



실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구

- I. 수치법 검증과 자연대류 -

Numerical Study on Convective Heat Transfer in a Compartment Fire

- I. Evaluation of Numerical Method and Natural Convection -

박 외 철* · 고 경 찬**

Woe-Chul Park · Kyung-Chan Ko

(1999년 1월 26일 접수, 1999년 4월 28일 채택)

ABSTRACT

In a compartment fire, convective heat transfer dominates spread of the fire and smoke movement before flash-over occurs, and natural convection is very important in particular when there are no openings. The finite volume method with SIMPLE algorithm was applied to a square cavity similar to a compartment without an opening. The objectives of this study are to evaluate the method and to simulate natural convection from a hot body in the cavity. The results without the hot body showed an excellent agreement with those of previous studies. Streamlines, isotherms and Nusselt numbers were computed for different Rayleigh numbers.

1. 서 론

매년 화재로 인해 많은 인명손실과 막대한 경제적 손실이 발생하고 있다. 화재로 인한 피해를 방지하기 위해서는 화재의 조기 감지와 초기 소화가 요구된다. 화재감지와 초기소화는 실내 온도가 상승하여 화재가 실내 전체로 확산되는 순발연소(Flash-over)가 일어나기 전에 이루어

어져야 한다. 실내 화재의 조기 감지와 초기 소화, 그리고 이미 발생한 화재의 원인을 추정하기 위해 실내의 유동과 온도분포의 정확한 예측이 필요하다. 화재의 실험연구는 실험과 유사한 화재에 대해 정확한 정보를 제공하지만 특별한 장소와 많은 장비가 소요된다. 이에 비해 수치연구는 수치법을 화재에 적용하여 그 정확성이 입증되면 많은 정보를 신속히 얻을 수 있는 장

* 부경대학교 공과대학 산업시스템안전공학부

** 부경대학교 산업대학원

점이 있다.

밀폐된 냉동창고나 문이 닫혀있는 실내와 같은 밀폐공간에서 화재가 발생하면 초기에는 가연성 물질의 연소부위로부터 자연대류에 의해 실내온도가 상승한다. 자연대류는 실내화재 뿐만 아니라 전자장비 내부의 냉각 등에 관련되어 있어 연구가 활발하게 수행되어 왔다. 밀폐공간내 자연대류의 수치연구에는 유한요소법^{1,2)}, 유한체적법³⁾, 고온물체^{4,5)}, 실내화재^{6,7)} 등이 있다.

본 연구는 실내화재 초기의 온도분포와 유동에 관한 수치연구로서, 연구의 목적은 수치법을 검증하고, 검증된 수치법으로 밀폐공간내 고온물체로부터의 자연대류를 모사하는 것이다. 일반적으로 연소부위의 크기와 온도, 실내 온도는 시간의 경과에 따라 달라지므로 비정상상태(unsteady state)이지만 문제를 단순히 하기 위해 정상상태로 하고, 2차원 정방형 밀폐공간 속에서 고온물체로부터 자연대류가 일어나는 것으로 하였다. SIMPLE 알고리즘이 포함된 유한체적법⁸⁾을 사용하여 Ra=10³, 10⁴, 10⁵에서의 유동형태와 온도분포, Nu를 계산하였다. 먼저 수치법을 검증하기 위해 두 수치법의 온도차이에 의한 자연대류의 결과를 타 연구자의 연구결과^{2,3)}와 비교하고, 검증된 수치법을 고온물체가 있는 밀폐공간에 적용하였다.

2. 수치법

비압축성 2차원 층류 정상흐름의 지배방정식은

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots\dots (4)$$

이다. 식(3)의 우변 첫 항은

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = -(\rho_c - \rho)g \dots\dots\dots (5)$$

로 쓸 수 있고 여기에 Boussinesq근사

$$\rho_c - \rho = -\rho g \beta (T - T_c)$$

를 대입하고, 무차원 변수 x*=x/L, y*=y/L, u*=uL/ν, v*=uL/ν, T*=(T-T_c)/(T_h-T_c)로 식(1)~(4)를 무차원화한 다음, *를 제거하면 아래의 무차원식을 얻는다. 여기서 L은 특성길이, u와 v는 각각 x, y방향 유속, T는 온도, T_c는 저온, T_h는 고온을 나타낸다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots\dots (7)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = GrT + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (9)$$

가 된다.

본 연구의 계산영역과 경계조건은 Fig.1과 같다. 특성길이 L은 정방형 공간의 한 변의 길이로 편의상 1.0로 하고, 벽과 물체의 표면에서의 유속은 0이고, 상하 두 벽은 단열되어 있다 (∂T/∂y=0). 고온물체가 없는 경우(Fig.1(a)) 타 연구자의 결과와 비교할 수 있도록 왼쪽 벽의 온도를 T_h, 즉, T=1.0, 오른쪽 벽은 T_c (T=0)으로 하였고, 고온물체가 있는 경우(Fig.1(b))에는 고온물체의 온도를 T_h, 좌우 두 벽의 온도를 T_c로 하였다. 고온물체의 위치는 오른쪽 아래이고 크기는 x방향 격자 4개, y방향 격자 1개이다.

식(6)~(9)를 유한체적법으로 이산화하고 대류항은 멱법칙(power law)으로 하여 미지수 u, v, T의 해를 구하였다. 연구의 초기단계에서 온도분포와 유속에 대한 격자수의 영향을 비교한 결과, 30×30보다 많아도 거의 차이가 나지 않으므로 30×30의 균일격자로 하였다. 속도에 대해서는 엇갈림 격자를 적용하였고, Pr은 공기의 Pr인 0.71으로 하였다.

Nu는 왼쪽 벽에서의 국소값으로, x=0에서 Nu=∂T/∂x (10) 이고, Nu_{mean}은 왼쪽벽의 모든 격자에 대해 국소

Nu를 합하여 격자수로 나눈 평균값이다.

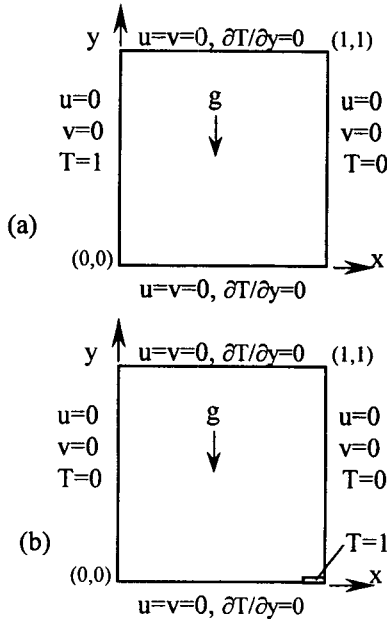


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

모든 계산은 펜티엄급 PC에서 수행하였으며, 계산순서(n)에 따라 모든 격자에서 온도의 상대 오차가

$$\left| \frac{T^{n+1} - T^n}{T^{n+1}} \right| < 10^{-4} \dots\dots\dots (11)$$

를 만족할 때 해가 수렴하는 것으로 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 고온물체가 없는 경우

Table 1은 Ra=10³일 때의 Nu를 비교한 것이다. Nu의 최대값과 최소값, 평균값의 오차가 거의 없다. 밀폐공간 중앙의 수직, 수평 평면에서의 최대속도와 그 위치도 Table 2와 같이 잘 일치하였다.

Ra=10³일 때 유동형태와 온도분포가 Fig. 2에 나타나 있다. 온도가 높은 왼쪽벽에서는 공기의 밀도가 낮아 공기가 위로 이동하고 그 자리에는 찬 공기가 들어오게 되어 공간의 중앙을 중심으로 시계방향의 소용돌이가 형성되어 있

다. 상하 두 벽은 단열되어 있으므로 y방향의 온도구배가 없음을 확인할 수 있다.

Table 1 Comparison of Nu at Ra=10³

Nu	present study	Davis ²⁾	rel. error (%)
Nu _{max}	1.508	1.505	0.20
Nu _{min}	0.692	0.692	0.00
Nu _{mean}	1.117	1.117	0.00

Table 2 Comparison of maximum velocity at midplane and its location

velocity & location	present study	Davis ²⁾	rel. error (%)
u _{max}	5.069	5.139	1.36
@x	0.817	0.813	0.49
v _{max}	5.130	5.027	1.48
@y	0.183	0.178	2.81

Table 3에는 고온물체가 없는 경우 Ra=10³, 10⁴, 10⁵일 때 Nu의 평균값 Nu_{mean}을 비교하였다. Ra=10³와 10⁴일 때 상대오차가 1.5% 이하이고, Ra=10⁵일 때는 4.64%로 나타났다.

Table 3 Comparison of Nu_{mean}

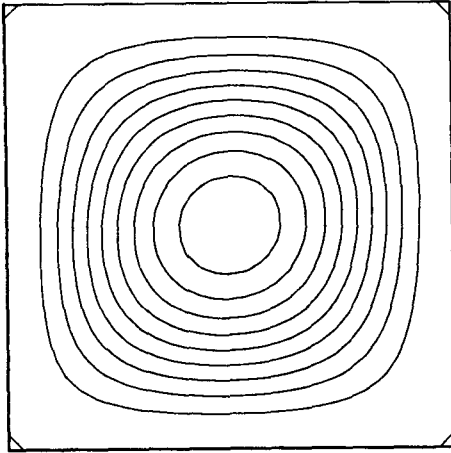
Ra	present study	Kim et. al ²⁾	rel. error (%)
10 ³	1.117	1.132	1.33
10 ⁴	2.268	2.301	1.43
10 ⁵	4.694	4.486	4.64

3.2 고온물체가 있는 경우

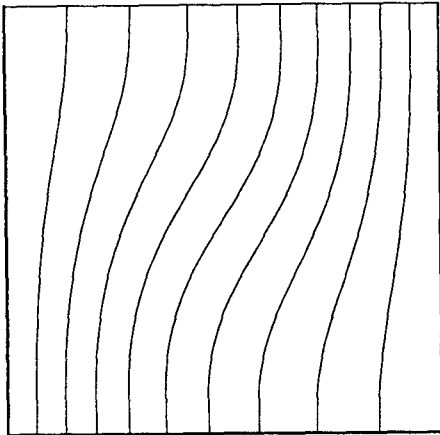
Fig. 3은 Ra=10³과 10⁵의 유동형태를 비교한 것이다. Ra=10³일 때 유동은 아주 미약하여 고온물체의 위쪽에 약한 소용돌이가 형성되어 있다. 이에 비해 Ra=10⁵인 경우에는 반시계 방향으로 회전하는 큰 소용돌이와 시계방향의 작은 소용돌이가 형성되어 있다. Ra=10⁵에서는 연기를 포함한 연소가스가 실내 전체로 빠른 속도로 섞이지만, Ra=10³에서는 연소가스가 물체의 위쪽의 오른쪽 벽면 근처에 모임을 알 수 있다.

Ra=10³과 10⁵일 때의 등온선이 Fig. 4에 나타나 있다. Ra에 따라 천정과 바닥면의 온도분포

에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 천정의 온도 분포가 다른 것은 열감지기를 설치할 때 연소부 위의 온도를 고려할 필요가 있음을 의미한다.



(a) streamlines



(b) isotherms

Fig. 2 Flow pattern and isotherms for $Ra=10^3$

Fig. 5는 Ra 가 각각 10^3 , 10^4 , 10^5 일 때 공간 중심면의 수직, 수평면에서의 속도분포를 그린 것이다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이 $Ra=10^3$ 일 때는 속도 u 와 v 가 거의 0이지만 $Ra=10^5$ 에서는 u 의 최대값이 24이고, v 의 분포에 3개의 변곡점이 나타난 것은 Fig. 3의 두 소용돌이로부터 예상한 바와 같다.

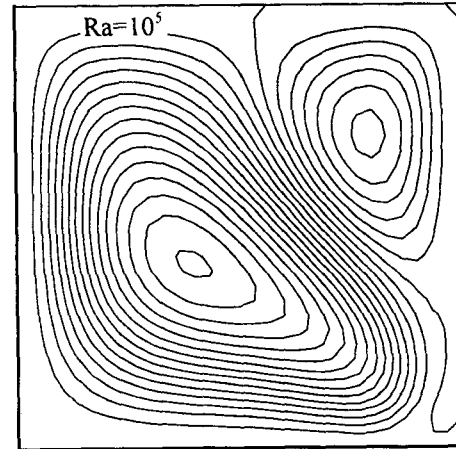
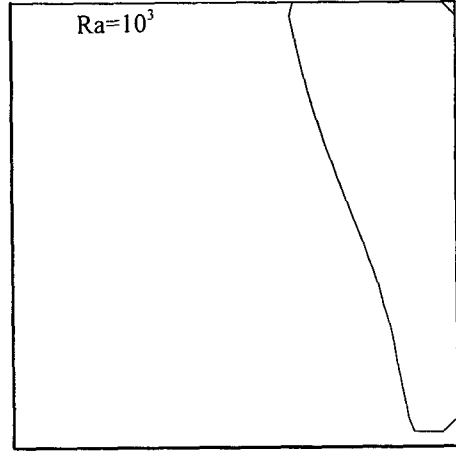


Fig. 3 Flow patterns for $Ra=10^3$ and 10^5

Fig. 6은 Ra 에 따른 Nu 를 비교한 그림이다. 공간내 공기의 온도가 왼쪽 벽면의 온도($T=0$)보다 높으므로 열전달은 공기로부터 벽면으로 이루어지고 따라서 Nu 는 -값을 가지게 된다. 그러나 이 그림에서는 편의상 Nu 의 절대값을 나타내었다. 벽면의 아래쪽($y=0$ 부근)에서는 Ra 의 값에 관계없이 Nu 가 0이다. 이것은 Fig. 4의 등온선으로 본 바와 같이 공간의 왼쪽 아래 부분에서는 벽면과 공기사이에 온도구배가 없어 열전달이 거의 일어나지 않기 때문이다. Ra 가 증가하면 Nu 가 증가하고, 최대값의 위치는 아래쪽으로 이동한다. Ra 에 따른 Nu 의 평균값과 최대값 및 그 위치를 비교한 Table 4에서 이것을

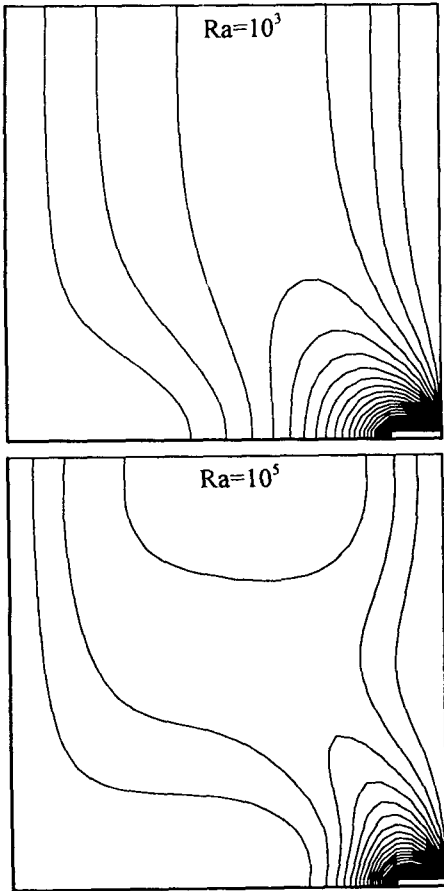


Fig. 4 Isotherms for $Ra=10^3$ and 10^5

확인할 수 있다. 즉, Ra 가 10^3 에서 10^5 로 증가했을 때 평균 Nu 는 0.160에서 0.222로, Nu 의 최대값은 0.228에서 0.358로 증가하고 그 위치는 $y=0.983$ 에서 $y=0.900$ 으로 이동하였다.

Table 4 Comparison of Nu_{mean} , Nu_{max} and its location

Ra	Nu_{mean}	Nu_{max}	@ y
10^3	0.160	0.228	0.983
10^4	0.169	0.254	0.917
10^5	0.222	0.358	0.900

4. 결 론

실내화재 초기의 자연대류를 모사하기 위해

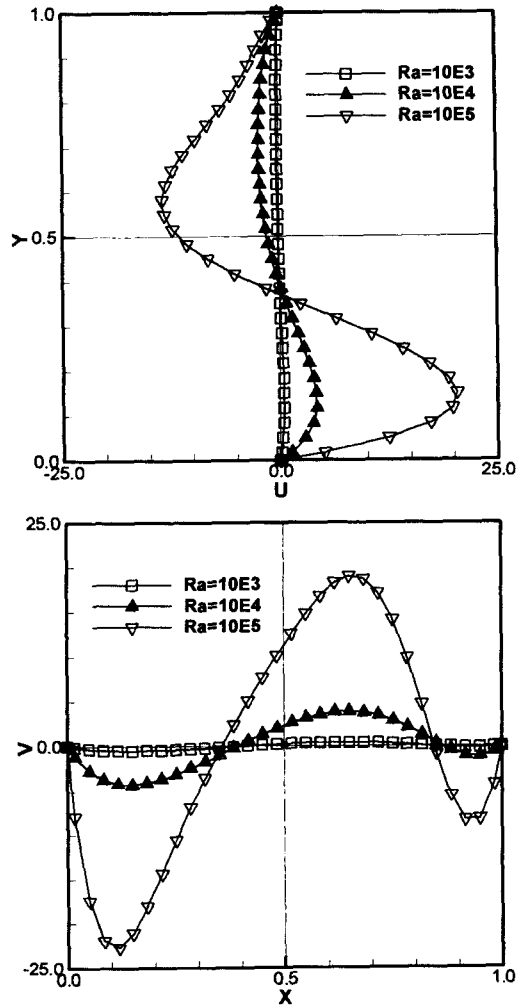


Fig. 5 Comparison of midplane velocity u and v

SIMPLE 알고리즘이 포함된 유한체적법을 정방형 밀폐공간에 적용하여 $Ra=10^3, 10^4, 10^5$ 에 대하여 계산한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고온물체가 없을 때 타 연구자의 연구결과와 잘 일치하였다.
- 2) 유동이 미약한 $Ra=10^3$ 에서는 연소가스가 실내 전체로 전파되지 않고 오른쪽 벽면 근처에 모이는 것으로 나타났다.
- 3) 천정의 온도분포는 Ra 에 따라 차이가 크므로 열감지기의 위치를 선정할 때 연소부위의 온

도를 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

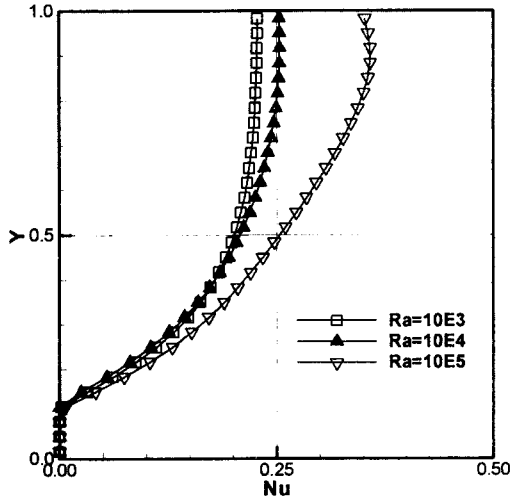


Fig. 6 Comparison of Nusselt numbers

기 호 설 명

Gr: Grashof number, $g\beta(T_h - T_c)L^3/\nu^2$

L : 특성길이

Nu: Nusselt number

Pr : Prandtl number

Ra: Rayleigh number, $PrGr$

T : 무차원 온도, $(T - T_c)/(T_h - T_c)$

(T_h : 고온, T_c : 저온)

u : x방향 무차원속도, uL/ν

v : y방향 무차원속도, vL/ν

α : 열확산계수

β : 체적팽창계수

ν : 동점성계수

ρ : 밀도

- 1) J.N. Reddy and A. Satake, "A Comparison of a Penalty Finite Element Model with the Stream Function-Vorticity Model of Natural Convection in Enclosure", J. Heat Transfer, Vol. 102, pp. 659~666, 1980.
- 2) 김무현, 이진호, 강신형, 손영석, "유한요소법을 이용한 정방형밀폐용기내의 플란틀수가 낮은 유체의 자연대류에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 541~550, 1988.
- 3) G. de Vahl Davis, "Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Bench Mark Numerical Solution", Int. Num. Methods in Fluids, Vol. 3, pp. 249~264, 1983.
- 4) 이재현, "고립된 발열물체를 가지는 정사각형 밀폐공간 내에서의 자연대류 열전달 및 유동 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제8권, 제3호, pp. 360~367, 1984.
- 5) 권순석, 정태현, 권용일, "다른 경계조건을 갖는 밀폐공간 내에 존재하는 고온부로부터의 자연대류 열전달", 대한기계학회 논문집, 제16권, 제12호, pp. 2395~2406, 1988.
- 6) K.B. Rehm and H.R. Baum, "Fire Driven Flows in Enclosures", J. Comp. Phys., Vol. 110, No. 2, 1994.
- 7) P.H. Thomas, "Modeling of Compartment Fires", Fire Safety Journal, Vol. 5, pp. 181~190, 1983.
- 8) S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, NY, 1980.