

장대 터널에서의 배연방식에 따른 기류 및 연기거동 연구

김 원 태[†], 최 만 용^{*}, 박 정 학^{*}, 채 경 희^{**}
공주대학교, *한국표준과학연구원, **우송정보대학교

Study on Flow and Smoke Behaviors on in Longitudinal Tunnel

Won-Tae. Kim, Man-Yong. Choi^{*}, Jeong-Hak Park^{*}, Kyung-Hee Chae^{**}

Major of Bio-Mechanical Engineering, Kongju National University, Chungnam 340-702, Korea

**ESM Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340. Korea*

***Division of Mechanical & Automotive Engineering, Woosung Information College, Daejeon 500-700, Korea*

(Received May 5, 2009; revision received May 10, 2009)

ABSTRACT: This study is aimed to analyze the flow patterns and thermal characteristics by computer simulation under the variations of fire strength for the longitudinal tunnel, from which flow and heat distributions are predicted in the longitudinal tunnel. Through the results of numerical computations, followings are found; one is that the volume flow rate is discontinuously increasing as closer to fire location, and the other is that a critical design to get the faster flow rate is required because of existence of backlayer flow for the high fire strength in view of safety for the people in fire of the tunnel

Key Words: Fire Strength(화재강도), Longitudinal Tunnel(장대터널), Volume Flow rate(풍량), Computer Simulation(컴퓨터모사), Backlayer flow(역류), Critical Velocity(임계속도)

기 호 설 명

C : 상수 [-]

C_p : 정압비열

g : 중력가속도 [m/s²]

k : 열전도계수 [W/mK]

S : 확산계수 식(3), [kg/s²]

T : 온도 [°C]

u : 속도, [m/s]

x : 좌표, [m]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-330-1283; fax: +82-42-330-1289

E-mail address: kwt@kongju.ac.kr

그리스 문자

- β : 열팽창계수(thermal expansion rate)
 $\kappa - \epsilon$: 난류모델
 ρ : 밀도
 μ : 점성계수
 ν : 동점성 계수
 τ : 전단응력

하첨자

- i, j : 텐서
 ref : 레퍼런스

1. 서론

1.1 연구 배경 및 현황

고속도로망 확충에 따른 터널의 수요는 가히 혁명적이라 할 수 있다. 이의 환기방식은 자연환기와 기계 환기로 대별되는데, 도로상황(일반도로, 도시간 고속도로, 도시고속도로)과 교통량, 대형차 혼입율, 입지조건, 터널연장 등을 고려하여 설계되며, 터널환기방식의 세계적 추세는 교통환기력

을 유효하게 이용하여 특히 산악터널의 경우 공사비 및 유지비를 절감할 수 있는 제트팬이 장착된 종류(longitudinal)식 환기방식을 지향하고 있다.⁽¹⁾

터널과 같은 부분적으로 밀폐된 공간 내에서 화재가 발생했을 경우 화염과 연소가스의 거동이 터널의 제연설비에 의해 효과적으로 제어되지 않는다면 터널 내의 위치한 사람들은 대피로를 확보하는 데 어려움이 따르며 결과적으로 수많은 사상자를 초래할 수 있다. PIARC 회원국들에 의해 보고된 자료에 의하면 지난 50년에 걸쳐 전세계 도로터널 내 대형 화재사고는 20건 이상으로, 이 중 10건은 1990년대 이후에 발생한 것으로서 최근 도로터널 내 화재사고가 증가하고 있음을 알 수 있다. 국내에서는 터널 내 인명사고를 포함한 대형화재는 다행히 없었으나, 2003년 서울 홍지문 터널에서의 사고와 같이 앞으로 많은 터널이 공사될 예정이고 터널이 점차 장대화 되고 있다. 또한 도심지의 도로 부족으로 인해 지하도로들이 건설될 것이므로 터널 내 화재로 인한 인명 피해를 줄이는 연구가 절실히 요구된다.⁽²⁾

1.2 연구 목적

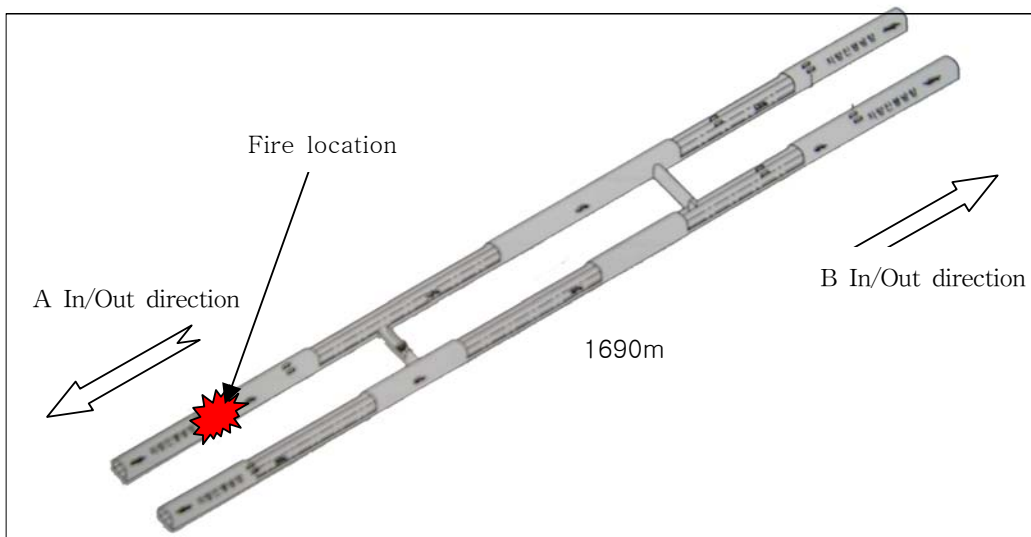


Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal tunnel

터널화재의 특성은 입출구를 제외하고는 밀폐된 공간이라는 특수 상하이므로 화염이나 매연이 단시간 내에 터널전체로 확산되어 대피할 시간적 여유가 없이 큰 재해를 일으키게 된다. 따라서 터널 내 화재발생시 인명 등의 재해를 최소화하기 위해서는 화염과 연소가스의 거동을 정확히 예측하여 효율적으로 제어하는 것이 중요하나 차량을 포함한 여러 물질의 복잡한 연소반응을 정확하게 모사하기는 현실적으로 불가능하므로 본 연구에서는 연소와 복사는 무시하였다. Biollay and Chasse는 Offenegg 터널화재 실험에 대한 결과를 수치해석 한 결과 Reynolds 수와 Froude수로 상사한 2차원 모델과⁽³⁾ 3차원 모델의 계산결과가 거의 일치함을 보였고, 복사열전달의 영향이 무시할 수 없을 만큼 크다고 하였다. Kumar and Cax와 Kumar는 Zwenberg 터널화재 실험에 대해 터널의 구배 정도가 자연화기시에 많은 영향을 미치고 있음을 밝혔다. Karki and Patankar는

미국 웨스트 버지니아주의 메모리얼 터널에서 복사 열전달 량을 화재발생량의 분율로 정의하고 화재발생량에서 복사 열전달 량을 제거하여 수치 해석한 결과 화염면 하류에서 비교적 정확한 결과를 얻었다.^(4,5)

본 연구에서는 장대 터널 내 화재에 의한 열 및 기류분포의 정확한 예측을 위해 기존에 설치된 A-B간 터널을 대상으로 화재강도를 경계조건으로 하여 온도로서 화재 수치해석을 연구 목적으로 하였고, 연소와 복사는 고려하지 않았다.

2. 해석모델

본 연구의 해석 모델은 2004년 12월 개통한 A-B간 고속도로에 위치한 임고4터널로 선정하였다. 설정된 터널은 제트 팬(jet fan)을 이용한 환기 시스템을 구축한 장대(longitudinal ventilation) 터널로 3개의 화재실험이 본 연구의 시뮬레이션 대상으로 선정하였다. Fig. 1은 터널

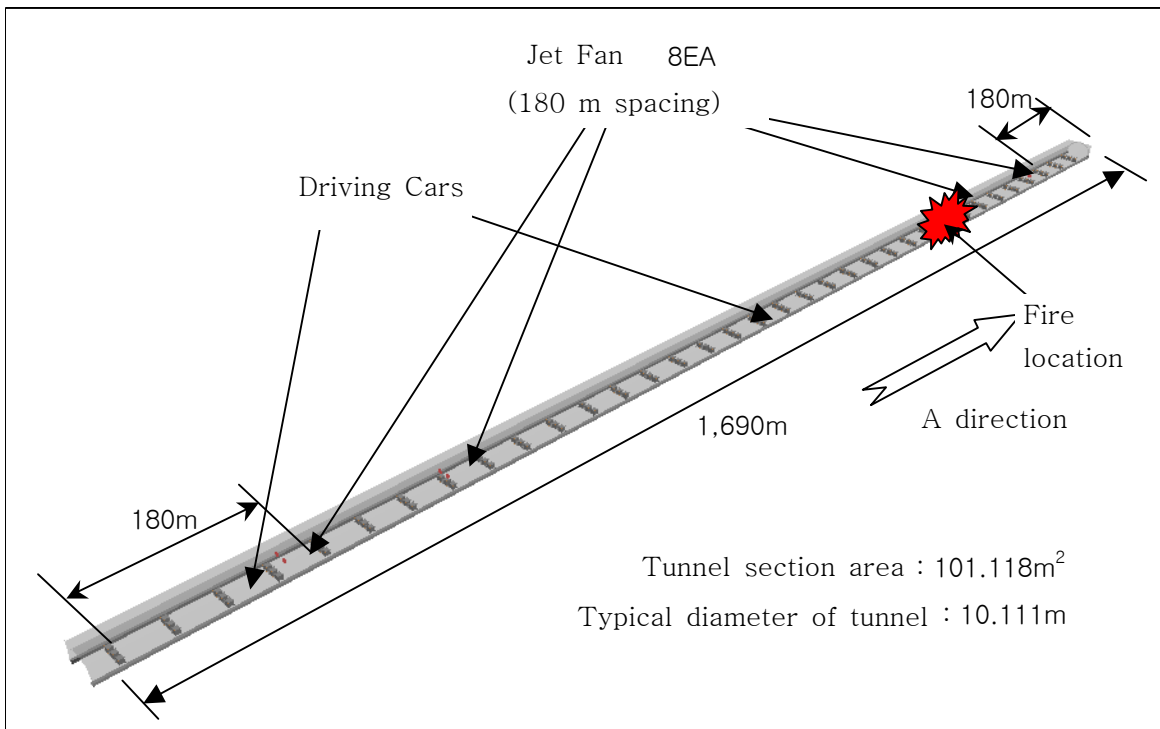


Fig. 2 Layout of jet fans locations

Table 1 Specification in longitudinal tunnel

Classification	A direction			B direction		
Tunnel section	1690m			1690m		
	417.72	1265.62	6.66	26.66	1333.34	330
Gradient[%]	3.412	2	0.09	-0.09	-2	-3.412
Lane	One-sided 3 lanes			One-sided 3 lanes		
Road section area	101.118m ²			101.118m ²		
Typical length	10.111m			10.111m		
Topography	Plane					
Design velocity	100 km/h					
Mean sea level	218 m					
Large cars mixing rate	33.9 %					
Daily traffics	82,722 cars/day					

터널의 종 방향 형상을 나타낸다. Table 1 은 한국도로공사의 터널 설계 제원을 정리한 것으로서 터널제원, 경사구배, 대형차 혼입율 등을 알 수 있다.

Fig. 2는 고려된 환기 설비인 3그룹의 제트팬들 간의 간격을 포함한 터널 모델링이다. 그림에서 보이는 것처럼, 180m 정도의 일정한 거리를 유지하고 있다. 화재실험은 A방향인 북쪽 출입구로부터 남쪽 출입구 방향으로 180m 지점에서 점화하는 것으로 시작된다. 설치된 화로의 용량은 각각 10MW, 30MW, 50MW 화재강도에 해당된다.

3. 지배방정식 및 경계조건

3.1 지배방정식

열·유체의 물리현상을 나타내는 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 난류 유동에 대한 운동량 및 에너지 방정식이 있다. 정상상태에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

난류유동에 대한 운동량방정식은 부력의 효과를 고려하여 다음과 같다

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + (\rho - \rho_{ref})g \quad (2)$$

에너지방정식은 온도에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S \quad (3)$$

여기서,

본 연구에서 사용한 $k-\epsilon$ 모델 난류 운동량방정식과 난류모델 에너지방정식을 식(4)와 식(5)에 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

Table 2 Boundary conditions for the computational modeling

Tunnel inlet	Pressure : Ambient + driven from cars
Tunnel outlet	Pressure : wind pressure driven from natural wind 2.5m/s
	parameters except pressure : $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$
No. of cars coming into tunnel	assumed to 327 cars
Strength of fire	10MW 20MW 50MW
Wall condition	Velocity : Wall method Temperature : assumed to adiabatic
Velocity of jet fan	30 m/s
No. of jet fan	5 EA

$$-\frac{C_{\mu}\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \cdot \frac{\rho\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

3.2 경계조건

터널입구와 출구에 대한 압력 설정은 차량풍과 자연풍을 고려하여 출구압력을 측정값인 22.4 Pa로 설정함으로써 입구와 출구의 압력차를 설정할 수 있었다. 터널출구에서는 압력을 제외한 물리량에 대해 Neumann 조건으로 0을 설정하였고 터널 벽면은 속도에 대해서 점착조건을 부여하였다. 터널진입차량수는 60km로 진입하는 것을 가정하여 화재발생 3분 후 정지한 것으로 가정하였다. 제트팬은 운동량 source로 처리하였으며, 30m/s로 가정하였다. 제트팬의 수는 화재강도 20 MW를 기준으로 Kennedy 식을 활용하여 계산한 임계속도를 얻기위한 제트팬수를 계산하여 적용하였다. 화재는 발생열량으로 표현하였으며, 발생차량의 상부면에서 발생하는 것으로 간주하였다. 화재강도를 계산 주조건으로 하여 온도로서

화재를 표현하였으며, 연소와 복사는 고려하지 않았다. Table 2는 본 연구에서의 수치해석에 적용된 경계조건을 나타낸 것이다. 연속방정식에서 밀도는 각 제어체적에 대해 이상기체 상태방정식을 적용하였으며, 점도는 온도에 대한 2차 Fitting식을 활용하여 계산하였다.^(7,8)

4. 수치해석방법

Fig. 3은 터널 모델링에 대한 계산격자를 도시한 것이다. 터널의 높이와 폭 및 종 방향 길이는 8.5m, 14.515m, 1,690m로서 실제 스케일로 모델화하였다. 횡단면의 격자수는 1,188개이며 길이방향으로는 4,806개로 분할하였는데, 길이방향 분할에 있어서 구배가 클 것으로 예상되는 팬

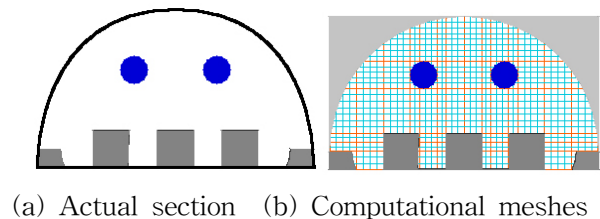


Fig. 3 Layout of computational grids

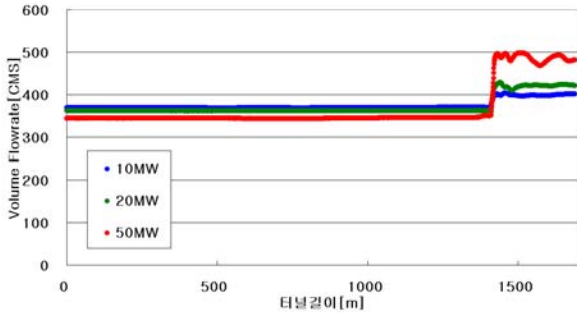


Fig. 4 Volume flow rate to the longitudinal direction in the tunnel

과 차량영역에서는 주위 격자보다 조밀하게 나누는 비 균등 분할을 적용하였다.⁽⁹⁾

5. 결과 및 고찰

5.1 터널내 유동 분포

Fig. 4로부터 화재발생 위치에 이르러 풍량이 불연속적으로 증가하는 분포를 나타내며 화재강도가 커질수록 더욱 뚜렷하다. 터널 풍량이 일정하지 않은 것은 정체중인 차량들이 존재하기 때문에 나타나는 현상이다. 질량보존의 법칙이 잘 적용되었음을 알 수 있다. 화재위치 이전영역에서는 화재강도가 작을수록 풍량이 큰 것을 알 수 있다. 이는 화재로 인한 부력효과를 유동저항으로 간주할 때에 화재강도가 클수록 저항이 더 커짐을 알 수 있다.

5.2 화재 온도 분포

Fig. 5로부터 터널 내 화재 시 화재차량 상부로부터 터널천정방향으로의 부력에 의한 상승기류가 뚜렷하다. 고온의 공기가 화재차량 상부로부터 터널천정으로 유동하며, 화재강도가 커질수록 그 영역이 더욱 크고 뚜렷해진다. 10MW와

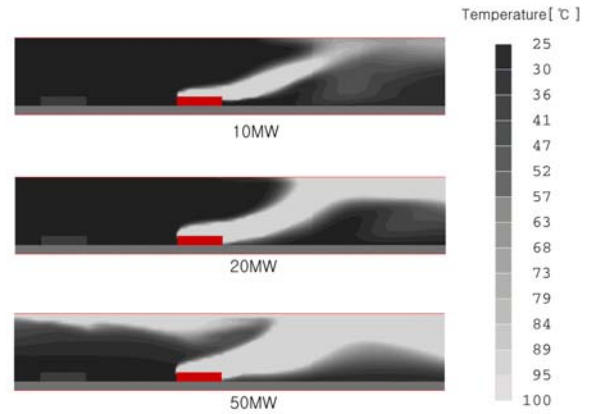


Fig 5 Isotherms for each fire strength in the fire

20MW의 경우 화재차량으로부터 발생한 고온공기가 모두 터널출구방향으로 원활하게 배기되는 반면, 50MW의 경우 심한 역류(backlayer)가 발생한다. 즉, 제트팬을 이용한 재연풍이 50MW에 이를 때에는 고온공기의 부력을 극복하지 못한다는 의미이다.⁽¹⁰⁾

6. 결론

본 연구는 장대 터널 내 화재에 의한 열 및 기류분포의 정확한 예측을 위해 A-B간 임고4터널을 대상으로 화재강도를 경계조건으로 하여 컴퓨터 수치해석을 수행하였다.

1. 화재위치 이전영역에서는 화재강도가 작을수록 풍량이 커진다.
2. 화재로 인한 부력효과를 유동저항으로 간주할 때에 화재강도가 클수록 저항이 더 커진다.
3. 터널 내 화재 시 고온의 공기가 화재차량 상부로부터 터널천정으로 유동한다.
4. 화재강도가 커질수록 그 영역이 더욱 크고 뚜렷해진다.

참고문헌

1. The Ministry of Government Administration and Home Affairs, 1999, Annual Statistics of Fire.
2. Biollay, H. and Chasse, P., 1995, Validating and optimizing 2D and 3D computer simulations for the Offenegg tunnel fire tests, 9th International symposium BHRA, pp. 357-382.
3. Kumar, S. and Cox, G., 1985, Mathematical modeling of fires in road tunnels, The 5th International Symposium on th Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Lille, France, 20-24, May.
4. Kumar, s., 1995, Fire development and smoke spread in tunnels-some modeling considerations, Safety in Road and Rail Tunnel, pp. 379-393.
5. Karki, K.C. and Patankar, S.V., 2000, CFD model for jet fan ventilation systems, Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR group conference series publication, No.43, pp. 355-374.
6. Software Manual, PHOENICS-VR Ver. 3.5.1, User Manual, Cham, 2004
7. Schlichting, H., 1980, Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, 7th ed., pp. 328-329.
8. Chow, W. K., 1996, Simulation of Tunnel Fires using a Zone Model, Tunneling and underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 221-236
9. Chow, W. K., 1998, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 271-275.
10. Megret, O. and Vauquelin, O., 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal, Vol. 34, No. 4, pp. 393-401