

환기가 있는 터널에서의 화재유동 해석의 정확성에 대한 고찰

장용준,^{*1} 이창현,¹ 김학범,¹ 정우성¹

THE EXAMINATION OF ACCURACY OF FIRE-DRIVEN FLOW SIMULATION IN TUNNEL EQUIPPED WITH VENTILATION

Yong-Jun Jang,^{*1} Chang-Hyun Lee,¹ Hag-Beom Kim¹ and Woo-Sung Jung¹

Numerical methods are applied to simulate the smoke behavior in a ventilated tunnel using large eddy simulation (LES) which is incorporated in FDS (Fire Dynamics Simulator) with proper combustion and radiation model. In this study, present numerical results are compared with data obtained from experiments on pool fires in a ventilated tunnel. The model tunnel is 182m(L)×5.4m(W)×2.4m(H). Two fire scenarios with different ventilation rates are considered with two different fire strengths. The present results are analyzed with those from LES without combustion and radiation model and from RANS ($k-\epsilon$) model as well. Temperature distributions caused by fire in tunnel are compared with each other. It is found that thermal stratification and smoke back-layer can be predicted by FDS and the temperature predictions by FDS show better results than LES without combustion and radiation model. The FDS solver, however, failed to predict correct flow pattern when the high ventilation rate is considered in tunnel because of the defects in the tunnel-inlet turbulence and the near-wall turbulence.

Key Words : 화재유동(Fire-Driven Flow), LES(Large Eddy Simulation), RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes), 역기류(Back-Layer)

1. 서 론

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

터널 화재 유동은 화원에 의하여 강한 부력이 발생하며 터널 천정에 충돌 제트와 같은 현상을 일으키고, 화염 고유의 비정상 연소유동 현상으로 인하여 대규모 와류(Large Eddy)가 생성되며, 천정으로부터 바닥 쪽으로 열기류 성층화 현상이 발생하여 천정 부근은 매우 뜨거운 가스가 존재하게 된다. 또

한 터널 입구에서 자연풍 또는 강제 기계 환기에 의한 유동이 화원 방향으로 접근하게 되면, 유입방향의 천정에서 역기류(Back layer 또는 Reverse stratified flow)가 발생하게 된다[1]. 역기류 현상은 터널에서 팬 용량 결정 및 연기 제어 시스템 설계시 중요한 변수가 되고 있다. 연기 제어 시스템이 충분한 공학적 고려 없이 설계가 될 경우 터널 화재 시 승객들의 보호에 치명적인 오류가 될 수 있으므로, 연기의 거동에 대한 과학적 연구가 충분히 이루어진 후 환기 시스템 설계를 하여야 한다.

이러한 터널에서의 복잡한 연기유동 현상을 이해하기 위해서 실험적 접근 방법과 수치 해석적 접근방법을 동시에 사용하고 있다. 실험적 연구방법으로서 Apte 등[2]은 길이 130 m의 모형 터널을 제작하고 풀 화재(Pool fire) 실험을 수행하여, 역기류가 발생하는 연기 분포 속에서의 연기온도를 계측하였다. Oka and Atkinson[3]은 축소모형 터널에서 화원의 크기와 위치를 변화시켜가며 임계속도에 관하여 연구하였고, Kim 등[4]은 경사터널에서 화재 발생시 연소율의 변화에 따른 임계속도의 영향에 관하여 축소모형 실험을 수행하였다. 수치 해

접수일: 2009년 7월 24일, 수정일: 2009년 9월 2일,

게재확정일: 2009년 9월 4일.

1 정회원, 한국철도기술연구소 철도환경연구실

* Corresponding author, E-mail: jangyj@krii.re.kr

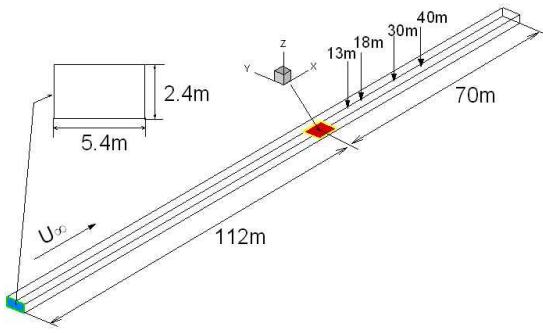


Fig. 1 Geometry of ventilated tunnel model and the analyzed positions for fire-driven flow simulation with FDS

석적 연구로서 Fletcher 등[5]은 Apte 등[2]이 수행한 풀 화재 실험을 RANS의 $k-\epsilon$ 난류모델을 활용하여 수치 해석하였다. 이들의 수치 해석적 연구 중 중요한 점은 연소 화학방정식 및 복사 모델을 사용하여 화재를 모사하였다는 점이다. Wu and Baker[6]는 서로 다른 형상을 가진 모형 터널에서 실험과 수치해석을 동시에 수행하였다. Hwang and Edwards[7]의 연구에서는 축소모형 실험결과와 FDS 코드의 해석결과를 비교분석하고 다양한 화원의 크기와 환기속도에 따라 상관관계식을 구하였다. Gao 등[8]은 Apte 등[2]이 수행한 풀 화재실험을 LES 기법을 이용하여 수치 해석적으로 연구를 하였다. 이 연구에서는 연소 모델 대신에 Boussinesq 가정을 이용하여 화재에 의한 열부력을 모사하였으며, 복사 모델도 도입하지 않았다.

수치해석의 기법 중 RANS의 새로운 난류 모델의 개발을 통하여 열유동 예측 성능을 향상시키기 위한 노력이 꾸준히 진행되어 왔으나[9,10] 화재 유동과 같이 대규모의 와류가 발생하고 상대적으로 저속인 경우는 LES 기법이 우수한 예측 성능을 가지고 있는 것으로 밝혀지고 있어[11-13] 최근에는 화재유동 해석을 위하여 LES 기법이 개발되고 있다.

특히 최근에는 철도터널 화재유동 해석을 위하여 National Institute of Standards and Technology (NIST:미국)에서 개발된 FDS (Fire Dynamics Simulator) 코드의 사용이 학계 및 연구소, 산업계에서 증가하고 있다. FDS 코드는 연소 화학방정식 및 복사 모델을 기본적으로 사용하고 있어 다양한 화재유동 모사에 있어서 편리한 장점이 있다. 또한 LES 기법을 사용하고 있기 때문에 역기류의 예측 성능에 있어서 RANS에 비하여 뛰어난 장점이 있다[1]. 다만, Jang 등[14]의 연구에서 지적된 것처럼 벽에서의 유동예측 성능이 RANS의 성능 보다 떨어지는 단점이 있다. 그의 연구에서는 FDS 코드의 유동예측 성능을 Non-Linear $k-\epsilon$ 난류모델과 비교분석하였다.

본 연구에서는 Apte 등[2]이 수행한 풀 화재실험을 FDS를

이용하여 동일한 터널 공간에서 수치해석을 수행하였다. Gao 등[8]도 동일한 공간에서 자체 개발한 LES 코드 및 RANS를 이용하여 그 결과를 비교분석하고 역기류의 예측에 있어서 LES의 성능이 뛰어난 것을 보였지만, LES의 활용에 있어서도 연소 모델 및 복사 모델을 사용하지 않을 경우에는 예측 성능에 제한이 있음을 보여주고 있다. 따라서 LES 기법을 활용하고 있고, 연소모델 및 복사모델도 포함하고 있는 FDS 코드의 성능은 어느 정도가 되는지를 체계적으로 조사해보는 것이 필요하다고 판단된다. 현재 FDS 코드는 국내외 건물 화재 해석에서 활발히 사용되고 있는 화재 전용 해석 코드이지만 장대터널에서의 FDS 성능에 대한 검증이 필요한 상태이다. 본 연구의 주목적은 연기의 거동 및 온도의 분포 예측에 있으므로, 기타 독성가스의 분포 예측은 본 연구에서 제외되었다.

2. 수치해석 조건 및 모델

2.1 터널화재유동 조건 및 수치해석 방법

본 연구의 해석 대상은 Apte 등[2]이 수행한 터널에서의 풀 화재실험으로서, 길이 130 m, 폭 5.4 m, 높이 2.4 m의 터널에, 화원은 터널의 입구로부터 40 m 하류 지역에 화원을 설치하였다. 그러나 본 연구에서는 여러 번의 수치해석 결과 터널 천정에서 발생하는 역기류가 터널 입구 방향으로 40 m 이상의 거리를 전파되는 것으로 판명되어, 터널의 길이를 52 m 더 연장하여 Fig. 1에서처럼 터널 입구에서 화원까지의 거리를 112 m로 설정하고, 화원으로부터 터널 출구까지의 거리를 70 m로 조정하여 수치해석을 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 터널의 총 길이가 182 m가 되며, 터널의 높이 및 터널의 폭은 실험 조건과 동일하게 설정하였다. 전체 해석 도메인의 좌표축(Fig. 1)은 화원을 기준으로 설정하였다. 화재 강도 및 환기 유동속도는 실험과 동일하게 설정하였으며, Table 1과 같다.

화원으로서는 Octane(헵탄)을 사용하였으며, 화원의 면적은 0.78 m²로서 실험조건과 동일하다. 환기 유동의 속도는 0.85와 2 m/sec를 사용하여, 실험 결과에 있어서 역기류가 생성이 되는 경우와 역기류가 발생이 되지 않는 경우로 나누어 조사하였다. 화원의 총 열발생율(HRR : Heat Release Rate)은 다음과 같이 계산된다.

Table 1 Fire strength and ventilation rate condition for simulation

Case	Fuel release rate (kg s ⁻¹ m ⁻²)	Air flow speed U _∞ (m s ⁻¹)	Total heat release rate (MW)
a	0.065	0.85	2.25
b	0.058	2.00	2.0

$$\dot{Q} = \dot{q}_m A \dot{m} \quad (1)$$

여기서 \dot{Q} 은 총 열발생율 (W), \dot{q}_m 은 연료의 열량으로서 Octane의 열량은 44.4 MJ/kg 이다. A는 화원의 면적, \dot{m} 는 연료 발생율(kg/s/m²)이다.

입구에서의 난류 조건은 FDS의 기본사항[15,16] 인 'No Turbulence'로 설정이 되었다. 출구에서는 대기압 조건으로 하였으며, 대기의 온도는 20℃ 이다. 벽에서의 유동 조건은 FDS의 기본사항인 'half-slip' 조건으로 설정하였다. 터널 벽은 단열 조건(adiabatic)을 주었다.

2.2 지배방정식 및 수치모델

FDS 코드의 LES 기법의 경우 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 이상 기체의 상태 방정식으로 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' + \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' + \epsilon \quad (4)$$

$$P = \rho RT \quad (5)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, \mathbf{g} 는 중력가속도, \mathbf{f} 는 부가항 (source term), R은 기체상수, T는 온도, ϵ 는 소산율(dissipation rate), h는 엔탈피(enthalpy), \mathbf{u} 는 속도 벡터(u,v,w) 이며, \dot{q}''' 는 화학반응으로부터 단위부피당 열방출률 (heat release rate) 이고, $\dot{\mathbf{q}}''$ 는 전도 및 복사열유속을 나타내는 것으로 자세한 사항은 FDS 지침서[15,16]에 설명 되어 있다.

$\boldsymbol{\tau}_{ij}$ 는 sub-grid scale(SGS) stress 으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ij} = \overline{U_i U_j} - \overline{U_i} \overline{U_j} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \quad (7)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

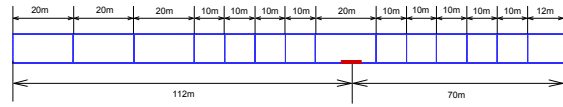


Fig. 2 The mesh partitions of tunnel-model grid for parallel computation with FDS

여기서 ν_t 는 모델링이 되어야 하며, FDS에서는 기본적으로 Smagorinsky model[13,15,16]을 사용하고 있다.

$$\nu_t = (C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| \quad (9)$$

$$|\overline{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (10)$$

$$\overline{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (11)$$

그리고, Smagorinsky constant $C_s = 0.2$ (FDS 기본 조건)을 사용하였다.

연소 방정식과 관련하여서는 혼합분율 연소모델(Mixture fraction model) 및 복사모델을 사용하였으며, 복사모델에서는 가스에서 산란에 의한 손실 효과가 없다고 가정하였다. 기타 사항은 기본 사항[15,16]으로 설정하였다.

수치해석에 사용된 격자의 수를 결정하기 위하여 화원의 총 열발생률(HRR)과 관계된 특성 길이(characteristic length)[17] L을 고려하여 결정되었다. 최대 그리드 크기는 L/10 보다 작아야 한다[17].

$$L = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_o T_o C_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (12)$$

여기서 $\rho_o = 1.16 \text{ kg m}^{-3}$, $C_p = 1007 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$, $T_o = 293 \text{ K}$, $\dot{Q} = 2.0 \text{ MW}$.

2.3 해석 격자

방정식 (12)을 이용하여 결정된 격자수는 총 2.4백만개이다. 이는 여러 개의 파라미터들의 영향을 조사하기 위해서는 일반 PC에서 처리하기에 쉽지 않은 격자 수 이므로, 본 연구에서는 Linux 기반의 병렬 처리 기법[18]을 사용하였다. Fig. 2 와 같이 전체 해석 도메인을 14개로 분할하고, CPU 7개를 MPI 기능을 사용하여 연결하여 병렬 계산을 수행하였다. 계산 속도를 비교한 결과 단일 CPU를 사용하는 것에 비하여 약 5배의 계산 속도의 증가가 있었다.

FDS 코드에서 비정상 상태의 유동을 2000초까지 계산하였으며, 이와 같이 장시간 계산을 한 이유는 입구 유동의 속도가 0.85 m/sec 이하일 경우 발생하는 역기류의 강도가 매우 큰 까닭에 유동이 안정될 때까지 기다리는 데 장시간이 소요되었다. 따라서 역기류가 발생하는 경우는 단일 CPU로 계산하는 것이 더욱 곤란하여진다. 반면 역기류가 발생되지 않을 경우는 상대적으로 짧은 계산 시간이 필요하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 화재유동 시뮬레이션 - 모델 성능비교

길이 130 m, 폭 5.4 m, 높이 2.4 m의 터널에서 풀 화재를 이용하여 Apte 등[2]이 수행한 터널 화재실험 결과와 본 연구의 FDS를 이용하여 해석한 결과를 비교하여 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 실험 결과와의 비교 위치는 화원으로 부터 출구 방향 쪽 (즉, 화원(X=0 m)의 후류)으로 각각 X=13, 18, 30, 40 m 지점이다. 같은 형상의 터널에서 RANS의 $k-\epsilon$ 모델을 가지고 Fletcher 등[5]이 수행한 결과도 동일한 위치에서 비교하였다. 한편, Gao 등[8]은 동일한 터널 형상에서 별도의 LES 코드를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 이의 결과도 함께 비교하였다.

Fig. 3은 Table 1에서 환기량이 상대적으로 적은 case a의 조건을 가지고 수치해석을 수행한 결과이다. 화원으로부터 출구 쪽으로 X=13 m 지점에서는 실험결과의 경우 천정 부근의 온도가 460K까지 올라가는 것으로 되어있다. FDS를 이용한 온도 예측은 거의 실험값과 일치하는 결과를 보이고 있는 반면, Gao 등[8]의 LES를 이용한 계산 결과는 동일한 위치에서 750 K까지 상승하는 것으로 예측이 되었다. 반면에, Fletcher 등[5]이 RANS의 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 예측한 결과는 실험값에 접근하는 온도를 보이고 있다. 그러나 터널의 중간 높이 (Z=1.5 m)에서는 FDS의 결과보다 실험값의 두 배에 이르는 예측치를 보이고 있어 FDS 코드 화재 모델의 우수성을 볼 수가 있다. 이 위치에서 놀라운 발견사항은 터널의 바닥 부근과 천정 부근의 온도의 차가 130°C 이상이 된다는 것이다. 이는 화재의 폭발적인 부력 효과에 의하여 고온의 열기가 터널 천정 부근에 집중된다는 의미이다.

화원으로부터 출구 쪽으로 더 진행된 X=18 m 지점에서는 온도가 420 K(실험 결과)로 하강하고 있는 것이 발견되고 있다. 여전히 FDS의 결과는 실험 결과를 잘 추적하고 있는 반면, 같은 위치에서 Gao 등[8]의 LES는 온도를 720 K로 예측하여 실험 결과와 매우 큰 차이를 보이고 있다. Fletcher 등[5]의 RANS 결과는 실험 결과에 접근하는 온도 예측을 보이고 있지만 FDS의 예측 결과보다는 성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

동일한 그림의 하류 방향 X=30 m에서는 실험 결과의 천정 부근의 온도가 400 K, FDS의 결과도 역시 400 K 정도를 보이고 있어 계속적으로 FDS의 예측결과가 실험 결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. Gao 등[8]의 LES는 동일한 위치에서 710 K로 예측하고 있어 여전히 실험 결과를 매우 상회하는 결과를 보이고 있고, Fletcher 등[5]의 RANS 결과는 실험 결과를 잘 추적하고 있지만 실험 결과보다 높은 예측값을 보이고 있다.

Fig. 3의 마지막 위치인 하류방향 X=40 m에서도 역시 FDS의 예측 결과가 실험 결과인 390 K 온도를 잘 예측하고 있다. Gao 등[8]의 LES 및 Fletcher 등[5]의 RANS 결과는 실험 결과를 상회하는 높은 온도결과를 보이고 있다.

이와 같이 Gao 등[8]의 LES 결과가 같은 LES 기법을 사용하는 FDS의 결과보다 매우 좋지 않은 결과를 보이고 있는 것은 계산상에 있어서 두 가지의 중요한 차이점에 기인하는 것으로 판단된다. 첫 번째는 Gao 등[8]의 LES에서는 화재모사에 있어서 FDS에서와 같이 화학 반응식을 사용하지 않고 운동량 방정식에서 부력항을 사용하여 단순 열대류로 화재를 모사한 점이다. 또 다른 중요한 차이점은 FDS에서는 화재모사에 있어서 소스(source)항 중의 하나인 복사에너지(radiation) 모델을 사용하였지만 Gao 등[8]의 LES에서는 복사에너지를 고려치 않은 점이다.

반면에 Fletcher 등[5]의 RANS 계산에서는 화재 모사를 위하여 화학 반응식 및 복사에너지 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였기 때문에 비록 RANS의 기법을 이용하였지만 LES 기법을 사용한 Gao 등[8]의 결과보다 실험값에 가까운 결과를 보이고 있다. 따라서 화재모사에 있어서 화학 반응식의 사용 및 복사 모델의 사용이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 1에서 터널 입구에서의 환기량이 case a의 두 배 이상인 case b 조건을 가지고 FDS 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. X=13 m에서는 실험 결과가 존재하지 않아서 그 이후의 후류에서 비교하였다. 실험 결과 X=18 m에서는 천정 부근에서 온도가 370 K 까지 상승하는 것으로 조사 되었으며, 이는 case a에 비하여 입구 환기량이 많은 까닭에 낮은 온도를 보이고 있다. FDS의 결과도 실험 결과에 근접한 결과를 보이고 있다. 반면 Fletcher 등[5]의 RANS 계산에서는 터널 바닥 부근에서 실험 값보다 높은 온도 분포를 보이고 있다. X=30 m 지점에서는 FDS 및 RANS의 결과가 비슷한 결과를 보이고 있으나 두 결과 모두 실험 온도를 상회하는 결과를 보이고 있다. 터널 바닥부근에서는 FDS의 결과가 실험값에 더욱 근접한 결과를 보이고 있다. X=40 m 지점에서 FDS와 RANS의 결과가 비슷한 성능을 보이고 있다.

이와 같이 입구 환기량이 많은 case b의 경우 FDS의 예측

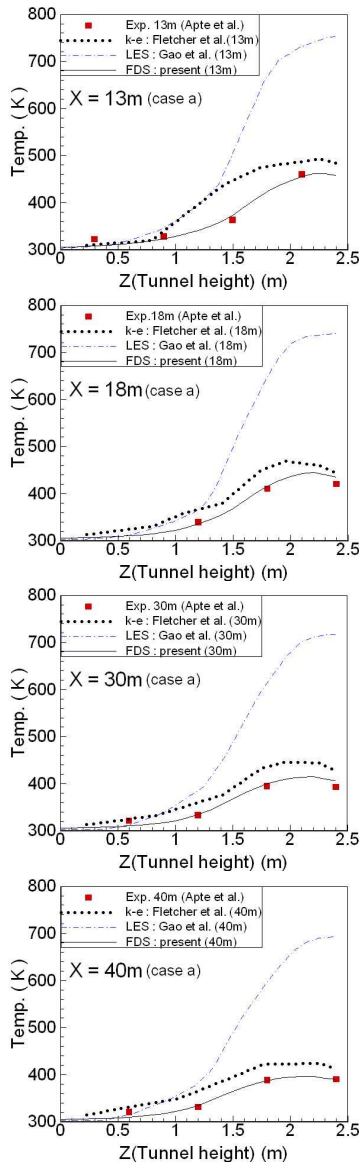


Fig. 3 Vertical temperature profiles at different positions for case a - comparison between models

성능이 환기량이 적은 case a의 경우보다 떨어지는 결과를 보이고 있다.

CFD 측면에서는 case b의 경우가 입구 방향으로 역기류가 발생하지 않으므로 계산 시간이 단축되고 발산의 가능성도 매우 낮은 경우로서 CFD 연구자들이 시뮬레이션 하기 쉬운 경우이나, 본 연구에 사용된 FDS의 경우는 시뮬레이션 하기에 오히려 어려운 case a의 예측에서는 실험결과에 매우 근접한 결과를 보이고 있는 반면 case b의 경우에는 실험 결

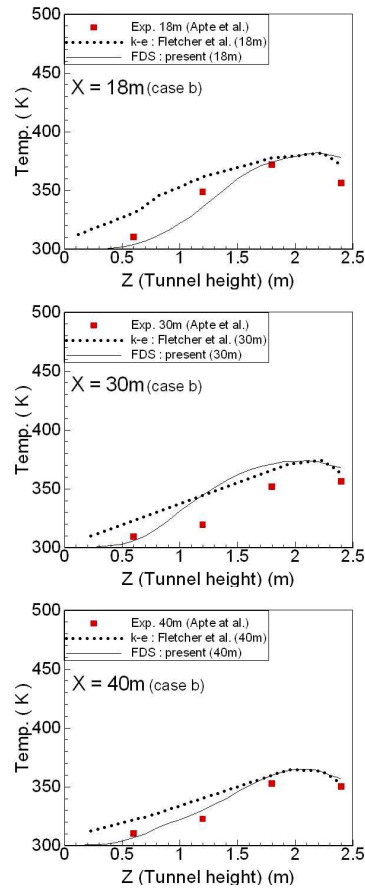


Fig. 4 Vertical temperature profiles at different positions for case b - comparison between models

과와는 차이가 있는 것으로 조사 되었다. 이는 Jang 등[1, 14]에서 지적하였듯이 FDS의 LES 계산시 터널 입구에서의 난류 유동 조건이 주어지지 않아서 층류입구 유동이 진입하기 때문이다. 따라서 case a의 경우는 화재유동으로 인하여 상당량의 역기류가 발생하기 때문에 입구의 층류 유동이 입구에서부터 역기류로 인한 난류유동과 혼합되어서 터널 중앙부근까지 진입하기 때문에 비교적 정확한 유동의 형태를 구할 수가 있었다. 반면 case b의 경우는 역기류 발생이 적고 터널 입구의 층류 유동이 터널 중앙부근까지 진입하게 되어 화재 위치 이후에서 화재유동과 혼합되기 때문에 난류량이 실험값과 차이가 있어 Fig. 4와 같이 예측 결과가 실험값에서 떨어진 결과를 보이고 있다고 추측된다. 이 보다 중요한 또 다른 원인은 Jang 등[1,14] 논문에서 지적된 FDS의 LES 계산시 벽에서 wall-law를 이용하여 정확한 벽 난류 계산을 수행하지 않았기 때문이라고 판단된다. Fletcher 등[5]의 RANS 계산에서 case a 및 case b의 경우 큰 차이가 없이 실험 결과를

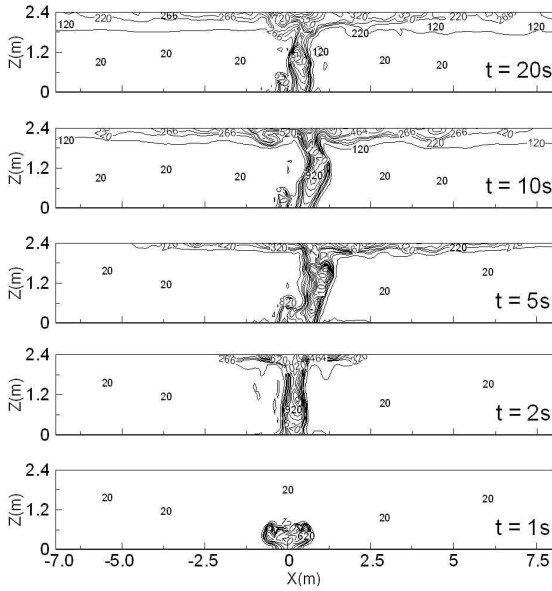


Fig. 5 Instantaneous temperature profiles with increasing time for case a (°C)

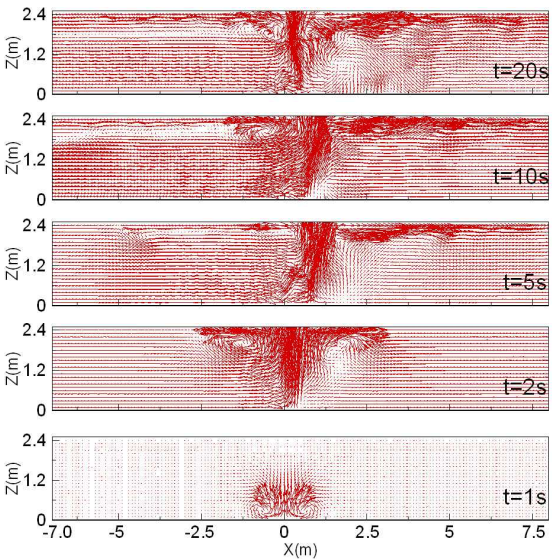


Fig. 6 Instantaneous velocity vectors with increasing time for case a

어느 정도 일정하게 추적하는 결과를 보이고 있는 이유는 터널 입구에서의 난류 조건 및 벽에서의 난류 계산 수행이 비교적 정확히 이루어지고 있기 때문이라고 판단된다. 그러나 역기류가 발생하는 case a 보다 역기류 발생이 적은 case b의 경우에 있어서 보다 실험 값에 접근하는 결과를 보이고 있는

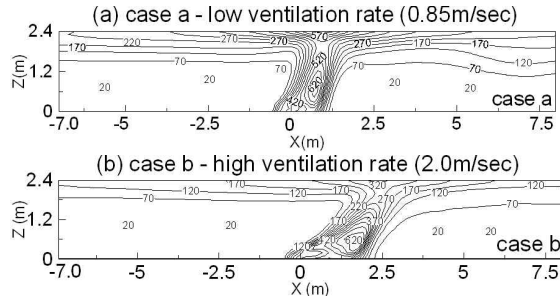


Fig. 7 Averaged smoke and flame shapes predicted by FDS : (a) case a - low ventilation rate (0.85m/sec) (b) case b - high ventilation rate (2.0 m/sec)(°C)

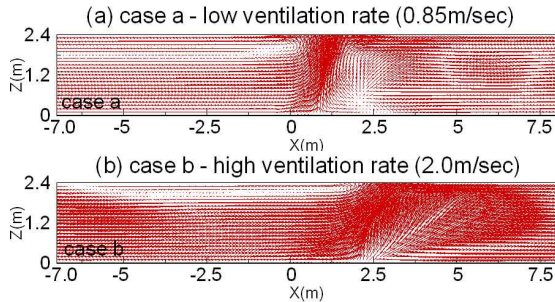


Fig. 8 Averaged velocity profiles predicted by FDS : (a) case a - low ventilation rate (0.85m/sec) (b) case b - high ventilation rate (2.0 m/sec)

이유는 RANS의 기법은 역기류가 발생하는 곳에서 취약하기 때문이다[1].

Fig. 5 및 Fig. 6는 역기류가 활발히 발생하는 case a 경우에 대하여 화원근처에서 시간에 따른 순간 화재유동 현상을 나타낸 것으로 Fig. 5는 순간 온도 분포 현상을 Fig. 6는 순간 벡터장을 각각 나타내고 있다. 순간 온도 분포를 보게 되면 화원에서 발생한 고온의 열기류가 부력으로 인하여 매우 짧은 시간 안에 터널 천정으로 상승하고 있는 것을 확연히 볼 수가 있으며 또한 열기류의 중심부의 온도가 1000°C를 넘는 것을 볼 수가 있다.

천정에 도달한 고온의 열기류는 천정부의 온도를 상승 시키며 천정을 따라 좌우로 급속히 전파되는 것을 볼 수 있다. 이때 입구에서 접근하는 환기량의 유속이 화재유동으로 인한 열기류의 강한 운동량 모멘텀을 극복을 못하고 입구 방향쪽의 역기류를 형성 시키고 있는 것을 볼 수 있다. 순간 벡터장을 보면 입구에서의 환기 유속으로 인하여 열기류 기둥이 출구방향 쪽으로 기울어지고, 출구방향 쪽 천정을 타고 강한 열기류가 전파되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 터널의 주 유동 방향에서의 평균 온도장을 나타내고 있다. 환기량의 유속이 약한 case a의 경우는 터널의 입

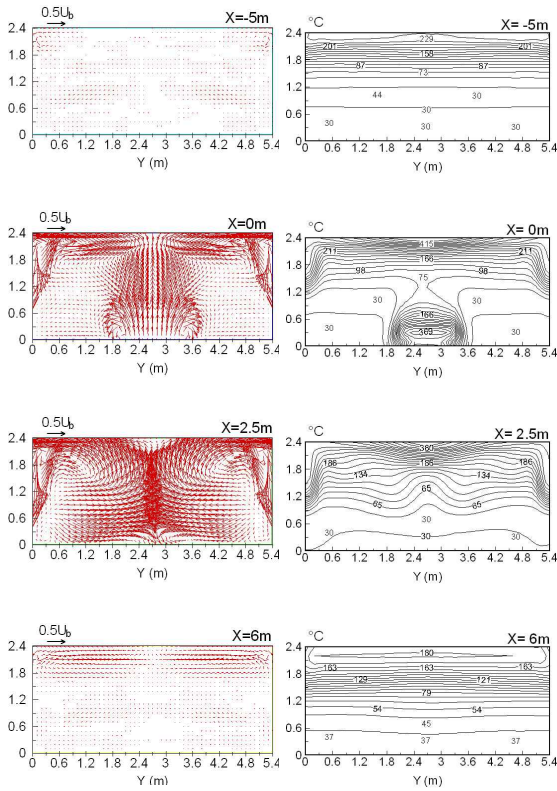


Fig. 9 Averaged velocity vectors and temperature contour in the secondary flow of tunnel predicted by FDS for case a

구 방향으로 역기류가 대량으로 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 반면 환기량이 큰 경우인 case b의 경우는 역기류가 매우 약하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나 실험 결과에서는 case b의 경우 역기류가 발생하지 않는 것으로 조사되어 FDS의 해석결과와 차이가 있는 것으로 조사되었다. 이는 Jang 등[1,14]에서 지적하였듯이 FDS 해석시 입구에서 난류 강도가 존재하지 않고 벽에서 벽 난류가 발생하지 않아 화원에서 발생하는 강한 열기류에 의한 난류 유동을 극복을 못하고 터널 입구 방향쪽으로 역기류를 허용하는 것으로 추측된다. 따라서 FDS의 사용자는 이러한 점을 유의하여야 한다고 판단된다. Fig. 8은 Fig. 7의 온도장에 대한 평균 속도장을 동일한 좌표에서 나타낸 것으로 역기류 층이 case a일 경우 매우 두텁게 형성되는 것을 확인할 수 있다. case b의 경우는 강한 터널 환기로 인하여 화염 및 연기가 터널 출구 방향으로 강한 속도 벡터장을 형성하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 터널의 횡 단면에서 시간 평균하여 계산한 2차 유동(secondary flow)의 속도 벡터 및 온도장을 나타내고 있다.

화원(X=0 m)에서는 강한 부력으로 인하여 매우 뜨거운 열기가 터널 천정으로 향하고 있으며 이는 마치 층돌 제트(Jet) 유동의 형태와 흡사하게 보인다. 터널 천정으로 상승한 뜨거운 열기류는 터널 천정을 타고 양쪽 벽(X=2.5 m)으로 이동을 하면서 매우 강력하고 큰 규모의 한 쌍의 와류(Vortex)를 형성하고 있으며, 또한 천정으로부터 열기류 성층화(thermal stratification) 현상이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 여기서 지적해야 될 중요한 사항은 연기가 화원으로부터 터널의 양쪽 방향으로 5~6 m(X= -5 m, X=6 m)을 진행하게 되면 연기의 운동량 모멘텀을 유지하던 고온의 가스는 주위에 급속히 열을 빼앗기고 강력한 2차 유동은 갑자기 사라져, 1차원의 터널 유동으로 다시 되돌아간다. 이는 Gao 등[8]에서도 지적된 사항으로 실험 결과와 잘 일치하는 유동 패턴이다.

4. 결 론

본 연구에서는 Apte 등[2]이 수행한 터널 내에서의 풀 화재(pool fire) 실험을 FDS code를 이용하여 동일한 터널 공간에서 수치해석을 수행하여 실험 결과와 비교 분석하였고, 이의 결과를 Gao 등[8]의 LES 결과 및 Fletcher 등[5]의 RANS 결과와도 비교 검토하였다.

FDS의 수치해석에서는 터널 환기가 강한 경우와 약한 경우 두 가지 조건을 계산하였으며, 터널 환기가 약한 경우 실험적으로 역기류가 많이 발생하였으며, FDS의 예측 결과도 이를 잘 예측하고 있다. 또한 화원 뒤의 후류에서의 온도 예측 값도 실험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수가 있었다. 반면에 같은 LES 기법으로 수치해석을 수행한 Gao 등[8]의 결과는 실험 결과에 비하여 두 배 이상의 온도 분포를 보이고 있었다. 이는 Gao 등[8]의 LES 계산 시 FDS에서와 같이 화학반응식을 사용하지 않고 단순히 운동량 방정식에서 부력항을 사용하여 열대류를 모사하였기 때문이며 또한 복사에너지(radiation) 모델을 사용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 동일한 터널 모델에서 Fletcher 등[5]의 RANS 계산에서는 화학 반응식 및 복사에너지 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였기 때문에 비록 RANS 기법을 사용하였지만 실험값에 가까운 결과를 보였다.

터널 환기가 강한 경우는 실험 결과에 비하여 FDS의 온도 예측 결과가 약간 높게 나왔다. 또한 실험적으로는 역기류가 존재하지 않는 것으로 조사가 되었으나 FDS의 계산 결과는 역기류가 발생하는 것으로 예측하여 터널 환기가 강한 경우 FDS의 예측 성능이 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 FDS의 계산 시 입구에서의 난류가 존재하지 않고, 벽에서 벽 난류가 발생하지 않아서 화원에서 발생하는 강한 열기류에 의한 난류 유동을 극복하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 “철도화재안전성능 평가 및 사고방지 기술개발(SR08014)” 과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2009, Jang, Y.-J., Kim, H.-B., Kim, J.-H. and Han, S.-Y., "Comparative Study on The Numerical Simulation for The Back-Layer of The Tunnel Fire-Driven Flow with LES and RANS," *Transactions of the KSME (B)*, Vol.33, No.3, pp.156-163.
- [2] 1991, Apte, V.B., Green, A.R. and Kent, J.H., "Pool fire plume flow in a large-scale wind tunnel," *Proceedings of Third International Symposium on Fire Safety Science*, Elsevier, pp.425-434.
- [3] 1995, Oka, Y. and Atkinson, G.T., "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires," *Fire Safety Journal*, Vol.25, No.4, pp.305-322.
- [4] 2008, Kim, S.-R., Jang, Y.-J. and Ryou, H.-S., "An Experimental Study on the Critical Velocity Considering the Slope in Tunnel Fire," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.11, No.1, pp.7-12.
- [5] 1994, Fletcher, D.F., Kent, J.H. and Apte, V.B., "Numerical simulations of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel," *Fire Safety Journal*, Vol.23, No.4, pp.305-325.
- [6] 2000, Wu, Y. and Baker, M.Z.A., "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems - A Study of the Critical Velocity," *Fire Safety Journal*, Vol.35, No.4, pp.363-390.
- [7] 2005, Hwang, C.C. and Edwards, J.C., "The critical ventilation velocity in tunnel fires - a computer simulation," *Fire Safety Journal*, Vol.40, pp.213-244.
- [8] 2004, Gao, P.Z., Liu, S.L., Chow, W.K. and Fong, N.K., "Large eddy simulation for studying tunnel smoke ventilation," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.19, pp.577-586.
- [9] 2001, Jang, Y.J., Chen, H.C. and Han, J.C., "Computation of Flow and Heat Transfer in Two-Pass Channels with 60 deg Ribs," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.123, No.3, pp.563-575.
- [10] 2008, Jang, Y.J., "An Investigation of Higher-Order Closures in The Computation of the Flow Around a Generic Car," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.22, pp.1019-1029.
- [11] 2002, Jang, Y.J., Leschziner M.A., Abe, K. and Temmerman, L., "Investigation of anisotropy-resolving turbulence models by reference to highly-resolved LES data for separated flows," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol.69, pp.161-203.
- [12] 2005, Dejoan, A., Jang, Y.J. and Leschziner, M.A., "Comparative LES and Unsteady RANS Computations for a Periodically-Perturbed Separated Flow Over a Backward-Facing Step," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.127, pp.872-878.
- [13] 2003, Temmerman, L., Leschziner, M.A., Mellon, C.P. and Frohlich, J., "Investigation of wall-function approximation and subgrid-scale models in large eddy simulation of separated flow in a channel with streamwise periodic constrictions," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.24, pp.157-180.
- [14] 2007, Jang, Y.-J. and Park, W.-H., "The Applicability Analysis of FDS code for Fire-Driven Flow Simulation in Railway Tunnel," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.10, No.2, pp.224-230.
- [15] 2006, McGrattan, K.B., *Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide*, NIST, March.
- [16] 2006, McGrattan, K.B. and Forney, G., *Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide*, NIST, March
- [17] 1998, McGrattan, K.B., Baum, H.R. and Rehm R.G., "Large Eddy Simulation of Smoke Movement," *Fire Safety Journal*, Vol.30, pp.161-178.
- [18] 2009, Jang, Y.-J., Kim, H.-B., Lee, C.-H. and Jung, W.-S., "The Numerical Simulation of Fire Driven Smoke and Heat Flow in the Deeply Underground Subway Station using a Linux Clustering Computer(Supercomputer)," *Proceedings of The KSME 2009 Spring Annual Meeting*, KSME 09TE063.