

전기변색 외피시스템 적용 업무공간의 채광 성능 분석*

Daylighting Performance of Office Space Applied with Electrochromic Façade System

김재향** · 한승훈***

Jae-Hyang Kim** · Seung-Hoon Han***

Abstract

A smart window is a new building material that can realize energy savings in a building. Smart windows can freely adjust Visible Light Transmittance (VLT) and solar gain coefficient (g-value) according to the situation. Smart windows include such technologies as Electrochromic (EC), Suspended Particle Device (SPD), and Polymer Dispersed Liquid Crystal (PDLC). Recent research on building energy savings through the VLT and g-value control functions of smart windows is being actively conducted and meaningful results are being drawn. However, since most of the research is focused on energy savings, research on the indoor environment is somewhat lacking. A building is a space where people live and the comfort of life should be prioritized before energy savings. Therefore, in this study, analysis on the daylight performance of an office space was carried out. Through green building standards such as LEED, BREEAM, CASBEE, and G-SEED, the daylight performance was reviewed according to VLT value changes of the smart window. In addition, a study was conducted on the VLT range of the electrochromic façade that can maintain a comfortable indoor environment. The smart window used electrochromic control with a wide range of VLT. The study showed that the minimum VLT of a smart window that can satisfy G-SEED is 25% or more. In addition, it was found that the VLT change of the electrochromic smart window did not significantly affect the uniformity of the room. When the LEED standard was applied, the minimum VLT value of the electrochromic smart window that must be maintained according to each orientation of the building was derived.

Keywords : Smart Window, Electrochromic Façade, Visual Comfort, Daylighting Performance, Illuminance Analysis

1. 서론

Grand View Research(2021)의 Smart Glass Report에 따르면 세계 스마트 윈도우 시장의 규모는 2021년부터 2028년까지 연평균 약 6.8%의 성장률을 기

록할 것으로 예상된다. 스마트 윈도우란 가시광선 투과율(VLT) 및 일사취득계수(g-Value)를 조절할 수 있는 창호를 의미하며, Electrochromic(EC), Suspended Particle Device(SPD), Polymer Dispersed Liquid Crystal(PDLC) 등이 포함된다. 선행연구에 의하면

*이 연구는 산업통상자원부(한국에너지기술연구원) 에너지기술개발사업 신재생에너지핵심기술개발(20193020010440) 및 과학기술정보통신부(한국연구재단) 이공분야기초연구사업 중견연구(NRF-2021R1A2C2011893) 지원으로 수행된 연구임.

**전남대학교 일반대학원 건축토목공학과 박사과정(주저자: gcna5128@naver.com)

***전남대학교 공과대학 건축학부 교수, 건축학박사(교신저자: hshoon@jnu.ac.kr)

스마트 윈도우 적용은 건축물의 에너지 성능을 향상시킬 수 있다. Nicholas et al.(2017)의 연구에서는 미국 16개 기후대를 대상으로 상업 및 주거용 건물에 대하여 세 가지 상태의 조절이 가능한 전기변색(EC) 스마트 윈도우를 설치할 때 절약할 수 있는 에너지에 대한 분석이 이루어졌다. 또한 Oh et al.(2018) 연구에서는 전기변색 스마트 윈도우, 일반 유리, 블라인드 및 롤 셔이드 모델에 대한 시뮬레이션 분석이 진행하였으며, 전기변색 스마트 윈도우는 다른 차양 장치에 비해 냉방부하 절감 효율이 뛰어나다는 결과를 도출하였다.

최근에는 스마트 윈도우의 운용 스케줄에 따른 추가적인 에너지 절감 효과에 대한 연구가 진행되고 있다. Kim(2021)의 연구에서는 오피스 건물을 대상으로 한국의 4계절을 대표하는 기후에 대한 전기변색 스마트 윈도우의 에너지 성능에 대해 비교하였으며, 최적 효율을 위한 g-value 적용 스케줄에 대한 고안이 진행되었다. Dabbagh and Krarti(2021)은 스위칭이 가능한 투명 단열 시스템과 스마트 윈도우를 결합하여 주거용 건물의 최적 제어 전략을 세우는 연구를 진행하였다.

초기에는 스마트 윈도우의 개발 및 성능 향상을 위한 연구와 건물에 적용되었을 시 생기는 에너지 특성에 대한 연구가 주로 진행되어왔으며, 최근에는 효율 향상을 위한 스마트 윈도우의 제어 전략에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 대부분의 연구에서는 스마트 윈도우의 에너지 특성에 초점을 맞추고 있으며, 실내 환경에 관한 연구는 다소 부족한 실정이다. Nundy and Ghosh(2020)의 연구에서 SPD 스마트 윈도우를 적용 하였을 때 실내의 조도 범위와 눈부심 지수(Daylight Glare Index)에 대한 평가가 일부 진행되었으나, 스마트 윈도우의 제어 상태에 따라 변화하는 실내 환경 평가는 이루어지지 못했다.

따라서 이 연구에서는 사무공간의 적절한 실내 빛 환경 조성을 위한 스마트 윈도우의 제어 상태 도출

을 목적으로 한다. 연구 대상으로는 실내 빛 환경에 직접적으로 영향을 주는 VLT의 조절 범위가 가장 넓은 전기변색 스마트 윈도우를 대상으로 하며, 선행 연구에서 발전된 후속 연구로서 선행연구의 모델이 차용되었다(Kim, 2021). 또한 분석 기법으로는 Ray-tracing 방식의 시뮬레이션 분석 방법이 이용되었다.

2. 이론적 검토

시뮬레이션 기법을 통한 실내의 빛 환경 평가 방법으로는 미국의 Leadership in Energy and Environmental Design(LEED)(2021)에서 제시하는 실내 조도의 범위에 대한 평가와 한국의 Green Standard for Energy and Environmental Design(G-SEED)(2021), 영국의 Building Research Establishment Environmental Assessment Method(BREEAM)(2021), 일본의 Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency(CASBEE)(2021)에서 제시하는 평균주광률 평가로 구분된다.

LEED Ver. 2에서 시뮬레이션 기법을 이용할 경우 춘·추분의 청천공 정오를 기준으로 채광성을 평가하고 있으며, 전체 면적의 75%에 해당되는 부분의 최소 조도가 25fc(약 270 lux)를 초과하고 있는지를 평가한다. Ver. 3과 Ver. 4의 경우 기준이 더 강화되었으며, 가장 최신의 Ver. 4.1 시뮬레이션 방법 option2는 춘·추분 청천공 오전 9시 및 오후 3시를 기준으로 55%~75%에 해당되는 부분의 조도가 300~3000 lux 해당 여부를 통해 차등 점수를 부여하고 있다. 과거의 LEED에서는 일정 조도를 초과하는지에 대한 평가가 진행되었다면 현재의 LEED는 실내의 채광 균형을 요구하고 있으며, 이는 G-SEED, BREEAM, CASBEE에서 제시되고 있는 규제도와 유사한 개념이 내포되어 있다.

G-SEED, BREEAM, CASBEE에서는 평균주광률 및 규제도를 이용하고 있다. G-SEED의 경우 교육시설

에 한정되어 전체 바닥면적 80%의 평균값을 이용한 평균주광률 2.0%, 균제도 0.3이 요구되고 있으며, BREEAM의 경우 공간 유형 및 위도에 따라 기준은 달라지나, 한국과 마찬가지로 80% 바닥면적에 대해 평균주광률과 균제도를 제시하고 있다. CASBEE는 평균주광률 2.5%를 달성하여야 최고 점수를 획득할 수 있다. 평균주광률은 식 (1)과 같이 답천공시 외부 전천공 조도에 대한 실내 평균 작업면 조도의 비율로 계산되며, 균제도는 식 (2)와 같이 답천공시 실내 평균 작업면 조도에 대한 최소 작업면 조도의 비율로 계산된다.

$$\text{평균주광률}(DF) = \frac{\text{실내평균작업면조도}(E_i)}{\text{답천공시외부전천공조도}(E_0)} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$\text{균제도} = \frac{\text{최소작업면조도}(E_{\min})}{\text{답천공시실내평균작업면조도}(E_{\text{ave}})} \quad (2)$$

LEED의 채광 성능 평가는 청천공이 이용되며, G-SEED, BREEAM, CASBEE의 채광 성능 평가는 답천공이 이용된다. 청천공은 직사되는 빛의 영향이 직접적으로 실내에 영향을 미치지 때문에, 계절에 따라 실내 환경이 크게 변화하게 된다. 반면, 직사광선의 영향이 적은 답천공은 계절에 따른 실내 환경 변화가 적다. 이 연구는 적절한 실내 빛 환경 조성을 위한 스마트 윈도우의 조건에 대한 연구로 답천공 상태와 청천공 상태에 대한 환경 분석이 수행되었다. 청천공을 통해 평가되는 LEED 기준의 경우 평균 태양 입사각을 가진 춘분과 추분 시점을 기준으로 하나, 이 연구에서는 VLT가 고정된 창호가 아닌 VLT를 조절할 수 있는 창호를 대상으로 하기 때문에, 동지나 하지에도 춘분(추분)의 기준을 만족시킬 수 있는 지에 대해 평가가 진행되었다.

김강수·정희영(2009)의 연구에서는 LEED Ver. 2와 BREEAM, CASBEE가 비교되었으며, 9.0m × 6.0m

× 2.7m의 공간을 대상으로 창면적비와 창 투과율, 차양 유무의 3가지 변인에 대하여 RADIANCE 프로그램을 이용한 시뮬레이션이 진행되었다. 김한용(2013)의 연구에서는 이중외피에 대하여 BREEAM, CASBEE의 기준을 만족시킬 수 있는 최소 창면적비와 창 투과율이 Daysim 프로그램 시뮬레이션을 통해 도출되었다.

3. 시뮬레이션 설정

선행연구의 채광성 시뮬레이션은 Ray-tracing 방식의 RADIANCE 엔진이 주로 이용되었다. Ray-tracing 방식은 확산, 경면 또는 경면 + 확산 재질에 따른 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 굴절과 같은 복잡한 현상에 대해 분석을 진행할 수 있다(김지현·송규동, 2011). 이 연구에서는 3차원 모델링 프로그램 Rhino를 기반으로 알고리즘 편집할 수 있는 Grasshopper의 환경 분석도구 Ladybug를 통해 RADIANCE 엔진 기반 시뮬레이션이 진행되었다.

시뮬레이션 단위 유닛으로는 에너지 분석에 이용되었던 선행연구의 오피스 유닛이 차용되었다(Kim et al., 2021). 남, 동, 서쪽의 각 방위별 분석을 위해 Fig. 1과 같은 25.2m × 25.2m × 3.4m의 중심코어형 오피스 모델이 사용되었으며, 모든 향에 대하여 창면적비는 60%가 적용되었다. 실내 마감재로는 흰색 기본 페인트로 설정되었다.

시중에서 유통되고 있는 O사의 전기변색 스마트

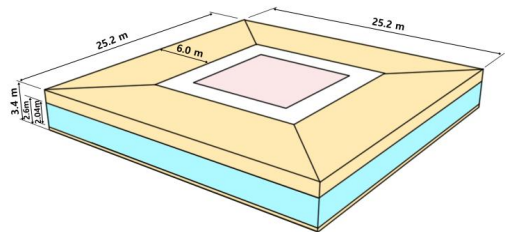


Fig. 1. Office Unit for Simulation

Table 1. Performance of Smart Window

Type	EC State	VLT (%)	g-value	U-value (W/m ² ·K)
6mm Clr + 1mm EC + 6mm Clr	Min	70	0.64	5.4
	Max	15	0.30	
6mm Clr + 1mm EC + 6mm Clr + 5mm Air + 6mm LowE	Min	63	0.44	1.1
	Max	13	0.12	

윈도우는 Table 1과 같이 복층 구조일 때 VLT 13%~63%의 변색 범위를 가진다(ORION NES, 2021). 따라서 10% 단위로 등분하여 대조군이 설정되었다. 이 연구에서는 G-SEED를 기반으로 하는 평균주광률 및 균제도와 LEED에서 요구되는 실내 조도 측면에서 시뮬레이션이 수행되었다.

LEED Ver. 4.1 Daylight 평가에서는 Useful Daylight Illuminance(UDI)를 기반으로 한 300~3,000 lux를 기준으로 하고 있으나, 이를 충족시키기 위해서는 공간의 구조 및 광선반과 같은 채광 보조장치가 요구된다. 설정된 오피스는 전기변색 외피만이 가정되어 있으므로, 이 기준을 충족시키기 어렵기 때문에, 최소 조도 충족여부를 제안하는 LEED Ver. 2 Daylight option2를 적용한 시뮬레이션 방법이 설정되었다.

시뮬레이션 장소는 광주광역시(위도: N 36.35°, 경도: E 127.39°)로 설정되었으며, 한국패시브건축 협회에서 제공하는 2015 광주광역시 기상데이터 Energy Plus Weather(EPW) 파일과 CIE(Commission Internationale de l'Eclairage) 표준 천공 모델이 이용되었다. 또한 태양의 고도가 가장 높고, 낮은 하지와 동지, 중간 고도를 가지는 춘·추분에 대해 시뮬레이션 시점이 설정되었으며, 분석 방법 및 사용 천공 모델은 Table 2와 같다.

Table 2. Analysis Indicators and Applied Sky Models

Direction	Sky Model
Daylight Factor	Overcast Sky
Uniformity	Overcast Sky
Illuminance	Clear Sky

4. 시뮬레이션 분석

4.1 평균주광률 및 균제도 분석

평균주광률은 담천공시 외부 전천공 조도에 대한 실내 평균 작업면 조도로 계산된다. 청천공이 아닌 담천공을 대상으로 산출되기 때문에 계절과 시간, 방위의 영향은 매우 적으며, VLT, 공간의 구성, 창면 적비, 보조 채광 장치의 영향을 받게 된다. 이 연구에서는 공간의 구성, 창면적비, 보조 채광 장치 유무가 제한되었다. CIE 표준 담천공을 기준으로 VLT에 따른 평균주광률의 측정이 Table 3과 같이 이루어졌다. 또한 균제도 측정을 동시에 진행하여, VLT가 균제도에 미치는 영향이 동시에 측정되었다.

시뮬레이션 결과 VLT가 13%일 경우 평균주광률은 0.48%로 측정되었으며, Fig. 2와 같이 VLT가 10% 증가할 때마다 평균주광률은 약 1.305%가 증가하는 것으로 확인되었다. 균제도의 경우 VLT가 23% 이상일 때에는 0.21~0.22로 VLT 변화에 따라 큰 차이를 나타내지는 않았으나, VLT 13%에서는 0.14로 급격하게 변하는 것으로 나타났다. 균제도는

Table 3. Daylight Factor and Uniformity According to VLT Changes

VLT (%)	Daylight Factor (%)	Uniformity
13	0.48	0.14
23	1.96	0.21
33	3.29	0.22
43	4.49	0.22
53	5.72	0.21
63	6.99	0.21

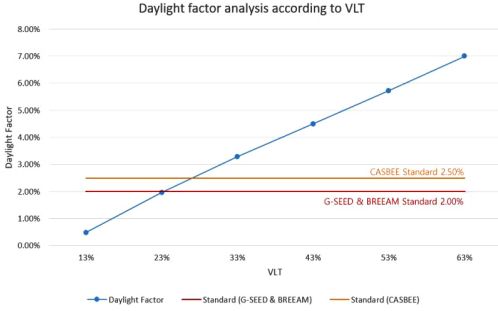


Fig. 2. Daylight Factor Changes and Certifications

대부분의 VLT 범위에 대해 영향에 큰 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으나, VLT 23% 미만의 매우 낮은 구간에서는 영향을 받는 것으로 확인되었다.

CASBEE에서는 2.5% 이상의 평균 주광률을 요구하고 있으며, BREEAM의 경우 2.00% 이상 성능이 확보가 요구된다. 한국의 G-SEED는 교육시설에 한정적이지만 평균 주광률 2%를 기준으로 하고 있다. BREEAM과 G-SEED의 기준을 준용할 때, 현재 설계된 건물에서는 약 VLT 25%가 요구되며, VLT 25% 미만인 범위에서는 에너지 성능에서 더 유리하더라도 채광성능이 확보되지 않음으로 사용을 지양할 필요가 있다. 또한 인증제도에서 요구하고 있는 0.3의 균제도는 설계된 시뮬레이션 모델로는 달성하기 어려우며, 채광보조장치가 필요한 것으로 확인되었다.

4.2 춘·추분 최저조도 분석

LEED Ver. 2 Option 2에서는 춘분 또는 추분의 청천공 정오를 대상으로 실내 75%의 면적에 대하여 최저 조도가 25fc(약 270 lux)를 초과 여부를 평가한다. 춘분(추분)은 평균적인 일광과 태양 고도를 가지기 때문에 채광성을 평가하는 기준시점으로 이용된다. 광주광역시 epw 파일 및 CIE 표준 청천공을 통해 산출된 춘분 12시의 외부 전천공조도는 약 67,700 lux로 측정되었으며, 이 때 각 향 및 VLT 별 75%의 면적에 대한 조도 분포는 Table 4와 같다.

Table 4. Minimum Illuminance by VLT (Equinox)

Direction	Minimum Illuminance for 75% Area				Note
	VLT (%)	Min (Lux)	VLT (%)	Min (Lux)	
South	13	105	23	317	
	33	571	43	765	
	53	970	63	1176	
East	13	32	23	159	
	33	322	43	432	
	53	552	63	666	
West	13	22	23	137	
	33	275	43	378	
	53	469	63	590	

LEED Ver. 2에서 요구되는 75% 면적에 대한 최저 조도 270 lux를 만족하기 위한 VLT는 남향 < 동향 < 서향 순서로 나타났다. 남향의 경우 VLT 23%일 때 317 lux로, 동향과 서향의 경우 VLT 33%일 때 322 lux, 275 lux로 최저조도 기준을 충족시킬 수 있는 것

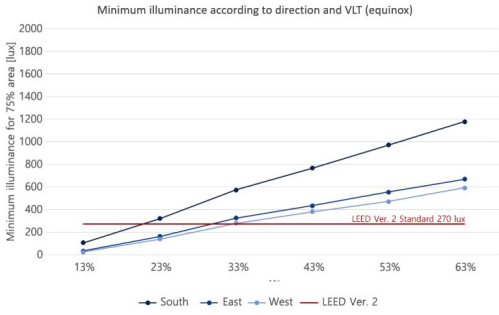


Fig. 3. Minimum Illuminance Changes (Equinox)

으로 확인되었다. 이를 그래프로 표현하면 Fig. 3과 같으며 정비례관계에 놓여있는 것으로 확인되었다. 이를 통해 남향의 경우 VLT 21% 이상, 동향의 경우 VLT 30% 이상, 서향의 경우 VLT 33% 이상이 되어야 LEED Ver. 2 기준을 충족할 수 있는 것으로 나타났다.

4.3 하지 최저조도 분석

하지는 춘분(추분)에 비해 일광이 강하고 태양 고도가 높은 특징을 지닌다. 광주광역시 epw 파일 및 CIE 표준 청천공을 통해 산출된 하지 12시의 외부 전 천공조도는 약 85,100 lux로 측정되었으나, 태양 고도가 높기 때문에 남향의 경우 실내로 입사되는 빛의 양이 적어지는 특징을 가진다. 반면, 동향과 서향의 경우 강한 일광으로 인해 실내의 조도가 높아지는 경향이 나타난다. 이와 같은 특징은 Table 4와 Table 5의 비교를 통해 나타난다. 남향의 실내는 춘분(추분)에 비해 하지의 평균 조도가 낮게 측정되는 반면, 동향과 서향의 실내는 하지의 평균 조도가 더 높게 측정되는 경향을 가진다.

하지의 75% 면적 최저 조도 270 lux를 만족하기 위한 VLT는 춘분(추분)과 마찬가지로 남향 < 동향 < 서향 순서로 나타났다. 태양의 고도로 인해 남향의 경우 최저조도가 전 구간 크게 감소되었으나, 향에 따른 순서 역전은 일어나지 않았다. 남향의 실내는

Table 5. Minimum Illuminance by VLT (Summer Solstice)

Direction	Minimum Illuminance for 75% Area				Note
	VLT (%)	Min (Lux)	VLT (%)	Min (Lux)	
South	13	38	23	188	
	33	395	43	524	
	53	672	63	811	
East	13	34	23	178	
	33	369	43	502	
	53	638	63	772	
West	13	26	23	165	
	33	346	43	469	
	53	594	63	711	

VLT 33%일 때 270 lux를 초과하는 395 lux로 측정되었으며, 동향과 서향 또한 VLT 33% 일 때, 각각 369 lux, 346 lux로 기준을 충족시킬 수 있는 것으로 확인되었다. Fig. 4 그래프를 통해 VLT와 최저조도

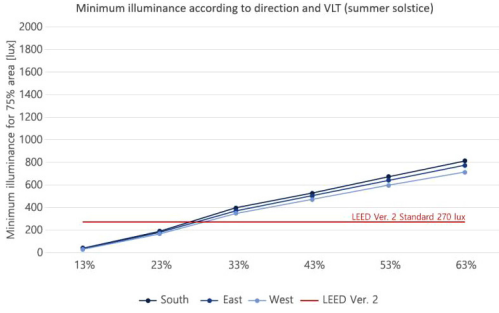


Fig. 4. Minimum Illuminance Changes (Summer Solstice)

와의 관계는 정비례 관계인 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통해 추론할 경우 남향의 경우 VLT 27% 이상, 동향의 경우 VLT 28% 이상, 서향의 경우 VLT 29% 이상 되어야 LEED Ver. 2에서 요구되는 기준을 통과 하는 것으로 나타났다.

4.4 동지 최저조도 분석

동지는 춘분(추분)에 비해 일광이 약하고 태양 고도가 낮은 특징을 지닌다. 광주광역시 epw 파일 및 CIE 표준 청천공을 통해 산출된 동지 12시의 외부 전천공조도는 약 41,500 lux로 측정되었으나, 태양 고도가 낮기 때문에 남향의 경우 실내로 입사되는 빛의 양이 증가하는 특징을 가진다. 반면 동향과 서향의 경우 약한 일광으로 인해 실내의 조도가 낮아지는 경향을 보인다. 이와 같은 특징은 Table 4와 Table 6의 비교를 통해 나타난다. 남향의 실내는 춘분(추분)에 비해 동지의 평균 조도가 높게 측정되는 반면, 동향과 서향의 실내는 하지의 평균 조도가 더 낮게 측정되는 경향을 가진다.

동지의 75% 면적 최저 조도 270 lux를 만족하기 위한 VLT는 춘분(추분), 하지와 마찬가지로 남향 < 동향 < 서향 순서로 나타났다. 남향의 경우 최저조도가 VLT 23%일 때 555 lux로 측정되어 270 lux를 초과하는 것으로 나타났으며, 동향과 서향은 VLT 43%

Table 6. Minimum Illuminance by VLT (Winter Solstice)

Direction	Minimum Illuminance for 75% Area				Note
	VLT (%)	Min (Lux)	VLT (%)	Min (Lux)	
South	13	254	23	555	
	33	892	43	1166	
	53	1466	63	1790	
East	13	25	23	116	
	33	223	43	304	
	53	383	63	508	
West	13	22	23	108	
	33	206	43	282	
	53	347	63	428	

일 때, 각각 304 lux, 282 lux로 기준을 충족시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 5 그래프를 통해 VLT와 최저조도와의 관계는 정비례 관계인 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통해 추

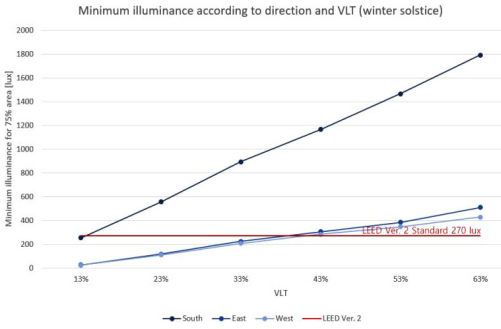


Fig. 5. Minimum Illuminance Changes (Winter Solstice)

론할 경우 남향의 경우 VLT 14% 이상, 동향의 경우 VLT 39% 이상, 서향의 경우 VLT 42% 이상 되어야 LEED Ver. 2에서 요구되는 기준을 통과할 수 있는 것으로 확인되었다.

5. 결론

이 연구에서는 오피스 모델을 대상으로 실내 채광 환경을 고려하기 위해서 적용되어야 하는 VLT에 대한 분석을 목적으로 진행되었으며, 도출된 결과는 다음과 같다. 1) 한국의 친환경 건축물 인증제도인 G-SEED의 평균주광률을 기준으로 하였을 때 계획된 오피스에서 최소한 확보되어야 하는 전기변색 스마트 윈도우의 VLT는 25%로 확인되었다. 2) 계획된 오피스에서 전기변색 스마트 윈도우의 VLT 변화에 따른 규제도 변화는 미비하였다. 3) LEED Ver. 2 option2의 기준을 계절별로 적용하여 분석한 결과를 바탕으로 계절별 유지되어야 하는 전기변색 스마트 윈도우의 최소 VLT가 도출되었다.

이 연구에서는 CIE 표준 답천공을 기준으로 평균주광률과 규제도가 산출되었다. 답천공은 방위나 계절의 영향은 매우 적어, 일정한 값이 도출되었다. 또한 VLT 증가 할수록 평균주광률은 정비례하여 증가하고, 규제도는 0.21~0.22가 유지되는 점을 확인할 수 있었다. 연구에서 계획된 오피스의 경우 전기변

색 스마트 윈도우가 G-SEED에서 요구하는 평균주광률 2%를 달성하기 위한 최소한의 VLT는 25%로 도출되었으며, 규제도 0.3은 달성할 수 없는 것으로 나타났다.

또한 청천공 모델을 이용하여 실내의 조도를 평가하는 LEED Ver. 2 option2의 계절별 75%면적에 대한 최저 조도 분석결과 남향의 경우 춘분(추분) VLT 21%, 하지 VLT 27%, 동지 VLT 14%가 도출되었다. 하지만 VLT 25%이 되어야 평균주광률을 만족할 수 있으므로, 남향의 춘분(추분), 하지, 동지에 대해 각각 VLT 25% 이상, VLT 27% 이상, VLT 25% 이상이 요구된다. 동향의 경우 춘분(추분), 하지, 동지에 요구되는 VLT 각각 30%, 28%, 39%가 요구되었다. 이때, 요구되는 VLT는 평균주광률 달성을 위한 25%를 초과하는 것으로 나타났다. 서향의 경우도 동향과 마찬가지로 세 사례 모두 평균주광률을 만족시키기 위한 VLT 25%가 초과되는 것으로 확인되었으며, 이 때 춘분(추분) 33% 이상, 하지 29% 이상, 동지 42% 이상으로 운용하는 것이 요구된다.

기존의 연구는 스마트 윈도우를 적용하였을 때 생기는 에너지 효율에 대한 분석이 진행된 반면, 이 연구는 스마트 윈도우가 적용되었을 경우 채광성능 확보를 위한 분석이 이루어졌다는 점에서 차별화된 의미를 가진다. 또한 스마트 윈도우가 상용화되면서 반드시 동반되어야 할 작동 제어 프로그램 제어에 이용할 수 있는 데이터를 제공하였다는 점에서 연구의 활용도가 높을 것으로 예상된다. 다음과 같은 한계도 있다. 이 연구는 모식화된 오피스 건물 유형을 대상으로 진행되었기 때문에, 다른 유형의 건물에 대한 분석이 진행되지 못했다. 때문에 바닥 면적, 창면적비, 건물의 세밀한 각도에 대하여 데이터가 대응하지 못한다. 이를 해결하기 위해서는 각각의 조건별로 분석을 진행하고, 간략화 된 회귀식 구축이 필요하다. 따라서 바닥면적, 창면적비 등 여러 조건 하에 채광성능을 분석하고 특징을 도출하는 후속연

구를 제안한다.

방법론적 한계도 존재한다. 이 연구에서는 계절에 따라 최소한의 조도 확보를 위한 VLT 설정이 이루어졌으며, 시뮬레이션 방법이 사용되었다. 최근 시뮬레이션을 통한 채광성 평가는 공간 일광 자율성 (sDA), UDI를 기준으로 수행되지만, VLT 전환이 가능한 전기변색 스마트 윈도우의 특성 때문에 이를 직접적으로 적용하지 못하고, 최소한의 기준 설정만이 이루어졌다. 이를 해결하기 위해서는 시간별로 적절한 VLT를 적용할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요한 실정이다. 또한 이 연구는 시뮬레이션 기법만을 이용하여 분석이 진행되었기 때문에 실제 건물과 데이터 차이를 보일 수 있으며, 이에 대한 보완이 필요하다.

참고문헌

1. 김강수·정회영(2009), "친환경 인증 자연채광 평가 기준의 비교 분석에 관한 연구", 「대한건축학회논문집」, 25(11): 341~348.
2. 김지현·송규동(2011), "빛환경 시뮬레이션의 첨단 기법", 「한국건축친환경설비학회 학술발표대회 논문집」, 29(7): 181~186.
3. 김한용(2013), "건물 용도별 자연채광성능 평가와 빛환경 성능 향상 방안에 관한 연구", 석사학위 논문, 고려대학교.
4. Dabbagh, M. and M. Krarti (2021), "Optimal Control Strategies for Switchable Transparent Insulation Systems Applied to Smart Windows for US Residential Buildings", *Energies*, 14(10): 2917.
5. Kim, J., J. Hong and S. Han (2021), "Optimized Physical Properties of Electrochromic Smart Windows to Reduce Cooling and Heating Loads of Office Buildings", *Sustainability*, 13(4): 1815.
6. Nicholas, D., S. Arman, S. Stephen and J. Delia (2017), "A Comparative Energy Analysis of Three Electrochromic Glazing Technologies in Residential Building, *Applied Energy*", *Applied Energy*, 192: 95~109.
7. Nundy, S. and A. Ghosh (2020), "Thermal and Visual Comfort Analysis of Adaptive Vacuum Integrated Switchable Suspended Particle Device Window for Temperate Climate", *Renewable Energy*, 156: 1361~1372.
8. Oh, M., S. Tae, and S. Hwang (2018), "Analysis of Heating and Cooling Loads of Electrochromic Glazing in High-Rise Residential Buildings in South Korea", *Sustainability*, 10(4): 1121.
9. Building Research Establishment Environmental Assessment Method, "BREEAM International New Construction Technical Manual", Accessed December 20, 2021. <http://www.breeam.com>
10. Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency, "CASBEE for Buildings (New Construction)", Accessed December 20, 2021. <http://www.ibec.or.jp>
11. Grand View Research, "Smart Glass Market Size, Share and Trends Analysis Report by Technology (SPD, PDLC, Liquid Crystal, Electrochromic) by Application (Consumer Electronics, Architectural, Transportation), and Segment Forecasts", Accessed December 20, 2021. <http://www.grandviewresearch.com>
12. Green Standard for Energy and Environmental Design, "녹색건축 인증기준", Accessed December 20, 2021. <http://www.gseed.or.kr>
13. Leadership in Energy and Environmental Design, "LEED v4 for Building Design and Construction", Accessed December 20, 2021. <http://www.usgbc.org>
14. ORION NES (2021), "Electrochromic Window Models", Accessed December 24. <http://www.orionnes.co.kr>

요 약

스마트 윈도우는 건물의 에너지 절감을 실현할 수 있는 신소재 건축 자재이며, 상황에 따라 가시광선 투과율(Visible Light Transmittance), 일사획득계수(Solar Heat Gain Coefficient, g-value)를 자유롭게 조절할 수 있는 특징을 가진다. Electrochromic(EC), Suspended Particle Device(SPD), Polymer Dispersed Liquid Crystal(PDLC) 등이 스마트 윈도우에 해당되며 현재 실용화 단계에 있다. 최근 스마트 윈도우의 VLT 및 g-value 조절 기능을 통해 건축물의 에너지를 절감하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 일부 유의미한 결과가 도출되고 있다. 하지만, 건축물의 에너지 절감에 대해서 연구의 영역이 제한되어 있고, 실내 환경에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다. 에너지 절감에만 초점을 맞춘 실내 공간은 충분한 쾌적성이 확보되지 않기 때문에 실내 환경에 대한 고려가 요구된다. 따라서 이 연구에서는 사무공간을 기준으로 채광성능(Daylight Performance) 분석이 수행되었다. 세계 각국의 친환경 건축인증제도인 LEED, BREEAM, CASBEE, G-SEED의 기준을 통해 스마트 윈도우의 VLT 조절에 따른 채광성능 검토가 이루어졌으며, 쾌적한 실내 채광환경을 유지할 수 있는 스마트 윈도우의 VLT 범위에 대한 고찰이 이루어졌다. 분석을 위해 사용된 스마트 윈도우는 VLT 조절 범위가 가장 넓은 EC가 사용되었다. 분석 결과 한국의 친환경 건축인증제도인 G-SEED의 평균주광률을 충족하기 위한 스마트 윈도우의 최소 VLT는 25% 이상으로 나타났으며, 스마트 윈도우의 VLT 조절은 규제도에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한, LEED의 실내 최소조도의 기준을 적용할 시 적용되어야 하는 계절 및 향에 대한 스마트 윈도우의 VLT 조절 범위 값이 도출되었다.

주제어 : 스마트창호, 전기변색 외피, 시각적 쾌적성, 채광성능, 조도분석
