

스마트 윈도우 설치 속성에 따른 사무공간의 주광 환경 추이

김재향¹⁾ · 한승훈^{2)*}

Trends of Daylight Environment for Office Spaces Based on Smart-Window Installation Settings

Jae-Hyang Kim¹⁾ · Seung-Hoon Han^{2)*}

Received 1 September 2023 Revised 8 September 2023 Accepted 11 September 2023 Published online 19 September 2023

ABSTRACT Smart windows are capable of varying their visible light transmittance (VLT) in response to changing environmental conditions. The VLT variability of architectural windows is highly valuable because it enables indoor lighting and energy environments to align with external changes. However, challenges such as high installation costs and assurance of glass visibility have prompted the exploration of alternative solutions, including models incorporating partially applied smart windows. Prior research focused on useful daylight illuminance (UDI) analysis for south-facing office buildings, pointing out suitable areas for smart-window implementation to enhance lighting control. In this study, we broadened this scope by determining optimal smart-window application zones under changing building orientation. Furthermore, we studied the correlation between building orientation and smart-window deployment areas.

Key words Smart window(스마트 윈도우), Visible Light Transmittance(가시광선투과율), Useful daylight illuminance(유용 일광 조도), Building orientation(건물 방위), Electrochromic(전기변색소자)

Subscript

VLT : Visible Light Transmittance

SHGC : Solar Heat Gain Coefficient

DF : Daylight Factor

sDA : Spatial Daylight Autonomy

ASE : Annual Solar Exposure

UDI : Useful Daylight Illuminance

EC : Electrochromic

1. 서론

최근 Artificial Intelligence, Internet of Things 등 4차 기술이 빠르게 발전·상용화 되고 있다. 건축 분야에서는 원격제어, 최적제어 기술을 바탕으로 빌딩자동화, 빌딩 에너지 관리 시스템, 스마트홈 등의 서비스에 4차 기술을 적용하고 있으며, 제로에너지 하우스를 구현하기 위한 모니터링, 통계 시스템으로도 활용되고 있다.^[1] 이러한 4차 기술은 에너지관리 분야에서 510~1,080억 달러의 잠재적 효과를 가질 것으로 분석하고 있다.^[2] 최근 Visible Light Transmittance(VLT) 조절이 가능한 유리에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이를 건축 소재로 활용하는 스마트 윈도우에 대한 활용 가능성 검토가 수행되고 있다.

1) Ph.D. Candidate, Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University

2) Professor, School of Architecture, Chonnam National University

*Corresponding author: hshoon@jnu.ac.kr

Tel: +82-62-530-1646

Fax: +82-62-530-1639

건축물의 에너지 이동은 특히 창호에서 이루어진다.^[3] 여름철 태양에너지의 실내 유입은 냉방부하가 증가시키는 반면, 겨울철의 태양에너지 실내 유입은 난방부하를 감소시킬 수 있다. 태양 에너지는 빛 환경 또한 영향을 미친다. 실내에서 특정 작업을 수행할 때 적절한 조도가 필요하며, 그 범위는 KS A 3011을 통해 규정되어 있다.^[4] 창호는 유입되는 태양 빛을 조절하여 실내조도를 조절하는 역할을 수행한다. 즉, VLT 조절이 가능한 스마트 윈도우는 건축물에서 열 환경과 빛 환경 모두를 조절할 수 있는 수단이다.^[5]

초기 스마트 윈도우는 제어방식, 복잡한 설비, 설치비용 등의 문제로 인해 건물 외피에 직접 적용되지 못하고, 실내에서 이용하는 경향이 나타난다. 하지만 최근에는 센싱 및 Artificial Intelligence를 활용한 자동제어방식, Internet of Things를 활용한 원격제어 방식 등 4차 기술이 빠르게 보급됨에 따라 활용 가능성이 증대되고 있다. 스마트 윈도우의 보급은 전체 최종에너지 소비의 약 31%를 차지하는 주거, 서비스 분야^[6]의 유의미한 에너지 절감이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 높은 설치비용은 스마트 윈도우의 보급에 여전한 장애요인으로 남아있다.

스마트 윈도우의 설치방식은 창 전체에 대하여 스마트 윈도우를 직렬로 설치하는 방식과 구역을 구분하여 스마트 윈도우를 설치하는 방식으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 비교적 설비가 간단하며, 창 전체에 대하여 VLT를 일괄적으로 변경할 수 있는 특징을 지닌다. 후자의 경우 구역별로 VLT를 조절할 수 있는 설비를 각각 갖추어야 하며, 공간 프로그램이나, 외부환경에 대응하여 효율적인 대응이 가능하다. 구역별로 스마트 윈도우의 VLT를 조절하는 방식 경우 외부 조망 확보의 차원에서 창의 상단에 대하여 VLT를 낮게 설정하는 방식이 주로 운영된다. Fig. 1은 각 방식에 따른 사례를 나타낸다.



(a) 988 West Broadway (b) Boston Science Museum

Fig. 1. Case of smart window installation method

이 연구는 구역별로 스마트 윈도우의 VLT를 조절하는 방식에 대하여 효율성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 외부 조망 확보 차원에서 창의 하단부의 VLT를 높게 설정하여 운영되고 있는 현상에 대하여, 일반유리의 대체 가능성을 살펴보고자 한다. 창 전체에 대하여 스마트 윈도우가 적용되었을 경우와 하단부 일반유리를 적용 했을 때 얻을 수 있는 이점을 비교·분석한다. 후자가 전자에 비해 더 효율이 좋거나, 비슷하다면 스마트 윈도우의 설치 면적을 줄일 수 있으며, 이는 곧 스마트 윈도우 설치비용을 절약할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

스마트 윈도우의 VLT 변화는 Solar Heat Gain Coefficient (SHGC), Contrast Ratio, Color Rendering Index 등과 연관된다.^[7,8] 특히 가시광선 영역의 파장(400~700 nm)에서 태양복사는 431.1 W/m^2 으로 전체 태양복사 에너지의 약 43.1%를 차지하기 때문에 VLT와 SHGC는 비례하는 특징을 지니게 된다.^[9] 이와 같은 특징은 VLT와 냉·난방 부하 간의 밀접한 상관관계를 만든다. 때문에 여름에는 VLT가 낮을수록, 겨울에는 VLT가 높을수록 열 환경에 유리하다. 하지만 이와 동시 VLT의 변화는 실내 빛 환경(조도)에도 영향을 미치게 되며, 열 환경과 빛 환경의 적절한 조화가 필요하다.

실내 환경은 여러 가지 복합적인 요인을 모두 고려해야 하나, 이 연구는 실내 빛 환경을 분석하는 것을 목적으로 한다. 빛 환경은 공간을 구성하기 위한 가장 기본적인 환경이다. 단순히 단열 상자와 같은 암실은 생활할 수 있는 공간이 되지 못하기 때문에, 우선되는 빛 환경 분석이 수행되었다. 따라서 이 연구는 구역별로 적용된 스마트 윈도우의 빛 환경을 평가하고, 효율성을 분석하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 연구 방법

2.1 평가 도구

실내 빛 환경을 평가하는 도구는 Daylight Factor(DF), 균제도, spatial Daylight Autonomy(sDA), Annual Solar Exposure(ASE), Useful Daylight Illuminance(UDI) 등이 있으며, 한국의 녹색건축인증제를 비롯한 여러 나라의 친

환경건축인증제도에서 지표들을 사용하고 있다.^[10~12] DF 및 균제도는 답천공 상태에서의 실내 조도평가로 실시간으로 VLT가 변화하는 스마트 윈도우에 적용하기 어려운 지표이다. 스마트 윈도우는 연간 시나리오 평가로 이루어지는 sDA, ASE로 이루어질 수 있으나, 8,760시간에 해당되는 VLT 스케줄이 작성되어야 적용이 가능하기 때문에 평가에 어려움이 있다. UDI는 Nabil과 Mardaievic이 제안한 평가지표로 실내에서 유용하게 사용할 수 있는 조도의 범위를 한정하고, 바닥면 면적에 대한 조도 달성 면적 정도를 평가한다.^[13] 미국 친환경건축물 인증제도인 Leadership in Energy and Environmental Design(LEED) 평가 또한 sDA, ASE를 대체하여 UDI 평가를 수행할 수 있다.^[11] LEED v4.1 Daylight 평가에서는 3가지 옵션을 제공하고 있으며, 이 중 Option 2는 정기적으로 점유하는 각 공간에 대해 춘분 맑은 날 9시, 15시의 조도에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고, 바닥면 조도가 300~3,000 lux를 유지하는 면적을 측정하도록 되어 UDI 개념을 활용하고 있다. 정기적으로 점유된 바닥면적의 비율이 55%일 경우 1 point, 75%일 경우 2 point, 90%일 경우 3 point를 획득하게 된다. 이 연구에서는 이 기준을 준용하여 평가가 수행되었다. 컴퓨터 시뮬레이션의 경우 Radiance 엔진을 이용할 수 있다고 구체적으로 명시가 되어있다. 이 연구는 Radiance 엔진을 활용할 수 있는 Rhino Grasshopper Ladybug & Honeybee 플러그인을 활용하여 분석이 수행되었다. Rhino Grasshopper Ladybug & Honeybee는 다양한 변인 조건에 대하여 비주얼 스크립트를 통해 손쉽게 조작할 수 있으며, Radiance 엔진을 구동할 수 있는 특징을 가진다.

2.2 변인

건축물은 다양한 용도, 규모, 형태, 방위, 개구부 형태 등을 지닌다. 때문에 상황에 따라 모두 다른 결과값이 도출될 수 있다. 이 연구에서는 용도, 규모, 형태가 통제되었다. 스마트 윈도우의 경우 창 면적이 클수록 효과가 크기 때문에 전면 커튼월을 이용하는 사무공간으로 설정되었다. 직육면체 형태의 일반적인 사무공간을 대상으로 하며, 선행연구를 참조하여 중심 코어 오피스 건물을 기반한 20,000 mm * 6,000 mm * 3,000 mm 유닛이 설정되었다.^[14] 또한 분석 위치로는 광주광역시(35°N, 126°E)가 설정되었으며, 국제

조명위원회 표준 천청공 모델을 구현하여 수행되었다.

이 연구에서는 세 가지 조작변인이 설정되었다. 첫 번째 조작변인으로 건물의 방위가 설정되었다. 건물의 방위에 따라 빛이 입사되는 각도가 변화하며, 적절한 빛 환경 조성을 위한 스마트 윈도우의 설치·구동방식에 영향을 미치게 된다. Fig. 2와 같이 북향을 제외한 남향, 동향, 서향의 사무공간에 대하여 10°단위로 구분하여 분석이 수행되었다.

두 번째 조작변인은 스마트 윈도우의 설치 면적 비율이다. 이 연구는 구역별로 스마트 윈도우를 적용방식에 대한 효율성 분석을 목적으로 하기 때문에 스마트 윈도우의 적용면적에 대한 조작변인이 필요하다. 스마트 윈도우의 경우 시장 확보차원에서 상단부터 VLT를 낮게 적용하는 경향을 보이기 때문에 사무공간의 커튼월 상부부터 적용되는 스마트 윈도우가 가정되었다. Fig. 3과 같이 스마트 윈도우의 적용면적 0%, 25%, 50%, 75%, 100%에 대한 조작변인이 설정되었다.

세 번째 조작변인은 스마트 윈도우의 VLT이다. 적용되는 스마트 윈도우의 VLT에 따라 실내 빛 환경이 변화하며 UDI에 영향을 미치게 된다. 스마트 윈도우에 사용되는 소재로는 Electrochromic(EC), Suspended Particle Devices, Photochromic, Polymer Dispersed Liquid Crystal 등이 있으나, 능동적으로 VLT 변환이 가능하고, VLT 조절 범위가 크면서, 내구성이 높고 높은 EC 스마트 윈도우를 대상으로 분석이 수행되었다.^[15] 국내 O사의 EC 스마트 윈도우 특성을 바탕으로 13~63%의 VLT 가변범위에 대하여 10% 단위로 변인이 설정되었다.^[15] 일반 유리 적용 부분의

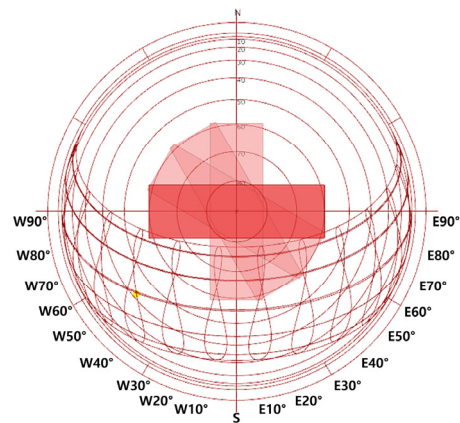


Fig. 2. Variable setting according to orientation

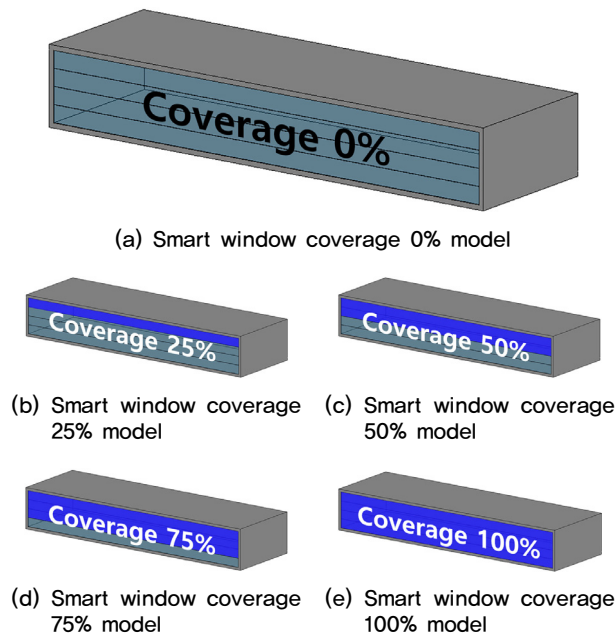


Fig. 3. Variable setting according to smart window applied area

경우 VLT 78%가 적용되었다. 따라서 19개의 방위, 5개의 스마트 윈도우 적용면적, 6개의 VLT 변인에 따라 570개의 비교대상이 설정되었으며, 9시 및 15시에 대하여 1,140번의 Daylight 평가가 수행되었다.

2.3 평가

평가는 LEED v4.1 Daylight 평가 척도가 사용되었다. UDI 300~3,000 lux 달성 바닥면적 비율 55%, 75%, 90%에 대하여 각 1, 2, 3 point를 부여하는 방식으로 평가를 수행한다. 개구부에 근접할수록 3,000 lux를 초과하는 빈도가 증가하며, 개구부와 떨어질수록 300 lux에 미달하는 빈도가 증가하게 된다. Fig. 4는 UDI 300~3,000 lux 달성에 관한 예시를 나타낸다.

3. 분석결과

3.1 동향(東向) 분석(E10°~E90°)

동향(東向)의 사무공간에 대하여 10° 단위 분석이 수행되었다. 대부분의 동향 사무공간은 스마트 윈도우를 설치하더라도 LEED에서 요구하는 채광 조건 달성이 어려웠다.

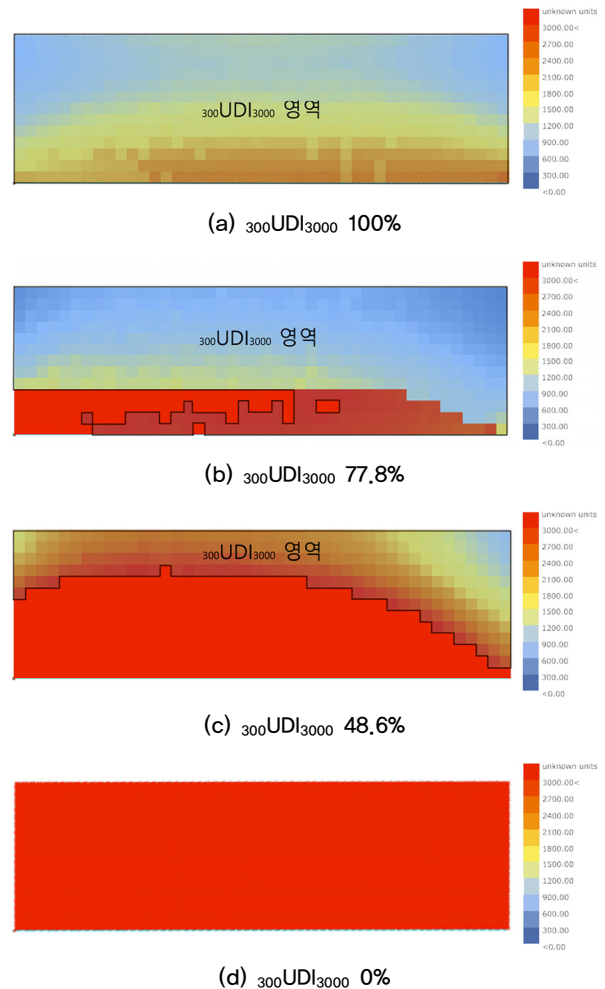


Fig. 4. Example of UDI achieved area

정남향을 기준으로 동쪽으로 20°를 향할 때 Daylight point 1점을 획득할 수 있었으며, 이때 스마트 윈도우의 적용면적은 커튼월 창 전체면적의 75% 또는 전체에 적용되어야 하는 것으로 나타났다. 커튼월 창의 75%에 스마트 윈도우가 적용된 경우 9시, VLT 13%에 대하여 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 57.5%로 나타났으며, 15시, VLT 33% 이하에 대하여 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 85.5%로 나타나 최종 57.5%로 Daylight point 1점을 획득했다. 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우가 적용된 경우 9시 VLT 23%에 대하여 300UDI3000 만족 하는 바닥면적의 비율은 57.5%로 나타났으며, 15시 VLT 33%에 대하여 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 85.5%로 나타났다. 이와같은 결과는 남향을 기준으로 동쪽 20°를 향하는 사무공간은 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우를 적용할 필

요 없이, 75%의 면적에만 적용하더라도 동일한 실내 채광 환경을 조성할 수 있는 점을 나타낸다.

정남향을 기준으로 동쪽으로 10°를 향할 때스마트 윈도우의 설치 면적에 따라 Daylight point 1점 또는 2점을 획득할 수 있는 것으로 나타났다. 스마트 윈도우의 적용면적이 커튼월 창 전체면적의 75%인 경우 9시, VLT 23% 이하에 대하여 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 65.0%로 나타났으며, 15시, VLT 23% 이하에 대한 300UDI3000는 78.3%로 나타나 최종 65.0%에 해당하는 Daylight point 1점 획득이 가능했다. 커튼월 창 전체면적에 스마트 윈도우가 적용된 경우 9시, VLT 13%에 대하여 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 76.8%로 나타났으며, 15시 VLT 23%에 대하여 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 78.3%로 나타나 Daylight point 2점 획득이 가능했다. 9시, 15시 모두에 대하여 균형잡힌 실내 채광 환경을 조성할 수 있는 것으로 나타났다.

또한 정남향을 기준으로 동쪽 30°를 향할 때는 75%의 면적과 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우를 적용했을 때 최종 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 각각 45.3%, 49.3%로 유사한 성능을 나타냈다. 즉, 이 경우에는 스마트 윈도우 설치가 다소 비효율적일 수 있으나, 설치를 할 경우 75% 면적에만 적용되어도 실내 채광 환경 측면에서 유사한 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 동쪽을 향하고 있는 사무공간의 스마트 윈도우 적용면적 대비 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 Table 1과 같다.

비록 동쪽을 향하는 사무공간의 대부분은 스마트 윈도우를 설치하더라도 LEED에서 요구하는 실내 채광 환경을 만족시킬 수 없는 것으로 나타났으나, 스마트 윈도우를 설치할 경우, 그렇지 않은 경우보다 분명한 개선이 이루어졌다. 이는 블라인드와 같은 차광장치를 적절히 사용할 필요가 있음을 나타낸다.

3.2 서향(西向) 분석(W10°~W90°)

서향(西向)의 사무공간에 대하여 10° 단위 분석이 수행되었다. 정남향을 기준으로 서쪽으로 10°~90°을 향하고 있는 모든 경우에 대하여 사무공간의 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우를 적용할 경우 9시, 15시 300UDI3000를 만족하는 바닥면적의 비율은 61.9%~70.3%로 Daylight point 1

Table 1. Smart window application area and UDI achieved area (East)

Orientation	SW Application Rate	SW's Best VLT at 9	Best UDI at 9	SW's Best VLT at 15	Best UDI at 15	UDI Result
E 10°	0%	-	6.8%	-	6.8%	6.8%
	25%	13%	15.0%	13%	32.3%	15.0%
	50%	13%	46.0%	13%	61.2%	46.0%
	75%	23% ↓	65.0%	23% ↓	78.3%	65.0%
	100%	13%	76.8%	23%	78.3%	76.8%
E 20°	0%	-	2.5%	-	41.8%	2.5%
	25%	13%	5.2%	13%	60.1%	5.2%
	50%	13%	20.1%	13%	85.3%	20.1%
	75%	13%	57.5%	33% ↓	85.5%	57.5%
	100%	23%	57.5%	33%	85.5%	57.5%
E 30°	0%	-	0.5%	-	72.0%	0.5%
	25%	13%	1.8%	13%	89.7%	1.8%
	50%	13%	7.0%	33% ↓	92.8%	7.0%
	75%	13%	45.3%	13%	95.1%	45.3%
	100%	23% ↓	49.3%	33%, 43%	92.8%	49.3%
E 40°	0%	-	0.0%	-	92.5%	0.0%
	25%	13%	0.4%	43% ↓	99.8%	0.4%
	50%	13%	3.2%	43% ↓	100%	3.2%
	75%	13%	29.6%	33% ↑	100%	29.6%
	100%	13%	41.3%	43% ↑	100%	41.3%
E 50°	0%	-	0.0%	-	99.8%	0.0%
	25%	13%	0.0%	53% ↓	100%	0.0%
	50%	13%	1.2%	13% ↑	100%	1.2%
	75%	13%	18.0%	33% ↑	100%	18.0%
	100%	13%	32.9%	43% ↑	100%	32.9%
E 60°	0%	-	0.0%	-	100%	0.0%
	25%	13%	0.0%	13% ↑	100%	0.0%
	50%	13%	0.5%	13% ↑	100%	0.5%
	75%	13%	12.4%	33% ↑	100%	12.4%
	100%	13%	31.6%	43% ↑	100%	31.6%
E 70°	0%	-	0.0%	-	100%	0.0%
	25%	13%	0.0%	13% ↑	100%	0.0%
	50%	13%	0.2%	13% ↑	100%	0.2%
	75%	13%	11.2%	33% ↑	100%	11.2%
	100%	13%	30.8%	43% ↑	100%	30.8%
E 80°	0%	-	0.0%	-	100%	0.0%
	25%	13%	0.0%	13%	100%	0.0%
	50%	13%	0.5%	13%	100%	0.5%
	75%	13%	15.2%	33% ↑	100%	15.2%
	100%	13%	32.3%	43% ↑	100%	32.3%
E 90°	0%	-	0.0%	-	100%	0.0%
	25%	13%	0.2%	13% ↑	100%	0.2%
	50%	13%	1.9%	13% ↑	100%	1.9%
	75%	13%	24.5%	33% ↑	100%	24.5%
	100%	13%	40.7%	43% ↑	100%	40.7%

* Round to second decimal place

* The best VLT was established through comparison.

* ↑: or more, ↓: or less

* Values for which LEED Daylight points can be achieved are shaded.

점 획득이 가능한 특징이 나타난다. 이는 동쪽을 향하고 있는 사무공간보다 서쪽을 향하고 있는 사무공간이 스마트 윈도우 설치에 더 효율적임을 나타낸다.

정남향을 기준으로 서쪽으로 10°를 향할 때, 스마트 윈도우의 적용면적이 커튼월 창 전체 면적의 75%인 경우 9시, VLT 13%에 대하여 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율은 94.6%로 나타났으며, 15시, VLT 13%에 대한 300UDI₃₀₀₀는 60.7%로 나타나 최종 60.7%에 해당하는 Daylight point 1점 획득이 가능했다. 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우가 적용된 경우 최종 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율은 70.3%로 75%면적에 스마트 윈도우가 적용된 경우와 9.6%의 차이를 보였지만, Daylight point는 동일하게 1점으로 측정되었다.

또한 정남향을 기준으로 서쪽 90°를 향할 때, 사무공간의 커튼월 창 75%에 스마트 윈도우가 적용된 경우에도 Daylight point 1점을 획득할 수 있는 것으로 확인되었다. 이때 스마트 윈도우의 VLT는 9시에 43% 이상이며, 15시에 13%인 것으로 확인되었다. 이때 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율은 각각 100%, 62.1%로 최종 62.1%로 측정되었으며, 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우가 적용되었을 때와 8.2%의 차이를 보였으나, Daylight point는 1점으로 동일한 것으로 확인되었다. 따라서 정남향을 기준으로 서쪽으로 10° 또는 90°로 배치된 사무공간의 경우 스마트 윈도우를 커튼월 창 75% 면적만 적용하여도 유사한 효과를 얻을 수 있는 것으로 확인된다. 서쪽을 향하고 있는 사무공간의 스마트 윈도우 적용면적 대비 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율은 Table 2와 같다.

서향의 사무공간의 경우 동향의 사무공간과 두 가지의 큰 차이점을 보인다. 첫 번째는 스마트 윈도우를 커튼월 전체에 적용했을 경우 사무공간이 향하는 각도와 상관없이 Daylight point 획득이 가능하다는 점이다. 두 번째는 동향과는 다르게 서쪽으로 향할 때 스마트 윈도우 적용면적이 줄어들어도 효율이 지속적으로 증가하는 구간이 생기며, 정남향으로부터 90°를 향하고, 스마트 윈도우 적용면적이 75%일 때 Daylight point를 획득할 수 있는 특징이 나타난다는 점이다. 즉, 전반적으로 동쪽을 향하고 있는 사무공간에 비해 서쪽을 향하고 있는 사무공간이 스마트 윈도우 설치에 유리할 것으로 판단된다.

Table 2. Smart window application area and UDI achieved area (West)

Orientation	SW Application Rate	SW's Best VLT at 9	Best UDI at 9	SW's Best VLT at 15	Best UDI at 15	UDI Result
W 10°	0%	-	68.7%	-	0.7%	0.7%
	25%	13%	85.5%	13%	3.9%	3.9%
	50%	13%	89.3%	13%	22.4%	22.4%
	75%	13%	94.6%	13%	60.7%	60.7%
	100%	43%	86.2%	23%	70.3%	70.3%
W 20°	0%	-	99.8%	-	0.2%	0.2%
	25%	13%	100%	13%	1.2%	1.2%
	50%	23% ↑ 53% ↓	100%	13%	9.6%	9.6%
	75%	43% ↑	100%	13%	46.2%	46.2%
	100%	43% ↑	100%	13%	62.8%	62.8%
W 30°	0%	-	100%	-	0.0%	0.0%
	25%	13%	100%	13%	0.4%	0.4%
	50%	23% ↑	100%	13%	5.4%	5.4%
	75%	43% ↑	100%	13%	37.4%	37.4%
	100%	43% ↑	100%	13%	62.4%	62.4%
W 40°	0%	-	100%	-	0.0%	0.0%
	25%	13% ↑	100%	13%	0.2%	0.2%
	50%	23% ↑	100%	13%	3.3%	3.3%
	75%	43% ↑	100%	13%	31.3%	31.3%
	100%	43% ↑	100%	13%	61.9%	61.9%
W 50°	0%	-	100%	-	0.0%	0.0%
	25%	13% ↑	100%	13%	0.0%	0.0%
	50%	23% ↑	100%	13%	2.8%	2.8%
	75%	43% ↑	100%	13%	29.7%	29.7%
	100%	43% ↑	100%	13%	61.5%	61.5%
W 60°	0%	-	100%	-	0.0%	0.0%
	25%	13% ↑	100%	13%	0.2%	0.2%
	50%	23% ↑	100%	13%	3.7%	3.7%
	75%	43% ↑	100%	13%	31.6%	31.6%
	100%	43% ↑	100%	13%	61.9%	61.9%
W 70°	0%	-	100%	-	0.0%	0.0%
	25%	13% ↑	100%	13%	0.5%	0.5%
	50%	23% ↑	100%	13%	5.2%	5.2%
	75%	43% ↑	100%	13%	37.1%	37.1%
	100%	53% ↑	100%	13%	62.4%	62.4%
W 80°	0%	-	100%	-	0.2%	0.2%
	25%	13% ↑	100%	23% ↓	1.2%	1.2%
	50%	23% ↑	100%	13%	9.8%	9.8%
	75%	43% ↑	100%	13%	46.3%	46.3%
	100%	43% ↑	100%	13%	62.8%	62.8%
W 90°	0%	-	100%	-	0.7%	0.7%
	25%	13%	100%	13%	3.5%	3.5%
	50%	23% ↑	100%	13%	23.1%	23.1%
	75%	43% ↑	100%	13%	62.1%	62.1%
	100%	43% ↑	100%	23%	70.3%	70.3%

* Round to second decimal place

* The best VLT was established through comparison.

* ↑: or more, ↓: or less

* Values for which LEED Daylight points can be achieved are shaded.

3.3 남향(南向) 분석(South)

정남향의 사무공간은 9시와 15시에 대하여 비슷한 실내 채광 환경을 조성할 수 있는 특징을 지니기 때문에, 비교적 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율 확보가 용이한 것으로 확인되었다. 정남향의 경우 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우를 적용한 경우보다 75%의 면적에만 적용한 것이 더 유리하게 나타났다. 창 면적의 75%에 스마트 윈도우가 적용된 경우 9시, VLT 13%에 대하여 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율은 79.6%이며, 15시, VLT 13%에 대한 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적은 77.8%로 나타났다. 최종 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적은 77.8%로 Daylight point 2점 획득이 가능했다. 반면, 사무공간의 커튼월 창 전체에 스마트 윈도우가 적용된 경우 9시, VLT 13%에 대하여 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율은 74.7%, 15시, VLT 23%에 대한 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율 78.0%로 나타났다. 이 경우 도출된 300UDI₃₀₀₀를 만족하

는 바닥면적 비율은 74.7%이다. 비록 창 전체에 스마트 윈도우가 적용 되었을 경우 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율 75%에 근접하나, 결과적으로 Daylight point 1점 획득이 가능한 것으로 확인되었다. 즉, 정남향의 사무공간의 경우 커튼월 전체에 스마트 윈도우를 적용하는 것보다 75%의 면적에만 설치하는 것이 더 효율적일 것으로 판단된다. 정남향 사무공간의 스마트 윈도우 적용면적 대비 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적의 비율은 Table 3과 같다.

4. 결론

결과적으로 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율을 55% 이상 달성할 수 있는 방위는 E20°~W90°로 나타났다. 또한 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율을 75% 이상 달성할 수 경우는 창 전체에 스마트 윈도우가 적용되고, 동쪽으로 10°를 향하고 있는 사무공간과 창의 75% 면적에 스마트 윈도우가 적용된 정남향의 사무공간인 것으로 확인되었다. 스마트 윈도우가 사무공간의 커튼월 창의 75%만 적용되더라도 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율을 55% 이상 달성할 수 있는 방위는 E10°, E20°, W10°, W90°, S0°으로 확인되었다. S0°의 경우 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율이 77.8%로 커튼월창 전체에 스마트 윈도우를 적용하는 경우보다 더 높은 것으로 확인되었다. 건물 방위 및 스마트 윈도우의 적용면적에 따른 300UDI₃₀₀₀를 만족하는 바닥면적 비율의 변화 추이는 Fig. 5와 같다.

앞선 결과를 바탕으로 다음과 같은 시사점이 도출되었다. 첫째, UDI 측면에서 한국의 경우 사무공간에서 스마트 윈도우의 설치 동쪽을 향하는 건축물보다 서쪽, 남쪽을 향

Table 3. Smart window application area and UDI achieved area (South)

Orientation	SW Application Rate	SW's Best VLT at 9	Best UDI at 9	SW's Best VLT at 15	Best UDI at 15	UDI Result
S 0°	0%	-	26.9%	-	3.0%	3.0%
	25%	13%	48.6%	13%	10.0%	10.0%
	50%	13%	72.6%	13%	38.1%	38.1%
	75%	13%	79.6%	13%	77.8%	77.8%
	100%	13%	74.7%	23%	78.0%	74.7%

* Round to second decimal place
 * The best VLT was established through comparison.
 * ↑: or more, ↓: or less
 * Values for which LEED Daylight points can be achieved are shaded.

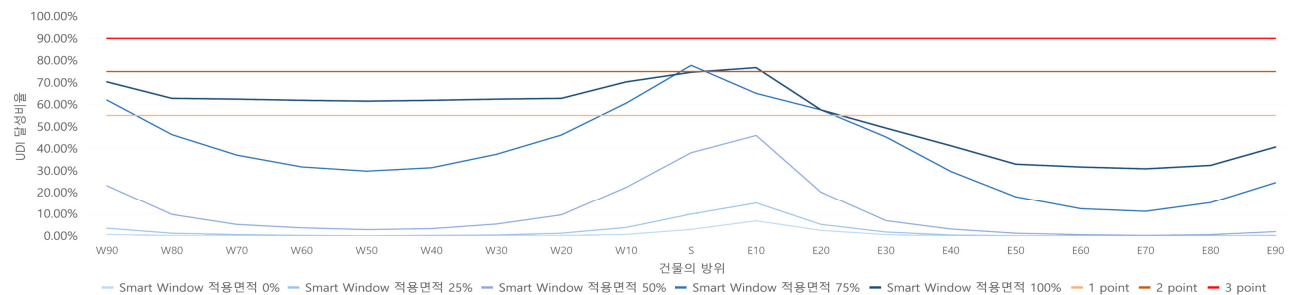


Fig. 5. UDI satisfaction ratio according to building orientation and smart window applied area

할 때 더 유리한 것으로 확인된다. 이는 한국이 동경 127° 임에도 불구하고 동경 135°에 해당되는 도쿄시를 따르고 있어 약 30분의 시간 차가 나타나기 때문에 유추된다. 둘째, E10°, E20°, W10°, W90°, S0°의 건물 방위에서 75%의 면적에만 스마트 윈도우를 설치하더라도 UDI 측면에서 전체에 설치한 것과 같은 효과를 얻을 수 있으며, 이 경우 스마트 윈도우의 설치비용 절약을 기대할 수 있다. 특히 이 연구의 결과로 제시된 데이터는 사무공간에서 부분적으로 스마트 윈도우를 설치하고자 하는 디자이너, 클라이언트 등에게 설치전략을 제공할 수 있는 하나의 색인으로 활용 가능하다.

다만 이 연구는 시장으로 활용되는 부분에 대하여 78%의 높은 VLT가 설정되었기 때문에 실제 적용과 차이점을 가지는 한계를 지니고 있다. 따라서 시장으로 활용되는 부분에 대한 다양한 VLT 따른 분석이 후속연구로 수행된다면, 더 활용적인 스마트 윈도우의 설치전략을 제공할 수 있을 것으로 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 중견연구자지원사업(NRF-2021R1A2C2011893, 과제명 : 지역대응형 에너지스케이프 구현을 위한 스마트 건축외피 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, S.G. and Kwon S.W., 2015, "The study of optimum method about the design and operating through a zero-energy house built in the existing building", *New. Renew. Energy*, **11**(1), 49-59.
- [2] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA), 2019, "AI-based smart housing technology development (smart housing platform and residential service technology development) planning report", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, http://www.kaia.re.kr/portal/cmm/fms/FileDown.do?atchFileId=FILE_00000000027945&fileSn=1&bbsId=.
- [3] Rezaei, S.D., Shannigrahi, S., and Ramakrishna, S., 2017, "A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **159**, 26-51.
- [4] Korean Agency for Technology and Standards, 2018, "KS A 3011 Recommended Levels of Illumination", <https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchView.do?menuId=919&topMenuId=502&upperMenuId=503&ksNo=KSA3011&tmprKsNo=KSA3011&reformNo=10&displayBlock=none&displayBlock2=block>.
- [5] Lee, E.S., Dibabolomeo, D.L., and Selkowitz, S.E., 2006, "Daylighting control performance of a thin-film ceramic electrochromic window: Field study results", *Energy Build.*, **38**(1), 30-44.
- [6] International Energy Agency (IEA), 2020, "Energy efficiency indicators", https://iea.blob.core.windows.net/assets/59268647-0b70-4e7b-9f78-269e5ee93f26/Energy_Efficiency_2020.pdf.
- [7] Cannavale, A., Ayr, U., Fiorito, F., and Martellotta, F., 2020, "Smart electrochromic windows to enhance building energy efficiency and visual comfort", *Energies*, **13**(6), 1449.
- [8] Dussault, J.-M. and Gosselin, L., 2017, "Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort", *Energy Build.*, **153**, 50-62.
- [9] Martín-Chivelet, N., Guillén, C., Trigo, J.F., Herrero, J., Pérez, J.J., and Chenlo, F., 2018, "Comparative performance of semi-transparent PV modules and electrochromic windows for improving energy efficiency in buildings", *Energies*, **11**(6), 1526.
- [10] Green Standard for Energy and Environmental Design, 2016, "G-SEED Green building certification standards", <http://www.gseed.or.kr/boardOpenDetailPage.do?rnum=5&bbsCnt=1370&bbsId=12>.
- [11] U.S. Green Building Council, 2023, "LEED v4.1 Building design and construction", <https://build.usgbc.org/bdc41>.
- [12] Building Research Establishment Environmental Assessment Method, 2016, "BREEAM International new construction technical manual", <https://www.breeam.com/discover/>

technical-standards/newconstruction.

- [13] Nabil, A. and Mardaljevic, J., 2006, "Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors", *Energy Build.*, **38**(7), 905-913.
- [14] Kim, J.H. and Han, S.H., 2022, "Indoor daylight performances of optimized transmittances with electrochromic-applied kinetic louvers", *Buildings*, **12**(3), 263.
- [15] Yoo, S.J., 2011, "Latest research trends in the field of electrochromic electrode catalysts", *CHERIC*, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.cheric.org/files/research/ip/p201302/p201302-801.pdf.