

화재시 터널내 열유동 시뮬레이션 모델 연구

우 경 범, 김 원 갑*, 한 화 택**

국민대학교 기계공학과 대학원, *국민대학교 자동차공학전문대학원, **국민대학교 기계자동차공학부

A Study on the Heat and Gas Flow for Fire Simulation in a Tunnel

Kyung-Bum Woo, Won-Kap Kim*, Hwataik Han**

Graduate School of Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received September 24, 2001; revision received April 29, 2002)

ABSTRACT: The objective of the present study is to develop a model to predict heat and gas flow movement by fire in a tunnel. The model includes component models such as turbulence model, combustion model, fire model, jet fan model, etc. It has been validated using the data from Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program. The predictions are in good quantitative agreement with the experimental data in the far-field region of the tunnel. It should be further investigated to develop models for radiation between surfaces, for composite boundary conditions for conduction and convection, and for vigorous turbulent mixing in a tunnel especially for a large size of fire.

Key words: Fire size(화재강도), Memorial tunnel(메모리얼 터널), Tunnel fire(터널화재)

기 호 설 명

C_p : 비열 [J/kg $^{\circ}$ C]

C_s : Sutherland 상수

h : 엔탈피

k : 난류운동에너지 [m²/s²]

m_{fu} : 연료소모량 [kg/s]

m_l : 화학종 l 의 질량분율

M_l : 화학종 l 의 분자량

p : 압력 (Pa)

Pr : Prandtl 수, ν/α

Q_{fire} : 화재강도 [W]

R : 이상기체상수 [J/kmol, $^{\circ}$ C]

s : 이론공연비 [kg_{air}/kg_{fuel}]

S_h : 열발생항 [W/m³s]

S_l : 화학종 l 의 생성항

S_m : 질량생성항 [kg/m³s]

T : 온도 [K]

그리스 문자

ρ : 공기밀도 [kg/m³]

μ : 점성계수 [kg/ms]

1. 서 론

터널과 같은 부분적으로 밀폐된 공간 내에서 화재가 발생했을 경우 화염과 연소가스의 거동이

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4819; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: wkkim@kookmin.ac.kr

터널의 제연설비에 의해 효과적으로 제어되지 않는다면 터널 내에 위치한 사람들은 대피로를 확보하는 데 어려움이 따르며 결과적으로 수많은 사상자를 초래할 수 있다. PIARC 회원국들에 의해 보고된 자료에 의하면 1949년 이후 현재까지 전세계 도로터널내 화재사고는 20건이 있었고 98명이 사망하였으며 수백여대의 차량이 전소되었다.⁽¹⁾ 20건 중 10건은 1990년대 이후에 발생한 것으로서 최근 도로터널내 화재사고가 증가하고 있음을 알 수 있다. 우리나라의 경우를 보면 현재까지 보고된 터널내 화재사고는 없었으나⁽²⁾ 앞으로 많은 터널이 공사될 예정이고 터널이 점차 장대화되고 있으며 또한 도심지의 도로 부족으로 인해 지하도로들이 건설될 것이므로 터널내 화재로 인한 인명피해를 줄이는 연구가 절실히 요구된다.

터널화재의 특성은 밀폐된 공간이라는 특수한 사정 때문에 화염이나 매연이 단시간 내에 터널 전체로 확산되어 대피할 시간적 여유가 없이 큰 재해를 일으키게 된다. 따라서 터널내 화재발생시 인명과 재산피해를 줄이기 위해서는 화염과 연소가스의 거동을 정확히 예측하여 효율적으로 제어하는 것이 중요하며 이를 위해서는 기본적으로 터널화재의 물리적 현상을 모사할 수 있는 연구가 선행되어야 한다. 그러나 차량을 구성하는 여러 물질이 연소되는 복잡한 연소반응을 정확하게 모사하기는 현실적으로 불가능하므로 되도록 간단한 화학반응으로 가정하면서도 충분한 정확도를 가지는 연소모델을 설정하는 것이 필요하다.

현재까지 기존의 연구에서 밝혀진 내용으로 Biollay and Chasse⁽³⁾는 오프네그(Offenegg) 터널화재 실험에 대한 결과를 수치해석한 결과, Reynolds 수와 Froude 수로 상사한 2차원 모델과 3차원 모델의 계산결과가 거의 일치함을 보였고, 복사열전달의 영향이 무시할 수 없을 만큼 크다고 하였다. Kumar and Cox⁽⁴⁾와 Kumar⁽⁵⁾는 즈웬버그(Zwenberg) 터널화재 실험에 대해 터널의

구배 정도가 자연환기시에 많은 영향을 미치고 있음을 밝혔으며, 화재성장(fire development)에 관한 연구에서는 부력과 대류, 난류 및 복사의 물리적 화학적 과정이 화재의 성장을 특징짓는 가장 중요한 요소라고 하였다. Karki and Patankar⁽⁶⁾은 메모리얼 터널에서 복사 열전달량을 화재발생량의 분율로 정의하고 화재발생량에서 복사 열전달량을 제거하여 수치해석하였으며 이 결과 화염면 하류에서 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다고 보고하였다.⁽⁶⁾

본 연구는 터널내 화재에 의한 열 및 기류분포의 정확한 예측을 위한 연소모형을 설정하기 위한 연구로서, 터널내 화재에 의해 발생하는 열 및 유동장을 상용 CFD 코드를 사용하여 실제 화재현상을 모델링하였으며 적용된 모델의 적합성을 검증하기 위하여 메모리얼(Memorial) 터널의 화재실험결과⁽⁷⁾와 비교하였다.

2. 해석 모델

본 연구의 해석 모델은 미국 웨스트버지니아(West Virginia) 주의 수도인 찰스톤(Charleston) 근방에 위치한 메모리얼 터널로 선정하였다. 이 터널에 대하여 B/PB(Bechtel/Parsons Brinckerhoff) 그룹의 주도하에 MTFVTP(Memorial tunnel fire ventilation test program)이 수행되었다. 이 연구에서 총 98개의 full-scale 화재 환기테스트가 실시되었으며 이중에서 종류식(longitudinal ventilation)에 대한 실험은 제트팬(jet fan)을 이용한 환기 시스템으로서 15개의 화재실험이 수행되었고 그중 Test 606A와 Test 615B에 대한 실험결과를 본 연구의 시뮬레이션 대상으로 선정하였다.

Fig. 1~3은 메모리얼 터널의 종방향 형상과 터널 단면 형상 및 제트팬의 배열상태를 나타내었다.

Table 1은 15개의 종류식 화재실험 중에서 Test

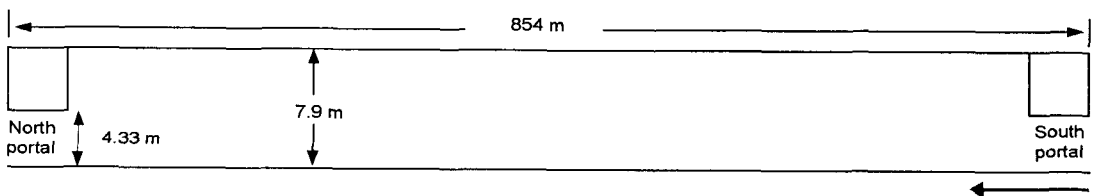


Fig. 1 Memorial tunnel profile view.

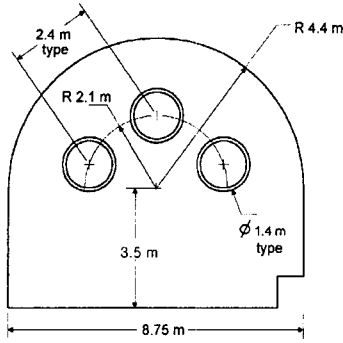


Fig. 2 Typical jet fan installation.

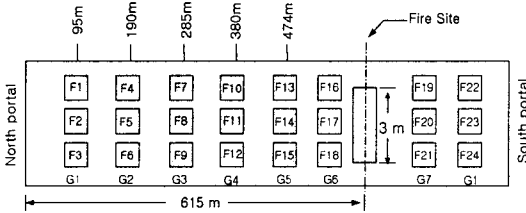


Fig. 3 Location of jet fans throughout the tunnel.

606A와 Test 615B를 정리한 것으로서 각 테스트의 화재강도와 제트팬 가동수를 알 수 있다. Fig. 3에서 터널의 횡단면상에 위치한 3개의 팬을 한 개의 그룹으로 보면 G1~G8의 총 24개의 팬이 설치되었다. 팬그룹들 간의 간격은 100 m 정도의 일정한 거리를 유지하고 있다. 화재실험은 북쪽 출입구로부터 남쪽 출입구 방향으로 615 m 지점에 위치한 화로(fire pan)에서 디젤연료를 점화시킴으로 시작된다. 설치된 화로는 총 4개이며 각각 10 MW, 20 MW, 30 MW, 50 MW 화재강도에 사용된다. 따라서 Test 606A는 10 MW용 화로 1개가 사용되었으며 Test 615B는 3개의 화로가 사용되었다.

3. 지배방정식 및 경계조건

3.1 지배방정식

열·유체의 물리현상을 나타내는 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 화학종의 농도를 구하기 위한 스칼라 방정식이 있다.

정상상태에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Longitudinal ventilation test of Memorial tunnel⁽⁷⁾

Test number	Fire size (MW)	Fan airflow direction		Jet fans in operation	Ventilation system response time
		N	S		
606A	10		○	2	5 min
615B	100		○	6	2 min

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = S_m \quad (1)$$

S_m 은 제어체적 내부에 추가되는 단위시간 단위 체적당 질량으로서 본 연구에서는 다음과 같이 나타내었다.

$$S_m = \frac{\dot{m}_{fu}}{V_{fire}} \quad (2)$$

여기서, V_{fire} 는 가정된 화염체적을 나타낸다.

난류유동에 대한 운동량방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i(\rho_o - \rho) \quad (3)$$

에너지방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + S_h \quad (4)$$

식(4)의 생성항은 화재발생에 의한 단위체적당 열발생량으로 다음과 같이 표현되며, 여기서 Q_{fire} 는 화재강도를 나타낸다.

$$S_h = \frac{Q_{fire}}{V_{fire}} \quad (5)$$

다음은 본 연구에서 사용한 표준 $k-\epsilon$ 난류모델 방정식을 나타내었다.

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho k + \mu_t \left[G - \frac{g_i}{\sigma_t} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left[G - \frac{g_i}{\sigma_t} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \right) \right] - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (7)$$

사용된 모델함수와 상수는 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (9)$$

$$G = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (11)$$

3.2 경계조건

터널 벽면은 속도에 대해서 점착조건을 부여하였으며 온도에 대해서는 화재지점을 중심으로 120 m에 해당하는 영역만을 단열조건으로 주었는데 이것은 실제로 이 영역에 두꺼운 단열재가 입혀졌기 때문이다. 그 이외의 영역은 화재실험 이전의 측정된 벽면온도로 설정하였다. 터널의 양쪽 출입구는 압력경계조건을 주었으며 제트팬은 입·출구조건을 적용하여 유출속도 33 m/s, 난류강도 1%, 길이 스케일은 팬 단면 수력직경의 10%로 가정하였다. Test 606A에서 가동된 제트팬은 Fig. 3에서 보여지는 F3, F6번이며 Test 615B에서는 F1, F3, F4, F6, F7, F9번이 가동되었다. 제트팬의 유출속도는 33 m/s로서 방향은 남쪽 출입구를 향한다.

본 연구에서 3가지의 경우를 고려하였는데, (1) 터널 벽면의 온도는 실험 전 측정된 온도인 11°C로 고정하고 복사를 고려하지 않은 경우(Case 1), (2) 복사로 인한 20%의 손실이 있는 경우(Case 2), (3) 복사에 의한 손실을 고려하고 터널 벽면

온도를 터널 단면 평균 온도로 수정한 경우(Case 3)이다. Case 2에서 복사손실량을 20%로 정한 것은 기존의 연구에 근거하면 화염면에서 터널 벽면으로 전달되는 복사량은 총 발열량 \dot{Q}_{fire} 의 10~30%를 차지한다고 알려져 있기 때문이다.⁽⁸⁾

실험보고서에 따르면 Test 606A에서의 화재 전과정은 비정상상태이나 화재발생 후 400~1,600 초 동안, Test 615B는 400~800초 동안 터널내 온도와 속도의 변화가 미소한 안정한 상태를 유지하며 이 시간 동안의 평균 화재강도는 각각 9 MW, 100 MW라고 하였다.

따라서 본 연구에서는 이 시간 동안을 정상상태로 간주하고 해석을 수행하였다. Test 606A의 경우는 화염체적을 10 m³로 가정하여 식(5)의 체적당 발열량을 0.9 MW/m³로 하였다. 연료의 단위시간당 소모량이 0.26 kg/s로 측정되었고 디젤 연료(C_{10.8}H_{18.7})의 이론공연비는 14이므로 식(2)의 화학종의 발생량은 0.39 kg/m³이 된다.

Test 615B의 경우는 화염체적을 78 m³로 가정하여 체적당 발열량이 1.28 MW/m³이 되게 하였고 단위시간당 연료소모량이 2.6 kg/s로 측정되어 화학종의 발생량을 0.5 kg/m³으로 하였다. Test 651B의 경우에 실험은 3개의 화로를 이용하여 수행되었으나 화로가 서로 가까운 거리를 두고 배치되었으므로 계산의 편의상 한 개의 화염소스로 처리하였다.

4. 수치해석방법

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 본 연구의 해석을 위해 구성한 터널격자의 높이와 폭 및 종방향 길이는 7.9 m, 8.75 m, 854 m로서 실제 스케일로 모델화하였다. 횡단면의 격자수는 617개이며 길이 방향으로는 356개로 분할하였는데, 길이방향 분할에 있어서 구배가 클 것으로 예상되는 팬과 화재영역에서는 주위 격자보다 조밀하게 나누는 비균등 분할을 적용하였다. 본 연구에서는 상용 프로그램인 STAR-CD를 이용하였으며 수렴판정조건은 전체 내부격자에서 모든 변수들의 잉여량이 0.1% 이하이면 수렴한 것으로 간주하였다. 잉여량에 대한 정의는 다음과 같다.

$$R_\phi = \frac{\sum |r_\phi^k|}{m_\phi} \quad (12)$$

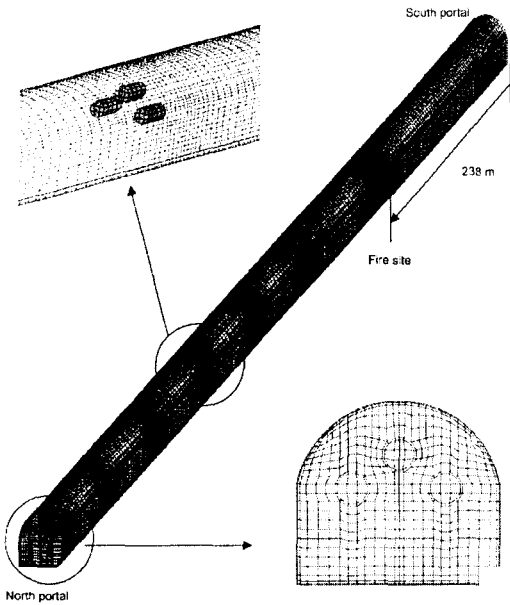


Fig. 4 Grid system of the tunnel simulation.

$$r_{\phi}^k = A_p \phi_p^k - \sum A_m \phi_m^k - s_{\phi} \quad (13)$$

5. 결과 및 고찰

5.1 제트팬 가동수에 따른 터널내 공기 유입량

본 절에서는 터널내 화재를 발생시키지 않은 상황에서 제트팬 가동수와 터널내 유입되는 풍량의 관계를 알아보기 위한 Cold Flow Test에 대한 결과를 고찰하였다. Table 2는 실험결과와 시뮬레이션에 의해 예측된 결과를 비교한 것이다.

실험에 의하면 위치를 바꿔 가면서 제트팬을 3, 9, 15대를 가동시켰을 때, 팬 수가 동일한 경우의 각각의 유입 풍량은 차이가 크지 않게 나타

Table 2 Comparison of CFD results with experimental data for cold flow

No of fans operating	Test data	CFD model		Deviation from test data (%)
	Average bulk flow (m ³ /s)	Fans utilized	Bulk flow (m ³ /s)	
3	175	G1	171	2.2
9	288	G1-G3	304	5.5
15	376	G1-G5	389	3.4

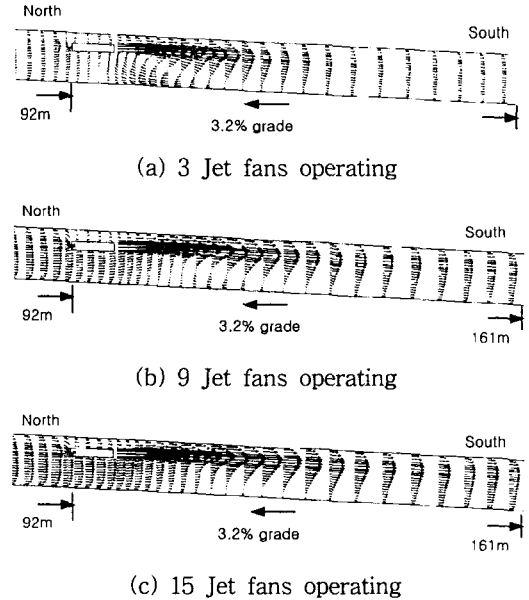


Fig. 5 Velocity vector distributions on the middle plane.

났다. 실험과 같은 조건에서의 수치해석 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 실험 결과값은 평균값을 이용하였으며 5.5% 이하의 오차를 보이고 있다.

Fig. 5는 Cold Flow Test의 시뮬레이션 결과로서 제트팬 가동수가 3, 9, 15대일 때, 터널 중심단면에서의 속도분포를 나타낸다. 구간은 남쪽 출입구를 기점으로 91~161 m 사이에 해당하는 영역이다. (a)의 제트팬 가동수가 3대인 경우를 보면 제트팬 출구 앞에서 재순환 영역이 현저히 나타나고 있지만 가동수가 많아질수록 재순환 영역이 사라지고 전체 유동방향이 남쪽 출구를 향하게 된다.

5.2 Test 606A

Test 606A는 화재발생 이후 400~1,600초 동안 실험값에 근거하여 안정한 것으로 판단되었고 이 부분에 대한 정상상태 해석을 실시하였다. 압력 경계조건인 터널의 양쪽 출입구에는 서로 다른 압력을 주었는데, 이것은 벽면과 외기의 온도차와 경사진 터널의 고도차에 의해 발생하는 자연 대류현상을 반영하기 위해서다. 화재실험 이전에 측정된 벽면 및 외기의 온도가 11℃, 1℃이고 터

널구배에 의한 고도차는 40 m이므로 터널의 양쪽 출입구 압력차는 17.7 Pa로 설정하였다.

Fig. 6, 7은 Test 606A에 대한 결과로서 터널 길이에 따른 유량과 평균 온도를 실험자료, Karki and Patankar⁽⁶⁾의 결과와 함께 비교하여 나타내었다.

Fig. 6의 풍량에 대한 결과를 보면, 4개의 해석 결과는 대체적으로 실측결과와 비슷한 값을 보이고 있지만, 750~850 m 구간에서는 Case 3의 해석결과가 가장 근접한 예측을 하고 있다.

Fig. 7에서 복사를 고려하지 않은 경우와 Case 2를 비교해 보면 Case 2가 화재근방, 즉 단열구간인 600~670 m 영역의 실측 온도분포와 가깝다는 것을 알 수 있다. 그러나 화재지점을 중심으로 약 60 m를 지난 이후부터는 온도를 매우 낮게 예측하였는데, 이것은 단열벽면 이후의 벽면온도

를 화재실험 이전에 측정된 벽면온도로 고정시켰기 때문에 터널 내부의 온도가 급격하게 냉각된 것으로 판단된다.

Case 3은 이러한 냉각손실을 고려해 주기 위한 것으로 Karki⁽⁶⁾의 해석결과와 Case 3을 비교해보면, 560 m까지는 비슷한 온도분포를 나타내고 있지만 그 이후의 영역에서는 Case 3이 실측온도에 더 근접한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 화재근방 615~710 m 구간에서 Case 3은 실측온도와 거의 일치하고 있다. 특히 화재지점에 못미치는 560~600 m 구간의 실측온도를 보면 이미 온도가 점차적으로 상승하고 있음을 알 수 있는데 이것은 이 구간에 역기류(backlayering)가 발생하고 있다는 것을 나타내는 것이며, 이 부분에 대한 해석결과도 실측과 근사한 값을 보이고 있

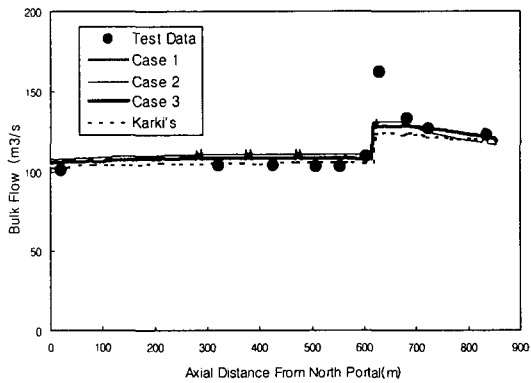


Fig. 6 Bulk flow rate along the tunnel for Test 606A.

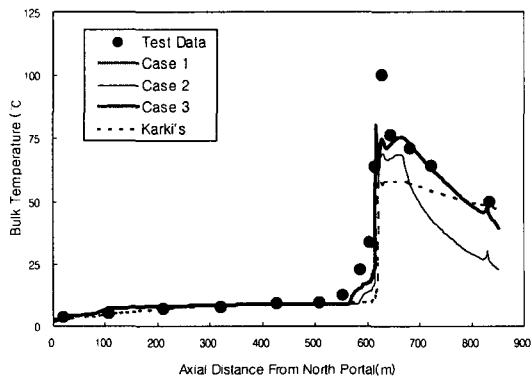
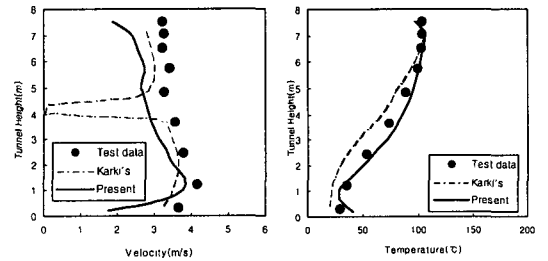
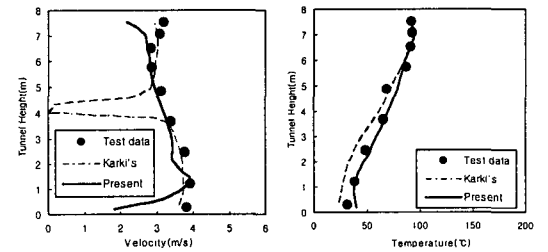


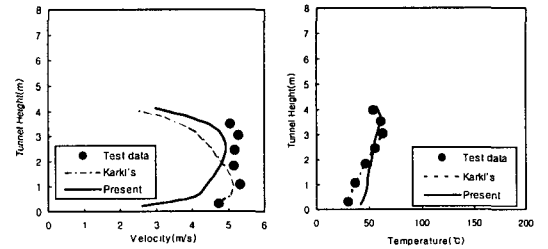
Fig. 7 Bulk temperature distributions along the tunnel for Test 606A.



(a) 66 m south of fire site



(b) 108 m south of fire site



(c) 219 m south of fire site

Fig. 8 Temperature and velocity profile for Test 606A.

다. 615~670 m 구간에서 Case 3은 Case 2보다 9% 가량 온도가 상승되었고 단열벽 이후의 영역에서는 Case 3에서 보였던 온도의 급한 하강곡선이 완만한 기울기를 가진 곡선으로 바뀌었다.

Fig. 8의 (a)~(c)는 화재지점으로부터 각각 66 m, 108 m, 219 m에 위치한 터널 횡단면에서의 높이에 따른 평균 속도와 평균 온도분포이다. 각 단면의 온도에 대한 시뮬레이션 결과는 실측결과와 비교하여 매우 근사한 예측을 하고 있다. 66 m와 108 m에 위치한 단면에서의 온도분포는 실측결과와 거의 일치하고 있다. 속도에 대한 해석 결과를 보면, 108 m 단면에서 실측결과와 가장 근접한 결과를 보였으며, 66 m 단면에서는 터널 상부로 갈수록 속도를 낮게 예측하고 있다.

Karki⁽⁶⁾의 속도분포에 대한 해석결과를 보면, 마찬가지로 108 m에 위치한 단면에서 실측값과

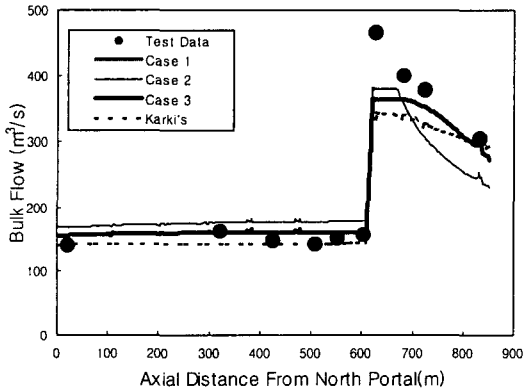


Fig. 9 Bulk flow rate along the tunnel for Test 615B.

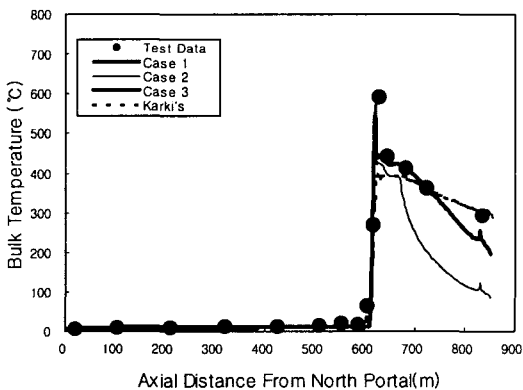


Fig. 10 Bulk temperature distributions along the tunnel for Test 615B.

가장 가까운 예측을 하고 있으며, 219 m에 위치한 단면에서는 상부에서 가장 큰 오차를 보이고 있다.

Fig. 8의 (a)와 (c)에서 Karki⁽⁶⁾의 결과가 높이 4 m에서 속도가 0이 되는 것은 그의 논문에서 명확히 밝히지는 않았으나, 실험시의 상황을 최대한 가깝게 유지하기 위해 실험측정장비까지 모형화하였기 때문인 것으로 추측된다.

5.3 Test 615B

Fig. 9, 10은 Test 615B에 대한 시뮬레이션 결과로서 길이방향에 따른 풍량과 평균 온도를 나타낸다. 계산방법은 Test 606A와 동일하게 하였다. Case 2를 보면, 단열벽을 통과한 이후의 기류 온도는 급속히 낮아져 화재지점 이후 219 m에서는 실험값보다 200°C 낮은 온도를 예측하고 있다. 또한 급한 온도하강으로 인한 공기밀도의 감소가 터널내 체적유량을 낮게 예측하는 결과를 가져왔다. 이에 반면 Case 3는 전체적으로 높은 온도를 예측하고 있으나 화재지점 이후의 온도하강 곡선의 기울기가 실험값에 가까운 경향을 보이고 있으며 단열벽 이후의 체적유량의 감소폭도 현저히 줄어들었음을 알 수 있다.

6. 결 론

터널화재의 물리적 현상을 모사하기 위해 적합한 경계조건 설정과 유동 및 열 확산에 대한 모델링을 수행하였고, 모델링의 적합성을 검증하기 위해 메모리얼 터널 화재실험에서 측정된 실측결과와 비교하였으며 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제트팬 모델을 적용하여 터널내 유입되는 풍량을 예측해 본 결과 실험값과 5.5% 이하의 작은 오차를 보였다.
- (2) 복사에 의한 열손실을 20% 고려한 경우가 열손실이 없다고 가정한 경우보다 화재발생부근인 600~700 m 구간에서 실측 온도값에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서 터널화재를 해석하는 데 있어서 복사열 손실을 고려해 주는 것이 필요하며, 본 연구에서의 20%의 열손실이 적당한 것으로 나타났다.
- (3) 화재에 의해 상승되는 벽면온도를 고려하기 위하여 터널의 단면 평균 온도로 가정하여 계

산을 수행한 결과, 온도분포와 풍량에 있어서 전체적으로 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 특히 단열벽 이후, 즉 660 m를 넘어선 구간에서의 변화된 온도와 풍량의 결과가 실측값에 근접한 경향을 보였다.

(4) 10 MW 규모에 대한 해석결과에서 온도분포나 풍량 및 속도분포는 실측과 매우 근접한 값을 보였으며, 화재발생부근의 역기류 현상까지도 예측할 수 있었다. 특히 각 단면에서의 온도분포는 실측결과와 거의 일치하고 있다.

참고문헌

1. The 18th World Road Congress, 1987, Technical Committee, Report No. 5 Road Tunnels, Brussels 13-19, Sept.
2. The Ministry of Government Administration and Home Affairs, 1999, Annual Statistics of Fire.
3. Biollay, H. and Chasse, P., 1995, Validating and optimizing 2D and 3D computer simulations for the Offeneegg tunnel fire tests, 9th International Symposium BHRA, pp. 357-382.
4. Kumar, S. and Cox, G., 1985, Mathematical modeling of fires in road tunnels, The 5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Lille, France, 20-24, May.
5. Kumar, S., 1995, Fire development and smoke spread in tunnels-some modeling considerations, Safety in Road and Rail Tunnel, pp. 379-393.
6. 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.
7. Massachusetts Highway Department and Bechtel/Parsons Brinckerhoff, 1995, Memorial Tunnel Fire Test Ventilation Program Test Report.
8. Drysdale, J., 1990, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons.
9. Schlichting, H., 1980, Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, 7th ed., pp. 328-329.
10. Woo, K. B., 2001, A Study on Heat and Smoke Dispersion Model for Fire Simulation in a Tunnel, M.S. Thesis, Kookmin University.