

< 논문 >

자연 및 강제 배기시의 터널 내 연기거동에 관한 실험적 연구

황철홍* · 유병훈* · 이창언* · 금성민** · 김정엽*** · 신현준***
(2004년 11월 29일 접수, 2005년 4월 28일 심사완료)

An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fire with Natural and Forced Ventilations

Cheol-Hong Hwang, Byung-Hun Yoo, Chang-Eon Lee,
Sung-Min Kum, Jung-Yup Kim and Hyun-Joon Shin

Key Words: Tunnel Fire(터널화재), Smoke Movement(연기거동), Natural Ventilation(자연배기), Forced Ventilation(강제배기)

Abstract

In order to design of emergency ventilation systems, the smoke movements in tunnel fire with natural and forced ventilation were investigated. Reduced-scale experiments were carried out under the Froude scaling with novel fire source consisting many wicks. Temperature profiles were measured under the ceiling and vertical direction along the center of the tunnel and poisonous gases were measured at emergency exit point in the natural ventilation case. In forced ventilation, temperature profiles were measured with various flow rate to obtain critical velocity. The results showed that the interval of emergency exit having 225m was estimated reasonably through the measurements of temperature variation and poisonous gas in the natural ventilation. In the case of forced ventilation, the temperature distribution near fire source is remarkably different from that of natural ventilation. Also, the critical velocity to prevent upstream smoke flow has the range of 0.57m/s between 0.64m/s. Finally, it was also identified that although the increase of flow rate can suppress the backward flow of smoke to upstream direction, brings about the increase of flame intensity near stoichiometric fuel/air ratio.

1. 서론

최근 산업발전에 따른 교통량 증가에 대처하기 위해 도로나 철도의 개선 및 신설 공사가 활발하게 진행되고 있으며, 이들 공사는 단순한 지역간의 연결에 그치지 않고 주행성, 안정성 및 환경영향을 고려하여 건설되고 있다. 국내에서는 산

악 지형이 많은 지리적 특성상 장대터널의 수요가 급증하고 있다. 특히, 장대터널은 환경 및 여러 가지 효율 측면에서 많은 장점을 가지고 있어 향후 지속적인 수요가 예상되는 분야이다.

그러나 지하공간을 활용하는 장대터널은 반 밀폐적 구조로 인하여 화재시 배연에 많은 어려움이 있으며, 고온의 유독성 연기로 인하여 호흡과 시야의 장애 및 심리적인 공포감으로 대형 사고를 초래할 수 있다. 또한 터널 길이가 증가할수록 피난과 소화활동이 용이하지 않아 인명안전에 상당한 위협적 요인이 되고 있다. 따라서 장대터널의 수요가 급증하는 국내현황을 고려하면, 장대터널 화재 시에 발생하는 여러 현상들을 체계적으로 규명하여 터널의 방재설비, 환기설비 및

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail: chelee@inha.ac.kr
TEL: (032)867-4522 FAX: (032)868-1716
** 회원, 한라대학교 기계자동차공학부
*** 회원, 한국건설기술연구원, 화재설비연구부

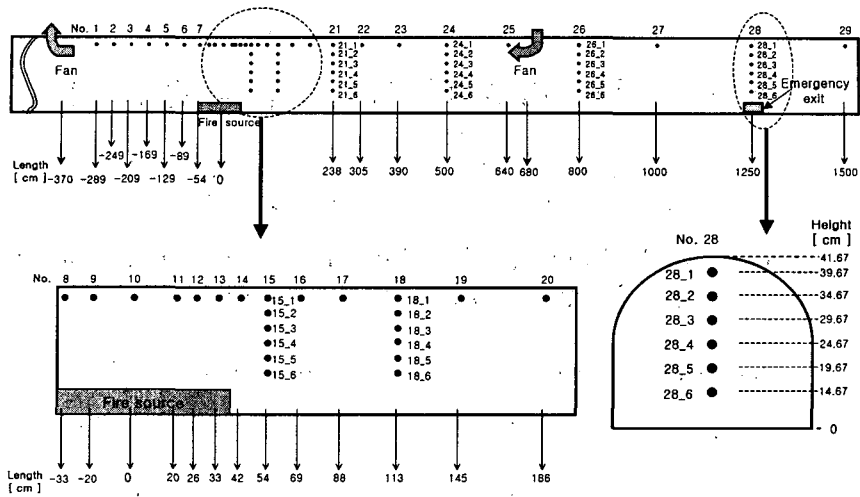


Fig. 1 Schematic of the experimental setup and thermocouples positions

피난설비를 설계하는데 필요한 자료를 구축하는 것은 매우 시급한 과제라 할 수 있다.

일반적으로 터널 화재시 열 및 연기를 포함한 연소 생성물의 거동(이하에서는 간략히 연기로 칭함)을 제어하는 방법에는 자연적인 환기력을 이용한 자연배기 방식과 터널 내부에 설치된 제연설비를 이용하는 강제배기 방식이 있다. 터널 화재에 관한 기존 연구로서 Kim⁽¹⁾ 등과 Chow⁽²⁾ 등은 수직구를 통한 자연배기 터널에서의 수치적, 실험적 연구를 통해 발열량에 따른 연기의 거동 특성에 대해 파악하였다. 그리고 Lee⁽³⁾ 등은 자연배기에서 터널 단면의 형상 변화에 따른 연기의 거동특성을 파악한 바 있다. 또한, Kim⁽⁴⁾ 등과 Atkinson⁽⁵⁾ 등은 터널의 구배에 따른 연기의 거동을 수치해석 및 모형터널 실험을 통해 검토하였다. 강제배기에 관하여 Thomas⁽⁶⁾ 등과 Kennedy⁽⁷⁾ 등이 실험 및 Froude 수에 기초한 이론해석을 통해 장대터널 내의 강제 배기시에 발열량과 임계속도(Critical velocity)간의 관계식을 도출한 바 있다.

기존 연구들을 살펴보면 대부분은 비교적 길이가 짧은 모형터널을 대상으로 연구를 수행되었으나,⁽¹⁻⁴⁾ 연기의 확산 및 하강 특성은 터널 길이에 민감하기 때문에 장대터널에 대한 유효한 실험결과를 얻기 위해서는 정확한 축소모형에서의 실험이 요구되어 진다. 또 화재 실험에서 가장 중요한 변수인 화원에 대한 정확한 제어도 매우 중요

하다. 화재 시 발생하는 화염은 공업적으로 이용되는 일반 화염과는 다르게 주로 가연물질의 기화 및 부력 특성에 의해 지배된다. 기존에 모형화원으로 많이 사용되는 Plume 화원은 특정한 형상의 용기에 액체연료를 공급하여 화염을 발생시키는 것이다. 이러한 화원은 실제 화재에서와 유사한 거동을 갖는 화염을 생성시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 터널모형 실험을 체계적으로 수행하기 위해 필요한 모형화원의 화염길이, 열 방출률 및 연기 발생률 등의 여러 인자들을 독립적으로 일정하게 제어하는 것이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에 건설 예정인 실제터널의 축소모형을 대상으로, 화원의 여러 인자들을 독립적으로 제어할 수 있는 모형화원을 이용하여, 자연배기 상황에서 사람들이 대피할 수 있는 비상출구 위치의 적절성을 검토하고자 한다. 또한 제원이 확정된 터널에서 연기의 역류를 방지하여 대피시간을 확보하기 위한 제연설비의 설계에 필요한 기초적인 자료를 획득하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 원형 및 모형터널의 개요

본 연구에서 대상으로 하는 건설 예정의 장대터널(이하, 원형터널)은 높이 7.5m 및 폭 10.2m이

며, 화재가 발생할 경우 대피할 수 있는 비상출구(Emergency exit)는 225m 간격으로 설치되어 있다. 본 실험의 가상 시나리오는 이 터널의 비상출구 바로 근방에서 버스(Bus)에 화재가 발생한 경우로, 이 경우 화원에서 양쪽의 비상출구까지의 총거리는 450m이기 때문에, 실제 터널에서 관심 대상의 터널길이는 600m로 하였다. 모형터널은 원형터널을 1/18로 축소한 것으로 길이 33.4m, 최대 높이 0.417m, 폭 0.566m의 크기를 갖는다. Table 1은 실험에 이용한 모형터널의 제원 및 다음에 기술하는 Froude 수 상사를 적용하여 계산한 모형화원의 열 방출률을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 실험장치의 개요를 나타낸 것으로서, 중앙의 비상출구에 버스 차량을 축소한 모형화원이 설치되어 있으며, 이 화원을 기준으로 약 12.5m 떨어진 곳에 비상출구가 설치되었다. 모형터널의 재료는 5mm 두께의 강화 아크릴을 이용하였으며, 화원근방의 터널 재료는 화원에서 발생하는 열에 의한 변형을 막기 위하여 3mm 두께의 철판을 사용하였다. 화재의 거동을 계측하기 위하여 Fig. 1의 점으로 표시된 위치에 열전대를 설치하였으며, 화원 근처에는 R-Type 열전대를 그 외 지역에는 T-Type 열전대를 사용하였으며, 좌측으로부터 순서대로 번호가 기입되어져 있다. 연기의 수평방향 이동속도를 계측하기 위해 천정에서 약 2cm 떨어진 곳에 비상출구까지 수평방향의 열전대를 등비 간격으로 설치하였으며, 연기의 수직분포를 파악하기 위해 화원과 비상출구 사이의 6곳에 수직방향 열전대를 5cm 간격으로 배치하였다. 강제배기의 실험을 위하여 화원을 중심으로 양쪽에 설치된 팬을 이용하여 외부공기의 유입과 배출을 유도하였다. 이때 팬의 위치는 강제배기 조건에서 연기가 역류되지 않는 충분한 거리에 설치되었다. 또한 공기의 공급은 밸브 및 유량계에 의해 제어되었으며, 유량에 따른 화원 근처의 단면 평균유속을 측정하기 위하여 Hot-wire 방식의 유속계(KANOMAX: Model 6112)를 사용하였다.

2.2 Froude 수 상사 및 화원의 결정

2.2.1 Froude 수를 이용한 상사법칙

화재에서의 유동특성은 부력에 의해 지배되어지며, 주로 부력과 관성력의 비에 의존한다고 알

Table 1 Model tunnel using Froude scaling

	Prototype tunnel	Model tunnel
Horizontal length	600 m	33.4 m
Vertical length	7.5 m	0.417 m
Location of emergency exit	225 m	12.5 m
Heat release rate (for a bus)	20 MW	14.55 kW

려져 있다.⁽⁶⁾ 그러므로 Froude 수를 이용한 유동의 동역학적인 상사(Similarity)를 통해 원형과 모형사이의 상관관계를 도출할 수 있다.

Froude 수는 식 (1)과 같이 표현되며, 이 Froude 수를 이용한 속도, 시간 및 발열량의 상관관계는 식 (2)-(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Fr_m = \frac{V_m^2}{gL_m} = \frac{V_p^2}{gL_p} = Fr_p \quad (1)$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2} = \sqrt{\alpha} \quad (2)$$

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{L_m/V_m}{L_p/V_p} = \sqrt{\alpha} \quad (3)$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{5/2} = \alpha^{5/2} \quad (4)$$

여기서, m 은 모형(Model)을 의미하며, p 는 원형(Prototype)을 나타낸다. 또한, α 는 길이의 비, V 는 속도, T 는 시간, Q 는 발열량을 의미한다.

2.2.2 화원의 설계

화재시 발생하는 연기의 거동은 화원의 분포 위치, 크기, 열 방출률 및 스모크 발생률 등 여러 가지 화원의 특성에 따라 매우 달라지며, 이를 제어하기 위한 제연설비의 운전조건도 역시 매우 달라진다. 이러한 화재 거동을 정확히 파악하기 위해서는 가능한 위와 같은 화원의 변수들을 독립적으로 가변시킬 수 있는 화염 발생장치(이하, 모형화원)가 요구된다. 기존의 많은 연구들에서는 특정 크기와 형상을 갖는 용기에 액체 연료를 공급하고, 액체 표면에서 기화하는 연료에 의해 화염의 형성되는 Plume 화원을 이용하였다. 그러나 이 경우에는 시간 경과에 따른 기화율의 변화로 인해 열 방출률, 화염 길이 등의 제어가 어렵고, 연료 소모에 따른 화염 기부(Base)의 위치변화로 인하여 화재의 특성이 시간에 따라 변하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 모형화원의 문제

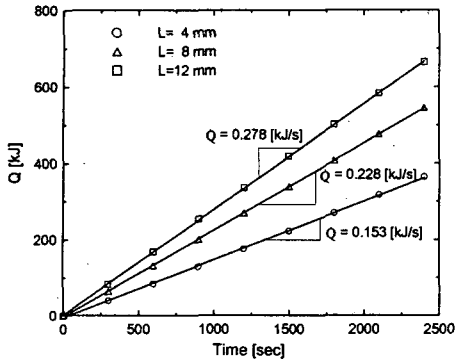


Fig. 2 The variation of heating value for one wick

점을 보완하기 위하여 시간에 따른 액체 연료의 기화율 및 화염 길이를 거의 일정하게 지속시킬 수 있는 램프 심지(Wick) 화염을 사용하였다.

Fig. 2는 약 5mm의 지름을 갖는 심지 1개에 대한 누적 열 방출량(Q)을 도시한 것이다. 이 열 방출량은 각 시간에서의 연료 소모량을 전자저울로 측정하여 완전연소로 가정하고 산출한 것으로, 연료는 43.12kJ/g의 발열량을 갖는 등유를 사용하였다. 화재 실험에서 연료의 선택에 따라 연기의 발생량과 조성이 차이를 보일 수 있으나, 연기의 전달은 농도차에 의한 확산보다 화염대의 열발생에 따른 부력현상으로 인한 대류에 의해 주로 지배된다. 따라서 상사법칙이 적용된 열 발생률을 기준으로 실제 화재에 대한 모형실험은 연기의 거시적인 이동특성을 검토하는데 타당할 것으로 사료된다.^(8,9) 그림에서 특정 심지 높이에서의 열 방출률(\dot{Q})은 Plume 화원과는 다르게 시간 경과에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. 그리고 심지 높이에 비례하여 열 방출률도 증가함을 알 수 있다. 그리고 정량적으로 측정하지는 않았지만 촛불 화염에서 볼 수 있듯이 심지 높이에 따라 화염 길이는 커지며, 스모크 발생량도 증가함을 확인하였다. 단, 심지 높이에 따른 열 방출률, 화염 길이 및 스모크 발생량 간에는 특정한 관계가 있을 것으로 추측되어 추후 연구를 수행할 예정이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 실험 결과를 바탕으로 제작된 모형화원을 나타낸 것이다. 이 모형화원은 버스 화재를 가정하여 실제버스의 길이를 축소한 것으로 직육면체의 강철 상자에 연료인 등유를 넣고, 상판에는 필요한 개수의 심지를 등 간격으로 삽입하여, 모형 화재의 분포면적, 화염 길이 및 열

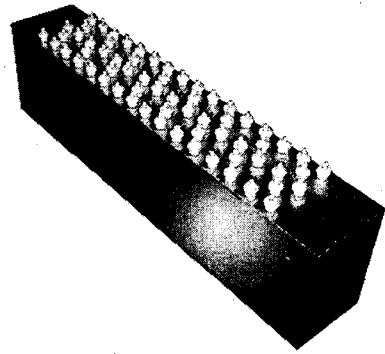


Fig. 3 Fire source using wicks



Fig. 4 Photograph of a smoke using wicks

방출률을 조절할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 모형터널 내에서 대형버스의 화재에 상응하는 열 방출률 14.55kW를 구현하기 위해 지름 5mm, 높이 8mm의 심지 화염을 80개 설치하였다. 이때 심지 개수의 증가로 인한 불완전 연소를 고려하기 위하여 연소효율은 0.8로 가정하였다. 기존의 대부분의 연구에서는 연소효율을 0.7로 가정⁽¹⁰⁾하고 있으나, 본 연구에서 사용하는 화원의 경우 기존 Plume에 비해 완전연소의 가능성이 크기 때문에 보다 높은 연소효율을 부여하였다. 이에 대한 명확한 검증은 추후 수행할 예정이다.

Fig. 4는 위 화원에서 3개의 심지만을 사용한 경우의 연기 거동을 7W급 Ar-Ion 레이저를 이용하여 직접 촬영한 결과이다. 그림에서 심지 화염에서 발생한 연기는 부력에 의해 상승하여 터널 천정의 벽면을 따라 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이러한 연기의 거동은 기존의 연구들에서 이용된 Plume 화원에 의한 연기거동과 거의 유사하며, 시간이 경과하여도 연기 발생량은 거의 일정함을 확인하였다.

위와 같은 결과로부터 심지를 이용한 화원은 심지의 직경, 높이 및 개수, 분포 위치 등의 적절한 조절을 통하여 화염 길이, 열 방출률, 화재의

분포면적 및 강도(열 방출률/화재면적), 연기 발생량 등을 제어할 수 있기 때문에 화재 연구를 위한 모형화원으로 매우 유용할 것으로 기대된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자연배기에서의 연기거동

화원에서 발생한 연기는 부력효과에 의해 상승하여 터널 천정을 따라 이동하며, 이동 중 천정으로 열손실이 발생하여 밀도가 증가하게 되면 점차 하강을 하게 된다. 이 연기가 하강하는 시점 및 거리는 화재 발생시 대피를 위한 시간, 가시거리, 유독성 물질로부터의 안전성 확보 측면에서 매우 중요한 정보이다. 자연배기의 경우 대피할 수 있는 시간을 확보하기 위해서는, 사람이 높이까지 연기가 하강하는 시간 및 거리를 예측할 수 있어야 하며, 이 정보는 비상출구의 위치 선정에 매우 중요한 자료로 활용된다. 터널 화재시의 화재 확산시간 및 비상출구 간격에 대한 기준은 기관마다 조금 다르나, 미국 화재방재협회 규격(NFPA-130)에서는 화재 인지시간을 1분 정도로 가정하여 6분 이내에 대피가 완료되기 위해서는 비상출구 간격은 250m로 하고 있으며, 국립방재연구소(NIDP)에서는 4분 동안 대피할 수 거리 250m 기준으로 비상출구의 위치를 선정하고 있다. 본 절에서는 모형터널 실험을 통해 원형터널의 비상출구 위치의 적합성에 대해 검토하고자 한다.

Fig. 5는 자연배기 상태에서 천정 바로 밑에서 측정된 온도들의 수평방향 분포를 도시한 것으로,

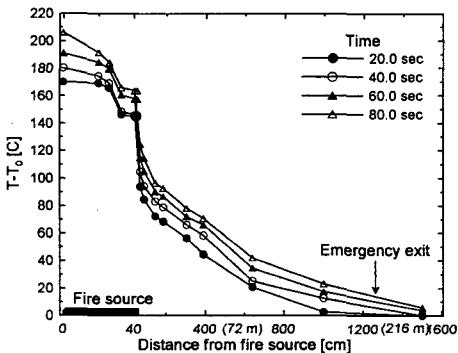
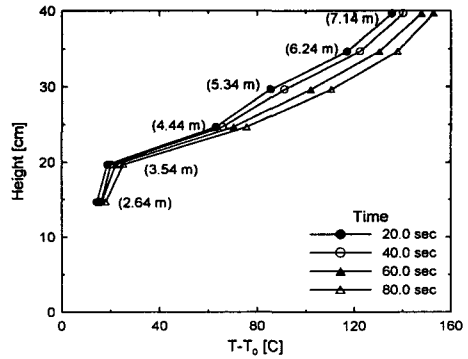
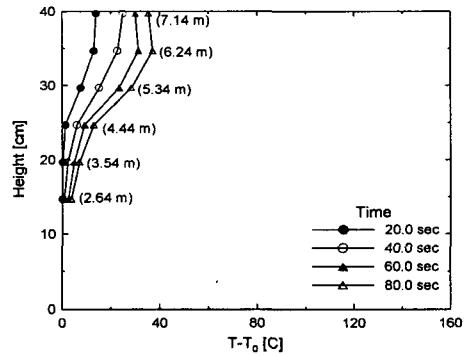


Fig. 5 Temperature distribution of ceiling direction in natural ventilation

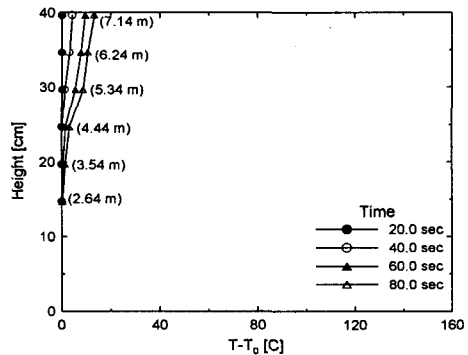
로, 측정 시간은 화재 발생을 기준으로 20초 간격으로 80초까지 측정하였다. y축은 터널 내 연기 온도에서 주위 온도(25°C)를 뺀 온도차이다. x축은 모형터널의 화원에서 비상출구 방향 거리를 나타내며, 괄호안의 수치는 대응하는 원형터널의 길이이다. 화원 근처(0~42cm)는 이해를 돕기 위해 확대 도시하였다. 온도분포를 보면 화원의



(a) Position of 54cm



(b) Position of 800cm



(c) Position of 1250cm

Fig. 6 Temperature distribution of vertical direction in natural ventilation

상부에서 온도차가 최고값을 나타내며, 시간 경과에 따라 점차 높아져 화재 발생 후 20초에서 170°C이었던 것이 80초가 지나면서 210°C까지 상승한다. 이 온도분포는 화원을 벗어나면 바로 100°C까지 급격히 떨어진 후에 다시 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 화원 상부가 현저히 주변보다 고온이 되는 이유는 연기의 상승과 함께 화원으로부터 발생하는 미소한 복사열에 기인하는 것으로 사료된다. 그리고 비상출구 위치인 1250cm에서는 화재 발생 후 20초까지는 아무런 영향이 없으며, 40초가 경과하면서 대략 10~20°C의 온도 상승이 있다. 이를 통해 터널 천정에는 화재 발생 후 약 40초에 연기가 비상출구 위치까지 도달함을 알 수 있다.

Fig. 6은 화원 중심에서 비상출구 방향으로 54cm, 800cm 및 1250cm 떨어진 위치에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시한 것이다. 측정시간은 수평방향의 온도분포에서와 같이 화재

발생 후 20초 간격으로 80초까지 측정하였다. 각 그림에서 x축은 연기 온도에서 주위 온도를 뺀 온도차를 나타낸다. y축은 모형터널의 높이를 나타내며 팔호안의 수치는 상응하는 원형터널의 높이를 의미한다. Fig. 6(a)는 화원에서 54cm 떨어진 곳의 수직 온도분포를 나타낸 것이다. 온도차는 모든 시간에서 천정에서 하부로 내려갈수록 급격히 작아지며, 또 모든 위치에서 시간 경과와 더불어 점진적으로 상승하고 있다. 예로, 화재 발생 후 20초에는 천정 근처의 온도는 130°C, 사람 키 높이에서는 약 15°C 정도가 상승하며, 80초가 지나면 천정은 약 150°C, 하부에서는 약 20°C까지 상승함을 알 수 있다. 이들 온도 상승은 화원과 매우 가까운 위치에서 측정한 값이기 때문에 고온의 연기이동과 더불어 화염의 복사열이 복합적으로 작용한 결과에 기인한다고 할 수 있다.

Fig. 6(b)는 화원과 비상출구의 중간영역인 800cm 떨어진 곳의 수직 온도분포를 나타낸 것이다. 화재 후 20초의 온도차를 보면 천정으로 갈수록 커지나, 시간이 경과함에 따라 최고 온도차는 천정 근처보다 다소 밑에 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 천정을 따라 이동하는 연기가 시간이 경과하면서 열손실에 의해 온도가 낮아져 점차 하강하고 있음을 보여주는 것이다. 이곳에서의 시간 경과에 따른 온도변화는 화원 근처인 54cm에서의 경향과 유사하나, 그 절대치에서는 많은 차이가 있다. 즉, 이 지점에서는 화재 발생 후 80초에 천정 근처는 약 40°C, 사람 키 높이에서는 약 2~3°C 상승하여, 화원 근처의 대응하는 150°C, 20°C에 비해 매우 작아진다. Fig. 6(c)는 비상출구 위치인 x=1250cm의 결과를 도시한 것이다. 이 지점에서의 천정 근처 온도는 20초 후부터 약간씩 증가하여 80초에는 최대 10°C까지 상승하나, 하부에서는 화재 발생 후 80초가 지나도 거의 변하지 않는 것처럼 보인다. 또한 Fig. 6(b)와는 다르게 천정 근처에서 최고의 온도가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 약 10°C 정도의 작은 온도차로 인하여 천정과 거의 전도 열손실이 크게 작용하지 않기 때문으로 사료된다.

시간에 따른 연기의 이동특성을 보다 상세히 검토하기 위해 Fig. 7에 비상출구 위치에서의 시간에 따른 온도 및 유독가스의 측정결과를 도시하였다. Fig. 7은 비상출구 위치에서 사람 키에

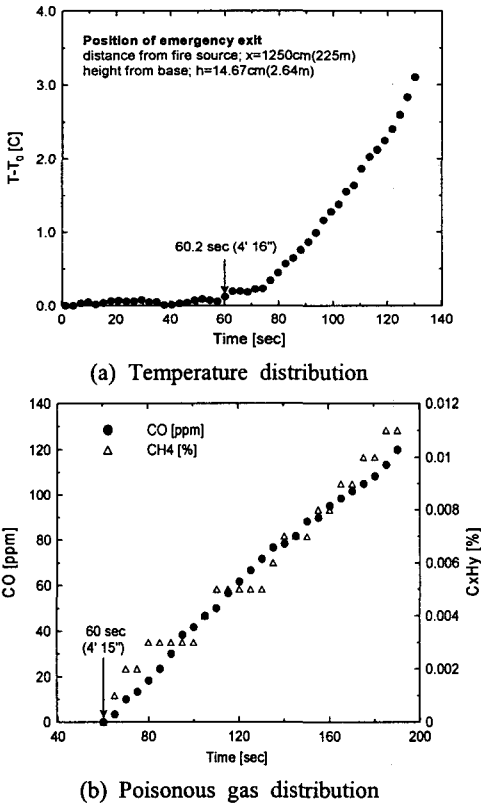


Fig. 7 Temperature and poisonous gas distribution in emergency exit

해당하는 높이 14.67cm 지점에서 시간에 따른 온도차 및 유독물질인 CO, CH₄(미연 탄화수소들을 CH₄로 환산한 값) 농도를 도시한 것이다. Fig. 7(a)의 온도차 분포에서 초기 미소한 온도변화는 외부공기의 교란에 의한 것으로 판단되며, 화재 발생 후 약 60초 후에는 온도가 일정하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러나 온도차는 80초에서 0.5℃, 120초에서 2℃로 매우 미소하다. Fig. 7(b)는 미연가스인 CH₄ 농도와 CO 농도를 측정된 것으로, CO 농도도 온도와 같이 화재 발생 후 60초가 지나면 감지되기 시작한다. 한편, 그 농도의 증가 경향은 온도와는 다르게 80초 후에 20ppm에서 200초 후에 100ppm까지 급격하게 증가하고 있다. 이 CO 농도가 급격히 증가하는 이유로는 시간 경과와 더불어 터널 내의 산소량 감소로 인한 불완전 연소가 더욱 활발히 진행된 결과라 여겨진다. 이 결과로부터 화재 감지는 CO와 같은 유독가스에 의한 감지가 유리하며, 온도에 의한 감지는 화원에서 멀어질수록 그 변화가 미소하기 때문에 주의가 요망됨을 알 수 있다. CH₄ 농도의 경우에도 시간에 따른 변화 경향은 CO의 경향과 동일함을 알 수 있으나, 본 측정에서는 센서의 해상도가 낮아 CO와 같이 시간에 대해 선형적으로 비례하는 값은 얻지 못하였다.

위 결과들로부터 본 모형터널에서는 화재 발생 후 60초가 지나면서 거리 1250cm에 위치하는 비상출구의 사람 높이까지 연기가 확산됨을 알 수 있었다. 앞에서 언급한 실제 장대터널에서 비상출구의 간격 250m를 대피하는데 걸리는 시간 4~6분을 본 모형터널로 환산하면 비상출구 거리 1250cm를 51~77초 안에 대피해야하는 것에 해당한다. 따라서 위 모형터널 실험으로부터 원형터

널의 비상출구 위치는 제연설비가 가동하지 않을 시에도 비교적 적절한 것임을 알 수 있다.

3.2 강제배기에서의 연기거동

장대터널의 화재시 연기유동의 제어를 위하여 터널 내부의 상류에서 제연설비를 통해 강제배기를 수행하게 된다. 일반적으로 임계속도(Critical velocity)는 화원근처에서 연기가 역류되지 않는 순간에 환기팬이 설치된 상류 위치에서의 단면 평균유속을 의미한다. 그러나 이러한 의미의 임계속도는 터널형상, 화원의 배치 및 크기 등에 의해 상당히 다른 값을 갖게 된다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서는 연기의 역류현상에 대한 보다 근본적인 접근을 위해 상류의 제연설비를 이용하여 시간에 대해 일정량의 유량을 공급하고 각 유량에 대한 화원근처에서의 단면 평균유속을 임계속도로 정의하였다.

모형터널에서 제연설비 가동시 터널 내의 연기거동 및 임계유속을 측정하기 위하여, Fig. 1에서와 같이 우측에서는 제연설비를 통해 외부공기를 유입해주고, 좌측에서는 터널 내부의 공기를 외부로 배출하도록 하였다. Fig. 8은 화원 근처에 해당되는 수평 길이 54cm에서의 제연설비에 의해 공급되는 공기의 단면 평균유속을 측정된 것이다. 이때 평균유속은 각 유량에 대해 터널 단면의 중심부에서 등 간격으로 10개의 위치에서 측정하여 평균하였다. 유량이 1000 l/min ~2600 l/min으로 변할 때 단면의 평균 유속(U)은 0.35~0.95 m/s로 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 본 연구에서는 1000 l/min에서 2600 l/min까지 유량을 순차적으로 증가시키면서 화원 근처의 연기

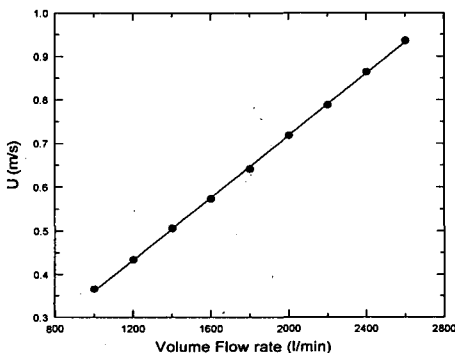


Fig. 8 Average velocity of cross section

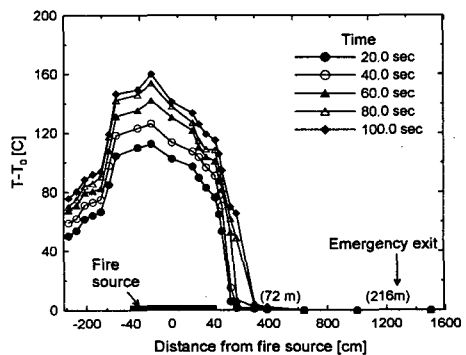
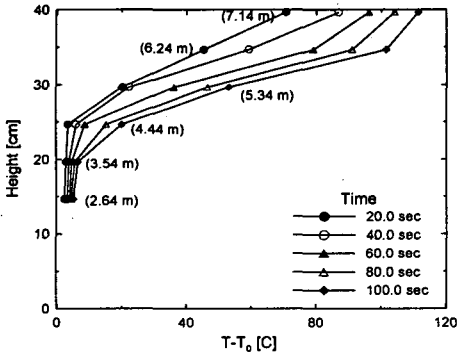


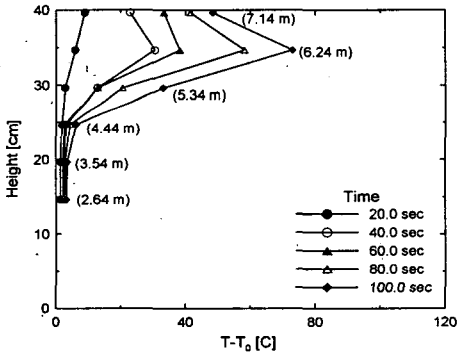
Fig. 9 Temperature distribution of horizontal direction at 1400 l/min

역류현상을 온도측정을 통해 관찰하였다.

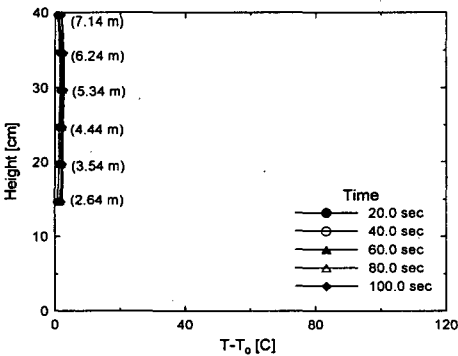
Fig. 9는 강제배기의 공급 유량이 1400 l/min (0.50m/s)일 경우의 터널 천정에서의 수평방향 온도분포를 시간에 따라 도시한 그림이다. 그림에서 x축은 화원으로부터의 수평방향 거리, y축은 온도차를, 화원 근처(-54~42cm)는 x축을 확대하여 도시하였다. 우선, Fig. 5의 자연배기 경우와 비교



(a) Position of 54cm



(b) Position of 113cm



(c) Position of 238cm

Fig. 10 Temperature distribution of vertical direction at 1400 l/min

해보면 화원 상부의 온도분포 및 수평방향의 온도분포에 현격한 차이가 있음을 알 수 있다. 화원 상부의 온도변화에 대해서는 이절의 끝 부분에서 종합적으로 논하기로 하고, 여기서는 수평방향의 온도분포를 이용하여 강제배기시의 연기 거동을 고찰하고자 한다. 우선, 임의 시각의 온도분포를 보면 화원에서 조금 떨어진 곳에서 급격히 강하하고 그 상류에서는 온도차가 거의 없어 화재의 영향이 나타나지 않음을 알 수 있다. 시간에 따른 온도변화를 보면, 시간이 경과함에 따라 상류 방향으로 온도가 상승하면서 온도구배가 감소함을 알 수 있다. 이는 공급유량이 1400 l/min인 경우에는 강제배기에도 불구하고 상류 방향으로 많은 양의 연기가 역류됨을 의미한다.

Fig. 10은 Fig. 9의 강제배기 유량이 1400 l/min인 경우에 연기가 역류되는 정도와 역류 위치를 검토하기 위하여, 수평 길이 54cm, 113cm 및 238cm에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시한 것이다. Fig. 10(a)를 보면 터널 천정 근처에서 시간이 지남에 따라 최대 110°C 정도의 온도 상승을 보이고 있고, 모형터널의 높이 15cm(원형 높이 2.64m)에서도 5~6°C 정도의 온도 상승을 보이고 있다. 이를 통해 수평방향으로 54cm가 떨어진 위치에서는 터널의 하부로 연기의 역류가 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 x=113cm인 곳의 수직 온도분포를 도시한 것으로, 천정 근처에서는 최대 80°C 정도의 온도상승을 보이며, 하부에서는 대략 2~3°C의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 10(c)는 수평 길이 238cm에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시한 것으로 터널 천정 근처와 하부에서의 온도변화가 거의 없음을 볼

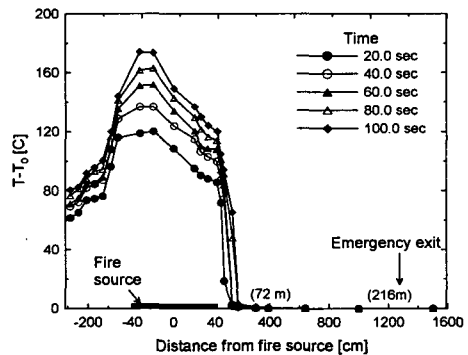


Fig. 11 Temperature distribution of horizontal direction at 1600 l/min

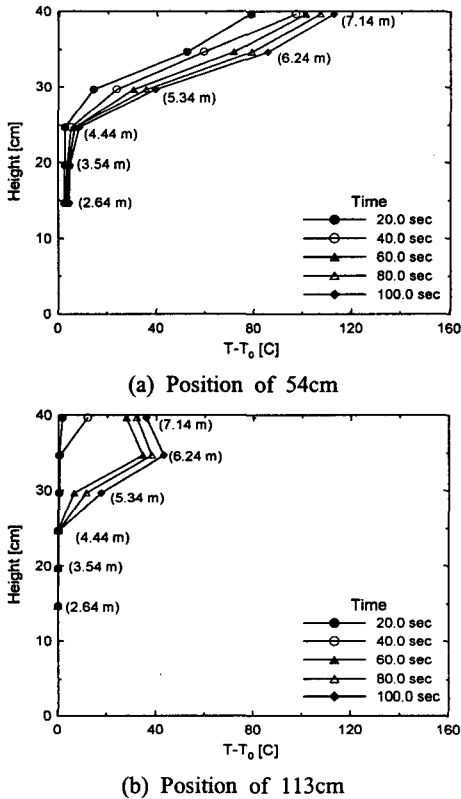


Fig. 12 Temperature distribution of vertical direction at 1600 l/min

수 있다. 이 결과를 통해 제연설비의 유량이 1400 l/min인 경우에 터널 천정 근처에서의 역류가 일어나는 범위는 수평 길이 113cm와 238cm 사이에 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 강제배기의 공급 유량이 1600 l/min (0.57m/s)인 경우의 터널 천정에서의 수평방향 온도분포를 도시한 것이다. 이 경우의 전반적인 온도분포 및 시간에 따른 변화 경향은 유량 1400 l/min인 Fig. 9와 비슷하다고 할 수 있다. 차이점으로는 강제배기 유량이 증가한 경우에는 화원에서 조금 떨어진 곳에서 온도가 급격히 강하하며, 시간이 경과함에 따라 상류방향으로 온도가 조금씩 증가하기는 하나 매우 미소함을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11의 연기거동을 보다 자세히 검토하기 위하여 x=54cm 및 113cm 떨어진 곳의 수직 온도분포를 도시한 것이다. Fig. 12(a)에서 보면 화원에서 조금 떨어진 곳에서는 터널 천정 근처의 온도가 화재 후 20초에는 80℃이며, 80초 후에는 130℃로 상승하고 있어, 연기의 역류를

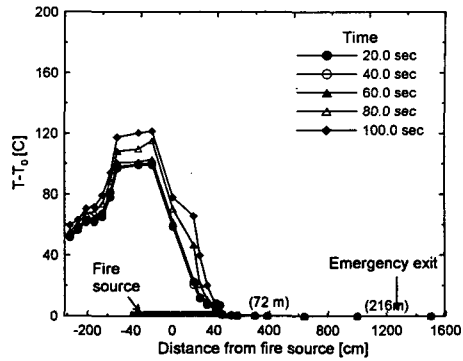


Fig. 13 Temperature distribution of horizontal direction at 1800 l/min

확인할 수 있다. 그러나 터널 하부의 온도변화는 거의 없어 연기의 확산이나 하강이 100초 이내에는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12(b)의 결과도 마찬가지로, 터널 천정 근처의 온도는 최대 40℃까지 상승하는 것으로 보이나, 터널 하부의 온도는 거의 변하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 제연설비에 의해 유입되는 총 공기유량이 1600 l/min(0.57m/s)일 때 화원의 터널 천정 근처에는 미소량의 연기가 역류되고 있으나, 사람 키 높이에 해당하는 터널 하부에서는 강제 배기로 인해 연기가 역류되거나 하강되지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 강제배기의 공급 유량이 1800 l/min (0.64m/s)인 경우에 터널 천정 근처에서의 수평방향 온도분포를 도시한 것이다. 화원 중심부의 온도는 시간에 따라 점차적으로 증가하나, 화원 우측에는 온도변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 즉 강제배기의 공급 유량이 1800 l/min으로 증가함에 따라 화원에서 연기의 역류가 전혀 발생되지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 실험조건에 해당되는 터널 내의 임계속도는 0.57(1600)~0.64m/s(1800 l/min)의 범위에 존재함을 짐작할 수 있다.

여기서 Figs. 5, 9, 11 및 13을 이용하여 화원 상부의 온도분포 변화를 살펴보고자 한다. 우선 자연배기의 경우 화원 상부의 온도분포는 화원을 중심으로 대칭분포를 보이며, 최대 온도차는 시간 경과에 따라 점점 증가하여 화재 후 20초에서 80초 사이에 170℃에서 210℃까지 상승한다. Figs. 9, 11 및 13의 강제배기의 경우에는 우선, 전체적인 온도분포 형상이 강제배기에 의해 하류

로 밀리면서 비대칭 구조를 나타낸다. 또한 시간 경과에 따른 온도상승은 자연배기와 유사하나, 최고 온도차에는 차이가 있음을 알 수 있다. 공급 유량이 1400 l/min의 경우에는 화재 발생 후 80초에서 최대 온도차가 160℃로 자연배기의 210℃에 비해 낮아짐을 알 수 있다. 그 이유로는 강제배기에 의한 대류 열전달에 의해 화원 상부의 온도가 낮아진다고 할 수 있다. 그러나 공급 유량이 1600 l/min인 경우에는 최고 온도차가 175℃로서, 대류에 의한 열전달이 더 많아짐에도 불구하고 더 높은 온도상승을 나타낸다. 마지막으로 1800 l/min의 경우는 120℃로 모든 조건 중 가장 낮은 온도차를 보이고 있어 강제유량에 따라 터널천정의 최고 온도차가 비선형적인 결과를 나타냄을 알 수 있다. 위 결과로부터 강제 대류에 의한 열전달뿐만 아니라, 화원 주변으로 공급되는 산소량의 변화가 최고 온도의 변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉 제연설비의 공급 유량이 증가할수록 상류로의 연기 확산은 억제되지만, 1600 l/min의 조건과 같이 공기 공급량이 이른 연료-공기비에 접근할수록 화염 강도가 커지게 되어 하류 방향으로 화재 전파를 촉진하는 부작용을 초래할 수 있다. 이에 대한 보다 상세한 연구는 현재 진행 중에 있다.

4. 결론

본 연구에서는 건설 예정인 실제터널을 축소한 모형터널을 대상으로 자연배기 및 강제배기 조건에서의 터널 내의 온도 및 유독가스 측정을 통한 연기거동에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 새로운 방식의 심지화원을 이용하여 화재 모사를 위한 화염 길이, 열 방출율, 연기 발생량, 화재의 분포면적 및 강도 등을 효과적으로 제어할 수 있었다.

(2) 건설 예정인 터널에서 비상출구의 위치(225m)는 자연배기 조건에서 비교적 적절함을 알 수 있었다. 또한 모형터널에서 강제배기를 적용하여 역류가 발생되지 않는 임계속도는 약 0.6 m/s에 해당되며, Froude 수 상사를 이용하면 실제 터널에서 임계속도는 2.55m/s에 해당된다.

(3) 화재 감지는 CO와 같은 유독가스에 의한 감지가 유리하며, 온도에 의한 감지는 화원에서

멀어질수록 그 변화가 미소하여 주의가 요망된다.

(4) 강제배기의 유량증가는 상류로의 연기확산을 억제할 수 있지만, 산소 공급량의 증가로 화염강도를 증가시키는 결과를 초래할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 “지하 공간전용 소화설비 및 소방방재 통합 시스템 구축에 관한 연구”의 일환으로 한국건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, S. C., Ryou, H. S., Lee, S. R. and Kim, C. I., 2002, “A Study of Smoke Movement in Tunnel Fire with Natural Ventilation,” *Transactions of the KSME B*, Vol. 26, No. 7, pp. 976~982.
- (2) Chow, W. K., 1998, “On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation,” *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 271~275.
- (3) Lee, S. R., Ryou, H. S. and Kim, C. I., 2003, “An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Aspect Ratio of Tunnel Cross Section,” *Proceedings of the KSME 2003 Autumn Annual Meeting*, pp. 115~120.
- (4) Kim, W. K. and Han, W. T., 2000, “The Study on the Burned Gas Movement Respect to Tunnel Grade During Fire Disaster,” *Proceedings of the ASHRAE 2000 Winter Meeting*, pp. 12~21.
- (5) Atkinson, G. T. and Wu, Y., 1996, “Smoke Control in Sloping Tunnels,” *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 335~341.
- (6) Thomas, P. H., 1968, “The Movement of Smoke in Horizontal Passage Against an Air Flow,” *Fire Research Station Note*, No. 723.
- (7) Kennedy, W. D. and Parsons, B., 1996, “Critical Velocity: Past, Present and Future,” *One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels*.
- (8) Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W. and

- Drysdale, D. D., 2001, "Variation of Heat Release Rate with Forced Longitudinal Ventilation for Vehicle Fires in Tunnels," *Fire Safety Journal*, Vol. 36, pp. 569~596.
- (9) Babrauskas, V. and Peacock, R. D., 1992, "Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard," *Fire Safety Journal*, Vol. 18, pp. 255~272.
- (10) Hamins, A., Konishi, K., Borthwick, P. and Kashiwagi, P., 1996, "Global Properties of Gaseous Pool Fires," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 1429~1436.
- (11) Oka, Yasushi and Atkinson, G. T., 1995, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires," *Fire Safety Journal*, Vol. 25, pp. 305~322.