

환기를 동반한 철도터널 화재 연기유속 및 온도장 해석

The Analysis of Fire-Driven Flow and Temperature in The Railway Tunnel with Ventilation

장용준* · 이창현** · 김학범*** · 이우동****
Jang, Yong-Jun, · Lee, Chang-Hyun, · Kim, Hag-Beom · Lee, Woo-Dong

ABSTRACT

Fire-driven flow and temperature distribution in a ventilated tunnel was analyzed by Large Eddy Simulation using FDS code. The simulated tunnel is 182m length, 5.4m wide and 2.4m height. A pool fire was located 112m from tunnel entrance and was taken as a heat source of 0.89m^2 . The heat is assumed to be released uniformly throughout the whole simulated time. The fire strength was 2.76MW and the fuel burnt was octane.

The parallel computational method was employed to accelerate the computing time and manage the large grid points which is not possible to handle in the one CPU. The total grid points used were 2.4×10^6 and 7 CPUs were used to calculate the momentum and energy equations. The simulated results were well compared with the experiments.

국문요약

2006년에 고시가 된 「철도시설 안전세부기준」(건설교통부고시 제2006-395호)에 의하면 1km 이상의 철도터널을 건설할 경우 철도터널에 대한 화재 시뮬레이션을 수행하여 철도터널 내부의 화재에 대한 안전성 분석을 실시하도록 되어있다. 철도터널에서 화재에 대한 안전성 분석을 하기 위해서는 실험적 방법과 수치해석을 이용한 방법이 있는데, 본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용하여 터널에서의 화재유동 및 온도장 분포를 해석하였으며, 실험 결과와 비교하여 수치해석의 신뢰성 정도를 분석하였다.

Fletcher 등이 수행한 모형 터널 실험을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 터널 모형은 길이 182m, 높이 2.4m, 폭 5.4m으로 이루어져 있으며, 수치해석에서도 실험과 동일한 상황을 가정하여 해석을 하였다. 화재가 발생한 부분은 터널의 입구로부터 112m 지점이며, pool fire를 사용하였다. 화재 강도는 약 2.76MW이며, 화원으로서는 Octane을 사용하였다.

수치해석을 위하여 LES 기법을 이용한 FDS (Fire Dynamics Simulator)를 사용하였으며, 본 연구에서는 계산 속도를 증속시키고, 단일 CPU에서는 처리가 곤란한 격자수를 처리하기 위하여 여러 개의 CPU를 사용하는 병렬 처리 기법을 활용하였다. 본 연구에서 사용된 총 격자의 개수는 2.4백만 개이며, 사용된 CPU수는 7개 이다. 수치해석 결과와 실험 결과를 비교 분석하여 수치해석의 신뢰성과 FDS의 철도터널 안전성 분석에의 활용 가능성에 대하여 논하였다.

*책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원

E-mail : jangyj@krri.re.kr

TEL : (031)460-5355 FAX : (031)460-5319

** 정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원

**** 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 책임연구원

1. 서 론

2006년에 고시가 된 「철도시설 안전세부기준」(건설교통부고시 제2006-395호)에 의하면 1km 이상의 철도터널을 건설할 경우 철도터널에 대한 화재 시뮬레이션을 수행하여 철도터널 내부의 화재에 대한 안전성 분석을 실시하도록 되어있다.

터널화재유동은 화원(Fire source)에 의해 밀도차가 생기고 이로 인한 부력이 발생하여 대규모의 와류가 생성되며, 천정에서 열기류성층(Hot stratified flow)을 형성한다. 또한 터널입구에서 환기유동(Ventilation flow)이 유입되면, 유입방향의 천정에서 역기류(Back-layer or reverse stratified flow)가 발생된다[1]. 이처럼 터널화재는 복잡한 유동현상이 존재하는데, 이러한 물리적 현상을 이해하기 위하여 다양한 연구가 시도 되었다[1,2]. 그러나 터널내의 화재유동은 실험실 규모의 제약과 화원을 다루어야 하는 위험성이 존재하므로 전산모사로 많이 시도되어 연구되고 있다.

국내에서 많이 사용되는 화재 해석용 CFD 코드로는 NIST(National Institute of Standards and Technology : USA)에서 개발한 LES 기반의 FDS[3,4,5,6] (Fire Dynamics Simulator)코드가 있으며, RANS 기법을 사용하는 화재 해석 전용 Smartfire와 범용유동해석 코드인 FLUENT, STAR-CD가 있다.

Ko & Park[7] 연구에서는 FDS 코드를 이용하여 실내공간에서의 중심형 화재와 모서리 화재의 전산모사를 수행하였으며, 실험데이터와 비교하여 FDS 코드가 해석한 화재성장이 실험에 비해 빠름을 지적하였다. Jang & Park[8] 연구에서는 화재가 배제된 터널내의 유동을 LES기법을 사용하는 FDS 코드와 STREAM code[9,10,11]의 Non-Linear k- ϵ 난류모델을 사용하여 비교분석하였으며 FDS 코드가 벽면근처의 유동예측 능력이 RANS보다 떨어짐을 보였다. Hwang & Edward[1]의 연구에서는 축소모형 실험결과와 FDS 코드의 해석결과를 비교분석하고 다양한 화원의 크기와 환기속도에 따라 상관관계식을 구하였다. Fletcher et al. [12]등은 모형 터널을 제작하고 pool fire를 이용하여 터널에서의 화재 실험을 수행하였으며, RANS 기법을 이용하여 수치 해석적으로도 조사하였다. Gao et al. [13] 등은 Fletcher 등이 실험한 동일한 규모에서 LES 기법을 이용하여 실험 결과와 비교하였다.

이와 같이 국내외적으로 화재유동에 대한 관심이 증가하고 있는 가운데 국내에서는 최근에 FDS를 활용한 화재유동 해석이 증가하고 있다. 현재까지는 FDS가 주로 환기가 없는 곳에서의 화재유동 해석에 사용을 하였으나, 본 논문에서는 환기가 존재하는 철도 터널내부에서 화재가 발생한 경우에 FDS의 적용 가능성 및 예측 성능을 실험값과 비교하여 조사하였다. 사용된 실험 data는 Fletcher et al.[12]의 것을 사용하였으며, 동일한 터널 규모를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 동일한 터널에서 LES 기법을 사용하여 시뮬레이션을 수행한 Gao et al.[13]의 결과와도 비교하였다.

2. 터널 형상 및 해석 기법

2.1 터널 형상

Fletcher et al. [12]등이 실험한 터널은 터널의 입구로부터 40m 하류 지역에 화원을 설치하고 화재 실험을 수행하였으나, 본 연구에서는 여러 번의 수치해석을 해본 결과 터널 천정에서 발생하는 역기류가 터널 입구 방향으로 40m 이상의 거리를 전파되는 것으로 판명되어 터널의 입구 길이를 72m를 연장하여 Fig 1에 보이는 것처럼 터널 입구에서 화원까지의 거리를 112m로 설정하였다. 또한 화재 발생 지점 이후의 터널 출구까지의 거리를 70m로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 따라서 터널의 총 길이는 182m

이며, 터널의 높이 2.4m, 터널의 폭 5.4m은 실험과 동일하게 설정하였다. 화재 강도는 2.76MW를 사용하였으며, 화원으로서는 Octane을 사용하였다. 또한 환기유동의 방향은 +X 방향으로써, 환기 유동의 속도는 0.85m/sec 이다.

2.2 지배방정식 및 수치모델

FDS코드의 LES기법의 경우, 운동량 방정식을 필터링(filtering)하여 얻었으며, 식은 다음과 같다.[3,4]

$$\frac{D\overline{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right\} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \overline{U_i U_j} - \overline{U}_i \overline{U}_j \quad (2)$$

여기서 τ_{ij} 는 sub-grid scale(SGS) stress이다.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \overline{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

여기서 ν_t 는 모델링이 되어야 하는데 FDS에서는 다음과 같은 범용적인 Smagorinsky model[3,4]을 사용하고 있다.

$$\nu_t = (C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| \quad (5)$$

여기서,

$$|\overline{S}| = (2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

$$\overline{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (7)$$

그리고 Smagorinsky constant $C_s = 0.2$ (FDS default 조건)을 사용하였다. FDS에서 연소 모델은 혼합분율 연소모델을 사용하였으며, 복사모델로는 FVM 방법을 사용하였다.

수치해석에 사용된 격자의 수를 결정하기 위하여 화원의 총열발생률(HRR)과 관계된 특성 길이(characteristic length)[5] L을 고려하여 결정되었다.

$$L = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_o T_o C_P \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (8)$$

여기서 $\rho_o = 1.16 \text{ kg m}^{-3}$, $C_P = 1007 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$, $T_o = 300 \text{ K}$, $\dot{Q} = 2.76 \text{ MW}$. 방정식 (8)을 이용하여 결정된 격자수는 총 2.4백만개이다. 이는 일반 PC에서 수치해석하기에 쉽지 않은 격자 수이며, 여러 개의 파라미터들의 영향을 조사하기 위해서는 일반 PC에서 처리하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Linux 기반의 병렬 처리 기법을 이용하여 Fig 2와 같이 격자를 14개로 분할한 후 CPU 7개를 사용하여 병렬 계산을 수행하였다. 일반 PC에 비하여 계산 속도의 증가는 약 5 배정도이다.

FDS 코드에서 비정상 상태의 유동을 2000초까지 계산하였으며, 이와 같이 장시간 계산을 한 이유는 역기류의 강도가 매우 큰 까닭에 유동의 패턴이 안정되기까지 장시간이 필요하였기 때문이다. 따라서 이러한 이유 등으로 인하여 일반 PC에서는 처리하기가 더더욱 곤란하다.

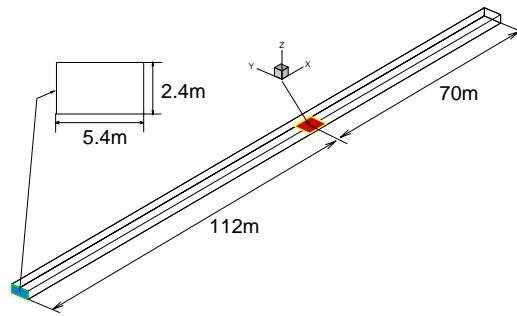


Fig. 1. Schematic diagram for ventilated tunnel model for simulation with FDS

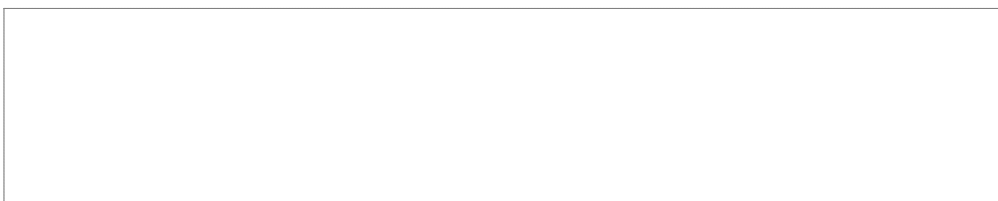


Fig. 2. The mesh partition of tunnel-model grid for parallel computation of FDS

3. 결과 및 고찰

Fig 3은 터널에서의 화재 현상을 나타낸 것으로써 주유동 방향으로의 화염 및 연기의 전파 형태를 나타낸 것이다. 예상과 같이 화원에서 격렬하게 발생하는 화염의 부력 효과로 인하여 터널 바닥에서 천정 방향으로 강한 기류가 형성되고 있는 것을 볼 수 가 있다. 화재 부근에서의 온도는 600K를 가

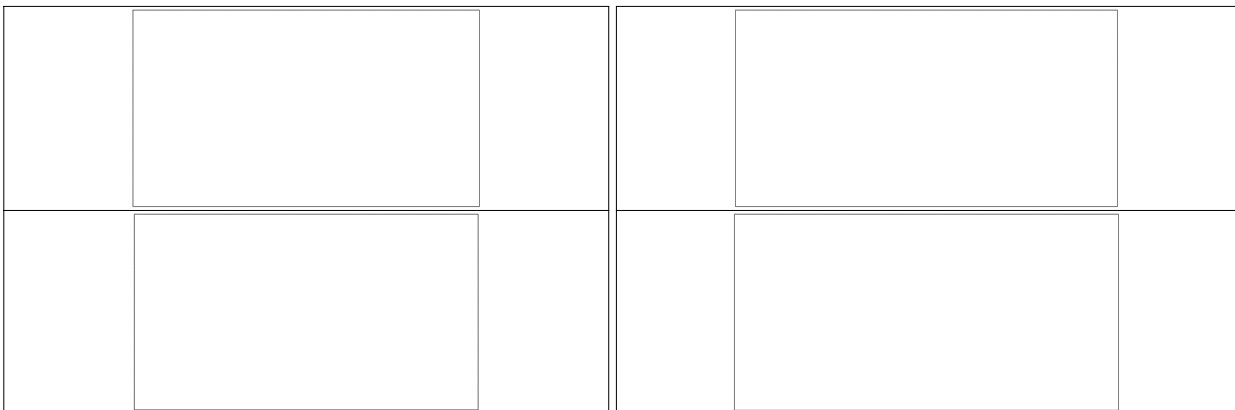
리키고 있으며, 터널 천정 부근에서 500K 정도를 나타내고 있다. 특이한 사항으로는 환기 유동이 +X 방향임에도 불구하고 화원의 양 방향(+X, -X) 쪽으로 동시에 온도의 분포가 비슷한 것을 볼 수 있다. 이는 화재 강도 2.76MW일 경우 역기류가 매우 강하게 발달하고 있기 때문인 것으로 판단된다.



Fig. 3. The temperature distribution in the tunnel with ventilation (°C)

Fig. 4는 터널의 단면적에서의 화재 유동의 패턴을 보여주는 그림이다. $X=0$ 인 곳이 화원이며 $X<0$ 인 영역은 화원의 상류 지역을 $X>0$ 인 영역은 화원의 하류 지역을 나타낸다. Fig 4는 터널 천정에서의 화재유동의 패턴을 상세히 보여준다. 고온의 열기류가 천정 부근에 머물면서 그곳에서 에너지를 소실한 기류가 다시 터널 벽면을 타고 터널 바닥으로 순환되는 구조를 보이고 있다. 이러한 터널의 단면에 존재하는 이차 유동의 강도는 환기 유동의 강도와 비슷한 규모인 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 화원으로부터 하류 방향의 온도 분포를 Fletcher et al.[12]의 실험 data와 비교한 그림이다. 화원으로부터 각각 13m, 18m, 30m, 40m의 위치에서 터널천정으로부터 터널바닥까지의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 시험 data의 특징은 터널 천정 부근에서는 매우 고온의 기류가 존재하지만 터널 바닥으로 접근할수록 온도가 급격히 하강하고 있는 것을 볼 수가 있다. 즉, $X=13m$ 지점에서는 터널 천정 부근에서 460K 이상의 온도를 보이고 있지만 터널 바닥 근처에서는 320K의 온도를 보이고 있다. 하류로 이동할수록 터널 천정에서의 온도가 하강하고 있는데, $X=40m$ 지점에서는 약 390K까지 하강하였다. Fletcher et al.[12]의 실험 data와 비교한 결과 본 연구의 시뮬레이션 값이 실험값과 잘 일치하고 있는 것을 볼 수가 있다. 또한 터널 천정의 최상층에서는 온도가 오히려 약간 내려가는 현상을 FDS 시뮬레이션에서도 잘 예측하고 있다. Gao et al.[13]의 결과를 보면 본 연구와 같은 LES 기법을 사용하였는데도 불구하고 $X=13m$ 부근에서 터널 천정에서의 온도를 약 750K정도로 예측하고 있어 실험 결과와 두 배 정도 차이가 나는 것으로 보고되고 있다.



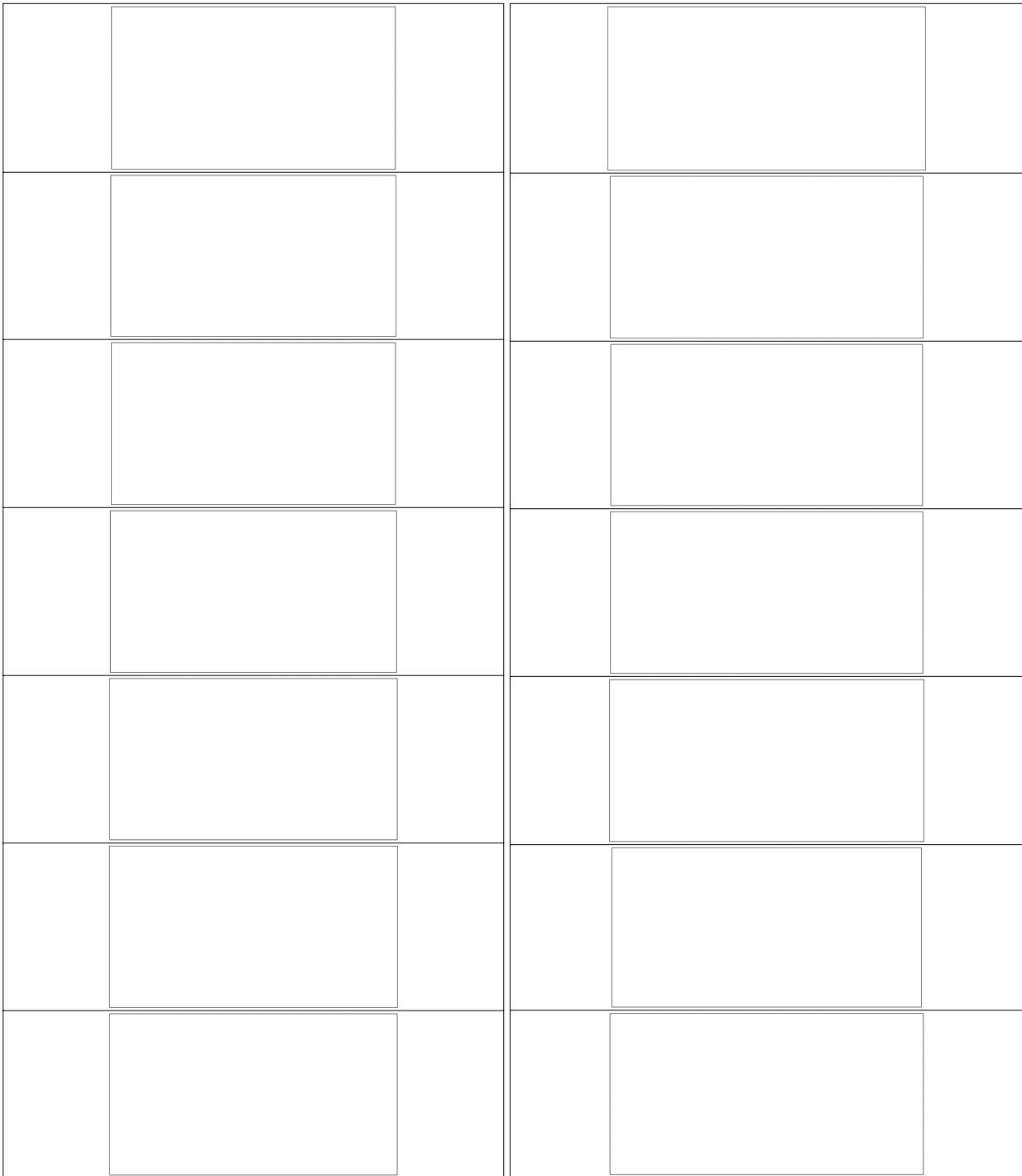


Fig. 4. The velocity and temperature distribution in the tunnel cross section



Fig. 5. The vertical temperature profiles at different positions from the fire source

4. 결론

본 논문에서는 환기가 존재하는 철도 터널내부에서 화재가 발생한 경우에 FDS의 적용 가능성 및 예측 성능을 실험값과 비교하여 조사하였다. 사용된 실험 data는 Fletcher et al.[12]의 것을 사용하였으며, 동일한 터널 규모를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 터널 입구에서 화원까지의 거리를 112m로 설정하였으며, 화재 발생 지점 이후의 터널 출구까지의 거리를 70m로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 터널의 총 길이는 182m 이며, 터널의 높이 2.4m, 터널의 폭 5.4m은 실험과 동일하게 설정하였다. 화재 강도는 2.76MW를 사용하였으며, 화원으로서는 Octane을 사용하였다. 또한 환기유동의 방향은 +X 방향으로써, 환기 유동의 속도는 0.85m/sec 이다.

본 연구에서는 Linux 기반의 병렬 처리 기법을 이용하여 터널 격자를 14개로 분할한 후 CPU 7개를 사용하여 병렬 계산을 수행하였다. 화재유동 해석 결과 매우 강한 역기류로 인하여 계산에 소요되는 시간이 장시간 지연 되었으나 병렬처리 기법이 이에 대한 매우 효과 있는 대책으로 판단된다.

시뮬레이션 결과는 Fletcher et al.[12]의 실험 data와 비교 분석 되었으며, 매우 잘 일치하고 있는 것으로 조사되었다. 특히 터널 천정에서의 온도 분포를 다른 연구자들의 것 보다 우수하게 예측하고 있는 것으로 조사되었다. 본 연구를 통하여 FDS가 환기가 존재하는 철도터널에서의 화재유동 해석에서도 적당한 해석 도구가 될 수 있다는 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Hwang, C. C. and Edwards, J.C., 2005, "The critical ventilation velocity in tunnel fires-a computer simulation", *Fire Safety Journal* 40. pp. 213~244.
- (2) Hwang, C. C. and Wargo, J. D., 1986, "Experimental Study of Thermally Generated Reverse Stratified Layers in a Fire Tunnel", *COMBUSTION AND FLAME* 66, pp.171~180.
- (3) McGrattan, Kevin, 2006, "Fire Dynamics Simulator(Version 4) Technical Reference Guide", NIST,

March

- (4) McGrattan, Kevin and Forney, Glenn, 2006, "Fire Dynamics Simulator(Version 4) User's Guide", NIST, March
- (5) McGrattan, K. B., Baum H. R. and Rehm R. G., 1998, "Large Eddy Simulation of Smoke Movement", *Fire Safety Journal* 30, pp. 161~178.
- (6) McGrattan, K. B., Rehm R. G. and Baum H. R., 1994, "Fire-Driven Flows in Enclosures", *Journal of Computational Physics*, 110, pp.285~291.
- (7) Ko, Kyung-Chan and Park, Woe-Chul, 2004, "A Numerical Study of a Room Fire for Fire Sizes I. Center Fire", *Journal of the KIIS*, Vol. 19, No. 1, pp. 18~22.
- (8) Jang, Yong-Jun and Park, Won-Hee, 2007, "The Applicability Analysis of FDS code for Fire-Driven Flow Simulation in Railway Tunnel", *Journal of the korean society for railway*, April Vol. 10 No. 2, pp. 224~230.
- (9) Jang, Yong-Jun, 2006, "Three-Dimensional Flow Analysis around Rolling Stock with Square Cross Section Using Low Re $k-\epsilon$ ", *Journal of the korean society for railway*, April Vol. 9 No. 6, pp. 772~777.
- (10) Lien, F.S., Leschziner, M.A., 1994a, "A general non-orthogonal collocated finite algorithm for turbulent flow at all speeds incorporating second-moment turbulence-transport closure, Part 1: Computational implementation", *Comput. Methods Appl. Mech. Engr.*, Vol 114, pp.123-148.
- (11) Lien, F.S., Leschziner, M.A. 1994b, "Upstream monotonic interpolation for scalar transport with application to complex turbulent flows", *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol 19, pp.527-548.
- (12) Fletcher, D.F., Kent, J.H., Apte, V.B., Green, A.R., 1994, "Numerical Simulations of Smoke Movement from a Pool Fire in a Ventilated tunnel", *Fire Safety Journal*, Vol. 23 No. 4, pp. 305 - 325
- (13) Gao, P.Z., Liu, S.L., Chow, W.K. and Fong, N.K., 2004, "Large Eddy Simulation for Studying Tunnel Smoke Ventilation", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol 19, pp. 577-586