

소나무와 굴참나무 임분의 가지 분해율과 탄소 및 질소 동태 비교

최병길¹, 백경원¹, 김형섭², 손요환², 김춘식^{*}

¹경상국립대학교 산림자원학과, ²고려대학교 환경생태공학과
(2020년 7월 15일 접수; 2021년 5월 10일 수정; 2021년 5월 26일 수락)

Comparisons of Decomposition Rates, Carbon and Nitrogen Dynamics of Branches in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* Stands

Byeonggil Choi¹, Gyeongwon Baek¹, Hyungsub Kim², Yowhan Son², Choonsig Kim^{*}

¹Department of Forest Resources, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received July 15, 2020; Revised May 10, 2021; Accepted May 26, 2021)

ABSTRACT

This study was carried out to understand how factors of decomposition such as quality of the substrate (tree species), forest types, and soil • meteorological conditions affect decomposition rates and dynamics of carbon (C) and nitrogen (N) of branches in adjacent *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands in Sancheong and Jinju in Southern Korea. The branch bags (30 cm × 30 cm) with branch samples (a diameter of 2.0 - 4.0 cm and length of 10 cm) were placed on the forest floor at each stand in May 2018. The branch bags were collected in August and November 2018, February and May 2019, respectively. The decomposition rates of branches in *P. densiflora* stands were 4.49 % for Sancheong, and 5.75 % for Jinju. Whereas, the decomposition rates in *Q. variabilis* were 20.01 % for Sancheong, and 24.68 % for Jinju, respectively. The decomposition of branches was more rapid in *Q. variabilis* compared with *P. densiflora* in both regions. C and N in decomposed branches were more mineralized in *Q. variabilis*, whereas C and N were more accumulated in *P. densiflora*. These results indicated that the decomposition rates, C and N of decomposed branches may be affected by differences in substrate quality such as initial N concentration and C/N ratio rather than differences between both regions including different environmental factors.

Key words: Carbon, Nitrogen, C/N ratio, Decomposition rate, Mineralization, *Quercus variabilis*, *Pinus densiflora*



* Corresponding Author : Choonsig Kim
(ckim@gnu.ac.kr)

I. 서 론

과거 우리나라는 6.25 한국전쟁 이후 황폐화된 산림을 국가 주도로 산림기본계획에 따라 집중적인 산림 복구를 진행해왔으며, 현재 제6차 산림기본계획(2018~2037)을 수립 및 이행 중이다(Korea Forest Service, 2018a). 이에 따라 지속가능한 산림자원 조성을 위한 숲 가꾸기 사업을 통해 축적 증가와 같은 외적 성장과 더불어 숲 구조를 다층화하는 등 생태적으로 안정된 산림을 조성하고자 하는 노력을 기울이고 있다. 특히 우리나라의 산림은 입목축적이 2000년 $63 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 에서 2017년 $154 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 으로 불과 17년만에 $91 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 가 증가되었으며, 생태·경관적으로도 다양한 가치를 창출할 수 있는 자원으로 성장하였다(Korea Forest Service, 2018b).

현재 우리나라 산림의 영급은 약 69%가 III~IV영급으로 중·장령화 됨에 따라 가지치기, 간벌과 같은 숲 가꾸기 작업과, 벌채시기 도래에 따른 벌채작업의 요구가 증가되고 있다. 벌도와 가지치기, 조재작업 등과 같은 산림작업으로 인해 발생하는 미이용 산림잔재물들은 수집·운반용 임업기계의 부족과 비싼 운반비용으로 인해 산지 내에 방치되고 있는 경우가 많았다. 하지만, 최근 방치되는 산림작업 잔재물들을 활용한 목재 펄릿생산 관련 연구와 잔재물의 집적으로 인해 산불강도에 영향을 끼칠 수 있다는 다양한 연구 결과들에 따라 숲 가꾸기 산물의 수집·제거 등과 같은 필요성이 언급되고 있다(Kim and Lee, 2018; Lee *et al.*, 2009). 그러나, 다양한 생물들이 서식하는 공간인 산림생태계가 건전하게 유지되기 위해서는 낙엽·낙지 또는 고사목, 목재 잔재물과 같은 양질의 영양원이 지속적으로 공급되어야 할 필요성이 존재한다. 산림생태계에서 발생하는 낙엽·낙지 그리고 목재 잔재물들은 토양층으로 이동되는 양분과 에너지의 주요 경로로서 물리적, 화학적, 생물학적 분해과정을 통해 산림생태계 내 양분균형, 토양의 비옥도 유지, 유기물질의 형성, 유기양분의 무기화, 토양 미생물들의 에너지원으로 사용되는 등 산림생태계의 물질순환에 중요한 영향을 미친다(Laskowski and Berg, 2006; Ulyshen *et al.*, 2017; Wambsganss *et al.*, 2017). 산림생태계 내 유입되는 낙엽·낙지 중 목질부인 가지는 전체 낙엽·낙지 생산량의 10% 이상을 차지하며, 앞보다 느린 분해율로 인해 상대적으로 긴 양분 잔존 시간을 가진다(Bray and Gorham, 1964). 국내에서 수행된 일본잎

갈나무와 리기다소나무 조림지의 가지 비율은 총 낙엽·낙지 생산량에 대해 각각 10.2%와, 10.1%였으며, 졸참나무, 서어나무, 까치박달나무가 우점하는 천연활엽수림에서 가지 유입량은 총 낙엽·낙지 유입량의 16% 정도로 토양에 유입되는 탄소 및 질소의 중요한 공급원으로서 제시된 바 있다(Kim *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005).

분해과정은 낙엽·낙지의 기질적 특성, 분해 미생물의 종류와 양, 온도와 습도 같은 환경요인들과 토양 양분의 가용성 등과 연관성을 나타내며, 특히 기질의 화학적 조성은 분해과정에서 중요한 요인으로 알려져 있다(Aerts, 1997; Kim *et al.*, 2019; Swift *et al.*, 1979; Zhang *et al.*, 2008). 이러한 생태적 중요성으로 인해, 가지분해에 관한 연구는 다양한 형태로 수행되어 왔으며, 국내에서 수행된 가지 분해 연구로 상수리나무 가지의 분해 및 분해과정에 따른 영양염류 변화(Mun, 2004), 신갈나무 가지의 연령에 따른 분해율(Chae *et al.*, 2016), 온대 낙엽수림에서 수종 간 가지분해율(Cha *et al.*, 2017) 등이 있다. 그러나 대부분의 연구가 단일수종 또는 낙엽활엽수 등을 대상으로 연구가 수행되었으며, 우리나라 산림생태계에서 우점 수종인 소나무 및 굴참나무와 관련된 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 서로 인접하여 생육하고 있는 소나무와 굴참나무 임분에서 가지를 대상으로 기질의 특성, 임분 종류, 토양 및 기상 환경요인 등이 가지의 분해율과 탄소 및 질소 동태에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 조사구 일반현황

본 연구의 조사지는 경상남도 진주시 국립산림과학원 ‘월아 연구 시험림’ 및 산청군 삼장면 홍계리 산 110번지 일원의 국유림에 서로 인접하여 정상적으로 생육하고 있는 V영급 이상의 소나무와 굴참나무 천연림을 대상으로 하였다. 최근 30년 동안(1981~2010년) 진주 지역의 연평균기온과 강수량은 각각 13.1°C 와, $1,513 \text{ mm}$ 이며, 산청군의 연평균기온과 강수량은 12.8°C 와, $1,557 \text{ mm}$ 이다(Korea Meteorological Administration, 2019). 조사지의 산림토양형은 진주의 경우 암적갈색 약건산림토양형(DRb₂)이 산청은 갈색적운산림토양형(B₃)으로 나타났다. 조사지로 선정된 임분은 진주의 경우($35^\circ12'33''\text{N}$, $128^\circ10'24''\text{E}$) 표고 150~170 m 내

240° 서향의 사면 경사 10° 이하이며, 산청은(35°22′ 29″N, 127°51′12″E) 표고 470~490 m 내 서향, 사면 경사는 32°였다.

하층식생은 진주의 경우 개웃나무(*Toxicodendron trichocarpum* Miq. Kuntze), 산초나무(*Zanthoxylum schinifolium* S. et Z.), 짚레꽃(*Rosa multiflora* Thunb.), 청미레덩굴(*Smilax china* Linné), 졸참나무(*Quercus serrata* Murray), 굴참나무(*Q. variabilis* Blume), 산딸기(*Rubus crataegifolius* Bunge) 등이, 산청 지역은 쪽동백나무(*Styrax obassia* S. et Z.), 쇠물푸레나무(*Fraxinus sieboldiana* Bl.), 생강나무(*Lindera obtusiloba* Blume), 개웃나무(*Rhus trichocarpa* Miq. Kuntze), 산철쭉(*Rhododendron yedoense* Nakai), 비목나무(*L. erythrocarpa* Makino) 등이 분포하였으나 두 지역 모두 하층식생의 피도는 높지 않았다. 조사구는 20 m × 20 m 크기로 총 4개의 조사구[2수종(소나무, 굴참나무) × 2지역(진주, 산청)]을 설치하였다.

2.2. 기상 및 토양의 물리적, 화학적 특성

가지 분해에 영향을 미치는 기상요인은 2018년 5월부터 2019년 4월까지 1년 동안 Hobo 자동측정기(Hobo U23-004 Pro V₂, Italy)를 사용하여 온도와 습도를 1시간 간격으로 측정하였다. 토양 환경요인은 2018년 11월, 2019년 2월, 5월 총 3회에 걸쳐 토양채취기(Oakfield soil core sampler)를 이용하여 토심 10 cm 부위를 각 조사구 내 임의의 지점에서 3개씩 채취하였다. 채취된 시료는 지퍼백에 밀봉한 후 실험실로 운반하였다. 토양 입경 분포의 경우 비중계법을 이용하여 모래, 미사, 점토 함량을 결정하였으며, 토양 수분함량은 5 g의 신선한 토양을 건조기에서 105°C로 24시간 건조 후 생중량과 건중량 차이를 이용하여 계산하였다. 토양 pH와 EC는 토양시료와 증류수를 1:5 비율로 혼합하여 30분 간 진탕 후 이온전극(Istec 735-P, Korea)과 EC메타(Orion 3 star conductivity, Singapore)를 이용하여 측정하였으며 토양 유효인산은 UV분광분석기(Libra S22; Bio chrom, Cambridge, UK)를 이용하여 측정하였다. 토양 내 유기탄소와 질소 농도는 토양 건중량 시료를 0.420 mm체(ASTM NO. 40)를 이용하여 시료를 조제한 후 원소분석기(Vario Macro cube, Langensfeld, Germany)를 이용하여 분석하였다. 포타슘, 칼슘, 마그네슘 농도는 2.5 g의 건조 토양에 암모늄 아세테이트 용액 55 ml를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출하였으며(Kalra and

Maynard, 1991) 추출한 용액을 ICP(Perkin Elmer Optima 5300, USA)를 이용하여 분석하였다.

2.3. 가지 분해율, 탄소 및 질소농도 분석

본 연구에서 사용된 가지 시료는 2018년 4월 각 지역으로부터 정상적으로 생육한 소나무(진주 홍고직경: 11.6 cm, 수고: 6.3 m; 산청 홍고직경: 16.5 cm, 수고: 7.1 m)와 굴참나무(진주 홍고직경: 7.7 cm, 수고: 5.8 m; 산청 홍고직경: 12.4 cm, 수고: 5.2 m)를 별도로 하여 시료를 채취하였다. 일반적으로 낙엽·낙지로 떨어지는 가지의 경우 유입된 가지의 분해 정도가 다르게 나타나기 때문에 본 연구에서는 별도로목으로부터 가지 시료를 채취하여 임분 및 조사지역 간 가지 시료의 균질성을 유지하였으며, 타 연구에서도 임목을 별도로 후 가지를 채취하여 분해율을 조사한 바 있다(Bargali, 1996; Garrett *et al.*, 2012). 채취한 시료는 실험실에서 10일간 풍건하였으며, 직경 2.0~4.0 cm, 길이 10 cm로 가지 분해에 사용할 시료를 제작하였다. 가지 시료 중 일부는 65°C 건조기에서 향량에 도달할 때까지 건조하여 가지의 수분 함수율을 계산하였다. 계산된 수분 함수율을 이용하여 풍건된 생 가지의 초기 건중량 값을 추정하였으며, 건중량 200 g의 가지시료를 나일론 백에 넣은 후 2018년 5월 각 임분의 임상에 총 48개의 백[2수종(소나무, 굴참나무) × 2지역(진주, 산청) × 3반복 × 4회]을 매설하였다. 분해과정 동안 시료손실을 최소화하기 위하여 매쉬 크기 1 mm × 1 mm 그물망을 사용하였다. 매설 후 가지 백은 2018년 8월과, 11월, 그리고 2019년 2월과, 5월에 각 조사구로부터 3개씩 회수하였다. 회수된 가지시료는 실험실로 운반하였으며 65°C 건조기에서 48시간 이상 향량에 도달할 때까지 건조하였다. 가지 시료의 분해율은 초기 매설 당시의 건중량과 회수된 시료의 건중량을 이용하여 계산하였다. 건중량 측정 후 가지 시료는 분쇄기로 파쇄하고 40-mesh 체로 분석용 시료를 제조하였으며 탄소 및 질소 농도는 원소분석기(Vario Macro cube, Langensfeld, Germany)로 측정하였다.

2.4. 탄소 및 질소 동태 조사

분해과정 동안 가지시료의 탄소 및 질소 무기화(Mineralization) 또는 부동화(Immobilization)는 양분 축적 지수(Nutrient Accumulation Index; NAI)를 이용하여 계산하였다(Harmon *et al.*, 1986; Romero *et al.*

al., 2005). NAI < 1인 경우 분해 중인 가지로부터 양분의 순 무기화가 발생하는 것을 의미하며, 반면 NAI > 1인 경우 분해 중인 가지에 양분의 축적이 발생하는 것을 나타낸다.

$$NAI = W_t X_t / W_0 X_0 \quad (\text{Eq. 1})$$

- W_t = t개월째 가지 건중량
- W_0 = 초기 가지 건중량
- X_t = t개월째 가지 탄소 및 질소 농도
- X_0 = 초기 가지 탄소 및 질소 농도

2.5. 자료분석

토양 수분함량, 토양 pH, 토양 EC와 같은 토양 특성 및 가지의 잔존율, 탄소 및 질소 농도, C/N율, 탄소 및 질소 축적지수 등의 수종 및 지역간 차이는 일원분산분석(One-way ANOVA)에 의해 유의성을 검정($P < 0.05$)하였으며, 유의성이 인정되는 경우 Tukey 검정을 이용하여 처리 간 차이를 비교하였다(SAS Inc., 2003).

III. 결과 및 고찰

3.1. 임분 현황, 토양 및 기상요인

각 조사구의 임분 밀도는 산청-굴참나무 950 본 ha^{-1} , 산청-소나무 700 본 ha^{-1} , 진주-굴참나무 1200 본 ha^{-1} , 진주-소나무 1025 본 ha^{-1} 로 나타났으며, 흉고단면적 합은 산청-굴참나무 37.00 $m^2 ha^{-1}$, 소나무는 55.93 $m^2 ha^{-1}$, 진주-굴참나무 36.57 $m^2 ha^{-1}$, 소나무 40.15 $m^2 ha^{-1}$ 로 소나무 임분의 흉고단면적 합이 굴참나무 임분에 비해 크게 나타났다. 연평균대기온도의 경우 진주는 14.1°C로 산청의 12.8°C보다 높게 나타났다. 월평

균기온도 진주가 산청보다 높게 나타났으며, 월평균최고온도는 8월 진주가 26.4°C, 산청 24.4°C, 월평균최저기온은 1월 진주가 2.2°C 산청은 1.1°C로 나타났다. 연평균대기 습도의 경우 진주가 71.6 %, 산청 67.6 % 보다 높게 나타났으며, 월평균대기습도는 5월, 7월, 8월을 제외하고 진주가 산청보다 높았다.

토양 성질 중 입경 분포의 경우 모래는 산청 굴참나무 임분이 54.33±1.20 % (평균±표준오차), 소나무 임분 51.33±0.67 %로 진주의 굴참나무 32.67±0.67 %나 소나무 임분 36.68±2.91 %보다 유의적으로 높게 나타났으나($P < 0.05$) 미사는 진주의 굴참나무 임분이 40.33±0.33 %, 소나무 임분이 35.67±1.45 %로 산청의 굴참나무 임분은 26.00±0.58 % 소나무는 23.33±0.33 %에 비해 유의적으로 높게 나타났다($P < 0.05$). 점토는 진주의 소나무 27.67±2.85 %와 굴참나무 임분이 27.00±0.58 %로 산청의 소나무 임분 25.33±0.88 %나 굴참나무 임분 19.67±0.88 %보다 유의적으로 높게 나타났다($P < 0.05$). 이는 진주의 경우 퇴적암 모재, 산청은 화강편암 모재로부터 생성되어 진주의 토양에서 미사와 점토 같은 세립질 입자가 높게 나타난 것으로 사료된다. 모래함량의 경우 화성암과 변성암 모재가 퇴적암 모재에 비해 20 % 이상 높게 나타났음이 보고된 바 있으며(Jeong et al., 2003) 이는 화강암이나 화강편암을 모재로 하는 토양의 경우 기계적, 화학적 풍화에 저항성이 높은 석영이 풍부하기 때문으로 알려져 있다(Zhang et al., 2001). 우리나라의 퇴적암 모재인 산림 토양 A층은 모래 24.5 %, 미사 51.2 %, 점토 23.3 %로 화강암 모재인 산림 토양 A층의 모래 44.2 %, 미사 39.3 %, 점토 15.5 %인 것과 비교하였을 때 진주와 산청의 토양 입경분포는 유사한 범위에 분포하였다(Jeong et al., 2003). 평균 토양 수분함량은 산청 굴참

Table 1. General stand characteristics of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands

Site	Stand	Location	Elevation (m)	Tree density (tree ha^{-1})	DBH (cm)	Basal area ($m^2 ha^{-1}$)
Jinju	<i>P. densiflora</i>	35°12'33"N 128°10'24"E	150	1,025	21.6	40.2
	<i>Q. variabilis</i>	35°12'32"N 128°12'15"E	170	1,200	18.8	36.6
Sancheong	<i>P. densiflora</i>	35°22'30"N 127°50'59"E	490	700	30.9	55.9
	<i>Q. variabilis</i>	35°22'29"N 127°51'12"E	470	950	20.7	37.0

나무 임분이 46.08 ± 1.07 %, 소나무 임분이 27.74 ± 2.81 %로 진주 지역의 소나무 임분 21.91 ± 0.52 %이나 굴참나무 임분 18.29 ± 0.23 %보다 유의적으로 높게 나타났다($P < 0.05$). 이는 산청 굴참나무 임분과 소나무 임분이 진주 지역의 굴참나무 임분이나 소나무 임분보다 토양 유기탄소 농도가 높게 나타나 토양 수분 함량에 영향을 미친 것으로 사료된다. 평균 토양 pH의 경우 진주의 소나무 임분은 $\text{pH } 5.11 \pm 0.11$, 굴참나무 임분은 $\text{pH } 4.88 \pm 0.06$ 로 산청 지역의 굴참나무 임분 $\text{pH } 4.60 \pm 0.06$ 이나 소나무 임분의 $\text{pH } 4.50 \pm 0.05$ 보다 유의적으로 높게 나타났다. 평균 토양 전기전도도의 경우 산청이 진주의 두 임분보다 높은 경향은 있었으나 임분간 유의적인 차이는 나타나지 않았다($P > 0.05$). 토양 유효 인의 경우 진주의 굴참나무 임분은 $1.26 \pm 0.18 \text{ mg kg}^{-1}$, 소나무 임분 $1.00 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 산청의 소나무 $0.82 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ 나 굴참나무 $0.80 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$ 보다 유의적으로 높게 나타났다($P < 0.05$).

3.2. 가지 분해율

가지의 분해는 5월부터 7월까지 매설 3개월 동안 급격하게 진행되어, 진주와 산청 소나무 가지의 경우 2.63~3.70 %, 굴참나무는 13.62~15.70 % 분해되었다(Fig. 3). 일반적으로 하절기의 경우 온도와 강수량의 증가로 인해 수용성 물질의 급속한 용탈과 미생물

의 활동이 왕성하여 분해가 활발하게 나타날 수 있다고 알려져 있다(Wedderburn and Carter, 1999; Tripathi *et al.*, 2009). 매설 12개월 후 가지 분해율은 산청-소나무(4.49 %) < 진주-소나무(5.75 %) < 산청-굴참나무(20.01 %) < 진주-굴참나무(24.68 %)의 순으로 나타났으며, 굴참나무의 가지가 소나무보다 유의적으로 빠른 분해율을 보였다($P < 0.05$) (Fig. 3). 본 연구에서 지역 간 연평균대기온도 및 대기습도와 같은 기상 환경요인 그리고 토양 입경 분포, 토양 수분함량, 토양 pH, 토양 유기탄소 및 질소 등과 같은 토양 특성의 차이가 있음에도 불구하고 두 지역 모두에서 굴참나무 가지가 소나무보다 분해가 빠른 것은 분해 초기 단계는 환경요인보다 수증기 및 질소 및 탄소 농도, C/N율과 같은 기질 특성 차이가 가지의 분해율에 더욱 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다(Fig. 3). 또한 낙엽·낙지 분해 연구에서 공간적으로 광범위한 지역에서 수행되는 경우는 연평균 기온, 습도, 강수량 등과 같은 기후요인이 가지 분해율에 영향을 미칠 수 있지만 본 연구와 같이 소규모의 지역단위 연구에서 기후 요인은 기질적 특성보다 상대적으로 가지 분해에 기여도가 낮을 수 있다. 예를 들어, Meentemeyer(1984)는 지역적으로 수행되는 소규모의 분해연구에서 기질의 특성이 기후요인보다 분해율에 상대적으로 강한 영향을 미칠 수 있다고 보고한 바 있으며, Berg *et al.*(2000)은 가지보다 분해가 빨리 진행되는 침엽수 잎을 대상으로 분

Table 2. Soil physical and chemical properties at 0-10cm depth in *Quercus variabilis* and *Pinus densiflora* stands

Site	Stand	Particle size distribution (%)			Soil water (%)	Soil pH	Soil EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Organic C (%)	Total N (%)	Avail. P (mg kg^{-1})	Exchangeable (cmolc kg^{-1})		
		Sand	Silt	Clay							K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Jinju	<i>P. densiflora</i>	36.68 (2.91)	35.67 (1.45)	27.67 (2.85)	21.91 (0.52)	5.11 (0.11)	130.72 (8.56)	1.33 (0.08)	0.08 (0.007)	1.00 (0.03)	0.11 (0.009)	0.63 (0.08)	0.40 (0.04)
	<i>Q. variabilis</i>	32.67 (0.67)	40.33 (0.33)	27.00 (0.58)	18.29 (0.23)	4.88 (0.06)	140.87 (15.93)	1.81 (0.15)	0.11 (0.011)	1.26 (0.18)	0.16 (0.007)	1.74 (0.25)	0.95 (0.11)
Sancheong	<i>P. densiflora</i>	51.33 (0.67)	23.33 (0.33)	25.33 (0.88)	27.74 (2.81)	4.50 (0.05)	174.28 (22.44)	4.78 (0.21)	0.26 (0.014)	0.82 (0.05)	0.14 (0.015)	0.34 (0.09)	0.17 (0.01)
	<i>Q. variabilis</i>	54.33 (1.20)	26.00 (0.58)	19.67 (0.88)	46.08 (1.07)	4.60 (0.06)	198.48 (24.23)	5.57 (0.36)	0.37 (0.004)	0.80 (0.01)	0.15 (0.003)	0.20 (0.04)	0.13 (0.01)

* Values in parenthesis represent standard errors. Different letters at each column indicate a significant difference at $P < 0.05$.

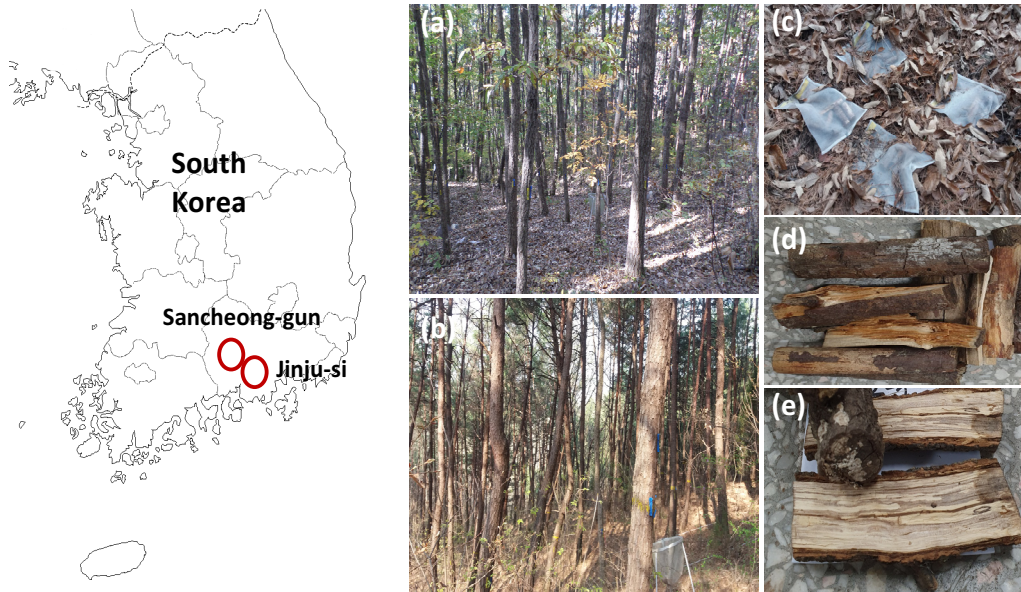


Fig. 1. Location of the study site in Jinju and Sancheong (a : *Quercus variabilis* stand, b : *Pinus densiflora* stand, c : branch bags, d : branch samples of *P. densiflora*, e : branch samples of *Q. variabilis* after 12 months incubation).

해 실험을 한 결과, 기후요인은 매실 첫 일년 후의 분해율과는 상관관계가 없었으며, 기후 요인에 비해 기질적 특성이 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 요인임을 보고한 바 있다.

가지 분해의 경우 기질의 초기 물리적 특성이나 탄소와 질소 농도, 리그닌의 양, C/N율과 같은 화학적 특

성들이 분해의 속도를 조절하는 중요한 인자로 알려져 있다(Melillo *et al.*, 1982). 특히 높은 질소 농도, 낮은 C/N율, 낮은 리그닌 농도를 가진 수종은 그렇지 않은 수종에 비해 분해율이 높게 나타났다(Cha *et al.*, 2017; Singh, 1969; Xiaogai *et al.*, 2013). 본 연구에서 가지의 초기 질소 농도는 산청과 진주 두 지역에서 모두

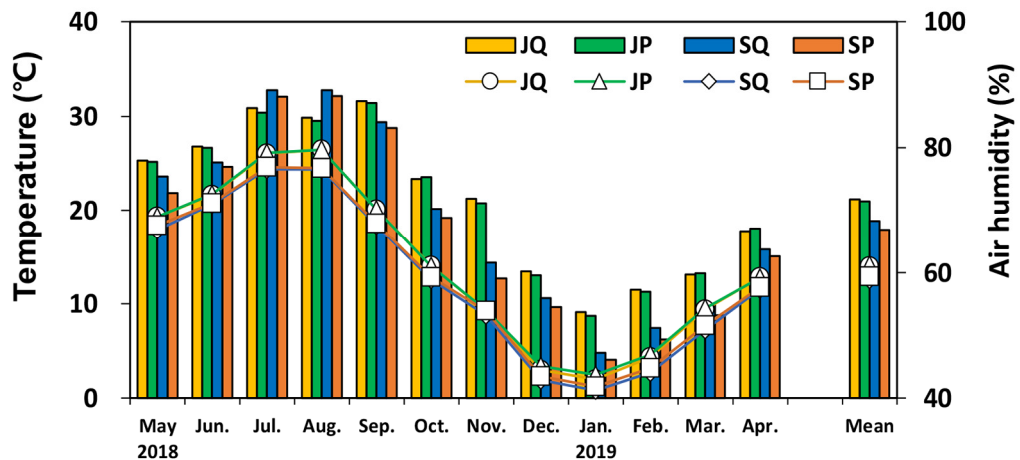


Fig. 2. Monthly variation of air temperature (Line) and air humidity (Bar) in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands. JP (Jinju, *P. densiflora*), JQ (Jinju, *Q. variabilis*), SQ (Sancheong, *Q. variabilis*), SP (Sancheong, *P. densiflora*).

굴참나무가 소나무보다 높았으며, C/N율은 소나무가 굴참나무보다 유의적으로 높게 나타났다($P < 0.05$). 본 연구의 높은 초기 질소 농도 및 낮은 C/N율을 가진 굴참나무 가지가 낮은 질소 농도 및 높은 C/N율을 가진 소나무보다 분해가 빠르게 진행된 결과는 타 연구에서도 관찰된 바 있다(Chae *et al.*, 2016; Palviainen *et al.*, 2008). 한편, Cha *et al.* (2017)는 기질의 초기 리그닌 농도는 가지의 분해율과 음의 상관관계($r^2 = 0.813$, $P = 0.014$)가 있으며, 리그닌 농도가 10~15 % 정도로 낮은 물푸레나무 및 상수리나무보다 리그닌 농도가 약 28 %로 높게 나타났던 소나무 가지에서 분해가 느리게 진행되었음을 보고한 바 있다. 일반적으로 소나무 가지의 리그닌 농도는 29.32 %로 굴참나무 23.10 %에 비해 높다고 알려져 있으며(Chong and Park, 2008), 본 연구에서 나타난 분해율 역시 수종 간 리그닌 농도 차이와 연관성이 있는 것으로 사료된다.

3.3. 탄소 및 질소 동태

조사기간 동안 탄소 농도와 탄소 축적 지수(NAI)는 소나무가 굴참나무보다 높게 나타나는 경향이 있었다. 평균 탄소 농도의 범위는 소나무 454~482 mg g^{-1} 로 나타났으며 굴참나무 457~469 mg g^{-1} 범위로 나타났다. 분해가 진행되기 전 가지의 초기 탄소 농도는 수종 및 지역 간 유의적인 차이가 없었던 반면 매설 12개월 후 분해가 진행된 가지의 탄소 농도는 산청-소나무는 $477 \pm 1.7 \text{ mg g}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, 진주-굴참나무는 $465 \pm 4.3 \text{ mg g}^{-1}$ 로 가장 낮게 나타나 유의적인 차이가 있었다($P < 0.05$). 매설 12개월 후 굴참나무의 탄소 농도는 산청과 진주 두 지역 모두 분해 전의 초기 값과 차이가 나타나지 않았으나 소나무의 경우 산청과 진주 모두 초기 값에 비해 유의적으로 증가하였다($P < 0.05$). 본 연구에서 분해 중인 소나무 가지의 탄소 농도 증가는 다당류(Polysaccharides)의 손실과 시간이

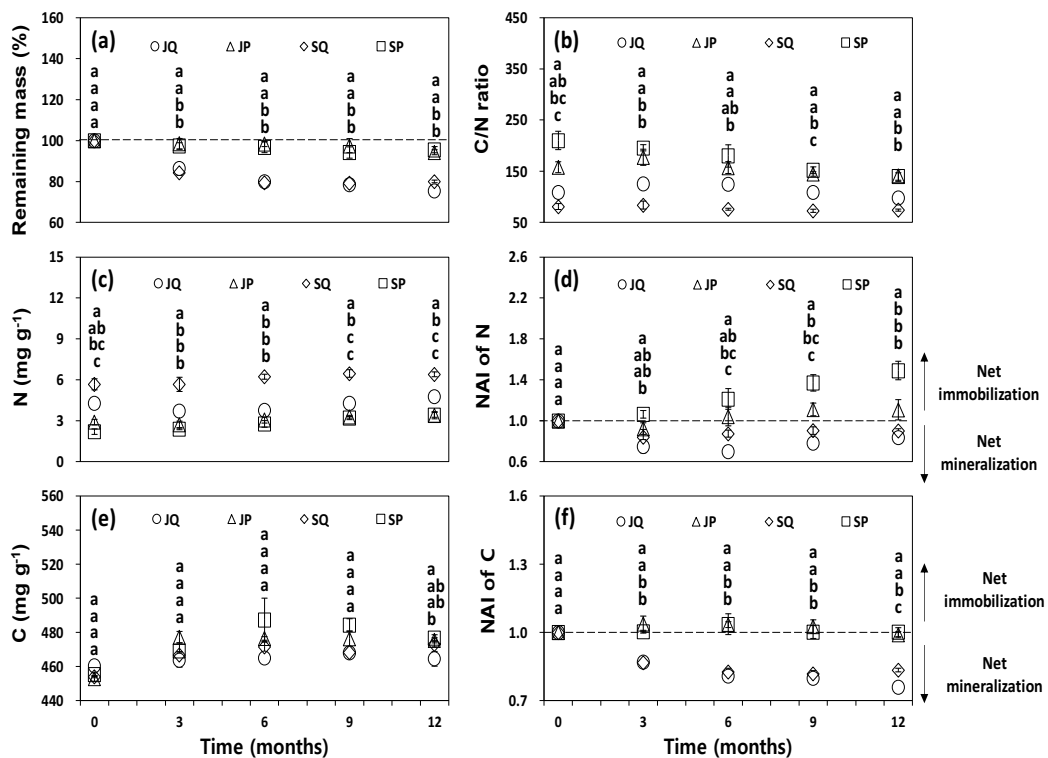


Fig. 3. Remaining mass of branch (a), C/N ratio (b) and N concentration (c), NAI of N (d), C concentration (e) and NAI of C (f) of branches in *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands during the decomposition period (from May 2018 to May 2019). JP (Jinju, *P. densiflora*), JQ (Jinju, *Q. variabilis*), SQ (Sancheong, *Q. variabilis*), SP (Sancheong, *P. densiflora*). Vertical bars represent standard error. Different letters on the bar represent a significant difference at $P < 0.05$.

지남에 따라 상대적으로 증가된 리그닌 농도로 인해 나타날 수 있다(Preston *et al.*, 1998). 이와 같은 결과는 타 분해 연구에서도 유사한 경향이 관찰된 바 있으며 *Castanopsis chinensis*와 *Schima superba* 수종의 가지와 같은 목재 잔해물의 탄소 농도는 분해 5년 후 일시적으로 증가하였으며(Yang *et al.*, 2010), *Pinus Sylvestris* L., *Picea abies* (L.) Karst., *Betula pendula* Roth., *Pinus radiata* 수종의 줄기 목질부에서 분해가 진행됨에 따라 탄소 농도가 증가하였다(Palviainen *et al.*, 2010). 탄소 축적 지수(NAI)는 조사기간 동안 가지의 잔존율과 유사한 경향을 나타냈으며, 매설 12개월 후 소나무의 탄소 축적 지수는 진주와 산청 모두 약 1.0 정도로 나타나 무기화가 발생하지 않았던 반면 굴참나무는 분해가 진행됨에 따라 지수가 감소하여 산청 0.83±0.008, 진주는 0.76±0.002으로 나타나 굴참나무 가지가 소나무 가지에 비해 탄소 무기화가 빠르게 발생하는 것으로 나타났다($P<0.05$).

질소 농도 및 질소 축적 지수는 조사기간 동안 수종 및 지역 간 유의적인 차이가 있었다($P<0.05$). 분해가 시작되기 전 굴참나무의 초기 질소 농도는 산청 5.7±0.40 mg g⁻¹, 진주 4.3±0.40 mg g⁻¹, 소나무는 진주 2.9±0.2 mg g⁻¹, 산청 2.2±0.2 mg g⁻¹로 나타났다. 굴참나무의 매설 12개월 후 질소 농도의 변화는 초기 값에 비해 증가하거나 감소하는 등의 변화는 나타나지 않았으며, 질소 축적 지수는 산청 0.90±0.018, 진주 0.84±0.049로 순 무기화가 발생하였다. 소나무의 질소 농도 및 질소 축적 지수는 진주의 경우 분해가 진행됨에 따라 초기 값에 비해 변화가 없었던 반면 산청의 질소 농도는 초기 값 2.2±0.2 mg g⁻¹에서 매설 12개월 후 3.4±0.2 mg g⁻¹, 양분 축적 지수는 1.49±0.091까지 증가하여 질소의 축적을 나타냈다($P<0.05$). 본 연구 결과에 따르면 굴참나무와 달리 소나무의 초기 질소 농도의 차이는 분해과정에서 질소의 저장 및 보유에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예를 들어, 초기 질소 농도가 가장 낮았던 산청 지역의 소나무 가지가 진주 소나무 가지보다 분해 과정 동안 질소의 축적이 높게 나타났다. 이는 초기 질소 농도가 낮은 경우 상대적으로 초기 농도가 높은 경우보다 더 많은 질소 저장 및 보유가 가능할 수 있다는 보고와 일치하였다(Alban and Pastor, 1993; Laiho and Prescott, 2004). 이러한 질소 농도의 증가는 분해 과정 동안 미생물에 의한 질소의 부동화, 분해 미생물의 증가, 먼지, 곤충 배설물, 곰팡이 등의 유입으로 인해 나타날 수 있으며, 타

연구에서도 질소 농도의 증가가 보고된 바 있어 본 연구에서 나타난 결과와 일치하였다(Bütler *et al.*, 2007; Holub *et al.*, 2001; Laiho and Prescott, 2004).

C/N율은 소나무 가지가 굴참나무 가지보다 조사기간 동안 모두 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$). 가지의 초기 C/N율은 굴참나무(진주 109, 산청 81)가 소나무(산청 210, 진주 158)에 비해 현저하게 낮게 나타나 굴참나무 가지의 급속한 분해율에 영향을 끼친 것 같아 일치하였다. 분해과정에 따른 가지의 C/N율의 변화는 굴참나무는 진주와 산청 모두 감소하는 경향은 있었으나 유의적인 차이가 없었던 반면, 소나무는 진주의 경우 매설 기간에 따른 유의적인 차이가 없었으나 산청은 초기 값 210±17.9에서 매설 12개월 후 140±7.2로 유의적인 감소($P<0.05$)가 나타났다(Fig. 3). 분해가 진행됨에 따라 나타나는 C/N율의 감소는 소나무 가지의 급속한 탄소 무기화와 증가된 질소로 인해 나타났으며 이는 낙엽이나 가지 분해 과정에서 일반적으로 나타나는 결과이다(Bütler *et al.*, 2007).

IV. 요약 및 결론

서로 인접하여 생육하는 소나무 임분과 굴참나무 임분에서 두 지역 모두 굴참나무 가지가 소나무에 비해 빠른 분해를 보여 수종 간 초기 질소 농도, C/N율과 같은 기질의 화학적 특성이 분해율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 분해에 따른 탄소 및 질소 동태의 경우 12개월 조사기간 동안 굴참나무는 탄소 및 질소의 순 무기화를 나타냈으며, 소나무는 탄소 및 질소의 축적이 나타나 수종 간 다른 경향을 보였다. 비록, 본 연구가 12개월의 단기 조사이지만 굴참나무와 소나무 가지의 분해율이 수종 간 차이가 있었으며, 분해과정 동안 굴참나무 가지의 탄소 및 질소의 무기화가 소나무 가지에 비해 빠른 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 분해율은 소나무 5%, 굴참나무 약 23%로 매우 낮게 나타나 소나무와 굴참나무 가지의 탄소 및 질소 동태를 보다 명확히 이해하기 위해서는 두 수종의 분해율에 대한 장기적인 연구가 필수적인 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 경상남도 산청과 진주 지역으로부터 서로 인접하여 생육하고 있는 소나무와 굴참나무를 대상으로 기질의 특성, 임분 종류, 토양 및 기상 환경요인

등이 가지의 분해율과 탄소 및 질소 동태에 어떠한 영향을 끼치는지 알아보기 위해 수행하였다. 직경 2.0~4.0cm, 길이 10cm의 가지 시료를 30cm × 30cm 크기의 매쉬 백에 넣은 후 2018년 5월 각 임분의 임상에 매설하였으며 2018년 8월과, 11월, 그리고 2019년 2월과, 5월에 각 조사구에서 회수하여 가지의 분해율과 탄소 및 질소 동태를 조사하였다. 매설 12개월 후 가지 분해율은 산청-소나무(4.49 %) < 진주-소나무(5.75 %) < 산청-굴참나무(20.01 %) < 진주-굴참나무(24.68 %) 순서로 나타나 두 지역 모두 굴참나무 가지가 소나무에 비해 빠른 분해를 보였다. 탄소 및 질소의 경우 굴참나무는 순 무기화를 나타냈으며, 소나무는 탄소 및 질소의 축적 및 저장이 나타나 수종 간 다른 경향을 보였다. 본 연구 결과에 따르면 서로 인접하여 생육하고 있는 두 수종의 분해율과 탄소 및 질소 동태는 지역·환경적 요인보다 수종 간 초기 질소 농도, C/N율과 같은 기질의 특성이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국 임업진흥원의 “신기후체제 대응 산림분야 국가 온실가스 인벤토리 산정체계 및 탄소계정 고도화 연구(R1707942)”와 “국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호: 20UMRG-B158194-01)”의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aerts, R., 1997: Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos* **79**(3), 439-449.
- Alban, D. H., and J. Pastor, 1993: Decomposition of aspen, spruce, and pine boles on two sites in Minnesota. *Canadian Journal of Forest Research* **23**(9), 1744-1749.
- Bargali, S. S., 1996: Weight loss and N release in decomposing wood litter in eucalypt plantation age series. *Soil Biology and Biochemistry* **28**, 669-702.
- Berg, B., M. B. Johansson, and V. Meentemeyer, 2000: Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. *Canadian Journal of Forest Research* **30**(7), 1136-1147.
- Bray, J. R., and E. Gorham, 1964: Litter production in forests of the world. *Advances in Ecological Research* **2**, 101-157.
- Bütler, R., L. Patty, R. C. Le Bayon, C. Guenat, and R. Schlaepfer, 2007: Log decay of *Picea abies* in the Swiss Jura mountains of central Europe. *Forest Ecology and Management* **242**(2-3), 791-799.
- Cha, S., H. M. Chae, S. H. Lee, and J. K. Shim, 2017: Branch wood decomposition of tree species in a deciduous temperate forest in Korea. *Forests* **8**(5), 176.
- Chae, H. M., S. Cha, S. H. Lee, M. J. Choi, and J. K. Shim, 2016: Age-related decomposition of *Quercus mongolica* branches. *Plant Ecology* **217**, 945-957.
- Chong, S. H., and B. S. Park, 2008: Wood properties of the useful tree species grown in Korea. *Korea Forest Research Institute* **29**, 215-285.
- Garrett, L. G., M. O. Kimberley, G. R. Oliver, S. H. Pearce, and P. N. Beets, 2012: Decomposition of coarse woody roots and branches in managed *Pinus radiata* plantations in New Zealand – A time series approach. *Forest Ecology and Management* **269**, 116-123.
- Harmon, M. E., J. F. Franklin, F. J. Swanson, P. Sollins, S. V. Gregory, J. D. Lattin, N. H. Anderson, S. P. Cline, N. G. Aumen, J. R. Sedell, G. W. Lienkaemper, K. Cromack Jr, and K. W. Cummins, 1986: Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* **15**, 133-302.
- Holub, S. M., J. D. H. Spears, and K. Lajtha, 2001: A reanalysis of nutrient dynamics in coniferous coarse woody debris. *Canadian Journal of Forest Research* **31**(11), 1894-1902.
- Jeong, J. H., K. S. Goo, C. H. Lee, H. G. Won, J. O. Byun, and C. Kim, 2003: Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal of Korean Forest Society* **92**(3), 254-262.
- Kalra, Y. P., and D. G. Maynard, 1991: Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319E, 116pp.
- Kim, C., J. H. Lim, and J. H. Shin, 2003: Nutrient dynamics in litterfall and decomposing leaf litter at the Kwangneung deciduous broad-leaved natural forest. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 87-93.
- Kim, C., K. S. Koo, and J. K. Byun, 2005: Litterfall and nutrient dynamics in pine (*Pinus rigida*) and larch (*Larix leptolepis*) plantations. *Journal of*

- Korean Forest Society* **94**(5), 302-306.
- Kim, C., S. Kim, G. Baek, and A. R. Yang, 2019: Carbon and nitrogen responses in litterfall and litter decomposition in red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands disturbed by pine wilt disease. *Forests* **10**(3), 244.
- Kim, S. S., and B. H. Lee, 2018: Estimation of the production potential of domestic wood pellets using unused forest biomass by analyzing the potential volume of forest biomass and the growth of forest trees. *Journal of Oil and Applied Science* **35**(1), 247-253.
- Korea Forest Service, 2018a: The 6th Basic Forest Plan (2018-2037). Korea Forest Service (in Korean), 153pp.
- Korea Forest Service, 2018b: Statistical Yearbook of Forestry. Korea Forest Service (in Korean), 445pp.
- Korea Meteorological Administration, 2019: Annual Climatological Report. Korea Meteorological Administration (in Korean), 323pp.
- Laiho, R., and C. E. Prescott, 2004: Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis. *Canadian Journal of Forest Research* **34**(4), 763-777.
- Laskowski, R., and B. Berg, 2006: Litter decomposition: guide to carbon and nutrient turnover. *Advanced in Ecological Research*, **38**, 1-448.
- Lee, S. Y., M. Y. Lee, C. H. Yeom, C. G. Kwon, and H. P. Lee, 2009: Comparative analysis of forest fire danger rating on forest characteristics of thinning area and non-thinning on forest fire burnt area. *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering* **23**(4), 32-39.
- Meentemeyer, V., 1984: The geography of organic decomposition rates. *Annals of Association of American Geographers* **74**(4), 551-560.
- Melillo, J. M., J. D. Aber, and J. F. Muratore, 1982: Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* **63**(3), 621-626.
- Mun, H. T., 2004: Decay rate and nutrients dynamics during decomposition of oak branches. *The Korean Journal of Ecology* **27**(2), 93-98.
- Palviainen, M., L. Finér, R. Laiho, E. Shorohova, E. Kapitsa, and I. Vanha-Majamaa, 2010: Carbon and nitrogen release from decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps. *Forest Ecology and Management* **259**(3), 390-398.
- Palviainen, M., R. Laiho, H. Mäkinen, and L. Finér, 2008: Do decomposing Scots pine, Norway spruce, and silver birch stems retain nitrogen? *Canadian Journal of Forest Research* **38**(12), 3047-3055.
- Preston, C. M., J. A. Trofymow, J. Niu, and C. A. Fyfe, 1998: ¹³CPMAS-NMR spectroscopy and chemical analysis of coarse woody debris in coastal forests of Vancouver Island. *Forest Ecology and Management* **111**(1), 51-68.
- Romero, L. B., T. J. Smith III, and J. W. Fourqurean, 2005: Changes in mass and nutrient content of wood during decomposition in a south Florida mangrove forest. *Journal of Ecology* **93**, 618-631.
- SAS Institute Inc., 2003: SAS/STAT Statistical Software. Version 9.1 SAS publishing Cary, NC.
- Singh, K., 1969: Studies in decomposition of leaf litter of important trees of tropical deciduous forest at Varanasi. *Tropical Ecology* **10**, 292-311.
- Swift, M. J., O. W. Heal, J. M. Anderson, and J. M. Anderson, 1979: *Decomposition in terrestrial ecosystems*. University of California Press, 372pp.
- Tripathi, O. P., H. N. Pandey, and R. S. Tripathi, 2009: Litter production, decomposition and physico-chemical properties of soil in 3 developed agroforestry systems of Meghalaya, Northeast India. *African Journal of Plant Science* **3**(8), 160-167.
- Ulyshen, M. D., R. Shefferson, S. Horn, M. K. Taylor, B. Bush, C. Brownie, S. Seibold, and M. S. Strickland, 2017: Below-and above-ground effects of deadwood and termites in plantation forests. *Ecosphere* **8**(8), e01910.
- Wambsganss, J., K. P. Stutz, and F. Lang, 2017: European beech deadwood can increase soil organic carbon sequestration in forest topsoils. *Forest Ecology and Management* **405**, 200-209.
- Wedderburn, M. E., and J. Carter, 1999: Litter decomposition by four functional tree types for use in silvopastoral systems. *Soil Biology and Biochemistry* **31**(3), 455-461.
- Xiaogai, G., Z. Lixiong, X. Wenfa, H. Zhilin, G. Xiansheng, and T. Benwang, 2013: Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review. *Acta Ecologica Sinica* **33**, 102-108.
- Yang, F. F., Y. L. Li, G. Y. Zhou, K. O. Wenigmann, D. Q. Zhang, M. Wenigmann, S. Z. Liu, and Q. M. Zhang, 2010: Dynamics of coarse woody debris and decomposition rates in an old-growth forest in lower tropical China. *Forest Ecology and Management* **259**(8), 1666-1672.
- Zhang, D., D. Hui, Y. Luo, and G. Zhou, 2008: Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology* **1**(2), 85-93.

Zhang, Y. S., P. K. Jung, S. K. Kim, and I. S. Jo,
2001: The weathering and chemical composition of

young residual entisols in Korea. *Korean Journal
of Soil Science and Fertilizer* **34**(6), 373-379.