

월악산에 식재된 잣나무와 화백나무의 형성층 활동과 기후인자와의 관계¹

서정욱^{2,†} · 최은비² · 주정덕³ · 신창섭³

The Association of Intra-Annual Cambial Activities of *Pinus koraiensis* and *Chamaecyparis pisifera* planted in Mt. Worak with Climatic Factors¹

Jeong-Wook Seo^{2,†} · En-Bi Choi² · Jeong-Deok Ju³ · Chang-Seop Shin³

요약

본 연구는 월악산에 식재된 잣나무와 화백나무의 형성층 활동을 모니터링 하여, 1) 수종에 따른 형성층 활동 기간을 확인하고, 2) 적산온도가 형성층 활동 개시에 미치는 영향과 3) 생육기간 중 강수량이 연륜생장에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 또한, 식재연도가 동일하지만 직경생장이 다른 두 그룹(DBH 평균 30 cm (CPL)와 15 cm (CPS))의 화백나무 생장패턴도 함께 조사하였다. 형성층 활동 모니터링을 위해 미니코어를 활용하였으며, 시료채취는 2015년 4월부터 10월까지 2주 간격으로 실시되었다. 형성층 활동 개시와 종료는 4-5월과 9월 중순-10월은 일주일 간격으로 실시하였다. 연륜분석 결과 잣나무의 평균 연륜 수는 30개로 CPS와 CPL보다 7 (CPS) 또는 8 (CPL) 개 적었다. 반면, 잣나무의 평균 연륜폭은 4.12 mm로 CPL (3.97 mm)과 CPS (1.84 mm)보다 넓은 것으로 확인되었다. 화백나무 상호비교에서는 CPL의 평균 연륜폭이 CPS보다 2.13 mm 넓은 것으로 확인되었으나, 최근 3년간 평균 연륜폭을 비교한 결과 CPS1 (0.83 mm)를 제외한 CPS2 (2.42 mm)와 CPS3 (2.73 mm)은 CPL (2.71 mm) 그룹과 유사하였다. PK의 형성층 활동 개시는 4월 13일과 21일 사이로 CPS1를 제외한 화백나무보다 일주일 정도 빨랐으며, 종료는 9월 1일과 22일 사이로 형성층 활동 최대기간이 157.3 (± 3.3)일이었으며, CPS (145.7 ± 6.6일)와 CPL (148.0 ± 15.1일)보다 길었다. 화백나무의 경우 형성층 활동 종료 시기에 차이가 많았으며, 형성층 활동기간과 연륜폭 상호간 상관분석에서는 유의수준에 근접한 결과($r = 0.69$, $p < 0.064$)를 보였다. 잣나무의 형성층 활동을 유도하는 적산온도는 99와 134 사이였으며, CPS1 (274)을 제외한 화백나무는 134와 200 사이였다. CPS3을 제외한 모든 수목은 7월 21일에 채취한 시료에서 위연륜(false ring)이 관찰되었으며, 그 원인이 여름철 강수량 부족인 것으로 판단되었다.

ABSTRACT

This study was fulfilled to verify the durations of cambial activity and analyze the associations of degree days and precipitation with the initiation of cambial activity and intra-annual wood formation for *Pinus koraiensis* and

¹ Date Received November 9, 2016, Date Accepted December 9, 2016

² 충북대학교, 농업생명환경대학, 목재·종이과학과, Department of Wood & Paper Science, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea

³ 충북대학교, 농업생명환경대학, 산림학과, Department of Forest Science, College of Agriculture, Life and Environment Science, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 서정욱(e-mail: jwseo@chungbuk.ac.kr)

Chamaecyparis pisifera planted at Mt. Worak, respectively, by monitoring of their intra-annual cambial activities. And more, the reason was also analyzed why the DBH of *Chamaecyparis pisifera* known as planted in the same year could be classified as two groups (CPL: \varnothing 30 cm, CPS: \varnothing 15 cm). The intra-annual cambial activity was monitored using mini-cores (\varnothing 2 mm) and they were collected in 2-week interval between April and October. However, between April and May and between middle September and October expected as the initiation and cessation of the cambial activity, respectively, it was fulfilled in 1-week interval. The average number of tree rings for PK (30) was less than CPS (37) and CPL (38), whereas the average ring width of PK (4.12 mm) was wider than CPS (1.84 mm) and CPL (3.97 mm). In the comparison of ring widths between CPL and CPS, CPL was 2.13 mm wider than CPS, however, excepting CPS 1 (0.83 mm), the average ring widths of CPS 2 (2.42 mm) and CPS 3 (2.73 mm) in the last 3 years were close to the average of CPL (2.71 mm). The initiation of cambial activity for PK was between 1 and 21 April, which was 1 week earlier than CPL and CPS (excepting CPS 1) and the cessation was between 1 and 22 September. The longest growing season therefore was 157.3 days (\pm 3.3) and it was longer than CPL (145.7 \pm 6.6 days) and CPS (148.0 \pm 15.1 days). In CP groups there were wide variations for the cessation of cambial activity and also there were the meaningful linear relationship between the growing seasons and the ring widths ($r = 0.69$, $p < 0.064$). The cambial activity in PK was initiated when degree days were between 99 and 134 and in CPS (excepting PCS 1) and CPL between 134 and 200. Excepting CPS 3, the false ring was observed in all samples collected on 21 July when drought stress was high due to low precipitation from June to the beginning of July.

Keywords : cambial activity, degree days, wood formation, climate change, korean pine, sawara cypress

1. 서 론

국내 주요 관측소(서울, 인천, 강릉, 대구, 목포, 부산)에서 측정된 지난 100여 년의 평균온도에 따르면 우리나라 평균기온은 약 1.7 $^{\circ}$ C 상승하였으며, 이는 유사 기간에 발생한 세계 평균기온 상승률(+ 0.89 $^{\circ}$ C) 보다 0.81 $^{\circ}$ C 높은 수치이다(Shim *et al.*, 2015). 이러한 기후변화는 산림 내 수목의 계절학적 반응(Menzel *et al.* 2006; Cleland *et al.*, 2007)뿐만 아니라, 형성층 활동을 자극하여 목재세포의 양적, 질적 특성을 결정하는 중요한 요인이 된다(Rossi *et al.*, 2008; Seo *et al.*, 2008).

계절변화가 뚜렷한 온대와 한대지역 침엽수의 형성층 활동 개시 또는 종료는 온도조건에 의해 주로 결정되며(Seo *et al.*, 2008; Rossi *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2015), 연료폭 생장은 온도뿐만 아니라 생육 기간 중 강수량이 주요 요인이 될 수 있는 것으로 조사되었다(Eilmann *et al.*, 2011). 최근 30년간 유럽과 북미를 중심으로 덴드로미터(Deslauriers *et al.*, 2007), 피닝(Seo *et al.*, 2007), 미니코어(Rossi *et al.*, 2006)를 이용한 산림 내 주요 침엽수인 소나무류

(*Pinus sylvestris*, *Pinus cembra*) (Eilmann *et al.*, 2011; Oberhuber and Gruber, 2010; Seo *et al.*, 2008), 가문비류(*Picea abies*, *Picea mariana*) (Gričar *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2014; ThibeaultMartel *et al.*, 2008), 전나무(*Abies balsamea*) (Huang *et al.*, 2014; ThibeaultMartel *et al.*, 2008), 낙엽송(*Larix decidua*) (Rossi *et al.*, 2008) 등의 형성층 활동을 모니터링함으로써 밝혀진 결과이다. 국내에서 형성층 활동 모니터링에 관한 체계적 연구는 충북 월악산에서 생육하는 낙엽송(*Larix leptolepis*), 리기다소나무(*Pinus rigida*), 소나무(*Pinus densiflora*)를 대상으로 실시한 것이 첫 사례이다(Park and Seo, 2000). 본 연구에 따르면 형성층 활동 개시는 온도 상승이 두드러진 4월부터이며, 개시 순서는 낙엽송(4월 중순), 소나무(4월 말), 리기다소나무(5월 초) 순이었다. 생육 기간 중 형성층 활동에 영향을 주는 주요 인자는 기온보다 강수량이 크다고 제시하기도 하였다. 이후 Kwon and Kim (2005)은 춘천지역 침엽수(소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*))와 활엽수(신갈나무(*Quercus mongolica*), 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*), 층층나무(*Cornus controversa*), 산벚

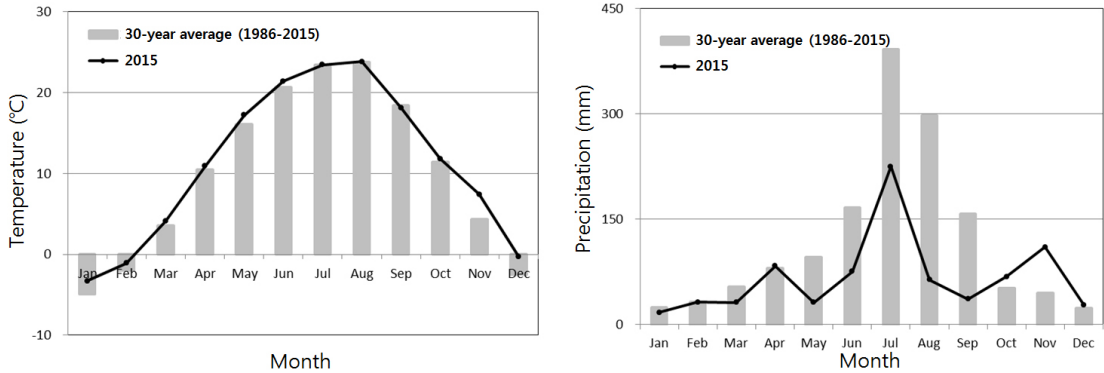


Fig. 1. Monthly mean temperature (left) and precipitation (right) at the Jecheon Meteorological Station between 1986 and 2015.

나무(*Prunus sargentii*)를 대상으로 형성층 활동을 모니터링 하였으며, Park *et al.* (2015)은 소광리와 안면도 소나무를 대상으로 형성층 활동을 모니터링 하여 지역간 형성층 활동 특징을 상호 비교하였다.

국내에서 발생하고 있는 온도 상승이 수목의 개화와 개엽(Lee *et al.*, 2016)를 앞당기고, 생육적지도 이동시키고 있음(Ko *et al.*, 2014)이 최근 몇몇 연구에 의해 밝혀졌다. 개화 또는 개엽과 온도와의 관계는 적산온도를 이용하여 밝히는데, 적산온도란 봄철 만상의 피해를 피하여 생육이 가능한 5°C 이상의 일일 평균 온도만을 누적한 값이다(Sarvas, 1972; Seo *et al.*, 2008). 육안관찰이 가능한 개화 또는 개엽과는 달리 목재생산량과 탄소저장량을 결정하는 형성층 활동 모니터링은 정기적인 시료채취 없이는 확인이 불가능하여(Seo *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2015), 이 분야에 대한 국내 연구사례는 매우 부족한 현실이다.

본 연구는 충북 월악산에 식재된 잣나무와 화백나무 형성층의 계절적 활동을 모니터링 하여, 수종에 따른 목재세포 형성 개시와 종료 시기를 밝히고, 적산온도가 형성층 활동 개시에 미치는 영향과 생육기간 중 강수량 변화가 형성층 활동에 미치는 영향을 분석하고자 수행되었다. 또한, 식재연도가 동일한 것으로 알려져 있는 화백나무의 흉고직경이 크게 두 그룹으로 구분되는 원인도 형성층 모니터링 결과를 근거로 분석하였다. 잣나무와 화백나무는 과거 조림 계획에 따라 월악산에 식재된 수종이다. 식재 이후

적응력 또는 기후요소와의 관계를 밝히는 연구가 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구결과는 향후 예측되는 기후변화가 두 수종의 목재생산량과 탄소저장량을 결정하는데 기여도가 큰 형성층 활동에 어떤 영향을 주는지를 예측하는데 중요한 기초자료가 될 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지 개황 및 수종 선택

충북대학교 월악산 학술림 경영계획구의 6입반에 위치한 차소반(128° 03' 50", 36° 50' 31")과 타소반(128° 03' 51", 36° 50' 37")을 연구지로 선정하였다. 차소반은 1986년에 식재한 잣나무 조림지이며, 타소반은 참나무가 우점종으로 있는 소반이나 화백나무가 일부에 식재된 소반이다(제3차기 산림관리계획서). 하지만 화백나무 식재에 관한 정확한 정보는 기록되어 있지 않다. 연구지에서 가장 근접한 제천시 기후자료에 따르면 최근 30년(1986-2015년)간 연평균기온은 10.2°C이며, 최한월과 최난월은 각각 1월(-4.9°C)과 8월(23.7°C)이다(Fig. 1). 연평균강수량은 1,422 mm이며, 강수량이 가장 적은 월과 많은 월은 각각 12월(23 mm)과 7월(392 mm)이었다. 대부분의 강수는 여름(6, 7, 8월)에 집중되었으며, 연강수량의 60.2% (855 mm)를 차지하였다.

Table 1. Description of experimental trees

Tree species	Plot ID	No. of tree rings at HMS*	Diameter at HMS* (cm)	Height (m)
<i>Pinus koraiensis</i>	PK01	28	24	13
	PK02	30	27	12
	PK03	26	22	14
<i>Chamaecyparis pisifera</i>	CPL1	30	28	17
	CPL2	38	29	17
	CPL3	31	30	17
	CPS1	31	13	10
	CPS2	37	16	12
	CPS3	35	13	9

*: HMS= the height for collecting increment cores (Ø5.2 mm) and mini-cores (Ø1.9 mm).
Bold: increment cores with the pith.

형성층 활동 모니터링을 위해 차소반에서 잣나무 3본, 타소반에서 화백나무 6본을 선발하였다(Table 1). 식재된 연도가 동일한 것으로 알려져 있는 화백나무의 경우 흉고직경이 약 30 cm (CPL)와 15 cm (CPS)로 나뉘어져 있어 흉고직경에 따른 형성층의 계절적 활동을 모니터링하기 위하여 각 등급에서 3본씩 선발하였다.

2.2. 기후자료

기후인자(온도, 강수량)가 잣나무(PK)와 화백나무(CPL, CPS)의 형성층 활동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구지에서 가장 가까운 기상관측소(충청북도 제천시) 자료를 이용하였다. 형성층 활동 모니터링이 수행된 2015년 의 평균 기온은 11.12°C이었으며, 총강수량은 803 mm였다(Fig. 1). 지난 30년간(1986-2015년) 제천시 평균기온(10.20°C)보다는 0.8 2°C 높았으나, 동일기간 평균강수량(1,422 mm)보다는 618 mm 부족하였다. 특히, 강수가 집중되는 여름 중 7월의 강수량은 255 mm로 지난 30년간 7월 평균 강수량(392 mm)보다 167 mm 부족하였다.

2.3. 적산온도

적산온도는 아래 Sarvas (1972) 모델을 이용하여 계산하였다.

$$d.d. = \sum_{i=j}^{365} (T_{D_{diff}})i$$

$$T_{D_{diff}} = \begin{cases} T_i - 5 & \text{for } T_i > 5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, $d.d.$ 는 $T_{D_{diff}}$ 의 누적이며, $T_{D_{diff}}$ 는 i 번째 율리우스 일(Julian day)의 평균온도와 +5°C와의 차이이며, j 는 일일 평균온도가 처음으로 +5°C 이상 5일 이상 지속되는 기간이 시작되는 율리우스 일이다 (Seo *et al.*, 2008)

2.4. 형성층 채취

형성층 피해를 최소화하며 시료를 채취하기 위하여 Ø1.9 mm 미니 생장추(Trephor)를 이용하였다. 또한 시료 채취에 따른 상해조직(callus) 형성을 고려하여 2.5 cm 간격으로 시료 채취를 실시하였다(e.g. Seo *et al.*, 2007). 시료 채취는 4월부터 10월까지 2주 간격으로 실시하였으나, 형성층활동 개시와 종료 가 예상되는 4월부터 5월, 9월 중순부터 10월까지 는 일주일 간격으로 실시하였다. 현장에서 채취된 모든 시료는 수집과 동시에 증류수에 담겨 보관하였으며, 실험실에서는 임베딩 전까지 냉장보관(4°C) 하였다.

2.5. 임배딩(embedding)과 현미경 관찰

광학현미경을 이용한 형성층 활동 관찰을 위하여 박편제작을 실시하였다. 박편제작을 위해 모든 시료를 polyethylene glycol (PEG2000)에 임배딩(embedding)하였으며, 활주식 마이크로톰(sliding microtome)으로 7-12 μm 두께로 박편제작을 실시하였다. 형성층에서 분열된 목재세포의 발달과정을 관찰하기 위하여 safranin (1%)과 astrablue (0.5%) 혼합 용액으로 1분간 염색하였다.

형성층 활동 개시와 종료는 형성층 내 원형질체 또는 액포 상태를 근거로 결정할 수 있는데(Schmitt *et al.*, 2016), 광학현미경으로는 확인이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 광학현미경(Nikon Eclipse 80i) 관찰에서 새로운 목부세포(xylem cell) 분열이 형성층에서 관찰되면 형성층 활동 개시로 정의하였으며, 형성층 활동의 종료는 더 이상의 목부세포 분열이 형성층에서 관찰되지 않고, 가장 최근에 분열된 목재세포의 목질화가 관찰되었을 때로 정의하였다(Rossi *et al.*, 2006; Seo *et al.*, 2007).

3. 결과 및 고찰

3.1. 연륜 분석

조사한 잣나무(PK) 3본 중 수(pith)가 관찰된 PK02의 연륜 수는 30개로 제3차기 산림관리계획서(2003)에 기록된 식재연도 1986년과 동일한 것으로 조사되었다. 성장편 채취 높이를 고려한다면 식재 당시 성장편 채취 높이의 어린 묘목들이 식재되었을 것이라 판단된다. 화백나무는 잣나무와 비슷한 높이에서 연륜관찰을 했음에도 불구하고 연륜이 7(CPS)-8(CPL)개 많은 것으로 확인되어 잣나무보다 앞서 조립되었거나, 조립 시기가 잣나무와 동일하다면 식재 시 수령이 7-8년 많은 화백나무가 이용된 것으로 보인다. 일반적으로 화백나무 조림은 2년생의 어린 묘목을 이용하기 때문에 후자 보다는 전자의 가능성이 높을 것이라 판단된다.

PK의 평균 연륜폭은 4.12 mm로 CPL (3.97 mm)

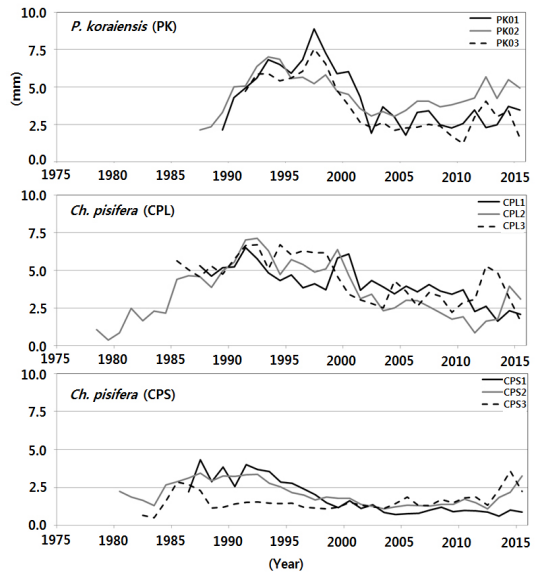


Fig. 2. Intra-annual ring-width variations of experimental tree species, *Pinus koraiensis* (PK) and *Chamaechiparis pisifera* with large diameter (CPL) and small diameter (CPS).

와 CPS (1.84 mm)보다 넓어 잣나무 직경생장이 화백보다 우수한 것으로 확인되었다. 화백나무 상호비교에서 CPL의 평균 연륜폭이 CPS보다 2.13 mm 넓은 것으로 조사되었으나, 최근 3년간 연륜폭을 비교하면 CPS1을 제외한 CPS2 (2042 mm)와 CPS3 (2.73 mm)이 CPL (2.71 mm)과 유사한 것으로 나타났다(Fig. 2). 이러한 결과가 수령 증가에 따른 연륜폭 감소(Fritts 1976)로 나타난 CPL의 생물학적 특징인지, 아니면 CPS가 식재지에 적응되어 CPL의 성장량 만큼 회복한 것인지 확인하기 위해서는 보다 장기간의 모니터링이 수행되어야 할 것이다.

3.2. 형성층의 계절적 활동

잣나무(PK) 형성층 활동 개시는 4월 21일 수집된 형성층에서 확인되어 실제 형성층 활동은 4월 13일과 21일 사이에 개시한 것으로 조사되었다. 반면, CPS1을 제외한 모든 화백나무의 형성층 활동 개시는 잣나무보다 1주일 늦은 4월 21일과 28일 사이였

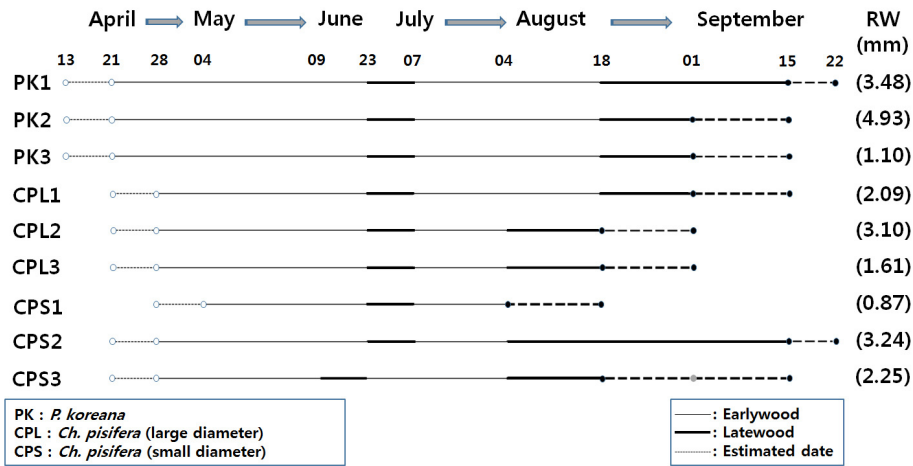


Fig. 3. Duration of wood formation of *Pinus koraiensis* (PK) and *Chamaehiparis pisifera* with large diameter (CPL) and small diameter (CPS) in 2015 and their ring widths (RW).

다(Fig. 3). CPS1의 형성층 활동 개시는 4월 28일과 5월 4일 사이로 가장 늦었다. 형성층 활동 개시와는 달리 형성층 활동 종료는 잣나무(PK)가 화백나무보다 전체적으로 늦었으며, 종료 시기는 9월 1일과 22일 사이였다. 화백나무 중 흉고직경이 큰 CPL 그룹의 화백나무의 형성층 활동 종료는 8월 18일과 9월 15일 사이로 잣나무보다 빨랐으며, 흉고직경이 작은 CPS 그룹의 화백나무는 형성층 활동 종료가 8월 4일(CPS1)부터 9월 22일(CPS2)까지 차이가 매우 컸다. 따라서 잣나무 형성층 활동의 최대기간 평균은 157.3 (\pm 3.3)일로 가장 길었으며, 다음으로 CPS와 CPL 순으로 각각 148.0 (\pm 15.1)일과 145.7 (\pm 6.6)일이었다.

2015년 잣나무의 평균 연륜폭은 3.19 (\pm 1.60) mm로 화백나무 CPL의 평균 연륜폭 2.27 (\pm 0.62) mm와 CPS의 평균 연륜폭 2.12 (\pm 0.97) mm보다 넓었다(Fig. 3). 전체 연륜폭을 결정하는데 생육속도가 중요한 인자가 될 수 있으나, 잣나무의 생육기간과 연륜폭이 화백나무보다 길고, 넓은 것으로 보아 생육속도보다는 생육기간이 연륜폭을 결정하는데 기여도가 큰 것으로 판단되었다. 형성층 활동 기간과 연륜폭 상호간 선형관계를 확인하기 위하여 화백나무만을 이용한 단순상관분석에서도 통계적으로 유의한 수준

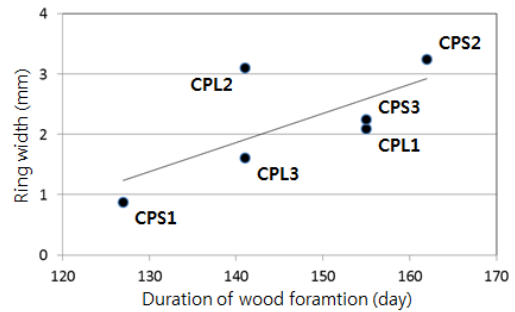


Fig. 4. Linear relationship between the durations of wood formation for individual *Chamaehiparis pisifera* and their ring widths ($r = 0.69$, $p < 0.064$).

의 결과인 0.69 ($p < 0.064$)를 보였다. 본 분석에서 CPL2를 제외할 경우에는 상관계수가 0.90 ($r < 0.00$)를 나타내어 통계적으로 매우 유의한 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 4). 시료수가 적어 CPL2와 같은 극단치가 전체 결과에 큰 영향을 미쳤으나, 전체적으로 형성층 활동 기간이 연륜폭을 결정하는데 중요한 인자가 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 보다 신뢰성 있는 결과를 제시하기 위해서는 보다 많은 시료를 이용한 연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

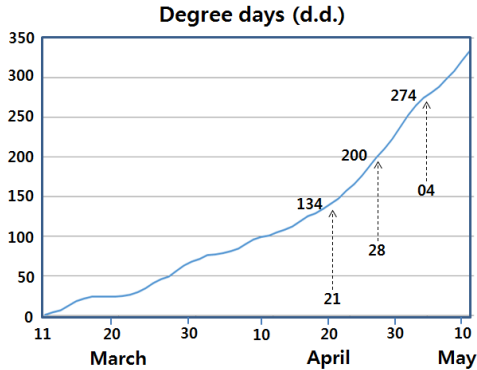


Fig. 5. Degree days of *Pinus koraiensis* and *Chamaechyparis pisifera* for the initiation of cambial activity.

3.3. 적산온도(degree days)

잣나무의 형성층에서 2차목부세포 분열이 처음으로 관찰될 때는 4월 21일이었으며, 적산온도는 134였다(Fig. 5). 반면, CPS1을 제외한 화백나무는 적산온도가 200일 때 처음으로 2차목부세포 분열이 형성층에서 관찰되었다. CPS1은 적산온도가 274일 때 목부세포 분열이 확인되었다. 잣나무는 표고 600 - 1500 m 사이에 분포하는 한대성 수종(Kong, 2004)인 반면, 화백나무는 일본이 원산으로 우리나라에서는 중부 이남에만 식재된 수종이며, 잣나무보다는 따뜻한 지역에서 분포하는 수종이다(Choe, 1999). 핀란드 북부에서 자라는 구주적송(*Pinus sylvestris* L.)의 형성층 활동 개시와 적산온도와의 관계를 조사한 연구에 따르면 동일한 수종일지라도 생육지역이 상대적으로 춥다면 형성층 활동도 상대적으로 낮은 적산온도에서 개시할 수 있는 것으로 밝혀졌다(Seo et al., 2008). 이는 추운 환경으로 인한 생육기간 단축에 적응한 결과로 볼 수 있다. 추운 지역에 생육하는 수목이 상대적으로 따뜻한 지역에서 자라는 수목과 동일한 적산온도에서 생육을 시작한다면 세포분열은 물론, 생육과 관련된 모든 생물학적 과정을 수행하는데 시간적으로 많은 제한이 따를 것이다. 따라서 한대성 수목인 잣나무가 주로 따뜻한 지역에 분포하는 화백나무보다 낮은 적산온도에서 형성층 활동을 개

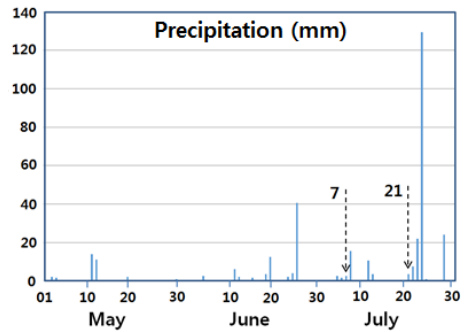
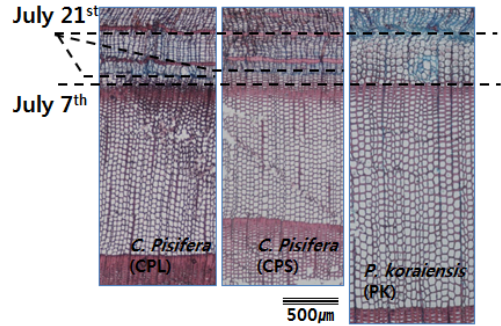


Fig. 6. Transverse thin sections of *Pinus koraiensis* (PK) and *Chamaechyparis pisifera* (CPL and CPS) sampled on 21 July and daily precipitation between May and July in 2015 at the Jecheon Meteorological Station.

시하여 생육을 시작하는 것으로 판단된다.

3.4. 위연륜(false ring)

CPS3를 제외한 모든 수목은 7월 21일 채취한 시료에 뚜렷한 위연륜(false ring)이 관찰되었다(Fig. 6). 7월 7일에 채취한 시료에서는 만재세포만이 관찰되어 7월 21일에 관찰된 조재세포는 7월 7일 이후에 형성된 것으로 확인되었다. Fig. 1에서 지난 30년(1986-2015)간 6월 평균 강수량을 살펴보면 166.03 mm인 반면, 형성층 모니터링이 수행된 2015년 6월 강수량은 75.40 mm로 매우 적었다. 또한, 2015년 7월 1일부터 7일까지 강수량을 살펴보면 2.50 mm 이하의 강수가 5회 있었는데, 이 중 2회는 0.30 mm 이하로 매우 적었다. 7월 7일 시료채취 이후 강수량을 살

퍼보면 8일과 12일에 각각 15.50 mm, 10.50 mm를 기록하였다.

형성층 활동 기간 중 수분조건은 수목의 직경생장에 중요한 인자가 됨이 여러 논문을 통해 밝혀졌다 (Eilmann *et al.*, 2009; Oberhuber and Gruber, 2010; Park and Seo, 2000). 특히, 형성층 활동이 왕성한 여름철 강수량 감소는 생육기간을 단축하여 연륜폭 감소의 원인이 되며, 지속적 강수량 감소는 수목이 고사하는 원인이 되기도 한다(Eilmann *et al.*, 2009). 생육기간 중 일시적 가뭄 스트레스는 위연륜(false ring) 형성에 중요한 원인이 될 수 있는데 본 연구에서도 위연륜의 형성 원인은 가뭄 스트레스 증가로 판단된다.

4. 결 론

월악산에 식재된 잣나무의 형성층 활동 개시는 적산온도가 134일 때였으며, 화백나무의 경우에는 CPS1(274)을 제외하고 200일 때로 조사되었다. 형성층 활동의 종료는 잣나무가 화백나무보다 평균적으로 1-2주 늦어서 PK의 평균 생육기간이 157.3 (\pm 3.3)일로 가장 길었으며, 다음으로 CPS가 148.0 (\pm 15.1)일, CPL이 145.7(\pm 6.6)일이었다. 이러한 결과는 내한성으로 알려진 잣나무가 상대적으로 따뜻한 지역에 분포하는 화백나무보다 낮은 적산온도에서 형성층 활동을 할 수 있기 때문일 것으로 판단된다.

화백나무 CPL과 CPS 연륜폭 비교에서 상대적으로 흉고직경이 큰 CPL의 평균 연륜폭은 CPS보다 2.13 mm 넓었으나, 최근 3년간 연륜폭을 비교하면 CPS1를 제외한 CPS2 (2.42 mm)와 CPS3 (2.73 mm)이 CPL (2.71 mm)과 유사하였다. 본 결과가 CPL의 수령증가에 따른 연륜폭 감소에 따른 것인지 CPS가 생육지에 적응하면서 발생한 성장량 회복인지를 밝히기 위해서는 장기간의 모니터링이 수행되어야 할 것이다. 또한 화백나무의 연륜폭과 형성층 활동기간과의 상관분석에서는 통계적으로 유의한 수준의 결과가 획득되어 수목의 직경생장을 결정하는데 형성층 활동기간의 기여도가 큰 것으로 조사되었다.

CPS3을 제외한 모든 수목은 7월 21일 채취한 시

료에 뚜렷한 위연륜(false ring)이 관찰되었다. 2015년 6월 강수량은 75 mm로 지난 30년(1986-2015)간 6월 평균 강수량 166 mm에 크게 미치지 못하였다. 또한, 2015년 7월 1일부터 7일까지 강수량을 살펴보면 2.5 mm 이하의 강수가 5회 있었고, 이 중 2회는 0.3 mm 이하로 매우 적었다. 따라서 형성층 활동이 왕성한 6월부터 7월초까지의 극심한 강수 부족이 위연륜 형성의 원인으로 분석되었다.

이상의 결과는 향후 예상되는 기후변화가 월악산 잣나무와 화백나무 형성층 활동에 미칠 영향을 예측하고, 이에 따른 목재생산량과 탄소저장량을 추정하는데 중요한 기초자료가 될 것이다.

사 사

이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Choe, M.-S. 1999. *Chamaecyparis pisifera*. Landscaping tree 49(3/4): 21-22.
- Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A., Schwartz, M.D. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *TRENDS in Ecology and Evolution* 22(7): 357-364.
- College of Agriculture, Life and Environment Science. 2003. The 3rd Forest Management Plan. Chunbuk National University, Forestry Inventory 6, 6-1.
- Deslauriers, A., Rossi, S., Anfodillo, T. 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: what kind of information can be inferred?. *Dendrochronologia* 25(2): 113-124.
- Eilmann, B., Zweifel, R., Buchmann, N., Fonti, P., Rigling, A. 2009. Drought-induced adaptation of the xylem in Scots pine and pubescent oak. *Tree Physiology* 29(8): 1011-1020.
- Eilmann, B., Zweifel, R., Buchmann, N., Pannatier

- E.G., Rigling, A. 2011. Drought alters timing, quantity, and quality of wood formation in Scots pine. *Journal of Experimental Botany* 62(8): 2763-2771.
- Gricar, J., Zupančič, M., Čufar, K., Koch, G., Schmitt, U., Oven, P. 2006. Effects of local heating and cooling on cambial activity and cell differentiation in the stem of norway spruce (*Picea abies*). *Annals of Botany* 97(6): 943-951.
- Huang, J.-G., Deslauriers, A., Rossi, S. 2014. Xylem formation can be modeled statistically as a function of primary growth and cambium activity. *New Phytologist* 203(3): 831-841.
- Ko, S.Y., Sung, J.H., Chun, J.H., Lee, Y.G., Shin, M.Y. 2014. Predicting the changes of yearly productive area distribution for *Pinus densiflora* in Korea based on climate change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 16(1): 72-82.
- Kong, W.-S., 2004. Species composition and distribution of native Korean conifers. *Journal of the Korean Geographical Society* 39(4): 528-543.
- Kwon, S.M., Kim, N.H. 2005. Annual ring formation of major wood species growing in Chuncheon, Korea(I) - the period of cambium activity. *Journal of the Korean Wood Science & Technology* 33(4): 1-8.
- Lee, S.-H., Bae, C.-H., Park, J.-M., Jin, H.-M., Park, J.-A. 2016. Studies on biological phenology of the main forest area in Gyeonggi region. *Proc. Korean Soc. Environ. Ecology. Con.* 26(1): 21-22.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch E., Aasa A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatzcak, K., Mâge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Züst, A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12(10): 1969-1976.
- Oberhuber, W., Gruber, A. 2010. Climatic influences on intra-annual stem radial increment of *Pinus sylvestris* (L.) exposed to drought. *Trees* 24: 887-898.
- Park, S.-Y., Eom, C.-D., Seo, J.-W. 2015. Seasonal change of cambium activity of pine trees at different growth sites. *Journal of the Korean Wood Science & Technology* 43(3): 411-420.
- Park, W.-K., Seo, J.-W. 2000. Long-term monitoring of climatic and soil factors, and tree growths in Worak Mountain using phytogram system. *The Korean Journal of Quaternary Research* 14(2): 101-107.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T. 2006. Assessment of cambial activity and xylogenesis by microsampling tree species: an example at the alpine timberline. *IAWA Journal* 27(4): 383-394.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., Carrer M. 2008. Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *New Phytologist* 177: 199-208.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Gričar, J., Seo, J.-W., Rathgeber, C.B.K., Anfodillo, T., Morin, H., Levanic, T., Oven, P., Jalkanen, R. 2008. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography* 17: 696-707.
- Sarvas, R. 1972. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Active period. *Commun. Inst. For. Fenn.* 76(3): 1-110.
- Schmitt, U., Koch, G., Eckstein, D., Seo, J.-W., Prislán, P., Gricar, J., Cufar, K., Stobbe, H., Jalkanen, R. 2016. The vascular cambium of trees and its involvement in defining xylem

- anatomy. *Secondary Xylem Biology: Origins, Functions, and Applications* (eds. Y.S. Kim, Funada, R., Singh, A.P.) 3-24.
- Seo, J.-W., Eckstein, D., Schmitt, U. 2007. The pinning method: from pinning to data preparation. *Dendrochronologia* 25: 79-86.
- Seo, J.-W., Eckstein, D., Jalkanen, R., Rickebusch, S., Schmitt, U. 2008. Estimating the onset of cambial activity in Scots pine in northern Finland by means of the heat-sum approach. *Tree Physiology* 28: 105-112.
- Shim, K.M., Kim, Y.S., Jeong, M.P., Choi, I.T. 2015. Characteristics of climate change in sowing period of winter crops. *Journal of Climate Change Research* 6(3): 203-208.
- Thibeault-Martel, M., Krause, C., Morin, H., Rossi, S. 2008. Cambial activity and intra-annual xylem formation in roots and stems of *Abies balsamea* and *Picea mariana*. *Annals of Botany* 102(5): 667-674.