

理學碩士學位論文

漢拏山 구상나무群落의 衰退原因에
關한 研究

The Causes of Forest Decline on *Abies koreana*
Stand in Mt. Halla

2006年 2月

서울市立大學校 大學院
環境園藝學科
權 美 廷

漢拏山 구상나무群落의 衰退原因에 關한
研究

The Causes of Forest Decline on *Abies koreana*
Stand in Mt. Halla

指導教授 禹 秀 泳

이 論文을 理學碩士學位 論文으로 提出함

2005. 12.

서울市立大學校 大學院

環境園藝學科

權 美 廷

權 美 廷의 理學碩士學位 論文을 認准함.

審查委員長 李 貞 植 (印)

審 查 委 員 沈 利 星 (印)

審 查 委 員 禹 秀 泳 (印)

2005年 12月

서울市立大學校 大學院

목 차

적요	i
List of Tables	ii
List of Figures	iii
I 서언	1
II 연구사	3
III 재료 및 방법	
1. 조사지형 개황	6
2. 제주도 온도추이	7
3. 생리활성 분석	8
4. 토양분석	10
5. 식물체 분석	13
IV 결과 및 고찰	
1. 계절별 광합성률	14
2. 계절별 기공전도도	23
3. 계절별 수분이용효율	32
4. 계절별 엽록소 함량	38
5. 계절별 항산화효소 활성	41
6. 지역별 토양특성	44
7. 6월 구상나무 식물체분석	48
8. 8월 구상나무 Na함량	50
9. 9월 구상나무 식물체분석	51
V 종합고찰	53
인용문헌	54
Summary	59

적 요

본 연구는 한라산 구상나무림의 쇠퇴원인을 조사하기 위하여 잎세오름, 영실, 성판악 세지역을 선정하여 계절별 온도에 따른 광합성률을 비교해 보았으며 항산화효소, 각 지역별 토양의 물리화학적 특성을 분석하였다.

세지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체에 비해서 높은 광합성률을 보였고 온도가 낮을수록 높은 광합성률을 보였다. 계절별 특성은 6월과 7월의 경우 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이가 뚜렷이 나타나지만 9월에 쇠퇴개체의 광합성률이 다시 회복되는 양상을 나타냈다. 기공전도도 또한 건전개체가 쇠퇴개체에 비해 높게 나타났고 9월의 쇠퇴개체가 6월과 7월에 비해 높게 나타나 광합성률과 비슷한 경향을 보였다. 그리고 기공전도도가 증가하면 광합성률 또한 증가한다는 것을 알 수 있었다.

전반적으로 건전개체에 비해 쇠퇴개체에서 높은 수분이용효율을 보였고 9월에 가장 높은 수분이용효율을 보였으며 반면 7월에 낮은 수분이용효율을 나타냈다. 또한 9월에 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이가 낮아져 광합성률과 기공전도도와 비슷한 경향을 보였다.

환경스트레스에 대한 식물의 환경적응성 또는 생리적 상태를 확인하기 위해 산화피해를 규명하기 위해서 ascorbate peroxidase(APX)와 glutathion reductase(GR)의 활성을 조사한 결과 건전개체와 쇠퇴개체간에는 차이는 없으나 6월과 7월에 비해 9월의 항산화효소 활성도가 낮아지는 것을 볼 수 있었다.

각 지역별 토양분석한 결과 전기전도도나 유기물함량, 전질소, 유효인산, 양이온치환용량과 양이온의 함량이 전반적으로 건전지역에 비해 쇠퇴지역의 토양이 낮은 것으로 보아 토양환경이 불량한 것으로 보여 고온 등 환경적 스트레스에 더욱 민감하여 쇠퇴하는 정도가 더욱 심해지는 것으로 보였다.

List of Tables

Table 1. Tophographic condition of <i>Abies koreana</i> of three sites in Mt. Halla.	7
Table 2. Tophographic condition of <i>Abies koreana</i> of three sites in Mt. Halla.	49
Table 3. Nutrient contents of <i>Abies koreana</i> of three sites in June.	50
Table 4. Nutrient contents of <i>Abies koreana</i> of three sites in September.	52

List of Figures

Figure 1. Location of three experimental sites in Mt. Halla. Site 1, 2 and 3 indicate Youngsil, Witseorum and Sungpanak, respectively.	6
Figure 2. Climatological informations of Cheju from 1961 to 2005.	8
Figure 3. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown <i>Abies koreana</i> at Witseorum in June.	15
Figure 4. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown <i>Abies koreana</i> at Youngsil in June.	16
Figure 5. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown <i>Abies koreana</i> at Sungpanak in June	17
Figure 6. Differences in photosynthetic rate of naturally grown <i>Abies koreana</i> in three survey sites in June.	18
Figure 7. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown <i>Abies koreana</i> at Witseorum in September.	20
Figure 8. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown <i>Abies koreana</i> at Youngsil in September.	21

Figure 9. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown <i>Abies koreana</i> at Sungpanak in September.	22
Figure 10. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown <i>Abies koreana</i> at Witseorum in June.	24
Figure 11. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown <i>Abies koreana</i> at Youngsil in June.	25
Figure 12. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown <i>Abies koreana</i> at Sungpanak in June.	26
Figure 13. Differences in stomatal conductance of naturally grown <i>Abies koreana</i> in three survey sites in August.	27
Figure 14. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown <i>Abies koreana</i> at Witseorum in September.	29
Figure 15. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown <i>Abies koreana</i> at Youngsil in September.	30
Figure 16. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown <i>Abies koreana</i> at Sungpanak in September.	31
Figure 17. The effect of temperature on the water use efficiency naturally grown <i>Abies koreana</i> at Witseorum in June.	33

Figure 18. The effect of temperature on the water use efficiency naturally grown <i>Abies koreana</i> at Youngsil in June.	33
Figure 19. The effect of temperature on the water use efficiency naturally grown <i>Abies koreana</i> at Sungpanak in June.	34
Figure 20. Water use efficiency of <i>Abies koreana</i> in three sites in August.	35
Figure 21 The effect of temperature on the water use efficiency naturally grown <i>Abies koreana</i> at Witseorum in September.	37
Figure 22. The effect of temperature on the water use efficiency naturally grown <i>Abies koreana</i> at Youngsil in September.	37
Figure 23. The effect of temperature on the water use efficiency naturally grown <i>Abies koreana</i> at Sungpanak in September.	38
Figure 24. Total chlorophyll contents of <i>Abies koreana</i> in three sites in June.	39
Figure 25. Total chlorophyll contents in newly developed and old leaf of <i>Abies koreana</i> in three sites in August.	40
Figure 26. Total chlorophyll contents of <i>Abies koreana</i> in three sites in September.	41
Figure 27. Seasonal changes on activities of glutathione reductase(GR) of <i>Abies koreana</i> in three sites.	43

Figure 28. Seasonal changes on activities of ascorbate peroxidases(APX)
of *Abies koreana* in three sites. 44

Figure 29. Na contents in leaf of *Abies koreana* in three sites in
August. 51

I. 서 언

구상나무(*Abies koreana*)는 1915년 中井와 Wilson에 의해서 처음 새로운 종으로 명명된 후 한국, 일본, 중국, 북미대륙 및 러시아의 아한대지역과 한대지역에 주로 분포하는 40여 종류의 *Abies* 중 한국의 특산 수종으로 인정되어 왔다(이, 1970). 열매의 색깔에 따라, 푸른구상나무 (*Abies koreana* Wils. for. *chlorocarpa*) 검은 구상나무 (*A. koreana* Wils. for. *nigrocarpa*) 붉은 구상나무 (*A. koreana* Wils. for. *rubrocarpa*) 등으로 나뉘어 진다. 구상나무의 수직적 분포는 지리산에서는 해발 1,050m~1,900m, 덕유산은 1,350m~1,590m, 가야산은 1,350m~1,420m, 한라산에서는 1,000m~1,950m사이의 산성상부나 산능선부의 암석지대에 많이 분포하고 있다(이와 홍, 1995).

현재 고산지대에서 수목생장의 쇠퇴현상이 나타나고 있는데 특히 구상나무는 형질교환이 가능한 개체군의 크기가 매우 작아 진화가 불가능하고 그 결과 멸종될 가능성이 매우 높은 식물이다(이와 조, 1993).

식물의 생장은 유전적 요인뿐만 아니라 그 식물이 자라고 있는 환경에 의하여 많은 영향을 받을 수 있고 동일종이라 할지라도 그들이 처해있는 환경조건 즉, 온도, 수분, 광선, 토양, 고도, 바람 등의 환경요인과 주변 식생과 같은 생물학적 요인에 의하여 생장이 크게 달라진다(Beatly, 1994).

고산지대에 자라는 식물은 낮은 온도, 가뭄, 강한 바람, 서리 등 극한 환경에 노출되어 있어 이들 환경적 요인에 의해 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다. 대부분 고산식물의 생장은 온도 및 상대습도와 밀접한 관계를 갖고 있으며 자생지에서는 비교적 높은 습도가 지속적으로 유지되고 있어 온도변화가 고산식물의 주요 생장에 중요한 환경요소로 작용한다고 볼 수 있다(Wildi and Lutz, 1996).

최근 한라산의 구상나무 집단이 심각한 쇠퇴현상을 보이고 있는 것으로 알려져 왔다(김, 1994). 특히, 구상나무림의 생장쇠퇴는 구상나무 자생지 전체에 광범위하게 나타나고 있고, 특히 한라산의 경우에는 그 정도가 심해서 고사목의 숫자가 증가하고 자연적인 치수 발생도 제대로 이루어지지 않고 있으며(김, 1994; 김 등, 1997). 척박하고 얇은 토양에서 생육하고 있어 계곡과 능선을 따라 부는 탁월

풍과 소용돌이 바람으로 인한 구상나무의 뿌리가 상하고 수분 부족을 초래하여 고사되거나, 여름의 한랭, 겨울의 건조 등 환경적 요인에 의하여 구상 나무가 고사되고 있다(강, 1989).

최근 환경오염, 지구온난화, 자외선량의 증가와 산성비 등에 의해 식물의 생육 환경상태가 변화하고 있는데 그에 따른 식물체의 반응 및 변화를 예측하기 위한 수단이 필요하다. 환경스트레스에 대한 식물의 상태는 외부형태상의 피해, 항산화기구의 발현, 광합성능의 변화 등을 분석함으로써 파악할 수 있다(Mckersie and Leshem, 1994).

온도는 광량, 강우량과 더불어 식물의 생장과 발달, 지리적 분포와 생존 등에 결정적으로 작용하는 요인 중 하나로 중요한 환경인자이다(Berry and Bjorkman, 1980). 식물체는 생장과 발달에 필요한 최적온도를 가지며, 이 온도를 중심으로 고온과 저온의 극단적인 온도에 대한 최대 상한온도와 하한 온도를 갖는다. 온도가 양쪽 한계에 가까워질수록 생장이 감소할 수 있고, 그 한계를 넘어서면 고사하게 된다(Kratsch and Wise, 2000).

특히 한라산은 동절기에 따뜻한 기온이 지속되어 고산수목인 구상나무는 생장에 있어서 오히려 따뜻한 온도가 스트레스로 작용할 수도 있을 것으로 보여 본 연구는 한라산 아고산대 위치하고 있는 구상나무 임분을 대상으로 쇠퇴현상이 일어나는 원인을 구명하기 위해서 온도에 따른 광합성률을 비교해 보았으며 환경스트레스에 의한 방어 정도를 알아보기 위하여 항산화효소 활성을 조사하였고 산림토양 내 이화학적 성질의 차이는 임목생장과 밀접한 관련이 있기 때문에(정 등, 1980) 한라산 토양의 물리화학적 특성을 분석하였다.

II. 연 구 사

구상나무는 1907년 5월에 Faurei 신부가 한라산에서 처음으로 수집하였으며, 1915년에 Wilson에 의해서 구상나무(*Abies koreana* Wilson)라고 명명되어(이, 1970) 한국 고유종으로 인정되어 왔으며 희귀식물로서 그 생육지가 아고산대에 한정되어 연구가치가 매우 높은 식물이다. 최근 구상나무 집단이 심각한 쇠퇴현상을 보여 이에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다.

구상나무에 대한 연구를 보면 구 등(2001)은 생장쇠퇴의 원인이 지속적인 기온 상승으로 추정되며, 특히 겨울기온의 상승이 영향을 미친 것으로 보며 겨울기온이 상승하는 경우 상록수는 광합성을 할 수 있는 조건이 충족되나 광합성에 필요한 수분공급이 부족하여 수분수지의 불균형이 발생하게 되어 이로 인하여 생장에 악영향을 미치게 되는 것으로 판단된다고 보고하였고 강(1984)과 김(1994)은 태풍과 봄 가뭄이 주요 쇠퇴원인인 것으로 제시하였다.

또한 오 등(2001)은 구상나무는 환경요인에 대하여 광화학적 반응이 계절에 따라 다르며 겨울에는 온도, 광량, 상대습도의 증가가 구상나무 생육에 우호적으로 작용하는 반면 여름에는 높은 온도와 광량이 광억제를 다소 일으키지만 그에 따른 광피해는 야기하지 않은 것으로 보여진다고 하였다.

구상나무의 연륜지수와 기후요소와의 상관관계를 살펴본 결과 구 등(2001)은 구상나무의 생장은 강수량과 유의한 수준의 양의 상관관계를 보여 구상나무가 수분스트레스에 민감한 수종인 것으로 추정되며 4월은 구상나무가 생장을 시작하는 시기로 기온이 낮을 경우 생장개시기가 늦어지거나 새로운 세포들에 동해에 의한 수분스트레스가 발생하여 생장이 나빠지는 것으로 보여진다고 하였다. 또한 김(1994)는 구상나무림의 고사원인을 밝히기 위해 한라산과 지리산을 조사하여 쇠퇴의 가장 중요한 인자는 오염으로 인한 이상기후일 것이라 보고한 바 있다.

지리산 구상나무의 경우 역시 기온과 부의 관계를 갖는 경향이 있고 강수의 영향은 봄기간의 수분수지가 중요한 것으로 보고하였다(박과 서, 1999). 또한 이와 조(1993)은 가야산의 구상나무의 연륜생장은 연간 변화가 심하며 기온이나 강

수 등 대기후요인에 의해 영향을 받는다고 보다 각 개체의 위치에 따른 미기후 요인에 영향을 받는 것 같다고 발표한 바 있고 김 등(1997)은 구상나무의 고사목의 수와는 해발고가 상대적으로 높은 정의 상관을 보여 해발고가 높은 지역이 구상나무 생육에 부적합한 환경인 것으로 조사하였다.

일반적으로 잣나무류가 생육특성상 유묘의 생장률이 매우 낮은 편인데 구상나무 또한 그러한 결과를 나타냈고(정, 1998) 구상나무의 직경 및 수고는 각각 15cm, 8m이며, 최대생장한계는 100년 전후라고 보고하였다(김과 윤, 1991).

구상나무의 개체군동태를 잘 이해하기 위한 목적으로 지리산의 제석봉과 장터목 북사면의 고도 1,400-1,700m의 구상나무림에서 군집구조 및 주요구성수종의 직경계급과 연령의 분포를 조사하였고(조, 1994) 한라산에서 구상나무림이 다른 지역과는 다르게 단순림이 형성되어 있는데 그 이유로 지형과 얇은 토심 때문에 다른 낙엽활엽수들의 생장이 구상나무림의 생장에 미치지 못하기 때문인 것으로 보고 하였으며 구상나무림의 보존과 임업경영에 필요한 자료를 얻고자 군락분류를 하였다(이와 홍, 1995).

고 등(1996)이 구상나무림의 동태를 알아본 결과 구상나무 치수는 대부분 산림주연부에서 발생하고, 산림 내부로 향할수록 구상나무의 빈도는 점차 감소하며 고사목의 출현빈도는 상대적으로 증가한다고 보고하였다.

정 등(1996)은 지리산 구상나무림 식생구조와 치수발생을 조사하여 상층의 피도와 치수발생 및 생육과 밀접한 관련이 있음을 보고하였고 김 등(1997)은 지리산 국립공원의 천왕봉(1,915m)-덕평봉(1,521m)을 중심으로 한 고산지대에 분포하는 구상나무의 생육현황과 구상나무림의 군집구조를 파악하였다.

지구적 차원의 환경문제와 연계되어 많은 관심을 집중시키는 것 중의 하나가 고산지대에서 수목생장의 쇠퇴현상이 나타나고 있다. 예를 들면, 북센실베니아의 사탕단풍(*Acer saccharum* Marsh.)이 1980년 이후부터 꾸준히 쇠퇴되고 있는 이유로 군집이 쇠퇴하지 않는 곳에서의 사탕단풍과 군집이 쇠퇴하는 곳에서의 사탕단풍에서 토양환경의 차이가 있는 것으로 조사하였고 군집이 쇠퇴한 곳에서의 토양이 양분부족과 수분스트레스가 있는 것으로 조사되었다(Drohan *et al.*, 2002). 그리고 남스웨덴의 건전한 산림에서 주위 바닷바람에 의해 섞여있는 NaCl

에 의해 점점 쇠퇴가 일어난다고 하였고(Gustafsson, 1997) UV-B에 의해 독일가
문비(*Picea abies*)가 광합성률 감소와 엽록소 함량이 감소한다고 보고된 바 있다
(Sprtova *et al.*, 1999).

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 조사지역 개황

구상나무가 분포하는 한라산 지역에서 3지역을 연구지로 선정했다(Fig. 1). 영실, 윗세오름, 성판악지역으로 구분하여 조사하였고 이곳에서 장기간 생장 모니터링을 하기위해서 영구 방형구를 설치하였다.

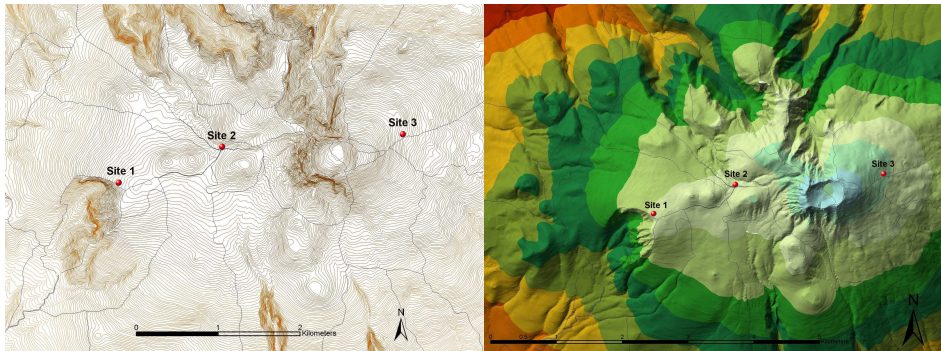


Fig. 1. Location of three experimental sites in Mt. Halla. Site 1, 2 and 3 indicate Youngsıl, Witseorum and Sungpanak, respectively(Lim, 2005).

세지역 모두 해발고도는 1,600m 이상이 되고 영실지역은 절벽에 가깝고 성판악지역은 평지에 가깝다. 이 지역에 분포하는 구상나무의 흉고직경(DBH)는 평균 9~10cm 정도였고 평균연령은 40~60년 정도인 것으로 추정된다(Table 1).

Table 1. Tophographic condition of *Abies koreana* of three sites in Mt. Halla(Lim, 2005).

Site Name	Elevation (m)	Topographical position	Aspect	Slope (°)	DBH range (cm)	Height range (m)	Age (year)
Site 1 (Youngsil)	1,633	Near cliff	SWS	< 3	10.0(2.9-27.5)	3.0(1.7-3.6)	40-60
Site 2 (Witseorum)	1,672	Small ridge	SWS	< 3	9.8(3.1-22.1)	4.0(1.7-5.6)	40-60
Site 3 (Sungpanak)	1,748	Flat area	SES	< 3	12.7(3.6-26.4)	3.4(2.0-4.8)	40-60

3 지역에서 생육상태가 비슷한 건전한 생장을 하는 개체와 고사목의 잎의 변색, 낙엽, 신초의 고사를 고려하여 쇠퇴현상이 육안으로 확연하게 드러나는 개체를 선발하여 조사하였다.

2. 제주도 온도추이

제주도의 1961~2005년 동안 1월과 2월에 기온이 5℃ 이상의 일수와 7월과 8월에 기온이 28℃ 이상의 일수가 점점 증가 하였다(Fig. 2).

가장 따뜻한 기온은 8월에 23.5℃~28.3℃이며 가장 추운달 기온은 1월에 2.4℃~7.7℃ 가량이였다. 실험기간중의 평균 기온은 2004년 8월은 27.2℃, 2005년 6월은 23.2℃이며 9월은 25.1℃였다(제주지방기상청, 2005).

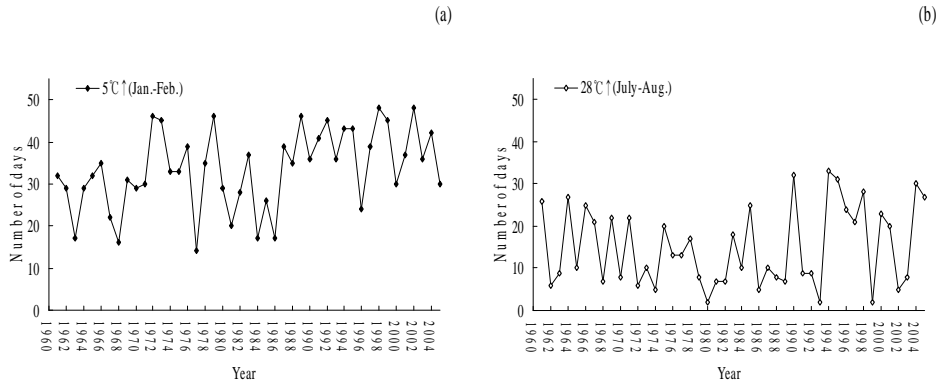


Fig. 2. Climatological information of Jeju from 1961 to 2005.

(a)◆ : Number of days more than 5°C in January and February

(b)◇ : Number of days of more than 28°C in July and August.

3. 생리활성 분석

3.1. 광합성 능력

각 수종의 광합성능력(Net photosynthesis; 순 광합성량(A_n))은 Licor-6400 Portable Photosynthesis System (Li-cor Inc., USA)를 이용해서 광 포화점에 가까운 $1000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광도에서 측정하였다. 순 광합성량은 다음과 같은 식으로 계산하였다. 그리고 light curve를 그려서 각 지점의 광합성 특성을 비교하였고 이때 가지는 각 사이트별로 채취하여 현지에서 조사하였다.

$$A_n = \frac{U_e(C_e - C_c)}{100s} - C_cE$$

A_n ; Net photosynthesis($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), U_e ; mole flow rate of air entering the leaf chamber($\mu\text{mol s}^{-1}$), C_e ; mole fraction of CO_2 in the leaf chamber($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$), C_c ; mole fraction of CO_2 entering in the leaf chamber($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$), s ; leaf area(cm^2), E ; transpiration($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

3.2. 증산량

증산량은 다음과 같은 계산식으로 환산하였다.

$$E = \frac{U_e(W_c - W_e)}{s \cdot 10^5 \left(1 - \frac{W_c}{1000}\right)}$$

E=Transpiration rate((mmol H₂O m⁻²s⁻¹), U_e; mole flow rate of air entering the leaf chamber(μmol s⁻¹), W_c; mole fraction of water vapor in the leaf chamber(mol H₂O mol⁻¹ air), W_e; mole fraction of water vapor entering the leaf chamber(mmol H₂O mol⁻¹ air).

3.3. 기공전도도

기공의 전도도를 측정하기 위해서 챔버의 공기압력(flow rate)은 500μmol s⁻¹을 유지하였고, 외부에서 주는 CO₂ 의 농도는 400 ppm을 유지하였다. Li-6400 Portable Photosynthesis System의 기본 엽면적은 6cm였고, 기공 전도도 측정시 leaf cuvette의 온도는 25℃, 상대습도는 40%, 광량(Photosynthetically Active Radiation ; PAR)은 1000μmol m⁻²s⁻¹를 유지하도록 하였다.

$$G_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{G_{tw}} - \frac{K_f}{G_{bw}}}$$

G_{sw}; stomatal conductance(mol H₂O m⁻²s⁻¹), K_f; factor based on the estimate K of the fraction of stomatal conductances, G_{bw}; boundary layer conductance to water vapor (mol H₂O m⁻²s⁻¹) from one side of the leaf, G_{tw}; total(includes stomatal and boundary layer) conductance of the leaf.

3.4. 수분이용효율

수분이용효율은 광합성능력/증산량 (Wang, 2001; Ashraf et al., 2002)으로

계산하였다. 수분이용효율의 계산에 사용한 광합성능력과 증산량은 $1,000 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 광도에서 측정하였다.

3.5. 항산화효소 활성분석

Ascorbate peroxidase(APX)의 활성분석은 잎 단편 0.2g에 1M 아스코르빈산(AsA)과 pH가 7.4로 보정된 100mM 인산칼륨 완충액(K-P buffer)을 함유한 추출용액 2mL를 가하여 균질화하였다. 이를 16,000rpm에서 30분간 원심분리한 후 추출액 60μL를 취하여 반응액[H₂O 2.34mL, 1M K-P buffer(pH 6.5) 300μL, 10mM AsA 180μL, 5mM H₂O₂ 120μL]과 잘 혼합한 후 분광광도계(UV-2100, Shimadzu, Japan)를 사용하여 파장 290nm에서 H₂O₂에 의한 30초간의 아스코르빈산 산화도(extinction coefficient of $2.8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)를 측정하였다.

Glutathione reductase(GR)의 활성 분석은 잎 0.15g을 취한 후 추출용액(50mM K-P buffer, 5% PVP, 5mM AsA, 5mM DTT, 5mM EDTA, 0.1M NaCl 함유)을 2mL 가하여 균질화하였다. 12,000rpm에서 5분간 원심분리한 후 상정액 150μL를 취하여 반응액[H₂O 2.43mL, 1M K-P buffer(pH7.8) 300μL, 10mM GSSG 60μL, 10mM NADPH 60μL]과 혼합하였다. 이때의 산화·환원 반응을 파장 340nm에서 90초간의 흡광도 변화로 측정하였다(extinction coefficient of $6.2 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

모든 효소활성은 단백질 1mg을 기준으로 산정하였으며, 단백질 정량은 Bradford(1976)가 기술한 바와 같이 Bio-Rad Protein assay(Bio-Rad Laboratories, U.S.A) 5배 희석액에 엽 추출액을 100 : 1로 가하여 반응시킨 후 파장 595nm에서의 흡광도를 측정함으로써 이뤄졌다.

3.6. 엽록소 함량 분석

엽록소함량을 분석하기위해서 잎을 채취하여 80% 아세톤 용액에 담근 후 냉장고에 7일 간 4℃의 온도에 보관한 후 분광광도계(UV/Visible Diode Array, Walden Precision Apparatus Ltd., UK)를 사용하여 파장 663 and 645 nm에서 측정하여 다음의 식으로 환산하였다 (Arnon, 1949).

$$\text{Chlorophyll } a + b \text{ (}\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}\text{)} = 8.05 A_{663} + 20.29A_{645}$$

4. 토양분석

4.1. pH, EC (1:5)

토양의 pH,와 EC는 풍건 토양 5g을 50mL 비이커에 취하여 증류수 25mL를 가하고 유리막대로 충분히 저어주면서 1시간 방치한 후 각각 pH 메타(MP230, Mettler toledo, UK)와 EC 메타(MC226, Mettler toledo, UK)로 측정하였다.

4.2. 유기물 (O.M.)

유기물 함량은 Walkley-Black법에 따라 정량하였다. 분쇄시킨 풍건 시료(50 mesh 통과) 0.5g을 500mL 삼각플라스크에 취하여 1N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 용액 10mL를 가하고 토양이 기벽에 묻지 않도록 조심스럽게 흔들여 준 다음 진한 황산 20mL를 가하고, 증류수 200mL를 가한 후 0.02M *O*-phenanthroline-ferrous complex를 지시약으로 하여 남아있는 1N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 을 0.5N $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 로 역적정하여 유기물 함량을 계산하였다.

4.3. 전질소 (total-nitrogen)

풍건 토양 (50 mesh 통과) 0.1g을 케달 플라스크에 취하고, 2g 촉매혼합물을 가한 후 진한 황산 10mL 가하여 잘 혼합하였다. 이것은 Kjeldahl 분해대에서 낮은 온도로 예열하였다가 온도를 높여 시료가 무색이 될 때까지 약 2시간 동안 가열하였다. 분해가 끝나면 식힌 후 질소 분석기(Kjeldahl 2300, FOSS, Sweden)에서 증류하여 적정하였다.

4.4. 유효인산 (Avail-P.)

유효인산은 Bary No. 1법에 따라 정량하였다. 풍건 시료 2.85g을 100mL 삼각플라스크에 취하여 침출액(0.025 N HL + 0.03N NH_4F) 20mL을 가하고 1분간 흔들 다음 여과지(Whatman No. 42)에 여과하였다. 50mL 메스플라스크에 여액

5mL와 발색시약(*Ammonium molybdate*, H_2SO_4 , *Antimony potassium tartarate* + *Asorbic acid*) 6mL를 첨가하여 증류수로 표선까지 채웠다. 이 용액의 일부를 측정용기(*cell*)에 옮겨서 분광광도계(UV-160A, *Shimadzu, Japan*)를 이용하여 파장 880nm에서 흡광도를 측정하였다. 이때 표준용액의 인산함량 (0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 ppm)에 따른 흡광도도 시료 액의 조작과정과 똑같은 과정을 거쳐 측정하고 표준곡선을 작성하고, 이 표준곡선으로부터 유효인산의 양을 구하여 $(mg \cdot L^{-1} - P) \times 2.29 = mg \cdot L^{-1} P_2O_5$ 로 계산하였다.

4.5. 양이온 치환용량 (CEC)

양이온 치환용량은 1N 초산 암모니아법에 따라 구하였다. 양이온 치환용량 분석용 침출관(*column*)의 하부에 여과지(*Whatman No. 2*)를 깔고, 풍건 토양 5g을 취하여 양이온 치환용량 분석 세트에 연결시켰다. 침출관 상부에 설치된 침출액병에 1N CH_3COONH_4 (pH = 7.0) 용액을 50mL 넣고, 12시간 정지한 후 침출관으로 방울방울 떨어지게 하여 침출관내 토양을 NH_4^+ 포화시킨다. 침출이 끝나면 에탄올로 위와 같은 방법으로 과포화된 NH_4^+ 를 세척하고, 세척이 끝나면 1N KCl을 붓고 침출시킨다. 침출이 끝나면 침출액을 *Kjeldahl flask*에 옮기고 *MgO* 분말 5g을 넣고 질소 분석기(*Kjeldahl 2300, FOSS, Sweden*)에서 증류하여 적정하였다. 따로 증류수를 써서 같은 조건에서 바탕시험을 시행하고, 양이온 치환용량을 다음 식으로 구하였다. $CEC(cmol \cdot kg^{-1}) = (T-B) \times H_2SO_4 \text{ 규정 농도 } (0.1 N) \times 100 / (\text{취한 토양의 } g\text{수})$. 여기에서 T와 B는 각각 본시험과 바탕시험의 적정에 소비된 0.1 N H_2SO_4 의 양 (mL)이다.

4.6. 치환성 양이온(Ca, Mg, K, Na)

치환성 양이온 함량은 1N 초산 암모니아법에 따라 구하였다. 양이온 치환용량 분석용 침출관(*column*)의 하부에 여과지를 깔고, 풍건 토양 5g을 취하여 양이온 치환용량 분석 세트에 연결시켰다. 침출관 상부에 설치된 침출액병에 1N CH_3COONH_4 (pH = 7.0) 용액을 50mL 넣고, 하룻밤 장치시킨 후 침출관으로 방울방울 떨어지게 하여 침출관 내 토양을 NH_4^+ 포화 조작하고 양이온을 침출하였

다. 침출된 용액 중의 양이온의 함량은 원자흡광 분석기(AA-6800, Shimadzu, Japan)로 측정하였다. 필요에 따라 여액을 적절하게 희석하여 원자흡광분광석기로 측정하였다.

4.7. 입경분석 (토성)

입경분석은 *micro-pipette*법을 이용하였다. 풍건토양 2g을 50mL 원심관에 넣고 분산제 40mL를 가한 후 *end-over-end shaker*에 넣고 50ppm으로 12시간 진탕하였다. 진탕이 끝난 후 현탁액이 고루 섞이도록 흔든 후 Stokes의 법칙에 의거하여 2 μ m이하의 입자가 침강하는데 걸리는 시간(20℃, 1시간 56분 3초)후 마이크로 피펫으로 2.5cm깊이에서 5초간에 걸쳐 서서히 2.5mL의 현탁액을 취하여 (clay 분리) 미리 무게를 달아놓은 *weighing pan*에 이 현탁액 2.5mL를 취하고 남은 시료를 거르고 증류수로 맑은 물이 나올 때까지 세척한 후 미리 무게를 달아 놓은 *weighing pan*에 옮겨 105℃ 건조기에 건조한 후 정량하였다(sand). Silt는 실험에 사용한 토양무게에서 sand와 clay의 무게를 뺀 값으로 나타내었다

5. 식물체 분석

분쇄된 식물체 시료 0.5g을 분해용 flask에 넣고 50% HClO₄ 10mL 와 H₂SO₄ 1mL를 가한 후 200℃ 전열판에서 가열하여 분해액이 백색으로 투명하게 되면 분해를 멈추어 냉각시킨 다음 분해액을 100mL volumetric flask에 증류수를 첨가하여 부피를 맞춘 후 이 분해액을 중의 치환성 양이온(Ca, Mg, K, Na)을 원자 흡광분광분석기로 측정하였다. 식물체 중의 질소함량은 분해 10mL를 취하여 질소 증류장치(Kjeldahl 2300, FOSS, Sweden)를 이용하여 측정하였다. 인산은 Vanadate법에 의하여 측정하였으며, 식물체 분해액 4mL와 발색시약 Ammonium meta vanadate 4mL를 가하여 30℃에서 30분간 정치 후 분광광도계를(UV-2100, Shimadzu, Japan)이용하여 470nm 파장에서의 흡광도를 측정하였다. 이때 표준용액의 인산함량(0, 5, 10, 30, 50 mg · L⁻¹)에 따른 흡광도도 시료액의 조작과정과 똑같은 과정을 거쳐 측정하고 표준곡선을 작성하고, 이 표준곡선으로부터 유효인산의 양을 구하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 계절별 광합성률

1.1. 6월 광합성률

윗세오름 지역 건전개체의 경우 15℃의 비교적 저온조건에서 광합성률이 높았고, 20℃, 25℃의 순으로 낮게 나타났다. 쇠퇴한 지역 개체의 경우 역시 15℃에서의 광합성률이 가장 높았으나 건전개체에 비해서는 69%정도 낮은 수준이었다. 또한 25℃에서의 광합성률이 가장 낮았다(Fig. 3).

영실 지역의 건전개체의 경우도 15℃에서의 광합성률이 높았고, 20℃, 25℃의 순으로 낮게 나타났다. 쇠퇴한 지역 개체의 경우 15℃에서의 광합성률이 가장 높았으며 건전개체에 비해서는 11%정도 낮은 수준을 보였다. 또한 15℃에서의 광합성률이 25℃에서 광합성률보다 74%정도 높게 나타나 건전개체의 경우보다 그 차이가 더 컸다(Fig. 4).

성판악 지역의 건전개체의 경우 또한 15℃에서의 광합성률이 높았고, 20℃, 25℃의 순으로 낮게 나타났으며 10℃에서의 광합성률이 25℃에서의 광합성률보다 56% 정도 높게 조사되었다. 쇠퇴한 지역의 개체 경우 5℃와 10℃에서의 광합성률이 가장 높았으며 건전개체의 비해서는 49%정도 낮은 수준 이었다(Fig. 5).

위의 결과로 보아 세 지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체보다 광합성률이 높았다. 15℃의 비교적 저온조건에서 세 지역 모든 건전개체와 쇠퇴개체에서 가장 높은 광합성률을 보였으며 상대적으로 고온조건에서는 낮은 광합성률을 보여 구상나무는 생육적온이 15℃전후의 저온이라고 할 수 있겠다.

지역별 건전개체와 쇠퇴개체의 광합성률 차이는 윗세오름이 69% 가장 높았고 성판악, 영실 순으로 높은 것을 볼 수 있었다. 영실지역의 쇠퇴개체의 광합성률이 15℃와 20℃에서 다른 두 지역보다 높았지만 비교적 고온인 25℃에서 가장 낮은 광합성률을 보여 고온일 때 피해를 가장 많이 받을 수 있을 것으로 보인다.

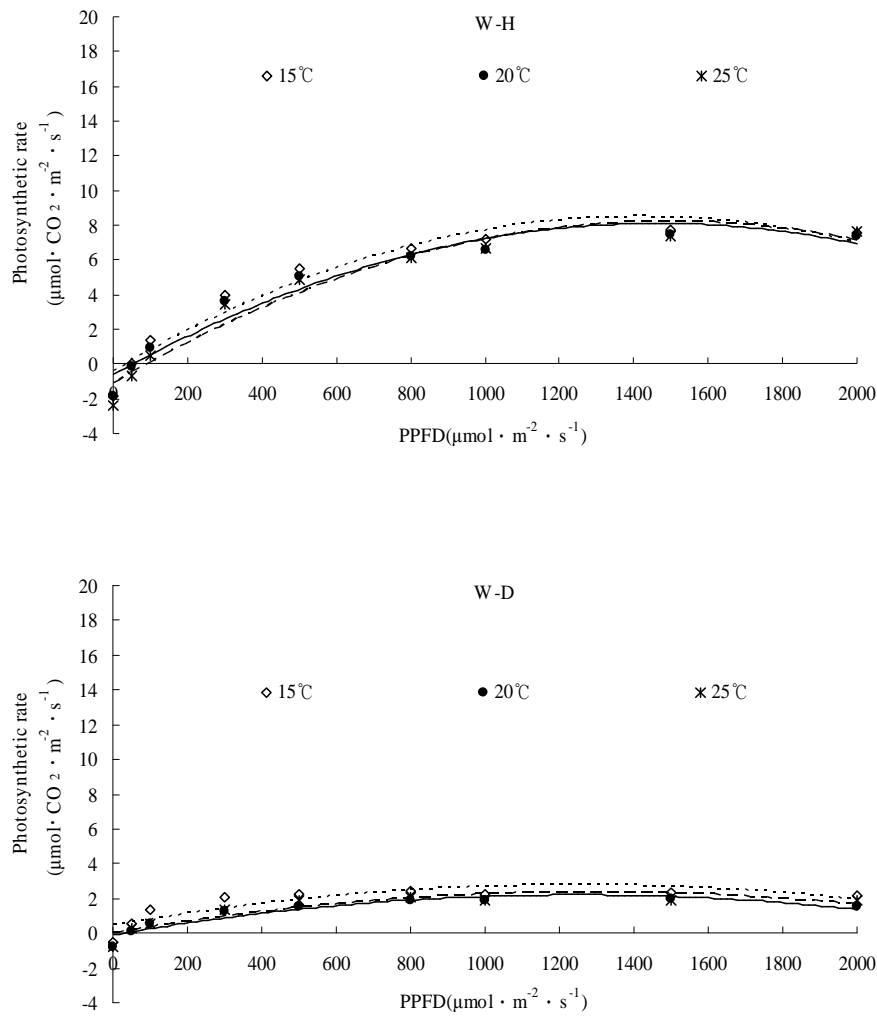


Fig. 3. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown *Abies koreana* at Witseorum in June.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree.

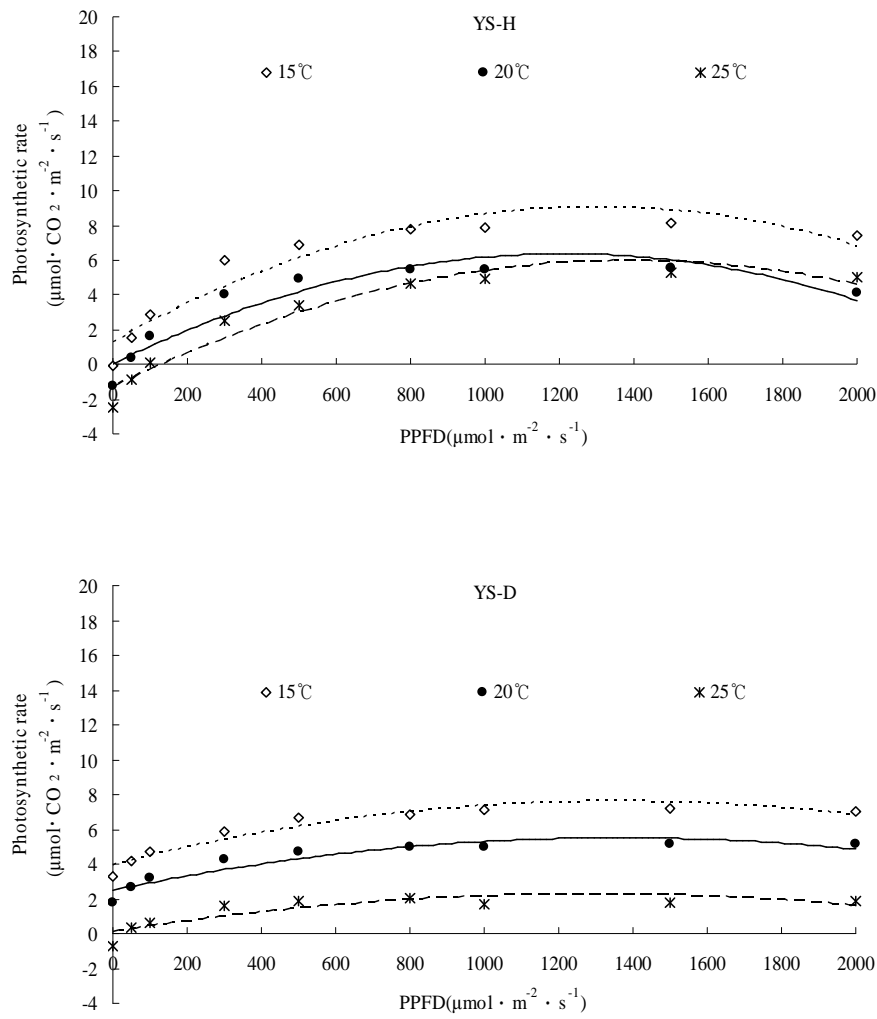


Fig. 4. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown *Abies koreana* at Youngsil in June.

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree.

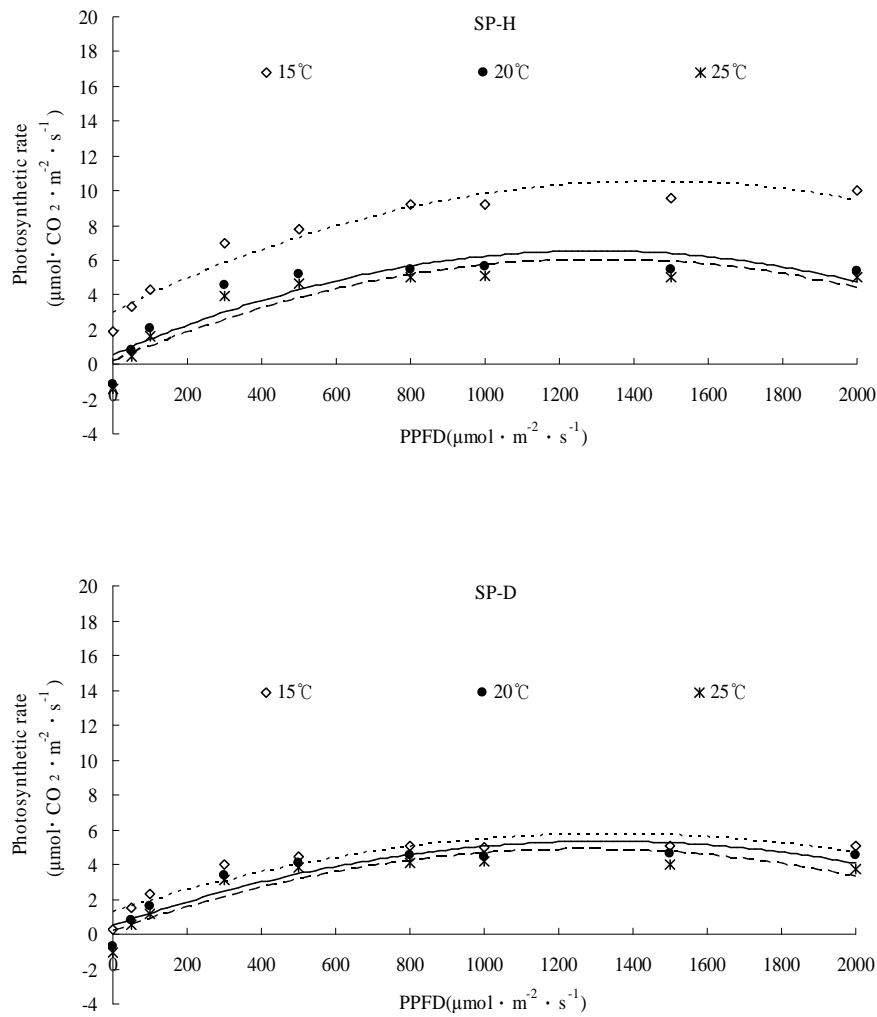


Fig. 5. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown *Abies koreana* at Sungpanak in June.

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

1.2. 8월의 광합성률

20°C에서의 광합성능력은 쇠퇴한 개체에 비해서 건전한 개체에서 같은 광도에 서 광합성능력이 높은 것으로 관찰되었다. 지역별로 비교할 때 영실지역의 구상

나무가 다른 지역보다 같은 광도에서 일반적으로 높은 것으로 나타났다(Fig. 6).

윗세오름지역의 구상나무는 건전한 개체와 쇠퇴목과의 차이가 72%정도 나고 성판악지역의 건전개체와 쇠퇴목의 광합성능력의 차이는 35%정도 이상 차이가 났으며 영실지역의 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이는 25%정도 차이가 나타나 윗세오름지역에서 같은 지역 내에서 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이가 가장 많이 나타났으며 세지역의 쇠퇴개체에서 광합성능력이 가장 낮게 나타났다.

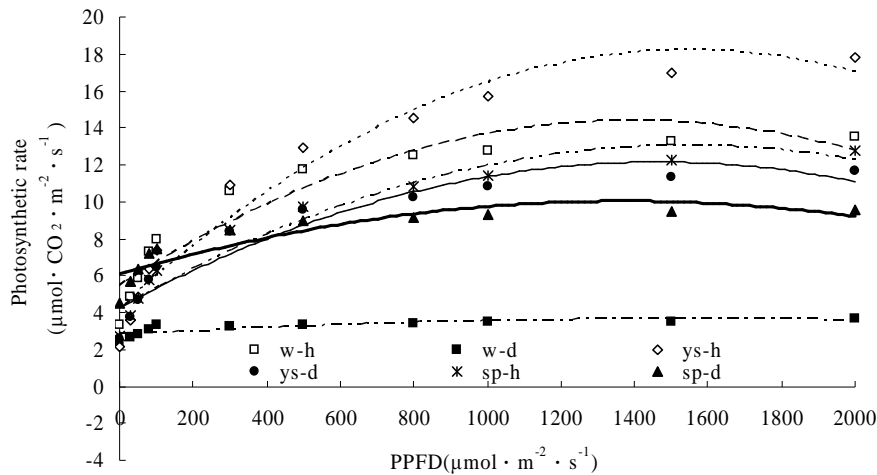


Fig. 6. Differences in photosynthetic rate of naturally grown *Abies koreana* in three survey sites in August.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

1.3. 9월의 광합성률

윗세오름 지역 건전개체의 경우 20℃에서 광합성률이 높았고, 15℃, 25℃의 순으로 낮게 나타났으며 쇠퇴한 지역 개체의 경우는 15℃에서의 광합성률이 가장 높았고, 25℃, 20℃의 순으로 낮게 나타났다(Fig. 7).

영실 지역의 건전개체의 경우 15℃에서의 광합성률이 높았고 20℃, 25℃의 순으로 낮게 나타났으며 15℃에서의 광합성률이 25℃에서의 광합성률 보다 38% 정도 높게 났고 쇠퇴한 지역 개체의 경우 20℃에서 광합성률이 가장 높았으며 15℃, 25℃순으로 낮게 나타났다(Fig. 8).

성판악 지역의 건전개체의 경우 15℃에서의 광합성률이 높았고 25℃, 20℃의 순으로 낮게 나타났으며 쇠퇴한 지역의 개체 경우 20℃에서의 광합성률이 가장 높았으며 15℃, 25℃ 순으로 낮게 나타났다(Fig. 9).

세 지역에서 건전개체가 쇠퇴개체에 비해 높은 광합성률을 보였지만 그 정도가 미미했고 온도변화에 따른 광합성률은 비교적 고온 조건일 때 낮은 값을 보였다.

구상나무의 광합성속도의 변화는 모든 지역에서 건전개체가 쇠퇴개체에 비해서 높은 광합성률을 보였으며 계절별로 보면 전반적으로 8월에 건전개체에서 높은 광합성률을 보였으며 반면 생장초기인 6월에 건전개체에서 낮은 광합성률을 나타냈다.

구상나무는 낮은 온도환경에 적응하여 살아 왔기 때문에 현재 연구의 결과처럼 온도가 낮을수록 높은 광합성률을 보였다. 6월과 8월의 경우 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이가 뚜렷이 나타나지만 9월에 쇠퇴개체의 광합성률이 다시 회복되는 양상을 나타냈다.

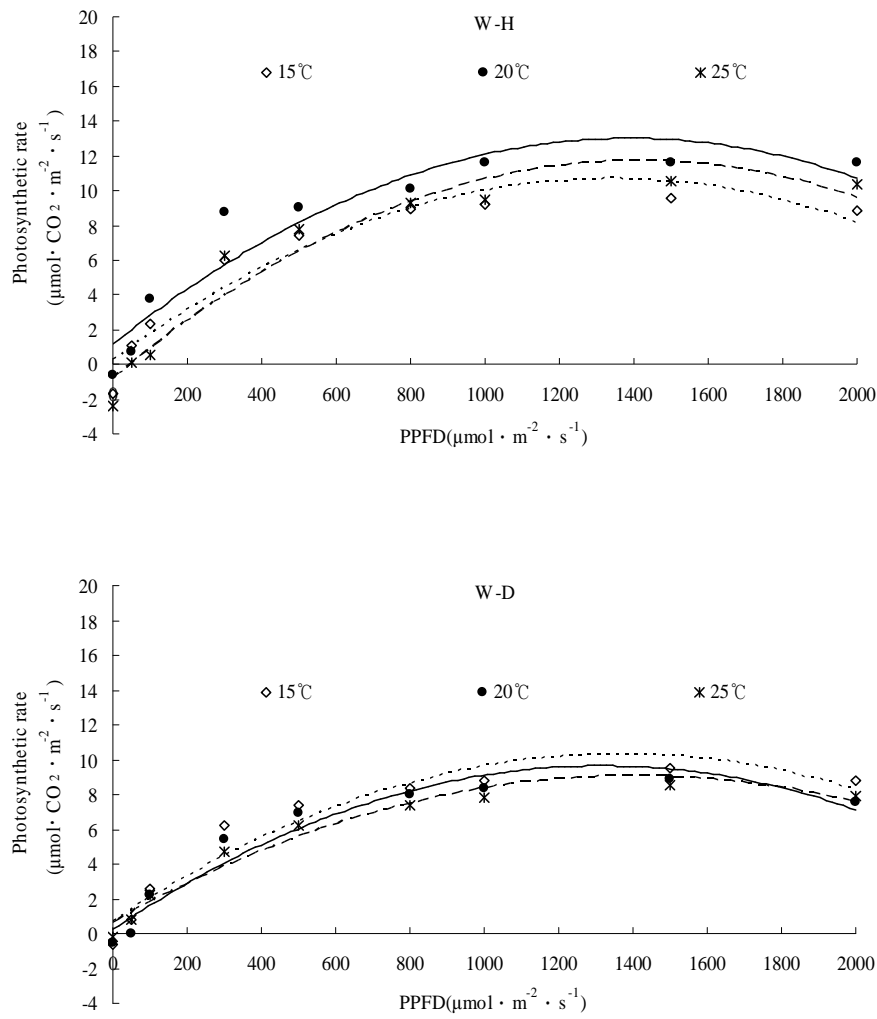


Fig. 7. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown *Abies koreana* at Witseorum in September.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree.

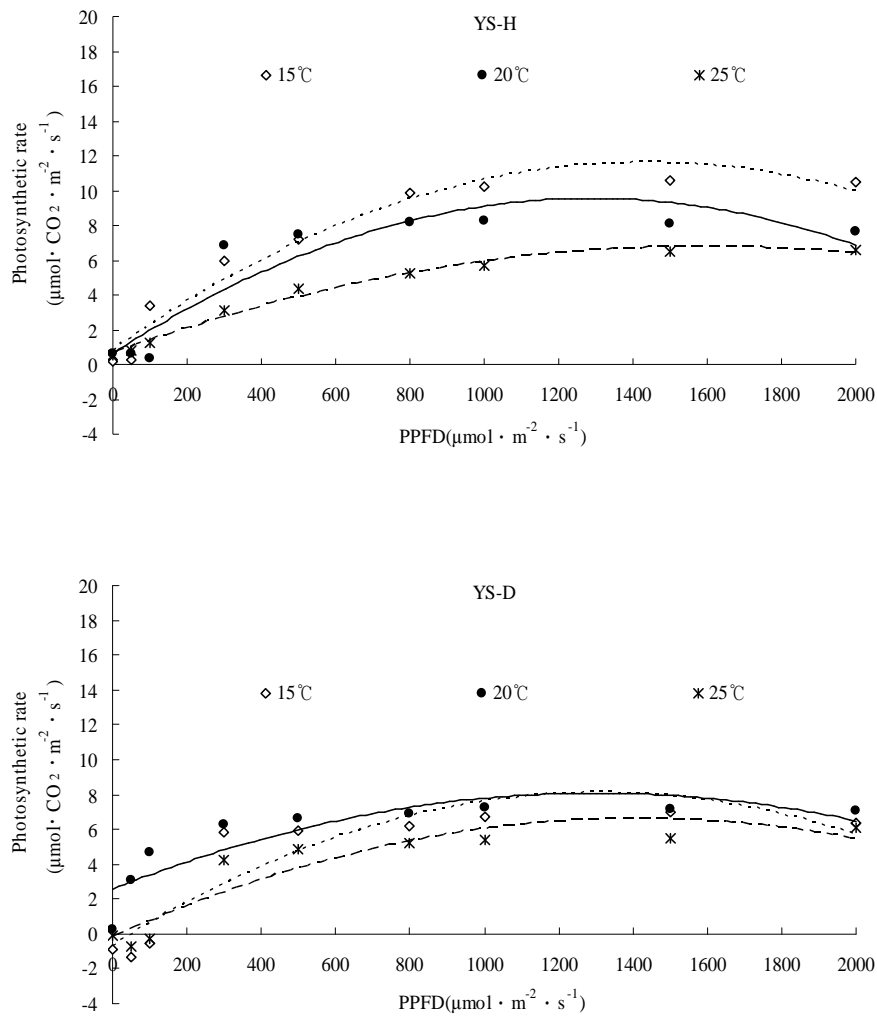


Fig. 8. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown *Abies koreana* at Youngsil in September.

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree.

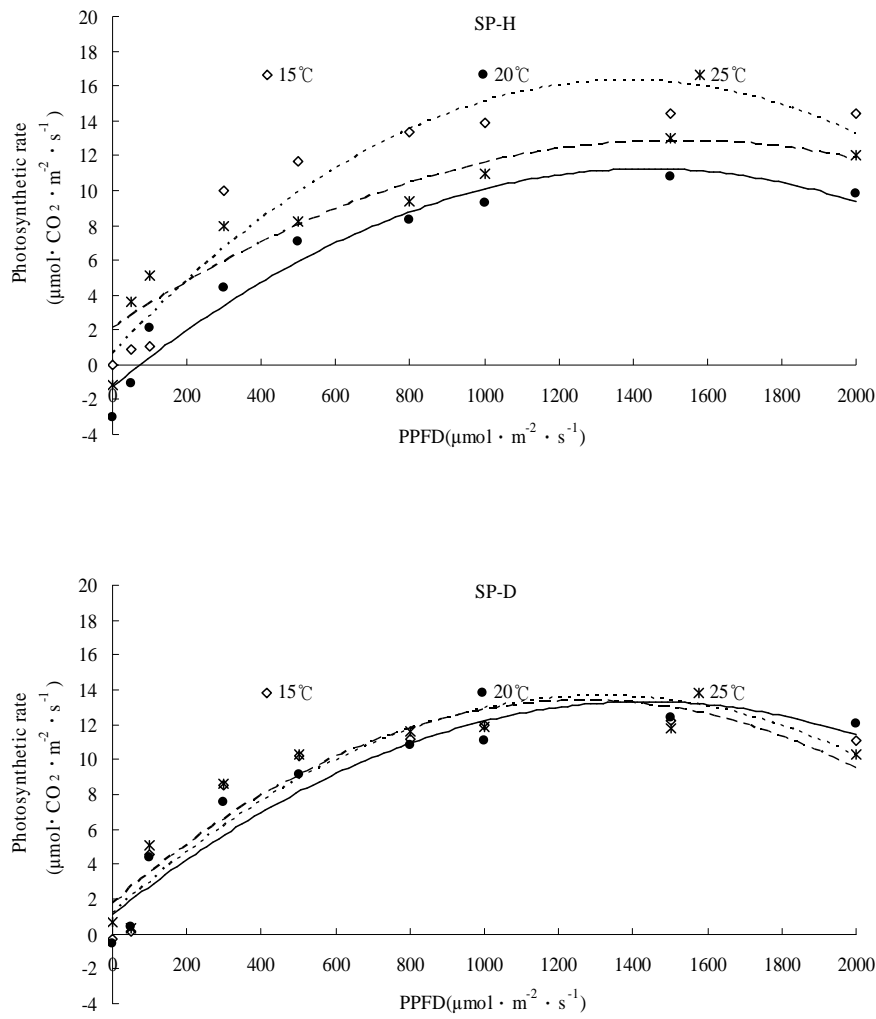


Fig. 9. The effect of temperature on the photosynthetic rate naturally grown *Abies koreana* at Sungpanak in September.

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

2. 계절별 기공전도도

2.1. 6월의 기공전도도

윗세오름 지역 건전개체의 경우 비교적 고온조건인 20℃에서 가장 높았고 25℃, 15℃순으로 낮게 나타났으며 20℃에서의 기공전도도가 15℃에서의 기공전도도 보다 거의 18%정도 높게 나타났다. 쇠퇴한 지역의 개체는 25℃에서 가장 높았고 20℃, 15℃순으로 낮게 나타났고 각 개체간의 가장 높은 기공전도도의 차이는 78%정도 차이로 쇠퇴개체의 기공전도도가 낮게 나타났다. 25℃에서 기공전도도가 15℃에서의 기공전도도 보다 49%정도 높게 나타나 건전개체 경우보다 높은 차이를 보였다(Fig. 10).

영실 지역 건전개체의 경우 25℃에서의 기공전도도가 가장 높았고 15℃, 20℃, 순으로 낮게 나타났으며 쇠퇴한 지역의 개체는 20℃에서 가장 높았으며 건전개체 25℃에서와는 35%정도 낮은 수준이었다. 15℃, 25℃순으로 낮게 나타났으며 20℃에서의 기공전도도가 25℃에서의 기공전도도 보다 거의 43%정도 높게 나타나 건전개체 보다 높은 차이를 보였다(Fig. 11).

성판악 지역 건전개체의 경우 25℃에서 가장 높았고 20℃, 15℃ 순으로 낮은 경향을 보였고 25℃에서의 기공전도도가 15℃에서의 기공전도도 보다 28%정도 높게 나타났다. 쇠퇴한 지역의 개체는 25℃에서 가장 높았으나 건전개체에 비해서는 14%정도 낮은 수준이었다. 20℃, 15℃순으로 낮게 나타났으며 25℃에서 기공전도도가 15℃에서의 기공전도도 보다 26%정도 높게 나타나 건전개체보다는 낮은 차이를 보였다(Fig. 12).

Faria et al.(1996)은 기공단힘이 순광합성속도를 제한하는 중요한 요소이기 때문에 기공전도도와 순광합성속도 사이에는 정의 상관관계가 있다고 하였으며, 위의 결과로 보아 세 지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체에 비하여 기공전도도가 높게 나타났는데 이것은 광합성률 역시 같은 경향을 보였다.

온도에 따른 기공전도도는 세 지역 모두 비교적 고온일때 높은 값을 보였는데 광합성에서는 반대로 고온일때 낮은 값을 보였다.

건전한 개체를 대상으로 볼 때 윗세오름 지역의 기공전도도가 가장 높았고 영

실지역, 성판악 지역 순으로 낮게 나타났으며 쇠퇴한 개체를 대상으로 볼 때는 성판악 지역이 가장 높았으며 영실지역, 윗세오름 지역 순으로 낮은 기공전도도를 나타내었다.

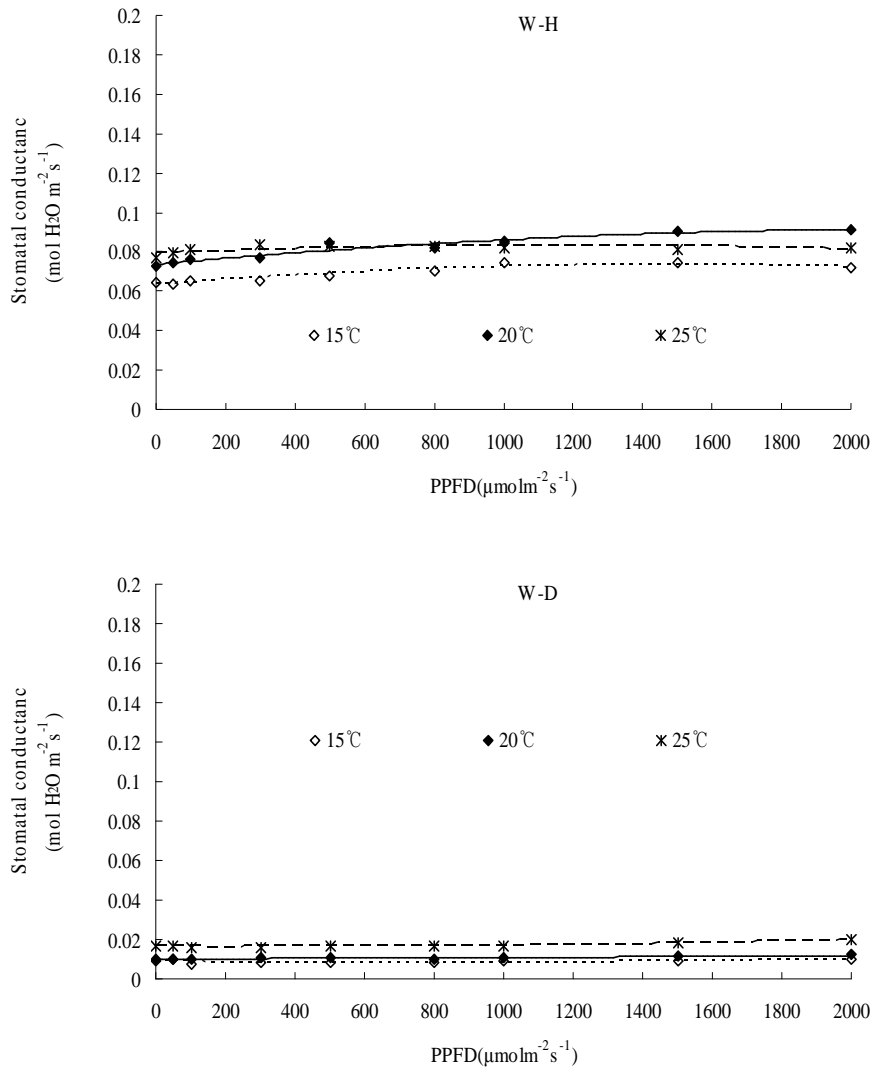


Fig. 10. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown *Abies koreana* at Witseorum in June.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree.

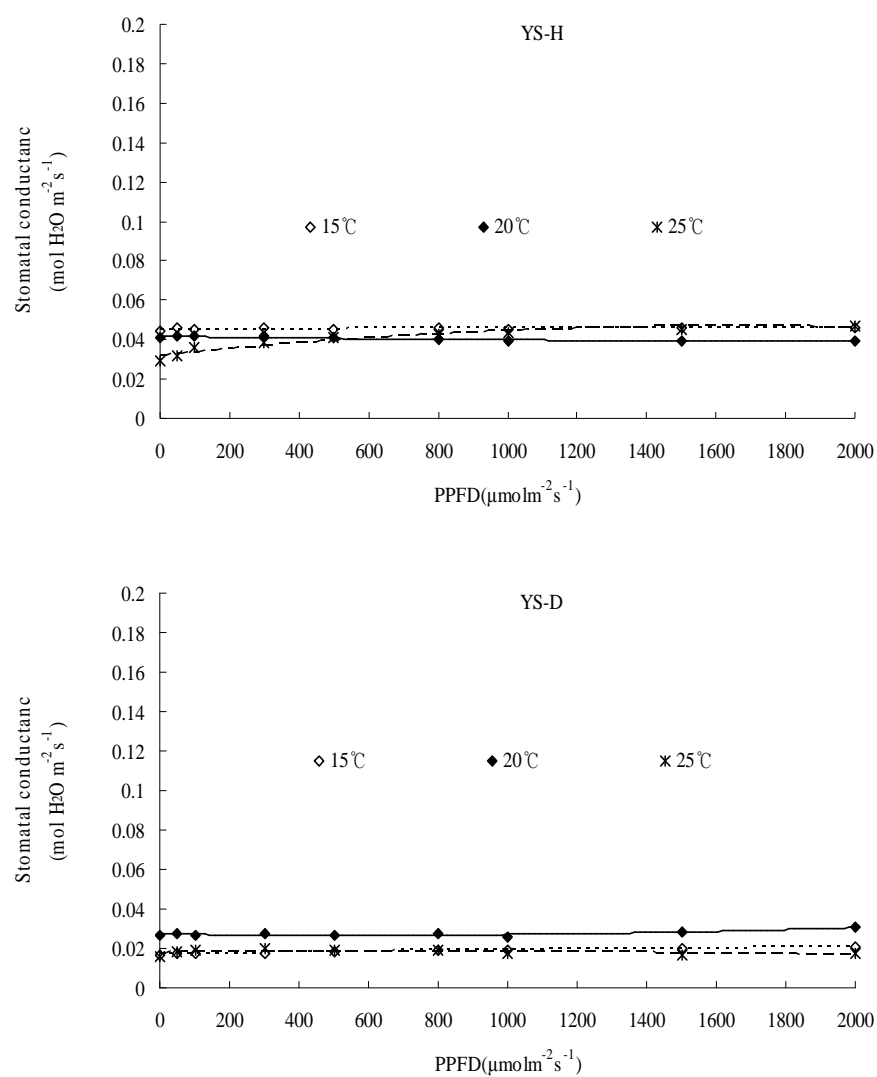


Fig. 11. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown *Abies koreana* at Youngsil in June.

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree.

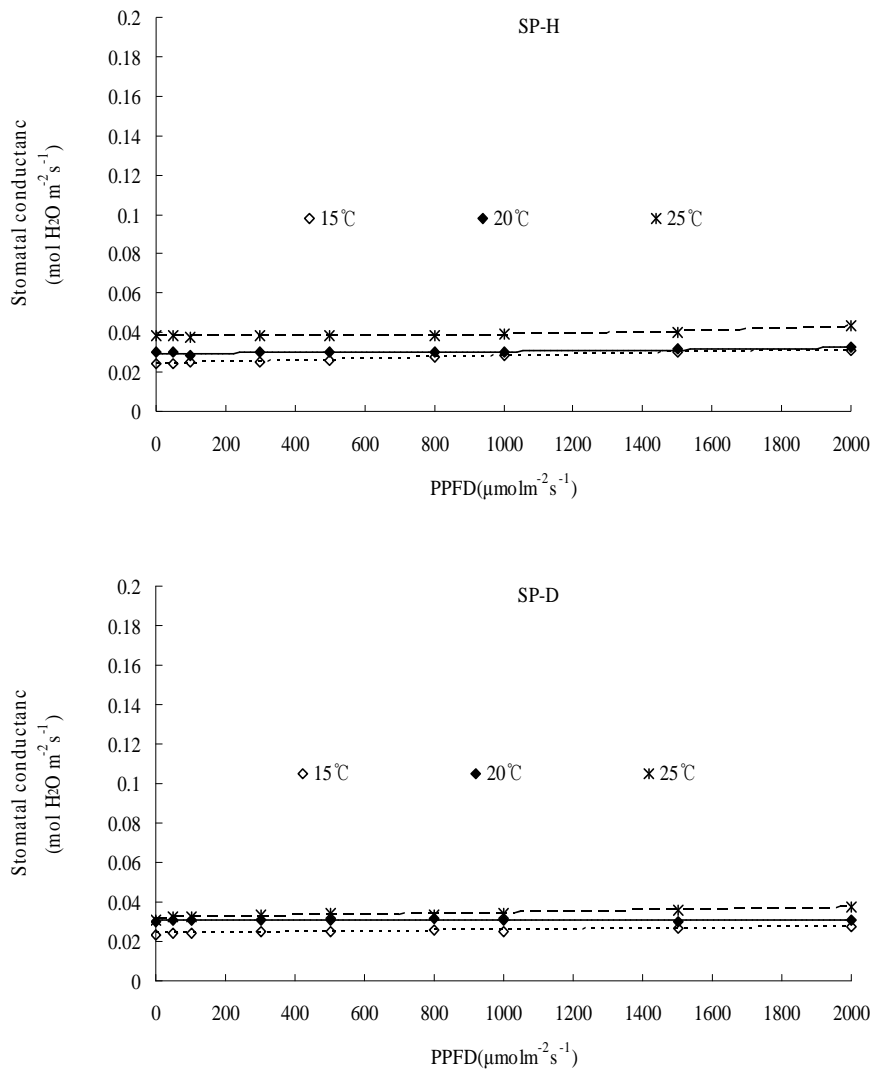


Fig. 12. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown *Abies koreana* at Sungpanak in June.

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

2.2. 8월의 기공전도도

20°C에서의 기공전도도는 세 지역 모두 같은 지역 내에서 건전개체가 쇠퇴개체에 비해서 더 높은 기공전도도를 보였으며 지역별로 비교하여 볼 때 영실지역

에서의 쇠퇴개체와 건전개체 모두 기공전도도가 다른 지역보다 높게 나타났으며 상대적으로 건전개체의 경우 성판악 지역에서의 기공전도도가 가장 낮게 나타났다. 윗세오름 지역의 구상나무는 건전한 개체와 쇠퇴개체간의 차이가 91%정도 낮으며 성판악지역의 건전개체와 쇠퇴개체의 기공전도도의 차이는 32%정도 차이를 보였고 성판악 지역의 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이는 64%정도를 보였다 (Fig. 13).

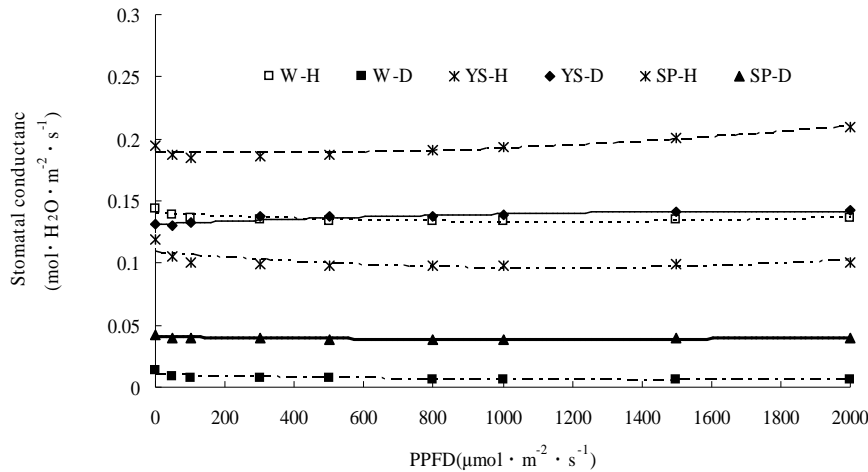


Fig. 13. Differences in stomatal conductance of naturally grown *Abies koreana* in three survey sites in August.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,
 YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,
 SP-H: Sungpanak-healthy tree. SP-D: Sungpanak-damaged tree.

2.3. 9월의 기공전도도

윗세오름 지역의 건전개체의 경우 15℃에서 가장 높았으며 25℃, 20℃순으로 낮게 나타났으며 15℃에서의 기공전도도가 20℃에서의 기공전도도 보다 거의 85%정도 높게 나타나 그 차이가 크게 나타났다.

쇠퇴한 지역의 개체는 20℃에서 가장 높았고 25℃, 15℃순으로 낮게 나타나 20℃에서의 기공전도도와 15℃에서의 기공전도도의 차이는 13%정도 차이가 나 건전

개체 보다는 그 차이가 적게 나타났다(Fig. 14).

영실 지역 건전개체의 경우 15℃에서의 기공전도도가 가장 높았고 20℃, 25℃ 순으로 낮게 나타났으며 가장 높은 15℃에서의 기공전도도가 가장 낮은 25℃에서의 기공전도도와 차이는 6%정도였다.

쇠퇴한 지역에서의 기공전도도는 20℃에서 가장 높았고 25℃, 15℃순으로 낮게 나타났으며 20℃에서의 기공전도도와 15℃에서의 기공전도도의 차이는 15%정도 나타났으며 건전개체 보다는 높게 나타났다(Fig. 15).

성판악 지역 건전개체의 경우 기공전도도는 15℃에서 가장 높았으며 20℃, 25℃ 순으로 낮게 나타났고 15℃와 25℃와의 기공전도도의 차이는 22%정도였다.

쇠퇴한 지역에서의 기공전도도는 15℃에서 가장 높았고 20℃, 25℃순으로 낮게 나타났으며 15℃와 25℃와의 기공전도도의 차이는 6%정도로 건전개체보다는 낮았다(Fig. 16).

식물의 생리활동은 기공을 통하여 이루어지고, 기공기작은 육상식물의 광합성, 호흡, 증산, 기공전도도, 엽육세포 간극의 이산화탄소농도 등과 같은 생리활동을 제어하는 중요한 생리적 작용이며 광합성속도 측정시 대기로의 수분확산속도의 크기를 의미하는 기공전도도를 측정하여 기공개폐의 정도를 알 수 있다. 기공전도도는 광도, 증기압포차, 이산화탄소 농도, 기온, 상대습도 등과 같은 여러 가지 환경인자들의 변화에 영향을 받으며 작용한다(Hinckley and Braatne, 1994).

또한 Reich *et al.*(1985)는 광합성능력이 낮은 개체들이 대부분 기공전도도가 낮은 것으로 보여져 이들 개체들은 광합성에 필요한 CO₂ 가스가 교란을 받아서 광합성에 영향을 미칠 수 있다. 원활한 가스 교환이 이루어지지 않고 광합성에 필요한 CO₂를 기공이 닫힘으로 인해서 충분히 확보하지 못해 결국 광합성능력에 지장을 주었을 것으로 보인다고 보고했다.

기공전도도 또한 9월의 쇠퇴개체에서 어느 정도 회복이 나타나 광합성률과 비슷한 경향을 보여 기공전도도가 광합성률에 크게 기여 한다고 보여지며 기공전도도가 크면 광합성률 또한 증가한다는 것을 알 수 있었다.

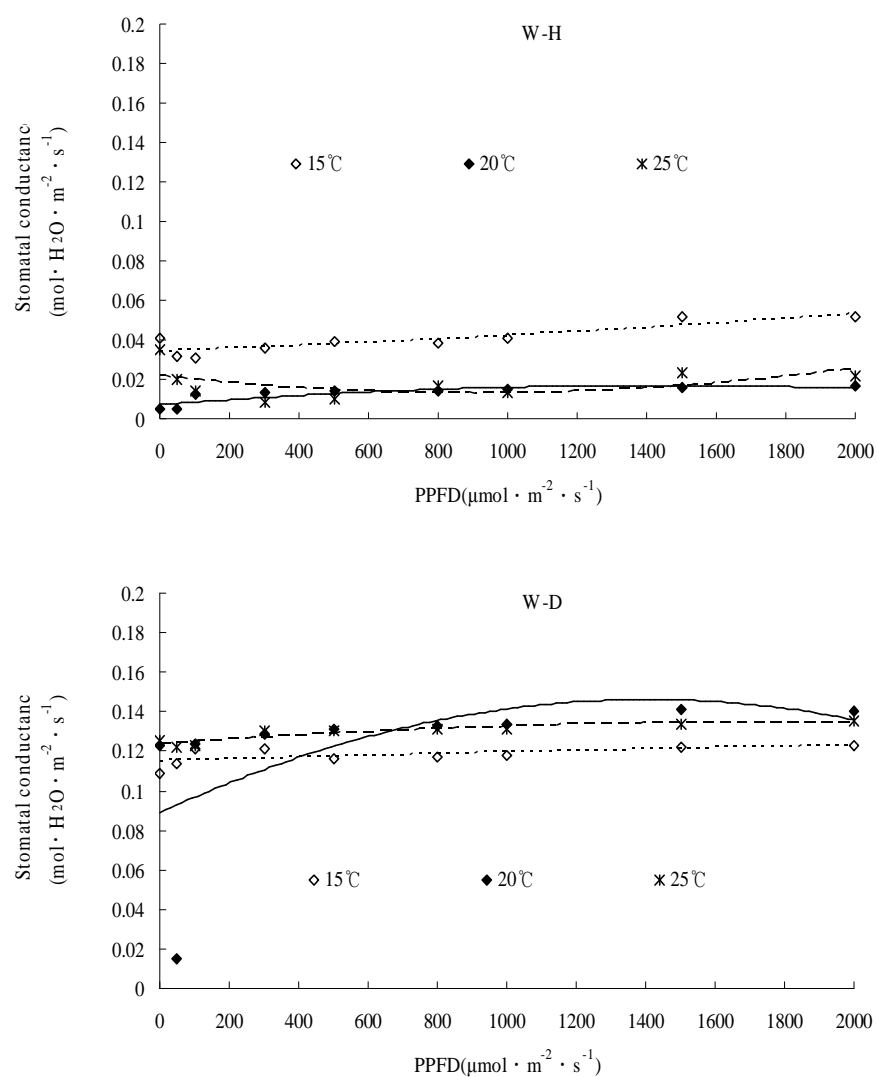


Fig. 14. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown *Abies koreana* at Witseorum in September.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree.

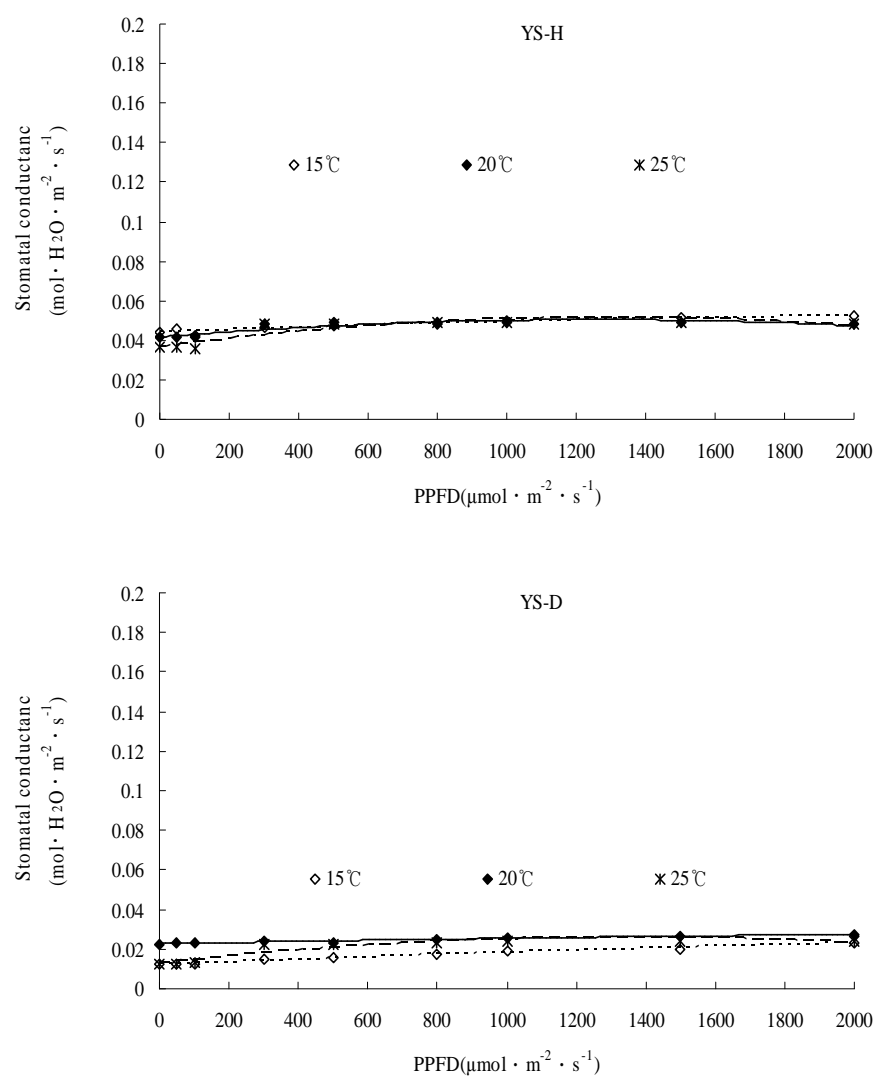


Fig. 15. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown *Abies koreana* at Youngsil in September.

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree.

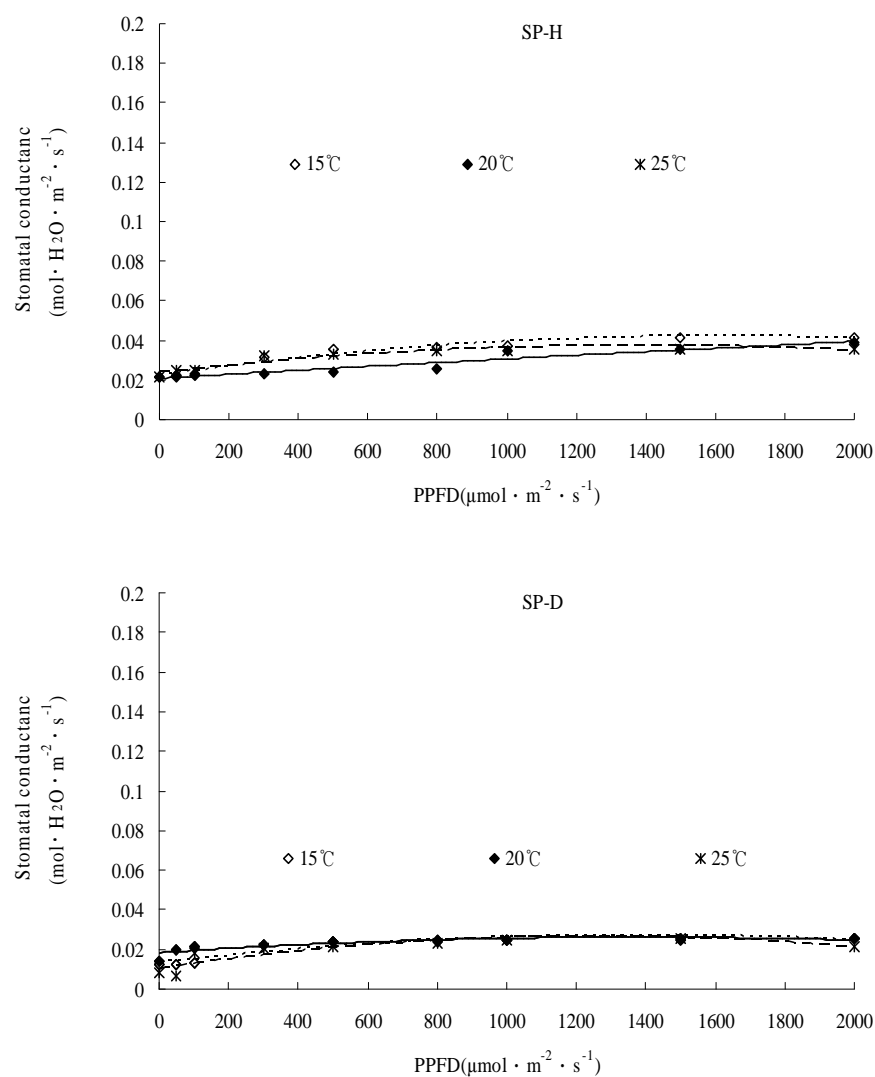


Fig. 16. The effect of temperature on the stomatal conductance naturally grown *Abies koreana* at Sungpanak in September.

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

3. 계절별 수분이용효율

3.1. 6월의 수분이용효율

윗세오름 지역에서 건전개체 보다 쇠퇴개체에서 높은 수분이용효율을 보였다. 건전개체의 경우 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 온도가 높아질수록 수분이용효율은 낮아지는 경향을 보여, 25℃에서는 5℃에 비해 45%정도 낮았다.

쇠퇴개체에서는 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 나타냈고 건전개체와는 55%정도 높은 수준 이였고 20℃, 25℃순으로 낮아졌다. 15℃에서의 수분이용효율이 25℃에서의 수분이용효율보다 67%정도 높게 나타났다(Fig. 17).

영실 지역에서 전반적으로 건전개체 보다 쇠퇴개체에서 높은 수분이용효율을 보였다. 건전개체의 경우 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 20℃, 25℃순으로 낮아지는 경향을 보였다. 15℃에서의 수분이용효율이 25℃에서의 수분이용효율 보다 63%정도 높게 나타났다. 쇠퇴개체에서는 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 건전개체와는 41%정도 높은 수준 이였으며 20℃, 25℃순으로 낮아졌다. 15℃에서의 수분이용효율이 25℃에서의 수분이용효율보다 83%정도 높은 경향을 보였다(Fig. 18).

성판악 지역에서는 전반적으로 쇠퇴개체와 건전개체간 수분이용효율은 거의 비슷한 수준 이였고, 건전개체의 경우 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 20℃, 25℃순으로 낮아지는 경향을 보였고 15℃에서의 수분이용효율이 25℃에서의 수분이용효율보다 42%정도 높게 나타났다. 쇠퇴개체에서는 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 건전개체와는 17%정도 높았으며 20℃, 25℃순으로 낮아지는 경향을 나타냈다. 15℃에서의 수분이용효율이 25℃에서의 수분이용효율보다 56%정도 높았다(Fig. 19).

위의 결과로 보아 세 지역에서 쇠퇴개체의 수분이용효율이 건전개체의 수분이용효율보다 더 높은 경향을 보였으며 세 지역에서 건전개체에서 더 높은 광합성률을 하고 기공전도도 역시 더 높아 증산량을 늘려 상대적으로 수분이용효율이 낮아지는 결과를 가져온 것이라고 보인다.

세지역 모두 건전개체와 쇠퇴개체의 수분이용효율이 전반적으로 저온일 때 높

은 것을 볼 수 있었다.

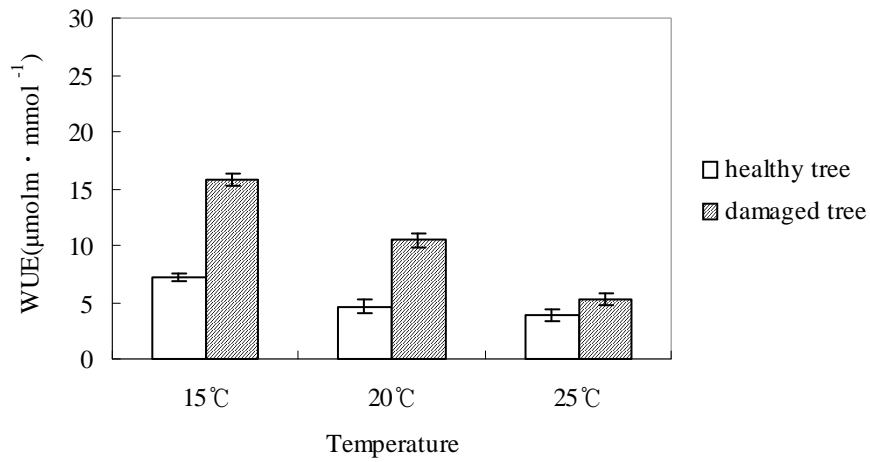


Fig. 17. The effect of temperature on the water use efficiency(WUE) naturally grown *Abies koreana* at Witseorum in June.

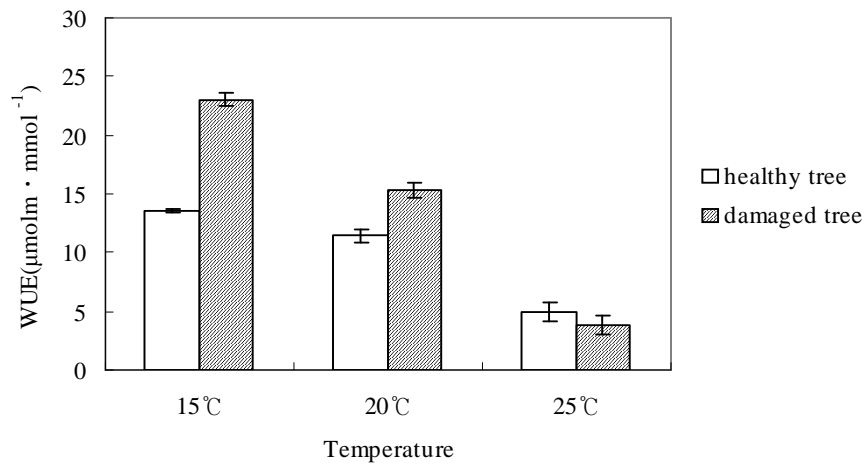


Fig. 18. The effect of temperature on the water use efficiency(WUE) naturally grown *Abies koreana* at Youngsıl in June.

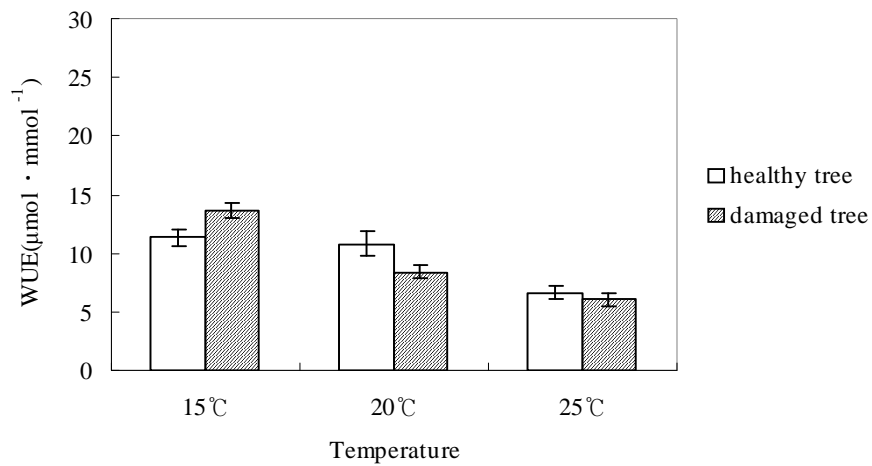


Fig. 19. The effect of temperature on the water use efficiency(WUE) naturally grown *Abies koreana* at Sungpanak in June.

3.2. 8월의 구상나무의 수분이용효율

수분이용효율은 일반적으로 영실지역이 쇠퇴목이나 건전한 개체나 공통적으로 다른 지역의 수분이용효율보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 20). 또한 쇠퇴개체의 경우에 건전한 생장을 하는 개체에 비해서 높은 경향을 나타냈다. 이는 쇠퇴개체의 경우에 광합성능력이 거의 비슷한 상황에서 증산량이 낮아지는 이유로 인해서 쇠퇴개체의 수분이용효율이 높은 것으로 나타난 것으로 짐작된다.

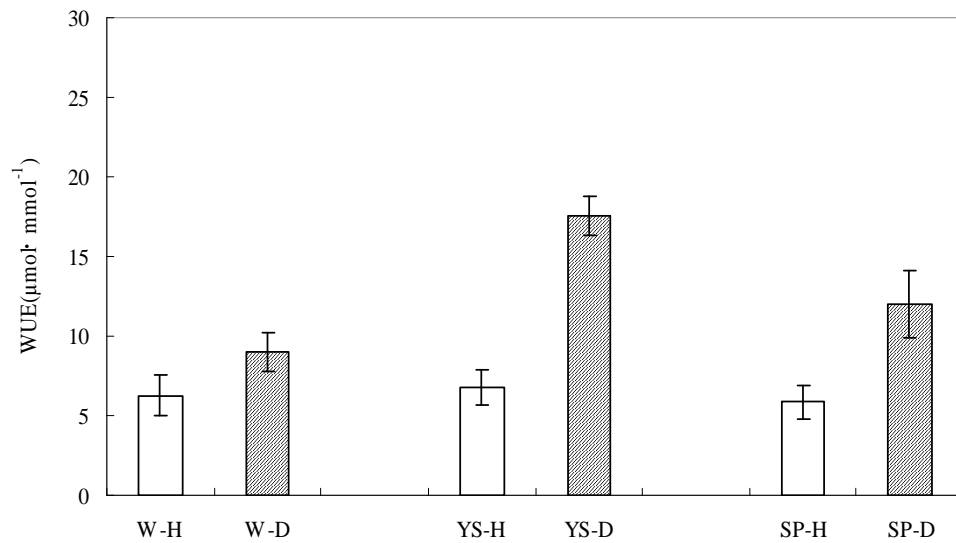


Fig. 20. Water use efficiency(WUE) of *Abies koreana* in three sites in August.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

3.3. 9월의 구상나무의 수분이용효율

윗세오름 지역에서 25℃를 제외하고 건전개체가 쇠퇴개체보다 약간 높은 수분이용효율을 보였다. 건전개체의 경우 15℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 쇠퇴개체에서는 20℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 건전개체의 15℃에서 수분이용효율이 쇠퇴개체의 20℃에서 수분이용효율에 비해 60%정도 높은 수준이었다(Fig. 21).

영실 지역에서 전반적으로 25℃를 제외하고 건전개체보다 쇠퇴개체에서 높은 수분이용효율을 보였다. 건전개체의 경우 25℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였으나 쇠퇴개체의 경우는 20℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였다(Fig. 22).

성판악 지역에서는 전반적으로 건전개체 보다 쇠퇴개체에서 더 높은 수분이용효율을 보였다. 건전개체의 경우 25℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였고 쇠퇴개체의 경우는 20℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보였다(Fig. 23).

퇴개체에서도 25℃에서 가장 높은 수분이용효율을 보여 비슷한 경향을 나타냈다 (Fig. 23).

위의 결과로 보아 세 지역 중에서 윗세오름이 가장 낮은 수분이용효율을 보였고 전반적으로 세 지역 모두 쇠퇴개체가 건전개체에 비해 높은 수분이용효율을 보였다.

수분이용효율은 광합성 동화산물에 대한 수분손실률로서 기공전도도 감소에 따라 증산량이 감소할 수 있으므로 수분이용효율이 증가할 수 있고, 광합성증가와 기공전도도 감소에 따른 증산율의 감소를 수분이용효율이 증가될 수 있음을 알 수 있다. Hamerlynck and Knapp(1996), 그리고 Penuelas *et al.*(1998)은 낮은 기공전도도는 높은 수분이용효율로 나타난다고 보고했다. 이 연구에서도 가장 높은 수분이용효율 나타낸 개체에서 가장 낮은 기공전도도를 나타내 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

전반적으로 건전개체에 비해 쇠퇴개체에서 높은 수분이용효율을 보였고 이로 보아 쇠퇴개체에서 기공활동의 저하로 증산률 또한 낮아져 결국 광합성이 떨어지는 것으로 보여진다.

9월에 가장 높은 수분이용효율을 보였으며 반면 8월에 낮은 수분이용효율을 나타냈으며 9월에 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이가 낮아져 광합성률과 기공전도도와 비슷한 경향을 보였다.

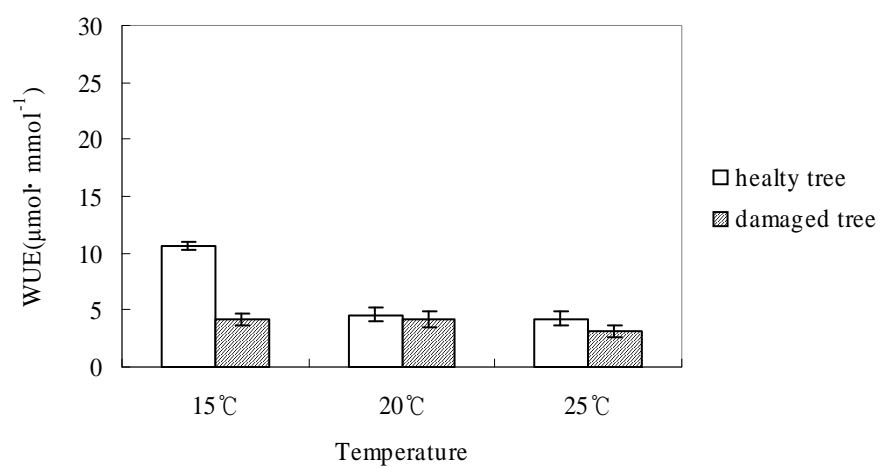


Fig. 21. The effect of temperature on the water use efficiency(WUE) naturally grown *Abies koreana* at Witseorum in September.

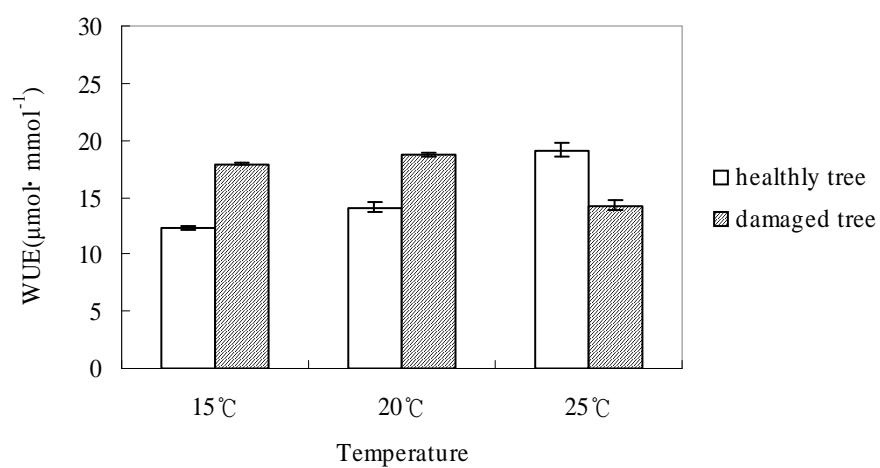


Fig. 22. The effect of temperature on the water use efficiency(WUE) naturally grown *Abies koreana* at Youngsıl in September.

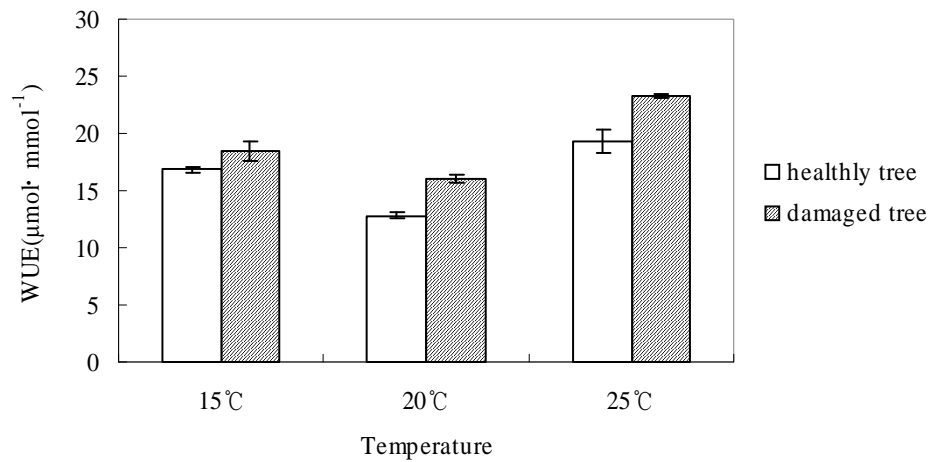


Fig. 23. The effect of temperature on the water use efficiency(WUE) naturally grown *Abies koreana* at Sungpanak in September.

4. 계절별 엽록소 함량

4.1. 6월의 구상나무의 엽록소 함량

세 지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체보다 엽록소 함량이 높게 나타났다.

영실 지역의 건전개체와 쇠퇴개체 모두 다른 두 지역에 비해 엽록소 함량이 많았으며 성판악 지역, 윗세오름 지역 순으로 낮은 경향을 보였다(Fig. 24).

윗세오름 지역의 건전개체가 쇠퇴개체보다 22%정도 높았으며 영실 지역의 건전개체는 쇠퇴개체 보다 15%정도 높았고 성판악 지역의 건전개체는 쇠퇴개체 보다 13%정도 높게 나타났다.

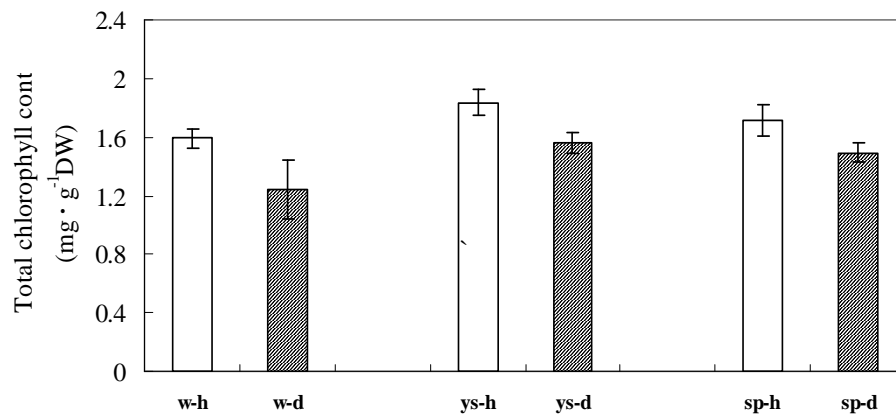


Fig. 24. Total chlorophyll contents of *Abies koreana* in three sites in June.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,
 YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,
 SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

4.2. 8월의 구상나무의 엽록소 함량

총 엽록소 함량은 윗세오름의 경우만 제외하고 다른 지역에서 쇠퇴지역의 개체가 건전한 지역의 개체보다는 높은 경향을 보였다(Fig. 25). 영실지역의 쇠퇴개체가 가장 높은 값을 보였다. 그러나 총 엽록소함량은 성엽, 유엽 그리고 3지역 간에서 일반적인 경향을 보이지는 않았다.

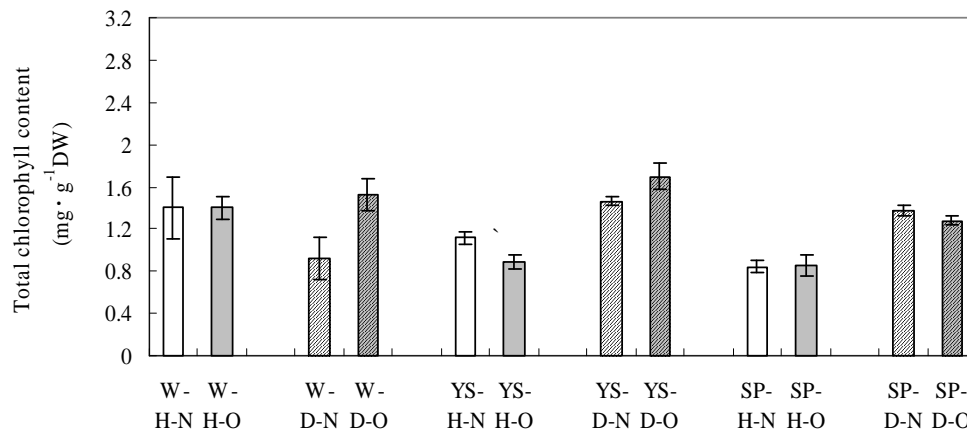


Fig. 25. Total chlorophyll contents in newly developed and old leaf of *Abies koreana* in three sites in August.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,
 YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,
 SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree,
 O-old leaf, N-newly developed leaf.

4.3. 9월의 구상나무의 엽록소 함량

윗세오름을 제외한 두 지역에서 쇠퇴개체가 건전개체보다 엽록소 함량이 높게 나타났다. 성판악 지역의 건전개체와 쇠퇴개체가 다른 두 지역에 비해 엽록소 함량이 많았으며 영실의 건전개체가 가장 낮은 엽록소 함량을 보였다(Fig. 26).

엽록소는 식물이 광합성을 하는데 필수적인 색소로 알려져 있고 지구상에 가장 많은 색소 가운데 하나다. 엽록소 함량은 일반적으로 광합성 능력과 비례하는 것으로 알려져 있는데, 식물의 엽록소는 대기오염 같은 스트레스를 받으면 황화나 백화현상으로 파괴되므로 엽록소 함량을 분석해서 광합성 효율을 간접적으로 추정하면 식물이 대기오염과 여러 환경적 스트레스에 피해를 받고 있는지 아닌지를 알 수 있다(Baczek and Koscielniak, 2003).

Grimm and Fuhrer(1992)는 엽록소 함량이 광합성능력에 비례해서 나타난다고

하였는데 이번 실험에서는 다른 경향을 보여 엽록소 함량의 변화와 광합성율의 변화 사이에는 나타날 수 있는 직접적인 연관성을 발견할 수 없어 쇠퇴개체에서 광합성률이 저하가 엽록소와는 직접적인 관련이 없는 것으로 보여진다.

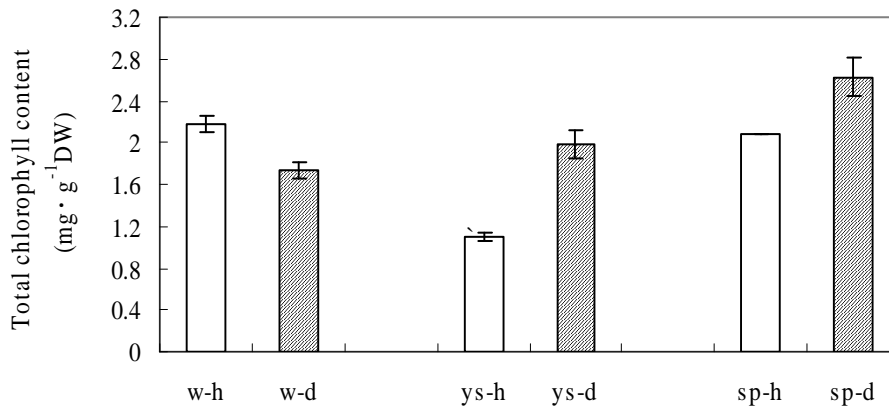


Fig. 26. Total chlorophyll contents of *Abies koreana* in three sites in September.

.W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

5. 계절별 항산화효소 활성

식물은 환경요인의 계절적 변화에 따라 여러 가지 생리적 변화를 겪으면서 성장하며 식물이 각종 환경스트레스를 받으면 생체내 산소(O_2)는 반응성이 높은 독성 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)으로 변하여 (Alscher and Hess, 1993), 이들은 강한 산화력을 가지고 있어 핵산, 단백질, 지질 등의 변성과 광합성 억제 등 심각한 생리적 장애를 일으켜 결국 식물체가 고사하게 만든다 (Alscher and Hess, 1993; Asada, 1992). 그러나 식물체가 정상적으로 성장을 유지할 수 있는 것은 독성의 활성산소종을 해독시키는 기능을 갖고 있기 때문이다 (Lidon and Henniques, 1993). 활성산소에 대한 식물의 방어기작은 활성산소의

형성을 억제하거나 생성된 활성 산소를 제거하는 것인데, SOD, *peroxidase* 등의 효소에 의한 방어 기작과 *ascorbic acid* 등의 항산화물질에 의한 방어기작으로 구분할 수 있다(Alscher and Hess, 1993; Inze and Van Montagu, 1995). 그러나 이러한 식물의 반응은 스트레스의 강도나 기간뿐만이 아니라 식물종에 따라서도 항산화효소 활성이 변한다는 점을 고려할 때, 환경스트레스에 대한 식물의 환경 적응성, 방어력 또는 생리적 상태를 확인하는데 사용할 수 있다.

항산화효소들은 각종 스트레스에 의해 과다하게 생성되는 활성산소종을 제거하는 기능을 가지고 있으며, 저분자 항산화제와 마찬가지로 스트레스 하에서 식물의 생존 또는 내성과 관련이 있다(Foyer *et al.*, 1991) 그리고 SOD, APX는 각종 스트레스에 의해 유도되거나 또는 증가하는 것으로 보고 되고 있다(Walker and McKersie, 1993; Anderson *et al.*, 1995; Hodges *et al.*, 1997).

증가된 활성산소를 효율적으로 소거할 수 없다면 광합성 기구는 물론 세포전반에 영향을 미쳐 노화 및 세포사멸 등 심각한 손상을 가할 수 있을 것이다.

식물피해를 유도하는 독성물질인 활성산소는 여러 환경스트레스에 의한 식물장해와 밀접한 관계가 있다고 보고 되었다(Asada, 1992). 즉 활성산소는 스트레스 조건에서 생성되는 강한 반응성을 갖는 물질로서 조직을 산화시켜 식물에 직접적인 피해를 초래한다. 따라서 본 실험에서는 활성산소발생의 지표로서 산화피해를 경감시키는 효소인 과산화수소(H_2O_2)를 물(H_2O)로 해독하는 *ascorbate peroxidase*(APX)와 전자공여체(NADPH)로부터 전자를 받아 환원제(*ascorbate*)를 재생하기 위한 *glutathion reductase*(GR)의 활성을 조사하였다.

6월의 GR활성은 영실지역을 제외하곤 다른 두 지역에서 쇠퇴개체가 건전개체에 비하여 높게 나타났으며 특히 윗세오름 지역이 두 개체간 33%로 현저한 차이를 나타냈고 영실지역은 두 개체가 거의 비슷한 수준을 보였다(Fig. 27).

6월의 APX활성은 지역간의 유의성은 없는 것으로 나타났으며 윗세오름 지역에서는 두 개체가 거의 비슷한 수준 이었고 영실지역은 쇠퇴개체가 건전개체에 비해 56%정도 높게 나타났으며 성판악 지역은 건전개체가 쇠퇴개체에 비하여 34%정도 높은 것으로 조사되었다(Fig. 28).

8월의 APX활성은 다른 두 지역에 비해 비교적 건전한 성판악 지역에서 높은

것으로 나타났으며 건전군락이 쇠퇴군락에 비해 다소 높은 경향을 보였으나 일정한 경향은 없는 것으로 나타났다. 윗세오름지역의 경우는 GR과 달리 쇠퇴군락의 APX활성이 건전군락에 비해 현저하게 높은 것으로 조사되었다(Fig. 27, 28).

9월의 GR활성은 윗세오름에서 쇠퇴개체가 건전개체보다 높게 나타났으며 영실과 성판악은 건전개체가 쇠퇴개체보다 높은 수준을 보였고 영실지역은 두 개체가 거의 55%정도 차이를 보였다(Fig. 27).

9월의 APX활성은 윗세오름과 영실에서 쇠퇴개체가 건전개체에 비해 높게 나타났고 성판악은 건전개체가 쇠퇴개체보다 높게 나타났다(Fig. 28).

영실지역에서 GR과 APX활성이 다른 두 지역에 비해 현저히 낮은 수준을 보였다.

건전개체와 쇠퇴개체간에는 일반적인 경향은 없으나 6월과 8월에 비해 9월의 항산화효소 활성도가 낮아지는 것을 볼 수 있는데 9월의 효소의 활성이 낮아지는 것은 단백질 합성등 생리활성에 관여하는 인자가 모두 낮아지기 때문인 것으로 보여진다.

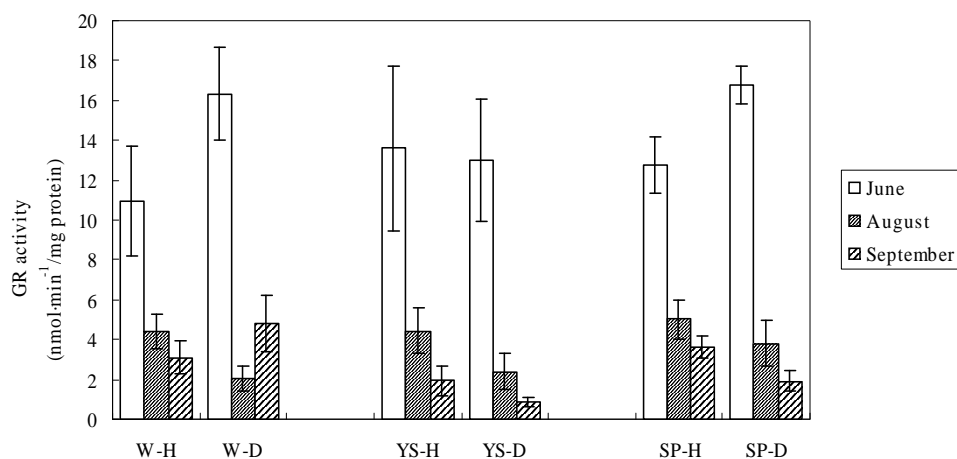


Fig. 27. Seasonal changes on activities of glutathione reductase(GR) of *Abies koreana* in three sites.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,

YS-H: YoungSil-healthy tree, YS-D: YoungSil-damaged tree,

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

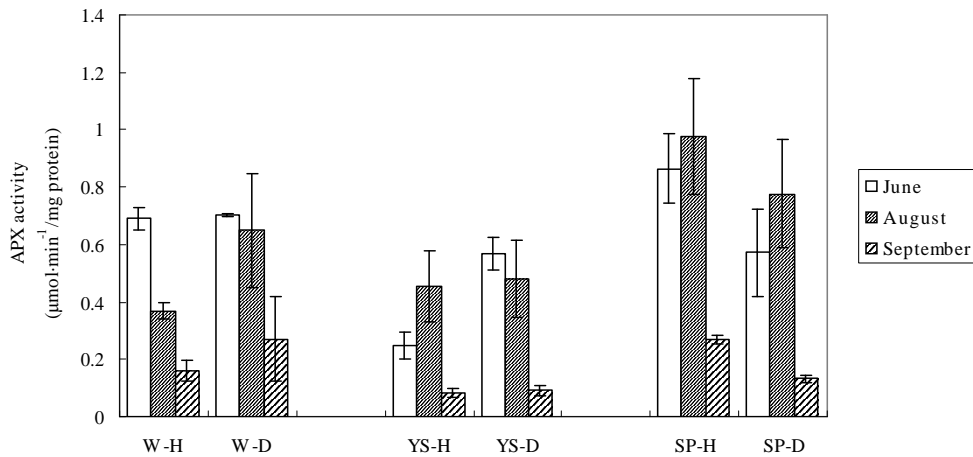


Fig. 28. Seasonal changes on activities of ascorbate peroxidases (APX) of *Abies koreana* in three sites.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,
 YS-H: YoungSil-healthy tree, YS-D: YoungSil-damaged tree,
 SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

6. 지역별 토양특성

6.1. pH

세 지역 토양의 pH는 4.23~5.59의 범위로써 약 산성토양으로 나타났으며 (Table 2), 우리나라 대부분의 산림토양의 pH 5.0~5.6에 비해 큰 차이가 없었다. pH는 식물이 흡수할 수 있는 양분의 유효도에 영향을 끼치므로 매우 중요한 화학성이고 토양의 낮은 pH는 그 자체만으로도 식물의 생산성에 심각한 영향을 미칠 수 있으며 (Cruickshank, 1992), 대부분 침엽수의 생육범위가 토양 pH 4.8~5.5인데 반해 영실지역의 건전군락과 쇠퇴군락과 윗세오름의 건전군락이 낮게 나타나 어느 정도 피해를 입을 수 있을 것이라고 짐작되며 세 지역 모두 건전개체보다 쇠퇴개체에서 pH가 더 높은 것을 볼 수 있다. 특히 성관악의 쇠퇴개체에서 가장 높은 pH를 나타냈다.

6.2. EC (*electrical conductivity*, 전기전도도)

세지역 토양의 EC는 $0.11 \sim 0.41 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 범위였다. 세지역 모두 건전개체 보다 쇠퇴개체에서 EC가 낮았고 윗세오름의 건전개체에서 가장 높은 EC값을 보였으며 또한 쇠퇴개체에서 가장 낮은 EC값을 나타냈다(Table 2).

EC는 토양중 전해질 즉 이온의 농도를 나타내는 지표로 토양 중 비료, 오염물질, 염류의 집적으로 인한 용질, 이온의 과부족을 나타내는 것이다. 식물 생육과 관련한 EC의 값은 포화침출액의 EC가 $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 초과할 때 식물의 생육이 불가능하다고 보는 것이다. 본 실험에서 사용한 방법은 포화침출법이 아닌 토양:증류수의 비가 1:5가 되도록 하여 EC를 측정한 것인데 우리나라에서는 이 값에 5를 곱한 값과 포화침출액의 EC를 유사하다고 본다. 본 시료의 경우 $0.04 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1} \times 5 = 2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 이 토양들은 집적된 염분으로 인하여 식물이 해를 입을 가능성은 없다고 보아도 무방하다.

6.3. O.M (*organic matter content*, 유기물함량)

토양유기물 함량은 건전개체의 경우 $33.23 \sim 57.50\%$ 이며, 쇠퇴개체의 경우 $16.56 \sim 20.98\%$ 의 범위로서 일반적인 산림토양의 표토층 평균 유기물함량 4.5% 에 비해 본 조사지역은 모두 훨씬 높게 나타났다(Table 2).

세지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체에 비하여 높은 유기물함량을 보였고 영실지역에서 가장 높게 나타났으며 반면 성판악 지역이 가장 낮았다. 토양 유기물은 동, 식물의 유체가 분해되어 미생물체 또는 부식(humus)으로 변환된 물질로서 세지역 모두 쇠퇴개체에서도 평균이상의 유기물함량을 보여 이에 따른 피해증상은 아니라고 보여진다.

6.4. T-N (*total nitrogen*, 전질소)

전질소 함량은 건전개체의 경우 $0.64 \sim 1.58\%$, 쇠퇴개체의 경우 $0.36 \sim 0.84\%$ 범위였다. 세지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체에 비하여 높은 값을 보였고 그 중에서 영실의 건전개체가 가장 높았다. 윗세오름 지역의 경우 건전개체와 쇠퇴개체간 전질소 함량은 비슷하였고 성판악 지역의 건전개체와 쇠퇴개체 모두 다른 두 지

역에 비하여 낮게 나타났다(Table 2).

6.5. Avail-P (available phosphorus, 유효인산)

토양 중 유효인산 함량은 건전개체의 경우 $4.31 \sim 38.96 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 쇠퇴개체의 경우 $6.24 \sim 7.17 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 의 범위로서 대부분의 개체에서 일반적인 미경작 산지토양의 유효인산 함량인 $5.60 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 에 비하여 높은 수준을 나타내었다. 윗세오름지역과 영실지역의 경우 건전개체가 쇠퇴개체에 비하여 월등히 높게 나타났으나 성판악 지역은 쇠퇴개체가 건전개체에 비하여 약간 높은 수준 이었다. 영실지역의 건전개체가 가장 높은 유효인산 함량을 나타냈고 가장 낮은 성판악 지역의 건전개체에 비하여 89%정도 높은 것으로 조사되었다(Table 2).

유효인산은 토양의 인 함량 중 식물이 이용 가능한 것으로 보는 형태이다. 토양에는 천연 공급되는 인의 양이 적고 그 적은 양도 대부분 식물이이용하기 어려운 형태이므로, 식물의 정상적인 생육을 한다는 측면에서 볼 때 인은 식물의 다량 필수원소 중 가장 식물의 생육을 제한하는 원소라고 볼 수 있다.

6.6. 양이온치환용량 (cation exchange capacity, CEC)

양이온 치환 용량(CEC)은 건전개체의 경우 $61.70 \sim 88.49 \text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 쇠퇴개체의 경우 $29.50 \sim 58.31 \text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 의 범위로서 일반적인 우리나라 산지토양의 평균 값인 $16.50 \text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 보다 월등히 높은 수준 이었다. 세지역 모두 건전개체가 쇠퇴개체에 비하여 높게 나타났으며 그 중에서 영실지역의 CEC가 가장 높은 수준 이었다. 반면 윗세오름지역은 가장 낮은 값을 보였다(Table 2).

양이온치환용량은 토양비옥도를 나타내는 하나의 지표이며 CEC가 높은 토양일수록 양분을 지니는 능력이 크고 토양 비옥도가 높다고 볼 수 있다. 즉 토양 비옥도는 건전개체와 쇠퇴개체 모두 영실지역이 가장 높으며 성판악지역, 윗세오름순으로 낮게 나타났다.

6.7. 교환성 양이온 (exchangeable cations : Ca, Mg, K, Na)

토양 중 교환성 Ca는 건전개체의 경우 $1.97 \sim 5.52 \text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 쇠퇴개체의 경우

0.54~2.07cmol · kg⁻¹의 범위였고 모든 지역의 건전개체가 쇠퇴개체보다 높게 나타났다. 건전개체와 쇠퇴개체 모두 영실지역에서 가장 높은 Ca의 함량을 보였고 윗세오름의 건전개체가 가장 낮은 Ca함량으로 조사되었으며 Mg는 건전개체의 경우 1.01~2.95cmol · kg⁻¹, 쇠퇴개체의 경우 0.61~1.21cmol · kg⁻¹의 범위였으며 모든 지역의 건전개체가 쇠퇴개체보다 높게 나타났으며 영실지역의 Mg함량이 가장 높게 조사되었다. Na은 건전개체의 경우 0.32~0.47cmol · kg⁻¹, 쇠퇴개체의 경우 0.26~0.47cmol · kg⁻¹의 범위였고 윗세오름과 영실지역의 건전개체가 쇠퇴개체보다 높았으나 성판악 지역의 경우 쇠퇴개체가 건전개체보다 높은 게 나타났다. 영실지역의 건전개체가 다른 두 지역의 건전개체보다 Na함량이 가장 높았고 성판악지역의 쇠퇴개체도 같은 함량을 보였다. K은 건전개체의 경우 0.97~1.86cmol · kg⁻¹, 쇠퇴개체의 경우 0.30~0.97cmol · kg⁻¹의 범위이며 모든 지역의 건전개체가 쇠퇴개체보다 높게 나타났으며 영실지역에서 가장 높은 K함량을 보였다(Table 2).

치환성 양이온은 대부분 (-)전하를 띠는 토양입자에 흡착되어 있다가 서서히 식물의 양분으로 이용될 수 있는 것으로 모든 치환성 양이온은 영실지역에서 가장 높게 나타났다.

6.8. 토성 (soil texture)

토성은 토양중 무기입자들을 그 크기에 따라 모래(sand, 0.05mm~2mm), 미사(silt, 0.002mm~0.05mm), 점토(clay, 0.002mm이하)로 구분할 때 이들 모래: 미사: 점토의 비에 따른 토양의 성질을 말하는 것이다. 이는 토양의 물리성중 가장 중요한 것이다. 세지역의 토양의 토성은 영실지역의 건전개체에서만 양질사토(loamy sand)였고 다른 지역 건전개체와 쇠퇴개체의 토성은 사양토(sandy loam)로서 배수가 매우 양호하므로 그에 따른 문제는 없을 것으로 보인다(Table 2).

Table 2. Chemical properties of three sites in Mt. Halla.

Site ^z	pH (1:5)	EC(1:5) dS · m ⁻¹	O.M %	CEC me · 100g ⁻¹	T-N %	Avail.P mg · kg ⁻¹
W-H	4.41	0.41	47.86	61.70	0.88	18.52
W-D	4.80	0.11	20.98	29.50	0.84	6.86
YS-H	4.23	0.33	57.50	88.49	1.58	38.96
YS-D	4.64	0.21	32.78	58.31	0.65	7.17
SP-H	4.73	0.17	33.23	83.57	0.64	4.31
SP-D	5.59	0.13	16.56	37.95	0.36	6.24

Site ^z	Ca	Mg	Na	K	Texture
	(mg · L ⁻¹)				
W-H	1.97	1.58	0.36	1.53	sandy loam
W-D	1.11	0.61	0.26	0.75	sandy loam
YS-H	5.52	2.95	0.47	1.86	loamy sand
YS-D	2.61	1.21	0.40	1.08	sandy loam
SP-H	2.07	1.01	0.32	0.97	sandy loam
SP-D	0.54	0.72	0.47	0.30	sandy loam

^zSee Fig. 6.

7. 6월 구상나무 식물체 분석

7.1. T-N (total nitrogen, 전질소)

식물체의 전질소는 0.06~0.09% 범위로서 건전개체가 쇠퇴개체보다 약간 높게 나타났으나 그 차이는 매우 작았으며 영실지역의 경우 거의 차이가 없는 것으로

조사되었다(Table 3). 이중 가장 높은 전질소를 나타낸 지역이 윗세오름지역으로 나타났으며 가장 낮은 지역은 영실지역이다.

7.2. 인 함량(P_2O_5)

식물체중 함량은 0.12~0.23% 범위로서 윗세오름 지역에서 건전개체가 쇠퇴개체에 비해 33%정도 높게 나타났으나 다른 두 지역에서는 두 개체간의 차이는 크게 나지 않았다(Table 3).

7.3. 치환성 양이온 함량(*exchangeable cations* : Ca, Mg, K, Na)

식물체 중 교환성 Ca는 건전개체의 경우 0.27~0.41%, 쇠퇴개체의 경우 0.32~0.51%의 범위였고 모든 지역의 쇠퇴개체가 건전개체보다 높게 나타났다. Mg는 0.03~0.06%의 범위였으며 윗세오름 지역이 가장 낮았고 나머지 지역에서는 같은 함량을 보였다. Na는 건전개체의 경우 0.13~0.19%, 쇠퇴개체의 경우 0.03~0.13%의 범위였고 영실지역을 제외한 두 지역에서는 건전개체가 쇠퇴개체보다 높게 나타났다. 윗세오름과 영실지역에의 건전개체와 쇠퇴개체간의 Na함량의 차이는 크게 나타나지 않았지만 반면 성판악 지역에서는 건전개체가 쇠퇴개체에 비해 거의 79%정도 높게 나타나 두 개체간의 차이가 크게 나타났다. K는 건전개체의 경우 0.76~0.82%, 쇠퇴개체의 경우 0.75~0.86%의 범위이며 영실지역을 뺀 나머지 지역에서 건전개체가 쇠퇴개체보다 더 높은 K함량을 보였다(Table 3).

Table 3. Nutrient contents of *Abies koreana* of three sites in June.

Site ^z	T-N %	P ₂ O ₅ %	Ca %	Mg %	Na %	K %
W-H	0.09	0.15	0.27	0.03	0.14	0.82
W-D	0.07	0.23	0.32	0.05	0.13	0.75
YS-H	0.06	0.12	0.41	0.06	0.19	0.76
YS-D	0.06	0.12	0.47	0.06	0.14	0.86
SP-H	0.07	0.13	0.38	0.06	0.13	0.80
SP-D	0.06	0.14	0.51	0.06	0.03	0.76

^zSee Fig. 6.

8. 8월 구상나무 Na 함량

Na함량은 윗세오름지역의 쇄퇴군락과 영실지역의 쇄퇴군락에서 성판악지역에 비해 높은 것으로 나타났으며 성판악지역의 경우도 쇄퇴군락의 Na함량이 건전군락에 비해 다소 높은 것으로 나타났다(Fig. 29).

영실지역의 경우 쇄퇴군락의 Na함량이 건전군락에 비해 45%정도 높은 것으로 나타났으며 윗세오름지역의 경우 건전군락의 Na함량이 쇄퇴군락과 차이를 보이지 않아 다른 두 지역의 건전군락에 비해 높은 것으로 나타났다.

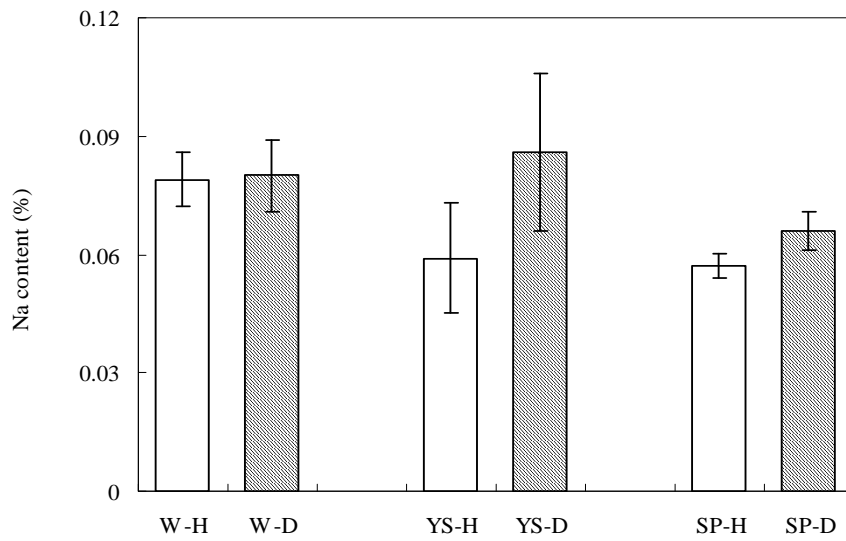


Fig. 29. Na contents in leaf of *Abies koreana* in three sites in August.

W-H: Witseorum-healthy tree, W-D: Witseorum-damaged tree,

YS-H: Youngsil-healthy tree, YS-D: Youngsil-damaged tree,

SP-H: Sungpanak-healthy tree, SP-D: Sungpanak-damaged tree.

9. 9월 구상나무 식물체 분석

식물체 중 교환성 Ca 는 건전개체의 경우 1.73~1.93%, 쇠퇴개체의 경우 1.52~2.16%의 범위였고 윗세오름 지역을 제외하고 두 지역에서는 쇠퇴개체가 건전개체보다 높게 나타났다. Mg 는 0.06~0.08%의 범위였으며 세 지역 모두 거의 비슷한 수준 이었다. Na 은 건전개체의 경우 0.03~0.04%, 쇠퇴개체의 경우 0.04~0.13%의 범위였고 성판악 지역은 건전개체와 쇠퇴개체간의 Na 함량은 같았으나 다른 두 지역에서는 쇠퇴개체가 건전개체보다 높게 나타났으며 윗세오름지역의 쇠퇴개체가 건전개체에 비해 약 77%정도 높은 Na 함량을 보였고 영실지역에서는 쇠퇴개체가 건전개체에 비해 거의 57%정도 높은 Na 함량을 나타냈다. K 은 건전개체의 경우 0.63~0.72%, 쇠퇴개체의 경우 0.62~0.77%의 범위이며 성판악지역을 뺀 나머지 지역에서 쇠퇴개체가 건전개체보다 더 높은 K 함량을 보였다(Table 4).

Table 4. Nutrient contents of *Abies koreana* of three sites in September.

Site ^z	Ca	Mg	Na	K
	(%)			
W-H	1.73	0.06	0.03	0.72
W-D	1.52	0.08	0.13	0.77
YS-H	1.94	0.08	0.03	0.63
YS-D	2.02	0.07	0.07	0.71
SP-H	1.93	0.07	0.04	0.68
SP-D	2.16	0.06	0.04	0.62

^zSee Fig. 6.

V. 종합고찰

한라산 구상나무가 분포하는 윗세오름, 영실, 성판악지역을 선정하여 각 지역별로 건전개체와 쇠퇴개체로 나뉘서 계절별 생육상태를 살펴본 결과 모든 지역에서 건전개체가 쇠퇴개체에 비해서 높은 광합성률을 보였다.

구상나무는 낮은 온도환경에 순응하여 생존해 왔기 때문에 현재 연구의 결과처럼 온도가 낮을수록 높은 광합성률을 보였으며, 구상나무의 광합성률은 온도가 높을 때 보다 낮을 때 더욱 높았다. 6월과 7월의 경우 건전개체와 쇠퇴개체간의 광합성률의 차이가 뚜렷이 나타나지만 9월에 쇠퇴개체의 광합성률이 다시 회복되는 양상을 나타냈다.

기공전도도 또한 건전개체가 쇠퇴개체에 비해 높게 나타났고 9월의 쇠퇴개체에서 어느 정도 회복이 나타나 광합성률과 비슷한 경향을 보였고 기공전도도와 광합성률이 밀접한 관련이 있었으며 기공전도도가 증가하면 광합성률 또한 증가한다는 것을 알 수 있었다.

전반적으로 건전개체에 비해 쇠퇴개체에서 높은 수분이용효율을 보였는데 이것은 부적합한 환경에서 광합성률을 증대시켜 물질생산을 늘리기 보다는 체내 수분손실 방지에 치중하여 기공의 개폐정도를 낮추어 생리작용을 낮게 유지하고 있는 것으로 보인다. 9월에 가장 높은 수분이용효율을 보였으며 반면 7월에 낮은 수분이용효율을 나타냈다. 또한 9월에 건전개체와 쇠퇴개체간의 차이가 낮아져 광합성률과 기공전도도와 비슷한 경향을 보였다.

환경스트레스에 대한 식물의 환경적응성 또는 생리적 상태를 확인하기 위해 *ascorbate peroxidase*(APX)와 *glutathione reductase*(GR)의 활성을 조사한 결과 건전개체와 쇠퇴개체간에는 큰 차이가 없으나 6월과 8월에 비해 9월의 항산화효소 활성도가 낮게 나타났다.

각 지역별 토양분석한 결과 전기전도도나 유기물함량, 전질소, 유효인산, 양이온치환용량, 양이온의 함량이 건전지역에 비해 쇠퇴지역의 토양이 낮은 것으로 보아 생육환경이 불량한 것으로 보여져 고온 등 환경적 스트레스에 더욱 민감하여 쇠퇴하는 정도가 더욱 심해지는 것으로 보인다.

인용문헌

- 강상준. 1989. 한라산 구상나무 숲의 재생에 대하여. 제 17회 국제학 술대회 논문집 p.21~50.
- 강상준. 1984. 지리산 아고산대 침엽수림의 갱신. 한국생태학회지 7(4):185~193.
- 김갑태, 추갑철, 엄태원. 1997. 智異山 천왕봉-덕평봉 地域의 森林群集構造에 關한 研究. 한국임학회지 86(2): 146~157.
- 김성덕, 윤웅섭. 1991. 지리산 반야봉의 구상나무(*Abies koreana* wils.)林的 更新에 關한 研究. 충남대학교 환경연구보고 Vol.9: 97~106.
- 김은식. 1994. 환경변화와 고산지대 수복생장 쇠퇴현상과 상관성 해석. 한국과학재단 연구보고서 KOSEF 921-1500-081-2. pp.89.
- 고정균, 김대신, 고석찬, 김문홍. 1996. 한라산 구상나무림의 동태. 제주도연구 제 13집 p.223~241.
- 구경아, 박원규, 공우석. 2001. 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜연대학적 연구 -기후변화에 따른 생장변동 분석- 한국생태학회지 24(5): 281~288.
- 제주지방기상청. 2005. <http://jeju.kma.go.kr>
- 박원규, 서정욱. 1999. 지리산 천왕봉지역 구상나무의 연륜기후학적 해석, 제4기학회지 13(1): 52~33.
- 이운원, 홍성천. 1995. 구상나무林的 군락생태학적 연구. 한국임학회지 84(2): 247~257.
- 이창복. 1970. 구상나무와 새로 발견된 품종. 한국임학회지 10: 5~6
- 이창석, 조현제. 1993. 가야산 구상나무 군락의 구조 및 동태. 한국생태학회지 16(1): 75~91.
- 오순자, 고정균, 김응식, 오문유, 고석찬. 2001. 한라산 구상나무 잎의 엽록소형광의 일변화와 계절적 변화. 한국생태학회지 19(1): 43~48.
- 정영관, 홍병화, 김종만. 1980. 토양의 화학적 성질과 임목생장과와의 관계. 한국임학회지 46: 10~20.
- 정운수. 1998. 구상나무 種字의 충실도가 發芽 및 幼苗생장에 미치는 영향. 건국

- 자연과학연구지 제9집(1): 7~14.
- 정재민, 이수원, 이강녕. 1996. 智異山 구상나무林分의 植生構造와 釋樹 發生 및 生育 動態. 한국임학회지 85(1): 34~43.
- 조도순. 1994. 지리산 아고산대 구상나무림의 군집구조 및 침엽수의 직경과 연령 분포. *Korean J. Ecol.* 17(4): 415~424.
- Alscher R.G. and J.L. Hess. 1993. *Antioxidants in higher plants*. CRC Press, Boca Raton. p.1~174.
- Anderson M.D., T.K. Prasad and C.R. Stewart. 1995. *Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings*. *Plant Physiol.* 109: 1247~1257.
- Arnon, D. I. 1949. *Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenol-oxidase in Betula vulgaris*. *Plant Physiol.* 24: 1~15.
- Asada K. 1992. *Ascorbate peroxidase - a hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plants*. *Plant Physiol.* 85: 235~241.
- Ashraf, M., Arfan, M., Shahbaz, M., Ahmad, A. and Jamil, A. 2002. *Gas exchange characteristics and water relations in some elite okra cultivars under water deficit*. *Photosynthetica* 40(4): 615~620.
- Baczek, K. R. and J. Koscielniak. 2003. *Antioxidative effect of elevated CO₂ concentration in the air on maize hybrids subjected to severe chill*. *Photosynthetica* 41(2): 161~165.
- Beatty, J.C. 1994. *Effects of rainfall and temperature on the distribution and behavior of Larrea tridentata in the Mojave desert of Nevada*. *Ecology* 55: 245~261
- Berry, J. and O. Bjorkman. 1980. *Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants*. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31: 491~543.
- Bradford, M.M. 1976. *A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye*

- binding. *Anal. Biochem.* 72:248.
- Cruel, P. J. 1992. *Urban soil in landscape design*. John Wiley & Sons, Inc., Canada. p.4~32.
- Foyer, C.H., M. Lelandais, E.A. Edwards and P.M. Mullineaux. 1991. The role of ascorbate in plant, interactions with photosynthesis and regulatory significance. In: Pell, E.J. and Steffen, K.L.(Eds.), *Active Oxygen/Oxidative Stress and Plant Metabolism. Current Topics in Plant Physiology*, vol. 6. American Society of Plant Physiologists, Rockvills, M.D., p.131~144.
- Faria, T., J. I. Garcia-Plazaola, A. Abadia, S. Cerasoli, J. S. Pereira and M. M. Chaves. 1996. Diurnal changes in photoprotective mechanisms in leaves of cork oak (*Quercus suber*) during summer. *Tree Physiology* 16: 115~123
- Grimm, A.G. and J. Fuhrer. 1992. The response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to ozone at higher elevations. III. Response of leaf and canopy gas exchange and chlorophyll fluorescence to ozone flux. *New Phytologist* 122: 321~328.
- Hamerlynck, E.P. and Knapp, A.K. 1996. Early season cuticular conductance and gas exchange in two oaks near the western edge of their range. *Trees* 10: 403~409.
- Hinckley, T.M. and J.H. Braatne, 1994. Stomata. In : Wilkinson, R.E (eds) *Plant-Environment Interactions*. Dekker, New York, p.323~355.
- Hodges, D.M., C.J. Andrews, D.A. Johnson, and R.I. Hamilton. 1997. Antioxidant enzymes responses to chilling stress in differentially sensitive inbred maize lines. *J. Experimental Botany*. 48: 1105~1113.
- Inze D. and M. Van Montagu. 1995. Oxidative stress in plants *Curr. Opin. Biotechnol.* 6: 153~158.
- Kratsch, H.A. and R.R. Wise. 2000. The ultrastructure of chilling stress. *Plant Cell and Environment*. 23: 337~350.
- Lidon, F.C. and F.S. Hennesques. 1993. Oxygen metabolism in higher plant

- chloroplasts. *Photosynth.* 29: 249~279.
- Lim, J.H., J.H. Chun, S.Y. Woo, M.J. Kwon and Y.K. Kim. 2005. Monitoring the Decline of *Abies koreana* Forest in Mt. Halla. EMEA 2005 in Kanazawa. p.44
- Gustafsson. M,E,R. 1997. Raised levels of marine aerosol deposition owing to increased storm frequency; a cause of forest decline in southern Sweden?. *Agricultural and Forest Meteorology* 84: 169-177.
- McKersie, B.D. and Y.Y. Leshem. 1994. Stress and stress coping in cultivated plants. *Kluwer Academic Publishers.* p.256.
- Sprtova, M., M.V. Marek, L. Nedbal, O. Prasil, J. Kalina. 1999. Seasonal changes of photosynthetic assimilation of Norway spruce under the impact of enhanced UV-B radiation. *Plant Science* 142: 37-45.
- Penuelas, J., I. Filella, , Llusia, J., D. Siscart, and J. Pinol, 1998. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *J. Experimental Botany* 319: 229-238.
- Drohan, P.J., S.L. Stout, G.W. Petersen. 2002. Sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) decline during 1979-1989 in northern Pennsylvania. *Forest Ecology and Management* 170: 1-17.
- Reich, P.B., A.W. Schoettle H.F. Stroh, J. Troiano and R.G. Amundson. 1985. Effects of O₃, SO₂ and acidic rain on mycorrhizal infection in northern red oak seedlings. *Canadian Journal of Botany* 63: 2049-2055
- Walker, M.A. and B.D. McKersie. 1993. Role of the ascorbate-glutathione antioxidant system in chilling resistance of tomato. *J. Plant Physiol.* 141: 234~239.
- Wang, R. Z. 2001. Photosynthesis, transpiration and water use efficiency of vegetative and reproductive shoots of grassland species from north-eastern China. *Photosynthetica* 39(4): 569~573.

Wildi, B. and C. Lutz. 1996. *Antioxidant composition of selected high alpine plant species from different altitudes. Plant Cell and Environment* 19: 138-146.

Summary

We investigated seasonal physiological changes of Korean fir (*Abies koreana*) and environmental factors of its habitat. In order to examine by reference to decline caution we selected three sites, Witseorum, Youngsil and Sungpanak and divided site into healthy and damaged trees.

Net photosynthetic rate was associated with seasonal changes. Net photosynthetic rates in high temperature were lower than those of low temperature. The difference of net photosynthetic rate between healthy and damaged trees was clear in June and August but damaged trees recovered with passing of the time. So, there was no relationship between healthy and damaged trees in September. Stomata conductance(g_s) was very much alike. Over all water use efficiency(WUE) of damaged trees was higher than healthy trees. Like the preceding there was no relationship between healthy and damaged trees in September. Their response may be an ability to adaptation or compensate for stress on weak environment.

On the one hand, we measuremented antioxidant enzyme activity to define adaptation of environment or physiological condition on weak environment. They were no significant relationship between healthy and damaged trees as a result of GR activity. But antioxidant enzyme was lower in June and August than that of September. As a result, we considered that the damage was caused by the high temperature in June and August.

Moreover, Soil chemical and physical properties of each site showed that site of damaged trees had lower organic content(OM), total nitrogen content(T-N), available phosphorus(Avail. P), cation exchange capacity(CEC) and cation content than site of healthy trees.

Taken together, these results suggest that site of weak trees which had

not healthy soil were more sensitive to high temperature environment than site of health trees.