

개구부를 통한 공기흐름이 공간내 대류에 미치는 영향

박외철, 이경아*

부경대학교 안전공학과, 부경대학교 산업대학원*

Effects of Air Flow Through Openings on Convection in an Enclosure

Woe-Chul Park, Kyong-A Lee*

Pukyong National University

1. 서론

열려있는 출입문이나 창문, 기타 개구부가 있는 공간에서 화재가 발생했을 때 개구부를 통해 공기가 흐르면서 실내의 유동과 온도분포가 밀폐공간과는 다르게 된다. 특히 천장부근에서의 온도분포가 개구부를 통한 유동에 민감하다면 열감지기를 설치할 때 개구부의 위치를 고려할 필요가 있을 것이다. 본 연구에서는 개구부를 통해 공기가 유입-유출될 때 유입 유속이 실내의 유동과 온도분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 유한체적법¹⁾을 사용하였다. 박외철과 고경찬²⁾은 본 연구에 사용하는 수치법을 밀폐공간에서의 자연대류에 적용하여 검증하였고, 박외철 등³⁾은 이를 개구부가 있는 공간에 적용하여 자연대류와 강제대류의 복합대류 문제에 사용하였다. 본 연구에서는 앞의 연구와 같이 층류 정상유동을 대상으로 하고, 복사 열전달은 고려하지 않았다. 레일리수(Rayleigh number) $Ra=10^4$ 과 5×10^4 , 유입유속 $U=20, 40, 60$ 에 대하여 계산하고, Ra 와 U 의 값에 따른 유동형태와 실내 온도분포, 천장의 온도 분포를 서로 비교하였다.

2. 지배방정식과 수치법

2차원 층류 정상흐름의 연속방정식과 선형 운동량방정식, 에너지 방정식의 무차원 방정식은 다음과 같다²⁾.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{2}$$

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

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

여기서 u 와 v 는 각각 x 방향, y 방향의 무차원 속도, T 는 무차원 온도, Gr 은 그라

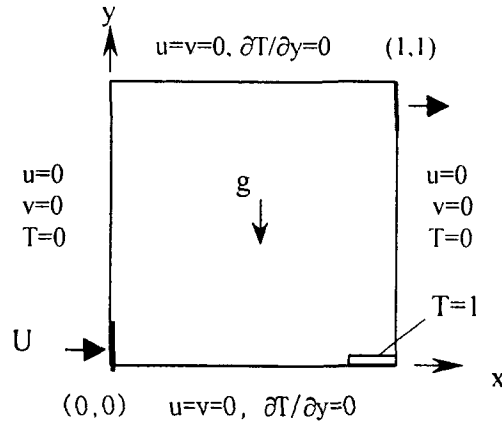


Fig. 1. Computational domain and boundary conditions

쇼프수(Garshof number), Pr은 프란틀수(Prandtl number)이다. y방향 운동량 방정식인 식(3)의 GrT는 압력구배항에 Boussinesq근사를 적용한 것이다.

본 연구의 계산영역과 경계조건은 Fig. 1과 같다. 정방형 공간의 한 변의 길이는 편의상 1로 하였다. 벽과 고온물체의 표면에서의 속도는 0, 두 수직벽의 온도는 $T=0$ 이고, 상하 두 벽은 단열되어 있다($\partial T/\partial y=0$). 고온물체의 온도는 1이고, 유입유체의 온도는 0, 유출 경계조건은 $\partial u/\partial x=0$, $\partial T/\partial x=0$ 로 하였다. 개구부의 크기는 각각 격자 4개, 즉 길이 0.133이고, 고온물체의 크기는 x방향 0.133, y방향 0.033이다. 유입유속은 입구 전체에 균일하게 $U=20, 40, 60$ 으로 하고, 고온물체와 저온벽 사이의 자연대류는 $Ra=10000$ 과 50000 , Pr은 공기의 값인 0.71로 하였다. 식 (3)의 Gr은 Ra로부터 입력된다. 유입유속이 20보다 작을 때는 그 영향이 거의 나타나지 않았다.

식 (2)-(4)를 유한체적법으로 이산화하고 대류항은 멱승도식(power law scheme), 압력항은 SIMPLE 알고리즘에 의해 미지수인 u, v, T 를 구하였다. 이전의 연구에서와 같이 30×30 의 균일격자로 하고, 속도에 대해서는 엇갈림 격자를 적용하였고, 해의 수렴을 촉진하기 위해 하향 이완계수(under-relaxation factor)로 속도에는 0.5, 압력에는 0.8을 사용하였다. 해의 수렴조건은 모든 격자에 대하여 온도의 상대오차가 0.01% 미만, 즉

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

을 만족하는 것으로 하였다. 여기서 윗첨자 n은 계산순서를 나타낸다.

3. 결과 및 토의

Fig. 2는 $Ra=10^4$, $U=20$ 일 때 유선과 등온선을 그린 것이다. 공간내에 소용돌이가 있고 두 개구부를 통한 유동이 형성되어 있다. 온도분포는 고온물체 근처에서 온도구배가 크지만, 공기의 유입으로 유입구 근처에서는 온도구배가 아주 작다.

Fig. 3은 같은 Ra에서 $U=40$ 으로 유입유속이 증가했을 때의 유동형태와 온도분포를 나타낸 그림이다. 개구부를 통한 공기의 흐름이 빨라짐에 따라 공간내 소용돌이는 $U=20$ 인 Fig.2a에 비해 크게 약화되었다. 오른쪽 벽 근처에서의 온도분포에는 유입유속의 영향이 거의 없는 반면에 좌측의 두 등온선이 오른쪽으로 이동하였다. 이것으로 온도분포가 유입유속에 민감함을 알 수 있다.

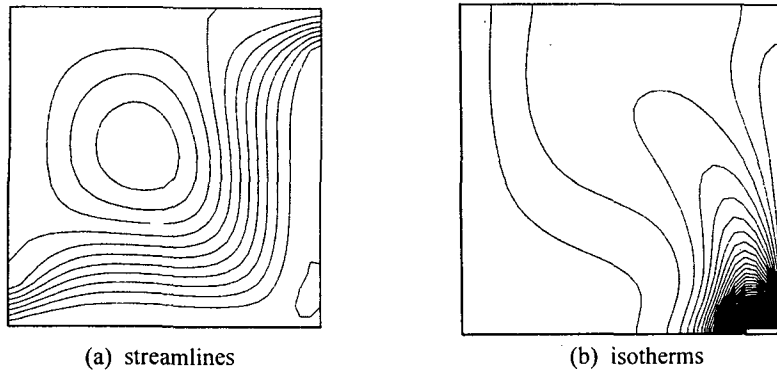


Fig. 2. Flow pattern and temperature distribution at $Ra=10000$, $U=20$

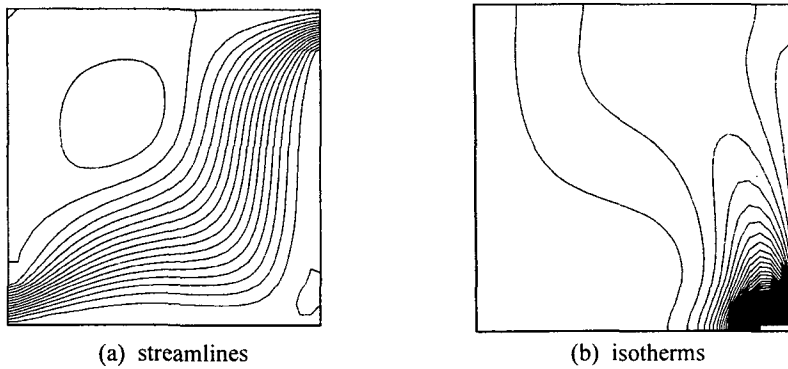


Fig. 3. Flow pattern and temperature distribution at $Ra=10000$, $U=40$

Ra 의 증가는 자연대류의 증가를 의미하는 것으로, 유체의 물리적 성질이 같은 경우에는 고온물체의 온도증가를 나타낸다. Fig. 4는 $Ra=50000$, $U=20$ 에서의 결과이다. Fig. 4a를 같은 유입유속인 Fig. 2a와 비교하면 $Ra=10^4$ 에서 $Ra=5 \times 10^4$ 으로 증가함에 따라 소용돌이의 회전속도와 공기의 유속이 크게 증가했음을 볼 수 있다. 온도분포 (Fig. 4b)는 Fig. 2b와 비교할 때 오른쪽 벽 근처를 제외하고는 크게 다르고, 특히 유입개구부 쪽에 큰 차이가 있다.

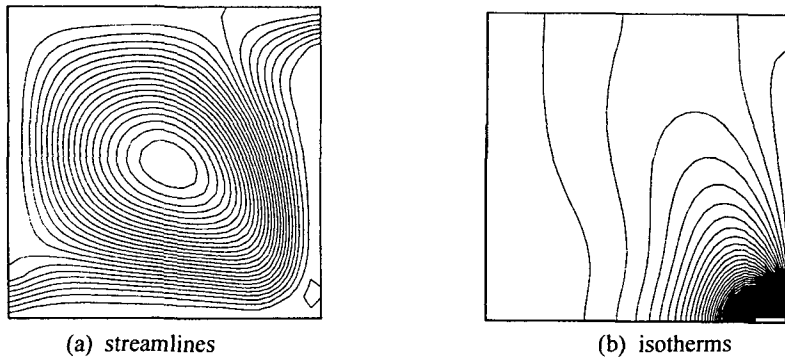


Fig. 4. Flow pattern and temperature distribution at $Ra=50000$, $U=20$

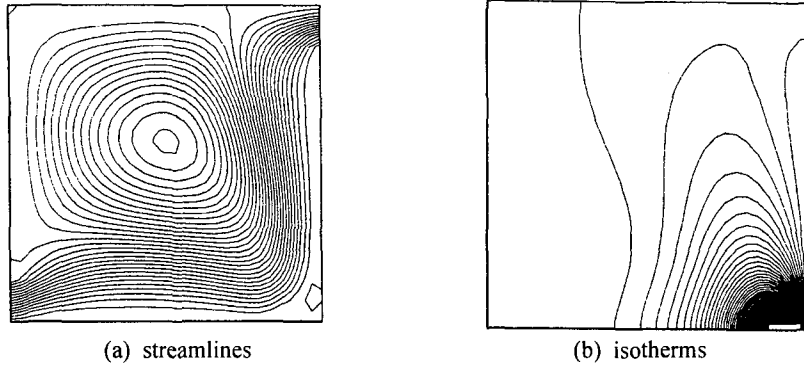


Fig. 5. Flow pattern and temperature distribution at $Ra=50000$, $U=40$

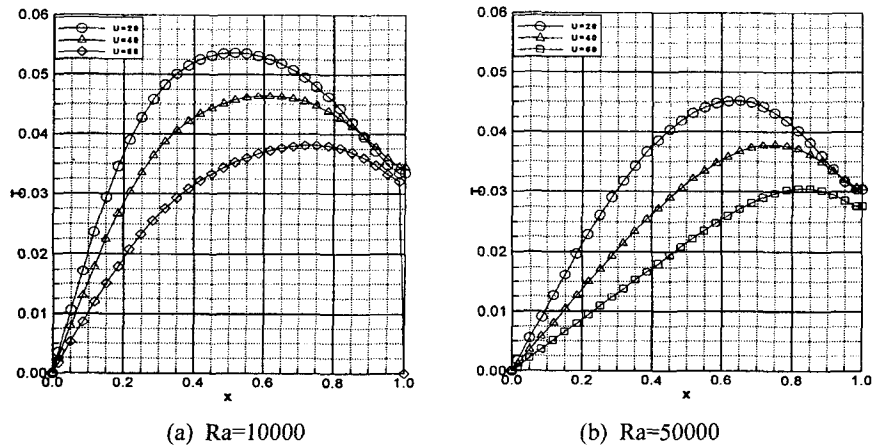


Fig. 6. Temperature distribution on top wall

Fig. 5는 $Ra=5 \times 10^4$, $U=40$ 일 때의 결과이다. 자연대류의 증가로 Fig. 3에 비해 유동 형태와 온도분포가 상당히 다를 수 있다. 한편 같은 Ra 에서 유입유속이 $U=20$ 일 때(Fig. 4a)에 비해 유동형태는 크게 달라지지 않았다. 그러나 온도분포(Fig. 5b)는 Fig. 4b와 비교할 때 고온물체와 오른쪽 벽 근처를 제외하고는 유입공기의 영향이 큼을 알 수 있다.

천장에서의 온도분포를 Fig. 6에 비교하였다. $Ra=10^4$ (Fig. 6a)와 $Ra=5 \times 10^4$ (Fig. 6b)의 경우를 비교하면 같은 유입유속에서 Ra 의 증가로 온도가 증가하였다. 그러나 같은 Ra 에서는 유입유속 U 가 20, 40, 60으로 증가할 수록 천장의 온도는 크게 감소한다. 천장에서 온도가 최고인 위치는 유입유속이 클 수록 유출 개구부쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 열감지기를 설치할 때 개구부의 위치를 고려할 필요가 있음을 나타낸다.

4. 결론

개구부를 통한 공기의 흐름이 공간내 유동과 온도분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 $Ra=10^4$ 과 5×10^4 , $U=20, 40, 60$ 일 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.

참고문헌

1. Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, NY, 1980.
2. 박외철, 고경찬, “실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구- I. 수치법 검증과 자연대류”, 한국산업안전학회지, 제14권 제2호, pp. 26-31, 1999.
3. 박외철, 고경찬, 이광진 “실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구- II. 혼합대류”, 한국산업안전학회지, 제14권 제3호, pp. 33-39, 1999.