Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 6 pp. 586~591, 2015
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.6.586

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

자연대류상의 LED 모듈의 경량열관리를 위한 하이브리드 휜 히트싱크의 수치적으로 조사된 열성능

김경준†

(Received March 30, 2015; Revised May 1, 2015 ; Accepted June 12, 2015)

Numerically-Investigated Thermal Performances of Hybrid Fin Heat Sinks for Lightweight Thermal Management of LED Modules Under Natural Convection

Kyoung Joon Kim†

요약: 본 연구는 자연대류상의 LED 모듈의 경량열관리를 위한 하이브리드 휜 히트싱크(HF HS)의 열성능을 수치적으로 조사한 결과에 대해 논하였다. 할로우 하이브리드 휜 히트싱크(HHF HS)와 솔리드 하이브리드 휜 히트싱크(SHF HS)가 HF HS로 제안되고, 신뢰성있는 수치결과를 획득하기 위하여 3차원 CFD 해석이 수행되었다. 3차원 CFD 연구는 HHF HS와 SHF HS의 성능에 대한 휜 공간과 내부유로직경의 영향을 조사하였다. 연구결과는 HHF HS의 질량기반 열저항이 핀 휜 히트싱크(PF HS) 보다 20~32% 작음을 보여주고, 유로직경의 증가에 따라 HHF HS의 질량기반 열저항이 감소함을 보인다. 이 결과는 주로 질량감소와 내부유로를 통한 열방출의 결합효과에 기인한다. 고전적인 PF HS 대비 상당히 우월한 HHF HS의 질량기반 열성능은 자연대류상의 LED 모듈의 경량열관리 적용 가능성을 제시한다.
주제어: 할로우 하이브리드 휜 히트싱크, 솔리드 하이브리드 휜 히트싱크, LED, 경량열관리, 전산유체역학

Abstract: This study discusses numerically-explored thermal performances of hybrid fin heat sinks (HF HSs) for lightweight thermal management of LED modules under natural convection. A hollow hybrid fin heat sink (HHF HS) and a solid hybrid fin heat sink (SHF HS) are proposed as HF HSs. A 3-D CFD analysis has been carefully conducted to obtain reliable numerical results. The 3-D CFD study investigates the effects of both fin spacing and an internal channel diameter on performances of the HHF HS and the SHF HS. The study results show that the mass-based thermal resistance of the HHF HS is 20~32% smaller compared with the pin fin heat sink (PF HS). The results also show that the mass-based thermal resistance of the HHF HS decreases with the increase of the channel diameter. These results are mainly due to coupled effects of the mass reduction and heat pumping through an internal channel. Considerably superior mass-based thermal performances of the HHF HS to the conventional PF HS suggest the feasible application for the lightweight thermal management of the LED modules under natural convection.
Keywords: Hollow hybrid fin heat sink, Solid hybrid fin heat sink, LED, Lightweight thermal management, CFD

1. 서 론

LED 모듈은 에너지 고효율, 장수명, 친환경성의 장점으로 거리조명, 실내조명, 자동차조명등에 광범위하게 적용되고 있다**[1]**. 발광소자인 LED 광효율의 한계로 상당량의 폐열이 발생하므로 LED 칩 패키지의 장수명과 성능유지를 위해서는 폐열을 효과적으로 방출해야 한다**[2]**. 따라서 LED 모듈의 건전한 작동을 위해서는 고등열관리가 필수적이다.

선행연구에서 우리는 LED 모듈의 냉각을 위해 제안된 하이브리드 휜 히트싱크(HF HS)의 가능성 연구를 수행하였다**[3][4]**. 선행연구에서 제안된 HF HS는 내부유로와 관통형 판 휜을 지니는 할로우 핀 휜들로 구성되며, 각 휜 베이스 근처에는 천공이 존재하는 페니트레이티드(Penetrated) 하이브리드 휜 히트싱크 (PHF HS) 이다**[4]**. PHF HS는 Elshafei**[5]** 가 연구한 할로우 핀 휜 히트싱크와는 다른 고유한 구조를 지닌다. 선행연구에서는 PHF HS의 열성능이 고전적인 핀 휜 히트싱크보다 우수함을 논증했으며, 또한 다양한 형태의 하이브리드 휜 구조를 제안했고, 열성능을 조사하였다**[6][7]**. 논증된 가능성에도 불구하고, PHF HS는 복잡한 휜 구조로 인해 고전적 히트싱크에 비해 도전적인 제조과정이 요구된다. 따라서 좀 더 단순한 구조의 HF HS

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2043-7659): Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, 365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 608-739, Korea, E-mail: kjkim@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6168

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

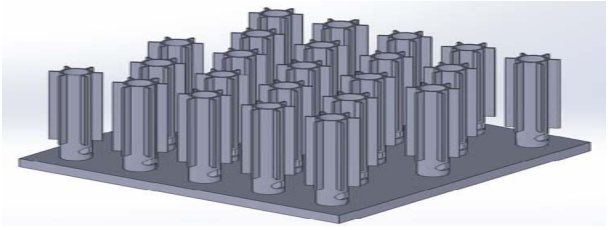
의 제안이 필요하며 그 성능이 연구되어야 한다.

본 논문에서는 제안된 할로우 하이브리드 휜 히트싱크 (HHF HS)와 솔리드 하이브리드 휜 히트싱크 (SHF HS)를 소개한다. 그리고 HHF HS와 SHF HS의 열성능을 수치적으로 조사하고 PF HS와 상대비교하기 위한 전산열모델과 모델링 기법에 대해 논한다. 마지막으로 다양한 휜 공간과 내부유로직경에서 전산열모델을 적용하여 결정된 HHF HS, SHF HS, PF HS의 질량기반 열저항 결과를 보여주고, 그 결과에 대한 매개변수적 영향에 대해 논한다.

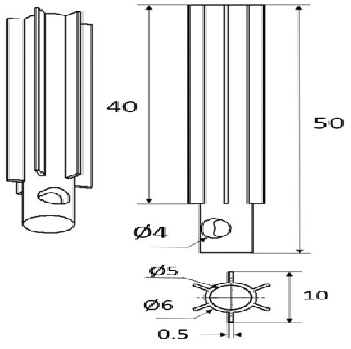
2. 하이브리드 휜 히트싱크

HF는 구조적 하이브리드 휜을 의미하며 HF HS는 HF의 배열로 구성된다. **Figure 1**과 **2**는 제안된 HHF HS와 SHF HS의 물리적 구조와 기준 수치를 보여주며 여기서 모든 단위는 mm이다.

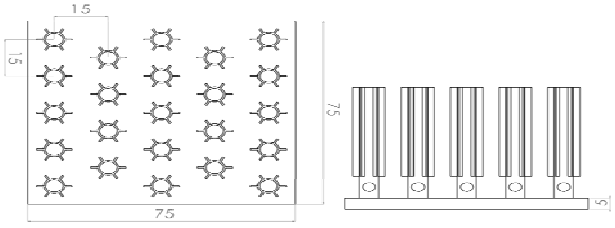
Figure 1 (b)가 보여주는 것처럼 HHF는 방사형으로 위치한 판 휜을 지니는 할로우 핀 휜이며, 휜 베이스에는 천공이 존재한다. SHF는 방사형으로 돌출된 판 휜을 지니는 솔리드 핀 휜이며, **Figure 2 (b)**는 SHF의 구조를 보여준다. 아래 그림에서 보여주는 것처럼 HHF HS와 SHF HS는 각각 HHF 와 SHF의 엇갈림 배열로 구성된다.



(a) The 3-D view of a HHF HS

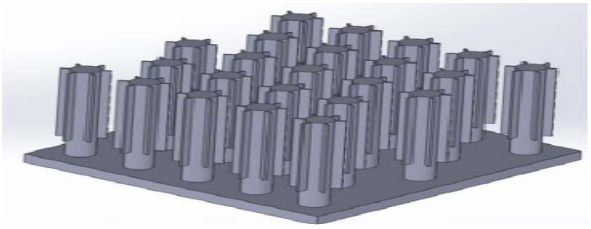


(b) The structure of a HHF

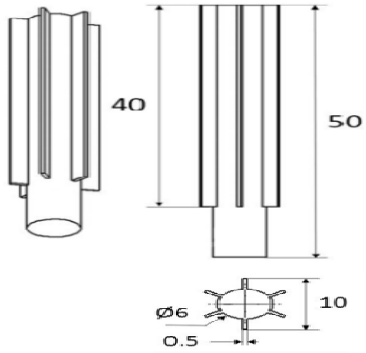


(c) The 2-D view of a HHF HS

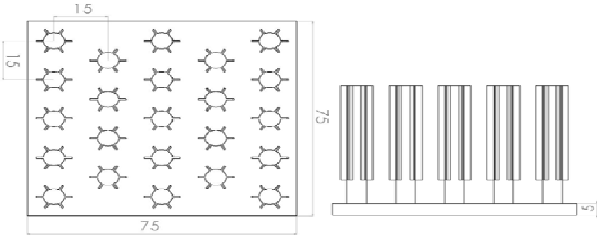
Figure 1: The structure of a HHF HS



(a) The 3-D view of a SHF HS



(b) The structure of a SHF



(c) The 2-D view of a SHF HS

Figure 2: The structure of a SHF HS

Figure 1 (b)가 보여주는 것처럼 핀 휜 길이는 50mm, 휜 외경은 6mm, 휜 내경은 5mm, 천공 직경은 4mm이고, 판 휜의 길이는 40mm, 폭은 2mm, 두께는 0.5mm이다. 그리고 히트싱크 베이스 면적은 75mm × 75mm, 베이스 두께는 5mm이며, 알루미늄이 히트싱크 기본 소재로 선택되었다.

PF HS는 HHF HS와 SHF HS의 열성능을 상대비교하기 위한 기준으로 적용되며, 휜길이와 직경은 각각 50mm, 6mm이다. PF HS 베이스 면적과 두께, 휜 공간은 HHF HS 그리고 SHF HS와 동일하다.

3. 열모델

하이브리드 휜 히트싱크인 HHF HS 와 SHF HS, 비교 대상인 PF HS 의 질량기반 열성능과 매개변수적 영향을 해석하기 위해 3-D CFD 모델이 생성되었다.

격자생성에는 ANSYS ICEM CFD가 적용되었고, 약 200만 개의 격자가 사용되었으며, 계산에는 ANSYS FLUENT **[8]**을 이용하여 해석하였으며, 모델의 격자독립성과 공기영역크기에 대한 독립성은 격자와 공기영역의 크기가 히트싱크 열저항 결과에 미치는 영향을 상세히 고찰하여 검증되었다. 공기의 유동조건은 자연대류 상에서 히트싱크의 크

기, 표면상태, 휜 공간 등의 기하학적 조건을 고려하여, 정상, 비압축성, 층류유동으로 가정되었다.

모델의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식으로 각각 **식 (1)**, **(2)**, **(3)**과 같다**[9].**

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_k}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left[-p\delta_{ij}+\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\rho g_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j\left(h+\frac{1}{2}u_i^2\right)\right]-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)=0 \tag{3}$$

여기서 u_k는 속도 (m/s), x_k는 직각좌표계에서의 방향 (m), ρ는 밀도(kg/m^3), p는 압력(Pa), δ_{ij}는 $i=j$이면 1이고, 그 외는 0, μ는 점성계수(N·s/m^2), g_i는 중력가속도 (m/s^2), h는 엔탈피(J/kg·K), k는 열전도율(W/m·K), T는 온도(K)이다.

Figure 3은 히트싱크 열모델과 상응하는 경계조건을 보여준다. 모델의 경계조건으로 히트싱크베이스 아랫면에서 균일열유속 부하가 설정되었고, 주변공기온도는 25℃의 실온으로 가정되었으며, 히트싱크의 소재는 전형적인 히트싱크 소재로 광범위하게 사용되는 알루미늄으로 설정되었다.

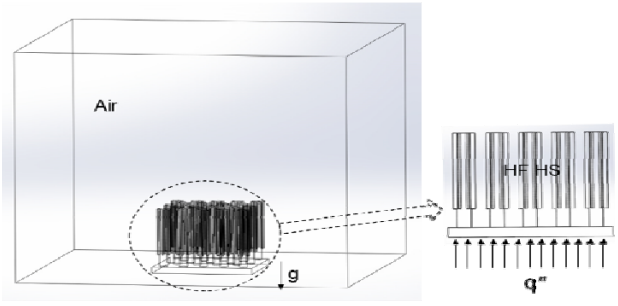


Figure 3: The thermal model and boundary conditions of a HF HS

4. 열성능

본 장에서는 15, 20, 25mm 의 휜 공간과 0 ~ 5mm 의 내부유로 직경에 대해 하이브리드 휜 히트싱크의 질량기반 열성능을 수치적으로 계산한 결과와 핀 휜 히트싱크와 상대 비교한 결과에 대해 논한다.

히트싱크의 열성능 지표로 질량기반 열저항, $R_{th}M$을 정의하였으며, 다음의 식으로 표현된다.

$$R_{th}M=\frac{(T_b-T_a)M}{q} \tag{4}$$

여기서 q는 히트싱크 베이스에 공급되는 총 열전달률(W), T_b는 히트싱크 베이스의 평균 온도(℃), T_a는 주변의 공기 온도(℃), M은 히트싱크의 질량이다.

4.1 온도 및 유동장 특성

본 절에서는 전산모사된 SHF HS, HHF HS, PF HS의 대표적 온도장과 유동장을 가시화하여 해석의 정성적 합리성을 확인하고, 대표적인 온도장과 유동장 특성을 이해함이 주목적이다.

온도장과 유동장의 대표적 해석결과를 가시화하기 위하여 기준 휜 공간인 15mm, 대표 열소산인 30W에서 해석된 결과를 **Figure 4**와 **5**에서 보여주는데, 가시화된 각 SHF, HHF, PF 에서의 온도구배, 각 히트싱크베이스에서 온도 분포의 대칭성과 에지(edge) 효과, 유동 속도분포의 대칭성, 최대유속은 해석의 정성적 합리성을 논증한다.

온도장 해석결과는 SHF HS와 HHF HS가 PF HS 보다 최대온도가 각각 11%, 6% 낮음을 보이고, 유동장 해석결과는 HHF HS 의 유로를 통한 내부유동이 약 0.1m/s의 속도로 원활함을 보여준다. 이와같이 SHF HS 와 HHF HS의 우수한 열성능은 표면적증대와 내부유로를 통한 유동에 기인함으로 보이며, 다양한 매개변수에 대한 각각의 히트싱크의 정량적 열성능은 후행절들에서 상세히 논의된다.

4.2 휜 공간에 미치는 영향

Figure 6은 SHF HS, HHF HS, PF HS의 질량기반 열성능에 대한 휜 공간 영향을 해석한 결과를 나타내며, (a)는 열소산이 5W, (b)는 열소산이 30W일 때의 결과이다.

해석결과에서 HHF HS의 경우는 20~32%, SHF HS의 경우는 4~9% 정도 PF HS보다 질량기반 열저항이 작음을 알 수 있다. 즉 해석한 모든 휜 공간 영역에서 HHF HS의 질량기반 열성능이 월등함을 보이며, 또한 모든 히트싱크에 대해서 휜 공간이 15mm일 때 질량기반 열성능이 20, 25mm 경우보다 더 우수함도 보인다.

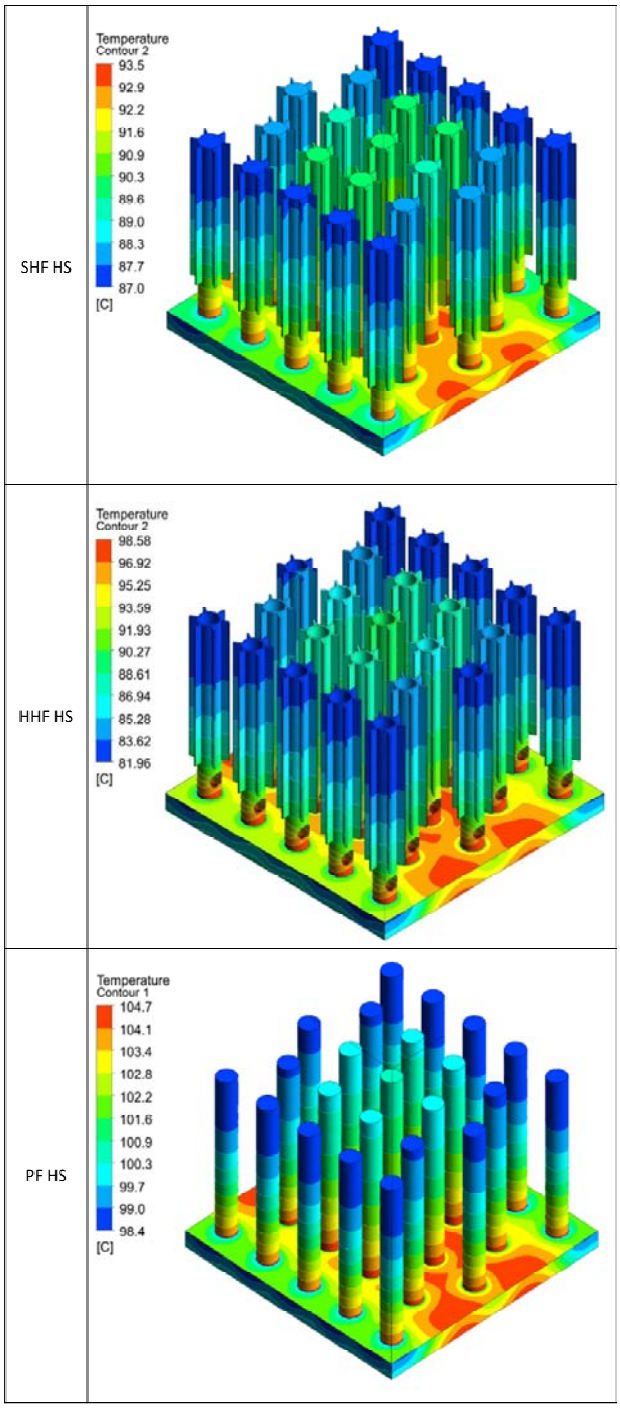


Figure 4: Temperature fields of a SHF HS, a HHF HS, and a PF HS associated with a fin spacing of 15mm at a heat dissipation of 30W

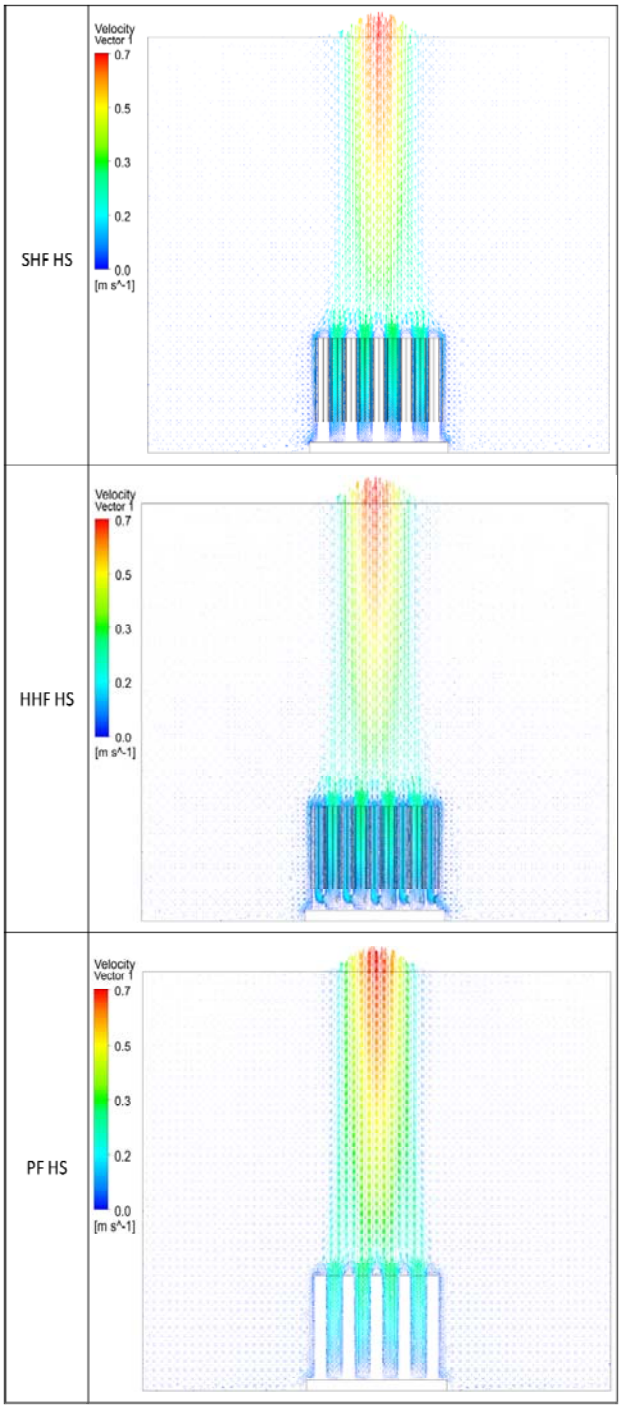
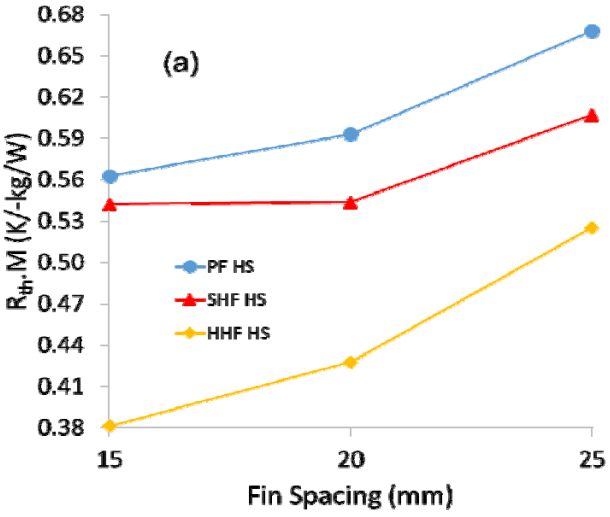
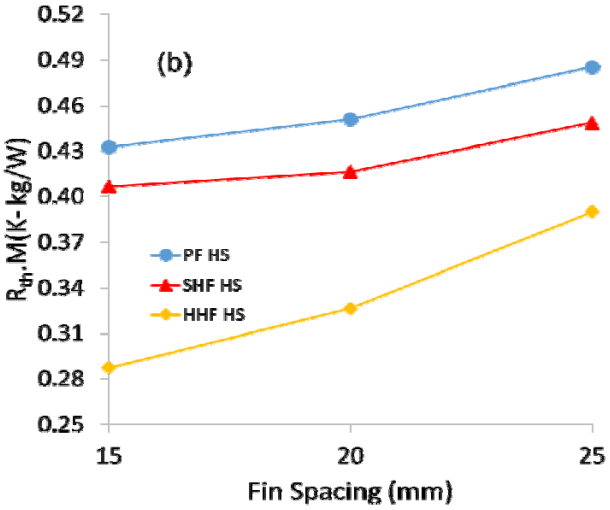


Figure 5: Air velocity fields of a SHF HS, a HHF HS, and a PF HS associated with a fin spacing of 15mm at a heat dissipation of 30W

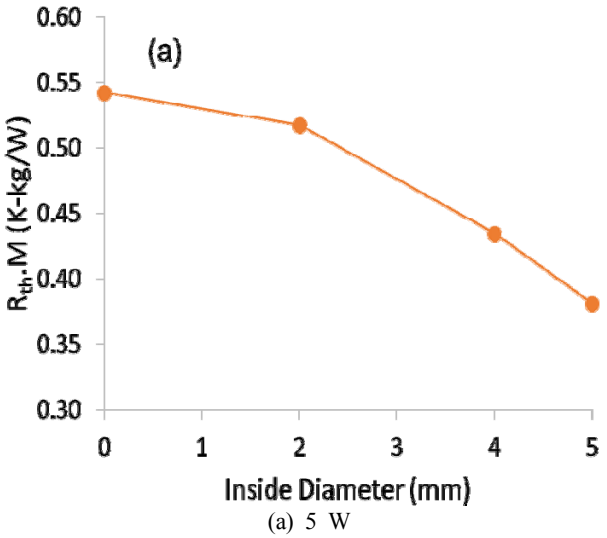


(a) 5 W

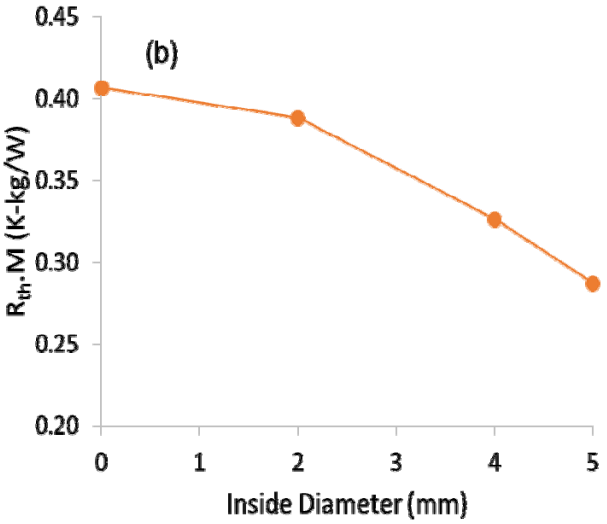


(b) 30 W

Figure 6: Mass-based thermal resistances of a HHF HS, a SHF HS, and a PF HS as a function of fin spacing at various heat dissipations



(a) 5 W



(b) 30 W

Figure 7: Mass-based thermal resistances of a HHF HS, a SHF HS, and a PF HS as a function of channel diameter at various heat dissipations

4.3 내부유로의 특성

Figure 7은 SHF HS, HHF HS, PF HS의 질량기반 열성능에 대한 내부유로직경의 영향을 해석한 결과를 나타낸 것이며, (a)는 열소산이 5W, (b)는 열소산이 30W일 때 결과이다. 이때 휜 공간은 15mm로 설정되었다. 여기에서 내부유로직경 0mm는 SHF HS를, 5mm는 HHF HS를 의미한다.

그 결과로 질량기반 열저항이 내부유로직경의 증가에 따라 감소됨을 보인다. 이 결과는 질량기반 열성능이 내부유로직경의 증가에 따라 증대됨을 의미한다. 이 결과는 내부유로 크기의 증가에 따르는 휜 축방향 열전도저항의 증가가 질량기반 열성능에 미치는 부정적 영향보다 히트싱크 질량의 감소가 미치는 긍정적 영향이 더 크기 때문으로 해석이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 자연대류상의 LED 모듈의 경량열관리를 위한 하이브리드 휜 히트싱크로 할로우 하이브리드 휜 히트싱크(HHF HS)와 솔리드 하이브리드 휜 히트싱크(SHF HS)를 제안하였다. HHF는 방사형으로 위치한 판 휜을 지니는 할로우 핀 휜이며, 휜 베이스에는 천공이 존재하고, SHF는 방사형으로 돌출된 판 휜을 지니는 솔리드 핀 휜이다. 그리고 HHF HS와 SHF HS는 각각 HHF, SHF의 엇갈림 배열로 구성되었다. 본 연구에서는 3차원 CFD 모델링을 적용하여 전산해석을 수행하여 히트싱크들의 질량기반 열성능을 해석하였고, 휜 공간과 내부유로 직경의 매개변수적 영향도 상세하게 분석하였다.

연구결과는 HHF HS의 경우에 20~32%, SHS HS의 경우는 4~9% 정도 PF HS 보다 질량기반 열저항이 작음을 보여주었다. 즉 모든 해석 영역에서 HHF HS가 PF HS보다 질량기반 열성능이 월등함을 보였다. 이결과는 HHF HS의 질량절감과 내부유로를 통한 열방출의 결합효과에 기인한 것으로 보인다. 연구결과는 질량기반 열저항이 내부유로직경의 증가에 따라 절감됨을 보여줬는데, 이 결과는 내부유로 직경의 증가에 따르는 휜 축방향 열전도저항의 증가가 질량기반 열성능에 미치는 부정적 영향보다 히트싱크 질량의 절감이 미치는 긍정적 영향이 더 크기 때문으로 해석된다. PF HS 에 비교하여 우월한 HHF HS의 질량기반 열성능은 자연대류상의 LED 모듈의 경량열관리용으로서의 HHF HS의 가능성을 가시화한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업의(WC300, 과제번호:10043214) 지원을 받아 수행된 연구임.

References

[1] J. H. Choi and M. W. Shin, “Thermal investigation of LED lighting module,” Microelectronics Reliability, vol. 52, pp. 830-835, 2012.

[2] M. Arik, J. Petroski, and S. Weaver, “Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: Light Emitting Diodes,” Proceedings of the 8th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, pp. 113-120, 2002.

[3] H. Kim, K. J. Kim, and Y. W. Lee, “Thermal performance of smart heat sinks for cooling high power LED modules,” Proceeding of the 13th IEEE Intersociety Conferenceon Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, pp. 62-67, 2012.

[4] K. J. Kim, “Performance of hybrid fin heat sinks for thermal control of light emitting diode lighting modules,” Journal of Electronic Packaging, vol. 136, no.1, 011002, 2014.

[5] E. A. M. Elshafei, “Natural convection heat transfer from a heat sink with hollow/perforated circular pin fins,” Energy, vol. 35, no.7, pp. 2870-2877, 2010.

[6] M. S. Jeon, K. J. Kim, “Numerical study on the thermal performance of passively cooled hybrid fins,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 8, pp. 816-821, 2013 (in Korean).

[7] K. J. Kim, “Orientation effects on the performance of natural convection cooled hybrid fins,” Proceedings of the 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, Greenwich, 2014.

[8] ANSYS Inc., ANSYS Fluent User’s Guide, 2014.

[9] K. A Hoffmann and S. T. Chiang, Computational Fluid Dynamics Volume I, 3rd Ed., Wichita, KS, Engineering Education System, 998.