지하역사에 정차한 열차의 화재에 따른 역사 내 열유동 특성 평가

Evaluation of Heat Transfer Characteristics due to a Fire of a Train Standing at Under-Ground Station

이 광 섭* · 류 봉 조**† · 신 광 복** · 김 동 현*** · 이 은 규**** · 김 재 황****

Kwang-Seob Lee · Bong-Jo Ryu · Kwang-Bok Shin · Dong-Hyun Kim · Eun-Kyu Lee · Jae-Hwang Kim

ABSTRACT

This paper deals with the heat transfer characteristics due to a fire of train standing at under-ground station. In order to analyze the fluid characteristics at under-ground station, the governing equation was assumed to be steady-state, incompressible and turbulent fluid model. The commercial Fluent ver. 6.0 was used to solve the above numerical problem. Through the numerical analysis, fluid path-line, temperature distribution and CO_2 density distribution are demonstrated for three kinds of cases. As a conclusion of the study, a scenario for operation of ventilation fan in a fire is proposed.

1. 서론

현대 사회의 교통수단은 승객의 요구에 따라 이용이 편리하고 안전하며 정시에 이동이 가능한 수단들로 발달을 거듭해왔다. 이러한 요구들이 반영되어 선로 위를 달리는 차량(Railway Vehicle)이 개발되고 오늘날까지 진보해 오고 있다. 그러나 차량운행 시 발생하는 운행 소음은 주변의 주거환경에 문제를 일으켜 점차 지하로 운행되게 되었다. 승강장의 지하화는 밀폐된 공간이라는 약점을 가지고 화재나 차량 운행 시 비산되는 미세먼지에 승객들이 무방비로 노출되어 건강에 적잖은 영향을 끼치고 있는 것이 사실이다. 이러한 문제점을 해결하고자 지하 선로와 지하 승강장에 대한 제연, 제열 환기방식에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 지하 4층 역사에서 차량 화재가 발생했을 경우, 승강장과 계단으로 연결된 지하 3층(대합실)에서의 온도분포와 CO_2 농도 분포 등을 수치해석을 통하여 확인하고 밀폐형 PSD와 환기휀의 작동 매커니즘에 대한 시나리오를 제안하였다.

2. 본문

2.1 계산 모델의 설정

해석 모델은 부산지하철 3호선 2단계 경전철 구간 중 지하 4층의 상대식 승강장 역사를 모델로 선정하였고 구조는 Fig 1.과 같이 선로 단면적이 6.56m(W)×5.6(H)이고 선로의 길이는 105m이며 승강장의 크기는 3.86m(W)×3m(H)×65m(L)이다. 지하3층의 대합실의 크기는 14.28m(W)×3m(H)×65m(L)로 10개의 기둥이 설치되어 있고 기둥을 중심으로 3.57m 떨어진 양쪽 천정부에 대합실 환기 휀(0.5m×0.5m)이 설치되어 있다. 계산 영역은 수치해석 시간을 줄이기 위하여 Fig 2.와 같이 선로 중심을 기준으로 좌우 대칭인 구조로 설정하여 역사의 1/2을 해석영역으로 설정하였다.

* (주) 우진산전, 기술연구소, 비회원

**† 교신저자, 국립한밭대학교 기계설계공학과, 교수, 정회원

E-mail : bjryu1009@hanbat.ac.kr

*** 국립경상대학교 항공기계공학과, 교수

**** (주) 우진산전, 기술연구소

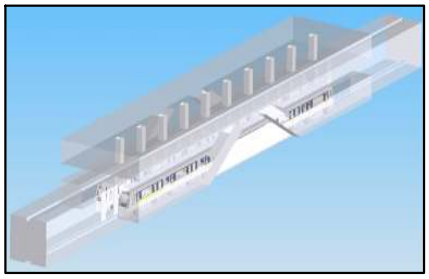


그림 1 3D modeling for simulation

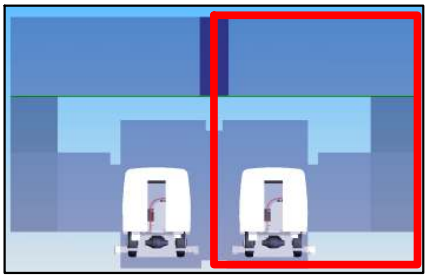


그림 2 Domain for analysis

2.2 지배방정식 및 경계조건

지하역사 내의 유동특성 해석을 수행하기 위하여 유동현상을 기술하는 지배방정식에 대하여 정상상태, 비압축성 난류유동으로 가정하였다. 이에 다음과 같은 보존방정식을 설정하였고 난류 모델로는 표준 $k-\varepsilon$ 난류모델을 설정하였다. 유동장내의 밀도 변화에 따른 부력항(Boussinesq approximation)을 사용하는 비압축성 정상상태 3차원 난류혼합대류유동의 지배 방정식은 다음의 식과 같이 구성되었다.

2.2.1 지배방정식

가) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

나) 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}+S_u \tag{2}$$

다) 난류에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}+\mu_t G-\rho\varepsilon \tag{3}$$

라) 난류에너지 소산률 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}+\frac{\varepsilon}{k}(C_1\mu_t G-C_2\rho\varepsilon) \tag{4}$$

마) 에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}}+\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t})\frac{\partial T}{\partial x_i}+S_T \tag{5}$$

바) 농도방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C)=\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu}{Sc}+\frac{\mu_t}{Sc_t})\frac{\partial C}{\partial x_j}+R_c \tag{6}$$

여기서,

$$\mu_t=C_\mu\frac{\rho k^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

$$\tau_{ij}=-(\mu+\mu_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{8}$$

$$S_u=-\frac{2}{3}(\mu+\mu_t)\frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{9}$$

$$\mu_t G=\mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{2}{3}(\rho k+\frac{\partial u_i}{\partial x_i})\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \tag{10}$$

2.2.2 경계조건

본 연구에 적용된 해석공간의 경계조건은 승강장의 시점부에서 급기 조건을 고려한 inlet를 적용하였고 종점부에 outlet을 적용하였다. 승강장 중앙 선로에서는 경량전철 1량의 크기(약 2.3m×2.5m×9m)의 열원 Source를 설정하였다. 열원 Source와 함께 화재 시 승강장과 대합실로 퍼지는 연기의 유동과 농도를 파악하기 위하여 CO_2의 오염원을 설정하여 확산되는 경향을 파악하고자 하였다. CO_2는 연소반응 시 발생되는 기체중 하나로, 비중은 공기 1에 대하여 1.53정도로 공기보다 무거우며, 상온에서의 미량은 호흡하는데 큰 문제가 되지는 않으나 고온에서 철 등과 반응하면 일산화탄소로 변하는 경우가 많아 화재 시 농도가 높아질 때는 인명에 치명적인 기체가 될 수 있다. 또한, 지하 3층의 대합실에는 총 22개

의 환기구 중 12개를 대합실의 급기용 휀으로, 10개를 배기용 휀으로 설정하여 해석을 수행하였다.

지하 3층 대합실의 환기와 관련하여 설계 시행된 자료에 의하면 대합실에서의 급기는 1,455CMM, 배기는 985CMM이다. 이 수치를 본 해석영역에 적용하기 위하여 휀의 크기를 고려하면 급기휀의 속도는 8m/s, 배기휀의 속도는 6.56m/s로 산출되었다.

화재강도는 경량전철 1량에서 화재가 발생했을 경우를 설정하였으며, 온도는 Marco Bettelini[(1)]의 연구결과에 의거하여 20MW이 열량을 적용하였다. Marco Bettelini 보고서에 의하면 차량의 화재 시 일반 승용차는 2.5-5MW의 열을 발산하며, 버스나 기차는 15-20MW, 가연성 물질을 실은 화물차는 20-30MW, 위험물을 실은 화물차의 경우는 100MW이상의 열을 화재 시 발산하는 것으로 연구결과를 도출하였다. 본 연구에서는 화재강도를 열원의 체적으로 나눈 단위 체적당 열량, 약 300KW/m^3을 입력하였다.

2.2.3 시뮬레이션 적용 조건

본 연구에 적용된 case는 우선 선로부 inlet의 공기 유입 속도에 따라 2.5m/s와 5m/s, 7m/s의 세 가지 모델을 적용하였다. 2.5m/s의 경우는 본선 환기구의 제열풍속에 해당된다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 7m/s는 일반적으로 제연풍속으로 알려져 있기 때문에 우선적으로 시뮬레이션에 적용하였으며, 5m/s는 제열 풍속과 제연풍속의 평균값을 취하여 적용한 것으로 제열과 제연 풍속을 적용하였을 때와 유동과 온도 분포 경향을 비교해 볼 수 있는 데이터라 판단된다.

위의 세 가지 case를 해석한 후, 제연, 제열 풍속의 중간 풍속인 5m/s의 경우에 한하여 지하 3층 대합실의 환기휀 급기와 배기 속도를 각각 4m/s와 3.28m/s, 8m/s와 6.56m/s 로 변화시켜 해석을 수행하였다.

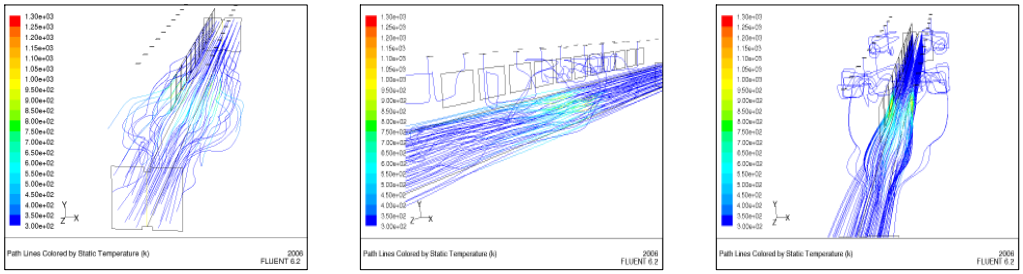
마지막으로 설계 자료에는 급기와 배기 풍량이 다르나, 경향 분석을 위해 급기와 배기 풍량이 같을 때, 모든 휀이 급기가 될 때 그리고 모든 휀이 배기가 될 때의 세 가지 조건을 입력하여 해석을 수행하였다.

표 1. Case에 따른 경계조건

	Factor	Value	Other boundary conditions.
case 1	본선 환기구 Inlet Velocity.	2.5m/s	<Source> 열원: 300KW/m^3 오염원: CO2 <대합실 환기휀 속도> Inlet:4m/s ,Outlet:3.28m/s
		5m/s	
		7m/s	
case 2	지하 3층 대합실 환기 휀	In_fan:4m/s Out_fan:3.28m/s	<Source> 열원: 300KW/m^3 ,오염원: CO2 <본선 환기 속도> 5m/s
		In_fan:8m/s Out_fan:6.56m/s	
case3	지하 3층 대합실 환기휀 가동방식	급,배기 풍량 동일	<Source> 열원: 300KW/m^3 , 오염원: CO2 <본선 환기 속도> 5m/s
		전체 급기(강제)	
		전체 배기(강제)	
		자연 급배기	

3. 결과 및 고찰

그림 4는 case에 따른 path-line과 온도를 나타낸 것이다. 본선에서 유입되는 공기는 승강장으로 유입된 후에 다시 선로 출구 쪽으로 빠져나가는 경향을 보이고 있다. 또한 승강장과 대합실로 연결되는 통로에서 기류가 미약하나마 지하 3층과 지하 4층을 흐르려는 경향이 나타나고 있다. 유속이 늦을수록 선로와 승강장의 유선은 좀 더 복잡한 궤적을 그리며 유동하는 것을 알 수 있다.



a. case 1　　b. case 2　　c. case 3

그림 4 Path-line (with temperature).

그림 5는 case1의 온도분포를 나타낸 것이다. 중앙 대칭면에서의 온도보다 PSD 설치위치에서의 열원 부근 온도분포가 다소 높게 나타나고 있으며 승강장의 천정을 따라 다소 높은 온도가 형성되고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 case 1의 CO_2분포를 나타낸 것이다. 화원 주위의 이산화탄소 농도가 제일 높으며, 이산화탄소는 기류를 타고 승강장 안쪽으로 상당량이 흘러 들어오는 것을 볼 수 있다.

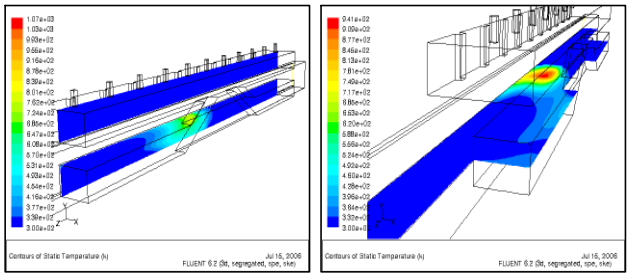


그림 5 Temperature distribution (case 1)

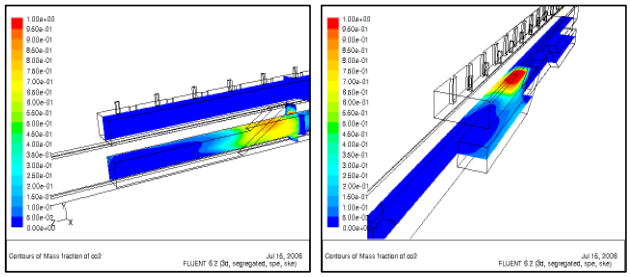


그림 6 CO_2 density distribution (case 1)

그림 7과 그림 8은 각각 case 2의 온도와 농도분포를 나타낸다. case1과 유사한 상태를 보이고 있으며 승강장 내부로 고온의 열과 이산화탄소가 분포하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로 대합실의 유동이 계단을 따라 승강장으로 유입되어 승강장과 본선의 기류에 영향을 주는 정도는 아니라 판단된다.

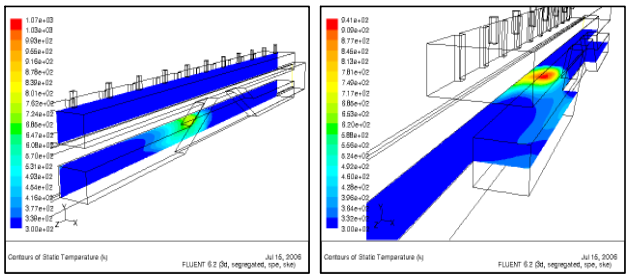


그림 7 Temperature distribution (case 2)

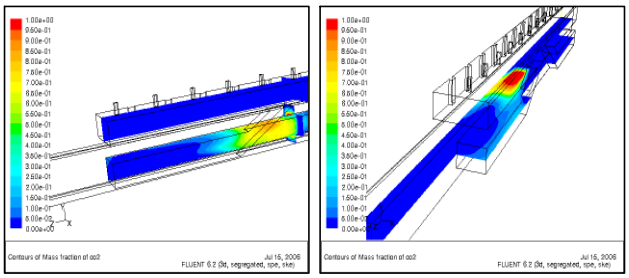
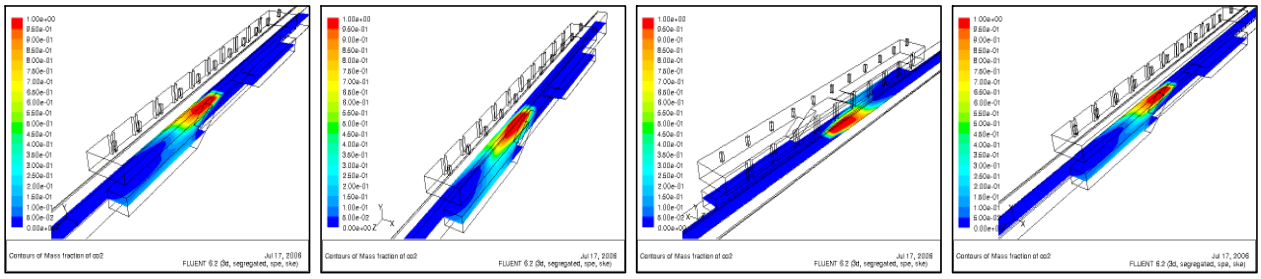


그림 8 CO_2 density distribution (case 2)

그림 9는 case 3의 온도분포를 나타낸 그림이다. 대합실의 환기휀 속도에 따라 승강장과 선로의 온도분포가 약간의 차이가 보이나 승강장으로 편류하는 경향은 a~d 모두 동일하게 나타나고 있다.



a. 급,배기 풍량 동일　　b. 전체 강제 급기　　c. 전체 강제 배기　　d. 자연 급,배기

그림 9 Temperature distribution (case 3)

4. 결론

본 연구에서는 지하역사에 밀폐형 PSD를 설치할 경우의 화재나 기타 해로운 상황에서 승객이 얼마나 보호될 수 있는가를 예측하기 위해 3차원 시뮬레이션을 수행하여 최적의 환기 조건과 대피선을 파악하는데 그 목적이 있다고 할 수 있다. 본 연구의 모델 역사는 부산 지하철 3호선 2단계 경량전철 구간을 시뮬레이션 모델역사로 선정하고 역사의 기본 모델링을 적용하였으며, 3단계 총 8가지 조건의 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본선 시점부에 2.5m/s와 5m/s, 7m/s의 유속으로 본선 종점부 방향으로 급기 하였을 경우, 7m/s의 조건에서 선로 및 승강장에서 온도, 농도 분포가 가장 양호하게 나타났다. 이 결과는 세 가지 경우에 대하여 속도가 보다 빠른 조건이 고온, 고농도의 공기를 배출하는데 최적이라는 결론을 얻을 수 있다.
2) 본선 급기가 5m/s로 동일할 때, 지하 3층 대합실의 최적 환기조건으로는 전체 환기휀을 강제 급기로 설정하는 것이 가장 양호한 결과를 나타내었다. 본선과 승강장을 음압으로 유지하면서 대합실의 송풍조건을 급기로 하면 기류가 계단을 통해 승강장과 본선으로 흘러가면서 상대적으로 대합실에는 신선한 공기를 공급받을 수 있다.
3) 대합실 환기구의 급,배기가 동시에 이루어질 경우에는 대합실에는 오염의 큰 문제는 없으나 승강장 계단 부근에 고온, 고농도의 오염기류가 형성되어 사고시 승객 대피선이 막힐 수 있는 문제가 발견되었다. 따라서 결론 2)에서와 같이 대합실 송풍은 급기로 설정하여야 한다.
4) 시뮬레이션 결과 선로와 승강장의 경계에 밀폐형 PSD를 설치할 경우 화재시 열과 오염된 공기로부터 승객의 안전에 도움을 줄 수 있다고 판단된다.

5. 화재시 환기휀의 작동 시나리오 제안

본 연구의 시뮬레이션 결과를 참고로 지하 역사의 화재시 적용할 수 있는 환기휀의 작동 시나리오를 제안하고자 한다. 본 시뮬레이션 모델에서는 PSD를 제외하고 모델링 하였다. 그 이유는 지하역사에 설치되는 PSD의 경우 완전 밀폐형이므로 선로 화재시 PSD가 닫혀있을 경우에는 연기가 승강장 쪽으로 확산되지 못한다는 가정이 있었기 때문이다. 그러나 제연 시나리오에는 PSD의 개폐동작까지 적용하여 제안한다.

5.1 전동차 화재시

	전동차 출입문	PSD		본선송풍기 (지하4층)	승강장 송풍기 (지하 4층)	대합실 송풍기 (지하 3층)
		PSD 출입문	선로 출입문			
작동 방법	열　림	열　림	열　림	제연운전(배기)	가압운전(급기)	가압운전(급기)
비　고						

전동차 화재시 승객의 대피를 위하여 전동차 문과 PSD는 열려 있어야 한다. 이때 본선의 좌, 우측 송

풍기는 제연운전을 실시해 양쪽으로 모두 연기를 배출할 수 있도록 운전을 실시해야 하며, 지하 4층 승강장 송풍기와, 지하 3층의 대합실 송풍기는 급기운전을 실시해 승강장으로 신선한 공기를 계속 공급하여야 하며 선로쪽의 연기가 승강장 계단을 통해 대합실로 올라오는 것을 방지 하여야 한다. 그리고 승강장 송풍기와 대합실 송풍기의 급기운전은 신선한 공기를 승강장 계단을 통해 계속 공급하면서 승객들의 대피선을 확보할 수 있도록 해야 하며. 대피하는 승객들에게는 자세를 최대한 낮추고 계단을 통해 대합실로 대피할 수 있도록 유도하여야 한다.

5.2 승강장 화재시

	전동차 출입문	PSD		본선송풍기 (지하4층)	승강장 송풍기 (지하 4층)	대합실 송풍기 (지하 3층)
		PSD 출입문	선로 출입문			
작동 방법	닫 힘	닫 힘	열 림	제연운전(배기)	제연운전(배기)	가압운전(급기)
비 고	전동차 통과					

승강장 화재시에는 승강장에 대기하던 승객들에게 직접적으로 위험이 전달되기 때문에 최대한 빠르게 제연이 이루어 져야 한다. 그렇기 위해서는 우선 화재 후 역사에 진입하는 전동차는 무정차 통과시켜야 하며 본선 송풍기와 승강장 송풍기는 모두 제연운전을 실시하여야 한다. 그리고 PSD의 선로출입문을 개방하여 승강장의 양쪽으로 연기가 빠져나갈 수 있도록 해야 한다. 또한 대합실 송풍기는 가압운전을 계속하여 승강장에 신선한 공기를 공급하여야 한다. PSD 출입문도 개방할 경우 본선의 음압이 줄어들어 승강장의 제연이 원활하지 않고, PSD의 열린 다른 문으로 연기가 역류할 소지가 있으므로 PSD 출입문은 닫아둔 채 선로 출입문만 개방하는 것이 효과적일 것이라 판단된다. 또한 승강장 화재로 대피선이 폐쇄될 경우를 감안하면 선로 출입문을 개방하여 선로를 통해 반대쪽 승강장이나 다음 역사로 대피하는 방법도 좋을 것이다.

5.3 대합실 화재시

	전동차 출입문	PSD		본선송풍기 (지하4층)	승강장 송풍기 (지하 4층)	대합실 송풍기 (지하 3층)
		PSD 출입문	선로 출입문			
작동 방법	닫 힘	닫 힘	열 림	운전중지	가압운전(급기)	제연운전(배기)
비 고	전동차 통과					

대합실 화재시에는 승강장 화재시와 마찬가지로 전동차는 역사에 정차하지 말고 그대로 통과 하여야 한다. 대합실의 송풍기는 제연운전을 실시하여 최대한 빠른 속도로 대합실내에 연기를 제거해야 하며, 승강장에 대기하던 승객들은 선로측 출입문을 통하여 다른 역사로 대피하는 것이 효과적이다. PSD 출입문은 개방할 경우 승강장이 음압이 형성될 우려가 있다. 승강장에 음압이 형성되면 대합실의 연기가 승강장 쪽으로 퍼질 우려가 있기 때문에 PSD 출입문은 폐쇄시키는 것이 효과적이다. 마찬가지의 이유로 본선 송풍기는 운전을 중지하고 승강장 송풍기는 가압운전을 하여야 한다.

위에 나열한 3가지 화재 상황은 전동차와 승강장, 대합실의 중앙부에서의 화재 상황을 고려한 것이다.

전동차와 승강장 화재가 역사의 좌, 우 한쪽으로 치우쳐 발생했을 경우는 화원으로부터 가까운 본선 송풍기는 제연운전을, 화원으로부터 먼 본선 송풍기는 급기 운전을 해야 한다. 단, 화재의 위치에 따라 가동 휀의 작동이 달라질 수 있다.

7. 참고 문헌

1. Dr. Marco Bettelini, HBI Haerter 외(2001), CFD for Tunnel Safety, FLUENT Users' Meeting, Bingen, 17-18
2. Launder, B.E. and Spalding, (1974) The numerical computation of turbulent flows, computer

Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289
4. 이상철 외(2003), 열원을 가지는 캐비티 내의 열전달에 관한 연구, 대한설비공학회 2003하계학술발표대회 논문집,pp.1178~1183.
5. 정해권 외(2004), 극한 조건에서 PSD 설치에 따른 지하철 내부 유동장 계산, 대한설비공학회 2004동계학술발표대회 논문집 pp.179~184.
6. 김정엽 외(2006), 스크린도어가 설치된 지하철에서 열차운행에 의한 비정상유동의 실험 및 수치적 해석, 설비공학 논문집 제18권 제2호, pp.103~111.
7. 이동호 외(2004), 지하철 화재시 열차의 정차조건에 따른 배열 및 배연특성에 관한 연구, 대한설비공학회 2004 하계학술발표대회 논문집, pp.1024~1029.