

개구부가 있는 밀폐공간내 화재의 복합열전달 및 연소가스 분석에 관한 연구

A Study on the Combined Heat Transfer and Analysis Fire Induced Combustion Gas in a partially Open Enclosure

박 찬 국*
Park, Chan-Kuk
추 병 길**
Chu, Byeong-Gil
김 철***
Kim, Cheol

.....
Abstract

The natural convection and combined heat transfer induced by fire in a rectangular enclosure is numerically studied. The model for this numerical analysis is partially opened right wall. The solution procedure includes the standard k-ε model for turbulent flow and the discrete ordinates method (DOM) is used for the calculation of radiative heat transfer equation. In numerical study, SIMPLE algorithm is applied for fluid flow analysis, and the investigations of combustion gas induced by fire is performed by FAST model of HAZARD I program.

In this study, numerical simulation on the combined natural convection and radiation is carried out in a partial enclosure filled with absorbed-emitted gray media, but is not considered scattering problem. The streamlines, isothermal lines, average radiation intensity and kinetic energy are compared the results of pure convection with those of the combined convection-radiation, the combined heat transfer. Comparing the results of pure convection with those of the combined convection-radiation, the combined heat transfer analysis shows the stronger circulation than those of the pure convection.

Three different locations of heat source are considered to observe the effect of heat source location on the heat transfer phenomena. As the results, the circulation and the heat transfer in the left region from heating block are much more influenced than those in the right region. It is also founded that the radiation effect cannot be neglected in analyzing the building in fire. And as the results of combustion gas analysis from FAST model, it is found that O₂ concentration is decreased according to time. While CO and CO₂ concentration are rapidly increased in the beginning (about 100sec), but slowly decreased from that time on.

.....
* 전남대학교 기계공학과
** 순천공업전문대학 산업안전과
*** 경남지방 중소기업사무소

I. 서 론

2차원 부분적으로 개방된 정사각형 밀폐공간 내에서 화재에 의해서 발생한 연소가스의 유독성 및 유동에 관한 연구는 많은 연구자들에 의하여 활발하게 행하여져 왔다. 밀폐공간의 화재시 열전달 및 유동에 관한 연구는 연소가스 유동을 예측할 수 있어 효율적으로 제어하면 피난방향을 신속히 판단하여 유독성 연기로부터의 인명피해를 방지할 수 있으며 또한 화재 원인이 되는 여러가지 변수를 시스템적으로 모델링을 개발하여 유사 재해시 신속한 대처 능력 향상 및 설비를 개발하여 설계시부터 foolproof적인 안전성 평가를 할 수 있으며 화재 원인 조사에 기여하고 신뢰성이 확보되면 법적 증빙서류로도 활용할 수 있다.

이러한 화재열전달 현상을 이해하기 위해서는 이론적인 해석법과 실험적인 방법을 고려할 수 있는데 실험적인 방법을 고려할 경우에는 실제 크기의 실험 수행도 어렵지만 고가의 측정 장비가 필요하게 되며 측정장비의 부정확도, 측정자의 에러, 측정하는 상태들을 파악하는 데 오차 등이 따른다. 또한 시스템의 전반적인 특성을 파악하기 위하여 온도, 속도, 성분율, 열유속 등을 동시에 측정하는 것이 불가능하며 시스템의 형상 변화에 따라 동일한 실험 절차를 반복해야 하므로 연소의 모형 실험은 그 어려움으로 많은 제약을 받는다. 따라서 수학적 모델에 의한 컴퓨터를 이용한 수치해석법이 많이 고려되고 있으며 이론적인 해석법을 통하여 얻은 자료가 화재 실험 모델의 보완책으로 적절하게 조화시켜 연구해야 한다.

밀폐공간에 대한 연소 가스 유동에 대한 수학적 접근 방법으로는 Zone모델과 Field 모델이 있다. Zone모델은 밀폐공간의 형태하에서 뚜렷하게 열층(hot layer)은 성장되어지고 실행하기 위하여 거시적 분석을 할 수 있는 방법으로 Havard Fire FAST와 ASET가 Zone모델의 예다. Zone모델은 해석 영역을 여러개의 분할 영역으로 나누어 상승부 온도와 한 실의 화재층 높

이를 합리적으로 예측할 수 있고 새로운 상황에서 혼합과정이나 유동을 연구하는 데 매우 유익하다. Field모델은 물리적인 현상을 지배하기 위하여 편미분 방정식을 직접 풀어서 연소가스 유동을 예측하는 수리적인 방법으로 Zone모델에 비하여 많은 계산 시간 및 컴퓨터 용량을 필요로 한다¹⁾.

이제까지의 화재와 관련한 기본 모델들이 화재의 복잡한 메카니즘으로 인하여 주로 자연대류를 이용한 부분 밀폐공간내의 일정한 화재 발생 영역과 Heat source를 가정하고 부력으로 야기되는 층류나 난류의 유동장을 해석하는 경우가 대부분이었다. 그러나 불행히도 화재시에는 건축 재료 등의 가연성 재료가 연소할 때 발생하는 그을음(soot), H₂O, CO₂ 등은 복사에 관계하는 생성물로 이러한 연소 시스템은 비회색체(non-gray gas)의 매질에 기인하는 것으로 전도, 대류, 복사가 동시에 발생하는 화재와 같은 복합 열전달현상에 있어서는 전도 및 대류에 의한 열전달 현상에 비하여 매우 큰 영향을 미치고 있음에도 불구하고 지금까지의 화재에 대한 수치해석 연구는 복사를 배제한 기하학적 형상이 간단한 자연대류를 중심으로 연구를 수행하여 왔다.

그러나 최근에 있어서 화재와 관련한 연구들은 Fusegi²⁾에 의해 화재실내에 복사에너지를 고려한 온도장 및 유동장 특성에 관한 연구를 수치해석과 실험을 통해 타당성을 검토하였고 Cooper³⁾는 천장 vent를 통하여 양방향 흐름에 대해서 zone모델의 알고리즘을 제시하였으며 Takeda와 Satho⁴⁾은 ceiling vent가 중앙에 위치한 밀폐공간의 온도분포를 Field모델을 사용하여 유동을 조사하였다. 국내에서도 자연대류-복사 복합열전달에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Kim⁵⁾ 등은 흡수, 방출 및 산란하는 매체로 충전된 공간에서의 전도-대류-복사 복합열전달 해석 프로그램을 개발하였으며 Son⁶⁾은 발열체와 개구부가 있는 복합공간내의 자연대류-복사 열전달에 대한 연구를 수행하였고 Park⁷⁾은 Field모델을 적용 건물내 화재에 의한 연소 가스 예측을 수행하였으며 그 타당성을

검증하였다.

본 연구는 화재에 의해 발생된 연소가스의 분석 및 유동을 수행하기 위하여 시스템 내부에 발열체가 중앙에 존재하는 밀폐공간내의 자연대류와 복사열전달의 온도 및 유동장을 CCRHT 프로그램⁹⁾을 이용하여 수치해석하였고 연소가스 분석은 HAZARD I 프로그램의 FAST모델을 이용하여 수행하였다. 해석모델내 유체는 열복사 에너지를 흡수·방출에 의하여 가열되며 산란은 고려되지 않았다. 난류유동해석은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 난류 자연대류 보존방정식은 SIMPLE알고리즘을 이용하여 해석하였고 복사열전달에 대하여서는 구분종좌표법(DOM)을 적용하였다. 이러한 해석모델에 대하여 내부공간의 난류자연대류 및 복합열전달에 대한 온도 및 유동장을 Heat Source 위치에 따라 해석하였다. 이에 대한 실험적인 검증은 현재 수행중이며 차후 발표할 예정이다.

II. 이론해석

1. 해석모델 및 가정

Fig. 1에 나타낸 모델은 화재실내에 Heat source(폭 125mm×높이 125mm)가 바닥 중앙에 놓여 있는 2차원적인 형상이다. 그림에서 보

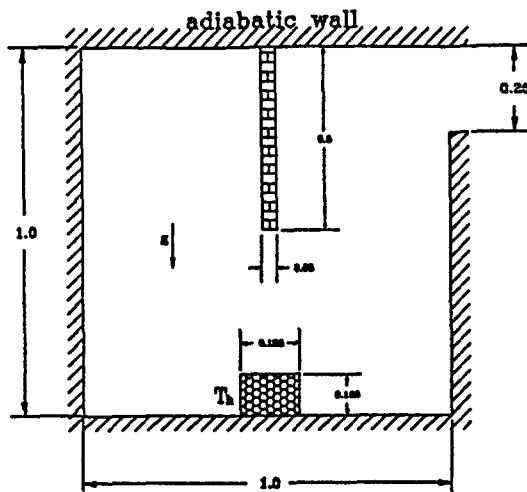


Fig. 1. Schematic diagram of Computational domain.

는 바와 같이 우측 상부가 25% 개방되어 있으며 개구부의 크기는 250mm×1000mm이며 하며 나머지는 모두 단열된 부분밀폐공간(L×L)으로 구성되어 있다. 본 연구는 압축성 Newton 유체로서 유동은 2차원 정상상태이고 매질은 회색체이며 각 벽면은 모든 방향으로 균일한 확산을 하고 복사 고려시 산란 효과는 무시한다고 가정하여 난류자연대류와 복합열전달을 해석하였다.

2. 지배방정식

2.1 지배방정식

위의 물리적인 가정하에 2차원 정상상태 무차원 난류의 유동장 및 온도장에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식

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

- 운동량방정식

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

$$= \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\mu_e \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\mu_e \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \right\} + \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\mu_e \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\mu_e \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial}{\partial x^*}(u^* v^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^* v^*) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\mu_e \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\mu_e \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \right\} + \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\mu_e \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\mu_e \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) \right\} + Gr \cdot \Theta$$

- 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x^*}(u^* \Theta) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^* \Theta) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial \Theta}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial \Theta}{\partial y^*} \right) \right\} + S$$

여기서 S는 복사열전달의 생성항이다.

2.2 난류모델

난류유동은 난류운동에너지와 에너지소산을
에 의하여 특징지어지며 본 연구에서는 표준 $k-\epsilon$
난류모델을 사용하였다.

- 난류 운동에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^* k^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^* k^*) \\ &= \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k^*}{\partial y^*} \right) \right\} \\ & \quad + \frac{G_k^*}{\mu_0} - C_\mu \epsilon^* \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 난류 에너지 생성항 G_k 는 다음과 같이
무차원화된 형태로 정의되고 σ_k 는 Prandtl-
Schmidt 상수이다.

$$\begin{aligned} G_k^* = & \mu \left\{ 2 \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

- 난류운동에너지 소산을 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^*}(u^* \epsilon^*) + \frac{\partial}{\partial y^*}(v^* \epsilon^*) \\ &= \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon^*}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon^*}{\partial y^*} \right) \right\} \\ & \quad + C_1 C_k^* \frac{\epsilon^*}{\mu_0} k^* - C_2 \frac{\epsilon^*}{k^*} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 σ_ϵ , C_1 및 C_2 는 난류모델상수이다. 난
류점성계수는 다음과 같이 k 및 ϵ 으로부터 계산
할 수 있다.

$$\mu = C_{\mu\rho} \rho f k^2 / \epsilon \quad (8)$$

따라서 난류 유동하에서 유효점성계수는 다음
과 같으며 난류모델 상수는 Table 1과 같다.

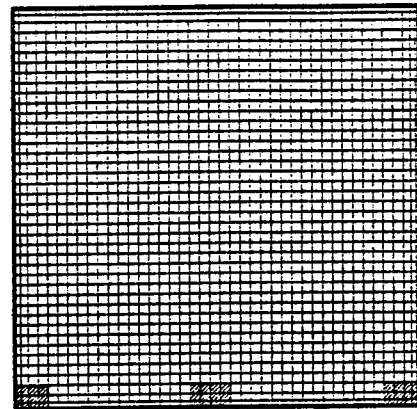
$$\mu_e = \mu + \mu_f \quad (9)$$

Table 1. Turbulent model constants.

C_1	C_2	C_μ	σ_k	σ_ϵ	σ_c
1.44	1.92	0.09	0.7	1.0	1.3

2.3 복사열전달 방정식

2 차원 사각형 밀폐공간내의 흡수, 방출하는
연소가스의 복사열전달을 해석하기 위해서 복사
매체를 회색체 가스(gray gas) 로 가정할 때
Fig.2와 같은 좌표계에 대한 복사열전달 방정식은
다음과 같다.



(position ①) (position ②) (position ③)

Fig. 2. Coordinate system considered in this study.

$$\begin{aligned} & \left\{ \mu \frac{\partial}{\partial x^*} + \xi \frac{\partial}{\partial y^*} + \tau_L \right\} I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) \\ &= S^*(x^*, y^*, \mu, \xi) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 무차원 복사강도 $I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) =$
 $\frac{\pi I(x^*, y^*, \mu, \xi)}{(\sigma T_w^4)}$ 로 정의되고 방향여현은 Fig. 2

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

$$\begin{aligned} S^*(x^*, y^*, \mu, \xi) = & (1 - \omega) \tau_L T_w^4(x^*, y^*) \\ & + \frac{\omega \tau_L}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 I^*(x^*, y^*, \mu', \xi') \\ & \Phi(\mu, \xi; \mu', \xi') d\mu', d\xi' \end{aligned} \quad (11)$$

에너지 보존방정식에서 복사열전달에 의한 생
성항은 복사열유속 벡터의 Divergence로 주어
지며 복사열전달 방정식을 전 입체각에 대하여
적분하면 다음식으로 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot q_r = 4\pi a \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} - G^* \right) \quad (12)$$

여기서 무차원 평균 복사 강도 G^* 는 다음 식으로 정의된다.

$$G^*(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) d\mu d\xi \quad (13)$$

본 연구에서는 복사강도를 구하기 위하여 S-N 구분종좌표법(DOM)을 사용하였고 DOM의 자세한 계산방법은 참고문헌⁹⁾에 나타내었다.

2.4 FAST모델의 기본 방정식

2.4.1 기본방정식

하나의 zone을 가진 화재실의 화재 성장모델은 다음과 같은 에너지 보존식으로 구성되었다.

$$C_p \rho V \left(\frac{dT_g}{dt} \right) = Q_c - Q_w - Q_v - Q_o - Q_r \quad (14)$$

여기서

$$Q_c = \Delta H_c R \gamma \mu \quad (\text{fuel controlled fire})$$

$$Q_c = \Delta H_c m_a \mu \quad (\text{ventilation controlled fire})$$

$$Q_w = \epsilon \sigma (T_g^4 - T_{wi}^4) s + h_i (T_g - T_{wi}) s$$

$$Q_v = C_p [m_a (T_g - T_c) + R (T_g - T_{wi})]$$

$$Q_o = [\epsilon \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon) T_{wi}^4 - T_o^4] A$$

$$Q_r = R \Delta H_v$$

여기서 Q_c 는 실내에서 열방출량이고 Q_w 는 실벽을 통한 열손실율이다. Q_v 는 실개구부를 통한 환기에 의한 열손실율이며 Q_o 는 실개구를 통한 복사열손실율이고 Q_r 은 연소대상물에서 기화로 인한 열손실율이다.

2.4.2 연소 후 가스 농도 생성

연료로 조정된 화재에서 연소 후 생성 가스 농도는 다음의 질량 평형식을 사용하여 얻어진다.

$$Y_{PRO} = \frac{Y_{PRO} \rho V + (100 + 238) \mu R \delta t}{\rho V + (m_a + R) \delta t} \quad (15)$$

환기로 조정된 화재의 경우는

$$Y_{PRO} = \frac{Y^{*} \rho V + 23 + 100/\gamma \mu R \delta t}{\rho V + (m_a + R) \delta t} \quad (16)$$

윗 식에서 δt 는 time step이고 Y_{PRO} 는 $t=t-\delta t$ 시간에서 생긴 가스 농도이고 μ 는 연소 효율이다. 연소효율은 L, A_v, ρ 와 R 의 함수로 알려진 Takeda모델을 사용하여 계산되어진다.

$$\mu = f \left(\frac{L A_v \rho}{R} \right) \quad (17)$$

2.5 경계조건

2.5.1 난류 유동에 대한 경계조건

난류유동에 대한 초기 조건 및 경계조건은 다음 식으로 표현된다.

- 초기조건

$$u=v=0, T=0, k_i = C_{\mu} \rho_0 \frac{k_i^2}{\mu t} \quad (18)$$

- 경계조건

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial y} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

2.5.2 복사 열전달의 경계 조건

복사열전달을 해석하는 데 있어서 모든 고체 벽면에 대하여 불투명한 확산 반사를 한다고 가정하여 벽면에서의 복사 강도를 고려하였다. 따라서 계산 경계면으로부터의 복사 강도는 벽면 온도의 4제곱에 비례하여 방출되는 복사에너지와 벽면에 입사하는 복사에너지의 반사에 의한 영향을 함께 고려하여 모든 방향으로의 균일한 반사를 하는 불투명한 벽면(diffusely reflecting opaque wall)에 대하여 다음과 같이 무차원화된 형태로 표시할 수 있다.

$$I_w(x^*, y^*, \Omega) = \epsilon_w T_w^4(x^*, y^*)$$

$$+ \frac{\rho_w}{\pi} \int_{\Omega' : n < 0} |\Omega' \cdot \vec{n}| I_w(x^*, y^*, \Omega') d\Omega' \quad (20)$$

여기서 \vec{n} 은 벽면으로부터 안쪽으로 향하는 단위 수직 벡터이며 각도벡터는 $\Omega = (\mu, \xi)$ 를 나타낸다. 그러나 계산영역의 경계면이 고체표면이 아닌 고온가스가 유입되는 입구부 및 가스출구부에 대해서는 그 위치에 있는 가스의 온도에 해당하는 가상적인 흑체면으로 고려하여 복사열전

달을 해석하였다.

III. 수치해석

위의 난류자연대류열전달의 지배방정식을 계산하기 위하여 계산 영역을 43×43 의 비균일 격자계로 분할하고 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 해석하였으며 대류항은 Power-law Scheme으로 처리하였다. 대류 및 복사에 대한 복합열전달의 해석은 2차원 CCRHT⁽¹⁰⁾ 프로그램을 이용하여 해석하였으며 복사열전달의 방정식의 해석은 S-N구분종좌표 방법으로 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 격자 구조이며 천정부의 온도는 상온으로 가정하였고 화재실은 좌측 상부에 25%의 개구부를 두었으며 나머지는 단열벽으로 가정하였다. Heat Source는 바닥면의 각각 3곳(좌측, 중앙, 우측)에 위치하였으며 열원의 온도는 1000°K로 가정하였다.

연소가스에 대한 수치해석은 화재성장모델로 많이 사용하고 있는 NIST에서 개발한 FAST모델을 사용하였다. 화재성장모델에 사용된 변수는 CCRHT 프로그램과 동일한 화재실크기, 개구부수 및 크기, 재료의 열전도계수, 밀도, 비열. 복사율을 입력시켜 해석하여 산소, 일산화탄소, 이산화탄소의 농도를 분석하였다. 이 프로그램의 화재성장모델의 알고리즘은 Fig. 4에 나타

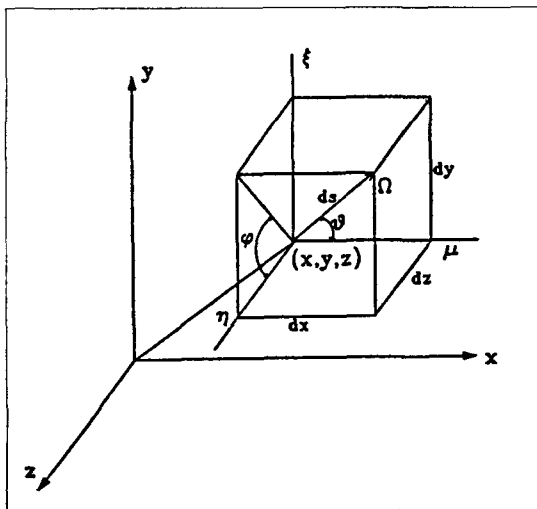


Fig. 3. Computational grid system.

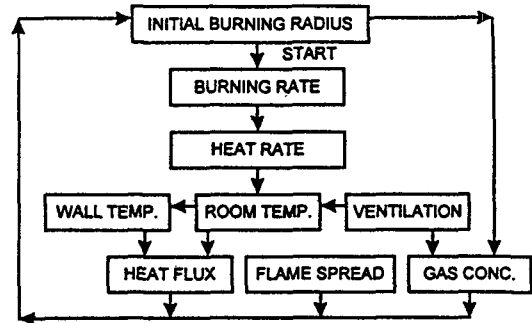


Fig. 4. Computation algorithm of the "NRCC" fire growth Model.

내었다.

복합열전달의 계산소요시간은 펜티엄급 (90 MHz) 컴퓨터에서 순수자연대류만을 고려하였을 경우 약 1800sec, 대류 및 복사의 복합열전달을 해석하였을 경우에는 약 2012sec 소요되었으며 해의 수렴은 프로그램 내의 Source max가 10^{-6} 이하일 때 수렴된 것으로 간주하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1 순수자연대류와 복합열전달의 비교

4.1.1 속도장, 유동장, 온도장 해석

본 연구에서 고려한 개구부가 한면에 존재하는 2차원 밀폐공간 내부의 유동, 온도장, 운동에너지를 순수 자연대류와 복사를 고려한 복합열전달에 대하여 비교 분석하였다. Fig. 5, 6, 7은 Heat source 위치에 따라 밀폐공간의 속도장, 유동장, 온도장을 보여주고 있다. Fig. 5는 열원이 좌측에 존재하는 경우에 대한 해석결과이며 복합열전달의 해석 결과는 복사에너지의 영향으로 유체가 직접 가열되기 영향을 받기 때문에 순수 자연대류에 비하여 훨씬 큰 부력이 발생하여 강한 순환력이 발생되고 있다는 것을 보여 주고 있다. 또한 순수 자연대류는 2개의 뚜렷한 순환 cell이 형성되는데 비하여 복합열전달은 열원 주위의 큰 부력으로 인하여 하나의 커다란 cell이 형성되어 순환되고 있는 것을 알 수 있다. 좌측

벽면 25% 개구된 출구 주위 유동을 살펴보면 개구부의 하부에서는 유체가 외부로부터 흡입되고 상부에서는 내부의 유체가 외부로 나가는 현상을 보이고 있다. 이것은 개구부 상부에서는 온도차에 의하여 배출기류가 강하게 나타나고 있으며 복합열전달에서는 유입량과 배출량이 밀도차로 기인된 순환력에 의하여 순수자연대류에 비하여 크게 나타나고 있다. Fig. 6에서 열원이 중앙에 존재하는 경우를 보면 순수 자연대류는 4개의 cell이 형성되고 열원을 중심으로 좌우에 2개의 cell이 만들어지며 복합열전달에서는 3개의 cell이 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고 열원을 중심으로 개구부가 존재하는 우측 공간보다 좌측의 공간이 전체의 유동을 지배하고 있으며 이것은 좌측공간의 열이 개구부를 통하여 밖으로 유출되고 있기 때문인 것으로 생각된다. 아울러 열원이 중앙에 있는 경우는 좌우측에 존재하는 경우보다 비교적 대칭적인 형태를 보이고 있으며 개구부가 있는 영역으로 속도가 빠르게 흐르고 있다. Fig. 7의 경우 역시 복합 열전달의 순환력이 순수 자연대류보다 강력하게 발생되고 있음을 보여 주고 있으며 열원이 개구부가 있는 벽면에 위치하고 있어 유동속도가 단열된 우측의 벽면보다 빨라지는 경향으로 나타났다.

Fig. 5, 6, 7의 온도장을 살펴보면 순수 자연대류에 있어서는 좌우측 벽면을 따라 온도분포가 형성되는 경향을 보이고 천정면에서 ceiling 기류를 형성하여 개구쪽으로 흘러 유출되고 있음을 확인하였다. 따라서 열원이 없는 좌측 반대 벽면에서는 그다지 온도가 상승되지 않은 것은 열전달이 비교적 낮은 것때문인 것으로 생각된다. 그러나 중앙에 열원이 존재하는 경우에는 좌우측 벽면으로 열전달이 이루어지고 있으며 개구부 반대쪽으로 더 많은 열전달이 되고 있음을 확인하였다. 복합열전달에 있어서는 순수 자연대류보다 복사열전달에 의하여 공간의 유체를 가열하는 영향으로 인하여 전 밀폐공간으로 온도장이 분포되고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8, 9에서는 열원의 위치에 따라 순수 자연대류와 복합열전달의 온도와 속도분포를 비교하였다. ($y=0.5L$) Fig. 8의 온도분포를 보면 복

사열전달을 고려한 복합열전달의 온도가 더 높은 것을 알 수 있으며 이것은 복합열전달의 경우 내부 유체가 복사열에 의해 직접 가열되기 때문이라고 생각한다. 열원의 위치가 좌측벽과 중앙에 위치하고 있는 경우에는 x^* 위치에 따라 일정한 온도분포를 보이고 있으며 열원이 중앙에 위치하였을 때 좌우가 비교적 대칭적인 분포를 보이고 있다.

Fig. 9의 속도분포를 살펴보면 유체의 속도는 열원과 개구부가 우측에 있는 경우에는 좌측과 중앙에 있는 경우보다 훨씬 빨라지고 있는 것으로 나타나고 있으며 복합열전달이 순수 자연대류보다 유체의 속도가 빠른 경향을 보이고 있다. 따라서 복사의 영향은 유동장 및 온도장에 큰 영향을 미치고 있음을 보이고 있다.

4.1.2 난류운동에너지(k)와 복사강도(G)의 비교

난류 흐름에서 유체의 평균속도는 난류운동에너지 값에 의해 결정되는데 Fig. 10에서는 순수 자연대류와 복사를 고려한 복합 열전달의 난류운동에너지를 Heat Source의 위치에 따라 도시한 것이다. Fig. 10(a)에서 살펴보면 열원이 개구부 반대 벽면에 있을 때(좌측) 순수 자연대류보다 복합열전달이 복사열의 영향으로 인하여 유동속도가 빠르므로 레이놀드 수가 증가함에 따라서 난류운동 에너지가 커져서 그 영향이 출구 쪽으로 더 많이 집중되고 있음을 보이고 있다. Fig. 11(b)에서처럼 열원이 중앙에 있을 때는 자연대류에서는 운동에너지가 개구부쪽으로 이동되는 반면에 복합열전달에서는 좌측벽면으로 커지는 경향을 보이고 있으며 열원이 개구부면에 있을 때는 복합열전달의 경우 비교적 전 공간에 고르게 분포되고 있으나 자연대류에서는 개구부 벽면으로 상승되어 가는 형태를 보이고 있다. 이것은 순수 자연대류에서는 개구부의 온도차 때문에 속도 영향이 큰 반면에 복합열전달에서는 내부의 열전달이 크므로 개구부의 속도는 미약하기 때문이다.[Fig. 10(c)]

Fig. 11에서는 복합열전달인 경우 Planck 수 0.02, Rayleigh 수 10^7 으로 고정시킨 후 열원의 위치에 따른 평균 복사 강도(G^*)를 나타내었다.

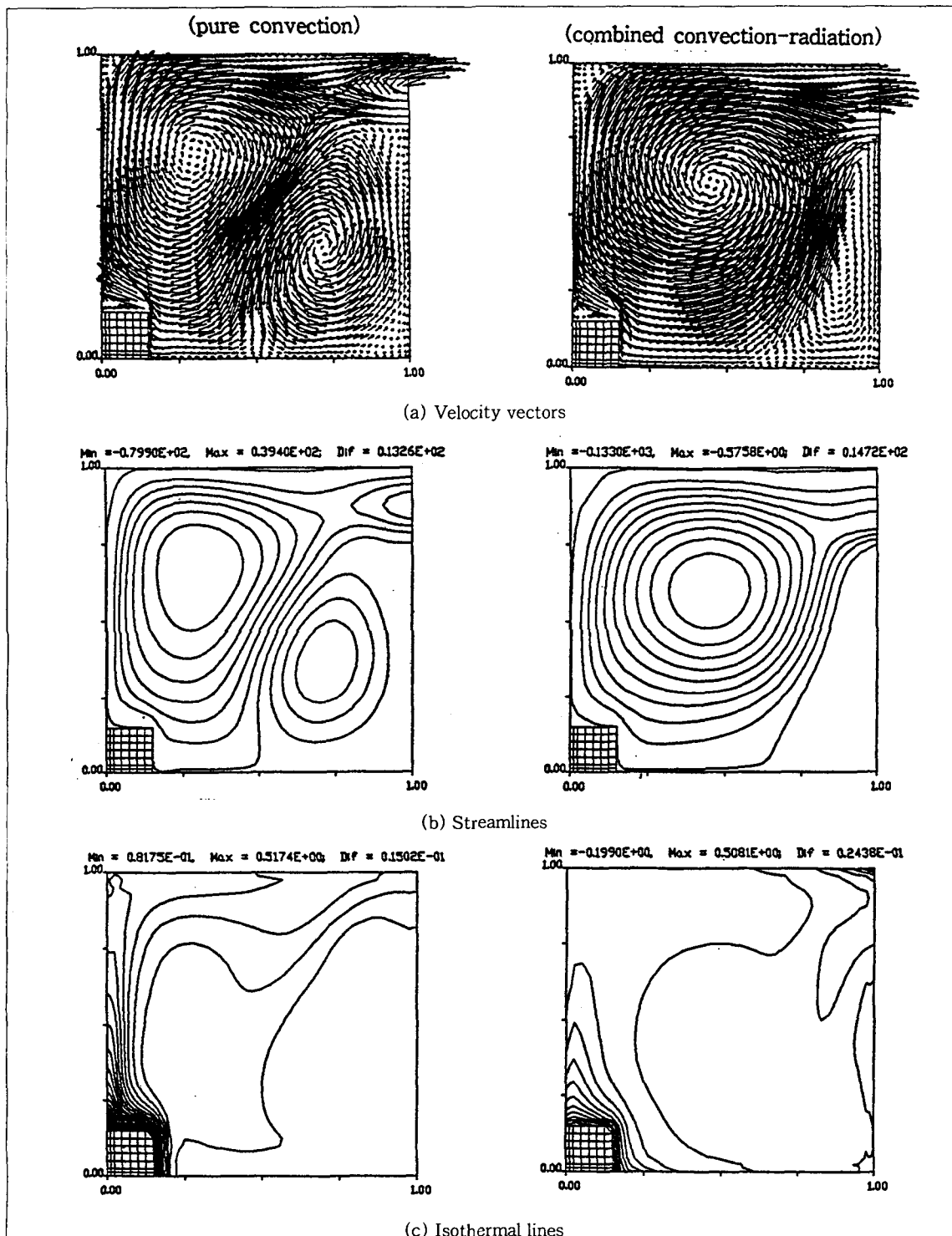


Fig. 5. Comparison of velocity vectors, stream lines and isothermal lines between pure convection and combined mode heat transfer for heat source position ①.

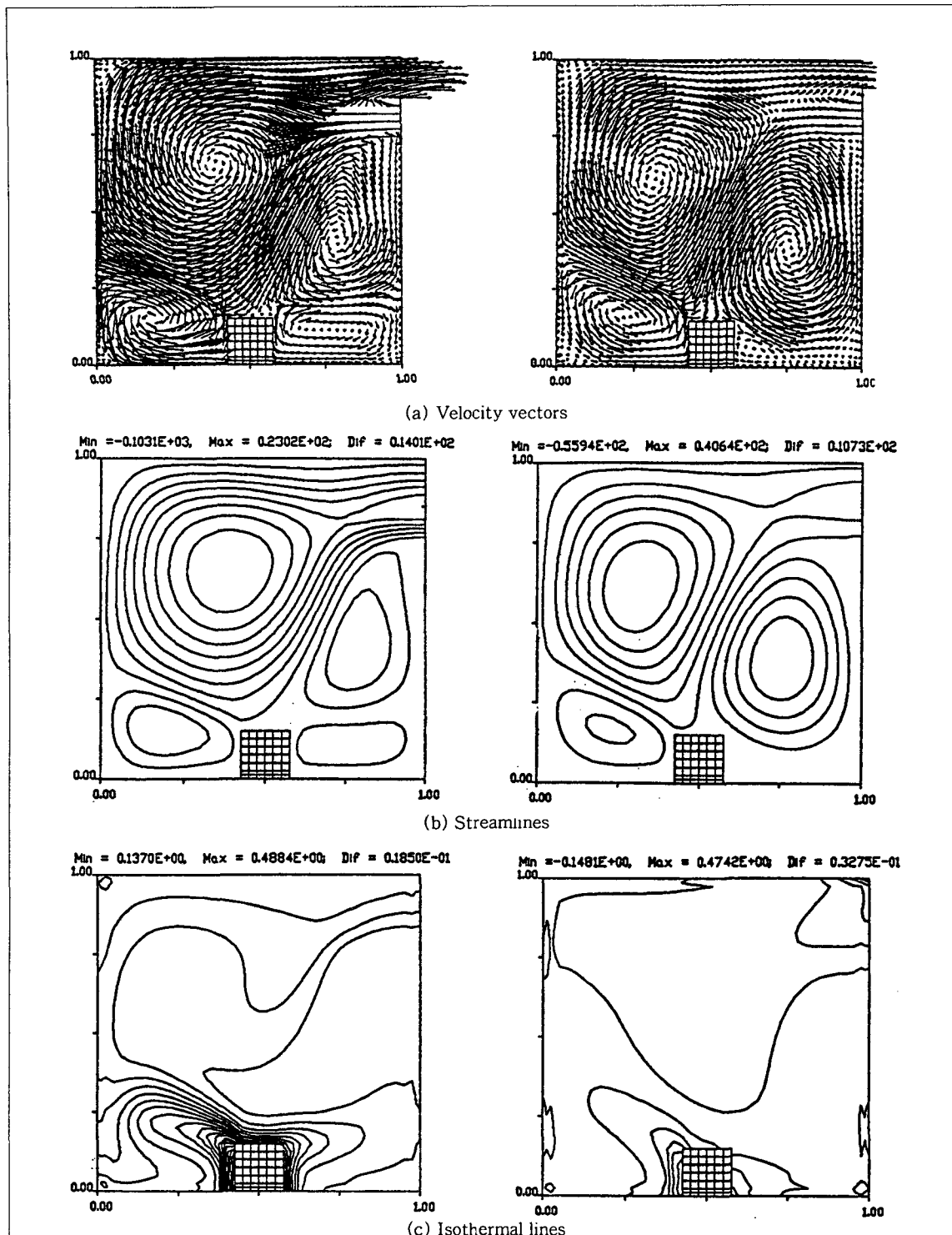


Fig. 6. Comparison of velocity vectors, streamlines and isothermal lines between pure convection and combined mode heat transfer for heat source position ②.

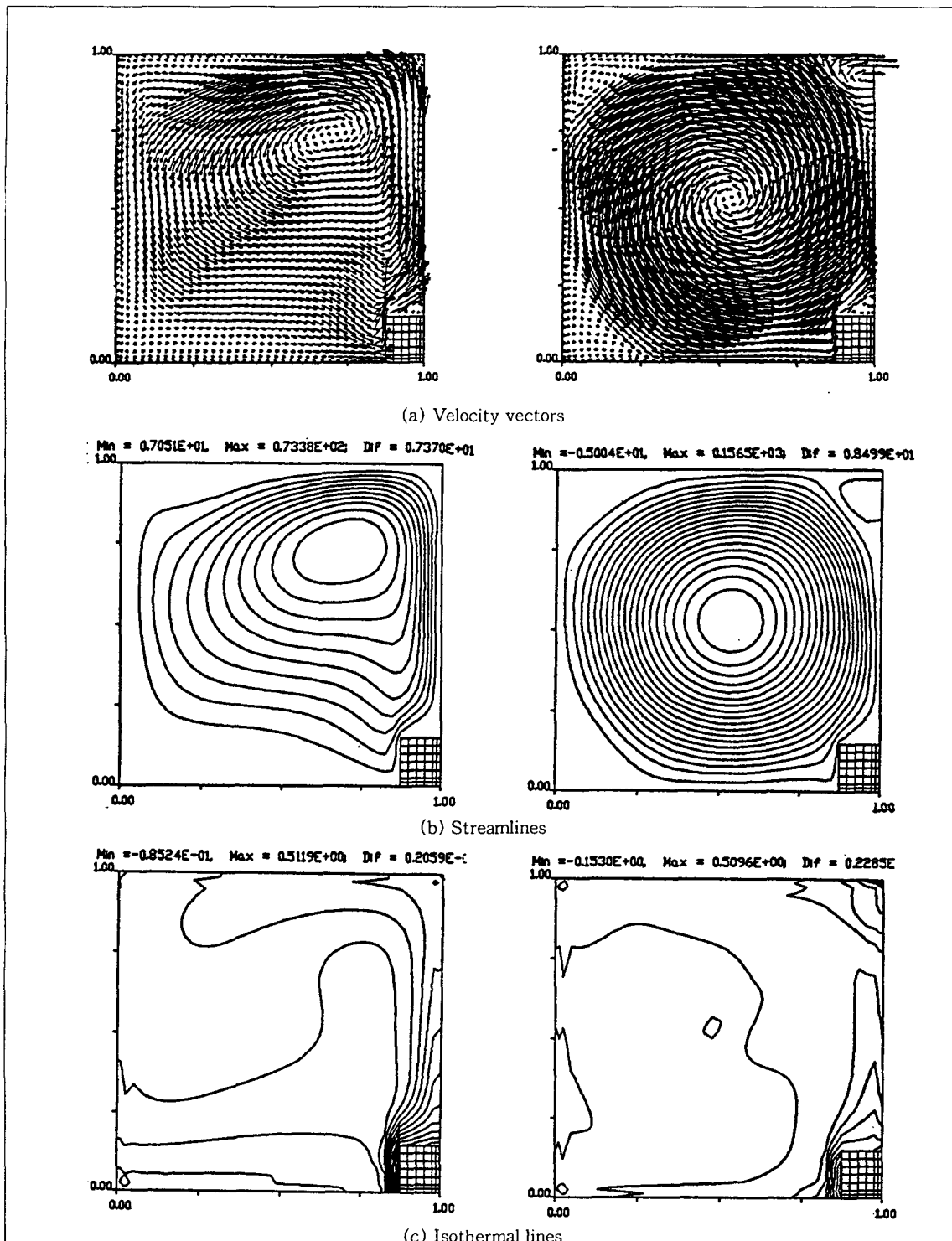


Fig. 7. Comparison of Velocity vectors, streamlines and isothermal lines between pure convection and combined mode heat transfer for heat source position ③.

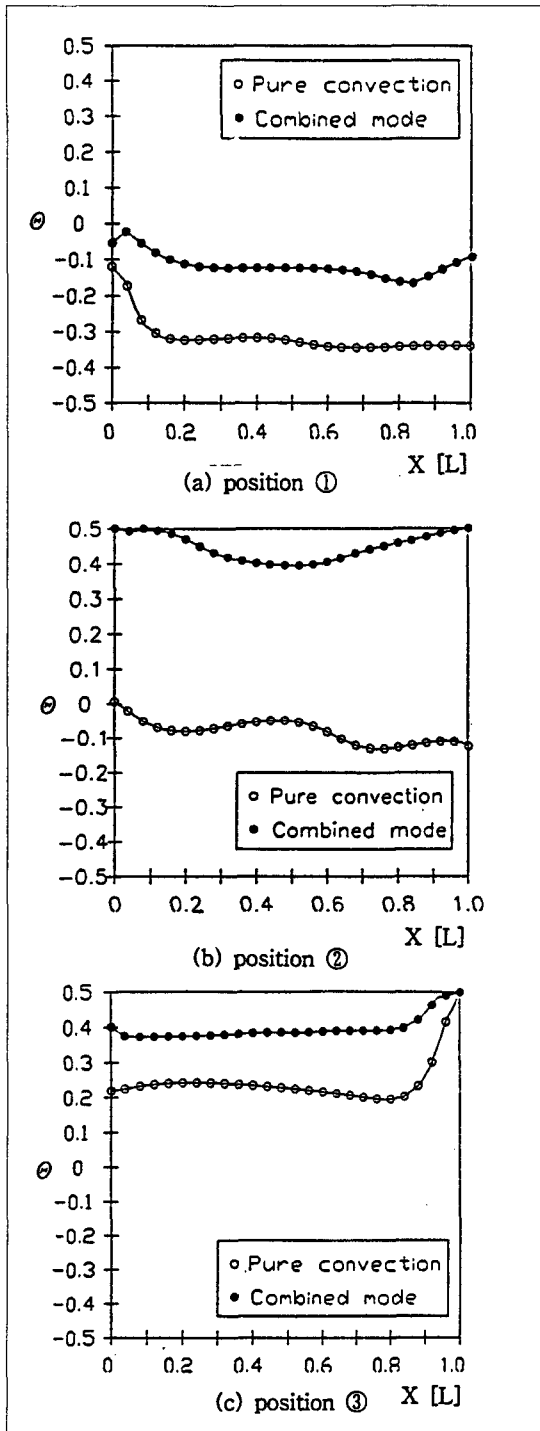


Fig. 8. Comparison of temperature between pure convection and combined mode heat transfer for heat source position ①, ②, ③ ($\alpha=1.0$, $\sigma_s = 0.0$, $\rho=0$).

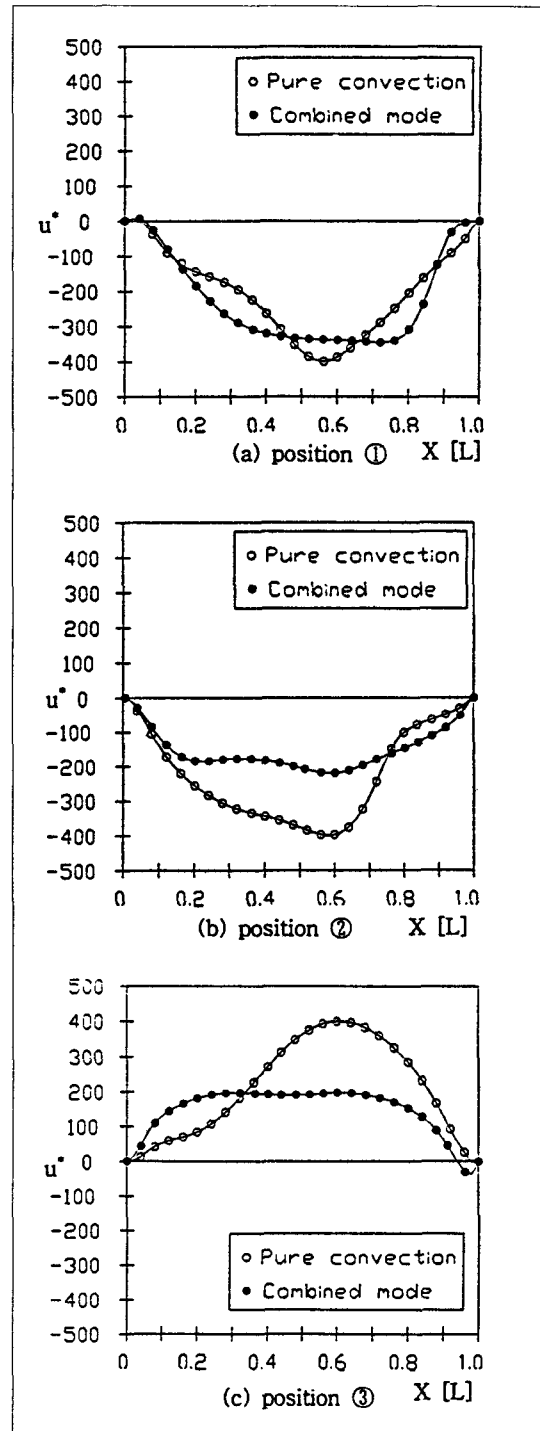


Fig. 9. Comparison of velocities between pure convection and combined mode heat transfer for heat source ①, ②, ③ at position $y^* = 0.5m$.

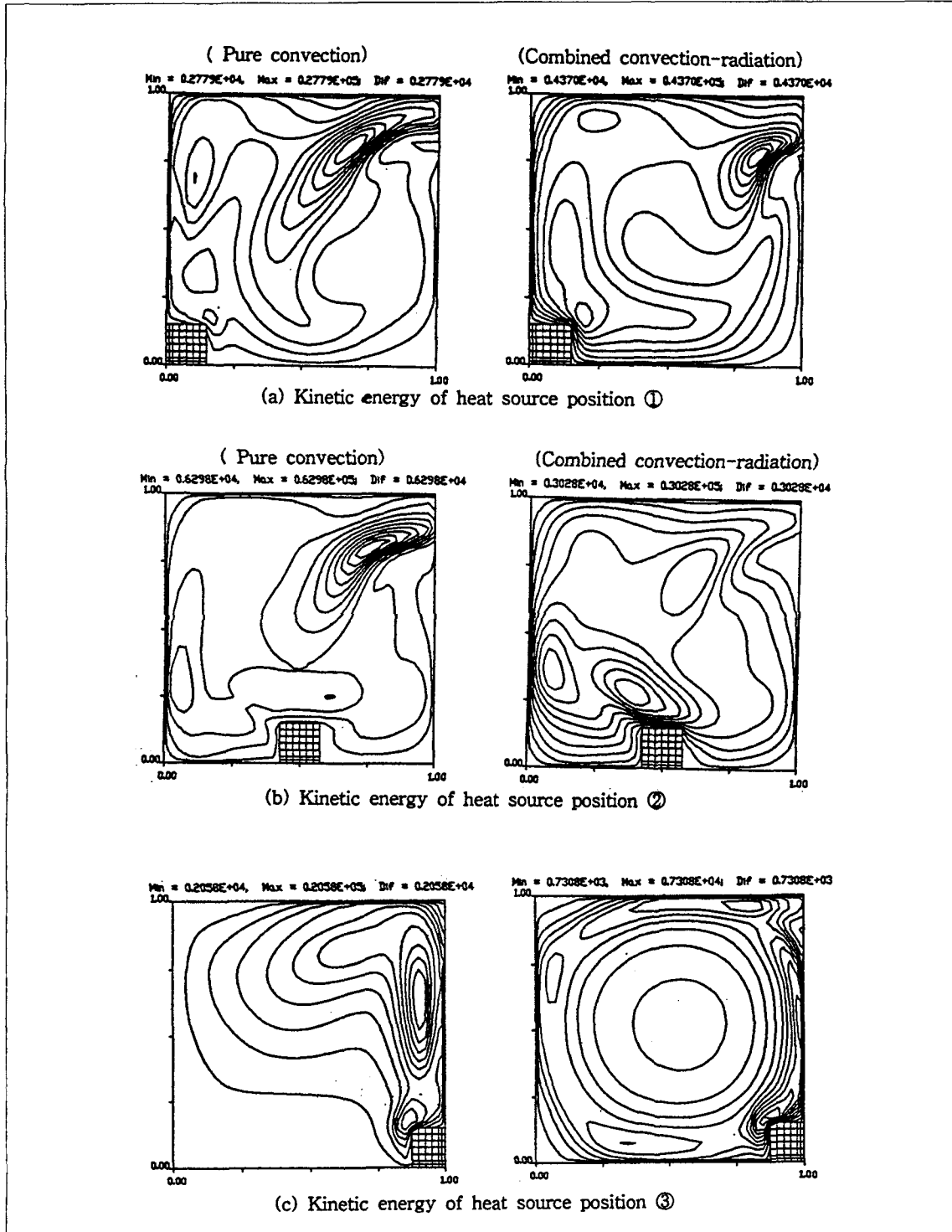


Fig. 10. Comparison of the kinetic energy between pure convection and combined mode heat transfer at location of Heat source position ①, ②, ③.

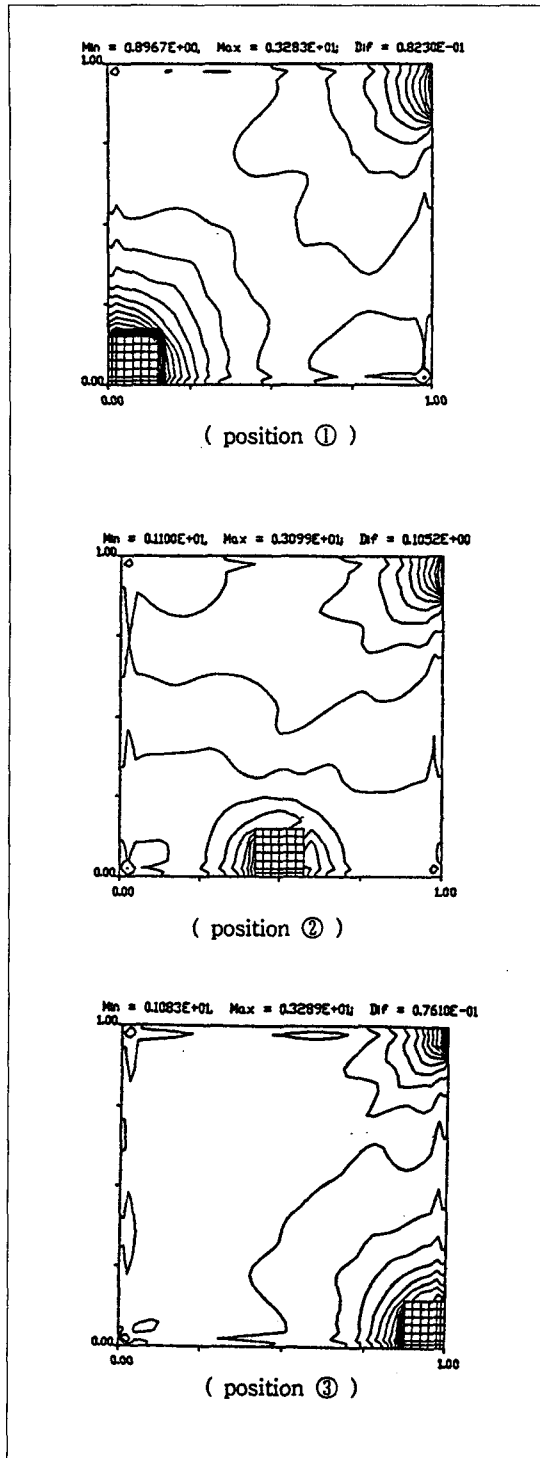


Fig. 11. Contours of average radiation intensity for location of heat source position ①, ②, ③.

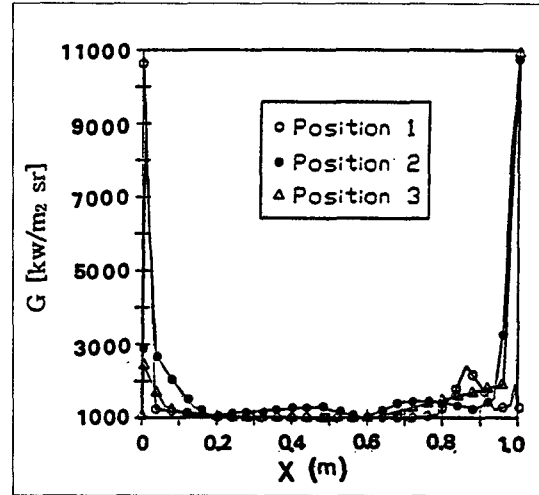


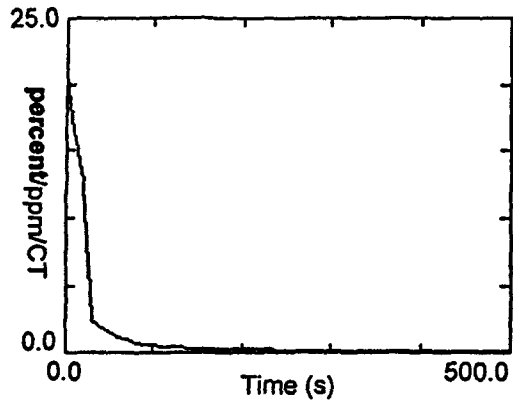
Fig. 12. Average radiation intensity for location of heat source position ①, ②, ③.

다만 복사 물성치의 산란은 무시하였다. 그림에서 살펴보면 평균복사강도는 열원의 위치에 따라 계산 결과를 비교할 때 큰 차이를 보였는데 열원이 좌측과 우측에 있을 때에는 열원과 개구부 주위로 많은 복사 에너지를 전달하고 있으며 중앙에 위치하고 있을 때에는 모든 공간으로 복사 에너지를 전달하고 있어 비교적 고른 복사강도 분포를 보여주고 있다. 열원이 개구부가 있는 우측에 있을 때에는 개구부를 통하여 고온의 열을 방출하고 있기 때문에 좌측의 공간까지 도달하고 있지 못하며 다만 벽을 통하여 아주 약한 에너지만이 전달하고 있음을 보였다.

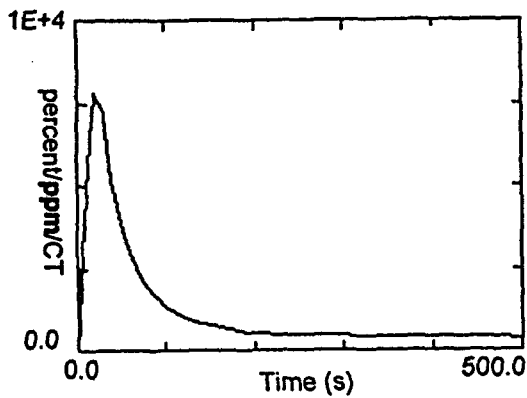
Fig. 12에서는 x^* 에 따른 평균복사강도를 나타내었다. ($y=0.5H$) 열원의 위치에 따라 평균복사강도는 유사한 분포를 보이고 있으며 천정부에서 열원이 좌측(개구면과 반대부위)에 있을 때 복사강도가 낮은 분포를 보인 것은 복사열이 벽면을 따라 흐르면서 흡수된 것으로 생각된다. 또한 열원이 위치한 양벽면이 자유 공간보다 복사강도가 훨씬 높게 나타난 것은 벽이 고온으로 되어 상대적으로 복사열을 많이 방출하기 때문이다.

4.1.3 연소가스 분석

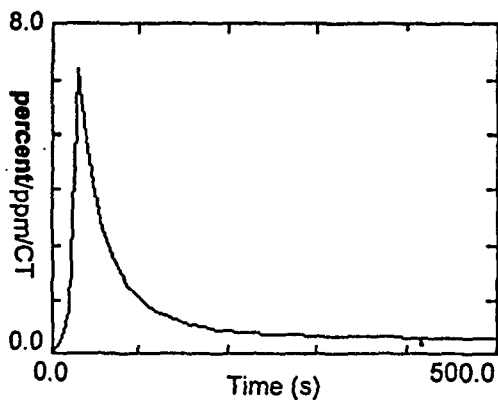
Fig. 13에서는 HAZARD I 프로그램을 사용하여 연소 가스에 대한 농도를 해석한 결과를



(a) Oxygen concentration



(b) Carbon monoxide



(c) Carbon dioxide

Fig. 13. Change with time of O₂, CO, CO₂ concentration at upper layer. (0~500sec).

O₂, CO, CO₂의 농도 변화에 따라 나타내었고 이들의 변화와 mass flux와의 상관관계를 비교하였다. 여기서 U는 화재실의 상층부(upper layer)를 나타내었다. 그림에서 살펴보면 화재 초기 온도의 급격한 상승으로 인하여 산소 농도가 대기농도 21%에서 급속하게 감소되다가 100sec 이후 완만하게 감소되면서 입력시 제한농도인 1%에 일정하게 도달하였다. 이것은 화재시 신속한 피난을 하지 않으면 산소 농도의 감소로 질식할 우려가 크다. CO나 CO₂의 분포를 살펴보면 화재 초기에는 연소로 인하여 급격한 증가를 보이다가 100sec 이후 완만하게 감소되어 200sec 이후 거의 일정하여 농도 변화를 나타내지 않았다. 이것은 산소농도의 감소로 인하여 더 이상 연소가 진행되지 않는다는 것을 나타내며 Fig. 14에 나타낸 상층부의 mass flux 역시 200sec이후는 거의 일정하여 더 이상 생성물이 발생되지 않는다는 것을 의미한다.

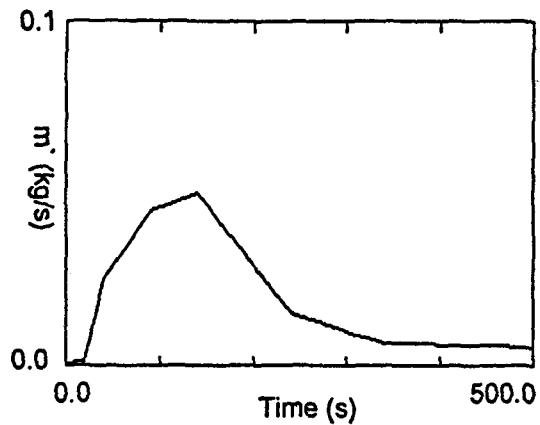


Fig. 14. Mass flux from the plume into upper layer with time(0~500 sec).

V. 결론

CCRHT프로그램을 이용하여 부분 개방되고 시스템 내부에 열원이 존재된 2차원 밀폐공간내의 화재에 의하여 만들어진 연소가스의 유동 현상을 순수 자연대류와 복사열전달을 고려하여 수치적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 화재 발생시 자연대류와 복사를 고려한 복합 열전달은 자연대류만을 고려한 경우보다 유동장 및 온도장 모두에 큰 영향을 미치게 됨을 확인할 수 있었으며 연소가스의 유동을 정확히 예측가능하였다. 따라서 화재시 열전달은 복사에 의한 영향을 반드시 고려하여야 한다.
- 2) 화재원이 개구부 반대벽 쪽에 위치할 때 연기의 방향이나 열전달이 개구면으로 집중되는 경향이 있어 피난에 위험성이 더 크리라고 생각된다.
- 3) 외부로부터 유입된 공기의 영향은 순수 자연대류에 의한 경우에는 순환력이 낮아 큰 영향력을 미치지 못하지만 복합열전달의 경우는 복사열이 시스템 내부의 유체를 가열하는 효과와 재가열에 의한 유체의 순환력의 증가로 외부로 많은 에너지를 유출시키는 효과가 크다고 판단된다.
- 4) 평균 복사 강도는 열원이 좌우측에 있을 때는 열원 및 개구부 주위로 많은 복사강도 분포를 나타내고 중앙에 있을 때는 전공간으로 고른 복사장을 나타내고 있어 화재시 발열체의 위치와 개구부에 따라 화재의 확산이 달라짐을 알 수 있다.
- 5) O₂ 농도는 초기에 급속히 감소하는 반면에 CO나 CO₂는 급속한 증가를 보이다가 일정한 분포를 보였으며 이것은 mass flux의 변화와 일치함을 볼 수 있다. 따라서 초기 피난의 중요성을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Cheok-Fah Than and Brian J. Savelonis, "Modeling Fire Behavior in Enclosure with a Ceiling Vent", Fire Safety Journal 20, 1993, pp.151-174
2. T. Fusegi and B. Farouk, "Laminar and Tubulent natural Convection -Radiation Interactions in a square Enclosure Filled with a Nongray Gas," Numer. Heat transfer, Part A, Vol.15, 1989, pp. 303-322
3. Cooper, L. Y., "Calculation of the Flow Through a Horizontal Ceiling/Floor Vent., National Institute of standards and Technology, (NISTIR), 1989, pp.4052
4. Takeda, H., "Model experiments of ship fire. 22nd Symp. (international) on Combustion., The Combustion Institute, pp.1311-17
5. Kim-T-K, "Radiation and Combined Mode Heat Transfer Analysis in absorbing, Emitting, and Mie-Anisotropic scattering Media Using the S-N Discrete Ordinate Method", University of Minnesota, 1990
6. 손봉세, "발열체와 개구부가 있는 복합 공간내의 자연대류-복사 열전달 연구", 건국대학교 박사 학위 청구 논문, 1995
7. 박희용, 박경우, "건물내 화재에 의한 연소가스 거동 예측에 관한 연구" 공기조화, 냉동공학 회 논문집제6권 3호, 1994, pp.267-281
8. Fiveland, W. A, "Discrete-Ordinates Solutions of the Radiative transfer Equation for Rectangular Enclosure", ASME J. of Heat Transfer, Vol.106, pp.669-706
9. 김태국, "Numerical Analysis of Combined Mode Heat Transfer", 중앙대학교출판부, 1995
10. Kim,T.-K, H. Lee and J. A. Menart, "Nongray Radiative Gas Analysis Using the S-N Technique," ASME Journal of Heat Transfer, Vol.113, 1991
11. Patankar, S.V, "Numerical Heat Transfer and fluid Flow", Hemisphere, Washington, D. C 1980
12. 추병길, 박찬국, 방배연설비실무, 동화기술, 1995
13. Richard W. Bukowski 외2, "Software User guide for the HAZARD I Fire Hazard Assessment Method", NIST, 1989.