

〈論 文〉

원형환에서 열전달 특성분석

이 금 배*

(1990년 5월 23일 접수)

Heat Transfer on Annular Fins with One-Dimensional Radiative and Convective Heat Exchange

Kum-Bae Lee

Key Words: Annular Fin(원형환), Radiation(복사), Poljak's Net-Radiation Method(Poljak의 순수 복사법), Fin Efficiency(환효율), Fin Effectiveness(환유효성)

Abstract

Numerical solutions are presented for the heat transfer from radiating and convecting fins. Consideration is given to thin, annular fins attached to a tube surface for which the temperature is constant. Fin to fin, fin to base, and fin to environment radiative interactions are considered. It is assumed that the radiating surface is diffuse-gray, the environment is black, and the surrounding fluid is transparent. The radiation terms are formulated by using Poljak's net-radiation method. The mathematical description of the simultaneously heat transport by conduction, convection, and radiation leads to a nonlinear integro-differential equation. This has been solved for a wide range of the pertinent physical parameters by using finite difference method and iteration method based on the Newton-Raphson technique. The temperature distributions, heat transfer rates, fin efficiencies, and fin effectivenesses are presented in dimensionless form. The results definitely indicate that the use of fins leads to a significant increase in heat transfer compared with the unfinned tube.

기 호 설 명

B : 무차원 환의 반쪽 두께	R : 무차원 r -좌표, 무차원 반경
b : 환의 두께	r : r -좌표, 반경
F : 형상계수	r_i : 환의 내경, 튜브 외경
h : 열전달계수	R_0 : 무차원 환의 외경
H : 대류-복사 열전달 비	r_0 : 환의 외경
k : 열전도도	T : 온도
L : 무차원 환과 환 사이의 길이	T_b : 환바닥의 온도, 튜브표면의 온도
l : 환과 환 사이의 길이	T_e : 주변온도 (environmental temp)
Q : 열전달률	T_f : 유체온도 (fluid temp)
q : 단위 면적당 열전달률	X : 무차원 x -좌표
	x : x -좌표
	ε : 복사율
	μ : 전도-복사 열전달 비

*정회원, 한국동력자원연구소 에너지기연구부

η : 유효율
 ϕ : 유효효성

첨 자

b : 윗바닥, 튜브 표면
 $cond$: 전도
 $conv$: 대류
 rad : 복사
 f : 윗
 i : 유입
 o : 유출
 r : 복사
 $1, 2$: 윗1, 윗2
 $*$: 무차원

1. 서 론

높은 온도의 물체 (solid body)로부터 낮은 온도의 유체 (fluid)로, 또는 높은 온도의 유체로부터 낮은 온도의 물체로 열이 전달될 때 표면적을 증가 시킴으로써 열이 더 많이 전달된다는 것은 오래전부터 알려진 사실이다. 표면적을 증가시키는 방법 중에 하나가 윗 (fins)의 사용이다.

Donovan과 Rohrer⁽¹⁾는 수치 반복법 (numerical iterative method)을 이용하여 평면에 부착되어 있는 직사각형의 윗으로부터 전도와 복사 열전달 문제를 다루었다. Eslinger와 Chung⁽²⁾은 윗바닥의 온도가 주기적으로 변하는 복사와 대류 열전달 문제를 다루었다. 문제를 풀기 위하여 유한요소법을 이용하였으며 시뮬레이션 모델은 Donovan과 Rohrer의 모델과 같다.

Okamoto⁽³⁾는 임의 형태의 윗 (arbitrary shaped fin) 내부에 열원을 동반한 복사와 대류 열전달 문제를 다루었다. Okamoto⁽⁴⁾는 또한 열원을 포함한 이차원의 전도 열전달 문제를 다루었다. 윗표면에서 복사와 전도가 포함된 경계조건을 사용하였다.

윗의 바닥으로부터 거리의 승에 따라 변하는 열전달계수와 선형 (linear)으로 변하는 열전도도를 가진 사다리꼴 형태의 윗통형의 최적차원 (optimum dimensions)의 값들이 Razelos와 Imre⁽⁵⁾에 의해 구해졌다.

윗을 통한 복사 열전달은 공학에서 최근에 중요하게 다루어지고 있다. 인공위성의 보조엔진에서 복사 열전달, 높은 고도에서 미사일등은 단지 복사

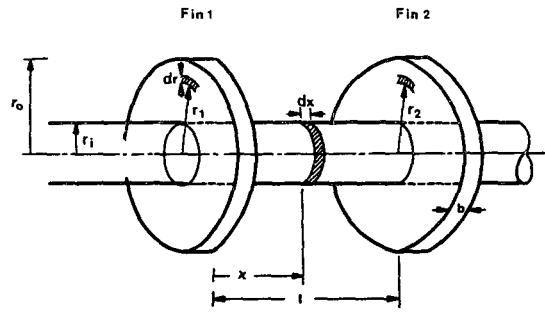


Fig. 1 Schematic diagram of circular fins for heat transfer

에 의해서 열이 전달된다. 왜냐하면 높은 고도에서는 대기에서의 대류 열전달이 거의 불가능하기 때문이다. 또한 에어컨, 히터, 냉장고등에서는 대류를 통한 열전달이 중요한 역할을 한다. 특히 극저온에서 가동되는 냉동기는 유체가 열교환기를 서너 개 거쳐야 온도가 0K 가까이 까지 떨어지기 때문에 윗의 역할은 절대적이다.

많은 실질적인 시스템에서, 많은 양의 복합된 전도, 대류, 복사의 열전달 현상이 동시에 일어나기 때문에 복합된 열전달 모드가 다같이 다루어져야만 한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 얇은 윗형윗이 튜브 주위에 무수히 부착되어 있으며, 윗과 튜브 주위를 기체가 흐르고 있다. 윗과 윗, 윗과 튜브표면, 윗과 주위환경, 튜브표면과 주위환경 사이에서 복사 열전달 상호교환이 충분히 다루어졌다. 전도, 대류, 복사가 동시에 일어나는 열전달 방정식은 비선형 적분-미분 방정식 (nonlinear integro-differential equation)으로 표현된다. 온도 분포도 (temperature distributions), 열전달률 (heat transfer rates), 윗효율 (fin efficiencies), 윗유효성 (fin effectivenesses) 등이 계산되어졌고, 무차원 형태로 도표에 결과들을 제시하였다.

2. 수학적 이론

Fig. 1에서 보는 바와 같이 얇은 윗형윗이 튜브 주위에 무수히 부착되어 있다. 윗의 내경은 r_1 , 외경은 r_0 , 두께는 b 이며, 윗과 튜브주위를 기체가 흐르고 있고, 주변의 온도와 유체의 온도가 균일하다고 할때 윗으로부터 이루어지는 열전달 현상을 규명하기 위한 수식을 유도하고자 한다.

2.1 에너지 방정식의 유도

환에 의한 열전달 문제를 풀기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 제약조건 및 가정들이 요구된다. 즉, 환은 얇기 때문에 환의 국부적인 온도 (local temperature)는 두께 b 에 걸쳐 일정하며, 환 및 튜브는 확산-회색체(diffuse-gray) 표면을 지녔으며 등방성(isotropic), 균질(homogeneous) 재료이다. 또한 환주위를 흐르는 유체는 복사에 대해 투명하며 (transparent), 그밖에 모든 물성치들도 일정하다고 가정 하였다.

하나의 환에서 미소요소(differential element)를 취하여 그에 대한 에너지 밸런스를 세우기로 하자. 이 때 주변과 유체의 온도를 각각 T_e , T_g 라 하고, 무수히 많은 환이 배열되어 있으므로 주변의 영향은 각 환에 대해 동일하며 또한 환의 양면에 대해서도 동일하다. 따라서 대칭성이 성립되므로 환 두께의 반쪽만을 고려해도 되며, 에너지 밸런스도 환의 반쪽만 고려해도 무방하다.

$$Q_{cond,i} + Q_{conv,i} + Q_{r,i} = Q_{cond,o} + Q_{conv,o} + Q_{r,o} \quad (1)$$

한 표면으로부터 복사 에너지가 방출되면 그 표면을 둘러싸고 있는 다른 표면으로 이동하여 일부는 흡수되고 나머지는 반사된후 다시 이동하는 과정을 여러번 되풀이하는 복잡한 복사교환이 이루어진다. 이러한 복사선의 움직임을 정확하게 추적한다는 것은 불가능한 일이다. 그러나 순수-복사법을 이용하면 이러한 복사선의 움직임을 추적할 필요없이 간단하게 수식화 할 수 있다.

복사항은 Poljak의 순수-복사법(Poljak's net-radiation method)⁽⁶⁾을 이용하여 수식화 하였는데, 그 방법은 Hottel⁽⁷⁾에 의해 처음으로 고안되었으며 후에 Poljak^(8,9)에 의해 더욱 개발되었다.

환의 면적소에 유입되는 복사량은

$$q_{r,i}(r_1) = \int_{r_2=r_i}^{r_o} q_{r,o}(r_2) dF_{dr_1-dr_2} + \int_{x=0}^l q_{r,o}(x) dF_{dr_1-dx} + \sigma T_e^4 \int_{x=0}^l dF_{dr_1-de} \quad (2)$$

우변의 1, 2, 3항은 각각 근접한 환, 튜브의 표면, 그리고 주변으로부터 유입되는 복사량을 나타내고 있다.

환의 면적소로부터 유출되는 복사량은

$$q_{r,o}(r_1) = \epsilon_f \sigma T^4 + (1 - \epsilon_f) q_{r,i}(r_1)$$

$$= \epsilon_f \sigma T^4 + (1 - \epsilon_f) \left[\int_{r_2=r_i}^{r_o} q_{r,o}(r_2) dF_{dr_1-dr_2} + \int_{x=0}^l q_{r,o}(x) dF_{dr_1-dx} + \sigma T_e^4 \int_{x=0}^l dF_{dr_1-de} \right] \quad (3)$$

튜브 표면으로부터 유출되는 복사량은

$$q_{r,o}(x) = \epsilon_b \sigma T_b^4 + (1 - \epsilon_b) q_{r,i}(x) = \epsilon_b \sigma T_b^4 + (1 - \epsilon_b) \left[\int_{r_1=r_i}^{r_o} q_{r,o}(r_1) dF_{dx-dr_1} + \int_{r_2=r_i}^{r_o} q_{r,o}(r_2) dF_{dx-dr_2} + \sigma T_e^4 \int_{x=0}^l dF_{dx-de} \right] \quad (4)$$

유출 복사량은 방사량과 반사량의 합으로 나타낸다. 모든 변수는 상수로 가정하고, 식 (1)에 전도, 대류, 유입 복사항등을 대입하면 에너지 방정식은

$$h(T - T_\theta) - \frac{kb}{2r_1} \frac{d}{dr_1} \left(r_1 \frac{dT}{dr_1} \right) + q_{r,o}(r_1) = \int_{r_2=r_i}^{r_o} q_{r,o}(r_2) dF_{dr_1-dr_2} + \int_{x=0}^l q_{r,o}(x) dF_{dr_1-dx} + \sigma T_e^4 \int_{x=0}^l dF_{dr_1-de} \quad (5)$$

$q_{r,o}(r_1) = q_{r,o}(r_2)$ 이므로, 3개의 미지수 [T , $q_{r,o}(r_1)$, $q_{r,o}(x)$]는 3개의 방정식 (5), (3) 및 (4)에 의해 구해진다. 방정식 (5)는 2차 미분방정식이므로 2개의 경계조건이 필요하다. 환의 바닥과 환 끝에서 경계조건은

$$T = T_\theta \quad \text{at } r_1 = r_i \quad (6)$$

$$-k \frac{dT}{dr_1} = h(T - T_\theta) + \epsilon_f \sigma (T^4 - T_e^4) \quad \text{at } r_1 = r_o \quad (7)$$

2.2 무차원 에너지 방정식

에너지 방정식은 다음과 같은 형태의 무차원 변수들을 이용하여 일반화 할 수 있다.

$$T^* = \frac{T}{T_b} \quad q^* = \frac{q}{\sigma T_b^4} \\ R = \frac{r}{r_i} \quad X = \frac{x}{r_i} \quad (8)$$

무차원 에너지 방정식과 환의 면적소 및 튜브 표면으로부터 유출 복사량식은 각각 다음과 같다.

$$H(T^* - T_\theta^*) - \mu \frac{d^2 T^*}{dR^2} - \frac{\mu}{R} \frac{dT^*}{dR}$$

$$\begin{aligned}
 &+ q_{r,0}^*(R_1) = \int_{R_2=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_2) dF_{dR_1-dR_2} \\
 &+ \int_{X=0}^L q_{r,0}^*(X) dF_{dR_1-dX} + T_e^{*4} \int_{X=0}^L dF_{dR_1-dE} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{r,0}^*(R_1) &= \epsilon_f T^{*4} + (1 - \epsilon_f) \left[\int_{R_2=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_2) \right. \\
 &dF_{dR_1-dR_2} + \int_{X=0}^L q_{r,0}^*(X) dF_{dR_1-dX} \\
 &\left. + T_e^{*4} \int_{X=0}^L dF_{dR_1-dE} \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{r,0}^*(X) &= \epsilon_b + (1 - \epsilon_b) \left[\int_{R_2=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_1) dF_{dX-dR_1} \right. \\
 &+ \int_{R_2=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_2) dF_{dX-dR_2} \\
 &\left. + T_e^{*4} \int_{X=0}^L dF_{dX-dE} \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
 R_0 &= \frac{r_0}{r_i} & L &= \frac{l}{r_i} \\
 H &= \frac{h}{\sigma T_b^3} & \mu &= \frac{kb}{2\sigma T_b^3 r_i^2}
 \end{aligned}$$

방정식 (9)는 비선형 적분-미분방정식이므로 수치적으로 풀 수 있다. 무차원 경계조건은

$$T^* = 1 \text{ at } R_1 = 1 \quad (13)$$

$$-\frac{\mu}{B} \frac{dT^*}{dR_1} = H(T^* - T_\theta^*)$$

$$+ \epsilon_f (T^{*4} - T_e^{*4}) \text{ at } R_1 = R_0 \quad (14)$$

무차원 흰 두께 $B = b/2r_i$ 가 새로운 변수로 문제에 도입되었다. 만약 μ/B 가 매우 크다면 dT^*/dR_1 은 0에 접근한다.

앞의 수식 표현들 중 형상계수(configuration factor)는 흰의 기하학적인 인자만의 함수이며, 이들 형상계수의 값들은 무차원 변수들의 향으로 표시되어졌다. Masuda⁽¹⁰⁾는 Fig. 1에서 링과 튜브표면 사이에 형상계수를 제시하였다.

$$\begin{aligned}
 dF_{dR_1-dX} &= \frac{2X}{\pi(Z^2 - 4R_1^2)} \{ (R_1^2 - 1)^{1/2} \\
 &+ \frac{2(R_1^2 - X^2 - 1)}{(Z^2 - 4R_1^2)^{1/2}} \tan^{-1} \\
 &[\frac{Z + 2R_1}{Z - 2R_1} \frac{R_1 - 1}{R_1 + 1}]^{1/2} \} dX \quad (15)
 \end{aligned}$$

여기서

$$Z = 1 + R_1^2 + X^2$$

형상계수 상호관계로 부터 $2\pi r_1 dr_1 dF_{dR_1-dX} = 2\pi r_i dx dF_{dX-dr_1}$, 튜브표면과 링 사이의 형상계수는

$$dF_{dX-dR_1} = R_1 dR_1 \frac{dF_{dR_1-dX}}{dX} \quad (16)$$

링과 근접해 있는 링사이에 형상계수도 Masuda⁽¹⁰⁾

에 의해 제시되어졌다.

$$\begin{aligned}
 dF_{dR_1-dR_2} &= \frac{4L^2 R_2}{\pi(Z^2 - 4R_1^2 R_2^2)} \left\{ \frac{R_1 R_2 \sin \Phi}{(Z - 2R_1 R_2 \cos \Phi)} \right. \\
 &+ \frac{Z}{(Z^2 - 4R_1^2 R_2^2)^{1/2}} \tan^{-1} \\
 &\left. \left[\left(\frac{Z + 2R_1 R_2}{Z - 2R_1 R_2} \right)^{1/2} \tan \frac{\Phi}{2} \right] \right\} dR_2 \quad (17)
 \end{aligned}$$

여기서

$$Z = R_1^2 + R_2^2 + L^2$$

$$\Phi = \cos^{-1} \left(\frac{1}{R_1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{1}{R_2} \right)$$

링과 주변(entire environment) 사이에 형상계수는

$$\begin{aligned}
 F_{dR_1-E} &= \int_{X=0}^L dF_{dR_1-dE} \\
 &= 1 - \int_{R_2=1}^{R_0} dF_{dR_1-dR_2} - \int_{X=0}^L dF_{dR_1-dX} \quad (18)
 \end{aligned}$$

튜브표면과 주변의 형상계수는

$$\begin{aligned}
 F_{dX-E} &= \int_{X=0}^L dF_{dX-dE} \\
 &= 1 - \int_{R_1=1}^{R_0} dF_{dX-dR_1} - \int_{R_2=1}^{R_0} dF_{dX-dR_2} \quad (19)
 \end{aligned}$$

2.3 환효율

환효율은 핀전체가 흰바닥 온도와 같은 온도도 유지될 때 흰으로부터 방출되는 에너지에 대한 실제 온도로 유지될 때 방출되는 방출 에너지의 비로 정의되며, 무차원의 향으로 표시하면 다음과 같다

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{Q^*(T^*)}{Q^*(T_b^*)} \\
 &= \frac{Q_{conv}^*(T^*) + Q_r^*(T^*)}{Q_{conv}^*(T_b^*) + Q_r^*(T_b^*)} \quad (20)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 Q_{conv}^*(T^*) &= R_0 B H [T^*(R_0) - T_\theta^*] \\
 &+ H \int_{R_1=1}^{R_0} (T^* - T_\theta^*) R_1 dR_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_r^*(T^*) &= R_0 B \epsilon_f [T^{*4}(R_0) - T_e^{*4}] \\
 &+ \int_{R_1=1}^{R_0} [q_{r,0}^*(R_1, T^*) - q_{r,i}^*(R_1, T^*)] R_1 dR_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{conv}^*(T_b^*) &= R_0 B H (1 - T_\theta^*) \\
 &+ \frac{H}{2} (R_0^2 - 1) (1 - T_\theta^*)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_r^*(T_b^*) &= R_0 B \epsilon_f (1 - T_e^{*4}) + \int_{R_1=1}^{R_0} [q_{r,0}^*(R_1 \\
 &T_b^*) - q_{r,i}^*(R_1, T_b^*)] R_1 dR_1
 \end{aligned}$$

무차원 유출 복사량 $q_{r,0}^*(R_1, T^*)$ 에 대해서는 절에서 이미 언급한 바 있으며, 또한 링 면적소.

유입되는 무차원 유입 복사량은 쉽게 구해진다. 흰 전체를 통해 $T^* = T_b^* = 1$ 로 유지된다면 무차원 유출, 유입복사량은

$$q_{r,0}^*(R_1, T_b^*) = \epsilon_f + (1 - \epsilon_f) q_{r,i}^*(R_1, T_b^*) \quad (21)$$

$$q_{r,i}^*(R_1, T_b^*) = \int_{R_2=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_2, T_b^*) dF_{dR_1-dR_2} + \int_{X=0}^L q_{r,0}^*(X, T_b^*) dF_{dR_1-dX} + T_e^{*4} \int_{X=0}^L dF_{dR_1-dE_1} \quad (22)$$

$$q_{r,0}^*(X, T_b^*) = \epsilon_b + (1 - \epsilon_b) \left[\int_{R_1=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_1, T_b^*) dF_{dX-dR_1} + \int_{R_2=1}^{R_0} q_{r,0}^*(R_2, T_b^*) dF_{dX-dR_2} + T_e^{*4} \int_{X=0}^L dF_{dX-dE} \right] \quad (23)$$

2.4 흰 유효성

흰 유효성은 핀이 없는 상태의 열전달률에 대한 흰 부착상태의 열전달률의 비로 정의된다. 무차원 항으로 표시하면

$$\varphi = \frac{Q^*(T^*)}{Q^*(T_b^*)} = \frac{Q_{conv}^*(T^*) + Q_r^*(T^*)}{Q_{conv}^*(T_b^*) + Q_r^*(T_b^*)} \quad (24)$$

여기서

$$Q_{conv}^*(T^*) = R_0 B H [T^*(R_0) - T_\theta^*] + H \int_{R_1=1}^{R_0} (T^* - T_\theta^*) R_1 dR_1$$

$$Q_r^*(T^*) = R_0 B \epsilon_f [T_e^{*4}(R_0) - T_e^{*4}] + \int_{R_1=1}^{R_0} [q_{r,0}^*(R_1, T^*) - q_{r,i}^*(R_1, T^*)] R_1 dR_1$$

$$Q_{conv}^*(T_b^*) = B H (1 - T_\theta^*)$$

$$Q_r^*(T_b^*) = B \epsilon_b (1 - T_e^{*4})$$

3. 수치 해법

세개의 미지수는 $(T^*, q_{r,0}^*(R_1), q_{r,0}^*(X))$ 두 경계조건을 이용하여 세개의 방정식을 가지고 계산되어진다. 지배 방정식인 에너지 방정식은 유한 차분법(finite difference method)을 이용하여 수치적으로 풀어졌다. 전도, 대류, 복사 현상이 결합된 문제를 풀기 위해 유한 차분법을 이용할 경우 에너지 방정식은 일련의 비선형 대수 방정식으로 대체

시킬 수 있다. 전도 및 대류 항은 온도에 대해 1승, 복사항목은 4승의 형태론 표시되어진다. Ness⁽¹¹⁾는 이러한 일련의 비선형 방정식들을 풀기 위해 Newton-Raphson 방법을 기초를 둔 급속 수렴 반복법 (rapid-convergence iteration method)을 제시하였는데 Newton-Raphson 방법은 온도의 초기 추정치가 최종값과 많이 다를 경우 방정식의 근에 수렴하지 않는 제한성을 쉽게 극복하여 근을 구할 수 있다. 계산되어진 온도를 이용하여 열전달량, 열효율, 열유효성등이 쉽게 계산되어진다. 상세한 풀이과정은 참고문헌 (12)에 자세히 기록되어 있다.

4. 결 과

수치계산은 원형핀 설계시 영향을 주는 여러인자들을 이용하여 수행하였다. 그 인자들은 주로 유체와 주변의 온도, 전도-복사 열전달의 비(μ), 대류-복사 열전달의 비(H), 흰의 길이 (R_0) 등을 이용하였다. 고정 변수로는 $L=0.15, B=0.01, \epsilon_f = \epsilon_b = 0.5$ 를 이용하였다. 결과로는 온도 분포도, 열전달율, 흰효율, 흰유효성등으로 제시되어졌다.

Fig. 2는 $T_\theta^* = 0.2, T_e^* = 0.2, H = 1$ 일 때 $\mu = 0.5 \sim 10$ 의 값을 사용하여 온도분포도를 보여주고 있다. μ 가 작을 때 ($\mu = 0.5$) 즉 열전도도가 작을 때 많은 양의 열이 흰끝까지 전달되지 않고 중간에서 유체속으로 전달된다. μ 의 값이 커짐에 따라 열전도도 잘 이루어져 흰끝의 온도도 자연히 커지고, $\mu = 10$ 일 때 흰끝의 온도는 0.88이 된다. 따라서 H 값이 일정할 때 대류나 복사에 의한 열전달

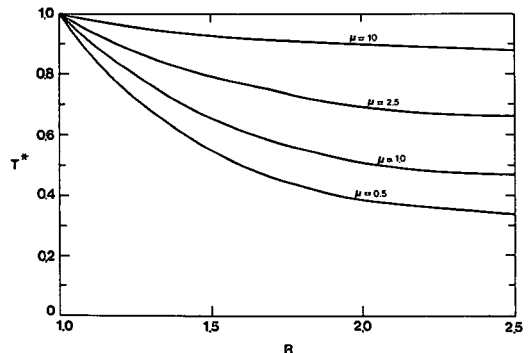


Fig. 2 Temperature distribution ($R_0 = 2.5, T_\theta^* = T_e^* = 0.2, H = 1$)

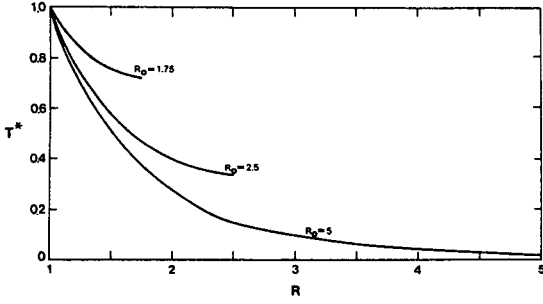


Fig. 3 Temperature distribution ($\mu=1$, $T_e^*=T_g^*=0$, $H=1$)

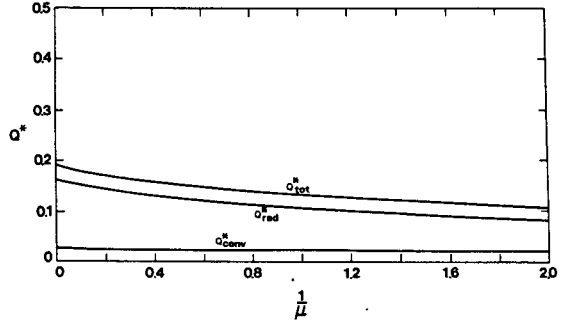


Fig. 5 Heat transfer rate ($R_0=2.5$, $T_e^*=T_g^*=0$, $H=0.01$)

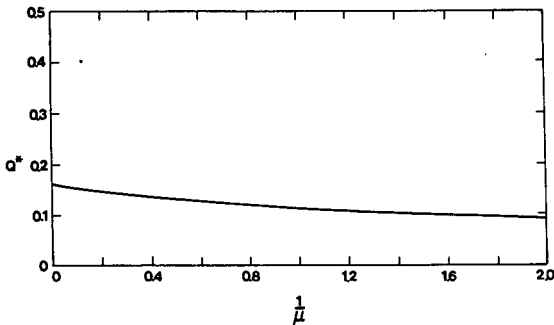


Fig. 4 Heat transfer rate ($R_0=2.5$, $T_e^*=T_g^*=0$, $H=0$)

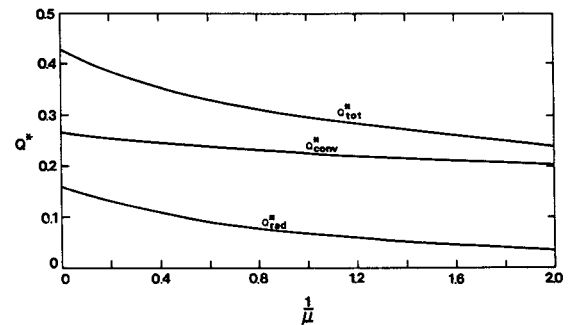


Fig. 6 Heat transfer rate ($R_0=2.5$, $T_e^*=T_g^*=0$, $H=0.1$)

은 유체나 주위와 환의 온도차에 의하여 열전달이 이루어지기 때문에 될 수 있는대로 큰 열전도도를 가진 재료로 환을 제작하여야 한다.

Fig. 3은 열에 관계되는 변수 (thermal parameters)가 일정할 때 환의 길이 변화에 따라 온도 분포도를 나타내고 있다. 환의 길이가 1.75일 때 온도 감소는 약간 이루어지고 있으며 환끝의 온도가 0.72이고, 환의 길이가 커짐에 따라 온도 감소가 급격하여 환의 길이가 2.5일 때 환 끝의 온도는 0.34, 환의 길이가 5일 때 환끝의 온도는 0.02 정도가 된다. 따라서 환 설계시 열에 관계되는 변수들이 일정할 때 이와 같은 도표로서 쉽게 환의 길이를 결정할 수 있다. 따라서 이와 같은 조건하에서는 환의 길이는 온도 감소가 적은 2.5에서 4사이 값을 취하는 것이 좋다. 이보다 작은 R_0 값 ($R_0 < 2.5$)에선 온도 감소가 급격히 일어나기 때문이다.

Fig. 4부터 Fig. 7까지 4개의 그림은 H 값에 따라 환으로부터 대류, 복사, 대류와 복사를 합친 총

열전달량을 각각 보여주고 있다. Fig. 4는 $H=0$ 일 때 순 복사에 의한 열전달을 보여주고 있으며, Fig. 5에서 $H=0.01$ 일 때는 작은 대류의 영향으로 총 열전달량은 약간 증가하고 있다. Fig. 6은 $H=0.1$ 일 때 총 열전달량은 증가폭이 더 크게 나타나고 있다. 이는 대류의 영향으로 환의 온도가 감소하여 복사에 의한 열전달률도 자연스럽게 감소하는 현상을 보여주고 있다. Fig. 7에서는 더 큰 대류의 영향으로 총 열전달량은 더 증가하고 있으며, 복사에 의한 열전달률은 더욱 감소하는 경향을 보이고 있다. $1/\mu=0.5$ 를 지나 비록 값은 작지만 복사량은 음 (negative)의 값이 된다. 이는 환으로부터 나가는 복사량보다 환으로 들어오는 양이 더 많기 때문이다. 좀더 자세히 설명하면 높은 온도의 튜브 표면으로부터 낮은 온도의 환표면으로 복사되는 양이 더 크기 때문에 복사에 의한 열전달량은 음의 값이 되고 있다. 여기서의 열전달량은 식 (20)의 분자항의 값들이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 $1/\mu$ 값에 따른 환효율을 보여

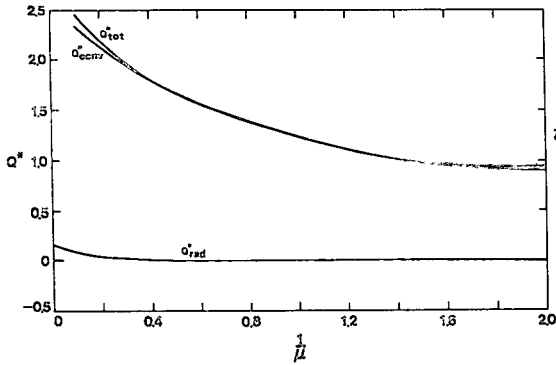


Fig. 7 Heat transfer rate ($R_0=2.5$, $T_e^*=T_\theta^*=0$, $H=1$)

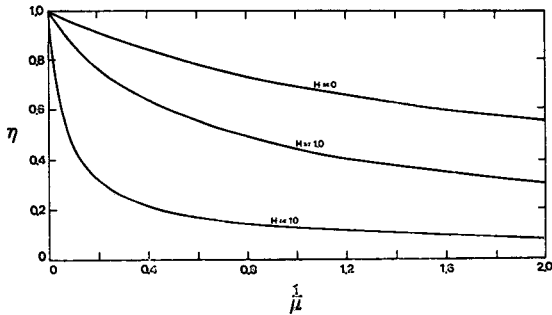


Fig. 8 Fin efficiency ($R_0=2.5$, $T_e^*=T_\theta^*=0$)

주고 있다. 원의 길이가 $R_0=2.5$ 을 사용한 Fig. 8에서 순수한 복사만에 의한 ($H=0$) 원효율은 대류값이 포함된 ($H=1$ 이나 $H=10$) 원효율보다 원효율이 매우 크다. H 값이 커짐에 따라 원효율은 작아지며 $1/\mu$ 값이 커짐에 따라 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. $H=10$ 인 경우 $1/\mu=0.4$ 까지는 급격히 감소하고 있으며 이후에는 완만하게 감소하고 있다.

Fig. 9는 원의 길이에 따른 원효율과 열전달량을 보여주고 있다. 원의 길이가 제일 적은 $R_0=1.75$ 인 경우 원효율은 제일 크나 열전달량은 제일 적게 나타나고 있다. 원의 길이가 제일 큰 $R_0=5$ 인 경우 열전달량은 제일 크나 열효율은 제일 적다. 따라서 열전달량이 클수록 원효율이 작다. 이는 열전달량일 크면 클수록 원의 온도가 떨어져 원효율이 작아지기 때문이다.

Fig. 10은 전도값에 따른 원의 유효성을 보여주고 있다. H 값이 0, 0.1, 1.0으로 커짐에 따라 원유효성도 커지나, $H=10$ 인 경우 오히려 작아지

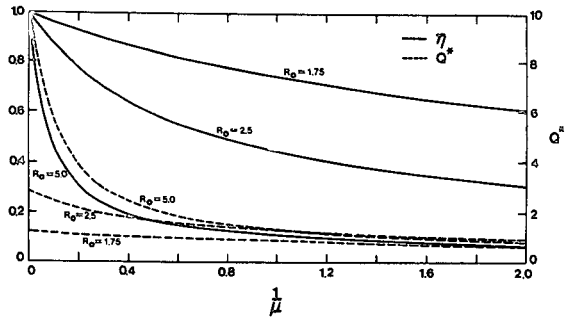


Fig. 9 Fin efficiency ($T_e^*=T_\theta^*=0$, $H=1$)

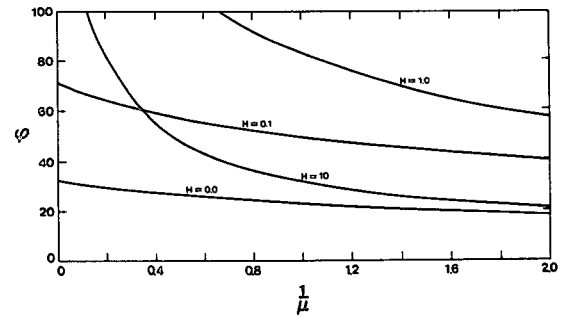


Fig. 10 Fin effectiveness ($R_0=2.5$, $T_e^*=T_\theta^*=0$)

고 있다. 전도항이 매우 클수록 즉 $1/\mu$ 값이 매우 작을수록 열전도가 잘되어 원끝에서도 원바닥의 온도와 비슷하며, H 값이 커짐에 따라 원끝에까지 열이 잘 전달되지 않고 H 값이 커지면 원바닥을 조금지나 원의 온도가 급격히 감소하여 원유효성이 급격히 떨어진다. $H=0$ 인 경우 순복사에 의한 열전달을 나타내고 있으며 원의 유효성은 32에서 17에 걸쳐 나타나고 있다. 즉 원을 부착시킴으로서 원을 부착시키지 않을 때 보다 17~32배 정도 열전달을 더 시킬수 있다. 본 수치계산에서 주위온도와 유체온도의 값으로 0를 사용한 이유는 원과 그들과의 온도차가 매우 클 경우에 일어나는 현상들을 알아보기 위한 것이다.

5. 결 론

전도, 대류, 복사가 동시에 일어나는 원형원에서 열전달 현상은 비선형-적분-미분 방정식 (non-linear integro-differential equation)으로 유도되었으며 Newton-Raphson 방법을 이용하여 문제를 풀었다. 결과로 온도 분포, 열전달량, 원효율, 원유효성등이 무차원으로 표현되었다. 원을 사용함으

로써 흰을 사용하지 않는 경우보다 열전달량이 상당히 증가하였으며 다음과 같은 결과들을 얻었다.

(1) 복사항은 기존에 많이 이용되는 Monte Carlo 방법을 사용하지 않고, 간단하면서도 더 정확한 Poljak's net-Radiation 방법을 이용하여 에너지 방정식을 유도하였으며, 처음 흰 문제에 적용시켰다.

(2) 대류(H)와 전도(μ) 값은 클수록 좋으며, 주위의 온도와 유체의 온도는 작을수록 좋다. 흰의 길이가 커면 클수록 무조건 다 좋은 것은 아니며 경제적인 최적의 R_0 값은 그래프등을 통하여 얻는 것이 좋다(Fig. 3 참조).

(3) 대류 값이 커지면 열전달량은 증가하나, 복사에 의한 열전달량은 비록 값은 작지만 음의 값을 갖는다. 이는 흰으로 부터 나가는 복사량보다 흰으로 들어오는 복사량이 더 크기 때문이다. 다시 말하면 높은 온도의 튜브 표면으로부터 낮은 온도의 흰표면으로 복사되는 양이 더 크기 때문이다.

(4) 순복사 열전달인 경우 ($H=0$) 흰의 길이가 $R_0=2.5$, 유체와 주위온도가 $T_c^*=T_g^*=0$ 일 때, 열유효성 즉 흰을 사용할 경우가 흰을 사용하지 않을 경우보다 열전달량이 17~32배 많다. H 가 커질 경우 열전달량은 더 더욱 커지고 있다.

(5) 최적 R_0 의 값은 열관계 변수 및 흰치수 관계 변수들이 모두 고려된 방정식으로 유도되는 것이 가장 이상적이며 바람직하다고 생각되며, 유도된 방정식 또한 실험을 통하여 증명이 되어야 한다. 본 논문은 이런 최적 R_0 의 값을 구하기 위한 전초단계라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Donovan, R.C. and Rohrer, W.M., 1969, "Radiative and Conductive Fins on a Plane Wall, Including Mutual Irradiation", ASME paper No. 68-WA/HT-22, Nov.
- (2) Eslinger, R.G. and Chung, B.T.F., 1979, "Periodic Heat Transfer in Radiating and Convecting Fins or Fin Arrays", AIAA J., Vol.17, No.10, pp.1134~1140.
- (3) Okamoto, Y., 1964, "Temperature Distribution and Efficiency of a Single Sheet of Radiative and Convective Fin Accompanied by Internal Heat Source", Bulletin of JSME, Vol. 7, No.28, pp.751~758.
- (4) Okamoto, Y., 1966, "Temperature Distribution and Efficiency of a Plate and Annular Fin with Constant Thickness", Bulletin of JSME, Vol. 9, No. 33, pp. 143~150.
- (5) Razelos, P. and Imre, K., 1979, "The Optimum Dimensions of Circular Fins with Variable Thermal Parameters", ASME 79-WA/HT-48, pp.1~9.
- (6) Sigel, R. and Howell, J.R., 1981, "Thermal Radiation Heat Transfer", 2nd Edition, McGraw-Hill Book Co.
- (7) Hottel, H.C., 1954, "Radiant Heat Transmission, in William H. McAdams (ed.), Heat Transmission," 3rd Edition, Chap. 4, McGraw-Hill Book Co.
- (8) Poljak, G., 1935, "Analysis of Heat Interchange by Radiation between Diffuse Surfaces", Tech. Phys., USSR, Vol. 1, Nos. 5, 6, pp.555~590.
- (9) Jakob, M., 1957, "Heat Transfer", Vol. 2, John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Masuda, H., 1972, "Radiant Heat Transfer on Circular-Finned Cylinders", Trans. of JSME, Vol.38, pp.3229~3234.
- (11) Ness, A.J., 1959, "Solution of Equations of a Thermal Network on a Digital Computer", Solar Energy, Vol. 3, No. 2, p.37.
- (12) 이금배, 1988, "월형핀 사이에서 핀의 열효율 계산 (1)", KE-88(B)-9, 과학기술처기본과제.

(1) Donovan, R.C. and Rohrer, W.M., 1969, "Radiative