

큰 개구부가 있는 공간의 화재와 제연의 대와류모사 Large Eddy Simulation of Fire and Smoke Control in a Compartment with Large Openings

박 외 철[†]

Woe-Chul Park[†]

부경대학교 공과대학 안전공학과
(2003. 4. 25. 접수/2003. 8. 29. 채택)

요 약

지하철 역과 같이 대형 개구부가 있는 공간의 화재와 제연을 조사하기 위해, 지하철 역과 유사한 구조의 4 m×1 m×1.5 m 크기의 공간 내 50 kW의 폴리우레탄 화재에 대한 수치모사를 수행하였다. 대와류모사를 난류모델로 사용하고, 혼합분율 연소모델과 복사 유한체적법을 사용하였다. 화재 발생 후 5초부터 급배기방식과 급기방식, 배기방식의 세가지 기계 제연방식이 각각 작동했을 때 제연방식에 따른 승강장과 출입통로의 공기온도와 연기이동을 비교하였다. 제연방식 가운데 급배기방식의 제연성능이 가장 좋고 안전한 것으로 나타났다. 그러나 지하철 역에 사용되고 있는 급기방식은 급기구를 통해 공급된 공기가 고온의 연기와 혼합됨으로써 제연성능이 오히려 자연제연방식보다 불량하므로 지하철 역과 같은 구조에서는 적합하지 않음을 확인하였다.

ABSTRACT

A 50 kW polyurethane fire in a compartment of 4 m×1 m×1.5 m with large openings similar to a subway station was simulated by a large eddy simulation to investigate the fire and smoke control. The NIST FDS, which employed a mixture fraction combustion model and a finite volume method for radiation, was utilized. Distribution of temperature and smoke particles was compared with in the lower and upper corridors for three different smoke control systems, ventilation, purge, and extraction, starting in 5 sec from the ignition of the fire. For the given geometries, the ventilation system showed the best smoke removal rate and lowest temperature distribution in the both corridors. It was confirmed that the purge system is not recommended for a subway station since the smoke removal rate of the purge system was worse than that without a smoke control system.

Keywords : Subway station, Smoke control systems, Ventilation system, Purge system, Extraction system, Large eddy simulation

1. 서 론

화재가 발생했을 때 연기에 질식하여 사망하는 인명 피해가 매년 일어나고 있다. 특히 2003년 2월 18일 190여명이 사망한 대구 지하철 중앙로역 화재참사에서는 다량의 유독성 가스가 효과적으로 배출되지 못한 것으로 밝혀졌다. 지하철역에는 급기방식의 제연설비가 설

치되어 있었고, 사고 당시 연기로 시계가 불량했으며 피난 표지판과 유도등이 잘 보이지 않은 것으로 밝혀졌다. 공간 내의 등은 유동장에 무작위로 분포한 입자를 이용한 수치모사¹⁾의 결과, 개구부가 있을 때는 급기방식의 제연성능이 급배기방식이나 배기방식에 비해 떨어지는 것으로 밝혀졌다. 그러나 화재실에서는 연기의 온도가 주위 공기보다 높아 부력으로 천장 부근에 연기층을 이루게 되므로 등은상태의 무작위 입자분포와 다른 결과가 나올 수 있다. 그러므로 승강장과 여러 개

[†]E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

의 출입계단, 승강장 출입통로 및 양방향 철로와 같은 대규모 개구부가 있는 지하철 역에서 실제 화재가 발생했을 때 제연방식, 특히 현재 사용되고 있는 급기방식의 제연성능을 확인할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 실제 화재의 수치모사를 통해 큰 개구부가 있는 공간에서의 제연방식의 제연성능을 비교 조사하는 것이다.

이 연구에서는 지하철 역의 구조와 유사한 축소 3차원 4 m×1 m×1.5 m 크기의 공간에 50 kW의 폴리우레탄 화재를 대상으로 하였다. 제연방식은 제연설비가 없는 경우(자연제연방식)와, 급배기방식, 급기방식, 배기방식의 세가지 기계 제연방식에 대하여 공간 내 연기와 온도의 분포, 연기 입자수의 변동을 비교하였다.

2. 수치모사 방법

지하철 역이나 대형 건축물의 화재와 연기거동에 관한 연구는 그 규모가 커서 특별한 경우가 아니면 컴퓨터 기억용량과 계산시간을 줄이고 더 자세한 정보를 얻기 위해 축소공간이나 화재 또는 대피에 취약한 부분을 대상으로 하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 일정한 척도로 축소한 모델을 사용하는 대신에, Fig. 1과 같이 1층의 승강장과 2층의 출입통로로 구성된 4 m×1 m×1.5 m 크기의 3차원 공간을 대상으로 하였다. 1층 승강장은 4 m×1 m×1 m의 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 1 m×1 m의 수평 개구부로 처리하였다. 2층의 출입통로는 높이 0.5 m로 축소하고 오른쪽 끝이 대기에 접하는 개구부로 가정하였다. 화재는 바닥면적이 0.5 m×0.5 m인 폴리우레탄 50 kW로 가정하였고, 그 중심의 좌표는 (0.75, 0.5, 0.0 m)이다. 폴리우레탄의 열발생률은 21544 kJ/kg이다. 본 연구에서의 화재크기 50 kW는 지하철 전동차나 지하철역 내의 가연성물질의 성상과는 전혀 무관하며, 예비모사를 통해 제연방

식별 온도 및 입자분포를 비교하기 위해 임의로 선정한 것이다.

급기구와 배기구의 크기는 각각 0.4 m×0.5 m이고, 급기구의 중심위치는 Fig. 1의 i(1.95, 0.5, 1.0 m)로 출입계단 개구부 근처에, 배기구는 화원 근처인 Fig. 1의 c(1.2, 0.5, 1.0 m)에 두었다. 이 위치 선정은, 지하철 역의 급기구(평상시 환기구)가 천장에 있고 이 연구에서 관심의 대상이 화원의 오른쪽 승강장과 2층 출입통로의 연기와 온도분포이기 때문이다. 급기방식에서는 배기구가 없고 배기방식에서는 급기구가 없는 것으로 하였다. 모든 벽과 유입 공기의 온도를 20°C로 하고, 공기는 이상기체로 취급하였다. 지배방정식으로서 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식, 화학종방정식은 각각 다음과 같다.

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

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

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

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

여기서

$$p = \rho RT \quad (5)$$

$$h = c_p T \quad (6)$$

이고 전단응력은

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2 \partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

이다. ρ 는 밀도, u 는 속도, t 는 시간, p 는 압력, g 는 중력가속도, 9.81 m/s², τ 는 전단응력, Q 는 단위체적당 열발생률, q_r 는 단위면적당 복사 열전달률, 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. 난류점성계수는 대외류모사(large eddy simulation)³⁾를 사용하여 격자크기 Δ 와 점성소산함수 Φ 로부터

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 (\Phi / \mu_M)^{1/2} \quad (8)$$

로 계산된다. μ_M 은 층류점성계수를 나타낸다. 점성소산함수는

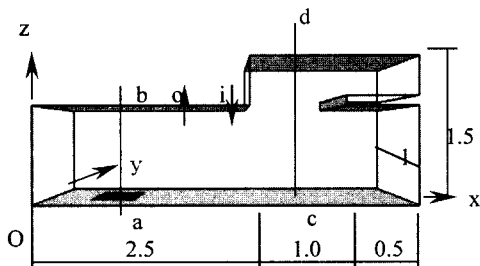


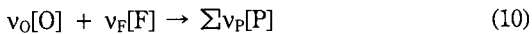
Fig. 1. Computational domain (dimensions in m).

$$\Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (9)$$

이다.

격자의 크기는 x, y, z방향 모두 균일하게 0.05 m로 하여 격자수를 80×20×30개로 하였다.

연소모델은 산소의 소모량에 열 발생율이 비례한다는 원리에 기초한 혼합분을 연소모델⁴⁾을 사용한다. 혼합분을 연소모델을 간략하게 요약하면 다음과 같다. 연소반응식



에서 O는 산소, F는 연료, P는 생성물이고,

$$s = v_o M_o / v_f M_f \quad (11)$$

라고 하면, 혼합분율 Z의 정의는

$$Z = \frac{s Y_f - (Y_o - Y_{o,\infty})}{s Y_f + Y_{o,\infty}} \quad (12)$$

이다. 여기서 아래첨자 O는 산소, F는 연료, ∞는 외기를 나타내고, M은 분자량, v는 화학양론계수, Y는 질량분율이다. 정의에 따라 산소가 전혀 없이 가연성 가스 또는 증기만 있는 영역에서는 Z = 1, 공기만 있는 곳은 Z = 0이 된다. Y_f = 0인 화염의 표면에서 혼합분율 Z_f는 식 (12)로부터

$$Z_f = \frac{Y_{o,\infty}}{s Y_f + Y_{o,\infty}} \quad (13)$$

가 된다. 산소의 질량분율과 혼합분율 Z는

$$\begin{aligned} Y_o &= Y_{o,\infty}(1 - Z/Z_f) & Z < Z_f \\ Y_o &= 0 & Z > Z_f \end{aligned} \quad (14)$$

로 한다.

화원으로부터 주위로 전달되는 복사열을 무시할 수 없으므로 복사열전달은 복사 유한체적법(finite volume method for radiation)⁴⁾을 사용한다. 제어각(control angle)의 수를 104로 하고, 계산시간을 줄이기 위해 열 복사는 매번 계산하는 대신에 15번째마다 한번씩 계산하였다.

이상에서 요약한 대외류모사와 혼합분을 연소모델, 복사 유한체적법은 FDS에서 기본으로 설정되어있고, 본 연구에서 특별히 언급하지 않은 것은 모두 FDS의 기본값을 그대로 사용하였다. 수치모사법에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등⁵⁾에 기술되어 있다.

일정한 열발생율의 화재가 발생하면 일정한 개수의 연기입자가 일정한 시간간격으로 화원에서 발생, 유동

장으로 고온공기와 함께 위로 올라간다. 약 5초 후에는 연기입자가 공간내에 어느 정도 채워지므로, 이 때 부터 제연설비를 가동한다. 제연설비의 풍량은 급기구(급배기방식과 급기방식) 또는 배기구(급배기방식과 배기방식)에서 평균유속의 기준이 5 m/s 이내임을 고려하여 연기입자의 이동을 비교하기 쉽도록 2 m/s로 하였다. 이 값에 급배기구의 면적을 곱한 값인 0.4 m³/s를 본 연구의 풍량으로 선정하였다. 공간 내에 각 제연방식에 따라 Fig. 1의 두 수직축 a-b(x = 0.75 m)와 c-d(x = 2.25 m)의 평균온도, 입자를 이용한 연기의 이동, 시간에 따른 공간 내 입자수의 변화 등을 비교하였다.

3. 결과 및 토의

화재가 발생하면 화염이 위로 올라가고 연기도 부력에 의해 공기와 함께 상승하여 천장을 따라 이동한다.

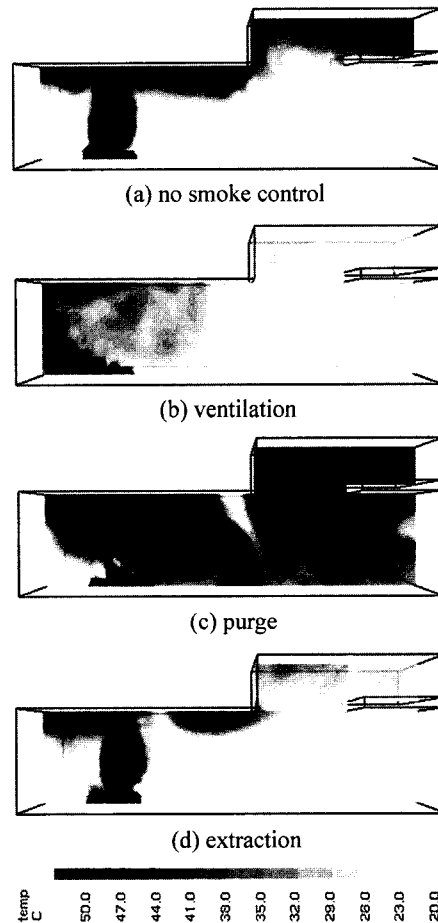


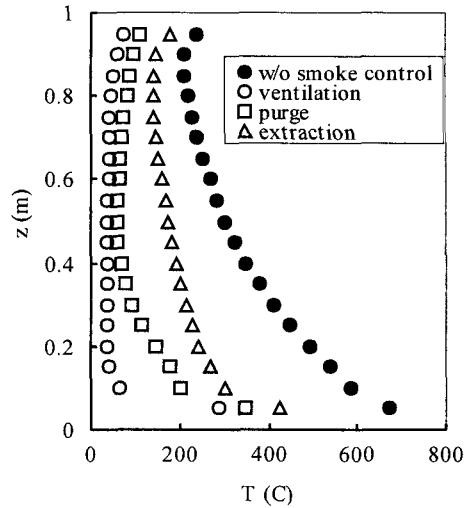
Fig. 2. Temperature distribution at t=25 sec (y=0.5 m)

연기는 고온의 공기와 함께 승강장 좌우의 개구부로 배출되고, 출입계단의 상부에 해당하는 개구부를 거쳐 2층의 출입통로를 따라 배출된다(Fig. 1참조).

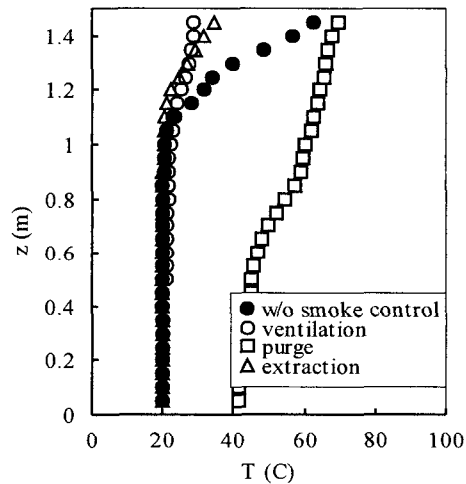
Fig. 2는 $t = 25$ sec일 때 공간 내 y 축 중앙 평면 ($y = 0.5$ m)의 온도분포를 나타낸 그림으로, 가시효과를 높이기 위해 편의상 50°C 이상인 곳을 검정색으로 표시하였다. (a)는 제연설비가 없는 경우(자연제연)이고, (b)~(d)는 세가지 방식의 제연설비를 가동하여 $t = 25$ sec일 때 온도분포를 나타낸 것이다. 제연설비가 없는 경우(Fig. 2a)에는 고온의 공기가 자연대류에 의해 천 공간의 천장에 퍼져 있다. 대피로인 오른쪽 위 출입통로에는 바닥까지 50°C 이상의 공기가 흐름을 알 수 있다. 급배기방식인 경우(Fig. 2b)에는 급기로 고온의 공기가 화원의 오른쪽으로 이동하는 것이 차단되고 배기구를 통해 밖으로 배출됨에 따라 승강장의 왼쪽을 제외하고는 고온의 공기가 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 급기방식(Fig. 2c)에서는 급기구를 통해 유입된 공기가 고온의 공기와 혼합되어 공간 전체의 온도가 높음을 볼 수 있다. 제연설비를 사용하지 않는 자연배기방식(Fig. 2a)이 오히려 급기방식보다 대피로 확보에 훨씬 더 유리함을 알 수 있다. 한편, 배기방식(Fig. 2d)에서는 2층 출입통로의 온도가 급배기방식보다는 조금 더 높지만 고온의 공기가 2층 출입통로로 흐르는 것이 차단되어 제연효과를 뚜렷이 보여주고 있다.

Fig. 3은 a-b선과 c-d선(Fig. 1참조)의 평균온도를 비교한 그림이다. 평균온도는 연기입자수가 거의 준평형 상태를 유지(뒤의 Fig. 5 참조)하는 $t = 15 \sim 25$ sec 사이의 온도로부터 구하였다. 화원의 중심을 지나는 a-b선의 승강장 온도(Fig. 3a)는 제연방식에 따라 상당히 다르게 분포되어 있다. 급기구와 배기구의 공기흐름에 따라 수직축의 온도분포에 상당히 차이가 있음을 알 수 있다. 제연설비가 없는 자연제연의 경우에는 제연설비가 있는 경우에 비해 화염기둥(fire plume)이 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 급기방식의 화원 중앙을 지나는 수직축의 온도는 급배기방식보다 더 높고, 배기방식의 온도는 급기방식보다 더 높게 나타나 있다.

Fig. 3b에는 1, 2층 사이 개구부(승강장 출입계단의 상부에 해당)의 중앙인 c-d선($x = 2.25$ m, $y = 0.5$ m)의 평균온도분포가 나타나 있다. 1층 승강장($z \leq 1.0$ m)에는 급기방식을 제외한 급배기방식과 배기방식, 제연설비가 없는 경우 모두 외기온도(20°C)와 거의 같다 그



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



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

Fig. 3. Comparison of vertical temperature distribution averaged over $t=15 \sim 25$ sec ($y=0.5$ m).

려나 출입통로($1.0 \text{ m} < z < 1.5 \text{ m}$)에서는 제연설비가 없는 자연제연의 경우에 온도가 천장에 가까울수록 높아지는 반면에 급배기방식과 배기방식은 천장의 온도가 약 30°C 가 된다. 한편, 급기방식에서는 급기구를 통해 유입된 외부공기가 천장부근을 흐르던 고온의 연소공기와 혼합됨에 따라 승강장과 출입통로의 온도가 높아 $40 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 로 분포되어 있다. 급기방식에서의 공기의 온도가 자연제연방식보다 더 높게 나타나 있다. 공간 내 연기입자수의 변화를 나타낸 Fig. 5에서 $t = 25$ sec에서도 입자수가 증가하고 있기 때문에, 급기방식의 평균온도는 시간의 경과에 따라 더 상승할 것이다.

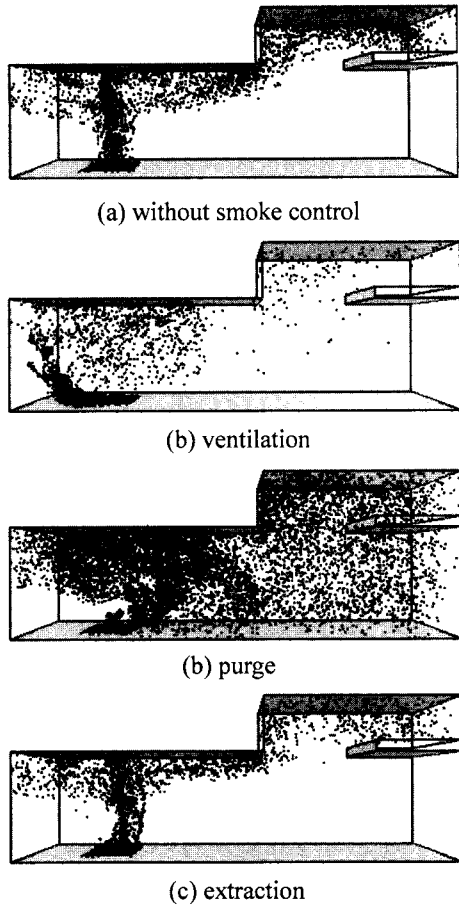


Fig. 4. Smoke particle distribution at t=25 sec.

제연방식에 따른 t = 25 sec에서의 공간 내 연기의 분포가 Fig. 4에 나타나 있다. 제연설비가 없는 자연제연의 경우(Fig. 4a)에는 연기의 일부는 왼쪽 개구부로 나가고 오른쪽 출입계단 개구부와 2층 출입통로를 통해 배출된다. 승강장의 오른쪽 개구부로는 연기가 전혀 나가지 않음을 볼 수 있다. 급배기방식의 경우(Fig. 4b)에는 급기구를 통해 0.4 m³/s로 유입하는 공기가 출입통로로 흐르는 연기를 차단하고, 동시에 배기구로 0.4 m³/s로 연기가 배출됨으로써 오른쪽 승강장과 출입통로에는 연기가 현저히 줄어들어 제연성능이 양호함을 알 수 있다. 그러나 급기방식(Fig. 4c)에서는 급기구에서 유입된 공기가 연기와 혼합하여 2층 출입통로뿐만 아니라 1층 승강장까지 연기가 차게 되어 제연설비가 없는 경우보다 오히려 악화되어있다. 이 공기와 연기층의 혼합이 앞의 Fig. 2c에서와 같이 공간 전체의 온도상승을 초래하여 연기뿐만 아니라 고온의

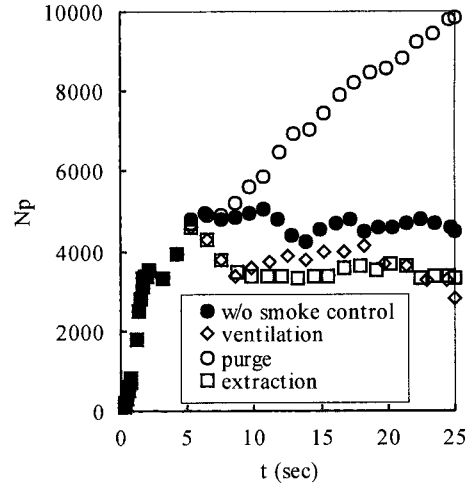


Fig. 5. Comparison of the variation of the number of smoke particles with time.

공기로 인해 피난이 곤란하게 된다. 그러므로 지하철역과 같은 구조에서는 제연성능이 떨어져 적합하지 않음을 알 수 있다. 한편, 배기방식(Fig. 4d)은 연기의 배출로 오른쪽 위 출입통로에 연기가 감소한 것으로 나타났다. 위의 Fig. 5에서 알 수 있듯이 시간이 흐를수록 입자수가 점차 감소하는 것으로 나타났다.

공간 내 전체의 연기 입자수의 시간에 따른 변화를 Fig. 5에 비교하였다. 제연설비가 없는 경우에는 연기가 개구부로 배출되면서 화재발생 약 5초 이후부터 공간내 입자수가 준정상상태를 유지하고 있다. 급배기방식의 경우와 급기방식에서도 t~10 sec부터 입자수의 변화가 크지 않다. 그러나 급배기방식의 경우에는 입자수가 더 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러므로 급배기방식의 제연설비를 더 긴 시간동안 가동한다면 Fig. 4b에 나타난 출입통로와 오른쪽 승강장의 연기도 모두 배출될 것으로 판단된다. 이에 비해 급기방식에서는 연기 입자수가 거의 선형적으로 증가하여 t = 25 sec에서는 10000개 정도가 된다. 제연효과가 거의 나타나지 않으며, 제연설비를 가동한지 20초(화재발생 후 25초)가 지나도 제연이 효과적으로 이루어지지 않고, 급기방식보다 오히려 자연제연방식에서 연기가 더 잘 배출됨을 알 수 있다. 이것은 급기방식에서는 유입된 공기가 연기입자와 혼합되므로 연기를 배출하는데 시간이 걸리지만, 자연제연방식에서는 부력에 의해 연기입자가 천장을 따라 개구부로 빠져나가기 때문이다.

이상에서 온도분포와 연기입자의 배출을 비교한 결과, 급기방식의 제연성능이 낮은 것으로 나타났다. 앞

에서 언급한 바와 같이 지하철 역에서 화재가 발생했을 때 화원의 위치와 급기구 및 배기구의 위치가 제연 성능에 큰 영향을 미칠 수 있지만, 급기방식은 지하철 역과 같은 장소에 적합하지 않음을 알 수 있다. Fig. 1 보다 훨씬 더 큰 공간에서 화재크기가 50 kW의 4배인 200 kW일 때 다양한 풍량을 적용한 예비 조사에서도 본 연구와 비슷한 결과를 얻었다. 그러므로 지하철 역과 같이 큰 개구부가 있는 공간에서는 급기방식 제연설비를 배기방식으로 전환해야 하며, 특히 질식의 우려가 높은 공간에서는 급배기방식이 배기방식에 비해 더 안전하다. 이와 관련하여 실제 지하철역에 적합한 규모의 화재크기와 풍량, 공간 각 부분의 실제 치수와 급배기구의 위치를 기준으로하여 화재와 제연 성능에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

4. 결 론

지하철 역과 유사한 4 m×1 m×1.5 m 크기의 축소 공간에 50 kW의 폴리우레탄 화재가 발생하고 풍량 0.4 m³/s의 제연방식이 가동될 때 제연방식에 따른 연기의 이동과 온도분포를 대와류모사로 조사한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 주어진 조건에서 급배기방식의 제연성능이 가장 우수하였다.
- (2) 배기방식은 급배기방식에 비해 제연성능이 약간 떨어지지만 제연효과가 뚜렷이 나타났다.
- (3) 급기방식은 다른 제연방식에 비해 제연성능이 낮음을 확인하였다.
- (4) 지하철역의 기존 급기방식의 제연설비를 배기방식으로 전환하거나, 급배기방식으로 개선하는 것이 바람직하다.

기호설명

- c_p : 정압비열
- D : 확산계수
- g : 중력가속도, 9.81 m/s²
- h : 엔탈피
- M : 분자량
- N_p : 연기입자의 개수
- p : 압력
- Q : 단위체적당 열발생율
- q_r : 단위면적당 복사열전달률

- R : 기체상수
- s : $v_o M_o / v_F M_F$
- S_c : Smagorinsky 상수, 0.2
- T : 온도
- t : 시간
- u : 속도
- w : 단위체적당 화학종 생성률
- Y : 질량분율
- Z : 혼합분율(mixture fraction)
- Δ : 격자 크기
- δ_{ij} : Kronecker delta
- Φ : 점성소산합수
- μ : 절대점성계수?
- ν : 화학양론계수(stoichiometric coefficient)
- λ : 열전도계수
- ρ : 밀도
- τ : 전단응력

아래첨자

- O : 산소
- F : 가연성 가스
- ∞ : 외기

참고문헌

1. 박외철, "제연방식과 풍량에 따른 제연의 수치적 연구", 한국화재소방학회 논문지, 제17권, 제2호, pp.56-61 (2003).
2. J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations - I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review, Vol. 91, pp.99-164(1963).
3. 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).
4. G. D. Raithby and E. H. Chui, "A Finite-Volume Method for Predicting Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media", J. Heat Transfer, Vol. 112, No. 2, pp. 415-423(1990).
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.