

유한 요소 해석 프로그램을 이용한 모듈 내 온도 분포 예측

Prediction of temperature distribution in PV module using finite element method

박영은* · 정태희** · 고석환** · 주영철** · 김준태*† · 강기환**†

Park Young-Eun* · Jung Tae-Hee** · Go Seok-Hwan** · Ju Young-Chul**

Kim Jun-Tae*† and Kang Gi-Hwan**†

(Received 26 February 2016; Accepted 18 April 2016)

Abstract : PV module is installed in various outdoor conditions such as solar irradiation, ambient temperature, wind speed and etc. Increase in solar cell temperature within PV module aggravates the behaviour and durability of PV module. It is difficult to measure temperature among respective PV module components during PV module operating, because the temperature within PV module depends on thermal characteristics of PV module components materials as well as operating conditions such as irradiation, outdoor temperature, wind etc. In this paper, simulation by using finite element method is conducted to predict the temperature of each components within PV module installed to outdoor circumstance. PV module structure based on conventional crystalline Si module is designed and the measured values of thickness and thermal parameters of component materials are used. The validation of simulation model is confirmed by comparing the calculated results with the measured temperatures data of PV module. The simulation model is also applied to estimate the thermal radiation of PV module by front glass and back sheet.

Key Words : 태양전지모듈(Photovoltaic module), 열분석(Thermal analysis), 온도분포(Temperature distribution), 원부자재(Component materials), 유한요소(Finite element)

*† 김준태(교신저자) : 국립공주대학교 건축학부 건축공학과 교수

E-mail : jtkim@kongju.ac.kr, Tel : 041-521-9333

**† 강기환(교신저자) : 한국에너지기술연구원 태양광연구실 책임연구원

E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418

*박영은 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실, 공주대학교 대학원 학연석사과정

**정태희 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실

**고석환 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실

**주영철 : 한국에너지기술연구원 태양광연구실

*† Kim Jun-Tae(corresponding author) : Department of Architecture Kongju National University.

E-mail : jtkim@kongju.ac.kr, Tel : 041-521-9333

**† Kang Gi-Hwan(corresponding author) : Korea Institute of Energy Research Solar energy Department.

E-mail : ghkang@kier.re.kr, Tel : 042-860-3418

*Park Young-Eun : Korea Institute of Energy Research Solar energy Department, Graduate School of Kongju National University.

**Jung Tae-Hee : Korea Institute of Energy Research Solar energy Department.

**Go Seok-Hwan : Korea Institute of Energy Research Solar energy Department.

**Ju Young-Chul : Korea Institute of Energy Research Solar energy Department.

1. 서 론

옥외 설치된 태양전지 모듈은 일사량, 외기 온도, 풍속과 같은 환경적인 요소뿐만 아니라 설치각도, 어레이(array)구성 등과 같은 인위적인 요인에 의해 발전성능이 결정된다. 특히 태양광 시스템 내 모듈의 발전 온도는 모듈의 출력과 장기간 모듈 내구성을 결정하는 요소 중에 하나이다. 태양전지의 온도가 상승하면 단락전류가 미세하게 증가하지만 개방전압이 큰 폭으로 감소하여 태양전지의 최대 출력이 감소하게 된다. 일반적으로 결정질 태양전지 모듈에서 온도계수는 0.40~0.43%/°C 정도의 범위내로 출력이 감소하며, 반면 CIGS, Si 박막 태양전지 모듈의 온도계수는 각각 0.38%/°C, 0.27%/°C로 결정질 태양전지 모듈은 온도변화에 더욱 민감하게 반응한다고 알려져 있다.¹⁾²⁾ 또한, 태양전지모듈에 있어서 온도 상승은 봉지재가 갖고 있는 절연성, 광 투과도, 접착력 등의 고유특성이 저하되어 모듈에서 PID (Potential Induced Degradation), 변색(Discoloration), 박리(Delamination)와 같은 열화를 가속시켜 모듈의 수명을 단축시키는 중요한 요소 중하나이다. 따라서 모듈의 온도를 근본적으로 낮추기 위해 백시트 뒤에 금속재질의 방열판을 부착하거나 열전도율이 높은 백시트를 이용하여 모듈을 제작하는 기술이 발전하였다. 그러나 실제 방열효과는 백시트 이외의 다른 원부자재에 의해서도 영향을 받으므로 그 효과는 제한적이다. 따라서 모듈의 방열 특성을 보다 극대화시키기 위해서는 모듈 구조 및 원부자재의 특성을 반영한 모듈 내부 온도 분포에 대한 연구가 필요하다.³⁾⁴⁾⁵⁾

또한 일반 태양광시스템에 비해 건물에 적용하는 건물일체형이나 부착형 태양광시스템 (Building integrated photovoltaic system,

Building applied photovoltaic system)은 설치 환경의 제약에 의해 공기 흐름이 원활하지 않아 모듈의 온도가 상대적으로 높아져 시스템 출력이 낮다. 그러나 지금까지의 연구결과는 태양전지를 포함한 원부자재의 열 발생 및 이동에 관한 연구보다는 건물과 모듈사이의 설치 조건에 관한 연구결과가 주를 이루고 있다. 따라서 건물일체형 태양광 시스템에서도 발전효율을 향상시키기 위해서는 태양전지로부터 열 발생과 모듈 원부자재를 통한 열 이동 메커니즘을 분석하여 모듈 내부의 온도 상승을 억제하는 시스템 설계 기술의 개발이 요구되고 있다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾

지금까지의 모듈 내부온도는 광의 영향이 없는 백시트 후면의 온도를 측정하고 이론적 계산을 통하여 태양전지 온도를 간접적으로 확인하거나, 태양전지나 백시트 후면에 온도 센서를 설치하여 직접 내부 온도를 측정하는 방법을 주로 이용하였다. 그러나 모듈의 내부 온도는 각 원부자재의 열적 특성에 의해 차이가 날 뿐만 아니라 동일한 종류의 부자재도 제조사 및 제품에 따라 열적 특성 차가 존재함으로써 일부 모듈의 측정된 결과를 다른 모듈에 바로 적용하기에는 한계가 있다.⁹⁾¹⁰⁾ 또한 모듈 내부온도는 모듈의 원부자재 뿐만 아니라 외기온도, 풍속 등과 같은 자연환경적인 요인에 의해 크게 좌우된다. 결국 태양광 시스템의 출력 향상과 내구성 확보를 위해서는 태양광 시스템에서의 모듈의 다양한 요소를 반영한 모듈 내부 온도 해석이 요구된다.¹¹⁾¹²⁾

따라서 본 논문에서는 우선 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 모듈의 전면 유리, 봉지재, 태양전지, 백시트와 같은 모듈 원부자재 뿐만 아니라 자연환경을 고려한 모듈 내부 온도 변화에 관한 시뮬레이션을 진행하였다. 이 시뮬레이션 결과는 실제 제작된 모듈을 바탕

으로 측정된 결과와 비교함으로써 본 연구에서 진행한 시뮬레이션의 유효성을 확인하였다. 마지막으로 동일한 방법으로 외기온도, 태양전지 온도, 백시트 열전도율 변화에 모듈 내부온도를 예측함으로써 본 연구 결과에서 제안한 시뮬레이션 기법의 유용함을 확인할 수 있었다.

2. 시뮬레이션 조건

2.1 각 원부자재의 물성치 측정

우선 시뮬레이션 결과를 보다 정확하게 도출하기 위하여 태양전지를 제외한 유리, EVA, 백시트의 두께를 측정하였다. 각각의 원부자재는 버니어 캘리퍼스(Vernier calipers)를 이용하여 두께를 측정하였다. 특히 봉지재와 백시트는 라미네이션(lamination)공정에서 열과 압력에 의해 두께가 변화할 것으로 판단되어 라미네이션 이후 측정값을 적용하였다.

Table 1은 각 원부자재의 측정된 두께를 보여주고 있다.

Table 1 The measured thickness of PV module components

Material	Thickness[mm]
Glass	3.2
EVA	0.45
Cell ¹³⁾	0.18
Backsheet	0.446

또한, 본 연구에서는 모듈의 내부온도를 결정하는 가장 중요한 요소인 각 원부자재의 전도율, 비열, 밀도와 같은 파라미터는 NETZSCH사의 LFA 427(Laser flash apparatus) 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 태양전지를 열원으로 가정하였을 뿐만 아니라 실리콘 계열

의 태양전지 경우 거의 일정한 물성값을 가지고 있어 기존 문헌의 결과를 그대로 이용하였다.¹³⁾ Table 2는 각 원부자재의 전도율, 비열, 밀도에 관한 물성치를 보여주고 있다.

Table 2 The measured thermal parameters of PV module components

Material	Thermal Conductivity [W/m·K]	Specific Heat [J/kg·K]	Density [g/cm ³]
Glass	1.094	855	2.500
EVA	0.315	3346	0.927
Cell	130	677	2.330
Backsheet	0.314	2217	1.144

2.2 유한요소 모델링 및 하중·구속조건 정의

태양전지 모듈을 Fig. 1과 같이 24개의 태양전지로 구성된 모듈에 전면유리, EVA, 태양전지, 백시트의 두께가 각각 3.2mm, 0.4mm, 0.18mm, 0.446mm 가지며, 단면 구조는 전면유리, EVA, 태양전지, EVA, 백시트로 구성된 모듈을 기준으로 모델링하였다. 본 연구에서 시뮬레이션은 태양전지 모듈의 원부자재 사이의 수직적 온도분포를 확인하고자 서로 다른 원부자재가 만나는 지점에서 온도를 확인하였다. 태양전지모듈 모델링은 Table 1의 측정된 원부자재의 두께와 Table 2의 열적 변수 값을 대입하여 시뮬레이션을 진행하였다. 모델링은 ANSYS 프로그램 내에 있는 Workbench를 이용하였다. 외기온도와 모듈사이의 열 교환이 이루어지게 하기 위해 유동장을 형성하고 Inlet과 Outlet을 설정하여 y축의 양(+)에 방향에서 음(-)의 방향으로 자연대류 조건을 만들었다. 또한 유동장과 태양전지모듈 구조를 모두 하나의 구성단위(Part)로 설정하고 서로 접하고 있는 태양전지 모듈 원부자재의 모든

부분을 연결(Coupled) 되도록 하여 열의 이동을 가능하게 하였다.

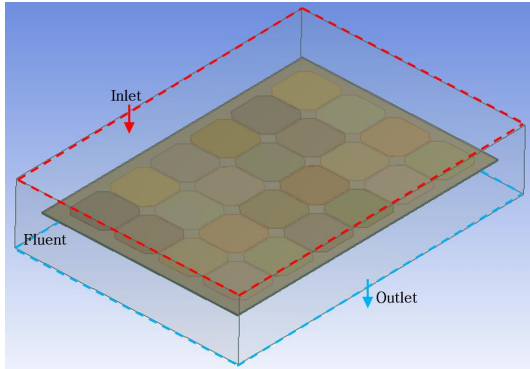


Fig. 1 The model of PV module

3. 실험 및 시뮬레이션 비교

3.1 실험 조건

본 실험은 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실제 모듈의 내부온도를 측정하였다. 이를 위하여 약 17%의 효율을 갖는 단결정 태양전지를 이용하였으며, 각 원부자재는 표 1과 표 2에서와 동일한 제품을 적용하여 모듈을 제작하였다. 이때 지름이 0.127mm이고, 측정 범위는 $-200^{\circ}\text{C} \sim 2000^{\circ}\text{C}$ 이며, 약 $\pm 0.05\%$ 이내의 측정오차를 가지는 K-type TC(Thermal Couple)를 이용하여 Fig. 2에서와 같이 유리 전면(Glass), 유리와 EVA 사이(F_EVA: front EVA), 태양전지 전면(F_Cell: front Cell), 태양전지 후면(B_Cell: Cell Back), EVA와 Backsheet 사이(B_EVA: EVA Back), 모듈후면(Back)에 각각 삽입하였다.

데이터 로거와 온도센서를 포함한 측정오차를 확인하기 위하여 일정한 온도에서 테스트한 결과 약 0.1°C 미만의 오차를 가지는 것을 확인하였다. 실험에 사용된 태양전지 모듈은 옥외에 30° 각도로 설치하고 모듈후면은 외부

공기 흐름을 원활하게 흐를 수 있게 설치하였다. 모듈의 두 전극은 일사량에 의해 태양전지 온도상승을 극대화시켜 내부 원부자재 별 온도분포를 명확하게 구분하기 위하여 개방상태로 두었다. 측정기간은 2015년 10월 3일부터 6일까지 4일간 실험을 진행하였다.

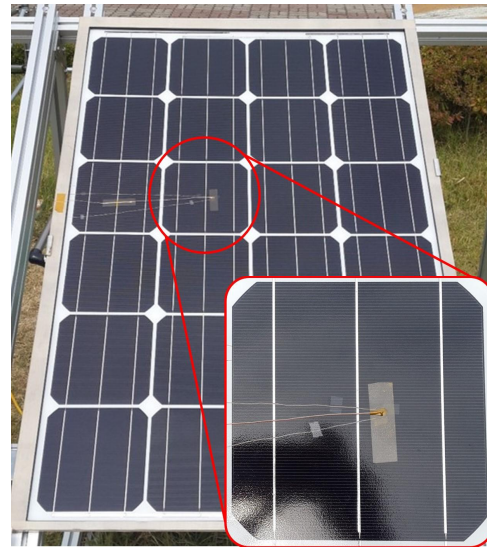


Fig. 2 The manufactured PV module with TC

3.2 실험 및 시뮬레이션 결과

본 장에서는 옥외에 설치된 태양전지모듈 구성부재 사이의 온도분포를 확인하고 시뮬레이션 검증을 위해 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 우선 일사량이 $200\text{W}/\text{m}^2$ 이하에서는 온도가 가장 높은 태양전지 후면과 유리나 백시트의 외부 온도차가 약 1°C 미만 나타났다. 그렇지만 일사량의 범위가 $500\text{W}/\text{m}^2$ 으로 증가하면 온도차이가 약 3°C 로 증가하고, 일사량이 $800\text{W}/\text{m}^2$ 일 경우 온도차이가 약 4°C 까지 증가하는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. Fig. 3은 일사량에 따른 태양전지모듈의 태양전지 후면, 유리 전면, 백시트 후면의 각각의 측정된 온도를 보여주고 있으며, 또한 이

결과를 바탕으로 온도 차를 표 3에서 나타내었다.

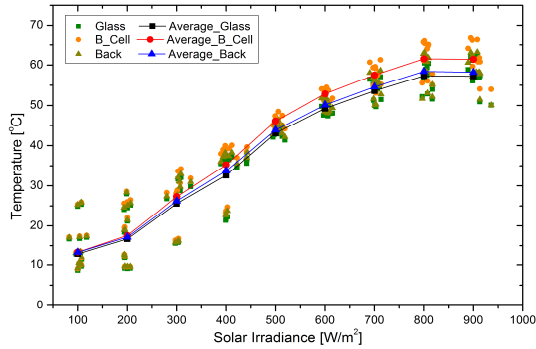


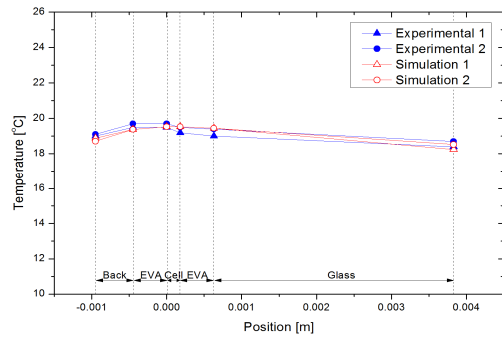
Fig. 3 The measured temperature of glass, solar cell, back sheet in PV module according to increase in solar irradiance

Table 3 The difference temperature of respective PV module components base on Fig. 3

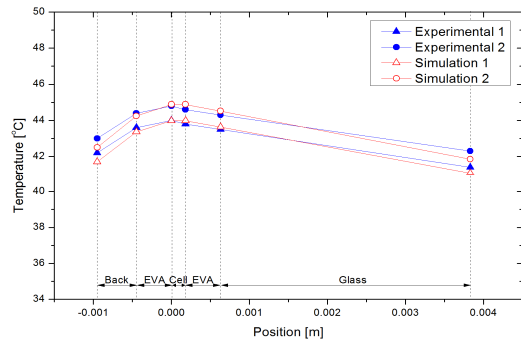
Temperature[°C] Irradiance[W/m ²]	(B_Cell) -(Glass)	(B_Cell) -(Back)
100	0.450	0.040
200	0.873	0.391
300	1.717	1.083
400	2.583	1.467
500	3.025	2.225
600	3.625	2.742
700	3.908	2.917
800	4.183	3.075
900	4.158	3.200

다음은 Table 1과 Table 2의 모듈 원부자재의 물성 값을 대입하고 Fig. 3의 실험을 통해 측정된 태양전지 후면 온도와 외기온도, 풍속을 시뮬레이션에 적용하였다. Fig. 4는 일사량이 200, 500, 800W/m²일 때의 측정된 결과와 시뮬레이션 통해 얻은 결과를 보여주고 있다. Fig. 4 (a)의 경우는 외기와 태양전지 모듈의 온도가 차이가 미미하게 나타나지만 Fig. 4

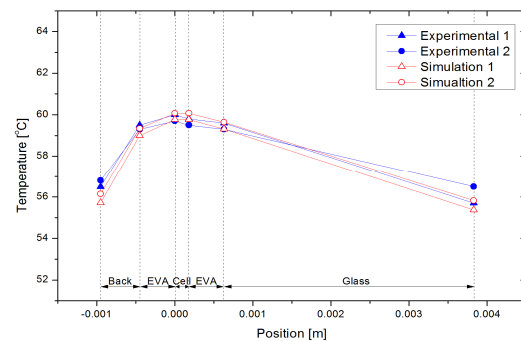
(b)(c)에서 보다시피 외부 공기와 접해있는 유리 전면과 백시트 후면에서의 각각 1.47%와 1.38%로써 가장 큰 오차를 가지는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Temperature distribution of experimental and simulation in the thickness of the PV modules. (solar irradiance : (a) 200W/m², (b) 500W/m² and (c) 800W/m²)

그러나 모듈 내부 온도의 경우 오차율이 0.5% 이내의 정확도를 가지면서 온도를 예측할 수 있었다. 이는 시뮬레이션에 의해 모델링 된 모듈 주변의 공기흐름이 실제 측정된 풍속 및 풍향의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한 모듈의 내부온도와 유리 전면 및 백시트 후면을 비교해 보면 각 원부자재가 가지고 있는 열적 특성보다는 외부온도에 의해 많이 좌우되어 온도가 유사한 것을 관찰할 수 있다.

4. 다양한 조건에 따른 모듈 내부 온도분포 예측

마지막으로 모듈 내부의 온도 분포를 예측하기 위해 제안한 유한요소 시뮬레이션 기법이 실제 다양한 조건에 적용함으로써 활용성을 확인하였다. 외기온도와 태양전지 온도, 백시트의 열전도율 변화에 의한 태양전지 모듈 원부자재 사이에서의 온도분포를 동일한 시뮬레이션 기법으로 예측하였다.

4.1 태양전지 및 외기온도에 따른 모듈 내부 온도 변화

본 연구는 우선 동일한 일사량일 때 외기온도의 변화에 의한 모듈 내 각 구성 소재 사이의 온도 차를 예측하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 태양전지 온도를 60°C로 일정하게 설정하고 외기온도를 -10°C에서 +40°C 까지 변화시키면서 시뮬레이션 결과를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 이와 같은 온도변화에 유리 전면보다 백시트 후면의 온도 차가 약 0.5°C 작으며, 또한 백시트와 EVA사이의 온도차는 유리와 EVA 사이보다도 약 0.4°C 크게 변화하는 것을 Fig. 6에서 관찰할 수 있다. 이와 같은 현상은 열 전도율이 백시트 보다 유리가 더 높지만 상대적으로 유리의 두께가 훨씬 두꺼워 내부 열이 백시트를 통하여 더욱

많이 발산하는 것을 추정할 수 있다.

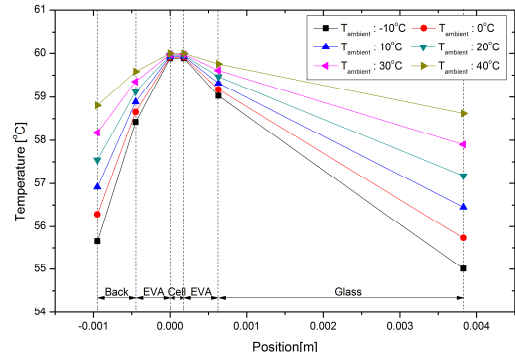


Fig. 5 The calculated temperature distribution of PV module components according to the ambient temperature

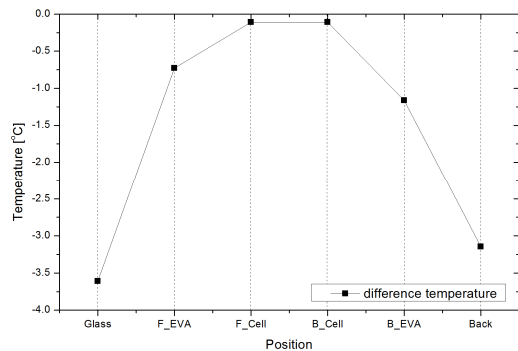


Fig. 6 The difference temperature between two contacted PV module components base on Fig.5

한편 일사량이 증가하여 태양전지 온도가 상승 하였을 때 모듈 표면에서의 온도 변화를 시뮬레이션 하였다. 이를 위해 자연대류 상태에서 외기온도가 25°C 일 때 태양전지온도가 30°C부터 60°C까지 증가할 때 유리 전면과 백시트 후면의 온도 변화를 시뮬레이션 하였다. Fig. 7에서와 같이 태양전지 온도가 상승함에 따라 유리와 백시트의 온도도 동시에 상승하지만 그 차이는 점점 증가하여 태양전지 온도가 60°C경우 유리 전면과는 약 2.448°C, 백시트와는 약 1.448°C 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이 또한 모듈

내 태양전지에 발생하는 열은 백시트의 후면을 통하여 주로 발산함으로써 백시트와 태양전지 사이의 온도차가 상대적으로 적은 것으로 판단된다. 따라서 모듈의 방열 효과를 극대화시키기 위해서는 유리의 두께를 줄이고, 백시트의 방열 성능을 높이는 연구가 필요함을 본 시뮬레이션 결과를 통하여 확인할 수 있다.

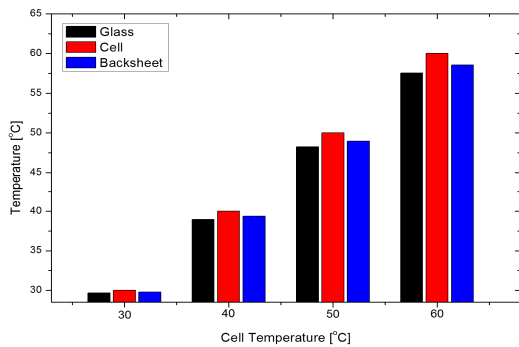


Fig. 7 The temperature of surface of PV module according to increase in solar cell temperature in PV module

4.3 백시트의 열 전도율에 따른 모듈 후면 온도변화

다음은 서로 다른 열전도율을 가지는 백시트를 적용할 경우 모듈의 방열 효과를 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하였다. 우선 그림 4의 결과를 얻기 위해 적용한 물성치 중 단지 백시트의 열전도율만 변화시켜 백시트의 후면 온도변화를 시뮬레이션 하였다. 이때 백시트의 방열 특성에 의해 표면 온도 변화를 명확하게 구분하기 위해 태양전지 온도는 60°C로 가정하였다.

Fig. 8에서 보다시피 백시트의 열 전도율이 약 0.5W/m·K이하 일 때는 열 전도율 변화에 의한 백시트 후면 온도가 급격하게 변화하여 방열 효과가 두드러지지만 열전도율이 0.5/m·K 이상인 경우 그 효과는 미미한 것을 알 수 있다. 따라서 백시트의 방열 기능에 필요한 열전도율은 약 0.5/m·K정도일 때 가장 합리적인 범위인 것을

본 시뮬레이션 결과를 통하여 알 수 있었다.

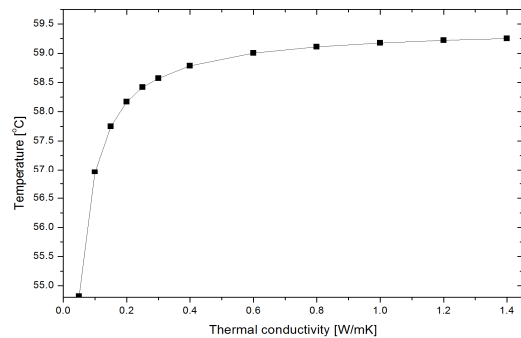


Fig. 8 The calculated temperature of rear back sheet in PV module by changing thermal conductivity of back sheet

5. 결 론

본 논문에서는 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 모듈의 원부자재 뿐만 아니라 외기 온도에 의한 모듈 내부온도 변화를 예측하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과는 실제 옥외 설치된 모듈의 내부온도를 측정된 실험 결과와 비교하여 유효성을 확인하였다. 마지막으로 동일한 시뮬레이션 방법으로 몇 가지 다양 조건에 대해 모듈의 온도 변화를 예측함으로써 본 연구에서 제안한 시뮬레이션 기법의 활용성을 확인하였다.

- (1) 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 통하여 모듈 구성 소재별 온도 분포를 시뮬레이션 하였으며, 실제 제작된 모듈을 옥외 설치하여 측정된 온도 결과와 비교하였을 때 약 2%이내의 오차를 가지고 예측 가능함을 확인할 수 있었다.
- (2) 이와 같은 시뮬레이션 기법은 모듈 구조나 원부자재와 상관없이 태양전지모듈의 온도 분포를 정량적으로 분석할 수 있으므로 방열에 효과적인 태양전지 모듈의 제작 조건을 강구하는데 활용될 수 있음을 보았다.

- (3) 다양한 모듈 설치환경에서 열에 의한 모듈의 내구성 및 발전 성능향상을 위하여 합리적인 원부자재의 선정과 최적화된 모듈 제작 조건을 찾는 데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.
- (4) 본 연구에서는 열의 발생을 태양전지에서 국한하였을 뿐만 아니라 환경적인 요인에 의해 태양전지 열 발생 정도를 무시하였다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 다양한 환경 조건에서 태양전지, 리본이나 기타 원부자재의 열 발생에 관한 추가적인 해석 및 분석이 요구된다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 결과입니다.(No.20143010011820, No.20134010200540)

Reference

1. E. Skoplaki, J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations, *Solar energy*, Vol. No 83, pp. 614-624.
2. Yamawaki. T, Mizukami. S, Masui, T, Takahashi. H, Experimental Investigation on generated power of amorphous PV module for roof azimuth, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 67, pp. 369 - 377, 2011
3. Lee. C. G, Kim. K. S, Kang. G. H, Analysis with aging case of field exposed PV modules, *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 11, pp. 409-414, 2010
4. Lee. E. S, Jung. T. H, Go. S. H, Ju Y. C, Chang. H. S, Kang. G. H, PID recovery characteristics of photovoltaic modules in various enviromental conditions, *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 10, pp. 57-65, 2015
5. Kim, Y. S., Hong, J. W., A study on efficiency improvement of solar cell temperature dependence, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 7, pp. 847-848, 2012
6. Bloem. J.J., Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment, *Building and Environment*, Vol. 43, pp.205 - 216, 2008
7. Kim. B. N, Yoon. J. H, Shin. U. C, An experimental study on pelationship between temperature change and generation performance of a-Si BIPV window system, *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, pp. 179-184, 2012
8. M.C. Alonso Garcia, J.L. Balenzategui, Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp.1997-2010, 2004
9. G. Notton, C. Cristofari, M. Mattei, P. Poggi, Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 2854-2877. 2005
10. Kim. K. S, So. J. H, Kang. K. H, Yu. G. J, Yoon. S. G, Evaluation of electric and thermal characteristics of Photovoltaic module under various temperature and irradiance conditions, *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 12, pp. 125-130, 2010
11. Y. Lee, A. A. O. Tay, Finite element thermal analysis of a solar photovoltaic module, *Energy Procedia*, Vol. 15, pp. 413-420, 2012
12. Kim. J. P, Park. H. W, Jeon. C. H, Chang. Y. J, A study on the thermal characteristics of photovoltaic modules, *The Korean Society For New and Renewable Energy*, Vol. 10, pp. 121-123, 2008
13. J. Zhou, Q. Yi, Y. Wang, Z. Ye, Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation, *Solar Energy*, Vol. 111, pp. 97-103, 2015