

Original article

CO₂ 농도와 온도상승이 칠면초, 통통마디, 해홍나물 그리고 나문재의 생육 반응 및 개체군 재생율에 미치는 영향

김지은 · 김의주 · 이응필¹ · 박재훈 · 이승연 · 박지원 · 이정민 · 최승세² · 유영한*

국립공주대학교 생명과학과, ¹국립생태원 외래생물연구팀, ²국립생태원 자연환경조사팀

Effects of Elevated CO₂ and Elevated Temperature on the Growth Response and Regeneration Rate of Population of Halophytes – *Suaeda japonica*, *Salicornia europaea*, *Suaeda maritima* and *Suaeda glauca* –. Ji-Eun Kim (0000-0003-4863-1437), Eui-Joo Kim (0000-0002-9249-7055), Eung-Pill Lee¹ (0000-0002-0014-8465), Jae-Hoon Park (0000-0002-7905-8998), Seung-Yeon Lee (0000-0001-6751-0994), Ji-Won Park (0000-0002-2691-4236), Jung-Min Lee (0000-0002-6630-0685), Seung-Se Choi² (0000-0002-3332-5544) and Young-Han You* (0000-0002-9039-7595) (Department of Life science, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea; ¹Invasive Alien Species Research Team, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea; ²Team of National Ecosystem Survey, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea)

Abstract We investigated the growth response and population regeneration of four halophyte species: *Suaeda japonica*, *Salicornia europaea*, *Suaeda maritima* and *Suaeda glauca*, when climate change proceeds caused by increased CO₂ concentration and temperature. The plants collected from habitat in 2018 were transplanted into Wagner pots, and cultivated for two years in greenhouse divided into a control (ambient condition) and a treatment (elevated CO₂ + elevated temperature). The shoot length of halophytes was measured in July of each year, and the population regeneration rate was measured in October 2019. The shoot lengths of *S. japonica* and *S. glauca* had no difference between control and treatment for two years. Those of *S. europaea* were longer in control than treatment for two years. Those of *S. maritima* had no difference between control and treatment in 2018 but were longer in control than treatment in 2019. In control, the shoot lengths of *S. japonica*, *S. europaea* and *S. glauca* had no difference between years while those of *S. maritima* were longer in 2018 than in 2019. In treatment, those of *S. japonica*, *S. europaea* and *S. maritima* were shorter in 2019 than 2018 but *S. glauca* had no difference between years. The regeneration rates of *S. japonica*, *S. europaea* and *S. glauca* were lower treatment than control, and there was no difference in the regeneration rate of *S. maritima*. In conclusion, if climate change progresses caused by the increase of CO₂ concentration and temperature, the shoot lengths of *S. japonica*, *S. europaea* and *S. maritima* will be shortened, and the regeneration rate of population will be increased only in the *S. maritima*.

Key words: climate change, global warming, Chenopodiaceae, above-ground length, annual herb

Manuscript received 20 August 2020, revised 7 September 2020,
revision accepted 8 September 2020
* Corresponding author: Tel: +82-41-850-8508, Fax: +82-41-850-0957
E-mail: youeco21@kongju.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

서 론

지속적인 지구 대기 평균 기온 상승은 산업화에 의한 온실가스의 증가 때문이며 (Keeling *et al.*, 1989), 온실가스 중 인위적인 CO₂ 배출량의 증가가 지구온난화의 가장 큰 원인이다 (Kobayashi, 2006). 이러한 대기 중 CO₂의 증가로 인해 지난 100년간 지구의 기온을 약 0.74°C 상승시켰다 (IPCC, 2007). 2018년에 우리나라의 평균 CO₂ 농도는 415.2 ppm이었고 1999년에 비교하여 약 11.9% 증가하였는데 이로 인해 한반도의 평균 기온은 약 2°C 상승되었다 (KOSIS, 2019). CO₂의 누적 배출량은 21세기 후반과 그 이후의 지구 표면 평균 온도 상승에 상당한 영향을 미칠 것이며, 이로 인해 인간과 자연은 기후변화에 치명적인 영향을 받을 것이다 (IPCC, 2014). 특히, 지속적인 CO₂ 농도와 온도 상승은 식물의 생육 반응과 생산량을 변화시킬 것이다 (Morison *et al.*, 2002).

온난화가 진행됨으로써 해양 표층수의 수온 상승은 해류의 유속과 위치 그리고 해수의 무기영양소 함량과 층의 형성을 변화시키고 있다 (Kim, 2012; IPCC, 2014). 그 중 대기의 CO₂는 약 40%가 대기에 남아있고 나머지는 육지와 해양에 축적되며, 특히, 바다에 이산화탄소 배출량의 30%가 흡수되어 해양 산성화가 일어났다 (IPCC, 2014). 이러한 현상은 해양을 걸친 전 지구적으로 물순환에 변화가 일어나고 있다는 간접적인 증거이며 (IPCC, 2014), 또한 해양 산성화로 다양한 해양생물의 발생과 생육이 저해되고 있다 (Kim, 2012). 이처럼 해수 산성화는 해양 생물과 생태계의 안전성을 위협하고 있다 (Gim *et al.*, 2014).

염생식물 (Halophyte)은 토양의 염분농도가 높은 해안의 염습지에서 생활사를 완성하는 식물로서 염류를 축적하고 염분에 대한 저항력을 지니고 있다 (Flowers *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 2018). 염생식물 군락은 높은 일차생산력과 다양한 분류군의 생육지 및 오염물질의 정화 등의 역할을 수행한다 (Chang *et al.*, 2019). 최근 전 세계는 기후변화 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나가 해양생태계의 탄소흡수 원인 블루카본 (blue carbon)에 이목이 집중되고 있고, 이 중 염생식물은 탄소순환과 퇴적작용을 통해 대기 중의 탄소를 식물체와 퇴적물에 저장하는 역할을 함으로써 생태계 서비스를 제공한다 (Crooks *et al.*, 2017).

우리나라에서는 통통마디, 칠면초, 해홍나물, 나문재, 갈대 등의 총 16과 40분류군의 다양한 염생식물이 해안과 갯벌에 분포하고 있다 (Jeong, 2011). 하지만 기후변화가 진행되면서 전 세계적으로 염생식물의 중요성이 집중과 강조됨에 따라 염생식물의 생태학적 연구는 CO₂ 및 온도 스트레스 하에서 근권 미생물이 염생식물의 종자 발아에

미치는 영향 (Mesa-Marín *et al.*, 2019), 염분 농도 기울기에 따른 수종의 생육 반응 (Son, 1968; Egan and Ungar, 2001) 과 염생식물 군락의 분포 및 식생조사 (Jeong *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2020), 염생식물 분포와 현존량에 관한 연구 (Kim *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2000) 등이 최근까지 연구되었다. 하지만 기후변화 조건에서 염생식물의 생육 반응에 대한 연구는 사실상 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기후변화에 대비한 염생식물의 생태적 반응을 알아보기 위한 기초자료를 제공하고자 CO₂ 농도와 온도가 상승하였을 때 칠면초, 통통마디, 해홍나물 그리고 나문재의 생육반응과 개체군 재생을 알아보려고 하였다.

대상 및 방법

1. 연구 대상

실험에 사용된 염생식물은 명아주과 (Chenopodiaceae)의 칠면초 (*Suaeda japonica* Makino), 통통마디 (*Salicornia europaea* L), 해홍나물 (*Suaeda maritima* (L.) Dumort) 그리고 나문재 (*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge)이었다. 2018년 4월에 군산시 오식도동 841번지 (35°56'41.13"N, 126°35'21.26") 일대의 새만금 방조제의 북측 간척지에서 통통마

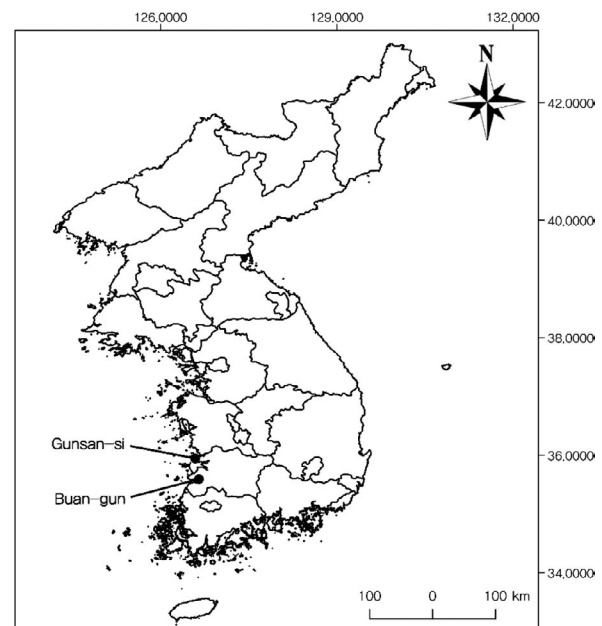


Fig. 1. A collection site: *Salicornia europaea* L. and *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge collected in Gunsan-si, *Suaeda japonica* Makino and *Suaeda maritima* Dumort in Buan-gun.

디의 유식물을 채집하였고 간척지에서 육상과 근접한 건조한 곳에서 나문재의 유식물을 채집하였다. 그리고 동일 시기에 전라북도 부안군 보안면 유천리 산 79-216 (35° 35'42.14"N, 126°39'06.02") 일대의 조수 영향을 지속적으로 받는 저조선과 만조선 사이의 펄 갯벌에서 칠면초의 유식물을 채집하였고, 만조선 근처 습한 지대에서 해홍나물의 유식물을 채집하였다(Fig. 1).

2. 환경처리

기후변화에 따른 생육반응을 알아보기 위해 유리온실을 대조구 (ambient CO₂, control)와 처리구 (CO₂-enrichment, treatment)로 구분하였다. 대조구의 평균 CO₂ 농도와 평균 온도는 각각 332.5±32.2 ppm과 17.4±12.1°C로 대기 중의 환경을 그대로 반영하였다. 처리구의 CO₂ 농도는 CO₂ 가스통 2개를 설치한 후, 0.2 mm 호스를 연결하여 CO₂ 가스를 24시간 주입하였고 CO₂ 측정 로거 (TEL-7001, Onset computer, USA)를 통해 모니터링한 뒤 가스조절기를 조절하여 평균 CO₂ 농도를 408.9±60.9 ppm으로 유지시켰다. 그리고 처리구내에 설치된 CO₂ 센서 (TEL-7001, Onset computer, USA)를 통해 10분 간격으로 모니터링하였다

(Fig. 3). 처리한 CO₂ 농도 값은 2014년 기후 변화에 관한 정부 간 협의체 (IPCC)에서 제시한 온실가스 저감정책에 따른 다양한 시나리오 중 RCP 2.6 시나리오에 가장 근접한 것으로 (IPCC, 2014) 대조구에 비해 약 1.2배 상승시켰다. 온실가스 중에서 온실효과를 가장 많이 발휘하는 가스는 CO₂이며, 온실가스는 온도 상승을 나타내는 척도이다. 따라서 처리구의 온도는 대조구에 비해 CO₂를 약 1.2배 처리하였기 때문에 온도가 상승되었다. 처리구의 온도는 온도데이터로거 (TR-71U, T&D, Japan.)를 사용하여 10분 간격으로 측정하였으며, 평균 약 19.1±12.2°C로 대조구에 비해 평균 1.7°C 높았다(Fig. 3).

3. 재배 및 측정

기후변화에 따른 연도별 염생식물의 생육반응과 개체군 재생률의 차이를 알아보기 위하여 2018년 4월에 칠면초, 통통마디, 해홍나물 그리고 나문재의 자생지에서 채집해 온 유식물들은 유리온실의 대조구와 처리구에 각 환경구배당 6개의 와그너포트 (Wagner pot)에 5개체씩 이식하였고 2018년 10월까지 재배하였다. 와그너포트에 2mm 이하의 동일 입자의 크기의 모래토양을 저토로 충전하였고,

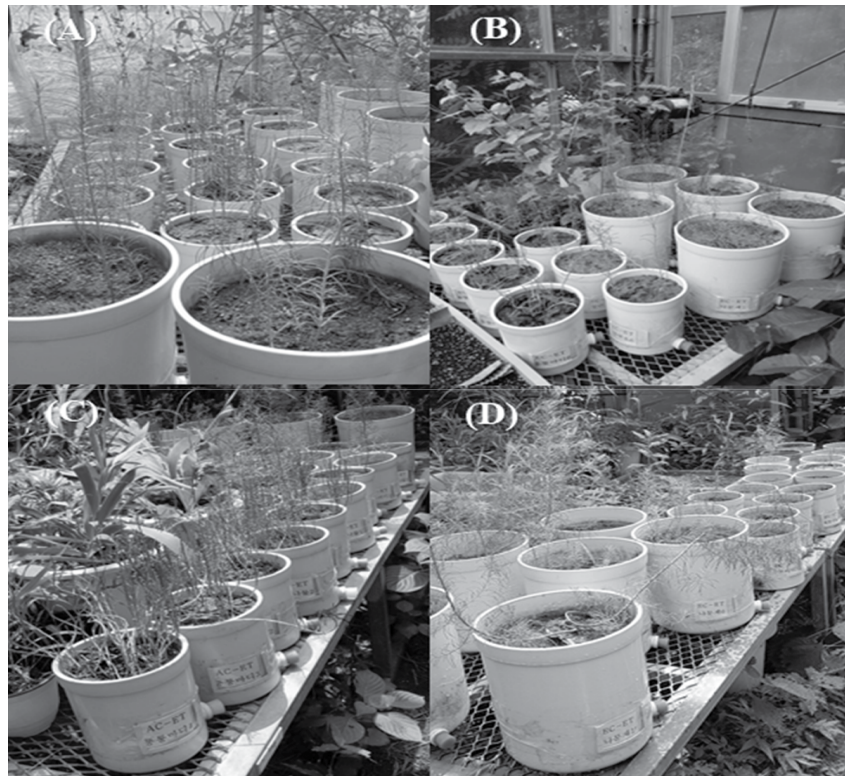


Fig. 2. Photo of halophytes that have been cultivated in the control and treatment for two years. The upper left is the control (A) in 2018 and the upper right is the treatment (B) in 2018. The lower left is control (C) in 2019 and the lower right is the treatment (D) in 2019.

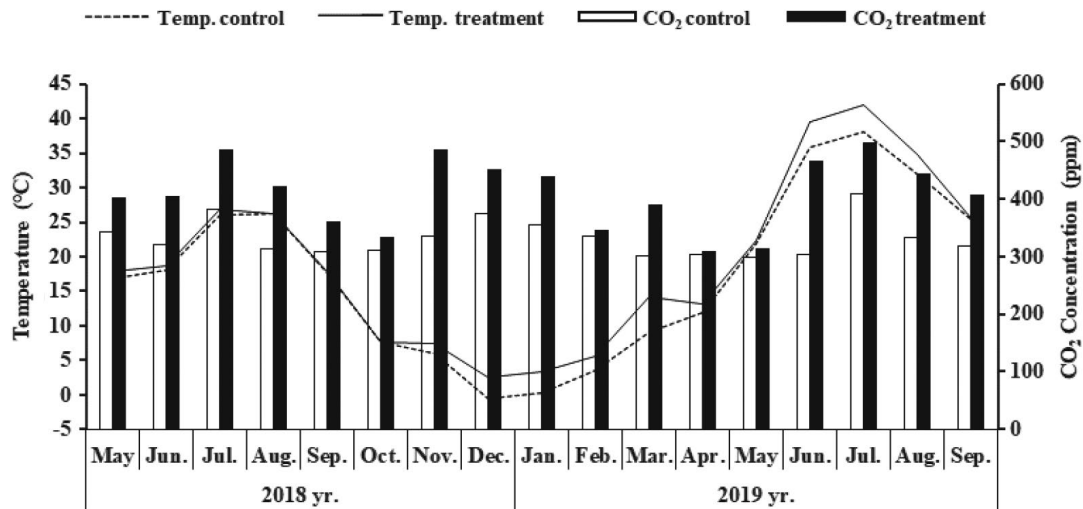


Fig 3. Average monthly temperature and CO₂ concentration under two environmental conditions (control and treatment) from May 2018 to September 2019. The histograms mean CO₂ concentration and the line graphs mean temperature in control and treatment (CO₂-enrichment). Empty square means CO₂ concentration in control (ambient CO₂), painted square means CO₂ concentration in treatment (CO₂-enrichment), dotted line means temperature in control (ambient CO₂) and line means temperature in treatment (CO₂-enrichment).

상토는 엽분이 포함된 생육지의 토양으로 사용하였다. 나문재는 직경 256 mm와 높이 297 mm의 와그너포트에 이식하였고 칠면초, 통통마디 그리고 해홍나물은 직경 174.6 mm와 높이 197.5 mm의 와그너포트에 이식하였다. 유식물들을 개체 간 경쟁을 최소화하고자 포트에서 일정 간격으로 맞추어 모서리와 중앙에 이식하였다(Fig. 2). 이식된 4종의 엽생식물은 당해 종자를 생산한 후 생활사를 마쳤다. 2018년 10월에 생성된 종자는 화분 내 토양에 파종되어 2019년 3월에 발아하였고, 정착한 유식물들을 대상으로 2019년 10월까지 재배하였다(Fig. 2). 수분은 와그너포트 내 토양 상태를 확인하여 4~5일 간격으로 공급하였고 증발이 빠른 여름철에는 2~3일 간격으로 관수하였다.

엽생식물 4종의 생육반응을 파악하기 위해서 2년 동안 엽생식물의 활력도가 높았던 7월에 지상부의 길이를 측정하였다. 대조구와 처리구에서 각 포트 당 칠면초, 통통마디, 해홍나물 그리고 나문재의 생육이 양호하며 지상부의 길이가 가장 길었던 3개체를 선별하여 50 cm 자를 활용하여 표토부터 식물체의 정단부까지 지상부 길이(cm)를 측정하였다. 엽생식물 4종의 개체군 재생율을 파악하기 위해서 2019년 10월에 대조구와 처리구에서 각 포트 당 발아한 칠면초, 통통마디, 해홍나물 그리고 나문재의 개체 수를 측정하였다. 그리고 종별 포트 당 측정된 개체 수를 2018년에 와그너포트로 이식한 총 개체 수로 나누어 개체군 재생율(ea)을 산출하였다.

4. 통계 분석

대조구와 처리구별 지상부 길이의 차이를 알아보기 위하여 Kolmogorov-smirnov test를 이용하여 정규분포 여부를 확인하였고, 정규분포를 나타내지 않아($p < 0.05$) 비모수 통계 분석(Nonparametric analysis)을 사용하였다. 대조구와 처리구별 차이의 유의성은 Kolmogorov-smirnov two sample test로 확인하였다. 종별 각 대조구와 처리구 간의 재생율의 차이는 Kolmogorov-smirnov two sample test로 확인하였고 대조구와 처리구별 종 간의 재생율의 차이의 유의성은 Kruskal-Wallis로 확인하였다. 통계 분석은 통계 프로그램인 Statistica 7 통계패키지(Statsoft, Inc, USA)를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 생육반응

칠면초의 지상부 길이는 2018년에 처리구가 대조구보다 0.3 cm 길었으나 통계적 차이가 없었고, 2019년의 지상부 길이는 대조구가 처리구보다 13.6 cm 길었으나 통계적 차이가 없었다(Fig. 4a). 대조구내에서 지상부의 길이는 2018년이 2019년보다 평균 4.5 cm 길었으나 통계적 차이가 없었고, 처리구내에서는 2018년이 2019년보다 평균 18.4 cm 길었다(Fig. 4a). CO₂ 농도와 온도가 상승되면 칠면초의 지

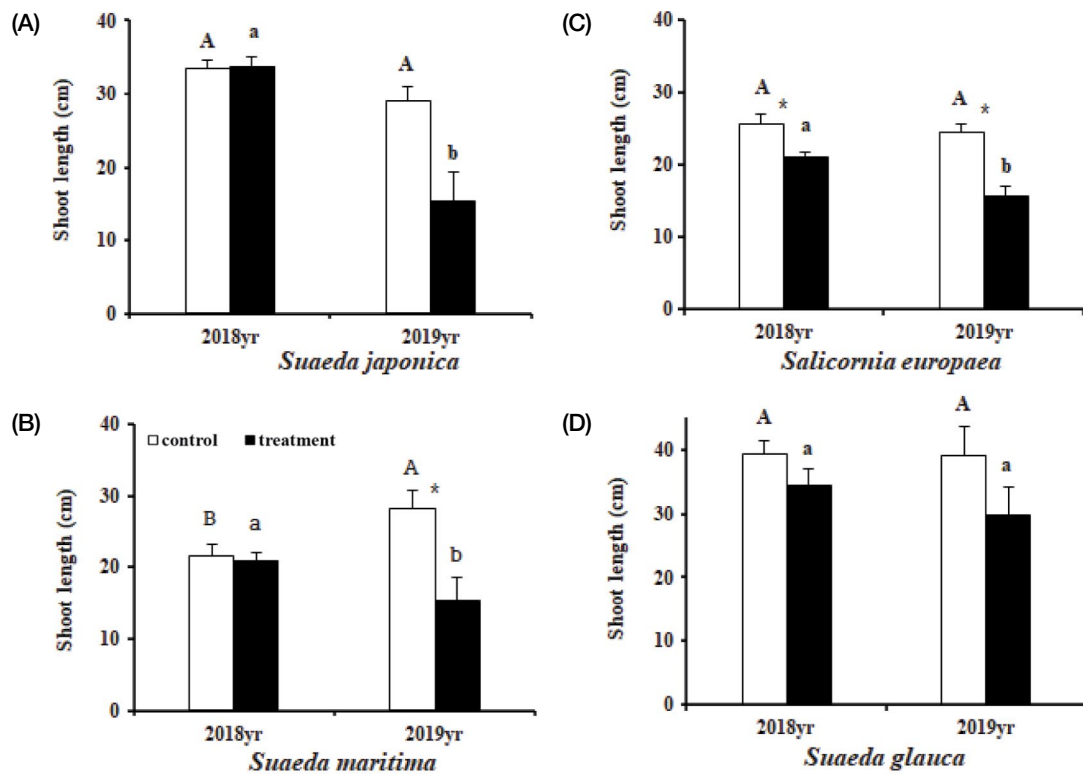


Fig. 4. Shoot length (cm) of *Suaeda japonica* Makino (a), *Salicornia europaea* L. (b), *Suaeda maritima* Dumort. (c) and *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge (d) in control (ambient CO₂) and treatment (CO₂-enrichment) conditions for two years. Upper case on the bars mean significantly different between 2018-year and 2019-year in control. Lower case on the bars mean significantly different between 2018-year and 2019-year in treatment. * (marker) on the alphabet means significantly difference between control and treatment ($p < 0.05$).

상부 길이는 짧아질 것이다.

통통마디의 지상부의 길이는 2018년과 2019년 모두 대조구가 처리구보다 각각 평균 4.5 cm, 9 cm 길었다(Fig. 4b). 대조구내에서 지상부의 길이는 2018년이 2019년보다 평균 1.0 cm 길었으나 통계적 차이가 없었고, 처리구내에서는 2018년이 2019년보다 평균 5.4 cm 길다(Fig. 4b). CO₂ 농도와 온도가 상승되면 통통마디의 지상부 길이가 짧아질 것이다.

해홍나물의 지상부 길이는 2018년에 대조구가 처리구보다 0.9 cm 길었으나 통계적 차이가 없었고, 2019년의 지상부 길이는 대조구가 처리구보다 12.8 cm 길었다(Fig. 4c). 대조구내에서 지상부의 길이는 2019년이 2018년보다 평균 6.5 cm 길었고, 처리구내에서는 2018년이 2019년보다 평균 5.5 cm 길었다(Fig. 4c). CO₂ 농도와 온도의 상승은 해홍나물의 생육에 영향을 미쳐 해홍나물의 지상부 길이는 짧아질 것이다.

나문재의 지상부 길이는 2018년에 대조구가 처리구보다 평균 4.9 cm 길었으나 통계적 차이는 없었고, 2019년에는 지상부 길이가 대조구가 처리구보다 평균 9.4 cm 길었으나

통계적인 차이는 없었다(Fig. 4d). 대조구내에서 지상부 길이는 2018년이 2019년보다 평균 0.1 cm 길었으나 통계적 차이가 없었고, 처리구내에서 2018년이 2019년보다 평균 4.6 cm 길었으나 통계적 차이는 없었다(Fig. 4d). CO₂ 농도와 온도의 상승은 나문재의 생육반응에는 영향을 미치지 않을 것이다.

일반적으로 대기 중 CO₂ 농도가 상승하게 되면 식물은 CO₂ 분압을 높여 광합성기관에서 CO₂ 확산과 rubisco의 탄소고정이 촉진되고, 광호흡을 억제시켜(Bowes 1996) 식물체에 공급되는 CO₂의 양이 증가해 광합성 속도가 증대되고(Park, 1993; Park, 2003), 이러한 이유로 식물의 생장을 증진시켜서 지상부의 길이가 길어질 것이다. 하지만 CO₂ 농도가 상승하게 되면 일년생 식물은 지상부의 길이가 짧았다. 본 연구 대상식물들도 일년생 식물로서, 통통마디와 해홍나물의 지상부 길이는 처리구에서 짧았다. 본 연구대상과 같은 과(family)에 속한 명아주(*Chenopodium album* var. *centrorubrum* Makino)의 지상부 길이는 CO₂ 농도가 점차 증가할수록 길어지는 경향을 보였다가 일정 이산화탄소의 농도(1,500 ppm 이상)를 초과하면 다시 줄어

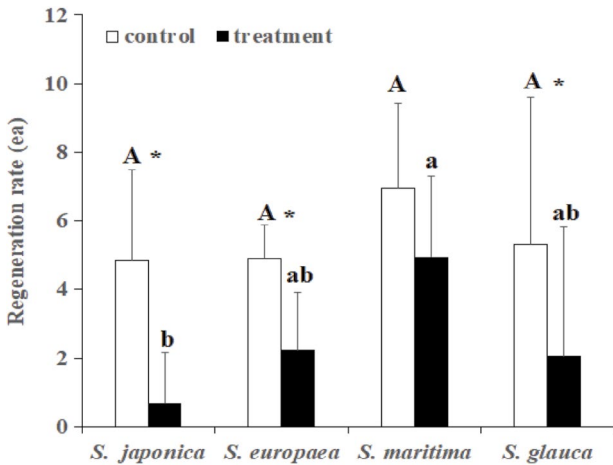


Fig. 5. Regeneration rates of *S. japonica*, *S. europaea*, *S. maritima* and *S. glauca* under control (ambient CO₂) and treatment (CO₂-enrichment) conditions. Upper case on the bars mean significantly different among four halophytes in control. Lower case on the bars mean significantly different among four halophytes in treatment. * (maker) on the alphabet means significantly difference between control and treatment ($p < 0.05$).

드는 경향이 나타났다 (Pilipavicius *et al.*, 2006). 또한 일년생 식물인 어저귀 (*Abutilon theophrasti* Medik.)의 지상부 길이가 대조구보다 처리구가 더 낮아서 본 연구결과와 일치하였다 (Garbutt *et al.*, 1990). CO₂ 농도와 온도 증가가 식물의 성장과 발달을 증진시키기도 하지만 (Carson and Bazzaz, 1982; Krizek *et al.*, 1969), 변화가 없거나 (Garbutt and Bazzaz, 1984) 본 연구결과와 같이 감소하기도 한다 (Idso and Kimball, 1997). CO₂ 농도와 온도의 상승은 여러 식물들에게 영향을 주는데, 특히 CO₂ 농도의 상승에 따른 영향은 식물의 종류에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 (Kim, 2012) 즉, 이산화탄소 농도의 상승에 따른 식물의 반응은 종 특이적이다 (Leadley *et al.*, 1999). 본 연구에서 칠면초, 통통마디 그리고 해홍나물은 CO₂ 농도와 온도의 상승으로 지상부 길이가 짧아졌다. 기후변화는 칠면초, 통통마디 그리고 해홍나물의 생육반응을 감소시킬 것이다.

2. 개체군 재생율

칠면초, 통통마디 그리고 나문재의 재생율은 대조구보다 처리구에서 낮았고 해홍나물의 재생율은 대조구와 처리구 간의 차이는 없었다. 대조구내에서의 염생식물의 재생율은 차이가 없었고 처리구내에서의 재생율은 해홍나물이 가장 높았고 칠면초가 가장 낮았다. CO₂ 농도와 온도가 상승되면 해홍나물을 제외한 칠면초, 통통마디 그리고 나문재의 재생은 낮아질 것이고 특히 칠면초가 더욱 심할 것이다

(Fig. 5).

본 연구 대상과 유사하게 애기장대 (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.)는 대조구에 비해 CO₂ 농도를 높인 처리구에서 낮은 발아율로 본 연구결과와 유사한 결과를 보였다 (Andalo *et al.*, 1996). 반면에 긴털비름 (*Amaranthus hybridus* L.)과 명아주 (*C. album* var. *centrorubrum*)의 발아율과 출현 개체 수는 700 ppm 증가시킨 농도에서 증가하였다 (Ziska and Bunce, 1993). 말냉이장구채 (*Silene noctiflora* L.)는 CO₂ 농도를 대조구보다 370 ppm 증가시킨 처리구에서 발아율이 증가하였고 (Qaderil and Reid, 2008), 토끼풀 (*Trifolium repens* L.) 그리고 창질경이 (*Plantago lanceolata* (Koidz.) Ohwi) 등은 CO₂ 농도와 온도가 높을수록 발아율이 증가하여 (Wulff and Alexander, 1985; Edwards *et al.*, 2001) 본 연구 결과와 상반된 결과를 나타냈다. CO₂ 농도에 따른 발아율의 반응 강도는 종별로 다르기도 하고 (Poorter, 1993) 식물의 영양상태에 따라 달라질 수 있기 때문에 (Wong *et al.*, 1992; El Kohen and Mousseau, 1994) 본 연구와 유사하거나 상반된 결과가 나타난 것으로 고려된다. 일반적으로 염생식물이 생육하는 염습지의 경우 더운 날씨에 종자 발아가 감소하며, 이는 여러 학자들에 의해 염도의 증가일 것으로 고려되어 졌다 (Khan and Ungar, 1986; Egan and Ungar, 1999). 하지만 식물은 환경적 조건이 열악한 경우 일반적으로 생식투자가 감소하는 것으로 볼 때 (Way *et al.*, 2009), 본 연구 대상의 재생율은 CO₂ 농도의 증가로 인해 줄어든 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 식물 재생에 있어 온도와 수분의 공급은 종자 휴면의 개시와 해제 및 발아에 중요한 요인이다 (Woodward and Williams, 1987). 이러한 이유는 생태학적 신호에 영향을 주는 다른 환경 변화와 함께 기후 변화는 식물의 회복 (recruitment)과 개체군 활력 (dynamics)에 영향을 미친다 (Arft *et al.*, 1999; Diemer, 2002; Fitch *et al.*, 2007; Walck and Dixon, 2009; Baeten *et al.*, 2010). 기후변화는 식물의 초기 성장 단계 때 민감할 것으로 예상되며, 식물의 회복 (recruitment)에 주요한 장애물이 될 수 있다 (Lloret *et al.*, 2004; Fay and Schultz, 2009; Dalglish *et al.*, 2010). 따라서 본 연구 대상인 칠면초, 통통마디, 해홍나물 그리고 나문재는 CO₂ 농도와 온도의 상승에 영향을 받아 개체군 재생율이 낮아질 것으로 판단된다 (Fig. 5).

저자정보 김지은(국립공주대학교 박사수료), 김의주(국립공주대학교 박사과정), 이응필(국립생태원 연구원), 박재훈(국립공주대학교 이학박사), 이승연(국립공주대학교 이학박사), 박지원(국립공주대학교 석사과정), 이정민(국립공

주대학교 석사과정), 최승세 (국립생태원 연구원), 유영한 (국립공주대학교 교수)

저자기여도 개념설정: 유영한, 김지은, 방법론 및 분석: 유영한, 김지은, 김의주, 박재훈, 이응필, 이승연, 박지원, 이정민, 실험 및 자료제공: 김지은, 김의주, 박재훈, 이정민, 박지원, 원고 초안작성: 김지은, 김의주, 박재훈, 원고교정 및 검토: 최승세, 박재훈, 이응필, 이승연

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1A2B5A01021358).

REFERENCES

- Andalo, C., B. Godelle, M. Lefranc, M. Mousseau and I. Till Bottraud. 1996. Elevated CO₂ decreases seed germination in *Arabidopsis thaliana*. *Global Change Biology* **2**: 129-135.
- Arft, A.M., M.D. Gurevitch, J. Gurevitch, J.M. Alatalo, M.S. BretHarte, M. Dale and R.D. Hollister. 1999. Responses of tundra plants to experimental warming: meta-analysis of the international tundra experiment. *Ecological Monographs* **69**: 491-511.
- Baeten, L., P.D. Frenne, K. Verheyen, B.J. Graae and M. Hermy. 2010. Forest herbs in the face of global change: a single-species-multiple-threats approach for *Anemone nemorosa*. *Plant Ecology and Evolution* **143**: 19-30.
- Black, R.F. 1960. Effects of NaCl on the ion uptake and growth of *Atriplex vesicaria* Heward. *Australian Journal of Biological Sciences* **13**: 249-266.
- Bowes, G. 1993. Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO₂. *Annual Review of Plant Biology* **44**: 309-332.
- Bowes, G. 1996. Photosynthetic responses to changing atmospheric carbon dioxide concentration. In *Photosynthesis and the Environment*. 387-407.
- Bowes, G., J.C. Vu, M.W. Hussain, A.H. Pennanen and L.H. Allen. 1996. An overview of how rubisco and carbohydrate metabolism may be regulated at elevated atmospheric [CO₂] and temperature. *Agricultural and Food Science* **5**: 261-270.
- Campbell, W.J., L.H. Allen and G. Bowes. 1988. Effects of CO₂ concentration on rubisco activity, amount, and photosynthesis in soybean leaves. *Plant Physiology* **88**: 1310-1316.
- Carson, R.W. and E.A. Bazzaz. 1982. Photosynthetic and growth response to fumigation with SO₂ at elevated CO₂ for C₃ and C₄ plants. *Oecologia* **59**: 50-54.
- Chang, M.C., Y.S. Cho, J.S. Noh and Kim S.H. 2019. Study on Classification and Ecological Characteristics of Halophyte in Tidal Flat Using Remote Sensing Technique: Application to Marine Spatial Planning. *The Korean Society for Marine Environment and Energy* **22**: 34-46.
- Choi, B.Y., N.Y. Gil, J.Y. Mun, S.H. Yeo and S.Y. Kim. 2018. Changes in the physicochemical characteristics of low-salt Doenjang by addition of halophytes. *The Korean Society of Food Preservation* **25**: 819-829.
- ÇINAR, İ.B., G. AYYILDIZ., A.E. YAPRAK and G.N. TUĞ. 2016. Effect of salinity and light on germination of *Salsola grandis* Freitag, Vural and *N. adiguzel* (Chenopodiaceae). *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series C: Biology* **25**: 25-32.
- Conroy, J. and P. Hocking. 1993. Nitrogen nutrition of C₃ plants at elevated CO₂ atmospheric concentrations. *Physiologia Plantarum* **89**: 570-576.
- Crooks, S., M. von Unger, L. Schile, C. Allen and R. Whisnant. 2017. Understanding strategic blue carbon opportunities in the seas of East Asia. *PEMSEA report*, 1-56.
- Dalgleish, H.J., D.N. Koons and P.B. Adler. 2010. Can life-history traits predict the response of forb populations to changes in climate variability?. *Journal of Ecology* **98**: 209-217.
- Diemer, M. 2002. Population stasis in a high-elevation herbaceous plant under moderate climate warming. *Basic and Applied Ecology* **3**: 77-83.
- Edwards, G.R., P.C.D. Newton, J.C. Tilbrook and H. Clark. 2001. Seedling performance of pasture species under elevated CO₂. *New Phytologist* **150**: 359-369.
- Egan, T.P. and I.A. Unga. 1999. The effects of temperature and seasonal change on the germination of two salt marsh species, *Atriplex prostrata* and *Salicornia europaea*, along a salinity gradient. *International Journal of Plant Sciences* **160**: 861-867.
- Egan, T.P. and I.A. Ungar. 2001. Competition between *Salicornia europaea* and *Atriplex prostrata* (Chenopodiaceae) along an experimental salinity gradient. *Wetlands Ecology and Management* **9**: 457-461.
- El Kohen, A. and M. Mousseau. 1994. Interactive effects of elevated CO₂ and mineral nutrition on growth and CO₂ exchange of sweet chestnut seedlings (*Castanea sativa*). *Tree Physiology* **14**: 679-690.
- Fay, P.A. and M.J. Schultz, 2009. Germination, survival, and growth of grass and forb seedlings: effects of soil moisture variability. *Acta Oecologica* **35**: 679-684.
- Fitch, E.A., J.L. Walck and S.N. Hidayati. 2007. Agroecosystem management for rare species of *Paysonia* (Brassicaceae): integrating their seed ecology and life cycle with cropping regimens in a changing climate. *American Journal of Botany* **94**: 102-110.
- Flowers, T.J., P.F. Troke and A.R. Yeo. 1977. The mechanism

- of salt tolerance in halophytes. *Annual Review of Plant Physiology* **28**: 89-121.
- Garbutt, K. and F.A. Bazzaz. 1984. The effects of elevated CO₂ on plants. III. Flower, fruit and seed production and abortion. *New Phytologist* **98**: 433-446.
- Garbutt, K., W.E. Williams and F.A. Bazzaz. 1990. Analysis of the differential response of five annuals to elevated CO₂ during growth. *Ecology* **71**: 1185-1194.
- Gim, B.M., T.S. Choi, J.S. Lee, Y.G. Park, S.G. Kang and E.C. Jeon. 2014. Effect Assessment and Derivation of Ecological Effect Guideline on CO₂-Induced Acidification for Marine Organisms. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy* **17**: 153-165.
- Han, Y.S., H.R. Kim and Y.H. You. 2012. Effect of elevated CO₂ concentration and temperature on the ecological responses of *Aster altaicus* var. *uchiyamae*, endangered hydrophyte. *Journal of Wetlands Research* **14**: 169-180.
- Idso, S.B. and B.A. Kimball. 1997. Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the growth and fruit production of sour orange trees. *Global Change Biology* **3**: 89-96.
- 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, 851-912.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- Jang, R.H., S.H. Lee, Y.S. Han, K.T. Cho and Y.H. You. 2013. Ecological Response of the endangered aquatic plant, *Viola raddeana* Regel, to Effect of Increased CO₂ Concentration and Air Temperature. *Journal of Wetlands Research* **15**: 381-386.
- Jeong, J.C. 2011. The Analysis of Temporal and Spatial Variation on the Vegetation Area of the Siwha Tidat Flat. *Environmental Impact Assessment* **20**: 349-356.
- Jeong, J.K. 2012. Ecological response of *Bupleurum latissimum* (Apiaceae, endangered species) to the environmental gradient treatments. Master's thesis, Kongju National University.
- Jeong, M.H., S.C. Kim, B.R. Hong and K.S. Lee. 2017. Spatial Distribution of Halophytes in the Goraebul Coastal Sand Dune, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **35**: 380-388.
- Keeling, C.D., R.B. Bacastow, A.F. Carter, S.C. Piper, T.P. Whorf, M. Heimann, W.G. Mook and H. Roeloffzen. 1989. A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas. D.H. Peterson Eds., Geophysical Monograph, 55, AGU, Washington, U.S.A., 165-236.
- Khan, M.A. and I.A. Ungar. 1986. Life history and population dynamics of *Atriplex triangularis*. *Vegetatio* **66**: 17-25.
- Kim, H.R. and Y.H. You. 2010. Effects of elevated CO₂ concentration and temperature on the response of seed germination, phenology and leaf morphology of *Phytolacca insularis* (endemic species) and *Phytolacca americana* (alien species). *Korean Society of Environment and Ecology* **24**: 62-68.
- Kim, J.H. 2012. Global warming through the eyes of a biologist. Seoul National University Press, Seoul.
- Kim, J.W., T.K. Song, J.S. Lee, H.S. Kim, S.H. Lee and B.S. Ihm. 1999. Studies on the Vegetation Distribution and Standing Biomass at the Coastal Sand dune of Pohang. *The Journal of Basic Sciences* **17**: 107-116.
- Kobayashi, N. 2006. Global warming and Forest business. Bommundang, 21-27.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2020. http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=141&dtbId=DT_14103_A000&conn_path=I3.
- Krizek, D.T., R.H. Zimmermann, H.H. Kueter and W.A. Bailey. 1969. Accelerated growth of birch and crabapple seedlings under CO₂ enriched atmospheres. *Plant Physiology Supplement* **44**: 15.
- Leadley, P.W., P.A. Niklaus, R. Stocker and C. Körner. 1999. A field study of the effects of elevated CO₂ on plant biomass and community structure in a calcareous grassland. *Oecologia* **118**: 39-49.
- Lee, J.S., K.S. Lee, B.S. Ihm, H.S. Kim and S.H. Lee. 2000. Studies on the Vegetation Distribution and Standing Biomass at the Coastal Sand Dune of Uido. *The Journal of Basic Science Research* **15**: 53-60.
- Lee, K.M., H.R. Kim, H. Lim and Y.H. You. 2012. Effect of Elevated CO₂ Concentration and Temperature on the Growth and Ecophysiological Responses of Ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer). *Korean Journal of Crop Science* **57**: 106-112.
- Lee, S.I., E.P. Lee, Y.H. Jung, E.J. Kim, J.K. Lee, S.Y. Lee, J.H. Park, S.H. Lee and Y.H. You. 2018. Study of Ecological Response of Endangered *Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai according to Moisture and Nutrient under Condition of Climate Change for Propagation and Restoration. *Korean Journal of Environment and Ecology* **32**: 30-38.
- Lloret, F., J. Peñuelas and M. Estiarte. 2004. Experimental evidence of reduced diversity of seedlings due to climate modification in a Mediterranean-type community. *Global Change Biology* **10**: 248-258.
- Meinzer, F.C. and J. Zhu. 1999. Efficiency of C₄ photosynthesis in *Atriplex lentiformis* under salinity stress. *Functional Plant Biology* **26**: 79-86.
- Mesa-Marín, J., J.A. Pérez-Romero, E. Mateos-Naranjo, M. Bernabeu-Meana, E. Pajuelo, I.D. Rodríguez-Llorente and S. Redondo-Gómez. 2019. Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on *Salicornia ramosissima* Seed Germina-

- tion under Salinity, CO₂ and Temperature Stress. *Agronomy* **9**: 655.
- Ministry of Environment. 2009. White Paper of Environment. Ministry of Environment: 65
- Moon, Y.G., I.S. Jang and M.S. Heo. 2008. Antibacterial Activities of *Suaeda maritima* Hot Water Extracts. *Journal of Life Science* **18**: 668-673.
- Morison, J.I.L. and D.W. Lawlor. 2002. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant, Cell and Environment* **22**: 659-682.
- Park, H.R. 2003. Global warming and its effects and preventive. Uyoug, Seoul, 285.
- Park, J.H., Y.S. Hong, H.R. Kim, J.K. Jeong, H.M. Jeong and Y.H. You. 2014. Effects of Elevated CO₂ and Temperature on the Growth of Endangered Species, *Cicuta virosa* L. in Korea. *Journal of Wetlands Research* **16**: 11-18.
- Park, J.W., S.Y. Lee, E.P. Lee, E.J. Kim, J.H. Park, J.M. Lee, M.J. Kim, J.Y. No, D.U. Han and Y.H. You. 2020. Studies on the Characteristics of Vegetation and Plant Diversity of Coastal Sand Dune in Busan Metropolitan City. *Journal of Wetlands Research* **22**: 66-72.
- Park, W.K. 1993. Increasing atmospheric carbon dioxide and growth trends of Korean subalpine conifers-Dendrochronological analysis. *Journal of Korean Society of Forest Science* **82**: 17-25.
- Pilipavicius, V., R. Romaneckiene, A. Ramaskeviciene and A. Sliesaravicius. 2006. The effect of CO₂ and temperature combinations on *Chenopodium album* L. early growth. *Agronomy Research (Tartu)* **4**: 311-316.
- Poorter, H. 1993. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio* **104**: 77-97.
- Qaderil, M.M. and D.M. Reid. 2008. Combined effects of temperature and carbon dioxide on plant growth and subsequent seed germinability of *Silene noctiflora*. *International Journal of Plant Sciences* **169**: 1200-1209.
- Rogers, H.H., G.B. Runion and S.V. Krupa. 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environmental Pollution* **83**: 155-189.
- Son, W.H. 1968. Studies on Salt Injuries of Seedlings Growth-Sand Media Effect of Various Concentration of Added Salts upon 3 Kinds of Seedlings. *Journal of Korean Forest Society* **8**: 3-10.
- Van Kraalingen, D.W.G. 1990. Effects of CO₂ enrichment on nutrient-deficient plants. In The greenhouse effect and primary productivity in European agro-ecosystems. *Pudoc Wageningen*, 42-45.
- Walck, J. and K. Dixon. 2009. Time to future-proof plants in storage. *Nature* **462**: 721-721.
- Way, D.A., S.L. Ladeau, H.R. Mccarthy, J.S. Clark, R. Oren, A.C. Finzi and R.B. Jackson. 2009. Greater seed production in elevated CO₂ is not accompanied by reduced seed quality in *Pinus taeda* L. *Global Change Biology* **16**: 1-10.
- Webb, K.L. 1966. NaCl effects on growth and transpiration in *Salicornia bigelovii* a salt-marsh halophyte. *Plant and Soil* **24**: 261-268.
- Wong, S.C., P.E. Kriedemann and D. Farquhar. 1992. CO₂-nitrogen interaction on seedling growth of four species of Eucalypt. *Australian Journal of Botany* **40**: 457-473.
- Woodward, F.I. and B.G. Williams. 1987. Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio* **69**: 189-197.
- Wulff, R.D. and H.M. Alexander. 1985. Intraspecific variation in the response to CO₂ enrichment in seeds and seedlings of *Plantago lanceolata* L. *Oecologia* **66**: 458-460.
- Ziska, L.H. and J.A. Bunce. 1993. The influence of elevated CO₂ and temperature on seed germination and emergence from soil. *Field Crops Research* **34**: 147-157.