

터널내에서 화재 발생시 연기 거동에 대한 연구 A Study of Smoke Movement in Tunnel Fires

김상훈* · 김성찬* · 김충익*** · 유흥선**

S. H. Kim* · S. C. Kim* · C. I. Kim*** · H. S. Ryou**

*중앙대학교 기계공학과 대학원

**중앙대학교 기계공학부

요 약

본 연구는 터널에서의 화재성상을 파악하기 위해 실험실 실험의 대안으로서 축소 모형 실험을 수행하였고 또한 실험결과와 비교분석하기 위하여 터널내에서의 화재에 대하여 연기거동을 수치해석하였다. 터널내에서의 연기유동은 Buoyancy force에 의해 지배되므로 Froude scaling에 의해 얻어진 결과에 따라 실험터널을 1/20로 축소한 모형에서 실험을 수행하였고 검증하였다. 여기서 얻어진 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 수치해석은 3D 비정렬 격자, PISO 알고리즘, 부력 Plume 모델등을 사용하였다. 분석결과 실험과 수치해석 결과가 어느정도 일치함을 확인하였고, 연층의 전달 속도, 온도 구배, 하강 높이를 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, reduced-scale experiments as the alternative to a real-scale fire test were conducted to understand fire properties in tunnel, and their results were compared with those of numerical simulation. The 1/20 scale experiments were conducted under the Froude scaling since smoke movement in tunnel is governed by buoyancy force. A numerical simulations were on performed 3D unstructured meshes with PISO algorithm and buoyant plume models. Results showed that data was in reasonable agreement with the numerical data of smoke velocity, temperature distribution, and clear height.

Keywords : Smoke movement, Froude scaling, PISO algorithm, Buoyant plume model

1. 서 론

현대는 대도시의 인구집중과 생활수준의 향상으로 인한 도시 기능 및 도시 기반 시설들이 필요하다. 도로 증가율에 비해 자동차의 수가 기하급수적으로 늘어나고 도시의 교통체증은 날로 심해지고 있으며, 신도시 개발에 따라 도시간을 연결하는 교통대책이 시급히 해결하여야 할 문제로 나타나고 있다. 그러나 지가 상승과 토지 수용능력의 한계로 필요한 토지 확보의 어려움이 제기되고 있고 도로와 철도의 직선화에 따라 터널 건설의 필요가 증가되고 있다.

터널내에서 발생하는 화재는 연기와 같은 유독성 물질이 바람 방향과 터널 경사각도에 따라 제한된 통로를 통하여 전달되고 자연조명도 없으므로 매우 위험한

상태에 놓이게 된다. 이처럼 터널내의 방재에 대한 연구가 중요함에도 불구하고 이론적인 연구나 실험적인 연구가 미미한 상태이므로 터널 건설시 체계적인 배연 설비 및 방재 대책을 시행하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 터널 화재시의 연기 유동, 열 및 물질전달의 특성을 이론적인 모델과 실험을 통하여 규명함으로써 효율적인 방재 시스템을 수립하고 터널 설계를 위한 방재 기술의 기본 자료를 도출하여 터널 공간내에서 연기 거동에 대한 이론적인 규명과 함께 피난 대책을 마련하고자 한다.

2. 실험적 연구

2.1 실험 터널

실험에 사용된 터널은 폭 8m, 높이 8m, 길이 180m 크기의 터널을 대상으로 실험을 실시하였다. 이

† E-mail: cik@cau.ac.kr

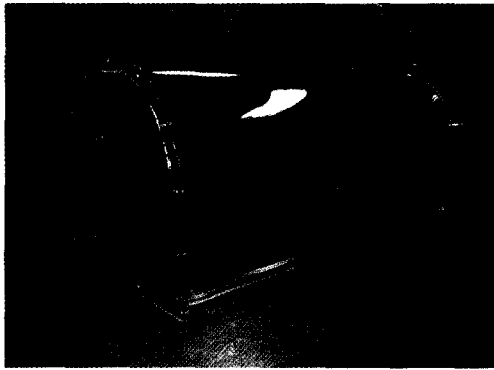


Fig. 1. Photograph of the reduced tunnel.

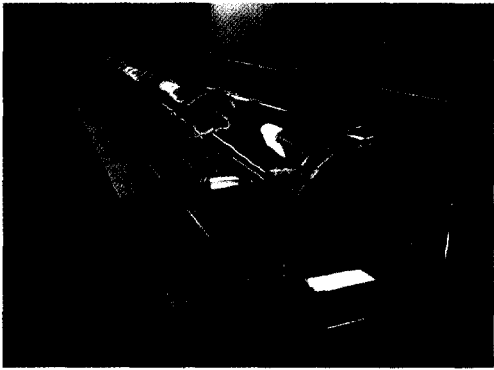


Fig. 2. Photograph of the reduced tunnel 2.

실물 터널 공간을 길이에 대해 1/20으로 축소시켜 폭 0.4 m, 높이 0.4 m, 길이 9m의 내부공간을 갖는 축소모형을 투명 아크릴을 사용하여 제작하였으며 본 실험에서 사용한 터널 공간 축소모형의 사진을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 실험 장치

터널모형 내부에서의 온도변화를 측정하기 위해 0.32 mm 두께의 T-type(구리-콘스탄탄, 측정범위 : -270 ~400°C) 열전대를 설치하였다. 터널의 중앙에 화원이

위치하므로 대칭이라 가정하였으며 이에 따라 터널 공간 모형의 한쪽 부분의 내부에 31개의 열전대를 설치하였다. 터널 공간 축소모형 실험에서의 열전대의 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 또한 정확한 온도값을 얻기 위해 0°C와 100°C에 대해 각각 보정을 행하였고 보정의 결과로서 다음 식을 얻었다.

$$\text{실제온도} = \frac{\text{측정온도} - 27.66048}{0.94838} \quad (1)$$

2.3 화원

축소 모형의 터널 공간에서의 화원의 위치는 축를 1/20에 따라 터널 모형의 중앙에 설치하였고 사용한 화원은 지름이 2.20 cm, 3.55 cm, 4.36 cm, 5.23 cm인 4 가지 크기의 화원을 사용하였다.

축소 모형 실험에서는 가연물질로서 휘발유를 사용하였으며 휘발유의 발열량은 다음 식에 의하여 얻어진다.

$$(\text{발열량}) = (\text{연소량}) \times (\text{연소열}) \times (\text{연소효율}) \quad (2)$$

단위 면적당 연소되는 휘발유의 연소량은 준정상상태값인 약 $1.667 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 그리고 휘발유의 연소열은 $4.39 \times 10^4 \text{ KJ/kg}$ 을 곱하여 화원에서 발생하는 발열량을 계산하였다. 연소효율은 증발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 불완전 연소로 인한 연소효율 0.7을 고려하여 정상상태인 화원의 유효 발열량을 계산하였다[1].

2.4 Scaling Law

터널내에서의 연기유동은 Buoyancy Force에 의해 지배되고 Froude No.가 가장 중요하므로 본 터널 축소모형 실험에서 ‘Froude’ Scaling을 사용하였다. 이는 실제 원하는 부분의 Plume 형상과 온도장을 생성하는 모형에서의 얻어진 발열량과 속도들로부터, 실제 터널에서의 비슷한 유동을 생성하는 발열량과 속도값들이 일치하게 해줄 것이다.

축소모델과 실제크기에서의 Heat Release Rates Q_M 과 Q_F , 유동의 속도 V_M 과 V_F 사이의 관계는 다음 식과 같다[2].

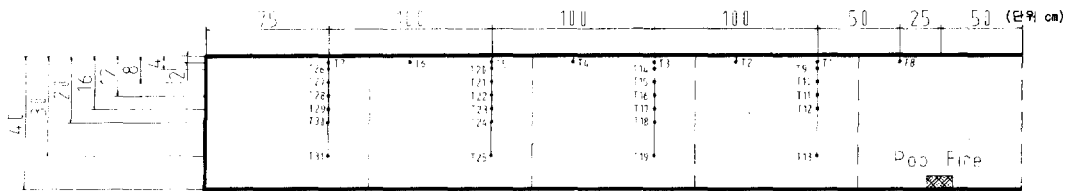


Fig. 3. Schematic of the Thermocouple arrangement in the reduced tunnel.

Table 1. The model and full-scale heat release rates in each pool

화원크기 D(cm)	발열량 Q _M (KW)	환산발열량 Q _F (MW)
2.20	0.1944	0.348
3.55	0.5072	0.907
4.36	0.7648	1.368
5.23	1.1004	1.968

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2} \quad (3)$$

$$\frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \quad (4)$$

실험에 사용된 화원에 대한 발열량은 식 (2)에 의해 각각의 화원에 대해 발열량을 계산하였고 위의 식에 의해 실제 크기의 터널에서의 발열량을 환산하여 계산한 값은 Table 1과 같다.

3. 수치해석적 연구

3.1 이론 해석

화재에 의해 발생하는 연기는 질량, 운동량, 에너지 및 스칼라량들에 대한 보존 방정식에 의해 지배받는다. 상기에 언급한 보존 방정식들을 텐서의 형태로 나타내면 다음과 같다.

· 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (5)$$

· 운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) \right) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

· 스칼라 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (8)$$

Γ_{eff} 는 유효확산 계수를 나타내고 다음과 같이 표현된다.

Table 2. Effective exchange coefficients and source term

지배방정식	ϕ	Γ_{eff}	S_ϕ
에너지	h	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_h}$	$\frac{\partial p}{\partial t}$
성분율	f	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_f}$	0
난류운동 에너지	k	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_k}$	$G_K + G_B - \rho \epsilon$
난류운동에너지 소멸율	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1(G_K + G_B) - C_2 \rho \epsilon]$

$$\Gamma_{eff} = \frac{\mu}{Pr_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (9)$$

스칼라 방정식의 유효확산계수와 생성항은 Table 2와 같다.

· 상태 방정식

$$P = \rho RT \quad (10)$$

3.2 난류 모델

화재에 의해 발생된 연기의 난류거동을 해석하기 위하여 부력 생성항을 추가한 수정 k- ϵ 난류 모델에서 레이놀즈 응력은 난류운동에너지와 난류운동에너지의 소산율에 의존되고 k와 ϵ 은 다음과 같은 수송방정식에 의해 구해진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} k - \frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla k \right) = (G_K + G_B) - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \epsilon - \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \nabla \epsilon \right) \\ & = \left(C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_K + G_B) + -C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k^j} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

난류운동에너지 생성을 G_K 와 부력에 의한 k와 ϵ 의 생성항 G_B 는 다음과 같다.

$$G_K = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (14)$$

$$G_B = \frac{\mu_t g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (15)$$

Table 3. Coefficient of turbulence model

C_μ	C_1	C_2	Pr_k	Pr_ϵ	Pr_h	Pr_f
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.7	0.7

상기 식에서 나타나는 주요 경험상수와 Prandtl No. 는 Table 3과 같다.

3.3 수치해석적 방법

일반적으로 수치해석에 이용되는 격자계는 정렬 격자계와 비정렬 격자계로 나뉘며 본 연구에서는 복잡한 기하학적인 형상을 처리하기 위하여 격자와 격자간 연결상태가 임의적인 비정렬 격자계를 이용하였다. 화재 발생부와 벽 근처 등 계산 변수의 변화가 큰 영역에서는 계산결과와 정확도를 높이기 위하여 많은 격자를 두었고 상대적으로 계산변수의 변화가 적은 영역에 대해서는 격자수를 줄이기 위하여 적은 격자수를 두는 불균일 격자를 이용하였다.

각 보존방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서는 유한체적법을 이용하였으며[3,4] 대류항의 처리는 하이브리드도식[5]을 이용하였다.

앞에서 언급한 지배방정식에 도입하여 얻어진 일반적인 이산화 방정식의 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_P \phi_P = \sum_i a_i \phi_i + b_P$$

$$a_P = S_P + \sum_i a_o + \frac{\rho_P (\delta V)_P}{\Delta t} \quad (16)$$

$$b_P = S_C + \frac{\rho_P^0 (\delta V)_P \phi_P^0}{\Delta t}$$

여기서, P는 격자의 중앙 계산점, 하첨자 i는 격자점 P와 경계면을 공유하고 있는 인접 격자점, 상첨자 o는 이전 계산에서 얻어진 값이다.

위의 비정상 유동에 대한 최종적인 형태의 이산화 방정식은 압력-속도 연결 문제를 해결하기 위해 반복 계산을 하지 않고 시간 진행에 따라서 불완전 수렴해의 오차를 줄여 나가는 PISO 알고리즘을 이용하였으며[6] 행렬해법은 대칭행렬이고 양인 행렬에 대해서는 보다 효율적인 복합구배법(Conjugated Gradient Method)을 이용하여 일정한 반복 횟수내에서 엄밀해에 수렴할 수 있도록 하였다.

복합구배법은 반복 형태의 선택에 따라서 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 비교적 수렴성능이 좋은 Kershaw에 의한 방법을 사용하였다[7].

3.4 경계 조건

3.4.1 입구 경계 조건

화재 발생으로 인한 터널 내부에서의 연기 거동을 파악하기 위하여 비교적 규칙적이고 정량화된 화원을 사용할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 제한된 크기의 Pool에 연료를 연소시킴으로써 정량화된 발열량을 계산하였고 이를 입구 조건으로 적용하기 위하여 화재에 의해 발생하는 부력 Plume을 적절히 모사할 필요가 있으며 본 연구에서는 부력 Plume 모델을 적용하여 화원에서의 Plume 거동을 모사하였다[8].

발열량에 대한 무차원 변수는 다음과 같다.

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_\infty C_{p\infty} T_\infty (gD)^{1/2} D^2} \quad (17)$$

\dot{Q}_c : 연소효율이 고려된 발열량 [kW]

ρ_∞ : 주위 공기 밀도 (1.205 kg/m³)

T_∞ : 주위 공기 온도 (293 K)

$C_{p\infty}$: 공기의 정압비열 (1.015 kJ/kgK)

g : 중력가속도 (9.813 m/s²)

D : Pool의 특성길이 (m)

발열량에 대한 무차원 변수(Q_D^*)의 값에 따라 화원에서의 Flame의 높이 Z_f 는 다음과 같은 관계에 의해 구해진다.

$$Q_D^* < 1.0 \text{인 경우 :} \\ Z_f = 3.3 Q_D^{*2/3} D \quad (18)$$

$$Q_D^* > 1.0 \text{인 경우 :} \\ Z_f = 3.3 Q_D^{*2/5} D \quad (19)$$

Pool의 직경 D에 대한 Plume의 Point source의 Virtual origin(ΔZ_f [m])은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta Z_f = 1.02D - 0.083 \dot{Q}_c^{2/5} \quad (20)$$

ΔZ_f 가 음수인 경우 virtual origin은 연료 위에 존재하며 ΔZ_f 가 양수인 경우 virtual origin은 연료 아래에 존재하게 된다. 상승 Plume으로 유입되는 공기의량은 Cetegen *et al.*, Thomas *et al.*, McCaffrey와 Cox등에 의해 제시된 많은 모델들이 있지만 본 연구에서는 화염의 높이와 유효발열량 및 virtual origin이 고려된 유입량 식을 이용하였다[9].

$$\dot{m} = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} (Z_f + \Delta Z_f)^{5/3} \\ \times [1 + 0.026 \dot{Q}_c^{2/3} (Z_f + \Delta Z_f)^{-5/3}] \quad (21)$$

Plume의 평균 온도는 운동에너지와 포텐셜에너지의

변화를 무시하므로써 다음과 같은 $T_{zi}[K]$ 를 구할 수 있다.

$$T_{zi} = T_{\infty} + \frac{Q_c}{C_p \dot{m}} \quad (22)$$

C_p : Plume의 비열 [kJ/kgK]

화염 높이에서 Plume의 수직상승속도 $w[m/s]$ 는 다음과 같다.

$$w = \frac{Q_c}{\rho_{\infty} \frac{\pi D^2}{4} C_p (T_{zi} - T_{\infty})} \quad (23)$$

이상과 같은 방법으로 얻어진 속도 w 와 온도 T_{zi} 를 화원에서의 입구 조건으로 적용하였으며 밀도는 발열량에서 계산된 온도에 의해 입구에서의 밀도를 결정하였다.

3.4.2 벽면 경계 조건

벽면 경계조건은 벽에서 속도가 영인 비미끄러짐(No slip) 경계 조건을 적용하였다. 일반적으로 높은 레이놀즈 수에 완전 발달된 벽면 난류 유동에서는 난류 에너지의 생성과 소산이 균형을 이루고 대류 확산 등의 영향이 적으며 속도 분포가 대수 함수로 표현되는 대수 영역(Logarithmic region)이 존재하는데 이 영역에서의 벽법칙을 이용하여 격자점의 k, ϵ 등의 미지량이나 벽 전단 응력 등을 계산하였다. 또한 실제 터널의 경우 연층과 벽 사이의 열전달이 존재하지만 본 연구에서는 그로 인한 영향이 전체 터널 공간에 대하여 미치는 영향이 적기 때문에 벽면에 대하여 단열조건을 적용하였으며 복사열전달에 의한 영향은 고려하지 않았다.

4. 연구 결과

화재시 생성된 연기는 부력에 의해 상승하여 천장에 도달하고 천장을 따라 수평 방향으로 이동하며 천장 제트를 형성한다. Fig. 4는 화재 발생 후 100초 경과후의 연층의 각 위치에서의 속도를 화원의 크기에 따른 계산 결과이다. 실험에서는 연층의 수평전파를 터널 천장에 설치된 열전대를 이용하여 그 도달 시간을 파악하였다. 즉, 수평 방향으로 설치된 열전대의 온도 반응이 일어나는 시간을 연기의 선단으로 간주하고 반응 시간을 열전대가 설치된 위치까지의 거리를 고려하여 화원의 크기에 대한 연층의 평균 속도를 구한 것으로 본 연구에서는 TC1과 TC7사이를 기준으로 하여

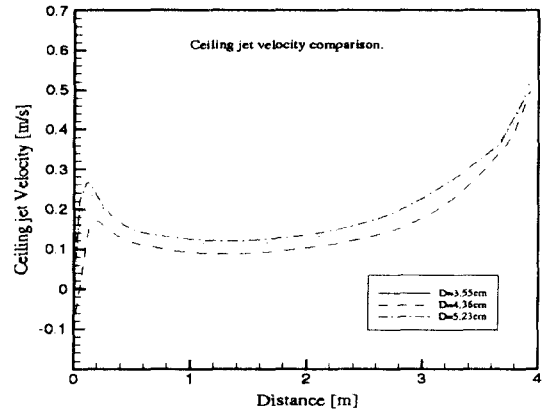


Fig. 4. Ceiling jet velocity to horizontal position at 200sec.

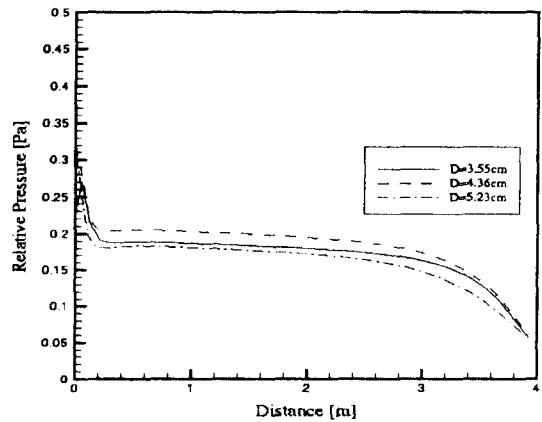


Fig. 4-1. Relative pressure to horizontal position at 200sec.

ceiling jet의 도달 속도를 계산해 주었다.

Fig. 4는 수치해석 결과로 나타난 터널안에서의 천장제트의 속도를 나타낸 것이다. 화원쪽의 천장에서는 부력에 의해 상승하는 연기의 운동량에 의해 속도가 빠르게 나타난다. 터널안으로 연기가 전파됨에 따라 벽과의 마찰등의 영향으로 속도는 점차 감소하게 되고 출구쪽으로 향하면서 다시 속도가 상승함을 알 수 있다. Fig. 4-1에 비추어 압력은 거의 비슷하게 유지되다가 화원으로부터 1.5m지점 근처에서부터 서서히 감소하며 출구쪽에서 빠르게 감소한다. 이에 따라 천장제트의 속도도 그 지점을 지나면서 서서히 증가하다가 출구 부근에서 빠르게 증가함을 보여준다.

Fig. 5는 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것으로 실험 결과가 수치해석 결과보다 다소 상향 예측하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 화원의 크기가 2.20

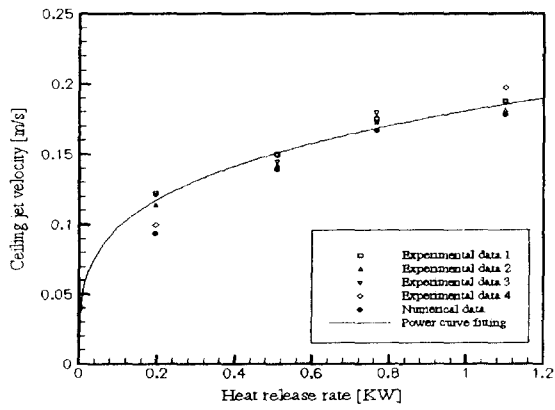


Fig. 5. Ceiling jet velocity comparison between predicted and measured.

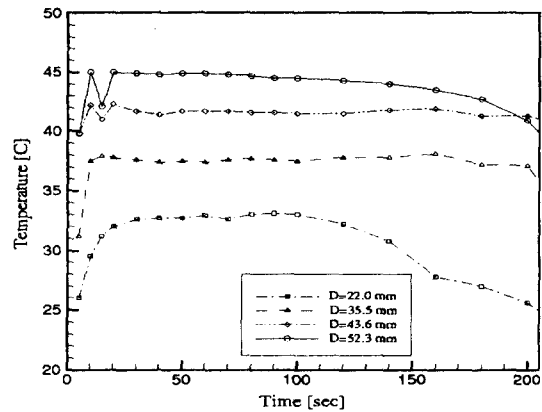


Fig. 6. Temperature variation at the ceiling of fire source.

Table 4. The model and full-scale ceiling jet velocities in each pool

화원의 크기 D(cm)	속도 V _M (m/s)	환산속도 V _F (m/s)
2.20	0.1113	0.4977
3.55	0.1468	0.6565
4.36	0.1775	0.7938
5.23	0.1891	0.8457

cm인 경우를 제외하고 나머지 화원에 대해서는 오차 범위가 5% 정도여서 실험결과와 수치해석을 통해 얻은 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있으며 이는 실험에 대한 상사법칙의 적용에 무리가 없음을 보여준다. 또한 이 값들을 기준으로 하여 앞절에서 언급한 scaling law에 의해 실제 크기의 터널에서의 속도를 환산하여 계산하였다. 각각의 값들은 Table 4와 같다.

또한 화원의 크기가 커짐에 따라 천장 제트의 속도는 화원직경의 멱승에 비례하며 그 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = \alpha \cdot Q^\beta \quad (24)$$

여기서 α 와 β 는 실험 상수로써 작은 크기의 화원에 대하여 본 연구에서 얻어진 값은 α 는 약 0.18 정도이며 β 는 약 0.25 정도의 값을 얻었다.

Fig. 6은 화원 바로 위 천장에서 시간에 따른 온도 변화를 수치해석에 의해 얻은 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 화재 발생 초기에 부력 Plume에 의해

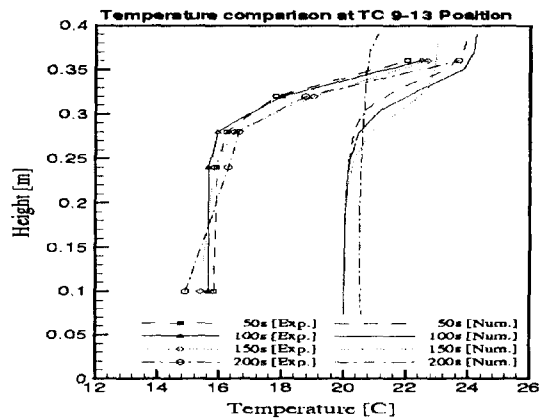


Fig. 7-1. Temperature comparison at TC9-TC13 with D=2.20 cm pool.

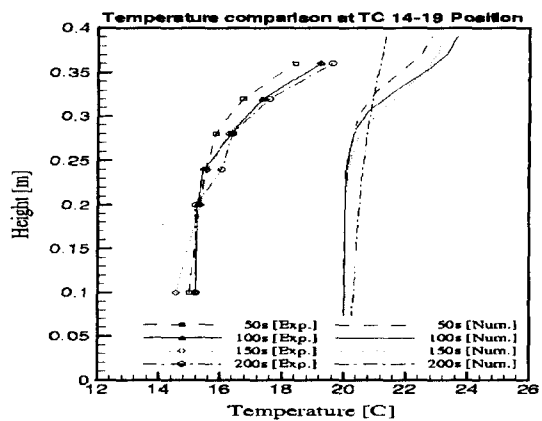


Fig. 7-2. Temperature comparison at TC14-TC19 with D=2.20 cm pool.

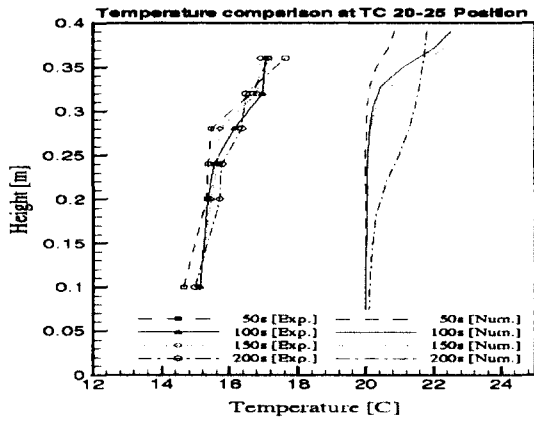


Fig. 7-3. Temperature comparison at TC20-TC25 with D=2.20 cm pool.

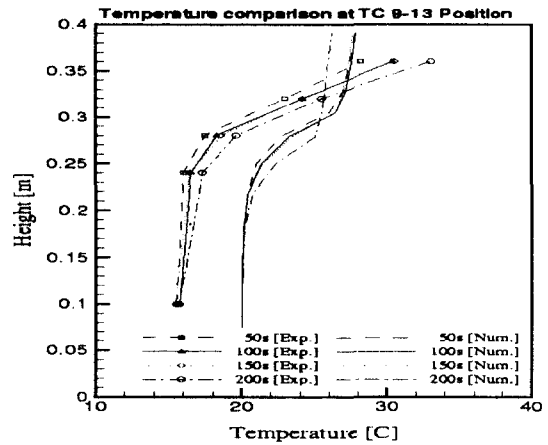


Fig. 8-1. Temperature comparison at TC9-TC13 with D=3.55 cm pool.

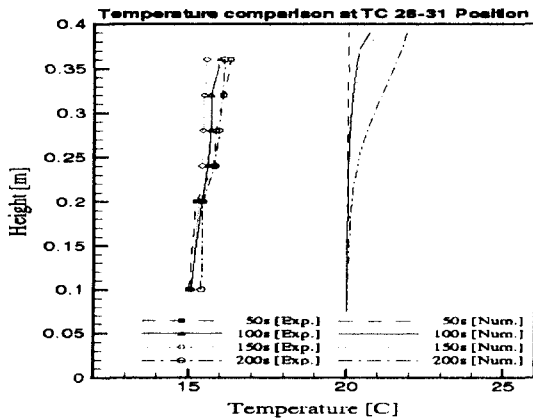


Fig. 7-4. Temperature comparison at TC26-TC31 with D=2.20 cm pool.

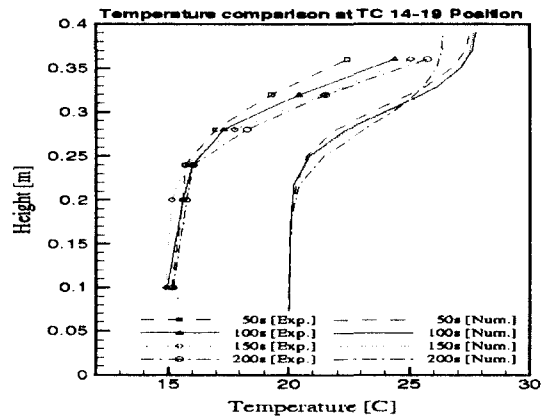


Fig. 8-2. Temperature comparison at TC14-TC19 with D=3.55 cm pool.

급격한 온도의 상승을 보이고 있으며 이후 약 30초 이후 정상상태에 도달하게 된다. 이후 터널 공간으로 주위 공기의 유입이 활발해짐에 따라 온도는 다소 내려가게 됨을 알 수 있다. 터널 공간 내의 수직 방향의 연기 하강은 피난 경로를 차단하고 이로 인한 질식을 가져올 수 있으므로 매우 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 따라서 본 연구에서는 터널 공간 내에 일정간격으로 수직하게 열전대를 설치하여 수직 방향의 온도 분포를 파악하여 수치해석 결과와 비교하였다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각 화원 크기에 대하여 50초, 100초, 150초, 200초 일 때 각 위치에서의 온도를 보여주고 있다. 결과에서 보는 바와 같이 각 부에서 온도 분포는 실험결과와 수치해석 결과가 다소 차이가 난다. 이는 실험에서는 주위 온도가 15°C 정도

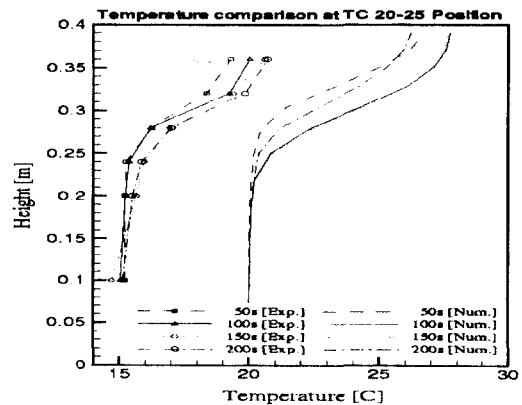


Fig. 8-3. Temperature comparison at TC20-TC25 with D=3.55 cm pool.

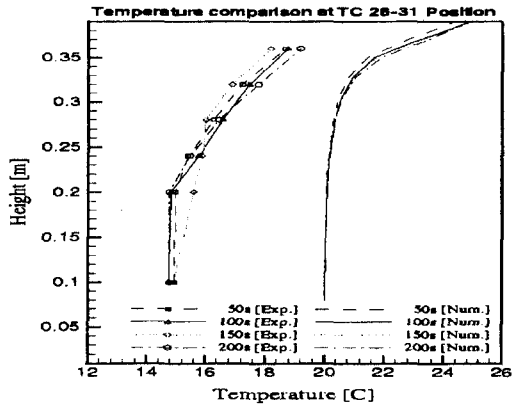


Fig. 8-4. Temperature comparison at TC26-TC31 with D=3.55 cm pool.

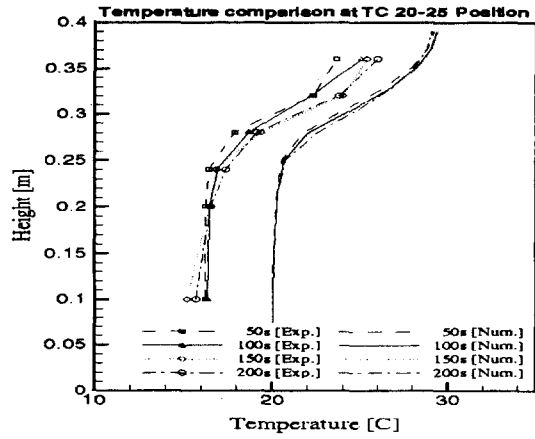


Fig. 9-3. Temperature comparison at TC20-TC25 with D=4.36 cm pool.

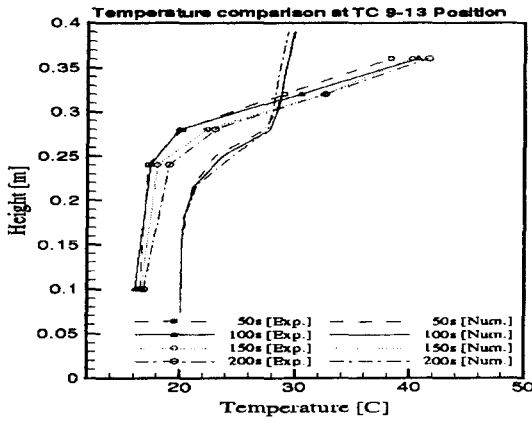


Fig. 9-1. Temperature comparison at TC9-TC13 with D=4.36 cm pool.

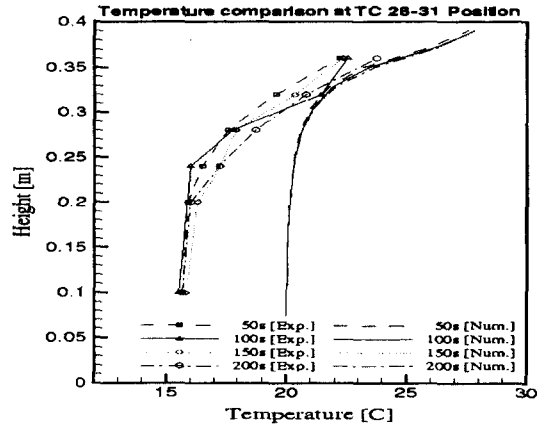


Fig. 9-4. Temperature comparison at TC26-TC31 with D=4.36 cm pool.

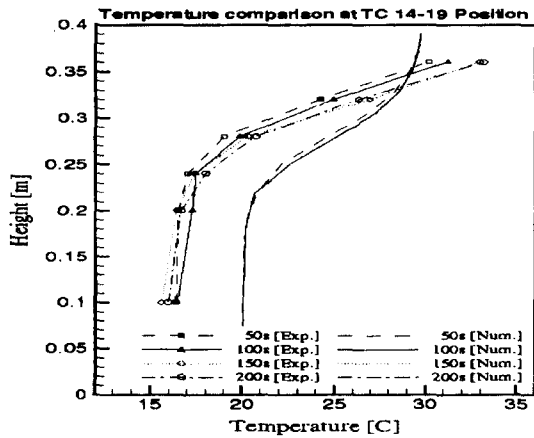


Fig. 9-2. Temperature comparison at TC14-TC19 with D=4.36 cm pool.

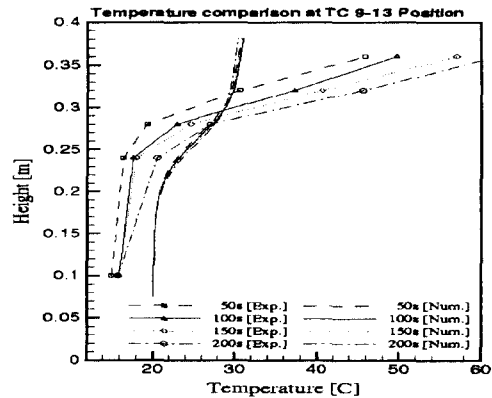


Fig. 10-1. Temperature comparison at TC9-TC13 with D=5.23 cm pool.

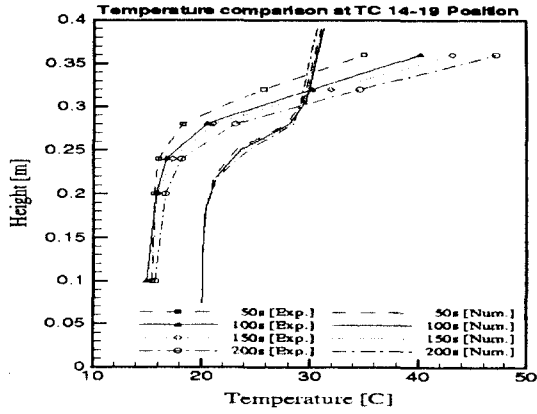


Fig. 10-2. Temperature comparison at TC14-TC19 with D=5.23 cm pool.

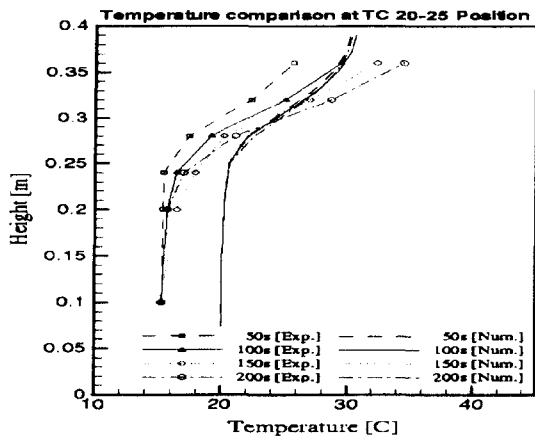


Fig. 10-3. Temperature comparison at TC20-TC25 with D=5.23 cm pool.

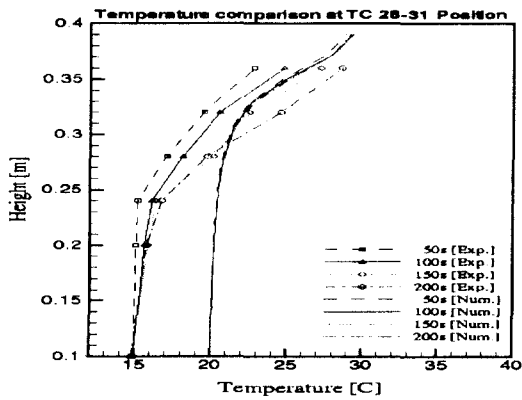


Fig. 10-4. Temperature comparison at TC26-TC31 with D=5.23 cm pool.

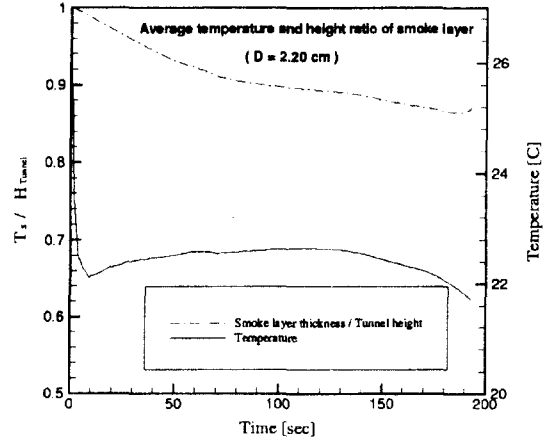


Fig. 11-1. Average temperature and height ratio of smoke layer with D=2.20 cm pool.

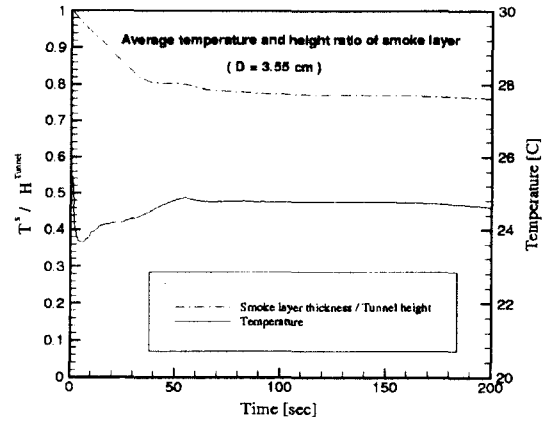


Fig. 11-2. Average temperature and height ratio of smoke layer with D=3.55 cm pool.

의 상태였지만 수치해석에서는 주위 공기의 온도를 20°C로 고정하여 생기는 차이이다. 그러나 화원의 크기에 따라서 주위 온도에 대한 온도 상승률은 크게 차이가 없음을 보여주고 있다. 또한 연층의 하강을 판단할 수 있는 온도 변화는 실험과 수치해석결과가 잘 일치하고 있음을 보여준다. 그리고 실험과 수치해석 모두 연층의 하강은 50초 이후 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 터널 공간에 대하여 출입구로부터 화원으로의 지속적인 주위 공기의 유입과 연기가 출입구를 통해 지속적으로 빠져나감에 따라 연층의 높이가 일정하게 유지되는 것이다.

Fig. 11은 화원 크기에 대하여 연층의 높이와 연층의 평균 온도를 시간에 따라 전체 터널에 대해 수치해

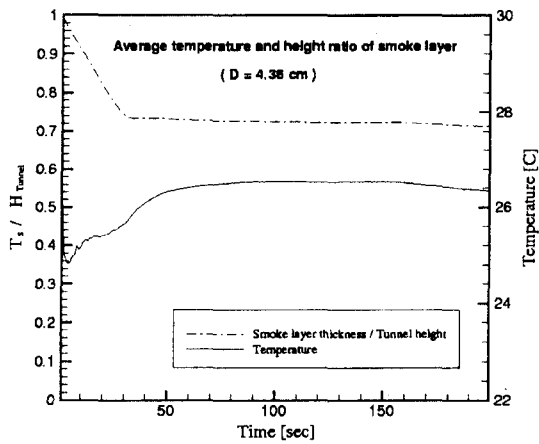


Fig. 11-3. Average temperature and height ratio of smoke layer with D=4.36 cm pool.

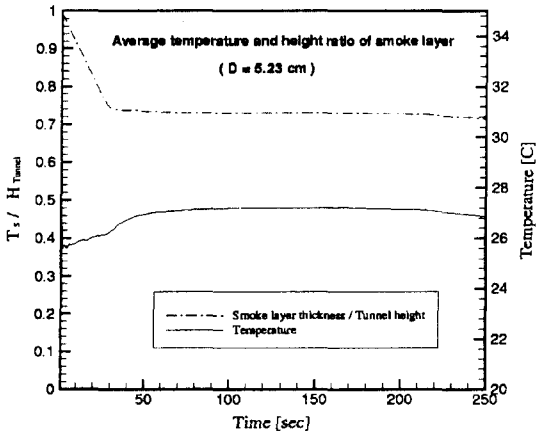


Fig. 11-4. Average temperature and height ratio of smoke layer with D=5.23 cm pool.

석에 의해 계산한 결과이다. 연층의 높이는 연기의 농도가 1%를 경계로 하여 연층을 구분하였으며 연층의 평균 온도는 다음과 같은 방법으로 계산하였다[10].

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i \nabla \tau_i}{\sum \Delta \tau_i} \quad (25)$$

i : 연기 농도가 1% 이상의 계산 격자
 $\Delta \tau_i$: 각 계산 격자의 체적.

그림에서 보는 바와 같이 각 화원에 대하여 연층의 하강은 약 50초 전후로 정상상태에 도달하게 됨을 알 수 있고 정상상태에서의 터널의 높이에 대한 연층의

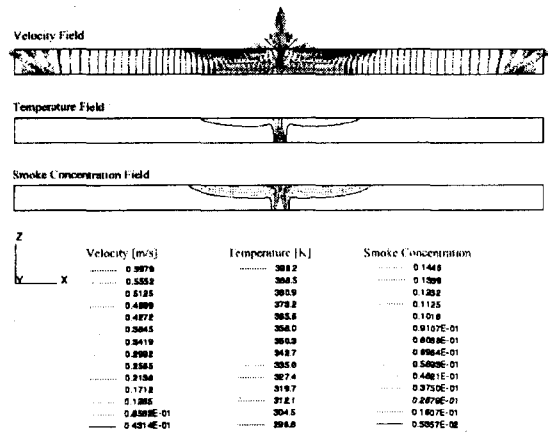


Fig. 12. Velocity, temperature and smoke concentration at 10sec (D=5.23 cm).

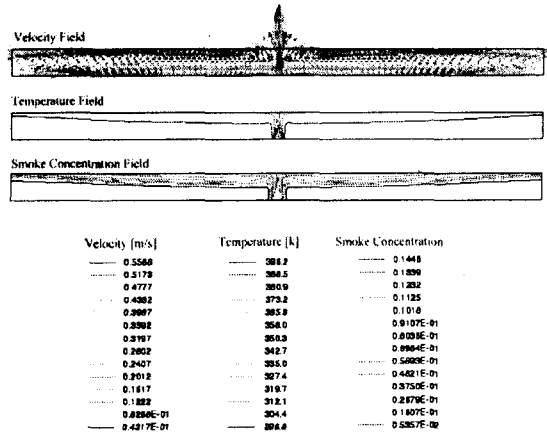


Fig. 13. Velocity, temperature and smoke concentration at 100sec (D=5.23 cm).

두께의 비율은 70%를 넘지 않음을 알 수 있다. 이는 실제 터널의 높이를 약 8m로 간주 할 경우 연층이 5m 이하로 내려오지 않고 터널의 양쪽 출입구로 빠져 나간다는 사실을 예측할 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 5.23 cm 화원크기에 대하여 10초와 100초일때의 터널공간내의 유동장, 온도장 및 연기의 농도장을 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 화원에서의 발생된 연기는 천장제트를 형성하며 터널 양단의 출입구 쪽으로 이동하고 있으며 화원의 상승에 의해 주위 공기를 유입하게 되어 터널의 양단으로부터 유입이 일어나게 된다. 따라서 터널 양단의 출입구의 상단부에서는 연기의 유출이 일어나고 하단부에서는 주위 공기의 유입이 발생하게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널내에서의 연층의 성장과 이동과정, 그리고 온도분포를 실험 및 수치해석적 방법에 의하여 얻어냈다. 이러한 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 실험과 수치해석적인 방법을 이용하여 얻은 연층의 천장제트 속도는 화원의 크기에 따라서 다소 차이는 나지만 오차범위 10% 이내로 잘 일치하고 있으며 실제 터널 공간에 대한 화재 현상을 모형 실험을 통해 모사할 수 있다는 사실을 입증하였다.

(2) 모형에 대한 결과를 실제 터널에 대한 결과로 환산하여 터널내에 화재 발생시 천장제트의 전파 속도를 상사법칙을 이용하여 계산함으로써 실제 터널 설계시 화재로 인한 피난 시간 설정에 본 연구의 결과를 적용할 수 있다.

(3) 터널 공간내의 연층의 하강을 파악하기 위하여 모형 실험에서 얻은 수직 온도 분포와 수치해석에서 얻은 결과를 비교하였으며 실험과 수치해석의 온도 상승률이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 연층의 하강은 실험과 수치해석 모두 전체 터널 높이에 대해 70%이하로 내려오지 않았으며 수치해석에 의해 Clear height를 계산 해 본 바로도 역시 유사한 결과를 얻었다. 이러한 결과로 본 수평 터널내의 화재 발생시 연층의 하강 높이는 터널 높이의 70%이하로 내려오지 않는다는 결론을 내릴 수 있다.

(4) 화원의 크기가 증가함에 따라 천장제트의 속도는 화원 크기의 약 1/4승에 비례하여 증가함($V_f = \alpha \dot{Q}^{1/4}$)을 보여주고 있다.

Nomenclature

Q : Heat release rate - 발열량[kW]
 D : Diameter - 직경[m]
 V : Velocity - 속도[m/s]
 L : Length - 길이[m]
 m : mass - 질량[kg]
 g : Gravitational acceleration - 중력가속도[m/s²]
 Pr : Prandtl number
 u : Velocity component - 속도성분[m/s]
 P : Pressure - 압력[Pa]
 R : Gas constant - 기체상수
 S : Source term - 생성항
 G : Turbulence source term - 난류생성항
 k : Turbulent kinetic energy

t : Time - 시간[sec]
 T : Temperature - 온도[K]
 Z : Flame Height - 플레임 높이[m]

Greek

ρ : Density - 밀도[kg/m³]
 Γ : Diffusion coefficient - 확산계수
 μ : Dynamic Viscosity - 점성[kg/m · sec]
 ϵ : Rate of dissipation of turbulent kinetic energy - 난류 운동에너지 소산율
 ϕ : General dependant variable - 종속변수

Subscript

F : Full scale - 실물 스케일
 M : Model - 모형
 eff : Effective
 fl : Flame

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-1-304-001-2) 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김명배, 한용식, "유동에 의한 연층확산에 관한 실험적 연구", 한국화재·소방학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 3-14(1997)
2. Y. Oka, G. T. Atkinson, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", Fire Safety Journal, 25, pp. 305-322(1995)
3. S. V. Pantankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill Washington, D.C(1980)
4. S. Mujaferija, "Adaptive Finite Volume Method for Flow Prediction using Unstructured Meshes and Multigrid Approach", Ph.D. Imperial College (1994)
5. D. B. Spalding, "A novel finite-difference formulation for differential expression involving both first and second derivatives", International Journal of Numerical Methods Eng., Vol. 4, pp. 551(1972)
6. R. I. Issa, "Solution of the Implicity Discretised Fluid Flow Equation by Operator-Splitting", Journal of Computational Physics, 62, pp. 40-65

- (1985)
7. D. S. Kershaw, "The Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method for the Iterative Solution of Systems of Linear Equations", Journal of Computational Physics, Vol. 26, pp. 43(1978)
 8. G. Cox, "Combustion Fundamentals of Fire", ACADEMIC PRESS INC. San Diego, CA 92101
- (1995)
9. G. Heskestad, "Virtual origins of fire plumes", Fire safety Journal, Vol. 5, pp. 109-114(1983)
 10. W. K. Chow, "A Comparison of the Use of Fire Zone and Field Models for Simulating Atrium Smoke-filling Process", Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 337-353(1995)