

# 고정된 핀 바닥 높이에 기준한 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀의 최적 설계

강형석\*

강원대학교 기계공학과

## Optimum Design of a Geometrically Asymmetric Trapezoidal Fin Based on the Fixed Fin Base Height

Hyungsuk Kang\*

Department of Mechanical Engineering, Kangwon University, Gangwon 200-701, Korea

(Received 14 January 2008 / Accepted 1 May 2008)

**Abstract** : A geometrically asymmetric trapezoidal fin with variable fin base thickness and height is optimized based on the fixed fin base height using a one-dimensional analytic method. The temperature profile along the normalized X position in the fin is presented. For the fixed fin base height, the optimum heat loss, fin length and efficiency as a function of inside fluid convection characteristic number, fin base thickness and height, fin shape factor, convection characteristic numbers ratio and ambient convection characteristic number are represented. One of the results shows that the effect of fin base height and ambient convection characteristic number on the optimum values is remarkable.

**Key words** : Heat loss(열손실), Increasing rate(증가율), Convection characteristic number(대류특성계수), Efficiency(효율), Fin length(핀 길이)

### Nomenclature

$h$	: ambient heat transfer coefficient, $W/(m^2\text{°C})$	$L_b$	: dimensionless fin base thickness, $l_b/l_c$
$h_e$	: fin tip heat transfer coefficient, $W/(m^2\text{°C})$	$l_c$	: characteristic length, m
$h_f$	: inside fluid heat transfer coefficient, $W/(m^2\text{°C})$	$l_e$	: fin tip length, m
$I_0$	: modified Bessel function of the first kind order of 0	$L_e$	: dimensionless fin tip length, $l_e/l_c$
$I_1$	: modified Bessel function of the first kind order of 1	$l_h$	: fin base height, m
$k$	: thermal conductivity, $W/(m\text{°C})$	$L_h$	: dimensionless fin base height, $l_h/l_c$
$K_0$	: modified Bessel function of the second kind order of 0	$l_w$	: fin width, m
$K_1$	: modified Bessel function of the second kind order of 1	$M$	: ambient convection characteristic number, $(hl_c)/k$
$l_b$	: fin base thickness, m	$M_e$	: fin tip convection characteristic number, $(h_e l_c)/k$
		$M_f$	: inside fluid convection characteristic number, $(h_f l_c)/k$
		$q$	: heat loss from the fin, W
		$Q$	: dimensionless heat loss from the fin, $q/(kl_w \phi_f)$

\*Corresponding author, E-mail: hkang@kangwon.ac.kr

- $q_{id}$  : ideal heat loss from the fin, W
- $Q_{id}$  : dimensionless ideal heat loss from the fin,  
 $q_{id}/(kl_w\phi_f)$
- $s$  : upper fin lateral surface slope,  $(1-\xi)l_h/(l_e-l_b)$
- $T$  : fin temperature, °C
- $T_f$  : inside fluid temperature, °C
- $T_\infty$  : ambient temperature, °C
- $x$  : length directional variable, m
- $X$  : dimensionless length directional variable,  $x/l_c$
- $y$  : height directional variable, m
- $\beta$  : convection characteristic numbers ratio,  $M_e/M$
- $\eta$  : fin efficiency
- $\theta$  : dimensionless temperature,  $(T-T_\infty)/(T_f-T_\infty)$
- $\xi$  : fin shape factor,  $1-s(l_e-l_b)/l_h$ ,  $(0 < \xi \leq 1)$
- $\phi_f$  : adjusted inside fluid temperature, °C,  $(T_f-T_\infty)$

### Subscripts

- b : fin base
- c : characteristic
- e : fin tip
- f : inside fluid
- h : fin height at the base
- id : ideal
- max : maximum
- w : fin width
- $\infty$  : ambient
- \*

## 1. 서 론

핀 또는 확장된 표면은 열 시스템에서 중요한 역할을 해오고 있다. 예를 들면 전자부품의 방열 핀, 열교환기, 자동차의 라디에이터 등에서부터 최첨단 항공 우주분야에 이르기 까지 매우 광범위한 분야에서 사용되고 있다.

핀에 대한 연구는<sup>1-4)</sup> 끊임없이 계속해서 이루어지고 있는데 최근에는 핀의 최적화에 대하여 많은 연구가 발표되고 있다. 핀의 최적화를 찾는 방법 중 하나는 주어진 핀의 형상에서 체적이 일정하게 주어졌을 때 최대 열전달이 일어나는 핀의 차원을

구하는 것이다. 이와 같은 최적화에 대한 예로, Chung등은<sup>5)</sup> 대류만을 고려한 사다리꼴 핀의 최적화를 다루었으며 Laror와 Kalman은<sup>6)</sup> 길이 형, 가시형 그리고 환형 타입의 사각, 삼각 그리고 포물선형상의 핀들에 대한 최적화를 연구하였다. Yu와 Chen은<sup>7)</sup> 변화하는 열적 매개변수를 고려하며 원형 핀을 최적화하였다. 최근에는 Kang과 Look이<sup>8)</sup> 열적으로 비대칭 환형 핀에 대한 최적화를 수행한 반면 Kang이<sup>9)</sup> 사각 핀의 최적 성능과 설계 값을 제시하였다.

또 다른 실용적인 핀의 최적화로 Zubair등은<sup>10)</sup> 일정한 핀 측면 높이의 핀으로부터의 열손실에 대한 핀 측면 형상이 변화하는 핀으로부터의 열손실의 증가 비를 고려하여 원형 핀에 대한 최적화를 수행하였으며 Kang과 Look은<sup>11)</sup> 핀 바닥 높이가 고정되었을 때 핀 길이를 늘려가며 열손실이 최대 열손실의 일정 비율에 도달되었을 때의 열손실을 최적 열손실로 정의하여 열적 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀을 최적화 하였다. 또한 최근에 일정한 체적을 고려하거나 열손실의 비를 고려하며 다소 독특한 형상의 핀인 원 관을 둘러싼 편심 핀에 대한 최적화가 Kundu와 Das에<sup>12)</sup> 의해 발표되었다.

본 논문은 1차원 해석적 방법을 사용하여 내벽에 유체가 있으며 핀 바닥 두께와 높이가 변할 수 있는 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀의 최적화를 다루었다. 핀 바닥높이가 일정하게 주어지면 핀 길이가 길어짐에 따라 열손실은 증가하여 핀 길이가 충분히 길어지면 최대값에 도달하는데 핀 길이가 길어질수록 열손실의 증가율은 감소한다. 본 연구에서는 핀 바닥 높이가 일정하게 주어졌을 때 무차원 핀 길이가 0.1씩 길어질 때 열손실의 상대 증가율이 0.5% 이하로 되는 순간의 열손실을 최적의 열손실로 정의하였다. 핀 바닥의 경계조건으로 일정한 핀 바닥 온도 대신에 내벽 안에 있는 유체로부터 내벽으로의 열대류, 내벽으로부터 핀 바닥으로의 열전도 그리고 핀 바닥을 통한 열전도를 고려하였다.

## 2. 1차원 해석적 방법

### 2.1 온도분포

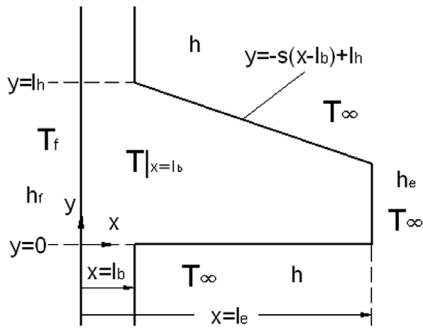


Fig. 1 Schematic diagram of a geometrically asymmetric fin

형상이 변하는 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀의 개요도가 Fig. 1에서 보여 진다. 이와 같이 형상이 변하는 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀을 위한 무차원 지배방정식이 식 (1)로 주어진다. 1차원 해석에 기준한 식 (1)은 z 방향의 핀 폭 크기가 핀 바닥 높이를 무시할 정도로 크다는 가정아래 (i.e.  $l_w \gg l_h$ ) 성립된다.

$$\frac{d^2\theta}{dX^2} - \frac{s}{L_h - s(X - L_b)} \frac{d\theta}{dX} - M \frac{\sqrt{1+s^2} + 1}{L_b - s(X - L_b)} \theta = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 주어진 기울기 s는 식 (2)로 표현되며  $\xi$ 는 핀 형상계수로 범위는 0과 1사이로 주어지며 값이 1일 때는 사각 핀을 의미하며  $\xi$ 값이 작아질수록 핀 바닥 높이고와 핀 끝 높이의 차이가 작아지는 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀이 되며  $\xi$ 값이 0으로 수렴하게 되면 밑면이 수평인 기하학적 비대칭 삼각 핀이 된다.

$$s = (1 - \xi)L_h / (L_e - L_b) \quad (2)$$

무차원 지배방정식 (1)을 풀기 위하여 필요한 두개의 경계 조건이 무차원 형태로 식 (3)과 (4)로 주어진다.

$$-\frac{d\theta}{dX} \Big|_{X=L_b} = \frac{1 - \theta|_{X=L_b}}{1/M_f + L_b} \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dX} \Big|_{X=L_e} + M_e \theta|_{X=L_e} = 0 \quad (4)$$

물리적으로 경계 조건 (3)은 내부 유체로부터 핀

내벽으로 전달되는 대류에 의한 열전달과 핀 내벽으로부터 핀 바닥까지의 전도 열전달과 이 핀 바닥을 통하여 흐르는 전도 열전달이 모두 같다는 의미이며 경계조건 (4)는 핀 끝을 통하여 흐르는 전도 열전달이 핀 끝을 통하여 외부로 나가는 대류 열전달과 같다는 것을 나타낸다. 무차원 지배 방정식 (1)을 풀 후 경계 조건식 (3)과 (4)를 적용하면 식 (5)와 같은 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀 내의 온도분포 식을 얻게 된다.

$$\theta(X) = \frac{C_2 I_0\{f(X)\} + C_3 K_0\{f(X)\}}{C_1} \quad (5)$$

여기서,

$$C_1 = C_2\{I_0(C_4) + C_5 I_1(C_4)\} + C_3\{K_0(C_4) - C_5 K_1(C_4)\} \quad (6)$$

$$C_2 = C_6 K_1(C_7) + M_e K_0(C_7) \quad (7)$$

$$C_3 = C_6 I_1(C_7) - M_e I_0(C_7) \quad (8)$$

$$C_4 = 2C_8 \sqrt{L_h} \quad (9)$$

$$C_5 = \frac{sC_8}{\sqrt{L_h}} \left( \frac{1}{M_f} + L_b \right) \quad (10)$$

$$C_6 = \frac{sC_8}{\sqrt{L_h - s(L_e - L_b)}} \quad (11)$$

$$C_7 = 2C_8 \sqrt{L_h - s(L_e - L_b)} \quad (12)$$

$$C_8 = \frac{\sqrt{M}}{s} \{(1+s^2)^{1/2} + 1\}^{1/2} \quad (13)$$

$$f(X) = 2C_8 \sqrt{L_h - s(X - L_b)} \quad (14)$$

## 2.2 열전달

Fig. 1에서 보여 지는 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀 바닥으로 들어가는 단위 폭 (x, y면에 수직인 방향을 의미) 당 열전달은 식 (15)를 사용하여 구할 수 있으며, 무차원 열손실은 식 (16)으로 주어진다.

$$q = -kl_h l_w \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l_b} \quad (15)$$

$$Q = \frac{s C_8 \sqrt{L_h} \{C_2 I_1(C_4) - C_3 K_1(C_4)\}}{C_1} \quad (16)$$

### 2.3 핀 효율

핀 효율을 구하기 위해서는 먼저 핀 전체가 핀 바닥 온도와 같다는 가정 아래 핀으로부터의 이상적 열손실을 계산하여야 하는데 식 (17)을 사용하여 구할 수 있다.

$$q_{id} = [h(\sqrt{1+s^2}+1)(l_e - l_b) + h_e \{l_h - s(l_e - l_b)\}] l_w (T_b - T_\infty) \quad (17)$$

식 (17)을 정리한 무차원 형태의 핀으로부터의 이상적 열손실은 식 (18)로 주어진다.

$$Q_{id} = [M(\sqrt{1+s^2}+1)(L_e - L_b) + M_e \{L_h - s(L_e - L_b)\}] \theta |_{X=L_b} \quad (18)$$

핀 효율은 정의에 의하여 식 (19)로 표현된다.

$$\eta = \frac{Q}{Q_{id}} \quad (19)$$

식 (19)에서 보여 지는 열손실  $Q_{id}$ 는 핀 전체의 온도가 핀 바닥 온도와 같다고 가정 했을 때 발생하는 이상적인 열손실을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 각각 두 경우의 핀 바닥 높이와 대류특성 계수에 대하여 핀 길이의 변화에 따른 열손실의 변화를 나타낸다. 네 경우 모두 핀 길이가 길어짐에 따라 열손실은 처음에 급격히 증가하다가 그 이후 서서히 증가하여 최대값에 이르게 됨을 보여주는데 핀 바닥 높이가 작을수록 또는 대류특성계수가 클수록 최대값에 빨리 도달함을 보여준다. 따라서 최적의 핀 길이는 핀 길이의 증가에 따른 열손실의 증가가 현저히 미미해 지는 핀 길이로 잡아주는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 최적의 핀 길이에 대한 좀 더 구체적인 내용은 Table 1에서 언급된다. 또한 대류특성계수가 커질수록 핀 바닥 높이의 차이에 따른 최대 열손실의 차가 커짐을 보여준다.

Table 1은 사각 핀에서 대류특성계수가 0.01과 0.05인 경우 열손실이 최대 열손실의 90%, 95% 그

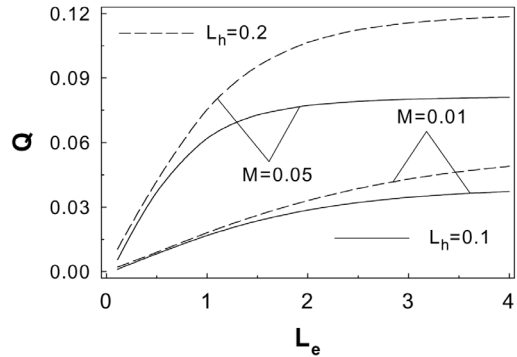


Fig. 2 Heat loss versus the fin length ( $\xi = 0.5, M_f = 10, L_b = 0.1, \beta = 1$ )

Table 1 Fin length for  $Q/Q_{max}$  and the increasing rate of heat loss ( $\xi = 1, M_f = 10, L_h = 0.15, L_b = 0.1$ )

$Q/Q_{max}$	M	$L_e$ for $Q/Q_{max}$	$\{Q(L_e+0.1)-Q(L_e)\} / Q(L_e)$ (%)
0.9	0.01	3.9655	0.749
	0.05	1.7406	1.614
0.95	0.01	4.9472	0.363
	0.05	2.1783	0.779
0.98	0.01	6.2202	0.142
	0.05	2.7470	0.305

리고 98%가 일어날 때의 무차원 핀 길이와 그 핀 길이에서 0.1이 길어질 때 열손실의 상대 증가율 비를 나열한다. 최대 열손실  $Q_{max}$ 는 핀 길이가 충분히 길어졌을 때 실제 핀에서 일어나는 최대 열손실을 나타낸다. 대류특성계수가 0.01인 경우  $Q/Q_{max}$ 가 0.9에서 0.98의 범위에서 열손실의 증가 비는 0.749%에서 0.142%의 범위에 있으며 0.05인 경우  $Q/Q_{max}$ 가 0.9에서 0.98의 범위에서 열손실의 증가 비는 1.614%에서 0.305%의 범위에 있음을 보여준다. 두 경우의 대류특성계수에 대하여 열손실의 증가비가 0.5%일 때  $Q/Q_{max}$ 가 0.9에서 0.98 사이에 있으며 대류특성계수 및 다른 변수들의 변화에 따라 다소 차이가 있을 수는 있으나 대체적으로 이 범위 내에서 크게 벗어나지 않음을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 무차원 핀 길이가 0.1 증가함에 따라 열손실의 상대 증가율이 0.5% 이하로 떨어지는 순간의 핀 길이를 최적 핀 길이로 정의하고 그 길이에서 발생하는 열손실과 효율을 최적의 열손실과 최적의 효율로 정의해준다. 본 연구에서 정의 해 준 최적의 열손실도서

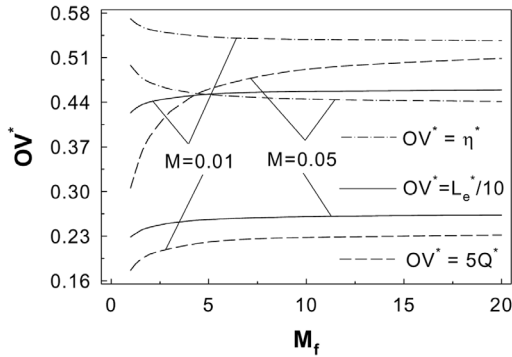


Fig. 3 Optimum values vs. the inside fluid convection characteristic number ( $\xi = 0.5, L_b = 0.1, L_h = 0.15, \beta = 1$ )

론에서 언급된 다른 몇몇 최적의 열손실과 같이 핀의 설계에 도움이 되리라 생각된다. 또한 일반적으로 핀 유용성의 척도를 2부터 5의 범위 정도로 잡아 주듯이 본 연구에서 최적의 열손실로 정의해 준 열손실의 상대증가율 0.5%는 주위 환경이나 사용자의 취향에 따라 다소 변할 수 있으리라 생각된다.

내부 유체 대류특성계수의 변화에 따른 최적 열손실, 효율 그리고 핀 길이의 변화가 Fig. 3에서 보여진다. 내부 유체 대류특성계수가 증가함에 따라 최적의 열손실과 핀 길이는 증가하는 반면 효율은 감소함을 보여준다. 내부 유체 대류특성계수의 변화에 따른 세 개의 최적 값 모두  $M_f$ 가 5이하에서 변화가 현저하나  $M_f$ 의 증가에 따라 변화율이 감소되어  $M_f$ 가 약 10이상에서는 변화율이 상대적으로 상당히 작아짐을 보여준다. 이는 물리적으로  $M_f$ 가 어느 정도 커지게 되면  $M_f$ 의 증가에 따른 핀 바닥 온도의 증가가 현저하지 않기 때문이다. 예를 들면  $M=0.05$ 인 경우  $M_f$ 가 1부터 5까지 증가함에 따라 최적 열손실과 최적 핀 끝 길이의 상대증가율은 각각 50.7%와 11.9%이고 핀 바닥온도는 약 0.55부터 0.82로 높아지는 반면  $M_f$ 가 10부터 15까지 증가할 때는 최적 열손실과 최적 핀 끝 길이의 상대증가율은 각각 2.3%와 0.6%이고 핀 바닥온도는 약 0.87부터 0.89로 높아진다.

Fig. 4는 핀 바닥 두께의 변화에 따른 최적 값들의 변화를 보여준다. 최적 값들은 모두 핀 바닥 두께의 변화에 대하여 선형적으로 변화하는데 핀 바닥 두께가 두꺼워짐에 따라 최적의 열손실과 핀 길이는

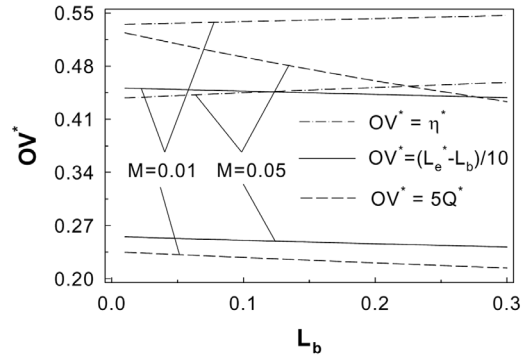


Fig. 4 Optimum values versus the fin base thickness ( $\xi = 0.5, M_f = 10, L_h = 0.15, \beta = 1$ )

감소하는 반면 최적의 효율은 증가한다. 주위 대류 특성계수  $M$ 이 0.01일 때 보다 0.05일 때가 핀 바닥 두께의 변화에 따른 최적열손실의 변화가 특히 현저해짐을 나타낸다.

Fig. 5는 핀 바닥 높이의 변화에 따른 최적 값들의 변화를 보여준다. 핀 바닥 높이의 변화에 따른 최적의 열손실과 핀 길이의 변화는 지속적인데 반하여 핀 바닥 높이가 높아짐에 따라 최적 효율에 미치는 핀 바닥 높이의 영향은 상대적으로 작아짐을 보여준다. 또한 핀 바닥 높이가 높아짐에 따라 각각의 최적 값들은 모두  $M=0.01$ 인 경우와  $M=0.05$ 인 경우의 차이 값이 커짐을 주지할 수 있다.

핀 형상 계수의 변화에 따른 최적 열손실, 효율 그리고 핀 길이의 변화가 Fig. 6에서 묘사된다. 핀 형상 계수가 증가함에 따라 (물리적으로는 아래 면이 수평인 기하학적 비대칭 삼각 핀으로부터 기하학적

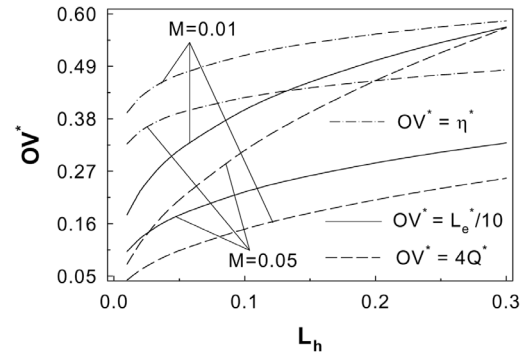


Fig. 5 Optimum values versus the fin base height ( $\xi = 0.5, M_f = 10, L_b = 0.1, \beta = 1$ )

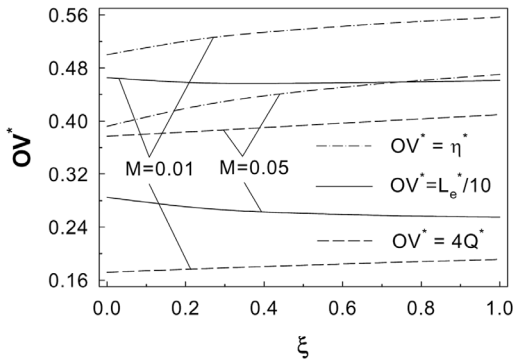


Fig. 6 Optimum values versus the fin shape factor ( $M_f = 10$ ,  $L_b = 0.1$ ,  $L_h = 0.15$ ,  $\beta = 1$ )

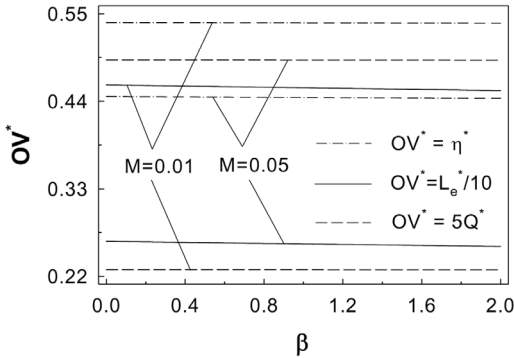


Fig. 7 Optimum values vs. the convection characteristic numbers ratio ( $\xi = 0.5$ ,  $M_f = 10$ ,  $L_b = 0.1$ ,  $L_h = 0.15$ )

비대칭 사다리꼴 핀을 거쳐 사각 핀으로 변함에 따라) 최적의 열손실은 거의 선형적으로, 최적의 효율은 다소 곡선 적으로 증가하는 반면 최적의 핀 길이는 다소 곡선 적으로 감소함을 보여준다. 주위 대류 특성계수가 0.01에서 0.05로 변해도 핀 형상계수의 변화에 따른 각각의 최적 값들의 변화 경향은 비슷함을 주지할 수 있다.

Fig. 7은 대류특성계수 비의 변화에 따른 최적 값들의 변화를 보여준다. 다른 변수들에 비하여 상대적으로 대류특성계수 비의 변화에 따른 최적 값들의 변화가 무척 미미함을 보여준다. 대류특성계수 비가 0부터 2까지 증가함에 따라  $M=0.01$ 인 경우 최적의 핀 길이는 상대적으로 1.53%,  $M=0.05$ 인 경우에는 2.44%가 감소하며 최적의 열손실과 효율도 그 라프 상에서는 거의 일정하게 보이나 아주 미세하게 감소한다.

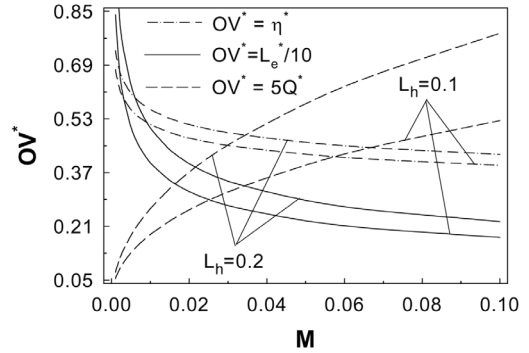


Fig. 8 Optimum values vs. the ambient convection characteristic number ( $\xi = 0.5$ ,  $M_f = 10$ ,  $L_b = 0.1$ ,  $\beta = 1$ )

Fig. 8은 주위 대류특성계수의 변화에 따른 최적 값들의 변화를 보여준다. 핀 바닥 높이와 함께 주어진 범위에서 최적의 변수들 변화에 미치는 영향이 상당히 큼을 보여준다. 주위 대류특성계수가 0.01부터 0.1까지 증가함에 따라 최적의 열손실은 처음에 급격히 증가하다 서서히 증가율이 떨어지나 지속적으로 증가하는 반면 최적의 핀 길이와 효율은 처음에 급격히 감소하다 그 이후 서서히 감소함을 나타낸다.

#### 4. 결론

일정한 핀 높이에서 무차원 핀 길이가 0.1 증가할 때 열손실의 상대 증가율이 0.5% 아래로 내려가는 순간을 최적의 열손실, 핀 길이 그리고 효율로 정의 하여 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀에 대한 최적화를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 일정한 핀 높이에서 무차원 핀 길이가 0.1 증가할 때 열손실의 증가율이 0.5% 아래로 내려가는 순간의 열손실은 대략 최대열손실의 90%와 98%내에 존재한다.
- 2) 기하학적 비대칭 사다리꼴 핀의 최적 열손실, 핀 길이 그리고 효율 값들이 내부유체대류특성계수, 핀 바닥 두께, 핀 바닥 높이, 핀 형상계수, 대류특성계수 비 그리고 주위 대류특성계수의 함수로 제시된다. 한 예로, 핀 형상계수가 0부터 1로 커짐에 따라 최적의 핀 길이의 감소 경향과 최적 열손실의 증가 경향을 보여주는데, 특성 길이에 임의의 적절한 값을 적용하고 주어진 무차원

변수들을 차원 화함으로써 실제 핀 설계에 도움이 되리라 생각된다.

- 3) 최적 값들에 미치는 핀 바닥 높이와 주위 대류특성계수의 영향은 현저한 반면 대류특성계수 비의 영향은 미미하다.

### References

- 1) S. Sikka and M. Iqbal, "Temperature Distribution and Effectiveness of a Two-Dimensional Radiating and Convecting Circular Fin," AIAA Journal, Vol.8, pp.101-106, 1970.
- 2) A. G. Mikhail, "Fin Gaps and Body Slots: Effects and Modeling for Projectiles and Missiles," J. Spacecraft, Vol.25, No.5, pp.345-353, 1988.
- 3) Y. H. Kim and H. S. Kang, "Analysis of a Modified Plate Fin for Enhanced Performance of a Plate Fin Heat Exchanger," Transactions of the KSAE, Vol.9, No.3, pp.84-91, 2001.
- 4) P. Razelos, "A Critical Review of Extended Surface Heat Transfer," Heat Transfer Engineering, Vol.24, No.6, pp.11-28, 2003.
- 5) B. T. F. Chung, M. H. Abdalla and F. Liu, "Optimization of Convective Longitudinal Fin of Trapezoidal Profile," Chem. Eng. Comm., Vol.80, pp.211-223, 1989.
- 6) K. Laror and H. Kalman, "The Effect of Tip Convection on the Performance and Optimum Dimensions of Cooling Fins," Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol.19, pp.359-362, 1992.
- 7) L. T. Yu and C. K. Chen, "Optimization of Circular Fins with Variable Thermal Parameters," J. of the Franklin Institutes, Vol. 336(B), pp.77-95, 1999.
- 8) H. S. Kang and D. C. Look, Jr., "Optimization of a Thermally Asymmetric Convective and Radiating Annular Fin," Heat Transfer Engineering, Vol.28, pp.310-320, 2007.
- 9) H. S. Kang, "Optimum Performance and Design of a Rectangular Fin," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.6, pp.705-711, 2007.
- 10) S. M. Zubair, A. Z. Al-garni and J. S. Nizami, "The Optimal Dimensions of Circular Fins with Variable Profile and Temperature-Dependent Thermal Conductivity," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.39, No.16, pp.3431-3439, 1996.
- 11) H. S. Kang and D. C. Look, Jr., "Optimization of Thermally and Geometrically Asymmetric Trapezoidal Fins," AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.18, No.1, pp.52-57, 2004.
- 12) B. Kundu and P. K. Das, "Performance Analysis and Optimization of Elliptical Fins Circumscribing a Circular Tube," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.50, pp.173-180, 2007.