

실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구(Ⅱ)

- 혼합대류 -

Numerical Study on Convective Heat Transfer in a Compartment Fire(Ⅱ)

- Mixed Convection -

박 외 철* · 고 경 찬** · 이 광 진***

W.C. Park · K.C. Ko · K.J. Lee

(1999년 3월 16일 접수, 1999년 4월 28일 채택)

ABSTRACT

In a compartment fire with openings, convective heat transfer consists of natural convection from the hot bodies and forced convection by airflow through the openings. The same finite volume method that was applied to pure natural convection in part I was utilized without modification to the square cavity with two openings. The objective of this study is to investigate effects of the openings on temperature distribution. Flow patterns, temperature distribution and heat transfer were compared for different Rayleigh numbers and with and without the openings.

1. 서 론

밀폐공간의 화재에서 가연성 물체의 연소부로부터 자연대류가 일어나지만, 열려있는 출입문이나 창문, 기타 개구부가 있는 공간에서는 자연대류와 함께 개구부를 통한 공기의 흐름에 의해 온도분포와 유동형태가 밀폐공간과는 상당

히 달라진다. 본 연구는 실내화재 초기에 화재 감지와 소화, 화재의 원인추정 등에 필요한 유동과 온도분포를 예측하기 위해 각각 밀폐공간과 개구부가 있는 공간에서 고온물체로부터의 대류 열전달을 유한체적법¹⁾으로 조사한 것이다.

I부²⁾에서는 2차원 정방형 밀폐공간내 정상상태의 자연대류를 계산하였다. 수치법을 검증하기

* 부경대학교 공과대학 산업시스템안전공학부

** 부경대학교 산업대학원

*** 창원기능대학 전산응용학과

위해 두 수직벽의 온도차에 의한 자연대류를 $Ra=10^3, 10^4, 10^5$ 에 대하여 계산하였고, 그 결과는 다른 연구자들의 결과^{3,4)}와 잘 일치하였다. 또 이 수치법으로 고온물체가 있는 밀폐공간의 유동과 온도분포 특성을 Ra 에 따라 서로 비교하였다. II부에서는 흔히 실내화재의 현장에서 볼 수 있는 개구부의 존재가 유동 및 온도분포에 미치는 영향을 조사하였다. 개구부의 유무에 따른 결과를 비교하기 위해 유입구와 유출구의 경계조건을 제외하고는 모든 조건을 I부의 공간내 고온물체가 존재하는 경우와 같게 하였다. 일정한 유속으로 유입된 공기가 유출구로 흐를 때 실내 유동형태와 온도분포 및 열전달 특성을 조사하고, 특히 개구부의 유무에 따른 천정의 온도분포를 서로 비교하였다.

2. 수치법

I부²⁾에 제시된 바와 같이 무차원 지배방정식은

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

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

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = GrT + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \dots (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots(4)$$

이다. 본 연구는 벽과 고온물체 사이의 온도차부터 식(3)의 우변 첫 항 GrT 에 따라 유동장이 형성되는 자연대류뿐만 아니라 개구부를 통한 공기의 흐름에 의해 강제대류가 일어나므로 혼합대류에 관한 문제가 된다.

본 연구의 계산영역과 경계조건은 Fig. 1과 같다. 정방형 공간의 한 변의 길이 L 은 편의상 1.0, 격자배열은 30×30 의 균일격자로 하였다. 벽과 고온물체의 표면에서의 유속은 0이고, 상하 두 벽은 단열되어 있다. 고온물체는 오른쪽 아래에 위치하고, 고온물체의 크기는 격자 4개, 즉, 길이 0.133으로 하였다. 무차원 온도는 고온물체를 1, 두 수직벽과 개구부로 유입되는 공기의 온도는 0으로 하였다. 개구부는 왼쪽 벽($x=0$)의

아래쪽의 입구 1개, 오른쪽 벽($x=1.0$) 위쪽의 출구 1개이고, 크기는 각각 격자 4개(길이 0.133)이다. 유입유속은 입구 전체에 균일하게 x 방향으로 10단위, 즉, $u=10$ 으로 하고, 출구에서의 유출 경계조건은 유속 u 의 x 방향 기울기가 0인 것으로 하였다. 입구의 유속이 작을 때(예: $u=1.0$)에는 그 영향이 분명하게 나타나지 않아 10으로 하였다. 강제대류는 개구부의 유입과 유출 경계조건에 의해 수치법에서 계산된다. Pr 은 공간내 기체를 공기로 가정하여 0.71로 하였다. 이상의 계산영역과 경계조건은 개구부를 제외하고는 I부에서와 같다.

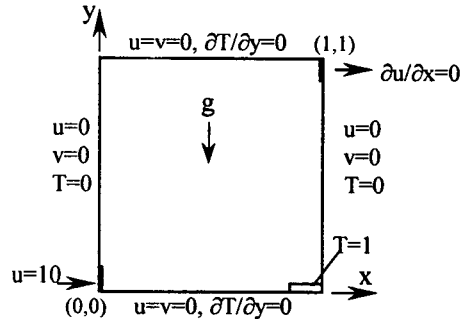


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

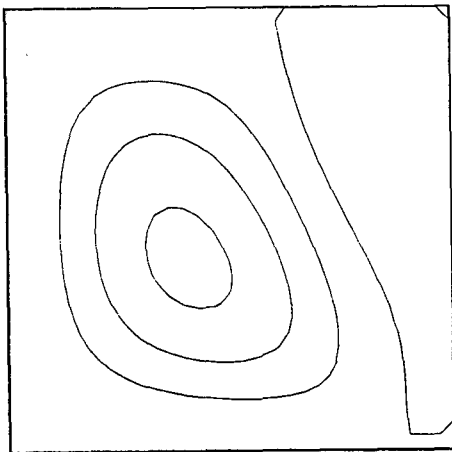
식(1)~(4)를 유한체적법으로 이산화하여 미지수 u, v, T 의 해를 구하는 방법도 I부와 같다. 국소 Nu 는 왼쪽 벽과 첫 격자의 온도차이 ΔT 를 격자크기 Δx 로 나눈 값이고, 해의 수렴조건은 계산순서(n)에 따라 모든 격자에 대하여 온도의 상대오차가 다음 식을 만족하는 것으로 하였다.

$$\left| \frac{T^{n+1} - T^n}{T^{n+1}} \right| < 10^{-4} \dots\dots\dots (5)$$

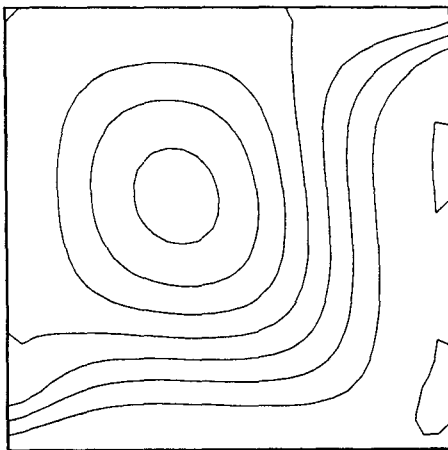
3. 결과 및 토의

혼합대류가 일어나면 자연대류 단독의 경우에 비해 공간내 유동이 빨라지고 열전달이 증가한다. $Ra=10^3$ 일 때에는 I부에서 나타난 바와 같이 자연대류에 의한 유동이 미약하므로, 개구부가 있을 때의 공간내 유동은 개구부를 통한 흐름이 지배적이어서 입구에서 출구로 거의 직선적으로 흐름이 형성되었다.

Fig. 2는 $Ra=10^4$ 에서의 유동형태를 유선으로 표현하여 비교한 것이다. 개구부가 있을 때 유입 공기가 거의 직각을 이루면서 유출되는 것을 볼 수 있다. 개구부가 없는 경우에는 오른쪽 아래에 위치한 고온물체로부터의 자연대류에 의해 오른쪽 벽 근처에 약한 소용돌이가 형성되지만, 개구부가 있으면 이 소용돌이는 소멸된다. 또 개구부가 없을 때 반시계 방향으로 형성된 큰 소용돌이는 개구부를 통해 흐르는 공기에 의해 유동범위가 더 작고 유속이 빨라졌다.

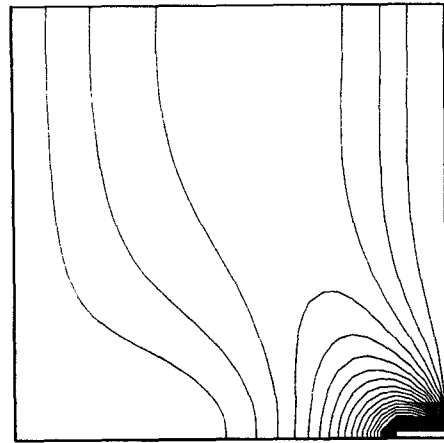


(a) without openings

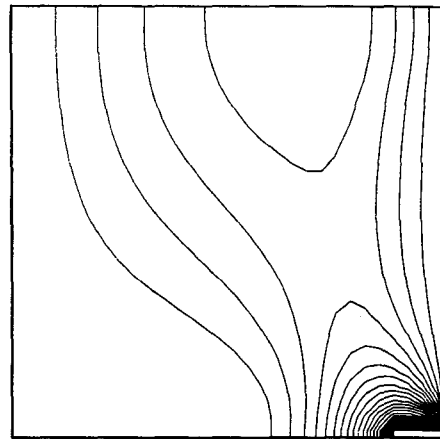


(b) with openings

Fig. 2 Comparison of flow patterns for $Ra=10^4$



(a) without openings



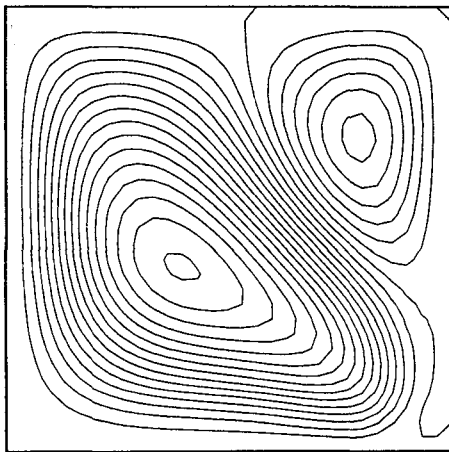
(b) with openings

Fig. 3 Comparison of temperature distribution for $Ra=10^4$

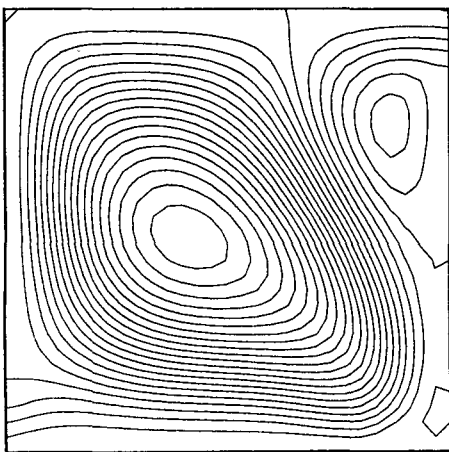
Fig. 3는 $Ra=10^4$ 에서 개구부의 유무에 따라 실내의 온도분포를 비교한 것이다. 등온선은 $T=1.0$ (고온물체)과 $T=0$ (수직벽)사이에서 0.02간격으로 그린 것이다. 고온물체 주위의 온도분포는 개구부의 유무에 관계없이 비슷하지만, 천정 근처에서는 개구부의 영향이 나타나 있다. 즉, 개구부가 있을 때 천정의 가운데 부분의 온도가 개구부가 없을 때보다 더 높다. 또 오른쪽 벽면 위쪽에 가까운 공간에서 등온선의 간격이 좁아져 온도구배가 증가하였다. 이것은 출구가 오른

쪽 벽의 위쪽에 위치하기 때문이다. 한편, 왼쪽 개구부를 통해 유입되는 공기(온도 $T=0$)의 영향으로 공간의 왼쪽 아래부분의 저온영역이 개구부가 없을 때보다 더 넓어졌음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 $Ra=10^5$ 에서의 유선을 그린 그림이다. 앞의 Fig. 2에 비해 Ra 의 증가로 공간내 유속이 훨씬 더 빨라졌다. 개구부가 있어도 반시계 방향의 큰 소용돌이는 크게 달라지지 않았지만, 출구부근의 작은 소용돌이는 개구부의 유동으로 크기가 줄어들었다.

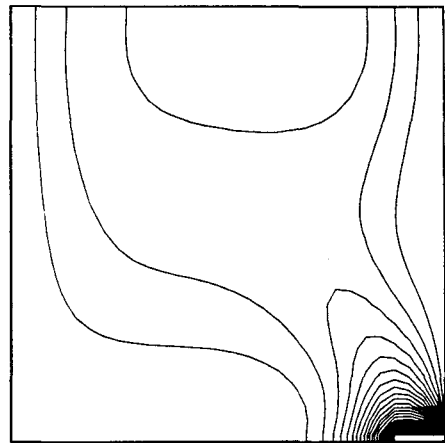


(a) without openings

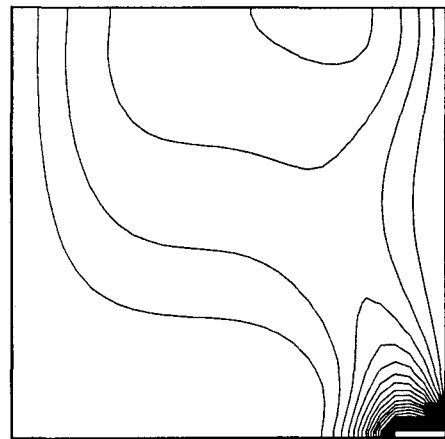


(b) with openings

Fig. 4 Comparison of flow patterns for $Ra=10^5$



(a) without openings



(b) with openings

Fig. 5 Comparison of temperature distribution for $Ra=10^5$

이 경우에 해당하는 온도분포를 Fig. 5에 비교하였다. $Ra=10^4$ 의 경우와 마찬가지로 공간 하부의 온도분포에는 큰 차이가 없지만 상부의 온도분포가 상당히 다르게 나타나 있다. 개구부가 있을 때 유출되는 공기에 의해 천정의 온도가 높아졌고 출구 근처에서의 온도구배도 증가하였음을 알 수 있다. 개구부를 통해 유입되는 공기에 의해로 공간의 왼쪽 아래부분의 저온영역이 개구부가 없을 때보다 더 넓어졌으나 바닥면에서의 온도분포는 거의 같게 나타나 바닥면

에서의 온도분포에 대한 개구부의 영향이 작음을 알 수 있다. Fig. 3($Ra=10^3$)과 Fig. 5($Ra=10^3$)를 비교하면 천정뿐만 아니라 바닥의 온도분포도 상당히 다름을 볼 수 있다.

Fig. 6은 개구부가 있을 때 Ra 에 따른 천정에서의 온도분포를 나타낸 것이다. $Ra=10^4$ 일 때 $Ra=10^3$ 보다 천정 전체의 온도가 높아졌고 최고 온도도 증가하였다. Ra 는 $GrPr$ 이고 Pr 은 0.71로 주었기 때문에 Ra 의 증가는 Gr 의 증가를 의미하고, 이것은 식(3)의 GrT , 즉 자연대류의 증가를 초래한다. 그러므로 개구부의 유무에 관계없이 Ra 가 증가하면 천정의 온도가 증가하는 것은 당연하다. 그러나 $Ra=10^3$ 에서는 $x < 0.45$ 와 $x > 0.9$ 의 온도가 $Ra=10^4$ 보다 높지만, $0.45 < x < 0.9$ 에서는 오히려 온도가 감소하였다. $0.45 < x < 0.9$ 에서의 온도감소는 Fig. 5에서와 같이 두개의 반대방향 소용돌이의 발생에 의한 것이다. $Ra=10^5$ 에서는 $Ra=10^3$ 과 10^4 와 달리 두개의 소용돌이가 형성되어 유동형태가 다르기 때문이다. 개구부가 없는 경우에도 $Ra=10^3$ 일 때의 천정의 최고온도가 10^4 일 때보다 낮았다.

개구부가 있을 때 천정에서의 최고온도 T_{max} 과 그 위치가 Table 1에 나타나 있다. $Ra=10^3$ 에서 10^4 로 증가하면 최고온도가 증가하고 그 지점이 왼쪽으로 이동했지만, 10^5 에서는 최고온도가 오히려 낮아지고 그 위치는 $x=0.75$ 로 이동하였다.

Table 1 T_{max} and its locations

Ra	T_{max}	Location
10^3	0.0924	$x=0.717$
10^4	0.0957	0.683
10^5	0.0866	0.750

Fig. 7은 $Ra=10^5$ 에서 개구부의 유무에 따른 천정의 온도분포를 비교한 그림이다. 개구부가 있을 때의 온도가 없을 때보다 훨씬 높게 나타나 있다. 왼쪽 벽 근처에서는 온도차이가 거의 없으나 출구가 있는 오른쪽 벽 근처가 더 크다. 개구부가 있으면 자연대류와 강제대류의 혼합대류로 열전달이 증가하고, 오른쪽 벽($x=1.0$) 상부의 출구로 유출되는 더운 공기의 영향이 작아졌기 때문이다.

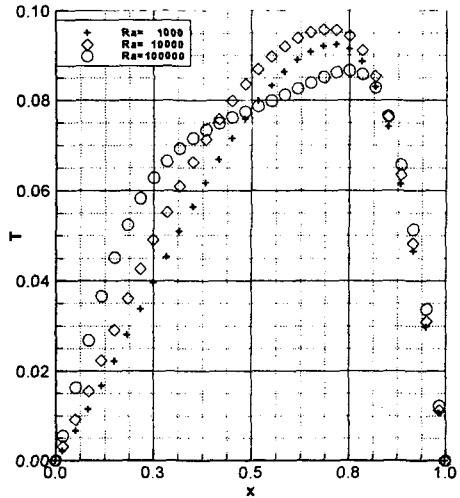


Fig. 6 Temperature distribution on top wall for different Ra with openings

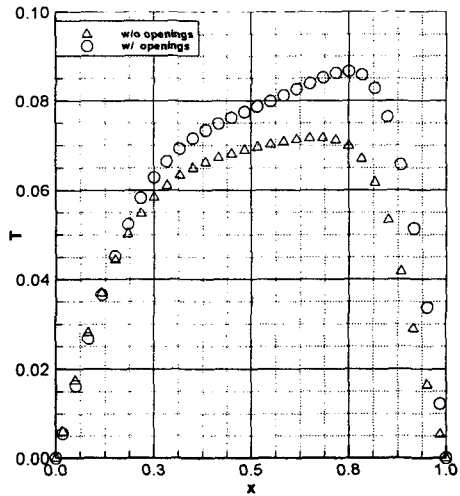


Fig. 7 Comparison of temperature distribution on top wall for $Ra=10^5$ with and without openings

Fig. 8에는 $Ra=10^5$ 에서 개구부의 유무에 따라 실내 공기로부터 왼쪽 벽($x=0$)으로의 열전달을 Nu 로 비교하였다. 왼쪽 벽에서 $T=0$ 으로 유입되는 공기의 영향으로 개구부가 있을 때에는 열전달이 감소하고 따라서 Nu 가 작음을 볼 수 있다. $y=0$ 근처에서 Nu 가 0인 것은 개구부의 유무에 관계없이 공간의 아래쪽 구석에는 열전달이 거의 일어나지 않기 때문이다. 이것은

앞의 Fig. 3과 Fig. 5의 등온선으로도 확인된다.

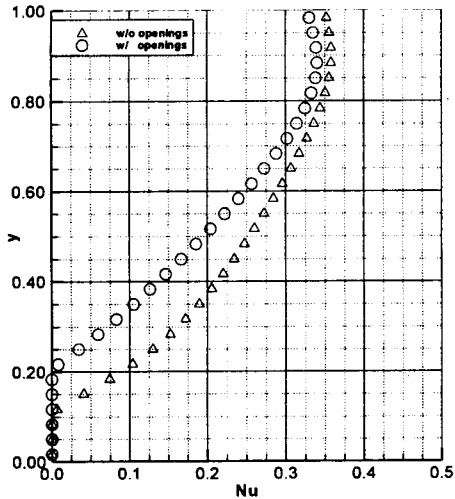


Fig. 8 Comparison of local Nusselt numbers for Ra=10⁵ with and without openings

Table 2는 왼쪽 벽에서의 Nu 평균치 Nu_{mean}를 Ra와 개구부의 유무에 따라 비교한 것이다. 개구부의 유무에 관계없이 Ra가 증가하면 Nu_{mean}이 증가하며, 왼쪽 벽 아래쪽에서 찬 공기가 유입되는 개구부가 있는 경우에는 개구부가 없을 때보다 Nu_{mean}이 작음을 확인할 수 있다. Nu_{mean}의 감소는 실내 공기로부터 왼쪽 벽으로의 열전달이 감소했음을 의미한다.

만일 고온물체에서 가까운 오른쪽 벽에서의 Nu값을 개구부의 유무에 따라 비교했다라면 개구부는 열전달을 증가시켜 Nu값이 더 크게 나타났을 것이다. 이것은 앞의 Fig. 3과 Fig. 5에서 개구부가 있을 때 오른쪽 벽 근처의 등온선 간격이 개구부가 없을 때보다 더 좁게 나타나 있는 것으로 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of Nu_{mean}

Ra	Nu _{mean}	
	w/o openings	w/ openings
10 ⁴	0.160	0.064
10 ⁵	0.169	0.087
10 ⁶	0.222	0.178

4. 결 론

개구부를 통한 공기의 유입과 유출이 온도분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 공간내의 혼합대류를 유한체적법으로 조사한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개구부가 온도분포에 미치는 영향은 유입구 근처에서는 작고 유출구 부근에서는 컸다.
- 2) 천정에서 온도가 가장 높은 지점 근처를 제외하고는 Ra가 증가하면 천정의 온도가 증가하였다.
- 3) 천정의 최고온도는 Ra가 10³일 때 0.0924, 10⁴일 때 0.0957로 높아졌으나, Ra=10⁵에서는 공간내 반대방향의 소용돌이가 형성되어 최고온도가 0.0866으로 낮아짐을 알 수 있었다.

기 호 설 명

- Gr : Grashof number, $g\beta(T_h - T_c)L^3/\nu^2$
- L : 특성길이
- Nu : Nusselt number(x=0)
- 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
- β : 체적팽창계수
- ν : 동점성계수

참 고 문 헌

- 1) S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, NY, 1980.
- 2) 박외철, 고경찬, "실내화재에 있어서의 대류 열전달에 관한 수치연구 - I. 수치법 검증과 자연대류", 한국산업안전학회지, 제14권, 제2호, pp. 26~31, 1999.
- 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) 김무현, 이진호, 강신형, 손영석, “유한요소
법을 이용한 정방형 밀폐용기내의 플란틀수

가 낮은 유체의 자연대류에 관한 연구”, 대
한기계학회 논문집, 제12권, 제3호, pp. 541~
550, 1988.
