

도로터널 화재발생시 연기유동에 관한 축소모형실험 연구

A Study on the Model Experiment for Smoke Flow in Road Tunnel Fire

김정엽^{*1}, 신현준², 강세구³, 안경철³

Kim, Jung-Yup • Shin, Hyun-Joon • Kang, Se-Gu • Ahn, Kyung-Chul

Abstract

In this study, smoke movement in tunnel fire with natural and longitudinal ventilation systems has been investigated. Reduced-scale experiments were carried out under the Froude scaling using 14.55kW fire source with a wick and experimental data is obtained with 1/18 model tunnel test. Temperature profiles were measured under the ceiling and vertical direction along the center of the tunnel and poisonous gas was measured at emergency exit point. The results show that refuge time for 225m intervals of emergency exit in case of natural ventilation systems is 256 seconds and critical velocity for sufficient back-layer prevention is 2.8m/s for fire strength of 20MW.

KeyWords: Tunnel fire, smoke flow, model experiment, froude scaling

요 지

도로터널내 화재가 발생한 경우 자연환기와 종류식 환기시스템에서의 연기유동에 대한 연구가 수행되었다. Froude Scaling에 기초한 1/18 축적의 축소모형실험장치가 제작되었으며, 화원으로는 연료심지를 이용한 14.55kW 규모의 연소기가 사용되었다. 화원으로부터 등비간격으로 터널천정부근과 수직방향의 온도분포가 측정되었으며, 연소가스의 농도가 피난대피구 입구에서 측정되었다. 연구결과로서 자연환기시스템에서 비상대피구가 225m 간격으로 설치되어 있을 경우 비상대피구 구간의 연기확산시간은 256초가 되며, 20MW의 화재강도에 대해 화염역류를 완전히 방지하기 위해서는 터널풍속을 2.8m/s로 형성해 주어야 한다.

주요어: 터널화재, 연기유동, 축소모형실험, Froude 축적

1. 서론

산업발전에 따른 교통량의 증가를 해소하기 위한 도로의 신규건설과 기존 도로의 개선공사가 활발하게 진행되면서 교통 효율의 향상과 도로의 직선화, 터널굴

착기술의 향상 등으로 인한 장대도로터널의 건설이 증가되고 있다.

반 밀폐적 구조를 가진 터널은 화재 발생시 효과적인 배연에 많은 어려움이 있으며 고온의 온도상승과 함께 유독성 연기로 인하여 호흡과 시야의 장애 및 심리적인

*1 비회원, 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부(jykim1@kict.re.kr)

2 정회원, 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부

3 정회원, (주)태조엔지니어링

공포감이 초래되어 터널의 연장이 증가할수록 피난과 소화활동이 용이하지 않아 인명안전에 위협적 요인이 되고 있다. 이와 같은 이유로 대형 터널은 1999년의 Mont-Blanc 터널과 Tauern 터널의 화재참사와 같은 대형 사고로 야기되어 질 수 있다 (인하대, 2003). 산악지형이 많아 장대도로터널의 건설이 증가되고 있는 국내 현황을 미루어 볼 때 터널 화재시 적절한 방재용 환기설비의 설치와 피난 대책 마련은 무엇보다 중요하다고 볼 수 있다. 일반적으로 터널 내 화재 발생시 열 및 연기의 거동을 제어하기 위한 방법으로는 자연적인 환기력을 이용한 자연배기 방식과 터널의 주요부에 제연설비를 설치하여 열과 연기를 제어하는 강제배기 방식이 적용되고 있다. 자연배기 방식에 관한 연구로는 Kim (김성찬, 2002) 등과 Chow (1998) 등이 수직구를 통한 자연배기 터널에서의 수치적, 실험적 연구를 통해 발열량에 따른 연기의 거동 특성에 대해 파악하였고, Lee (이성룡, 2003) 등이 자연배기 시에 터널 단면의 형상 변화에 따른 연기의 거동 특성을 파악한 바 있다. 또한, Kim (김원갑, 2000) 등은 터널의 구배에 따른 연기의 거동을 수치해석 및 모형터널 실험을 통해 제시한 바 있다. 한편 강제배기 방식에 관한 연구로 Kang (강신형, 2000, 2001)은 제트팬의 위치에 따른 오염물질의 환기성능을 수치해석을 통해 제시하였고, Thomas (1968) 등과 Kennedy (1996) 등은 실험이나 Froude 수에 기초한 이론해석을 통해 터널 내 강제배기 시에 발열량과 연기제어의 임계속도간의 관계식을 도출한 바 있다.

현재 국내 도로터널에서는 터널화재시 화염과 연기의 역류를 제압할 수 있는 터널임계속속 (Tunnel Critical Velocity)의 결정과 이를 실현하기 위한 제연설비설계를 위하여 국외의 연구결과를 바탕으로 한 근사적 설계 기법을 채택하고 있다. 이러한 국외 의존도를 탈피하고 도로터널의 설계조건에 부합하는 성능적 (Performance Based) 건설을 지향하기 위해서 국내대학을 중심으로 기초적인 도로터널 화재모형실험과 함께, 최근 빠른 속도로 발전하고 있는 CAE기반 열유동 수치모사기술을 도로터널 화재공학 분야에 적용하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

그러나, 도로터널 화재현상은 기류유동과 열확산, 화재와 관련된 연소화학반응을 모두 고려해야하기 때문에

해석결과의 정확성에 대한 신뢰성을 완전히 확보하지 못하고 있어 실제적인 적용에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 건설예정인 국도의 장대터널을 대상으로 제연설비의 설계안에 대한 타당성을 검증하고 유사시 이용객의 안전한 대피를 확보하기 위하여 화재 축소모형실험을 수행하고 설계안과의 비교검토를 통하여 합리적인 설계방안을 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1. 모형터널의 설계

실제 화염의 거동을 유사하게 묘사할 수 있도록 실제터널의 600m구간에 대해 1/18의 축적을 적용하여 수평길이 33.4m, 최대수직길이 0.417m, 폭 0.566m의 모형터널을 제작하였으며 (Fig. 1), 화원에서 발생하는 열에 의한 변형을 막기 위하여 길이 1.2m, 두께 5mm의 강화아크릴 (총 28개)을 사용하였다 (Photo 1).

터널 내부 연기 거동을 예측하기 위하여 화염대 근처에는 R-Type 열전대를 다른 부분에는 T-Type 열전대를 사용하였다.

Fig. 2는 제작된 모형터널의 열전대 위치를 표기한 도면으로 열전대의 위치는 점으로 표현 되어있고, 모형터널의 좌측으로부터 순서대로 번호가 기입되어져 있다.



Photo 1. Picture of the model tunnel

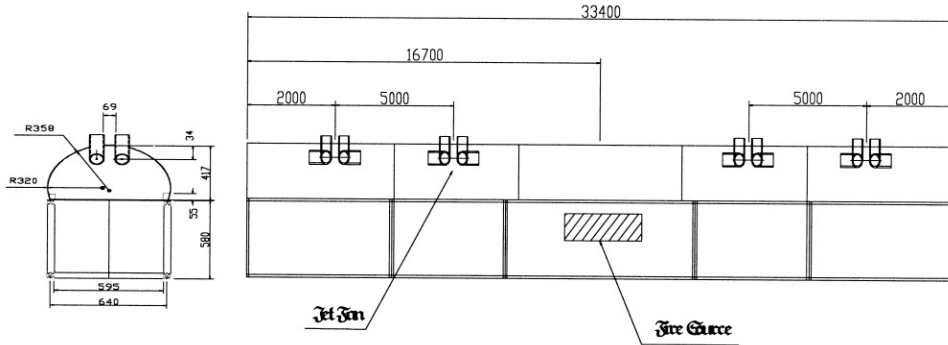


Fig. 1 Schematic diagram of the model tunnel

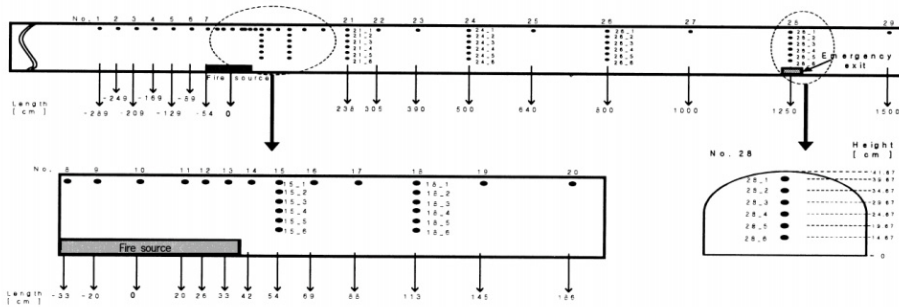


Fig. 2 Schematic diagram of the thermocouples positions

연기의 수평방향 이동속도를 예측하기 위하여 열전대는 터널 천정으로부터 약 2cm 낮은 위치에 등비간격으로 설치하였고, 또한 연기의 수직분포를 파악하기 위하여 피난연결통로 부분과 화염대 근처를 포함하여 6곳에 5cm 간격으로 균등하게 수직으로 배치하였다. 터널 내 화재가 발생할 경우 대피할 수 있는 피난연결통로의 거리는 실제 터널의 경우 225m의 간격으로 설정되어 있다. 본 연구에서는 화재 발생시 대피해야 하는 최대거리를 화원으로부터 12.5m인 곳에 설정하였다.

2.2. Froude 수를 이용한 화원의 결정

2.2.1. Froude 수를 이용한 상사법칙

Froude 수는 중력에 대한 관성력의 비를 나타내는 무차원 수로서, 터널내의 화재 발생시 부력에 의해 지배적인 영향을 받는 연기의 거동을 묘사하기 위해서는

Froude 수의 보존이 중요하며, 다음과 같이 표현된다.

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

이를 이용한 속도, 시간 및 발열량의 상관관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

여기서, m은 모형 (model)을 의미하며, p는 실제

(prototype)를 나타낸다. 또한, α 는 길이의 비, V 는 속도, T 는 시간, Q 는 발열량을 의미한다. Table 1은 Froude 수를 이용한 상사법칙을 적용한 결과이다.

2.2.2 화염의 결정

화재 시 발생하는 연기는 발열량, 화원의 크기 및 화염의 비정상적인 거동에 의해 민감하게 반응하며, 이러한 거동을 파악하기 위해서는 실제 화재 발생시와 유사한 조건에서 실험이 이루어져야 한다. 기존의 많은 연구들에서는 특정 크기와 형상을 갖는 화원에 액체 연료를 공급하고 점화시켜 얻은 Plume을 이용하였으나, Plume은 화원의 형상 및 크기에 따라 화염 및 연기의 거동뿐만 아니라 발열량과 같은 연소의 전반적인 특성이 크게 달라지는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 연구의 단점을 보완하기 위하여 시간에 따라 화염의 길이, 연기 발생량 및 액체연료의 기화를 일정하게 발생시키기 위하여 특정 단면적을 갖는 심지를 사용하였다.

Fig. 3은 약 5mm의 지름을 갖는 심지 1개에 대한 발열량을 측정된 것으로 연료는 43.12kJ/g의 발열량을 갖

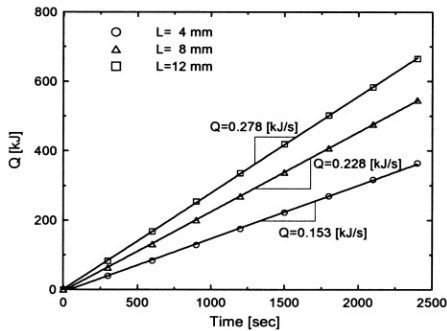


Fig. 3 The heating value for one wick

Table 1. The results using froude scaling

구 분	실제터널	모형터널
터널 수평 길이	600 m	33.4 m
터널 수직 길이	7.5 m	0.417 m
젯팬 풍량	2,209m ³ /min	1.6m ³ /s
화재강도 (대형버스기준)	20 MW	14.55 kW
터널풍속	2.3m/s	0.54m/s

는 등유를 사용하였으며, 완전연소를 가정하고 시간에 따른 연료소모량을 측정하여 발열량을 산출한 것으로, 이를 통하여 실험에 사용되어질 심지의 총 개수를 결정 하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 특정 심지 길이에 대해 시간에 따른 연소율은 거의 일정함을 알 수 있다. 심지 길이가 증가할수록 연소율도 증가함을 볼 수 있으나, 그 증가율이 균일하지는 않음을 볼 수 있다. 이는 심지의 길이가 증가할수록 흡수되는 연료의 절대량은 증가하지만, 연료 표면으로부터의 거리가 멀어지기 때문에 연료의 흡수량이 심지의 길이 및 표면적에는 정비례하지 않기 때문으로 예상된다.

이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 모형터널 내에서 대형버스의 발열량에 해당하는 14.55kW를 재현하기 위해 8mm의 심지길이를 기준으로 80개의 심지를 사용하였다. 이때 심지 개수의 증가로 인한 불완전 연소를 고려하기 위하여 연소효율은 0.8로 설정하였다. 기존의 대부분의 연구에서는 연소효율을 0.7로 고려하고 있으나, 본 연구에서 사용하는 화원의 경우 기존 Plume에 비해 완전연소의 확률이 크기 때문에 보다 높은 연소효율을 부여하였다. 이에 대한 명확한 검증은 추후 연구되어야 할 것으로 판단된다.

Photo 2는 Fig. 3의 실험결과를 바탕으로 제작된 실제 화원의 모습이다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 버스의 길이를 축소하여 제작한 직육면체의 강철 상자에 연료인 등유를 넣고, 상판에는 필요한 개수의 심지를 부착하여, 화원의 발열량을 조절할 수 있도록 하였다.

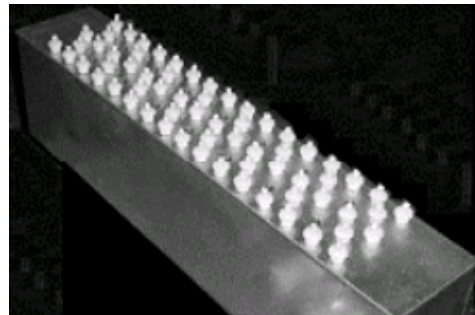


Photo 2. Fire source using a wick

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제연설비 미가동시의 실험결과

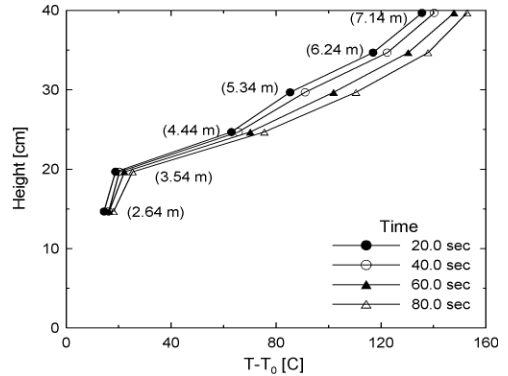
대상터널에서 화재가 발생할 때 대피할 수 있는 피난연결통로 간격이 225m로 설정되어 있다. 그러므로 본 실험에서는 화재 발생시 대피해야 되는 최대거리를 225m (축소거리=12.50m)로 가정하여, 화원으로부터 225m 인 곳을 피난연결통로로 설정하였고 이를 바탕으로 화원에서 피난연결통로까지의 터널 내에 대한 온도분포를 측정하였으며, 피난연결통로에서의 CO 농도를 측정하였다. 화원에서 발생하는 연기는 부력효과에 의해 일차적으로 터널 상층을 따라 전파되다가 터널 천정과의 마찰로 인한 열손실에 따른 밀도의 증가로 점차 하강을 하게 된다. 제연설비의 미가동시 사람이 대피할 수 있는 정확한 시간 예측을 위해서는 사람의 높이까지 연기가 하강하는 정도를 예측해야 한다. 이렇듯 연기의 하강은 화재 발생시 사람들의 대피를 위한 가시거리 확보 및 유독성 물질로부터의 안전 확보 면에서 매우 중요하다.

Fig. 4는 화원 중심으로부터 0.54, 8.0, 12.5m에 해당하는 각 수평위치에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시한 그림이다. 각 그림에서 x축은 온도 상승 값을 나타내고, y축은 터널의 높이를 도시한 것으로 괄호 안의 수치는 실제 터널의 높이를 나타낸 것이며, 화재 발생 후 20초 간격으로 80초까지 측정된 온도값을 도시하였다.

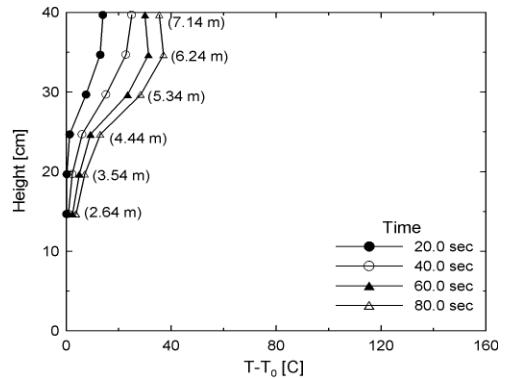
Fig. 4(a)는 0.54m에서의 수직방향 온도분포로서 터널 천정쪽으로 온도가 급격히 상승하고 있는데, 화재발생 20초 후에 터널천정 부근의 온도는 약 130°C정도 상승하였고, 하부에서는 대략 15°C정도의 온도가 상승한 것으로 나타나고 있다. 한편 Fig. 4(b)의 수평길이 8.0m에서의 수직방향 온도분포를 보면 0.54m 위치에 비해 온도상승폭이 적으며 이는 연기가 터널 천정을 따라 이동하면서 터널 천정과의 전도로 인한 열손실이 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. 터널하부에서 화재 발생 후 40초가 지날 때까지 온도변화가 미소한 것으로 보아 연기의 유입이 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 4(c)는 수평길이 12.5m에서의 온도분포로 실제 터널에서 피난연결통로에 해당하는 위치이다. 터널천정

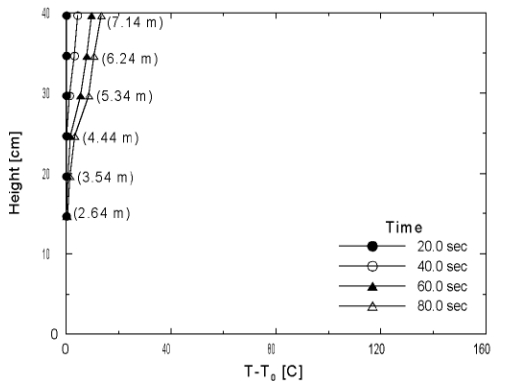
부근에서의 온도상승은 10°C정도로 매우 낮고, 하부에



(a) Position of 0.54m



(b) Position of 8.0m



(c) Position of 12.5m

Fig. 4 Temperature distributions of vertical direction

서는 화재 발생 후 80초가 지나도 온도가 거의 상승하지 않음을 볼 수 있다. 이를 보아 제연설비가 가동되지 않더라도 화재 발생 후 대략 60초에서 80초까지는 피난연결통로까지 연기의 유입이 거의 없음을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 피난연결통로의 위치를 나타내는 수평거리 12.5m인 곳에서 터널바닥으로부터 14.67cm (실제거리:2.64m)인 위치에서 측정된 온도분포로서 이 높이는 사람의 키보다 조금 높은 위치로 생각할 수 있다.

열전대를 통한 온도변화의 발생은 연기의 유입에 의한 것으로 생각할 수 있으며, 출구 근처에서 미세한 공기유동 때문에 다소 미소한 온도변화가 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 온도 상승경향과 0.2도 이상 온도가 상승한 경우를 연기의 도달 시간으로 간주하였다. 그림에서와 같이 피난연결통로의 위치에서 60.2초가 되었을 때 온도가 상승되는 것으로 보아 연기가 이 시각정도에 도달함을 알 수 있으며 60.2초 이후에 온도의 지속적인 증가가 나타나고 있다. 또한 절대적인 온도상승폭은 그리 크지 않은 것을 알 수 있으며, 이는 연기가 이동하면서 주위와의 열전달 및 출구근처에서 연층 아랫부분에서 유입되는 새로운 공기와의 열교환등에 의한 열손실이 발생하기 때문으로 판단된다. 이 결과를 통해서 본 실험대상 터널에서는 제연설비가 가동되지 않은 경우에 60.2초, 실제터널에서는 4분 16초 정도의 피난 시간내에 이용객이 피난연결통로를 통하여 대피한다면 화재에 대한 안전을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 피난연결통로의 위치에서 CO와 미연가스인

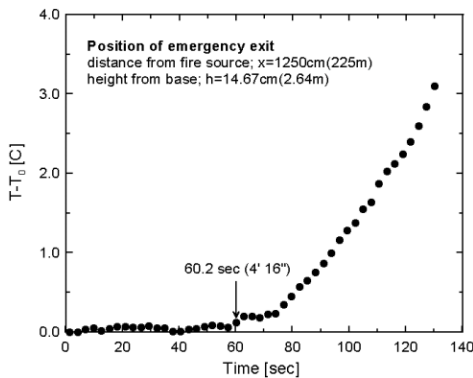


Fig. 5 Temperature distributions at emergency exit

CxHy를 측정된 결과로서, CO의 발생량은 연기가 피난연결통로에 도달하는 순간에 감지되기 시작하여 시간이 지나면서 점차 증가되고 있다. 그림에서와 같이 CO와 CxHy의 농도측정결과 역시 온도분포와 동일한 결과를 보여주고 있다. 즉, 연료 연소 후 60초가 지나서부터 피난연결통로 위치에서 CO와 CxHy가 감지되고 있으며, 이를 토대로 피난시간과의 비교분석을 통해 안전한 대피방안의 제시가 가능할 것이다.

3.2 제연설비 가동시의 실험결과

모형 터널에서 제연설비를 가동시켜 임계풍속 전후에서의 터널 내 화염·연기거동을 검토하기 위하여 젯트팬의 유량을 변화시켜가며 화재축소모형실험을 수행하였다.

Fig. 7은 젯트팬에 의해 송풍되는 공기 유량에 따른 화염근처 단면에서의 평균 풍속을 측정된 것이다. 유량이 1,000 l/min에서 2,600 l/min으로 변화시킬 경우 단면의 평균유속이 0.35m/s에서 0.95m/s로 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다. 본 연구에서는 1,200~1,800 l/min의 범위에서 실험을 수행하였으며, 각 경우에서의 연기의 역류현상을 검토하기 위해 터널 내 열전대에서의 온도분포를 분석하였다.

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 각각 터널풍속이 0.65m/s, 0.57m/s, 0.50m/s의 경우에 대해서 수평방향으로 터널천정부근의 온도분포를 도시한 것이다.

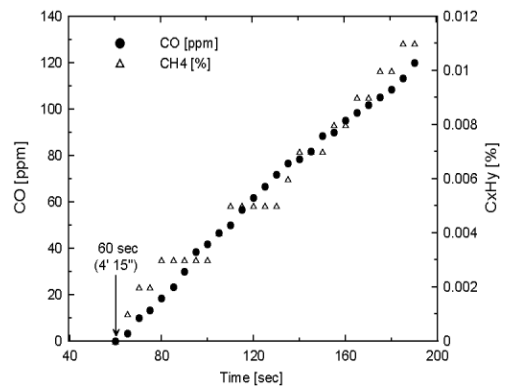


Fig. 6 Poisonous gas concentration at emergency exit

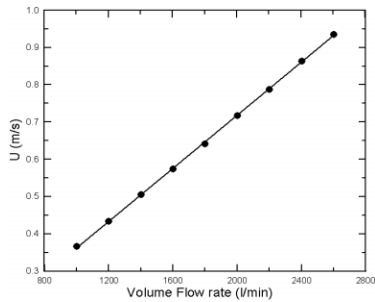
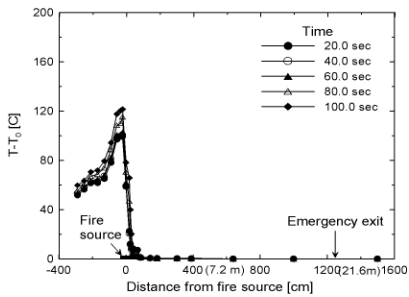
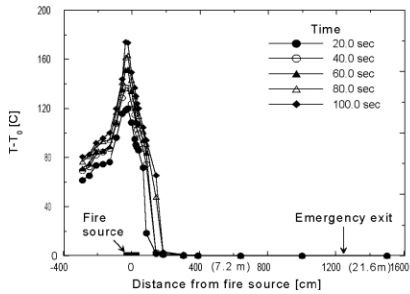


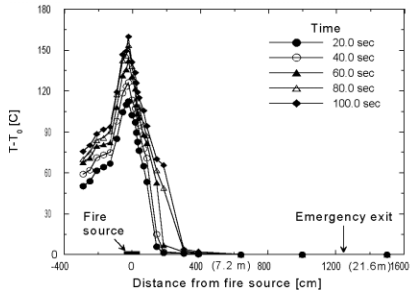
Fig. 7 Tunnel flow velocities for fan flow rates



(a) Tunnel flow velocity : 0.65m/s



(b) Tunnel flow velocity : 0.57m/s

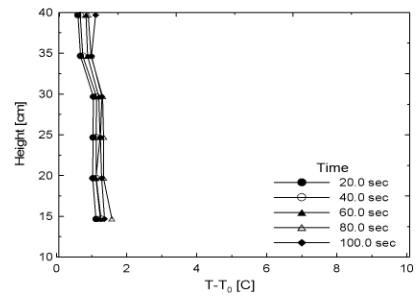


(c) Tunnel flow velocity : 0.50m/s

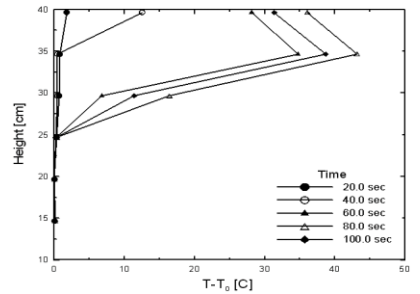
Fig. 8 Temperature distributions of longitudinal direction for tunnel flow velocity

Fig. 8(a)의 경우는 화원을 중심으로 기류의 상류측으로 완전하게 화염의 역류가 방지되어 화원의 상류지역에서도 온도상승이 전혀 일어나지 않고 있으나 Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)의 경우는 화염근처의 상류측으로 온도가 상승하고 있으며 이로부터 터널풍속이 0.57m/s이하일 경우에는 화염의 부력효과로 인한 역류가 발생하고 있음을 알 수 있다.

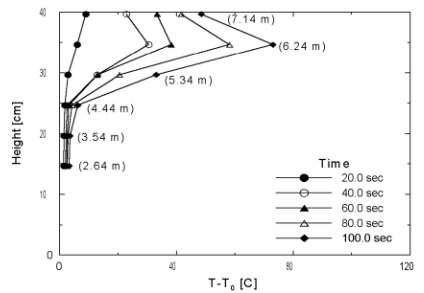
Fig. 9는 모델터널의 화원기준 상류측 0.11m (실제터



(a) Tunnel flow velocity : 0.65m/s



(b) Tunnel flow velocity : 0.57m/s



(c) Tunnel flow velocity : 0.50m/s

Fig. 9 Temperature distributions of vertical direction for tunnel flow velocity

널:20m)에서의 수직방향 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과와 마찬가지로 터널풍속이 0.65m/s의 경우에는 수직방향으로 온도의 상승이 전혀 없으며, 0.57m/s, 0.5m/s의 경우 터널상부로 올라갈수록 화염의 역류영향으로 온도가 상승되며 터널풍속이 적어질수록 온도상승폭이 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국도상 장대도로터널 방재설비 설계안에 대한 타당성을 검증하기 위하여 실제터널에 대하여 축소모형실험장치를 설계, 제작하고 유고시나리오에 따른 화재실험을 수행하였다. 이를 위하여 실제터널에 대하여 1/18 Scale의 축소모형실험장치와 화재발생 모형 연소장치를 제작하였으며, Froude Scaling에 의한 화재모형실험방법을 적용하여 제연설비 비가동/가동시의 화염·연기의 확산거동을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 제연설비 미가동시 피난연결통로의 이격거리 (225m) 구간에 대한 연기확산시간은 60.2초 (실제:4분16초)로서 이 시간 안에 승객의 대피가 이루어져야 하다.
2. 제연팬이 가동되어 터널풍속이 근사적 설계기법에 의해 산출된 임계속도0.54m/s (실제:2.3m/s)로 형성되면 터널 상층부에서의 일부 역류를 제외하고는 화염 제압이 이루어져 안전한 대피가 가능하다. 한편 터널 상층부를 포함한 완전한 화염역류의 방지를 위해서는 터널풍속을 0.67m/s (실제:2.8m/s)로 높게 형성해 주어야 한다.

참고문헌

1. Inha university, Development of Fire Strength Control with Scaling model tunnel in road tunnel, 2003.
2. Shin Hyung, Kang, A Study on Efficiency of Ventilation due to Location of Jet Fan in Tunnel, Journal of Konyang University Industrial Cooperation, Vol. 4, pp. 87~98, 2001.
3. Shin Hyung, Kang, Analysis of Smoke Control for Longitudinal Ventilation Using Jet Fan, Journal of Konyang University Industrial Cooperation, Vol. 5, pp. 13~22, 2002.
4. Sung Chan Kim, Hong Sun Ryou, Sung Ryong Lee and Choong Ik Kim, A Study of Smoke Movement in Tunnel Fire with Natural Ventilation, Transactions of KSME B, Vol. 26, No. 7, pp. 976~982, 2002.
5. Sung Ryong Lee, Hong Sun Ryou, Choong Ik Kim, 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, 2003.
6. Won Kap Kim and Wha Taek Han, The Study on the Burned Gas Movement respect to Tunnel Grade during Fire Disaster, Proceedings of the ASHRAE 2000 Winter Meeting, pp. 12~21, 2000.
7. W. K. Chow, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 271~275, 1998.
8. Kennedy, W. D. and Parsons, B, Critical Velocity: Past, Present and Future, One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, 1996.
9. Thomas, P. H., The Movement of Smoke in Horizontal Passage Against an Air Flow, Fire Research Station Note, No. 723, 1968.



김정엽

한국건설기술연구원 화재 및
설비연구부
jykim1@kict.re.kr



신현준

한국건설기술연구원 화재 및
설비연구부
hjshin@kict.re.kr



강세구

(주)태조엔지니어링
sgkang@hanmail.net



안경철

(주)태조엔지니어링
agc1224@hanmail.net