

염분 스트레스에 대한 신갈나무(*Quercus mongolica*)와 졸참나무(*Q. serrata*)의 생리적 반응

박지원* · 박재훈* · 김의주* · 박여빈* · 이정민** · 김세희*** · 이승준* · 유영한**

*국립공주대학교

**국립산림과학원

***국립생태원

Physiological Responses of *Q. mongolica* and *Q. serrata* to Salinity Stress

Ji Won Park* · Jae Hoon Park* · Eui Joo Kim* · Yeo Bin Park* · Jung Min Lee** · Se Hee Kim*** · Seung Jun Lee ·
Young Han You*

*Kongju National University

**National Institute of Forest Science

***National Institute of Ecology

(Received : 22 January 2025, Revised : 17 February 2025, Accepted : 17 February 2025)

요약

한국의 기수습지에는 거의 수목이 없으며, 일부 보존되는 지역에서는 졸참나무가 드물게 발견되고 있다. 본 연구에서는 이 졸참나무(*Q. serrata*)와 우리나라에서 가장 흔히 발견되는 신갈나무(*Q. mongolica*)에 염수처리를 하여 두 종간의 생리적 반응을 비교함으로써 두 종이 잠재적으로 기수지역의 조림지 조성 종으로서의 가능성을 알아보고자 시도하였다. 그 결과, 염수처리는 두 종의 광합성률의 감소를 일으켰으나 그 정도는 신갈나무나 현지 기수종인 졸참나무간에 차이는 없었다. 또한, 증산률과 수분이용효율은 두 종에서 유사하게 감소되어 나타났다. 염처리에 따른 스트레스(엽록소 형광)는 염도에 따라 두 종이 받는 정도는 서로 달랐고, 엽록소 농도는 염분농도에 따라 졸참나무에서는 크게 감소하였으나 신갈나무에서는 낮은 염농도에서는 감소가 일어나지 않았다. 이러한 결과는 기수 간존식생종이 아닌 신갈나무도 졸참나무처럼 잠재적으로 기수지역에 생육할 수 있는 복원수종임을 뜻한다. 또한, 참조생태계에서 확인된 종 뿐만 아니라 현지에는 없지만 이와 생리생태적으로 유사한 속(Genus)의 수종을 대상으로 연구가 진행된다면 기수지역의 복원에 더 다양한 수종으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기수습지, 염분농도, 복원수종, 내염성, 잠재자연 식생

Abstract

In Korean brackish wetlands, trees are rarely found, with *Quercus serrata* occasionally observed in some preserved areas. This study aimed to investigate the potential of *Q. serrata* and the more commonly found *Q. mongolica* as afforestation species for brackish environments by comparing their physiological responses to saltwater treatment. The results showed that saltwater treatment reduced the photosynthetic rate in both species, but there was no significant difference between *Q. mongolica* and the native brackish species, *Q. serrata*. Similarly, transpiration rate and water use efficiency decreased in both species at comparable levels. However, stress responses measured through chlorophyll fluorescence varied between the species depending on salinity levels. Additionally, chlorophyll concentration significantly decreased in *Q. serrata* as salinity increased, whereas *Q. mongolica* did not exhibit a decline at lower salinity levels.

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Biological Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

E-mail : youeco21@kongju.ac.kr

- Ji Won Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Graduate student(ecopark@kongju.ac.kr)
- Jae Hoon Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Ph.D.(jhoon5314@gmail.com)
- Eui Joo Kim Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Ph.D.(euijoo@kongju.ac.kr)
- Yeo Bin Park Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Graduate student(pyb1994@smail.kongju.ac.kr)
- Jung Min Lee Livable Urban Forests Research Center, National Institute of Forest Science, Korea/Researcher(jungmin9307@naver.com)
- Se Hee Kim Ecikigucak Restiratuib Team, National Institute of Ecology, Korea/Researcher(ksh0720@nie.re.kr)
- Seung Jun Lee Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Graduate student(gudwp98@hanmail.net)
- Young Han You Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Professor(youeco21@kongju.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

These findings suggest that *Q. mongolica*, despite not being a native brackish species, has the potential to thrive in brackish areas, similar to *Q. serrata*, and could be used in ecological restoration. Furthermore, research on species within the same genus that share physiological and ecological traits with brackish vegetation could provide a wider range of species options for restoring brackish ecosystems.

Key words : Brackish wetland, Salinity, Restoration tree species, Salt tolerance, Potential Natural Vegetation (PNV)

1. 서론

기후변화로 인한 지구온난화의 심각성이 점차 대두되고 있고, 국제사회는 이에 대응하기 위해 여러 방안을 제시하고 있다 (Park and Nam, 2024). 한편 기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2018년 지구온난화 1.5°C 특별보고서를 승인하고 파리협정에서 합의된 1.5°C 목표의 과학적 근거를 마련하였다(IPCC, 2018). 국내에서 이러한 공동대응에 맞춰 2015년 2030 NDC를 시행한 이후 2021년 탄소중립 녹색성장 기본법을 제정하는 등 다양한 시행을 진행하고 있으며(Park and Nam, 2024), 국제사회 및 국내에서는 탄소흡수원 발굴을 주요 쟁점으로 제기하고 있다 (Park and Nam, 2024). IPCC에서는 주요 탄소흡수원으로 블루카본을 제시하고 있으며(IPCC, 2021), 탄소흡수원으로써 이산화탄소 제거에 대한 해결책으로 장기적인 효과에 대해 연구가 진행되고 있다(Ricart et al., 2022; Hurd et al., 2022; Boyd et al., 2022).

기수습지는 생물종들의 서식지 기능 및 수질 개선 등 생태계 서비스를 제공할 뿐만 아니라 탄소를 저장하는 등 탄소저장원으로써 높은 가치를 가지고 있다(Shiau et al., 2019). 기수습지는 대기 중 CO₂를 유기탄소로 광합성적으로 격리하는 생산성이 높은 습지이며 이에 대한 보전 및 복원은 기후변화 완화에 효과적인 방식으로 제안되어 왔다(Duarte et al., 2013). 한편, IPCC에서는 기후변화 위기에 따른 관리 방법으로 생태학적 복원(조림 및 재조림 등)을 제시하였으며(IPCC, 2014), 염습지에 비해 비교적 낮은 염분농도를 나타내는 기수습지는 육상식물종의 내염성 확인을 통해 효과적인 탄소흡수 복원지가 될 수 있다.

자연에 서식하는 식물은 염분을 포함한 다양한 환경 스트레스에 노출되고, 높은 염도는 식물 성장과 번식을 제한하는 주된 요인이기도 하다(Allakhverdiev et al., 2000). 일부 식물들은 이러한 높은 염도에도 일부 식물들은 염분을 배제하거나 특이적인 생리기작을 통해서 염분이 높은 지역 또는 이에 준하는 지역에서 서식한다(Flowers and Colmer, 2015). 식물 내에서 염분에 의한 스트레스가 진행되는 동안 광합성, 단백질 합성, 에너지 및 지질 대사와 같은 식물내부 전반적으로 영향을 미친다(Parida and Das, 2005). 염분 영향에 대한 초기 영향은 잎 표면의 확장 감소되고 염분의 스트레스가 심화되면 확장이 중단 된다(Parida and Das, 2005). 세포 성장에 필요한 영양소 중 하나인 탄소화물은 주로 광합성 과정을 통해 공급되는데 염분에 대한 노출은 광합성을 저하하게 된다(Parida and Das, 2005).

광합성은 식물의 가장 중요한 특성으로, 태양에너지를 화학 에너지로 전환하는 기작을 일컫는다(Balasubramaniam et al., 2023). 염분 스트레스는 기공의 폐쇄, 효소활동의 변화, CO₂ 공급의 감소 등 다양한 요인으로 광합성의 감소를 야기시킨다(Balasubramaniam et al., 2023). 이러한 광합성의 특징을 통해 육상 식물종의 염분농도의 내성 범위를 확인할 수 있다.

한편 기수습지는 탄소흡수원으로서 가치는 높으나 염분농도로 인해 식물종이 제한적으로 분포하며, 탄소를 지속적으로 축적이 가능한 목본식물 보다는 다년생 및 일년생 식물종의 비율이 높은 편이다. 반면에 산림생태계의 목본식물은 오랜 기간 동안 탄소흡수 및 저장이 가능할 뿐만 아니라 국가 정책에 필요한 표준을 제공한다(Bispo et al., 2017; Wellbrock et al., 2017; Lee et al., 2018; Lee et al., 2022). 신갈나무는 한 반도 전역에 분포하는 낙엽활엽수로 우리나라를 대표하는 표장종이며(Yim, 1977; Yu et al., 2024), 졸참나무는 국내 참나무류 중 분포면적이 비교적 적은 식물종이며, 해발이 낮은 지역에 남향성 입지에 주로 분포하는 특징을 가지고 있다(Kim and Kim, 2017). 또한, 현재 기수습지 탄소흡수에 대한 연구(You et al., 2024)에서 기수지역 잔존식생으로 확인된 만큼 내염성 연구를 통해서 명확한 생태복원 잠재식재종으로 판단할 수 있다.

따라서 본 연구는 우리나라 산림식생을 대표하는 신갈나무 및 졸참나무의 내염성 연구를 통해 염분내성 범위를 밝히고 이를 통해 염습지에 비해 비교적 염분농도가 낮으며, 탄소흡수원으로서 가치가 높은 기수습지 내 탄소흡수 조림지 조성종 선발을 위한 기초자료를 제공하는 것에 그 목적을 두고 있다.

2. 연구방법

2.1. 염분 처리

실험에 사용한 신갈나무와 졸참나무는 크기가 유사한 유식물(1년생)을 대상으로 살균된 모래를 채운 화분(지경 24cm, 높이, 23.5cm)에서 성장한 개체를 대상으로 진행하였다. 염분 처리에 따른 신갈나무와 졸참나무의 스트레스 반응을 분석하기 위해서 구배에 따라 20개체, 총 60개체의 유식물을 대상으로 연구를 진행하였다.

토양염분은 염분이 섞인 물을 건조된 토양으로 채운 화분(지름 24cm, 높이 23.5cm)에 공급하여 처리되었다. 염분 농도는 화분 아래로 물이 빠져나가기 직전까지의 양인 포장용수량(700ml) 기준(100%)으로 하여 M1(Control, 0psu), M2(8psu), M3(12psu)으로 처리하였다. 염수는 참나무 유식물이 자라는 화분에 동일한 시간대 2-4일 간격으로 공급하였다.

2.2. 생육·생리적 반응 측정

염분처리에 따른 생육 및 생리적 반응을 확인하기 위해 신갈나무와 졸참나무의 개체마다 잎의 크기가 일정한 성숙한 잎 3장을 선정하여 측정하였다. 광합성 반응은 일사량이 광포화점보다 높은 오전 10시부터 12시 사이에 광합성측정기(LCI Ultra Compact Photosynthesis System, ADC 2005)를 이용하여 광합성률($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a), 증산율($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, e), 기공전도도($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, gs), 수분이용효율($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmolH}_2\text{O}$, WUE)을 측정하였다.

비파괴적인 방법으로 식물의 광합성 및 생리 상태를 측정할 수 있는 OS-30p(Chlorophyll fluorometer, OPTI-SCIENCE, US)를 이용하였다. 형광측정은 신갈나무와 졸참나무 광합성 측정에 이용되었던 동일한 잎에 클립(FL-DC, Dark adaptation clip)을 끼워 20분간 암적응을 시킨 후 측정기를 통해 최소형광(F_0 , minimum fluorescence), 최대형광(F_m , maximum fluorescence)을 측정하였으며, 광계 II의 광화학적 효율을 의미하는 F_v/F_m (maximum quantum yield)를 확인하였다.

엽록소 함량(mgm^{-2} , Chlorophyll content; chl)은 광합성 반응 측정에 사용한 동일한 잎을 대상으로 하여 엽록소 함량 측정기(CCM-300, Chlorophyll Content Meter, OPTI-SCIENCES)를 이용하였다.

2.3. 통계처리

정규분포 여부를 Kolmogorov-smirnov test를 통하여 확인하였으며, 정규분포를 따르지 않아($p < 0.05$) 비모수 통계분석(Nonparametric analysis)을 실시하여 각 환경구배별 차이를 확인하였다. 구배별 차이의 유의성은 Mann-Whitney U Test와 Median Test로 확인하였다. 모든 통계적 분석은 STATISTICA 7 (Statsoft, Inc., Tulsa, OK, USA)을 사용하였다.

3. 결과

3.1. 광합성률(Photosynthetic rate)

염분은 신갈나무와 졸참나무의 광합성을 크게 감소시켰다(Fig. 1). 염분 농도가 8psu이나 12psu나 두 종의 광합성에 미치는 영향은 서로 간 차이가 없었다. 신갈나무의 경우 염수처리를 하지 않은 대조구에서의 광합성률은 $5.02 \pm 4.28 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 측정되었으며, 이는 8psu의 염수로 처리한 구배($0.35 \pm 0.70 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 14.2배 높았으며($p \leq 0.05$), 12psu의 염수로 처리한 구배($0.09 \pm 0.43 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 53.2배 높았다($p \leq 0.05$).

한편 졸참나무의 광합성률 또한 염수처리로 인해 유의한 감소를 보였다(Fig. 1). 대조구에서의 광합성률은 $5.77 \pm 2.66 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 8psu의 염수로 처리한 구배($0.85 \pm 0.89 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 6.8배 높았으며($p \leq 0.05$), 12psu의 염수로 처리한 구배($0.19 \pm 0.56 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 29.8배 높았다($p \leq 0.05$).

두 수종간의 비교에서는 염수처리를 하지 않은 대조구에서 졸참나무의 광합성률($5.77 \pm 2.66 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)이 신갈나무의

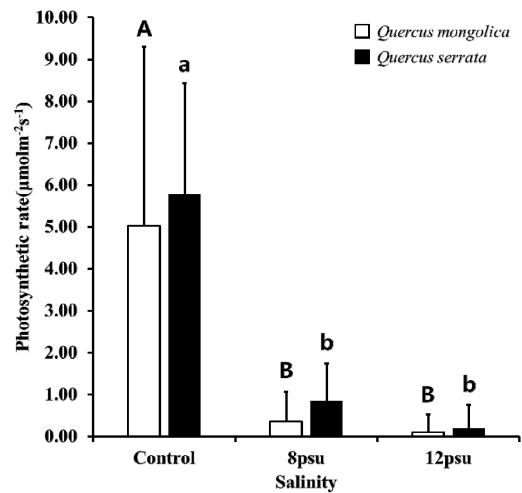


Fig. 1. Changes in photosynthetic rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) of *Q. mongolica* (white bars) and *Q. serrata* (black bars) under different salinity conditions (Control, 8psu, and 12psu). Different uppercase letters above the bars indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.05$).

광합성률($5.02 \pm 4.28 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 1.15배 높았으나 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$). 8psu 염수를 처리한 구배는 졸참나무의 광합성률($0.85 \pm 0.89 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)이 신갈나무의 광합성률($0.35 \pm 0.70 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 2.4배 높았으나, 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$). 마찬가지로 12psu 염수로 처리한 구배에도 졸참나무의 광합성률($0.19 \pm 0.56 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)이 신갈나무의 광합성률($0.09 \pm 0.43 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 2.1배 높았으나, 이 또한 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$).

종합적으로 염수처리는 두 수종의 광합성률에 부정적인 영향을 미쳤으며, 8psu 이상의 염분농도부터는 광합성률의 차이는 나타나지 않고, 염수처리에 따른 민감도는 두 수종에서 유사한 양상을 보였다.

3.2. 증산률(Transpiration rate)

염수처리를 하지 않은 신갈나무와 졸참나무의 증산률은 염수처리를 한 것에 비해 차이가 있는 것으로 나타났으며, 8psu나 12psu의 염분농도에 따른 수종 간 차이는 없었다(Fig. 2). 신갈나무의 경우 염수처리를 하지 않은 대조구에서의 증산률은 $1.86 \pm 0.74 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 측정되었으며, 이는 8psu의 염수로 처리한 구배($0.25 \pm 0.27 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 7.3배 높았으며($p \leq 0.05$), 12psu의 염수로 처리한 구배($0.29 \pm 0.22 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 6.4배 높았다($p \leq 0.05$).

졸참나무 또한 염수처리로 인해 유의한 감소를 보였다(Fig. 2). 대조구에서의 증산률은 $1.21 \pm 0.50 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 8psu의 염수로 처리한 구배($0.11 \pm 0.62 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 11.0배 높았으며($p \leq 0.05$), 12psu의 염수로 처리한 구배($0.21 \pm 0.20 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)보다 약 5.9배 높았다($p \leq 0.05$).

한편, 두 수종간의 비교에서는 염수처리를 하지 않은 대조구

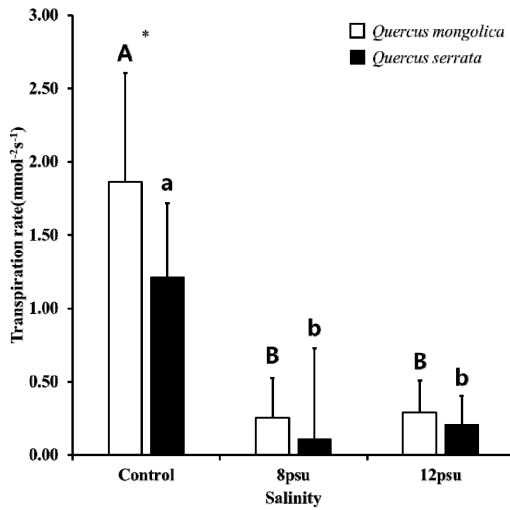


Fig 2. Changes in transpiration rate ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) of *Q. mongolica* (white bars) and *Q. serrata* (black bars) under different salinity conditions (Control, 8psu, and 12psu). Different uppercase letters above the bars indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.05$). An asterisk (*) indicates a significant difference between species within the same treatment.

에서 신갈나무($1.86 \pm 0.74 \text{ mmol}^{-2} \text{s}^{-1}$)가 졸참나무($1.21 \pm 0.50 \text{ mmol}^{-2} \text{s}^{-1}$)보다 약 1.5배 높았으며($p \leq 0.05$), 8psu와 12psu의 염수를 처리한 구배는 신갈나무가 졸참나무 보다 각각 약 2.3배, 1.4배 높았으나, 통계적으로 유의하지 않았다($p > 0.05$).

종합적으로 염수처리하는 두 수종의 광합성률에 부정적인 영향을 미쳤으며, 광합성률과 마찬가지로 8psu의 염분농도부터 증산률의 차이는 나타나지 않았으며, 두 종에 유사하게 부정적인 영향을 미쳤다.

3.3. 수분이용효율(Water use efficiency)

신갈나무와 졸참나무의 수분이용효율(WUE)은 증산률과 동일하게 대조구에서는 차이가 있었으나 염수처리를 한 구배에서는 차이가 나타나지 않았다(Fig. 3).

신갈나무의 염수처리를 하지 않은 대조구 수분이용효율은 $3.46 \pm 3.23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ 로 측정되었으며, 8psu의 염수처리를 한 구배($3.01 \pm 2.69 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)보다 약 1.2배, 12psu의 염수를 처리한 구배($1.13 \pm 1.32 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)보다 약 3.1배 높았다($p \leq 0.05$).

졸참나무의 대조구에서 수분이용효율은 $4.68 \pm 1.19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ 로 이는 8psu의 염수 처리한 구배($3.97 \pm 6.89 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)보다 약 1.2배, 12psu로 처리한 구배($2.96 \pm 5.40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)보다 약 1.6배 높았다. 두 구배 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p \leq 0.05$).

두 수종간 비교에서는 졸참나무 대조구의 수분이용효율($4.68 \pm 1.19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)이 신갈나무의 대조구 수분이용효율($3.46 \pm 3.23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)보다 약 1.4배 높았으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p \leq 0.05$). 8psu와 12psu의 염수처리한 구배에서도 졸참나무가 신갈나무에 비해

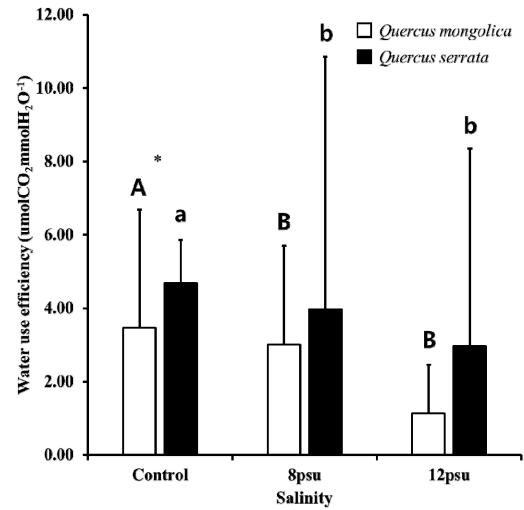


Fig. 3. Changes in water use efficiency ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$) of *Q. mongolica* (white bars) and *Q. serrata* (black bars) under different salinity conditions (Control, 8psu, and 12psu). Different uppercase letters above the bars indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.05$). An asterisk (*) indicates a significant difference between species within the same treatment.

각각 약 1.3배, 약 2.6배 더 높은 것으로 나타났으나 통계적으로 유의하지 않았다($p < 0.05$).

3.4. 광계II의 광화학적 효율(Fv/Fm)

염수처리에 따른 신갈나무와 졸참나무의 광계II의 광화학적 효율(Fv/Fm)은 대조구와 동일하게 모두 스트레스를 받는 것으로 나타났으며, 염분농도에 따라 수종간 스트레스의 차이를 보였다(Fig. 4).

신갈나무에서 염수처리를 하지 않은 대조구에서의 광화학적 효율은 0.75 ± 0.04 로 측정되었다. 이는 8psu의 염수를 처리한 구배(0.55 ± 0.12)보다 약 1.4배 높았고($p \leq 0.05$), 12psu의 염수를 처리한 구배(0.63 ± 0.12)보다 약 1.2배 높은 것으로 나타났다($p \leq 0.05$).

졸참나무에서는 염수처리에 따른 광화학적 효율은 0.75 ± 0.07 로 측정되었으며, 이는 8psu의 염수를 처리한 구배(0.65 ± 0.12)보다 약 1.2배 높았고($p \leq 0.05$), 12psu의 염수를 처리한 구배(0.56 ± 0.15)보다 약 1.3배 높은 것으로 나타났다($p \leq 0.05$).

수종간 비교에서는 대조구에서 신갈나무와 졸참나무의 광화학적 효율이 각각 0.75 ± 0.04 와 0.75 ± 0.07 로 거의 동일했으며 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p > 0.05$). 반면 8psu의 염수를 처리한 경우, 졸참나무의 광화학적 효율(0.65 ± 0.12)은 졸참나무의 광화학적 효율(0.55 ± 0.12)보다 약 1.2배 높았다($p \leq 0.05$). 반면, 12psu의 염수를 처리한 경우에는 신갈나무가 광화학적 효율(0.63 ± 0.12)이 졸참나무(0.56 ± 0.15)보다 약 1.1배 높은 것으로 나타났다($p \leq 0.05$). 결과적으로 염수처리하는 두 수종 모두의 광계II의 광화학적 효율을 감소시키는 것으로 나타났으며 염분농도에 따라 효율 감소의 양상이 다르게 나타났다.

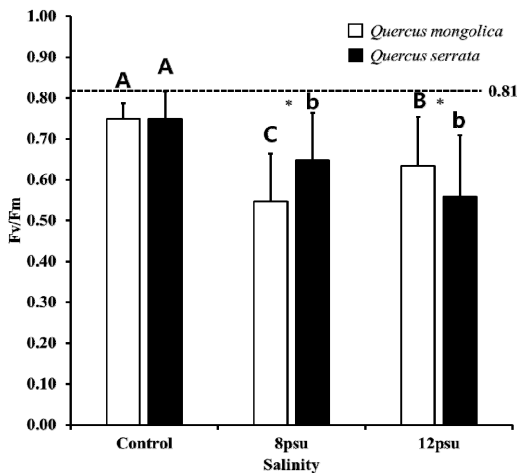


Fig 4. Changes in maximum quantum yield of PSII (Fv/Fm) for *Q. mongolica* (white bars) and *Q. serrata* (black bars) under different salinity conditions (Control, 8psu, and 12psu). Different uppercase letters above the bars indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.05$). An asterisk (*) denotes a significant difference between species within the same treatment. The dashed line represents the optimal Fv/Fm value(0.81).

3.5 엽록소 함량(Chlorophyll content)

염수처리에 따른 신갈나무와 졸참나무의 엽록소 함량 (mgm^{-1} ; 평균 \pm 표준편차)에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 신갈나무의 경우 염수처리를 하지 않은 대조구($33.97 \pm 19.89 \text{ mgm}^{-1}$)에서가 8psu로 처리한 구배($17.50 \pm 21.15 \text{ mgm}^{-1}$)으로 처리한 것보다 약 1.9배 높았으며($p \leq 0.05$), 12psu로 처리한 구배($5.47 \pm 12.82 \text{ mgm}^{-1}$)으로 처리한 것보다 약 6.2배 높았다($p \leq 0.05$).

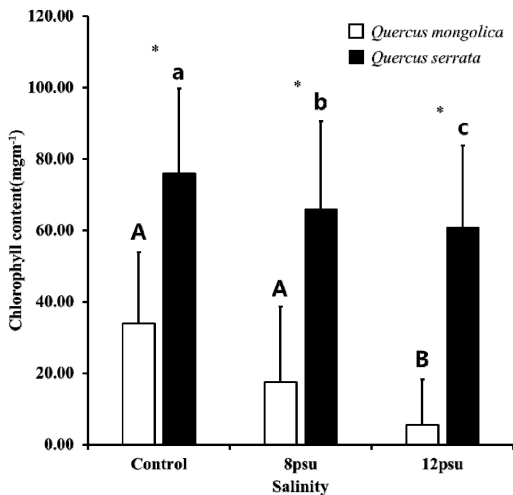


Fig. 5. Changes in chlorophyll content (mgm^{-2}) of *Q. mongolica* (white bars) and *Q. serrata* (black bars) under different salinity conditions (Control, 8psu, and 12psu). Different uppercase letters above the bars indicate significant differences between treatments ($p \leq 0.05$). An asterisk (*) indicates a significant difference between species within the same treatment.

졸참나무의 엽록소 함량은 염수처리를 하지 않은 대조구 ($75.87 \pm 23.91 \text{ mgm}^{-1}$)에서가 8psu로 처리한 구배($65.93 \pm 24.62 \text{ mgm}^{-1}$)보다 약 1.2배 높았으며($p > 0.05$), 12psu로 처리한 구배($60.87 \pm 22.99 \text{ mgm}^{-1}$)보다는 약 1.2배 높았다($p \leq 0.05$).

수중 간 비교에서는 염수처리를 하지 않은 대조구에서 졸참나무($75.86 \pm 23.91 \text{ mgm}^{-1}$)가 신갈나무($33.96 \pm 19.89 \text{ mgm}^{-1}$)보다 약 2.2배 높았다($p \leq 0.05$). 8psu의 염수를 처리한 경우에도 졸참나무($65.93 \pm 24.62 \text{ mgm}^{-1}$)가 신갈나무($17.50 \pm 21.15 \text{ mgm}^{-1}$)보다 약 3.8배 높은 것으로 나타났다($p \leq 0.05$). 12psu의 염수로 처리한 경우에도 졸참나무($60.87 \pm 22.99 \text{ mgm}^{-1}$)가 신갈나무($5.47 \pm 12.82 \text{ mgm}^{-1}$)보다 약 11.1배 높은 것으로 나타났다($p \leq 0.05$). 이로 볼 때 염수처리는 신갈나무와 졸참나무 모두의 엽록소 함량에 부정적인 영향을 미쳤으며, 졸참나무의 경우 염수처리와 관계없이 신갈나무에 비해 상대적으로 높은 엽록소 함량을 유지하였다.

4. 고찰

대한민국 서해안의 주요 기수지역(파주 공릉천하구, 고창 인천강하구, 고양 대덕생태공원, 서천 장항습지)에서의 염분농도는 $2.68 \pm 3.99 \text{ psu}$ 로 전세계적인 범위($0.5 \sim 35 \text{ psu}$; Han et al. 2021)의 낮은 부분에 해당되고, 이곳에서는 현재 수목이 거의 존재하지 않는다(You et al., 2024).

한편, 생태계의 성공적인 복원에 중요한 요소는 참조생태계를 모방하는 것이다(SER, 2002). 현재 고창의 인천강하구는 생물다양성과 자연성이 높은 보존가치가 매우 높은 지역이면서(Baek, et al., 2023) 동시에 그 주변부에 졸참나무와 더불어 여러 수종이 잔존식생으로 분포하고 있어 참조생태계로서 가치가 높다(You et al., 2022).

본 연구에서는 기수습지 복원시 참조지역의 수종인 졸참나무의 염도에 대한 반응을 분류학적으로 생태학적으로 유사한 신갈나무와 비교하여 두 종 참나무의 복원수종으로서의 가능성을 보고자 하였다.

염분은 식물의 엽록소 합성 손상(Qin et al., 2020), 기공 폐쇄로 인한 CO_2 공급 감소(Hinai et al., 2022) 등 다양한 요인으로 통하여 광합성 감소를 일으킨다(Balasubramaniam et al., 2023). 염분의 내성의 범위는 식물종에 따라 다르며 쌍떡잎식물의 염도 내성 변화는 단자엽식물보다 더 큰 특징을 지닌다(Munns and Tester, 2008). 이것으로 볼 때 염분 농도변화에 따른 광합성농도의 변화는 쌍떡잎식물인 신갈나무와 졸참나무의 특징에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 대조구에서의 신갈나무와 졸참나무의 광합성률이 염수를 처리한 구배에 비해 차이가 나타났다(Fig. 1).

기공을 통한 증산은 변화하는 환경조건에서 빠르게 적응해야 하는 역동성을 가지고 CO_2 흡수와 수분 손실을 최적화 해야 하는 식물에 필수적인 역할을 한다(Damour et al., 2010). 기공을 통해 CO_2 가 공급되기 때문에 기공 폐쇄로 인한 증산률이 감소하면 광합성 또한 감소하게 된다. 염수 처리 후 신갈나무와 졸참나무 증산률이 감소하는 경향이 나타났다(Fig. 2).

이는 토양에 염분이 고농도로 존재하게 되면 뿌리가 물을 추출하기 어려워진다는 연구(Munns and Tester, 2008)로 볼 때, 토양의 높은 염분은 식물 뿌리를 통한 토양 수분 흡수를 방해함으로써 두 종 모두 증산률이 크게 감소된 것으로 해석된다(Toam et al., 2020). 수분이용효율은 동일한 증산량에 따른 광합성률의 차이이므로, 본 연구에서 광합성률과 증산률 모두 감소했지만 수분이용효율이 감소했다는 것은 수분이용효율 감소에 증산률보다는 광합성률이 더 크게 기여했음을 의미한다. 이는 염분처리를 하지 않았을 때는 졸참나무가 신갈나무보다 수분이용효율이 더 높았지만 8psu 이상을 처리할 경우 두 종 모두 수분이용효율이 감소했고, 졸참나무도 신갈나무와 유사한 수준으로 낮아져 변별성이 사라졌음을 의미한다.

식물에 대한 스트레스는 여러 환경요인에 대한 통합된 반응이 생리적으로 나타낼 수 있으며(Naumann and Young, 2007), 암순응을 통한 광계II의 광화학적 효율(Fv/Fm) 측정은 식물의 스트레스 지표로 많이 사용되어 왔다(Baker and Rosenqvist, 2004; Mun et al., 2024).

신갈나무는 염분농도가 낮을 때에는 졸참나무보다 Fv/Fm값이 감소하였으나 염분농도가 높을 때에는 졸참나무보다 더 높은 것으로 나타났다. 또한, 낮은 염분농도에서는 졸참나무가 신갈나무보다 염스트레스 하에서 더 안정적인 광합성을 하지만 염분농도가 높아지게 되면 상반된 반응이 나타났다. 이로 미루어 보아 염분농도가 높아질 경우 신갈나무가 졸참나무보다 기수습지에 더 적합한 식재종으로 판단할 수 있다.

염분에 노출된 식물은 일반적으로 잎의 면적이 줄어들게 되며(Jamil et al., 2007), 엽록소 분해 효소인 클로로필라아제(Chlorophyllase)의 활동을 증가시켜 식물의 총 엽록소 함량을 감소시킨다(Rao and Rao, 1981). 이러한 엽록체 구조의 파괴는 색소 단백질 복합체의 불안정성을 유도하여(Singh and Ubeey, 1995) 결과적으로 광합성률의 감소로 나타난다(Delfine et al., 1999).

엽록소 함량의 특이점은 염분농도에 따라 감소하는 졸참나무에 비해 신갈나무는 높은 염도에서만 엽록소 함량이 감소하였다는 것이다(Fig. 5). 같은 양의 광합성 산물을 생산할 때, 엽록소 함량이 높아질수록 엽록소를 구성하는 주요 성분인 질소에 대한 요구량도 동시에 높아지므로 엽록소 함량의 증가가 식물 질소 흡수 또는 사용 효율의 증가를 반영하지 않고 오히려 탄소 고정 능력을 저하시킨다(Mao et al., 2024). 이러한 결과는 염도가 높은 환경에서도 신갈나무의 광합성에 대한 질소이용효율은 졸참나무보다 더 높을 것으로 판단되며, 신갈나무는 더 적은 질소 자원을 이용하면서도 높은 식물생산성을 가질 수 있으므로 기수지역의 탄소흡수에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

신갈나무의 광합성률은 세 염분조건에서 졸참나무와 유사하게 나타났으나, 엽록소함량은 상대적으로 매우 낮았다. 같은 양의 광합성 산물을 생산할 때, 엽록소함량이 높아질수록 엽록소를 구성하는 주요 성분인 질소에 대한 요구량도 동시에 높아지므로(Toam, et al., 2020), 이러한 결과는 염도가 높은 환경에서도 신갈나무의 광합성에 대한 질소이용효율은 졸참나무

보다 더 높을 것으로 판단된다. 이러한 신갈나무의 특성은 더 적은 질소 자원을 이용하면서도 높은 식물생산성을 가질 수 있으므로 기수지역의 탄소흡수에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

참조생태계에서 확인된 참나무 수종인 졸참나무(You et al., 2022)와 한국의 산림지역 대표 수종인 신갈나무 두 종은 염분농도 8psu 이상에서의 생리적 반응을 보이고 생육을 함으로써 이 두 종은 기수습지 생태숲 조성의 잠재적인 수종으로 활용될 가능성이 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

현재 대한민국의 탄소숲을 조성하는데 있어 적합한 수종이 거의 없는 실정이다. 그런데 한편 일부 서해안의 기수수변림이 분포하고 있고, 그곳에는 졸참나무가 생육하고 있다. 본 연구에서는 이러한 기수지역에 있는 잔존식생인 졸참나무와 국내의 가장 넓은 범위를 차지하고 있는 신갈나무 두 종을 대상으로 염분처리를 후 나타나는 생리적인 반응을 비교하여 기수습지 복원종으로서의 가능성을 알아보려고 하였다.

그 결과, 신갈나무는 잔존식생이 아니지만, 기수지역의 현지 수종인 졸참나무에 비하여 생리적으로 받는 염분스트레스(광합성, 증산률, 수분이용효율)에 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 기수습지의 숲 조성 가능성에 졸참나무뿐만 아니라 현지에서 발견되지 않는 신갈나무도 복원수종으로서 사용할 수 있음을 뜻한다. 이를 통해 참조생태계에서 확인된 종 뿐만 아니라 현지에는 없지만 이와 생리생태적으로 유사한 속(Genus)의 수종을 대상으로 연구가 진행된다면 기수지역의 복원에 더 다양한 수종으로 사용될 수 있을 것으로 예측된다. 또한, 기수습지의 복원은 염분뿐만 아니라 토양의 저질, 습도 등이 중요한 환경요인임으로 성공적인 식재를 위해서는 이러한 기수습지의 토양환경의 특성을 고려한 연구가 겸비되어 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003630003).

References

- Allakhverdiev, SI, Sakamoto, A, Nishiyama, Y, Inaba, M and Murata, N (2000). Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant physiol.* 123(2000), 1047-1056.
- Baek, WK, Lee, MJ, Yu, HE, Kim, JC and Ryu, JH (2023). Mapping topography change via multi-temporal sentinel-1 pixel-frequency approach on Incheon river estuary wetland, Gochang, Korea. *Korean Journal of*

- Remote Sensing, 39(6-3), 1747-1761.
- Baker, NR and Rosenqvist, E (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607-1621.
- Balasubramaniam, T, Shen, G, Esmaeili, N and Zhang, H (2023). Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 12, 2253.
- Bispo, A, Andersen, L, Angers, DA, Bernoux, M, Brossard, M, Cécillon L, Comans, RNJ, Harmsen, J, Lamé, F, Lhuillery, C, Maly, S, Martin, E, Mcelnea, AE, Sakai, H, Watabe, Y and Eglin, TK (2017). Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: Do we have the necessary standards?. *Frontiers in Environmental Science*, 5, 41.
- Boyd, PW, Bach, LT, Hurd, CL, Paine, E, Raven JA and Tamsitt, V (2022). Potential negative effects of ocean afforestation on offshore ecosystems. *Nature Ecology and Evolution*, 6(6), 675-683.
- Damour, G, Simonneau, T, Cochard, H and Urban L (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell and Environment*, 33(9), 1419-1438.
- Delfine, S, Alvino, A, Villana, MC and Loreto, F (1999). Restriction to carbon dioxide and photosynthesis in spinach leaves recovering from salt stress. *Plant Physiology*, 199, 1101-1106.
- Duarte, CM, Losada IJ, Hendriks, IE, Mazarrasa, I and Marbà N (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature climate change*, 3, 961-968.
- Flowers, TJ and Colmer, TD (2015). Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 327-331.
- Han, SP, Hwang, IC and Kwon, SJ (2021). Studies on distribution and ecology of *Clithon retropictus* (Martens, 1879) in South Korea. *Journal of Wetlands Research*, 23(4), 317-326.
- Hinai, AMS, Ullah, A, Al-Rajhi, RS and Farooq, M (2022). Proline accumulation, ion homeostasis and antioxidant defence system alleviate salt stress and protect carbon assimilation in bread wheat genotypes of Omani origin. *Environmental and Experimental Botany*, 193, 104687.
- Hurd, CL, Law, CS, Bach, LT, Britton, D, Hovenden, M, Paine, ER, Raven, JA, Tamsitt, VB and Philip, W (2022). Forensic carbon accounting: Assessing the role of seaweeds for carbon sequestration. *Journal of Phycology*, 58(3), 347-363.
- Jamil, M, ur Rehman, S, Lee, KJ, Kim, JM, Kim, HS and Rha, ES (2007). Salinity reduced growth PS2 photochemistry and chlorophyll content in radish. *Science Agriculture*, 64(2), 111-118.
- Kim, YH and Kim, JW (2017). Distributional uniqueness of deciduous oaks (*Quercus* L.) in the Korean peninsula. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 20(2), 37-59.
- Lee, SJ, Yim, JS, Son, YM, Son, Y and Kim, R (2018). Estimation of forest carbon stocks for national greenhouse gas inventory reporting in South Korea. *Forests*, 9(10), 625.
- Lee, ST, Chung, SH and Kim, CS (2022). Carbon stocks in tree biomass and soils of *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 111(3), 365-373.
- Mao, L, Song, Q, Li, X, Zsheng, H and Zhu, X-G (2024). Would reducing chlorophyll content result in a higher photosynthesis nitrogen use efficiency in crops?. *Food and Energy Security*, 13(4), e576.
- Mun, JH, Lee, IH, Shon, JY and Chung, NJ (2024). Plant early growth and chlorophyll fluorescence of seven varieties of Italian Ryegrass under various salt stress conditions. *Korean Journal of Crop Science*, 69(3), 181-197.
- Munns, R and Tester, M (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Naumann, JC and Young, DR (2007). Linking leaf chlorophyll fluorescence properties to physiological responses for detection of salt and drought stress in coastal plant species. *Physiologia Plantarum*, 131(3), 422-433.
- Parida, AK and Das, AB (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349.
- Park, JC and Nam, JV (2024). A Basic study for the discovery of carbon absorbers : Measurement of carbon dioxide respiration and correlation analysis of environmental factors in *Zoysia sinica* Hance community. *The Journal of Korean Island*. 36(2), 97-115.
- Qin, C, Ahanger, MA, Zhou, J, Ahmed, N, Wei, C, Yuan, S, Ashraf, M and Zhang, L (2020). Beneficial role of acetylcholine in chlorophyll metabolism and photosynthetic gas exchange in *Nicotiana benthamiana* seedlings under salinity stress. *Plant Biologist*, 22, 357-365.
- Rao, GG and RAO, GR (1981). Pigment composition and chlorophyllase activity in pigeon pea (*Cajanus indicus* Spreng) and Gingelly (*Sesamum indicum* L.) under NaCl salinity. *Indian Journal of Experimental Biology*, 19, 768-770.
- Ricart, AM, Krause-Jensen, D, Hancke, K, Price, NN, Masqué, P and Duarte, CM (2022). Sinking seaweed in

- the deep ocean for carbon neutrality is ahead of science and beyond the ethics. *Environmental Research Letters*, 17(8), 081003.
- Shiau, YJ, Burchell, MR, Krauss, KW, Broome, SW and Birgand, F (2019). Carbon storage potential in a recently created brackish marsh in eastern North Carolina, USA. *Ecologica Engineering*, 127, 579–588.
- Singh, AK and Dubey, RS (1995). Changes in chlorophyll a and b contents and activities of photosystems 1 and 2 in rice seedlings induced by NaCl. *Photosynthetica*, 31, 489–499.
- Society for ecological restoration international science and policy working group(SER). (2004). The SER international primer on ecological restoration. Available online at www.ser.org and Tuscon: Society for Ecological Restoration.
- The intergovernmental panel on climate change(IPCC) (2014). The Synthesis Report of the Fifth Assessment Report. Geneva, Switzerland.
- The intergovernmental panel on climate change(IPCC) (2018). Global warming of 1.5°C. SPECIAL REPORT. Geneva, Switzerland.
- The intergovernmental panel on climate change(IPCC) (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Geneva, Switzerland.
- Toam, F, Hou, M, Qiu, Y, Zhang, T and Yuan, Y (2020). Salinity stress effects on transpiration and plant growth under different salinity soil levels based on thermal infrared remote(TIR) technique. *Geoderma*, 357(1), 113961.
- Wellbrock, N, Grüneberg, E, Riedel, T and Polley, H (2017). Carbon stocks in tree biomass and soils of German forests. *Central European Forestry Journal*, 63(2–3), 105–112.
- Yim, YJ (1977). Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. II. Distribution of tree species along the thermals gradient. *Japanese Journal of Ecology*, 27, 177–189.
- You, YH, Park, JW, Kim, EJ, Park, JH Lee, JM, Kim, YS, Kim, SH, Cho, KM, Choi, YK, Jeon, BY, Lee, JS, Kim, GR (2022). Technology development of brackish wetland restoration and creation for the ecological value enhancement as carbon sequestration source, RS-2022-KE002309, Korea Environmental Industry and Technology Institute.
- You, YH, Park, JW, Kim, EJ, Park, YB, Park, JH, Lee, JM, Kim, YS, Lee, SP, Lee, SJ (2024). Technology development of brackish wetland restoration and creation for the ecological value enhancement as carbon sequestration source, RS-2022-KE002309, Korea Environmental Industry and Technology Institute.
- Yu, HR, You, YH, Park, JW and Park, YB (2024). Structural characterization and succession prediction of the Korean peninsulas major deciduous broadleaf forest, *Quercus mongolica* community. *Journal of Wetlands Research*, 26(4), 331–337.