

Mock-Up 데이터 학습을 통한 반투광형 태양광(STPV) 모듈의 표면 온도 예측 모델 개발

김내경¹ · 김지원² · 조수현³ · 광영훈⁴ · 문선혜^{5†}

¹서울시립대학교 건축학부 건축공학전공, 학사과정

²서울시립대학교 도시과학연구원, 연구원

³서울시립대학교 건축공학과, 박사과정

⁴서울시립대학교 건축학부, 연구교수

⁵서울시립대학교 건축학부, 교수

Development of a Surface Temperature Prediction Model for STPV through Mock-Up Data Learning

Kim Naekyung¹ · Kim Jiwon² · Cho Suhyun³ · Kwak Younghoon⁴ · Mun Sunhye^{5†}

¹Undergraduate Student, School of Architecture and Architectural Engineering, University of Seoul

²Researcher, Institute of Urban Science, University of Seoul

³Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

⁴Research Professor, Department of Architecture, University of Seoul

⁵Professor, Department of Architecture, University of Seoul

[†]Corresponding author: msh@uos.ac.kr

Abstract

Semi-Transparent Photovoltaics (STPV) panels are integrated into building windows to allow natural light transmission while generating electricity. However, conventional energy simulation tools often underestimate the indoor heat transfer, as they fail to accurately account for the thermal effects of STPV power generation. This study develops an indoor surface temperature prediction model for STPV modules to simulate the thermal behavior during power generation and enhance the reliability of energy performance assessments. Using measured mock-up data, Pearson correlation and multiple regression analyses were conducted, and power production per unit area (PPA), outdoor temperature (OT), and relative humidity (RH) were identified as the primary factors influencing the surface temperature of the STPV module. The heat transfer calculation involves comparing the surface temperature of the STPV module with the indoor temperature, and the model is applied only when the power production per unit area exceeds 2.32 Wh/m² for crystalline silicon modules and 4.13 Wh/m² for amorphous silicon modules. Overall, this approach provides a refined assessment of the indoor thermal performance of STPV systems, ultimately improving the reliability of energy performance evaluations.

Keywords: 반투광형 태양광(Semi-Transparent Photovoltaics, STPV), 표면 온도 예측(Surface Temperature Prediction), 열전달 분석(Heat Transfer Analysis), 에너지 성능 평가(Energy Performance Evaluation)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.44, No.6, pp.79-92, December 2024
<https://doi.org/10.7836/kjes.2024.44.6.079>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 14 October 2024

Revised: 22 November 2024

Accepted: 22 November 2024

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호 및 약어 설명

STPV	: Semi-Transparent Photovoltaics, 반투광형 태양광[-]
c-Si	: Crystalline Silicon Module, 결정질 모듈[-]
a-Si	: Thin-Film Module, 박막형 모듈[-]
MT	: Module Temperature, 실내 측 모듈 표면 온도[°C]
GHI	: Horizontal Solar Irradiance, 수평면 일사량[W/m ²]
GTI	: Tilted Solar Irradiance, 경사면 일사량[W/m ²]
OT	: Outdoor Temperature, 외기 온도[°C]
RH	: Relative Humidity, 상대습도[%]
WS	: Wind Speed, 풍속[m/s]
PPA	: Power Generation per Unit Area, 모듈 면적당 발전량[Wh/m ²]
T	: Temperature, 온도[K]
Q	: Quantity of Heat, 열전달량[W]
A	: Area, 면적[m ²]
h	: Convective Heat Transfer Coefficient, 대류 열전달계수[W/m ² K]

그리스 기호 설명

σ	: 스테판-볼츠만 상수[W/m ² K ⁴]
ε	: STPV 표면 방사율[-]

하첨자 설명

surface	: 모듈 표면 영역
indoor	: 실내 영역
rad	: 복사
conv	: 대류
predicted	: 표면 온도 예측 모델 기반
simulated	: 시뮬레이션 데이터 기반
additional	: 발전에 따른 추가적인 열효과

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

국제 에너지 기구(IEA)에 따르면, 2023년 건물 부문은 전 세계 에너지 소비의 약 1/3을 차지하고 있으며¹⁾, 이를 줄이기 위해 건물의 에너지 효율을 높이고 쾌적한 실내 열환경을 제공할 수 있는 지속 가능한 전략이 필요하다²⁾. 이에 따라 세계 각국은 재생 가능 에너지(RES)의 사용을 의무화하거나 권장하고 있으며, 이는 화석 연료 의존도를 줄이고 친환경적인 에너지 전환을 위한 효과적인 대안으로 자리 잡고 있다³⁾. 그중에서도 태양광 에너지는 건물에 쉽게 통합할 수 있고 발전 잠재력이 높아 도심 건축물에 적용되는 BIPV (Building Integrated Photovoltaics) 기술로 널리 활용되며, 탄소중립 실현에 기여할 중요한 기술로 평가받는다⁴⁾.

건물의 에너지 손실은 주로 창문을 통해 발생하며⁵⁾, 이는 에너지 소비 증가의 주요 원인 중 하나이다. 창문은 태양 복사를 직접 받기 때문에 이를 효과적으로 차단하거나 조절하는 것이 중요하다⁶⁾. 그러나 단순히 태양 복사를 차단하는 방식만으로는 에너지 절감 효과가 제한적이므로, 건물의 에너지 수요를 줄이면서 동시에 재생 가능 에너지를 활용할 수 있는 기술이 필요하다. STPV (Semi-Transparent Photovoltaics)는 이러한 요구를 충족하는 기술로, 창문에 적용하여 자연광을 실내로 투과시키면서도 태양광을 흡수해 전기를 생산할 수 있다⁷⁾.

STPV의 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 전력 생산량뿐만 아니라, 발전 시 발생하는 열이 실내 환경에 미치는 영향도 함께 고려해야 한다. 일반적으로 BIPV는 전력 생산과 에너지 효율에 중점을 두지만, GtoG (Glass-to-Glass) 구조의 STPV는 두 개의 유리층 사이에 태양광 셀이 배치되어 있어 발전 시 발생한 열이 실내로 전달될 수 있다⁸⁾. 그러나 기존의 건물 에너지 해석 도구들은 STPV 발전 과정에서 실내로 유입되는 열의 영향을 충분히 반영하지 못해⁹⁾, 실내 온도 변화와 에너지 소비를 과소평가하는 한계가 있다. 따라서 STPV 발전 시 발생하는 열이 실내에 미치는 영향을 반영할 수 있는 예측 모델을 개발하여 이러한 한계를 보완하고자 한다.

1.2 연구 범위 및 목표

본 연구에서는 STPV 모듈의 실내 측 표면 온도 예측 모델을 개발하고, 이를 활용하여 STPV 발전에 따른 열 전달 특성 및 모델의 적용 조건을 검토하였다. 이를 위해 Mock-Up 실증 데이터를 바탕으로 피어슨 상관분석과 다중회귀분석을 수행하여 표면 온도에 영향을 미치는 주요 변수를 도출하고, 예측 모델의 정확성을 검증하였다. 연구 절차는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 데이터 수집 및 전처리, 표면 온도 예측 모델 개발, STPV 열전달 특성 분석, 모델 적용 조건 검토의 4단계로 구성된다. 개발된 예측 모델은 EnergyPlus와 같은 건물 에너지 해석 도구에 적용할 수 있으며, STPV 발전 시 발생하는 열이 실내에 미치는 영향을 보다 정확히 반영함으로써 실내 열 환경 특성과 에너지 성능 평가의 정밀도를 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

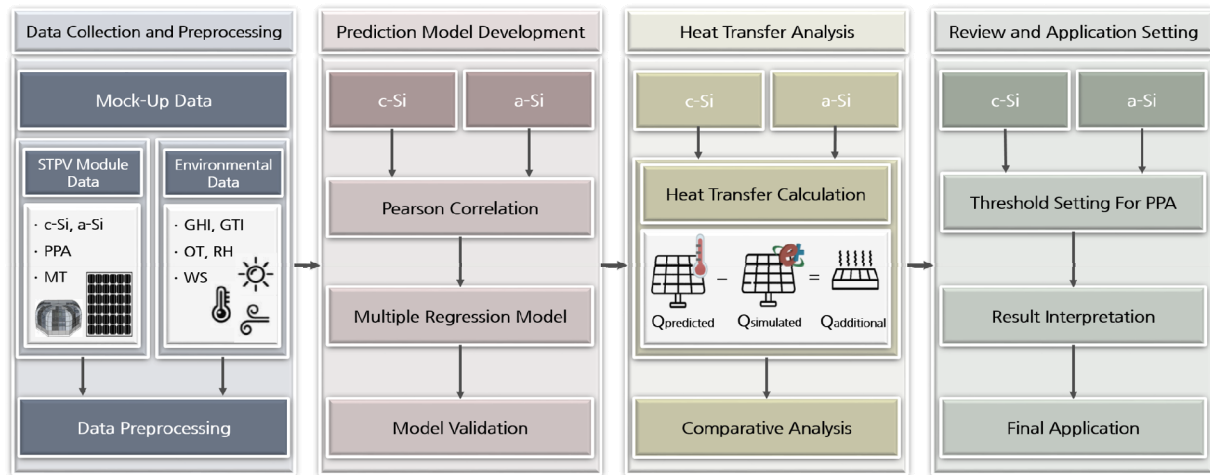


Fig. 1 Research Flowchart

2. 문헌분석

2.1 STPV 성능분석

기존 연구들은 STPV의 전력 생산뿐만 아니라 건물의 에너지 성능과 실내 환경에 미치는 영향을 평가하였다. Wang et al. (2017)¹⁰⁾은 홍콩의 겨울철 환경에서 STPV 창이 난방 부하를 감소시키는 효과를 확인하였다. 이는 STPV가 태양 복사 에너지를 전력으로 변환하여 실내 열 손실을 줄이고, 외부의 냉기 유입을 감소시킨 결과로 해석된다. 또한, 태양 복사량, 외기 온도, 창 투명도와 같은 요인이 STPV의 전력 생산량과 열 성능에 중요한 영향을 미친다는 점을 강조하였다. Zhu et al. (2024)¹¹⁾는 다양한 투명도를 가진 STPV 모듈을 시뮬레이션하여 투명도가 높아질수록 전력 생산 성능과 열 차단 성능이 모두 저하될 수 있음을 밝혔다. 이는 투명도가 증가하면서 더 많은 태양광이 셀을 통과해 셀이 흡수할 수 있는 에너지가 줄어들고, 동시에 실내로 유입되는 태양광이 늘어나 창이 열 차단 성능이 약해지기 때문이다. 이러한 결과는 STPV 설계 시 발전 효율을 유지하면서 열적 특성도 함께 고려해야 함을 시사한다. Wang et al. (2023)¹²⁾는 STPV 창이 전력 생산 외에도 실내 열적 쾌적성을 개선하는데 기여할 수 있음을 분석하였다. 연구 결과, STPV 창은 태양 복사 에너지를 전력으로 변환하면서 실내로 유입되는 직사 복사를 줄여, 일반 유리창 대비 더 나은 열적 쾌적성을 제공할 수 있음을 확인하였다. 이는 STPV가 전력 생산과 함께 실내 환경의 쾌적성을 개선할 수 있는 잠재력을 지닌 기술임을 보여준다.

2.2 STPV의 열전달 특성 분석

STPV 모듈은 발전 과정에서 발생한 열이 실내외로 전달되면서 창이 열적 특성에 영향을 미친다. Yao et al. (2024)¹³⁾은 STPV 모듈의 투명도와 외부 환경 조건에 따른 열전달 성능을 실험 및 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 연구 결과, 투명도가 높을수록 창이 열관류율(U-value)이 증가하여 열 손실이 커질 수 있음을 확인하였다.

이는 투명도가 높아지면 더 많은 빛이 창을 통해 실내로 직접 들어와 창외 열 차단 성능이 떨어지기 때문이다. 이 연구는 STPV가 단순히 전력 생산 성능만이 아니라 열적 성능도 중요하게 고려해야 함을 강조한다. Rodrigues et al. (2018)¹⁴⁾는 STPV 모듈의 열전달 메커니즘이 창호 구성 및 외부온도 조건에 따라 변화하는 특성을 분석하였다. 연구 결과, 단일 유리, 이중 유리, 저방사 유리 등 다양한 창호 구성에 따라 STPV의 열 성능이 다르게 나타나며, 각 구성에 따라 열전달 특성이 달라질 수 있음을 밝혔다. 이는 STPV의 열적 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 창호의 구성과 실내외 온도 변화 등을 종합적으로 고려해야 함을 시사한다.

3. Mock-Up 데이터

3.1 데이터 수집

서산에 위치한 Mock-Up 건물은 다양한 환경 조건에서 STPV 모듈의 성능을 분석하기 위해 설계되었다. 건물의 구성과 설계 특징은 Fig. 2에 제시되어 있다. 건물은 남향, 남동향, 남서향, 서향, 동향의 5가지 방위로 구성되며, 각 방위에는 커튼월 타입(90° , 75° , 30°)과 지붕 타입(15° , 3°)의 설치 각도가 적용되었다. 실내 공간은 사무용 건물을 모사하여 가로 5 m, 세로 2 m, 높이 2.6 m로 설계되었으며, 두 개의 독립된 공간이 나란히 배치되어 있다. 각 공간에는 결정질 모듈(c-Si)과 박막형 모듈(a-Si)이 각각 설치되어, STPV 시스템의 열적 특성과 전력 생산량을 비교할 수 있도록 구성되었다.

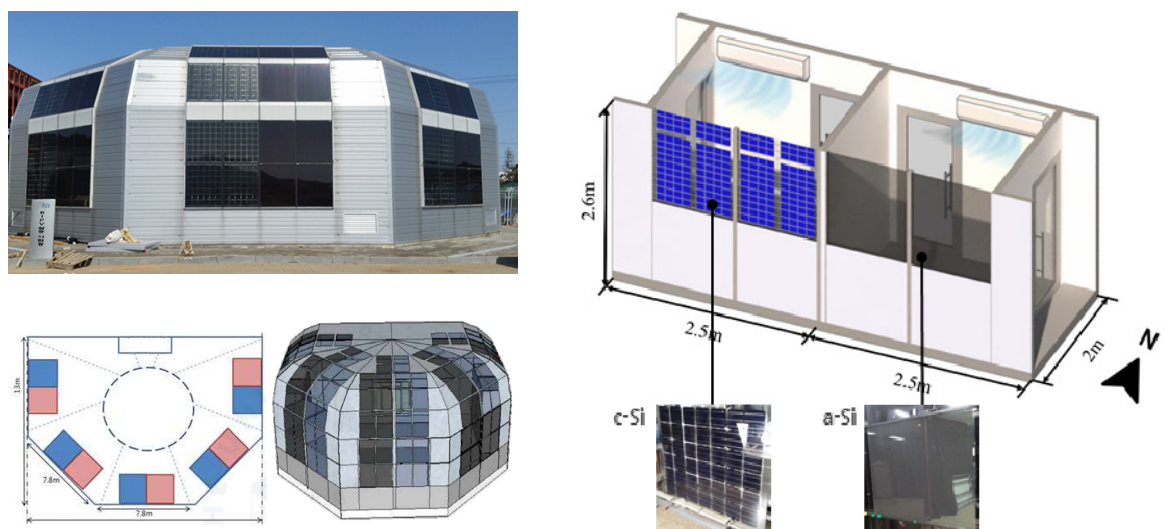


Fig. 2 Mock-Up Exterior and Interior Space

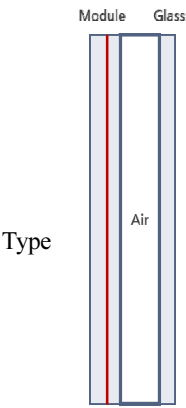
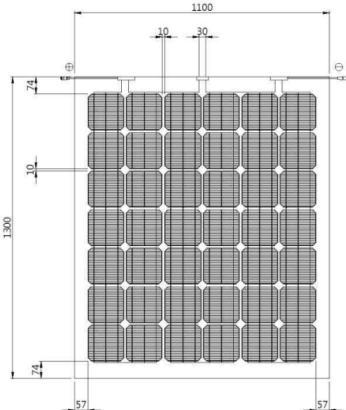
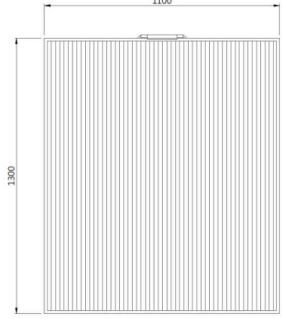
연구에 사용된 STPV 모듈은 Glass-to-Glass 형태로 설계된 맞춤형 모듈로, 연구 목적에 따라 제작되었다. 두 모듈은 동일한 크기(가로 1100 mm, 세로 1300 mm)로 제작되었으며, 각각 6겹의 층 구조로 구성되었다. 결정질 모듈은 5 mm의 저철유리(Low-Iron Glass), 1 mm의 PVB (Polyvinyl Butyral), 4 mm의 CL (Clear

Glass), 8 mm의 공기층, 6 mm의 CL로 구성되었다. 박막형 모듈은 4 mm의 저철유리, 1 mm의 PVB, 5 mm의 CL, 8 mm의 공기층, 6 mm의 CL로 구성된 유사한 구조를 가지고 있다.

Mock-Up 건물의 데이터 수집은 2016년 5월부터 2017년 4월까지 15분 간격으로 진행되었으며, 수집된 데이터는 외부 환경 요인(일사량, 외기 온도, 강수량 등)과 내부 환경 요인(내부 온도, 모듈의 실내 측 표면 온도), 그리고 전력 생산량과 관련된 정보를 포함한다. 각 데이터는 실시간으로 기록되어, STPV 모듈의 실내 측 표면 온도 예측 모델을 개발하는 데 활용되었다. Table 1은 각 모듈의 주요 물리적 특성과 성능 지표를 정리한 것으로, 각 성능에 대한 결과는 KS 시험방법으로 이루어진 시험 결과를 정리한 것이다.

본 연구는 남향에 위치한 90° 각도로 설치된 결정질 및 박막형 모듈이 있는 공간을 주요 분석 대상으로 설정하여, 해당 공간에서 표면 온도 변화와 열전달 특성을 분석하였다.

Table 1 Characteristics of Installed Module Types

Category	c-Si	a-Si
		
Section	Glass to Glass	
Thickness	5 mm (Low-iron) + 1 mm (PVB) + 4mm (CL)	4 mm (Low-iron) + 1 mm (PVB) + 5 mm (CL)
	24 mm: 10 mm (Module) + 8 mm (Air Gap) + 6 mm (CL)	
Size	1100 mm × 1300 mm	
Transmittance	10%	10%
Power Conversion Efficiency	16%	10%
Temperature Coefficient	-0.501	-0.340
U-Value	1.61 W/m ² K	1.55W/m ² K
SHGC	0.13	0.19

3.2 데이터 전처리

2016년 5월부터 2017년 4월까지 수집된 데이터 중, 모니터링 장비가 안정적으로 작동한 기간을 기준으로 87

일간의 데이터를 선별하였다. 이 중, 모델 개발에는 냉방 및 난방 시스템이 작동하지 않는 비공조 상태에서 일사량이 존재하는 시간대(5시부터 20시까지) 데이터를 활용하였으며, 해당 조건을 충족하는 2016년 11월 9일부터 2017년 4월 19일까지의 43일간 데이터를 분석 대상으로 선정하였다. 나머지 데이터는 모델 검증에 사용되었다. 모델 개발에 사용된 데이터의 수집 기간은 Table 2에 제시되어 있다.

비공조 상태 데이터를 사용한 이유는 STPV 모듈의 실내 측 표면 온도에 영향을 미치는 외부 환경 요인을 분석하는 데 있어, 냉방 및 난방 시스템의 간섭을 배제하기 위함이다. 전처리 과정에서는 결측치와 이상치를 제거하여 신뢰성 있는 데이터를 확보하였으며, 데이터는 15분 간격으로 수집되었다. 발전량(Wh) 데이터는 모듈의 면적 차이를 보정하기 위해 모듈 면적당 발전량(Wh/m^2)으로 변환하여 분석에 사용하였다. 정제된 데이터는 STPV 모듈의 표면 온도 예측 모델을 개발하고 검증하는 데 활용되었으며, 수집된 데이터의 각 변수와 단위는 Table 3에 제시되어 있다.

Table 2 Analysis Period for Model Development (Total 43 Days)

Year	2016			2017		
Month	11	12	1	2	3	4
Start Date	9	21	17	4	7	11
End Date	15	27	21	10	14	19

Table 3 Description of Mock-Up Data

Category	Variable	Abbreviation	Unit
Environmental Data	Horizontal Solar Irradiance, Tilted Solar Irradiance	GHI, GTI	W/m^2
	Outdoor Temperature	OT	$^{\circ}\text{C}$
	Humidity	RH	%
	Wind Speed	WS	m/s
Module Data	Power Generation per Unit Area	PPA	Wh/m^2
	Indoor Surface Temperature of Module	MT	$^{\circ}\text{C}$

4. STPV 모듈 실내 측 표면 온도 예측 모델

4.1 피어슨 상관분석

STPV 표면 온도에 영향을 미치는 요인을 파악하고, 예측 모델의 입력 변수를 선정하기 위해 피어슨 상관분석을 실시하였다. 상관분석은 수평면 일사량(GHI), 경사면 일사량(GTI), 외기 온도(OT), 상대습도(RH), 풍속(WS) 등의 환경적 요인과 모듈 면적당 발전량(PPA)을 모듈의 실내 측 표면 온도(MT)와 비교하여 수행하였다.

분석 결과, 결정질 모듈(c-Si)과 박막형 모듈(a-Si) 모두 경사면 일사량과 모듈 면적당 발전량이 표면 온도에 가장 높은 양의 상관성을 보였다. 상대습도는 유일하게 음의 상관성을 나타냈으며, 외기 온도는 표면 온도와 중

간 수준의 상관성을 보였다. 반면, 풍속은 상대적으로 낮은 상관성을 보여 모델에 포함하지 않았다.

이에 따라, 예측 모델의 입력 변수로 모듈 면적당 발전량, 외기 온도, 상대습도를 선정하였다. 외기 온도는 표면 온도에 직접적인 열적 영향을 미치기 때문에 포함되었으며, 상대습도는 음의 상관성을 나타내어 실내 온도와 외기의 반비례 관계를 반영하였다. 경사면 일사량은 모듈 면적당 발전량과의 높은 상관성으로 인해 중복을 방지하기 위해 제외하였다. 상관분석 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 시각적으로 표현되어 있다. Fig. 3은 결정질 모듈의 상관관계를, Fig. 4는 박막형 모듈의 상관관계를 나타내며, 각 변수의 상관성을 시각적으로 확인할 수 있다.



Fig. 3 Pearson Correlation Analysis of c-Si



Fig. 4 Pearson Correlation Analysis of a-Si

4.2 다중회귀분석

피어슨 상관분석을 통해 선정된 변수들을 활용하여, STPV 모듈의 실내 측 표면 온도(MT)를 예측하기 위한 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 수행하였다. 다중회귀분석에서는 모듈 면적당 발전량(PPA), 외기 온도(OT), 상대습도(RH)를 독립변수로 설정하고, 모듈의 실내 측 표면 온도를 종속변수로 설정하여 각 변수의 영향력을 평가하였다. 분석 결과를 바탕으로 STPV 표면 온도를 예측하는 회귀 모델 식은 식(1)과 같다.

$$MT = B_0 + B_1 \times PPA + B_2 \times OT + B_3 \times RH \quad (1)$$

여기서, B_0 은 상수항, B_1 , B_2 , B_3 는 각각 모듈 면적당 발전량, 외기 온도, 상대습도의 비표준화 회귀계수(B)이다.

분석 결과는 Table 4와 Table 5에 요약되어 있다. Table 4는 결정질 모듈(c-Si)의 회귀계수(B) 및 표준화 회귀계수(β)를, Table 5는 박막형 모듈(a-Si)의 회귀계수(B) 및 표준화 회귀계수(β)를 나타낸다. B 계수는 변수의 실제 단위를 반영하여 표면 온도의 절대적인 변화를 설명하며, β 계수는 각 독립변수가 종속변수에 미치는

상대적 영향력을 나타낸다.

Table 4 Surface Temperature Prediction Model for c-Si

Variable	Unstandardized Coefficient			t
	B	Standard error of estimate	β	
(constant)	11.454	0.616		18.586
Power Generation per Unit Area	1.928	0.029	0.656	65.463
Outdoor Temperature	1.128	0.021	0.464	53.238
Relative Humidity	-0.132	0.008	-0.171	-17.073

Table 5 Surface Temperature Prediction Model for a-Si

Variable	Unstandardized Coefficient			t
	B	Standard error of estimate	β	
(constant)	10.594	0.514		20.602
Power Generation per Unit Area	8.950	0.104	0.712	85.933
Outdoor Temperature	1.158	0.018	0.464	63.893
Relative Humidity	-0.116	0.007	-0.147	-17.767

4.3 모델 검증

모델의 예측 정확성을 평가하기 위해, 2016년 5월 13일부터 2016년 10월 8일까지의 데이터를 사용하여 검증을 수행하였다. 이 데이터는 모델 개발에 사용된 2016년 11월부터 2017년 4월까지의 데이터와 다른 시기의 데이터로, 모델이 다양한 환경에서도 일관된 예측 성능을 보이는지 평가하기 위함이다. 검증에 사용된 데이터 수집 기간은 Table 6에 제시되어 있으며, 각 월별 측정 시작일과 종료일이 정리되어 있다.

Table 6 Analysis Period for Model Validation (Total 44 Days)

Year		2016				
Month	5	6	7	8	9	10
Start Date	13	14	26	17	14	1
End Date	21	20	31	21	22	8

검증 결과, 결정질 모듈(c-Si)의 결정계수(R^2) 값은 0.851, 박막형 모듈(a-Si)의 결정계수(R^2) 값은 0.897로, 두 모델 모두 높은 예측 성능을 보였다. 이 결과는 Fig. 5와 Fig. 6의 산점도에서도 확인할 수 있으며, 이를 통해

개발된 모델이 새로운 데이터에서도 표면 온도 변화를 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

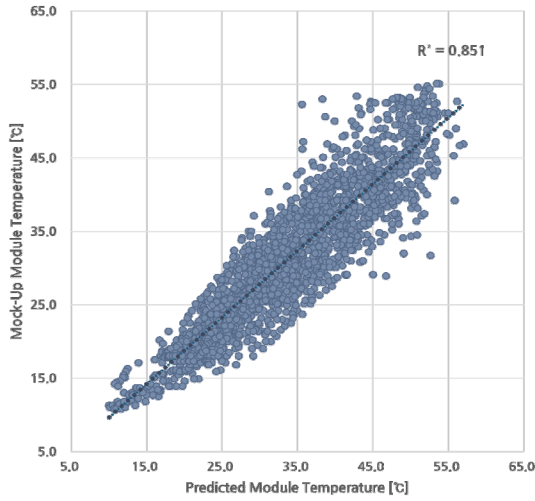


Fig. 5 Scatter plot of c-Si

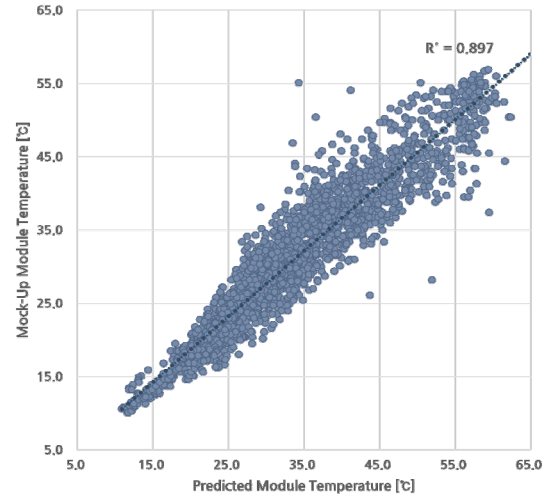


Fig. 6 Scatter plot of a-Si

5. STPV 열전달 분석 및 모델 적용 평가

5.1 열전달량 산출 및 분석

STPV 모듈의 발전으로 인해 발생하는 열이 실내로 유입되거나 외부로 손실되는 양을 평가하기 위해, 총 열전달량(Q_{total})을 산출하였다. 총 열전달량은 복사 열전달량(Q_{rad})과 대류 열전달량(Q_{conv})의 두 가지 메커니즘으로 구성되며, 모듈의 표면 온도와 실내 온도를 기준으로 계산되었다.

$$Q_{rad} = \epsilon \times \sigma \times A \times (T_{surface}^4 - T_{indoor}^4) \quad (2)$$

$$Q_{conv} = h \times A \times (T_{surface} - T_{indoor}) \quad (3)$$

$$Q_{total} = Q_{rad} + Q_{conv} \quad (4)$$

열전달량 산출 과정에서는 예측 열전달량($Q_{predicted}$)과 시뮬레이션 열전달량($Q_{simulated}$)을 비교하였다. 예측 열전달량은 표면 온도 예측 모델을 통해 계산된 표면 온도와 시뮬레이션 상의 실내 온도를 기반으로 산출되며, 발전에 따른 표면 온도 변화가 반영된 열전달량을 의미한다. 반면, 시뮬레이션 열전달량은 기존 시뮬레이션 데이터에서 산출된 표면 온도와 실내 온도를 기반으로 산출되며, 발전에 따른 표면 온도 변화가 반영되지 않은 열전달량을 의미한다. 두 열전달량을 비교하여 추가 열전달량($Q_{additional}$)을 도출하였으며, 이는 식(5)와 같이 정

의된다.

$$Q_{\text{additional}} = Q_{\text{predicted}} - Q_{\text{simulated}} \quad (5)$$

$Q_{\text{additional}} \geq 0$ 인 경우, STPV 발전으로 인해 실내로 추가적인 열 유입이 발생함을 의미하며, 반대로 $Q_{\text{additional}} < 0$ 인 경우, STPV 발전이 실내 열환경에 유의미한 영향을 미치지 않음을 의미한다. 따라서, $Q_{\text{additional}} \geq 0$ 경우만 발전으로 인해 실내 열유입이 발생한다고 판단할 수 있으며, 이러한 상황에서만 모델의 적용이 필요하다.

5.2 모델 적용 조건 설정

표면 온도 예측 모델은 STPV 발전이 활발히 이루어지는 9시부터 17시 사이의 시간대에만 적용되도록 설정하였다. 이 시간대는 일사량이 충분하여 발전이 실제로 이루어지는 시점으로, 실내 열유입의 변화를 평가하기에 적합하다.

모델 적용 여부는 모듈 면적당 발전량(PPA)과 직전 시간대의 모듈 면적당 발전량(previous PPA)을 기준으로 판단하며, STPV 발전이 실내 열환경에 유의미한 영향을 미치는 경우에만 모델이 적용되도록 설계되었다. Fig. 7과 Fig. 8은 모델 적용 여부를 판단하기 위한 알고리즘을 나타내며, 각각 결정질 모듈(c-Si)과 박막형 모듈(a-Si)에 적용된 알고리즘 단계를 제시한다.

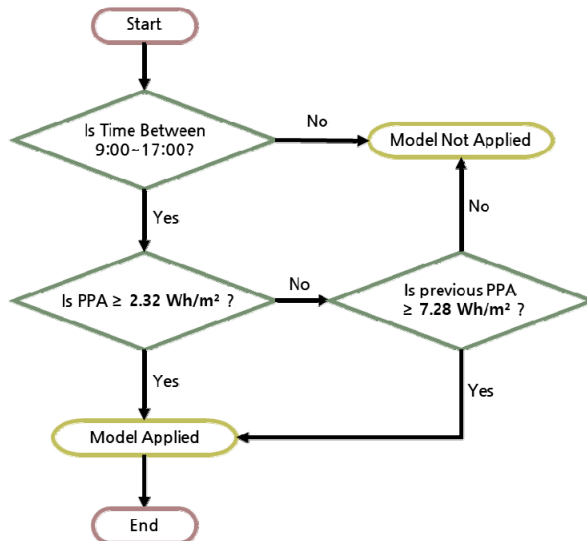


Fig. 7 Flowchart of Model Application for c-Si

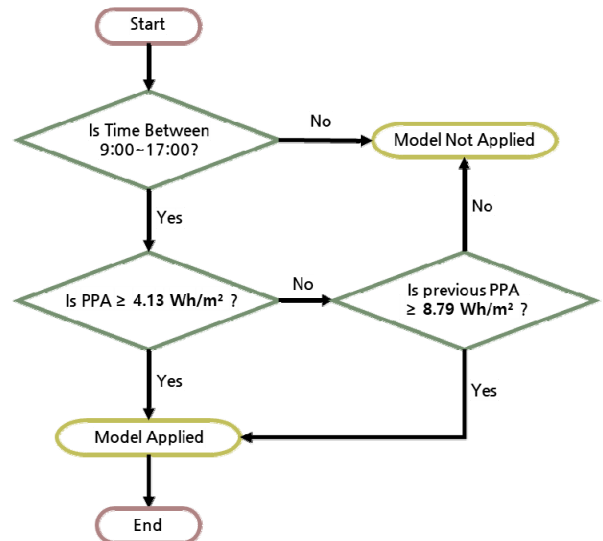


Fig. 8 Flowchart of Model Application for a-Si

결정질 모듈의 경우, 모듈 면적당 발전량이 2.32 Wh/m^2 이상일 때 $Q_{\text{predicted}} \geq Q_{\text{simulated}}$ 조건이 성립하여 모델이 적용된다. 반면, 모듈 면적당 발전량이 2.32 Wh/m^2 미만일 때는 $Q_{\text{predicted}} < Q_{\text{simulated}}$ 가 나타나 발전으로 인

한 추가 열유입이 발생하지 않으므로 모델을 적용하지 않는다. 다만, 모듈 면적당 발전량이 기준치 이하라도 직전 시간대의 모듈 면적당 발전량이 7.28 Wh/m^2 이상일 경우, 잔류 열의 영향으로 $Q_{\text{predicted}} \geq Q_{\text{simulated}}$ 조건이 유지되어 예외적으로 모델이 적용된다(Fig. 9).

박막형 모듈의 경우, 모듈 면적당 발전량이 4.13 Wh/m^2 이상일 때 $Q_{\text{predicted}} \geq Q_{\text{simulated}}$ 조건이 성립하여 모델이 적용된다. 반면, 모듈 면적당 발전량이 4.13 Wh/m^2 미만일 때는 $Q_{\text{predicted}} < Q_{\text{simulated}}$ 가 나타나므로 모델을 적용하지 않는다. 다만, 모듈 면적당 발전량이 기준치 이하라도 직전 시간대의 모듈 면적당 발전량이 8.79 Wh/m^2 이상일 경우, 잔류 열의 영향으로 $Q_{\text{predicted}} \geq Q_{\text{simulated}}$ 조건이 유지되어 예외적으로 모델이 적용된다(Fig. 10).



Fig. 9 Analysis results of c-Si

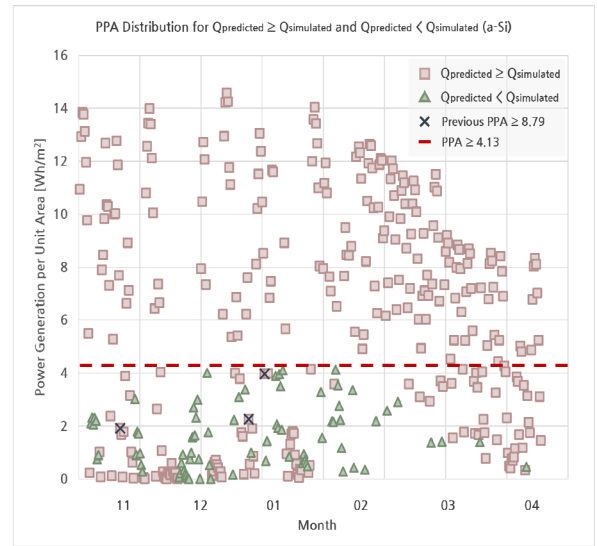


Fig. 10 Analysis results of a-Si

6. 결론

본 연구는 STPV 모듈의 발전이 실내 열환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 실내 측 표면 온도 예측 모델을 개발하고, 발전 조건에 따른 모델 적용 기준을 설정하였다. EnergyPlus와 같은 기존 에너지 해석 도구가 STPV 발전 시 발생하는 열적 특성을 반영하지 못하는 한계를 보완하고자, 발전에 따른 표면 온도 변화와 실내 온도 간의 관계를 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 예측 열전달량($Q_{\text{predicted}}$)과 시뮬레이션 열전달량($Q_{\text{simulated}}$)의 차이를 분석하여, 모델이 실제로 적용될 수 있는 조건을 설정하였다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 모듈 면적당 발전량(PPA), 외기 온도(OT), 상대습도(RH)가 STPV 표면 온도에 영향을 미치는 주요 변수로 확인되었으며, 이를 바탕으로 실내 측 표면 온도 예측 모델을 구축하였다.
- 결정질 모듈(c-Si)은 모듈 면적당 발전량이 2.32 Wh/m^2 이상일 때, 박막형 모듈(a-Si)은 모듈 면적당 발전

량이 4.13 Wh/m^2 이상일 때 예측 모델을 적용하도록 설정하였다. 또한, 잔류 열효과를 반영하여 직전 시간대 모듈 면적당 발전량이 높은 경우에는 모듈 면적당 발전량이 기준치 이하일 때도 예외적으로 모델을 적용할 수 있도록 조건을 보완하였다.

본 연구는 STPV 모듈의 열전달 특성을 정확하게 평가하고, 이를 기반으로 모델 적용 조건을 명확히 설정하여 기존 에너지 해석의 한계를 보완하고자 하였다. 연구 결과는 STPV 모듈을 건물에 적용할 때 실내 열환경 변화를 예측하고, 에너지 성능을 개선하는 데 기여할 것이다.

후기

본 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 제원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2022R1A2C1004879).

REFERENCES

1. International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2023, 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. last accessed on the 24th September 2024.
2. Oliveira, C. C. de, Vaz, I. C. M., and Ghisi, E., Retrofit Strategies to Improve Energy Efficiency in Buildings: An Integrative Review, *Energy and Buildings*, Vol. 321, 114624, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114624>.
3. Yurter, G., Nadar, E., and Kocaman, A. S., The Impact of Pumped Hydro Energy Storage Configurations on Investment Planning of Hybrid Systems with Renewables, *Renewable Energy*, Vol. 222, 119906, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119906>.
4. Yu, G., Yang, H., Luo, D., Cheng, X., and Ansah, M. K., A Review on Developments and Researches of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Windows and Shading Blinds, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 149, 111355, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111355>.
5. Grynning, S., Gustavsen, A., Time, B., and Jelle, B. P., Windows in the Buildings of Tomorrow: Energy Losers or Energy Gainers?, *Energy and Buildings*, Vol. 61, pp. 185-192, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.029>.
6. Aste, N., Buzzetti, M., Del, P. C., and Leonforte, F., Glazing's Techno-Economic Performance: A Comparison of Window Features in Office Buildings in Different Climates, *Energy and Buildings*, Vol. 159, pp. 123-135, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.088>.
7. Kumar, N. M., Sudhakar, K., and Samykano, M., Performance Comparison of BAPV and BIPV Systems with c-Si, CIS and CdTe Photovoltaic Technologies under Tropical Weather Conditions, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 13, 100374, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100374>.
8. Rodrigues, T., Carlo, J. C., Simulação Térmica de Sistemas BIPV por meio do EnergyPlus, Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, pp. 808-817, September 2017, Balneário Camboriú, Republic of Brazil.
9. Wong, P. W., Shimoda, Y., Nonaka, M., Inoue, M., and Mizuno, M., Semi-Transparent PV: Thermal Performance, Power Generation, Daylight Modelling and Energy Saving Potential in a Residential Application, *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 1024-1036, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.016>.
10. Wang, M., Peng, J., Li, N., Lu, L., and Yang, H., Experimental Study on Thermal Performance of Semi-

- Transparent PV Window in Winter in Hong Kong, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 864-868, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.402>.
11. Zhu, Y., Luo, D., and Yu, G., Simulation Study of Thermal Performance on the Inner and Outer Surfaces of Semi-Transparent Photovoltaic (STPV) Glass with Different Transparency, *Scientific Journal of Technology*, Vol. 6, No. 6, pp. 1-13, 2024, <https://doi.org/10.54691/sm880e49>.
 12. Wang, H., Lin, C., Hu, Y., Zhang, X., Han, J., and Cheng, Y., Study on Indoor Adaptive Thermal Comfort Evaluation Method for Buildings Integrated with Semi-Transparent Photovoltaic Window, *Building and Environment*, Vol. 228, 109834, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109834>.
 13. Yao, L., Zhang, W., Huang, F., Zhao, R., and Tang, K., Experimental and Simulation Study on the Thermoelectric Performance of Semi-Transparent Crystalline Silicon Photovoltaic Curtain Walls, *Journal of Building Engineering*, Vol. 90, 109421, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109421>.
 14. Rodrigues, T., Carlo, J., and Oliveira Filho, D., Thermal Modeling of Semi-Transparent Photovoltaics: Impacts on the Cell Efficiency and on the Zone Performance, *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Vol. 9, No. 4, pp. 305-318, 2018, <https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8652785>.