

PSD 설치역사의 화재유동 및 배연 효율 연구
The Study of Fire Driven Flow and Smoke Exhaust Efficiency
for PSD Installation Subway Station

장용준*
Jang, Yong-Jun

이창현†
Lee, Chang-Hyun

김학범**
Kim, Hag-Beom

김진호***
Kim, Jin-Ho

ABSTRACT

This research was performed with emphasis on fire driven flow behavior and smoke exhaust efficiency which depend on the presence of PSD which are being installed domestically and overseas. For simulation, Jung-ang-ro station of Dae-gu subway station was chosen as model, and fire driven flow analysis was performed by using FDS as flow analysis code. Since many calculation time are required for calculation due to increase in the number of grid as the entire station is modeled, simulation was conducted in parallel processing technique. The fire driven flow analysis was analyzed case by case with composing fire scenario to compare fire driven flow and smoke exhaust efficiency changes depending on the presence of PSD. For fire scale, fire strength of 10MW was studied by referring to NFPA-130. The calculation results were analyzed with focus on passenger safety by referring to NFPA-130.

국문요약

본 연구에서는 현재 국내외적으로 설치가 이루어지고 있는 PSD에 대하여 설치 유무에 따른 화재유동 변화와 배연효율변화에 중점을 두어 연구를 진행하였다. 시뮬레이션 모델은 대구지하철 중앙로 역사이며, 승강장과, 대합실 2개층을 포함하여 화재해석을 수행하였고, 화재해석 프로그램은 FDS를 사용하였다. 역사 전체를 모델링함에 따른 격자수 증가로 많은 계산시간이 소요되므로 병렬처리 기법을 통한 화재해석을 수행하였다. PSD 유무에 따른 화재유동 및 배연효율 변화의 비교를 위하여 화재시나리오를 작성하여 Case별로 화재해석을 수행하였다. 화재규모는 NFPA-130을 참조하여 10Mw상황에서의 화재유동을 연구하였다. 해석 결과는 NFPA-130을 참고하여 승객안전에 중점을 두어 분석하였다.

1. 서론

최근 국내외적으로 승객안전과 더불어 역사내 공기질 향상과 에너지 효율증대, 전동차 운행으로 인한 소음경감 등의 이유로 PSD 설치가 늘고 있는 실정이다. 이는 지하철 이용 빈도 증가와 체류시간이 길어짐에 따라서 안전하고 쾌적한 생활환경의 조건이 요구되고 있기 때문이다. 이러한 사회적 흐름에 따라 PSD 설치 역사가 늘고 있고, 이에 따라 PSD 설치에 따른 지하역사 환경변화에 대한 연구가 활발히 진행 중에있다.

† 이창현 : 정회원, 철도기술연구원, 철도환경연구실, 연구원
E-mail : changhy@krii.re.kr
TEL : (031)460-5856 FAX : (031)460-1234

* 장용준 : (정)비회원, 철도기술연구원, 철도환경연구실, 연구원

본 연구에서는 FDS 화재시뮬레이션 Code를 이용하여 지하승강장 화재발생시 화재유동일 살펴보고, PSD 설치 역사와의 비교를 통하여 PSD 유무에 따르는 화재유동 변화와 배연효율의 변화에 대한 연구를 진행하였다. 또한 해석 결과를 해석 후처리 프로그램인 Smoke View와 Tecplot을 이용하여 보다 다양하게 해석결과를 분석하였다.

2. 시뮬레이션 모델 구성

2.1 해석모델

시뮬레이션 대상으로는 대구지하철 중앙로 역사를 그림1. 과 같이 지하3층 승강장, 지하2층 대합실, 지하 1층 대합실로 구성하였으며, 연결통로는 각 층간의 계단으로만 화재유동이 전파한다고 가정하였다. 외부와 연결되어진 개구부는 지하승강장 양쪽 터널 부분과 지하1층 대합실에 연결되어진 외부출입 계단으로 설정하였다. 객차는 총 12량을 상하행선에 열차 정차위치에 배치하였으며, 객차의 형상은 연결면간 거리 18m, 차체길이 17.5m, 차체폭 2.75m 지붕높이 3.6m, 객실 상면 높이 1.115m로 하였으며, 그림 3.과 같다. 승객출입문은 승강장 플랫폼으로는 모두 열려 있으며, 각 객차간의 개폐이는 모두 연결되어 있다 가정하였다. 격자의 크기는 그림 2와 같이 역사 전체를 0.2m 로 설정하였으며, 이는 McGrattan의 화재 크기에 따른 격자크기 설정에 따른 것으로 식은 다음과 같다.

$$L = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_o T_o C_P \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

여기서 $\rho_o = 1.16 \text{ kg m}^{-3}$, $C_P = 1007 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$, $T_o = 300 \text{ K}$, $\dot{Q} = 10 \text{ MW}$. 로 설정하였다. 또한 FDS의 경우 격자셀이 입방체에 가까울수록 즉, 길이, 폭, 높이가 대체로 같은 것이 가장 이상적이며, 계산의 중요한 부분이 Fast Fourier Transform (FFTs)에 근거한 Poisson solver를 이용하므로 격자의 치수는 $2l3m5n$ (l,m,n은 정수)이어야 하므로 이에 맞추어 격자를 생성하여 약 500만개의 격자를 사용하였다.

객차와 승강장 플랫폼 사이에 각 Case에 따라 PSD가 없는 경우, PSD 승객출입문이 닫혀 있는 경우 PSD 승객 출입문이 열려 있는 경우로 나누어 밀폐형 PSD를 가정하여 모델링 하였다.

제연에 필요한 승강장과 대합실 1, 2 층의 환풍기는 대구지하철 중앙로 역사 도면을 참조하여 그림2. 과 같이 모델링 하였으며, 그 개수는 그림 4.에서 보는 바와 같다.

본 연구에 사용되어진 팬의 개수는 실제 역사와는 차이점이 있으며 이는 도면에 나타나지 않는 부분이나 계단의 경사부천정부분은 고려하지 않았기 때문이다. 향후 연구를 통하여 이러한 점은 개선하도록 할 것이다. 또한 환풍기 개구부의 크기는 그 위치와 용도에 따라 다르지만, 격자의 손실을 적게 하기 위하여 승강장 터널부분을 제외한 나머지 환풍기의 개구부의 크기는 모두 동일한 것으로 가정하였다.

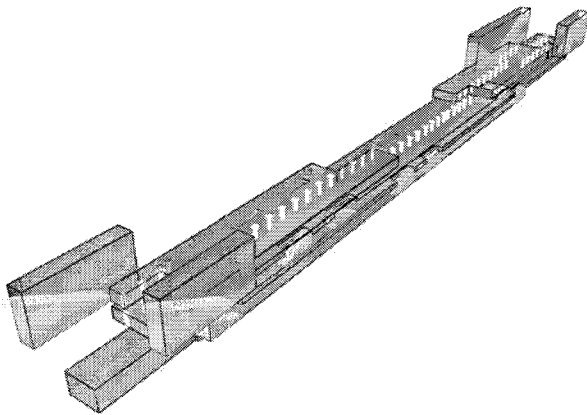


그림 1. FDS Geometry

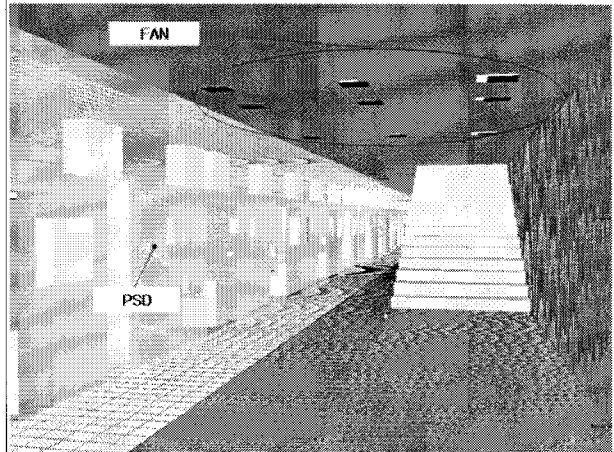


그림 2. Greed System & Construction

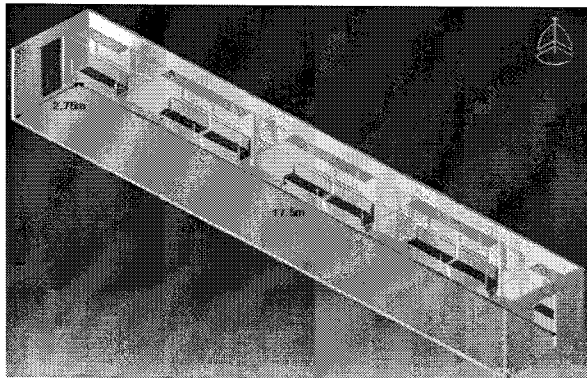


그림 3. Train Geometry

승강장 하부 (좌) - 79개		승강장 하부 (우) - 57개	대합실 1층
승강장 하부 (좌) - 62개		승강장 하부 (우) - 121개	
터널 배기 2개	플랫폼 (좌) - 66개	플랫폼 (우) - 87개	승강장
	승강장 하부 (좌) - 17개	승강장 하부 (우) - 16개	
	승강장 상부 (좌) - 15개	승강장 상부 (우) - 15개	
	플랫폼 (좌) - 66개	플랫폼 (우) - 87개	
		터널 배기 3개	

그림 4 . Number of Fan in Station

2.2 수치모델 및 해석조건

FDS는 Navier-Stokes Equation에 기초하고 있으며, 연소 모델은 혼합분을 연소모델(Mixture Fraction Combustion Model)을 사용하고, Huggett의 화염 표면의 반응메커니즘을 이용한다. 수치해석 대상공간의 화재현상 및 열적 유동, 오염물질의 전파 거동 등을 해석하기 위해 고려되는 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 보존 방정식, 화학종 방정식, 상태 방정식, 연소 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot (\rho D)_i \nabla Y_i + \dot{W}_i''' \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + \nabla \cdot r \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}'' - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i(\rho D)_i \nabla \rho Y_i \quad (5)$$

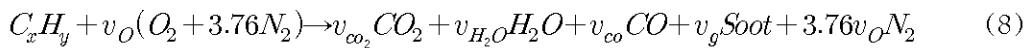
$$\rho_0(t) = \rho RT \sum (Y_i/M_i) = \rho \frac{RT}{M} \quad (6)$$

여기서, R은 기체상수, Q는 단위체적당 열 방출률, q_r 은 단위 면적당 복사열전달계수, w는 단위 체적당 화학종 생성률, Cp는 정압비열, M은 분자량을 의미한다.

$$V_F Fuel + V_O \rightarrow \sum_i V_{P,i} Products \quad (7)$$

여기서 V는 화학양론 계수이고, O는 산소, F는 가연성가스, P는 생성물을 나타낸다.

위의 식을 연료와 산소가 무한히 얇은 불꽃면에서 연소한다고 가정하여 산소와 연료의 관계식을 일반적인 총괄 반응식으로 다음과 같이 표시할 수 있다.



이를 화학양론 계수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{O_2} = \left(x - \frac{M_f}{2M_{CO}} y_{CO} - \frac{M_f}{M_c} y_s \right) + \frac{y}{4} - \frac{Z}{2}, \quad V_{CO_2} = x - \frac{M_f}{M_{CO}} y_{CO} - \frac{M_f}{M_c} y_s \quad (9), (10)$$

$$V_{H_2O} = \frac{y}{2}, \quad V_{CO} = \frac{M_f}{M_{CO}} y_{CO}, \quad V_{soot} = \frac{M_f}{M_c} y_s \quad (11), (12), (13)$$

여기서, MF와 M0는 연료와 산소의 분자량을 나타낸다.

화재유동계산은 FDS code를 사용하였으며, 계산 시간을 단축하기 위하여 총 39개의 Multi_mesh를 사용하고, 이를 병렬처리기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. OS 환경은 해석의 안전성과 계산속도 개선을 위하여 Linux를 사용하였다. 화재 위치는 그림 7.에서 보는 바와 같이 상행선 3번째 차량 중간에 불이 난 것으로 가정하여 연구를 수행 하였다. 화재 규모는 객차 1량이 타는 규모로 약 10Mw로 설정하였으며, 이는 NFPA-130의 내용과 Eureka 499 fire test에서 German intercity passenger railway car에서의 실제 화재시험에서 구한 값을 참조하여 적용한 값이다. 화재시나리오에 따른 화재성장은 보편적으로 많이 쓰이는 화재성장곡선 중에서 Ultra-Fast mode를 가정하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Q = a \times t^2, \quad (\text{여기서 } a = 177.78 \text{ W/s}^2) \quad (14)$$

위의 식에 따라 화재 발생 후 약 237sec에서 최대발열량이 발생하여 이후 일정하게 유지 되는 것으로 가정하였고, 이는 그림6.에서 보는 바와 같다. 또한 발화객차에서 발생한 화재로 인한 화재 전파와 객차의 물성치에 의한 화재전파는 표준적인 비교를 위해 일어나지 않는 것으로 적용하여 연구를 진행하였다. 화원 모델 실제 실험에서 많이 사용되어지는 Heptane(C7H16)을 모델로 하였으며, 이에 따른 연소열,

CO 발생량, Soot 발생량은 표 1.에서 보는 바와 같다. 연소의 발열량에 따라 연료와 산소의 반응으로 인하여 생성된 연소 생성물의 양과 거동 해석을 위하여, 종의 보존 방정식(4)을 사용하며, 연소방정식에 의한 반응식(8)을 사용하여 해석을 수행하였다.

각 층간의 배연 용량은 그림 8. 과 같이 설정 하였으며, 실제로 각 환풍기의 배연 용량은 환풍기의 위치와 용도에 따라 다르지만, 실제 계측이 어려우므로 본 연구에서는 모두 같은 배연 용량을 가진 것으로 가정하였다. 총 계산 시간은 1200sec로 하였으며, 이는 NFPA-130의 내용을 참조하여 승객피난이 충분히 완료되었을 거라 생각되는 시간으로 선정하였다.

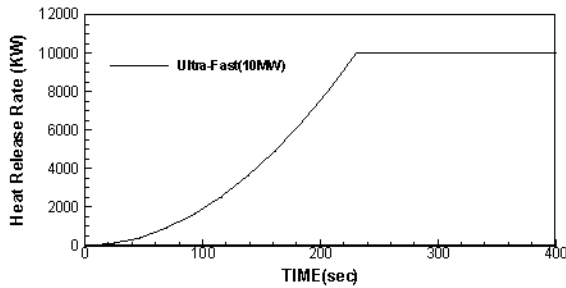


그림 6. Heat Release Rate (Ultra-Fast)

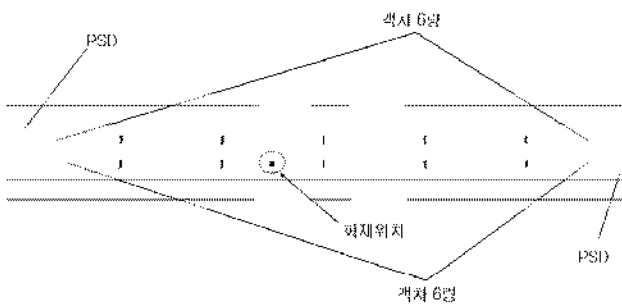


그림 7. The Position of Fire and Train

표 1. Fire Source

연료	Heptane
C	7
H	16
HEAT_OF_COMBUSTION	44600
CO_YIELD	0.00765
SOOT_YIELD	0.015

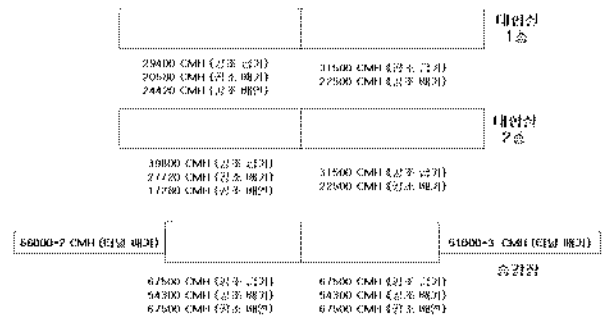


그림 8. The Capacity of Smoke Exhaust

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션은 PSD의 유무와 PSD_Door의 Open, Close 에 따라 Case 별로 분석하였으며, 화재위치는 비교를 위하여 고정하였다. 결과분석은 FDS 후처리 프로그램인 Smoke View와 Fds2ascii 파일을 이용하여 Tecplot을 사용해 수행하였다. Tecplot의 경우는 FDS의 장애물 데이터가 입력되지 않으므로 본원에서 제작한 간단한 프로그램을 사용하여 그림 9.와 같이 나타내었다.

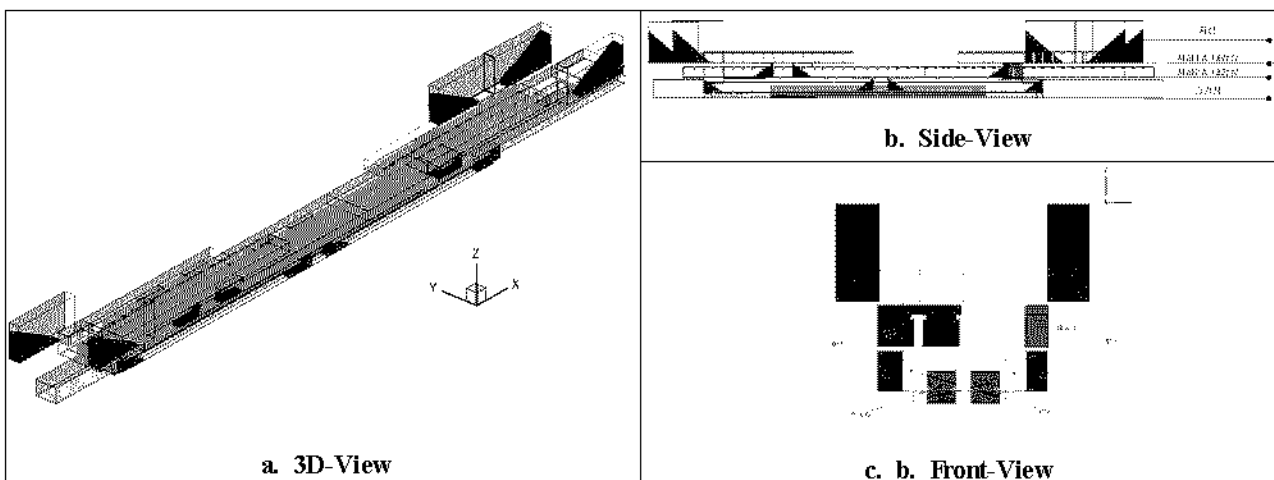


그림 9. 3D Modeling View (Tecplot)

3.1 PSD 설치가 되지 않은 지하역사 (Case1.)

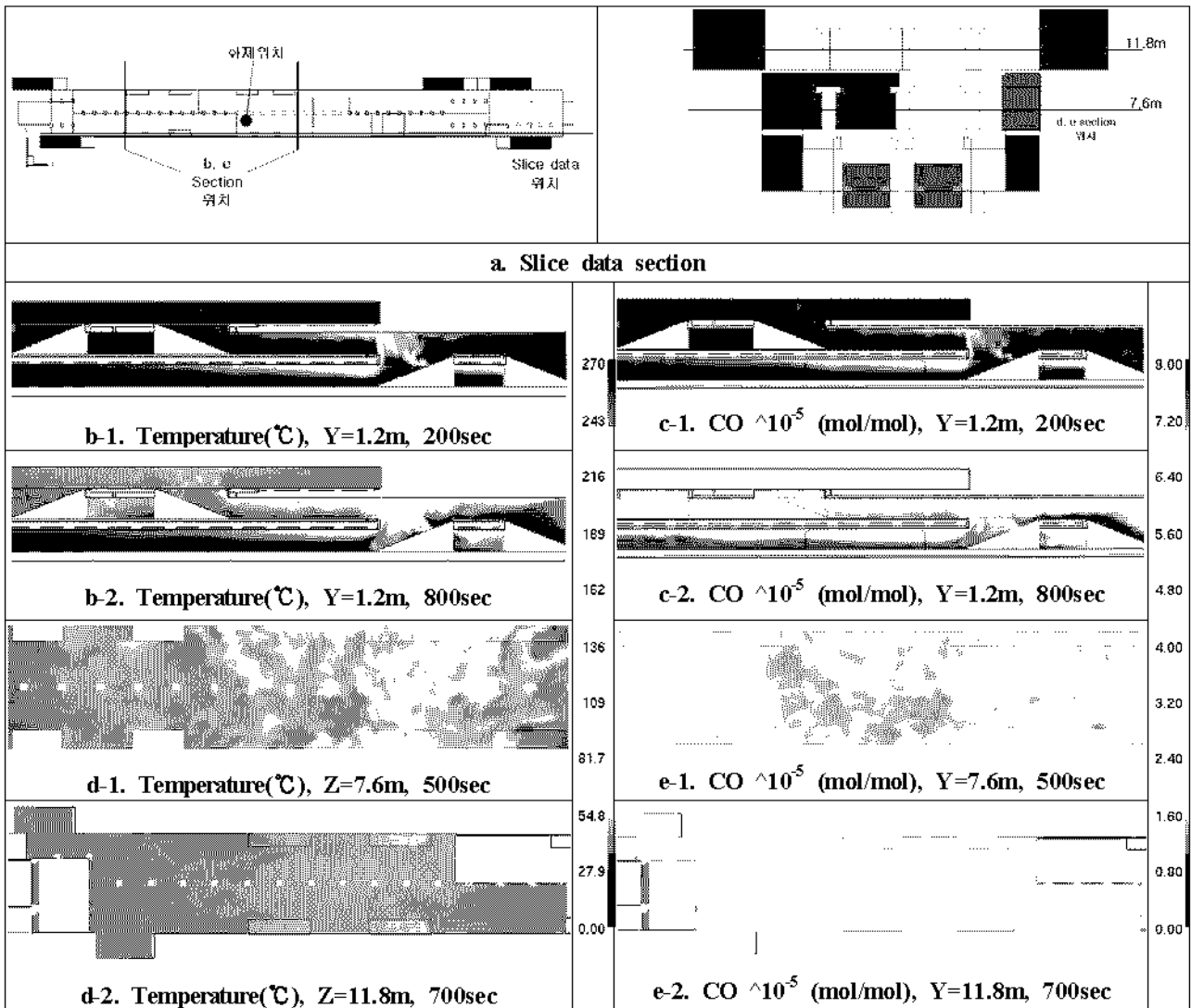


그림 10. Temperature and CO distribution of Subway Station

Case 1.은 PSD 설치가 되지 않은 역사로 다른 Case와의 비교를 위하여 배연시설은 가동하지 않았다. 그림 10. 은 시간에 따른 온도분포 및 CO 분포를 보여주는 그림으로 사람의 호흡높이(1.5m)에 초점을 두어 분석하였다. CO 분포를 통하여 다른 연소 생성물의 분포를 예측 가능하므로 CO 분포 량만을 표시하였다. 화재발생으로 온도가 급격히 상승하여 뜨거워진 공기와 연소 생성물은 열 부력에 의하여 승강장 천정을 따라 이동하게 되며, 대합실과 연결된 계단을 통하여 역사 전체로 이동하게 된다. 화재발생 100sec 후 뜨거워진 공기와 연소 생성물은 대부분 터널 천정을 따라 이동하며 화재발생지역 주변의 일부 플랫폼 부분을 위험 온도(50℃)까지 상승 시켰다. 500sec 후에는 그림 b-3에서 보는 바와 같이 대합실 2층 대부분 화재로 인하여 온도가 상승하며, 화재지역과 연결된 계단 근처에서의 온도는 위험 온도까지 상승되는 것을 볼 수 있다. 700sec 후에는 지하1층 대합실까지 영향을 끼치고, 800sec 후에는 지하역사 전 구역이 화재로 인한 영향을 받으며, 대부분의 지역이 위험온도까지 상승하고, CO 농도 또한 상당량 높아지는 것을 알 수 있다.

3.2 PSD가 설치된 역사 와 비 설치역사 비교 (Case2.)

Case 2.는 PSD가 설치된 지하역사로 배연시설을 가동하였으며, PSD에 의한 화재유동변화를 중점으로 분석하였다.

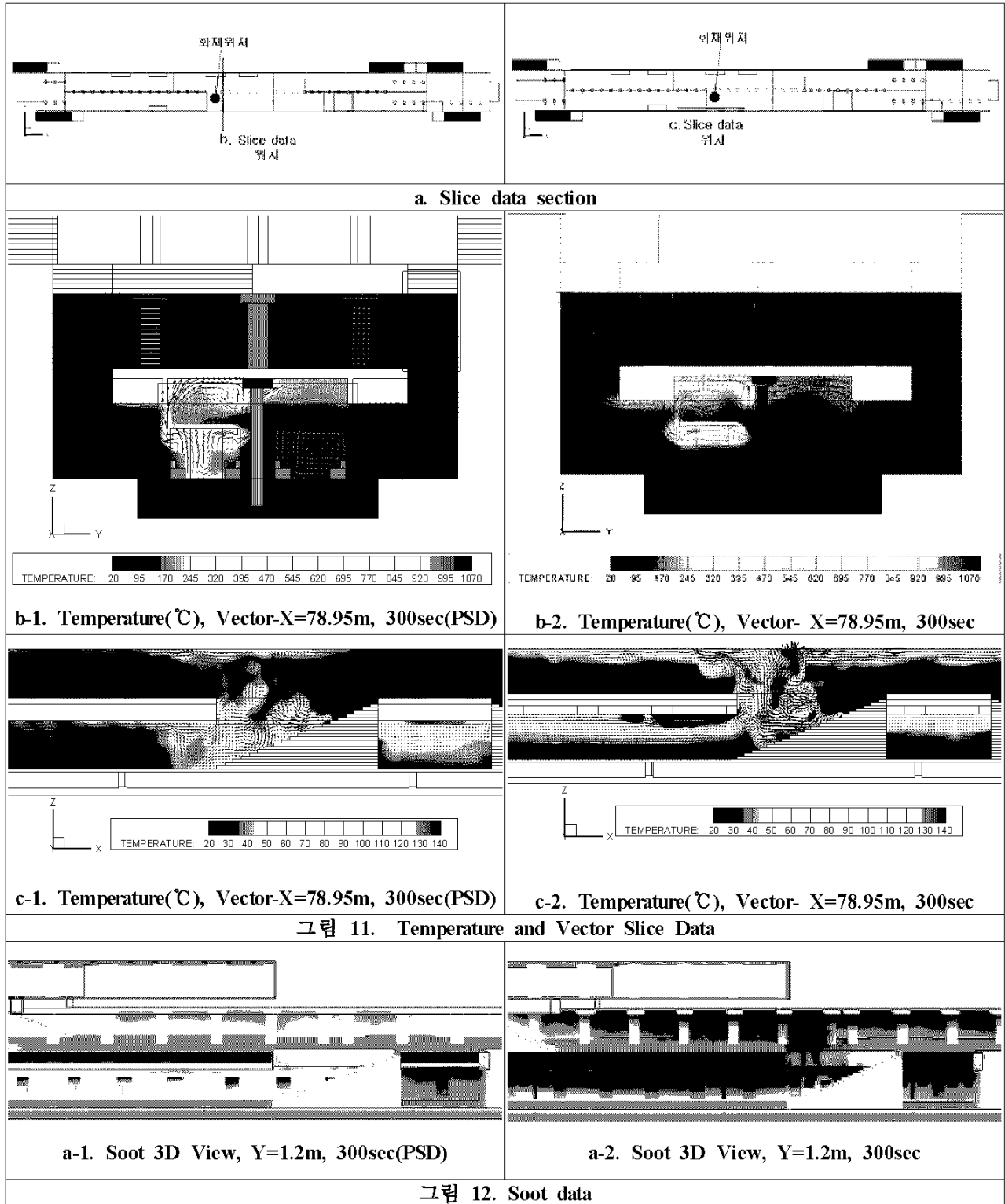


그림 11. Temperature and Vector Slice Data

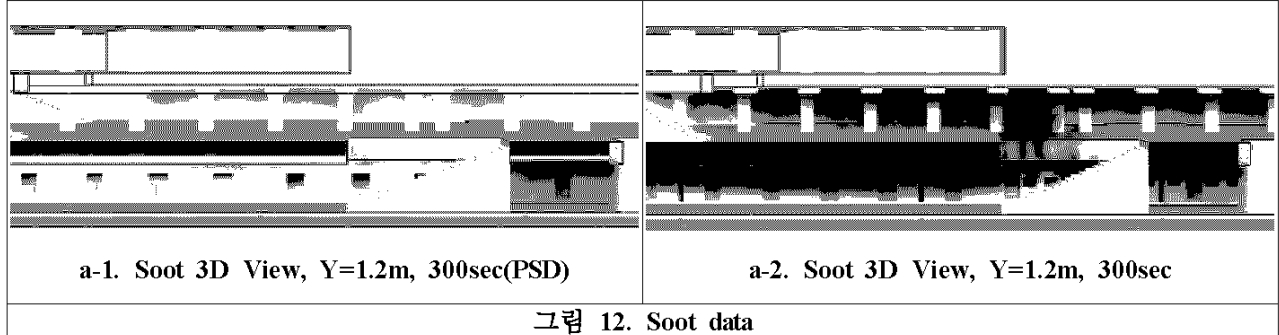


그림 12. Soot data

그림 11.은 화재주변에서의 화재거동을 분석한 것으로 승객들이 전동차를 모두 빠져나가 대합실로의 대피가 이루어지는 시간을 300sec로 가정하여 분석하였다.(NFPA-130 참조) 화재로 인한 연소생성물 및 기류는 열 부력에 의하여 전동차의 개구부를 통하여 승강장 터널의 천정으로 이동하게 되며, 터널 천장부터 점점 짧이게 되면서, 플랫폼으로 이동하여 대합실과 연결된 계단을 통하여 역사전체로 퍼져나가게 된다. 이는 승객들의 피난방향과 일치하므로 이를 최대한 지연시키는 방안이 필요하며 방연벽이 한 예이다. 본 연구에서 분석한 바로는 그림 11. 에서와 같이 PSD가 설치된 경우는 없는 경우보다 더 많은 하강을 필요로 하므로 연소생성물과 위험온도의 기류가 역사로 확산되는데 방해가 되며, 이로 인하여 마차 방연

벽과 같은 역할을 하게 되므로, 승객들이 안전하게 대피할 수 있는 시간을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 물론 PSD가 설치된 역사의 경우도 화재발생지역 근처에서 연소생성물과 위험온도의 기류가 플랫폼으로 이동하기는 하지만, PSD가 없는 경우에 비하여 극히 적은 양이기 때문에 배연시설에 의하여 모두 배출될 수 있었다. 이러한 결과를 비추어 볼 때 적은 량의 풍량을 가지고도 배연을 할 수 있으므로, 배연효율 향상이 기대된다. 그림 12.는 Soot의 거동을 3D로 나타낸 것으로 앞에서 분석한 결과와 마찬가지로 PSD가 설치된 역사가 PSD가 미설치된 역사보다 더욱 적은양이 분포하였다.

4. 결론

본 연구는 지하역사 화재발생시 PSD 설치유무에 따라서 변하는 화재현상을 분석하고, 위험요소를 찾기 위하여 FDS 화재해석 코드를 이용하여 화재 유동 해석을 수행하였으며, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 화재로 인한 기류는 열 부력현상에 의하여 승강장 천정을 따라 이동하게 되며, 대합실 연결계단을 따라 이동하기 때문에 승객들의 피난방향과 일치하는 바 이를 지연시켜 승객안전을 도모해야 하며 이를 위한 방법으로 현재 천정부분에 방화벽이나 에어커튼 등을 설치하고 있으며, 밀폐형 PSD의 경우도 화재 유동 확산지연에 큰 역할을 할 수 있는 것으로 확인되었다.

(2) PSD의 설치로 인하여 화재유동의 확산의 방해물로 작용하여 화재로 인한 유독성물질이나, 열원으로 인하여 높아진 기류가 국부적으로 형성되어 있으므로 배연시설의 효율성이 증대 되는 것으로 확인되었다. 하지만, 본 연구에 사용된 자료는 설계 자료에 인한 이상적인 값들을 사용한 것이고, 정량적인 평가는 이루어 지지 않았으므로 향후 실제 실험이나 측정을 통한 연구가 필요할 것으로 보인다.

(3) 본 연구는 정량적인 비교를 위하여 최대한 변수를 줄이고자 지하역사 구조물이나 차량 등의 물성치에 의한 화재전파를 배제하였다. 또한, PSD의 경우 화재로 인하여 파손이나 변형이 일어나지 않는 것을 가정한 것으로 실제 화재현상과는 차이를 보일 수 있으므로, 향후 이에 대한 연구도 같이 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 장용준, 이창현, 박원희, 정우성, "Fluent와 EXODUS를 이용한 승객피난 시뮬레이션", 한국철도학회 논문집 제 11 권 제1호 2008년 pp. 95-100
2. 홍원화(2004), "2.18 대구지하철 화재조사 연구백서", 경북대학교 건축학과 도시환경설비연구실.
3. 건설교통부 "도시철도 정거장 및 환승편의시설 보완 설계지침" 2002.
4. Mcgrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., 1998. Large eddy simulation of smoke movement. Fire Safety Journal 30 (2), 161-178.
5. Mcgrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., 1996. Numerical simulation of smoke plumes from large oil fires. Atmospheric Environment 30 (24), 4125 - 4136
6. 건설교통부 "도시철도 정거장 및 환승편의시설 보완 설계지침" 2002.
7. NFPA 130 고정 안내로 운송 시스템 및 여객 철도 시스템에 대한 기준 2007년 판
8. 장용준, 이창현, 김학범, 김진호, "FDS 및 FLUENT를 이용한 대구지하역사 화재유동 해석비교", 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집
9. 장용준, 김학범,, 이창현, 정우성, "대심도 지하역사에서의 화재시 급/배기 동작유무에 따른 열, 연기 거동 분석", 2008 한국철도학회 추계학술대회 논문집