

수동적으로 냉각되는 하이브리드 핀들의 열성능에 대한 수치적 연구

전문수¹ · 김경준[†]

(원고접수일 : 2013년 8월 6일, 원고수정일 : 2013년 9월 9일, 심사완료일 : 2013년 10월 11일)

Numerical study on the thermal performance of passively cooled hybrid fins

Mun Soo Jeon¹ · Kyoung Joon Kim[†]

요약: 본 논문은 자연대류 상에서 수동적으로 냉각되는 다양한 하이브리드 핀들과 핀 핀의 열성능에 대한 수치연구결과를 보고한다. 연구된 하이브리드 핀들은 basic hybrid fin (BHF), hollow hybrid fin (HHF), solid hybrid fin (SHF) 이다. 다양한 방열율에 대한 HF들과 PF의 열성능을 조사하기 위해 CFD 핀 모델이 개발되었다. 핀들의 열성능은 각각의 핀에 대해 핀 베이스 면적에 대한 열전달계수, h_a 와 질량에 대한 열전달계수, h_m 을 정량화하여 분석되었다. 연구결과는 SHF의 h_a 가 PF 보다 23% 더 크음을 보여주고, HHF의 h_m 은 PF 보다 무려 140% 더 크며, HHF의 질량기반 성능, 즉 h_m 은 BHF 보다 40% 더 우수함이 밝혀졌다.

주제어: 하이브리드 핀, 자연대류, 열 성능, 경량

Abstract: This paper reports numerical study results with respect to the thermal performance of various hybrid fins (HFs) and a pin fin (PF) passively cooled under natural convection state. Investigated HFs are a basic hybrid fin (BHF), a hollow hybrid fin (HHF), and a solid hybrid fin (SHF). CFD models for both HFs and the PF have been developed to explore their thermal performance under various heat dissipations. Thermal performances of fins have been analyzed by quantifying array-based heat transfer coefficients, h_a , and mass-based heat transfer coefficients, h_m , for each fin. Study results show that h_a of the SHF is 23% greater than that of the PF. h_m of the HHF is found to be even 140% greater than that of the PF, and the HHF is found to be 40% better than the BHF in terms of the mass-based performance, h_m .

Keywords: Hybrid fin, Natural convection, Thermal performance, Light weight

1. 서론

전자 및 광전자장치는 저전력 설계에도 불구하고 소형화에 따른 열밀도의 증가로 인하여 열 및 온도 관리의 중요성이 증대되고 있다. 저출력이 요구되거나 강제냉각기기의 유지보수가 곤란하고 장수명이 요구되는 시스템들에게는, 예를 들자면 LED 거리등, 중장거리 무선통신기기 경우에는 자

연대류에 의해 수동적으로 냉각되는 히트싱크는 안정적인 온도관리 기기이다.

자연대류 상에서 히트싱크의 냉각성능을 향상시키기 위해서 표면적 증대 구조물인 핀의 역할이 매우 중요함에도 불구하고, 이에 관해 보고된 연구는 단일 형상의 플레이트 핀, 핀 핀 등으로 한정되어 있다[1][2]. 히트싱크 무게는 히트싱크의 소재 및 제조에 소모되는 에너지 및 비용, 장착되는 시

[†]Corresponding Author: Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University, 365 Sinseon-Ro, Nam-Gu, Busan, 608-739, Korea, E-mail: kjkim@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6168

¹ Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University, E-mail: ddongnamxx@naver.com, Tel: 051-629-6168

스텝의 구조적 안정성 등에 직접적인 영향을 미치므로 자연대류상의 히트싱크는 열성능과 더불어 경량성도 요구되어 진다. 따라서 최근에는 경량 히트싱크 개발을 위한 다양한 연구들이 활발하게 진행되고 있다[3]-[6].

본 연구에선 자연대류 상에서 가볍고, 열 성능이 우수하며, 에너지 효율적인 히트싱크 설계에 기초 가이드라인을 제시할 목적으로 선행연구[7]-[9]에서 고안된 다양한 하이브리드 핀들의 열 성능에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 하이브리드 핀 중에 기본 하이브리드 핀(Basic Hybrid Fin, BHF)과 할로우 하이브리드 핀(Hollow Hybrid Fin, HHF)은 평판 핀이 결합된 내부유로가 있는 핀 핀으로 구성되고, BHF는 평판핀이 내부유로를 관통하여 핀 핀의 외부로 돌출되지만, HHF는 평판핀이 단지 외부면에서 돌출되어 형성된 구조이다. 솔리드 하이브리드 핀(Solid Hybrid Fin, SHF)은 평판 핀이 결합된 핀 핀으로 구성된다.

본 논문에서는 다양한 HF들의 물리적 구조에 대해서 설명하고, 각각의 HF, 핀 핀의 자연대류상의 열성능을 비교 분석하기 위한 각 핀들의 CFD 모델과 해석 방법에 대해서 논한다. 연구 결과로 CFD 모델로 가시화된 각 HF와 핀핀의 온도장과 주변 공기의 속도장에 대해 토의하고, CFD 해석으로 예측된 각 HF와 핀 핀의 열성능을 베이스 면적기준 열전달계수 (array-based heat transfer coefficient)와 질량기준 열전달계수(mass-based heat transfer coefficient)로 정량화하여 분석한 결과에 대해서 논한다.

2. 하이브리드 핀

Figure 1은 세 종류의 Hybrid Fin 들인 Basic Hybrid Fin (BHF), Hollow Hybrid Fin (HHF), Solid Hybrid Fin (SHF) 과 Pin Fin의 구조와 치수를 보여 준다.

BHF는 내부유로를 지닌 핀핀에 평판핀이 관통하여 형성된 구조이고, HHF는 평판핀이 내부유로가 존재하는 핀 핀의 외부에 장착되어 있는 형태이지만, SHF는 핀핀 외부에 평판 핀이 돌출 된 구조이다. HF의 세 구조는 내부유로, 내부유로 내 평

판핀, 외부에 돌출된 평판핀 각각의 열적효과를 일

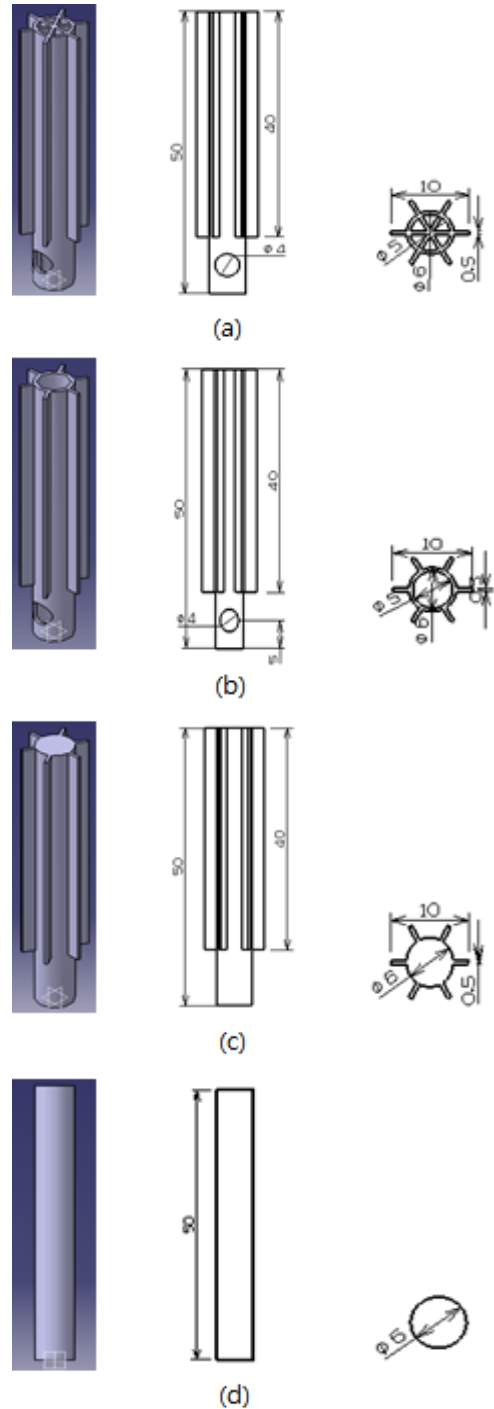


Figure 1: (a) Basic Hybrid Fin (BHF) (b) Hollow Hybrid Fin (HHF) (c) Solid Hybrid Fin (SHF)

(d) Pin Fin (PF)

반적인 PF의 경우와 비교하여 연구하기 위해서 고안된 구조이다. 흰의 소재로는 타 금속대비 가공이 용이하고, 가볍고, 열전도율이 우수한 알루미늄이 선택되었고, 각 흰의 총길이는 50mm, 내부직경은 5mm, 흰 두께는 0.5mm, 평판 흰의 길이는 40mm 로 설정되었다.

3. CFD 흰 모델

자연대류에 의하여 공기 냉각되는 다양한 구조의 하이브리드 흰(BHF, HHF, SHF)들의 열 특성을 분석하기 위해 상용코드인 ANSYS Fluent를 사용하여 각각의 HF의 3-D CFD모델이 개발되었고, 모델에는 약 220 ~ 330만개의 격자가 포함되었다.

공기유동은 비압축, 정상유동으로 가정되었고, 이때 모델의 지배방정식은 연속방정식(1), 운동량 방정식(2), 에너지 방정식(3)으로 다음과 같다[10].

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

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

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

여기서 u_k 는 속도 (m/s), x_k 는 직각좌표계에서의 방향(m), ρ 는 밀도(kg/m³), p 는 압력(Pa), δ_{ij} 는 $i=j$ 이면 1이고 그 외엔 0, μ 는 점성계수(N·s/m²), g_i 는 중력가속도(m/s²), h 는 엔탈피(J/kg·K), k 는 열전도율(W/m·K), T 는 온도(K)를 지칭한다.

CFD 흰 모델의 경계조건은 Figure 2 에서 보여주는 것처럼 흰 베이스 아랫면에서 균일 열유속으로 명료하고, 중력의 방향은 열유속의 정반대 방향이다. 각 흰의 수치는 Figure 1과 같으며, 베이스 면적은 15.6mm x 15.6mm이며, 베이스 두께는 5mm이다.

4. 열성능

4.1 온도장 및 유동장

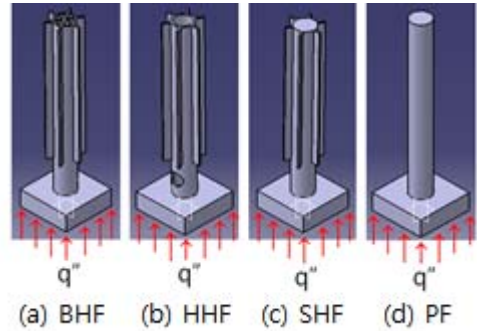


Figure 2: Boundary conditions of CFD fin models

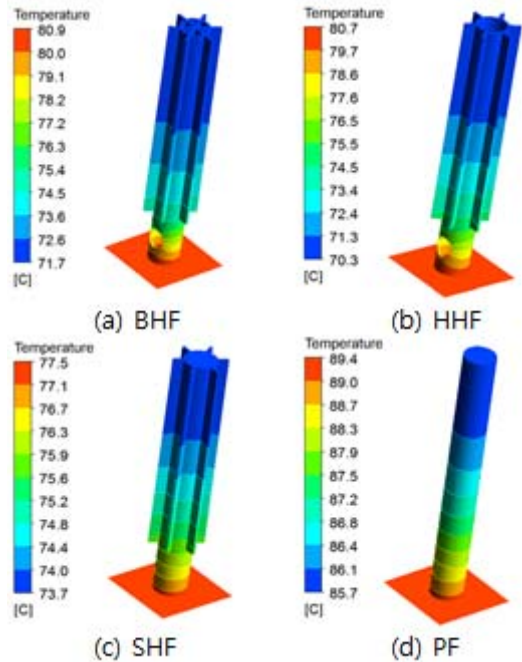


Figure 3: Temperature fields of various HF's and a PF under natural convection state

Figure 3은 열유속이 0.53W/cm² 이고 대기온도가 25℃ 일 때 CFD 모델에 의해 계산된 BHF, HHF, SHF, PF의 온도장을 보여주고 있다.

최대온도는 BHF는 80.9℃, HHF는 80.7℃, SHF는 77.5℃, PF는 89.4℃를 보이고 있으며, PF의 최대온도와 비교시 BHF가 약 9.5% (8.5℃), HHF가

약 9.7% (8.7°C), SHF는 약 13.3% (11.9°C) 낮음을 보여준다. 이 결과는 계산시 설정된 물리적 조건에서 HF의 열성능이 PF보다 우수함을 시사한다.

Figure 4는 Figure 3과 동일한 조건에서 HF와 PF 주변 공기유동의 속도장을 나타내고 있다. 보이는 것처럼 공기유동은 종방향 축을 기준으로 대칭인 모습을 보여주고 있다.

또한, 내부유로가 존재하는 BHF와 HHF의 경우 내부유로를 통하여 이동되는 공기유동의 모습이 명확히 구분되어진다. 내부유로는 환의 무게를 줄이고, 굴뚝효과와 표면적 확대를 통하여 대류열전달을 증대시켜 환의 열성능을 증대시키기 위한 목적으로 고안되었는데 HHF의 경우 BHF와 비교하여 공기의 흐름이 더 원활함을 알 수 있다. 따라서 BHF보다 HHF에서 내부유로의 긍정적 효과가 기대된다.

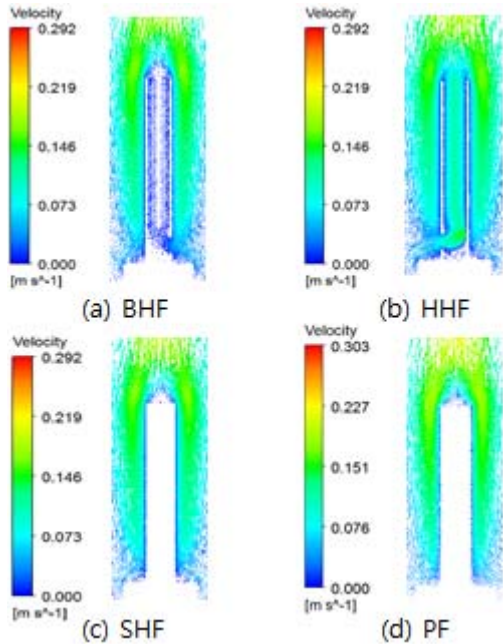


Figure 4: Velocity fields of various HF and a PF under natural convection state

4.2 열전달계수

BHF, HHF, SHF, PF의 열 성능을 나타내기 위한

지표로 열전달 계수를 사용하였는데, h_a 는 환 베이스 면적에 기반한 열전달계수, h_m 은 환 질량에 기반한 열전달계수이고, 다음의 두 식으로 정의된다.

$$h_a = \frac{q}{A_b(T_b - T_{air})} \quad (4)$$

$$h_m = \frac{q}{\rho V(T_b - T_{air})} \quad (5)$$

여기서 q 는 열유속(W), A_b 는 환 베이스 면적(m^2), T_b 는 환 베이스 온도(K), T_{air} 는 주변 대기온도(K), ρ 은 환 소재의 밀도(kg/m^3), V 는 환의 부피(m^3)이다.

Figure 5와 6은 자연대류 상태에서 다양한 열유속 조건하에 CFD 환 모델을 적용하여 예측한 BHF, HHF, SHF, PF의 h_a 와 h_m 를 보여주고 있다.

열유속이 증가할수록 h_a , h_m 값은 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 열유속이 증가하면서 환과 환 베이스 주변의 공기온도 역시 증가되어 부력효과를 높이기 때문이다.

각각의 HF와 PF의 예측된 결과는 열유속 0.18~0.53W/cm²의 조건에서 다음과 같은 값을 지닌다. h_a 의 경우 BHF는 82.0~95.5W/m²·K, HHF는 81.8~95.8W/m²·K, SHF는 86.6~101.7W/m²·K, PF는 70.6~82.9W/m²·K이고, h_m 의 값은 BHF는 0.9~1.1W/kg·K, HHF는 1.3~1.5W/kg·K, SHF는 0.5~0.6W/kg·K, PF는 0.5~0.6W/kg·K이다.

선행연구논문에서도[7][8] 수치적으로 계산된 BHF의 h_a 값을 발견할 수 있는데, 계산된 값은 47.8 W/m²·K로 본 논문에서 계산된 값과 차이가 있다. 이 차이는 Figure 2에서 보여주는 환 모델과 달리 선행연구에서는 BHF의 경사각 효과를 조사하기 위해 판형 베이스를 포함하지 않고 환만으로 구성된 수치모델을 활용했기 때문이다. 이러한 CFD 모델의 차이점은 선행연구논문의 Figure 9 [7]과 Figure 6 [8]에서 확인할 수 있다.

h_a 의 경우 SHF는 HHF보다 약 6%, PF보다 23% 더 우수하고, h_m 의 경우 HHF가 BHF보다 약 40%, PF보다 140% 더 우수함을 결과는 보여준다.

이러한 결과는 PF에 비해 외부 표면적이 증대되고 내부유로를 포함하는 HF들의 열성능이 더 우수

함을 입증한다. HF 중에서도 h_a 의 경우 SHF, HHF 순으로 우수한 것으로 나타나지만, 흰 무게에 대한 열 성능을 나타내는 h_m 까지 고려할 경우 HHF가 가볍고, 열 성능이 우수하며, 에너지 효율적인 히트싱크 설계에 적합한 흰으로 보인다.

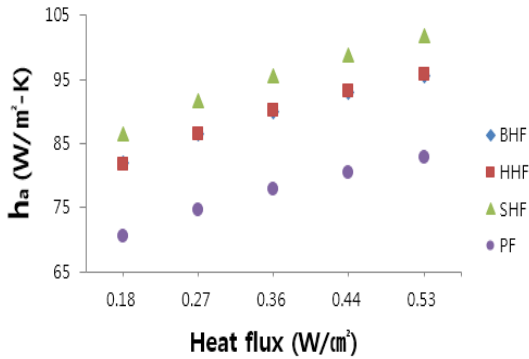


Figure 5: Predicted array-based heat transfer coefficients, h_a , of various HF's and a PF as a function of heat flux

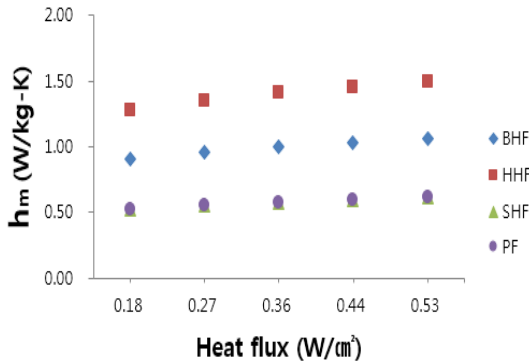


Figure 6: Predicted mass-based heat transfer coefficients, h_m , of various HF's and a PF as a function of heat flux

5. 결 론

본 논문은 자연대류 상에서 냉각되는 다양한 하이브리드 흰들(BHF, HHF, SHF)의 열 성능을 CFD 모델을 이용하여 해석하고 PF 와 비교 분석한 연구결과에 대해 논한다.

BHF와 HHF의 경우 내부유로가 존재하는 핀흰과 평판흰으로 구성되어 있고, 반면에 SHF는 내부유로가 없는 핀흰과 평판흰으로 구성되어 있다. 다양한 열 유속에 대하여 각각의 HF들과 PF의 열성능을 수치적으로 예측된 흰 베이스 면적에 대한 열전달계수(h_a)와 질량에 대한 열전달계수(h_m)을 이용하여 비교하고 분석하였다.

분석결과는 HF들과 PF는 $0.18\sim 0.53W/cm^2$ 의 균일 열유속 조건에서 h_a 의 경우 SHF는 HHF보다 6%, PF보다 23% 더 우수하고, h_m 의 경우 HHF가 BHF보다 40%, PF보다 140% 더 우수함을 보여준다.

SHF의 h_a 가 HHF 보다 우수한 이유는 HHF의 전도열저항보다 작은 SHF의 전도열저항의 효과가 HHF의 내부 유로에 의한 대류 열전달 증대 효과보다 베이스 면적에 대한 열성능에 더 큰 영향을 미치는 것으로 설명할 수 있다. HHF의 h_m 이 BHF보다 우수함은 HHF의 내부유로에 평판 흰이 결합되어 있지 않은 관계로 BHF 보다 가벼운 무게에 기인한 것으로 해석이 가능하다.

후 기

본 연구는 2012년 부경대학교 학술연구비 사업으로 (C-D-2012-0553) 수행된 연구결과이다.

참고문헌

- [1] W. A. Khan, J. R. Culham, and M. M. Yovanovich, "Optimization of pin-fin heat sinks using entropy generation minimization", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 247-254, 2005.
- [2] E. M. Sparrow and S. B. Vemuri, "Orientation effects on natural convection/radiation heat transfer from pin-fin arrays", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 29, no. 3, pp. 359-368, 1986.
- [3] 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.

- [4] R. Bahadur and A. Bar-Cohen, "Thermal design and optimization of natural convection polymer pin fin heat sinks", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 28, no. 2, pp. 238-246, 2005.
- [5] R. Bahadur and A. Bar-Cohen, "Analysis and design of a least material orthotropic pin fin heat sinks", *Proceedings of the 10th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems*, pp. 305-313, 2006.
- [6] T. Icoz and M. Mehmet, "Light weight high performance thermal management with advanced heat sinks and extended surfaces", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 33, no. 1, pp. 161-166, 2010.
- [7] H. Kim, K. J. Kim, and Y. Lee, "Thermal performance of smart heat sinks for cooling high power LED modules", *Proceeding of the 13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp. 62-67, 2012.
- [8] K. J. Kim, "Numerical study on the thermal behavior of natural convection hybrid fin heat sinks", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 51-56, 2013 (in Korean).
- [9] M. S. Jeon and K. J. Kim, "Thermal behavior of passive air cooled hybrid fins", *The Korean Society of Mechanical Engineers 2013 Spring Meeting Spring Meeting*, pp. 252-253, 2013 (in Korean).
- [10] K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, *Computational Fluid Dynamics Volume I*, 3rd ed., KS, USA: Engineering Education System, 1998.