

## 일방향 도로터널내 화재 발생시 역류를 막는 환기속도결정에 관한 축소모형실험

유영일<sup>1)</sup> · 이희근<sup>2)</sup>

### The Reduced Model Test for the Determination of Ventilation Velocity to Prevent Backflow in Uni-directional Road Tunnel during a Fire Disaster

Young-II You and Hi-Keun Lee

**ABSTRACT** In the case of a fire disaster in a uni-directional road tunnel, it is important to determine the critical ventilation velocity to prevent the backflow travelling toward the tunnel exit where vehicles are stopped. The critical ventilation velocity is horizontal velocity to prevent hot smoke from moving toward the tunnel exit. According to Froude modelling, the model tunnel which was 300 mm in diameter and 21 m in length was made of acryl tubes. Inner section of acryl tubes was clothed with polycarbonate. 1/20 scaled model vehicles were installed to simulate the situation that vehicles are stopped in the tunnel exit. Methanol in a pool type burner was burned in the middle of tunnel to simulate a fire hazard. In this study, the basis of determining the critical ventilation velocity is the ventilation flow rate that is able to maintain the allowable CO concentration in the tunnel section. We assumed that the allowable CO concentration was backflow dispersion index. Furthermore, We intended to find out CO distribution and temperature distribution according as we changed ventilation velocity. The results of this study were that no backflow happened when ventilation velocity was 0.52 m/s in the case of 5.75 kW. If we adapt these results to a fire disaster releasing 10 MW heat capacity in real tunnel which is 400 m in length, no backflow happens when ventilation velocity is 2.31 m/s. After we figured out dimensionless heat release rate and dimensionless ventilation velocity of model test and those of real test to verify experimental correctness, we tried to find out correlation between experimental results of model tunnel and those of real tunnel.

### 1. 서 론

터널내 화재는 드문 편으로 지난 50년동안 발생한 대형 도로터널 화재로는 1949년 Holland 터널화재(미국 뉴욕-뉴저지), 1979년 Nihonzaka 터널화재(일본), 그리고 1982년 Caldecott 터널화재(미국 캘리포니아) 등을 들 수 있다. 지금까지 터널화재건수가 상당히 적지만 화재가 발생하였을 경우 인명피해의 가능성성이 상당히 크다. 열과 연소물질이 터널입구쪽으로 이동하여 정체되어 있는 차량과 탈출하려는 사람에게 상당히 위험한 환경을 유발시키기 때문이다.

일방향 도로터널화재시 터널환기시스템의 목표 중의 하나는 화재시 정차되어 있는 차량쪽과 탈출하려는 사람에게 움직이는 스모그를 억제하는 것이다. 스모그를

억제하기 위한 방법중의 하나는 화재지역에서 한쪽 방향으로만 환기를 시키는 것이다. 즉, 스모그와 연소물질을 터널출구쪽으로 유도시켜 터널입구쪽에 머물러 있는 사람들이 피할 수 있도록 하고 소방원들이 접근하기 쉽도록 하는 것이다. 일방향 도로터널의 경우에 요즈음 경제성을 중요시하여 대부분의 장대터널에 종류식 환기방식을 채택하고 있다. 화재지점부터 출구측의 차량은 주행하여 탈출하는 것이 가능하고 환기통의 방향과도 일치하기 때문에 비교적 안전을 확보하기 쉽고 배연효과도 높기 때문이다.

주어진 화재에 있어서 스모그가 터널입구 방향으로 이동하지 못하도록 하는 임계환기속도를 결정하는 것

1) 정회원, 주식회사 건화엔지니어링 토질부

2) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

이 중요하다. 이 임계환기속도를 결정하기 위한 실험이 세계적으로 많이 이루어졌다.

1976년에 Heselden은 높이 5 m, 폭 10 m인 터널에서 다양한 종류의 화재원을 사용하여 실제터널의 화재에 있어서 발생하는 열방출율과 임계환기속도를 처음으로 구하였다.<sup>1)</sup> 1995년에 영국 HSL(Health and Safety Laboratory)에서는 화염의 길이가 터널의 길이에 비해 작은 경우에 차원분석과 실험결과를 토대로 임계환기속도는 열방출율의 1/3승에 비례한다고 제안했다.<sup>2)</sup>

우리 나라에서는 1996년에 FLUENT CODE를 이용해 3차원 모델해석을 실시하였다. 400 m 일방향도로 터널 중심에서 화재가 발생하였을 경우 몰농도가 1% 이상인 CO<sub>2</sub>를 추적하여 매연의 역류를 막는 임계환기속도를 계산하였다.<sup>3)</sup>

실제 스케일로 실험을 행하는 것은 비용이 많이 들고 위험부담이 크기 때문에 많은 어려움이 있다. 따라서, 모형실험을 통해서 얻은 결과를 실제터널에 적용하려는 시도가 최근에 이루어지고 있다.

1995년에 Y. Oka와 G. T. Atkinson은 높이가 244 mm, 폭이 277 mm, 그리고 길이가 15 m인 모형터널을 Froude 모델링에 따라 PMMA로 제작하여 실험을 행하였다.<sup>4)</sup>

본 실험에서도 Froude 스케일링을 통해서 실제터널 화재시의 결과에 적용할 수 있는 모형터널을 설계하여 역류를 막을 수 있는 임계환기속도를 정하고자 하였으며, CO 농도가 터널입구 방향에서 감지되지 않는 경우를 역류를 막는 기준으로 설정하였다.

## 2. 스케일링 법칙

화염기둥에서 폐쇄공간 화재에 이르기까지 많은 경우에 스케일링법칙에 따라 만든 작은 기하학적 모델을 사용하여 실제상황을 모사할 수 있다. 화재현상에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션과 더불어 축소 모형실험을 행하는 것은 실제상황에서 실험을 행하는 것이 불가능한 경우가 많고 실제스케일로 실험을 하는 것보다 시간이 절약되고 경제적이기 때문이다. 또한, 실험실 실험에 적합한 스케일로 줄여서 화재현상에 대한 연구를 수행하는 것은 정확한 정량적인 결과를 주지 못할지라도 시스템의 거동과 메커니즘에 대한 통찰력을 줄 수 있어서 많은 연구자들이 연구해왔다. 예를 들어, Thomas는 1906년에

발생한 Austrian Ring 극장화재의 원인을 규명하기 위해 1/3과 1/10 스케일로 줄여 모형실험을 행하였다.<sup>5)</sup>

축소모형실험에서 중요한 것은 차원분석을 통해 실험 결과를 일반화시키고 스케일링법칙을 만족시키는 무차원 매개변수들을 이끌어내는 것이다. Williams는 화재현상에 있어서 스케일링에 대한 이론적인 근거로서 가능한 모든 형태의 무차원 그룹을 유도하였고,<sup>6)</sup> Heskethad는 다양한 화재문제에 적용가능한 스케일링 방법을 설명하였다.<sup>7)</sup> 하지만, 모든 경우에 있어서 이론적인 근거에도 불구하고 스케일링 법칙은 문제시되는 모든 변수를 적절하게 포함하는 것은 불가능하기 때문에 완벽하지는 못하다.

화재의 Froude 모델링은 기하학적 형태가 보전되어야 하므로 차원분석을 통하여  $V/L^2$ 와  $Q/L^5$ <sup>2</sup>를 일정하게 유지시키면 된다. 이는 화염형태와 온도분포에 영향을 주는 모형터널의 열방출율과 환기속도가 주어진다면 스케일링 법칙에 따라 원형(原型) 터널에서 유사한 유동을 일으키는 열방출율과 환기속도를 얻을 수 있다는 것이다.

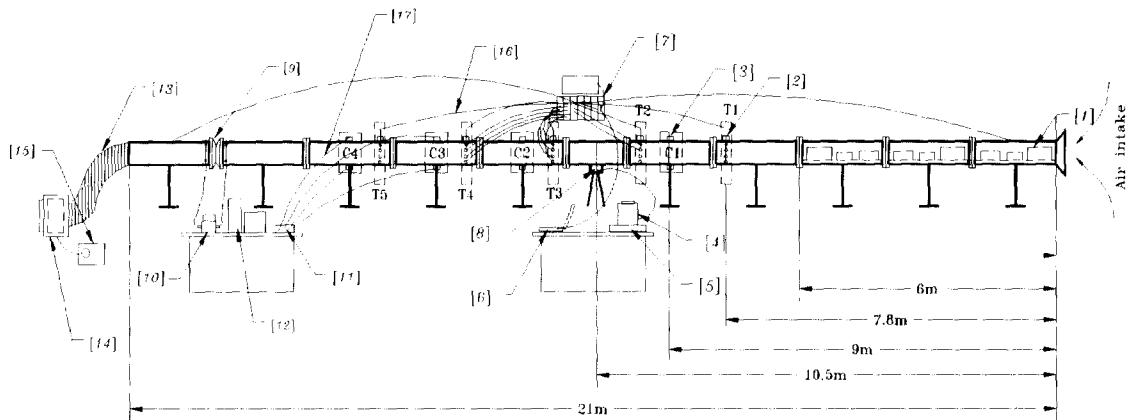
본 실험의 모형터널은 실제터널의 특성길이차원을 1/20 스케일로 줄인 것이다.

## 3. 실험모델 제작 및 실험방법

모형터널의 대부분은 두께 15 mm인 아크릴 (PC 내부코팅)로 제작하였고, 버너가 설치된 곳에서 양쪽으로 80 cm까지 최대 1000°C까지 견디는 7.5 mm 두께의 유리섬유를 내부에 장착시켰다. Fig. 1과 같이 모형터널의 형태는 외경이 300 mm, 단면적이 0.0638 m<sup>2</sup>인 원형(圓形)이다. 2 m의 아크릴관 10개와 1 m의 버너가 설치된 관을 플랜지로 연결하여 모형터널의 총길이가 21 m 되게 하였다.

입구유동(inlet flow)은 유동노즐과 연결된 직경이 25 cm인 원심력팬(centrifugal fan)으로 유발된다. 대략적인 환기속도의 조절은 팬의 회전속도를 조절함으로써 최대 1.4 m/s까지 가능하다. 유동노즐의 재질은 두랄루민(DR79)이다. 본 실험의 모형환기속도는 실제 환기속도를 Table 1과 같이 스케일링한 것이다.

Fig. 2와 같이 유동노즐양단의 압력을 차압센서(MKS)와 데이터로깅시스템(DT-2801)을 사용하여 측정하고 HP-VEE 소프트웨어를 이용하여 기록할 수 있다. 또한, 개별적으로 디지털 모니터를 사용하여 눈으로 확인할 수



T1~T5 section : Temperature measurement

C1~C4 section : CO concentration measurement

Fig. 1. Experiment apparatus

[1] model cars, [2] K-type thermocouple rod, [3] CO concentration sensor, [4] fuel box, [5] a weighing plate, [6] notebook, [7] DA-100 data acquisition system, [8] burner, [9] flow nozzle, [10] differential pressure transducer & digital read out monitor, [11] DT-2801 data acquisition system, [12] CPU-100 MHz Pentium Computer, [13] flexible coupling, [14] centrifugal fan, [15] rpm-controller, [16] K-type thermocouple wire, [17] connection wire between CO sensor and DT-2801 board

Table 1. The scaling of velocity

$V_p$ (m/s)	$V_m$ (m/s)
1.27	0.28
1.62	0.36
1.97	0.44
2.31	0.52
2.66	0.60
4.01	0.91

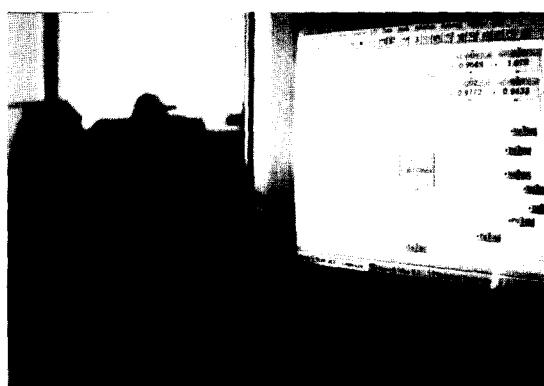


Fig. 2. Differential pressure transducer and data logging system

도 있다.

Fig. 3과 Fig. 4와 같이 각 터널천장부, 바닥부와 주변

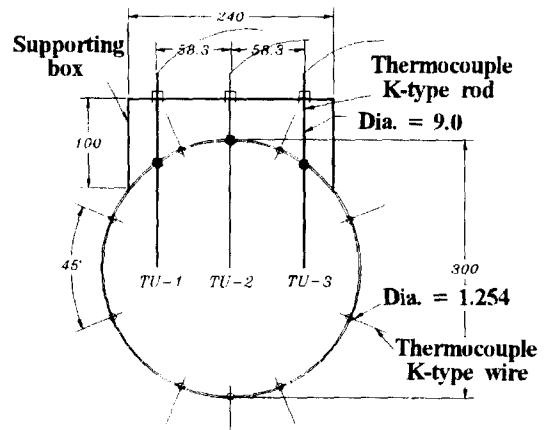


Fig. 3. The temperature measurement section

부의 온도를 측정하는 K-type 열전쌍선(thermocouple wire)을 원형돌레를 따라 9개의 측정점에 설치하고, 터널중심부의 온도를 측정하기 위해 세개의 열전쌍막대(thermocouple rod)를 삽입한다.

즉, 유리섬유로 피복된 직경 1.254 mm인 열전쌍선을  $45^\circ$  간격으로 9개를 터널내부로 10 mm 정도 들어가게 고정시켜 터널벽 주위의 온도를 측정하고 스테인레스로 피복된 직경 9 mm인 K-type 열전쌍 막대를 58.3 cm 간격으로 설치하여 터널중심부의 온도를 측정한다. 온

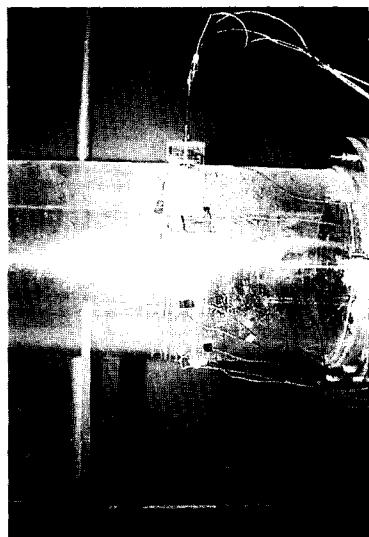


Fig. 4. Thermocouple installing section

도를 측정하는 단면의 위치는 터널입구 방향으로 두개의 단면 (-2.7 m(T1 단면), -0.7 m(T2 단면))과 터널출구 방향으로 세개의 단면 (0.7 m(T3 단면), 2.7 m(T4 단면), 4.7 m(T5 단면))에서 측정하게 된다. 메탄올의 불완전 연소로 발생하는 일산화탄소(CO)의 농도를 터널입구방향으로 한개의 단면 (-1.5 m(C1 단면))과 터널출구 방향으로 세개의 단면 (1.5 m(C2 단면), 3.5 m(C3 단면), 그리고 5.5 m(C4 단면))에서 천장과 바닥에서 측정

한다. CO 농도센서의 크기는 직경×높이가 42×40 mm이다.

Fig. 5(a)와 같이 C1과 C2 단면에서는 온도가 높아 올라가기 때문에 CO 농도센서가 오작동하는 우려가 있어 흡입(sampling)방법을 이용하고 Fig. 5(b)와 같이 C3와 C4 단면에서는 확산(dispersion)방법을 이용하였다. 흡입방법은 뜨거운 연소가스가 직접 CO 농도센서에 닿지 않도록 펌프를 이용해 연소가스를 석한후에 CO 농도센서와 전기화학적 반응을 일으키도록 하는 방법이다.

버너의 형태는 직경이 12 cm인 것과 15 cm인 두 종류로써 pool식 버너를 사용한다. 이 버너에 공급되는 메탄올의 질량을 측정하기 위해 저울을 설치한다. pool식

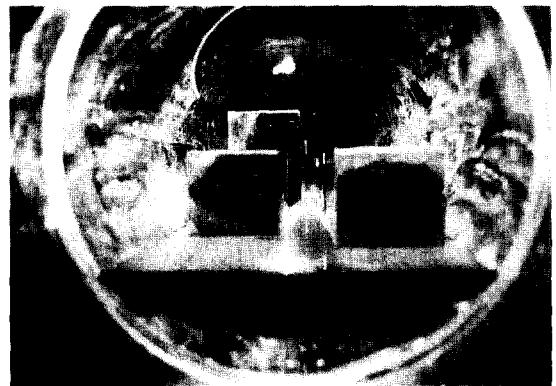
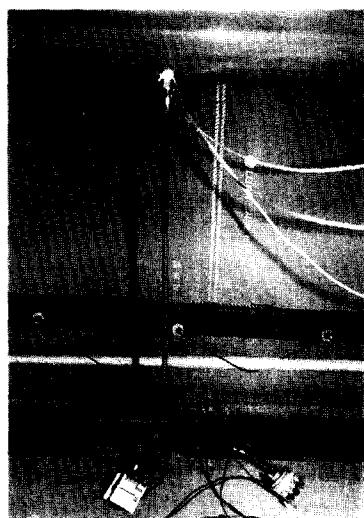


Fig. 6. A tunnel section installed with model cars



(a) Sampling methods



(b) Dispersion methods

Fig. 5. CO concentration sensor installing section

Table 2. The scaling of heat release rate

$Q_p$ (MW)	$Q_m$ (kW)
5	2.79
6	3.35
7	3.91
8	4.45
9	5.03
10	5.59

버너란 수평연료표면에서 연료가 자연연소되는 버너를 말한다. 실제 화재에서 나타나는 연료연소를 어느 정도 모사할 수 있기 때문에 pool식 버너를 사용하였다. pool식 버너에서 연소는 낮은 초기 모멘텀 확산화염 (diffusion flame)이라는 것과 부력효과에 의해 영향을 많이 받는다는 특징을 가진다.

연료로 써는 메탄올을 35 g, 40 g, 그리고 45 g을 연소 시켰다. 버너의 직경과 사용연료량에 따라 질량감소율은 0.183~0.28 g/s로 다양화시킬 수 있다. 버너에서 발생한 열량( $Q$ , kW)은 화염으로 들어가는 휘발성연료의 질량감소율( $m$ , g/s), 휘발성물질의 연소열( $\Delta H_c$ , kJ/g)과 불완전연소에 관계되는 연소효율계수( $x$ )를 써서 표현하면 다음과 같다.

$$Q(\text{kW}) = xm \Delta H_c \quad (1)$$

메탄올의 경우  $\Delta H_c$ 가 19.83(kJ/g)이고 연소효율계수를 “1”로 가정하고 버너에서 나오는 열량을 계산하였다. 터널내 화재시 차량이 터널입구쪽에서 정체된 상황을 모사하기 위해 Fig. 6과 같이 아크릴판으로 만든 모형차량을 모형터널입구쪽에서부터 출구방향으로 6 m 정도 삽입하여 정체된 상황을 모사하였다. 1/20 스케일에 따라 승용차의 경우 길이×폭×높이 = 22×8.5×7 cm이고 버스인 경우 길이×폭×높이 = 40×11×13 cm 크기로 아크릴로 제작하였다.

본 실험에서는 원형(原型) 터널의 형태를 직경이 6 m이고, 길이가 400 m되는 터널로 가정하였다. 그리고, 화재는 터널중앙에서 발생한 5-10 MW 정도의 화재를 모사하였다. 스케일절차를 사용하면 실제터널의 화재시 발생하는 열량,  $Q_p$ 이 5-10 MW라면 모형터널에서 발생한 열량,  $Q_m$ 은 Table 2와 같이 2.79~5.59 kW가 된다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 400 m 길이의 일방향도로터널을 1/

20 스케일로 줄여 축소모형실험을 실시하였다. 버너 크기, 사용연료량에 따라 열방출율을 변화시켰다. 그리고, 차량모형을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우로 나누었다. 이를 각 경우별로 정리하면 Table 3과 같다. 각

Table 3. Experiment results

CASE	Burner size (Dia.cm)	Fuel quantity (g)	Heat release rate(kW)	Critical velocity (m/s)
1-1Y	12	35	3.64	0.36
1-2Y	15	35	4.62	-
2-1Y	12	40	4.96	0.44
2-2Y	15	40	5.35	-
3-1Y	12	45	5.57	-
3-2Y	15	45	5.75	0.52
1-1N	12	35	3.64	-
1-2N	15	35	4.62	-
2-1N	12	40	4.96	-
2-2N	15	40	5.35	-
3-1N	12	45	5.57	-
3-2N	15	45	5.75	-

Y : Installing model cars, N : Not installing model cars

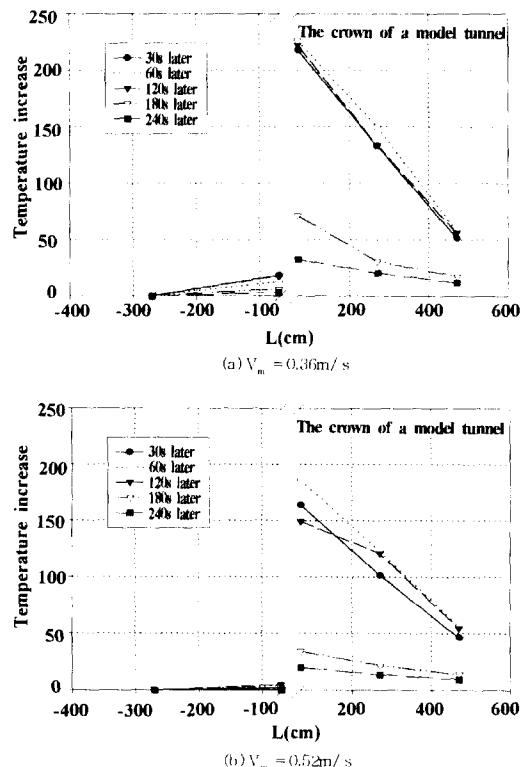


Fig. 7. Plots of temperature increase and tunnel length at the crown of a model tunnel (Case 2-Y)

경우에 대하여 10분동안 5개의 온도측정단면과 4개의 CO 농도측정단면에서 온도분포와 CO 분포를 알아보았다. CO가 터널입구 방향으로 확산되는 것을 막는 임계환기속도의 결정은 차량모형을 설치한 경우에 한해서 구하였다.

#### 4.1 터널단면내 온도분포

##### 4.1.1 화재경과시간에 따른 터널길이내 온도분포

Fig. 7은 열방출량이 5.75 kW인 경우(Case 3-2Y)에 화재경과시간에 따른 터널길이 내 터널천장부의 온도분포를 나타낸 것이다.

모형환기속도가 0.36 m/s일 때 터널출구 방향으로 0.7 m 지점(T3 단면)에서 터널천장부의 온도상승폭이 30~120초 동안에 최고 230°C 정도로 유지되었다. 터널출구 방향으로 1.7 m 지점(T4 단면)에서는 130~150°C 까지 상승하였고 4.7 m 지점(T5 단면)에서는 50~60°C 까지 온

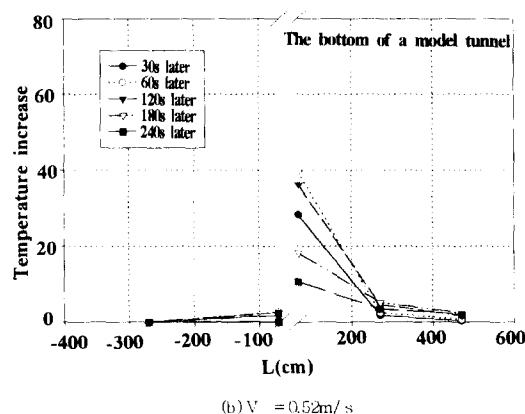
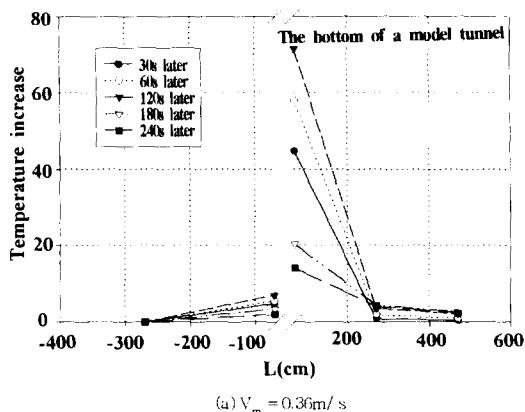


Fig. 8. Plots of temperature increase and tunnel length at the bottom of a model tunnel (Case 3-2Y)

도상승이 있었다. 반면에 터널입구 방향으로 0.7 m 지점(T2 단면)에서는 30~120초 동안 20°C 정도의 온도상승이 있은 후 온도상승이 억제되었다. 모형환기 속도가 0.52 m/s 일 때 터널출구 방향으로 0.7 m 지점(T3 단면)에서 터널천장부의 온도상승폭이 30~120초 동안

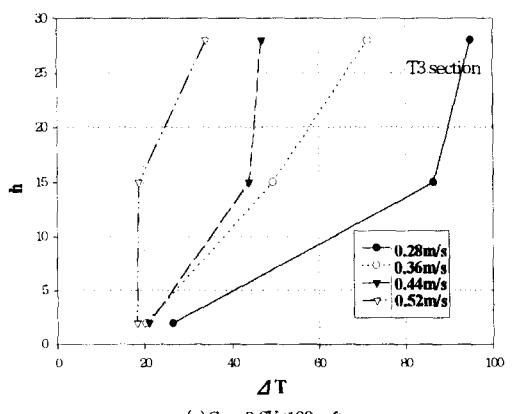
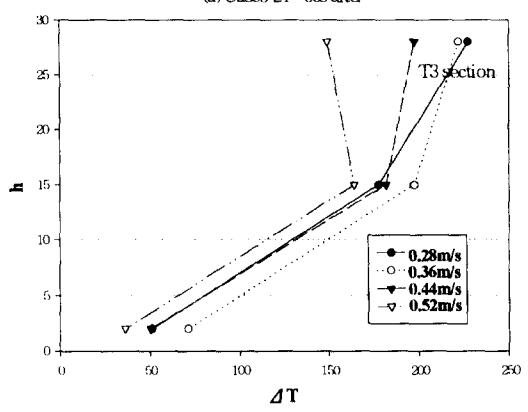
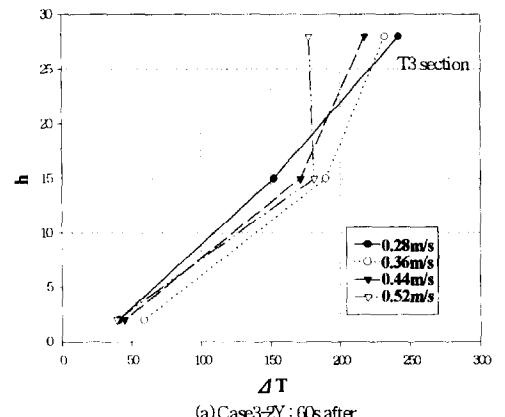


Fig. 9. Plots of temperature increase and tunnel height at T3 section (Case 3-2Y)

에 150~190°C 정도로 유지되었다. 터널출구 방향으로 1.7 m 지점(T4 단면)에서는 100~125°C 까지 상승하였고 4.7 m 지점(T5 단면)에서는 50~55°C까지 온도상승이 있었다. 반면에 터널입구 방향으로 0.7 m 지점(T2 단면)에서는 거의 온도상승이 없었다. 따라서, 모형환기속도가 0.52 m/s에서는 터널천장부에서 열이 터널입구쪽으로 이동하는 것을 충분히 막을 수 있었다.

Fig. 8은 열방출량이 5.75 kW인 경우(Case 3-2Y)에 화재경과시간에 따른 터널길이 대 터널바닥부의 온도분포를 나타낸 것이다.

모형환기속도가 0.36 m/s 일 때 터널출구 방향으로 0.7 m 지점(T3 단면)에서 터널바닥부의 온도상승폭이 30~120초 동안에 45~75°C 정도로 유지되었다. 터널출구 방향으로 1.7 m 지점(T4 단면)과 4.7 m 지점(T5 단면)에서는 5°C 미만의 온도상승이 있었다. 반면에 터널입구 방향으로 0.7 m 지점(T2 단면)에서는 30~120초 동안 5°C 미만의 온도상승이 있었다. 모형환기속도가 0.52 m/s 일 때 터널출구 방향으로 0.7 m 지점(T3 단면)에서 터널바닥부의 온도상승폭이 30~120초 동안에 30~40°C 정도로 유지되었다. 터널출구 방향으로 1.7 m 지점(T4 단면)과

4.7 m 지점(T5 단면)에서는 5°C 미만의 온도상승이 있었다. 반면에 터널입구 방향으로 0.7 m 지점(T2 단면)에서는 거의 온도상승이 없었다.

#### 4.1.2 모형환기속도에 따른 T3단면에서 터널 높이 대 온도분포

Fig. 9(a)는 Case 3-2Y인 경우, 모형환기속도에 따른 T3 단면에서 60초가 경과한 후 터널높이 대 온도상승분포를 나타낸 것이다.

모형환기속도가 빨라짐에 따라 터널천장부의 온도상승은 감소하는 것을 볼 수 있었다. 또, 모형환기속도가 빨라짐에 따라 터널중앙부와 터널천장부의 온도차는 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 9(b)는 Case 3-2Y인 경우, 모형환기속도에 따른 T3 단면에서 120초가 경과한 후 터널높이 대 온도상승분포를 나타낸 것이다.

60초가 경과한 후와 비교해서 비슷한 경향성을 나타낸다. 하지만, 0.52 m/s인 경우는 120초를 지나면서부터 빨리 온도가 떨어지는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 9(c)는 Case 3-2Y인 경우, 모형환기속도에 따른 T3 단면에서 180초가 경과한 후 터널높이 대 온도상승분포를 나타낸 것이다. 모형환기속도가 0.28 m/s에서는

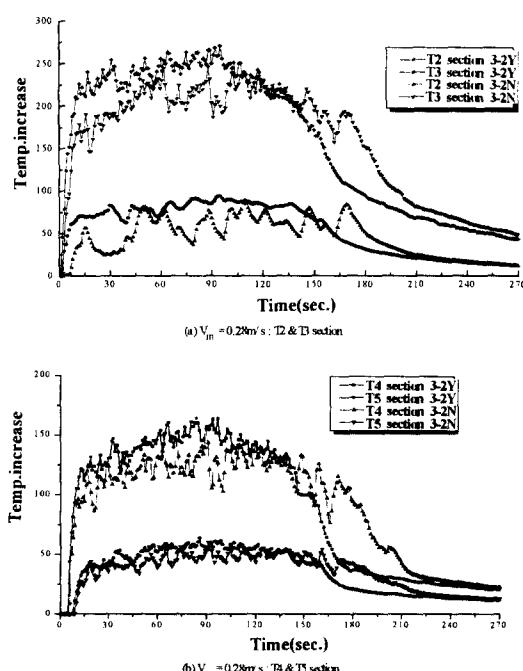


Fig. 10. Relations between temperature increase at the crown of a model tunnel and installing model cars when  $V_m = 0.28 \text{ m/s}$

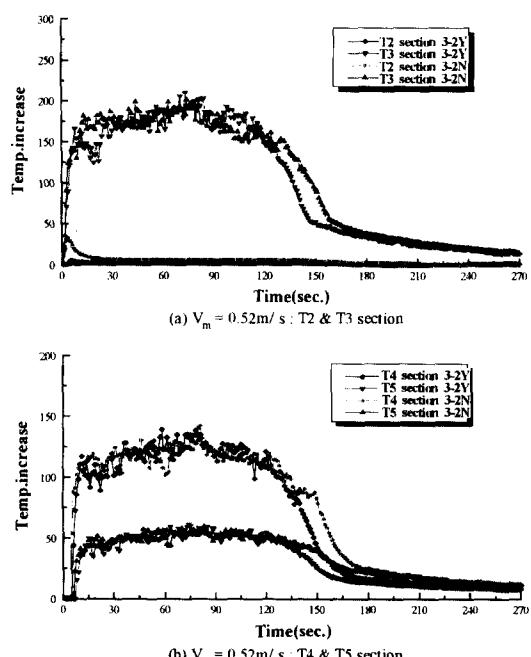


Fig. 11. Relations between temperature increase at the crown of a model tunnel and installing model cars when  $V_m=0.52 \text{ m/s}$

아직도 터널천장부의 온도상승이 95°C 정도로 유지됨을 볼 수 있었다. 모형환기속도가 0.52 m/s에서는 35°C 정도의 온도상승이 있었다.

#### 4.1.3 차량모형설치에 의한 영향

Fig. 10은 모형환기속도가 0.28 m/s인 경우에 차량모형 설치여부에 따른 터널천장부의 온도상승을 나타낸 것이다. 차량모형을 설치한 경우에 T2 단면~T5 단면의 터널천장부에서 관측되는 온도가 전반적으로 높게 나타났다. 이는 차량모형으로 인해 터널입구쪽에서 유입되는 차가운 공기를 막기 때문이다. 따라서, 역류를 막기 위해서 차량모형이 설치되는 경우에 상대적으로 더 빠른 환기속도가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 모형환기속도가 0.52 m/s인 경우에 차량모형 설치여부에 따른 터널천장부의 온도상승을 나타낸 것이다. 차량모형을 설치한 경우에 T2 단면~T5 단면의 터널천장부에서 관측되는 온도가 전반적으로 높게 나타났다. 하지만, T4 단면과 T5 단면에서 모형환기속도가 0.52 m/s로 빨라진 경우에는 0.28 m/s인 경우와 비교해서 차량모형의 설치여부에 따라 크게 좌우되

지 않았다.

## 4.2 터널단면내 CO 농도분포

### 4.2.1 모형환기속도에 따른 CO 농도분포

Fig. 12는 case3-2Y (열 방출량이 5.75 kW)인 경우, 터널천장부에서 모형환기속도에 따른 CO 농도분포를 나타낸 것이다. 모형환기속도가 빨라짐에 따라 각 관측지점에서 관측되는 CO 농도가 감소되는 것을 볼 수 있었다. 터널입구 방향으로 1.5 m 지점(C1 단면)에서 환기속도가 0.44 m/s 일 때 CO 농도가 30초가 지난 후 100 ppm 이하로 떨어졌다. 그러나, 모형환기속도가 0.52 m/s의 경우에는 CO 농도를 감지할 수 없었다. 터널출구방향으로 1.5 m 지점(C2 단면)에서는 CO 농도가 0.44 m/s인 경우가 0.52 m/s 보다 2배정도 높게 190 ppm 정도로 관측되었다. 이는 모형환기속도가 0.52 m/s인 경우에는 터널입구 방향으로 확산이 이루어지지 않고 터널출구 방향으로만 확산이 이루어지기 때문이다.

Fig. 13은 case3-2Y (열방출량이 5.75 kW)인 경우, 터널바닥부에서 모형환기속도에 따른 CO 농도분포를

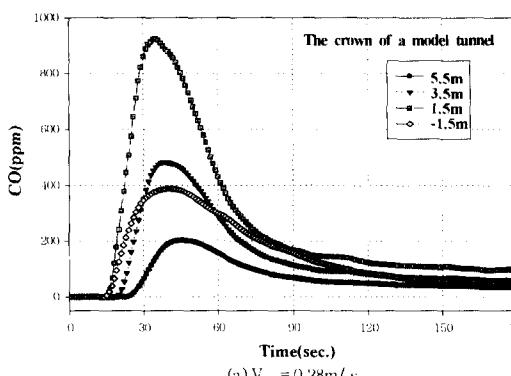
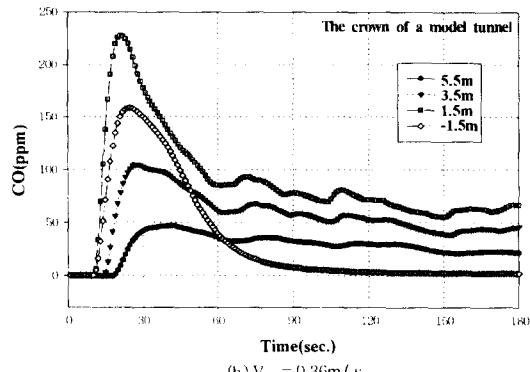
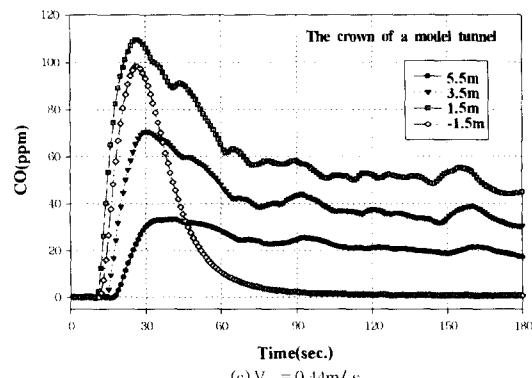
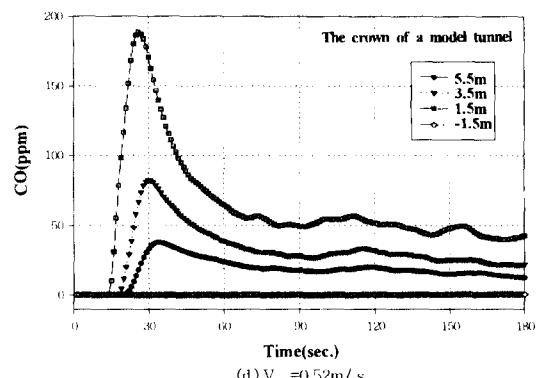
(a)  $V_m = 0.28 \text{ m/s}$ (b)  $V_m = 0.36 \text{ m/s}$ (c)  $V_m = 0.44 \text{ m/s}$ (d)  $V_m = 0.52 \text{ m/s}$ 

Fig. 12. Plots of CO concentration at the crown of a model tunnel and time (Case 3-2Y)

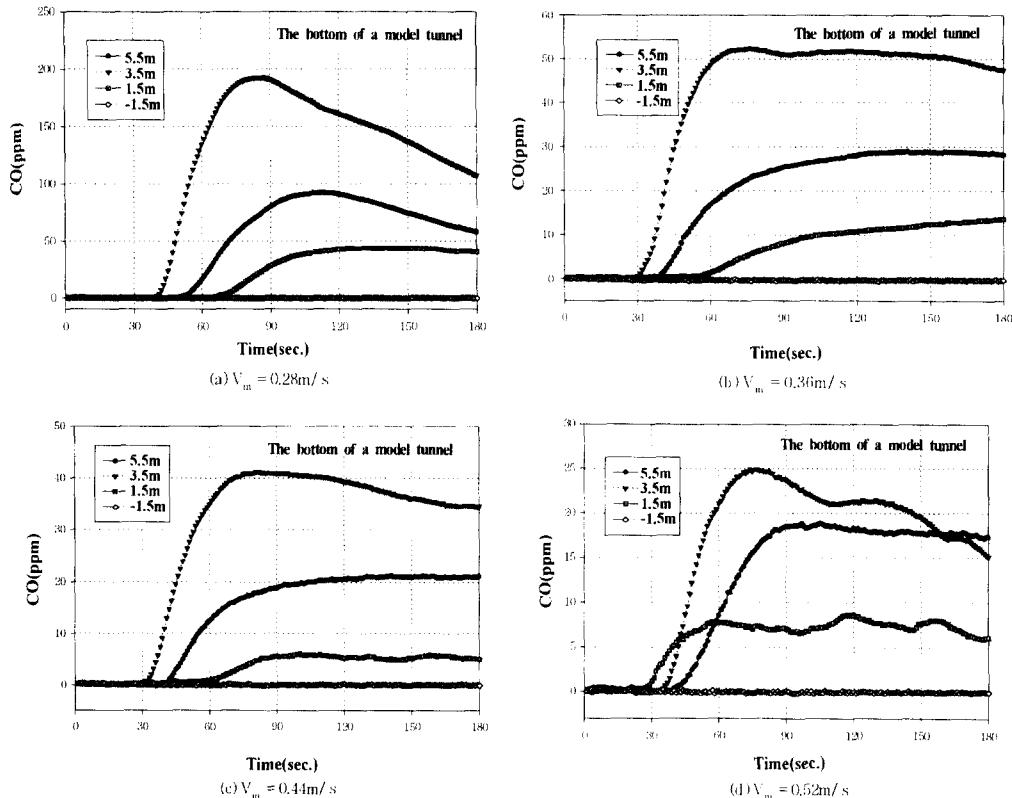


Fig. 13. Plots of CO concentration at the bottom of a model tunnel and time (Case 3-2Y)

나타낸 것이다. 터널바닥부에서 CO 농도가 작게 감지되는 이유는 CO의 밀도가 공기와  $\text{CO}_2$ 의 밀도보다 작기 때문에 터널천장부에 주로 존재하게 되고 무거운 공기나  $\text{CO}_2$ 가 터널바닥부에 존재하기 때문이다. 터널입구 방향으로 1.5 m 지점에서는 모형환기속도가 0.28 m/s 일 때도 CO 농도가 감지되지 않았다. 전반적으로 터널바닥부에서의 CO 농도분포는 터널출구 방향으로 3.5 m 지점(C3 단면)에서 가장 높게 나타났다. 이는 화재지점과 가장 가까운 터널출구 방향으로 1.5 m 지점(C2 단면)에서는 터널바닥과 터널천장의 밀도차에 의해 뜨거운 연소가스가 터널천장부에 가득차 있다가 터널출구 방향으로 움직임에 따라 식은 후 터널바닥부로 내려오기 때문이다. 모형환기속도가 0.28 m/s 일 때, 60초가 경과한 후 터널출구 방향으로 3.5 m 지점(C3 단면)에서 터널천장부의 CO 농도가 터널바닥부보다 160 ppm 정도 높은 300 ppm으로 관측되었다. 하지만, 최고농도가 감지되는 시간은 터널천장부에서는 40초 후지만, 터널바닥부에서는 80초 후였다.

#### 4.2.2 차량모형설치에 의한 영향

Fig. 14는 모형환기속도가 0.36 m/s 일 때와 0.44 m/s 일 때 터널입구 방향으로 1.5 m 지점(C1 단면)과 터널출구 방향으로 1.5 m 지점(C2 단면)에서 차량모형 설치여부에 따른 터널천장부의 CO 농도분포를 나타낸 것이다. 모형환기속도가 0.36 m/s 일 때 차량모형을 설치한 경우가 차량모형을 설치하지 않은 경우보다 C1 단면 및 C2 단면에서 각각 최고 150 ppm과 110 ppm 정도로 나타났다. 이는 차량모형의 설치로 인해 터널단면적의 31.7%정도를 차지하고 있기 때문에 터널입구에서 들어오는 차가운 공기의 유입량이 줄어들었고, 팬의 압력손실이 커졌기 때문이다. 모형환기속도가 0.44 m/s 일 때 C2 단면에서 CO 농도분포를 보면, 40초를 지나면서부터 차량모형을 설치한 경우가 높게 나타났다. 하지만, C1 단면에서는 차량모형을 설치하지 않은 경우에 CO 농도는 감지되지 않았다.

#### 4.3 무차원화된 열방출율과 환기속도의 관계

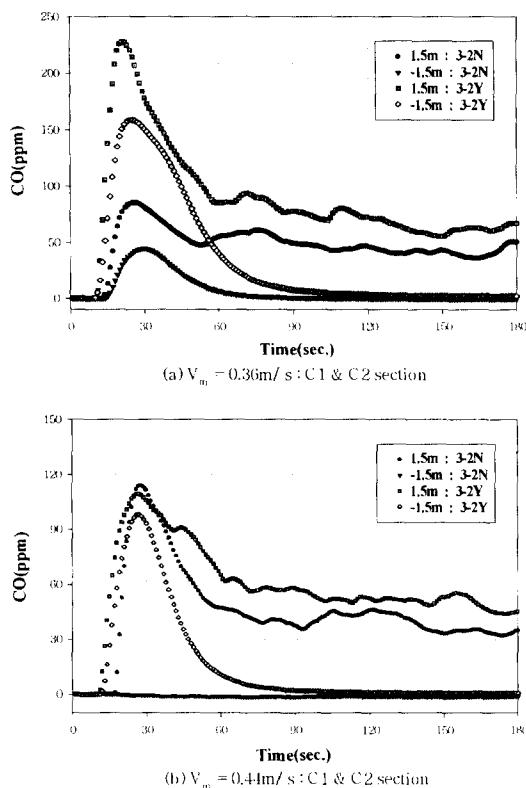


Fig. 14. Relations between CO concentration at the crown of a model tunnel and installing model cars

Froude수 (Fr) 척도란 어떤 값이하로 떨어진다면 역류가 발생하지 않는다는 것을 의미한다.

즉, Fr은 터널바닥부에 있는 차가운 가스(cold flow)의 운동학적 헤드(Kinetic head)와 터널천장부에 있는 뜨거운 가스의 부력헤드(buoyancy head)의 국지적인 비를 나타낸다.

$$Fr = \frac{gH(T_f - T_a)}{V_a^2 T_a} \quad (2)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $H$ 는 터널 높이,  $T_f$ 는 화염 지역의 절대온도,  $T_a$ 는 주위의 절대온도이고  $V_a$ 는 환기 속도이다.

그리고, Froude 스케일링에 의해 제안된 무차원화된 변수로 나타난다면 다양한 스케일에 보다 더 쉽게 적용 할 수 있다.

$$V_c = \left[ \frac{gQH}{\rho_a T_a c_p A} \right]^{1/3} \quad (3)$$

여기서,  $V_c$ 는 임계환기속도,  $c_p$ 는 공기의 비열,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도이다.

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_a c_p T_a g^{1/2} H^{5/2}} \quad (4)$$

그리고,

$$V^* = \frac{V_{critical}}{\sqrt{gH}} \quad (5)$$

식(3), (4), 그리고 (5)를 정리해서 풀면, 다음과 같다.

$$V^* = H^{1/3} A^{-1/3} Q^{*1/3} \quad (6)$$

Oka와 Atkinson<sup>4)</sup>에 따르면 임계환기속도를 결정하

Table 4. Critical velocity as calculated by Heselden for a fire in a real (5 m high  $\times$  10 m wide) tunnel

Source of fire	Heat release rate(MW)	Critical velocity(m/s)
Car	3	1.3
Van	10	2.2
Lorry or coach	20	3
Petrol spill	50~100	5.3~6.7

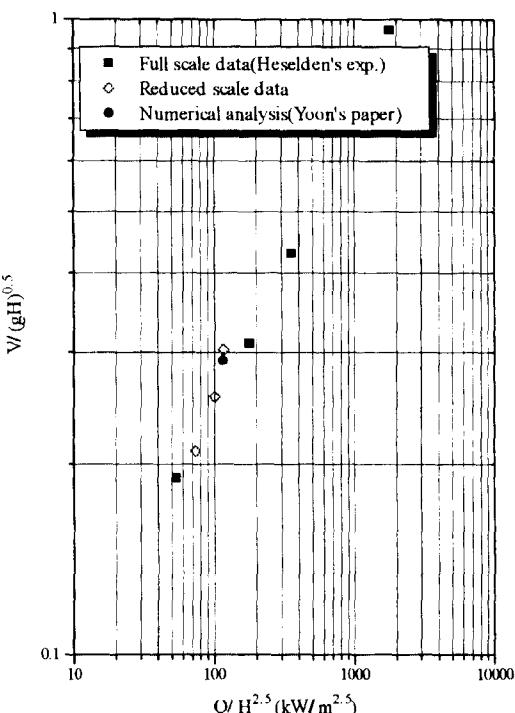


Fig. 15. The comparison of model tunnel experiment, real tunnel experiments (Heselden's data), and numerical analysis(Yoon's paper)

는데 필요한 주요변수가 무차원화된 열량,  $Q^*$ 라고 하였다. 즉,  $Q^*$ 가 0.124 보다 작으면 임계환기속도는  $Q^{*1.3}$ 에 의존 하고  $Q^*$ 가 0.124보다 크면 임계환기속도는  $Q^*$ 에 의존하지 않는다.  $Q$ 가 5.75 kW인 경우 식(3)에 적용하면,  $Q^*$ 는 0.105를 얻을 수 있다. 따라서, 무차원화된 환기속도, 무차원화된 환기속도,  $V^*$ 는 0.790을 얻을 수 있다.

모형실험의 타당성을 검증하기 위해 Table 4와 같이 Heselden에 의해 수행된 실제터널내 실험자료,<sup>1)</sup> 윤성우에 의해 수행된 수치해석자료<sup>3)</sup>와 본 모형실험자료를 무차원화시켜 나타내면 Fig. 15와 같다. 본 모형실험 데이터는 실제터널내 실험 데이터 및 수치해석으로 얻은 자료와 상관성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

터널내 화재 발생시 인명피해를 줄이기 위해서는 스모그가 터널입구 방향으로 확산되는 것을 막는 것이 중요하다. 이를 위한 연구의 첫 단계로써 실제터널에서 실험을 실시하는 것은 비용이 많이 들고 위험부담이 많기 때문에 현장실험에 앞서 Froude 모델링을 이용하여 모형실험을 실시하였다.

화재시 차량이 터널입구쪽에 정차되어 있는 것을 모사하기 위해 아크릴로 차량모형을 제작하여 모형터널 입구쪽에 6 m 정도 장치하였다. 또, 터널내 화재상황을 모사하기 위해 모형터널의 중간지점에 pool식 버너를 설치하여 메탄올을 연소시켰다.

본 연구에서는 도로 터널내 화재가 발생하였을 경우에 각 단면에서 온도분포와 CO 농도분포를 측정하여 역류를 막는 임계환기속도를 결정하고자 하였다. 즉, 매연의 역류를 막기 위한 임계환기속도를 결정하는 방법으로 터널입구방향으로 CO의 확산을 막는 것을 기준으로 하였다. 이를 바탕으로 하여 모형실험에서의 열방출량과 임계환기속도로부터 스케일링법칙에 따라 실제터널의 화재시 요구되는 임계환기속도를 결정하였다.

본 연구에서 얻어진 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1)  $Q_m$ 이 5.75 kW인 경우 차량모형을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하면, 모형환기속도가 0.36

m/s 일 때, 터널입구 방향으로 1.5 m 지점의 터널천장부에서 CO 농도가 차량모형을 설치한 경우에는 최고 150 ppm 정도 측정되었고, 차량모형을 설치하지 않은 경우에는 45 ppm 정도로 낮게 측정되었다.

2)  $Q_m$ 이 5.75 kW인 경우, 터널입구쪽으로 3.35분 동안 CO가 확산되지 않아야 한다는 기준으로 임계환기속도를 구하여 보면 0.52 m/s (실제환기속도 2.31 m/s)이다. CO의 역류를 막기 위한 이 임계환기속도를 식(2)에 적용하여 계산하면 Froude 수는 9.42이다.

3) C1 단면에서 터널바닥부에서의 CO 농도는 모형환기속도가 0.28 m/s인 경우에도 감지되지 않았다. 이는 CO 밀도가 공기나 CO<sub>2</sub> 밀도보다 작고 연소가스가 터널천장부를 따라 움직이기 때문이다.

4) CO 농도분포를 보면 모형환기속도가 0.28 m/s에서 0.44 m/s 까지는 터널출구방향의 C2, C3, C4 단면 천장부의 농도가 감소하다가 0.52 m/s에서는 오히려 C2 단면에서 0.44 m/s 보다 높게 나왔다. 이는 터널 입구방향으로 CO 농도가 확산되지 않기 때문이다.

5) 60초 경과후 T3 단면에서 온도상승분포를 보면 환기속도가 빨라짐에 따라 터널천장부와 터널중앙부의 온도가 근접하는 것을 볼 수 있다. 이는 환기에 의한 동적모멘텀이 불의 부력모멘텀보다 커져서 화염의 형태가 많이 기울어지기 때문이다.

## 참 고 문 헌

1. A. J. M. Heselden BSc., 1976, Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels, 2nd Int. Symp. on the Aerodynamics & ventilation of vehicle tunnels.
2. Lea, C. J., Bettis, R. J. & Jagger, S. F., 1995, A review of available data models for tunnel fires. HSE Project Report, IR/L/FR/94/12, Health and Safety Executive, UK.
3. 윤성우, 1997, 도로터널내 화재발생시 매연제거를 위한 모델해석, 서울대학교 석사논문.
4. Y. Oka & G. T. Atkinson, Control of smoke flow in tunnel fires, Fire Safety Journal, 25, 1995.
5. Thomas, P. H., 1983, Fire Safety Journal 5, 181-90.
6. Williams, F. A., 1969, Fire Res. Abstracts and Rev. 11, 1-22.
7. Heskethad. G. J., 1975, Fire and Flammability Journal 6, 253-273.