

속리산 참나무류 도관내강면적연대기와 기후인자와의 관계분석¹

정 현 민^{2,3} · 김 요 정^{2,4} · 서 정 욱^{4,†}

Relationships Between Vessel-lumen-area Time Series of *Quercus* spp. at Mt. Songni and Corresponding Climatic Factors¹

Hyun-Min Jeong^{2,3} · Yo-Jung Kim^{2,4} · Jeong-Wook Seo^{4,†}

요 약

본 연구는 국내 속리산 참나무류 도관내강면적연대기를 작성하고, 작성된 연대기가 기후프록시로서의 활용 가능성이 있는지 확인하기 위해 수행되었다. 도관내강면적연대기 작성을 위해 3가지 측정 방법이 이용되었다. 방법 1과 2는 도관내강면적이 각각 $6,000 \mu\text{m}^2$ (MVA-60)와 $7,500 \mu\text{m}^2$ (MVA-75) 이상인 것만 이용하여 평균값으로 연대기를 작성하는 것이고, 방법 3은 각 연륜에서 가장 큰 도관내강면적(MAX)만을 이용하여 연대기를 작성하는 것이다. MVA-60과 MVA-75는 전년도 11월부터 당년 1월까지인 겨울철 강수량과 유의성에 근접한 정의 상관관계를 나타냈으나, MAX는 전년도 11월에 대해서만 유의성 있는 정의 상관관계를 나타냈다. 본 연구결과를 근거로 국내 참나무류의 도관내강면적은 연륜기후학 분야에서 기후프록시로서의 활용이 가능성이 확인되었다.

ABSTRACT

This study aimed to suggest a method to establish vessel-lumen-area chronologies in domestic *Quercus* spp. from Mt. Songni and to verify their potential as a climate proxy. In order to establish vessel-lumen-area chronologies, three options were applied to filter vessels. Options 1 and 2 use vessels having lumina larger than or equal to $6,000 \mu\text{m}^2$ (MVA-60) and $7,500 \mu\text{m}^2$ (MVA-75), respectively, to establish the chronologies by their mean values in each year, and option 3 uses the largest one (MAX) in each tree ring. MVA-60 and MVA-75 had mostly significant relationships with the winter precipitation between November in the previous year and January in the current year, however, MAX had only significant relationship with November precipitation in the previous year. Based on these results, it was

¹ Date Received December 7, 2016, Date Accepted December 28, 2016

² 충북대학교 산학협력단부설 목재연륜소재은행. Tree-ring Material Bank, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea

³ 충북대학교 문화재과학과. Department of Cultural Heritage Science, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea

⁴ 충북대학교 농업생명환경대학 목재·종이과학과. Department of Wood & Paper 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)

verified that the potential of vessel lumina in domestic *Quercus* spp. could be a climate proxy in dendroclimatology.

Keywords : vessel lumen area, tree ring, climate change, climate proxy, oak

1. 서론

우리나라와 같이 계절변화가 뚜렷한 온대, 또는 한대지방의 수목 내 연륜폭은 형성층 활동 정도에 따라 결정되며, 형성층 활동의 정도와 기후인자 상호 간에는 높은 상관관계가 있는 것으로 밝혀져 있다 (Deslauriers and Morin, 2005; Seo *et al.*, 2007). 따라서 연륜에는 연륜이 생성된 해당년도에 대한 기후 정보가 저장되어 있으며, 이러한 특성은 우리가 관측하지 못한 과거 기후를 복원하는 연구에 과거 기후인자에 대한 proxy로서 크게 기여하였다(Briffa *et al.*, 1988; Grudd *et al.*, 2002; Büntgen *et al.*, 2011). 연륜폭 이외에도 다양한 분석 장비의 도움을 받아 연륜 내 밀도(Briffa *et al.*, 1988; Grudd, 2008; Fan *et al.*, 2009) 또는 동위원소(McCarroll and Loader, 2004; Gagen *et al.*, 2011) 등을 측정하여 고기후를 복원하는 연구가 20세기 중반부터 수행되었다. 특히, 2000년대 전후로는 참나무류(*Quercus* spp.) 도관요소(이하 도관)의 내강면적을 활용한 연륜연대학적 연구가 유럽을 중심으로 시작되었다(García-González and Eckstein, 2003; Fonti and García-González, 2008).

우리나라 전체 산림(6,334,615 ha) 중 소나무 다음으로 많이 차지하는 수종은 참나무류로 약 15.4%에 달한다(Korea Forest Service, 2016). 지속적인 기후 변화로 인해 국내 산림식생의 대부분은 참나무아속의 단순림으로 천이될 것이라는 연구결과(Um *et al.*, 2009)를 볼 때, 향후 산림 내 참나무아속림은 더욱 증가할 것으로 예측된다. 2010년을 기준으로 국내 활엽수목재 시장에서 참나무아속이 차지하는 비율은 59% (약 76만 m²)이다(National Institute of Forest Science, 2013). 결국, 향후 예상되는 기후변화로 인해 산림 내 참나무아속의 성장량이 어떻게 변하게 될 것인지를 정확히 분석하는 것은 산림생태계의 변

화를 예측함은 물론, 목재자원 관리에 있어서 매우 중요한 요소이다.

참나무아속과 같은 환공재는 공권부에 대도관을 갖고 있으며, 대도관의 내강면적은 강수량 또는 기온과 같은 기후인자의 조건에 따라 변동하는 것으로 밝혀졌다(García-González and Eckstein, 2003; García-González and Fonti, 2008; Matisons and Brümelis, 2012). 수목생장에 필요한 물의 양은 강수와 같은 직접적 요인과 온도에 따른 증발산 작용으로 결정되는 토양수분량과 같은 간접적 요인에 의해 결정되며, 이렇게 결정된 물의 양이 도관요소의 내강면적을 결정하는데 중요한 인자가 되기 때문이다(Woodcock, 1989; Corcuera *et al.*, 2006; Fonti *et al.*, 2010; Eilmann *et al.*, 2006). 따라서 도관의 내강면적으로 작성된 연대기를 연륜연대학적으로 분석할 경우 연륜폭연대기에서 찾을 수 없는 새로운 기후 정보에 대한 신뢰성 있는 결과를 획득할 수 있다(Sass and Eckstein, 1995; Abrantes *et al.*, 2013; Kniessel *et al.*, 2015). 이러한 세계적 연구 동향에도 불구하고 참나무아속의 도관내강면적을 이용한 연륜연대학적 연구가 국내에서 수행된 사례는 아직까지 없다.

본 연구는 기후 인자(온도, 강수량)와 졸참나무류 성장과의 관계를 밝혀 향후 예상되는 기후변화가 졸참나무류 성장에 어떠한 영향을 줄 것인지에 대한 예측 연구를 위한 기초자료를 구축하기 위하여 수행되었다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 및 시료채취

속리산국립공원 내 문장대로부터 약 300 m 떨어진 신갈나무-졸참나무 임분을 연구지역으로 선정하

Table 1. Geographical coordinates of individual sample trees (*Quercus* spp.) and the information on increment cores (\varnothing 5.15 mm) extracted from them

ID	Latitude / Longitude	Altitude (a.s.l. [*])	Type of samples	No. of samples	DBH ^{**} (cm)
SRQU01	N36° 33.887' E127° 51.742'	900	Core	3	48
SRQU02	N36° 33.881' E127° 51.766'	920	Core	3	47
SRQU03	N36° 33.876' E127° 51.759'	908	Core	3	45
SRQU04	N36° 33.875' E127° 51.756'	906	Core	3	49
SRQU05	N36° 33.870' E127° 51.746'	896	Core	4	47
SRQU06	N36° 33.863' E127° 51.751'	896	Core	4	48
SRQU07	N36° 33.838' E127° 51.721'	871	Core	3	51
SRQU08	N36° 33.825' E127° 51.672'	867	Core	3	53
SRQU22	N36° 33.872' E127° 51.752'	900	Core	2	43
SRQU23	N36° 33.866' E127° 51.722'	890	Core	2	63
SRQU24	N36° 33.853' E127° 51.741'	884	Core	2	54
SRQU26	N36° 33.848' E127° 51.716'	877	Core	2	55
SRQU27	N36° 33.826' E127° 51.707'	860	Core	2	35
SRQU28	N36° 33.781' E127° 51.675'	838	Disk	1	60
SRQU29	N36° 33.790' E127° 51.683'	844	Disk	2	30
SRQU31	N36° 33.836' E127° 51.739'	877	Disk	1	62
SRQU32	N36° 33.875' E127° 51.768'	916	Disk	1	50

*a.s.l.: above sea level, **DBH: diameter at breast height

였다. 선정된 연구지역에서 줄참나무류 우세목 17본을 선발하여 연륜폭(TRW: tree-ring width)과 도관내강면적(VA: vessel lumen area) 측정을 위해 생장추(\varnothing 5.15 mm)를 이용하여 생장편(increment core) 46개(Table 1)를 추출하였다(Fig. 1A).

2.2. 연륜폭(TRW: tree-ring width) 측정 및 크로스데이팅(cross-dating)

추출된 생장편을 도관이 상하로 주행하도록 하여 ‘U’자형 홈이 팬 나무틀에 접착제(twist & glue, UHU, Germany)를 사용하여 고정하였다. 고정 후에는 연륜경계가 잘 보이도록 생장편의 횡단면을 사포로 연마하였으며, 연마는 #80을 시작으로 #120, #320, #600 순으로 실시하였다. 연륜폭(TRW)은 실체현미경(Nikon smz800, Japan)으로 연륜경계를 확인하면서 0.01 mm 단위(LINTAB, RINNTECH,

Germany)로 측정하였다(Fig. 2A). 측정된 생장편에 위연륜(false ring) 또는 실연륜(missing ring)이 존재하는지 확인하기 위하여 크로스데이팅(cross dating)을 실시하였다(Speer, 2010). 이는 각 연륜에 정확한 연대를 부여하는 필수적인 과정이다. 각 연륜에 잘못된 절대연도가 부여될 경우 각 생장편에서 측정된 TRW 값을 평균화하여 대표연륜연대기를 작성하면 각 연도별 수치가 가감되어 중요한 공통 정보가 사라질 수 있기 때문이다(Park and Seo, 2000). TSAPWin 프로그램(RINNTECH, Germany)에서 제공하는 t 값(식 (1))과 G 값(gleichläufigkeit) (식 (2))을 이용하여 통계적으로 크로스데이팅을 실시하였으며(Baillie and Pilcher, 1973; Eckstein and Bauch 1969), 최종 확인은 연륜폭 측정값으로 작성된 각 연륜연대기들을 육안으로 상호비교하는 그래픽방법(graphic method)으로 하였다.

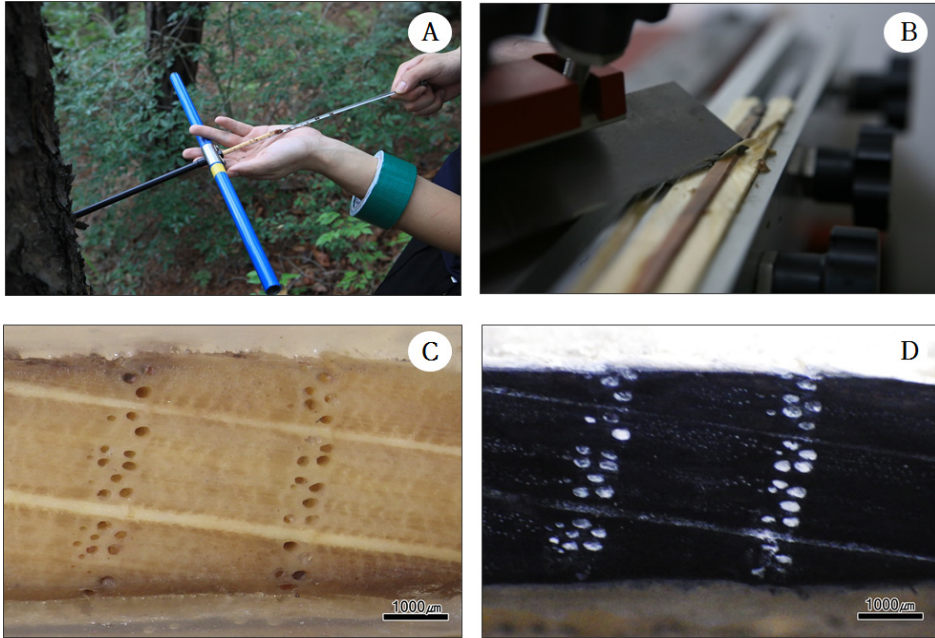


Fig. 1. Work flow (A: extracting increment cores (∅ 5.15 mm) from the experimental trees, B: cutting the surface in the cross section by a sliding microtome, C: the surface after cutting, D: vessel lumina filled with white chalk powder and wood tissues stained with black permanent marker.

$$t = \frac{CC \times \sqrt{n-2}}{\sqrt{(1-CC)^2}} \dots\dots\dots (1)$$

CC : 연륜폭을 5년 이동평균한 후 자연로그로 표준화하여 계산된 상관계수
 n: 비교결과 겹치는 년수

$$G_{(x,y)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |G_{ix} + G_{iy}| \dots\dots\dots (2)$$

($x_{i+1} - x_i$) > 0 이면 $G_{ix} = +1/2$
 ($x_{i+1} - x_i$) = 0 이면 $G_{ix} = 0$,
 ($x_{i+1} - x_i$) < 0 이면 $G_{ix} = -1/2$

2.3. 도관내강면적(VA: vessel lumen area) 측정

도관내강면적(VA) 측정은 17본의 공시목 중에서 크로스데이팅이 우수한 7본에서 추출된 성장편(8개

으로 실시하였다. 정확한 VA 측정을 위하여 선발된 성장편의 횡단면을 슬라이딩 마이크로톰(G.S.L.-1, Swiss)으로 절삭(Fig. 1B)한 후, 횡단면을 유성매직으로 칠하고, 흰 분필가루로 도관내강을 채웠다(Fig. 1D). 이상의 과정을 통하여 도관내강과 세포벽 경계를 명확히 구분할 수 있어서 정확한 VA 측정이 가능하였다(Gärtner *et al.*, 2015). VA는 WinCELL PRO (Regent Instrument, Canada)로 측정하였으며, 실체현미경에 부착된 디지털카메라(Nikon DS-5mc, Japan)로 획득된 디지털이미지(2,560 × 1,920 픽셀)를 사용하였다. VA 측정 기간은 기후인자가 측정된 1970년부터 2014년(충북 보은기상관측소)이다.

선행 연구(Fonti *et al.*, 2009; Kniessel *et al.*, 2015)에 따르면 VA로 만들어진 연대기는 VA 선발 방법에 따라서 획득되는 기후정보가 달라짐이 확인되었다. 본 결과를 근거로 VA 선발 방법을 다음과 같이 3가지로 구분하였다. 방법 1은 VA가 6,000 μm² 이상인 도관을 각 연륜에서 선발하여 그 평균값으로

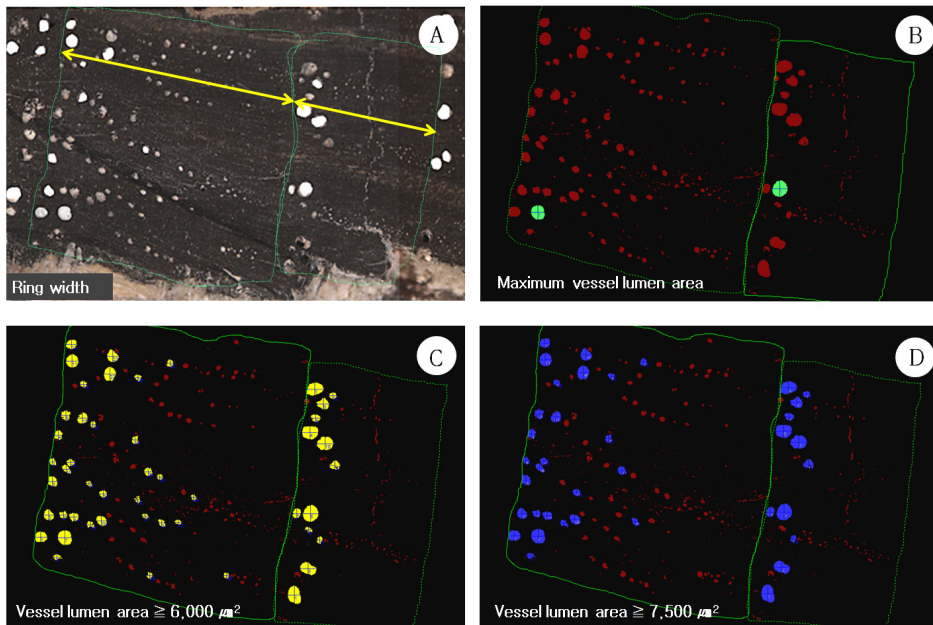


Fig. 2. Measurement method for establishing ring-width (A) and vessel-lumen-area chronologies which are the average of vessel lumen areas above or equal to $6,000 \mu\text{m}^2$ (MVA-60, green in C) and above or equal to $7,500 \mu\text{m}^2$ (MVA-75, yellow in D) in each time series and the maximum lumen area in each time series (Max, blue in B).

연대기를 만드는 것이며(MVA-60, Fig. 2C), 방법 2는 VA가 $7,500 \mu\text{m}^2$ 이상인 도관의 평균값으로 연대기를 만드는 것이며(González-González *et al.*, 2014) (MVA-75, Fig. 2D), 방법 3은 각 연륜에서 VA가 최대인 도관(MAX, Fig. 2B)만을 이용하여 연대기를 작성하는 것이다.

2.4. 표준화(Standardization)

연륜폭과 도관내강면적에 저장되어 있는 다양한 정보들 중에 기후정보를 강조하기 위하여 임목 고유의 생물학적 생육추세(biological trend) (예, 수령) 및 임분동태(stand dynamics) (예, 임분 내 교란 및 경쟁) (Fritts, 1976)와 관련된 정보를 제거하는 표준화를 실시하여 지수연대기(index chronology)를 작성하였다. 연륜폭은 1단계로 음지수곡선(negative exponential curve)을 이용하여 생육추세를 제거하고, 2단계로 평활스플라인 함수(smoothing spline, 50% 반응주기:

60년)로 임분동태를 제거(Fig. 3A)하는 이중표준화법(double detrending method)을 적용하여 지수연대기를 작성하였다. 반면, 도관내강면적(MVA-60, MVA-75, MAX)에는 평활스플라인 함수(50% 반응주기: 23년)만을 적용하여 도관내강면적 지수연대기를 작성하였는데, 이는 임령 증가에 따른 생육추세가 뚜렷하지 않은 성숙목 기간만이 연대기 작성에 사용되었기 때문이다(Fig. 3B). 표준화는 ARSTAN 프로그램(Cook, 1985)으로 실시하였다.

2.5. 통계학적 분석

작성된 연대기들 상호간 일치도와 연륜기후학적 가치를 통계적으로 확인하기 위하여 연대기 상호간 상관분석(Rbt: correlation between trees), 평균민감도(MS: mean sensitivity, 식 (3)), 모수설명신호(EPS: expressed population signal, 식 (4))를 구하였다(Briffa and Jones, 1990). 평균민감도는 연대기의 시계열에

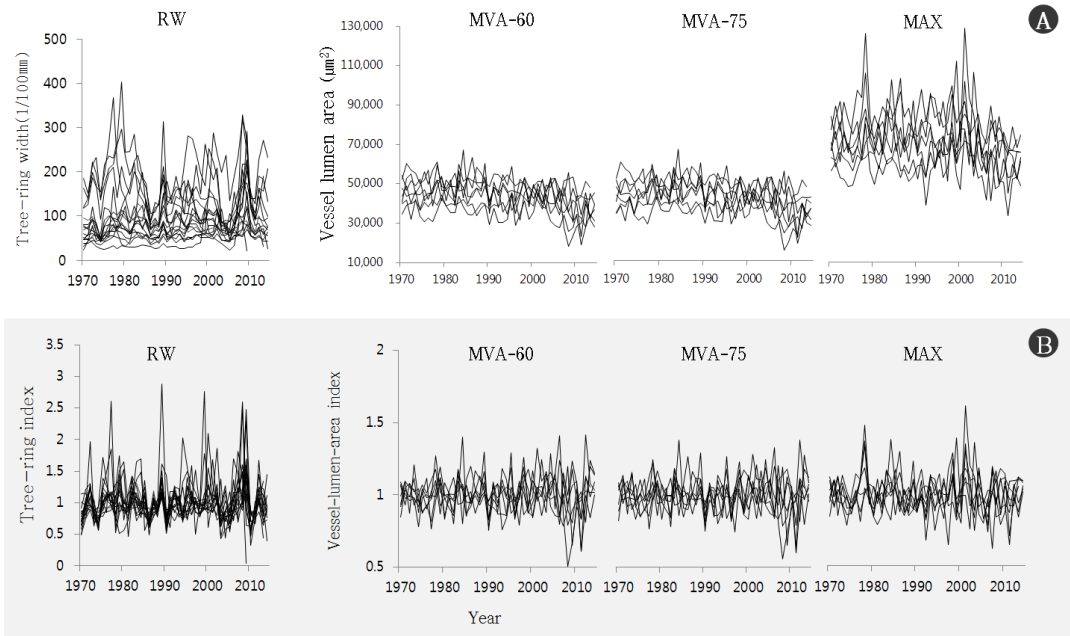


Fig. 3. Inter-annual ring-width and vessel-lumen-area chronologies (A) and the standardized index chronologies (B) from 1970 to 2014 (RW: ring width, MVA-60: vessel lumen area $\geq 6,000 \mu\text{m}^2$, MVA-75: vessel lumen area $\geq 7,500 \mu\text{m}^2$, and MAX: maximum vessel lumen area).

서 인접한 두 측정값간의 변이 크기이며, 생육환경 변화에 대한 수목의 성장반응 정도를 평가하는 기초 자료가 된다(Fritts, 1976). 모수설명신호는 선발된 연대기들이 해당 임분에서 생육하는 수목들이 갖는 공통생육신호(common growth signal)를 어느 정도 대표할 수 있는지를 평가하는 것으로, 기후인자와의 비교 연구에서는 보통 0.85 이상을 기준으로 한다(Briffa and Jones, 1990). 이상의 통계분석을 위하여 ARSTAN 프로그램(Cook, 1985)을 이용하였다. 연륜 폭연대기와 조건별 도관내강면적연대기들 상호간 존재하는 통계적 유사성을 근거로 동질적인 군집으로 구분하기 위하여 주성분분석(PC: principal component analysis)을 수행하였으며, SAS 프로그램(ver. 9.4, SAS institute)을 사용하였다.

$$MS_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right| \dots\dots\dots (3)$$

MS_x : x임목의 평균민감도
 x_t : x임목의 t년도 연륜지수
 x_{t+j} : x임목의 t+1년도 연륜지수

$$EPS(t) = \frac{\overline{r_{bt}}}{r_{bt} + (1 - \overline{r_{bt}})/t} \dots\dots\dots (4)$$

$EPS(t)$: 모집단에 대한 신호강도
 r_{bt} : 임목간의 상관계수
 t : 임목의 수

3. 결과 및 고찰

3.1. 연대기의 통계학적 분석

연륜폭으로 작성된 연륜연대기(RW)의 R_{bt} 는 0.276 으로 조건별 도관내강면적연대기의 0.21 (MVA-60:

Table 2. Means, standard deviations (STD), and mean sensitivities (MS) of ring widths (RW) and vessel lumen area (MVA-60, MVA-75, and MAX) used to establish their time series and the first autocorrelations (AC1), correlation between trees (Rbt), and expressed population signals (EPS) of the standardized ring-width and vessel-lumen-area chronologies (RW: ring widths, MVA-60: vessel lumen area $\geq 6,000 \mu\text{m}^2$, MVA-75: vessel lumen area $\geq 7,500 \mu\text{m}^2$, and MAX: maximum vessel lumen area)

	Measurements			Residual chronology		
	Mean	STD	MS	AC1	Rbt	EPS
RW	0.99 mm	0.37	0.22	-0.004	0.28	0.87
MVA-60	42,607 μm^2	6,603	0.12	-0.141	0.22	0.66
MVA-75	43,577 μm^2	6,538	0.15	-0.135	0.19	0.62
MAX	71,058 μm^2	11,267	0.16	-0.080	0.22	0.66

0.22, MVA-75: 0.19, MAX: 0.22)보다 높았으며, 연륜폭연대기의 ESP도 0.86으로 조건별 도관내강면적연대기의 0.65 (MVA-60: 0.66, MVA-75: 0.62, MAX: 0.66)보다 높았다(Table 2). 연륜연대학에서 요구하는 일반적인 EPS 기준은 0.85이며, 연륜폭연대기만이 이 기준을 만족하였다.

조건별 도관내강면적연대기들 중 가장 높은 Rbt와 MS는 0.22와 0.16으로 MAX를 활용할 경우였다. MVA-60과 MVA-75의 Rbt는 0.22와 0.19이며, MS는 0.12와 0.15였다(Table 2). 이러한 결과는 각 연륜에 있는 최대도관내강면적이 도관내강면적이 $6,000 \mu\text{m}^2$ 이상 또는 $7,500 \mu\text{m}^2$ 이상인 도관들보다 외부 환경변화에 상대적으로 더 민감하게 반응하기 때문이라 판단된다.

연륜폭으로 작성된 연륜연대기와는 달리 MAX, MVA-60, MVA-75의 EPS는 연륜연대학에서 요구하는 0.85보다 낮았다. 이는 EPS 산출에 있어서 중요한 요소인 임목의 수(7개)와 활용된 연대기 길이(45년)가 짧기 때문이다. 도관내강면적연대기 작성을 위해서는 연륜폭으로 작성하는 연륜연대기보다 많은 시간이 소요된다. 이런 이유로 여러 선행 연구들에서도 연륜폭으로 작성된 연륜연대기들 중에서 크로스데이팅이 우수한 성장편을 선발하여 도관내강면적연대기를 작성하는 것이 일반적이다(Abrantes *et al.*, 2013; Matison and Brümelis, 2012). 따라서 도관내강면적연대기의 경우 0.75 정도의 EPS를 요구하나 이하인 경우가 활용된 경우도 있다(Kniesel *et al.*, 2015).

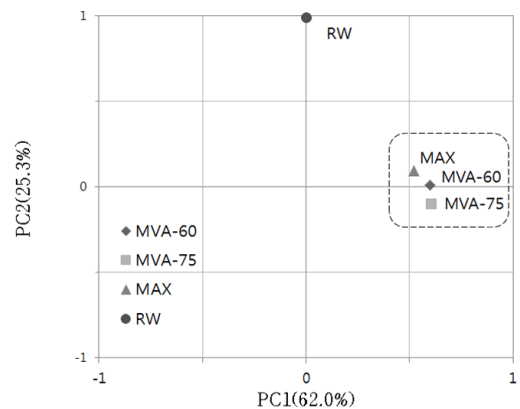


Fig. 4. Principal component analysis of the correlation matrix of ring-width (RW) and all vessel-lumen-area (MVA-60, MVA-75, and MAX) chronologies between 1970 and 2014. (MVA-60: vessel lumen area $\geq 6,000 \mu\text{m}^2$, MVA-75: vessel lumen area $\geq 7,500 \mu\text{m}^2$, and MAX: maximum vessel lumen area).

3.2. 군집분석

연륜연대기(RW)와 조건별 도관내강면적연대기들을 이용한 주성분분석을 실시한 결과 제1주성분과 제2주성분으로 설명될 수 있는 변동이 각각 62.0%과 25.3%로 총 변동의 87.3%였다(Fig. 4). 제1주성분과 제2주성분에 따르면 RW는 조건별 도관내강면적연대기들과 다른 그룹으로 구분되었으며, 연대기 상호간 비교에서도 RW는 MVA-60, MVA-75, MAX와

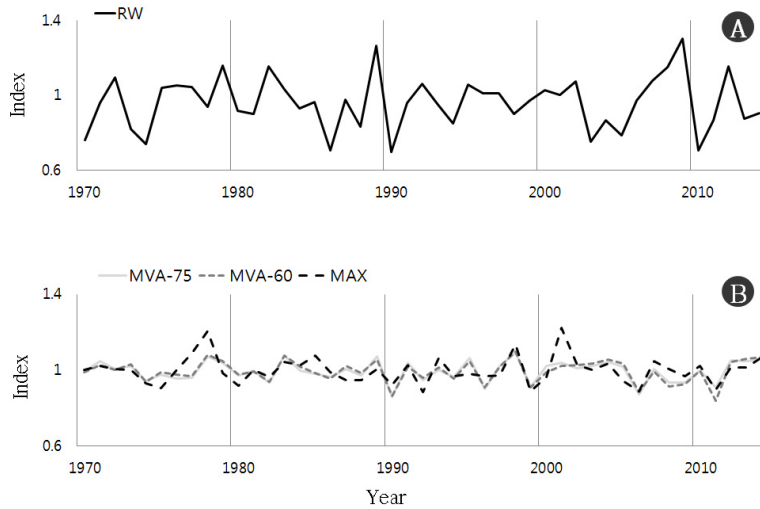


Fig. 5. Residual chronologies for ring widths (A) and vessel lumen areas (B) between 1973 and 2014 (RW: ring widths, MVA-60: vessel lumen area $\geq 6,000 \mu\text{m}^2$, MVA-75: vessel lumen area $\geq 7,500 \mu\text{m}^2$, and MAX: maximum vessel lumen area).

다른 연간생육변동 경향을 나타냈다(Fig. 5). 그 결과 RW와 각 도관내강면적연대기(MVA-60, MVA-75, MAX)와의 상관분석에서 상관계수는 0.07부터 0.10으로 매우 낮았으며, 도관내강면적연대기 상호간 상관분석에서는 0.59 ($p < 0.01$) 이상의 유의성 있는 상관계수를 보였다.

참나무아속과 같은 환공재는 조재부의 대도관을 앞이 피기 전에 형성하며, 약 24일 이내에 세포형성이 종료되는 것으로 알려져 있다(Sass *et al.*, 2011). 국내에서 참나무아속에 대한 대도관의 형성 개시와 기간에 대한 연구는 아직까지 수행된 바가 없으나, 연륜생장 기간은 3월부터 10월 중순까지로 보고되어 있다(Kwon and Kim, 2005). RW와 조건별 도관내강면적연대기들과의 낮은 상관은 대도관의 형성 기간이 연륜생장 기간과 크게 달라 각각 독특한 연간생육변동 패턴을 갖게 된 것이 주요인이라 판단된다.

3.3. 연대기와 기후인자의 비교

전체적으로 연륜연대기는 강수량보다는 온도와 높은 상관을 보인 반면, 조건별 도관내강면적연대기들

은 강수량과 상대적으로 높은 상관을 보여주었다(Fig. 6). 특히, 연륜연대기는 전년 1월 온도에 대하여 신뢰성 있는 정의 상관관계를 나타냈으며, MVA-60은 전년도 11월과 12월 강수량 및 11월 온도, MVA-75는 전년도 11월 강수량 및 온도, MAX는 전년도 강수량에 대하여 신뢰성 있는 정의 상관관계를 나타냈다. MVA-75는 전년도 12월 강수량에 대하여 신뢰성 있는 상관을 보이지 않았으나, 전체적으로 MVA-60과 매우 유사한 기후인자와의 관계를 갖는 것으로 조사되었다.

참나무아속은 추위가 발생하면 냉해 피해를 쉽게 받는 것으로 알려져 있다(Repo *et al.*, 2008). 특히, 겨우내 저온은 뿌리 피해를 증가시켜 당년 성장량에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있는데, 이는 겨우내 뿌리 조직이 눈층(snow layer)에 덮여 있지 않게 되면 저온 영향을 그대로 받기 때문이다(Hardy *et al.*, 2001; Matisons and Brumelis, 2013). 이런 이유로 1월 온도가 참나무아속의 연륜생장에 중요한 제한요소로 분석된 것이라 판단된다. 반면, 조건별 도관내강면적연대기들은 겨울철 강수량이 중요한 기후인자로 조사되었다. 참나무아속과 같은 환공재의 대도관

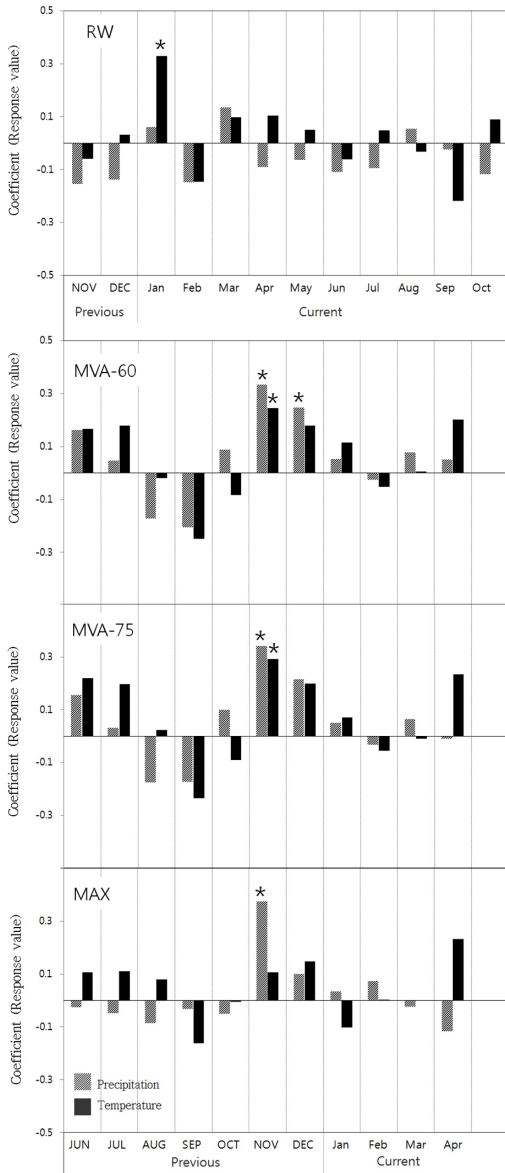


Fig. 6. Response functions between residual chronologies and monthly mean temperature and total precipitation from 1973 to 2014 (RW: ring width, MVA-60: vessel lumen area $\geq 6,000 \mu\text{m}^2$, MVA-75: vessel lumen area $\geq 7,500 \mu\text{m}^2$, and MAX: maximum vessel lumen area, *: significant at the 0.05 level).

요소는 잎이 피기 전에 형성(Sass *et al.*, 2011)된다. 따라서 토양에 저장되는 늦겨울 강수는 대도관이 형성되는 이른 봄에 활용될 수 있기 때문에 중요한 인자로 분석된 것으로 판단된다.

반응함수분석에서 연륜폭생장과 조건별 도관내강면적을 결정하는데 중요한 인자로 확인된 기후요소(기온, 강수)와 연대기들과 상호 비교하였다. 그 결과 모든 연대기들이 중요한 기후요소들과 유사한 연간 변동 패턴을 나타냈으며, 상관분석에서도 신뢰성 있는 결과를 보여주었다(Fig. 7). 결국, 봄철 기온 상승은 참나무류의 연륜폭 증가를 유도하고, 겨울철 강수량 증가는 참나무류의 도관내강면적 증가를 유도하였다.

MVA-60과 MVA-75를 기후요소와 비교한 결과는 매우 유사하였으나 MVA-60이 MVA-75보다 겨울철 강수량에 대해 높은 정의 상관관계를 나타냈다. 반면 MAX는 MVA-60과 MVA-75와는 달리 전년도 11월 강수량에 대해서만 통계적으로 높은 정의 관계를 나타냈다. 이상의 결과를 근거로 참나무아속 도관면적 연대기를 이용한 겨울철 강수량 변동에 대한 연륜연대학적 연구에서는 MVA-60을 이용하고, 전년도 11월 강수량에 대한 연륜연대학적 연구에서는 MAX를 이용하는 것이 유리할 것이다.

본 결과는 향후 예측되는 기후변화로 인한 속리산 지역 참나무류의 연륜폭과 도관내강면적 변화를 예측하고, 이에 따른 성장량 및 목질 변화를 예측하는데 중요한 기초자료로 활용될 것이다.

4. 결 론

속리산 졸참나무류를 이용하여 235년간의 연륜연대기(RW)와 45년간의 조건별 도관내강면적연대기(MVA-60, MVA-75, MAX)를 성공적으로 작성하였다. 군집분석 결과, 작성된 연대기들은 연륜연대기와 도관내강면적연대기(MVA-60, MVA-75, MAX) 두 그룹으로 명확히 분류되었다. 반응함수분석에 따르면 연륜연대기와 조건별 도관면적연대기는 각각 1월 평균기온과 겨울철 강수량과 정의 상관을 가졌다. 특히 조건별 도관내강면적을 이용한 연륜연대학적 연

속리산 참나무류 도관내강면적연대기와 기후인자와의 관계분석

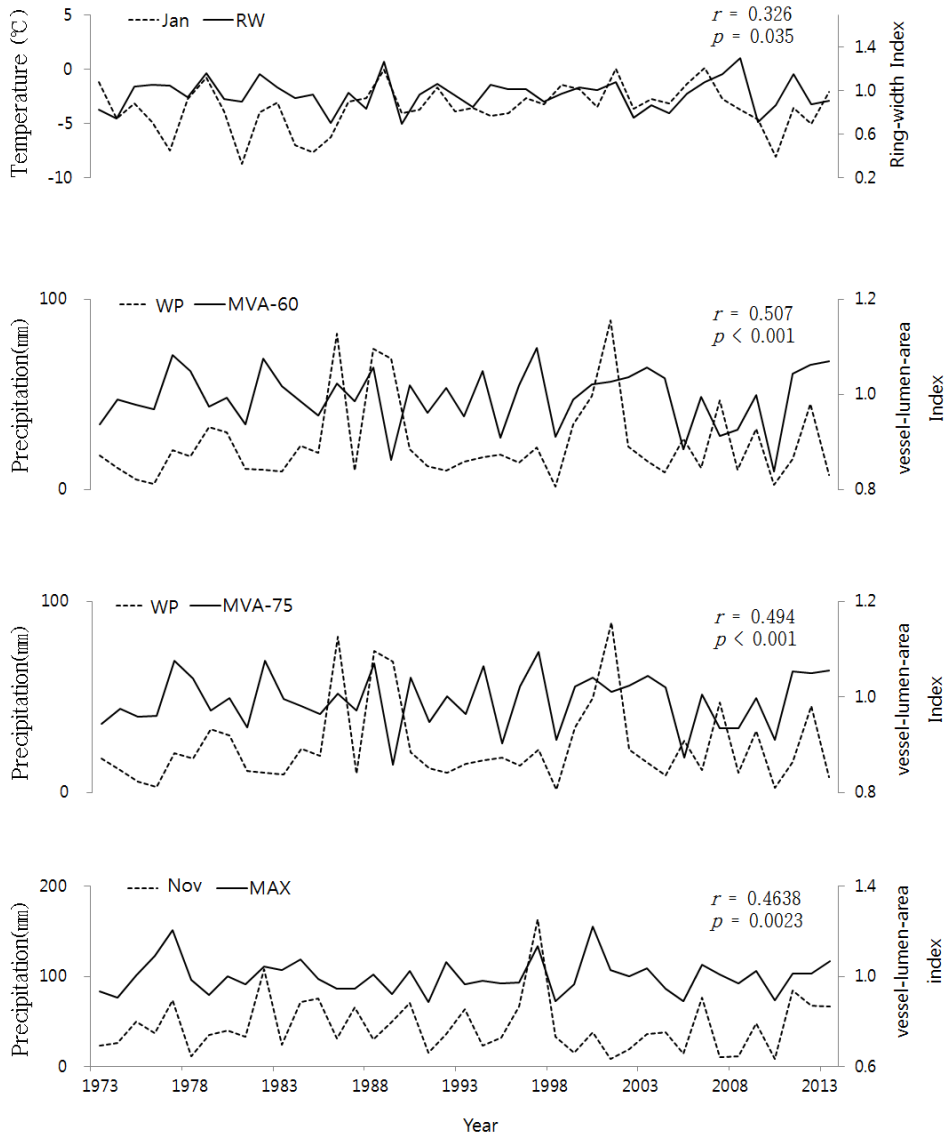


Fig. 7. Comparison of residual chronologies with climatic factors (i.e., monthly mean temperature and total precipitation) in the current year between 1973 and 2014 (WP: November in the previous year to January in the current year, RW: ring width, MVA-60: vessel lumen area $\geq 6,000 \mu\text{m}^2$, MVA-75: vessel lumen area $\geq 7,500 \mu\text{m}^2$).

구 결과에 따르면 $6,000 \mu\text{m}^2$ 이상의 도관내강면적의 평균으로 작성한 MVA-60이 $7,500 \mu\text{m}^2$ 이상으로 작성한 MVA-75보다 겨울철 강수량과 높은 정의 관계

를 보였다. 각 연륜의 최대 도관내강면적을 이용하여 작성한 MAX는 MVA-60와 MVA-75와는 달리 전년 도 11월 강수량에 대해서만 통계적으로 높은 정의

관계를 나타냈다. 이상의 결과는 국내 졸참나무류의 도관면적연륜연대기 작성 방법과 도관면적연륜연대기를 이용한 기후정보 복원연구에 중요한 기초자료가 될 것이다.

사 사

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013R1A1A2060485).

REFERENCES

- Abrantes, J., Campelo, F., García-González, I., Nabais, C. 2013. Environmental control of vessel traits in *Quercus ilex* under Mediterranean climate: relating xylem anatomy to function. *Trees-Structure and Function* 27: 655-662.
- Alla, A.Q., Camarero, J.J. 2012. Contrasting responses of radial growth and wood anatomy to climate in a Mediterranean ring-porous oak: implications for its future persistence or why the variance matters more than the mean. *European Journal of Forest Research* 131(5): 1537-1550.
- Baillie, M.G.L., Pilcher, J.R. 1973. A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree Ring Bulletin* 33: 7-14.
- Briffa, K.R., Jones, P.D., Pilcher, J.R., Hughes, M.K.. 1988. Reconstructing summer temperatures in northern Fennoscandia back to A.D. 1700 using tree-ring data from Scots pine. *Arctic and Alpine Research* 20(4): 385-394.
- Briffa, K., Jones, P.D. 1990. Basic chronology statistics and assessment. In *Method of Dendrochronology* (eds. Cook, ER and Kairiukstis L.A.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 137-152.
- Büntgen, U., Tegel, U., Nicoluss, K., McCormick, M., Frank, D., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J. 2011. 2500 years of european climate variability and human susceptibility. *Science* 331(6017): 578-582.
- Corcuera, L., Camarero, J.J., Siso, S., Gil-Pelegrin, E. 2006. Radial-growth and wood-anatomical changes in overaged *Quercus pyrenaica* coppice stands: functional responses in a new Mediterranean landscape. *Trees* 20(1): 91-98.
- Deslauriers, A., Morin, H. 2005. Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables. *Trees* 19: 402-408.
- Eckstein, D., Bauch, J. 1969. Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230-250.
- Eilmann, B., Weber, P., Rigling, A., Eckstein, D. 2006. Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. *Dendrochronologia* 23(3): 121-132.
- Fan, Z.X., Bräuning, A., Yang, B., Gao, K.F. 2009. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in southern China. *Global and Planetary Change* 65(1-2): 1-11.
- Fonti, P., García-González, I. 2004. Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytologist* 163(1): 77-86.
- Fonti, P., García-González, I. 2008. Earlywood vessel size of oak as a potential proxy for spring precipitation in mesic sites. *Journal of Biogeography* 35(12): 2249-2257.
- Fonti, P., Eilmann, B., García-González, I., von Arx, G. 2009. Expeditious building of ring-porous earlywood vessel chronologies without losing signal information. *Trees* 23: 665-671.
- Fonti, P., von Arx, G., García-González, I., Eilmann,

- B., Sass-Klaassen, U., Gärtner, H., Eckstein, D. 2010. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist* 185: 42-53.
- Fonti, P., Heller, O., Cherubini, P., Rigling, A., Arend, M. 2013. Wood anatomical responses of oak saplings exposed to air warming and soil drought. *Plant Biology* 15: 210-219.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press. London. 567 pp.
- Gagen, M., Zorita, E., McCarroll, D., Young, G.H., Grudd, H., Jalkanen, R., Loader, N.J., Robertson, I., Kirchhefer A. 2011. Cloud response to summer temperatures in Fennoscandia over the last thousand years. *Geophysical Research Letters* 38(5): L05701, DOI 10.1029/2010GL046216.
- García-González, I., Eckstein, D. 2003. Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology* 23(7): 497-504.
- García-González, I., Fonti, P. 2008. Ensuring a representative sample of earlywood vessels for dendroecological studies: an example from two ring-porous species. *Trees-Structure and Function* 22: 237-244.
- Gärtner, H., Cherubini, P., Fonti, P., von Arx, G., Schneider, L., Nievergelt D., Verstege, A., Bast, A., Schweingruber, F.H., Büntgen, U. 2015. A technical perspective in modern tree-ring research - how to overcome dendroecological and wood anatomical challenges. *Journal of Visualized Experiments* 5(97).
- González-González, B., Rozas, V., García-González, I. 2014. Earlywood vessels of the sub-Mediterranean oak *Quercus pyrenaica* have greater plasticity and sensitivity than those of the temperate *Q. petraea* at the Atlantic-Mediterranean boundary. *Trees-Structure and Function* 24: 237-252.
- Grudd, H., Briffa, K.R., Karlén, W., Bartholin, T.S., Jones, P.D., Kromer, B. 2002. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial time scales. *The Holocene* 12(6): 657-665.
- Grudd, H. 2008. Torneträsk tree-ring width and density AD 500-2044: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers. *Climate Dynamics* 31: 843-857.
- Hardy, J.P., Groffman, P.M., Fitzhugh, R.D., Henry, K.S., Welman, A.T., Demers, J.D., Fahey, T.J., Driscoll, C.T., Tierney, G.L., Nolan, S. 2001. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry* 56: 151-174.
- Kniessel, B. M., Günther, B., Roloff, A., von Arx, G. 2015. Defining ecologically relevant vessel parameters in *Quercus robur* L. for use in dendroecology: a pointer year and recovery time case study in Central Germany. *Trees - Structure and Function* 29(4): 1041-1051.
- Korea Forest Service. 2016. *Statistical yearbook of forestry*. Vol. 46.
- Kwon, S.M., Kim, N.H. 2005. Annual ring formation of major wood species growing in Chuncheon, Korea(1) - the period of cambium activity -. *Journal of the Korean Wood Sciences and Technology*. 33(4): 1-8.
- Matisons, R., Brumelis, G. 2012. Influence of climate on tree-ring and earlywood vessel formation in *Quercus robur* in Latvia. *Trees-Structure and Function* 26: 1251-1266.
- McCarroll, D., Loader, N.J. 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23(7-8): 771-801.
- National Institute of Forest Science, 2013, Estimation of greenhouse gas emissions of Korean major timbers using life cycle assessment.

- Park, W.-K., Seo, J.-W. 2000. Reconstruction of May-June precipitation (253 years: A.D. 1746-1998) in east-coastal region (Yungdong) of Korea from tree rings of *Pinus densiflora* S. et Z. The Korean Journal of Quaternary Research 14: 87-99.
- Sass, U., Eckstein, D. 1995. The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its eco-physiological interpretation. Trees-Structure and Function 9(5): 247-252.
- Sass, U., Sabajo, C.R., Ouden, J. 2011. Vessel formation in relation to leaf phenology in peduncululate oak and European ash. Dendrochronologia 29: 171-175.
- Seo, J.-W., Eckstein, D., Schmitt, U. 2007. The pinning method: from pinning to data preparation. Dendrochronologia 25: 79-86.
- Speer, J.H. 2010. Fundamentals of Tree-Ring Research. The University of Arizona Press. USA.
- Repo, T., Mononen, K., Alvila, L., Pakkanen, T.T., Hänninen, H. 2008. Cold acclimation of peduncululate oak (*Quercus robur* L.) at its northernmost distribution range. Environmental and Experimental Botany 63: 59-70.
- Um, T.W., Chun, J.H., Kim, K.H. 2009. Stand structure characteristics of oak wilt infected forest, Korea. Korean Journal of Environment and Ecology 23(2): 220-232.
- Woodcock, D.W. 1989. Climate sensitivity of wood-anatomical features in a ring-porous oak (*Quercus macrocarpa*). Canadian Journal of Forest Research 19: 639-644.