



목조 공동주거 건축물 외장 목재 마감재의 비처리 및 도장처리에 따른 준공 후 외관 변화 비교분석과 한국 기후 적용 시사점

- 오스트리아 Seestadt Aspern D12 및 독일 Wohnen am Dantebad 사례를 중심으로 -

Comparative Analysis of Post-Completion Exterior Changes in Timber Facade Finishes of Wooden Multi-Family Residential Buildings: Untreated vs. Coated Wood and Implications for the Korean Climate - Cases of Seestadt Aspern D12 and Wohnen am Dantebad -

이남주*

Nam-Ju Lee*

* Architect/Timber Engineer, BIM-Planner, B&O Bau GmbH, Germany (namjulee@gmx.net)

ABSTRACT

Purpose: This study investigates the long-term weathering performance of exposed timber facades by comparing uncoated and pigment-coated larch cladding systems and derives design implications for their application under Korean climatic conditions. **Method:** Field observations and photographic comparisons were complemented by digital image color analysis in the CIE L*a*b* color space using ImageJ. Two residential buildings were examined at completion (2015) and after nine years (2024). Weathering patterns were evaluated according to facade orientation and floor level, while climatic differences between Vienna and Korean cities were assessed using publicly available meteorological and air quality data. **Results:** The uncoated facade exhibited orientation- and floor-dependent weathering caused by cumulative UV exposure and wind-driven rain. The west-facing uppermost facade showed the greatest greying, whereas lower north-facing areas exhibited darker discoloration associated with biological growth. Localized fungal staining occurred at end-grain details with insufficient drainage and ventilation. In contrast, the pigment-coated facade maintained a uniform appearance without significant orientation- or floor-level-dependent discoloration after nine years, demonstrating the effectiveness of surface treatment in reducing weathering variability. Compared with Vienna, Korean cities are expected to experience greater weathering risks because of higher wind-driven rain, solar irradiation, and particulate pollution. Based on these findings, practical design and maintenance recommendations are proposed to improve the long-term durability of exposed timber facades in Korea.

KEYWORD

목재 파사드
낙엽송 외장
풍화 열화
회색화
디지털 이미지 분석

Timber Facade
Larch Cladding
Natural Weathering
Natural Greying
Digital Image Analysis

ACCEPTANCE INFO

Received Jun. 10, 2026
Final revision received Jul. 17, 2026
Accepted Jul. 23, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

파사드 마감재로서의 목재는 수종의 선택과 표면 처리 방식에 따라 다양한 외관 표현이 가능하며, 시공 용이성·부분 교체 가능성·탄소 저장 등의 장점을 가진다. 최근 탄소 저감 및 지속가능성에 대한 사회적 수요 증가로 국내외 건축 분야에서 목재 외장재의 활용이 확대될 것으로 기대하고 있으며, 산림청·국토교통부의 목조건축 활성화 정책과 맞물려 그 수요는 더욱 가속화될 전망이다.

그러나 목재 외장재는 자연 소재 특유의 열화 특성을 지니며, 변색·오염·균열·미생물 오염 등의 문제가 장기적으로 발생할 수 있다. 특히 한국의 여름철 집중호우·고온다습·겨울철 동결·융해라는 복합 기상 조건은 현대식 목조건축이 발달한 중부 유럽에 비해 목재를 외벽 마감재로 사용하는 것에 더욱 가혹한 환경을 형성한다. 그럼에도 국내에서는 실증적 장기 실측 연구가 아직 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 1) 준공 후 약 9년이 경과한 유럽 목재 파사드 사례의 방위별·층위별 열화 특성을 분석하고, 2) 도장 처리와 무도장 처리 사례를 비교하며, 3) 그 결과를 한국 기후에 적용하여 목재를 외장용 마감재로 사용할 때 참고자료로 제공하는 것을 목적으로 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 준공 직후·준공 후 9년 경과 시점의 사진 비교, 현장 육안 관찰, 디지털 이미지 색채 분석(CIE L*a*b*측정), 선행 문헌 검토로 구성된다. 단 실험실 재료 시험은 범위에서 제외하며, 정성적(qualitative) 현장 관찰 연구(정량보조 분석 추가)임을 명시한다. 열화 판단기준은 [1]과 [2]를 준용하였으며, 한국 기후 조건 비교에는 기상청 기후평년값 [3]을 참조하였다.

Table 1.과 같이 해외 선행연구들은 풍화 메커니즘의 화학적 기전 규명 [4,5], 유럽 목조 외장재의 설계·수분·풍화·코팅에 대한 이론적 원칙과 풍화 현상 및 그 평가방법에 대한 일반적 경향을 체계화 하였으며 [2,6,7], 국내 선행연구는 한국 기후 특성을 반영한 수치 시뮬레이션 등을 통해 경량 목구조의 수분 거동을 분석하였다 [8]. 하지만 이

Table 1. Comparison with previous studies

Author (year)	Evaluation method	Climate	Key contribution
Feist & Hon [4]	Chemical analysis	North America	First elucidation of the greying mechanism through lignin photo-oxidation
Feist [5]	Outdoor specimen exposure	North America	Demonstrated orientation-dependent weathering differences and protective effects of coatings
Grüll et al. [6]	Monitoring of coating degradation	Europe	Defined limit states for exterior coatings and proposed recoating intervals
Jansen [10]	Construction technology report	Europe	Described the facade construction of the Aspern D12 project
Lee et al. [8]	WUFI simulation	South Korea	Quantified regional climate conditions and moisture loads across Korea
Kropat et al. [7]	Field observation and simulation comparison	N/A	Systematized weathering test methodologies
Hill et al. [2]	Literature review	N/A	Review of timber durability and surface treatments

러한 연구들은 대체로 이론·모델 중심에 머물러 있으며, 실제 시공된 외장 마감재에서 장기간 수집한 관측 데이터가 부족하여 모델의 현장 타당성 검증과 설계 지침 도출에 제약이 있을 수 있다. 본 연구는 이러한 공백을 메우기 위해 독일과 오스트리아의 집합주택 총 2개 동의 9년차 외관 비교 관찰을 수행하고, 그 결과분석을 한국 기후 조건에 연결하여 시사점을 도출하는 것을 목적으로 한다.

1.3. 주요 용어 정의

회색화(natural greying of wood): 목재 표면이 자외선·수분·미생물의 복합 작용으로 점진적으로 회백색으로 변화하는 자연 열화 현상으로, 무도장 노출 목재에서 필연적으로 발생한다.

흑색 곰팡이(black mold growth on timber surfaces): 지속적인 수분 축적 환경에서 정착하는 암색 균류로, 목재 조직 내부로 균사가 침투하는 경우 구조적 열화의 전조가 될 수 있다.

사선강우(Wind-Driven Rain): 바람의 영향을 받아 수직이 아닌 사선 방향으로 건물 외벽에 직접 도달하는 강우로, 강우 강도와 풍속의 함수로 정량화된다(ISO 15927-3). 사선강우는 목재 외장재의 수분 부하 및 열화 속도를 결정하는 핵심 변수이다.

2. 이론적 고찰

2.1. 목재 외장재의 열화 메커니즘

목재 세포벽은 셀룰로오스 미세섬유가 헤미셀룰로오스와 리그닌으로 이루어진 기지(matrix)상에 배열된 계층적 복합구조를 가진다(Fig. 1.).

셀룰로오스는 식물 세포벽의 주요 구성 성분으로, 목재 건조 질량의 약 40~50%를 차지한다. 셀룰로오스 사슬은 집합하여 높은 인장

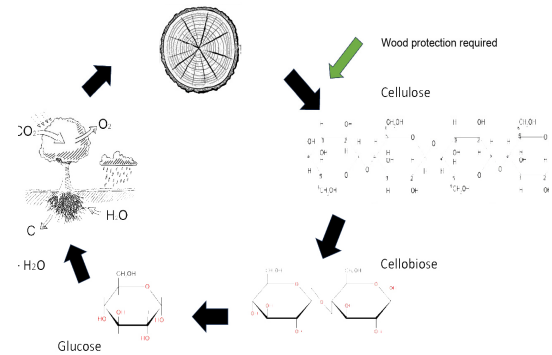


Fig. 1. Natural degradation process of cellulose

Table 2. Classification of timber use classes (Gebrauchsklasse, GK) according to DIN 68800

GK	Wood moisture content and environmental conditions	Main Deterioration Agents
GK 0	Permanently dry (MC≤20%), relative humidity≤85%	None
GK 1	Permanently dry (MC≤20%), relative humidity≤85%	Insects
GK 2	Intermittently wet (MC>20%), relative humidity>85% or temporary condensation	Insects, fungi
GK 3.1	Intermittently wet (MC>20%), no moisture accumulation within the wood	Insects, fungi, leaching
GK 3.2	Intermittently wet (MC>20%), localized internal moisture accumulation	Insects, fungi, leaching
GK 4	Predominantly or permanently wet (MC>20%)	Insects, fungi, leaching, soft rot
GK 5	Permanently wet (MC>20%)	Insects, fungi, leaching, soft rot, marine organisms

Source: DIN68800-1: 2011, Informationsdienst Holz p.14

강도를 지닌 미세섬유(microfibril)를 형성하며, 이는 식물체를 지지하는 중요한 역할을 한다[4]. 목재 외장재의 열화는 자외선(UV)과 수분, 생물학적 요인이 복합적으로 작용하는 과정이다. 목재 세포벽의 구조적 결합체인 리그닌(lignin)은 자외선에 노출될 경우 광산화반응(photo-oxidation)을 통해 분자 구조가 분해된다. 이후 분해된 리그닌이 빗물에 의해 용출되면 셀룰로오스(cellulose)가 표면에 노출되어 회백색으로 변화하며, 이것이 목재 회색화(natural greying of wood)의 초기 단계로 알려져 있다[4].

수분은 또 다른 주요 열화 요인이다. 목재는 주변 온·습도 변화에 따라 팽윤과 수축을 반복하며, 이 과정에서 표면 균열과 섬유 이완이 촉진된다. 특히 마구리면(end grain)은 섬유 방향과 수직으로 수분이 침투하여 측면보다 흡수 속도가 수 배 이상 빠르다[5].

Table 2와 같이 독일의 DIN68800은 목재의 함수율과 주변 환경에 따라 Gebrauchsklassen (사용등급, 이하 GK)을 GK 0부터 GK 5 사이에 GK 0, 1, 2, 3.1, 3.2, 4, 5의 총 7단계로 세분하는데 이중 외

기에 직접 노출된 목재 파사드는 일반적으로 사용등급 3(GK 3)에 해당하며 GK 3 등급 조건부터 해충과 곰팡이의 위험 노출이 시작된다[9]. 또한 목재 표면에 수분이 지속적으로 축적되면 흑색 곰팡이, 조류(algae), 이끼류(mosses) 등의 생물학적 오염원이 정착하여 변색과 표면 열화를 유발할 수 있다. 특히 접합부와 마구리 노출부는 미생물 정착의 우선 거점이 된다.

2.2. 낙엽송의 외장 재료적 특성

낙엽송(Larix decidua, Larix kaempferi)은 침엽수 중 비교적 높은 내후성을 지닌 수종으로, 밝은 색의 조재(earlywood)와 짙은 갈색의 만재(latewood) 사이의 대비가 매우 강한테 이는 낙엽송 목재의 대표적인 특징이다. 기계적 성질로는 높은 탄성(elasticity)과 큰 인성(toughness)을 지니고 있으며 산·알칼리·염분 등 공격적 환경에 강한 화학적 내성으로 인해 외장재, 데크, 수변 구조물, 고산지대 건축물에 사용된다. 못이나 나사를 이용한 기계적 접합(nails and screws)도 큰 어려움 없이 가능하며 접착(bonding)성능 역시 일반적으로 뛰어나다[9].

2.3. 방위별·층위별 기상 노출 차이

햇빛을 많이 받는 남쪽과 서쪽 면은 자외선의 양이 크기 때문에 목재의 리그닌이 분해되면서 회색화 및 균열이 더 빠르게 나타난다[5]. 반대로 북쪽과 동쪽 면은 일사가 적어 표면이 잘 마르지 않고 젖은 상태가 오래 유지되는 경향이 있는데, 이 때문에 색 변화는 덜하지만 일반적으로 곰팡이나 이끼 같은 미생물이 오히려 더 잘 생긴다. 결국 일사량 많은 면이 일방적으로 불리한 것이 아니라, 방위에 따라 열화가 진행되는 방식 자체가 달라진다고 볼 수 있다. 처마의 유무도 큰 변수로 작용한다. 처마가 없는 파사드는 비가 벽면에 직접 들이치기 때문에 자외선과 수분의 영향을 동시에 받으면서 열화가 가속된다[1]. 또한 목재 마구리 하단과 금속 플래싱 사이의 이격거리가 충분하지 않으면 그 틈으로 모세관 현상에 의해 물이 빨려 들어가 적당한 건조가 이루어지지 못한다. 이렇게 수분이 정체되는 부위에 결과적으로 흑색 곰팡이가 발생하게 된다.

3. 사례 개요

3.1. 주 사례: Seestadt Aspern D12, 빈, 오스트리아

조사대상 프로젝트는 오스트리아 빈 22구 Seestadt Aspern 신도시 내 집합주거로, querkraft Architekten과 Berger+Parkkinen이 공동 설계하여 2015년 준공된 목조하이브리드 건물이다(Fig. 2., Fig. 3.). 외장재는 낙엽송 판재(폭 120~150mm, 두께 19mm)를 수직 방향으로 설치한 무도장 노출 마감으로 하였으며, 배면에 3cm의 통기층(ventilated cavity)이 확보되어 있다. EI 90¹⁾의 방화성능을 가지며 약 9,000m² 면적(19,386장)의 낙엽송 마감(판)재가 사용되었다[10]. 주변 건물 높이가 비교적 일정하여 방위별로 일조·풍우에 대한 노출 또한 균등하게 유지되어 분석에 이상적인 환경을 제공한다. 빈의 기후는 쾨펜의 기후분류상²⁾ Cfb (해양성 기후)로, 연평균 기온은 약 11℃, 연평균 강수량은 약 650mm이다[11].



Fig. 2. Housing D12, Seestadt Aspern, Vienna, Austria, 2015



Fig. 3. Aspern D12, Siteplan © Querkraft architekten



Fig. 4. Wohnen am Danteabad, Munich, Germany, 2026

3.2. 대조사례: Wohnen am Danteabad, 뮌헨, 독일

Florian Nagler Architekten 설계로 2016년 준공된 4층 규모 사회주택(GEWOFAG)이다. 무대패 마감 낙엽송 판재에 청회색·적색 도장 처리를 적용하였다(Fig. 4.). 빈과 동일한 Cfb 기후대(연 강수량 약 950mm)[12]에 위치하며, 외부 회랑(access gallery)이 동측의 목재외장을 부분적으로 보호한다. Aspern D12와 동일 수종·동일시 기·인접 기후대라는 점에서 마감 도장 유무를 변수로 통제할 비교 사례로 활용될 수 있다(Table 3.).

Table 3. Project overview

Item	Seestadt Aspern D12	Wohnen am Dantebad
Year of completion	2015	2016
Location & climate	Vienna (Cfb, annual precipitation 650mm)	Munich (Cfb, annual precipitation 950mm)
Building type	Cooperative housing	Social housing
Exterior cladding	Uncoated vertical larch boards, 19mm	Coated rough-sawn vertical larch boards, 19mm
Ventilation cavity thickness	30mm	50mm
Survey date	Dec. 2024 (approx. 9 years in service)	Apr. 2026 (approx. 9.5 years in service)



Fig. 5. Aspern D12 South-east facade, in 2024



Fig. 6. Aspern D12 West-facing facade, in 2024

4. 현장 실측 결과 및 분석

4.1. 방위별 회색화 비교

1) Seestadt Aspern D12

Fig. 5.와 같이 남동측에서 촬영한 외관 사진에서는 2024년 촬영 시점에 최상층이 강하게 풍화되어 은회색(silver-grey)으로의 전환이 완료된 상태인 반면, 저층부에서는 여전히 낙엽송(larch) 특유의 적갈색 톤이 유지되고 있었다. 최상층 바로 아래층의 경우 최상층과 같은 정도의 회색화는 진행되지 않았으나, 아래층에 비해 황색과 적색 성분이 더 감소한 밝은 색상이 관찰되었다.

반면 동일 건물동의 서쪽 파사드에서는(Fig. 6.) 남쪽대비 회색화



Fig. 7. South-facing facade, Wohnen am Dantebad, in 2018 (source: dataholz.eu)



Fig. 8. South-facing facade, Wohnen am Dantebad, in 2026

정도가 더욱 심하여 최상층에서는 서향이 가장 심한 회색화를 보였고, 북향의 불균일 변색은 주로 중, 하층에서 두드러졌다. 서향이 남향 대비 회색화가 심한 이유로는, 서향의 경우 오후 강한 일사로 인하여 자외선에 의한 광산화 및 풍화가 지배적임을 들 수 있으며, 반면 북향의 경우 일사량은 적으나 인접 건물에 의한 그림자가 없어 산란 자외선이 지속적으로 작용하고, 또 수분의 건조 속도가 느려 표면 체류 시간이 길어져 미생물 정착이 가속된 것으로 해석된다.

2) Wohnen am Dantebad

유사 시점(약 9년 반)에서 Dantebad는 방위에 따른 색상 차이가 육안상 식별되지 않았다. 도장 처리가 자외선과 수분의 표면침투 및 목재 조직까지의 도달을 차단함으로써 회색화 메커니즘의 발현을 효과적으로 억제한 것으로 해석된다.

외장목재는 추후 회색화 현상을 고려해 시공당시 미리 회색계열의 도장을 하기도 하며 이는 비균질한 회색화 진행의 결과로 나타나는 회색과 도색 계획 시 예측한 회색이 어우러져 추후 파사드의 전체적인 외관이 처음과 크게 다르게 보이지 않는 역할을 한다.

Dantebad 프로젝트에서는 회색이 가해진 청색계열로 도색되었으며(Fig. 7.) 이는 준공이 9년이 지난 시점까지 별도의 재도색 없이 원 모습을 유지하고 있었다(Fig. 8.). 이러한 결과는 외장 목재 코팅이 자외선에 의한 리그닌 광산화(photo-oxidation)를 지연시키고 수분 침투를 억제하여 풍화를 완화한다는 Feist[5] 및 Hill et al.[2]의 보고와도 일치한다. 따라서 본 사례는 적절한 표면처리가 장기간 외관 균질성 유지에 효과적일 수 있음을 실제 건축물에서 확인한 사



Fig. 9. Aspern D12, South-facing facade, in 2024



Fig. 11. Aspern D12, Black mold on a fire-protection profile in a facade system, 2024



Fig. 10. North-facing facade, Wohnen am Dantebad, in 2026

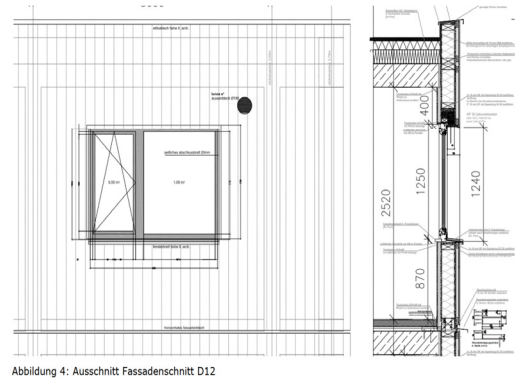


Fig. 12. Aspern D12, Elevation and section, © Querkraft architekten

례로 해석할 수 있다.

4.2. 층별 회색화 비교

1) Seestadt Aspern D12

Fig. 9.와 같이 남측 파사드의 경우 최상층은 준공 후 9년 시점에서 판재 전면에 걸쳐 회색화가 완료된 상태였으나, 중층 및 하층은 낙엽송 특유의 적갈색을 상당 부분 유지하고 있었다. 이러한 층별 차이는 최상층 파라пет(Parapet) 부위는 인접구조물로부터 차양 역할을 받지 못해 자외선·풍하중에 무방비로 노출되며 또한 건물 상층부일수록 풍속이 증가하고 사선 강우(Driving Rain)의 빈도와 강도가 높아져 수직 판재 배면까지 수분이 침투하고 흡습·건조 사이클 횟수가 증가하기 때문인 것으로 풀이된다. 현장에서 발견된 또 한 가지 사실로는 전 층에 걸쳐 창호가 있는 계단실 부분의 경우 빛 반사에 의해 인접 파사드 전 층에서 회색화가 나타난 것을 확인할 수 있었다.

2) Wohnen am Dantebad

Dantebad는 수목 및 외부 회랑(access gallery)이 외벽 상층부를 보호하고 도장면이 광산화 열화를 차단하여 층위별 색상 차이가 관찰되지 않았다(Fig. 10.).

4.3. 흑색 곰팡이 발생 부위 및 원인 분석

1) Seestadt Aspern D12

현장 실측에서 주목된 국부적 결함은 방화 구획 프로파일(fire barrier profile) 하단 판재 마구리부에 집중된 흑색 곰팡이였다(Fig. 11.).



Fig. 13. Wohnen am Dantebad, North-facing facade, 2026

빗물이 판재 표면을 흘러내리다가 방화 프로파일 상단 플랜지에서 흐름이 차단되어 수분이 축적되고, 판재 끝단과 프로파일 사이의 간격이 부족할 경우(Fig. 12.) 고인 수분이 마구리면의 도관 조직을 따라 모세관 흡수(capillary absorption) 현상에 의해 목재 내부로 침투할 수 있다. 통기 불량으로 건조되지 못한 수분이 함수율 20%를 지속적으로 초과하면 흑색 곰팡이 군락이 형성된다.

현장에서 확인된 해당 부분을 도면과 비교해본 결과 곰팡이 생성의 원인으로 판재 끝단의 연결철물 시공과 이에 따른 프로파일 사이 이격거리 부족으로 인한 공기 순환 저해로 나타났다.

2) Wohnen am Dantebad

Dantebad에서는 파사드 마감재를 떠받치는 구조각재가 가로방

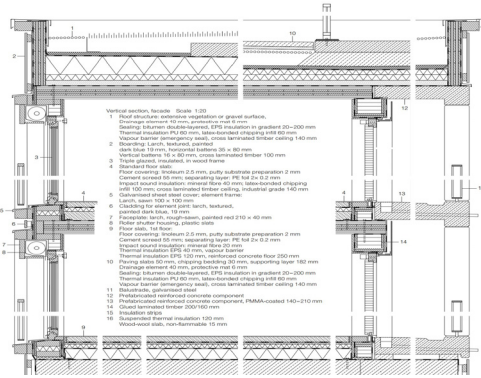


Fig. 14. Wohnen am Dantebad, Section, © Detail Verlag

향에 더해 세로방향으로 한 층 더 시공되었으며 이를 통해 보다 깊은 공기 유동층(5cm)이 확보되었다(Fig. 14.). 현장 확인 결과 방화 구획 프로파일 상·하부 마구리면에서 흑색 곰팡이가 관찰되지 않았는데, 이는 수분의 보다 원활한 흐름과 함께 도장면이 마구리면에서 수분이 흡수되는 것을 막는 차단막으로 작용했기 때문으로 파악된다(Fig. 13.).

4.4. 시각적 변화 종합평가

1) Seestadt Aspern D12

Fig. 15., Fig. 16. 및 Fig. 17.에서 나타났듯이 2015→2017→2024 세 시점 비교를 종합해보면, 준공 2년 후부터 남서 파사드 상층부를 중심으로 초기 회색화가 시작되었고, 9년 시점에는 방위별·층별 차등 열화가 명확히 진행된 상태였다. 흑색 곰팡이 발생 부위를 제외한 대부분의 파사드면에서는 회색화가 미관적 변화 수준의 열화에 머무르고 있으며 이는 구조적인 손상을 발생시키는 내부 부후(wood decay)와는 구분된다. 목재의 회색화(greying)는 자연적이며 피할 수 없는 현상으로, 구조적 관점에서는 대체로 무해하지만 미관에 대한 평가에서는 의견이 갈릴 수 있다. 독일, 노르웨이, 스웨덴 3국에서 각 1000명씩 온라인 설문조사를 한 결과에 따르면 무도장 목재 마감을 선호하는 비율은 20%로 이는 수용자의 성격과 문화적 배경에 따라 선호여부가 다를 수 있음을 보여준다[13]. 다만 무도장 자연 노출 마감을 선택할 경우 시간의 흐름에 따른 자연스러운 외관 변화를 설계 의도로 한다는 점을 이용자와 사전에 합의하는 것이 중요하다.

2) Wohnen am Dantebad

Dantebad 주택에서는 전 방위에서 시공직후 모습이 잘 보전되고 있었는데 준공사진 촬영시점은 겨울(Fig. 18.)이나 조사당시는 봄(Fig. 19.)이어서 마감재의 색변화여부가 사진상 뚜렷하게 구분되지는 않는다. 다만 입주민에 따르면 준공 후 추가 도색작업이 이루어지지 않았으며 표면오염이나 회색화 현상 또한 현장 방문 시 인지할 수 있는 정도는 아니었다(저자 현장 문답, 2026.04).

4.5. 정량적 보조분석

4.1~4.4의 정성적 관찰 결과를 보완하기 위해 현장 사진 자료를 활용한 디지털 이미지 색채 분석을 수행하였다. 분석 도구는 ImageJ



Fig. 15. Aspern D12, in 2015



Fig. 16. Aspern D12, in 2017



Fig. 17. Aspern D12, in 2024



Fig. 18. Wohnen am Dantebad, in 2016, © Stefan Müller-Naumann



Fig. 19. Wohnen am Dantebad, 2026

Fiji v.2.17.0을 사용하였으며, CIE $L^*a^*b^*$ 색 공간에서 명도(L^*), 적-녹 축(a^*), 황-청 축(b^*) 값을 추출하였다. 분석 대상은 해당 건물의 설계사무소 및 입주민으로부터 입수한 준공 당시 사진(2015)과 저자가 직접 촬영한 현장 사진(2024년 12월, iPhone 16 촬영)이다. 두 시점 간 촬영 조건의 차이를 보정하기 위해 기준 ROI 오프셋 적용을 시도하였으나, 준공 사진의 후처리 이력 불명 및 방위별 조도 조건의 차이로 인해 일부 방위에서 물리적으로 타당하지 않은 보정 값이 산출되었다. 이에 따라 보정을 적용하지 않은 값을 사용하였으며, 본 분석은 절대적인 색차 측정보다는 방위별·층위별 상대적 풍화 경향을 정량적으로 비교하는 데 목적을 둔다. 분석의 일관성을 확보하기 위해 발코니 경계부, 클래딩 조인트, 창호 정렬선 등 고정된 건축 요소를 기준으로 비교 가능한 동일 위치에서 각 조건별 3~4개의 ROI를 선정하고 평균값을 산출하여 다음 식에 대입하였다.

$$\Delta E = \sqrt{(L_{2mean} - L_{1mean})^2 + (a_{2mean} - a_{1mean})^2 + (b_{2mean} - b_{1mean})^2}$$

ΔE 값이 2 이하일 경우 육안상 차이가 거의 인지되지 않으며, 5 이상에서는 명확한 색차, 10 이상에서는 색 변화가 현저하다고 볼 수 있다[14]. 분석 결과, 최상층(5층)의 ΔE 는 서향 32.0, 남향 24.7, 동향 21.2, 북향 21.2로 도출되었으며, 하층부(2층)에서는 북향 27.8, 서향 21.8, 동향 5.8, 남향 5.2로 나타났다. 복수 ROI의 평균값을 사용하여 측정 오차를 완화하였으나, 비교 대상 사진의 촬영 시기와 조도 조건이 상이하여 일부 항목에서는 L^* 값의 분산이 상대적으로 크게 나타났다. 따라서 ΔE 값은 절대적인 변색량보다는 외장면 간 상대적 풍화 수준을 비교하는 지표로 해석하였다(Fig. 20., Fig. 21., Fig. 22., Fig. 23.).

Fig. 24.에 따르면 결과값(ΔE)은 서측 최상층 파사드에서 가장 크게($\Delta E \approx 32$) 나타났으며, 이는 장기간 풍화에 따른 현저한 변색 및 표면 열화가 충분히 진행되었음을 시사한다. 반면, 동·남측 저층부에서는 상대적으로 제한적인 색 변화가 관찰되었다. Dantebad는 분석 대상 건물의 설계사무소 및 입주민으로부터 준공 사진을 입수하지 못하여 2016년 준공 직후 dataholz.eu 공개 사진과 2026년 현장 사진을 활용하였다. 동일 방법으로 분석한 결과 전 방위 ΔE 는 약

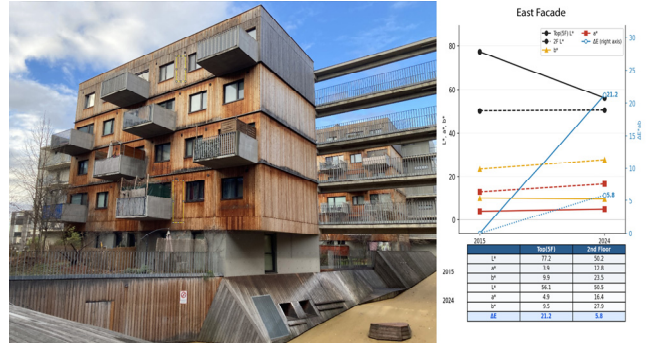


Fig. 20. East-facing facade color analysis based on CIE $L^*a^*b^*$

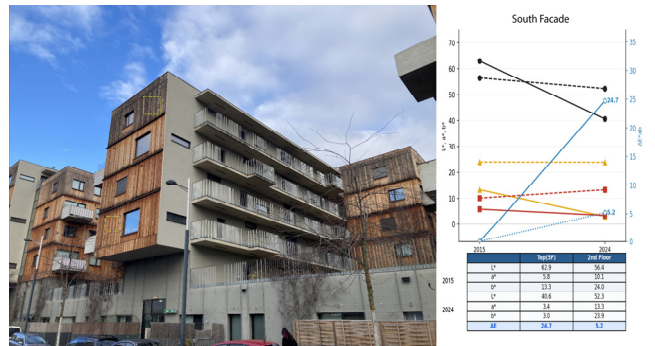


Fig. 21. South-facing facade color analysis based on CIE $L^*a^*b^*$

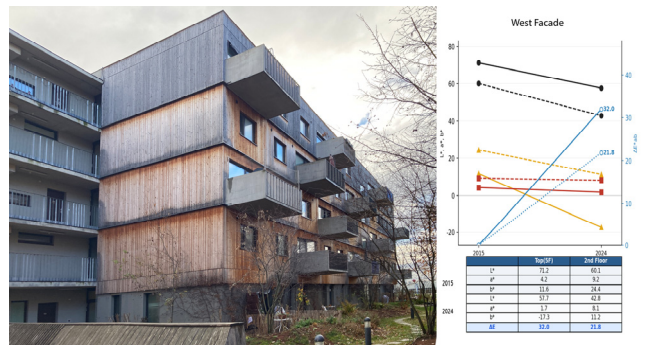


Fig. 22. West-facing facade color analysis based on CIE $L^*a^*b^*$

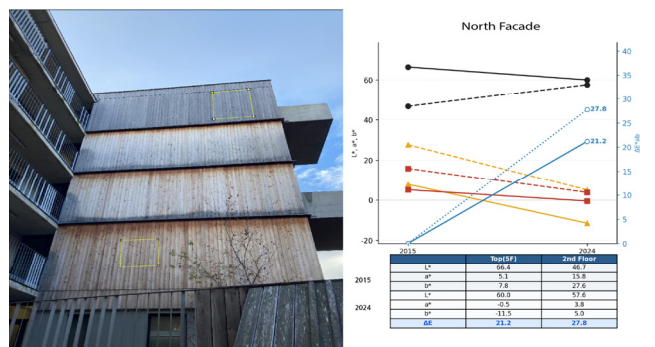


Fig. 23. North-facing facade color analysis based on CIE $L^*a^*b^*$

4미만으로, 도장 마감의 색변화를 효과적으로 억제했음을 정량적으로 확인할 수 있었다[14]. 다만 본 비교는 통제된 실험이 아닌 자연 사례 비교로, 도장 외 변수(도시, 디테일, 조사시점)가 공존하므로 결과 해석에 이를 고려하였다.

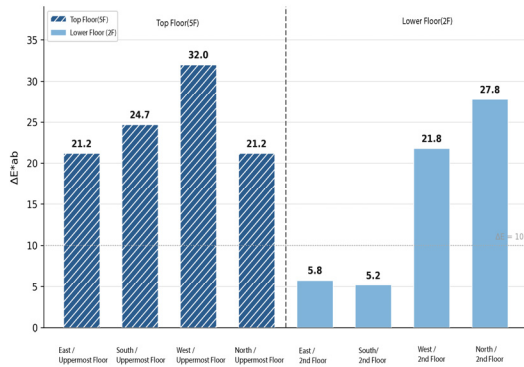


Fig. 24. Comparative ΔE values of facade surfaces between 2015 and 2024 according to orientation and floor level

5. 한국 기후 적용 시사점

목재 파사드 열화를 야기하는 환경 인자는 수분(사선강우), 자외선(일사량), 대기오염(미세먼지·염분)의 세 가지로 구분된다. 4장에서 관찰한 빈의 9년차 열화 결과를 한국에서 목재 외장재 설계 시 적용하기 위해서는 이 세 인자의 두 지역 간 차이를 먼저 파악하는 것이 필요하다. 본 절에서는 공개된 기상·환경 데이터를 활용하여 빈·서울·부산의 환경 부하를 비교하는 보조 분석을 수행한다. 이는 상대적 기후 부하의 크기를 가늠하기 위한 비교지표이며, 정량적 인과 모델 수립은 후속 연구의 과제로 남긴다. 비교에 앞서, 유럽과 한국의 목재 내후성 등급 체계의 대응 관계를 먼저 정리하자면 DIN 68800-1의 사용등급(Gebrauchsklassen, 이하 GK로 표기)과 국립 산림과학원 고시 제2016-2호[15]의 한국 사용환경범주(H 코드)를 대응시키면 Table 4.와 같으며, 본 사례 건물들의 파사드는 모두 GK 3.2(한국 기준 H3B)에 해당된다. 두 나라 체계의 차이는 분류 방식에 있다. 독일의 경우는 DIN 68800에 따라 내후성 수준의 심재 사용, 구조적 보호, 화학 방부처리 중 하나로 GK 3.2로 분류할 수 있는 반면, 현행 한국 H3B 기준은 화학 방부처리에 편중되어 내후성에 의한 분류 경로가 명시되어 있지 않다. 향후 국내 목재 외장재 활성화를 위해서는 수준에 따른 내후성 등급제 도입과 구조적 보호 방법의 제도화 논의가 필요하다.

5.1. 빈 - 서울 - 부산의 기후 비교

1) 강수량과 사선강우

가장 직접적인 비교는 연강수량이다. Table 5.에 따르면 빈은 연간 약 650mm[11]인 데 비해 서울은 1,437mm, 부산은 약 1,519mm로[3], 단순 강수량만으로도 2.2~2.3배 차이가 난다. 그러나 목재 파사드에서 실제로 문제가 되는 것은 하늘에서 수직으로 내리는 비가 아니라, 바람에 실려 벽면에 수평으로 부딪히는 사선강우(driving rain)이다. 사선강우량은 강수량에 풍속을 곱한 값에 비례한다[16].

부산의 연평균 풍속은 약 3.6m/s로 빈(3.4m/s)과 비슷하지만, 강수량 자체가 훨씬 많기 때문에 외벽에 실제로 부딪히는 빗물의 양은 빈보다 상대적으로 그만큼 더 큰 강수 부하를 받을 것으로 추정된다.

여기에 한국의 강수 패턴이라는 변수가 더해진다. 빈은 연중 비가

Table 4. Correspondence between DIN 68800-1 use classes (GK) and korean wood use categories (H) (Source: [9,15])

GK	Exposure condition	KS	Typical applications
GK 0	No exposure	None	Interior structural members
GK 1	Interior, dry conditions	H1	Furniture, interior wall and ceiling materials
GK 2	Under roof; condensation or occasional moisture	H2	Roof rafters, members adjacent to insulation
GK 3.1	Exterior exposure with structural protection (eaves); no direct rainfall	H3A	Protected exterior cladding, balcony ceilings, sheltered façades
GK 3.2	Direct exterior exposure to wind-driven rain and solar radiation	H3B	Exposed façades, decking, exterior walls without eaves
GK 4	Direct contact with soil or fresh water	H4A/H4B	Deck support posts, landscape edging, embedded timber members
GK 5	Contact with seawater	H5	Marine and coastal structures

Table 5. Comparison of climatic characteristics of Vienna, Seoul, and Busan (Source: [3,11])

Parameter	Vienna (Wien)	Seoul	Busan
Köppen Climate Classification	Cfb	Dwa	Cfa
Mean Annual Temperature	11.5°C	13.0°C	15.1°C
Annual Precipitation	650mm	1,437mm	1,519mm
Annual Solar Irradiation	1,210kWh/m ²	1,238kWh/m ²	1,482kWh/m ²
Mean Annual Wind Speed	3.4m/s	2.5m/s	3.6m/s

고르게 분산되지만, 한국에서는 연강수량의 약 60%가 6~9월 장마·태풍 기간에 집중된다. 이처럼 단기간에 집중되는 폭우는 목재 내부로 수분이 침투할 시간을 충분히 주기 때문에, 단순히 2.3배 많은 비보다 실질적인 손상은 더 클 수 있다. 또한 서울의 연 동결일수는 약 60~70일로 이는 마구리 침투수의 동결팽창으로 인한 균열을 가속화한다[3].

2) 일조량

자외선은 목재의 리그난을 분해하여 회색화를 일으키는 주원인이다. 연간 평균 일사량을 비교하면 서울(1,238kWh/m²), 부산(약 1,482kWh/m²)로 부산의 경우 빈(약 1,210kWh/m²)보다 약 23% 높다. 이 차이는 목재 표면의 리그닌 분해 속도에 직접 영향을 미치므로 이는 Aspern D12에서 관찰된 9년간의 회색화가 부산에서는 보다 빠르게 진행될 가능성을 시사한다[17].

3) 대기오염

빗물이 벽면을 타고 흐를 때 대기 중 먼지와 오염 입자도 함께 표

Table 6. Estimated composite weathering index by city (vienna=1.0 as reference)

Parameter	Vienna (reference)	Seoul	Busan
Wind-Driven Rain $\tilde{R}$	1.0	1.63	2.47
UV Exposure $\tilde{UV}$	1.0	1.02	1.23
Air pollution $\tilde{PM}$	1.0	1.76	1.4
Composite Weathering Index WI ($\alpha=\beta=\gamma=1/3$)	1.0	1.47	1.70

Table 7. Summary of design and maintenance recommendations for timber facades under Korean climate conditions

Recommendation	Key Content	Basis	Related Standard
1) End-grain protection	Min. 30mm clearance · water-repellent treatment · metal capping	D12 black mold case observation	[2,9]
2) Ventilation cavity	$\geq 40\text{mm}$ (double the KDS minimum of 20mm)	Wind-driven rain exposure $\sim 2.3 \times \text{Vienna}$	KDS 42 50 10 [22]
3) Eaves/overhang	Design shading angle $\leq 60^\circ$ from façade	Accelerated weathering observed at uppermost floor	[9,21]
4) Floor-differentiated maintenance	Shorten inspection interval for uppermost floor by 1.5–2×	Floor-level ΔE differential results	This study, [6,7]
5) Surface treatment selection	Pre-apply grey pigment coating to reduce long-term burden	Dantebad: no recoating required after 9 years	[4,5]
6) Insect screen	Mandatory insect screen at top and bottom of ventilation cavity	Risk of timber pest infestation in warm Korean climate	KDS 42 50 10 [15,22]
7) Metal connectors	STS 304 or equivalent; particularly critical in coastal areas	Corrosion acceleration by marine salt	KDS 42 50 10 [22]

면에 달라붙어 변색을 가속한다. 서울과 부산의 PM_{2.5} 연평균 농도는 각각 약 $17.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $14.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 빈(약 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 각각 1.76배, 1.4배 높다[18~20]. 특히 부산의 경우 해안 도시의 특성 때문에 미세먼지 외에도 염분 입자가 목재 표면의 수분 흡수를 촉진하고 금속 연결 철물의 부식을 가속하는 추가 변수로 작용한다.

5.2. Weathering Index 정량비교(빈=1.0기준)

5.1에서 비교한 세가지 환경부하, 즉 사선강우(R), 자외선 누적량(UV), 대기오염(PM)을 단일 종합 지표로 통합하기 위해 다음과 같은 단순화된 Weathering Index (WI)를 정의한다.

$$WI = \alpha \cdot \tilde{R} + \beta \cdot \tilde{UV} + \gamma \cdot \tilde{PM} \quad (1)$$

여기서 $\tilde{R}$, $\tilde{UV}$, $\tilde{PM}$ 은 빈(Wien)을 기준값 1.0으로 정규화한 각 요인의 상대값이며, α , β , γ 는 가중치 계수로 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 을 만족한다.

다. 본 연구는 정량 모델 수립이 아닌 지역 간 상대비교를 목적으로 하는 개념적 지표로 동일 가중치($\alpha = \beta = \gamma = 1/3$)를 적용하며 각 요인의 목재 열화 기여도에 관한 가중치 보정은 후속 연구의 과제로 남긴다. Table 6.에 따르면 산출 결과 서울 및 부산의 WI는 각각 빈의 약 1.47 및 1.70배로, 동일 설계로 시공된 목재 파사드의 경우 복합 열화 부하의 상대적 크기가 각각 해당 배수 수준으로 증가함을 시사한다. 즉, Aspern D12에서 관찰된 9년차 열화 수준이 대한민국 서울과 부산에서는 그만큼 빠르게 진행될 가능성을 시사한다. 단, 목재 풍화는 초기 가속 후 포화되는 비선형 거동을 보이므로, 이 선형 환산은 부하 크기의 개념적 비교일 뿐 실제 도달시점의 예측치는 아니다.

5.3. 목조 마감재 설계시 한국의 기후를 고려한 시사점

이상의 분석을 종합하여 볼 때 한국 기후 조건은 목재 파사드 적용 시 내후성 측면에서 불리한 조건을 가지며 한국 기후조건에서 목재 파사드 설계 및 유지관리 시 고려해야 할 주요 권고사항을 Table 7.과 같이 정리하였다.

6. 결론

본 연구는 빈 Seestadt Aspern D12 (무도장 낙엽송 파사드)와 뮌헨 Wohnen am Dantebad (도장 낙엽송 파사드)의 준공 후 약 9년 시점 현장 관찰을 바탕으로, 표면처리 방식·디테일 설계·기후 부하가 목재 파사드 열화에 미치는 복합적 영향을 분석하고 그 결과를 한국 기후 조건에 적용하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다. 첫째, 무도장 목재 파사드에서는 방위별·층위별로 뚜렷한 회색화 속도 차이가 나타나며, 이는 자외선 누적 조사량과 사선강우 노출 조건의 차이에 기인한다. 서향 최상층에서 가장 큰 열화가 관찰되었으며, 남향 최상층에서도 현저한 회색화가 나타났다. 반면 북향 저층부에서는 생물학적 흑화에 따른 색 변화가 두드러졌다. 둘째, 방화 구획 프로파일 하단 마구리부의 흑색 곰팡이 발생은 수분 집적·모세관 흡수·통기 불량 등의 복합 작용으로 발생하는 현상이다. 예방을 위해서는 목재에 유입된 수분이 정체하지 않고 원활히 건조될 수 있도록 목재 간 또는 목재와 방화 프로파일 사이에 충분한 이격 거리를 확보하여야 하며 확보가 어려울 경우 도장 또는 발수제 처리로 예방할 수 있다. 셋째, 도장 처리된 Dantebad에서는 조사 시점에 방위·층위별 외관 차이가 관찰되지 않아, 표면처리 방식(도색)이 열화 방지에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 넷째, 한국(서울·부산)의 기후환경은 열화현상에 대해 중부유럽의 빈보다 상대적으로 높은 부하를 나타내므로 목재 파사드의 표면보호가 특히 중요하다. 이를 위해서는 수분으로부터 마구리면의 보호 강화, 통기층 확대, 차양·차수를 위한 처마 설계 등의 건축적 해결이 필요하며 또한 층별로 차등화된 유지관리 계획이 요구된다. 아울러 현행 한국 사용환경 범주 H3B 기준은 수중별 자연 내후성에 의한 사용등급 분류를 하지 않고 화학 방부 처리에 편중되어 있어, 향후 목재 내후성 등급제 도입 및 목재 보호를 위한 건축적·구조적 설계 매뉴얼의 정비가 필요하다.

본 연구는 다음과 같은 방법론적 한계를 내포한다. 첫째, 색채 분석에 사용된 2015년 준공 사진과 2024년 현장 사진은 촬영 시점·조

도·카메라 기종이 상이하여 ΔE 절대값의 직접 비교에 한계가 있으며, 본 분석은 방위별·층위별 상대 비교를 목적으로 한정하였다. 둘째, 두 사례는 도장 유무 외에 도시·설계자·디테일(통기층 두께)·조사 시점 등 복수의 변인이 공존하는 자연 비교로, 통제된 실험과는 구별된다. 셋째, 사전강우 지수는 연평균 강수량과 풍속의 비례 관계로 근사하였으며, ISO 15927-3[16]에서 정의하는 시간별 풍향·풍속 실측 데이터를 활용한 정밀 산정은 후속 연구의 과제로 남긴다. 또한 본 연구는 두 개 사례만을 대상으로 한 사례연구(case study)이므로 일반화에는 한계가 있어 다양한 기후권과 수종을 포함한 장기 추적조사를 통해 결과의 일반성을 검증할 필요가 있다. 향후 연구에서는 한국 기후 조건에서의 실증 노출 시험과 장기 유지관리 데이터의 구축을 통해 본 연구의 정성적 관찰 결과를 정량적으로 검증하고, 지역별 기후 특성을 반영한 목재 파사드 내구성 예측 모델의 개발이 필요하다.

References

- [1] I. Gabriel, Praxis: Holzfassaden, Staufeu bei Freiburg: Ökobuch, 2023. // I. Gabriel, Practice: Wood facades, Staufeu bei Freiburg: Ökobuch, 2023.
- [2] C. Hill, M. Kymäläinen, L. Rautkari, Review of the use of solid wood as an external cladding material in the built environment, *Journal of Materials Science*, 57, 2022, pp.9031-9076.
- [3] 기상청, 기후평년값(1991-2020), 2021. // Korea Meteorological Administration, Climate Normals (1991-2020), 2021.
- [4] W.C. Feist, D.N.-S. Hon, Chemistry of weathering and protection, In Chemistry of solid wood, American chemical society symposium series, 207, Washington DC: American Chemical Society, 1984.
- [5] W.C. Feist, Outdoor wood weathering and protection, In: R.M. Rowell, R.J. Barbour, editors, Archaeological Wood: Properties, Chemistry, and Preservation, Advances in Chemistry Series, 225, Washington DC: American Chemical Society, 1990, pp.263-298.
- [6] G. Grüll et al., Maintenance procedures and definition of limit states for exterior wood coatings, *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 2011, pp.443-450.
- [7] M. Kropat, M.A. Hubbe, F. Laleicke, Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A review, *BioResources*, 15(4), 2020, pp.9998-10062.
- [8] J. Lee et al., Prediction evaluating of moisture problems in light-weight wood structure: Perspectives on regional climates and building materials, *Building and Environment*, 168, 2020, 106521.
- [9] Holzbau Deutschland-Institut e. V., Holzschutz – Bauliche Maßnahmen, Informationsdienst Holz, 2023, p.2.
- [10] N. Jansen, Einzigartige gebäudehülle mit laerchenfassade im gefoerderten wohnbau in der seestadt Aspern in Wien (GK 5), 8. Europaeischer Kongress EBH 2015, Forum Holzbau, 2015. // N. Jansen, Unique building envelope with larch facade in subsidized housing development in seestadt Aspern, Vienna (GK 5), Proceedings of the 8th European Congress EBH 2015, Forum Holzbau, 2015.
- [11] GeoSphere Austria, Klimanormalwerte 1991-2020, Hohe Warte Station, Wien, 2021. // GeoSphere Austria, Climate normal values 1991-2020, Hohe Warte Station, Vienna, 2021.
- [12] Stadt München, Niederschläge in München von 1955 bis 2020, <https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:5c47b32d-bf51-42a7-b36d-4612972d0f10/ms210404.pdf>, 2026.05.28. // City of Munich, <https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:5c47b32d-bf51-42a7-b36d-4612972d0f10/ms210404.pdf>, 2026.05.28.
- [13] G.W. Gustavsen et al., Exploring consumer perception of uncoated wooden cladding: A Study across three European countries, *European Journal of Wood and Wood Products*, 83, 2025, 79.
- [14] W.S. Mokrzycki, M. Tatol, Colour difference ΔE - A survey, *Machine Graphics and Vision*, 20(4), 2011, pp.383-411.
- [15] 국립산림과학원, 목재의 방부·방충처리 기준, 국립산림과학원 고시 제2016-2호, 2016. // National Institute of Forest Science, Standards for wood preservative and insect-repellent treatment, National Institute of Forest Science Notice No. 2016-2, 2016.
- [16] International Organization for Standardization, Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data, ISO 15927-3:2009, 2009.
- [17] European Commission Joint Research Centre, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, 2026.05.28.
- [18] Stadt Wien, PM2.5 - Ergebnisse kontinuierlicher Messungen, <https://www.wien.gv.at/spezial/luftguetebericht/ergebnisse-kontinuierlicher-messungen/feinstaub-pm25/>, 2026.06.07. // City of Vienna, PM2.5 - Results of Continuous Measurements, <https://www.wien.gv.at/spezial/luftguetebericht/ergebnisse-kontinuierlicher-messungen/feinstaub-pm25/>, 2026.06.07.
- [19] 서울특별시, 2024년 서울시 초미세먼지(PM2.5) 농도 역대 최저 및 나쁨 일수 최소 기록, 2026.06.07. // Seoul Metropolitan Government, Record low annual PM2.5 concentration and fewest high-pollution days in Seoul in 2024, <https://english.seoul.go.kr/seoul-records-lowest-pm2-5-level-in-2024-with-fewest-bad-air-quality-days/>, 2026.06.07.
- [20] 부산광역시, 주요 광역시 미세먼지 및 초미세먼지 농도 현황, <https://www.busan.go.kr/depart/ahfinedust01>, 2026.06.07. // Busan Metropolitan City, Status of fine dust and ultrafine dust concentrations in major metropolitan cities, <https://www.busan.go.kr/depart/ahfinedust01>, 2026.06.07.
- [21] K. Siegele, S. Klaus, Holzfassaden: Konstruktion, gestaltung, beispiele, München: Detail, 2008. // K. Siegele, S. Klaus, Wood facades: Construction, design, examples, Munich: Detail, 2008.
- [22] 국토교통부, 소규모건축 목구조, KDS 42 50 10:2022, 국가건설기준센터, 2022.10.11. // Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Small-scale Building Timber Structures, KDS 42 50 10:2022, Korea Construction Standards Center, 2022.10.11.

- 1) EI 90: 화재시 90분간 인접실로 불이 번지거나 온도를 특정온도이상 전달하지 않도록 하는 건축부재의 내화성능표시 유럽기준.
- 2) 독일 기후학자 블라디미르 쾨펜(Vladimir Köppen)이 1884년 처음 제안하고 이후 수정·발전시킨 기후분류 체계로, 식생 분포와 기온·강수량 데이터를 기반으로 전 세계 기후를 대분류(알파벳대문자)-강수패턴(소문자)-기온특성(소문자)의 조합으로 구분함.
예) 대한민국 서울 Dwa (냉대성, 겨울건기, 무더운여름).