

지리산국립공원 아고산대 주요 수종 (주목, 잣나무, 구상나무, 신갈나무)에 대한 산소동위원소연대기 작성 및 기후와의 관계 분석¹

서 정 옥^{2,†} · 정 현 민³ · Masaki Sano⁴ · 최 은 비⁵ ·
박 준 희² · 이 광 희⁶ · 김 요 정² · 박 흥 철⁷

Establishing Tree Ring $\delta^{18}\text{O}$ Chronologies for Principle Tree Species (*T. cuspidata*, *P. koraiensis*, *A. koreana*, *Q. mongolica*) at Subalpine Zone in Mt. Jiri National Park and Their Correlations with The Corresponding Climate¹

Jeong-Wook Seo^{2,†} · Hyun-Min Jeong³ · Masaki Sano⁴ · En-Bi Choi⁵ ·
Jun-Hui Park² · Kwang-Hee Lee⁶ · Yo-Jung Kim² · Hong-Chul Park⁷

요 약

지리산 아고산대 주요 침엽수(주목, 잣나무, 구상나무)와 신갈나무를 이용하여 50년간의 산소동위원소연대기(1966~2015)를 작성하였다. 산소동위원소연대기 작성은 크로스데이팅(cross-dating) 결과가 우수한 4본을 각 수종에서 선발하여 실시하였다. 동일 수종 내 임목 간 산소동위원소연대기의 상관분석 결과 모두 유의성($p < 0.001$) 높은 상관성이 있는 것으로 확인되었으며, EPS도 0.85 이상이었다. 동일 수종 내 임목 간 상관분석뿐만 아니라 수종간 상관분석에서도 유의성($p < 0.001$) 높은 상관관계가 확인되었다. 기후요소(강수량, 기온)와 산소동위원소와의 관계를 조사하기 위한 반응함수 분석에서 주목은 전년 5월 강수량과 유의성 있는 부의 상관을 보였으며, 구상나무는 4월 강수량과 유의성 있는 부의 상관을 보였다. 향후 주목과 구상나무에 대한 장기간의 산소동위원소연대기가 작성된다면 과거 측정하지 못한 장기간의 4월과 5월 강수량 복원이 가능할 것이다.

¹ Date Received August 3, 2017, Date Accepted September 15, 2017

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

³ 전통건축수리기술진흥재단 부재조사연구팀. Architectural Elements Research Team, Korea Foundation for the Traditional Architecture and Technology, Gyeonggi 10859, Republic of Korea

⁴ 일본 와세다대학교 인류과학부. Faculty of Human Science, Waseda University, Saitama 359-1192, Japan

⁵ 충북대학교 문화재과학협동과정. Department of Cultural Heritage Science, Chungbuk National University, Chungbuk 28644, Republic of Korea

⁶ 한국전통문화대학교 문화재보존과학과. Department of Conservation Science, Korea National University of Cultural Heritage, Chungnam 33115, Republic of Korea

⁷ 국립공원관리공단 국립공원연구원. Korea National Park Research Institute, Gangwon 26441, Republic of Korea

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

ABSTRACT

50-year tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies (1966~2015) for principle conifer tree species (*Taxus cuspidata*, *Pinus koraiensis*, *Abies koreana*) and *Quercus mongolica* at subalpine zone in Mt. Jiri were established. The establishing of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies for each tree species were fulfilled using four trees, which showed the good result in cross-dating. In the comparisons between tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies within the same tree species all tree species showed reliable results statistically ($p < 0.001$), and they also showed EPS higher than 0.85. In addition to, the reliable correlations ($p < 0.001$) were verified between tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies of four tree species, as well. In the response function analysis in order to investigate the relationships between tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies and corresponding climatic factors, i.e., monthly precipitation and mean temperature, *T. cuspidata* showed a negative correlation with May precipitation ($p < 0.05$) and *A. koreana* showed a negative correlation with April precipitation ($p < 0.05$). If long tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies of *T. cuspidata* and *A. koreana* will be established, it will be possible to reconstruct April and May precipitation in the past when we have no the meteorological data.

Keywords : tree ring, climate proxy, $\delta^{18}\text{O}$, subalpine trees

1. 서 론

연륜(年輪, tree ring)의 생성연도와 연륜에 저장된 다양한 환경정보를 이용하는 연륜연대학(dendrochronology) (Kaennel and Schweingruber, 1995)은 다양한 연구 분야에서 활용되고 있다. 이러한 연구가 가능한 이유는 계절변화가 뚜렷한 지역의 수목은 1년에 하나의 연륜을 만들고, 연륜 요소인 폭(Schwingruber, 1988), 해부학적 특성(예: 세포 크기, 내강 면적, 세포 벽 두께)(García-González and Eckstein, 2003; Seo *et al.*, 2012; Jeong *et al.*, 2017), 화학적 특성(예: 동위원소)(McCarroll and Loader, 2004)이 생육 당시의 특정 환경요소에 의해 결정되기 때문이다. 연륜의 여러 요소들 중에 연륜폭(ring width)은 측정이 용이할 뿐만 아니라 다양한 환경정보가 저장되어 있어 연륜연대학에서 가장 일반적으로 활용되는 요소이다.

국내에서 연륜폭을 이용한 기후조사 연구가 체계적으로 시작된 것은 1990년대 초부터이다(Choi *et al.*, 1992; Park, 1993). 이후 여러 연구를 통해 기후변화가 수목생장에 어떤 영향을 주는지가 밝혀졌다(Park and Seo, 1999; Koo *et al.*, 2000; Seo *et al.*, 2000). 이러한 연구결과들은 기후변화가 산림 내 재적생장에 어떤 영향을 주는지를 예측하는데 중요한 기초자료로 활용될 뿐만 아니라, 미래 기후변화를 예

측하는데 필요한 고기후 복원 연구에도 활용되었다(Park and Yadav, 1998; Seo and Park, 2002). 이 후 Jeong *et al.* (2017)은 참나무류의 도관면적연대기를 활용하여 연륜폭연대기에서 찾을 수 없는 새로운 기후정보를 찾아내기도 하였다. 이와 같이 국내 연륜연대학 분야에서 연륜폭과 연륜의 해부학적 특성인 세포 크기가 활용된 사례는 있으나, 산소동위원소를 이용한 연구사례는 아직까지 없다.

자연에서 산소는 중성자 수에 따라 3가지 안정 동위원소(^{16}O , ^{17}O , ^{18}O)로 존재한다. 이 중 ^{18}O 와 ^{16}O 의 비율은 자연과학에서 자주 사용되고 있다(McCarroll and Loader, 2004). 특히, 연륜의 셀룰로오스에서 측정되는 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 는 연륜이 형성된 각 연도의 강수량 또는 기온을 대표할 수 있는 프록시(proxy)임이 확인되었다(Rebetz *et al.*, 2003; Danis *et al.*, 2006; Kress *et al.*, 2010; Sano *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013; Altieri *et al.*, 2015).

본 연구는 국내 연륜연대학 분야에 산소동위원소 연대기 활용방법을 소개하고, 작성된 산소동위원소 연대기를 전통적인 연륜연대학적 방법으로 평가하여 활용가치를 확인하고자 수행하였다. 또한, 미래 기후변화 예측모델 개발에 필요한 고기후 요소들 중 어떠한 요소가 산소동위원소연대기로 복원 가능한지도 함께 조사하였다.

지리산국립공원 아고산대 주요 수종(주목, 잣나무, 구상나무, 신갈나무)에 대한 산소동위원소연대기 작성 및 기후와의 관계 분석

Table 1. Experimental trees used to establish tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ time series and their geographical coordinates

Tree species	ID	DBH* (cm)	No. of TR**	Latitude / Longitude / m a.s.l.
<i>Taxus</i>	TC1	57	148	35°20'20.88" / 127°43'37.15" / 1,650
<i>cuspidata</i>	TC2	84	222	35°20'23.51" / 127°43'33.67" / 1,615
	TC3	56	145	35°20'32.16" / 127°43'25.72" / 1,453
	TC4	110	142	35°20'35.64" / 127°43'20.70" / 1,340
	PK1	44	101	35°20'21.91" / 127°43'36.46" / 1,645
<i>Pinus</i>	PK2	45	89	35°20'21.91" / 127°43'36.46" / 1,645
	PK3	45	116	35°20'21.65" / 127°43'36.22" / 1,643
	PK4	42	123	35°20'21.27" / 127°43'34.29" / 1,621
<i>Abies</i>	AK1	43	109	35°20'21.34" / 127°43'36.61" / 1,645
	AK2	49	92	35°20'27.99" / 127°43'30.74" / 1,550
	AK3	50	111	35°20'34.40" / 127°43'21.86" / 1,370
	AK4	53	72	35°20'36.79" / 127°43'17.53" / 1,310
<i>Quercus</i>	QM1	-	146	35°17'44.94" / 127°32'12.66" / 1,394
	QM2	41	148	35°17'45.84" / 127°32'12.96" / 1,383
	QM3	68	189	35°17'46.44" / 127°32'13.14" / 1,373

* DBH: diameter at breast height, ** TR: tree ring, -: no data

2. 연구 방법

2.1. 시료정보 및 산소동위원소연대기 작성을 위한 시료 선발

시료 채취는 지리산국립공원 해발고 1,310~1,650 m 에 자생하는 주목(*Taxus cuspidata*: TC) 10본, 잣나무 (*Pinus koraiensis*: PK) 5본, 구상나무(*Abies koreana*: AK) 11본, 신갈나무(*Quercus mongolica*: QM) 24본 을 대상으로 실시하였다. 연륜분석을 위한 성장편 (increment core)은 직경 5.2 mm의 성장추를 이용하여 선발된 수목의 흉고높이에서 채취하였다. 연륜폭 측정을 위해 접착제를 이용하여 모든 성장편을 U 자형 홈이 있는 고정막대에 고정하였다. 고정 시 축방향가도관이 축방향으로 주행하도록 하였으며, 연륜경계가 잘 보이도록 벨트사포 #80을 시작으로 #120, #320, #600 순으로 연마하였다.

연륜폭은 실체현미경으로 연륜경계를 확인하면서 0.01 mm 단위(LINTAB, RINNTECH, Germany)로 측정하였다. 측정된 각 연륜에 정확한 생육연도를

부여하는 크로스데이팅(cross-dating)(Schweingruber, 1988; Jeong *et al.*, 2017)은 TSAPWin (RINNTECH, Germany)을 이용하여 실시하였다. 크로스데이팅 결과를 근거로 산소동위원소연대기를 작성하였으며, 산소동위원소연대기 작성을 위해 선발된 성장편 은 수종 당 4본(TC, PK, AK), 또는 3본(QM)이었다 (Table 1).

2.2. 산소동위원소연대기 작성

산소동위원소연대기는 식 1과 같이 각 연륜에 있는 셀룰로오스에서 측정되는 ^{18}O 와 ^{16}O 의 비율과, 표준물질(VSMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water)에서 측정되는 ^{18}O 와 ^{16}O 의 비율을 이용하여 천분율로 계산된 $\delta^{18}\text{O}$ 로 작성된다. 측정은 일본 교토에 위치한 인류자연과학연구원(Research Institute for Humanity and Nature)의 고온원소분석기(Thermal Conversion/Elemental Analyzer, Thermo Fisher Scientific)가 달려있는 질량분석기(Delta V Advantage, Thermo Fisher Scientific)로 실시하였다.

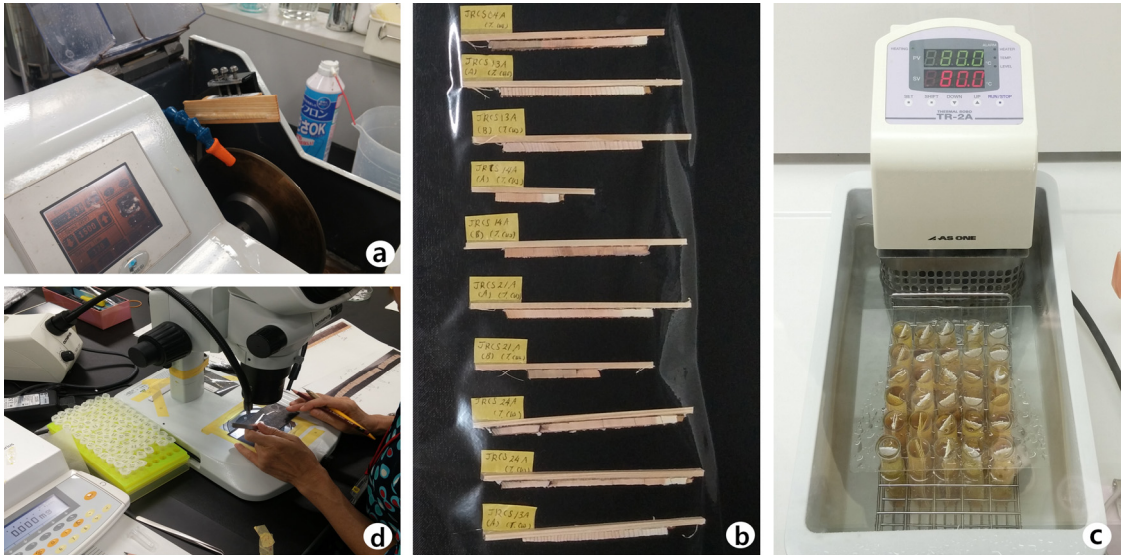


Fig. 1. Sample preparation to establish 50-year inter-annual time series of $\delta^{18}\text{O}$ in cellulose for experimental tree species, *Taxus cuspidata*, *Pinus koraiensis*, *Abies koreana*, *Quercus mongolica* (a: cutting an increment core using a low-speed diamond wheel asw (Mecatome T180), b: cross-sectional laths in the thickness of 1 mm, c: removing lignin and hemicellulose from the laths in acidified NaClO_2 and in 17 wt% NaOH solution, respectively, in a water bath adjusted to 70°C and 80°C , respectively, d: separating $120\sim 250\ \mu\text{g}$ α -cellulose from each tree ring under a binocular stereomicroscope).

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \dots\dots\dots (1)$$

R_{sample} : 연륜의 셀룰로오스에서 측정된 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$
 R_{standard} : VSMOW에서 측정된 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

생장편에서 리그닌과 헤미셀룰로오스를 제거하기 전에 다이아몬드 휠이 달려 있는 절삭기(Mecatome T180, PRESI, France)를 이용하여 두께 1 mm 생장 박편을 제작하였다(Fig. 1a, b). 다음으로 Jayme-Wise 방법에 따라(Loader *et al.*, 1997) 아염소산나트륨(NaClO_2)이 채워져 있는 시험관에 두께 1 mm 박편을 침지하여 리그닌을 제거하고(70°C 항온수조에서 1시간 단위로 아염소산나트륨을 교체하며 리그닌이 제거될 때까지 실시), 리그닌이 완전히 제거된 다음에는 수산화나트륨(NaOH 17%)이 채워져 있는 시험관에 침지하여 헤미셀룰로오스를 완전히 제거(80°C 항온수조에서 1시간 단위로 3회 반복)하였다(Fig.

1c). 마지막 단계로 생장편이 들어있는 시험관에 증류수를 채워 진공세척 2회를 실시하였다.

각 연륜의 셀룰로오스로부터 동위원소를 측정하기 위해 실체현미경 하에서 연륜의 경계를 확인하면서 $120\sim 250\ \mu\text{g}$ 가량의 소시험편을 메스로 분리하였다(Fig. 1d). 소시험편에 대한 측정은 최근 50연륜(1966~2015년)을 대상으로 실시하였다. 이상의 방법은 Kagawa *et al.* (2015)을 따랐다.

2.3. 산소연대기의 통계학적 성질

작성된 연대기의 활용 가능성을 평가하는 방법으로 연륜연대학(dendrochronology)에서는 평균민감도(MS: mean sensitivity), 평균상호상관(RBAR: mean series intercorrelations), 모수설명신호(EPS: expressed population signal) 등을 활용한다(Briffa and Jones, 1990; Liang and Eckstein, 2009). 신뢰성 높은 연륜 분석을 위해서는 대표연대기 작성에 활용된 수목들

지리산국립공원 아고산대 주요 수종(주목, 잣나무, 구상나무, 신갈나무)에 대한 산소동위원소연대기 작성 및 기후와의 관계 분석

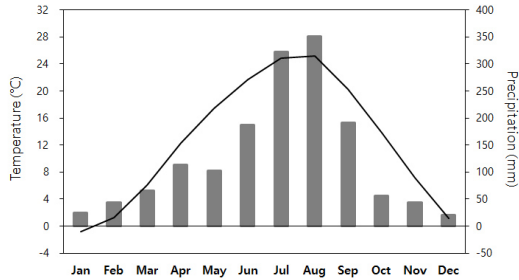


Fig. 2. Monthly mean temperature and precipitation between 1973 and 2015 from meteorological stations (Namwon-si and Sancheong-gun) close to the research area.

간 공통생육신호(common growth signal) 강도인 EPS 값이 0.85 이상일 것을 연륜연대학의 많은 연구에서 요구하고 있다(Briffa and Jones, 1990; Jeong *et al.*, 2017). 통계학적 분석은 ARSTAN 프로그램 (Cook, 1985)으로 실시하였다.

2.4. 기후자료

지리산 인근 기상관측소인 남원과 산청에서 관측된 자료를 이용하여 지역평균 자료를 만들었다. 지역평균자료를 사용할 경우에는 연구범위를 확대할 수 있기 때문에 연륜연대학에서 일반적으로 활용되는 방법이다(Seo *et al.*, 2000). 기후자료의 기간은 1973년 1월부터 2015년 12월까지로 총 43년이며, 분석에 활용된 기후요소는 월별 평균기온과 강수량이다(Fig. 2). 지난 43년간 평균기온은 12.5°C이었으며, 추운 달과 더운 달은 1월과 8월로 각각 -0.78°C와 25.18°C이었다. 동일 기간 연강수량은 1523.85 mm로 강수량이 가장 많은 달과 적은 달은 12월과 8월로 각각 20.73 mm와 351.49 mm이었다.

2.5. 산소동위원소연대기와 기후와의 관계 분석

각 연륜에서 측정된 $\delta^{18}\text{O}$ 와 기후요소(월별 평균기온과 강수량)와의 관계를 분석하기 위하여 반응함수 분석을 실시하였다. 반응함수 분석은 단순상관 분석

과는 달리 여러 독립변수들 상호간 존재하는 다중공선성(multicollinearity)을 제거하여 독립변수와 종속변수 상호간 보다 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있는 분석방법으로 DendroClim 2002 (Biondi and Waikul, 2004)를 이용하여 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산소동위원소연대기 작성

각 연륜의 셀룰로오스에서 측정된 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 값을 이용하여 50년(1966~2015년)간의 $\delta^{18}\text{O}$ 연대기를 작성하였다(Fig. 3). $\delta^{18}\text{O}$ 값이 가장 큰 수종은 잣나무(26.41%)이며, 다음으로 구상나무(25.81%), 주목(25.54%), 신갈나무(24.04%) 순이었다. 대부분의 연구에서 수종 간 $\delta^{18}\text{O}$ 의 차이는 수목의 잎과 뿌리 구조에 따른 생리·생화학적 차이에 따른 결과로 해석하고 있다(McCarroll and Loader, 2004; Li *et al.*, 2015). 이는 잎과 뿌리의 구조가 광합성에 필요한 물의 양과 물 분자의 ^{18}O 와 ^{16}O 의 비율을 결정하기 때문이다(MaCarroll and Loader, 2004). 또한, 수종과 수령에 따라서 연륜을 형성하는 기간에 차이가 존재(Park *et al.*, 2015; Seo *et al.*, 2017)함으로 형성층 활동 기간과 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 와의 관계를 밝히는 연구가 요구된다.

지난 50년간 구상나무와 신갈나무 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 각각 0.85%, 0.77% 상승하였으나, 잣나무는 0.58% 감소하였다. 주목은 구상나무와 신갈나무와 같이 상승하였으나, 그 양이 0.19%로 다른 수종에 비해 매우 미미한 것으로 조사되었다. 동위원소를 이용한 연륜연대학적 연구에서는 연륜폭을 이용하는 전통적인 연륜분석과는 달리 수령과 관련된 경향(age trend)을 고려할 필요가 없기(McCarroll and Loader, 2004) 때문에 Fig. 3의 추세선을 특정 기후요소(예: 강수량, 온도)의 변화로 해석하는 경우가 일반적이다. 하지만 스페인 피레네지역 소나무류(*Pinus uncinata*)의 장기간 산소동위원소연대기를 분석한 연구에 따르면(Esper *et al.*, 2010) 동위원소연대기에도 비기후적 요소인 생물학적 경향(biological trend)이 존재함이

Table 2. Expressed population signals (EPS) and mean correlation coefficients between tree ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies within the same tree species (RBAR)

	<i>T. cuspidata</i>	<i>P. koraiensis</i>	<i>A. koreana</i>	<i>Q. mongolica</i>
EPS	0.96	0.96	0.90	0.90
RBAR	0.86	0.84	0.70	0.75
(<i>p</i> : probability)	(<i>p</i> < 0.001)	(<i>p</i> < 0.001)	(<i>p</i> < 0.001)	(<i>p</i> < 0.001)

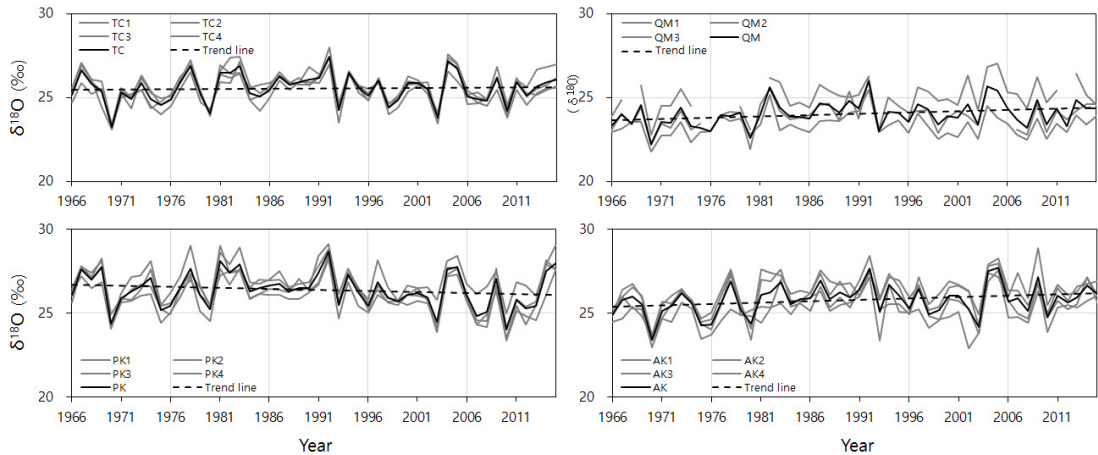


Fig. 3. 50-year inter-annual time series of $\delta^{18}\text{O}$ in cellulose for *Taxus cuspidata* (TC), *Quercus mongolica* (QM), *Pinus koraiensis* (PK), and *Abies koreana* (AK). (black bold line: the average $\delta^{18}\text{O}$ of four cores (gray lines), black dashed line: trend of 50-year inter-annual time series of $\delta^{18}\text{O}$).

확인되었다. 따라서 본 연구를 통해 작성된 산소동위원소연대기에 존재하는 장기간의 $\delta^{18}\text{O}$ 경향이 기후 영향인지, 생물학적 경향인지 결정하기 위해서는 보다 장기간의 산소동위원소연대기를 작성하여 분석해야 할 것이다.

3.2. 동일 수종 내 산소동위원소연대기 비교

연구대상 4 수종의 EPS 값은 연륜분석에서 요구하는 기준치(0.85) 이상을 나타냈다(Table 2). 연륜폭을 이용한 연륜분석에서 기준치 이상의 EPS를 달성하기 위해서는 약 10본 이상의 수목을 선별하여 조사하는 것이 일반적이지만, 본 연구결과에 따르면 산소동위원소연대기의 경우 4본 또는 3본을 조사하여도 연대기분석에 충분한 EPS 획득이 가능함이 확인되었다. 또한 많은 연구사례에서도 동일한 결과가 확인

(McCarroll and Loader, 2004; Sauer *et al.*, 2008; Sano *et al.*, 2013)되어 산소동위원소를 활용한 연륜연대학적 연구에서는 3본 이상의 공시목으로도 연구가 가능함을 알 수 있었다. 동일 수종 내 임목 간 상관분석 결과에서도 유의성 높은 결과($p < 0.001$)가 모든 수종에서 확인되어 이를 뒷받침하였다.

3.3. 수종 간 산소동위원소연대기 비교

산소동위원소연대기 상호간 상관분석결과 주목(TC)과 구상나무(AK) 간의 상관계수 값이 0.90으로 가장 높았으며, 잣나무(PK)와 신갈나무(QM) 간은 0.66으로 가장 낮았다(Table 3). 하지만 모든 결과 값이 통계적으로 유의성이 높게 나와($p < 0.001$), 산소동위원소연대기의 경우 동일 환경에서 자란 수목이라면 수종 구분 없이 연대기의 패턴이 유사함이 확

지리산국립공원 아고산대 주요 수종(주목, 잣나무, 구상나무, 신갈나무)에 대한 산소동위원소연대기 작성 및 기후와의 관계 분석

Table 3. Correlation coefficients between tree ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies of *Taxus cuspidata* (TC), *Pinus koraiensis* (PK), *Abies koreana* (AK), and *Quercus mongolica* (QM)

	TC	PK	AK	QM
TC	1.00***	0.84***	0.90***	0.78***
PK	0.84***	1.00***	0.78***	0.66***
AK	0.90***	0.78***	1.00***	0.80***
PK	0.78***	0.66***	0.80***	1.00***

***: $p < 0.001$

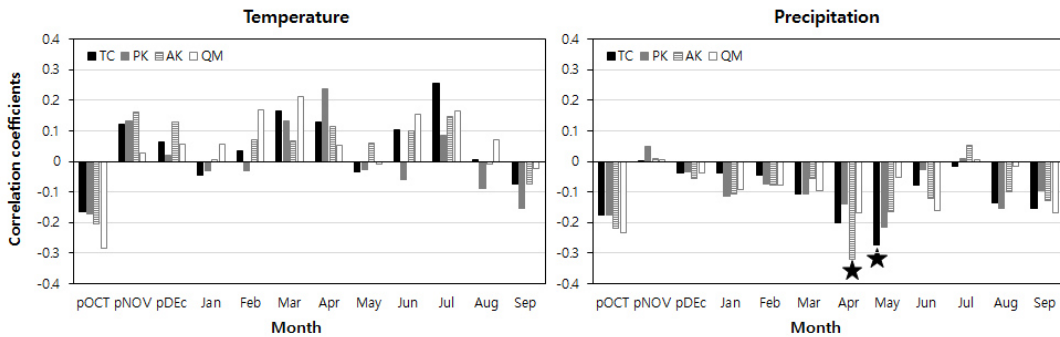


Fig. 4. Response functions between 50-year inter-annual time series of $\delta^{18}\text{O}$ in cellulose for *Taxus cuspidata* (TC), *Quercus mongolica* (QM), *Pinus koraiensis* (PK), and *Abies koreana* (AK) and monthly climate variables (mean temperature and total precipitation from October in the previous year to September in the current year).

인되었다. 해외 연구사례에서는 이미 확인된 것이나 (McCarroll and Loader, 2004; Li *et al.*, 2015), 국내에서는 처음으로 확인된 결과이다. 국내에서 목재시료의 연륜에 연대를 부여하는데 한계는 다양한 수종에 대한 장기간의 연륜폭연대기 부족이다. 연륜폭 중심으로 작성된 국내 연륜연대기에 대해 산소동위원소 측정방법을 활용한다면 이러한 한계를 극복할 수 있을 것이라 판단된다.

3.4. 산소동위원소연대기와 기후인자(강수량, 온도)와의 관계

반응함수 분석 결과 모든 수종의 산소동위원소연대기는 월평균온도와 유의성 있는 결과를 보이지 않았다(Fig. 4), 하지만 강수량의 경우 구상나무(AK)는 4월, 주목(TC)은 5월과 유의성 있는 음의 상관관계를 나타냈다. 전체적으로 이른 봄인 3월과 4월 기온과는 정적 상관관을 보였으며, 늦봄인 4월과 5월 강수량과

는 부의 상관관을 나타냈다. 각 연륜의 셀룰로오스에서 측정되는 $\delta^{18}\text{O}$ 는 광합성에 사용된 물 분자에 결합되어 있는 산소동위원소에 의해 결정된다(McCarroll and Loader, 2004). 온도 상승으로 잎의 기공에서 증산이 시작되면 가벼운 산소동위원소(^{16}O)가 결합되어 있는 물 분자부터 증발되어 앞에는 무거운 산소동위원소(^{18}O)가 결합되어 있는 물 분자가 상대적으로 많이 남게 된다. 그 결과로 식 1에 따라 $\delta^{18}\text{O}$ 가 큰 값을 갖게 된다. 반면, 비가 오거나 공중습도가 높은 날은 온도가 높거나 맑은 날에 비해 가벼운 산소동위원소(^{16}O)가 결합된 물 분자의 양이 많게 되어 $\delta^{18}\text{O}$ 가 작은 값을 갖게 된다. 본 연구 결과에 따르면 주목(TC)과 구상나무(AK) 셀룰로오스에 있는 $\delta^{18}\text{O}$ 는 온도보다 강수량의 영향이 더 큰 것으로 확인되었다. 특히, 주목(TC)의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 5월 강수량을 대표할 수 있는 프록시(proxy)이며, 구상나무(AK)의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 4월 강수량을 대표할 수 있는 프록시임을 확인하였다. 하지만, 잣나무(PK)와 신갈나무(QM) $\delta^{18}\text{O}$ 와 기

후요소 상호간에는 통계적으로 유의한 결과를 얻지 못했다. 이러한 결과는 분석에 사용된 기상관측자료가 연구지에서 비교적 멀리 떨어져 있어 연구지의 기후를 정확히 대표할 수 없기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

지리산 아고산대 주요 침엽수인 주목, 잣나무, 구상나무와 신갈나무를 대상으로 50년간의 산소동위원소연대기를 작성하였다. 그 결과, 산소동위원소연대기는 동일 수종 내 임목 간(Fig. 3)에는 물론 수종 간 비교에서도 통계적으로 유의한 일치도가 있는 것으로 확인되었다(Table 3). 본 결과로 연륜폭연대기(ring-width chronology) 중심의 국내 연륜연대학에 새로운 분석방법을 제시하게 되었다. 또한 연륜폭연대기의 경우 수종별 연대기가 요구되는데, 산소동위원소연대기는 수종 간 제한이 없어 기존의 연륜연대학의 한계를 극복할 수 있게 되었다.

연구 수종 중 주목의 산소동위원소연대기는 5월 강수량과 통계적으로 유의한 부의 상관이 있었으며, 구상나무 산소동위원소연대기는 4월 강수량과 통계적으로 유의한 부의 상관이 있는 것으로 확인되었다. 본 결과를 근거로 연구지역의 4월과 5월 강수량 복원이 주목과 구상나무 산소동위원소연대기로 가능하게 되었다. 두 수종에 대한 장기간의 산소동위원소연대기가 작성된다면 장기간의 고기후 복원을 통한 미래 기후예측에 크게 기여할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립공원관리공단 국립공원연구원 ‘기후변화 생태계 모니터링’과 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2060485)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

Altieri, S., Mereu, S., Cherubini, P., Castaldi, S., Sirignano, C., Lubritto, C., Battipaglia, G. 2015.

Tree-ring carbon and oxygen isotopes indicate different water use strategies in three Mediterranean shrubs at Capo Cassia (Sardinia, Italy). *Trees* 29: 1593-1603.

Biondi, F., Waikul, K. 2004. Dendroclim2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30: 303-311.

Briffa, K.R., Jones, P.D. 1990. Basic chronology statistics and assessment. In: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. eds. *Method of Dendrochronology: Applications in the Environmental Science*. Dordrecht: Kluwer p. 137-152.

Choi, J.N., Yu, K.B, Park, W.-K. 1992. Paleoclimate reconstruction for Chungbu mountainous region using tree-ring chronology. *The Korean Journal of Quaternary Research* 6(1): 21-32.

Cook, E.R. 1985. *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*. Ph.D. Dissertation. University of Arizona, Tucson, Arizona. pp.175.

Danis, P.A., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Guillemin, M.T., Daux, V., Naveau, Ph., von Grafenstein, U. 2006. Reconstruction of past precipitation $\delta^{18}\text{O}$ using tree-ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$: a calibration study near Lac d’Annecy, France. *Earth and Planetary Science Letters* 243: 439-448.

García-González, I., Eckstein, D. 2003. Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology* 23(7): 497-504.

Jeong, H.-M., Kim, Y.-J., Seo, J.-W. 2017. Relationships between vessel-lumen-area time series of *Quercus* spp. at Mt. Songni and corresponding climatic factors. *Journal of Korean Wood Science and Technology* 45(1): 72-84.

Kaennel, M., Schweingruber, F.H. 1995. *Multilingual Glossary of Dendrochronology*. Paul Haupt Berne pp. 90-98.

Kagawa, A., Sano, M., Nakatsuka, T., Ikeda, T.,

- Kubo, S. 2015. An optimized method for stable isotope analysis of tree rings by extracting cellulose directly from cross-sectional laths. *Chemical Geology* 393-394: 16-25.
- Koo, K.-A., Park, W.-K., Kong, W.-S. 2000. Growth of *Daphniphyllum macropodum* and climatic factors at Mt. Naejang, Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research* 14(1): 65-71.
- Kress, A., Saurer, M., Siegwolf, R.T.W., Frank, D.C., Esper, J., Bugmann, H. 2010. A 350 year drought reconstruction from Alpine tree ring stable isotopes. *Global Biogeochemical Cycles* 24:GB2011, doi:10.1029/2009GB003613.
- Li, Z., Nakatsuka, T., Sano, M. 2015. Tree-ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ variability in pine and oak and its potential to reconstruct precipitation and relative humidity in central Japan. *Geochemical Journal* 49: 125-137.
- Liang, E., Eckstein, D. 2009. Dendrochronological potential of the alpine shrub *Rhododendron nivale* on the south-eastern Tibet Plateau. *Annals of Botany* 104: 665-670.
- Loader, N.J., Robertson, I., Barker, A.C., Switsur, V.R., Waterhouse, J.S. 1997. An improved technique for the batch processing of small whole-wood samples to α -cellulose. *Chemical Geology* 136: 313-317.
- McCarroll, D., Loader, N.J. 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23(7-8): 771-801.
- Park, S.-Y., Eom, C.-D., Seo, J.-W. 2015. Seasonal change of cambium activity of pine trees at different growth sites. *Journal of Korean Wood Science and Technology* 43(4): 411-420.
- Park, W.-K. 1993. Increasing atmospheric carbon dioxide and growth trends of Korean subalpine conifers. *Journal of Korean Forest Science* 82(1): 17-25.
- Park, W.-K., Seo, J.-W. 1999. A dendroclimatic analysis on *Abies koreana* in Cheonwang-bong area of Mt. Chiri, Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research* 13(1): 25-33.
- Park, W.-K., Yadav, R.R. 1998. Reconstruction of May precipitation (A.D. 1731-1995) in west-central Korea from tree rings of Korean red pine. *Journal of Korean Meteorological Society* 34(3): 459-465.
- Rebetez, M., Saurer, M., Cherubini, P. 2003. To what extent can oxygen isotopes in tree rings and precipitation be used to reconstruct past atmospheric temperature? A case study. *Climatic Change* 61: 237-248.
- Sano, M., Tshering, P., Komori, J., Fujita, K., Xu, C., Nakatsuka, T. 2013. May-September precipitation in the Bhutan Himalaya since 1743 as reconstructed from tree ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 8399-8410.
- Sauer, M., Cherubini, P., Reynolde-Henne, C.E., Treyde, K.S., Anderson, W.T., Siegwolf, R.T.W. 2008. An investigation of the common signal in tree ring stable isotope chronologies at temperate sites. *Journal of Geophysical Research* 113:G04035, doi:10.1029/2008JG000689.
- Schweingruber, F.H. 1988. *Tree Rings - Basics and Applications of Dendrochronology*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, Boston pp. 276.
- Seo, J.-W., Kim, J., Park, W.-K. 2000. Analysis of heterogeneous tree-ring growths of *Pinus densiflora* with various topographical characteristics in Mt. Worak using GIS. *The Korean Journal of Ecology* 23(1): 25-32.
- Seo, J.-W., Eckstein, D., Jalkanen, R. 2012. Screening various variables of cellular anatomy of Scots pine in subarctic Finland for climatic signals. *IAWA Journal* 33(4): 417-429.
- Seo, J.-W., Choi, E.-B., Ju, J.-D., Shin, C.-S. 2017. The association of intra-annual cambial activities

- of *Pinus koraiensis* and *Chamaecyparis pisifera* planted in Mt. Worak with climatic factors. Journal of Korean Wood Science and Technology 45(1): 43-52.
- Seo, J.-W., Park, W.-K. 2002. Reconstruction of May precipitation (317 years: A.D. 1682-1998) using tree rings of *Pinus densiflora* S. et Z. in western Sorak Mt. The Korean Journal of Quaternary Research 16(1): 29-36.
- Xu, C, Sano, M., Nakatsuka, T. 2013. Tree-ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ of *Fokienia hodginsii* in northern Laos: a promising proxy to reconstruct ENSO?. Journal of Geophysical Research 116:D24109, doi:10.1029/2011JD016694.
- Xu, C., Sano, M., Nakatsuka, T. 2013. A 400-year record of hydroclimate variability and local ENSO history in northern Southeast Asia inferred from tree-ring $\delta^{18}\text{O}$. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 386: 588-598.