

터널 내 화재발생시 구난역 내의 연기 거동에 미치는 설계된 환기 영향에 대한 실험적 연구

김동운* · 이성혁** · 유홍선† · 윤성욱***

Experimental Study on the Designed Ventilation Effect on the Smoke Movement at Rescue Station fire in Railway Tunnel

Dong Woon Kim*, Seong Hyeok Lee**, Hong Sun Ryou† and Sung Wook Yoon***

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

Abstract

In this study, the 1/35 reduced-scale model experiment were conducted to investigate designed ventilation effect on the smoke movement at rescue station fire in railway tunnel. A model tunnel with 2 mm thick, 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 incident tunnel and rescue tunnel. The n-heptane pool fires with heat release rate 698.97W were used as fire source. The fire source was located at the center and portal of incident tunnel as worst case. A operating ventilation system extracted smoke amount of 0.015 cms(cubic meters per second). The smoke temperature and CO gas concentration in cross-passage were measured to verify designed ventilation system. The result showed that, at center fire case without ventilation, smoke did not propagate to rescues station. In portal fire case, smoke spreaded to rescues station without ventilation. But smoke did not propagated to rescues station with designed ventilation.

1. 서론

우리나라와 같이 대부분이 산악지형으로 이루어진 곳에서는 지형적 제한 때문에 터널이나 지하 공간 활용에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근 철도 고속화에 따른 연장 1 km이상의 장대터널 수요가 급증할 전망이다. 국내에서도 총 길이가 10 km 이상이 넘는 초장대 철도터널인 영동 터널이 건설되었다. 유럽의 경우, 스위스, 프랑스, 그리고 독일의 알프스 산맥을 관통하는 50 km가 넘는 터널 등 초장대 철도터널이 이미 건설되어 운행 중이다. 하지만, 철도 터널인 경우, 공간적 특성상 터널 내 화재발생시 열기와 유독가스로 자칫 대형사고로 이어질 수 있으며 또한 화재를 진압하는 과정에도 상당히 어려움이 따른다. 1999년 몽블랑 도로터널 사고와 2000년 오스트리아 산악터널 사고 등 터널 화재사고는 다른 사고에 비해 그 발생 빈도는 낮으나 인명 및 재산 피해가 막대하여, 적절한 사고 대처방안이 제시되어야 한다. 최근 터널 내 화재사고에 대하여 사고 후 적절한 사고대책과 전략보다는 사전 터널 설계가 터널사고 예방에 더 중요하다는 견해가 나오고 있다.

초장대 철도 터널의 경우, 화재나 위험상황이 발생하였을 때의 대책은 기존의 철도 터널과 완전히 다른 개념이다. 그 이유는 초장대 터널의 경우, 터널의 길이가 수십 km이기 때문에 기존의 터널에서의 승객 대피방법과 차이를 보인다. 예를 들어 초장대 터널 내 화재발생시 이미 열차가 터널내 수 ~ 수

십 km 이상 진입하여 외부로 탈출하는데 어렵고 탈출 구간이 15 km를 초과면 비상정거장과 같은 구난역이 반드시 필요하다.

구난역은 화재발생등 열차 비상 상황시 승객들을 하차시키고 안전하게 피난 통로로 대피하도록 하며 초장대 터널 내 최적의 위치에 건설되어야 하고 상행 또는 하행 방향에 위치시켜야 한다. 또한, 구난역 설계에 있어 터널 내 환기 시스템, 화재방재 및 피난 등 여러 가지 상황 등을 고려하여 검증하고 계획해야 된다. 이미 국외에서 구난역을 적용한 사례를 보면 스위스의 Gottard Base 터널과 Lotschberg 터널, 일본의 Seikan 터널 등이 있으며, 국내에는 영동 솔안 터널[1]과 원주~계천간 백운 및 박달 터널, 원주~강릉 대관령터널 등이 계획 및 건설 중이다.

본 연구에서는 터널 내 화재발생시 설계된 구난역 내 환기 시스템으로 연기 제어 성능을 검증하고자 하였다. 실제터널을 이용하여 화재 상황을 구현하는 것은 비용과 시간 등 많은 제약이 따르므로 축소 모형 터널을 이용하여 실험을 실시하였고 이를 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 축소된 모형터널을 제작하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 축소 모형터널은 두께가 2 mm인 강철을 사용하여 길이 10 m, 터널 높이 0.19 m, 터널 폭 0.26 m로 제작되었다. 구난역 축소 모형은

* 중앙대학교 기계공학부 비회원, wooni53@wm.cau.ac.kr

** 중앙대학교 기계공학부 비회원, shlee89@cau.ac.kr

† 중앙대학교 기계공학부 정회원, cfdmec@cau.ac.kr

*** GS건설 비회원, yoonsw@gconst.co.kr

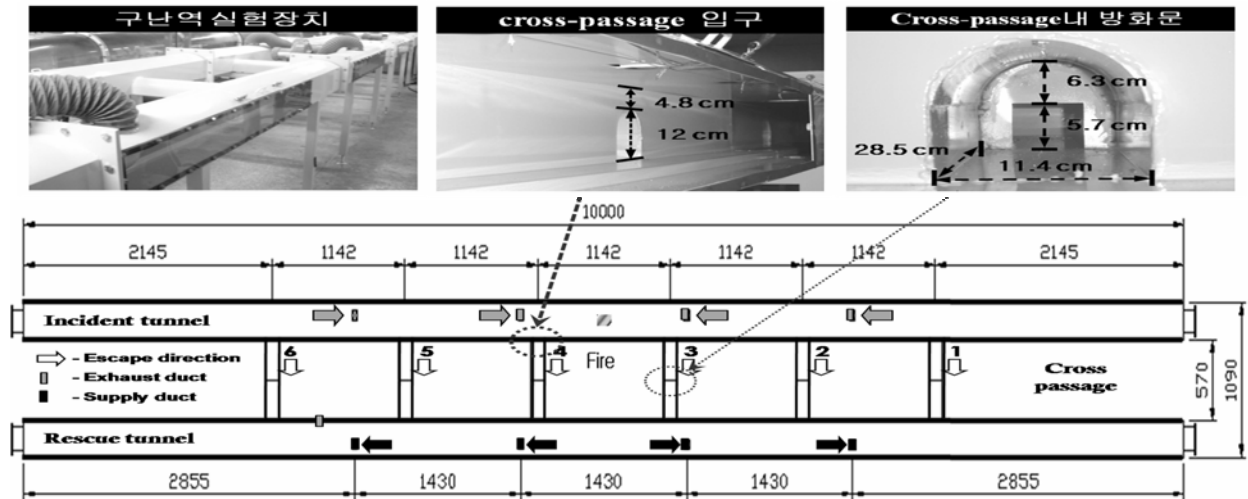


Fig. 1 A Experimental Device

Fig. 1과 같이 사고 터널과 비사고 터널 사이에는 총 6개의 Cross-passage가 연결되며, Cross-passage내 중앙에는 방화문(5.7 cm×5.7 cm)이 설치되어 있다. 터널 화재발생시 사고 터널과 비사고 터널의 환기를 제어할 수 있는 송풍기가 설치되어 있고 사고 터널의 천장에는 총 4개의 배기 덕트가 설치되어 있다.

2.2 실험장치

터널 내 화재발생시 연기거동을 예측하고자 구난역 내 온도를 측정하여 Cross-passages내로 유입되는 연기의 유무를 파악하였다. 온도 측정은 크로멜-알루미늄의 재료로 구성되어 있고 측정범위가 -200~1260℃인 K-type 열전대를 이용하였다. 열전대 2개의 영역으로 나누어 설치하였는데 사고터널에서는 천장으로부터 0.5 cm 아래이고, Cross-passage에서는 바닥으로부터 4 cm 높다. Fig. 2는 구난역 내 열전대 설치 위치를 나타내며 사고 터널에는 24개, 6개의 Cross-passages에는 20개로 총 44개의 열전대를 설치하였다. 터널 내 화재발생시 사고 터널의 열전대 입력 신호로부터 화원에서 발생한 연기가 각 Cross-passage입구 위치까지 도달한 시간을 예측하였고, Cross-passage 내 열전대 입력 신호로부터 Cross-passage 내부에서 비사고 터널로 전파되는 연기의 유무를 측정하였다. 또한, 온도 측정 이외도 연소가스 중 독성물질인 CO가스 농도를 측정하여 Cross-passage 내 연기의 유무를 측정하였다. 화원으로부터 발생한 CO가스는 각 Cross-passage 내 방화문을 기준으로 뒤로 3 cm 지점과 바닥으로부터 4 cm 높이에서 측정하였다. CO가스 농도 검출에 사용된 가스분석기는 GASTMASTER 720 이고 Sensor Type은 NDIR 방식이며 가스분석기로 유입되는 연기의 유량은 분당 1 ℓ 이다. 본 실험에서 열전대와 가스분석

기에서 발생한 입력 신호는 Agilent 34970 data acquisition unit를 사용하여 데이터를 수집하였으며 터널 내 화재가 발생함과 동시에 측정이 이루어졌다.

2.3 화원 및 환기조건

비교적 설치가 간단하고 연소면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 풀 화재(Pool Fire)를 사용하여 실험을 실시하였다 [2]. 사용된 연료는 n-heptane(C₇H₁₆)이고, 각 변의 길이가 4 cm 인 정사각형 풀을 이용하였다. n-heptane은 연소열이 높아 화재 실험에 많이 사용되고 n-heptane의 경우 연소열은 44,600 kJ/kg 이다. 연료의 증발률은 분해능이 0.01 g 인 전자저울을 터널에 직접 설치하여 3 초 간격으로 연료의 증발량을 측정하였다. 화원의 발열량을 연기 위하여 실험을 통해 측정된 연료의 증발률과 연소열을 이용하여 발열량을 산정하였고 이용된 식은 다음과 같다. [3]

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

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

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

Fig. 3은 시간에 따른 축소 모형 터널 내 평균 발열량을 나타내며 발열량은 약 698.97 W이다. 이것을 실제터널에 적용하면 약 5.07 MW가 된다.

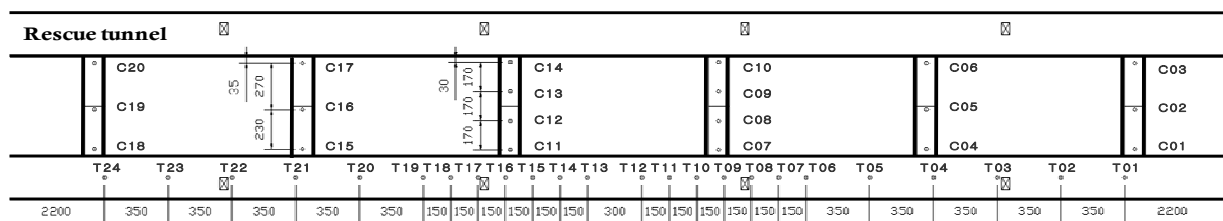


Fig. 2 The thermocouples arrangement

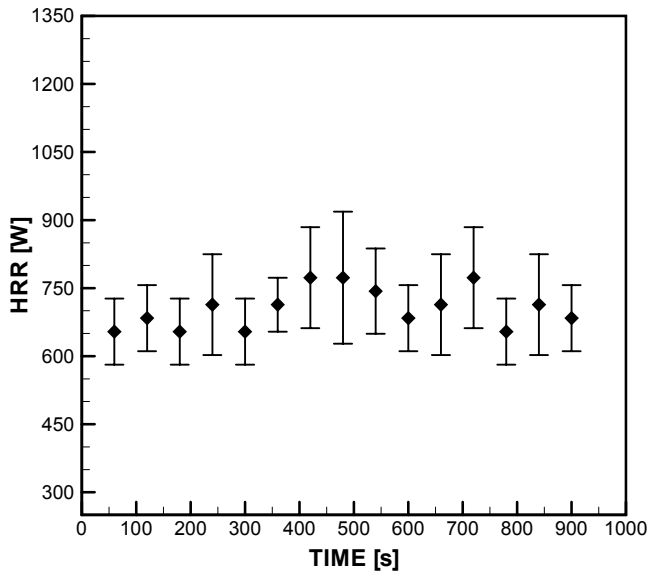


Fig. 3 Mean Heat Release Rate

본 연구에서는 3가지 화재 시나리오를 설정하여 실험을 실시하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 Case1는 구난역 내 배기 조건을 주지 않고 터널중앙에 화재가 발생한 경우와 Case 2는 Worst Case로 배기 조건을 주지 않고 1 번째 Cross-passage에서 터널입구 방향으로 0.3 m 떨어진 위치에 화재가 발생한 경우이다. 또한 Case3은 Case2의 조건에서 화원과 가장 인접한 천장 덕트에서 배기를 주는 경우로 총 3가지 화재 시나리오를 설정하였다. 화원은 강제소화가 아니라 자연소화가 이루어질 때까지 하였고 case2와 case3의 경우, 자연소화가 된 후에도 연기거동을 파악하고자 일정기간 동안 데이터를 수집하였다. Case 3의 경우, 터널 내 화재발생시 배연량은 설계된 1.53×10^{-2} cms(cubic meter per second)로 하였다.

2.5 축소법칙

실제 크기의 화재 조건과 환기 조건을 축소 모형 터널 실험에 적용하기 위하여 Froude 수 상사를 적용하였으며, 축소터널과 실제터널의 유량, 발열량 사이의 관계는 다음 식과 같다.[4]

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

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

여기서 V_M 과 Q_M 는 축소모델에서의 유량과 발열량이고 V_F 과 Q_F 는 실제모델에서의 유량과 발열량이다.

Table 1 Fire Scenario

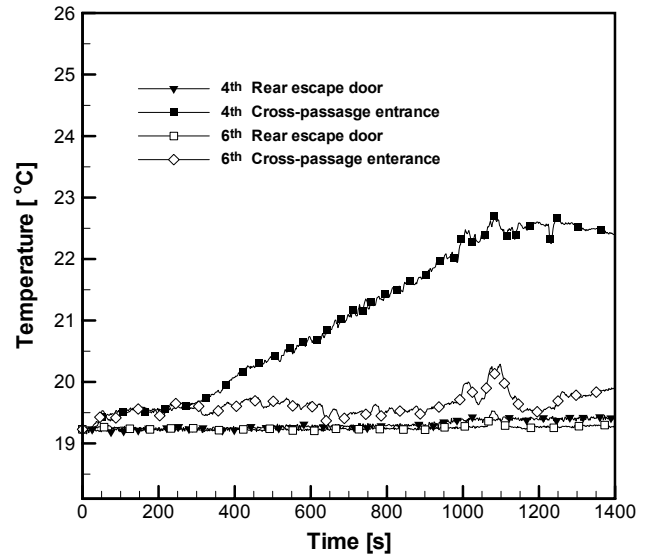
	환기 조건	화원 위치
CASE 1	배기 팬 작동 안함	터널 중앙
CASE 2	배기 팬 작동 안함	터널 입구
CASE 3	배기 팬 작동함	터널 입구

Table 2 Comparison of HRR and Volume Flow Rate between the Reduce and Full Scale Model

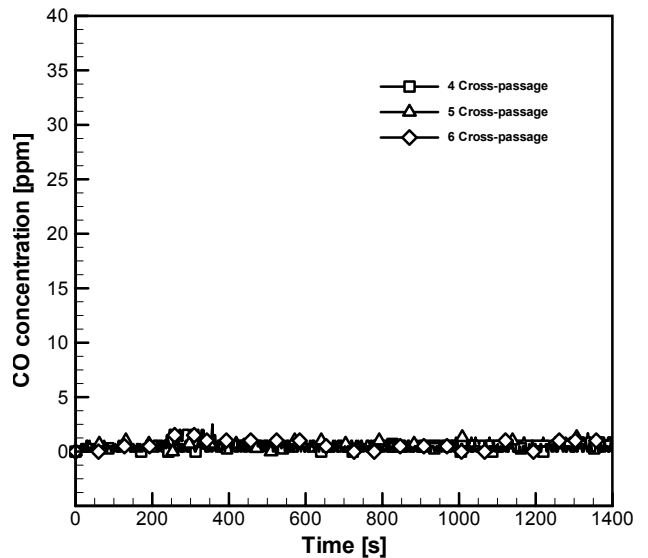
V_M	Q_M	V_F	Q_F
1.53×10^{-2} cms	698.97 kW	111 cms	5.07 MW

3. 결과 및 고찰

Case 1 실험은 환기 시스템 중 배기 조건을 주지 않고, 터널중앙에 화원을 설치하여 구난역 내 온도와 CO 가스 농도를 측정하여 연기의 유무를 예측하였다. Case 1의 경우 화원이 터널중앙에 위치하고 있어 터널중앙을 기준으로 각 대칭적인 위치에서의 온도분포와 CO 가스 농도분포가 거의 일치하여 4th, 5th, 6th Cross-passage 내 결과만 나타내었다. Fig. 4의 a는 화원과 가장 가까운 4th Cross-passage 와 가장 먼 6th Cross-passage 내 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 3의 a에서 보는 바와 같이 4th Cross-passage 내 방화문을 기준으로 사고 터널 방향으로 화재발생 후 온도가 증가하는 현상을 보이나 비사고 터널 방

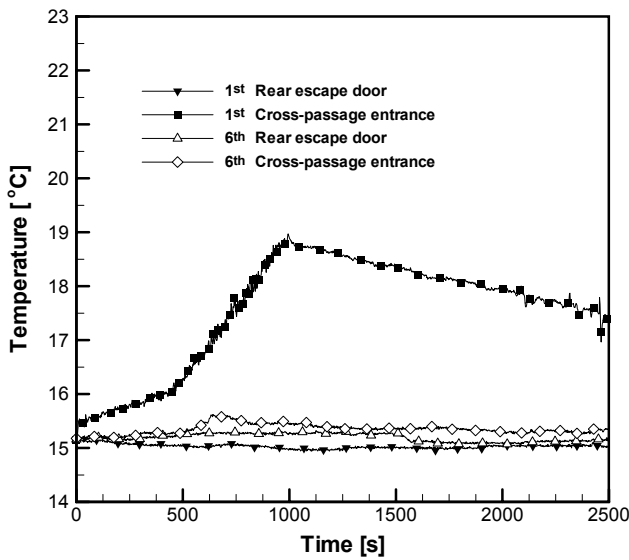


a) No-vent and Center Fire, Temperature Distribution

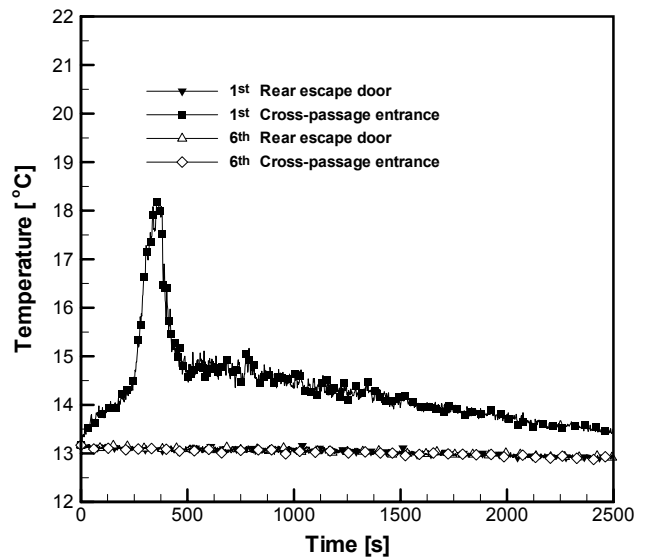


b) No-vent and Portal Fire, CO Gas Concentration

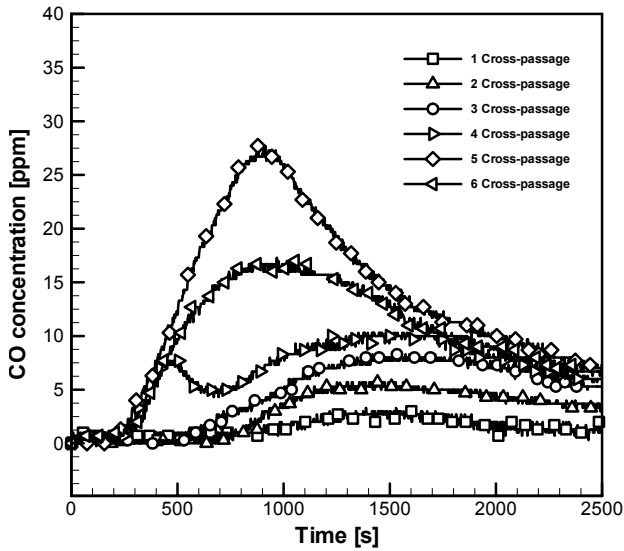
Fig. 4 Temperature and CO Gas Concentration (Case 1)



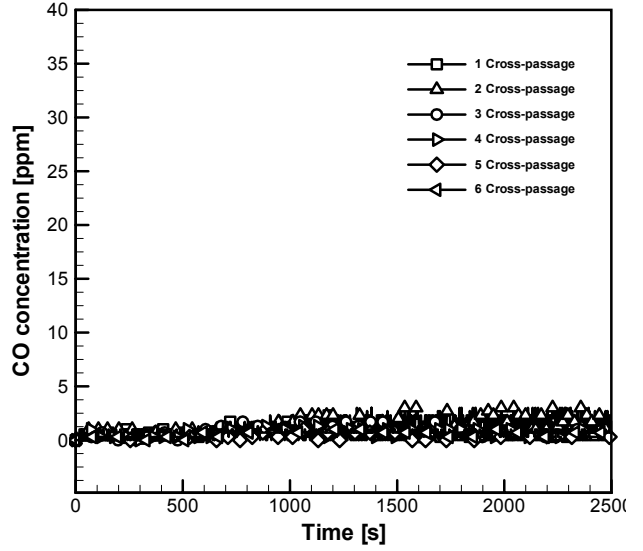
a) No-vent and Portal Fire, Temperature Distribution



a) Vent and Portal Fire, Temperature Distribution



b) No-vent and Portal Fire, CO Gas Concentration



b) Vent and Portal Fire, CO Gas Concentration

Fig. 5 Temperature and CO Gas Concentration (Case 2)

면으로는 온도 분포가 일정하다. 1st Cross-passage 의 경우도 4th Cross-passage 와 같은 경향을 보이지만 방화문 앞의 온도는 1 °C이하로 거의 변화가 없다. Fig. 4 의 b 는 4th, 5th, 6th Cross-passage 내 CO 가스 농도 분포를 나타내며 결과는 모든 Cross-passage 에서 CO 가스가 검출되지 않았다. Case 1 의 경우, 방화문 뒤로 연기가 전파되지 않았는데 이것은 여러 가지 원인으로 판단될 수 있다. 첫째, Fig. 1 에서 보는 바와 같이 Cross-passage 입구에서 터널 천장 사이의 벽과 Cross-passage 내 천장과 방화문 사이의 벽이 체연장막과 같은 효과로 작용하고 둘째, 화원으로부터 발생된 연기는 사고 터널 천장을 따라 주위로 이동하면서 열교환 등으로 많은 양의 에너지를 손실한다. 이로 인해 연기는 4th, 5th, 6th Cross-passage 로 유입되지 않는다. 셋째, 화원으로부터 발생된 고온의 연기는 부력에 의해 상승함과 동시에 화원 주변의 공기는 화원으로 흡입된다. 그러므로 화원과 인접한 Cross-passage 에서는 비사고 터널에서 사고 터널로 공기가 유입되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Case 2의 경우, Cross-passage 내 온도분포와 CO가스 농도분포를 나타낸다. 터널입구와 인접한 지역에 화재가

Fig. 6 Temperature and CO Gas Concentration (Case 3)

발생한 경우, 화원이 터널입구와 가깝기 때문에 제한된 공간인 터널안쪽보다는 상대적으로 터널입구에서 더 많은 공기가 유입된다. 이것으로 화원을 중심으로 유입되는 공기의 운동량이 다르므로 화원으로부터 발생된 연기는 상대적으로 낮은 운동량을 갖는 터널안쪽으로 멀리 전파되는 효과가 발생하게 된다. Fig. 5의 b는 Cross-passage 내 CO가스 농도를 측정된 값인데 터널 내 화재발생시 측정 초기에 CO가스 농도는 일정하게 유지된다. 이것은 가스분석기가 CO가스를 검출하는데 걸리는 반응시간을 포함하기 때문이다. 5th, 6th Cross-passage CO가스 농도 변화는 화원이 자연소화할 때까지 증가하다가 소화 후 감소한다. Fig. 5의 결과는 화원으로부터 발생된 연기가 사고 터널을 따라 이동하는 도중에 냉각되어 5th, 6th Cross-passage 내 방화문 뒤로 유입된다. 그리고 다른 Cross-passage 내 CO가스 수치보다 높은 결과로 보아 대부분의 연기는 5th Cross-passage 에서 하강하고 이로 인해 화원으로부터 멀어질수록 연기에 의한 위험도가 증가한다는 것을 예측할 수 있었다. 반면 1st, 2nd, 3rd, Cross-passage 내 CO가스 농도는 5th, 6th Cross-passage 보다

Table 3 Velocity and Travel Time of Smoke Propagation

		화원과의 거리		0.6 m	1.75 m	2.8 m
배기 작동	연기전과	축소터널	0.165	0.121	0.109	
	속도(m/s)	실제터널	0.976	0.716	0.645	
안함	(터널중앙 화재)	축소터널	3.66	14.47	25.78	
		실제터널	21.65	85.61	152.52	
		화원과의 거리		1.35 m	2.5 m	3.7 m
배기 작동	연기전과	축소터널	0.246	0.171	0.078	
	속도(m/s)	실제터널	1.455	1.012	0.461	
안함	(터널입구 화재)	축소터널	5.48	14.63	47.26	
		실제터널	32.42	86.55	279.59	
배기 작동함	연기전과	축소터널	0.106	0.028	0.012	
	속도(m/s)	실제터널	0.627	0.166	0.077	
(터널입구 화재)	도달시간(s)	축소터널	12.71	88.27	275.9	
		실제터널	75.19	522.21	1632.25	

약 300초 후에 증가한다. 이러한 현상은 약 500초 후부터는 화원이 약해지기 시작하여 터널안쪽에서 화원으로 유입되는 공기의 양이 점차 적어진다. 따라서 이 시점부터는 사고 터널에서 비사고 터널로 연기가 유입된다. 또한 화원이 자연소화된 후로부터는 5th, 6th Cross-passage 입구 안쪽에 있는 대부분의 연기가 내려옴에 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 체연 효과와 함께 터널입구에서 공기가 터널 내부로 유입된다. 그러므로 화원으로 들어가는 공기의 유입량이 많아져 화원의 발열량이 증가한다. 따라서 배기 팬을 작동하지 않는 경우보다 터널 내 온도가 상당히 높아지고, 발열량이 증가함에 따라 연료의 증발률이 증가하여 자연소화시간도 그만큼 짧아진다. Fig. 6의 a처럼 1st Cross-passage내 방화문 앞 부분에서 온도는 급속하게 증가한 후 자연소화 후 급격하게 내려가다 서서히 냉각된다. 또한 터널 내 배기 효과로 Fig. 6의 b와 같이 Cross-passage 내 CO가스는 검출되지 않았다.

Table 3은 사고 터널 내 각 Cross-passage 입구에서 축소터널 및 실제터널에서의 연기전과 속도를 나타내었다. Case 2와 Case 3에서는 1st Cross-passage 입구 위치와 4th Cross-passage 이후에서의 연기전과속도를 측정할 수 없었다. 본 실험에서 구난역 내 44개 위치에서 온도측정이 이루어지기 때문에 온도측정장치의 데이터 양이 많아져 한번 측정이 이루어지는 시간이 1.83초로 비교적 길다. 이러한 이유로 1st Cross-passage 입구에서는 온도측정장치의 분해능 때문에 연기의 전과속도를 측정할 수 없었고, 또한 화원이 멀리 떨어진 4th Cross-passage 이후부터 명확하게 연기분포를 측정할 수 없었다. Table 3 에서 연기전과 속도는 터널로 전파하면서 열교환 등으로 에너지를 손실하여 화원과 멀리 떨어질수록 감소하는 현상을 보인다.

4. 결론

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

1. 터널 내 화재발생시 설계된 환기 시스템의 영향에 따른 구난역 내 온도분포와 CO 가스 농도로부터 Cross-passage 내 연기 유입을 예측할 수 있었다.
2. 환기 시스템 중 배기 조건이 없는 경우, 터널중앙에서 화재가 발생한 경우 모든 Cross-passage 에서 연기가 검출되지 않았으나 터널입구에 화재가 발생한 경우에는 Cross-passage 로 연기가 전파되었다.
3. Cross-passage 내 연기유입 여부를 정확히 판단하기 위해서는 온도 및 가스 분포를 동시에 고려하여야 한다. 다시 말해 방화문 뒤쪽에 연기온도가 일정하게 측정되었다라도 CO 가스의 측정결과를 동시에 고려하여야 보다 정확한 연기 유입여부를 판단할 수 있다.
4. 터널입구에 화재가 발생한 경우 화원 주위에 설계된 배기량으로 배기를 Cross-passage 내 연기가 없는 것으로 보아 구난역 내 환기 시스템 중 배기만으로도 충분한 효과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 GS건설 연구비 지원으로 수행되었으며 관계제 위게 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] J. G. Quintiere, "Scaling Application in Fire Research, Fire Safety Journal, Vol.15 pp 3-29, 1989"
- [3] 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.
- [4] O. Megret, O. Vauquelin, "A model to evaluate tunnel fire characteristics", fire safety journal 34, pp 393-401, 2000
- [5] J. G. Quintiere, "Scaling Application in Fire Research, Fire Safety Journal, Vol.15 pp 3-29, 1989."
- [6] O. Vauquelin, D. Telle, "Definition and experimental evaluation of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires", Fire Safety Journal, 40 pp 320-330, 2005
- [7] 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
- [8] GS건설 기술연구소, "철도터널 방재시스템 연구보고서", 2008