

삼나무와 편백 조림지의 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소유입량

박희정¹ · 백경원² · 김춘식^{1,2*}

¹경상국립대학교 환경산림과학부, ²경상국립대학교 농식품바이오융복합연구원

Carbon and Nitrogen Inputs from Litterfall Components in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* Plantations

Heejung Park¹, Gyeongwon Baek² and Choonsig Kim^{1,2*}

¹Division of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

²Agri-Food Bio-Convergence Institute, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

요약: 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소 유입의 정량화는 산림생태계 양분순환 기작의 이해나 산림생산력 증진을 위한 토양양분관리에 중요하다. 본 연구는 서로 인접한 지역에 식재된 동일 영급의 삼나무와 편백 조림지를 대상으로 낙엽트랩을 설치한 후 2020년 12월부터 2021년 12월까지 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소유입량을 3개월 단위로 조사하였다. 낙엽·낙지량은 꽃, 구과, 종자 같은 생식기관을 제외하고 수종 간 차이가 없었으며, 계절별로는 12월에서 3월에 유입량이 가장 많았다. 낙엽·낙지 중 편백 잎(낙엽)과 종자의 탄소농도는 삼나무에 비해 유의적으로 높았으며 낙엽과 꽃의 탄소농도는 계절별 변동을 보였다. 한편 낙엽의 질소농도도 계절별 변동을 보여 하절기(6월~9월)의 질소농도(삼나무 0.96%, 편백 1.01%)는 타 계절(삼나무 0.43%, 편백 0.53%)에 비해 유의하게 높았다. 수종별 질소농도는 삼나무 구과가 편백에 비해 높은 값을 보였다. 낙엽·낙지 중 낙엽에 의한 탄소 및 질소유입량은 두 수종 모두 12월~3월에 가장 많았으며, 6월~9월은 가장 적게 유입되었다. 연 탄소유입량은 삼나무 조림지 3,054 kg C ha⁻¹ yr⁻¹, 편백 조림지 3,129 kg C ha⁻¹ yr⁻¹로 두 수종 사이에 차이가 없었다. 연 질소유입량은 삼나무 조림지의 생식기관에 의한 질소유입량이 편백에 비해 크게 나타나 삼나무가 46.93 kg N ha⁻¹ yr⁻¹로 편백의 25.17 kg N ha⁻¹ yr⁻¹에 비해 약 1.9배 많았다. 본 연구 결과는 삼나무와 편백 조림지에 낙엽·낙지를 포함한 임분 단위 탄소 및 질소순환을 예측하는데 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract: Evaluating carbon (C) and nitrogen (N) inputs from litterfall is important for soil nutrient management to enhance forest productivity and to understand the mechanisms of nutrient cycling in forest ecosystems. This study was conducted to compare C and N inputs from litterfall components of *Cryptomeria japonica* D. Don and *Chamaecyparis obtusa* Endlicher planted in adjacent sites in the Jinju Research and Experimental Forests in Gyeongsangnam-do, South Korea. Litterfall into litter traps was collected at three-month intervals between December 2020 and December 2021, and the C and N concentrations of the litterfall components were measured. Litterfall amounts were not significantly different between the plantations, except for reproductive litterfall components. Litterfall accumulation peaked between December and March. The litterfall C concentration in the needle and seed litterfall was significantly higher for *C. obtusa* than for *C. japonica*. By contrast, the C concentrations in needle and flower litterfall differed seasonally. The mean N concentration of needle litterfall was significantly higher in *C. japonica* (0.96%) and *C. obtusa* collected between June and September (1.01%) than in the other seasons (*C. japonica*: 0.43%; *C. obtusa*: 0.53%). Carbon and N inputs in both plantations were highest in needle litterfall collected from December to March and lowest in needle litterfall collected from June to September. Annual C input by litterfall was similar between the plantations (*C. japonica*: 3,054 kg C ha⁻¹ yr⁻¹; *C. obtusa*: 3,129 kg C ha⁻¹ yr⁻¹), whereas total N input was higher for *C. japonica* (46.93 kg N ha⁻¹ yr⁻¹) than for *C. obtusa* (25.17 kg N ha⁻¹ yr⁻¹). The higher N input in the *C. japonica* plantation than in the *C. obtusa* plantation was associated with the input of reproductive components. These results could be applied to improve stand-scale models of C and N cycling by litterfall components in *C. japonica* and *C. obtusa* plantations.

Key words: carbon, Japanese cedar, Japanese cypress, litterfall, nitrogen, nutrient cycling

* Corresponding author
E-mail: ckim@gnu.ac.kr

ORCID
Choonsig Kim  <https://orcid.org/0000-0002-3263-1187>

서론

산림생태계의 낙엽·낙지는 토양생물의 에너지 및 영양원이며 분해과정에서 방출되는 다량 및 미량원소는 산림 내 생육하는 임목의 양분 공급원으로 제공된다(Yang et al., 2004; Michopoulos et al., 2020). 또한 낙엽·낙지의 분해 과정을 통한 유기물의 유입은 토양의 물리·화학적 성질의 개선과 토양 탄소 및 양분저장원으로 중요한 위치를 차지한다(Kim et al., 2010; Michopoulos et al., 2020).

낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소유입량의 정량적 평가는 탄소 및 질소순환 기작에 대한 이해와 함께 산림생산력의 증진을 위한 토양 양분관리에 중요한 의미를 갖는다(Inagaki et al., 2010). 그러나 낙엽·낙지를 통한 탄소 및 질소 유입 기작은 입지환경요인, 산림경영활동, 산림재해 발생 등에 따라 변동이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(Inagaki et al., 2008; Kim et al., 2010; Lee et al., 2023). 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소유입량의 경우, Yang 등(2004)은 활엽수와 침엽수 임분의 낙엽·낙지에 의한 질소유입량은 활엽수 임분이 침엽수 임분에 비해 많았으며, Takahiro 등(2004)은 삼나무와 편백 조림지의 낙엽·낙지량은 낙엽활엽수 천연림에 비해 적었다고 보고하였다. 국내에서 조사된 결과로 소나무, 리기테다소나무, 일본잎갈나무 조림지의 낙엽·낙지에 의한 탄소 유입량은 소나무류가 일본잎갈나무 조림지에 비해 높았으나, 질소유입량은 반대되는 경향을 보여(Kim et al., 2010) 수종 간 차이가 있었다. 한편, Choi 등(2022)은 소나무와 굴참나무 임분을 대상으로 조사한 결과 낙엽·낙지의 탄소농도는 11월이 높고 2월이 낮은 반면에 질소농도는 탄소농도와 반대되는 경향을 보였으며, 낙엽은 가지에 비해 낮은 탄소 농도를 보였다고 보고하였다. 그러나 편백 낙엽·낙지 중 낙엽의 탄소 농도는 계절적인 변화가 없었으며, 생식기관을 포함하는 기타 물질의 탄소농도는 가지에 비해 낮은 농도를 보였다(Kang et al., 2021). 이와 같이 낙엽·낙지의 부위별 탄소 및 질소농도는 수종별 계절적 변동이 보고되고 있으나, 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소 유입량과 관련된 연구의 대부분은 낙엽·낙지 구성 요소의 양분농도 차이나 계절적 변동을 고려하지 않고 있는 실정이다(Inagaki et al., 2004; Kim et al., 2010; Lee et al., 2023).

삼나무(*Cryptomeria japonica* D. Don)와 편백(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)은 주요 용재수종으로 경제림 조성을 위해 우리나라 남부지방에 대량으로 식재되어 왔으며(Kim et al., 2020), 최근 소나무재선충병 피해지 대체 조림수종으로 선호되고 있다(Baek and Kim, 2023). 2020년 기준, 삼나무와 편백 식재지의 면적은 6,296 ha와 72,592 ha

정도이고, 삼나무는 연 140 ha, 편백은 연 4,000 ha 이상 조림하고 있다(Korea Forest Service, 2023).

조림수종으로서의 중요성 때문에 삼나무 및 편백에 대한 다양한 연구가 국내에서 보고되었으며(Lee et al., 2006; Kim et al., 2020; Baek and Kim, 2023, Lee et al., 2023), 낙엽·낙지 관련 연구로 Kang 등(2021)은 소나무 재선충병 피해지에 식재된 15년생 편백 조림지의 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소 유입량, Im and Kim(2020)은 전라북도 문수산 편백 47년생 조림지의 간벌 강도에 따른 낙엽·낙지량 조사, Lee 등(2023)은 편백 조림지의 임분밀도가 낙엽·낙지량에 끼치는 영향 등의 연구를 수행한 바 있다. 그러나 국내 삼나무 조림지의 낙엽·낙지량이나 낙엽에 의한 탄소 및 질소 유입에 관한 연구는 아직까지 보고된 바 없다. 본 연구는 III 영급의 서로 인접한 지역에 식재된 삼나무와 편백 조림지를 대상으로 낙엽·낙지의 부위별 탄소 및 질소농도의 계절적 변동과 유입량의 차이를 비교하기 위한 목적으로 수행하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 연구 설계

본 연구는 경상남도 진주에 위치한 국립산림과학원 “진주산림과학연구시험림” 내 동일한 시기에 식재된(1997년) 삼나무와 편백 조림지를 대상으로 하였다(Figure 1). 이 지역의 연평균 기온과 강수량은 13.4°C와 1,518 mm yr⁻¹이다(Korea Meteorological Administration, 2022). 수종 간 낙엽·낙지량 비교시 입지환경요인의 영향에 대한 분리가 필요하기때문에(Jeong et al., 2009), 수종 식재지간 공간적 변동 차를 극복하기 위해 서로 인접한 지역에 식재된 동일 임령을 대상으로 하였다. 산림토양형은 퇴적암인 회백질

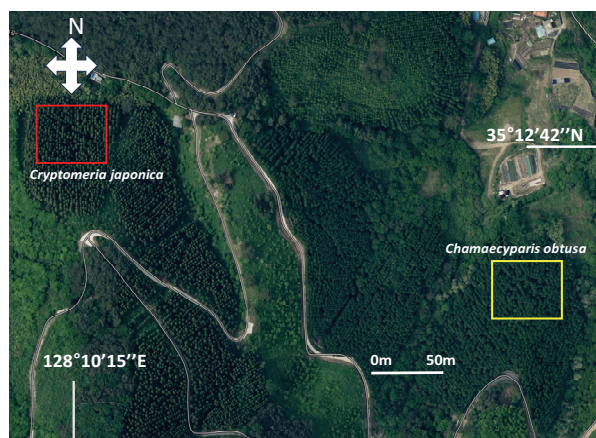


Figure 1. Location of the study site in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations.

사암이나 자색 사암을 모암으로 생성된 암적갈색약건산림 토양형(DRb₂)이 분포하고 있으며, 조사구 토양의 물리·화학적 특성은 타 연구에 보고되어 있다(Baek et al., 2023).

조사구는 10 × 10 m 크기의 총 8개 조사구[2 수종(삼나무, 편백) × 4 반복]를 설치하였다(Figure 1). 두 조림지 식재 밀도는 1,500 본 ha⁻¹이었으나, 2019년 1차 간벌이 실시되어, 2020년 조사시 임분밀도는 편백이 1,270 본 ha⁻¹으로 삼나무 1,050 본 ha⁻¹보다 약간 높았다. 평균 흉고직경은 삼나무가 19.95 cm로 편백 18.71 cm에 비해 1.24cm 정도 컸으며, 흉고단면적과 흉고단면적 증가량은 임분밀도가 높았던 편백 조림지가 크게 나타났다(Baek et al., 2023).

2. 탄소·질소 농도 및 유입량 분석

각 조사구의 중심 부분에 약 60 cm 높이의 원형 Litter traps(그물망 크기 0.1 mm, 수집면적 0.25 m²)을 2020년 12월 18일 설치하고 1년 동안 계절별 1회씩 총 4회[수집시기: 3월 19일(2020년 12월 18일~2021년 3월 19일), 6월 15일(2021년 3월 19일~2021년 6월 15일), 9월 15일(2021년 6월 15일~2021년 9월 15일), 12월 14일(2021년 9월 15일~2021년 12월 14일)] 낙엽·낙지를 수집하였다. 현장에서 수집된 낙엽·낙지는 지퍼 비닐주머니에 넣어 실험실로 운반한 후 65°C 온풍건조기에서 48시간 이상 건조하였다. 건조된 낙엽·낙지 시료는 잎(낙엽), 가지, 꽃, 종자, 구과, 기타 물질로 분류하고 무게를 측정하였다. 한편, 삼나무와 편백 모두 작은 가지나 소지에 소엽이 부착되어 잎과 가지의 분리가 어렵기 때문에 잎이 붙어 있는 작은 가지나 소지는 잎으로 분류하였으며 구과 내 종자도 완전히 분리하여 측정하였다. 무게 측정이 끝난 낙엽·낙지 시료는 분쇄 후 0.420mm 체(ASTM No. 40)로 선별하고 원소분석기(Thermo Scientific, Flash 2000, Italy)로 탄소 및 질소 농도를 측정하였다. 한편, 일부 낙엽·낙지의 부위별 시료는 양이 적어 반복구별 시료를 혼합한 후 측정하였다. 낙엽·낙지에 의한 탄소 및 질소 유입량은 부위별 탄소 및 질소농도를 건중량에 곱하여 환산하였다.

3. 통계 분석

수집된 자료는 Shapiro-Wilk에 의한 정규성 및 Levene에 의한 등분산성을 검정하였으며(Milliken and Johnson, 2009), 등분산성을 만족하지 못한 자료는 Log 변환 후 분석하였다. 수종과 계절에 따른 낙엽·낙지량과 탄소 및 질소유입량은 Two-way ANOVA에 의해 주요인(수종, 계절)과 상호작용 요인(수종×계절)에 대한 유의성을 SAS의 GLM Procedure로 $P < 0.05$ 수준에서 검정하였다. 요인 간 유의성이 있는 경우 사후 비교는 Tukey 방법, 수종간 연 낙엽·

낙지량과 탄소 및 질소 유입량의 비교는 t-검정을 이용하였다(SAS Institute, 2003).

결과 및 고찰

1. 수종 및 계절별 낙엽·낙지량

삼나무와 편백 조림지의 낙엽·낙지량은 수종 및 계절별 차이가 있었으나 모든 부위에서 상호작용 요인에 대한 유의성은 없었다(Figure 2). 수종별로는 삼나무 조림지의 꽃과 종자 유입량이 편백 조림지에 비해 높았으나, 낙엽과 총 유입량은 유의성이 없었다.

낙엽·낙지량 중 낙엽 유입량은 두 조림지 모두 12월~3월이 가장 많았고, 6월~9월은 가장 적었다. 이는 남부지방 소나무류의 최대 낙엽·낙지 유입 시기가 9월~12월(Jeong et al., 2009; Choi et al., 2022)이라는 결과와는 상이하였다. 한편 본 연구 결과는 일본 아이치현에서 조사된 25년생 편백 조림지의 낙엽·낙지는 2월에 가장 많은 양이 유입되었으며(Hagihara et al., 1978; Inagaki et al., 2008), 국내 문수산 편백 조림지의 월별 최대 유입 시기는 12월, 10월, 4월(Im and Kim, 2020) 순이었다는 결과와는 유사하였다. 생식기관인 꽃 유입량은 3월~6월에 삼나무 수꽃(웅화수, male flowers)이나 편백 수꽃이 유입되었고, 종자와 구과는 12월~3월, 기타물질은 12월~6월 사이에 유입량이 많았다. 일본 편백 조림지에 기타물질의 최대 유입 시기는 곤충 배설물의 유입이 주로 발생하는 여름(Miyaura and Hozumi, 1985)으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 곤충 배설물이 관찰되지 않았다. 총 낙엽·낙지의 계절별 유입량은 낙엽·낙지의 주요 구성요인인 낙엽 유입량과 유사한 변동을 보였다(Figure 2).

2. 수종 및 계절별 탄소·질소농도와 C/N비

낙엽·낙지의 부위별 탄소농도 중 낙엽은 수종과 계절적 요인의 주효과 외에도 수종과 계절적 요인 사이에 상호작용 효과가 있었다(Figure 3). 12월~3월과 3월~6월 사이에 유입된 낙엽·낙지 중 편백 낙엽의 탄소농도는 삼나무 낙엽에 비해 유의적으로 높았으나, 6월~9월 또는 9월~12월 사이에 유입된 낙엽은 두 수종 사이에 차이가 없었다. 평균 탄소농도도 수종 간 유의성이 있어 낙엽과 종자는 삼나무가 49.8%와 49.1%로 편백 51.0%와 53.3%에 비해 낮은 값을 보였다. 그러나 가지, 꽃, 구과, 기타 물질의 탄소농도는 수종 간 유의성이 없었다. 일반적으로 수종 사이 탄소농도는 유전적·환경적 요인이 기여하는 것으로 알려져 있다(Bert and Danjon 2006). 본 조사지의 경우 해발고나 토양 등과 같은 생육환경이 두 수종 사이에 유사하

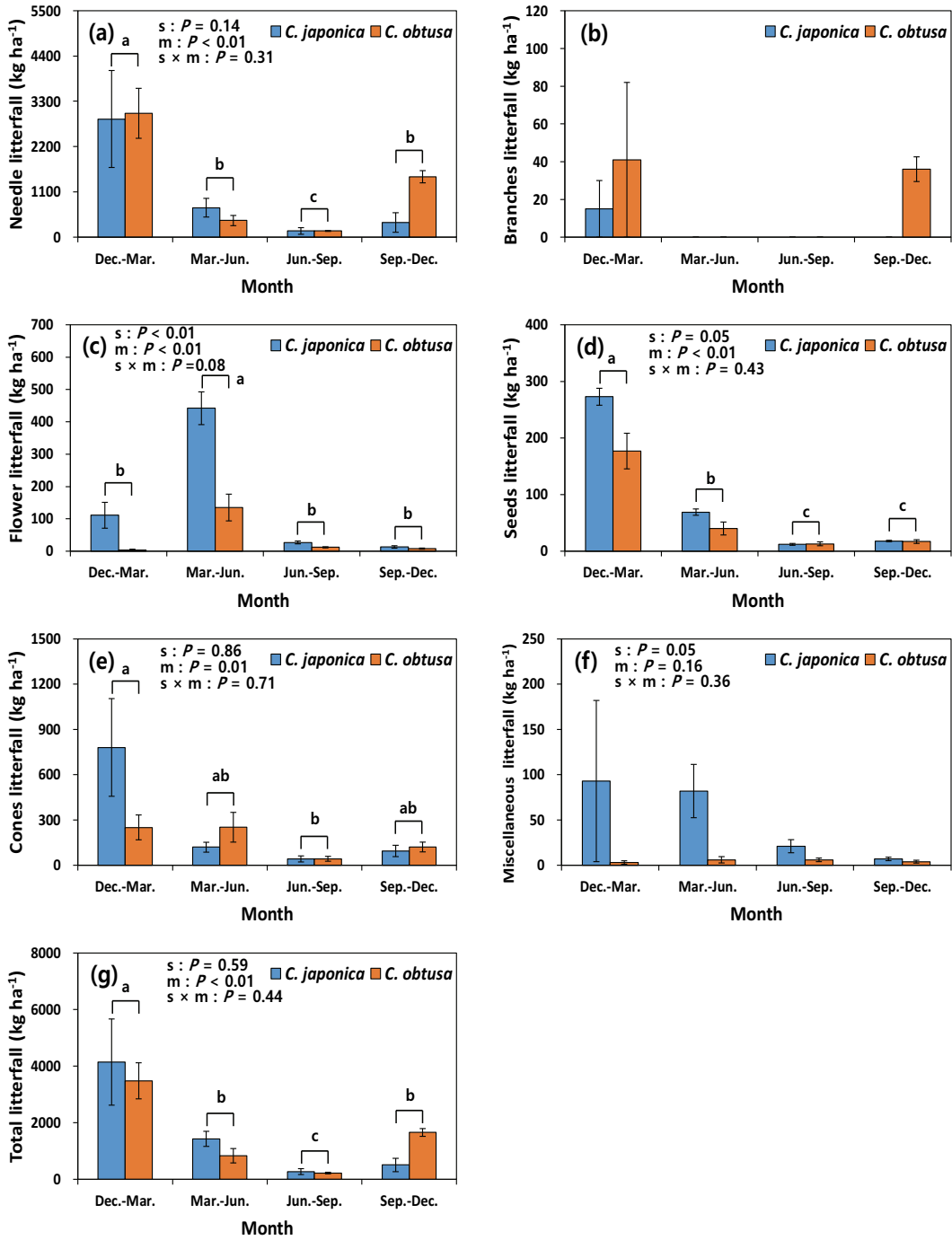


Figure 2. Seasonal inputs of litterfall components (a: needle; b: branches; c: flower; d: seed; e: cone; f: miscellaneous; g: total litterfall) in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations (s: species; m: month). Vertical bars indicate standard error. Different letters on the bars represent a significant difference at $P < 0.05$.

기 때문에 낙엽이나 종자의 탄소농도는 유전적인 차이가 기여하는 것으로 사료된다. 예를 들면, 임목 부위별 탄소 농도는 리그닌이나 양분농도의 영향을 많이 받게 되며, 일반적으로 리그닌 농도가 높고 낙엽 내 양분농도가 낮을 경우 탄소 농도가 높게 나타나는 경향을 보이는 것으로

알려져 있다(Inagaki et al., 2004). 본 연구에서 낙엽 내 질소농도가 두 수종 사이에 차이가 없음을 고려할 때(Figure 3), 편백 낙엽의 높은 탄소농도는 리그닌농도와 밀접한 관련이 있을 수 있다. 일본에서 조사된 결과에 따르면 편백 낙엽의 리그닌농도는 43.8%로 삼나무 낙엽의 리그닌 농

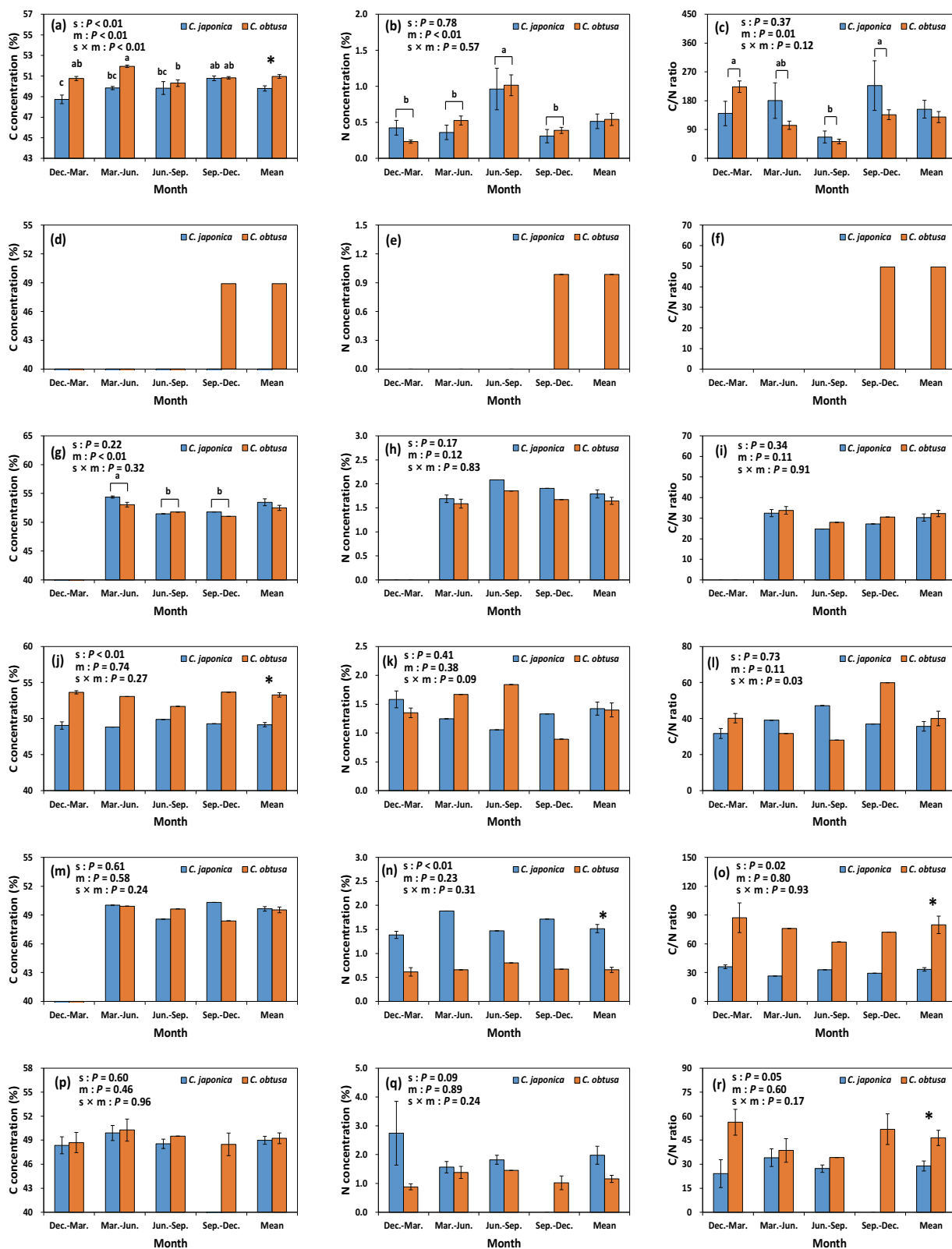


Figure 3. Seasonal variation of carbon concentration, nitrogen concentration, and C/N ratio of litterfall components (a, b, c: needle; d, e, f: branches; g, h, i: flower; j, k, l: seed; m, n, o: cone; p, q, r: miscellaneous) in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations (s: species; m: month). Vertical bars indicate standard error. Different letters and asterisk on the bars represent a significant difference at $P < 0.05$.

도 33.7%에 비해 높게 나타나는 것으로 보고된 바 있다 (Inagaki et al., 2004). 한편, 낙엽·낙지 중 잎과 꽃을 제외한 종자, 구과, 기타 물질은 계절적 변동이 크지 않았다. 본 연구에서 조사된 편백 낙엽의 탄소농도는 일본 카나가와현 편백 40년생의 11월에 수집된 낙엽 내 평균 탄소농도 50.2%(Nakajima and Kaneko, 2012)와 큰 차이는 없었다.

낙엽·낙지의 평균 탄소농도 중 삼나무의 꽃은 53.5%, 편백의 꽃은 52.5%로 잎이나 구과의 탄소농도 50% 이하에 비해 높은 값을 보였다(Figure 3). 침엽수의 낙엽·낙지 중 꽃의 탄소농도 분석에 관한 연구는 거의 전무한 편이며, 대부분 종자나 열매 등에 포함하여 생식기관(Choi et al., 2022)이나 기타물질(Inagaki et al., 2004)로 분류하고 측정하여 본 연구 결과인 꽃의 탄소농도와 직접적인 비교는 어려운 실정이다. 그러나 두 수종 모두 꽃은 외벽이 매우 단단하고 분해에 저항성이 강한 고분자화합물의 화분(Filipiak, 2016)을 포함하는 응화수로 구성되어 타 부위에 비해 탄소농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 본 연구에서 꽃의 탄소농도는 Ujiié 등(2003)이 보고한 곰솔(*Pinus thunbergii*) 화분의 탄소농도 52.8%와 큰 차이는 없었다.

낙엽·낙지의 질소농도는 구과를 제외하고 수종 간 차이가 없었으며, 계절적 변동도 낙엽을 제외하고 유의성이 없었다(Figure 3). 계절적 변동을 보인 낙엽의 질소농도는 6월~9월에 삼나무 0.96%, 편백 1.01%로 타 계절에 유입된 삼나무 0.43%, 편백 0.53%에 비해 높게 나타났다. 이 기간동안 낙엽의 높은 질소 농도는 생엽(green leaves)의 유입이 원인으로 제시된 바 있으며(Inagaki et al., 2008), 타 연구에서도 편백은 6월~9월에 유입된 낙엽에서 높은 값을 보이는 것으로 보고된 바 있다(Kang et al., 2021). 한편, 구과의 질소농도는 삼나무가 1.52%로 편백의 0.66%에 비해 높은 값을 보였으며, 이는 삼나무의 구과가 엽록소 성분을 많이 포함하기 때문으로 사료된다. 본 연구에서 편백 생엽과 낙엽의 질소농도는 일본 교토지역 편백 생엽의 질소 농도 0.86~1.23%, 낙엽의 질소농도 0.47~0.71%(Nakanishi et al., 2009)의 범위에 분포하였다. 또한, 경남 사천에서 조사된 편백 생엽의 질소농도 1.10%나 낙엽의 질소농도 0.35~0.40%와도 차이가 없었다(Kang et al., 2021). 삼나무의 경우 일본에서 조사된 낙엽의 평균 질소농도는 0.57%(Inagaki et al., 2015)로 본 연구에서 조사된 삼나무 낙엽의 질소농도 0.54%와 유사하였다. 삼나무나 편백 낙엽의 질소농도는 간벌(Inagaki et al., 2004), 연년 변화(Inagaki et al., 2008), 해발고나 경사(Nakanishi et al., 2009), 기상 요인(Inagaki et al., 2010) 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

낙엽·낙지의 평균 질소농도는 삼나무 꽃이 1.79%, 편백 꽃은 1.64%로 삼나무 낙엽 0.51%나 편백 낙엽 0.54%에 비해 높았다(Figure 3). 꽃의 높은 질소 농도는 화분에 단백질 함량이 높기 때문으로(Filipiak, 2016), 타 연구에서도 *Pinus resinosa*나 *P. strobus* 화분의 질소농도는 2.0%(Doskey and Ugoagwu, 1989), 곰솔은 2.99%(Ujiié et al., 2003)로 보고한 바 있다. 그러나 본 연구 결과는 타 연구에 비해 질소농도가 낮았으며, 이는 화분을 포함한 응화수가 포함되어 분석되었기 때문으로 사료된다.

종자를 제외한 낙엽·낙지의 C/N비는 수종 간 차이가 없었으나, 9월~12월에 수집된 편백 종자는 낮은 질소농도로 인하여 C/N비가 가장 높은 값을 보였다(Figure 3). C/N비는 질소농도와 부의 상관을 보이기 때문에(Choi et al., 2022) 본 연구에서도 부위별 질소농도가 높을 경우 C/N비는 낮은 경향을 보였다. C/N비는 낙엽을 제외하고 계절적 변동이 나타나지 않았으며, 본 연구에서 6월~9월의 낮은 C/N비는 이 기간 동안 높은 질소농도를 보이는 생엽 유입이 원인으로 사료된다. 유사한 결과로 일본 카나가와현 편백 조림지 낙엽의 C/N비는 양분 재전류가 발생하여 질소농도가 낮게 나타난 11월이 63으로 하절기에 생엽이 유입되는 8월의 39에 비해 높은 것으로 보고된 바 있다(Nakajima and Kaneko, 2012).

3. 수종 및 계절별 탄소 및 질소유입량

탄소 및 질소유입량은 두 조림지 모두 12월~3월에 가장 많은 유입량을 보인 반면에 6월~9월은 가장 적게 유입되었다(Figure 4). 탄소 및 질소유입량은 3월~6월에 꽃, 종자는 12월~3월, 구과는 3월~6월, 기타물질은 12월~6월이 타 계절에 비해 많은 양이 유입되었다. 총 낙엽·낙지를 통한 탄소 및 질소유입량은 낙엽을 통한 탄소 및 질소유입량과 유사한 계절적 변동을 보였다. 한편, 삼나무는 3월~6월에 유입되는 꽃, 12월~3월에 유입되는 종자 및 구과 등과 같은 생식기관에 의한 탄소 및 질소 유입량이 편백에 비해 많았다.

4. 연 낙엽·낙지량과 탄소 및 질소유입량

연 낙엽·낙지량은 삼나무 6,358 kg ha⁻¹ yr⁻¹, 편백 6,194 kg ha⁻¹ yr⁻¹로 수종 간 유의적인 차이가 없었으나 꽃, 열매, 구과 등과 같은 생식기관은 삼나무 조림지의 유입량이 편백 조림지에 비해 크게 나타났다(Table 1). 낙엽 유입량은 삼나무 조림지 4,087 kg ha⁻¹ yr⁻¹, 편백 조림지 5,024 kg ha⁻¹ yr⁻¹로 삼나무 조림지는 전체 낙엽·낙지량의 64%, 편백 조림지는 81%였으며, 가지의 비율은 삼나무 조림지 0.2%, 편백 조림지 1.2%로 매우 낮은 값을 보였다. 본 연

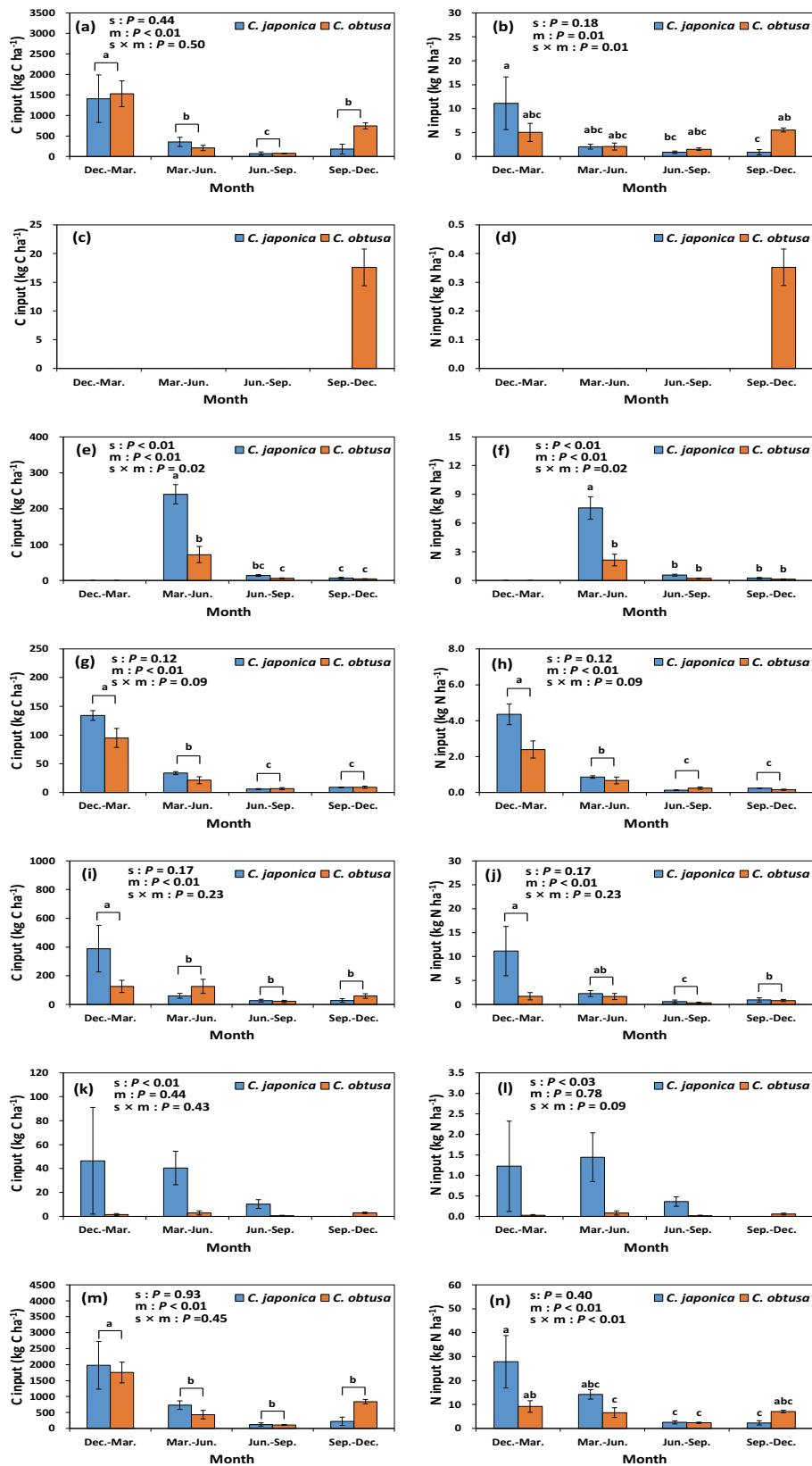


Figure 4. Seasonal variation of carbon and nitrogen inputs of litterfall components (a, b: needle; c, d: branches; e, f: flower; g, h: seed; i, j: cone; k, l: miscellaneous; m, n: total litterfall) in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations (s: species; m: month). Vertical bars indicate standard error. Different letters on the bars represent a significant difference at $P < 0.05$.

Table 1. Litterfall, carbon and nitrogen inputs of litterfall components in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* plantations.

Components	Plantation	Litterfall	C input	N input
		(kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)		
Needle	<i>C. japonica</i>	4,087 (1,168)	2,016 (573)	14.96 (5.08)
	<i>C. obtusa</i>	5,024 (809)	2,557 (417)	14.17 (2.24)
Branches	<i>C. japonica</i>	15 (15)	0 (0)	0 (0)
	<i>C. obtusa</i>	77 (42)	18 (32)	0.35 (0.06)
Flowers	<i>C. japonica</i>	593 (83)*	261 (29)*	8.39 (1.24)*
	<i>C. obtusa</i>	158 (44)	82 (22)	2.49 (0.62)
Seeds	<i>C. japonica</i>	372 (21)*	183 (12)	5.58 (0.65)
	<i>C. obtusa</i>	247 (43)	132 (22)	3.46 (0.65)
Cone	<i>C. japonica</i>	1,038 (300)	503 (161)	14.97 (5.18)*
	<i>C. obtusa</i>	667 (170)	331 (86)	4.52 (1.28)
Miscellaneous	<i>C. japonica</i>	203 (109)*	97 (54)*	3.03 (1.49)*
	<i>C. obtusa</i>	19 (8)	8 (3)	0.19 (0.10)
Total	<i>C. japonica</i>	6,358 (1,487)	3,054 (736)	46.93 (10.50)
	<i>C. obtusa</i>	6,194 (959)	3,129 (492)	25.17 (4.22)

Parenthesis values indicate standard error. Asterisk between *C. japonica* and *C. obtusa* represent a significant difference at $P < 0.05$.

구에서 가지유입량이 낮게 나타난 것은 III 영급 범위의 유령림 단계로 임관 하부에 죽은 가지가 거의 나타나지 않았고, 자연낙지가 발생하지 않았으며(Hagihara et al., 1978), 소지나 작은 가지의 경우 삼나무는 비늘 엽, 편백은 소엽이 함께 부착되어 가지와 함께 낙엽으로 분류하였기 때문에 사료된다.

본 연구에서 조사된 결과는 국내에서 조사된 문수산 V영급 편백 조림지 낙엽·낙지량 4,450 kg ha⁻¹ yr⁻¹~8,490 kg ha⁻¹ yr⁻¹(Lee et al., 2023)의 범위에 속하며, 일본에서 조사된 VI영급 편백 임분의 6,180 kg ha⁻¹ yr⁻¹(Oikawa, 1977)와 유사하나, III영급 편백 임분의 낙엽·낙지량 3,950 kg ha⁻¹ yr⁻¹(Inagaki et al., 2004)보다는 많았다. 한편 일본에서 조사된 삼나무 조림지 II영급과 VI영급의 낙엽·낙지량은 2,570 kg ha⁻¹ yr⁻¹과 6,070 kg ha⁻¹ yr⁻¹(Inagaki et al., 2004)로, 본 연구 결과는 VI영급 임분과 유사하였다.

낙엽·낙지를 통한 탄소유입량은 삼나무 조림지 3,054 kg C ha⁻¹ yr⁻¹, 편백 조림지는 3,129 kg C ha⁻¹ yr⁻¹였다. 본 연구에서의 탄소유입량은 경상남도 사천에서 조사된 15년생 편백 조림지의 탄소유입량 1,290 kg C ha⁻¹ yr⁻¹보다는 높았으며, 이는 임령의 차가 원인으로 사료된다. 꽃, 구과, 기타물질 등에 의한 질소유입량은 삼나무 조림지가 편백 조림지에 비해 많아 생식기관의 기여도가 큰 것으로 나타났다. 총 질소유입량은 삼나무 조림지 46.93 kg N ha⁻¹ yr⁻¹로 편백 조림지 25.17 kg N ha⁻¹ yr⁻¹에 비해 약 1.9배

크게 나타났으나 유의적인 차이는 없었다. 일본에서 조사된 시코쿠지역 22년생 편백 조림지의 낙엽·낙지에 의한 질소유입량은 25.7 kg N ha⁻¹ yr⁻¹, 55년생 삼나무 조림지는 49.1 kg N ha⁻¹ yr⁻¹(Inagaki et al., 2004)로 본 연구 결과와 큰 차이는 없었다.

결론

삼나무와 편백 조림지의 낙엽·낙지량은 꽃과 종자 같은 생식기관 유입량을 제외하고 수종 간 차이가 크지 않았으며 낙엽, 종자, 구과는 12월~3월, 꽃은 3월~6월 사이에 최대 유입되었다. 낙엽·낙지의 탄소농도 중 낙엽은 편백, 종자는 삼나무가 높았으며, 계절별로는 3월~6월에 유입된 꽃의 탄소농도가 가장 높았다. 질소농도는 구과를 제외하고 수종 간 차이가 없었으며, 계절별로는 6월~9월 사이에 유입된 낙엽의 질소농도가 높았다. 본 연구 결과에 따르면 낙엽·낙지는 수종이나 계절에 따라 탄소 및 질소 농도에 차이가 있어 유입량의 산정 시 이들을 고려해야 함을 시사한다. 두 수종 모두 꽃의 탄소 및 질소농도는 종자나 구과에 비해 높았으며, 삼나무 조림지는 꽃, 구과, 종자 등에 의한 탄소 및 질소유입량이 기여도가 높았다. 한편, 삼나무와 편백 모두 소지로부터 잎의 분리가 매우 어렵기 때문에 추후 연구에서는 이들을 효과적으로 분류할 수 있는 방안도 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 연구비(2020R1A2C1005791; RS-2023-00271791) 지원에 의해 수행되었습니다. 본 논문은 제1저자의 석사학위논문이 포함되어 있으며, 저자들은 실험을 도와준 경상국립대학교 산림토양연구실 학생들에게 감사함을 전합니다.

References

- Baek, G., Baek, G., Choi, B., Kim, H., Lee, J. and Kim, C. 2023. Soil respiration rates in *Cryptomeria japonica* D. Don, *Chamaecyparis obtusa* Endl., and *Quercus glauca* Thunb. stands. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 25(2): 71-89.
- Baek, G. and Kim, C. 2023. Comparisons of different regeneration approaches on soil respiration of *Chamaecyparis obtusa* planted in pine wilt disease-disturbed stands. Journal of Forest Research 28(3): 168-176.
- Bert, D. and Danjon, E. 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). Forest Ecology and Management 222: 279-295.
- Choi, B., Baek, G., Kim, H., Son, Y. and Kim, C. 2022. Comparisons of carbon and nitrogen dynamics of litterfall components in adjacent *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* stands. Journal of Forest Science 68(8): 287-297.
- Doskey, P.V. and Ugoagwu, B.J. 1989. Atmospheric deposition of macronutrients by pollen at a semi-remote site in northern Wisconsin. Atmospheric Environment 23(12): 2761-2766.
- Filipiak, M. 2016. Pollen stoichiometry may influence detrital terrestrial and aquatic food webs. Frontiers in Ecology and Evolution 4: 136.
- Hagihara, A., Suzuki, M. and Hozumi, K. 1978. Seasonal fluctuations of litter fall in a *Chamaecyparis obtusa* plantation. Journal of Japanese Forestry Society 60(11): 397-404.
- Im, S. and Kim, H. 2020. Effect of thinning intensity on litterfall of *Chamaecyparis obtusa* stand. Trends in Agriculture and Life Science 58: 11-18.
- Inagaki, Y., Miura, S. and Kohzu, A. 2004. Effects of forest type and stand age on litterfall quality and soil N dynamics in Shikoku district, southern Japan. Forest Ecology and Management 202: 107-117.
- Inagaki, Y., Sakai, A., Kuramoto, S., Kodani, E., Yamada, T. and Kawasaki, T. 2008. Inter-annual variations of leaf-fall phenology and leaf-litter nitrogen concentration in a hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) stand. Ecological Research 23: 965-972.
- Inagaki, Y., Okuda, S., Sakai, A., Nakanishi, A., Shibata, S. and Fukuta, H. 2010. Leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress forests in relation to the time of leaf fall under different climatic conditions in Japan. Ecological Research 25: 429-438.
- Inagaki, Y., Inagaki, M., Hashimoto, T. and Kaneko, S. 2015. Stable nitrogen and carbon isotope ratios and related leaf properties of four tree species at high and low nitrogen-deposition sites in the Kanto district of Japan. Bulletin of FFPRI 14(4): 201-208.
- Jeong, J., Kim, C., An, H.C., Cho, H.S. and Choo, G.C. 2009. A comparison of litterfall dynamics in three coniferous plantations of identical age under similar site conditions. Journal of Ecology and Field Biology 32(2): 97-102.
- Kang, H.C., Baek, G., Choi, B., Ha, J. and Kim, C. 2021. Carbon and nitrogen inputs by litterfall of *Chamaecyparis obtusa* planted in pine wit disease-disturbed forests. Journal of Korean Society of Forest Science 110(1): 43-52.
- Kim, C., Jeong, J., Cho, H.S. and Son, Y. 2010. Carbon and nitrogen status of litterfall, litter decomposition and soil in even-aged larch, red pine and rigitaeda pine plantations. Journal of Plant Research 123: 403-409.
- Kim, C., Baek, G., Choi, B., Ha, J., Bae, E.J., Lee, K.S. and Son, Y.M. 2020. Carbon stocks of tree, forest floor, and mineral soil in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands. Journal of Korean Society of Forest Science 109(2): 169-178.
- Korea Forest Service. 2023. Annual Reports of Forestry Statistics. Korea Forest Service. pp. 438.
- Korea Meteorological Administration. 2022. Climatological Normals of Korea. pp. 1012.
- Lee, I.K., Kang, Y.J., Kim, C.S. and Kim, Y.K. 2006. Effects of thinning on soil properties and seed productivity in seed orchards of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. Journal of Ecology and Field Biology 29(6): 495-501.
- Lee, J.G., Lee, D.H., Jung, J.Y., Lee, S.G., Han, S.H., Kim, S. and Kim, H.J. 2023. The effects of stand density control on carbon cycle in *Chamaecyparis obtusa* (Siebold and Zucc.) Endl. forests. Forests 14: 217.
- Michopoulos, P., Kaoukis, K., Karetos, G., Grigoratos, T. and Samara, C. 2020. Nutrient in litterfall, forest floor and mineral soils in two adjacent forest ecosystems in Greece. Journal of Forestry Research 31(1): 291-301.

- Milliken, G.A. and Johnson, D.E. 2009. Analysis of Messy Data. Volume 1. Designed Experiments. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 674.
- Miyaura, T. and Hozumi, K. 1985. Measurement of litterfall in a hinoki (*Chamaecyparis obtusa* S. et. Z.) plantation by the clothing-trap method. Journal of Japanese Forestry Society 67: 271-277.
- Nakajima, G. and Kaneko, N. 2012. The effect of Japanese cypress plantation on soil biochemical characteristics converted from deciduous forests. Journal of Japanese Forest Society 94: 112-119.
- Nakanishi, A., Inagaki, Y., Osawa, N., Shibata, S. and Hirata, K. 2009. Effects of patch cutting on leaf nitrogen nutrition in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) at different elevations along a slope in Japan. Journal of Forest Research 14: 388-393.
- Oikawa, O. 1977. The surface movement of soil and organic matter in a *Chamaecyparis obtusa* stand on the slope. Journal of Japanese Forestry Society 59: 153-158.
- Ujiié, Y., Arata, Y. and Sugawara, M. 2003. Heating experiments on *Pinus* pollen grains and its relation to petroleum genesis. Geochemical Journal 37: 367-376.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS/STAT Statistical Software. Version 9.1 SAS Publishing Cary, NC.
- Takahiro, I., Terumasa, T. and Yoshito, A. 2004. Comparison of organic matter dynamics between natural deciduous broad-leaved forest and adjacent artificial evergreen coniferous forest. Korean Journal of Ecology 27(4): 217-224.
- Yang, S., Guo, J.H., Chen, G.S., Xie, J.S., Cai, L.P. and Lin, P. 2004. Litterfall, nutrient return, and leaf-litter decomposition in four plantations compared with a natural forest in subtropical China. Annals of Forest Science 61: 465-476.

Manuscript Received : November 2, 2023

First Revision : January 3, 2024

Second Revision : February 24, 2024

Accepted : February 27, 2024