

터널 내 화재발생시 구난역 내의 설계된 환기 시스템 성능에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Designed Ventilation System Performance at Rescue Station in Tunnel Fire

김동운* · 이성혁** · 유홍선† · 윤성욱***

Dong-Woon Kim · Seong-Hyeok Lee · Hong-Sun Ryou · Sung-Wook Yoon

Abstract In this study, the 1/35 reduced-scale model experiment were conducted to investigate designed ventilation system performance at rescue station in tunnel fire. A model tunnel with 2 mm thick of steel, 10 m long, 0.19 m high and 0.26 m was made by using Froude number scaling law. The cross-passages installing escape door at the center were connected between accident tunnel and rescue tunnel. The n-heptane pool fire, 4 cm × 4 cm, with heat release rate 698.97W were used as fire source. The fire source was located in the center and portal of accident tunnel as worst case. An operating ventilation system extracted smoke amount of 0.015 cms. The smoke temperature and carbon monoxide concentration in cross-passage were measured to verify designed ventilation system. The results showed that, in center fire case without ventilation in accident tunnel, smoke did not propagated to rescue station. In portal fire case, smoke spreaded to rescue station without ventilation. But smoke did not propagated to rescue station with designed ventilation.

Keywords : Tunnel fire, Reduced model, Rescue station, Ventilation system, Smoke propagation

요 지 본 연구는 축소실험을 통하여 터널내 화재발생시 구난역 내 설계된 환기 시스템 성능을 검증 하였다. Froude 수 상사법칙을 적용하여 실제 터널 크기의 1/35로 축소된 모형터널을 사용하였다. 모형터널은 두께가 2mm인 철을 사용하여 총 길이 10m, 높이 0.19m, 폭 0.26m으로 제작되었다. Cross-passage는 사고터널과 구난 터널 사이에 연결되고 Cross-passage 중앙에는 방화문이 설치되어 있다. 실험에는 n-heptane, 4cm × 4cm 풀화재를 이용하였다. 화원의 발열량은 698.97W이고, 화원 위치는 터널 중앙과 가장 위험한 경우로써 터널 입구지점에 각각 설치하였다. 환기조건은 0.015cms이고 화원과 가장 인접한 곳에서만 배기하도록 하였다. 구난역 배기 성능을 검증하기 위해 온도와 CO농도를 측정하여 연기의 유무를 파악하였다. 본 실험의 결과는 다음과 같다. 첫째, 터널 중앙화원인 경우 환기가 없어도 구난 터널에 연기가 검출되지 않았다. 둘째, 구난역 입구 부근에 화원을 설치한 경우 환기 조건을 주지 않으면 연기가 구난 터널로 침투하지만, 설계된 배기 조건시 연기는 구난터널로 전파하지 않았다.

주 요 어 : 터널 화재, 축소 모델, 구난역, 환기 시스템, 연기 전파

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근, 철도 고속화 및 선로 직선화에 따라 연장 10km 이상의 초장대 터널의 수요가 급증할 전망이다. 우리나라

또한 대부분의 지형이 산악으로 이루어져 있기 때문에 이미 국내에서도 총연장 길이 16.2km 인 솔안터널[1]이 건설되었고, 원주-제천간 무설터널(25.1km), 원주-강릉간 대관령 제1터널(21km) 등이 계획 및 건설 중이다. 국외에서는 Gottard Base 터널과 Lötschberg 터널[2], 일본의 Seikan 터널[3]등이 있다. 초장대 터널의 건설 수요가 증가할 만큼, 그 터널 운영에 있어 비상상황 발생시 승객 및 시설물의 안정성을 어떻게 확보해야 하는지 고려해야 한다. 왜냐하면 터널은 그 자체적인 공간적 특성상 화재에 매우 취약하고 고온의 열과 연기로 인한 재산 및 인명피

* 책임저자 : 정회원, 중앙대학교 기계공학부 교수
E-mail : cfdmec@cau.ac.kr
TEL : (02)813-3669 FAX : (02)813-3669

** 정회원, 중앙대학교 기계공학부

*** 중앙대학교 기계공학부 교수

GS건설 기술연구소 선임연구원

해가 상대적으로 높아 사고발생 빈도가 낮음에도 불구하고 쉽게 대형사고로 이어지는 문제점이 있기 때문이다. 대표적인 사고사례로는 1999년도 프랑스에서 몽블랑 도로터널사고로 39명의 사상자가 발생하였고, 2000년도 오스트리아에서는 산악터널사고로 156명의 사상자가 발생하는 등 여러 대형 화재사고가 있었다. 이에 따라 최근에는 터널 내부에서 발생한 화재사고를 미연에 방지하기 위해 사고 후 적절한 대책과 전략보다는 사전 터널설계가 더 부각되고 있다.

초장대 터널인 경우, 터널 내 열차화재가 발생하였을 때 비상대책은 기존 철도 터널과 완전히 다른 개념이다. 왜냐하면 터널 연장 길이가 수십 km 이어 기존 터널에서의 승객 대피방법과 차이를 보이기 때문이다. 예를 들어 열차가 초장대 터널 내 수~수십 km 이상 진입한 상태에서 화재가 발생한 경우, 열차 화재성장을 고려하여 열차는 저속으로 운행되어야 하기 때문에 터널 밖으로 탈출하는데 많이 시간이 소비된다. 따라서 열차 내 승객들은 열과 연기로부터 생명을 위협받는 매우 위험한 상황에 놓이게 된다. 그러므로 초장대 터널에서는 열차 화재발생시 열차가 터널 밖으로 탈출할 수 없다면 터널 내부에 자체적으로 화재방재와 승객 피난을 수행할 수 있는 비상장거장과 같은 구난역이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 터널 내 화재발생시 설계된 구난역에서의 연기저동과 환기 시스템 작동으로 인한 연기 제어 성능을 검증하고자 하였다. 또한 실제 터널을 이용하여 화재 상황을 구현하는 것은 비용과 시간 등 많은 제약이 따르므로 축소 모형 터널을 이용하여 실험을 실시하였다.

Table 1. Fire Scenario

	환기 조건	화원 위치
CASE 1	배기 없음	터널 중앙
CASE 2	배기 없음	터널 입구
CASE 3	배기 작동함	터널 입구

이 실험을 통하여 초장대 터널 내 구난역 설치시 화재방재와 환기 시스템 설계에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 축소모형 터널

본 연구에서는 실제 구난역 크기의 1/35로 축소한 모형 터널을 제작하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 축소 모형 터널은 두께가 2 mm인 철을 사용하여 길이 10 m(본문에서 숫자와 단위의 띄움을 일정하게), 폭 0.26 m, 높이 0.19 m로 제작되었으며 Fig. 1과 같이 사고 터널과 구난 터널로 구성되어 있다. 또한 사고 터널과 구난 터널 사이에는 총 6개의 Cross-passage가 연결되며, Cross-passage내 중앙에는 방화문(5.7cm × 5.7cm)이 설치되어 있다. 방화문은 화재 실험시 개방되는 조건으로 하였다. 터널 내 화재발생시 사고 터널과 구난 터널 내 환기를 형성하기 위해 각 터널 천장에는 총 4개의 덕트가 천장에 설치되어 있으며, 송풍기로 환기량을 제어하였다.

2.2 실험장치

터널 내 화재발생시 설계된 환기 시스템으로 배연 성능

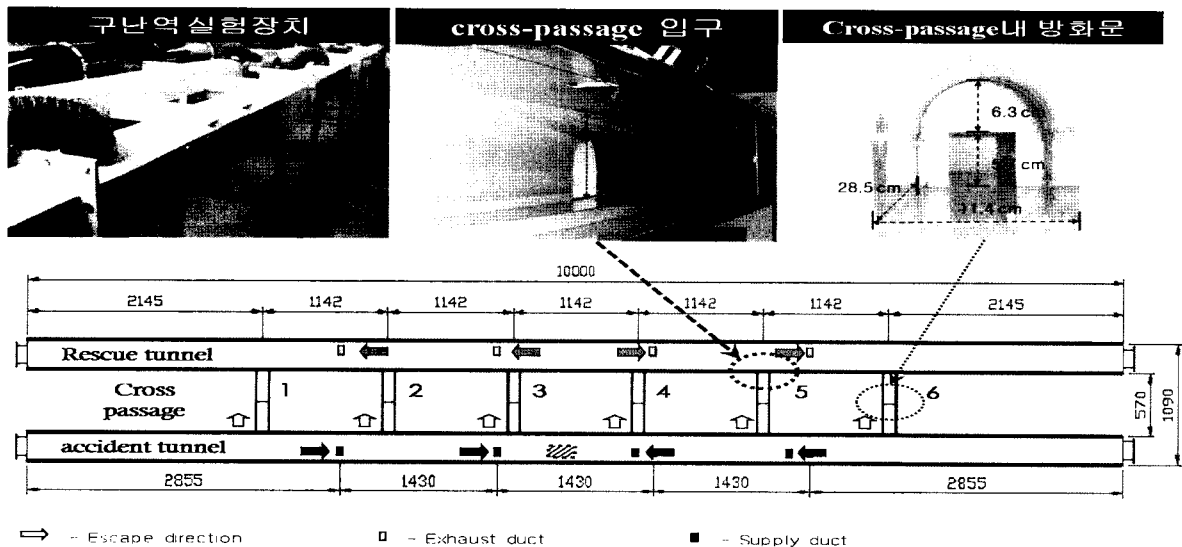


Fig. 1. An experimental device

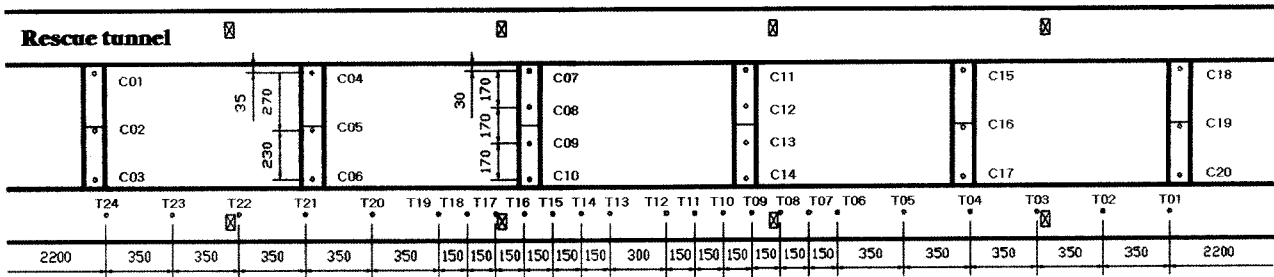


Fig. 2. The arrangement of thermocouples

을 검증하고자 온도와 CO 가스를 측정하여 구난 터널로 전파되는 연기의 유무를 파악하였다. 온도 측정은 크로멜-알루미늄의 재료로 구성되어 있고 측정범위가 -200~1260 °C인 K-type 열전대를 이용하였다. 열전대는 2개의 영역으로 나누어 설치하였는데 사고 터널에서는 천장으로부터 0.5cm 아래이고, Cross-passage에서는 바닥으로부터 4cm 높이이다. Fig. 2는 구난역 내 열전대 설치 위치를 나타내며 사고 터널에는 24개, 6개의 Cross-passages에는 20개로 총 44개의 열전대를 설치하였다. 터널 내 화재발생시 사고 터널의 온도분포로부터 화원에서 발생한 연기가 각 Cross-passage입구 위치까지 연기 전파속도와 도달한 시간을 예측하였고, Cross-passage 내 온도분포로부터 구난 터널로 전파되는 연기의 유무를 파악하였다. 또한, 각 Cross-passage에서 연소가스 중 독성 물질인 CO가스 농도를 측정하여 온도분포와 함께 연기의 유무를 판단하였다. 화원으로부터 발생한 CO가스는 Cross-passage 내 방화문 뒤로 3m 지점과 바닥으로부터 4cm 높이에서 측정되었다. CO가스 농도 검출에 사용된 가스 분석기는 GASTMASTER 720이고 Sensor Type은 NDIR 방식이며 가스 분석기로 유입되는 연기의 유량은 분당 1L이다. 열전대와 가스 분석기에서 발생된 입력 신호는 Agilent 34970 data acquisition unit를 사용하여 데이터를 수집하였으며 터널 내 화재가 발생함과 동시에 측정이 이루어졌다.

2.3 화원

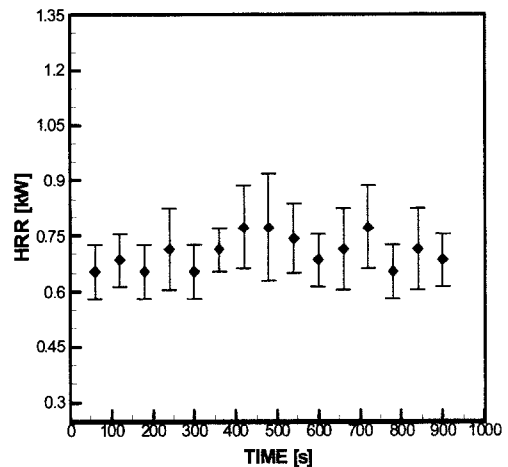
비교적 설치가 간단하고 연소면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 풀 화재(Pool Fire)를 사용하여 실험을 실시하였다. 사용된 연료는 n-heptane(C7H16)이고, 각 변의 길이가 4cm인 정사각형 풀을 이용하였다. n-heptane은 연소열이 높아 화재 실험에 많이 사용되며 n-heptane의 경우, 연소열은 44,600kJ/kg이다. 연료의 증발률은 분해능이 0.01g인 전자저울을 터널에 직접 설치하여 3초 간격으로 연료의 증발량을 측정하였다. 화원의 발열량을 얻기 위하여 실험을 통해 측정한 연료의 증발률과 연소열을 이용하

여 발열량을 계산하였고 이용된 식[4]은 다음과 같다.

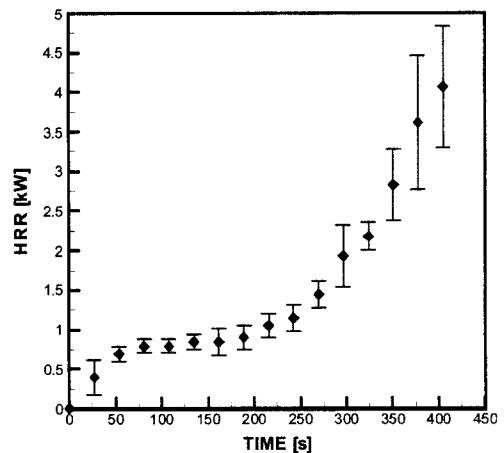
$$Q = m'' \cdot A \cdot \Delta H \quad (1)$$

$$m'' = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot A} \quad (2)$$

여기서 Q 는 화원의 발열량, m'' 는 연료의 증발률, A 는 화원의 면적, ΔH 는 연료의 연소열을 나타낸다. ΔW 는 연료의 질량 변화량이고 이때 걸리는 시간은 Δt 이다.



(a) No vent, mean value of HRR



(b) Vent, mean value of HRR

Fig. 3. Mean value of heat release rate

Fig. 3의 (a)는 배기 조건이 없는 상태에서 시간에 따른 축소 모형 터널 내 평균 발열량을 나타내며 발열량은 약 698.97W이다. 이것을 Froude 수 상사 법칙을 적용하면 실제 터널에서는 약 5.07MW가 된다. 터널 내 배기 조건시 화원으로 유입되는 공기의 양이 많아져 Fig. 3의 (b)와같이 발열량이 증가하고 이때 최고 발열량은 약 4.16kW이고, 실제 터널에서는 약 30.15MW가 된다.

열차 내부에서 화재가 발생하면 차량 화재로 10MW 이상의 화재 강도가 나오지만, 차량 내부의 화염이 터널 천장에 대부분 닿지 않는 화재특성을 나타낸다. 이에 따라 본 실험에서도 그러한 화재특성을 고려하여 화염이 터널 천장에 닿지 않게 하면서 연기의 효과를 파악하고자 하였기 때문에 낮은 발열량을 설정하였다.

2.4 환기조건

본 연구에서는 3가지 화재 시나리오를 설정하여 실험을 실시하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 Case 1는 구난역 내 배기 조건을 주지 않고 터널 중앙에 화재가 발생한 경우이고 Case 2는 가장 위험한 경우로 배기 조건을 주지 않고 1 번째 Cross-passage에서 터널 입구 방향으로 0.3 m 떨어진 위치에 화재가 발생한 경우이다. 또한 Case 3은 Case 2의 조건에서 화원과 가장 인접한 천장 덕트에서 배기를 주는 경우로 총 3가지 화재 시나리오를 설정하였다. 화원은 강제소화가 아니라 자연소화가 이루어질 때까지 하였고 Case 2와 Case 3의 경우, 자연소화가 된 후에도 연기 거동을 파악하고자 일정기간 동안 데이터를 수집하였다. Case 3의 경우, 터널 내 화재발생시 배연량은 설계된 1.53×10^{-2} cms(cubic meter per second)로 하였고, 실제 터널에서는 111 cms가 된다.

2.5 축소법칙

실제 크기의 화재 조건과 환기 조건을 축소모형 터널 실험에 적용하기 위하여 Froude 수 상사를 적용하였으며, 축소 터널과 실제 터널의 유량, 발열량 사이의 관계는 다음 식[5]과 같다.

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

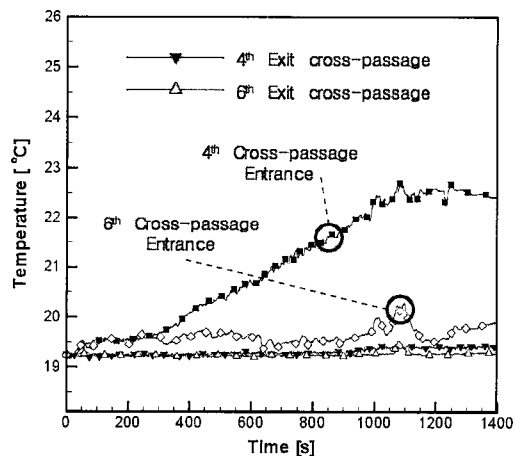
$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{5/2} \quad (4)$$

여기서 V_M 과 Q_M 는 축소모델에서의 유량과 발열량이고

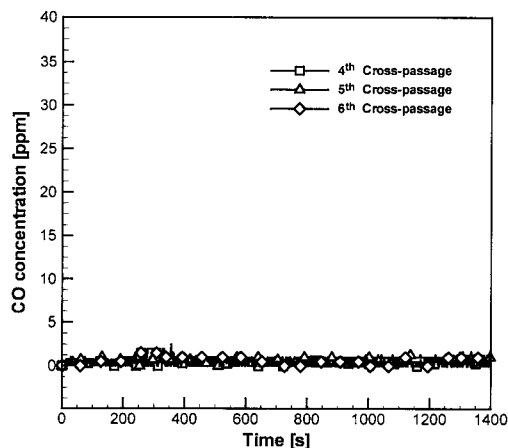
V_F 과 Q_F 는 실제모델에서의 유량과 발열량이다.

3. 결과 및 고찰

Case 1 실험은 환기 시스템 중 배기 조건을 주지 않고, 터널 중앙에 화원을 설치하여 구난역 내 온도와 CO가스 농도를 측정하여 연기의 유무를 예측하였다. Case 1의 경우 화원이 터널 중앙에 위치하고 있어 터널 중앙을 기준으로 각 대칭적인 위치에서의 온도분포와 CO가스 농도분포가 거의 일치하여 4th, 5th, 6th Cross-passage 내 결과만 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 화원과 가장 인접한 4th Cross-passage와 가장 먼 6th Cross-passage 내 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 4의 (a)에서 보는 바와 같이 화재발생후 4th Cross-passage 입구 부근의 온도가 증가하는 현상을 보이나 Cross-passage 출구에서의 온도분포는 일정하다. 6th Cross-passage의 경우도 4th Cross-passage와 같은 경향을 보이지만 입구 온도는 1°C이하로 거의 변화가 없다. Fig. 4의 (b)



(a) No-vent and center fire, temperature distribution

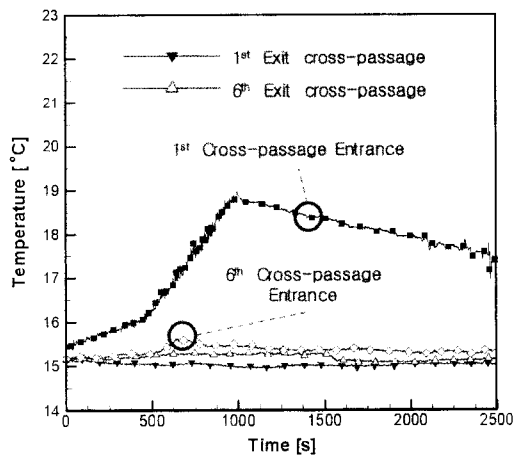


(b) No-vent and center fire, CO gas concentration

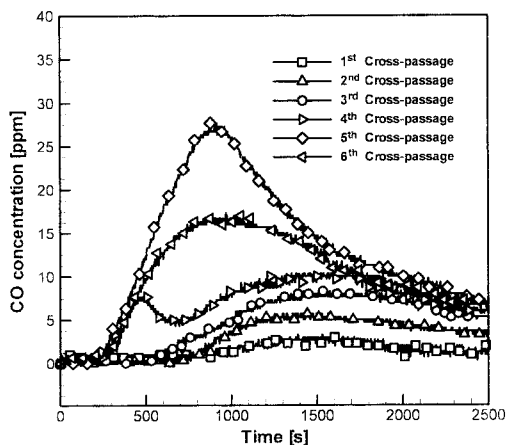
Fig. 4. Temperature and CO gas concentration (Case 1)

는 4th, 5th, 6th Cross-passage 출구 CO가스 농도 분포를 나타내며 결과는 모든 Cross-passage에서 CO가스가 검출되지 않았다. Case 1의 경우, 구난 터널로 연기가 전파되지 않았는데 이것은 여러 가지 원인으로 판단될 수 있다. 첫째, Fig. 1에서 보는 바와 같이 Cross-passage 입구에서 터널 천장 사이의 벽과 Cross-passage 내 천장과 방화문 사이의 벽이 제연장막과 같은 효과로 작용하고 둘째, 화원으로부터 발생된 연기는 사고 터널 천장을 따라 주위로 이동하면서 열교환 등으로 많은 양의 에너지를 손실한다. 이로 인해 다량의 에너지를 손실한 연기는 4th, 5th, 6th Cross-passage 통해 구난 터널로 전파되지 않는다. 셋째, 화원으로부터 발생된 고온의 연기는 부력에 의해 상승함과 동시에 화원 주변의 공기는 화원으로 흡입된다. 그러므로 화원과 인접한 Cross-passage에서는 구난 터널에서 사고 터널로 공기가 유입되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Case 2의 경우, Cross-passage 내 온도분포와 CO가스 농도분포를 나타낸다. 터널 입구와 인접한 지점에



(a) No-vent and portal fire, temperature distribution



(b) No-vent and portal fire, CO gas concentration

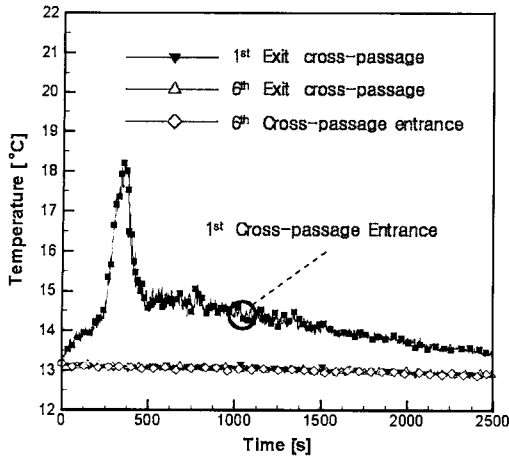
Fig. 5. Temperature and CO gas concentration (Case 2)

화재가 발생한 경우, 화원이 터널 입구와 가깝기 때문에 제한된 공간인 터널 안쪽보다는 상대적으로 터널 입구에서 더 많은 공기가 유입된다. 이것으로 화원을 중심으로 유입되는 공기의 운동량이 다르므로 화원으로부터 발생된 연기는 상대적으로 낮은 운동량을 갖는 터널 안쪽으로 멀리 전파되는 효과가 발생하게 된다.

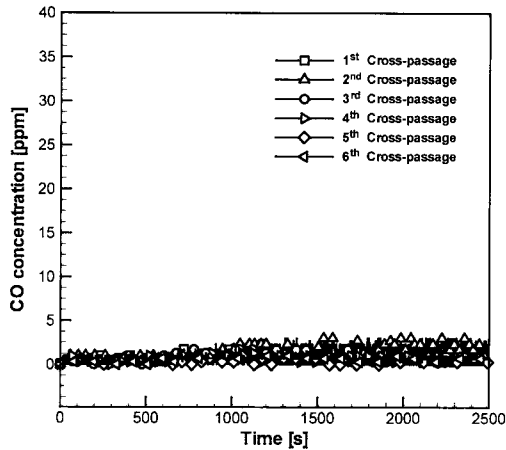
Fig. 5의 (b)는 Cross-passage 내 CO가스 농도를 측정하 값이다. CO가스 측정 초기에 농도가 일정하게 유지되는데 이것은 가스분석기가 CO가스를 측정하는데 걸리는 반응 시간을 포함하기 때문이다. Case 2의 경우, Fig. 5의 (a)의 온도분포 결과를 미루어 보아 연기는 구난 터널로 전파되지 않는 것으로 판단할 수 있으나 CO가스 농도분포 결과로 연기는 구난 터널로 전파되었다. 또한, Cross-passage 출구 부근의 온도가 일정한 것으로 보아 화원으로부터 발생된 연기는 사고 터널을 따라 이동하는 도중에 냉각되어 Cross-passage 통해 구난 터널로 연기가 유입되는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 다른 Cross-passage보다 5th, 6th Cross-passage의 CO가스 농도 수치가 높기 때문에 대부분의 연기는 5th Cross-passage 부근에서 하강하고 이 결과로부터 화원으로부터 멀어질수록 연기에 의한 위험도가 증가한다는 것을 예측할 수 있었다. 반면 1st, 2nd, 3rd Cross-passage 내 CO가스 농도는 5th, 6th Cross-passage 보다 약 300초 후에 증가한다. 이러한 현상은 약 500초 후부터는 화원이 약해지기 시작하여 터널 안쪽에서 화원으로 유입되는 공기의 양이 점차 적어지기 때문에 이 시점부터는 사고 터널에서 구난 터널로 연기가 전파된다. 또한 화원이 자연소화된 후부터는 5th, 6th Cross-passage 입구 안쪽에 있는 대부분의 연기가 하강하고 구난 터널로 연기가 전파함에 따라 1st, 2nd, 3rd, 4th CO가스 농도가 소화 후에도 증가하는 현상을 나타낸다.

Fig. 6은 Case 3의 실험결과로 Cross-passage 내 온도분포와 CO가스 농도분포를 나타낸다. 터널 내 화재발생시 화원과 인접한 덕트에서 배기 조건을 주면 제연 효과와 함께 터널입구에서 공기가 터널 내부로 유입된다. 그러므로 화원으로 들어가는 공기의 유입량이 많아져 화원의 발열량이 증가한다. 따라서 배기 조건을 주지 않는 경우보다 터널 내 온도가 상당히 높아지고, 발열량이 증가함에 따라 연료의 증발률이 증가하여 자연소화 시간도 그만큼 짧아진다. 배기 조건시 Fig. 6의 (a)처럼 1st Cross-passage 입구 부분에서만 온도는 급속하게 증가한 후 자연소화 후 급격하게 내려가다 서서히 냉각된다. 또한 Fig. 6의 (b)와 같이 Cross-passage 내 CO가스는 검출되지 않았다.

Table 2은 사고 터널 내 각 Cross-passage 입구에서 축소 터널 및 실제 터널에서의 연기 전파속도를 나타내었



(a) Vent and portal fire, temperature distribution



(b) Vent and center fire, CO gas concentration

Fig. 6. Temperature and CO gas concentration (Case 3)

다. Case 2와 Case 3에서는 1st Cross-passage 입구 위치와 4th Cross-passage 이후에서의 연기 전파속도를 측정할 수 없었다. 본 실험에서 구난역 내 44개 위치에서 온도 측정

이 이루어지기 때문에 온도 측정 장치의 데이터 양이 많아져 한번 측정이 이루어지는 시간이 1.83초로 비교적 길다. 이러한 이유로 1st Cross-passage 입구에서는 온도 측정 장치의 분해능 때문에 연기 전파속도를 측정할 수 없었고, 또한 화원으로부터 멀리 떨어진 4th Cross-passage 이후에서는 명확하게 연기분포를 측정할 수 없었다. 연기 전파속도는 터널로 전파하면서 열교환 등으로 에너지를 손실하여 화원과 멀리 떨어질수록 감소하는 현상을 보인다. 또한 Case 2의 경우 Case 1보다 연기 전파속도가 빠르게 측정되었는데, 이것은 Case 2의 경우 터널 입구 근처에 화원이 설치되었기 때문에 터널 입구에서 더 많은 연기 유입으로 인해 연기 전파속도가 빠른 것으로 판단된다.

4. 결론

본 실험에서는 터널 내 화재발생시 구난역 내 설계된 환기 시스템으로 배연 성능을 검증하고자 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 환기 시스템 중 배기 조건이 없고 터널 중앙에서 화재가 발생한 경우, 구난 터널로 연기가 전파되지 않았으나 터널 입구에 화재가 발생한 경우에는 구난 터널로 연기가 전파되었다.
2. 터널 입구에 화재가 발생한 경우, 화원 주위에 설계된 배기량으로 배기를 하면 구난 터널로 연기가 전파되지 않는 것으로 보아 구난역 내 환기 시스템 중 배기만으로도 충분한 효과를 얻을 수 있었다.
3. Case 2의 경우처럼 Cross-passage 출구 부근에 온도가 일정하게 측정되었지만, CO가스는 검출되었다. 따라서 연기의 전파를 정확하게 판단하기 위해서는 온도와

Table 2. Velocity and travel time of smoke propagation

		화원과의 거리			
		0.6 m	1.75 m	2.8 m	
배기 조건 없음 (터널 중앙 화재)	연기 전파 속도 (m/s)	축소 터널	0.165	0.121	0.109
		실제 터널	0.976	0.716	0.645
	도달 시간 (s)	축소 터널	3.66	14.47	25.78
		실제 터널	21.65	85.61	152.52
		화원과의 거리			
		1.35 m	2.5 m	3.7 m	
배기 조건 없음 (터널 입구 화재)	연기 전파 속도 (m/s)	축소 터널	0.246	0.171	0.078
		실제 터널	1.455	1.012	0.461
	도달 시간 (s)	축소 터널	5.48	14.63	47.26
		실제 터널	32.42	86.55	279.59
배기 조건 (터널 입구 화재)	연기 전파 속도 (m/s)	축소 터널	0.106	0.028	0.012
		실제 터널	0.627	0.166	0.077
	도달 시간 (s)	축소 터널	12.71	88.27	275.9
		실제 터널	75.19	522.21	1632.25

CO가스를 동시에 고려하여야 한다.

4. 터널 중앙보다 터널 입구에서 화재가 발생한 경우, 화원으로 유입되는 공기의 양이 더 많기 때문에 연기 전파속도는 더욱 빠르다. 그러므로 화원이 터널 입구와 인접할수록 연기에 의한 위험도가 증가한다.

감사의 글

본 연구는 GS건설 연구비 지원과 2008년도 중앙대학교 우수 연구자 연구비 지원에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. Fathi Tarada, Rudolf Bopp, Samuel Nyfeler, Kwang-Soo Jegal, Deog-Su Kim, "Ventilation and Risk Control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea", *The First International Conference on Major Tunnel and Infrastructure Projects*, 22-24 May 2000, Taipei, Taiwan.
 2. C Rudin, "Fires in long railway tunnels-the ventilation concepts adopted in the AlpTransit projects", *10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Boston, November 2000.
 3. Michitsugu Ikuma, "Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 143-149, 2005.
 4. J. G. Quintiere., "Principles of fire behavior", New york, Delamer Publishers, 1998.
 5. Richard L. P. Custer., "Smoke Management in Coverd Malls and Atria", Section 4, Chapter 13, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, NFPA, Quincy MA, 2002.
 6. J. G. Quintiere., "Scaling Application in Fire Research", *Fire Safety Journal*, Vol.15 pp 3-29, 1989.
 7. Zhou, X.C. and Gore, J.P., "Air Entrainment Flow Field Induced by a Pool Fire", *Combustion and Flame*, Vol. 100, No. 1, pp 52-60, 1995.
 8. O. Megret, O. Vauquelin, "A model to evaluate tunnel fire characteristics", *Fire Safety Journal* 34, pp 393-401, 2000.
 9. O. Vauquelin, D. Telle, "Definition and experimental evaluation of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires", *Fire Safety Journal*, 40, pp. 320-330, 2005.
 10. Kim D. H., Park W. H., "Experiment by Using Reduced Scale Models for the Fire Safety of a Rescue Station in Very Long Rail Tunnel in Korea", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, no. 3-4, 2006, pp. 303.
 11. GS건설 기술연구소, "철도터널 방재시스템 연구보고서", 2008.
- 접수일(2008년 4월 1일), 수정일(2008년 10월 17일),
게재확정일(2009년 2월 12일)