

유출개구부의 위치와 크기에 따른 천장의 온도분포에 관한 수치연구

박외철[†] · 김재일^{*}

부경대학교 안전공학과 · *르노삼성자동차(주)
(2000. 12. 30. 접수 / 2001. 6. 14. 채택)

A Numerical Study on Temperature Distribution on Ceiling for Different Locations and Sizes of the Outflow Opening

Woe-Chul Park[†] · Jae-II Kim^{*}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University · *Renault Samsung Motors
(Received December 30, 2000 / Accepted June 14, 2001)

Abstract : The finite volume method was utilized for computation of convection heat transfer in a two-dimensional enclosure with an inflow opening and an outflow opening. The objective of this study is to investigate temperature distribution on ceiling for different locations and sizes of the outflow opening. The inflow opening was set to be $H_f=0$ and $U=50$. The results for different sizes of the opening $H_o=0.1, 0.2, 0.3,$ and 0.4 showed similar flow patterns and temperature distribution. Location of the outflow opening, however, influenced significantly on the temperature distribution on the ceiling.

Key Words : combined convection, finite volume method, opening, laminar flow, steady flow

1. 서 론

화재가 발생한 공간에 개구부가 있는 경우, 이 개구부를 통한 공기의 흐름으로 강제대류와 자연대류의 조합대류가 일어난 공기의 흐름은 공간내와 천장의 온도분포에 직접적으로 영향을 미치므로, 개구부가 있는 공간의 유동 및 온도분포에 대한 수치해석은 화재의 모사, 특히 화재 감지기를 설치할 때 적절한 위치 선정에 중요하다.

연소가 진행되면서 실내의 온도가 시간에 따라 변하므로 비정상 유동, 비정상 상태이고, 3차원 유동이며, 복사가 열전달의 상당한 부분을 차지하는 경우가 많다. 그러나 화재의 초기성장기에 화염이나 고온부분의 크기가 작은 경우에는 연소부위로부터의 복사는 대류에 비해 아주 작게 된다.

본 연구에서는 문제를 단순화하기 위해 일정한 온도의 고온물체가 있는 2차원 정방형 공간에서, 복사를 무시한 정상유동, 정상상태를 고려하였다. 본

연구의 목적은 유출 개구부의 위치와 크기를 변경할 때 공간 내, 특히 천장에서의 온도분포가 어떻게 달라지는가를 조사하는 것이다. 이를 위해 본 연구자들이 이전의 연구¹⁻³⁾에서 사용한 유한체적법⁴⁾을 그대로 적용하였다. 또한 계산영역을 개구부를 제외하고는 이전의 연구에서와 같게 하였다. 난류모델의 도입 등으로 인한 문제의 복잡성을 피하기 위해 층류로 한정하여 Ra와 유입유속의 크기를 작은 값으로 하였다. 유입개구부의 위치와 크기를 일정하게 유지하면서 천장 개구부와 수직벽 개구부의 위치와 크기를 달리하여 각각의 경우에 유동장과 온도분포를 계산하고, 천장에서의 온도분포를 비교하였다.

2. 수치법

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

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

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

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

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

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

식(3)의 GrT는 y방향 운동량방정식의 압력 구배 항에 Boussinesq 근사를 적용한 것으로, 자연대류에서 온도차이로 인해 흐름을 유발하는 항이다. 이 편미분방정식을 유한체적법⁴⁾으로 이산화하고, 대류항은 멱승도식(power law scheme), 압력항은 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 미지수인 u, v, T를 구하였다. 유한체적법은 널리 알려져 있는 수치법으로, 상용코드인 FLUENT⁵⁾ 등에서도 사용되고 있으며, 각 검사체적에서 보존법칙을 만족하는 것이 하나의 특징이다. 본 연구에 사용한 프로그램은 2차원 정상유동 및 열전달(전도, 대류) 해석 프로그램이며, 이미 검증¹⁾을 거쳐 이전연구^{1~3)}에서 사용하였으므로 검증 절차를 생략하였다.

본 연구의 계산영역은 Fig. 1과 같이 한 변의 길이

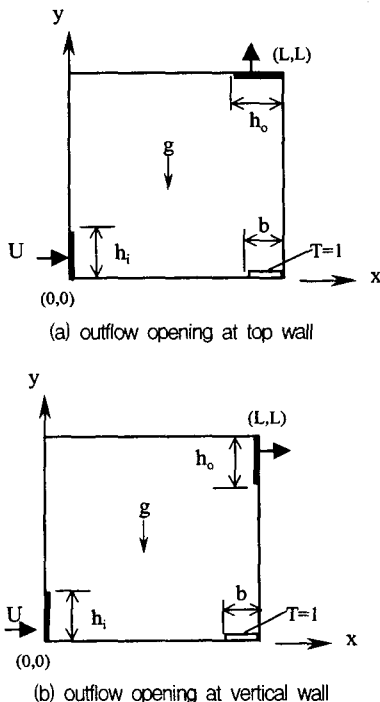


Fig. 1. Computational domain

L이 1.0인 정방형 2차원 공간이고, 유입 개구부는 좌측 수직벽 하단에 위치하고, 그 크기는 $H_i=0.2$ 이다. 유출 개구부의 위치는 천장 개구부의 경우(Fig. 1a)에 각각 좌측, 중앙, 우측에, 수직벽 개구부의 경우(Fig. 1b)에는 각각 우측 수직벽의 상부, 중앙, 하부에 위치하며, H_o 를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 하였다.

모든 고체표면에서 $u=v=0$ 이고, 유출 개구부에서는 유출방향의 속도 및 온도의 구배가 없는 것으로 가정하였다. 열적 경계조건으로 두 수직벽이 $T=0$, 고온물체는 $T=1$, 두 수평벽은 단열, 유입개구부는 $T=0$ 이다. 격자배열은 이전의 연구^{1~3)}와 같이 30×30 의 균일 검사체적(속도는 엇갈림 격자)으로 하였고, 고온물체는 오른쪽 바닥면에 위치하며, 그 크기는 4×1 개의 격자로 하여 x방향으로 0.133, 즉 $b/L=0.133$, y방향으로 0.033이다. 고온물체와 수직벽의 온도를 기준으로 한 Ra의 값은 5×10^4 , Pr은 0.71, 유입유속 U는 50으로 하였다.

해의 수렴을 촉진하기 위한 하향 이완계수(under-relaxation factor)로는 속도에 0.5, 압력에 0.8을 사용하였다. 해의 수렴조건은 모든 격자에 대하여 온도 상대오차가 0.01% 미만인

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

으로 하였다. 여기서 윗첨자 n은 계산순서를 나타낸다.

Table 1은 위에서 언급한 매개변수의 값을 요약한 것이다.

Table 1. Parameters used in computation

B		0.133
H_i		0.2
H_o		0.1
		0.2
		0.3
		0.4
location of outflow opening	horizontal (ceiling)	left center right
	vertical	top center bottom
Ra		5×10^4
U		50
T_H		1.0
T^c		0.0

3. 결과 및 토의

공간내 유동형태와 온도분포는 유선과 등온선으로 각각 표시하였다. 등온선은 무차원 온도 T 가 0.01씩 증가할 때마다 선으로 표시하였다. 등온선의 간격이 좁아 각 등온선에 그 값을 나타내었을 때 읽을 수 없게 되므로, 값을 표기하지 않았다. 유선에도 같은 이유로 유동함수의 값의 표기도 생략하였다.

천장 개구부의 위치와 크기에 따른 공간내 유동형태를 유선으로 비교한 결과의 일부가 Fig. 2에 나

타나 있다. (a)와 (b)에는 같은 크기($H_0=0.2$)의 천장 개구부가 각각 천장의 우측과 좌측에 있을 때, 공간내 공기의 흐름이 크게 다르게 나타나 있다. 이에 비해 $H_0=0.2$ 인 (a)와 $H_0=0.4$ 인 (c)로부터 천장 개구부의 크기가 달라도 개구부의 위치가 같은 경우에 두 유동형태가 유사함을 알 수 있다. $H_0=0.1$ 과 0.3 및 천장 개구부의 위치가 중앙에 위치한 경우에도 비슷한 결과를 얻었다.

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 조건에서 공간내의 온도분포를 등온선으로 비교한 것이다. 천장 개구부가 좌

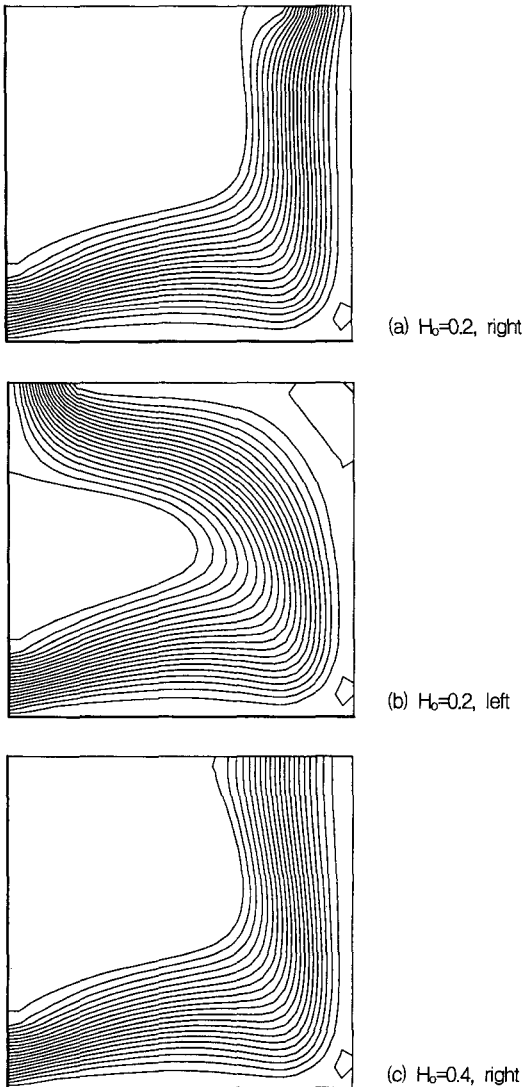


Fig. 2. Streamlines for different locations and sizes of outflow opening at top wall

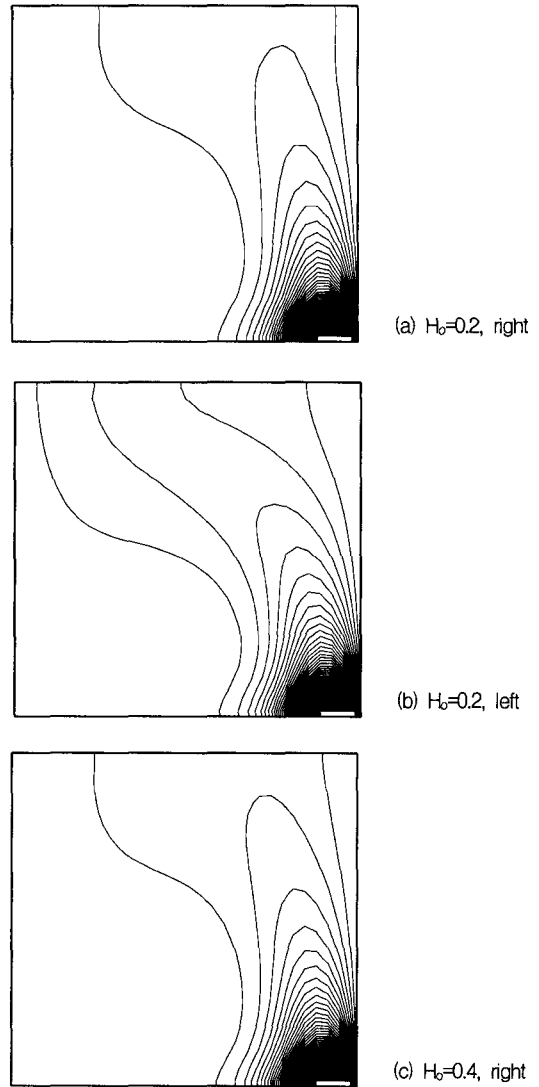


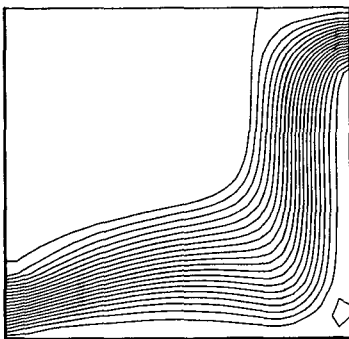
Fig. 3. Isotherms for different locations and sizes of outflow opening at top wall

측에 있을 때 등온선이 좌측으로 휘어져 있는 이유는 앞의 Fig 2에서 본 바와 같이 개구부의 위치에 따른 유동의 변화 때문이다. 천장에서의 온도가 가장 높은 지점도 개구부 쪽으로 이동하였음을 볼 수 있다. (a)와 (b)에서는 개구부의 크기가 달라도 온도 변화는 크지 않음을 알 수 있다.

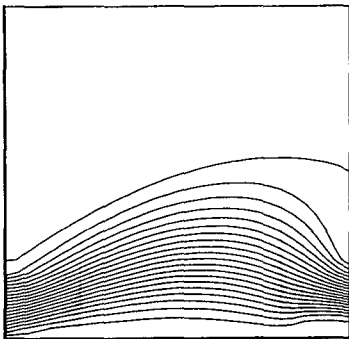
유출 개구부가 수직벽에 위치한 경우의 유동형태가 Fig. 4에 나타나 있다. $H_b=0.2$ 인 우측벽의 하단에 개구부가 위치할 때(Fig. 3b) 공간의 상부에는 거의 흐름이 정지되어있다. (a)와 (c)에서 개구부의 위치

는 같지만 크기가 $H_b=0.2$ 와 0.4 인 경우를 비교하면 유동이 비슷하다. 앞의 천장 개구부의 경우와 마찬가지로 개구부의 크기는 유동형태에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

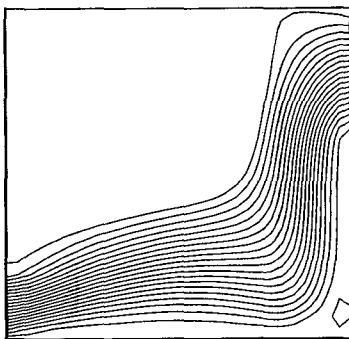
Fig. 4에 해당하는 수직벽 개구부의 위치와 크기에서의 온도분포를 Fig. 5에 비교하였다. 앞의 Fig. 4(b)의 유동에 나타난 바와 같이 개구부가 고온물체가 있는 우측벽 하단에 위치할 때는 고온물체로부터의 대류의 영향이 미치지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 공간내 온도는 고온물체 주위를 제외하고는



(a) $H_b=0.2$, top

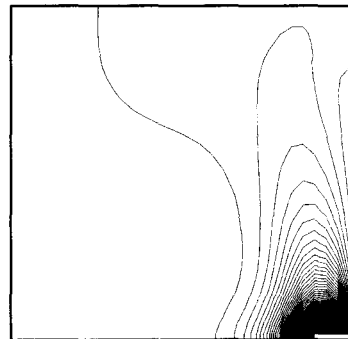


(b) $H_b=0.2$, bottom

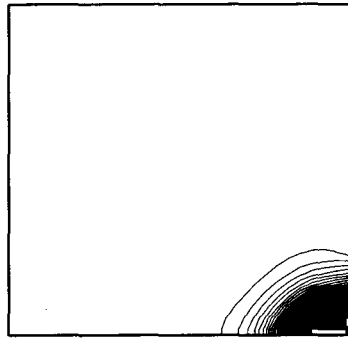


(c) $H_b=0.4$, top

Fig. 4. Streamlines for different locations and sizes of outflow opening at vertical wall



(a) $H_b=0.2$, top



(b) $H_b=0.2$, bottom



(c) $H_b=0.4$, top

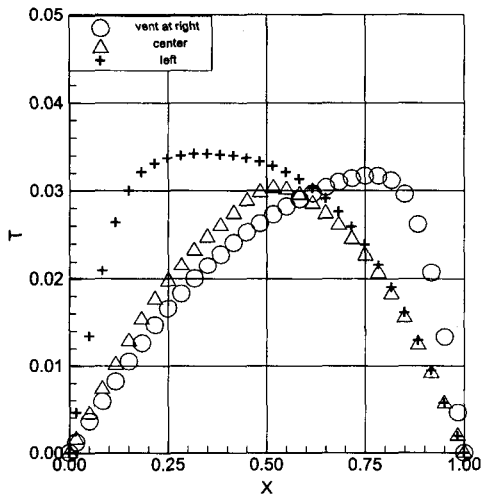
Fig. 5. Isotherms for different locations and sizes of outflow opening at vertical wall

온도가 모두 $T=0$ 로 나타났다. 개구부가 수직벽 상단에 위치하고 개구부의 크기가 $H_0=0.4$ 일 때(Fig. 5c)에는 $H_0=0.2$ (Fig. 5a)보다 천장부근의 온도가 약간 증가(Fig. 7b 참조)한 것 외에는 온도분포가 유사하다.

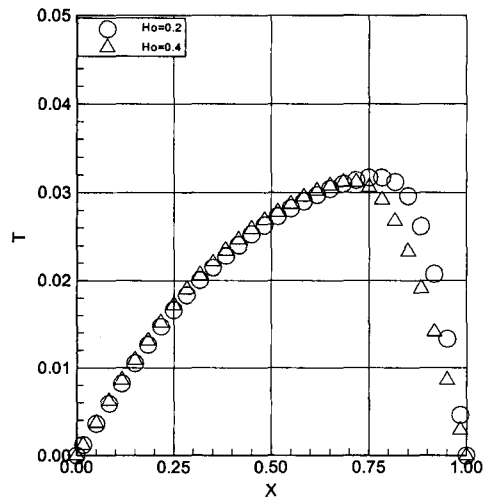
Fig. 6은 크기가 $H_0=0.2$ 인 천장 개구부와 수직벽 개구부의 위치에 따른 천장 표면의 온도분포를 나타낸 그림이다. (a)에서 천장 개구부가 우측에서 좌측으로 이동하면 천장에서의 최고온도가 나타나는 지점도 우측에서 좌측으로 이동함을 볼 수 있다. 또 (b)의 수직벽 개구부에서는 위에서 아래로 개구부가 이동하면 천장의 온도가 급격히 감소하는 것이 나

타나 있다. 개구부가 우측벽 하단에 위치한 경우에는 천장에서의 온도는 모두 0이다. 따라서 유출 개구부의 위치가 천장의 온도분포에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 이것은 개구부가 있는 공간에 열 감지기를 부착할 때는 개구부의 위치를 고려할 필요가 있음을 보여주고 있다.

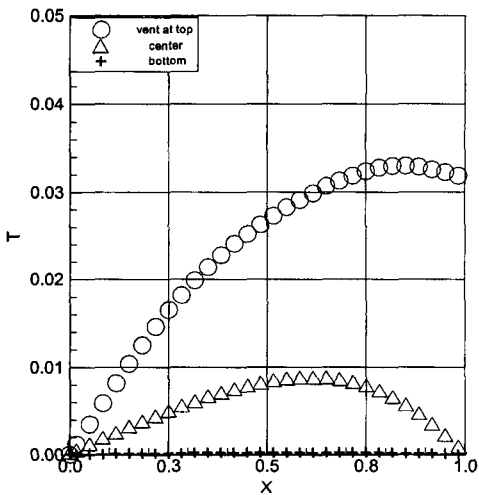
Fig. 7에는 유출 개구부의 크기에 따른 천장에서의 온도분포를 비교하였다. 천장 개구부의 경우 우측에 개구부가 위치할 때(Fig. 7a) 개구부를 제외하고는 천장에서의 온도가 거의 같게 나타났다. 즉, $x < 0.75$ 에서 $H_0=0.2$ 와 $H_0=0.4$ 의 천장 온도가 비슷하



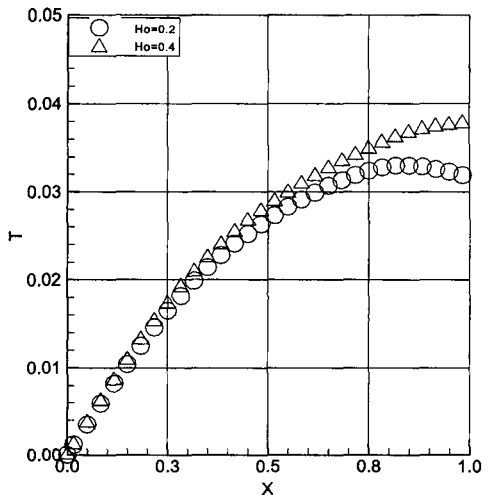
(a) outflow opening at top wall ($H_0=0.2$)



(a) outflow opening at right of top wall



(b) outflow opening at vertical wall ($H_0=0.2$)



(b) outflow opening at top of vertical wall

Fig. 6. Comparison of temperature distribution on ceiling

Fig. 7. Comparison of temperature distribution on ceiling

지만, 개구부인 $x > 0.75$ 에서는 개구부를 통해 유출되는 공기의 온도에 약간의 차이가 있다.

우측 수직벽의 상단에 위치한 수직벽 개구부의 경우에는 Fig. 7b과 같이 개구부가 클수록 천장의 온도가 높아졌고, 최고온도의 위치가 개구부 근처로 나타났다. 개구부의 크기에 따른 천장의 온도변화는 앞의 공간내 유동형태와 온도분포에서 나타난 바와 같이 그 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 개구부의 위치가 달라도 이러한 경향은 유사하게 나타났다.

이상에서 $Ra=5 \times 10^4$, $U=50$ 의 일정한 값에 대하여 유출 개구부의 위치와 크기에 따라 천장의 온도와 공간내 유동 및 온도분포를 관찰하였다. Ra 의 값에 따라 결정되는 자연대류와 U 의 값에 따른 강제대류의 크기에 따라 천장의 온도분포가 달라질 것이다. 또 복사를 무시할 수 없는 경우에 복사를 포함하면 천장의 온도분포가 다르게 된다. 그러나 자연대류와 강제대류의 상대적 크기변화나 복사의 영향에도 불구하고, 개구부를 통한 흐름이 천장의 온도분포에 미치는 영향은 본 연구의 결과와 크게 다르지 않을 것으로 예측된다.

4. 결 론

$Ra=5 \times 10^4$, $U=50$ 에서 유출 개구부의 위치와 크기에 따라 공간내 고온물체로부터의 복합대류 열전달에 대해 유한제적법으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유출 개구부의 위치가 공간내 유동장과 온도 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 2) 수직벽개구부가 천장에 가까이 위치할수록 천장의 온도가 급격히 상승했다. 천장개구부의 경우 천장에서 최고 온도가 나타나는 위치가 천장개구부가 있는 방향으로 이동하였다.
- 3) 유출 개구부의 크기는 그 위치에 관계없이 유동장과 온도분포에 큰 영향을 미치지 않았고 천장의 온도에도 변화가 거의 없었다.
- 4) 개구부가 있는 공간에 열감지기를 설치할 때 유출 개구부의 위치를 고려할 필요가 있음을 확인

하였다.

기호설명

- b : 고온물체의 크기
- B : 고온물체의 무차원 크기, b/L
- g : 중력가속도
- Gr : Grashop number, $g\beta(T_h-T_c)L^3/\nu^2$ (Eq. 3)
- h : 개구부의 크기
- H : 무차원 개구부의 크기, h/L
- L : 특성길이(정방형 공간의 한변길이)
- Pr : Prandtl number (Eq. 4)
- Ra : Rayleigh number, $GrPr$
- T : 무차원 온도, $(T-T_c)/(T_h-T_c)$
- u : x방향 무차원속도, uL/ν
- U : 무차원 유입유속, UL/ν
- v : y방향 무차원속도, vL/ν
- β : 체적팽창계수
- ν : 동점성계수

아래첨자

- i : 유입개구부
- o : 유출개구부
- H : 고온 (고온물체의 온도)
- C : 저온 (수직벽의 온도)

참고문헌

- 1) 박외철, 고정찬, “실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구- I. 수치법 검증과 자연대류”, 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 2, pp. 26~31, 1999.
- 2) 박외철, 고정찬, 이광진 “실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구- II. 혼합대류”, 한국산업안전학회지, Vol. 14, No. 3, pp. 33~39, 1999.
- 3) 박외철, 이경아, “개구부의 유동이 대류에 미치는 영향에 관한 수치연구”, 한국산업안전학회지, Vol. 15, No. 3, pp. 52~56, 2000.
- 4) S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, NY, 1980.
- 5) Fluent 5 User's Guide, Fluent Inc., 1999.