

## 대구 지하철역 제연의 문제점과 대책

박외철

부경대학교 공과대학 안전공학과

### A Simulation of Smoke Control in Daegu Subway Stations

Woe-Chul Park

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

#### 1. 서론

2003년 192명이 사망한 대구 지하철 중앙로 역의 화재에서 제연이 충분히 이루어지지 못한 것으로 밝혀졌다. 대구 지하철역뿐만 아니라 부산 지하철 1호선 역에는 화재가 발생하면 평상시의 환기용 배기팬이 급기용으로 전환되는 급기방식의 제연설비가 설치되어있다. 유사한 사고에 대비하기 위해 급기방식 제연설비의 제연성능을 조사하고, 만일 연기를 신속하게 배출할 수 없다면 그 대책을 강구해야한다.

지하철역은 규모가 커서 실물 화재실험을 수행하기가 곤란한 반면에, 컴퓨터와 전산유체역학의 발달에 따라 수치모사를 이용한 지하철역이나 터널에서의 화재와 연기이동에 대한 연구가 증가하고 있다. 화재모사용으로 개발된 Fire Dynamics Simulator (FDS)<sup>1)</sup>는 입출력이 비교적 간단하고 해의 수렴과 안정성에 문제가 없어 국내에서도 흔히 사용되고 있다. 박외철<sup>2)</sup>은 FDS를 이용하여 크기 4 m × 1 m × 1.5 m의 공간에 50 kW의 폴리우레탄 화재가 발생했을 때 급기방식의 제연설비는 제연효과가 거의 없음을 밝혔으나, 공간의 크기와 구조가 실제 지하철역과 거의 같은 조건에서 이를 확인할 필요가 있다. 이동호와 유지오<sup>3)</sup>는 180 m × 30 m × 6 m의 지하철역에서 1량의 전동차에 발생한 20 MW의 화재에 FDS를 적용하였다. 그러나 이 연구에서는 격자크기가 지나치게 클 뿐만 아니라 가연성물질의 종류에 대한 언급이 없어 그 지정이 누락된 것으로 보인다. FDS에서 가연성물질을 지정하지 않으면 기본 가연성물질인 프로판가스의 연소가 된다. 같은 화재규모에서도 가연성물질이 다르면 연소에 소요되는 산소의 양이 달라 연소모델의 열 발생 예측이 전혀 다르게 되며, 연기를 포함한 연소생성물의 종류와 양, 그리고 이와 관련된 대류와 복사 열전달도 다르게 되므로, 입력에서 반드시 가연성물질의 종류를 지정해야한다.

본 연구의 목적은 FDS를 사용하여 대구 지하철역에서 연기를 효과적으로 배출하지 못한 원인을 조사하고 개선방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 예비계산을 통해 연기의 이동을 비교하는데 적합하도록 본 연구에서는 200 kW의 폴리우레탄 화재로 설정하였다. 화

재가 지하철역의 구조와 유사한 계단주위  $10\text{ m} \times 3\text{ m} \times 5.4\text{ m}$  크기의 부분을 대상으로 하였다. 승강장에 화재가 발생했을 때, 제연설비가 없는 경우와 급기방식의 제연설비가 설치된 경우에 공간내 온도와 연기입자의 분포를 비교하여 급기방식의 제연성능을 조사하였다. 또 급기방식과 급배기방식, 배기방식의 세 가지 기계제연방식의 제연성능을 비교하여 가장 우수한 제연방식을 제시하였다.

## 2. 수치모사방법

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 부산 지하철 1호선과 대구 지하철의 역에 설치된 제연설비의 제연성능 조사에 관한 것이므로, 격자크기에 따른 수치오차를 줄이고, 대피로인 승강장 계단 주위의 연기거동을 중점적으로 조사하기 위해 계단을 포함한 지하철역의 일부분을 대상으로 하였다. 계산영역은 Fig. 1과 같이 1층 승강장과 2층 출입통로, 그리고 계단으로 구성된 바닥면적  $10\text{ m} \times 3\text{ m}$ , 높이  $5.4\text{ m}$ 의 공간으로 계산영역을 한정하였다. 화원이 계단의 왼쪽에 위치하고 급배기구가 모두 천장에 있어 계단의 경사도는 연기배출에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 계단의 경사각을 편의상 실제보다 약간 더 큰  $45^\circ$ 로 하였다. 계단의 폭은  $1.8\text{ m}$  ( $1.2 < y < 3\text{ m}$ )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 없다. 실제 지하철역에는 개표구가 있는 2층에는 계단이 있거나 지하상가로 연결되어 있지만, 본 연구에서는 계단과 지하상가가 단절있는 최악의 경우로 설정하여, 2층의 측면을 모두 벽으로 가정하였다. 소방기술기준에 관한 규칙에는 급기구를 바닥으로부터  $1.5\text{ m}$  이하의 높이에 설치하도록 되어있으나, 부산 지하철 1호선 역과 대구 지하철역에는 급기구(평상시에는 배기구)가 천장에 설치되어 있어 본 연구에서도 급기구를 천장에 두었다. 급기구와 배기구의 크기는 모두  $0.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 로 하였다. 급기구와 배기구에서의 평균유속을 편의상  $3\text{ m/s}$ 로 하였다. 풍량은 급배기구의 면적에 평균유속을 곱한 값이므로, 평균유속  $3\text{ m/s}$ 는 급기구 또는 배기구 1개당 풍량  $0.9\text{ m}^3/\text{s}$  또는  $3240\text{ m}^3/\text{h}$ 에 해당한다. 모든 벽과 유입 공기의 온도를  $20^\circ\text{C}$ 로 가정하였다.

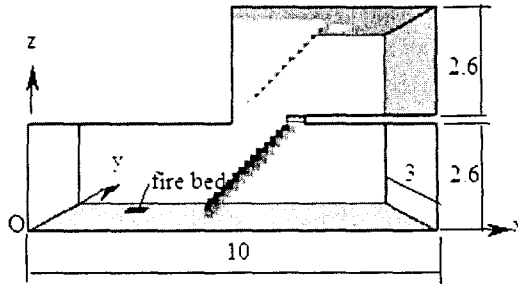


Fig. 1. Computational domain (dimensions in m).

Table 1. Locations of inlets, outlets and openings.

	ventilation system	purge system	extraction system
centers of inlets	(4.25,2.1,2.6 m), (9.25,2.1,5.4 m)	(4.25,2.1,2.6 m), (9.25,2.1,5.4 m)	N/A
centers of outlets	(3.25,2.1,2.6 m), (8.25,2.1,5.4 m)	N/A	(3.25,2.1,2.6 m), (8.25,2.1,5.4 m)
openings	plane of $x=0$ , plane of $y=0$ , $z<2.6$ m, plane of $x=10$ , $z<2.6$ m		

공간내 유속과 온도를 미국 표준기술연구소의 Fire Dynamics Simulator(FDS)1) v3.1으로 구하였다. 난류 유동장과 연소, 복사열전달에 각각 FDS에 기본으로 포함되어 있는 대와 류모사<sup>4)</sup>와 혼합분율 연소모델<sup>5)</sup>, 복사 유한체적법<sup>6)</sup>을 사용하였다. 수치법 관련 상수와 기체의 물성치도 FDS의 기본값을 그대로 사용하였다.

대구 지하철역 화재의 성장과정을 알 수 없기 때문에 이를 정확하게 모사하는 것은 불가능하다. 다행히 본 연구에서는 제연성능을 조사하므로, 실제 화재의 진행과정이나 화재 크기와 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 가연성 물질을 입력과일에 지정해야 한다. 혼합분율 연소모델에서의 열발생과 열전달, 연기발생 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  $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ , 화원의 중심 위치를 (2.1, 2.1, 0.0 m)로 하였다. 격자의 크기는 x, y, z방향 모두 균일하게 0.1 m로 잡아 격자수를  $100 \times 30 \times 54$ 로 하였다.

제연설비가 없는 경우에 화재 발생 후 약 2.7초가 되면 연기입자가 개구부를 통해 밖으로 배출되며,  $t=5$  s부터 다시 연기입자수가 거의 시간에 비례하여 증가함을 예비계산에서 확인하였다(Fig. 6 참조). 이에 따라 공간내 연기입자의 분포와 시간에 따른 연기입자의 감소율을 비교할 수 있도록  $t=10$  s일 때 제연설비가 가동되도록 설정하였다. 또 배기방식의 제연설비에서 연기입자수가  $t>20$  s일 때 거의 일정하게 유지되므로, 계산종료시간을

50 s로 하였다. 제연방식에 따라 공간내 온도와 연기입자의 분포, 연기입자수의 변화를 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 평면에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. 편의상 50°C 이상인 곳을 검정색으로 표시하였다. 제연설비가 없는 경우(Fig. 2a)에는 고온공기가 천장을 따라 이동하여 2층 공간의 온도가 높게 나타났다. 이에 비해 1층과 2층의 천장에 각각 1개씩 설치된 급기구에서 급기구당 풍량  $0.9$  m<sup>3</sup>/s(또는 3240 m<sup>3</sup>/h)의 공기가 유입되는 급기방식의 경우(Fig. 2b), 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.

급기방식의 이 문제점은 공간내 연기입자의 분포로도 확인할 수 있다. Fig. 3에는 화재발생 후 50초에서의 공간내 연기입자의 분포를 비교하였다. 제연설비가 없는 경우(Fig. 3a)에는 연기의 일부가 왼쪽 개구부로 나가고 나머지는 천장을 따라 올라가 2층에 차 있고, 계단의 아래 부분에는 연기입자가 없다. 그러나 급기방식의 경우(Fig. 3b)에는 제연설비가 없는 경우에 비해 2층에는 연기입자가 적으나, 계단 전체에 많은 연기입자가 있어 제연설비가 없는 경우보다 대피가 더 곤란함을 알 수 있다. 이 때 공간내 연기입자의 수는 제연설비가 없는 경우에 6893개였고, 급기방식의 경우에는 이보다 많은 6986개였다. 그러므로 연기입자의 분포는 Fig. 2의 온도분포와 함께 급기방식의 제연효과가 거의 없음을 나타내고 있다. 이것은 공간내 연기를 포함한 공기는 급기량만큼 개구부로 배출되지만, 배출되는 공기 중의 연기는 급기량에 비해 아주 적음을 의미한다. 또 본 연구에서 같이 2층 공간에 개구부가 없다면 연기입자는 대기 중으로 배출되는 것이 아니라 지하철역 양방향 본선 통로로 밀려나갈 뿐이다. 그러므로 급기풍량이 대폭 증가하더라도 급기방식으로는 제연효과가 개선될 수 없음을 알 수 있다. 지하철역이나 터널과 같이 양방향으로 큰 개구부가 있는 공간에서는 급기방식의 제연효과를 기대할 수 없다. 대구 지하철역 화재에서 제연이 효과적으로 이루어지지 못한 것은 급기에도 불구하고 배출되는 연기의 양은 적었기 때문임을 알 수 있다.

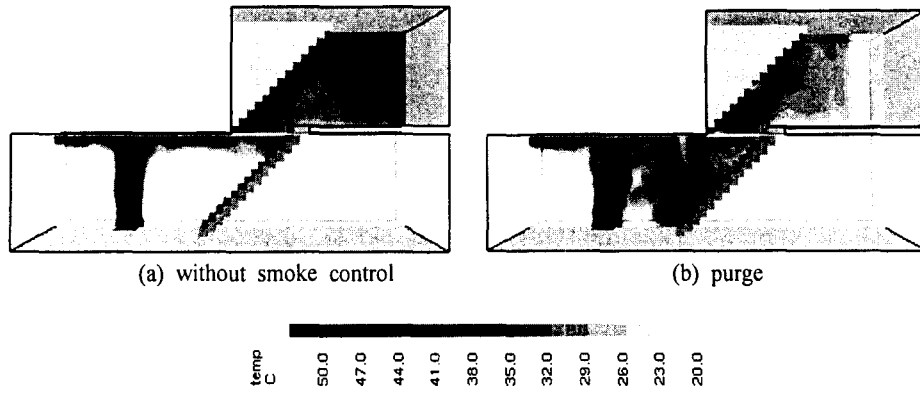


Fig. 2. Temperature distribution at  $t=50$  s ( $y=2.1$  m).

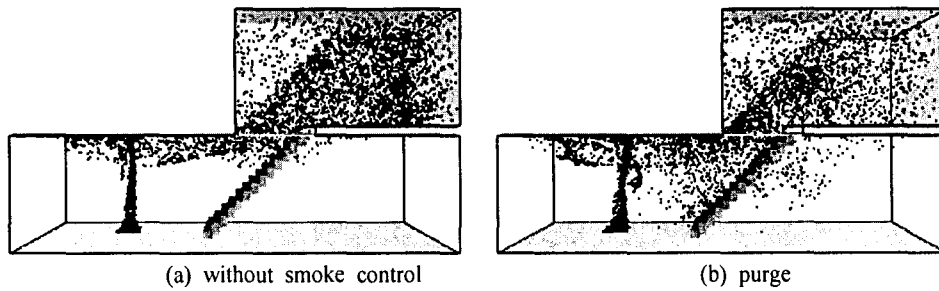


Fig. 3. Smoke particle distribution at  $t=50$  s.

급기방식의 제연성능이 아주 낮은 것은 계단이 없는 작은 공간의 50 kW 화재<sup>2)</sup>에 대한 연구결과와도 일치한다. 급기방식으로는 연기를 신속하게 배출할 수 없으므로 대구 지하철과 부산 지하철 1호선 역의 제연설비를 다른 제연방식으로 전환해야한다. Fig. 4는 급기방식과 급배기방식, 배기방식의 세가지 기계제연방식의 각 급기구와 배기구의 풍량을 0.9 m<sup>3</sup>/s(3240 m<sup>3</sup>/h)로 일정하게 유지할 때  $t=50$  s에서 온도분포를 비교한 그림이다. 급기방식(Fig. 4a)에 비해 급배기방식(Fig. 4b)에서는 고온공기가 배출되고 찬 외부공기가 유입됨에 따라 계단의 온도가 현저히 감소하였다. 배기방식(Fig. 4c)에서는 고온의 공기를 배출함으로써 제연효과가 더욱 뚜렷이 나타났다. 계단과 2층의 온도분포로부터 세 가지 기계제연방식 중에서 배기방식이 가장 우수함을 알 수 있다.

공간내 온도분포보다 연기입자의 분포를 통해 제연성능을 더 명확히 확인할 수 있다. Fig. 5에는  $t=50$  s일 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 6986개인데 비해 급배기방식과 배기방식은 각각 5961개, 4205개였다. 연기입자의 분포로부터 급기방식은 다른 제연방식에 비해 제연성능이 떨어지며, 배기방식의 제연성능이 가장 높음을 알 수 있고, 이것은 Fig. 4의 온도분포의 결과와 일치한다.

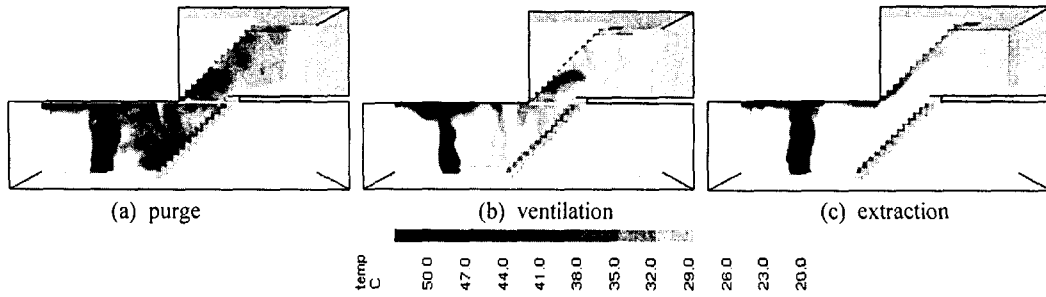


Fig. 4. Temperature distribution at  $t=50$  s ( $y=2.1$  m).

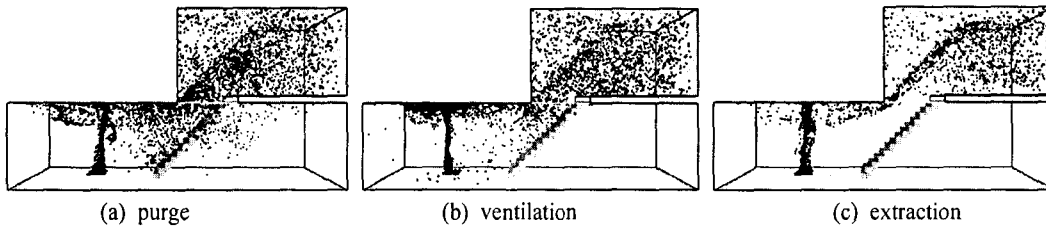


Fig. 5. Smoke particle distribution at  $t=50$  s.

시간에 따른 공간내 연기입자수의 변화를 Fig. 6에 비교하였다. 초기에 연기입자수가 급격히 증가하다가 화재발생 후 약 2.7초에 연기입자들이 개구부를 통해 외부로 빠져나가기 시작하여 입자수가 일시적으로 감소하였다. 제연설비가 없는 경우에는  $t=5$  s부터 계산 종료까지 계속 증가하였다.  $t=10$  s에서 급기방식의 제연설비를 가동해도 제연설비가 없는 경우와 비슷한 증가율을 나타내므로 제연효과가 거의 없음을 알 수 있다. 또 급배기방식에서는  $t=40$  s 이후에 입자수의 증가율이 둔화되었다.  $t=20-35$  s일 때 급기방식과 급배기방식의 입자수가 제연설비가 없는 경우보다 더 많은 것은 급기에 의한 공간내 유동의 일시적 불안정 때문으로 추측된다. 한편, 배기방식의 경우에는  $t=20$  s 이후 4000개 내외를 유지하는 준정상상태에 도달하였다. 이것은 유동장으로 투입되는 연기입자의 수가 개구부를 통해 배출되는 연기입자와 배기방식의 제연설비에 의해 배출되는 연기입자의 수가 거의 균형을 이루고 있음을 의미한다. 배기방식의 제연성능이 월등히 우수함을 알 수 있고, Fig. 4와 Fig. 5의 결과와도 일치한다.

지금까지 급기방식은 제연효과가 거의 없어 연기를 신속하게 배출할 수 없음을 확인하였다. 급기방식을 급배기방식으로 전환하는 데는 배기구와 배기팬의 설치 등 추가 경비가 많이 소요된다. 이에 비해 단순히 평상시의 급기팬을 화재시에는 배기 모드로 두면 배기방식으로 전환되므로, 추가비용을 투입하지 않고도 제연성능을 대폭 개선할 수 있다. 따라서 대구 지하철역과 부산 지하철 1호선 역의 기존 급기방식 제연설비를 배기방식으로 전환하는 것이 바람직하다.

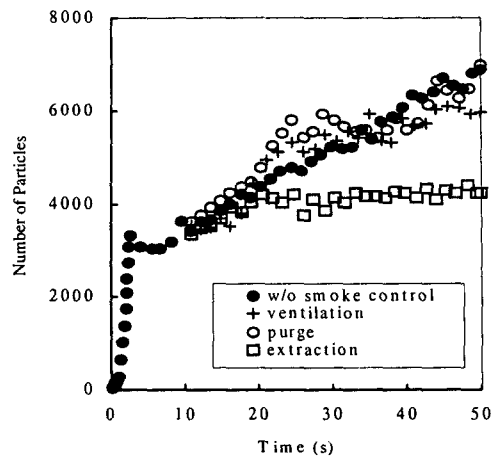


Fig. 7. Comparison of variation of the number of smoke particles with time.

#### 4. 결론

대구 지하철역의 급기방식 제연의 문제점을 조사하고 개선방안을 제시하기 위해, 지하철역의 승강장과 계단, 출입통로를 포함한  $10\text{ m} \times 3\text{ m} \times 5.4\text{ m}$  크기 공간의 200 kW 폴리우레탄 화재를 FDS로 조사하였다. 제연설비는 화재 발생 후 10초부터 가동하고, 각 급기구와 배기구의 풍량을  $0.9\text{ m}^3/\text{s}$ 로 유지하였다. 공간내 온도와 연기입자의 분포, 연기입자수의 변화로부터, 대구 지하철역의 제연이 충분히 이루어지지 못한 것은 급기방식 제연설비의 제연효과가 거의 없기 때문임을 알 수 있었다. 또 세 가지 기계제연방식 중에서 배기방식의 제연성능이 가장 우수하므로, 추가비용 없이 단순히 기존의 급기방식을 배기방식으로 전환함으로써 제연성능을 대폭 개선할 수 있음을 확인하였다.

#### 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 v.3, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A. (2002).
2. 박외철, "큰 개구부가 있는 공간의 화재와 제연의 대와류모사", 한국화재소방학회 논문지, 제17권, 제3호 게재예정 (2003).
3. 이동호, 유지오, "지하철 화재시 분선터널 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. Heat Transfer, Vol. 112, No. 2, pp. 415-423 (1990).