

대기-엽 수증기압차(VPD)에 의한 어수리와 눈개승마의 광합성 반응 비교

Comparison of Photosynthetic Responses in *Heracleum moellendorffii* and *Aruncus dioicus* var. *Kamtschaticus* in Relation to Atmosphere-Leaf Vapor Pressure Deficit

이경철¹⁾ · 권영휴²⁾ · 이경민²⁾ · 한상균^{2)*}

K.-C. Lee¹⁾, Y.-H. Kwon²⁾, K.-M. Lee²⁾, S.-K. Han^{2)*}

Abstract

This study was conducted to investigate the effect of atmosphere-leaf vapor pressure deficit (VPD) in *Heracleum moellendorffii* and *Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus*. The VPD was rapidly increased with increasing temperature and decreasing relative humidity. Taken as a whole, the stomatal transpiration reaction was slightly late with increasing of VPD. Maximum photosynthetic rate at high-VPD condition was $6.49 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in *Heracleum moellendorffii* Hance, which was a little lower than $5.57 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in *Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus*, respectively. After 2 p.m, stomatal transpiration of *Heracleum moellendorffii* at the high VPD condition was rapidly decreased. The results indicated that physiological activities in *Heracleum moellendorffii* are more limited from high VPD conditions.

Key Words : *Heracleum moellendorffii*, *Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus* , Stomatal transpiration, photosynthetic rate, Vapor pressure deficit

* 교신저자 : 한국농수산대학 산림조경학과 (54874, 전라북도 전주시 완산구 콩쥐팥쥐로 1515)

Korea National College of Agriculture & Fisheries, 1515, Kongjiwipatjwi-ro, Wansan-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, Korea 54874,
Tel : +82-63-238-9271, E-mail : hsk5311@korea.kr

¹⁾ National Institute of Ecology.

²⁾ Korea National College of Agriculture and Fisheries

I. 서론

산채는 일반적으로 고유의 독특한 맛과 향을 지니고 있으며, 칼슘, 철 등의 무기물과 각종 비타민이 많이 함유되어 최근 농가의 소득 작목으로 높은 관심을 받고 있다. 산채의 수요 역시 국민 생활수준의 향상과 더불어 높아지고 있으며, 이로 인해 산채의 가공 및 산업화가 가속도를 내고 있다. 이러한 산채의 수요증가 및 소비패턴의 변화로 규격화되고 높은 품질의 산채를 공급하기 위한 노력이 많이 이루어지고 있으며, 산지나, 농경지, 시설하우스 등에서 적극적으로 재배되고 있다. 또한 산채의 자생지 분포, 산지재배기술, 생장특성, 항산화 효과 등 여러 분야의 연구가 국내에서 활발히 진행되고 있다(Ham 등, 1998; Lee 등, 2011; Lee 등, 2014; 성 등, 2016).

산림청 통계자료에 의하면 산채류를 포함한 산나물이 2015년 전국적으로 9,089ha에서 재배되고 있으며, 이 중 강원도의 재배면적이 2,966ha로 가장 많았다. 특히 10년간 지속적으로 공급량이 증가한 결과 2014년에 약 40,338ton의 생산량을 기록하였으며, 생산액은 2004년 1,448억 원에서 2014년 3,697억 원으로 약 2배 이상 급증한 것으로 나타났다(산림청, 2015).

산채의 일종인 눈개승마와 어수리는 다양한 효능과 식감을 가지고 있어 소비자에게 호응이 높으며, 현재 임업 농가에서 활발히 재배되고 있다. 눈개승마(*Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus*)는 장미과의 다년생 초본으로 높은 영양가와 독특한 향기는 물론 상큼한 맛으로 인해 울릉도의 대표적인 산채자원이며, 특히 사포닌이 들어 있어 성인병에 탁월한 효능을 지닌 것으로 알려져 있다(윤 등, 2012). 또한 어수리(*Heracleum moellendorffii*)는 산형화목 미나리과의 여러해살이식물로 전체에 털이 많고, 줄기는 곧게 뻗어

속이 비어 있는 것이 특징이다. 특히 Angelicin, Pimpinelin, Xanthotoxin, Sphondin 등의 성분이 함유되어 있어 일반적으로 식용과 약용으로 모두 사용되고 있다(Park 등, 2015). 눈개승마와 어수리는 산채의 일종으로 현재 임업 농가에서 활발히 재배되고 있다.

본 연구는 어수리와 눈개승마를 대상으로 수증기압차(vapor pressure deficit: VPD)에 의한 생리반응을 조사하여 차이점을 밝히고, 효율적인 생산과 재배관리를 위한 기초자료를 제공하고자 엽의 순광합성 속도(net photosynthetic rate: Pn), 기공증산속도(stomatal transpiration rate: E), 수분이용효율(water use efficiency; WUE), 엽육세포간극의 CO₂ 농도(intercellular CO₂ concentration: Ci), 수분 불포화도(water saturation deficits, WSD)의 일변화를 측정하여 비교 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2010년 3월 파종한 어수리와 눈개승마 2년생 묘 각각 30본을 대상으로 강원대학교 구내 유리 온실에서 실험을 진행하였으며, 2011년 4월 22일(흐리고 습한 조건, Low-VPD)과 2011년 5월 3일(건조한 조건, High-VPD)에 대기와 엽의 수증기압차(VPD)에 따른 생리반응의 일변화(오전 4시부터 오후 7시 까지)를 측정하였다.

흐리고 습한 환경의 광도는 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이하로 나타나 비교적 낮은 광환경이 형성되었으며, 광 조건에 의한 영향을 줄이기 위해 고온 건조한 환경에서 실험을 수행할 때에도 상대광도 80% 수준의 차광막을 설치하여 흐리고 습한 날과 유사한 약 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이하의 광도가 유지되도록 하였다.

대기와 엽의 VPD는 온습도 측정용 데이터로거

(HOBO, H08-004-02, ONSET, USA)를 이용하여 대기 중의 온도와 습도를 측정하였고, 휴대용 광합성 측정장치(Ultra Compact Programmable Photosynthesis System, LCpro+, ADC, UK)를 이용하여 온도와 광량을 설정하지 않은 상태로 외부 공기만 흐르게 하여 엽온이 안정될 때까지 3~5분을 기다린 후 엽온을 측정하였다.

일반적으로 잎의 기공아래 공간은 기체상태의 물로 포화되어 있으며(Kwon 등, 2003), 잎을 통한 수분의 증산작용은 엽육세포와 잎 표면위의 정체된 공기 경계층(air boundary layer), 그리고 대기 중 수증기의 농도 기울기에 의해 일어난다. 따라서 실험을 진행할 때 식물체 표면의 상대습도는 100%로 가정하였으며(이 등, 2012), 다음과 같은 식으로 대기-엽의 VPD를 계산하여 각각 구하였다.

$$\text{VPD (kPa)} = \text{SVP (saturation vapor pressure)} - \text{VP (vapor pressure)}$$

$$\text{SVP} = 6.1078 \times \exp [(17.269 \times \text{Temp}) / (\text{Temp} + 273.3)]$$

$$\text{VP} = (\text{RH} \times \text{SVP}) / 100$$

휴대용 광합성 측정 장치(Ultra Compact Programmable Photosynthesis System, LCpro+, ADC, UK)를 이용하여 단위 잎표면적당 순광합성 속도(net photosynthetic rate; Pn), 기공증산속도(stomatal transpiration rate; E), 엽육세포간극의 CO₂ 농도(intercellular CO₂ concentration; Ci)를 20회 반복 측정하였으며, Caemmerer과 Farquhar (1981)의 식으로 자동 계산하였다. CO₂의 공급은 4m 높이의 공기유입 안테나를 사용하였으며, 수분이용효율(water use efficiency; WUE)의 계산은 순광합성 속도를 기공증산속도로 나눈 값, 즉 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$ 로 나타내고, 대기 속의 CO₂ 농도(air CO₂

concentration; Ca)에 대한 엽육세포 간극의 CO₂ 농도의 비율은 Ci·Ca⁻¹로 나타냈다(Sim과 Han, 2003).

III. 결과 및 고찰

1. VPD와 상대습도 및 엽온의 관계

흐리고 습한 날씨를 보인 4월 22일은 기온과 상대습도의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 일평균 기온이 8.7°C, 상대습도 92%로 나타나 Low-VPD 환경이 형성된 것을 알 수 있었다. 맑고 건조한 날씨를 보인 5월 3일은 오전 6시경 기온이 10.2°C, 상대습도 79.7% 였으나 오후 1시경 기온은 26.3°C, 상대습도 25.9%로 온도와 상대습도의 일변화가 크게 나타나 High-VPD 환경이 형성되었다. 눈개승마와 어수리의 일중 대기과 엽의 수증기압차(VPD)의 변화가 비슷한 경향을 나타냈으며, 전반적으로 어수리의 VPD가 다소 높게 나타났다. 특히 High-VPD 환경에서 두 종 모두 13시부터 17시 까지 매우 높은 VPD를 보였다(Fig. 1).

VPD와 상대습도, 엽온의 관계를 Fig. 2에 나타냈다. 전반적으로 상대습도가 감소함에 따라 VPD는 증가되었으며, 이와 반대로 엽온의 증가에 따라 VPD는 증가하였다. 이런 경향은 특히 건조한 날 두드러진 것으로 나타났다. 두 종간의 차이를 비교해 보면 눈개승마는 어수리에 비해 상대적으로 상대습도의 감소에 따른 VPD 증가 경향이 뚜렷했으나 엽온에 따른 VPD 변화는 두 종간에 거의 차이가 없었다. 이는 상대적으로 엽육조직이 얇고 엽면적의 크기가 작은 눈개승마가 어수리에 비해 상대습도에 따른 VPD 변화에 대해 더 민감하게 반응하는 것으로 보인다.

대기-엽 수증기압차(VPD)에 의한 어수리와 눈개승마의 광합성 반응 비교

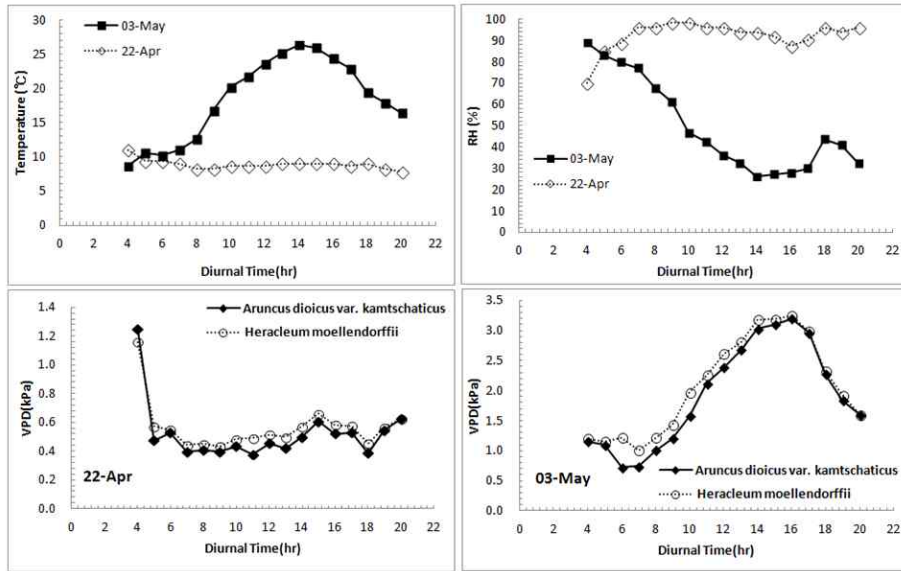


Fig. 1 Comparisons of temperature, relative humidity(RH) and vapor pressure deficit (VPD) of VPD conditions. Low VPD and High VPD conditions were acquired on 22 April 2011 and 03 May 2011, respectively.

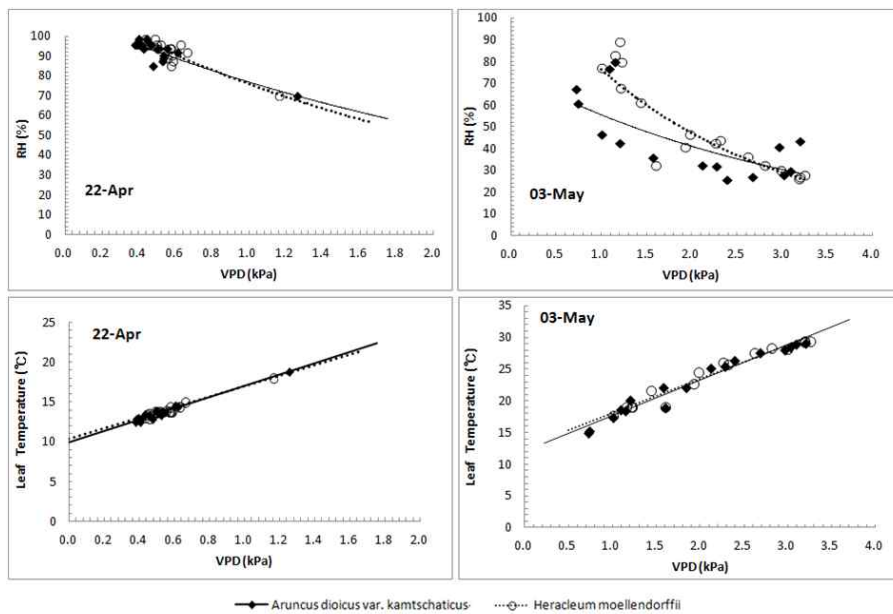


Fig. 2 Relationships between relative humidity(%) and vapor pressure deficit(VPD), leaf temperature(°C) and vapor pressure deficit(VPD). Low VPD and High VPD conditions were acquired on 22 April 2011 and 03 May 2011, respectively.

2. VPD 변화에 따른 광합성 반응

대기 환경에 따른 눈개승마와 어수리의 광합성과 기공관련 생리적 반응을 살펴보면, 어수리와 눈개승마 모두 흐리고 습한 날의 순광합성도, 기공증산속도, 엽육세포 간극의 CO_2 농도의 변화가 거의 없었으며, 순광합성 속도에서 어수리는 약 $0.20 \sim 1.59 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 범위를 보였고, 눈개승마는 약 $0.22 \sim 0.98 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 나타나 어수리가 눈개승마에 비해 오후에 다소 높은 순광합성 속도를 나타냈다(Fig. 3).

맑고 건조한 날의 경우 두 종 모두 순광합성 속도의 증가가 오전 8시부터 급속히 이루어지기 시작하여 12시 ~ 오후 2시경 가장 높은 경향을 나타냈으며, 어수리가 눈개승마에 비해 다소 높은 경향을 보였다. 눈개승마는 VPD가 1.0kPa 이상이 되는 오전 8시경부터 급속히 순광합성 속도가 증가하기 시작하여 VPD가 2.5kPa 이상이 되는 12시에서 오후 2시 사이 가장 높은 경향을 보였다. 어수리의 경우 오전 8시경 VPD가 1.4kPa 이상에서부터 급속히 증가하다가 12시에서 오후 1시경 약 $6.4 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 가장 높은 순광합성 속도를 보였는데, VPD가 3.2 kPa 이상으로 가장 높게 유지되는 오후 2시에서 4시 사이에는 오히려 $3.7 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하로 급격히 낮아져 대기-엽의 수증기압차가 3.0kPa 이상이 형성되는 건조한 경우 순광합성 속도가 저하되는 것으로 나타났다. 이를 통해 어수리는 눈개승마에 비해 3.0kPa 이상의 비교적 높은 VPD환경에서 순광합성 속도의 저하가 뚜렷한 종임을 알 수 있었다(Fig. 3).

기공증산속도의 경우 두 종간의 차이가 뚜렷하였다. 눈개승마의 경우 높은 순광합성 속도를 보인 12시경부터는 기공증산속도가 $1.5 \text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상을 유지하다가 해가 지기 시작한 오후 6시경 이후부터 급속히 저하되었으며, 이때의 VPD는 2.28kPa이었다. 어수리의 경우 오전

11시경부터는 눈개승마의 최대 기공증산속도 보다 약 2배 이상 높은 $3.0 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 높은 기공증산속도를 보이다가 오후 7시경 급속히 저하되었다. 이를 통해 어수리는 눈개승마에 비해 VPD의 증가에 따라 높은 증산속도를 유지하게 되고 수분손실이 많아져 순광합성 속도의 감소를 유발한 것으로 생각된다(Fig. 3).

높은 Ci Ca^{-1} 농도는 엽육세포간극의 CO_2 농도가 높다는 의미로 엽육세포간극의 CO_2 이용효율이 낮다고 볼 수 있다(Sim과 Han, 2003). 눈개승마와 어수리 모두 흐리고 습한 날에 엽육세포간극의 CO_2 농도(Ci/Ca)는 거의 변화가 없었으나, 맑고 건조하여 High-VPD 환경조건이 형성된 경우 광합성이 활발해지기 시작하는 오전 8시경부터 급격하게 감소하기 시작하여 12시에서 오후 2시경 가장 낮은 값을 보였다. 이는 VPD의 증가에 따른 순광합성 속도의 증가로 엽육세포간극의 CO_2 가 광합성에 이용되어져 Ci/Ca 의 감소가 나타난 것으로 볼 수 있으며, 어수리가 눈개승마에 비해 다소 높은 것으로 보아 어수리가 엽육세포간극 내의 CO_2 를 더 효율적으로 사용하는 것으로 볼 수 있다(Fig. 3).

수분이용효율은 광합성 동화산물에 대한 수분손실률로서 낮은 기공전도도는 높은 수분이용효율과 연결된다고 알려져 있다(Lim 등, 2006). 전반적으로 눈개승마가 어수리에 비해 수분이용효율이 더 높은 것으로 나타났으며, 이는 눈개승마와 어수리의 순광합성 속도 차이는 크지 않은데 비해 기공증산속도는 어수리가 2배 이상 높기 때문으로 눈개승마는 적은 수분을 효율적으로 활용하여 높은 VPD환경에 대응하고 비교적 높은 순광합성 속도를 유지하는 종임을 알 수 있다(Fig. 3).

광합성 관련 생리반응 측정을 통해 건조한 High-VPD 환경에서 눈개승마가 어수리에 비해 증산량을 줄이면서 수분이용효율을 높이므로 비

대기-엽 수증기압차(VPD)에 의한 어수리와 눈개승마의 광합성 반응 비교

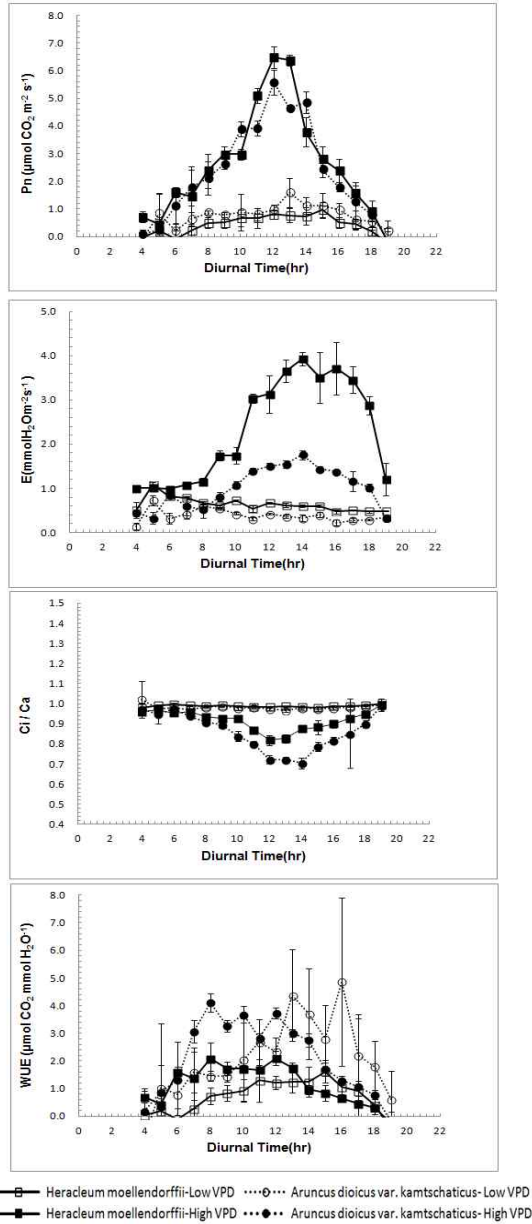


Fig. 3 Diurnal changes of stomatal transpiration rate(E), intercellular(Ci)/atmospheric CO_2 concentration(Ca), water use efficiency(WUE) and net photosynthetic rate(Pn) (mean \pm S.D, n=20).

교적 높은 순광합성 속도를 유지하는 종임을 알 수 있었으며, 어수리는 VPD가 3.0kPa이상으로 높게 유지되면 순광합성 속도의 감소가 뚜렷히 나타나 상대적으로 건조한 대기 환경에서 생육하기 어려운 종임을 알 수 있었다.

3. VPD 변화에 따른 수분 퍼텐셜과 수분 불포화도의 일변화

새벽녘(pre-dawn) 수분 퍼텐셜(WP)과 수분 불포화도(WSD)를 측정 한 뒤 수분 스트레스가 일중 가장 높은 오후 1시경(mid-day)의 수분 퍼텐셜(WP)과 수분 불포화도를 다시 측정하여 VPD 환경조건에 따른 수분스트레스를 간접적으로 나타냈다(Table 1). 눈개승마와 어수리 모두 흐린 날의 Low-VPD환경에서 오전과 오후의 수분 퍼텐셜 및 수분 불포화도 변화가 크지 않았다. 건조한 High-VPD 환경에서는 눈개승마의 경우 오전에 비해 오후의 수분 퍼텐셜(WP)이 약 2.5배 정도 낮아졌으나 엽의 수분 불포화도(WSD)는 거의 차이가 없어 수분스트레스가 크지 않은 것을 알 수 있었으며, 이에 반해 어수리는 오전에 비해 오후에 수분 퍼텐셜이 약 3배 이상 낮아 졌으며, 수분 불포화도는 10배 이상 높아져 엽의 수분스트레스가 높은 것을 알 수 있었다. 이를 통해 어수리는 눈개승마에 비해 건조한 환경에서 더 낮은 수분 퍼텐셜을 보임으로 수분스트레스를 많이 받는 종임을 알 수 있었고, 엽의 수분 불포화도 역시 커지는 것을 알 수 있었다.

Table 1. Changes in vapor pressure deficit(VPD), Leaf water potential(WP) and water saturation deficits(WSD) of two wild vegetables.

Species	Condition	VPD				WP (-MPa)	WSD
		Time	Air	Leaf	$VP_{leaf} - VP_{air}$		
<i>Aruncusdioicus</i> var. <i>kamtschaticus</i>	Low VPD	Pre-dawn	T= 9.4°C RH= 85.1% VP= 1.00kPa	T= 12.8°C RH= 100% VP= 1.47kPa	0.47	0.21±0.01**	15.9±0.2a
		Mid-day	T= 9.0°C RH= 93.8% VP= 1.08kPa	T= 13.0°C RH= 100% VP= 1.49kPa	0.42	0.24±0.01b	14.8±0.3a
	High VPD	Pre-dawn	T= 10.6°C RH= 83.0% VP= 1.06kPa	T= 18.7°C RH= 100% VP= 2.16kPa	1.1	0.21±0.01b	15.5±0.2a
		Mid-day	T= 25.2°C RH= 32.4% VP= 1.04kPa	T= 27.7°C RH= 100% VP= 3.71kPa	2.68	0.59±0.01c	13.5±0.5b
<i>Heracleum moellendorffii</i>	Low VPD	Pre-dawn	T= 9.4°C RH= 85.1% VP= 1.00kPa	T= 13.8°C RH= 100% VP= 1.57kPa	0.57	0.21±0.01a	5.8±0.4a
		Mid-day	T= 9.0°C RH= 93.8% VP= 1.08kPa	T= 13.8°C RH= 100% VP= 1.57kPa	0.50	0.29±0.01b	3.9±0.4a
	High VPD	Pre-dawn	T= 10.6°C RH= 83.0% VP= 1.06kPa	T= 19.1°C RH= 100% VP= 2.21kPa	1.15	0.22±0.02b	3.8±0.5a
		Mid-day	T= 25.2°C RH= 32.4% VP= 1.04kPa	T= 28.3°C RH= 100% VP= 3.84kPa	2.81	0.74±0.02c	33.3±0.8b

* mean±S.D. n=3

* Means with different letters are significantly different at P<0.05, which are testified with one ANOVA test and Duncan's multiple range test

IV. 적 요

산채의 일종으로 현재 임업농가에서 활발히 재배되고 있는 눈개승마와 어수리의 수증기압차(vapor pressure deficit: VPD)에 따른 순광합성 속도 등 생리반응을 조사하여 효율적인 생산과 재배관리를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 건조한 High-VPD 환경에서 눈개승마가 어수리에 비해 증산량을 줄이면서 수분이용효율을 높이는 기작을 통해 높은 순광합성 속도를 유지하는 것

을 알 수 있었으며, 어수리에 비해 눈개승마는 엽의 수분 퍼텐셜의 감소가 비교적 크지 않고, 엽의 수분 불포화도 역시 큰 변화가 없는 것으로 보아 건조한 대기 환경에 따른 수분스트레스의 적응력이 비교적 양호한 종임을 알 수 있었다. 어수리는 VPD가 3.0kPa 이상으로 높게 나타나는 건조한 대기상태가 되면 순광합성 속도의 감소가 뚜렷히 나타나고 수분 퍼텐셜의 급속한 저하 및 엽의 수분 불포화도가 10배 이상 높게 나타나 상대적으로 건조한 대기 환경에서 생육하기 어려운 종임을 알 수 있었다.

따라서 재배지의 환경조건이 VPD 3.0kPa 이상의 건조한 환경이 자주 형성되는 곳은 어수리의 생육에 불리할 수 있으며, 눈개승마의 경우 어수리 보다 다소 건조한 대기환경에 더 높은 적응력을 지닌 것을 알 수 있었다.

V. 참고문헌

1. 권영명, 고석찬, 김준철, 문병용, 박민철, 박현범, 박인호, 이영숙, 이일하, 이준상, 이진범, 이춘환, 전방욱, 조성호, 홍주봉. 2003. 최신 식물생리학. 아카데미서적. 서울. PP.429
2. 산림청. 2015. 임업통계연보(제45호). P.299
3. 성낙윤, 안은주, 박원종, 박우용, 변의홍. 2016. 고사리(*Pteridium aquilinum*) 및 취나물(*Aster scaber*)이 첨가된 된장의 면역증강 효과. 한국식품영양과학회지. 45:445-451.
4. 윤진숙, 신승용, 우용시양, 황주영, 조재호, 하용근, 김진기, 박민정, 이선호, 김태훈, 김태완. 2012. 눈개승마 추출물의 항산화 및 주름개선 효과. 한국식품저장유통학회. 19:393-399.
5. 이경철, 김선희, 박완근, 김영설. 2014. 수분스트레스가 잣나무의 광합성 능력 및 광계 II의 활성화에 미치는 영향. 한국약용작물학회지. 22:38-45.
6. 이경철, 김하선, 노희선, 김종환, 한상섭. 2012. 대기-엽 수증기압차에 의한 산마늘과 울릉산마늘의 광합성 반응 비교. 한국약용작물학회지. 20:171-176.
7. Caemmerer, S., and G.D. Farquhar. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*. 153:376-387.
8. Ham, S.S., S.Y. Lee, D.H. Oh, S.W. Jung, S.H. Kim, C.K. Jeong, and I.J. Kang 1998. Cytotoxicity of *Ligularia fischeri* extracts. *Journal of Food Science and Nutrition*. 27:745-750.
9. Lee, K.C., H.S. Kim, and S.S. Han. 2011. Water relations parameters in the leaves of *Allium ochotense* and *Allium microdictyon*. *Journal of Forest Science*. 27:33-37.
10. Lim, J.H., S.Y. Woo, M.J. Kwon, J.H. Chun, and J.H. Shin. 2006. Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean fir in Mt. Halla. *Journal of Korean Forest Society*. 95:705-710.
11. Park, S.A., Y.J. Mun., W.H. Woo and K.S. Ko. 2015. Effect of Ethanol Extract of *Heracleum moellendorffii* on Hypopigmentation Activity. *Journal of The Korean Society of cosmetology*. 21:439-445
12. Sim, J. S., and S. S. Han. 2003. Ecophysiological characteristics of deciduous oak species(III)-photosynthetic responses of leaves to change of light intensity. *Journal of Korean Forest Society*. 92:208-214.