

할로우 하이브리드 흰 배열 주변의 자연대류 예측 연구 An Investigation on Predicting Natural Convection around Hollow Hybrid Fin Arrays

양현호* · 노우현* · 시나 자밀라* · 김경준**†

Hyeon-Ho Yang*, Wooheon Noh*, Sina Jamilah* and Kyoung-Joon Kim**†

(Received 11 October 2022, Revision received 04 January 2023, Accepted 31 January 2023)

초록 : 본 연구에서는 할로우 하이브리드 흰 (HHF) 배열 주변의 자연대류 예측에 대해 조사한다. HHF 배열은 HHF의 엇갈림배열이고, HHF는 방사형 관 흰과 결합된 중공 핀 흰이다. HHF 배열에 대한 CFD 모델이 구축되었고, CFD 해석에 의한 HHF 배열의 열저항 결과와 측정값의 상대비교로 CFD 모델이 검증되었다. 48개의 CFD 케이스가 해석되었고, 그 결과는 HHF 배열의 Nu 상관식을 개발하는데 활용되었다. 상관식은 Ra 수와 흰 외경, 흰 내경, 흰 공간, 흰 높이 등의 구조 변수의 함수로 정의되었다. 연구결과는 상관식에 의해 계산된 Nu 값이 CFD에 의해 해석된 Nu 값과 유사함을 보여준다. 또한 CFD 해석 대비 상관식 예측 Nu 값의 평균 차이는 Ra <9000에서 3.5%, 9000<Ra<60000에서 8% 그리고 60000<Ra<292000에서 2.8%로 확인되었다.

키워드 : 할로우 하이브리드 흰 배열, 자연대류, 누셀트 수 상관식, 예측

Abstract : This study investigates prediction of natural convection around hollow hybrid fin (HHF) arrays. The HHF array is the staggered array of the HHFs, the hollow pin fins integrated with radially-oriented plate fins. The CFD models of the HHF arrays were generated and experimentally validated by comparing the thermal resistance values of HHF arrays by CFD analysis with those of the measurement. 48 CFD cases were simulated, and the results were used to develop Nu correlations of the HHF array. The correlations include Ra and structure parameters such as outer fin diameter, inner fin diameter, fin spacing, and fin height. The results show that the correlation-predicted Nu values were well matched with CFD-calculated Nu values. It was found that the average discrepancy values of the correlation prediction for the CFD calculation were 3.5% for Ra <9000, 8% for 9000<Ra<60000, and 2.8% for 60000<Ra<292000.

Key Words : Hollow Hybrid Fin Array, Natural Convection, Nusselt Number Correlation, Prediction

*† 김경준(<https://orcid.org/0000-0003-2043-7659>) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과

E-mail : kjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6168

*양현호(<https://orcid.org/0000-0002-0275-6229>),

*노우현(<https://orcid.org/0000-0002-1755-4136>),

*시나 자밀라(<https://orcid.org/0009-0006-7294-175X>) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과

*† Kyoung-Joon Kim(<https://orcid.org/0000-0003-2043-7659>) :

Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

E-mail : kjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6168

*Hyeon-Ho Yang(<https://orcid.org/0000-0002-0275-6229>),

*Wooheon Noh(<https://orcid.org/0000-0002-1755-4136>),

*Sina Jamilah(<https://orcid.org/0009-0006-7294-175X>) :

Graduate student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

— 기 호 설 명 —

C	: 경험적 상수
D	: 직경 [mm]
g	: 중력가속도 [m/s^2]
H	: 흰높이 [mm]
h_c	: 대류열전달 계수 [W/m^2-K]
k	: 열전도율 [$W/m-K$]
L_c	: 특성길이 [mm]
N	: 흰 개수
Nu	: Nusselt 수
P	: 압력 [Pa]
Pr	: Prandtl 수
q	: 열전달율 [W]
Ra	: Rayleigh 수
R_{th}	: 열저항 [K/W]
S	: 흰 공간 [mm]
T	: 온도 [$^{\circ}C$]
ΔT	: 히트싱크와 대기의 온도 차 [K]
u	: x 방향 속도 [m/s]
v	: y 방향 속도 [m/s]
w	: z 방향 속도 [m/s]
W	: 판 흰 너비 [m]

그리스 문자

α	: 열 확산율 [m^2/s]
β	: 체적열팽창계수 [$1/K$]
η	: 흰 효율
ν	: 동점성도 [m^2/s]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]

상첨자

cor	: 상관식
num	: 수치해석

하첨자

a	: 주변공기
-----	--------

b	: 히트싱크 베이스
FA	: 흰 배열
i	: 내부
o	: 외부
p	: 천공
T	: 전체
∞	: 자유 시스템

1. 서 론

전자 및 광전자 시스템의 신뢰성 유지와 성능 증대를 위해 지난 반세기 동안 다양한 열관리 기술이 왕성하게 연구되어 왔지만 흰 기반 히트싱크에 대한 관심과 기대는 여전히 유효하다.¹⁻³⁾ 특히, 무인기, 옥외용 LED 등기구, 무선 송수신기처럼 전력망으로부터 고립되어 있거나 전력 저장장치의 활용이 곤란한 시스템의 열관리 기술로 자연대류상에서 히트싱크는 상당히 유효하고 실용적인 기술로 인정된다.³⁻⁵⁾

히트싱크의 제조와 운용 시에 소모되는 에너지와 비용 그리고 관리되는 시스템의 구조 안정성은 히트싱크의 무게에 매우 중속적이다. 따라서 자연대류, 즉 수동냉각 히트싱크의 경량성은 유효성과 실용성의 평가 시 핵심 지표이다.⁶⁻⁹⁾ 경량 히트싱크에 대해 다수의 연구가 수행되었으며, 대표적으로 Bar-Cohen 그룹⁶⁾은 최소재료법 기반 원형 흰 최적화 연구를 수행하였고, Bahadur와 Bar-Cohen⁷⁾은 자연대류상의 폴리머 복합소재 히트싱크의 열성능을 연구, 흰 높이가 약 5 cm까지 알루미늄 히트싱크와 유사한 열성능 결과를 도출하였으며, Mehmet et al.⁸⁾은 자연대류상에서 폴리머 기반 경량 히트싱크의 실험적, 이론적 연구를 수행하였고 그래파이트 기반 히트싱크는 전형적인 히트싱크의 성능을 증가하고 질량도 저감할 수 있음을 논증하였다.

본 연구의 선행연구에서는 관통형 할로우 하이브리드 흰, 할로우 하이브리드 흰, 솔리드 하이브리드 흰 기반의 독창적 구조의 히트싱크들을 제안하였고 냉각성능을 분석하기 위해 실험과 수치 연구를 병행하였다.^{3-5,9,10)} 그 결과, 할로우 하이브

리드 흰 히트싱크(HHFHS)의 냉각성능이 핀 흰 히트싱크(PFHS)에 비해 12~14% 정도 우수함을 보이며, 기준모델의 경우 14% 정도 경량화된 것을 확인하였다.^{3-5,9,10)} 또한 자연대류 HHFHS 주위의 대류 열전달의 예측방법을 정립하기 위해 HHFHS의 Nusselt 수 상관식을 도출하였고, 히트싱크 구조, 열적 매개변수가 광범위하게 변화에도 불구하고 상관식을 적용한 예측결과와 전산해석 결과와의 차이는 $\pm 20\%$ 이내로⁵⁾ 상관식의 유효성이 검증되었다.

HHFHS의 효과적인 최적화를 위해서는 HHF 배열의 성능예측방법이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 심도 있게 연구되지 않았던 자연대류 하 HHF 배열의 성능예측방법에 대해 조사한 결과에 대해서 논한다. 우선 HHF 배열의 열성능을 비교 분석하기 위한 CFD 모델과 해석방법에 대해 논의 하며, CFD 모델의 검증을 위해 수행된 실험 연구에 대한 설명이 그 뒤를 따른다. 마지막으로 열성능 예측을 위한 HHF 배열 상관식을 개발하고 실험으로 검증된 CFD 모델의 열 해석적 데이터를 이용해 비교·분석한 결과를 논의한다.

2. HHF 배열

할로우 하이브리드 흰(HHF) 배열은 자연대류에 의해 수동 냉각되는 전자시스템의 경량 열관리를 위해 고안되었고 독창적 구조인 HHF의 엇갈림 배열로 구성된다. HHF는 중공 핀 흰과 방사형 관 흰의 결합으로 구성되며, 흰 베이스 근처에 천공을 지닌다. HHF의 중공 구조는 흰의 무게를 줄이고 베이스 근처의 천공을 통해 굴뚝효과를 일으켜 내외부 유동이 동시에 발생하게 하며 방사형으로 결합된 판 흰들은 표면적을 증대시키며 냉각 성능을 향상시킨다.

Fig. 1은 HHF와 HHF 배열의 구조를 도식화해서 설명한다. HHF 배열은 흰 외경(D_o), 흰 내경(D_i), 천공의 지름(D_p), 판 흰의 폭(W), 흰 높이(H), 흰 간격(S), 흰 개수(N)를 주요 기하학적 매개변수로 가진다. 기준 조건의 배열 베이스는 $75\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 이고 두께는 5 mm 이다.

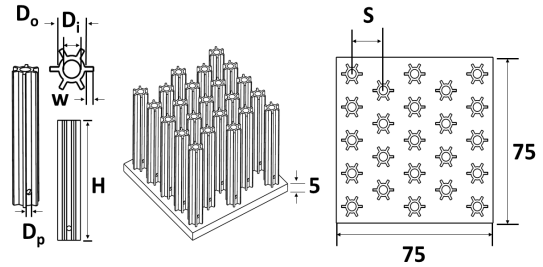


Fig. 1 The structure of a HHF and a HHF array

3. CFD 모델링 및 실험적 검증

3.1 CFD 모델

HHF 배열 주위의 열과 유동 흐름의 양상을 이해하고, Nusselt 수 상관식 개발을 위해서는 광범위한 열유동 데이터 획득이 필요하다. 따라서 20, 75, 200 mm의 흰 높이, 10, 15, 25, 40 mm의 흰 간격, 4, 20 mm의 흰 외경, 1, 3, 19 mm의 흰 내경의 조합으로 12종의 HHF 배열 모델이 생성되었다. 이때 HHF 배열 베이스에 $50, 70, 90, 120^\circ\text{C}$ 의 균일 온도 조건을 주어 총 48개 사례의 HHF 배열에 대한 3-D CFD 열유동모델이 생성되었다.

격자 생성을 위해 ANSYS ICEM-CFD, 계산을 위해 ANSYS FLUENT, 결과 해석을 위해 CFD-POST를 사용하였다. 본 연구에서는 오직 자연대류 열전달 해석에 초점을 두고 있으므로 복사열전달은 고려하지 않았고, 열유동조건으로 정상, 비압축성 유동조건과 Boussinesq 근사가 적용되었다. 격자와 유체영역 크기에 대한 모델의 독립성 검증을 위해서 유체영역과 격자의 크기 변화에 따르는 HHF 배열의 열저항 변화가 1% 이내임을 확인하였다.

HHF 배열의 전산유체 해석을 위한 지배 방정식은 다음의 식 (1)~(6)에 제시되어 있고, 식 (1)은 연속방정식, 식 (2)~(4)는 운동량 방정식, 식 (5)~(6)은 에너지 방정식이다.^{11,12)}

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

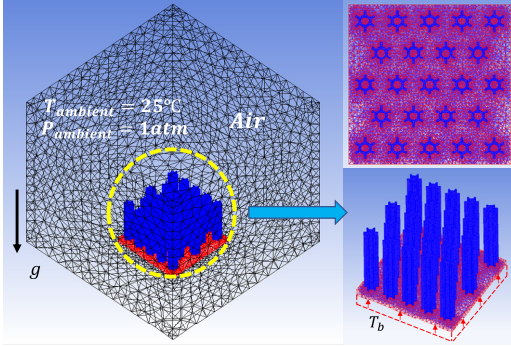


Fig. 2 The CFD model and boundary conditions of the HHF array

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g\beta(T - T_\infty) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

여기에서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도, α 는 열확산율, β 는 체적 열팽창 계수, ρ 는 밀도, ν 는 동점성도, P 는 압력, g 는 중력가속도, T 는 온도, T_∞ 는 원거리 유체의 온도이다.

Fig. 2는 HHF 배열의 CFD 모델과 경계조건을 제시한다. 전산해석을 위해 최대 2,500만 개의 격자가 생성되었으며, 점성모델로 층류모델이 선택되었다. 압력기반 해석자가 적용되었으며, 압력-속도 결합으로 SIMPLE 알고리즘이 적용되었다. 주변공기는 1기압의 압력과 25°C로 설정되었고, 베이스 아랫면에 균일한 온도 조건이 부여되었다.

3.2 실험적 검증

CFD 해석결과인 HHF 배열의 열저항과 측정된

열저항을 상대 비교하여 HHF 배열의 CFD 모델의 유효성을 실험적으로 검증하였다.

HHF 배열의 열저항은 다음의 식으로 정의된다.

$$R_{th} = \frac{T_b - T_a}{q} \quad (7)$$

위 식에서 q 는 열전달율, T_b 는 HHF 배열의 베이스온도, T_a 는 대기온도이다.

실험장치의 개략도는 Fig. 3에 제시되었고, 측정을 위한 장비와 요소들은 Table 1에 제시되었다. 필름히터에 전력을 인가하기 위해 DC power supply가 사용되었으며, HHF 배열과 주변 공기 온도 측정을 위해 5개의 T-type 열전대가 사용되었고, 온도 데이터의 모니터링과 저장을 위해 Data logger와 DAQ PC가 사용되었다. 본 측정에서 HHF 배열 베이스에서 Biot 수는 약 0.002이고, 측정된 온도구배는 0.5K 이내로 HHF 배열 베이스는 등온체로 간주가 가능하다. HHF 배열 베이스 하면으로 열손실을 최소화하기 위해 10 mm 두께의 PTFE 층, 10 mm 두께의 glass wool 층, 100 mm 두께의 PET 블록을 단열재로 적용하였다. 열전대로 측정된 온도 데이터를 보충하기 위해 IR 열화상 카메라가 사용되었으며, 두 측정법의 오차가 3% 이내에 있음을 확인하였다.

측정 시 장비와 요소에서 발생하는 오차로 인한 불확도 전파는 불가피하고, DC Power supply는 0.2%의 불확도를 지니고, T-type 열전대의 측정오차는 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이고, IR 열화상 카메라의 측정오차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이다. 따라서 물리적 측정에 대한 불확도

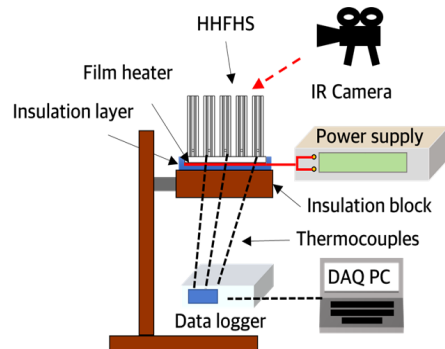


Fig. 3 The schematic of the test rig setup

Table 1 Description of equipment and components for the experiment

Equipment and components	
DC power supply	Agilent 6655A
Thermocouple	Omega T-type
Data logger	Agilent 34970A
Data acquisition PC	DAQ PC
IR Camera	FLIR T440
Polyimide film heater	75 × 75 mm
Insulation layers	
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	100 × 100 × 10 mm
Glass wool	100 × 100 × 10 mm
Polyethylene Terephthalate (PET)	100 × 100 × 100 mm

전과 분석이 수행되었으며,¹³⁾ Table 2는 HHF 배열 실험의 불확도 전과 분석을 요약한 것이다.

분석 결과, 최대 불확도는 가장 낮은 열율인 10 W에서 발생한 것을 확인할 수 있으며 전체 실험에서 평균 1.3%의 불확도를 가진다.

Fig. 4가 보여주는 것처럼 CFD 해석에 의해 수치적으로 결정된 열저항은 측정된 열저항 값과 비교되었으며, 평균 차이는 10% 이내로 확인되었다. 자연대류 실험의 특성 상 단열층 설치에도 불가피하게 발생하는 HHF 배열 베이스로부터의 열손실이 측정값과 해석값의 차이를 초래하는 주 요인으로 보이고, 측정값과 해석값의 합리적 차이는 CFD 모델의 유효성을 보증한다.

Table 2 Uncertainty of the experiment

Heat Dissipation (W)	T_b (°C)	Deviation (±°C)	Bias error (±°C)	Total uncertainty (±°C)	Uncertainty (%)
10.0	53.69	0.50	0.61	1.11	2.07
14.4	64.24	0.22	0.63	0.85	1.32
20.7	76.90	0.19	0.65	0.85	1.10
25.5	85.86	0.20	0.67	0.87	1.01
30.0	93.45	0.33	0.69	1.02	1.09

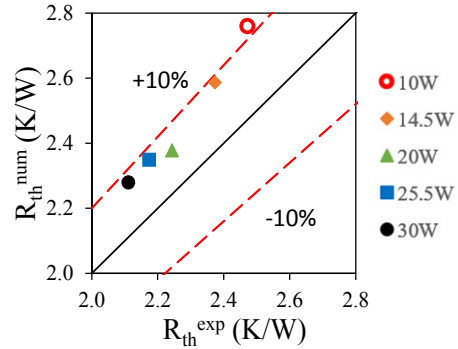


Fig. 4 Numerically-evaluated thermal resistance values as a function of experimentally-determined thermal resistance values of the HHF array

4. 자연대류 예측

4.1 열유동장

HHF 배열에 대한 CFD 해석 결과를 시각적이고 정성적으로 이해하기 위해 온도장과 유동장을 가시화하였고, Fig. 5는 대표 결과를 제시한다. 이

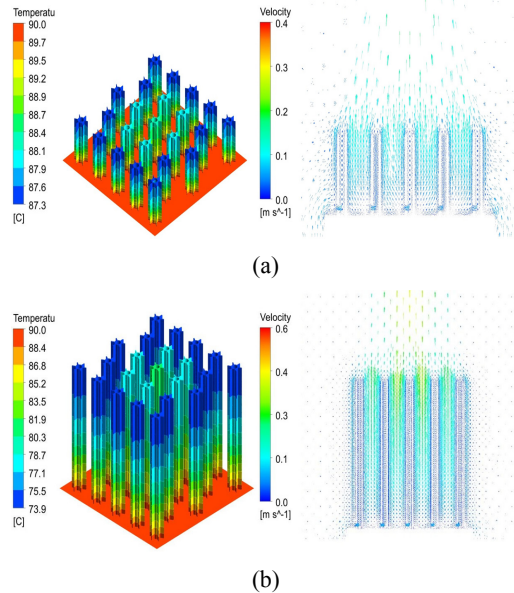


Fig. 5 Temperature and velocity fields of the HHF array with (a) H of 20 mm, Do of 4 mm, Di of 3 mm, N of 23 and (b) H of 20 mm, Do of 4 mm, Di of 3 mm, N of 23

때, HHF 배열의 흰높이는 20 mm, 외경은 4 mm, 내경은 3 mm, 흰 개수는 23개이고 베이스 온도는 90°C이다.

온도장과 속도장 모두 자연대류에 의한 대칭적 결과를 보여준다. 배열 중심부에서 가장자리로, 흰의 베이스에서 흰 끝으로 온도가 감소하며 흰베이스 근처의 천공을 통해 내부 유로에서 약 0.1 m/s의 상향 유동이 원활히 발생함을 확인할 수 있다.

4.2 Nusselt 수 상관식

HHF 배열 주위의 자연대류 특성 예측을 위해 HHF 배열의 Nusselt 수 상관식이 개발되었다. 상관식은 Rayleigh 수와 주요 기하학적 인자들의 조합으로 구성되고, 검증된 CFD 모델로부터 얻어진 열 데이터를 기반으로 도출되었다.

Nusselt 수와 Rayleigh 수는 각각 식 (8)과 (9)로 표현되고, 흰 공간을 특성길이로 지니고, HHF 배열의 Nusselt 수 상관식은 식 (10)으로 표현된다.

$$Nu = \frac{h_c L_c}{k} \tag{8}$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L_c^3}{\nu\alpha} \tag{9}$$

$$Nu_{FA}^{cor} = C_1 \left(\frac{D_o - D_i}{H} \right)^{\left(\frac{H}{1000} - c_2 \right)} (Ra_{FA})^{c_3} \left(\frac{S}{D_i} \right)^{c_4} \left(\frac{D_o}{D_o - D_i} \right)^{c_5} \tag{10}$$

여기에서 h_c 는 대류 열전달 계수이며, L_c 는 특성길이, k 는 공기의 열전도율, g 는 중력, β 는 체적열팽창계수, ΔT 는 히트싱크와 주위대기의 온도차, ν 는 동점성도, D_o 는 외경, D_i 는 내경, S 는 흰 공간 그리고 H 는 흰 높이를 의미한다.

HHF 배열의 Nusselt 수 상관식은 Rayleigh 수가 낮은 영역($Ra < 9000$), 중간 영역($9000 < Ra < 60000$) 그리고 높은 영역($60000 < Ra < 292000$)으로 3개의 구간에 나뉘어 정의된다. 최소제곱법으로 계산된 상관식의 경험적 상수들은 Table 3에 제시된다. 상관식에서 무차원화된 인자들은 구조적 특성을 지니며, $\left(\frac{D_o - D_i}{H} \right)$ 는 흰효율과 $\left(\frac{S}{D_i} \right)$ 는 내외부 유동과 연관되어 있다.

Table 3 Constants of Nusselt number correlations for the HHF array

Region	Low (<9000)	Mid (9000 -60000)	High (60000 -292000)
C ₁	0.000658	0.00169	0.00180
C ₂	0.258	0.231	0.105
C ₃	0.430	0.156	0.223
C ₄	1.490	1.601	1.491
C ₅	0.855	1.877	1.332

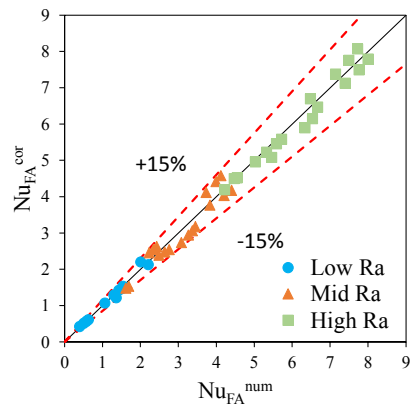


Fig. 6 Correlation-evaluated NuFA as a function of numerically-determined NuFA

Fig. 6은 HHF 배열에 대해 상관식으로 예측된 Nusselt 수와 CFD 해석에 의해 수치적으로 결정된 Nusselt 수의 상대 비교 결과를 제시한다. 상관식으로 예측된 Nusselt 수와 수치적으로 결정된 Nusselt 수의 차이가 ±15% 이내에 있음을 확인할 수 있으며, 낮은 Ra 영역, 중간 Ra 영역, 높은 Ra 영역에서 각각 3.5%, 8%, 그리고 2.8%의 평균 차이를 가지는 것으로 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 HHF 배열 주위의 자연대류 예측을 위해 HHF 배열의 Nusselt 수 상관식이 개발되었다. HHF 배열의 CFD 모델은 실험적으로 검증되었고, CFD 해석에 의한 HHF 배열의 열저항

값과 측정된 열저항 값의 상대비교로 CFD 모델의 유효성이 검증되었다. 상관식 도출을 위해 광범위한 데이터가 요구되므로 총 48개 경우의 CFD 해석이 수행되었다.

도출된 상관식은 Ra 수, 흰 공간, 흰 높이, 흰 내경, 흰 외경 등의 변수로 구성된다. 예측 정확도를 높이기 위해 상관식은 3개의 영역으로 나뉘어 정의된다. 상관식으로부터 예측된 Nusselt 수와 수치적으로 평가된 Nusselt 수의 평균 오차가 낮은 Ra 영역, 중간 Ra 영역, 높은 Ra 영역에서 각각 3.5%, 8%, 그리고 2.8%의 평균 차이를 가지는 것으로 확인되어 상관식의 우수한 예측도와 유효성이 검증되었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

H. H. Yang; Writing-original draft, Data curation. W. Noh; Data curation, Validation. S. Jamilah; Visualization, Data curation. K. J. Kim; Conceptualization, Funding acquisition, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. A. Bar-Cohen and M. Iyengar, 2002, "Design and Optimization of Air-Cooled Heat Sinks for Sustainable Development", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(4), 584-591. (DOI:10.1109/TCAPT.2003.809112)
2. N. S. Effendi and K. J. Kim, 2021, "Thermal Performance of Hollow Hybrid Fin Heat Sinks under Air Impingement", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11, 1759-1767. (DOI:10.1109/TCPMT.2021.3102384)
3. N. S. Effendi and K. J. Kim, 2017, "Orientation Effects on Natural Convective Performance of Hybrid Fin Heat Sinks", *Applied Thermal Engineering*, 123, 527-536. (DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.134)
4. K. J. Kim, 2014, "Performance of Hybrid Fin Heat Sinks for Thermal Control of Light Emitting Diode Lighting Modules", *Journal of Electronic Packaging*, 136, 011002. (DOI:10.1115/1.4025673)
5. N. S. Effendi, S. S. G. R. Putra, and K. J. Kim, 2018, "Prediction Methods for Natural Convection around Hollow Hybrid Fin Heat Sinks", *International Journal of Thermal Science*, 126, 272-280. (DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.002)
6. A. Sonn and A. Bar-Cohen, 1981, "Optimum Cylindrical Pin Fin", *ASME Journal of Heat Transfer*, 103, 814-815. (DOI:10.1115/1.3244547)
7. R. Bahadur and A. Bar-Cohen, 2005, "Thermal Design and Optimization of Natural Convection Polymer Pin Fin Heat Sinks", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 28(2), 238-246. (DOI:10.1109/TCAPT.2005.848498)
8. T. Icoz and M. Mehmet, 2010, "Light Weight High Performance Thermal Management with Advanced Heat Sinks and Extended Surfaces", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 33(1), 161-166. (DOI:10.1109/TCAPT.2009.2026736)
9. N. S. Effendi and K. J. Kim, 2018, "Natural Convective Hybrid Fin Heat Sinks for Lightweight and High Performance Thermal Management", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(10), 5005-5013. (DOI:10.1007/s12206-018-0948-4)
10. S. S. G. R. Putra, N. S. Effendi, and K. J.

- Kim, 2019, "A Parametric Study on Structural Effects of Hollow Hybrid Fin Heat Sinks in Natural Convection and Radiation", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(6), 2985-2993.
(DOI:10.1007/s12206-019-0548-y)
11. K. A Hoffmann and S. T. Chiang, 1998, *Computational Fluid Dynamics, Volume I*, 3rd Ed., Engineering Education System, Wichita, KS.
12. K. J. Kim, 2014, "Study on the Thermal Behavior of Immersion Cooled LED Lighting Engines", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 18(3), 87-92.
(DOI:10.9726/kspse.2014.18.3.087)
13. R. J. Moffat, 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, 3-17.
(DOI:10.1016/0894-1777(88)90043-X)