

B-01

제연방식과 풍량에 따른 제연의 수치적 연구

박외철, 고정찬*, 박준*

부경대학교 안전공학과, *부경대학교 대학원 안전공학과

Numerical Study on Smoke Control for Smoke Control Systems and Air Flowrate

Woe-Chul Park, Kyung-Chan Ko*, Jun Park*

Pukyong National University, *Graduate School, Pukyong National University

1. 서론

화재로 인한 사망자의 대부분이 유독가스를 포함한 연기에 질식사하여 발생한다. 그러므로 화재의 조기탐지와 초기진화뿐만 아니라 난연성 불연성 자재와 유독성 가스를 적게 발생하는 재질의 사용과 함께 발생한 연기를 신속하게 제거하는 것이 인명손실을 줄이는데 대단히 중요하다. 씨랜드 화재(1999)와 대구 지하철 중앙로역 화재(2003)는 이를 잘 보여주는 사례들이다.

제연설비는 연기의 발생량과 그 독성지수를 고려해서 설치해야 하는데, 오피스텔과 일반 공동주택의 대기에 면하지 않은 승강기 전실 또는 부속실에는 각각 급배기방식과 가압급기방식이 사용되고있다. 급배기방식은 실내에 외부의 공기를 공급하여 연기농도를 희석하고, 외부보다 높은 압력을 유지하여 연기의 유입을 방지하면서 실내의 연기를 배출하는 방식이다. 가압급기방식은 실내 압력이 주위 압력보다 높게 유지되도록 급기함으로써 연기의 유입을 방지하는데 사용되지만, 화재참사가 발생한 대구 지하철 중앙로역에는 가압급기방식의 제연설비가 설치되어있다. 배기방식(흡인방식)은 실내의 연기를 제거하는데 효과적이거나 새로운 공기가 유입될 수 있는 개구부가 작으면 충분한 제연효과를 기대할 수 없다. 한편, 급기 또는 배기 풍량도 연기를 배출하는데 중요하며, 연기를 신속하게 배출하기 위해서는 충분한 풍량이 필요하다. 제연설비에 관한 일반적인 사항은 한일기술연구소¹⁾와 추병길과 박찬국²⁾에 상세하게 기술되어 있다.

이성룡 등³⁾은 0.4m x 1.0 m x 0.4 m의 축소모형 터널 내 0.7~2.5 kW의 휘발유 화재에 대한 실험적 연구에서 급기방식은 터널하부의 연기층 두께를 증가시켰고 배기방식이 더 적합하다고 보고하였다(급기팬 및 배기팬의 용량 미상). 터널과는 구조와 경계조건이 다

른 일반 건축물의 실내 또는 지하철 역에 연기가 유입되었을 때 유사한 결과를 얻을 수 있는가에 대한 연구가 필요하다. 또 현재 지하철 역에 사용되고 있는 가압급기방식 제연설비의 제연효과와 제연설비의 풍량에 따른 연기의 배출에 관한 연구도 필요하다. 이에 따라 이 연구의 목적은 수치모사를 통해 제연방식과 풍량에 따른 제연효과를 조사하는 것이다. 3차원 공간 내에 일정한 개수의 입자를 배열한 다음, 각 제연방식을 가동했을 때 시간에 따른 입자수의 변화를 비교하였다.

2. 수치법

이 연구의 대상은 Fig. 1과 같이 좌우에 각각 한 개의 급기구와 배기구가 있는 2 m x 2 m x 2.4m의 공간이다. 급기구(inlet)와 배기구(outlet)의 크기는 각각 0.5 m x 0.5 m이고, 그 중심위치는 각각 (2.0, 1.0, 1.2), (0.0, 0.1, 2.05)이다. 가압급기방식에서는 배기구가 개구부로, 또 배기(흡인)방식에서는 급기구가 개구부로 취급된다. 개구부의 유무에 따른 연기 배출속도를 비교하기 위해 왼쪽 벽 아래에 중심점이 (0.0, 1.0, 0.275)에 1 m x 0.25 m의 개구부(opening)가 있고 그 면적은 급기구, 배기구와 같다. 벽과 실 내외 공기의 온도는 모두 20°C이고 공기는 이상기체로 가정하였다.

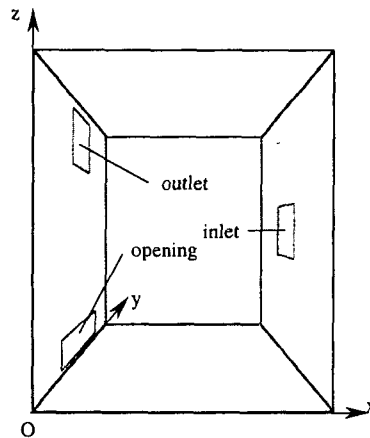


Fig.1 Computational domain (2 m x 2 m x 2.4 m)

이 경우에 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 전단응력은

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2\partial u_k}{3\partial x_k} \right) \quad (3)$$

이다. 이 연구에서는 실내에 유입된 연기의 이동을 등온상태에서 다루므로 에너지방정식과 연소모델, 화학종방정식은 필요하지 않다.

제연설비의 풍량에 따라 실내 흐름은 난류가 될 수 있으므로 난류모델로 대와류모사 (large eddy simulation)⁴⁾가 사용된다. 난류점성계수는

$$\mu_t = \rho (C_S \Delta)^2 (\Phi / \mu_M)^{1/2} \quad (4)$$

로 계산된다. 여기서 μ_M 은 층류점성계수이고, 점성소산함수는

$$\Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

이다. 이것을 스칼라 형태로 쓰면

$$\begin{aligned} \Phi = \mu_M & [2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2] \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다.

유동장의 해 u 를 구하기 위한 수치법으로 미국표준연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 화재모사 코드 Fire Dynamics Simulator(FDS)⁵⁾를 사용하였다. 격자의 크기는 x, y, z 방향 모두 균일하게 0.05 m(격자수 40x40x48)로 하였다. 계산 시간간격 Δt 는 해의 안정성을 확보할 수 있도록 각 격자에서의 CFL수 (Courant-Friedrich-Lewy number)가 0.5이하, 즉,

$$u \Delta t / \Delta x, v \Delta t / \Delta y, w \Delta t / \Delta z \leq 0.5 \quad (7)$$

를 만족하도록 자동으로 계산된다. 여기서 $u, v, w, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 각각 x, y, z 방향의 유속과 격자크기를 나타낸다. 수치법에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등⁵⁾에 기술되어 있다.

실내에 유입된 연기를 20,000개의 입자가 무작위로 분포하는 것으로 가정하고, 시간이 경과함에 따라 세가지 제연방식에 대하여 각각 실내에 남아있는 입자수를 조사함으로써 제연효과를 파악할 수 있게 하였다. 이 경우에 급기구 또는 배기구의 유량은 0.5 m³/s로 일정하게 유지하였다. 또 제연설비의 풍량에 따른 조사에는 급배기방식을 대상으로 하고, 급기구와 배기구의 풍량을 같게 하여 0.25 m³/s, 0.5 m³/s, 0.75 m³/s의 세가지 값을 대상으로 하였다. 이것은 각각 급기구와 배기구의 평균유속 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s에 해당한다. 제연방식과 급배기 풍량에 따른 유동장의 속도벡트와 입자분포, 그리고 입자수의 감소율을 비교하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 2와 같이 연기가 실내에 유입된 상황을 20,000개의 입자의 실내에 무작위 분포로 가정하였다. 일반적으로 연기의 온도는 주위 공기보다 높아 천장에 연기층을 이루지만, 이 입자분포는 공기와 비슷한 온도의 연기가 실내에 다량 유입하여 공기 중에 혼합된 상태로 볼 수 있다. 이 상태에서 가압급기방식, 배기방식(또는 흡인방식), 급배기방식의 3가지 제연방식에 따라 급기구와 배기구에 공기가 흐르기 시작하면 실내의 입자들이 이동하고 배기구로 배출된다.

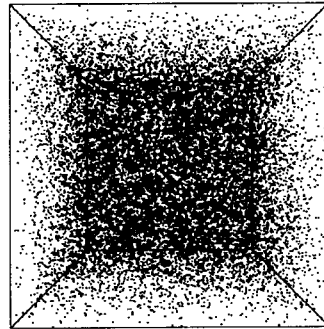
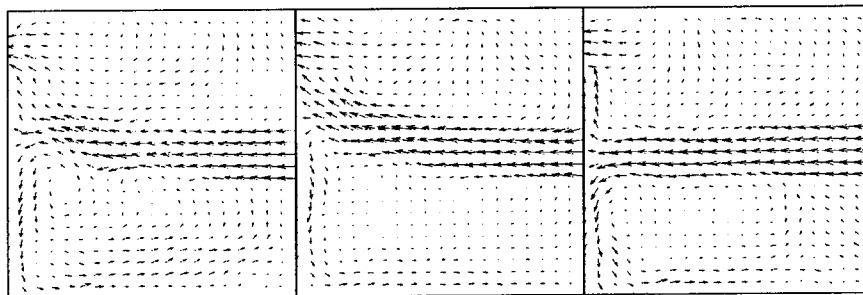


Fig. 2 Initial particle distribution (t = 0 sec, 20,000 particles)

Fig. 3은 개구부가 없을 때(Fig. 1의 개구부 폐쇄), 제연설비가 풍량 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ (급배기구 유속 각 2 m/s)로 가동한지 30초 뒤, 중앙평면 ($y=1\text{ m}$)에서의 유동장을 속도벡터로 나타낸 그림이다. 실내 유동장이 시간에 따라 변하므로 제연방식에 따라 속도벡터의 순시값은 서로 다르지만, 시간에 대한 평균 속도벡터는 세가지 제연방식에서 모두 같게 된다. 질량 보존의 법칙에 따라 제연방식에 관계없이 급기구와 배기구를 통해 같은 유속으로 공기가 흐르기 때문이다.



(a) pressurization (b) extraction (c) ventilation

Fig. 3 Velocity vectors at t= 30 sec (without opening, $y=1\text{ m}$, $Q=0.5\text{ m}^3/\text{s}$)

그러나 개구부가 열려있는 경우(Fig. 4)에는 제연방식에 따라 이 개구부를 통해 공기가

유입 또는 유출되므로 같은 풍량에서도 유동형태가 서로 다르게 된다. 가압급기방식(a)에서는 배기구와 개구부로 공기가 흘러나가지만, 배기방식(b)에서는 급기구 뿐만 아니라 개구부에서도 공기가 유입되고 있다. 한편, 급배기방식(c)에서는 배기구와 급기구를 통해 같은 양의 공기가 흐르므로 개구부에는 흐름이 거의 형성되지 않는다. 세가지 제연방식 중에서 가압급기방식의 공기의 유동거리가 가장 짧음을 알 수 있다.

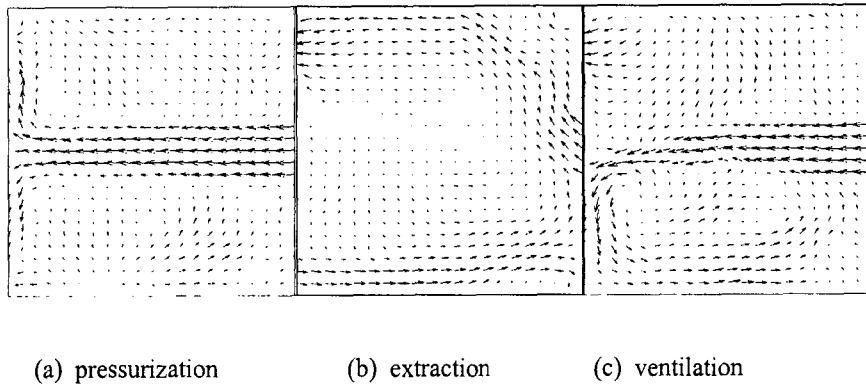


Fig. 4 Velocity vectors at $t = 30$ sec (with opening, $y = 1$ m, $Q = 0.5$ m³/s)

개구부의 유무와 제연방식에 따른 입자의 감소율을 Fig. 5에 비교하였다. 개구부가 없는 경우(Fig. 5a)에는 세가지 제연방식 모두 실내 입자감소율이 거의 비슷하게 나타났다. 이것은 앞의 유동장 비교에서 언급한 바와 같이 개구부가 없으므로 급배기구에 같은 양의 공기가 흐르고 따라서 시간평균 유동형태가 동일하기 때문이다. 그러나 개구부가 있는 경우(Fig. 5b), 배기방식과 급배기방식은 차이가 없지만 가압급기방식은 입자감소율이 떨어짐을 알 수 있다. 가압급기방식에서는 Fig. 4(a)에서와 같이 실내로 들어온 공기의 유동거리가 짧는데 그 원인이 있다. 특히 연기층이 공간의 상부에 형성된 경우에는 제연효과의 감소가 더 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다. 이 결과는 지하철 역과 같이 여러 개의 큰 개구부가 존재하는 공간에서는 가압급기방식이 배기방식이나 급배기방식에 비해 제연효과가 떨어짐을 암시한다. 이와 관련하여 개구부의 크기에 따른 제연효과의 변화에 대한 조사가 필요하다.

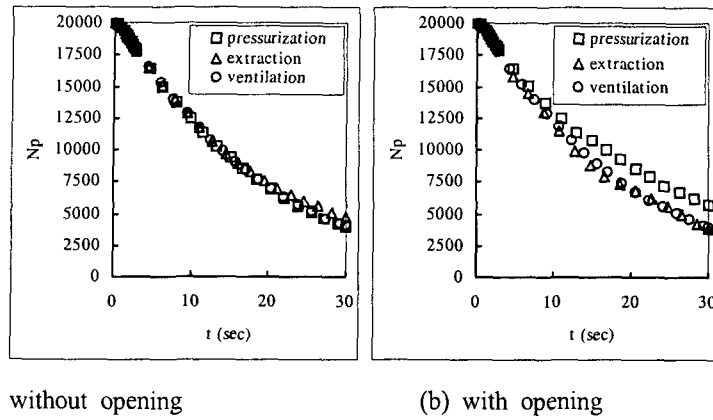


Fig. 5 Decreasing rate of the number of particles in the room ($Q= 0.5\text{m}^3/\text{s}$)

Fig. 6은 개구부가 없는 실내에 30초동안 급배기방식의 제연설비를 가동했을 때 풍량에 따라 실내에 남아있는 입자의 분포를 나타낸다. 풍량이 증가할수록 입자수의 감소가 뚜렷이 나타나 있다. $Q= 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 실내에 남은 입자수는 9112개, $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 4017개, $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 1738개였다. 개구부가 있는 경우에는 각각 9028개, 3987개, 1696개로 개구부가 없는 경우와 큰 차이가 없었다.

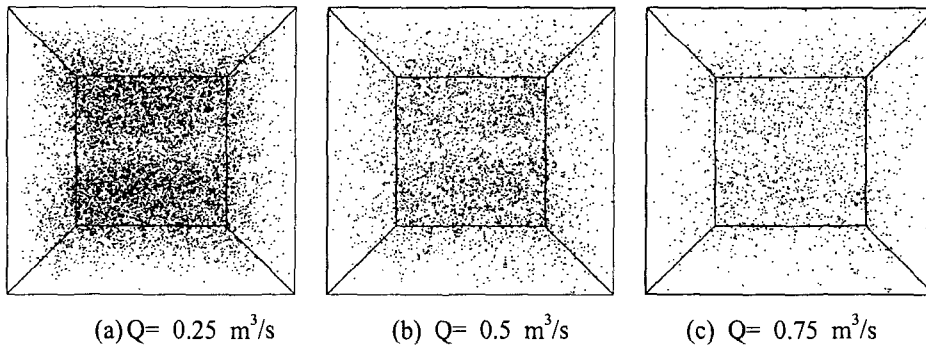


Fig. 6 Particles for different air flowrate at $t = 30 \text{ sec}$ (ventilation system without opening)

급배기방식을 적용했을 때 개구부의 유무와 풍량에 따른 실내 입자수의 감소율이 Fig. 7에 나타나 있다. 개구부의 유무는 입자수의 감소율에 영향을 거의 미치지 않으나, 풍량이 클수록 입자수의 감소율이 빠르다. 그러므로 지하철 역과 같은 다중이용시설의 제연설비는 연기를 신속히 제거할 수 있도록 급기구나 배기구의 유속 5m/s 이하의 범위 내에서 풍량을 최대한으로 크게 할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 결론

실내에 유입된 연기의 배출에 있어 가압급기방식, 배기방식(흡인방식), 그리고 급배기방식의 제연방식과 개구부의 유무 및 풍량의 영향을 조사하기위해 20,000개의 입자가 무작위로 분포된 것으로 가정하고 시간에 따라 입자수의 감소율을 비교하였다. 개구부가 없는 경우에는 세가지 제연방식 모두 비슷한 제연효과를 나타내었다. 그러나 개구부가 있는 경우에 가압급기방식은 제연효과가 떨어졌다. 이 결과로 여러 개의 개구부가 존재하는 지하철 역에는 가압급기방식 대신에 배기방식이나 급배기방식을 사용해야 함을 확인하였다. 또 풍량이 증가할수록 제연효과가 대폭 개선되므로 특히 다중이용시설에는 소방법에 규정된 급배기구의 유속범위 내에서 풍량을 최대한 크게 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

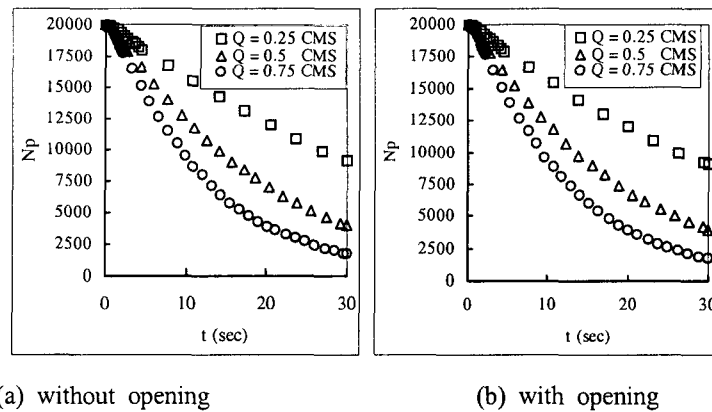


Fig. 7 Decreasing rate of the number of particles in the room for different air flowrate (ventilation system)

기호

g : 중력가속도, 9.81 m/s^2	u : 속도
N_p : 실내의 입자 개수	Δ : 격자크기
p : 압력	δ_{ij} : 크로네커 델타(Kronecker delta)
Q : 제연설비의 풍량	μ : 절대점성계수
Sc : Smagorinsky 상수, 0.2	ρ : 밀도
t : 시간	τ : 전단응력

참고문헌

1. 한일기술연구소, 제연설비의 개념설계, 공기조화냉동공학, 제13권, 제2호, pp. 36-50 (1984).

2. 추병길, 박찬국, 방배연설비 실무, 동화기술, 212pp. (1995).
3. 이성룡, 정진용, 김충익, 유홍선, 터널화재시 환기방식에 따른 연기거동에 관한 실험적 연구, 설비공학논문집, 제14권, 제9호, pp. 691-698 (2002).
4. J. Smagorinsky, General Circulation Experiments with the Primitive Equations - I. The Basic Experiment, Monthly Weather Review, Vol. 91, pp. 99-164 (1963).
5. K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm, A. Hamins, G. P. Forney, J. E. Floyd and S. Hostikka, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide v.3, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A. See <http://fire.nist.gov/fds/> (2002).