

스팬드럴용 투광형 결정계 PV창호의 셀 간격 개구율에 따른 온도 및 발전성능 해석연구

윤종호*, 김동수**, 오명환***, 이재범****

*한밭대학교 건축공학과(jhyoon@hanbat.ac.kr), **한밭대학교 건축공학과(aamgood@naver.com),
한밭대학교 건축공학과(bigomh@nate.com), *국립환경과학원 기후변화연구과(gerclib@korea.kr)

Temperature and Power Generation Characteristics of c-Si G/G Spandrel Window depending on Opening Ratio of PV Module

Yoon, Jong-Ho* Kim, Dong-Su** Oh, Myung-Hwan*** Lee, Jae-Beom****

*Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University(jhyoon@hanbat.ac.kr),
**Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University(aamgood@naver.com),
***Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University(bigomh@nate.com),
****Dept of Climatic Change, National Institute of Environmental Research(gerclib@korea.kr)

Abstract

This study aims to analyze characteristics of Cell surface temperature and generated power performance for improving PV(Photovoltaic) system condition according to the cell opening ratio of transparent crystal PV system at Spandrel of curtain-wall. For this purpose, alternatives were classified for eight different cases that opening ratio of transparent crystal PV system varied from 0% to 70%, which was used by simulation tool, EnergyPlus. As results, it turned out that increasing opening ratio of transparent crystal PV system led higher PV surface temperature. back-sheet type was thus the most advantageous for decreasing surface temperature, annual generating efficiency, and annual accumulated generating power. Consequently, blocking off air space from outside insolation can advantageously keep to be better condition for generated power performance.

Keywords : 커튼월(Curtain wall), 스팬드럴(Spandrel), 결정계 태양전지(c-Si PV Cell), 표면온도(Surface temperature), 개구율(Opening ratio), 발전성능(Generated electric power performance), G/G 타입(Glass to Glass type)

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물의 외피를 유리로 형성하는 커튼월

구조는 재실 자의 점유공간과 다층구조의 건물에서 임의 층의 창호 상단부부터 상부층의 창호 하단부까지의 범위를 스팬드럴 부위로 정의된다[1]. 스팬드럴(Spandrel) 부분의 외관

Submit date : 2012. 08. 17, Judgment date : 2012. 08. 17, Publication decide date : 2012. 00. 00
Communication author : Kim, Dong-su(aamgood@naver.com)

은 통일성을 고려하여 상·하단부에 일체화를 위한 유리 와 프레임으로 구성된다. 스펠드럴 부분의 후면 마감 구성은 석고보드나, 철판 또는 단열재 등으로 구성되는 것이 일반적이다. 그러나 위와 같이 후면 마감이 무분별하게 형성될 때 스펠드럴 후면부에 밀폐된 공기층을 형성하게 된다. 밀폐된 공기층은 외피면에 마감된 유리를 통하여 유입된 일사에 영향으로 내부온도가 급격히 상승하여 스펠드럴 부분의 유리표면온도상승에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 표면온도 상승은 열 파손과 같은 문제점을 일으킬 수 있고, 또한 최근 건물 일체형 태양광발전(BIPV, Building Integrated Photovoltaic) 적용에 관한 관심이 주목받고 있는 시점에서 태양광 업계의 주류를 이루고 있는 결정계 태양전지를 PV(Photovoltaic) 모듈화하여 BIPV로 스펠드럴 부분에 적용할 때 태양전지 표면의 온도상승에 따른 발전 성능 저하는 불가피한 상태이다[2]. 특히 결정계 태양전지 간의 간격을 띄워 부분적으로 빛이 통과할 수 있게 구성한 투광형 G/G(Glass to Glass) PV 모듈의 경우 투명부위의 면적 비인 개구율(OR¹⁾ 값에 따라 온도변화 및 발전 성능의 변화가 매우 클 것으로 우려되고 있다.

따라서 본 연구에서는 투광형 결정계 G/G PV 모듈이 적용된 커튼월 스펠드럴 부분을 대상으로, PV 모듈의 개구율(OR) 변화에 따른 온도변화 및 발전 성능 변화를 예측하고 이에 따른 연간 에너지 성능을 분석하는데 주목적이 있다.

1.2 연구의 방법

본 연구의 흐름은 스펠드럴 부분에 적용된 PV 모듈의 표면온도에 따른 발전 성능 저하를 분석한 선행 연구[4]를 바탕으로, 표면 온도상승을 줄이기 위한 방안을 모색하기 위해 동적 에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus

[9]을 이용하여 이론적 수치해석을 수행하였다. EnergyPlus는 실내외 환경 변화에 따라 BIPV의 표면온도가 동적으로 계산되고, 계산된 표면온도 데이터는 PV 모듈에 연동하는 복합적인 해석이 가능하여서 본 연구를 수행하는데 적합하다고 판단하였다[12][13]. 또한, 해석에 앞서 수치해석의 신뢰성 검증은 선행 연구를 바탕으로 타당성을 확보했다[4]. 이후 검증된 해석 시뮬레이션을 이용하여 스펠드럴 해석모형을 구현하고, 전면에 설치된 PV 모듈의 셀 개구율을 0%에서 70%까지 변화에 따른 표면온도 및 PV 모듈의 발전 성능을 분석하였다.

2. 선행연구 고찰 및 시뮬레이션의 개요

2.1 선행연구 고찰

현재까지 PV의 온도특성에 따른 발전 성능에 관한 많은 연구가 진행됐다. 선행연구[5]는 결정계 PV 모듈이 적용된 스펠드럴 부분의 외장 건자재 구성에 따른 투명모듈의 온도 변화와 이에 따른 발전 성능을 실측실험과 이론적 해석을 통하여 분석하였다. 결과 후면에 건자재를 적용함에 따라서 일반 투명모듈 대비 15℃ 정도 상승하는 것을 보였고, 모듈 온도 1℃ 상승에 따라서 약 0.45%의 발전량 감소를 나타냈다. 선행 연구[2]는 태양광발전(PV) 모듈을 건물 수직 외벽 재료 적용할 때 발생하는 열 및 발전 성능의 상관관계를 후면 통기 조건에 따라 실험적 방법으로 규명하였다. 분석결과 후면 통기 조건에 따라 후면 중공층 온도의 냉각 효과 및 PV 모듈의 발전 성능 개선 측면에서 효과적이라고 나타났다. 선행 연구[3]는 지붕용 건물 일체형 태양광발전 시스템(BIPV)을 건축외장재로 적용했을 때 온도 및 발전 성능의 상관관계를 규명하기 위해, 실측실험을 하였다. 분석한 결과 표면온도 차에 따른 발전 성능 차의 상관관계 분석은 PV 모듈 표면온도 1℃ 상승에 따라, 약 0.64%

1) 본 연구에서는 투명 PV 모듈 내 Cell을 제외한 투명유리의 면적 비율을 PV 모듈 개구율(OR, Opening ratio)로 정의하였다.

씩의 발전량 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 선행 연구[4]는 유리 온도 변화에 따른 열 파손과 휨 내력의 약화 때문인 유리의 파괴를 거론하고, 이를 해결하는 방안으로 투광성이 있는 아몰 힘 계열 실리콘 박막 태양전지(a-Si PV)를 스팬드럴 부위에 적용하여 일사획득계수(SHGC, Solar Heat Gain Coefficient), 후면 마감재의 떨어진 거리, 단열수준 그리고 내부표면의 흡수율에 따른 유리표면온도 줄이기를 위한 방안을 에너지해석 프로그램인 EnergyPlus를 이용하여 결과를 도출하였다. 분석 결과 창 내부표면 온도는 SHGC 및 후면 마감재 구성에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 투명복층창 대비 BIPV복층모듈은 비교적 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 이는 스팬드럴 후면 부위의 일사유입이 상대적으로 적기 때문에 투과율이 높은 투명 복층 창에 비해 내부표면온도가 낮게 상승하는 것으로 판단된다.

위와 같은 사례 검토를 통해 표면온도특성에 따라 PV 발전성능에 미치는 영향을 파악하고 해결방안을 모색하였다. 그러나 현재까지 스팬드럴 부위에 투광형 결정계 G/G 타입 PV 모듈을 적용할 때 PV 모듈의 최대성능을 장기적으로 유지하려는 해결방안에 대한 연구가 미흡한 실정이며, 이에 대한 대책으로 PV 모듈의 개구율에 따른 표면온도 및 발전성능을 분석하였다.

2.2 시뮬레이션 해석모델 개요

G/G PV 모듈의 표면 온도변화 및 발전성능을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 형태의 해석모델을 구현했다. 선행 연구[4]에서와 같이 스팬드럴 부분은 SHGC가 낮은 유리를 적용하는 것이 바람직하다. 따라서 G/G 모듈 적용 시 일사획득량을 감소시키기 위한 대안으로 개구율 변화조건을 선정하여 분석을 수행하였다. G/G BIPV 모듈의 해석조건은 각각의 면이 외기에 노출된 상태이며, 그 밖에 후

면 스팬드럴 부분은 열교가 없음을 가정하고 단열경계 조건화하여 해석을 하였다.

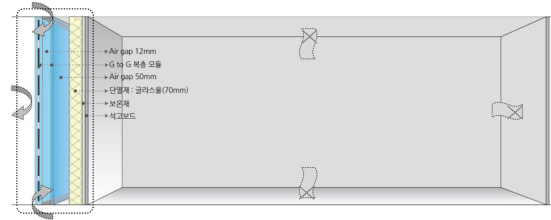


Fig. 1 Section view of the modeled spandrel by the Simulation.

G/G 타입의 복층모듈에 적용된 태양전지의 성능은 Table 1과 같으며, EnergyPlus에서 제공하는 Sandia 모델을 적용하였다. Sandia Model은 이론적 해석과 실측된 데이터를 기반으로 결과 값을 산출하며, 실측된 일사강도와 모듈의 온도변화에 따른 성능변화에 대한 계수를 적용하여 I-V 커브곡선의 변화량을 근거로 결과 값을 산출한다[9][13][14]. 따라서 Table 1과 같은 태양전지 성능을 각 개구율 변화조건에 모두 동일하게 적용하였다.

Table. 1 Properties of BIPV module(G/G Type).

Open Circuit Voltage Voc[V]	Short Circuit Current Isc[A]	Voltage at Maximum Power Point Vmp[V]	Current at Maximum Power Point Imp[A]	V/T
18.0	3.4	14.6	3.15	-0.09

V/T : Voltage Drops Coefficient (Voltage/Temperature)

해석을 위해 적용된 창호는 G/G PV 모듈로 구성된 복층 유리(10mm PV 모듈 + 12mm Air + 6mm 투명유리)가 적용되었으며, 복층창호의 열관류율 2.730W/m², 일사획득계수(SHGC) 0.763, 가시광선 투과율(T-vis) 0.814의 특성을 나타낸다. 해석을 위해 활용된 기상데이터는 태양에너지학회에서 제공하는 대전지역의 30년 표준 기상데이터를 적용했으며, Fig. 1과 같은 스팬드럴 조건으로 적용된 PV 모듈의 발전성능 향상을 위한 개선책으

로 개구율 0%(Back-sheet) 그리고 Fig. 2와 같이 G/G 타입 모듈의 개구율을 10%에서 70%까지 10%씩 총 8개의 조건으로 적용하여 PV 모듈의 표면온도 및 발전성능을 분석하였다.

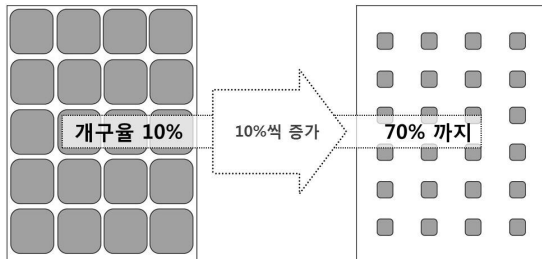


Fig. 2 Opening ratio cases from 10% to 70%.

3. 개구율 구성에 따른 온도 및 발전성능

본 장은 시간별 동적 건물에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus를 활용하여 커튼월 구조의 스펀드럴 부위 해석모델을 구현하고, PV 모듈의 최대성능을 위한 대안으로 투광형 결정계 G/G 타입의 개구율 측면에서 PV 모듈 표면온도(Cell 외측 표면온도) 및 발전효율을 정량적으로 분석하였다.

3.1 BIPV개구율에 따른 모듈의 표면온도

상기조건에 따른 해석결과를 대상으로 연중 온도가 가장 높은 대표일(9월21일)과 연간 시간별 평균표면온도의 형태로 Fig.3, Fig.4와 같이 Whisker-plot²⁾으로 나타내었다.

Fig. 3은 PV 모듈의 표면온도가 가장 높은 대표일(9월 21일)을 선정하여 분석한 결과이다. 하루 중 가장 높은 온도는 70%일 때 91.1℃를 나타냈다. 최소온도는 백 시트 유형일 때 69.5℃를 나타내었고, 개구율 10% 일 때 82.8℃를 보였다. 개구율 0%(백 시트 유형) 조건에서 개구율 10%로 증가할 때 표면온도

상승률 19.0%를 보였고, 개구율 10%에서 70%까지 10%씩 차례로 증가할 때 각 변화조건에 따른 최대 온도증가율은 평균 2.0%를 나타내었다.

Fig. 4는 연간 시간별 평균 표면온도를 분석한 결과이다. 전반적인 온도 패턴형태는 대표일(9월 21일)과 같이 나타났으며, 연간 시간별 데이터 중 12시를 기준으로 최대 온도는 70%일 때 52.5℃를 나타냈고, 최소온도는 백 시트 유형일 때 38.7℃를 보였다. 개구율 0%(백 시트 유형)에서 10% 증가 시 가장 높은 증가율 23.1%를 나타냈으며, 개구율 10%에서 70%까지 순차적인 증가에서는 평균적으로 1.6%를 보였다.

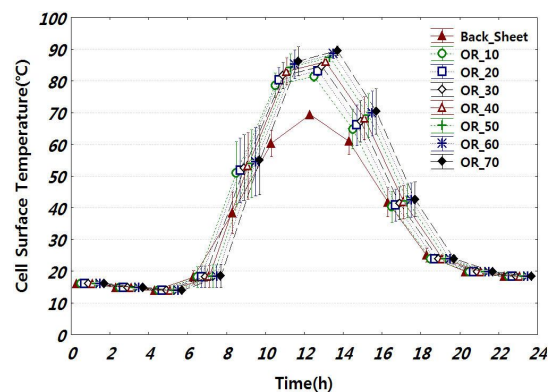


Fig. 3 The hourly change of temperature with opening ratio cases on representing day, 21 September.

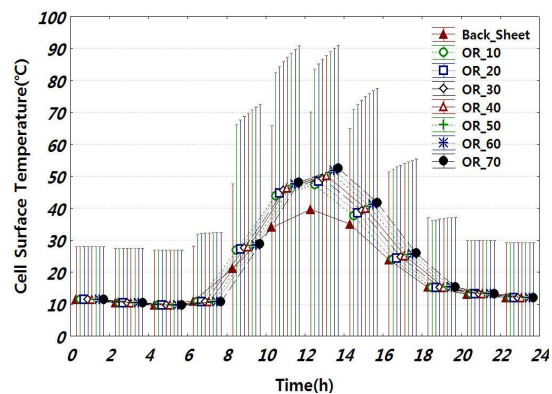


Fig. 4 The hourly change of temperature with opening ratio cases for a year.

2) * 기호는 평균값(Mean)을, 휘스커(Whisker) I 기호는 최대(Max) 및 최소값(Min)의 변화범위를 나타낸다.

Table 2는 일사량 $100\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 사이에 한정된 온도특성을 나타낸 것이며, 연간 평균온도는 개구율 0%일 때 최소평균온도는 35.5°C 를 보였고, 개구율 70%일 때 최대평균온도는 47.1°C 를 나타냈다. 개구율 0%에서 10% 증가 시 표면온도 상승률을 20%에 상대적으로 높은 비율을 나타냈으며, 10%에서 70%까지 10%씩 순차적으로 증가할 때 각각 평균적으로 2.1%의 증가율을 보였다.

Table. 2 Comparison of surface temperature with opening ratio cases.

Opening ratio cases	Maximum surface temperature($^\circ\text{C}$)	Average surface temperature($^\circ\text{C}$)
Back sheet	69.5	35.5
10%	82.8	42.6
20%	84.7	43.6
30%	85.9	44.4
40%	87.5	45.2
50%	88.8	45.9
60%	90.0	46.5
70%	91.1	47.1

Sorted Insulation from $100\text{W}/\text{m}^2$ to $1000\text{W}/\text{m}^2$

PV 모듈의 개구율 증가에 따른 표면온도 상승은 개구율이 증가할수록 셀 주변 유리면을 통하여 밀폐된 스펀드럴 부위 내부 쪽으로 유입되는 일사량이 상대적으로 많아지기 때문이라고 사료된다. 반면 가장 낮은 개구율 0%(백 시트 유형) 조건은 후면에 불투과체 구조가 적용되어 일사 유입에 대한 영향을 무시되고, PV 모듈의 열전도에 영향만 고려되어 G/G 조건대비 비교적 낮은 표면온도를 나타낸 것으로 분석된다.

위와 같은 분석을 통하여 스펀드럴 전면에 설치된 PV 모듈의 개구율에 따라서 PV 모듈의 표면온도 상승에 미치는 영향을 분석했다. 앞서 사례분석[4]을 통해 언급한 바와 같이 PV 표면온도상승은 발전성능 저하에 원인이 된다. 따라서 PV 모듈 표면온도 상승을 감소

시키는 것이 장기적인 성능향상에 기여할 수 있다고 사료된다.

3.2 BIPV개구율에 따른 모듈의 발전효율

앞서 나타낸 결과와 같이 PV 개구율 조건 변화에 따라 표면온도가 감소하는 것을 보였다. 이를 바탕으로 본 장은 표면온도에 따라 PV 모듈의 발전효율의 상관관계를 검토하기 위해 대표적인 3개 조건(개구율 0%인 Back-sheet, 개구율 10%, 개구율 70%)을 선정하여 표면온도에 따른 발전효율을 분석하였다. 여기서 발전효율은 PV 모듈 1m^2 에 입사되는 일사량 대비 생산되는 전력량의 비율을 나타낸다.

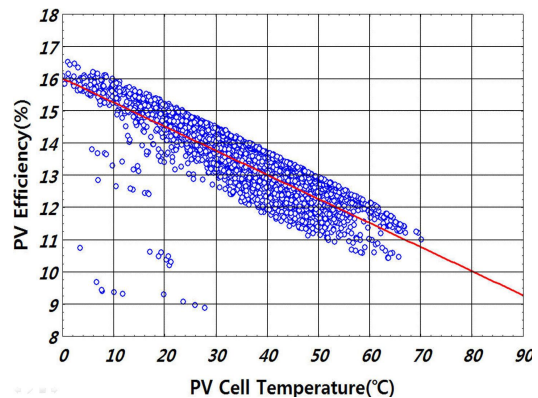


Fig. 5 G/G(Back sheet) generating efficiency according to PV cell surface temperature.

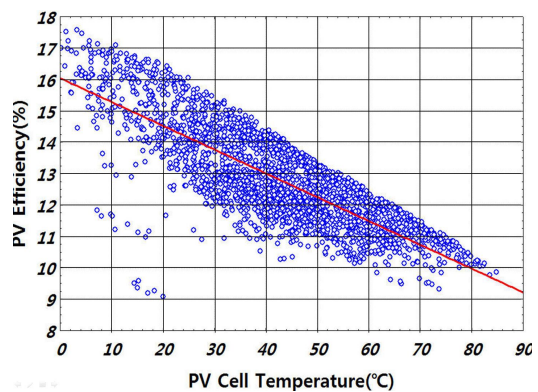


Fig. 6 G/G(OR:10%) generating efficiency according to PV cell surface temperature.

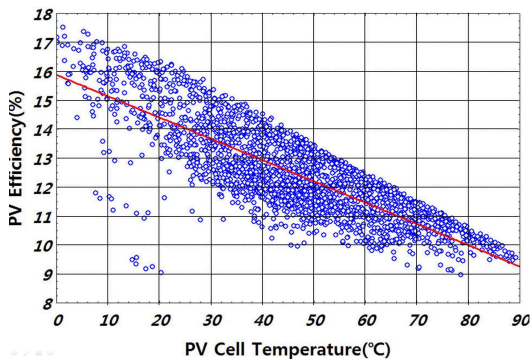


Fig. 7 G/G(OR:70%) generating efficiency according to PV cell surface temperature.

Fig. 5 - Fig. 7은 대표적인 조건의 PV 모듈의 표면온도에 따른 발전효율을 산점도로 도식한 것이며, 본 연구에서는 일사구간을 $100\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 구간에 대한 발전효율을 분석하였다. 이는 불확실한 일사구간에 따라 나타날 수 있는 오류를 최소화하고, 분석에 대한 경계조건을 설정하여 보다 더 명확한 결과를 도출하기 위함이다.

분석 결과 개구율 0%인 조건이 상대적으로 낮은 온도 분포에 따른 효율을 나타낸다. 개구율 10%와 70%의 조건은 개구율은 증가했지만, 발전효율 변화량은 많지 않았다. 연간 평균 발전효율을 보면 개구율 0% 조건이 13.3%를 나타냈고, 개구율 10% 조건은 12.8%, 개구율 70%는 12.4%로 전체적인 변화폭은 1% 이내로 낮은 변화를 보였다.

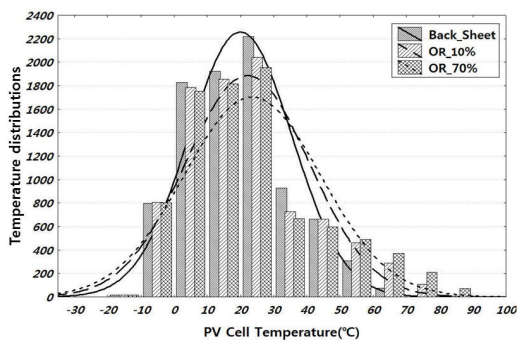


Fig. 8 Annual PV cell surface temperature distributions with three cases.

위와 같은 결과는 Fig. 8과 같은 조건별 표면온도 분포를 보면 개구율이 증가할수록 표면온도 분포범위가 고온영역으로 포함되거나 전체적인 비율로 보았을 때 그 양이 미소하기 때문에 각 조건에 따른 발전효율의 변화에 크게 미치지 않는 것으로 사료된다.

3.3 BIPV 개구율에 따른 연간누적발전량

앞서 G/G 타입의 개구율 변화에 따라 Cell 표면온도 및 PV 모듈에 발전효율의 경향을 분석하였다. 따라서 본 절은 위와 같은 조건에 따라서 BIPV의 연간 누적발전량에 미치는 영향을 분석하였다.

개구율이 증가하면 태양전지 면적의 감소에 따라 누적발전량이 대폭 감소하는 것은 매우 자명한 사실이며, 또한 유입일사량의 증가에 따라 온도영향에 따른 발전량 감소도 같이 수반된다. Table 3에서는 G/G 개구율 증가에 따른 온도상승효과로 인해 저하되는 발전성능의 영향을 고찰하기 위해 연간 총 발전량을 설치용량으로 나눈 Yield값 즉, 단위용량당 연간발전량의 형태 kWh/kWp로 결과를 제시하였다.

Table. 3 The annual energy yield (kWh/kWp) according to G/G opening ratio cases.

Opening ratio cases	The annual energy yield (kWh/kWp·year)	Decreasing rate (%)
Back sheet	978.8	0.0
10%	957.5	2.2
20%	950.2	2.9
30%	942.4	3.7
40%	935.0	4.5
50%	928.2	5.2
60%	921.8	5.8
70%	915.8	6.4

개구율 0% 조건에서 G/G모듈 1kWp에서 생산될 수 있는 연간 발전량은 978.8 kWh/kWp·year로 나타났으며, 개구율이 10% 증가한 경우 957.5kWh/kWp·year로 2.2%의 연간발전량 저

하를 나타내었다. 이후 개구율 70%로 증가할 때 연간발전량 감소율은 4.2%를 나타내었다. 이는 개구율 10% 증가에 따라 평균적으로 0.7%의 감소율을 보이는 것으로 분석되었다.

개구율이 커질수록 일사유입면적이 증가하여 스팬드럴 전면에 설치된 PV모듈의 표면 온도 상승에 따른 발전성능 저하가 Table 3과 같이 나타났다. 한편 개구율 증가에 따른 온도영향에 의한 연간발전량 감소율이 상대적으로 낮게 나타난 이유는 3.2절의 결과에서 보듯 연간 차원에서 고온영역의 분포 비율이 상대적으로 낮기 때문인 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구는 스팬드럴 부분에 투광형 결정계 G/G 타입 PV 모듈 적용 측면에서 Cell 표면 온도 줄이기에 대한 해결방안으로 PV모듈의 개구율 관점에서 PV 모듈의 Cell 표면온도 및 발전효율을 분석하고, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) G/G 개구율 변화에 따른 PV 모듈의 표면 온도 증가에 대한 분석 결과 본 조건에서 연간 최대온도는 개구율 0%(backsheet유형)시 69.5°C에 비해 개구율 70%의 경우 91.1°C로 21.6°C의 온도차를 나타내어 개구율에 따라 모듈의 온도차가 크게 발생할 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) G/G 개구율 변화에 따른 연간 평균발전효율은 개구율 0% 조건이 13.3%를 나타냈고, 개구율 10% 조건은 12.8%, 개구율 70%는 12.4%로 전체적인 변화폭은 0.9% 이내로 낮은 변화를 나타냈다. BIPV의 장기적인 측면에서 성능향상을 고려할 때 위와 같은 해결방안 모색이 필요할 것으로 사료된다.
- (3) 개구율 0% 조건의 연간 누적 발전성능은 978.8 kWh/kWp.yr로 나타났으며, 개구율이 10% 증가함에 따라 평균적으로 0.7%

의 연간 발전성능 감소율을 보이는 것으로 나타나 70% 개구율 조건에서는 총 6.4%의 연간 발전성능 저하가 나타났다. 개구율에 따른 모듈표면 최대온도의 편차가 매우 크게 나타나는 반면, 연간 발전량의 차이는 상대적으로 작게 나타났는데 이는 연간 차원에서 실제로 고온에 따른 모듈효율 저하 시점은 크기 않기 때문으로 분석되었다.

본 논문에서는 G/G유형 BIPV 모듈의 개구율 관점에서 표면온도 상승 및 그에 따른 효율저하와 연간 누적발전량의 영향에 대해 해석적 평가를 수행하였으며, 향후 장기성능의 실측데이터를 통해 개구율과 온도 및 발전성능의 관계를 규명할 예정이다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호:2011804000 0040)

References

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/spandrel>
2. Yoon, Jong-ho. Kim, Jae-ung., Experimental Study on the Thermal Effect of BIPV Modules Depending on the Ventilation Type of PV Module Backside, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol.26 No.1, 2006
3. Yoon, Jong-ho., Experimental Study on the Combined Effect Power and Heat in 3kW Roof Integrated PV Module System, Journal of the Korean Solar Energy Society, 2007. 3
4. Yoon, Jong-ho. Oh, Myung-Hwan., 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, Journal Architectural Institute of Korea, 2012
5. Pack, Kyung-Eun., Generation Characteristics of BIPV Module as Spandrel Glass according to Temperature Variation, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2007
 6. Pack, Kyung-Eun. Kang, Gi-Hwan., Experimental Verification of Prediction Equation for Crystalline PV Modules Electrical Performance Considered Temperature Variation, Journal of the Korean Solar Energy Society, 2010
 7. Sin, Chi-Ung., SI Unit Air conditioning equipment, 2008
 8. Kim, Gwang-Man. Lee, In-Hyeok., the Story of Engineer Architectural Execution, 2007
 9. EnergyPlus Engineering Reference, Lawrence Berkeley National Laboratory, p.1117 Sandia Photovoltaic Performance Model, Oct 2010,
 10. Frederick C. Winkelmann, Modeling Windows in EnergyPlus, IBPSA, Building Simulation, Sept 2011
 11. Yazdani, M. and J. H. Klems, Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 100 Part 1, p.1087, 1994
 12. B.T.Griffith, Photovoltaic and Solar Thermal Modeling with the EnergyPlus Calculation Engine, July 2004
 13. Stephen K Wittkopf, Development of a Solar radiation and BIPV Design tool as EnergyPlus Plugin for Google Sketchup, July 2009
 14. D.L King, W.E.Boyson, J.A Kratochvil, 2004, Photovoltaic Array Performance Model, Sandia National Labs,