

자연 배기 터널에서의 연기 거동에 관한 연구

김성찬* · 유홍선* · 이성룡* · 김충익**
(2001년 11월 5일 접수, 2002년 3월 13일 심사완료)

A Study of Smoke Movement in Tunnel Fire with Natural Ventilation

Sung Chan Kim, Hong Sun Ryou, Sung Ryong Lee and Choong Ik Kim

Key Words: Tunnel Fire(터널화재), Natural Ventilation(자연배기), Smoke Movement(연기거동), Pool Fire (풀화재), LES(대와동모사)

Abstract

In this study, smoke movement in tunnel fire with natural ventilation shaft has been investigated with various size of fire source. Gasoline pool fire with different size of diameter - 73mm, 100mm, 125mm and 154mm - was used to describe fire source. Experimental data is obtained with 1/20 model tunnel test and its results are compared with numerical results. The computation were carried out using FDS 1.0 which is a field model of fire-driven flow. Temperature profiles between measured and predicted data are compared along ceiling and near the ventilation shaft. Both results are in good agreement with each other. In order to evaluating a safe egress time in tunnel fire, horizontal smoke front velocity was measured in model tunnel fire tests and those are compared with numerical results. According to the presence or absence of natural ventilation shaft, ventilation effect are estimated quantitatively. Finally, this paper shows that computational fluid dynamics(CFD) is applicable to predict fire-induced flow in tunnel.

기호설명

- D : 화원 직경, [m]
- \dot{q} : 단위면적당 발열량 [kW/m^2]
- \dot{m}'' : 연료의 증발량 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- $\dot{m}_{c''}$: 무한반경의 연료증발량 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- $k\theta$: Extinction-Absorption Coeff. [m^{-1}]
- \dot{Q} : 전체발열량 [kW]

- ΔH_c : 연소열 [MJ/kg]
- Q_M : 모형 화원의 발열량 [kW]
- Q_R : 실제 화원의 발열량 [kW]

1. 서론

현대 산업사회의 발달에 따른 교통량의 증가 및 다양화로 인해 교통 체증은 날로 심각해지고 있으며 도로나 철도 건설 등의 육상교통 확보를 위한 많은 사회간접자본이 적용되고 있는 상황이다. 이와 함께 지형적 제약을 극복하기 위하여 지하철이나 터널 등과 같은 지하 공간의 활용에 대한 관심이 증대되고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 한편 이러한 공간의 지하학

* 책임지자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : cfdmcc@cnu.ac.kr
TEL : (02)820-5280 FAX : (02)813-3669
* 중앙대학교 대학원
** 중앙대학교 기계공학부

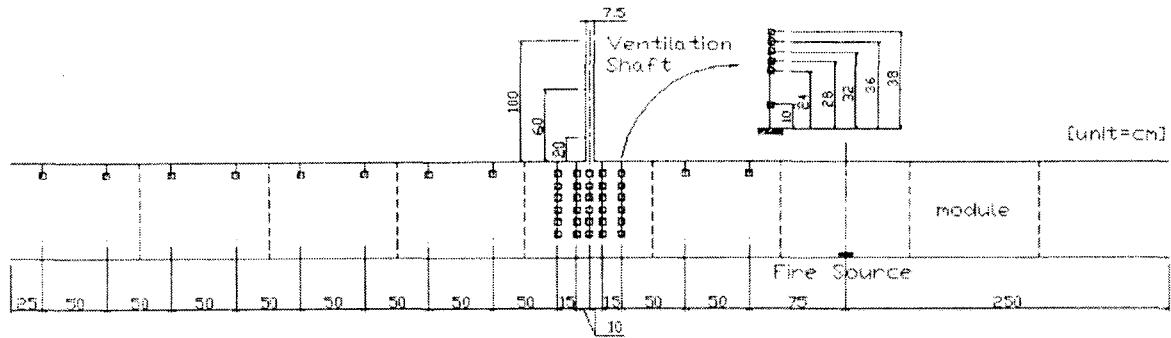


Fig. 1 Schematic of the experimental setup and thermocouples positions

적인 제약 조건으로 인하여 공간대의 위험요소 발생시 안전성 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히 터널내의 화재 발생시 내부 공간은 외부와 의 통로가 한정되어 있기 때문에 화재 발생으로 인한 열의 축적 및 연기에 의해 발화점의 파악이 힘들고 제한적인 진입구에 의해 소방 활동의 큰 지장을 받게 된다. 따라서 터널 이용자와 구조자의 안전에 심각한 문제를 야기하여 대형 사고를 유발하게 된다. 이와 같은 대표적인 대형 터널 사고로는 1996년 11월 유러터널 화재로 인하여 해저터널 구조에 심각한 손상을 가져왔으며 1999년 3월 프랑스 알프스 산맥을 관통하는 퐁블랑 터널 안에서 화재가 발생하여 30여명이 사망하는 사고가 발생했다. 최근 들어서는 2000년 11월 오스트리아의 키츠슈타인호른 산악열차 화재 사고로 인하여 스키 휴양지를 이용하고자 했던 170여 명의 여행객이 사망한 대형 참사가 발생했으며, 2001년 7월 미국 볼티모어 시내의 한 터널에서 유독성 화학물질을 실은 화물열차가 탈선, 화재가 발생하여 소방대원들이 부상하고 터널의 기능을 상실하는 사고가 발생했다. 이러한 사고 사례에서 보는 바와 같이 터널 화재시 적절한 배연 장치의 설치와 피난 대책 마련은 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 일반적으로 터널화재시 열 및 연기거동을 제어하기 위한 방법으로는 터널의 자연 환기력을 이용하는 자연배기방식과 터널의 주요부에 팬을 설치하여 열과 연기거동을 제어하는 강제배기 방식이 적용되고 있다. 이와 함께 터널내 화재에 관한 연구도 앞에서 언급한 바와 같은 2가지 배연방식에 초점을 두고 연구가 진행 중이다. 강제배기에 관한 연구는 Thomas, Kennedy 등에 의해 실험이나 Froude 수에 기초한 이론해석을 통하여 터널내의 강제배기에 의한 연기제어의 임계속도(Critical Velocity)가 발열량의

1/3 승에 비례한다는 사실을 파악하였고 상관관계식을 제시하였다.^(1,2) Oka 와 Atkinson 등은 모형 실험을 통하여 무차원 발열량에 따라 무차원 임계속도가 발열량의 1/3승에 비례하는 구간과 무차원 발열량에 상관없이 일정 구간이 존재한다는 사실을 파악하였다.⁽³⁾ 한편 자연배기에 관한 연구로는 Ingason등이 강제 및 자연배기 장치를 가진 모형 실험을 수행하였고 그 결과를 수치해석 결과와 비교하여 터널화재에 대한 배기구의 수나 강제배기 속도 등의 영향을 파악하였다.⁽⁴⁾ 그러나 자연배기에 관한 연구는 강제 배기 실험에 비해 상대적으로 긴 실험 장치의 제작과 설치 공간을 요구하기 때문에 연구결과가 상대적으로 적다. 따라서 본 연구에서는 수직구가 있는 터널에 대하여 자연배기 효과를 파악하기 위하여 모형터널을 제작하여 실험을 수행하고 그 결과를 수치해석 결과와 비교하여 터널 화재시 수직구의 영향을 파악하고 터널 화재 해석 방법으로써의 수치해석의 타당성을 입증함으로써 터널 설계시 화재 방재 계획을 설정함에 있어서의 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험장치

2.1.1 모형터널 및 실험장치

터널내 화재를 모사하기 위하여 길이 9m, 폭 0.4m, 높이 0.4m 로써 실제 해석하고자 하는 터널의 1/20 크기로 모형터널을 제작하였다. 각 터널모듈은 길이 1m, 두께 1cm의 아크릴로 제작되었으며 모듈 9개를 연결하여 전체 모형터널을 구성하고 있다. 그러나 화재 발생부의 경우 화원에서 발생하는 열에 의해 모형터널의 변형 및 2차

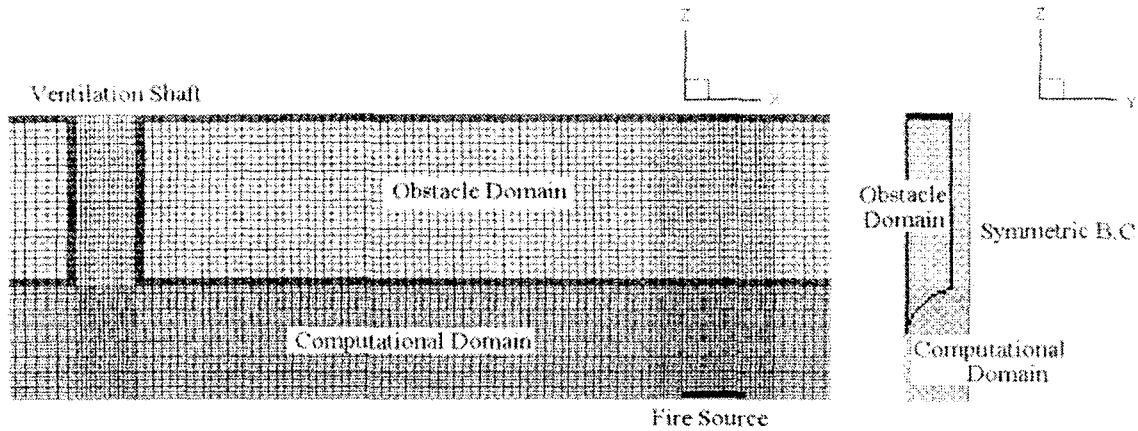


Fig. 2 Numerical grid on tunnel centre plane and cross-section

화재 발생으로 인하여 화원 발생부 모듈만큼은 강철로써 제작하였다. 수직구는 직경이 7.5cm이며 높이는 0.6m로 제작하였다. 터널내부의 온도 측정을 위하여 0.32mm의 T-type 열전대(구리-콘스탄탄, -270~400℃ 측정범위)를 이용하였다. 수평적인 연층의 온도 분포를 측정하기 위하여 천장 아래 2cm 위치에 50cm 간격으로 열전대를 설치하였고 환기구 주위의 수직적인 온도 분포를 측정하기 위하여 5개의 열전대 Tree를 제작하여 수직구 주위의 온도를 측정하였다. 모형터널의 개략도 및 치수와 열전대 위치는 Fig. 1과 같다.

2.1.2 화원

발열량이 터널 화재에 미치는 영향을 파악하기 위하여 직경이 다른 4개의 화원(73mm, 100mm, 125mm, 154mm)을 제작하여 Gasoline Pool Fire를 통하여 실제 화재 발생 상황을 모사하였다. Gasoline Pool Fire의 경우 연료의 증발량과 연소열을 이용하여 단위면적 당 발열량을 산정한다. 발열량 산정에 이용된 식은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\dot{q} = \dot{m}'' \cdot \Delta H_{c, \text{gasoline}} \quad (1)$$

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' (1 - e^{-k\theta D}) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{\infty}'' = 0.055 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\Delta H_{c, \text{gasoline}} = 43.7 \text{ MJ/kg}$$

$$k\theta = 2.1 \text{ m}^{-1}$$

Table 1 Fire size of model and full scale

직경 D	모형화재	실제화재	비고 (PIARC 규정)
	$Q_M(\text{KW})$	$Q_R(\text{KW})$	
73mm	1.00	1,790	
100mm	2.50	4,480	Passenger car
125mm	4.77	8,530	
154mm	8.66	15,490	Van-bus

증발된 연료의 불완전 연소를 통하여 Soot 생성이나 일산화탄소 등 유독성 가스를 생성하므로 일반적으로 공간 화재에서 사용되는 연소효율 0.7을 고려하였다.⁽⁶⁾ 또한 모형실험의 결과를 실제결과에 적용하기 위하여 Froude Scaling을 이용하였으며 다음 식과 같다.⁽⁷⁾

$$u_R = u_M \left(\frac{L_R}{L_M} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$Q_R = Q_M \left(\frac{L_R}{L_M} \right)^{5/2} \quad (4)$$

모형실험에 의해 이용된 발열량과 실제 환산 발열량을 정리하면 Table 1과 같다. 또한 PIARC (Permanent Int. Association of Road Congress)에서는 터널 내 화재 시나리오에 대한 화원크기의 기준을 제공하고 있는데 Passenger car의 경우 약 4MW, Van-bus의 경우 15MW, HGV의 경우 30MW, Petrol Tanker의 경우 100MW로써 각 차량의 화재 발생시 발열량을 추천하고 있다.⁽⁸⁾

2.2 수치해석

터널내의 보다 정확한 유동장을 파악하고 실험

결과와의 비교를 통하여 터널 화재 해석의 도구로써 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 NIST에서 개발한 화재 전용 해석 프로그램인 Fire Dynamics Simulator 1.0(FDS 1.0)을 이용하였다. FDS 1.0은 LES(Large Eddy Simulation)에 기본을 두고 개발된 프로그램으로 화원은 Thermal Element Model에 의해 질량이 없는 Lagrangian particle(Thermal Element)이 정해진 발열량을 가지고 화원에서 발생한다고 가정하였다. 수치해석에 이용된 격자수는 360,000 개이며 변수의 구배가 클 것으로 예상되는 화원부근과 수직구 부근에 조밀한 격자를 적용하였고 상대적으로 안정된 유동형태를 보이는 출구 부근에 대하여 격자의 크기를 상대적으로 크게 부여한 비균일 격자를 이용하였다. 또한 격자수를 줄이기 위하여 전체 터널 단면의 절반을 수치해석 영역으로 설정하여 대칭경계조건을 부여하였다. 수직

구 및 터널의 출구에는 대기 경계조건을 적용하였다. 수치해석 코드가 직교 격자계만을 지원하기 때문에 육면체 격자 블록을 형성한 후 터널의 계산 영역을 제외한 나머지 영역은 Obstacle로 처리하여 터널의 형상과 수직구의 형상을 구현하였다. 계산에 이용된 주요부의 격자체는 Fig. 2와 같다. 복사 열전달은 Simple ray tracing technique을 이용하였으며 연층과 벽과의 점도열전달의 해석하여 연층의 열손실을 고려하였다⁽⁹⁾. 3가지 화원(73mm, 100mm, 125mm)의 경우 화재 발생 후 100초 결과를 실험치와 비교하였으며 화원의 크기가 가장 큰 154mm의 경우 높은 발열량으로 인하여 장시간동안 실험 측정이 불가능하여 화재 발생이후 50초의 결과를 수치해석과 비교하였다. 수치해석에 이용된 컴퓨터는 Pentium3 800 MHz PC로써 화재 발생이후 150초까지 계산하는데 소요된 시간은 96시간이다.

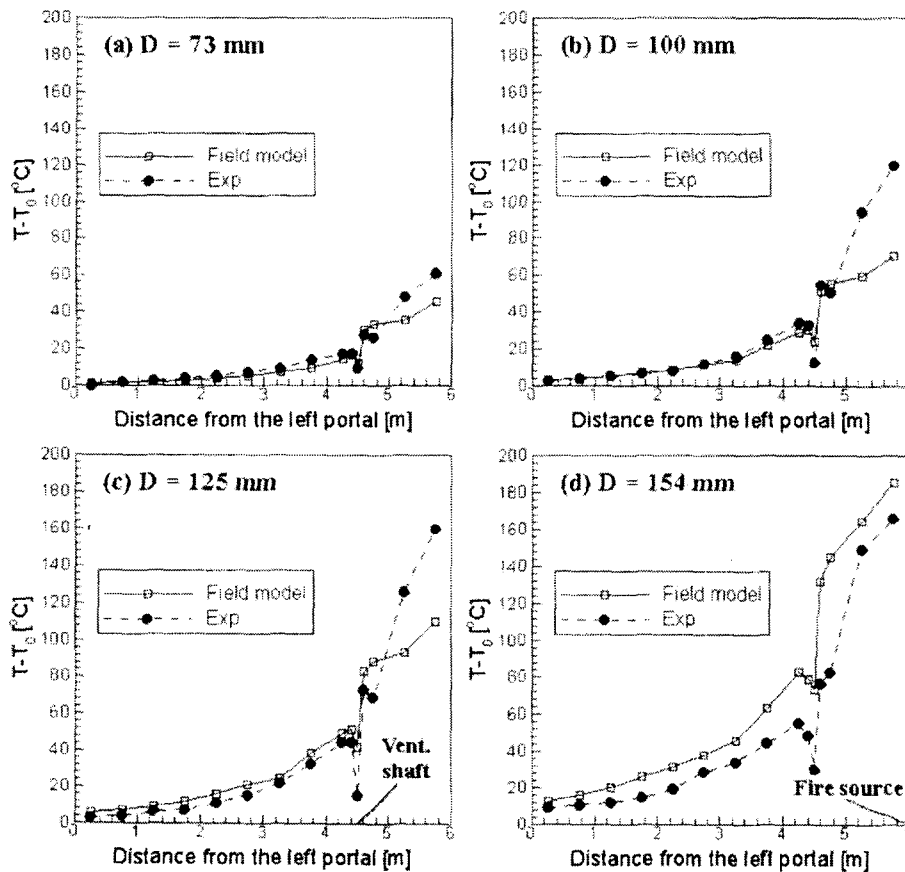


Fig. 3 Comparison between predicted and measured ceiling temperature distribution

3. 결과 및 고찰

3.1 천장 아래 연층의 온도분포

터널에서의 화재 발생시 화재를 감지하는 연기 및 온도 감지기는 대부분 천장에 위치하고 있어 감지기 작동에 있어서 천장 아래 연층의 온도 분포는 중요한 요소이며 부력에 의해 수직구로 배출되는 배연량과도 관련 있으며 터널 구조에도 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 모형터널에서 천장아래 연층의 온도 분포에 대한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 3은 터널 길이 방향으로의 천장 아래 연층의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 화원의 크기가 상대적으로 작은 경우 수치해석 결과가 실험결과를 상당히 정확하게 예측하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 상대적으로 큰 화원의 경우 수치해석에 의해 예측된 온도 분포가 실험에서 측정된 온도분포에 비해 상대적으로 상향예측을 하고 있음을 보여주고 있다. 이는 화원의 발열량 계산에 있어서 화원의 크기에 관계없이 일정한 연소효율(0.7)을 고려함으로써 발생하는 것으로 간주된다. 실제로 연소효율은 화원으로 유입되는 공기의 양과 관련이 있는데 이는 화원의 둘레(Perimeter)와 직접적으로 관련이 있다. 그러나 화원의 직경의 증가에 따른 화원 면적 증가율에 비해 화원둘레 증가율이 작기 때문에 화원직경 증가로 인한 화원으로 유입되는 공기의 양은 상대적으로 부족하게 된다. 따

라서 유입되는 공기의 양이 부족할수록 불완전 연소가 증가하게 되고 그로 인하여 연소효율은 감소하게 된다. 이러한 문제는 차후 화원의 발열량이나 연료의 증발량을 직접적으로 측정하여 이를 실제 터널에 대한 발열량으로 산정함으로써 해결해야 할 문제로 간주된다. 또한 화원근처의 온도분포에 대한 대부분의 수치해석의 결과가 실험결과에 비해 하향예측 하는 이유는 수치해석에서 화원을 모사하는 Volumetric Heat Source model 자체가 화염 자체를 해석하는 것이 아니라 화염 위 플립 영역에 대한 평균적인 발열량을 고려하는 것이기 때문에 화염에 의한 직접적인 높은 온도를 예측하지 못하기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 그러나 전체적으로 수치해석 결과가 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다.

3.2 연층의 수직적 온도분포

연층의 수직적 온도분포는 연층의 하강 정도를 보여주는 자료로써 화재발생시 대피자의 가시거리 확보에 있어서 중요한 자료로써 활용된다. Fig. 4는 화원에서 발생한 연기가 수직구를 지나 25cm 떨어진 위치에서 터널의 높이 방향으로의 온도분포를 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 화원의 크기가 작은 경우 수치해석 결과가 실험결과를 잘 예측하고 있으나 화원의 크기가 상대적으로 큰 경우 앞에서 언급한 바와 같이 발열량 산정의 문제로 인하여 비교적 큰 온도차이를 보이고 있다. 한편 대피자의

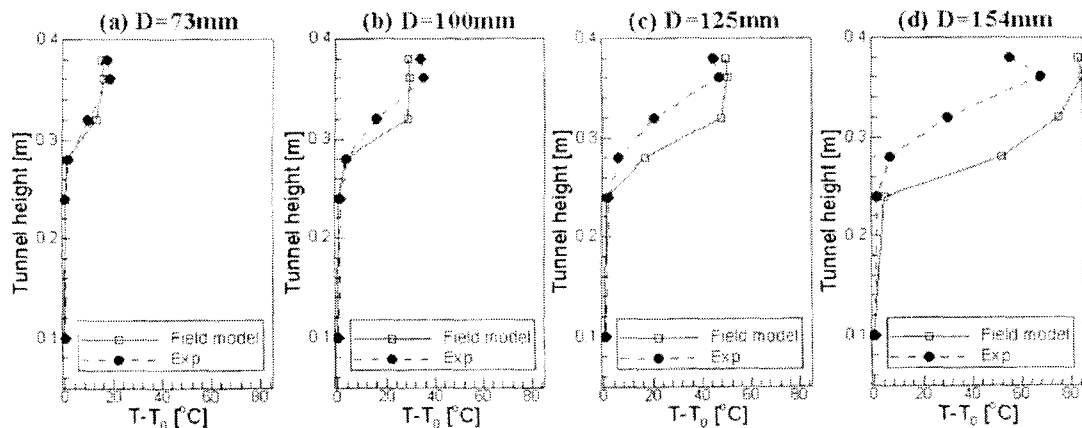


Fig. 4 Comparison between predicted and measured vertical temperature profile

Table 2 Ventilation effect with heat release rate

발열량 $Q_M(KW)$	연중전파시간 (초)		연중전파 지연효과
	배기구 (유)	배기구 (무)	
1.00	42.9	30.4	1.41 배
2.50	34.0	24.2	1.40 배
4.77	25.6	19.3	1.44 배
8.66	18.5	16.6	1.11 배

가시거리 확보와 관련된 연층의 높이는 4 가지 경우 모두 50%(실제 높이로 환산시 4m)를 넘지 않음을 보여주고 있다. 일반적으로 연층의 하강은 천장 하 연기 선단이 긴 터널벽을 따라 수평 전파되는 과정에서 발생하는 열손실, 벽과의 마찰 및 화원 방향으로 유입되는 공기와의 혼합 등으로 인하여 연층의 온도하강이 발생하고 이러한 연층 온도 하강은 연층 밀도증가를 가져오게 되므로 연층의 수직 방향으로 하강이 발생하게 된다. 그러나 본 연구에 적용된 터널의 길이가 짧아 상대적으로 연층의 에너지 손실이 적은 상태로 터널 출구로 빠져나가기 때문에 연층 하강은 적게 일어나게 된다. 따라서 터널의 길이가 길 경우 연층의 수직 하강으로 인하여 가시거리 확보에 지장을 주어 피난 대책 마련에 있어서 중요한 요소로 작용하지만 터널의 길이가 짧은 경우 연층의 수직하강이 적어 피난대책에 대한 상대적 중요성이 적다는 사실을 파악할 수 있다.

3.3 연층의 수평전파

터널에서의 화재 발생시 연층이 터널 길이 방향으로 전파하여 터널 출구까지 도달하는 시간은 터널내 대피자들의 대피시간과 직접적으로 관련이 있다. 따라서 본 연구에서는 수직구가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 연중전파 시간을 비교하여 수직구가 연중전파 지연에 미치는 영향을 파악하였다. 연중 전파시간 계산은 화원에서 75cm 떨어진 위치의 열전대(TC1)와 수직구를 지나 왼쪽 출구에서 25cm 떨어진 위치의 열전대(TC15)까지 연층이 도달하는데 걸리는 시간으로 계산하였다. 연기 선단의 도착유무는 열전대가 반응하기 시작하는 시간을 연층의 도착시간으로 설정하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 수직구가 있는 경우 연중 수직해석결과가 실험결과를 매우

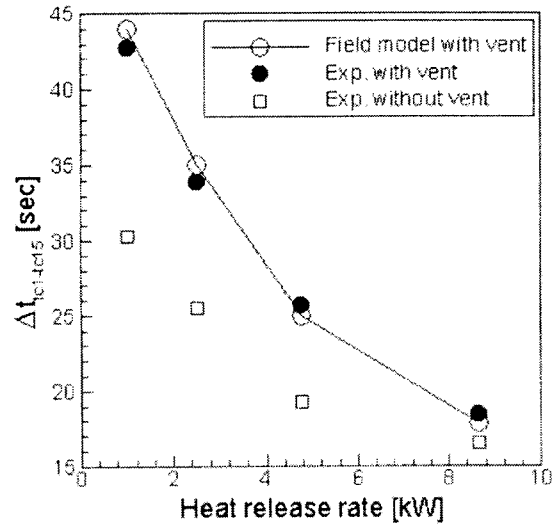


Fig. 5 Comparison of smoke spreading time

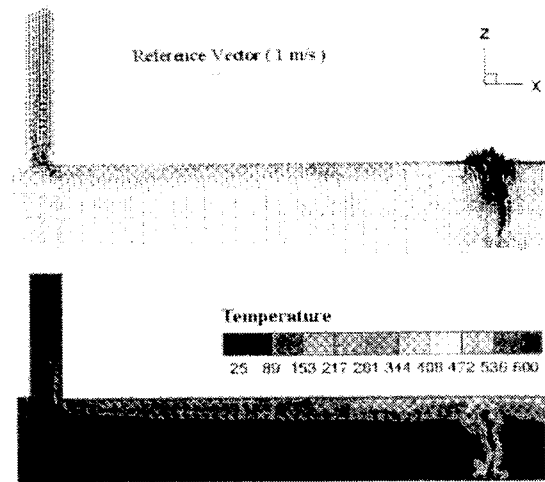


Fig. 6 Instantaneous velocity and temperature field at 60sec(D=125mm)

잘 예측하고 있으며 오차는 1초 이내로써 매우 신뢰할만한 결과를 제공하였다. 또한 배기구가 있는 경우와 없는 경우를 비교하였을 경우 발열량이 작은 경우 연중전파의 지연효과가 크고 발열량이 큰 경우 지연효과가 상대적으로 작다는 사실을 보여주고 있다. 따라서 터널 내 설치된 수직구에 의한 배연효과는 화원의 크기가 작을 경우 상대적 효과가 크다는 사실을 알 수 있다. 자연 배기의 효과를 정리하면 Table 2와 같다. Fig. 6은 125mm 화원에 대하여 화재 발생후 60

분 경과후의 속도경과 온도장을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직구가 있는 터널공간내의 화재 발생시 연기거동을 실험 및 수치해석적 방법을 이용하여 비교 분석하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 터널 길이 방향으로의 천장하 연층의 온도 분포와 수직 온도 분포는 연소효율에 기인한 방열량 산정의 오차로 인하여 화원의 크기가 큰 경우 수치해석결과가 실험결과에 비해 다소 상향 예측하였으나 전체적으로 신뢰할만한 결과를 제공하였으며 연층의 하강은 터널 길이에 밀접한 관련이 있다는 사실을 파악하였다.

(2) 수직구의 유무에 따른 연층진파는 화원의 크기가 클 수록 지연효과는 작아진다는 사실을 파악하였으며 본 연구에서는 최고 1.4배의 연층진파 지연효과가 있는 것으로 파악되었다.

(3) 수치해석 결과는 부분적인 차이는 있으나 전체적으로 실험결과를 잘 예측하고 있으며 터널 화재를 해석하는 유용한 도구로써 적용이 가능함을 보여주고 있다.

(4) 수직구 길이가 긴 경우 굴뚝효과(stack effect)에 의해 수직구의 배연효과가 큰 영향을 받게 되는데 향후 이에 대한 연구가 수행되어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업(M10113000012-01A2-90000600)지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Thomas, P. H., 1968, "The Movement of Smoke in Horizontal Passage Against an Air Flow," *Fire Research Station Note No. 723*, Fire Research Station, U.K.
- (2) Kennedy, W. D. and Parsons, B., 1996, *Critical Velocity: Past, Present and Future*, One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, London, U.K.
- (3) Oka, Y. and Atkinson, G. T., 1995, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires," *Fire Safety Journal*, Vol. 25, pp. 305~322.
- (4) Ingason, H., Hagglund, B. and Werling, P., 1999, "Effects of Ventilation on Smoke Spread in Tunnels," *Proceeding of the 1st International Conference on Tunnel Fire and One Day Seminar on Escape from Tunnels*, Lyon, France.
- (5) The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1988, pp. 2-1 to 2-15.
- (6) Hamins, A., Konishi, K., Borthwick, P. and Kashiwagi, P., 1996, "Global Properties of Gaseous Pool Fires," *26th Symposium on Combustion. The Combustion Institute*, pp. 1429~1436.
- (7) Quintiere, J. G., 1988, "Scaling Application in Fire Research," *Proceeding of the International Symposium on Scale Modeling*.
- (8) Lacroix, D., 1998, "The New PIARC Report on Fire and Smoke Control in Road Tunnels," *3rd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, Nice, France, pp. 185~197.
- (9) *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide*, 2000, NIST, U.S.A.