

CO₂농도와 온도 상승이 멸종위기식물 단양쑥부쟁이의 종생태적 반응에 미치는 영향

한 영 섭* / 김 해 란** / 유 영 한***

Effect of Elevated CO₂ Concentration and Temperature on the Ecological Responses of *Aster altaicus* var. *uchiyamae*, Endangered Hydrophyte

Young-Sub Han* / Hae-Ran Kim** / Young-Han You***

요약 : 단양쑥부쟁이(*Aster altaicus* var. *uchiyamae*)는 한국특산식물이자 환경부 지정 멸종위기식물 II급으로 하천변에 서식하는 식물이다. 본 연구는 지구온난화가 단양쑥부쟁이의 생태적 반응에 미치는 영향을 알아보기 위해 CO₂농도와 온도가 상승된 처리구와 대조구에서 종자를 파종하고, 유식물을 키워 발아율, 식물계절학, 영양생장과 생식생장을 관찰하였다. 그 결과, 단양쑥부쟁이의 발아율은 대조구보다 처리구에서 더 낮았다. 처리구에서 살아있는 잎의 지속 시기는 대조구보다 더 길었다. 개화와 꽃의 지속 시기, 종자 성숙 시기는 처리구에서 더 느렸다. 지상부와 지하부 무게는 처리구에서 더 가벼웠다. 개체 당 꽃대 수와 꽃대 당 종자개수는 처리구에서 더 적었다. 개체 당 꽃대무게, 꽃대 당 종자무게 그리고 종자 한 개 무게는 처리구에서 더 가벼웠다. 이상으로 볼 때, CO₂농도와 온도상승은 단양쑥부쟁이의 생태에 부정적인 영향을 준다.

핵심용어 : 지구온난화, 영양생장, 생식생장, 한국특산식물

Abstract : *Aster altaicus* var. *uchiyamae*, endangered plants to grade II designated by the Ministry of Environment Korea, is only distributed in Gyeongsangbukdo, Chungcheongnamdo in Korea. In order to know the effects of elevated CO₂ concentration and temperature on ecological responses of *A. altaicus* var. *uchiyamae*, this study was carried out in the control(ambient CO₂ + ambient temperature) and treatment(elevated CO₂ + elevated temperature) at glasshouse. As a result, germination rate of *A. altaicus* var. *uchiyamae* was higher in control than in treatment. Period of alive leaf was longer in control than in treatment. Period of blooming and seed maturity was faster in control than in treatment. Shoot and root weight were heavier in control than in treatment. No. of inflorescence per plant and seed per inflorescence was higher in control than in treatment. Weight of inflorescence per plant, seed per inflorescence and one seed was heavier in control than in treatment. These results indicate that ecological responses of *A. altaicus* var. *uchiyamae* may be more negatively affected by elevated CO₂ and temperature except for phenological responses of that may be delayed under future global warming situation.

Keywords : Global warming, Vegetative response, Reproductive growth, Korea endemic plant

1. 서 론

전 세계적으로 일어나고 있는 지구온난화

(Global warming)의 가장 큰 원인은 인위적으로 발생하는 CO₂농도의 증가에 있다(Kobayashi 2006). 지구온난화로 인해 지구의 온도가 올라가

+ Corresponding author: youeco21@kongju.ac.kr
* 공주대학교 생물학과 석사과정 · E-mail : cdhome@kongju.ac.kr
** 공주대학교 생물학과 박사과정 · E-mail : khr0727@kongju.ac.kr
*** 공주대학교 생물학과 교수 · E-mail : youeco21@kongju.ac.kr

면 지구표면에 큰 변화가 일어날 것이며 그에 따라 인류의 생활을 비롯한 생물의 생태계도 큰 영향을 받으리라 예상된다(장순근 외 1998). IPCC의 2001년 보고서에는 100년에 0.6℃의 속도로 온난화가 일어난다고 보고하였지만, 2007년의 보고서에는 100년에 0.74℃의 속도로 온난화가 일어나고 있으며 20세기 이후 온난화 속도가 가속되고 있다고 발표하였다(IPCC 2007).

지구온난화의 영향은 한반도도 예외는 아니다. 한반도의 2005년 CO₂ 평균농도(389 ppm)는 세계 평균(379 ppm)보다도 10 ppm 더 높았으며, 기온은 지난 100년간 1.5℃ 올랐다. 이러한 상승률은 지구평균의 2배에 이른다(환경부 2009).

일반적으로 CO₂농도와 온도의 증가는 식물의 성장과 생리적 특성에 변화를 일으켜 육상 생태계의 구조와 기능에 직접적인 영향을 미칠 것이다(Idso *et al.* 1987; He *et al.* 2005; Florides and Christodoulides 2009). 지구온난화가 진행되어 온도가 1.5~2.5℃이상 상승할 경우, 전체 생물종의 20~30%는 멸종 위기의 가능성이 높아지고, 4℃이상 상승할 경우 전체 생물종의 최대 40%가 멸종의 위기를 맞는 심각한 결과를 가져올 것으로 전망된다(IPCC 2007). 실제 지구상에서 100여종의 동·식물이 멸종위기를 맞고 있으며 이미 50여종은 가까운 시기 안에 멸종 될 것으로 보고 있다(IPCC 2007). 그리고 1,103종의 3분의 1이 넘는 종들이 지금부터 2050년까지 사라지거나 사라질 위기에 처할 것이라는 연구결과도 나왔다(Thomas *et al.* 2004).

식물에게 미치는 생리, 생태적 반응에 관한 CO₂농도와 온도의 영향은 다양하며 복잡적이다. 그 이유는 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문이다(Enoch and Honour 1993; Kim and Kang 2003). 지구온난화에 의한 식물의 변화 중 가장 눈에 띄는 것은 식물계절(phenology)의 변화이다. 식물의 발아, 개엽, 개화 그리고 낙엽 등의 식물 계절 시기는 매년 반복되는 계절변화를 반영하기 때문이다(이경미 외 2009).

한반도의 자생 동·식물은 현재 서식지 파괴와

환경오염 증가로 인해 매우 취약한 상태이다. 특히, 최근에 온난화로 인한 기온과 강우량의 변화로 개화특성의 변동이 의심되고 있으므로 우리나라 식물의 개화 특성에 대한 연구는 조속히 수행되어야 할 필요성이 있다(홍용식 2012).

본 연구에 사용한 단양쑥부쟁이(*Aster altaicus* var. *uchiyamae*)는 냇가의 모래땅에 서식하는 초롱꽃목 국화과의 두해살이풀로 전세계적으로 경상북도와 충청북도에만 한정 분포하는 한국특산식물이자 환경부 지정 멸종위기식물이다. 단양쑥부쟁이는 2008년 하반기부터 정부에 의해 시행된 4대강 사업으로 여주 남한강에 위치한 군락지가 파괴되어 논란이 되었다. 원형을 보존하고 대체 서식지로 옮겨 심는 등 노력을 기울여야 할 세계 유일의 희귀식물 단양쑥부쟁이가 멸종 위기를 맞게 된 것이다. 한국특산식물이자 멸종위기식물들에 대해 더욱 많은 관심을 가지고 연구가 수행되어야 하나 국내의 연구 결과는 미비한 실정이다. 어떤 생물종을 보전, 복원하기 위해서는 그 종의 기초적인 생태정보를 밝히고 활용하는 것이 가장 중요한 요소이다. 단양쑥부쟁이에 대한 기초 생태정보의 부족은 이 종을 복원하고 보존하는데 어려운 문제점이 될 것이다(신정훈 2012).

본 연구는 지구온난화가 한반도 자생식물에 미치는 영향을 알아보기 위해 한국특산식물인 단양쑥부쟁이를 대상으로 지구온난화의 핵심인 CO₂농도와 온도를 상승시켜 생태적 영향을 관찰하였다.

2. 연구방법

2.1 실험재료 및 기간

단양쑥부쟁이(*Aster altaicus* var. *uchiyamae*)는 전세계적으로 국내 경상북도와 충청북도에만 분포하는 한국특산식물이며, 환경부 지정 멸종위기식물이다(환경부 2005). 본 연구에 사용된 단양쑥부쟁이는 2010년 6월에 한강 유역에서 채집한 개체를 사용하였다. 채집한 개체 중 성숙한 개체에서 종자를 수확하고, 유식물은 공주대학교 온실

에서 구배별로 이식하여 생육하였다.

수확한 종자는 4℃ 냉장 보관하였다가 이듬해인 2011년 3월 7일에 대조구와 처리구에 각각 종자 100개씩 모판(가로59cm × 세로28cm × 높이 3cm)에 파종하여 4월 26일부터 6월 1일까지 발아실험을 하였다. 생태적 반응 실험은 본 잎이 4~5장인 유식물을 각 구배 당 4개체씩 화분(가로50cm × 세로15cm × 높이 13cm)에 이식하여 4반복 실험하였다. 그 후 10개월간 재배하여 환경적응을 유도하였다. 그 후 2년째가 되는 2011년 4월부터 11월까지 8개월 동안 본 실험을 수행하였다.

2.2 환경요인구배

본 실험은 지구온난화의 핵심 요소인 CO₂농도와 온도상승이 단양쑥부쟁이의 생태적 반응에 미치는 영향을 알아보기 위하여 진행되었다. 실험은 유리 온실 안을 두 공간으로 나누어 일반대기조건인 대조구와 온실가스인 CO₂농도와 온도를 상승시킨 처리구에서 처리하였다.

대조구의 CO₂농도는 360ppm~370ppm, 온도는 대기조건과 같게 처리하였다. 처리구의 CO₂농

도는 최근에 가장 일반적인 지구온난화 시나리오(IPCC 2007)에 사용되는 일반대기의 약 2배 상승한 750ppm~800ppm, 온도는 우리나라의 경우 지난 97년간(1912~2009) 주요 6개 도시의 평균기온이 약 1.7℃ 상승하여 전 지구의 평균기온상승(0.74℃)의 2배 이상으로 전 지구적인 추세를 상회하고 있음을(기상청, 2009; IPCC 2007) 바탕으로 하여 대조구보다 약 2℃ 상승한 값을 처리하였다.

CO₂는 CO₂가스통 2개를 설치한 뒤, 각각의 CO₂가스통에 지름 0.2mm인 호스를 연결하여 주입하였고, Gas regulator로 조절하여 유지하였다. 온도는 환풍기를 통해 유지하였다.

CO₂농도는 이산화탄소 농도 측정로거(Telair 7001, Onset computer, USA), 온도는 디지털 데이터 온도계(Thermo recorder TR-71U, Co., Japan)를 설치하여 30분마다 모니터링 하였다(Fig. 1; Fig. 2).

광은 자연광을 사용하였고, 토양은 냇가의 모래 땅에 서식하는 식물의 특성을 생각하여 모래 100%, 수분은 3~4일 간격으로 같은 양을 공급하였다.

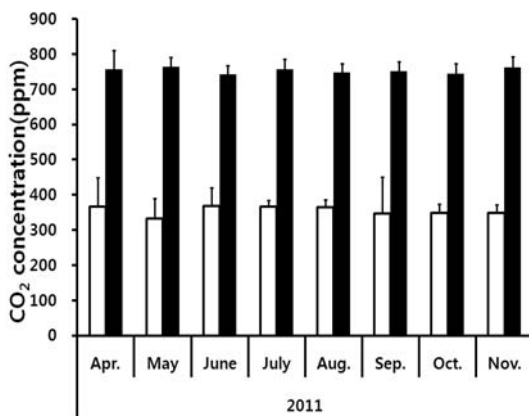


Fig. 1. Average Monthly CO₂ concentration in control (opened square) and treatment (closed square).

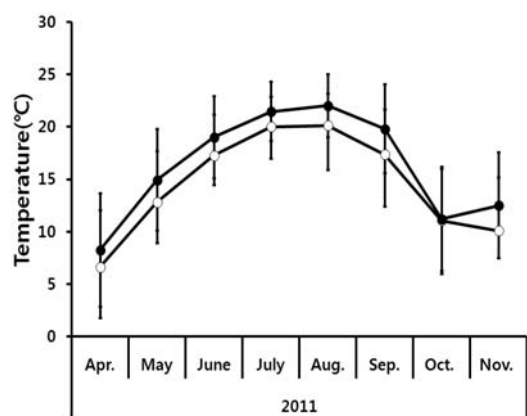


Fig. 2. Average Monthly temperature in control (opened circle) and treatment (closed circle).

2.3 측정 항목

1) 식물계절학

CO₂농도와 온도 상승에 따른 단양쭉부쟁이의 식물계절 변화를 알아보기 위해 구배마다 살아있는 잎의 지속 시기, 개화와 꽃의 지속 시기, 종자 성숙 시기를 관찰하였다. 살아있는 잎의 지속 시기는 개엽부터 잎이 갈색으로 변해 죽을 때까지, 개화와 꽃의 지속 시기는 꽃대에서 수술이 보일 때부터 떨어질 때까지, 종자 성숙 시기는 꽃이 지고 종자가 맺힐 때부터 적갈색으로 결실을 맺을 때까지를 측정하였다.

2) 생태적 반응

발아율(%)은 100개의 종자 중 자엽이 지면 밖으로 나온 것을 발아로 간주하여 육안으로 확인하여 개수를 측정하였다. 영양생장은 열매가 결실을 맺는 11월에 식물체를 수확하여 3일 동안 자연 건조시킨 후 지상부와 지하부 무게(g)를 전자저울(UX420H, 1987, SHIMADZU, Suzhou, Japan)을 이용하여 측정하였다. 생식생장은 구배 당 1개체에서 5개의 꽃대를 수확한 뒤 식물체당 꽃대 수(ea), 식물체당 꽃대무게(g), 꽃대 당 종자개수(ea), 꽃대 당 종자무게(g) 그리고 종자 한 개 무게(g/ea)를 측정하였다.

2.4 통계분석

환경구배에 따른 생태적 반응의 경향성을 밝히기 위하여 Statistica 통계패키지(Statsoft Co. 2006)의 ANOVA 일원배치 분산분석(One-way Anova)을 실시하였다. 분산분석(analysis of variance ; ANOVA)은 대조구와 처리구에서 측정된 항목을 독립변수와 종속변수로 나누고 각 수준에 따라 나누어진 집단 간의 평균차를 검정하여 통계적으로 유의한지를 검정하였다(박정식과 윤영선 2008). 구배별 차이의 유의성은 일원배치 분

산분석에 의해 평균치의 Fisher 최소유의차 법으로 5% 유의수준에서 검정하였다(노형진과 정한열 2002).

3. 실험 결과

3.1 발아율

단양쭉부쟁이의 발아율은 높은 CO₂농도와 온도에서 감소되는 결과를 보였다(Fig. 3). 대조구와 처리구의 발아율은 각각 26%와 23%로 대조구보다 처리구에서 낮았다. 그리고 발아시작부터 더 이상 발아가 되지 않은 시점까지 처리구의 발아율이 대조구보다 낮았으며, 구배 간 발아율의 차이도 거의 일정하게 나타났다.

Morse and Bazzaz(1994)는 18°C, 28°C, 38°C에서 어저귀(*Abutilon theophrasti*)와 털비름(*Amaranthus retroflexus*)을 연구한 결과 고온에서 발아율이 증가하였으며, 윤중서(2001)는 15~25°C, 20~30°C, 25~35°C에서 발아율을 측정된 결과 고온에서 별개미취(*Aster koraienses*)와 별노랑이(*Lotus corniculatus* var. *japonicus*)의 발아율이 증가하였다. 그러나 도라지(*Platycodon grandiflorum*), 수염패랭이(*Chrysanthemum maximum*)와 대금계국(*Callostephus chinensis*)은 온도가 높을수록 발아율이 감소하였고, 민들레(*Taraxacum mongolicum*)와 쭉부쟁이(*Aster yomena*)는 온도변화에 영향을 받지 않고 일정한 정도의 발아율을 나타냈다.

Ziska and Bunce(1993)의 연구에서 CO₂농도가 증가함에 따라 자주개자리(*Meidcago sativa* L.), 명아주(*Amaranthus hybridus* L.)와 긴털비름(*Chenopodium album* L.)의 발아율은 감소하였다.

350ppm과 20°C, 675ppm과 26°C의 CO₂농도와 온도에서 수행된 Wulff and Alwcauder(1985)의 연구에서 CO₂농도와 온도가 증가함에 따라 창질경이(*Plantago lanceolata*)의 발아율이 증가하였다. 또한 땅콩(Toole *et al.* 1964), 메귀리(Hart

and Berrie 1966), 해바라기(Corbineau *et al.* 1990)의 발아율도 증가하였다. 김해란(2010)은 본 연구와 같은 조건에서 CO₂농도와 온도가 증가함에 따라 섬자리공(*Phytolacca insularis*)과 미국 자리공(*Phytolacca americana*)의 발아율은 증가하였고, 정중규(2012)는 본 연구와 같은 조건에서 섬시호(*Bupleurum latissimum* Nakai)를 실험한 결과 CO₂농도와 온도는 발아율에 영향이 없었다.

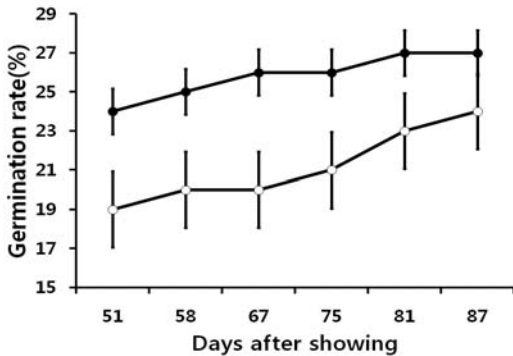


Fig. 3. Germination rate of *Aster altaicus* var. *uchiyamae* under the control (closed circle) and treatment (opened circle). Alphabets on the graph mean significantly different at $p < 0.05$ determined by Fisher's test.

3.2 식물계절학

2년생 단양쑥부쟁이는 높은 CO₂농도와 온도에 의해 살아있는 잎의 지속 시기는 길어지고, 개화와 꽃의 지속 시기, 종자 성숙 시기는 느려지는 결과를 보였다(Fig. 4). 이 중 온도 상승 시 개화 시기가 느려지는 것은 일반적인 결과와 다른 것이다(이경미 2011). 겨울을 지낸 단양쑥부쟁이는 대조구에서 4월 15일에 개엽이 시작되었고, 처리구에서 2일 늦은 4월 17일에 개엽이 시작되었다. 개화시기가 8~9월(이영노 2006)인 단양쑥부쟁이는 대조구에서 8월 31일에 개화를 하였고, 처리구에서 3일 늦은 9월 3일에 개화를 하였다. 개화를 한 뒤 대조구에서 10월 21일에 꽃과 암술, 수

술이 낙화하면서 종자가 적갈색으로 달렸고, 처리구에서 3일 늦은 10월 24일에 종자가 달렸다. 단양쑥부쟁이는 대조구에서 개화한 지 33일이 지난 후 개체의 꽃이 모두 떨어졌으며, 처리구에서 개화한 지 39일이 지난 후 모두 떨어졌다. 또한 대조구에서 종자가 성숙한 지 20일이 지난 후 종자가 떨어졌으며, 처리구에서 종자가 성숙한 지 26일이 지난 후 종자가 떨어졌다.

최근 약 50년간 우리나라 기상관측에 따른 개나리(*Korean Forsythia*)와 진달래(*Korean rosebay*)는 온도가 높아짐에 따라 개화시기가 더 빨라졌다(이경미 2011).

CO₂농도를 증가시켜 주었을 때 Purohit and Tregunna(1974)의 연구에서 단기간 동안 나팔꽃(*Pharbitis nil*)과 도꼬마리(*Xanthium pennsylvanicum*)의 개화는 억제되었으며, Carter & Peterson(1983)은 350ppm, 600ppm의 CO₂농도에서 왕포아풀(*Sorghum halpense*)을 연구한 결과 높은 CO₂농도에서 개화는 늦어졌다. 높은 CO₂농도에서 Purohit and Tregunna(1974)의 끈이대나물(*Silene armeria*)은 개화시기가 빨라졌다. 또한 Garbutt and Bazza(1984)는 300ppm, 600ppm, 900ppm의 CO₂농도에서 드림블꽃(*Phlox drummondii*)과 독말풀(*Datura stramonium*)의 개화시기를 연구한 결과 CO₂농도가 높을수록 개화시기가 빨라졌다. 그러나 350ppm, 525ppm, 700ppm에서 CO₂농도를 증가시켜 주었을 때 애기달맞이꽃(*Oenothera laciniata*)의 식물계절은 영향을 받지 않았다(Reekie and Bazzaz 1991).

본 연구와 같은 조건에서 섬시호(*Bupleurum latissimum* Nakai)는 CO₂농도와 온도를 증가시켜 주었을 때 개화와 열매발달, 열매성숙이 모두 빨라졌다(정중규 2012). 본 연구와 같은 조건에서 섬자리공(*Phytolacca insularis*)은 CO₂농도와 온도를 증가시켜 주었을 때 개엽시기, 꽃대형성, 개화시기, 열매 형성시기와 열매 성숙시기 모두 빨라졌다(신동훈 2012).

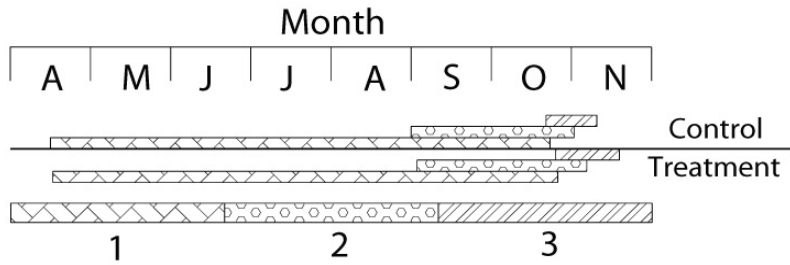


Fig. 4. Phenological response to *Aster altaicus* var. *uchiyamae* (2-year-old) in the control and treatment by temperature and CO₂ (1: Period of alive leaf, 2: Blooming period, 3: Period of seed maturity).

3.3 영양생장

높은 CO₂농도와 온도에 대한 단양쑥부쟁이의 영양생장은 부정적인 영향을 보였다. 지상부와 지하부 무게 모두 대조구보다 처리구에서 가벼웠다 (Fig. 5A~5B).

대기 중 CO₂농도가 증가하면 식물의 광합성률은 증가하고 그에 따라 광합성 산물인 가용성 당과 저장탄수화물의 생산량이 증가한다 (Farrar and Williams 1991). 광합성 산물은 공급부인 잎으로부터 여러 수용부 기관들로 전류(partitioning)가 일어나며 그 중 지하부와 지상부 사이의 광합성 산물의 전류는 식물 종, 식물계절 시기 그리고 환경요인 등에 따라 달라진다 (Klepper 1991). 일반적으로 CO₂농도가 증가하면 지상부보다 지하부에 대한 광합성 산물의 전류

가 증가하여 식물 기관 중 가장 높은 생물량을 보인다(Hocking and Meyer 1991; Patterson and Flint 1980; Rogers *et al.* 1994). 그러나 단양쑥부쟁이는 위의 일반적 사실과는 다르게 증가한 CO₂농도에서 낮은 생물량을 보였다.

380ppm, 700ppm에서 실험한 결과 높은 CO₂농도 조건에서 창질경이(*Plantago lanceolata*)는 지상부 무게가(Fajer 1991), 캐나다 영경귀(*Cirsium arvense*)는 지상부와 지하부 무게가 모두 증가하였다(Ziska 2004).

본 연구와 같은 조건에서 CO₂농도와 온도가 증가하였을 때 섬자리공(*Phytolacca insularis*)의 지상부 무게는 차이가 없었고, 지하부 무게는 더 무거웠다. 반면 미국자리공(*Phytolacca americana*)은 지상부와 지하부 무게 모두 차이가 없었다(김해란 2010).

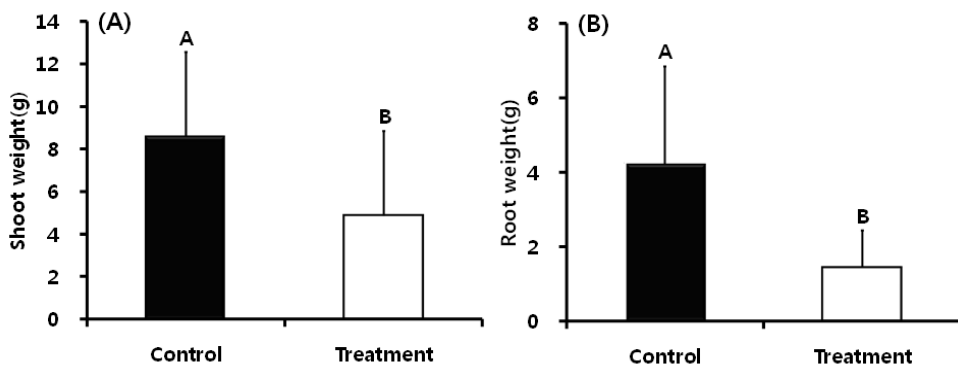


Fig. 5. Shoot weight(A) and root weight(B) of *Aster altaicus* var. *uchiyamae* (2-year-old) under the control and treatment. Alphabets on the bars mean significantly different at $p < 0.05$ determined by Fisher's test.

3.4 생식생장

높은 CO₂농도와 온도에 대한 단양쭈부쟁이의 생식생장은 모든 항목에서 부정적인 영향을 보였다. 개체 당 꽃대 수는 대조구보다 처리구에서 적었으며(Fig. 6A), 개체 당 꽃대무게는 대조구보다 처리구에서 가벼웠다(Fig. 6B). 꽃대 당 종자개수는 대조구보다 처리구에서 적었으며(Fig. 6C), 꽃대 당 종자무게는 대조구보다 처리구에서 가벼웠고(Fig. 6D), 종자 한 개 무게는 대조구보다 처리구에서 가벼웠다(Fig. 6E).

종자의 등숙(seed-filling)정도는 환경의 영향을 받으며 특히 영양상태와 탄소동화량이 중요하다(Fenner 1992). CO₂농도와 온도의 증가는 옥수수 and 콩의 수확시기에 생산량을 감소시켰다(Lobell and Asner 2003). 이와 같이 단양쭈부쟁이 종자의 등숙시기에 자생지의 기온이 평균기온(약 15.4℃)보다(Korea Meterological Administration

2010) 높은 것은 단양쭈부쟁이의 열매무게를 감소시켜 부정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

콩과의 잔개자리(*Medicago lupulina*)와 토끼풀속(*Trifolium medium*)은 360ppm, 650ppm 중 높은 CO₂농도에서 종자 생산량이 감소하였으며(Thürig *et al.* 2003), 창질경이(*Plantago lanceolata*)를 360ppm, 475ppm에서 실험한 결과 높은 CO₂농도에서 종자생산량이 감소하였다(Edwards *et al.* 2001). 그러나 Thürig *et al.*(2003)의 연구에서 CO₂농도가 높을수록 사초과 갈색사초(*Carex caryophylla*)와 사초속(*Carex flacca*)의 종자 생산량이 증가하였으며, 대기조건과 200ppm이 상승된 조건에서 시행된 Leishman *et al.*(1999)의 연구에서 개쭈갓(*Senecio vulgaris* L.)은 높은 CO₂농도에서 종자무게가 증가하였다. CO₂농도가 증가할수록 독말풀(*Datura stramonium*)의 종자생산량은 변화가 없었고(Edwards *et al.* 2001), 어저귀(*Abutilon*

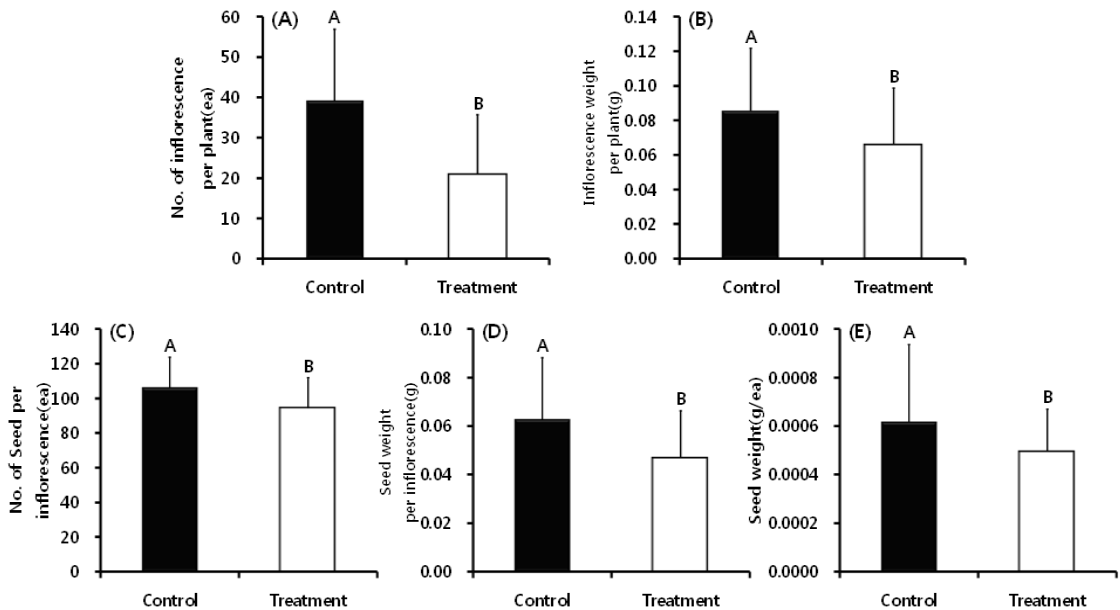


Fig. 6. No. of inflorescence per plant(A), inflorescence weight per plant(B), No. of seed per inflorescence(C), seed weight per inflorescence(D) and seed weight(E) of *Aster altaicus* var. *uchiyamae* (2-year-old) under the control and treatment. Alphabets on the bars mean significantly different at $p < 0.05$ determined by Fisher's test.

theophrasti)의 종자생산량은 감소하였으나 종자 한 개 무게가 증가하여 전체무게는 변화가 없었다 (Garbutt and Bazzaz 1984).

본 연구와 같은 조건에서 섬자리공(*Phytolacca insularis*)은 CO₂농도와 온도가 증가하였을 때 줄기 당 꽃대 수는 차이가 없었으나, 줄기 당 열매 수, 줄기 당 열매무게, 줄기 당 종자 수, 줄기 당 종자무게 모두 감소하였다(신동훈 2012). 미국자리공(*Phytolacca americana*)은 CO₂농도와 온도가 증가하였을 때 꽃대 당 열매 수가 적었고, 무게도 낮았지만, 열매 한 개 무게는 높았다(김해란 2010).

4. 고 찰

실험 결과를 종합해 볼 때, 높은 CO₂농도와 온도에서 단양쭉부쟁이는 식물계적학적으로 반응이 느려지고, 생태적으로 부정적인 영향을 받는다. 특히 지상부(43%)와 지하부(66%) 무게 그리고 개체 당 꽃대수(47%)는 40%이상 크게 부정적인 영향을 받았다(Fig. 7). 단양쭉부쟁이의 서식지는 냇가의 모래땅으로 본래 온도가 낮은 지역에 서식하는 식물이기 때문에 온도의 영향을 많이 받아 이와 같은 결과가 나온 것으로 보인다.

발아요인의 경우 식물의 종(유전자형)이나 품종 내지는 종자의 성숙도를 비롯한 기타 환경조건에 따라 크게 영향을 받는데 유전성의 차이를 제외하면 수분, 산소와 온도의 영향을 많이 받는다(홍병희 외 2006). 단양쭉부쟁이는 수분과 광이 풍부하고 모래와 자갈이 섞여 물이 잘 빠지는 지역에 서식하는 생육조건이 까다로운 식물인데 높은 CO₂농도와 온도는 단양쭉부쟁이의 발아 온도 조건과 맞지 않을 것이다.

CO₂농도가 증가하면 식물은 CO₂분압을 높여 광합성기관에서 CO₂확산과 rubisco의 탄소고정 반응이 촉진되고, 광호흡을 억제시킨다. 그 결과 광합성 속도가 상승하여 생산량이 증가한다 (Bowes 1996). 그러나 식물에 따라서는 CO₂농

도와 온도의 증가가 식물에 영향을 미치지 않거나(Garbutt and Bazzaz 1984), 부정적인 영향을 받기도 한다. 이는 CO₂농도와 온도에 장기간 노출되면 광합성에 의해 식물 잎의 탄수화물량이 축적됨으로 증가하게 되고, 이로 인해 엽록체의 물리적 손상을 가져오며, 엽록소 농도를 감소시키고, CO₂분압 상승으로 광합성의 피드백 억제를 발생시켜 광합성률을 감소시킨다(Campbell et al. 1988). 이러한 광합성률은 식물의 생산량에 큰 영향을 준다.

생태적 반응의 경우 지상부와 지하부 무게 모두 부정적인 영향을 받았으며, 생식생장의 모든 항목 또한 높은 CO₂농도와 온도에 대해 부정적인 영향을 받았다. 식물은 환경적 조건이 열악한 경우 일반적으로 생식투자가 감소한다(Way et al. 2009). 본 실험의 경우 지상부와 지하부 무게가 모두 부정적인 영향을 받은 단양쭉부쟁이는 정상적인 생장에 불균형을 가져와 생식생장도 부정적으로 나타났을 것이라 판단된다.

식물계절학으로 보았을 때 높은 CO₂농도와 온도에서 단양쭉부쟁이의 모든 항목이 느려지는 결과가 나왔다. 이 중 개화시기가 느려진 것은 높은 온도로 인해 식물이 광합성을 유지하거나 생장을 하기 좋은 조건이 형성되어 식물이 영양생장에 투자하는 시간이 길어져 번식생장으로의 전환이 늦어진 것으로 판단된다. 또한 개화시기가 느려졌기 때문에 종자 성숙 시기도 늦어진 것이라 판단된다. 이러한 경우 종자가 성숙하기 전에 기후변화를 예측하지 못한 식물체가 서리를 맞아 피해를 받게 되면 번식생태학 적으로 부정적인 영향을 받을 수 있다.

본 실험은 지구온난화의 주요한 원인이 CO₂이고, 온도는 CO₂농도에 의존하여 필수적으로 상승한다는 시나리오(IPCC 2007)에 의해 진행된 실험이며, 이를 고려해 볼 때 CO₂농도와 온도 상승에 따른 식물의 반응을 명확히 알기 위해서는 보다 다양한 환경구배의 실험이 필요할 것으로 판단된다.

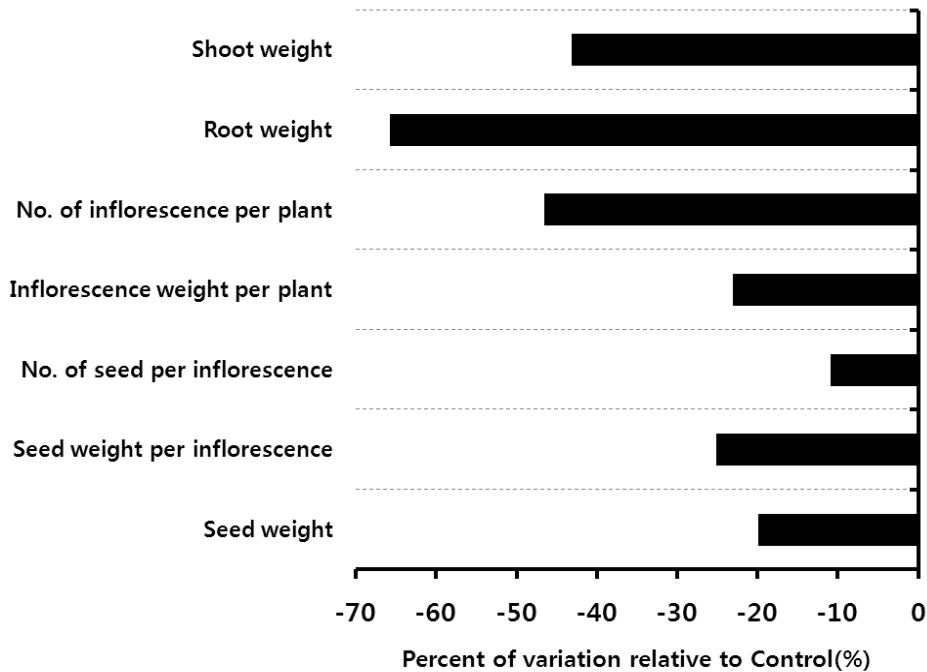


Fig. 7. Percentage variation of measured ecological parameters of *A. altaicus* var. *uchiyamae* under treatment (elevated CO₂ and temperature condition) compared with control (ambient condition).

감사의 글

2011년 교육과학기술부의 지역거점/에너지자립형 그린빌리지 핵심 기술 사업단(과제번호 2010-50300)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

기상청. 2009. 이상기후 감시 Update. 기상청 간행물. 235: 4.
 김해란, 유영한. 2010. CO₂농도와 온도증가에 따른 한국 특산식물 섬자리공과 귀화식물 미국자리공의 발아, 식물계절 및 잎의 형태학적 반응 연구. 한국환경생태학회지. 24(1): 62-68.
 김해란. 2010. 지구온난화에 따른 희귀식물 섬자리공과 귀화식물 미국자리공의 생태학적 반응. 공주대학교 대학원 석사학위 논문. pp. 1-69.

노형진, 정한열. 2002. STATISTICA에 의한 알기 쉬운 통계분석. 형석출판사. p. 336.
 박정식, 윤영선. 2008. 현대통계학 제 4판. 다산출판사. p. 526.
 신동훈. 2012. CO₂농도 및 온도 증가가 한국특산식물 섬자리공의 식물계절학 및 번식생태학적 특성 변화에 미치는 영향. 한국습지학회. 14(1): 1-9.
 신정훈. 2012. 제주고사리삼(고사리삼과) 서식지의 환경 특성, 개체군 동태와 환경처리에 따른 지상부와 지하부의 생태학적 반응. 공주대학교 대학원 석사학위 논문. pp. 1-10.
 윤중서. 2001. 온도에 따른 녹화용 식물의 발아율. 단국대학교 대학원 석사학위 논문. pp. 12~20.
 이경미. 2011. 한반도 식물계절과 기후에 관한 연구. 건국대학교 대학원 박사학위 논문. p. 140.

- 이경미, 권원태, 이승호. 2009. 우리나라 식물계절의 분포와 변화경향. 대한지리학회 연례학술대회발표논문요약집. (5): 195-197.
- 이영노. 2006. 새로운 한국식물도감. 교학사. p. 293.
- 장순근, 정호성, 윤호일. 1998. 지구온난화와 서남극 남쉐틀랜드군도 킹조지섬의 최근 빙벽후퇴. 韓國地球科學會誌(Journal of the Korean Earth Science Society). 19(1): 101-106.
- 정중규. 2012. 환경처리조건에 따른 멸종위기식물 섬시호(산형과)의 생태적 반응에 관한 연구. 공주대학교 대학원 석사학위 논문. pp. 1-21.
- 홍병희, 최봉호, 강광희, 김진기, 김석현, 민태기. 2006. 신고종자학. 향문사. pp. 1-115.
- 홍용식. 2012. CO₂농도와 온도증가가 멸종위기 수생식물 독미나리(*Cicuta virosa*)의 식물계절, 생육반응과 번식생태에 미치는 영향. 공주대학교 대학원 석사학위 논문. pp. 1-20.
- 환경부. 2009. 환경백서. 환경부. p. 65.
- Campbell W.J, Jr. Allen L.H. and Bowes G. 1988. Effects of CO₂ concentration on rubisco activity, amount and photosynthesis in soybean leaves. Plant Physiology. 88: 1310-1316.
- Carter D.R, Peterson K.M. 1983. Effects of a CO₂-enriched atmosphere on the growth and competitive interaction of a C₃ and a C₄ grass. Oecologia. 58: 188-193.
- Edwards G.R, Clark H, Newton P.C.D. 2001. The effects of elevated CO₂ on seed production and seedling recruitment in a sheep-grazed pasture. Oecologia. 127: 383-394.
- Enoch, H.Z, Honour S.J. 1993. Significance of increasing ambient CO₂ for plant growth and survival, and interactions with air pollution. NATO ASI Series. 16: 51-75.
- Fajer E.D, Bowers M.D, Bazzaz F.A. 1991. Performance and allocation patterns of the perennial herb, *Plantago lanceolata*, in response to simulated herbivory and elevated CO₂. Oecologia. 87: 37-42.
- Farrar J.F, and Williams M.L. 1991. The effects of increased atmospheric carbon dioxide and temperature on carbon partitioning, source-sink relations and respiration. Plant, Cell and Environment. 14: 819-830.
- Fenner M. 1992. Environmental influences on seed size and composition. In Horticultural Reviews 13(eds. J. Janick). John Wiley & Sons, Inc., Canada. pp. 183-214.
- Florides G.A. and Christodoulides P. 2009. Global warming and carbon dioxide through sciences. Environment International. 35: 390-401.
- Garbutt K and Bazzaz F.A. 1984. The effects of elevated CO₂ on plants. III. Flower, fruit and seed production and abortion. New Phytologist. 98: 433-446.
- He J.S, Kelly S, Wolfe-Bellin and Bazzaz. 2005. Leaf-level physiology, biomass and reproduction of *Phytolacca americana* under conditions of elevated CO₂ and altered temperature regimes. Int. J. Plant Sci. 166(4): 615-622.
- Hocking P.J. and Meyer C.P. 1991. Effects of CO₂ enrichment and nitrogen stress on growth, and partitioning of dry matter and nitrogen in wheat and maize. Aust. J. Plant Physiol. 18: 339-356.
- Idso S.B, Kimball B.A, Anderson M.G. and Mauneyv J.R. 1987. Effect of Atmospheric CO₂ Enrichment on Plant Growth: the Interaction role of Air Temperature. Agriculture, Ecosystems and Environment. 20: 1-10.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: Mitigation

- of climate change. Contribution working group III contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press, Cambridge, New york, USA. p. 815.
- Kim S.Y. and Kang H.J. 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on wetland plants: a review. Korean J. Limnol. 35(4): 391-402.
- Kim H.R. and You Y.H. 2010. Effects of elevated CO₂ concentration and increased temperature on leaf relates-physiological responses of *Phytolacca insularis* (native species) and *Phytolacca americana* (invasive species). The Ecological Society of Korea. 33(3): 195-204.
- Kim H.R. and You Y.H. 2010. The Effects of the Elevated CO₂ Concentration and Increased Temperature on Growth, Yield and Physiological Responses of Rice (*Oryza sativa* L. cv. Junam). Advances in Bioresearch. 1(2): 1-5.
- Klepper B. 1991. Root-shoot relationships. In Plant root: The hidden half(eds Waisel *et al.*). Marcel Dekker, New York. pp. 265-286.
- Kobayashi N. 2006. Global warming and Forest business. Bomundang. pp. 21-27.
- Korea Meterological Administration. 2010. Report of Global Atmosphere Watch 2010. Seoul, Korea. p. 239(in Korean).
- Leishman M.R, Sanbrooke K.J, Woodfin R.M. 1999. The effects of elevated CO₂ and light environment on growth and reproductive performance of four annual species. New phytol. 144: 455-462.
- Lobell D.B. and Asner G.P. 2003. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. Science. 299: 1032.
- Morse S.R, Bazzaz F.A. 1994. Elevated CO₂ and Temperature Alter Recruitment and Size Hierarchies in C₃ and C₄ Annuals. Ecology. 75(4): 966-975.
- Patterson D.T. and Flint E.P. 1980. Potential effects of global atmospheric CO₂ enrichment on the growth and competitiveness of C₃ and C₄ weed and crop plants. Weed Science. 28: 71-75.
- Purohit A.N, Treounna E.B. 1974. Effects of carbon dioxide on *Pharbitis*, *Xanthium*, and *Silene* in short days. Can. J. Bot. 52: 1283-1291.
- Reekie E.G, Bazzaz F.A. 1991. Phenology and growth in four annual species grown in ambient and elevated CO₂. Can. J. Bot. 69: 2475-2481.
- Rogers H.H, Runion G.B. and Krupa S.V. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. Environmental Pollution. 83: 155-189.
- Thomas C.D, Cameron A, Green R.E, Bakkenes M, Beaumont L.J, Collingham Y.C, Erasmus B.F.N, Siqueira M.F, Grainger A, Hannah L, Hyghes L, Huntley B, Jaarsveld A.S, Midhley G.F, Miles L, Ortega-Huerta M.A, Petercon A.T, Phillips O.L. and Willians S.E. 2004. Extinction risk from climate change. Nature. 427: 145-148.
- Thüfig B, Körner C, Stöcklin J. 2003. Seed production and seed quality in a calcareous grassland in elevated CO₂. Global Change Biology. 9: 873-884.
- Way D.A, Ladeau S.L, Mccarthy H.R, Clark J.S, Oren R, Finzi A.C, Jackson R.B. 2009.

- Greater seed production in elevated CO₂ is not accompanied by reduced seed quality in *Pinus taeda* L. *Global Change Biology*. pp. 1-10.
- Wulff R.D, Alexander H.M. 1985. Intraspecific variation in the response to CO₂ enrichment in seeds and seedlings of *Plantago lanceolata* L. *Oecologia*. 66: 458-460.
- Ziska L.H, Bunce J.A. 1993. The influence of elevated CO₂ and temperature on seed germination and emergence from soil. *Field Crops Research*. 34(2): 147-157.
- Ziska L.H, Faulkner S, Lydon J. 2004. Changes in biomass and root:shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO₂: implications for control with glyphosate. *Weed Science*. 52: 584-588.

- 논문접수일 : 2012년 03월 26일
- 심사의뢰일 : 2012년 03월 26일
- 심사완료일 : 2012년 04월 02일