

일본잎갈나무와 리기다소나무 고사목의 호흡속도: 고사목의 부후등급과 이화학적 특성의 영향

이민규¹ · 권보람¹ · 김성근^{1,2} · 윤태경³ · 손요환⁴ · 이명종^{1*}

¹강원대학교 산림환경시스템학과, ²산림조합중앙회, ³상지대학교 산림과학과, ⁴고려대학교 환경생태공학과

Coarse Woody Debris (CWD) Respiration Rates of *Larix kaempferi* and *Pinus rigida*: Effects of Decay Class and Physicochemical Properties of CWD

Minkyu Lee¹, Boram Kwon¹, Sung-geun Kim^{1,2}, Tae Kyung Yoon³,
Yowhan Son⁴ and Myong Jong Yi^{1*}

¹Department of Forest Environment System, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

²National Forestry Cooperative Federation, Seoul 05601, Korea

³Department of Forest Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea

⁴Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

요약: 고사목(CWD)은 산림생태계 구성요소의 하나로서 산림의 에너지 흐름과 물질순환에서 주요한 역할을 한다. 특히 고사목은 탄소를 격리하는 장기 저장고로서, 산림에서 대기로 방출되는 탄소의 속도를 지연시키는 측면에서 고사목의 호흡속도를 구명하는 것은 의미가 크다. 따라서 본 연구는 온대중부지역의 일본잎갈나무와 리기다소나무 고사목을 대상으로 호흡속도를 측정하고, 호흡속도에 영향을 미치는 인자(밀도, 함수율, 탄소농도, 질소농도 및 C/N비)의 영향력을 파악하였다. 2018년 여름, 우리나라 중부지역 14개 임분에서 부후등급 별로 시료를 채취하고, 실험실에서 휴대용 이산화탄소 센서를 부착한 밀폐형 챔버를 이용하여 고사목 호흡을 측정하였다. 두 수종 모두 부후가 진행함에 따라 고사목 밀도는 감소하였으며, 함수율은 증가했다. 또한 탄소농도는 부후등급에 따라 유의성을 나타내지 않았으나, 질소농도는 증가하고 C/N비는 감소하는 경향을 보였다. 일본잎갈나무의 경우 부후 IV등급까지 고사목의 호흡속도가 유의하게 증가하였지만, 리기다소나무에서는 부후 II등급까지 증가 후 평형상태를 보였다. 따라서 탄소농도를 제외하고, 모든 인자들이 호흡속도와 유의한 상관관계를 나타냈으며, 단계적 회귀분석의 결과, 두 수종 모두 함수율이 고사목 호흡속도에 가장 영향을 미치는 인자로 나타났다. 이와 같이 고사목의 수분은 미생물의 활성도를 높여 호흡속도에 영향을 미치며, 온도와 광 환경 등 복잡하게 연결된 환경인자들과 밀접한 관계에 있으므로 향후 이들의 상호관계 및 수분의 시계열적패턴 추정에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

Abstract: Coarse woody debris (CWD), which is a component of the forest ecosystem, plays a major role in forest energy flow and nutrient cycling. In particular, CWD isolates carbon for a long time and is important in terms of slowing the rate of carbon released from the forest to the atmosphere. Therefore, this study measured the physiochemical characteristics and respiration rate (R_{CWD}) of CWD for *Larix kaempferi* and *Pinus rigida* in temperate forests in central Korea. In summer 2018, CWD samples from decay class (DC) I to IV were collected in the 14 forest stands. R_{CWD} and physiochemical characteristics were measured using a closed chamber with a portable carbon dioxide sensor in the laboratory. In both species, as CWD decomposition progressed, the density (D_{CWD}) of the CWD decreased while the water content (WC_{CWD}) increased. Furthermore, the carbon concentrations did not significantly differ by DC, whereas the nitrogen concentration significantly increased and the C/N ratio decreased. The respiration

* Corresponding author

E-mail: mjyi@kangwon.ac.kr

ORCID

Myong Jong Yi  <https://orcid.org/0000-0001-9598-5348>

rate of *L. kaempferi* CWD increased significantly up to DC IV, but for *P. rigida* it increased to DC II and then unchanged for DC II–IV. Accordingly, except for carbon concentration, all the measured characteristics showed a significant correlation with R_{CWD} . Multiple linear regression showed that WC_{CWD} was the most influential factor on R_{CWD} . WC_{CWD} affects R_{CWD} by increasing microbial activity and is closely related to complex environmental factors such as temperature and light conditions. Therefore, it is necessary to study their correlation and estimate the time-series pattern of CWD moisture.

Key words: coarse woody debris, respiration rate, decay class, carbon, nitrogen

서론

지난 수십년간 지구 온난화의 요인인 온실가스의 배출량은 지속적으로 증가해왔으며, 온실가스의 대부분을 차지하는 이산화탄소(CO_2) 방출의 완화 및 지연이나 감축은 필수적인 과제이다(IPCC, 2006). 산림생태계는 흡수·축적되는 탄소량이 방출되는 양보다 많아, 이산화탄소의 주요 흡수원으로 중요한 역할을 한다(Pan et al., 2011). 산림생태계에서 탄소의 주요 저장고는 임목, 고사목, 낙엽층 및 토양인데 가장 많은 탄소가 저장되는 임목과 토양에 대해서는 양분순환 및 바이오매스 등의 연구가 다양하게 실시되었다(Schuur et al., 2001; Noh et al., 2010; Kim et al., 2018). 그러나 고사목은 낙엽 및 낙지에 비해 양분농도가 낮고, 공간적 변이가 크기 때문에 산림생태계 탄소순환 측정에서 종종 간과되거나 과소평가되기도 한다(Clark et al., 2002; Kim and Son, 2002).

일반적으로 고사목(Coarse Woody Debris; CWD)은 자연적인 요인(노화, 천이, 경쟁, 바람, 설해, 병충해 등)이나 인위적인 요인(벌목, 산불 등)에 의해 발생한 조립질의 목질 유기물을 말하는데(Waring and Schlesinger, 1985), 고사목의 바이오매스는 성숙한 산림의 지상부 바이오매스 중 10–20%를 차지하는 중요한 산림생태계의 구성 요소이다(Gough et al., 2007). 고사목은 완전히 분해될 때까지 산림생태계에 오랜 기간에 걸쳐 영향을 미치기 때문에 산림의 생산성 증대, 생물의 서식처 제공, 지형의 안정 및 생물다양성의 기반제공 등의 생태적으로 큰 역할을 하며, 더불어 임상에 장기간 잔존하여 탄소의 장기 저장에 큰 역할을 한다(Stevens and Victoria, 1997). 고사목의 분해에 따라 방출되는 탄소는 CO_2 로서 대기로 유입하거나 계 내(예; 토양이나 계류수)에 재분배되는데, 아마존 유역의 노령림에서는 전자가 전체의 76%를 차지하기도 하며, 그의 연간 방출량은 1.9 Mg C ha^{-1} 로서 세립질의 지표유기물(예; 낙엽이나 낙지)의 호흡량에 필적하기도 한다(Chambers et al., 2001).

이와 같이 산림 내 고사목의 탄소저장과 분해 기작으로서 호흡은 산림의 탄소 동태파악에 있어서 간과할 수 없는 내용이다(Chambers et al., 2001; Howard et al., 2004).

국외에서는 입고목이나 도복목 등과 같은 고사형태에 따른 호흡속도에 관한 연구(Carmona et al., 2002; Harmon et al., 2013), 고사목의 크기에 따른 호흡속도의 측정(Sprugel, 1990; Yoon et al., 2014), 그리고 밀도, 함수율, 온도 등 고사목의 물리적·생물적 특성에 따른 호흡속도의 변화 등 다양한 연구가 이루어지고 있다(Chambers et al., 2001; Wang et al., 2002; Gough et al., 2007; Wu et al., 2010; Forrester et al., 2012; Olajuyigbe et al., 2012). 국내에서도 산림생태계의 물질순환에 있어서 고사목의 중요성을 인식한 연구자들이 고사목의 현존량과 분해속도의 추정을 중심으로 하는 연구가 일부 진행되었다(Yoon et al., 2015; Noh et al., 2017; Son et al., 2017).

이 연구는 6차 국가산림자원조사(NFI; Korea Forest Service, 2010)의 고사목 조사결과에서, 침엽수종 중 소나무(70.3%) 다음으로 많이 발견된 일본잎갈나무(9.0%)와 리기다소나무(8.0%)의 고사목을 대상으로 고사목의 부후등급에 따른 이화학적(밀도, 함수율, 탄소, 질소, C/N비)과 호흡속도의 변화를 측정하고, 호흡속도에 영향을 미치는 주요 이화학적 인자의 영향력을 파악하고자 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구는 장마 전인 2018년 6월 한 달 동안, 온대 중·북부 지역에서 일본잎갈나무와 리기다소나무의 인공조립지를 대상으로 자연 고사되거나 간벌 후 잔존하는 고사목을 조사하였다. 온대 중·북부 지역의 고사목 특성을 대표하도록 조사지역 간의 거리는 최소 20km 이상 격리시켰고, 각 수종마다 최소 9개 이상의 지역을 선정하였다. 특히, 부후가 심하게 진행된 고사목의 정확한 수종 판별을 위하여, 산림공간정보서비스(FGIS; Korea Forest Service, 2018)의 임상도를 분석하여 각 지역마다 단순 인공림을 선정하였다. 선정된 임분은 경기도와 강원도의 표고 65m–754m 범위에 분포하였다(Figure 1).

본 연구에서는 고사목을 부후등급 별로 선정했는데, 제 6차 국가산림자원조사의 고사목 선정기준(Korea Forest Service, 2010)에 따라 4개 부후등급으로 나누었다(Table 1). 부후 I 등급의 고사목은 II 등급과 비교하여 잎과 가지가

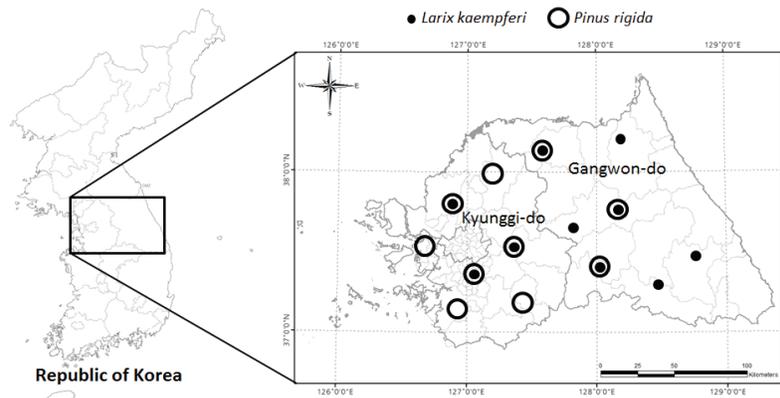


Figure 1. Locations of sampling sites for coarse woody debris (CWD) across central Korea.

Table 1. Qualitative classification systems for coarse woody debris (CWD) into four decay classes.*

Characteristics of fallen trees	Decay class			
	I	II	III	IV
Leaves	Often present	Absent	Absent	Absent
Twigs	Present	Absent	Absent	Absent
Branch	Present	Often present	Absent	Absent
Bark	Present	Often present	Absent	Absent
Wood consistency	Solid	Semi-solid	Partly soft	Soft

*adapted from Korea forest service (2010).

붙어있는지에 따라 구분되기 때문에 도복목 뿐 아니라 입고목의 형태로도 발견되었고, 부후 II, III, IV등급의 고사목은 대부분 도복목의 형태였다. 고사목의 시료는 부후를 대표할 수 있는 부분에서 길이 5cm로 절단하여 채취하였고, 직경을 측정하였다. 부후 IV등급의 고사목은 분해가 상당히 진행하여 목질부가 쉽게 부서지기 때문에, 시료 채취 전에 직경을 측정하였다. 채취한 시료는 온도의 상승에 따른 호흡 속도의 증가 및 부후의 진행을 방지하기 위하여(Gough et al., 2007) 저온상태로 보관하여 실내로 운반하였다.

본 연구에서는 Chambers et al.(2001)의 연구결과에 기초하여 실온에서 최소 3시간 이상 고사목의 온도와 호흡 속도가 안정되는 시간을 가진 후 호흡을 측정하였다. 온도의 변화에 따른 고사목의 호흡속도를 측정한 Yoon et al.(2014)의 연구에서 22.6℃ 이상에서 고사목의 호흡속도가 일정하게 유지되었으므로, 본 연구에서는 평균온도 26℃±1.8, 평균습도 40%의 조건에서 실험하였다. 한편, 미생물 이외의, 고사목의 호흡속도에 영향을 미칠 수 있는 이끼, 개미와, 낙엽 등은 모두 제거하였다.

고사목의 호흡 측정은 자체 제작한 부피 10 L의 밀폐형 챔버에 채취한 시료를 넣고, 휴대용 이산화탄소센서(GMP-343, Vaisala, Finland)로 이산화탄소 농도를 측정하였다. 이때 챔버 내부의 이산화탄소 농도를 고르게 하

기 위하여 배터리를 장착한 소형 팬을 부착하였다. 챔버 내 시료를 넣은 후, 챔버 내부의 이산화탄소 농도가 안정된 이후 일정하게 증가하는 구간의 시점을 호흡측정의 시작점으로 하여 5초 간격으로 최소 10분 이상 측정하였고, 다음 식으로 계산하였다:

$$R_{CWD}(\text{mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) = \frac{\Delta \text{CO}_2}{\Delta t} \times \frac{V_{\text{air}} \times M_C}{22.41} \times \frac{273.15}{T_{\text{air}}} \times \frac{1}{W_{CWD}}$$

여기서 R_{CWD} 는 고사목의 호흡속도($\text{mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$), $\Delta \text{CO}_2/\Delta t$ 는 시간당 CO_2 (ppm) 농도의 시간당 증가율, V_{air} 은 챔버내부의 부피(cm^3), M_C 는 탄소분자량, T_{air} 은 대기온도(℃), W_{CWD} 은 고사목 건조중량(kg)이다. 호흡 측정을 마친 시료는 생중량(g) 측정 후, 건조기에서 65℃로 항량에 달할 때까지 건조하여 중량(g)을 측정하고 함수율(W_{CWD} ; g g^{-1})을 산출하였다. 그리고, 측정한 직경과 길이로 부피를 산출하여 고사목의 밀도(D_{CWD} ; g cm^{-3})를 구하였다. 호흡 측정과 건조를 완료한 모든 시료는 실험용 분쇄기(IKA-A11, Finland)를 사용하여 분쇄하고, CN분석기(US/Vario Max CN)를 이용하여 탄소와 질소 농도를 측정하였다.

모든 통계처리는 SPSS Version 24(IBM, 2016)를 이용하여 0.05 수준에서 유의성을 검증하였다. 수종과 부후등급에 따른 호흡속도와 각 인자들(고사목의 밀도, 수분,

탄소, 질소 및 C/N비)의 평균차를 확인하기 위하여 이원 분산분석을 실시하였고, 유의성이 인정된 부후등급 별 평균의 차이는 Duncan의 다중범위검정으로 사후분석 하였다. 그리고 고사목의 호흡속도와 각 특성 간의 관계는 상관분석을 실시하였다. 고사목의 호흡속도에 미치는 각 인자의 영향력의 크기를 평가하기 위하여 다중회귀분석의 단계선택법을 사용하였으며, 잔차의 정규분포와 등분산성을 만족하고 다중공선성이 나타나지 않은 독립변수들을 이용하여 표준화계수(β)를 도출하였다. 이 값은 단위가 다른 독립변수들의 직접적인 비교를 위하여, 각 인자의 편차에 대한 호흡속도의 편차로 계산되며, 절대값이 클수록 종속변수에 영향력이 높다고 평가된다.

결 과

1. 수종과 부후등급에 따른 고사목의 호흡속도 및 이화학적 특성

고사목의 호흡속도와 이화학적 인자들(밀도, 함수율, 질소, 탄소, C/N비)을 수종, 부후등급, 수종×부후등급에 따라 평균값을 비교·분석했고(Table 2), 각각의 평균은 Table 3과 Figure 2에 나타냈다. 수종에 따라 고사목 호흡속도는 리기다소나무($2.96 - 9.18 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)가 일본잎

갈나무($0.83 - 8.74 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)보다 높았고($p < 0.001$), 함수율은 특히 부후 초기인 I, II등급에서 리기다소나무(각각 0.28 g g^{-1} , 0.38 g g^{-1})가 일본잎갈나무(각각 0.19 g g^{-1} , 0.23 g g^{-1})에 비하여 약 1.5 - 1.7배 높았다($p < 0.05$). 또한 탄소농도와 질소농도도 수종 간 차이를 보였는데($p < 0.05$), 탄소농도는 리기다소나무의 고사목이 더 높았고, 질소농도는 일본잎갈나무에서 더 높았다. 한편, 고사목의 밀도(g cm^{-3})는 II등급(일본잎갈나무 0.42, 리기다소나무 0.35, $p < 0.05$)에서 유의한 차이를 보여, 전체 등급에 따른 수종 간 차이가 다소 나타났으나($p = 0.062$), C/N비는 모든 부후 등급에서 유의한 차이가 보이지 않았다($p = 0.684$).

부후가 진행됨에 따라 탄소농도를 제외한 모든 인자들에서 유의한 차이를 보였는데($p < 0.001$), 호흡속도, 함수율과 질소농도는 부후가 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보였고, 밀도와 C/N비는 감소하는 경향을 나타냈다. 호흡속도의 증가는 일본잎갈나무의 경우 I, II등급을 제외하고 II, III등급과 III, IV등급 사이에서 유의하게 증가하였지만($p < 0.001$), 리기다소나무는 II - IV등급 사이에서는 차이가 없었다. 일본잎갈나무의 밀도와 함수율은 부후 초기인 I, II등급에서는 유의한 차이를 보이지 않았지만, 리기다소나무는 부후 초기부터 이러한 물리적 특성들이 유의한 변화를 보였다. 화학적 특성 중 탄소농

Table 2. Result from the two-way ANOVA on the effects of species and decay classes CWD on respiration rate (R_{CWD}) and physicochemical properties (D_{CWD} ; density, WC_{CWD} ; water contents, carbon, nitrogen and C/N ratio) of CWD from *Larix kaempferi* and *Pinus rigida*. Significantly different values are bolded.

Source	R_{CWD}		D_{CWD}		WC_{CWD}		Carbon		Nitrogen		C/N ratio	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Species	25.54	0.000	3.58	0.062	5.15	0.026	0.02	0.021	0.03	0.026	0.68	0.684
Decay class	23.67	0.000	74.89	0.000	27.51	0.000	0.92	0.918	0.00	0.000	0.00	0.000
Species × Decay class	2.82	0.044	2.39	0.075	4.36	0.007	0.72	0.718	0.38	0.375	0.94	0.944

Table 3. Physical characteristics (D_{CWD} ; density, WC_{CWD} ; water contents) and respiration rate (R_{CWD}) of coarse woody debris (CWD) samples.

Species	Decay class	Number of samples	R_{CWD} ($\text{mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	D_{CWD} (g cm^{-3})	WC_{CWD} (g g^{-1})
<i>Larix kaempferi</i>	I	12	0.83Aa (0.95)	0.47Ca (0.05)	0.19Aa (0.07)
	II	11	1.34Aa (1.03)	0.42Cb (0.05)	0.23Aa (0.09)
	III	12	6.10Ba (3.88)	0.31Ba (0.08)	0.39Ba (0.19)
	IV	10	8.74Ca (3.90)	0.13Aa (0.07)	0.59Ca (0.16)
<i>Pinus rigida</i>	I	9	2.96Ab (2.09)	0.44Da (0.07)	0.28Ab (0.10)
	II	11	6.92Bb (3.22)	0.35Ca (0.09)	0.38Bb (0.11)
	III	11	9.73Bb (2.74)	0.27Ba (0.07)	0.47Ca (0.08)
	IV	11	9.18Ba (3.47)	0.17Aa (0.06)	0.49Ca (0.10)

The numbers in parentheses refer to standard deviation of the means. Capital letters indicate significant differences among decay class within species, while small letters indicate significant differences among species within decay class ($p < 0.05$).

는 두 수종 모두 부후의 진행에 따른 변화는 인정되지 않았지만($p=0.918$, Figure 2a), 질소농도는 두 수종 모두 부후가 진행됨에 따라 유의한 증가를 나타냈다($p<0.001$, Figure 2b). 특히 질소농도는 부후 초기인 I 등급에서 II 등급 사이에서는 큰 증가를 보이지 않았지만, 일본잎갈나무의 경우 IV등급까지 0.58 %로 급격히 증가하였으며, 리기다소나무에서는 0.41 %까지 상대적으로 완만한 증가를 보였다. 이에 따라 두 수종 모두 부후가 진행됨에 따라 C/N비가 감소하는 경향을 보였다($p<0.001$, Figure 2c). 이로 인하여 수종과 부후등급에 따른 복합적인 상호작용은 고사목의 호흡속도와 함수율에서만 유의하게 발생하여(각각 $p<0.05$, $p<0.01$), 각 수종의 부후등급마다 호흡속도나 함수율이 명확히 다를 수 있다.

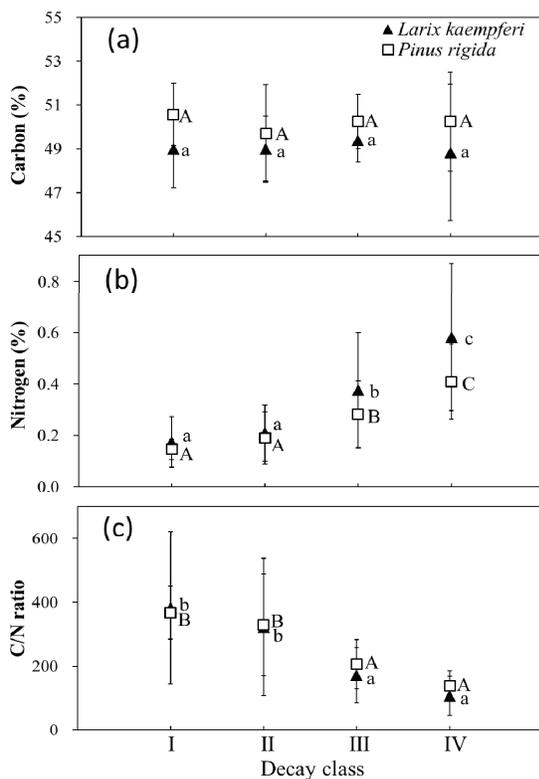


Figure 2. Carbon concentration (a), nitrogen concentrations (b), and C/N ratio (c) of coarse woody debris(CWD) of *Larix kaempferi* (closed triangles) and *Pinus rigida* (open square) by decay classes from I to IV. Means with different letters are significantly different ($p < 0.05$) between decay classes as determined by Duncan's multiple range test (capital letters: *Pinus rigida*, small letters: *Larix kaempferi*). Significant difference between species are indicated by an asterisk. Bars indicate standard deviations.

2. 고사목 호흡속도와 이화학적 특성 간의 상관관계

일본잎갈나무와 리기다소나무 고사목의 호흡속도와 이화학적 특성의 상관관계를 Figure 3과 Figure 4에 나타내

었다. 모든 부후등급에서 두 수종 모두 밀도는 호흡과 음의 상관관계($p<0.001$), 함수율은 호흡과 양의 상관관계를 보였으며($p<0.001$), 일본잎갈나무(밀도 $R^2=0.638$, 함수율 $R^2=0.773$)의 결정계수가 리기다소나무(밀도 $R^2=0.261$, 함수율 $R^2=0.498$) 보다 높게 나타났다. 한편 탄소농도는 각 등급의 모두에서 호흡속도와 유의성을 보이지 않았고, 질소농도와 C/N비는 일본잎갈나무의 IV등급($p<0.01$)과 리기다소나무의 II등급(각각 $p<0.01$, $p<0.05$)에서만 유의성이 나타났다. 마찬가지로 두 수종의 모든 부후등급에서는 질소농도와 C/N비 모두 호흡속도와 지수함수적인 상관관계를 나타냈고, 질소농도는 양의 상관관계, C/N비는 음의 상관관계를 보였다.

독립변수들 간의 상관분석 결과 질소농도와 C/N비가 85.6 %의 높은 상관성을 보였으므로, 질소농도를 다중회귀분석에서 제외하였다. 따라서 다중회귀분석에 4개의 이화학적 인자(밀도, 함수율, 탄소농도 및 C/N비)를 독립변수로 이용하여, 고사목의 호흡속도에 가장 영향을 미치는 주요 인자를 도출하였다. 호흡속도에 대한 영향력을 의미하는 표준화계수(β)는 일본잎갈나무의 I, II, III 등급에서 오직 함수율만이 각각 84% ($R^2=0.712$), 83% ($R^2=0.696$), 79% ($R^2=0.618$)로 나타났으며, IV등급에서는 C/N비가 -83% ($R^2=0.690$)로 나타났다. 리기다소나무의 경우, II등급에서 C/N비와 함수율이 주요 인자로 도출되어 각각 -61%와 53%의 영향을 미치는 것으로 나타났다 ($R^2=0.649$). 따라서 전체 부후등급에서 호흡속도에 영향을 미치는 공통인자는 두 수종 모두 함수율이 가장 크게 나타났으며, 일본잎갈나무와 리기다소나무 각각에서 밀도 (-31%)와 C/N비(-28%)가 두번째 영향인자로 나타났다 (각각 $R^2=0.801$, $R^2=0.550$).

고 찰

1. 고사목의 부후등급에 따른 호흡속도

야외에서 고사목 호흡속도의 측정은 고사목의 표면에 챔버를 부착하여 호흡을 측정하므로, 고사목 표면에 대한 호흡속도를 산출하는 경우가 일반적이데(Lim et al., 2012), 실험실내 챔버에 의한 실험에서는 시료의 모든 표면에서 방출되는 탄소를 측정하기 때문에, 많은 연구에서 고사목의 무게 또는 부피 단위로 호흡속도를 산출하는 경우가 많다(Chambers et al., 2001; Gough et al., 2007; Wu et al., 2010; Forrester et al., 2012). 실내에서 고사목 호흡을 측정한 본 연구는 챔버로 이동하는 과정에서 분해가 진행된 고사목의 형태 변형에 따른 부피측정의 오류를 최소화하기 위하여 무게를 기준으로 호흡속도를 계산하였다.

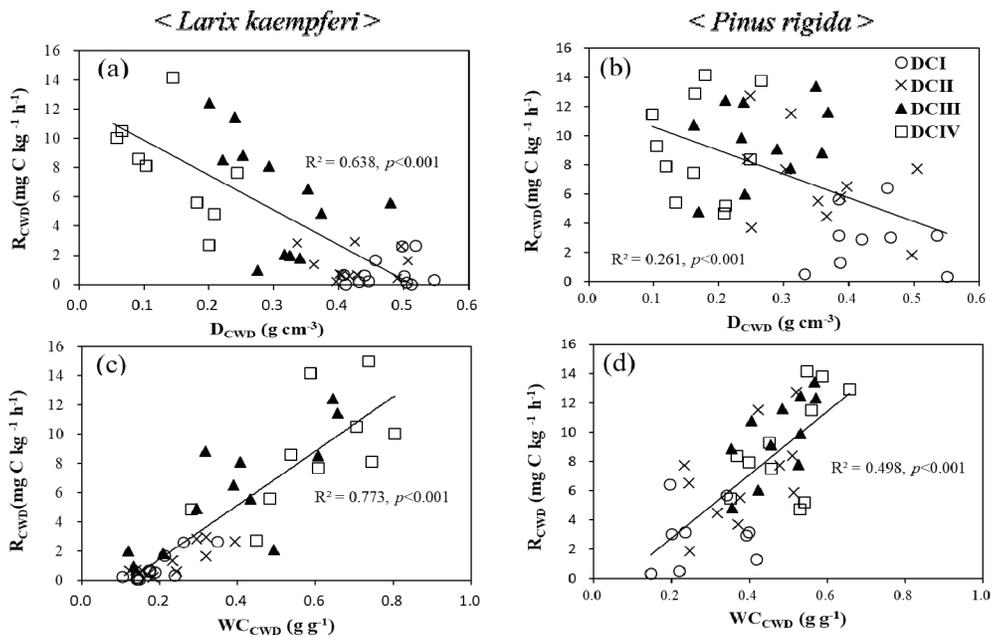


Figure 3. Relationships between wood density (D_{CWD}) and respiration rate of CWD (R_{CWD}) (a, b), and between water content (WC_{CWD}) and R_{CWD} (c, d) for *Larix kaempferi* (a, c) and *Pinus rigida* (b, d). The different point shapes represent the decay classes of CWD.

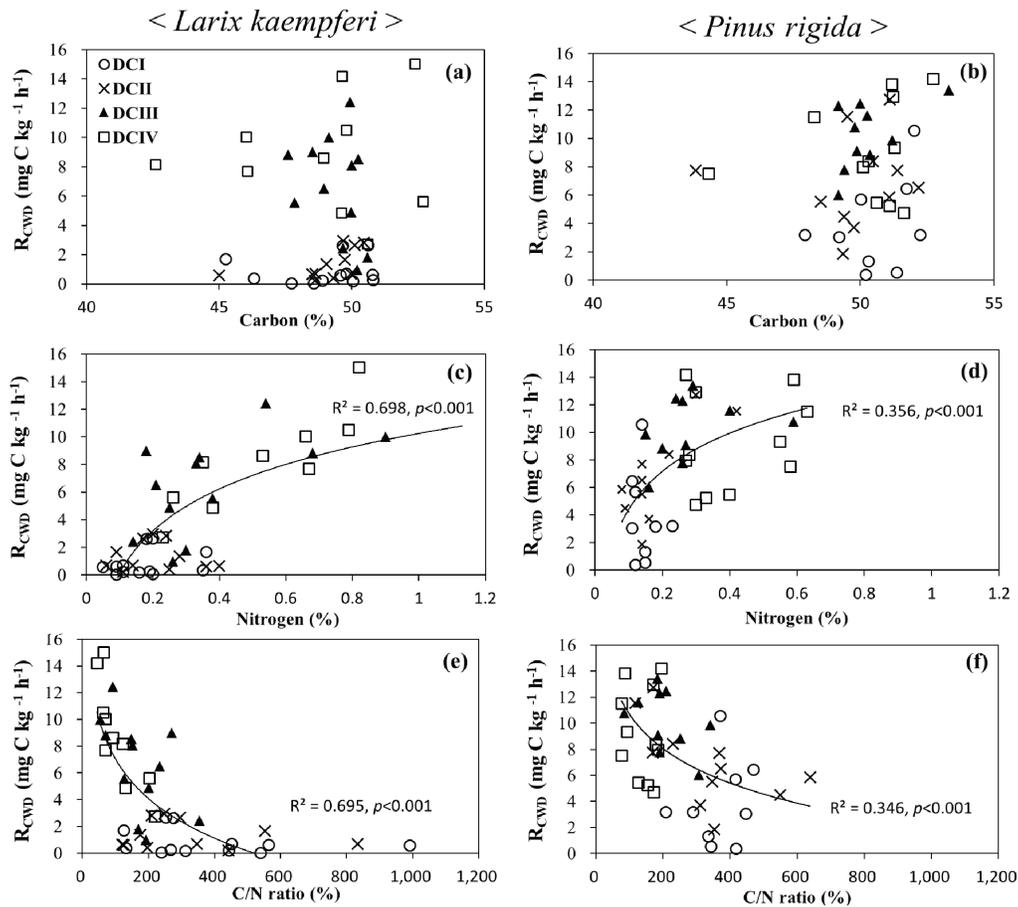


Figure 4. Relationship between carbon concentrations and R_{CWD} (a, b), between nitrogen concentrations and R_{CWD} (c, d), and between C/N ratio and R_{CWD} (e, f) of *Larix kaempferi* (a, c, e) and *Pinus rigida* (b, d, f). The different point shapes represent the decay classes of CWD.

본 연구의 I 등급 고사목 호흡속도와 고사한지 6개월이 경과한 우리나라 굴참나무의 고사목 호흡속도($1.22 - 1.57 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)와 비교하면, 일본잎갈나무는 작았고, 리기다소나무는 높았다(Table 2; Yoon et al., 2014). 또한 호흡속도는 부후등급에 따라 증가하였고, 전반적으로 일본잎갈나무 보다 리기다소나무에서 높았다. 부후의 진행에 따른 고사목 호흡속도의 증가는 국외의 침엽수종, 예를 들면 가문비나무속의 시트카스프루스(*sitka spruce*, $4.09 - 19.09 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$; Olajuyigbe et al., 2012)나 블랙스프루스(*black spruce*, $8.65 - 15.13 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$; Wang et al., 2002)에서 볼 수 있다. 한편, 유럽잎갈나무(*Larix decidua*)와 라디아타소나무(*Pinus radiata*)의 고사목 리그닌 농도는 고사목의 부후에 따라 지속적으로 증가하거나 증가 후 일정수준에 머무르는 등, 본 연구와 다른 경향을 보여(Ganjegunte et al., 2004; Petrillo et al., 2015), 수종의 차이도 호흡속도의 변화에 영향을 미치는 요인으로 생각된다.

2. 고사목의 부후등급에 따른 이화학적 특성

일본잎갈나무와 리기다소나무 두 수종의 고사목은 부후등급에 따라 밀도는 감소하고, 함수율은 증가했는데(Table 3), 이와 같은 경향은 많은 선행 연구결과와 동일하다(Wang et al., 2002; Seedre et al., 2013; Petrillo et al., 2015; Noh et al., 2017). 한편 일본잎갈나무와 리기다소나무의 기본목재밀도는 각각 0.45 g cm^{-3} , 0.50 g cm^{-3} 인데(Lee et al., 2018), 두 수종 모두 고사목의 밀도는 이 값보다 낮았고, 초기 부후등급에서 일본잎갈나무의 고사목 밀도가 더 높게 나타났다. 또한 본 연구의 결과는 같은 속의 고사목의 밀도인 북이탈리아의 유럽잎갈나무(*Larix decidua*)의 $0.15 - 0.45 \text{ g cm}^{-3}$ 와 캐나다의 방크스소나무(*Pinus banksiana*)의 $0.13 - 0.44 \text{ g cm}^{-3}$ 의 범위와 비슷한 수준이었다(Seedre et al., 2013; Petrillo et al., 2015). 한편, 고사목의 함수율은 분해등급과 고사형태 뿐 아니라 임관에 의한 직사광선 차단율과 그에 따른 온도 변화와 관련하여 사·공간적인 편차가 큰 것으로 알려져 있다(Wang et al., 2002; Forrester et al., 2012; Yoon et al., 2014). 유럽잎갈나무의 고사목은 부후가 진행될수록 함수율이 약 $0.30 - 0.70 \text{ g g}^{-1}$ 으로 약 2.3배 증가하였고(Petrillo et al., 2015), 미국 위스콘신 활엽혼효림에서는 숲틈에 위치한 고사목의 함수율(24.0% - 42.5%)이 임관아래에 위치한 고사목(29.0% - 45.9%) 보다 모든 부후등급에서 더 낮은 경향을 보였다(Forrester et al., 2012). 일본잎갈나무와 리기다소나무 모두 부후가 진행됨에 따라 질소농도는 각각 3.3배, 2.8배 증가하였으나(Figure 2), 탄소농도는 대부분의 연구에서와 같이 분해가 진행됨에 따

라 유의한 변화를 보이지 않았다(Creed et al., 2004; Palviainen et al., 2010; Noh et al., 2017). 이는 중국의 졸갈참나무(*Q. aliena var. acuteserrata*)와 소나무류(*chines white pine; Pinus armandi*)가 고사 후 17년간 질소 농도가 지속적으로 증가하였지만, 탄소의 농도는 약간의 증가와 감소를 보였을 뿐 일정한 경향이 나타내지 않은 것과 같은 결과였다(Yuan et al., 2017). 한편, 일반적으로 살아있는 식물체의 탄소농도는 약 50% 수준으로 알려져 있으며(Harmon et al., 2004). 국내에서 Noh et al.(2017)이 연구한 소나무와 참나무 고사목의 탄소농도도 각각 48.8 - 51.3%과 48.5 - 50.9% 수준으로, 본 연구의 결과와 비슷한 수준이었다. 따라서 C/N비도 모든 부후등급에서 두 수종 간 유의한 차이를 보이지 않았지만, 분해가 진행됨에 따라 분해 초기에 비해 일본잎갈나무는 71.9%, 리기다소나무는 62.4% 감소되었다. 이러한 결과는 기후와 수종 등의 차이는 있지만, 10년간 고사목의 C/N비가 306.1에서 138.4로 54.8% 감소한 동일 속의 호주 라디아타소나무(*Pinus radiata*) 보다 높았다(Mackensen and Bauhus, 2003). 한편 구주소나무(*scots pine; Pinus sylvestris*) 고사목의 목질부는 분해 약 20년 이후 C/N비가 약 100정도로 일정하게 유지되었고, 수피는 초기부터 약 200정도로 변화 경향이 없었다(Palviainen et al., 2010). 이와 같이 동일한 침엽수종 간에서도 분해 또는 심재의 구성 성분 등에 따라서 다양한 분해 특징을 보이며(Hua and Zhenbang, 1992), 수목의 구조와 리그닌의 함량, 당, 단백질 등의 다양한 인자가 미생물 및 기타 곤충의 분해특성에 영향을 미치므로 고사목의 분해 속도가 달라진 것으로 생각된다(Zhou et al., 2007). 이런 점을 고려하여 본 연구의 고사목에 대해서도 선행 연구와 같이(Snowdon et al., 2005; Noh et al., 2017; Yuan et al., 2017), 수피의 유무, 직경의 차이 등을 고려하여 분해에 따른 C/N비와 양분동태 등을 비교·분석하는 연구가 필요하다.

3. 고사목의 호흡에 대한 각 인자의 영향

탄소농도를 제외한 고사목의 이화학적 인자들은 고사목의 호흡과 유의한 관계를 나타냈고, (Figure 3, 4), 단계적 회귀분석 결과 두 수종의 호흡속도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 공통적으로 함수율이었다(Figure 5). 아마존 열대우림과 그와 인접한 목초지의 두 지역에서, 155개 수종의 고사목은 밀도와 함수율 모두 호흡속도와 유의한 관계가 나타났으나, 목초지에서는 오직 함수율에서만 상관성이 있었다(Chambers et al., 2001). 한편, 고사목의 함수율은 일정의 적정 수준에서 호흡속도가 가장 높게 나타나거나(Yoneda, 1975; Jomura et al., 2008), 일정수준 이상의 함수율은 호흡속도에 영향을 미치지 않았다

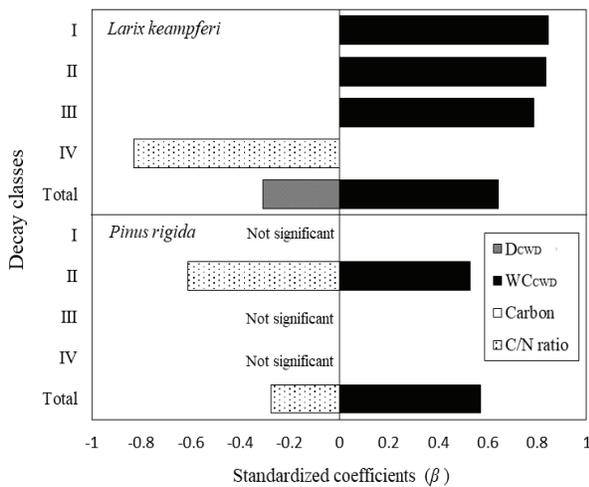


Figure 5. Standardized coefficients (β) of density (D_{CWD}), water content (W_{CWD}), carbon concentration (Carbon), nitrogen concentration (Nitrogen), and carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) for the respiration rate (R_{CWD}) observed at decay classes of coarse woody debris (CWD) of *Larix kaempferi* and *Pinus rigida*. The standard coefficients are the estimates resulting from a multiple regression analysis and refer to how many standard deviation (SDs) a respiration rate will change per SD increase in either the factors. Note that the predictors without statistical significance ($p>0.05$) are not presented.

(Wang et al., 2002; Bond-Lamberty et al., 2003). 국내에서도 광릉시험림과 점봉산의 소나무 고사목의 호흡속도는 3.9°C에서 측정된 호흡속도는 함수율과 유의한 관계가 나타나지 않았고, 9.8°C와 16.3°C에서는 함수율과 호흡속도는 양의 상관관계를 보였다(Yoon et al., 2015). 또한 Douglas fir 고사목에 세균류와 담자균류를 접종하고 강우차단막을 설치한 Progar et al.(2000)의 연구에서는 균류 접종과 강우 차단 고사목에서 호흡속도가 더 높았고, 특히 여름이 봄보다 호흡속도가 빨랐다. 이와 같이 적정한 수준의 온도와 함수율이 미생물의 활성도를 높이며, 이것이 고사목의 분해에 관여하여 호흡속도를 높이는 것으로 생각된다. 따라서 함수율은 호흡속도와 밀접한 인자이지만, 기후와 수종뿐 아니라 임분 구조에 따른 임내 환경, 즉 상대습도와 온도 등의 미기후의 변화에 따라 유기적으로 변동하므로(Hagemann et al., 2010; Yoon et al., 2014), 고사목의 호흡속도와 수분특성의 파악하기 위한 향후 연구가 필요하다. 한편 대형목인 호주의 유칼립투스 레그난스(mountain ash; *Eucalyptus regnans*) 고사목의 연구에서 C/N비는 호흡속도와 음의 상관관계를 보였는데(Mackensen and Bauhus, 2003), 본 연구에서도 물리적인 인자 외에 C/N비가 호흡속도에 영향력이 있는 것으로 나타났다. 고사목의 질소는 미생물의 질소고정에 의해 증가하나, 강우에 의한 대기 중 침적이나 인접 토양으로부터 유입한 균체의 영향 가능성을 포함하여(Laiho

and Prescott,2004; Klockow et al.,2014), 임령, 토양비옥도, 고사형태 등 다양한 인자들의 영향에 의한 과대평가를 간과하기는 어렵다(Berg, 1988; Boddy and Watkinson, 1995; Downs et al., 1996). 그러나 결과적으로 C/N비가 감소되고 낮게 유지된다는 것은 미생물에 의한 질소 증가와 호흡에 의한 탄소 방출의 결과를 의미하므로, 본 연구에서는 간접적으로 호흡속도의 증가에 미생물의 영향을 나타낸 것으로 생각된다.

결론

본 연구는 온대중북부지역 일본잎갈나무와 리기다소나무 고사목의 부후등급에 따른 이화학적 특성을 분석하고, 고사목의 호흡속도에 영향을 미치는 인자를 연구하였다. 두 수종 모두 부후등급의 증가에 따라 밀도가 감소하였으며, 함수율은 증가하는 경향을 보였다. 또한 두 수종 모두 부후등급에 따라 탄소농도는 변화가 없었으나, 질소농도는 유의적으로 증가하였고, 이에 따라서 C/N비는 부후등급의 증가에 따라 유의적으로 감소하였다. 결과적으로 두 수종 모두 함수율이 호흡속도에 밀접한 인자로 작용했다. 고사목의 부후가 진행함에 따라 함수율이 증가하고, 이는 고사목을 분해하는 미생물의 증식과 활성도 증가로 이어져 호흡속도도 높아진 결과로 생각된다. 그러나 함수율 외에 밀도와 C/N비 또한 영향인자로 도출되었는데, 이러한 결과는 산림생태계내 다른 여러 인자들이 복잡하게 연계되어 고사목의 호흡속도에 영향을 미치는 것을 의미한다. 따라서 차후 산림생태계에 있어서 탄소의 흡수원이나 방출원으로서의 고사목의 위치를 보다 명확히 하기 위해, 현장에서의 분해 경과에 따른 온도와 수분 관계, 미생물의 종류, 고사형태, 리그닌이나 비구조성탄수화물(non-structural carbohydrate) 등과 고사목 호흡의 관계를 조사할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원)의 ‘신기후체제 대응 산림분야 국가 온실가스 인벤토리 산정체계 및 탄소계정 고도화(2017044B10-1819-BB01)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

Berg, B. 1988. Dynamics of nitrogen (^{15}N) in decomposing Scots pine (*Pinus sylvestris*) needle litter: Long-term decomposition in a scots pine forest. Canadian Journal of

- Botany 66(8): 1539-1546.
- Boddy, L. and Watkinson, S.C. 1995. Wood decomposition, higher fungi, and their role in nutrient redistribution. *Canadian Journal of Botany* 73(S1): 1377-1383.
- Bond-Lamberty, B., Wang, C. and Gower, S.T. 2003. Annual carbon flux from woody debris for a boreal black spruce fire chronosequence. *Journal of Geophysical Research* 108(D3): 8220.
- Carmona, M.R., Armesto, J.J., Aravena, J.C. and Perez, C.A. 2002. Coarse woody debris biomass in successional and primary temperate forests in Chiloe' Island, Chile. *Forest Ecology and Management* 164: 265-275.
- Chamber, J.Q., Schimel, J.P. and Nobre, A.D. 2001. Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests. *Biogeochemistry* 52: 115-131.
- Clark, D.B., Clark, D.A., Brown, S., Oberbauer, S.F. and Veldkamp, E. 2002. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient. *Forest Ecology and Management* 164: 237-248.
- Creed, I.F., Webster, K.L. and Morrison, D.L. 2004. A comparison of techniques for measuring density and concentrations of carbon and nitrogen in coarse woody debris at different stages of decay. *Natural Resources Canada* 34: 744-753.
- Downs, M.R., Nadelhoffer, K.J., Melillo, J.M. and Aber, J.D., 1996. Immobilization of a ¹⁵N labelled-nitrater addition by decomposing forest litter. *Oecologia* 105: 141-150.
- Forrester, J.A., Mladenoff, D.J., Gower, S.T. and Stoffel, J.L. 2012. Interactions of temperature and moisture with respiration from coarse woody debris in experimental forest canopy gaps. *Forest Ecology and Management* 265: 124-132.
- Ganjeguntea, K.G., Condrona, L.M., Clintonb, P.W., Davisb, M.R. and Mahieu, N. 2004. Decomposition and nutrient release from radiata pine (*Pinus radiata*) coarse woody debris. *Forest Ecology and Management* 187: 197-211.
- Gough, C.M., Vogel, C.S., Kazanski, C., Nagel, L., Flower, C.E. and Curtis, P.S. 2007. Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest. *Forest Ecology and Management* 244: 60-67.
- Hagemann, U., Moroni, M.T., Gleißner, J. and Makeschin, F. 2010. Disturbance history influences downed woody debris and soil respiration. *Forest Ecology and Management* 260: 1762-1772.
- Harmon, M.E., Bible, K., Ryan, M.G., Shaw, D.C., Chen, H., Klopatek, J. and Li, X. 2004. Production, respiration, and overall carbon balance in an old-growth *Pseudotsuga-Tsuga* forest ecosystem. *Ecosystems* 7: 498-512.
- Harmon, M.E., Fasth, B., Woodall, C.W. and Sexton, J. 2013. Carbon concentration of standing and downed woody detritus: Effects of tree taxa, decay class, position, and tissue type. *Forest Ecology and Management* 291: 259-267.
- Howard, E.A., Gower, S.T., Foley, J.A and Kucharik, C.J. 2004. Effects of logging on carbon dynamics of a jack pine forest in Saskatchewan, Canada. *Global Change Biology* 10(7): 1267-1284.
- Hua, C. and Zhenbang, X. 1992. Composition and storage of fallen trees and snags in Korean Pine-deciduous mixed forest at Changbai mountain. *Chinese Journal of Ecology* 11(1): 17-22.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory. IPCC/IGES. Hayama, Japan.
- Jomura, M., Kominami, Y., Dannoura, M. and Kanazawa, Y. 2008. Spatial variation in respiration from coarse woody debris in a temperate secondary broad-leaved forest in Japan. *Forest Ecology and Management* 255: 149-155.
- Korea Forest Service. 2010. Carbon emission factors of major trees for forest greenhouse gas inventories. (Project number: 11-1400377-000394-01). Korea forest research institute. pp. 34.
- Korea Forest Service. 2018. <http://map.forest.go.kr/forest/?systype=mapSearch&searchOption=stock#/>. (2018.05.30.).
- Kim, R.H. and Son, Y.H. 2002. Coarse woody debris (CWD) in forest ecosystem. *Life Science and Natural Resources* 10: 50-67.
- Kim, S.G., Kwon, B.R., Son, Y.H. and Yi, M.J. 2018. Carbon storage in an age-sequence of temperate *Quercus mongolica* stands in central Korea. *Journal of Forest and Environmental Science* 34(6):472-480.
- Klockow, P.A., D'Amato, A.W., Bradford, J.B. and Fraver, S. 2014. Nutrient concentrations in coarse and fine woody debris of *Populus tremuloides* michx. - dominated forest, northern Minnesota, USA. *Silva Fennica* 48(1): 962.
- Laiho, R. and Prescott, C.E. 2004. Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis. *Canadian Journal of Forest Research* 34(4): 763-777.
- Lee S.J., Yim, J.S., Son, Y.M., Son, Y.H. and Kim, R.H. 2018. Estimation of forest carbon stocks for national greenhouse gas inventory reporting in South Korea. *Forests* 9(10): 625; doi:10.3390/f9100625.
- Lim, H.W., Choi, W.J., Ahn, K.W. and Lee, K.H. 2012. Ecosystem respiration and tree growth influenced by thinning in a red pine forest in southern Korea. *Forest Science and Technology* 8(4): 192-204.
- Mackensen, J. and Bauhus, J. 2003. Density loss and respiration rates in coarse woody debris of *Pinus radiata*, *Eucalyptus regnans* and *Eucalyptus maculata*. *Soil Biology &*

- Biochemistry 35: 177-186.
- Noh, N.J., Son, Y.H., Lee, S.K., Seo, K.W., Heo, S.J., Yi, M.J., Park, P.S., Kim, R.H., Son, Y.M. and Lee, K.H. 2010. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea. *Science China Life Sciences* 53(7): 822-830.
- Noh, N.J., Yoon, T.K., Kim, R.H., Bolton, N.W., Kim, C.S. and Son, Y.H. 2017. Carbon and nitrogen accumulation and decomposition from coarse woody debris in a naturally regenerated Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.). *Forest* 8(6): 214; doi:10.3390/f8060214.
- Olajuyigbe, S., Tobin, B. and Nieuwenhuis, M. 2012. Temperature and moisture effects on respiration rate of decomposing logs in a Sitka spruce plantation in Ireland. *Forestry* 85(4): 485-496.
- Pan, Y., Richard, A.B., Fang, j., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, P.E., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Pio, S., Rautiainen, A., Sitch, S. and Hayes, D. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333(6045): 988-993.
- Palviainen, M., Finer, L., Laiho, R., Shorohova, E., Kapitsa, E. and Majamaa, V. 2010.[HTML] Carbon and nitrogen release from decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps. *Forest Ecology and Management* 259(3): 390-398.
- Petrillo, M., Cherubini, P., Sartori, G., Abiven, S., Ascher, J., Bertoldi, D., Camin, F., Barbero, A., Larcher, R. and Egli, M. 2015. Decomposition of Norway spruce and European larch coarse woody debris (CWD) in relation to different elevation and exposure in an Alpine setting. *Biogeosciences and Forestry* 9: 154-164.
- Progar, R.A., Schowalter, T.D., Freitag, C.M. and Morrell, J.J. 2000. Respiration from coarse woody debris as affected by moisture and saprotroph functional diversity in Western Oregon. *Oecologia* 124: 426-431.
- Schuur, E.A.G., Chadwick, O.A. and Matson P.A. 2001. Carbon cycling and soil carbon storage on mesic to wet Hawaiian montane forests. *Ecology* 82(11): 3182-3196.
- Seedre, M., Taylor, A.R., Chen, H.Y.H and Jogiste, K. 2013. Deadwood density of five boreal tree species in relation to field-assigned decay class. *Forest Science* 59(3): 261-266.
- Snowdon, P., Ryan, P. and Raison, J. 2005. Review of C/N ratios in vegetation, litter and soil under Australian native forests and plantations. *Australian Greenhouse Office* (45): 57.
- Son, Y.M., Jeon, J.H., Lee, S.J., Yim, J.S. and Kang, J.T. 2017. Development of estimated equation for mortality rates by forest type in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 106(4): 450-456.
- Sprugel, D.G. 1990. Components of woody-tissue respiration in young *Abies amabilis* (Dougl.) forest trees. *Trees* 4: 88-98.
- Stevens and Victoria. 1997. The ecological role of coarse woody debris: an overview of the ecological importance of CWD in B.C. forests. Research Branch, British Columbia Ministry of Forests, Victoria.
- Wang, C., Bond-Lamberty, B. and Gower, S.T. 2002. Environmental controls on carbon dioxide flux from black spruce coarse woody debris. *Oecologia* 132: 374-381.
- Waring, R.H. and Schlesinger, W.H. 1985. *Forest ecosystems: concepts and management*. Academic Press Inc., Orlando, San Diego. ISBN 978-01-2735-440-8.
- Wu, J., Zhang, X., Wang, H., Sun, J. and Guan, D. 2010. Respiration of downed logs in an old-growth temperate forest in north-eastern China. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25: 500-506.
- Yoneda, T. 1975. Studies on the rate of decay of wood litter on the forest floor dry weight loss and CO₂ evolution of decaying wood. *The Ecological Society of Japan* 25(3): 132-140.
- Yoon, T.K., Han, S., Lee, D., Han, S.H., Noh, N.J. and Son, Y.H. 2014. Effects of sample size and temperature on coarse woody debris respiration from *Quercus variabilis* logs. *Journal of Forest Research* 19: 249-259.
- Yoon, T.K., Noh, N.J., Kim, S.J., Han, S.R. and Son, Y.H. 2015. Coarse woody debris respiration of Japanese red pine forests in Korea: controlling factors and contribution to the ecosystem carbon cycle. *Ecological Research* 30(4): 723-734.
- Yuan, J., Hou, L., Wei, X., Shang, Z., Cheng, F. and Zhang, S. 2017. Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in the Qinling Mountains, China. *PLoS ONE* 12(4): e0175203.
- Zhou, L., Dai, L., Gu, H. and Zhong, L. 2007. Review on the decomposition and influence factors of coarse woody debris in forest ecosystem. *Journal of Forestry Research* 18: 48-54.