

개구부의 유동이 대류에 미치는 영향에 관한 수치연구

박외철[†] · 이경아^{*}

부경대학교 안전공학과 · ^{*}홍원제지
(2000. 4. 22. 접수/ 2000. 8. 17. 채택)

A Numerical Study on Effects of Flow Through Openings on Convection

Woe-Chul Park[†] · Kyoung-Ah Lee^{*}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University · ^{*}Hongwon paper
(Received April 22, 2000 / Accepted August 17, 2000)

Abstract : The finite control volume method was utilized to investigate the effects of flow through openings on convection in an enclosure. Flow patterns and temperature distribution were compared for non-dimensional inflow velocity $U=20, 40, 60$ at $Ra=10^4$ and 5×10^4 , respectively. The inflow velocity influenced temperature distribution in the enclosure significantly and lowered temperature on the top wall. The flow through openings forced the position of the highest temperature on the top wall to move toward the outflow opening.

Key Words : building fire, forced convection, flow through openings, laminar flow, control volume method

1. 서론

개구부가 있는 공간내에서 화재가 발생하면 개구부를 통한 공기의 흐름으로 인해 밀폐공간과는 다른 유동형태와 온도분포가 나타난다. 밀폐공간에서는 자연대류가 일어나는데 비해 개구부가 있으면 자연대류와 강제대류의 복합대류가 일어나기 때문이다. 개구부를 통한 공기의 흐름은 공간내 유동과 온도분포에 직접적으로 영향을 미친다. 특히, 화재시 천장부착형 열감지기의 적절한 위치선정과 관련하여 개구부를 갖는 공간내의 해석은 중요한 의미를 갖는다.

박외철과 고정찬¹⁾은 밀폐공간에서의 자연대류에 유한체적법²⁾을 적용하였고 그 결과가 다른 연구자들의 결과와 잘 일치함을 보였다. 박외철 등³⁾은 동일한 유한체적법을 개구부를 통한 일정 유입속도에서의 복합대류에 적용하였다. 본 연구에서는 개구부를 통한 공기의 흐름이 실내 유동과 온도분포에 미치는 영향을 조사하기 위해

유한체적법을 사용하였다. 앞의 연구와 같이 층류 정상유동을 대상으로 하고, 복사 열전달은 고려하지 않았다. $Ra=10^4$ 과 5×10^4 에서 유입유속 $U=20, 40, 60$ 에 대하여 각각 유선과 등온선으로 유동형태와 실내 온도분포를 서로 비교하였다. 또한 유입유속의 변화에 따른 천장에서의 온도분포를 비교하였다.

2. 수치법

2차원 층류 정상흐름의 연속방정식과 선형 운동량방정식, 에너지 방정식의 무차원 방정식은 다음과 같다³⁾.

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

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

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

[†]To whom correspondence should be addressed.
wcpark@pknu.ac.kr

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

식 (3)의 GrT는 y방향 운동량방정식의 압력 구배항에 Boussinesq 근사를 적용한 것이다.

본 연구의 계산영역과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다. 계산영역은 한변의 길이가 1.0인 정방형 2차원 공간이고, 두개의 개구부가 있으며, 고온물체는 오른쪽 바닥면에 위치해 있다. 유입 개구부는 왼쪽 수직벽의 아랫부분에, 유출 개구부는 오른쪽 수직벽의 윗부분에 위치한다. 격자배열은 이전의 연구³⁾와 동일하게 30×30개의 균일 격자로 하여 격자 1개의 크기는 0.033×0.033이다.

벽과 고온물체의 표면에서는 비활조건에 따라 u=v=0이고, 유출구에서는 u와 x방향 속도구배가 없다고 가정하여 $\partial u / \partial x = 0$ 로 하였다. 온도의 경계조건으로 두 수직벽은 T=0, 고온물체는 T=1, 두 수평벽은 단열($\partial T / \partial y = 0$), 유입구에서 T=0, 유출구에서 $\partial T / \partial x = 0$ 이다.

개구부의 크기는 각각 격자 4개, 즉 길이 0.133, 고온물체의 크기는 4×1격자, 즉 x방향 0.133, y방향 0.033으로 하였다. 예비계산에서 유입유속 U가 20보다 작을 때 그 영향이 아주 작게 나타나므로, U=20, 40, 60의 세 경우에 대하여 조사하였다. Pr은 공기의 값인 0.71로 하고, Ra=10⁴과 5×10⁴의 두 경우에 대하여 계산하였다.

식 (2)-(4)를 유한체적법으로 이산화하고, 대류항은 멱승도식(power law scheme), 압력항은 SIMPLE 알고리즘으로 미지수인 u, v, T를 구하였다. 해의 수렴을 촉진하기 위해 하향 이완계수(under-relaxation factor)로 속도에는 0.5, 압력에는 0.8을 사용하였다. 해의 수렴조건은 모든 격자

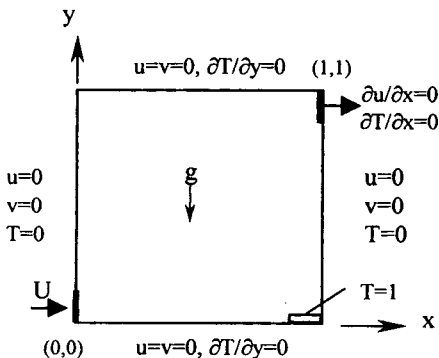


Fig. 1. Computational domain and boundary conditions

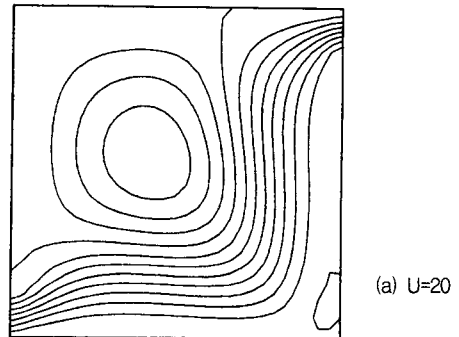
에 대하여 온도의 상대오차가 0.01% 미만, 즉

$$|T^{n+1} - T^n| / T^n < 0.0001 \quad (5)$$

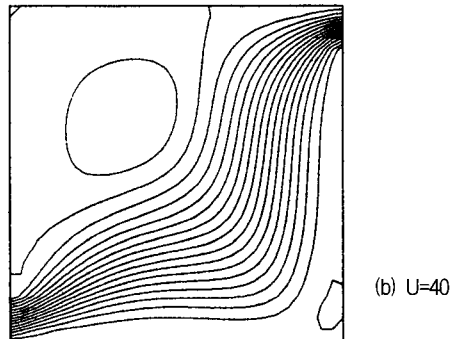
을 만족하는 것으로 하였다. 여기서 윗첨자 n은 계산순서를 나타낸다.

3. 결과 및 토의

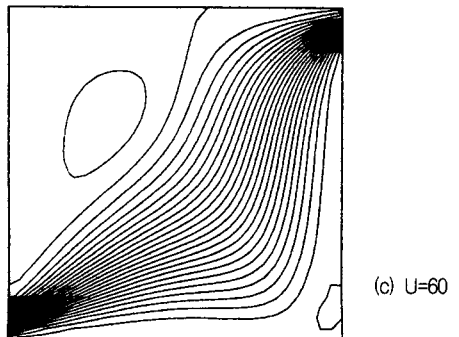
Fig. 2는 Ra=10⁴일 때 유입유속에 따른 유선을 비교한 그림이다. U=20에서 공간에 큰 소용돌이가



(a) U=20



(b) U=40



(c) U=60

Fig. 2. Comparison of flow patterns at Ra=10⁴

가 있고 개구부를 통한 흐름은 거의 직각을 이루고 있다. U 가 상승할 수록 자연대류에 의한 유동은 상대적으로 감소되어, $U=40$ 과 60 에서는 소용돌이가 거의 소멸되었다. U 가 상승하면 개구부를 통한 흐름의 영역이 확대되고 강제대류가 지배함을 볼 수 있다.

같은 Ra 에서 유입유속에 따른 등온선을 Fig. 3에 나타내었다. 유입속도의 변화에도 불구하고 고온물체와 오른쪽 벽 근방의 온도분포는 거의 동일하게 나타난다. 그러나 U 값이 증가할 수록 공간의 왼쪽에 저온영역이 넓어진다. 이것은 유입유체의 온도가 두 수직벽의 온도와 동일하기

때문이다. 개구부를 통해 유입되는 유체에 의해 두 수평벽의 온도분포도 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 4는 $Ra=5 \times 10^4$ 에서의 유동형태를 비교한 것이다. Ra 의 증가는 유체의 물리적 성질이 동일한 경우에는 고온물체와 수직벽면 사이의 온도차 증가를 의미한다. 그러나 본 연구에서는 무차원 온도가 일정하므로 Ra 의 증가는 자연대류의 증가를 뜻한다. 자연대류가 증가하면 공간내 유동이 증가되는데, 이것은 Fig. 4를 앞의 Fig. 2와 비교할 때 같은 U 에서 소용돌이의 회전속도가 훨씬 빠른 것으로 확인된다. $Ra=5 \times 10^4$ 에서는

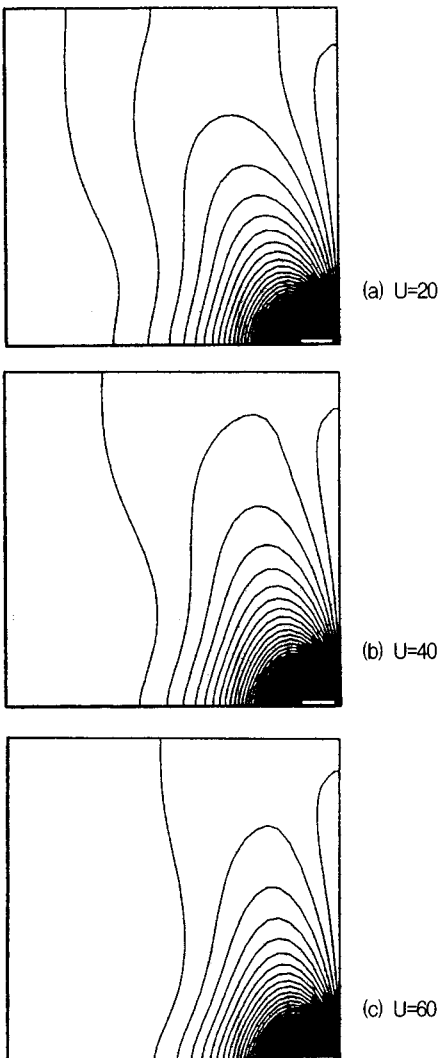


Fig. 3. Comparison of temperature distribution at $Ra=10^4$

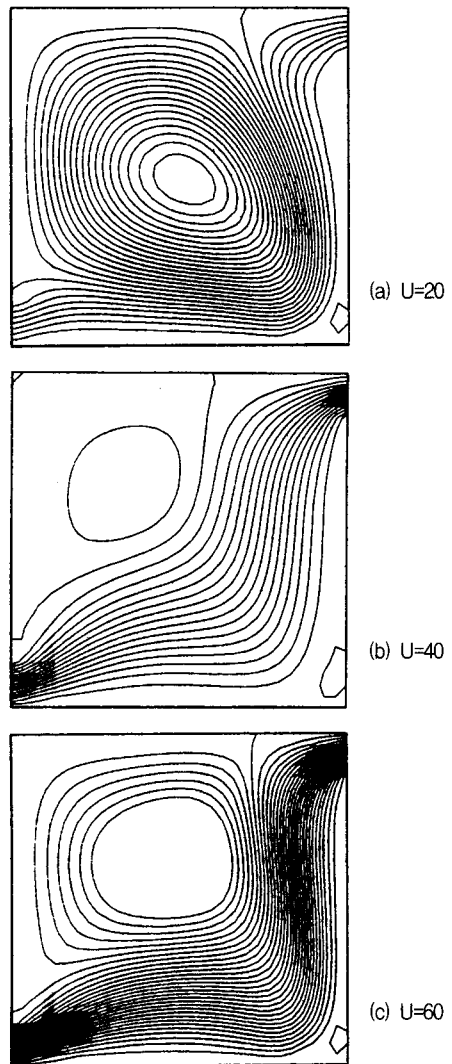


Fig. 4. Comparison of flow patterns at $Ra=5 \times 10^4$

U=60에서도 자연대류에 의해 소용돌이가 뚜렷이 나타나 있다.

Fig. 5에는 $Ra=5 \times 10^4$ 의 경우에 유입유속에 따른 온도분포를 비교하였다. 반시계 방향으로 회전하는 소용돌이로 인해 천장과 공간내의 고온영역이 Fig. 3에 비해 훨씬 더 넓어졌고 바닥면에서의 고온영역은 축소되었다. 한편 U가 20에서 40, 60으로 증가하면 Fig. 3의 $Ra=10^4$ 의 경우와 같이 공간내 저온영역이 확대되고 바닥과 천장에서의 온도분포에 영향이 큼을 확인할 수 있다.

유입유속이 천장의 온도분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 천장의 온도분포를 Fig. 6에 비교

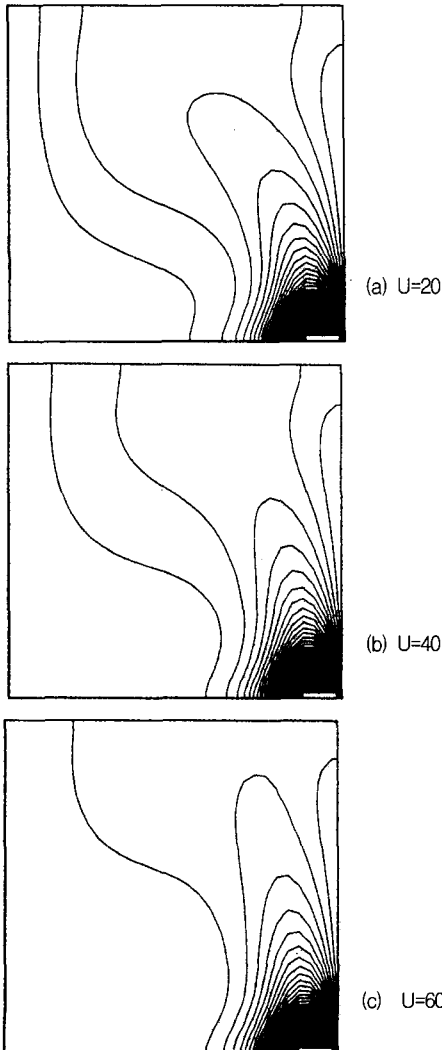


Fig. 5. Comparison of temperature distribution at $Ra=5 \times 10^4$

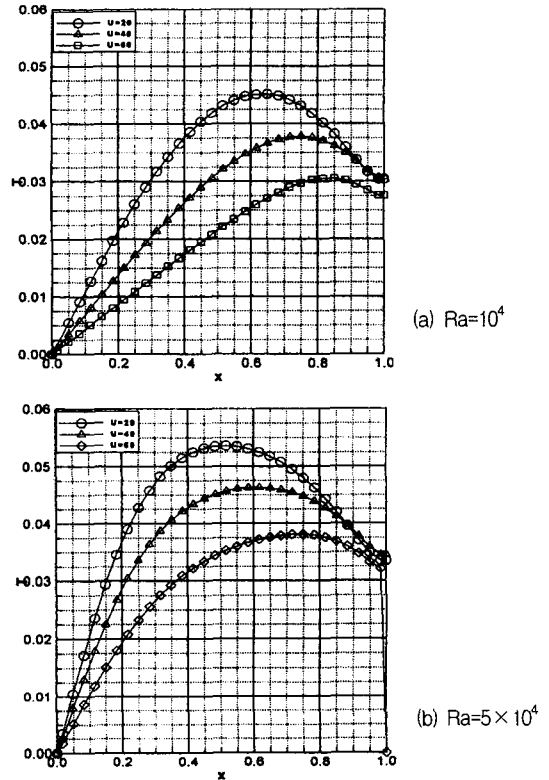


Fig. 6. Temperature distribution on top wall

하였다. Fig. 6a($Ra=10^4$)에서 유입유속 U가 20, 40, 60으로 증가할 수록 천장의 온도는 크게 감소한다. 또 천장에서 온도가 가장 높은 위치는 유입유속이 클 수록 유출 개구부쪽으로 많이 이동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 $Ra=5 \times 10^4$ (Fig. 6b)의 경우에도 동일하다. Ra가 증가했을 때 같은 U에서 천장의 온도는 Ra가 큰 경우에 유동의 증가로 천장의 온도가 더 높고 최고 온도의 위치가 더 왼쪽에 위치한다. 개구부를 통한 유체의 흐름으로 인하여 천장에서의 최고 온도 위치가 유출개구부 쪽으로 이동하는 것은 열감지기를 설치할 때 개구부의 위치를 고려할 필요가 있음을 나타낸다.

4. 결론

개구부를 통한 유동이 공간내 대류에 미치는 영향을 조사하기 위해 $Ra=10^4$ 과 5×10^4 , U=20, 40, 60일 때 공간내의 복합대류를 유한체적법으로 조사한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개구부의 유입유속은 공간내와 천장의 온도분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 2) 유입유속이 증가할 수록 천장의 온도는 감소하고 최고온도의 위치는 유출 개구부 쪽으로 이동하였다.
- 3) 공간내 공기의 유입이 큰 경우에는 열감지기의 설치위치를 유출 개구부쪽으로 이동할 필요가 있음을 알 수 있었다.

기호설명

- g : 중력가속도
- Gr : Grashof number, $g\beta(T_h - T_c)L^3/\nu^2$
- L : 특성길이
- Pr : Prandtl number
- Ra : Rayleigh number, PrGr
- T : 무차원 온도, $(T - T_c)/(T_h - T_c)$
(T_h :고온; T_c :저온)

- U : 무차원 유입유속, UL/ν
- u : x방향 무차원속도, uL/ν
- v : y방향 무차원속도, vL/ν
- β : 체적팽창계수
- ν : 동점성계수

참고문헌

- 1) 박외철, 고정찬, “실내화재에 있어서의 대류 열전달에 관한 수치연구- I. 수치법 검증 과 자연대류”, 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 2, pp. 26~31, 1999.
- 2) S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, NY, 1980.
- 3) 박외철, 고정찬, 이광진 “실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구- II. 혼합대류”, 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 3, pp. 33~39, 1999.