

개구부와 열원의 위치에 따른 연기이동에 관한 연구 A Study on the Smoke Movement by the Opening and Heat Generator Position

조성우[†] · 이재윤

Sung-Woo Cho[†] · Jae-Yoon Lee

삼척대학교 건축학부 건축학과
(2002. 8. 10. 접수/2002. 11. 30. 채택)

요 약

열원의 발열이 있는 작은 공간에서 상승기류에 의한 연기 확산의 특징에 대하여 조사하였다. 유입구와 유출구의 위치와 연기의 발생위치의 변화에 대한 3가지의 경우에 대하여 수치시뮬레이션을 이용하여 연기가 어떻게 확산되는가를 알아보았다. 좌측 상부에 유입구와 우측 하부에 유출구가 설치된 경우와 좌측 하부에 유입구, 우측 상부에 유출구가 설치된 경우는 기류속도, 공기온도 및 연기농도는 비슷한 분포를 나타냈다. 또한, 좌측 하부의 유입구와 우측 상부의 유출구인 경우 온도분포는 0~0.3이고, 연기의 농도분포는 0.06~0.14로 나타났다. 특히, 열원의 발열의 위치는 작은 실에 있어서 온도분포에는 영향을 미치지 않으나, 농도분포에는 영향을 미치는 것을 나타냈다.

ABSTRACT

The diffusion characteristics of the smoke by effect of an ascending air movement in a local part of the room where heat generated was studied. How the smoke move in the limited parts of the room at which heat generated was studied through 3 cases altering locations of inlet and outlet of ventilated air and heat generated by CFD(Computational Fluids Dynamics) method. It was found that 1. Similar distribution of air velocity, air temperature and smoke concentration appeared in the case of upper left inlet and lower right outlet and the case of lower inlet and upper right outlet. 2. Distribution of temperature and smoke concentration was 0~0.3, 0.06~0.14 in the case of lower left inlet and upper right outlet. 3. the location of heat generation did not influence on the temperature distribution, but influence on the distribution of smoke concentration.

Keywords : CFD, mobility, smoke movement, Reynolds number, Grashof number

1. 서 론

소방법 시행규칙에 따라 대규모의 건물이나 공공건물에서는 여러 가지 소방설비 즉 스프링클러나 방화벽 등으로 인하여 화재가 발생시 초기 진압이 어느 정도는 가능한 상태이나, 소규모 건물이나 지하건물 또는 주택 등에서 화재가 발생할 시 소방설비의 미비로 인하여 초기진압의 어려움이 있는 관계로 많은 인명 피해 및 재산피해를 야기시키게 된다. 특히, 지하공간의 경우에는 무창의 형태가 많고, 한정된 출입구로 인하

여 소방활동의 제약이 많은 것이 특징이다. 또한, 주택의 경우, 방법상의 문제로 인하여 방법창을 설치하는 경우로 인하여 피난출구는 거의 출입문으로 제한되고 있는 것이 현실이다. 거실과 출입문(피난출구)등과 같은 수평피난로 쪽으로 연기의 흐름이 발생하지 않도록 방화계획이 요구된다.

또한, 2000년도 발생한 전체 화재 건수 34,844건 중 주택·아파트 화재가 9,734건으로 27.9% 차지하고 있으며, 공장 및 작업장 3,973건으로 11.4%, 음식점 1,990건으로 5.7%, 점포 1,741건으로 5.0%의 순으로 보고 되고 있다. 이와 같이 공장이나 작업장에 비하여 바닥면적의 규모가 작은 건물에서 발생하는 화재건수

[†]E-mail: c_sungwoo@hotmail.com

가 전체 화재 건수의 30%정도를 차지하고 있다. 또한, 화재시 질식사(窒息)에 의한 사망이 다수를 차지하고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 좁은 실내에서의 복사성분을 고려하지 않고, 대류에 의한 연기이동을 알아보고자 한다. 자연환기 기법으로 좁은 실내 어떤 위치에 있는 열원에 의한 발열이 생겼을 경우, 열원 및 유입구와 유출구의 위치변화에 따른 실의 온도분포와 연기이동 및 농도를 알아보고자 한다.

이에 대한 수치해석은 차분법의 종류인 4계 미분을 포함한 3차 수치 점성항을 가진 3차 정도차분법(精度差分法)인 HSMAC¹⁾(Highly Simplified Marker and Cell method)를 이용하였다.

2. 기초방정식

2.1 기초방정식²⁾

2차원 공간을 대상으로 한 연속식, 운동량과 에너지 보존식은 식 (1)~식 (4)와 같다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \rho g_x \\ \rightarrow x \text{ 방향의 운동량} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v}{\partial y} \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \rho g_y \\ \rightarrow y \text{ 방향의 운동량} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho U T}{\partial x} + \frac{\partial \rho V T}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\tau \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{q_T}{C_p} \end{aligned} \quad (4)$$

자연대류에 의한 연기이동을 조사하기 위하여 밀도 차는 온도와의 함수관계에 있으므로, 부력항으로 표현하는 것이 가능하다. 자연대류에 있어서는 y 방향의 운동방정식 식 (3)에 중력에 의한 외력을 더할 수 있다. 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial v v}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \end{aligned} \quad (5)$$

압력 p를 중력에 의해서 받는 힘과 외력 의해서 생기는 압력 p'를 분리하여 정리하면, 압력 p는 식 (6)과 같다. 또한, 식 (6)을 Navier-Stokes식에 대입하여, p'를 p와 치환하면, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = p' + \int_y^0 \rho_0 g dy \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial v v}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho_0 - \rho) g \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 온도와의 함수관계에 있는 체적팽창계수 β 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \approx \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_0 - \rho}{T - T_0} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하여 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial v v}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_0 g \beta (T - T_0) \end{aligned} \quad (9)$$

연속식, 운동량과 에너지 보존식을 대표길이 L과 x 방향의 대표 속도 U'와 y 방향 대표 속도 V'와 기준온도 T₀를 이용하여 무차원화시키면, 식 (10)~식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial U V}{\partial x} + \frac{\partial V V}{\partial y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial U V}{\partial x} + \frac{\partial V V}{\partial y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} + T' \frac{\partial U}{\partial x} + T' \frac{\partial V}{\partial y} \\ = \frac{1}{Pr Re} \left\{ \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial y^2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

2.2 농도의 수송방정식³⁾

공기중에 흐르는 연기는 입자의 운동으로 생각할 수 있다. 그러므로, 이들의 입자운동은 입자에 작용하는

외력의 합이 관성력과 같다고 하는 입자 운동방정식으로의 표현이 가능하다. 입자의 운동방정식은 유체저항과 외력과의 물리량으로서 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$m \frac{dv'}{dt} = \frac{1}{B}(u - v') + F \quad (14)$$

여기서, B는 이동도라고 한다. 또한, 입자의 완화속도 시간 $\tau = mB$ 의 관계가 성립한다.

입자에 작용하는 힘은 여러 가지가 있으나, 여기에서는 입자에 작용하는 외력으로서 중력이 작용하는 경우를 고찰한다. 입자는 $F = mg$ 의 힘을 받아서, 초기속도의 입자는 감속 또는 가속되어 최종적으로는 일정한 하강속도에 이르게 되면, 정지된 유체중에서 하강하게 된다. 이 경우 입자의 속도변화는 식 (14)에 $u=0$, $F=mg$ 를 대입하여 다시 쓰면 식 (15)와 같다.

$$\frac{dv'}{dt} = -\frac{1}{\tau}v' + g \quad (15)$$

초기조건 $t=0$ 에서 $v'=0$ 혹은 입자에는 항상 Stokes의 저항식에 작용하는 것으로 풀면, 식 (16)과 같다.

$$v' = \tau g \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} \quad (16)$$

식 (16)에서 $t \rightarrow \infty$ 에서는 $v' = \tau g$ 가 된다. 이것이 속도의 최종 침강속도를 의미한다.

온도의 영향을 받지 않는 것으로 가정하여, 입자의 이동을 에너지 방정식으로 표현하는 것이 가능하다. 입자가 유효속도를 가지고 이동하는 경우 식 (17)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + C \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (17)$$

3. 연기이동의 수치시뮬레이션

3.1 수치시뮬레이션의 조건

연기는 공기와 일체되어 이동하는 것을 가정하여 입자의 확산계수는 기체의 동점성계수와 같고, 열원이 있는 부분에서 연기입자가 발생한 것으로서 가정하여 2차원 시뮬레이션을 하였다. 본 시뮬레이션에서 유입구와 유출구의 위치 및 열원은 Fig. 1과 같다.

벽체의 경계조건으로서 좌벽과 우벽의 온도차는 1로 두고, 공간의 크기는 1×1 , 격자분할은 30×30 , 격자의 간격은 $\Delta x = \Delta y = 1/30$ 이며, Pr수는 0.717로 하였다. 시간간격은 10^{-4} 이고, 반복횟수는 50,000으로 하였다. 또

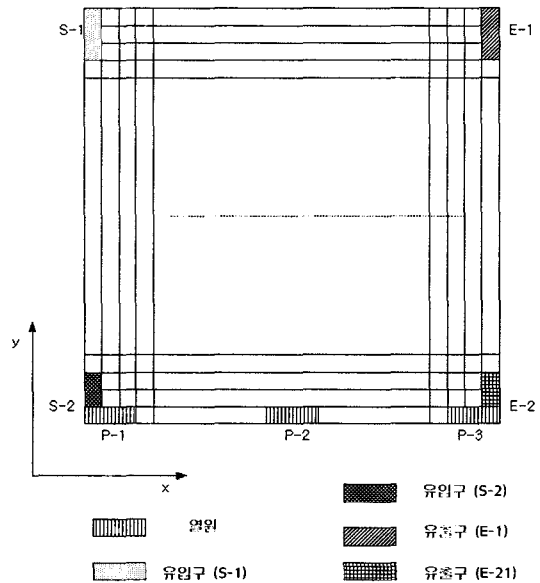


Fig. 1. 유입구와 유출구 및 열원의 위치.

Table 1. 열원과 유입구 및 유출구의 크기와 위치

	유입구위치	유출구위치	열원위치
case-1	S-1(27~30)	E-2(0~3)	P-1[0~5]
case-2	S-1(27~30)	E-2(0~3)	P-2[15~19]
case-3	S-2(0~3)	E-1(27~30)	P-1[0~5]
case-4	S-2(0~3)	E-1(27~30)	P-3[25~30]
case-5	S-2(27~30)	E-2(0~3)	P-2[15~19]
case-6	S-2(27~30)	E-2(0~3)	P-3[25~30]

()는 y 방향의 격자수, []는 x 방향의 격자수.

Table 2. 유입구와 유출구 및 벽면의 경계조건

	유입구와 유출구	벽면
속도	Free	Non-slip
온도	-	좌측벽; 0.5 우측벽; -0.5

한, 위치별에 따른 발열면의 온도는 공간의 온도보다 0.5 높고, 최초입자농도는 1.0 kg/m^3 로 가정하였고, 유입구와 유출구 및 열원의 위치는 Table 1과 같고, 경계조건은 Table 2와 같다.

3.2 수치시뮬레이션의 결과 및 고찰

6개의 경우에 대한 수직단면의 기류속도와 온도분포 및 농도분포는 Fig. 2~Fig. 7과 같다.

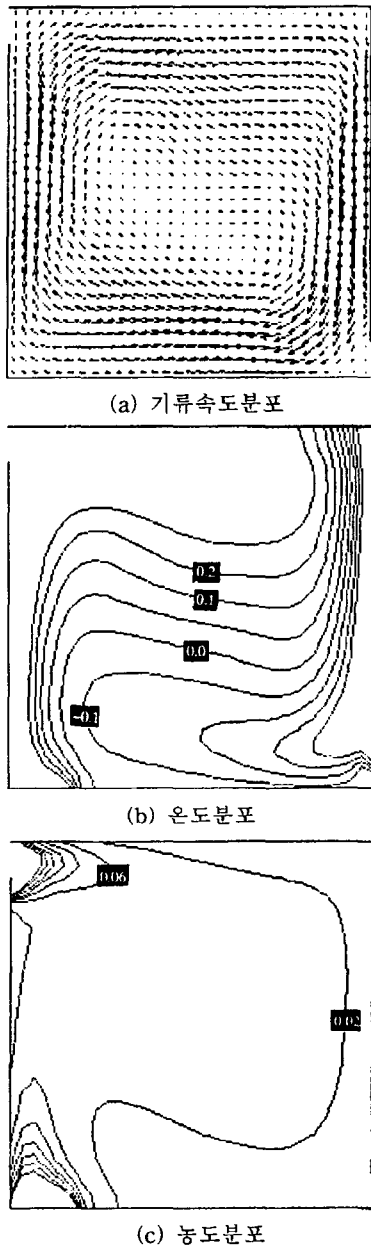


Fig. 2. Case-1의 경우.

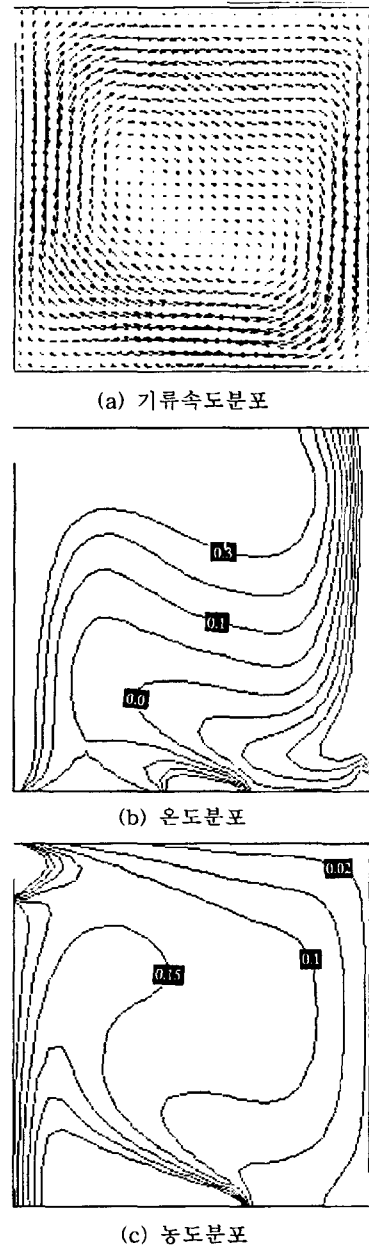


Fig. 3. Case-2의 경우.

(1) case 1과 2의 경우

case-1과 2의 경우, 기류속도분포, 온도분포 및 농도 분포는 Fig. 2와 3과 같다. 두 경우에서 기류속도분포는 전반적으로 유사하게 나타났다.

온도분포의 경우, 열원의 위치가 다른 경우, Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)를 비교해보면, 중간부분과 상부의 온

도분포는 비슷하게 나타났으나, 하부에서는 $-0.2 \sim 0$ 의 온도분포가 열원의 위치가 P-1인 경우에서 넓은 범위를 가지고 있으나, 열원의 위치가 P-2인 경우에는 중앙부분의 온도가 높은 관계로 그 범위가 작은 것을 알 수 있다. 두 경우 중앙에서는 $0 \sim 0.3$ 를 보이고 있다.

Fig. 2(c)는 농도분포를 보이고 있다. 유입구쪽에서는

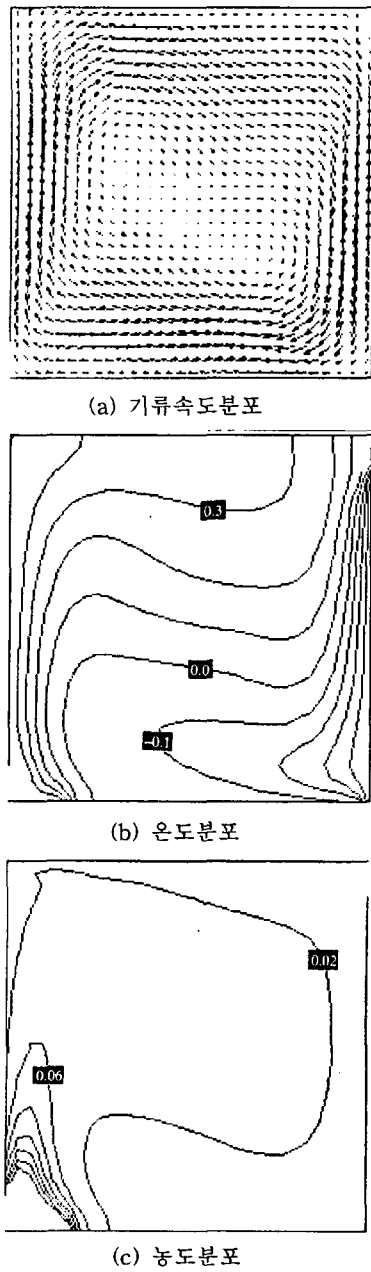


Fig. 4. Case-3의 경우.

실내전체의 농도인 0.02보다 3배 이상 높은 0.06의 분포를 보이고 있다. 이는 유입구의 아래쪽에 위치한 열원의 영향으로 발생한 상승기류의 영향으로 생각된다. case-2의 경우 농도분포는 Fig. 3(c)와 같다. 중앙부분에 위치한 열원의 영향으로 인하여 연기가 실전체로 확산되는 것을 볼 수 있으며, 농도 또한 case-1에 비하

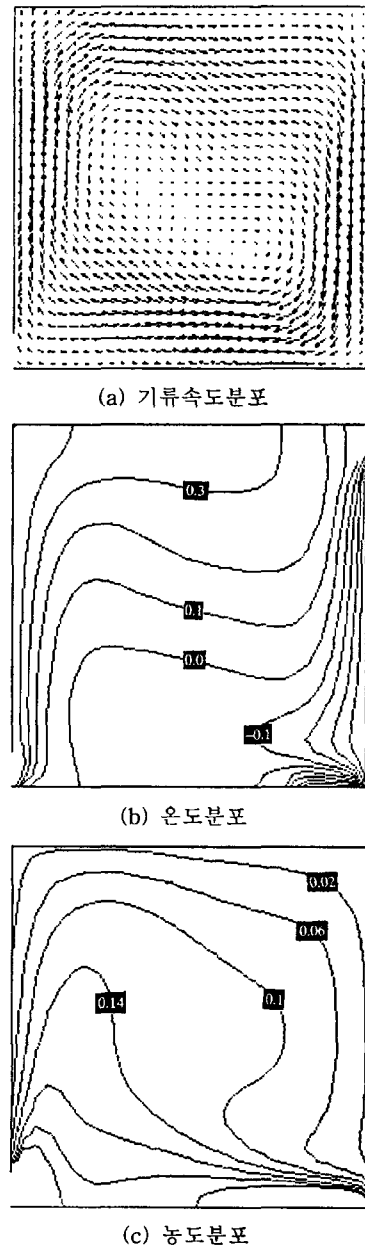


Fig. 5. Case-4의 경우.

여 최대 7배 이상의 높은 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다.

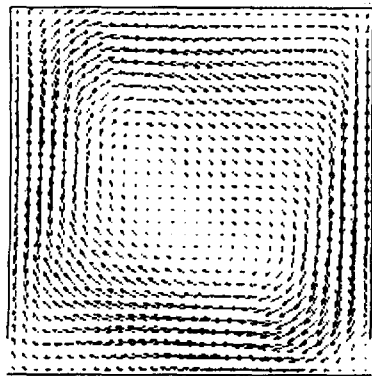
유입구와 유출구의 위치가 동일한 case-1과 case-2에서 온도분포는 거의 변화가 없는 것을 나타난 반면, 실내의 농도분포는 열원이 유입구의 아래쪽에 위치한 경우에 비하여 중앙에 위치한 경우에서 강한 상승기류

의 영향으로 실전체로 확산되고 농도 또한 높은 것으로 나타났다. 즉, 열원의 위치는 실전체의 온도에 미치는 영향보다 농도분포에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알았다.

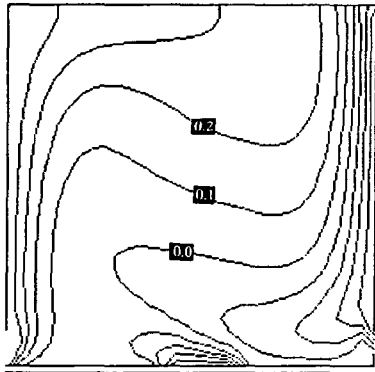
유입구가 S-2, 유출구가 E-1로 동일하고, 열원의 위치가 P-1과 P-3인 case-3과 4의 기류속도분포, 온도분

포 및 농도분포는 Fig. 4와 5와 같다. 기류속도의 분포는 두 경우에서 비슷한 분포를 보이고 있다.

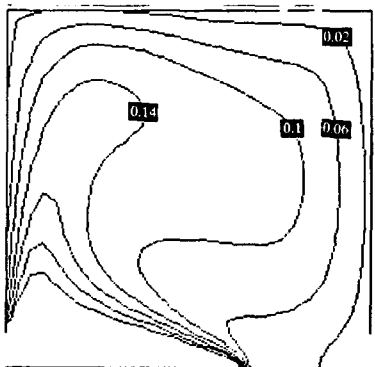
온도의 경우, 열원의 위치가 다른 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)를 비교해보면, 두 경우 모두 상부에서는 0.3~0.4의 분포를 나타내고 있다. 또한, 열원의 위치가 P-1인 경우, 하부에서의 온도분포는 -0.2~0이고, 열원의 위



(a) 기류속도분포

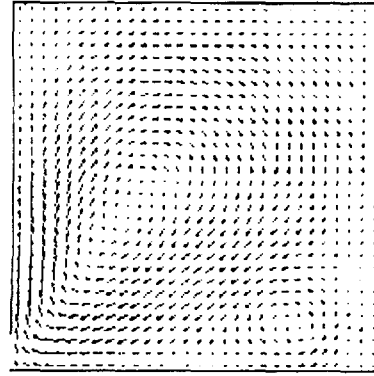


(b) 온도분포

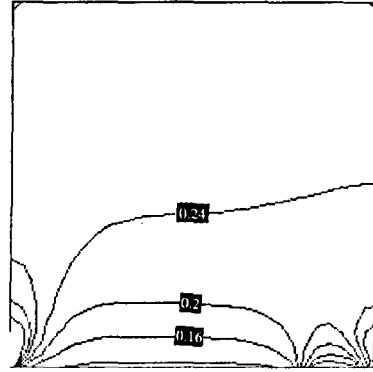


(c) 농도분포

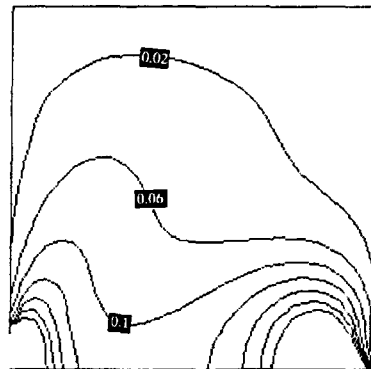
Fig. 6. Case-5의 경우.



(a) 기류속도분포



(b) 온도분포



(c) 농도분포

Fig. 7. Case-6의 경우.

치가 유출구의 아래쪽에 있는 경우, 하부에서의 온도 분포는 -0.1~0의 분포로 거의 비슷하게 나타났다. 두 경우의 중앙부에서는 0~0.3의 온도범위를 보이고 있다.

Case-1과 2와 같이 열원의 위치변화는 실전체의 온도분포에는 많은 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 농도분포는 Fig. 4(c)를 보면, case-1의 농도분포와 비슷하게 유입구 근처에서 0.06으로 높게 나타난 반면, 실 전체의 농도는 0.02로 낮고, 넓은 범위를 차지하는 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 5(c)와 같이 열원이 유출구의 아래쪽에 있는 경우, 실 전체의 농도는 높게 나타났다.

특히, 유입구에 부근에서 가장 높은 농도분포를 보이고 있으나, 유출구가 있는 반대쪽의 벽면을 따라서 그 농도분포가 약 7배 정도 낮게 나타났다.

열원이 유출구의 아래쪽 부근에 가까울수록 실 전체의 농도는 높게 나타난 반면, 유입구의 아래쪽에 가까울수록 실 전체의 농도분포는 큰 변화없이 낮게 분포되는 것을 알 수 있다. 이는 유입구에서 유입되는 기류와 열원에서 발생하는 상승기류가 더해져서 실의 순환기류가 빨라지는 것이 원인이라고 생각된다.

case-5와 6의 기류속도, 온도분포 및 농도분포는 Fig. 6과 7과 같다. 좌측과 우측의 하단에 유입구와 유출구가 있고, 열원이 유출구 부근에 있는 case-6은 유입구와 유출구의 위치는 동일하고, 열원이 중앙에 있는 case-5에 비하여 전반적으로 속도벡터가 작고, 좌측의 중앙부에 소용돌이 현상이 생기는 것을 볼 수 있다. 또한, 유입구와 유출구가 대각선으로 위치한 case-1~case-4의 경우와 비교해보면, 온도분포는 많은 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 실 상부에서 0.24~0.5, 실 하부에서는 0.2~0.24의 분포로 층을 이루고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 열원이 중앙에 위치한 case-5의 경우 온도분포는 case-1~case-4경우와 비슷한 분포를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

또한, 농도분포는 Fig. 7(c)에 보듯이 0.02~0.06의 낮은 농도가 실 전체로 확산되어 있는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

유입구와 유출구의 위치 및 열원의 위치변화에 따른 실의 온도분포와 농도분포를 예측하기 위하여 CFD이 용한 결과는 아래와 같다.

1. 유입구와 유출구가 대각선의 위치에 있는 경우, 열원의 위치는 실 전체의 온도분포에는 큰 영향을 미치지 않으나, 농도분포에는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2. 열원이 중앙부분에 있는 경우에는 유입구와 유출구의 위치에 관계없이 실 전체의 연기 농도는 높게 나타났다.

3. 온도차의 영향으로 상승기류가 발생하는 지점 즉 열원의 위치가 좌측의 하부에 있는 경우보다 온도차에 의해서 생성되는 상승기류와 순환기류가 만나는 지점 즉 열원의 위치가 중앙부분이나 우측에 있는 경우 실 전체의 연기 농도는 높은 쪽으로 확산되는 것을 알 수 있다.

기 호

C : 농도[kg/m³]

C_p : 정압비열[J/kgK]

F : 외력[kgm/s²]

g : 중력가속도[m/s²]

L : 단위길이[m]

Gr : Grashof 수 $\left(= \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \right)$

Pr : Prandtl's 수 $\left(= \frac{C_p\mu}{k} \right)$

Re : Reynolds 수 $\left(= \frac{\rho uL}{\mu} \right)$

P : 압력[Pa]

u, v : 속도성분[m/s]

U', V' : 무차원화된 속도성분 $\left[- \right] \left(\frac{U}{U'} \right), \left(\frac{V}{V'} \right)$

T' : 무차원화된 온도성분 $\left[- \right] \left(\frac{T}{T_0} \right)$

x : x 축 방향의 길이 $\left[- \right] (x/L)$

y : y 축 방향의 길이 $\left[- \right] (y/L)$

α : 열전도율(W/mK)

β : 체적팽창계수[1/K]

ν : 동점성계수(kgs/m²)

μ : 점성률[kg/ms]

τ : 입자의 완화시간(=mg)[s]

T₀ : 기준온도[K]

ρ₀ : 기준온도에서의 밀도[kg/m³]

참고문헌

1. 非等粘性流體解析, 東京大學校 出版會, pp.86-111 (1995).
2. 荒川忠一, 數值流體工學, 東京大學出版社(1994).

3. 勝田, 村上, 小林, 閉鎖的空間の氣流性狀に關する研究 (第1報 空間中央の亂れの性狀), 日本建築學會計畫系論文報告集, 第234(1975).
4. 勝田, 村上, 小林, 閉鎖的空間の氣流性狀に關する研究 (第2報 亂れの統計量の空間分布), 日本建築學會計畫系論文報告集, 第238(1975).
5. コンタミネーションコントロール便覽, 日本空氣清淨協會編, pp.275-278(1996).
6. A.A. Amsden and F.H. Harlow, A Simplified MAC Technique for Incompressible Fluid Calculation, J. Comp. Phys., Vol. 64, pp322-325(1970).
7. 한국소방안전협회, 2000년 전국화재발생통계.
8. 이지희, 고층 공동주택의 개구특성에 따른 화재시 열·연기유동에 관한 연구, 한국화재·소방학회논문집, 제15권, 2호(2001).
9. 김명배, 한용식, 연기선단의 전파속도모델에 관한 연구, 한국화재·소방학회 논문집, 제15권, 2호(2001).