

생육환경에 따른 한국특산식물 벌개미취의 광합성 특성

남효훈*, 손창기, 이중환, 권중배

경상북도농업기술원 생물자원연구소

Photosynthetic Characteristics of Korean Endemic Plant, *Aster koraiensis* Nakai According to Growth and Development Conditions

Hyo-Hoon Nam*, Chang-Ki Son, Joong-Hwan Lee and Jung-Bae Kwon

Institute for Bioresources Research, Gyeongbuk Agricultural Research and Extension Services,
Andong 36614, Korea

Abstract - This study was conducted to elucidate the photosynthetic response to the environment and establish optimum cultivation conditions for the Korean endemic plant, *Aster koraiensis*. Photosynthetic characteristics according to growth stage, light, CO₂, and soil water potential were investigated. During the first year of transplanting, photosynthetic rates were drastically increased until June, after which they slowly declined. During the second year, photosynthetic rates declined throughout the entire growth period. The highest level of light compensation point was shown the early growth stage. Photosynthetic rates affected by intercellular CO₂ concentration were maintained or decreased over the CO₂ saturation point. The lowest CO₂ compensation point was 16.1 μmol·mol⁻¹ during March. The morphological changes of leaves were observed due to shading with chlorophyll contents increasing. Photosynthetic rates were higher at 0% and 50% shading treatments than at 75%. There were rarely any morphological changes of leaves due to soil moisture, however, changes to leaf compactness were observed. Photosynthetic rate, apparent quantum yield, and respiration rate increased, whereas water use efficiency decreased over -25 kPa of soil moisture.

Key words - A-Light curve, A-Ci curve, Shading, Soil water potential

서 언

자생 자원식물의 활용에 대한 관심이 높아지면서 국내 생산 규모는 지속적으로 증가하여 연간 생산규모는 1,000억원, 재배 면적 300 ha 정도에 달하고 있다(RDA, 2009). 자생 자원식물들은 국내 환경에 높은 재배안정성을 보이며 농업, 환경, 의학, 신소재 등 다양한 분야에서 이용 가능성을 평가받고 있다. 그러나 높은 상업적 이용가치에 비해 작물화를 위한 생장, 재배 및 품종 육성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 자원식물의 작물화를 위해서는 다양한 환경조건에 대한 일차적인 생장반응의 구명을 통한 작물생산성의 평가가 필요하다(Nam *et al.*, 2009). 광합성은 식물생장의 환경요인에 대한 변화의 가장 효율적인 평가방법으로 다양한 작물에서 생산성 평가를 위한 훌륭한 지표로 활

용되고 있다.

광합성은 작물의 생육단계, 광, 온도, CO₂, 수분 등 다양한 요인의 영향을 받게 된다. 건물생산과 작물생산율은 식물에 수용되는 빛의 양에 큰 상관성이 있으며 고광도의 상태에서는 광저해(photoinhibition)가 발생하고 저광도의 상태에서는 최대한의 광을 수용하고 광 이용효율을 높이기 위해서 생태적, 형태적 변화를 보인다. 차광상태의 식물은 잎의 수, 두께, 기공수, 광합성과 호흡률 변화 등의 반응을 보이며 결국 이들 식물은 고광도에서 낮은 순양자수율을 보이고 저광도에서는 높은 광합성률과 순양자수율을 보인다(Krishna and van Iersel, 2004). 차광조건에서 자란 식물은 상대적으로 광효율을 높이기 위해 큰 안테나 복합체를 가지고 제2광계의 활성을 높인다(Critchely, 1998). 식물체의 수분함량은 뿌리로부터 흡수하는 상대수분량과 증산량에 의해 조절되며 수분스트레스는 각 기관의 물질분

*교신저자: whoisnam@korea.kr

Tel. +82-54-859-5123

배비의 변화, 분화 및 발달의 억제를 통해서 식물의 생산활성을 현저히 저하시켜, 식물의 생장, 형태, 개체발생 및 대사생리에 영향을 미친다(Pugnaire *et al.*, 1993). 또한 토양수분 스트레스는 식물체의 수분포텐셜, 기공전도도 및 엽록체의 활성화에 영향을 주고 이들 요인이 광합성에 영향을 준다(Bennett *et al.*, 1987).

별개미취(*Aster koraiensis* Nakai)는 국화와 속근초로서 생장이 왕성하고 7~9월에 연자주색의 꽃을 피우는 한국특산 식물이며(Lee, 2003; Nam *et al.*, 2015), 경관용 또는 지피용으로 수요가 많아 2009년 생산량이 약 600만본에 이를 것으로 추정된다(RDA, 2009). 또한 항산화 활성(Shin and Park, 2014), 당노병성 백내장 발병 지연(Kim *et al.*, 2009), 토양내 중금속 흡수(Ju *et al.*, 2011) 등 기능성 자원으로서의 가치도 평가받고 있다. 본 연구는 수요량이 많고 산업화 가능성이 높은 한국특산식물 별개미취의 생육시기, 광-광합성, 세포내 CO₂농도-광합성 반응 등 내적요인과 차광, 관수조건 등 외적 요인에 따른 광합성 반응을 조사하여 다양한 재배환경에 대한 성장반응을 예측하고 생산성 향상을 위한 기초 자료를 얻고자 수행하였다.

재료 및 방법

2006년부터 2007년까지 경상북도농업기술원 시험포장에서 수행되었으며 동 시험포장에 유지종인 별개미취(*Aster koraiensis* Nakai)를 분주하여 2006년 3월 30일에 30×30 cm 간격으로 정식하였고, 매년 3월에 분상 유기물퇴비(유기물 43.6%, N 2.7%, P 3.2%, K 2.3%)를 10 a당 2,000 kg씩 사용하였다.

광도 및 생육시기별 광합성 특성

완전 전개된 건전엽 5매를 대상으로 지상부의 생육기간동안 약 30일 간격으로 12회에 걸쳐 CO₂ cartridge와 light source가 부착된 휴대용광합성측정기(LI-6400, LI-COR, USA)를 이용하여 광합성을 측정하였다. 0, 100, 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,500 및 2,000 μmol·mol⁻¹·s⁻¹의 광도에서 측정하고 기타 측정 조건은 CO₂ 400 μmol·mol⁻¹ flow rate 500 μmol·s⁻¹로 하였다. Kume and Ino (1993)의 방법에 따라 asymptotic exponential equation ($A=A_{max}(1-\exp(-\Phi I/A_{max}))-R$, A, 광합성률; A_{max}, 최대 광합성률, Φ, 초기 기율기; I, 광도; R, 호흡속도)을 이용하여 광-광합성반응을 검토하였다. 최대 광합성률을 보이는 통계적으로 유의성 없는 최소 광도를 광포화점으로 하였다. 100 μmol·m⁻² 이하의 저광도에서 나타나는 선형회귀($y=ax+b$)

를 산출하고 기율기를 광화학반응계의 활성을 나타내는 순양자수율, y절편을 광보상점, -b/a를 암호흡속도로 추정하였다.

세포내 CO₂ 농도별 광합성 특성

2007년 3, 5, 7 및 9월에 휴대용 광합성측정기(LI-6400, LI-COR, USA) sample cell의 CO₂ 농도를 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1,000 및 1,500 μmol·mol⁻¹의 수준으로 처리하였다. 각 농도별 10분의 안정시간을 거친 뒤 광합성률을 측정하였고 기타 측정조건은 광도 800 μmol·m⁻²·s⁻¹, 엽온 25°C, flow rate 500 μmol·s⁻¹이었다. 세포내 CO₂ 농도와 광합성률의 관계식을 기초로 저농도의 CO₂ 농도에서 나타나는 광합성률과 CO₂ 농도간 직선회귀의 기율기를 탄소고정효율, y절편을 광호흡속도로 산출하였다.

차광수준별 광합성 특성

가로 2, 세로2, 높이 1.5 m의 차광하우스를 설치하고 하우스 내 광도가 노지의 50% 및 75%가 되도록 차광망을 피복하였다. 차광 90일 후에 잎크기, 화경장, 꽃수, 엽록소함량 등을 조사하였으며, 차광 120일 후에 각 처리별 광도에 따른 광합성을 측정하였다. 광합성률, 광보상점, 암호흡속도, 순양자수율 등은 광도 및 생육시기별 광합성 특성시험과 동일한 방법으로 측정 및 산출하였다.

관수수준별 광합성 특성

직경 30 cm, 높이 30 cm, 용적 20 L의 원형 화분에 1본씩 정식하였고 재배용토는 pH 6.5, EC 1.6 ds·m⁻¹, O.M. 54.2 g·kg⁻¹, 유효인산 769 mg·kg⁻¹의 사양토였다. 수분장력계(vacuum dial gauge 2060FG2, Soilmoisture Equipment Corp., USA)를 지하 15 cm 위치에 설치하여 토양수분이 -5, -25 및 -70 kPa을 유지하도록 각각 관수하였으며 처리 30일 후에 광도 및 생육시기별 광합성 특성시험과 동일한 방법으로 광합성을 측정하였다.

통계처리

통계소프트웨어 R (v3.2.0)을 이용하여 분산분석을 수행하였고 유의성 검정은 Least significant difference test (p<0.05)와 Duncan's multiple range test (p<0.05)로 하였으며 그래프는 Sigmaplot 12.5 (Systat Software Inc., USA)을 이용하였다.

결과 및 고찰

광도 및 생육시기별 광합성 특성

Fig. 1과 같이 벌개미취의 광-광합성반응은 $A = -1.64 + 20.51 [1 - \exp(-0.05I/20.51)]$ 의 asymptotic exponential equation으로 표현되었고, 광합성률과 기공전도도는 $A = -115 + 643g_s - 768g_s^2$ (A, 광합성률; I, 광도; g_s : 기공전도도)의 2차 함수 관계를 보였으며(Kumudini, 2004) 최대 광합성률을 나타내는 기공전도도

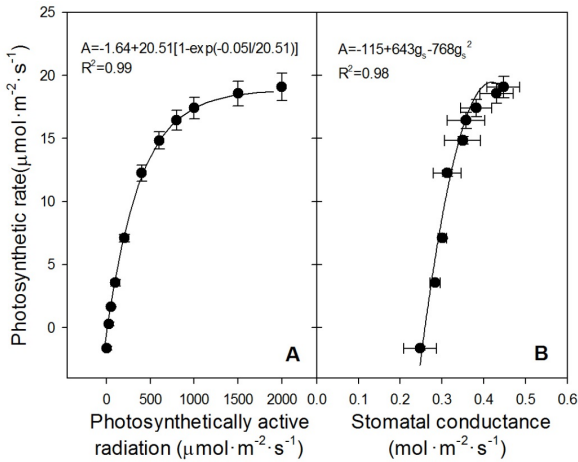


Fig. 1. Light-photosynthesis curves (A) and relationships between photosynthetic rate and stomatal conductance (B) in Korean endemic plant, *Aster koraiensis*. Vertical or horizontal bars represent standard errors (n=12). A, I, and g_s respectively mean photosynthetic rate, photosynthetically active radiation, and stomatal conductance.

는 $0.43 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이었다. 벌개미취의 광합성률은(Fig. 2) 정식 초기에는 광도에 상관없이 상대적으로 낮은 $-2.1 \sim 5.7 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 활착이 완료된 후 광합성률은 1년차 8월까지 급격히 증가한 뒤 감소 또는 유지되었다. 최대 광합성률을 보이는 시기까지 광도 증가에 따른 광합성률의 증가폭은 커지는 경향이 있었다. 하지만 정식 2년차에는 생육시기에 따른 변화가 적은 편이었다. $200 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 광도에서는 계절적 변화가 적고 생육 후기로 갈수록 광합성률이 증가하는 반면 $400 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광도에서는 변화가 크고 생육이 진전될수록 광합성률이 감소하는 경향이었으나 통계적 유의성은 없었다. Table 1과 같

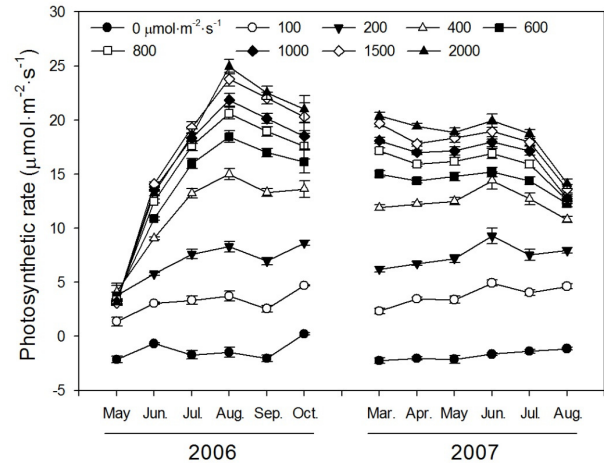


Fig. 2. Seasonal changes of photosynthetic rates as affected by photosynthetically active radiations in Korean endemic plant, *Aster koraiensis*. Vertical bars represent standard errors (n=5).

Table 1. Seasonal changes of photosynthetic characteristics as affected by light condition in Korean endemic plant, *Aster koraiensis*

Year	Month	Light compensation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Light saturation point ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Maximal photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Dark respiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Apparent quantum yield ($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
2006	May	47 a ^z	265 c	5.5 e	2.1 ab	48
	Jun.	8 bc	792 b	16.9 cd	0.5 bc	56
	Jul.	27 abc	1,381 a	25.6 ab	1.6 ab	59
	Aug.	28 abc	1,483 a	26.2 a	1.5 ab	55
	Sep.	40 a	1,479 a	25.0 ab	2.0 ab	51
	Oct.	0 c	1,446 a	21.8 abc	-0.2 c	43
2007	Mar.	44 a	1,350 a	22.5 abc	2.2 a	51
	Apr.	39 ab	1,141 ab	19.9 a-d	2.0 ab	54
	May	38 ab	1,138 ab	20.4 a-d	2.1 ab	56
	Jun.	25 abc	1,060 ab	20.8 a-d	1.7 abc	66
	Jul.	25 abc	1,048 ab	19.1 bcd	1.4 abc	58
	Sep.	18 abc	811 b	14.9 d	1.1 abc	63

^zMean separation within each column by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

이 광보상점은 생육 초기인 1년차 5월과 2년차 3월에 각각 47, 44 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 높았고, 광포화점은 일부 시기를 제외하고는 1,000~1,500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 가량인 것으로 추정되었으며, 광합성률이 높은 시기에 광포화점도 높았다. 최대 광합성률은 정식 1년차 9월에 26.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 순양자수율은 43~66 $\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 이는 정상적인 환경하의 식물체가 보이는 순양자수율 값의 범위였다(Björkman and Demmig, 1987). 광합성률이 높은 시기에 순양자수율도 높은 경향으로 광 이용효율 증가가 광합성에 영향을 준 것으로 보인다. 암호흡률은 1.7~2.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 범위였고, 광보상점과 유의한 정적 상관($r=0.94^{**}$)을 보였다. 이와 같은 광합성 특성의 변화는 온도, 일사량과 같은 환경 변화에 적응하기 위하여 광합성률, 기공전도도, 암호흡속도 등을 조절하는 적응기작으로 추정된다(Terashima and Hikosaka, 1995).

세포내 CO₂ 농도별 광합성 특성

CO₂ 농도가 증가할수록 광합성률은 증가하였으나 일정 수준 이상에서는 정체 혹은 감소하는 경향으로 최대 광합성률을 보이는 세포내 CO₂ 농도는 840 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 추정된다(Fig. 3). CO₂의 단기적 상승은 고광도에서 광합성률이 직선적으로 증가하고 엽육내 CO₂ 농도가 높은 영역에서의 광합성속도는 탄소고정계의 재인산화속도에 의해서 결정하게 되며 장기간 고농도의 CO₂ 조건에 노출되면 축적된 전분립이 엽록체내의 CO₂ 확산을 저해하여 광합성이 저하되기도 한다(Rogers *et al.*, 2004). 벌개미취는 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 정도의 CO₂ 환경에서도 높은 광합성률을 보였고 단기적인 CO₂ 농도의 증가에 따라 동화능력이 향상될 수 있음을 확인하였으나 장기적인 CO₂, 온도 상승과 같은 환경변화가 자생식물의 식생, 성장반응 등에 미치는 영향에 대하여는 추후에 더 검토할 필요가 있을 것으로 보인다. 생육시기에

따른 광호흡속도, 탄소고정효율의 유의한 차이는 없었으나 CO₂ 보상점은 5월에 16.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 가장 낮았다(Table 2). 생육 시기가 경과할수록 CO₂ 보상점은 높아지고 최대 광합성률이 증가하는 경향이였으며, 이러한 반응의 계절적 변동은 온도, 토양 수분 등의 환경요인에 의한 것으로 보인다(Borjigidai *et al.*, 2006).

차광수준별 광합성 특성

차광수준에 따른 광도는 13:00까지 증가하다가 감소하였고, 광도의 일변화는 차광정도가 높을수록 적었다. 무차광, 50, 75% 차광의 최대 광합성유효과장은 각각 1,882, 880, 431 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었고, 평균 광합성유효과장은 1,491, 732, 391 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이

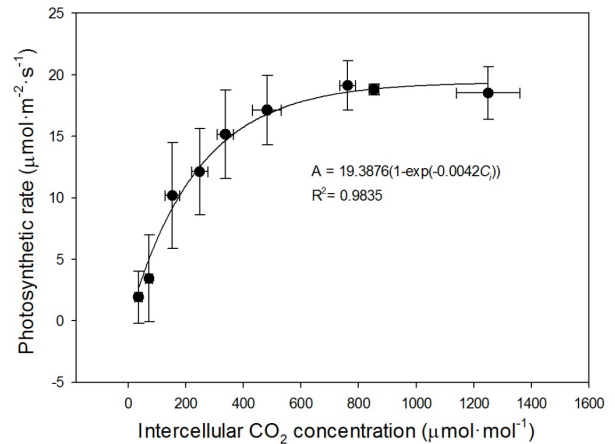


Fig. 3. Photosynthetic responses as affected by intercellular CO₂ concentrations in Korean endemic plant, *Aster koraiensis*. Vertical and horizontal bars represent standard deviations (n=20). A, photosynthetic rate; Ci, intercellular CO₂ concentration.

Table 2. Photosynthetic characteristics as affected by intercellular CO₂ concentrations and growth periods in Korean endemic plant, *Aster koraiensis*

Growth period	CO ₂ compensation point (µmol·mol ⁻¹)	Photorespiration rate (µmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Maximum photosynthetic rate (µmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Carboxylation efficiency (mmol·mol ⁻¹)
Mar.	27.53	3.03	18.68	104.0
May	16.05	1.21	16.84	72.5
Jul.	32.33	2.07	20.60	109.6
Sep.	55.45	3.06	19.46	55.5
LSD (5%)	21.78	ns ²	ns	ns

²Not significantly different.

었다(Fig. 4). 차광에 의해 엽록소의 함량과 활성 및 잎의 형태적 특성도 변화하게 되는데(Yang *et al.*, 2007), 별개미취는 차광 수준이 높을수록 잎 크기와 비엽면적은 커지고 수분함량은 증가하였으며 엽록소 함량은 증가하였다. 광보상점과 암호흡률은 50% 차광에서 높았고, 순양자수율과 수분이용효율은 처리 간 유의한 차이가 없었다(Table 3). Fig. 5와 같이 광합성률은 무차광과 50% 차광처리간 차이가 없었고 75% 차광에서는 상대적으로 낮았고 기공전도도는 차광수준이 높아질수록 낮아졌으며, 증산율은 50% 차광에서 가장 높았다. 차광처리에 의한 별개미취의 반응은 잎의 크기, 두께 등 형태적 특성이 변화하고 광합성률과 같은 광합성 특성은 무차광 또는 50% 차광처리에서 높았다. 별개미취는 무차광 또는 50% 차광수준에서 광합성 특성이 높거나 일정하여 생산성 향상을 위한 광환경을 설정할 수 있었다.

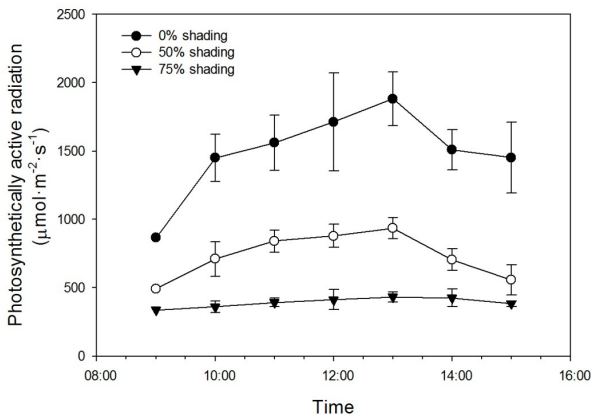


Fig. 4. Diurnal changes of photosynthetically active radiation as affected by shading degrees from 11th Sep. to 9th Oct. 2007.

관수수준별 광합성 특성

토양수분은 광합성에 직접적인 영향을 주는 요인(Bennett *et al.*, 1987)인데, Table 4와 같이 토양수분 조건에 따른 잎의 형태적 특성의 유의한 변화는 없었으나 토양수분이 높을수록 건물률은 낮아지고 엽면적/엽건물중은 증가하는 경향으로 체내 수분함량과 잎 두께와 같은 충실도가 토양수분에 반응하는 것으로 보인다. 토양수분이 -5 kPa일 때 별개미취의 암호흡속도와

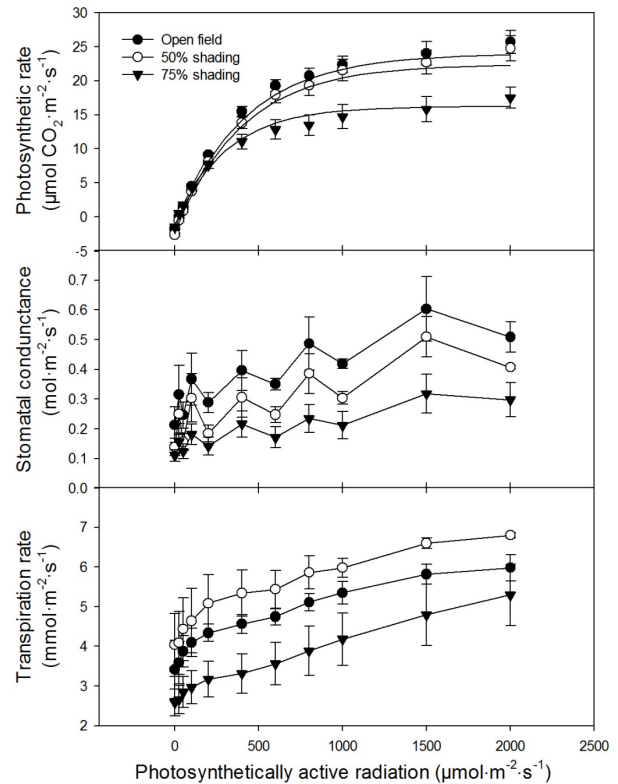


Fig. 5. Effects of shading degrees on the photosynthetic characteristics of Korean endemic plants, *Aster koraiensis*.

Table 3. Leaf and photosynthetic characteristics as affected by shading treatments in Korean endemic plants, *Aster koraiensis*

Shading (%)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf area (cm ²)	Percentage of dry matter (%)	Specific leaf area (cm ² ·g ⁻¹)	SPAD	Light compensation rate (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Dark respiration rate (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Apparent quantum yield (mmol·mol ⁻¹)	Water use efficiency (μmol·mmol ⁻¹)
0	18.8	3.1	30.0	21.3	120.0	40.9	27.49	1.17	62.1	2.47
50	20.0	2.9	32.7	17.6	125.1	45.8	37.76	2.33	62.1	2.03
75	26.1	3.5	46.4	19.8	134.2	52.9	22.11	1.26	57.4	2.33
LSD (5%)	4.7	ns ^z	13.7	ns	ns	9.1	7.82	0.53	ns	ns

^zNot significantly different.

Table 4. Leaf and photosynthetic characteristics as affected by soil water potentials in Korean endemic plants, *Aster koraiensis*

Soil water potential (-kPa)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf area (cm ²)	Percentage of dry matter (%)	Specific leaf area (cm ² ·g ⁻¹)	SPAD	Light compensation rate (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Dark respiration rate (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Apparent quantum yield (mmol·mol ⁻¹)	Water use efficiency (μmol·mmol ⁻¹)
5	23.3	3.2	36.1	15.3	139.1	48.4	35.89	2.19	61.5	2.03
25	23.3	2.8	32.8	17.0	127.8	44.9	35.57	2.05	58.9	2.05
70	20.6	2.6	29.3	20.3	108.5	49.6	28.31	0.54	28.3	3.93
LSD (5%)	ns ^z	ns	ns	3.8	ns	ns	ns	0.48	14.3	1.20

^zNot significantly different.

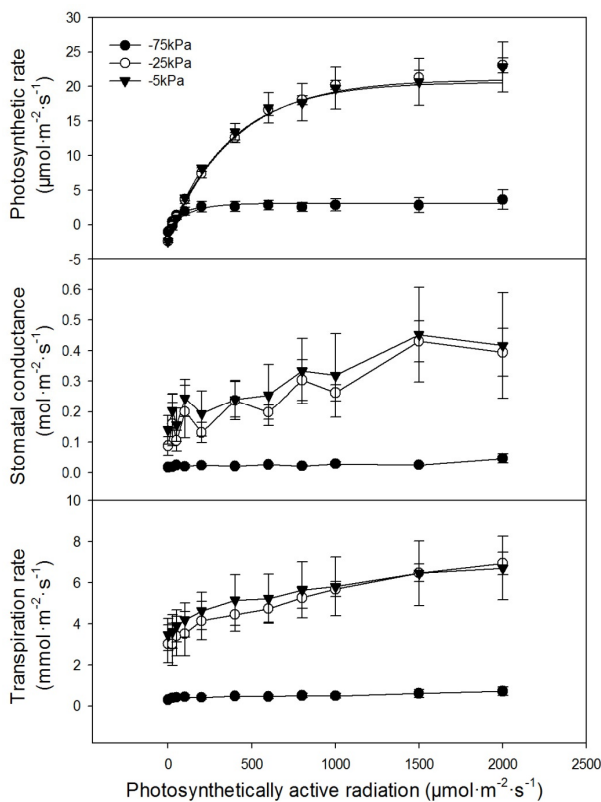


Fig. 6. Effects of soil water potentials on the photosynthetic characteristics in Korean endemic plants, *Aster koraiensis* (A, B, C).

순양자수율은 2.19 mmol·m⁻²·s⁻¹, 61.5 mmol·mol⁻¹이었고 수분이용효율은 토양수분포텐셜이 낮을수록 높아지는 경향이 있었다. 토양수분포텐셜이 낮을수록 광합성률과 기공전도도는 높아지는 반면 증산율은 감소하였다(Fig. 6). 토양수분은 기공전도도와 잎의 수분포텐셜에 영향을 주며 기공전도도는 광합성률과 고도의 유의성을 보인다. 본 실험에서도 토양수분포텐셜이 낮을수록 광합성은 증가하지만 수분이용효율은 감소하여 벌개

미취의 적정 토양수분포텐셜 범위는 -25 kPa 이하로 보인다. 또한 -5 kPa의 과습상태에서도 광합성률의 저하가 나타나지 않았던 것은 토양수분의 지속기간에 따른 식물체의 반응 정도가 다르기 때문으로 보인다.

이상의 결과, 한국특산식물인 벌개미취의 생육시기, 광도와 CO₂, 차광, 관수조건 등 다양한 재배환경에 따른 광합성 반응을 구명하였으며, 이는 작물화 및 생산성 증대를 위한 균락구조 개선과 생장 지표 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

한국특산식물 벌개미취의 재배환경에 따른 생리적 반응과 최적 재배조건의 설정을 통해 생산성을 향상하기 위하여 연구를 수행하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다. 생육시기별 광합성률은 정식 후부터 급격히 증가하였다가 7월 이후 감소하였으며 정식 2년차에서는 생육 후기로 갈수록 저하되는 경향이었고 광보상점은 생육 초기에 높았다가 후기에 감소하였다. 세포내 CO₂ 농도가 증가할수록 광합성률은 증가하였으나 일정 수준 이상에서는 정체 혹은 감소하는 경향이었고 생육시기별 CO₂ 보상점은 5월에 가장 낮았다. 차광처리에서 엽록소 함량은 무처리에 비해 높았으며 잎 형태의 유의한 변화가 관찰되었다. 무차광 또는 50% 차광수준에서 광합성률이 높았다. 토양수분 조건에 따라서 잎의 형태적 변화는 거의 없었으나 엽충실도가 변화하였고 -25 kPa 이상의 토양수분조건에서는 광합성률, 순양자수율은 증가하였으며 이에 따라 암호흡속도도 증가하였고 수분이용효율은 감소하였다.

References

Bennett, J.M., T.R. Sinclair, R.C. Muchow and S.R. Costello.

1987. Dependence of stomatal conductance on leaf water potential, turgor potential, and relative water content in field-grown soybean and maize. *Crop Sci.* 27:984-990.
- Borjigidai, A, K. Hikosaka, T. Hirose, T. Hasegawa, T. Hasegawa, M. Okada and K. Kobayashi. 2006. Seasonal changes in temperature dependence of photosynthetic rate in rice under a free-air CO₂ enrichment. *Ann. Bot.* 97:549-557.
- Björkman, O. and B. Demmig. 1987. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 170:489-504.
- Critchely, C. 1998. Photoinhibition: *In* Raghavendr, A.S. (ed.), *Photosynthesis: A comprehensive treatise*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. pp. 264-272.
- Ju, Y.K., H.J. Kwon, J.S. Cho, S.L. Shin, T.S. Kim, S.B. Choi and C.H. Lee. 2011. Growth and heavy metal absorption capacity of *Aster koraiensis* Nakai according to types of land use. *Korean J. Plant Res.* 24:48-54 (in Korean).
- Kim, C.S., J.H. Kim, I.H. Jeong, Y.S. Kim, J. Lee, D.S. Jang and J.S. Kim. 2009. Slow development of diabetic cataract in streptozotocin-induced diabetic rats via inhibition of aldose reductase activity and sorbitol accumulation by use of *Aster koraiensis* extract. *Kor. J. Pharmacogn.* 40:339-344 (in Korean).
- Krishna, S.N. and M.W. van Iersel. 2004. Acclimation of wax begonia to light intensity: Changes in photosynthesis, respiration, and chlorophyll concentration. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 129:745-751.
- Kume, A. and Y. Ino. 1993. Comparison of ecophysiological responses of heavy snow in two varieties of *Acuba japonica* with different areas of distribution. *Ecological Research* 8:111-121.
- Kumudini, S. 2004. Effect of radiation and temperature on cranberry photosynthesis and characterization of diurnal change in photosynthesis. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 129:106-111.
- Lee, C.B. 2003. *An Illustrated Book of the Korean Flora*. Hyangmun Press, Seoul, Korea (in Korean).
- Nam, B.M., J.Y. Kim, S. Jeong, J.H. Lee, M.J. Nam, B.U. Oh and G.Y. Chung. 2015. A flora of vascular plant in Mt. Cheongnyangsan (Bonghwa-gun, Andong-si). *Korean J. Plant Res.* 28:616-634 (in Korean).
- Nam, H.H., H.S. Lee and J.H. Woo. 2009. Seasonal changes in dry matter productivity of Korean native plants, *Aster koraiensis*, *Iris ensata*, and *Hemerocallis fulva*. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27:371-379 (in Korean).
- Pugnaire, F.I., L.Z. Endoliz and J. Pardos. 1993. Constraints by water stress on plant growth: *In* Pessarakli, M. (ed.), *Handbook of Plant and Crop Stress*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA. pp. 247-260.
- RDA (Rural Development Administration). 2009. *The Guidebook for Korean Native Plant Landscaping*. RDA, Suwon, Korea. pp. 8-11 (in Korean).
- Rogers, A., D.J. Allen, P.A. Davey, P.B. Morgan, E.A. Ainsworth, C.J. Bernachi, G. Cornic, O. Dermody, F.G. Dohleman, E.A. Heaton, J. Mahoney, X.G. Zhu, E.H. Delucia, D.R. Ort and S.P. Long. 2004. Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown though out their life-cycle under free-air carbon dioxide enrichment. *Plant, Cell and Environ.* 27:449-458.
- Shin, E.H. and S.J. Park. 2014. Component analysis and antioxidant activity of *Aster koraiensis* Nakai. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 43:74-79 (in Korean).
- Terashima, I. and K. Hikosaka. 1995. Comparative ecophysiology of leaf and canopy photosynthesis. *Plant, Cell and Environ.* 18:1111-1128.
- Yang, W.H., S. Peng and M.L. Dionisio-Sese. 2007. Morphological and photosynthetic responses of rice to low radiation. *Korean J. Crop Sci.* 52:1-11 (in Korean).

(Received 2 March 2016 ; Revised 14 June 2016 ; Accepted 17 June 2016)