

Research Paper

아파트 단지 내 공간별 차폐 특성이 광환경 변화와 수목 생육에 미치는 영향

이성훈* · 양 준** · 김민수** · 정연욱** · 김학구* · 박솔비* ·
백준하* · 이준섭* · 권진온* · 권용진* · 김찬범*

한국수목원정원관리원*, 삼성물산 건설부문**

The Effects of Shading Characteristics by Space within an Apartment Complex on Changes in Light Environment and Tree Growth

Seong Hun Lee* · June Yang** · Min Soo Kim** · Yeon Wook Jeong** ·
Hak Koo Kim* · Sol Bee Park* · Jun Ha Paek* · Jun Seop Lee* ·
Jin On Kwon* · Yong Jin Kwon* · Chan Beom Kim*

Korea Arboreta and Gardens Institute*
Samsung C&T corporation**

요약: 아파트 단지는 건물의 고층화와 고밀도화로 인해 복잡한 미기후를 형성한다. 하지만 기존 조경 식재는 설계자의 직관이나 단순 방위에 의존하여 이러한 환경 특성을 정밀하게 반영하지 못하고 있다. 이에 본 연구는 건물에 의한 공간의 차폐 특성을 정량적으로 유형화하고 광환경(광량, 광파장) 차이가 조경수의 실제 생장(근원직경)에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 6개 아파트 단지 내 36개 표준지를 조사하였다. 어안렌즈로 천공 차폐율과 8방위 내 건물 수를 산출한 뒤 K-Means 군집 분석을 통해 공간을 개방형, 부분 차폐형, 차폐형으로 분류하였다. 이후 공간 유형별로 광환경과 식재된 수목의 연평균 근원직경 생장량을 통계적으로 비교 분석하였다. 연구 결과 무조건적인 개방 공간이 수목 생육의 최적지가 아닌 것이 확인되었다. 수목의 전체적인 생장량은 부분 차폐형에서 가장 우수하였으며($p < 0.001$) 광환경 분석 결과에서도 부분 차폐형은 개방형보다 광량은 적었으나 식물 생장에 중요한 광파장(R:FR 비율)은 일과시간 동안 가장 높고 안정적으로 유지하는 것으로 나타났다. 본 연구는 아파트 단지 내 공간을 정량적으로 분류하고 적절한 차폐가 오히려 수목 생장에 긍정적인 광환경을 조성할 수 있다는 것을 실증적인 데이터로 입증한 것에 의의가 있다. 이 결과는 향후 공간 특성을 반영한 조경수 선정 및 식재 가이드라인 마련을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어: 부분 차폐형, R:FR 비율, K-Means 군집 분석, 미기후

First Author: Seong Hun Lee, Tel: +82-44-251-0251, E-mail: dbajds00@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0003-0562-494X

Corresponding Author: Chan Beom Kim, Tel: +82-44-251-0211, E-mail: misdb83@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3373-2000

Co-Authors: June Yang, Tel: +82-2-2145-5730, E-mail: June.yang@samsung.com

Min Soo Kim, Tel: +82-2-2145-5730, E-mail: minsoo88.kim@samsung.com

Yeon Wook Jeong, Tel: +82-2-2145-5730, E-mail: yw57.jeong@samsung.com

Hak Koo Kim, Tel: +82-44-251-0218, E-mail: hakkoo1@koagi.or.kr, ORCID: 0000-0002-4300-7590

Sol Bee Park, Tel: +82-44-270-5184, E-mail: thfql109@kookmin.ac.kr, ORCID: 0009-0000-3064-4411

Jun Ha Paek, Tel: +82-44-270-5184, E-mail: paekjunha@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8355-308X

Jun Seop Lee, Tel: +82-44-270-5184, E-mail: wnstjq7508@naver.com, ORCID: 0009-0000-8213-2573

Jin On Kwon, Tel: +82-44-270-5090, E-mail: pola1226@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0003-7030-7649

Yong Jin Kwon, Tel: +82-44-251-0197, E-mail: yjk072@koagi.or.kr, ORCID: 0009-0006-9760-9358

Received: 30 June 2026. Revised: 8 August 2026. Accepted: 11 September 2026.

Abstract: The high-rise and high-density development of apartment complexes creates complex microclimates. However, conventional landscape planting has often failed to accurately reflect these environmental characteristics, heavily relying on designers' intuition or simple compass directions. Therefore, this study aimed to quantitatively categorize spatial shading characteristics formed by buildings and to investigate the impact of differences in the light environment (light intensity and R:FR ratio) on the actual growth (diameter at root collar) of landscape trees. For this purpose, 36 standard plots across six apartment complexes were investigated. Using hemispherical photography, the sky obstruction ratio and the number of buildings in eight directions were calculated. Subsequently, the spaces were classified into Open, Partially shaded, and Completely shaded types through K-Means clustering analysis. Following this, the light environment and the annual root collar diameter growth of the planted trees were statistically compared across the spatial types. The results confirmed that unconditionally open spaces are not the optimal environments for tree growth. The overall tree growth was the highest in the partially shaded spaces ($p < 0.001$). Furthermore, the light environment analysis revealed that although the partially shaded spaces had a lower total light intensity than the open spaces, they maintained the essential light quality (R:FR ratio) crucial for plant growth at the highest and most stable levels during the day. This study is significant as it quantitatively classifies spaces within apartment complexes and empirically proves that appropriate shading can actually foster a positive light environment for tree growth. These findings can serve as fundamental data for future landscape tree selection and the establishment of planting guidelines that accurately reflect spatial characteristics.

Keywords: Partially shaded, R:FR ratio, K-Means clustering analysis, Microclimate

I. 서론

현대 도시의 아파트 단지는 토지이용 효율을 극대화하기 위해 고층화 및 고밀도화되는 경향이 뚜렷하다. 이러한 건축 변화는 아파트 단지 내 복잡하고 다양한 미기후를 형성한다. 특히 건축물의 배치와 높이에 의해 결정되는 차폐(Shading)와 위요(Enclosure)는 일조 시간과 광량을 불규칙하게 변화시키는 주된 요인으로 작용한다. 그러나 현재의 조경 식재 설계 및 관리는 이러한 미기후의 복잡성을 정량적으로 반영하지 못하고 있다. 아파트 조경 식재는 생태적 특성보다는 시각적 경관 위주로 이루어지고 있으며(Lee et al., 2004) 현장에서는 여전히 설계자의 주관적 판단이나 방위(남향/북향) 혹은 단순 광량(양지/음지)과 같은 분석에 의존하고 있다. 이러한 정성적 접근은 고층 건물에 의해 입체적으로 형성되는 그림자와 광환경의 스펙트럼을 정확히 반영하지 못하여 공간의 특성에 부합하는 정밀한 조경 식재를 저해하는 원인이 된다(Rayner & Williams, 2016).

기후 위기 대응과 관련하여 도시 수목의 가치는 더욱 중요해지고 있다(Lee et al., 2024). You et al. (2019)와 Kang et al. (2004)은 아파트 공간의 수목이 탄소흡수원으로 기능하기 위해서는 단순한 식재 본 수 확보를 넘어 수목의 건전한 생육이 필요하다는 것을 강조하였다. 이는 수목이 환경에 적응하여 잘 자라지 못하면 탄소저감 효과도 기대할 수 없다는 것을 의미한다. 이에 따라 아파트 단지의 생육 환경을 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되어왔다. Jang et al. (2007)은 건물과 수목 간의 이격 거리가 부족하여 수목의 정상적인 수관 발달이 저해됨을 보고하였다. Bae (2025)와 He and Chen (2025)은 건물 배치가 기온 저감 및 바람길 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Jung et al. (2015)과 Park and Oh (2022)는 대구와 광주 등 남부 지역 아파트 수목의 생장 및 식재특성을 분석하였다. 하지만 선행연구에서는 건물 인접 공간을 단순히 생육에 불리한 공간으로 규정하여 거리 확보만을 대안으로 제시하거나 공간 유형화의 기준이 연구자의 직관이나 단순 방위구분에 머물러 있다는 한계가 있다. 고층 건물이 불규칙

Table 1. Characteristics of the study sites

No.	Apartment Complex	City	Completion Year	Address
1	A	Seoul	2014	77 Sinpung-ro, Yeongdeungpo-gu
2	B	Busan	2017	402 Jwadongsunhwan-ro, Haeundae-gu
3	C	Seoul	2019	8 Seolleung-ro, Gangnam-gu
4	D	Seoul	2020	62 Seoun-ro, Seocho-gu
5	E	Seoul	2021	651 Samseong-ro Gangnam-gu
6	F	Busan	2022	135-9 Geumjeongmaeul-ro, Dongnae-gu

하게 배치된 아파트 단지의 경우 실제 수목이 받는 입체적인 차폐 환경을 정확하게 확인하기가 어렵다. 따라서 수목 생육 환경을 객관적으로 파악하기 위해서는 수목의 시점에서 바라본 하늘의 개방감을 정량적인 수치로 환산하는 과정이 필수적이다(Rich, 1990).

정량적 공간 분류가 수목 식재에 있어 유의미한 가치를 가지려면 차폐 특성이 수목의 생육 기작에 미치는 영향을 생리학적 관점에서 확인해야 한다. 특히 자연 상태의 그늘과 인공 구조물에 의한 그늘은 광질(광파장) 측면에서 본질적인 차이를 보인다. Smith (1982)에 따르면 숲속에서 형성되는 식물에 의한 그늘은 나뭇잎이 광합성을 위해 적색광을 우선적으로 흡수하므로 하층부의 R:FR 비율(적색광/원적색광 비율)이 급격히 낮아지는 특성이 있다. 이는 수목에게 경쟁 신호로 인식되어 줄기를 가늘고 길게 뻗게 하는 웃자람을 유발한다. 반면 아파트 단지의 주된 차폐 요소인 건물은 가시광선 전 영역을 균일하게 차단하는 그늘을 형성한다. Gommers et al. (2013)은 이러한 그늘에서 광량은 감소하더라도 R:FR 비율은 높게 유지되므로 식물에 의한 그늘과는 다른 성장 반응이 나타날 수 있음을 시사하였다. 건물에 의한 차폐 공간은 광량 부족을 야기하는 부정적 환경이 아니라 안정적인 광질(광파장)을 통해 수목의 건전한 생육이 가능한 잠재적 공간일 수 있다.

이에 본 연구는 고층 아파트 단지의 공간을 객관적인 기준으로 유형화하고 각 공간 유형에 따라 광환경이 어떻게 변화하는지 전반적인 경향성을 파악하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 서울과 부산의 6개 아파트 단지 36개 표준지에서 다음과 같은 연구를 수행하였다. (1) 표준지별 천공 차폐율을 산출하고 이를 기준으로 아파트 단지 내 공간을 개방형, 부분 차폐형, 차폐형으로 구분하였다. (2) 분류된 공간 유형에 따라 광량

과 광파장이 어떻게 변화하는지 현장 측정을 통해 확인하였다. (3) 각 공간 유형별로 표준지에 식재되어 있는 수목 중 비교 가능한 수목을 파악하여 수목 생장이 어떻게 달라졌는지 확인하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지 선정

본 연구는 기후 특성에 따른 식재 환경의 차이를 포괄하고 분석 결과의 일반화를 도모하기 위해 서울특별시와 부산광역시에 있는 아파트 6개소를 대상으로 진행하였다(Table 1). 비슷한 환경의 아파트를 비교하기 위해 가급적 남서·남동향의 아파트 형태가 V자 형태에 가까운 단지로 선정하였으며 동과 동 사이의 간격을 멀리하여 대규모 녹지 공간을 조성한 아파트보다는 동과 동 사이의 녹지들이 균형있게 조성되어있는 곳을 선정하였다. 표준지는 방위, 건물의 위치 등을 고려하여 1개 아파트당 6개 표준지를 선정하였다. 6개 아파트 모두 동일한 방법으로 선정하여 서로 다른 차폐 특성을 대변할 수 있는 총 36개 표준지를 최종 조사구로 확정하였다. 표준지를 확정하는 과정에서 외부 오차를 줄이기 위해 기본적인 토양 조건과 평소의 조경 관리 수준이 유사한 곳을 우선적으로 선정하였다. 특히 단지당 할당된 6개 표준지를 개방적 공간 3개소와 폐쇄적 공간 3개소로 임의 할당하여 선정하였다.

2. 천공 차폐율 및 8방위 내 건물 수 산출

각 표준지의 천공 차폐율을 정량화하기 위해 어안렌즈를 활용하여 사진을 촬영하였다. 사진은 1개 표준지당 3곳에서 촬영하였으며 조사구의 지상 50cm 높이에서 어안렌즈(4K HD Fullscreen Fisheye Lens, ILWOO)

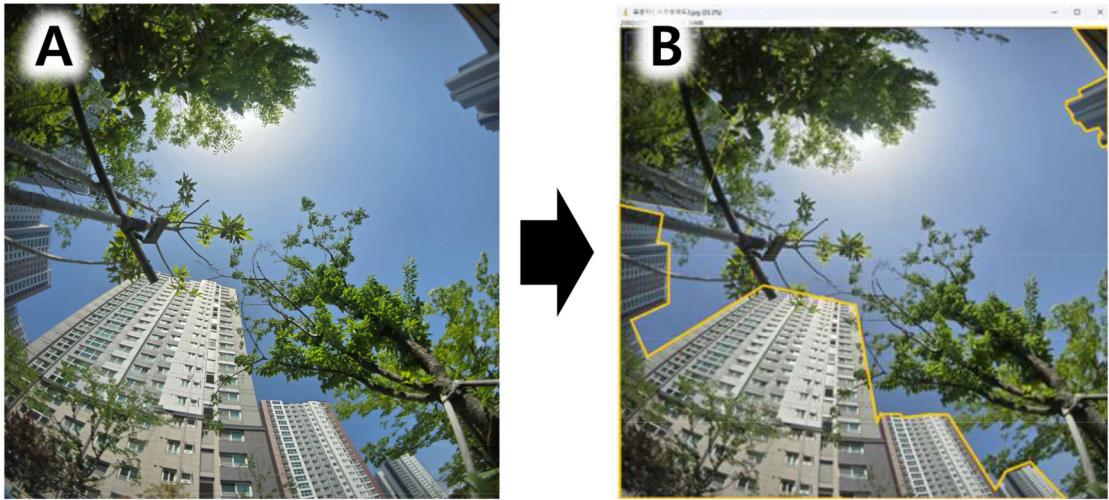


Figure 1. Calculation process of the sky blockage ratio. (A) Captured sky photograph, (B) Defined outline of the apartment buildings

를 장착한 카메라(Galaxy S24 Ultra, Samsung)를 북쪽으로 두고 수평으로 고정하여 천공 사진을 촬영하였다. 모든 표준지는 동일한 방식으로 촬영되었고 총 108개의 사진이 촬영되었다. 획득된 사진은 이미지 분석 소프트웨어인 ImageJ 프로그램을 이용하여 분석하였다(Schneider et al., 2012). 1차로 각 사진에 대한 전체 픽셀 수를 확인하였고 2차로 아파트에 대한 외곽선을 설정하여 외곽선 안의 픽셀 수를 확인하였다. 이후 측정된 두 개의 픽셀 수를 활용하여 총 픽셀 수에 대한 아파트 범위 픽셀 수의 비율을 계산해 천공 차폐율을 산출하였다(Figure 1). 1개 표준지당 3개의 사진이 획득되었기에 3개 사진에 대한 천공 차폐율 값을 평균하여 1개 표준지의 천공 차폐율로 확정하였다.

8방위 내 건물 수는 단순히 건물의 가림 정도만 보는 것이 아닌 방향에 따른 입체적 위요감을 확인하기 위해 촬영된 사진을 바탕으로 방위별 분포를 조사하였다. 사진 내 공간을 8개 방위(N, NE, E, SE, S, SW, W, NW)로 분할하고 해당 면적이 구조물에 가려지는 수를 조사하였다.

3. K-Means 군집 분석

아파트 단지 내 공간의 유형화를 위해 비계층적 군집화 알고리즘인 K-Means 군집 분석을 실시하였다(Bao, 2021). K-Means 알고리즘은 대량의 데이터를 거리 기반으로 분류하는 데 효과적이며, 엘보우 기법 등 통계적 검증 지표를 함께 활용함으로써 군집화 과정에

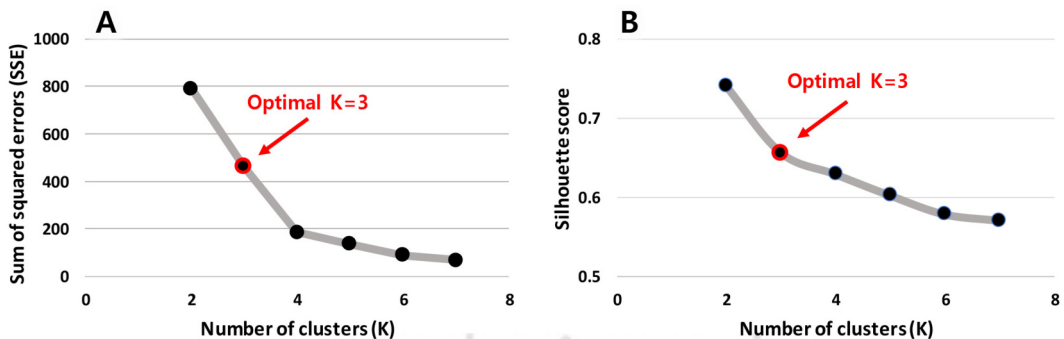


Figure 2. Validation of the optimal number of clusters (K=3) for K-means clustering. (A) Elbow method showing the decrease in sum of squared errors (SSE), and (B) Silhouette analysis evaluating cluster separation and cohesion

서 발생할 수 있는 연구자의 주관적 편향을 최소화할 수 있다. 분석 과정에서 광환경을 결정하는 주요 요인인 천공 차폐율의 중요도를 왜곡없이 반영하기 위해 인위적인 변수 표준화 과정을 배제하고 원시 데이터의 수치 규모를 가중치로 활용하였다. 최적의 군집 수(K) 결정을 위해 군집 내 오차 제곱합(SSE)의 감소율이 완만해지는 지점을 찾는 엘보우 기법을 적용하였으며 실루엣 계수를 산출하여 군집 간 분리도와 군집 내 응집도를 평가하였다(Figure 2). 그 결과 K=3 지점에서 오차 제곱합(SSE)의 감소율이 완만해지는 꺾임점이 나타났으며 실루엣 계수 역시 K=3일 때 실루엣 계수가 0.657로 도출되어 우수한 군집 타당성(0.6 이상)을 확보하는 것으로 확인되었다. 이에 따라 공간 유형은 초기에 임의 할당된 2개 그룹에서 벗어나 개방형, 부분 차폐형, 차폐형으로 세분화되었다.

4. 광환경 및 수목 측정

분류된 공간 유형에 따라 실제 수목이 체감하는 광환경이 어떻게 달라지는지 파악하기 위해 2025년 9월에 현장 광환경 조사를 실시하였다. 6개 아파트 단지별로 차폐 특성이 가장 뚜렷하게 대조되는 개방지와 차폐지를 각각 1개소씩 선정해 총 12개소의 표본 표준지에서 측정을 진행하였다. 측정은 10시부터 16시까지 1시간 간격으로 연속 측정을 실시하였다. 측정 장비로는 휴대용 광파장 측정기(PSI SpectraPen Mini, PSI)를 사용하였으며 이를 통해 공간 유형별 파장 대역에 따른 분광 방사조도($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)를 측정하고 기록하였다. 기상 조건에 따른 데이터 왜곡을 최소화하고자 비가 오는 날은 측정하지 않았다. 12개 표본 표준지에서 수집된 광환경 데이터는 앞서 K-Means 군집 분석을 통해 도출된 세 가지 공간 유형에 따라 정량적으로 분류되었으며 각 공간의 광환경을 설명하는 유형별 대표값으로 산출되었다.

이와 더불어 광환경 차이가 수목의 생장에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 전체 36개 표준지 내에 식재된 모든 교목성 수종을 대상으로 매목 조사를 실시하였다. 수목의 성장량은 아파트 준공 당시 설계된 조경 식재 도면 상의 수목 규격과 본 연구의 현장 실측값을 일대일(1:1)로 비교하여 산출하였다. 도면 상의 식재

수목과 현재 생육 중인 수목을 정확하게 대조하기 위해 각 표준지 내 수종을 동정하고 GPS 장비를 사용하여 모든 개체의 위치 좌표를 취득하였다. 취득된 좌표 데이터와 준공 도면의 식재 위치를 중첩 및 대조하여 일대일(1:1) 매칭을 완료하였다. 객관적인 성장량 데이터 확보를 위해 대조 과정에서 고사로 인한 식재 추정 수목, 도면상의 오기입 등 명백한 오류가 확인된 개체는 분석대상에서 제외하여 연구 결과의 신뢰성을 확보하였다.

5. 통계 분석

본 연구의 통계 분석은 Python(Python software foundation 2024)을 통해 수행되었다. 수집된 데이터의 특성과 분석 목적에 따라 다음과 같은 통계 기법을 적용하였다.

첫 번째로 표준지 간 토양 환경의 통계적 유의성을 확인하기 위해 임의 할당된 표준지(개방형, 폐쇄형)에 대해서는 독립표본 t-검정을 실시하였다. 이후 세분화된 표준지(개방형, 부분 차폐형, 차폐형)에 대해서는 일원분산분석(Analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다. 두 번째로 K-Means 군집 분석을 통해 도출된 3가지 공간 유형(개방형, 부분 차폐형, 차폐형) 간의 천공 차폐율 및 8방위 내 건물 수 차이를 검증하기 위해 일원분산분석을 실시하였으며 유의미한 차이가 인정될 경우 Tukey's HSD 검정을 통해 사후분석하였다. 세 번째로 각 공간 유형(개방형, 부분 차폐형, 차폐형)에 식재되어있는 수목의 근원직경 성장량 차이를 분석하기 위해 비모수 검정인 Kruskal-Wallis 검정을 실시하였다. 또한 집단간의 구체적인 차이를 확인하기 위한 사후분석으로는 Mann-Whitney U 검정을 실시하였다. 네 번째로 이러한 공간별 생육 차이가 개별 수종 단위에서도 동일하게 나타나는지 교차 검증하기 위해 서로 다른 공간에 공통으로 식재된 수종(소나무, 배롱나무, 단풍나무)을 추출하여 독립표본 t-검정을 실시하였다. 다섯 번째로 공간 유형(개방형, 부분 차폐형, 차폐형) 간 수종 구성의 불균형이 성장량 결과에 미치는 편향을 통제하기 위해 수종을 공변량으로 하는 공분산분석(Analysis of Covariance, ANCOVA)을 수행하였으며 불균형 자료의 특성을 고려하여 제2종 제곱합 방식을

적용하였다. 모든 통계적 가설 검정의 유의수준은 5% ($p<0.05$)로 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 공간 유형별(개방적 공간, 폐쇄적 공간) 토양 환경 동질성 검증

아파트 단지 내 수목 생육에 미치는 광환경의 영향을 분석하기 전 외부 오차 요인인 토양 환경의 동질성을 검증하였다. 임의 할당된 개방적 공간($N=18$)과 폐쇄적 공간($N=18$) 간의 토양 환경(토양 온도, 토양 수분, 전기 전도도) 측정값을 대상으로 독립표본 t-검정을 실시하였다. 분석 결과 두 공간 유형 간 토양 온도($p=0.218$), 토양 수분($p=0.712$), 전기전도도($p=0.238$) 모두 통계적으로 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. K-Means 군집 분석 이후 세분화된 대상지를 대상으로도 일원분산분석을 실시한 결과 토양 온도($p=0.400$), 토양 수분($p=0.248$), 전기전도도($p=0.982$) 모두 통계적으로 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 2).

2. K-Means 군집 분석을 통한 아파트 내 공간의 정량적 유형화

본 연구에서는 표준지 선정 과정에서 단지별 차폐 경향을 고려하여 개방적 공간과 폐쇄적 공간으로 각각 18개소씩 균등하게 임의 할당하여 선정하였다. 그러나 육안에 의한 현장 조사만으로는 차폐의 편차를 객관적으로 구분하는데 한계가 있어 정확한 공간별 특성을 반영하기 위해 천공 차폐율과 8방위 내 건물 수를 이용해 K-Means 군집 분석을 수행하였다. 그 결과 초기에 임의 할당된 18개 개방적 공간 중 16개소는 개방형으로 유지되었으나 2개소는 중간 단계인 부분 차폐형으로 재분류되었다. 또한 18개의 폐쇄적 공간 중 4개소는 개방형, 5개소는 부분 차폐형으로 이동하였으며 나머지 9개소만이 차폐형으로 분류되었다. 이처럼 사전 임의 할당은 조사 시점의 육안 평가에 의존하는 한계가 있었으나 K-Means 군집 분석을 거치면서 기존의 이분법적 구분이 개방형(20개소), 부분 차폐형(7개소), 차폐형(9개소)의 세 가지 정량적 유형으로 보다 정밀하게 세분화되었음을 확인하였다(Table 3).

세 가지 유형의 천공 차폐율을 확인한 결과 개방형

Table 2. Statistical homogeneity verification of underlying soil environmental factors among three spatial types

Variable	Open ($N=20$) Mean $\pm$ SD	Partially shaded ($N=7$) Mean $\pm$ SD	Completely shaded ($N=9$) Mean $\pm$ SD	Degrees of freedom (df)	F-value	p-value
Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	28.74 $\pm$ 1.85	28.06 $\pm$ 3.87	29.59 $\pm$ 1.25	2, 33	0.942	0.400
Soil Moisture (%)	41.86 $\pm$ 9.99	50.06 $\pm$ 11.39	44.07 $\pm$ 12.63	2, 33	1.456	0.248
Electrical conductivity (dS/m)	0.11 $\pm$ 0.12	0.10 $\pm$ 0.105	0.10 $\pm$ 0.14	2, 33	0.018	0.982

Table 3. Correspondence table between the initial spatial assignment and the final spatial classification by K-Means clustering

Initial Assignment	Final classification: Open	Final classification: Partially shaded	Final classification: Completely shaded	Total
Open space	16	2	0	18
Closed space	4	5	9	18
Total	20	7	9	36

Table 4. Quantitative characteristics of the three spatial types classified by K-Means clustering

Type	N	Range of sky blockage ratio (%)	Number of building within 8 directions
Open	20	35.2~49.5	4~6
Partially shaded	7	57.4~62.1	5~7
Completely shaded	9	65.1~72.4	5~8

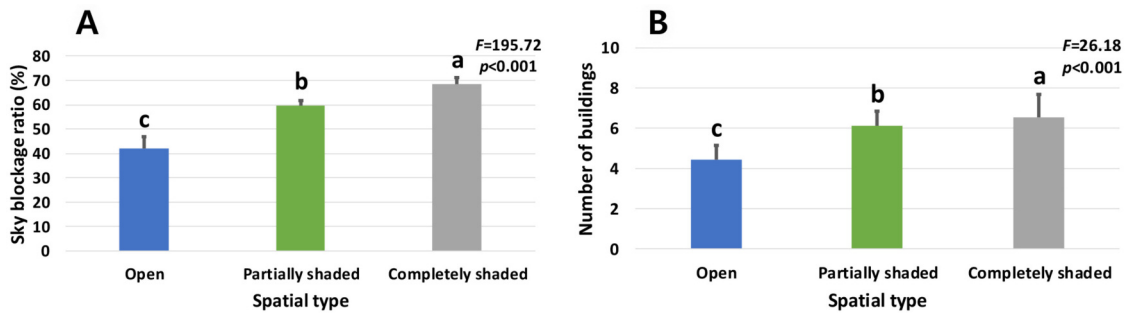


Figure 3. Comparison of sky blockage ratio and number of buildings by spatial type derived from K-Means clustering. Graph (A) shows the mean sky blockage ratio (%), and (B) shows the mean number of buildings in eight directions by spatial type. Data are expressed as Mean $\pm$ SD. Different lowercase letters (a, b, c) on top of the bars indicate statistically significant differences among the groups ($p<0.05$, Tukey's HSD test)

(35.2~49.5%), 부분 차폐형(57.4~62.1%), 차폐형(65.1~72.4%)으로 나타났다(Table 4). 각 공간 유형의 수치를 아파트의 공간적 맥락으로 해석하면 개방형은 4~6개 건물에 가려져있고 천공 차폐율이 세 공간 유형 중 가장 낮다. 이는 아파트 내에서 하늘이 가장 넓게 열려있는 실질적인 개방 공간을 뜻한다. 차폐형은 5~8개 아파트로 둘러싸여 하늘의 대부분이 가려진 곳이다. 사방이 대부분 막혀있어 만성적인 일조량 부족이 발생하는 곳으로 도시기후학에서 미기후 변화의 주요 원인으로 꼽는 도시 협곡 형태의 강한 위요 공간을 형성한다. 부분 차폐형은 5~7개 아파트로 둘러싸여 음지와 비슷하게 건물로 막혀있지만 실제 하늘이 가려진 비율은 건물 수에 비해 상대적으로 낮게 나타난다. 건물이 많음에도 불구하고 하늘이 많이 가려지지 않은 이유는 해당 공간이 대부분의 방향은 건물에 막혀있으면서도 건물과 건물 사이의 벌어진 틈새나 단지 내 도로처럼 예외적으로 트여있는 공간이 있기 때문으로 보인다. 따라서 아파트 단지의 다양한 동 형태와 배치 방식으로 인해 건물이 밀집한 구역임에도 하늘의 약 40% 정도가 확보되는 환경이 형성된 것으로 판단된다. 이는 주변에 건물이 많다고 해서 반드시 하늘이 차단되는 것은 아님을 시사한다. 따라서 부분 차폐형 공간은 상시 그늘이 지는 음지와 달리 태양의 이동에 따라 빛과 그림자가 교차하는 특수한 공간이라고 할 수 있다.

도출된 각 공간 유형이 실제 대상지의 환경 차이를 대변하고 있는지 검증하기 위해 분산분석을 실시한 결과 유형 간 천공 차폐율의 차이에 대한 F -value가 195.72

로 도출되어 명확한 통계적 유의성을 나타냈으며($p<0.001$), 8방위 내 건물 수 역시 F -value가 26.18로 도출되어 통계적으로 매우 유의미한 차이가 있는 것으로 확인되었다($p<0.001$). 이는 각 유형 내에서 발생하는 단순한 오차에 비해 유형 간의 분산이 더 크다는 것을 의미하며 K-Means 알고리즘을 통한 공간 유형 분류가 통계적으로 타당하게 이루어졌음을 뒷받침한다. 이를 바탕으로 각 공간 유형별로 차이가 있는지 명확하게 확인하기 위해 사후분석한 결과 개방형과 차폐형, 개방형과 부분 차폐형, 부분 차폐형과 차폐형 모두 천공 차폐율과 8방위 내 건물 수의 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($p<0.001$)(Figure 3).

2. 공간 유형에 따른 광환경 특성 비교 및 분석

야외 공간의 광환경은 측정 당시의 기상 조건에 따라 변동성이 크게 나타난다(Mol et al., 2023). 본 연구의 광환경 현장 측정 데이터 역시 맑고 흐린 기상 조건이 혼재되어 변동성을 가지고 있다. 그러나 이러한 변동성에도 불구하고 건축물의 차폐가 각 공간에 미치는 영향을 규명하기 위해 본 연구는 광환경의 평가 지표를 광량과 광파장(R:FR 비율)으로 구분하여 분석하였다. 광량이 에너지원이라면 R:FR 비율은 수목 내 광수용체인 피토크롬(Phytochrome)을 자극하여 주변 장애물에 의한 피압 여부를 감지하고 생장의 방향(직경, 수고)을 결정하기 때문이다(Smith, 1982). 이러한 두 가지 지표를 바탕으로 세 가지 공간 유형에 대해서 분석한 결과 차폐 정도에 따라 차별화되는 경향성을 확인할 수 있

었다.

개방형의 평균 광량은 $2135.9\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ 로 세 공간 중 가장 높았으며 R:FR 비율은 0.93으로 나타났다(Figure 4A, B). 최대 $10809.7\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ 까지 광량이 증가하였는데 이는 상부 개방에 따른 강한 직사광선 유입과 고층 건물의 외벽 유리 등 반사광이 중첩되었기 때문으로 분석된다(Speroni et al., 2022). 수목의 일반적인 광포화점을 초과하는 광량의 집중은 식물의 광합성 기구에 과부하를 일으킨다. 처리 한계를 넘은 과도한 광량은 오히려 광화학 반응의 효율을 떨어뜨리고 광스트레스를 유발하여 결과적으로 정상적인 생육을 억제하는 스트레스로 작용할 가능성이 높다(Taiz et al., 2015). 반면 차폐형은 직사광선 유입이 매우 제한된 결과 평균 광량이 $783.4\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ 로 가장 낮았으며 R:FR 비율 또한 0.87로 세 공간 중 최저치를 기록하였다(Figure 4A, B). 이를 통해 차폐형은 광합성을 위한 광량의 부족뿐만 아니라 직경 생장을 유도하는 R:FR 비율마저 가장 열악한 환경임이 확인되었다. 이 경우 식물의 피토크롬이 피압상태로 인지하며 직경 생장을 멈추고 빛을 찾기 위해 수고 생장에 에너지를 사용하는 음지회피증후군 반응을 보일 가능성이 높다(Franklin, 2008; Casal, 2013). 마지막으로 부분 차폐형은 평균 광량이 $864.7\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ 로 음지와 유사하게 낮았다. 그러나 R:FR 비율은 0.94를 나타내어 개방형과 통계적으로 동일한 수준의 비율을 유지하였다(Figure 4A, B). 광량은 감소하였으나 R:FR 비율이 유지된 이유는 부분 차폐형의 구조에 기인한다(Lee & Nam, 2021). 콘크리트

외벽 등은 특정 파장만을 선택적으로 흡수하지 않고 전 파장을 비교적 균일하게 산란시킨다(Yu et al., 2015). 따라서 건물 사이의 틈새나 반사광을 통해 유입되는 빛은 광량만 줄어든 뿐 광파장(R:FR 비율)은 비교적 온전히 유지된 것으로 보인다.

이러한 기술 통계 분석의 경향성과 고찰을 뒷받침하기 위해 수집된 데이터를 바탕으로 통계적 유의성을 검증하고 분석하였다. 세 공간 유형 간 광량의 차이가 통계적으로 유의한지 확인하기 위해 Kruskal-Wallis 검정을 실시한 결과 집단 간 유의미한 차이가 확인되었다($p=0.006$). 이를 바탕으로 사후분석(Mann-Whitney)한 결과 개방형은 부분 차폐형($p=0.007$) 및 차폐형($p=0.008$)에 비해 통계적으로 유의하게 강한 광량을 나타냈다(Figure 4A). 반면 부분 차폐형과 차폐형 간에는 광량의 통계적인 차이가 발견되지 않았다($p=0.578$). 그러나 R:FR 비율에 대한 검정 결과는 다른 양상을 보였다. R:FR 비율에 대한 통계 검정은 성장 주요 파장대인 R: 650~670nm, FR: 720~740nm으로 실시하였다(Reglinski et al., 2019). 사후분석 결과 개방형과 차폐형 간 R:FR 비율의 통계적 차이가 확인되었다($p<0.001$). 또한 부분 차폐형과 차폐형 간에도 통계적 차이가 확인되었다($p=0.015$). 그러나 개방형과 부분 차폐형 간 R:FR 비율은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다($p=0.648$). 평균 수치를 고려할 때 부분 차폐형(0.93)은 광량이 현저히 감소했음에도 불구하고 개방형(0.96)과 유사한 수준의 높은 R:FR 비율을 안정적으로 유지하고 있는 것이 확인되었다(Figure 4B).

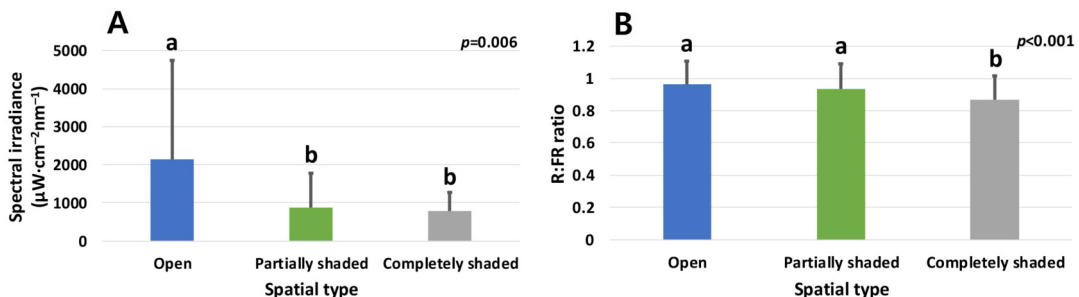


Figure 4. Analysis of the light environment (light quantity and light quality) according to spatial shading characteristics. Graph (A) shows the mean light quantity across wavelengths ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$), and (B) shows the mean R:FR ratio calculated from the maximum effective growth wavelengths (Red: 650-670nm, Far-red: 720-740nm). Data are expressed as Mean $\pm$ SD. Different lowercase letters (a, b) on top of the bars represent statistically significant differences among the groups ($p<0.05$, Mann-Whitney U test)

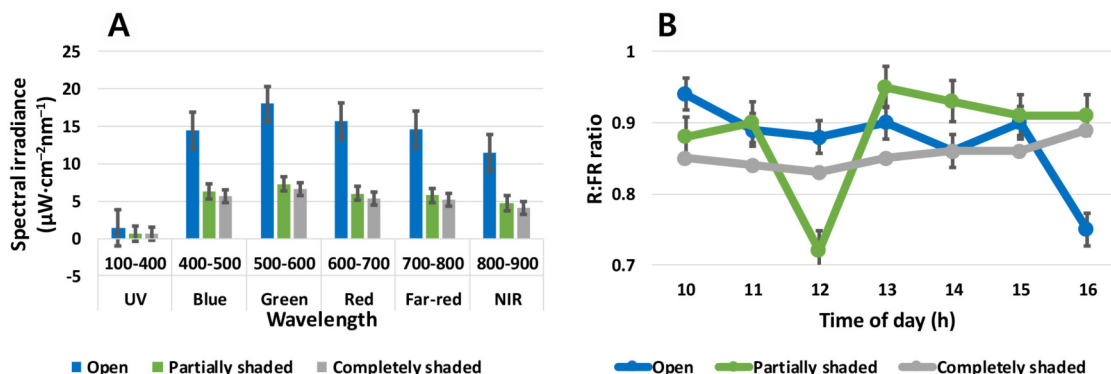


Figure 5. Comparison of light environment characteristics among spatial types. (A) Distribution of mean light quantity by wavelength band, (B) Changes in R:FR ratio over time of day

이러한 공간 유형별 광환경의 차이는 Figure 5을 통해 구체적으로 확인할 수 있다. 가시광선 전 영역에 걸친 파장별 광량 분포를 보면 부분 차폐형과 차폐형 모두 개방형에 비해 광량이 급격히 감소하는 양상을 보인다. 특히 두 공간은 파장별 광량의 전반적인 분포 형태마저 유사하여 형태만으로는 두 공간이 지니는 생태적 차별성을 구별하기 어렵다(Figure 5A). 하지만 수목 생장에 직접적으로 관여하는 R:FR 비율의 변화를 분석하면 두 공간의 생태적 차이가 드러난다. 10시부터 16시까지 1시간 간격으로 측정한 시간대별 광파장을 통해 R:FR 비율을 확인한 결과 부분 차폐형은 오전 시간에 전체 유형 중 광량이 가장 낮게 나타나는 구간이 존재하였다. 그러나 생장에 직접적으로 관여하는 R:FR 비율을 확인한 결과 10시와 12시를 제외한 대부분에서 부분 차폐형이 전체 공간 중 가장 높은 수치를 기록하는 패턴을 보였다(Figure 5B). 부분 차폐형이 이처럼 항상 높은 R:FR 비율을 유지할 수 있는 것은 건물의 균일한 산란광 덕분이다(Yu et al., 2015). 반면 12시에 관찰된 일시적 수치 저하는 부분 차폐형 특유의 공간 구조에 기인한 것으로 추정된다. 사방에서 빛이 유입되어 수관의 광 흡수가 희석되는 개방형과 달리 부분 차폐형은 양측 건물이 측면 산란광의 간섭을 차단한 상태에서 정오의 직사광선이 수관을 수직으로 관통하게 된다. 그 결과 나뭇잎의 적색광(R) 흡수 기작(Holmes & Smith, 1977)이 지배적으로 작용하여 일시적인 감소세가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 일시적으로 저하되는 구간이 있음에도 불구하고 부분 차폐형

이 전반적으로 가장 높은 수치를 유지했다는 점은 광량이 제한되는 시간대나 조건 속에서도 수목 생장에 필수적인 R:FR 비율만큼은 부분 차폐형 공간이 가장 잘 공급받고 있다는 것을 의미한다.

결과를 종합해볼 때 개방형은 과도한 광량, 차폐형은 적은 광량과 광파장(R:FR 비율) 결핍이 스트레스를 유발하였다면 부분 차폐형은 과도한 광량을 건물이 막아주면서도 광파장(R:FR 비율)은 보존해주었다. 이는 부분 차폐형이 수목이 생육하는데 최적의 공간이 될 수 있음을 보여준다.

3. 공간 유형별 수목 생육(근원직경) 특성 및 광환경과의 상관관계 고찰

조사 대상지 내 세 가지 공간 유형에 식재된 수목의 연평균 근원직경 성장량을 비교 분석한 결과 건물의 차폐에 따른 차이가 수목의 실제 생장에 영향을 미치고 있다는 것이 확인되었다. 비록 본 연구의 광환경 데이터가 9월의 단기 측정 결과라는 한계가 있으나 건물의 고정된 배치로 인해 형성되는 공간별 일조 패턴과 차폐의 상대적 특성은 일관된 경향을 유지하므로(Oke, 1988) 이를 바탕으로 수목의 연간 생육 차이를 설명하는 것은 가능하다고 판단된다. 공간별 평균 근원직경 성장량은 부분 차폐형이 1.46cm로 세 공간 중 가장 많았으며 개방형이 0.99cm, 차폐형이 0.58cm 순으로 뒤를 이었다(Table 5). 비모수 검정(Kruskal-Wallis) 결과 공간 간 성장량 차이는 통계적으로 유의하였으며 사후 분석(Mann-Whitney U 검정)을 통해서도 세 공간 그룹

Table 5. Descriptive statistics and statistical test results of annual root collar diameter growth by spatial type

Spatial type	N	Mean (cm)	Median (cm)	Kruskal-Wallis H	p-value
Open	166	0.99	0.57	28.76	$p<0.001$
Partially shaded	75	1.46	0.99		
Completely shaded	73	0.58	0.37		

간의 성장량 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($p<0.001$).

가장 많은 광량을 확보한 개방형보다 오히려 부분 차폐형의 성장량이 약 1.5배 높게 나타난 결과는 무조건적으로 넓게 개방된 공간이 도심 수목 생육에 항상 유리한 것만은 아님을 시사한다. 개방형은 상부가 넓게 개방되어 직사광선이 여과없이 유입될 뿐만 아니라 주변 건물의 반사광까지 중첩되는 특성을 가진다. 건물의 반사가 인접 지표면의 태양 복사 에너지를 증가시킬 수 있음이 보고된 바 있으며(Speroni et al., 2022) 이로 인해 아파트 단지 내 개방형 공간은 직사광선과 반사광이 더해져 과도한 광량이 유입된다. 식물생리학 기작에 따르면 한계치를 넘어서는 과도한 광량은 광합성 효율을 높이는 것이 아니라 오히려 엽록체를 손상시키는 광저해 현상을 유발한다(Taiz et al., 2015). 개방형에 식재된 수목들은 강한 직사광선과 건물의 반사광으로부터 광합성 기구를 방어하는데 스트레스를 겪게 되며 이것이 결국 정상적인 성장을 가로막는 원인이 된 것으로 보인다(Long et al., 1994). 반면 부분 차폐형은 개방형에서 발생한 광의 중첩 문제를 완충해준다. 주변 건축물이 직사광선을 일차적으로 차단하여 과도한 광량은 줄여주고 건물 틈새 등을 통해서 파장 왜곡이 없는 양질의 건물 반사광을 유입시켜준다. 개방형에서는 직사광선과 더해져 과도한 광량의 원인이 되었던 반사광이 부분 차폐형에서는 오히려 직경 성장에 필수적인 광파장(R:FR 비율: 0.94)을 공급해주는 안전한 광원으로 작용한 것이다. 이처럼 과한 광량은 줄여주고 필수적인 광파장(R:FR 비율)을 유지해주는 부분 차폐형 특유의 특성이 결과적으로 식재된 수목에 가장 이상적인 공간을 제공한 것으로 분석된다.

이와 대조적으로 차폐형은 직사광선 유입이 매우 차단되었을 뿐만 아니라 부분 차폐형처럼 양질의 반사광 조차 유입될 수 없는 폐쇄성으로 인해 광량 부족과 직

경 성장에 필수적인 광파장(R:FR 비율: 0.87) 결핍이 동시에 발생한 공간이다. 식물생리학 선행 연구에 따르면 R:FR 비율이 저하된 환경을 인지할 경우 직경 성장 보다는 수고 성장에 에너지를 배분하게 된다(Franklin, 2008; Casal, 2013). 본 연구에서 차폐형 수목의 근원직경 성장이 개방형이나 부분 차폐형 대비 작게 나타난 것도 광합성 산물의 부족과 더불어 직경 성장을 억제하는 음지회피 반응의 연장이었을 것으로 생각된다.

이러한 차이가 개별 수종 단위에서도 동일한 경향으로 나타나는지 탐색적으로 확인하기 위해 서로 다른 공간에 공통으로 식재된 수종을 추출하여 독립표본 t-검정을 실시하였다. 본 분석은 기초성된 현장을 연구 특성상 일부 수종의 표본 수가 통계적 정규성을 가정하기에 제한적이라는 한계가 있으나 부분 차폐형이 개별 수종에 미치는 생태적 효용성을 가늠하기 위한 예비적 고찰로서 의미를 갖는다. 그 결과 개방형과 비교하여 부분 차폐형에서 소나무($p<0.001$)와 배롱나무($p=0.012$)의 성장량이 유의미하게 컸으며 차폐형과 비교했을 경우에도 소나무($p<0.001$), 단풍나무($p=0.021$), 배롱나무($p=0.004$) 모두 부분 차폐형에서 더 큰 성장량을 보였다(Table 6). 이러한 결과는 선행연구에서도 찾아볼 수 있다. 소나무류(잣나무)의 경우 100% 전광 조건보다 60% 수준의 부분 차폐 조건에서 야간 암호흡이 최소화되어 직경생장이 극대화되었으며(Zhu et al., 2014) 단풍나무류(고로쇠나무, 당단풍나무) 역시 개방지에서는 생장이 억제된 반면 55~75%의 부분 차폐 환경에서 근원직경이 가장 굵게 자란 것으로 보고되었다(Zhang et al., 2022).

현장 조사 특성상 공간 유형별로 식재된 수종의 구성비와 표본 크기가 균일하지 않은 불균형 자료 형태를 띠는 한계를 극복하고자 전체 데이터를 대상으로 수종을 공변량으로 통제하는 공분산분석(ANCOVA)를 추가로 실시하였다. 그 결과 수종의 개별적 성장 효과

Table 6. Comparison of annual root collar diameter growth of major common species by spatial type

Species	Open (cm)	Partially shaded (cm)	Completely shaded (cm)	Significant differences
<i>Pinus densiflora</i>	0.69 (N=20)	2.37 (N=4)	0.24 (N=6)	Partially shaded > Open ($p<0.001$) Partially shaded > Completely shaded ($p<0.001$)
<i>Lagerstroemia indica</i>	0.23 (N=12)	0.90 (N=3)	0.09 (N=2)	Partially shaded > Open ($p=0.012$) Partially shaded > Completely shaded ($p=0.004$)
<i>Acer palmatum</i>	1.14 (N=33)	1.05 (N=5)	0.29 (N=6)	Open > Completely shaded ($p=0.028$) Partially shaded > Completely shaded ($p=0.021$)

Table 7. ANCOVA results for root collar diameter growth controlling for species

Source	Sum of squares (SS)	Degrees of freedom (df)	Mean square (MS)	F-value	p-value
Spatial Type	28.69	2	14.34	15.12	$p<0.001$
Species (Covariate)	246.51	38	6.49	6.84	$p<0.001$
Residual	259.01	273	0.95	-	-
Total	534.21	313	-	-	-

를 통제한 후에도 공간 유형(개방형, 부분 차폐형, 차폐형)이 근원직경 생장량에 미치는 영향은 여전히 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(Table 7). 이는 본 연구에서 관찰된 생육 차이가 수종 구성의 불균형에서 비롯된 것이 아니라 건축물의 차폐 및 광환경 특성에 의한 결과임을 뒷받침한다.

본 연구대상지인 도심 아파트 단지의 개방형 공간은 풍부한 광량에도 불구하고 직사광선 및 복사열의 증가로 인해 수목에 가해지는 생리적 부하를 가중시킨 것으로 사료된다. 반면 부분 차폐형 공간은 이러한 미기 후적 스트레스를 저감하는데 기여한 것으로 판단된다. 결론적으로 통계적으로 검증된 근원직경 생장 데이터는 부분 차폐형이 개방형의 과한 광·열 부하와 차폐형의 광파장 결핍을 동시에 보완하여 수목에 보다 안정적인 생육 조건을 제공할 수 있음을 시사한다.

IV. 결론

본 연구는 아파트 단지의 건축물에 따라 형성되는 공간을 차폐 특성에 따라 정량적으로 유형화하고 각 공간의 광환경 차이가 수목의 실제 생장(근원직경)에 미치는 영향을 규명하였다. K-Means 군집 분석을 통해 공간을 개방형, 부분 차폐형, 차폐형으로 분류하여 분석한 결과 수목 생육의 최적지는 무조건적인 개방 공

간이 아니라 건축물에 의한 적절한 차폐와 개방이 공존하는 부분 차폐형 공간인 것이 확인되었다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

첫 번째로 개방형 공간은 수목 생장에 항상 유리한 것이 아니라 오히려 광 스트레스 공간으로 작용할 수 있다. 개방형은 넓게 열린 하늘을 통한 강한 직사광선 유입과 건축물의 반사광까지 중첩되면서 광량이 과해지는 현상이 발생한다. 수목의 적정 광포화점을 초과하는 과한 광량은 엽록체를 손상시키는 광저해 현상을 유발하여 수목이 광합성 기구를 방어하는 데 스트레스를 겪게 되어 정상적인 생장을 가로막는 원인이 될 수 있다. 두 번째로 부분 차폐형 공간은 수목 생장에 이상적인 환경을 제공한다. 부분 차폐형은 건축물이 과도한 직사광선을 일차적으로 가려주어 광 스트레스는 완충해주고 건물 틈새와 반사광을 통해 유입되는 빛이 직경 생장에 필수적인 광파장(R:FR 비율)을 온전히 보존해준다. 세 번째로 차폐형 공간은 광량과 광파장의 동시 결핍을 초래하여 수목의 정상적인 생장을 억제한다. 차폐형 공간은 직사광선과 양질의 반사광 유입이 차단되어 광량이 부족하며 직경 생장에 필수적인 광파장(R:FR 비율)마저 크게 저하되는 환경을 형성한다. 이로 인해 수목은 직경 생장을 멈추고 수고 생장에 에너지를 집중하는 음지회피 반응을 보였을 것으로 판단되며 실제로 세 공간 중 가장 저조한 근원직경 생장량을 기

록하였다. 이러한 세 가지 결론은 아파트 단지 내 다양한 미기후에 대응하는 공간 맞춤형 조정 식재 가이드라인의 필요성을 시사한다. 개방형 공간의 경우 광 스트레스에 내성이 강한 수종을 우선적으로 검토하거나 조정 시설물과 연계하여 수목의 활착을 돕는 완충 설계를 고려하여야 한다. 부분 차폐형 공간의 경우는 단지의 경관을 주도하는 주요 대형 교목을 배치함으로써 수목의 생장 잠재력을 높이는 방안을 기대해볼 수 있다. 차폐형 공간의 경우 대형 교목을 식재하기보다는 내음성이 우수한 아교목 및 지피류 중심의 다층 식재 기법을 활용하여 아파트 단지 전체의 생태적 건전성을 보완하는 유연한 접근을 제안한다.

본 연구는 아파트 단지 내 복잡한 미기후와 차폐 특성을 정량적으로 분류하고, 이를 실제 수목의 생장 및 광환경 파장 데이터와 실증적으로 연계했다는 점에서 의의가 있으나, 다음과 같은 연구의 한계점을 가진다. 첫째, 수목 생장량 산출을 위한 초기 기준 데이터의 제약이다. 본 연구는 수목의 식재 당시 초기 규격을 준공 조정 식재 도면에 의존하였다. 실제 현장에 반입된 수목의 규격과 설계 도면 간에는 현실적인 오차가 존재할 수 있다. 그러나, 이러한 초기 규격의 오차는 특정 공간에 편중되지 않고 단지 전체에 걸쳐 무작위로 분포했을 가능성이 높으므로 공간 유형 간의 '상대적인 생장량 차이'를 통계적으로 비교·분석한 본 연구의 결과에는 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다. 둘째, 광환경 측정 데이터의 시간적 한계이다. 본 연구의 광환경 분석은 특정 시기(9월)의 주간 단기 측정 데이터를 기반으로 수행되었다. 수목의 생장에는 하절기의 강한 복사열이나 동절기의 태양 고도 변화 등 연중 복합적인 광환경 변화가 누적되어 영향을 미치므로 단기 데이터로 연간 생장 특성을 완벽히 대변하기에는 한계가 있다. 셋째, 어안렌즈를 활용한 2차원적 광환경 분석 한계이다. 본 연구에서 활용한 천공 차폐율은 수목 상부의 개방감을 평면적인 수치로 환산하는데 유용하였으나 고층 건물들이 밀집한 아파트 단지의 복잡하고 입체적인 공간구조를 완벽하게 묘사하기에는 제약이 따른다. 이러한 2차원적 분석 한계를 극복하기 위해 지상 및 드론 LiDAR 측정을 통한 입체적인 공간 스캐닝 및 광환경 정밀 분석 등 후속 연구가 필요하다. 넷째, 공간

유형별 표본 크기의 불균형에 따른 통계적 제약이다. 본 연구의 핵심 결론인 부분 차폐형 공간의 우수한 생육 특성은 해당 유형의 표본 크기(7개소)가 개방형(20개소) 및 차폐형(9개소)에 비해 상대적으로 적은 상태에서 도출되었다. 비모수 검정을 통해 통계적 유의성은 확보되었으나 표본이 가장 적은 그룹의 데이터에 기반하고 있으므로 이를 모든 아파트 조정 공간의 보편적인 현상으로 일반화하기에는 신중한 해석이 요구된다. 그러나 본 연구는 수목의 생육이 건물 차폐 특성에 따라 달라질 수 있다는 잠재적 경향성을 실증 데이터로 확인한 것에 의의를 두며 향후 표본을 확충하여 도출된 결과를 교차 검증하는 후속 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서 입증된 '부분 차폐 공간의 생태적 효용성'이 향후 고도화된 3차원 공간 데이터와 결합된다면 조정수의 정밀한 수관 체적 산정 및 탄소흡수계수 개발은 물론, 도심지 다층식재 모델 구현이나 3-30-300 원칙(눈에 보이는 3그루 이상의 나무, 수목 피복률 최소 30%, 주거지에서 공공 녹지까지 300m 이내 접근 가능)과 같은 선진 도시숲 정책 실현을 위한 핵심 지표로 그 활용 범위가 더욱 확장될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 한국수목원정원관리원과 삼성물산 건설부문이 함께 추진한 K-테스트베드 과제 '도시환경 최적화 식재모델 개발' 사업 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 배지훈. (2025). 아파트단지 주동 및 녹지배치에 따른 여름철 수목하부 미기후 특성 분석. [석사학위논문, 서울대학교].
- Bae, J. (2025). *Microclimatic characteristics under the canopy induced by building and green space layout of apartment complexes*. [Master's thesis, Seoul National University].
- Bao, C. (2021). K-means clustering algorithm: A brief review. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 4(5), 37-40. <https://doi.org/10.25236/AJCIS>.

- 2021.040506
- Casal, J. J. (2013). Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 403-427. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120221>
- Franklin, K. A. (2008). Shade avoidance. *New Phytologist*, 179(4), 930-944. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02507.x>
- Gommers, C. M., Visser, E. J. W., St Onge, K. R., Voesenek, L. A. C. J., & Pierik, R. (2013). Shade tolerance: When growing tall is not an option. *Trends in plant science*, 18(2), 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.008>
- He, J., & Chen, Z. (2025). The influence of tree planting layout on the wind environment of residential areas in Hangzhou and optimization strategies. *Highlights in Art and Design*, 9(3), 38-45. <https://doi.org/10.54097/cwx17t29>
- Holmes, M. G., & Smith, H. (1977). The function of phytochrome in the natural environment—II. The influence of vegetation canopies on the spectral energy distribution of natural daylight. *Photochemistry and Photobiology*, 25(6), 539-545. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1977.tb09125.x>
- 장하경, 안근영, 이은희. (2007). 수목생육 조건을 고려한 조경수목과 아파트 건물의 최소 이격거리에 관한 연구. *한국조경학회지*, 35(1), 1-8.
- Jang, H. K., Ahn, G. Y., & Lee, E. H. (2007). A study on the minimum distance between landscape trees and apartment buildings. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 35(1), 1-8.
- 정문화, 정성관, 최철현, 신재윤, 유주한. (2015). 아파트 단지 내 조경수목의 생장특성 분석 -대구광역시 메트로팔레스단지를 대상으로-. *한국임학회지*, 104(1), 35-42.
- Jung, M. H., Jung, S. G., Choi, C. H., Shin, J. Y., & You, J. H. (2015). Analysis on growth characteristics of landscape trees in apartment complex -Focusing on Metropalace Complex, Daegu Metropolitan City-. *Journal of Korean Forest Society*, 104(1), 35-42. <https://doi.org/10.14578/jkfs.2015.104.1.35>
- 강연주, 백규리, 정인경. (2024). 탄소흡수량 증대를 위한 아파트 외부 공간 식재 가이드라인 개발에 관한 연구. *한국조경학회지*, 52(5), 65-82.
- Kang, Y., Baek, K., & Jung, I. K. (2024). A study on the development of planting design guidelines for outdoor space of apartment for increased carbon absorption. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 52(5), 65-82. <https://doi.org/10.9715/KILA.2024.52.5.065>
- Lee, B., & Nam, S. (2021). Influence of the architectural elements on sunlight hours: Urban form study of residential area in Seoul. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 12(4), 335-346. <https://doi.org/10.22712/susb.20210028>
- 이경준, 이승호. (2010). 조경수 식재관리기술. 서울대학교출판문화원.
- Lee, K., & Lee, S. (2010). *Landscape tree planting and management technology*. Seoul National University Press.
- 이경재, 한봉호, 이수동. (2004). 서울시 아파트단지내 조경수목 배식특성 및 개선 연구. *한국환경생태학회지*, 18(2), 236-248.
- Lee, K. J., Han, B. H., & Lee, S. D. (2004). Improvement planting method and characteristics of planting design with ornamental trees in apartment complex, Seoul. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 18(2), 236-248.
- Lee, S., Lee, S., Lee, J., Son, Y., & Yoon, T. K. (2024). Estimating aboveground volume of diverse urban tree species: Developing allometric equations for higher taxonomic levels. *Urban Forestry & Urban Greening*, 94, 128256. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128256>
- Long, S. P., Humphries, S., & Falkowski, P. G. (1994). Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Biology*, 45(1), 633-662. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.45.060194>

003221

- Mol, W. B., van Stratum, B. J. H., Knap, W. H., & van Heerwaarden, C. C. (2023). Reconciling observations of solar irradiance variability with cloud size distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(5), e2022JD037894. <https://doi.org/10.1029/2022JD037894>
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103-113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- 박상욱, 오창송. (2022). 광주광역시 아파트단지 내 난 대상록활엽수 식재특성에 관한 연구. *한국정원 디자인학회지*, 8(2), 92-103.
- Park, S. W., & Oh, C. S. (2022). Planting characteristics of evergreen broad-leaved trees in the landscape space of apartment complexes in Gwangju Metropolitan City, South Korea. *Journal of The Korean Institute of Garden Design*, 8(2), 92-103. <https://doi.org/10.22849/jkigd.2022.8.2.004>
- Python Software Foundation. (2024). *python* (version3.11.8). <https://www.python.org>
- Rayner, J. P., & Williams, C. C. (2016). Learning from failure: Evaluating plant performance in urban landscapes. *Acta Horticulturae*, 1108, 220-226. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1108.28>
- Reglinski, T., Taylor, J. T., Northcott, G. L., Ah Chee, A., Spiers, M., & Wohlers, M. (2019). Growth environment and seedling age affect constitutive and inducible defence in radiata pine. *Plant Pathology*, 68(8), 1481-1492. <https://doi.org/10.1111/ppa.13068>
- Rich, P. M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews*, 5(1), 13-29. <https://doi.org/10.1080/02757259009532119>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Smith, H. (1982). Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology*, 33(1), 481-518. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.002405>
- Speroni, A., Mainini, A. G., Zani, A., Paolini, R., Pagnacco, T., & Poli, T. (2022). Experimental assessment of the reflection of solar radiation from façades of tall buildings to the pedestrian level. *Sustainability*, 14(10), 5781. <https://doi.org/10.3390/su14105781>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- 유수진, 윤형권, 한승원, 김광진, 정나라. (2019). 재건축 아파트 단지의 탄소흡수량 변화를 고려한 조경 식재 시나리오 분석. *한국시스템다이내믹스연구*, 20(4), 71-90.
- You, S., Yun, H. G., Han, S. W., Kim, K. J., & Jeong, N. (2019). An analysis of planting scenarios considering changes of carbon absorption in a reconstruction apartment complex. *Journal of Korean System Dynamics Society*, 20(4), 71-90. <https://doi.org/10.32588/ksds.20.4.4>
- Yu, Y., Hu, D., Wang, X., Li, Y., & Han, F. (2015). Characteristics of light intensity and light quality in different types of shade environments in urban areas. *Acta Ecologica Sinica*, 35(23), 7748-7755. <https://doi.org/10.5846/stxb201405120974>
- Zhang, J., Ge, J., Dayananda, B., & Li, J. (2022). Effect of light intensities on the photosynthesis, growth and physiological performances of two maple species. *Frontiers in Plant Science*, 13, 999026. <http://doi.org/10.3389/fpls.2022.999026>
- Zhu, J., Wang, K., Sun, Y., & Yan, Q. (2014). Response of *Pinus koraiensis* seedling growth to different light conditions based on the assessment of photosynthesis in current and one-year-old needles. *Journal of Forestry Research*, 25(1), 53-62. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0432-7>