

CPV 냉각용 열분산기 모듈의 열성능에 관한 실험적 연구

도규형*, 한용식**, 최병일***, 김명배****

*한국기계연구원(kyudo@kimm.re.kr), **한국기계연구원(yshan@kimm.re.kr),
한국기계연구원(cbisey@kimm.re.kr), *한국기계연구원(mbkim@kimm.re.kr)

Experimental Investigation on the Thermal Performance of a Heat Spreader Module for the CPV Cooling

Do, Kyu-Hyung* Han, Yong-Shik** Choi, Byung-Il*** Kim, Myung-Bae****

*KIMM(kyudo@kimm.re.kr), **KIMM(yshan@kimm.re.kr),
KIMM(cbisey@kimm.re.kr), *KIMM(mbkim@kimm.re.kr)

Abstract

In this paper, the thermal performance of a heat spreader module for CPV(Concentrating Photovoltaic) cooling is experimentally investigated. In order to evaluate the thermal performance of the heat spreader module which consists of a Metal PCB and an aluminum alloy heat spreader, experiments are conducted with varying the type of the metal PCB, the thickness of the heat spreader, the inclination angle, and the applied heat flux. To validate the experimental data, three dimensional numerical simulations are performed using the commercial simulation tool in the present work. The experimental results are compared with the corresponding numerical results and are in close agreement with the numerical results. From the experimental results, the temperature difference between the maximum temperature and the ambient temperature increases with decreasing the thickness of the heat spreader and with increasing the applied heat flux. Also, it is found that the inclination angle significantly affects the thermal performance of the heat spreader. the maximum temperature difference of the heat spreader with the horizontal orientation is much larger than that with the vertical orientation.

Keywords : 열분산기 모듈(Heat spreader Module), CPV(Concentrating photovoltaic), 열성능(Thermal performance), 메탈 PCB(Metal PCB)

기 호 설 명

L	: 열분산기 길이 (mm)	T	: 온도 (°C)
Q_{in}	: 열입력량 (W)	t	: 열분산기 두께 (mm)
		W	: 열분산기 폭 (mm)

투고일자 : 2011년 7월 18일, 심사일자 : 2011년 7월 19일, 게재확정일자 : 2011년 8월 23일
교신저자 : 도규형(kyudo@kimm.re.kr)

1. 서 론

에너지에 대한 세계 수요는 2050년까지 지금의 두 배 이상 그리고 21세기 말에는 지금의 세 배까지 증가할 것으로 예상하고 있다. 그러나 현재의 에너지원으로는 급격히 증가하는 에너지 수요를 따라 잡기 힘들다. 따라서 미래에는 친환경적인 동시에 지속 가능한 에너지원을 찾는 것이 현 사회의 도전 과제 중의 하나이다¹⁾.

태양에너지는 기존의 에너지원을 대체할 수 있는 에너지원 중의 하나이다. 태양에너지 기술은 태양광을 집적하는 방법과 태양열을 이용하는 방법으로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 태양전지를 사용하는 집광형 태양전지(Concentrating Photovoltaic, CPV) 모듈을 다루고자 한다. 집광형 태양전지 모듈은 고가의 태양전지를 거울 또는 프레넬 (Fresnel) 렌즈와 같은 상대적으로 저렴한 광학적인 집광 장치로 대체하여 전기 생산단가를 줄일 수 있는 방법 중의 하나로 최근 그 관심이 증가하고 있다²⁾. 그러나 CPV 시스템에서 III-V 족 태양전지의 경우 흡수된 태양에너지가 전기에너지로 변환되는 비율은 35 ~ 39% 정도이다³⁾. 흡수된 에너지의 나머지 부분은 열에너지로 변환되며 열에너지를 대기로 효율적으로 방열하지 못할 경우 태양전지의 온도를 상승시켜 발전 효율을 감소시키게 된다. 뿐만 아니라 III-V 족 태양전지의 크기는 수십~수백 mm² 정도로 매우 작기 때문에 태양전지 모듈 내에 고열유속을 가지는 열점(Hot Spot) 가지게 된다. 이 영역에서는 CPV 모듈 평균 값의 수에서 수십 배 높은 고열유속을 가지기 때문에 태양전지의 작동온도를 상승시켜 장기적인 신뢰성 저하를 유발 할 수 있다⁴⁾. 따라서 고집광 태양전지 모듈의 효율 및 장기적 신뢰성 향상을 위해서는 반드시 냉각 시스템이 필요하다⁵⁾.

기존의 많은 연구자들이 태양 전지용 냉각

시스템에 대한 연구를 수행하였다. 몇몇 연구자들은 태양전지 모듈을 냉각하기 위해 히트 싱크로 금속 판을 사용하였다⁶⁾⁷⁾⁸⁾. Zhu et al.⁹⁾은 고밀도의 태양전지를 냉각하기 위해 수냉식 열교환기를 사용하였다. Cheknane et al.¹⁰⁾은 집광형 태양전지를 냉각하기 위해 히트 싱크와 히트 파이프로 구성된 냉각장치를 사용하였다.

본 연구에서는 위에서 언급한 냉각 방식 중에서 공기를 이용하는 수동형 냉각 방식을 사용하고자 한다. 특히, 집광된 태양에너지를 흡수하는 태양전지는 충분한 냉각 면적을 확보하지 못하기 때문에 냉각 면적을 확보하기 위해 메탈 PCB와 열분산기로 구성된 열분산기 모듈(Heat Spreader Module)의 열성능 평가를 위한 실험적 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 메탈 PCB의 종류, 열분산기의 두께 및 가해지는 열유속이 집광형 태양전지 모듈의 최대 온도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 또한 열분산기의 위치(수직 또는 수평 방향)가 열성능에 미치는 영향에 대해 조사하고자 한다.

2. 발열량 산정

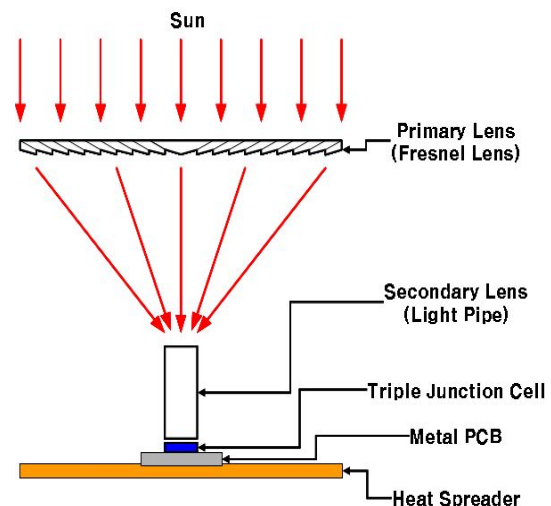


그림 1. CPV 시스템 개략도

본 연구에서 개발하고자 하는 CPV 시스템의 개략도는 그림 1과 같다. 집광 시스템의 경우, 1차 및 2차 렌즈로 구성된다. PV셀에서 발생하는 열량을 계산하기 위해서는 직달일조 강도, 1차 및 2차 렌즈의 광효율, PV셀 AR (Anti-Reflective) Coating Layer에 의한 반사율, PV셀의 발전효율 등을 고려하여야 하며 최종 발열량은 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$Q_{in} = G \times \eta_{1st} \times \eta_{2nd} \times A \times (1 - R) \times (1 - \eta_{cell}) \quad (1)$$

여기서, G , η_{1st} , η_{2nd} , A , R , η_{cell} 은 각각 직달일조 강도, 1차 및 2차 렌즈 광효율, 1차렌즈 면적, PV셀 반사율 및 발전효율을 나타낸다. 본 연구에서 개발하고자하는 1차 및 2차 렌즈 목표 광효율은 각각 80% 및 85%이며, 1차렌즈 면적은 224 mm×224mm이고 PV셀의 발전효율은 35%이다. PV셀의 AR Coating에 의한 반사율 값은 Kumar et al¹¹⁾의 실험결과를 토대로 Single Layer SiN AR Coating과 Double Layer SiN AR Coating의 측정 평균치인 12.7%를 사용하였다. 표 1은 직달 일조 강도 변화에 따라 PV셀에서 발생하는 열량을 나타내고 있으며, 최대 발열량은 17W임을 알 수 있다.

표 1. 직달 일조 강도 변화에 따른 PV셀의 발열량

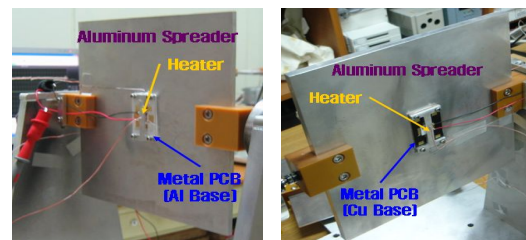
CASE	직달 일조 강도	발열량
Primary Lens Only (광효율: 80%)	800 W/m ²	18 W
	850 W/m ²	19 W
	900 W/m ²	21 W
Primary Lens / Secondary Lens (광효율: 80% / 85%)	800 W/m ²	15 W
	850 W/m ²	16 W
	900 W/m ²	17 W

3. 실험장치 및 방법

3.1 열분산기 모듈

본 연구에서는 열분산기 모듈의 열성능을 평가하기 위해, 메탈 PCB 종류, 열유속, 열분산기 두께, 그리고 열분산기의 위치를 변화시

키면서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 열분산기 모듈은 그림 2와 같다. 열분산기 모듈은 박막 히터, Metal PCB, 열분산기로 구성된다. 메탈 PCB는 34mm×52 mm의 크기와 2.15mm의 두께를 가지며, 알루미늄 합금($k=170W/mK$)을 Base로 하는 Metal PCB와 구리($k=380W/mK$)를 Base로 하는 Metal PCB 2종을 사용하여 실험을 수행하였다. 박막 히터(전기저항: 3.6 Ω)는 태양전지에서 발생하는 열유속을 모사하기 위해 10mm×10mm의 크기로 제작하였다. 열분산기는 224mm×224mm의 면적을 가지며, 두께는 3mm, 5mm, 10mm의 3가지로 알루미늄 합금($k_{HS} = 167W/mK$)의 재질로 제작하였다. 열분산기 모듈의 열성능 향상을 위해 열전도도가 우수한 구리 재질의 열분산기를 고려할 수 있으나, 구리의 밀도($\rho = 8,933kg/m^3$)가 알루미늄 합금의 밀도($\rho = 2,700kg/m^3$)에 비해 3.3배 크기 때문에¹²⁾ 냉각시스템의 무게를 최소화하기 위하여 알루미늄 합금 재질의 열분산기를 선택하였다. 또한 본 연구에서는 접촉 열저항을 최소화하기 위하여 Thermal Grease (TC 5080, Dow Corning)를 박막 히터, 메탈 PCB, 열분산기 사이에 각각 적용하였다.



(a) Al Base Metal PCB (b) Cu Base Metal PCB

그림 2. 열분산기 모듈 구성도

3.2 실험장치 및 실험방법

그림 3은 실험장치의 사진을 나타내고 있다. 실험 장치는 크게 열분산기 모듈, 지지대, 그리고 데이터 획득 장치로 구성된다. 입력열량은 Power Supply(E3633A, Agilent Technology)에서 박막 필름 히터로 공급된다. 박막 히터,

Metal PCB 후면, 열분산기 후면의 온도를 측정하기 위하여 3개의 J-type 열전대를 사용하였으며, 열전대 위치는 그림 4와 같다. 데이터 획득 장치(34970A, Agilent Technology)는 열전대의 온도 값을 얻는데 사용하였다.

실험은 열분산기 면적을 224mm×224mm로 고정한 상태에서 메탈 PCB 종류, 열유속, 열분산기 두께, 및 방향을 변화시키면서 수행하였다(표 2 참조). 측정 온도 값들의 변화가 2분 동안 ±0.1℃ 이하일 때 정상상태로 간주하여 열분산기 모듈의 최종 온도 값을 결정하였다.

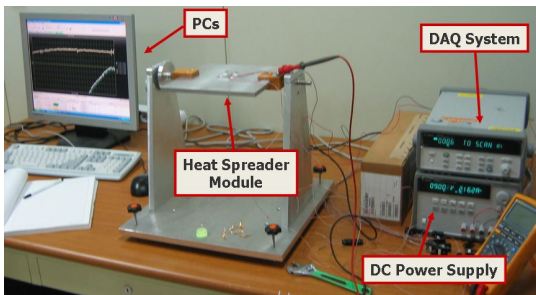


그림 3. Experimental apparatus

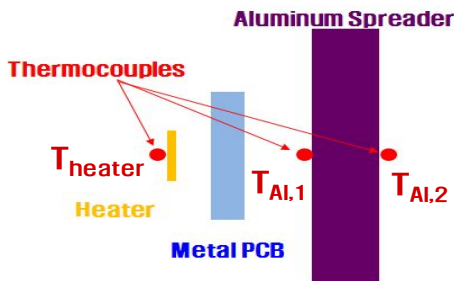


그림 4. 열전대 위치

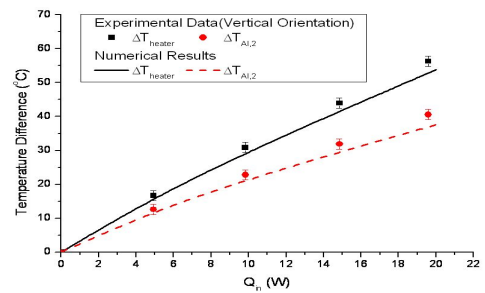
표 2. 실험에 사용된 열분산기 형상 변수 및 열입력량

No.	Metal PCB Type	L(or W) (mm)	t (mm)	Q _{in} (W)
Spreader 1	Al Base Metal PCB	224	10	5,10,15,20
Spreader 2			5	5,10,15,20
Spreader 3			3	5,10,15,20
Spreader 4	Cu Base Metal PCB	224	10	5,10,15,20
Spreader 5			5	5,10,15,20
Spreader 6			3	5,10,15,20

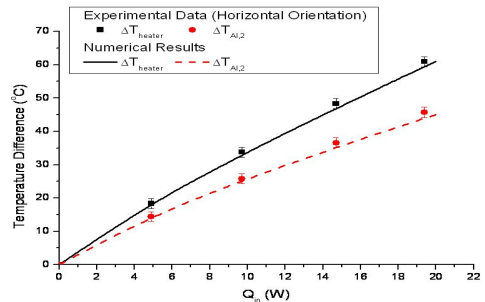
4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과의 타당성 검증

본 연구에서 수행한 실험 결과의 타당성을 확인하기 위해 수치 해석결과와의 비교를 수행하였다. 수치해석은 상용 코드인 ICEPAK을 이용하여 수행하였다.



(a) Vertical orientation



(b) Horizontal orientation

그림 5. Comparison between experimental and numerical results for temperature difference

그림 5는 알루미늄 합금을 Base로 하는 메탈 PCB를 사용하고 3mm의 두께를 가지는 열분산기를 적용할 경우, 열입력량 및 위치변화에 따른 열분산기의 발열부 및 열분산기 후면의 온도에 차이에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 그래프를 나타내고 있다. ΔT_{heater} , $\Delta T_{Al,1}$, $\Delta T_{Al,2}$ 는 각각 열분산기 모듈의 발열부와 대기와의 온도차, 메탈 PCB 후면과 대기와의 온도차, 열분산기 후면과 대기와의 온도 차이를 나타낸다. 그림 5의 결과로부터

실험 결과와 수치해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 본 연구에서 수행한 실험 결과가 타당함을 보였다.

4.2 실험 결과의 고찰

그림 6은 알루미늄 합금을 Base로 하는 메탈 PCB를 사용한 열분산기 모듈의 열분산기 두께를 각각 10mm, 5mm, 3mm로 고정된 상태에서 열입력량과 열분산기 모듈의 방향 변화에 따른 온도차, ΔT_{heater} , $\Delta T_{Al,1}$, $\Delta T_{Al,2}$ 를 나타내고 있다.

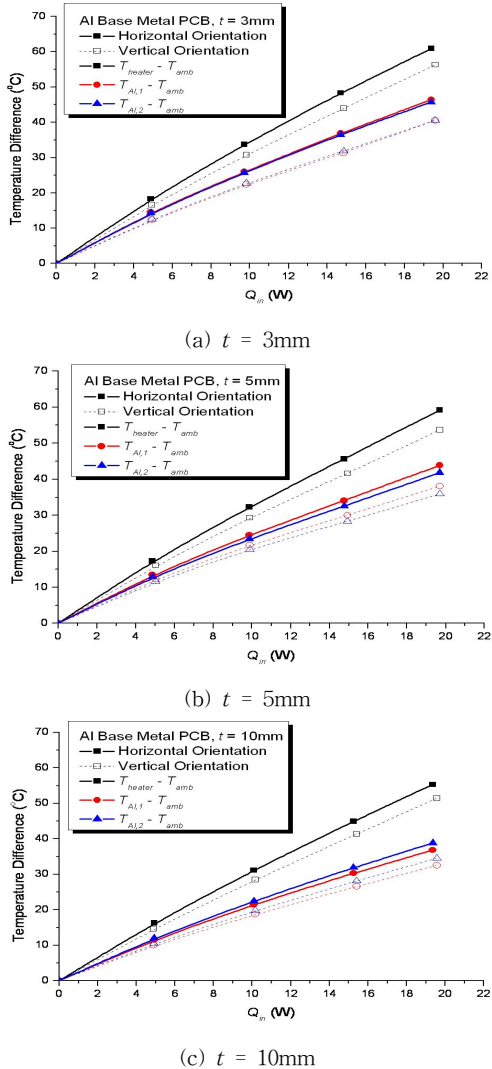


그림 6. Experimental results (Al Base Metal PCB)

그림 7은 구리를 Base로 하는 메탈 PCB를 사용한 열분산기 모듈의 온도차 측정결과를 나타낸 그래프이다.

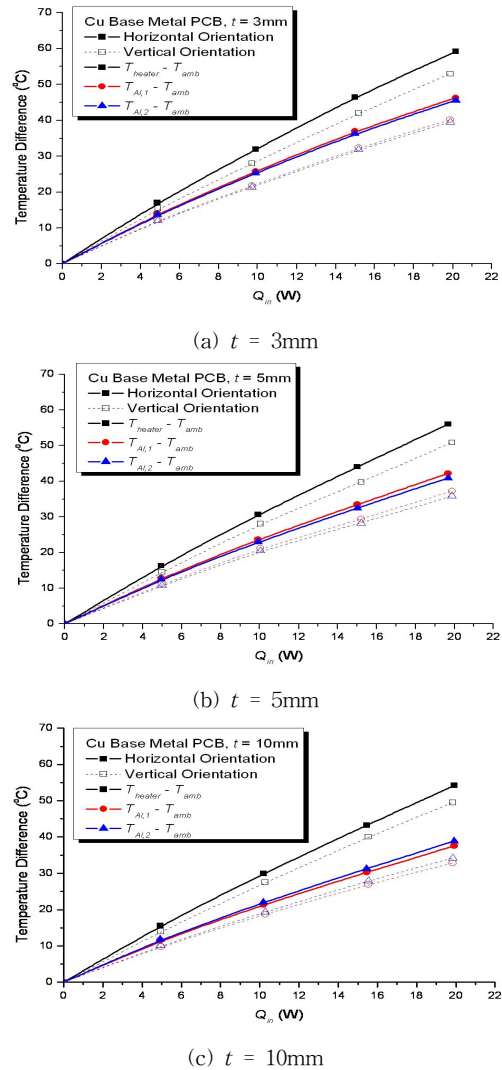


그림 7. Experimental results (Cu Base Metal PCB)

그림 6과 그림 7의 그래프에서 알 수 있듯이, 열입력량이 증가할수록 열분산기 두께가 감소할수록 박막 히터와 대기온도 사이의 온도차가 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

열입력량이 증가할수록 온도차가 증가하는 이유는 방열을 위한 열전달 면적이 고정된 상

태에서 온도차 증가에 의한 자연 대류 열전달량의 증가에 비해 열입력량 증가가 크기 때문이다. 열분산기 두께가 감소함에 따라 온도차가 증가하는 이유는 박막 히터에서 발생하는 국부 열유속이 열분산기에서 충분히 분산되지 못하여 열분산기 후면의 열전달면적을 효율적으로 사용하지 못하기 때문이다. 일반적으로 분산 열저항(Spreading Thermal Resistance)은 열분산기의 열전도도가 증가할수록, 열분산기 두께가 증가할수록 감소한다¹³⁾. 그림 6과 그림 7의 결과에서 알 수 있듯이, 수직방향을 가지는 열분산기 모듈의 온도차가 수평방향을 가지는 열분산기 모듈의 온도차에 비해 낮다. 이는 수직방향일 경우 열분산기 후면에서 자연대류에 의한 열전달 계수가 수평방향일 경우 열분산기 후면에서 자연대류에 의한 열전달 계수에 비해 커서 방열량이 증가하여 열분산기 모듈의 온도를 감소시키기 때문이다.

그림 8은 열입력량, $Q_m=20W$ 에서 수치해석을 통해 구한 열분산기 두께 변화에 따른 열분산기 후면의 온도 분포를 나타내고 있다. 열분산기의 두께가 $t=3mm$ 인 경우, 박막 히터에서 발생한 열이 충분히 분산되지 못해 온도가 불균일함을 알 수 있다. 반면에 $t=10mm$ 인 경우는 열분산기 후면의 온도가 비교적 균일함을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 열분산기 두께가 감소함에 따라 박막 히터에서 발생하는 국부 열유속이 열분산기에서 충분히 열분산되지 않아 열분산기 후면의 열전달면적을 효율적으로 사용하지 못하기 때문이다.

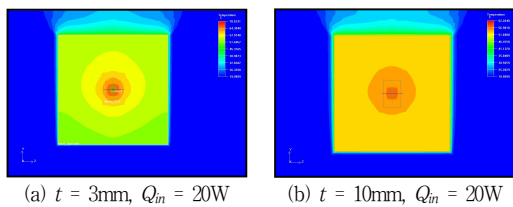
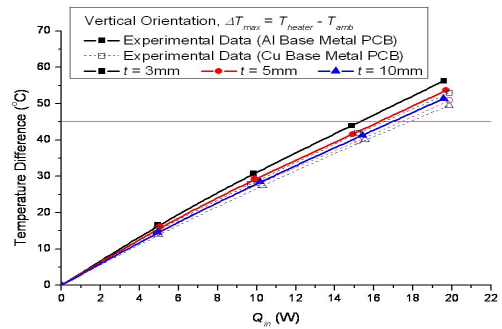


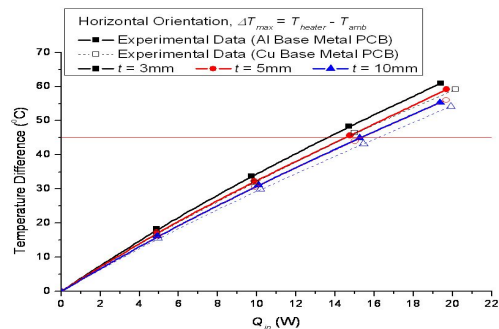
그림 8. Temperature contour (열분산기 후면)

그림 9는 메탈 PCB 종류, 열분산기 두께,

그리고 열분산기 모듈의 방향이 열분산기 모듈의 열성능에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 본 연구에서 수행한 실험변수 범위 내에서 열분산기 모듈의 열성능에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 열분산기 모듈의 방향이며, 메탈 PCB 종류, 그리고 열분산기 두께 순으로 나타났다. 예를 들어 직달일사량이 $800W/m^2$, 렌즈면적 및 총합 광효율이 각각 $224mm \times 224mm$ 및 68%, 그리고 III-V족 태양전지의 효율이 35%인 CPV 모듈을 설계하고자 할 때, $10mm \times 10mm$ 면적을 가지는 태양전지에서 발생하는 열량은 약 15W이며, 태양전지의 온도와 대기온도와의 차이를 $45^\circ C$ 이하로 유지하기 위해 요구되는 냉각시스템의 설계치는 열분산기 모듈의 냉각의 두께는 최악의 열성능을 가지는 수평방향을 기준으로 Al Base의 메탈 PCB를 적용할 경우 $t \geq 10mm$ 이며, Cu Base의 메탈 PCB를 적용할 경우 $t \geq 5mm$ 임을 알 수 있다.



(a) Vertical orientation



(b) Horizontal orientation

그림 9. Maximum temperature difference

5. 결 론

본 연구에서는 집광형 태양전지 모듈의 냉각을 위한 열분산기의 열성능을 실험적으로 연구하였다. 성능 평가를 위해 메탈 PCB 종류, 열분산기 두께, 열유속, 및 열분산기 방향이 열분산기 모듈의 최대 온도에 미치는 영향을 조사하였다. 열입력량이 증가할수록 열분산기 두께가 감소할수록 박막 히터와 대기온도 사이의 온도차가 증가하는 경향을 보임을 확인하였다.

또한, 수직방향을 가지는 열분산기 모듈의 온도차가 수평방향을 가지는 열분산기 모듈의 열성능이 우수함을 확인하였다. 마지막으로 태양전지에서 발생하는 열량이 약 15W일 경우, 태양전지의 온도와 대기온도와의 차이를 45°C 이하로 유지하기 위해서는 열분산기 모듈의 냉각의 두께는 최악의 열성능을 가지는 수평방향을 기준으로 Al Base의 메탈 PCB를 적용할 경우 $t \geq 10\text{mm}$ 이며, Cu Base의 메탈 PCB를 적용할 경우 $t \geq 5\text{mm}$ 이 요구된다. 본 연구의 결과는 CPV 모듈의 냉각 시스템을 개발하는데 설계기준으로 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Lewis, N. S. et al., 2005, "Basic research needs for solar energy utilization," Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization, April, 18-21, 2005.
- Royne, A. and Dey, C. J., 2007, "Design of a jet impingement cooling device for densely packed PV cells under high concentration," *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 1014-1024.
- Zubi, G., Bernal-Agustin, J. L. and Fracastoro, G. V., 2009, "High concentration photovoltaic systems applying III-V cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 2645-2652.
- Shakouri, A. and Zhang, Y., 2005, "On chip solid state cooling for integrated circuits," *J. IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*, Vol. 28, pp. 65-69.
- Anderson, W. G., Tamanna, S., Sarraf, D. B., Dussinger, P. M. and Hoffman Jr., R. W., 2008, "Heat pipe cooling of concentrating photovoltaic (CPV) systems," 6th IECEC, July, 28-30, 2008, Cleveland, Ohio.
- Gray, A., 2007, "Modeling a passive cooling system for photovoltaic cells under concentration," *HT2007*, July, 8-12, 2007, Vancouver, Canada.
- Min, C., Nuofu, C., Xiaoli, Y., Yu, W., Yiming, B. and Xingwang, Z., 2009, "Thermal analysis and test for single concentrator solar cells," *Journal of Semiconductors*, Vol. 30, No. 4, pp. 044011.
- Sun, J., Israeli, T., Reddy, T. A., Scoles, K., Gordon, J. M. and Feuermann, 2005, "Modeling and experimental evaluation of passive heat sinks for miniature high-flux photovoltaic concentrators," *ASME J. Solar Energy Engineering*, Vol. 127, pp. 138-145.
- Zhu, L., Wang, Y. Fang Z., Sun, Y. and Huang, Q., 2010, "An effective heat dissipation method for densely packed solar cells under high concentrations," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 94, pp. 133-140.
- Cheknane, A., Benyoucef, B. and Chaker,

- A., 2007, "Performance of concentrator solar cells with passive cooling," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 21, pp. 144-147.
11. Kumar, B., Pandian, T.B., Sreekiran, E., Narayanan, S., 2007, "Double Layer Anti-reflective Coatings for Silicon Solar Cells," *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando*, pp. 1237-1240.
 12. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., and Lavine, A.S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
 13. Vermeersch, B. and De May, G., 2008, "Dependency of thermal spreading resistance on convective heat transfer coefficient," *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp. 734-738.