

터널 화재시 종횡비에 따른 연기 거동에 관한 수치해석적 연구 A Numerical Study of an Effect of the Aspect Ratio on Smoke Movement in Tunnel Fires

이성룡 · 김충익* · 유홍선*†

Sung-Ryong Lee · Choong-Ik Kim* · Hong-Sun Ryou*†

중앙대학교 기계공학부 대학원, *중앙대학교 기계공학부
(2003. 12. 30. 접수/2004. 5. 24. 채택)

요 약

본 연구에서는 터널 화재시 종횡비에 따른 연기의 거동 특성을 파악하기 위하여 화재 전용 해석 코드인 FDS 3.0을 이용하여 수치해석 하였다. 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하여 FDS의 터널 화재 적용 가능성을 검증하였으며, 실험값과 비교한 결과 10°C 이내의 범위에서 비교적 잘 일치하였다. 속도 분포를 이용한 연층의 경계높이의 예측값이 실험과 약 3%의 오차를 보였으며 온도장과 속도장의 해석을 통해 터널내 연기의 거동을 확인하였다. 종횡비의 변화에 따른 결과도 잘 일치하였으며, 종횡비가 증가할수록 화원 부근에서는 온도가 낮지만 연기가 퍼져나가면서 폭방향으로의 열손실 감소로 인해 온도 감소율은 줄어들었다.

ABSTRACT

In this study, numerical simulations were conducted to analyze an effect of the aspect ratio on smoke movement in tunnel fires using FDS 3.0. It was confirmed an application for tunnel fires in comparison with experimental results. The results showed relatively good agreement with experimental data within 10°C. Clear height of CFD by velocity distribution was about 3% higher than that of experiment. Smoke movement was confirmed by the analysis of temperature and velocity field. Results from variation of the aspect ratio showed good agreement with experimental data. The temperature at the vicinity of the fire source became lowly with the increase of the aspect ratio. But, decrease rate of the temperature was reduced by the decrease of the heat loss to the width direction.

Keywords : Tunnel fire, Aspect ratio, LES, Smoke movement

1. 서 론

화재에 대한 공학적 연구는 크게 화염 및 연기 거동 해석, 화재 및 연기 전파 방지를 위한 기술적 해석, 화재 공간의 안정성 및 피난 대책 확보 등 매우 다양한 방면에서 접근이 이루어지고 있다. 이러한 화재 연구는 실험적 접근과 이론 및 수치 해석적 접근을 병행하고 있다.

일반적으로 터널 화재는 터널의 형태, 경사, 배연 용량, 팬의 위치, 환기 및 풍압과 같은 외부 요인과 열 및 질량전달, 화학반응 등이 포함된 물리적 현상이기 때문에 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 그러나 아직

까지 이러한 복잡한 현상을 명확하게 이해하지 못하고 있는 실정이다. 터널내 연기의 거동을 해석하기 위한 방법으로 실험 터널 실험,¹⁻³⁾ 축소 모형실험^{4,5)} 그리고 수치 해석적 방법이 있다. 이들 중에서 실제 환경에서 필요한 상황을 가정하여 결과를 측정할 수 있는 실험 터널 실험이 가장 유용한 데이터를 제공해 준다. 그러나 실험을 위한 시간과 비용이 많이 들고 화재 발생의 위험성 등의 단점을 가지고 있다. 이의 대안으로 축소 모형실험과 수치 해석이 주로 사용되고 있다. 축소 모형실험은 유체역학적 상사법칙을 적용하여 실제와 동일한 유동 특성을 가질 수 있도록 축소 모형을 제작하여 수행된다. 실험 터널 실험에 비해 시간, 비용이 저렴한 장점을 가지고 있으나 실험과 모형간의 상사에

† E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

주의하여야 한다. 수치 해석적 방법은 최소의 비용으로 다양한 조건 하에서 반복적 해석이 가능하다. 그러나 해석상 많은 가정을 포함하고 있으며 데이터의 도출을 위한 실험적인 연구가 수행되지 않을 경우 신뢰성 결여의 단점을 가지고 있다.

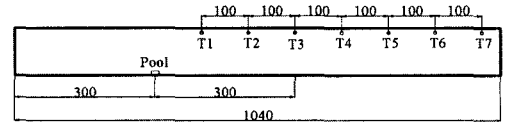
터널 화재에 관한 수치해석적 연구로 Chow⁶⁾는 공간을 두개의 층으로 단순화시키는 Zone 모델의 가정을 보완하기 위해 터널 내부를 여러 구역으로 나누어 CFAST를 사용하여 수치 해석을 실시하였다. Ribot 등⁷⁾은 기계 환기력이 작동하지 않고 터널 양쪽에 수직갱이 설치되어 자연 환기력에 의한 경우와 한쪽 끝과 수직갱에서 기계 배연에 의한 두 가지 경우에 대해 CFX-F3D를 사용하여 수치 해석하였으며 실험 결과와 비교하였다. Woodburn과 Britter^{8,9)}는 FLOW3D를 사용하여 터널 화재에 대하여 공간을 화원 부근과 하류 영역의 두 부분으로 나누어 수치 해석의 민감성에 관한 연구를 하였다. Tetzner 등¹⁰⁾은 FLUENT를 이용한 해석을 통하여 Kennedy의 식에 수정이 필요함을 확인하였다.

터널의 형태는 화재의 성장과 발달에 매우 중요한 인자이다. 그러나 터널의 높이와 폭을 함께 고려한 연구는 체계적으로 진행되지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 현재 널리 이용중인 화재 전용 해석 코드인 FDS version 3.0을 사용하여 수치 해석 결과를 이성룡 등¹¹⁾의 실험 결과와 비교하여 코드의 타당성을 검증하고, 터널내 화재시 터널 단면 형상의 영향을 파악하고자 한다. 동일한 수력직경을 가지는 터널에 대해 종횡비 변화에 따른 터널 화재 특성 파악을 통하여 터널 화재의 물리적 특성의 이해와 터널 설계자나 방재 전문가들에게 보다 유용한 화재 안전 설비에 관한 이론적, 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

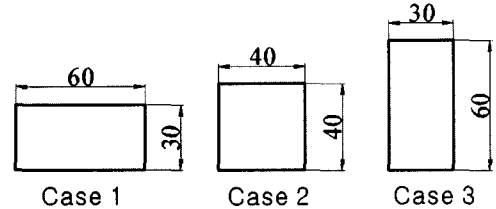
2. 실험 및 수치해석

2.1 실험

터널 내부의 단면적이 64 m², 총연장 208 m 크기의 실물 터널 공간을 길이에 대하여 1/20로 축소하였다. 모형 터널의 내부 단면적은 0.16 m², 총연장은 10.4 m이다. 터널 단면의 수력직경이 0.4 m로 동일한 3개의 모형 터널이 사용되었으며 종횡비를 각각 0.5, 1.0, 2.0으로 변화시켜가며 축소터널에 대하여 실험을 실시하였다.¹¹⁾ Fig. 1에 터널 개략도와 단면의 형상을 나타내었다. 터널의 입구와 출구는 외부에 개방되어 있으며 내부 유동이 없는 상태에서 실험이 실시되었다. 화원을 출구로부터 3 m 떨어진 위치에 설치하였으며 가연 물질로 에탄올을 사용하였다. 발열량을 2.47~12.30 kW



(a) Schematic of the reduced tunnel



(b) Cross-section of the reduced tunnel

Fig. 1. Schematic diagram and cross-section of the tunnels.

로 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

2.2 수치해석

FDS 모델은 난류 해석에 있어서 DNS와 LES를 적용할 수 있으나 DNS 계산의 경우 화재 공간 전체를 해석하기에는 지나치게 많은 격자를 요구하기 때문에 본 연구에서는 LES 모델을 적용하였다. LES 모델은 필터링을 통하여 필터의 폭보다 큰 에디들의 유동은 직접 해석하고 작은 에디들은 유동의 형태에 독립적으로 모델링하게 된다. FDS 모델의 필터링에는 가우시안 필터와 모자 필터가 적용되고 있으며 본 연구에서는 모자 필터를 이용하였다. 필터링에 의한 지배 방정식은 다음과 같이 정리된다.¹²⁾

연속 방정식

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 보존 방정식

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial (\bar{p} - p_0)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \bar{\rho} g \delta_{i3} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

에너지 보존 방정식

$$\bar{\rho} C_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \bar{p}_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \bar{Q} - \frac{\partial h_j}{\partial x_j} \quad (3)$$



Fig. 2. Computational grid for numerical simulation.

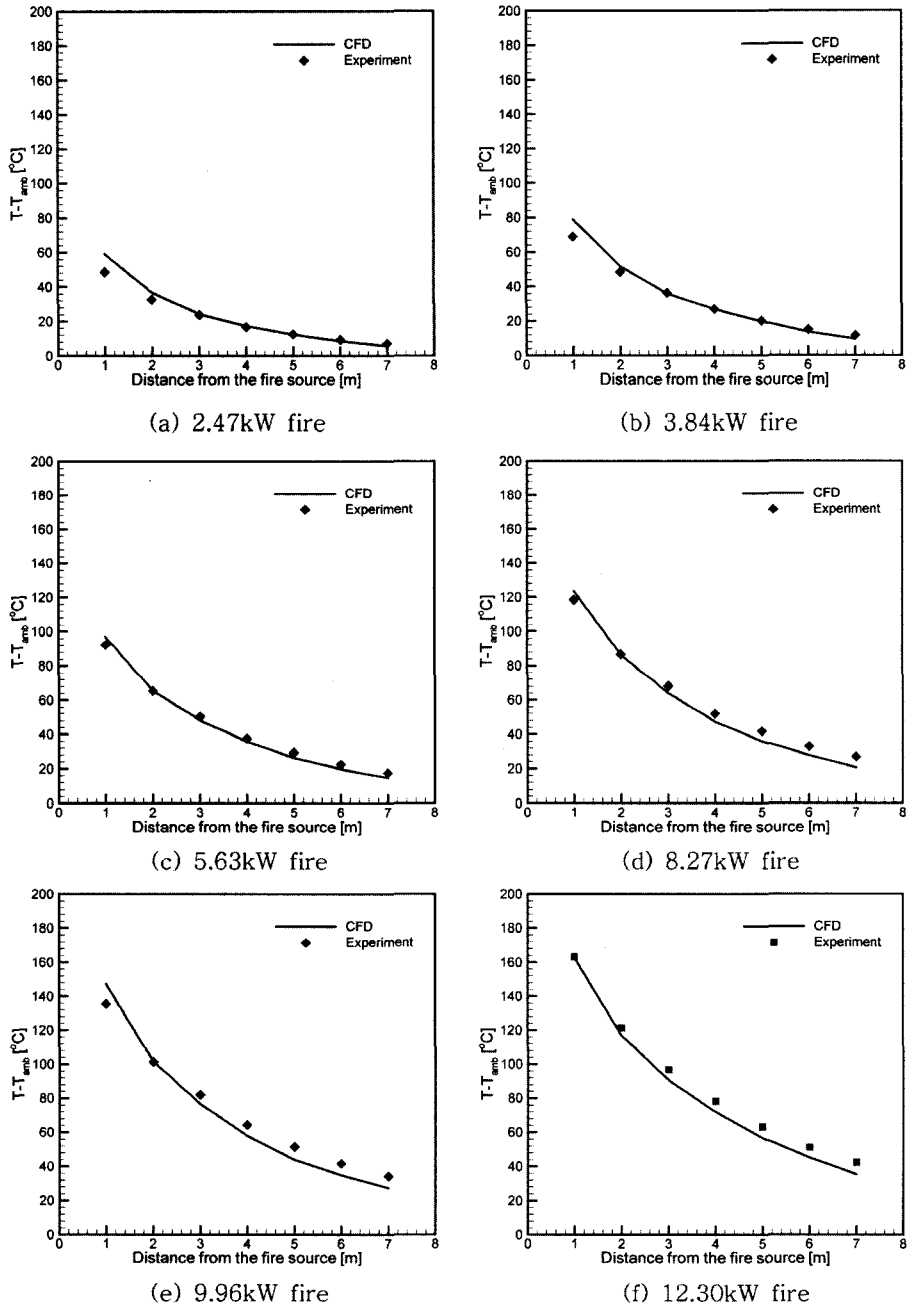


Fig. 3. Temperature comparison under the ceiling at 200 sec.

상태 방정식

$$\bar{p}_0 = \bar{\rho} R \bar{T} \quad (4)$$

FDS에 적용된 연소 모델은 유한 화학반응률 모델과 혼합분율 연소 모델이 있다. LES 모델에서는 종의 확산을 직접 해석하기에는 격자가 성기기 때문에 혼합분율 연소 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 격자 독립성 시험을 통하여 최적 격자를 선정하였다. 수치해석에 사용된 격자수는 약 517,000 (560×22×42)로 변수의 구배가 클 것으로 예상되는 화원 부근에는 조밀한 격자를 적용하였으며, 상대적으로 안정된 유동형태를 보이는 입구와 출구 부근에는 격자의 크기를 상대적으로 크게 부여한 비균일 격자를 이용하였다. 또한 격자수를 줄이기 위해 전체 터널 단면의 절반을 수치해석 영역으로 설정하여 대칭경계조건을 부여하였다. 터널 출구와 입구에는 대기 경계조건을 적용하였다. 복사열전달은 Simple ray tracing technique을 이용하였으며 연층과 벽과의 전도열전달을 해석하여 연층의 열손실을 고려하였다. 화재발생 이후 200초까지 계산하는데 걸린 시간은 Pentium-IV 1.7 GHz를 이용하여 약 65시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 코드의 타당성을 검증하기 위해 종횡비가 1.0인 Case 2에 대하여 화재발생 200초 후 천장 아래 2 cm 위치에서의 온도를 실험결과와 비교하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 수치해석 결과가 실험결

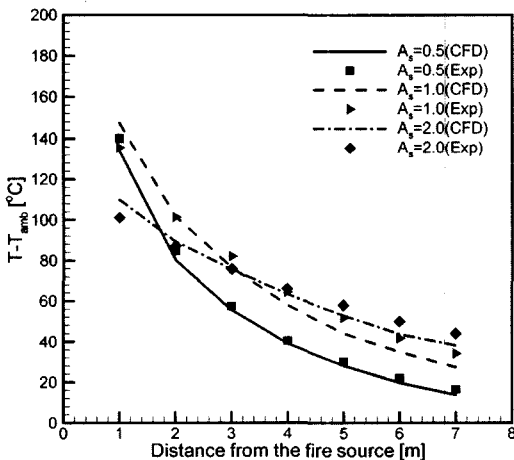


Fig. 4. Temperature comparison under the ceiling with aspect ratio.

과와 최대 10°C 이내의 범위에서 비교적 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 화원 부근에서는 수치해석 결과가 다소 상향예측하고 있는데 이는 발열량을 일정하게 고정함으로 인해 기인한 것으로 사료된다. 화원으로부터 멀어짐에 따라 발열량이 증가할수록 수치해석 결과가 하향예측을 하고 있다. 실험 시 외기의 온도가 터널 내부보다 약 2~3°C 높았는데 이의 영향이 고려되지 않아 출구 부근의 온도를 하향 예측하는 것으로 사료된다.

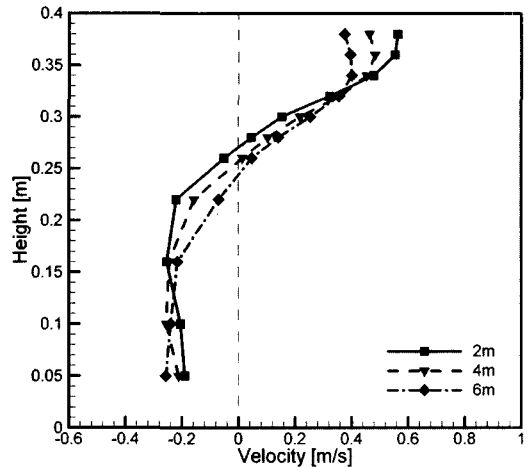


Fig. 5. Velocity distribution with distance.

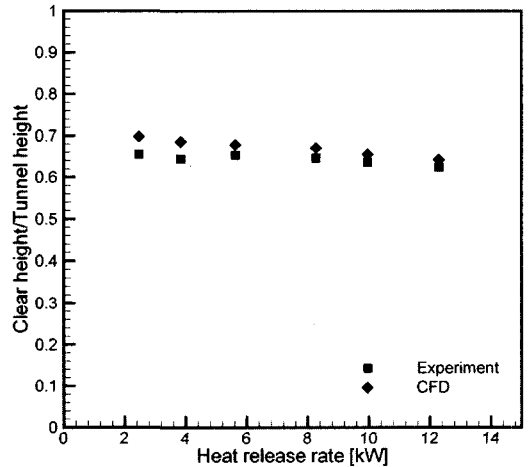


Fig. 6. Elevation of smoke interface.

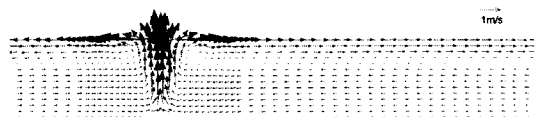


Fig. 7. Velocity field at 200 sec.

TEMP: 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300

Fig. 8. Temperature field at 200 sec.

9.96 kW 화재에 대하여 화재발생 200초 후 천장 아래 2 cm 위치에서 중횡비에 따른 온도분포를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 수치해석 결과가 실험결과와 비교하여 비교적 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 중횡비가 1.0 이하의 경우 화염이 천장에 도달하여 천장을 직접 가열하게 된다. 따라서 화원 부근의 온도가 화염이 천장에 도달하지 않는 중횡비가 2.0인 경우에 비하여 높은 것을 확인할 수 있다. 그러나 연기가 천장을 따라 전파되면서 중횡비가 클수록 터널 폭이 줄어들기 때문에 터널 폭방향으로의 열손실이 감소하여 온도의 강하율이 줄어든다. 출구 부근에서는 중횡비가 클수록 온도가 높아지게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 9.96 kW 화재에 대하여 화재발생 200초 후 터널 높이방향을 따라 속도분포를 나타내었다. 화원으로부터 멀어질수록 배출되는 연기의 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 연기가 출구로 배출되면서 열에너지의 손실과 부력의 감소로 인하여 연층이 하강하는 것을 확인할 수 있다.

속도가 0인 위치를 연층 경계높이로 간주하여 연층 경계높이를 결정하였다. 실험에서는 N퍼센트법을 사용하여(N=15%) 연층 경계높이를 계산하였다. Fig. 6에 화재발생 200초 후 수치해석 결과와 실험결과를 비교하였다. 발열량이 커질수록 연층 경계높이가 3% 이내에서 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며 연층두께가 터널 높이의 약 40% 이내에서 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 화재발생 200초 후 속도장을, Fig. 8에 온도장을 나타내었다. 터널 상부에서 고온의 연기가 터널 출구로 배출되고 하부에서 차가운 공기가 유입되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널 화재 시 터널 단면의 중횡비의 영향을 파악하기 위하여 수치해석을 실시하여 연기의 거동과 온도분포 등을 연구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 실험결과와 비교하여 FDS가 터널 내부의 온도를 10°C 이내에서 비교적 잘 예측하고 있으며, 터널화

재 해석 도구로 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

(2) 동일 수력직경을 가지는 터널에 대하여 중횡비가 증가할수록 터널 높이가 높기 때문에 화원 부근에서는 온도가 낮지만 터널 폭이 감소하기 때문에 출구로 배출되는 동안 연기의 온도 감소율은 줄어든다.

(3) 연층두께가 터널 높이의 약 40% 이내에서 일정하게 유지된다.

(4) 속도장과 온도장 해석을 통하여 터널 상부와 하부의 유동 형태를 파악할 수 있다.

(5) 터널 단면의 중횡비에 따른 터널 내부 연기의 거동을 파악하여 터널 방재계획과 배연시스템의 설계 시 정성적 자료로 제공될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해 방재기술개발 사업(M10323000002-03B32000020) 지원으로 수행되었으며 관계제위에 감사드립니다.

참고문헌

1. Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration, "Memorial Tunnel Fire Ventilation Program Report", USA(1999).
2. R. J. Bettis, S. F. Jagger, and Y. Wu, "Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models; Summary of Phase 2 Tests", The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/93/11, The Health and Safety Executive, UK(1993).
3. R. J. Bettis, S. F. Jagger, A. J. R. Macmillan, and R. T. Hambleton, "Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models; Summary of Phase 1 Tests", The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/94/2, The Health and Safety Executive, UK(1994).
4. Y. Oka and G. T. Atkinson, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", Fire Safety Journal, Vol. 25, pp.305-322(1996).
5. Y. Wu and M. Z. A. Bakar, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems - A Study of the Critical Velocity", Fire

- Safety Journal, Vol. 35, pp.363-390(2000).
6. W. K. Chow, "Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, pp.221-236(1996).
 7. B. Ribot and P. Chasse, "Numerical Simulations of Smoke Extraction by Roof Vents in a Tunnel: Comparison with Experimental Tests Analysis of Physical Phenomena", Proceedings of the 1st International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels, Lyon, France, pp.169-179 (1999).
 8. P. J. Woodburn and R. E. Britter, "CFD Simulations of a Tunnel Fire-Part I", Fire Safety Journal, Vol. 26, pp.35-62(1996).
 9. P. J. Woodburn and R. E. Britter, "CFD Simulations of a Tunnel Fire-Part II", Fire Safety Journal, Vol. 26, pp.63-90(1996).
 10. D. Tetzner, R. Pollak, W. Foit, and M. Sippel, "Critical Velocity - Comparative Assessment of Test Results and CFD Simulation", Proceedings of the 1st International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnel, Lyon, France, pp.181-190(1999).
 11. 이성룡, 유홍선, 김충익, "터널 화재시 터널 단면의 중형비에 따른 연기 거동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.115-120(2003).
 12. W. Zhang, A. Hamer, M. Klassem, D. Carpenter, and R. Roby, "Turbulence Statics in a Fire Room Model by Large Eddy Simulation", Fire Safety Journal, Vol. 37, pp.721-572(2002).