

장대 교통터널의 피난연락갱 설치 간격에 관한 실험적 연구

유용호¹⁾, 윤찬훈^{2)*}, 윤성욱³⁾, 김진⁴⁾

Experimental Study on the Interval of Emergency Exits in Long Traffic Tunnels

Yongho Yoo, Chanhoon Yoon, Sungwook Yoon and Jin Kim

Abstract The objective of this study was to analyze the smoke movement for the case of fire and to determine the interval between emergency exits in long tunnels. Based on Froude modeling, the 1/50 scaled model tunnel (20 m long) was constructed by acrylic tubes and tests were carried out systematically. From the strong relationship between CO propagation time and distance through the tunnel, it was found that the optimal escaping time was 6 minutes in case of 20MW fire. But, regarding passengers' psychological state under fire, another one minute of delay time should be considered. Therefore, the total escaping time should be estimated by 5 minutes. The interval between the emergency exits for vehicle passengers was calculated by 250 m with respect to the 5 minute of escaping time.

KeyWords long tunnel fire, scaled model test, emergency exit

초 록 본 연구에서는 장대 터널 화재시 연기의 거동 특성 파악과 피난연락갱의 설치간격을 결정하기 위하여 축소 모형실험을 실시하여 그 결과를 분석하였다. Froude 상사를 기본으로 1/50로 축소하여 20 m의 모형 터널을 제작하여 실험하였다. 터널 내 20 MW의 화재가 발생 하였을 경우 CO의 전파 속도와 거리와의 관계를 이용하여 피난연락갱의 위치를 검토한 결과, 승객들의 피난시간은 6분이 적절하나 화재시 승객들의 심리적 상태를 고려하여 1분여의 지체시간을 생각하면 실제의 피난시간은 5분 정도가 될 것이므로 최대 간격 250 m로 대인용 피난연락갱을 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

핵심어 장대 터널화재, 모형실험, 피난연락갱

1. 서 론

최근 증가하고 있는 장대 터널의 환기설계는 일반터널과는 차별성을 가지고 심각하게 고려하여야 하며, 특히 터널화재시 원활한 탈출로 확보 및 연층 제어를 위한 방재시스템은 장대 터널을 건설하는데 있어 매우 중요한 설계사항이다. 국내외적으로도 장대 터널의 건설 및 운영사례는 그리 많지 않으나 프랑스와 이탈리아를 연결하는 11.6 km의 도로터널로서 매우 중요한 역할을 하는 뮌헨-리엔츠 터널과 오스트리아의 산악을 통과하는 6.4 km의 타우너터널의 화재 사고 후 유럽의 각국에서는 설계기준의 전반적인 재정립이 요구되고 있다. 각국은

새롭고 엄격한 안전기준을 마련하여 기존 터널시설의 보완계획을 세우고, 신설되는 터널에서는 한층 강화된 법규구정을 적용하는 등 환기·방재에 대한 관심이 높아지고 있다. 국내의 경우도 경제력 및 기술력 부족으로 외국자본 및 기술 도입에 의존하여 급속한 경제성장에 따른 성장위주형 정책으로 인간과 친화되지 못한 고속 건설이 진행되었으나 대구지하철 참사 및 홍지문 터널 화재 이후 사용자 중심의 안전을 최우선으로 하는 터널 및 지하공간 건설의 요구가 높아지고 있는 실정이다.

이러한 터널의 방재 설계를 위해 실제 터널에서의 화재 실험[1] 및 축소 모형실험등[2-4] 터널 화재에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으나, 실제 스케일로 실험을 행하는 것은 비용이 많이 들고 위험부담이 크기 때문에 모형실험을 통해서 얻은 결과를 실제 터널에 적용하려는 시도가 주로 이루어지고 있고, 이들 실험은 임계속도를 결정하는 것에 관심이 집중되어 있다. 그러나 일반적으로 터널에서 화재가 발생할 경우

¹⁾ 인하대학교 환경토목공학부

²⁾ 인하대학교 환경토목공학부 박사과정

³⁾ LG건설 연구개발팀 과장

⁴⁾ 정회원 인하대학교 공과대학 환경토목공학부 부교수

*교신저자(Corresponding author) : yoon0940@hanmail.net

접수일: 2005년 1월 26일

심사 완료일: 2005년 2월 23일

터널 내에 화재감지장치가 설치되어 있다하더라도 터널 내 제연 설비가 가동되기까지는 최소 수분의 지체시간이 발생하게 되고 승객들이 안전하게 대피하기 위한 초기 피난 시간동안에는 화재에 대처하기 위한 환기 설비의 가동은 기대하기 힘들기 때문에 이에 따른 대책 및 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 화재시 초기 상황 대처 및 승객들의 안전한 대피를 위하여 터널 내 환기 설비가 가동되지 않을 경우 터널내 연기 거동특성 및 열환경 변화를 검토하여 승객들의 안전한 대피로 역할을 담당할 피난연락경의 최적 위치를 산정함으로써 피난연락경의 설치 빈도 및 요건 등의 정량화 지표를 제시하고자 하였다. 이를 위하여 Froude 상사에 의거한 피난연락경이 포함된 길이 20 m의 일방향 쌍굴터널을 제작하였으며, 실제 가연성 물질을 연소하여 화재를 모사하였다.

2. 축소모형실험

2.1 상사법칙

축소모형실험은 차원분석을 통해 실험결과를 일반화시키고 스케일링법칙을 만족시키는 무차원 매개변수들을 이끌어내는 것이 매우 중요하다. 유동을 해석하기 위한 대표적인 방법은 압력모델링과 Froude 모델링이 있다. 압력모델링은 모델의 주위압력을 변화시키므로써 실제상황을 모사할 수 있으나, 도로터널 환기시스템의 경우 모형의 주위압력을 변화시키면서 실험을 행하기가 현실상 어렵기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 일반적이다. Froude 모델링은 주위와 같은 상태에서 실험을 행할 수 있으며, 화재의 Froude 모델링은 기하학적 형태가 보전되어야 하므로 차원분석을 통하여 $V/L^{1/2}$ 와 $Q/L^{5/2}$ 를 일정하게 유지시킨다. Froude 모델링의 한계는 점착력이 매우 큰 경우이지만, 난류조건이 지배적인 화재인 경우 점착력은 무시될 수 있기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 가능하며, 모형터널과 실제터널의 열방출율 및 속도는 식 (1)과 같이 스케일링될 수 있다[5].

$$\left(\frac{Q_m}{Q_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{5/2}$$

$$\left(\frac{V_m}{V_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, Q : 열방출율(Heat release rate) [kW]
 L : 터널길이(Tunnel length) [m]
 V : 환기속도(Ventilation velocity) [m/sec]

식의 하첨자 'm'은 축소모형에서 스케일된 값임을 나타내며, 'r'은 실제 터널에서의 값을 나타낸다. 식 1을 적용하여 축소모형터널에서의 열방출율, 환기속도 등을 계산하였으며, 그 결과를 실험에 적용하였다.

2.2 실험장치

모형실험장치는 Fig. 1과 같다. 제작 모형은 일방향 쌍굴터널에 최대한으로 근사하도록 기하학적 형상을 모사하였으며, 피난연락경도 차량용과 대인용으로 구분하여 각기 다른 단면을 적용하였다. 터널부분은 실제 터널 규모의 1/50로 축소하였으며, 길이 20 m, 단면직경 0.2 m의 아크릴원관에 노면에 상당하는 아크릴판을 삽입하여 실제의 터널 기준단면과 거의 동일하게 하였다. 화원부분은 아크릴 원형관의 변형을 방지하기 위하여 특수 유리로 제작하였으며, 나머지 터널부분은 1 m 간격의 조립식으로 제작하여 피난연락경의 위치 변화가 가능하도록 하였다.

터널 내 열적 안정성 판단을 위한 온도와 화재시 발생한 연기의 거동특성에 따른 연기류를 확인하기 위하여 공기속도 및 CO 농도를 측정하였으며, 측정기구와 측정지점을 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다. 터널천장부, 중앙부 등의 온도를 측정하는 K-type 열전쌍선(thermocouple wire)이 화원(fire source)을 기준으로 양쪽이 대칭되도록 총 23개소에 설치하였다.

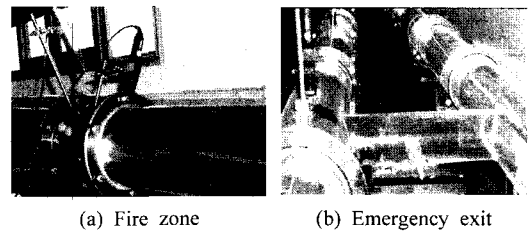


Fig. 1. Photograph of model tunnel

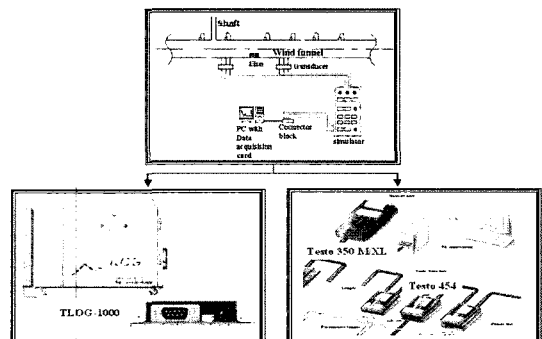
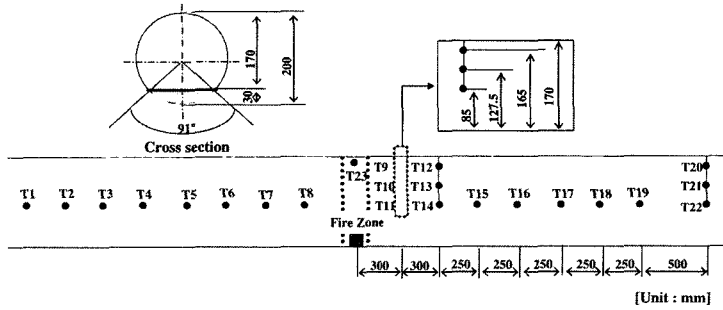
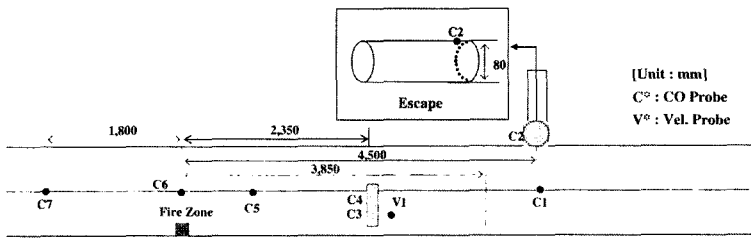


Fig. 2. Temperature and CO concentration measurement units



(a) The position of thermocouples



(b) The position of CO & velocity probes

Fig. 3. The schematic of measurement section

측정된 온도 데이터는 6CH 24비트 thermocouple data logger(TLOG-1000) 4개로 구성된 데이터 취합(data acquisition) 시스템의 연결부(connector block)를 거쳐 SDLog 프로그램에 의해 실시간으로 컴퓨터에 기록된다. 또한, 연료의 불완전 연소로 발생하는 일산화탄소(CO)의 농도를 측정하기 위한 CO probe를 화원을 비롯하여 총 7개소에 설치하였다. Testo 350 M/XL control unit과 Testo 454 logger 3개로 구성된 데이터 취합(data acquisition) 시스템의 연결부(connector block)를 거쳐 Testo comfort software에 의해 실시간으로 컴퓨터에 기록된다. 기류 측정은 1개의 Testo 열선 유속계 probe로 측정되어 CO와 동일한 방식으로 저장되며, 별도의 디지털 열선 유속계(digital hot-wire anemometer)로 측정하여 내장버퍼에 임시 저장한 후 다시 컴퓨터에 입력된다.

또한, 화원은 직경이 5 cm와 7.5 cm인 두 종류의 pool 식 버너를 사용하였다. Pool식 버너란 수평연료표면에서 연료가 자연 연소되는 버너로서, pool식 버너에서의 연소는 낮은 초기 모멘텀 확산화염(diffusion flame)이라는 것과 부력효과에 의해 영향을 많이 받는다는 특징을 가짐으로써 실제화재에서 나타나는 차량의 연소를 비교적 유사하게 모사할 수 있는 장점이 있다. 연료로는 가솔린을 사용하였으며, pool 화재의 경우 발열량은

식 (2)에 의하여 결정된다[6]. 또한, 연료의 연소효율은 증발된 연료가 모두 연소가 되는 것은 아니라는 가정 하에 0.7로 고려하였다.

$$\dot{Q} = H_c \dot{m}'' A \tag{2}$$

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

\dot{m}_{∞}'' : 휘발성물질의 질량감소율, [0.055 kg/m²sec, kθ=2.1 m⁻¹]

Hc : 휘발성물질의 연소열, [휘발유=43.7 MJ/kg]

A : 화원단면적, [m²]

터널에서 발생한 화재는 5-20 MW정도로 모사하였다. 식 (2)를 이용하면 실제터널의 화재시 발생하는 열량이 5-20 MW라면 모형터널에서 발생한 열량, Q_m은 Table 1과 같이 0.28~1.13 kW가 된다.

Table 1. The scaling of heat release rate

Q _r (MW)	Q _m (kW)
5	0.28
10	0.57
15	0.85
20	1.13

3. 실험결과

화재 실험시 발생하는 CO의 농도는 항상 일정하지는 않다. 이는 화재시 연소 조건이 미세하나마 차이를 나타내기 때문이다. 따라서 다수의 반복적인 실험을 통하여 얻어진 측정치로부터 터널에서 연기의 거동 특성을 분석하기 위하여 측정된 CO의 농도는 발생된 CO 최고치로 나누어 일반화된 비교 값을 이용하였다.

$$CO^* = \text{Measured CO Conc.} / \text{Max. CO Conc.} \quad (3)$$

3.1 화재규모 5 MW시 연기거동

화재 규모 5 MW시 화원 상부에서의 온도와 CO 농도 분포를 Fig. 4에 표시하였다. 화재 발생 후 지속적으로 온도가 증가하여 화재 상부는 9분 후에 187.07℃로 최고에 이르게 되고, CO는 이보다 조금 이른 8분 경과 후에 최고(447.63 ppm)를 나타낸다. 이후 온도의 감소와 함께 CO 농도도 감소하기 시작한다.

Fig. 5는 화재 위치별 CO 농도의 변화를 나타내고 있다. 화재위치를 중심으로 전후의 CO 농도는 거의 대칭의 형태를 나타내고 있으며, 화재 후 2분이 경과할 때까지 화재 후방 100여 m 지점에는 CO가 감지되지 않는다. 그러나 화재의 성장과 함께 생성된 CO는 점차적으로 증가하며, 화재 발생부의 CO가 감소하기 시작하는 8분이 지나도 화재 발생 후방은 역기류에 의하여 지속적으로 증가한다. 터널의 수평방향 온도 분포는 Fig. 6과 같다. CO 농도와 유사하게 화재 발생부를 중심으로 대칭의 분포를 나타낸다. Fig. 7과 Fig. 8에 보이는 바와 같이 화재 후방 15 m 지점의 터널 높이별 단면 온도를 보면, 천장부의 경우 시간이 10분 경과함에 따라 69.22℃까지 증가한다. 또한 밀폐된 천장으로 인하여

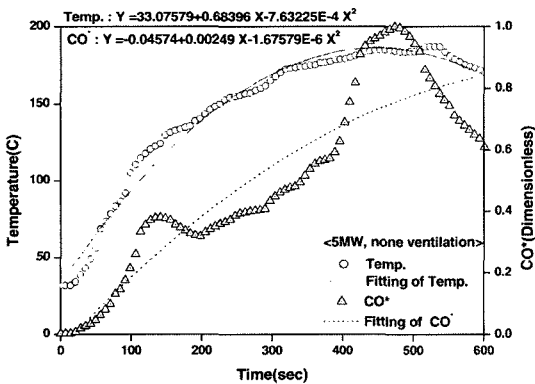
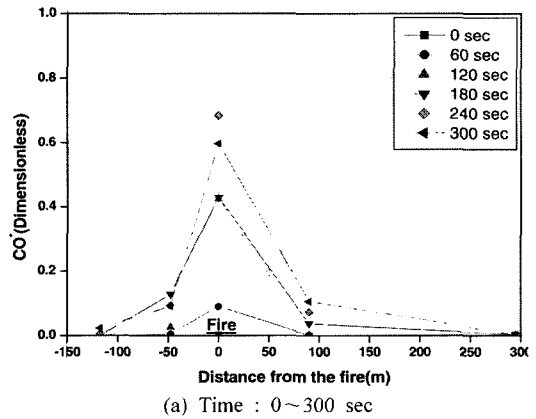


Fig. 4. Temperature and CO concentration at the fire location(5 MW)

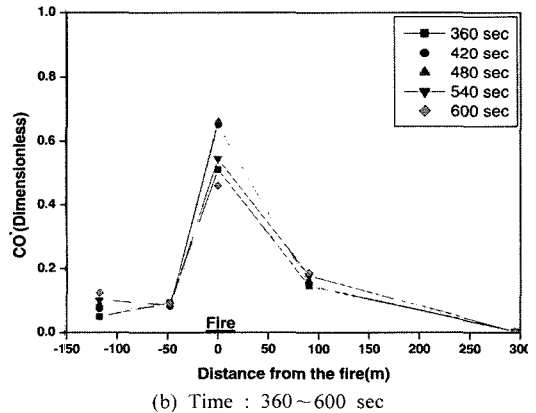
성장하지 못하는 화염은 점차적으로 하강하여 6.375 m 지점은 온도역시 67.09℃까지 급속히 성장하나, 터널 중간부분인 4.25 m 지점은 35.25℃정도를 나타내어 피난 중인 승객들에게 열적 위해감을 주지는 않을 것으로 판단된다. 이보다 15 m 후방인 30 m 지점의 단면온도는 다소 증가의 폭이 작아서 천장부가 58.12℃, 높이 6.375 m 지점의 온도는 46.96℃, 중간 높이인 4.25 m에서는 33.71℃ 정도의 온도 분포를 보인다.

3.2 화재규모 20 MW시 연기거동

터널에서 화재가 발생하면 화원에서 발생한 연기는 일차적으로 터널 상층을 따라 전파되다가 터널 천정과의 마찰로 인한 열손실에 따른 밀도의 증가로 점차 하강한다. Fig. 9는 화원 상부에서의 온도와 CO 농도 분포를 도시하였다. 화재가 발생하면 시간이 진행에 따라 연소가 촉진되어 100초 경과 후 200℃에 이르게 되고 240초가 경과되면서 최고 295℃에 이르게 된다. 그 후



(a) Time : 0~300 sec



(b) Time : 360~600 sec

Fig. 5. CO concentration with the longitudinal direction of tunnel(5 MW, non-ventilation system)

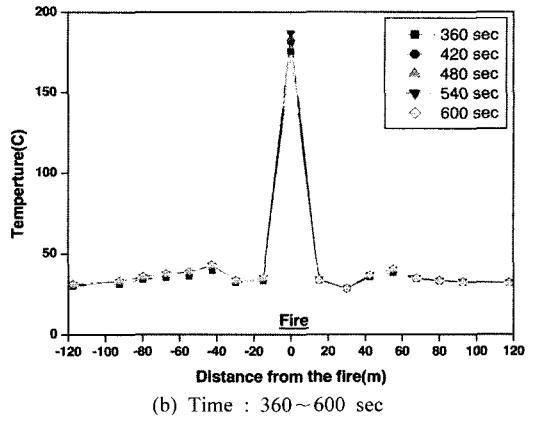
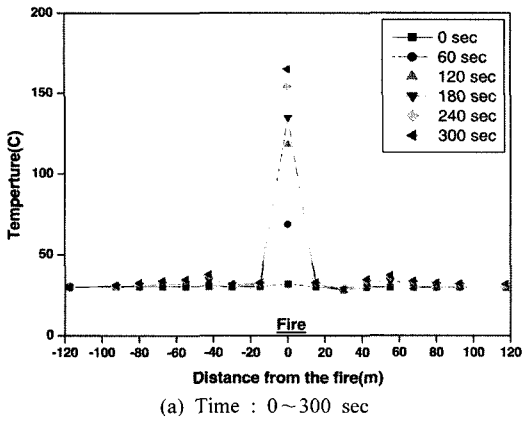


Fig. 6. Temperature with the longitudinal direction of tunnel(5 MW, non-ventilation system)

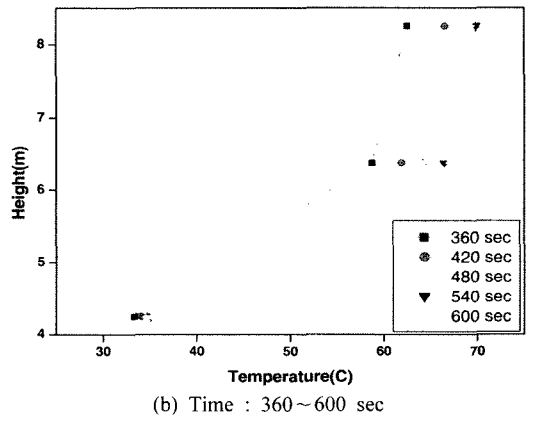
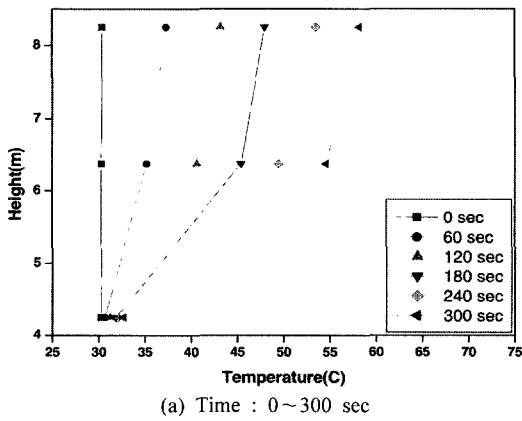


Fig. 7. Temperature with the vertical direction of tunnel(15 m from the fire 5 MW, non-ventilation system)

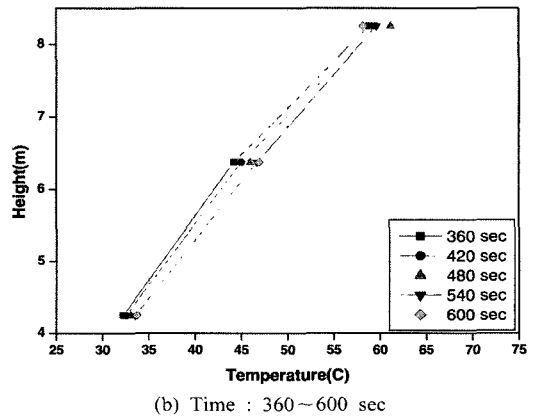
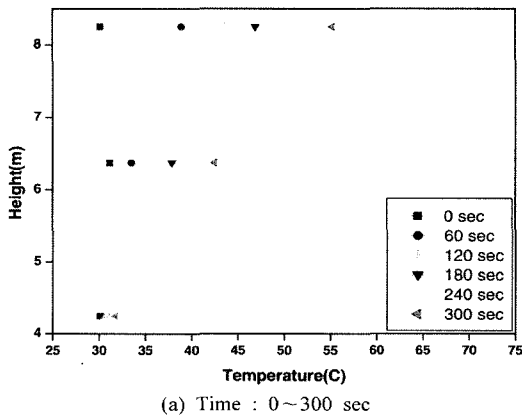


Fig. 8. Temperature with the vertical direction of tunnel(30 m from the fire-5 MW, non-ventilation system)

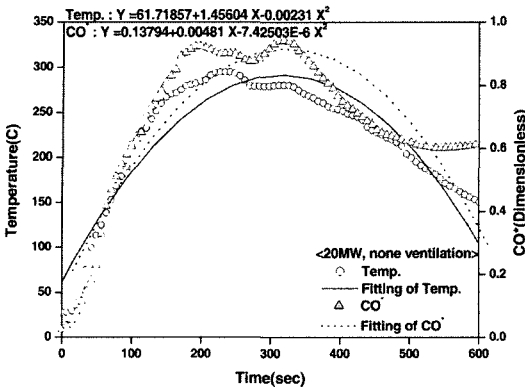


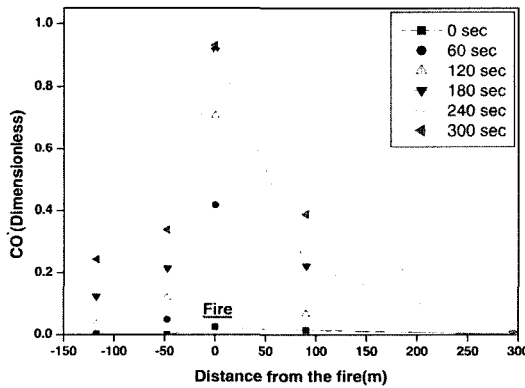
Fig. 9. Temperature and CO concentration at the fire location(20 MW, non-ventilation system)

연료 감소에 따른 소화과정으로 온도는 차츰 감소한다. CO 농도 역시 온도의 성장 곡선과 동일한 양상을 보이며, 180초 경과 후부터 최고값(624.07 ppm)을 나

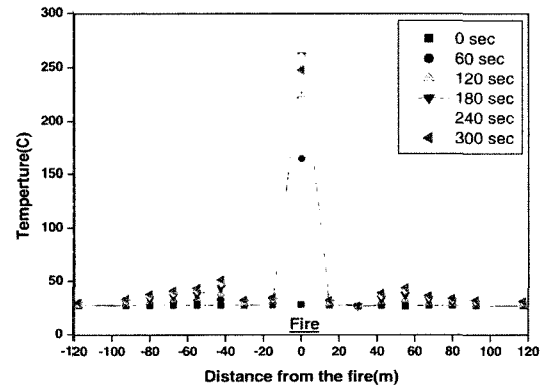
타낸다. 다만, 소화가 이루어진 후 온도는 급격히 감소하는 것에 반하여 터널 내 기류가 없으므로 CO가스가 적체 현상을 나타내어 농도가 급격히 감소하지는 않는다.

Fig. 10은 시간 변화에 따른 터널내부의 CO 농도 변화를 도시하였다. 3~6분 사이에 화원에서 발생하는 CO 농도는 터널 전후에 걸쳐 거의 대칭의 형태로 전파되며, 10분이 경과될 때 즈음에 이르러서는 화재 발생 지점 후방에서 역류현상에 의하여 CO*은 CO 발생량 최고치의 35%(202 ppm) 이상으로 유지되었다. 화재의 전방에는 100 m부근까지만 CO가 측정되며 300 m 부근에서는 10분이 지나도 감지되는 것은 없다. 역기류에 의한 CO는 30분이 경과해서야 비로소 배연되기 시작한다.

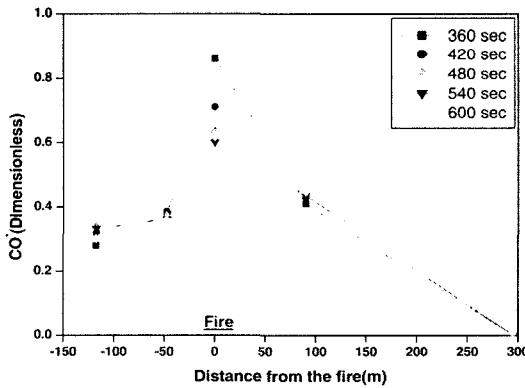
Fig. 11은 화재시 시간의 경과에 따른 터널내부의 높이 4.25 m 지점의 온도 분포이다. CO 농도 분포와 유사하게 화원을 기준으로 대칭 분포를 나타내며, 화재가 활발하게 진행되고 있는 동안에는 화염의 대류운동에



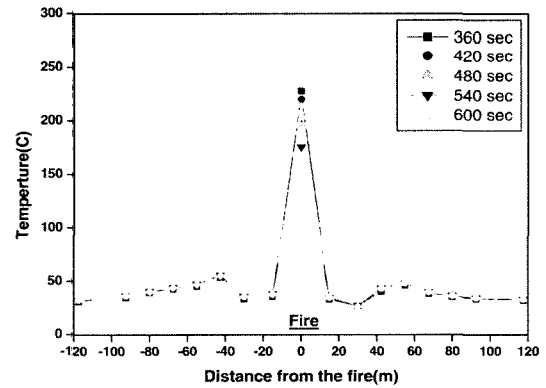
(a) Time : 0~300 sec



(a) Time : 0~300 sec



(b) Time : 360~600 sec



(b) Time 360~600 sec

Fig. 10. CO concentration with the longitudinal direction of tunnel(20 MW, non-ventilation system)

Fig. 11. Temperature with the longitudinal direction of tunnel(20 MW, non-ventilation system)

따라 온도가 점차적으로 증가한다. 화재지점으로부터 50 m 떨어진 지점까지는 온도가 직접적으로 상승하나 그 이후부터는 상승의 폭이 다소 둔화된다. 또한 화재 후 5분여까지는 온도가 지속적으로 상승하나 그 이후부터는 큰 변화를 보이지 않는다. 터널 단면에서 높이에 따른 온도 분포는 Fig. 12, Fig. 13과 같다. 화재지점 후방 15 m 지점의 터널 천장부는 화재 발생 후 8분 후까지 84℃까지 온도가 증가하며 그 이후부터 감소하기 시작한다. 또한, 높이 6.375 m 지점에서는 93.4℃까지 온도가 증가한 후 감소한다. 이는 급속한 화염의 하강과 화재에서 발생하는 복사열의 직접적인 영향일 것이다. 높이 4.25 지점에서는 10분 경과후 까지 고온을 나타내지는 않으나 지속적으로 감소하고 있어 계속적으로 화염이 하강하고 있음을 보여준다. 화재지점 후방 30 m 지점에서는 터널의 천장부에 온도가 가장 높게 나타났으며 이는 화염이 터널의 천장부를 타고 전파되어 가고 있음을 보여준다. 이 지점에서 화염은 지속적으로 하

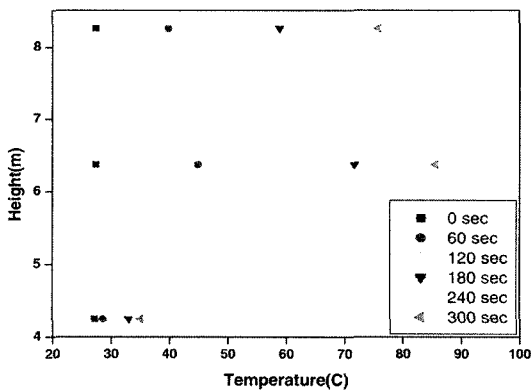
강하고 있으며, 10분 경과 후에는 화재 발생시점보다 약 10℃의 상승이 나타난다.

4. 피난연락갱 설치간격

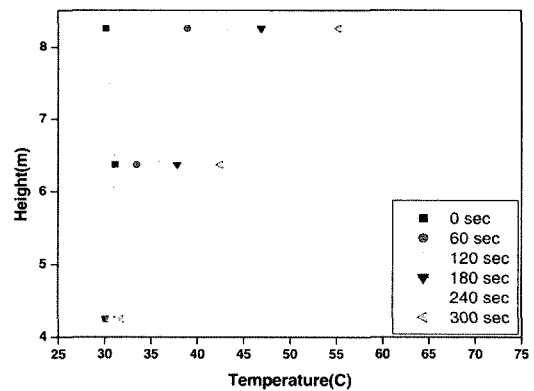
피난연락갱이란 일방향 터널에서 양 터널을 연결하여 터널 내 재난발생시 인접터널로 사람이나 자동차가 대피할 수 있도록 설치되는 비상시설로서 화재시 승객들의 안전 피난을 위한 핵심적인 구조 시설이다. 해외 여러 나라들의 피난연락갱에 관한 기준은 Table 2와 같다 [7-9]. 본 연구에서는 화재시 제연설비가 가동되지 않을 경우 CO의 전파 속도를 측정하여 피난연락갱의 적정거리를 추정하여 보았다.

4.1 CO 전파시간

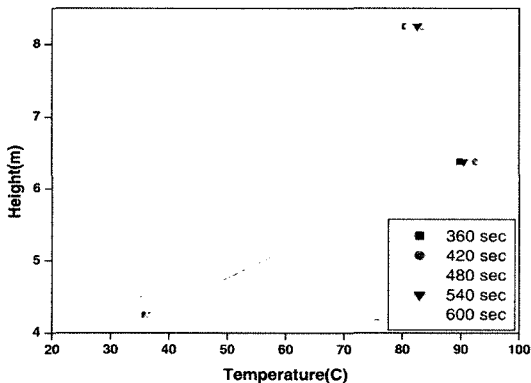
전술한 바와 같이 화재 발생시 CO의 농도는 연기의 거동과 비례적으로 증가하며, 실험 결과 터널 후방에서



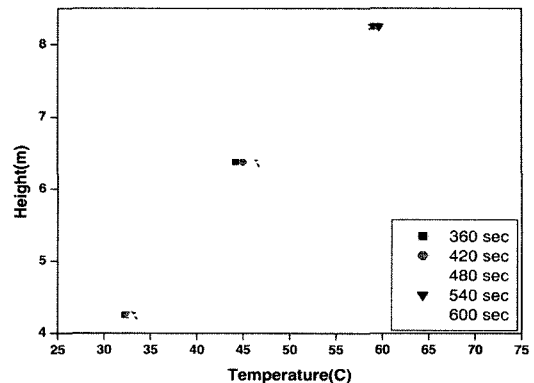
(a) Time : 0~300 sec



(a) Time : 0~300 sec



(b) Time : 360~600 sec



(b) Time : 360~600 sec

Fig. 12. Temperature with the vertical direction of tunnel(15 m from the fire-20 MW, non-ventilation system)

Fig. 13. Temperature with the vertical direction of tunnel(30 m from the fire-20 MW, non-ventilation system)

Table 2. The emergency exit distance of the some countries

		Max. distance lengths(m)		Application Limits	
		for people	for cars		
USA	NFPA	200		over 300 m	NFPA 502(road tunnel)
	NFPA	244			NFPA 130(subway)
Germany	PABT	350		over 700 m	road tunnel
	EBA	1,000			railway
	BOStrab	600			subway
Swiss		300	900	over 600 m	
Japan	one way	750		over 750 m	road
	facing traffic	350			road
Norway		250	1,000~2,000		road
England		750			railway
Sweden		150~200			railway
UN		200~500	600~1,500		road
EU		500	1,500		road
PIARC		100~200			road tunnels in city

CO가 감지되는 시점과 육안으로 관찰되는 연기의 도달 시점은 거의 일치하였다. 따라서 CO농도의 시간대별 변화를 검토하면 연기의 전파속도도 추정할 수 있을 것으로 판단되었다.

먼저, CO 전파 시간 분석을 위한 기준을 설정하였다. 일정 공간에서 반복적으로 노출되어도 유해한 영향을 받는 일이 없다고 믿어지는 조건을 제시하는 허용한계치(TLV, threshold limit value)는 시간하중평균(TLV-TWA, time weighted average), 단시간폭로한계(TLV-STEL, short term exposure limit) 그리고 천정치(TLV-C, ceiling)등 크게 세 가지로 구분된다. 국내의 경우 터널 화재시 CO 및 여타의 발생 유해물질에 관한 관리 기준은 정해져 있지 않으나, 지하생활공간 공기질관리법에서 CO 농도 기준을 1시간 평균 25 ppm으로 정하여 이를 기준으로 관리되고 있다[10]. 따라서 본 절에서는 25 ppm이 시간하중평균치이기는 하나, 국내에서 제시되고 있는 유일한 CO 기준값인 것을 고려하여 이를 기준으로 터널 내부의 CO 농도가 25 ppm에 이르는 시간을 분석하였다.

Fig. 14는 화재 후방으로 역기류에 의하여 CO 농도가 25 ppm 이상이 될 때의 시간을 측정한 결과이다. 화재 발생 47.5 m 지점에서 25 ppm 이상이 감지되는 시점은 1분 경과후였으며, 피난연락갱이 설치될 225 m 지점에서는 5분여(약 310초)가 경과하면 25 ppm 이상을 나타내었다.

또한, 이들 측정치를 가지고 화재로부터의 거리와

CO 농도와의 관계를 알아보기 위하여 다항회귀모형을 이용하였다. 이 방법을 통하여 얻어진 화재 거리와 CO 감지 시간의 상관식은 식 (4)와 같다.

$$Y = 35.60363 + 0.42049X + 0.00357X^2 \quad (4)$$

여기서, Y : CO propagation time [sec]
X : Distance from the fire [m]

이들 CO의 전파 속도와 거리와의 관계를 이용하여 승객들의 피난에 필요한 피난연락갱의 위치를 산정하였다.

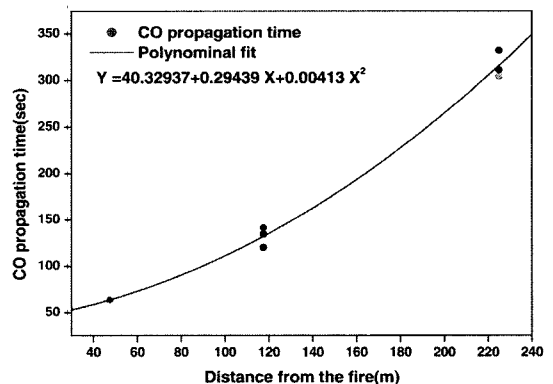


Fig. 14. The CO propagation time

4.2 피난연락갱 설치 간격

본 연구에서는 터널 화재 지점으로부터 225 m 지점의 CO 농도 변화를 관측함으로써 피난연락갱의 거리를 산정하여 보고자 하였다. Fig. 15는 터널 최상부인 높이 8.5 m 지점과 높이 3.5 m 지점의 CO 농도의 변화를 도시하였다. 시간의 경과에 따라 화재에 의해 발생된 역기류의 증가로 높이 8.5 m 지점에서는 260초가 경과 되었을 때 CO의 농도가 감지되기 시작하여 311.13초가 되면서부터 25 ppm 이상의 높은 농도가 지속된다. 그러나 승객들의 호흡과 직접적인 관련이 있을 높이인 3.5m 지점은 289.9초에 CO가 인지되어 374.77초 이후부터 25 ppm 이상을 유지한다. 이러한 터널 높이에 따른 CO 농도의 차이는 천장부에서 하강하는 연층의 증가와 함께 차츰 감소하여 화재 발생 후 15분(900초)경에 최고를 보인 후 급격히 감소한다.

화재시 피난 속도와 시간은 터널 내부의 조명등 여러 제반 여건에 따라 상이하므로 명확히 규정하는 것이 매우 곤란하다. 피난 시간의 경우 EU의 주도하에 노르웨이 실제터널에서 시행된 EUREKA 프로젝트(NOV. 1995)에서는 6분으로, 국내의 연구에서는 4분으로 규정하고 있으며, 피난 속도의 경우도 1999년도 PIARC 보고서에서는 0.5~1.5 m/sec, 국내의 연구에서는 0.8~0.9 m/sec로 제시하고 있다. 이 범위에서의 피난 시간과 속도에 의거하여 피난 가능 거리를 산출하여 보면 Table 3과 같으며, 현재까지 제시된 피난 속도와 시간을 적용할 경우 피난가능거리는 200~430 m 이다. 결론적으로, CO가 감지되기 시작하는 시점은 약 4분정도 이기는 하나 승객들의 호흡에 관여하는 높이까지 하강하는데 소요되는 시간을 고려하여 볼 때, 대피시간은 EUREKA test에서 제시한 시간과 동일한 6분이 적절할 것이다. 그러나 화재시 승객들의 심리적 상태를 고려하

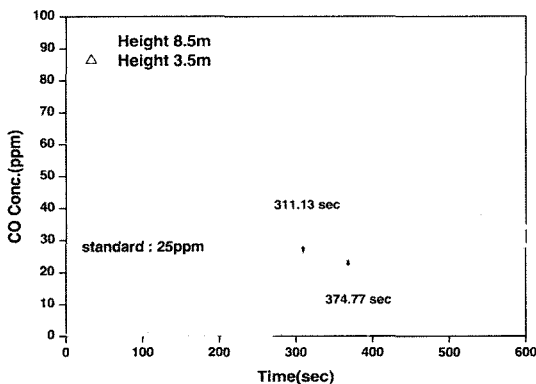


Fig. 15. CO concentration at 225 m position from the fire location

Table 3. The interval between emergency exits in tunnel

escape time(sec)	escape speed(m/sec)		
	0.85	1.00	1.19
240	204	240	285.6
300	255	300	357
600	306	360	428.4

여 1분여의 지체시간을 생각하면 실제의 피난시간은 5분 정도가 될 것이므로 최대 간격 250 m로 대인용 피난연락갱을 설치하는 것이 바람직할 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 장대 터널의 방재설비를 계획하기 위한 축소 모형실험을 실시하여, 터널 화재시 연기의 거동 특성 파악과 피난연락갱의 설치 간격을 검토하였으며, 이를 통하여 얻어낸 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 터널 내 20 MW의 화재가 발생 하였을 경우 화재 발생 47.5 m 지점에서 25 ppm 이상이 감지되는 시점은 1분 경과 후였으며, 225 m 지점에서는 5분여가 경과하면 25 ppm 이상을 나타내었다.
- 2) 이들 측정치를 가지고 다항회귀모형을 적용한 분석 결과 화재 거리와 CO 감지 시간의 상관식은 아래 식과 같다.

$$Y = 35.60363 + 0.42049X + 0.00357X^2$$

여기서, Y : CO propagation time(sec)

X : Distance from the fire(m)

- 3) 승객들의 피난에 필요한 피난연락갱의 위치를 검토한 결과, CO가 감지되기 시작하는 시점은 약 4분정도이기는 하나 승객들의 호흡에 관여하는 높이까지 하강하는데 소요되는 시간과 화재시 승객들의 심리적 상태를 고려하여 1분여의 지체시간을 생각하면 실제의 피난시간은 5분 정도가 될 것이므로 최대 간격 250 m로 대인용 피난연락갱을 설치하는 것이 바람직할 것이다.

사 사

본 연구는 LG건설(주) “장대터널 환기시스템 최적화 연구” 용역의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최준석외, 2002, 터널내 자동차화재와 풀화재 비교 분석, 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회, 5-36.
2. 김정엽외, 2004, 도로터널 제연설비 축소 모형실험에 관한 연구, 한국터널공학회 2003 정기학술발표회 논문집, 12-22.
3. 유영일, 이희근, 1998, 일방향 도로터널내 화재 발생시 역류를 막는 환기속도결정에 관한 축소 모형실험, 터널과 지하공간, 제8권, 107-117.
4. 이성룡외, 2002, 터널화재시 자연환기에 의한 연기거동에 관한 실험적 연구, 설비공학논문집, 제14권 제3호, 247-253.
5. Oka Y. and Atkinson G.T., 1995, Control of smoke flow in tunnel fires, Fire Safety Journal, 25, 305-322.
6. Megret O. and O. Vauquelin, 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire safety journal 34, 393-401.
7. National Fire Protection Association, 2001, NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems 2001 Edition.
8. National Fire Protection Association, 1998, NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridge, and Other Limited Access Highways.
9. 일본도로공단, 일본도로설계요령('97 개정판).
10. 건설교통부, 1998, 지하생활공간공기질관리법시행규칙 - 제3조 지하공기질 기준.

유 용 호

1997년 인하대학교 자원공학과 공학사
1999년 인하대학교 자원공학과 공학석사
2005년 인하대학교 자원공학과 공학박사

Tel. 031-9100-107
E-mail : ventil@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 화재설비연구부

윤 성 욱

1993년 서울대학교 자원공학과 공학사
1997년 서울대학교 자원공학과 공학석사
2002년 영국 Imperial College
환경공학과 공학박사

Tel. 02-568-1571
E-mail : yoonsw@lgenc.co.kr
현재 (주) 엘지건설 기술본부 연구개발팀
과장

윤 찬 훈

2002년 인하대학교 자원공학과 공학사
2004년 인하대학교 자원공학과
공학석사

Tel: 032-872-7551
E-mail: yoon0940@hanmail.net
현재 인하대학교 환경토목공학부
박사과정 재학중

김 진

1987년 인하대학교 공학사
1990년 미국 University of Kentucky
공학석사
1995년 미국 University of Missouri-
Rolla 공학박사

Tel: 032-860-7558
E-mail: jinkim@inha.ac.kr
현재 인하대학교 환경토목공학부
부교수