

한라산 영실지역 구상나무 고사연도와 시계열적 생육쇠퇴도 조사*

서정욱¹⁾ · 김요정^{1,2)} · 최은비³⁾ · 박준희³⁾ · 김재훈⁴⁾

¹⁾ 충북대학교 목재 · 종이과학과 · ²⁾ 충북대학교 나이트연구소

³⁾ 충북대학교 임산공학과 · ⁴⁾ 국립산림과학원 난대 · 아열대산림연구소

Investigation of Death Years and Inter-annual Growth Reduction of Korean Firs (*Abies Koreana*) at Yeongsil in Mt. Halla *

Seo, Jeong-Wook¹⁾ · Kim, Yo-Jung^{1,2)} · Choi, En-Bi³⁾ · Park, Jun-Hui³⁾ · Kim, Jae-Hoon⁴⁾

¹⁾ Department of Wood & Paper Science, Chungbuk National University,

²⁾ Tree-Ring Research Center, Chungbuk National University,

³⁾ Department of Forest Products, Graduate School, Chungbuk National University,

⁴⁾ Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science.

ABSTRACT

With a view to developing a database of death years of Korean firs (*Abies koreana*) at Yeongsil in Mt. Halla and investigating their abrupt inter-annual growth reduction tree-ring analysis was employed. To this end, 10 living trees (YSL) were selected to establish a master chronology and 20 dead trees were used to date their dead years. To investigate the difference in death years by death types, 10 trees, which remained standing (YSSD) out of the 20 dead trees were selected. The rest 10 dead trees were already fallen (YSFD). Two increment cores per tree at breast height were extracted in contour direction using an increment borer. A 106-year master chronology (1911-2016) was successfully established from the 10 YSLs. Through cross-dating between individual YSSD time series and the master chronology, it was verified that 1 YSSD was dead in summer 1978, 1 YSSD between autumn 1999 and spring 2000, 2 YSSDs in summer 2007, 1 YSSD in summer 2010, 1 YSSD in summer 2012, and 1 YSSD in summer 2013. The youngest tree rings of 2 YSSDs having no bark were in 1977 and 2002. For the YSFDs, it was verified that 1 YSFD was dead between autumn 1997

* 본 연구는 산림청 국립산림과학원 과제(FE0100-2017-04)의 지원을 받아 수행되었음.

First author : Seo, Jeong-Wook, Department of Wood & Paper Science, Chungbuk National University,

Tel : +82-43-261-2543, E-mail : jwseo@chungbuk.ac.kr

Corresponding author : Seo, Jeong-Wook, Department of Wood & Paper Science, Chungbuk National University,

Tel : +82-43-261-2543, E-mail : jwseo@chungbuk.ac.kr

Received : 8 January, 2019. **Revised** : 7 May, 2019. **Accepted** : 30 April, 2019.

and spring 1998, 1 YSFD between autumn 2001 and spring 2002, 2 YSFDs between autumn 2009 and spring 2010, 1 YSFD in summer 2010, and 2 YSFDs between autumn 2012 and spring 2013, while the youngest tree rings of 2 YSFDs having no bark were in 1989 and 2004. To note, the death years of two trees, one from each death type (YSSD and YSFD), could not be verified due to poor cross-dating with the master chronology. The inter-annual growth reductions of YSSD and YSFD occurred more frequently and intensively than YSL. Typically, the YSFD showed the most frequent and intensive inter-annual growth reduction. On comparing the inter-annual growth reductions with the corresponding records of typhoons however we could not find any reliable relationship. Finally, from prior reports and results of the current study it can be concluded that the death and abrupt growth reduction of Korean fir at Yeongsil in Mt. Halla are not caused by only a certain environmental factor but various factors.

Key Words : *Korean fir*, *Mt. Halla*, *Death type*, *Death year*, *Dendrochronology*

I. 서 론

구상나무(*Abies koreana*)는 우리나라에서만 생육하는 특산종으로 지리산을 포함하여 한라산, 덕유산, 가야산, 백운산, 영축산, 금원산, 속리산에 분포하는 것이 확인되었다(Korea National Arboretum, 2014). 한라산에서 구상나무의 수직적 분포는 1,000~1,950 m a.s.l.이며, 지리산과 더불어 구상나무 군락이 존재하는 곳이다(Kim et al., 2006). 하지만 지속적인 기후변화로 인해 이곳의 구상나무의 생육이 쇠퇴 또는 고사하고 있는 것으로 보고되고 있다(Kang, 1984; Kim et al., 1991; Kim, 1994; Park and Seo, 1999; Koo et al., 2001; Kim and Lee, 2013; Kim et al., 2017). Kim과 Lee(2013)에 따르면 기후변화로 인해 제주도 구상나무 분포는 1988년 이후로 15년간 34%가 감소하였으며, 지리산에서는 1981년 이후로 27년간 18%가 감소하였다.

구상나무 보전 및 복원을 위해 본 연구가 수행된 구상나무 임분 인근에 위치한 구상나무 식재지(E126°30'08.9" N33°21'33.0", 1,630 m a.s.l.)에서 조사된 토양조사 결과에 따르면 토양의 산성화가 의심되고 있으며, 고상률이 낮아

보수력은 나쁘고, 공극률은 높아 토양침식에 대한 저항성이 낮은 것으로 조사되었다(Kim et al., 2018). 이와 같은 불량한 토양 조건으로 강풍에 따른 뿌리 흔들림과 집중 강우에 따른 토양 유실 피해가 영실 지역 구상나무 생육 쇠퇴에 큰 영향을 주었을 것이라는 연구도 발표되었다(Song et al., 2016).

아고산대 구상나무의 생육 쇠퇴 또는 고사의 심각성을 밝히기 위한 연구들 중에 연륜분석을 기반으로 한 결과에 따르면 태풍, 겨울철 기온 상승, 봄철 가뭄 등(Kim, 1994; Park and Seo, 1999; Koo et al., 2001)이 주요 원인으로 제시되고 있다. 구상나무의 연륜폭으로 작성된 시계열 그래프(이하 연륜연대기)와 다양한 환경인자 상호간 관계를 통계적으로 분석하면서 밝혀진 결과이다. 이렇게 밝혀진 여러 요인들 중에서 봄철 가뭄에 대한 영향은 모든 연구에서 제시되었다. 이러한 이유로 강수량이 증가할 것이라는 시나리오를 기초로 구상나무 분포지 변화를 예측한 결과 구상나무의 분포지가 확장되기도 하였다(Koo et al., 2016). 하지만 다양한 고사원인들 중 어떠한 요인이 구상나무 고사에 얼마나 많은 영향을 주었는지에 대한 체계적인 조사 및

밝혀진 결과를 이용한 서식이 가능한 지역을 찾는 체계적 연구는 아직까지 부족하다(Kim et al., 2015).

본 연구는 한라산 영실지역에서 고사한 구상나무 연륜을 이용하여 고사한 연도와 시계열적 생육쇠퇴도를 밝혀 향후 한라산 내 다양한 지역에서 수행될 구상나무 고사원인 분석에 필요한 기초자료를 구축하고자 실시되었다.

II. 연구범위 및 방법

1. 연구지 및 시료채취

한라산 동사면의 해발고 1,600 m 이상에 위치한 영실지역에서 시료채취를 실시하였다. 지리적 위치는 북위 33°21′ 33.1″~33°21′ 34.5″, 동경 126°30′ 07.8″~126°30′ 09.8″ 이다(Figure 1, Table 1). 제주시와 서귀포시에서 측정된 기상자료에 따르면 지난 57년간(1961년~2017년) 제주 지역 연평균기온은 16.0°C이며, 평균 연강수량은 1,657 mm이었다.

연륜 분석을 위해 구상나무 생육목 10본과 고사목 20본을 선별하였다(Figure 2, Table 1). 고사목 20본의 경우 고사형태에 따른 고사연도 차이를 조사하기 위하여 서있는 고사목(SD: standing dead trees)과 전도되어 있는 고사목(FD: fallen dead trees)으로 구분하여 선별하였다. 또한 수피 유·무에 따른 고사연도 차이를

조사하기 위해 SD 고사목과 FD 고사목에서 수피가 없는 고사목을 각각 4본과 2본을 선별하였다. 성장편(increment cores)은 성장추(increment borer)를 이용하여 채취하였으며, 등고선 방향으로 실시하였다. 구상나무와 같은 침엽수가 경사지에서 생육하면 경사지 아래 방향으로 압축이상재(compression wood)를 형성한다(Schweingruber 1988). 압축이상재는 목재해부학적인 구조가 다를 뿐만 아니라 물리적, 화학적 성질도 정상재와 다르다(Park et al., 2006). 이상재를 피하여 연륜을 분석하기 위해 등고선 방향으로 연륜채취를 하는 것이 연륜연대학에서 일반적으로 적용되고 있다(Cook and Kairiukstis, 1990). FD 고사목의 경우 쓰러진 방향과 경사방향을 고려하여 가능한 압축이상재를 피해 성장편 채취를 실시하였다. 생육목과 SD 고사목은 가슴높이(1.2~1.4m)에서 성장편 채취를 실시하였으며, FD 고사목은 뿌리와 줄기 경계면을 기준으로 약 1.2~1.4m 윗부분에서 시료채취를 실시하였다.

2. 시료 준비 및 연륜폭 측정

모든 성장편을 U자형 홈이 있는 막대에 실리곤을 이용하여 고정하였다. 성장편 고정 시 가도관 세포가 상하로 주행하도록 하였다. 다음으로 연륜경계가 잘 보이도록 하기 위해서 성장편의 횡단면(cross section)을 성장편용 절삭기로

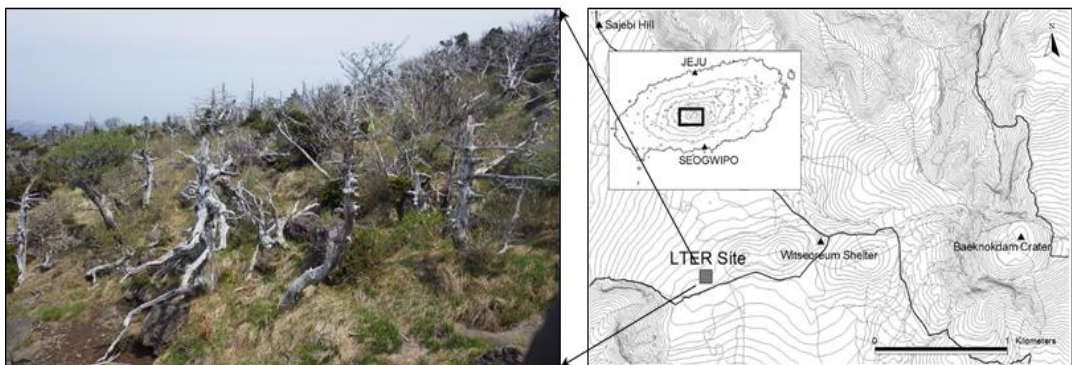


Figure 1. Sampling site (LTER: long-term ecological research) in Yeongsil area of Mt. Halla.

Table 1. Description of study trees and the number of samples

Living trees						
ID	DBH (cm)	Pith	Bark	Longitude	Latitude	Elevation (m a.s.l.)
YSL01	21.0	nP	B	126°30'09.7''	33°21'33.7''	1,617
YSL02	26.0	nP	B	126°30'09.1''	33°21'34.0''	1,611
YSL03	23.0	nP	B	126°30'09.1''	33°21'33.1''	1,611
YSL04	22.0	-	B	126°30'09.0''	33°21'34.2''	1,608
YSL05	21.0	-	B	126°30'08.9''	33°21'34.3''	1,608
YSL06	25.0	nP	B	126°30'08.2''	33°21'34.5''	1,602
YSL07	18.0	nP	B	126°30'08.2''	33°21'34.3''	1,611
YSL08	22.0	-	B	126°30'08.3''	33°21'34.3''	1,611
YSL09	23.0	P	B	126°30'08.3''	33°21'34.4''	1,610
YSL10	26.0	nP	B	126°30'08.3''	33°21'34.5''	1,609
Standing dead trees						
ID	DBH (cm)	Pith	Bark	Longitude	Latitude	Elevation (m a.s.l.)
YSSD01	17.0	-	B	126°30'09.1''	33°21'33.4''	1,608
YSSD02	22.0	-	B	126°30'09.3''	33°21'33.5''	1,609
YSSD03	22.5	nP	B	126°30'09.6''	33°21'33.7''	1,605
YSSD04	21.5	P	B	126°30'09.6''	33°21'33.7''	1,607
YSSD05	23.0	nP	B	126°30'09.7''	33°21'33.5''	1,613
YSSD06	24.5	-	-	126°30'09.2''	33°21'33.2''	1,616
YSSD07	22.5	P	-	126°30'09.5''	33°21'33.4''	1,615
YSSD08	21.0	-	-	126°30'09.5''	33°21'33.4''	1,617
YSSD09	16.0	P	-	126°30'09.5''	33°21'33.5''	1,615
YSSD10	21.5	-	B	126°30'08.2''	33°21'34.2''	1,604
Fallen dead trees						
ID	DBH (cm)	Pith	Bark	Longitude	Latitude	Elevation (m a.s.l.)
YSFD01	20.0	nP	B	126°30'09.8''	33°21'33.6''	1,613
YSFD02	22.5	P	B	126°30'09.8''	33°21'33.6''	1,613
YSFD03	21.0	P	B	126°30'09.0''	33°21'34.1''	1,609
YSFD04	20.5	-	B	126°30'09.0''	33°21'34.1''	1,609
YSFD05	25.5	-	B	126°30'08.3''	33°21'34.0''	1,611
YSFD06	19.0	-	-	126°30'09.3''	33°21'33.7''	1,612
YSFD07	22.5	-	-	126°30'08.9''	33°21'34.1''	1,612
YSFD08	22.0	-	B	126°30'08.3''	33°21'34.0''	1,614
YSFD09	25.5	-	B	126°30'08.3''	33°21'34.0''	1,610
YSFD10	20.5	nP	B	126°30'07.8''	33°21'33.8''	1,623

DBH: diameter at breast height / nP: near pith / B: with bark

절삭하였다(Gärtner and Nievergelt, 2010). 연륜 폭은 LINTAB(Rinntech, Germany) 장비를 이용하여 0.01 mm단위까지 측정하였으며, 인접한 연륜들의 단축방향으로 실시하였다(Figure 2). 정확한 측정을 위해 실체현미경으로 연륜경계를 확인하면서 수행하였다.

3. 크로스데이팅 (cross-dating)

크로스데이팅은 모든 연륜에 정확한 생육연도를 부여하는 방법이다. 시계열적 연륜폭 그래프(이하 연륜연대기)는 제한요소의 법칙(Speer, 2010)에 따라서 시대별로 독특한 패턴을 갖게 된다. 동일한 생육환경에서 자란 동일 수종은

시대별로 나타나는 독특한 패턴을 공유하기 때문에 연륜연대기 상호간 일치도를 비교함으로써 위연륜(false ring), 실연륜(missing ring), 불연속륜(discontinues ring) 등을 찾아내고, 각 연륜에 정확한 생육연도를 부여할 수 있게 된다 (Park and Seo, 2000). 연륜연대학에서 활용하는 대표적인 크로스데이팅 방법은 연륜연대기 상호간 일치도를 계산하는 통계방법과 연륜연대기의 일치도를 육안으로 확인하는 그래프방법이 있다(Schweingruber, 1988). 본 연구에서는 통계방법으로 1차 크로스데이팅을 실시한 후, 그래프방법으로 최종 확인하는 과정으로 크로스데이팅을 수행하였다. 통계방법을 수행하기 위해 연륜연대학에서 활용되고 있는 t-value(식 1)와 G value(식 2)를 이용하였다. T-value는 연륜연대기 상호간 상관계수 값을 기초로 개발된 수식이며, G value는 두 연륜연대기 상호간 일치도를 기초로 개발된 수식이다(Ecsktein and Bauch, 1969; Baillie and Pilcher, 1973). 연륜연대학에서 100년 이상의 기간을 크로스데이팅하여 t-value가 3.5 이상이고, G value가 65% 이상이면 통계적으로 유의한 수준에서 크로스데이팅이 성공하였다고 판정하는 것이 일반적이다 (Kim, 2003). T-value와 G value를 계산하기 위하여 TSAPWin 프로그램(Rinntech, Germany)이 활용되었다.

$$r = \frac{\sum(S_i - S) \times (R_i - R)}{\sqrt{\sum(S_i - S)^2 \times (R_i - R)^2}} \rightarrow$$

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

S_i = 표본 연륜연대기의 i 번째 연륜폭
 S = 표본 연륜연대기의 평균 연륜폭
 R_i = 상대 연륜연대기의 i 번째 연륜폭
 R = 상대 연륜연대기의 평균 연륜폭
 n = 표본 연륜연대기와 상대 연륜연대기에서 중첩되는 연륜 수

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

----- (2)

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

절대연도가 부여된 대표연륜연대기는 크로스데이팅에 성공한 생육목 연륜연대기들의 평균 값으로 작성하였다.

4. 수령분석

수목의 중심을 벗어나 채취된 성장편의 경우, 보다 정확한 수령분석을 위해 수목중심거리추정표를 활용하여 성장추에서 수(P: pith)까지의 거리를 추정하였다. Figure 2A와 같이 성장편의

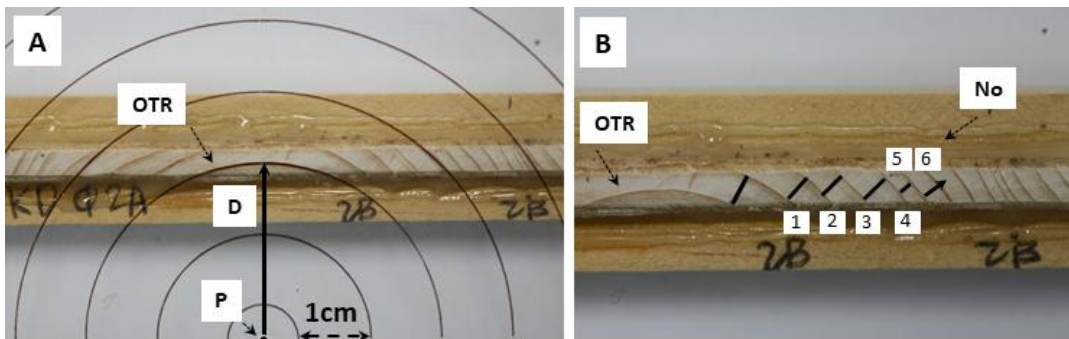


Figure 2. A: Estimation of distance (D) from the oldest tree ring (OTR) to the pith (P) in an increment core, B: Number (No.) of tree rings: the sum of their ring widths is just more than the estimated distance (D).

최내 연륜경계(OTR)에서 수까지의 거리를 추정 한 후(D in Figure 2A), Figure 2B와 같이 OTR에서 수피방향으로 연륜폭의 누적치가 D 이상 값이 나오는 연륜 수를 추정하였다. 추정된 연륜 수를 추가하여 수령을 보정하였다. Figure 2B에서는 성장편 중심에서 수피 방향으로 여섯 개의 연륜폭 누적치가 Figure 2A에서 추정한 D 이상 값을 나타냈다. 연륜폭은 수에서 수피 방향으로 갈수록 좁아지기는 경향이 있기 때문(Schweingruber, 1988)에 수에 가까운 연륜폭을 이용하여 수령을 보정하였다.

5. 고사연도 분석

고사연도 분석은 크로스데이팅 방법을 기초로 실시되었다. 각각의 고사목 연륜연대기를 대표연륜연대기와 상호 비교하여 일치도가 확인 되는 구간을 찾아서 고사목 연륜연대기에 절대 연도를 부여하는 방법이다.

고사한 계절을 판정하기 위해 최외곽 연륜의 목재세포를 관찰하였다. 최외곽에 조재(early wood)만이 관찰되면 고사한 계절을 여름으로 판정하였으며, 만재(latewood) 일부만이 관찰되면 여름~가을, 완전한 연륜이 관찰되면 당년 가을~다음해 봄으로 판정하였다.

6. 시계열적 생육쇠퇴도 조사

생육쇠퇴도는 연륜폭이 전년도 대비 40% 이상 감소된 후에 3년 이상 지속이 되면 수목생장이 쇠퇴한 것으로 판정하고 시계열적 그래프로 작성한 것이다(Schweingruber, 1988; Seo and Park, 2011). 이와 같은 형태의 생육쇠퇴는 기후 영향보다는 물리적 이벤트의 영향이 큰 것으로 보고 있다. 생육쇠퇴도는 연륜폭 감소 강도에 따라서 3등급으로 구분하였다. 연륜폭 감소 등급은 Schweingruber(1988)가 제시한 기준에 따라 40~55%이면 미량, 56~70%이면 중간, 71% 이상이면 극심으로 구분하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 크로스데이팅 및 대표연륜연대기 작성

영실지역 생육목 연륜연대기들을 이용하여 106년(1911~2016년) 간의 대표연륜연대기(master chronology)를 작성하였다. 모든 생육목 연륜연대기들이 성공적으로 크로스데이팅이 되어 대표연륜연대기 작성에 모두 활용되었다(Figure 3). 통계 방법을 이용한 크로스데이팅 성공 여부를 확인하기 위하여 대표연륜연대기와 생육목 연륜연대기 상호간 t-value와 G value를 계산하였다(Table 2). T-value 중 최저치는 2.5(YSL05)이었으며, 최고치

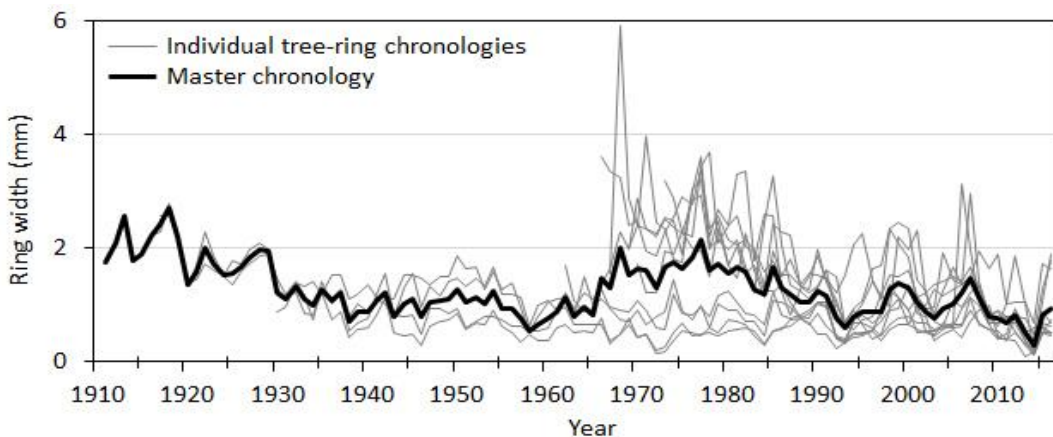


Figure 3. Master chronology and all individual tree-ring time series used to establish the master chronology.

Table 2. T- and G values between individual time series and the master chronology

	YSL 01	YSL 02	YSL 03	YSL 04	YSL 05	YSL 06	YSL 07	YSL 08	YSL 09	YSL 10	Ave. (Std.)
T-value	4.2	5.2	6.5	7.0	2.5	5.2	6.5	4.7	8.9	5.5	5.6 (1.7)
G value (%)	66	74	75	69	64	69	69	73	70	67	69.6 (3.5)

Ave.: average, Std.: standard deviation

Table 3. Estimated tree ages of living trees (L), standing dead trees (SD), and fallen dead trees (FD)

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	Ave. (Std.)
YSL	53	48	55	92	54	112	60	55	87	112	72.8 (25.4)
YSSD	58	73	75	40	55	—	49	62	38	56	56.2 (12.8)
YSFD	98	61	58	—	63	56	55	62	48	62	62.6 (14.1)

-: not cross-dated

는 8.9(YSL09)로 확인되었다. YSL05를 제외한 모든 연륜연대기들은 3.5 이상을 나타냈으며, 평균 t-value는 5.6이었다. T-value에서와 같이 가장 낮은 G value를 나타낸 연륜연대기는 YSL05로 64%였으며, YSL05를 제외한 모든 연륜연대기들은 65% 이상을 나타내었다. T-value와 G value 모두에서 최저치를 나타낸 YSL05 연륜연대기를 대표연륜연대기와 상호 비교하여 육안으로 관찰한 결과에서는 유의성 있는 일치도가 확인되어 크로스데이팅이 된 것으로 판정하였다. 연륜연대학에서 크로스데이팅 여부 확인은 t-value와 G value와 같은 통계치를 참고로, 연륜연대기 상호간 일치도를 육안으로 확인하여 판정하는 것이 일반적인 방법이다(Schweingruber, 1988; Jeong et al., 2017).

2. 수령 및 고사 연도 분석

수목중심거리추정표를 활용한 수령분석 결과 수령이 가장 높은 구상나무는 L06과 L10으로 112년이었으며, 평균 수령이 가장 높은 그룹은 생육목으로 72.8년이였다. SD와 FD의 평균 수령은 각각 56.2년과 62.6년이였다. L의 표준편차가 큰

이유는 수령이 높은 L06과 L10을 제외한 다른 구상나무 생육목의 수령이 낮기 때문이었다. L06과 L10을 제외한 8본의 구상나무 평균 수령은 63.0년으로 72.8년과는 큰 차이를 보였다. 크로스데이팅에 성공하지 못한 시료(YSSD06, YSFD04)에는 각 연륜에 정확한 생육년도를 부여할 수 없기 때문에 수령분석에서 제외되었다.

고사 연도를 분석을 위해 먼저 T-value와 G value를 근거로 고사목 연륜연대기에 연도 부여를 실시하였다. 하지만 최종 확인은 고사목 연륜연대기와 대표연륜연대기와 일치도를 육안으로 비교하여 결정하였다. T-value와 G value를 확인한 결과(Table 4) YSSD 중 최저 t-value와 G value를 나타낸 연륜연대기는 YSSD08로 각각 3.1과 61%이었다. 반면, 최고 t-value와 G value는 YSSD03(8.9)과 YSSD09(78%)로 확인되었다. YSSD08을 제외한 대부분의 YSSD 연륜연대기는 t-value 3.5 또는 G value 65% 이상을 나타냈다. YSFD 중 최저 t-value는 1.8(YSFD02), 최저 G value는 55%(YSFD04)였으나, YSFD04를 제외한 대부분의 연륜연대기들

Table 4. T- and G values between individual YSSD & YSFD time series and the master chronology

Standing dead trees (SD)			Fallen dead trees (FD)		
ID	T-value	G value (%)	ID	T-value	G value (%)
YSSD01	4.2	77	YSFD01	8.4	74
YSSD02	6.3	76	YSFD02	1.8	67
YSSD03	8.9	74	YSFD03	6.5	72
YSSD04	3.2	72	YSFD04	2.0	55
YSSD05	5.7	70	YSFD05	5.8	75
YSSD06	3.3	65	YSFD06	6.8	76
YSSD07	4.8	71	YSFD07	5.3	73
YSSD08	3.1	61	YSFD08	4.7	75
YSSD09	4.4	78	YSFD09	5.7	79
YSSD10	5.1	75	YSFD10	5.5	77

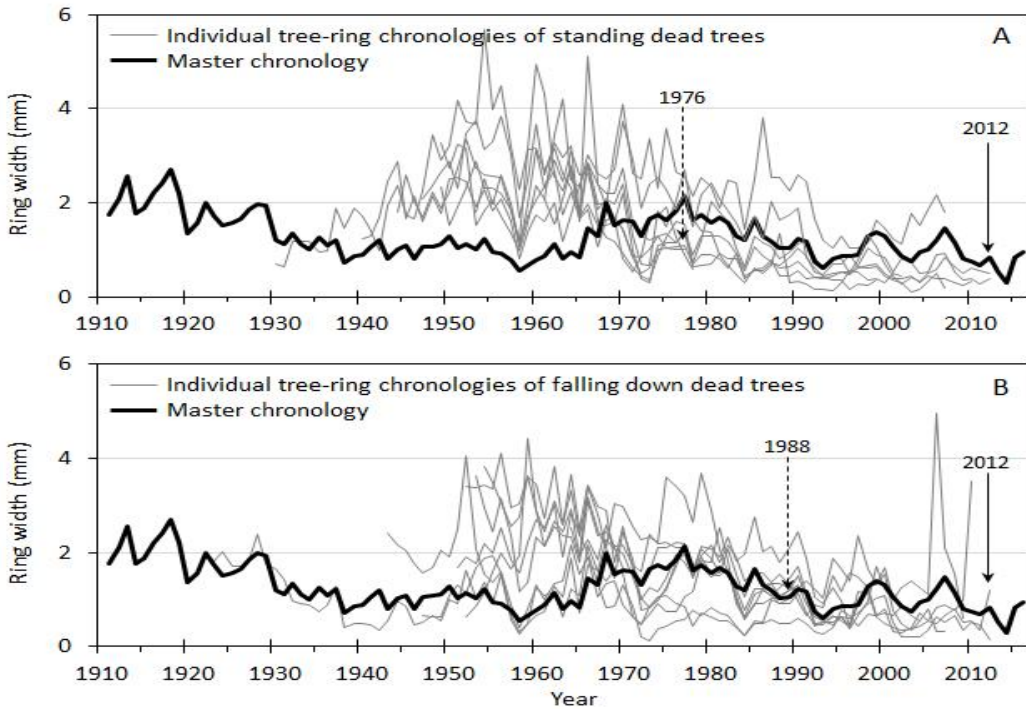


Figure 4. Comparison of individual tree-ring time series of (A) standing dead trees and (B) fallen dead trees which are successfully cross-dated with the master chronology. The youngest tree rings in each tree, which have only earlywood (EW), were not measured (\downarrow : the year of the earliest dead tree \downarrow : the year of the latest dead tree).

은 YSSD에서와 같이 t-value 3.5 또는 G value 65% 이상인 것으로 확인되었다.

통계방법에서 제시된 연도분석 결과를 확인하기 위하여 각 연륜연대기들과 대표연륜연대

기를 비교하였다. 크로스데이팅의 최종확인 은 연륜연대기 상호간 일치도를 육안으로 검토하는 것을 원칙으로 하고 있다(Jeong et al., 2017). 그 결과, YSSD08이 통계방법을 이용한 일치도

Table 5. The outmost tree-ring information for dead trees dated with the master chronology

Standing dead trees (YSSD)				Fallen dead trees (YSFD)			
ID	Bark	The outmost tree ring		ID	Bark	the outmost tree ring	
		wood cell	Year			wood cell	date
YSSD01	B	EW	2007	YSFD01	B	LW	2012
YSSD02	B	EW	2010	YSFD02	B	LW	2009
YSSD03	B	EW	2012	YSFD03	B	LW	2001
YSSD04	B	EW	2007	YSFD04	B	-	not cross-dated
YSSD05	B	LW	1999	YSFD05	B	EW	2010
YSSD06	-	-	not cross-dated	YSFD06	-	EW	1989
YSSD07	-	LW	1978	YSFD07	-	LW	2004
YSSD08	-	EW	2002	YSFD08	B	LW	2012
YSSD09	-	EW	1977	YSFD09	B	LW	1997
YSSD10	B	EW	2013	YSFD10	B	LW	2009

조사에서 낮은 t-value와 G value를 나타냈으나, 연륜연대기 상호간 비교에서는 유의한 수준의 일치도가 확인되어 고사 연도 분석에 성공하였다(Table 4). 반면, YSSD06과 YSFD04는 통계적으로 유의한 수준에 근접한 결과를 보였으나 대표연륜연대기와의 일치도가 낮아 고사연도 분석 실패로 최종결정을 하였다. Figure 4는 크로스데이팅에 성공한 YSSD 9본(A) 및 YSFD 9본(B)을 대표연륜연대기와 비교한 그래프이다.

크로스데이팅은 동일한 생육환경에서 자라는 동일 수종은 제한요소의 범칙(Speer, 2010)에 따라서 유사한 생육패턴을 갖는다는 원칙으로 가능하다. 하지만 동일한 산림 내에서 각 수목의 생육은 동일하지 않은 토양, 경사, 주위 임목과의 경쟁 등과 같은 조건하에서 이뤄지기 때문에 생육패턴에 차이가 존재한다(Schweingruber, 1998). 또한, 연륜연대기가 짧은 경우에는 크로스데이팅 가능한 기간이 충분하지 않기 때문에 크로스데이팅 성공률이 떨어지게 된다. 이러한 이유로 유럽과 미국에서 연대측정을 위한 연륜연대 분석에서 크로스데이팅 성공률이 2/3를 넘는 경우는 드문 것으로 알려져 있다(Schweingruber, 1988).

고사한 계절을 확인하기 위해 최외곽 연륜에 존재하는 세포를 실체현미경을 이용하여 조사하

였다. YSSD 고사연도 분석에 성공한 9본 중 7본의 최외곽 연륜에 조재만이 형성된 것으로 확인되었으며, YSFD 2본만이 최외곽 연륜에 조재만을 형성한 것으로 확인되었다. 연륜폭 측정은 연륜이 완전히 형성된 경우에만 실시되어(Figure 4), 최외곽 연륜에 조재가 관찰되면 고사한 시기를 다음해 여름으로 판정하였다(Table 5). 수피가 있는 고사목 중 최외곽 연륜에 조재만 확인된 고사목의 고사계절은 여름, 완전한 만재가 확인된 고사목의 고사계절은 당년 가을부터 다음해 봄으로 판정하였다. 수피가 없는 고사목(YSSD06, 07, 08, 09와 YSFD06, 07)은 풍화 및 기타 물리적 영향으로 얼마나 많은 연륜이 탈락되었는지 정확히 확인할 수는 없으나, 고사목의 수간 형태를 전체적으로 살펴 볼 때에 연륜의 탈락 가능성은 낮아 보였다. 따라서 고사연도 분석 결과를 고사연도로 판정함이 가능해 보였다.

고사목의 빈도수를 연도별로 살펴보면 특정 연도에 집중되지 않는 것으로 확인되었다. 수피가 있는 고사목 14본 중에서 고사 연도 분석에 성공한 13본의 고사 연도 분포를 보면 최근 10년 사이(2007~2017년)에 77%(10본)로 매우 높았다. 반면, 수피가 없는 고사목의 경우 모두가 10년 이전에 고사한 것으로 확인되어 고사 이후

에 진행된 풍화작용이 수피 탈락에 영향을 준 것으로 판단된다. 연구지역은 암석이 많은 개활지(Figure 1)로 토양침식과 바람의 영향을 많이 받을 수 있는 환경조건이다. 하지만 고사한 연도가 특정 연도에 집중되지 않아 강풍을 동반한 태풍 이외에 다양한 원인으로 구상나무 고사가 발생된 것으로 판단된다. 선행연구에서 제시된 한라산 고산지대 구상나무의 생육쇠퇴 원인은 겨우내 기온 상승, 봄철 수분 부족, 바람, 토양침식 등이었다(Kim, 1994; Koo et al., 2001).

연구지역에 대한 장기간의 기후자료가 없어 선행연구에서처럼 제주시와 서귀포 기상자료를 봄철 중심으로 검토해 보았다. Kim(1994)은 윗세오름 대피소(해발고 1,690m)에서 2년간 측정된 자료와 제주시 측후소 자료와의 유의성 있는 상관관계를 근거로 제주시 자료를 활용하여 분석하였으며, Koo et al.(2001)도 제주시 자료를 활용하여 분석하였다. 일반적으로 기상자료가 없는 고산 또는 고위도의 연륜을 분석할 때는 가장 가까이에 위치한 측후소, 또는 유사한 거리에 있는 측후소 자료를 평균화 하여 사용한다(Briffa et al., 1988; Grudd et al., 2002; Seo and Park, 2002). 그 결과, 최근 58년(1961~2018년)간 제주시와 서귀포시의 4월과 5월 평균 강수량 변동 추이를 보면 소폭 상승하는 경향을 보이나(Figure 6A), 이상값($\geq 1.5\sigma + \text{평균}$ 또는 $\leq 1.5\sigma - \text{평균}$)을 제외하면 매해 소폭 감소하는 것으로 확인되어(Figure 6B) 봄철 수분 부족 현상이 존재하였을 것으로 판단되었다. 하지만, 국가태풍센터에서 제공하는 연도별 태풍 발생 건수와 강도를 고사 연도와 비교한 결과에서는 뚜렷한 연관성을 찾기 어려웠다(Figure 5).

3. 시계열적 생육쇠퇴도 조사

구상나무 생육목 10본 중 생육쇠퇴가 관찰되지 않은 구상나무는 3본(YSL01, YSL02, YSL03)이며, 가장 많은 생육쇠퇴를 나타낸 기간은 1990년대로 7본 중 4본(YSL04, YSL05, YSL08,

YSL09)에서 관찰되었다(Figure 5A). 생육쇠퇴 누적이 가장 높았던 해는 1993년으로 확인되었다. 생육목 중 YSL07과 YSL08은 2000년대 말부터 현재까지 강한 생육쇠퇴가 관찰되었다. 따라서 최근 약 10년간 강한 생육쇠퇴를 보인 YSL07과 YSL08이 정상적인 생육으로 회복하지 못한다면 향후 고사의 가능성이 높을 것이라 판단된다.

YSSD는 1970년대에 가장 많은 구상나무(YSSD01, YSSD02, YSSD07, YSSD08)에서 생육쇠퇴가 발생한 것으로 확인되었으며, 생육쇠퇴 누적이 가장 높았던 해는 1972년이었던(Figure 5B). YSSD 10본 중에서 생육쇠퇴 진행 중 고사가 발생한 구상나무는 3본(YSSD03, YSSD07, YSSD08)에 불과하였다. 국가태풍센터에서 제공한 자료에 따르면 1971년에 풍속 25~33m/s에 해당하는 태풍이 한 차례 발생하였으며, 이후 17~25m/s에 해당하는 태풍이 1973년을 제외하고 1972년부터 1978년까지 해마다 발생하였다. 1972년에 나타난 높은 생육쇠퇴가 1970년대 발생한 태풍빈도 및 강도와 관련이 있어 보이거나, 1940년대와 50년대에 기록된 태풍 기록과의 관련성은 크게 관찰되지 않았다. 1980년대에 기록된 태풍 기록과 생육쇠퇴의 시기와도 직접적인 관계는 관찰되지 않았다.

YSFD는 YSL과 YSSD와는 달리 전반적으로 강한 생육쇠퇴가 관찰되었다(Figure 5C). 생육기간 중에 생육쇠퇴가 3회 발생한 구상나무는 2본(YSFD01, YSFD05), 2회 발생한 구상나무는 3본(YSFD02, YSFD06, YSFD10), 1회 발생한 구상나무는 2본(YSFD07, YSFD08)이었다. 생육쇠퇴 누적이 가장 높았던 해는 2002년과 2003년이었으며, 1958년과 1972년에도 높은 생육쇠퇴도를 확인할 수 있었다. 1980년대를 제외하면, 1950년대 이후로 풍속 25~33m/s 이상이 관측되면 최소한 2년 내에 생육쇠퇴 누적치가 크게 증가하는 것으로 관찰되었다. YSSD와는 달리 YSFD는 강풍과의 연관성이 일부 관찰되었다.

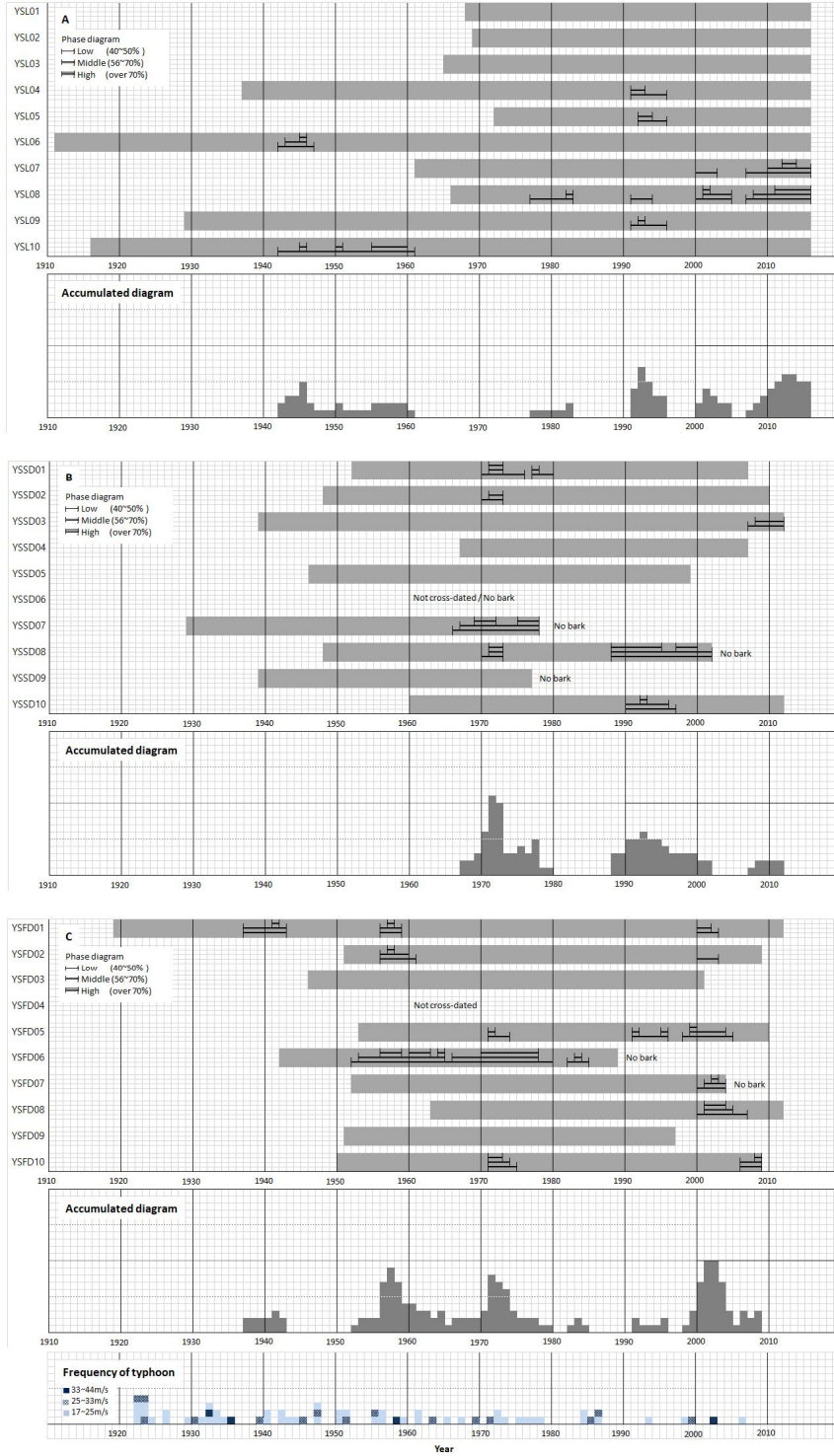


Figure 5. Inter-annual growth reduction of individual trees and the accumulated diagram for each group (YSL, YSSD and YSFD).

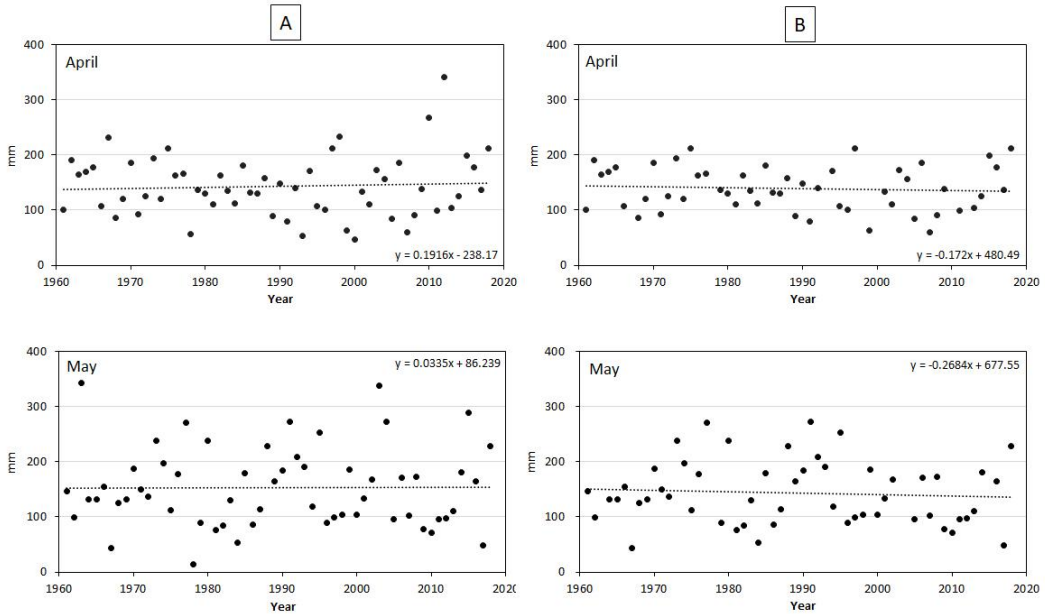


Figure 6. April and May precipitation between 1961 and 2017 measured at Jeju and Seogwipo meteorological stations (A: raw measurement records, B: measurement records without outlier) (outlier: $\geq 1.5\sigma + \text{average}$ and/or $\leq 1.5\sigma - \text{average}$).

IV. 결 론

한라산 영실지역 내 고사한 구상나무의 고사 연도와 시계열적 생육쇠퇴도를 조사하여 고사 원인을 찾고자 연구를 수행하였다. 연구 목적을 달성하기 위하여 생육목(YSL) 10본, 서있는 고사목(YSSD) 10본, 쓰러져 있는 고사목(YSFD) 10본씩을 선발하여 연륜분석을 실시하였다. 연륜분석을 위해 각 조사목의 연륜폭을 측정하여 연륜연대기를 작성하였으며, 연륜의 생육연도가 분명한 생육목을 이용하여 106년(1911~2016년)간의 대표연륜연대기를 작성하였다. 고사목의 연륜연대기와 대표연륜연대기 상호간 크로스데이팅을 실시한 결과, YSSD는 1999년 가을~2000년 봄 1본, 2007년 여름 2본, 2010년 여름 1본, 2012년 여름 1본, 2013년 여름 1본이 고사하였으며, 수피가 관찰되지 않은 3본의 최외곽 연도는 1977년, 1978년, 2002년인 것으로 확인되었다. YSFD의 경우에는 1997년 가을~

1998년 봄 1본, 2001년 가을~2002년 봄 1본, 2009년 가을~2010년 봄 2본, 2010년 여름 1본, 2012년 가을~2013년 봄 2본이 고사하였으며, 수피가 관찰되지 않은 2본의 최외곽 연도는 1989년과 2004년인 것으로 확인되었다. 하지만 YSSD와 YSFD에서 각각 한 본씩의 구상나무 고사목은 고사연도 분석이 성공적으로 이뤄지지 않았다. 고사형태(YSSD, YSFD)에 따른 고사연도 시기에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

시계열적 생육쇠퇴도 조사에서 가장 높은 생육쇠퇴를 나타낸 해를 조사한 결과 YSL은 1993년, YSSD는 1972년, YSFD는 2002년과 2003년이었다. YSFD는 YSL과 YSSD와는 다르게 빈번하고, 뚜렷한 생육쇠퇴를 보였다. 특히, 풍속 25~33m/s 이상을 동반한 태풍이 발생되면 최소한 2년 내에 생육쇠퇴 누적치가 크게 증가하는 것으로 관찰되어 강풍에 대한 스트레스가 YSL과 YSSD보다 높은 것으로 판단되었다.

영실지역에서 고사한 구상나무의 고사연도가

특정 연도에 집중되지 않고, 고사형태(YSSD, YSFD)에 따른 시계열적 생육쇠퇴 경향도 다른 것으로 조사되었다. 따라서 영실지역 구상나무의 고사를 유도한 원인은 다양한 것으로 판단되며, 보다 정확한 원인을 찾기 위해서는 토양조사와 함께 보다 많은 구상나무 고사목에 대한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이라 판단된다.

References

- Baillie, M. G. L. and J. R. Pilcher. 1973. A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree Ring Bulletin*. 33: 7-14.
- Briffa, K. R. · P. D. Jones · J. R. Pilcher and M. K. Hughes. 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.
- Cook, E. R. and L. A. Kairiukstis. 1990. *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. International Institute for Applied Systems Analysis. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. p.394.
- Eckstein, D. and J. Bauch. 1969. Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 88: 230-250.
- Gärtner, H and D. Nievergelt. 2010. The core-microtome: a new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. *Dendrochronologia*. 28: 85-92.
- Grudd, H. · K. R. Briffa · W. Karlén · T. S. Bartholin · P. D. Jones and B. Kromer. 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.
- Jeong HM. · Kim YJ and Seo JW. 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. (in Korean with English summary)
- Kang SJ. 1984. Regeneration process of sub-alpine coniferous forest in Mt. Jiri. *Journal of Ecology and Environment*. 7(4): 185-193. (in Korean with English summary)
- Kim ES. 1994. Decline of tree growth and the changes of environmental factors on high altitude mountains. KOSEF 921-1500-018-2.
- Kim GT · Kim JS and Choo GC. 1991. Studies on the structure of forest community at Banyabong area. *Korean Journal of Environment and Ecology*. 5(1): 25-31. (in Korean with English summary)
- Kim JK · Koh JG · Yim HT and Kim DS. 2017. Changes of spatial distribution of Korean fir forest in Mt. Hallasan for the past 10 years (2006, 2015). *Korean Journal of Environment and Ecology*. 31(6): 549-556. (in Korean with English summary)
- Kim KS · Koh JG · Kim DS and Ko SH. 2018. Research of restoration of *Abies koreana* in Mt. Hallasan. 17th Research Report. Hallasan Research Department, World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Province. pp.394-404. (in Korean)
- Kim NS and Lee HC. 2013. A study on changes and distribution of Korean fir in sub-alpine zone. *Journal of Korea Society of Environment*

- tal Restoration Technology 16(5): 49-57. (in Korean with English summary)
- Kim NS · Han DU · Cha JY · Park YS · Cho HJ · Kwon HJ · Cho YC · Oh SH and Lee CS. 2015. A detection of novel habitats of *Abies koreana* by using species distribution model (SDMs) and its application for plant conservation. Journal of Korea Society of Environmental Restoration Technology 18(6) : 135-149. (in Korean with English summary)
- Kim CS · Kong YJ · Mun MO and Song KP. 2006. Flora of Mt. Halla IX. Institute of Ecology and Culture for Mt. Halla. p.327. (in Korean)
- Kim YJ. 2003. Dating of the 17th-century korean buildings using tree rings of *Pinus densiflora* S. et Z. Master Thesis, Chungbuk National University. (in Korean with English summary)
- Koo KA · Park WK and Kong WS. 2001. Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: Effect of climate change on the growth. The Korean Journal of Ecology. 24(5): 281-288. (in Korean with English summary)
- Koo KA · Kim J · Kong WS · Jung H and Kim G. 2016. Projecting the potential distribution of *Abies koreana* in Korea under the climate change based on RCP scenarios. Journal of Korean Wood Science and Technology. 19(6): 19-30. (in Korean with English summary)
- Korea National Arboretum. 2014. Forest of Korea (I): Conservation of Korean fir (*Abies koreana*) in a changing environment. (in Korean)
- Park SJ · Lee WY and Lee HH. 2006. Wood Tissue and Identification. Hyangmoonsa, Seoul, Korea. pp.237-243. (in Korean)
- Park WK and Seo JW. 1999. A dendroclimatic analysis on *Abies koreana* in Cheonwang-bon area of Mt. Chiri, Korea. The Korean Journal of Quaternary Research. 13(1): 25-33. (in Korean with English summary)
- Park WK and Seo JW. 2000. Reconstruction of May~June precipitation (253 years: A.D. 1746~1998) in east-coastal region (Youngdong) of Korea from tree rings of *Pinus densiflora* S. et Z. The Korean Journal of Quaternary Research. 14(2): 87-99. (in Korean with English summary)
- Schweingruber, FH. 1988. Tree Rings-Basic and Applications of Dendrochronology. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht. pp.40-93.
- Schweingruber, FH. 1998. Tree Rings and Environment Dendroecology. Paul Haupt Publishers Berne. pp.77-215.
- Seo JW and Park WK. 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. (in Korean with English summary)
- Seo JW and Park WK. 2011. Examination of death years and causes by the analysis of growth decline in tree rings of *Pinus densiflora* from the Euilimji lake park in Jecheon, Korea. Journal of Korea Society of Environmental Restoration Technology 14(2): 1-10. (in Korean with English summary)
- Song KM · Kim J · Kang YJ · Choi HS · Jung CS · Lee SY · Lee JH · Koh JG · Kim J G · Lee KH · Hong YP · Im JH and Kim CS. 2016. Korean fir in Hallasan Mountain: why are they dying?. National Institute of Forest Science. p.135. (in Korean)
- Speer J. H. 2010. Fundamental of Tree-Ring Research. University of Arizona Press.