고효율화 기술이 적용된 심미성 기반 BIPV 태양광 모듈에 관한 연구

조성배^{1†} · 장효식²

¹(주)에스케이솔라에너지, 부장

²충남대학교 에너지과학기술대학원, 교수

A Study on the Aesthetic BIPV Module with High-efficiency Technology Applied

Cho Sungbae^{1†} · Chang Hyosik²

¹Department Manager, SK Solar Energy Co., Ltd.

²Professor, Chungnam National University Graduate School of Energy Science and Technology

[†]Corresponding author: sbcho@skse1.com

Abstract

The rapid growth of the building integrated photovoltaics (BIPV) market is attributable to the government's expansion of BIPV installation support and the policy of raising the REC weight by a factor of 1.5. In addition, as the mandatory, 2025 zero-energy building policy has been extended to the private building sector, interest and demand for BIPV modules and systems are continuously increasing. However, when a general PV module with insufficient aesthetics is installed, it is possible that the installation of BIPV is avoided for aesthetic reasons or installed only at a minimal rate. In other words, to expand the installation and supply of BIPV modules, it is necessary to develop color BIPV modules with aesthetics and high-efficiency technology. In this study, a color BIPV module was developed using polysilazane, which is inexpensive and has excellent transmittance. The electrical output characteristics of the developed color PV module were analyzed, and the output loss was minimized by applying half-cut and gapless processes. In addition, the developed high-efficiency color BIPV module was subjected to an outdoor test, and a commercialization model was established by analyzing the amount of power generated.

Keywords: 건물일체형 태양광(Building Integrated PhotoVoltaic, BIPV), 컬러 모듈(Color module), 고 효율화(High efficiency), 심미성 향상(Aesthetic improvement), 실증분석(Outdoor analysis)

1. 서론

정부에서는 신재생에너지 기본계획에 따라 2034년까지 신재생에너지의 비중을 25.8%까지 보급하고자 계획을 수립하였으나 국내 태양광 발전 시스템은 사업 실적 기준 산지, 농지, 건축물(옥상)에 설치된 비율이 약 90%에 육박하여 이미 국내 태양광 발전설비 보급의 한계에 도달하고 있다¹⁾. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대규모 면적의 부지를 요구

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.6, pp.97-107, December 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.6.097>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 30 October 2021

Revised: 22 November 2021

Accepted: 23 November 2021

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.

하거나 입지 규제 등의 문제가 없는 건물일체형 태양광 설비(BIPV: Building Integrated Photovoltaic)의 보급·확대가 필요하다. 이를 위해서 최근 정부에서는 공공기관 건축물 신재생에너지 의무화 사업의 비율 향상 등을 통해 적극적인 정책지원을 진행하고 있다²⁾.

BIPV 태양광 발전은 건축에 일체화하여 적용할 수 있는 건물구조로서 커튼월, 천장, 차양, 지붕, 창호 등 매우 다양하며, 그 특성에 따라 건물의 전체적인 에너지효율을 향상할 수 있다³⁾. 여러 가지 장점으로 인해 일반 결정질 태양광 모듈 대비 고비용임에도 불구하고 유럽을 비롯한 선진국에서는 이미 보편화가 되었으며, 국내 시장도 급속히 성장하고 있다. 하지만 BIPV 시스템의 발전효율은 일반 결정질 태양광 모듈 대비 낮을 뿐만 아니라 건물의 심미성을 저해한다는 부분과 디자인적 요소의 부족으로 인해 설계에 반영을 기피하고 있다. BIPV 태양광 모듈의 심미성 강화를 위해서는 일반적으로 색상이 적용된 유리를 사용한다⁴⁾. 하지만 태양광 모듈의 전면 투명유리 대비 색상 유리를 적용할 경우, 투과율이 감소 될 수밖에 없으며⁵⁾ 태양광 모듈의 출력이 낮으면 공급 의무화 비율에 따라 정해진 설치 용량을 달성할 수 없게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 Fig. 1과 같이 태양광 모듈을 건물에 설치하는 형태가 아닌 고효율 태양광 모듈을 건물일체형 태양광 모듈에 적용할 필요가 있으며, 이와 함께 색상을 적용하여 심미성을 강화한 건물일체형 태양광 모듈의 제작과 특성 분석이 필요하다. 즉, 심미성이 강화되고 외장재 기능과 태양광 모듈의 고효율화 기능도 동시에 발현될 수 있는 태양광 모듈의 개발이 필요하다.

Fig. 1 Building rooftop installation and roof type BIPV case_(left) Vietnam Electricity, (right) Korea Energy Agency

이에 본 논문에서는 심미성 향상을 위해 무기 폴리실라잔을 적용하였으며, 고효율 BIPV 태양광 모듈을 위해서 half gapless가 적용한 태양광 모듈을 제작하였다. 일반적으로 나대지에 설치되는 half gapless 태양광 모듈의 전면 유리는 색상이 없는 일반적인 저 철분 강화유리만을 사용하며, 심미성 향상을 위한 공정과 전면소재는 적용되지 않는다. 또한 지금까지 대부분의 컬러 태양광 모듈의 전면 유리는 플라즈마 공정 또는 안료를 이용하여 색상을 발현하였다. 하지만 본 논문에서는 신뢰성 확보가 가능하며, CTM 손실이 적은 무기 폴리실라잔을 적용하여 심미성과 고효율 BIPV 태양광 모듈을 제작하였다.

실험을 위해서 일반 BIPV 태양광 모듈과 gapless 태양광 모듈, 그리고 색상 유리가 적용된 태양광 모듈의 전기적 출력을 비교 분석하였으며, 추가로 옥외 환경에서 실제 발전된 출력을 비교 분석하였다. 실험 결과 고효율 half gapless 컬러 태양광 모듈은 기존 일반 투명유리 태양광 모듈에 비해 일부 색상에서 출력이 동등 이상이었다. 또한 무기폴리잔을 적용한 컬러 태양광 모듈의 경우, 출력 저하율은 8% 미만으로 기존 컬러 태양광 모듈의 출력 저하율보다 우수한 특성을 확인할 수 있었다.

2. 심미성이 적용된 고효율 BIPV 태양광 모듈의 특성 분석을 위한 실험 방법

태양광 모듈은 저 철분 강화유리/EVA/태양전지/EVA/후면 시트 순서로 적층 시킨 후에 lamination 공정을 통해서 제작된다. BIPV 태양광 모듈의 심미성을 강화하기 위해서는 일반적인 투명 저 철분 강화유리가 아닌 색상이 들어간 컬러유리를 적용할 필요가 있다⁶⁾. 국내에는 다양한 컬러 유리 제조 기법이 존재하며⁷⁾, 소재 및 공정별로 투과율과 내구성이 달라진다. 본 논문에서는 태양광 모듈의 심미성을 위해서 무기 폴리실라잔을 이용한 컬러 태양광 유리를 사용하였으며, BIPV 모듈의 고효율을 위해서 gapless 공정을 적용하였다.

실험 순서는 Fig. 2와 같으며 먼저 컬러유리를 선정하고 모듈을 제작하여 CTM 손실을 분석하였다. 이후 BIPV 태양광 모듈의 고효율을 위해 gapless 공정을 적용하여 전기적 출력 특성 분석, 그리고 컬러와 고효율이 적용된 태양광 모듈에 대해서 분석하였다. 제작한 컬러 고효율 BIPV의 공정은 일반 BIPV 제작 공정 조건과 동일하게 진행하였으며, 컬러유리의 특성상 고유의 색을 발현하기 위해 후면 배경은 검은색 색상의 backsheet를 사용하였다. 그 이유는 태양전지와 태양전지 사이에 흰색 backsheet가 있으면 색차가 발생하여 심미성을 저하시키기 때문이다. 또한 전기적 출력은 STC 조건($1,000 \text{ W/m}^2$, 25°C)에서 시료 당 5회 이상 측정하였으며, 출력 편차는 1% 미만으로 우수한 재현성을 확인할 수 있었다.

Fig. 2 Experimental sequence for analyzing the characteristics of color high efficiency BIPV module

3. 고효율 컬러 BIPV 태양광 모듈 제작 및 특성 분석

3.1 심미성이 적용된 컬러 태양광 모듈 제작 및 특성 분석

(1) 컬러 BIPV 태양광 모듈 제작을 위한 전면 유리 특성 분석

유럽과 같은 선진국에서는 다양한 기법을 토대로 심미성이 강화된 BIPV 시스템의 연구가 지속해서 진행되고 있다⁸⁾. 특히 컬러유리를 사용한 태양광 모듈의 경우에는 이미 많은 선진국에서 개발이 되었으며, 국내 제조사들

은 2018년부터 BIPV 시장성을 토대로 태양광 모듈 제작을 위한 컬러유리 제품이 개발되었다.

건물에 태양광 모듈을 적용하기 위해서는 건물의 외벽과 유사한 다양한 색상의 구현이 필수적이다. 또한 가격경쟁력을 확보하면서 CTM 손실이 적어야만 한다. Table 1은 폴리 실라잔이 적용된 컬러 태양광 모듈과 현재 국내외에서 판매되고 있는 컬러 태양광 모듈의 특성을 나타내고 있다. 유기물과 무기 안료 경우에는 자외선에 취약한 것으로 알려져 있으며 외국의 제품의 경우에는 플라즈마를 사용하여 태양광 모듈의 단가가 높아 컬러 BIPV 태양광 모듈의 보급 확대를 위해서는 적합하지 않다. 하지만 무기 안료의 경우에는 Al_2O_3 / SiO_2 로 구성된 마이크로 단위의 투명 판상 입자로 빛의 투과율이 우수하다고 알려져 있다.

Table 1 Manufacturing technology by color glass manufacture

Classification	‘D’ company in Korea	‘R’ company in Korea	Overseas company ‘K’	Overseas company ‘K’
Country of manufacture	Republic of Korea	Republic of Korea	Switzerland	Netherlands
Color BIPV
Applied technology	Nano-color material	Micro pattern	Plasma process	Plasma process
Ingredient	Polysilazane	Pattern printing	Surface deposition	Pattern printing
Production method	Synthesis technology of polysilazane and inorganic pigments	Dry thin film multi-coated plasma process	Print patterns on low pressure plasma process glass	Manufacturing modules with non-reflective color glass

(2) 컬러를 적용한 BIPV 태양광 모듈 제작 및 전기적 출력 특성 분석

그럼 일반적인 BIPV 모듈 공정에 컬러유리를 적용하여 효율감소 부분을 확인하고자 한다. BIPV 모듈 제작은 Fig. 3과 같이 Tabber & Stringer → Lay-up → Lamination → Trimming & J/B 부착 → Simulation 순으로 공정이 진행되며, 일반 공정과 차이점은 Lay-up 단계에서 컬러 유리 고유의 색상발현을 위한 블랙 테이프 마스크링 공정이 추가하여 모듈이 제작을 진행하였다.

모듈의 제작 사양은 M3 타입의 6inch 태양전지를 6×7 matrix (총 42장) 구조로 컬러 BIPV를 제작하였으며, Table 2와 같이 Blue / Gray / Red / Yellow 색상으로 모듈 제작 후 출력 저하율을 확인하였으며(투과율의 경우, 컬러유리 제조사에서 제공함 / 투과율 측정방식은 수직으로 시편을 세워 콘택트렌즈를 투과하는 방식) 기존 컬러 태양광 모듈에 적용된 제품은 타입 및 색상별로 가격과 효율감소 정도는 다르겠지만, 일반적으로 투명 유리 대비 15 ~ 20% 내외의 효율 저하가 발생 된다고 알려져 있으나, 본 실험을 확인한 결과 Reference 모듈도 블랙 테이프 마스크를 진행하였기에, 일반적인 효율 저하보다 출력 저하율이 적게 확인되었다.

Fig. 3 The color BIPV production process

Table 2 Decreased output rate by color

Classification	Characteristics		Pmax [W]	Rate of decrease [%]
Reference Module	Ribbon Marking		202.5	0
Color Module (Application of general manufacture process)	Red Color	Transmittance : 83%	193.5	4.5
	Yellow Color	Transmittance : 81%	188.1	7.1
	Grey Color	Transmittance : 77%	180.9	10.7
	Blue Color	Transmittance : 83%	194.2	4.1

3.2 고효율 gapless BIPV 태양광 모듈 제작 및 특성 분석

컬러유리의 투과율 저하에 따른 컬러 태양광 모듈의 출력손실은 필연적이다. 하지만 BIPV 시스템의 보급 확대와 공공건축물 신재생에너지 의무화를 달성하기 위해서는 태양광 모듈의 출력손실을 최소화하여 고효율을 달성하는 것이 필요하다.

최근에 제작되는 컬러 BIPV 태양광 모듈은 Ag 전극 라인에 블랙 마스킹 작업을 진행한다. 태양광 모듈에 사용되는 ribbon은 Cu를 중심으로 Sn/Pb가 사용되기 때문에 은색을 띠며, 컬러 태양광 모듈을 제작할 때 심미성을 저해하는 요소가 된다. 즉, 심미성을 확보하기 위해서 먼저 Ag 전극 라인에 블랙 마스킹 작업이 필수적이며, 컬러 태양광 모듈의 출력 최적화를 위해서는 블랙 마스킹 테이프의 폭에 따른 출력 특성을 확인할 필요가 있다. 이때, 사용되는 블랙 마스킹 테이프의 재질은 접착성을 가진 0.055 mm 두께의 Polyimide film이며, 열 안정성 및 화학적 안정성을 기초로 절연성과 뛰어난 전기적 특성을 띠는 재료로 사용하였다.

실험 결과는 Fig. 4와 같이 검정 테이프의 폭이 좁을수록 출력이 높은 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 태양전지의 리본을 가리기 위한 마스킹 작업을 진행할 때는 작업의 편의성을 고려하여 폭이 넓은 것을 선호한다. 하지만 검은색 테이프의 폭이 넓을수록 태양전지에 음영이 발생하기 때문에 광 생성 전류가 낮아지게 된다. 측정 결과, 전압의 경우에는 출력 차이가 거의 없지만 Imp의 값은 3 mm 대비 약 3% 정도의 차이가 발생하였다.

Fig. 4 Aesthetic effect and change in output according to width according to module inter and bus ribbon masking operations_(left) the effect of black masking, (right) changes in output according to the width of the black masking

본 논문에서는 태양광 모듈 공정 레벨에서 BIPV 모듈의 출력손실을 최소화하고자 Fig. 5와 같은 개념으로 Half cutting과 gapless를 동시에 병행하여 cell to cell의 거리 최소화를 위한 겹치는 공정을 적용하였다.

Fig. 5 Structure and overview of Gapless technology

일반적인 One-cell에서 Half-cell로 진행 시, Cutting의 면적감소에 따른 I factor가 1/2로 감소함에 따라 출력손실 역시 감소할 수밖에 없으며, 이는 출력 상승으로 나타낼 수 있다($P_{loss} = I_2 \times R$). 하지만 겹치는 구조로서 발생할 수 있는 Cell 미세크랙은 Tabbing 공정에서 Soldering 조건 최적화와 Lamination 공정의 봉지재 두께 증가는 Gap을 보완함으로써 크랙을 방지하였다. 제작된 태양광 모듈은 Fig. 6과 같다.

또한, Gapless 공정의 최대 장점은 Cell to Cell 간격의 최소화로 인해 줄어든 간격을 추가로 Half cell 적용이 원활하다는 것이며, 일반 One-cell의 적용이 힘든 규격에 최적의 설계로 Cell 추가가 가능하다는 것이다. 따라서, 본 연구에서도 같은 크기로 Reference 모듈과 동일한 크기에 Half / Gapless 공정을 적용하여 Half cell을 추가 적용하였다. 이에 대한 설계 도면은 Fig. 7과 같으며, 이 구조로 모듈을 제작하였을 시 Table 3의 결과 처럼 8.23%의 출력상승을 확인하였다.

Fig. 6 Gapless strings and transparent glass_(left) gapless strings, (right) transparent glass half-gapless/normal one-cell production

Fig. 7 Cell arrangement design drawings for each type according to the same standard

Table 3 Output deviation by process according to the application of general transparent glass

Classification	Pmax (W)	Isc (A)	Voc (V)	Imp (A)	Vmp (V)
Transparent glass + Gapless	219.17	4.46	61.47	4.19	52.28
Transparent glass + Normal	202.50	9.08	28.75	8.63	23.46
Output growth rate	8.23% ↑				

3.3 고효율 컬러 gapless 고효율 BIPV 태양광 모듈의 전기적 특성 분석

투명유리를 전면소재로 하여 One-cell 적용 일반 공정과 Half-cell 적용 Gapless 공정의 출력 차이를 분석한 후, 위 4종류의 컬러유리로 제작된 동일 효율대의 태양전지를 적용하여 투명유리와 마찬가지로 전기적 특성값을 분석하고자 한다. 제작된 시료는 Fig. 8과 같으며, One Cell을 Half로 Cutting 하여 설계를 진행할 때는 일반적으로 병렬 구조로 적층을 진행하나, 병렬 구조에서 발생할 수 있는 저항 손실 등을 최소화하고자 직렬연결로 제작하였으며 출력 분석 시 마이크로 크랙 등 공정상에 발생할 수 있는 불량 현상은 Lamination 공정 이후, EL (Electro Luminescence)을 확인하여 배제할 수 있도록 하였다.

Fig. 8 Manufacture of half-cutting gapless modules by color

각 4개의 색상 기준 공정별로 출력 특성을 측정한 결과, Table 4와 같이 Normal (One-cell) 타입에서는 유리 투과율과 비례하여 출력값이 측정되었으며, 투명유리 기준 200 W의 모듈에서는 투과율 1%의 차이가 모듈 레벨에서는 약 2 W의 편차를 보였다. 또한, 일반 One-cell 공정 대비 Gap-less 공정에서는 출력 증가율은 6.7%에서 8.2%까지 많은 수치가 증가하였으며, 투과율에 따라 출력 증가율도 비례한다는 분석도 가능해진다.

Table 4 The variation in output by process according to the application of color glass

Classification	Pmax (W)	Isc (A)	Voc (V)	Imp (A)	Vmp (V)
Blue glass+ Gapless	209.20	4.24	61.48	4.01	52.22
Blue glass + Normal	194.16	8.70	28.77	8.24	23.56
Gray glass+ Gapless	193.95	3.99	61.15	3.71	52.19
Gray glass + Normal	180.92	8.11	28.69	7.70	23.50
Red glass+ Gapless	208.67	4.26	61.37	4.00	52.21
Red glass + Normal	193.53	8.64	28.78	8.22	23.56
Yellow glass+ Gapless	202.44	4.14	61.45	3.87	52.29
Yellow glass + Normal	188.09	8.34	28.75	7.99	23.53
Output growth rate compared to the standard by color	Blue : 7.2%		Gray : 6.7%		
	Red : 7.3%		Yellow : 7.1%		

3.4 옥외 환경에서의 실증 모니터링 데이터 분석

위 실험에서 제작된 하프 갭리스용 모듈을 옥외에 설치하여 실증 값을 분석하고자 한다. 실증 공사 공정도는 Fig. 9와 같이 기축 건물인 공장용도의 벽면에 입면 제단 후, 하지 구조물을 제작하여 컬러 모듈을 부착 및 마감 하였으며, 블루계열부터 레드, 옐로우, 그레이 순으로 횡 배치를 진행하였다. 또한, 총 12장 대한 모듈별 옵티마이저를 적용하여 개별 모니터링이 가능하게끔 설치를 완료하였다.

Fig. 9 The order of demonstration of high efficiency color modules

Table 4의 초기값을 기준으로 실증을 진행하였으며, 색상별 Gapless와 One-cell을 약 6개월(4월 ~ 10월) 동안 실증을 진행하면서, Fig. 10과 같은 결과값을 확보하였다.

Fig. 10 Comparison of power generation for module types by color

Table 4의 값에서 확인하였다시피, Normal 모듈 대비 Gapless 모듈의 초기 출력값이 약 7% 정도 상승차이를 보였으며 옥외에서 데이터를 Table 5의 값에서 확인한 결과, 출력량 기준 3 ~ 4% 정도 Gapless 모듈이 더 높은 수치를 확인하였다. 하프컷 기술이 전류 저감에 따라 열 손실 및 온도감소 효과가 가능하다는 데이터를 확인할 수 있었다.

Table 5 Monthly raw data for module types by color

	Blue (Gapless)	Blue (Normal)	Grey (Gapless)	Grey (Normal)	Red (Gapless)	Red (Normal)	Yellow (Gapless)	Yellow (Normal)
Apr ave.	743.07	689.21	656.76	597.65	707.05	632.81	706.42	635.78
May ave.	603.78	547.88	526.35	478.98	568.08	508.43	566.42	509.78
Jun ave.	633.81	566.44	556.66	506.56	588.55	526.75	586.83	528.15
Jul ave.	632.83	551.80	561.04	510.55	583.24	522.00	573.11	515.80
Aug ave.	512.46	440.22	449.91	409.42	470.07	420.72	469.31	422.38
Sep ave.	704.63	639.72	623.72	567.58	662.85	593.25	656.15	590.54
Oct ave.	804.42	736.03	708.24	644.50	762.94	682.83	751.66	676.49
Daily ave.	662.14	595.90	583.24	530.75	620.40	555.25	615.70	554.13
Growth rate (%)	11.12		9.89		11.73		11.11	

4. 결론

본 논문은 건물일체형 태양광(BIPV)이 에너지 절감과 함께 건물 외관 개선 효과까지 얻을 수 있는 고효율균 컬러 BIPV 제품을 제작 및 분석을 수행하였다. 기존 일반 BIPV 제품이 가지고 있는 단점을 극복하고자 색상 및 효율 성능을 높이는 연구를 진행하였으며, 컬러 유리를 접목한 제품이 일반적으로 15 ~ 20%의 효율 감소를 하프커팅과 태양전지간 적층되는 구조인 갭리스 공정을 적용하여 동일한 면적에서 태양전지를 추가 적용이 가능, 이는 효율과 출력개선으로 확인되었다. 또한, 실제 옥외환경에서 원셀로 적용한 컬러모듈과 하프-갭리스 공정이 적용된 컬러모듈의 데이터를 분석한 결과, 하프-갭리스 공정의 제품출력이 정격 대비 추가 상승을 확인하였으며, 이는 전류 저감에 따른 열 손실과 온도 감소 등의 내용으로 사료된다. 향후 성장이 지속가능한 BIPV 시장에서 디자인적 요소와 고효율균의 제품군 확대 및 사업화 모델이 필요한 시점으로 본 연구가 참조가 되었으면 한다.

REFERENCES

1. The 5th Basic Plan for the Development, Utilization, and Distribution of New and Renewable Energy Technologie (2020-2034), 2020. <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId =156429610>. last accessed on the 29th December 2020.
2. Enforcement Decree and Enforcement Regulations of the Act on Promotion of Development, Use, and Distribution of New Energy and Renewable Energy, 2020. <https://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=222488>. last accessed on 19th May 2020.
3. Juen, G. S. and Ryu, S. H., A Study on the Architectural Design Plans Using BIPV, Journal of The Korean Digital Architecture Interior Association, Vol. 12, No. 3, pp. 5-13, 2012.
4. Song, J. H., BIPV Performance Test Evaluation Technology, Electrical and Electronic Materials, Vol. 27, No. 10, pp. 22-29, 2014.
5. Kim, B. N., Yoon, J. H., and Shin, U. C., A Study on Optimum of Performance Objectives of Passive House

- with Load Reduction Elements, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 1, pp. 171-176, 2012.
6. Lee, A. K., Kim, J. C., Choi, O. M., and Kang, B. W., An Experimental Study on the Array Design of BIPV System in Complex Facility of Downtown, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 67, No. 3, pp. 454-459, 2018.
 7. Lee, E. J., A Review of the Current Status and Examples of Color Type BIPV Design-Mainly in Switzerland, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 41, No. 1, pp. 93-106, 2021.
 8. Kim, H. W., A Study on How to Activate the Supply of New and Renewable Energy BIPV, Ulsan Research Institute, 2020.