

〈論 文〉

# 원관내 유동에서의 복사 및 강제대류 열전달에 관한 연구

임승욱\* · 이준식\*\* · 이택식\*\*\*

(1990년 8월 2일 접수)

## Combined Radiation-Forced Convection in a Circular Tube Flow

Seung Wook Lim, Joon Sik Lee and Taik Sik Lee

**Key Words :** Spherical Harmonics Approximation(구조화 근사법), Radiative Heat Transfer (복사열전달), Weighted Sum of Gray Gases Model(회기체가중합산모델), Law of the Wall(벽법칙), Wall Emissivity(벽방사율), Optical Thickness(광학두께)

### Abstract

Combined radiative-convective heat transfer in a hot gas tube flow has been investigated numerically and experimentally. In the numerical analysis, a standard  $k-\epsilon$  model is used for the evaluation of turbulent shear stresses and spherical harmonics method with the Weighted Sum of Gray Gases Model for the solution of radiative transfer equation. In the experimental study measured are the velocity and temperature of the hot gas flow generated by the propane gas combustion, and tube wall heat flux distribution. Numerical results are compared with experimental ones and it is confirmed that P-3 provides quite reliable results in the analysis of the combined radiation-convection system.

### 기 호 설 명

$A$ : 기체가 점유하는 면적	$Nu_R$ : 복사누셀트수
$a$ : 흡수계수	$Nu_T$ : 전누셀트수
$C_{\epsilon 1}$ : $\epsilon$ 의 생성항 계수	$P$ : 평균압력
$C_{\epsilon 2}$ : $\epsilon$ 의 소멸항 계수	$Pr$ : 프란틀수
$C_\mu$ : 와류 확산률에 관련된 $k-\epsilon$ 모델 상수	$q$ : 열유속
$D_h$ : 수력직경 ( $2r_0$ )	$r$ : 반경방향좌표
$G$ : 난류운동에너지의 생성항	$r_0$ : 반경방향길이
$g$ : 중력가속도	$S$ : 이동방정식에서의 생성항 또는 빛의 경로
$h$ : 엔탈피	$T$ : 온도
$I$ : 복사강도	$T_b$ : 혼합평균온도
$k$ : 난류운동에너지 또는 열전도 계수	$U, u$ : $x$ 방향의 평균속도와 요동속도 성분
$L_m$ : 평균광로	$U_i, u_i$ : 속도벡터의 평균속도와 요동속도 성분
$Nu_C$ : 대류누셀트수	$V, v$ : $r$ 방향의 평균속도와 요동속도 성분
	$x$ : 축방향좌표
	$\delta$ : Kronecker 델타
	$\epsilon$ : 방사율 또는 난류운동에너지 소산률
	$\Gamma$ : 확산계수

\* 서울대학교 대학원

\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 명예회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- $\mu$  : 점성계수
- $\rho$  : 밀도

첨 자

- $r$  : 복사
- $b$  : 흑체
- $C$  : 대류
- $eff$  : 등가계수
- $f$  : 연료
- $i, j, k$  : 텐서성분
- $\bar{R}$  : 복사
- $t$  : 난류성분
- $w$  : 벽
- $z$  : 축방향
- $\epsilon$  : 방사율

2. 서 론

가스터빈 연소실, 사업용 로나 디젤엔진 같은 고온의 공학 시스템에서 대류와 복사의 동시작용을 고려하여 열전달률과 온도를 예측할 수 있는 방법이 개발되고 있다. 복사열전달을 해석하는 방법으로는 Monte Carlo 방법과 Zonal 방법이 많이 사용되고 있으나 이들은 유한차분법을 주로 사용하는 대류유동의 해석과 연계시키기가 용이하지 않으므로 최근에는  $k-N$ ,  $S-N$  등과 같은 미분형 근사방법이 사용되고 있다. Jeng과 Faeth<sup>(1)</sup>은 증류화산 화염에서의 복사특성에 대하여 프로판가스를 연료로 계산과 실험을 수행하였다. 계산시  $k-\epsilon-g$  난류 모델, Goddy statistical narrow-band 모델과 Curtis-Godson 근사식을 사용하여 속도, 온도, 가스농도 및 복사열유속에 대해 연구하였다. Jeng 등<sup>(2)</sup>은 부력효과가 있는 축대칭난류화산화염에서 난류요동성분이 비발광복사물성치에 미치는 영향에 관해 mean property 방법을 사용하여 연구하였으며 Hutchinson 등<sup>(3)</sup>은 축대칭 원통형 연소실에서 질량평균  $k-\epsilon$  모델과 4유속근사법(four flux method) 및 DeMarco-Lockwood 유속근사법을 사용한 수치해석적 결과와 실험치를 비교하여, 밀도-속도 관계와 난류요동성분 처리에 따른 열유속의 차이는 무시할 수 있다고 하였다. Nakra와 Smith<sup>(4)</sup>는 등온의 원관내 유동에서 입구와 출구를 그 위치에서의 가스온도와 같은 가상의 흑체벽으로 가정하여, Zonal 방법과 Weighted Sum of Gray Gases Model

을 사용하여 온도분포 및 벽면열유속을 계산하였으며, Razavi와 Gupta<sup>(5)</sup>는 발전용 보일러를 대상으로 하여 복사매질을 공기로 보고, 모든 물성치를 온도의 함수로 가정하여  $k-\epsilon$  모델, 대수응력 모델 및 유속근사법을 사용하여 속도장과 온도장에 대해 수치해석적으로 연구하였다.

본 연구에서는 원관내에서 복사에 관여하는 고온의 가스유동에 의한 복사열전달과 대류열전달간의 상호작용에 대해 실험과 수치해석을 통하여 고찰하고자 한다. 실험으로는 프로판가스의 화염생성에 의한 속도, 온도 및 벽면에서의 열유속분포를 측정하고, 수치적으로는 냉염(cold flame) 상태에서 측정된 난류요동성분과 연소시의 입구속도와 온도를 초기조건으로 하여 밀도와 점성계수의 온도에 따른 변화를 고려한  $k-\epsilon$  모델과 구조화근사법<sup>(6)</sup> 및 최근에 개발되어 사용되기 시작한 Weighted Sum of Gray Gases 모델<sup>(7)</sup>을 사용하여 속도, 온도 및 열유속 분포를 계산하여 수치해석의 결과와 실험결과를 비교함으로써 모델의 타당성을 검증하고, 복사에 의한 열전달량과 대류에 의한 열전달량을 분리하여 각 모드가 온도분포 및 열유속분포에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 수치해석적 연구

실제 연소실은 노즐로부터 화염이 분출되는 돌연확대관 구조를 가지나, 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 노즐의 상류를 시험체적으로 하여 동질의 고온 가스가 유입되는 수직 원관으로 단순화하였으며 유동장내에서 화학반응은 일어나지 않고 가스는 전유동장에 균일하게 섞여 있으며, 밀도와 점성계수는 온도의 함수이며 유연(soot)은 생성되지 않는다고 가정하였다. 또한 혼합대류 효과를 나타내는  $Gr/Re^2$ 가 10이하인 경우에 부력효과는 무시할 수 있으므로, 본 연구에서 부력효과는 무시한다.

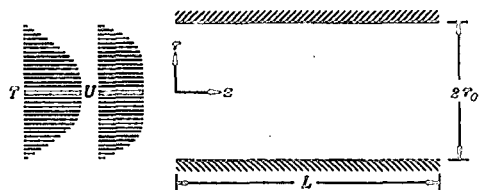


Fig. 1 Calculation domain and coordinate system

Table 1 Coefficients in  $k-\epsilon$  model

Symbol	Value	Basis for determination
$c_\mu$	0.09	Equilibrium shear layer
$c_{\epsilon_1}$	1.44	Boundary layer
$c_{\epsilon_2}$	1.92	Homogeneous flow
$\sigma_k$	1.0	Computer optimization
$\sigma_\epsilon$	1.3	Computer optimization

2.1 난류유동 지배방정식

비압축성 2차원 정상 난류유동의 지배방정식은 다음과 같다<sup>(8)</sup>.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] + S_i \tag{2}$$

$k-\epsilon$  모델을 도입하면  $\overline{u_i u_j}$ 를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{3}$$

여기서 난류점성계수  $\mu_t$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

레이놀즈수가 충분히 커서 난류점성계수가 국소 등방성(local isotropy)이라고 가정하면, 난류운동 에너지  $k$ 와 소산률  $\epsilon$ 에 대한 이동 방정식들은 Navier-Stokes 방정식으로부터 적절한 모델링을 거치면 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(9)</sup>.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = G - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon_1} G - C_{\epsilon_2} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \tag{6}$$

여기서  $\mu_{eff} = \mu_t + \mu$ 이며, 생성항  $G$ 는 다음과 같다.

$$G = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{7}$$

위에서 사용된 상수는 Table 1에 표시하였다.

2.2 에너지방정식

비압축성 2차원 정상 난류유동에 대한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_{eff} \frac{\partial h}{\partial x_j}) - \nabla \cdot q^r \tag{8}$$

$$\Gamma_{eff} = \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \tag{9}$$

여기서  $\nabla \cdot q^r$ 은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot q^r = 4\pi a I_b [T(r, x)] - a I_b(r, x) \tag{10}$$

$I_b$ 는 복사전달방정식을 2차원으로 구조화근사하여 얻어지는 P-1 및 P-3 근사식으로부터 구하며, 이 근사식에 대해서 참고문헌 (10)에 나타나 있다. 복사에 의한 생성항은 온도의 4승항을 포함하고 있는 비선형 형태이므로 수치해를 안정적으로 수립시키기 위하여 다음의 방법을 사용하여 선형화하였다<sup>(11)</sup>.

$$S = S^* + \left( \frac{dS}{dT} \right)^* (T_r - T_r^*) \tag{11}$$

온도장과 열유속 분포로부터 공학적 비교수치인 누셀트수는 다음과 같이 정의한다<sup>(12)</sup>.

$$Nu_T = -\frac{q_w(x, r=r_0) \cdot D_h}{k(T_w - T_b)} = Nu_c + Nu_R \tag{12}$$

$$Nu_c = -\frac{q_{c,w} \cdot D_h}{k(T_w - T_b)} \tag{13}$$

$$Nu_R = -\frac{q_{R,w} \cdot D_h}{k(T_w - T_b)} \tag{14}$$

여기서 혼합평균온도  $T_b$ 는 다음과 같다.

$$T_w - T_b = \frac{\int_0^{r_0} U(T_w - T) r dr}{\int_0^{r_0} U r dr} \tag{15}$$

2.3 복사물성치

연소생성물의 복사물성치는 Smith등<sup>(7)</sup>의 Weighted Sum of Gray Gases Model을 사용하여 구하였다. 연소생성물을 이산화탄소, 수증기 및 질소가스 와 이들의 혼합물로 보면 전방사율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \sum_{i=0}^I a_{\epsilon,i}(T) [1 - e^{-h_i PS}] \tag{16}$$

$$a_{\epsilon,0} = 1 - \sum_{i=1}^I a_{\epsilon,i} \tag{17}$$

$$a_{\epsilon,i} = \sum_{j=1}^J b_{\epsilon,i,j} T^{j-1} \tag{18}$$

여기서  $b_{\epsilon,i,j}$ 는 다항계수이고,  $a_{\epsilon,i}$ 는 가중치이며  $PS$ 는 분압과 경로의 곱이고,  $k_i$ 는  $I$ 가스의 흡수계수이다. 여기서 구한  $\epsilon$ 을 다음식에 대입하여 계산에 필요한 물성치를 얻는다.

$$\epsilon = 1 - \exp(-\beta \cdot L_m) \tag{19}$$

여기서  $L_m$ 은 빛의 평균광로(mean beam length)로서 다음과 같이 근사된다.

Table 2 Polynomial coefficients

Coeff.	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity (kg/m · s)
A <sub>0</sub>	2.7521	7.7978E-06
A <sub>1</sub>	-7.6107E-03	2.1527E-08
A <sub>2</sub>	8.2728E-06	8.6434E-11
A <sub>3</sub>	-1.5834E-09	-1.4265E-13
A <sub>4</sub>	-1.7983E-12	7.1652E-17

$$L_m = 3.6V/A \quad (20)$$

여기서  $V$ 는 가스가 차지하고 있는 체적이고  $A$ 는 가스와 접하고 있는 면적에 해당한다. 가정에서 유연의 생성을 배제하였으며 산란을 무시하면

$$\epsilon = 1 - \exp(-aL_m) \quad (21)$$

이므로 여기서 흡수계수  $a$ 를 계산할 수 있다. 한편 본 계산에 필요한 물성치  $\rho$ ,  $\mu$  등은 연소가스를 공기로 취급하여 공기의 물성치로부터 최소자승법 (least square method)을 사용하여 Table 2와 같이 온도의 함수로 가정하였다.

### 2.4 경계조건

Fig. 1에 나타난 계산영역에 대해 각 경계면에서의 경계조건을 표시하면 다음과 같다. 입구에서의 조건은 실험에서 얻은 결과 이용하였으며, 여기서 필요한 물리량은  $u, U, T, k, \epsilon$ 으로  $u, U, T$ 는 측정치를 이용하였고 유입난류에너지는  $k = (3/2)\overline{u^2}$ 으로부터 구하였으며, 유입소산률은  $\epsilon = C_\mu \cdot k^{3/2}/l$ 로 하였다. 출구에서  $U$ 는 질량보존법칙을 만족하도록 하였으며  $T$ 와  $V$ 는 유동방향으로의 구배가 0인 Neumann 조건을 사용하였고  $r=0$ 인 중심선에 대해서는 대칭조건을 사용하였다. 한편 고체 벽근처에서는 국소 레이놀즈수가 매우 작아 점성효과가 난류효과를 압도하므로 이 영역에서 정확한 운동량 방정식을 해석하려면 무한 수의격자가 필요하므로, 고체면에서는 점착조건을 벽근처에서 1차원 Couette 유동으로 가정하여 벽법칙 (law of the wall)을 적용하였으며, 벽근처에서 난류에너지의 생성과 소산률은 평형을 유지하는 것으로 가정하였다.

한편 복사방정식의 경계조건으로는, 입구에서는 유입유체와 같은 온도를 갖고 출구에서는 외기와 같은 온도를 갖는 흑체벽으로 가정하였으며, 유동

장을 풀 때와는 달리 시험체적의 하류( $x/r_0 > 10.0$ )에서의 벽면은 대기온도를 갖는 흑체벽으로 하여 시험체적과 대기와의 복사열교환으로 가정하였다.

### 2.5 수치해석

본 연구에서 유동장의 해석은 TEACH-2E code<sup>(9)</sup>를 기본으로 사용하였다. 격자계는 엇물림 격자계 (staggered grid system)를 사용하였으며, 수치해석 방법으로는 연속방정식, 운동량 방정식으로부터 압력을 수정하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 유동이 거의 모든 영역에서 평행류이므로 대류항에 대해서는 hybrid scheme을 사용하였고 각 방정식의 해법에는 TDMA를 사용하는 line-by-line 방법을 사용하였으며 수치해석의 순서는 다음과 같다.

(i) 입구, 경계 및 전체 유동장에서 속도 및 다른 물리량들을 가정하거나, 이전 단계에서 얻어진 값을 받아 들인다.

(ii) 주어진 경계조건하에서  $U, V$ 의 운동량 방정식을 푼다.

(iii) 구해진 속도장으로 연속 방정식이 만족되도록 보정압력을 구한 후 속도를 보정한다.

(iv)  $k, \epsilon$ 에 대한 차분 방정식을 푼다.

(v) 복사효과를 고려한 에너지 방정식을 푼다.

(vi) 위에서 구한 물리량들로 부터 점성계수등 유동물성치들을 다시 구한다.

(vii) 구해진 온도장으로 복사전달방정식을 푼다.

수렴이 될때까지 (i)~(vii)을 반복 수행한다.

각각의 방정식을 풀 때 under-relaxation을 사용하였으며, 수렴조건은 다음과 같다.

$$\text{MAX} \left| \frac{\phi - \phi^*}{\phi} \right| < 10^{-3}$$

### 3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2는 공기에열실, 연료 및 공기 공급장치와 연소실로 구성된 실험장치의 개략도이다. 공기에열실은 450mm×450mm×700mm의 사각 철판구조물로서 송풍기로부터 들어온 공기의 맥동을 완화시키고, 또한 내부에 1kW 전열선이 4개 있어 유입공기의 온도를 상승시켜 송풍공기로 인한 연소가스 온도의 하강을 줄인다. 가열된 공기의 온도는 C.A.형 열전대로 측정하였다. 연료노즐은 내경 4.3mm

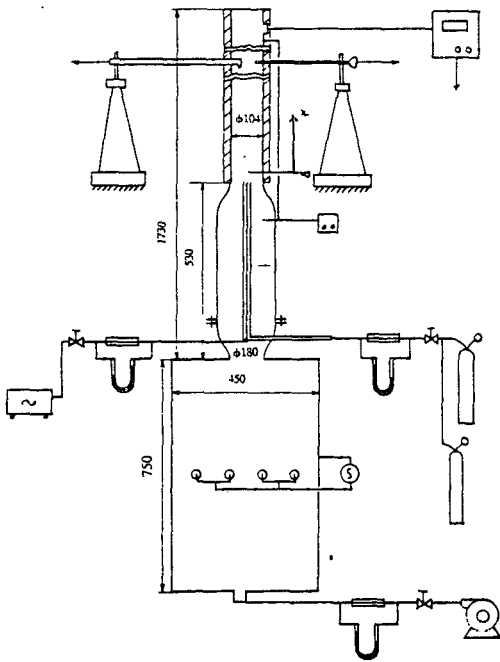


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

두께 0.8mm의 원형 구리관과 내경 12mm 두께 3.8mm의 원형 구리관이 동심으로 설치되어 두개의 동심 원관사이(간격 3mm)로 연료가 공급되는 구조로 이 연료노즐은 출구직경 180mm의 강관에 동심으로 설치되어 있다. 연료노즐 외측의 유동을 외부유동, 연료노즐 중심축 유동을 내부유동이라고

칭하면 외부공기는 송풍기로부터 오리피스를 통하여 공기 예열실에서 52℃로 가열되어 일정속도  $U_0 = 4\text{m/s}$ 로 공급되고 내부공기는 압축기에서 만들어진 압축공기가 오리피스를 통하여  $U_i = 10\text{m/s}$ 로 공급된다. 연료는 프로판가스로 가스통에서 오리피스를 통하여  $U_f = 0.8\text{m/s}$ 로 공급된다. 연소실은 내경 104mm 두께 4mm의 강관으로 만들어졌으며 전체 높이는 연료노즐로부터 1200mm이며, 시험체적은 노즐 상류 500mm부터이다. 시험체적은 높이 100mm의 강관에 피토관 통과용 구멍을 내었고, 벽온도를 측정하기 위해 C.A.형 열전대를 부착하였으며, 열유속센서는 동일크기의 다른 강관에 부착하여, 구멍이 없는 동일 크기의 강관과 서로 교체시키면서 끼워 맞춤으로써 구멍이 있는 강관 1개로 전 시험체적에 걸쳐 측정이 가능토록 하였다. 모든 강관은 두께 25mm의 유리섬유로 단열시켜 외부 공기와 열교환을 줄여서 외부 공기변동에 의한 내부의 온도와 열유속 변동을 감소시켰다. 수치해석을 위한 초기조건 설정을 위해, 프로판 가스의 대용으로 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 비 연소시의 유동장의 속도 및 난류 유동성분을 측정하였으며, 측정계기는 정온형 열선유속계(Kanomax, 21-1911)를 사용하였다. 연소시의 연소가스 속도와 온도측정에는 C.A.형 열전대가 부착된 3공 피토관(United Sensor, CT-156-C/A), 벽면 열유속 측정에는 Heat Flux Transducer(Medtherm Corp.)를 사용하였다. 측정기기는 스캐니밸브(Scanivalve model 5), 신호분석기(Iwatsuk SM-21008), Heat Flux Meter(Medtherm, H

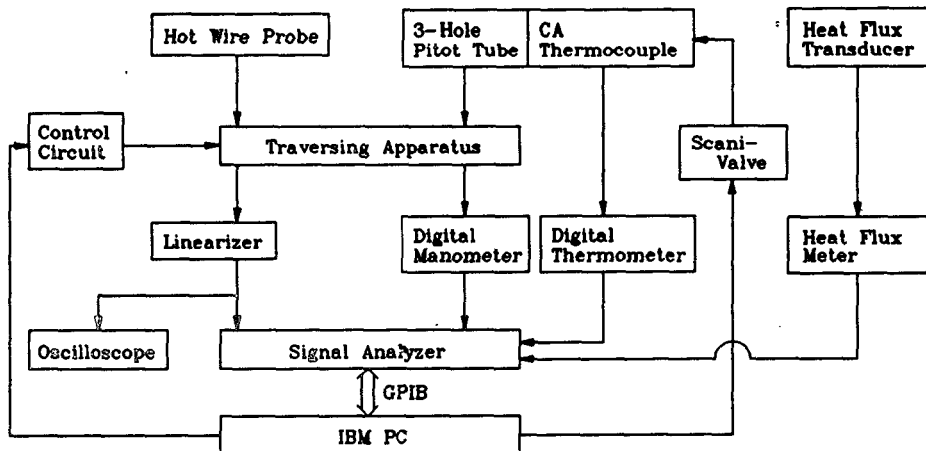


Fig. 3 Block diagram of data acquisition system

-201), 계수형 전압계(METEX 8215), 컴퓨터로 제어되는 이송장치 그리고 마이크로 컴퓨터등으로 구성되어 있다. 자료처리 장치의 구성은 Fig. 3과 같다.

4. 결과 및 검토

실측한 복사열유속을 계산치와 비교하기 위한 수치해석 입력조건은 다음과 같다. 매질의 광학두께는 Weighted Sum of Gray Gases Model을 사용하여 1.596을 취하였고, 벽면의 방사율은 열복사방사계를 사용하여 0.25임을 알았다. 또한 각 측정위치 사이에서의 온도는 두 위치에서의 값으로부터 선형 보간법으로 구하였다.

4.1 복사열유속

Fig. 5는 강제대류가 없는 경우에 고온의 연소가스가 Fig. 4와 같은 온도분포를 가질 때 벽면에 전달되는 복사열유속을 나타내고 있다. 화염에서 멀어짐에 따라 복사열유속이 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있는데, 이는 고온가스의 이동방향에 따라 매질간의 복사열교환이 원활히 이루어지고 또한 벽면의 방사율이 작아서 매질로부터 오는 복사열을 적게 흡수하고 매질로 반사하는 양이 크므로 벽면에 전달되는 열량은 점점 감소하게 되는 것을

의미하게 된다. 이러한 복사열교환으로 인하여 온도분포는 복사가 없는 경우와는 달리 온도 경계층을 발달시키지 못하고 매질간의 온도차가 줄어들어 온도구배가 완만하게 된다. 구조화근사식의 결과와 비교하면, 출구근처를 제외하고는 비교적 잘 일치하며 P-1근사가 다소 높은 값을 보이고 있다. 출구에서의 오차가 크게 나타난 것은, 실측시는 외기

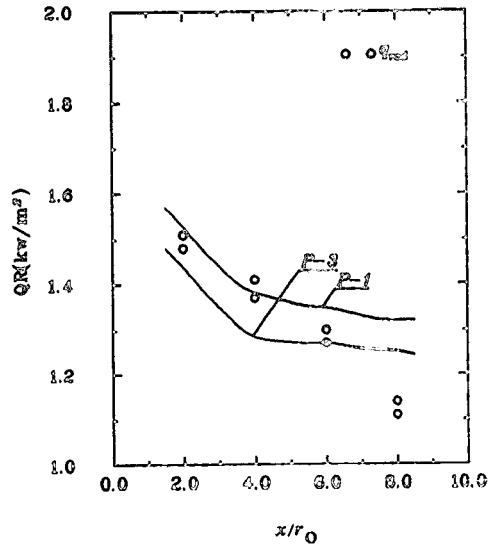


Fig. 5 Measured and calculated radiative wall heat flux without forced convection

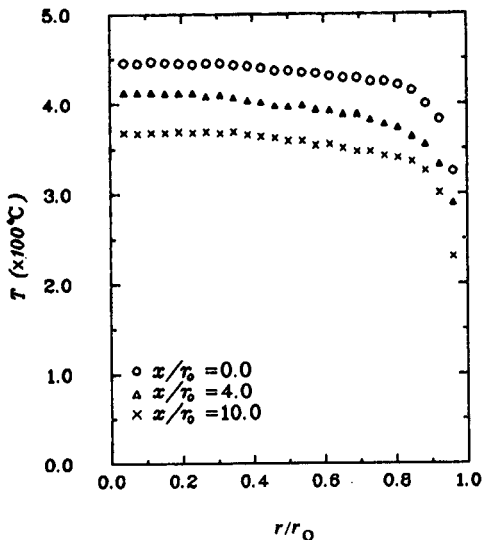


Fig. 4 Measured temperature profile without forced convection

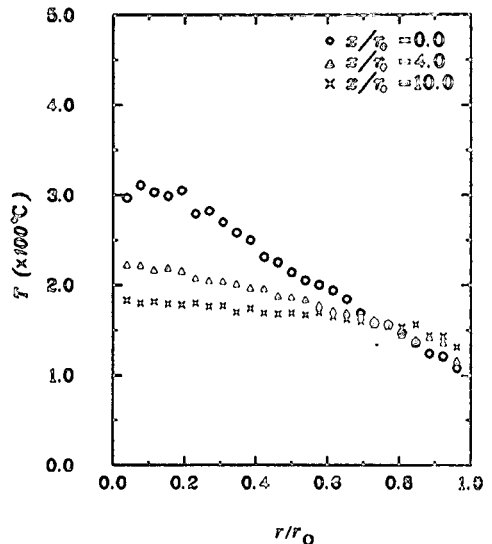
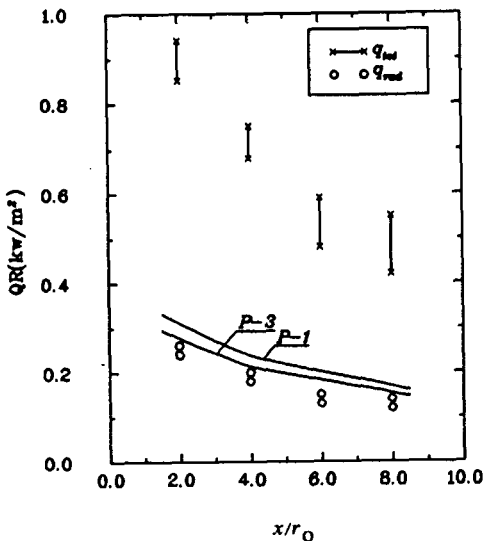


Fig. 6 Measured temperature profile with forced convection

**Table 3** nusselt number along the axial direction

$x/R$	$Nu_c$	$Nu_R$	$Nu_T$	$T_b - T_w$
2.0	23.3-26	9.2-9.9	32.5-35.9	74
4.0	22.3-24.5	8.0-8.9	30.3-33.4	64
6.0	18.8-23.1	6.8-7.9	25.6-31.0	55
8.0	19.0-25.9	7.6-8.9	26.6-34.8	46

와의 온도차(300°C)가 커서 매질로부터의 복사열손실이 매우 크나 계산에서는 이 점을 고려해 주지 못하기 때문이다. Fig. 7은 강제대류가 있는 경우에 Fig. 6과 같은 온도분포를 갖는 매질에 의해 벽면에 전달되는 복사열유속과 전열유속(total heat flux)을 나타내고 있다. 가스가 유동함에 따라 매질과 매질사이, 매질과 벽과의 복사열교환에 의해 온도장이 발달되지 못하고 매질간의 온도차가 작아짐을 볼 수 있으며, 또한 벽면에 전달되는 열량이 감소함을 알 수 있다. P-3근사해가 P-1근사해보다 실측치와 잘 일치하고 있으며 Fig. 5에서와는 달리 출구 근처에서의 차이가 작은 것은 외기와와의 온도차가 작아 상대적인 복사열전달량이 작기 때문이다. 하류로 갈수록 복사열전달의 감소와 함께 대류열전달량도 감소하여 전열유속이 감소하게 되는데 Table 3에서 보는 바와 같이 하류로 갈수록  $T_w - T_b$ 는 감소하여 이에 따라 열전도 계수는 감소하

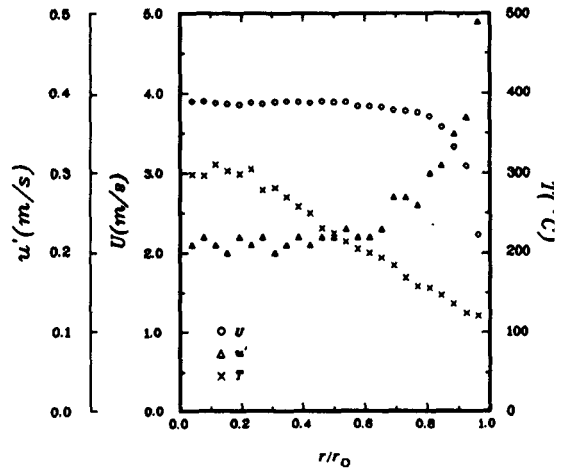


**Fig. 7** Measured and calculated radiative wall heat flux with forced convection

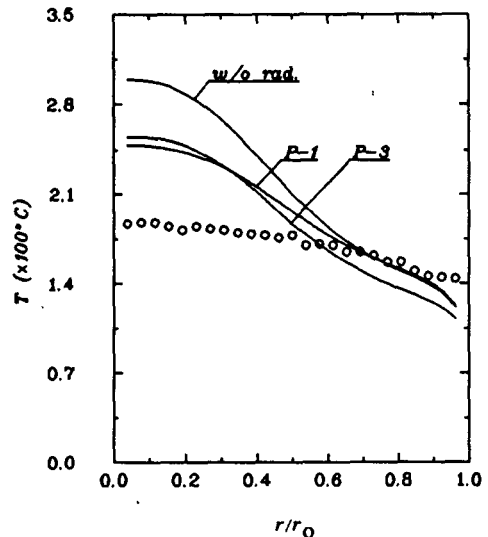
나 이들의 감소율보다 열전달량의 감소율이 커서 누셀트수는 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

**4.2 유동속도 및 온도**

본 계산에서 밀도와 점성계수는 온도의 함수이므로 속도장과 온도장은 동시에 해석을 하여야 각각의 변화에 대한 정확한 해석이 가능하다. Fig. 9의 Fig. 10은 Fig. 8과 같은 초기조건을 사용했을 때



**Fig. 8** Measured temperature and velocity profile at inlet position ( $x/r_0=0.0$ )



**Fig. 9** Measured and calculated temperature profile at outlet position ( $x/r_0=10.0$ )

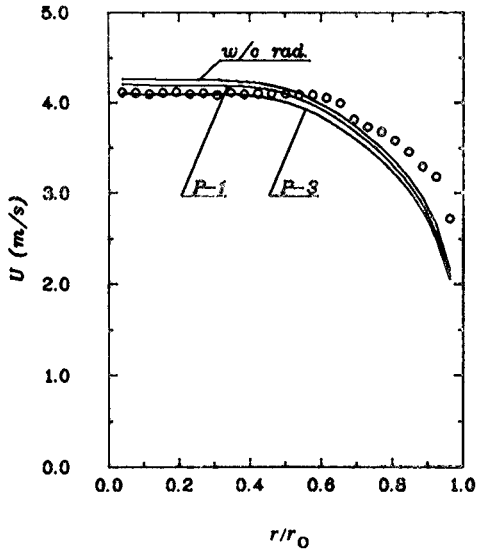


Fig. 10 Measured and calculated velocity profile at outlet position ( $x/r_0=10.0$ )

$x/r_0=10.0$ 인 단면에서의 수치해석 결과와 실험치의 비교를 나타내고 있다. 속도의 경우 중간단면에서의 변화는 차이를 표시하기에 작으므로 출구에서의 값만 비교하였으며, 온도의 경우는 중간단계에서 변화는 크나 속도와 연관시켜 해석하기 위하여 동일장소에서의 값만 비교하였다. 먼저 Fig. 9의 온도분포를 보면 P-1과 P-3 근사해가 서로 비슷한 값을 가지면서 실측과 복사열전달이 없는 경우의 온도와의 중간 값을 나타내고 있다. 대류만에 의한 열전달 결과보다 매질내의 가스온도가 현저히 감소하고 있어 복사의 효과가 크게 작용하고 있음을 알 수 있으나, 실측치와의 오차가 발생한 것은 실험시 외부로의 열손실을 줄이기 위해 단열재를 사용하였으나 실제로는 충분한 효과를 내지 못해 벽면을 통한 열손실로 인하여 온도하강이 증대하였기 때문이다. 내부에서는 실측보다 온도가 높아 밀도가 낮은 값을 가지며 벽근처에서는 반대 경향을 보이므로 질량을 보존시키기 위해서 속도분포가 Fig. 10에서와 같이 내부에서는 실측보다 높고 벽근처에서는 낮은 결과를 보이고 있다.

### 5. 결 론

복사전달방정식의 미분형 근사해법인 구조화근사식(P-1 및 P-3)을  $k-\epsilon$ 난류모델에 연계시켜 속

도, 온도 및 벽면열유속 분포를 수치계산하여 실험치와 비교함으로써 다음의 결론을 얻었다.

(1) 복사 및 대류가 연계된 열전달해석에 있어서 구조화근사식을 이용하여 신빙성있는 결과를 얻을 수 있었으며 특히 실측한 온도분포를 이용한 벽면에서의 복사열유속의 예측은 실험 결과와 잘 일치하였다. 그러나, 온도분포에 있어서는 계산결과가 높은 값을 보이는데 이는 실험시 불완전한 단열로 벽면을 통한 열손실에 기인한다.

(2) 벽면에서의 복사열유속 계산에는 P-3 근사식이 P-1근사식보다 정확하므로 매질의 온도분포와 복사물성치에 대한 정보가 있으면 P-3근사식에 의한 복사열전달 예측이 가능하다. 그러나 정성적인 예측이나 그 상한값을 알기 위해서는 P-1근사식도 이용이 가능하다.

(3) 본 실험의 온도조건( $120^{\circ}\text{C} \sim 310^{\circ}\text{C}$ )에서 벽면에서의 복사열유속이 전열유속의 25%~30%를 차지하므로 고온의 가스가 유동하는 시스템에 대한 열전달해석시 복사효과와 물성치의 온도에 따른 변화를 고려하여야 한다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구의 일부로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Jeng, S. M., and Faeth, G. M., 1984, "Prediction of Mass Scalar Properties in Turbulent Propane Diffusion Flames", ASME, J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 891~893.
- (2) Jeng, S. M., Lai, M. C. and Faeth, G. M., 1984, "Nonluminous Radiation in Turbulent Buoyant Axisymmetric Flames", Combustion Science and Technology, Vol. 40, pp.41~53.
- (3) Hutchinson, P., Khalil, E. E. and Whitelaw, J. H., 1977, "Measurement and Calculation of Furnace-Flow Properties", J. Energy, Vol.1, No.4, pp. 212~219.
- (4) Nakra, N. K. and Smith, T. F., 1977, "Combined Radiation-Convection for a Real Gas", ASME, J. Heat Transfer, pp.60~65.
- (5) Modarres-Razavi, M. R. and Gupta, A. K., 1987, "Numerical Simulation of Flow and Combustion



- Phenomena in a Power Plant Boiler", 24th National Heat Transfer Conference.
- (6) 서인수, 손종관, 임승욱, 이준식, 1988, "복사에 관여하는 유한원통형 매질에서의 복사열전달", 대한기계학회논문집, 제12권, 제6호, pp.1428~1437.
- (7) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model", ASME, J. Heat Transfer, Vol. 104, pp.602~608.
- (8) Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1980, "Convective Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill.
- (9) Gosman, A. D., Ideriah, F. J. K. and Arnal, M. P., 1983, "TEACH-2E : A General Computer Program for Two-Dimensional, Turbulent, Recirculating Flows", Rep. FM-83-2, University of California Berkely.
- (10) 임승욱, 1989, 복사가 관여하는 매질의 원관내 유동에서의 열전달에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교, 기계공학과.
- (11) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill.
- (12) Wassel, A. T. and Edwards, D. K., 1976, "Molecular Gas Radiation in a Laminar or Turbulent Pipe Flow", ASME, J. Heat Transfer, pp. 101~107.