

도로터널 내 환기소 위치별 방재 효율에 관한 실험적 연구

이동호^{1*}, 김하영², 윤찬훈³, 김진⁴

An experimental study of smoke extraction efficiency along with ventilation building location in the road tunnel

Dong-Ho Rie, Ha-Young Kim, Chan-Hoon Yoon, Jin Kim

Abstract An experimental study was carried out on a reduced scale model tunnel to investigate the efficiency of disaster prevention at underground and ground ventilation equipments for the fire in road tunnels. Based on Froude modeling, the 1/50 scaled model tunnel (20 m long) was manufactured. The vertical shafts that are used in the analysis of efficiency of disaster prevention are the two models that had considered when the real tunnels are designed and the amounts of smoke exhaust are applied the miniature of the real tunnels' smoke exhaust, 560 and 280 m³/s. As the result of analysis, it is the possible the emissions of the entire quantity of CO gas through the vertical shafts. In the ground ventilation equipments, the concentration of CO is discharged 2.23~2.73 ppm smaller than the underground ventilation equipments. And the temperature rise in the ground ventilation equipments is 0.53~0.94°C lower than in the underground ventilation equipments because of a cooling effect of the surface of the tunnel wall. As a result of analysis of CO concentration and the temperature rise in the modeling ventilation equipment, the position of ground ventilation equipment is more effective than the underground ventilation equipment in disaster prevention measures.

Keywords: Road tunnel, scaled model tunnel, efficiency of disaster prevention, ventilation equipmnet

요지 본 연구에서는 도로터널 화재 시 지하 및 지상 환기소의 방재 효율을 검토하기 위해 터널 축소모형실험을 실시하였다. 터널 모형은 Froude 상사를 기본으로, 도로터널을 1/50로 축소하여 20 m의 모형 터널을 제작하였다. 방재 효율 분석에 적용된 연직갱은 실제 터널 설계시 고려된 두 가지 모형으로서 실험용 560, 280 m³/s의 배연량을 1/50로 상사하여 적용하였다. 결과로 모두 연직갱을 통한 CO 가스의 전량 배출이 가능한 것으로 분석되었다. 두 환기소의 CO 농도는 지상 환기소가 지하 환기소 보다 2.23~2.73 ppm 작게 배출되었다. 그리고 지상 환기소의 경우 터널 벽면의 냉각효과로 인해 화재 후 온도의 상승이 지하 환기소보다 0.53~0.94°C 낮게 나타났다. 이상의 축소모형 환기소 내 CO농도 및 온도변화의 분석 결과, 방재적인 측면에서 볼 때 도로터널 내 환기소의 위치는 지하보다 지상에 위치하는 것이 유리할 것으로 판단되었다.

주요어: 도로터널, 축소모형실험장치, 방재 효율, 환기소, 연직갱

1. 서론

장대 도로터널은 반 밀폐공간이라는 점과 더불어 매우 긴 연장을 가지고 있다는 점으로 인하여 화재나 사고가 발생하는 경우, 일반도로가 갖는 위험요소보다 더 많은 위험요소를 내포할 수밖에 없다. 따라서 장대터널에서의 사고를 예방하고 사고의 충격을 최소화할 수 있도록 구조적, 기술적, 조직적인 안전기준이 필요하며, 공사비용과 유지관리 비용의 절감을 위해 가장 효과적으로 위험을 감소시킬 수 있는 방법을 우선적으로 고려하여

야 한다. 특히, 터널에서 화재는 기류의 확산이 제한되어 화재연기로 인한 가시거리의 감소, 유독성가스의 확산 및 급격한 온도상승을 초래하여 통행자의 생명을 위협할 뿐만 아니라 구조물이나 각종설비에 손상을 유발할 수 있다. 이러한 터널 화재시 문제점들을 해결하기 위해 국내에서는 장대 도로터널 피난연락갱의 적정 간격(유용호 등, 2005), 도로터널 내 제연설비(김정엽 등, 2004) 및 터널 화재시 자연환기에 의한 연기 거동 연구(이성룡 등, 2002)와 같은 터널 축소모형을 이용한 연구들이 수행되고 있으며, 축소모형실험을 실제 터널 설계시에 위험도 평가 방법으로 적용하고 있다.

국내의 장대 도로터널에는 환기 및 방재시스템 운전시 연직갱을 이용하여 유해가스들을 배연시키기 위한 환기소가 설치되어 있다. 도로터널내의 환기소는 대체

¹정회원, 인천대학교 안전공학과

²정회원, 인천대학교 안전공학과 대학원

³정회원, 인하대학교 자원공학과 대학원

⁴정회원, 인하대학교 자원공학과

*교신저자: 이동호 (E-mail: riedh@incheon.ac.kr)

적으로 지하에 설치되어 있으나 지하에 설치되어 있을 경우 접근의 용이성, 화재의 취약성 등의 문제점이 예상된다. 반면, 지상 환기소를 설치하였을 경우 접근의 용이성, 연직갱 관의 냉각효과로 인한 배연팬의 열화 억제가 예상된다. 이에 본 연구에서는 환기소의 위치에 따른 방재 효율성 검토를 위해 축소모형실험 통한 CO 농도와 온도특성을 지상 환기소와 지하 환기소로 나누어 분석하였다.

2. 축소모형 실험 장치

2.1 상사법칙

축소모형실험은 차원분석을 통해 실험결과를 일반화시키고 상사법칙을 만족시키는 무차원 매개변수들을 이끌어내는 것이 매우 중요하다. 유동을 해석하기 위한 방법은 Froude 모델링과 압력 모델링 등이 있다. 압력 모델링은 모델의 주위 압력을 변화시키므로써 실제상황을 모사할 수 있다. 그러나 도로터널 환기시스템의 경우 모형의 주위 압력을 변화시키면서 실험을 행하기가 현실상 어렵기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 일반적(윤찬훈 등, 2006)이다.

Froude 모델링은 모델 주위의 압력이 같은 상태에서 실험을 행할 수 있으며, 화재의 Froude 모델링은 기하학적 형태가 보존되어야 하므로 차원분석을 통하여 $V/L^{1/2}$ 와 $Q/L^{5/2}$ 를 일정하게 유지시킨다(이창우 등, 2006). Froude 모델링의 한계는 점착력이 매우 큰 경우이며 난류조건이 지배적인 화재인 경우 점착력은 무시될 수 있기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 가능하다(윤찬훈 등, 2006). 화재의 Froude 모델링을 이용한 모형터널과 실제터널의 열방출 및 속도는 식 (1)과 같이 상사된다.

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

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

- Q : 열방출량(kW)
- L : 터널길이(m)
- V : 환기속도(m/sec)

식 (1)에서 아래첨자 'm'은 축소모형에서 스케일된 값임을 나타내며, 'r'은 실제 터널에서의 값을 나타낸다. 식 (1)로부터 축소모형터널에서의 열방출율, 환기속도 등을 계산하였으며, 그 결과를 실험에 적용하였다.

2.2 실험장치

제작 모형은 그림 1과 같이 연직갱이 포함된 일방향 쌍굴터널에 최대한으로 근사하도록 기하학적 형상을 모사하였다. 터널부분은 실제 터널 단면의 1/50로 축소하였으며, 길이 20 m, 단면직경 0.2 m의 아크릴 원관 노면에 상당하는 아크릴판을 삽입하여 그 단면을 실제의 터널 기준단면과 동일하게 제작 하였다. 화원 부분은 아크릴 원형관의 변형을 방지하기 위하여 특수 유리로 제작 하였다. 터널 부분은 기본적으로 1 m 간격의 조립식으로 제작하여 연직갱 및 화원의 위치 변화가 가능하도록 하였다. 터널내 기류는 원심력팬의 회전속도를 조절하여 제어하였다. 기존 국내 실험에서 적용된 연직갱의 설치 위치가 실제 터널에 적용되는 것과는 달리 터널의 바로 상층부에 관통되어진 점을 감안하여, 본 실험장치는 실제 도로터널에 적용되는 기하학적형상에 최대한 근사하도록 터널 측면에 굴곡부를 가지도록 설계하였다. 또한, 연직갱은 프랜지 조립형의 원통관 형식으로 높이 조절이 가능하도록 설계하였으며, 입기와 배기가 모두 가능한 팬을 설치하였다.

화원은 직경이 7.5 cm인 pool식 버너를 사용하였다. Pool식 버너란 수평연료표면에서 연료가 자연 연소되는

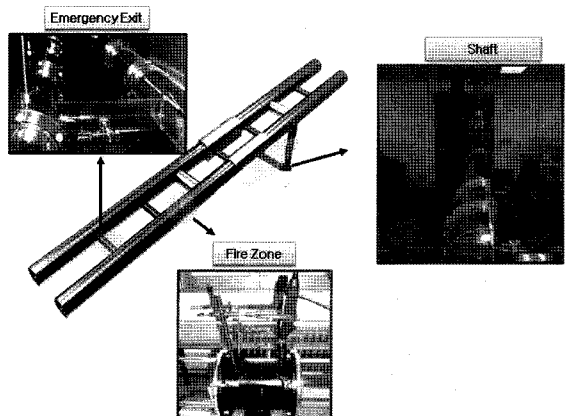


그림 1. 축소모형 실험장치

버너로서, pool식 버너에서의 연소는 낮은 초기 모멘텀 확산화염(diffusion flame)이라는 것과 부력효과에 의해 영향을 많이 받는다는 특징을 가지므로 실제 차량의 연소를 비교적 유사하게 모사할 수 있는 장점이 있다(Megret and Vauquelin 2000). 연료로는 가솔린을 사용하였으며, pool 화재의 경우 열방출량은 식 (2)(Megret and Vauquelin 2000)에 의하여 결정하였다. 또한, 화재 강도의 설정은 연료의 연소효율과 복사열의 분산을 고려하여 계산된 방출량의 0.7배로 설정하였다(Megret and Vauquelin 2000).

$$\dot{Q} = H_c \dot{m}'' A \quad (2)$$

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

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

D : 터널직경(m)

H_c : 휘발성물질의 연소열(휘발유=43.7 MJ/kg)

A : 화원단면적(m²)

모형 터널에서 발생한 화재의 강도는 현재 국내 방재 설계 시 기준이 되고 있는 화재 강도인 20 MW로 모사

하였다(한국도로공사, 2004).

3. 축소모형 실험결과

3.1 연직갱 형태에 따른 배연능력 검토

본 연구의 목표인 지상 및 지하 환기소의 배연효율 검토 이전에 두 가지 형태의 연직갱 A, B에 대한 CO 가스 배연능력을 검증하는 것이 필요하다고 판단되어, 실제 터널 설계시 고려된 두 가지 기준으로 표 1과 같이 설정하여 20 MW 화재가 발생할 경우에 배연능력 검토 실험을 진행 하였다. 그리고 CO농도의 기준치인 25 ppm(지하생활공간 공기질관리법의 CO허용기준)과 100 ppm(도로터널내 CO허용기준)을 배연효율의 기준으로 설정하였다(건설교통부, 2004).

본 실험은 그림 2~3에서 보는 바와 같이 연직갱과 화원의 거리는 실제상황에서 약 340 m 이격되어 있으

표 1. 모형실험의 적용 풍량 및 임계속도

Case / 적용지	연직갱 A		연직갱 B	
	실제	모델	실제	모델
연직갱량	560 m ³ /s	0.032 m ³ /s	280 m ³ /s	0.016 m ³ /s
임계속도	3.4 m/s	0.48 m/s	3.4 m/s	0.48 m/s

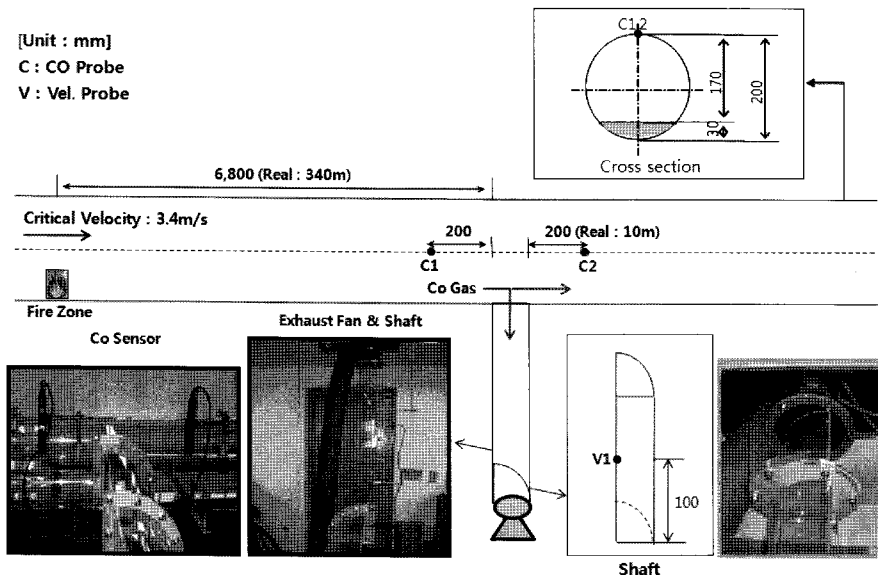


그림 2. 연직갱 배연모형 실험 모식도(연직갱 A)

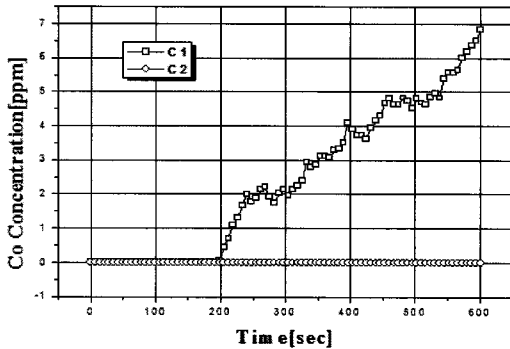


그림 3. C1 및 C2 지점에서의 시간경과별 농도변화(연직갱 A)

며, 연직갱에서 발생하는 배연 기류가 시작되는 지점을 중심으로 하여 좌우로 20 cm(실제 : 10 m) 이격된 지점에 CO 센서를 부착하였다. 본 터널에서는 화재와 동시에 임계속도 3.4 m/s가 유입되게 하였으며, 연직갱 내부의 V1에서 풍속을 측정하여 연직갱의 형태에 따라 배연 팬에서 각각 560 m³/s, 280 m³/s의 풍량을 적용하였다. 연직갱의 형태에 따른 배연능력을 가늠하는 기준은 C1 지점과 C2 지점의 CO 농도로 결정하였고, 정확한 실험을 위해 화원과 연직갱 사이에 있는 피난연락갱에 설치된 방화문은 모두 닫은 상태에서 진행하였다.

3.1.1 연직갱 A의 배연능력 실험

그림 2에서와 같이 연직갱 A는 본선 터널 천정부 전체에 연결된 1/4 원형 모양의 환기갱부와 구배 12%의 경사갱부, 그리고 연직갱으로 구성되어 있다. 그 이후 연직갱은 배기팬과 연결되어 있어 원하는 풍량을 쉽게 적용할 수 있도록 하였다. 실험은 연직갱과 340 m 이격된 지점에서 20 MW 화재와 동시에 임계속도(3.4 m/s)와 배연풍량(560 m³/s)을 적용시켰으며, 화재 후 시간에 따른 CO 농도를 C1과 C2 지점에서 측정하였다.

연직갱 이전지점에 설치되어있는 C1 센서에서는 화재 후 약 29초(실제 : 205초)후에 처음으로 CO가 0.45 ppm으로 감지되었으며, 약 85초(실제 : 600초) 이후에는 6.82 ppm까지 상승하였다. 그러나 연직갱을 지난 지점에 설치된 C2 센서에서는 화재발생 후 600초까지 CO 가스가 전혀 감지되지 않았다(그림 3).

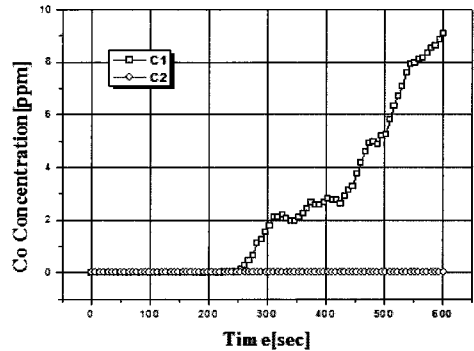


그림 4. C1 및 C2 지점에서의 시간경과별 농도변화(연직갱 B)

3.1.2 연직갱 B의 배연능력 실험

연직갱 B 역시 연직갱 A와 같이 본선 터널 천정부에 연결된 환기갱부와 구배 12%의 경사갱부, 그리고 연직갱으로 구성되어 있다. 그러나 환기갱 및 경사갱의 경우 1/4 원형 모양이 아닌 직사각형 형태이며, 1/4 원형 모양의 연직갱부는 연직갱 A에 비해 약 1/2배가량 작은 단면적을 가지고 있다. 실험은 연직갱 A 때와 같은 조건으로 20 MW의 화재와 동시에 임계속도(3.4 m/s)와 배연풍량(280 m³/s)을 적용시켰다(그림 5).

연직갱 이전 지점에 설치되어있는 C1 센서에서는 화재 후 약 36초(실제 : 254초)후에 처음으로 CO가 0.14 ppm으로 감지되었으며, 약 85초(실제 : 600초) 이후에는 9.1 ppm 까지 상승하였다. 연직갱을 지난 지점에 설치된 C2 센서에서는 연직갱 A와 마찬가지로 CO 농도가 감지되지 않았다(그림 4).

검토결과 두 가지 연직갱의 형태 모두 적절한 배연풍량을 통해 터널 내 20 MW화재시 발생하는 CO 가스를 적절하게 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 지상 및 지하 환기소의 CO 농도 및 온도변화 분석

터널 내에 화재가 발생하였을 경우 연직갱의 터널내 임계속도를 3.4 m/s로 유지하여 CO 가스 배연시 환기소 위치에 따른 환기팬의 열화 및 CO 농도를 측정하기 위한 실험이다.

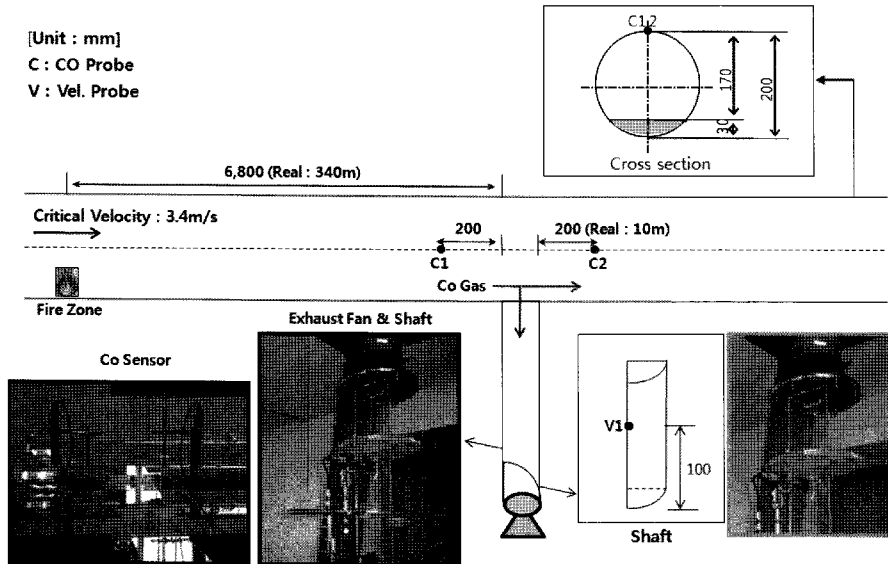


그림 5. 연직갱 배연모형 실험 모식도(연직갱 B)

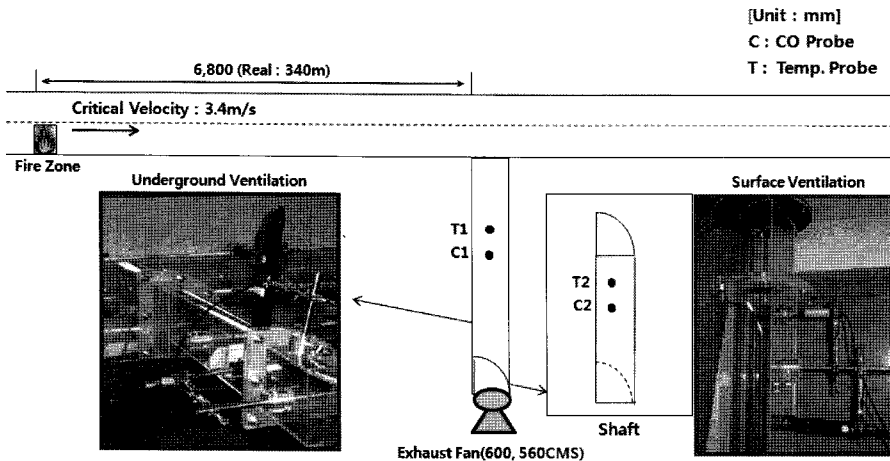


그림 6. 환기소 위치별 CO농도 및 온도 비교 실험 모식도(연직갱 A)

3.2.1 CO 농도 및 온도변화 측정(연직갱 A)

터널 내에 화재가 발생하였을 경우 터널 내 임계속도를 3.4 m/s(모델 : 0.48 m/s)로 유지하고 연직갱의 배연 팬은 가동하지 않았을 때 지하 환기소와 지상 환기소에서의 CO 농도와 온도변화를 분석하였다. 지하 환기소의 경우는 C1, T1 지점에서, 지상 환기소의 경우는 C2, T2 지점에서의 시간별 CO농도 및 온도변화를 확인하였다. (그림 6).

그림 7은 지하 환기소 및 지상 환기소별 CO 농도변화를 나타내고 있는데, 지하 환기소에서 최대 CO 농도는 화재발생 1200초 후 26.77 ppm을 나타내었으며, 지상 환기소의 경우 24.54 ppm으로서 지하 환기소보다 약 2.23 ppm 감소한 농도를 보였다. 또한, 지하 환기소와 지상 환기소의 최초 CO 검출시간의 차이는 약 200초로 나타났는데 이는 각 환기소의 위치적인 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

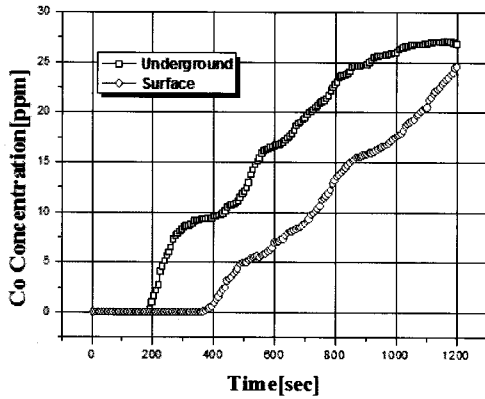


그림 7. 지하 및 지상 CO 농도변화

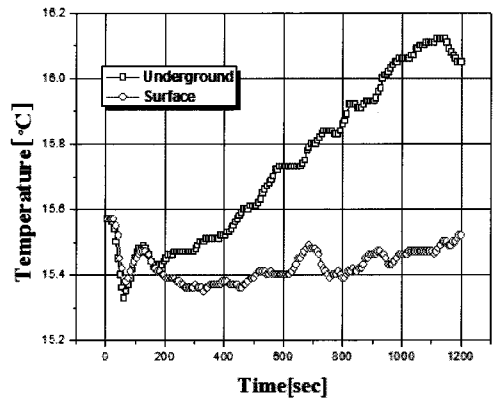


그림 8. 지하 및 지상 온도변화

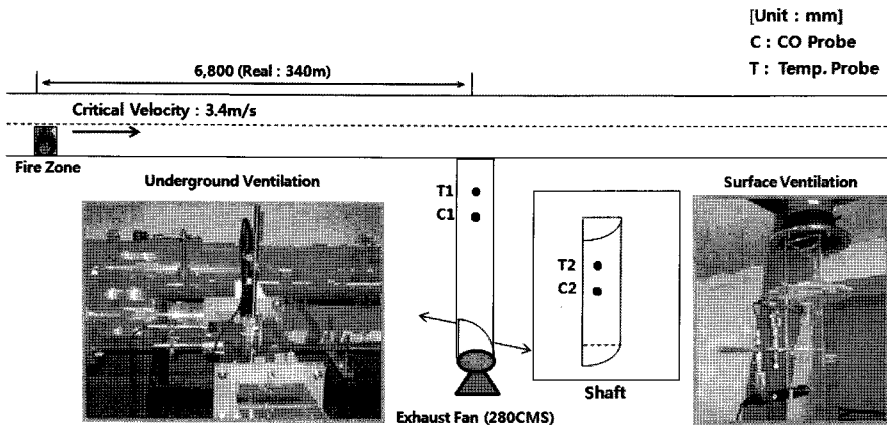


그림 9. 지하 & 지상 환기소 CO, 온도 비교실험 모식도(연직갱 B)

그림 8은 환기소내 온도변화를 나타낸 것으로 화재 발생 후 100초 이전에 지하 및 지상 환기소 내 온도가 낮아지다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 화재 발생과 함께 터널 내 임계속도가 유지되면서 신선한 외기가 유해가스보다 각각의 환기소에 일찍 도달하여 온도가 점차 낮아지며, 화재의 규모가 점차 정점에 이르면서 온도가 점차 증가되는 것으로 판단된다.

화재 후 지하 및 지상 환기소의 최대 온도는 각각 16.12°C, 15.57°C 로서 약 0.55°C 가량 차이를 보였으며, 최종 분석시간인 1200초 때의 온도는 각각 16.05°C, 15.52°C 로서 약 0.53°C 차이를 나타내었다.

3.2.2 CO 농도 및 온도변화 측정(연직갱 B)

연직갱 B의 경우 역시 터널 내에 화재가 발생하였을 경우 터널 내 임계속도를 3.4 m/s(모델 : 0.48 m/s)로 유지하고 연직갱의 배연팬은 가동하지 않았을 때 지하 환기소와 지상 환기소의 CO 농도와 온도변화를 분석하였다.

지하 및 지상 환기소에서의 CO 농도변화 측정 결과, 그림 10과 같이 위치적 특성으로 인해 CO가 검출되기 시작하는 시간이 지상 환기소의 경우 약 412초로 나타나 약 205초인 지하 환기소보다 207초의 차이가 발생하였다. 또한 최종 분석시간인 1200초에 지하와 지상의

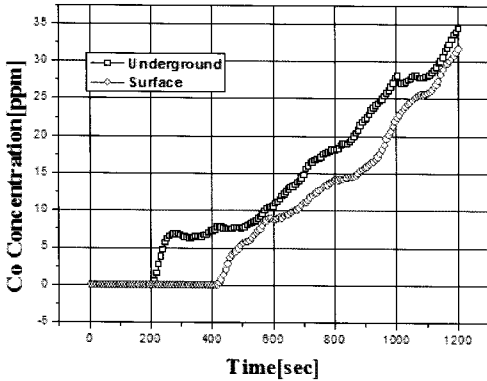


그림 10. 지하 및 지상 CO 농도변화

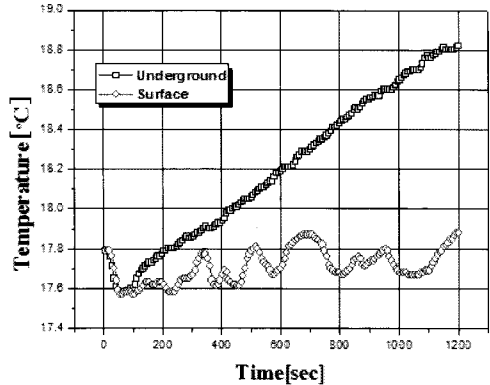


그림 11. 지하 및 지상 온도변화

CO 농도는 약 34.36 ppm과 약 31.63 ppm으로 나타나 지상 환기소가 2.73 ppm 낮은 수치를 나타냈다.

그림 11은 환기소 내 온도변화를 나타낸 것으로 연직갱 A의 경우와 같이 화재 후 100초 이전에 온도가 낮아지는 현상이 발생하였다. 지하 환기소의 경우 최종 분석 시간인 1200초에 약 18.82°C까지 상승하였으나 지상 환기소는 시간에 따른 온도 변화가 완만한 상승세를 나타내며 최종 분석시간에는 약 17.88°C까지 상승하는 것으로 나타났다. 이는 연직갱의 지하 환기소에 비해 갱도의 길이가 상대적으로 길어 갱도표면의 냉각효과로 완만한 상승을 보이는 것으로 사료된다.

4. 결 론

1. 두 가지 연직갱의 배연능력 실험 결과, 연직갱 A의 경우 C1지점에서 최대 6.82 ppm, 연직갱 B의 경우는 9.1 ppm의 CO 농도가 감지되었으며 C2 지점에서는 두 가지 연직갱 모두 CO가 검출되지 않았다. 즉 두 연직갱 모두 유해가스들의 연직갱을 통한 전량 배출이 가능하였다. 결론적으로 두 가지 연직갱을 통한 방재 효율 분석에는 문제가 없을 것으로 사료된다.
2. 지상 및 지하 환기소에서의 CO 농도 변화 측정 결과 환기소의 위치적 특성으로 인해 CO가 상승하기 시작하는 시간이 두 가지 형태의 연직갱 모두 지상 환기소의 경우 지하 환기소보다 약 200초의 차이가 발

생하는 것으로 나타났다. 또한, 최종 분석시간인 1200초에 지하와 지상의 CO 농도 차이는 각각 2.23 ppm, 2.73 ppm 으로서 지하 보다 지상 환기소가 방재적인 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

3. 지하 환기소의 경우 화재지역과 근접하여 지속적인 온도 상승이 발생하여 최종 분석시간인 1200초에 연직갱 A, B 각각 16.05°C, 18.82°C까지 상승하는 것으로 나타났다. 반면, 지상 환기소는 지하 환기소에 비해 시간에 따른 온도 변화가 완만한 상승세를 나타내며, 최종 분석시간에는 15.52°C, 17.88°C까지 상승하는 것으로 나타나는 것으로 보아 지하 환기소에 비해 갱도의 길이가 상대적으로 길어 갱도표면의 냉각효과로 인해 온도가 낮게 형성 되었다.
4. 최종 분석시간인 1200초에 지하와 지상의 CO 농도 차이는 각각 2.23 ppm, 2.73 ppm 으로 지상 환기소 내 CO 농도 수치가 다소 낮으나, 화재 후 발생하는 유해한 가스들이 연직갱으로 전량 배연되는 것을 가정하였으므로 1200초 이상의 시간이 경과되면 두 환기소의 CO 농도 차이는 거의 발생하지 않을 것으로 판단된다. 또한 화재 후 두 환기소의 온도는 약 0.53°C, 0.94°C의 미세한 차이가 발생하지만, 이는 실제 연직갱의 높이 및 단면의 열전도율에 대한 상사를 완벽하게 재현할 수 없는 실험적 한계로 실제 터널에서의 온도차와 정량적인 상사는 되지 않았으나, 환기소 위치에 따른 온도차의 경향을 반영할 수 있을 것으로

판단된다.

5. 터널 내 연직갱 환기소의 위치는 방재적인 측면으로 고려될 경우 접근의 용이성, 연직갱 관의 냉각효과로 인한 배연팬의 열화 역제가 예상되는 지상 환기소가 다소 유리한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2004), 도로터널 방재시설 설치지침, 건설교통부.
2. 김정엽, 신현준, 강세구, 안경철, 김택곤 (2004), 도로터널 제연설비 축소모형실험에 관한 연구, 한국터널공학회 2003 정기학술발표회 논문집, pp. 12-22.
3. 유용호, 윤성욱, 김진, 윤찬훈 (2005), 장대 교통터널의 피난연락갱 설치 간격에 관한 실험적 연구, 암반공학회, 터널과 지하공간, 제15권, 제1호, pp. 61-70.
4. 윤찬훈, 윤성욱, 유용호, 김진 (2006), 장대 교통터널 화재시 임계속도 결정에 관한 실험적 연구, 암반공학회, 터널과 지하공간, 제16권, 제1호, pp. 85-94.
5. 이성룡, 정진용, 김충익, 유홍선 (2002), 터널화재시 자연 환기에 의한 연기거동에 관한 실험적 연구, 설비공학회 논문집, 제14권, 제3호, pp. 247-253.
6. 이창우, 서기윤, 김정욱 (2006), 터널의 기하학적 형태 및 캐노피 설치가 터널 환기 및 화재 확산에 미치는 영향 분석, 터널공학회, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 325-331.
7. 한국도로공사 (2002), 고속도로터널 환기시설 설계기준, 한국도로공사.
8. Megret, O. and Vauquelin, O. (2000), A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal 34, pp. 393-401.

접수일(2010.2.11), 수정일(2010.4.19), 게재확정일(2010.5.24)