

〈論 文〉

비축대칭 대류열손실 경계조건하에서 원관내 복사에 관여하는
매질의 층류 열적발달의 수치해석

김택영* · 백승욱**

(1994년 9월 23일 접수)

**Analysis on the Thermal Development of Radiatively Participating
Pipe Flow with Nonaxisymmetric Convective Heat Loss**

Taik-Young Kim and Seung-Wook Baek

Key Words : Nonaxisymmetric Circumferential Convective Heat Loss(원관주위의 비축대칭 대류열손실), Thermal Development(열적발달), Radiatively Participating Medium(복사에 관여하는 매질), Discrete Ordinates Method(구분종좌법)

Abstract

The cooling problem of the hot internal pipe flow has been investigated. Simultaneous conduction, convection, and radiation were considered with azimuthally varying convective heat loss at the pipe wall. A complex, nonlinear integro-differential radiative transfer equation was solved by the discrete ordinates method (or called S_N method). The energy equation was solved by control volume based finite difference technique. A parametric study was performed by varying the conduction-to-radiation parameter, optical thickness, and scattering albedo. The results have shown that initially the radiatively active medium could be more efficiently cooled down compared with the cases otherwise. But even for the case with dominant radiation, as the medium temperature was lowered, the contribution of conduction became to exceed that of radiation.

기 호 설 명

a_o : 선형 비등방성 산란위상함수의 계수	Re : Reynolds 수
C : 관내의 유체의 열전도계수비	T : 온도
I : 복사강도	u : 속도
I_b : 흑체복사강도	z : 축방향 공간좌표
N : 전도-복사 계수	α : 열확산계수
n : 굴절률	β : 상각계수
Nu : Nusselt 수	ϵ_w : 표면 방사율
Pe : Peclet 수	η, μ, ξ : 방향코사인
q : 열유속	θ : 방위각방향 공간좌표
r : 반경방향 공간좌표	θ_D : 방위각방향 방향좌표
	λ : 열전도계수
	σ : Stefan-Boltzmann 상수
	σ_o : 산란계수

*현대전자산업주식회사

**정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

τ_0 : 특성광학두께
 ϕ_0 : 위상각방향 방향좌표
 ω_0 : 산란알bedo
 Ω, Ω' : 출사 및 입사방향

상첨자 및 하첨자

C : 전도
 R : 복사
 r : 반경방향
 T : 전체
 w : 벽
 θ : 방위각방향
 ∞ : 관주위 횡류
 \sim : 실차원변수

1. 서 론

원관내의 강제대류에 의한 내부유동의 열적발달(thermal development) 및 원관주위로의 열교환 문제는 공학적 응용범위의 다양성으로 인하여 오래 전부터 관심의 대상이 되어왔다. 특히 내부유동이 열복사에 민감한 고온의 매질일 경우, 태양열 집적계에서 산업용 열교환기, 고온 연소가스로 부터의 열추출, 원자력 발전소 핵반응기의 냉각 및 MCVD(modified chemical vapor deposition)라 일컬어지는 광섬유 제작공정에 이르기까지 그 적용범위가 광범위하여 지난 수십년간 수많은 연구가 수행되었다. 초기에는 복사열전달 해석의 난해성으로 인하여 관내벽의 표면복사만을 고려한 연구가 발표되었으나, 최근 컴퓨터의 눈부신 발달에 힘입어 여러가지 상황하에서 복사열을 방사, 흡수 및 산란하는 매질에 관한 연구결과들이 보고되고 있다. 원관내 강제대류에 의한 열적입구(thermal entrance)에서 반경방향의 1차원 복사열전달의 영향에 관한 연구^(1~4)가 많은 연구자들에 의하여 수행된 바 있고, 축방향의 복사열전달의 영향을 고려한 연구^(5,6)도 발표되었다. 이러한 모든 연구들은 원관벽면의 온도가 일정하게 유지되거나, 벽면에서의 열교환량이 일정한 경우의 두가지에 국한되어 왔으며, 또한 대부분이 축대칭임을 가정한 계산결과들이다.

일반적으로 고온계에서는 복사열전달의 영향이 매우 중요하다. 그러나 복사전달방정식(radiative transfer equation)이 비선형 미적분방정식의 형태

이므로 이의 완전한 해석해를 구하는 것은 불가능하며, 많은 경우 근사해법을 사용하고 있으나, 다차원 복사전달방정식의 효율적이며 정확도가 높은 근사해법의 개발은 아직 연구의 대상으로 남아 있다. 이제까지 제안된 많은 근사해법중 구분종좌법(discrete ordinates method)으로 알려진 S_N 근사법은 정확도가 뛰어나고 에너지방정식 등 기존방정식의 유한차분화된 격자계와 동일한 격자계에서 적분이 가능하여 그 효용성이 높다고 알려져 있다. 구분종좌법은 개념적으로는 다유속 근사법(multi flux model)의 일종이며, 복사강도(radiative intensity)를 전체 입체각(solid angle) 4π 에 대하여 몇개의 유속구간으로 나누어 각각의 구간복사강도를 종속변수로 하여 수치적으로 해석한다. 이 때 기존의 다유속 모델에서 문제점으로 지적되는 구간복사강도간의 연계성의 부족을 Gaussian 형식의 수치적분으로 해결하여 정확도를 향상시켰다. 구분종좌법은 초기 중성자전달방정식(neutron transport equation)의 해석에 도입되어 사용되었으며,⁽⁷⁾ 이후 많은 연구자들에 의하여 복사전달방정식의 해석에 적용되어^(8~10) 정확도가 입증되었고, 최근에는 비축대칭인 경우의 원통좌표계에 대한 연구⁽¹¹⁾도 발표되고 있다.

언급한 바와 같이 많은 연구자들에 의하여 관내 강제대류 및 전도열전달과 축대칭 복사열전달의 복합적인 해석이 수행되었으나 비축대칭 대류열손실이 관표면에서 이루어질 때에 관한 연구는 발표된 바 없다. 복사에 관여하는 고온의 매질이 흐르는 원관이 차가운 횡류(crossflow)를 가로질러 놓여있을 때 원관표면에서의 대류열손실은 방위각(azimuthal angle)에 따라 변하는 양을 갖게 되며 이로 인하여 관내유동의 열적발달도 축대칭성을 상실한 채로 이루어진다. 본 연구에서는 이러한 상황하에서 관내유동의 열적발달과 관표면에서의 열손실을 수치적으로 해석하여 이를 정량적으로 분석하고자 한다. 비축대칭의 복사열전달은 언급한 바와 같이 정확도와 효율성이 좋은 구분종좌법으로 해석하였으며 에너지방정식은 유한차분법으로 수치해석하였다. 본 연구의 주된 관점이 열적발달에 있으므로 해석상의 편의를 위하여 관내유동이 수력학적으로는 완전히 발달되었다고(hydrodynamically fully developed) 가정하여 이론적으로 구해지는 유동속도분포를 도입하였다. 관을 흐르는 매질의 열에너지는 전도와 복사에 의하여 관의 내벽으로 전달되며 하류로 발

달되어간다. 관내벽으로 전달된 열은 외벽에서 방위각에 따라 변하는 열전달계수 또는 Nusselt수, $Nu_{\infty}(\theta)$ 에 의하여 외부의 찬 횡류로 전달된다. 본 연구에서는 관내유동의 효율적인 냉각에 미치는 복사의 영향을 고찰하기 위하여 전도-복사계수, 특성 광학두께 및 산란알베도 등 세가지 복사관련 매개변수에 대하여 수치계산을 수행하였으며 그결과에 대하여 기술하였다.

2. 이론해석

본 연구에서 해석하고자 하는 물리적 모델과 좌표계를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 저온의 횡류가 원관주위를 흐르고, 원관내에는 복사에 대하여 흡수, 방사 및 산란하는 고온의 회매질(gray medium)이 수력학적으로 완전히 발달된 속도분포, $u=2(1-r^2)$ 의 형태로 유입되고 있다. 이러한 상황에서 관내매질은 대류, 전도 및 복사열전달에 의하여 반경 및 방위각방향의 온도구배를 갖고 열적발달을 하며, 후류로 흐르게 된다. 한편, Sparrow와 Cess⁽¹²⁾는 다음과 같은 조건에서는 축방향의 복사열전달은 무시될 수 있음을 보여주었고, 본 연구에서는 이러한 조건이 만족되는 물리계를 모델로 설정하였다.

$$\frac{\bar{u}z_o}{16\sigma n^2 T_{in}^3 \alpha / 3\beta\lambda} \gg 1 \quad (1)$$

결과적으로 복사는 반경 및 방위각 방향의 2차원 해석을 하였다. 횡류 Reynolds수의 지배를 받는, 방위각의 함수로 나타나는 원관외벽에서의 열손실

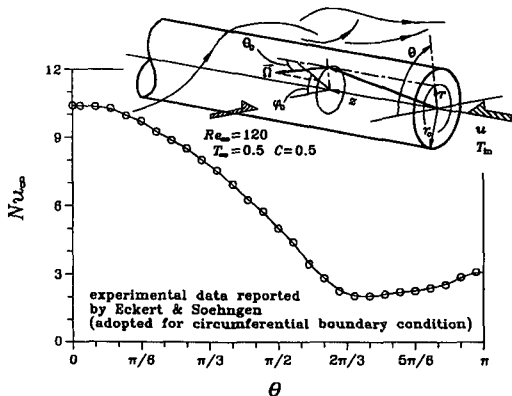


Fig. 1 Schematic of the problem and crossflow local Nusselt number for the circumferential boundary condition

지표인 $Nu_{\infty}(\theta)$ 는 실험치⁽¹³⁾를 사용하였으며 이를 Fig. 1에 도시하였다. 정체점(stagnation point)에서 열손실이 가장 크고 후류에서는 원관표면에서 유동박리(separation)와 이에 따른 와류에서 속도의 감소로 열손실량이 다소 증가함을 보여준다.

본 연구에서 제안한 물리계를 지배하는 무차원화된 에너지방정식은 다음과 같다.

$$u \frac{\partial T}{\partial z} = \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right\} - \frac{\tau_o^2 (1 - \omega_o)}{N} \left[T^4 - \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega \right] \quad (2)$$

이 때 사용된 무차원변수 및 매개변수들은 다음과 같이 정의하였으며, 은 실차원의 변수를 의미한다.

$$\begin{aligned} r &= \hat{r} / \hat{r}_o, z = 2\hat{z} / \hat{r}_o Pe, u = \hat{u} / \hat{u} \\ \bar{u} &= \int \hat{u} d\hat{A} / \pi \hat{r}_o^2, T = \hat{T} / \hat{T}_{in}, I = \hat{I} / \hat{I}_{bo} \\ q &= \hat{q} \hat{r}_o / \lambda \hat{T}_{in}, \hat{I}_{bo} = \sigma n^2 \hat{T}_{in}^4 / \pi \\ N &= \lambda \beta / 4\sigma n^2 \hat{T}_{in}^3, \tau_o = \beta \hat{r}_o, \omega_o = \sigma_o / \beta \\ Pe &= 2 \hat{r}_o \bar{u} / \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

입구에서는 고온의 매질이 유입되므로 무차원 입구 온도는 1로 일정하게 유지한다. 관 중심축에서는 유한한 온도를 가져야 하며, 관벽의 두께는 무한히 얇다고 가정하여 관벽에서의 열전달은 무시하였고, 관벽면을 통한 관내의 유체간의 열교환은 Fig. 1에 나타난 바와 같은 Nusselt수에 의하여 진행되므로 다음과 같은 벽면의 경계조건을 부여할 수 있다.

$$q_{r|w}^i = q_{r|w}^c + q_{r|w}^R = \frac{C}{2} Nu_{\infty} (T_w - T_{\infty}) \quad (4)$$

식 (4)의 상첨자 T, C, R 은 각각 전체, 전도 및 복사항을 의미하고 관내의 유체의 열전도계수비, $c = \lambda_{\infty} / \lambda$ 와 횡류의 무차원온도, T_{∞} 는 모두 0.5인 유체로 정하였다. 각각의 무차원 열유속은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} q_r^i \\ q_{\theta}^i \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} q_r^c \\ q_{\theta}^c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} q_r^R \\ q_{\theta}^R \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} -\frac{\partial T}{\partial r} \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \end{Bmatrix} + \frac{\tau_o}{N} \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} \begin{Bmatrix} \mu \\ \eta \end{Bmatrix} I d\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

관내유체의 냉각정도를 나타내는 지표로서 다음과 같은 혼합평균온도(mixed mean temperature)와 벽면의 평균온도를 정의한다.

$$\bar{T} = \frac{\int T u dA}{\int u dA}, \quad \bar{T}_w = \frac{\int T_w d\theta}{2\pi} \quad (6)$$

한편, 원관내벽에서 전도 및 복사열손실의 정량적인 해석을 위하여 다음과 같은 평균 Nusselt수를 정의한다.

$$Nu^T = Nu^c + Nu^r = \frac{\int (q_{r|w}^c + q_{r|w}^r) d\theta}{\pi(T - T_w)} \quad (7)$$

언급한 바와 같이 식 (1)이 성립되면 복사열전달은 반경 및 방위각방향의 변화를 고려한 공간상의 2차원 문제가 되어 다음과 같은 무차원 복사전달방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{1}{\tau_0} \left\{ \frac{\mu}{r} \frac{\partial(rI)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial(\eta I)}{\partial \varphi_0} + \frac{\eta}{r} \frac{\partial I}{\partial \theta} \right\} + I = (1 - \omega_0) T^4 + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} \Phi(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) I' d\Omega' \quad (8)$$

이 식의 $\Phi(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ 는 선형 비등방성 산란위상함수(linear anisotropic scattering phase function)로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = 1 + a_0(\mu\mu' + \eta\eta' + \xi\xi') \quad (9)$$

이 식의 '은 입사방향을 의미하며 방향코사인(direction cosine)은 각각 다음식으로 표현되며 하첨자 Ω 는 Fig. 1에 도시한 바와 같은 방향을 나타내는 좌표계를 의미한다.

$$\mu = \sin\theta_0 \cos\varphi_0, \quad \eta = \sin\theta_0 \sin\varphi_0, \quad \xi = \cos\theta_0 \quad (10)$$

본 연구에서는 결과의 방대함때문에 등방성 산란($a_0=0$)의 경우에 국한하여 계산을 수행하였다. 복사전달방정식에 대한 경계조건은 다음 식으로 주어지며 원관내벽은 흑체로 가정하여 $\varepsilon_w=1$ 로 한다.

$$I = I' \text{ with } \vec{\Omega} = -\vec{\Omega}' \text{ (for } \mu > 0) \text{ at } r=0$$

$$I = \varepsilon_w T_w^4 + (1 - \varepsilon_w) \frac{\int_{\Omega'=2\pi} \mu' I' d\Omega'}{\int_{\Omega'=2\pi} \mu' d\Omega'} \quad (11)$$

(for $\mu < 0$) at $r=1$

복사전달방정식 (8)은 구분중좌법을 사용하여 계

산한다. 구분중좌법의 자세한 내용과 해법은 저자들의 기존발표 연구⁽¹⁰⁾에 수록되어 있으므로 반복된 설명을 생략하였다. 구분중좌법은 전체입체각 4π 를 몇구간으로 나누는가에 따라 S_2, S_4, S_6, S_8 근사법 등으로 지칭하며 구간수가 많을수록 정확도가 증가한다. 본 연구에서는 S_2, S_4, S_6, S_8 근사법 등 4가지로 계산하였으며, 그 결과 S_4 근사법으로 얻은 결과가 더 고차의 해법으로 구한해와 같은 차수의 정확도를 갖음을 확인하였고 계산의 효율성을 위하여 모든 계산을 S_4 근사법으로 수행하였다. 에너지방정식 (2)는 구분중좌법과의 격자계의 일관성을 위하여 미소체적을 기본으로하는 유한차분법으로 차분화하여 계산하였다. 관단면에서 반경방향과 방위각방향으로 21×57 의 균일 격자계를 취하였으며, 축방향으로는 지수함수형의 밀집함수를 도입하여 관입구에 밀집된 격자계를 구성하고 관후류에서 열적발달이 진행됨에 따라 격자간의 간격을 넓혔으며 충분히 발달된 후 계산을 종료하였다. 단면에서 31×87 의 격자계를 취하였을 때 격자의존도가 0.01% 이하이고, 축방향으로는 밀집함수의 계수를 변화시키며 관입구의 밀집도를 줄이거나 늘렸을 때의존도가 0.01% 이하이다. 에너지방정식은 Crank-Nicolson 방법으로 계산하였고 복사에 관여하는 항은 생성항 선형화법을 도입하였으며, 복사 전달방정식 (8)과 연계하여 두 식이 모두 수렴할 때까지 반복계산한다.

3. 결과 및 검토

원관주위의 횡류에 의한 원관내 유체의 비축대칭 냉각효율에 미치는 복사의 영향을 고찰하기 위하여 전도-복사계수, N , 특성광학두께, τ_0 및 산란알베도, ω_0 등 복사관련 매개변수의 4가지 조합에 대한 수치해석을 수행하였으며 4가지 조합은, (a) $N=0.1, \tau_0=1, \omega_0=0.1$ 로 이 후의 그림에서는 실선으로 표시하였으며, (b) $N=0.02, \tau_0=1, \omega_0=0.1$ 로 a 에 대하여 전도-복사계수의 영향을 고찰하기 위한 것으로 점선으로 나타내었고, (c) $N=0.1, \tau_0=5, \omega_0=0.1$ 은 a 에 대한 특성광학두께의 영향을 고찰하기 위한 것으로 일점쇄선으로 도시하였고 마지막으로, (d) $N=0.1, \tau_0=1, \omega_0=0.8$ 로 (a)에 대한 산란알베도의 영향을 고찰하기 위한 것으로 이점쇄선으로 나타내었다.

Fig. 2는 원관대칭면의 상부유체 등온선의 열적

발달과정을 네가지 경우에 대하여 도시한 것이다. 관주위 횡류의 방위각에 의존하는 냉각효과로 인하여 원관단면의 온도장은 뚜렷한 비축대칭성을 가지나, 후류로 열적발달이 진행되면 매질의 온도가 균일하게되어 점차 축대칭성을 회복함을 볼 수 있다. 정체점에서의 열손실이 가장 크므로 이 지역의 온도구배가 심하며, 이는 전도열전달의 영향이 이곳에서 역시 가장 크게 나타남을 의미한다. 고온의 중심부는 관후부의 와류지역으로 치우쳐서 존재한다.

전도-복사계수, N 의 영향을 고찰하기 위하여 a 와 b 를 비교하여 보자. 일반적으로 복사열은 그 전달영역이 넓다. 즉, 중심부 고온유체의 열이 복사에 의하여 관내벽까지 직접 전달될 수 있다. N 의 감소는 복사 영향의 강화를 유발시키며, 이 경우 언급한 복사의 광역전달성으로 내부유체는 단면에 걸쳐 전체적인 냉각이 이루어져 단면에서의 온도구배가 적고 이에 따라 전도열전달량은 상대적으로

로 더욱 줄어든다. 특성광학두께, τ_0 의 영향은 a 와 c 를 비교하면 알 수 있다. τ_0 의 증가는 매질이 복사에 대하여 더욱 민감해짐을 의미하며 이로 인하여 매질의 열방출 가능한 방사율(emittance)이 증가하게되어 매질은 더욱 빨리 식는다. 한편, 매질의 산란성이 증가하면, 즉 산란알베도, ω_0 가 증가하면 매질의 복사열 흡수도 감소하지만 방사량도 감소하여 냉각효율이 떨어지며, 이를 a 와 d 의 비교로 확인할 수 있다.

자세하고 정량적인 열전달효율을 고찰하기 위하여, 중심축 4위치 단면에서, 방위각 0에서 π 까지의 관벽의 온도와 대칭면에서의 온도분포를 각각 Fig. 3의 좌우에 도시하였다. 열적입구역($z=0.03$ 과 $z=0.186$)에서는 조합 b 의 경우 온도구배가 가장 적다. 이는 전도에 의한 열손실이 가장 적음을 의미한다. 그러나 열적발달이 거의 확립된 $z=1.601$ 에서의 전체 매질의 온도는 이 경우가 가장 낮다. 즉, 복사에 민감한 매질에서는 매질의 열손

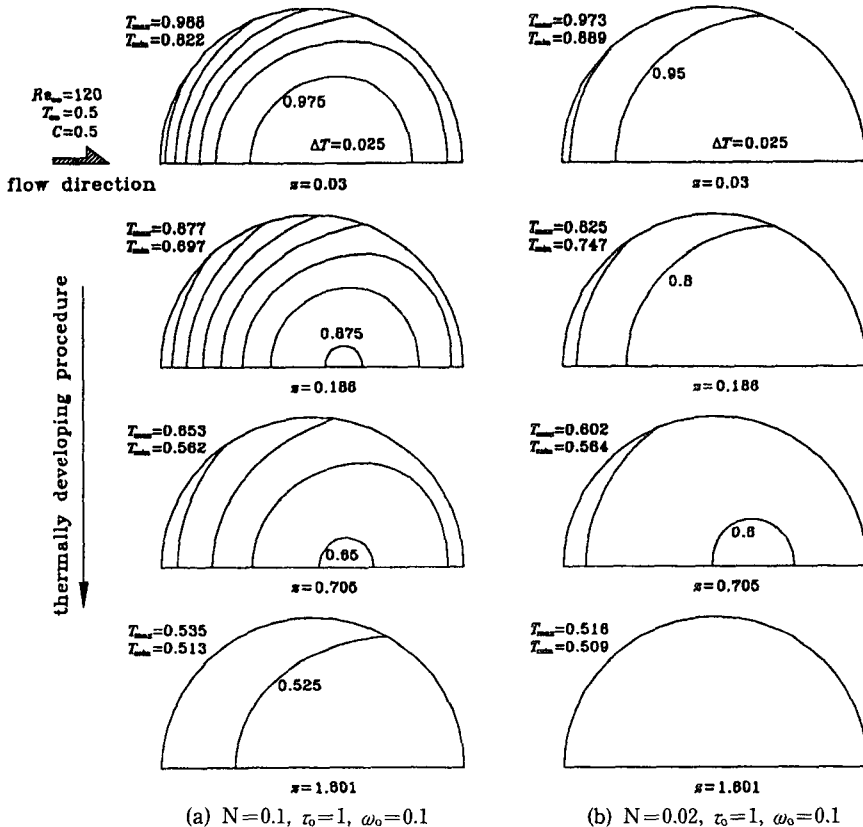


Fig. 2 Continued

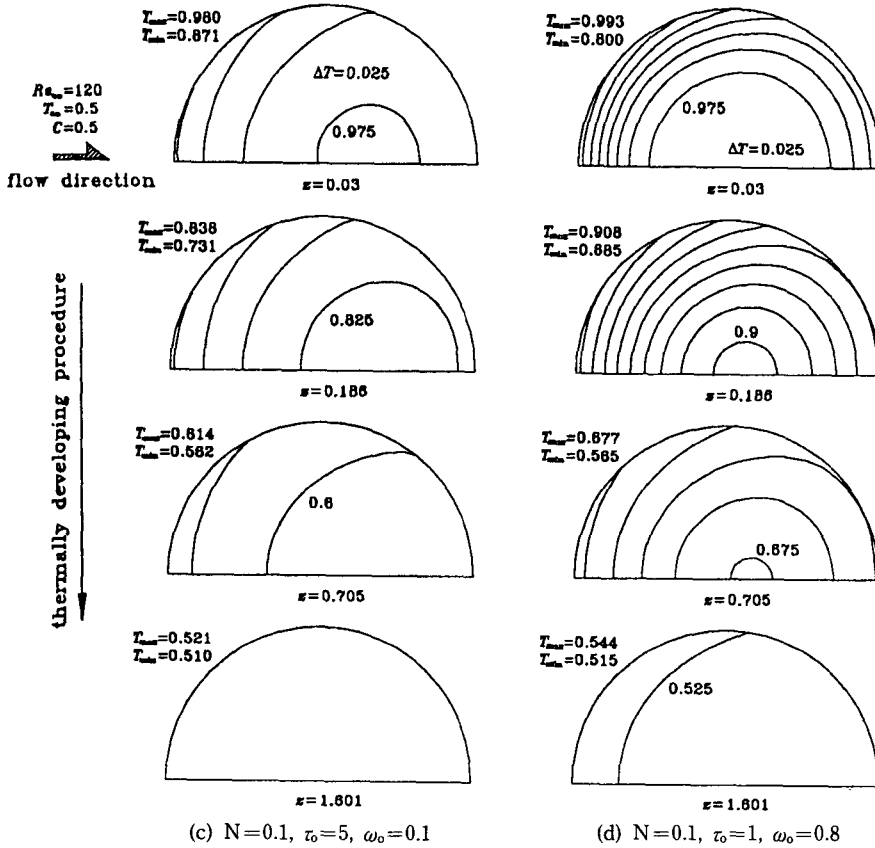


Fig. 2 Thermally developing isothermal contours

실이 주로 복사에 의하여 진행되므로 온도구배가 상대적으로 적어서 전도열손실을 더욱 감소시키지만, 매질은 여전히 복사의 광역열전달성에 의하여 벽면으로 직접적인 열방출을 하므로 냉각효율이 좋을 수 있다. 결과적으로 관내유체가 복사에 민감하게 참여하는 매질이면 매질의 복사방사율이 냉각효율을 지배하는 기본인자임을 확인할 수 있다. 모든 경우 벽면 근처에서는 매질의 지역광학두께가 작으므로 상대적으로 전도의 영향이 커서 온도구배가 급격함을 보여준다.

축방향 또는 유동방향의 열적발달에 따른 냉각율 및 열손실률을 고찰하기 위하여 식 (6)으로 정의한 혼합평균온도와 벽면의 평균온도를 Fig. 4에 도시하였다. 이미 고찰한 바와 같이 복사의 영향이 지배적일수록 냉각효율이 좋으므로 혼합평균온도도 이러한 경향을 보여준다. 그러나 벽면의 평균온도는 열적입구지역에서는 오히려 반대로 나타난다. 이것은 벽면근처에서는 지역광학두께가 얇아서 항

상 전도열전달이 지배적이므로 상대적으로 복사의 영향이 감소하기 때문이다. 모든 경우 대략 $z > 3$ 이면 매질의 온도는 관주위 횡류유동의 온도인 0.5로 수렴한다.

방위각에 따른 원관내벽으로의 전체 및 전도열유속 변화를 Fig. 5의 좌우에 각각 나타내었다. 열손실량은 횡류에 의한 Nusselt수의 분포에 따라 정체점에서 가장 크고 관표면을 따라 감소한 후 다소간 증가하는 경향을 보여준다. 매질이 복사에 민감한 b와 c의 경우 상류의 열적입구지역에서는 복사열유속이 전도열유속에 비하여 상대적으로 크다. 그러나 어느정도 냉각된 후 ($z=0.705$)에는 온도의 4승에 비례하는 매질의 복사열 방사의 능력이 감소되어 전체열손실은 전도의 지배를 받게 된다.

Fig. 6은 유동의 열적발달에 따른 전체 Nusselt 수, Nu^T 의 분포와 전체열전달에 대한 전도열전달의 비인 Nu^C/Nu^T 의 분포를 도시한 것으로, 복사에 가장 민감한 매질인 b의 경우 전체 발달과정을

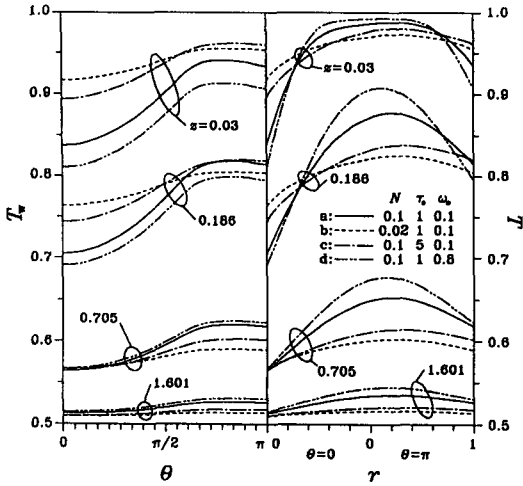


Fig. 3 Azimuthal variation of the wall temperature and radial temperature variation at $\theta=0$ and π

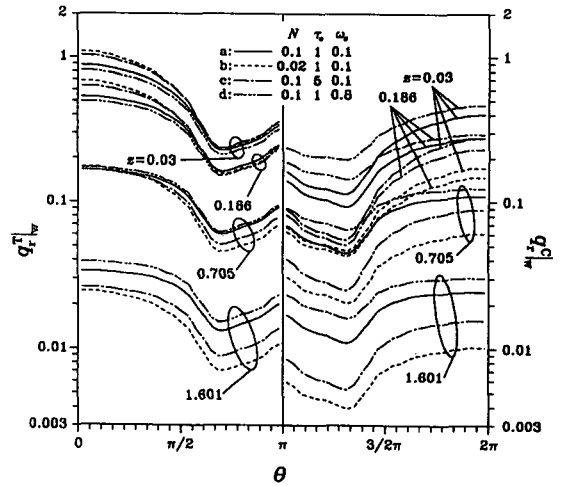


Fig. 5 Azimuthal variation of wall total as well as conductive heat fluxes at four different axial positions

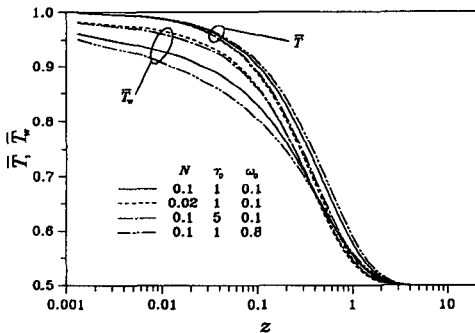


Fig. 4 Streamwise variation of mixed mean temperature and azimuthally averaged wall temperature

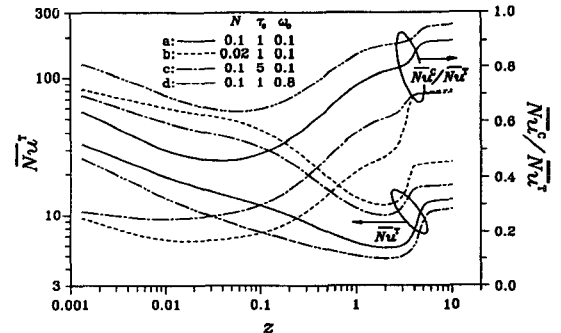


Fig. 6 Streamwise variation of the total mean Nusselt number and the ratio of conductive to total wall heat flux

통하여 Nu^T 가 가장 크다. 그러나 매질이 냉각됨에 따라 점차적으로 감소하며 식 (7)의 분모에 나타난 온도차의 감소율이 열손실률을 초과하면 Nu^T 는 다시 증가하고 완전히 발달하면 더 이상 변화하지 않는다. Nu^c/Nu^T 의 분포에서 볼 수 있듯이 냉각효율에 미치는 복사의 영향은 b인 경우 최대로 나타나고 d인 경우 최소로 나타난다. Nu^c/Nu^T 는 열적발달이 진행되며 벽면근처의 온도구배가 작아짐에 따라 감소하고, 언급한 바와 같이 냉각이 진행되어 매질의 복사열 방사의 능력이 감소되면 다시 증가하는 경향을 보인다. 이 후 더 이상의 뚜렷한 발달이 없으면 평편한 분포를 나타낸다. 산란의 영향이 큰 d의 경우 복사의 방사능력이 저하되어 전

도의 영향이 지배적이 된다.

4. 결론

수력학적으로 완전히 발달된 관내유동의 대류, 전도 및 복사에 의한 비축대칭 열적발달과정을 효율성과 정확성이 높은 구분중좌법으로 수치해석하였고, 효율적인 냉각에 미치는 복사의 영향을 고찰하기 위하여 전도-복사계수, 특성광학두께 및 산란알베도 등 세가지 복사관련 지표에 대한 매개변수 해석을 수행한 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

열적발달 초기에 생성되는 매질의 비축대칭적인

온도분포는 후류로 흐르며 다시 대칭성을 회복한다. 매질이 복사에 민감할수록, 즉 전도-복사계수가 작을 때나 특성광학두께가 클 때 복사의 광역전달효과로 인하여 냉각효율은 좋아지며 매질단면의 온도구배가 작아진다. 산란알베도가 크면 매질의 복사열 방출량이 줄어서 냉각이 지연된다. 열적발달 초기인 입구지역에서는 복사의 영향이 크지만 냉각이 진행되어 매질의 복사열 방사 가능성이 떨어지면 전체열손실은 전도의 주된 지배를 받는다.

참고문헌

- (1) Tamehiro, H., Echigo, R. and Hasegawa, S., 1973, "Radiative Heat Transfer by Flowing Multiphase Medium-Pt. III. an Analysis on Heat Transfer of Turbulent Flow in a Circular Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, No. 6, pp. 1199~1213.
- (2) Azad, F. A. and Modest, M. F., 1981, "Combined Radiation and Convection in Absorbing, Emitting and Anisotropically Scattering Gas-particulate Tube Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, No. 10, pp. 1681~1698.
- (3) Tabanfar, S. and Modest, M. F., 1987, "Combined Radiation and Convection in Absorbing, Emitting, Nongray Gas-particulate Tube Flow," *J. Heat Transfer*, Vol. 109, No. 2, pp. 478~484.
- (4) Chiou, J. S., 1992, "Combined Radiation-convection Heat Transfer in a Pipe," *J. Thermophysics*, Vol. 7, No. 1, pp. 178~180.
- (5) Huang, J. M. and Lin, J. D., 1991, "Radiation and Convection in Circular Pipe with Uniform Wall Heat Flux," *J. Thermophysics*, Vol. 5, No. 4, pp. 502~507.
- (6) Kim, T. Y. and Baek, S. W., 1992, "Axisymmetric Analysis of Thermally Developing Poiseuille Flow with Radiation," *3rd UK National Conference Incorporating 1st European Conference on Thermal Science*, Vol. 1, pp. 675~681.
- (7) Carlson, B. G. and Lathrop, K. D., 1968, "Transport Theory-the Method of Discrete Ordinates," In *Computing Methods in Reactor Physics* (Edited by H. Greenspan, C. N. Kelber and D. Okrent), pp. 165~266, Gordon & Breach Press, New York.
- (8) Fiveland, W. A., 1988, "Three-dimensional Radiative Heat-transfer Solutions by the Discrete-ordinates Method," *J. Thermophysics*, Vol. 2, No. 4, pp. 309~316.
- (9) Kim, T. Y. and Baek, S. W., 1991, "Analysis of Combined Conductive and Radiative Heat Transfer in a Two-dimensional Rectangular Enclosure Using the Discrete Ordinates Method," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 9, pp. 2265~2273.
- (10) Baek, S. W., Kim, T. Y. and Lee, J. S., 1993, "Transient Cooling of a Finite Cylindrical Medium in the Rarefied Cold Environment," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 16, pp. 3949~3956.
- (11) Jamaluddin, A. S. and Smith, P. J., 1992, "Discrete-ordinates Solution of Radiative Transfer Equation in Nonaxisymmetric Cylindrical Enclosure," *J. Thermophysics*, Vol. 6, No. 2, pp. 242~245.
- (12) Sparrow, E. M. and Cess, R. D., 1978, *Radiation Heat Transfer* (Augmented Ed), pp. 273~274, McGraw-Hill Press, Washington.
- (13) Eckert, E. R. G. and Soehngen, E., 1952, "Distribution of Heat Transfer Coefficients Around Circular Cylinders in Crossflow at Reynolds Numbers from 20 to 500," *J. Heat Transfer*, Vol. 74, pp. 343~347.