

지하철 상대식 승강장의 제연운전모드 실효성에 관한 연구

이 동 호

인천대학교 안전공학과
(2004. 10. 8. 접수 / 2005. 2. 21. 채택)

A Study for a Effectiveness of Smoke Control Operation Mode for a Subway with Separate Platform

Dong-Ho Rie

Department of Safety Engineering, University of Incheon
(Received October 24, 2004 / Accepted February 21, 2005)

Abstract : This study aims to derive the operation method of a comprehensive ventilation system which is capable of providing passengers with safe exit paths from platforms in onboard fire situations. The airflow distributions in subway platforms under 13 types of tunnel vent system for a double track stop condition was calculated and having analyzed diffusion behaviors of smoke and heat exhaust in such states by performing 13 kinds of different ventilation scenarios by using a 3-D Fire Dynamic Simulation (FDS) simulation model to clarify the safety evaluation for the heat and smoke exhaust on subway fire events.

Key Words : subway fire, smoke control, fire dynamic simulation

기호설명

S_m : 승강장 평균연기농도[mg/m^3]
 S_i : 격자연기농도[mg/m^3]
 T_m : 승강장 평균온도[$^{\circ}C$]
 T_i : 격자온도[$^{\circ}C$]
 A : 격자면적[m^2]
 i : 격자
AC% : $65mg/m^3$ 이상 농도에 의한 승강장 점유율 [%]
A65C : $65mg/m^3$ 이상 농도의 승강장 점유 면적 [m^2]
AT% : $60^{\circ}C$ 이상 온도에 의한 승강장 점유율[%]
A60T : $60^{\circ}C$ 이상 온도에 의한 승강장 점유 면적 [m^2]
 I_o : 연기가 없는 경우의 빛의 강도[W/m^2]
 I : 연기를 통과한 후의 빛의 강도[W/m^2]
 K : 소광계수[m^{-1}]
 ρY_s : 매연농도[mg/m^3]

S : 가시거리[m]
 T : 온도[$^{\circ}C$]

1. 서 론

지하공간에서의 화재는 반 밀폐 공간이라는 특수성으로 일단 화재가 발생할 경우 대인지하철화재 참사와 유사한 대형 참사로 발전될 가능성이 상존한다. 지금까지의 방재계획은 화재발생 가능 범위 내를 기준으로 실시되어 왔으나, 테러와 같은 비정상적 화재발생에도 대처가능한 선까지 그 범위를 넓히고 있는 것이 세계적 추세이다¹⁾. 또한, 지하철은 다른 구조물과 비교하여 화재발생시 화재진압 및 인명구조에 본질적으로 취약한 구조적 특성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 상대식 승강장을 대상으로 상행열차의 화재시 하행열차의 동시정차에 따른 지하역사의 제연방식에 따른 제연성능평가를 수행한다. 따라서, 본 연구는 복선구간의 열차정차를 고려한 종합적 제연운전방안에 대한 기초적 자료를 제시한다.

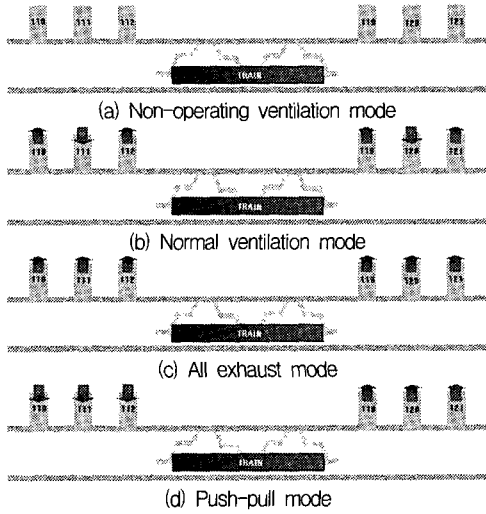


Fig. 1. Tunnel ventilation mode

2. 승강장 선로부 열차정차 조건 및 제연조건

대구지하철 참사를 계기로 지하공간 내에서의 사고예방 및 공학적 해석에 대한 많은 관심이 기울여지고 있으며¹⁻⁷⁾ 이중에서도 화재시 승객의 대피로 확보관점에서 수행된 연구 결과로부터 터널부의 환기설비를 화재시 배연운영방식으로 전환함에 따라 승강장부의 열 및 연기배출 특성에 효과적임을 밝혔다⁸⁾. 지금까지의 연구는 선로에 화재열차만을 고려하였으나 본 연구에서는 상대식 승강장을 대상으로 복선선로에 상하행선의 열차가 동시에 정차되어 있는 경우에 대한 해석을 실시하였다. 따라서, 터널부 환기팬을 제연팬으로 구동시 형성되는 기류에 의해 원활히 열 및 연기배출이 가능한지에 대한 검증은 실시함으로써 보다 세부적인 방재계획의 기초자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서의 제연팬 운전 조건은 Fig. 1에 나타냈으며 다음의 조건하에서 구동된다.

- (a) 제연팬의 정지조건
- (b) 평상시 환기팬 자동조건으로 운전하는 경우
- (c) 본선부 환기팬을 모두 배기운전 하는 경우
- (d) Push-pull 방식에 의한 운전하는 경우

또한 위의 경우, 승강장 선로부 배열 시스템은 상하부 모두 배기, 무가동 및 일반배기시의 배연량을 세분화하여 설정하였다.

Table 1. Boundary condition for each ventilation modes

Case (터널구간 초기 온도)	선로부 급배기조건 (2100 m ³ /min)		경계조건 (풍량 : m ³ /min)		
	상부	하부	상행 방향	하행 방향	계단
1	급배기 무작동		Open (압력경계 조건)	Open (압력경계 조건)	Open (압력경계 조건)
2	전배기	60%	7128 (유출)	4198 (유출)	
3	압인배기		7512 (유입)	11097 (유출)	
4	중앙급기 양단배기		455.6 (유입)	109.5 (유출)	
5	급배기 무작동		Open	Open	
6	전배기	0%	7128 (유출)	4198 (유출)	
7	압인배기		7512 (유입)	11097 (유출)	
8	중앙급기 양단배기		455.6 (유입)	109.5 (유출)	
9		100%			
10	급배기 무작동	0%	Open	Open	
11		50%			
12	압인배기	100%	7512 (유입)	11097 (유출)	
13	중앙급기 양단배기	100%	455.6 (유입)	109.5 (유출)	

3. 승강장 화재해석

3.1. 해석

본 연구에서는 화재 발생에 따른 열 및 발생물질 이동현상을 수치해석적으로 파악하기 위하여 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology) 의 FDS(Fire Dynamics Simulator) Ver.3을 사용하였다. 화재발생은 상행열차가 상대식 승강장에서 정차하여 중앙1량이 전소되면서 맞은편 하행선 중앙1량이 동시에 전소하는 조건이며 발화위치는 양단 선로부 기준 2.6m 상부 지점으로 선정하였다. 해석은 이미 화재가 발생한 열차가 승강장에 진입하여 급속 확산하는 조건으로 승강장을 대피하는 최종시간은 SIMULEX를 이용하여 300초로 산출됨에 따라 300초 대피시간에 대해 계산을 수행하였다. 4×185×3(m)의 승강장 실제영역을 대상으로 계산에 적용된 격자는 64×720×24이며 총격자수는 1,105,92이다. 1량의 화재강도는 미국 NAFA규정에 설계된 Los Angeles (21.4 MW적용)와 Boston transitway (20

MW)에 적용한 화재강도에 준하는 값으로 20MW로 가정하였다^{7,8)}. Table 1은 환기팬 운전조건에 따른 경계조건을 나타내며 초기온도는 30℃이다. 본 연구에서 얻어진 계산결과는 FDS / Smokeview Tool에서 제공된 FDS2ASCii의 실행 프로그램을 활용하여 텍스트 파일로 데이터를 변환시켜 승강장의 평균온도 및 평균농도의 계산을 수행하였다. 대구지하철화재 참사 이후 객차의 내장재는 불연화로 이루어지고 있는 점 및 추후 화재시에 가연성물질에서 발생하는 연기는 상대적으로 감소한다는 가정하에 가연성 물질은 FDS의 Default값인 Propane을 사용하였다.

3.2. 대피에 적합한 열환경 및 제연기준

본 연구에서는 화재시 승객의 안전한 대피를 위한 열환경 및 제연기준으로 NFPA 130(1997)을 만족하도록 승강장 온도 및 연기농도의 기준을 설정하였다. 따라서, 안전이 확보된 대피환경은 화재시 60℃ 이하의 대피공간 공기온도로 유지되어야 하며, 연기에 의한 가시거리는 발광체의 경우 9.144m, 무광체는 6.096m 이내에서 식별 가능한 조건을 적용하였다⁹⁾.

3.3. 연기농도의 산출

발광원에서 빛의 강도 I₀와 수광원에서 빛의 강도 I, 소광계수 K의 관계는 식 (1)와 같다.

$$I/I_0 = e^{-KL} \tag{1}$$

소광계수 K와 연기농도 ρY_s와의 관계는 식 (2)로 표기된다.

$$K = K_m \cdot \rho Y_s \tag{2}$$

여기서, K_m specific extinction coefficient로서 7.6 m²/kg의 값을 갖으며 소광계수 K와 가시거리 S와의 관계식은 식 (3)과 같다.

$$S = C/K \tag{3}$$

연기농도의 값은 식 (2)와 (3)으로부터 식 (4)로 정리된다.

$$\rho Y_s = \frac{C}{K_m \cdot S} \tag{4}$$

4. 결 과

4.1. 승강장부 평균연기농도 및 평균온도

승강장 바닥으로부터 1.5m 상부의 2차원 공간평면을 기준으로 계산된 승강장 평균 연기농도는 S_m, 승강장 평균 온도 T_m은 식 (5)와 (6)으로 계산된다.

$$S_m = \frac{\sum(S_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \tag{5}$$

$$T_m = \frac{\sum(T_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \tag{6}$$

4.1.1. 승강장부 평균연기농도

Fig. 2는 상부 60% 하부 40% 비율의 동일한 선로 부 배풍량 조건을 기준으로 터널부 급배기조건인 급배기 무작동(1), 전배기(2), 압인배기(3), 중앙급기 양단배기(4)의 승강장부 평균연기농도를 나타낸다. Case (1)과 (2)는 화재발생 140sec 이후부터 승객이 대피하기 부적합한 65mg/m³ 이상의 연기농도를 나타냈으며 조건중, Case (3)이 가장 낮은 값을 나타냈다.

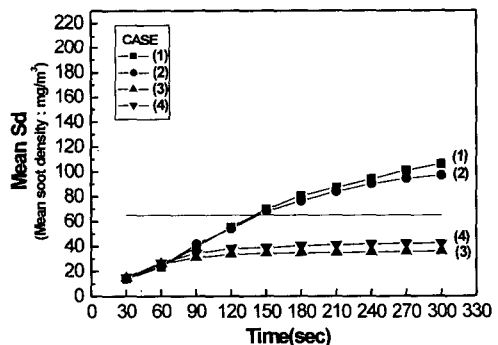


Fig. 2. Mean soot concentration of platform area

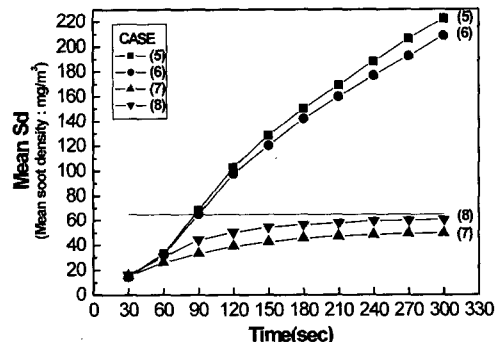


Fig. 3. Mean soot concentration of platform area

Fig. 3은 선로부 급배기조건 무작동 상태에 대하여 각각 터널부 급배기조건인 급배기 무작동(5), 전배기(6), 압인배기(7), 중앙급기 양단배기(8)의 승강장부 평균연기농도를 나타낸다. Case (5)와 (6)은 화재발생 90sec 이후부터 승객이 대피하기 부적합한 65mg/m^3 이상의 연기농도를 나타냈으며 조건중, Case (7)이 가장 낮은 값을 나타냈다.

Fig. 4는 터널부 급배기조건 급배기 무작동에 대하여 각각 선로부 급배기조건인 상부 60% 하부 40%배기(5), 상부 100%배기(9), 하부100%배기(10), 상부 50% 하부 50%배기(11)의 승강장부 평균연기농도를 나타낸다. Case (5)와 (10), (11)은 각각 80sec, 100sec, 150sec에 승객이 대피하기 부적합한 65mg/m^3 이상의 연기농도를 나타냈으며 조건중, Case (9)가 가장 낮은 값을 나타냈다.

Fig. 5는 터널부 급배기조건인 압인배기(3), (12)와 중앙급기 양단배기(4), (13)에 대하여 선로부 급배기조건인 상부 60% 하부 40%배기(3), (4)와 상부 100%배기(12), (13)의 승강장부 평균연기농도를 나타낸다. 모든 Case가 승객이 대피하기 적합한 65mg/m^3 이하의 연기농도를 나타냈으며 조건중, Case (12)가 가장 낮은 값을 나타냈다.

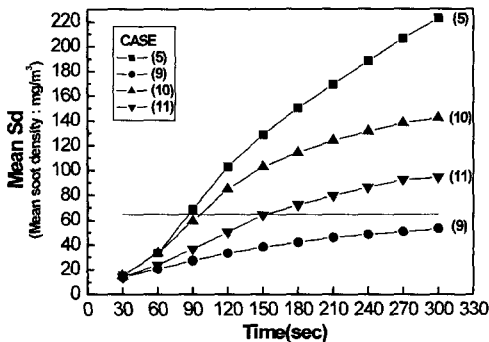


Fig. 4. Mean soot concentration of platform area

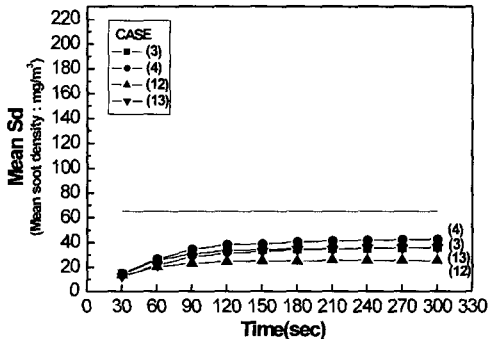


Fig. 5. Mean soot concentration of platform area

4.1.2. 승강장부 평균온도

Fig. 6는 선로부 급배기조건 상부 60% 하부 40%배기에 각각 터널부 급배기조건인 급배기 무작동(1), 전배기(2), 압인배기(3), 중앙급기 양단배기(4)의 승강장부 평균온도를 나타낸다. 모든 Case가 80초 이후에 승객이 대피하기 부적합한 60°C 의 평균온도를 나타냈으며 조건 중 Case (3)이 가장 낮은 90초를 나타냈다. Fig. 7은 선로부 급배기조건 무작동 상태에 대하여 각각 터널부 급배기조건인 급배기 무작동(5), 전배기(6), 압인배기(7), 중앙급기 양단배기(8)의 승강장부 평균온도를 나타낸다. Case (5)와 (6), (8)이 60초 이후에 승객이 대피하기 부적합한 60°C 의 평균온도를 나타냈으며 조건 중 Case (7)이 가장 낮은 100초를 나타냈다.

Fig. 8은 터널부 급배기조건 급배기 무작동에 대하여 각각 선로부 급배기조건인 상부 60% 하부 40%배기(5), 상부 100%배기(9), 하부100%배기(10), 상부 50% 하부 50%배기(11)의 승강장부 평균온도를 나타낸다. Case (5), (9), (10), (11)이 각각 50sec, 110 sec, 70sec, 80sec에 승객이 대피하기 부적합한 조건으로 나타났다.

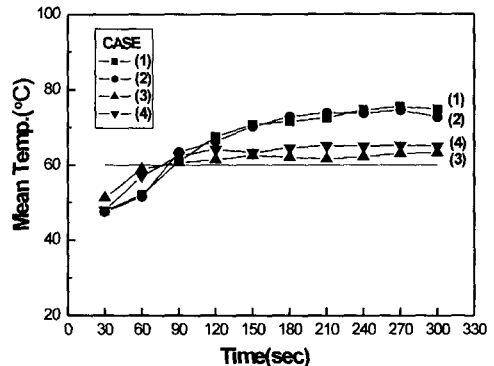


Fig. 6. Mean temperature of platform area

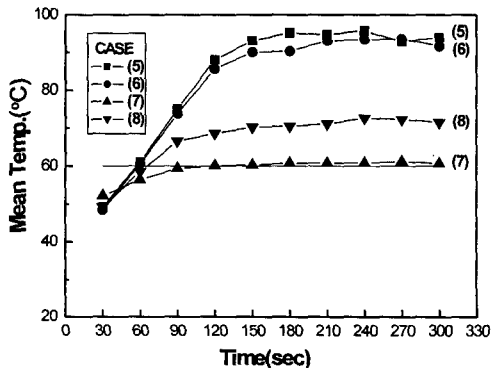


Fig. 7. Mean temperature of platform area

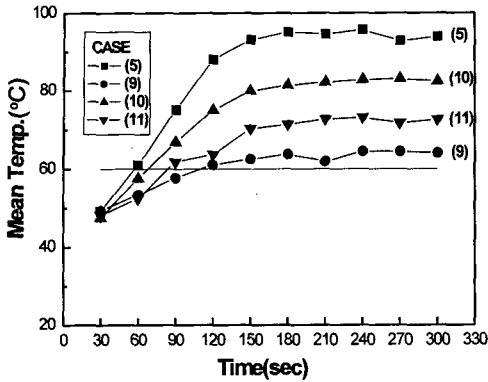


Fig. 8. Mean temperature of platform area

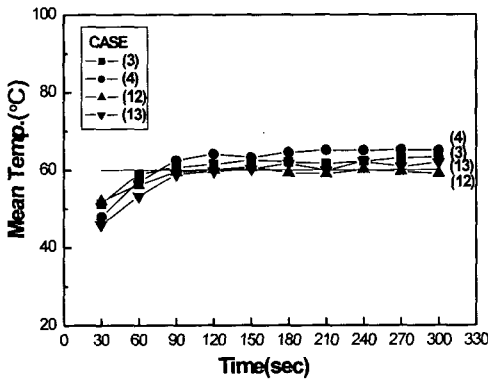


Fig. 9. Mean temperature of platform area

Fig. 9는 터널부 급배기조건인 압인배기(3), (12)와 중앙급기 양단배기(4), (13)에 대하여 선로부 급배기조건인 상부 60% 하부 40%배기(3), (4)와 상부 100%배기(12), (13)의 승강장부 평균온도를 나타낸다. 모든 Case가 60°C부근에서 70°C를 넘지 않는 평균온도를 나타냈으며 조건 중에 Case (12)가 가장 낮은 값을 나타냈다.

4.2. 기준을 초과하는 승강장 점유율

본 연구에서는 대피기준 65mg/m³ 이상의 연기농도를 식 (7)의 승강장 점유율로 계산하였다. 승강장 바닥으로부터 1.5m 상부의 2차원 공간 평면을 기준으로 화재발생 150sec 및 300sec를 대상으로 배연방식기준 65mg/m³ 이상 농도에 의한 승강장 점유율 (%)을 나타내며 대피기준 60°C 이상 온도의 승강장 점유율은 식 (8)로 계산하였다.

$$AC\% = \frac{A65C}{A} \quad (7)$$

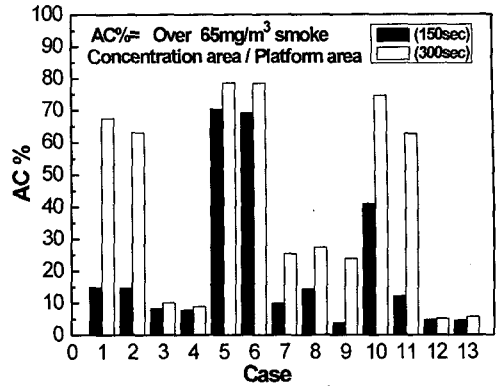


Fig. 10. Percentage of over 65mg/m³ soot concentration's share at platform

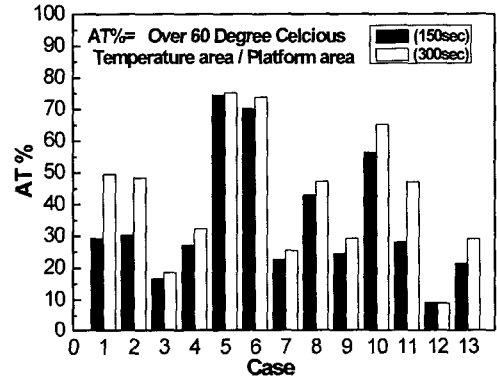


Fig. 11. Percentage of over 60°C temperature's share at platform

$$AT\% = \frac{A60T}{A} \quad (8)$$

이상의 연기농도로 나타났다. Case (12)과 (13)은 각각 4.09%과 4.90%의 극히 낮은 분포도를 나타냄에 따라 Case (12)가 가장 우수한 승강장 연기배출 특성을 나타냈다.

4.2.1. 배연방식기준 65mg/m³ 이상 농도에 의한 승강장 점유율

Fig. 10은 대피 농도기준 65mg/m³을 초과하는 승강장 점유율을 나타낸다. 화재발생 후 300sec의 대피 시간에서 Case (5), (6)의 경우 각각 79.1%, 78.4%로 대피하기에 부적합한 65mg/m³

4.2.2. 대피기준 60°C 이상 온도의 승강장 점유율

Fig. 11은 대피 온도기준 60°C를 초과하는 승강장

점유율을 나타낸다. 화재발생 후 300초의 대피시간에서 Case (5), (6)의 경우, 대피하기에 부적합한 60℃ 이상의 승강장 공기온도 점유율은 각각 75.1% 및 73.2%의 높은 비율로 나타났다. Case (12)가 10% 이하의 가장 낮은 점유율을 나타냈다.

5. 결론

상대식 승강장을 대상으로 상하행 열차 동시 정차조건에 있어서 터널부 및 승강장 선로부의 조합 운전모드의 변화에 따른 배연해석으로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 승강장 바닥으로부터 1.5m 상부의 2차원 공간 평면을 기준으로 화재발생 300초를 대상으로 나타난 배연설비기준 65mg/m^3 이상의 농도에 의한 승강장 점유율 및 60℃ 이상의 온도에 의한 승강장 점유율의 결과로부터 상하행 열차 동시 화재발생시 가장 우수한 승강장 배연 및 배열특성은 승강장 선로부 상부 100%배기와 본선터널 압인방식임을 밝혔다.

2) 환기기준 설계로 운영되고 있는 본선터널부 환기팬 및 승강장 선로부 환기운전모드를 화재시 제연모드로 전환 운영시 상하행 열차 동시 화재에도 배열 및 배연에 효과가 있음을 밝혔다.

참고문헌

1) 이상호, 이재복, “대구지하철 사고에 따른 화재 의식조사 및 방재의식변동모형에 관한 연구”,

화재소방학회논문지, 제17권, 제3호, pp. 45~49, 2003.

2) 김진수, 박종근, 노삼규, “지하공간의 피난안전성 평가시스템 개발에 관한 연구”, 화재소방학회지 논문지, 제17권, 제4호, pp. 57~63, 2003.

3) 박외철, “대구지하철역 제연의 문제점과 대책”, 화재소방학회논문지, 제17권, 제4호, pp. 105~110, 2003.

4) Anthoky J. Ploicastro, “The use of technology in preparing subway system for chemical/biological terrorism”, Argonne National Laboratory, Safety and Security, pp. 1~20.

5) Bjrn Karlsson, James G. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”, CRC, 2000.

6) K. Opstad, P. Aune and J. E. Henning, “Fire emergency ventilation capacity for road tunnel with considerable slop”, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, pp. 535~543.

7) Y. Wu, M. Z. A Baker and G. T. Atkinson and S. Jagger, “A study of the effect of tunnel aspect ratio on control of smoke flow in tunnel fire”, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, pp. 573~587, 1997.

8) 이동호, “지하철 터널부로의 열 및 연기배출에 관한 연구”, 한국안전학회지, 제19권, 제3호, pp. 1~88, 2004.

9) NFPA, “The SFPE handbook of fire protection engineering”, NFPA Third edition, Quincy, MA. 3~28, 2000.