

정사각형 밀폐실내의 비정상 자연대류의 수치해석

이승만, 이병곤
충북대학교 안전공학과

1. 서론

밀폐된 실내에서 화재현상을 예측하기 위한 해석 방법은 Zone 모델^[1~2]과 Field 모델^[3~4]로 대별된다. Zone 모델은 상부층과 하부층의 온도, 시간에 따른 연기층의 높이 등을 실험값을 대입한 간단한 대수식으로 계산하여, 계산이 간편한 장점이 있으나 각 위치에 대한 온도와 유속을 구할 수 없다.

Field 모델은 해석영역을 다수의 격자로 구성하고 열-유동의 물리적인 현상을 지배하는 운동량, 에너지방정식을 수치해석하는 방법으로 많은 계산시간 및 컴퓨터 용량이 필요하나 각 위치에서의 유동 및 온도분포 등을 자세히 규명 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 Field 모델로 화재현상을 시뮬레이션 하는 기초연구로서 바닥면이 부분적으로 가열될 때 우측벽면의 경계조건을 변화시켜가면서 밀폐실내의 층류 자연대류로 인한 유동장과 온도장을 해석하였다.

2. 수치해석

Fig. 1 (a)는 바닥의 중앙 부분이 가열되어 고온으로 유지되며 나머지 전체 벽면은 단열되는 경우(case a1)이고, Fig. 1 (b)는 바닥의 좌측코너가 고온인 경우(case a2)의 수치해석 모델과 경계조건이다.

case b1은 case a1에서 실우측에 개구부가 있는 상태를 시뮬레이션 하기 위하여 우측벽면의 하부 1/2 이 상온으로 생각되는 경우이고, case b2는 case a2에서 우측벽면의 하부 1/2 이 상온으로 생각되는 경우이다.

수치해석은 Prandtl수가 0.708, Rayleigh수가 0.94×10^6 인 경우로서 비정상상태로부터 정상상태까지 수행하였다.

무차원화하기 위하여 다음과 같은 무차원 변수를 도입하였다.

$$U = \frac{u \times H}{\alpha}, \quad V = \frac{v \times H}{\alpha}, \quad P = \frac{p \times H^2}{\rho \times \alpha^2}, \quad \tau = \frac{at}{H^2}, \quad X = \frac{x}{L},$$
$$Y = \frac{y}{H}, \quad \Theta = \frac{T - T_o}{T_h - T_o}, \quad Ra = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times H^3}{\alpha \times \nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

이들을 지배방정식에 대입하여 다음과 같이 무차원 지배방정식을 얻는다.

연속 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

X 방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + Pr \Delta^2 U \quad \dots \dots \dots (2)$$

Y 방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \Delta^2 V + Ra \theta \quad \dots \dots \dots (3)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Delta^2 \theta \quad \dots \dots \dots (4)$$

수치해석 방법은 Patankar가 제시한 SIMPLE방법을 이용하였다. 대류항은 하이브리드 도식을 사용하였다. 수렴조건은 질량생성항의 오차가 10^{-3} 이하이면 수렴하는 것으로 간주하였다.

3. 실험

수치해석 case a1의 온도를 실험과 비교하기 위하여 석고보드로 가로 5cm, 세로 5cm, 길이 11cm인 육면체를 제작하고 Polystyrene form으로 단열하였으며, 고온면은 니크롬선이 들어간 폭 1.1 [cm], 길이 11 [cm]의 Heater를 부착하였다. 가열면의 온도는 Programmable temperature controller을 이용하여 ± 2 °C를 유지하도록 하였으며 상부에서 thermometer로 온도를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 Case a1, a2에 대한 속도벡터, 유선, 등온선

Fig. 2는 case a1의 속도벡터, 유선, 등온선으로 유동장은 부력에 의하여 위로 상승하며 점차 상부 벽면으로 향하다가 ceiling jet를 형성하여 벽면을 따라 벽을 가열하면서 아래쪽으로 내려간다. 이 유동은 부력에 의해 다시 상승하며 중심축에 대하여 좌우 대칭적인 2개의 와류를 형성한다. 와류의 중심은 초기에는 밀폐공간의 하부에 위치하나 시간이 지남에 따라 점차 상승하여 3분 이후에는 공간의 상부에 위치한다. 시간이 지남에 따라 속도와 유동함수의 값이 점차적으로 감소하는데 이것은 상하 온도차가 감소하면서 유동을 지배하는 대류 및 부력이 감소하기 때문이다.

온도장은 부력에 의한 유동의 영향으로 시간이 지남에 따라 점차 상승하여 41분경에 화재감지기 온도 72 °C에 도달했다.

Fig. 3은 case a2의 경우로서 유동장은 초기에 좌측 수직벽에서 45° 방향으로 확산되어 간다. 3분 경부터는 좌측 수직벽면을 따라 상승하여 ceiling jet를 형성하며 속도가 감소하여 우측벽면을 따라 하강하여 커다란 하나의 와류를 형성한다. 온도장은 좌측 수직벽면을 따라 점차적으로 온도가 상승하여 52분경에 천정 중앙부에서 화재감지기 온도 72℃에 도달한다.

4. 2 Case b1, b2에 대한 속도벡터, 유선, 등온선

Fig. 4는 case b1의 경우로서 우측벽 하부 1/2이 상온으로 실외부로 열이 손실되어 우측에서 상대적으로 차가운 기류가 발생한다. 유동장은 초기에는 case a1의 경우와 유사하나 6분 경부터 유동이 좌측으로 치우치며, 20분 경에는 두 개의 와류에서 하나의 와류로 합쳐진다.

와류의 중심은 초기에는 case a1과 같이 밀폐공간의 하부에 형성되나 시간이 지남에 따라 상부로 이동하였다가 20분 경에 이르면 중심부에 위치하며, 30분 경부터는 밀폐공간의 좌측 상부에서 위치하다가 점차 중앙부로 이동한다. 온도도 초기에는 case a1과 유사하나 시간이 지남에 따라 우측벽면의 영향으로 case a1보다 낮다.

Fig. 5는 case b2의 경우로서 case a2에서와 같이 우측면이 상온으로 열이 손실된다. 유동은 4분경까지는 case b1과 같은 형태의 유동을 보이나 10분 경부터는 우측 하부 코너로 흐르는 유동이 발생하며, 약한 2차 와류가 발생한다. 온도장은 좌측면을 따라 기류가 상승하기 때문에 좌측벽면의 온도가 높고 우측면의 1/2이 냉각되기 때문에 우측면의 하부에서 낮다.

4. 3 속도변화

Fig. 6~9는 가열부와 상온의 온도차가 110℃인 경우에 수평중심선에서의 y방향 속도(V)이다.

Fig. 6은 case a1에 대한 것으로서 2분 경까지는 속도가 증가하나 시간이 지남에 따라 점차 감소하며, 중심에서 높고 좌우에서 낮은 속도분포를 나타낸다.

Fig. 7은 case b1에 대한 것으로서 우측벽면의 영향으로 5분 경까지는 Fig. 6과 유사하나 시간이 지남에 따라 우측의 찬 기류의 영향으로 점차적으로 좌측으로 이동하며 35분 경에는 좌측면을 따라 유동이 상승한다.

Fig. 8은 case a2에 대한 것으로 2분 경까지는 case a1과 같이 속도가 증가하나 시간이 지남에 따라 점차 감소하며, 실의 좌측에서 큰 속도를 보인다. Fig 9는 case b2에 대한 것으로 초기에는 case a2와 유사하나 5분 경부터는 우측의 찬 기류의 영향으로 좌측으로 치우치며, 15분 경까지는 우측하부 코너로 흐르는 속도가 점차 증가하나 시간에 따라 점차 감소한다.

4. 4 수치해석 결과와 실험결과의 비교

Fig. 10은 case a1의 천정 중심부의 수치해석한 온도와 실험값을 비교한 것으로, 2분 경까지는 수치해석 값이 실험 값보다 다소 낮으나, 그 이후에는 수치해석값이 실험값보다 다소 크게 예측되었는데, 그 이유는 수치해석에서는 완전한 단열조건이나 실험에서는 완전하게 단열이 되지 않았기 때문으로 판단된다. 2분 경까지의 초기를 제외하면, 수치해석값과 실험값은 최대오차 8 %이내로 잘 일치하였고, 특히 시간이 경과함에 따라 매우 근접하였다.

그 결과 수치해석에서는 약 41.5분에, 실험에서는 42분에 화재감지기 온도 72℃에 도달하였다. Fig 11은 case a2의 경우로서 case a1과 유사하며 수치해석에서는 50분, 실험에서는 52분에 72℃에 도달하였다.

5. 결론

1. case a1은 2개의 와류가 좌우 대칭으로 형성되며, 와류의 중심은 초기에 하부에 위치하나 시간에 따라 상승한다. case a2는 1개의 와류가 형성되며, 와류의 중심은 초기에 좌측 하부에서 시간에 따라 좌측 상부로 이동한다. 속도는 초기에는 커지나 시간에 따라 부력의 감소로 작아진다.
2. case b1은 초기에는 case a1과 유사하나 시간에 따라 유동이 좌측으로 확산되어 1 개의 와류로 합쳐진다.
3. case a1의 천정 중심부 온도에 대한 수치해석값은 실험값과 잘 일치한다.

참고문헌

1. Staffan Bengtson, "A smoke-filling simulation model and its engineering applications", *Fire Technology*, Vol. 22, no. 2, pp. 92. May 1986,
2. William D. Walton, ASET-B : "A room fire program for personal computers", *Fire Tecgnology*, Vol. 21, no. 4, pp. 293, November 1985
3. C. P. Mao & A. C. Fernandez-Pello & J. A. C. Humphery, "An investigation of steady wall-ceiling and partial enclosure fires", *Journal of Heat Transfer* , Vol. 106, pp. 221~228, February 1984
4. W. K. Chow & N. K. Fong, "Numerical simulation on the fire-induced air flow by sprinkler water sprays", *Safety Journal*, Vol. 17, pp 263~290, 1991

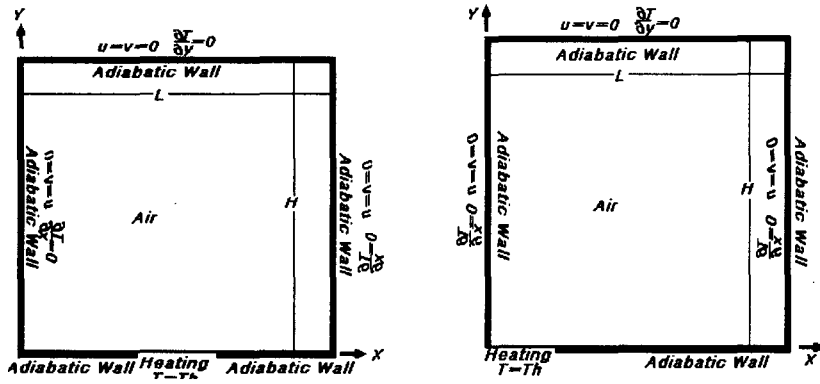
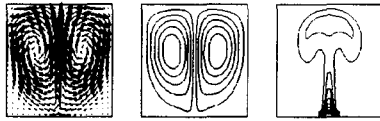
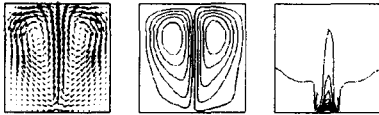


Fig. 1 Simulation model with boundary condition.



(a) [t=3min.], $v_{\max}=0.176$ m/s, $\psi_{\max}=44.50$,
 $\psi_{\min}=-44.61$, $\theta_{\max}=0.8086$



(b) [t=42min.], $v_{\max}=0.11$ m/s, $\psi_{\max}=24.93$,
 $\psi_{\min}=-23.04$, $\theta_{\max}=0.9016$

Fig. 2 Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of case a1

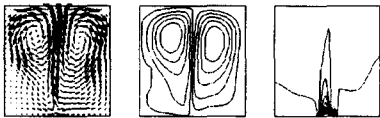


(a) [t=10min.], $v_{\max}=0.109$ m/s, $\psi_{\max}=0.103$,
 $\psi_{\min}=-31.12$, $\theta_{\max}=0.8897$

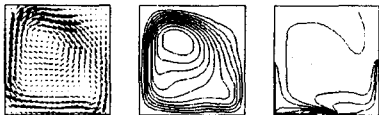


(b) [t=52min.], $v_{\max}=0.078$ m/s, $\psi_{\max}=0.028$,
 $\psi_{\min}=-22.87$, $\theta_{\max}=0.9369$

Fig. 3 Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of case a2



(a) [t=6min.], $v_{\max}=0.147$ m/s, $\psi_{\max}=29.64$,
 $\psi_{\min}=-33.93$, $\theta_{\max}=0.8281$



(b) [t=30min.], $v_{\max}=0.098$ m/s, $\psi_{\max}=0.089$,
 $\psi_{\min}=-30.28$, $\theta_{\max}=0.800$

Fig. 4 Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of case b1



(a) [t=4min.], $v_{\max}=0.113$ m/s, $\psi_{\max}=0.85$,
 $\psi_{\min}=-51.57$, $\theta_{\max}=0.8850$



(b) [t=70min.], $v_{\max}=0.084$ m/s, $\psi_{\max}=0.011$,
 $\psi_{\min}=-18.53$, $\theta_{\max}=0.9013$

Fig. 5 Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of case b2

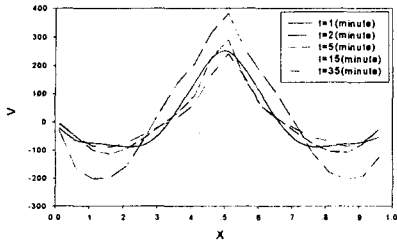


Fig. 6 V-Velocity distributions at the horizontal centerline with case a1

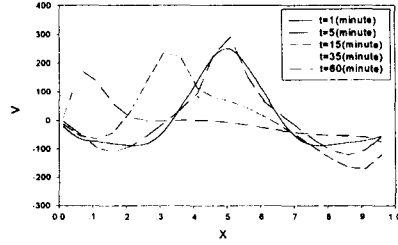


Fig. 7 V-Velocity distributions at the horizontal centerline with case b1

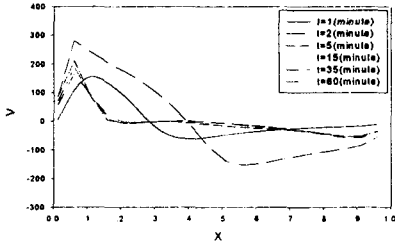


Fig. 8 V-Velocity distributions at the horizontal centerline with case a2

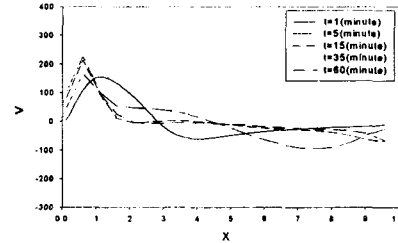


Fig. 9 V-Velocity distributions at the horizontal centerline with case b2

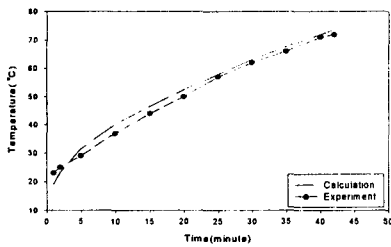


Fig. 10 Comparison of ceiling temperature for the experiment and calculation of case a1

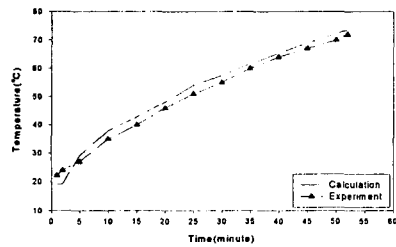


Fig. 11 Comparison of ceiling temperature for the experiment and calculation of case a2