

## 스팬드럴용 투광형 결정계 BIPV창호의 후면단열 조건에 따른 연간 온도 및 발전성능 분석 연구

윤종호\*, 오명환\*\*, 강기환\*\*\*, 이재범\*\*\*\*

\*한밭대학교 건축공학과(jhyoon@hanbat.ac.kr), \*\*한밭대학교 건축공학과(bigomh@nate.com),  
\*\*\*한국에너지기술연구원 태양에너지연구단(ghkang@kier.re.kr), \*\*\*\*국립환경과학원 기후변화연구과(gercljb@korea.kr)

### Annual Base Performance Evaluation on Cell Temperature and Power Generation of c-Si Transparent Spandrel BIPV Module depending on the Backside Insulation Level

Yoon, Jong-Ho\* Oh, Myung-Hwan\*\* Kang, Gi-Hwan\*\*\* Lee, Jae-Bum\*\*\*\*

\*Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University(jhyoon@hanbat.ac.kr),  
\*\*Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University(bigomh@nate.com),  
\*\*\*Solar Energy Research Group, Korea Institute of Energy Research(ghkang@kier.re.kr),  
\*\*\*\*Climate Change Research Division, Climate and Air Quality Research Department(gercljb@korea.kr)

#### Abstract

Recently, finishing materials at spandrel area, a part of curtain-wall system, are gradually forced to improve thermal insulation performance in order to enhance the building energy efficiency. Also, Building Integrated Photovoltaics(BIPV) systems have been installed in the exterior side of the spandrel area, which is generally composed of windows. Those BIPVs aim to achieve high building energy efficiency and supply the electricity to building. However, if transparent BIPV module is combined with high insulated spandrel, it would reduce the PV efficiency for two major reasons. First, temperature in the air space, located between window layer and finishing layer of the spandrel area, can significantly increase by solar heat gain, because the space has a few air density relative to other spaces in building. Secondly, PV has a characteristics of decreased Voltage( $V_{oc}$  and  $V_{mp}$ ) with the increased temperature on the PV cell. For these reasons, this research analyzed a direct interrelation between PV Cell temperature and electricity generation performance under different insulation conditions in the spandrel area. The different insulation conditions under consideration are 1) high insulated spandrel(HIS) 2) low insulated spandrel(LIS) 3) PV stand alone on the ground(SAG). As a result, in case of 1) HIS, PV temperature was increased and thus electricity generation efficiency was decreased more than other cases. To be specific, each cases' maximum temperature indicated that 1) HIS is 88.8°C, 2) LIS is 74.2°C, and 3) SAG is 66.3°C. Also, each cases yield electricity generation like that 1) HIS is 913.3kWh/kWp, 2) LIS is 942.8kWh/kWp, and 3) SAG is 981.3kWh/kWp. These result showed that it is needed for us to seek to the way how the PV Cell temperature would be decreased.

Keywords : BIPV;Building Integrated Photovoltaic(건물일체형태양광시스템), Insulation(후면단열), Spandrel(스팬드럴), PV Electricity generations(발전성능), Transparent Crystalline PV(투광형 결정계 태양전지)

Submit date : 2012. 4. 3, Judgment date : 2012. 4. 10, Publication decide date : 2012. 7. 23  
Communication author : Oh, Myung-Hwan(bigomh@nate.com)

## 기 호 설 명

$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant
$\epsilon_i$	Emissivity of face i
$k_i$	Conductance of glass layer I [W/m <sup>2</sup> ]
$h_o, h_i$	Outside, inside air film convective conductance [W/m <sup>2</sup> ]
$h_j$	Conductance of gap k [W/m <sup>2</sup> ]
$T_o, T_i$	Outdoor and indoor air temperature [K]
$E_o, E_i$	Exteriorm interior long-wave radiation incident on window [W/m <sup>2</sup> ]
$\theta_i$	Temperature of face i [K]
$S_i$	Radiation(short-wave, and long-wave from zone internal source) absorbed by face i [W/m <sup>2</sup> ]

## 1. 서 론

건축물에서 스펀드럴(Spandrel) 부분이란, 다층구조의 건물에서 임의 층의 창호 상단부에서 상부층의 창호 하단부 까지의 범위로 정의된다[1]. 경량 유리 커튼월 구조의 외장재를 적용하는 건물에서는 층간 비주거 공간 즉, 배선 및 배관, 공조기기 등의 설비시설이 위치해 있는 공간의 외피 부분을 스펀드럴이라 일컫는다. 스펀드럴 부분의 외피는 상·하단부와와의 일체화를 위해 유리와 프레임으로 구성되며, 후면에 석고보드나 철판 또는 단열재 등을 설치하여 마감하는 것이 일반적이다.

최근 스펀드럴의 구성 가운데 후면 마감재는 건축물의 열손실을 방지하기 위한 목적으로 단열재가 적용되고 있는 추세이다[2]. 또한 건물에너지 효율 향상 및 에너지 자체생산 기능을 부여하기 위해 스펀드럴 부분에 건물일체형 태양광 시스템(BIPV; Building Integrated Photovoltaics)을 적용하고 있다. 하지만 단열 성능이 강화된 스펀드럴 부분에 건물일체형 태양광시스템을 적용할 경우 문제가 발생할 수 있다. 스펀드럴의 구조적인 특성상 유리와

후면마감재 사이의 공간이 생성되는데, 이 공간의 공기층은 다른 공간에 비해 체적이 작다. 따라서 상대적으로 적은 내부공기량 때문에 일사유입은 스펀드럴의 온도상승에 상당한 영향을 미쳐 유리의 열파손[3] 및 발전성능 저하의 문제를 야기할 수 있다[4]. PV(Photovoltaics)를 구성하는 Cell은 온도상승에 따라 발전성능이 저하되는 특성을 가지고 있기 때문에 스펀드럴에 적용되는 BIPV는 공기층의 온도상승과 밀접한 연관이 있다고 볼 수 있다[5]. 따라서 스펀드럴 부분의 단열성능 강화는 태양 복사열의 축적을 더욱 야기 시켜 BIPV의 표면온도상승과 발전성능저하에 영향을 미칠 수 있다[6].

이처럼 투광성 BIPV 모듈이 적용될 경우 스펀드럴 부분의 온도가 상승으로 인한 발전성능 저하가 우려되고 있는 가운데 현재 이 부위에 대한 연간 온도 상승 정도 및 발전량에 대한 정량적 평가가 부족한 실정이다. 평가가 요구되는 범위는 첫 번째로 후면마감재의 단열수준 강화로 인해 연간 PV의 온도가 어느 정도 상승이 될 것인가에 대한 평가, 두 번째로 이러한 영향으로 발전성능이 감소되는 정도에 대한 평가, 세 번째로 온도 상승이 연간 발전되는 생산량에 미치는 영향에 대한 평가가 포함될 수 있다. 본 연구에서는 위의 세 가지 사항을 후면 마감재의 단열수준에 따라 평가하여 정량적 현상을 규명하는 것에 목적이 있다.

연구의 방법은 시뮬레이션(EnergyPlus) 해석을 통해 연간 BIPV의 온도상승을 예측하고, 그에 따른 발전성능 및 연간 발전량 해석을 통해 성능저하 수준을 평가하였다. 시뮬레이션을 위해서는 해석모델의 정확성 및 신뢰성 검증이 선행되어야함에 따라 본 연구에서는 Mock-up 실험모델을 제작하여 스펀드럴 조건에 대한 실험을 우선 수행하였다[7]. 실험 결과를 토대로 시뮬레이션 해석모델의 정확성을 보정하고 신뢰성을 검증한 뒤, 연간 PV Cell의 온도변화, 발전성능 및 누적발전량에 대한 해석을 수행하였다.

## 2. 태양전지 온도와 발전성능의 상관관계

커튼월의 스펠드럴 후면마감재의 단열성능을 강화하는 PV의 Cell 표면온도 상승과 발전성능 저하의 문제를 야기할 수 있다. 이는 PV의 고유한 특성에 의해 설명될 수 있으며 Fig. 1은 이러한 PV Cell 표면온도에 따른 발전성능 저하를 나타내는 I-V곡선을 도식한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Cell의 표면온도가 상승됨에 따라 전류의 변화는 비교적 크지 않은 반면에, 전압이 감소에 직접적인 영향이 있음을 알 수 있다[7].

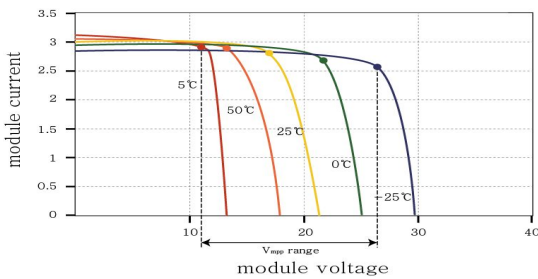


Fig. 1 Fluctuation of I-V curve depending on cell temperature

이러한 온도상승에 따른 전압강하로 인해 Fig. 2와 같이 모듈에서 출력되는 전력량도 감소시키는 결과를 나타낸다. 따라서 건물의 열손실을 방지하기 위한 목적으로 후면마감재의 단열성능을 강화된 스펠드럴과 투광형 BIPV 모듈이 조합되면 투과된 태양복사열이 실내외측으로 방출되지 못해 PV Cell 온도 상승과 더불어 발전성능에 악영향을 미칠 것으로 예상된다.

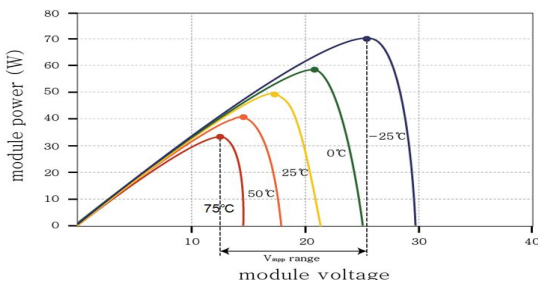


Fig. 2 Fluctuation of PV power output depending on cell temperature

이와 같은 이론적 배경을 바탕으로 본 연구에서는 투광형 BIPV가 적용된 스펠드럴 부분의 고단열 후면마감재 적용에 인한 Cell 표면온도 및 발전성능에 미치는 영향에 대해 정량적 평가를 수행하였다.

## 3. BIPV창호의 온도 및 발전성능 이론적 해석 방법

본 연구에서는 연간 BIPV창호의 표면온도 및 발전성능을 EnergyPlus를 활용하여 분석하였다. EnergyPlus에서 창호의 유리 표면온도는 각 유리의 레이어 별 열평형 방정식에 의해 해석된다. 복층유리로 구성된 창호의 경우 아래와 같이 도식할 수 있으며, 복층유리 각 Layer 표면에서의 열평형방정식은 수식 (1) - (4)와 같이 나타낼 수 있다.

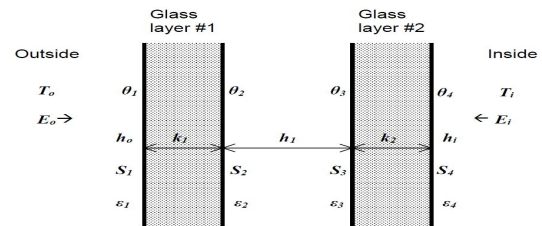


Fig. 3 Variables used in glazing's heat balance algorithm

$$E_o \epsilon_1 - \epsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1 (\theta_2 - \theta_1) + h_o (T_o - \theta_1) + S_1 = 0 \quad (1)$$

$$k_1 (\theta_1 - \theta_2) + h_1 (T_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\epsilon_2 \epsilon_3}{1 - (1 - \epsilon_2)(1 - \epsilon_3)} (\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0 \quad (2)$$

$$h_1 (\theta_2 - \theta_3) + k_2 (\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\epsilon_2 \epsilon_3}{1 - (1 - \epsilon_2)(1 - \epsilon_3)} (\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0 \quad (3)$$

$$E_i \epsilon_4 - \epsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2 (\theta_3 - \theta_4) + h_i (T_i - \theta_4) + S_4 = 0 \quad (4)$$

여기서, 수식 (1)은 실외측 표면, 수식 (4)는 실내측 표면 Layer의 열평형 방정식을 의미한다. 열평형 방정식 해석 시 조건은 우선, 각 유리의 레이어는 상대적으로 얇기 때문에 열용량은 무시하고 장파복사에 대해서는 불투명함을 가정한다.. 또한 유리의 표면을 기준

으로 열의 흐름은 수직으로 만 작용하여 1차 원으로 이동하는 것으로 가정한다. 일반적으로 유리의 표면의 부위별 온도는 상이하나, 그 차이가 미미함에 따라 EnergyPlus에서는 유리의 표면 전체는 동일한 온도로 해석된다.

열평형 방정식에서 Si는 태양복사, 실내의 조명 및 기기에 의한 단파 및 장파복사를 의미한다. 구체적으로, 수식 (5)  $S_{2j-1} = S_{2j}$ 와 같이 태양, 조명 및 기기의 단파복사(직달일사, 확산일사) 단파복사는 유리에 흡수된 뒤, 양쪽 Layer로 동일하게 분배되도록 가정되고 있음을 알 수 있다. 또한 실내 측 조명 및 기기에 의한 장파복사는 수식 (6)과 같이 2N 측, 짝수 Layer에서만 이를 흡수해서 복사하는데 EnergyPlus의 열평형 방정식에서는 장파복사에 대해서는 불투명하다는 전제로 실내측 표면(복층창의 경우  $S_4$ )에서만 이를 포함하는 것으로 해석한다.

$$S_{2j-1} = S_{2j} = \frac{1}{2} (I_{bn}^{ext} \cos\Phi A_j^f(\Phi) + I_{dif}^{ext} A_j^{f,dif} + I_{sw}^{int} A_j^{b,dif}) \quad j = 1, 2, N$$

$$S_{2N} = S_{2N} + I_{lw}^{int} \epsilon_{2N} \quad (6)$$

수식 (1) - (4)의 실내측 대류열전달계수  $h_i$ 는 ISO 15099에 의해 결정되며 무차원 수인 Nusselt number와 Rayleigh number의 상관관계에 의해 결정된다[8]. 이와 같이 다양한 변수를 고려한 열평형 방정식을 통해 연간 BIPV의 Cell 표면온도변화를 도출하게 된다.

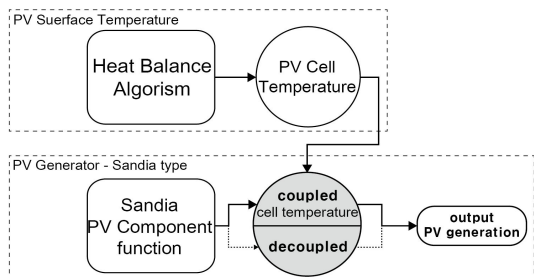


Fig. 4 Simulation method of generating PV electricity combined with fluctuation of BIPV cell temperature

BIPV 창호의 연간 표면온도변화를 연계한 발전성능의 도출방법은 Fig. 4의 개념도를 통해 설명할 수 있다. 그 방법은 앞서 열평형 방정식에 의한 BIPV Cell의 표면온도를 도출한 뒤, EnergyPlus PV 발전성능 해석 Component의 함수에 Cell 표면온도 결과 값을 연계하여 발전성능을 해석하게 된다. 따라서 연간 PV의 표면온도 변화에 따른 발전성능의 상관관계를 파악하는데 효과적이라고 할 수 있다. EnergyPlus에서 제공하고 있는 PV 해석 Component는 크게 Simple, Equivalent One-diode, Sandia Method 3가지 PV 해석방식을 제공하고 있는데, 본 연구에서는 PV의 표면온도를 건물의 외피와 연계할 수 있고 실험적 데이터를 바탕으로 검증된 a-Si계열 PV 이론 모델을 제공하고 있는 Sandia Method를 활용하였다[8].

#### 4. 실측실험을 통한 스펀드럴 해석모델의 검증

##### 4.1 해석모델 검증을 위한 Mock-up 실험

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 스펀드럴 후면마감재의 단열성능 강화가 연간 PV Cell의 표면온도와 발전성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다. 연간 시뮬레이션을 위해서는 해석모델의 정확성 및 신뢰성의 검증이 선행되어야 한다.



Fig. 5 Interior and exterior view of mock-up test model

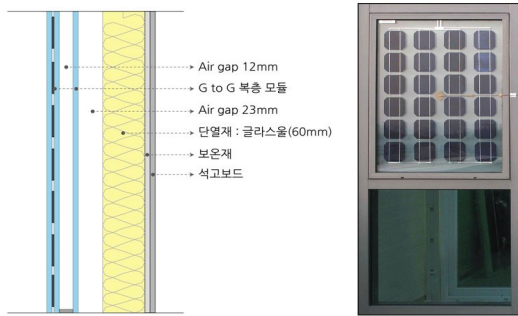


Fig. 6 Cross section and front view of spandrel

따라서 본 연구에서는 Fig. 5과 같이 스펀드럴을 모사한 Mock-up 실험시설을 통해 BIPV와 단열재사이의 공기층의 온도를 실측하고, 측정결과에 근거하여 시뮬레이션 해석 모델을 보정하는 방법으로 신뢰성을 검증하였다. Mock-up 실험시설은 대전의 K연구소 내에 위치하고 있으며, Fig. 6은 Mock-up

실험시설 및 후면에 단열재를 설치한 스펀드럴 부분을 모사한 단면 및 정면을 도식한 것이다. GtoG 타입의 BIPV는 복층모듈(GtoG BIPV 복층모듈 + 공기층 23mm + 단열재 60mm)이며 공기층 간격은 23mm, 후면마감재로 글라스울(60mm)이 적용되어 있다. 설치된 투광형 결정계 BIPV 모듈의 유리면적 대비 셀면적은 50%이다.

스펀드럴 부분의 온도측정을 위해 23mm 공기층(Air gap)에 열전대(OMEGA社)를 설치하여 GRAPHTEC社의 midi LOGGER GL450으로 데이터를 수집하였으며 오차범위는  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

이다. 신뢰성 검증에 활용된 온도측정 부위는 스펀드럴의 공기층만을 선정하였는데, 그 이유는 GtoG 타입 PV의 특성상 Cell의 온도를 측정하기 위해서는 열전대가 유리사이에 위치하여야하나 접합(Lamination)과정에서 고온발생으로 인한 설치의 어려움이 있어 물리적으로 한계가 있었다. 또한 Cell 바로 위의 유리 표면온도를 측정할 수는 있으나 Cell의 직접적인 표면온도로 볼 수 없기 때문에 신뢰성 검증에서 제외 하였다.

온도측정은 하절기 대표일(8월 16일~8월 31일)동안 실험을 진행하였고, 공기층 온도 분석 결과는 Fig. 7과 같다. 하절기 대표일의 공기층 온도는 최대 표면온도가  $77.4^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하는 것으로 나타났다. 본 하절기 2주간 실험 결과를 바탕으로 후술될 시뮬레이션 해석모델의 보정이 수행되었다.

### 3.2 실측결과와 해석모델 결과의 오차분석

PV Cell의 표면온도와 발전성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 동적에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. EnergyPlus는 실내·외 환경변화에 따라 BIPV의 표면 온도가 동적으로 계산되고, 계산된 표면온도 데이터는 PV Generation 모듈에 연동되는 복합적인 해석이 가능하기 때문에 본 연구를 수행하는데 적합하다고 판단하였다.

시뮬레이션 해석모델은 Fig. 6의 Mock-up

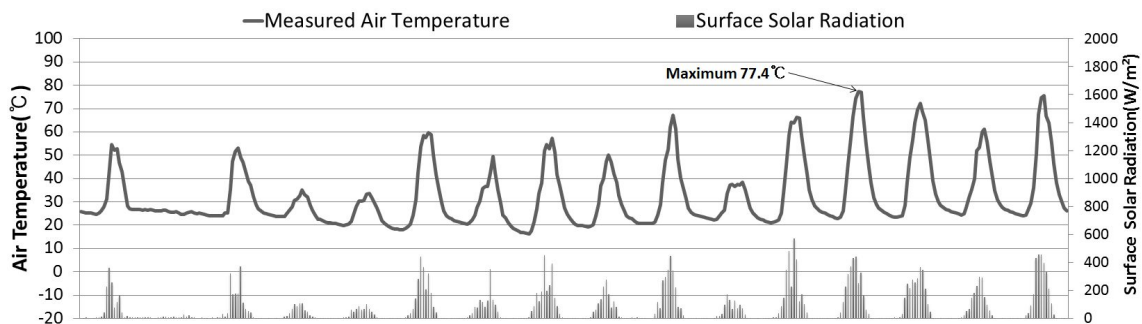


Fig. 7 Measured air temperature at soandrel air-gap through the mock-up test model

실험시설 스펠드럴 부분과 동일하게 구성하였으며, 활용된 기상데이터는 하절기(8월 16일부터 8월 31일) 실측모델에서 측정된 실제 기상데이터(풍향 및 풍속 데이터 제외)를 EnergyPlus 프로그램 기상파일인 epw형식으로 변환하여 적용하였다. 단, 스펠드럴 부분 해석모델의 GtoG 타입 BIPV 복층모듈의 경계조건은 외기에 노출된 상태이며, 나머지 부위는 단열경계 조건화하여 열교가 없다고 가정하였다.

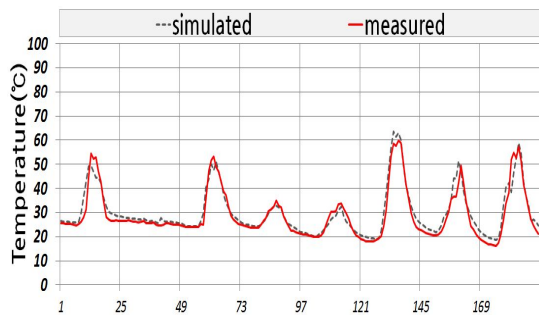


Fig. 8 Error analysis of air temperature at air-gap between measured and simulated data (16. Aug - 24. Aug)

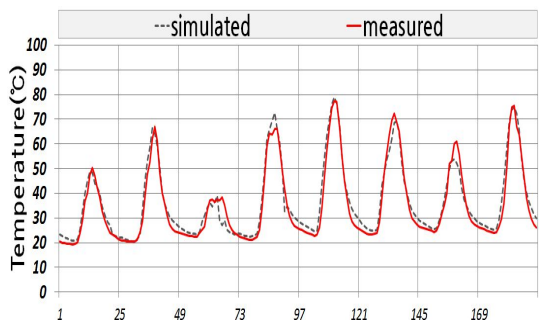


Fig. 9 Error analysis of air temperature at air-gap between measured and simulated data (24. Aug - 31. Aug)

Fig. 8 - 9는 스펠드럴 부분 공기층온도 변화에 대한 실측실험 및 시뮬레이션 해석결과를 비교 도식한 것이다. 실측치와 이론치의 온도 평균편차는 2.4°C로 나타났으며, 그림에 도식된 바와 같이 EnergyPlus 해석모델은 실

제 측정값의 온도변화 경향을 매우 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 오차 결과를 바탕으로 EnergyPlus의 이론적 해석방법을 통해 스펠드럴 부분 단열성능에 따른 BIPV Cell의 표면온도 및 발전성능 경향을 예측할 수 있을 것으로 판단하고 연구를 진행하였다.

## 5. 단열수준에 따른 연간 온도 및 발전성능평가

### 5.1 단열수준 별 스펠드럴 해석모델 개요

스팬드럴 부분의 단열성능 강화가 Cell의 표면온도 및 발전성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 앞서 신뢰성을 확보한 해석모델을 바탕으로 Fig. 10과 같이 3가지 모델을 구성하였다.

해석모델은 크게 주변 장애물 없이 세워둔 외부거치형태(Stand Alone Type), 스펠드럴 후면 마감재에 석고보드를 적용한 형태(Uninsulated Type), 후면마감재에 단열재 적용 형태(Insulated Type)로 구분할 수 있다. 스펠드럴 부분에 적용한 PV는 투광형 c-Si계열 태양전지로서 Cell 면적 대비 유리 면적은 50%인 모듈을 적용하였다.

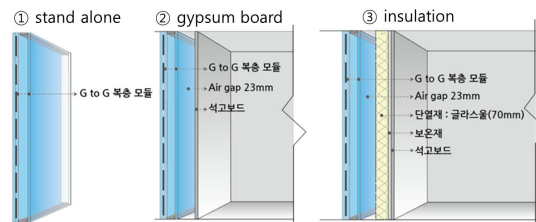


Figure 10. Simulation model of spandrel varied in backside materials classified by insulation level

투광형 c-Si 계열 BIPV 모듈은 Table. 1과 같이 개방전압 18.0V, 단락전류 3.4A, 작동전압 14.6V, 작동전류 3.15A, Cell 온도에 따른 전압강하계수는 0.09의 성능을 나타낸다.

Table. 1 Characteristics of PV module for simulation

Voc[V]	Isc[A]	Vmp[V]	Imp[A]	V/T
18.0	3.4	14.6	3.15	-0.09

V/T : PV temperature coefficient (Voltage/Temperature)

투광형 c-Si 계열 BIPV 모듈은 복층 유리 (10mm + 12mm Air + 6mm)로 구성하였으며 Table. 2과 같이 열관류율 2.730W/m<sup>2</sup>, 일사획득계수(SHGC) 0.763, 가시광선 투과율(Tvis) 0.814의 특성을 나타낸다. 해석모델 가운데 스펠드럴 부분을 모사한 2가지 대안의 경우 단열수준에 따라 후면마감재에 석고보드와 단열재를 적용하였으며, 그 물성은 Table. 3과 같다. 본 연구에서는 기상데이터 입력변수로서 대전지역표준기상데이터<sup>1)</sup>를 활용하였다.

Table. 2 Optical characteristics of double glazing

U-Value(W/m <sup>2</sup> )	SHGC	Tvis
2.730	0.763	0.814

Table. 3 Thermal characteristics of backside finishing materials

gypsum board (W/m <sup>2</sup> )	insulation (W/m <sup>2</sup> )
4.210	0.450

여기서 단열재는 남부지역에 기준하여 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙[2]에서 명시하고 있는 외벽의 열관류율을 충족시켰으며 후면마감재의 반사율(태양 및 가시광선)은 0.8로 가정하였다.

### 5.2 단열수준 별 BIPV Cell 표면온도 변화

스펠드럴 부분의 단열성능 강화가 PV Cell의 온도상승에 미치는 영향에 대한 평가를 위해 본 절에서는 앞서 언급한 시뮬레이션 조건하에 구성된 3가지 단열수준별 후면마감재 조건 별 BIPV Cell의 연간 표면온도 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 표면온도 특성은 각 대안별로 연간데이터를 수집한 뒤 시간별 표면온도 특성을 Box-plot 을 활용하여 통계 분석하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다.

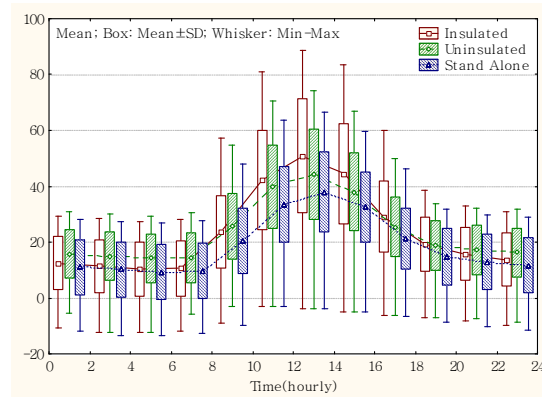


Fig. 11 Statistically analyzed annual cell temperature (simulated data) depending on finishing materials classified by insulation level

Table. 4 Analyzed data of cell temperature(simulated data) depending on finishing materials classified by insulation level

classification	mean cell temp.(°C)	max cell temp.(°C)
insulation	31.4	88.8
gypsum board	29.5	74.2
stand alone	24.3	66.3

analyzed data: limited hour from am 7:00 to pm 6:00

그래프에 나타난 바와 같이 BIPV 시스템이 전력을 생산할 수 있는 일조시간대(오전 7시부터 오후 6시까지로 가정)의 경우 전반적으로 단열재를 적용한 형태가 Cell 표면온도가 높은 것을 알 수 있다.

연간 평균 및 최대 표면온도를 분석한 Table. 4에 의하면 단열재를 적용한 경우 평균온도가 31.4°C로 가장 높았으며, 이는 석고보드를 적용한 경우보다 0.9°C, 외부거치 형태보다는 7.1°C 높은 수치이다. 특히 연간 최대표면온도에서 차이가 크게 발생했는데, 단열재를 적용 할 경우 최고 88.8°C까지 상승하였고, 이는 석고보드 적용 시 74.2°C보다 14.6°C, 외부거치상태 66.3°C 보다 22.5°C 높은 표면온도를 나타냈다.

따라서 현행 규정[2]에 따라 스펠드럴 부분에 단열재를 적용할 경우 Cell의 표면온도 상승에 영향을 미칠 수 있음을 확인 할 수 있다.

1) 태양에너지학회, 대한민국 표준기상데이터(<http://www.kses.re.kr>)

**5.3 단열수준 별 BIPV 연간 발전효율 특성**

후면마감재에 단열재 적용이 Cell 표면온도 상승에 영향이 있음을 밝혔고 이를 바탕으로 표면온도 상승이 스펀드럴 부분 BIPV의 연간 발전성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 단열 조건 별 발전효율 차이를 분석하였다.

다음 페이지의 Fig. 12는 단열수준별로 Cell 표면온도 변화에 따른 발전효율 상관관계를 도식한 산점도를 나타내고 있다. 그래프에서와 같이 단열수준이 향상될수록 Cell 표면온도가 상대적으로 높은 범위에 포함되는 도수가 증가하고, 이에 따라 낮은 발전효율에 해당하는 도수도 증가됨을 알 수 있다.

Table. 5는 연평균 발전효율 분석결과를 나타내고 있는데, 여기서 연평균 발전효율은 연간 BIPV 모듈 1m<sup>2</sup>에 입사되는 일사량 대비 생산되는 전력량 비율의 평균을 나타내며, 본 연구에서는 불확실한 일사구간 100W/m<sup>2</sup>미만을 제외한 나머지 구간에 대해 분석을 수행하였다.

Table 5. Yearly average PV efficiency depending on insulation level

classification	Yearly mean PV efficiency(%)
insulation	12.63
gypsum board	12.95
stand alone	13.41

연간 발전효율 분석결과 단열재를 적용할

경우 다른 대안에 비해 작게는 0.3%에서 크게는 0.8%까지 감소됨을 확인 할 수 있었다. 이처럼 온도 상승에 따른 발전효율 저하의 발생은 전압강하에 가장 큰 원인이 있는데, Fig. 13은

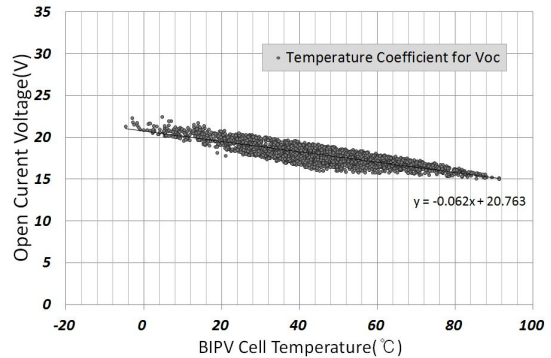


Fig. 13 Simulated data of fluctuation of voltage depending on cell temperature

3가지 경우 중 대표적으로 단열재를 적용한 해석모델의 Cell 표면온도상승에 따른 전압 ( $V_{OC}$ ) 특성을 분석한 결과 그래프로서, 이를 통해 온도 상승이 전압강하에 미치는 영향을 확인 할 수 있다.

Fig. 13에 나타난 바와 같이 개방전압( $V_{OC}$ )은 PV Cell의 표면온도 1°C 상승함에 따라 6.2%씩 감소되는 특성을 갖는 것으로 나타났고, 이는 앞서 이론적 배경에서 기술한 PV의

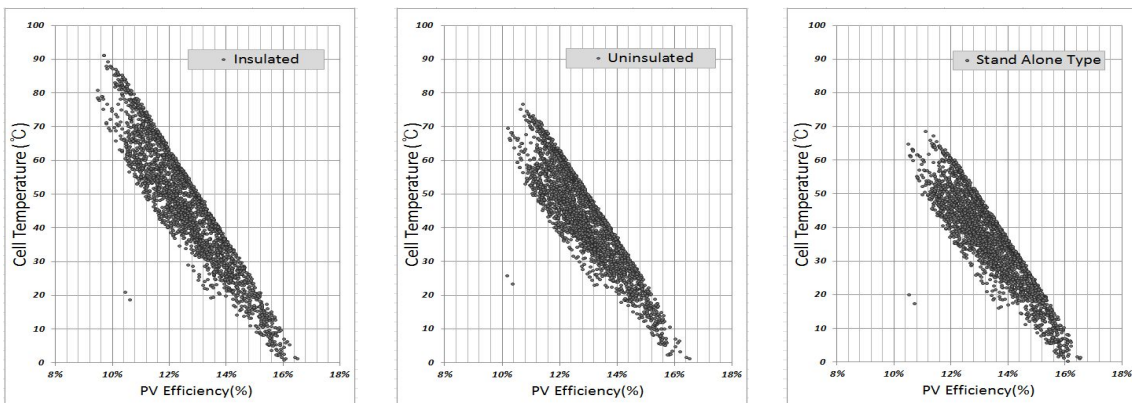


Fig. 12 Yearly simulated data of PV efficiency depending on finishing materials classified by insulation level (analyzed data : limited irradiation data over 100W/m<sup>2</sup>)



근본적인 특성인 전압은 표면온도에 의한 영향 특성을 일례로 보여 주고 있다.

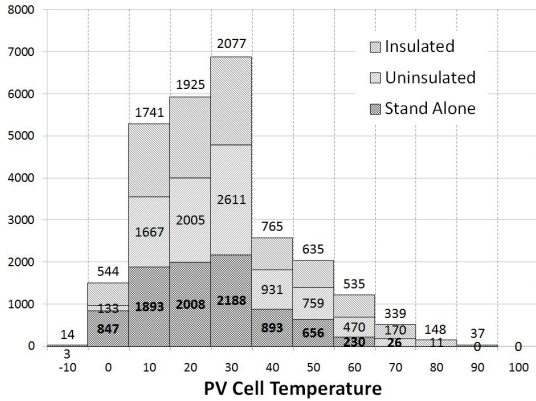


Fig. 14 Yearly distribution of PV cell temperature depending on finishing materials classified by insulation level

각 단열 조건별 연평균 발전효율의 차이 발생 원인은 Fig. 14의 연간 표면온도 분포 그래프를 통해 확인할 수 있는데, 단열수준이 높아질수록 고온에 해당하는 빈도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 후면마감재의 단열수준이 높아져도 연평균 발전효율에 있어 1% 이상의 극명한 차이가 발생하지는 않았는데, 이는 높은 온도범위에 해당되는 시간이 상대적으로 적기 때문으로 해석될 수 있다.

#### 4.4 단열수준 별 연간 BIPV 누적발전량 분석

단열성능이 높아질수록 PV Cell 표면온도 상승과 발전효율이 저하됨을 확인하였고, 본 절에서는 이러한 발전효율 저하가 연간 단위출력당 발전량에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 분석을 수행하였다.

Table 6. Cumulative amount of generating electricity depending on finishing materials classified by insulation level

alternative	Cumulative electricity (kWh/kWp)	decreasing rate (%)
insulation	913.3	-6.9
gypsum board	942.8	-3.9
stand alone	981.3	0.0

분석결과 Table. 6에 나타난 바와 같이 스펠드럴 부분에 단열재를 설치한 경우 석고보드 대비 3.9%, 외부 거치상태 보다 6.3% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 스펠드럴 부분의 단열강화 조치는 투광형 BIPV 모듈 설치 시 연간 발전량이 감소될 수 있음을 예측할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 투광형 BIPV가 적용된 스펠드럴 부분의 후면마감재 단열수준을 강화가 BIPV Cell의 연간 표면온도 상승과 발전성능에 미치는 영향에 대해 정량적 분석을 수행하였다.

후면마감재의 단열 수준에 따라 연중 최대 상승온도는 외부거치 시 66.3°C, 석고보드(U-Value:4.210W/m<sup>2</sup>) 74.2°C, 단열재(U-Value:0.450W/m<sup>2</sup>) 88.8°C로 나타나, 후면마감재의 단열성능 강화는 연간 PV Cell 표면온도 상승에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

BIPV Cell 표면온도 상승으로 인한 발전성능 분석결과, 모듈의 연간 평균발전효율은 외부거치형태가 13.41%, 석고보드적용형태는 12.95%, 단열재적용형태가 12.63%로 나타나 단열수준이 강화될수록 효율이 낮아짐을 알 수 있다. 또한 연간 단위출력당 발전량은 외부거치형태 981.3 kWh/kWp에 비해 석고보드적용형태가 3.9% 감소하여 942.8 kWh/kWp, 단열재적용형태는 6.9% 감소되어 913.3kWh/kWp를 나타냈다.

본 연구의 결과를 바탕으로 현행 규정대로 스펠드럴 후면마감재의 단열성능을 강화시킨 후, 이 부위에 투광형 BIPV 모듈을 적용할 경우 PV Cell 온도 상승 및 발전성능 저하의 문제가 발생될 것으로 판단된다. 따라서 향후 스펠드럴 부위에 투광형 BIPV 모듈 적용 시 온도를 저감시킬 수 있는 기술적 혹은 정책적 개선방안에 대한 모색이 시급할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 : 20118040000040)

## 참 고 문 헌

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Spandrel>
2. 국토해양부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, 2011.11.30.
3. Jong-ho Yoon, Myung-Hwan Oh, U-Cheol Shin, A Study on the Glazing Surface Temperature and Thermal Shock of BIPV Window Applied to the Spandrel Area of Curtain Wall System in Office Building, Architectural Institute of Korea, 2012. 2
4. Jurij Kurnik, Marko Jankovec, Kristijan Brecl, Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational condition, Solar Energy Materials and Solar Cell, 2011
5. Dong-Su Kim, Myung-Hwan Oh, Jong-Ho Yoon, The Evaluation of the Temperature Characteristics at the Spandrels of Curtain wall with a-Si BIPV Window System, Korean Solar Energy Society, Conference 2012
6. M.Mattei, G.Notton, Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance, Renewable Energy, 2006
7. Kyung-Eun, Park, Generation characteristics of BIPV module as spandrel glass according to temperature variation, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Conference 2007
8. EnergyPlus Engineering Reference, LBNL, Oct. 2010