

밀폐공간내의 피가열체 존재시 복합열전달에 관한 연구

홍성국 · 유홍선[†] · 홍기배* · 채수**

중앙대학교 기계공학과 · *충주대학교 열공학과 · **군장대학 자동차 시험과
(1999. 9. 21. 접수 / 1999. 12. 13. 채택)

A Study on Combined Heat Transfer in a Enclosure with a Block

Seong-Kook Hong · Hong-Sun Ryou[†] · Ki-Bae Hong* · Soo Chae**

Department of Mechanical Engineering, ChungAng University

*Department Thermal Engineering, ChungJu University · **Department of Automobile, Koon Jang College

(Received September 21, 1999 / Accepted December 13, 1999)

Abstract : This paper numerically deals with combined heat transfer in a enclosure with a block. The block affected by hot wall is located centrally in the enclosure with a radiating gray gas. The discrete ordinate method(DOM) was used for solving the radiative transfer equation. Both laminar and turbulent cases were investigated for various Rayleigh number and standard k- ϵ model was adopted to turbulent case. The effects of optical thickness, wall emissivity and fluid-solid thermal conductivity ratio are investigated on the flow and temperature fields. This study shows that as the wall emissivity decreases, the temperature distribution gradually becomes uniform and the heat transfer is reduced in enclosure. It is expected that this study can help to design the energy system related to the combined heat transfer and operate it safely.

1. 서론

복사와 자연대류의 상호작용에 의해 발생하는 복합열전달은 공학적인 중요성으로 인하여 많은 관심의 대상이 되어왔다. 복합열전달 현상은 전자장치의 냉각, 실내공간에서의 냉난방, 고온의 열교환기, 보일러, 공업로 등과 같이 에너지 산업 전반에 걸쳐 발생되고 있다. 따라서 이러한 에너지 시스템을 보다 효율적이고 안전하게 설계하고 운전하기 위해서는 복합열전달 현상에 대한 정확한 해석과 이해가 선행되어야 한다. 최근에 이러한 필요성과 함께 비약적인 컴퓨터의 발전으로 수치 해석을 통한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁹⁾.

복사에 관한 현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 미적분 형태로 표현되는 복사전달 방정식의 근사화가 필요하며 이를 위해 Zone법¹⁾, P-N법²⁾, Monte-Carlo법³⁾, DOM⁴⁻⁹⁾ 등이 개발되어 왔다. 본 연구에서 사용한 구분종좌법(Discrete Ordinate Method)은 전체 각도에 대해 유한크기를 갖는 M

개의 각도구역으로 나누어 각각의 각도구역에서의 복사강도를 구하게 된다. 일반적으로 유한체 적법에 기초한 기존의 유동해석 프로그램과 잘 어울리고 정확한 해를 구하기 위해서는 분할된 종좌표의 수만을 늘리면 되며 다차원의 기하학적 형상에 적용이 쉬운 장점을 가지고 있어 Chandrasekhar⁴⁾에 제시된 이래로 국내외적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. Fiveland 등⁵⁾, Yucel 등⁶⁾은 구분종좌표법을 사용하여 직사각형 밀폐공간내에서 열전달 특성에 대해 연구하였다. 박희용 등⁷⁾은 차폐막이 존재하는 밀폐공간에서의 층류와 난류의 경우로 구분하여 유동과 온도장에 대해 해석하였으며 김태국 등⁸⁾은 발열체를 차폐막과 동시에 고려하여 매체의 광학두께, 발열체의 위치 변화 등에 따른 연구를 수행하였다.

최근에는 보다 실제적인 시스템 해석을 위해서 단순 밀폐공간이 아닌 분할벽이나 장애물이 있는 복합 밀폐공간에 대한 연구가 활발해지고 있다. 그러나 지금까지 복합밀폐공간 해석시 복사에 대한 차폐막 효과만을 고려하기 위하여 피가열체를 매우 얇은 두께로 가정하거나 이를 단순하게 단

[†] To whom correspondence should be addressed.
ctdmec@cau.ac.kr

열처리하여 그 내부의 온도분포나 피가열체의 특성에 따른 참여매체와의 상호작용에 의한 온도변화에 대한 연구는 간과되었다. 또한 복사가 관련되어 유체와 고체간에 일어나는 열전달 현상에 대해서도 해석한 경우를 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 흡수 및 방사하는 매질로 채워진 정사각형 밀폐공간내 피가열체 존재시 자연대류 및 복사의 상호작용에 의해 수반되는 열전달 현상을 Rayleigh수 기준으로 하여 층류와 난류의 경우로 나누어 수치적으로 해석하였다. 난류 계산 시에는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 복사전달 방정식 계산에는 구분종좌법을 사용하였다. 이 때 광학두께, 벽방사율, 참여매체와 피가열체의 열전도비가 참여 매체와 피가열체간의 열전달에 미치는 영향을 비교 검토하였다. 본 연구를 통하여 복합열전달과 함께 유체와 고체간의 열전달현상을 해석함으로써 실제적인 에너지 시스템의 설계 및 안전운전에 대한 기본 자료를 제공하려 한다.

2. 이론해석

2.1. 해석모델

본 연구에서 채택한 계산모델은 Fig. 1과 같이 정사각형 밀폐공간에서 좌측벽은 저온으로 우측벽은 고온인 상태로 일정하게 유지되고, 상하벽면은 단열인 상태로 고정되어 있다. 높이와 너비

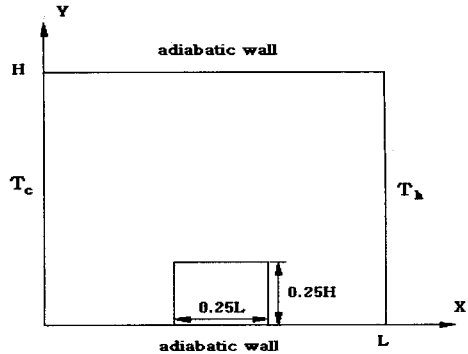


Fig. 1. Schematic diagram of the present study

가 각각 $H/4$, $L/4$ 인 피가열체는 밀폐공간 가운데 아래 놓여 있으며 일정한 열전도계수를 갖는다. 위와 같은 시스템을 해석하기 위하여 사용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 밀폐공간내의 유동은 2차원 정상상태이다.
- (2) 참여매체는 비압축성, Newton 유체이며 마찰에 의한 점성소산을 무시한다.
- (3) 부력항의 온도차에 의한 밀도변화를 제외한 모든 물성치는 일정하다.(Boussinesq 근사)
- (4) 참여매체는 회색기체이다.
- (5) 벽면과 피가열체는 모든 방향으로 균일한 반사를 하는 비투과경계이다.

2.2. 지배방정식

앞서 언급한 가정들을 기초로 2차원 직교좌표계에서의 유동 및 열전달 특성을 지배하는 무차원화된 지배방정식은 Table 1과 같다. 여기서 P_k ,

Table 1. Governing Equations for the present study

연속 방정식	$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0$	(1)
운동량 방정식	$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial X} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial X} \right]$	(2)
	$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial X} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial Y} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[(1 + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial Y} \right] + \frac{Ra}{Pr} \theta$	(3)
에너지 방정식	$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left[\left(\frac{1}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \theta}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\left(\frac{1}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right] - \frac{\theta_o}{Pl Pr} \nabla \cdot Q_R$	(4)
난류 운동에너지 방정식	$U \frac{\partial K}{\partial X} + V \frac{\partial K}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left[\left(1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\left(1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial Y} \right] + P_k + G_b - E$	(5)
난류에너지 소멸률 방정식	$U \frac{\partial E}{\partial X} + V \frac{\partial E}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left[\left(1 + \frac{\mu_t}{\sigma_e} \right) \frac{\partial E}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\left(1 + \frac{\mu_t}{\sigma_e} \right) \frac{\partial E}{\partial Y} \right] + \frac{E}{K} [C_1 P_k + C_3 G_b - C_2 E]$	(6)
	$P_k = \mu \left[2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} \right)^2 \right] \quad (7), \quad G_b = -\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{Ra}{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (8), \quad \mu_t = C_\mu \frac{K^2}{E} \quad (9)$	

Table 2. Standard k-ε turbulent model constants

C_μ	C_1	C_2	C_3	σ_t	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	0.7	0.9	1.0	1.3

G_b , μ_t 는 각각 난류에너지 생성항, 부력에 의한 생성항 그리고 난류 점성계수를 무차원화된 형태로 나타낸 것이다. 표준 k-ε 모델에 사용된 경험상수는 Table 2와 같다.

또한 피가열체내에서의 에너지 방정식은 다음의 식으로 나타내어진다.

$$\frac{r_k}{Pr} \nabla^2 \theta = 0 \quad (10)$$

2.3. 복사전달 방정식

2차원 직교격자계(X, Y)에서 임의의 Ω방향으로의 무차원 복사전달방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다^{3,9)}.

$$\mu \frac{\partial I}{\partial X} + \xi \frac{\partial I}{\partial Y} + \tau I = \tau(1-\omega)I_b + \frac{\omega \tau}{4\pi} \int_{4\pi} I d\Omega' \quad (11)$$

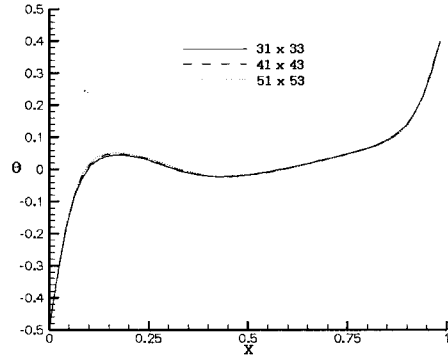
에너지방정식의 생성항으로 주어지게 되는 복사 생성항은 전체 입체각(4π)에 대하여 적분하여 다음과 같이 나타내어진다.

$$\nabla \cdot Q_R = \tau(1-\omega)[4\pi I_b + \int_{4\pi} I d\Omega'] \quad (12)$$

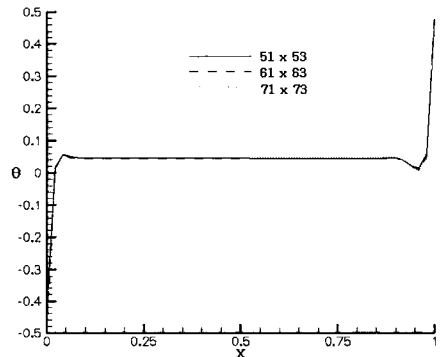
3. 수치해석

3.1. 격자계

본 계산에 알맞는 격자를 선택하고 계산결과 의 격자 의존성을 알아보기 위하여 층류인 $Ra=10^6$ 의 경우 31×33, 41×43, 51×53에 대해서, 난류인 $Ra=10^9$ 의 경우 51×53, 61×63, 71×73인 격자에 대해서 계산하였다. Fig. 2는 광학두께와 벽방사율이 1일 때 Y=0.5인 위치에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 정확성과 경제성을 고려하여 Fig. 3과 같이 층류의 경우 41×43개를, 난류의 경우 61×63개의 비균일 격자를 사용하였다.

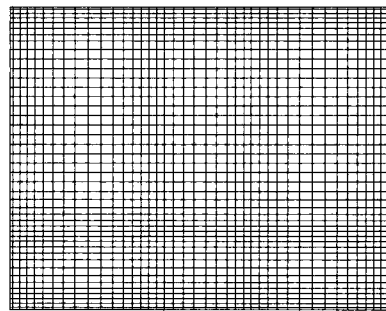


(a) $Ra=10^6$

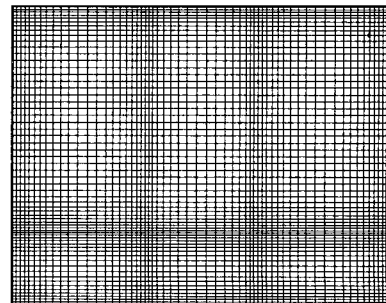


(b) $Ra=10^9$

Fig. 2. Dimensionless temperature for various grid number



(a) $Ra=10^6$



(b) $Ra=10^9$

Fig. 3. Computational grid

3.2. 경계조건

속도에 대한 경계조건으로 모든 벽면과 피가열체 표면에 대해 점착조건을 적용하였다. 좌우 벽면의 무차원 온도는 각각 저온 ($\theta_c = -0.5$) 및 고온 ($\theta_h = 0.5$)으로 일정하며 상하벽면은 단열조건을 적용하여 복사와 대류에 의한 에너지 평형을 고려한 다음의 식을 사용하였다.

$$Q \cdot \vec{j} = (-\nabla\theta + \frac{\theta_o}{Pr} Q_R) \cdot \vec{j} = 0 \quad (13)$$

참여매질과 피가열체간에 복사, 대류 및 전도에 의한 열교환이 일어나므로 피가열체 표면에 대해 에너지 평형을 고려하여 다음과 같은 조건을 적용하였다.

$$-\nabla\theta + \frac{\theta_o}{Pr} Q_R = r_k(-\nabla\theta) \quad (14)$$

복사전달 방정식 계산시 밀폐공간내의 벽면과 피가열체의 표면에서 다음과 같은 비투과 벽면 경계조건을 사용하였다.

$$I_w = \epsilon I_{b,w} + \frac{1-\epsilon}{\pi} \int_{n \cdot \Omega < 0} n \cdot \Omega I d\Omega \quad (15)$$

또한 Rayleigh수가 10^9 인 난류의 경우에는 유동장과 온도장 계산을 위하여 벽함수를 적용하였으며 난류 운동에너지 경우는 벽면에서 $K=0$ 을 난류에너지 소산율에 대해서는 벽면으로부터 첫 번째 계산점에 대해 다음과 같은 값을 적용하였다.

$$E = \frac{C_\mu^{3/4} K^{3/2}}{\kappa \delta n} \quad (16)$$

3.3. 수치해석방법

본 연구에서는 비엇갈림 격자에 SIMPLE알고리즘을 이용하였으며 지배방정식의 대류항은 상류차분도식을, 확산항은 선형차분도식을 각각 사용하였다. 복사전달 방정식의 해를 구하기 위해 사용된 구분중좌표법은 정확성과 경제성을 고려하여 S-6(24개의 방향)을 적용하였다. 이산화된 대수 방정식의 해를 구하기 위해 SIP (Stone's Implicit Procedure)방법을 이용하였다. 반

복계산중 해의 발산을 막고 수렴을 안정시키기 위해 속도와 온도에 대해서는 0.3, 압력에 대해서는 0.4인 하향이완계수를 사용하였다. 전체 해석영역에 대한 에너지 평형을 고려하여 얻어진 B 값이 10^{-4} 이하가 되고 전 영역에서 종속변수들에 대한 잔류생성항을 계산하여 그들의 절대값의 합이 10^{-3} 보다 작게 될 때를 수렴조건으로 설정하였다.

$$B = \int_{Y=0}^1 [(Q_T \cdot \vec{i})_{X=0} - (Q_T \cdot \vec{i})_{X=1}] dY \quad (17)$$

계산시간은 Pentium II 333으로 각각의 해석 경우에 따라 30분에서 8시간 정도가 소요되었다. 본 연구에서는 밀폐공간에서의 대류와 복사에 의한 열전달 영향을 구체적으로 알아보기 위하여 등온벽면에서 열유속을 다음과 같은 Nusselt 수로 나타내었다.

$$Nu_T = Nu_R + Nu_C = \int_{Y=0}^1 \frac{Q_R}{Pr} \theta_o dY + \int_{Y=0}^1 -\frac{\partial \theta}{\partial Y} dY \quad (18)$$

여기서 Nu_R 와 Nu_C 는 각각 복사와 대류에 의한 Nusselt수를 나타낸다.

3.4. 복사모델의 검증

본 연구에서 사용한 복사모델과 수치해법의 타당성을 검증하기 위하여 피가열체가 없는 단순 밀폐공간내에서 계산한 Yucel⁶⁾의 결과와 비교하였다. Table 3은 고온벽면에서의 총열유속을 광학두께의 변화에 대하여 비교한 것이며 본 연구에서 계산된 값과 Yucel의 결과와 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of present study and Yucel's result

광학두께	0.2	1.0	5.0
Yucel's result	46.45	39.36	31.93
the present study	46.90	40.27	33.17

4. 결과 및 고찰

피가열체가 존재하는 밀폐공간에서 자연대류

와 복사가 관련되어 발생하는 열전달 현상을 규명하기 위해 Rayleigh수를 기준으로 10^6 일 때 층류와 10^9 일 때 난류 경우로 구분하여 해석하였다. Prandtl수를 0.71로 두고 고온과 저온벽의 온도비를 2/3로 고정하여 기준온도비(θ_0)를 2.5로 선택하였다. 본 연구에서는 $Pr=0.02$, 광학두께=1.0, 벽방사율=1.0을 비교 대상의 기준모델로 선정하였으며 참여매체의 산란은 고려하지 않았다.

4.1. 층류 경우

Fig. 4와 5는 복사가 열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 자연대류만을 고려한 경우와 복사가 고려된 경우를 비교한 것이다. 그림에서

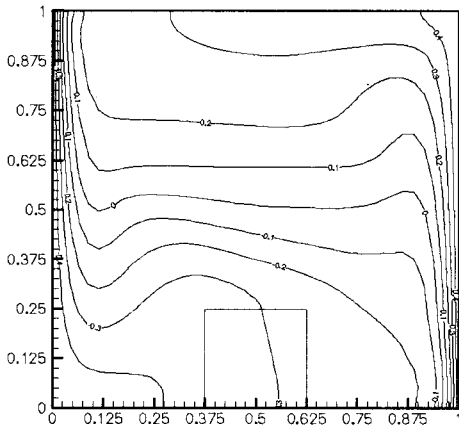


Fig. 4. Dimensionless isothermal lines
($Ra=10^6$, $r_k=2$, convection)

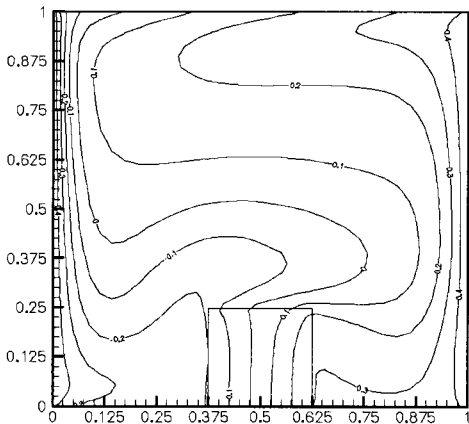


Fig. 5. Dimensionless isothermal lines
($Ra=10^6$, $r_k=2$, $\tau=1.0$, $\epsilon_w=1.0$)

볼 수 있듯이 복사를 고려한 경우(Fig. 5)에는 자연대류만을 고려한 경우(Fig. 4)에 비해 복사에 의한 열전달 증가로 인하여 밀폐공간내의 온도가 상승하며 많은 차이를 보이고 있다. 일반적으로 복사에 관여하는 참여매체가 존재하는 경우 이러한 매체는 온도를 보다 균일(equalize)하게 하려는 경향이 있다. 본 연구에서도 평균온도범위로 간주할 수 있는 온도분포($\theta=0.2\sim-0.2$)의 영역이 확대됨으로 이러한 경향을 확인할 수 있다.

4.1.1. 광학두께의 영향

Table 4는 광학두께에 따른 고온 벽면에서의 열유속을 나타낸 것이다. 광학두께가 클수록 열유속이 작게 나타나는데 이는 광학두께의 증가로 인한 감쇄효과가 커져서 고온벽에서 저온벽으로의 복사에너지가 보다 적게 전달되고 있기 때문이다. Fig. 6은 $Y=0.125$ 위치에서의 참여매체와 피가열체의 온도를 보인 것이다. 피가열체의 온도분포를 살펴보면 광학두께가 작을수록 고온벽쪽의 온도가 높음을 보이고 있다. 이는 피가열

Table 4. Heat flux for various optical thickness at hot wall
($Ra=10^6$)

광학 두께	$r_k=2$			$r_k=500$		
	Nu_R	Nu_C	Nu_T	Nu_R	Nu_C	Nu_T
0.2	28.503	5.421	33.924	31.285	5.514	36.799
1.0	23.916	4.616	28.532	25.719	4.820	30.538
5.0	16.164	4.979	21.143	16.604	5.184	21.788

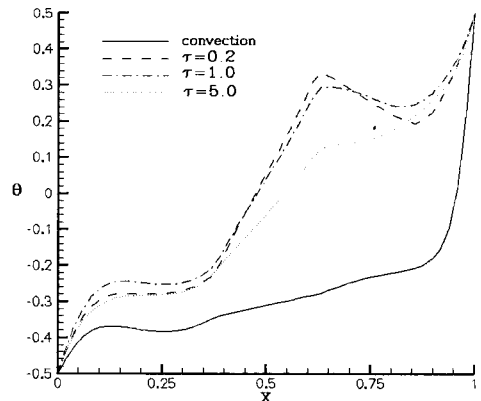


Fig. 6. Dimensionless temperature distribution at $Y=0.125$
($Ra=10^6$, $r_k=2$)

체에 전달되는 복사열유속이 크기 때문에 사라지며 저온벽쪽의 온도분포는 피가열체의 차폐막 효과로 인한 복사에너지 전달 감소로 광학두께에 따른 온도의 차이는 크지 않다. 따라서 피가열체내의 온도구배는 광학두께가 클수록 점점 작아짐을 보이고 있다.

4.1.2. 벽방사율의 영향

벽방사율이 감소하면 등은 벽면에서 방출되는 복사 에너지는 감소되며 벽으로 입사되는 복사 에너지를 흑체처럼 모두 흡수하지 않고 재반사를 통해 주변 매체로 전달시키게 된다. 이로 인해 참여매체의 온도분포는 점점 균일해지려는 경향을 보이게 되며, Fig. 5와 7-8을 살펴보면 평

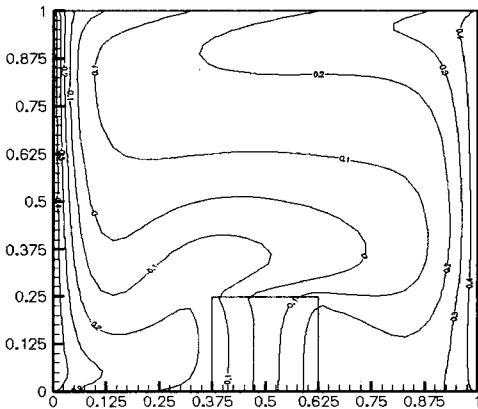


Fig. 7. Dimensionless isothermal lines ($Ra=10^6, r_k=2, \epsilon_w=0.75$)

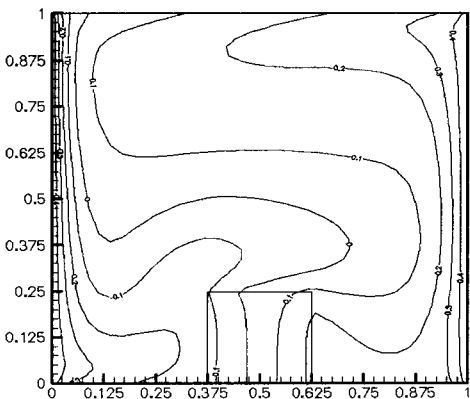


Fig. 8. Dimensionless isothermal lines ($Ra=10^6, r_k=2, \epsilon_w=0.5$)

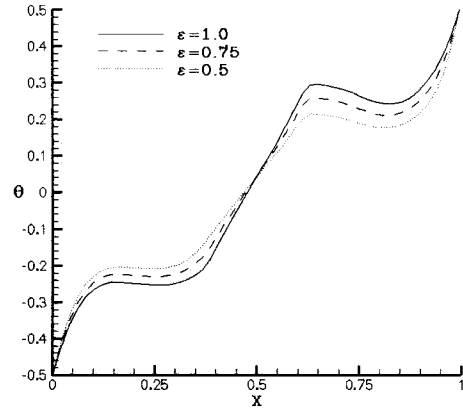


Fig. 9. Dimensionless temperature distribution at $Y=0.125$ ($Ra=10^6, r_k=2$)

Table 5. Heat flux for various wall emissivity at hot wall ($Ra=10^6$)

벽 방사율	$r_k=2$			$r_k=500$		
	Nu_R	Nu_C	Nu_T	Nu_R	Nu_C	Nu_T
1.0	23.916	4.617	28.533	25.719	4.820	30.539
0.75	18.551	5.180	23.731	19.685	5.433	25.118
0.5	13.042	5.818	18.86	13.636	6.090	19.726

균온도범위($\theta=0.2 \sim -0.2$)의 영역이 점점 확대됨을 확인할 수 있다. Fig. 9는 벽방사율의 감소에 따라 피가열체내의 온도 구배가 작아지며 균일한 분포를 유지하고 있음을 보여주고 있다. Table 5는 벽방사율에 따른 복사열유속을 비교한 것으로 벽방사율이 증가하면 복사강도의 증가로 인하여 복사에 의한 열유속은 커지나 벽 근처에서 참여매체의 온도구배 감소로 대류에 의한 열유속은 감소된다. 전체적으로는 복사의 영향으로 총열유속은 증가된다.

4.1.3. 매체와 피가열체의 열전도비(r_k)의 영향

Fig. 10은 r_k 이 500일 때의 온도분포를 나타낸 것으로 r_k 이 2인 경우(Fig. 5)와 비교하면 피가열체내의 온도구배가 매우 작아 균일한 온도임을 알 수 있다. r_k 이 커질수록 피가열체내의 열전달이 활발해지기 때문이다. 이러한 온도분포는 피가열체 주변의 참여매체에 영향을 미치게 되어 참여매체의 온도를 상승시키며 보다 균일

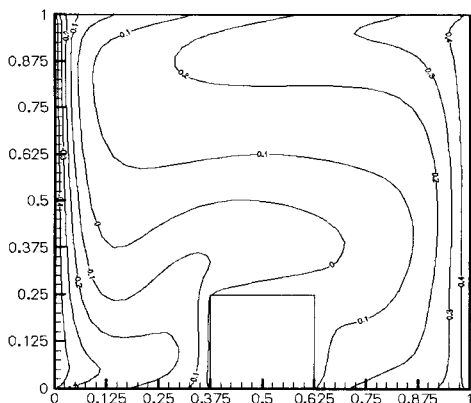


Fig. 10. Dimensionless isothermal lines
($Ra = 10^6$, $r_k = 500$, $\tau = 1.0$)

하게 유지시키고 있다. 이로 인하여 r_k 이 클수록 열유속이 크게 나타나고 있다.

4.2. 난류 경우

Fig. 11은 $Ra = 10^9$ 인 난류의 경우일 때 온도분포를 나타낸 것이다. 난류의 경우에도 복사를 고려시 밀폐공간내의 온도가 상승되며 균일해지는 경향을 보이고 있다. 그러나 층류의 경우(Fig. 5)와는 달리 벽면 근처에서 얇은 열경계층을 형성하며 이로 인한 온도구배의 증가와 함께 전체적으로 층을 이루고 있는 온도분포를 보이고 있으며, 피가열체는 층류 경우에 비해 낮은 온도분포를 보이고 있다. 이는 고온벽에서 전달된 에너지의 증가가 벽면부근의 참여매체 속도를 증가시키게 되며, 상부의 단열벽면을 지나온 참여매체는 저온벽 상단에서부터 빠르게 에너지를 외부로 전달시켜 밀폐공간 중심 내부로의 열전달이 작아진 결과라 사려된다. 총열유속(Table 6)을 비교해 보면 등온 벽면에서의 급격한 온도구배로 대류에 의한 열유속이 층류에 비해 매우 크게 증가되었으나 복사열유속의 증가량은 크지 않음을 알 수 있다. Table 6은 피가열체가 존재하지 않은 경우의 열유속을 나타낸 것으로 피가열체 존재하는 경우보다 큰 열유속을 보이는데, 이는 피가열체의 존재로 발생하는 복사열전달 차단효과가 사라졌기 때문으로 판단된다. 층류의 경우에서 각각의 파라미터에 대해 서술한 바와 같이 난류의 경우에서도 대체적으로 유사한 경향을 볼 수 있었다.

Table 6. Heat flux for various thermal conductivity ratio at hot wall

	$Ra = 10^6$			$Ra = 10^9$		
	Nu_R	Nu_C	Nu_T	Nu_R	Nu_C	Nu_T
No solid	27.287	5.984	33.271	32.622	61.152	93.774
$r_k = 500$	25.719	4.820	30.539	31.771	57.804	89.575
$r_k = 2$	23.916	4.617	28.533	30.719	56.533	87.252

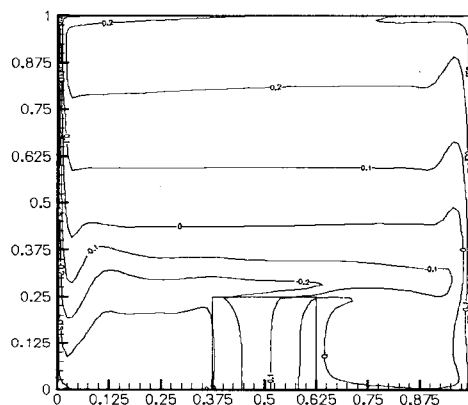


Fig. 11. Dimensionless isothermal lines
($Ra = 10^9$, $r_k = 2$, $\tau = 1.0$)

Fig. 12와 13은 $r_k = 2$ 일 때 층류와 난류의 유동장을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유동형태가 매우 다르게 나타나고 있다. 피가열체의 고온벽 부근의 온도가 주변 참여매체의 온

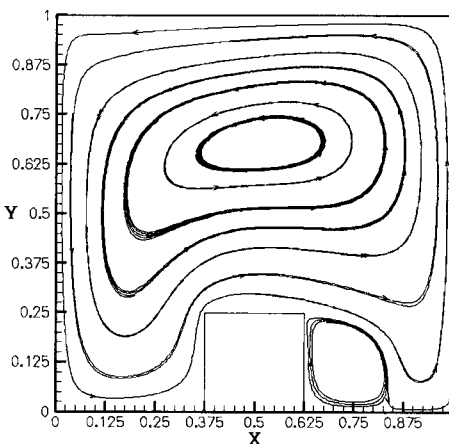


Fig. 12. Streamlines for laminar
($Ra = 10^6$, $r_k = 2$, $\tau = 1.0$)

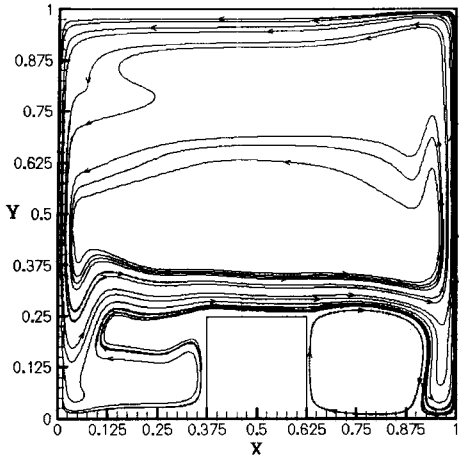


Fig. 13. Streamlines for turbulence
($Ra = 10^9$, $r_k = 2$, $\tau = 1.0$)

도보다 증가됨으로 인해 피가열체 앞면에서 시계방향의 2차 유동이 발생되고 있으며, 난류의 경우(Fig. 13)가 층류의 경우(Fig. 12)보다 큰 2차 유동이 형성되고 있다. 반시계 방향의 1차 유동의 중심은 층류에 비해 난류의 경우 밀폐공간내의 하단부로 이동되고 있으며 이는 중심부분에서의 열전달 감소에 의해 형성된 온도분포의 결과라 사려된다. 또한 난류의 경우에 벽면 근처에서 보다 활발한 유동을 보이고 있다.

5. 결론

정사각형 밀폐공간내에서 피가열체 존재시 자연대류 및 복사에 의한 열전달 현상을 수치적으로 해석하였다. 광학두께, 벽방사율, 참여매체와 피가열체의 열전도비와 같은 여러 가지 파라미터가 열전달에 미치는 영향에 대해 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 복사를 고려하지 않은 순수 자연대류와 복사를 고려한 경우를 비교한 결과 벽면에서의 총열유속과 전체 온도분포에 큰 차이를 확인할 수 있었으며 따라서 복사를 수반하게 되는 실제현상에 복사를 고려한 해석이 필수적이다.
- (2) 참여매체의 광학두께가 증가함에 따라 피가열체로의 복사에너지 전달량의 감소로 피가열체의 온도가 낮아짐을 알 수 있었으며 또한 벽방사율이 감소하면 참여매체의

균일한 온도분포와 함께 피가열체의 온도도 균일해짐을 알 수 있었다.

- (3) 층류에 비해 난류의 경우 중심내부로의 열전달 감소로 피가열체는 낮은 온도분포를 보였다. 따라서 피가열체의 온도를 높이기 위해서는 팬 이용과 같은 강제순환이 필요하다고 판단된다.
- (4) 참여매체와 피가열체의 열전도비가 클수록 보다 활발한 열전달에 의해 피가열체의 온도는 균일해지며 참여매체의 온도가 증가됨을 알 수 있었다.
- (5) 복합열전달과 함께 유체와 고체간의 열전달 현상을 해석함으로써 실제적인 에너지 시스템의 설계 및 안전운전에 대한 기본자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

기호설명

- E : 무차원 난류에너지 소멸률 [$\epsilon/(\nu^3/H^4)$]
- K : 무차원 난류에너지 [$k/(\nu/H)^2$]
- k_f, k_s : 유체 및 고체 열전도도
- \vec{i}, \vec{j} : x,y 방향의 단위벡터
- I : 무차원복사강도 [$i/4\sigma T_o^4$]
- n : 경계면 안쪽으로 향하는 단위 수직벡터
- Nu : Nusselt 수
- P : 무차원압력
- Pl : Plank수 [$(k_f/H)/4\sigma T_o^3$]
- Pr : Prandtl 수 [ν/a]
- Q_R : 무차원 복사열유속 [$q_R/4\sigma T_o^4$]
- r_k : 참여매체와 피가열체의 열전도비 [k_s/k_f]
- T_h, T_c : 온 및 저온벽 온도
- T_o : 기준온도 [$(T_h + T_c)/2$]
- Ra : Rayleigh수 [$g\beta(T_h - T_c)H^3/\nu a$]
- X, Y : 무차원 x,y좌표 [$x/H, y/H$]
- U, V : 무차원속도 [$u/(\nu/H), v/(\nu/H)$]

Greek symbols

- θ : 무차원온도 [$(T - T_o)/(T_h - T_c)$]
- θ_o : 기준온도비 [$T_o/(T_h - T_c)$]
- τ : 광학두께
- ω : 산란알베도
- μ, ξ : 방향코사인
- μ_t : 무차원 난류 점성계수
- σ : Stefan-Boltzman 상수
- ϵ : 방사율
- Ω : 방향벡터
- κ : Von-Karman 상수
- δn : 벽면으로부터 첫 번째 계산점까지의 거리

Superscripts

' : 입사방향

Subscripts

b : 흑체

w : 벽면

참고문헌

- 1) Larson, M. E., Howell, J. R., The Exchange Factor Method : An Alternative Basis for Zonal Analysis of Radiating Enclosures, Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 936~942, 1985.
- 2) Razel, A. C., Two-Dimensional Radiation in Absorbing-Emitting Media Using the P-N Approximation, Journal of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 333~340, 1983.
- 3) Siegel, R., Howell, J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, Hemisphere, Washington D.C., 1992.
- 4) Chandrasekhar, S., Radiative Transfer, Dover Publication, New York, 1960.
- 5) Fiveland, W. A., Discrete Ordinate Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosure, Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 699~706, 1984.
- 6) Yucel, A., Acharya, S. and Williams, M. L., Natural Convection Radiation in a Square Enclosure, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 15, pp. 261~278, 1989.
- 7) 박 경우, 이주형, 박희용, 차폐막이 있는 밀폐 공간내에서의 난류 자연대류-복사열전달에 관한 연구, 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 10, pp. 2738~2750, 1994.
- 8) 김태국, 민동호, 손봉세, 한규익, 서석호, 발열체와격막이 있고 일부가 열린 복합공간내의 자연대류 복사열전달에 관한 수치적 연구 대한기계학회논문집, Vol. 21, No. 2, pp. 235~251, 1997.
- 9) 김태국, 복합열전달의 수치해석, 중앙대학교출판부, 1995.