66 대한기계학회논문집 B권, 제26권 제1호, pp. 66~73, 2002

열적 비대칭 삼각 휜의 성능해석

강 형 석*

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 12월 1일 심사완료)

Performance Analysis of a Thermally Asymmetric Triangular Fin

Hyung Suk Kang

Key Words: Biot Number(비오트 수), Fin Effectiveness(휜 유용성), Triangular Fin(삼각 휜), Fin Efficiency(휜 효율)

Abstract

Fin effectiveness and efficiency of a thermally asymmetric triangular fin are represented as a function of the ratio of fin lower surface Biot number to upper surface Biot number and the non-dimensional fin length. For this analysis, two dimensional separation of variables method is used. When fin effectiveness is 2 and efficiency is 90%, the relationship between the non-dimensional fin length and the ratio of fin lower surface Biot number to upper surface Biot number is shown. The relationship between the non-dimensional fin length and the upper surface Biot number for the same condition is also presented.

기호설명

$Bi1$: 휜 윗면 Biot 수 (= $h_1 l / k$)
$Bi2$: 휜 아래면 Biot 수 (= $h_2 l / k$)
h_1 : 휜 윗면 열대류계수 (W/m2。C)
h_2 : 휜 아래면 열대류계수 (W/m2。C)
k : 휜의 열전도율 (W/m。C)
l : 휜 높이의 반 (m)
L' : 휜 길이 (m)
L : 무차원 휜 길이 (= L'/l)
Q : 열손실 (W)
T : 온도 (。C)
T_w : 휜뿌리 온도 (。C)
T_∞ : 주위 온도 (。C)
x' : 길이 방향 좌표 (m)
x : 무차원 길이 방향 좌표 (= x'/l)
y' : 높이 방향 좌표 (m)
y : 무차원 높이 방향 좌표 (= y'/l)

그리스문자

θ : 무차원 온도 $(T-T_\infty)/(T_w-T_\infty)$
θ_0 : 변형된 온도 (T_w-T_∞) (℃)
λ_n : 고유값 (n = 1, 2, 3, · · ·)
ε : 휜 유용도
η : 휜 효율

상첨자

' : 차원 변수

* 회원, 강원대학교 기계 · 메카트로닉스공학부
E-mail : hkang@cc.kangwon.ac.kr
TEL : (033)250-6316 FAX : (033)242-6013

1. 서 론

휜이라고 하는 확장 표면은 열전달을 향상시키기 위하여 우리 주위의 여러 산업 현장에서 널리 사용되고 있다. 휜이 부착된 표면은 열전달 효과에 있어서 명확한 향상을 보여주기 때문에 휜 문제에 대하여 많은 연구와 관심이 이루어지고 있다. 이루어지고 있는 연구 분야의 다양성도 이루 말할 수 없이 많으며 그 중 하나인 휜의 성능에 대한 연구도 활발하다. Burmeister[1]는 1차원 열균형 적분법을 사용하여 삼각 휜에 대한 성능을 수행하였으며 Prasad[2]는 휜의 효율에 관련하여 양쪽 벽의 온도가 다른 평판 휜의 열교환에 대한 mechanism을 연구하였다. 환형 휜에 대한 연구로는 Campo와 Eugenestuffle[3]가 균일한 두께를 가진 환형 휜에서 반경비와 열 기하학적 매개변수의 함수로 휜 끝의 온도와 효율을 조사하였으며 Ullmann과 Kalman[4]은 다양한 단면의 형태를 가진 환형 휜의 효율과 최적성에 대한 논문을 발표하였다. 또한 환형 휜이 둘레에 달려있는 원관에서 휜 효율의 평가가 Kuan, Aris 그리고 Davis[5]에 의하여 이루어졌다. 사각 형상의 휜에 대하여는 Stachiewicz[6]가 난류흐름을 유지시키면서 국지적 필름 계수의 변화가 휜의 성능에 미치는 효과에 대한 연구를 하였으며 Kang, Yoon 그리고 Lee[7]는 3차원 해석을 통하여 휜의 유용성과 효율을 휜 길이와 폭의 함수로 나타내었다. Ünal[8]은 내부에서 각각 열발생이 있고 없는 경우에 대하여 곧은 실린더형 휜에 대한 휜 끝의 경계조건의 효과를 발표하였다. 이상과 같이 다양한 조건하에서 다양한 형상 휜의 성능에 대한 연구가 이루어지고 있는데 주로 주위의 열대류계수는 대칭이며 일정하다고 가정하였다. 그러나 실제로는 주위의 열대류계수는 대칭이 아닌 경우가 많이 발생한다.

본 연구에서는 여러 형상 중 삼각 휜을 택하여 위아래 면의 열대류계수를 비대칭으로 설정하고 휜 윗면의 열대류계수를 휜 아래 면의 열대류계수보다 크거나 같게 놓고, 끝에서의 열대류계수는 물리적으로 위아래 열대류계수와는 다른 별도의 값을 취하는 것도 가능하나 본 연구에서는 위아래 면이 만나는 끝에서는 임의로 위아래 열대류계수의 평균값으로 설정하였다. 이와 같은 열적 비대칭 삼각 휜에 대한 성능을 2차원 변수분리법을 사용하여 해석한다. 보통 휜의 성능하면 유용성, 효율 그리고 저항 등[9]이 있는데 본 논문에서는 휜의 유용성과 효율을 휜 위아래 면에서의 Biot 수의 비와 무차원 휜 길이의 함수로 나타낸다. 또한 각각 유용성이 2, 효율이 90%가 되는 무차원 길이와 휜 위아래 면에서의 Biot 수의 비의 관계와 무차원 길이와 휜 윗면에서의 Biot 수와의 관계가 조사된다. 휜 내와 주위의 상태는 정상상태이며 휜 재질의 열전도율은 일정하다고 가정한다.

2. 2차원 해석

Figure 1에서 보여지는 주위의 열대류계수가 다른 상태에 있는 삼각 휜에 대한 정상상태에서의 지배방정식은 식 (1)에 의하여 주어진다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x'^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y'^2}=0 \tag{1}$$

형상이 삼각이고 열적 상태가 비대칭인 휜에 대한 지배방정식 (1)을 풀기 위하여 2개의 경계조건식과 2개의 에너지 균형식이 필요한데 그 식들은 식 (2)부터 (5)에서 표현된다.

$$T=T_w \quad \text{at} \quad x'=0,\ -l\le y'\le l \tag{2}$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial x'}=\frac{(h_1+h_2)}{2}\cdot(T-T_\infty) \quad \text{at} \quad x'=L',\ y'=0 \tag{3}$$

$$-\int_0^l k\frac{\partial T}{\partial x'}\Big|_{x'=0}dy' - \int_0^{L'} k\frac{\partial T}{\partial y'}\Big|_{y'=0}dx' = \int h_1(T-T_\infty)\sqrt{dx'^2+dy'^2} \tag{4}$$

$$-\int_{-l}^{l} k\frac{\partial T}{\partial x'}\Big|_{x'=0}dy' = \int h_1(T-T_\infty)\sqrt{dx'^2+dy'^2}$$

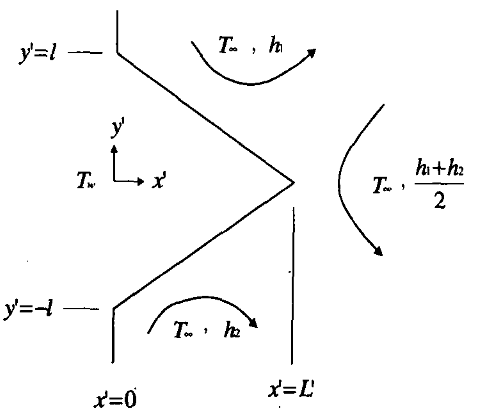


Fig. 1 Geometry of a thermally asymmetric triangular fin

$$+\int h_2(T-T_\infty)\sqrt{dx'^2+dy'^2} \tag{5}$$

식 (1)부터 (5)까지의 식들을 무차원으로 표현하면 각각 식 (6)부터 식 (10)까지 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}=0 \tag{6}$$

$$\theta=1 \quad \text{at } x=0,\ -1\le y\le 1 \tag{7}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial x}+\frac{1}{2}(Bi1+Bi2)\cdot\theta=0$$

$$\text{at } x=L,\ y=0 \tag{8}$$

$$-\int_0^1\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big|_{x=0}dy-\int_0^L\frac{\partial\theta}{\partial y}\Big|_{y=0}dx$$

$$=Bi1\cdot\sqrt{1+L^2}\int_0^1\theta\,dy \tag{9}$$

$$-\int_{-1}^1\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big|_{x=0}dy=Bi1\cdot\sqrt{1+L^2}\int_0^1\theta\,dy$$

$$+\ Bi2\cdot\sqrt{1+L^2}\int_{-1}^0\theta\,dy \tag{10}$$

에너지 균형식 (9)는 삼각휜의 위 쪽 반에 대하여 전체 삼각휜의 위 면의 열대류 계수가 아래 면의 열대류 계수보다 더 클 경우에 핀 중심선을 (i.e. y=0) 통해 아래에서 위로 전도로 들어오는 열전달과 핀 벽면의 위 쪽 반에서 전도로 들어오는 열전달은 경사진 윗면을 통하여 대류로 나가는 열전달과 같다는 것을 나타낸다. 또한 에너지 균형식 (10)은 전체 삼각휜에 대하여 핀 벽면에서 전도로 들어오는 열전달은 경사진 위 아래 면을 통하여 각각 대류로 나가는 열전달과 같다는 것을 설명한다. 식 (7)과 식 (8)에서 보여지는 2개의 경계조건 식과 1개의 에너지 균형식 (9)를 가지고 지배방정식 (6)을 풀면 휜 내의 무차원 온도 분포에 대한 식을 구할 수 있는데 그 결과는 식 (11)에서 보여진다.

$$\theta(x,y)=\sum_{n=1}^{\infty}N_n\cdot f(x)\cdot f(y) \tag{11}$$

여기서,

$$f(x)=\cosh(\lambda_n x)-f_n\cdot\sinh(\lambda_n x) \tag{12}$$

$$f(y)=\cos(\lambda_n y)+g_n\cdot\sin(\lambda_n y) \tag{13}$$

$$N_n=4\sin(\lambda_n)/\left[\{2\lambda_n+\sin(2\lambda_n)\}\right.$$

$$\left.+\ g_n^2\cdot\{2\lambda_n-\sin(2\lambda_n)\}\right] \tag{14}$$

식 (12)와 (13)에서 보여지는 f_n과 g_n은 각각 식 (15)와 식 (16)으로 표현된다.

$$f_n=\frac{\lambda_n\cdot\tanh(\lambda_n L)+\frac{1}{2}(Bi1+Bi2)}{\lambda_n+\frac{1}{2}(Bi1+Bi2)\cdot\tanh(\lambda_n L)} \tag{15}$$

$$g_n=[2\lambda_n\cdot Bi1\cdot A_n-\lambda_n\cdot\sqrt{1+L^2}\cdot C_n$$

$$+Bi1\cdot(Bi1+Bi2)\cdot B_n]/[2\lambda_n\cdot Bi1\cdot D_n$$

$$+Bi1\cdot(Bi1+Bi2)\cdot E_n$$

$$+\lambda_n\cdot\sqrt{1+L^2}\cdot F_n] \tag{16}$$

식 (16)에 있는 A_n부터 F_n항들은 식 (17)부터 식 (22)로 주어진다.

$$A_n=L\cdot\cos(\lambda_n)\cdot\sinh(\lambda_n L)$$

$$+\sin(\lambda_n)\cdot\cosh(\lambda_n L) \tag{17}$$

$$B_n=L\cdot\cos(\lambda_n)\cdot\cosh(\lambda_n L)$$

$$+\sin(\lambda_n)\cdot\sinh(\lambda_n L)-L \quad (18)$$

$$C_n = 2\lambda_n\cdot\sin(\lambda_n)\cdot\sinh(\lambda_n L)$$
$$+(Bi1+Bi2)\cdot\sin(\lambda_n)\cdot\cosh(\lambda_n L) \quad (19)$$

$$D_n = \cos(\lambda_n)\cdot\cosh(\lambda_n L)$$
$$-L\cdot\sin(\lambda_n)\cdot\sinh(\lambda_n L)-1 \quad (20)$$

$$E_n = \cos(\lambda_n)\cdot\sinh(\lambda_n L)$$
$$-L\cdot\sin(\lambda_n)\cdot\cosh(\lambda_n L) \quad (21)$$

$$F_n = -2\lambda_n\cdot\cos(\lambda_n)\cdot\sinh(\lambda_n L)+$$
$$(Bi1+Bi2)\cdot\{1-\cos(\lambda_n)\cdot\cosh(\lambda_n L)\} \quad (22)$$

고유값들 λ_n은 또 다른 하나의 에너지 균형식 (10)을 전개하여 정리한 식 (23)을 사용하여 구할 수 있다.

$$2f_n\cdot\lambda_n\cdot\sin(\lambda_n)\cdot\sqrt{1+L^2}$$
$$=(G_n-f_n\cdot L\cdot H_n)\cdot(Bi1+Bi2)$$
$$+g_n\cdot(H_n-f_n\cdot I_n)\cdot(Bi1-Bi2) \quad (23)$$

여기서,

$$G_n = \sin(\lambda_n)+L\cdot\sinh(\lambda_n L) \quad (24)$$

$$H_n = \cosh(\lambda_n L)-\cos(\lambda_n) \quad (25)$$

$$I_n = \sinh(\lambda_n L)-L\cdot\sin(\lambda_n) \quad (26)$$

본 논문에서 충분히 수렴이 가능한 200개의 eigenvalues를 사용하였으며 Table 1은 무차원 휜 길이가 6일 때 세 경우의 열적 비대칭 상태에 대하여 처음 5개의 eigenvalues를 열거한다. 여기서 처음 eigenvalue는 식 (23)으로부터 incremental search method를 사용하여 구하였으며 그 이후의 eigenvalue들은 forced analytic method[10]를 이용하여 계산되었다.

Table 1 List of first five eigenvalues for L=6

n	λ_n		
	Bi1=0.11 Bi2=0.09	Bi1=0.055 Bi2=0.045	Bi1=0.01 Bi2=0.001
1	0.304249	0.211878	0.068469
2	3.171702	3.156033	3.143086
3	6.298351	6.290431	6.283933
4	9.434902	9.429611	9.425276
5	12.573967	12.569997	12.566744

휜으로부터의 열손실은 온도분포식 (11)을 Fourier's 열전도식에 적용하여 구한 식 (27)로부터 계산되어진다.

$$Q = 2k\theta_0\sum_{n=1}^{\infty}N_n\cdot f_n\cdot\sin(\lambda_n) \quad (27)$$

마지막으로 이 열적 비대칭 삼각 휜의 유용성과 효율을 구할 수 있는 식은 각각 그 정의[9]에 의하여 식 (28)과 식 (29)로 주어진다.

$$\varepsilon = \frac{2\sum_{n=1}^{\infty}N_n\cdot f_n\cdot\sin(\lambda_n)}{Bi1+Bi2} \quad (28)$$

$$\eta = \frac{2\sum_{n=1}^{\infty}N_n\cdot f_n\cdot\sin(\lambda_n)}{(Bi1+Bi2)\cdot\sqrt{L^2+1}} \quad (29)$$

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 무차원 휜 길이가 5이고 Bi1이 각각 0.01, 0.05 그리고 0.1인 경우에 Bi2/Bi1이 0.8부터 1.0으로 변할 때 그에 따른 휜 유용성의 변화를 나타낸다. 세 경우의 Bi1값에 대하여 모두 Bi2/Bi1이 0.8부터 1로 증가함에 따라 유용성은 선형적으로 감소하는데 Bi1이 커질수록 감소 기울기가 커짐을 보여준다. 이와 같이 Bi2/Bi1이 증가할수록 유용성이 감소하는 이유는 핀을 사용하지 않을 때의 벽에서의 Biot 수를 Bi1과 Bi2의 평균값으로 취했기 때문이며, 이와 같은 조건 아래에서는 물리적으로 Bi1이 고정되었을 때 Bi1과 Bi2의 차이가 커져서 열적 비대칭이 커질수록 절대 열손실은 줄어들더라도 핀을 부착하지 않은 경우에 대한 핀의 효과는 더욱 좋아진다는 것을 설명한다.

Figure 3은 Fig. 2와 같은 조건에서 Bi2/Bi1의 변화에 대한 휜 효율의 변화를 나타낸다. 효율을 구할 때 기준이 되는 이상적인 열손실, 즉 핀 전체의 온도가 핀 바닥의 온도와 같다고 가정하였을 때의 열손실을 구할 때 역시 핀 주위의

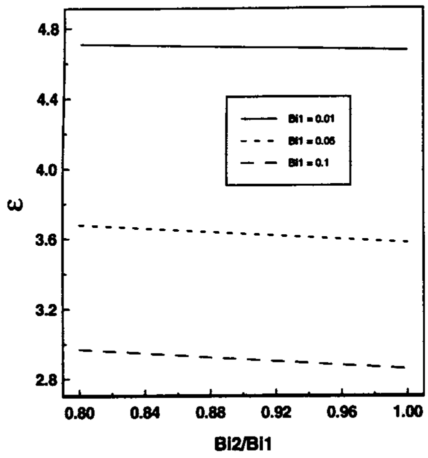


Fig. 2 Fin effectiveness vs. Bi2/Bi1 for L=5

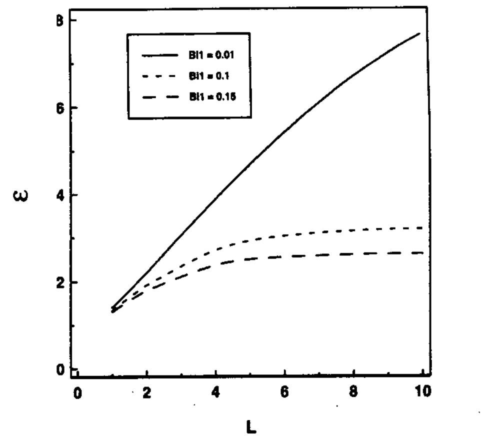


Fig. 4 Fin effectiveness versus L for Bi2/Bi1=0.9

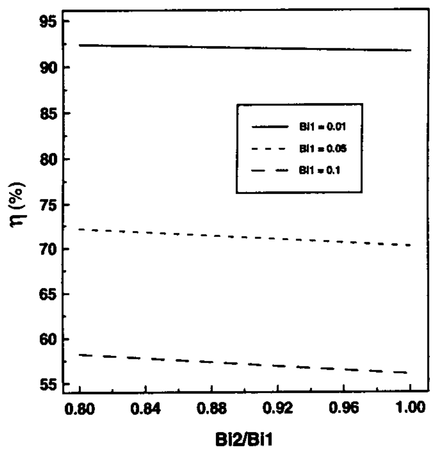


Fig. 3 Fin efficiency versus Bi2/Bi1 for L=5

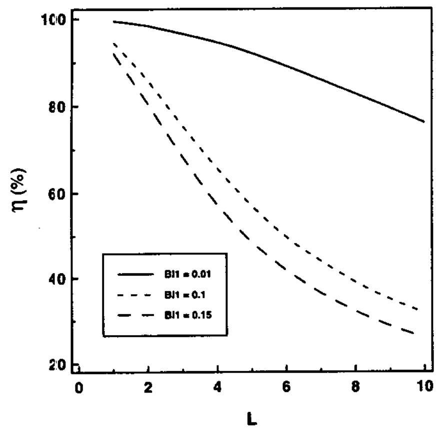


Fig. 5 Fin efficiency versus L for Bi2/Bi1=0.9

Biot 수는 Bi1과 Bi2의 평균값으로 취하였다. 수치적인 값은 다르나 Bi2/Bi1의 변화에 대한 효율의 변화경향은 유용성의 변화경향과 거의 같음을 보여준다. 특히 상대감소율 측면에서는 유용성과 효율의 두 경우 모두 Bi2/Bi1이 0.8에서 1로 증가함에 따라 Bi1이 0.01일 때 0.82%, 0.05일 때 2.73% 그리고 0.1일 때 3.74% 감소한다.

Figure 4는 Bi2/Bi1이 0.9로 주어지고 Bi1이 각각 0.01, 0.1 그리고 0.15인 경우에 무차원 길이 L이 1부터 10까지 변할 때 그에 따른 휜 유용성의 변화를 보여준다. 먼저 Bi1이 0.01인 경우는 무차원 길이가 증가함에 따라 유용성이 지속적으로 증가하는 반면 Bi1이 0.1과 0.15인 경우에는 L이 약 4이후부터는 무차원 길이의 증가에 따른 유용성의 증가가 상당히 미미함을 보여준다. 휜의 사용기준인 유용성이 2보다 큰 경우라고 할 때 Biot 수가 각각 0.01, 0.1 그리고 0.15에서 무차원 길이는 각각 약 1.75, 2.2 그리고 2.7이상에서 이 조건을 만족한다.

Figure 4와 같은 조건에서 무차원 길이의 변화에 따른 효율의 변화가 Fig. 5에서 보여진다. 유용성의 경우와 마찬가지로 Bi1이 작을수록 효율은 커지나 무차원 길이가 증가함에 따라서는 유용성의 경우와 반대로 효율은 감소함을 보여준

Table 2 The variation of relative effectiveness and efficiency

L	$(\varepsilon_{asy}-\varepsilon_{sy})/\varepsilon_{sy}$ (%)	$(\eta_{asy}-\eta_{sy})/\eta_{sy}$ (%)
1	- 0.0368	- 0.0368
2	- 0.0278	- 0.0278
4	- 0.0233	- 0.0233
6	- 0.0207	- 0.0207
8	- 0.0194	- 0.0194
10	- 0.0193	- 0.0193

※ $\varepsilon_{asy}=\varepsilon$, $\eta_{asy}=\eta$ for Bi1=0.055 and Bi2=0.045

$\varepsilon_{sy}=\varepsilon$, $\eta_{sy}=\eta$ for Bi1=Bi2=0.05

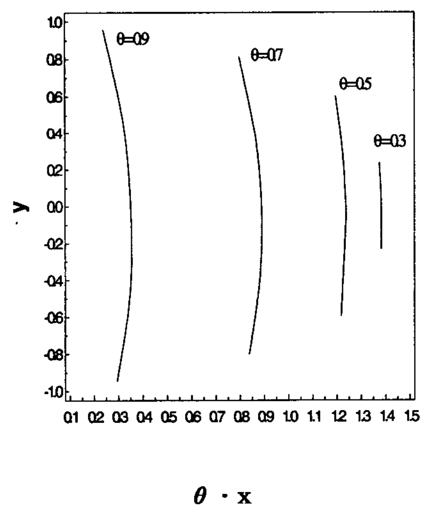
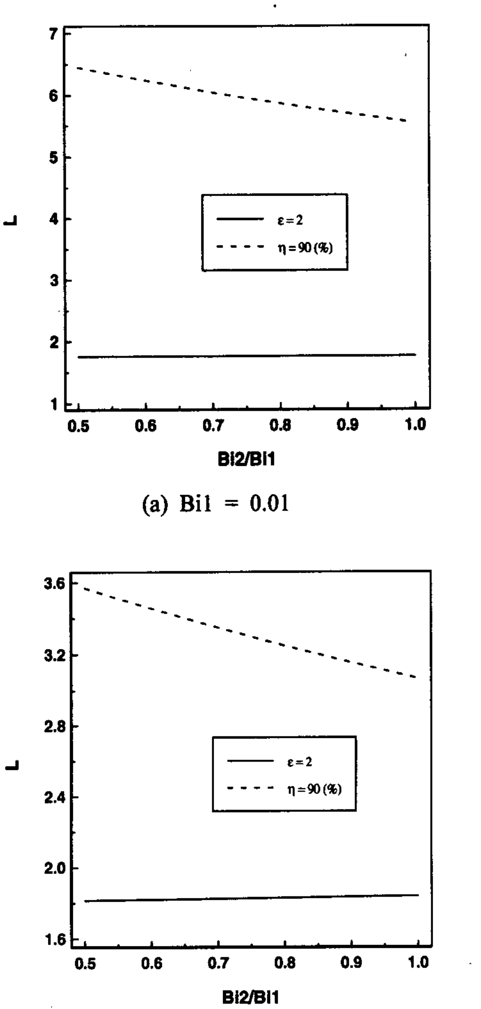


Fig. 6 Isothermal line within the fin for L=6, Bi1= 0.11 and Bi2=0.09



(a) Bi1 = 0.01

(b) Bi1 = 0.03

Fig. 7 The relationship between L and Bi2/Bi1 for ε =2 and η =90%

다. 특히 Bi1이 0.01인 경우는 무차원 길이가 증가함에 따라 효율이 서서히 감소하면서 감소 기울기가 증가하는 반면 Bi1이 0.1, 0.15인 경우는 처음에는 급격히 감소하다가 서서히 감소하는 것을 주지할 수 있다.

Table 2는 휜 주위의 평균 열대류계수가 같을 때 휜 길이의 변화에 따른 열적 대칭인 경우에 대한 열적 비대칭 경우의 상대적인 유용성과 효율의 변화를 나열한다. 유용성과 효율 모두 열적 비대칭인 경우가 대칭인 경우에 비하여 작으나 그 크기는 상대적으로 0.05% 이내임을 보여준다 이는 결국 물리적으로 주위의 평균 열대류계수가 같을 경우에는 열적 비대칭인 경우의 값과 대칭인 경우의 값 차이가 거의 없다는 것을 의미한다. 여기서 두 가지 주지할 점은 유용성과 효율의 상대 감소율이 휜 길이가 커짐에 따라 감소한다는 것과 휜 길이에 따른 유용성과 효율의 상대 감소율 값이 같다는 것이다.

Fig. 6은 임의로 무차원 휜 길이가 6이고 Bi1=0.11, Bi2=0.09인 열적 비대칭 경우에 휜 내

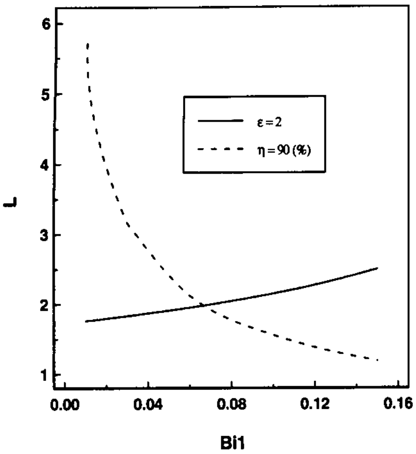


Fig. 8 The relationship between L and Bi1 for ε =2 and η =90% when Bi2/Bi1 is 0.9

의 등온선을 나타낸다. 등온선의 곡선을 좀 더 명확히 보이기 위하여 세로축의 좌표는 y로 잡아준 반면 가로축의 좌표는 단순히 x로 잡아주지 않고 $\theta \cdot x$로 설정하였다. 예측한 대로 열대류계수가 큰 휜 위면에서의 온도가 가장 낮음을 알 수 있고 등온선의 분포는 비대칭을 나타내고 있다. 한 예로 θ가 0.9가 되는 위 경사면의 x 좌표는 0.265인 반면 아래 경사면의 x 좌표는 0.326이다. 이러한 비대칭 온도분포는 x가 증가함에 따라 다소 완만해짐을 보여준다.

Figure 7(a), (b)는 Bi1이 0.01, 0.03인 경우 각각 휜의 유용성이 2, 효율이 90%를 만족하는 무차원 길이와 Bi2/Bi1의 관계들을 나타낸다. 먼저 유용성이 2를 만족하는 무차원 길이는 Bi2/Bi1이 증가함에 따라 그 변화가 크지 않고 약간 증가함을 보여준다. 또한 Fig. 7(a)의 Bi1이 0.01인 경우와 7(b)의 Bi1이 0.03인 경우에도 그 값의 차이가 크지 않음을 보여준다. 반면에 효율이 90%를 만족하는 무차원 길이는 Bi2/Bi1이 증가함에 따라 현저히 감소하며 또한 Bi1이 0.01일 때 보다 Bi1이 0.03일 때 무차원 길이가 상당히 짧아짐을 알 수 있다. 핀의 부착기준을 핀의 유용성에 기준을 둔다고 볼 때 Fig. 7의 결과는 물리적으로 핀의 열적 비대칭의 변화가 일정한 유용성을 갖기 위한 핀의 길이변화에 미치는 영향은 미미하다는 것을 설명한다.

마지막으로 Bi2/Bi1이 0.9일 경우 각각 휜의 유용성이 2, 효율이 90%를 만족하는 무차원 길이와 Bi1의 관계들이 Fig. 8에서 보여진다. 유용성이 2를 만족하는 무차원 길이는 Bi1이 0.01부터 0.15까지 증가함에 따라 약 1.8부터 2.5까지 거의 선형적으로 증가하는 반면 효율이 90%를 만족하는 무차원 길이는 Bi1이 0.01에서 약 5.7인데 Bi1이 증가함에 따라 처음에는 급속히 감소하다가 서서히 감소하는 경향을 보인다.

4. 결 론

열적 비대칭 상태의 삼각 휜에 대한 2차원 변수 분리법 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) Bi2/Bi1이 증가함에 따라 휜 유용성과 효율은 모두 선형적으로 감소하며 Bi1값이 커질수록 감소 기울기가 증가한다.

(2) 휜 주위의 평균 열대류계수가 같을 때 열적 비대칭인 경우의 유용성과 효율은 대칭인 경우의 그 값들보다 약간 작다.

(3) 일정효율 조건에서는 휜 위아래면의 대류열전달 계수의 비가 (Bi2/Bi1) 증가함에 따라 휜의 길이가 현저히 감소하나, 일정 유용성 조건에서는 휜의 길이에 거의 변화가 없다.

(4) Bi2/Bi1이 일정할 때 일정한 유용성을 만족하는 무차원 길이는 Bi1이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 반면 일정한 효율을 만족하는 무차원 길이는 Bi1이 증가함에 따라 처음에는 급속히 감소하다가 서서히 감소하는 포물선 경향을 보인다.

참고문헌

(1) Burmeister, L. C., 1979, "Triangular Fin Performance by the Heat Balance Integral Method," *ASME J. Heat Trans.*, Vol. 101, pp. 562~564.

(2) Prasad, B. S. V., 1996, "Fin Efficiency and Mechanisms of Heat Exchange through Fins in Multi-Stream Plate-Fin Heat Exchangers : Formulation," *Int. J. Heat Mass Transfer*,

Vol. 39, No. 2, pp. 419~428.

(3) Campo, A. and Eugenestuffle, R., 1997, "Symbolic Mathematics for the Calculation of Thermal Efficiencies and Tip Temperatures in Annular Fins of Uniform Thickness," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 2, pp. 490~492.

(4) Ullmann, A. and Kalman, H., 1989, "Efficiency and Optimized Dimensions of Annular Fins of Different Cross-Section Shapes," *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 32, pp. 1105~1110.

(5) Kuan, D. Y., Aris, R. and Davis, H. T., 1984, "Estimation of Fin Efficiencies of Regular Tubes Arrayed in Circumferential Fins," *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 27, No. 1, pp. 148~151.

(6) Stachiewicz, J. W., 1969, "Effect of Variation of Local Film Coefficients on Fin Performance," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 91, pp. 21~26.

(7) 강형석, 윤세창, 이성주, 2001, "사각 휜에 대한 성능해석," 대한기계학회논문집(B), 제 25권, 제 1호, pp. 1~8.

(8) Ünal, H. C., 1988, "The ffect of the Boundary Condition at a Fin Tip on the Performance of the Fin with and without Internal Heat Generation," *Int. J. Heat Mass Transfer,* Vol. 31, No. 7, pp. 1483~1496.

(9) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, *Introduction to Heat Transfer*, Wiley, New York, pp. 120~123.

(10) Kang, H. S., 1997, "Comparison of Performance of the Various Shapes of Asymmetric Fins," *KSME International Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 311~318.