



기후대별 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호 적용 사무용 건물의 에너지 성능분석

Energy Performance Analysis of Office Building with Semi-transparent Solar Cell Windows for Solar Signage by Climate Zone

박보람* · 최영재** · 김아영*** · 문진우****

Bo Rang Park* · Young Jae Choi** · A Young Kim*** · Jin Woo Moon****

* Associate Research Engineer, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ, South Korea (pbr_1123@naver.com)

** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ, South Korea (chlyoungwo@gmail.com)

*** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ, South Korea (dkdud100345@gmail.com)

**** Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ, South Korea (gilerbert73@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: This study analyzed building heating, cooling, and lighting energy performance and power generation performance under various climate zones in accordance with Solar Signage Semi-transparent window application.

Method: American climate areas, them being tropical, desert, maritime, and microthermal, have been selected and 40%~80% window wall ratio (WWR) has been established in relation to five Solar Signage Semi-transparent windows. Designbuilder, building energy analysis software, was used to model office building and simulate.

Result: Total energy consumption presented Phoenix was highest, followed by Miami, Ann Arbor, with San Francisco being the lowest. The smaller the WWR the higher the heating energy consumption at San Francisco and Ann Arbor appeared with G1 window confirmed to be the highest. Cooling energy consumption in all four climate zones increased as WWR increased due to increase in amount of solar gain. Lighting energy consumption in all four climate zones decreased as WWR increased, with G5 showing smaller consumption than G1 due to VLT's influence. Climate zone with the amount of energy savings on account of power generation being largest turned out to be San Francisco. Especially, possibility of zero energy building achievement in case of G1, G2 window being applied when WWR was 80% was confirmed. With the result of this particular research, to expand applicability as building exterior materials, products improved upon traits such as colour, insulation, and strength should be under continuous performance evaluation study across various foreign and domestic climate zones.

KEYWORD

솔라사이니지
반투명 태양전지 창호
건물일체형태양전지
건물에너지
기후대

Solar Signage
Semi-transparent Window
Building Integrated Photovoltaic
Building Energy
Climate Zone

ACCEPTANCE INFO

Received Mar. 28, 2022

Final revision received Apr. 7, 2022

Accepted Apr. 12, 2022

© 2022. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

국토교통부는 2021년 6월 '2050년 탄소중립 달성을 위한 녹색건축 활성화 방안'을 발표하고[1] 기존 건축물 및 신규 건축물 에너지 절감에 대한 맞춤형 지원을 가속화 하기 위한 전략을 수립하고 있다. 기존 건축물의 경우 에너지 성능향상 및 효율개선을 추진할 계획이며 신규 건축물의 경우 제로에너지건축물의 조기 확산과 '25년 민간 의무화에 대비할 수 있도록 다양한 제도·정책적 기반을 마련할 계획'이다.

제로에너지건축물을 위해서는 에너지 효율 개선과 함께 저탄소화를 위한 신재생에너지 기술 활용이 중요하다. 제로에너지건축물 인증등급은 '에너지 자립률'을 기준으로 나뉜다. 에너지 자립률은 단위면적당 1차에너지소비량 대비 단위면적당 1차에너지 생산량 비율을 말한다[2]. '22년 1월 기준 제로에너지건축물 인증현황은 에너지자립률 100% 이상인 1등급은 6.3%로 가장 적고, 20% 이상인 5등급로 60.4%로 가장 높아[3] 단순 인증을 위한 에너지자립률 달

성이 아닌 탄소중립 및 환경적 현안문제 해결에 기여하기 위해서는 신재생에너지 적용률을 더욱 높여야 한다.

'21년 특허청에서 조사한 바에 의하면 제로에너지 건축 관련 특허 출원이 '20년 560건으로, '08년 259건 대비 2.1배 증가하였다. 그중 재생에너지를 활용하여 에너지를 생산하는 태양광 기술이 23.5%를 차지하고 있다[4]. 태양광 패널을 옥상 등 한정된 곳에 설치하는 기존의 액티브 기술로는 에너지 소비 제로를 달성하기 어려우므로 이를 해결하기 위한 건물 일체형 태양광 시스템(Building Integrated Photovoltaic System, BIPV) 관련 기술이 활발하다. BIPV는 전력 생산의 목적 외에도 건축 외장재를 대신함으로써 경제적, 미적 측면의 이중효과를 거둘 수 있다. 특히, 사무용 건물은 대형, 고층건물과 같이 창 면적비(Window-to-Wall Ratio, WWR)가 극대화된 커튼월 건물 등이 증가함에 따라 창호의 상당 부분을 반투명 BIPV 설치에 활용하여 적극적인 에너지 생산이 매우 중요하다.

일반적인 태양광 패널은 색상이 어둡고, 투광성이 좋지 못해 건물 창호나 외장재에 바로 적용하기에 어려운 문제가 있었다. 이에 투명도를 높여 창호로 활용하는 차세대 스마트 창호기술이 개발되고 있다. 투명성을 보유한 태양전지 창호는 광변색유리, 전기변색유리, 염료감응형, 페로브스카이트 등을 활용하고 있다.

더 나아가 최근에는 태양광을 이용한 에너지 생산과 더불어 디스플레이가 가능한 솔라사이니지(Solar Signage) 창호가 등장하였다. 고부가가치 미래산업으로 기대되고 있는 솔라사이니지 창호는 태양광 기술을 접목하여 전력생산 및 이용을 극대화하는 기술로 에너지 자립형 디지털 정보 디스플레이를 이용한 옥외광고 및 실내 재실자에게 정보를 제공하는 기능으로 주목받고 있다. 솔라사이니지 창호는 반투명 광전변환 및 투명 LED를 부착하여 디스플레이 기술의 일체화를 통해 공간에는 태양광 발전 및 실내 디지털 사이니지 역할, 야간에는 외부 조명 및 건물 디지털 사이니지와 에너지 회수 역할을 수행할 수 있다[5].

솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 소재, 제작, 내구성 등의 기술 분야 연구는 활발한 편이나 건축창호재로서의 성능평가는 상당히 부족한 실정이다. 창호는 건물을 둘러싼 환경적 조건이 수시로 변하면서 실내환경 및 건물에너지 소비에 상당한 영향을 미치기 때문에 건축창호재로서 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호 적용 시 외부환경에 적극적으로 대응한 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구의 목적은 신개념 스마트창호인 솔라사이니지 반투명 태양전지의 건축창호재로서 성능분석이다. 이를 위해 사무용 건물에서의 박막형 CdTe (Cadmium Telluride) 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호 적용 시 건물 난방, 냉방, 조명에너지 소비량 분석 및 전력 발생량에 대한 분석을 시뮬레이션을 활용하여 수행한다. 이때, 반투명 태양전지 창호는 외부 일사 조건의 영향에 따라 발전능이 변동되므로 여러 가지 기후조건을 고려하였으며 설치 면적에 따라 전력 생산량, 건물에너지 소비량에 미치는 영향력이 달라지므로 다양한 장면적비를 반영하여 연구를 수행하였다.

연구 결과는 기후대별 건물 외장재로서의 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 적용 방안 및 가능성을 확인하는 것에 의미가 있으며 향후 지속적인 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 개발 및 적용에 대해 적정 수준 선택을 돕는 기반자료로써 활용성을 기대할 수 있다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

기후대별 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 건물에너지 성능 분석을 위해 확연히 다른 환경의 기후대로 구성되는 미국의 네 가지 대표 기후대로 1) 사막기후-Phoenix, Arizona (AZ), 2) 열대기후-Miami, Florida (FL) 3) 해양성기후-San Francisco, California (CA), 4) 냉대기후-Ann Arbor, Michigan (MI)으로 선정하였다. 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호는 가시광선투과율(Visible Light Transmittance, VLT), 태양전지 발전효율(PV Cell Generation Efficiency, Geff)에 따라 다섯 가지로 구분한다. 장면적비의 경우 선행연구[6]를 기반으로 사무용 건물의 주요 장면적비 분포에 따라 40%~80%로 다섯 가지 유형으로 설정하였다. 이를 통해 기후대별, 창 유형별, 창 면적비별 연간 건물 난방, 냉방, 조명에너지 소비량과 전력 발생량 비교분석을 실시하였다. 태양전지는 일사획득량에 의해 전력 생산량이 달라지므로 각 기후대별 일사획득량을 추가로 실시하였다. 에너지 분석은 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행하였으며 건물에너지 해석 프로그램인 DesignBuilder (Version 6.1.0.006)를 사용하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 박막형 CdTe 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 성능분석을 위하여 건물 난방, 냉방, 조명에너지 소비량과 태양전지의 전력 발전량을 통합하여 전체 에너지소비량을 분석하였다. 건물 에너지소비량 분석은 시뮬레이션을 통해 수행되었으며 DesignBuilder (Version 6.1.0.006) 프로그램을 활용하였다. DesignBuilder는 Energyplus 동적 시뮬레이션 엔진으로 구동되는 프로그램으로 건물 에너지소비량을 연간 시 각별로 정밀 분석이 가능하다. 태양전지의 전력 발전량 산출은 상세 분석을 위해 Energyplus와 연동하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 적용되는 각 지역별 Weather File은 ASHRAE International Weather for Energy Calculation (IWEC2)가 제공하는 TMY3 기상 파일을 사용하였다[9].

2.1. 대표 기후대 설정

솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 태양전지 발전성능은 외부 일사 조건과 기후에 직접적인 영향을 받으므로 기후조건 고려는 중요하다 [7]. 국제 에너지 절약법 (International Energy Conservation Code, IECC)과 미국 냉난방 공조 기술자 학회(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)에서는 미국 기후를 온도, 냉난방도일, 강수량에 따라 8개의 Zone으로 구분하며, 습도를 기준으로 A (Moist), B (Dry), C (Marine)로 명확히 구분하고 있다[8]. 따라서 기후에 대해 다양하고 확연한 차이가 존재하는 미국을 선정하여 본 연구를 진행하였다. 미국 각 기후대를 대표하는 지역으로 Table 1.과 같이 사막기후(Phoenix-Arizona), 열대기후(Miami-Florida), 해양성 기후(San Francisco-California), 냉대기후(Ann Arbor-Michigan)으로 선정하였다. 또한, Table 2.와 같이 기후대별 특성을 Hottest Month와 Coldest Month의 Average Maximum / Minimum으로 구분하여 상세정보를 확인하였다.

Table 1. Reference Regions by Climate Zones

Climate Zones	Reference City	CDD (50°F)	HDD (65°F)
2B (Hot-Dry)	Phoenix-Arizona (AZ)	8425	1350
1A (Hot-Moist)	Miami-Florida (FL)	9474	200
3C (Marine)	San Francisco-California (CA)	2883	3016
5A (Moist)	Ann Arbor-Michigan (MI)	2707	6791

Table 2. Climate zones Temperature Information

Climate Zones	Hottest Month	Average Maximum/Minimum	Coldest Month	Average Maximum/Minimum
2B	July	41°C/29°C	December	19°C/8°C
1A	August	32°C/26°C	January	24°C/17°C
3C	September	22°C/14°C	January	14°C/9°C
5A	July	28°C/17°C	January	0°C/-7°C

2.2. 대상 건물모델링

시뮬레이션 대상 건물은 선행연구[10][11]를 기반으로 표준형 사무소 건물로 구성하였으며, 연면적 640m², 4층 규모이다. 대상 건물은 남향이며 평면은 복도식 코어와 두 개의 업무공간 (6.5m x 8.8m)으로 설계하였다. 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 VLT에 따른 조명에너지 소비량에 미치는 영향을 반영하기 위하여 오피스 작업 높이인 0.75m에 조도센서를 설치하여 Dimming Control을 적용하였다(Fig. 1.). 실내조도는 업무시설 기준인 Office 400lux, Core 200lux로 설정하였으며, 선행연구를 참조하여 Designbuilder에 내재되어 있는 조명제어 방식 중 실내조도 변화에 따른 조명에너지 절감에 가장 효과적인 Linear off 방식을 적용하였다[12]. 대상 건물의 외피 단열성능은 ASHRAE 90.1 기준에 따라 각 기후대에 적합한

U-value를 적용하였다. 냉난방 시스템은 사무소 건물에 일반적으로 사용하는 Fan Coil Unit (4-Pipe)로 모든 기후대에 동일하게 적용하였으며, 냉난방 설정온도 및 기간은 각 기후조건을 고려하여 설정하였다. 대상 건물의 상세 물성값은 Table 3. 과 같다.

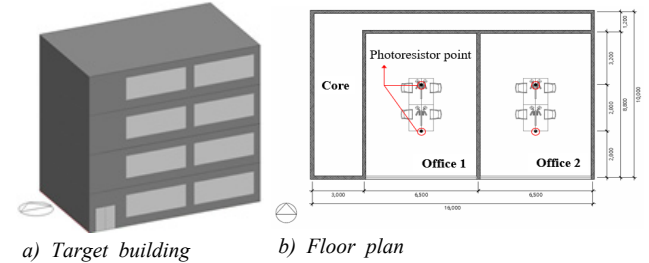


Fig. 1. Simulation Model Drawing

Table 3. Simulation Model Information

Item	Building Information	
Building Information	Total Floor Area	640m ²
	Number of Floors	4F
	Floor Heights	3.5m
Occupied load	Lighting	Office-10.2 W/m ² , Core-2 W/m ²
	People	0.161 person/m ²
	Office Equipment	11.8 W/m ²
	Dimming Control	Office-400lux, Core-200lux
Detail Variables by Climate zone		
Phoenix, Arizona (AZ)		
Building Envelope Constructions (U-value)	Roof	0.048 W/m ² K
	External walls	0.124 W/m ² K
	Ground Floors	0.107 W/m ² K
	Window	0.750 W/m ² K
System	Heating/Cooling system type	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling Setpoint Temperature	-/24°C
	Heating/Cooling Setback Temperature	-/27.4°C
Schedule	Heating period	-
	Cooling period	January 01-December 31
Miami, Florida (FL)		
Building Envelope Constructions (U-value)	Roof	0.063 W/m ² K
	External walls	0.124 W/m ² K
	Ground Floors	0.322 W/m ² K
	Window	1.200 W/m ² K
System	Heating/Cooling system type	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling Setpoint Temperature	-/24°C
	Heating/Cooling Setback Temperature	-/27.4°C
Schedule	Heating period	-
	Cooling period	January 01-December 31
San Francisco, California (CA)		
Building Envelope Constructions (U-value)	Roof	0.048 W/m ² K
	External walls	0.084 W/m ² K
	Ground Floors	0.107 W/m ² K
	Window	0.650 W/m ² K
System	Heating/Cooling system type	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling Setpoint Temperature	21.5°C/24°C
	Heating/Cooling Setback Temperature	17°C/27.4°C
Schedule	Heating period	January 01-February 28, December 01-December 31
	Cooling period	March 01-November 30
Ann Arbor, Michigan (MI)		
Building Envelope Constructions (U-value)	Roof	0.048 W/m ² K
	External walls	0.064 W/m ² K
	Ground Floors	0.074 W/m ² K
	Window	0.550 W/m ² K
System	Heating/Cooling system type	Fan Coil Unit (4-Pipe)
	Heating/Cooling Setpoint Temperature	21.5°C/24°C
	Heating/Cooling Setback Temperature	17°C/27.4°C
Schedule	Heating period	January 01-April 30, October 01-December 31
	Cooling period	May 01-September 30

2.3. 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호 유형 설정

태양전지는 1세대인 결정형(단결정, 다결정) 실리콘 박막형, 2세대인 박막형(CdTe, CIGS)이 개발되었으며, 3세대인 유기 박막형은 현재 연구단계에 있다. 이 중 본 연구에서 적용한 솔라사이니지 반투명 태양전지는 2세대인 박막형 CdTe에 속한다. CdTe는 2세대 태양전지 중 낮은 제조비용, 비교적 높은 효율성으로 향후 상용화에 높은 가능성을 보여준다. CdTe 박막 태양전지 구조는 태양광을 받아 전기를 생산하는 반투명 태양전지와 LED Film으로 구성된다[13]. PV cell의 컬러는 일반적인 Gray로 선정하였으며,

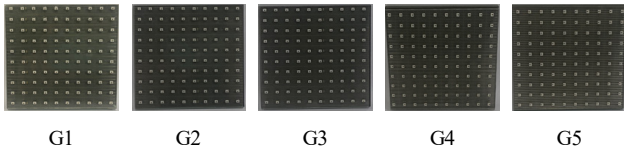


Fig. 2. Solar Signage 100mm x 100mm PV cell

Table 4. Specifications of LED gray PV cell

Item	G1	G2	G3	G4	G5
Visible reflectance [%]	4.9	9.9	14.7	20.2	26.6
Inside/Outside Visible reflectance [%]	6.2/19.4	7.1/18.7	7.7/18.2	8.9/18.1	10.3/19.3
Solar transmittance [%]	4.6	8.9	13.2	17.9	23.4
Inside/Outside Solar transmittance [%]	6.9/18.3	7.5/17.3	7.9/16.6	8.9/16.6	10.0/17.4
Infrared transmittance [%]	4.3	8.2	11.9	16.0	20.7
Inside/Outside Infrared transmittance [%]	9.1/17.4	9.0/16.1	9.3/15.3	10.6/15.3	11.5/15.8
U-value [W/m ² K]	5.60	5.60	5.59	5.60	5.59
SHGC	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
SC	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Emissivity [%]	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84

*SHGC: Solar heat gain coefficient, SC: Shading coefficient

Table 5. Window layer and Parameters

Window type	Glazing layer [No. Thickness]	U-Value [W/m ² K]	SHGC	SC	VLT [%]	Geff [%]
G1	Clr3+Air12+(LED Film3+Gray PV7) +Air12+Clr3	0.896	0.33	0.38	4.05	10
G2	Clr3+Air12+(LED Film3+Gray PV7) +Air12+Clr3	0.890	0.35	0.40	8.20	8.89
G3	Clr3+Air12+(LED Film3+Gray PV7) +Air12+Clr3	0.889	0.38	0.44	12.10	7.60
G4	Clr3+Air12+(LED Film3+Gray PV7) +Air12+Clr3	0.896	0.40	0.46	16.70	6.67
G5	Clr3+Air12+(LED Film3+Gray PV7) +Air12+Clr3	0.904	0.42	0.48	22.00	5.56

*VLT: Visible transmittance, Geff: Generating efficiency

Fig. 2.와 같이 100mm x 100mm 사이즈의 시편을 국내 공인 시험 기관인 한국 건설 생활환경 시험 연구원(Korea Conformity Laboratories, KCL)에 의뢰하여 KS L 2514:2011, NFRC 300:2017 시험을 통해 Table 4.와 같이 각종 특성을 취득하였다. 취득한 다섯 가지 유형의 PV cell 특성을 활용하여 국제 유리 데이터베이스 (International Glazing Database, IGDB)를 기반으로 하는 DesignBuilder의 Glass data를 이용하여 창호로 구성하였다. 창호는 Table 5.와 같이 투명유리 (3mm), 공기층 (12mm), LED Film (3mm), Gray PV (7mm), 공기층 (12mm), 투명유리 (3mm)의 3중 창호로 구성하였다. 창호는 VLT, 발전효율 등 각기 다른 특성을 지니며 PV Cell의 컬러인 Gray의 G를 차용하여 G1, G2, G3, G4, G5로 명명한다.

2.4. 창 면적비 설정

창호는 면적비에 따라 건물에너지 소비량에 영향을 줄 수 있다. 또한, 최근 사무용 건물은 대형화되며 창 면적비가 증가하고 있어 창호의 상당 부분을 반투명 BIPV 설치에 활용하여 적극적인 에너지 생산이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 건물에너지 소비에 취약한 동, 서측은 무창으로 설계하고 북측은 최소화하여 15%, 남측면을 기준으로 창 면적비를 40%부터 80%까지 총 다섯 가지로 설정하였다. 대상 건물의 창 면적비별 설계 이미지는 Table 6.과 같다.

2.5. 시뮬레이션 Case

시뮬레이션의 시나리오 설정은 Table 7.과 같다. 네 가지 기후대에서 다섯 가지의 창호 유형에 따라 창 면적비를 다섯 가지로 구분하여 총 100개의 Case를 시뮬레이션한다. 즉, 하나의 기후대에서 총 25개의 Case에 대해 난방, 냉방, 조명 에너지소비량과 전력 발전량이 도출된다.

Table 6. South WWR setting

Model	WWR	Size	Diagram	
			①	②
	①	40% 6.4m x 1.75m	①	②
	②	50% 6.4m x 2.19m		
	③	60% 6.4m x 2.63m	③	④
	④	70% 6.4m x 3.06m		
	⑤	80% 6.4m x 3.50m		

Table 7. Simulation Scenario

Item	No.Case	Contents
Climate Zones	4	<ul style="list-style-type: none"> Phoenix, Arizona (AZ) Miami, Florida (FL) San Francisco, California (CA) Ann Arbor, Michigan (MI)
Window Types	5	G1, G2, G3, G4, G5
WWR	5	40%, 50%, 60%, 70%, 80%

3. 시뮬레이션 결과

3.1. 일사획득량 분석

본 연구에서 다양한 기후대별 다섯 가지 유형의 솔라사이니지 반투명 창호 적용에 의한 건물에너지와 전력 발전량 분석을 수행하였다. 이때, 건물에너지 성능 및 태양전지 발전성능에 가장 큰 영향을 미치는 기후요소인 일사획득량에 대하여 분석하였다.

Fig. 3.과 같이 네 가지 기후대에서 일사획득량은 사막기후인 Phoenix-2B에서 가장 높고 냉대기후인 Ann Arbor-5A에서 가장 낮게 나타났다. Phoenix-2B의 경우 최대 일사획득은 창 면적비 80%, 창호 유형 G5일 때 37,815.42 kWh로 가장 높았고 창 면적비 40%, G1 창호일 때 8,407.16kWh로 가장 적게 나타나 창 면적비가 높을수록, 창호의 VLT가 높을수록 일사획득량은 높은 것으로 확인되었다. Phoenix-2B 외 세 가지 기후대에서도 동일한 패턴이 나타났다.

창 면적비에 따른 창호별 일사획득량은 모든 기후대에서 공통으로, 창 면적비 40%대에서는 G1을 기준으로 G5까지 각각 약 37%, 74%, 115%, 151%씩, 창 면적비 50%대에서는 42%, 84%, 130%, 185%씩, 창 면적비 60%대는 46%, 92%, 142%, 202%씩, 창 면적비 70%대는 49%, 98%, 153%, 217%씩 증가하였고 마지막으로 창 면적비 80%에서는 52%, 104%, 162%, 230% 증가하는 경향을 보여 창 면적비가 커질수록 창호별 일사획득량의 차이도 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이는, G1~G5의 가시광선 투과율의 차이와 더불어 창 면적비 증가의 효과로 인한 현상으로 판단된다.

분석된 일사획득량 현상에 따라 기후대별, 창호별, 창 면적비별 태양전지의 발전성능에도 차이가 있을 것으로 사료된다.

3.2. 건물에너지 성능분석

건물에너지는 1)~4)와 같이 기후대별 난방, 냉방, 조명에너지에 대한 분석을 진행하고 5)~6)과 같이 전력 발전량이 반영된 통합 에너지소비량을 분석하였다. 그 결과는 Fig. 4.~Fig. 5. 와 같다. 총 에너지소비량은 사막기후인 Phoenix-2B가 가장 높았으며 열대기후 Miami-1A, 냉대기후 Ann Arbor-5A, 해양성기후 San Francisco-3C 순으로 낮게 나타났다. 기후대별 난방, 냉방, 조명에너지 소비량 분석 결과는 다음과 같다.

1) Phoenix-2B의 경우 사막기후로 인해 난방에너지는 발생하지 않는다. 냉방에너지는 창 면적비가 증가할수록 높게 산출되었는데 이는 일사획득량에 영향을 받은 현상으로 사료된다. 창 면적비 40%를 제외한 모든 창 면적비에서 G1 창호보다 G5 창호로 갈수록 더 많은 냉방에너지를 소비하는 것으로 확인되며 창 면적이 증가할수록 각각의 창호가 소비하는 에너지의 차이도 최소 120.5kWh(0.5%)~최대 1,405kWh(5%)로 증가하였다. G1에서 G5로 갈수록 SHGC, SC, VLT의 성능이 우수하여 일사획득 증가에 의한 현상으로 판단된다. 창 면적비 40%의 경우 반대 현상으로 나타나는 이유는 크지 않은 창 면적비에서 창호로부터의 단열성능에 의한 주간과 야간의 열손실 및 열획득의 차이와 기밀성에 의한 효과로 사료된다. 조명에너지 소비량은 창 면적이 클수록 줄어들었으며 VLT의 영향으로 G1 창호보다 G5 창호로 갈수록 적게 소비하는 것으로 나타났다. 창 면적비 40%의 G1 창호가 소비하는 조명에너지 11,390.9kWh 대비 창 면적비 80%의 G5는 3,341.6kWh로 최대 70%까지 절감되는 것으로 산출되었다. 각각의 창 면적비에서 다섯 가지 창호에 대해 냉방에너지소비량은 대체로 G1이 가장 낮고, G5가 가장 높은 소비량을 보였다. 이는 G1~G5 창호의 열관류율, SHGC 차이는 각각 0.01, 0.02로 미미하지만 4%씩 차이 나는 VLT까지 고려하면 G1보다 G5가 창호를 통한 일사취득과 실내 발열의 해결에 가장 취약한 것으로 해석될 수 있다. 총 에너지소비량의 경우 창 면적비가 클수록 증가하여 창 면적비 80%에서 G1이 41,414.5kWh로 가장 높으며 창 면적비가 작을수록 감소하여 40%에서 G5가 30,727.4kWh로 가장 낮은 것으로 확인된다. 이는 창 면적과 각 창호의 특성에 의한 냉방에너지와 조명에너지 소비 현상의 상충효과로 해석될 수 있다.

2) Miami-1A는 열대기후로 Phoenix-2B와 같이 난방에너지는 소비되지 않는다. 냉방에너지의 경우 창 면적비가 증가할수록, G1 창호보다 G5에서 높은 소비량을 보였다. 예외현상으로 창 면적비 40%의 경우 G1이 G5보다 0.8% 많은 냉방에너지를 소비하는 것으로 나타났다. 이는 G1은 열관류율이 G5보다 낮은 고단열 창호이기 때문에 창 면적비가 크지 않은 40%에서는 열손실보다 과한 실내 기밀 효과로 인하여 냉방부하 해결에 G5보다 더 많은 에너지를 소비하는 것으로 판단할 수 있다. 조명에너지 소비량은 창 면적비가 증가할수록 낮고 G1창호 보다 G5 창호로 갈수록 낮게 나타났다. 창 면적비 40%

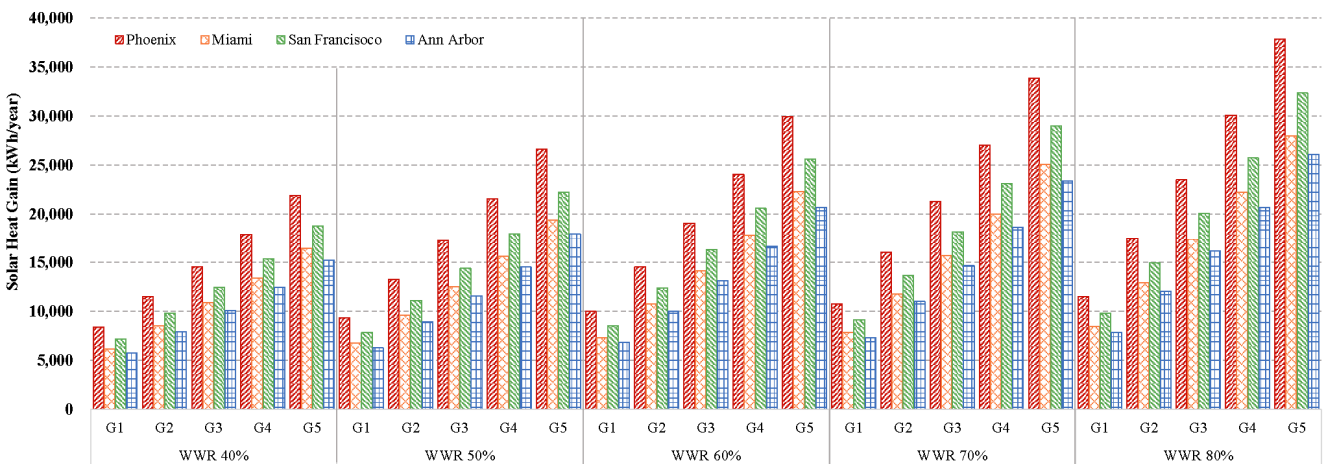
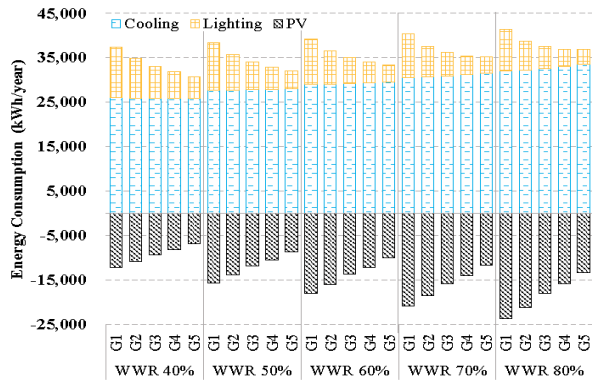
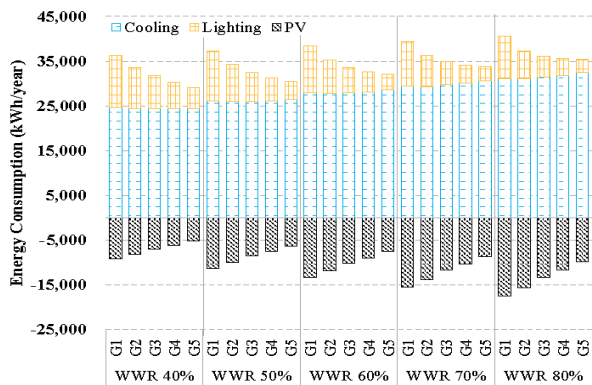


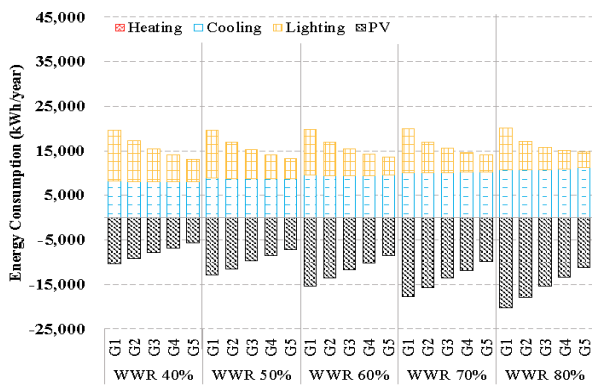
Fig. 3. Solar Heat Gain through Window by Climate Zone



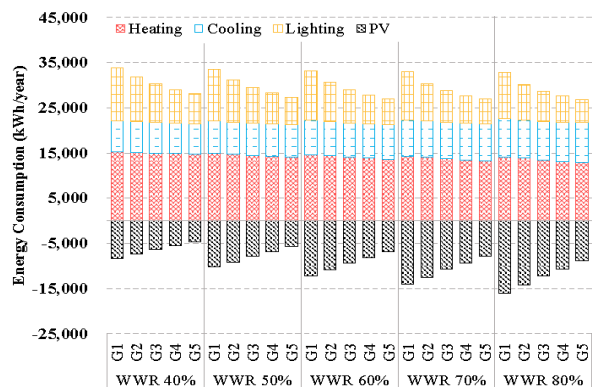
a) Phoenix



b) Miami



c) San Francisco



d) Ann Arbor

Fig. 4. Energy Consumption by Climate Zone

에서의 G1 창호를 기준으로 창 면적비가 50%~80%로 증가할수록 G1의 조명에너지소비량은 각각 599.9kWh(5%), 1,173.7kWh(10%), 1,703.3kWh(15%), 2,190.4kWh(19%)씩 감소하였다. 동일 창 면적비에서 G1 창호를 기준으로 각 창호별 조명에너지는 최소 21%~67%의 차가 발생하며 창 면적비가 증가할수록 창호별 소비량 차이도 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 조명에너지 소비의 현상은 다섯 가지 창호의 VLT 값인 4.05%~22%의 차로 인한 것으로 해석될 수 있다. 냉방에너지와 조명에너지를 합한 총 에너지소비량은 창 면적비 80%의 G1이 40,507.6kWh로 가장 높았고, 창 면적비 50%의 G5가 29,165.2kWh로 가장 낮은 것으로 확인되었다.

3) San Francisco-3C는 네 가지 기후대에서 가장 적은 건물에너지를 소비하며 난방, 냉방이 모두 발생하는 지역이다. 총 에너지소비량에 비하면 극소량인 난방에너지는 창 면적비가 작을수록 높은 것으로 계산되었다. 창 면적비가 증가할수록 창호로부터의 일사 획득이 증가하여 난방에너지 소비량이 절감되는 것으로 판단할 수 있다. G1 창호가 G2, G3, G4, G5 보다 모든 창 면적비에서 높게 나타났다. G1이 열관류율 측면에서는 미미하게 우수하나, SHGC, SC, VLT 성능이 모두 가장 낮아 난방 측면에서 취약한 것으로 판단된다. 냉방에너지의 경우 Phoenix-2B, Miami-1A와 유사하게 창 면적비가 증가할수록 소비량이 증가하였으며 G1과 G5 창호의 소비량 차이가 증가하였다. 창 면적비 40%의 경우 G1 창호가 G5보다 냉방 에너지를 많이 소비하는 것으로 나타나는데 이는 SHGC, VLT 등 창호의 특성과 조명에너지 소비량의 영향으로 판단된다. VLT가 낮으면 인공조명 사용량이 증가하여 조명에너지 증가뿐만 아니라 내부 발열 증가에도 영향을 미쳐 냉방부하가 증가할 수 있다. 따라서 일반적 창 면적비인 40%에서는 일사유입의 영향보다는 인공조명 사용에 의한 내부발열의 영향이 더욱 크게 작용한 것으로 사료된다. 조명에너지 또한 Phoenix-2B, Miami-1A와 유사하게 창 면적비가 증가할수록 낮고 G1창호 보다 G5 창호로 갈수록 낮게 나타났다. 총 에너지소비량은 모든 창호에서 창 면적비가 증가할수록 높아져 창 면적비 80%에서의 G1이 20,043.3kWh로 가장 높고, 창 면적비 40%의 G5가 13,036.9kWh로 가장 낮게 나타났다.

4) Ann Arbor-5A는 냉대기후로 건물에너지 중 난방에너지 소비량이 약 45%로 가장 많은 비율을 차지한다. 창 면적비가 증가할수록 난방에너지소비량은 감소하는데 이는 일사획득량의 증가로 인한 현상으로 볼 수 있다. 창호별로는 G1이 G5보다 난방에너지소비량이 높게 산출되었다. 창 면적비가 증가할수록 창호별 난방에너지소비량 차는 12.6%~53%로 늘어난다. 난방에너지의 경우 외장재의 열관류율 성능과 주로 관계가 있어 고단열일수록 난방에 효과적이다. 그러나 본 연구에서 설정한 다섯 가지 창호 중 G1이 가장 단열이 우수하며 G5가 가장 취약함에도 0.01 W/m²k 차이로 매우 미미하기 때문에 열관류율뿐만 아니라 SHGC, SC, VLT 성능도 함께 고려하여야 해석되어야 한다. 따라서, G1의 열관류율이 가장 우수함에도 일사취득 측면에서는 가장 효과적이지 못한 창호로 인해 타 창호보다 난방에너지가 높게 계산된 것으로 분석할 수 있다. 냉방에너지의 경우 난방에너지와 반대로 타 기후대와 유사한 현상으로 창 면적비가 증가할수록, G1보다 G5로 갈수록 소비량이 증가하는 것을 확인하였다. 창 면적비 40%의 경우 San Francisco-3C와 같이 G1 창호

가 G5보다 냉방에너지를 많이 소비하는 것으로 나타났는데 이는 역시 SHGC, VLT 등 창호의 특성과 조명에너지 소비량의 영향으로 판단된다. 조명에너지는 창 면적비가 감소할수록 높은 소비율을 보였으며 VLT 성능이 우수한 G5 창호가 다섯 가지 창호 중 가장 낮게 나타났다. 총 에너지소비량은 창 면적비가 클수록 모든 유형의 창호에서 증가하는 것으로 나타나 창 면적비 40%의 G1 창호가 33,925.8kWh로 가장 높고 창 면적비 80%의 G5가 26,865.6kWh로 가장 낮은 것으로 확인되어 최대 7,060.2kWh(20.8%) 차이가 발생하였다.

5) 전력 발전량은 Fig. 5. 와 같이 일사확득량의 결과와 동일하게 Phoenix-2B, San Francisco-3C, Miami-1A, Ann Arbor-5A 순으로 높게 나타났다. 태양전지의 발전효율이 가장 우수한 G1 창호가 모든 기후대에서 높은 전력 발전량을 보였으며 창 면적비가 증가할수록 다섯 가지 창호의 전력 발전량도 증가하였다. 각 창호의 발전효율은 10%인 G1을 기준으로 G2, G3, G4, G5가 각각 11%, 24%, 33%, 44%의 차이를 가지며 이에 따라 전력 발전량도 같은 차이를 보인다.

6) 전력 발전량을 반영한 통합 건물에너지 소비량 분석 결과는 Fig. 5.와 같다. 통합 에너지소비량은 Miami-1A, Phoenix-2B, Ann Arbor-5A, San Francisco-3C 순으로 높게 나타났다. 전력 발전량이 반영되기 전인 총 에너지소비량 대비 전력 발전량에 의한 에너지 절감량이 가장 큰 기후대는 San Francisco-3C로 창 면적비가 증가할수록 에너지 절감률도 대폭 증가하였다. 가장 높게는 창 면적비 80%의 다섯 가지 창호에서 평균

93.7%의 에너지 절감률을 보였고 가장 낮게는 창 면적비 40%에서 50.4%의 절감률을 보였다. 특히, 창 면적비 80%일 때 창호 G1, G2 적용시 각각 20,191.4kWh (100.7%), 17,970.3kWh (104.8%)의 에너지 절감으로 제로에너지건축물 달성 가능성을 확인하였다. Miami-1A의 경우 창 면적비에 따라 최소 22%. 최대 36.7%의 절감률을 보였다. 기존 에너지소비량이 가장 높았던 Phoenix-2B는 80%의 창 면적비에서 평균 45%의 절감을 보였다. Ann Arbor-5A는 창 면적비 40%에서 평균 21%, 창 면적비 80%에서 평균 42%의 절감을 보였다. 즉, 전력 발전량에 의한 에너지 절감률은 San Francisco-3C - Phoenix-2B - Ann Arbor-5A - Miami-1A 순으로 확인되었다.

4. 결론

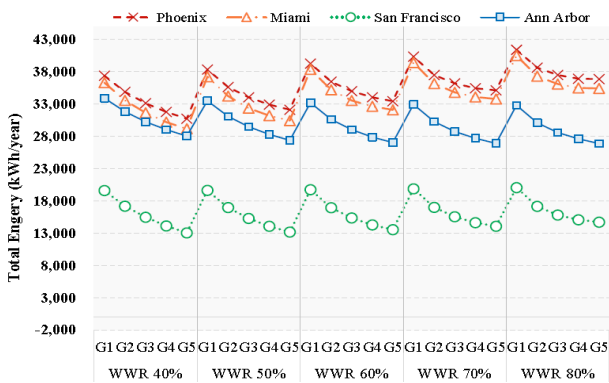
본 연구의 목적은 슬라사이니지 반투명 태양전지 창호가 적용된 사무용 건물의 기후대별 에너지소비량을 분석하여 건축창호재로서의 적용 가능성을 확인하는 것이다. 이를 위해 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 특성이 각기 다른 다섯 가지 유형의 반투명 태양전지 창호를 기후대별로 창 면적비를 달리하여 건물 난방, 냉방, 조명에너지 및 전력 발전량을 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

총 에너지소비량은 사막기후인 Phoenix-2B가 가장 높았으며 열대기후 Miami-1A, 냉대기후 Ann Arbor-5A, 해양성기후 San Francisco-3C 순으로 높게 나타났다. 난방에너지의 경우 사막기후와 열대 기후대에서는 발생하지 않았으며 해양성기후와 냉대기후대인 San Francisco-3C, Ann Arbor-5A 에서 발생하였다.

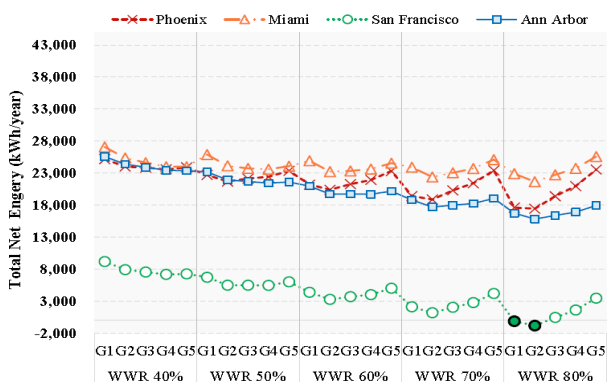
3C와 5A 기후대에서 창 면적비가 작을수록 난방에너지 소비량이 높게 나타났으며 냉방에너지는 네 가지 기후대에서 모두 창 면적비가 증가할수록 소비량도 증가하였다. 조명에너지도 네 가지 기후대에서 공통적으로 창 면적비가 증가할수록 소비량이 감소하였다. 이는 일사확득량의 증가로 인한 것으로 판단된다. G1 창호가 타 유형의 창호보다 모든 창 면적비에서 난방에너지 소비량이 많게 나타났다. G1이 열관류율 측면에서는 미미하게 우수하나, SHGC, SC, VLT 성능이 낮아 난방 측면에서 취약한 것으로 판단된다. 또한, G5 창호가 G1 창호보다 냉방에너지를 많이 소비하는 것으로 나타났는데 이는 SHGC, VLT 성능이 높음에 의한 것으로 확인된다. 조명에너지 소비량은 VLT의 영향으로 G1 창호보다 G5 창호가 적게 소비하는 것으로 나타났다.

전력 발전량은 일사확득량의 패턴과 동일하게 Phoenix-2B, San Francisco-3C, Miami-1A, Ann Arbor-5A 순으로 높게 산출되었다. 태양전지의 발전효율이 가장 우수한 G1 창호가 모든 기후대에서 높은 전력 발전량을 보였으며 창 면적비가 증가할수록 다섯 가지 창호의 전력 발전량도 증가하였다. 전력 발전량을 반영한 통합 건물에너지 소비량 분석 결과 Miami-1A, Phoenix-2B, Ann Arbor-5A, San Francisco-3C 순으로 높게 나타났다.

전력 발전량에 의한 에너지 절감률이 가장 큰 기후대는 San Francisco-3C로 창 면적비가 증가할수록 에너지 절감률도 대폭 증가하는 것을 확인하였다. 특히, 창 면적비 80%일 때 G1, G2 창호 적용시 각각 20,191.4kWh (100.7%), 17,970.3kWh(104.8%)의 전력 발전량에 의한 에너지소비량 절감으로 제로 에너지건축물 달성 가



a) Total Energy Consumption



b) Total Net Energy Consumption

Fig. 5. Energy Consumption by Climate Zone

능성을 확인하였다. 그뿐만 아니라 제로에너지 건축물을 달성하고 도 각각 148.1kWh, 823.2kWh의 발전된 전력이 남아 요금상계제도(Net metering) 활용이 가능하다.

본 연구를 통해 솔라사이니지용 반투명 태양전지 창호를 건축창호재로 창 면적비를 달리하여 적용할 경우 다양한 기후대별 난방, 냉방, 조명 및 전력 발전량에 미치는 영향을 확인하였다. 즉, 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호의 건축창호재로서 적용 가능성을 확인하였다. 솔라사이니지 반투명 태양전지 창호는 태양전지와 디스플레이 기술 분야의 결합을 통하여 구현된 신개념 BIPV 기술로 건축의 예술적, 공학적 특성이 고려된 외장재라 할 수 있다. 따라서 향후 건축창호재로서 적용성을 확대하기 위하여 본 연구 결과를 기반으로 투과도, 색상뿐만 아니라 단열, 강도 등의 특성까지 개선된 제품을 대상으로 다양한 해외 및 국내 기후대에서의 지속적인 성능분석 연구가 이루어져야 할 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-미래선도기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임[No. NRF-2018M3C1B9088457].

Reference

- [1] 국토교통부, 2050년 탄소중립 달성을 위한 녹색건축 활성화 방안, 보도 자료, 2021.06.02. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Announcement of Green Building activation plan to achieve carbon neutrality in 2050, 2021.06.02.)
- [2] 국토교통부, 건축물 에너지효율등급 인증 및 제로에너지건축물 인증 기준. [별표 1의 2] 제로에너지건축물 인증 기준 // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Standards for building energy efficiency rating certification and zero energy building certification. [Appendix 1-2] zero energy building certification criteria)
- [3] 제로 에너지건축물 인증시스템, zeb.energy.or.kr, 인증현황 2022.01.04. // (Zero Energy Building Certification system, zeb.energy.or.kr, Certification Status, zeb.energy.or.kr, 2022.01.04)
- [4] 특허청, 탄소중립, 에너지자급(zero energy) 건축물로 다가간다. 보도자료, www.kipo.go.kr, 2021.10.14. // (Korean Intellectual Property Office, Approaching a carbon-neutral, zero energy building, www.kipo.go.kr, 2021.10.14.)
- [5] 한국연구재단, 솔라사이니지용 반투명 태양전지 및 사물인터넷 기술 개발, 최종보고서, 2018.10.04. // (National Research Foundation of Korea, Development of translucent solar cells and IOT for solar Signage, Final report, 2018.10.14.)
- [6] 최서영, 강혜진, 이언구, 사무소 건물의 Zero Emission Building 디자인을 위한 기초적 연구, 한국건축환경설비학회 학술발표대회 논문집, 2021.10, pp.207-210. // (S.Y. Choi, H.J. Kang, E.K. Rhee, A Fundamental study of Zero Emission Building design for Office Building, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2021.10, pp.207-210.)
- [7] 정민희, 반투과형 태양전지를 이용한 창호형 BIPV 건물의 환경성능 분석, LHI Journal, 11권 1호, 2020.4, pp.87-94. // (M.H. Chung, Comparison assessment of semi-transparent solar cell for BIPV Windows, LHI Journal, 11(1), pp.87-94.)
- [8] ASHRAE Standard 90.1, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, 2010.
- [9] ASHRAE IWEC2 weather files for international location, www.ashrae.org, 2022.02.14
- [10] 박보량 외 3인, 사무소 건물 적용 DSSC BIPV 창호의 환경 및 에너지 성능 분석, KIEAE Journal, 제20권 제1호, 2020.2, pp.121-128. // (B.R. Park et al., Environmental and Energy Performance Analysis of

- DSSC BIPV Window in Office Buildings, KIEAE Journal, 20(1), 2020.2, pp.121-128.)
- [11] 현지연 외 5인, 사무소 건물 적용 PCW 창호의 기후대별 에너지 성능 분석, 한국생태환경건축학회 논문집, 제20권, 제6호, 2020.12, pp.119-124. // (J.Y. Hyun et al., Energy Performance Analysis of Photochromic Window in Office Buildings According to Climate Zone, KIEAE Journal, 20(6), 2020.12, pp.119-124.)
- [12] 김남현 외 4인, 조명제어방식에 따른 DSSC BIPV 창호 적용 건물에너지 성능 분석, 2021년 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 제41권 제2호(통권 제76집), 2021.10, pp.336-337. // (N.H. Kim et al., Analysis on Building Energy Performance with DSSC BIPV Window according to Lighting Control Method, Architectural Institute of Korea 2021 Autumn Conference, pp.336-337.)
- [13] 송민근 외 3인, 색상구현이 자유로운 반투명 디지털 사이니지 태양전지의 개발 및 활용, KIEE Journal, 제69권, 제2호, 2020.2, pp.10-16. // (M.G. Song et al., Development and utilization of free translucent digital signage solar cells, KIEE Journal, 69(2), 2020.2, pp.10-16.)