

양방향 유체-고체 연성해석을 통한 표면 위 미세날개의 진동이 열전달에 미치는 영향 분석

A Numerical Study on the Effect of a Microfin with a Flexible Up-down Movement on Heat Transfer using a Fluid-structure Interaction (FSI) Method

박기홍¹, 민준기², 김진규², 강석훈³, 김성진³, 박상후^{4,✉}

Ki-Hong Park¹, June Kee Min², Jin Kyu Kim², Seok-Hoon Kang³, Seong-Jin Kim³ and Sang-Hu Park^{4,✉}

- 1 부산대학교 기계공학부 에너지시스템 전공 (Department of Energy Engineering, Pusan National Univ.)
2 부산대학교 롤스-로이스 대학 기술센터 (Rolls-Royce University Technology Center, Pusan National Univ.)
3 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템 전공 (Department of Precision Engineering, Pusan National Univ.)
4 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)
✉ Corresponding author: sanghu@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-1011

Manuscript received: 2011.2.24 / Revised: 2011.4.6 / Accepted: 2011.6.3

A microfin on a heated surface and its effects of the heat transfer has been investigated. The thickness of the fin is about 8 micrometer to allow the flexible up-down motion of the fin. Two-way complete FSI (Fluid-Structure Interaction) method has been applied for the analysis. Firstly, the deformation of a microfin due to the pulsating flow is evaluated using structure analysis. The flow and temperature patterns are predicted by CFD (Computational Fluid Dynamics) method. At each time step, using the pressure force and temperature distribution from CFD, the deformation of the wing is evaluated by FEM. Also in order to estimate the resonance probability, the natural frequency of the wing structure is calculated by modal analysis. The proposed numerical procedure was validated through experiment using a single fin. Through this work, we show that the increase of 40% in heat transfer capacity using the microfin has been compared with that of flat plate case.

Key Words: Microfin (미세날개), Two-way FSI (양 방향 유체-구조 연성해석), Pulsating Flow (맥동류), CFD (전산유체해석), Modal Analysis (모드해석)

1. 서론

최근 산업 기술의 발달로 전자제품과 같은 장비들이 고기능화, 고성능화, 소형화로 점차 발전하고 있다. 예를 들면, 컴퓨터는 다기능/고성능화를 요구하는 소비자의 욕구를 충족시키기 위하여 고직접화 고밀도화 되고 있다. 그 결과, 다양한 전자제품 또는 기계시스템 내의 단위 면적당 열 발생률(heat generation per area)이 급격하게 증가하고 있

다.¹ 또한 컴퓨터 부품의 고직접화 고밀도화가 이루어짐에 따라 컴퓨터 시스템의 전반적인 크기가 점차로 줄어들면서 부품의 냉각을 위한 공간적 여유도 함께 줄어들어 기존의 방식으로는 충분한 냉각을 시킬 수가 없을 것으로 사료된다. 따라서 부품의 작동온도가 기존의 설계된 작동 온도를 초과하게 되고 시스템의 오작동 비율을 증가시킬 수 있다. 그러므로, 시스템의 안정된 작동을 위해서 효과적이고 효율적인 냉각기술을 필수적으로 요구

한다.² 컴퓨터의 경우 발생된 열을 제거하기 위하여 비용 절감과 제작의 편리를 위해 수냉식을 사용하지 않고 일반적으로 공냉식이 사용된다. 이처럼 공기를 이용하여 시스템 내의 발생된 열을 효과적으로 제거하기 위하여 많은 기술이 개발되었다. 지금까지 상용화된 냉각방식은 냉각팬(cooling fan)과 냉각핀(cooling fin)을 이용하는 방식으로 팬(fan)에 의해 생성되는 공기유동은 냉각핀(fin) 표면의 열을 제거하게 된다.

뉴턴의 냉각법칙(Newton's law of cooling)에 따르면, 온도차를 가진 하나의 시스템에서 대류 열전달을 증가시키는 방법으로 크게 두 가지가 있다. 하나는 표면의 면적을 증가시키는 방법이고 다른 하나는 유동장 내의 유동 흐름을 복잡하게 하여 열전달 계수를 크게 하는 방법이다.³ 그러나 표면적을 증가시키는 방법은 오늘날 고밀도화 되어 있는 장비에서는 히트싱크(heat sink)와 같은 다소 큰 부품을 사용할 공간이 없기 때문에 적절하지 않다. 따라서 제한된 공간 안에서 열전달을 증가시키기 위해 표면에 딴플(dimple)같은 미세 구조를 만들어서 유동 흐름을 복잡하게 만들어 열전달을 촉진시키는 방법이 제안되고 있다.^{4,5} 또한 맥동류(pulsating flow)에 의해 열전달을 더 증가시키는 것은 잘 알려져 있다.⁶ 이러한 결과에 근거하여 수력학적 혼합(hydrodynamic mixing)이 열전달 계수를 향상시키기 위한 효과적인 방법이라는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서도 미세날개 진동에 의해 수력학적 혼합을 크게 하여 열전달을 증가시키고자 한다. 이를 위해 Go 등⁶이 MEMS 공정으로 만들어 제안한 일자형 미세날개 열전달 증가 효과를 더욱 향상시키기 위해 날개 상단의 면적이 증가된 형상을 고안하였으며, 맥동류를 사용하여 핀의 운동을 극대화 시키는 방법에 대해 고찰하였다. 또한 정밀한 효과분석을 위하여 기존의 단순화된 일방향 유체-구조 연성해석(one-way fluid-structure interaction; FSI)¹³을 확장한 양방향 연성해석(two-way FSI)을 제안하였고 최종적으로 미세 날개의 기초 설계변수에 대하여 연구하였다.

연구내용으로는 먼저 재료 실험을 통하여 재료의 기계적 물성을 파악하고, 해석의 타당성을 평가하기 위하여 실험을 하였다. 또한 다구찌기법(Taguchi-method)⁸과 단방향 유체-구조 연성해석을 적용하여 최대 변형이 생기는 미세날개의 형상을 결정하고 구조적 안정성을 평가하였다. 유체와 구

조 사이의 연성해석에서는 대부분 구조를 강체로 가정하지만 본 연구에서 제안하는 미세 날개 구조의 경우 유체에 의해 큰 변형이 발생하므로 양방향 유체-구조 연성해석을 이용하여 제안된 방법의 열전달 촉진 특성을 파악하였다.⁹⁻¹³ 다시 말해서 본 연구에서는 미세날개가 외부로부터 들어오는 맥동류에 의해 공진이 발생하고 미세 날개에 큰 변형이 생기므로 양방향 유체-구조 연성해석을 통해 표면 위 미세 날개의 진동이 열전달에 미치는 효과를 수치적으로 파악하였다.

2. 재료물성 분석

본 연구에 사용된 미세날개의 기계적 물성을 알아보기 위하여 인장시험을 수행하였다.

시편의 규격은 KS B 0801의 규격에 따라 두께 20 μ m의 STS304-H 소재를 압연방향(rolling direction)으로 절취하여 인장 시편을 제작하고, 2 mm/min의 속도로 총 4회 인장실험을 실시하였다. Fig. 1과 Table 1은 각각 사용된 소재의 평균 응력-변형률 선도와 기계적 물성을 나타낸 것이다.

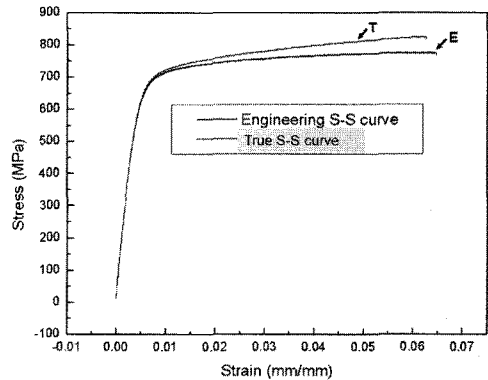


Fig. 1 Stress-Strain curve of STS 304-H

Table 1 Mechanical properties of STS 304-H

Material	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Elongation (%)	Elastic Modulus
STS304-H	670.0	771.4	6.0	143.9

3. 수치해석 기법

미세날개 진동이 열전달에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 유체-구조 연성해석 모델을 구성하였다. 미세날개의 형상은 큰 변형을

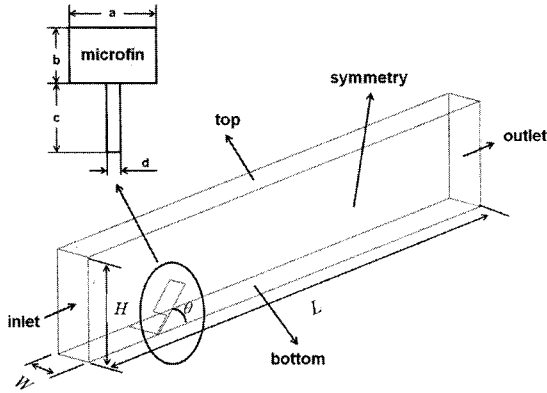


Fig. 2 Schematic view of half-shape of the micro fin geometry and typical computational domain for the FSI analysis (the insert shows the full shape of a microfin)

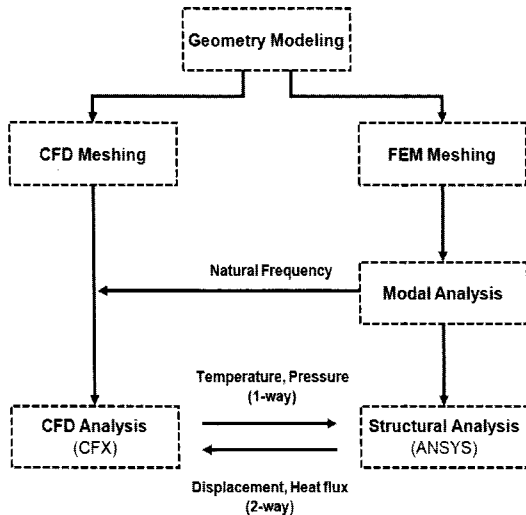


Fig. 3 Schematic procedure of design method on the array of microfins

가지기 위해 날개의 머리부분의 면적($a \times b$)을 크게 하였으며, 폭 d 의 지지대가 초기 각도(θ)로 기울어져 있도록 설계하였다.

이때 미세 날개의 형상 변수는 a, b, c, d 이고 미세 날개와 바닥 면(bottom)의 각도는 45° 로 일정하게 하였다. 미세 날개의 두께는 최대 변위가 발생할 수 있도록 $8 \mu\text{m}$ 로 하였다. 또한 공진을 이용한 미세 날개의 최대 변형을 위해 유동입구에서 구조의 고유진동수(natural frequency)와 같은 맥동주파수를 가지는 맥동류가 들어 온다고 가정하였다.

3.1 유체-구조 연성해석 모델

Fig. 3 에는 본 연구에 적용된 미세날개의 열전달 촉진영향 분석을 위한 구조설계 및 양방향 유체-구조 연성해석의 전체 프로세스를 나타낸 것이다. 기본적으로 유동과 열전달을 위한 전산유체해석(CFD)과 구조의 응력과 변형량을 위해 유한요소해석(FEM)을 적용하였다. 또한 모드 해석(modal analysis)을 통해 구조의 고유 진동수를 분석하여 설계된 미세날개의 최대변위 발생을 위한 맥동류 주파수를 계산하였다. 양방향 유체-구조 연성해석은 유동해석의 압력과 온도가 시간 간격마다 수렴되고 압력은 미세 날개의 표면에 추가되는 외부 하중조건으로 연계되어 구조해석을 하게 된다. 이때 구조의 응력과 변형량이 계산되고 다시 유동장으로 전달 되면서 매 시간마다 반복적으로 수행한다. 최대 변위를 발생시키기 위한 조건과 미세 날개의 형상을 결정하기 위해서 단방향 유체-구조 연성해석을 이용하였다. 이는 미세 날개의 일정한

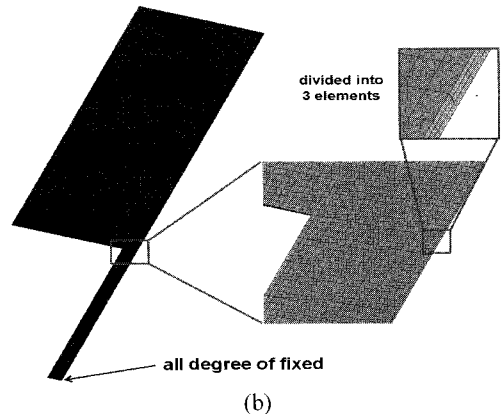
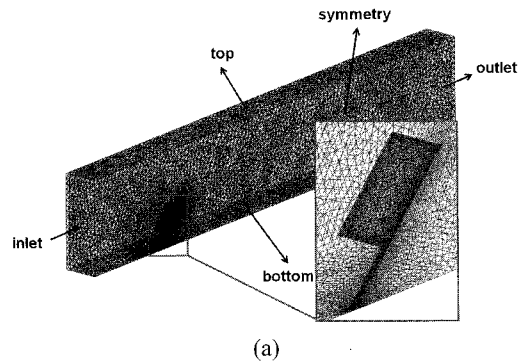


Fig. 4 Full model of computational meshes under symmetric condition and boundary conditions: (a) CFD mesh; and (b) FEM mesh

의력에 의해 최대 변형을 가지는 형상을 상대비교를 통해 알아 보기 위함이다. 이러한 유체-구조 연성해석에 사용된 상용 코드로 전산유체해석(CFD)은 CFX(Ansys CFX ver. 12.0)로 구조해석은 (Ansys transient structure ver. 12.0)을 이용하였다. 해석에 사용된 요소의 형태는 Fig. 4(a)와 같다. 미세 날개의 형상을 결정하기 위해 단방향 유체-구조 연성해석의 모든 경우에 대칭조건을 이용하였고, 유동해석의 각각의 경우의 요소(mesh)수는 330,000 ~ 680,000 였다.

요소 수는 예비 실험결과와 비교를 통하여 결정된 최적의 요소수 수준을 유지하였다. 또한 연성해석의 경우, 미세 날개의 큰 변형에 의한 요소의 과도한 왜곡을 방지하기 위하여 미세 날개 주변 요소의 강성을 크게 하였다. 입구의 속도는 식 (1)과 같이 맥동류를 적용하였고, 바닥면과 윗면은 점착조건 (no slip condition)을 적용하였다.

$$u(t) = V\{(\sin 2\pi \cdot f \times t) + 1\}m/s \quad (1)$$

여기서, $u(t)$ 는 입구 속도, V 는 입구 평균속도, f 는 맥동 주파수이다. 입구로부터 들어오는 작동 유체는 25°C 의 공기이고, 물성과 작동 조건은 Table 2 와 같다.

Table 2 The properties of air and operating condition

Properties at 25 °C	Operating condition
Density = 1.185 kg/m ³	Ref. pressure = 1 atm
C _p = 1005.4 J/kg K	Rel. pressure = 0 Pa
μ = 1.835e-05 kg/ms	Ref. temp.= 298.15 K

비정상 비압축성 공기를 위한 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 일정한 물성이 해석에 적용되었고, 압력과 속도의 연계해석을 위해 SIMPLE 알고리즘과 2 차 상류차분도식(second-order upwind scheme)이 적용되었다.

그리고 해석방법에 대한 실험적 검증은 실시하기 위하여 해석검증모형을 제시하였다. 해석검증모형에서는 제작의 편의를 고려하여 미세날개 크기를 Fig. 5 의 삽입된 모양과 같이 하였고, 입구측 최대 레이놀즈 수(Re)가 2650 가 되도록 하였다. 또한 미세날개의 성능평가를 위한 양방향 유체-구조 해석에서의 최대 레이놀즈 수는 228 로 두었다. 따라서 전자의 검증모델해석에서는 난류모델로 $k-\epsilon$ 모델을

사용하였고, 후자는 층류(laminar)를 적용하였다.

Fig. 4(b)는 연성해석을 위한 미세 날개구조의 요소 형상을 나타낸 것이다. 이때 요소 타입은 solid 226 을 이용하였고, 미세날개의 형상 결정을 위한 요소수는 (12,000~30,000)이었다. 미세 날개의 굽힘을 정확하게 표현하기 위해서 두께 방향으로 3 단계 요소를 나누었다. 이는 굽힘이 발생하는 구조의 중립축(neutral axis)을 기준으로 위/아래에 정확한 인장과 압축에 대해 계산하기 위함이다. 경계조건으로 미세 날개의 끝단을 모든 방향에서 고정하였다.

3.2 해석 검증 기초실험

유체-구조 연성해석의 타당성을 검증하기 위해 미세 날개의 진동에 대한 실험을 하였다. Fig. 5 는 실험 장비의 전체적인 개략도이다. 두께 15 mm 의 투명 아크릴로 제작하였고 폭, 높이, 길이는 각각 120 mm, 120 mm, 1000 mm 로 설계하였다. 채널 입구의 팬(fan)으로부터 유량이 들어오고 균일한 입구유동을 만들기 위해 허니컴브(honeycomb)를 그 다음에 설치하였다. 전원공급장치(power supply)를 이용하여 팬의 분당 회전수(rpm)를 조절하고, 맥동류를 생성하기 위해 Fan 뒤에 셔터(wind-block shutter; WBS)를 설치하였다. WBS 에 반사 테이프를 부착하고, 반사 테이프와 적외선 측정기(Kurzanleitung testo 460)을 이용하여 WBS 의 분당 회전수를 측정하였다. 채널 길이, 높이 방향의 유동을 측정하기 위하여 열선 유속계(hot-wire anemometer)를 이용하여 길이 방향으로 다양한 위치에서 측정하였다. 또한 열선 유속계와 traverse 를 이용하여 채널 단면의 높이 방향으로 속도의 분포를 측정하였다.

실험은 처음에 WBS 의 회전없이 Fan 을 작동하여 채널에 공기를 공급하고 정상 상태에 도달하였을 때 WBS 를 10 rps 로 회전시켰다.

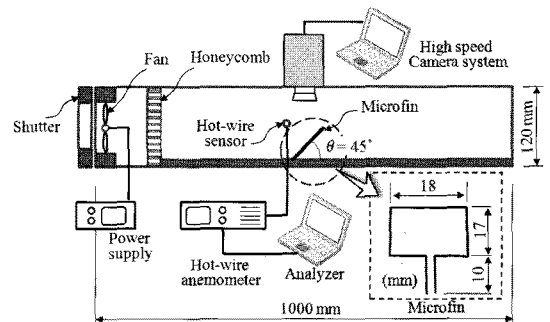


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental apparatus

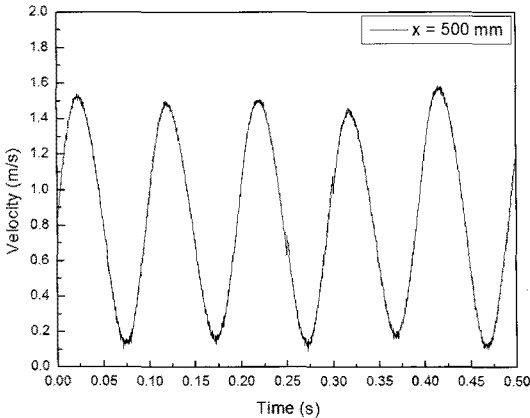


Fig. 6 The measured velocity at channel length of 500mm

Fig. 6 은 채널 내에서 팬의 위치에서 길이방향으로 200, 300, 500 mm 에서 측정하였을 때 가장 양질의 맥동류가 생성된 500 mm 위치에서의 맥동류 생성을 보여주고 있다. 이때 입구로 들어 오는 맥동류는 식 (1)에서와 같이 $V = 0.75 \text{ m/s}$ 이고 $f = 10 \text{ Hz}$ 였다. 실험을 위한 미세 날개는 STS304-H 계열의 두께 $20 \mu\text{m}$ 박판을 이용하여 제작하였고, 미세 날개 진동의 확인을 쉽게 하기 위해서 실험에서는 큰 사이즈의 날개를 제작하였다. Fig. 7(a)-(b)는 미세날개의 크기와 실제 제작한 그림이다. 이때 실험에서 적용된 미세 날개의 크기는 모드해석(modal analysis)을 통해 실험에서 얻어진 맥동 주파수와 같은 10 Hz 의 1 차 고유진동수를 가지는 형상을 결정 하였다. 채널의 바닥과 미세날개의 각도는 일정한 45° 였다.

실험에서의 맥동류에 의한 미세 날개 진동을 확인하기 위해 Fig. 5 와 같이 고속 카메라(MEMRECAM 4)를 이용하였고, 정량적으로 미세

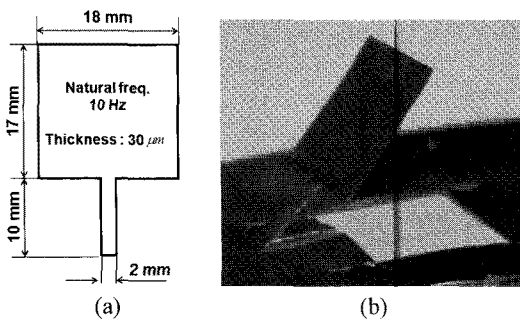


Fig. 7 The shape and dimensions of the test fin having a natural frequency of 10 Hz; (a) dimensions and (b) actual photography of a test fin

날개의 진폭의 크기를 알아 보기 위해 식 (2)를 이용하였다.

$$\delta = l \sin \theta \tag{2}$$

여기서, δ 는 미세 날개의 변형량, l 은 미세날개의 길이, θ 는 미세 날개의 변형된 각을 나타낸다. 식 (2)를 이용하여 미세 날개의 총 변형량은 15.8 mm 로 나타났다.

4. 결과 및 토의

4.1 실험 검증

양방향 유체-구조 연성해석의 타당성을 평가하기 위해 실험에서 얻어진 결과를 경계조건으로 적용하여 양방향 유체-구조 연성 해석을 하였다. 해석을 총 2 sec 동안 실행하였으며 Fig. 8 은 총 시간 동안의 미세 날개의 동적 거동특성(dynamic characteristic)을 나타낸 것이다. 그림에서 미세 날개의 진동은 약 0.6 sec 동안까지 진폭의 크기가 변하다가 이후부터는 일정한 진폭을 가지면서 안정적인 상태로 진동을 한다. 이때 최대 진폭의 크기는 17 mm 이다. 이때 1 주기(period)는 0.1 sec 였고, 이는 미세 날개가 맥동류에 의해 고유진동수와 같은 주파수를 가지면서 진동하는 것을 확인하였다.

Fig. 9 는 각각 실험과 해석에서 미세날개의 위/아래 위치에서의 변형된 형상을 나타낸다. 양방향 유체-구조 해석에서의 미세 날개의 변형된 형상이

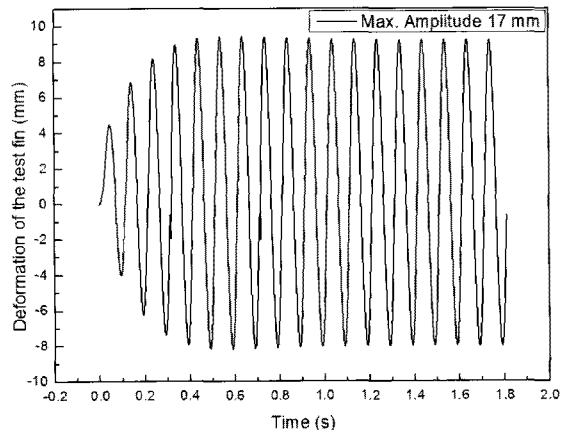


Fig. 8 The predicted deformation of fin from FSI analysis during 2 sec

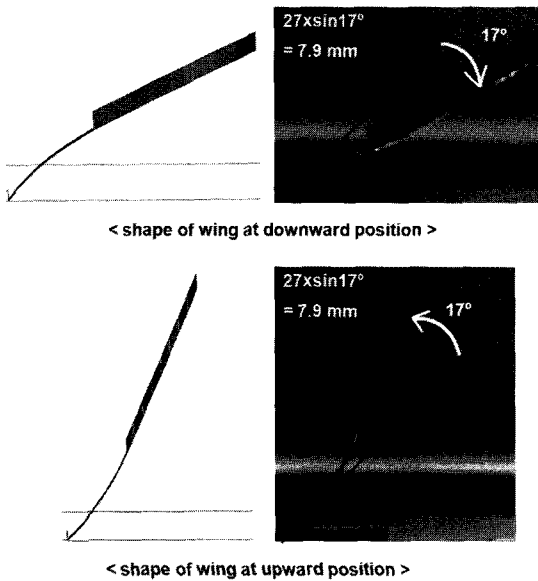


Fig. 9 Deformed shapes of vibrating fin from FSI analysis and visualization test

실제 실험에서의 변형된 형상과 거의 이상적으로 같다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 각각의 실험과 해석에서의 미세 날개의 최대 진폭의 크기는 15.8 mm, 17 mm 였고, 실험과 해석 결과의 오차는 7% 이내였다. 이러한 결과로 인하여 본 연구에 사용된 양방향 유체-구조 연성해석이 맥동류의 조건에서 진동하는 미세날개의 동적 특성을 예측하는데 타당한 것을 확인하였다.

4.2 미세 날개의 형상 설계

4.2.1 최대변형을 갖는 미세 날개의 크기

Table 3 Parametric study case through the Taguchi orthogonal array $L_9(3^4)$

Case No.	Dimension (mm)				Deformation (mm)
	a	b	c	d	
1	1.0	1.0	1.0	0.05	0.018
2	1.0	1.5	1.5	0.1	0.050
3	1.0	2.0	2.0	0.15	0.110
4	2.0	1.0	1.5	0.15	0.026
5	2.0	1.5	2.0	0.05	0.350
6	2.0	2.0	1.0	0.1	0.107
7	3.0	1.0	2.0	0.1	0.130
8	3.0	1.5	1.0	0.15	0.054
9	3.0	2.0	1.5	0.05	0.680

수력학적 혼합(hydrodynamic mixing)을 키우기 위해 미세 날개 진동의 진폭이 최대값을 가져야 한다. 하지만 STS-304 와 같은 금속은 강성이 높기 때문에 큰 변형의 발생이 어렵다. 이를 해결하기 위해 다구찌기법을 이용하여 일정한 유동에 의해 최대 변형을 갖는 미세 날개의 형상을 결정하였다.

미세 날개의 형상 변수를 Fig. 2 의 상단그림과 같이 a, b, c, d 로 정하고 각각의 변수는 3 수준을 가지도록 결정하였다. Table 3 은 설계변수에 대한 다구찌 직교배열표를 나타낸 것이다. 전산유체해석의 압력을 구조해석의 외력으로 이용하여 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 2 에서 유동장의 크기($W \times H \times L = 2 \times 5 \times 10$ mm)와 입구속도를 일반 컴퓨터용 냉각팬의 속도인 3 m/s 로 일정하게 하였다.

Table 3 은 또한 각각의 경우에 대한 미세 날개의 변형량을 나타내고, 이때 최대 변형이 발생하는 9 번째 경우($a=3.0, b=2.0, c=1.5, d=0.05$ mm)로 미세 날개의 형상을 결정하였다. 이것은 미세 날개 형상에서 공기의 저항이 많이 발생하도록 a, b 변수가 최대가 되도록 하고 강성을 줄이기 위하여 날개 길이에 해당하는 c 는 최대, 고정부 쪽에 해당되는 d 는 최소로 설계하는 것이 동일한 유동조건에서 가장 큰 변위를 발생시키는 방법임을 알 수 있다. 이러한 설계 개념에 따라 형상변수 a, b, c, d 를 각각 3, 2, 1.5, 0.05 mm 로 결정하고 미세 날개 두께에 대한 변형거동을 분석해보기 위하여 두께를 5 ~ 15 μ m 로 바꾸어 가면서 해석을 수행하였다. 해석결과 두께가 5 μ m 에서 미세날개가 최대 변위(5.25 mm)를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 두께가 작을수록 강성이 약하여 미세 날개가 쉽게 변형함을 알 수 있다. 하지만 미세날개가 열전달 촉진을 위해서는 탄성거동을 하여 부재질 형태로 반복적으로 거동해야 하는데 두께가 너무 얇은 경우에는 유동에 의해 완전 소성변형이 발생하여 거동이 불가능하여 열전달 촉진을 할 수 없게 된다. 두께 5 μ m 인 경우에는 응력이 소재의 항복응력(yield stress) 670 MPa 을 초과하기 때문에 구조적으로 부적합하다.

따라서 미세 날개 구조의 안전성을 고려하여 두께를 8 ~ 10 μ m 수준으로 하는 것이 적합한 것으로 사료된다. Fig. 10 은 미세날개의 형상이 a, b, c, d 가 3, 2, 1.5, 0.05 mm 이고 두께가 8 μ m 일 때 변형된 형상과 최대 응력을 나타낸 것이다.

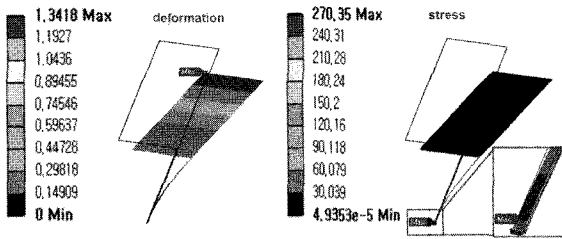


Fig. 10 Deformation and stress distribution of the microfin with thickness of 8 μm

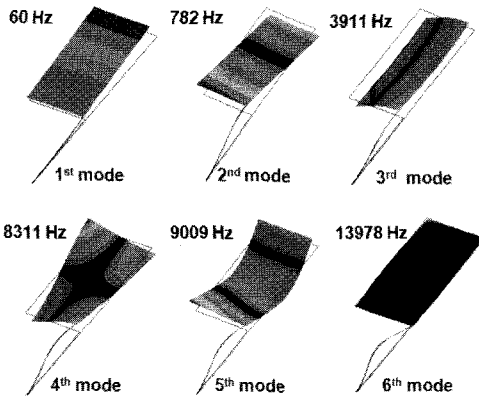


Fig. 11 Picture of the deformed shapes of a micro fin and the natural frequencies

4.2.2 미세 날개의 모드해석

일반적으로 미세 날개와 같이 길쭉한 모델은 강성이 가장 약한 굽힘의 형상이 첫 번째 모드에서 쉽게 나타나고 또한 공진(resonance)현상이 쉽게 발생한다. Fig. 11은 최종 미세 날개의 각각의 모드(1st ~ 6th)에서의 변형된 형상을 나타내고 이때, 고유 진동수(natural frequency)는 각각 60 Hz, 782 Hz, 3911 Hz, 8311 Hz, 9009 Hz 그리고 13978 Hz 이다. 본 연구에서는 1st 고유 진동수를 고려하였다.

4.3 열전달 및 유동 특성

미세 날개의 진동이 표면 열전달 촉진에 미치는 영향을 알아보기 위해서 양방향 유체-구조 연성해석을 수행하였다. Fig. 2에 나타난 것처럼 유동장의 크기는 ($W \times H \times L = 2 \times 5 \times 10 \text{ mm}$)이고, 입구로 들어오는 맥동류는 식 (1)에서 평균 속도 V 는 0.6 m/s 이다. 또한 입구로 들어오는 맥동류의 온도는 298.15 K, 바닥면의 온도는 348.15 K로 하였다.

미세 날개 진동에 의한 열전달 특성을 알아보면 다음과 같다. Fig. 12(a)는 1 주기(0.016 s)동안의

미세 날개 주위의 속도에 대한 유선(streamline)의 흐름을 나타낸 것이다. 미세 날개가 아래방향으로

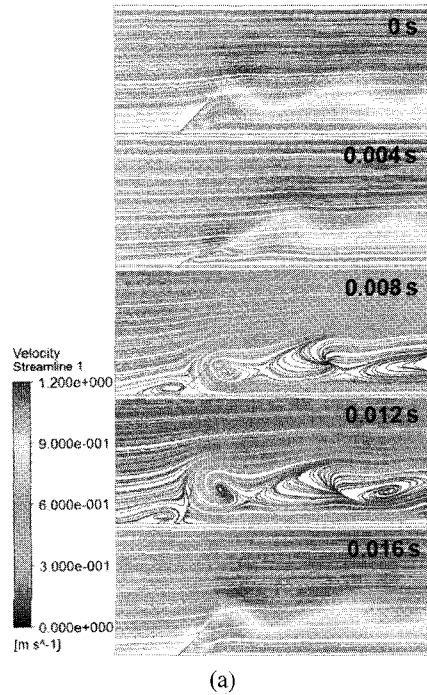


Fig. 12 (a) Streamline and (b) temperature distributions around the microfin during one period (0.016s)

진동할 때($t = 0.004$ s) 비교적 평행한 흐름을 보이고, 미세 날개가 위 방향 진동을 시작할 때($t = 0.008$ s) 미세 날개 후류에서 여러 개의 강한 와류(vortex shedding)가 발생하는 것을 알 수 있다. 후류 부분의 와류는 미세날개가 위 방향 최대 변위를 가질 때($t = 0.012$ s)까지 형성되어 있다가 점차 약해지면서 다시 원래의 위치에서 평행 흐름을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이, 미세 날개가 진동하면서 후류에서의 주기적인 와류가 시간에 따라서 계속 생성, 소멸되는 현상을 알 수 있다. 이러한 주기적인 와류 유동장 미세 날개 후류의 수력학적 혼합(hydrodynamic mixing) 비율을 강화시키고 또한 열전달을 촉진시킨다.

1 주기(0.016 s) 동안의 미세 날개 주위의 비정상 상태의 온도 분포를 살펴보면 Fig. 12(b)에 나타난 것처럼 미세 날개가 진동할 때 유동장 내의 온도 분포가 시간의 흐름에 따라 오른쪽으로 점점 이동 하는 현상을 볼 수 있다. 이는 미세 날개가 진동하면서 부채질하는 효과와 함께 펌핑(pumping) 기능을 한다. 이런 동적 특성은 선행연구와 비슷하다.¹³ 따라서 이러한 반복적인 미세날개의 움직임에 의해 바닥면(bottom)의 온도가 냉각 된다. 미세 날개의 진동이 표면 열전달 촉진에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위해 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 유동장의 바닥 면(bottom)의 누셀트 수(Nusselt number)를 계산하여 열전달 특성을 확인하였다.

$$q_w = h \cdot (T_w - T_\infty) \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (4)$$

여기서, q_w 는 바닥 면에서의 열유속(heat flux), h 는 대류 열전달 계수, T_w 와 T_∞ 은 각각 바닥 면에서의 온도와 기준 온도를 나타낸다. 또한 L 과 k 는 각각 미세날개의 길이와 유체의 열전도 계수를 나타낸다. Fig. 13은 표면 위에 미세날개가 있을 때와 없을 때의 바닥 면에서의 누셀트 수(Nusselt number)를 보여 준다. 이 값은 1 주기(0.016 s) 동안 시간 평균 값이다. 이러한 결과로, 후류에서 와류와 같은 주기적인 복잡한 유동 흐름에 의해 발생된 활발한 수력학적 혼합(hydrodynamic mixing) 때문에 미세 날개가 있을 때가 없을 때 보다 열전달이 잘 된다고 판단할 수 있다. 본 연구의 경우, 바닥 면

에 대한 면적 적분을 취하면 미세 날개의 진동이 있을 때 총 열전달량 크기가 미세 날개가 없을 때 보다 40% 증가하는 것을 알 수 있다.

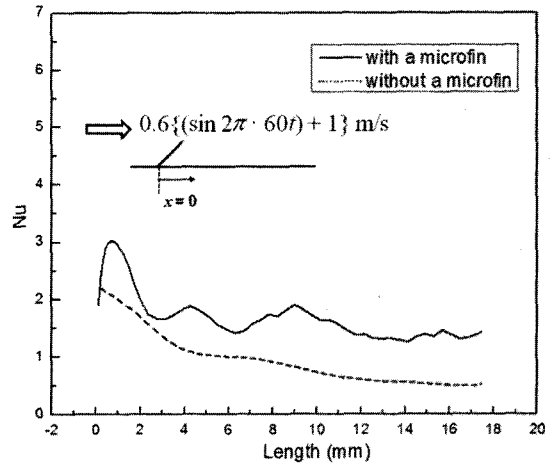


Fig. 13 The Nusselt number distribution on the bottom with and without the microfin under pulsating flow

5. 결론

본 연구에서는 표면 위 미세 날개의 진동이 표면 열전달 촉진에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 외부 유동에 의해 최대변위를 갖는 미세 날개의 형상을 이용하여 공진 주파수 부근에서 양방향 유체-구조 연성해석을 통하여 변형거동과 열전달 촉진현상을 정량적으로 확인하였다. 본 연구에서 고안한 형상의 경우, 미세 날개의 진동이 표면 열전달에 미치는 영향은 미세날개가 없는 경우보다 총 열전달량 크기가 40% 증가됨을 알 수 있었고 제안한 미세 날개 구조에 대하여 계속적인 연구를 통하여 여러 개의 미세 날개의 배열과 조합을 통한 열전달 촉진과 최적의 미세 날개 배열을 도출하고 실험적 방법으로 효과를 검증할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 정부재원으로 한국연구재단(과제번호: K20702001648-10E0100-07010), 한국 에너지 기술 평가원(과제번호: 2010T00100839), 그리고 한국연구재단 특정기초연구사업(과제번호: 2010-0016093) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Chu, R. C., "Heat transfer in electronic systems," Proceedings of the 8th International Conference on Heat Transfer, pp. 293-305, 1986.
2. Go, J. S., Lim, G. B., Yun, H. Y., Lee, J. H., Song, I. S. and Pak, Y. E., "Heat transfer enhancement using flow-induced Vibration of a microfin array," Sensors Actuators A : Physical, Vol. 90, No. 3, pp. 232-239, 2001.
3. Ralph, L. and Webb, J., " Principles of enhanced heat transfer," Int. J. of Heat and Fluid flow, Vol. 15, No. 4, pp. 341, 1994.
4. Aliaga, D. A., Lamb, J. P. and Klein, E. E., "Convection heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurement," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 3, pp. 363-374, 1994.
5. Davalath, J. and Bayazitoglu, Y., "Forced convection cooling across rectangular," Journal of Heat Transfer, Vol. 109, No. 2, pp. 321-328, 1987.
6. Kim, S. Y., Kang, B. H. and Hyun, J. M., "Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, No. 3, pp. 625-634, 1998
7. Wu, Y. and Wu, A., "Taguchi methods for robust design," ASME, 2000.
8. Bathe, K. J., "Computational fluid and solid mechanics," Proceedings of the First M.I.T Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2001.
9. Zhang, H., "Direct and Iterative computing of fluid flows fully coupled with structures," Proceedings of the First M.I.T Conference of Computational Fluid and Solid Mechanics, pp. 1440-1443, 2001.
10. Bathe, K. J., Zhang, H. and Ji, S., "Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions," Computers and Structures, Vol. 72, No. 1-3, pp. 1-16, 1999.
11. Bathe, K. J. and Zhang, H., "Finite element developments for general fluid flows with structural interactions," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 60, No. 3, pp. 213-232, 2004.
12. Zhang, H., Zhang, X., Ji, S. H., Guo, Y. H., Ledezma, G., Elabbasi, N. and deCouny, H., "Recent development of fluid-structure interaction capabilities in the ADINA system," Computers and Structures, Vol. 81, No. 8-11, pp. 1071-1085, 2003.
13. Go, J. S., "Design of a microfin array heat sink using flow-induced vibration to enhance the heat transfer in the laminar flow regime," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 105, No. 2, pp. 201-210, 2003