

한라산 구상나무 건전개체와 쇠약개체의 온도변화에 따른 광합성능력과 수분이용효율

임종환¹ · 우수영^{2*} · 권미정³ · 천정화¹ · 신준환¹

¹국립산림과학원 산림환경부, ²서울시립대학교 환경원예학과, ³서울대학교 농업과학공동기기센터

Photosynthetic Capacity and Water Use Efficiency under Different Temperature Regimes on Healthy and Declining Korean Fir in Mt. Halla

Jong-Hwan Lim¹, Su-Young Woo^{2*}, Mi Jeong Kwon³,
Jung Hwa Chun¹ and Joon Hwan Shin¹

¹Department of Forest Environment, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

³National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

요약: 한라산의 윗세오름, 영실(윗세오름과 영실사이), 진달래밭 등 3개 지역에서 구상나무의 광합성능력과 수분이용효율의 특성을 알아보기 위하여 시기별, 온도별, 그리고 지역별 건전개체와 쇠약한 개체에 대하여 조사를 수행하였다. 일반적으로 구상나무의 광합성능력은 15°C일 때가 20°C, 25°C일 때 보다 높았다. 6월과 8월의 경우 건전개체와 쇠약개체간의 광합성능력의 차이가 뚜렷했지만 9월에 쇠약개체의 광합성능력이 다시 회복되었다. 모든 개체에서 수분이용효율은 쇠약개체가 건전개체에 비해 높았다.

Abstract: We investigated seasonal photosynthetic capacity and water use efficiency changes of Korean fir (*Abies koreana* Wils.) trees located at three sites around the peak of Mt. Halla, Witseorum, Youngsil and Jindallebat. At each sites, we chose healthy and declining individuals to examine the differences of physiological characteristics between them. Net photosynthetic capacity in 15°C were lower than those of 20°C and 25°C. The difference of net photosynthetic capacity between healthy and damaged trees was clear in June and August but damaged trees recovered with passing of the time. There was no difference between healthy and damaged trees in September on photosynthetic rate. Generally, water use efficiency (WUE) of damaged trees was higher than healthy trees.

Key words : photosynthesis, temperature, water use efficiency

서론

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 잣나무속 (*Abies*) 중 한국의 특산 수종으로 인정되어 왔다(이운원과 홍성천, 1995; 이창복, 1970).

고산지대에 자라는 식물은 낮은 온도, 건조(토양), 강한

바람, 서리 등 극한 환경에 노출되어 있어 이들 환경적 요인에 의해 영향을 많이 받는다고 볼 수 있다. 대부분 고산 식물의 생장은 온도 및 상대습도와 밀접한 관계를 갖고 있으며 자생지에서는 비교적 높은 습도가 지속적으로 유지되고 있어 온도변화가 고산식물의 생장에 중요한 환경요소로 작용한다고 볼 수 있다(Wildi and Lutz, 1996). 최근 한라산의 구상나무 군락이 심각한 쇠퇴현상을 보이고 있는 것으로 알려져 왔다(김은식, 1994). 특히, 구상나무림의 생장쇠퇴는 구상나무 자생지 전체에 광범위하게 나타나고 있고, 특히 한라산의 경우에는 그 정도가

*Corresponding author
E-mail: wsy@uos.ac.kr

심해서 고사목의 숫자가 증가하고 자연적인 치수 발생도 제대로 이루어지지 않고 있다(김은식, 1994; Kim *et al.*, 1997).

구경아 등(2001)은 성장쇠퇴의 원인이 겨울기온의 상승이 영향을 미친 것으로 보며 겨울기온이 상승하는 경우 상록수는 광합성을 할 수 있는 조건이 충족되나 광합성에 필요한 수분공급이 부족하여 수분수지의 불균형이 발생하게 되어 생장에 악영향을 미치게 되는 것으로 판단된다고 보고하였고 강상준(1989)과 김은식(1994)은 태풍과 봄가뭄이 주요 쇠퇴원인인 것으로 제시하였다.

온도는 광량, 강우량과 더불어 식물의 성장과 발달, 지리적 분포와 생존 등에 결정적으로 작용하는 요인 중 하나로 중요한 환경인자이며 식물체는 성장과 발달에 필요한 최적온도를 가진다. 한계온도에 가까워질수록 생장이 감소할 수 있고, 그 한계를 넘어서면 고사하게 된다(Kratsch and Wise, 2000).

이 연구의 목적은 한라산 아고산대 위치하고 있는 구상나무 임분을 대상으로 온도에 따른 광합성능력과 수분이용효율을 비교해 보는 것이다. 한라산은 冬期乾高현상 즉, 동절기에 건조하고 따뜻한 기온이 지속되어 토양 수분이 증발량이 많으며 그로 인해서 고산수목인 구상나무의 생장은 오히려 따뜻한 온도가 스트레스로 작용할 수도 있을 것이라는 것이 이 연구의 가설이다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

구상나무가 분포하는 한라산 지역에서 3지역을 연구지로 선정했다(Figure 1). 영실, 윗세오름, 성판악지역(진달래밭)으로 구분하여 조사하였고 이곳에서 장기간 변화모니터링을 하기 위해서 영구 방형구를 설치하였다(Lim *et al.*,

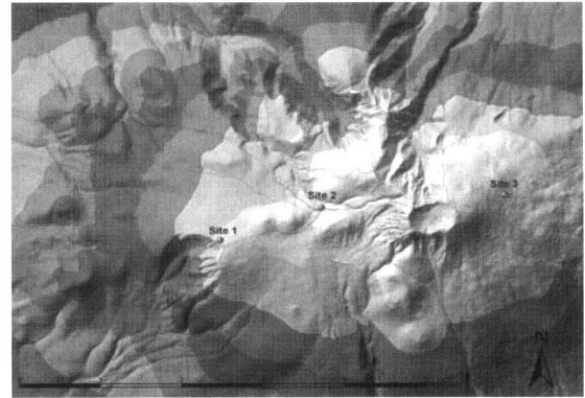


Figure 1. Location of three experimental sites in Mt. Halla. Site 1, 2 and 3 indicate Youngsil (YS), Witseorum (WS) and Jindallebat (JD), respectively.

2005).

세 지역 모두 표고는 1,600m 이상이다. 이 지역에 분포하는 구상나무의 흉고직경(DBH)은 평균 9~13 cm 정도였고 평균연령은 40~60년 정도인 것으로 추정된다(Table 1).

2. 쇠약, 건전도 판정 및 조사 대상목 선정

각 조사지에서 DBH 2 cm 이상 살아있는 모든 구상나무 개체에 대하여 엽량, 엽장, 잎이 달리는 햇수의 3가지 특성을 이용하여 건전도를 1에서 5등급으로 판정하였다(Table 2). 이때, 다른 나무에 의한 피압의 효과와 남-북 방향에 따른 차이를 구별해내기 위하여 나무높이를 상-중-하로 3구분하고 방향을 남과 북으로 구분하여 판정하였다. 그런 다음 상층의 남과 북쪽의 쇠약-건전도의 평균으로 각 개체의 건전도를 계산하였다. 그 결과 Table 3와 같은 분포를 보였는데, 4분위수가 되는 2보다 작은 경우를 쇠약한 개체로, 3보다 큰 개체를 건전한 개체로 판정하여 이 가운데에서 대상목을 선정하였다.

Table 1. Topographic conditions of three Korean fir stands in Mt. Halla.

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

Table 2. Vitality assessment using leaf characteristics for Korean fir.

Vitality grade	Leaf characteristics		
	Amount of leaves	Leaf length	Oldest leaf age
1 Almost dead	Less than 10%	Mostly shorter than 1 cm	Mostly 2-3years
2 Very unhealthy	10-40%	Mostly shorter than 1.5cm	Mostly 3years
3 Unhealthy	40-60%	About 1.2-1.6 cm	Mostly 3-4years
4 Vigorous	60-90%	Mostly longer than 1.5 cm	Mostly 4 years, some 5 years
5 Full vigor	More than 90%	Mostly longer than 1.5 cm	Mostly more than 5 years

Table 3. Frequency by mean vitality grade.

Mean vitality	Number of individuals
1.0	12
1.5	12
2.0	38
2.5	20
3.0	26
3.5	6
4.0	10

3. 조사목 선정 및 측정 설계

조사 대상목은 3개 조사지역내에서 각각 건전하고 생육이 비교적 양호한 개체와 쇠약한 개체를 선정하였다(Table 2, 3). 고산지대인 대상지에서 생장이 시작되는 6월과, 여름철인 8월 및 가을의 시작인 9월에 각각 광합성능력과 수분이용효율을 분석하였다. 각 개체에서 3개의 가치를

대상으로 하였고, 챔버의 온도를 15, 20 및 25°C로 변경하면서 측정하였다.

4. 광합성능력 측정 및 수분이용효율 분석

각 수목의 광합성능력(Net photosynthetic capacity; 순 광합성능력(A_n))은 Licor-6400 Portable Photosynthesis System(Li-cor Inc., USA)를 이용해서 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광도에서 측정하였다. 측정시 상대습도는 60%를 유지하였다. 순 광합성능력은 아래와 같은 식으로 계산했다. 그리고 light curve를 Sigma plot 프로그램을 이용해서 각 지점의 광합성 특성을 비교하였다.

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

A_n ; Net photosynthesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ DWg}^{-2} \text{ s}^{-1}$), U_e ; mole flow rate of air entering the leaf chamber (μmol

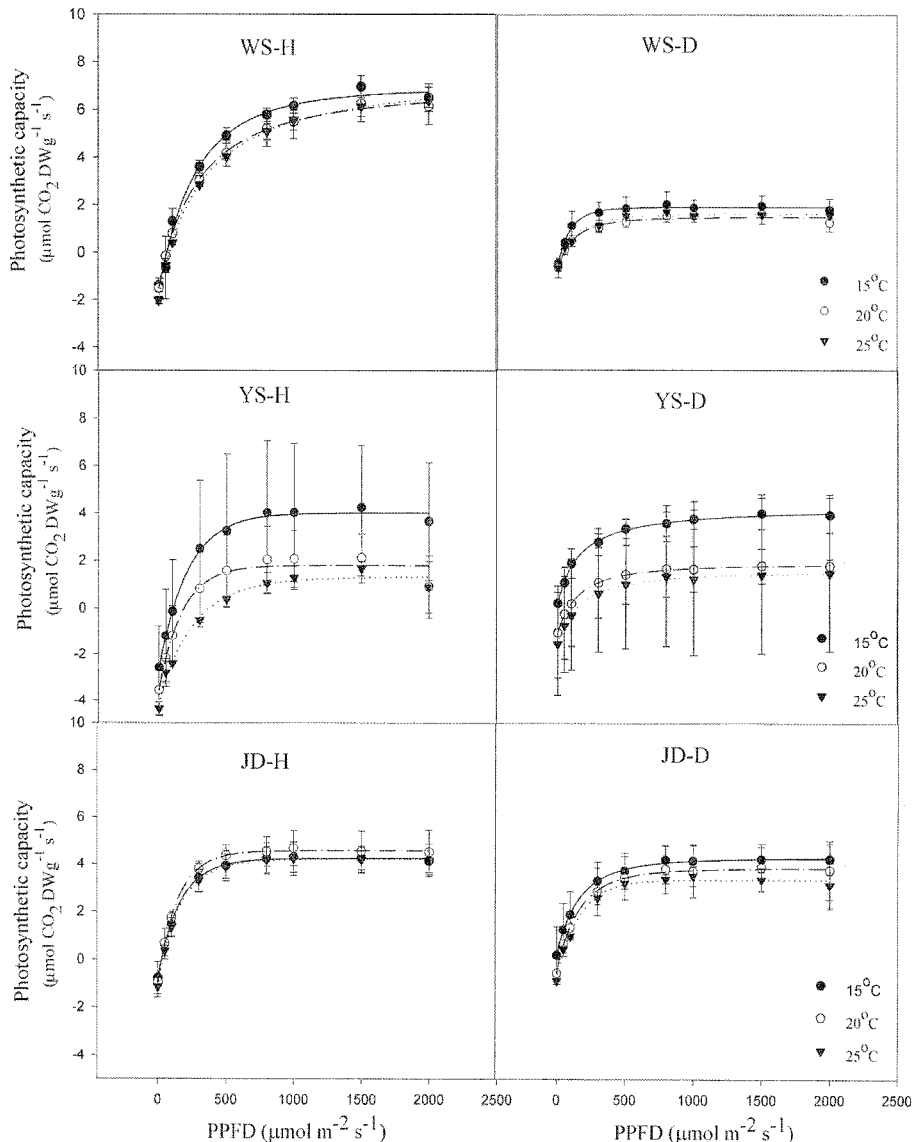


Figure 2. The effect of temperature on the photosynthetic capacity naturally grown Korean fir trees at three sites in June. Abbreviations of site names refer to those in Figure 1 and Table 1; H is healthy tree, D is degraded or stressed tree. Bars indicate standard deviation (n=3).

s^{-1}), C_o ; mole fraction of CO_2 in the leaf chamber ($\mu mol CO_2 mol^{-1} air$), C_e ; mole fraction of CO_2 entering in the leaf chamber ($\mu mol CO_2 mol^{-1} air$), s ; leaf dry weight (g), E ; transpiration ($mmol H_2O m^{-2}s^{-1}$).

수분이용효율은 광합성능력/증산량(Wang, 2001; Ashraf *et al.*, 2002)으로 계산하였다. 수분이용효율의 계산에 사용한 광합성능력과 증산량은 $1,000 \mu mol m^{-2}s^{-1}$ 광도에서 $20^\circ C$ 로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 계절별 광합성능력

구상나무의 광합성속도는 모든 지역에서 건전개체가 쇠약한 개체에 비하여 높은 것으로 나타났다. 계절별로는 8

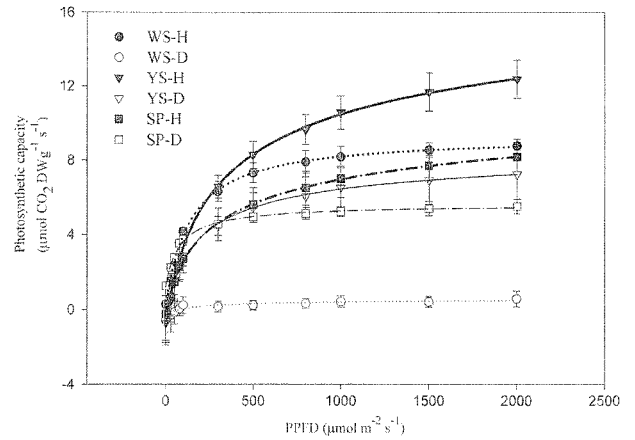


Figure 3. Differences in photosynthetic capacity of naturally grown Korean fir trees at three survey sites in August. Abbreviations refer to those in Figure 2.

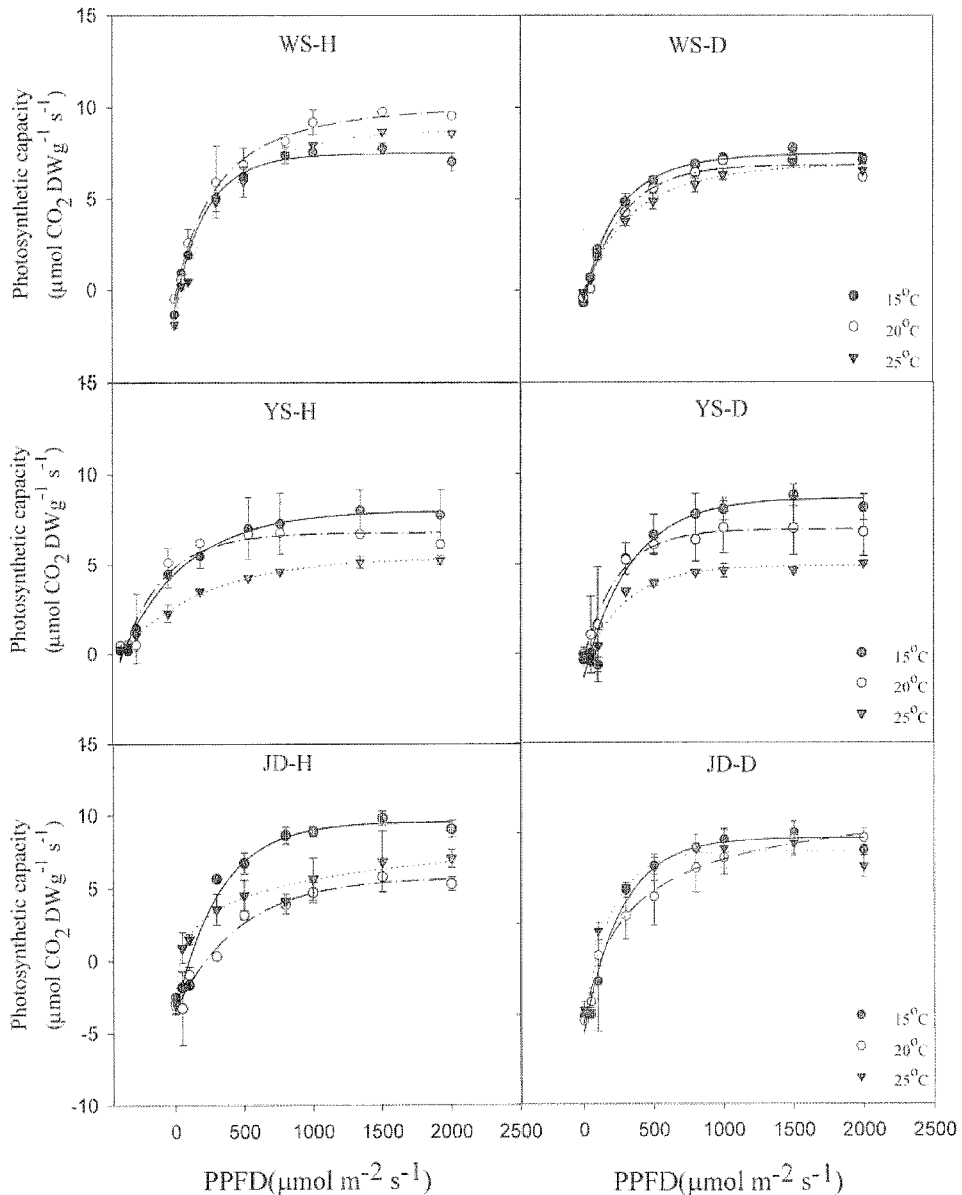


Figure 4. The effect of temperature on the photosynthetic capacity naturally grown Korean fir trees at three sites in September. Abbreviations refer to those in Figure 2.

월에는 건전개체가 쇠약한 개체보다 광합성능력이 높았으나 성장초기인 6월에는 건전개체가 쇠약한 개체에 비해 낮은 광합성능력을 나타냈다(Figure 2, 3). 6월과 8월의 경우 건전개체와 쇠약개체간의 차이가 뚜렷이 나타나지만(Figure 2) 9월에 쇠약개체의 광합성능력이 다시 회복되는 양상을 나타냈다(Figure 4).

또한 온도별로 구상나무의 광합성능력을 조사해 본 결과 온도가 15°C일 때가 20, 25°C의 경우보다 광합성능력이 높은 것으로 나타났다(Figure 2, 3). 시기별로도 6월과 8월의 측정치에서 일반적으로 온도와 광합성능력은 15°C일 때가 20, 25°C일 때보다 높았다. 그러나 9월의 측정값은 온도에 따라서 경향이 뚜렷하지는 않았다.

구상나무는 고산식물이고 낮은 온도환경에 오랜 기간 동안 적응하여 살아 왔기 때문에 15°C 온도조건하에서는 오히려 25°C 온도 환경보다는 높은 광합성능력을 보일 수 있다. 일반적으로 고산성 식물들은 낮은 온도에서 높은 광합성효율을 보인다. 이는 고산지대의 구상나무가 기온이 높은 환경에서는 오히려 광합성능력이 감소하여 전체적으로 영향을 줄 수도 있다는 가설을 설득력 있게 해준다.

광합성능력은 기공의 개폐정도와의 밀접한 관련성을 보인다. Faria *et al.*(1996)은 기공 단합이 순광합성능력을 제한하는 중요한 요소이기 때문에 기공전도도와 순광합성능력 사이에는 정의 상관관계가 있다고 하였다. 세 지역에서 건전개체가 쇠약개체에 비하여 기공전도도가 거의 높게 나타났는데(data not shown) 이것은 광합성능력과 기공개폐가 정의 상관관계가 있다는 것을 설명한다(Hinckley and Braatne, 1994).

또한 광합성능력이 낮은 개체들이 대부분 기공전도도가 낮은 경향을 보이는데 이는 광합성에 필요한 CO₂ 가 스코환이 제한을 받기 때문이고 이로 인해서 광합성능력이 저하되었을 것이다(Reich *et al.*, 1985). 쇠약한 개체들에 대한 9월 측정값에서 기공전도도가 증가되었고 광합성능력과 비슷한 경향을 나타낸 것으로 보아 기공전도도가 광합성능력에 크게 기여하였던 것으로 판단된다.

2. 수분이용효율

개체 간 수분이용효율을 비교하면 일반적으로 쇠퇴하는 개체의 수분이용효율이 건전한 개체의 수분이용효율보다 높은 것을 알 수 있다(Figure 5). 즉, 수분이용효율은 지역별로 약간의 차이는 있지만 건전한 개체의 수분이용효율이 낮다는 것을 의미한다.

수분이용효율은 광합성 동화산물에 대한 수분손실률로서 기공전도도 감소에 따라 증산량이 감소되기 때문에 일시적으로 수분이용효율이 증가할 수 있다. Hamerlynck and Knapp(1996), Penuelas *et al.*(1998)은 낮은 기공전도도는 높은 수분이용효율로 연결된다고 보고했다. 이 연구에서

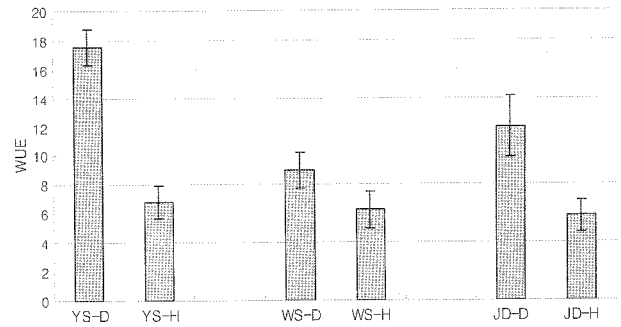


Figure 5. The effect of temperature on the water use efficiency (WUE) naturally grown Korean fir trees at three sites in June. Abbreviations refer to those in Figure 2.

도 가장 높은 수분이용효율을 나타낸 개체에서 가장 낮은 기공전도도를 나타내 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

수분이용효율은 일반적으로 영실지역이 쇠퇴목이나 건전한 개체나 공통적으로 다른 지역의 수분이용효율보다 높은 것으로 나타났다(Figure 5). 또한 쇠약개체의 경우에 건전한 성장을 하는 개체에 비해서 수분이용효율이 높은 경향을 나타냈다. 이는 쇠약개체의 경우에 광합성능력이 거의 비슷한 상황에서 증산량이 낮아지는 이유로 인해서 쇠약개체의 수분이용효율이 높아진 것으로 추정된다(Kimmins, 1987; Oliver and Larson, 1990).

생육기가 되어서 지상부가 생육을 시작했는데도 수분공급이 원활하게 이루어지지 않는다면 스트레스를 받은 상황이 될 것이고 식물의 광합성능력은 온화한 기온 때문에 높아지고 동결된 토양에서의 수분공급이 이루어지지 않는다면 일시적으로 수분이용효율이 높은 것처럼 보이지만 장기적으로는 생리적인 장애를 가져올 수 있는 것이며 이러한 현상은 스트레스 피해를 받은 식물들에서 흔하게 나타나는 현상이다(Binkley *et al.*, 1994; Blank *et al.*, 1990). Figure 5의 수분이용효율도 6월에 조사한 결과이며 이 시기는 한라산 고산지대에서 토양이 해빙이 되는 시기이지만 지상부는 이미 온도가 상당히 증가한 상태일 것이기 때문에 수분이용효율이 쇠약개체에서 높을 수 있다. 식물이 대기오염 피해를 받게 되면 기공이 닫혀서 일반적으로 증산량이 크게 낮아지게 되며 이로인해 일시적으로 수분이용효율이 증가하는 현상을 보일 수 있는 것이다.

본 연구에서도 건전한 구상나무개체의 수분이용효율보다 쇠약한 구상나무 개체에서 일반적으로 수분이용효율이 높은 값을 보였는데 이는 스트레스로 인한 증산량의 감소로 생긴 현상으로 판단된다. 이러한 현상이 지속적으로 유지되면서 한라산 고산지역에 봄철의 해빙기 무렵, 지상부는 적당한 온도로 광합성이 시작되지만 토양은 아직도 얼어 있다면 토양으로부터 적당한 수분이 공급이 되지 않고 증산량이 감소하며 구상나무가 스트레스를 받아서

궁극적으로는 생장이 감소하고 쇠퇴할 수도 있을 것으로 추정된다.

결 론

한라산 구상나무가 분포하는 윗세오름, 영실, 성관악지역을 선정하여 각 지역별로 건전개체와 쇠약개체로 나누어 계절별 광합성 능력과 수분이용효율을 분석했다. 모든 지역에서 건전개체가 쇠약개체에 비해서 높은 광합성능력을 보였다. 일반적으로 구상나무의 광합성능력은 15°C 일 때가 20°C, 25°C일 때 보다 높았다. 6월과 8월의 경우 건전개체와 쇠약개체간의 광합성능력의 차이가 뚜렷이 나타났지만 9월에 쇠약개체의 광합성능력이 다시 회복되었다. 수분이용효율은 건전개체에 비해서 쇠약개체에서 높았다.

감사의 글

한라산 정상까지 동행해서 무거운 기계를 운반하고, 자료수집, 분석을 같이 한 서울시립대학교 도시환경연구실의 제선미, 김경남군에게 감사를 드립니다.

인용문헌

- 강상준. 1989. 한라산 구상나무 숲의 재생에 대하여. 제 17회 국제학술대회 논문집 p. 21-50.
- 김은식. 1994. 환경변화와 고산지대 수목생장 쇠퇴현상과 상관성 해석. 한국과학재단 연구보고서 KOSEF 921-1500-081-2. pp.89.
- 구경아, 박원규, 공우석. 2001. 한라산 구상나무(*Abies koreana* W.)의 연륜연대학적 연구-기후변화에 따른 성장변동 분석. 한국생태학회지 24(5): 281-288.
- 이윤원, 홍성천. 1995. 구상나무林的 군락생태학적 연구. 한국임학회지 84(2): 247-257.
- 이창복. 1970. 구상나무와 새로 발견된 품종. 한국임학회지 10: 5-6.
- 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.
- Binkley D., Son, Y.W., and Z.S. Kim. 1994. Impacts of air pollution on forests: A summary of current situations. *Jour. of Korean For. Soc.* 83(2): 229-238.
- Blank L.W., Payer, H.D., Pfirrmann, T., and Rehfuss, K.E. 1990. Effects of ozone, acid mist and soil characteristics on clonal Norway spruce-overall results and conclusions of the joint 14 month tree exposure experiment in closed chambers. *Environ. Pollut.* 64: 385-395.
- Faria, T., Garcia-Plazaola, J.I., Abadia, A., Cerasoli, S., Pereira, J.S., and Chaves, M.M. 1996. Diurnal changes in photoprotective mechanisms in leaves of cork oak (*Quercus suber*) during summer. *Tree Physiology* 16: 115-123.
- 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 Braatne, J.H. 1994. Stomata. In Wilkinson, R.E. (eds.) *Plant-Environment Interactions*. Dekker, New York, p.323-355.
- Kim, G.T., Choo, G.C., and Um, T.W. 1997. Studies on the Structure of Forest Community at Cheonwangbong-Deokpyungbon Area in Chirisan National Park-*Abies koreana* Forest-. *J. of Forest Society* 86(2): 146-157.
- Kimmins, J.P. 1987. *Forest Ecology*. Macmillan Publishing Company, New York, 531p.
- Kratsch, H.A. and Wise, R.R. 2000. The ultrastructure of chilling stress. *Plant Cell and Environment*. 23: 337-350.
- Lim, J.H., Chun, J.H., Woo, S.Y., Kwon, M.J., and Kim, Y.K. 2005. Monitoring the Decline of *Abies koreana* Forest in Mt. Halla. *EMEA 2005 in Kanazawa*. p.44.
- Oliver, C.D. and Larson, B.C. 1996. *Forest Stand Dynamics*. John Wiley and Sons. Inc. New York. 520 p.
- Penuelas, J., Filella, I., Llusia, J., Siscart, D., and Pinol, J. 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.
- Reich, P.B., Schoettle, A.W., Stroh, H.F., Troiano, J., and Amundson, R.G. 1985. Effects of O₃, SO₂ and acidic rain on mycorrhizal infection in northern red oak seedlings. *Canadian Journal of Botany* 63: 2049-2055.
- 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 Lutz, C. 1996. Antioxidant composition of selected high alpine plant species from different altitudes. *Plant Cell and Environment* 19: 138-146.

(2006년 8월 23일 접수; 2006년 10월 17일 채택)