철도터널 내 화재 시 대피환경 확보를 위한 임계속도 산정식의 유효성 평가

Effectiveness of critical velocity method for evacuation environment in a railroad tunnel at fire situation

이승철*[1], 이재헌[2], 이승호[3]
Lee, Seung-Chul · Lee, Jae-Heon · Lee, Seung-Ho

Abstract

The effectiveness of one dimensional critical velocity method for evacuation environment at 10MW fire size in a railroad tunnel have been investigated in this paper by three dimensional CFD method. It was performed to evaluate the evacuation environment in terms of temperature distribution, visible distance distribution and CO concentration at some tunnel inlet velocity, 1m/s, 2m/s (near critical velocity), and 3m/s. At all inlet velocity, passenger should give away downward the flow direction because the inlet velocity can not afford to sufficient evacuation environment for passengers. In case of 3m/s inlet velocity, however, the evacuation environment for passengers is better than the other cases. To provide more safe evacuation environment on fire situation, tunnel inlet velocity should be larger than critical velocity.

Keywords: Critical velocity, evacuation environment, tunnel fire

요 지

본 연구에서는 3차원 전산유체역학 기법을 이용하여 열차터널 내 10MW급 화재발생 시, 대피환경에 대한 1차원 임계속도의 유효성을 평가하였다. 또한 터널의 입구속도가 1m/s, 2m/s (임계속도) 그리고 3m/s일 때의 터널 내 기류분포, 온도분포, 가시거리분포 및 오염물질분포가 대피환경에 미치는 영향을 각각 검토하였다. 그 결과, 세 가지 경우 모두, 승객의 안전한 대피환경을 충분하게 제공하지 못할 것으로 예상되어 승객들은 유동방향 하류로 대피하여야 한다. 그러나 3m/s 입구속도의 경우는 1m/s, 2m/s의 경우 보다 승객의 대피환경에 있어서 좀 더 나은 결과를 보인다. 따라서 터널의 방재시스템의 설계 시, 안전한 대피환경을 확보하기 위해서는 임계속도보다 큰 입구속도의 사용이 요구된다

주요어: 임계속도, 대피환경, 터널화재

*1 정회원, 동해대학교 공과대학 자동차공학과 교수 (sclee@donghae.ac.kr)
2 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학부 교수
3 정회원, 상지대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수

1. 서론

우리나라의 경우, 국토의 70%가 산악지형으로 구성되어 있는 지형적인 특성을 가지고 있어 자연환경 훼손을 최소화할 수 있는 터널의 건설과 이의 활용성이 더욱 더 증대되고 있다. 그러나 아직 터널에 대한 건설기술과 제반 운영 기술이 미비하고, 철도나 지하철 같은 궤도차량용 터널인 경우 소방법상의 시설물에 대한 규정 또한 없는 것이 현실이다. 터널은 건축물 특성상 타 공간과 격리되어 있는 폐쇄적인 공간이므로 화재 발생시 인명과 재산의 피해가 크게 발생한다. 1994년 화재통계연보에 의하면 화재 발생 시 사망의 원인 중 질식사가 47.5%로 가장 높게 나타나고 있다. 사망의 큰 원인인 질식사는 유해가스에 의한 직접적인 피해 이외에도 화재 시 발생한 연기가 탑승자의 시정을 저해하여 피난로를 찾지 못함으로서 유발된다. 따라서 터널 내 화재발생시 승객의 안전을 확보하고 피난 구조 활동 및 화재 진압 활동을 펼 수 있도록 하기 위해서는, 고온의 유해가스와 연기가 피난로에 침투하지 못하도록 적절한 유속을 만들어 줄 수 있는 환기시스템이 필요하다.

이미 각 선진국에서는 이미 '70년대부터 철도터널 환기시스템에 대한 개발의 필요성이 대두됨에 따라 터널화재에 대하여 실제 터널에서의 화재실험 및 수치해석과 같은 다양한 연구[1-3]가 진행되고 있다. 국내에서도 최근에 들어서 장대 철도터널 건설 수요 증가에 따른 철도터널 내 화재 시 대피환경에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다[4,5].

터널 방재시스템 설계 시, 다양한 환경조건 (화재강도, 터널형상, 환기설비 및 운전조건 등)에 따라 상이한 결과를 보인다. 이러한 것을 환기설비 설계단계에서 고려할 때, 상당한 시간과 비용이 요구되므로 일반적으로는 간편한 1차원 임계속도식을 사용한다. 그런데 1차원 임계속도식은 화재 발생시, 기류측면의 연기의 역류를 방지하는 환기풍속을 결정하는 것이다. Wu 등[6]은 터널의 높이 등 터널의 단면형상을 변화시켜 역기류층 (backlayer)이 발생되지 않는 임계속도를 실험적으로 고찰하였다. 그 결과, 터널 단면형상의 변화가 임계속도에 미치는 영향은 미소함을 보고한 바 있다. 또한 Tetzner 등[7]은 기존의 임계속도 산정식에 대한 일부오류를 지적하고 실험적 결과로부터 보정계수를 도입하여 그 산정식을 보완하였다. 그러나 실제 화재 발생 시 승객들의 대피 환경에는 기류측면뿐만 아니라 피난로 상의 온도, 연기 및 유해물질의 분포가 중요하다.

따라서 본 연구에서는 방재시스템의 설계 시, 적용되고 있는 1차원 임계속도 산정방법의 유효성을 점검하고, 1차원 임계속도식으로 설계된 환기설비가 기류, 온도, 가시거리 및 유해물질 분포 측면에서 승객들의 안전한 대피환경을 확보하는지에 대해 3차원 전산유체역학 기법을 도입하여 평가하고자 한다.

2. 대피환경 안전기준

대피환경의 안전성에 대하여 제정된 국내의 기준이 없으므로 본 연구에서는 외국의 여러 기준을 고려하여 다음의 사항을 적용하여 안전성을 검토하였다.

(i) 공기온도 : 승객의 안전한 대피를 위해서는 평균온도가 60~80℃ 이하로 유지되어야 하며[8,9], 최대 수초 이내 60℃이하 또는 6분 이상 경과 후에는 평균온도 49℃이하로 유지되어야 한다[10].

(ii) CO 농도 : 최대 수초 이내는 2000 ppm, 6분 이내는 1500 ppm, 15분 이내는 800 ppm 그리고 그 이후에는 50 ppm 이하로 유지되어야 한다[10].

(iii) 가시거리 : 최소 10 m정도 떨어진 벽이나 문을 식별할 수 있어야 한다[10].

3. 해석모델

본 연구에서는 열차의 화재로 인한 철도터널 내의 내부환경을 알아보기 위하여 그림 1에 보이는 바와 같이 터널 내부에서 운행 중인 210 m 길이 정도의 열차에서 화재가 발생되어 열차가 정지했을 경우를 해석 대상으로 하였다. 설명의 편의를 위해서 원점 (O.P)을 그림 좌측 하단의 지점으로 정하고, 원점을 기준으로 열차의 진행방향을 z축, 터널의 바닥면의 방향을 x축, 터널의 높이 방향을 y축이라 정하였다. 터널의 입구는 그림의 좌측 하단 부분이며 환기시스템에 의해 일정한 유속으로 신선한 공

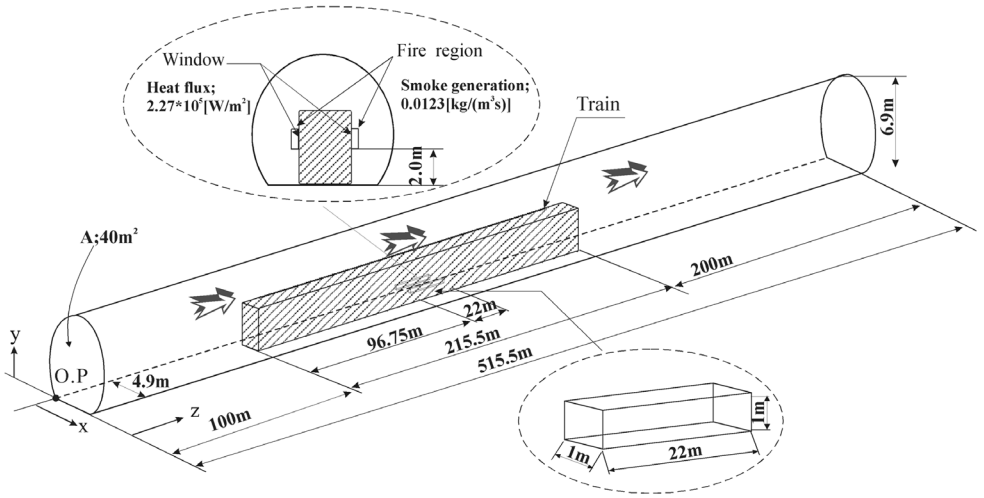

그림 1. 터널모델의 개략도

기가 터널입구를 통해 터널 내로 유입된다. 터널의 단면적 A는 40 m^2이며, 이때의 터널 높이 H는 6.9 m, 터널의 수력학적 지름 D_h는 6.88 m 이다. 해석구간은 화재발생부 주위에서의 터널내부환경을 평가하기 위하여 열차길이 215.5m (전동차 1량 (22 m) + 객차 8량 (176 m) + 발전차 1량 (17.5 m))와 열차 전후로 각각 200 m와 100 m를 포함하여 총 515.5 m이다. 화재가 발생된 차량 양측에 있는 창문의 중심위치는 y방향으로 2.5 m, z방향으로 207.75 m 떨어져 있으며, 단면적은 22 m^2이다. 10 MW급의 화재강도에 의한 열량은 해당 차량의 양측 창문을 통해서 균일한 열유속으로 터널내부로 전달되고 이때 발생되는 연기는 열차의 양쪽 창문에 바깥쪽으로 인접한 22 m^3의 가상체적공간에서 발생된다고 가정하였다.

4. 1차원 임계속도 산정

터널화재 시 화재지점으로 신선한 외기를 보냄으로써 승객의 대피를 돕는다. 이때 신선외기가 유입방향으로 되돌아 나오는 현상을 역기류 발생이라 하며, 역기류가 발생되면 대피환경이 안전하지 못한 것이다. 역기류를 방지하기 위한 최소한의 유입풍속을 임계속도로 칭하며 이를 산정하기 위해 주로 사용되고 있는 Kennedy의 1차원 임계속도 V_c의 산정식[11]은 아래와 같다.

$$V_c = K_g \left(\frac{gHE}{\mathrm{Fr_c}\,\rho_\infty c_p A T_f} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{E}{\rho_\infty c_p A V_c} + T_\infty \quad (2)$$

$$K_g = 1 + 0.0374\gamma^{0.8} \quad (3)$$

여기서,

A : 터널의 단면적 (m^2)
c_p : 공기의 정압비열 (J/(kg · K))
E : 화재강도 (W)
$\mathrm{Fr_c}$: 임계 Fr 수 (4.5)[12]
g : 중력가속도 (m/s^2)
H : 터널높이 (m)
ρ_∞ : 화재영역외의 공기밀도 (kg/m^3)
T_f : 연소에 의해 가열된 가스의 온도 (K)
T_∞ : 화재영역 이외의 공기의 온도 (K)
γ : 터널의 구배 (%)
K_g : 터널의 구배 보정계수 (-)

임계속도는 식 (1)과 식 (2)을 반복적으로 풀이하여 결정되는 것으로서 화재영역 이외의 공기의 온도를 17℃로

보았을 때 본 연구의 경우에는 약 2.0 m/s로 산정되었다.

5. 지배방정식 및 경계조건

5.1 지배방정식

철도 터널 내 열차화재에 따른 터널 내부환경을 평가하기 위하여 본 연구에서는 3차원 정상상태 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소멸방정식, 에너지방정식 그리고 정상상태 농도방정식을 풀이하였다. 각각의 지배방정식은 표 1에 나타내었다. 표에서 에너지방정식과 농도방정식은 각각 온도분포와 오염물질 분포 해석을 위한 지배방정식이다. 각 식들에서의 기호 선정은 일반적인 문헌의 예를 따랐으며 난류를 해석하기 위해 부력이 고려된 $k-\varepsilon$모델[13]을 선택하였다.

5.2 경계조건

지배방정식을 풀기 위한 경계조건을 표 2에 나타내었다. 표 2에서 u, v 및 w는 각각 x, y, z 방향의 속도이다. 여기서 D_h는 수력학적 지름으로 터널형상으로부터 결정된다.

화재강도에 따른 발열량, 연기발생량 및 CO 발생량은 이전의 연구결과[3,14]를 참조하여 각각 10 MW, 0.541 kg/s와 0.055 kg/s로 가정하였다. 이를 바탕으로 열차의 화재부분에서는 좌·우측 창문을 통해 2.27×10^5 W/m^{2}의 열유속으로 열이 터널 내부로 전달되고 있으며, 연기와 CO는 창문 양쪽에 인접한 가상체적 공간에서 각

표 1. 지배방정식과 각 계수값

Continuity equation ;

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

Momentum equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)= -\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right\}+\rho g_i\beta(T-T_m)$$

Turbulent kinetic energy equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)= \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right\}+G_k+G_b-\rho\varepsilon$$

Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy ;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right\}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

Energy equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{(\frac{\mu}{\sigma_l}+\frac{\mu_t}{\sigma_t})\frac{\partial T}{\partial x_i}\right\}$$

Concentration equation ;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C_s)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{(\frac{\mu}{S_l}+\frac{\mu_t}{S_t})\frac{\partial C_s}{\partial x_i}\right\}+S_c$$

$$\rho=(\rho_{ref}T_{ref})/T$$

$$\nu= -0.49467910^{-5}+0.45839410^{-7}T+0.8097410^{-10}T^2$$

where,

$$\mu_t=\frac{c_\mu\rho k^2}{\varepsilon},\ G_k=\mu_t(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j})\frac{\partial u_j}{\partial x_i},\ G_b=\frac{\mu_t g_i\beta}{\sigma_t}\frac{\partial T}{\partial x_i},$$

$C_\mu=0.09$, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_{3\varepsilon}=1.0$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=0.9$, $\sigma_l=1.0$, $\sigma_t=1.0$, $S_t=0.68$

표 2. 경계조건

Tunnel inlet	$u=0,\ v=0,\ T=290K,\ C=0,\ w=1m/s,\ 2m/s$ and $3m/s$ $k=0.015\times w^2,\ \varepsilon=C_\mu\times k^{1.5}/(0.5\times D_h)$
Tunnel outlet	$\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{\partial w}{\partial z}=0,\ \frac{\partial k}{\partial z}=0,\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=0,\ \frac{\partial C}{\partial z}=0,\ \frac{\partial T}{\partial z}=0$
Tunnel wall	$u=v=w=0,\ \frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\partial T}{\partial z}=0,\ \frac{\partial C}{\partial x}=\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial C}{\partial z}=0$

각 0.0123 (kg/(m^3 · s))와 1250 ppm이 발생되는 것으로 하였다.

본 연구에서는 터널 내 유입풍속을 2 m/s의 임계속도, 그리고 그 전후인 1 m/s, 3 m/s 등 3가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 이때 유입공기의 온도는 17℃이다. 터널의 출구는 유출경계조건을 적용하였으며, 터널의 벽은 점착조건과 단열로 처리하였다.

5.3 수치해석 방법

본 연구에서는 철도터널 화재 시 터널내 대피환경의 특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 PHOENICS[15]를 사용하였다. 이 프로그램은 완전암시기법을 사용한 유한체적법 (finite volume method) 코드로서, 속도 등의 벡터량과 압력, 농도 등의 스칼라량의 위치가 서로 다른 엇갈린 격자계 (staggered grid system)를 사용한다. 운동량방정식의 대류항을 계산하기 위해서 하이브리드 도식 (hybrid differencing scheme)을 사용하였고, 속도장을 얻기 위하여 SIMPLEST 알고리즘을 사용하였다. 수렴판정 조건으로는 각 시간단계에서 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 cell에서의 운동량 유수의 합, 연속방정식에서 유수의 합, 그리고 농도방정식의 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하일 때로 정하였다. 또한 비직교형상을 처리하기 위하여 경계밀착좌표계를 사용하였으며 내부영역을 15×16×90개의 제어체적으로 분할하였다.

6. 결과 및 고찰

본 연구에서는 철도터널의 방재시스템의 설계 시, 적용되고 있는 1차원 임계속도 산정방법의 유효성을 평가하기위하여 1차원 임계속도식으로 설계된 환기설비가 기류, 온도, 가시거리 및 유해물질 분포 측면에서 승객들의 안전한 대피환경을 확보할 수 있는가를 살펴보았다.

화재 발생시, 화재지점을 기준으로 유동방향의 상류쪽에 탑승한 승객은 화재지점을 지나지 않고 상류쪽으로 대피할 수 있다. 그러나 반대로 하류쪽에 탑승한 승객은 상류쪽으로 피난하기 위하여 화재지점을 지나쳐야 하는데, 이는 사실상 불가능하다. 그러므로 하류측 승객은 유동의 하류방향으로 대피하여야 하며 따라서 이들이 대피할 유동 하류지역의 대피환경에 대한 안전성이 평가되어야 한다. 이를 위해 터널 바닥으로부터 y방향으로 1.5 m 떨어진 x-z 단면 (z방향으로 186 m~400 m까지의 구간)에 대하여 각각의 분포를 살펴보았다. 이 단면은 승객들의 호흡선 높이의 단면으로서, 화재 발생시 승객들의 대피에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 단면이며, 이후 이 단면을 호흡면이라 칭하였다.

6.1 기류분포 측면에서의 유효성 검토

식 (1)에 의한 임계속도 산정의 타당성을 검증하기 위하여 유입풍속을 임계속도인 2 m/s와 이의 90%인 1.8 m/s, 110%인 2.2 m/s로 각각 변화시키면서 대피로 (x = 1 m) 단면에서의 기류거동을 검토하였다. 역기류 현상의 발생여부를 검토하기 위해, 화재가 발생된 위치인 원점에서 +x방향으로 1 m 떨어진 y-z 단면 중에서, z방향으로 186.75 m~226.75 m 구간에 대해 단면 기류분포를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)에서 보면 화재영역에서 최대 6.7 m/s의 상승기류가 생기며, 외기가 유입되는 방향으로 -1.5 m/s~-2.2 m/s의 역기류가 발생

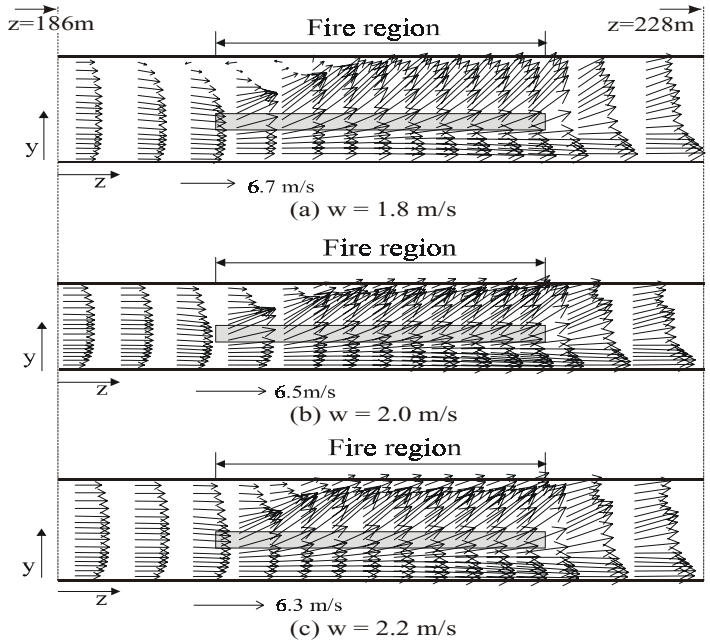

그림 2. 입구속도변화에 따른 터널내부 속도분포 (x=1m)

되는 것을 볼 수 있다. 그림 2(b)에서 보면 화재영역에서 최대 6.5 m/s의 상승기류가 발생하며 역기류는 발생되지 않는다. 그림 2(c)에서 보면 화재영역에서 최대 6.3 m/s의 상승기류가 발생하며 유입풍속을 2 m/s로 했을 경우와 동일하게 역기류는 발생되지 않는다. 따라서 역기류 발생을 예측하기 위하여 적용되고 있는 1차원 임계속도 산정방법은 비교적 타당하다고 판단된다.

6.2 온도분포 측면에서의 유효성 검토

유입풍속변화에 따른 호흡면에서의 온도분포를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서 볼 때 터널내 유입풍속이 1 m/s인 경우, 공기의 온도는 화재영역을 지난 후로 유동하류로 갈수록 점차적으로 상승하여 최고 140℃의 온도를 나타내고 있다. 이로부터 화재 영역 하류에 있는 승객들의 대피환경으로는 매우 열악한 것으로 판단된다. 유입풍속이 2 m/s인 그림 3(b)를 살펴보면, 화재지점 하류방향의 최고온도는 96℃로써 여전히 허용 기준온도인 80℃ 보다 높게 나타난다. 즉 일차원 임계속도 산정식에 근거하여 터널 내 유입풍속이 2 m/s를 유지하더라도 승객의 대피환경은 여전히 열악함을 알 수 있다. 이는 임계속도이 역기류 방지를 위한 최소풍속일지라도 대피환경에는 적합하지 않는 것으로 판단된다.

유입풍속이 3 m/s인 그림 3(c)를 살펴보면, 화재지점 하류방향의 최고온도는 65℃로써 허용온도 보다는 낮게 나타남을 알 수 있다. 즉 승객들의 안전한 대피를 위해서는 임계속도의 150% 정도 입구유속을 유지해야 열적으로 보다 안전한 대피환경을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

6.3 가시거리분포 측면에서의 유효성 검토

가시거리 측면에서 승객들 대피환경의 안정성을 평가하기 위하여 연기의 농도분포를 기준으로 계산한 가시거리분포를 그림 4에 나타내었다. 가시거리 분포는Steinert가 제안한 아래의 실험식과 계수 값[5]을 이용하였다.

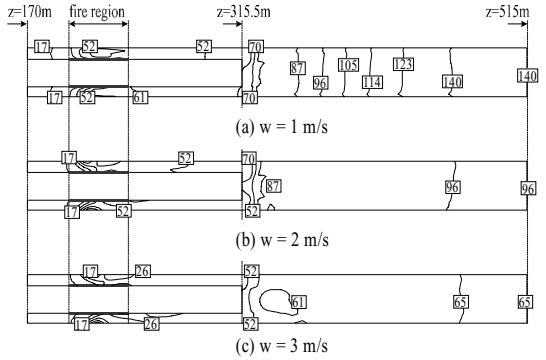

그림 3. 입구속도변화에 따른 터널내부 온도분포 (unit : ℃)

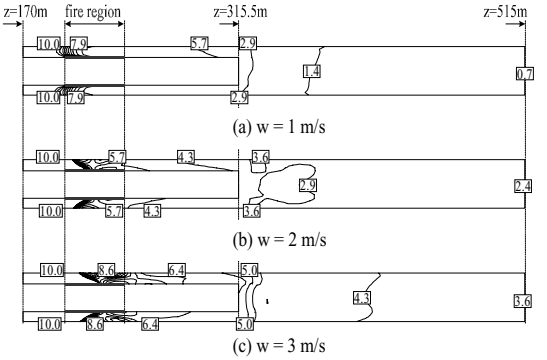

그림 4. 입구속도변화에 따른 터널내부 가시거리 분포 (unit : m)

$$L_v[m] = \frac{D_s \cdot \ln(A)}{K \cdot Y_s \cdot C_S \cdot \rho_\infty} \quad (4)$$

여기서,

A : 시야 확보거리 (=10m)
C_S : 오염물의 농도 (-)
D_s : 광밀도 (-)
K : 비흡수면적 (m^2/kg)
L_v : 가시거리 (m)
Y_s : 연소생성물에 대한 연기 입자비 (-)

그림 4(a)에서 보면 화재영역에서 유동하류방향으로 150 m 정도 떨어진 지점부터는 발생된 연기로 인하여 가시거리가 약 1 m 미만으로 급격히 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이는 승객들의 대피환경으로는 아주 열악하므로, 대피에 필요한 가시거리를 확보하기 위한 추가적인 환기장치가 필요하다고 사료된다. 유입풍속이 2 m/s로 증가된 그림 4(b)에서는 가시거리가 약 2.5 m정도로서 그림 4(a)에 비해 향상은 되었지만, 이 경우도 승객들의 안전한 대피환경을 보장할 만한 가시거리를 제공해주지는 못하고 있다. 또한 유입풍속이 3 m/s로 증가된 그림 4(c)의 경우도 마찬가지로 가시거리는 약 3~4 m로 증가되지만, 이때도 역시 승객들의 안전한 대피환경을 보장하지는 못하는 수준이다.

가시거리의 분포에서도 알 수 있듯이 임계속도를 기준으로 환기장비를 선정할 경우, 가시거리 측면에서 승객들의 안전한 대피환경을 제공하지 못할 것이 예상된다. 따라서 승객들의 안전한 대피환경을 보장하기 위해서는 추가적인 환기장치가 필요하다고 사료된다.

6.4 오염물질 분포 측면에서의 유효성 검토

CO 농도분포 측면에서 승객들 대피환경의 안정성을 평가하기 위하여 호흡면 높이에서의 CO 농도분포를 그림 5에 나타내었다. 유입풍속이 1 m/s인 그림 5(a)를 살펴보면, CO 농도는 유동의 하류방향으로 이동할수록 350 ppm까지 증가됨을 알 수 있다. 유입풍속이 2 m/s인 그림 5(b)를 살펴보면, 터널출구 영역에서의 최대 농도는 300 ppm으로서 유입풍속 1 m/s인 경우와 큰 차이를 보이지는 않으며, 다만 기류속도 증가로 인하여 CO와 공기의 혼합이 향상되어 넓은 영역에서 225 ppm의 농

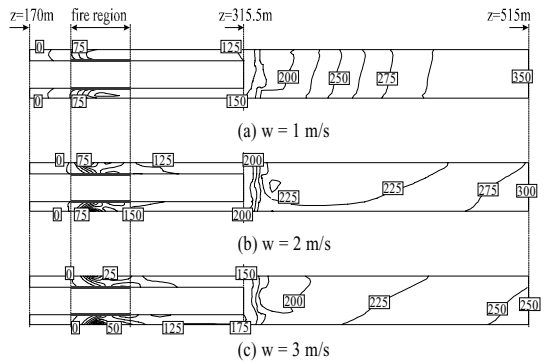

그림 5. 입구속도변화에 따른 터널내부 CO 분포 (unit : ppm)

도를 보임을 알 수 있다. 유입풍속이 3 m/s인 그림 5(c)를 살펴보면, 피난로 하류영역에서의 최대 농도는 250 ppm으로서, 위의 두 경우에 비하여 CO 농도가 상당히 감소됨을 알 수 있다. 이는 신속한 동작을 요구하는 화재상황 시 어느 정도의 여유시간을 제공할 수 있을 것이라 생각된다.

세 가지 유입풍속의 경우 CO의 분포가 15분 동안의 평균농도인 800 ppm 보다는 상당히 낮으나 15분 이상 대피 시 요구되는 50 ppm 보다는 상당히 높으므로 승객들은 15분 이내에 신선한 공기가 공급되는 지점까지 대피하여야 할 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 철도터널의 방재시스템의 설계 시, 적용되고 있는 1차원 임계속도 산정방법의 유효성을 평가하기 위하여 1차원 임계속도식으로 설계된 환기설비가 기류, 온도, 가시거리 및 유해물질 분포 측면에서 승객들의 안전한 대피환경을 확보할 수 있는가를 살펴보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 임계속도인 2m/s 이상에서는 역기류 발생현상이 나타나지 않으므로 기류측면에서의 1차원 임계속도 산정방법은 비교적 타당하다고 판단된다.
2. 온도분포측면에서는 유입풍속이 1 m/s나 2 m/s의 경우 승객의 대피환경은 열악함을 알 수 있다. 이에 비하여 유입풍속이 임계속도보다 증가된 3 m/s일 경우 다소 안전한 열적 대피환경을 제공할 수 있다.
3. 가시거리분포 측면에서는 유입풍속이 증가됨에 따라 가시거리가 개선되기는 하지만, 충분한 가시거리를 제공하지 못할 것이 예상되므로, 승객들의 안전한 대피환경을 보장하기 위해서는 가시거리를 개선하기 위한 추가적인 환기장치가 필요하다고 사료된다.
4. CO분포측면에서는 모든 유입풍속에서 CO의 분포가 15분 평균농도인 800 ppm 보다는 상당히 낮으나 대피시간이 15분 이상일 때 요구되는 50 ppm 보다는 상당히 높으므로, 승객들은 15분 이내에 신선한 공기가 공급되는 지점까지 대피하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Favre P. et al. (1997), Detailed simulation of smoke movement due to a train fire in the context of general safety considerations for the gotthard base tunnel, Proc. 9th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, BHR Group, pp 245-254.
2. Miles. S., and Kummer, S. (1997), Validation of a CFD model for fires in the memorial tunnel, Proc. 9th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, BHR Group, pp. 159-168.
3. Eureka Project EU 499: FIRETUN, Nov. (1995), Fires in transport Tunnels, Report on full-Scale Tests, Editor: Studiengesell schaft Stahlanwendung e. V., D-40213 Dusseldorf.
4. 신현준, 유지오 (1999), 철도터널 환기설계의 기초, 공기조화·냉동공학, 제28권, 제6호, pp. 463-466.
5. 이순일 (2000), 철도터널화재시 터널내부 환경에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.
6. Wu, Y., Baker, M. Z. A., Atkinson, G. T. and Jagger, S. (1997), A study of the effect of tunnel aspect ratio on control of smoke flow in tunnel fires, Proc. 9th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, BHR Group, pp. 573-587.
7. Tetzner, D., Pollak, R., Foit, W. and Sippel, M. (1999), Critical Velocity-Comparative Assessment of Test Results and CFD Simulation, International Conference Tunnel Fires and Escape from Tunnels, pp. 181-190.
8. Meacham, B. J. (1998), "NIST GCR 98-761: Evolution of Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods", NIST, 65p.
9. Chow, W. K. and Li, S. M. (1999), Safety Requirement and Regulations Reviews on Ventilation and Fire for Tunnels in the Hong Kong Special Administrative Region, Tunnelling and underground space technology, Vol. 14, No. 1, pp. 18-20.
10. NFPA 130 (2000), Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, National Fire Protection Association, USA.
11. Kennedy, W. D. (1997), Critical Velocity Past, Present and Future, One Day Seminar, ITC Ltd., London.

12. Lee, C. K., Chaiken, R. F., and Singer, J. M. (1979), Interaction between Duct Fires and Ventilation Flow: An Experimental Study", Combustion Science and Technology, Vol. 20, pp. 59–72.
13. Rodi, W. (1984), Turbulence Model and Their Application in Hydraulics, pp.27–31.
14. Lacroix, D. (1997), New French Recommendations for Fire Ventilation in Road Tunnels, Proc. 9th Int. Symp. Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, BHR Group, pp 103–123.
15. CHAM development team (1991), The PHOENICS manual, CHAM.

이승철
동해대학교 공과대학 자동차공학과 교수
sclee@donghae.ac.kr

이승호
상지대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수
shsh123@hanmail.net

이재헌
한양대학교 공과대학 기계공학부 교수
jhlee@hanyang.ac.kr