

승강장 스크린도어 설치에 따른 배연설비운영에 대한 연구

이동호[†] · 고재웅 · 김하영

인천대학교 안전공학과

(2005. 8. 24. 접수 / 2006. 2. 12. 채택)

A Study of Smoke Exhaust Facility Operation of Subway Platform with Installation of Platform Screen Door

Dong-Ho Rie[†] · Jae-Woong Ko · Ha-Young Kim

Department of Safety Engineering, University of Incheon

(Received August 24, 2005 / Accepted February 12, 2006)

Abstract : A study on fire phenomena in a subway transit mass station has been carried out as a part of disaster prevention plan at the subway station. The ventilation facilities installed in both the platform and the trackway are designed to convert into a smoke exhaust system in emergency situation, creating such an environment as necessary for evacuation. 3 dimensional Numerical Simulations based on the CFD are carried out using a simulation tool, Fire Dynamic Simulator. Additionally, four different vent modes are made and performances are compared with the original design mode and each other to find better operation of vents at both the platform and the trackway in case of fire. From the result, an vent operational characteristics under the condition of installed PSD is clarified for the effective smoke and heat removal from the platform area compared with non installed PSD.

Key Words : subway fire, smoke extraction, fire dynamic simulation, platform screen door

기호설명

Sm : 승강장 평균연기농도
Si : 격자연기농도
Tm : 승강장 평균온도
Ti : 격자온도
A : 격자면적
I : 격자
AC% : 65mg/m³ 이상 농도에 의한 승강장 점유율(%)
A65C : 65mg/m³ 이상 농도의 승강장 점유 면적(m²)
AT% : 60℃ 이상 온도에 의한 승강장 점유율(%)
A60T : 60℃ 이상 온도에 의한 승강장 점유 면적(m²)
ρ_∞ : 밀도(kg/m³)
Cp : 비열(kJ/kg · K)

T_∞ : 온도(K)
g : 중력가속도(m²/s)
Q : 발생열량(kW)
D* : 화원직경(m)

1. 서론

1995년 아제르바이젠의 수도 바쿠에서 발생한 지하철화재로 300여명의 사상자와 270여명의 부상자가 발생하였으며 2003년 대구지하철 화재사고로 인하여 200여명 사상자가 발생하였다. 또한, 2005년 1월25일 노숙자가 발화한 것으로 보이는 소규모 화재로 인해 미국 뉴욕시 지하철 2개 노선이 향후 3-5년 간 정상운영에 지장을 받게 됨으로서 9.11 테러 이후 뉴욕시 지하철이 겪게 된 가장 큰 피해로 지적되고 있다. 본 연구에서는 스크린도어 설치유무와 승강장 배연 방식에 따른 지하승강장의 화재시 제연, 제열 특성을 검토하여 안전성 평가를 수행함으로써 스크린도어 설치시 배연설비 운영 자료를 제

[†] To whom correspondence should be addressed.
riedh@incheon.ac.kr

시한다.

2. 승강장 제원

대구지하철 참사를 계기로 지하 공간 내에서의 사고예방 및 공학적 해석에 대한 많은 관심이 기울여지고 있으며^{1,4)} 기존 연구를 통하여 지하승강장 화재시 터널부 환기설비 운영과 승강장부 환기설비의 운영이 승객들의 안전대피에 효과적인 것으로 나타났다³⁾. 하지만, 지금까지의 연구는 승강장 부에 스크린도어가 설치되지 않은 조건을 기준으로 연구되어왔다. 본 연구에서는 스크린도어의 설치 유, 무와 화재시 스크린도어의 열적 파괴 현상을 고려한 해석을 수행함으로써, 스크린도어의 설치조건에 따른 효율적인 열 및 연기 배출 가능여부의 여부에 대한 검증 실시한다. 승강장의 환기 방식 및 스크린도어 설치조건은 현재 실시설계 중인 인천 지하철 송도 연장선 제 5역사를 대상으로 모델링하였다. Fig. 1은 스크린도어 설치와 승강장 100,000CMH 배연과 선로부 상부 100% 10,000CMH 배연 시스템을 적용한 지하철 승강장 구조를 나타낸다. Fig. 2는 대상 승강장의 평면도 및 제원을 나타낸다.

3. 승강장 화재 안전성 평가

3.1. 해석

본 연구에서는 화재 발생에 따른 열 및 유해가스의 이동현상을 수치해석적으로 파악하기 위하여 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) Ver. 3을 사용하였다. 화재발생은 상행열차가 승강장에서 정차하여 중앙 1량이 완전 전소되는 조건이며, 발화 위치는 양선로 부 기준 2.6m 상부 지점으로 선정하였다. 해석은 화재열차가 승강장에 진입하여 화재가 급속히 확산하는 것으로 가정하였으며 해석시간은 Simulex를 이용한 대피시간 해석에 근거하여 240초를 가정하여 계산을 수행하였다. 해석에 적용된 격자는 64×720×24로 총격자수는 1,105,92이다. 화재강도는 미국 NFPA규정에 의해 최근에 설계된 Los Angeles(21.4MW 적용)와 Boston transitway(20MW)에 적용한 화재강도에 준하는 값으로 20MW로 가정하였고⁶⁾, 화원은 FDS의 기본 설정 값인 메탄으로 선정하였다. Table 1은 스크린도어의 설치조건과 승강장 배연조건에 따른 경계조건을 나타낸다.

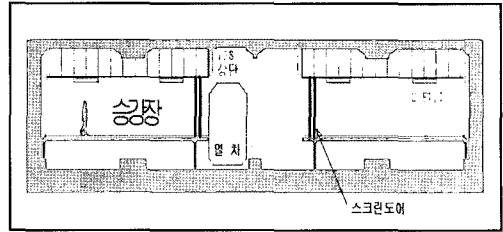


Fig. 1. Smoke extraction position of platform area.

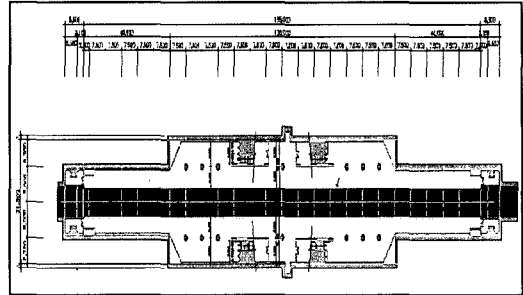


Fig. 2. A plan CAD figure of the 5th platform at Songdo International city of Incheon.

Table 1. Boundary condition for ventilation modes

Case	스크린도어	승강장 배연조건	열적파괴 조건
(1)	유	무배연	250℃ 파괴
(2)	무	무배연	-
(3)	유	무배연	비파괴
(4)	유	승강장부 10만CMH 배연 및 선로부 상부 100% 배연	250℃ 파괴
(5)	무	승강장부 10만CMH 배연 및 선로부 상부 100% 배연	-
(6)	유	승강장부 10만CMH 배연 및 선로부 상부 100% 배연	비파괴

3.2. 그리드 간격의 타당성

시뮬레이션의 계산정도는 그리드의 크기 설정에 좌우된다. 따라서 FDS에서 사용된 LES 모델의 그리드 크기는 SGS(Subgrid-scale stress) 모델에 적합하도록 설정되어야 한다. 화재근방의 Characteristic Length Scale은 McCaffery의 연구에 의한 식 (1)로 화재반경 특성(characteristic fire diameter)을 제안하였다.

$$D^* = \left[\frac{Q^*}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

$$\delta = 0.1D^* \quad (2)$$

본 실험에 적용된 격자는 McCaffery의 실험으로

부터 계산된 식 (2)의 조건에 일치한다. 본 연구에서는 20MW 화원의 크기를 대상으로 (1)식에 적용한 결과, 그리드 한계값은 $\delta=0.79m$ 의 값을 갖는다. 본 계산에서 X,Y,Z(폭, 길이, 높이)에 대응 그리드 수 $64 \times 720 \times 24$ 를 기준으로 실제 승강장 크기 $31.5m \times 202.6m \times 6.1m$ 의 그리드는 $\delta x = 0.49m$, $\delta y = 0.28m$, $\delta z = 0.25m$ 의 값을 갖는다. 따라서 본 계산에서 적용된 그리드 크기는 식 (3)의 조건을 충분히 만족하게 됨을 확인하였다.

$$\delta > \delta_{x,y,z} \quad (3)$$

3.3. 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 대피조건으로 설정하였다. 또한 화재 시 매연에 의한 무력화 지수(FIN)는 1.0이하를 유지하는 조건으로 설정하였다⁹⁾.

4. 결 과

4.1. 승강장부 평균연기농도 및 평균온도

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

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

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

4.1.1. 승강장부 평균연기농도

Fig. 3은 무배연조건을 기준으로 승강장 스크린도어 설치 유무에 따른 승객대피환경에 대한 승강장 평균 연기농도를 나타낸 것이다.

스크린도어 설치 시 열적파괴현상을 동반하는 경우와 열적파괴를 동반하지 않는 조건의 비교는 실제

화재현상과 근접한 결과를 유추하기 위한 중요한 항목으로 본 연구에서는 250℃에서 스크린도어가 열적 파괴하는 것으로 하였다.

Case(1)은 스크린도어의 열적 파괴현상을 고려한 경우이며, Case(3)은 열적파괴현상을 고려하지 않은 경우이다. 이 경우 파괴조건에 관계없이 60초까지는 연기농도가 동일한 경향으로 상승하고 있다. 그러나, 60초 경과 후에는 Case(3)가 Case(1)에 비하여 상당히 높은 연기농도를 나타내며, 매 30초 마다 약 8%씩 증가하여 240초에 도달 시에는 최대 48.4%의 편차가 발생하였다.

Case(2)는 스크린도어를 설치하지 않은 경우로, 스크린도어를 설치한 경우보다 미설치의 경우가 승강장 평균연기 농도에서 최소 29%, 최대 42%까지 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 승강장 양단으로 전파되는 열기류가 상대편 스크린도어에 의해 차단됨으로서 체적 감소로 인한 대피승강장의 열축적이 심화되는 현상으로 판단된다.

Fig. 4는 승강장 스크린도어 설치유무에 따른 승객대피환경에 대한 영향평가를 나타낸다.

Case(4)인 스크린도어 설치하고 열적 파괴현상을 고려한 경우이며, Case(6)은 열적파괴현상을 고려하지 않은 경우이다. Case(6)의 경우에서 연기농도가 보다 높게 나타나고 있으며, 60초까지는 동일한 연기농도 상승의 경향을 나타내고 있으나 60초 이후에는 매 30초경과에 따라 약 7%의 편차가 발생하여 계산시간 240초에는 최대 45%의 평균농도 차이가 나타났다.

Case(5)은 스크린도어를 설치하지 않은 경우로 승강장에서 평균 연기농도는 스크린도어를 설치한 Case4 보다 최소 5%에서 최대 32%까지 낮아지는 특성을 나타냈다.

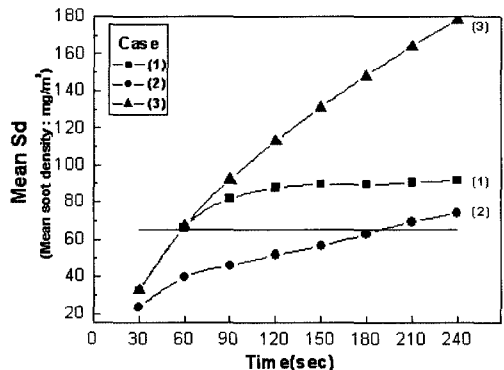


Fig. 3. Mean soot concentration of platform area(1).

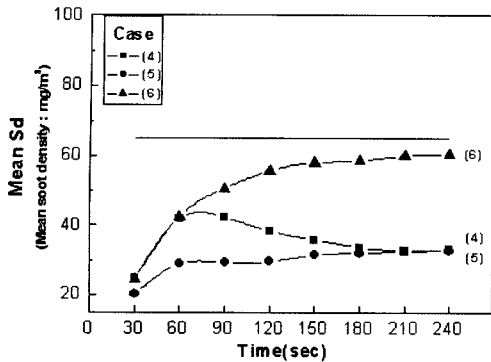


Fig. 4. Mean soot concentration of platform area(2).

무배연 조건인 Case(1)(2)(3)과 배연 조건 Case(4)(5)(6)을 비교하면 배연조건이 약 50% 정도의 낮은 승강장 평균 연기농도를 나타내며 승객의 대피에 안전한 환경을 제공할 수 있는 것으로 나타났다.

4.1.2. 승강장부 평균온도

Fig. 5는 무배연조건에서 승강장 스크린도어설치유무에 따른 승객대피환경에 대한 평가를 위해 승강장의 평균온도를 나타낸 것이다.

Case(1)은 스크린도어 설치, 열적 파괴현상을 고려한 경우, Case(3)은 열적파괴현상을 고려하지 않은 경우이다. 이 경우 스크린도어의 열적 파괴현상에 관계없이 50초까지는 동일한 평균 온도 상승의 경향을 나타내고 있으나, 60초 경과부터 30초씩 경과에 따라 약 3%의 편차를 가지고 Case(3)보다 높은 온도를 보이며, 계산시간 240초에 도달 시 최대 19%의 편차가 발생하였다.

Case(1)과 (2)는 각각 스크린도어 설치와 미설치에 따른 비교로 스크린도어를 설치한 경우가 열적 파괴가 이루어지기 전인 120초까지는 최대 33%정도 높은 온도를 나타내나 120초 이후에는 편차가 점점 감소하여 최종시간에 도달할수록 비슷한 값을 보이고 있다.

Fig. 6은 배연을 수행하는 경우 승강장 스크린도어설치유무에 따른 승객대피환경에 대한 온도평가를 나타낸 것이다.

Case(4)는 스크린도어가 설치되고, 열적 파괴현상 고려한 경우이며, Case(6)은 열적파괴현상이 고려되지 않은 경우이다. 이 경우 약 70초까지는 동일한 평균 온도 상승의 경향을 나타내고 있으나, 90초 이후 30초씩 경과에 따라 약 7%의 편차를 가지고 Case(6)의 경우가 온도가 상승하며 계산시간 240초에 도달 시 최대 15%의 편차가 발생하였다.

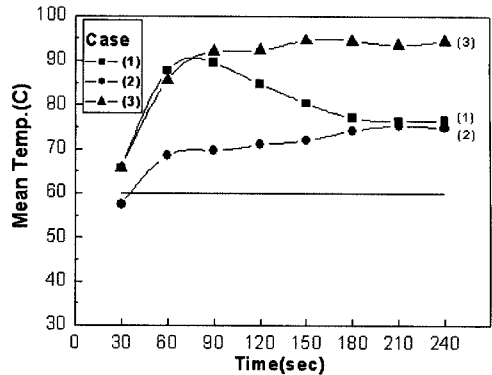


Fig. 5. Mean temperature of platform area(1).

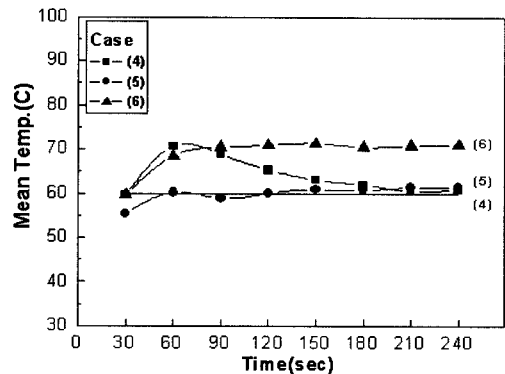


Fig. 6. Mean temperature of platform area(2).

Case(4)와 (5)는 Case(1)(2)의 경우와 마찬가지로 120초까지는 큰 편차를 보이나 최종시간에 도달할수록 비슷한 온도 값을 나타내고 있다.

무배연 조건인 Case(1)(2)(3)과 배연 조건 Case(4)(5)(6)을 비교하면 양조건 모두 안전 한계온도를 넘어서나 배연의 경우가 무배연의 경우보다 약 21% 낮은 온도를 나타냈다.

4.2. 기준을 초과하는 승강장 점유율

본 연구에서는 대피기준 65mg/m^3 이상의 연기농도가 분포하는 승강장 점유율을 식 (7)로 계산하였다. 점유율 평가는 승강장 바닥으로부터 1.5m 상부의 호흡면을 기준으로 화재발생 120sec 및 240sec에 대하여 수행하였으며, 60°C 이상 온도분포를 보이는 승강장 점유율을 식 (8)로 계산하였다.

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

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

화재 시 유해가스에 노출된 사람이 무능력화되는 흡입량의 한계값인 FIN(Fractional Incapacitating Dose)은 CO, HCN, CO₂, O₂의 농도를 적용하여 계산하는 발전적 모델로서 식 (9)로 계산된다.

$$FIN = \sum_{i=1}^n (F_{ICO_i} + F_{ICN_i}) V_{CO_2_i} + F_{IO_2_i} \Delta t_i \quad (9)$$

4.2.1. 대피한계 연기농도 65mg/m³ 이상에 의한 승강장 점유율

Fig. 7은 승강장 평균 연기농도를 대상으로 화재 시간 120초와 240초에 대한 대피한계 연기농도 기준 65mg/m³의 승강장점유율을 나타낸 것이다.

Case(3)의 경우가 case(1)보다 대피한계 연기농도 기준 65mg/m³의 승강장점유율이 높게 나타났으며 스크린도어 미설치인 Case(2)의 경우가 가장 낮은 값인 21.8%의 연기농도 승강장점유율로 나타났다.

배연을 하는 경우인 Case(4)(5)(6)에서는 스크린도어 미설치인 Case(5)가 가장 낮은 값인 8.7%를 나타내었고 동일한 조건에서는 배연을 하는 경우가 무배연의 경우보다 약 50% 정도 낮은 승강장 점유율을 나타내고 있다.

대피한계 연기농도 기준 65mg/m³ 이상의 승강장 점유율은 스크린도어 미설치 경우가 스크린도어 설치 경우 보다 낮게 나타났다. 따라서, 스크린도어를 설치하는 경우에는 기존의 스크린도어 미설치에서 고려된 배연설비의 효율향상에 대한 고려가 필수적임을 알 수 있다. 이러한 결과는 승강장안전을 위해 스크린도어 설치가 의무조항 항목으로 고려대상이 됨에 따라 열 및 연기배출성능을 좌우하는 화재 시 배연설비의 운전조건의 강화가 요구된다.

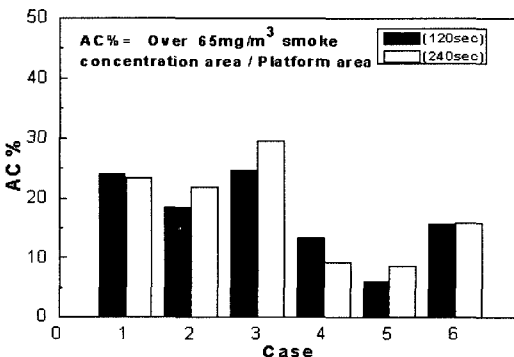


Fig. 7. Percentage of over 65mg/m³ soot concentration's share at platform.

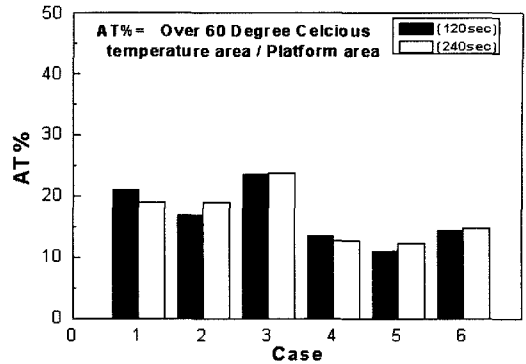


Fig. 8. Percentage of over 60°C temperature's share at platform.

4.2.2. 대피기준 60°C 이상 온도의 승강장 점유율

Fig. 8은 승강장 호흡면의 온도가 화재시간 120초와 240초에서 대한 대피한계 온도 기준 60°C를 초과하는 점유율을 나타낸 것이다.

Case(3)의 경우가 Case(1)보다 대피한계 온도 기준 60°C의 승강장점유율이 높게 나타나고 있으며 대피한계 연기농도 기준의 승강장 점유율에서와 마찬가지로 스크린도어 미설치인 Case(2)의 경우가 가장 낮은 값인 19.1%의 대피한계 초과 온도의 승강장점유율을 나타내고 있다.

배연조건인 Case(4)(5)(6)에서도 스크린도어 미설치인 Case(5)가 가장 낮은 값인 12.3%를 나타내고 있으며 배연조건인 경우가 무배연조건인 경우보다 약 47% 정도 낮은 대피한계 초과 온도의 승강장 점유율을 나타내고 있다.

4.2.3. 무력화 지수 값(FIN) 기준 평가

Fig. 9는 승강장 무력화 지수 값을 대상으로 각 시간 따른 승강장의 FIN 1.0이상의 승강장점유율을 나타낸다.

해석 최종시간 240초의 FIN 1.0이상의 승강장점유율의 경우, 스크린도어 설치, 승강장부 무배연, 스크린도어의 열적 비파괴의 조건인 Case(3)이 승강장 전체 약 3%의 점유율을 나타내며 가장 높은 것으로 나타났고, 스크린도어 미설치, 승강장부 무배연의 조건인 Case(2)가 승강장 전체 약 1.8%의 점유율을 나타내며 가장 낮은 조건으로 나타났다.

스크린도어의 열적 파괴조건에 따른 경우를 비교한 결과 열적 파괴조건인 Case(1)이 약 2.1%로 비파괴조건인 Case(3)보다 낮은 승강장 점유율을 나타내었다.

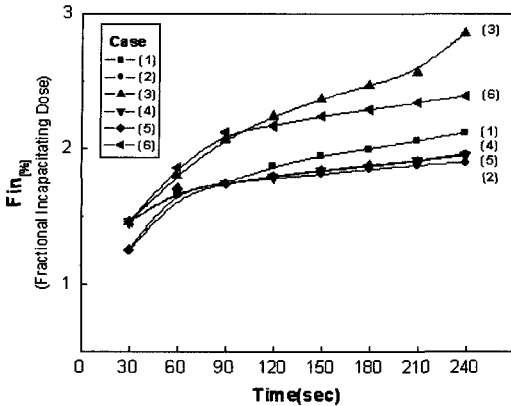


Fig. 9. Percentage of over 1.0 Fractional Incapacitating Dose' share at platform.

5. 결론

스크린도어 유무와 열적과피 및 배연조건에 따른 지하철 승강장의 열 및 연기배출 특성을 검토하고자 화재해석을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

지하철 승강장 화재시 연기농도 및 온도, FIn을 비교 검토한 결과,

1) 스크린도어를 설치하는 경우,

① 무배연시에는 열적과피가 발생하지 않는 경우가 승강장부 평균 연기농도 최대 48.4%, 최소 8%의 높은 값을 나타냈으며 평균온도의 경우 최대 19%, 최소 3%의 높은 값을 나타내었다.

② 배연시에는 열적과피가 발생하지 않는 경우가 승강장부 평균 연기농도 최대 45%, 최소 7%의 높은 값을 나타내었고, 평균온도의 경우 최대 15%, 최소 3%의 높은 값을 나타내었다.

2) 화재시 배연의 유무에 따른 해석으로부터 배연을 하는 경우가 배연을 하지 않는 경우에 비해, 승강장 평균연기 농도는 약 50%, 평균온도는 21%의 낮은 값을 나타냈으며 승객들의 안전한 대피 확보에 보다 유리한 것으로 나타났다.

3) 스크린도어 설치 유무에 따른 해석으로부터 스크린도어 미설치 경우가 스크린도어 설치 경우보다 대피한계연기농도 기준 $65\text{mg}/\text{m}^3$ 과 대피한계온도 기준 60°C 에서 낮은 승강장 점유율을 나타내었다.

따라서, 스크린도어를 설치하는 경우에는 기존 스크린도어 미설치에서 고려된 배연설비의 효율향상에 대한 고려가 필수적이며, 승강장 안전을 위해 스크린도어 설치가 의무조항 항목으로 고려됨에 따라 열 및 연기배출 성능을 좌우하는 화재 시 배연설비의 운전조건 강화가 요구된다.

참고문헌

- 1) 이동호, 고재웅 “지하철 화재 시 체연운전모드 타당성에 관한 연구”, 한국안전학회논문지, 제9호, pp. 205~211, 2004.
- 2) Baum H. R., B. J. McCaffery, “Fire Induced Flow Field - Theory and Experiment”, Fire safety Science - Proceedings of the Second International Symposium, pp. 129~148, 1989.
- 3) Anthoky J. Ploicastro, “The use of technology in preparing subway system for chemical/biological terrorism”, Argonne National Laboratory, Safety and Security pp. 1~20, 1999.
- 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, 1997.
- 5) 이동호, 유지오, “지하철 화재시 본선터널 환기시스템에 따른 열 및 연기배출특성”, 한국화재소방학회, 제17권, 제2호, pp. 62~69, 2003.
- 6) NFPA, “The SFPE handbook of fire protection engineering”, NFPA Third edition, Quincy, MA. 3~28, 2000.