

큰 개구부가 있는 지하공간의 화재와 제연에 관한 수치적 연구

박외철 · 고경찬* · 박준*

부경대학교 안전공학과 · *부경대학교 대학원 안전공학과

1. 서 론

화재가 발생했을 때 많은 사람이 연기에 질식사하여 사망하는 피해가 거의 해마다 일어나고 있다. 특히 올해 2월18일 190여명이 사망한 대구 지하철 중앙로역 화재참사에서 는 다량의 유독성 가스를 효과적으로 배출하지 못해 더 많은 사망자가 발생하였다. 당 시 지하철역에는 화재가 발생하면 환기용 배기장치가 급기장치로 전환되는 급기방식의 제연설비가 설치되어 있었고, 시계 불량으로 피난 표지판과 유도등이 잘 보이지 않은 것으로 밝혀졌다.

개구부가 있는 공간 내 등은 유동장에 무작위로 분포한 입자를 이용한 수치모사 결과, 급기방식의 제연설비는 급배기방식이나 배기방식에 비해 제연성능이 떨어지는 것으로 나타났다¹⁾. 또 같은 공간 내 등은 유동장의 개구부 크기에 대한 연구²⁾에서도 급기방식은 급배기방식이나 배기방식에 비해 제연성능이 떨어지며, 개구부의 크기가 제연성능에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 확인되었다. 그러므로 여러 개의 출입계단 과 양방향 철로로 구성된 대규모 개구부가 있는 지하철 역의 실제화재에 대한 제연방 식, 특히 급기방식의 제연성능을 확인할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 실제 화재의 수치모사를 통해 큰 개구부가 있는 공간에서의 제연방식에 따른 제연성능을 조사하는 것이다.

본 연구에서는 지하철 역의 구조와 유사한 축소 3차원, 4x1x1 m³ 크기의 공간에 50kW의 폴리우레탄(polyurethane) 화재를 대상으로 하였다. 제연방식은 급배기방식과 급기방식, 그리고 배기방식의 세가지 기계 제연방식에 대하여 공간 내 연기와 온도의 분포, 연기입자수의 변동을 비교하였다.

2. 수치모사 방법

지하철 역이나 대형 건축물의 화재나 연기거동에 관한 연구는 그 규모가 커서 특별한 경우가 아니면 컴퓨터 기억용량과 계산시간을 줄이고 더 세밀한 정보를 얻기 위해 축소공간이나 화재 또는 대피에 취약한 부분을 대상으로 연구를 수행하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 일정한 척도로 축소한 모델을 사용하는 대신에, Fig. 1과 같이 1층의 승강장과 2층의 출입통로로 구성된 3차원 공간을 대상으로 하였다. 공간의 치수는 4x1x1.5 m³로, 1층 승강장은 4x1x1 m³의 크기로 좌우 양쪽이 모두 대기와 접한다. 1층 승강장에서 화재가 발생했을 때 연기가 2층 출입통로로 이동하는 것이 관심의 대상이므로 1층 승강장과 2층의 출입통로 사이의 계단은 단순히 1x1 m²의 개구부로 처리하고, 2층의 출입통로는 높이 0.5 m로 하여 오른쪽 끝이 대기에 접하는 개구부로 가정하였다. 화재는 화원의 바닥면적이 0.5x0.5 m²인 폴리우레탄(polyurethane, PU) 50kW (단위면적당 열발생률: 200kW/m²)로 가정하였고, 그 중심의 좌표는 (0.75,0.5,0.0)이다.

급기구와 배기구의 크기는 각각 0.4x0.5 m²이고, 그 중심위치는 급기구(Fig. 1의 i)가 (1.95,0.5,1.0)로 출입계단 개구부 근처에, 배기구(Fig. 1의 e)의 중심은 (1.2, 0.5, 1.0)로 화원 근처에 두었다. 급기방식에서는 배기구가 없고 배기방식에서는 급기구가 없는 것으로 하였다. 모든 벽은 단열, 유입 공기의 온도는 20°C, 공기는 이상기체로 취급하였다.

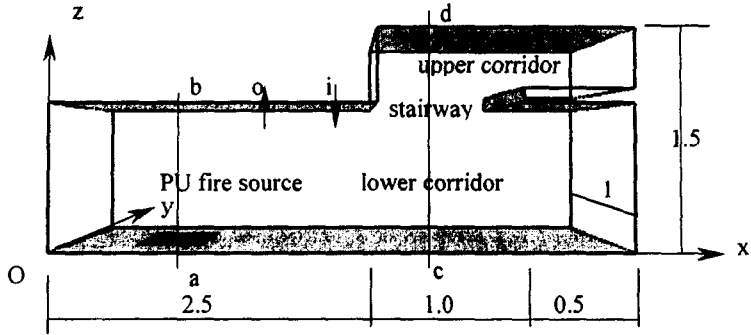


Fig.1 Computational domain (dimensions in m)

연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식, 화학종방정식은 각각 다음과 같다.

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

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

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_i}{\partial x_i} - \frac{Dp}{Dt} = Q + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + q_r \right) + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + w_i \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도, u 는 속도, t 는 시간, p 는 압력, g 는 중력가속도, 9.81 m/s^2 , τ 는 전단응력, Q 는 단위체적당 열발생율, q_r 는 단위면적당 복사열전달률, T 는 온도, λ 는 열전도계수, Y 는 질량분율, D 는 확산계수, w 는 단위체적당 화학종 생성률을 나타낸다. Dp/Dt 는 시간에 대한 압력의 물질도함수이다.

난류모델은 Smagorinsky의 대와류모사(large eddy simulation)³⁾를 사용한다. 연소모델은 산소의 소모량에 열 발생율이 비례한다는 원리에 기초한 혼합분율 연소모델⁴⁾을, 복사 열전달은 복사 유한체적법(finite volume method for radiation)⁵⁾을 사용한다. 수치법에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등⁶⁾에 기술되어 있다.

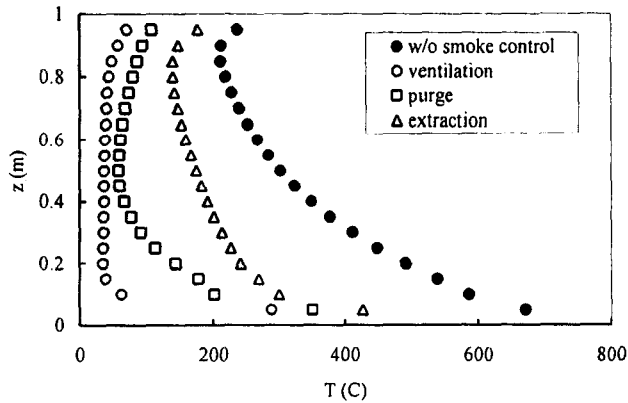
폴리우레탄 화재가 발생하면 계산이 끝날 때까지 열발생율은 50kW로 일정하게 유지되며, 화재발생 5초 후부터 제연설비를 가동한다. 제연설비의 풍량은 급기구(급배기방식과 급기방식) 또는 배기구(급배기방식과 배기방식)에서 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (급기구 또는 배기구의 평균유속 2m/s에 해당)로 일정하게 유지한다. 공간 내에 각 제연방식에 따라 Fig. 1의 두 수직축 a-b ($x = 0.75 \text{ m}$)와 c-d ($x = 2.25 \text{ m}$)의 평균온도, 입자를 이용한 연기의 이동, 시간에 따른 공간 내 입자수의 변화 등을 비교한다. 화재발생 후 약 10초가 되면 유동거리의 정상상태가 되므로, 평균온도는 $t = 15 \sim 25 \text{ sec}$ 의 순시값으로부터 구하였다.

3. 결과 및 토의

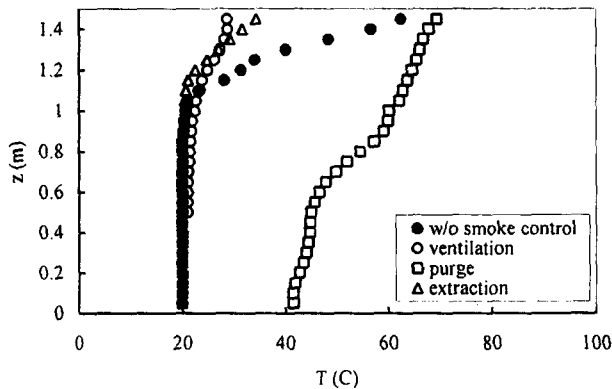
화재가 발생하면 화염이 위로 올라가고 연기입자도 부력에 의해 공기와 함께 천장으로 상승하며 천장을 따라 이동한다. 연기는 고온의 공기와 함께 승강장 왼쪽의 개구부로 배출되 하고, 오른쪽으로는 출입계단의 상부에 해당하는 개구부를 거쳐 2층 출입통

로를 따라 배출된다(Fig. 1 참조).

폴리우레탄이 50 kW의 열발생율로 연소하기 시작하고 5초 이후부터 제연설비를 가동 하였을 때 각 제연방식별 평균온도가 Fig. 2에 나타나 있다. 평균온도는 $t=15\sim 25$ sec 사이의 온도로부터 구하였다. 화원의 중심을 지나는 a-b축의 승강장 온도는 제연방식에 따라 상당히 다르게 분포되어 있다. 급기구와 배기구의 공기흐름에 따라 수직축의 온도 분포에 상당히 차이가 있음을 알 수 있다. 제연설비가 없는 경우에는 제연설비가 있는 경우에 비해 화염기둥(fire plume)의 높이가 훨씬 더 높아 온도가 가장 낮은 승강장 천장 근처인 $z=0.9$ m에서도 약 200°C 로 나타나 있다. 급배기방식의 경우에는 급기에 의해 화염기둥이 거의 생기지 않아 화원과 천장 부근을 제외하고는 약 40°C 이고, 외기가 공급되는 급기방식은 급배기방식보다 온도가 더 높고, 배기방식의 온도는 이보다 더 높다. 1, 2층간 개구부(승강장 출입계단의 상부에 해당)의 중앙인 c-d축($x=2.25$ m, $y=0.5$ m)에서는 승강장($z \leq 1.0$ m)에는 급배기방식과 배기방식, 제연설비가 없는 경우 모두 외기온도(20°C)와 거의 같다. 그러나 출입통로($1.0 \text{ m} < z < 1.5$ m)에서는 제연설비가 없는 경우에 온도가 높은 반면에 급배기방식의 천장온도가 가장 낮고 배기방식은 이보다 약간 더 높게 나타나 있다. 한편, 급기방식에서는 급기구를 통해 유입된 외부공기가 천장부근을 흐르던 고온의 연소공기층과 혼합됨에 따라 승강장과 출입통로의 온도가 높아 $40\sim 70^{\circ}\text{C}$ 로 분포되어 있다.



(a) along a-b axis ($x=0.75$ m)



(b) along c-d axis ($x=2.75$ m)

Fig. 2 Comparison of temperature along vertical lines averaged over $t=15\sim 25$ sec

제연방식에 따른 공간내 입자분포가 Fig. 3($t=20$ sec)과 Fig. 4($t=25$ sec)에 나타나 있다.

5초의 시간차에도 불구하고 연기의 흐름에는 큰 차이가 없어보인다. 제연설비가 없는 경우(Figs. 3a, 4a)에는 연기의 일부는 왼쪽 개구부로 나가고 오른쪽 출입계단 개구부와 2층 출입통로로 배출된다. 1층의 오른쪽 승강장 개구부로는 연기가 전혀 나가지 않음을 알 수 있다. 급배기방식의 경우(Figs. 3b, 4b)에는 화재 발생후 5초까지는 그림 (a)와 같이 연기가 분포되었다가 시간이 경과함에 따라 급기구를 통해 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 유입하는 공기가 출입통로로 흐르는 연기를 차단하고, 동시에 배기구로 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 연기가 배출됨으로써 오른쪽 승강장과 출입통로에는 연기가 현저히 줄어들었다. 그러나 급기방식(Figs. 3c, 4c)에서는 급기구에서 유입된 공기가 연기와 혼합하여 2층 출입통로뿐만 아니라 오른쪽 1층 승강장까지 연기가 차게 되어 제연설비가 없는 경우보다 오히려 악화되었다. 이 공기와 연기층의 혼합이 앞의 Fig. 2b에서와 같이 온도상승을 초래하여 연기뿐만 아니라 고온의 공기로 인해 피난이 곤란하게 된다. 그러므로 지하철 역과 같은 구조에서는 급기방식이 적합하지 않음을 알 수 있다. 한편, 배기방식(Figs. 3d, 4d)은 연기의 배출로 오른쪽 위 출입통로에 연기가 감소한 것으로 나타났고, 뒤의 Fig. 5에서 알 수 있듯이 시간이 흐를수록 입자수가 점차 감소한다.

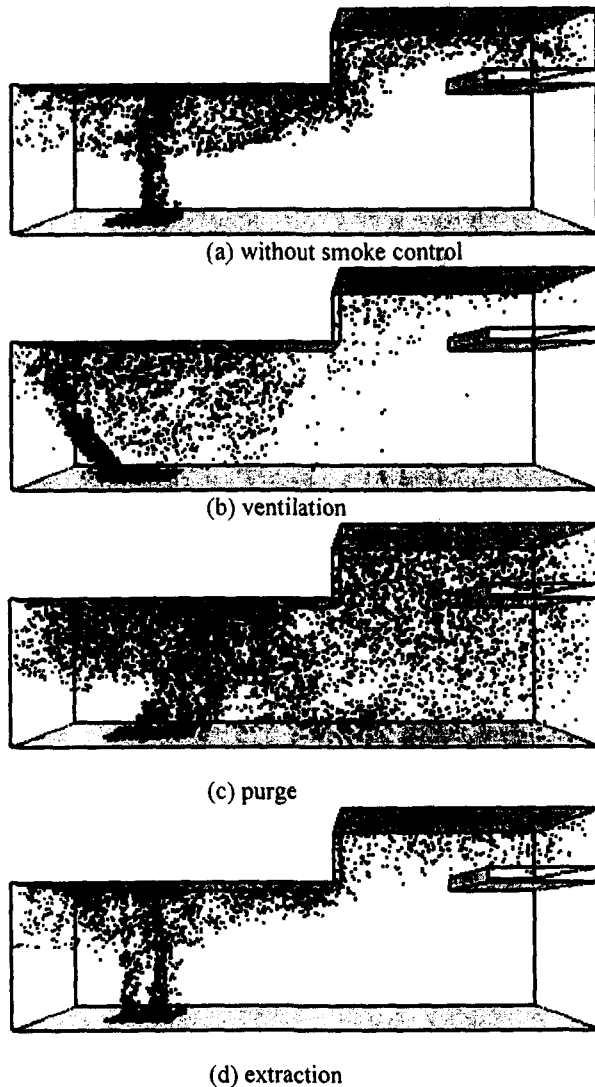


Fig. 3 Particle distribution at $t = 20 \text{ sec}$

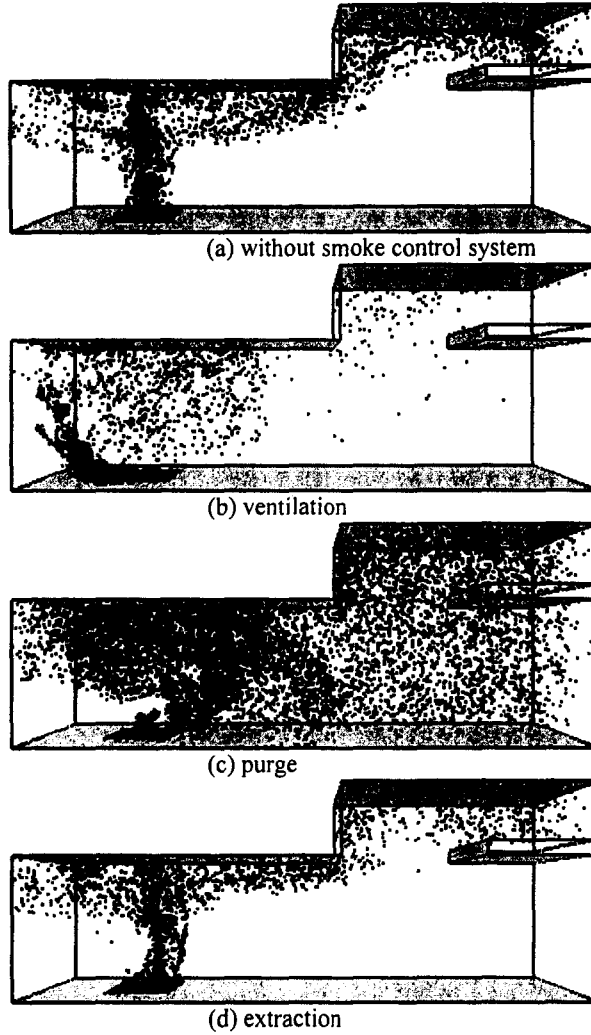


Fig. 4 Particle distribution at $t = 25$ sec

이 결과로부터 급기구와 배기구의 위치에 따라 제연효과가 상당히 영향을 받음을 알 수 있다. 화원과 출입계단의 위치에 따라 급배기구의 위치를 적합하게 선정하지 않으면 제연성능이 떨어질 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 공간내 입자수의 시간에 따른 변화를 나타낸 그림이다. 제연설비가 없는 경우에는 연기가 개구부로 배출되면서 화재발생 5초이후부터 4400~5000개의 입자를 유지하면서 준정상상태(qui-steady state)를 유지하고 있다. 급배기방식의 경우와 급기방식에서도 $t = 5$ sec에 제연설비가 작동하면 입자수가 감소하여 $t = 10$ sec부터 준정상상태를 유지하거나 점차 입자수가 감소한다. 이에 비해 급기방식에서는 입자수가 거의 선형적으로 증가하여 $t = 25$ sec에 10000개 정도이고 시간이 흐를수록 더 증가할 것으로 보인다.

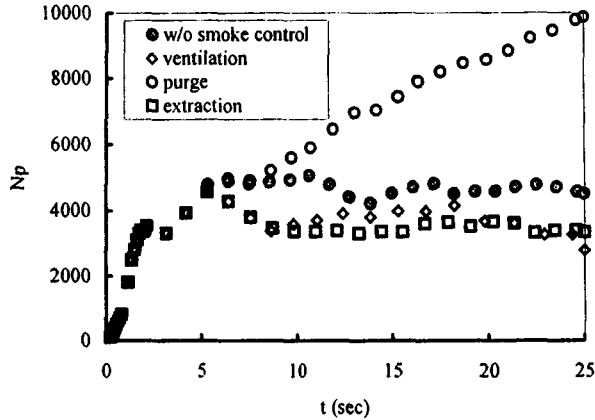


Fig. 5 Comparison of the variation of the number of particles with time

4. 결론

지하철 역과 같이 대기에 접한 승강장과 출입계단 및 통로를 축소한 $4 \times 1 \times 1.5 \text{ m}^3$ 크기의 공간에 50kW의 폴리우레탄 화재가 발생하였을 때 제연방식에 따른 연기의 흐름과 온도분포를 조사하였다. 급기구와 배기구의 풍량은 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정하게 유지하였다. 주어진 풍량과 화원 및 급배기구의 위치에서 급배기방식의 제연성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 반면에 현재 지하철 역에 사용되고 있는 급기방식은 제연설비가 없는 경우보다 더 제연효과가 떨어져 연기를 효과적으로 배출할 수 없으므로, 적합하지 않음을 알 수 있었다. 급배기구의 위치는 화원과 승강장 출입계단의 위치에 따라 적합한 곳에 설치하는 것이 연기를 제거하는데 중요함을 확인하였다.

참고문헌

- 1) 박외철, "대와류모사를 이용한 연기이동의 연구 - I. 제연방식과 제연풍량", 한국산업안전학회지 투고, 2003.
- 2) 박외철, "대와류모사를 이용한 연기이동의 연구 - II. 제연방식과 개구부의 크기", 한국산업안전학회지 투고, 2003.
- 3) J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations - I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review, Vol. 91, pp. 99~164, 1963.
- 4) J. E. Floyd, K. B. McGrattan and H. R. Baum, "A Mixture Fraction Combustion Model for Fire Simulation Using CFD", Proc. Int'l Conf. on Engineered Fire Protection Design, pp.279~290, 2001.
- 5) G. D. Raithby and E. H. Chui, "A Finite-Volume Method for Predicting Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media", J. of Heat Transfer, Vol.112, No.2, pp. 415~423, 1990.
- 6) 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.