

대구 지하철역 제연의 문제점과 대책 I. 제연방식

A Numerical Simulation of Smoke Control in Daegu Subway Stations I. Smoke Control System

박 외 철[†]

Woe-Chul Park[†]

부경대학교 공과대학 안전공학과
(2003. 9. 29. 접수/2003. 12. 9. 채택)

요 약

대구 지하철역 제연의 문제점과 그 대책을 조사하기 위해 지하철역 승강장 계단 주위 10 m×3 m×5.4 m의 공간에서의 제연을 FDS로 모사하였다. 200 kW의 폴리우레탄 화재와 각 급기구와 배기구의 공기유량 0.9 m³/s에 대한 급기방식의 제연성능을 온도와 연기입자의 분포로 조사한 결과, 급기방식은 제연효과가 거의 없어 연기를 신속하게 배출하지 못함을 알 수 있었다. 또 세가지 기계제연방식 중에서 배기방식의 제연성능이 가장 우수하므로, 급기방식을 단순히 배기방식으로 전환함으로써 제연성능을 대폭 개선할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

Smoke control in a space 10 m×3 m floor and 5.4 m high around the stairway of a subway station platform was simulated by using FDS to investigate problems of smoke control in Daegu subway stations. Distributions of temperature and smoke particles, and variation of the number of particles with time for a 200 kW polyurethane fire were compared. It was shown that the purge system fails to remove smoke efficiently and that the extraction system has the highest performance among the three smoke control systems for the given situations. Simply switching the purge system into extraction mode might improve much the smoke removal performance.

Keywords : Subway station fire, Smoke control systems, Large eddy simulation, Computational fluid dynamics

1. 서 론

2003년 2월18일 192명이 사망한 대구 지하철 중앙로 역 화재에서 제연이 충분히 이루어지지 않은 것으로 밝혀졌다. 화재가 발생했을 때 환기시스템이 연기를 외부로 배출하는 배풍기로 전환되지 않고 급기방식으로 운전되었다. 그러므로 지하철역과 같이 여러개의 대형 개구부가 있는 장소에서 급기방식으로는 연기를 신속히 배출할 수 없었던 것으로 추정할 수 있다. 급기방식의 제연설비가 지하철역에서 연기를 효과적으로

배출할 수 있는지를 조사하고 그 대책을 강구할 필요가 있다.

지하철역은 규모가 커서 실물 화재실험을 수행하기가 곤란한 반면에, 컴퓨터와 전산유체역학의 발달에 따라 최근에는 전산유체역학을 이용한 지하철역, 터널, 지하공간 등의 화재와 연기가동에 대한 연구가 증가하고 있다. 전산유체역학 코드 중에서 화재모사용으로 개발된 Fire Dynamics Simulator(FDS)¹⁾는 입출력이 비교적 간단하고 해의 불안정성과 같은 문제가 없어 국내에서도 흔히 사용되고 있다. 박외철²⁾은 FDS를 이용하여 크기 4 m×1 m×1.5 m의 공간에 50 kW의 폴리우레탄 화재가 발생했을 때 급기방식의 제연설비는

[†] E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

제연효과가 거의 없음을 밝혔으나, 공간의 크기와 구조가 실제 지하철역과 가까운 조건에서 이를 확인할 필요가 있다. 이동호와 유지오³⁾는 180 m×30 m×6 m의 지하철역에서 1량의 전동차에 발생한 20 MW의 화재에 FDS를 적용하였다. 그러나 이 연구에서는 격자 크기가 지나치게 클 뿐만 아니라 가연성물질을 정의하지 않았다. FDS에서는 프로판가스가 기본 가연성물질이므로, 가연성물질을 정의하지 않으면 속도와 온도의 분포, 연기농도 등 모든 계산결과는 프로판가스의 연소 결과가 된다.

본 연구의 목적은 전산유체역학을 이용하여 대구 지하철역에서 제연설비가 연기를 효과적으로 배출하지 못한 원인을 규명하고 이를 개선하기 위한 대책을 제시하는 것이다. 이를 위해 먼저 예비계산을 통해 연기의 이동을 비교하는 데 적합하도록 200 kW의 폴리우레탄 화재를 설정하였다. 화재가 지하철역의 구조와 유사한 10 m×3 m×5.4 m 크기의 부분을 대상으로 하여 승강장에 화재가 발생했을 때, 계단 주위와 2층 출입통로에서의 온도와 연기입자의 분포를 비교함으로써 기존 제연방식인 급기방식의 문제점을 조사하였다. 또 이를 개선하기 위해 급기방식과 급배기방식, 배기방식의 세 가지 기계제연방식의 제연성능을 비교하여 가장 적합한 제연방식을 제시하였다. 한편, 화재규모가 200 kW의 10배인 2 MW에서 대피로의 온도를 NFPA 규정에 맞도록 유지하기 위한 풍량을 조사하였다. I부에는 기존 제연방식의 제연성능 조사와 적합한 제연방식을 제시하기 위한 비교결과를 기술하였고, II부에서는 화재크기가 2 MW일 때 I부에서 제시된 제연방식의 풍량에 따른 제연성능을 기술하였다.

2. 수치모사 방법

지하철역이나 대형 건축물에서의 화재와 연기거동에 관한 수치적 연구는 특별한 경우가 아니면 컴퓨터 기억용량과 계산시간을 줄이고 상세한 정보를 얻기 위해 화재 또는 대피에 취약한 부분을 대상으로 하는 것이 바람직하다. 본 연구는 제연설비의 제연성능을 조사하

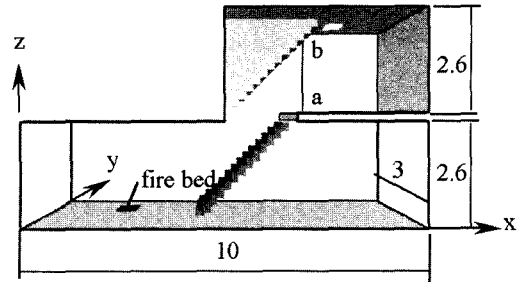


Fig. 1. Computational domain (dimensions in m).

는 것이므로, 계산시간과 격자크기에 따른 수치오차를 줄이고, 대피로인 승강장 계단 주위의 연기거동을 중점적으로 조사하기 위해 승강장 계단을 포함한 지하철역의 일부분을 대상으로 하였다. 계산영역은 Fig. 1과 같이 1층 승강장과 2층 출입통로, 그리고 계단으로 구성된 바닥면적 10 m×3 m, 높이 5.4 m의 공간으로 계산영역을 한정하였다. 1층 승강장은 10 m×3 m×2.6 m의 크기로 좌우 양쪽이 모두 대기와 접하며, 2층 출입통로의 크기는 4 m×3 m×2.6 m이다. 화원이 계단의 왼쪽에 위치하고 급배기구가 모두 천장에 있어 계단의 경사도는 연기배출에 큰 영향을 미치지 않으므로, 계단의 경사각을 편의상 실제보다 약간 더 큰 45°로 하였다. 계단의 폭은 1.8 m(1.2≤y≤3 m)로 하였다. 1층의 y=0 평면은 전동차 선로에 접하므로 개구부로 취급하였다. 세 가지 기계제연방식의 급기구와 배기구의 중심위치와 개구부의 위치는 Table 1과 같다. 급배기방식의 경우에는 급기구와 배기구를 1층과 2층에 각각 1개씩 두었고, 급기방식에서는 배기구가, 배기방식에서는 급기구가 없는 것으로 하였다. 실제 지하철역에는 개표구가 설치되어있는 2층에 지상까지 계단이 있거나 지하상가로 연결되어있지만, 본 연구에서는 계단이나 지하상가가 단척있는 최악의 경우로 설정하였다. 이에 따라 2층의 오른쪽 끝 x=10 m, z>2.6 m의 수직평면은 벽면으로 가정하였다.

소방기술기준에 관한 규칙에는 급기구를 바닥으로부터 1.5 m 이하의 높이에 설치하도록 되어있으나, 대구

Table 1. Locations of inlets, outlets and openings in m

	Ventilation system	Purge system	Extraction system
Centers of inlets	(4.25,2.1,2.6), (9.25,2.1,5.4)	(4.25, 2.1,2.6), (9.25, 2.1,5.4)	N/A
Centers of outlets	(3.25,2.1,2.6), (8.25,2.1,5.4)	N/A	(3.25,2.1,2.6), (8.25,2.1,5.4)
Openings	plane of x=0 plane of y=0, z≤2.6 plane of x=10, z≤2.6		

지하철역에는 급기구가 천장에 설치되어 있어 본 연구에서도 급기구를 천장에 두었다. 급기구와 배기구의 크기는 모두 0.5 m×0.6 m로 하였다.

급기구와 배기구에서의 풍량은 평균유속을 5 m/s 이하로 설정함을 고려하여 편의상 3 m/s로 하였다. 풍량은 급배기구의 면적에 평균유속을 곱한 값이므로, 평균유속 3 m/s는 급기구 또는 배기구 1개의 풍량 0.9 m³/s 또는 3240 m³/h에 해당한다. 모든 벽과 유입 공기의 온도를 20°C로 가정하였다.

이 경우 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식, 화학종방정식은 각각 다음과 같다.

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

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

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

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

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, u 는 속도, p 는 압력, g 는 중력가속도(9.81 m/s²), τ 는 전단응력, h 는 엔탈피, Q 는 단위체적당 열발생율, λ 는 열전도계수, T 는 온도, q_r 는 단위면적당 복사 열전달률, Y 는 화학종의 질량분율, D 는 확산계수, w 는 단위체적당 화학종 생성률을 나타낸다. Dp/Dt 는 시간에 대한 입력의 물질도함수이다.

이 편미분방정식의 해는 미국 표준기술연구소의 Fire Dynamics Simulator(FDS)¹⁾ v3.1.0으로 구하였다. 난류 유동장과 연소, 복사열전달에 각각 FDS에 기본으로 포함되어 있는 대와류모사(large eddy simulation)⁴⁾와 혼합분을 연소모델,⁵⁾ 복사 유한체적법⁶⁾을 사용하였다. 수치법 관련 상수와 기체의 물성치도 FDS의 기본값을 그대로 사용하였다.

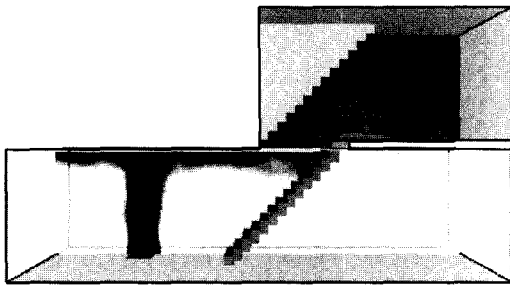
실험실 화재가 아닌 실제 실내화재를 정확하게 모사하는 것은 대단히 어렵다. 실내화재의 성장과 감쇠가 시간에 따라 어떻게 진행되었는가를 아는 경우가 거의 없기 때문이다. 만일 지하철역에서 전동차 1량의 한 부분에서 화재가 발생하여 다른 전동차로 전파되며 결국 지하철역 내장재의 연소로까지 이어지는 화재 시나리오를 설정한다면 시간에 따른 화재크기와 화원의 형태

및 크기의 변화 등 대단히 복잡한 과정을 입력해야 한다. 화재 시나리오를 어떻게 설정하느냐에 따라 그 결과가 달라지며, 화재 성장과정을 알 수 없는 대구 지하철역 화재를 정확하게 모사한다는 것은 사실상 불가능하다. 다행히 본 연구에서는 제연방식에 따른 제연의 성능을 비교하므로, 실제 화재의 진행과정이나 화재크기와 관계없이 시나리오를 설정할 수 있다. 그러므로 예비계산을 통해 연기이동의 비교에 적합하도록 화재크기를 200 kW로 설정하였고, 화재발생순간($t=0$ s)부터 계산종료($t=50$ s)까지 일정한 열발생률 200 kW로 연소가 진행되는 것으로 가정하였다. 한편, FDS에는 가연성물질의 분자량과 연소방정식을 입력하거나 FDS database에 포함되어있는 가연성물질을 입력해야 한다. 혼합분을 연소모델에서의 열발생과 열전달, 연기 발생 등이 가연성물질에 따라 다르고, 연소 생성물의 물성치가 다르기 때문이다. 본 연구에서는 FDS database에 정의되어 있는 가연성물질 중에서 폴리우레탄을 선정함으로써 분자량과 연소방정식의 입력이 필요하지 않도록 하였다. 화원의 바닥면적을 0.6 m×0.6 m, 화원의 중심 위치를 (2.1, 2.1, 0.0 m)로 하였다. 격자의 크기는 x, y, z 방향 모두 균일하게 0.1 m로 잡아 격자수를 100×30×54로 하였다.

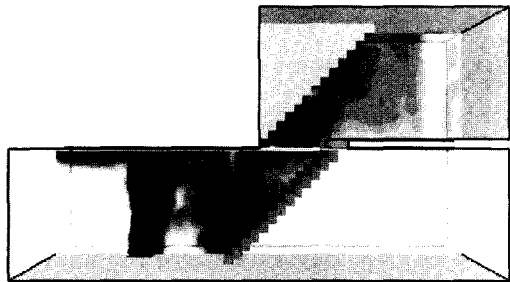
제연설비가 없는 경우에 화재 발생 후 약 2.7초($t=2.7$ s)가 되면 연기입자가 개구부를 통해 밖으로 배출되며, 이후 $t \sim 5$ s부터 다시 연기입자수가 거의 시간에 비례하여 증가함을 예비계산에서 확인하였다(Fig. 7 참조). 이에 따라 공간내 연기입자의 분포와 시간에 따른 연기입자의 감소율을 비교할 수 있도록 $t=10$ s에 제연설비가 가동되도록 설정하였다. 또 배기방식의 연기입자수가 $t>20$ s일 때 거의 일정하게 유지되므로, 계산종료시간을 50 s로 하고 평균온도는 $t=25 \sim 50$ s에서 구하였다. 제연방식에 따라 공간내 온도와 연기입자의 분포, 연기입자수의 변화를 비교하였다. 계단의 오른쪽 끝부분인 $x=7.0$ m, $y=2.1$ m에 위치한 수직축 a-b(Fig. 1 참조)에서의 평균온도도 비교하였다.

3. 결과 및 토의

화재가 발생하면 자연대류에 의해 고온공기와 연기가 위로 올라가 천장을 따라 이동한다. 연기의 일부는 개구부로 배출되고, 나머지는 계단의 상부를 거쳐 2층으로 올라가게 된다. Fig. 2는 화재발생 후 50초($t=50$ s)일 때 공간내 $y=2.1$ m인 평면의 온도분포를 나타낸 그림이다. 편의상 50°C 이상인 곳을 점검색으로 표시하였다. 제연설비가 없는 경우(Fig. 2a)에는 고온공



(a) Without smoke control



(b) Purge

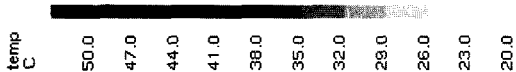
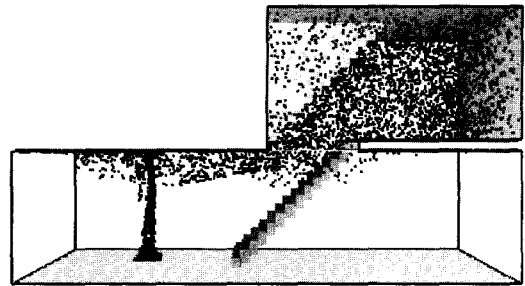


Fig. 2. Temperature distribution at t=50 s (y = 2.1 m).

기가 천장을 따라 이동하여 2층 공간의 온도가 높게 나타났다. 이에 비해 1층과 2층의 천장에 각각 1개씩 설치된 급기구에서 급기구당 풍량 0.9 m³/s(또는 3240 m³/h)의 공기가 유입되는 급기방식(Fig. 2b)의 경우에 2층 공간의 온도는 제연설비가 없는 경우보다 낮지만 급기구를 통해 유입된 공기가 고온공기와 혼합되면서 아래로 흘러 계단위의 온도는 더 높게 나타났다. 따라서 급기방식의 경우에 오히려 제연설비가 없는 경우보다 대피가 더 곤란함을 알 수 있다.

Fig. 3에는 화재발생 후 50초가 되었을 때 공간내 연기입자의 분포를 비교하였다. 제연설비가 없는 경우(Fig. 3a)에는 연기의 일부가 왼쪽 개구부로 나가고 나머지는 계단을 따라 올라가 2층에 차 있고, 계단의 아래부분에는 연기입자가 없다. 그러나 급기방식의 경우(Fig. 3b)에는 제연설비가 없는 경우에 비해 2층에는 연기입자가 적으나, 계단 전체에 오히려 더 많은 연기입자가 있음을 볼 수 있다. 이 때 공간내 연기입자의 수는 제연설비가 없는 경우에 6893개, 급기방식의 경우에 6986개였다. 연기입자의 분포는 Fig. 2의 온도분포와 함께 급기방식의 제연효과가 거의 없음을 나타내고 있다. 이것은 공간내 연기를 포함한 공기가 급기량



(a) Without smoke control



(b) Purge

Fig. 3. Smoke particle distribution at t=50 s.

만큼 개구부를 통해 배출되지만, 배출되는 공기 중의 연기는 급기량에 비해 아주 적고, 급기풍량이 대폭 증가하더라도 제연효과가 그만큼 개선될 수 없음을 의미한다. 지하철역과 같이 큰 개구부가 있는 공간, 특히 천장을 기준으로 할 때 개구부가 더 낮은 곳에 위치할수록 급기방식의 제연효과가 낮을 수 밖에 없다. 그러므로 대구 지하철역 화재에서 제연이 효과적으로 이루어지지 못한 것은 급기에도 불구하고 배출되는 연기의 양은 적었기 때문임을 알 수 있다.

급기방식의 제연성능이 아주 낮은 것은 계단이 없는 작은 공간의 50 kW 화재²⁾에 대한 연구결과와도 일치한다. 급기방식으로는 연기를 신속하게 배출할 수 없으므로 다른 제연방식으로 전환해야한다. Fig. 4는 급기방식과 급배기방식, 배기방식의 세가지 기계제연방식의 각 급기구와 배기구의 풍량을 0.9 m³/s(3240 m³/h)로 일정하게 유지할 때 t=50 s에서 온도분포를 비교한 그림이다. 계단의 온도가 높게 나타난 급기방식(Fig. 4a)에 비해, 급배기방식의 경우(Fig. 4b)에는 고온공기가 배출되고 찬 외부공기가 유입됨에 따라 계단과 2층의 온도가 현저히 감소하였다. 한편, 배기방식(Fig. 4c)에서는 급기없이 고온의 공기가 배출됨으로써 제연효과가 더욱 뚜렷이 나타났다. 계단과 2층의 온도분포로부터 세가지 기계제연방식 중에서 배기방식이 가장

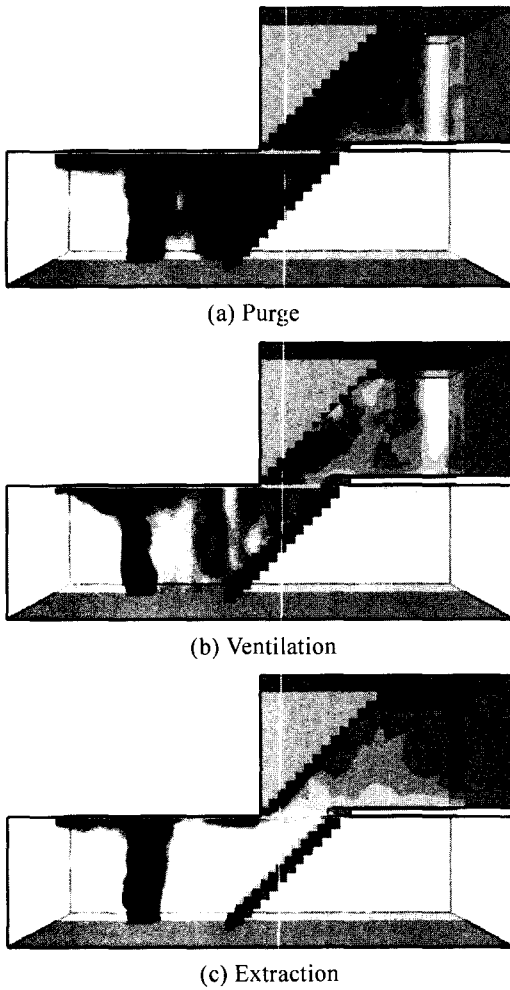


Fig. 4. Temperature distribution at $t=50$ s ($y=2.1$ m).

우수함을 알 수 있다.

공간내 온도분포보다 연기입자의 분포를 통해 제연 성능을 더 명확히 확인할 수 있다. Fig. 5에는 $t=50$ s 일 때 연기입자의 분포를 비교하였다. 급기방식의 경우(Fig. 5a)에는 많은 연기입자가 계단 전체와 2층에 분포되어있다. 급배기방식(Fig. 5b)에서는 급기방식에 비해 연기입자수가 줄었고, 배기방식(Fig. 5c)에서는 연기입자수가 현저히 감소하였다. 급기방식의 공간내 연기입자수는 6986개(Fig. 3에서 제연설비가 없는 경우 6893개)인데 비해, 급배기방식과 배기방식은 각각 5961개, 4205개였다. 연기입자의 분포로부터 급기방식은 다

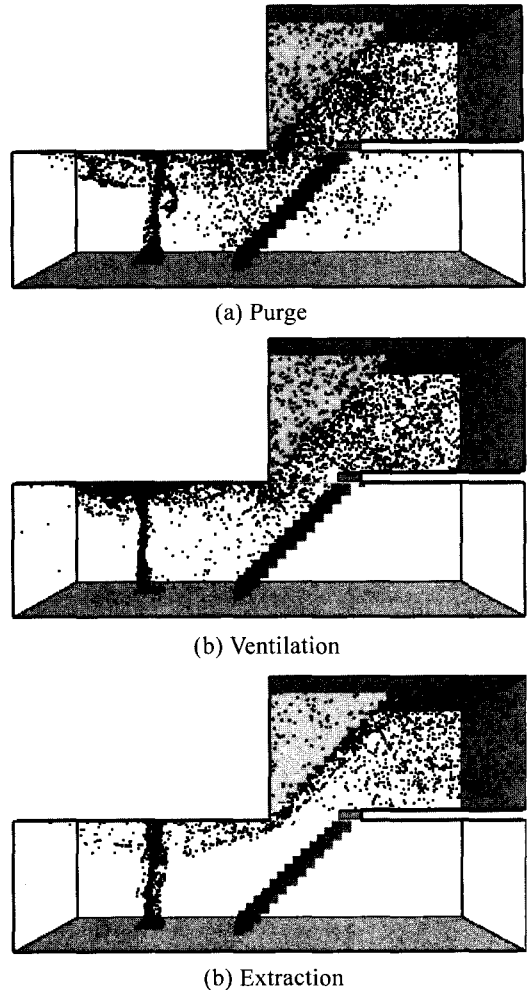


Fig. 5. Smoke particle distribution at $t=50$ s.

른 제연방식에 비해 제연성능이 떨어지며, 배기방식의 제연성능이 가장 높음을 알 수 있고, 이것은 Fig. 4의 온도분포의 결과와 일치한다.

Fig. 6은 대피로인 계단의 오른쪽 끝($x=7.0$ m)의 중앙($y=2.1$ m)에서 $t=25\sim 50$ s의 평균온도분포를 비교한 그림이다. 배기방식의 경우 $t>20$ s 일 때 연기입자수가 거의 일정하게 유지되므로(Fig. 7참조) 평균온도 계산구간을 $25\sim 50$ s로 하였다 $z=2.8$ m는 2층 바닥, $z=4.8$ m는 계단 위 천장에 해당한다. 전체적으로 제연설비가 없는 경우의 온도가 가장 높고, 배기방식이 가장 낮다. 천장 부근에서는 배기방식의 온도가 급배기방식과 급기방식에 비해 조금 더 높은 것은 고온공기의 배기로 인한 것이다. 급기방식의 최고온도가 $z=3.8$ m 부근에 나타난 것과 천장에서 급배기방식의 온

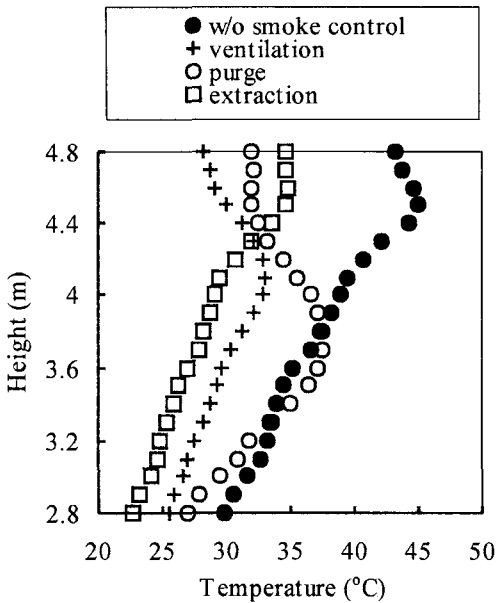


Fig. 6. Comparison of temperature distribution along the vertical line a-b averaged over $t=25\sim50$ s ($x=7.0$ m, $y=2.1$ m).

도가 가장 낮은 것은 급기로 인한 것이다. 자연제연방식의 경우 $z>4.4$ m에서 천장에 가까울수록 온도가 낮아지는 것은 천장과 계단위 경사진 천장이 만나는 지점의 재순환이 원인을 속도벡터로 확인하였다. 이 결과에서도 세가지 기계제연방식 중에서 급기방식이 가장 불리하며 배기방식이 가장 바람직함을 알 수 있다.

공간내 연기입자수의 변화를 Fig. 7에 비교하였다. 제연설비가 없는 경우에 초기의 연기입자수가 거의 시간에 비례하여 증가한다. 그러나 화재발생 후 약 2.7초가 되면 연기입자들이 개구부를 통해 외부로 빠져나가기 시작하여 입자수가 일시적으로 감소했다가 $t=5$ s부터 계산종료시간까지 계속 증가하였다. 본 연구에서 제연설비를 $t=10$ s에 가동한 것은 이 때문이다. 급기방식에서는 제연설비가 없는 경우와 비슷한 증가율을 나타내므로 급기방식은 제연효과가 거의 없음을 알 수 있다. 또 급배기방식에서는 $t=40$ s 이후부터 입자수의 증가율이 둔화되었다. $t=20\sim35$ 일 때 급기방식과 급배기방식의 입자수가 제연설비가 없는 경우보다 더 많은 것은 급기에 의한 공간내 유동의 불안정 때문으로 추측된다. 한편, 배기방식의 경우에는 $t=20$ s 이후 4000 개 내외를 유지하는 준정상상태(quasi-steady state)에 도달하였다. 이것은 유동장으로 투입되는 연기입자의 수가 개구부를 통해 배출되는 연기입자와 배기방식의

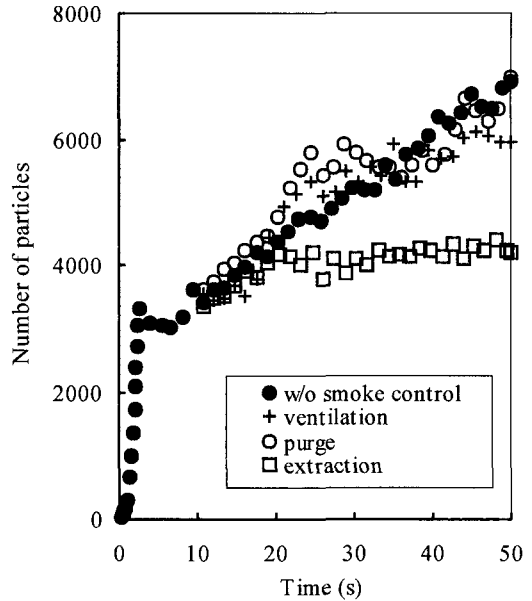


Fig. 7. Comparison of variation of the number of smoke particles with time.

제연설비에 의해 배출되는 연기입자의 수가 거의 균형을 이루고 있음을 의미한다. 연기입자수의 변화로부터 배기방식의 제연성능이 다른 제연방식에 비해 월등히 우수함을 알 수 있고, 앞의 Figs. 4~6의 결과와도 일치한다.

지금까지 공간내 온도와 연기입자의 분포, 계단 끝부분에서의 평균온도, 그리고 공간 내 연기입자수의 변화를 비교한 결과 급기방식은 제연효과가 거의 없어 연기를 신속하게 배출할 수 없음을 확인하였다. 급기방식을 급배기방식으로 전환하는 데는 배기구와 배기팬의 설치 등 추가 설비비가 많이 소요된다. 이에 비해 제연성능이 가장 우수한 것으로 나타난 배기방식으로 전환하려면 단순히 급기팬을 배기팬으로 전환하면 되므로 배기방식으로 바꾸는 것이 훨씬 더 경제적이다. 따라서 대구 지하철역과 부산 지하철 1호선 역의 기존 급기방식 제연설비를 배기방식으로 전환하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

대구 지하철역의 급기방식 제연의 문제점을 파악하고 대책을 강구하기 위해, 지하철역의 승강장과 계단, 출입통로를 포함한 $10\text{ m}\times 3\text{ m}\times 5.4\text{ m}$ 크기의 공간에 200 kW의 폴리우레탄 화재가 발생하였을 때 제연방식

에 따른 제연성능을 FDS로 조사하였다. 화재 발생 후 10초부터 제연설비에 따른 각 급기구와 배기구의 풍량을 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 유지하였다. 공간내 온도와 연기입자의 분포, 계단 상단의 평균온도 분포, 연기입자수의 변화를 조사한 결과, 급기방식 제연설비는 제연효과가 거의 없어 연기를 신속히 제거할 수 없음을 확인하였다. 또 주어진 조건에서 세가지 기계제연방식 중에서 배기방식의 제연성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러므로 급기방식을 배기방식으로 전환하면 제연성능을 대폭 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 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 V3, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A. (2002).
2. 박외철, "큰 개구부가 있는 공간의 화재와 제연의 대와 류모사", 한국화재소방학회 논문지, 제17권, 제3호, pp.000-000(2003).
3. 이동호, 유지오, "지하철 화재시 본선터널 환기시스템에 따른 열 및 연기배출특성", 한국화재소방학회 논문지, 제17권, 제2호, pp.62-69(2003).
4. J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations - I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review, Vol. 91, pp.99-164(1963).
5. 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).
6. 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).