

Color BIPV 모듈 성능 예측을 위한 모델 분석

신연배^{1,2} · 김규광¹ · 조용현¹ · 조영호¹ · 양태열^{3†}

¹충북테크노파크 차세대에너지센터, 전임연구원

²충남대학교 신소재공학과, 박사과정

³충남대학교 신소재공학과, 부교수

Prediction Model For Colored BIPV Modules

Shin Yeon-Bae^{1,2} · Kim Gyu-Gwang¹ · Cho Yong-Hyun¹ · Cho Young-Ho¹ · Yang Tae-Youl^{3†}

¹Associate Researcher, Next Generation Energy Center, Chungbuk Technopark

²Ph.D. Candidate, Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University

³Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University

†Corresponding author: taeyyang@cnu.ac.kr

Abstract

Adding various colors to photovoltaic (PV) modules is essential for the building-integrated photovoltaics (BIPV) market; however, it can also reduce PV performance and increase manufacturing costs. Therefore, a tool is required to predict PV performance based on color before production of PV modules. In this study, we demonstrate an approach for predicting the performance of colored PV modules before they are produced. First, we analyzed the optical properties of various colors of polyvinyl chloride (PVC) films available in the market and their correlation with power. A total of 15 prediction models were trained. Then, we manufactured colored films for BIPV, predicted their power using the trained models, and compared the predictions with actual power values. Additionally, we validated and optimized the prediction models using mean absolute error (MAE) and root mean squared error (RMSE). We achieved a low MAE of 3.8% and an RMSE of 4.3% using a prediction model formula that consisted of transmittance or a combination of transmittance and absorption. This approach offers several advantages, such as the ability to predict the performance based solely on the optical properties of front-colored films or glass used in colored BIPV without the need for sample production, which can save time and resources.

Keywords: 건물일체형 태양광발전시스템(Building integrated photovoltaic (BIPV)), 컬러 BIPV 모듈(Colored BIPV module), 태양광 모듈 출력 예측(Photovoltaic module power prediction), 상관계수(Correlation coefficients)

1. 서론

2020년 제로에너지 빌딩 시스템이 도입된 이후 건물일체형 태양광발전시스템(BIPV : Building Integrated Photovoltaic)은 시장에서 급속히 성장하고 있다^{1,2)}. 2021년 172억 2,600만 달러였던 BIPV 세계시장 규모는 2026년에는 407억 6,300만 달러까지 증가할 것으로 전망된다³⁾. BIPV는 태양광 모듈을 활용해 건물을 디자인하면서 건물에 필요한 에너



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.6, pp.67-77, December 2023
<https://doi.org/10.7836/kses.2023.43.6.067>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 22 October 2023

Revised: 6 November 2023

Accepted: 13 November 2023

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.

지를 생산하는 태양광발전 시설로 하나 이상의 기능을 제공하는 동시에 현장에서 재생가능 에너지를 생산한다는 장점을 가지고 있기 때문에 일반 태양광 모듈 대비 높은 가격에도 불구하고 유럽을 중심으로 이미 BIPV는 보편화가 되어있으며, 국내 시장에서 또한 주요시장으로 자리 잡고 있다^{4,5)}. 건축학적 관점으로 볼 때, BIPV는 미적 요구를 충족시키기 위해 크기, 외관(색상, 질감) 및 모양에 있어 높은 가변성을 가져야 하지만 태양광 모듈에 색을 입힌다는 것은 입사광의 일부가 반사되어 에너지 수율의 감소를 의미한다⁶⁻⁸⁾. 또한 컬러를 구현하기 위한 추가적인 자재나 공정이 투입되어 태양광 모듈의 생산 단가를 높이는 요인으로 이어지게 된다. 따라서 건축을 하고 BIPV를 적용하는 데 있어서 초기단계에서 최적화된 계획을 세우려면 실제로 모듈을 제작하기 전에 특정 색상이나 질감에 대한 BIPV 모듈의 에너지 생산 수율을 아는 것이 매우 유리하다. 이에 모듈을 제작하지 않고 제작 전 단계에서 전면컬러의 특성만으로 태양광 모듈의 성능을 예측하는 프로세스가 필요시 되고 있다.

이에 본 연구에서는 태양광 모듈 제작 전 단계에서 컬러 BIPV 모듈의 성능을 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였고 이에 대한 정확성을 검증하는 연구를 수행하였다. 예측 모델을 제시하기 위해 시판되고 있는 Poly Vinyl Chloride (PVC) 재질의 컬러 필름 사용하였으며, BIPV용으로 제작된 컬러 폴리머 필름을 예측 모델에 적용하여 컬러 태양광 모듈의 성능을 예측하였다. 예측 모델을 위한 학습 방법으로는 머신러닝 학습모델 중 선형 회귀 분석법을 적용하였으며 실측값과 비교하여 정확도를 평가하였다.

2. 실험 개요

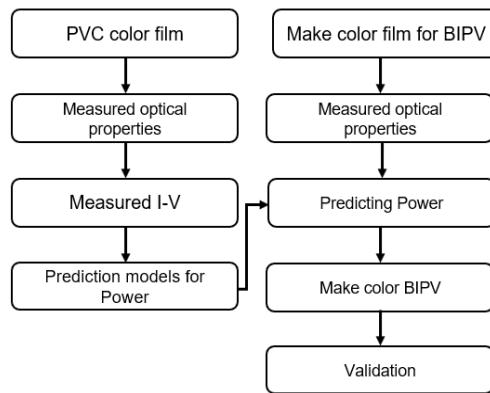


Fig. 1 Diagram for the model to predict the performance of colored BIPV modules

본 연구에서는 컬러 모듈 제작 전 단계에서 컬러 필름의 광학적 특성으로 모듈의 발전 성능을 예측할 수 있는 예측모델에 대한 연구를 진행하였다. 예측 모델을 위한 기초 데이터로 시판되고 있는 PVC 컬러 필름을 사용하였으며, PVC 컬러 필름의 광학 특성 그리고 컬러에 따른 태양전지 출력을 사용하였다. 광학 특성의 경우 SHIMADZU의 SolidSpec-3700을 사용하여 황산바륨(BaSO₄) 표준으로 투과율과 반사율 측정하였다. 태양전지의 출력은 DEKEN의 DKIVT-30 Cell IV Tester 시뮬레이터를 사용하였으며, IEC 규격에 명시된 태양전지 성능평가 조건인 Standard Test Condition (STC)에서 전압-전류를 측정하였다. 만들어진 예측모델을 기반으

로 모듈 제작 전 전면에 사용될 컬러 필름의 광학적 특성값을 대입하여 모듈의 발전 성능을 예측하였으며, 최종적으로 컬러 필름을 적용해 모듈을 제작 한 후 예측 성능과 실제 발전 성능을 비교하여 예측 모델을 최적화하였다. Fig. 1은 성능 예측 모델을 위한 전체적인 개략도이다.

3. 실험 결과

3.1 PVC 컬러필름의 광학 특성 및 모듈특성

예측 모델을 위해 12가지 컬러를 가지는 PVC 컬러 필름의 광학 특성을 측정하였다. PVC 컬러 필름의 색상은 빨강, 주황, 노랑, 초록, 파랑, 보라, 핑크, 형광주황, 형광노랑, 투명, 회색, 밤색이었으며 각 필름의 두께는 0.3 mm로 동일하였다. 측정된 PVC 컬러 필름의 투과, 반사, 흡수율은 Fig. 2과 같으며, 300 ~ 1200 nm 영역에서의 평균값과 PVC 컬러필름의 색 좌표계는 Table 1과 같다.

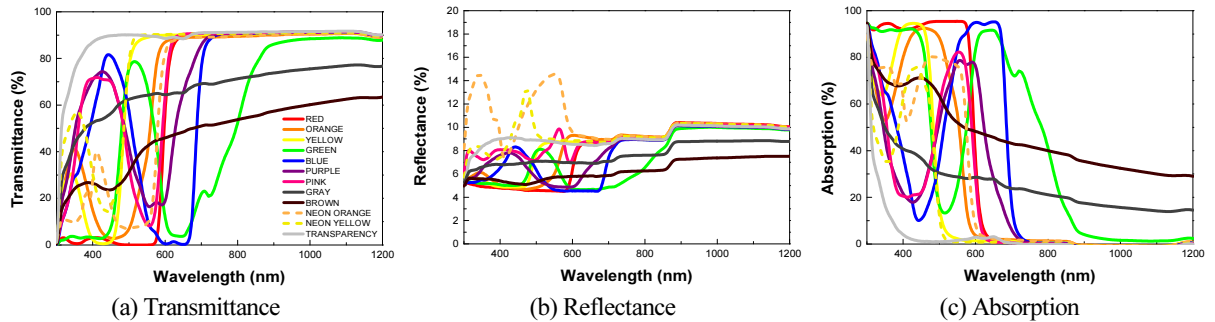


Fig. 2 Transmittance, reflectance and absorption of PVC color films. Absorption was calculated as : Absorption = 1 - (Transmittance + Reflectance)

Table 1 The average transmittance, reflectance and absorption rates in the 300 ~ 1200 nm and color coordinates of PVC color films

PVC color films	Transmittance [%]	Reflectance [%]	Absorption [%]	CIE 1976			E (= $\sqrt{L^2 + a^{*2} + b^{*2}}$)
				L	a*	b*	
Red	61.12	8.03	30.84	26.58	7.73	2.50	27.79
Orange	68.56	8.40	23.03	30.74	8.09	9.07	33.06
Yellow	73.90	8.46	17.62	33.95	-2.39	11.95	36.07
Green	51.59	7.31	41.09	29.75	-10.9	4.39	31.99
Blue	64.96	7.88	27.14	26.71	0.95	-10.28	28.64
Purple	71.80	8.16	20.03	27.13	3.6	-7.43	28.36
Pink	74.05	9.01	16.93	35.45	-2.88	3.46	35.73
Gray	66.18	7.69	26.02	31.40	-0.50	0.80	46.24
Brown	47.46	6.35	46.18	28.00	0.34	2.39	35.86
Neon orange	66.18	10.47	23.34	43.79	-14.18	4.41	34.74
Neon yellow	78.45	9.45	12.09	35.44	0.13	-5.45	31.41
Transparency	87.99	9.19	2.81	34.73	-0.36	-0.49	28.10

색 좌표는 PVC 필름의 컬러를 수치화하기 위해 D65 광원으로 10도 시야를 기준으로 측정되었으며 CIE (International Commission on Illumination)에 의해 CIE LAB의 색 좌표 L, a*, b*를 사용해서 표기하였다⁹⁾.

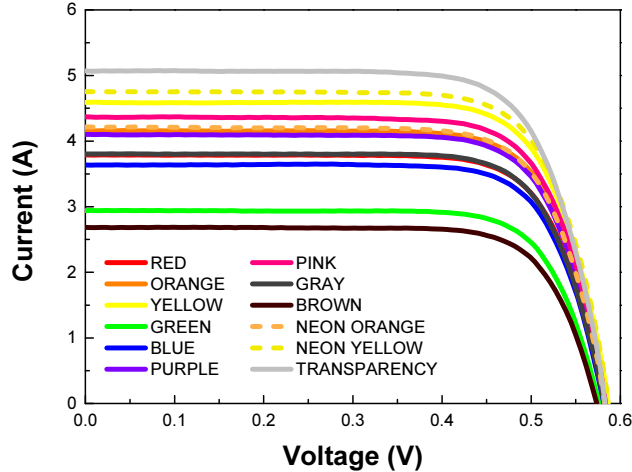


Fig. 3 I-V characteristics of PV modules based on front-side color PVC films

Table 2 Performance comparison of PV modules based on front-side PVC Colors

PVC color films	Voc [V]	Isc [A]	Vmax [V]	Imax [A]	Fill Factor [%]	Pmax [W]	Efficiency [%]
Red	0.58	3.78	0.47	3.53	75.50	1.66	12.50
Orange	0.58	4.17	0.47	3.82	74.30	1.79	13.50
Yellow	0.58	4.62	0.47	4.27	73.80	1.98	14.90
Green	0.57	2.95	0.46	2.75	75.20	1.26	9.50
Blue	0.57	3.66	0.46	3.36	74.30	1.56	11.70
Purple	0.57	4.13	0.46	3.82	73.80	1.75	13.20
Pink	0.58	4.36	0.46	4.04	73.90	1.86	14.00
Gray	0.57	3.81	0.46	3.52	74.70	1.63	12.30
Brown	0.57	2.69	0.46	2.50	75.00	1.14	8.60
Neon orange	0.58	4.21	0.46	3.89	73.80	1.79	13.50
Neon yellow	0.58	4.77	0.46	4.42	72.90	2.02	15.20
Transparency	0.58	5.09	0.45	4.68	72.50	2.13	16.00

12종의 PVC 컬러 필름이 전면이 적용된 모듈의 발전 성능 비교 평가를 위해 2.38 W 기준의 하프 셀 (Half-cut cell)을 사용하여 전압-전류 특성을 측정하였다. 전면 필름 컬러에 따른 전압-전류 특성은 Fig. 3과 같으며 각 모듈의 성능 정보는 Table 2와 같다. 전면 컬러에 따른 태양전지의 전압-전류 특성을 측정한 결과 형광노랑(Neon yellow), 노랑(Yellow), 핑크(Pink) 순으로 높은 발전효율을 보인 반면에 갈색(Brown) 필름을 적용한 모듈에서 가장 낮은 발전효율을 보였다. 이는 Table 1에서 PVC 컬러 필름의 투과율과 비례하는 것으로 나

타난다. 또한 PVC 컬러 필름을 사용해서 셀에서 모듈화하였을때의 출력감소율(CTM loss)과 PVC 컬러 필름의 투과율 감소값(100-Transmittance)의 색상에 따른 경향이 Fig. 4와 같이 서로 일치한다. 이를 통해, 태양전지 전면에 사용되는 컬러 필름의 투과율이 발전 성능에 직접적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

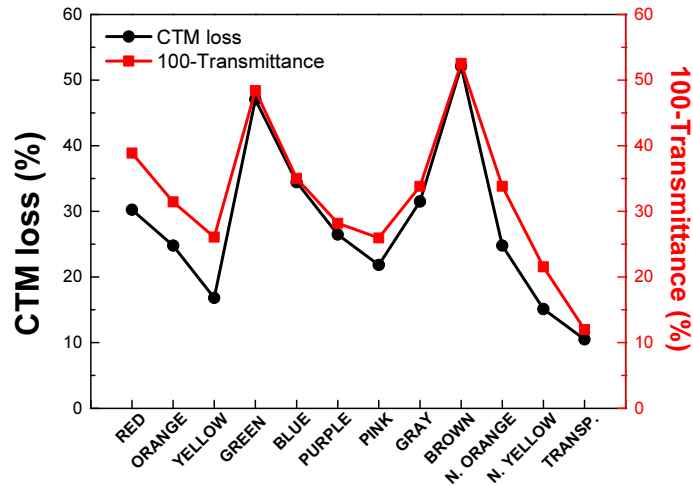


Fig. 4 The transmittance reduction values (100 - Transmittance) of PVC film colors and the losses when using PVC color films to create modules (CTM loss) (N. = Neon, TRANSP. = Transparency)

3.2 상관관계 분석 및 예측 모델

상관관계 분석은 두 변수의 연관성을 분석하는 기법으로 상관계수를 이용하여 표현한다. 상관계수 도출은 일반적으로 Pearson, Kendall, Spearman 등의 방법을 사용하지만 해당 논문에서는 Pearson 상관계수를 이용하여 필름의 광학 특성과 출력 간의 상관관계 분석을 진행하였다. 상관계수의 경우 두 변수의 연관성이 비례하는 관계일 경우 양의 관계를 가지며, 반대로 반비례 하는 관계일 때는 음의 값을 가진다. 상관관계는 R 프로그램이 이용하여 분석하였으며 Fig. 5에 필름의 광학 특성과 출력 사이의 상관관계를 나타냈다.

일반적으로 태양광 모듈에서 태양전지에 입사되는 빛이 많을수록 높은 효율을 보인다. 이 때문에 전면 유리 또는 필름의 투과율은 높고 반대로 반사율은 낮아야 고출력에 유리하다. 상관관계 분석에서도 PVC 컬러 필름의 투과율과 출력의 관계가 0.96인 강한 양의 상관관계로 투과율이 발전 성능에 직접적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 반사율 또한 양의 상관관계가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 300 ~ 1200 nm 영역에서의 색상별 평균값의 차이가 미미하여 상대적으로 출력에 의존도가 강한 투과율에 기인하기 때문인 것으로 보인다. 색 좌표의 경우 상관관계 분석을 위해서 L, a*, b*를 상수화(E)하였다. E의 경우 출력과 양의 관계를 가지므로 나타났다. 이는 색 좌표의 반사특성 이외에도 색상에 따라 태양전지 표면 온도 변화율이 달라져 작동 성능에 기인하기 때문에 출력과의 상관관계에 영향을 주는 것으로 나타난다¹⁰⁾.

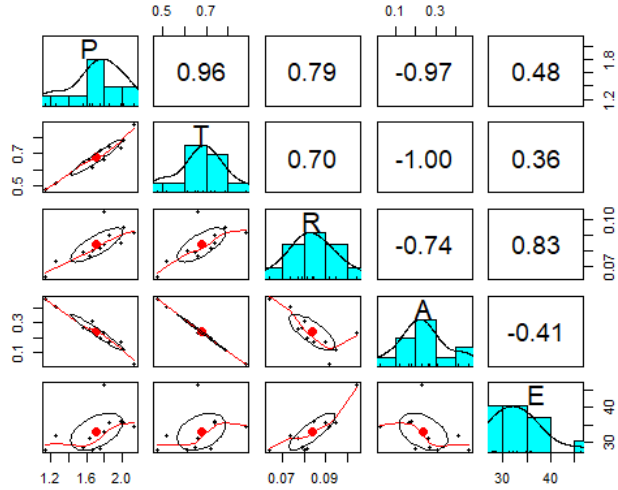


Fig. 5 Pairwise scatter plots and correlation coefficients between Pmax and optical properties of the PVC film. P : Pmax, T : Transmittance, R : Reflectance, A : Absorption, E : $\sqrt{L^2 + a^{*2} + b^{*2}}$

Table 3은 태양전지 전면에 컬러필름을 적용했을 때 출력을 예측하기 위한 모델이다. 변수를 조합하여 15가지 예측 모델을 구현하였으며 회귀계수 α , β , γ , δ 를 산출하였다. 또한 결정계수(R-squared)를 산출하여 성능 평가 척도로 사용하였다. 결정계수는 독립변수가 종속변수를 얼마나 잘 설명하는지를 나타내는 지표이며 상관관계가 높을수록 1에 가까워진다. 예측 모델에서는 P₁₁과 P₁₅가 0.9988로 가장 큰 결정계수를 나타냈으며 반대로 P₃가 가장 작은 결정계수를 나타냈다. 또한 투과를 변수로 사용한 예측 모델이 그렇지 않은 예측 모델보다 1에 가까운 결정계수를 갖는 것으로 나타났다.

Table 3 Pmax prediction model combining transmittance, reflectance, absorbance, and color coordinates

Model	Equations	α	β	γ	δ	R-squared
P ₁	αT_m	2.53225	-	-	-	0.9980
P ₂	βR_m	-	20.4949	-	-	0.9902
P ₃	γA_m	-	-	5.41	-	0.6804
P ₄	δE_m	-	-	-	0.051137	0.9750
P ₅	$\alpha T_m + \beta R_m$	2.0613	3.8504	-	-	0.9985
P ₆	$\alpha T_m + \gamma A_m$	2.53889	-	-0.02079	-	0.998
P ₇	$\alpha T_m + \delta E_m$	2.262673	-	-	0.00559	0.9984
P ₈	$\beta R_m + \gamma A_m$	-	22.4422	-0.7226	-	0.9934
P ₉	$\beta R_m + \delta E_m$	-	33.41191	-	-0.03259	0.9929
P ₁₀	$\gamma A_m + \delta E_m$	-	-	-0.84105	0.05898	0.9791
P ₁₁	$\alpha T_m + \beta R_m + \gamma A_m$	1.8624	6.1196	-0.2461	-	0.9988
P ₁₂	$\alpha T_m + \beta R_m + \delta E_m$	2.036888	4.528438	-	-0.00121	0.9985
P ₁₃	$\alpha T_m + \gamma A_m + \delta E_m$	2.18888	-	-0.19999	0.008446	0.9986
P ₁₄	$\beta R_m + \gamma A_m + \delta E_m$	-	31.69572	-0.57869	-0.02433	0.9948
P ₁₅	$\alpha T_m + \beta R_m + \gamma A_m + \delta E_m$	1.85159	6.42779	-0.24557	-0.00056	0.9988

3.3 컬러 BIPV용 필름 제작 및 출력예측

BIPV 모듈용 컬러 필름은 Polyethylene Terephthalate (PET) film + 컬러 안료 + 접착제 + PET film + Barrier coating으로 구성하였다. 컬러 안료를 조절하여 색상을 구현하였으며, 색상은 빨강, 노랑, 초록, 파랑, 보라, 핑크, 투명 총 7가지로 구현하였다. 제작된 필름의 광학적 특성은 Fig. 6과 같으며 출력예측에 사용한 평균 투과율, 반사율, 흡수율 그리고 색 좌표는 Table 4와 같다.

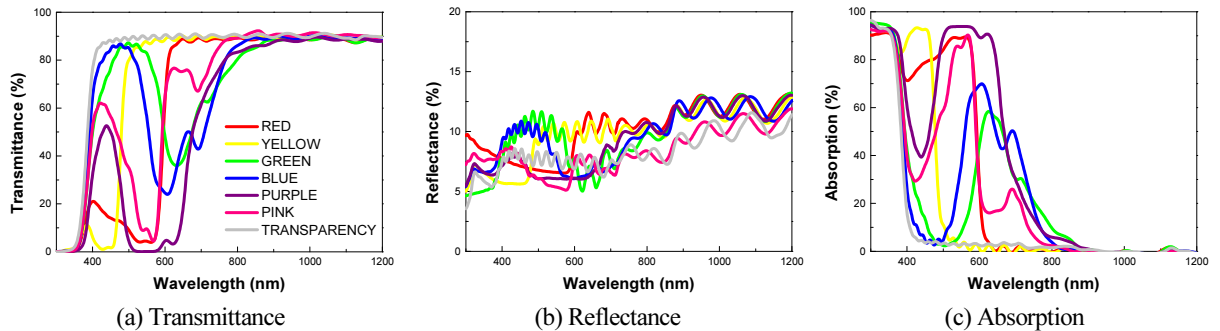


Fig. 6 Transmittance, reflectance and absorption of color films for BIPV modules. Absorption was calculated as : Absorption = 1 - (Transmittance + Reflectance)

Table 4 The average transmittance, reflectance and absorption rates in the 300 ~ 1200 nm and color coordinates of color films for BIPV

BIPV color films	Transmittance [%]	Reflectance [%]	Absorption [%]	CIE 1976			E (= $\sqrt{L^2 + a^{*2} + b^{*2}}$)
				L	a*	b*	
Red	62.41	10.13	27.45	31.67	7.81	0.97	32.63
Yellow	71.86	9.83	18.31	36.34	-2.54	12.71	38.58
Green	69.79	9.63	20.58	35.58	-8.44	-2.33	36.64
Blue	68.13	9.60	22.27	32.61	-6.22	-8.08	34.17
Purple	55.05	9.28	35.66	29.41	2.54	-4.63	29.88
Pink	66.67	8.40	24.94	29.26	10.79	-6.12	31.78
Transparency	81.36	8.34	10.30	29.06	5.91	-4.57	30.00

컬러 BIPV 모듈은 컬러필름 + EVA + Solar cell + EVA + Backsheet으로 구성하였으며, 예측 모델 식에 사용한 같은 타입의 태양전지를 사용하였다. BIPV용 컬러 필름을 전면에 적용해 제작한 모듈의 출력은 투명, 노랑, 핑크, 초록, 파랑, 빨강, 보라 순서로 높은 출력을 보였다. 이는 필름의 평균 투과율이 높은 순서와 상이한데, 핑크(66.77%) 필름의 경우 평균 투과율이 초록(69.79%), 파랑(68.13%) 필름보다 낮은 반면 출력 측면에서는 높은 값을 보였다. 그 이유는 평균투과율은 유사하지만 실리콘 태양전지의 주요 흡수 스펙트럼 대인 600 nm ~ 900 nm¹¹⁾ 영역에서 핑크 필름의 투과율이 높았기 때문으로 분석된다.

BIPV용 컬러 필름이 적용된 모듈의 출력을 예측하기 위해 측정된 광학 특성을 예측 모델에 적용하였다.

Table 5의 15가지 모델에 측정된 투과(T_m), 반사(R_m), 흡수(A_m) 그리고 색차값(E_m)을 적용해서 각 필름 색상에 따른 출력을 예측하였고, 실제 출력값과 비교하여 Table 5에 표기하였다. 또한 모델의 평가지표로 MAE (Mean absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error)를 사용하여 각 모델의 성능을 평가하였다. MAE는 실제값과 예측값의 차이를 절댓값으로 변환한 뒤 평균을 구하여 도출하며, 예측한 값과 실제값의 차이를 의미한다. RMSE는 실제값과 추정값의 오차를 제곱하여 평균한 값의 제곱근 오차를 사용하는 방법으로 표준편차를 일반화시킨 척도로서 실제 값과 추정값의 차이인 오차의 양을 타내는데 사용한다¹²⁻¹⁴. MAE와 RMSE 값은 작을수록 예측값과 실제 값의 정확도가 높다는 것을 의미한다. MAE와 RMSE는 식(1)과 식(2)으로 나타낼 수 있다^{5,16}.

$$MAE(Mean Absolute Error) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{1}$$

$$RMSE(Root Mean Squared Error) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2} \tag{2}$$

Table 5 Comparison data of actual power and estimated values based on the prediction models and colors

	Red [W]	Yellow [W]	Green [W]	Blue [W]	Purple [W]	Pink [W]	Transparency [W]	MAE [%]	RMSE [%]
$P_{measur.}$	1.66	1.94	1.74	1.71	1.35	1.79	2.13	-	-
P_1	1.58	1.82	1.77	1.73	1.39	1.69	2.06	3.8	4.3
P_2	2.08	2.01	1.97	1.97	1.90	1.72	1.71	15.2	17.7
P_3	1.49	0.99	1.11	1.20	1.93	1.35	0.56	78.7	117
P_4	1.67	1.97	1.87	1.75	1.53	1.63	1.53	10.3	16.1
P_5	1.68	1.86	1.81	1.77	1.49	1.70	2.00	4.9	5.5
P_6	1.58	1.82	1.77	1.73	1.39	1.69	2.06	3.8	4.3
P_7	1.59	1.84	1.78	1.73	1.41	1.69	2.01	4.3	4.6
P_8	2.08	2.07	2.01	1.99	1.83	1.70	1.80	14.8	16.4
P_9	2.32	2.03	2.02	2.09	2.13	1.77	1.81	17.2	20.8
P_{10}	1.69	2.12	1.99	1.83	1.46	1.66	1.68	10.2	12.5
P_{11}	1.71	1.89	1.84	1.80	1.51	1.69	2.00	5.5	6
P_{12}	1.69	1.86	1.81	1.78	1.51	1.70	2.00	5.2	5.7
P_{13}	1.59	1.86	1.80	1.74	1.39	1.68	2.01	4.1	4.4
P_{14}	2.26	2.07	2.04	2.08	2.01	1.74	1.85	16.6	19.2
P_{15}	1.72	1.90	1.84	1.80	1.51	1.70	2.00	5.6	6.1

투과(T), 반사(R), 흡수(A) 그리고 색차값(E)으로 조합된 15개의 예측 모델 중 P_1, P_6 에서 가장 낮은 MAE와 RMSE를 보였다. 이는 각각 투과(T), 투과(T) + 흡수(A)로 구성된 모델 식으로 약 3.8%의 MAE와 4.3%의 RMSE를 보였다. 반면 흡수로만 구성된 예측 모델 P_3 에서 78.7%, 117%로 가장 높은 MAE와 RMSE를 보였다.

예측 모델 P₃ 경우 빨강 필름을 제외하고 모두 30% 이상의 오차를 보였으며 특히 투명 필름에서 약 280%의 오차가 발생하여 평균 MAE와 RMSE 또한 높게 나타났다.

3.4 예측 모델 정확도 평가

예측 모델에 대한 평가 분석을 위해 예측 모델과 필름 색상에 따른 MAE를 비교하였다. Fig. 7(a)는 예측 모델 15개의 MAE 결과이다. 투과(T)를 변수로 한 1차 모델 식 P₁ (T) 그리고 투과(T)에 반사(R), 흡수(A), 색차(E)를 조합하여 변수로 활용한 2차 모델 식 P₅ (T+R), P₆ (T+A), P₇ (T+E)에서 오차가 낮은 경향을 보였다. 또한 15개 예측 모델의 평균 MAE가 13.3% 인 반면에 투과(T)가 변수로 사용된 예측 모델에서 4.6%의 평균 MAE를 보였는데, 7% 미만인 예측 모델들만 도출한 Fig. 7(b)에서도 4개 모델(P₁, P₆, P₇, P₁₃) 모두 투과(T)가 변수로 활용되었음을 알 수 있다.

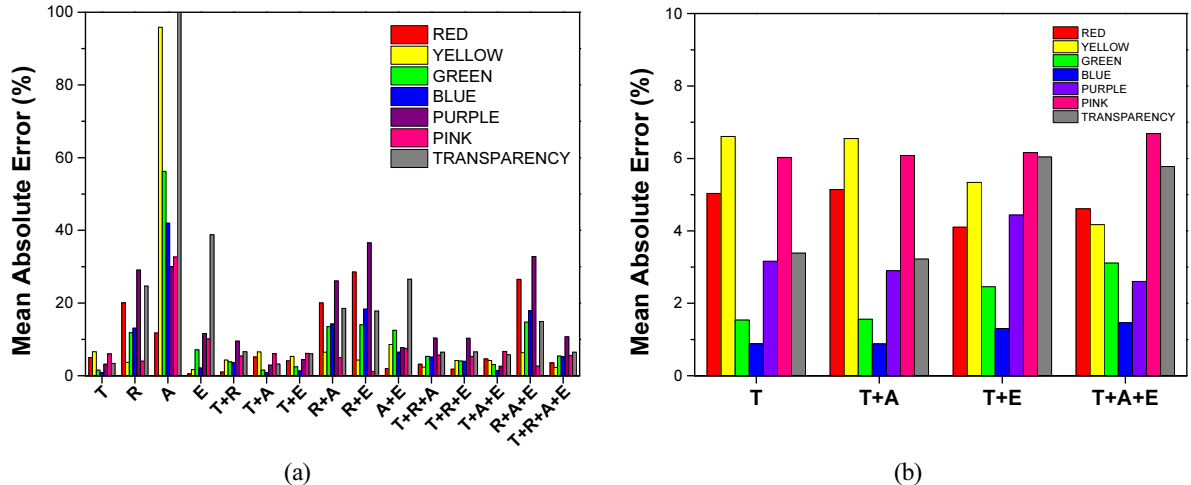


Fig. 7 (a) Mean absolute error based on all prediction models (x-axis : models), (b) Selecting prediction models with mean absolute error less than 7% (x-axis : model)

색상별 MAE는 Fig. 8(a)를 통해 확인할 수 있다. 투명 필름일 때 가장 높은 평균 MAE 31.2%를 보였으며 보라(15.2%), 노랑(10.9%), 초록(10.5%), 빨강(9.2%), 파랑(9.1%) 보라(7.3%) 순서로 낮은 값을 나타냈다. MAE가 7% 미만인 예측 모델들만 도출한 Fig. 8(b)에서는 400 ~ 500 nm 영역의 색상을 가지는 초록, 파랑 그리고 보라에서 상대적으로 낮은 MAE를 보이는 것으로 나타났다. 또한 P₁ (T)와 P₆ (T+A)에서 가장 낮은 MAE를 보였지만 색상에 따른 MAE 편차는 P₇ (T+E), P₁₃ (T+A+E)에서 적은 것으로 나타나는데, 이를 통해 E 값을 예측 모델 식의 변수로 활용하면 색상에 따른 MAE의 편차가 적어지는 것을 알 수 있다.

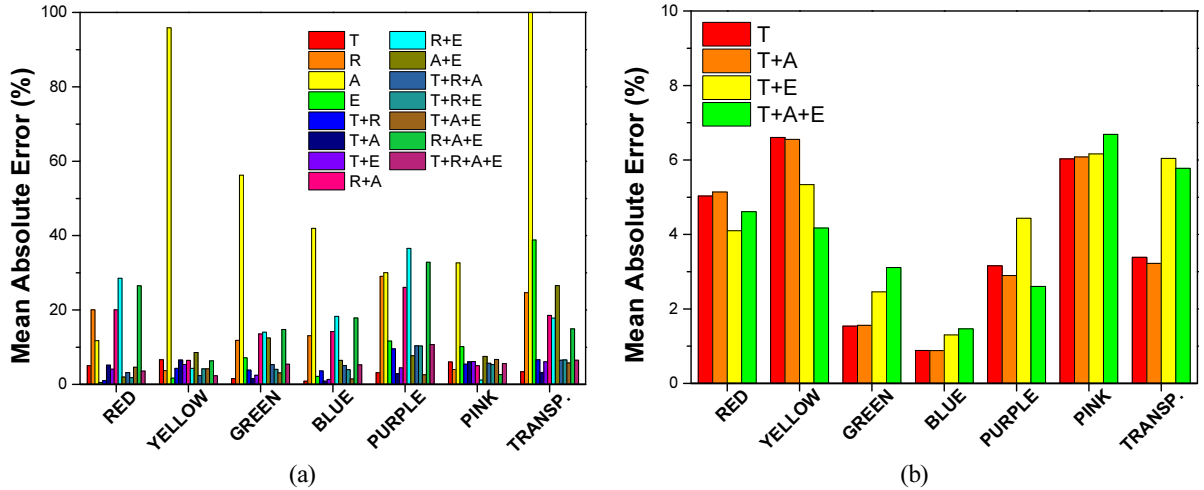


Fig. 8 (a) Mean absolute error based on all prediction models (x-axis : color), (b) Selecting prediction models with mean absolute error less than 7% (x-axis : color)

4. 결론

본 논문에서는 컬러필름이 적용된 컬러 BIPV의 출력을 예측하기 위해 예측 모델을 제시하고 실측값과 비교하여 정확도를 평가하였다. 시판되고 있는 PVC 컬러필름의 투과(T), 반사(R), 흡수(A), 색차표(E)를 조합하여 15가지 예측 모델을 제시하였다. 제시된 예측 모델은 BIPV 전용 컬러필름을 제작하여 검증하였다. 예측 모델 중 투과(T), 투과(T)+흡수(A)로 구성된 예측 모델 식에서 가장 낮은 MAE (3.8%), RMSE (4.3%)를 보였다. 반면에 오차가 가장 높은 모델 식은 흡수(A)로만 구성된 모델로 각각 78.7%, 117%의 MAE와 RMSE를 보였다. 위의 연구 결과를 종합해 보면, 샘플 제작 없이 컬러 BIPV에 사용되는 전면필름이나 유리의 광학적 특성만으로 성능을 매우 유사한 수준으로 예측할 수 있어 시간과 자원을 절약할 수 있게 된다. 향후 정교한 예측 모델을 위해 표준 색상 물질을 사용한 추가적인 연구가 필요하며 해당 예측 모델을 확장하여 검증하는 연구 또한 동반되어야 한다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20213030010290).

REFERENCES

1. IEA, Coloured BIPV : Market, Research and Development, 2019.
2. Lee, E. J., A Review of the Current Status and Examples of Color Type BIPV Design-Mainly in Switzerland, Korean Solar Energy Society, Vol. 41, No. 1, pp. 93-106, 2021, <https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.1.093>.

3. INNOPOLIS, Building-integrated Photovoltaics Market, 2021.
4. Gewohn, T., Schinke, C., Lim, B., and Brendel R., Predicting Color and Short-circuit Current of Colored BIPV Modules, AIP Advances, Vol. 11, 095104, 2021, <https://doi.org/10.1063/5.0063140>.
5. Shukla, A. K., Sudhakar, K., and Baredar, P., Recent Advancement in BIPV Product Technologies: A Review, Energy and Buildings, Vol. 140, pp. 188-195, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>.
6. Shin, J. Y., Ko, S. W., Shin, W. G., Hwang, H. M., Ju, Y. C., Kang, G. H., and Chang H. S., Proposal of Power Estimation Model of Color BIPV System, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 41, No. 5, pp. 1-11, 2021, <https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.5.001>.
7. N ria, S. P., Rosario, V., and Pastor, M. C., Aesthetic Impact of Solar Energy Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 98, pp. 227-238, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.021>.
8. Song, H. J., Technology Trends in Crystalline Silicon Color PV Module, Korea Photovoltaic Society, Vol. 1, No. 1, pp. 38-45, 2019.
9. Durmus, D., CIELAB Color Space Boundaries under Theoretical Spectra and 99 Test Color Samples, Color Research and Application, Vol. 45, No. 5, pp. 796-802, 2020, <https://doi.org/10.1002/col.22521>.
10. Manasrah, A., Al Zyoud, A., and Abdelhafez, E., Effect of Color and Nano Film Filters on the Performance of Solar Photovoltaic Module, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol. 43, No. 6, pp. 705-715, 2021, <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1631907>.
11. Ananda, W., External Quantum Efficiency Measurement of Solar Cell, International Symposium on Electrical and Computer Engineering, pp. 450-456, July 2017, Bali, Indonesia, <https://doi.org/10.1109/QIR.2017.8168528>.
12. Kim, G., Choi, J. H., Park, Y. S., Bhang, B. G., Nam, W. J., Cha, H. L., Park, N., and Ahn, H. K., Prediction Model for PV Performance with Correlation Analysis of Environmental Variables, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 9, No. 3, pp. 832-841, 2019, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2898521>.
13. Hea, Y. S., Kim, J. G., Kim, J. M., Kwon, B. M., and Song, H. J., Prediction and Analysis of Photovoltaic Modules's Output using MATLAB, Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 11, No. 8, pp. 2963-2967, 2010, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.8.2963>.
14. Chicco, D., Warrens, M. J., and Jurman, G., The Coefficient of Determination R-squared is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation, PeerJ Computer Science, Vol. 7, e623, 2021, <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
15. Lee, Y. K., Shin, W. G., Ju, Y. C., Hwang, H. M., Kang, G. H., Ko, S. W., and Chang, H. S., Estimation of PV Power Generation by Linear Regression Model Using Voltage and Current Data, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 41, No. 5, pp. 47-58, 2021, <https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.5.047>.
16. Saw, M. H., Pravettoni, M., and Birgersson, E., STC Short-Circuit Current Prediction and I – V Simulation of Colored BIPV Modules With Machine Learning and One-Diode Equivalent Circuit Models, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, No. 6, pp. 1533-1542, 2022, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3195693>.