

ORIGINAL ARTICLE

# 기후적응형 식생방음벽의 가뭄 스트레스 반응 평가 - 생존율과 엽록소 함량을 중심으로 -

김중성 · 권영휴<sup>1)</sup> · 정용조<sup>2)\*</sup>

에코랜드(주), <sup>1)</sup>한국농수산대학교 조경학과, <sup>2)</sup>상명대학교 그린스마트시티학과

## Evaluation of Drought Stress Response in a Climate - Adapted Vegetation Soundproof Wall - Focusing on Survival Rate and Chlorophyll Content -

Jong-Sung Kim, Young-Hyoo Kwon<sup>1)</sup>, Yong-Jo Jung<sup>2)\*</sup>

Eco Land Co., Ltd, Gyeonggi-do 17799, Korea

<sup>1)</sup>Department of Landscape Architecture, Korea National College of Agriculture & Fisheries, Jeonbuk 54874, Korea

<sup>2)</sup>Department of Greensmart City, Sangmyung University, Chungnam 31066, Korea

### Abstract

Vertical Greening Systems (VGS) are a key strategy for enhancing urban sustainability, yet harsh environmental conditions such as drought, threaten their long-term survival. This study aimed to develop resilient vegetated sound barriers by quantitatively evaluating the performance of nine plant species within a novel panel system featuring enhanced water retention capabilities. An extreme drought stress experiment was conducted under no-irrigation conditions for 110 days, from August 5 to November 19, 2024, to compare plant growth in an enhanced-performance test panel against a standard control panel. Plant resilience was assessed using two key non-destructive indicators: survival rate and chlorophyll content (SPAD). The results demonstrated the superior performance of the test panel. *Ligustrum sinense* 'Variegatum', *Euonymus japonicus* 'Aureomarginatus', and *Jasminum nudiflorum* planted in the test plot exhibited a 100% survival rate, whereas only *L. sinense* 'Variegatum' survived in the control plot. These drought-tolerant species maintained stable chlorophyll levels in the test plot, indicating excellent physiological health, where a sharp decline in chlorophyll content in the control plot served as an effective early stress indicator. Conversely, species such as *Vinca minor* had a 100% mortality rate in both groups, indicating their unsuitability for arid environments. Based on these quantitative findings, this study proposes a combining panel designs with enhanced water retention and empirically validated drought-tolerant species is a core strategy for developing sustainable, climate-adaptive VGS.

**Key words** : Vegetated sound barrier, Vertical Greening System (VGS), Drought stress, Plant resilience, Survival rate, Chlorophyll content, Climate-adaptive design

### 1. 서론

급격한 산업화와 도시화는 인구의 도시 집중을 가속화하였고, 이는 필연적으로 녹지 공간의 감소로 이어졌

다. 그 결과 도시는 열섬현상(Urban Heat Island, UHI), 대기 질 악화, 생물다양성 감소, 소음 공해 등 복합적인 환경 문제에 직면하게 되었다(Kim et al., 2024). 이러한 도시 환경문제에 대응하기 위한 혁신적

Received 25 August, 2025; Revised 31 October, 2025;

Accepted 24 November, 2025

\*Corresponding author : Yong-Jo Jung, Department of Greensmart City, Sangmyung University, Chungnam 31066, Korea  
Phone : +82-41-550-5493  
E-mail : smilejung@smu.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.

인 전략으로 건물이나 구조물의 수직면을 식물로 피복하는 수직녹화시스템(Vertical Greening System, VGS)이 전 세계적으로 주목받고 있다. VGS는 증발산 작용, 차광, 단열 등 복합적인 메커니즘을 통해 다양한 정량적 혜택을 제공한다(Pérez et al., 2011). 이러한 효과는 주변 온도를 현저히 저감하며, 건물의 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있다. 실제 지중해성 기후에서 수행된 연구에 따르면, 리빙월(Living Wall) 시스템은 대조군 건물 대비 냉방 에너지 수요를 최대 58.9%까지 줄이는 것으로 나타났다(Coma et al., 2017). 또한 식물 잎의 넓은 표면적은 미세먼지(Particulate Matter, PM)와 이산화탄소를 흡착하여 대기 질을 개선하며, 소음 저감, 도시 생태계의 서식처 제공, 그리고 시민들에게 심리적 안정감과 미적 쾌적함을 선사하는 등 다기능적 혜택을 제공한다(Pérez et al., 2011). 특히, 도로변에 설치되는 방음벽과 같은 회색 인프라(Gray Infrastructure)에 VGS를 적용한 식생방음벽은 소음 차단이라는 일차적 기능에 더해 삭막한 도시 경관을 개선하고 단절된 녹지 네트워크를 연결하는 중요한 녹색 자산으로서의 잠재력을 지닌다(Kim et al., 2024). 이는 단일 기능을 수행하던 기존의 도시 기반 시설을 생태적, 환경적 가치를 지닌 다기능적 자산으로 전환시키는 중요한 시도라 할 수 있다.

VGS가 제공하는 수많은 이론적 이점에도 불구하고 그 성공적인 도입과 확산은 중대한 현실적 제약에 직면해 있다. VGS의 식재 기반은 본질적으로 식물 생육에 매우 불리한 조건을 내포한다. 토심이 얇고 토양 용적이 극히 제한적이며 여름철에는 직사광선에 의한 고온과 극심한 건조에 노출되고 겨울철에는 혹독한 동해의 위협에 직면한다(Kim et al., 2024). 이러한 복합적인 환경 스트레스 요인 중에서도 주기적으로 반복되는 가뭄 스트레스는 VGS의 장기적인 지속가능성을 위협하는 가장 치명적인 요인으로 작용한다(Kim et al., 2024). 가뭄은 식물의 수분 손실을 막기 위한 기공 폐쇄를 유도하여 광합성을 저해하고, 세포 내 활성산소종(ROS)을 증가시켜 산화 스트레스를 유발한다. 이러한 스트레스는 세포막의 지질 과산화(lipid peroxidation)와 같은 손상을 일으키며, 궁극적으로는 식물 고사를 초래하여 시스템의 미관을 저해하고 막대한 유지관리 비용을 발생시킨다(Toscano et al., 2016; Ansari et al., 2019). 결국 이는 시스템 전체를 포기하게 만드는 주된 원인이 되며 VGS 기술의 광범위한 보급을 가로막

는 핵심적인 장벽으로 남아 있다(Kim et al., 2024). 따라서 VGS의 성공은 단순히 미학적 디자인이나 초기 설치에 그치는 것이 아니라 열악한 인공 환경에 성공적으로 적응하고 생존할 수 있는 식물 소재를 과학적으로 선별하고 이들의 생존을 적극적으로 지원할 수 있는 효과적인 시스템을 설계하는 것에 달려 있다. 이는 VGS의 생애주기비용(Life Cycle Cost)을 절감하고 장기적인 투자 가치를 확보하기 위한 필수 전제 조건이다(Kim et al., 2024).

VGS에 관한 선행 연구들은 주로 시스템이 제공하는 환경적 기능(에너지 효율, 미세먼지 저감 등)을 정량화하거나 다양한 식물 소재를 도입하여 경관성을 증진시키는 데 집중되어 있다(Kim et al., 2024). 그러나 식물이 직면하는 핵심적인 스트레스 요인 특히 가뭄에 대한 식물의 생리적 반응과 생존력을 정량적으로 평가하고 이를 바탕으로 실제 현장에 적용 가능한 회복탄력성 있는 식재 모델을 제시하는 연구는 여전히 부족한 실정이다. 대부분의 식물 추천은 내건성, 내한성 등 정성적 특성에 의존하고 있어 특정 시스템과 환경 조건 하에서의 실제 성능을 예측하기 어렵다. 이러한 접근 방식은 본 연구의 원시 데이터에서 볼 수 있듯이 양호 또는 고사 시작과 같은 주관적 관찰에 머물러 과학적 재현성과 객관성을 확보하기 어렵다(Kim et al., 2024).

따라서 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 패러다임의 전환을 제안한다. 즉, 단순한 녹화라는 개념을 넘어 시스템의 성능과 회복탄력성을 정량적으로 평가하는 과학적 접근이 필요하다. 이를 위해 본 연구는 객관적이고 재현 가능한 비파괴적 지표인 생존율과 엽록소 함량을 도입하였다. 생존율은 시스템의 장기적 지속가능성을 평가하는 가장 직접적인 지표이며(Kim et al., 2024), 엽록소 함량은 식물의 광합성 능력과 건강 상태를 반영하는 민감한 생리적 지표이다(Percival et al., 2008). 특히 엽록소 함량은 휴대용 SPAD 측정기를 통해 신속하고 비파괴적으로 측정할 수 있으며 가뭄과 같은 환경 스트레스로 인한 생리적 손상을 가시적인 위조 증상이 나타나기 전에 감지할 수 있는 조기 경보 지표로서의 유용성이 널리 입증되었다(Percival et al., 2008).

이러한 배경 하에 본 연구는 기후변화 시대에 대응할 수 있는 지속가능하고 회복탄력성 있는 식생방음벽 구축을 최종 목표로 설정하였으며 이를 달성하기 위해 다음과 같은 세 가지 구체적인 연구 목적을 설정하였다.

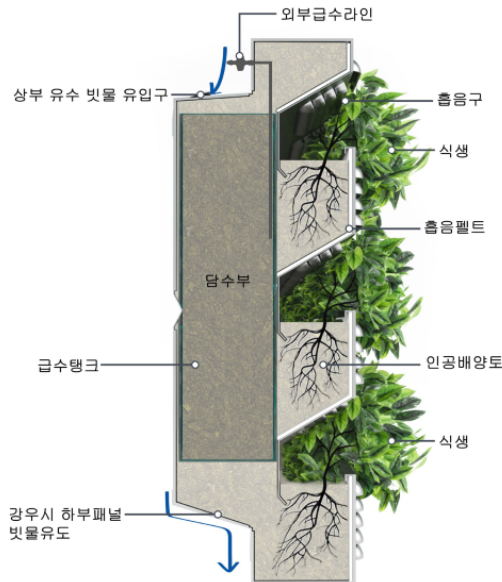


Fig. 1. Cross-section of the test specimen.



Fig. 2. 3D model of the test specimen.

첫째, 수분 보유 기능이 강화된 신규 식생방음벽 패널(시험구)과 일반 패널(대조구)에 9종의 상용 조경식물을 식재하고 장기간의 무관수 스트레스 조건 하에서 각 식물의 생육 반응을 비교 평가한다.

둘째, 생존율과 엽록소 함량(SPAD 값)의 시계열 분석을 통해 극한의 인공지반 환경에 가장 잘 적응하는 최적의 수종을 과학적 근거에 기반하여 정량적으로 선발한다.

셋째, SPAD 값 측정이 VGS의 스트레스 상태를 초기에 진단하고 데이터 기반 유지관리 프로토콜(protocol)을 수립하는 데 유용한 비파괴적 생물 지표로서의 타당성을 검증한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 시스템 및 현장

본 연구는 경기도 평택시에 위치한 공장부지 내에 설치된 실험 시설에서 수행되었다. 실험에는 수분 보유 기능이 강화된 시험구 패널 5개와 일반 상용 제품인 대조구 패널 5개, 총 10개의 패널이 사용되었다. 각 패널에는 Table 2에 명시된 9종의 식물을 동일한 수량과 밀도로 식재하였다. 실험의 객관성을 확보하고 잠재적인 환경적 편향을 최소화하기 위해, 모든 패널은 동일한 자연광, 강우, 온도 조건에 노출되도록 완전임의배치법(Completely Randomized Design)에 따라 실험 부지 내에 무작위로 배치하였다.

#### 2.1.1. 시험구(Test panel : enhanced-performance system)

시험구 패널은 길이 1,200 mm, 두께 200 mm, 높이 500 mm 크기의 강철 프레임으로 제작되었다(Kim et al., 2024). 이 패널의 핵심적인 혁신은 패널 하부에 강우 시 빗물을 일시적으로 저장하여 건조기 동안 모세관 현상을 통해 식물에 수분을 점진적으로 공급할 수 있도록 설계된 빗물 및 수동 관개 시스템(rainwater harvesting and passive irrigation system)을 통합한 것이다(Fig. 1, Fig. 2). 이 시스템은 하부 저수조에 저장된 물을 토양의 모세관 현상을 통해 상부 식재층으로 점진적으로 공급하는 수동 모관 관수(passive capillary irrigation) 또는 ‘위킹 베드(wicking bed)’ 원리를 적용하였다. 이러한 수분 공급 전략은 관개 과정에서 문제되는 증발·유출·심층침투(deep percolation) 등 수분 손실을 줄이고 물 이용효율을 높여려는 물 절감형 접근과 개념적으로 정합된다(Agarwal et al., 2023). 따라서 본 시스템은 건조기에도 식재 기반의 유효 수분을 보다 안정적으로 유지하고 외부 급수 의존도를 완화하는 데 기여할 것으로 기대된다.

#### 2.1.2. 대조구(Control panel: standard system)

대조구의 규격은 시험구와 동일하나 내부 구조는 시중에서 일반적으로 유통되는 입면녹화용 블록 제품을 사용하였다(Kim et al., 2024). 이는 시험구 패널의 성능 향상 효과를 객관적으로 비교 평가하기 위한 기준선(baseline) 역할을 한다. 대조구는 시험구와 동일한 외

**Table 1.** Soil composition

Coco coir	Peat moss	Zeolite	Perlite	Vermiculite	pH adjuster	Wetting agent	Fertilizer
30%	42%	3%	20%	5%	0.024%	0.018%	0.08%

**Table 2.** Plant species used in the experiment

Family	Common name (Korean)	Scientific name
Caprifoliaceae	Kkotdaenggang	<i>Abelia grandiflora</i> (Rovelli ex Andre) Rehder
Celastraceae	Hwanggeum-sacheol	<i>Euonymus japonicus</i> 'Aureomarginatus'
Oleaceae	Yeongchun-hwa	<i>Jasminum nudiflorum</i> Lind.
Oleaceae	Munui-jwittong-namu	<i>Ligustrum sinense</i> 'Variegatum'
Rosaceae	Hwanggeum-jopap	<i>Spiraea thunbergii</i> 'Ogon'
Cupressaceae	Rein-goldeu	<i>Thuja orientalis</i> 'Rheingold'
Celastraceae	Jul-sacheol	<i>Euonymus fortunei</i> (Turcz.) Hand.-Mazz.
Cupressaceae	Hwanggeum-nunhyang	<i>Juniperus chinensis</i> 'Aurea'
Apocynaceae	Binka-mainseo	<i>Vinca minor</i> L

Note: Scientific names were confirmed using national and international botanical databases (species.nibr.go.kr). Common names are listed in Korea.

부 환경 조건에 노출되었으나, 빗물 저장 기능과 같은 특수 설계는 포함되지 않는다(Kim et al., 2024).

### 2.1.3. 식재기반

시험구와 대조구 모두 통기성, 배수성, 보수력의 균형이 최적화된 ㈜서울바이오의 '명품골드'에서 생산한 인공토양을 사용하였다. 인공토양의 구성성분은 Table 1과 같다. 식재기반의 특성은 VGS의 수분 조절 능력과 식물 생장에 결정적인 영향을 미치므로 두 시스템 간의 비교 타당성을 확보하기 위해 동일한 기반재를 사용하였다(Wang et al., 2024).

## 2.2. 식물재료

본 실험에는 식생방음벽 환경의 특수성(내건성, 내한성, 차폐성, 경관성)을 고려하여 다음과 같은 다각적인 기준을 바탕으로 수종을 선정하였다. 첫째, 국내 조경 시장에서 상업적으로 쉽게 구할 수 있어 실제 현장 적용성이 높은 수종을 우선 고려하였다. 둘째, 관목, 만경목, 지피식물 등 다양한 성장 형태(growth form)를 포함하여 시스템 내에서의 기능적, 경관적 다양성을 확보하고자 하였다. 셋째, 기존 문헌에서 내건성이 우수하다고 알려진 수종과 함께, VGS 환경에서의 잠재적 적

응성 검증이 필요한 수종을 포함하여 폭넓은 스크리닝이 가능하도록 구성하였다. 실험에 사용된 수종은 Table 2에 명시된 바와 같다. 각 패널에는 동일한 수종을 동일한 수량으로 식재하여 처리 간 비교의 타당성을 확보하였다. 실험 초기 기록에 따르면 황금조팝(*Spiraea thunbergii*)과 레인골드(*Thuja orientalis*)는 식재 시점부터 시료의 상태가 불량했을 가능성이 제기되었으며(시료에 문제가 있을 것으로 예상) 이 점은 결과 해석 시 고려되었다.

## 2.3. 실험 설계 및 가뭄 스트레스 처리

2024년 7월 19일 모든 시험구와 대조구 패널에 식물을 식재한 후 초기 뿌리 활착을 돕기 위해 3일간 충분히 관수하였다. 이후 2024년 8월 5일부터 인위적인 관수를 완전히 중단하고 실험 종료일인 11월 19일까지 총 110일간 식물들이 패널 내 토양 수분과 자연 강우에만 의존하도록 하는 종말 가뭄 스트레스(terminal drought stress) 조건을 부과하였다. 선행연구에서도 처리 전 충분히 관수로 초기 수분 조건을 맞춘 뒤 인위적으로 물 공급을 제한해 가뭄 스트레스를 부과하고, 그에 따른 식물의 내건성과 수분 반응을 평가한 바 있다(Liu et al., 2023).

## 2.4. 데이터 수집 및 계측

가뭄 스트레스에 대한 식물의 반응을 다각적이고 정량적으로 평가하기 위해 생존율, 토양 특성 및 엽록소 함량을 측정하였다.

### 2.4.1. 생존율 평가

매주 각 패널의 식물 개체 수를 육안으로 조사하여 생존 여부 및 고사율을 기록하였다. 여기서 고사는 식물체의 모든 잎이 영구적으로 위조되거나 갈변하여 탈락하고, 줄기가 건조하여 쉽게 부서지는 상태가 되어 생리적 회복이 불가능하다고 판단되는 경우로 엄격히 정의하였다. 생존 여부의 최종 판정은 2인의 연구자가 독립적으로 평가를 수행한 후 그 결과를 교차 확인하여 판정의 일관성과 신뢰도를 확보하였다. 실험 데이터에 기록된 각 수종의 고사율(%) 정보를 바탕으로 각 측정 시점의 생존율을 다음의 식을 이용하여 계산하였다.  $SurvivalRate(\%) = 100 - MortalityRate(\%)$ . 이는 시간에 따른 각 처리구의 생존 동태를 정량적으로 분석하기 위한 시계열 데이터를 제공한다.

### 2.4.2. 토양 특성 측정

토양의 용적수분함량(Volumetric Water Content, VWC, %), pH, 전기전도도(Electrical Conductivity, EC)를 매주 측정하였다. 각 패널 내 상단, 중단, 하단 세 지점에서 측정하여 평균값을 사용하였다. 측정에는 휴대용 함수량 측정기, pH 측정기, EC 측정기가 사용되었다.

### 2.4.3. 엽록소 함량 및 생리적 스트레스 평가

식물의 광합성 능력 및 생리적 스트레스 수준을 비파괴적으로 평가하기 위해 주간 또는 격주 간격으로 휴대용 엽록소 측정기(SPAD-502 Plus, Konica Minolta, Japan)를 사용하였다. 측정은 꽃망강(*A. grandiflora*), 황금사철(*E. japonicus*), 무늬쥐똥나무(*L. sinense*), 황금조팝(*S. thunbergii*), 줄사철(*E. fortunei*) 5종에 대하여 이루어졌다. 각 식물의 완전히 성숙하고 건강한 잎을 대상으로 잎의 중앙부에서 일관된 위치를 5 회 반복 측정하여 평균값을 산출하였다. 이는 측정 데이터의 신뢰도를 높이기 위함이다(Percival et al., 2008). SPAD 측정기는 잎의 적색광(약 650 nm)과 근적외선(약 940 nm) 영역의 흡광도 차이를 측정하여 엽록소 함량과 비례하는 상대적인 수치(SPAD 값)를 산출한다

(Percival et al., 2008).

## 2.5. 통계분석

모든 측정 데이터의 통계 분석은 SPSS Statistics 25.0 프로그램(IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 사용하였다.

### 2.5.1. 생존율 분석

시험구와 대조구 간 최종 생존 개체 수의 차이를 검증하기 위해 카이제곱 독립성 검정( $\chi^2$  test of independence)을 실시하였다. 이 검정은 두 범주형 변수인 '패널 유형'과 '생존 여부' 간의 연관성 유무를 평가하는 통계적 방법이다(Agresti, 2018). 생존율의 시간적 변화를 시각화하고 그룹 간 생존 곡선의 차이를 통계적으로 비교하기 위해 카플란-마이어 생존분석(Kaplan-Meier survival analysis)과 로그-순위 검정(log-rank test)을 수행하였다.

### 2.5.2. 생리 및 환경 데이터 분석

시험구와 대조구 간의 토양 용적수분함량(VWC) 평균값 및 최종 엽록소 함량(SPAD) 평균값의 차이가 통계적으로 유의미한지 비교하기 위해 독립표본 t-검정(independent sample t-test)을 실시하였다(Percival et al., 2008). 분석에 앞서 데이터의 정규성 및 등분산성 가정을 확인하였다. 이러한 다각적인 통계 접근은 관찰된 현상의 유의성을 검증하고, 시스템 성능과 식물 반응 사이의 인과 관계를 보다 명확하게 추론하는 데 기여한다.

## 3. 결과

### 3.1. 시스템의 수분 보유 성능

110일간의 무관수 실험 기간 동안 시험구와 대조구의 토양 용적수분함량(VWC)은 뚜렷한 차이를 보였다. 실험 초기 관수 중단 후 두 그룹 모두 VWC가 감소했으나 대조구는 급격히 건조되어 실험 기간 내내 낮은 수분 상태를 유지했다. 반면 시험구는 패널 하부의 수분 저장 기능 덕분에 대조구보다 유의하게 높은 VWC를 지속적으로 유지하였다. 실험 전체 기간의 평균 VWC를 비교한 결과 시험구의 평균 VWC는 대조구에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며(독립표본 t-검정,  $p < 0.0001$ ), 이는 시험구 패널의 수분 완충(moisture buffering)

**Table 3.** Final survival rate and statistical comparison of plant species after 110 days of terminal drought

Species	Group	Survival/Total	Final survival rate (%)	Chi-square ( $\chi^2$ )	p-value
<i>E. japonicus</i>	Test	10/10	100	15.00	< 0.001
	Control	0/10	0		
<i>J. nudiflorum</i>	Test	10/10	100	15.00	< 0.001
	Control	0/10	0		
<i>L. sinense</i>	Test	10/10	100	N/A	N/A
	Control	10/10	100		
<i>A. grandiflora</i>	Test	0/10	0	N/A	N/A
	Control	0/10	0		
<i>E. fortunei</i>	Test	0/10	0	N/A	N/A
	Control	0/10	0		
<i>J. chinensis</i>	Test	0/10	0	N/A	N/A
	Control	0/10	0		
<i>V. minor</i>	Test	0/10	0	N/A	N/A
	Control	0/10	0		
<i>S. thunbergii</i>	Test	0/10	0	N/A	N/A
	Control	0/10	0		
<i>T. orientalis</i>	Test	0/10	0	N/A	N/A
	Control	0/10	0		

Note : Chi-square test was performed on species showing differential survival. N/A (Not Applicable) indicates tests were not performed due to 100% or 0% survival in both groups.

효과가 성공적으로 작동했음을 정량적으로 입증한다.

### 3.2. 가뭄 스트레스에 따른 식물 생존 동태

110일간의 종말 가뭄 스트레스 실험 종료 후 시험구와 대조구의 식물 생존율은 극명하게 차이를 보였다 (Table 3). 시험구에 식재된 9종의 식물 중 무늬쥐똥나무(*L. sinense*), 황금사철(*E. japonicus*), 영춘화(*J. nudiflorum*)는 100%의 최종 생존율을 기록하며 뛰어난 내건성을 입증했다. 반면 대조구에서는 무늬쥐똥나무(*L. sinense*)만이 100% 생존하였고, 황금사철(*E. japonicus*)과 영춘화(*J. nudiflorum*)를 포함한 나머지 8종은 모두 100% 고사하거나 높은 고사율을 보였다.

황금사철(*E. japonicus*)과 영춘화(*J. nudiflorum*)의 경우, 생존 여부가 패널 유형에 따라 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(카이제곱 검정,  $\chi^2=15.00$ ,  $p < 0.001$ ). 이는 수분 보유 기능이 강화된 시험구 패널이 식물 생존에 결정적인 역할을 했음을 명백히 보여준다. 황금조팝(*S. thunbergii*)과 레인골드(*T. orientalis*)는 두 처리구 모두에서 실험 초기에 빠르게 고사하였는데,

이는 실험 시작 당시부터 시료의 상태가 불량했을 가능성이 있다는 초기 관찰 기록과 일치하는 결과이다. 출사철(*E. fortunei*), 황금노향(*J. chinensis*), 빈카마이너(*V. minor*) 역시 두 처리구 모두에서 100% 고사하여 본 실험 조건과 같은 저관리형 건조 환경에서는 부적합한 것으로 나타났다.

생존율의 시간적 변화를 분석한 카플란-마이어 생존 곡선은 시험구와 대조구 간의 차이를 더욱 명확하게 보여주었다. 대조구에서는 대부분의 수종이 가뭄 처리 후 약 30~40일이 경과한 9월 초중순부터 고사가 시작되어 급격한 생존율 감소를 보였다. 예를 들어 대조구의 영춘화(*J. nudiflorum*)는 9월 9일(단수 35일 차)에 고사가 시작되어 11월 11일(단수 98일차)에 100% 고사하였다. 반면 시험구의 영춘화(*J. nudiflorum*)는 실험 기간 내내 100% 생존율을 유지했다. 이러한 생존 곡선의 뚜렷한 분리(로그-순위 검정,  $P < 0.001$ )는 시험구 패널이 제공하는 수분 완충 효과가 식물의 스트레스 발현을 지연시키고 궁극적으로 생존을 가능하게 했음을 시사한다.

### 3.3. 엽록소 함량을 통한 생리적 반응 분석

엽록소 함량(SPAD 값)의 변화는 생존율 데이터와 일관된 경향을 보이면서도 식물의 생리적 스트레스 수준을 더욱 민감하게 반영하는 조기 지표로서의 유용성을 보여주었다. 실험 초기 건강한 수종들의 SPAD 값은 50~60 범위에서 안정적으로 유지되었다. 가뭄이 지속됨에 따라 대조구에 식재된 수종들의 SPAD 값은 눈에 띄게 감소하거나 불안정한 패턴을 보였다. 황금사철(*E. japonicus*)의 경우 시험구에서는 실험 기간 내내 평균 60~70 대의 높은 SPAD 값을 안정적으로 유지하며 건강한 생리 상태를 보였다. 반면 대조구의 황금사철(*E. japonicus*)은 9월 중순부터 SPAD 값이 점진적으로 하락하기 시작하여 불안정한 변동을 보이다가 결국 고사에 이르렀다. 무늬쥐똥나무(*L. sinense*)는 두 그룹 모두에서 비교적 안정적인 SPAD 값을 유지하여 높은 내재적 스트레스 저항성을 나타냈다.

Table 3은 생존에 성공한 주요 수종의 최종 SPAD 값과 실험 기간 전체의 토양수분함량을 비교한 결과이다. 시험구의 황금사철(*E. japonicus*)은 대조구의 생존 개체보다 통계적으로 유의하게 높은 최종 SPAD 값을 기록했으며( $t$ -검정,  $< 0.05$ ) 이는 시험구의 우수한 수분 조건이 식물의 생리적 건강을 유지하는데 직접적으로 기여했음을 의미한다.

특히 주목할 점은 황금조팝(*S. thunbergii*)의 엽록소 함량 데이터이다. 황금조팝(*S. thunbergii*)은 실험 첫 측정일인 8월 12일부터 시험구와 대조구 모두에서 20~25 범위의 매우 낮은 SPAD 값을 보였다. 이는 건강한 다른 수종들의 초기값(50 이상)과 비교할 때 현저히 낮은 수치로 식물이 가뭄 스트레스 처리 이전부터 이미 영양 결핍이나 다른 스트레스 요인으로 인해 생리적으로 건강하지 않았음을 시사한다(Percival et al., 2008). 이 정량적 데이터는 시료에 문제가 있을 것으로 예상된다는 당시의 질적 관찰 기록을 강력하게 뒷받침하며 황금조팝(*S. thunbergii*)의 빠른 고사가 단순히 본 실험의 가뭄 처리 때문만은 아닐 수 있음을 명확히 한다. 이처럼 SPAD 측정은 식물의 초기 건강 상태를 객관적으로 평가하고 실험 결과의 해석 오류를 줄이는데 중요한 역할을 할 수 있다.

## 4. 고찰

### 4.1. 시스템의 수분 보유 성능과 식물 회복탄력성

본 연구 결과는 식생방음벽과 같은 극한의 인공 환경에서 식물의 장기적 생존이 단일 요인이 아닌 수종의 내재적 내건성 특성과 식재 기반 시스템의 공학적 성능 간의 시너지 효과에 의해 결정된다는 점을 명확히 보여준다. 동일한 기후 조건에 노출되었음에도 불구하고 시험구와 대조구에서 나타난 식물 생존율의 극명한 차이는 시스템 설계의 중요성을 명백히 드러낸다. 황금사철(*E. japonicus*)과 영춘화(*J. nudiflorum*)는 시험구에서는 100% 생존했으나 대조구에서는 전멸하거나 높은 고사율을 보였다. 이는 이들 수종이 잠재적인 내건성을 가지고 있더라도 그 능력이 발현되기 위해서는 최소한의 수분 환경이 전제되어야 함을 의미한다. 이러한 차이는 시험구 패널에 적용된 빗물 저장 및 관개 시스템에 기인한 것으로 해석된다. 이 시스템은 강우 시 초과 수분을 패널 하부에 저장했다가 건조기에 모세관 현상을 통해 토양으로 점진적으로 공급함으로써, 토양의 급격한 건조를 방지하고 식물이 이용 가능한 유효 수분 기간을 연장시키는 수분 버퍼(moisture buffer) 역할을 수행한다(Moise, 2016; Raut and Mali, 2023). 이 버퍼링 효과는 토양의 급격한 건조를 방지하고 식물이 이용 가능한 유효 수분 기간을 연장시킨다. 그 결과 식물은 극심한 가뭄 스트레스에 적응하고 내성 기작을 발현할 수 있는 귀중한 시간을 확보하게 된다(Liu et al., 2023). 대조구에서 9월 초부터 고사가 시작된 반면 시험구의 우수 수종들이 안정적인 생존을 유지한 것은 바로 이 버퍼링 효과의 직접적인 증거이다. 더 나아가 시험구 시스템은 단순히 식물의 죽음을 지연시키는 것을 넘어 생리적 항상성(homeostasis)을 유지할 수 있는 환경을 제공했다. 대조구 식물들이 SPAD 값 감소와 함께 생존율이 급격히 하락하는 위기모드에 빠진 반면 시험구의 우수 수종들은 높은 생존율과 함께 안정적인 SPAD 값을 유지했다. 이는 이들이 단순한 생존 유지를 넘어 활발한 광합성을 포함한 정상적인 생리대사가 이루어졌음을 의미한다(Percival et al., 2008). 외부 환경의 극심한 변동에도 불구하고 내부 상태를 안정적으로 유지하는 이러한 능력은 시스템의 진정한 회복탄력성을 보여주는 것이다. 따라서 수분 보유 기능이 강화된 패널 설계는 VGS를 단순한 생존 모드의 시설에서 장기적으로 안정적인 미관과 생태적 기능을 제공하는 변성 모드의 생태계로 전환시키는 핵심 기술이라 할 수 있다.

**Table 4.** Comparison of mean soil moisture and final chlorophyll content (SPAD) for key surviving species

Parameter	Group	Mean $\pm$ SD	t-statistic	p-value
Overall soil VWC(%)	Test	43.1 $\pm$ 14.2	4.87	< 0.001
	Control	31.5 $\pm$ 16.8		
Final SPAD ( <i>Euonymus japonicus</i> )	Test	72.58 $\pm$ 2.61	2.53	< 0.05
	Control	61.42 $\pm$ 8.75		
Final SPAD ( <i>Ligustrum sinense</i> )	Test	58.18 $\pm$ 4.50	0.98	> 0.05 (ns)
	Control	61.42 $\pm$ 8.75		

Note : VWC data represents the average of all measurements throughout the experiment. Final SPAD values are from the measurement on Nov 11, 2024. SD = Standard Deviation. ns = not significant.

#### 4.2. 생존율과 엽록소 함량으로 본 최적 수중 선발

본 연구의 정량적 데이터는 식생방음벽에 적합한 수종을 과학적으로 선발하는 명확한 기준을 제시한다. 실험 결과에 따라 수종은 뚜렷한 성능 그룹으로 나눌 수 있다.

첫째, 최우수 그룹(Top Performers) : 무늬쥐뚝나무(*L. sinense*)는 시험구와 대조구 모두에서 100% 생존한 유일한 수종으로 가장 열악한 조건에서도 생존을 보장할 수 있는 최고의 내건성과 회복탄력성을 지닌 것으로 평가된다. 문헌에서도 이 종은 가뭄과 불량한 토양 조건에 대한 높은 내성을 가진 것으로 알려져 있다. 황금사철(*E. japonicus*)과 영춘화(*J. nudiflorum*)는 시험구에서 100% 생존하며 뛰어난 성능을 보였지만, 대조구에서는 전멸했다. 이는 이들 수종이 우수한 잠재력을 가졌으나 그 성능은 개선된 시스템의 지원이 있을 때만 발현된다는 중요한 식물시스템 상호작용을 보여준다. 황금사철의 높은 내건성은 두껍고 광택이 있는 잎의 형태적 특성과 관련이 깊다. 이러한 잎은 발달된 왁스질 큐티클 층을 통해 기공을 통하지 않는 수분 증발을 효과적으로 억제하여 식물의 수분 손실을 최소화하는 역할을 한다(Toscano et al., 2016). 영춘화(*J. nudiflorum*)의 경우, 가뭄 스트레스에 직면했을 때 프롤린(proline)과 같은 삼투 조절 물질을 세포 내에 적극적으로 축적하여 수분 포텐셜을 유지하는 생화학적 방어기작을 통해 내성을 발현하는 것으로 보고되었다(Ma et al., 2024).

둘째, 부적합 그룹(Unsuitable Species) : 빈카마이너(*V. minor*), 황금눈향(*J. chinensis*), 줄사철(*E. fortunei*) 등은 두 패널 모두에서 완전히 고사하였다. 이는 패널의 성능 개선만으로는 극복할 수 없는 이들 수종의 근본적인 내건성 부족을 의미한다. 특히 그늘지고

습한 환경을 선호하는 빈카마이너(*V. minor*)와 같은 지피식물은 본 실험과 같이 직사광선과 건조에 노출되는 VGS 환경에서는 생태적으로 부적합하다. 이러한 결과는 VGS 설계 시 단순히 식물의 미관이나 피복 속도만을 고려할 것이 아니라 해당 지역의 기후 조건과 시스템이 제공할 수 있는 수분 공급 능력을 정량적으로 고려하여 식물의 생태적 지위(ecological niche)에 부합하는 과학적인 수종 선정이 시스템의 성패를 좌우함을 강력하게 시사한다.

#### 4.3. 엽록소 함량의 조기 경보 지표로서의 유용성

본 연구는 SPAD 값을 이용한 엽록소 함량 측정이 단순히 데이터 수집을 넘어 식생방음벽의 상태를 진단하고 선제적으로 관리하는 강력한 도구가 될 수 있음을 보여준다. 생존율과 SPAD 값의 시계열 데이터를 비교 분석하면 많은 경우 가시적인 고사 증상이 나타나기 수 주 전에 이미 생리적 스트레스가 시작되었음을 알 수 있다. 예를 들어 대조구의 황금사철(*E. japonicus*)은 9월 23일(단수 49일차)에 고사율이 10%에 불과했지만 SPAD 값은 이미 뚜렷한 감소 추세를 보이기 시작했다. 이는 엽록소 파괴가 식물 세포 수준에서 먼저 일어나고 이것이 누적되어 개체 수준의 위조 및 고사로 이어진다는 생리학적 원리와 일치한다(Percival et al., 2008). 이러한 SPAD 값의 예측 능력은 VGS 유지관리에 있어 패러다임 전환을 가능하게 한다. 기존의 유지관리는 대부분 식물이 노랗게 변하거나 시드는 등 육안으로 문제가 확인된 후에야 이루어지는 사후대응적 방식이었다. 이 시점에서 이미 회복이 불가능하거나 막대한 비용이 소요될 수 있다. 반면 SPAD 측정을 도입하면 사전 예방적 관리가 가능해진다. 유지관리 프로토콜에 따라 정기적으로 소수의 샘플 식물에 대해 신속하게 SPAD 값을 측

정하고 그 값이 사전에 설정된 임계치(예: 건강한 상태 대비 20% 감소 또는 특정 절대 값 이하) 이하로 떨어지면 시스템 전체에 심각한 미관적, 기능적 손상이 발생하기 전에 선별적인 관수나 영양 공급과 같은 조치를 취할 수 있다. 문헌에 따르면 특정 목본 식물에서 SPAD 값이 25 이하로 떨어지면 광합성 과정의 손상이 시작되는 것으로 보고된 바 있다(Percival et al., 2008). 이는 물과 자원의 낭비를 줄이면서 시스템의 건강과 자산 가치를 장기적으로 보존하는 데이터 기반의 효율적이고 지속 가능한 유지관리 전략으로 이어진다.

#### 4.4. 회복탄력성 기반의 식재 설계 제언 및 향후 연구

본 연구의 실증적 평가 결과는 기존의 개념적 모델을 넘어 검증된 성능 지표에 기반 한 정교하고 실용적인 식재 모델의 구축을 가능하게 한다. 가뭄 회복탄력성 수준에 따라 다음과 같은 3단계 계층형 식재 모델(3-Tier Resilience-Based Planting Model)을 제안한다.

첫째, 1등급(핵심 골격층, Tier 1: Structural Foundation): 이 계층은 최악의 조건에서도 시스템의 기본적인 녹지율과 구조적 안정성을 책임지는 생태적 보충 역할을 한다. 본 실험에서 유일하게 대조구에서도 100% 생존한 무늬쥐똥나무(*L. sinense*)가 이 계층에 해당한다. 이 수종은 시스템의 성능에 관계없이 최소한의 녹지를 보장하는 가장 신뢰도 높은 기반 요소로 사용되었다.

둘째, 2등급(고성능 핵심층, Tier 2: High-Performance Core): 이 계층은 시스템의 주된 경관과 기능을 형성하는 핵심 그룹이다. 황금사철(*E. japonicus*)과 영춘화(*J. nudiflorum*)가 여기에 속한다. 이들은 뛰어난 내건성과 미적 가치를 지녔지만 그 성능은 반드시 수분 보유 기능이 강화된 패널 시스템과 결합될 때만 발현된다. 잘 설계된 VGS에서는 이들 수종을 주력으로 식재하여 풍부한 녹화 효과를 극대화해야 한다.

셋째, 3등급(활용 제한층, Tier 3: Restricted Use/High-Input Accent): 본 실험에서 내건성이 가장 취약한 것으로 판명된 빈카마이너(*V. minor*), 황금눈향(*J. chinensis*), 줄사철(*E. fortunei*) 등은 일반적인 저관리형 식생방음벽 환경에서는 사용을 지양해야 한다. 만약 이들의 독특한 경관적 가치를 활용하고자 한다면 별도의 자동 관수 시스템이 보장되거나 빗물 유입이 집중되는 특정 지점에 국한하여 매우 제한적으로 사용하는 엑센트 식재로 접근해야 한다.

이러한 성능 기반의 다층 식재 모델은 단순히 보기 좋은 조합이 아니라 각 수종의 검증된 생태적 특성과 회복탄력성을 고려하여 시스템의 붕괴 위험을 최소화하고 장기적인 지속가능성을 확보하는 과학적이고 실용적인 설계 전략이다. 이는 설계자가 VGS 의미적 목표와 생태적 안정성 사이의 균형을 맞추는데 도움을 주는 강력한 의사결정 도구가 될 수 있다.

향후 연구에서는 본 연구의 결과를 확장하여 식재 기반의 수분 보유 능력을 더욱 향상시키기 위한 고급 재료의 적용을 검토할 필요가 있다. 예를 들어, 다공성 구조로 토양의 물리적 구조와 양분 보유력을 개선하는 바이오차(biochar)와 자체 무게의 수백 배에 달하는 물을 흡수하는 고흡수성 폴리머(superabsorbent polymer)와 같은 토양 개량제를 인공토양에 혼합하여 가뭄 저항성을 극대화하는 방안을 탐구할 수 있다. 특히 이 두 물질을 함께 적용했을 때 가뭄 스트레스 완화에 시너지 효과를 보인다는 연구 결과는(Youssef et al., 2018), 향후 VGS 식재 기반의 성능을 최적화하기 위한 유망한 연구 방향을 제시한다(Agbna and Zaidi, 2023). 또한 본 연구에서 선발된 우수한 수종들의 동절기 내한성 평가 및 장기적인 생육 모니터링을 통해 사계절에 걸친 종합적인 성능 검증이 이루어져야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구는 식생방음벽의 장기적인 지속가능성을 확보하기 위해 과학적 근거에 기반 한 수종 선별과 회복탄력성 증진을 위한 공학적 시스템 설계라는 이중 전략이 필수적임을 실증적으로 밝혔다. 110일간의 극한 가뭄 스트레스 실험을 통해 빗물 저장 및 수동 관개 기능이 포함된 기능 강화형 시험구 패널이 일반 상용 패널에 비해 식물의 생존율과 생리적 건강 상태를 현저히 향상시키는 것을 정량적으로 확인하였다. 이는 VGS의 성공이 단순히 식물을 심는 행위를 넘어 식물이 생존할 수 있는 안정적인 미세 서식처를 공학적으로 창출하는데 달려 있음을 의미한다. 특히 무늬쥐똥나무(*L. sinense*), 황금사철(*E. japonicus*), 영춘화(*J. nudiflorum*)는 가혹한 무관수 환경에서도 뛰어난 내건성과 회복탄력성을 보여 기후적응형 식생방음벽의 핵심 골격 수종으로서의 가치를 명백히 입증하였다. 또한 엽록소 함량(SPAD 값) 측정은 식물의 생리적 스트레스를 조기에 감지하는 효과적인 비파괴 진단 도구로서 데이터 기반의 선제적

유지관리 전략 수립에 기여할 수 있음을 보여주었다.

이러한 실증적 결과를 바탕으로 검증된 성능 기반의 다층 식재 모델은 단순히 미학적 구성을 넘어 시스템의 생태적 안정성과 장기적 생존력을 보장하는 실용적이고 과학적인 설계 지침을 제공한다. 본 연구의 결과와 방법론은 향후 식생방음벽뿐만 아니라 다양한 형태의 수직녹화시스템을 보다 과학적이고 지속가능한 방식으로 설계하고 구축하는데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 이는 궁극적으로 유지관리 부담을 줄이고 VGS의 광범위한 보급을 촉진하며 도시의 회복탄력성을 높이고 기후변화에 효과적으로 대응하는 건강한 녹색 인프라를 확충하는데 기여할 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- Agarwal, R., Shekhar, S., Thakur, A., Olakkangal, D. J., Singh, Y. P., 2023, Microirrigation: The water saving technology, *Pharma Innov. J.*, 12(6), 2386-2393.
- Agbna, G. H. D., Zaidi, S. J., 2023, Hydrogel performance in boosting plant resilience to water stress: A Review, *Gels*, 9(5), 388.
- Agresti, A., 2018, *An Introduction to categorical data analysis*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Ansari, W. A., Atri, N., Pandey, M., Singh, A. K., Singh, B., Pandey, S., 2019, Influence of drought stress on morphological, physiological and biochemical attributes of plants: A Review, *Biosci. Biotechnol. Res. Asia*, 16(4), 697-709.
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., Cabeza, L. F., 2017, Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A Comparative study between green walls and green facades, *Build. Environ.*, 111, 228-237.
- Kim, J. S., Kwon, Y. H., Jung, Y. J., 2024, Evaluation of the functions and reliability of an eco-friendly vegetated soundproof wall for climate benefits, *J. For. Environ. Sci.*, 40(2), 141-150.
- Liu, F., Zhao, Y., Wang, X., Wang, B., Xiao, F., He, K., 2023, Physiological response and drought resistance evaluation of *Gleditsia sinensis* seedlings under drought-rehydration state, *Sci. Rep.*, 13(1), 19963.
- Ma, B., Hu, H., Liu, X., Wang, Q., Zhou, H., Chen, S., Liu, J., Li, Y., 2024, Response of four shrubs to drought stress and comprehensive evaluation of their drought resistance, *Agriculture*, 14(8), 1211.
- Moise, G., 2016, Passive irrigation system for green roofs, *Sci. Pap. Ser. Manag. Econ. Eng. Agric. Rural Dev.*, 16(1), 331-334.
- Percival, G. C., Keary, I. P., Noviss, K., 2008, The potential of a chlorophyll content SPAD meter to quantify nutrient stress in foliar tissue of sycamore (*Acer pseudoplatanus*), english oak (*Quercus robur*), and european beech (*Fagus sylvatica*), *Arboric. Urban For.*, 34(2), 89-100.
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., Cabeza, L. F., 2011, Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings, *Appl. Energy*, 88(12), 4854-4859.
- Toscano, S., Farieri, E., Ferrante, A., Romano, D., 2016, Physiological and biochemical responses in two ornamental shrubs to drought stress, *Front. Plant Sci.*, 7, 645.
- Toscano, S., Ferrante, A., Romano, D., 2016, Response of mediterranean ornamental plants to drought stress, *Horticulturae*, 5(1), 6.
- Wang, W., Zhou, X., Wu, S., Zhao, M., Jin, Z., Bei, K., Zheng, X., Fan, C., 2024, Vertical green wall systems for rainwater and sewage treatment, *Sustainability*, 16(17), 7593.
- Youssef, S. M., Riad, G. S., Abu El-Azm, N. A. I., Ahmed, E. M., 2018, Amending sandy soil with biochar or/and superabsorbent polymer mitigates the adverse effects of drought stress on green pea, *Egypt. J. Hort.*, 45(1), 169-183.

- 
- CEO. Jong-Sung Kim  
Eco Land Co., Ltd.  
srs2002@empas.com
  - Professor. Young-Hyoo Kwon  
Department of Landscape Architecture, Korea National College of Agriculture & Fisheries  
flori2002@naver.com
  - Professor. Yong-Jo Jung  
Department of Greensmart City, Sangmyung University  
smilejung@smu.ac.kr