



## 반투명 태양전지 수직 루버의 건축 적용성 - 사무공간 유닛을 중심으로 -

### *Architectural Applicability of Vertical Louvers with Translucent Solar Cells - Focused on the Office Space Unit -*

한승훈\*

Seung-Hoon Han\*

\* Corresponding author; Professor; School of Architecture, Chonnam National Univ., South Korea (hshoon@jnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Translucent solar cells allow light to pass through and enable bifacial power generation. In particular, when translucent solar cells are applied to vertical louvers, the power generation effect can be expected to be excellent. This study analyzed whether a daylight environment could be created when translucent solar cell vertical louvers were applied to office space units. In addition, this study was conducted to examine the power generation performance by applying the bifacial power generation characteristics of the translucent solar cell louver. **Method:** It targets office space units facing south, east, or west. Analysis was performed based on changes in the angles of the louvers and the Visible Light Transmittance (VLT) of the translucent solar cells applied to the louvers. Daylighting performance was evaluated using the criteria of LEED v4.1 using the Useful Daylight Illuminance (UDI) concept. In addition, surface solar radiation analysis was performed on both sides of the louver to examine the power generation performance of the translucent solar cell. Simulations based on Radiance and EnergyPlus engines were performed with Rhino Grasshopper Ladybug & Honeybee plug-ins. **Result:** The application of translucent solar cell louvers in office space was found to have excellent usability in the following order: south, west, and east facings. Additionally, this study provides an information table and optimal plan for UDI and power generation performance according to the angle and VLT changes of the translucent solar cell louvers.

#### KEYWORD

반투명 태양전지  
양면발전 태양전지  
수직 루버  
채광환경

Translucent Solar Cells  
Double-sided Solar Cells  
Vertical Louvers  
Daylight Environment

#### ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 24, 2023  
Final revision received Jan. 10, 2024  
Accepted Jan. 16, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

건물 일체형 태양전지(BIPV)는 건축물과 태양전지를 결합하여 사용하는 형태로, 태양광 발전소와 같은 넓은 부지를 요구하지 않으며, 광역 전력 계통에서 발생하는 에너지 손실을 최소화할 수 있어 효율적인 시스템으로 알려져 있다. 때문에 BIPV에 대한 연구는 지속적인 관심을 받아오고 있으며, 이에 따라 다양한 태양전지를 건축에 적용하려는 시도가 지속되고 있다.

Korea Exchange(2020)에서 발간한 혁신성장상품분석 보고서에 따르면 상용화된 태양전지는 3개의 세대로 분류될 수 있다. 1세대 태양전지는 단결정, 다결정 실리콘이 해당되며, 2세대 태양전지는 CIGS(Copper Indium Gallium, Selenide), CdTe(Cadmium Telluride)로 구성된 형태로 박막형 태양전지로 불린다. 3세대 태양전지는 DSSC(Dye Sensitized Solar Cell), 유기 태양전지, 페로브스카이트 등이 해당된다. 1세대 태양전지는 실리콘 결정 구조 때문에 투명성 확보가 어려운 반면, 2세대, 3세대 태양전지는 구조에 따라 투명성 확보가 가능하다는 특징을 가진다[1]. 따라서 이와 같은 투명성 확보가 가능한 특징을 활용하여 BIPV를 개발하려는 연구가 다

방면에서 진행 중이다.

Jo(2018)의 연구에 따르면, BIPV는 설치방식에 따라 매립부착형, 일체형, 창호형, 경사지붕형, 평지붕형, 톱니지붕형, 수직차양형, 수평차양형, 발코니형으로 구분하고 있다[2]. 이 연구는 이 중 수직차양형에 해당되는 수직 루버를 대상으로 하며, 투명성을 가진 태양전지를 적용했을 때 발휘될 수 있는 건축적 성능과 생산 가능한 태양전지 발전량을 검토하는 것을 목적으로 한다.

수직 루버는 낮은 고도의 태양에서 유입되는 과도한 태양광을 차단하여 실내의 적절한 조도를 조성하기 위한 목적으로 사용되는 건축 장치이다. 실내로 유입되는 태양광의 일부를 루버가 대신 흡수하거나, 반사하는 역할을 수행하게 된다. 때문에 루버에 태양전지를 적용할 경우, 버려지는 태양에너지를 전기에너지로 활용할 수 있는 장점을 지닌다. 1세대 태양전지를 루버에 적용하고 있는 사례가 증가하는 추이이며, 다양한 루버형 태양전지 제품이 출시되고 있다. 하지만 수직 루버에 1세대 태양전지를 적용하는 경우 루버의 단면에 적용하는 경우가 많으며, 이 경우 동쪽에서 서쪽으로 이동하는 태양의 특성에 따라 루버의 한 쪽 면만 발전할 수 있다. 때문에 태양전지의 효율을 최대한 발휘하기 위해서는 루버의 양면 모두 태양전지가 적용되어야 하며, 비용 상승의 단점이 발생한다.

반면 투명성을 확보한 2세대, 3세대 태양전지의 경우 투명성을 갖기 때문에 양면 발전이 가능하며, 이는 비용을 절감하면서도 발전효

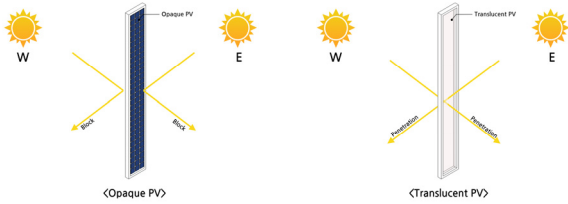


Fig. 1. Characteristic of translucent solar cell louvers

을 확보할 수 있는 특징을 지닌다. Fig. 1.은 불투명한 태양전지와 투명한 태양전지를 수직 루버에 이용했을 경우 특징을 나타낸다. 하지만, 투명한 루버를 이용할 경우 실내 태양광 차단 성능이 저하되는 단점이 발생할 수 있다. 따라서 이 연구는 투명성을 가진 태양전지가 적용된 수직 루버가 적절한 실내 채광환경을 조성할 수 있는지 검토하고, 1년을 기준으로 반투명 태양전지가 적용된 수직 루버의 에너지 생산성에 대한 분석을 수행하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

ASHREA Standard 90.1에서는 최소한의 에너지 성능을 보장하기 위하여 상업용 건물에 대해 40%의 Window Wall Ratio(WWR)을 제한한다[3]. 하지만, 사무공간, 상업공간 등에서 용도 및 미관상 제한된 수치보다 높은 WWR을 적용하는 경우가 있으며, 이때 태양광 차단을 위한 목적으로 루버가 이용되는 경우가 발생한다. 특히, 대면적 유리외피는 주로 사무공간에서 사용되는 경향이 나타나기 때문에, 이 연구에서는 사무공간에 적용된 루버를 연구범위로 한다.

이 연구에서는 두 가지 측면에서 분석이 수행되었다. 첫 번째 분석은 반투명 태양전지 수직 루버가 조성하는 실내 채광환경이다. 분석방법으로는 LEED v4.1(2023)에서 제시하는 춘·추분 9시 및 15시의 Useful Daylight Illuminance(UDI)를 만족하는 바닥면적의 비율을 채택하였다[4]. UDI는 실내에서 사용하기 유용한 조도를 의미하며, Nabil & Mardaievic(2006)이 제안하였다[5]. LEED v4.1 Daylight evaluation option2의 방법을 준용하여 Radiance 엔진 기반 시뮬레이션 기법이 사용되었다. 이 연구에서는 다량의 시뮬레이션을 수행하기 위하여 파라메트릭 모델을 이용하는 Rhino3D R.6의 Grasshopper를 통해 모델 구현을 하였으며, Grasshopper 플러그인 프로그램인 Ladybug 및 Honeybee를 이용하여 Radiance 엔진이 구동되었다. 이를 통해 반투명 태양전지 수직 루버의 VLT(Visible Light Transmittance)와 루버가 적용된 각도에 따라 UDI를 만족하는 바닥면적 비율이 산출되었다.

두 번째 분석은 반투명 태양전지 수직 루버가 생산할 수 있는 에너지 측면이다. 태양전지의 경우 태양전지의 종류, 제조방법, 제조공정에 따라 발전효율이 변화하기 때문에 태양전지의 성능은 광변환 효율을 사용한다. 일반적으로 태양전지는 적용된 면에 입사되는 일사량에 광변환효율을 적용하여 생산하는 에너지를 유추하게 된다. 이 연구에서는 태양전지를 특정하지 않고, 태양전지가 설치될 수 있는 면에 대한 연간 일사량 도출이 수행되었다. 때문에 태양전지의 색상에 대한 고려가 되지 않은 한계가 존재한다. 변인으로는 반투명 태양전지 수직 루버의 설치 각도가 설정되었으며, 시뮬레이션 기법이 활용되었다.

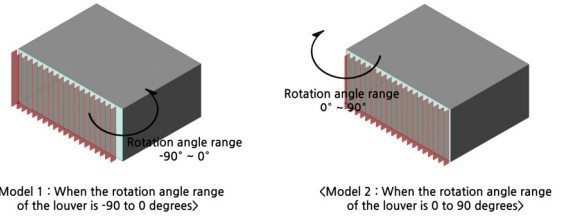


Fig. 2. Model settings according to louvers rotation direction

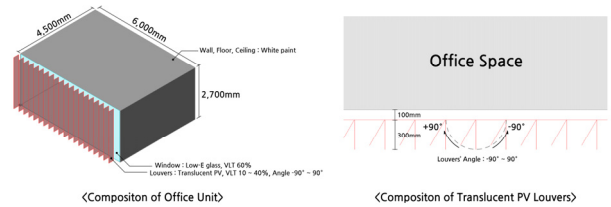


Fig. 3. Office space model overview

2. 시뮬레이션 설정

2.1. 분석 대상 설정

연구범위에 따라 반투명 태양전지 수직 루버 및 해당 입면요소가 적용된 사무공간을 대상으로 한다. 시뮬레이션 지역은 광주광역시(35° N, 126° E)가 설정되었으며, 건물의 향은 남향, 동향, 서향에 대해 분석되었다. 사무공간의 크기는 Kim et al.(2014)의 연구에서 활용되었던 6,000mm\*4,500mm\*2,700mm의 유닛을 채택하였다. 이 유닛의 경우 'Design Guidance for Offices in Washington, DC (2011)'에서 제시된 규격을 준수하여 작성되었다[6][ 7]. 창으로 인식되는 유리의 크기는 전면 커튼월을 기준으로 작성되었다. 커튼월의 VLT는 60%로 구성되었으며, 실내 벽, 바닥, 천장은 백색의 페인트로 설정되었다.

수직 루버의 각도는 수직 상태 0° 를 기준으로 -90° ~90° 를 범위로 설정되었다. 또한 루버가 -90° 및 90° 로 설정되었을 경우 입면이 완전히 차폐될 수 있도록 루버의 폭과 루버의 간격은 동일하게 설정하였으며, 건축적 수치를 고려하여 루버의 폭은 300mm로 구성되었다. 또한 루버의 설치 위치에 따라 완전히 차폐될 수 없는 경우가 발생되기 때문에 Fig. 2.와 같이 루버 각도 -90° ~0° 및 0° ~90° 에 대해 각각의 Model 1(a), Model 2(b)를 설정하였다. Model 1(a)는 -90° ~0° 로 루버 각도 조절이 가능하며, 루버의 시작점이 입면의 왼쪽이 되도록 설정되었다. Model 2(b)는 0° ~90° 로 루버 각도 조절이 가능하며, 루버의 시작점이 입면의 오른쪽이 되도록 설정되었다.

수직 루버의 재료 구성은 반투명 태양전지의 특성을 고려한 유리의 재질이 입력되었으며, 태양전지의 VLT 범위는 10~40%로 설정되었다. 설정된 사무공간 유닛의 구성은 Fig. 3.과 같다.

2.2. 채광환경 분석 설정

LEED v4.1 Daylight evaluation option2에서는 시뮬레이션을 통해 춘·추분 9시 및 15시의 채광환경을 평가를 진행한다. 이 때, 건축

Table 1. Variables used in daylight analysis

Division	Time (hour)	VLT (%)	Angle (°)
Valuable	9, 15	10, 20, 30, 40	-90, -75, -60, -45, -30, -15, 0(a), 0(b), 15, 30, 45, 60, 75, 90

(a) and (b) refer to model 1(a) and model 2(b).

Table 2. Variables used in radiation analysis

Division	Surface	Angle (°)
Valuable	Right, Left	-90, -75, -60, -45, -30, -15, 0(a), 0(b), 15, 30, 45, 60, 75, 90

용도로 사용하는 공간의 바닥면적에 대하여 300~3,000lux의 조도를 달성한 면적 비율을 통해 가점을 부여하며, 55%를 달성하였을 때 1point, 75%를 달성하였을 때 2point, 90%를 달성하였을 때 3point를 부여한다[4]. 이 연구에서는 춘분(3월 20일)을 기준으로 하여 분석되었다. CIE 표준 청천공 모델을 활용하였으며, 9시 및 15시에 대하여 300UDI<sub>3000</sub> 만족 바닥면적 비율이 산출되었다. 산출된 두 값 중 낮은 달성비율의 값을 최종적으로 채택하여 평가를 수행하였다.

반투명 태양전지는 유리 재질과 태양전지의 재료, 구성에 따라 다양한 VLT가 발현될 수 있다. 이 연구는 특정 반투명 태양전지가 아닌 반투명 태양전지가 가질 수 있는 VLT 전반에 따른 분석이 수행되었으며, 재료의 반사도는 고려하지 않았다. 따라서 반투명 태양전지 루버의 VLT는 10%, 20%, 30%, 40%가 각각 적용되었다. 루버의 각도는 수직 기준 0°에 대하여 15° 단위로 구분하여 분석을 수행하였다. 즉, -90°, -75°, -60°, -45°, -30°, -15°, 0° (a), 0° (b), 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°의 14가지 각도에 대한 분석이 수행되었다. 최종적으로 Table 1.과 같이 9시 및 15시, 4가지의 VLT와 14가지의 각도에 대한 112가지 시뮬레이션 모델을 설정하였다.

### 2.3. 수직 루버 면의 일사량 분석 설정

Choi & Han(2023)의 연구는 양면 발전형 태양전지에 대해 주면(Main Surface)과 반대쪽 면(Opposite Surface)에 대한 일사량을 더하는 방식으로 분석을 수행하였다[8]. 또한 Jiang. et. al.(2023)의 연구에 따르면 투명성을 가진 태양전지라도 발전효율이 높은 주면이 존재하며, 그 반대쪽 면은 91~93%의 효율만을 발휘할 수 있다고 밝히고 있다[9]. 이를 근거로 루버의 양쪽면에 대해 연간 표면 일사량 시뮬레이션이 수행되었으며, 두 면 중 낮은 값에 91% 효율을 적용한 뒤, 각 면의 연간 표면 일사량을 더하는 방식으로 일사량 분석 설정이 이루어졌다. 이 때, 이미 루버 면을 통과한 태양광은 다음 루버에 대해 발전에 미치는 영향이 없거나, 매우 미비한 것으로 가정되었다. 연간 일사량 데이터는 광주광역시 EnergyPlus weather file이 활용되었다. 채광환경 분석 설정과 마찬가지로 수직 루버 각도 -90°~90°에 대하여 15° 단위로 분석이 수행되었다. 최종적으로 설정된 변인은 Table 2.와 같다.

Table 3. Daylight analysis results (south facing)

Angle	VLT			
	10%	20%	30%	40%
-90°	26.3%	50.3%	66%*	71.7%*
-75°	79.3%**	77%**	75%**	71.7%*
-60°	81.0%**	80.3%**	72%*	71.7%*
-45°	87.7%**	84.7%**	71.7%*	71.7%*
-30°	88.7%**	87.7%**	71.7%*	71.7%*
-15°	84%**	80.7%**	71.7%*	71.7%*
0°(a)	76.7%**	75.7%**	71.7%*	71.7%*
0°(b)	76%**	75.3%**	71.7%*	71.3%*
15°	71.7%*	71.7%*	70.3%*	67.3%*
30°	61.7%*	60.7%*	59.3%*	56%*
45°	45%	44.3%	43.7%	40.7%
60°	57%*	56.3%*	54.7%	51.4%
75°	47.3%	64.7%*	71%*	70%*
90°	25.3%	49.3%	66.3%*	71.7%*

\* 1point

\*\* 2point

## 3. 분석결과

### 3.1. 남향 사무공간 분석

춘·추분 9시 및 15시의 300UDI<sub>3000</sub> 만족 바닥면적 비율과 루버 면에 입사되는 연간 일사량 시뮬레이션 데이터가 도출되었다. 전반적으로 남향의 사무공간이 동향, 서향의 사무공간에 비해 채광환경 및 루버 면에 입사되는 연간 일사량이 우수한 것으로 확인되었다. 300UDI<sub>3000</sub>를 만족하는 바닥면적의 평가 기준은 앞 장에서 설명한 바와 같이 LEED v4.2 Daylight evaluation의 기준 55%, 75%, 90%에 따라 1, 2, 3point로 차등 평가되었으나, 남향, 동향, 서향의 모든 경우에 대하여 90% 이상은 달성되지 못하는 것으로 확인되었다.

남향의 사무공간에 대하여 300UDI<sub>3000</sub> 75%를 달성한 경우는 14가지로 나타났으며, 이 때 루버의 각도는 -75°~0°이고, 루버의 VLT는 10%, 20%로 나타났다. 루버의 각도가 -75°~0°라면 일반적으로 광전변환효율이 우수한 낮은 VLT의 반투명 태양전지 사용이 유리할 수 있다. 가장 채광환경이 우수한 루버의 각도는 -30°이며, 이때 VLT는 10%로 나타났다. 300UDI<sub>3000</sub> 55%를 달성하는 경우는 총 31가지로 나타났다. 제안된 루버의 VLT 10~40%에 대하여 루버 각도 45%를 제외하곤 모든 상황에 대하여 달성이 가능한 것으로 확인되었다. 도출된 300UDI<sub>3000</sub> 달성 바닥면적 비율은 Table 3.과 같으며, 75%를 달성한 경우 음영, 55%를 달성한 경우 굵은 글씨로 표현되었다.

표면 일사량 분석은 반투명 태양전지의 경우 앞면과 뒷면에 대해 발전효율을 다르게 적용하였으며, Jiang. et. al.(2023)가 주장한 91~93%의 발전효율을 고려하여 일사량이 낮은 면에 대해 91%의 효율을 적용하였다[10].

남향의 사무공간에 적용된 루버에 입사되는 일사량 분석은 다음과 같다. 우선 -90° 및 90°, 즉 루버가 완전히 닫힌 상태에서 받는

Table 4. Solar radiation analysis results (south facing)

Angle	Solar radiation for each side (kWh/m <sup>2</sup> )		Sum of solar radiation (kWh/m <sup>2</sup> )
	Left	Right	
-90°	956.5	0*	956.5 (1)
-75°	949.5	2.8*	952.1 (2)
-60°	838.9	26.8*	863.2 (4)
-45°	714.9	52.2*	762.4 (6)
-30°	546.5	120.9*	656.5 (8)
-15°	365.1	212.1*	558.1 (12)
0°(a)	364.3	314.5*	650.5 (9)
0°(b)	360.1	318.4*	649.8 (10)
15°	246.2*	330.7	554.7 (13)
30°	141.8*	500.4	629.5 (11)
45°	61.3*	661.3	717.1 (7)
60°	32.7*	790.1	819.9 (5)
75°	3.2*	915.3	918.2 (3)
90°	0*	956.5	956.5 (1)

\* marks are multiplied by 0.91 when summed.  
The figures in parentheses indicate the final rankings.

표면 일사량이 956.5 kWh/m<sup>2</sup>로 가장 높게 나타났다. 하지만 완전히 닫힌 상태이기 때문에 수직 루버의 형태라고 보기 어려운 점이 있다. 루버의 각도가 -45° 미만이거나, 45° 이상일 경우 표면 일사량이 낮은 면은 일사량은 표면 일사량이 높은 면의 10% 미만으로 나타나, 양면 발전효율은 미미한 것으로 확인되었다.

반면 루버의 각도가 -30° ~30° 에 해당되는 경우, 이 값은 20~80% 증가할 수 있는 것으로 나타났다. 양면을 고려하더라도 루버의 각도가 증가할수록 루버에 입사되는 일사량이 증가하는 추이가 나타났으며, 각 면의 일사량, 일사량 합, 최종 순위는 Table 4.와 같다.

채광환경 및 표면 일사량을 종합적으로 분석하였을 때, 남향의 사무공간은 루버각도 -75°, VLT 10%가 최적안으로 고려될 수 있다. LEED v4.1 Daylight evaluation 2point를 획득할 수 있었으며, 루버 양면의 표면 일사량은 952.1 kWh/m<sup>2</sup>로 확인되었다. 다만, -45° 및 -30° 각도의 루버에 대해, VLT 10%를 적용할 경우 LEED v4.1 Daylight evaluation 3point의 기준인 300UDI<sub>3000</sub> 달성 바닥면적 비율 90%에 매우 근접하기 때문에 루버 표면 일사량을 활용하는 태양전지의 발전량을 일부 포기하고 선택을 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. 동향 사무공간 분석

동향의 사무공간은 남향, 서향의 사무공간에 비해 채광환경, 루버의 표면 일사량 측면 모두 가장 열악한 것으로 나타났다. LEED v4.1 Daylight point를 획득할 수 있는 경우는 단일 경우로 나타났으며, 이 때 300UDI<sub>3000</sub>을 만족하는 바닥면적 비율은 72.3%로 1point 획득 가능했다. 루버의 각도는 -45°, VLT는 10%로 나타났다. 도출된 300UDI<sub>3000</sub> 달성 바닥면적 비율은 Table 5.와 같다.

루버 양면을 고려하였을 때 가장 높은 표면 일사량 취득은 루버의

Table 5. Daylight analysis results (east facing)

Angle	VLT			
	10%	20%	30%	40%
-90°	0%	0%	0%	34.7%
-75°	6.7%	10.3%	29.3%	35.3%
-60°	41.3%	41%	35.3%	34%
-45°	72.3%*	35.3%	35.3%	32.3%
-30°	40%	35.3%	34.7%	18.7%
-15°	25.7%	19%	14.3%	8.7%
0°(a)	6%	5.7%	4%	3%
0°(b)	4%	3.7%	3%	2.7%
15°	1%	1%	1%	1%
30°	1.3%	1%	1%	1%
45°	12%	10%	7%	4.3%
60°	33.3%	23%	19%	14%
75°	11.3%	16%	28.3%	21.7%
90°	0%	0%	0%	35%

\* 1point

Table 6. Solar radiation analysis results (east facing)

Angle	Solar radiation for each side (kWh/m <sup>2</sup> )		Sum of solar radiation (kWh/m <sup>2</sup> )
	Left	Right	
-90°	613.2	0*	613.2 (3)
-75°	667.1	1.6*	668.5 (1)
-60°	632.1	9.1*	640.3 (2)
-45°	568.3	22.1*	588.4 (4)
-30°	479.5	41.4*	517.2 (6)
-15°	371.7	59.5*	425.9 (9)
0°(a)	347.7	95.5*	434.6 (8)
0°(b)	333.4	99.8*	424.3 (10)
15°	236.1	139*	362.6 (12)
30°	154.9*	210	351 (13)
45°	84.2*	303.5	380.1 (11)
60°	42.5*	413.6	452.3 (7)
75°	5.4*	524.5	529.4 (5)
90°	0*	613.2	613.2 (3)

\* marks are multiplied by 0.91 when summed.  
The figures in parentheses indicate the final rankings.

각도가 -75° 일 때 668.5 kWh/m<sup>2</sup>이며, 가장 낮은 표면 일사량 취득은 루버의 각도 30° 일 때 351 kWh/m<sup>2</sup>로 나타났다. 남향에 비해 전반적으로 약 60~70%의 표면 일사량을 취득할 수 있는 것으로 확인되었다. 루버 양면의 표면 일사량은 Table 6.과 같다.

채광환경 및 표면 일사량을 종합적으로 분석하였을 때, 동향의 사무공간은 루버 각도 -45°, VLT 10%가 고려될 수 있다. LEED v4.1 Daylight evaluation 1point를 획득할 수 있었으며, 루버 양면의 표면 일사량은 588.4 kWh/m<sup>2</sup>로 확인되었다.

Table 7. Daylight analysis results (west facing)

Angle	VLT			
	10%	20%	30%	40%
-90°	0%	0%	0%	16.3%
-75°	1.7%	2.7%	16.3%	40.7%
-60°	27.3%	31.7%	37.3%	38.7%
-45°	17.3%	17%	17%	15%
-30°	20.7%	20.7%	19%	18.3%
-15°	46.7%	43.3%	39.3%	34.3%
0°(a)	<b>69.7%*</b>	<b>67.3%*</b>	<b>59.3%*</b>	51.3%
0°(b)	<b>69.3%*</b>	<b>68.7%*</b>	<b>62.3%*</b>	54.7%
15°	<b>70.3%*</b>	<b>70%*</b>	<b>69.3%*</b>	64%*
30°	<b>76%**</b>	<b>75%**</b>	<b>70%*</b>	<b>68%*</b>
45°	53.3%	<b>56.7%*</b>	<b>62%*</b>	<b>69.7%*</b>
60°	28.3%	32%	38%	<b>56.7%*</b>
75°	1.3%	2.3%	14.3%	41.3%
90°	0%	0%	0%	16%

\* 1point  
\*\* 2point

Table 8. Solar radiation analysis results (west facing)

Angle	Solar radiation for each side (kWh/m <sup>2</sup> )		Sum of solar radiation (kWh/m <sup>2</sup> )
	Left	Right	
-90°	713.9	0*	713.9 (3)
-75°	612.9	5.5*	617.9 (5)
-60°	484.3	42.8*	527.2 (7)
-45°	354	87.1*	441.2 (11)
-30°	242	164.9*	406.9 (13)
-15°	156.7*	257.6	414.3 (12)
0°(a)	108.3*	372.6	480.9 (10)
0°(b)	104.5*	384.9	489.4 (9)
15°	62.9*	423.9	486.8 (8)
30°	42.6*	554.1	596.7 (6)
45°	22.5*	660.5	683.0 (4)
60°	9.2*	735.4	744.6 (2)
75°	1.6*	773.4	775.0 (1)
90°	0*	713.9	713.9 (3)

\* marks are multiplied by 0.91 when summed.  
The figures in parentheses indicate the final rankings.

### 3.3. 서향 사무공간 분석

서향의 사무공간에 대하여 300UDI<sub>3000</sub> 75%를 달성한 경우는 2가지로 나타났으며, 가장 우수한 경우는 루버의 각도 30° 및 루버의 VLT 10%인 것으로 확인되었다. 이때 300UDI<sub>3000</sub>을 만족하는 바닥면적 비율은 76%로 나타났다. 300UDI<sub>3000</sub> 55%를 달성하는 경우는 총 16가지이다. 루버의 각도는 0° ~ 60° 의 범위에 해당되며, 도출된 전체 300UDI<sub>3000</sub> 달성 바닥면적 비율은 Table 7.과 같다.

루버 양면을 고려한 가장 높은 표면 일사량 취득은 루버의 각도가 75° 일 때 774.8 kWh/m<sup>2</sup>인 것으로 확인되었다. 가장 열악한 경우

는 루버의 각도 -30° 일 때로, 이때 양면에 대한 표면 일사량은 392.1 kWh/m<sup>2</sup>로 나타났다. 전반적으로 남향에 설치된 루버에 비해 약 70~80%의 표면 일사량을 취득할 수 있으며, 동향의 사무공간보다 반투명 태양전지 루버 적용성이 높은 것으로 확인된다. 시뮬레이션을 통해 도출된 루버 양면의 표면 일사량은 Table 8.과 같다.

채광환경 및 표면 일사량을 종합적으로 분석하였을 때, 서향의 사무공간은 2가지 상황을 고려해 볼 수 있다. 루버의 각도 30°, VLT 10%를 적용하여, LEED v4.1 Daylight evaluation 2point를 획득하면서 루버 양면의 표면 일사량 592.8 kWh/m<sup>2</sup>를 확보하는 경우와 루버의 각도 60°, VLT 40%를 적용하여, 1point를 획득하면서 743.8 kWh/m<sup>2</sup>를 확보하는 경우이다. 일반적으로 반투명 태양전지는 VLT가 낮을수록 광전변환효율이 높아지는 경향이 있기 때문에, VLT별 광전변환 효율을 고려하여 대안을 검토할 필요가 있다.

## 4. 결론

이 논문은 반투명 태양전지 루버를 사무공간에 적용하였을 때, 발휘하는 실내 채광환경 성능과 태양전지 발전량을 검토하기 위해 수행되었다. 실내 채광환경 성능은 LEED v4.1 Daylight evaluation에서 이용하는 UDI 개념을 활용되었으며, 태양전지 발전량 검토를 위해 루버 표면에 입사되는 일사량이 분석되었다. 반투명 태양전지의 경우 빛이 투과하는 특성을 가지며, 이는 양면 발전이 가능한 특징으로 이어진다. 때문에 루버 양쪽면 모두에 대한 표면 일사량이 검토되었다. 연구 방법으로는 Radiance 엔진 및 EnergyPlus weather file을 기반으로 한 시뮬레이션 방법이 활용되었으며, 남향, 동향, 서향의 사무공간 유닛, 루버의 각도, 루버의 VLT에 대해 분석되었다. 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 반투명 태양전지 루버의 활용 근거를 확보했다는 점에서 의미를 가진다. 반투명 태양전지를 루버에 적용하더라도 적절한 실내 채광환경 조성은 유효한 것으로 확인되었다. 또한 양면 발전이 가능하다는 특징을 통해 태양전지가 활용할 수 있는 일사량에 대한 전반적인 조사가 수행되었다. 남향의 경우 완전히 차폐된 면에 대한 단면 태양전지 루버 표면 일사량은 최대 65.4% 감소한 것으로 나타났으나, 양면 발전의 경우 이 수치는 42%로 약 23.4% 개선되는 것으로 나타났다. 동향의 경우 이 수치는 65.8%에서 42.8%로 약 23% 개선되었다. 서향의 경우도 66.1%에서 45.1%로 약 23% 개선되는 효과를 나타냈다. 이와 같은 결론은 발전효율이 일반적으로 불투명 태양전지보다 낮은 반투명 태양전지의 단점을 보완하는 요소로 활용할 것으로 판단된다.

둘째, 사무공간에서 반투명 태양전지 루버의 적용은 남향, 서향, 동향 순서로 활용성이 우수한 것으로 확인되었다. 남향의 경우 반투명 태양전지 루버를 다양한 각도로 활용하면서도 발전성능을 최대한 끌어낼 수 있는 특징을 지닌다. 반면 동향의 경우 최소한의 채광환경 구성을 위한 선택지는 한 가지만 존재하지 않는다. 특히, 동향과 서향의 결과 차이는 동경 135°의 지방 평균시를 표준시로 채택하고 있는 한국의 특성 때문인 것으로 판단된다. 이같은 결론은 설계 단계에서 건축 향에 따라 반투명 태양전지 루버 적용을 고려할 수 있게 하는 도구로 활용이 가능하다.

셋째, 연구를 통해 도출된 데이터는 반투명 태양전지 루버 선택에 대한 의사결정에 사용될 수 있다. 태양전지는 종류, 공정 등에 따라 광전변환효율이 다르다. 이 연구에서는 태양전지를 특정하지 않고, 루버 양면에 대한 표면 일사량이 도출되었다. 이를 활용하여 다양한 반투명 태양전지의 광전변환효율을 적용할 수 있으며, 적절한 반투명 태양전지의 선택이라는 의사결정이 가능하다. 실내 채광환경 정보 또한 제공되었기 때문에 이 연구는 반투명 태양전지 루버의 사무 공간 적용에 대한 의사결정을 돕는 도구로 활용이 가능하다.

다만 다음과 같은 연구 한계도 존재한다. 첫째, 이 연구는 선행연구와 시뮬레이션을 통해 데이터가 도출되었다. 선행연구에서는 반투명 태양전지 반대편이 91~93%의 발전효율을 발휘한다고 발표했지만, 실제로 사용되는 태양전지의 종류, 공정에 따라 이 비율은 달라질 수 있을 것으로 예상된다. 둘째, 이 연구에서는 반투명 태양전지를 투과한 빛이 다음 태양전지를 투과할 때 2차 발전하지 않거나 매우 적다는 가정을 통해 데이터가 도출되었다. 이 또한 실제 상황에 대한 검증이 수행하지 못한 점에서 연구의 한계를 지닌다. 셋째, 반투명 태양전지는 다양한 색상으로 제작되는데, 색상이 실내환경에 미치는 영향력 분석이 포함되지 못했다는 점에서 한계를 지닌다. Cannavale, et al. (2020)은 CR(Contrast Ratio), CRI(Color Rendering Index)등이 색상 환경에 활용될 수 있다고 밝히고 있다. 이를 통해 연구를 보완하여 색 환경에 대한 후속연구를 진행할 필요가 있다.

## Acknowledgement

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

## References

- [1] Korea Exchange, Innovative growth item analysis report: Third generation solar cell, <http://data.krx.co.kr/>, 2023.12.02.
- [2] 조한솔, 태양전지 적용 건축물의 심미성 평가방안에 대한 연구, 전남대학교 석사학위논문, 2018.02. // (H.S. Jo, A study on the evaluation method for building aesthetics applied with solar cells, Master's Thesis of Chonnam National University, 2018.02.)
- [3] ASHRAE, ANSI/ASHRAE/IES standard 90.1-2016: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings.
- [4] U.S. Green Building Council, LEED v4.1 building design and construction, <https://build.usgbc.org/bdc41>, 2023.12.02.
- [5] A. Nabil, J. Mardaljevic, Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, *Energy and Buildings*, 38(7), 2006.07, pp.905-913.
- [6] S.H. Kim et al., A study on the proposes of energy analysis indicator by the window elements of office buildings in Korea, *Energy and Buildings*, 73, 2014.04, pp.153-165.
- [7] University of Minnesota, Twin Cities Campus, Center for Sustainable Building Research, Design guidance for offices in Washington, DC, <https://efficientwindows.org/wp-content/uploads/2022/05/WashingtonDesignGuideOffice.pdf>, 2023.12.02.
- [8] 최승주, 한승훈, 에너지 생산성 분석 기반 양면발전형 수직 태양전지의 활용 가능성 탐색, *신재생에너지*, 제19권 제4호, 2023.12, pp.11-24. // (S.J. Choe, S.H. Han, A study on the applicability of double-sided vertical photovoltaic panels based on energy productivity analysis, *New & Renewable Energy*, 19(4), 2023.12, pp.11-24.)
- [9] Q. Jiang et al., Highly efficient bifacial single-junction perovskite solar cells, *Joule*, 7(7), 2023.07, pp.1543-1555.
- [10] A. Cannavale et al., Smart electrochromic windows to enhance building energy efficiency and visual comfort, *Energies*, 13(6), 2020.03, 1449.