

지하철 화재시 본선터널 환기시스템에 따른 열 및 연기배출특성 A Study of Heat & Smoke Evacuation Characteristics by the Changing of Operational Method of Tunnel Fan Shaft Ventilation System for Fire on Subway Train Vehicle

이동호[†] · 유지오*

Dong-Ho Rie[†] · Ji-O Lew*

인천대학교 안전공학과, *신홍대학 건축설비과
(2003. 4. 23. 접수/2003. 6. 17. 채택)

요 약

국내의 경우, 지하철 승강장 제연설비는 전용설비로 구축되어 있지 않고 화재발생시 승강장환기설비 및 본선터널부의 환기설비를 제연모드로 절환하여 운영되고 있다. 제연효과는 이러한 까닭으로 환기설비의 위치, 용량 및 급배기방식에 종속된다. 따라서 본 연구는 승강장에 정차한 열차에서 화재가 발생하는 경우를 대상으로 승객의 대피 소요시간을 산출하고 지하철환경해석 프로그램인 SES(Subway Environmental Simulation)를 사용하여 터널부 환기설비의 제연절환운전으로 승강장부에 형성되는 기류의 해석 및 FDS(Fire dynamics Simulator)를 이용하여 화재해석을 제연방식별로 수행한다. 얻어진 가시도 및 승강장의 온도로부터 본선 터널부 제연모드별 특성을 규명한다.

ABSTRACT

The smoke control system in subway platform is not only using for smoke exhaust facility but also using ventilation system. For this reason, smoke vent effectiveness is depending on its position, ventilating volume capacity and the vent method. In this study, the passenger's evacuation time was calculated for the case of fire on stopped subway train vehicle in subway platform. In order to recommend the mechanical smoke exhaust operation mode, SES (Subway Environmental Simulation) was used to predict the airflow of the inlet and outlet tunnel for the subway station. Fire dynamics Simulator(FDS) was used the SES's velocity boundary conditions to calculate the smoke density and temperature under the condition of fire on stopped subway train vehicle at the platform. We compared smoke density and temperature distributions for each 6 types of smoke exhaust systems to clarify the characteristics of smoke and hot air exhaust effectiveness from the result of fire simulation.

Keywords : Smoke control(제연), Ventilation system(환기시스템), Subway station fire(지하철 승강장 화재), Evacuation(대피)

1. 서 론

지하공간에서의 화재는 반밀폐 공간이라는 특수성으로 일단 화재가 발생할 경우 대구지하철화재 참사와 유사한 대형 참사로 발전될 가능성은 매우 높다. 또한 지하철을 대상으로 방재계획은 화재는 물론 터러를 포함한 광범위한 선까지 그 범위를 넓히고 있는 세계적

추세이며¹⁾ 대구지하철화재 참사를 계기로 지하공간 방재에 대한 필요성이 한층 높아지고 있다. 지하철은 다른 구조물과 비교하여 화재발생시 화재진압 및 인명구조에 본질적으로 취약한 구조적 특성을 내포하고 있는 대표적인 구조물이며 국내의 경우, 서울, 인천, 부산, 대구 등 4개 도시의 10개 노선에 총연장 300 km에 달하며, 2005년까지 600 km에 육박할 것으로 전망된다. 본 연구는 지하철 승강장에서 열차 화재가 발생시, 승객의 안전한 대피로 확보가 가능한 환기기 조합운전의

[†]E-mail: riedh@incheon.ac.kr

도출을 목표로 한다. 따라서, 승강장 환기설비운전에 따른 평상시 승강장 기류분포를 계산한다. 또한, 화재 발생 시나리오에 따라 3차원 화재시뮬레이션을 수행함으로써 승강장내 연기거동 및 온도특성을 해석한다. 따라서, 본선 터널부 환기기의 제연절환 운전모드방식별 제연특성을 규명함으로써 승객대피안전을 꾀한다.

2. 승강장화재해석

지하철 화재연구는 지형적 특성에 따른 구조, 승강장의 형상 및 제연설비의 운전방식에 따라 해석결과가 달라지므로 역사 설계시 방재분야에 효과적인 제연방안의 제안이 실시되어왔다.^{2,4)}

국내의 경우, 승강장 제연설비는 전용설비로 구축되어 있지 않고 화재발생시 승강장환기설비 및 본선터널부의 환기설비를 제연모드로 전환하여 운영되고 있다. 제연효과는 이러한 까닭으로 환기설비의 위치, 용량 및 급배기방식에 종속되는 특성을 나타낸다. 본 연구에서 제연특성의 해석은 지하철 승강장과 본선터널구간의 환기를 포함하여 다음 방식에 입각하여 실시한다.

1. 승객의 대피시간 산정: 승강장에 정차한 열차에서 화재가 발생하는 경우, SIMULEX⁵⁾에 의해 승객의 대피 소요시간을 산출한다. 산출된 소요시간을 기준으로 하여 오염물질의 노출시간을 고려한 농도기준을 검토한다.

2. 환기설비가동에 따른 기류해석: 지하철환경해석 프로그램인 SES(Subway Environmental Simulation)⁶⁾를 사용하여 터널부 환기설비의 제연절환운전으로 승강장부에 형성되는 기류를 해석함으로써 화재시뮬레이션의 경계조건으로 활용한다.

3. 화재강도 선정: 지하철 화재시 발생열량을 산정한다. 본 연구에서는 국내 지하철 차량을 대상으로 구체적인 발열량 자료가 없는 실정으로 미국의 NFPA⁷⁾ 자료를 이용하여 화재강도를 설정한다,

4. 화재시 대피자의 안전대피 온도 및 가시거리에 대한 기준 설정: 대피시간 동안 발생하는 연기농도 및 열기류의 분포가 대피허용한도로 유지될 수 있는가에 대한 여부를 판정한다.

5. 승강장부 기류해석 및 발생 연기거동해석: 승강장부의 기류 해석 및 연기농도는 FDS(Fire dynamics Simulator)⁸⁾를 통해서 대피시간 이내의 비정상해석을 수행한다.

6. 화재시 제연 운전모드의 최적화환기기 운전모드를 선정하여 위에서 기술한 연기농도를 기준으로 가시도 해석 및 승강장의 온도 분포로부터 본선터널부 제

연모드별 비교·검토를 수행하여 대피에 적합한 운전모드를 선정한다.

2.1 대피시간 산정

연구에서 적용한 지하철역사 해석모델의 승강장 제연을 Table 1에 나타낸다.

대피 시뮬레이션에 적용하는 지하철은 8량으로 하며 승차인원은 최대 인원 990명, 한량 당 123~125명이 승차하는 것으로 설정하였다. 승객 구성비는 남자 40%, 여자 40% 및 어린이(성별 구분 없음) 20%로 하였다.

Table 1. Dimensions

Classification		Dimension(m)	Etc.
Subway station	Height of Floor	1.6	Side-platform station
	Height of ceiling	3	-
	Length	185	-
	Width of station	4	-
Rail road track	Cross section area	41.04 (W7.6×H5.4)	2 railway
Train (Incheon subway)	Width	2.75	-
	Height	3	-
	Height of air conditioner	0.5	-
	Length of train	144.5 (18 m/vehicle)	8 train vehicles

Table 2. Composition of passenger

Car	Male	Female	Child	Total
1st	50	50	24	124
2nd	49	49	25	123
3rd	50	50	25	128
4th	49	49	25	127
5th	49	49	25	128
6th	49	49	25	129
7th	50	50	24	131
8th	50	50	25	125

Table 3. Simulation conditions

Case	Conditions	
	Location of Fire generated	Door operation mode
1	1st train vehicle	close
2	5th train vehicle	close
3	5th train vehicle	open

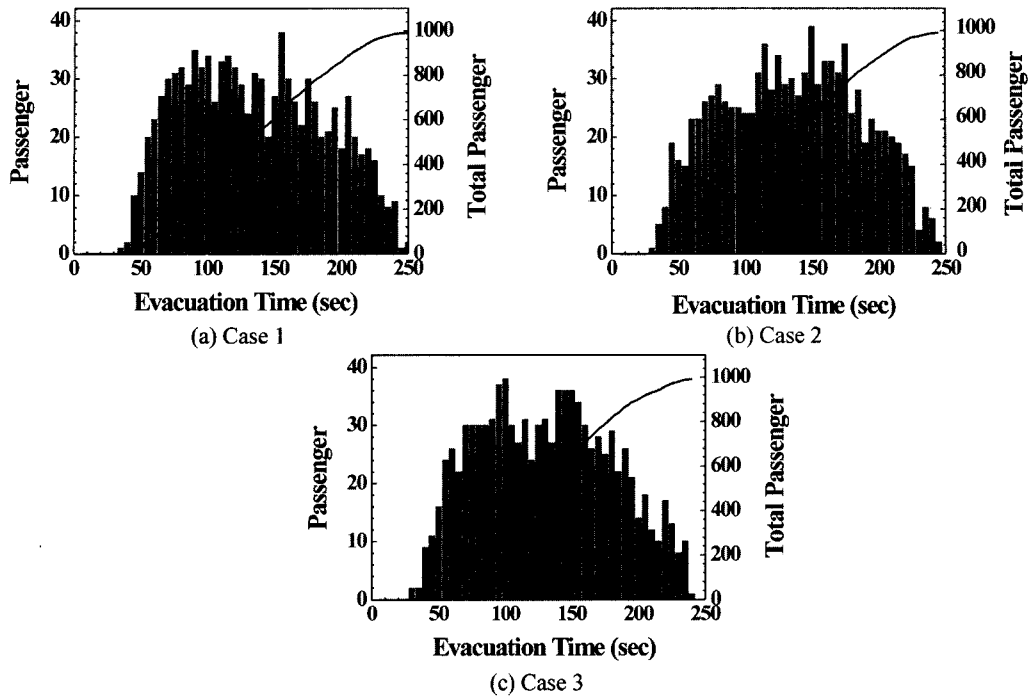


Fig. 1. Evacuation time.

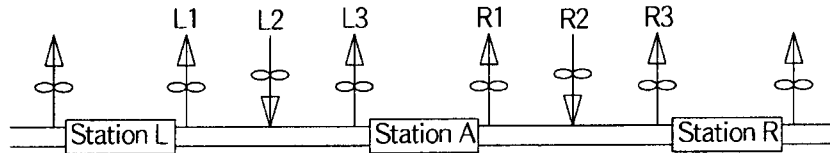


Fig. 2. Location of Left and right shaft fan array from model station A.

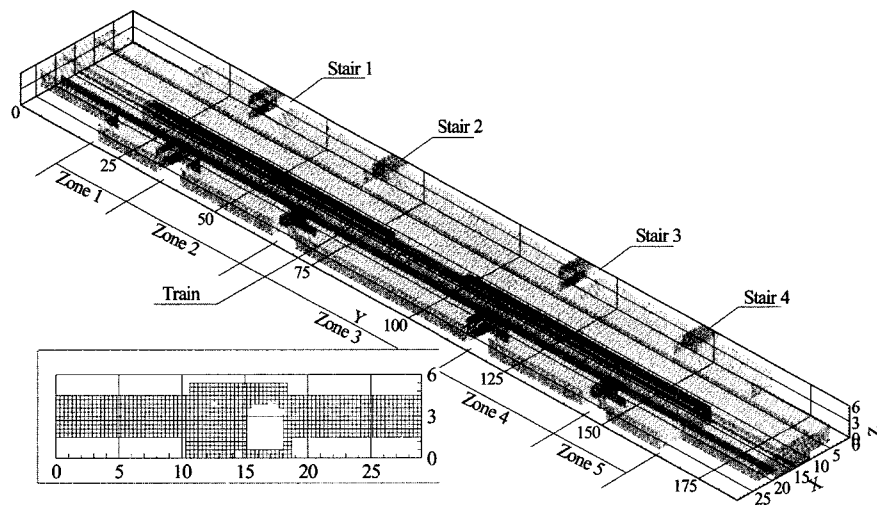


Fig. 3. Grid generation and compartment.

각 차량에 승차한 인원의 구성은 Table 2에 나타내며 화재 발생조건은 Table 3과 같다

Fig. 1~3은 각각 case1~3의 조건에서의 결과를 나타내며 승객은 화재발생에 따른 열차문의 개폐조건의 변화에 따라 240초~250초 사이에 대피 가능한 것으로 나타났다.

2.2 본선부 제연설비 가동에 따른 기류해석

승강장의 기류는 제연설비 및 승강장환기설비 운전 에 좌우된다. 따라서 기류해석은 모델역사를 중심으로 상행과 하행역사를 포함하여 모델을 구축하고 지하철 환경해석 프로그램인 SES를 사용하여 해석하였다. 전 구간은 1개의 route로 구성하였고 정확도를 향상시키기 위하여 모델역사를 중심으로 상행 및 하행을 포함 하는 구간으로 확대 계산하였다. 따라서, 지하철환경해 석은 총 7개의 Zone과 59개의 Line section, 12개의 환기구 섹션, 계단 및 승강장의 상하부 배기를 위한 환 기구 섹션으로 구성하였다. 본 연구에서는 해석역사를 기준으로 양단의 본선터널 구간의 길이를 각각 800 m 로 동일하게 설정하였다.

Fig. 4는 본 연구의 화재해석 대상 승강장A를 기준 으로 하행(L)과 상행(R)터널의 환기수직갱(ventilation Fan shaft)를 나타낸다. 본선 터널부 환기수직갱을 이 용하는 조건으로 다음의 3조건의 제연운전방식으로 설 정하였다.

1. 평상시 환기조건을 제연모드로 설정:

역사 양단의 본선부 환기팬을 화재시에 일반 환기조 건과 동일하게 운전하는 경우(배기운전: L1, L3, R1, R3 급기운전: L2, R2)

2. 본선부 환기팬을 모두 제연모드로 설정:

역사 양단의 환기팬을 모두 배기(L1, L2, L3, R1, R2, R3)하는 경우

3. 압인(Push-pull)방식으로 제연모드 설정:

역사를 중심으로 역사의 한쪽 환기팬은 모두 급기 (L1, L2, L3)하고 또 다른 방향의 환기팬은 모두 배기 (R1, R2, R3)하여 역사내 주기류를 한방향으로 유지하 는 경우.

이상의 3조건은 동일하게 승강장 환기시스템(TES) 을 상하부 모두 제연모드로 설정하였으며 본 조건을 기준을 정리하여 Table 5로 나타내었다.

2.2.1 평상시 환기조건을 제연모드로 설정시 풍량

승강장 하행터널(Station L)에서 유입되는 풍량은 약 450 CMM, 상행터널 방향(Station R)으로는 약 109 CMM정도가 유출되고 있어 본선부에서 승강장으로 유 출입되는 풍량은 무시할 정도로 작은 것으로 나타났다. 승강장 부에서 주기류의 방향은 계단을 통해서 외기 가 유입하여 승강장의 배기 시스템을 통해서 배기(4215 CMM)되는 것으로 나타났다. 계단부를 통해서 유입되 는 풍량의 총합은 약 3870 CMM이며, 승강장부 배기 시스템(TES)을 통해서 모두 배기된다.

2.2.2 본선부 환기팬을 전부 제연모드로 설정시 풍량

해석역사(station A)를 중심으로 하행부의 환기팬(110, 111, 112) 및 상행부향의 환기팬(119, 120, 121) 을 모두 배기 모드로 운전하는 경우이다. 해석역사를 중 심으로 양방향에서 배기되므로 계단을 통해서 다량 (17548 CMM)의 외기가 유입된다. 유입된 공기는 상 행(6220 CMM) 및 하행(7128 CMM)으로 거의 양방향 으로 균등 분배되며 승강장 배기시스템은 4197 CMM 의 값을 갖는다.

2.2.3 압인방식으로 제연모드로 설정시 풍량

승강장 주기류의 방향은 하행방향(7512.3 CMM)에 서 상행방향(11097.1 CMM)으로 형성되며, 계단부에서 는 외기가 유입되며 풍량은(7804 CMM) 모두 제연모 드로 설정방식보다 감소되며 많은 풍량(7803.9 CMM) 이 유입하는 것으로 나타났다. 승강장 배기는 4220 CMM이다.

2.3 화재강도 설정

본 연구에서 책정된 화재강도는 필라델피아 지하철 화재시 예측된 열량값을 기준 산정하였으며 1.5대/hr가 연소하는 값에 해당되는 60×10^6 Btu/h(=17.58 MW) 에 안전율을 감안하여 20 MW로 설정하였다. 이값은 미국 NFPA규정에 의해 최근에 설계된 Los Angeles (21.4 MW적용)와 Boston transitway(20 MW)에 적용

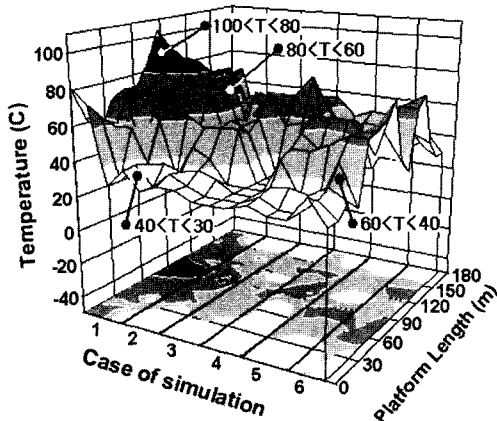


Fig. 4. 3D Temperature distributions & contour of platform for 6 cases.

한 화재강도에 준하는 값이다.

2.4 대피 한계 온도 및 가시거리

현재 국내에는 지하철 화재시 제연설비를 위한 설계 기준이 제시되어 있지 않으므로, NFPA 130(1997)에 준하여 화재시 대피공간의 공기의 온도는 60°C를 초과하지 않도록 하며 연기에 의한 가시거리는 출입문, 벽, 계단 등과 같이 스스로 발광하지 않는 반사체는 20 ft(6.096 m)에서 식별 가능한 조건을 만족하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서 NFPA 130의 조건을 환기설비의 적정성 평가 기준으로 적용하였다.

2.4.1 한계농도값의 계산

가시거리에 대한 평가는 소광계수 K(extinction coefficient)에 의해서 평가된다.

발광원에서 빛의 강도(I₀)와 수광원에서 빛의 강도(I), 소광계수(K)의 관계는 Lambert-Beer 식 (1)과 같다.

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

소광계수는 매연(smoke particle) 농도에 영향을 받게 되며, 소광계수(K)와 매연농도(ρY_s, density of smoke particulate)관계는 식 (2)와 같다.

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

여기서, K_m: Specific extinction coefficient, 7.6 m²/kg 이다.

소광계수(k)와 가시거리(S) 관계는 식 (3)으로 표현된다.

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

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

여기서, C는 상수로 연기의 종류 및 상황에 따라서 달리 적용되고 있으나 일반적으로 반사체에 대해서 C=3을 적용한다. 따라서, 가시거리에 대한 NFPA기준, 출입문이나 벽등과 같은 반사체는 20 ft(6.096 m)에서 식별되어야 한다는 기준을 식 (4)로 계산하여 한계농도 값 65 mg/m³으로 책정하였다.

3. 화재시뮬레이션 방법

3.1 대피 열환경 및 연기농도 해석

화재 발생에 따른 연기 및 고온열 제어효과를 수치 해석적으로 파악하기 위하여 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire dynamics Simulator) Version 3을 사용하였다. 난류유동장의 해석은 LES(Large Eddy Simulation) 모델 및 연소모델로는 혼합분율모델(Mixture Fraction Model)을 적용하였다. 또한, 복사열전달해석의 해석으로 유한체적법(Control Volume Method)을 사용하였다. 화재는 열차가 승강장에 정차하여 발생하고 열차중앙 1량이 전소하는 조건이며 발화위치는 선로부 기준 2.6 m 상부 지점으로 선정하였다. 해석은 이 미 화재가 발생한 열차가 승강장에 진입하여 급속 확산하는 조건으로 300초 대피시간에 대해 계산을 수행하였다.

Fig. 3은 해석에 사용된 격자를 나타내며 총 격자수는 64,800(90×360×20)개이다.

3.2 계산조건

화재해석에 대한 경계조건은 SES 해석 결과를 기준으로 Table 4에 나타냈다. Case1, 5, 6은 본선터널의 제연을 실시하지 않으며 Case2, 3, 4는 본선터널의 제

Table 4. Boundary conditions

Case	Boundary Condition					
	Left tunnel plan contact with station		Initial temp. (°C)	Heat Release Rate (kW/m ²)	Right tunnel plan contact with station	
	Flow	CMM			Flow	CMM
1	Pressure boundary condition		30	484.85	Pressure boundary condition	
2	Inflow	455.6			Outflow	109.5
3	Outflow	7128			Inflow	4198
4	Inflow	7512			Outflow	11097
5	Pressure boundary condition				Pressure boundary condition	
6	Pressure boundary condition				Pressure boundary condition	
Flame size	(2.75×15 m ²)					

Table 5. Operating mode of fan shaft & track exhaust system

Case	Mechanical Ventilation System							
	Fan shaft at left tunnel			Track Exhaust System at Platform		Fan Shaft at right tunnel		
	L1	L2	L3	UP	DOWN	R1	R2	R3
1	○	○	○	○	○	○	○	○
2	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↑
3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
4	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑
5	○	○	○	↑	○	○	○	○
6	○	○	○	○	↑	○	○	○

↑ : Exhaust ↓ : Intake ○ : stop

Table 6. Mechanical ventilation amount of fan shaft & track exhaust system

Case	Mechanical Ventilation Amount (CMM)							
	Fan shaft at left tunnel			Track Exhaust System at Platform*		Fan Shaft at right tunnel		
	L1	L2	L3	UP	DOWN	R1	R2	R3
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3647	7669	3672	40%	60%	3694	7397	3731
3	3604	7601	3611	40%	60%	3665	7354	3666
4	3610	7635	3612	40%	60%	3649	7376	3670
5	-	-	-	100%	-	-	-	-
6	-	-	-	-	100%	-	-	-

*Up and Down separate percentage for the total TES exhaust amount, 3700CMM

연방식에 따라 유출입량 및 방향의 변화를 갖는다. 따라서, Case1, 5, 6은 승강장부와 터널구간의 경계조건으로 압력경계조건을 Case2, 3, 4는 SES 시뮬레이션의 결과를 경계조건으로 계산을 수행하였으며 제연모드방식을 Table 5에 나타냈다. Table 6은 제연모드로 전환시 가동 조건별 공기유입 및 배출량을 나타냈다.

4. 결 과

4.1 방식별 배열 및 제연효과

화재시 승객의 원활한 대피에 효과적인 제연절환운전 모드 선정을 위하여 Table 5의 6종류의 제연운전방식에 대해 화재해석을 실시하여 배열 및 제연효과를 비교하였다. Fig. 4는 화재열차가 정차한 승강장을 대상으로 온도분포도를 Fig. 5는 연기농도 분포도를 나타냈다.

Case별로 승강장 온도분포를 비교한 Fig. 4로부터 Case1은 80°C < T < 100°C의 상대적으로 높은 열분포를 나타냈다. 전반적으로 본선터널구간의 수직갱 환기기

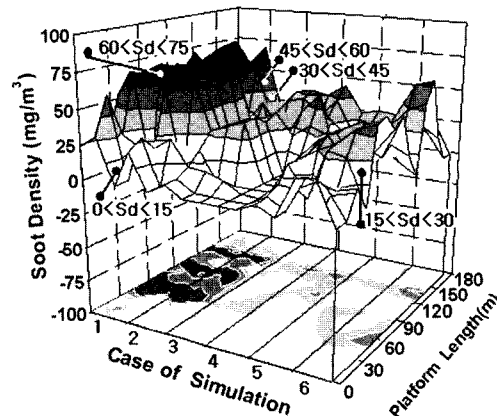


Fig. 5. 3D soot density distributions & contour of platform for 6 cases.

와 승강장환기설비(TES)를 동시에 제연모드로 절환시키는 Case2,3,4가 승강장환기설비(TES)만으로 구성된

Case5, 6보다 승강장의 열분산 효과가 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 대피열환경이 우수한 Case3과 4의 경우, Case3은 승강장 전체면적에 걸쳐 $T < 60^{\circ}\text{C}$ 의 온도분포를 나타냈으며 Case4는 압인(push-pull)특성으로 신선외기가 유입되는 전반부는 $30^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$ 의 낮은 온도장을 유지하는 반면 화재위치를 지나면서 $60^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$ 급격한 온도 상승을 나타냈다. Case5는 승강장 상단만으로 제연모드를 구성하는 경우이며 Case6은 승강장 하단만으로 제연모드를 각각 구성하고 본선 터널부의 수직개환기기는 운전정지 조건하에서의 온도분포도를 나타낸다. Case5가 Case6보다도 낮은 온도분포도를 형성하고 있으며 case5는 화재중앙부를 제외하고 $T < 60$ 의 온도분포를 나타냄으로서 승강장 선로부 상부TES의 제연절환만으로도 상당한 배열효과가 있는 것을 나타냈다.

Fig. 5는 가시거리의 적대인 매연농도를 Case별로 나타내었다. Case1과 case 2가 전체에서 상대적으로 높은 농도분포로서 65 mg/m^3 을 초과하는 영역이 상당부분 존재하는 것으로 나타났다. case 3은 대부분 지역의 가시거리가 $Sd < 60 \text{ mg/m}^3$ 으로 가시거리의 확보기준은 만족하는 것으로 나타났다. Case4는 온도장과 동일한 특징으로 승강장 선로부 상부만으로 제연을 실시하는 경우는 터널수직개환기기를 동시에 제연모드로 전환하는 경우보다 배출특성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 또한, TES 상부를 제연모드로 전환하는 경우가 하부만으로 제연하는 경우보다 상대적으로 배출효과가 높게 나타났다.

4.2 승강장 평균 연기농도 및 온도장 비교

승강장 온도 및 농도분포도를 기준으로 절대적 평가

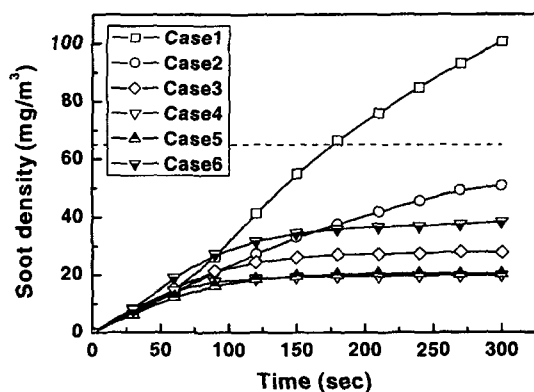


Fig. 6. Mean soot density above 1.5 m plan of subway platform.

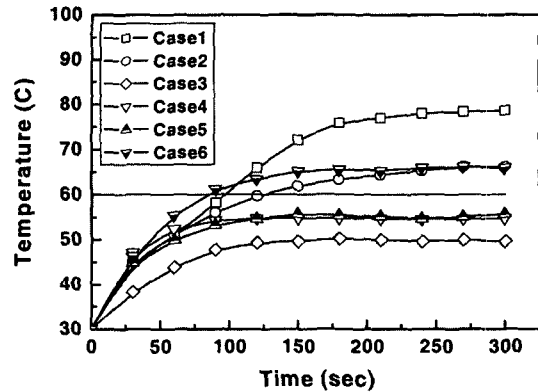


Fig. 7. Mean temperature above 1.5m plan of subway platform.

의 어려움이 있으므로 화재열차를 기준으로 양단 승강장의 온도 및 연기농도의 평균을 계산하여 온도 및 연기농도를 비교하였다.

Fig. 6과 7은 승강장 1.5 m 상단면의 평균온도 및 평균연기농도를 나타냈다.

Case1은 화재발생 270초 이후부터 대피에 부적합한 65 mg/m^3 의 평균농도값을 나타냈으며 Case2~6은 기준농도를 만족하였다. 가장 효과적인 제연방식은 Case4와 Case5로 나타났으며 본선부 수직개환기팬을 제연모드로 전환하여 사용하는 경우보다 화재발생지역을 중심으로 적극적으로 제연하는 방식이 보다 효과적인 것으로 나타났다. 따라서, 승강장부의 상부TES의 배출효율을 높이는 것이 보다 효율적인 것으로 나타났다.

Case1, 2, 6은 화재발생 100초를 전후하여 대피에 부적합한 60°C 의 평균온도를 나타냈으며 Case3, 4, 5는 기준온도를 만족하였다. 가장 효과적인 배열방식은 Case3과 Case4로 나타났다. 이중에서도 Case3의 방식이 화재발생 초기부터 배열특성이 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 수직개환기팬을 전부 배기모드로 전환하여 배열하는 방식이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

5. 결 론

본선부 제연방식별 배열 및 제연 해석결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 본선환기의 제연절환방식에 따라 승강장부의 열환경 및 연기농도에 큰 차이점을 나타냈다.
2. 연기농도장을 기준으로 대피에 가장 효과적인 제연절환방식은 승강장 상부제연방식이다.

3. 압인방식인 Case4는 화재 하류지역으로의 급격한 연기확산을 초기부터 유도함으로써 기류방향에 위치한 영역에서 승객 대피에 원활하지 못하다.

4. 가장 효과적인 배열방식은 화재발생 초기부터 열 배출 특성이 우수한 Case3으로 나타났다. 따라서, 수직환기팬을 전부 배기모드로 절환하여 배열하는 방식이 가장 효과적이다.

5. 제연은 외기의 유입으로 농도를 희석시키는 방식보다 발생시 확산이전에 바로 배출시키는 것이 효과적이며 배열은 이와 반대로 신선외기와 열확산을 동반하여 배출시키는 것이 효과적이다.

6. 승객의 원활한 대피가 가능한 가시거리 확보에 중점을 두어 본 연구의 조건에서는 승강장 상부제연/배열방식이 가장 우수한 것을 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 인천대학교 교내 연구사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

기호설명

I_0	: 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]
K_m	: 비흡광계수[m ² /kg]

S : 가시거리[m]

T : 온도[°C]

참고문헌

1. W. A. Swansier, "Defending Subways Against Chem-bio Terrorism", SAND98-8210, Sandia National Laboratory(1997).
2. P. C. Miclea, "The Impact of Fire Location in a Subway Station on Computer Simulation Results and Fan Operation Requirements", Aerodynamicss and Ventilation of Vehicle Tunnels, 9th International Conference, pp.589-597(1997).
3. J. Bader, "An Emergency Ventilation Technique for Highway, Rail and Subway Tunnel Fires", Tunnel Fires and Escape from Tunnel, 3rd Int. Conference, pp.289-297(2001).
4. D. T. Elias, "Numerical Simulation of Subway Station Fires and Ventilation", 1996 ASME Fluid Engineering Division Proceedings, pp.557-562 (1996).
5. <http://www.ies4d.com/VESsystem/VE-Evaluation/simulex/simulex.htm>.
6. <http://www.fta.dot.gov/research/equip/adsim/ses/ses.htm>.
7. NFPA, Code502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways 2001 Edition, Annex B Temperature and Velocity Criteria.
8. <http://fire.nist.gov/fds/>.