

성능위주의 배연설비를 위한 지하철 승강장 화재시물레이선에 관한 연구

이동호 · 김용주 · 김종원 · 조정훈

인천대학교 안전공학과

1. 서 론

최근 인구 증대 및 도시 집중화에 따른 지상공간 부족의 대안 및 택지 이용도 효율 방안으로 지하공간 개발의 필요성이 증대되고 있다. 특히 날로 증대되고 있는 지하공간에서의 문제점으로 설계 및 용도에 적합한 환기 시스템의 도입 및 운영의 미흡으로 공기질 악화 현상과 국민 보건상의 문제로 노출되고 있는 실정이다. 환기시스템은 일상적 공간환기는 물론 화재시의 배연기능을 포함한다. 따라서, 정상적인 작동(일반 환기)과는 별도로 비정상 환경(화재시의 배연)에서의 중요성이 인식되고 있다. 따라서, 시스템 설계 오류는 화재발생시 중대한 인명피해로 연결됨으로서 그 중요성은 아무리 강조하여도 지나침이 없다. 이미 미국, 일본, 노르웨이 등의 선진 외국에서는 지하공간의 최적환경 개선은 국민 삶의 질 향상이라는 관점 하에 꾸준히 진행되어오고 있다.^(1,3) 우리나라에서도 서울1기 지하철을 시작으로 교통난의 해소를 위하여 2005년까지 총연장 600 km에 이를 것으로 전망됨에 따라 지하공간의 공기질 개선 및 화재시의 배연설비의 최적화가 요구된다.

지하철 역사내 화재는 스프링클러와 같은 자동소화설비에 의한 적극적 소화작업이 불가능한 특징을 가지고 있다. 따라서, 승강장 및 선로부에 설치된 환기설비를 활용하여 비상시 배연설비로 기능을 전환시킴으로서 피난에 필요한 환경구축을 꾀하고 있다. 근래에 들어 비로서 스크린 도어(Platform Screen Door)를 설치하여 열차진입에 따른 승강장부의 공조환경 개선 및 승객의 안전을 확보함은 물론 화재시 승강장으로 열 및 연기이동을 억제시키는 수단으로 각광을 받고 있다. 한국에서도 서울 지하철 9호선을 비롯하여 각 도시에서 PSD를 지하철 승강장부에 설치하는 노력이 시도되고 있으나, 아직까지 초기단계에 있다. 본 연구는 PSD 미설치 승강장을 기준으로 열차 화재시 승강장 및 선로부 환기설비의 운전모드에 따른 승강장내 열환경특성 및 배연특성에 대한 평가를 수행한다.

본 연구의 해석은 FDS(Fire Dynamics Simulator) 프로그램을 사용하여 수행하였다. 일반 승강장 환기와 TES(Track Exhaust System) 가동유무에 따른 승강장내의 배연 및 열환경 최적조건을 얻기 위하여 17MW화재를 대상으로 승강장 급배기 방식별 배연

특성에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 화재시나리오 및 계산모델링

2.1 화재시나리오

본 연구는 승강장 화재를 대상으로 TES 및 승강장 공조와의 관계를 규명하기 위하여 화재발생시나리오를 토대로 수행되었다. 화재시나리오는 지하철 방재계획에 따라 본 선구간을 진행하는 열차의 화재시 인접한 역사로 이동하여 승객의 대피를 실시한다는 계획에 입각하여 화재열차는 승강장 내에 정차되어 있는 상황을 기준으로 승강장 내 열차화재를 대상으로 설정하였다.

2.2 계산모델링

일반적으로 지하철 역사내의 공조 및 환기시스템은 승강장환기/공조(line diffuser) 포함, TES와 연계적으로 운전되고 있다. 특히 TES는 승강장에 열차정차 시 발생하는 열 및 부유분진의 방출을 실시할 목적으로 운영되고 있으며 운전방식에 따라 상부배기 급배기방식이 적용되고 있다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 적용되고 있는 상부배기, 하부급기방식을 선택하여 승강장 공조설비 가동시의 열 및 연기 전파특성에 대하여 화재시 최적 배연 및 배열모드에 대한 고찰을 실시한다. 본 연구의 계산모델은 Table.1에 나타낸다.

Table.1 계산모델

계산모델		내용
(a) 전체시스템 가동중지		승강장 및 선로부의 공조 및 환기설비의 가동 없는 조건
(b) 승강장공조 가동		승강장내의 공조 실시조건. 기타 TES가동은 중단
(c) TES만 가동		선로구간의 TES만 가동조건, 기타 승강장내 공조가동은 중단
전체시스템 가동	(d)상부배기/하부급기	전체공조 및 환기설비의 가동. 단 TES는 상부배기/하부급기조건
	(e)상부배기/하부배기	전체공조 및 환기설비의 가동. 단 TES는 상부배기/하부배기조건

3. 지배방정식 및 경계조건

3.1 지배방정식

본 해석에서는 복잡한 화재시의 해석을 엄밀히 파악하기 위하여 3차원 비정상 유동장에 대해 실시간적 계산이 가능한 FDS를 사용하였다. 본 계산은 공간내의 해석구간

의 유체는 압축성 유체로 고려되며, 화염 및 연기로부터 복사열전달을 포함하여 계산하였다. 본 해석은 화재로 인하여 발생하는 열 및 연기의 전파거동에 대해 해석하기 (1)~(4) 식이 사용되었다⁽⁴⁾.

Conservation of Mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (1)$$

Conservation of Species

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot (\rho D)_i \nabla Y_i + W_i''' \quad (2)$$

Conservation of Momentum

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

Conservation of Energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{Dp}{Dt} = q_c''' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i \quad (4)$$

3.2 경계조건에 사용되는 방정식

본 계산의 경계조건은 (5)~(10)식과 같다.⁽⁴⁾

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial n^2}; \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_{n=0} = q_c''' + q_r''' - q_{rr}''' \quad (5)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q_c''' + q_r''' - q_{rr}'''}{\rho_s c_s \delta} \quad (6)$$

$$q_c''' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (7)$$

$$q_c''' = h \Delta T \quad \text{W/m}^2; \quad h = C |\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad \text{W/m}^2/\text{K} \quad (8)$$

$$q_r''' = \sum_{i=1}^{N_g} \cos(\Phi_i) \frac{\chi_i q_{p,i}}{4\pi |X_{p,i} - X_s|^2} e^{-\int K(\rho) dl} \quad (9)$$

$$q_{rr}''' = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (10)$$

3.3 FDS 계산조건

시뮬레이션의 조건은 다음과 같다.

1. 선로입구 단면적 : 21.0 m²

2. 화재크기 : 17MW
3. 차량 크기: 3.0m(W)×20m(L)×3.5m(H)
4. 화염해석 선로길이: 30m
5. Grid 개수: Total 194400 (90×72×30)
6. 외부공기상태 : 온도= 300 K, 밀도=1.21 kg/m³, 비열=1100 J/kg K
7. 열방출율 : 242.86 W/m²
8. Line diffuser : 급기 2대 (0.05×28.2), 배기 6대 (0.6×0.4)
9. TES : 급기10대 (0.6×0.3), 배기10대 (0.5×0.3)
10. 열차 자체 발열량: 무시
11. TES 급배기 방식: 하부급기, 상부배기

4. 승강장/선로부의 열 및 연기이동 특성

각각의 해석조건에 따라 화재시간 300초까지의 화재승강장내의 열환경 및 연기이동 특성을 해석하였다. 본 해석을 수행함에 따라 정상시의 공조/환기운전모드로 화재 시 활용 가능한 범위의 검토가 가능함을 물론 최적 배연 및 배열모드의 제안이 가능하다. 따라서, 신속한 대피를 위한 탈출경로의 예측 및 가능성을 제시할 수 있다.

4.1 열환경 특성해석

Fig.1은 화재발생으로부터 300초를 기준으로 나타낸 계산모델 별 승강장 및 선로부의 단면온도분포를 나타낸다. 승강장을 포함한 선로부 화재구간의 온도는 (b) 승강장 공조가동 조건에서 고온으로 유지되는 것을 나타낸다. 이와는 반대로 (d) 전체시스템 가동(상부배기/하부급기, TES가동)조건에서 화염의 크기 및 온도가 가장 작게 나타났다. 승강장 공조에 따라 선로부 화재열차로의 신선공기유입으로 인하여 지속적 화재의 가능성을 나타낸다. 그러나, TES에 의한 배연방식이 포함된 (d)의 조건은 선로 상단부의 연소기체를 신속히 배출함으로써 열축적을 낮추어 상대적으로 낮은 온도분포를 유지하게 하는 특성을 나타낸다. 그러나, 상부배연능력을 (d)의 1/2로 낮추어 하부급기를 배기모드로 전환시켜 얻어진 (e)의 결과로부터 화재전파는 TES상부배기의 성능에 좌우되는 특성을 확인하였다.

4.2 연기이동 특성해석

Fig.2는 승강장 및 선로부의 화재 시 발생된 등농도연기 분포도를 나타내며, 각 모델 별 계산 결과를 토대로 연기농도 $2.5 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기준농도로 나타낸 결과이다. 본 연기해석은 화재시 대피구간의 확보차원에서 중요한 의미를 갖는다. 밀폐공간내의 화재 시 발생된 (a)의 경우보다 화개구간에 외부로부터 강제대류가 개입된 (c)와 (d)의 경우가 승강장 영역으로 연기유입이 가장 많은 것으로 나타났다. 가장 안정적으로 배연이 가능한 방식으로는 (e) 조건인 전체시스템가동(TES 상부배기/하부배기)조건으로 나타났다.

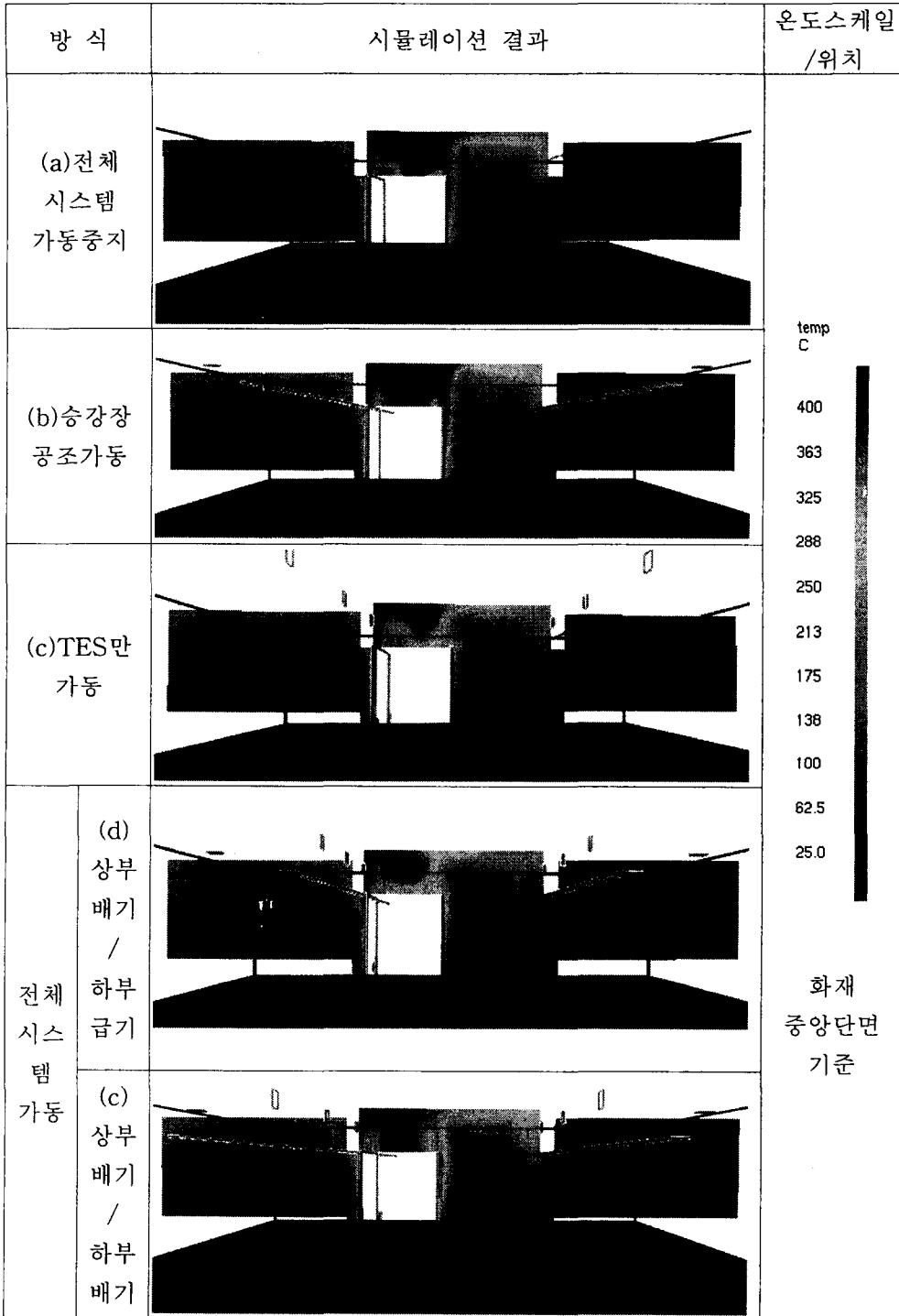


Fig.1 계산모델별 승강장 및 선로부의 단면온도분포

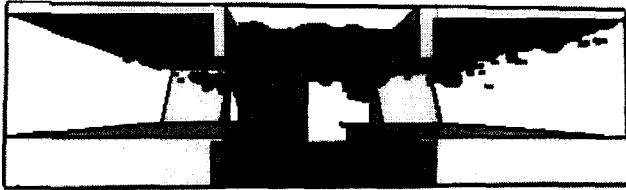




방식		시뮬레이션 결과	기준농도 / 위치
(a) 전체 시스템 가동중지			기준농도 2.5×10^4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ / 화재 중앙단면 기준
(b) 승강장 공조가동			
(c) TES만 가동			
전체 시스템 가동	(d) 상부 배기 / 하부 급		
	(c) 상부 배기 / 하부 배기		

Fig.2 계산모델별 승강장 및 선로부의 등농도연기 분포도

5. 결 론

이상의 승강장내 화재를 대상으로 열 및 연기이동의 해석을 환기/배연설비 운전조건별 평가를 실시한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 가장 낮게 열환경 유지가 가능한 운전조건은 전체시스템가동(TES상부배기/하부급기)조건이 됨을 밝혔다.
2. 배연에 가장 적합한 방식으로는 전체시스템가동(TES상·하부배기)임을 밝혔다.
3. 승강장 및 선로부의 열 및 연기제어는 TES 급배기 비율에 좌우됨을 밝혔다.

참고문헌

1. Jones, W.W., 1981, A review of compartment fire models, U.S. National Bureau of Standard, NBSIR 83-2884.
2. Kumar, S. and Cox. G., 1985, Mathematical modelling of fires in road tunnels, 5th international symposium on the aerodynamics & ventilation of vehicle tunnels, lille, france, 20-24, May.
3. Biollay, H and Chasse, P, 1995, Validating and Optimizing 2D and 3D computer simulations for the offenegg tunnel fire tests, 9th international symposium BHRA, pp. 357-382.
4. Kevin B. McGrattan,, 2001, Fire Dynamics Simulator-Technical reference guide., NIST