

ORIGINAL ARTICLE

차광막 처리가 고온 및 고광도 환경에서 구상나무(*Abies koreana*) 묘목의 생육에 미치는 영향

박재현 · 임효인 · 서한나 · 윤용한^{1)*}

국립산림과학원 산림생명정보연구과, ¹⁾건국대학교 녹색기술융합학과

Effects of Shading Treatments on Growth of *Abies koreana* Seedlings in High - Temperature and High Light Environments

Jae-Hyun Park, Hyo-In Lim, Han-Na Seo, Yong-Han Yoon^{1)*}

Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea

¹⁾Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology, Konkuk University, Chungju 27478, Korea

Abstract

This study investigated the protective effects of shade nets on *Abies koreana* seedlings subjected to high temperature and luminosity stress, which are pertinent for plant survival in climate change scenarios. This study, conducted at Konkuk University, compared the growth, survival, and soil conditions of 3-year-old specimens across natural, greenhouse, and shaded settings from July to September 2022. Our findings demonstrated that shade nets significantly enhanced seedling survival by moderating soil temperature and moisture. This is particularly evident in high-temperature conditions, where shade nets mitigate stress on seedlings and safeguard them from excessive sunlight exposure. Proper net installation height and location are crucial for optimal temperature and humidity control, suggesting broader applicability for various species and offering strategies to combat the ecological impacts of climate change.

Key words : *Abies koreana* Wilson, Shaded, Survival rate, Growth, Climate change

1. 서론

과거의 연구에서는 인간의 활동이 대기 중 이산화탄소에 끼치는 영향(Revelle and Suess, 1957)과 이로 인한 지구온난화 위험성(Broecker, 1975)을 강조하였다. 그 결과, CO₂ 배출량 증가의 시급성(Solomon et al., 2009)이 주장되었고, 기후변화에 대한 IPCC의 역할(Moser and Dilling, 2011), 가뭄과 열 스트레스로 인한 나무 고사 증가(Allen et al., 2010), 고지대 산림

건강에 대한 환경 요인의 영향(Millar et al., 2012) 등이 논의되었다.

기후변화는 전 세계의 산악 지역을 온난화시키며(Penpin et al., 2015), 환경에 적응 능력이 제한된 고산 수종에 잠재적 위험을 초래하고 있다(Cotto et al., 2017). 이는 고산 지역의 특정 종들에 위협이 되고 있으며(Pauli et al., 2012), 산악 식물에 불균등한 영향을 미치는 결과를 가져왔다(Engler et al., 2011). 특히, 고산지대에 서식하는 다양한 종들에게 이는 직접적인

Received 12 October, 2023; Revised 7 November, 2023;

Accepted 20 November, 2023

*Corresponding author : Yong-Han Yoon, Department of Green Technology Convergence, Konkuk University, Chungju 27478, Korea, Phone : +82-43-840-3512
E-mail : yonghan7204@kku.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

서식지 위협이 되고 있다(Bell et al., 2014).

한국 고유의 아고산 수종 중 하나인 구상나무(*Abies koreana*)는 해발 1000 m 이상의 한라산, 지리산, 덕유산, 가야산, 백운산, 영축산, 금원산 등에 분포하고 있으며, 세계자연보전연맹(IUCN)에서 멸종위기 종으로 지정되었다(Koo et al., 2016, Shin et al., 2021, Seo et al., 2021). 하지만 최근까지도 기후변화로 인한 성장환경 변화로 인해 구상나무의 쇠퇴와 고사가 지속적으로 나타나고 있으며, 이로 인해 구상나무 군락지가 감소하고 있다(Kim and Lee., 2013, Kim et al., 2017). 이러한 감소의 원인으로는 온도 상승, 가뭄 및 다른 종과의 경쟁(Park et al., 2018), 강풍(Seo et al., 2021) 등이 제시되었으나, 그 명확한 원인은 아직 규명되지 않았다.

또한, 고사가 진행되는 구상나무 자생지에서 성목이 고사하면서 어린 묘목이 받는 높은 일사량은 2차 피해 예상되고 있다. 이러한 높은 일사량은 구상나무의 쇠퇴 원인 중 하나로 지목되며, 이에 따른 열 스트레스와 열 가뭄에 민감하게 반응한다고 알려져 있다(Koo et al., 2017). 또한 높은 고도와 높은 일사량이 구상나무의 성장을 감소의 원인으로 작용하고 있다고 하였다(Ahn et al., 2020). 반면, 일사량이 적고 공기 습도가 높고 온도가 낮은 환경이 구상나무 생존에 더 유리하다고 알려져 있다(Park et al., 2018).

따라서, 본 연구는 구상나무 묘목의 높은 일사량 피해, 고온환경에서의 일사량 피해 차이, 그리고 차광막의 완화 효과를 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 이를 통해 구상나무의 보호 및 복원에 기여하고자 한다. 이 연구의 결과는 기후변화로 인한 생물 다양성 감소에 대응하는 데 중요한 통찰을 제공할 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험구

본 연구는 2022년 7월 초부터 9월 중순까지 일사량 및 기온은 높아지는 여름철에 진행되었다. 실험 장소는 충청북도 충주시에 위치한 건국대학교 글로벌캠퍼스(36°56'58"N 127°54'29"E) 내에 남서향으로 방위를 둔 실외 포지에서 진행되었다. 연구 대상으로는 우리나라 멸종 위기종으로 분류된 아고산대에 자생하는 구상나무 3년생을 사용하였으며, 처리구당 15 본씩 총 60 본을 이식하였다. 온난화 및 차광 실험을 위해 4가지 유형으로 무처리(EX.L.PAR), 온실(G.L.PAR), 온실+차광(G.S.L.PAR), 그리고 차광(S.L.PAR) 처리구를 설치하였다. 각 실험구의 토양은 기존 지반에서 30 cm를 성토하였다. 온실은 길이 300 cm, 폭 100 cm, 높이 120 cm의 규격에 맞게 설치되었고, 차광막은 검정색으로 차광율이 60 %인 것을 선택하여 사용하였다(Fig. 1). 또한, 관수 방법으로는 매일 1회 실험구 각각에 식재기 반이 완전히 포화하는 방식으로 물을 공급하는 방식으로 관수하였다.

2.2. 데이터

데이터 수집은 다음과 같다. 환경 데이터는 고정형 로거HOBO(H21-USB, Onset, USA)를 이용하여 1 m 광량(S-LIA-M003, Onset, USA), 10 cm / 100 cm 온습도(S-THC-M002, Onset, USA), 10 cm / 100 cm 토양온도(S-TMB-M002, Onset, USA), 10 cm / 100 cm 토양수분(S-SMD-M005, Onset, USA) 센서를 설치하여 측정하였다. 성장 데이터는 디지털 켈리퍼스

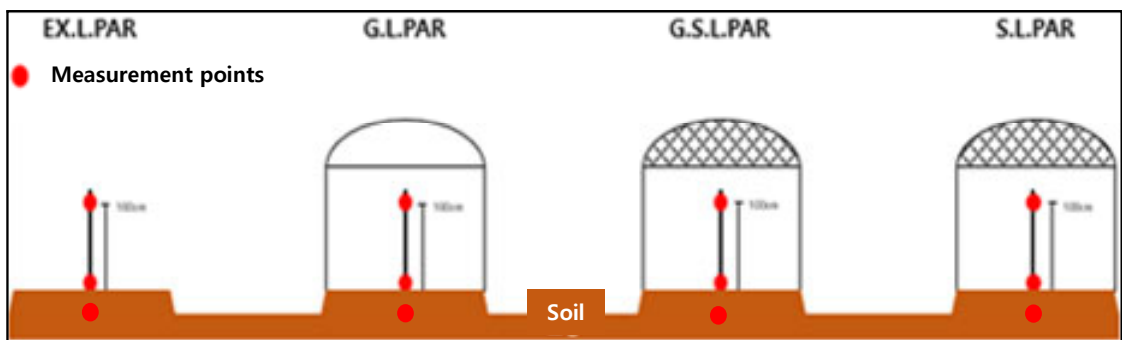


Fig. 1. Experiment block schematic.

(Digital calipers, Mitutoyo, Japan)를 사용하여 구상나무의 수고와 근원경을 측정하였다.

2.3. 통계분석

수집된 데이터는 R (R Core Team, 2021)과 R Studio (RStudio Team, 2021)를 활용하여 통계적 분석을 진행하였다. 각 실험구 간의 차이는 수치분석(Numerical integration), 이원분산분석(Two-way ANOVA)을 이용하여 비교하였고, 사후 검정은 Tukey's HSD를 사용하였다. 모든 분석은 0.05의 유의 수준에서 진행되었다. 추가로, 구상나무의 생존률에 대한 분석을 위해 생존분석(Kaplan-Meier, Log-rank Test)도 수행하였다. 생존분석은 시간에 따른 사건의 발생을 분석하는 통계적 기법으로, 본 연구에서는 구상나무의 생존 시간을 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 환경분석

3.1.1. 광 환경

실험구별로 광(Photosynthetic Active Radiation, PAR)의 차이를 확인하였다(Fig. 2). 네 가지 구역으로 분류된 실험에서 차광 효과가 없는 무처리구(EX.L.PAR), 투명 온실(G.L.PAR), 투명 온실과 차광막(G.S.L.PAR), 그리고 차광막만 덮인 구역(S.L.PAR)의 광 수치를 측정했다. 수치 적분을 통해 각 구역의 하루동

안 식물에게 도달한 광의 총량을 계산하였고, 무처리 구역에서 가장 높은 광의 양, 7226.91 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ 을 측정했다. 반면에, 투명 온실을 덮은 구역에서는 광의 양이 감소하여 6867.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ 로 측정되었고, 투명 온실과 차광막을 함께 덮은 구역에서는 광의 양이 크게 감소하여 1372.50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ 로, 차광막만 덮은 구역에서는 1776.94 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ 로 측정되었다. 네 가지 구역에 따른 광의 양의 차이가 분산 분석(ANOVA)을 통해 통계적으로 유의미하다는 것을 확인했다. 이 결과는 차광 처리 방식에 따라 식물에 도달하는 광의 양이 달라지며, 식물의 생장에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 사후 검정(Tukey)을 통해 특히 어떤 차광 처리 구역 간에 광의 양에서 통계적으로 유의미한 차이가 있는지를 구체적으로 확인하였다. 차광막과 투명 온실은 모두 광을 차단시키는 효과를 나타냈지만, 투명 온실의 광 차단 효과는 높지 않았다. 이러한 결과, 차광효과는 식물에 도달하는 광의 양에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 이는 차광효과가 광의 투과를 막아 식물에 도달하는 광의 양을 줄이는 것이 식물의 성장 환경에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 선행연구에 따르면, 차광효과를 통해 식물이 받는 광의 강도를 효과적으로 줄일 수 있다고 보고되었다(Friend et al., 1984; Samuelson et al., 2012; Tan et al., 2015; Zhang et al., 2019). 또한 광의 감소는 가소성 반응(plastic responses)을 유도할 수 있고(Zhang et al., 2020), 잎의 생리적 및 형태적 특성에 변화를 일으킨다고 보고되었다(Samuelson et al., 2012).

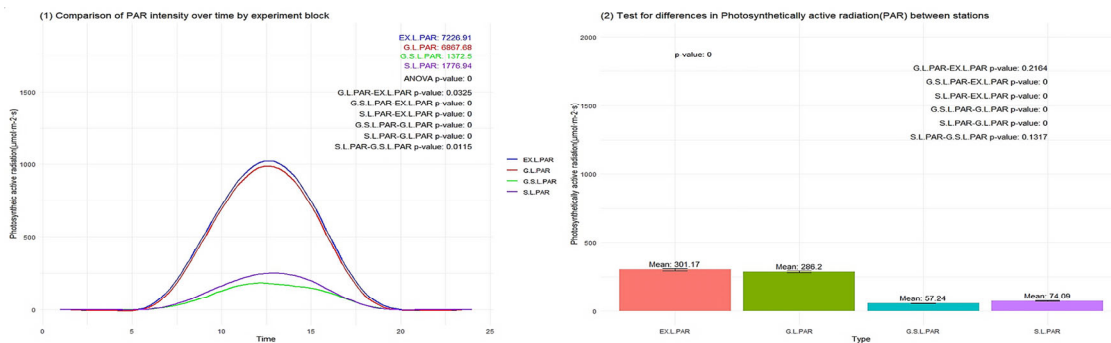


Fig. 2. Compare daily and total average PAR across experimental sites. Levene's test was used to test for equality of error term variances. The null hypothesis that the variances of the error terms are equal was rejected, so the corrected Welch method was applied. For post-hoc analysis, the Games-Howell method was applied to correct for unequal variances of the error terms.

Table 1. Comparison of average air temperature and humidity due to shading by high temperature and high conditions

	Marginal	Shade		Shade / Greenhouse		Shade / Height(10cm/100cm)			
		O	X	O / O	X / O	O / 10	O / 100	X / 10	X / 100
Air temperature (°C)	Mean	25.9	26.7	26.9	28.4	25.6	26.1	26.8	26.6
	<i>P</i>	***		***		***			
Air Humidity (%)	Mean	91.3	91.4	94.4	94.1	93.2	89.4	92.0	90.8
	<i>P</i>	NS		NS		***			

- 1) Levene's test was used to test for equality of error term variances.
- 2) The null hypothesis that the variances of the error terms are equal was rejected, so the corrected Welch method was applied.
- 3) For post-hoc analysis, the Games-Howell method was applied to correct for unequal variances of the error terms.
- 4) Nonsignificant(NS) of significant at $p \leq 0.05$, respectively.
- 5) ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$

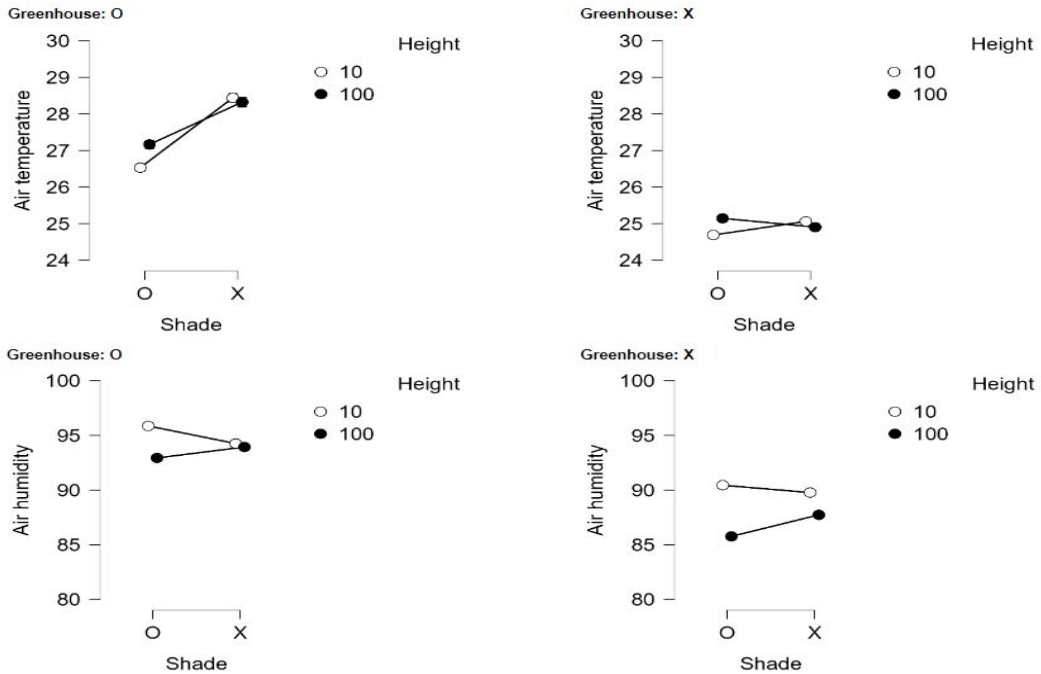


Fig. 3. Average change in air temperature(°C) and humidity(%) due to shading by high temperature and height conditions.

3.1.2. 대기환경

대기환경 이원분산분석(Two-way ANOVA) 결과에 따르면(Table 1), 차광효과는 대기온도를 약 0.8°C 감소시키지만 대기습도에는 큰 영향을 미치지 않았다. 특히, 고온환경에서는 차광효과가 대기온도를 약 1.5°C 감소시키는 효과를 보였으며, 지면으로부터의 높이가

높아질수록 대기온도 저감효과는 감소하고 대기습도는 낮아졌다. 또한, 차광효과가 고온환경에서 대기온도 저감에 더 효과적이며, 지면 가까이에서 대기습도 증가가 관찰되었다(Fig. 3). 따라서 차광효과는 대기온도를 낮추는 동시에 대기습도를 증가시키는 경향이 있으며, 이 효과는 고온환경에서 더 크게 나타난다. 최적의 차광 효

Table 2. Comparison of average soil temperature and humidity due to shading by high temperature and deep conditions

		Shade		Shade / Greenhouse		Shade / Deep(10cm/100cm)			
		O	X	O / O	X / O	O / 10	O / 100	X / 10	X / 100
Soil temperature (°C)	Marginal Mean	26.0	27.1	26.2	28.1	25.9	26.1	27.0	27.2
	<i>P</i>	***		***		***			
Soil Humidity (%)	Marginal Mean	0.26	0.29	0.27	0.30	0.26	0.27	0.27	0.30
	<i>P</i>	***		***		***			

- 1) Levene's test was used to test for equality of error term variances.
- 2) The null hypothesis that the variances of the error terms are equal was rejected, so the corrected Welch method was applied.
- 3) For post-hoc analysis, the Games-Howell method was applied to correct for unequal variances of the error terms.
- 4) Nonsignificant(NS) of significant at $p \leq 0.05$, respectively.
- 5) ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$

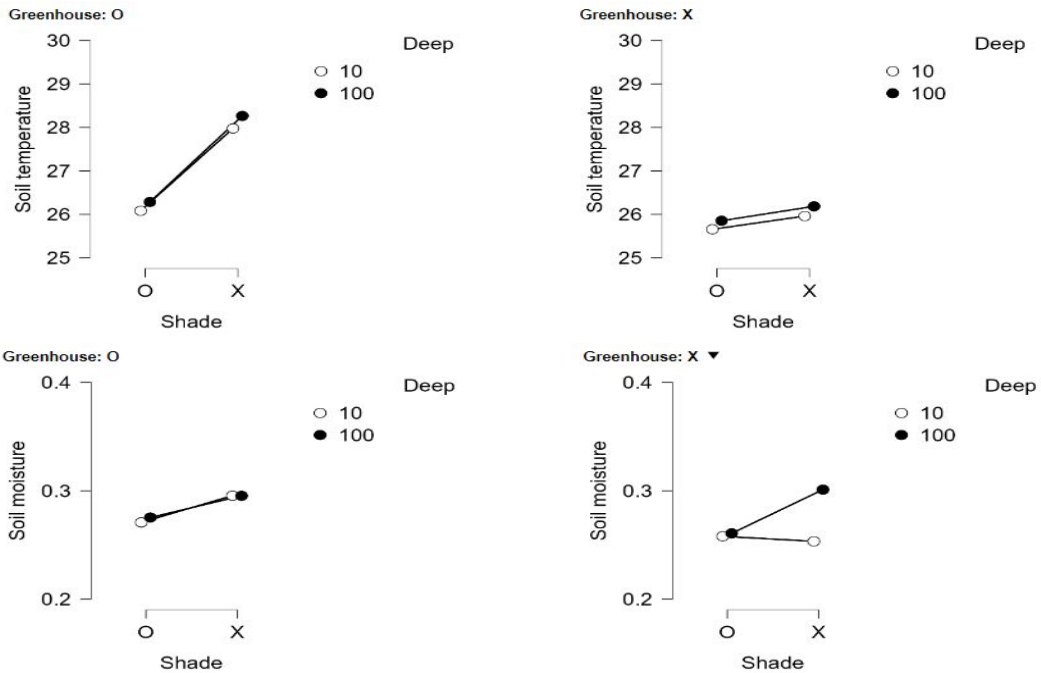


Fig. 4. Average change in soil temperature(°C) and humidity(%) due to shading by high temperature and deep conditions.

과를 얻기 위해서는 차광막의 설치 높이를 신중하게 고려해야 함을 알 수 있으며, 이는 지표면 온·습도에 큰 영향을 줄 것으로 사료된다. 과거 연구에서는 온실 내의 차광효과가 대기 습도를 5 %에서 12 %까지 증가시키고 지표면 온도를 더욱 낮추는 것으로 발표되었다(Aberkani et al., 2010). 또한 차광은 태양 복사의 강도를 줄이는 효과가 있으며, 이로 인해 온실 내 대기온

도가 낮아지고 대기습도가 증가한다(Hassanien et al., 2017). 식물의 성장과 생존율을 보호하기 위해 지면과 가장 가까운 'Microsites'(0-0.5cm)의 과열을 방지하는 것이 중요하다고도 지적되었다(Marcante et al., 2014).

3.1.3. 토양환경

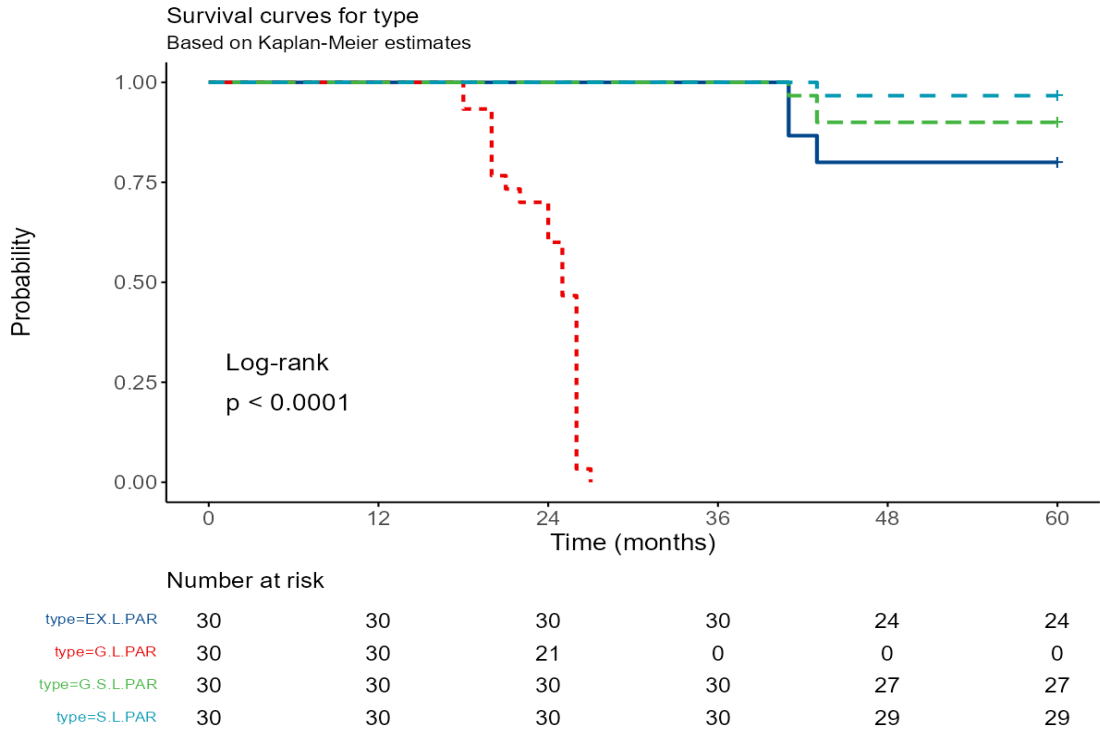


Fig. 5. Survival analysis for 60 day by experimental block. EX.L.PAR: Open ground + no shading, G.L.PAR: Greenhouse + no shading, G.S.L.PAR: Greenhouse + shading, S.L.PAR: Open ground + shading.

토양환경 이원분산분석(Two-way ANOVA) 결과에 따르면(Table 2), 차광효과는 토양온도 약 1.1℃, 토양습도 약 0.03 % 감소시켰다. 특히, 고온환경에서는 차광효과가 토양온도를 약 1.9℃ 감소시키는 큰 효과를 보였으며, 지면으로부터의 깊이가 깊어질수록 토양온도 및 토양습도가 높아졌다. 또한, 차광효과가 고온환경에서 토양온도 저감 및 토양습도 감소폭에 영향이 있었다(Fig. 4). 따라서 차광효과는 토양온도는 낮추고 토양습도 감소폭이 적은 경향이 있으며, 이 효과는 고온환경에서 더 크게 나타난다. 이러한 결과는 식물의 근권에 영향을 줄 것으로 사료된다. 과거 연구에서는 차광 효과는 토양 온도를 낮출 수 있으며(Morais et al., 2006; Klimková et al., 2021; May et al., 2022; Guèrin et al., 2022), 공기 습도를 증가시켜 토양 수분에 간접적으로 영향을 미친다는 것이 보고되었다(Aberkani et al., 2010; Klimková et al., 2021; Zou et al., 2022; Momeni et al., 2022). 또한, 토양 온도의 변동은 그들

이 없는 지역에서 더욱 두드러짐으로(Klimková et al., 2021), 토양 온도와 수분의 변화는 식물의 성장과 생산성에 영향을 미칠 수 있으며, 토양 미생물의 구조와 다양성에 영향을 미쳐 미기후를 형성할 수도 있다고 하였다(Zou et al., 2022).

3.2. 생육분석

3.2.1. 생존분석

차광효과가 구상나무 묘목의 생존에 더 유리한지 알아보기 60일 동안 실험을 진행하였고, 효과를 검증하기 위해 Kaplan-Meier와 Log-rank Test를 실시하였다(Fig. 5). Kaplan-Meier 분석 결과, S.L.PAR(96.7%) > G.S.L.PAR(90.6%) > EX.L.PAR(80%) > G.L.PAR(0%) 순으로 생존율이 확인되었다. Log-rank Test 결과, 처리구에 따른 생존곡선의 차이가 통계적으로 유의하게 나타났다. 결과적으로 차광효과는 구상나무 묘목의 생존을 유도하는데 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 선행연

Table 3. Comparison of Korean fir height and root collar diameter in response to shading in high temperature and high light environments.

	Cases	Apply	Mean Difference	SE	t	P	
Height	Shade	O X	-0.032	0.023	-1.376	NS	
	Greenhouse	O X	-0.045	0.023	-1.955	NS	
		O/O X/O	-0.023	0.033	-0.717	NS	
	Shade / Greenhouse	O/X	-0.053	0.033	-1.638	NS	
		X/X	-0.013	0.033	-0.410	NS	
		X/O O/X	-0.077	0.033	-2.355	NS	
		X/X	-0.037	0.033	-1.126	NS	
	Root collar diameter	O/X X/X	-0.040	0.033	-1.229	NS	
		Shade	O X	-0.068	0.019	-3.589	*
		Greenhouse	O X	-0.031	0.019	-1.639	NS
O/O X/O			-0.093	0.027	-3.509	*	
Shade / Greenhouse		O/X	-0.005	0.027	-0.188	NS	
		X/X	-0.037	0.027	-1.379	NS	
X/O O/X	-0.098	0.027	-3.697	*			
	X/X	-0.057	0.027	-2.130	NS		
O/X X/X	-0.042	0.027	-1.566	NS			

- 1) Levene's test was used to test for equality of error term variances.
- 2) The null hypothesis that the variances of the error terms are equal was rejected, so the corrected Welch method was applied.
- 3) For post-hoc analysis, the Games-Howell method was applied to correct for unequal variances of the error terms.
- 4) Nonsignificant(NS) of significant at $p \leq 0.05$, respectively.
- 5) ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$

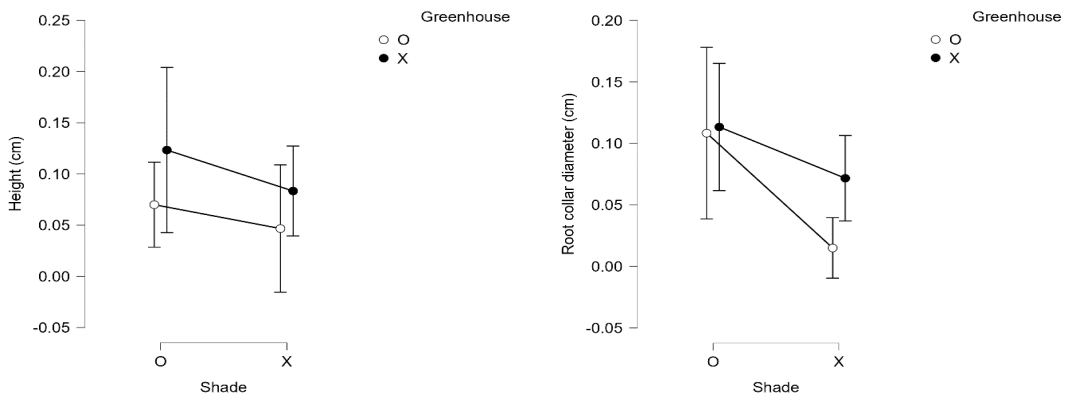


Fig. 6. Changes of Korean fir height and root collar diameter in response to shading in high temperature and high light environments.

구에 따르면, 차광효과는 빛의 강도를 감소시키고, 온도와 습도에 영향을 미쳐 묘목 생존에 더 유리한 환경을 미칠 수 있다고 하였다(Chen et al., 2012; Amisshah et al., 2015). 또한, 침엽수 묘목에 대한 차광효과는 수종

과 현장 조건에 따라 다를 수는 있지만, 증산량을 감소시키고, 최고 토양 표면 온도를 낮춰 생존에 긍정적인 영향을 미친다고 하였다(Helgerson, 1990).

3.2.2. 생장분석

고광도 및 고온 환경에서도 차광효과가 구상나무 묘목의 생장(수고, 근원직경) 차이에 효과가 나타나는지 알아보기 위해 이원분산분석(Two-way ANOVA) 및 사후검정을 실시하였다(Table 3). 수고는 고광도 및 고온 환경에서 차광효과 따른 생장량 평균값의 유의미한 차이가 없었다. 또한 두 변수 간 상호작용이 없었다. 근원직경은 고광도 환경에서 차광효과에 따른 생장량의 평균값의 유의미한 차이가 있었으며, 두 변수 간 상호작용이 있었다. 차광효과는 고광도 환경에서 효과를 나타내며, 고온상태에서도 차광효과에 따른 효과적인 근원직경 생장을 나타낼 수 있음을 시사하고 있다. 선행연구에서 고광도에 의한 근원직경 성장 저하는 차광에 의해서 향상을 유도할 수 있다는 연구결과와 유사하다(Thaler and Pagès., 1996).

4. 결론

본 연구는 구상나무 묘목의 고온 및 고광도 피해와 차광막의 완화 효과에 대해 깊이 있는 분석을 수행하였다. 고온 환경에서 고광도에 의한 피해와 차광막의 효과적인 활용 방법에 대한 이해는, 기후변화와 관련된 현상들에 대응하고, 식물의 생존과 성장을 지원하는데 필수적일 것이다.

본 연구 결과, 차광막의 사용은 구상나무 묘목의 생존율을 향상시키며, 토양 온도와 습도를 조절, 근원직경의 성장을 촉진시킬 수 있음이 확인되었다. 특히, 고온 환경에서 차광막은 더욱 큰 효과를 나타내며, 이를 통해 식물이 받는 스트레스를 감소시키고, 고온과 강한 일사로부터 식물을 보호할 수 있다. 이는 다양한 생태계에서의 생물 다양성을 유지하고, 특히 기후변화로 인해 취약해진 식물종의 보호에 중요한 방법으로 작용할 수 있다.

또한, 본 연구는 차광막의 설치 높이와 위치에 따른 영향도 검토하였다. 올바른 차광막의 설치의 지표면 온·습도에 큰 영향을 미치며, 이는 식물의 생장 환경을 개선하고 높은 일사량으로부터 식물을 보호하는데 큰 도움이 된다. 이 연구를 통한 차광막의 효과적인 활용은 식물의 생존을 향상뿐만 아니라, 기후변화에 따른 식물의 적응 능력을 향상시키는데 기여 할 것으로 기대된다. 향후 구상나무뿐만 아니라 다양한 고산지역 멸종위기 식물 종을 대상으로 기초 연구를 확장하여 기후변화로

인한 글로벌 생태계 변화와 생물 다양성 감소에 대응할 수 있는 새로운 지식과 방법론을 제공하고자 한다.

REFERENCES

- Aberkani, K., Hao, X., Halleux, D., Dorais, M., Vineberg, S., Gosselin, A., 2010, Effects of shading using a retractable liquid foam technology on greenhouse and plant microclimates, *Hortte*, 2(20), 283-291.
- Ahn, U. S., Yun, Y. S., 2020, Causes of decline in the Korean fir based on spatial distribution in the Mt. Halla region in Korea: A meta-analysis, *Forests*, 11(4), 391.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., Cobb, N., 2010, A Global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
- Amissah, L., Mohren, G., Kyereh, B., Poorter, L., 2015, The effects of drought and shade on the performance, morphology and physiology of Ghanaian tree species, *PLoS ONE*, 4(10), e0121004.
- Bell, D. M., Bradford, J. B., Lauenroth, W. K., 2014, Mountain landscapes offer few opportunities for high-elevation tree species migration, *Global change biology*, 20(5), 1441-1451.
- Broecker, W. S., 1975, Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming, *Science*, 189(4201), 460-463.
- Chen, F., Liu, L., Chen, F., Jia, G., 2012, The ecological characteristics of seed germination and seedling establishment of manglietia patungensis: implication for species conservation, *American Journal of Plant Sciences*, 10(03), 1455-1461.
- Cotto, O., Wessely, J., Georges, D., Klonner, G., Schmid, M., Dullinger, S., Guillaume, F., 2017, A Dynamic eco-evolutionary model predicts slow response of alpine plants to climate warming. *Nature Communications*, 8, 15399.
- Engler, R., Randin, C. F., Thuiller, W., Dullinger, S., Zimmermann, N. E., Araújo, M. B., Guisan, A., 2011, 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe, *Global Change Biology*, 17(7), 2330-2341.
- Friend, D., 1984, Shade adaptation of photosynthesis in coffee Arabica, *Photosynth Res*, 4(5), 325-334.
- Guérin, V., 2022, Soil CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in urban forests, treed and open lawns in Angers, France.
- Hassanien, R., Ming, L., 2017, Influences of greenhouse-

- integrated semi-transparent photovoltaics on microclimate and lettuce growth, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(10), 11-22.
- Helgerson, O., 1990, Effects of alternate types of microsite shade on survival of planted douglas-fir in Southwest Oregon, *New Forest*, 4(3), 327-332.
- Kim, J. K., Koh, J. G., Yim, H. T., Kim, D. S., 2017, Changes of spatial distribution of Korean fir forest in Mt. Hallasan for the past 10 years, *Korean Journal of Environment and Ecology*, 31(6), 549-556.
- Kim, N. S., Lee, H. C., 2013, A Study on changes and distributions of Korean fir in sub-alpine zone, *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 16(5), 49-57.
- Klimková, M., Cano, Y., Cano, Y., Lvončík, S., Lvončík, S., Khum, W., Maděra, P., 2021, Does shade impact coffee yield, tree trunk, and soil moisture on coffea canephora plantations in Mondulkiri, Cambodia?, *Sustainability*, 24(13), 13823.
- Koo, K. A., Kim, J., Kong, W. S., Jung, H., Kim, G., 2016, Projecting the potential distribution of *Abies koreana* in Korea under the climate change based on RCP scenarios, *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 19(6), 19-30.
- Koo, K. A., Kong, W. S., Park, S. U., Lee, J. H., Kim, J., Jung, H., 2017, Sensitivity of Korean fir (*Abies koreana* Wils.), a threatened climate relict species, to increasing temperature at an island subalpine area, *Ecological Modelling*, 353, 5-16.
- Marcante, S., Erschbamer, B., Buchner, O., Neuner, G., 2014, Heat tolerance of early developmental stages of glacier foreland species in the growth chamber and in the field, *Plant ecology*, 215, 747-758.
- May, J., Oberbauer, S., Unger, S., Simon, M., Betway, K., Hollister, R., 2022, Shading decreases and delays ndvi and flowering of prostrate arctic shrubs, *Arctic Science*, 3(8), 967-978.
- Millar, C. I., Westfall, R. D., Delany, D. L., Bokach, M. J., Flint, A. L., Flint, L. E., 2012, Forest mortality in high-elevation whitebark pine (*Pinus albicaulis*) forests of eastern California, USA: influence of environmental context, bark beetles, climatic water deficit, and warming, *Canadian Journal of Forest Research*, 42(4), 749-765.
- Momeni, D., 2022, Impact of shading net on microclimate condition in orchards., PREPRINT available at Research Square, 1-21.
- Morais, H., Caramori, P., Ribeiro, A., Gomes, J., Kogushi, M., 2006, Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil, *Pesq. agropec. bras.*, 5(41), 763-770.
- Moser, S. C., Dilling, L., 2011, Communicating climate change: closing the science-action gap, *The Oxford Handbook of Climate Change and Society*, 161-174.
- Park, J. S., Shin, H. S., Choi, C. H., Lee, J., Kim, J., 2018, Hierarchical environmental factors affecting the distribution of *Abies koreana* on the Korean Peninsula, *Forests*, 9(12), 777.
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Benito Alonso, J. L., Grabherr, G., 2012, Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits, *Science*, 336(6079), 353-355.
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraër, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Yang, D. Q., 2015, Elevation-dependent warming in mountain regions of the world, *Nature Climate Change*, 5(5), 424-430.
- R Core Team, 2021, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Revelle, R., Suess, H. E., 1957, Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades, *Tellus*, 9(1), 18-27.
- RStudio Team, 2021, RStudio: Integrated Development for R, RStudio, PBC, Boston.
- Samuelson, L., Stokes, T., 2012, Leaf physiological and morphological Responses to shade in grass-stage seedlings and young trees of *Longleaf Pine*, *Forests*, 3(3), 684-699.
- Seo, J. W., Choi, E. B., Park, J. H., Kim, Y. J., Lim, H. I., 2021, The role of aging and wind in inducing death and/or growth reduction in Korean fir (*Abies koreana* Wilson) on Mt. Halla, Korea, *Atmosphere*, 12(9), 1135.
- Shin, S., Kim, J. H., Dang, J. H., Seo, I. S., Lee, B. Y., 2021, Elevational distribution ranges of vascular plant species in the Baekdudaegan mountain range, South Korea, *Journal of Ecology and Environment*, 45(1), 1-10.
- Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., Friedlingstein, P., 2009, Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 1704-1709.
- Thaler, P., Pagès, L., 1996, Root apical diameter and root elongation rate of rubber seedlings (*hevea brasiliensis*) show parallel responses to photoassimilate availability, *Physiologia Plantarum*, 97(2), 365-371.
- Tan, P., Ismail, M., 2015, The effects of urban forms on

- photosynthetically active radiation and urban greenery in a compact city, *Urban Ecosyst*, 3(18), 937-961.
- Zhang, N., Westreenen, A., Anten, N., Evers, J., Marcelis, L., 2020, Disentangling the effects of photosynthetically active radiation and red to far-red ratio on plant photosynthesis under canopy shading: a simulation study using a functional-structural plant model, *Annals of Botany*, 4(126), 635-646.
- Zou, Y., Zhong, Y., Yu, H., Pokharel, S., Fang, W., Chen, F., 2022, Impacts of ecological shading by roadside trees on tea foliar nutritional and bioactive components, community diversity of insects and soil microbes in tea plantation, *Biology*, 12(11), 1800.
-
- Researcher. Jae-Hyun Park
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
jh2344@korea.kr
 - Researcher. Hyo-In Lim
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
iistorm@korea.kr
 - Researcher. Han-Na Seo
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
caragana2@korea.kr
 - Professor. Yong-Han Yoon
Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology, KonKuk University
yonghan7204@kku.ac.kr