 양분의 공급원으로써 중요한 역할을 하기 때문에 낙엽의 분해 과정과 분해 과정에 따른 양분 동태를 구명하는 연구가 필수적이다. 지금까지 침엽수림을 대상으로 한 낙엽량의 유입이나 낙엽 분해 연구는 일부 수행된 바 있으나(김 등 1997, 유 등 2000, 이와 손 2006), 천연 활엽수림을 대상으로 한 연구는 그리 많지 않다(Kim et al. 2003).

따라서 본 연구의 목적은 우리나라 온대 북부지역의 활엽수림에 조성되어 있는 장기생태조사지에서 우점종인 신갈나무,

* Corresponding author; Phone: +82-2-9612-608, Fax: +82-2-9612-629, e-mail: iklee@foa.go.kr

박달나무, 음나무 등을 중심으로 연간 낙엽량 및 낙엽 분해율, 그리고 낙엽 및 낙엽 분해를 통한 양분 동태를 파악하고자 수행하였다.

재료 및 방법

조사지 개황

본 연구는 강원도 홍천군 내면 계방산에 위치한 장기생태조사지(북위 37°44', 동경 128°29', 조사지 해발고 900 m ~ 960 m)에서 수행하였다(Fig. 1).

우리나라에서 온대 북부지역으로 분류되는 이 지역의 토양은 산성 모재인 화강편마암류가 주종을 이루고 있으며, 토심이 깊고 유기물 함량이 많은 갈색 산림토양이 주로 분포하였다. 조사지 토양의 물리·화학적 성질을 Table 1에 나타내었다.

장기생태조사지는 신갈나무, 당단풍나무, 피나무, 박달나무, 소나무 등이 우점하는 산림으로써 흉고직경 2 cm 이상의 수목류와 흉고 직경 5 cm 이상의 관목류 개체수는 ha당 2,950본이었고 ha당 흉고 단면적은 36.3 m^2이었다(임 등 2003).

연간 낙엽 생산량 및 낙엽 분해율 측정

낙엽은 4조사구(20 m × 10 m)에 각각 4개의 원형 트랩(원면적 0.25 m^2)을 이용하여 2002년 10월부터 2005년 9월까지 동절기(12월 ~ 4월)를 제외하고는 대략 한달 간격으로 채취하였다. 채취한 낙엽은 잎, 가지, 수피, 열매(꽃), 기타 등 5종류로 구분하여 65℃에서 48시간 동안 건조 후 건중량을 측정하고 이를 분쇄하여 양분 함량(N, P, K, Ca, Mg)을 분석하였다.

또한 2003년 11월에 낙엽층에 떨어진 신선한 낙엽 중 주요 수종인 신갈나무, 박달나무, 음나무, 당단풍나무, 그리고 층층나무 등 5개 수종의 낙엽을 선별하여 14일간 실내에서 음건시킨 후 60℃ 건조기에서 항량이 될 때까지 건조하고 수종별로 낙엽 분해 주머니(30 cm × 30 cm, 150 mesh)에 10 g씩 넣어 총 300개의 낙엽 분해 주머니를 제작하였다. 낙엽 분해 주머니는 2003년 12월 27일 현지에 매설하였으며, 2005년 9월까지 약 3개월 간격으로 수거하여 낙엽의 분해율을 조사하였다. 분해율 측

Fig. 1. Topography (left) and view (right) at the Long-Term Ecological Research site in Mt. Gyebangsan.

Table 1. Soil physical-chemical characteristics of mineral soils (0 ~ 20 cm depth, *n*=5) at the Long-Term Ecological Research site in Mt. Gyebangsan. Values are averages of plots with standard errors of the mean in parentheses

Soil depth (cm)	Particle size (%)			Soil Texture	pH	O.M. (%)	T.N. (%)	A.P. (ppm)	C.E.C	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
	Sand	Silt	Clay						(meq./kg)				
0 ~ 10	38.0 (2.5)	49.8 (3.3)	12.2 (0.8)	L	5.23 (0.14)	7.35 (0.42)	0.23 (0.05)	19. 6(3.21)	14.8 (2.47)	0.47 (0.06)	0.09 (0.004)	1.75 (0.31)	1.17 (0.04)
0 ~ 20	41.1 (1.9)	46.3 (2.8)	12.6 (0.7)	L	5.19 (0.08)	3.18 (0.21)	0.14 (0.04)	12.1 (1.97)	15.4 (1.58)	0.28 (0.04)	0.08 (0.005)	0.89 (0.19)	0.83 (0.06)

정이 끝난 시료는 분쇄하여 양분 함량(N, P, K, Ca, Mg) 분석(농업기술연구소 1988)에 사용하였다.

결과 및 고찰

낙엽 생산량의 계절적 변이 및 구성요소별 비율

낙엽 생산량의 계절적 경향을 Fig. 2에 나타내었다. 조사 기간 동안 낙엽 생산량은 계절간에는 고도의 유의성이 있는 것으로 나타났으나(p<0.001) 연도간에는 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 2002년 10월부터 2003년 9월까지의 연간 낙엽 생산량은 6,782 kg/ha이었으며, 2003년 10월부터 2004년 9월까지는 6,568 kg/ha, 그리고 2004년 10월부터 2005년 9월까지는 6,428 kg/ha로 매년 연간 낙엽 생산량은 적어지는 경향을 보였으나 통계적인 유의성은 나타나지 않았다. 이와 같은 결과는 조사 기간 동안 계방산 지역에 낙엽·낙지량에 영향을 크게 미치는 태풍 등이 없었기 때문으로 판단되며, 이는 *Alnus nepalensis*를 대상으로 낙엽 낙하 요인의 큰 변화가 없을 때에는 해마다 같은 양상의 월별 낙엽량을 보인다고 한 Sharma와 Ambasht(1987), 그리고 산림이 평형 상태에 도달하게 되면 생산량 또한 일정하게 유지된다는 Turner와 Lambert(1986)의 결과와도 일치되는 것이다.

계방산 장기생태조사지의 3년간의 평균 낙엽 생산량 6,593 kg/ha는 수종, 기후, 고도 그리고 낙엽 양상의 차이로 본 연구 결과와 직접적인 비교는 어려우나 같은 기간동안 조사된 광릉 장기생태조사지의 5,852 kg/ha와 남해 금산 장기생태조사지의 4,945 kg/ha에 비해서는 낙엽 생산량이 많은 것으로 나타났다(국립산림과학원 2005). 그리고 활엽수림을 대상으로 조사된 광릉의 서어나무림과 떡갈나무림의 2,756과 3,440 kg/ha(박 등 1970), 지리산 서어나무림과 졸참나무림의 2,982, 3,383 kg/ha (Chang and Kim 1983), 그리고 Northern Vancouver의 *Thuja plicata*와 *Tsuga heterophylla* 임분에서 조사된 3,094, 4,137 kg/ha (Keenan et al. 1995) 보다도 연간 낙엽 생산량이 많은 것으로 나타났다. 또한 Olsen(1963)의 낙엽 생산량에 대한 기준 중에서 매우 높은 편이라 할 수 있는 4,000 kg/ha 이상이 낙하하였기 때문에 본 조사지의 연간 낙엽 생산량은 매우 높았다고 할 수 있다.

조사 기간 동안 낙엽·낙지의 구성 요소별 비율을 Fig. 3에 나타내었다. 낙엽·낙지의 구성 요소별 비율은 계절간, 그리고 연도간 모두 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 3년간 평균 낙엽·낙지의 구성 요소별 비율은 신갈나무 잎(26.2%) > 기타 수종의 잎(23.1%) > 박달나무 잎(13.7%) > 음나무 잎(9.2%) > 가지(8.7%) > 당단풍나무 잎(5.8%) > 기타(3.6%) > 열매 등(3.3%) > 피나무 잎(2.9%) > 수피(1.9%) > 침엽(1.2%) > 층층나무 잎(0.4%) 등의 순으로 매년 같은 양상이었다.

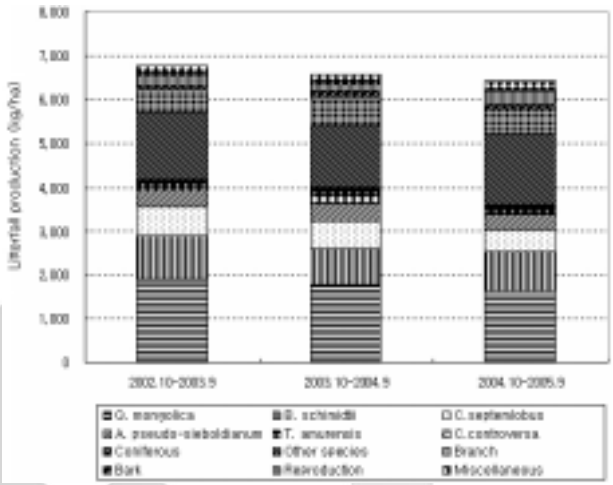

Fig. 3. Composition rates (%) of each component in litterfall at the LTER site in Mt. Gyebangsan.

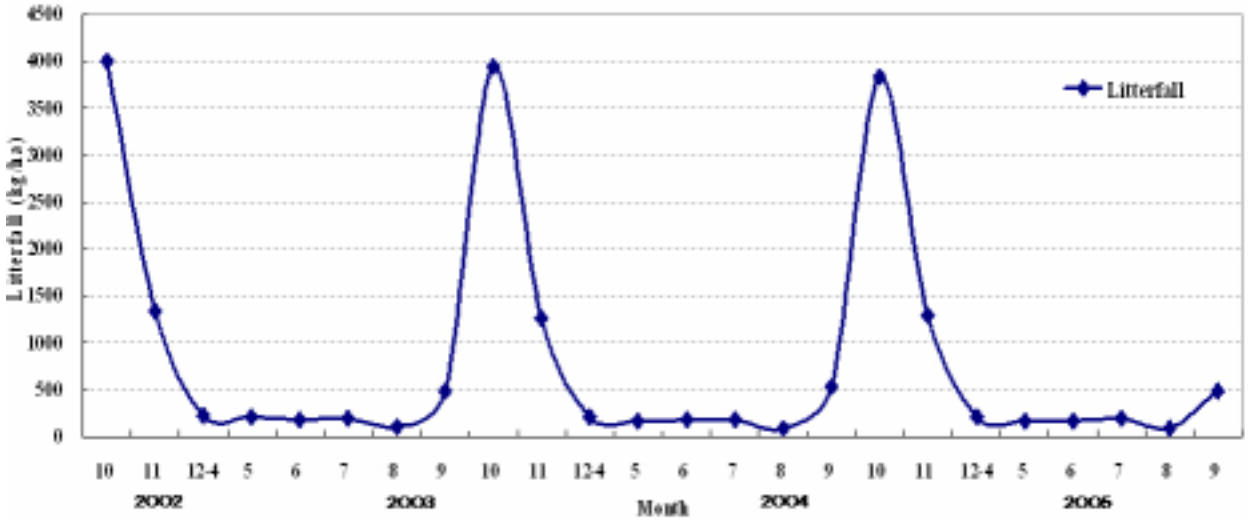

Fig. 2. Seasonal patterns of litterfall production (kg/ha, n=4) for 3 years at the LTER site in Mt. Gyebangsan.

전체 유입량 가운데 잎이 차지하는 비율은 82.6%로 이는 같은 기간 광릉 장기생태조사지에서 조사된 61%에(Kim *et al.* 2003) 비해 매우 높은 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 계방산 지역이 광릉 지역에 비해 수종이 다양하며, 임목 밀도가 높고 수관 울폐도가 높은데 기인하는 것으로 판단된다(임 등 2003).

낙엽을 통한 양분 유입량

낙엽을 통한 양분 유입량은 연도간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 따라서 3년간의 값들을 평균하여 주요 양분별 연평균 유입량을 조사한 결과(Fig. 4), 칼슘이 43.4 kg ha^{-1} yr^{-1}로 가장 높았으며, 질소(26.9 kg ha^{-1} yr^{-1}), 칼륨(12.6 kg ha^{-1} yr^{-1}), 마그네슘(9.7 kg ha^{-1} yr^{-1}) 그리고 인(0.9 kg ha^{-1} yr^{-1})의 순이었다. 이와 같은 결과는 광릉 장기생태조사지에서 1998년 10월부터 2000년 10월까지 조사된 칼슘(34.0 kg ha^{-1} yr^{-1}) > 질소(20.5 kg ha^{-1} yr^{-1}) > 칼륨(11.8 kg ha^{-1} yr^{-1}) > 마그네슘(6.0 kg ha^{-1} yr^{-1}) > 인 (1.0 kg ha^{-1} yr^{-1})의 결과와 경향이 일치되었으며(Kim et al. 2003), 계방산 장기생태조사지의 총 양분 유입량은 93.5 kg ha^{-1} yr^{-1}로 광릉의 73.3 kg ha^{-1} yr^{-1}보다 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 조사지간 양분 유입량에 차이가 있는 이유는 입지환경이나 구성 수종 등의 차이에 기인하는 것으로 판단되나 각 양분들의 농도는 조사지간에 유사하였던 것을 감안하면(자료 미제시), 두 조사지간 낙엽 생산량의 차이(계방산 : 6,593 kg ha^{-1} yr^{-1}, 광릉: 5,852 kg ha^{-1} yr^{-1})가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 낙엽을 통한 양분 유입량을 수종별로 살펴본 결과, 신갈나무가 35.4 kg ha^{-1} yr^{-1}로 총 양분 유입량의 38%를 차지하였으며, 음나무(26.2 kg ha^{-1} yr^{-1}), 당단풍나무(9.2 kg ha^{-1} yr^{-1}), 그리고 층층나무(1.1 kg ha^{-1} yr^{-1}) 순이었다.

낙엽 분해율

조사 기간 동안 계방산 장기생태조사지 내 주요 수종의 낙엽 분해율을 조사한 결과(Fig. 5), 1,003일이 경과한 시점에서 층층나무는 분해가 완료(100%)되었으며, 당단풍나무(93.1%), 음나무(92.8%), 박달나무(81.4%), 그리고 신갈나무(66.2%)의 순이었다. 분해율이 가장 빨랐던 층층나무의 경우, 경기도 광릉지역에서는 855일 이전에 분해가 완료된 바 있으나(국립산림과학원 2005), 본 조사지에서는 818일을 기준으로 97.2%의 분해율을 보여 분해속도가 다소 늦은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 계방산 지역이 광릉 지역에 비해 고도가 높고 연평균 기온이 낮아 낙엽의 분해과정에 큰 영향을 미치는 토양 미소동물의 활동이 위축된데 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구에서 신갈나무 낙엽의 분해가 느리게 진행된 것은 다른 수종에 비해 낙엽 내 양분 함량이 낮고(Fig. 6) 잎이 크며 질긴데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 광릉 장기생태조사지에서 졸참나무가 약 700일 경과 후 52%가 분해되어 같은 기간동안 77%의 분해율을 보인 서어나무와 84%의 까치박달에 비해 분해율이 낮았음을 보고한 Kim 등(2003)의 결과와 남해 금산 장기생태조사지에서 32개월 경과 후 졸참나무는 51%가 분해되어 62%가 분해된 혼합 낙엽에 비해 분해율이 낮았음을 보고한 바 있는 원 등(2005)의 결과와 모두 일치하는 것이다.

낙엽 분해 과정에서의 양분 변화

분해중인 낙엽에서의 질소 농도는 5개 수종 모두 조사 기간 동안 대체로 증가하는 경향을 보였으며, 수종별 평균 질소 농도는 층층나무 > 음나무 > 당단풍나무 > 신갈나무, 박달나무의 순으로 낙엽 분해율과 유사한 양상을 나타내었다. 낙엽 분해 과정동안 질소 농도가 증가된 것은 여러 연구자들(김 등 2003, Laj 2004, 원 등 2005)에 의해 관찰된 바 있으며, Bockheim과 Jepsen (1991)은 낙엽 분해 과정에서 질소 농도가 증가되는 것은 미생물에 의한 질소 부동화와 대기 중 질소 유입, 그리고 균류의 활성 때문이라고 보고한 바 있다.

또한 Staff와 Berg (1982)는 낙엽 분해 과정에서의 질소 동태는 3단계로 구분됨을 보고한 바 있는데, 용탈 위주의 초기 감소 단계, 토양 미소동물의 활성을 통한 잔유물이 유입되는 부동화 단계, 낙엽 분해에 의해 양분의 절대량이 감소하는 무기화 단계이다. 본 연구 결과도 이와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

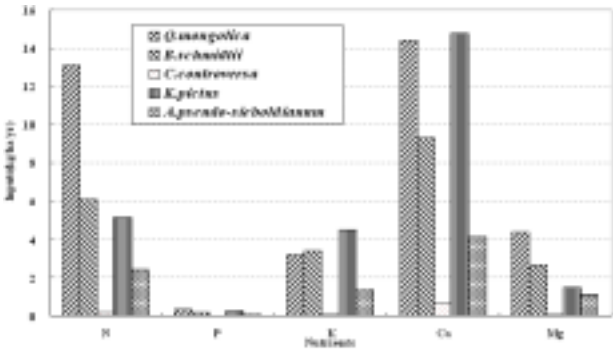

Fig. 4. Nutrient inputs (kg ha^{-1} yr^{-1}, *n*=3) by leaf litter of main species for 3 years at the LTER site in Mt. Gyebangsan.

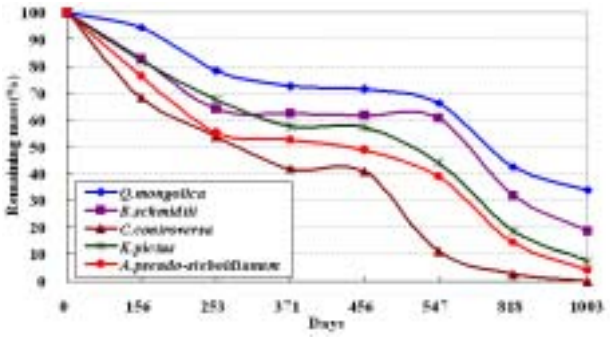

Fig. 5. Remaining mass (%, *n*=4) of leaf litter for three years at the LTER site in Mt. Gyebangsan.

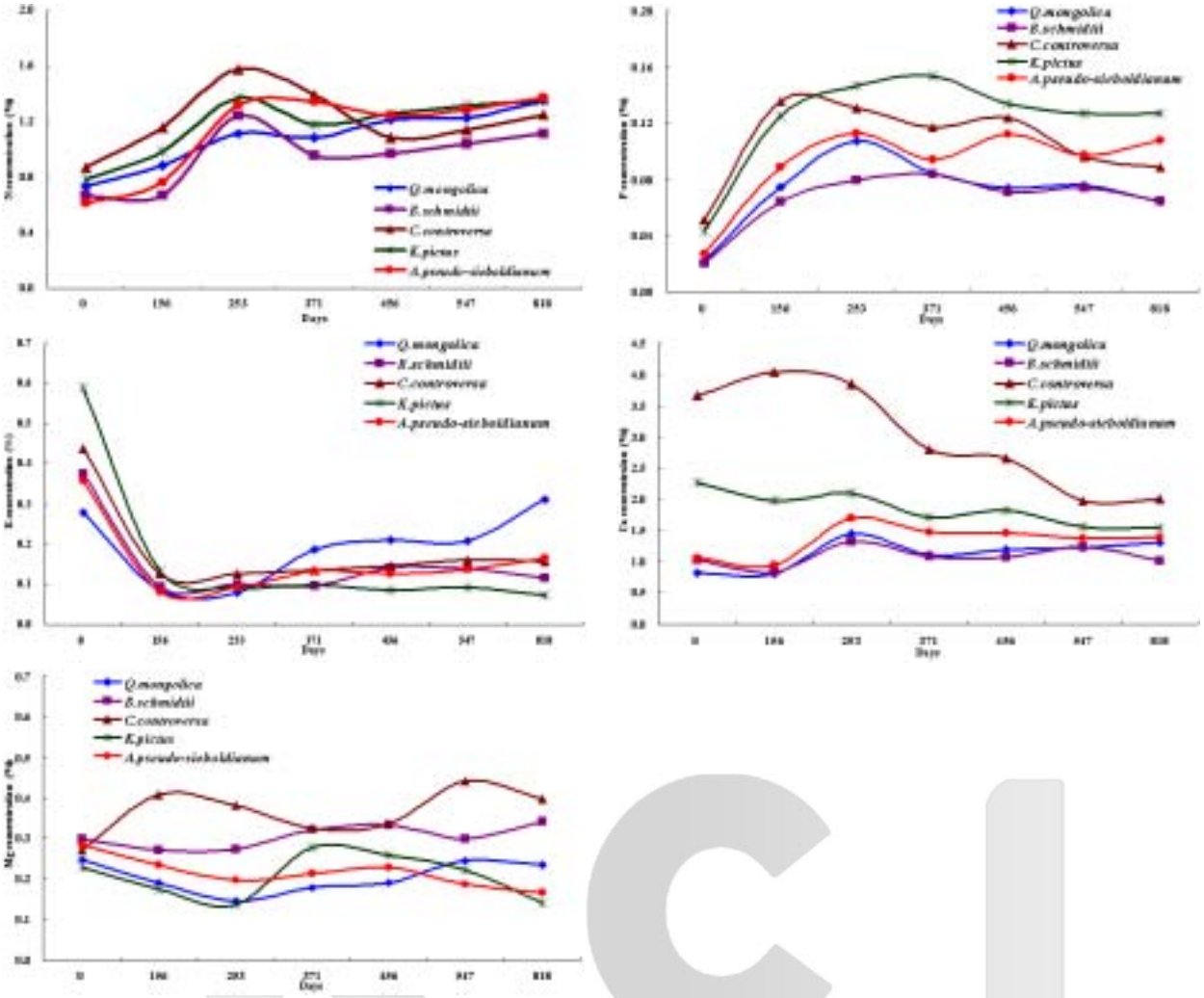

Fig. 6. Nutrient concentration (%, *n*=4) change of decomposing litter at the LTER site in Mt. Gyebangsan.

인 농도는 5개 수종 모두 낙엽 분해 초기에 급격히 증가되다가 점차 안정되는 경향을 보였는데, 이와 같은 결과는 낙엽 분해 초기에 감소되었다가 약 1년 후부터 점차 증가되었다고 한 Kim 등(2003)과 채(2005)의 결과와는 일치하지 않았다. 수종별 평균 인 농도는 음나무 > 층층나무 > 당단풍나무 > 신갈나무 > 박달나무의 순으로 질소 농도의 순서와 유사한 경향을 나타내었다.

칼륨 농도는 5개 수종 모두 낙엽 분해 초기에 급격히 감소되었다가 점차 안정되어 인 농도와는 반대되는 경향을 보였는데, 이와 같은 결과는 칼륨이 물에 잘 녹는 수용성 양분이므로 낙엽 분해 초기에 칼륨의 용탈이 빠르게 일어남을 보고한 바 있는 많은 연구자들(유 1991, Kim et al. 2003, 채광석 2005, 원 등 2005)의 결과와 일치하는 것이다. 수종별 평균 칼륨 농도는 신갈나무 > 층층나무 > 음나무 > 당단풍나무 > 박달나무의 순이었다.

칼슘 농도는 분해 과정 동안 점차적으로 감소하는 경향을 보인 층층나무 이외의 4개 수종은 전 과정에서 안정된 경향을 보였는데, 이와 같은 결과는 칼슘이 잎 내 세포벽의 구조를 구성하기 때문에 다른 양분에 비해 용출이 거의 없다고 한 Kim 등(2003)의 결과와 일치하는 것이다. 수종별 평균 칼슘 농도는 층층나무 > 음나무 > 당단풍나무 > 신갈나무 > 박달나무의 순으로 질소농도와 그 경향이 일치되었다.

마그네슘 농도는 5개 수종 모두 분해 과정동안 점차적으로 안정된 경향을 보였는데, 이와 같은 결과는 대부분의 낙엽에서 마그네슘은 용탈에 의해 낙엽 분해 과정동안 초기에는 감소하나 분해 과정 후기에는 소실률이 느리다고 보고한 Kelly와 Beauchamp (1987)의 결과와 일치하는 것이다. 수종별 평균 마그네슘 농도는 층층나무 > 박달나무 > 당단풍나무 > 음나무 > 신갈나무의 순이었다.

수종별 낙엽의 분해 속도와 낙엽 분해 과정에서의 양분 농도 간에 상관 관계를 살펴 본 결과, 낙엽의 분해 속도는 층층나무 > 당단풍나무 > 음나무 > 박달나무 > 신갈나무의 순으로 우점

종인 신갈나무의 분해율이 가장 낮았으며, 낙엽 분해 과정에서의 양분농도는 층층나무 > 음나무 > 당단풍나무 > 신갈나무 > 박달나무의 순으로 낙엽의 분해 속도와 양분 농도간에는 고도의 정의 상관 관계(r=0.891, p<0.01)를 나타내었다. 이와 같은 결과는 낙엽의 분해 속도와 낙엽 내 양분 농도와는 고도의 정의 상관 관계(r^2=0.861 ~ 0.949)가 있음을 보고한 Rawat과 Singh (1995)의 결과, 그리고 낙엽의 연간 유입량이 많은 임분에서는 유기물질들의 과다 축적에 의해 낙엽의 분해율이 낮아진다고 보고한 Hart 등(1992)의 결과와 정확히 일치하는 것이다.

적 요

본 연구는 온대 북부지역에 속하는 강원도 계방산의 천연 활엽수림에 위치한 장기생태연구(LTER) 조사지를 대상으로 3년 동안 연간 낙엽 낙지 유입량과 낙엽 분해율을 측정하였다. 낙엽낙지량은 채취 시기간에는 통계적으로 유의적인 차이가 있었던 반면, 연도간에는 통계적인 차이가 나타나지 않았다. 3년간의 전체 연평균 낙엽 낙지량은 6,593 kg ha^{-1} yr^{-1} 이었으며, 그 중 잎이 차지하는 비율은 82.6% 이었다. 수종별 유입량은 본 조사지의 우점종인 신갈나무 잎이 가장 많은 양을 보였으며, 기타수종의 잎, 박달나무 잎, 음나무 잎, 당단풍나무 잎 등의 순이었다. 낙엽 분해율은 층층나무와 당단풍나무, 음나무, 그리고 박달나무 낙엽이 신갈나무 낙엽에 비해 분해 속도가 빨라 1,003일간의 조사 기간 동안 층층나무 낙엽 100%, 당단풍나무 낙엽 96.1 %, 음나무 낙엽 92.8%, 박달나무 낙엽 81.4%, 그리고 신갈나무 낙엽 66.2%가 분해되었다. 신갈나무 낙엽의 분해가 느리게 진행된 것은 다른 수종의 낙엽에 비해 신갈나무 낙엽 내 낮은 양분 함량 같은 기질의 차가 원인인 것으로 나타났다. 칼륨과 마그네슘을 제외한 양분(N, P, Ca) 함량은 분해 초기 함량에 비해 낙엽 분해 과정 동안 증가하였다. 또한 낙엽 분해 과정 동안 양분(N, P, K, Ca, Mg)의 방출량은 층층나무, 당단풍나무, 음나무 등의 낙엽이 신갈나무 낙엽에 비해 빠른 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 계방산 장기생태조사지 내 우점종의 낙엽 분해와 양분의 동태는 동일한 입지에 있어서도 수종간에 차이가 있음을 나타내는 것이다.

인용문헌

국립산림과학원. 2005. 2005년도 연구사업 보고서 산림환경분야 5-1. 866p.

김춘식, 구교상, 김영걸, 이원규, 정진현, 서호석. 1997. 상수리나무와 잣나무 임분의 낙엽낙지와 양분유입 동태. 산림과학논문집 55: 13-18.

김춘식, 임종환, 최 경. 2003. 계방산지역 신갈나무와 혼합낙엽의 낙엽 분해율과 양분 동태. 한국임학회 학술연구발표회 논문집. p 113-114.

농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법: 토양, 식물체, 토양미생물. 농촌진흥청 농업기술연구소. 450p.

박봉규, 김준기, 장남기. 1970. 광릉 및 오대산의 주요 산림식물의 에너지 및 양분순환에 대하여. 한국생활과학연구원논총 4: 49-59.

원형규, 구교상, 이윤영, 정용호, 이임균, 임종환, 김춘식. 2005. 금산 장기생태연구지의 졸참나무 낙엽과 혼합낙엽의 분해와 분해과정에 따른 양분 함량의 변화. 2005 한국임학회 학술연구발표회 논문집. pp 216-218.

유영한, 남궁정, 이윤영, 김정희, 이종락, 문형태. 2000. 광릉 시험림 내의 임분별 낙엽의 분해과정에 따른 영양염류의 변화. 한국임학회지 89(1): 41-48.

유진상. 1991. 곰솔과 밤나무 낙엽의 분해에 따른 영양염류의 동태. (석사학위논문). 공주대학교, 공주.

이인숙. 1980. 남한의 산림 생태계에 있어서의 낙엽의 분해모델(박사학위논문). 이화여자대학교, 서울.

이임균, 손요환. 2006. 질소와 인 시비가 리기다소나무와 낙엽송의 낙엽 생산량 및 양분 동태에 미치는 영향. 한국생태학회지 29(3): 205-212.

임종환, 김광택, 신준환, 천정화, 배상원. 2003. 계방산 영구조사지의 생태학적 구조 및 동태. 한국임학회 학술연구발표회 논문집. p 113-114.

채광석. 2005. 소나무 임분에서 토양 pH 수준별 토양의 화학성과 낙엽 분해에 관한 연구(석사학위논문). 고려대학교, 서울.

Bockheim JG, Jepsen EA. 1991. Nutrient dynamics in decomposing leaf litter of four tree species on an sandy soil in northwestern Wisconsin. Can J For Res 21: 803-812.

Bray JR, Gorham E. 1964. Litter production in forest of the world. Adv Ecol Res 2: 101-158.

Chang NK, Kim IJ. 1983. A study of the matter production and decomposition of *Quercus serrata* and *Carpinus laxiflora* forests at Piagol in Mt. Jiri. Kor J Ecol 6(3): 198-207.

Hart SC, Firestone MK, Paul EA. 1992. Decomposition and nutrient dynamics of ponderosa pine needles in a Mediterranean-type climate. Can J For Res 22: 306-314.

Keenan RJ, Prescott CE, Kimmins JP. 1995. Litter production and nutrient resorption in western red cedar and western hemlock forests on northern Vancouver Island, British Columbia. Can J For Res 25: 1850-1857.

Kelly JM, Beauchamp JJ. 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 CS, Lim JH, Shin JH. 2003. Nutrient dynamics in litterfall and decomposing leaf litter at the Kwangneung deciduous broad-leaved natural forest. Kor Jour Agri For Meteoro 5(2): 87-93.

Laj KS, Raman KD, Madhoolika A. 2004. Litter decomposition and nutrient release of S and N in a dry tropical region. Pedobiologia 48: 305-311.

Lousier JD, Parkinson D. 1975. Litter decomposition in a cool temperate deciduous forest. Can J Bot 54: 419-436.

Olsen JS. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology 44: 322-331.

Rawat L, Singh SP. 1995. Leaf litter decomposition and nitrogen concentration in decomposing leaves of a *Quercus semecarpifolia* (Smith) forest stand of Kumaun Himalaya. Commun. Soil Sci Plant Anal 26(3/4): 411-424.

Sharma E, Ambasht RS. 1987. Litterfall, decomposition and nutrient release in an age sequence of *Alnus nepalensis* plantation stands in the eastern Himalaya. J Ecol 75: 997-1010.

Staff H, Berg B. 1982. Accumulation and release of plant nutrients in decomposing of Scot pine needle litter. Long-term decomposition in Scot pine forest Ⅱ. Can J Bot 60: 1561-1568.

Turner J, Lambert MJ. 1986. Fate of applied nutrients in a long-term superphosphate trial in *Pinus radiata*. Plant Soil 93: 373-382.

Twilley RR, Lugo AE, Patterson-Zucca C. 1986. Litter production and turnover in basin mangrove forests in southwest Florida. Ecology 67: 670-683.

Vitousek PM. 1982. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. Am Nat 119: 553-572.

Vogt KA, Grier CC, Vogt DJ. 1986. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and below-ground detritus of world forest. Adv Ecol Res 15: 303-377.

(2006년 12월 5일 접수; 2006년 12월 19일 채택)

KCI