

피음과 단수처리에 따른 개가시나무(*Quercus gilva*)와 종가시나무(*Q. glauca*)의 생리적 반응

이승준* · 박재훈* · 조경미* · 김의주* · 박지원* · 이정민** · 박여빈* · 서연옥** · 설아라** · 유영한**

*국립공주대학교

**국립산림과학원

Physiological Responses of *Quercus gilva* and *Q. glauca* to shade and drought treatments

Seung Jun Lee* · Jae Hoon Park* · Kyeong Mi Cho* · Eui Joo Kim* · Ji Won Park* · Jung Min Lee** · Yeo Bin Park* ·
Yeon Ok Seo** · Ara Seol** · Young Han You**

*Kongju National University

**National Institute of Forest Science

(Received : 23 January 2025, Revised : 18 February 2025, Accepted : 18 February 2025)

요약

이 연구는 우리나라에 자생하는 상록성 참나무 두 종 개가시나무(*Quercus gilva*)(멸종위기식물)와 종가시나무(*Q. glauca*)의 광과 수분에 대한 생리적 반응의 특성을 파악하고자 시도하였다. 이를 위해 광과 단수(토양 건조)를 처리하여 광합성률, 증산률과 수분이용효율을 측정하고 분석하였다. 그 결과 두 수종은 광량 감소에 따라 광합성률과 증산률이 뚜렷하게 감소하였으며, 그늘진 조건(광 2%)에서는 광합성이 일어나지 않아 두 종이 호광성 식물임을 확인할 수 있었다. 그러나 수분이용효율은 개가시나무에서는 광합성률이나 증산률의 변화 유형과는 같았으나, 종가시나무에서는 오히려 광이 높거나(100%), 중간(28%)에서 서로 같았다. 이는 광 100%에서 종가시나무의 증산률이 높았기 때문으로 나타난 것이다. 또한, 두 종은 토양수분이 줄어드는 건조한 환경을 가정한 단수조건에서 초기 12일째까지는 건조 스트레스에 대한 광합성률과 수분이용효율은 감소와 회복의 과정이 주기적으로 나타났으나, 그 이후에는 서로 다른 유형을 보여주었다. 두 종의 증산률은 토양 건조 초기에는 높게 나타났으나 12일(토양수분함량 13%) 이후부터는 감소 후 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 개가시나무와 종가시나무가 안정적으로 생육하기 위해서는 중간 정도 이상의 광량 조건(광 28%)과 13% 이상의 토양수분함량이 유지되도록 관리하는 것이 필요함을 뜻한다.

핵심어 : 상록성 참나무, 건조, 광합성, 증산, 수분이용효율

Abstract

This study aimed to investigate the physiological characteristics of two evergreen oak species (*Quercus gilva* and *Q. glauca*) native to Korea, in response to light and soil water availability. To achieve this, we conducted light and drought treatments and measured photosynthetic rate, transpiration rate, and water use efficiency (WUE). The results

*To whom correspondence should be addressed.

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

E-mail : youeco21@kongju.ac.kr

- Seung Jun Lee department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Graduate Student(A20240329@smail.kongju.ac.kr)
- Jae Hoon Park department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Ph.D.(jhoon5314@gmail.com)
- Kyeong Mi Cho Department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Graduate Student(whrudal77@smail.kongju.ac.kr)
- Eui Joo Kim department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Ph.D.(euijoo@kongju.ac.kr)
- Ji Won Park department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Ph.D.Candidate(ecopark@kongju.ac.kr)
- Jung Min Leeivable Urban Forests Resarch Center, National Institute of Forest Science, Korea/Researcher(jungmin9307@naver.com)
- Yeo Bin Park department of Biological Sciences, Kongju National University, Korea/Ph.D.Candidate(pyb1994@smail.kongju.ac.kr)
- Yeon Ok Seo forest Management Division, National Institute of Forest Science, Korea/Ph.D.(yoseo85@korea.kr)
- Ara Seol Warm temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Korea/Ph. D.(araseol@forest.go.kr)
- 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.

showed that both species exhibited a significant decline in photosynthetic rate and transpiration rate as light intensity decreased, and photosynthesis was absent under shaded conditions (2%light), confirming that both species are heliophytic plants. However, WUE followed a similar pattern to photosynthetic rate and transpiration rate in *Q. gilva*, whereas in *Q. glauca*, WUE remained similar under high (100%) and intermediate (28%) light conditions. This phenomenon is attributed to the high transpiration rate of *Q. glauca* under 100% light intensity. Additionally, under drought conditions simulating decreasing soil moisture, both species exhibited cyclical fluctuations in photosynthetic rate and WUE in response to drought stress during the initial 12 days. However, beyond this period, they displayed distinct response patterns. In contrast, transpiration rate was initially high under soil drying conditions but decreased after day 12 (when soil moisture content dropped to 13%), followed by a subsequent increase. These findings suggest that for *Q. gilva* and *Q. glauca* to maintain stable growth, a minimum of intermediate light intensity (28% light) and a soil moisture content of at least 13% must be maintained.

Key words : Evergreen oak, Drought, Photosynthesis, Transpiration, Water use efficiency (WUE)

1. 서론

꽃자왈은 제주 지역에서만 발견되는 독특한 숲 생태계로, 용암 암괴가 복잡하게 얽힌 지형 위에 형성된 수림지대이며 저지대에서는 대부분 우기에는 일시적인 습지를 이룬다. 식생·식물상의 관점에서 꽃자왈은 오름에서 발원하여 흐름을 가진 암괴상 용암류 위에 발달한 숲으로 정의되며(Kim, 2022), 아아(AA) 용암류, 파호이호이(Pahoehoe) 용암류, 전이형 용암류와 같은 다양한 용암류에서 형성된다. 아아 용암류는 암괴상의 클링커층(Clinker layer)에서, 파호이호이 용암류는 투물러스(Tumulus)와 같은 용암 표면이 깨져 있는 지형에서 꽃자왈을 주로 형성한다(Jeon et al., 2015). 아아 용암지대에서는 식물들이 클링커층 사이의 공극에 뿌리를 내리고, 파호이호이 용암지대에서는 용암 표면에 발달한 균열이나 갈라진 틈에 뿌리를 내리는 것으로 보고되었다(Kim, 2022). 꽃자왈은 용암지대의 균열을 통해 빗물이 직접 지하수층으로 스며드는 특징을 가지며, 제주도 전체 강수량의 46%가 꽃자왈을 통해 지하수로 유입되어 대한민국 내 최고 비율을 기록하고 있다(KOWACO, 2003; Jang, 2024). 또한, 꽃자왈 내의 습지는 제주 지역을 대표하는 습지 유형으로, 다양한 희귀식물들이 자생할 수 있는 최적의 생태적 환경을 제공하는 것으로 밝혀졌다(Jeong et al., 2013). 특히, 이 지역에 위치한 동백동산 숲은 2011년 람사르 습지(Ramsar Wetland)로 지정되었으며, 세계지질공원의 대표적인 지역 중 하나로 선정되었다(Lee et al., 2024).

이러한 꽃자왈은 제주도의 동부와 서부 지역에 분포하는 꽃자왈은 제주도 전체 면적의 6.1%(113.3km²)를 차지하며, 제주 내 6개 주요 지역에 걸쳐 형성되어 있다(Kim, 2021). 화산 활동으로 형성된 꽃자왈은 암석 유형과 용암 성분 비율의 차이에 따라 각 지역마다 고유한 특성을 가지며, 제주 지역 산림 생물자원의 46%가 분포할 정도로 생물종 다양성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Han, 2018; Kim, 2021). 특히, 꽃자왈은 개가시나무(*Quercus gilva*), 제주백서향(*Daphne jejuensis*), 약난초(*Cremastra appendiculata*), 제주고사리삼(*Mankyua chejuensis*) 등 희귀식물과 멸종위기종의 주요 서식지로, 이들의 보존이 꽃자왈 생태계 보전의 중요한 과제로 부각되고 있다(Lee, 2012; Kang et al., 2013; Jung, 2015).

개가시나무는 참나무과에 속하는 상록교목으로서 일본, 중국, 대만, 한국 등의 난대 상록활엽수림 지역에 분포하고 있다(Noshiro and Sasaki, 2011). 국내 개가시나무는 제주도 서남부 지역의 한계면과 안덕면 일대에 제한적으로 분포하며, 제주도가 북방한계선에 위치하는 내한성이 약한 수종으로 평가된다(Kim, 2006; Kim and You, 2012).

Momohara(1997)과 Sugiura et al.(2014)에 따르면 일본의 여러 지역에서도 서식지 파괴 등으로 인하여 집단 크기가 감소하였으며, 2004년 Kagawa지역 등에서도 멸종위기종으로 보고되기도 하였다. 또한, 자생지 내에서 개가시나무는 대부분 1960년대 이전까지의 벌목 이후 형성된 맹아의 생육으로 형성된 2차 맹아림이며, 그 개체수가 적고 발생하는 유묘의 수역시 매우 드물게 나타나, 현존하는 개체가 훼손될 경우 자연적인 수종갱신은 매우 어려울 것으로 판단되어, 보전 대책이 필요하다(Hyun et al., 2014).

제주도에 위치한 개가시나무의 자생지는 숲이 다소 발달한 곳으로, 하층식생은 수관층이 형성된 음지환경을 이룬다. 자생지 내 하층식생에는 개가시나무와 함께, 동일한 참나무속에 속하는 상록활엽수인 증가시나무(*Q. glauca*)의 후계목이 서식하고 있다. 본 연구는 꽃자왈 산림지에서 주로 나타나는 후계목인 개가시나무와 증가시나무 유식물을 대상으로, 광량과 수분 변화에 따른 광합성률, 증산률과 수분이용효율을 분석하여 두 수종의 기초 생리적 특성을 파악하고자 수행되었다.

2. 연구방법

2.1. 재배환경

개가시나무와 증가시나무의 유식물은 2021년 5월에 영산강 유역환경청의 허가를 받아 제주시 한계면 저지리 38-31, 제주시 한계면 청수리 산2 일원에서 각 대상지별로 채취되었다. 그리고 채취된 두 종의 유식물들은 각 개체별로 모래와 부엽토를 8:2의 비율로 혼합한 토양을 사용한 직경 21 cm, 높이 23 cm의 백색 플라스틱 포트에 식재되었고, 2021년 5월부터 10월까지 공주시 신관동에 위치한 공주대학교 교내 야외환경에서 재배되었다. 혼합 토양의 무게는 2 kg으로 조성되었으며, 유기물 함량은 12%로 처리하였다. 이때, 토양을 채운 화분에

서 물이 화분 밑으로 흘러나오기 직전까지 보유할 수 있는 최대 수분량을 의미하는 포장용수량(carrying water capacity)은 700 ml였다. 실험에서 식물에 공급된 물은 수돗물을 받아서 안정화한 후 사용하였다. 연구기간 동안 공주대학교의 평균 기온은 $21.15 \pm 5.37^\circ\text{C}$ 였고, 총 강수량은 840 mm였다(기상청, 2015).

2.2. 광처리

광 처리 실험은 야외 환경의 자연광을 대조구($273.9 \pm 12.5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)로 설정하고, 차광막의 두께를 조절하여 대조구 대비 광량을 28%($76.5 \pm 19.9 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$), 2%($5.5 \pm 0.6 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)로 처리하였다. 광 조건을 세 가지로 구분한 것은 하층식생이 처할 수 있는 양치 환경, 최적 성장 환경, 그리고 음지 환경의 조건을 반영하기 위함이다. 수분공급은 360 ml씩 3~4일 간격으로, 여름철에는 2~3일 간격으로 공급하였다. 광합성 측정 시의 토양수분함량은 15% 내외이었고, 광량은 광량 측정기(Light Meter, LI-205A, LI-COR, USA)로 측정하였다.

2.3. 단수처리

단수처리 실험은 8월부터 9월까지 한 달간 진행되었으며, 포장용수량(700 mL)을 공급한 후, 그 다음날부터 27일간 단수 처리하였다. 단수처리 이후에는 토양 수분함량에 따른 광합성 반응을 측정하였다.

단수처리 실험장은 온실의 외벽에 배치하고 폴리염화비닐(PVC) 설치하여 장마철 외부로부터 유입되는 수분을 차단하였다. 단수 기간 수분함량의 변화는 표층으로부터 뿌리에 최대한 가깝게 수직 방향으로 토양 센서를 설치하여, 토양수분함량 측정기(3685WD1, Watch Dog 1400 Micro Station, Spectrum Technologies, Incorporation, UK)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였다.

2.4. 광합성 반응 측정

환경구배(광, 수분)에 따라 식재된 개가시나무와 종가시나무의 생리적 반응을 측정하였다. 개가시나무와 종가시나무의 광합성 반응 측정은 일사량이 광포화점보다 높은 오전 10시부터 12시 사이에 광합성 측정기(Lci, Ultra Compact Photosynthesis System, ADC, UK)를 이용하여 광합성률($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$), 증산률($\text{mmol}^{-2}\text{s}^{-1}$), 수분이용효율($\mu\text{molCO}_2/\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$)을 측정하였다(Park, 2020).

2.5. 통계분석

개가시나무와 종가시나무의 환경구배 처리에 따른 생육 및 생리적 반응의 차이를 알아보기 위해, Kolmogorov-Smirnov test를 이용하여 정규분포 여부를 확인하였다. 이때, 정규분포를 따르지 않아 비모수 통계분석을 실시하여 각 구배별 차이를 확인하였다. 이때 2개 집단일 경우 Mann-Whitney U test를 사용하였고, 3개 집단 이상일 경우 Kruskal-Wallis H test를 사용하여 각 구배별 차이를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 광처리에 따른 개가시나무와 종가시나무의 광합성률

광합성률은 개가시나무와 종가시나무에서 광량 감소에 따라 뚜렷하게 감소하였으며, 광량이 낮은 곳(2%)에서는 광합성이 일어나지 않았다(Fig. 1A). 이는 두 종이 호광성 식물임을 뜻한다. 광 100%에서 광합성률($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 평균 \pm 표준편차)은 개가시나무(25.19 ± 3.65)가 종가시나무 (19.8 ± 5.3)보다 약 1.3배 높았으며($p \leq 0.05$), 광 28%에서 광합성률은 개가시나무(13.4 ± 6.9)가 종가시나무(9.2 ± 4.7)보다 약 1.5배 높았다($p \leq 0.05$). 개가시나무의 광합성률은 광 100%에서가 광 28% (13.4 ± 6.9)에서의 것보다 약 1.9배 높았으며($p \leq 0.05$), 28% (13.4 ± 6.9)에서가 광 2% (-0.8 ± 0.5)에서의 것보다 높은 값을 나타냈다($p \leq 0.05$). 종가시나무의 광합성률은 광 100%(19.8 ± 5.3)에서가 광 28%(9.2 ± 4.7)에서보다 약 2.15배 높았으며($p \leq 0.05$), 28%(9.2 ± 4.7)에서가 광 2% (-1.2 ± 0.6)에서의 것보다 높은 값을 나타냈다($p \leq 0.05$). 이처럼 광합성률이 개가시나무가 높는데 멸종위기종이 된 것은 환경의 광과 같은 요인이라기보다는 다른 요인이 관여함을 뜻한다.

모든 광도에서 개가시나무의 광합성률이 종가시나무보다 높았다($p \leq 0.05$). 이는 개가시나무가 상대적으로 높은 광합성 산물을 생산하여 더 높은 생산력을 가질 가능성을 시사한다.

자생지에서의 광량은 최대 $119.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 평균 $22.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 보고되었다(You et al, 2021). 높은 광($273.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) 조건에서 두 종은 광 스트레스를 겪었을 가능성이 높았다. 반면, 저광($5.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) 조건은 광보상점 이하로, 장기적으로 유지 호흡만 증가하여 생육이 제한될 가능성이 높았다. 중간 광($76.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) 조건은 자연 서식지 내에서 변동 가능한 범위에 속하며, 비교적 안정적인 생리적 반응을 보일 수 있는 환경으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로, 개가시나무 서식지를 효과적으로 관리하기 위해서는 하층부 유식물이 충분한 빛을 받을 수 있도록 임상 광량을 적절히 조절하는 것이 중요함을 알 수 있다.

3.2. 광처리에 따른 개가시나무와 종가시나무의 증산률

증산률은 개가시나무와 종가시나무에서 광량 감소에 따라 뚜렷하게 감소하였다(Fig. 1B). 증산률은 전광(100%) 및 낮은 광량(2%)에서 개가시나무가 종가시나무보다 낮았으나($p \leq 0.05$), 중간 정도의 광량(28%)에서는 개가시나무가 종가시나무보다 높았다($p \leq 0.05$). 광 100%에서 증산률($\text{mmol}^{-2}\text{s}^{-1}$, 평균 \pm 표준편차)은 개가시나무(4.12 ± 0.3)가 종가시나무 (5.99 ± 0.38)보다 약 31% 낮았으며($p \leq 0.05$), 광 28%에서 증산률은 개가시나무(2.85 ± 0.65)가 종가시나무(2.58 ± 0.55)보다 약 1.1배 높았다($p \leq 0.05$). 그리고 광 2%에서 증산률은 개가시나무(1.19 ± 0.49)가 종가시나무(1.79 ± 0.31)보다 약 34% 낮았다($p \leq 0.05$). 개가시나무의 증산률은 광 100%(4.12 ± 0.3)에서가 광 28%(2.85 ± 0.65)에서의 것보다 약 1.4배 높은 값을 나타냈으며($p \leq 0.05$), 광 28%(2.85

± 0.65)에서는 광 2%(1.19 ± 0.49)에서의 것보다 약 2.4배 높았다. 증가시나무의 증산률은 광 100%(5.99 ± 0.38)에서 광 28%(2.58 ± 0.55)에서의 것보다 약 2.3배 높은 값을 나타냈으며($p \leq 0.05$), 광 28%(2.58 ± 0.55)에서는 광 2%(1.79 ± 0.31)에서의 것보다 약 1.4배 높은 값을 나타냈다.

이러한 결과는 두 종의 광량이 낮아짐에 따라 증산을 통해 소비되는 수분의 양도 감소한다는 것을 시사한다. 즉, 저광(2%) 환경에서는 증산활동이 제한되면서 수분 손실이 줄어드는 생리적 반응이 나타날 수 있다.

중간 정도의 광에서 증산률은 광합성률과 유사한 변화유형을 보였지만, 전광(100%) 및 낮은 광량(2%)에서는 다른 변화유형을 보였다. 개가시나무의 잎 뒷면 밀생한 황갈색 털은 증산률과 관련이 있을 것으로 예상된다. 잎 뒷면의 털은 잎의 경계층 저항을 증가시켜 수분 손실을 줄이고 증산률을 낮추는 역할을 한다(Kim and Kim 1994).

3.3. 광처리에 따른 개가시나무와 증가시나무의 수분이용효율

개가시나무의 수분이용효율은 광합성률이나 증산률의 변화 유형과 유사했지만, 증가시나무에서는 전광(100%)과 중간 정도의 광량(28%)에서 유사하게 나타났다(Fig. 1C). 이러한 결과는 전광에서 증가시나무의 증산률이 높기 때문에 나타난 결과이다. 수분이용효율은 전광 및 중간 정도의 광량에서 개가시나무가 높았지만($p \leq 0.05$), 낮은 광량(2%)에서는 두 수종 간 유의미한 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$). 광 100%에서 수분이용효율($\mu\text{molCO}_2\text{mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$, 평균 \pm 표준편차)은 개가시나무(6.14 ± 1.0)가 증가시나무(3.39 ± 1.19)보다 약 1.8배 높았으며($p \leq 0.05$), 광 28%에서 수분이용효율은 개가시나무(4.75 ± 2.52)가 증가시나무(3.46 ± 1.67)보다 약 1.4배 높았다($p \leq 0.05$). 반면, 광 2%에서 수분이용효율은 개가시나무(-0.72 ± 0.55)가 증가시나무(-0.69 ± 0.33)보다 약 4.3% 낮은 값을 나타냈으나 통계적 차이는 없었다($p > 0.05$). 개가시나무의 수분이용효율은 광 100%(6.14 ± 1.0)에서가

광 28%(4.75 ± 2.52)에서의 것보다 약 1.3배 높았으며($p \leq 0.05$), 광 28%(4.75 ± 2.52)에서는 광 2%(-0.72 ± 0.55)에서의 것보다 높은 값을 나타냈다($p \leq 0.05$). 증가시나무의 수분이용효율은 광 100%(3.39 ± 1.19)에서 광 28%(3.46 ± 1.67)에서의 것보다 약 2% 낮았으나 통계적 차이는 없었다($p > 0.05$). 광 28%(3.46 ± 1.67)에서는 광 2%(-0.69 ± 0.33)에서의 것보다 높은 값을 나타냈다($p \leq 0.05$).

이러한 결과는 광이 높으면 수분을 많이 이용하는 종이 증가시나무라는 것을 의미한다. 즉, 광량이 높은 환경에서 수분 공급이 원활하지 않을 경우, 증가시나무의 생육이 제한될 가능성이 높음을 의미한다. 또한, 전광(100%)과 중간 수준의 광량(28%)에서 개가시나무의 수분이용효율이 증가시나무보다 높은 값을 나타냈으며(Fig. 1C), 이는 개가시나무가 상대적으로 높은 광량 환경에서 보다 효율적으로 물을 이용할 수 있음을 의미한다. 낮은 광량(2%)에서는 두 수종의 수분이용효율은 유의한 차이를 보이지 않았으며($p > 0.05$), 다른 광량 조건보다 수분이용효율이 낮게 측정되었다(Fig. 1C). 이는 저광 환경에서 광합성률과 증산률이 동반 감소하면서 생리적 한계에 도달했음을 시사한다. 즉, 광 2% 환경은 개가시나무와 증가시나무에게 최적의 서식지가 아니며, 지속적인 생육이 어려울 가능성이 높다.

3.4. 단수처리에 따른 개가시나무와 증가시나무의 광합성률

개가시나무와 증가시나무의 광합성률은 12일을 기준으로 두 가지 유형의 변화를 보였다(Fig. 2A). 이때 토양수분함량은 13%였다. 개가시나무와 증가시나무의 광합성률은 토양수분함량이 13% 이상인 환경에서는 감소와 증가를 반복하며 변동성을 나타냈다(Fig. 2A). 그러나 토양수분함량이 13% 이하로 감소한 환경에서는 변화 폭이 줄어들며, 개가시나무와 증가시나무의 광합성률이 비교적 일정한 경향을 보였다(Fig. 2A). 개가시나무의 광합성률은 1일째(6.69 ± 3.52)에서 3일째(5.59 ± 1.81)로 약 16.0% 감소했다($p \leq 0.05$). 이후 3일째에서 4일째

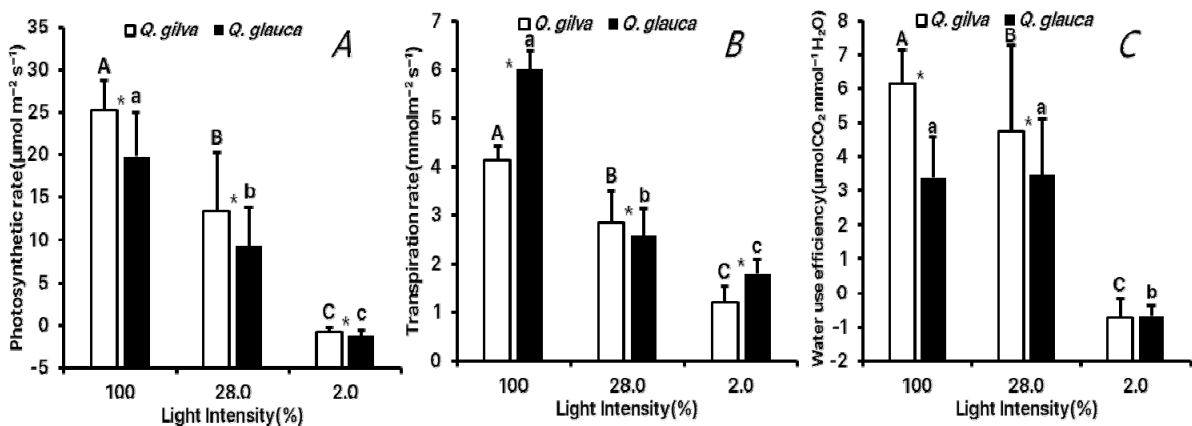


Fig. 1. Photosynthetic rate(A), Transpiration rate(B) and Water use efficiency(C) of *Q. gilva* and *Q. glauca* under different light intensities. Capital letters on the bars indicate significant differences among light intensity treatments for *Q. gilva* ($p \leq 0.05$). Lowercase letters on the bars indicate significant differences among light intensity treatments for *Q. glauca* ($p \leq 0.05$). Asterisks (*) indicate statistically significant differences between two species at different light intensity treatments ($p \leq 0.05$).

(14.91 ± 2.59)로 약 2.7배 증가했으며($p \leq 0.05$), 4일째에서 5일째(4.50 ± 4.57)로 다시 약 69.8% 감소했다($p \leq 0.05$). 5일째에서 9일째(16.14 ± 1.94)로는 약 3.6배 증가했고($p \leq 0.05$), 9일째에서 11일째(8.38 ± 1.84)로는 약 48.1% 감소했다($p \leq 0.05$). 11일째에서 12일째(19.68 ± 5.72)로는 약 2.4배 증가했으나($p \leq 0.05$), 12일째에서 13일째(2.22 ± 1.23)로는 약 88.7% 감소했다($p \leq 0.05$). 증가시나무의 광합성률은 1일째(7.20 ± 3.44)에서 3일째(3.41 ± 1.32)로 약 52.6% 감소했으나, 통계적으로 유의미한 차이는 없었다($p > 0.05$). 이후 3일째에서 4일째(8.40 ± 3.50)로 약 2.5배 증가했으며($p \leq 0.05$), 4일째에서 5일째(3.59 ± 1.58)로 다시 약 57.3% 감소했다($p \leq 0.05$). 5일째에서 9일째(11.50 ± 2.01)로는 약 3.2배 증가했고($p \leq 0.05$), 9일째에서 11일째(4.97 ± 1.85)로는 약 56.8% 감소했다($p \leq 0.05$). 11일째에서 12일째(12.58 ± 3.11)로는 약 2.5배 증가했으나($p \leq 0.05$), 12일째에서 13일째(2.24 ± 0.89)로는 약 82.2% 감소했다($p \leq 0.05$).

이는 건조 처리 후, 토양수분함량이 13% 이상 유지된 12일까지는 잔존 수분의 영향으로 일시적인 회복 반응(transient recovery response)이 나타났으나, 12일 이후 토양수분함량이 13% 이하로 감소하면서 건조 강도가 증가함에 따라 식물이 건조 스트레스에 대한 생리적 순응(physiological acclimation)을 나타냈음을 시사한다(Lee, 2018). 이는 광합성 저하가 기공 개폐 조절뿐만 아니라 엽록소 함량 감소, 광계 II(PSII) 손상, 세포막 안정성 감소, 엽시스산 감소 등 다양한 생리적 요인에 의해 영향을 받았을 가능성을 시사하며(Pandey & Shukla, 2015), 장기적인 건조 스트레스가 지속될 경우 두 종은 생육에 심각한 제한을 받을 수 있음을 보여준다. 즉, 개가시나무와 증가시나무의 안정적인 생육을 위해서는 토양수분함량이 13% 이상 유지되어야 하며, 이 조건에서 개가시나무가 증가시나무보다 생육에 있어 우위를 가질 가능성이 높다.

3일, 4일, 9일, 11일, 12일에는 개가시나무의 광합성률이 증가시나무보다 높았다($p \leq 0.05$). 이는 개가시나무가 건조 스트레스 환경에서도 상대적으로 높은 광합성 활성을 유지할 수 있음을 시사한다. 특히, 4일째와 12일째에는 개가시나무의 광합성률이 증가시나무보다 각각 1.8배, 1.6배 높게 나타났으며($p \leq 0.05$), 이는 개가시나무가 스트레스 조건에서도 증가시나무보다 광합성을 수행할 수 있는 생리적 조절 능력이 높을 수 있음을 의미한다. 반면, 12일 이후에는 두 수종 간 광합성률에서 유의미한 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$). 이는 건조 스트레스가 일정 수준에 도달하면 두 수종이 유사하게 낮은 수준의 광합성을 유지함을 시사한다.

3.5. 단수처리에 따른 개가시나무와 증가시나무의 증산률

개가시나무와 증가시나무의 증산률은 1일부터 3일까지 일정한 수준을 유지했으며, 4일부터 5일까지는 낮은 수준으로 감소하였다(Fig. 2B). 이 기간 동안 토양수분함량은 14% 이상을 유지하였다(Fig. 2B). 이후 9일째에 두 수종의 증산률은 증가하였으며, 이 시점에서 토양수분함량은 14% 이하로 감소하였다. 9일부터 13일까지는 두 수종 간 증산률에서 뚜렷한 차이

가 나타났다(Fig. 2B). 개가시나무는 증산률이 감소와 증가를 반복하며 변동성을 보인 반면, 증가시나무는 9일부터 12일까지 일정한 수준을 유지하다가 13일째 감소하였다(Fig. 2B). 또한, 13일 이후에는 토양수분함량이 13% 이하로 더욱 감소하였다(Fig. 2B). 특히, 13일째에는 두 수종의 증산률이 가장 낮게 나타났으며(Fig. 2B), 이후 건조가 지속됨에 따라 두 수종의 증산률이 다시 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2B). 개가시나무의 증산률은 9일째(3.57 ± 0.15)에서 11일째(1.96 ± 0.21)로 약 45.1% 감소했다($p \leq 0.05$). 이후 11일째에서 12일째(2.53 ± 0.30)로 약 1.3배 증가했으나, 통계적 유의미한 차이는 없었다($p > 0.05$). 12일째에서 13일째(0.54 ± 0.15)로 약 78.7% 감소했다($p \leq 0.05$). 특히, 13일째에서 27일째(1.57 ± 0.75)로 약 2.9배 증가했다($p \leq 0.05$). 증가시나무의 증산률은 9일째에서 12일째까지 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지 않았으나, 12일째(2.54 ± 0.24)에서 13일째(0.54 ± 0.04)로 약 78.7%로 감소했다($p \leq 0.05$). 특히, 13일째에서 27일째로는 약 2.7배 증가했다. 이러한 결과는 개가시나무와 증가시나무가 건조 스트레스에 대해 일관된 수분 조절 전략을 유지하는 것이 아니라, 환경 조건에 따라 유연하게 증산을 조절하는 생리적 반응을 보인다는 것을 의미한다. 또한, 토양수분함량이 13% 이하로 감소한 환경에서 건조 강도가 강해질수록 두 수종의 증산률이 증가한 것은(Fig. 2B), 잎의 수분 포텐셜을 조절하여 수분 흡수를 유도하려는 전략(Kim and Kim, 1994)과 건조 스트레스에 의한 잎 온도 상승을 억제하기 위해 엽시스산(ABA) 축적이 감소하면서 증산 냉각 작용(Evaporative Cooling)이 동시에 작용한 결과로 예상된다(Zandalinas et al., 2016).

3일과 9일에는 개가시나무의 증산률이 증가시나무보다 높았으며($p \leq 0.05$), 4일, 5일, 11일, 14일에는 개가시나무의 증산률이 증가시나무보다 낮았다($p \leq 0.05$). 그 외의 날에는 두 수종 간 증산률에서 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$). 3일째 증산률($\text{mmol}^{-2}\text{s}^{-1}$, 평균 ± 표준편차)은 개가시나무(2.48 ± 0.60)가 증가시나무(2.21 ± 0.66)보다 약 1.1배 높았고($p \leq 0.05$), 9일째 증산률은 개가시나무(3.57 ± 0.15)가 증가시나무(2.99 ± 0.35)보다 약 1.2배 높았다($p \leq 0.05$). 4일째 증산률은 개가시나무(0.99 ± 0.16)가 증가시나무(1.31 ± 0.21)보다 약 24.4% 낮았다($p \leq 0.05$). 5일째 증산률은 개가시나무(1.73 ± 0.46)가 증가시나무(1.88 ± 0.16)보다 약 8.0% 낮았으며($p \leq 0.05$), 11일째 증산률은 개가시나무(1.96 ± 0.21)가 증가시나무(2.61 ± 0.49)보다 약 24.9% 낮았다($p \leq 0.05$). 14일째 증산률은 개가시나무(0.67 ± 0.15)가 증가시나무(0.81 ± 0.08)보다 약 17.3% 낮았다($p \leq 0.05$). 이는 개가시나무와 증가시나무가 건조 스트레스에 대해 일관된 증산 전략을 유지하는 것이 아니라, 환경 조건에 따라 유연하게 증산 전략을 조절한다는 것을 시사한다. 즉, 두 종은 특정 조건에서는 수분 손실을 감수하며 광합성을 유지하는 전략을 선택하는 반면, 다른 조건에서는 수분 보존을 우선하여 증산률을 낮추는 전략을 활용하는 것으로 보인다.

3.6. 단수처리에 따른 개가시나무와 증가시나무의 수분이용 효율

수분이용효율은 광합성률과 유사한 변화유형을 보였으나, 종 간 뚜렷한 차이가 있었다(Fig. 2C). 개가시나무의 수분이용효율은 통계적으로 유의미하게 높았던 4일($p \leq 0.05$)과 12일($p \leq 0.05$), 그리고 통계적으로 가장 낮았던 27일($p \leq 0.05$)을 제외하면 일정한 수준을 나타냈다(Fig. 2C). 증가시나무의 수분이용효율은 토양수분함량이 13%였던 12일 이후를 기준으로 두 가지 유형을 보였다(Fig. 2C). 12일까지 증가시나무의 수분이용효율은 감소와 증가를 반복하는 유형을 나타냈다(Fig. 2C). 이때 토양수분함량은 13% 이상이었다(Fig. 2C). 반면, 12일 이후에는 일정한 수준을 유지하다가 27일에는 감소하였다(Fig. 2C). 이는 개가시나무가 증가시나무보다 건조 강도에 따른 수분이용효율의 변동성이 낮음을 의미한다. 즉, 개가시나무가 증가시나무보다 일정한 수분이용효율을 유지하며, 건조 환경에서 상대적으로 일정한 수분 이용 전략을 활용했음을 뜻한다.

14일부터 25일까지 토양수분함량은 5 ~ 13%를 유지했지만(Fig. 2C), 27일 토양수분함량은 5% 미만이었다(Fig. 2C). 13일부터 25일까지 두 수종의 수분이용효율이 일정한 수준을 유지했다는 점은, 건조 환경에 대한 생리적 조절이 이루어졌음을 뜻한다. 그러나 27일째에는 두 종의 수분이용효율이 일정한 수준을 유지하지 못하고 감소하였다. 또한, 자생지에서의 평균 토양 수분 함량은 $22.6 \pm 1.6\%$ 로 확인되었다(You et al, 2021). 토양 수분 함량이 13% 이하로 낮아질 경우, 두 종 모두 건조 스트레스에 직면할 가능성이 크며, 이는 생육에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

3일, 4일, 9일, 11일, 12일에는 개가시나무의 수분이용효율이 증가시나무보다 높았다($p \leq 0.05$). 3일째 수분이용효율($\mu\text{molCO}_2\text{mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$, 평균 \pm 표준편차)은 개가시나무(2.27 ± 0.54)가 증가시나무(1.53 ± 0.42)보다 약 1.5배 높았으며

($p \leq 0.05$), 건조 처리 후 4일째에서의 것은 개가시나무(14.94 ± 2.91)가 증가시나무(6.44 ± 2.49)보다 약 2.3배 높았다($p \leq 0.05$). 9일째 개가시나무(3.57 ± 0.15)가 증가시나무(2.99 ± 0.35)보다 약 1.2배 높았고($p \leq 0.05$), 11일째 개가시나무(4.28 ± 0.85)가 증가시나무(2.09 ± 1.21)보다 약 2.1배 높았다($p \leq 0.05$). 12일째 개가시나무(7.72 ± 1.72)가 증가시나무(4.99 ± 1.24)보다 약 1.5배 높았다($p \leq 0.05$). 반면, 1일째 개가시나무(2.96 ± 0.96)의 수분이용효율은 증가시나무(3.91 ± 1.12)보다 약 24.3% 낮았다.

13일부터 25일까지는 두 종 간의 수분이용효율 차이가 통계적으로 유의미하지 않았다($p > 0.05$). 그러나, 두 종의 수분이용효율이 가장 낮았던 27일에는 개가시나무가 증가시나무보다 약 1.4배 높은 수분이용효율을 보였다($p \leq 0.05$). 이러한 결과는 개가시나무가 증가시나무보다 상대적으로 건조 환경에 대한 내성이 높을 가능성이 있음을 의미한다.

9일째에는 두 수종의 광합성률이 높은 수준을 유지했음에도 수분이용효율은 낮은 수준을 유지했다(Fig. 2A, Fig. 2C). 이는 기공 개방에 의해 증산률이 증가했기 때문으로, 식물이 초기에는 기공을 닫아 수분 손실을 억제하지만, 시간이 지나면서 광합성을 유지하기 위해 기공을 다시 열어 증산이 증가할 수 있음을 시사한다.

4. 결론

이 연구는 한국에 자생하는 상록성 참나무 두 종(개가시나무, 증가시나무)의 광과 수분에 대한 생리적 특성을 파악하고자 시도하였다. 이를 위해, 광을 3 구배로 처리하고, 단수(건조)를 처리하여 광합성률, 증산률과 수분이용효율을 측정하고 분석하였다. 그 결과 두 수종은 광량 감소에 따라 광합성률과 증산률이 뚜렷하게 감소하였으며, 그늘진 조건(광 2%)에서는 광합성이 일어나지 않고 암호흡이 나타났다. 따라서 개가시나무와 증가시나무는 비내음성종임을 확인하였다. 그러나 수분

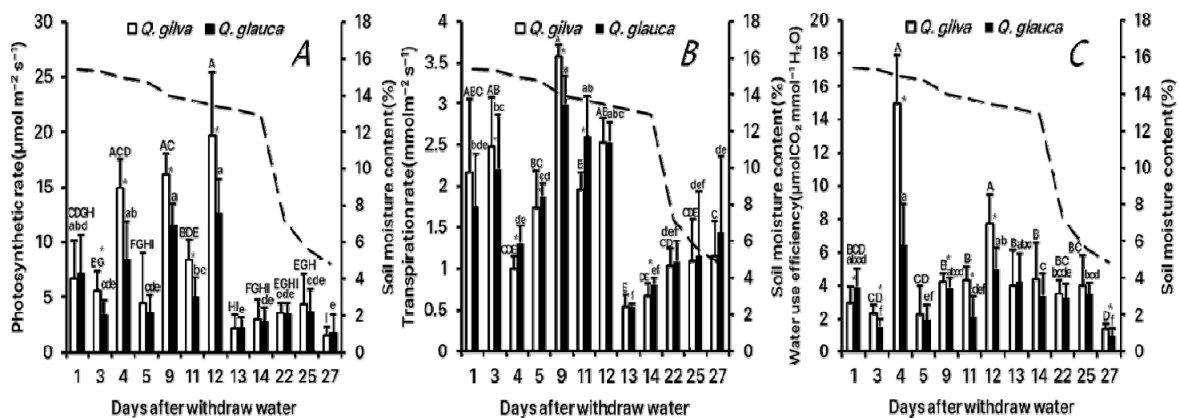


Fig. 2. Photosynthetic rate(A), Transpiration rate(B) and Water use efficiency(C) of *Q. gilva* and *Q. glauca* under different light intensities. Dashed line represents soil moisture content. Capital letters on the bars indicate significant differences among light intensity treatments for *Q. gilva* ($p \leq 0.05$). Lowercase letters on the bars indicate significant differences among light intensity treatments for *Q. glauca* ($p \leq 0.05$). Asterisks (*) indicate statistically significant differences between two species at different light intensity treatments ($p \leq 0.05$).

이용효율의 변화 유형은 두 종에서 차이를 보였다. 개가시나무에서는 광합성률과 증산률의 변화유형과 유사한 경향을 나타낸 반면, 종가시나무에서는 높은 광량(100%)과 중간 광량(28%)에서 수분이용효율이 유사하였다. 이는 종가시나무는 높은 광에서 수분효율이 낮다는 것을 의미한다.

두 종은 토양수분이 줄어드는 건조한 환경을 모의한 단수 조건에서 토양수분함량이 13% 이상인 조건에서 건조 스트레스에 대한 광합성률과 수분이용효율은 감소와 회복의 과정이 주기적으로 나타났으나, 그 이후에는 서로 다른 유형을 보여주었다. 두 종의 증산률은 토양 건조 초기에는 높게 나타났으나 12일(토양수분함량 13%) 이후부터는 감소 후 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 개가시나무와 종가시나무가 우점하는 제주도 꽃자왈 산림지를 안정적으로 관리하기 위해서는 그 종의 후계목들이 서식하는 하층의 광량 조건(28% 이상)과 토양수분함량(13% 이상)이 되도록 유지 관리하여야 함을 의미하는 것이다. 특히 두 종이 서식하는 생육지의 현지 토양 수분함량은 생리적인 저해가 나타나지 않을 정도이나 광량은 매우 낮아 수목 상층부를 적절히 제거하여 임상에 유입되는 광량을 높이는 것이 필요하다고 판단된다.

References

- Chung, M. Y., López-Pujol, J., Moon, M. O., Maki, M., Yukawa, T., Sugiura, N., & Chung, M. G. (2013). Population history of the terrestrial orchid *Cremastra appendiculata* var. *variabilis* from Korea, inferred from levels and distribution of genetic diversity. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 173(4), 721–732.
- Han, Y. S., Lee, E. P., Park, J. H., Lee, S. Y., Lee, S. I., & You, Y. H. (2018). Organic carbon distribution and cycling in the *Quercus glauca* forest at Gotjawal wetland, Jeju Island, Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 42(2), 60–69.
- Hyun, H. J., Song, G. M., Choi, H. S., & Kim, C. S. (2014). Distribution and dynamics of *Quercus gilva* population in Korea. *Journal of Korean Environment & Ecology*, 28(4), 385–392.
- Jang, Y., & Lee, C. (2009). The value of Gotjawal forest in Jeju Island as an internationally important wetland. *Korean Journal of Wetlands*, 11(1), 99–104.
- Kim, C. G., Jang, C. S., Lee, H. C., Oh, H. Y., Ryu, S. M., Kang, S. S., Hyun, W. H., Song, G. P., Kang, C. H., Park, J. B., Ko, C. S., Jeon, G. H., & Ko, O. S. (2022). Survey on the Current Status of the Gotjawal Area in Jeju and Establishment of Conservation and Management Plans. 79–6500000–000853–01. pp. 9, 89
- Jeju Special Self-Governing Province. (2009). *Jeju dialect dictionary.*, pp. 730
- Jeon, Y.M., Kim, D.S., Ki, J.S., & Ko, J.G. (2015). Proposal and significance of a geological classification system for the Gotjawal area in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(2), 235–241.
- Jeong, K. J. (2012). Recognition and utilization of Jeju's forests and Gotjawal. *Korean Journal of Photogeography*, 22(2), 11–28.
- Jeong, K. J. (2015). The lava forests of Jeju, Gotjawal. *Railway Journal*, 18(3), 24–28.
- Jeong, K. J., Kang, S. G., Choi, H. S., & Kim, C. S. (2013). A study on charcoal production activities at Seonheul Gotjawal in Jeju Island. *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 23, 37–55.
- Kang, H. G., Kim, C. S., & Kim, E. S. (2013). Human influence, regeneration, and conservation of the Gotjawal forests in Jeju Island, Korea. *Journal of Marine and Island Cultures*, 2(2), 85–92.
- Kim, C. S. (2006). Distribution and vegetation of endangered wild plants in Jeju Island. Ph. D. dissertation, Jeju National University.
- Kim, C. S., Seo, Y. O., & Choi, H. S. (2021). Taxonomic notes on several plant species growing in the Gotjawal lava forest of Jeju Island. *Jeju Island Research*, 55, 301–309.
- Kim, E. J., Jung, Y. H., Park, J. H., Lee, E. P., Na, C. S., Park, C. Y., ... & You, Y. H. (2022). Effect of experimental climate change and soil moisture content on germination and early growth response of *Quercus dentata* seedlings. *Forest Science and Technology*, 18(4), 213–223.
- Kim, H. H., Park, E. J., Hyun, H. J., Seo, Y. O., & Park, J. H. (2020). Comparison of vegetation structure in the Gotjawal area of Jeju Island. *Journal of Agricultural and Life Science*, 54(4), 43–50.
- Kim, H. R., & You, Y. H. (2012). Ecophysiological responses of *Quercus gilva*, endangered species, and *Q. glauca* to long-term exposure to elevated CO₂ concentration and temperature. *Journal of Ecology and Environment*, 35(3), 203–212.
- Kim, J.W., & Kim, J.H. (1994). Regulation of stomatal resistance and differentiation of strategies in response to drought stress in seedlings of *Quercus* species. *Journal of Ecology and Environment*, 17(3), 241–249.
- Kitamura, S., Murata, G., & Koyama, T. (1986). *Colored illustrations of herbaceous plants of Japan*. Osaka: Hoikusha Publishing Co.
- Korea Meteorological Administration (2021). Republic of Korea, accessed 22 January 2025, <www.weather.go.kr>
- Korea Water Resources Corporation (KOWACO), 2003, Comprehensive Research Report on the Hydrology and Groundwater of Jeju Island.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology* (4th ed.).

- Springer., pp. 488.
- Lee, J. S., Hwang, B., & Kim, Y. J. (1990). Study on the propagation of *Cremastra appendiculata* through anther culture and tissue culture, and the induction of hybrid plants. *Korean Journal of Biotechnology*, 5(1), 43–47.
- Lee, J. S., You, Y. H., Park, J. W., Park, Y. B., Kim, Y. S., Lee, J. M., ... & Kim, E. J. (2024). Comparison of plant species diversity and its relationship with physical environmental factors in Gotjawal Forest, Jeju Island, Republic of Korea, using the modified Whittaker plot method. *Journal of Ecology and Environment*, 48.
- Lee, K. M., Shin, J. H., Jeong, H. M., Kim, H. R., Kim, J. H., & You, Y. H. (2012). Study on the habitat and vegetation structure of the endangered plant *Mankyua chejuensis* in Jeju Island. *Journal of Korean Wetland Society*, 14(1), 35–45.
- Lee, K.C. (2018). Changes in photosynthesis and water-related factors in *Dendropanax trifidus* seedlings under drought stress. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*, 26(2), 181–187.
- Lee, W. B. (2007). *Gastrodia* R. Br. In flora of Korea editorial committee, the genera of vascular plants of Korea (p. 1351). Academy Publishing Co.
- Momohara, A. (1997). *Quercus gilva* forest in the middle part of Boso Peninsula in the latest Yayoi–earliest Kofun period. *Tech Bull Fac Hort China University*, 51, 127–136.
- National Institute of Biological Resources. (2012). *Red Data Book of Endangered Wildlife in Korea: Vascular Plants. Nature and Ecology*, Incheon.
- Noshiro, S., & Sasaki, Y. (2011). Identification of Japanese species of evergreen *Quercus* and *Lithocarpus* (Fagaceae). *IAWA Journal*, 32(3), 383–393.
- Pandey, V., & Shukla, A. (2015). Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress. *Rice science*, 22(4), 147–161.
- Park, J. H. (2020). Vegetation succession and soil factors in the alluvial areas of major river basins, and the cultivation and growth of the endangered plant *Epilobium hirsutum* in a closed smart farm. Ph. D. dissertation, Kongju National University.
- Park, J. H., Kim, S. B., Lee, E. P., Lee, S. Y., Kim, E. J., Lee, J. M., Cho, K. T., Jeong, H. M., Choi, S. S., Park, H. K., & You, Y. H. (2021). Study on the photosynthetic characteristics of *Eutrema japonica* (Siebold) Koidz. under the pulsed LEDs for simulated sunflecks. *Journal of Ecology and Environment*, 45, 1–8.
- Park, S. G. (2011). Analysis of the utilization of evergreen broad-leaved trees as landscape trees in Kyushu, Japan. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 14(6), 29–39.
- Pianka, E. R. (1983). *Evolutionary ecology* (3rd ed.). Harper & Row., pp. 253
- Sugiura, N., Kurokochi, H., Tan, E., Asakawa, S., Sato, N., Saito, Y., & Ide, Y. (2014). Development of 13 polymorphic chloroplast DNA markers in *Quercus gilva*, a regionally endemic species in Japan. *Conservation Genetics Resources*, 6, 961–965.
- Yeocheon Ecological Research Society. (2005). *Modern Ecology Experiment Book*. Kyomunsa. pp. 239–242
- You, Y. H., Park, J. H., Park, J. W., Kim, E. J., Lee, J. M., Cho, K. M., & Kim, Y. S. (2021). Analysis of Ecophysiological Characteristics of Rare Plants in Gotjawal. National Institute of Forest Science (NIFoS)
- Zandalinas, S. I., Rivero, R. M., Martínez, V., Gómez-Cadenas, A., & Arbona, V. (2016). Tolerance of citrus plants to the combination of high temperatures and drought is associated to the increase in transpiration modulated by a reduction in abscisic acid levels. *BMC plant biology*, 16, 1–16.