

존 모델을 이용한 종류식 배연 터널 화재시 연기 거동에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Study on Smoke Movement in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires Using a Zone Model

김현정*, 노재성*, 유홍선**, 김동현***, 장용준***

Kim, Hyun-Jeong Roh, Jae-Seong Ryou, Hong-Sun Kim, Dong-Hyeon Jang, Yong-Jun

ABSTRACT

Many researches have been performed to analyze the smoke movement in tunnel fires by using field model. Recently, FDS(Fire Dynamics Simulator) v.4, which is one of the field model and developed from NIST(National Institute of Standards and Technology), is widely used. In tunnel fires, FDS can show detail results in local point, but it has difficulties in boundary condition and taking long computing time as the number of grid increases. So, there is a need to use alternative method for tunnel fire simulation. A zone model is different kind of CFD method and solves ordinary differential equation based on conservation and auxiliary equations. It shows good macroscopic view in less computing time compared to field model. In this study, therefore, to confirm the applicability of CFAST in tunnel fire analysis, numerical simulations using CFAST are conducted to analyze smoke movement in longitudinal ventilation reduced-scale tunnel fires. Then the results are compared with experimental results. The differences of temperature and critical velocity between numerical results and experimental data are over 30°C and 0.9m/s, respectively. These values are out of error range. It shows that CFAST 6.0 is hard to be used for tunnel fire simulation.

1. 서론

터널 화재시 승객들의 인명 피해를 줄이기 위해서는 화재 진압 및 연기제어를 하는 것이 매우 중요하다. 특히 일정 크기 이상의 배연속도를 불어주어 연기가 없는 안전한 피난로를 확보할 수 있도록 연기를 제어하는 것은 매우 중요하다. 이러한 이유로 터널 내 연기거동, 특히 배연 시스템이 작동될 경우의 연기 거동은 승객들의 피난 대책, 즉 생명 안전의 관점에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러므로 터널 화재시 배연속도와 연기거동에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 터널 화재 연구는 비용적인 측면으로 인하여 주로 수치해석적 방법을 많이 이용하고 있으며, 사용하지 않은 터널에서의 화재 실험을 통해 얻은 실험 결과값을 가지고 비교 검증하고 있는 상태이다. 수치해석적 방법을 이용한 화재 모델은 필드모델(Field model)과 존 모델(Zone model)로 구분할 수 있다. 현재 널리 사용되고 있는 필드모델은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) V4가 있다. FDS는 3차원 Navier-Stokes 방정식을 명시적 방법을 이용하여 계산하는 모델로 해석 영역 전체에서 여러 값들에 대한 자세한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만

* 중앙대학교 기계공학과 대학원, 비회원

** 책임저자: 중앙대학교 기계공학과, 정회원

E-mail : cfdmec@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5280 FAX : (02)813-3669

*** 한국철도기술연구원 공기유동연구그룹, 정회원

터널 전체를 해석 영역으로 설정시 격자수 증가로 인한 계산시간 증가와 경계 조건 등의 해석조건의 어려움으로 인해 많은 주의가 요구되고 있다. FDS V4를 이용한 터널 화재에 관한 수치 해석적 연구로 Roh[1]등은 터널 화재시 종류식 환기에 의한 임계속도와 연소율 변화를 수치 해석하여 실험 결과와 비교하였다. 이 연구에서 앞에서 언급한 필드모델의 단점을 보완하기 위해 실험에서 얻은 발열량값을 이용하여 화원에 대한 입력값으로 사용하였다. 하지만 긴 터널에서 화원 근처의 일부 구간만을 해석 영역으로 설정하여 실제 터널 화재현상에서 나타나는 상류 및 하류에 대한 경계조건을 정확히 묘사하지 못했다. 일부 화원 주위를 해석 영역으로 설정하였음에도 불구하고 많은 계산 시간이 소요되어 다양한 배연 조건에 따라서 변화하는 연기 거동에 대한 분석에 어려움이 있었다. 이렇듯 해석 영역을 길게 설정할 경우 많은 계산 시간이 필요하게 되어 FDS같은 필드모델을 터널 화재에 적용하기에 어려움이 따르게 된다. 그러므로 터널 화재시 배연에 의한 국부적인 현상보다는 전체적인 연기 전과 분포를 파악하기 위해, 필드모델보다 계산시간이 적으면서 전체적인 연기 전과 분포를 파악할 수 있는 다른 방법의 터널 화재 시뮬레이션 기법이 요구되고 있다. 화재 수치해석 방법의 또 다른 기법인 존모델은 화재 시 고온의 상부층(Hot Gas Layer)과 비교적 저온이면서 산소가 풍부한 하부층(Lower Layer)으로 나누어서, 각각을 영역(Zone)으로 하여 상호간에 미치는 영향을 시간에 따라 평균값으로 계산하고 이를 해석하는 방법이다. 존모델 중에서 미국 NIST에서 개발된 CFAST(Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport) V6가 널리 사용되고 있다. CFAST는 보존 방정식과 보조 방정식을 상미분 방정식 형태로 계산하기 때문에 필드모델에 비해 계산시간이 빠르고, 데이터 입력이 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface)방식으로 되어있어 초보 이용자가 쉽게 시뮬레이션을 실행할 수 있도록 되어 있는 장점이 있다. 존 모델을 이용한 터널화재에 대한 수치 해석적 연구로 Chow[3]는 터널과 같은 종횡비가 큰 해석 영역의 경우 존 모델의 가정을 보완하기 위해 터널 내부를 여러 구역으로 나누어 CFAST를 이용하여 터널 화재에 대한 수치해석을 수행하였다. 이 논문에서 필드모델처럼 국부적인 지점에서 속도 및 온도 등의 정보를 예측할 순 없지만, 존모델을 여러 영역으로 나누어서 존모델의 단점을 보완하여 사용하면 어느 정도의 터널 화재 현상을 알아낼 수 있음을 보여 주었다. 하지만 터널 화재에서 중요한 배연조건에 따른 연기거동을 파악하지 않고, 온도값만을 예측하였기 때문에 실제 터널화재에서 발생하는 배연조건에 따른 연기거동 및 온도 분포에 대하여 제시하지 못했다. 따라서, 터널화재시 배연 조건하에 연기 전파속도 분포를 존모델에서 파악할 수 있다면, 많은 시간을 필요로 하는 필드 모델을 대체해서 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 존 모델인 CFAST V6를 이용해 터널 화재 발생 시 종류식 환기에 의한 연기 거동을 파악하고, 그 결과를 Roh[2]등의 실험 결과와 비교하여 터널 화재 해석 적용 가능성에 대하여 알아보고자 한다.

2. 시뮬레이션

2.1 해석대상

수치계산 영역은 Roh[2]등이 모형 터널에서 수행한 실험값과 비교하기 위해 동일 크기인 폭(W) 0.4m, 높이(H) 0.4m, 길이(L) 10m 인 터널을 선정하였다. 터널 천정 부분의 단면적의 변화를 고려하기 위하여 CFAST에서 높이에 따른 단면적 변화값을 수직방향으로 0.05m 간격으로 변화하도록 하였다. CFAST에서는 높은 온도를 가진 연기가 천정에 도달해 연기층이 형성된다는 가정하에 개발되어 있기 때문에 긴 터널이나 아트리움과 같은 구조에서는 화재 발생시 상층부터 연기가 형성되지 않으므로, 구간을 나누어 해석해야 하는 제한조건이 있다. 또, 해석 결과의 신뢰성이 보장되기 위해 길이와 폭(L/W), 길이와 높이(L/H)의 비가 3보다 낮은 값을 취하도록 요구[4]하고 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 10개의 구역으로 나누어서 계산하였다. 터널의 양쪽 출구는 외부와 개방하였으며, 초기 내부와 외부의 초기 경계 조건은 온도 20°C 로 주었다. 천정과 벽면 그리고 바닥의 재질은 CFAST 내부 데이터에 포함되어 있는 콘크리트로 설정하였다. 도표 1은 천정, 벽면, 바닥의 재질의 물성치를 나타내고 있다.

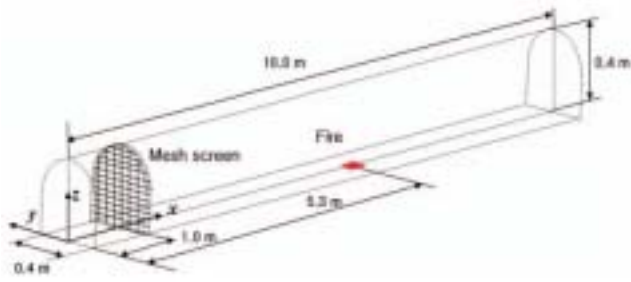


그림 1. 터널 모형의 개략도

도표 1. 천정, 벽면, 바닥 재질의 물성치

		콘크리트
열 전도도	[W/m · K]	1.75
비열	[J/kg · K]	1000
밀도	[kg/m ³]	2200
두께	[m]	0.15
복사율		0.94

2.2 화재시나리오

수치계산에서 사용한 연료는 메탄올(Methanol(CH₃OH))과 헵탄(n-Heptane(C₇H₁₆))이고 화원 크기는 한 변의 길이가 메탄올의 경우 4.5, 10.5, 12.5, 14.5cm, 또한 헵탄의 경우 4.5, 5.5, 6.5, 8.5cm이다. 도표 2는 본 수치계산에서 사용하는 화원 크기, 이에 따른 발열량, 또한 각 경우에 대하여 실험에서 얻은 임계속도값을 나타내 표이다. 도표 2에서 나타낸 값을 수치계산의 입력값[2]으로 이용하여 CFAST를 이용한 본 수치계산에서는 임계속도 조건에서 연기거동 및 온도분포를 파악하였다.

도표 2. 각 화원의 크기별 발열량

Methanol Pool fire			n-heptane pool fire		
화원 크기 [cm]	Q [kW]	임계속도 [m/s]	화원 크기 [cm]	Q [kW]	임계속도 [m/s]
8.5	1.71	0.74	4.5	4.97	0.87
10.5	2.29	0.81	5.5	6.31	0.92
12.5	2.93	0.93	6.5	8.3	0.96
14.5	4.00	0.97	8.5	12.9	1.12

화재 성장률에 따른 발열량은 시간에 대한 함수로 다음과 같이 표현 된다.

$$\dot{Q} = at^2$$

여기서 \dot{Q} 는 발열량 [kW], t는 화재 성장의 시간 [s], a는 화재성장계수로 화원의 발열량이 1MW에 도달하는 특성시간에 따라 결정되는 수이다. 본 시뮬레이션에서의 화재 성장 모드는 75s에 1MW 도달하는 Ultrafast를 적용시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포

그림 2는 임계속도일 때 터널내 온도 분포를 나타낸 그림이다. CFAST는 존모델의 특성상 구획내 상층부와 하층부의 평균 온도분포만을 나타내고 있고, 화원에서 하류지역으로 연기 전파에 의한 영향이 다시 그 구역 내에서 일어난 플럼(Plume)으로 가정하고 이를 상층부와 하층부인 2개의 영역으로 나누어 표현하고 있다. 화원에서 하류지역으로의 거리에 대한 온도 변화가 거의 없다. 이러한 이유는 화원이 있는 구간에서의 상층부 연기의 영향이 인접한 구간에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 그러므로 임계속도 이상의 역기류를 판단하는 데는 어려움이 있었다.

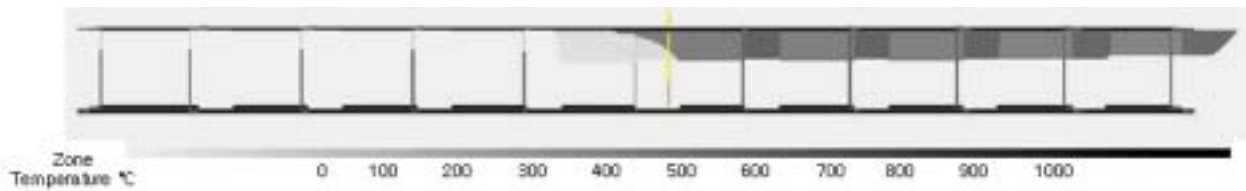
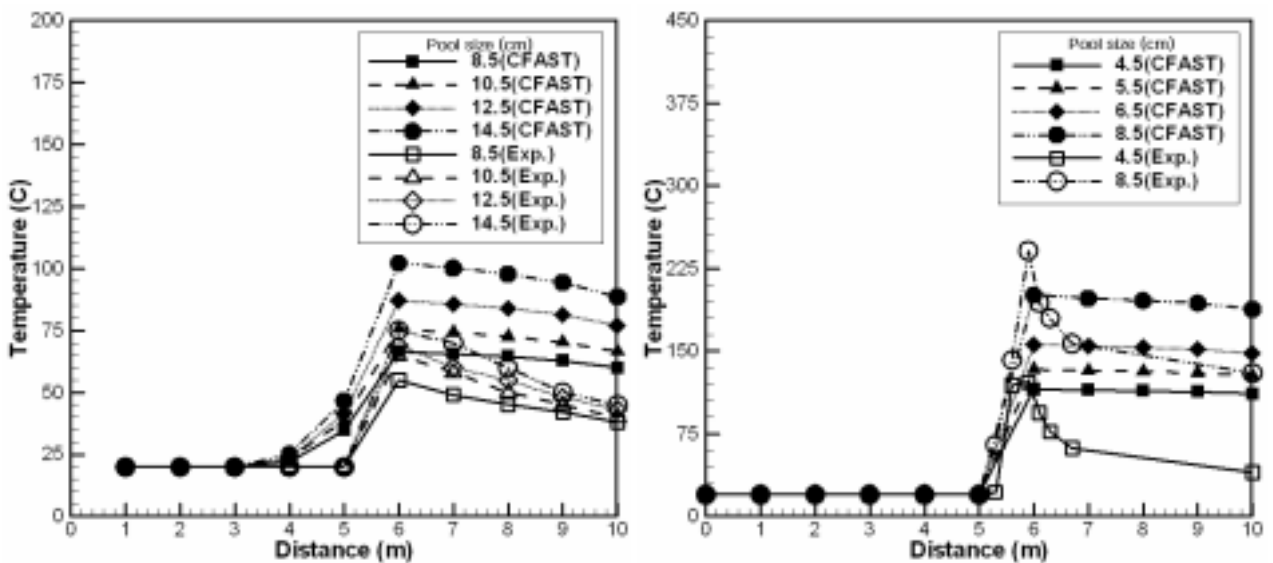


그림 2. 임계속도에서의 온도분포(헵탄 8.5cm, V=1.8m/s, Not to scale)

그림 3은 Roh등의 임계속도[2]일때 실험과 CFAST의 예측 결과 온도분포를 그래프로 나타내었다. 이러한 결과를 비교 해 볼 때 화원에서 하류지역의 온도는 화원 크기가 8.5cm 메탄올일 경우 30°C 높게 예측되었고 그 이상의 화원 크기에서는 120°C 이상의 큰 차이를 보였다. 또, 화원 이전의 위치에서 30°C이상의 온도가 예측되는데, 이는 존모델의 특성으로 화원의 높은 온도로 인해 온도분포의 평균값이 높게 계산되어졌다. 이러한 영향으로 인해 임계속도 또한 실험값보다 더 큰 것으로 예측되었다. 또, 실험 결과의 경우 화원에서 하류지역으로 갈수록 온도의 하강 분포가 뚜렷하게 이루어지는 반면에 CFAST 예측 결과에서는 천천히 감소하는데, 이는 실제 화재에서는 화원에서 연기가 천정에 닿으면서 층을 형성하고 인접한 구간으로 확산되면서 열전달에 이루어져 온도가 감소하는데 반해, CFAST의 경우 상층부의 온도가 평균값으로 계산되고 이 측정된 평균온도를 통해 다음 구간에서도 평균값을 구함으로 온도 하강의 변화가 작은 것으로 사료된다.



(a) 메탄올

(b) 헵탄

그림 3. 임계속도에서 온도 분포

3.2 임계속도

화원 바로 위의 천정 온도가 25℃ 이하인 최소 배연속도를 임계속도(Critical Velocity)라고 한다. 하지만, 개략적인 온도분포를 이용하여 임계속도를 파악하는 데는 어려움이 따르므로 본 수치계산에서는 배연속도가 0.4m/s에서 1.4m/s까지 0.2m/s 간격으로 변화를 주고 25℃이상 일 때 역기류가 존재하는 걸로 판단하여 역기류가 존재하는 구간과 바로 앞 구간 사이의 온도와 거리를 선형보간하여 역기류와 임계속도를 구하고 이를 Roh등의 실험값[2]과 나타내어 비교하였다. 그림 4는 두 종류의 연료를 사용하여 수치계산한 결과값과 실험값을 그래프로 나타내었다. 두 종류의 연료를 사용하였을 경우 모두 임계속도와 역기류가 실험값보다 크게 예측된 것을 알 수 있다. 또한, CFAST로 계산된 역기류 길이는 배연속도에 따라 실험에서 보다 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 존모델의 특성상 구간의 온도 분포를 평균값이 실험값보다 높고, 화원 근처로 갈수록 평균값이 화원온도로 인해 높게 계산되어짐으로 온도의 하강 혹은 상승이 이루어지는 정확한 위치를 파악하기 어려워, 역기류 거리가 실험값 보다 더 길게 존재하는 것으로 계산 되어져 임계속도 예측에 영향을 준 것으로 사료된다.

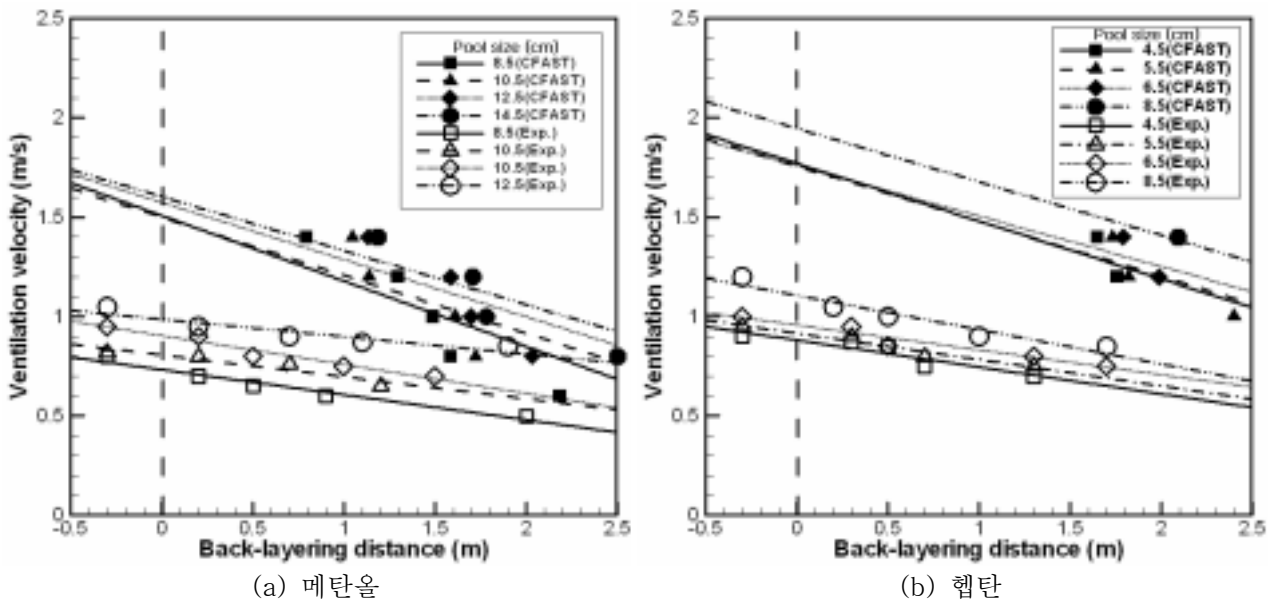


그림 4. 역기류 길이

4. 결론

본 연구에서는 CFAST V6를 이용하여 터널 화재시 배연 조건에서의 연기 거동을 수치해석하였다. 이를 실험 결과와 비교하여 CFAST V6가 터널 화재 해석의 적용 가능성에 대하여 파악하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CFAST V6를 이용한 시뮬레이션 결과로 전체적인 연기의 평균 온도를 해석하였으나 전체 구간에 따른 평균온도로는 실험값보다 높게 나왔으며, 이로 인하여 역기류의 거리(Back-layering distance)와 임계속도(Critical Velocity)의 계산 값은 실험값과 많은 차이가 있었다. 각 구획에 대한 온도는 30℃ 이상 차이가 나며 임계속도 또한 0.7m/s 크게 계산되었다.

2) CFAST V6를 이용한 화재 해석의 정확한 결과를 얻기 위해서는, 영역에 대한 구간 설정등 존모델이 가지고 있는 단점을 보완하기 위한 세심한 주의가 필요하다.

후기

본 연구는 철도종합안전기술개발사업(T305C1000005-05C010000512)의 일환으로 건설교통부의 지원으로 수행되었으며, 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. J-S, Roh, H-S, Ryou, D-H, Kim, W-S, Jung, and Y-J, Jang(2007), "critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation", *Tunnelling and Underground Space Technology* 22,262-271
2. J-S, Roh, S-S, Yang, H-S, Ryou(2007), "Tunnel Fires: Experiments on Critical Velocity and Burning Rate in Pool Fire During Longitudinal Ventilation", *Journal of Fire Sciences*, Vol.25
3. W. K. Chow(1996), "Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.11,No.2,pp.221-236
4. Richard D. Peacock, Walter W. Jones, Paul A. Reneke, Glenn P. Forney(2005), "CFAST V 6.0 User's Guide and Technical Reference Guide", *Building and Fire Research Lab.,NIST*