한국화재·소방학회, 제17권 제2호, 2003년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 17, No. 2, 2003

제연방식과 풍량에 따른 제연성능의 수치적 연구

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

박 외 철†

Woe-Chul Park†

부경대학교 안전공학과
(2003. 4. 1. 접수/2003. 5. 30. 채택)

요 약

제연방식과 풍량에 따른 실내에 유입된 연기의 제연성능을 조사하기 위해 Fire Dynamics Simulator의 대와류모사를 사용하였다. 급기구와 배기구, 개구부가 있는 크기 2 m×2 m×2.4 m의 실내에 급기방식과 배기방식, 급배기방식의 제연설비를 각각 가동했을 때 실내에 무작위로 분포한 입자의 감소율을 조사하였고, 급배기방식에서 풍량에 따른 입자의 감소율을 비교하였다. 세가지 제연방식 중 배기방식과 급배기방식은 제연성능에 차이가 없었으나, 개구부가 있는 경우에는 급기방식이 다른 두 제연방식에 비해 제연성능이 떨어졌다. 또 급배기방식에서 풍량이 감소하면 제연성능이 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 대형 개구부가 많은 지하철 역 등에는 급기방식 대신에 급배기방식 또는 배기방식의 제연설비를 사용해야 하며, 신속하게 연기를 배출하기 위해 풍량을 높게 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The smoke removal rate from a room with an opening was investigated for different smoke control systems by using the large eddy simulation turbulence model of the Fire Dynamics Simulator. The decreasing rate of the particles randomly distributed in the 2 m×2 m×2.4 m room was compared for the ventilation system, pressurization system and extraction system, and for the air flowrate of the ventilation system. Difference in the smoke removal rate among the three smoke control systems was small when the opening was closed. The pressurization system showed less smoke removal rate than the other two systems when the opening existed, and hence is not recommended for subway stations with large openings. It was also shown that a less flowrate in the ventilation system leads to a much longer smoke removal time.

Keywords : Smoke control systems, Pressurization system, Extraction system, Ventilation system, Computational fluid dynamics, Large eddy simulation

1. 서 론

화재에서 많은 사망자가 유독가스를 포함한 연기에 질식하여 발생한다. 그러므로 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 고려하여 설치해야 하는데, 오피스텔과 일반 공동주택의 대기에 면하지 않은 승강기 전실 또는 부속실에는 각각 급배기방식과 급기가압방식이 사용되고 있다. 급배기방식은 외부공기를 실내에 공급하여 연기농도를 희석하고, 외부보다 높은 압력을 유지하여 연기의 유입을 방지하면서 실내의 연기를 배출하는 방식이다. 급기가압방식은 실내 압력이 주위 압력보다 높게 유지되도록 급기함으로써 연기의 유입을 방지하는데 사용되지만, 화재참사가 발생한 대구 지하철 역과 부산 지하철 1호선 역에 급기방식이 설치되어 있다(개구부가 있는 경우에는 가압되지 않으므로 이하 급기방식으로 부름).

† E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

한편, 배기방식(흡인방식)은 실내의 연기를 제거하는데 효과적이나 새로운 공기가 유입될 수 있는 개구부가 작으면 충분한 제연효과를 기대할 수 없다. 또 급기 또는 배기 풍량도 연기를 배출하는데 중요하며, 연기를 신속하게 배출하기 위해서는 충분한 풍량이 필요하다. 제연설비에 관한 일반적인 사항은 제연설비의 설계[1]와 추병길과 박찬국[2]에 상세하게 기술되어 있다.

이성룡 등[3]은 0.4 m×1.0 m×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 구조가 다른 일반 건축물의 실내 또는 지하철 역에 연기가 유입되었을 때 유사한 결과를 얻을 수 있는가에 대한 연구가 필요하다. 또 현재 지하철 역에 사용되고 있는 급기방식 제연설비의 제연효과와 제연설비의 풍량에 따른 연기의 배출에 관한 연구도 필요하다. 이에 따라 본 연구의 목적은 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)를 이용하여 제연방식과 풍량에 따른 제연성능을 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×2 m×2.4 m의 공간이다. 급기구(inlet)와 배기구(outlet)의 크기는 각각 0.5 m×0.5 m이고, 그 중심위치는 각각 (2.0, 1.0, 1.2 m), (0.0, 1.0, 2.05 m)이다. 가압급기방식에서는 배기구가 개구부로, 또 배기(흡인)방식에서는 급기구가 개구부로 취급된다. 개구부의 유무에 따른 제연성능을 비교하기 위해 왼쪽 벽 아래에 중심점이 (0.0, 1.0, 0.275 m)에 1 m×0.25 m의 개구부(opening)가 있고 그 면적은 급기구, 배기구와 같다. 벽과 실 내외 공기의 온도는 모두 20°C이고 공기는 이상기체로 가정하였다.

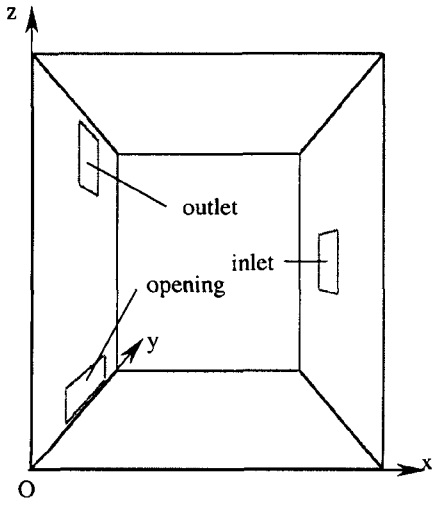


Fig. 1. Computational domain (2 m×2 m×2.4 m).

이 경우에 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

전단응력은

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

이다. 여기서 ρ는 유체의 밀도, t는 시간, u는 속도, p는 압력, g는 중력가속도, 9.81 m/s^2, τ는 전단응력, δ_{ij}는 Kronecker delta이다. 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

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

로 계산된다. 여기서 μ_M은 층류점성계수이고, S_C는 Smagorinsky 상수(0.2), Δ는 격자크기이고, 점성소산함수

$$\Phi = \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{5}$$

는

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

로 쓸 수 있다. u, v, w는 각각 x, y, z방향의 유속을 나타낸다.

유속 u를 구하기 위한 수치법으로 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)의 화재모사 코드 Fire Dynamics Simulator(FDS)[5]를 사용하였다. 격자의 크기는 x, y, z방향 모두 균일하게 0.05 m(격자수 40×40×48)로 하였다. 계산시간간격 Δt는 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 Δx, Δy, Δz는 각각 x, y, z방향의 격자크기를 나타낸다. 수치법에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등[5]에 기술되어 있다.

일반적으로 연기의 온도가 주위 공기의 온도보다 높아 천장에 연기층을 형성하지만, 연기층의 두께를 가정하기가 쉽지 않다. 또한 연기 입자의 수가 많을수록 비교의 타당성이 높지만, 입자수의 증가는 컴퓨터의 기억용량과 더 많은 계산시간을 요하게된다. 따라서 이 연구에서는 실내에 유입된 연기의 온도가 실내 공기의 온도와 같은 것으로 보고 20,000개의 입자가 무작위로 분포하는 것으로 가정하였다. 세가지 제연방식의 가동시간에 따라 각각 실내에 남아 있는 입자수를 조사함으로써 제연성능을 비교할 수 있게 하였다. 이 경우에 급기구 또는 배기구의 유량은 0.5 m^3/s(급기구, 배기구에서의 유속 2 m/s)로 일정하게 유지하였다. 또 제연설비의 풍량에 따른 제연성능의 조사에는 급배기방식을 대상으로 하고, 급기구와 배기구의 풍량을 같게 하여 0.25 m^3/s, 0.5 m^3/s, 0.75 m^3/s의 세가지 값을 대상으로 하였다. 이 풍량은 각각 급기구와 배기구의 평균유속 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s에 해당한다. 제연방식과 급배기 풍량에 따른 유동장의 속도벡터와 입자분포, 그리고 입자수의 감소율을 비교하였다.

3. 결과 및 토의

제연설비를 가동하기 전 연기의 분포는 Fig. 2와 같이 20,000개의 입자의 무작위 분포로 가정하였다. 이 입자분포는 공기와 비슷한 온도의 연기가 실내에 다량 유입하여 공기 중에 혼합된 상태로 볼 수 있고, 연기의 농도와는 아무런 관련이 없다. 이 상태에서 급기방식, 배기방식(또는 흡인방식), 급배기방식의 3가지 제연방식에 따라 급기구와 배기구에 공기가 흐르기 시작하면 실내의 입자들이 이동하고 배기구로 배출된다.

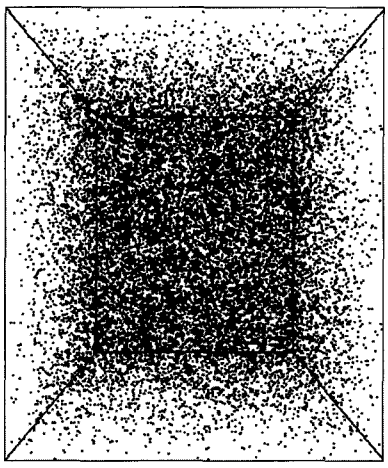
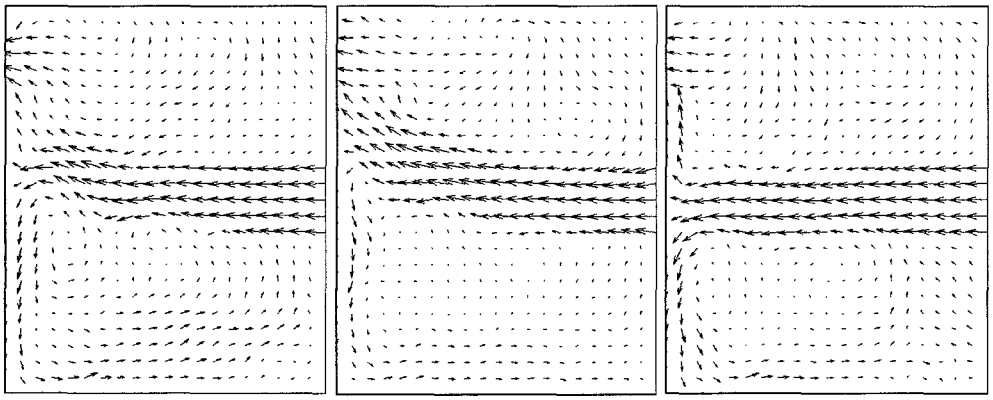


Fig. 2. Initial particle distribution (t=0 sec, 20,000 particles).



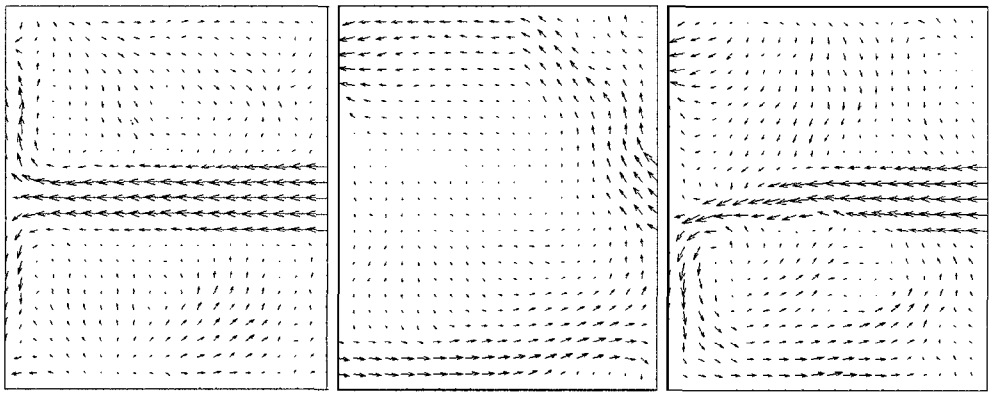
(a) Pressurization (b) Extraction (c) Ventilation

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

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

그러나 Fig. 4의 개구부가 열려있는 경우에는 제연방식에 따라 이 개구부를 통해 공기가 유입 또는 유출되므로 같은 풍량에서도 유동형태가 서로 다르게 된다. 급기방식(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.

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 때



(a) Pressurization (b) Extraction (c) Ventilation

Fig. 4. Velocity vectors at t=30 sec (with opening, y=1 m, Q=0.5 m^3/s).

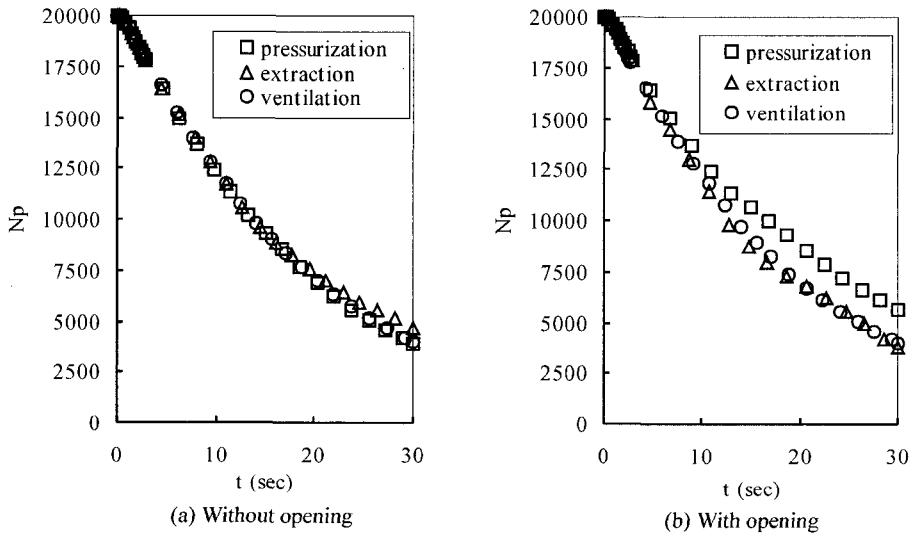
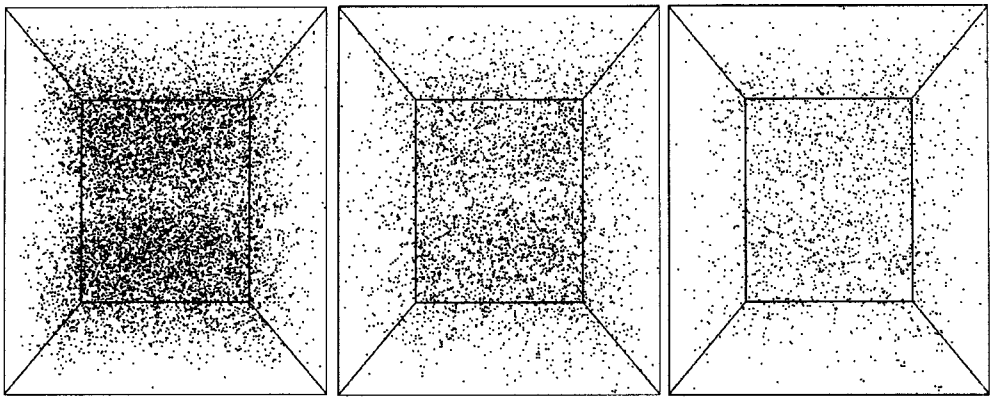
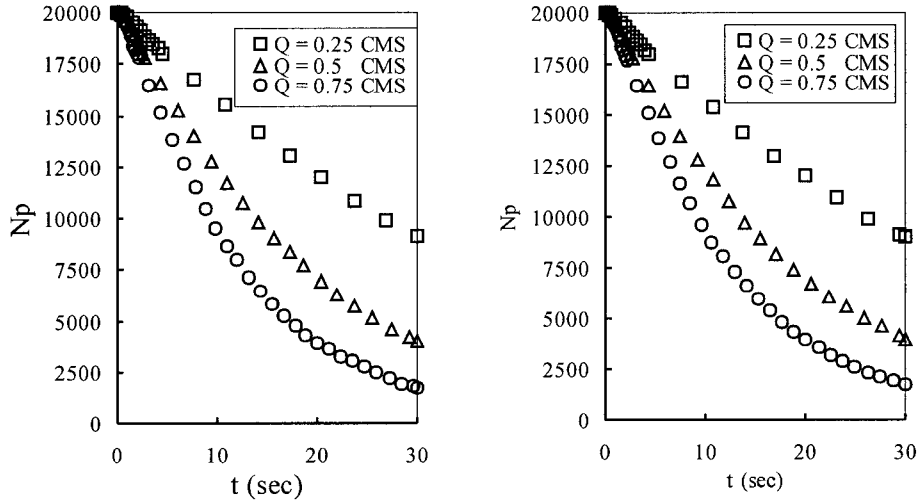


Fig. 5. Decreasing rate of the number of particles in the room (Q=0.5 m^3/s).



(a) Q= 0.25 m³/s (b) Q= 0.5 m³/s (c) Q= 0.75 m³/s

Fig. 6. Particles for different air flowrates at t=30 sec (ventilation system, without opening).



(a) Without opening (b) With opening

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

문이다. 그러나 개구부가 있는 경우(Fig. 5b), 배기방식과 급배기방식은 차이가 없지만 급기방식은 입자감소율이 떨어짐을 알 수 있다. 특히 연기층이 공간의 상부에 형성된 경우에는 제연성능의 감소가 더 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다. 이 결과는 지하철 역과 같이 여러 개의 큰 개구부가 존재하는 공간에서는 급기방식이 배기방식이나 급배기방식에 비해 제연성능이 떨어짐을 암시한다. 이와 관련하여 개구부의 크기에 따른 제연성능의 변화에 대한 조사가 필요하다.

Fig. 6은 개구부가 없는 실내에 30초 동안 급배기방식의 제연설비를 가동했을 때 풍량에 따라 실내에 남아있는 입자의 분포를 나타낸다. 풍량이 증가할수록 입자수의 감소가 뚜렷이 나타나 있다. Q=0.25 m³/s일 때 실내에 남은 입자수는 9112개, 0.5 m³/s일 때 4017개, 0.75 m³/s일 때 1738개였다. 한편, 개구부가 있는 경우에 실내에 남은 입자는 각각 9028개, 3987개, 1696개로 개구부가 없는 경우와 큰 차이가 없었다.

급배기방식의 경우에 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 5 m/s이하의 범위 내에서 풍량을 최대한으로 크게

할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

실내에 유입된 연기의 배출에 있어 급기방식, 배기방식(흡인방식), 그리고 급배기방식의 제연방식과 개구부의 유무 및 풍량의 영향을 조사하기위해 20,000개의 입자가 무작위로 분포된 것으로 가정하고 시간에 따라 입자수의 감소율을 비교하였다. 급배기구의 위치와 주어진 조건에서 개구부가 없는 경우에는 세가지 제연방식 모두 비슷한 제연성능을 나타내었다. 그러나 개구부가 있는 경우에 급기방식은 제연효과가 떨어졌다. 이 결과로 여러 개의 개구부가 존재하는 지하철 역에는 급기방식 대신에 배기방식이나 급배기방식을 사용해야 함을 확인하였다. 또 풍량이 크면 제연성능이 대폭 증가하므로 지하철 역과 같은 다중이용시설에는 급배기 풍량을 크게 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

기호설명

g : 중력가속도, 9.81 m/s^2
N_P : 실내의 입자 개수
p : 압력
Q : 풍량
S_C : Smagorinsky 상수, 0.2
t : 시간
u : 속도
Δ : 격자크기
δ_{ij} : Kronecker delta
Φ : 점성소산함수
μ : 절대점성계
ρ : 밀도
τ : 전단응력

참고문헌

1. 한일기술연구소, "제연설비의 개념설계", 공기조화냉동공학회지, 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. (2002).