

환기구를 가진 실내공간에서 복사 및 대류열전달의 비교 연구

정효민* · 정한식* · 김경근**

The Comparison Study of Radiative and Convective
Heat Transfer in a Room Air Ventilation

H.M. Jeong · H.S. Chung · K.K. Kim

Key words : Radiative Heat Transfer(복사열전달), Convective Heat Transfer(대류열전달),
Room Air Ventilation(실내공기환기), Radiative Heat Ray Method(방사열선법)

Abstract

The comparison of radiative and convective heat transfer in a room air ventilation is investigated by a numerical simulation. The room air temperature distributions with radiation are appeared more uniform than without radiation at $Gr=1460$ and $Re=50$. The mean Nusselt number in the radiative heat transfer shows less value than convective heat transfer. The total mean Nusselt number is found $Wall\ 1 > Wall\ 3 > Wall\ 2 \approx Wall\ 4$.

기호설명

b	: 유입 및 유출구 폭($b=0.1L$)	V	: 무차원 수직방향 속도 v/U_{∞}
B_{ij}	: Gebhart 흡수계수	X	: 무차원 수평방향 좌표 x/L
F_{ij}	: 형태계수	Y	: 무차원 수직방향 좌표 y/L
g	: 중력가속도	β	: 체적팽창계수
Gr	: Grashof수	ϕ	: 미소구간을 잇는 직선과 법선의 각
l	: 미소면적간의 거리	ϵ	: 벽면 방사율
L	: 사각공간 길이	μ	: 점성계수
Re	: Reynolds수	ν	: 동점성계수
T	: 온도	δ	: Stefan - Boltzmann상수
U	: 무차원 수평방향 속도 u/U_{∞}	h	: 열전달계수
		θ	: 무차원 온도

* 경상대학교 선박기계공학과 (원고접수일: 96년 10월)

** 한국해양대학교 기관공학부

하첨자

- c : 대류, 냉각면
- h : 가열면
- ∞ : 유입
- mrt : 평균복사온도
- r : 복사
- t : 전체
- w : 벽면

상첨자

- : 평균

1. 서 론

환기 문제를 고려한 실내 공간에 대한 연구는 쾌적한 환경 구축이라는 측면에서 대단히 중요한 문제로 대두되고 있다. 근래에 들어서 인간 삶의 질적 향상을 도모하는 경향에서 쾌적성 추구는 환경공학 이전에 모든 공학 분야에서 해결하여야 할 문제이다. 또한 산업의 고정밀화, 고밀도화 및 고속화 되는 시점에서 제품의 품질 향상을 확보하기 위하여서는 청정한 환경 조성이 필요하게 되고 이러한 관점에서도 실내공간의 공기 유동에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다.

이러한 문제를 해결하는 데는 환기구의 설정, 공기의 유동 형태, 실내 온도분포 특성 그리고 그들의 제어에 대한 연구가 필수적이다. 지금까지 가스 터빈의 연소실, 디젤엔진, 건물내의 화염전파 등의 고온상태에서의 열전달 문제에는 복사열전달과 대류열전달을 동시에 고려한 연구 결과들을 많이 찾을 수 있다. 그러나 비교적 낮은 온도에 관계되는 주거공간, 생산공장, 전자장비 등에 관하여서도 복사와 대류열전달을 상호비교 연구함으로써 전체적인 열 및 공기유동 특성을 규명할 수 있으리라 기대된다.

A.Yücel 등¹⁾은 사각밀폐 공간에서 자연대류-복사열전달을 DOM을 이용하여 수치해석하여 등온선, 유선 그리고 속도분포 등에 관한 결과를 보고하고 복사가 중요한 열전달 모드이며 DOM이 기존의 열 유동 해석 알고리즘과 잘 어울릴 수 있

는 방법임을 제안하였다. G. D. Raithby와 E. H. Chui²⁾는 매질을 갖는 밀폐공간에서 유한체적법을 이용한 복사열전달의 연구를 통하여 매질의 형태에 대한 1차원 또는 2차원 복사열전달 특성을 보고하고 그 적용의 타당성을 제안하였다. 수직 cavity, 수직 channel 또는 내부에 격판이 존재하는 경우들에 대한 연구들도 찾을 수 있다. 이들 연구들에서는 복사, 전도 그리고 대류 각각의 열전달 특성의 비교와 중간 장애물로 인한 유동 특성을 다양하게 보고 하였다^{3)~5)}.

본연구는 실내공간으로 왼쪽면 하부에 위치한 환기구를 통하여 공기가 유입되고 오른쪽 윗쪽으로 유출하는 경우에 복사 및 대류 열전달 특성을 Reynolds수와 Grashof수를 변수로 수치해석하여 내부 유체의 유동과 열전달 특성을 연구하고자 한다.

2. 수치해석

해석을 위한 모델은 Fig. 1과 같이 실내공간내의 바닥부분에서는 발열이 되고 그외벽은 단열벽으로 되어 있다. 입구에서는 온도, T_{∞} 과 속도, U_{∞} 으로 공기가 유입되며 오른쪽 윗쪽으로 유출한다. 유체는 정상상태, 비압축성으로 가정된 2차원 층류 유동이며 이에 대한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

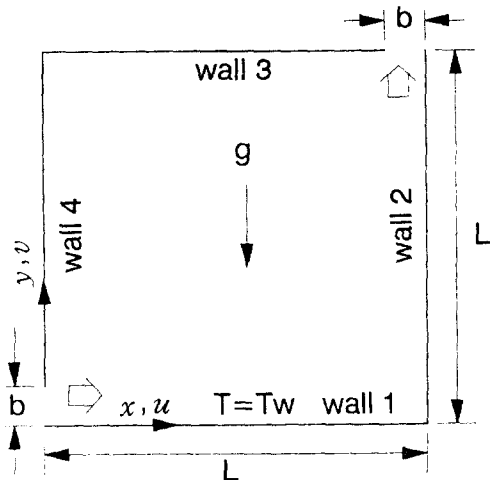


Fig. 1. Schematic diagram of the geometry investigated.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{R_e} \nabla^2 U \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{R_e} \nabla^2 V + \frac{G_r}{R_e^2} \theta \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = - \frac{1}{P_r R_e} \nabla^2 \theta \quad (4)$$

여기서 사용한 무차원 변수는 다음과 같다.

$$X = \frac{x}{b}, Y = \frac{y}{b}$$

$$U = \frac{u}{U_\infty}, V = \frac{v}{U_\infty}$$

$$P = \frac{p}{\rho U_\infty^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\pi - \pi_c}{T - T_c}$$

$$G_r = \frac{g \beta (T_h - T_c) b^3}{\nu^2}, P_r = \frac{\mu C_p}{k}$$

상기 방정식을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{입구 : } U=1, V=0, \theta=0$$

$$\text{출구 : } V=1, U=0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$\text{가열면 : } \theta=1$$

수치해석은 유한체적법(finite volume method)을 사용하였으며 대류항의 계산은 Hybrid Scheme을 이용하였다. 격자계는 40×40 로 엣물림 격자계를, 압력항의 계산은 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 지배방정식과 경계조건을 유한차분법으로 수치해석하였다. 또한 해의 수렴판정은 유입구의 운동량과 유량으로 무차원화한 값을 기준으로하여 각 방향의 연속방정식과 운동량방정식 결과의 오차가 0.001% 미만일 때를 수렴조건으로 하였다¹⁵⁾.

Nusselt 수 계산은 다음과 같다.

대류에 의한 국소 Nusselt 수 :

$$Nu_c = \frac{q_c \cdot L}{h_c (T_w - T_\infty)} \quad (5)$$

복사에 의한 국소 Nusselt 수 :

$$Nu_c = \frac{q_c \cdot L}{h_c (T_w - T_\infty)} \quad (6)$$

전체 Nusselt 수 :

$$Nu_t = Nu_c + Nu_r \quad (7)$$

평균 Nusselt 수 :

$$\bar{Nu} = \frac{1}{L} \int Nu \cdot dx \quad (8)$$

3. 복사해석

벽체의 내표면에 대한 열평형 방정식(heat balance equation)은 다음과 같이 표현된다.⁶⁾

$$q_c + q_r = 0 \quad (9)$$

$$q_c = h_c (T_u - T_w)$$

$$q_r = \varepsilon \delta (T_{mrt}^4 - T_w^4)$$

$$T_{mrt,i}^4 = \sum_j B_{ij} T_{w,j}^4 \quad (10)$$

식(10)에서 B_{ij} 와 F_{ij} 는 다음과 같다.

$$B_{ij} = \varepsilon_j F_{ij} + \sum_k F_{ik} (1 - \varepsilon_k) B_{kj} \quad (11)$$

이것은 면요소 i에서 방출된 복사 에너지 중에서 벽면에서의 상호 반사를 포함해서 최종적으로 면요소 j에 입사하는 비율을 의미한다. 또한, 면 A_1 과 A_2 사이의 형태계수는 다음의 식으로 정의 된다.

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi l^2} dA_1 dA_2 \quad (12)$$

식(12)를 해석적으로 취급하는 방법으로서 Monte - Calro법을 이용한 예가 있지만, 면의 수가 많을 경우 충분한 정도를 얻기 위해서는 계산 시간이 크게 증가하는 등의 단점이 있다.

본 연구에서의 형태계수를 구하는 방법으로는 Onishi 등에 의하여 타당성이 확인된 방사열선법(radiative heat ray method)을 이용하였다.^{7,8)}

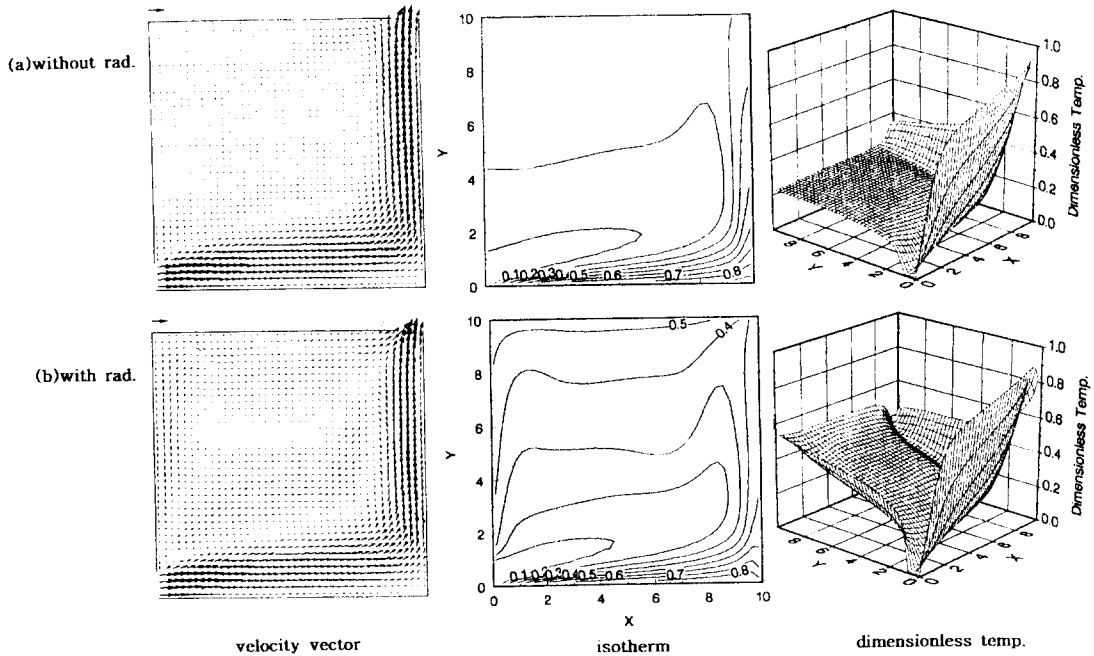


Fig. 2. Velocity vectors and isotherms for without radiation and with radiation at Gr=1460, Re=50.

4. 결과 및 토의

매질이 공기(Pr=0.71)인 상태에서 $\Delta T(^{\circ}C)=10, 30, 50, 70, 90$ (Gr=1460, 4237, 6841, 9285, 11585), $U_{\infty}(m/s)=0.075, 0.3, 0.6, 1.0, 3.0$ (Re=50, 200, 400, 666, 2000) 변수로 하여 연구하였다.

Fig. 2는 Gr=1460와 Re=50에서 복사를 고려하지 않았을 때와 복사를 고려하였을 때의 속도벡터와 등온선을 나타낸 것이다. 매질이 복사 비참여 기체인 공기이기 때문에 표면 복사만 일어나므로 복사를 고려한 것 과 복사를 고려하지 않는 것의 유동 패턴은 거의 비슷하게 나타난다. 그러나 온도분포는 복사를 고려한 경우가 상부 벽에서도 새로운 열경계층이 생성되며 이로 인하여 공간 전체적으로 고른 온도분포를 보여주고 있다. 이러한 결과는 이전의 연구결과들^{1,3,5)}과 비교하였을 때 정성적으로 잘 일치되는 결과들로서, 복사에 대하여 투명한 공기가 벽에서 방출하는 복사에너지를 그대로 통과 시킴으로서 보다 활발한 열교환이 이루어지고 이로 인하여 온도장이 비교적 균일하게 이루어진

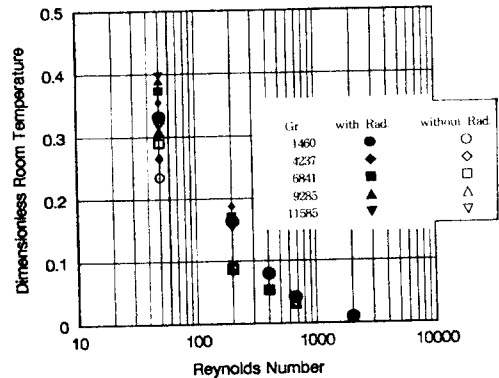


Fig. 3 Mean dimensionless temperature versus Reynolds number for various conditions.

것이다. 이러한 결과로 복사를 고려한 경우가 전체적으로 열전달은 촉진 시키지만 온도구배에 의존하는 Nusselt수는 감소되리라는 예측이 가능하다.

Fig. 3은 Reynolds수에 대한 평균 무차원실내 온도 분포를 나타낸 것이다. Reynolds수가 증가함에 따라 유입공기의 속도 증가로 공간내부의 열전달이 촉진되고 이러한 결과로 낮은 온도 분포를 보이

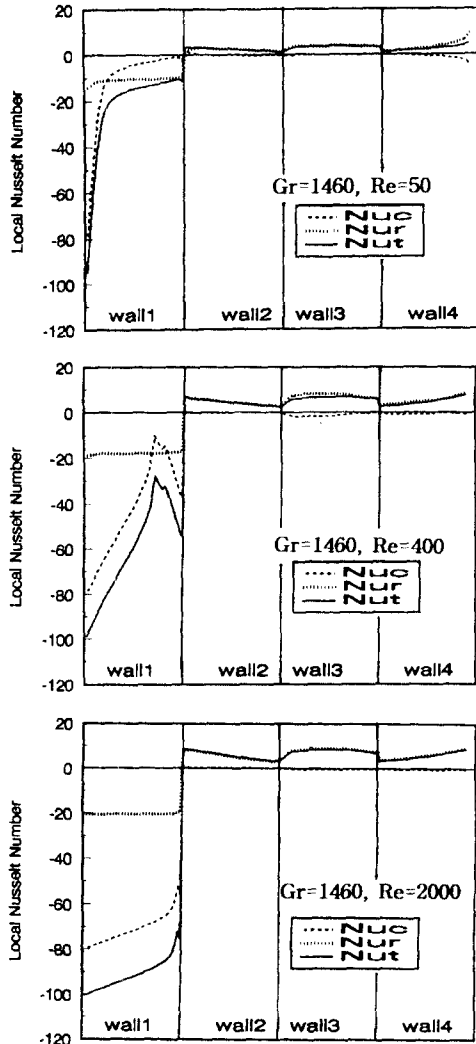


Fig. 4 Local Nusselt number distributions for various conditions.

고 있다. Reynolds수가 낮은 값에서는 복사를 고려한 경우가 높은 온도 분포를 보이며 Reynolds수가 증가함에 따라서는 그 차이가 미소함을 보여 주고 있다. 이는 Reynolds수가 낮은 값에서는 유입 공기의 속도 영향이 미소하여 가열벽의 복사가 공간내의 온도를 균일하게한 결과이다.

Fig. 4는 각벽면에서의 국소Nusselt수를 대류, 복사 그리고 전체Nusselt수의 분포를 각 조건에

Table.1 Mean Nusselt Number.

Gr=1460, Re=50

Nu	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall4
Tot.	-22.05	2.39	3.63	2.46
Con.	-11.23	0.03	-0.06	-0.91
Rad.	-10.82	2.36	3.69	3.37

Gr=11585, Re=50

Nu	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall4
Tot.	-32.99	4.54	6.72	4.57
Con.	14.57	0.08	-0.01	0.97
Rad.	18.42	4.47	6.74	5.54

Gr=1460, Re=400

Nu	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall4
Tot.	60.72	4.48	6.48	4.52
Con.	42.87	0.002	1.13	0.63
Rad.	17.85	4.48	7.61	5.15

Gr=11585, Re=400

Nu	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall4
Tot.	70.05	7.25	10.33	7.15
Con.	42.60	0.03	1.24	0.61
Rad.	27.46	7.29	11.58	7.77

Gr=1460, Re=2000

Nu	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall4
Tot.	-91.04	5.81	8.06	5.55
Con.	70.82	0.34	-0.45	-0.40
Rad.	20.23	5.47	8.51	5.95

Gr=11585, Re=2000

Nu	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall4
Tot.	101.10	8.80	12.16	8.36
Con.	70.82	0.35	-0.46	-0.41
Rad.	30.28	8.45	12.62	8.77

대하여 나타내었다. 각 조건에서 단열벽인 Wall 2, 3, 4에서는 거의 유사한 값을 가진다. 이는 발열벽으로 부터 먼거리에 있으므로 인하여 온도 구배가 작게 나타난 결과이다. 그러나 가열벽인 Wall 1에서는 그 차이를 볼 수 있다. Re=50에서는 축방향

거리가 증가함에 따라 유입구 쪽에서는 Nusselt수가 급격히 증가함을 볼 수 있으며 Reynolds수가 증가함에 따라 그 구배가 둔화됨을 알 수 있다. 이는 Reynolds수가 증가함에 따라 부력차의 영향이 차츰 감소된 결과이다. 복사에 의한 열전달은 벽면에 따라 거의 유사한 값을 가지나 대류열전달은 그 차이가 현저하여 일정한 표면복사를 가진 경우가 대부분 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 5는 Richardson수, Gr/Re^2 에 대한 각벽에서의 대류, 복사 그리고 전체의 평균 Nusselt수의 분포를 나타내고 있다. Gr/Re^2 가 증가함에 따라 평균 Nusselt수의 분포는 대류에서는 Wall 1에서 증가함을 그외 벽에서는 거의 유사한 값을 보여준다. 그러나 복사에 의하여서는 Wall 1에서 거의 유사

한 분포를, 그외 벽에서는 다소 감소함을 보이고 있다. 또한 Wall 1를 제외한 각벽에서의 대류에 의한 평균 Nusselt수는 거의 체로값을 나타내어 단열벽에서의 열전달은 거의 일어나지 않음을 알 수 있으나 복사에 의한 평균 Nusselt수는 Wall 1에서 가장 높게, 다음으로 Wall 3 그리고 Wall 2와 Wall 4는 거의 유사한 값을 보여 열방사가 좌우벽에는 그 영향이 미소함을 알 수 있다. 이에 대한 전체 평균 Nusselt수 분포는 Wall 1 > Wall 3 > Wall 2 = Wall 4로서 나타났다. Table 1은 $Gr=1460$ 과 $Re=50$ 에서의 평균 Nusselt수에 대한 값이다. 전체 Nusselt수에 대한 대류열전달과 복사열전달의 비율을 고찰하여 보면 Wall 1에서는 대류가 50.9%, 복사가 49.1%이며, Wall 2에서는 대류가

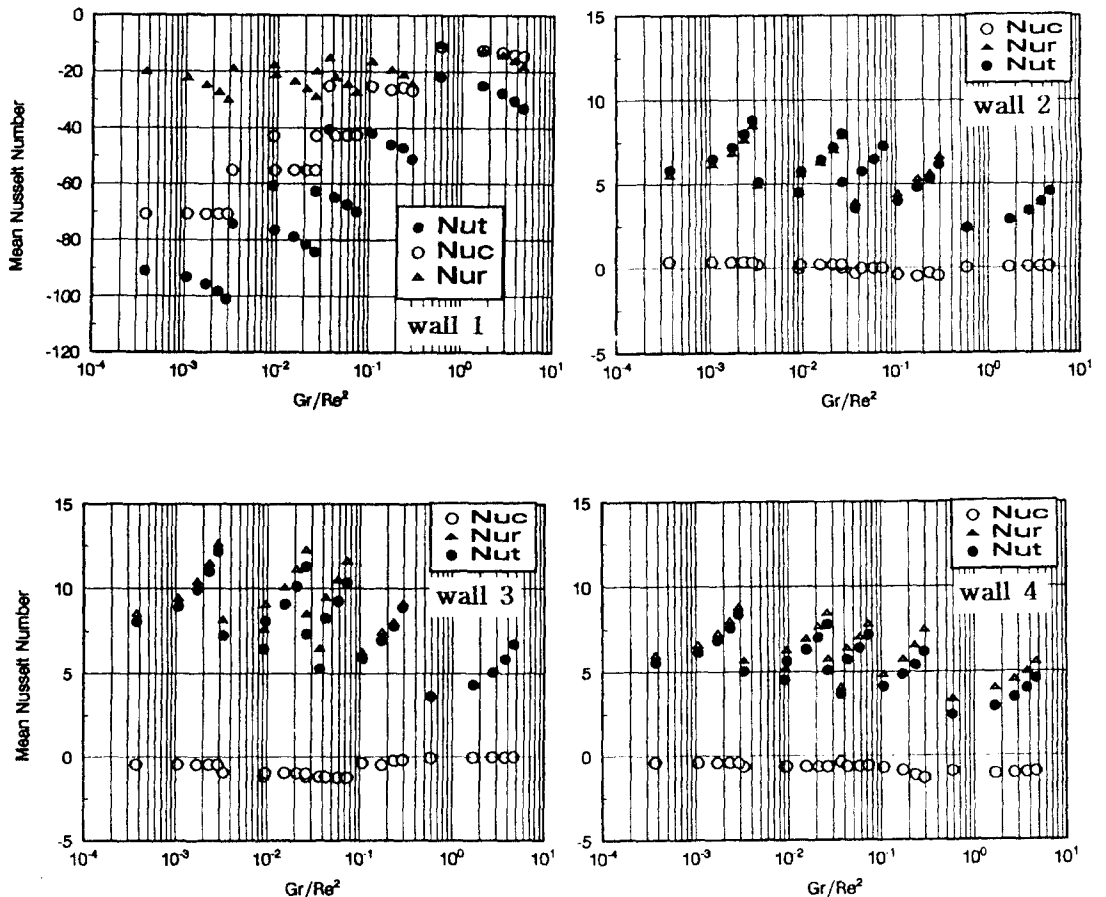


Fig. 5 Mean Nusselt number versus Gr/Re^2 for various wall surface.

1.3%, 복사가 98.7%이며, Wall 3에서는 대류가 1.6%, 복사가 98.4%이며, Wall 4에서는 대류가 21.3%, 복사가 78.7%로 각각 나타나서 복사가 전체열전달에 미치는 영향은 Wall 2, Wall 3, Wall 4 그리고 Wall 1의 순으로 크게 나타난다.

5. 결 론

(1) $Gr=1460$ 과 $Re=50$ 에서 복사를 고려할 경우 상부 벽면에도 열경계층이 발생되어 복사를 고려하지 않은 경우 보다 공간내의 온도장이 비교적 균일하게 나타난다.

(2) 평균 Nusselt수의 분포는 복사에 의한 값은 벽면에 따라 거의 유사하지만 대류에 의한 것은 현저한 차이가 나타나며, 대류 보다 복사에 의한 것이 낮은 값을 보여 준다.

(3) 전체 평균 Nusselt수는 $Wall\ 1 > Wall\ 3 > Wall\ 2 \approx Wall\ 4$ 로서 나타난다.

(4) 복사가 전체열전달에 미치는 영향은 Wall 2, Wall 3, Wall 4 그리고 Wall 1의 순으로 크게 나타난다.

참고문헌

- 1) A. Yücel, S. Acharya and M. L. Williams, 1989, "Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 15, pp. 261 - 278.
- 2) G. D. Raithby and E. H. Chui, 1990, "A Finite - Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media", Journal of Heat Transfer Vol. 112, pp. 415 - 423.
- 3) C. Bouallou and J. F. Sacadura, 1991, "Thermal Radiation, Convection and Convection in Porous Media Contained in Two - Dimensional Vertical Cavities", Journal of Heat Transfer Vol. 113, pp. 255 - 261.
- 4) R. Siegel and C. M. Spuckler, 1992, "Effect of Index of Refraction on Radiation Characteristics in a Heated Absorbing, Emitting and Scattering Layer", Journal of Heat Transfer Vol. 114, pp. 781 - 784.
- 5) L. C. Chang, K. T. Yang and J. R. Lloyd, 1983, "Radiation - Natural Convection Interactions in Two - Dimensional Complex Enclosures", Journal of Heat Transfer Vol. 105, pp. 89 - 95.
- 6) B. Geghart, 1959, "A New Method for Calculating Radiant Heat Exchanger", ASHRAE Trans, Vol. 65, pp. 321
- 7) J. Onishi, S. Tanaka and K. Naito, 1988, "Numerical Prediction of Room Air Distribution Effects of Calculation Procedures at Fluid - Solid Interfaces" Proceedings of ASHRAE, Symposium on Building Systems. pp. 161 - 168.
- 8) J. Onishi, M. Kurimura and S. Tanaka, 1990, "Applicability and Limitations of a Numerical Method in Thermal Environment Analysis for Air - Conditioned Rooms", Proceedings of 2nd International Conference on Engineering Aerodynamics and Thermodynamics of Ventilations (Room Vent '90), pp. 1 - p.15.