



사무소 건물 적용 DSSC BIPV 창호의 환경 및 에너지성능 분석

Environmental and Energy Performance Analysis of DSSC BIPV Window in Office Buildings

박보람* · 최은지** · 최영재*** · 문진우****

Bo Rang Park* · Eun Ji Choi** · Young Jae Choi*** · Jin Woo Moon****

* Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ, South Korea (pbr_1123@naver.com)

** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ, South Korea (ejchl77@gmail.com)

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

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

ABSTRACT

Purpose: This study aimed at analyzing the building indoor environment conditions and energy performance when DSSC BIPV windows are applied, and building a database to suggest the appropriate performance level of DSSC BIPV windows in future buildings. **Method:** The DesignBuilder, a building energy analysis program, was used to evaluate indoor illuminance, room temperature, cooling and heating energy, lighting energy, and power generation performance. **Result:** Simulation results demonstrate that the current characteristics of DSSC BIPVs exhibit an improved U-value but low visible light transmission (VLT) performance in comparison with low-emissivity double glazing windows. Thus, heating energy consumption was reduced, while as the electricity consumption for lighting was significantly increase. This increasement influenced the increase of the cooling energy consumption due to the higher indoor cooling load from lighting fixtures. To satisfy the 13% power generation efficiency suggested by the National Renewable Energy Laboratory, a VLT of 30% is required, which will produce energy savings of 4,861.44 kWh/year. For VLTs of >50%, energy saving is possible in combination with any generation efficiency.

KEYWORD

염료감응형태양전지
건물일체형태양전지
건물에너지

DSSC
BIPV
Building Energy

ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 23, 2019

Final revision received Dec. 27, 2019

Accepted Dec. 31, 2019

© 2020 KIEAE Journal

1. 서론

신재생에너지에 대한 관심 증가와 높은 투자로 인해 태양광 산업 역시 가파른 성장세를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 BIPV (Building Integrated Photovoltaic)의 비싼 단가, 색상 표현의 한계, 유지관리의 어려움 등의 이유로 성장이 미미하다 [1-5]. 2020년부터 국내 건물은 단계적으로 제로에너지빌딩으로 구현되어야 하는데 이를 위해서는 건물 에너지 성능 개선과 함께 신재생에너지 적용이 반드시 포함되어야 한다. 신재생에너지 적용 증대를 위해 BIPV를 건물 옥상 및 지붕에 한정적으로 적용하는 기존 방식에서 벗어나 건물 외피인 벽면 및 창호의 적극적인 활용이 필요하다. 특히 상업 및 사무소 건물의 경우 외피의 창면적비가 매우 크기 때문에 창호로서의 BIPV가 적극적으로 이용될 필요가 있다.

현재 창호형 BIPV에 적용되고 있는 태양전지 유형으로는 실리콘 계열과 비실리콘 계열 중 주로 실리콘 계가 적용되고 있다 [6]. 실리콘 계열은 단조로운 색상의 한계점을 내포하고 있다. 반면, 최근 연구가 활발히 진행 중인 DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell)의 경우 기존 태양전지에 비해 저렴한 비용으로 전력생산이 가능하고 다양한 색상이 구현된다 [7]. 하지만, DSSC의 발전효율은 기존 태양전지보다 낮은 편이며 색상과 투과율에 의해 영향을 받기 때문에 태양전지

의 발전효율과 투과율의 최적 조합에 대한 고려가 필요하다 [8].

창호에 태양전지를 적용할 경우 일반적으로 발전성능 향상을 위해 색상이 어두운 계열이 적용되고 있다. 유리의 VLT (Visible light transmittance), SHGC (Solar heat gain coefficient), U-Value는 건물 환경 및 에너지성능에 중요한 역할을 한다. 태양전지의 발전성능은 에너지 생산량에 매우 중요한 역할을 하지만 그로 인해 유리 성능 변화로 인하여 일사확득 감소, 내부 조도 감소로 인한 조명에너지 사용 증가 등 건물 에너지 소비 증가를 유발할 수 있다. 따라서 BIPV의 개발에는 태양전지의 발전성능 뿐만 아니라 건물 환경 및 에너지 성능 검증이 함께 이루어져야 한다 [9-13]. 비정질 실리콘계 태양전지 a-Si의 경우 발전성능 뿐만 아니라 광학적 성능, 에너지 성능에 대한 분석이 다수 실시되었으나 DSSC를 대상으로 건물 환경 및 에너지 성능을 검증한 연구는 부족한 실정이다. DSSC의 건물 창호로서 적용 가능성을 확보하기 위해 건축 외장재로서 요구되는 광학적 성능 지표와 이에 따른 건물 환경 및 에너지 성능 분석이 실시될 필요가 있다.

본 연구에서는 DSSC BIPV의 건물 창호로서의 적용가능성 확인을 위해 사무소 건물 DSSC BIPV 적용에 따른 건물환경 성능(실내 조도, 실내온도) 및 건물 에너지 성능(냉방, 난방, 조명에너지)을 분석하였다. 또한 발전성능 분석을 위하여 전력생산량을 계산하였다. 이를 기반으로 향후 DSSC BIPV가 지속적으로 개발 및 적용될 시 적정 수준 선택을 돕는 Data base를 구축한다. 이를 위해 DSSC BIPV

의 주요 물성치인 VLT, 발전효율을 다양한 수준으로 설정하여 건물 총 에너지소비량을 산출하고 실현가능성 있는 성능 범위를 제안하였다.

2. 선행연구 고찰

2.1. 창호형 BIPV 및 DSSC 선행연구 조사 · 분석

창호형 BIPV에 관련하여 제품개발, 적용방안, 심미적 성능 등을 다루는 연구가 수행 중인 것으로 조사되었다.

BIPV 제품 개발에 관한 연구로, Huang (2011)[14]은 BIPV에 PCM을 추가하여 태양전지를 25°C로 일정하게 온도를 유지하도록 하여 태양전지 성능을 향상시키도록 하였다. Didone et. al.(2013)[15]은 사무소 건물 창호 유형별 BIPV 성능 평가를 실시하였다. 단층유리, 복층유리, Low-e 복층유리, 유기태양전지유리, a-Si (Amorphous silicon) 태양전지로 유리 유형을 설정하였으며 유형에 따른 조명, 냉방, 전력 생산량을 비교하였다. Ghosh et al.(2019)[16]는 태양전지와 유리 사이의 열전달을 줄이고 태양열획득량을 조절하여 실내 열환경을 개선하기 위한 BIPV-vacuum 시스템을 제안하였다. 그 결과 기존 BIPV 복층유리와 비교하여 실내 온열쾌적감을 개선하였다.

Cheng et. al.(2018)[17]은 BIPV 적용방안 및 에너지성능에 대한 연구로 창호에 a-Si 유형의 태양전지 적용 시 최적 투과율과 창면적비를 산정하기 위하여 자연채광과 이에 따른 전체 에너지 성능을 계산하였다. 그 결과 최적 투과율과 창면적비는 50~60%, 40~50%인 것으로 나타났다. Yoon, et. al(2013)[18]은 투명 박막 BIPV 창호 적용에 따른 냉난방 및 조명 부하 저감 연구를 실시하였다. 그 결과 일반창호 적용한 모델보다 연간 냉난방 부하가 8.4% 감소하는 것으로 나타났다.

BIPV의 발전성능과 함께 심미적 성능 평가를 다루는 연구도 다수 진행되고 있다. Peng et. al.(2011)[19]에 의하면 BIPV 계획 시 기능, 초기투자비용, 기술 및 심미적 요소들이 고려되며, 특히 Curtius (2018)[20]에 의하면 BIPV 창호 관련 분야 실무자들은 심미적인 요소를 기준으로 BIPV를 선정한다고 하였다. 따라서 창호형 BIPV를 활성화하기 위해서는 기술적 성능이나 가격뿐만 아니라 심미적 요구사항을 만족시켜야 한다. 현재 창호형 BIPV로 적용되고 있는 태양전지는 주로 실리콘계 전지가 적용되고 있다[21]. Yoon et. al.(2011)[22]은 DSSC 태양전지의 TiO₂ 필름 두께에 따른 발전효율 성능과 일사투과량에 따른 에너지 소비량 분석을 실시하였다. 항별 DSSC 적용 유무에 따른 에너지소비량 비교분석 결과 남서향에서 투과율 25%를 적용하였을 때 총 건물 에너지 소비량이 가정 적은 것으로 나타났다. Asghar et al.(2014)[23]는 실외조건에서 pc-Si 태양전지와 DSSC의 발전성능을 7개월간 모니터링 하였다. 그 결과 고온과 낮은 조도 수준에서 DSSC가 pc-Si 보다 우수한 발전성능을 나타내는 것을 확인하였다. Yuan et. al.(2018)[24]는 DSSC BIPV의 실제 적용의 가능성 분석을 위해 실외 테스트를 4년간 수행하였다. DSSC 발전성능은 조도에 따른 일정하게 증가하지 않으며 08시부터 16시까지 일정한 것으로 나타났다. 향후 창호형 BIPV로 DSSC를 적용하였을 때, 일사량 변화와 관계없이 일정한 전력 발전량을 얻을 수 있을 것이다.

을 수 있을 것이다.

선행연구 고찰 결과, a-Si 계열 태양전지 창호의 경우 제품개발, 적용방안, 광학적 성능이나 전체 에너지 성능에 대한 분석이 다수 실시되었으나, DSSC를 대상으로 건물의 환경성능을 검증한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 DSSC의 건물 적용 가능성을 높이기 위해 건축물 자재로써 요구되는 성능지표와 이에 따른 건물 환경 및 에너지성능 분석이 실시되어야 한다.

3. 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 DSSC BIPV의 건물 창호로서의 적용 가능성 분석을 위해 환경성능인 빛, 열과 에너지 성능으로 에너지소비량, 전력 발전 성능을 분석하고 BIPV 로서의 기능을 만족하기 위한 VLT 및 발전효율의 적정 적용 수준을 제시하여 DSSC 기술개발 시 성능 수준 선택을 돕는 기반자료로 Data base를 구축하고자 하였다.

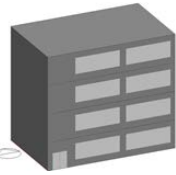
빛환경은 VLT에 의한 실내조도를 분석하고 열환경은 창호 성능에 의한 실내온도를 분석한다. 에너지 성능으로는 냉·난방, 조명에너지 소비량, 피크에너지 그리고 발전효율에 따른 전력생산량을 평가하여 DSSC BIPV의 현 수준을 파악한다. 이를 바탕으로 향후 건물 창호로써 DSSC BIPV가 지속적으로 개발 및 적용될 시 적정 수준 선택을 돕는 성능 Data Table구축을 실시하였다. 이를 위해 DSSC BIPV의 주 고려 요소인 VLT와 발전효율을 다양한 수준으로 설정하여 건물 총 에너지소비량을 산출하고 실현 가능성 있는 성능 범위를 제안하였다.

3.1. 대상건물 모델링

DSSC BIPV 성능 분석을 위하여 Designbuilder (Version 5.0.1.024)를 사용하였다. Designbuilder는 EnergyPlus 기반의 통합 건물 에너지 해석 시뮬레이션 프로그램으로 LEED와 ASHRAE 90.1의 기준 조건을 포함하고 있다[25].

시뮬레이션 대상 건물은 대한민국 서울에 위치한 준규모 및 형태의 오피스 건물로 Table 1.과 같이 구축하였다[26]. 최근 개정된 건물에너지절약설계기준에 따라 열관류율을 산정하고 표면 반사율은 일반적으로 적용되는 값에 따라 천장, 벽, 바닥을 70%, 50%, 25%로 각각 산정하였다[27]. 냉·난방시스템은 Designbuilder가 제공하는 사무소 건물에서 일반적으로 적용되는 팬 코일 유닛으로 선정하였다. 사용되는 기상 데이터는 서울지역 표준 기상년 데이터를 활용하였다.

Table 1. Parameters of simulation model

Item	Contents
Modeling	
Location/Orientation	Seoul, Republic of Korea/South

Item	Contents	
Area	Total Building Footprint	640m ² (160m ² for each floor)
	Number of Floors	4F
	Floor Heights	
Building Envelope constructions	Roof surface (U-value)	0.15 W/m ² K
	Above grade wall (U-value)	0.24 W/m ² K
	Ground floor (U-value)	0.2 W/m ² K
	Infiltration	0.7ACH
Schedule	Heating period	January 01 - February 28 November 01 - December 31
	Cooling period	June 01 - September 31
Exterior window	Size	5.6m x 2m (16AE)
	WWR	40%
System	Heating/Cooling system type & Heat source	Fan Coil Unit (4-Pipe) Boiler/Air cooled Chiller
	Heating/Cooling Seasonal CoP	0.85/5.96
	Heating/Cooling setpoint Temperature	20°C/26°C
	Heating/Cooling setback Temperature	15.5°C/29.4°C
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-400 Lux Core-200 Lux

3.2. 창호유형 설정

본 연구에 적용된 3가지 유형의 창호는 Table 2.와 같다. 기존에 널리 적용되고 있는 Low-e유리를 기준모델로 설정하여 DSSC BIPV 성능평가를 실시하였다. Low-E 창호는 복층유리구조로 투명 유리, 공기층, Low-E(3면 코팅) 유리로 구성된다. DSSC는 투명유리(3mm), 공기층(12.55mm), DSSC Cell(4.4mm), 공기층(12.55mm), 투명유리(3mm)의 구성을 가진다. 유리의 열 및 광학적 특성은 IGDB(International Glazing Data Base) 데이터를 기반으로 하는 DesignBuilder의 glass data를 이용하였다. DSSC Cell의 열 및 광학적 특성은 Table 3.과 같으며 공인 시험기관인 Korea Conformity Laboratories의 KS L 2514, NFRC 300:2017 시험법에 의한 DSSC Cell 100 x 100mm의 시험 성적서 값을 활용하였다. DSSC BIPV는 2가지 유형으로 한정하였으며 DSSC cell 컬러에 따라 DR(DSSC Red), DG(DSSC Green)으로 설정하였다.

Table 2. Physical properties of exterior window

Type	Glazing Layer [No. Thickness]	U-Value [W/m ² K]	SHGC	SC	VLT [%]	Note
Low-e	Clr6+Air12+Clr6	1.540	0.490	0.560	59	Base case
DR	Clr3+Air12.55+DSSC4.4(Red)+Air12.55+Clr3	1.082	0.426	0.490	4.9	
DG	Clr3+Air12.55+DSSC4.4(Green)+Air12.55+Clr3	1.077	0.417	0.479	2.8	

Table 3. Physical properties of DSSC Cell

Type	DR	DG
Tio2 Thickness [um]	8	8
U-Value [W/m ² K]	5.77	5.77
SHGC	0.41	0.40
SC	0.47	0.45
VLT [%]	6.0	3.5
Inside/Outside Visible reflectance [%]	9.1/9.4	8.1/5.1
Solar transmittance [%]	19.2	16.1
Inside/Outside solar reflectance [%]	11.2/11.3	10.4/9.1
Infrared transmittance [%]	20.3	21.1
Inside/Outside transmittance [%]	16.3/16.0	15.7/15.9

4. 시뮬레이션 결과 분석

4.1. DSSC BIPV 성능

DSSC BIPV의 현재 성능 수준 파악을 위해 환경성능인 빛, 열과 에너지 성능으로 에너지소비량, 전력발전 성능분석을 실시하였다.

빛환경 성능으로 실내조도 분석을 위한 대상공간은 남측만의 DSSC 창호의 VLT에 의한 실내조도를 분석하기 위해 주변 방해요인이 최소 환경으로 건물 3층의 내부 오피스로 선정하였다. 천공조건은 Clear Sky 상태로 측정 일자는 채광에 따른 실내조도 분석을 실시한 선행연구[28]를 참고하여 남측창에서 평균조도가 가장 높은 12월 22일 오후12시로 설정하였다. 그 결과 Table 4.와 같이 실내조도는 Low-e>DR>DG 순으로 높게 나타났다. DSSC BIPV 창호의 VLT 성능은 컬러에 따라 Low-e창호의 9~5%에 그치며 이에 따른 실내조도는 평균조도를 기준으로 DR 83.98lux, DG 46.73lux로 Low-e보다 현저히 낮게 나타났다. 사무소 건물의 기준 실내조도는 300~500lux로[29] DSSC BIPV창호의 경우 현 VLT 수준으로는 인공조명의 사용 없이 자연채광만으로는 실내조도 기준에 만족하기 어려운 것으로 확인되었다.

Table 4. Annual building energy consumption

Type	Amount of Energy [kWh/yr]			
	Heating	Cooling	Lighting	Total
Low-e	8,891.00	5,939.45	14,048.80	28,879.25
DR	5,693.19	7,414.69	37,827.28	50,935.16
DG	5,356.55	7,559.37	40,731.80	53,647.72

열환경 성능은 창호 조합에 따른 실내온도를 분석하였다. 각 창호가 실내온도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대상 공간은 실내조도분석 대상공간과 동일한 공간으로 한정한다. 실내온도는 창호별 일사투과량에 따라 분석되었고 창호 성능에 따른 실내온도만을 분석하기 위하여 냉난방 시스템은 Off로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 연간 일사투과량은 Fig. 1.에 나타나듯이 Low-e가 4,213.66W/yr로 가장 높고 DR 1,323.40W/yr, DG 1,106.09W/yr 순으로 나타났다. DR은 기준모델 대비 연간 약 68% 감소하는 것

로 나타났으며 7월에 69.19% 감소하여 가장 적고 12월에 67.68% 감소로 가장 높다. DG는 기준모델 대비 연간 약 73% 감소하였고 4월에 74.59% 감소하여 가장 적고 12월에 72.97% 감소하여 가장 높게 나타났다.

Fig. 2.는 창호의 일사투과량에 따른 실내온도를 나타낸다. 여름철(6~9월) 평균 실내온도는 Low-e가 28.47°C로 가장 낮고 DR과 DG가 동일하게 28.64°C로 미세하게 높아 기준모델인 Low-e 대비 0.18°C 증가하였다. 겨울철(1월~2월, 11월~12월) 평균 실내온도 역시 Low-e가 19.24°C로 가장 낮고 DR이 19.39°C로 기준모델 대비 0.15°C 증가하였다. 일사투과량은 Low-e 창호가 높으나 실내온도는 계절에 상관없이 DR이 가장 높고 DG, Low-e 순으로 반대되는 현상을 보인다. 두 가지 DSSC BIPV 창호의 일사투과량이 Low-e 대비 약 30% 수준에 그치지만 실내온도가 더 높게 나타났다는 것은 열관류율과의 관계를 분석해 볼 필요가 있다. 열관류율의 경우 DSSC-R이 1.082 W/m²k, DSSC-G은 1.077 W/m²k, Low-e 가 1.54 W/m²k 대비 30% 낮은 값을 가지는 고단열 창호 이므로 실내로부터 실외로의 열손실을 줄여 주기 때문에 실내온도가 더 높게 나타나는 것으로 해석될 수 있다.

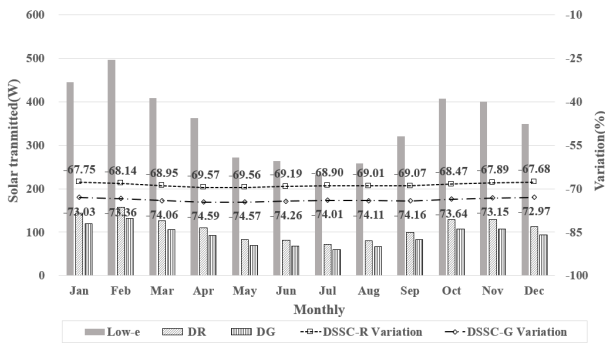


Fig. 1. Solar Transmission performance-3F, inside office (Variation: A percentage change compared to base model(Low-e))

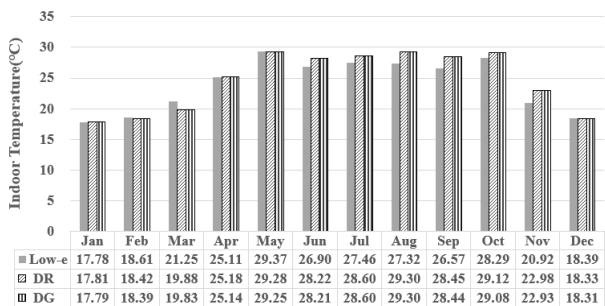


Fig. 2. Indoor temperature by solar transmission-3F, inside office

창호 유형에 따른 건물 에너지소비량 분석을 위해 냉방, 난방, 조명 에너지, 피크 에너지 소비량 분석이 수행되었다. 그 결과 Table 4., Fig. 3.과 같이 총 건물 에너지 소비량은 Low-e가 28,879.25 kWh로 세 가지 창호 유형 중 가장 낮으며 냉방보다 난방이 높은 비율로 계산되었다. 그 다음으로 DR, DG 순으로 낮게 나타나 DG가 기준모델 대비 24,768.47 kWh(85.77%) 증가한 53,647.72 kWh로 가장 많이 증가하였다.

난방에너지는 DR, DG 기준모델보다 감소하는 것으로 나타났다. DR이 5,693.19 kWh로 기준모델 대비 35.9%, DG가 5,356.55 kWh로 39.7% 감소하였다. 반면에 냉방에너지는 기준모델이 5,939.45 kWh로 가장 낮게 계산되었으며, 기준모델 대비 DR이 1,475.24 kWh(24.8%) 증가, DG가 1,619.92 kWh(27.2%) 증가하였다. 난방 에너지 감소 현상은 DSSC의 열관류율 특성으로 인하여 겨울철의 경우 실내 열손실이 줄어들기 때문에 난방이 줄어든 것으로 판단된다. 냉방 에너지 증가의 경우 여름철 실내 내부발열 해소가 어렵고, VLT로 인한 실내조명 발열이 증가하여 과냉방 현상이 나타난 것으로 사료된다. 이에 따라 DSSC는 실내 열손실에 취약한 한랭 기후에 설치 시 오피스 건물의 난방에너지 절감 효과가 있는 것으로 확인되었다.

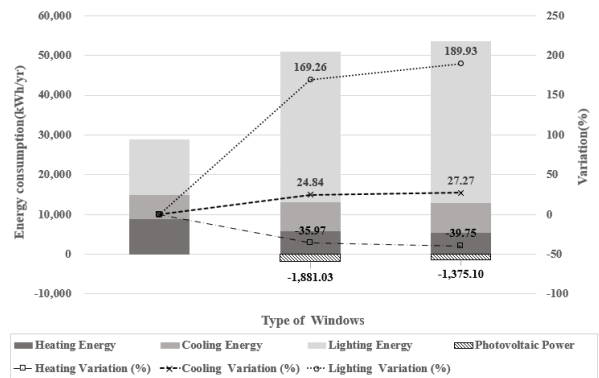


Fig. 3. Annual energy consumption. (Variation: A percentage change compared to based model (Low-e))

조명에너지 소비량은 기준모델과 DSSC BIPV 창호의 값이 크게 차이나는 것으로 나타났다. VLT이 조명에너지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Dimming control을 실시하였다. 제어 기준 조도는 Core 200Lux, Office 400Lux로 설정, Dimming Control 센서는 내부 오피스의 중간, 높이 0.75m로 설정하였다. VLT가 DR이 4.9%, DG가 2.8%로 Low-e창호의 약 8%에 그쳐 기준모델 대비 조명에너지 소비량이 대폭 증가하였다. DG가 기준모델 대비 26,683 kWh(189.93%) 증가하여 40,731.80 kWh로 세 가지 창호 중 조명에너지 소비량이 가장 높게 나타났고, 이어서 DR이 23,778.48 kWh(169.26%) 증가한 37,827.28 kWh로 계산되었다. 이는 DSSC BIPV의 VLT가 기준모델 보다 현저히 낮아 실내 인공조명 사용량이 늘어난 것으로 판단된다. 냉방, 난방, 조명에너지를 통합한 총 에너지소비량은 DSSC BIPV 창호의 난방에너지 절감에도 불구하고 냉방과 조명에너지 증가로 인해 기준모델보다 최종적으로 증가하는 것으로 나타났다.

DSSC BIPV의 전력 생산량과 함께 총 건물 에너지소비량을 분석하였다. 본 연구에서 적용된 DSSC BIPV는 발전효율이 아주 낮아 대량의 전력 발전량을 기대하기는 어렵다. DR의 연간 전력 발전량이 1,881.03 kWh, DG가 1,375.10 kWh로 계산되었다. 이는 각각의 연간 에너지소비량의 6.97%, 9.39%에 그치는 값이며 이를 반영한 총 에너지 소비량은 DR이 49,054.13 kWh, DG는 52,272.62 kWh로 확인되었다. DSSC BIPV 창호를 효율적인 건축 외장재로 적용하기 위해서는 VLT 개선으로 인한 조명에너지 절감이 시급하다. 또

한, 일반 창호가 아닌 PV로써 적절한 발전효율을 확보하는 것이 필요하다고 사료된다.

Table 5.는 피크 냉방, 난방, 조명에너지를 분석한 결과이다. 피크 에너지 발생일은 냉방 8월 12일, 난방 1월 21일로 확인되었으며 총 소비량은 Low-e가 456.21kWh로 가장 낮고, DG가 656.13kWh로 가장 높게 나타났다. DR, DG 창호 모두가 기준모델 대비 난방은 53.15 kWh(22.44%), 54.82 kWh(31.84%) 감소하였고 냉방은 35.47 kWh(29.13%), 38.78 kWh(31.84%) 증가하였다. 조명에너지 역시 기준모델 대비 DSSC가 증가하여 DR은 159.82%, DG가 177.34% 만큼 에너지를 많이 소비하는 것으로 나타났다. 피크 날 발생한 전력 생산량은 1월 21일과 8월 12일 모두 DR이 3.97 kWh, 4.23 kWh로 DG보다 높았다. 그러나 연간 전력 생산량과 마찬가지로 DSSC cell 발전효율에 따른 전력 생산량이 현저히 적어 피크 냉방, 난방, 조명에너지 소비량에 크게 기여하지 못하는 것을 알 수 있었다. DSSC BIPV의 건물 창호로 적용 시 겨울철 피크 난방의 감소는 안정적인 건물 에너지 소비 운영에 도움을 주어 실내 쾌적을 향상시킬 수 있을 것으로 사료되나 여름철 피크 냉방의 증가로 인해 에너지 비용 증가와 실내 불쾌적 현상이 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Peak energy consumption

Type	Amount of Energy [kWh/day]			Power generation [kWh/day]	
	Heating (January 21)	Cooling (August 12)	Lighting (Jan 21/Aug 12)	January 21	August 12
Low-e	236.89	121.78	60.37 / 37.17	-	-
DR	183.74	157.25	148.68 / 143.49	3.97	4.23
DG	182.07	160.56	158.92 / 154.58	2.90	3.11

4.2. DSSC BIPV 성능 Database 구축

DSSC BIPV 창호의 건축 외장재료의 적정 VLT, PV 발전효율 성능 수준을 분석하였다. VLT는 창호의 투명도 조절을 통해 실내 시 환경 쾌적도를 결정짓는 중요한 요소이다. 이에 따라 VLT는 실내 인공조명 사용에도 직접적인 영향이 있어 에너지 절약형 건물 운영을 위해 기본적으로 고려되어야 할 요소이다. 발전효율은 PV의 가장 중요한 역할로 전력을 생산하여 건물 에너지 소비에 기여할 수 있다. DSSC BIPV가 창호의 기능 뿐만 아닌 PV 기능을 충분히 발휘할 수 있는 성능 기준이 반드시 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 VLT를 5~60% 범위에서 10% 단위로 변경하고, 발전효율은 2~20% 범위에서 1% 단위로 설정하여 냉방, 난방, 조명에너지를 통합한 총 에너지소비량을 분석하였다. VLT 값 설정은 Table 2.를 기준으로 DSSC 중 가장 초기에 개발되고 널리 적용되고 있는 DR을 기준으로 cell의 VLT를 Table 6.과 같이 조정하여 DSSC BIPV 창호를 구성하였다.

Table 6. DSSC BIPV window VLT by DSSC cell VLT

DSSC Cell	VLT[%]							
	6.2	8.5	12	24	36	48	60	
DSSC BIPV window	5	7	10	20	30	40	50	60

VLT에 따른 에너지 소비량 비교를 위해 본 연구의 DSSC BIPV 창호 VLT와 유사한 5%를 기준모델로 설정하였으며 DSSC cell의 VLT 값과 유사한 7%도 함께 분석하였다. 분석 결과는 Table 7., Fig. 4.와 같이 VLT가 증가할수록 난방에너지는 증가하고 냉방과 조명에너지는 감소하는 것으로 확인되었다. 기준모델(VLT 5%) 대비 VLT가 10 ~ 60%까지 10%씩 증가함에 따라 난방에너지는 6,646.06 kWh/yr(16.74%) ~ 8,932.65 kWh/yr(56.90%)까지 증가되었고 증가 폭은 906.27 kWh/yr(15.92%) ~ 195.81kWh/yr(3.44%)로 점차 줄어드는 흐름을 보였다. 냉방에너지는 난방에너지의 증가율과 조명에너지의 감소율에 비해 적은 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. VLT 10~60%로 변함에 따라 7,032.91 kWh/yr(5.15%) ~ 5,267.71 kWh/yr(28.96%) 감소하였고 난방과 마찬가지로 감소 폭은 8.94~0.96%로 점차 줄어들었다.

Table 7. DSSC BIPV window energy consumption by VLT

VLT[%]	Amount of energy [kWh/yr](Variation, %)				Note
	Hating	Cooling	Lighting	Total	
5	5,693.19	7,414.69	37,827.28	50,935.16	Base case
7	6,113.13 (+7.38)	7,251.30 (-2.20)	34,945.50 (-7.62)	48,309.93 (-5.15)	-
10	6,646.06 (+16.74)	7,032.91 (-5.15)	31,203.33 (-17.51)	44,882.30 (-11.88)	-
20	7,552.33 (+32.66)	6,369.82 (-14.09)	22,722.06 (-39.93)	36,644.21 (-28.06)	-
30	8,105.28 (+42.37)	5,848.66 (-21.12)	17,581.47 (-53.52)	31,535.41 (-38.09)	-
40	8,491.10 (+49.14)	5,521.12 (-25.54)	14,456.12 (-61.78)	28,468.34 (-44.11)	-
50	8,736.84 (+53.46)	5,338.64 (-28.00)	12,559.32 (-66.80)	26,634.80 (-47.71)	-
60	8,932.65 (+59.90)	5,267.71 (-29.86)	11,370.98 (-69.94)	25,571.34 (-49.80)	-

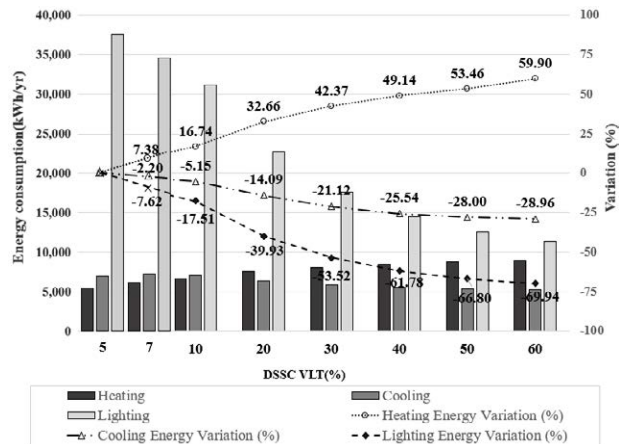


Fig. 4. DSSC BIPV window energy consumption by VLT (Variation: A percentage change compared to VLT 5%)

VLT 변화에 가장 직접적인 영향을 받는 조명에너지 소비량은 VLT가 커질수록 큰 폭으로 감소하였다. 기준모델 37,827.28 kWh/yr 대비 최대 VLT가 60%일 때 11,370.9 kWh/yr(69.94%) 감소하였고 VLT에 따른 감소폭은 22.42~3.14%로 줄어드는 것으로 분석되었다. 이와 같이 VLT 변화에 따른 현상은 자연채광으로 인한 실내 인공조명 사용 감소로 인하여 조명에너지가 줄고 이에 따라 내부발열 감소로 냉방에너지 감소, 난방에너지는 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

DSSC cell의 발전효율에 따른 PV power 생산량은 Table 8.에 나타난다. 본 연구에서의 DSSC cell 발전효율에 근접한 값인 2%를 최소 발전효율로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 발전효율 1% 증가 시 648.63 kWh/yr씩 동일하게 증가된 전력을 생산하는 것으로 계산되어 본 연구에서 설정한 최대 발전효율 20%일 때 12,972.64 kWh/yr, 최소 발전효율 2%일 때 1,297.26 kWh/yr 전력을 생산하는 것으로 확인되었다.

Fig. 3.의 Low-e 창호 총 에너지소비량을 기준모델로 VLT, efficiency 변화에 따른 DSSC BIPV window의 에너지 소비량을 Data base로 Table 9.와 같이 계산하였다. DSSC glazing 관련 선행 연구는 국내보다 국외에서 더 활발하며 이를 통해 확인되는 DSSC의 VLT는 Single window 기준 최대 53%, 발전효율 11%이며 NREL (National Renewable Energy Laboratory)가 제시하는 DSSC의 Cell Efficiency는 2020년 기준 13% 이다[30-33]. 그러나 대한민국의 창호 단열기준에 만족하기 위해서는 복층창 또는 삼중창으로 적용되어야 하므로 국외 선행연구 현황과 VLT에는 차이가 발생한다. 이를 감안하여 본 연구에서는 VLT의 현재 수준을 국외 선행연구의 절반 수준인 20%로 설정하였다. 본 연구 결과에 의하면 Low-e 창호 대비 에너지 절감 가능 최소 수준은 VLT 20%일 때 발전효율 14%에서 확인되며 VLT 50% 부터는 모든 발전효율에서 에너지 절감이 가능한 것으로 나타났다.

Table 8. Power generation by DSSC Cell efficiency

DSSC cell efficiency [%]	PV Power [kWh/yr]
2	1,297.26
3	1,945.90
4	2,594.53
5	3,243.16
6	3,891.79
7	4,540.43
8	5,189.06
9	5,837.69
10	6,486.32
11	7,134.95
12	7,783.59
13	8,432.22
14	9,080.85
15	9,729.48
16	10,378.11
17	11,026.75
18	11,675.38
19	12,324.01
20	12,972.64

Table 9. DSSC BIPV window energy consumption by VLT and generation efficiency [kWh/yr]-Base case: Low-e window (Current level: Standard of preceding research)

Eff[%] \ VLT[%]	5	7	10	20	30	40	50	60
2	-21,6327	-19,04804	-15,62041	-7,38232	-2,27352	-503.71	2,627.09	3,690.55
3	-21,02463	-18,39940	-14,971.77	-6,73368	-1,62488	2,090.82	3,275.73	4,339.19
4	-20,37600	-17,75077	-14,323.14	-6,08505	-976.25	2,739.45	3,924.36	4,987.82
5	-19,72737	-17,10214	-13,674.51	-5,436.42	-327.62	3,388.08	4,572.99	5,636.45
6	-19,07874	-16,453.51	-13,025.88	-4,787.79	321.01	4,036.72	5,221.62	6,285.08
7	-18,43010	-15,80487	-12,377.24	-4,139.15	969.65	4,685.35	5,870.26	6,933.72
8	-17,78147	-15,15624	-11,728.61	-3,490.52	1,618.28	5,333.98	6,518.89	7,582.35
9	-17,13284	-14,50761	-11,079.98	-2,841.89	2,266.91	5,982.61	7,167.52	8,230.98
10	-16,48421	-13,85898	-10,431.35	-2,193.26	2,915.54	6,631.24	7,816.15	8,879.61
11	-15,83558	-13,21035	-9,782.72	-1,544.63	3,564.17	7,279.88	8,464.78	9,528.24
12	-15,18694	-12,561.71	-9,134.08	-885.99	4,212.81	7,929.88	9,113.42	10,176.88
13	-14,53831	-11,91308	-8,485.45	-247.36	4,861.44	7,928.51	9,762.05	10,825.51
14	-13,88968	-11,26445	-7,836.82	401.27	5,510.07	8,577.14	10,410.68	11,474.14
15	-13,24105	-10,61582	-7,188.19	1,049.90	6,158.70	9,225.77	11,059.31	12,122.77
16	-12,59242	-9,967.19	-6,539.56	1,698.53	6,807.33	9,874.40	11,707.94	12,771.40
17	-11,94378	-9,318.55	-5,890.92	2,347.17	7,455.97	10,523.04	12,356.58	13,420.04
18	-11,29515	-8,669.92	-5,242.29	2,995.80	8,104.60	11,171.67	13,005.21	14,068.67
19	-10,64652	-8,021.29	-4,593.66	3,644.48	8,753.23	11,820.30	13,653.84	14,717.30
20	-9,99789	-7,372.66	-3,945.03	4,293.06	9,401.86	12,468.93	14,302.47	15,365.93

■ JINNE standard ■ Current level ■ Energy saving range

5. 결론

본 연구에서는 DSSC BIPV가 적용된 건물의 환경성능 및 에너지 소비량에 대한 관계를 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램 Design builder를 통하여 분석하였으며, DSSC BIPV의 적정 성능 수준 선택에 도움을 줄 수 있는 Database 구축을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 실내평균조도는 VLT에 따라 Low-e (1,356.55Lux) >DR (83.98Lux)>DR(46.73Lux) 순으로 나타난다. DSSC BIPV의 VLT가 기준모델(Low-e)보다 현저히 낮아 나타나는 현상으로 자연채광만으로는 사무소 실내조도 기준인 300~500Lux에 미치지 못한다. 창호 조합에 따른 연평균 실내온도는 DSSC-R (24.63℃) >DSSC-G (24.61℃) > Low-e (24.00℃)순으로 나타났다. 이는 DSSC BIPV가 Low-e 창호보다 고단열 창호이므로 실내 열손실을 줄여주어 나타나는 현상으로 해석될 수 있다.

(2) 연간 총 에너지 소비량은 DG > DR > Low-e 순으로 나타났으며 DG가 기준모델 대비 24,768.47 kWh(85.77%) 증가하여 가장 많았다. 이는, DSSC-G의 VLT 특성으로 인해 조명에너지가 과도하게 높고 이에 따른 냉방에너지 증가에 의한 것으로 사료된다. 난방에너지는 열관류율 특성으로 인해 두 가지 유형의 DSSC BIPV가 기준모델보다 낮게 계산되었으며 그 중 DG가 39.7% 감소하여 가장 낮았다. 반면, 냉방에너지는 DSSC BIPV가 기준모델보다 높게 나타났다. DG, DR이 기준모델 대비 각각 27.2%, 24.8% 증가하였다.

VLT이 조명에너지에 미치는 영향을 분석한 결과 DG가 세 가지 창호 중 가장 높은 조명에너지 소비량을 보였다. DSSC BIPV의 전력생산량은 연간 총 건물에너지 소비량의 DSSC-R이 6.97%, DSSC-G가 9.39%에 그쳐 에너지소비에 기여도가 상당히 적다. DSSC BIPV 창호의 PV로써의 역할을 충분히 발현하기 위해서는 현 수준보다 개선된 DSSC Cell의 발전효율 성능 확보가 시급하다고 판단된다.

(3) DSSC BIPV의 건물 창호로써 적정 VLT, PV generation efficiency 성능 수준 파악을 위해 VLT 5~60% 범위, 10% 단위로 설정하고 PV generation efficiency 2~20% 범위, 1% 단위로 설정하여 냉방, 난방, 조명에너지를 통합한 건물에너지 소비량을 분석하였다. Low-e 창호 대비 에너지 절감 가능 최소 수준은 VLT 20%, PV generation efficiency 14% 조합일 때로 확인되며 VLT 50%부터는 모든 PV generation efficiency 성능에서 에너지 절감이 가능한 것으로 나타났다.

DSSC BIPV의 지속적인 연구 및 적용을 위해, 본 논문의 연구 결과는 시뮬레이션에 의한 Data-base이므로 이를 기반 자료로 실현 가능한 적정 DSSC BIPV의 VLT 및 PV generation efficiency 성능 범위를 선정하여 활용하는 방안이 필요하다. 또한 본 연구를 바탕으로 성능이 개선된 DSSC Cell 개발 및 다양한 용도의 건물을 대상으로 적용된 환경 및 에너지 성능에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-미래선도기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2018M3C1B9088457).

Reference

- [1] International Energy Agency, Renewable energy medium-term market report - market trends and projections to 2018, 2013.
- [2] M. Tabakovic, H. Fechner, W. van Sark, A. Louwen, G. Georghiou, G. Makrides, E. Loucaidou, M. Ioannidou, I. Weiss, S. Arancón, S. Betz, Status and outlook for building integrated photovoltaics (BIPV) in relation to educational needs in the BIPV Sector, *Energy Procedia*, Vol.111, 2017.
- [3] Akash Kumar Shukla, K. Sudhakar, Prashant Baredar, Rizalman Mamat, Solar PV and BIPV system: Barrier, challenges and policy recommendation in India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.82, 2018.
- [4] Akash Kumar Shukla, K. Sudhakar, Prashant Baredar, R. Mamat, BIPV in Southeast Asian countries - opportunities and challenges, *Renewable Energy Focus*, Vol.21, 2017.
- [5] Mary Debbarma, K. Sudhakar, Prashant Baredar, Comparison of BIPV and BIPVT: A review, *Resource-Efficient Technologies*, Vol.3, 2017.
- [6] M. Tripathy, P.K.Sadhu, S.K.Panda, A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.61, 2016.
- [7] A. Fakhruddin, R. Jose, T. M. Brown, F. Febregat-Santiago, J. Bisquert, A perspective on the production of dye-sensitized solar modules, *Energy Environ Sci*, Vol.7, 2014.
- [8] Abdelkarim Ahmedi, Angela Wiens, Irén Juhász Junger, Daniel Werner, Andrea Ehrmann, Influence of grey and color filters on the electrical properties of the dye-sensitized solar cells, *Optik*, Vol.186, 2019.
- [9] Poh Khai Ng, Nalanie Mithraratne, Harn Wei Kua, Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings, *Energy and Buildings*, Vol.66, 2013.
- [10] Cristina S. Polo López, Marco Sangiorgi, Comparison assessment of BIPV façade semi-transparent modules: further insights on human comfort conditions, *Energy Procedia*, Vol.48, 2014.
- [11] Meng Wang, Jinqing Peng, Nianping Li, Hongxing Yang, Chunlei Wang, Xue Li, Tao Lu, Comparison of energy performance between PV double skin facades and PV insulating glass units, *Applied Energy*, Vol.194, 2017.
- [12] Jinqing Peng, Dragan C. Curcija, Aothai Thanachareonkit, Eleanor S. Lee, Howdy Goudey, Stephen E. Selkowitz, Study on the overall energy performance of a novel c-Si based semitransparent solar photovoltaic window, *Applied Energy*, Vol.242, 2019.
- [13] Aritra Ghosh, Senthilarasu Sundaram, Tapas K. Mallick, Colour properties and glazing factors evaluation of multicrystalline based semi-transparent Photovoltaic - vacuum glazing for BIPV application, *Renewable Energy*, Vol.131, 2019.
- [14] Ming Jun Huang, The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol.95, 2011.
- [15] Evelise Leite Didoné, Andreas Wagner, Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil, *Energy and Buildings*, Vol.67, 2013.
- [16] Aritra Ghosh, Nabin Sarmah, Senthilarasu Sundaram, Tapas K. Mallick, Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV) - vacuum glazing system, *Solar Energy*, Vol.190, 2019.
- [17] Yuanda Cheng, Min Gao, Jiankai Dong, Jie Jia, Xudong Zhao, Guiqiang Li, Investigation on the daylight and overall energy performance of semitransparent photovoltaic facades in cold climatic regions of China, *Applied Energy*, Vol.232, 2018.
- [18] 윤종호, 안영섭, 박장우, 김빛나, 투광형 박막 BIPV 창호 적용에 따른 냉난방 및 조명 부하 저감에 관한 연구, 한국: 한국생태환경건축학회지, 제13권 제3호, 2013.06 // (Yoon, Jong-Ho, An, young Sob, Park, Jang-Woo, Kim, Bich-Na, A Study on Analysis for Energy Demand of the Heating, Cooling and Lighting in Office Building with Transparent Thin-film a-Si BIPV Window, *KIEAE*, Vol.13, No.3, 2013.)
- [19] Changhai Peng, Ying Huang, Zhishen Wu, Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China, *Energy and buildings*, Vol.43, 2011.
- [20] Hans Christoph Curtius, The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators, *Renewable Energy*, Vol.126, 2018.
- [21] M. Tripathy, P.K.Sadhu, S.K.Panda, A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.61, 2016.
- [22] S. H. Yoon, S. H. Tak, J. S. Kim, et al., Application of transparent dye-sensitized solar cells to building integrated photovoltaic systems, *building and Environment*, Vol.46, 2011.
- [23] A. Asghar, M. Emziane, H. K. Pak, S. Y. Oh, Outdoor testing and degradation of dye-sensitized solar cells in Abu Dhabi, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.128, 2014.
- [24] Huihui Yuan, Wei Wang, Di Xu, Quan Xu, Huijiang Shen, Outdoor testing and ageing of dye-sensitized solar cells for building integrated photovoltaics, *Solar Energy*, Vol.165, 2018.
- [25] DesignBuilder, <https://designbuilder.co.uk>
- [26] Establishment of standard model DB for analysis of greenhouse gas reduction potential model for building sector, Korea institute of civil engineering and building technology, 2016.
- [27] M. Rea, IESNA Lighting Handbook, 9th edition, The Illuminating Engineering Society of North America, NY, USA, 2002.
- [28] S. M. Joe, The effect of indoor illuminance depends on direction of the side windows lighting, A master thesis, 2004.
- [29] M. Rea, IESNA Handbook, 9th edition, The Illuminating Engineering Society of North America, NY, USA, 2002.
- [30] P. Selvaraj., A. Ghosh., T. K. Mallick., S. Aundaram., Investigation of semi-transparent dye-sensitized solar cells for fenestration integration, *Renewable Energy*, Vol.141, 2019.

- [31] A. Roy, A. Ghosh, S. Bhandari, P. Selvaraj, S. Sundaram, and T. K. Mallick., Color comfort evaluation of Dye - Sensitized Solar Cell (DSSC) Based Building - Integrated photovoltaic (BIPV) glazing after 2 year of ambient exposure, Physical chemistry, Vol.123, 2019.
- [32] V. Dhas, S. Muduil, S. Agarkar, A. Rana, B. Hannover, R. Banerjee, S. Ogale, Enhanced DSSC performance with high surface area thin anatase TiO₂ nanoleaves, Solar Energy, Vol.85, 2011.
- [33] Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya , N. Koide, L. Han, Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11.1%. Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters, Vol.45, 2006.