

터널내 열차 화재시 최적 배연 조건 산정에 관한 연구

김하영* · 김종인* · 황명환 · 이동호

인천대학교 안전공학과 · *인천대학교 안전공학과 대학원

1. 서론

지하공간은 반 밀폐라는 공간적 특성으로 인해 화재의 발생시 화재 진압 및 인명구조에 본질적인 취약함이 상존한다. 또한 발화 및 폭파와 같은 테러가 지하철에서 발생되는 사례가 많아 이에 따른 지하 공간 내에서의 대피안전이 중요시 되는 추세이다. 본 연구에서는 지하철 본선 터널의 중앙 환기탑과 승강장 근접 배연시설 사이의 화재 위치에 국한 조건을 기준으로 배연특성을 도출하고 배연 조건별 연기 및 온도의 거동특성을 파악함으로써 이에 따른 대피 안전성 평가를 수행하였다. 터널내의 대피 안전성 평가는 화재 위치와 가까운 승강장 근접부 환기 뿐만 아니라 화재 위치와 먼 승강장의 근접부 환기팬의 운전방식에 따른 배연성능 평가를 실시함으로써 세부적인 방제계획의 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 지하철 본선터널 모델링

본선 터널의 배연량은 현재 실시 설계가 진행중인 인천지하철 송도 연장선 터널 제1구역을 기준으로 모델링하였다. 본선 터널의 길이는 역간 운행 시간 2.0분을 기준으로 1.0km를 적용하였다. Fig.1은 본선터널 모델링 및 환기팬의 위치를 나타낸다.

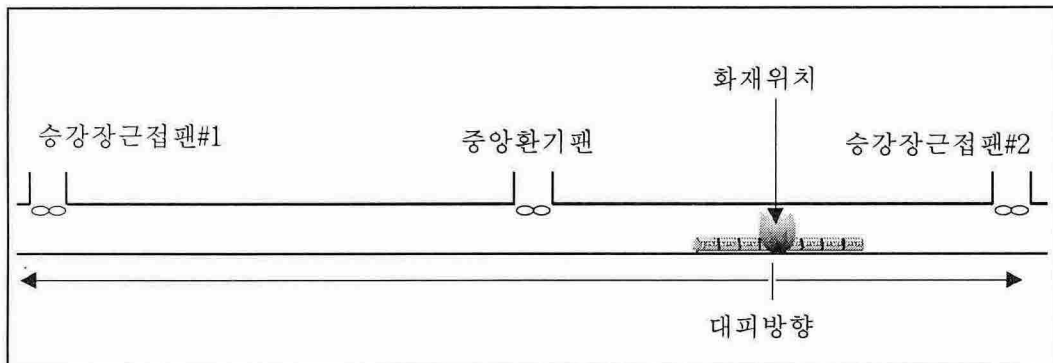


Fig.1 본선터널 모델링 및 환기팬 위치

3. 승강장 화재해석

3.1 해석

본 연구에서는 화재 발생에 따른 열 및 발생 물질이동현상을 수치해석 적으로 파악하기 위하여 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 FDS(Fire Dynamics Simulator) Ver.4를 사용하였다. 화재조건은 1량이 완전 전소되는 조건이며 발화위치는 하행방향 네 번째 차량으로 선정하였다. 해석은 이미 화재가 발생한 열차가 터널내 750m지점에 정차하여 승객의 최종 대피시간인 893초에 대해 계산을 수행하였다. 해석에 적용된 격자는 27x3,200x20으로 총격자수는 1,728,000이다. 1량의 화재 강도는 최근에 설계된 Los Angeles(21.4MW)와 Boston transitway(20MW)에 적용한 화재 강도에 준하는 20MW로 가정하였다. 또한 열차화재에 기인한 열차내 유리창문의 열적 파괴 현상이 250℃에 일어나도록 하였다. Table.1은 배연방식에 따른 경계조건을 나타낸다.

CASE	배 연 조 건
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
설 명	: 화재위치 ↑ : 배기 ↓ : 급기

Table.1 배연방식에 따른 경계조건

3.2 대피방향 및 대피시간 산정

터널내 열차 화재시 승객의 대피방향은 화재지점 750m기준 터널 양방향으로(A방향:상향승강장장부, B방향:하향승강장장부) 대피하는 것으로 설정하였다. 이에 따른 승객의 최종 대피시간은 대피 시뮬레이션 프로그램인 Simulex를 사용 대피승객 혼잡률 입석 200% 1568명을 적용하여 A방향으로 대피시 최종 대피시간은 893초, B방향으로 대피시 385초로 나타났다. Fig.2는 거리별 최종대피시간을 나타낸다.

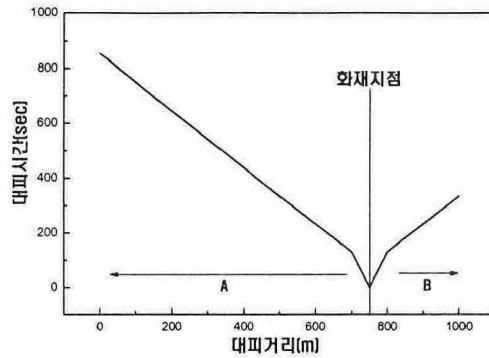


Fig.2 거리별 최종 대피시간

3.3 대피에 적합한 열환경 및 제연기준

본 연구에서는 화재시 승객의 안전한 대피를 위한 열환경 및 제연기준으로 NFPA 130(2003)을 만족하도록 승강장 온도 및 연기농도의 기준을 설정하였다. 따라서, 안전이 확보된 대피환경을 화재시 60℃ 이하의 대피공간 공기온도로 유지되어야 하며, 연기에 의한 가시거리는 발광체의 경우 9.144m, 무광체는 6.096m 이내에서 식별 가능한 조건을 만족하여야 한다. 또한 화재시 매연에 의한 무력화 지수(F_{IN})는 1.0이하를 유지하는 조건으로 설정하였다.

3.4 화재 성장 모델링

화재 성장은 NFPA 92B(2000)에서 제시한 t^2 식에 성장속도 FAST를 적용하였으며 식(1)에 의하여 화재가 20MW까지 성장하는 시간을 92.81초로 적용하였다.

$$q = at^2 \quad (1)$$

4. 결 과

4.1 평균연기농도

평균연기농도는 본선 터널부 바닥으로부터 1.5m 상부의 2차원 공간평면을 기준으로 계산되며 구간별 평균농도 S_m 으로 식(2)와 같이 계산된다.

$$S_m = \frac{\sum(S_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (2)$$

Fig.4와 Fig.5는 화재 발생후 500초 및 1000초의 화재지점 기준 50m간격의 각각 배연조건에 따른 승객대피 환경에 대한 본선터널 평균 연기 농도의 영향평가를 나타낸다.

화재 발생후 500초의 평균연기농도는 화재지점에서 Case(1)이 48.38mg/m³으로 가장

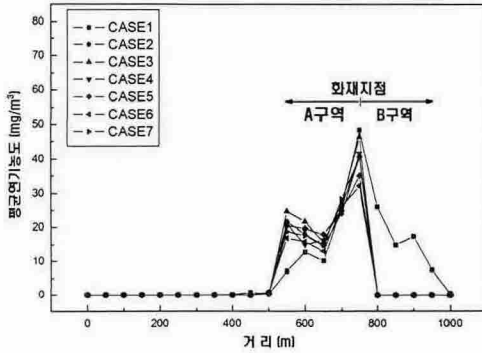


Fig.3 구간별 평균연기농도(500sec)

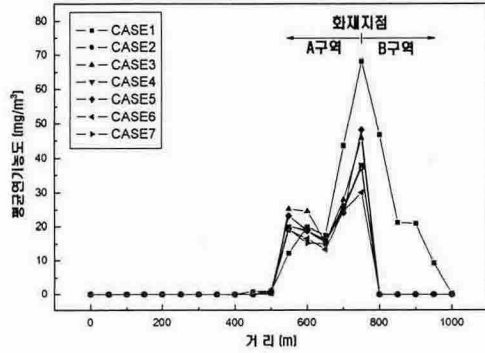


Fig.4 구간별 평균연기농도(1000sec)

높은 값을 나타냈으며 Case(6)은 $32.19\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도값이 나타났다. Case(6)은 Case(1)에 비해 $16.19\text{mg}/\text{m}^3$ 가 낮아 33.46% 농도 감소효과가 나타났다. A구역은 모든 Case가 500m지점의 중앙환기팬을 지나면서 거의 연기농도가 상승하지 않았으며, Case(3)이 가장 높은 농도값을 나타내었으며 가장 낮은 Case(1)에 비해 37.27% 높은 것으로 나타났다. B구역은 Case(1)을 제외한 모든 조건이 화재지점 기준 50m의 거리부터 거의 연기의 확산이 일어나지 않았다.

화재 발생후 1000초의 경우 화재지점에서는 Case(1)이 $68.16\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 대피 한계 농도값인 $65\text{mg}/\text{m}^3$ 을 넘어 가장 높은 평균연기 농도가 나타났으며 Case(6)이 가장 낮은 $30.06\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 나타나 55.90%의 감소효과가 있음을 알 수 있다. A구역은 500초와 마찬가지로 500m를 지나면서 거의 연기농도의 상승하지 않았으며, Case(1)의 농도가 가장 높게 그리고 가장 낮은 평균 연기 농도를 나타낸 조건은 Case(6)으로 21.60%가 낮게 나타났다. B구역의 경우 500초와 같은 양상으로 Case(1)을 제외한 모든 조건이 연기의 확산이 일어나지 않는 것으로 나타났다.

4.2 평균온도

평균온도는 승강장 바닥으로부터 1.5m 상부의 2차원 공간평면을 기준으로 계산되며 구간별 평균 온도 T_m 은 식(3)과 같이 계산된다.

$$T_m = \frac{\sum(T_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (3)$$

Fig.6과 Fig.7은 화재 발생 후 500초와 1000초의 화재지점 기준 50m간격의 각각 배연 조건에 따른 승객대피 환경에 대한 본선터널 평균 온도의 영향평가를 나타낸다.

화재 발생후 500초의 구간별 평균온도 중 화재지점에서는 Case(7)이 가장 높은 $74.4\text{ }^\circ\text{C}$ 로 나타났으며 Case(6)이 가장 낮은 $64.34\text{ }^\circ\text{C}$ 로 22.69%의 온도저감효과가 나타났다.

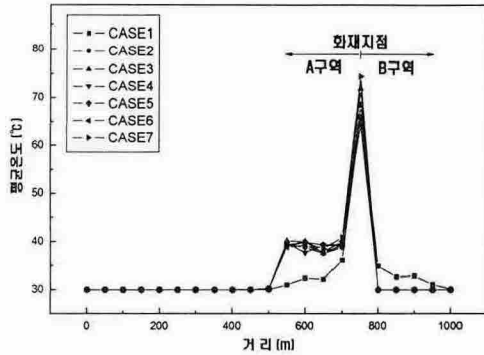


Fig.5 구간별 평균온도(500sec)

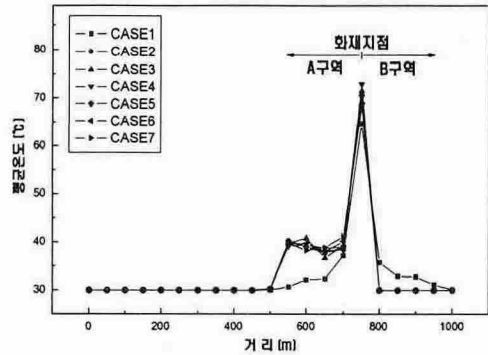


Fig.6 구간별 평균온도(1000sec)

A구역의 평균온도분포는 연기농도와 동일하게 500m를 지나 온도가 거의 상승하지 않았다. A구역은 Case(7)이 가장 높은 온도상승을 보이며 가장 낮은 Case(1)에 비해 69.58%가 높게 나타났다. B구역의 경우 Case(1)을 제외한 모든 조건이 거의 온도의 변화가 발생하지 않았다.

화재 발생 후 1000초의 경우 모든 배연조건이 거의 500초와 동일한 평균 온도값을 나타냈다. 화재지점의 경우 Case(4)의 경우가 72.98°C로 가장 낮은 평균온도인 64.74°C의 Case(1)에 비해 19.17% 높은 온도 상승을 보였다. A구역의 평균온도는 Case(7)이 가장 높았으며 가장 낮은 Case(1)에 비해 67.45% 높게 나타났다. B구역은 500초의 경우와 같이 Case(1)을 제외한 조건에서 온도의 변화는 나타나지 않았다.

5. 결론

환기팬에 의한 터널내 배연조건에 따른 해석으로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 배연조건에 따른 터널내의 대피안전성평가를 실시한 결과 연기농도의 경우 Case(6)이 다른 배연조건에 비해 최대 55.90%의 배연효과를 나타냄으로서 가장 우수한 운전방식으로 나타났다. 온도의 경우는 Case(1)이 다른 배연조건에 비해 최대 69.58%의 온도 상승 저감효과가 나타났다.

2. 본선 터널의 특성상 본연구 범위에서의 시뮬레이션 결과로부터 A구역의 중앙환기탑 이후의 모든 배연조건과 B구역의 Case(1)을 제외한 모든 배연조건에서 연기 및 온도가 대피자에게 미치는 영향은 미미한 것으로 나타남에 따라 양방향에서의 타당성을 검증하였다.

3. 터널내의 배연조건별 안전성평가를 실시함으로써 각각의 경계조건에 대한 배연특성을 파악하였으며, 추후에는 열차의 위치에 따른 알맞은 배연조건에 대한 연구가 추가적으로 요구되어지며 실험에 의한 연기거동 영향평가와의 비교도 연구되어야 할 과제로 남아있다.

참고문헌

1. 이동호, 고재웅 “지하철 화재 시 제연운전모드 타당성에 관한 연구”, 한국안전학회 논문지 No.9 2004, pp.205-211
2. Anthoky J. Ploicastro, "The use of technology in preparing subway system for chemical/biological terrorism", Argonne National Laboratory, Safety and Security pp.1-20
3. Bjrn Karlsson, James G. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", 2000, CRC
4. 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
5. 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, 1997, pp.573-587
6. 이동호, 유지오, "지하철 화재시 본선터널 환기시스템에 따른 열 및 연기배출특성", 한국화재소방학회, 제17권 제2호, 2003 pp.62-69
7. Chi-Ji LIN, Yew Khoy CHUSH² "Smoke Management Design and Computer Simulation of An Underground Mass Transit Station In Taiwan",
8. 인천광역시 도시철도건설본부 "인천도시철도 1호선 송도 연장건설사업 기본 설계 보고서(토목/궤도)", 2004. 8.
9. NFPA 92B, "Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas", NFPA 2000 Edition, Quincy, MA. 02269-9101
10. NFPA 130, "Standard for Fixed Guedeway Transit and Passenger Rail Systems", NFPA 2003 Edition, Quincy, MA. 02269-9101
11. John H.Klote, James A.Milke, "Principles of Smoke Management", SFPE, 2002, pp.27-48
12. Kevin McGrattan, Glenn Forney, 'Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide', 2005
13. David Ashton, William Gropp, Ewing Lusk, "Installation and User's Guide to MPICH", Argonne National Laboratory.