

태양광 웨이퍼링 슬러리 재생 다공성 SiC 세라믹 히트싱크 개발에 관한 연구

안일용¹, 이영림^{2*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Study on Development of Porous SiC Ceramic Heat Sink from Solar Wafering Slurry

Il-Yong An¹ and Young Lim Lee^{2*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Kongju National University

²Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 최근 들어 전자제품 소형화로 인한 방열의 중요성이 대두되고 있는 가운데 다양한 소재의 히트싱크가 사용되고 있다. 본 연구에서는 태양광에너지 소재산업에서 발생하는 슬러리로부터 SiC를 성공적으로 분리하여 다공성 세라믹 히트싱크를 개발하였고 알루미늄 히트싱크, 순수 SiC 히트싱크와 방열성능 비교실험을 통해 다공성 재생 SiC 세라믹 히트싱크의 방열성능을 검증하였다. 실험 결과, 다공성 재생 SiC는 알루미늄 히트싱크 대비 방열성능이 우수함을 확인하였는데 이는 미세기공으로 인한 전열면적 증가에 기인한다. 또한, 수치해석을 사용하여 미세기공이 방열성능에 미치는 영향을 대류열전달계수 증가로 정량화하였다.

Abstract In recent years, while the importance of thermal management has been emphasized due to smaller electronic products, various materials have been used as heat sink. In this study, porous ceramic heat sink was developed with SiC, successfully separated from the slurry of SiC occurring in solar energy materials industry and the thermal performance of porous SiC heat sink has been compared with those of aluminum heat sink and pure SiC heat sink through experiment. From the experimental results, it was verified that porous recycled SiC heat sink has better thermal performance than aluminum heat sink since its micropores increase the heat transfer area. In addition, the effect of the micropores on thermal performance has been quantified by increasing convective heat transfer coefficient with numerical analysis.

Key Words : SiC, Ceramic Heat Sink, Solar Wafering Slurry

1. 서론

반도체 산업의 급격한 발달로 인해 반도체 소자의 고밀도 집적기술이 실현가능 해졌고, 이를 이용한 전자제품은 성능과 효율뿐만 아니라 소형화, 경량화 측면에서도 기술개발이 이루어져 왔다. 하지만 반도체 소자의 고밀도 집적기술은 소자의 표면적이 급격히 작아져 단위면적당 발열량은 오히려 증가하였고, 제품 내부의 높은 발열량은 제품의 내구성 저하 및 오작동을 초래하는 주요한 원인

이 되었다. 이를 해결하기 위해 가장 보편적으로 사용되는 방법은 히트싱크(Heat sink)를 발열 부품에 부착하는 것이다.

최근 들어 다공성 히트싱크에 관한 연구는 활발히 이루어지고 있다. Hunt 와 Tien[1]은 폼(foam) 재료 채널의 열성능을 실험적으로 규명하였고, Ichimiya[2]는 세라믹 폼 채널의 열 성능을 연구하여 유체와 고체간의 열전달을 모델링하였다. Calmidi와 Mahajan[3]은 고다공성 알루미늄 폼에 공기를 냉각매체로 하는 강제대류 상태에서

본 연구는 2011년 한국산업단지공단 현장맞춤형기술개발사업을 통해 연구된 결과임.

*Corresponding Author : Young Lim Lee

Tel: +82-18-290-9719 email: ylee@kongju.ac.kr

접수일 12년 04월 18일

수정일 12년 05월 03일

계재확정일 12년 05월 10일

히트싱크의 성능을 실험적으로 규명하였다. 또한 히트싱크의 활용 측면에서도 다양한 연구가 이루어져 왔는데 Park과 Lee[4]는 승용차용 LED 전조등 방열 성능 최적화를 위해 히트싱크, 히트 파이프 및 팬을 사용하여 최적의 방열성능을 도출하였다. Noh 등[5]은 전자부품에 히트싱크를 부착시켜 통신시스템의 냉각성능에 대해 연구하였고, Lee 등[6]은 히트싱크를 이용하여 전자통신 시스템의 방열설계 프로그램 개발에 관한 연구를 하였다. Lau 등[7]은 실험을 통해 히트싱크 핀의 높이와 간격변화에 따른 열 저항치를 연구하였고, Lehmann 등[8]은 여러 가지 형상에 따른 히트싱크의 방열성능에 관한 연구를 하였다.

이런 히트싱크로 사용되는 소재는 열을 효과적으로 전달 하기위해 구리, 알루미늄 등 열전도율이 우수한 금속 재료가 널리 이용되고 있다. 그러나 이와 같은 금속재료는 원자재 가격 상승으로 높은 제조단가를 형성하고, 열 방출효율을 높이기 위해 가능한 부품의 표면적을 넓게 하는 복잡한 구조로 그 크기나 부피가 커져 전자제품의 경량화 및 소형화의 단점으로 작용하고 있다. SiC 세라믹은 이런 단점을 보완하는 대체 소재 중 하나이다.

SiC 세라믹은 비전도성 물질로 절연성, 내식성, 내화학성이 우수하며, 낮은 열팽창률로 장기간 사용 시에도 파손의 우려가 적은 화합물 소재이다. SiC 세라믹은 금속 재료에 비해 낮은 열전도율을 가지고 있지만, 미세기공을 가지고 있으므로 공기와 접하는 표면적을 극대화시켜 더 효율적인 방열효과를 얻을 수 있다. 또한 실리콘 잉곳을 잘라 웨이퍼를 만들 때 발생하는 슬러리를 재생하여 사용 가능하기 때문에 가격 경쟁력이 있고, SiC 분말 제조 시 발생하는 CO₂를 줄일 수 있어 강화되고 있는 환경규제에 대응할 수 있는 친환경적 소재활용 방안이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실리콘 잉곳을 잘라 웨이퍼를 만들 때 발생하는 SiC 슬러리를 재활용하여 만든 다공성 SiC 세라믹 히트싱크를 제작 후 상용되고 있는 순수 SiC 세라믹 히트싱크, 알루미늄 히트싱크와 방열성능 비교실험을 통해 각각의 방열효과를 알아보았다. 또한 수치해석 시 고려하기 힘든 다공성 세라믹 히트싱크의 미세기공을 대류열전달계수의 변화로써 모델링하였다. 끝으로 전열면적이 다른 다공성 SiC 히트싱크를 사용하여 전열면적 증가에 따른 방열 성능 변화도 살펴보았다.

2. 실험 준비 및 방법

본 연구에서는 열원으로써 MCPCB(Metal Core Printed Circuit Board) 타입 LED를 사용하였다. 태양광 웨이퍼링

슬러리로부터 재생한 다공성 SiC 히트싱크의 방열 성능을 알루미늄 히트싱크 및 순수 SiC 히트싱크와 비교하였다. 또한 재생 SiC 히트싱크의 전열면적 증가가 방열 성능 향상에 미치는 영향을 알아보기 위해 다른 크기의 두 가지 재생 SiC 세라믹 히트싱크를 개발하여 사용하였다. 그림 1에 사용한 히트싱크의 모습을 나타냈는데, 각각의 히트싱크 제원을 표 1에 정리하였다.

소재별 히트싱크의 방열성능을 알아보기 위해 표 2에 서와 같이 4가지 경우를 고려하였다. 실험 방법은 그림 2와 같이 LED PCB 전극에 T형 열전대를 부착하여 MCPCB 온도를 측정하였다. 먼저 단일 LED 온도가 135~150 °C가 되면 칩 단선 현상이 발생하므로 MCPCB 온도 기준으로 약 50 °C, 83 °C, 108 °C를 고려하였다. 이를 위해 약 0.74 W, 1.80 W, 2.89 W의 전원을 인가시켰고, 각 실험마다 T타입 열전대를 이용하여

[표 1] 히트싱크 제원

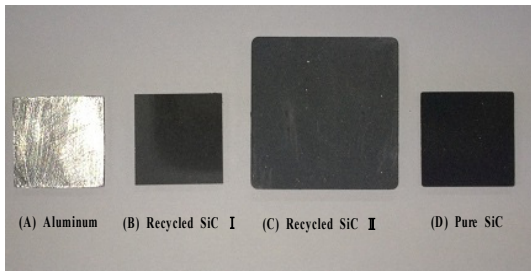
[Table 1] Specification of heat sink

Substrate	$W \times L \times H(mm)$
Aluminum	24*24*2
Recycled SiC I	24*24*2
Recycled SiC II	40*40*2.9
Pure SiC	25*25*2.5

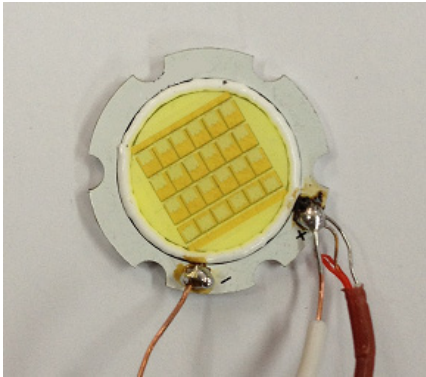
[표 2] 방열성능 실험

[Table 2] Experiments for thermal performance of heat sinks

	power(W)	Type of heat sink
Case 1	0.74	singe LED
		Aluminum heat sink
		Recycled SiC I heat sink
		Recycled SiC II heat sink
		Pure SiC heat sink
Case 2	1.80	singe LED
		Aluminum heat sink
		Recycled SiC I heat sink
		Recycled SiC II heat sink
		Pure SiC heat sink
Case 3	2.89	singe LED
		Aluminum heat sink
		Recycled SiC I heat sink
		Recycled SiC II heat sink
		Pure SiC heat sink
Case 4	4.4	Recycled SiC II heat sink
	5.6	
	6.44	
	7.50	



[그림 1] 알루미늄, 재생 SiC 및 순수 SiC 히트 싱크
[Fig. 1] Aluminum, recycled SiC and pure SiC heat sinks



[그림 2] 발열체 MCPCB LED
[Fig. 2] MCPCB LED as a heat source



[그림 3] LED와 히트싱크 개략도
[Fig. 3] Schematic of LED and heat sink

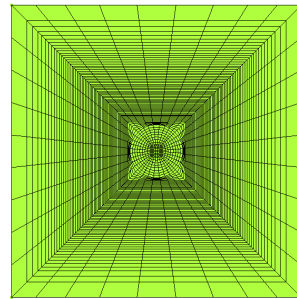
온도의 변화가 없을 때까지 측정하였다. LED와 히트 싱크는 그림 3과 같이 열 테이프(thermal tape)를 사용하여 부착시켰다.

3. 수치해석 방법

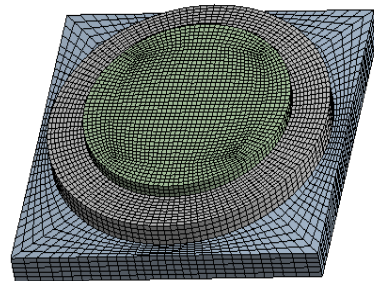
LED는 보통 인가 전력의 70~90 %가 열로 전환되므로 본 연구에서는 LED 실리콘과 알루미늄 PCB가 접하는 지점에 열유속 형태로 인가전력의 70 %를 지정하였다. 대기온도는 25 °C로 설정하였고, LED는 그림 3과 같이 히트싱크에 부착하였다. 각각의 히트싱크 열전도율과 방사율은 표 3과 같이 가정하였다.

[표 3] 각종 히트싱크 재료의 열전도율과 방사율
[Table 3] Thermal conductivities and emissivities of various heat sink materials

Material	Thermal conductivity k (W/m · K)	Emissivity ϵ
Aluminum	237	0.9
SiC	$66.368 - [9]$ $0.020045 T +$ $2.3297 \times 10^{-6} T^2$	0.8
Porous SiC	$\frac{k_{SiC}(1-\Phi)}{1+0.034k_{SiC}/k_{Air}}$ [9]	0.8



[그림 4] 복합열전달 해석용 격자 시스템
[Fig. 4] Mesh system for conjugate heat transfer analysis



[그림 5] 전도해석 해석용 격자 시스템
[Fig. 5] Mesh system for conduction analysis

그림 4는 복합 열전달 해석용 격자 시스템이다. 자연 대류의 정확한 해석을 위해 격자 시스템은 육면체 격자(hexahedral mesh)를 사용하였고, 격자수는 약 93만개이다.

그림 5는 열전도 해석용 격자시스템이다. 해석의 정확도 향상을 위해 육면체 격자 시스템을 사용하였고, 격자수는 4만6천개이다. 3차원 정상상태로 가정하였고 상용 해석 프로그램인 Ansys를 이용하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 다공성 SiC 세라믹 히트싱크 물성치

실험에 사용된 다공성 SiC I, II 세라믹 히트싱크는 태양광 웨이퍼링 슬러리로부터 SiC를 재생하여 제작하였다. 제작된 다공성 SiC I, II 세라믹 히트싱크의 물성치는 레이저 플래쉬 방법(laser flash method)을 사용하여 측정하였다.

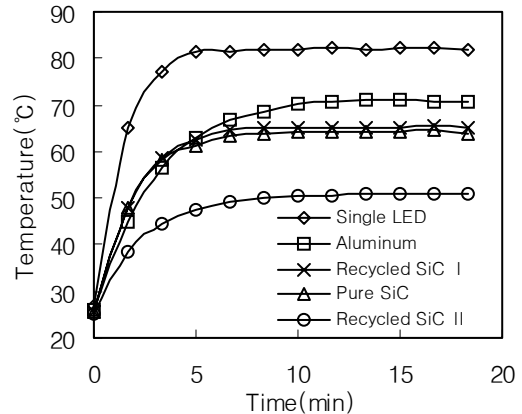
레이저 플래쉬 방법은 시료 전면에서 순간적 섬광으로 균일하게 가열하면 시간에 따른 시료배면에서의 온도를 적외선 센서(IR detector)에 의해 감지하여 측정한다[10]. 측정된 열전도율, 밀도, 비열, 기공률을 표 4에 나타내었다.

[표 4] SiC 및 다공성 SiC 히트싱크 물성치
[Table 4] Thermal properties of SiC and porous SiC heat sinks

Material	Pure SiC	Recycled SiC I	Recycled SiC II
k(W/m · K)	55.1	8.2	8.3
ρ (kg/m ³)	3100	1849	1847
C _p (J/g · K)	-	0.72	0.73
porosity	-	40%	40%

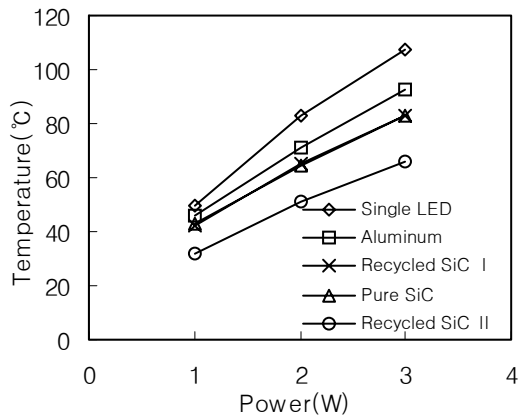
4.2 방열 성능 실험

그림 6은 주변온도 25 °C에서 1.8 W의 전력을 가했을 때 시간에 따른 MCPCB 온도변화를 보여준다. LED 칩 단산 효과를 방지하기 위해 낮은 전력을 인가하였으므로 단일 LED의 수렴온도는 약 82.6 °C이다. 같은 전력을 인가하고 알루미늄 히트싱크를 부착한 경우 MCPCB 온도는 약 71.2 °C이고, 다공성 SiC I 히트싱크의 경우 MCPCB 온도는 약 65.2 °C이다. 이것은 SiC I 히트싱크가 알루미늄 히트싱크보다 방열성능이 더 우수하다는 것을 보여준다. 열전도율이 알루미늄 히트싱크보다 매우 낮음에도 불구하고 다공성 SiC I 히트싱크의 방열성능이 더 좋은 이유는 미세기공이 공기와 접촉하는 면적을 극대화 시켜 더 효율적인 방열을 할 수 있기 때문이다. 순수 SiC 세라믹 히트싱크를 부착하였을 경우 MCPCB 온도는 약 64.2 °C이다. 이것은 태양광 웨이퍼링 슬러리로부터 재생하여 만든 다공성 SiC I 히트싱크와 방열성능이 거의 동일함을 알 수 있다. 한편, 전열면적이 약 3.7배 넓은 다공성 SiC II 히트싱크 MCPCB 온도는 50.8 °C로 판명되어 방열성능이 전열면적에 거의 선형적으로 비례한다는 것을 알려준다.



[그림 6] 단일 LED, 알루미늄, 다공성 SiC I, 순수 SiC, 다공성 SiC II 히트싱크일 경우 시간에 따른 MCPCB 온도변화

[Fig. 6] Variations of MCPCB temperature with time for single LED, aluminum, recycled SiC I, pure SiC, recycled SiC II heat sink

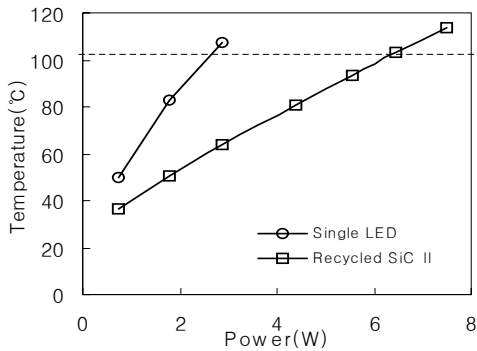


[그림 7] 단일 LED, 알루미늄, 다공성 SiC I, 순수 SiC, 다공성 SiC II 히트싱크일 경우 전력에 따른 MCPCB 온도변화

[Fig. 7] Variations of MCPCB temperature with time for single LED, aluminum, recycled SiC I, pure SiC, recycled SiC II heat sink

그림 7에 주변온도 25 °C일 때 전력에 따른 MCPCB 온도 변화를 나타냈다. 인가전력을 증가시키면 MCPCB 온도는 모든 경우 거의 선형적으로 상승하며 방열성능 효율은 히트싱크별 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 8은 주변온도 25 °C일 때 단일 LED와 전열면적이 SiC I 대비 약 3.7배 증가된 SiC II 세라믹 히트싱크의 인가전력에 따른 MCPCB 온도 변화를 보여주고 있다.



[그림 8] 단일 LED, 다공성 SiC II 히트싱크 부착 경우 인가전력에 따른 MCPCB 온도변화
 [Fig. 8] Variations of MCPCB temperature with power for single LED and recycled SiC II heat sink

히트싱크가 부착되지 않은 단일 LED의 경우는 약 2.89 W에서 100 °C를 초과하지만 다공성 SiC II 세라믹 히트싱크를 단일 LED에 부착한 경우에는 온도가 6 W를 상회하여야 100 °C를 초과하여 다공성 SiC II 세라믹 히트싱크의 효율이 상당히 우수함을 알 수 있다.

4.3 복합열전달 수치해석

다공성 SiC 히트싱크를 수치해석하기 전에 알루미늄 히트싱크의 복합열전달 해석을 수행하여 수치 모델을 검증하였다. 그림 9(a)에 알루미늄 히트싱크의 수치해석 결과를 나타냈는데 MCPCB 평균온도가 약 72.1 °C로써 실험결과와 약 1 °C차이로 수치 모델이 정확함을 알 수 있다.

다공성 SiC 히트싱크를 해석하기 위하여 기공율 40% 인 경우의 열전도율을 표 3의 실험식을 사용하여 계산하였다. 그림 9(b)은 다공성 SiC I 히트싱크의 수치해석 결과를 보여 준다. 수치해석 온도는 MCPCB 평균온도가 81.2 °C로 실험 온도인 65.2 °C와 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 오차는 예상한대로 수치해석 모델에 마이크로미터 크기의 미세기공으로 인한 전열면적 증가를 고려하지 못하였기 때문이다.

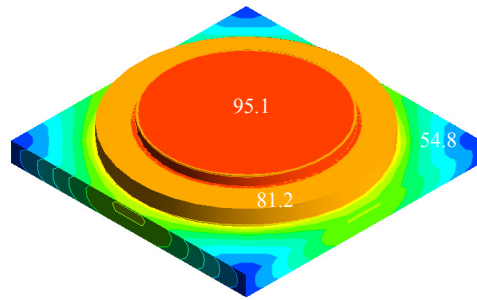
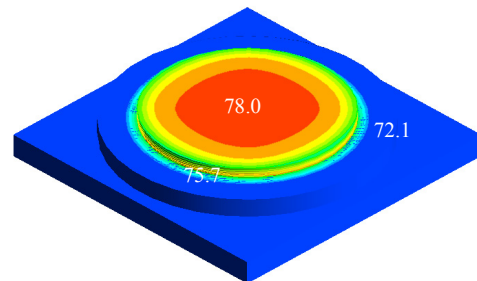
4.4 전도 수치해석

미세기공의 효과를 대류열전달계수 증가로 모델링하기 위하여 전도 해석을 수행하였다. 알루미늄 히트싱크일 경우 대류열전달계수 5 W/m²K를 입력하였을 때 그림 10(a)와 같이 실험값과 1 °C 이내로 일치함을 알 수 있다.

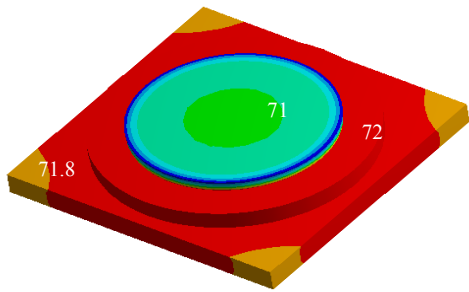
그림 10(b)는 알루미늄 히트싱크와 마찬가지로 대류열전달계수 5 W/m²K를 가정하였을 때의 다공성 SiC I 세라믹 히트싱크의 온도분포를 보여준다. 다공성 SiC I 히트싱크 MCPCB 온도는 77.6 °C로 실험값과 약 12.5 °C의 차이가 났다. 따라서 이러한 온도 차이를 극복하기 위해 대류열전달 계수를 증가시켰다. 그림 11에 대류열전달계수 12 W/m²K를 가정하였을 때의 온도 분포를 나타내었는데, 이 때의 MCPCB 온도는 64.9 °C로 실험값과 일치하였다. 따라서, 이 경우 미세기공에 의한 방열효과는 대류열전달계수를 약 2.4배 정도 증가시키는 효과가 있음을 알 수 있다. 즉, 다공성 SiC I 히트싱크가 알루미늄 히트싱크보다 열전도율은 상대적으로 낮지만, 오히려 미세기공이 전열면적을 획기적으로 늘려주어 결과적으로 방열효과가 더 우수함을 알 수 있다.

다공성 SiC II 히트싱크는 약 24 W/m²K의 대류열전달계수를 사용하여 그림 12과 같은 온도분포를 얻어 실험결과와 동일하게 된다. 이 경우 다공성 SiC I 히트싱크에서 사용했던 대류 열전달 계수보다 약 2배 정도 증가하였는데 이는 다공성 히트싱크의 체적이 증가하면 이에 비례하여 미세기공에 의한 전열면적 또한 증가함을 의미한다. 이러한 대류열전달계수, 즉 알루미늄 히트 싱크 5 W/m²K, 다공성 SiC I 히트싱크 12 W/m²K, 다공성 SiC II 히트싱크 24 W/m²K를 사용하여 인가전력 증가에 따른 각 히트싱크의 온도변화를 알아보았다.

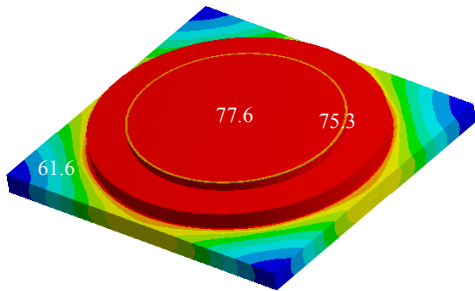
그림 13에서와 같이 고려한 전력 범위내에서 실험값과 수치해석값은 약 9 % 이내의 오차로 일치함을 알 수 있다.



[그림 9] 복합열전달 해석에 따른 온도분포
 [Fig. 9] Temperature distribution with different heat sinks

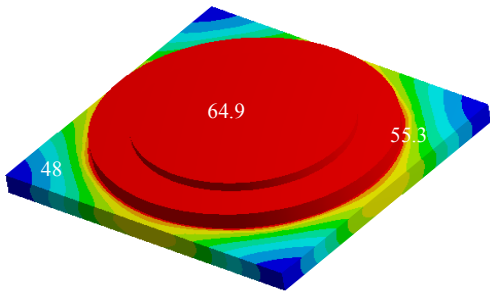


(a) Aluminum heat sink



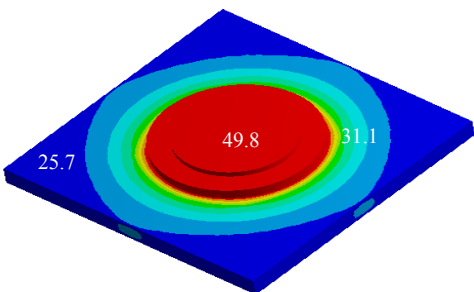
(b) Recycled SiC I heat sink

[그림 10] 대류열전달계수 $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 일 때 온도분포
[Fig. 10] Temperature distribution with convective heat transfer coefficient $5 \text{ W/m}^2\text{K}$



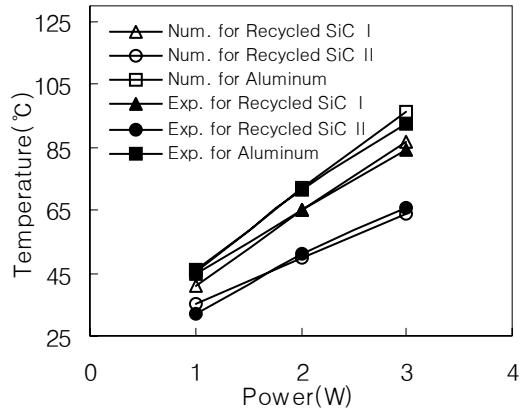
[그림 11] 대류열전달계수 $12 \text{ W/m}^2\text{K}$ 일 때 다공성 SiC I 히트싱크 온도 분포

[Fig. 11] Temperature distribution of SiC I heat sink with convective heat transfer coefficient $12 \text{ W/m}^2\text{K}$



[그림 12] 대류열전달계수 $24 \text{ W/m}^2\text{K}$ 일 때 다공성 SiC II 히트싱크 온도 분포

[Fig. 12] Temperature distribution of SiC II heat sink with convective heat transfer coefficient $24 \text{ W/m}^2\text{K}$



[그림 13] 알루미늄, 다공성 SiC I 세라믹, 다공성 SiC II 히트싱크일 경우 전력에 따른 MCPCB 온도변화
[Fig. 13] Variations of MCPCB temperature with time for aluminum, recycled SiC I, recycled SiC II heat sink

5. 결론

본 연구에서는 태양광 소재산업에서 발생하는 슬러리를 재생하여 얻은 SiC를 이용하여 다공성 SiC 세라믹 히트싱크를 개발한 후 수치해석 및 실험을 수행하여 방열 성능을 검증하였다. 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 고려한 다공성 SiC 히트싱크는 같은 크기의 알루미늄 히트싱크 대비 기공율 40 % 기준 약 32 % 정도 경량이다. 하지만, 미세기공으로 인한 전열면적 증가로 인해 방열성능은 훨씬 우수함을 알 수 있다.
- (2) 본 연구에서 고려한 범위내에서 다공성 SiC 히트싱크의 미세기공에 의한 방열성능 증가는 약 대류 열전달계수를 약 2~5배 정도 증가시키는 것과 같은 효과가 있다.
- (3) 태양광 소재산업에서 발생하는 슬러리를 재생시켜 만든 다공성 SiC 히트싱크는 기존 순수 SiC 세라믹 히트싱크와 동일한 방열성능을 보여 준다. 따라서, 태양광 웨이퍼링 재생 SiC를 사용하면 저가의 다공성 세라믹 히트싱크 제조가 가능하고 자원 재활용에도 기여할 수 있다.

References

- [1] M. L. Hunt and C. L. Tien, "Effects of Thermal Dispersion on Forced Convection in Fibrous Media", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp.301-309, 1988
- [2] K. Ichimiya, "A New Method for Evaluation of Heat Transfer between Solid Material and Fluid in a Porous Medium", *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 978-983, 1999
- [3] V. V. Calmidi and R. L. Mahajan, "Forced Convection in High Porosity Metal Foams", *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 557-565, 2000
- [4] S. J. Park and Y. L. Lee, "A Study on Optimization of Thermal Performance of a LED Head Light for Passenger Cars", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 27-32, 2012
- [5] H. K. Noh and J. H. Lee, "Cooling Performance of an Electronic System Including Electronic Components Mounted with Heat Sink", *The Korean Society Mechanical Engineers*, Vol. B, No. 22, Issue 2, pp. 253-266, 1998
- [6] J. H. Lee, J. M. Kim, J. H. Chun, C. H. Bea and M. W. Suh, "Development of Thermal Design Program for an Electronic Telecommunication System Using Heat Sink", *The Korean Society Mechanical Engineers*, Vol. 31, Issue 3, pp. 256-263, 2007
- [7] K. S. Lau and R. L. Mahajan, "Convective Heat Transfer from Longitudinal Fin Arrays in the Entry Region of Turbulent Flow", *Int. J. of Electronic Packaging*, Vol. 111, pp. 213-219, 1989
- [8] G. L. Lehmann and S. J. Kosteva, "A Study of Forced Convection Direct Air Cooling in the Downstream Vicinity of Heat Sink", *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 234-240, 1990
- [9] Y. L. Lee, "Study of Laser Chemical Vapor Deposition of Silicon Carbide from Tetramethylsilane", *The Korean Society Mechanical Engineers*, Vol.26, Issue 9, pp. 1226-1233, 2002
- [10] V. Casalegno, P. Vavassori, M. Valle, M. Ferraris, M. Salvo and G. Pintsuk, "Measurement of Thermal Properties of a Ceramic/Metal Joint by Laser Flash Method", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 407, Issue 2, pp. 83-87, 2010

안 일 용(An Yong An)

[준회원]



- 2012년 2월 : 공주대학교 기계설계공학전공 (공학학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 석사과정

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학

이 영 림(Young Lim Lee)

[정회원]



- 1995년 5월 : U of Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2000년 2월 : 삼성자동차삼성전자 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학, 자동차공학