



논문

발열체가 있는 열린 공간내에서의 자연대류-복사열전달
현상에 관한 수치적연구

Numerical Study On Combined Natural Convection-Radiation
In Partially Open Square Compartments with A Heater

손 봉 세* 한 규 익** 서 석 호**
Son, Bong-Sei Han, Gyu-Ik Seo, Seok-Ho
이 재 효*** 김 태 국****
Lee, Jae-Hyo Kim, Tae-Kuk

Abstract

Study on combined natural convection-radiation in partially open square enclosures filled with absorbing-anisotropic scattering media is performed. A heater block located in the enclosure causes the natural circulation of the fluid in the enclosure which results in significant in-flow of the cold fluid through the partially open wall. Four different locations of the heater are considered to observe the effect of the heater locations on the resulting heat transfer. Results obtained from the combined convection-radiation analyses show much stronger circulation of the fluid inside the enclosure as compared to those obtained from the pure convection analyses. As the ratio of the open area is increased, the inflow of the cold fluid and the circulation of the fluid inside the enclosure is increased causing lower fluid temperature inside the enclosure. It is shown that the location of the heater influences the circulation and heat transfer significantly by showing stronger circulations and more uniform temperature distributions for the cases where the heater is located on the bottom wall as compared to those for the cases where the heater is located on the upper part wall of the enclosure. For pure absorbing medium, the expected circulation in the fluid is relatively weak as compared to those with absorbing-scattering medium due to the smaller wall heating as the radiant heat is used to heat the fluid instead. The forward anisotropic scattering phase function is shown to increase the fluid circulation further as compared to the isotropic scattering medium.

1. 서 론

자연 대류 -복사복합열전달 문제는 많은 연구자들의 연구 대상이 되어 왔으며, 여러가지 실제 시

스템에서의 열전달을 규명하기 위하여 고려되어야 하는 공학적으로 매우 중요한 현상이라 하겠다. 이러한 열전달 현상은 태양열 집열장치, 전자 장치의 냉각, 실내의 화재 그리고 건물의 냉 난방 등에 응용될 수 있을 뿐만 아니라 핵융합로의 설계, 산업용 가열로등 고온의 열시스템에서 실제의 응용을 찾아 볼 수 있다. 특히 내부 발열체가 있는

* 경원전문대학교 소방안전학과
** 중앙대학교 대학원
*** 건국대학교 기계공학과
**** 중앙대학교 기계공학과

공간내에서의 복합열전달에 관한 연구는 실제 화재시 화재하중에 따른 화재성장 및 전파특성을 분석하는데 매우 중요하며 또한 열 및 인기감시기의 감지특성과 피난 및 소화시간의 결정등 화재예방에 필요한 기초자료로 활용 할 수있다. 따라서 공간내에서의 온도장과 유동장 특성에 관한 연구는 여러 산업분야에 응용될 수 있는 연구과제로서 보다 면밀한 연구가 필요가 하다.

1차원 공간내에서의 난류유동-자연대류와 복사의 복합열전달 현상을 연구한 결과가 발표된 바가 있으며,¹⁾ 2차원 공간에서의 자연대류-복사 복합열전달 문제에 대한 해석 결과는 주로 순수 흡수매체에 대하여 발표되고 있다.^{2,3,4)} 이와같이 각종 열시스템 및 건축물화재등의 열전달에서는 전도, 대류 및 복사에 의한 열전달이 복합적으로 발생하게 되므로 열전달 특성을 해석함에 있어서 복사에너지의 전달특성을 정확하게 이해하는 것은 매우 중요하다. 그러나 복사열전달 방정식(RTE)은 복잡한 비선형 적분-미분 방정식 형태로 주어지므로 유동장과 동시에 해를 구하는 데에 많은 어려움이 있기 때문에 복사에 의한 영향을 무시하는 경우가 많았다. 이러한 복사열전달의 해석은 x-y 평면좌표 및 r-z 원통좌표계에서 주로 회색체 복사 문제를 다루고 있으며, 대부분 이상적인 순수흡수 또는 등방향 산란매체로 가정하여 여러가지 방법에 의한 해석 결과가 발표 되었다. 최근에는 복사와 자연대류의 상호 작용이 존재하는 밀폐 공간내의 복합열전달에 대해서도 수치해석적 방법을 이용하여 연구를 하고 있으나 대부분의 경우 매질의 산란효과를 무시하였거나,^{5,6)} 등방산란으로 가정하였다.⁷⁾ 매질이 복사에 관여하는 문제의 많은 경우에 있어서, 참여매질은 연소시 발생하는 고온의 연소가스 및 분진등으로 인하여 복사에너지의 흡수 및 산란효과와 산란의 비등방성을 고려하여 줄 필요가 있다. 복사열전달방정식의 해를 수치해석적으로 구하기 위하여 많은 방법들이 제시되고 있지만 다차원 공간에서의 해석, 참여매체의 여러조건에서의 정확한 해석이 가능한지, 정확한 복사강도의 분포를 계산 할 수 있는지를 따져볼 때 만족하는 방법은 그리 많지 않다. 이들 방법은 복사강도를 종속변수로 고려하느냐 아니면 평균복사강

도 또는 복사열유속을 종속변수로 고려하느냐에 따라 S-N 구분종좌표법,^{8,9,10,11)} Monte Carlo법,¹²⁾ FEM법,^{13,14)} P-N법¹⁵⁾ 등이 있다. 이러한 방법들은 각기 장단점을 가지고 있으며, 본 연구에서 채용하고자 하는 S-N 구분종좌표법은 복사강도를 종속변수로 해석하는 계산방법이며 대체적으로 정확한 해를 얻을 수 있는 방법 중의 하나이다.¹⁶⁾

지금까지의 자연 대류에 관한 연구는 다양하지 못한 기하학적 형상과 물리적 지배 인자를 고려한 수치해석 연구가 진행되고 있으며 이러한 경우도 대부분 복사를 무시한 연구가 다수를 차지하고 있다. 또한 복사를 포함하여 해석한 자연 대류에 관한 연구도 아직은 밀폐된 사각 공간에서의 해석이 대부분을 차지하고 열린 공간에 대한 연구는 아직은 미미한 실정이다.

본 연구에서는 일부가 열린 2차원 공간내에서의 매질이 가열체에 의하여 가열될 때의 자연대류-복사 복합열전달 현상을 해석하고자 한다. 즉, 공간내에는 열복사를 흡수, 방출 및 비등방 산란하는 매질로 채워져 있으며 이러한 참여매체가 복사에너지를 흡수, 방출 및 산란함으로써 가열되고 동시에 이로 인하여 발생된 매체내의 온도차에 의하여 자연대류 열전달이 발생한다. 여기서 중점적으로 고려하고자 하는 사항은 열을 발산하는 가열체의 위치 및 개구부가 있는 실내에서의 복합열전달에 의한 유체의 유동 상태 및 온도 분포등을 파악하는데 있다

2. 이론 해석

2.1 계산모델의 설정

이 연구에서 채택한 계산모델은 그림 1과 같이 상하 좌우 벽면이 단열되어 있는 정사각형 공간으로써, 오른쪽 벽의 일부는 열려 있다. 이러한 정사각형 공간(L×L) 내에는 고온 발열체 (0.15L×0.15L)가 놓여 있으며, 열린 벽을 통하여 외부로부터 유입되는 저온유체와 발열체사이의 온도차에 의하여 자연대류가 발생하게 된다. 여기서, 고려하고 있는 유체는 열복사를 흡수, 방출 및 산란하는 매질이므로 복사열전달에 의한 영향을 함께 고려하여야 하는 문제이다. 그림 1에서 볼 수 있듯

이 열을 발산하는 발열체는 4가지의 다른 위치에 놓여 있을 수 있다고 가정하였으며, 각각의 경우 발생하는 자연대류-복사 복합열전달에 의한 열전달 현상을 연구하고자 한다.

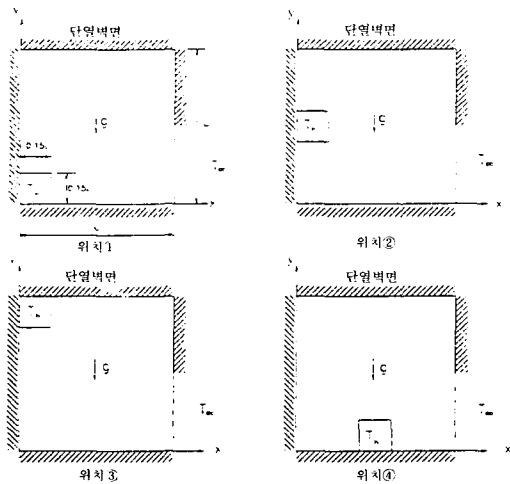


그림 1. 물리적 모델 및 좌표계

본 연구에서는 다음과 같은 가정하에서 복합열전달을 해석하고자 한다.¹⁷⁾

- (1) 유동은 2차원 정상 층류 유동으로 한다.
- (2) 고려되고 있는 유체의 온도에 대한 밀도의 변화를 아주 작다고 가정하고 부력항 이외에는 밀도를 상수로 가정하였다. (Boussinesq 근사)
- (3) 매질은 회색체이고 각 벽면은 모든 방향으로 균일한 반사를 한다.
- (4) 모든 벽면의 방사율은 균일하다.
- (5) 비등방산란 위상함수는 K개의 항으로 된 Legendre 다항식으로 표시된다. (Mie-산란 위상함수)

2.2 무차원 자연대류 방정식

전절에서 언급된 가정들을 기초로 하여 고려하고 있는 사각형공간에서의 무차원 연속, 운동량, 에너지 방정식들은 각각 다음과 같이 정리될 수 있다.

연속 방정식 :

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

운동량 방정식 :

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{Ra}{Pr} \Theta \quad (3)$$

에너지 방정식 :

$$u \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left[\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right] + S \quad (4)$$

여기서 S는 복사열전달에 의한 생성항으로서 다음과 같이 무차원화된 수식으로 표시될 수 있다.¹⁶⁾

$$\begin{aligned} S &= -\frac{\Theta_0 \tau_L}{Pr P_1} \cdot (1-\omega) \{T^4 - G^*\} \\ &= -\frac{\Theta_0 \tau_L}{Pr P_1} \cdot (1-\omega) \left\{ \left(\frac{\Theta + \Theta_0}{\Theta_0} \right)^4 - G^* \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

여기서, 무차원 변수들은 $\Theta = (T - T_0) / (T_h - T_x)$, $\Theta_0 = T_0 / (T_h - T_x)$, $T^* = T / T_0$, $x^* = x / L$, $y^* = y / L$, $u^* = u / (v_f / L)$, $v^* = v / (v_f / L)$ 등과 같이 정의되었으며, 기준 온도로는 $T_0 = 0.5(T_h + T_x)$ 가 고려되었다. 그리고, ω 는 산란율 (scattering albedo)로서 $1 - \omega = \alpha / \beta_0$ 의 관계를 가지며, 여기서 α 는 흡수계수, β_0 는 소멸계수를 각각 나타낸다. G^* 는 무차원 평균복사강도로서 $G^* = \pi G / (\sigma T_0^4)$ 와 같이 정의되며, 식 (3), (4) 및 (5)에서 나타나는 무차원 그룹들은 각각 다음과 같다.

Prandtl 수 : $Pr = \mu C_p$

Grashoff 수 : $Gr = \frac{g \beta (T_h - T_x) L^3}{v_f^2}$

Rayleigh 수 : $Ra = Gr \cdot Pr$

Planck 수 : $P_1 = (k / L) / (4\sigma T_0^3)$

전도-복사 인자 : $N_{cr} = P_1 \cdot \tau_L = k \beta_0 / (4\sigma T_0^3)$

여기서 μ , C_p , k 및 β 는 각각 유체의 점성계수, 비열, 열전도계수 및 열팽창계수이며, g 는 중력가속도이다. τ_L 은 광학두께로서 매체를 통한 복사에

너지의 통과 정도를 나타내는 값이며 $\tau_L = \beta_0 \cdot L$ 로 정의 된다.

2.3 복사열전달 방정식

복사열전달의 기본변수인 복사강도는 다음과 같은 형태로 무차원화 될 수 있다.

$$I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) = \pi I(x, y, \mu, \xi) / (\sigma T_0^4) \quad (6)$$

여기서 μ 및 ξ 는 x 및 y 방향에 대한 방향여현을 나타내며, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 무차원 복사강도 I^* 에 대하여 복사열전달 방정식을 정리하면 다음과 같이 나타난다.

$$\left[\mu \frac{\partial}{\partial x^*} + \xi \frac{\partial}{\partial y^*} + \tau_L \right] I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) = S^*(x^*, y^*, \mu, \xi) \quad (7)$$

여기서,

$$S^*(x^*, y^*, \mu, \xi) = (1 - \omega) \tau_L T_0^4(x^*, y^*) + \frac{\omega \tau_L}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 I^*(x^*, y^*, \mu', \xi') \Phi(\mu, \xi; \mu', \xi') d\mu' d\xi' \quad (8)$$

여기서, $\Phi(\mu, \xi; \mu', \xi')$ 는 산란 위상함수로서 다음과 같이 Legendre 다항식으로 표시할 수 있다.

$$\Phi(\mu, \xi; \mu', \xi') = \sum_{n=0}^{K=1} C_n P_n(\cos \varphi) \quad (9)$$

여기서, $\cos(\varphi) = \mu\mu' + \xi\xi' + \eta\eta'$ 로서 산란각을 나타낸다. 다항식의 계수 C_n 은 공기중에 떠 있는 물방울 [굴절계수=(1.33, 0.0), 입자의 크기계수

표 1. C_n , Mie 산란 위상함수의 계수¹⁶⁾

n	F2	Isotropic
0	1.00000	1.00000
1	2.00917	
2	1.56339	
3	0.67407	
4	0.22215	
5	0.04725	
6	0.00671	
7	0.00068	
8	0.00005	
항수(K)	9	1
$C_1/3$	0.66972	1.0

(size parameter)=1.0]의 산란을 가정하여 미리 계산된 표 1의 자료를 사용하였다.

식 (4) 및 (5)에서 복사에 의한 생성항은 다음과 같이 고려되었다.

$$\nabla \cdot Q_r = 4\sigma T_0^4(1 - \omega)[T_0^4 - G^*] \quad (10)$$

여기서, 무차원 평균복사강도 (G^*)는 다음과 같이 계산된다.

$$G^*(x^*, y^*) = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) d\mu d\xi \quad (11)$$

2.4 경계조건

2.4.1 단열벽에서의 경계조건

식 (4)에 주어진 에너지 방정식에 대한 경계조건으로서 단열경계면의 경우에 대하여 다음과 같은 무차원화 된 수식으로 표시 가능하다.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x^*} = \frac{\Theta_0}{P_1} Q_{rx}^* \quad (12a)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y^*} = \frac{\Theta_0}{P_1} Q_{ry}^* \quad (12b)$$

여기서, 무차원 복사열유속 Q^* 는 $Q^* = Q / (\sigma T_0^4)$ 로 정의된다.

$$Q_{rx}^*(x^*, y^*) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mu I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) d\mu d\xi \quad (13a)$$

$$Q_{ry}^*(x^*, y^*) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \xi I^*(x^*, y^*, \mu, \xi) d\mu d\xi \quad (13b)$$

2.4.2 복사열전달의 경계조건

복사열전달을 해석하는데 있어서 모든 고체벽면들은 불투명하며 확산 반사를 한다고 가정하여 벽면에서의 복사강도를 고려하였다. 따라서 계산 영역 경계면으로 부터의 복사강도는 벽면온도의 4제곱에 비례하여 방출되는 복사에너지와 벽면에 입사하는 복사에너지의 반사에 의한 영향을 함께 고려하여 모든 방향으로 균일한 반사를 하는 불투명한 벽면(diffusely reflecting opaque walls)에 대하여 다음과 같이 무차원화된 형태로 표시할 수 있다.

$$I_w(x^*, y^*, z^*, \vec{\Omega}) = \epsilon_w T_w^4(x^*, y^*, z^*)$$

$$+\frac{\rho_w}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \vec{n}_0}^{\vec{n} \cdot \vec{n}_0} |\vec{\Omega} \cdot \vec{n}| I_w(x, y, z; \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} \quad (14)$$

여기서, \vec{n} 은 벽면으로 부터 안쪽으로 향하는 단위 수직 벡터이며, 각도 벡터는 $\vec{\Omega} = (\mu, \eta, \xi)$ 를 나타낸다. 그러나, 계산영역의 경계면이 고체표면이 아닌 열린부분에 대하여는 그 위치에 있는 유체의 온도에 해당하는 가상적인 흑체면으로 고려하여 복사열전달을 해석하였다.

2.5 수치해석

이 연구에서는 방정식을 이산화 시키기 위하여 43×43 의 격자계를 각각 구성하여 검사 체적법(control volume method)을 적용하였다. 이산화된 보존 방정식들은 SIMPLE 알고리즘¹⁸⁾을 이용하여 해석하였으며, 복사열전달의 계산은 S-8 구분종좌표법(하나의 제어체적내에서 40개의 각도 구역을 고려)으로 이산화된 복사방정식의 해는 μ, η 의 값이 음의 수 인지 양의 수 인지에 따라 4방향 sweep 법으로 반복 계산하여 구하였다.¹⁶⁾

식 (5) 와 같이 표시된 복사생성항은 무차원 온도 Θ 의 4 승에 비례하므로 수치해석을 위하여 다음과 같은 형태로 선형화 하여 사용하였다.

$$S = S_p \cdot \Theta + S_c \quad (15)$$

식 (5)를 식 (15)와 같은 형태로 선형화하기 위하여는 그 기울기를 고려하여 다음과 같이 선형화시키는 것이 바람직하다.¹⁸⁾

$$S = \bar{S} + \left(\frac{dS}{d\Theta} \right) (\Theta - \bar{\Theta}) \quad (16)$$

식 (16)의 방법을 이용하여 식 (15)와 같은 형태로 선형화한 결과 S_c 및 S_p 는 각각 다음과 같이 유도되었다.

$$S_c = \frac{\Theta_0 \cdot \tau_L \cdot (1-\omega)}{\text{Pr} \cdot P_1} \{3T^4 - 4T^3 + G^4\} \quad (17)$$

$$S_p = -4 \frac{\tau_L \cdot (1-\omega)}{\text{Pr} \cdot P_1} T^3 \quad (18)$$

해의 수렴을 위해서 적절한 하향이완 (under relaxation) 을 실시하여 안정된 수렴을 얻었으며, 이때 속도에 대한 하향이완계수는 0.5, 압력 및 온

도에 대해서는 0.8을 사용하였다. 해의 수렴은 온도장이 다음과 같은 수렴조건을 만족할때까지 반복하게 하였다.

$$\max \left[\frac{\Theta_{\text{new}} - \Theta_{\text{old}}}{\Theta_{\text{new}}} \right] < \varepsilon \quad (19)$$

여기서 온도장에 대한 최대 허용상대오차 ε 은 10^{-4} 이하로 하였다. 계산소요시간은 계산조건에 따라 달라지지만 보통 IBM 호환 Pentium 90 MHz 컴퓨터로 순수 자연대류인 경우 약 30분 그리고 자연대류-복사 복합열전달의 경우 순수흡수 매체인 경우 약 1.5 시간, 비등방산란 매체인 경우에는 약 8 시간 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 자연대류-복사 복합열전달 현상의 연구에 있어 복사하는 가열체의 위치에 따른 정사각형 공간 내부에서의 열전달 양상의 변화를 수치해석적인 방법으로 연구하였다. 전도-복사 계수 (conduction-radiation parameter) N_{cr} 를 0.02, Prandtl 수 Pr을 0.72, Rayleigh 수 R_g 를 5×10^6 , 무차원 온도 Θ_0 를 1.5 (Boussinesq 근사를 만족하기 위하여,¹⁷⁾ $T_h = 1000K$ 및 $T_c = 500K$ 로 고려), 그리고 광학두께 τ_L 를 1.0으로 가정하였다. 이러한 조건하에서 복사열이 전체의 유동 및 열전달에 미치는 영향을 분석하였으며, 또한 발열체의 위치, 매체의 산란율 ω 및 산란위상함수 Φ 의 변화에 따른 복합열전달 현상의 변화도 연구하였다.

그림 2에서는 흑체벽면 ($\rho=0$)으로 구성된 정사각형 공간 내에 발열체가 그림 1의 위치(발열체는 격자모양으로 표시된 부분임)에 있을 때 순수 자연대류 및 자연대류-복사 복합열전달에 의하여 야기되는 속도 벡터, 유선함수 및 온도분포를 각각 나타내고 있다. 복사에 의한 열전달이 고려된 복합열전달의 해석 결과(그림 2의 오른쪽 편)는 이를 무시한 경우의 순수 자연대류 결과(그림 2의 왼쪽편)와 큰 차이를 보이고 있으며, 복합열전달의 해석 결과는 복사열에 의하여 유체가 직접 가열되는 영향을 받기 때문에 순수 자연대류에 비하

여 훨씬 더 큰 부력이 발생하여 강한 순환력이 생기게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과 그림 2의 오른쪽 그림들에서 보는 바와 같이 개구부로 부터는 더욱 많은 저온 유체가 유입되고 있음을 알 수 있으며, 전반적으로 공간내부의 유체는 더 높은 온도가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 복사에 의한 영향은 유동장 및 온도장 모두에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 만약 고려하고 있는 유체가 복사열전달을 흡수, 방출 및 산란할 경우 복사에 의한 영향을 필히 고려하여야 한다는 것을 보여주고 있다. 본 연구에서는 실내에서의 화재를 고려하여 참여매체가 복사에너지를 흡수, 방출 및 산란하고 있다고 가정하고 있기 때문에 이후의 여러가지 결과들은 복사를 고려한 복합열전달을 연구 대상으로 하고 있다.

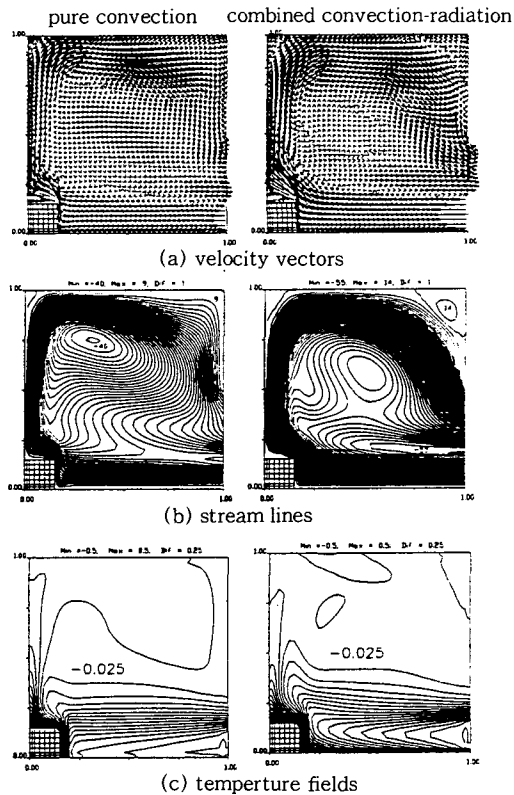


그림 2. 순수 자연대류와 자연대류-복사 복합열전달의 해석 결과 비교(개구율 50%)

그림 3, 4, 5 및 6에는 각 발열체의 위치별로 개

구율이 변화했을 경우의 자연대류-복사 복합열전달에 의한 유선함수 및 온도분포들을 보여 주고 있다. 여기서, 개구율이 0%인 밀폐시스템인 경우 외부에 있는 저온유체와 내부의 고온 발열체 사이에는 직접적인 열교환을 할 수가 없으며 따라서 이 경우에는 시스템의 오른쪽 벽을 외부의 저온 유체와 같은 온도로 유지되고 있다고 가정하였다. 그러나, 개구율이 50% 및 100%인 경우에 대하여는 개구부가 있는 벽의 차단된 부분을 다른 벽들과 마찬가지로 단열된 상태로 처리하였으며, 이러한 경우에는 내부의 발열체와 외부의 저온유체 사이에 열교환이 발생하는 것으로 고려하였다.

그림 3은 내부 발열체가 사각형 시스템의 좌측 하부에 위치 (위치 ①)할 경우 개구율의 변화에 따른 유동장 및 온도장을 보여주고 있다.

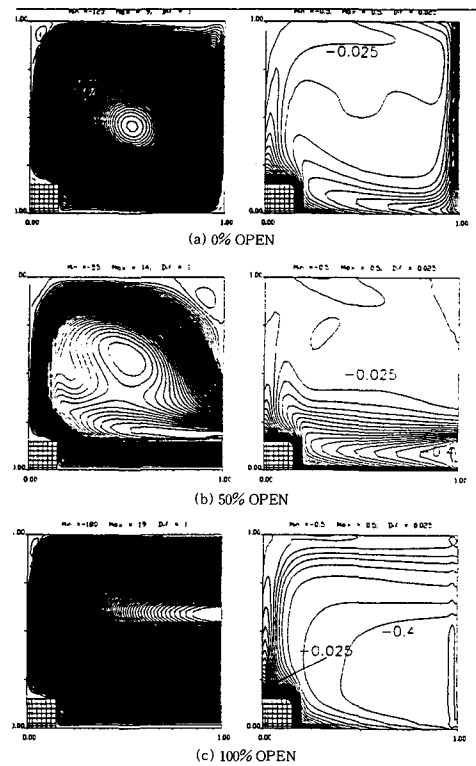


그림 3. 개구율의 변화가 복합열전달에 미치는 영향($\beta_0=1$, $\omega=0.0$, $\rho=0.0$, 발열체 위치①)

그림 3에서 볼 수 있듯이 개구율이 증가할수록

고체 벽면부분이 감소하여 유체의 유동이 보다 더 자유롭게 되기 때문에 외부로부터 더 많은 저온 유체가 유입되는 것을 알 수 있으며, 이로 인하여 사각 공간 내부의 유체는 개구율이 증가할수록 전반적으로 낮아지게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 발열체가 다른 위치에 있는 그림 4 (위치 ②), 그림 5 (위치 ③) 및 그림 6 (위치 ④) 등에서도 볼 수가 있다.

그림 3, 4, 5 및 6을 살펴볼 때 유체내부의 밀도 차이에 의한 순환력이 증대하면 공간내부의 온도 분포를 균일하고 또한 낮게 하는 효과를 가져오며, 이러한 순환력이 증대되는 현상은 발열체가 정사각형 공간의 하부에 있을 때 더욱 두드러진다는 것을 알 수 있다.

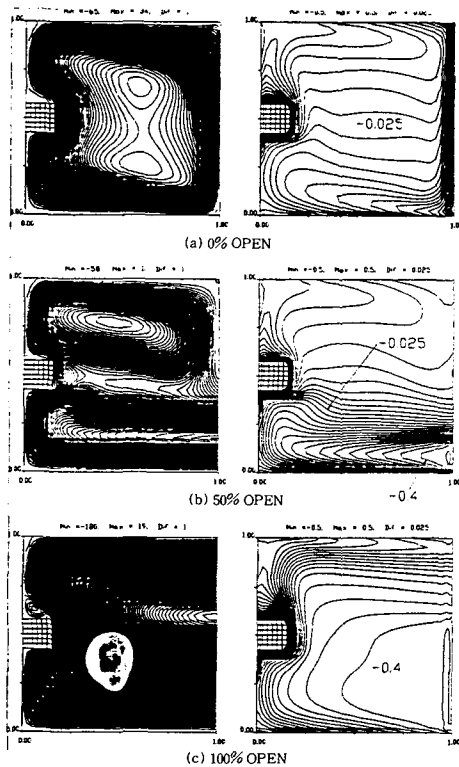


그림 4. 개구율의 변화가 복합열전달에 미치는 영향($\beta_0=1$, $\omega=0.0$, $\rho=0.0$, 발열체 위치②)

즉, 발열체가 사각 공간의 상부에 위치한 경우에는 가열된 유체의 밀도가 낮아져서 상부로 유동

하게되고 온도가 낮은 유체는 하부로 유동하게 되어 유체의 유동이 원활하게 이루어 지기가 어렵다. 반면에 발열체가 사각형공간의 하부에 위치한 경우 가열된 유체는 밀도가 낮아져서 상부로 유동하게 되고 온도가 낮은 유체는 하부로 유동하게 되어 유체의 유동이 원활하게 이루어 질수가 있다.

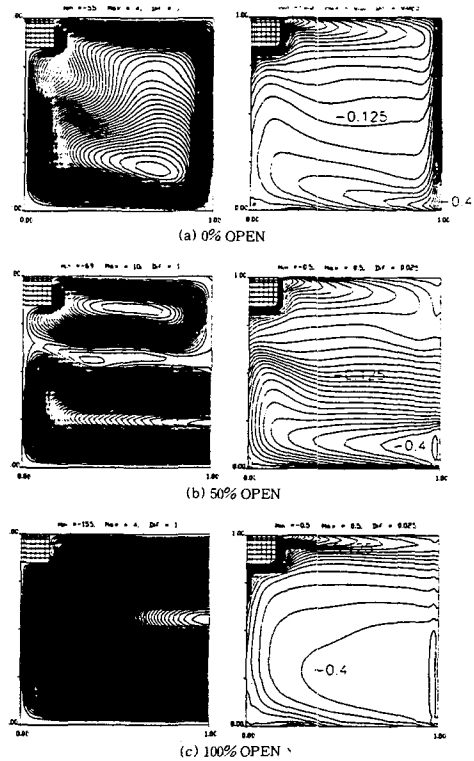


그림 5. 개구율의 변화가 복합열전달에 미치는 영향($\beta_0=1$, $\omega=0.0$, $\rho=0.0$, 발열체 위치③)

따라서 발열체가 상부에 위치한 경우에는 하부에 위치한 경우에 비하여 유체의 순환력이 증대되고 그결과 공간내 유체의 온도분포는 더 균일하게 된다. 그러나 그림 6의 ④ 번에 해당하는 위치에 가열체가 배열된 경우에는 고온 표면적이 ①, ② 및 ③의 위치에 가열체가 배치된 경우에 비하여 1.5 배가 되기 때문에 더욱 큰 순환력을 보여주고 있음을 알 수 있다.

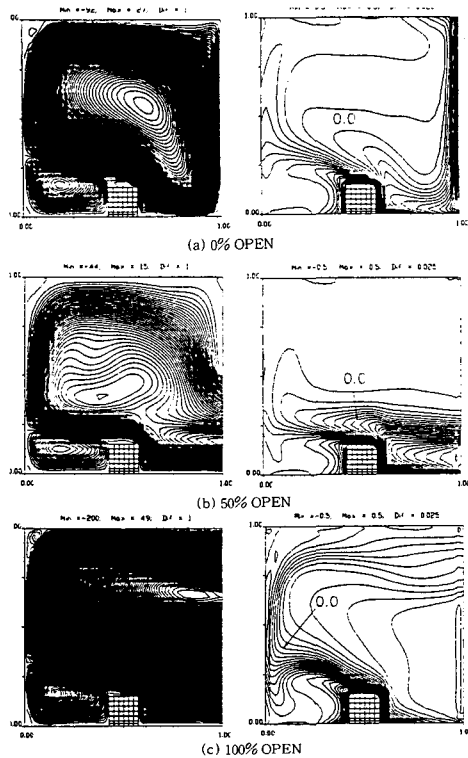


그림 6. 개구율의 변화가 복합열전달에 미치는 영향($\beta_0=1$, $\omega=0.0$, $\rho=0.0$, 발열체 위치④)

그림 7은 흑체벽면($\rho=0$)으로 구성된 정사각형 공간 내에 발열체가 그림 1의 위치에 있고 오른쪽 벽의 개구율이 50% 인 경우의 자연대류-복사 복합열전달 해석 결과들을 나타내고 있으며, 속도벡터, 유선함수 및 온도분포를 순수흡수 매체($\omega=0.0$), 흡수-등방산란 매체($\omega=0.5$) 및 흡수-비등방산란 매체($\omega=0.5$, 산란위상함수는 표 1에 주어진 F2)에 대하여 얻은 결과들을 각각 나타내고 있다. 그림 7에 주어진 산란율 및 산란함수의 변화에 따른 복합열전달의 결과들을 살펴볼 때 산란율이 0인 순수흡수매체인 경우 흡수 및 산란(등방 및 비등방) 하는 매체인 경우보다 개구부를 통하여 유입 및 유출되는 유체의 양이 적은 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 순수흡수매체인 경우 발열체에서 방출된 복사에너지가 대부분 사각공간의 중심부에 있는 매체에 흡수되어 공간내부의 전체영역을 골고루 가열시키는 반면에, 흡수 및 산란하는 매체인 경우에는 발열체에서 방출된 복사에너지가 공간내의 산란체에 의하여 흩어져서 다시 주위의 고체벽(특히 왼쪽벽)으로 흡수되어 벽의 온도를 상승시키기 때문으로 여겨진다.

지가 공간내의 산란체에 의하여 흩어져서 다시 주위의 고체벽(특히 왼쪽벽)으로 흡수되어 벽의 온도를 상승시키기 때문으로 여겨진다.

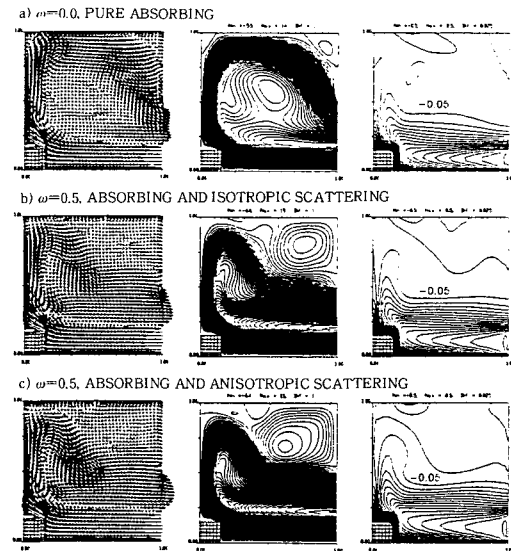


그림 7. 자연대류-복사 복합열전달의 산란율 및 산란위상함수에 따른 영향($\beta_0=1$, $\rho=0.0$, 발열체 위치①)

그림 7의 c)에서 볼 수 있듯이 이러한 현상은 전방방향으로 강하게 산란 시키는 비등방 산란체인 경우(고려하고 있는 F2 산란 위상함수는 이러한 전방 산란체를 나타냄) 발열체 상부에 있는 왼쪽벽을 더욱 심하게 가열하게 되고 이러한 결과 유체의 유동은 더욱 촉진된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

복사에너지의 전달에 참여하는 유체로 채워진 일부가 열린 정사각형 공간내에 발열체를 두었을 때의 전도-대류-복사에 의한 복합열전달 현상을 규명하기 위하여 수치해석적인 방법을 이용하여 여러가지 조건에 대하여 해석하였다. 유체가 복사열의 전달에 참여하는 경우의 결과는 참여하지 않는 순수대류열전달에 비하여 순환력이 증대되어 사각형공간내의 온도분포가 더 균일하게되는 것을 확인하였으며, 이로서 본 연구에서 고려하고자 하는 복합열전달의 해석이 중요하게됨을 입증할

수 있었다.

본 연구에서는 복사에너지의 전달에 참여하는 유체로 채워진 정사각형 공간내에서의 복합열전달의 특성을 살펴보기 위하여 개구부의 개구율, 발열체의 위치, 매체의 산란율 및 산란 위상함수 등을 변수로하여 해석하였다. 벽면의 개구율이 유동 및 열전달에 미치는 영향은 매우 큰 것을 확인하였으며, 개구율이 클수록 외부의 저온유체가 많이 유입되어 공간내의 온도는 낮아지는 것을 확인하였다. 발열체의 위치가 열전달에 미치는 영향 또한 상당히 큰 것으로 밝혀졌으며, 발열체가 사각형 공간의 하부에 위치된 경우에는 상부에 위치된 경우에 비하여 유체의 순환력이 증대되고 그 결과 공간내부로 저온유체의 유입 및 유출이 더 많아짐을 확인하였다. 산란율 또한 열전달 및 유체의 순환에 중요한 영향을 미치고 있음이 입증되었으며, 산란율이 영에 가까워질수록 유체내의 온도차이가 줄어서 순환력은 감소되고, 반대로 산란이 많이 되는 매체인 경우에는 발열체로부터 방출된 복사열이 고체벽을 가열하게되어 유체의 순환력을 증가시키는 효과를 준다는 것을 확인하였다. 이러한 산란체가 전방으로 비등방 산란하는 매체인 경우에는 이러한 순환력의 증대가 더욱더 크게 되는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Chawla, T. C., and S. H. Chan, "Combined Radiation Convection in Thermally Developing Poiseuille Flow with Scattering," ASME Journal of Heat Transfer, VOL. 102, pp. 297-302, 1980.
- 2) Yang, K. T., "Numerical Modeling of Natural Convection-Radiation Interaction in Enclosures," Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, August 18-23, 1986, VOL.1, pp.131-140, 1986
- 3) Yang, K. T. and Lloyd, "Natural Convection-Radiation Interaction in Enclosures," in "Natural Convection: Fundamentals and Applications," Edited by W. Aung, S. Kakac and R. Viskanta, Hemisphere Pub. Corp., Washington D. C., pp.381-410, 1985
- 4) Webb, B. W. and R. Viskanta, "Radiation-Induced Buoyance-Driven Flow in Rectangular Enclosures: Experiment and Analysis," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp.427-433, 1987
- 5) 김기훈, 이태식, 이준식, 1987, "직사각형 밀폐 공간에서의 복사 및 자연대류 열전달", 대한 기계학회 논문집, 제11권, 제2호, pp.331-334.
- 6) 차상명, 김창기, 박희용, 1991, "구조화 근사법에 의한 정사각형 밀폐공간내의 자연대류-복사 열전달 해석", 대한기계학회 논문집, 제15권, 제3호, pp.1021-1029.
- 7) Yucel, A., Acharya, S. and Willians, M. L., "Natural Convection Radiation in a Square Enclosure," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol.15, pp261-278, 1989.
- 8) Fiveland, W. , "A Discrete Ordinates Method for Predicting Radiative Heat Transfer in Axisymmetric Enclosures," ASME 82-HT-20, 1982.
- 9) Kim, T.-K. and Lee, H., International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 8, pp.1711-1721, 1988.
- 10) Kim, T.-K. and Lee, H., J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 42, No. 3, pp.225-238, 1989.
- 11) Kim, T.-K., "Radiation and Combined Mode Heat Transfer Analyses in Absorbing, Emitting, and Mie-Anisotropic Scattering Media Using the S-N Discrete Ordinates Method," Ph. D Thesis, University of Minesota, 1990.
- 12) Howell, J.R. and M Perlmutter, "Monte Carlo Solution of Thermal Transfer Through Radiant Media Between Gray Walls," ASME Journal of Heat Transfer, Vol.86, NO.1, pp. 116-122, 1964.
- 13) Razzaque, M.M., D.E. Klein and R. Howell, "Finite Element Solution of Radiative Heat Transfer in a Two-Dimensional Rectangular Enclosure with Gray Participating Media," ASME, 82-WA/HT-51, 1982.
- 14) Thynell, S. T. and M.N. Ozisik, "Radiation Transfer in Isotropically Scattering Rectangular Enclosures," Journal of Thermophysics and Heat Trans., Vol.1, No.1, pp.69-76, 1987.

- 15) Razel III, A.C., and J.R. Howell, "Two-Dimensional Radiation in Absorbing-Emitting-Scattering Media Using the P-N Approximation," ASME Paper, 82-HT-19, 1982 or ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 105, pp.333-340, 1983.
- 16) 김태국, "복합열전달의 수치해석", 1995출간중.
- 17) 차상명, 김종열, 박희용, 1992, "흡수, 방사 및 선형비등방 산란 매질을 포함하는 밀폐공간내의 자연대류-복사열전달에 대한 수치해석", 대한기계학회 논문집, 제16권, 제5호, pp.952-964.
- 18) Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGrawHill, N.Y., 1980.