

자연배기 장대 터널의 화재에 대한 수치 해석적 연구

이광철, 유병훈, 황철홍, 이창언, 장영남*
 인하대학교 기계공학과, (주)우당기술산업 연구소*

A Numerical Study of Fire in a Long Longitudinal Tunnel with Natural Ventilations

Kwang-Cheol Lee, Byung-Hun Yoo, Cheol-Hong Hwang, and Chang-Eon Lee, Yung-Nam Chang
 Department of Mechanical Engineering, INHA University,
 Woodang Technical industry Co.*

1. 서 론

지하공간을 활용하는 장대터널은 반 밀폐적 구조로 인하여 화재 시 배연에 많은 어려움이 있으며, 고온의 유독성 연기로 인하여 호흡과 시야의 장애 및 심리적인 공포감으로 대형 사고를 초래할 수 있다. 또한 터널의 길이가 증가할수록 피난과 소화 활동이 용이하지 않아 상당히 위협적 요인이 되고 있다. 따라서 장대터널의 수요가 급증하는 국내현황을 고려하면, 장대터널 화재 시에 발생하는 여러 현상들을 체계적으로 규명하여 터널의 방재, 환기 및 피난설비를 설계하는데 필요한 자료를 구축하는 것은 매우 시급한 과제라 할 수 있다.

그러나 터널 화재는 매우 큰 공간에서 발생되며, 우연히 발생하는 자연현상이므로 실험적으로 현상의 재현 및 해석에 많은 문제점이 있다. 또한 유체역학, 열전달, 연소 등과 같은 복잡한 현상들이 포함되어 있기 때문에, 터널화재의 체계적인 규명과 화재 방지기술로의 응용 단계에는 많은 어려움이 있는 실정이다. 이러한 배경 하에 터널 내 화재모사에 대한 많은 수치적 연구가 이루어지고 있으며, 방법적으로 크게 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)와 LES (Large Eddy Simulation)으로 구분될 수 있다.⁽¹⁾

RANS는 평균화 기법 및 난류모델을 이용하여, 터널 내 화재 발생 시 정상상태(Steady-state)의 결과를 효율적으로 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 화재 발생 시 화염은 부력에 의한 거대와 구조(Large coherent structure)를 보이는 비정상(Unsteady) 현상이다. 또한 안전적 측면에서 화재 발생 후 짧은 시간 내에 화염 전파 및 연기의 거동이 매우 중요시 된다. 따라서 유동 및 화염의 비정상 효과를 고려할 수 있는 LES가 최근 화재 모사를 위해 적용되고 있다.⁽²⁾

따라서 본 연구에서는 LES를 기반으로 한 FDS(Fire Dynamics Simulator)^(3~4)를 이용하

여 장대 터널 내 화재 시 온도 및 유속 분포를 통한 연기거동을 검토하였다. 수치결과는 최근 본 연구진에 의해 수행된 실험적 연구결과⁽⁵⁾와 비교검토 되었으며, 향후 단계적으로 부력에 의해 지배되는 화염의 비정상 거동, 오염물질을 포함하는 고온 연기의 발생 및 확산 현상에 대한 구체적인 해석을 진행하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

장대터널의 화재모사를 위하여 LES를 기반으로 개발된 FDS (Ver. 4.0)을 사용하였다. 화재 유동장의 유속은 음속에 비해 매우 작기 때문에 낮은 마하수 근사법(Low Mach number approximation)이 적용되었으며, 이때 연속, 운동량, 에너지, 화학종 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_i}{\partial x_i} - \frac{Dp}{Dt} &= Q + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + q_r \right) + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + w_i \end{aligned}$$

여기서 ρ 는 밀도, u 는 속도, t 는 시간, p 는 압력, g 는 중력가속도, τ 는 전단응력, Q 는 단위체적당 열 발생율, q_r 는 단위면적당 복사 열전달률, T 는 온도, λ 는 열전도계수, Y 는 질량분율, D 는 확산계수, w 는 단위체적당 화학종 생성률을 나타낸다. 또한 Dp/Dt 는 시간에 대한 압력의 물질도함수를 의미한다.

LES를 위한 공간여과(spatial filtering)은 격자 내 평균값을 의미하는 Box 여과함수를 적용하였으며, 필터링 후 생성되는 아격자(sub-grid) 레이놀즈 응력과 아격자 난류 열 유속은 Smagorinsky 모델⁽⁶⁾을 이용하였다. 연소모델은 산소의 소모량에 열 발생율이 비례한다는 원리에 기초한 혼합분율 연소모델(Mixture fraction combustion model)⁽⁷⁾을 사용하였으며, 연료의 증발에 의한 발열량의 산정은 화염 표면에서의 산소 소모율에 의해 결정되어졌다. 또한 복사 열전달은 복사 유한 체적법(finite volume method for radiation)⁽⁸⁾을 사용하였으며, 수치기법에 관한 보다 자세한 내용은 McGrattan 등⁽⁹⁾에 기술되어있다.

2.2 계산 조건

터널 내 화재모사에 대한 본 계산의 검증은 위하여, 본 연구진의 실험결과⁽⁵⁾와 동일한

수치조건에서 계산을 수행하였다. 실험연구에서 대상으로 하는 장대터널(이하, 원형터널)은 높이 7.5m 및 폭 10.2m를 갖으며, 화재가 발생할 경우 대피할 수 있는 비상출구(Emergency exit)는 225m 간격으로 설치되어 있다. 실험의 화재 가상 시나리오는 터널의 비상출구 바로 근방에서 버스(Bus)에 화재가 발생한 경우로, 이 경우 화원에서 양쪽의 비상출구까지의 총 거리는 450m이기 때문에, 실제 터널에서 관심 대상의 터널길이는 600m로 하였다. 실험에 사용된 모형터널은 원형터널을 1/18로 축소한 것으로서, 모형터널의 재원 및 Froude 수 상사를 적용한 모형화원의 열방출율은 Table 1과 같다. 모형터널에서 비상출구는 화원으로부터 12.5m 떨어진 곳에 설치되었으며, 온도측정을 위해 화원근처에서는 R-Type 열전대를, 그 외 지역에서는 T-Type 열전대가 사용되었다. Figure. 1은 본 연구에 사용된 계산영역을 도시한 것으로서, 실험에 사용된 장대터널의 형상과 동일하다.

Table 1. Model tunnel using Froude scaling

	Prototype tunnel	Model tunnel
Horizontal length	600 m	33.4 m
Vertical length	7.5 m	0.417 m
Location of emergency exit	225 m	12.5 m
Heat release rate (for a bus)	20 MW	14.55 kW

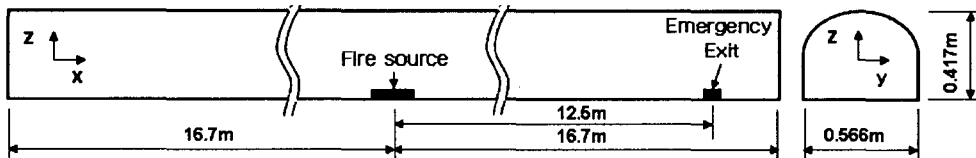


Figure. 1. Schematic of the computational domain.

2.3 계산결과 검증

터널 내의 화재 모사를 위해서는 매우 큰 계산영역이 요구되기 때문에, LES에서 요구되는 관성 아영역(Inertial subrange) 길이 스케일을 갖는 격자크기를 충족시키기 위해 매우 많은 격자수가 필요하다. 그러나 계산시간의 급격한 증가로 인한 문제점을 해결하기 위하여, 비교적 적은 격자수를 이용한 계산 결과와 실험결과와의 비교를 통하여 최종 격자수를 결정하였다. 본 계산에서 격자수의 검토는 Case 1($N_x \times N_y \times N_z = 744 \times 30 \times 25$)과 Case 2($744 \times 30 \times 48$)의 두 가지에 대해 수행되었다. 격자 분포로서 x와 y 방향은 화원 근처로 격자를 밀집하였으며, z방향은 균일한 격자분포를 부여하였다. 이때 불균일 격자에 의한 오차를 최소화하기 위하여 격자 신장율은 최대 5%로 하였다.

Figure 2는 격자수 검토를 위하여 화재 발생 후 60sec인 순간에 화원을 중심으로 x 방향에 따른 천장 근처의 온도분포와 비상출구에서 시간에 따른 CO 농도값을 나타낸 것

이다. Fig. 2(a)에서 Case 1의 경우는 5m를 기준으로 실험결과를 과대 및 과소 예측하고 있는 반면에, Case 2의 경우는 온도분포를 비교적 잘 예측하고 있다. Fig. 2(b)에서 Case 1의 경우는 출구에서 CO의 감지 시간은 실험결과(약 60sec)보다 매우 빠른 44sec이며, 시간에 따라 CO의 증가 경향은 실험결과보다 매우 크게 예측됨을 볼 수 있다. 반면, Case 2의 경우에 CO 감지 시간은 약 54sec로서 실험결과에 보다 근접함을 알 수 있다. 비록 CO의 농도는 실험결과보다 전체적으로 다소 낮게 예측하고 있으나, 시간에 따른 증가경향은 비교적 잘 보여줌을 확인할 수 있다. 위 결과를 바탕으로 본 계산에서는 Case 2와 같은 격자계를 적용하였다.

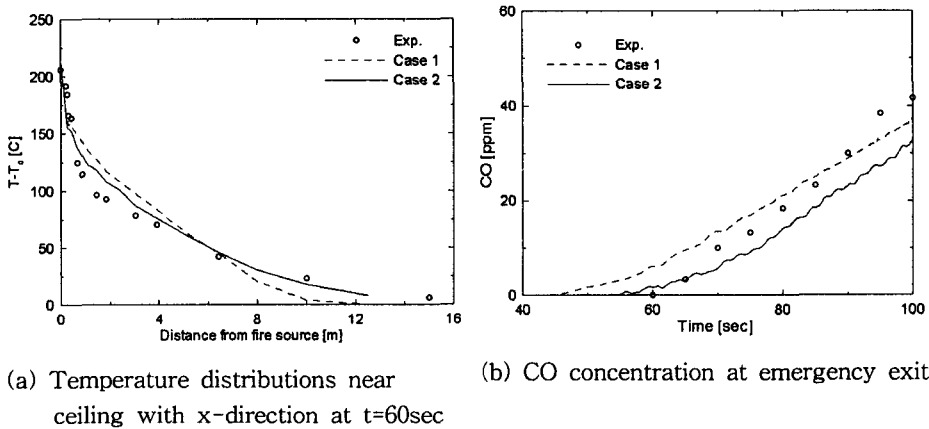


Figure. 2. Comparisons of experimental and numerical result with grid numbers.

본 계산에서 연소모델은 앞에서 언급한 바와 같이, 열 발생율은 산소 소모량에 비례한다는 원리에 기초한 혼합분율 연소모델이 사용되었다. 즉 연료의 증발에 의한 발열량의 산정은 화염 표면에서의 산소 소모율에 의해 결정된다. 그러므로 실험결과를 보다 정확히 모사하기 위해서는 실험조건과 유사한 이론 연소 효율에 대해 계산이 수행되어야 하며, 이를 위해 대표적인 연소효율에 대한 온도와 CO의 농도 변화를 검토하였다.

Figure 3은 연소 효율에 따른 온도변화 및 CO 발생 변화량을 도시한 것이다. Fig. 3(a)는 화재 발생 후 60sec 일 때 x 방향에 대한 천정 근처의 온도 분포를 나타낸 것이다. 연소효율이 0.96에서 0.8로 감소함에 따라 각 x 방향 위치에서 보다 낮은 온도값을 보여주며, 0.8인 경우에 실험결과를 가장 잘 예측함을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 출구에서 시간에 따른 CO 농도를 나타낸 것으로서, 산소부하율이 감소함에 따라 불완전 연소율의 증가로 인하여 CO의 발생량이 크게 증가됨을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 3(a)의 온도 결과와는 다르게 연소율이 감소함에 따라 실험결과와의 오차는 더욱 증가하는 상반된 결과를 나타내고 있다. 이러한 CO 농도의 오차는 본 계산의 연소모델에서 CO의 상세반응을 고려하지 않고, 1단계 총괄 반응식의 이론 계수로부터 간단하게 CO 발생을 예측하기 때문에 초래된 것으로 판단된다. 위 결과를 바탕으로 실제 실험에서는 연소효율이 약 0.8에 가까운

조건에서 화재가 진행되었음을 짐작할 수 있다. 그러나 계산 결과 연소효율에 따른 온도 변화의 차이는 크지 않는 반면에, CO 농도는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 현 단계에서 장대터널의 연기거동을 보다 사실적으로 모사하기 이후 계산에서의 연소효율은 0.96으로 설정하였으나, 향후 연소효율에 대한 온도변화 및 CO의 발생을 보다 정확히 모사할 수 있도록 연소모델의 부분적인 개선이 요구되어진다.

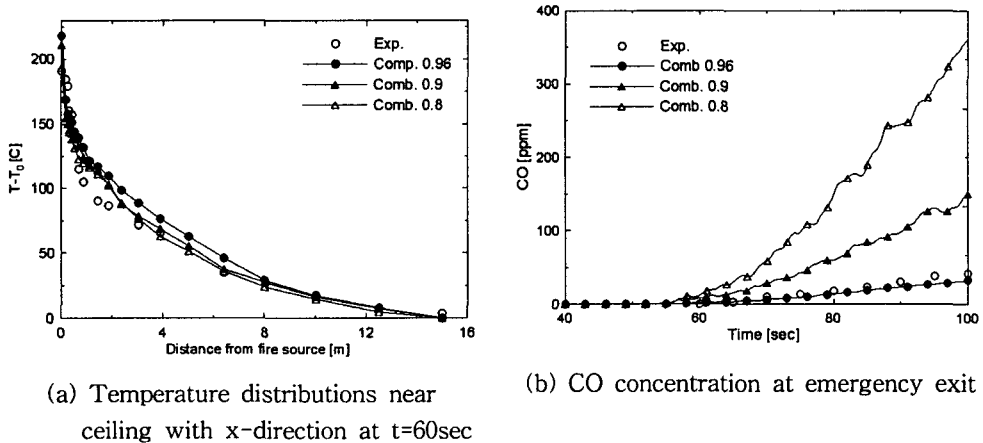


Figure. 3. Temperature and CO concentration with combustion efficiency.

3. 결과 및 고찰

터널 내의 연기는 부력에 의해 지배되는 화염의 동적거동과 관련된 큰 와동에 의해 천정으로 이동되며, 천정과와의 충돌을 통해 화원을 중심으로 양쪽 하류에 전파된다. 이러한 고온 연기의 거동에 대한 예측은 터널 내의 온도변화를 통해 간접적으로 예측될 수 있다.

Figure 4는 시간에 따른 연기 거동을 검토하기 위하여 20sec 간격으로 천정에서의 온도 변화 분포를 도시한 것이다. 천정 근처의 화원 중심부 온도는 20sec에서 약 210℃이며 80sec일 때 약 250℃까지 점차 증가한다. x방향에 대한 하류의 온도도 시간에 따라서 점차 증가함을 볼 수 있다. 또한 초기 연기 유입으로 인한 미세한 온도변화를 통해 연기의 확산속도를 짐작할 있는데, 연기는 20sec 일 때 약 10m까지 확산되며, 80sec 후에는 약 15m까지 전파됨을 알 수 있다. 또한 시간이 증가됨에 따라 연기의 확산속도가 점차적으로 감소되고 있음을 확인할 수 있다.

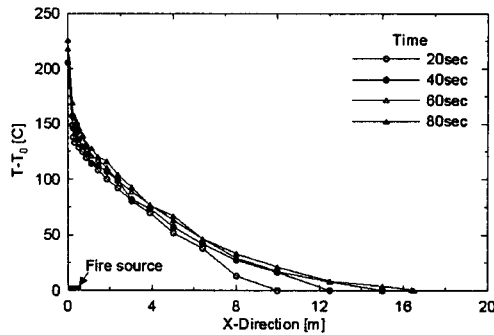


Figure. 4. Temperature distribution of x-direction near ceiling with time.

Figure 5는 시간에 따른 z 방향의 온도분포를 도시한 것으로서, 화원에서 1m부터 16m 까지 20sec 간격으로 도시한 것이다. 시간이 20sec인 경우에, 온도변화는 x=7m까지 발생되며, 비상출구의 근처에 해당되는 약 x=13m에서는 60sec 근처에서 연기가 유입됨을 짐작할 수 있다. 수직방향의 전체적인 온도분포 경향은 벽면의 열손실로 인하여 천정으로부터 약 0.397m에서 최고의 온도가 존재함을 볼 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 터널 수직방향의 온도변화가 점차 하부에서 발생하는 것을 통해 연기의 하강현상을 짐작할 수 있다.

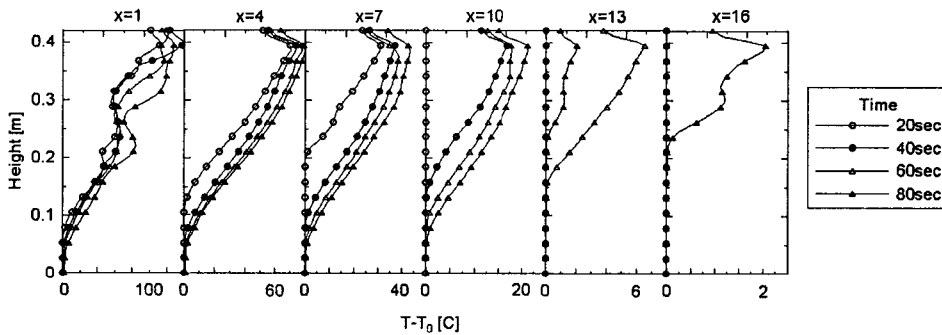


Figure. 5. Temperature distribution of z-direction.

Figure 6은 터널내부의 연기 이동속도를 검토하기 위하여 x 방향의 유속을 도시한 것이다. 화원 근처에 부력에 의한 말림현상으로 터널 상부에 하류방향의 (+) 성분의 유속이 생성되며, 상대적으로 보다 큰 (-) 유속이 터널 하부에 존재함을 볼 수 있다. 화원 근처에 해당되는 x=3m의 경우에, 하류보다 큰 연기의 유속이 발생되며, 동시에 가장 큰 역방향 유속이 존재함을 볼 수 있다. 즉 화원에서 부력에 의한 말림 현상으로 터널 하부에서 화원으로 공기가 유입됨을 짐작할 수 있다. 이러한 유속분포의 거동은 하류로 갈수록 유속의 크기는 작아지지만, 유사한 분포를 보여주고 있다.

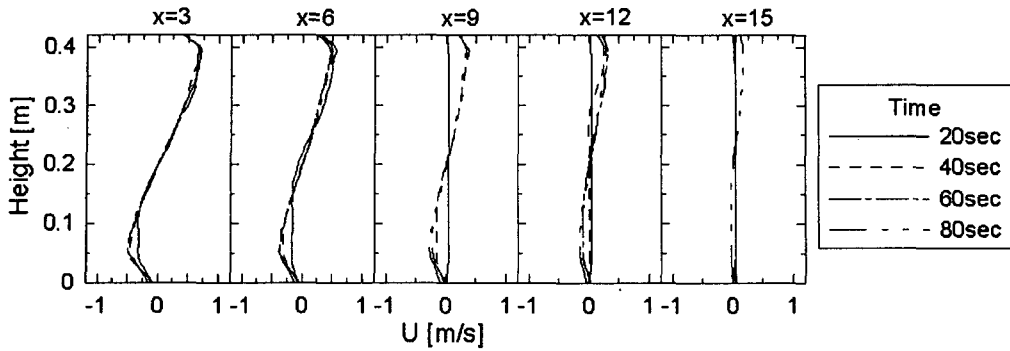


Figure. 6. Velocity distribution of z-direction.

Fig. 6에서 유속이 0이 되는 수직높이는 하류로 전파되는 연기와 상류로 유입되는 공기의 경계면을 의미하는 것으로서, Figure 7은 시간에 따른 이들의 수직 위치 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이, 속도 경계면은 시간에 상관없이 0.2m로 거의 일정한 높이에서 발생됨을 확인할 수 있다. 이 높이는 실제 온도변화를 통해 관측된 Fig. 5의 연기 층의 높이와는 상당히 다른 경향을 보이고 있다. 즉 실제 부력에 의해 하류로 전달되는 유속은 수직 높이 약 0.2m 위 영역에서 발생되나, Fig. 6에서와 같이 하부의 (-)의 유속에 의해 연기가 역류 및 하류로 하강됨을 알 수 있다. 이 결과를 통해 연기 층이 하강되는 주요 원인은 연기가 하류로 전파되는 유속보다는 외부에서 화원방향으로 유입되는 공기의 유속에 의해 보다 큰 영향을 받게 됨을 짐작 할 수 있다.

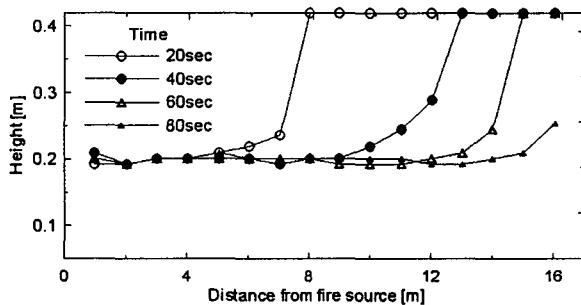


Figure. 7. Height of x-direction velocity having zero with time.

화재 발생 시 연기의 전파속도는 장대터널 내의 비상출구의 위치 선정에 매우 중요한 판단기준이 되기 때문에, Figure 8은 Fig. 5에서와 같이 각 x 방향 위치에서 온도가 가장 먼저 변화되는 순간, 즉 연기가 유입되는 순간들의 속도를 도시한 것이다. 이 결과는 화원에서 발생한 연기가 터널 상부를 따라 하류로 전파되는 연기선단의 유속을 의미한다. 연기의 전파 속도는 약 3m 부근에서 약 0.115m/s 까지 급격히 증가한 후, 점차 감소하여 12.5m에서 약 0.03m/s를 나타냄을 볼 수 있다. 이는 화원 근처에서 연기의 높은 농도구배에 의한 확산 및 부력에 의해 발생하는 속도장의 영향이 크게 작용되어 연기의 전파속도가 증가하지만, 하류로 갈수록 열손실로 인한 밀도의 증가와 농도구배의 감소로 인한 확

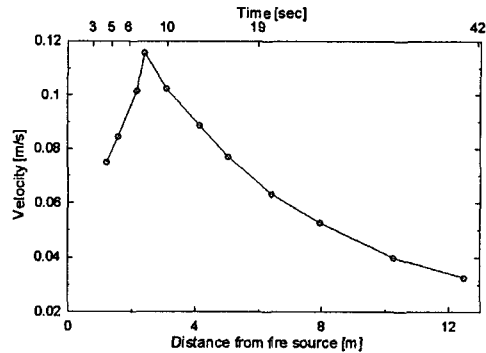


Figure. 8. Propagation velocity of smoke front.

산속도의 저하 등으로 점차 연기의 전파속도가 낮아짐을 짐작할 수 있다. 이러한 연기의 전파속도는 연료의 종류 및 연소 효율과 밀접한 관계를 갖기 때문에 실제 터널의 설계에 연기 전파속도의 활용을 위해서는 이들에 대한 보다 체계적인 해석이 요구되어 진다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 본 연구진의 실험결과를 바탕으로, 자연배기 조건에서 터널 내 연기 거동에 관한 수치 해석을 수행하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

- (1) 본 계산결과와 선행된 실험결과와의 비교를 통해, 터널 내 온도분포를 비교적 정확히 예측함을 확인하였으나, 연소 효율에 따른 CO 발생은 상당히 과다 예측되어, 향후 FDS에서 고려되는 연소모델의 부분적인 개선이 요구됨을 알 수 있었다.
- (2) 터널 내의 유속분포를 통해, 특정 수직높이(약 0.2m)를 기준으로 상부에서는 하류 방향으로 연기가 전파되는 (+) 성분의 유속이 존재하며, 하부에서는 상대적으로 더 큰 (-) 유속이 존재하며, 시간에 따라 이 높이는 거의 일정함을 확인하였다.
- (3) 터널 내의 유속 및 온도분포를 통해, 연기 층이 하강되는 주요 원인은 연기가 하류로 전파되는 유속보다는 하류에서 화원방향으로 유입되는 공기의 유속에 의해 보다 큰 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.
- (4) 화재 발생 후 연기선단의 전파속도는 하류로 진행하면서 급격히 증가하다가 $x=3\text{m}$ 이후에서 온도감소에 따른 밀도증가 및 연기농도 구배의 감소로 인하여 전파속도가 감소함을 알 수 있었다. 향후 연료의 종류 및 연소효율에 따른 보다 체계적인 연기의 전파속도 예측은 장대터널 내의 비상출구 위치 선정에 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

5. 후 기

본 연구는 “지하 공간전용 소화설비 및 소방방재 통합 시스템 구축에 관한 연구”의 일환으로 한국건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. V. Novozhilov, "Computational fluid dynamics modeling of compartment fires," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 27, pp. 611~666 (2001).
2. Y. Xin, Gore, J. P., McGrattan, K. B., Rehm, R. G. and Baum, H. R., "Fire dynamics simulation of a turbulent buoyant flame using a mixture-fraction-based combustion model," *Combustion and Flame*, Vol. 141, pp. 329~335 (2005).
3. K. B. McGrattan, R. G. Rehm, H. R. Baum, "Fire-driven flows in enclosures," *J. Comput. Phys.* Vol. 110, pp. 285~291 (1994).
4. W. E. Mell, K. B. McGrattan, H. R. Baum, "Numerical simulation of combustion in fire plumes," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, pp. 1523 (1996).
5. C. H. Hwang, B. H. Yoo, C. E. Lee, S. M. Kim, J. Y. Kim and H. J. Shin, "An experimental study of smoke movement in tunnel fire with natural and forced ventilations," *Transactions of the KSME B*, Vol. 29, No. 6, pp. 711~721 (2005).
6. J. Smagorinsky, "General circulation experiments with the primitive equations - I. The basic experiment," *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99~164 (1963).
7. J. E. Floyd, K. B. McGrattan and H. R. Baum, "A mixture fraction combustion model for fire simulation using CFD," *Proc. Int'l Conf. on Engineered Fire Protection Design*, pp. 279~290 (2001).
8. G. D. Raithby and E. H. Chui, "A finite-volume method for predicting radiant heat transfer in enclosures with participating media," *J. of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 2, pp. 415~423 (1990).
9. K. B. McGrattan, "Fire dynamics simulator (Version 4) - Technical reference guide," *NIST Special Publication 1018* (2005).