



## 지하철 터널 화재시 환기시설의 용량에 따른 제연효과 I. FDS 시뮬레이션

박경준 · 이기준 · Bettar El Hadi · 이재효\* · †신동일

명지대학교 화학공학과, \*건국대학교 기계공학부  
(2011년 3월 20일 접수, 2011년 6월 16일 수정, 2011년 6월 16일 채택)

## Smoke Control According to the Ventilation Capacity in Subway Tunnel Fire: I. FDS Simulation

KyungJun Park · KiJun Lee · Bettar El Hadi · \*Jaihyo Lee · †Dongil Shin

Dept. of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin, 449-728, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received March 30, 2011; Revised June 16, 2011; Accepted June 16, 2011)

### 요 약

본 연구에서는 미국 NIST의 Fire Dynamics Simulator (FDS) ver. 5.4.8을 이용하여 지하철 터널 안의 지하철에서 화재가 발생한 경우에 터널에 설치된 환기팬의 제연효과를 검증하였다. 시뮬레이션을 위해 서울 지하철의 실측 자료를 활용하여 지하터널과 지하철을 모델링 하였다. 이를 바탕으로 환기용량을 2.0~3.0 m/s 범위에서 변화시키면서 CO와 CO<sub>2</sub>의 제거 효율을 예측한 결과, 0.5 m/s의 용량 증가에 의해 평균 35% 이상의 제거효과가 있음을 확인하였다. 또한 FDS의 결과값이 전체 그리드 개수와 크기에 영향을 받는 점을 고려하여 정확한 결과값을 얻기 위해 FDS의 그리드 민감성을 검토하였다. 그리고 그리드 크기를 변화시켜 CO와 CO<sub>2</sub> 농도 산출값과 계산에 걸리는 시간을 비교한 결과를 바탕으로 최적의 그리드를 선정하여 시뮬레이션에 적용하였다.

**Abstract** - In this study, we investigate simulation studies to confirm the removal of smoke through ventilation when the subway car is on fire and stopped in an underground subway tunnel, by using Fire Dynamics Simulator (FDS) which is being upgraded by NIST. The structure of subway tunnel and train for simulation modeling are based actual data from Seoul metropolitan subway. The main purpose of this study is to assure the removal efficiency of the ventilation when changing the ventilation capacity between 2.0 m/s and 3.0 m/s. The results of the study shows that carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) are reduced by about 35% as the ventilation capacity is increased by 0.5 m/s. This study also performs the grid sensitivity verification of FDS for improved accuracy of the results. To find the effective size of the grid, three cases are simulated and the results are compared.

**Key words** : FDS, fire simulation, subway, ventilation, fan, grid sensitivity

### I. 서 론

도심으로의 인구의 밀집과 유동이 꾸준히 증가함과 더불어 지하철은 단순히 이동수단뿐만 아니라 해

당지역의 문화 및 생활공간의 중심으로 자리매김하고 있으며, 지하철의 활용도 또한 증가하고 있다. 그러나 지하철과 같이 지하공간에서 화재는 지상 건축물의 화재와 다르게 외부로부터 산소 공급이 제한될 수 있기 때문에 연소상태가 불안정하여 대량의 유독 가스와 연기를 배출할 수 있다. 화재로 인한 사망 대

†주저자: dongil@mju.ac.kr

부분이 연기에 의한 질식사임을 고려할 때 밀폐구조의 형태를 보이는 지하철 역사와 터널은 연기와 유독가스에 의한 위험에 더욱더 노출되어 있다고 할 수 있다. 지하철 터널에서 화재가 발생하게 되면 밀폐된 공간적 특성 때문에 화재 초기의 진화작업에 많은 어려움이 있고, 해당 지하공간에 충분한 방재 시설이나 통풍 등의 제연시스템의 설치가 미비하거나 환기팬의 성능이 저하되게 되면 많은 인명 피해가 발생할 가능성이 높아지게 된다. 그러나 배연시스템 작동 성능을 확인하기 위해 실제 운영을 하고 있는 지하철 역사와 터널에서 실물실험을 하기에는 경제적 및 공간적 제약이 많아서 국내에서는 열 방출실험, 모의 화재실험 등의 간접적인 실험이 제한적으로 실시되고 있는 실정이다[1].

방재분야에서 앞선 선진국에서는 환기팬 및 일반 터널화재에 대한 실제 실험 데이터를 적용하여 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하는 연구가 수행되어왔다. 환기팬 작동에 대한 공기유속의 변화의 산출값은 실제 실험과 평균 9%의 오차율을 보이고[2], 터널화재에서 온도 및 유속의 변화는 5~15%의 적은 오차율을 갖는다고 보고되었다[3]. 그밖에도 유럽의 EUREKA 499 Test Program[4]과 미국의 Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP)과 같은 실물 화재실험을 위한 대형 프로젝트를 실시하고, 이것을 통해 얻은 터널화재에 대한 실제 실험 데이터를 적용하여 FDS의 신뢰성을 검증하여 정확도 높은 시뮬레이션 결과값을 얻고 있다. 이와 같은 연구결과는 실험조건을 시뮬레이션에 정확히 반영하면 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 증명한다고 할 수 있다.

국내에서는 대구 지하철 화재사건 이후 지하철 승강장[5]을 대상으로 FDS를 이용한 화재시뮬레이션 연구가 활발히 진행되고 있지만, 지하철 터널 안에서 환기시설의 검증과 위험성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제한된 조건의 실험과 더불어 실험의 대안으로 활용할 수 있는 정확도의 수치해석을 통한 시뮬레이션을 이용하여 그 동안 시도되지 않았던 지하철 터널의 환기용량에 따른 유독가스 제거효율을 비교·분석하였다. 또한 사용된 화재 시뮬레이터인 Fire Dynamics Simulator (FDS) 시뮬레이션 결과의 정확도를 높이기 위하여 그리드 크기에 따른 결과의 그리드 민감성을 검토하였다.

## II. 이 론

본 연구의 화재 시뮬레이션에 사용된 FDS(ver. 5.4.8)는 미국국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 개발하였으

며, 국·내외에서 화재 시뮬레이션을 이용한 연구에 많이 활용되고 있다. 이 프로그램은 화재에 기인한 유동흐름을 Computational Fluid Dynamics (CFD)기반으로 해석하며, 연소 생성물, 열전달에 중점을 둔 저속 열 유동 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하는 모델이다. FDS는 연소모델(combustion model), 유체역학 모델(hydrodynamic model), 복사모델과 경계조건(boundary condition), 기하 구조체(geometry) 등으로 구성된다[6,7].

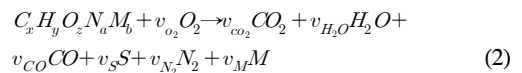
### 2.1. 연소 모델

혼합분율,  $Z$ 는 적어도 2개 이상의 구성성분으로 나누어지며, 구성 성분의 합은 혼합분율과 같다는 가정하에 각 성분은 전달 방정식을 거쳐 전달경로를 나타낸다. 하나의 구성성분에서 다른 성분까지의 질량보존은 반응단계와 조합된 에너지 방출비율로, 식 (1)과 같이 표시된다.

$$f = \frac{Z_K - Z_{KO}}{Z_{KF} - Z_{KO}} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 혼합분율,  $Z_{KF}$ 는 유입되는 가연물의 분율,  $Z_{KO}$ 는 산소의 분율 그리고  $Z_K$ 는 K성분을 구성하는 질량분율을 나타낸다.

혼합분율 연소모델은 혼합된 가스의 전체질량에서 각각의 가스종당 질량의 비율로 정의할 수 있다. 연소 시에 생성된 연기의 분율은 연료와 산소 및 연소 생성물의 비율로 나타내며, 식 (2)와 같은 화학반응식으로 나타낼 수 있다.



여기서  $S$ 는 연기를 나타내고,  $X_H$ 에 주어진 수소 원자분율은  $C$ 와  $H$ 가 혼합되는 것으로 가정한다. 또한  $v_i$ 는 화학양론계수로, 그을음(soot)으로 치환되는 가연물의 양을 나타내고,  $N_2$ 는 가연물 질량내의 질소로 가정하며,  $M$ 은 산소를 소비하지 않은 추가적인 생성물 평균화된 분자량의 몰수로 제시한다. 이때, soot yield( $y_s$ )는 식 (3) 및 식 (4)와 같은 관계가 이루어진다.

$$y_s = \frac{W_F}{W_S} y_s; W_S = X_H W_H + (1 - X_H) W_C \quad (3)$$

$$v_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (4)$$

여기서  $v_{CO}$ 는 CO의 양론계수이고,  $y_{CO}$ 는 CO의 수율을 나타낸다.

혼합분율  $Z$ 는 탄소-이송 생성물과 가연물의 질량분율을 기초로 하여 정의하면 식 (5)와 같다.

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_S} Y_S \quad (5)$$

여기서  $Y_F$ 는 연료의 질량분율,  $Y_{CO}$ 는 CO의 질량분율,  $Y_S$ 는 연기의 질량분율 이고,  $x$ 는 연소반응의 전화율이다.

또한 혼합분율은 식 (6) 같이  $Z$ 에 대한 질량수지식에 의한 보존방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \Delta Z \quad (6)$$

### 2.2. 유체역학 모델

CFD에서 난류현상을 시뮬레이션하기 위해 사용하는 주요 모델에는 RANS, LES, DNS 등이 있지만, FDS에서는 LES와 DNS를 사용하며, 주로 LES기법을 사용한다. 뉴턴유체는 질량, 운동량, 에너지, 이상기체 방정식을 기반으로 하며, 식 (7) ~ 식 (10)과 같다.

$$\text{Conservation of mass: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b''' \quad (7)$$

Conservation of momentum(Newton's second law):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \tau_{ij} \quad (8)$$

Transport of sensible enthalpy:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \rho h_s u = \frac{D_p}{Dt} + q''' - q_b''' - \nabla q'' + \epsilon \quad (9)$$

Equation of state for a perfect gas:

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (10)$$

지배방정식의 매개변수인  $\rho$ 는 밀도,  $u = [u, v, w]^T$ 는 속도 벡터,  $T$ 는 온도,  $p$ 는 압력,  $h_s$ 는 온도변화에 따른 엔탈피,  $g$ 는 중력가속도,  $f_b$ 는 외부의 힘 벡터,  $\tau_{ij}$ 는 전단응력,  $q'''$ 는 단위부피당 열 방출속도,  $q_b'''$ 는 입자의 열 방출속도,  $q''$ 는 전도와 복사에 의한 열 플럭스,  $\epsilon$ 는 소산율(dissipation rate),  $\dot{m}_b'''$ 는

입자의 증발속도,  $W$ 는 혼합기체의 분자량이고,  $R$ 는 기체상수를 뜻한다.

### 2.3. 복사모델

에너지는 대류나 전도 또는 복사의 형태로 전달되며, 대류에 의한 열전달은 기본적인 에너지 보존 법칙에 따르지만, 전도나 복사에 의한 열전달은 경계면에서 흡수와 방출의 상호작용이 발생하므로, 복사열의 흡수 및 방출을 계산하는 모델은 기본적으로 완전복사체 또는 흑체에 적용하는 식 (11)을 사용한다.

$$I_b(x) = \frac{\sigma T(x)^4}{\pi} \quad (11)$$

여기서  $I_b(x)$ 는 흑체의 복사강도,  $T$ 는 절대온도(K) 그리고  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이다.

### 2.4. 경계조건

표면에서의 경계조건은 식 (12)과 같이 표현되며, 단열의 경계조건인 경우에는 식 (13)과 같이 나타내어진다.

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = q_c'' + q_r'' \quad (12)$$

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

여기서  $q_c'' = h \Delta T$ 는 대류 열 플럭스,  $\Delta T$ 는 물체와 가스의 온도차,  $q_r'' = q''_{r, \in} - q''_{r, out}$ 는 순열복사 플럭스 그리고  $k$ 는 가스의 열전도도를 나타낸다.

## III. 화재 시뮬레이션

### 3.1. 터널 및 지하철 모델링

본 연구의 기초가 된 지하철 터널은 서울 지하철 1호선 제기동역과 신설동역사이의 본선터널이며, 터널의 크기는 Fig. 1과 같이 길이 60m×폭 5m×높이 6.8m로, 지하철 3량의 길이와 같다. 상, 좌, 우

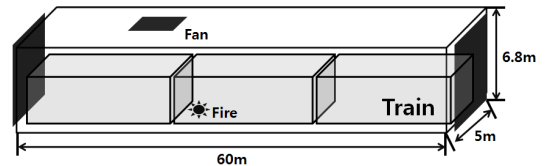


Fig. 1. Tunnel plan of subway tunnel.

벽은 0.4 m, 바닥면은 0.45 m 두께의 콘크리트로 하였고, 환기구는 터널의 시작점으로부터 13 m 지점에 가로 3.8 m×세로 2 m의 크기로 하였다. 지하철은 가로 20 m×세로 3 m×높이 3 m의 서울 지하철의 열차와 같은 크기로 하였다. 지하철의 출입문은 가로 1 m×세로 2 m의 출입문을 양 쪽 각 4개씩 총 8개로 하고, 실제 지하철 화재발생 시 승객의 대피를 위해 지하철 출입문을 모두 개방하는 것으로 가정하였다. 또한 화재가 발생하는 지하철 1량에 대해서 폴리우레탄폼의 좌석을 적용하고, 나머지 2량에 대해서는 걸모양과 출입문을 개방하는 것으로 가정하였다.

**3.2. 시뮬레이션 조건**

지하철 화재발생시 대피자의 대피시간은 국토해양부와 서울시 도시기반시설본부, 미국방화협회(National Fire Protection Association, NFPA)[8] 등에서 모두 4~6분 사이로, 4분 안에 안전구역까지 벗어나고, 6분 안에 대피자가 화재로부터 먼 곳으로 대피하는 것을 권장하고 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 시간을 5분으로 하였다.

철도화재의 경우 2006년 9월 22일 제정된 건설교통부고시 제2006-395호 제2장 제7조 제2항에는 화

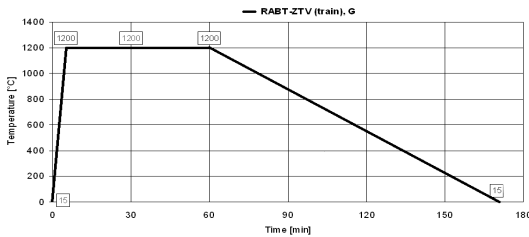
재 및 승객피난 시뮬레이션을 수행하여 분석할 경우 철도객차의 화재규모는 10 MW 이상을 적용해야 한다고 명시된 바 있고, 국내 화재 시뮬레이션 연구의 경우 10~20 MW 정도의 화원을 설정하고 있는 것을 참고하여 최대 열 방출량(HRR)이 15 MW 규모의 화원을 설정하였다.

화재가 성장하는 화재곡선[10,11]은 EUREKA-499 프로젝트의 결과물로 유럽에서 많이 이용되고 있는 Fig. 2와 같은 RABT 화재곡선[12]을 적용하여 최초 화재발생 시작부터 5분 만에 Fig. 3과 같이 최대 열 방출량을 발생하게 하였다.

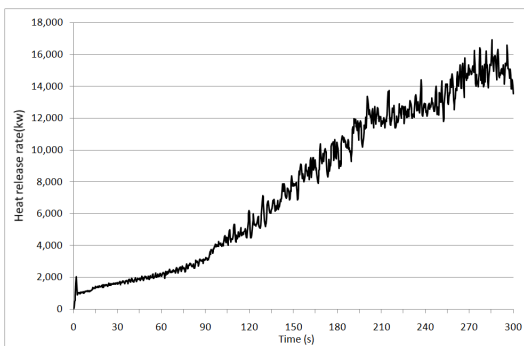
화재의 발화원은 지하철 폴리우레탄 폼 의자에서 화재가 발생하고, 경계조건은 터널 내 벽은 콘크리

**Table 1.** Numerical analysis conditions for fire simulation.

Time	300 s
Max. HRR	15 MW
The point of ignition	On the chair at second train
Grid size	12,000 (120×10×10)
	255,000 (300×25×34)
	510,000 (600×25×34)
Fan size	3.8 m×2 m
Ventilation capacity	2.0 m/s, 2.5 m/s*, 3.0 m/s
* 현재 지하철에서 통상적으로 사용되고 있는 환기용량	



**Fig. 2.** RABT curve for train[12].



**Fig. 3.** Heat release rate obtained from the simulation.

**Table 2.** Combustible load and boundary conditions of the fire simulation

Combustible materials	Polyurethane	
	Chemical formula	C=6.3, H=7.1, N=1.0, O=2.1
	Soot	0.10 kg/kg
	CO soot	0.06 kg/kg
Boundary conditions	Steel	
	Density	7,850 kg/m <sup>3</sup>
	Conductivity	45.8 W/m·K
	Concrete	
	Density	2,200 kg/m <sup>3</sup>
	Conductivity	1.2 W/m·K

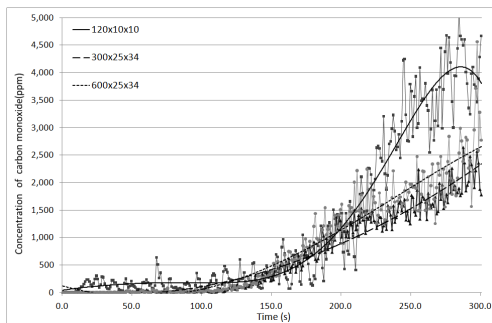
트로 구성되어 있으며, 지하철은 철 재질로 되었다고 가정하였다[13]. 시뮬레이션에서 적용된 물질들의 물성은 Table 2와 같으며, 양방향 터널의 끝부분은 개방형 공간이라고 가정하였다. 또한 터널 내 압력은 1기압이고, 온도는 20°C이며, 공기유동은 없는 무풍상태로 하였다[14].

#### IV. 결과 및 고찰

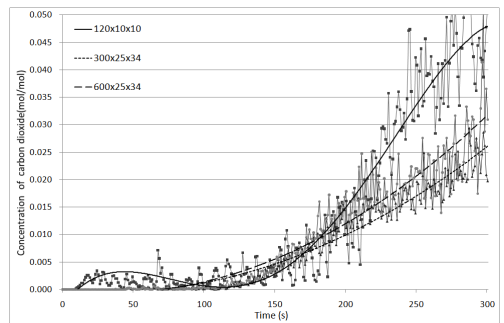
##### 4.1. 그리드 민감성 검토

CO 농도와 CO<sub>2</sub> 농도에 미치는 환기용량의 영향을 알아보기 위해 2.0 m/s와 2.5 m/s의 조건에서 3가지의 그리드 크기에 대해 그리드 민감성 검토를 실시하고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 화재발생 후 200초까지는 모든 조건에서 산출값은 유사하게 나타났지만, 그 이후부터 차이를 나타냈었다. 대상조건

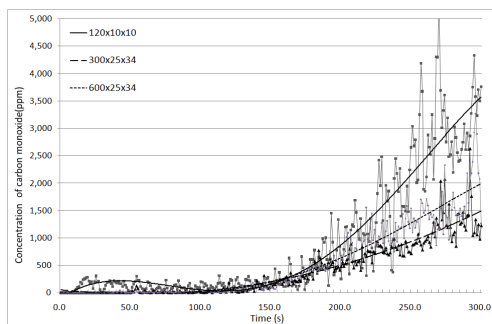
중 총 그리드 수가 12,000개인 120×10×10조건의 경우 다른 조건의 그리드에서 나타난 CO 농도보다 평균 1.8배가 높고, CO<sub>2</sub> 농도는 평균 1.7배로 높게 산출되었다. 그러나 총 그리드 수가 255,000인 300×25×34와 510,000개인 600×25×34의 두 조건을 비교하면 CO 농도와 CO<sub>2</sub> 농도 모두 1.3배의 근소한 차이가 난 것을 확인할 수 있었다. 그리고 4GB RAM, Dual core 2.5GHz Intel i5 CPU를 탑재한 PC를 이용한 시뮬레이션에서 120×10×10은 약 2시간, 300×25×34는 약 15시간, 600×25×34는 약 34시간이 소요됨을 확인할 수 있었다. 최종적으로 300×25×34와 600×25×34의 CO와 CO<sub>2</sub> 농도가 1.3배 정도의 적은 차이를 보인 점과 시뮬레이션 시간의 경제성을 고려하여 300×25×34를 최적의 그리드로 선정하였다.



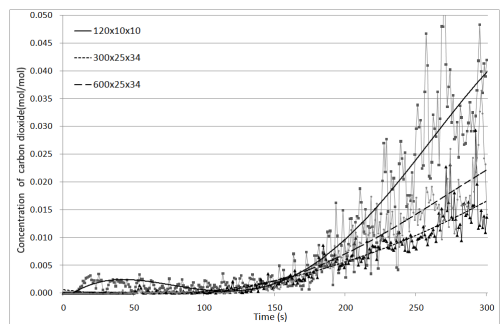
(a) 2.0 m/s



(a) 2.0 m/s



(b) 2.5 m/s



(b) 2.5 m/s

**Fig. 4.** Comparison of the CO concentration in front of the fan depending on different grid sizes.

**Fig 5.** Comparison of CO<sub>2</sub> concentration in front of the fan depending on different grid sizes.

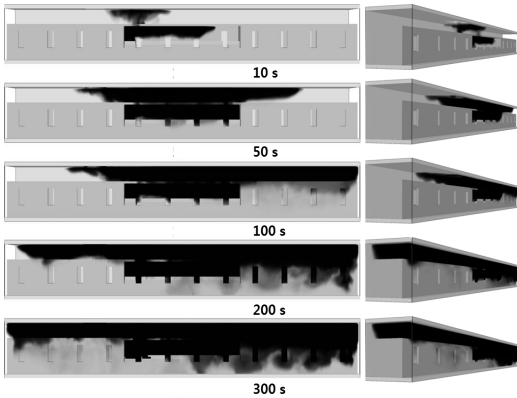
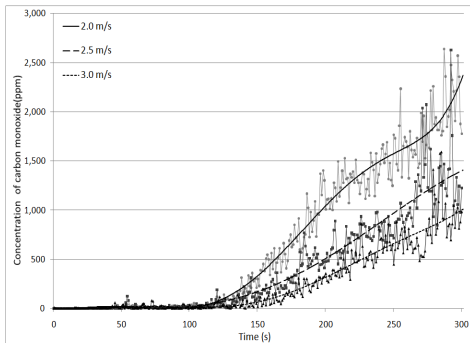
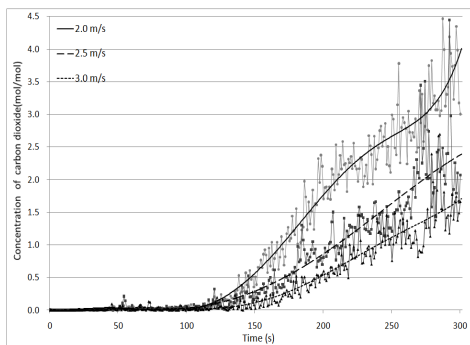


Fig. 6. Smoke movement in the tunnel by subway fire(Ventilation capacity: 2.5 m/s).



(a) CO



(b) CO<sub>2</sub>

Fig. 7. Concentration of CO and CO<sub>2</sub> according to the ventilation capacity in front of fan. (Plotted curves were obtained by fitting the simulation results as polynomials)

## 4.2. 유독가스 농도에 따른 제연효과 확인

화재시뮬레이션을 실시한 연기거동 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6을 통해 확인한 터널화재시의 연기거동은 환기용량 2.5 m/s에서 발화 10초 후에 열차의 개방된 문을 통하여 연기가 터널 안으로 이동하였다. 시간이 지남에 따라 지하철 내에 연기가 가득 차게 되고, 50초 후 환기팬의 제연능력을 벗어난 연기들이 터널 상부부터 양쪽 터널 끝부분으로 확산되었다. 100초에서는 환기팬이 있는 좌측 지역과 환기팬이 없는 우측지역의 연기확산 차이가 관찰되었고, 시간이 지날수록 연기확산과 대피자의 호흡높이로 연기 하강이 뚜렷하게 관찰되었다.

4.2절의 결과와 같이 최적의 조건인 300×25×34 그리드 크기에서 산출된 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도를 Fig. 7에 나타내었다. 화재발생 초기인 120초까지는 CO와 CO<sub>2</sub> 농도를 확인할 수 없었지만, 이후로는 급격하게 농도가 증가하였다. 먼저 대피자의 안전을 가장 위협하는 요소인 CO 농도를 분석한 결과는 지하철 터널의 기준용량에 미치지 못하는 2.0 m/s에서 250초 이후 산출값이 NFPA 130 Standard에서 극도의 위험도로 규정하고 있는 2000 ppm이상으로 확인되었고, 300초에서는 2500 ppm에 근접하는 높은 농도를 나타내었다. 반면에 환기용량을 2.5 m/s로 증가시키면, 최고 CO 농도가 약 40 %가 감소된 1400 ppm으로 확인되었으며, 3.0 m/s에서는 60 %가 감소된 1000 ppm의 최고농도를 확인하였다. 또한 CO<sub>2</sub> 농도는 환기용량 2.0 m/s에서 화재발생 300초가 지난 후의 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 4 %로 인체의 호흡중추를 작용해 산소 결핍장애를 일으킬 수준의 위험한 농도가 산출되었고, 2.5 m/s에서는 2.5 %, 3.0 m/s는 1.7 %의 농도로 산출되었다.

CO와 CO<sub>2</sub> 농도를 종합적으로 고려하면 본 시나리오에서는 환기용량이 2.0 m/s일 때 화재발생 5분 후에 NFPA의 권고기준 이상의 CO 농도와 인체에 영향을 미치는 CO<sub>2</sub> 농도가 산출되어 2.0 m/s 용량의 환기팬으로서는 대피자의 안전을 보장하지 못함을 알 수 있었다. 그러나 2.5 m/s와 3.0 m/s의 경우는 기준치안의 유독가스 농도를 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 4.3. 유독가스 도달시간에 따른 제연효과 확인

Fig. 8은 지하터널 화재 발생시 대피자가 대피하는 통로에서 인간의 호흡높이인 1.5 m에서 일산화탄소가 최초로 검출된 시간을 나타낸 것이다. 2.5 m/s의 환기용량에서 발화지점으로부터 환기구가 설치된 방향인 터널 시작점 기준 5 m와 15 m지점에서 CO 농도가 각각 200초와 180초 이후에 확인되었으나, 환기팬이 설치되지 않은 40 m와 55 m지점에서

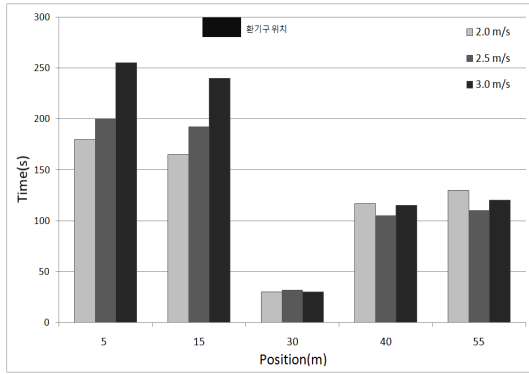


Fig. 8. The time to reach a notable amount of CO in each point at 1.5m high above the tunnel.

는 120초와 130초에 확인되었다. 또한 환기팬의 용량이 2.0 m/s에서 3.0 m/s로 증가할수록 평균 80초의 시간 차이를 보였다. 앞서 언급한 결과들로 환기용량에 따라 최대 80초의 대피시간을 더 확보할 수 있으며, 환기구가 위치한 곳이 그렇지 않은 곳 보다 1~2분의 대피시간을 늘려주는 효과가 있는 것으로 나타났다.

## VI. 결론

본 논문에서는 지하철 터널에서 화재가 발생하였을 때 제연시설의 용량에 따른 제연효과를 정량적으로 알아보기 위해 CFD기반의 FDS를 이용하여 화재시뮬레이션을 실시하였다. 또한 제연효과와 시뮬레이션에 앞서 그리드 크기에 따른 FDS의 민감성을 실시하였다. 3가지의 그리드 크기 대해 시뮬레이션을 하여 CO와 CO<sub>2</sub>의 산출값과 시뮬레이션 시간을 종합적으로 분석한 결과, 총 그리드 수가 255,000인 300×25×34의 그리드 크기가 가장 적합함을 확인할 수 있었다.

환기용량 2.0 m/s에서는 인체에 치명적인 CO 농도와 인체 유해한 CO<sub>2</sub> 농도가 산출되어 대피자의 안정성을 보장할 수 없음을 알 수 있었다. 그러나 환기팬의 제연효과는 환기용량이 0.5 m/s가 증가할수록 CO와 CO<sub>2</sub> 농도는 평균 35%의 감소효과를 나타내어 2.5 m/s 이상에서는 기준치를 만족하는 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 환기용량이 증가함에 따라 약 80초의 대피시간을 추가적으로 보장할 수 있었고, 환기구가 있는 곳이 없는 보다 약 1~2분간 더 늦게 유독가스가 도달하는 것을 확인하여 환기시설의 작동이 대피자의 대피시간확보에 효

과적임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 박원희, 김동현, 장용준, “부산지하철 지하역사에서의 열 부력 연기화재 실험”, *한국철도학회 2006년도 춘계학술대회 논문집*, 30-37, (2006)
- [2] Kerber, S. and Walton, W., *Characterizing Positive Pressure Ventilation using Computational Fluid Dynamics*, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7065, (2003)
- [3] Cochard, S., “Validation of Fire Dynamics Simulator (Version 2.0) Freeware”. *Tunnel Management International Journal*, 6(4), 41-50, (2003)
- [4] Haukur Ingason, “Model scale railcar fire tests”, *Fire Safety Journal* 42, 271-282, (2007)
- [5] 장희철, 윤경범, 박원희, 김태국, “지하철 화재시 제연모드에 따른 열 및 연기 배출 특성 연구”, *한국방재학회논문집*, 8(3), 37-42, (2008)
- [6] McGrattan, K. B., Baum, H. R., Rehm, R. G., Forney, G. P., Floyd, J. E., and Hostikka. S., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, December (2009)
- [7] 황준호, 정거성, 강동일, *3차원 화재시뮬레이션 해석*, 동화기술, (2008)
- [8] NFPA, *NFPA 130-Standard for Fixed Guideway Transit System*, National Fire Protection Association, (2003)
- [9] 오세준, 김남영, 이황, 이호석, “대심도, 장대 철도 터널의 방재 및 환기계획”, *터널기술학회지*, 10(4), 71-81, (2008)
- [10] Ingason H. and Lonnermark A., *Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels*, SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, (2004)
- [11] Powell P., *SFPE handbook of fire protection engineering*, 3<sup>rd</sup> ed, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, (2002)
- [12] Promat C, <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hc-m-hc-rab-rws.aspx#curves05>, (2006)
- [13] 손윤석, *지하철화재에서 FDS에 의한 열 및 연기 거동 해석*, 명지대학교 석사학위논문, (2008)

- [14] McGrattan, K. B., Hostikka S., and Floyd. J. E., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide*. NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, (2009)