

점봉산 신갈나무 낙엽의 분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석

원호연, 이영상, 이재석¹, 이일환*

국립생태원 기후생태관측팀, ¹건국대학교 생명과학특성학과

Correlation between litter decomposition rate of *Quercus mongolica* leaf and microclimatic factors at Mt. Jeombongsan

Ho-Yeon Won, Young-Sang Lee, Jae-Seok Lee¹ and Il-Hwan Lee*

Ecological Observation Team on Climate Change, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

¹Department of Biological Sciences, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea

***Corresponding author**

Il-Hwan Lee

Tel. 041-950-5612

E-mail. ilhwan9126@nie.re.kr

Received: 13 October 2022

First revised: 17 November 2022

Second revised: 25 November 2022

Final revision: 2 December 2022

Revision accepted: 5 December 2022

Abstract: To understand functional changes of forest ecosystems due to climate change, correlation between decomposition rate of leaf litter, an important function of forest ecosystems, and microclimatic factors was analyzed. After 48 months elapsed, percent remaining weight of *Quercus mongolica* leaf litter was 27.1% in the east aspect and 37.0% in the west aspects. Decay constant of *Q. mongolica* leaf litter was 0.33 in the east aspect and 0.25 in the west aspect after 48 months elapsed. Initial C/N ratio of *Q. mongolica* leaf litter was 38.5. After 48 months elapsed, C/N ratio of decomposing *Q. mongolica* leaf litter decreased to 13.43 in the east aspect and 16.72 in the west aspect. Average air temperature and soil temperature during the investigation period of the research site were 8.2 ± 9.0 and 9.1 ± 9.3 in the east and 8.5 ± 7.4 and 9.3 ± 7.3 °C in the west aspect, respectively, with the west aspect showing higher air and soil temperatures. Soil moisture showed no significant difference between east and west aspects (average soil moisture: $19.4 \pm 11.0\%$ vs. $20.5 \pm 5.7\%$). However, as a result of analyzing the correlation between decomposition rate and microclimatic factors, it was found that the decomposition rate and soil moisture has a positive correlation ($r=0.426$) in the east aspect but not in the west aspect. Our study shows that the correlation between decomposition rate and microclimatic factors can be significantly different depending on the direction of the aspect.

Keywords: Long term ecological research, Remaining weight, Climate change, Soil moisture, Correlation analysis

서 론

낙엽의 분해는 대기로의 광합성 동안 고정된 CO₂ 반환의 주요 경로와 영양 순환을 위한 필수과정이기 때문에 육상 생태계의 핵심과정이다(Chapin *et al.* 2002). 따라서 낙

엽분해는 탄소 순환에 대한 통제로서 토양 규모와 토양 비옥도 및 영양 상호작용을 결정하는 지역 규모에서 더 큰 규모로 생태계 기능에 영향을 미친다(Prescott 2010; Cotrufo *et al.* 2013). 또한, 낙엽이 분해되는 과정에서 영양 염류는 식물이 흡수할 수 있는 가용성 상태로 전환되기 때

문에 낙엽분해는 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 성장에 필요한 영양염류의 공급원이기 때문에 생태계 구조와 기능을 결정하는 중요한 요인이 된다(Berg and Agren 1984; Berg and Theander 1984; Kelly and Beauchamp 1987).

낙엽분해 과정의 복잡한 특징을 고려할 때, 관측되고 예측된 기후변화 효과가 다양하게 낙엽분해 과정에 작용한다고 밝혀졌으며(Gavazov 2010), 냉대 생물군계의 분해를 주도하는 주요 요인은 기후(온도 및 수분) - 낙엽의 질 - 토양의 군집 구성으로 가정되어(Aerts 2006), 기후변화는 낙엽의 분해과정에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기후변화에 영향을 주는 미기상요인이 낙엽분해 과정에 미치는 영향을 파악하기 위해 낙엽분해율 및 미기상요인을 측정하고, 상관관계 분석을 통해 낙엽분해율과 미기상요인과의 상관관계를 파악하였다. 또한, 두 사면의 기상조건에 따른 낙엽분해율을 파악하여 미기상요인이 낙엽분해율에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 사면의 방향에 따라 기상요인이 달라 생물량은 다양하다고 보고되어 있으며(Ran *et al.* 2018), 사면의 방향에 따라 토양 영양염류와 중 중요도, 생물량에도 관계가 있다고 알려져 있다(Hicks and Ray 1984).

국내외에서 다양한 수종에 관한 낙엽분해 연구는 다수 이루어져 있으나(Ono *et al.* 2011; Wang *et al.* 2015; Lee *et al.* 2021), 낙엽분해율에 영향을 미치는 요인으로 알려진 미기상요인과의 상관관계 분석은 많지 않은 실정이다. 낙엽분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석을 통해 산림생태계의 물질순환을 밝히는 데 필요한 기초자료를 확보하고 향후 기후변화로 인한 생태계 기능 변화를 예측하는데 본 연구의 목적이 있으며, 장기적인 낙엽분해율 분석을 통한 국내 산림의 기후변화에 대응하는 효율적인 관리 방안의 기초자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 강원도 인제군 기린면과 양양군 서면에 위

치한 점봉산에 구축된 국가장기생태연구 강원권 중점지소(N38°02'17", E128°28'05", 해발 790 m)에서 수행되었다. 중점지소의 연평균기온은 9.9°C, 최한월의 일평균최저기온은 -5.4°C, 최저기온은 -20.1°C이다. 평균 강수량은 1,114 mm이고, 이 중 70% 이상이 6월에서 9월 사이에 내리며, 상대습도는 71%, 평균 증발량은 1,114 mm, 온량지수는 85.9°C, 한냉지수는 -27.4°C로서, 냉온대낙엽활엽수림의 기후적 특성을 나타내고 있다(Park and Moon 1994).

조사지소의 교목층에는 신갈나무(*Quercus mongolica*)가 우점하는 가운데, 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 낮은 빈도로 분포하였으며, 관목층에는 생강나무(*Lindera obtusiloba*)와 국수나무(*Stephanandra incisa*)가 낮은 빈도로 분포하였다. 초본층은 빈약하였다. 조사지역에 설치된 간이 기상 측정장비의 자료에 따르면 낙엽주머니 설치지역의 조사기간(2017~2020년) 동안 연평균기온은 7.4°C, 연강수량은 1,485.3 mm이었다.

2. 미기상 자료 수집

조사기간 동안 미기상요인은 대기온도, 토양온도, 토양수분함량을 수집하였으며, 토양수분함량은 Hobo 토양수분센서(S-TMB-005; Onset, MA, USA), 대기 및 토양온도 또한 Hobo 온도센서(S-TMB-M002, Onset)를 이용하여 수집하였다. 수집한 자료는 데이터 로거를 통해 저장하였다(Hobo microstation; Onset).

3. 낙엽주머니 제작 및 설치

낙엽주머니의 제작에 사용된 잎은 2016년 11월에 강원도 인제군 점봉산에 위치한 국가장기생태연구 중점지소에서 갓 떨어진 신갈나무 낙엽을 수거하였고, 수거한 잎을 지퍼백에 밀봉하여 실험실로 운반 후 60°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조시켜 낙엽주머니 제작에 사용하였다. 낙엽주머니는 mesh size 2 mm인 나일론 그물을 사용하여 20 cm × 25 cm 크기로 만들어 약 5 g 정도의 잎과 함께 각각의 주머니에 고유번호가 적힌 aluminum tag를 함께 넣은 뒤 잎이 유출되지 않도록 잘 봉합하였다.

제작된 낙엽주머니는 사면에 따른 기상요인과의 상관관계를 분석하기 위해, 능선을 중심으로 동쪽 사면과 서쪽 사면에 서로 겹치지 않고, 낙엽주머니가 훼손되지 않도록 지면에 못과 끈을 이용하여 고정시켜 놓았다.

4. 낙엽주머니 수거 및 처리

낙엽주머니의 회수는 설치한 뒤 3개월 동안 매월 회수하였고, 3개월 이후인 2017년 3월부터 3개월 간격으로(3월, 6월, 9월, 12월) 매번 사면당 1회, 3개씩 회수하였다. 회수해 온 낙엽주머니에 묻은 흙, 뿌리, 원래 바닥에 있던 낙엽 등과 같은 이물질을 제거한 다음 주머니 안의 낙엽을 60°C 건조기에서 48시간 이상 말린 후 무게를 측정하였으며, 무게를 측정한 샘플은 곱게 갈아 유기탄소 및 영양염류 분석에 사용하였다. 분해율은 낙엽의 처음 건중량에 대한 무게 감소량으로 계산하였고, 분해 상수(k)는 Olson (1963)의 공식을 이용하였다(Eq. 3).

$$\text{Remaining mass (\%)} = M_t/M_0 \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Mass loss (\%)} = 100 - \text{remaining mass (g)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$k_t = -\ln(M_t/M_0) \quad (\text{Eq. 3})$$

M_t : dry weight at time t

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

5. 낙엽의 영양염류 분석

낙엽의 분해과정에 따른 영양염류의 변화를 파악하기 위해 유기탄소와 전질소의 화학적 분석을 샘플마다 3반복으로 수행하였다. 유기탄소 함량은 combustion method (Black *et al.* 1965)를 사용하여 측정하였으며, 전질소 샘플이 들어 있는 Kjeldahl flask에 분해촉진제와 진한 황산을 넣어 390°C block digester에서 120분간 분해시킨 후 상온에서 식힌 다음 증류수를 이용하여 50mL로 정용한 후 상등액을 자동 분석기(Quick Chem 8000; Lachat, USA)로 분석하였다. C의 값을 N의 값으로 나누어 C/N비를 계산하였다.

$$\text{잔존율 (\%)} = (L_t C_t / L_0 C_0 \times 100) \quad (\text{Eq. 4})$$

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

6. 통계분석

분해율과 낙엽의 영양염류 함량의 차이는 SPSS (SPSS

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

낙엽의 낙엽분해율과 조사지역에 설치된 미기상측정장치에서 수집된 대기온도, 토양온도, 토양수분과의 상관관계를 SPSS의 이변량 상관관계분석(bivariate correlation analysis)을 통하여 검증하였으며 상관계수는 Spearman 상관계수를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 연구지역의 사면별 미기상 자료 분석

1) 대기온도

조사기간 동안 동사면과 서사면의 대기온도 변화양상은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 동사면과 서사면의 평균 대기온도는 각각 $8.2 \pm 9.0^\circ\text{C}$, $9.1 \pm 9.3^\circ\text{C}$ 로 서사면의 평균 대기온도가 동사면에 비해 다소 높은 것으로 나타났다(Fig. 1A).

2) 토양온도

조사기간 동안 동사면과 서사면의 토양온도 양상도 대기온도와 마찬가지로 두 사면에서 큰 변화양상을 보이지 않았으며 연중 비슷한 양상이 계속되었다. 동사면과 서사면의 평균 토양온도는 각각 8.5 ± 7.4 , $9.3 \pm 7.3^\circ\text{C}$ 로 서사면의 평균 토양온도가 동사면에 비해 다소 높은 것으로 나타났다(Fig. 1B).

3) 토양수분

조사기간 동안 토양수분함량의 양상은 대기온도, 토양온도와는 매우 다른 양상을 나타내었다(Fig. 3C). 동사면과 서사면의 평균 토양수분함량은 각각 19.4 ± 11.0 , $20.5 \pm 5.7\%$ 로 사면 간 큰 차이를 보이지 않았으나 연간변화양상은 이와는 다른 차이를 보였다. 동사면의 경우 강우가 집중되는 여름철과 눈이 쌓이기 시작하는 늦가을에 토양수분이 상당히 높은 것으로 나타났으며, 겨울에서 봄으로 이어지는 기간에 토양수분이 급격하게 감소하여 15% 미만으로 유지되었다. 이는 사면의 특성으로 인해, 기온이 낮아 쌓인 눈이 잘 녹지 않아 토양수분이 늦가을~초겨울에 높은 것으로 판단되며, 바람의 영향으로 쌓인 눈이 제거되어

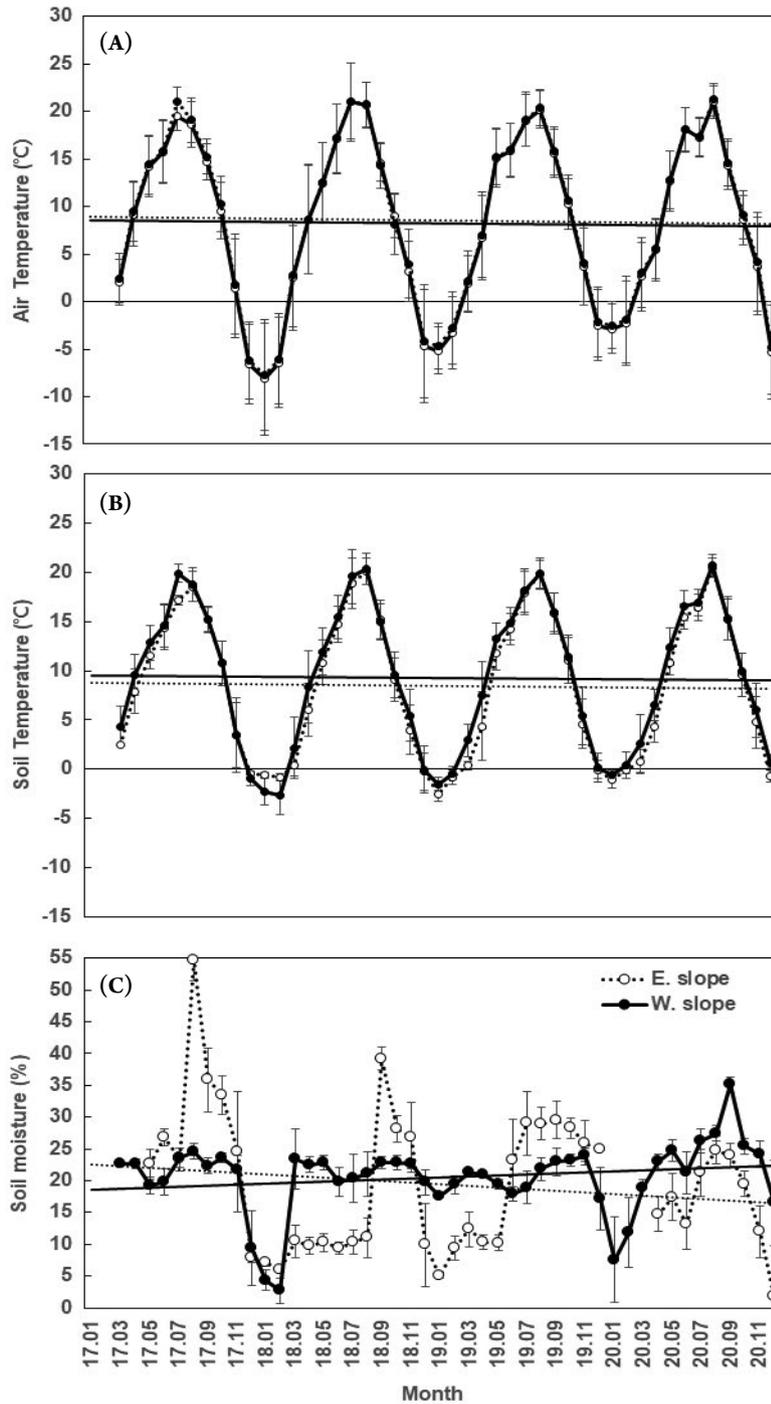


Fig. 1. Microclimatic factors (air temperature (A), soil temperature (B) and soil moisture (C)) in the study area. Bars indicate the standard deviation. $n=108$.

늦겨울철 이후 토양수분이 감소하는 것으로 판단된다. 서사면의 경우 동사면의 양상과는 다르게 강우가 집중되는 여름철에도 토양수분이 일정하게 유지되었으며, 겨울철에

접어들며 토양수분이 감소하였다가 봄철에 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 사면의 방위에 따른 광량과 경사에 의한 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

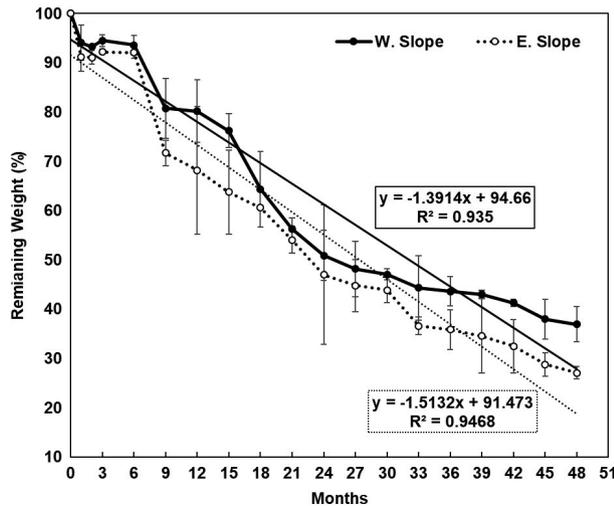


Fig. 2. Remaining weight (%) of decomposing leaf litter of *Quercus mongolica* in the study area. Bars indicate standard deviation.

2. 분해율과 분해상수

신갈나무 낙엽의 분해는 지속적으로 일어나 두 사면에서 모두 낙엽의 무게가 감소하였다(Fig. 2). 분해 24개월 경과 후까지 낙엽의 분해는 빠르게 일어나 동사면과 서사면의 낙엽의 잔존율은 각각 $47.0 \pm 14.2\%$, $50.9 \pm 5.1\%$ 로 감소하였다. 24개월 이후에는 분해의 속도가 다소 감소하여 48개월 경과 후 낙엽의 잔존율은 동사면과 서사면에서 각각 $27.1 \pm 1.3\%$, $37.0 \pm 3.6\%$ 로 나타났다.

본 연구의 낙엽분해율의 계절별 양상을 분석한 결과, 여름철의 분해가 빠르게 일어나는 것으로 나타났다. 이는 7~8월 중에 분해가 많이 이루어진다는 Kim and Chang (1989)의 결과와 유사하였는데, 분해가 하절기에 집중되는 것은 기온이 높고 강수량이 많아 분해자의 활성이 증가하고, 덥고 습한 환경으로 인해 더 많은 수용성 물질이 용해되는데 기인한다고 알려져 있다(Jensen 1974; Millar 1974; Swift et al. 1979; Chang and Yoo 1986; Mun 2009). 또한, 이는 기후변화에 따른 기온과 강수량의 변화가 낙엽분해에 미치는 영향을 예측하는 데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

신갈나무 낙엽의 분해에 따른 분해상수(k)는 동사면에서 24, 48개월째에 각각 0.38, 0.33으로 나타났고, 서사면에서는 같은 개월째에 각각 0.34, 0.25로 나타났(Table 1). 분해상수를 통해 분석한 동사면 낙엽의 반감기(t_{50})와 낙엽이 완전 분해되는 시간(t_{99})은 각각 2.12년, 15.33년이었

Table 1. Decay constant (k) and required time for loss of 50%, 95% and 99% in decomposing leaf of *Quercus mongolica* after 48 months elapsed

Aspect	K	Half time	95% time	99% time
		$0.369/k$	$3/k$	$5/k$
East	0.33	2.12	9.2	15.33
West	0.25	2.78	12.05	20.08

으며, 서사면에서는 각각 2.78년과 20.08년으로 동사면의 반감기와 완전 분해될 때까지의 시간이 더 짧은 것으로 나타났다.

신갈나무 낙엽의 분해가 시작된 후 1년이 지난 후부터 분해율이 다소 낮아지고 있는데, 이는 분해 초기 단계에서 용해성 물질이 빠르게 용탈된 후 리그닌과 같은 난분해성 물질이 낙엽분해의 제한요인으로 작용하고 있기 때문으로 판단된다(Fogle and Cromack 1977; Berg et al. 1982). 낙엽의 분해율은 탄소, 리그닌, 질소, 인 등의 초기 낙엽의 질에 의하여 영향을 받지만, 고도, 기온, 강수량, 방위 등의 외부 요인에 의한 영향도 받게된다(Namgung 2010).

3. 분해과정에 따른 낙엽의 탄소, 질소 함량 및 C/N비의 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(Seereeam and Lavender 2003).

신갈나무 낙엽의 초기 탄소 함량은 50.0%였고 시간이 경과함에 따라 점차 감소하였다. 두 사면에서 탄소의 함량은 분해 6개월 경과 후까지는 차이를 보이지 않다가, 15개월부터 동사면의 탄소 함량이 더 빠르게 감소하여 분해 48개월 경과 후 동사면과 서사면의 탄소 함량은 각각 34.12%, 39.97%로 나타났다(Fig. 3A). 신갈나무 낙엽의 초기 질소 함량은 1.3%로 두 사면에서 모두 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하였으며 사면 간 큰 차이를 보이지 않았다. 48개월 경과 후 동사면과 서사면 신갈나무 낙엽

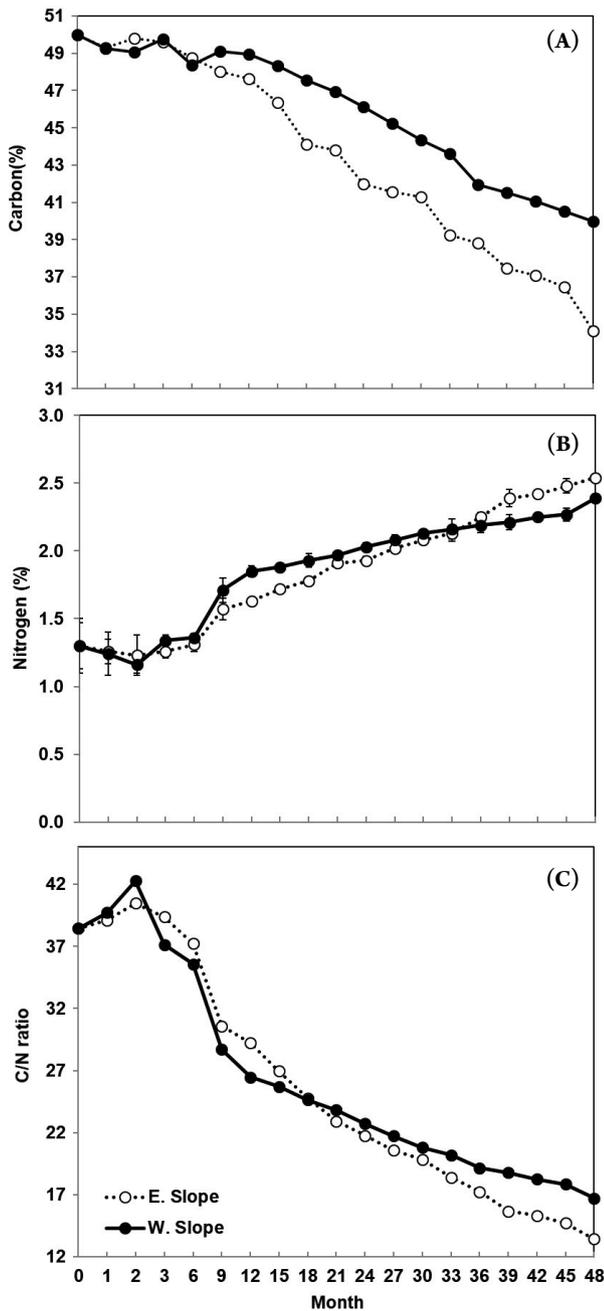


Fig. 3. Changes of carbon % (A), nitrogen % (B), and C/N ratio (C) for decomposing leaf litter of *Quercus mongolica* by the aspect area. Bars indicate standard deviation ($n = 108$).

의 질소함량은 각각 2.54, 2.39%로 나타났다(Fig. 3B). 낙엽의 분해과정에서 질소의 증가는 일반적인 현상인데(Berg and Staaf 1981; Mellilo *et al.* 1982; Kim *et al.* 2003; Xu *et al.* 2004), 분해 중인 낙엽의 질소함량이 증가되는 주원인은

미생물에 의한 질소고정과(Olsen 1932), 미생물의 증식, 강수, 먼지, 곤충의 배설물 등이 첨가되기 때문인 것으로 판단된다(Bocock 1964).

신갈나무 낙엽의 초기 C/N 비율은 38.46이었다. 낙엽의 C/N 비율은 초기 3개월째에 동사면에서 40.49, 서사면에서 42.42로 증가하였다가 이후 서서히 감소하여 48개월 경과 후 동사면과 서사면의 C/N 비율은 각각 13.43, 16.72였다(Fig. 3C). 동사면에 비해 서사면의 C/N 비율의 감소가 서서히 이루어지는 것으로 나타났는데, 이는 일정한 질소에 비해 탄소 함량의 감소가 서서히 이루어지기 때문으로 판단된다. 낙엽의 절대적인 질소 농도가 분해율을 결정하는 것은 아니며 토양 내 양분 함량과 그 비율이 중요하다(Liu *et al.* 2010). 낙엽의 분해는 수종(Kim and Chang 1965) 및 낙엽의 질에 따라 분해율에 큰 차이를 나타내는데(Berg *et al.* 1982; Melillo *et al.* 1982), 이 중 C/N 비율이 분해속도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다(Fogel and Cromack 1977).

4. 낙엽분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석

낙엽분해율과 미기상요인과의 상관관계 분석 결과(Table 2), 동사면에서의 낙엽분해율과 토양수분함량과의 상관관계가 통계적으로 유의미하게 나타났다($p < 0.05$). 동사면의 다른 요인(대기온도, 토양온도)과 서사면의 미기상요인과의 상관관계는 통계적으로 유의미하지 않아($p > 0.05$), 낙엽분해율과 동사면의 토양수분함량을 제외한 나머지 요인에서는 상관관계가 나타나지 않았다. 동사면의 분해율과 토양수분함량과의 상관관계 분석으로 이루어보았을 때, 토양수분과 낙엽분해율에는 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 미기상요인은 낙엽분해 초기 단계에 영향을 미친다고 보고되어 있으며(Chen *et al.* 2018), 토양 함수량이 높은 지역의 낙엽분해율이 더 높다고 보고되어 있다(Carlisle *et al.* 1966). 본 연구의 결과도 이와 유사한 경향을 나타내었다. 최근 토양수분과 식생유형이 낙엽분해율에 영향을 미치는 요인을 연구한 결과에 따르면, 눈이 쌓이는 사면에서의 토양수분이 낙엽분해율에 많은 영향을 미친다고 보고되어(Petraglia *et al.* 2019), 본 연구에서도 평균 기온이 다소 낮은 동사면의 적설로 인한 토양수분이 낙엽의 분해에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 2. Correlation between leaf litter decomposition rate and microclimatic factors

		Air temperature (°C)	Soil temperature (%)	Soil moisture (%)
East aspect	Spearman coefficient	0.190	0.238	0.426*
	<i>p</i> -value	0.290	0.183	0.013
	<i>n</i>	108	108	108
West aspect	Spearman coefficient	0.124	0.162	0.041
	<i>p</i> -value	0.491	0.368	0.819
	<i>n</i>	108	108	108

적 요

기후변화에 따른 산림생태계의 기능 변화를 파악하기 위해 산림생태계의 중요한 기능인 낙엽분해율과 미기상 요인과의 상관관계를 분석하였다. 2017년 1월부터 48개월간 동사면과 서사면에 설치된 낙엽주머니를 통해 낙엽의 분해율을 분석하고 연구지소의 미기상요인(대기온도, 토양온도, 토양수분)을 관측하여 상관관계를 도출하였다. 48개월 경과 후 신갈나무 낙엽의 잔존율은 동사면과 서사면에서 각각 $27.1 \pm 1.3\%$, $37.0 \pm 3.6\%$ 로 감소하였으며, 이에 따른 낙엽의 분해상수(*k*)는 동사면과 서사면에서 각각 0.33, 0.25로 나타났다. 신갈나무 낙엽의 초기 C/N비율은 38.5이었으며 시간이 경과함에 따라 감소하여 48개월 경과 후 동사면과 서사면의 C/N비율은 각각 13.4, 16.7로 나타났다. 연구지소의 조사기간 동안 평균 대기온도 및 토양온도는 동사면과 서사면에서 각각 8.2 ± 9.0 , 9.1 ± 9.3 과 8.5 ± 7.4 , 9.3 ± 7.3 °C로 서사면에서 더 높게 나타났다. 토양수분의 경우, 동사면과 서사면에서 평균 19.4 ± 11.0 , $20.5 \pm 5.7\%$ 로 큰 차이를 보이지 않았으나 연간 변화 양상이 다소 다르게 나타났다. 분석된 낙엽의 분해율과 미기상 요인과의 상관관계를 분석해본 결과, 동사면에서 낙엽분해율과 토양수분이 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타나, 낙엽분해율은 토양수분량에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 향후 기후변화에 따른 폭우, 폭설 등의 영향이 산림생태계의 기능에 미치는 변화에 대응할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

CRediT authorship contribution statement

Ho-Yeon Won: Conceptualization, Experiment design, Writing-Original draft preparation, Reviewing, and Editing. Young-Sang Lee: Data analysis (litter decomposition).

Jae-Seok Lee: Data analysis (microclimatic factor). Il-Hwan Lee: Data analysis (litter decomposition), Writing-Reviewing and Editing.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2022-02).

REFERENCES

- Aerts R. 2006. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *J. Ecol.* 94:713–724. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01142.x>
- Berg B, K Hannus, T Popoff and O Theander. 1982. Changes in organic chemical components of needle litter during decomposition. Long-term decomposition in a Scots pine forest. I. *Can. J. Bot.* 60:1310–1319. <https://doi.org/10.1139/b82-167>
- Berg B and O Theander. 1984. Dynamics of some nitrogen fraction in decomposition Scots pine needle litter. *Pedobiologia* 27:264–267. <https://doi.org/10.1139/b88-212>
- 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. III. *Can. J. Bot.* 62:2880–2888. <https://doi.org/10.1139/b84-384>
- Berg B, MP Berg, P Bottner, E Box, A Breymeyer, RC 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* 20:127–159.
- Black CA, DD Evans and RC Dinauer. 1965. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Blanco JA, JB Imbert and FJ Castillo. 2008. Nutrient return via litterfall in two constricting *Pinus sylvestris* forests in the Pyr-

- enees under different thinning intensities. For. Ecol. Manage. 256:1840–1852. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.011>
- 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. *Eco.* 52:273–284.
- Carlisle A, AHF Brown and EJ White. 1966. The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea*) canopy. *Ecology* 54:87–98. <https://doi.org/10.2307/2257660>
- Chang NK and JH Yoo. 1986. Annual fluctuations and vertical distributions of cellulase, xylanase activities and soil microorganisms in humus horizon of a *Pinus rigida* stand. *Korean J. Ecol.* 9:231–241.
- Chapin FS, PA Matson, HA Mooney and PM Vitousek. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer. New York.
- Chen Y, Y Liu, J Zhang, W Yang, R He and C Deng. 2018. Microclimate exerts greater control over litter decomposition and enzyme activity than litter quality in an alpine forest-tundra ecotone. *Sci. Rep.* 8:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33186-4>
- Cole DW and M Rapp. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. pp. 341–409. In: Dynamic Properties of Forest (Reiche DE, ed.). International Biological Programme 23. Cambridge University Press. Cambridge.
- Cotrufo MF, MD Wallenstein, CM Boot, K Deneff 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. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- Gavazov KS. 2010. Dynamics of alpine plant litter decomposition in a changing climate. *Plant Soil* 337:19–32. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0477-0>
- 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. <https://doi.org/10.1139/b77-190>
- Heal OW, JM Anderson and MJ Swift. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. pp. 3–45. In: Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition (Cadisch G and KE Giller, eds.). CAB International. Wallingford, UK.
- Hicks JR and R Ray. 1984. Relationship of aspect to soil nutrients, species importance and biomass in a forested watershed in West Virginia. *For. Ecol. Manage.* 8:281–291. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(84\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(84)90060-4)
- Jensen V. 1974. Decomposition of angiosperm tree leaf litter. pp. 69–104. In: Biology of Plant Litter Decomposition. Vol. 1. (Dickson CH and GJF Pugh, eds.). Academic Press. New York.
- Kelly JM and JJ 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060038x>
- Kim CM and NK Chang. 1965. The decomposition rate of litter affecting the amount of mineral nutrients of forest soil in the Korea. *Bull. Ecol. Soc. Am. Sep.* p. 14.
- Kim JK and NK Chang. 1989. Litter production and decomposition in the *Pinus rigida* plantation in Mt. Kwan-ak. *J. Ecol. Field Biol.* 12:9–20.
- Lee IH, SU Jo, YS Lee and HY Won. 2021. The long-term decay rate and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Pinus densiflora* and *Pinus thunbergii*. *Korean J. Environ. Biol.* 39:374–382. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2021.39.3.374>
- Liu P, J Huang, OJ 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. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1506-7>
- Meentemeyer V, EO Box and RT Thompson. 1982. World patterns and amounts of terrestrial litter production. *BioScience* 32:125–128. <https://doi.org/10.2307/1308565>
- Melillo JM, JD Aber and JF Muratore. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63:621–626. <https://doi.org/10.2307/1936780>
- Millar CS. 1974. Decomposition of coniferous leaf litter. pp. 105–128. In: Biology of Plant Litter Decomposition. Vol. 1. (Dickson CH and GJF Pugh, eds.). Academic Press. New York.
- Mun HT. 2009. Weight loss and nutrient dynamics during leaf litter decomposition of *Quercus mongolica* in Mt. Worak National Park. *J. Ecol. Field Biol.* 32:123–127. <https://doi.org/10.5141/JEFB.2009.32.2.123>
- Namgung, J. 2010. Production and nutrient cycling in the *Quercus variabilis* forest at Mt. Worak. Ph.D. Thesis. Kongju University. Gongju, Korea. p. 58.
- Olsen C. 1932. Studies of nitrogen fixation: nitrogen fixation in the dead leaves of forest beds. *Compt Rend Trav Lab Carlsberg.* 19: 36.
- Olson JS. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44:321–331. <https://doi.org/10.2307/1932179>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0397-z>
- Park IH and GS Moon. 1994. Biomass, net production and biomass estimation equations in some natural *Quercus* forests.

- J. Korean For. Soc. 83:246–253
- Petraglia A, C Cacciatori, S Chelli, G Fenu, G Calderisi, D Gargano and M Carbognani. 2019. Litter decomposition: effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type. *Plant Soil* 435:187–200. <https://doi.org/10.2307/3546886>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>
- Ran X, Y Qian, M Fuhong, W Xianzhi and S Yuying. 2018. Slope aspect influences plant biomass, soil properties and microbial composition in alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 18:1–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005000101>
- 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. p. 18.
- Swift MJ, OW Heal and JM Anderson. 1979. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. *Studies in Ecology*. Vol. 5. University of California Press. Berkeley, CA. p. 372.
- Wang Z, X Yin 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. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.03.010>