

## 천장개구부를 갖는 정사각형 밀폐공간내의 자연대류-복사 열전달에 관한 연구

박찬국 · 추병길\* · 김 철\*\* · 정재환

전남대학교 기계공학과

순천공업전문대학 산업안전과\* · 차량기계과\*\*

(1998년 3월 19일 접수, 1998년 3월 27일 채택)

## A Study on the natural Convection and Radiation in a Rectangular Enclosure with Ceiling Vent

Park, Chan-kuk · Chu, Byeong-gil\* · Kim, chol\*\* and Jung, Jai-hwan

*Dept. of Mechanical Engineering, Chonnam University, Kwangju, Korea*

*\*Dept. of Industrial Safety, Suncheon Junior College, Suncheon, Korea*

*\*\*Dept. of Transportation & Machinery, Suncheon Junior College, Korea*

(Received 19 March, 1998;-accepted 27 March 1998)

### 요 약

본 연구에서는 20% 천장개구부가 있는 정사각형 밀폐공간내의 순수자연대류와 자연대류-복사가 고려된 복합열전달을 수치해석과 실험을 통하여 비교 분석하였다. 수치해석은 순수자연대류에 대하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 복사열전달에 대해서는 S-N 구분종좌표법을 이용하였으며 난류유동의 경계조건은 벽함수를 적용하였다. 실험은 수치해석의 결과와 비교하기 위하여 동일한 조건에 대하여 수행되었다. 그 결과 순수자연대류와 복합열전달의 유동장, 온도장의 형상은 유사한 유선함수를 보이고 있으며, 유동가시화를 통한 실험결과와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 수치해석과 실험의 온도분포를 비교한 결과 평균 8.5%의 오차를 보였다.

**Abstract** - This study investigated the natural convection and radiation in a rectangular enclosure with ceiling vent experimentally and numerically. A heat source is located on the center of the bottom surface. The analysis was performed a pure convection and is combination of natural convection and radiation. The shape of the considered two dimensional model is a square whose center of ceiling(30%) is opened.

The numerical simulations are carried out for the pure natural convection case and the combined heat transfer case by using the SIMPLE algorithm. For the turbulent flow, Reynolds stresses are closed by the standard  $k-\epsilon$  model and the wall function is used to determine the wall boundary conditions. The experiment was performed on the same geometrical shape as the computations. The radiative heat transfer is analyzed by the S-N discrete ordinates method. The results of pure natural convection are compared with those of combined heat transfer by the velocity vectors, stream lines, isothermal lines.

The results obtained are as follows

1. Comparing the results of pure convection with those of the combined convection - radiation through the shape of stream lines, isothermal lines are similar to each other.
2. The temperature fields obtained by numerical method are compared to those obtained by experimental one, and it is found that they are showed mean relative error 8.5%.
3. Visualization bt smoke is similar to computational results.

**Key words** : Standard  $k-\epsilon$  model, S-N discrete ordinates method, Pure natural convection, Combined heat transfer,

## 1. 서 론

밀폐 사각공간내에서의 복합열전달은 공학적인 중요성 때문에 많은 연구자들에 의해서 과거 수십년간 관심의 대상이 되었다. 이러한 복합열전달은 태양에너지 집열장치, 원자로, 건축물 등의 냉난방 에너지이용, 화재의 예방, 연기의 유동 등의 많은 부분에서 복합열전달의 응용을 찾아볼 수 있다. 이처럼 에너지 시스템들은 전도-대류-복사현상이 복합적으로 관련되어 열이 전달되기 때문에 안전하고 효율이 좋은 시스템을 위해서는 정확한 복합열전달 현상을 이해하여야 한다. 그러나 복합열전달과 관련된 응용분야가 공학적으로 광범위하게 분포되어 있음에도 불구하고, 그 동안 국내 연구는 단순모델인 정사각형 밀폐공간을 중심으로 복사열전달을 고려하지 않은 자연대류 위주로 한 연구가 대부분이었다. 본 연구에서는 복사열전달을 고려한 자연대류, 난류 유동현상을 해석하기 위하여 천장 중앙부가 열린 정사각형 밀폐공간에 대하여 수치해석과 실험을 통하여 해석하였다. 본 연구에서 채택한 시험모델은 지하공간의 환기구 등 건축설계에서 찾을 수 있으며, 또한 화재실에 가득찬 연기를 배출하기 위하여 소방관에 의해서 비상시 만들어지기도 한다. 해석하고자 하는 시스템은 공간내의 매질이 발열체에 의하여 가열할 때 발생하는 부력 효과에 의하여 나타나는 난류자연대류-복사의 복합열전달을 CCRHT<sup>2-D</sup>프로그램의 수행과 실험을 통하여 해석하였다. 시스템내 유체는 열복사를 흡수, 방출함으로써 가열된다. 복사열전달 해석은 복사열전달 방정식을 비교적 정확하게 해석할 수 있는 S-N 구분종좌표법(discrete ordinates method)을 이용하여 복사에너지의 효과를 파악하고자 하였다. 난류 레이놀즈 응력의 해석은 표준  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 해석하였으며, 대류 지배방정식의 해는

SIMPLE(Semi-implicit for pressure-linked equation)알고리즘을 이용하여 구하였다. 이러한 해석모델에 대하여 시스템 내부의 열전달을 순수 자연대류와 복사가 고려된 대류 현상으로 나누어 유동장 및 온도장,  $x$ -거리에 따른 온도분포를 연구하였다. 복사열전달에 대해서는 산란율은 무시하였다. 실험결과에 대하여는 수치모델과 동일한 시험체적을 제작하여 가시화를 실시하였으며, 그 유동을 수치해석과 비교하고, 열전달을 이용하여  $x$ -거리에 따른 온도를 측정하여 측정된 결과를 수치해석과 비교검토했다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석

### 2.1. 연구 모델

본 연구는 복합열전달에 대한 천장 개구부가 있는 2차원 밀폐공간 내에서의 열전달 및 유동 특성에 대한 연구이다. 수치해석과 실험모델은 Fig.2.1과 같이 중앙에 열원(6W)이 존재하고 천장 중앙부가 30% 개구되어 있으며, 개구부를 제외한 모든 면은 석고보드로 단열되어 있는 정사각형(L×L) 공간이다. 바닥에 놓여진 열원에 의하여 대류-복사열전달이 이루어지므로써 열전달의 유동장 및 온도장을 해석하기 위하여 다음과 같이 가정을 하였다.

- (1) 물성치는 온도변화에 무관하고 체력(body force)은 무시한다.
- (2) 매질은 회색체이고 각 벽면은 모든 방향으로 균일한 확산방사를 한다.
- (3) 모든 벽면의 방사율은 균일하다.
- (4) 유동은 2차원 정상상태이고 유체는 비압축성 Newton 유체이다.
- (5) 복사매체에 대한 산란은 무시한다.

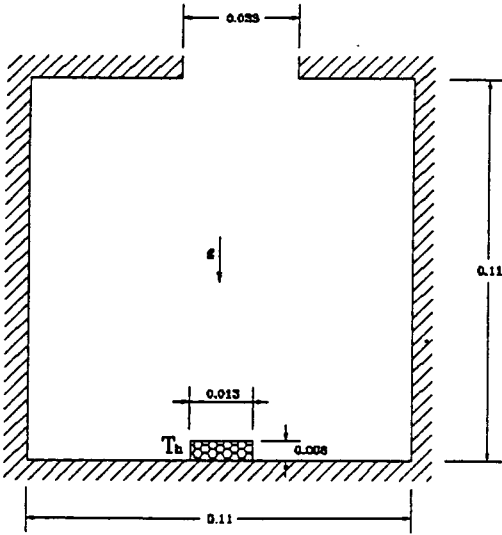


Fig. 2.1. Schematic of a single vent enclosure with a heat source

## 2.2. 지배방정식

위의 물리적인 가정하에 2차원 정상상태 난류의 유동장 및 온도장에 대한 연속, 운동량, 에너지, 난류운동에너지, 난류에너지소산율 방정식들을 무차원 형태로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (2-1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^*u^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(u^*v^*) \\ &= \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \mu_e \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \mu_e \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \mu_e \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \mu_e \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^*v^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^*v^*) \\ &= \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \mu_e \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \mu_e \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \mu_e \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \mu_e \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \right\} \\ &+ Gr \cdot \Theta \end{aligned} \quad (2-3)$$

에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^*\Theta) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^*\Theta) \\ &= \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial \Theta}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial \Theta}{\partial y^*} \right) \right\} + S^* \end{aligned} \quad (2-4)$$

여기서,  $S^*$ 는 복사열전달의 생성항을 나타낸다.

난류 운동에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^*k^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^*k^*) \\ &= \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial x^*} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial y^*} \right) \right\} + \frac{G_k^*}{\mu_o} - C_{\mu}\epsilon^* \end{aligned} \quad (2-5)$$

난류에너지소산율 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^*\epsilon^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^*\epsilon^*) \\ &= \frac{1}{\mu_o} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon^*}{\partial x^*} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y^*} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon^*}{\partial y^*} \right) \right\} + C_1 \frac{G_k^*\epsilon^*}{\mu_o k^*} - C_2 \frac{\epsilon^*}{k^*} \end{aligned} \quad (2-6)$$

여기서, 난류 에너지 생성항  $G_k^*$ 는 다음과 같이 무차원화된 형태로 정의된다.

$$\begin{aligned} G_k^* &= \mu_t \left\{ 2 \left( \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left( \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (2-7)$$

여기서,  $\mu_t = \mu_o C_{\mu} k^{*2} / \epsilon^*$ 로서 난류점성계수를 나타내고, 유효점성계수( $\mu_e$ )는 층류점성계수( $\mu_l$ )와 난류점성계수( $\mu_t$ )의 합으로 나타낸다.

본 연구에서는 난류유동을 해석하기 위하여 고 레이놀즈(high Reynolds) 수 난류 유동에 잘 일치되는 표준  $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.[9,10] 난류모델의 실험상수값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_h &= 0.7, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \\ C_1 &= 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_{\mu} = 0.09 \end{aligned}$$

위의 지배방정식들에 사용된 무차원변수들은  
 $x^* = x/L, \quad y^* = y/L, \quad T^* = T/T_o,$

$$\begin{aligned} \mu_e &= \mu_l + \mu_h, \quad \Theta = (T - T_o)/(T_h - T_o), \\ \Theta_o &= T_o/(T_h - T_o), \quad q_r^* = q_r/(\sigma T_o^4), \\ k^* &= k/(\nu_o/L)^2, \quad u^* = u/(\nu_o/L), \\ v^* &= v/(\nu_o/L), \quad \epsilon^* = \epsilon/(\nu_o^3/L^4), \\ G_k^* &= L^4 G_k/\nu_o^2, \quad p^* = p/(\rho \nu_o^2/L^2) \end{aligned}$$

등과 같이 정의되며, 무차원 기준 온도는  $T_o = 0.5(T_h + T_c)$ 로 하였다.

### 2.3. 복사열전달 방정식

2차원 사각형 밀폐공간내의 흡수, 방출하는 연소가스의 복사열전달을 해석하기 위해서 복사매체를 회색체 가스(gray gas)로 가정할 때 Fig.2.2와 같은 좌표계에 대한 복사열전달 방정식은 다음과 같다.[9,10]

$$\left\{ \mu \frac{\partial}{\partial x^*} + \xi \frac{\partial}{\partial y^*} + \tau_L \right\} \Gamma^*(x^*, y^*, \mu, \xi) = S^*(x^*, y^*, \mu, \xi) \quad (2-8)$$

여기서 무차원 복사강도

$$\Gamma^*(x^*, y^*, \mu, \xi) = \frac{\pi I(x^*, y^*, \mu, \xi)}{(\sigma T_o^4)}$$

고 방향여현은 Fig. 2.2에 표시된 좌표계에 대해서 각각  $\mu = \cos \theta, \quad \xi = \sin \theta \sin \psi, \quad \eta = \sin \theta \cos \psi$  로 표시되며 복사강도 생성항  $S^*(x^*, y^*, \mu, \xi)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S^*(x^*, y^*, \mu, \xi) &= (1 - \omega) \tau_L T^{*4}(x^*, y^*) \\ &+ \frac{\omega \tau_L}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Gamma^*(x^*, y^*, \mu', \xi') \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\Phi(\mu', \xi'; \mu, \xi) d\mu' d\xi'$$

여기서 매체의 흡수계수를  $\alpha$ 라 하고 소멸계수를  $\beta$ 라 할 때  $1 - \omega = \alpha/\beta$ 이고  $\omega$ 는 산란율을 나타낸다.  $\tau_L = \beta L$ 은 매체의 광학두께를 나타내며 산란위상함수  $\Phi(\mu', \xi'; \mu, \xi)$ 는 에너지 전달의 위상함수로 각도  $(\mu', \xi')$ 로 입사하여 각도  $(\mu, \xi)$ 로 산란되는 복사에너지의 각도에 대한 확률분포를 나타내는 함수이다. 본 연구에

서는 복사강도를 구하기 위하여 S-N 구분종좌 표법(DOM)을 사용하였다. [5,6,13]

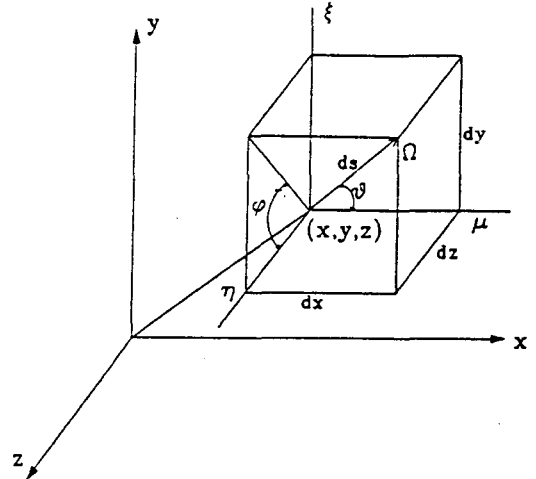


Fig. 2.2. Coordinate system for radiative heat transfer.

### 2.4. 경계조건

#### 2.4.1. 난류유동의 경계조건

난류유동의 경계조건은 난류 대수영역(turbulent logarithm region)과 층류저층영역(larminar sublayer region)의 다리역할을 할 수 있는 벽함수(wall function)를 적용하고 개구부에서는 질량보존을 이용하여 속도를 수정하였다. 난류 복사열전달의 경계조건은 다음과 같다.

초기의 내부유동은 완전히 정지 상태 ( $u, v=0$ )이고 내부온도는  $20^\circ\text{C}$ 로 하였다.

$$u = v = 0, \quad \Theta = -0.5, \quad k = 0, \quad \epsilon = 0.1k^2 \quad (2-17)$$

#### ① 열원에서의 온도조건

$$\Theta = 0.5 \quad (2-18)$$

#### ② 개구부에서의 경계조건

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial k}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0 \quad (2-19a)$$

$$\Theta = -0.5 \quad (v_{out} \leq 0) \quad (2-19b)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y} = 0 \quad (v_{out} > 0) \quad (2-19c)$$

#### ③ 단열벽에서의 경계조건

(a)  $k$  및  $\epsilon$  방정식의 경계조건

$$\frac{\partial k}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0 \quad (2-20a)$$

$$\epsilon_p = C_\mu k_p^{3/2} / l_p \quad (2-20b)$$

여기서 벽에서  $y_p$ 만큼 떨어진 위치에 대한 길이 단위  $l_p$ 는 다음식과 같이 결정된다.

$$l_p = C_\mu^{1/4} (0.4 y_p) \quad (2-21)$$

식(2-20b), (2-21)를 무차원화 변수를 사용하여 무차원화하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_p^* = \frac{C_\mu k_p^{*3/2}}{0.4 C_\mu^{1/4} y_p^*} \quad (2-22)$$

(b) 속도의 경계조건

- 층류저층영역

$$u^+ = y^+ \quad (2-23)$$

- 난류대수영역

$$\begin{aligned} u^+ &= 2.5 \ln y^+ + 5.5 \\ &= 2.5 \ln(9y^+) \end{aligned} \quad (2-24)$$

(c) 벽에 인접한 위치의 유효점성계수 ( $\mu_{eff}$ )

벽면에서부터 첫번째 격자점  $P$ 가 층류저층 내에 있는지 또는 완전 난류영역 내에 있는지는  $P$  지점에서의  $y^+$  값으로써 판단할 수 있다. 이러한  $y^+$ 는 벽근처에서 난류운동에너지 생성과 소멸이 같다는 것을 고려하여 다음과 같이 구할 수 있다.[8,10]

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_o y^+}{2.5 \ln(9y^+)} \quad (2-25)$$

(d) 열경계층에서 확산계수

$$\Gamma_{wall, \phi} = \frac{\mu_o y^+}{\sigma_h \{2.5 \ln(9y^+) + P\}} \quad (2-26)$$

여기서  $P$ 는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$P = 9.0 \left( \frac{Pr}{\sigma_h} - 1 \right) \left( \frac{Pr}{\sigma_h} \right)^{-1/4} \quad (2-27)$$

따라서 만약  $y^+ \leq 11.63$ 인 경우에는  $\Gamma_{wall, \phi} = \mu_o / Pr$ 이며  $y^+ > 11.63$ 인 경우에는 식(2-26)에서와 같이  $\Gamma_{wall, \phi}$ 를 결정하게 된다.

(e) 온도의 경계조건

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x^*} = \frac{\Theta_o}{P_l} q_{rx}^* \quad (2-28a)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y^*} = \frac{\Theta_o}{P_l} q_{ry}^* \quad (2-28b)$$

### 2.4.2 복사열전달의 경계조건

복사열전달을 해석하는데 있어서는 모든 고체 벽면에 대하여 불투명한 확산 반사를 한다고 가정하여 벽면에서의 복사강도를 고려하였다. 따라서 계산 영역 경계면으로부터의 복사강도는 벽면온도의 4제곱에 비례하여 방출되는 복사에너지와 벽면에 입사하는 복사에너지의 반사에 의한 영향을 함께 고려하여 모든 방향으로의 균일한 반사를 하는 불투명한 벽면(diffusely reflecting opaque walls)에 대하여 다음과 같이 무차원화된 형태로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} I_w(x^*, y^*, \Omega) &= \epsilon_w T_w^4(x^*, y^*) \\ &+ \frac{\rho_w}{\pi} \int_{\Omega' \cdot \vec{n}} |\Omega' \cdot \vec{n}| I_w(x^*, y^*, \Omega) d\Omega \end{aligned} \quad (2-29)$$

여기서  $\vec{n}$ 은 벽면으로부터 안쪽으로 향하는 단위 수직벡터이며 각도벡터는  $\Omega' = (\mu', \xi')$ ,  $\Omega = (\mu, \xi)$ 를 나타낸다. 그러나 계산 영역의 경계면이 고체표면이 아닌 고온가스가 유입되는 입구부 및 가스 출구부에 대하여는 그 위치에 있는 가스의 온도에 해당하는 가상적인 흑체면으로 고려하여 복사열전달을 해석하였다.

### 2.5. 수치해석

본 연구에서는 복합열전달의 해석을 대류열전달의 영역과 복사열전달의 영역으로 나누어 실시하였다. 대류열전달 영역은 식(2-1)~(2-6)의 지배방정식을 Harlow와 Welch[11]에 의해 도입된 엇갈린 격자계를 사용하여 Patankar [12]의 SIMPLE 알고리즘으로 처리하였으며, 대류항에 대하여서는 Power law Scheme을 사용하여 이산화하였고, 복사열전달 해석은 S-N 구분종좌표 방법을 이용하였다. 여기서 2차원 S-N 구분종좌표(40개방향)의 차수는  $S_8$ 로 해석하였고, Planck 수는  $P_l = 0.02$ , 흡수계수는  $\alpha = 1.0$ , 산란계수는  $\sigma_s = 0$  벽면반사율은  $\rho_w = 0$ , 산란율은  $\omega = 0$ 로 계산하였으며, 광학두께  $\tau_L = 1.0$ 으로 해석하였다. 수치계산에 사용된 격자구조는 Fig. 2.3과 같이  $43 \times 43$ 의 비균일 격자계로서 해석범위는  $Ra = 6.3 \times 10^8$ 이며, 유체의 Prandtl수는 0.71로 하였다. Fig.2.3과 같은 격

자시스템을 수치해석하는 데 있어서 천장의 개구부를 제외한 다른 벽들은 단열된 것으로 하였다. 저온인 외부 유체의 무차원 온도는  $\theta = -0.5$ 로, 시스템 내부에 있는 열원의 무차원 온도는  $\theta = 0.5$  각각 일정하게 유지되고 있다고 가정하였다. 또한 초기온도는 상온인  $20^{\circ}\text{C}$ , 열원의 온도는  $70^{\circ}\text{C}$ 로 하였다.

S-N구분종좌표법( $S_8$ , 40개방향)을 이용하여 자연대류-복사의 복합열전달을 해석하기 위한 계산소요시간은 펜티엄급(120MHz) 컴퓨터에서 자연대류의 경우에는 약 3600초, 복합열전달에서 산란과 벽면반사율을 고려하지 않은 경우에는 약 7200초 소요되었다. 해의 수렴은 온도값의 상대오차는  $10^{-4}$  이하일 때 수렴된 것으로 간주하였다.

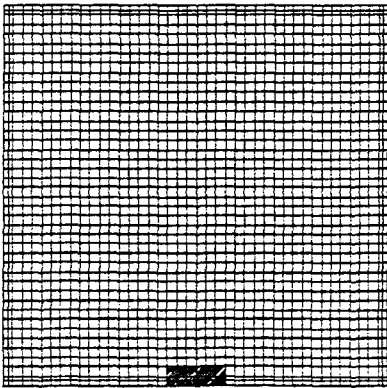


Fig. 2.3. Grid system for numerical calculation(43×43)

### 3. 실험

#### 3.1. 실험장치 및 방법

Fig.3.1, Fig.3.2는 실험장치의 전반적인 구성 및 사진을 나타낸 것이다. 시험체적을 중심으로 온도측정장치, 유동가시화장치를 설치하였다.

Fig.3.3은 시험체적(test section)을 나타낸 것으로서  $0.11(\text{m}) \times 0.61(\text{m}) \times 0.11(\text{m})$ 의 정육면체이며, 각 벽면은 동일하다. 공간의 바닥 중앙부에 설치한 하나의 열원과 천장부에는 30%의 개구부를 가진 부분 밀폐공간이다. 외부는 6mm의 아크릴로 제작되었고, 천장 개구부를 제외한 모든 벽면은 10mm의 석고보드로 단열되었다. 공간내의  $y=0.055(\text{m})$  높이에서 일정한 간격으로 x 방향에 대한 온도변화를 측정하기 위하여 모두 8개의 열전대(copper-

constantan thermocouple)가 부착되어 있으며, 열원(6.07w) 주위에 1개의 열전대를 온도측정기(multipoint digital thermometer : C8600)에 의하여 온도를 측정한다. 온도측정기는 12채널로 구성되어 있으며, 열전대에 의해 측정된 데이터를 RS-232를 통하여 컴퓨터에서 분석된다. 시험유체를 발열시키기 위하여 220V의 교류전원이 슬라이더스를 거치면서 감압되고, Wattmeter를 통과한 후 시험체적내의 열원에 공급된다. 내부발열에 의한 복합열전달의 가시화를 위하여 시험체적의 우측벽면에 설치된 슬릿 slit)을 통하여 조명용 광선이 도입된다. 이때의 조명원으로는 300w의 환등기용 전구를 사용하였다. 또한 유동가시화 실험시 외부 공기의 영향을 전혀 미치지 않도록 시험체적 전체를 넣을  $0.8(\text{m}) \times 0.8(\text{m}) \times 0.8(\text{m})$ 의 아크릴박스를 제작하여 덮었으며, 그 위로 검정암막을 덮어 외부 조명의 영향이 없도록 하였다.

Table 3.1. Location of thermocouples (unit : cm)

TC name axis	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
X	1	1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	11
Y	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5

시험유체에 균일한 내부 발열량을 주기 위하여 수치해석과 동일한 조건인  $Ra=6.3 \times 10^8$ 인 시험조건을 만들기 위하여 약 6W의 전력을 필요로 하였다. 열전대를 사용한 온도측정은 히터를 가열하기 시작하여 각각 열전대를 통한 온도변화가 거의 없는 정상상태로 될 때까지 온도측정기에서 5초마다 온도가 표시되도록 조정하여 데이터를 얻었다. 정상상태가 될 때까지 시간은 열원에 설치된 열전대에서 온도가  $70^{\circ}\text{C}$ 가 되어 거의 변화가 없는 상태를 정상상태로 간주하였으며 그 시간은 약 30분 소요되었다. 유동의 가시화를 위하여 시험체적의 외부박스에 연기를 가득채워 연기가 시험체적내로 흡입되도록 하였다. 연기입자는 공기와 함께 운반되지만 그 거동은 공기의 유동과 같다고 생각해도 된다. 왜냐하면 연기의 비중량은 공기와 비교할 때 3%정도의 오차를 보이며 압력의 영향도 무시해도 되므로 그 유동에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 보고되었다.[19] 온도측정기에서 수치해석과 동일한 온도에 해당

되는 전력을 wattmeter를 보면서 슬라이더스로 조정하여 시험체적의 열원에 공급한다. 정상상태에 30분 이후에 도달되면 시험체적에 마련된 슬릿을 통하여 조명을 시작하고 연기입자의 거동을 슬립면으로부터 집사렌즈가 부착된 카메라로 촬영한다. 유동가시화를 위한 조명방법은 어두운 환경에서의 촬영방법을 선택하였으므로 암막으로 덮어 외부의 빛을 차단한 후 촬영하였다. 사용된 카메라는 SAMSUNG MINOLTA AF28-80이며, 초점거리 50mm렌즈에 집사렌즈를 부착하여 확대촬영하였다. 이 때 카메라의 흔들림을 방지하기 위하여 자동회전기(Auto-rewinder)를 부착하여 촬영할 수 있도록 하였다. 촬영시 사용된 필름은 TMAX-400 (Kodak ASA 400)흑백필름을 사용하였고, 현상액은 D-76(Kodak Co.), 장착액은 KODAFIX (Kodak Co. liquid)가 사용되었다.

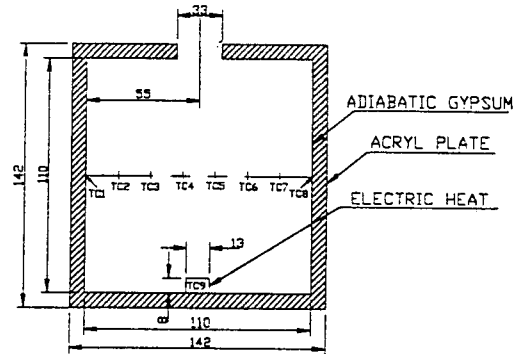


Fig. 3.3. Location of thermocouples

#### 4. 결과 및 고찰

Fig.4.1~4.3은 순수자연대류와 복합열전달에 대한 속도장, 유동장, 온도장을 나타낸 것이고, Fig.4.4~4.5는  $y=0.055m$ 에서  $x$ -거리에 대한 온도분포와 속도분포를 비교한 것이다. 여기서 복사열전달에 대한 복사물성치는 벽면반사율과 산란을 무시한 것이다. 속도장과 유동장을 살펴보면 전체적인 유동형태는 그 유동세포가 거의 비슷한 형태를 보이고 있으며, 개구부에서 흐름의 형태는 오른쪽에서 찬 외부공기가 유입되어 시계방향으로 회전하여 왼쪽 개구를 통하여 분출되어지고 있다. 자연대류나 복합열전달의 유동형태가 비슷한 이유는 천장의 중앙부에 개구부가 설치되어 있어 바닥의 열원에 의해 발생한 열에 의하여 생긴 부력과 시스템내의 복사열에 의해서 뜨거워진 유체가 밀도차에 의하여 천장개구부까지 상승되고 개구부에서 약간의 교란을 거친 후 외부 냉각공기 때문에 시스템내에서 순환력에 의해 반복회전되기 때문이다. 이것은 Fig. 4.6의 복합열전달에 대한 유동장을 수치해석 결과와 실험을 통한 유동가시화를 비교한 것에서도 증명되고 있다. 이 그림을 보면 1개의 주유동세포가 시스템내의 전역을 지배하고 있는 것을 볼 수 있고 천장부 좌우측 구석에 작은 2차 유동세포가 발생하였으며, 열원 주위에서는 활발한 유동이 형성되고 있다. 그림에서 보듯이 복합열전달의 수치해석 결과와 실험을 통한 유동가시화는 정상상태에서 모두 주유동세포가 시스템 전역을 지배하고 있으며 그 유선의 기본형태가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

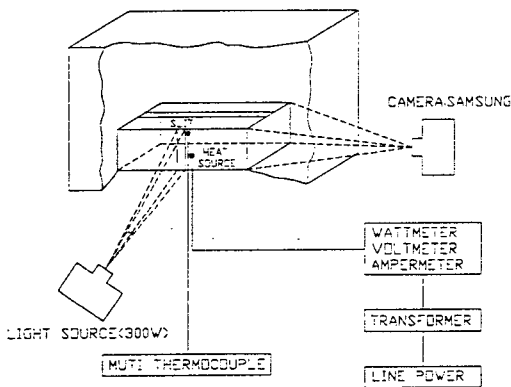


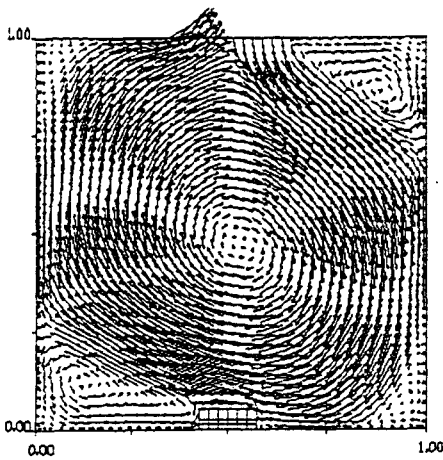
Fig. 3.1. Schematic of the experimental setup



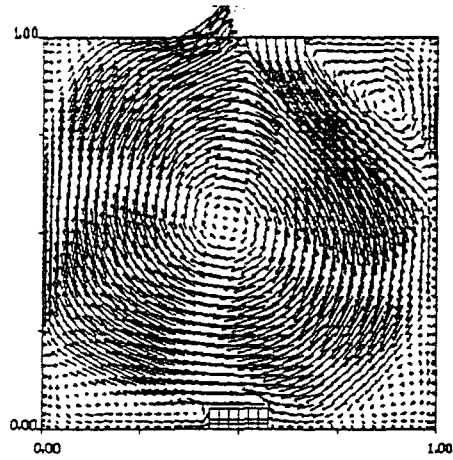
Fig. 3.2. Photograph of the experimental setup

Table 4.1. Temperature obtained by experiment and Computation  
( $Ra=6.3 \times 10^8$ )

X-Y distance		grid point(x,y)	experimental temperature ( °C)	computational temperature(°C)	relative error (%)
X	Y				
1	5.5	1, 22	25.1	30.935	18.8
1.6	5.5	6, 22	25.2	29.646	14.9
3.2	5.5	12, 22	25.3	27.058	6.5
4.8	5.5	18, 22	25.4	25.985	2.3
6.4	5.5	24, 22	24.8	24.773	0.1
8.0	5.5	30, 22	23.4	24.991	6.4
9.6	5.5	36, 22	22.5	24.773	9.2
11	5.5	43, 22	25.9	28.818	10.1



a) natural convection



(b) convection-radiation

$$(\rho = 0, \sigma_s = 0, a = 1, \omega = 0)$$

Fig. 4.1. Comparison of velocity vectors

Fig. 4.4의 온도분포를 살펴보면 복합열전달의 경우가 더 높은 온도를 나타내고 있다. 이것은 복합열전달의 경우 시스템내의 유체가 복사열에 의하여 유체에 더 많은 복사에너지를 주고 있기 때문이다. 또한 온도분포를 보면 복합열전달의 경우 시스템내의 온도가 좌측벽면 부근이 더 높게 나타나고 있는데, 이것은 개구부 우측으로 유입된 찬 외부공기가 열을 받아 시계방향인 좌측벽면을 타고 천장기류(ceiling jet)를 형성하면서 개구부 좌측으로 분출되고

있기 때문이다. 또한 복합열전달은 자연대류보다 강한 순환력의 지배로 넓은 영역에 걸쳐 시스템내의 온도가  $x$ -거리에 따라 큰 변화가 없이 비교적 일정한 분포를 보이고 있으나, 순수 자연대류는 복사에너지의 영향이 없으므로 부력으로 인하여 중앙부가 온도가 상승되는 경향을 보이고 있다.  $y=0.055[m]$  ( $y^*=0.5L$ )에서  $x$ -거리에 따라 8개의 열전대를 통하여 정상상태에 도달하였을 때 각 지점의 온도를 측정된 결과를 표 4.1에 나타내었다. 온도분포 경향은



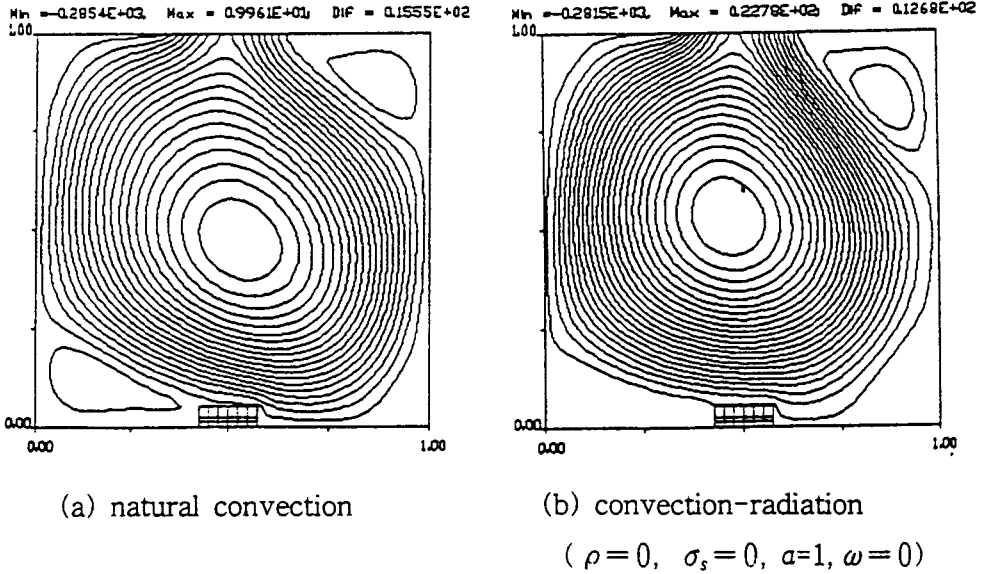


Fig. 4.2. Comparison of stream lines

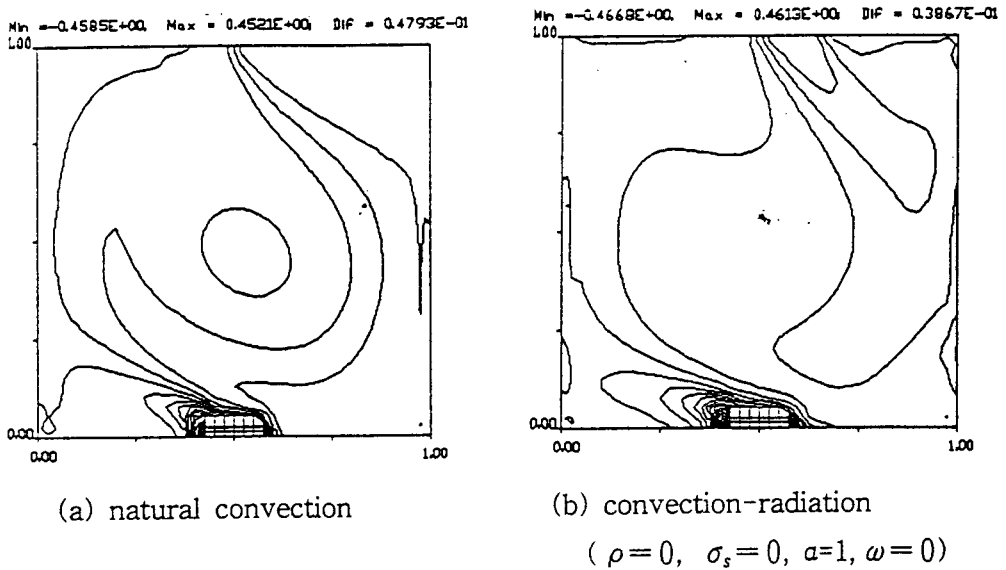


Fig. 4.3. Comparison of isothermal lines

전반적으로 수치해석의 결과보다 평균 2~3°C 낮은 분포를 보이고 있으나 그 분포경향은 근사한 형태를 보이고 있다. 실험의 온도가 낮은 이유는 시험체적내의 온도는 유입 및 유출 온도에 민감하게 반응하므로 시험조건외 오차 때문으로 생각된다. 특히 좌측벽면 주위에서 그 상대오차가 18.8%, 14.9%로 가장 큰 오차를 보이고 있으며 자연대류와 복합열전달의 온도가 거의 일치되는 y=0.064(m) 지점, 즉 개구부 아래에서 실험값 역시 가장 작은오차인 0.1%를

문으로 생각된다. 특히 좌측벽면 주위에서 그 상대오차가 18.8%, 14.9%로 가장 큰 오차를 보이고 있으며 자연대류와 복합열전달의 온도가 거의 일치되는 y=0.064(m) 지점, 즉 개구부 아래에서 실험값 역시 가장 작은오차인 0.1%를

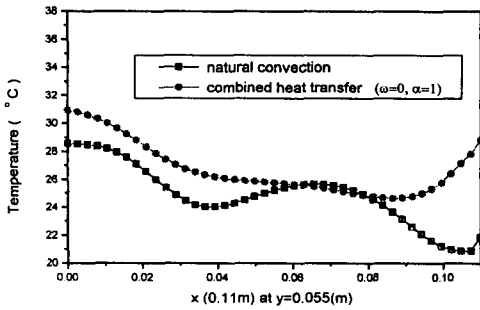


Fig. 4.4. Comparison of temperatures between computation and experiment

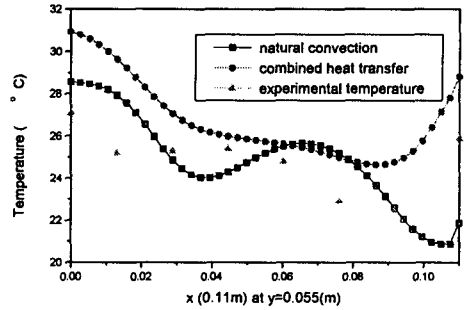


Fig. 4.5. Comparison of velocities of natural convection and combined heat transfer

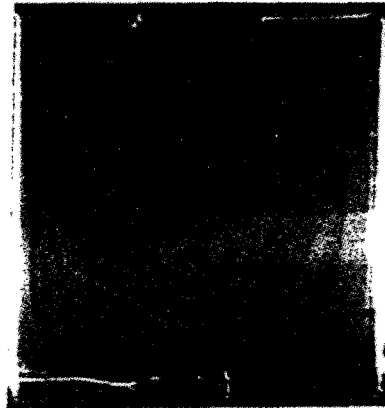
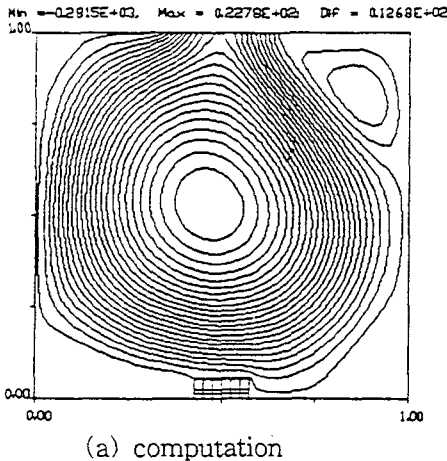


Fig. 4.6. Comparison of computational and experimental results

보여주고 있다. 전반적인 평균오차는 복합열전달보다 순수자연대류의 경우의 오차가 근소함을 알 수 있으며 평균 상대오차는 8%이내였다. 좌측벽면에서 상대오차가 큰 이유는 개구부 유입으로 유입된 유동이 시계 반대방향으로 회전하면서 상승된 열을 받아 좌측벽면이 온도가 높아지면서 개구부 좌측부를 통하여 배출되므로 그 유동이 흔들리는 원인때문으로 생각한다.

Fig. 4.5의 속도분포를 보면 유입 및 유출되는 개구부가 있는 중앙위치에서 속도가 빨라지는 것을 알 수 있으며, 복합열전달의 경우가 순수자연대류보다 이러한 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한  $x=0.02m$ 와  $x=0.08m$ 에서 속도분포는 자연대류보다 복합열전달의 속도가 더 높아지는 역전현상을 보이고 있고,  $x=0.02\sim$

$0.08(m)$ 에서는 중앙부의 개구부 때문에 상승되는 열기류에 의한 부력이 커지므로 자연대류의 속도가 더 빨라지는 경향을 보이고 있다. 최고 속도는 복합열전달의 경우  $x=0.04(m)$ 지점에서  $u=0.01(m/s)$ 였고, 최고온도는  $x=0$ 인 좌측벽면에서 약  $31^{\circ}C$ 였다.

## 5. 결 론

천장부에 30%의 개구부를 갖고 바닥에 열원이 존재하는 2차원 밀폐공간내의 자연대류와 복합열전달에 대한 연구로서 유체인 공기에 대하여 중횡비가 1.0이고, 정상상태인 경우에 수치해석과 실험을 통하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 천장부 중앙에 개구부가 있을 때 유동장은 벽이나 천장을 따라 흐르는 유동을 만들고 공기의 유출·유입방향은 우측에서 좌측벽으로 순환하는 현상을 보였다.

2) 순수 자연대류와 복사가 고려된 복합열전달의 유동장과 온도장을 살펴보면 천장 중앙에 개구부가 존재하고, 바닥 중앙에 열원이 있는 경우 정상상태의 유동장과 온도장은 거의 변화가 없는 것을 확인하였고 실험을 통한 유동장 시각화 이를 증명하였다.

3) 온도분포는 복합열전달이 순수 자연대류보다 더 높게 나타났으며 복합열전달은 시스템의 온도가  $x$ -거리에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나 자연대류에서는 열에 의한 부력 때문에 중앙부 지점이 온도가 상승되는 현상을 보였다.

4) 수치해석 및 실험결과 온도의 상대오차는 자연대류와 복합열전달의 온도가 일치되는 지점에서 0.11%로 가장 작은 오차를 보였고 좌측벽면에서는 온도가 높아지면서 개구부 좌측으로 공기가 유출되어 유동이 교란되므로 18.8%, 14.9%로 큰 오차를 보였다.

### 참고문헌

1. R. Viskanta, "Transient Combined Laminar Free Convection and Radiation in a Rectangular Enclosure", J. Fluid Mech. Vol.78, Part 1, 1992
2. A. Draoui, F. Allard and C. Beghein, "Numerical Analysis of Heat Transfer by Natural Convection and Radiation in Participating Fluids Enclosed in a square Cavities", Numer. Heat Transfer, Part A, Vol. 20, 1991
3. T. Fusegi and B. Farouk, "Laminar and Turbulent Natural Convection Convection - Radiation Interactions in a square Enclosure Filled with a Nongray Gas", Numer. Heat Transfer, Part A, Vol. 15, 1989
4. Kim, T-K. and H. Lee, "Two-Dimensional Radiative Transfer in Mie-Anisotropic Scattering Media : S-N Discrete Ordinates Solution", Heat Transfer Sym. at Univ. of II. Urbana-Champaign, II. Oct. 1-3
5. Kim, T-K. and H. Lee, "Effect of Anisotropic Scattering on Radiative Heat Transfer in Two-Dimensional Rectangular Enclosures", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.31, No. 8, pp. 1711-1721, 1987
6. Kim, T-K. and H. Lee, "Radiative Transfer in Two-Dimensional Anisotropic Scattering Media with Collimated Incidence", Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol.42, No.3, pp.225-238, 1989
7. Spalding, D.B., "The Prediction of Two-Dimensional Steady Turbulent flow", Imperial College, Heat Transfer Section Rep., EF/TN/A/16, 1969
8. Rodi, W., "The Prediction of Free Turbulent Boundary Layers by Use of a two-equation Model of Turbulence", PhD Dissertation, Mech. Eng., Imperial College, London, 1972
9. 김태국, 심대곤, 김창희, 민동현, 한구익, "흡수, 방출 및 산란하는 매체로 충만된 3차원 공간에서 전도-대류-복사 복합열전달 해석 프로그램의 개발연구", 중앙대학교 기술과학 연구소, 기술연구보고서, ITS 94-04-03, 1994
10. 김태국, "복합열전달의 해석기법", 중앙대학교 출판국, 1995
11. Harlow, F. H. and Welch, J. E., "Numerical Calculation of Time -Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", Phys. Fluids, vol. 8, pp.2182, 1965.
12. Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Mc-Grawhill Co., 1980.
13. Fiiveland, W. A., "Discrete-Ordinate Solutions of of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosure", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 609-706, 1984.
14. Kim, T.-K., "Radiation and Combined Mode Heat Transfer analysis in Absorbing, Emitting, and Mie-Anisotropic Scattering Media Using the S-N Discrete Ordinates Method, Ph. D Thesis, University of Minnesota, 1990
15. Mao, C.P., Fernandez -Pello, A.C. and Humphrey, J.A.C. " An Investigation of steady wall Ceiling and Partial Enclosure Fires", ASME J. of Heat Transfer, Vol.106, pp. 221-228, 1984
16. Liu, C.N. and Shih, T.M., " Laminar,

- Mixed Convection, Boundary Layer, Nongray-Radiative, Diffusion Flames", ASME J, of Heat Transfer, Vol.102, pp. 724-730
17. Cooper, L.Y., "Calculation of the Flow through a Horizontal Ceiling /Floor Vent., National Institute of standards and Technology, pp.89,1989.
  18. 추병길, "개구부를 갖는 사각공간내의 화재에 의하여 생성된 연소가스 유동 및 성분 분포에 관한 연구", 전남대학교 박사학위 논문, 1997
  19. Lee, C. E., "The Discrete S-N Approximation to Transport Theory, Los Alamos Laboratory Report LA-2595, 1990
  20. 畠送, 田中, "火災", 25[1], 45(1975)~46 (1977) 연재, 1975~1977