

다중 미세 날개구조의 표면 열전달에 미치는 영향분석

박기홍* · 박상후**† · 이주철*** · 민준기**** · 하만영**

* LG 전자 공통기술연구소, ** 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구센터,
*** 부산대학교 기계공학부대학원 정밀가공시스템 전공, **** 부산대-롤스로이스 대학연구센터

Numerical Study of Surface Heat Transfer Effects of Multiple Fan-Shaped Small-Scale Fins

Ki-Hong Park*, Sang Hu Park**†, Ju-Chul Lee***, June-Kee Min**** and Man-Yeong Ha*

* Basic Technology Research Center, LG Electronics, ** School of Mechanical Engineering & ERC/NSDM, Pusan Nat'l Univ.,
*** Div. of Precision Engineering, Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,
**** PNU and Rolls-Royce University Technology Centre.

(Received December 23, 2012 ; Revised February 7, 2013 ; Accepted February 12, 2013)

Key Words: Two-way FSI(양방향 유체-고체 연성해석), Heat Transfer Enhancement(열전달 촉진), Pulsating Flow(맥동류), Fan-Shaped Fin(부채모양 날개구조), CFD(전산유체해석)

초록: 전자제품과 같이 소형화 추세에 있는 제품에 대하여 열전달 촉진을 시키는 방법에 대하여 연구하였다. 두께 10 μm 를 가지는 미세 날개구조를 이용하여 상하진동 운동을 유도하고 열전달 특성에 대하여 분석하였다. 본 연구에서는 양방향 유체-고체 연성해석 (Two-way FSI)를 이용하여 미세 날개의 거동을 분석하였으며, 단일 날개구조를 제작하여 해석모델을 검증하였다. 단일 및 다중 미세 날개구조에 의한 열전달 향상이 날개가 없는 경우와 비교해 볼 때 최대 40% 정도 향상됨을 알 수 있으며, 본 연구에서 제안된 방법에 의하여 향후 실제적인 열전달 촉진기술에 충분히 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract: In this work, we study a heat transfer enhancement technology using fan-shaped small-scale fins. Fins having a thickness of 10 μm move up-down by a pulsating flow. Owing to these motions, the heat transfer on a surface increases dramatically. The two-way FSI (fluid-structure interaction) method was applied for the analysis, and the analysis model was evaluated using a single fin model by comparing the experimental results. In summary, a maximum 40% increase in heat transfer capacity using a single and multiple small-scale fins was obtained in comparison with the results obtained without using fins. From this work, we believe that the proposed method can be a promising method for heat transfer enhancement in real applications.

1. 서론

지구 온난화 등의 영향으로 에너지 효율향상 기술이나 전자제품과 같은 소형화 장비들에 대한 열 에너지 관리기술에 대한 중요성이 급증하고 있다. 소형화 또는 고집적화된 전자제품의 경우, 시스템 내부의 단위 면적당 열 발생량이 급격하게 증가하고 있다.⁽¹⁾ 또한, 부품의 냉각을 위한 공간적 여유도 함께 줄어들어 기존의 고정형 히터싱크(heat sink)로는 앞으로 충분한 냉각을 시킬 수가 없을 것으로 사료된다. 따라서 시스템의 안정성을 위하여 새로운 방식의 능동형 열전달 촉진 또는

열관리 기술이 요구된다.⁽²⁾ 대부분의 전기 시스템의 경우 발생된 열을 제거하기 위하여 일반적으로 공냉식이 사용하며, 지금까지 많은 관련기술들이 개발되어 왔다. 대부분 상용화된 냉각방식은 냉각팬(cooling fan)과 냉각핀(cooling fin)을 이용하는 방식으로 팬(fan)에 의해 생성되는 공기유동을 이용하여 냉각핀(fin) 표면의 열을 제거하게 된다. 온도차를 가진 시스템에서 대류 열전달을 증가시키는 방법으로 크게 두 가지로 분류된다. 표면적을 증가시키는 방법과 유동장 내의 유동 흐름을 복잡하게 하여 열전달 계수를 크게 하는 방법이다.⁽³⁾ 그러나 표면적을 증가시키는 방법은 간단한 접근방법이지만 소형 장치에는 공간적 한계가 있기 때문에 유동 흐름을 제어하여 열전달 촉진방식에 대한

† Corresponding Author, sanghu@pusan.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

연구가 많이 진행되고 있다.⁽³⁻⁷⁾

본 연구에서는 미세 날개의 진동을 이용하여 복잡한 공기유동을 유도하여 열전달을 촉진시키는 기술에 대하여 연구하였다. 발열소재 표면에 부착된 미세날개 진동을 위하여 맥동류(pulsating flow)를 이용하였다.⁽⁸⁾ 기존 연구에서 Go 등은 마이크로 머시닝 기술을 이용하여 실리콘 웨이프로 수십 마이크로 크기의 날개 배열(fin array)를 제작하여 실험적으로 열전달 효과를 보였다.⁽²⁾ 그러나 마이크로 머시닝 제작기술로는 복잡한 형태의 미세 날개 형상을 제작하기 어렵고 또한 제작비용이 많이 들기 때문에 본 연구에서는 양방향 유체-고체 연성해석(Two-way FSI)을 이용하여 가격이 저렴한 강판소재를 이용하여 만들 수 있도록 하며, 부채모양을 가진 단일 및 다중 미세 날개의 표면 열전달에 미치는 효과를 해석적으로 알아보았다. 또한 해석모델의 신뢰성을 확인하기 위하여 단일 날개 구조를 제작하여 실험적으로 구한 결과와 비교하였으며, 해석에서의 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

2. 기초연구

2.1 미세날개 형상설계

본 연구에서는 열전달 촉진을 위한 미세 날개의 제작을 용이하게 하기 위하여 STS304-H 소재를 이용하였다. KS B 0801 규격에 따라 두께 20 μm를 가진 소재의 압연방향(rolling direction)으로 절취하여 시편을 제작하였으며, 총 4 회의 인장실험으로 구해진 주요 재료물성은 Table 1 과 같다. 이 재료의 물성은 유체-고체 연성해석의 기본 데이터로 이용된다. 미세 날개 구조는 유동에 의하여 최대 변형을 일으킬 수 있는 구조가 되어야 한다. 따라서 기본적인 형태는 Fig. 1(a)와 같이 사각형 모양의 머리와 가는 다리를 가지는 형태로 설계하였다. 공기 유동에 대하여 쉽게 변형할 수 있는 구조를 찾기 위하여 미세 날개 기본형상에서 머리 폭(a)과 높이(b), 다리 길이(c)와 폭(d)으로 네 가지 설계변수를 두고 L₉(3⁴) 직교 배열표와 다구찌 기법(Taguchi method)을 이용하여 설계변수에 대한 기

Table 1 Mechanical properties of STS304-H

Items	Value
Yield Stress (MPa)	670.0
Ultimate Stress (MPa)	771.4
Elongation (%)	6.0
Elastic Modulus (GPa)	143.9

여도를 분석하였다. 해석 조건으로는 바닥면에 45° 각도로 기울어지게 고정된 미세 날개에 유체 영역의 크기가 2×5×10 mm 일 때, 입구풍속 (v_{in})이 1.2 m/s 로 일정하게 불며 층류 유동으로 가정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 ANSYS CFX (ver. 12.0)을 이용하였다. Fig. 1(b)와 1(c)에는 해석모델과 요인효과 분석결과를 나타낸 것이다. 해석결과에서 변형이 잘 되는 최적조건은 Fig. 1(a)에 나타낸 설계변수에서 a, b, c, d가 각각 3 수준, 3 수준, 2 수준

Table 2 Variation of maximum displacement and von Mises stress on a fin

Thick.(mm)	Max. Disp. (mm)	Max. Stress (MPa)
0.005	5.26	675.0
0.010	0.55	175.0
0.012	0.42	125.0
0.015	0.25	98.0

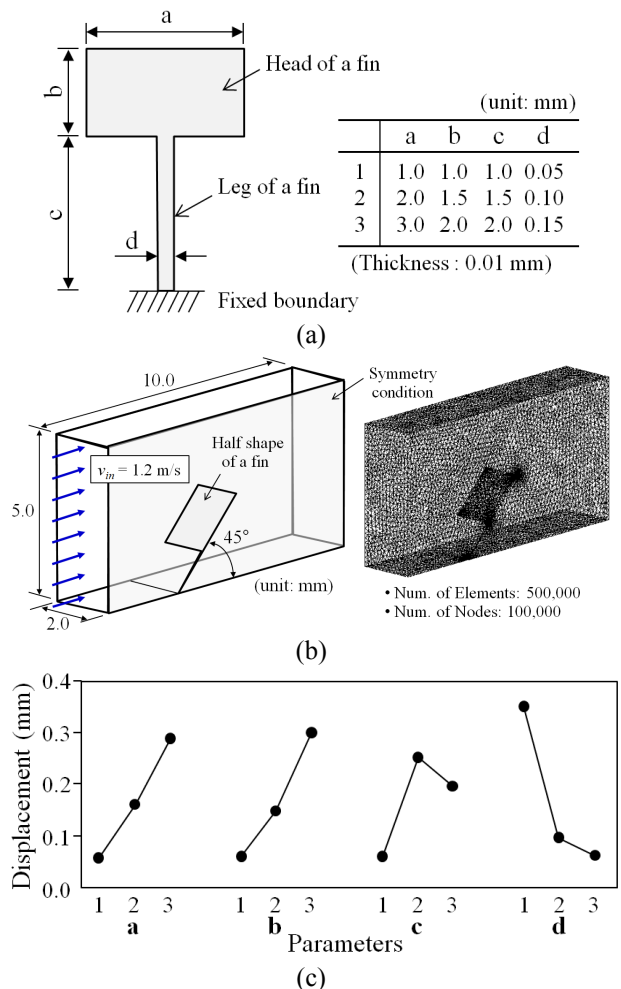


Fig. 1 (a) Basic shape of a fan-shaped pin and its design parameters and design levels, (b) CFD analysis model and mesh shape, and (c) result on the effectiveness of parameters.

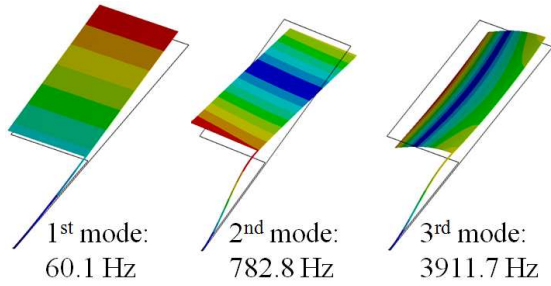


Fig. 2 Modal analysis results: 1st, 2nd, and 3rd modes

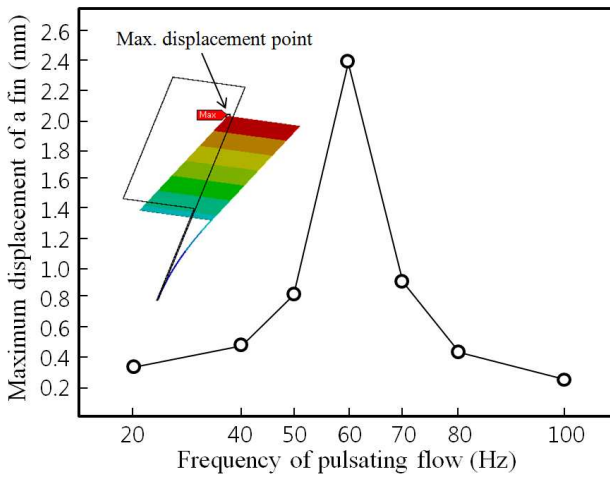


Fig. 3 Variation of maximum displacement of a fin according to the frequency of pulsating flow

(또는 3 수준), 1 수준 인 경우이다. 따라서 본 연구에서는 $a = 3.0 \text{ mm}$, $b = 2.0 \text{ mm}$, $c = 1.5 \text{ mm}$, $d = 0.05 \text{ mm}$ 를 미세 날개의 기본 치수로 선택하였다.

2.2 고유진동수 및 변형거동 분석

설계된 미세날개가 주기적 바람에 의해 최대의 변형이 발생할 수 있도록 유도하기 위하여 미세날개의 고유진동수를 모드 해석(modal analysis)를 통하여 분석하였다. Fig. 2 에는 관련 1 차에서 3 차까지의 모드 형상과 주파수를 나타내었다. 실제 불어오는 바람에 의해 미세날개의 굽힘변형을 유도하는 것이 중요하기 때문에 본 연구에서는 맥동류의 주기를 공진은 피하면서 미세날개의 1 차 고유진동수와 거의 일치하도록 61 Hz 로 두었다. 또한 실제 맥동류의 유동조건에서는 미세날개의 2 차 모드 이상의 진동수를 맞추기 어렵기 때문이기도 하다. 해석을 통하여 맥동류의 크기는 1.2 m/s 로 고정하고 유동 주파수를 20, 40, 50, 60, 70, 80, 100 Hz 로 변경하면서 미세날개의 동적 거동을 살펴보면, Fig. 3 에 나타난 것처럼 유동 주파수가 증가함에 따라 날개 진폭도 같이 증가하며, 60 Hz 일 때 급격하게 큰 진폭을 나타내었다. 이것은 맥동

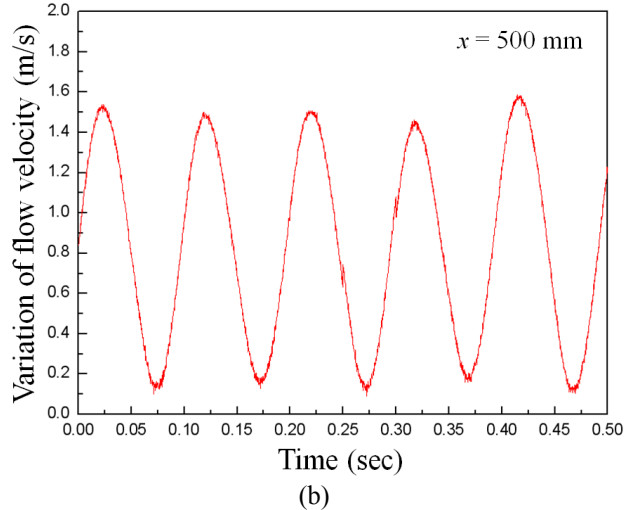
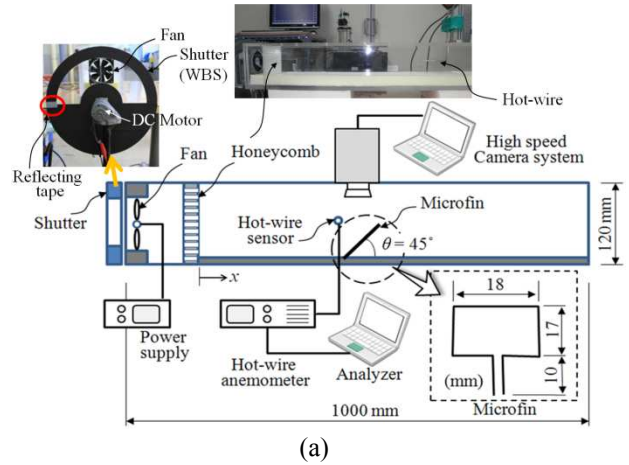


Fig. 4 (a) Experimental system setup for evaluation of pulsating flow, (b) measurement result of flow velocity at $x = 500 \text{ mm}$

주파수와 미세날개가 공진에 의해 변위가 증가된 것으로 판단된다.

앞서 2.1 절에 기술한 동일한 유속 1.2 m/s 이 주어질 때, ANSYS CFX (ver. 12.0)을 이용하여 최적 설계안으로 선정된 미세날개에서 두께를 변경하여 변형거동과 응력분포를 알아보았다. 실제 두께가 너무 얇은 경우, 영구변형이 발생할 수 있어 주기적인 맥동류에 반응하지 못하여 열전달 향상에 크게 기여를 못할 수가 있다. Table 2 에는 두께 변경에 따른 미세날개의 변형량과 최대응력을 나타낸 것이다. 현재 설계된 두께 0.01 mm 보다 작을 경우 변형량이 과대하고 최대응력도 항복응력을 넘게 되어 문제가 됨을 알 수 있다. 따라서 현재 설정한 두께조건이 정적 변형거동 입장에서 타당함을 알 수 있었다.

2.3 해석신뢰성 검증을 위한 기초실험

유체-고체 연성해석을 통하여 미세날개의 진동

에 의한 열전달 효과에 대한 분석을 하기 위하여 해석모델링 및 방법론을 검증하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 맥동류를 유도할 수 있는 실험장치를 구성하였다. 검증 실험에서는 제작의 편의성을 고려하여 2.1 절에서 설계된 형상보다 미세날개의 크기를 증대시켰다. 실험장치에서 주기적인 유동을 생성시키기 위하여 셔터 (shutter)를 DC 12V 모터에 연결하여 유동 팬 (flow fan)에서 불어오는 바람을 채널 내부로 유입을 on-off 형태로 제어하도록 하였다. 셔터의 정확한 회전수를 측정하여 맥동류의 주기를 맞추기 위하여 Fig. 4(a)에 나타난 것처럼 셔터에 반사판을 설치하고 적외선을 이용한 회전수 측정장치 (Kurzanleitung testo-460, TESTO)를 이용하였다. 기초실험에서는 600 rpm 으로 제어하여 10 Hz 의 맥동류를 유도하였으며, 또한 그에 맞추어 1 차 모드에서 고유진동수가 10 Hz 를 갖는 기

초실험용 날개의 형상을 제작하였다. 날개의 크기는 Fig. 1(a)의 기초형상에서 a, b, c, d 를 각각 18, 17, 10, 2 mm 이며, 두께 0.03 mm 를 가진 STS304-H 박판을 이용하여 제작하였다. 채널 속에서 주기적 맥동류의 흐름이 잘 발생하는 위치를 찾기 위하여 벌집모양의 판 (honeycomb plate) 뒤에서 Fig. 4(a)에 나타난 x 방향으로 다양한 위치에서 열선 풍속계 (hot-wire anemometer)를 이용하여 측정하였다. Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 x = 500 mm 위치 이상에서 맥동류가 잘 발생함을 알 수 있었으며, 이 위치에 제작된 날개를 설치하여 해석과 비교하도록 하였다. 또한 채널내부에서 측정된 유속을 이용하여 실제 해석에 이용하였다. 실험에서 얻어진 맥동류의 유속은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

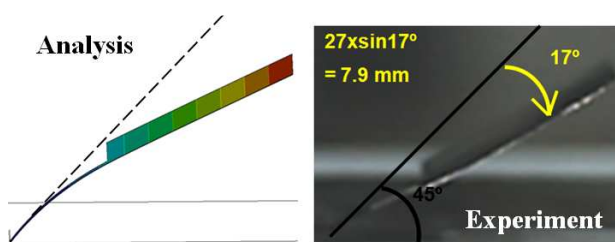
$$V_{in} \text{ (m/s)} = 0.75(\sin 2\pi ft + 1) \quad (1)$$

여기서 V_{in} , f , t 는 각각 유속, 맥동주파수 및 시간을 의미한다. 따라서 최대 유속은 1.5 m/s 이다.

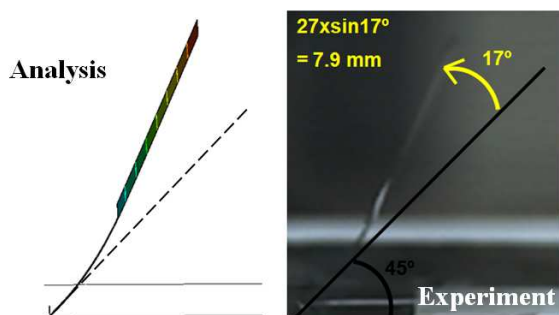
유체-고체 연성해석 모델의 검증을 위하여 실제 실험과 동일한 형태로 날개구조를 모델링하여 양방향 유체-고체 연성해석 (two-way FSI)를 수행하였다.⁽⁹⁾ 해석경계조건은 Table 3 과 같으며, 날개의 변형형상을 해석과 실험에서 상호 비교하기 위하여 열전달 특성에 대해서는 검토하지 않았다. 실험에서 날개의 변형은 고속카메라를 이용하여 측정하였으며, 1 주기 동안의 시간에서 상하방향의 최대점과 최소점의 위치에서 변형된 각도를 이용하여 선형적으로 진폭을 측정하였다. 진폭의 크기는 실험에서 약 15.8 mm 로 나타났으며 이것은 Fig. 5 에 나타난 것처럼 해석결과와도 유사함을 알 수 있으며, 변형량 오차가 약 7% 수준인 것으로 보아 양방향 유체-고체 연성해석의 모델링이나 해석조건이 타당한 것으로 판단된다.

Table 3 Boundary conditions for two-way FSI

Items	Value
Air properties	Density : 1.185 kg/m ³
	Ref. Temp. : 298.15 K
	Viscosity : 1.835e-05 kg/ms
	Cp : 1005.4 J/kg-K
Operation condition	Incompressible flow
	$V_{in} = 0.75 [\sin(2\pi \cdot 10 \cdot t) + 1]$
	No slip condition is applied at the interface between fluid and solid



Downward position of a fin



Upward position of a fin

Fig. 5 Comparison of deformed shapes between analysis (left-side) and experimental results (right-side)

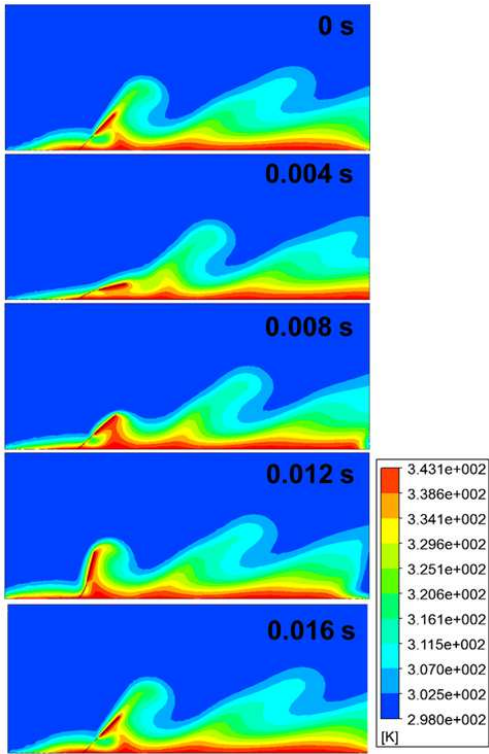
3. 열전달 및 유동특성

3.1 유체-고체 연성해석 기본조건 및 모델링

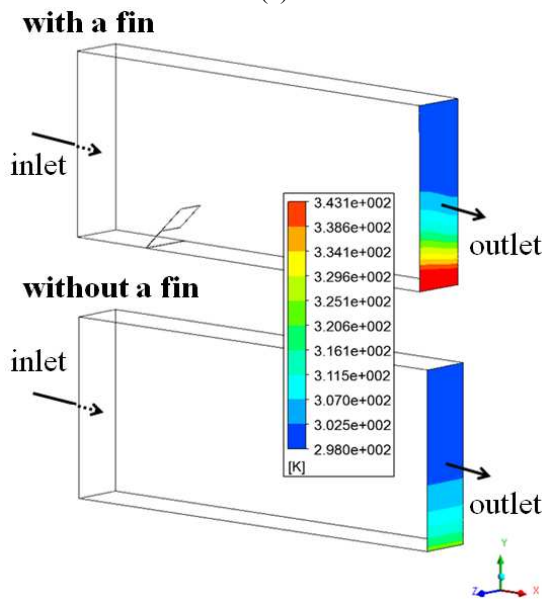
단일 미세날개의 맥동류에 대한 거동을 분석하기 위한 유체-고체 연성해석의 지배방정식은 오일러언 (Eulerian)과 라그랑지안 (Lagrangian) 관점을 포함한 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) 관점의 지배방정식을 이용하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 미세날개를 둘러싸고 있는 경계면에서 유체와 고체의 상호적합 표면력 평형조건 (traction equilibrium)과 변위적합 (displacement compatibility) 조건을 서로 만족되어야 한다. 표면력 평형조건은 유체와 고체구조 각각의 내부에서 발생하는 응력이 경계면의 수직

방향에 대하여 서로 같음을 의미하는 것으로 식 (2)의 조건을 만족해야 한다.

$$\vec{n} \cdot \vec{\tau}_f = \vec{n} \cdot \vec{\tau}_s \quad (2)$$



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Temperature distribution in the flow field during a period, (b) temperature distribution in air at the end of outlet

여기서 \vec{n} 과 $\vec{\tau}$ 는 각각 경계면의 단위 벡터와 응력을 나타낸 것이다. 아랫 첨자 f 와 s 는 유체와 고체구조를 의미한다. 또한 변위적합 조건은 경계면을 따라 유체의 변위와 고체구조의 변위가 서로 일치함을 나타낸 것인데 식 (3)의 조건이 만족되어야 한다.

$$d_f = d_s \quad (3)$$

여기서 d_f 와 d_s 는 각각 유체와 고체구조의 경계면에서 유체 변위 및 고체 변위를 나타낸 것이다. 그리고 유체와 고체구조의 경계면에서 유체의 속도는 점착조건 (no slip condition)을 사용하여 계산된다. 고체구조 표면에 가해지는 유체의 표면력 (fluid traction)은 유체와 고체의 경계면을 따라 작용하는 유체의 법선응력 (normal stress)를 구조의 변위에 따라 적분한 값으로 계산된다.

$$F(t) = \int h^d \tau_f \cdot dS \quad (4)$$

여기서 h^d 와 S 는 각각 고체구조의 변형크기, 자유 표면을 나타낸다.

열 및 유체-고체 연성해석을 위한 모델은 Fig. 1(b)에 나타낸 모델과 유사하며 미세날개의 형상을 고려하여 3(폭)×10(높이)×25(길이) mm 로 하였다. 또한 미세날개의 좌우대칭성을 고려하여 한쪽만 모델링하고 대칭조건을 부여하였다. 총 요소 (element)수는 약 100 만개이고 절점(node) 수는 약 20 만개이다. 또한 미세날개의 유동을 잘 나타내기 위하여 날개 주변에 약 8 만개의 요소를 집중하였다. 해석에 이용된 요소는 ANSYS CFX 에서 제공하는 solid 226 이다. 이 요소는 20 개의 절점으로 구성되어 있으며, 압력과 변위는 12 개의 절점에서

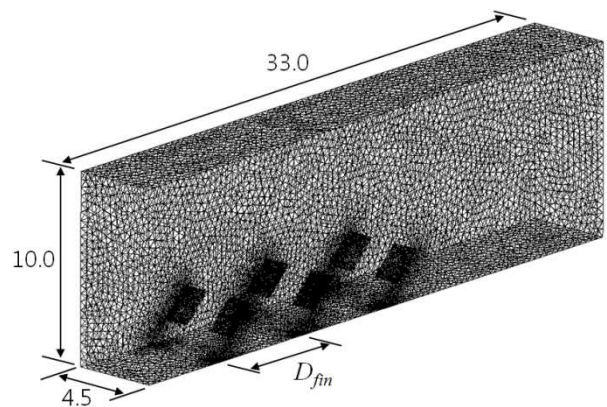


Fig. 7 Analysis model of multi-fins and its mesh shape. The D_{fin} is the distance between fins

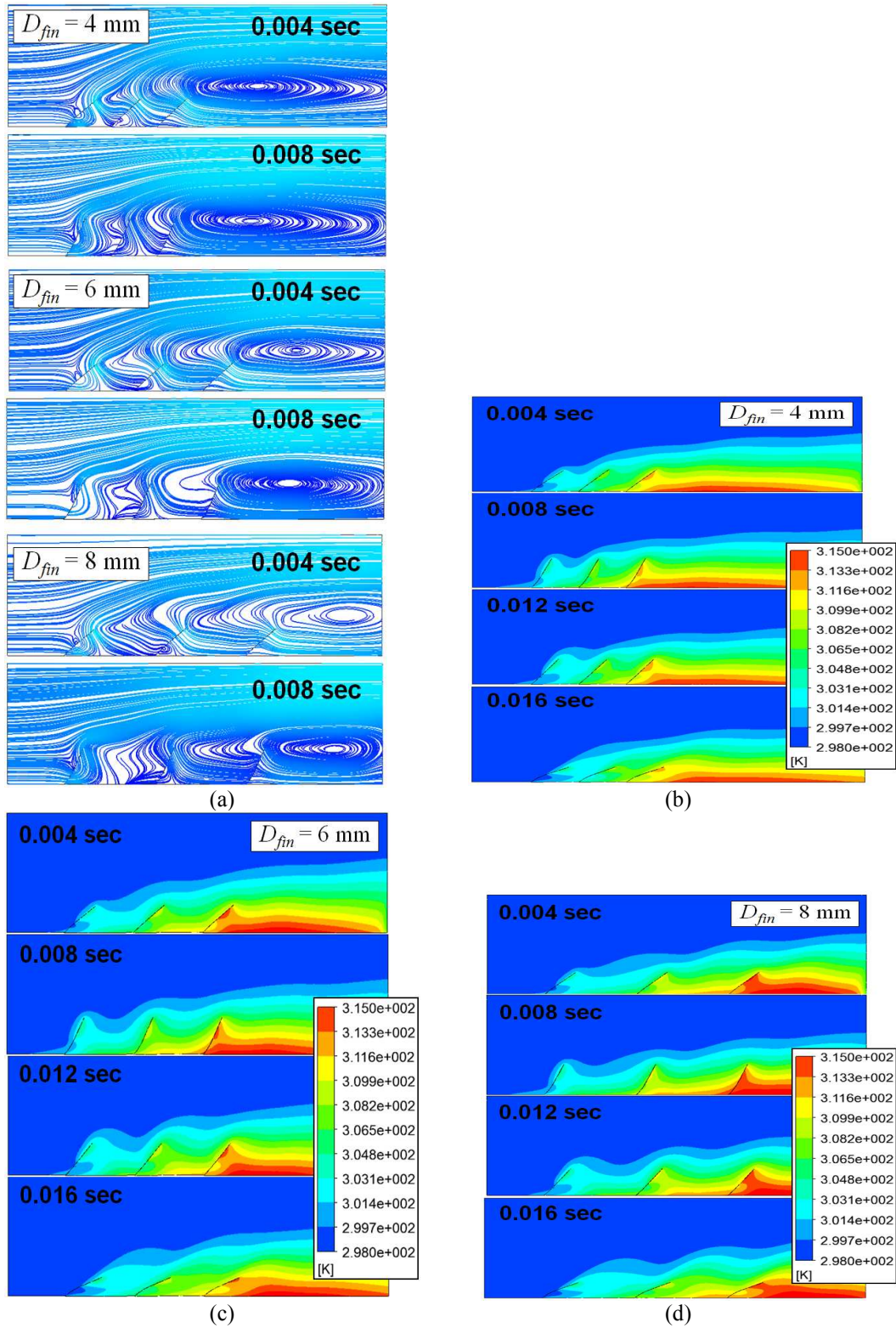


Fig. 8 (a) Comparison of flow patterns depending on the distance between fins. (b), (c), and (d) Temperature distribution during one period with change of the distance between fins

정의되고, 육면체 모서리부 8 개의 절점에서 온도가 정의된다. 작동유체와 조건은 Table 3 와 같다. 유체-고체 연성해석에서 비정상 상태(transient state)

의 수렴기준은 식 (5)와 같이 미세날개의 변위에 대한 상대 오차량이 10^{-3} 이하일 때 수렴이 되도록 하였다.

$$\frac{|d_s^k - d_s^{k-1}|}{|d_s^k|} = 10^{-3} \quad (5)$$

여기서 d_s 는 미세날개의 변위를 나타낸 것이고 상첨자 k 와 $k-1$ 은 반복 수를 의미한다. 맥동류의 입구속도는 식 (1)과 같이 주기함수로 주었으며, 입구에서 들어오는 맥동류의 온도는 298.15 K 이며, 미세날개가 부착된 바닥면의 온도는 348.15 K 로 두었다.

3.2 단일 미세날개의 열전달 특성

기본형상인 단일 미세날개에 대한 열전달 특성을 알아보았다. Fig. 6(a)에는 미세날개의 거동주기 (0.016 sec) 동안 주위의 온도분포를 나타낸 것이다. 날개가 상하로 부채질하듯 움직임에 따라 여러 개의 와류 (vortex shedding)이 발생하고 이것으로 인하여 수력학적 혼합 (hydrodynamic mixing) 비율이 강화되고 바닥면의 고온이 공기층으로 급속하게 열전달이 촉진되고 있음을 확인할 수 있다. 출구부의 공기층 온도분포를 비교해 보더라도 Fig. 6(b)에 나타낸 것처럼 미세날개가 없는 경우에 비하여 열전달이 촉진되어 공기층 온도가 최대 18°정도로 올라감을 알 수 있다.

미세 날개의 진동이 표면 열전달 촉진에 미치는 영향을 정량적으로 확인 하기 위해 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 바닥면의 누셀트 수(Nusselt number, Nu)를 비교해 보았다.

$$q_w = h \cdot (T_w - T_\infty) \quad (6)$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (7)$$

여기서, q_w 는 바닥 면에서의 열유속 (heat flux), h 는 대류 열전달 계수, T_w 와 T_∞ 은 각각 바닥면에서의 온도와 기준 온도를 의미한다. 그리고 L 과 k 는 각각 미세날개의 길이와 유체의 열전도 계수를 나타낸다. 한 주기 동안의 평균 값으로 출구 쪽 바닥의 Nu 수를 계산해 보면 미세날개가 있는 경우 약 1.4 가 나타났으며, 없는 경우는 약 0.5 가 나타났다. 따라서 미세날개의 상하 운동에 의한 주기적 복잡유동이 유발되어 열전달이 촉진됨을 확인할 수 있다. 바닥면에 대한 면적을 적분하여 총 열전달 량을 계산해 보면 미세날개가 없을 때보다 약 40% 증가되어 미세날개의 상하운동에 의한 열전달 증대 효과가 우수함을 알 수 있다. 그러나 미세날개의 거동에 의하여 바닥면의 국부적인 온도분포가 달라질 수 있기

때문에 실제 열전달 시스템 설계시에 이러한 점을 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3.3 다중 미세날개의 열전달 특성

다중 미세날개의 열전달 특성을 알아보기 위하여 Fig. 7 과 같이 두 줄로 서 있는 총 6 개의 미세날개를 해석모델로 하였다. 설계변수로 날개간의 간격 (D_{fin})을 각각 4, 6, 8 mm 로 달리할 때에 표면 열전달에 어떠한 영향을 주는지 해석적으로 알아보았다. 해석에 사용된 총 요소수는 150 만개이며, 절점은 약 30 만개 수준이다. 또한 미세날개의 벽면에서의 유동을 잘 표현하기 위하여 벽면에만 10 만개 요소를 집중적으로 두었다. 전체 해석모델 크기는 4.5(폭)×10(높이)×33(길이) mm 로 하였으며 좌우대칭성을 고려하여 양쪽에 모두 대칭 경계조건을 적용하여 모델링 하였다. 그리고 미세날개의 형상과 해석조건은 3.2 절과 동일한 조건으로 하였다. 해석에서 k-ε 난류모델을 앞의 해석과 동일하게 적용하였다.

Fig. 8(a)에는 6 개의 미세날개의 간격에 따라 미세날개 거동의 초기 생성되는 유동패턴과 온도분포를 비교하였다. 미세날개 사이 간격이 커질수록 유동장의 전 영역에 걸쳐 2 차 유동이 급격하게 발생하고, 날개 사이에서 와류의 발생이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 미세날개의 간격이 큰 경우에 주어진 바닥면의 전면에 고르게 열전달을 촉진시킬 것으로 사료된다. Fig. 8(b)-8(d)에는 날개간의 간격이 달라질 때, 한 주기 동안의 공기층 온도분포를 나타내었다. 날개 간격이 커질수록 날개 사이의 공기층의 온도가 고르게 증가함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 8(a)에 나타낸 것처럼 날개 간격이 증가함에 따라 날개 사이에 발생하는 와류의 크기가 증대되어 열전달이 촉진되기 때문으로 분석된다. 따라서 다중 날개구조를 이용하는 경우, 전체적으로 열전달을 촉진시키기 위해서는 바닥면에 날개의 배치가 또한 중요한 변수임을 알 수 있다.

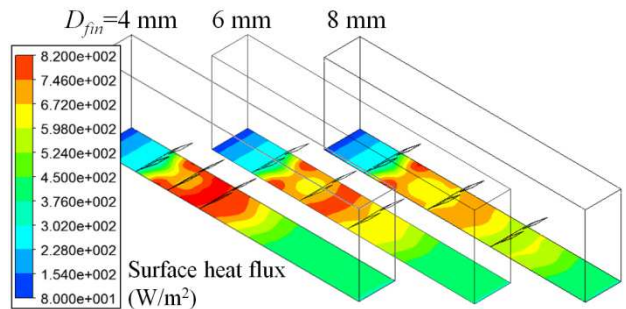


Fig. 9 Comparison of surface heat flux according to different distances of 4, 6, and 8 mm.

Fig. 9 에 나타난 것처럼 열원이 있는 바닥부분의 열유속 (heat flux)를 비교해 보면 날개 간격에 따른 열전달 효과를 알 수 있다. 날개 간격이 좁은 경우 ($D_{fm} = 4 \text{ mm}$)에 열유속이 국부적으로 집중되어 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 날개의 간격이 커짐에 따라 전체적으로 열유속이 바닥면에 고르게 분포되는 것을 알 수 있다. 한 주기 동안 국부적인 최대 열유속의 평균크기는 간격이 4 mm 일 때, 570.3 W/m^2 이며, 간격이 6, 8 mm 일 때는 각각 548.6 과 535.5 W/m^2 로 나타났다. 따라서 국부적인 열유속 크기는 간격이 4 mm 일 때가 8 mm 일 때보다 6.1% 정도 높지만 전체적인 열전달 차원에서 보면 간격이 클 경우에 고르게 일어나고 있다는 것이다. 따라서 열전달이 요구되는 바닥면의 크기나 부분에 따라 날개의 간격과 배치를 달리하면서 조절이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 단일 및 다중 미세날개의 상하유동에 의한 표면 열전달에 미치는 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유체-고체 연성해석을 통하여 단일 미세날개에 대한 해석모델을 실험결과와 비교하여 검증하였으며, 맥동류에 의한 날개 거동이 실험과 거의 유사함을 알았다. 또한 실험적으로 맥동류를 유도하기 위한 방법과 장치를 고안하였다.

(2) 단일 미세날개의 경우 유동에 의한 변형을 최대로 올리기 위하여 60 Hz 의 1 차 고유진동수에 맞추어 맥동류의 흐름 주파수를 유도하였으며, 해석결과에서 총 열전달량이 날개가 없는 경우에 비하여 약 40% 증가됨을 알 수 있었다.

(3) 2 열 구조를 가진 총 6 개의 다중 미세날개의 경우 전체적으로 마지막 날개 뒷부분에서 와류가 급속히 성장됨을 알 수 있으며, 이것으로 인하여 열전달이 이 부분에서 잘 일어남을 해석적으로 확인하였다. 또한 날개의 간격에 따라 와류의 생성이 각각 달라지며, 열원이 있는 바닥면 전체에서 일어나는 열전달이 간격이 넓은 경우에 균일하게 발생하는 것을 열유속량을 통하여 알 수 있었다.

(4) 다중 미세날개 사이의 간격을 달리하여 바닥면의 열전달을 국부적으로 조절이 가능함을 보였다. 또한 향후 연구를 통하여 전체적으로 균일한 열전달을 유도할 수 있는 날개 간격에 대한 해석적, 실험적 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 미세날개에 의한 압력손실에 대한 영향도 향후

분석할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외 우수 연구기관유치사업 (No. K20701002274-12E0100-05710)의 연구결과이며 관계자에게 사의를 표한다.

참고문헌

- (1) Chu, R. C., 1986, "Heat Transfer in Electronic Systems," In: *Proceedings of the 8th International Conference on Heat Transfer*, New York, pp. 293~305.
- (2) Go, J. S., Lim, G. B., Yun, H. Y., Lee, J. H., Song, I. S. and Park, Y. E., 2001, "Heat Transfer Enhancement Using Flow-Induced Vibration of a Microfin Array," *Sensors Actuators A : Physical*, Vol. 90, No. 3, pp. 232~239.
- (3) Shin, S.-W., Chung, I.-K. and Kim, S.-Y., 2009, "Local Heat Transfer Characteristics on Fin Surface of Plate Fin-Oval Tube with Delta Wing Vortex Generators," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 10, pp. 757~766.
- (4) Lee, J. K., Kim, Jung, C. W. and Kang, Y. T., 2008, "Experiment on Heat Transfer and Absorption Performance Enhancement for Binary Nanofluids ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O} + \text{Nano Particles}$)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 9, pp. 669~675.
- (5) Ralph, L. and Webb, J., 1994, "Principles of Enhanced Heat Transfer," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 15, No. 4, pp. 341.
- (6) Keil, R. H. and Baird, H. I., 1971, "Enhancement of Heat Transfer by Flow Pulsation," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, Vol. 10, No. 4, pp. 473~478.
- (7) Yoo, S.-Y., Cho, W.-S. and Ahn, J.-K., "A Study on Heat Transfer Enhancement from Flat Plate using Multiple Tripping Wires," 2012, *Korean J. Air-Conditioning and Ref. Eng.*, Vol. 24, No. 12, pp. 837~845.
- (8) Kim, S. Y., Kang, B. H. and Hyun, J. M., 1998, "Forced Convection Heat Transfer from Two Heated Blocks in Pulsating Channel Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 625~634.
- (9) Bathe, K. J. and Zhang, H., 2004, "Finite Element Developments for General Fluid Flows with Structural Interactions," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 60, No. 3, pp. 213~232.
- (10) Hirt, C. W., Amsden, A. A. and Cook, J. L., 1974, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds," *J. Comput. Phys.*, Vol. 14, pp. 227~253.