

PIV를 이용한 화재연기농도의 정량적 계측에 관한 실험적 연구

이동호* · 우인성* · 김 종 윤** · 고재웅

*인천대학교 안전공학과 · **인하대학교 기계과 대학원 · 인천대학교 안전공학과 대학원

1. 서 론

도로터널 화재시 터널환기시스템의 목표 중의 하나는 화재시 정차되어 있는 차량쪽과 탈출하려는 사람에게 움직이는 연기를 억제하는 것이다. 발생 연기를 억제하기 위한 방법중의 하나는 화재지역에서 한쪽 방향으로만 환기를 시키는 것이다. 즉, 연기와 연소물질을 터널 출구쪽으로 유도시켜 터널입구쪽에 머물러있는 사람들이 피할 수 있도록 하고 소방원들이 접근하기 쉽도록 하는 것이다. 그러므로, 주어진 화재에 있어서 연기가 터널입구 방향으로 이동하지 못하도록 하는 임계환기속도를 결정하는 것이 중요하다. 이러한 임계환기속도를 결정하기 위하여 여러나라에서 많은 실험들이 이루어졌다.¹⁾

우리나라에서는 1996년에 FLUENT CODE를 이용해 3차원적 모델해석을 실시하였다. 400m 일방향도로 터널 중심에서 화재가 발생하였을 경우 몰농도가 1%이상인 CO₂를 추적하여 매연의 역류를 막는 임계환기속도를 계산하였다. 또한 1998년에 Froude 스케일링을 통한 축소모형터널을 제작하여 CO농도가 터널입구 방향에서 감지되지 않는 경우를 임계환기속도로 산정하였다.²⁾

기존의 연구들은 CO₂, CO농도, 온도를 계측하여 임계속도를 산정하였다. 본 실험에서는 PIV(particle image velocimetry)를 사용한 축소모형실험을 실시하여 연기농도와 휘도의 상관관계를 분석하고, 연기농도 측정을 사용한 임계풍속 산정에 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 스케일링 법칙 및 임계속도 산정

2.1 Froude Scaling

터널 내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude No.가 가장 중요하며 이에 따라 본 축소실험에서는 Froude Scaling을 사용하였다. 축소터널과 실제터널의 길이 L_m 과 L_f 발열량 Q_m 과 Q_f , 속도 V_m 과 V_f , 시간 T_m 과 T_f 사이의 관계는 다음 식을 적용하였다.

$$\frac{Q_m}{Q_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{5/2} \quad (1) \quad \frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{T_m}{T_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{1/2} \quad (3)$$

축소법칙에 따른 실제 터널의 제원, 발열량, 임계속도를 축소모형터널의 값으로 환산하여 Table 1에 나타내었다.

2.1 Kennedy's Equation

본 실험에 적용된 임계환기풍속을 계산하기 위하여 사용된 Kennedy 방식은 V_c 를 구하기 위해 다음과 같은 반복계산식 시스템으로 표현된다.

$$V_c = K_g \left(\frac{gHQ}{Fr_c \rho_o Cp A_r T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_o Cp A_r V_c} + T_o \quad (5) \quad K_g = 1 + 0.0374\gamma^{0.8} \quad (6)$$

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| V_c : 임계속도 | g : 중력가속도 |
| H : 터널 높이 | Q : 화재 발열량 |
| ρ_o : 주위 공기밀도 | C_p : 공기의 정압비열 |
| A : 터널 단면적 | T_f : 화재로 인한 공기의 온도 |
| Fr_c : Froude 수 | K_g : 구배보정계수 |
| T_o : 주위온도 | γ : 터널 경사도 |

위 식을 통하여 계산된 임계풍속 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 실험의 제원

구분	넓이	높이	길이	발열량	임계풍속
실제터널	8 (m)	8 (m)	180 (m)	4,480 (KW)	1.353 (m/s)
모형터널	0.4 (m)	0.4 (m)	1 (m) × 9	2.50 (KW)	0.302 (m/s)

3. 실험장치 및 방법

3.1 축소모형터널

실험에 사용된 터널은 폭 8m, 높이 8m, 길이 180m 크기의 실물 터널을 길이에 대

해 1/20으로 축소시켜 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 1m의 내부공간에 1cm 두께의 투명 아크릴로 모형을 제작하였다.

화원은 PIARC(Permanent Int. Association of Road Congress)가 제공하는 터널 내 화재 시나리오에 대한 화원의 크기 기준에서 Passenger car 1대가 완전 연소 하는 경우를 선택하여 적용하였다. Passenger car의 발열량은 4,480 KW이며 이 것을 축소법칙으로 환산하여 2.50 KW를 실험에 적용하였다.³⁾

화재시 발생된 연기를 제어하기위한 임계환기풍속은 실제터널의 제원을 Kennedy 식에 적용하여 계산하였다. 계산된 실제터널의 임계풍속 1.353m/s를 다시 Froude의 축소법칙에 적용하여 축소모형터널의 임계풍속 값 0.302m/s를 구하였다.

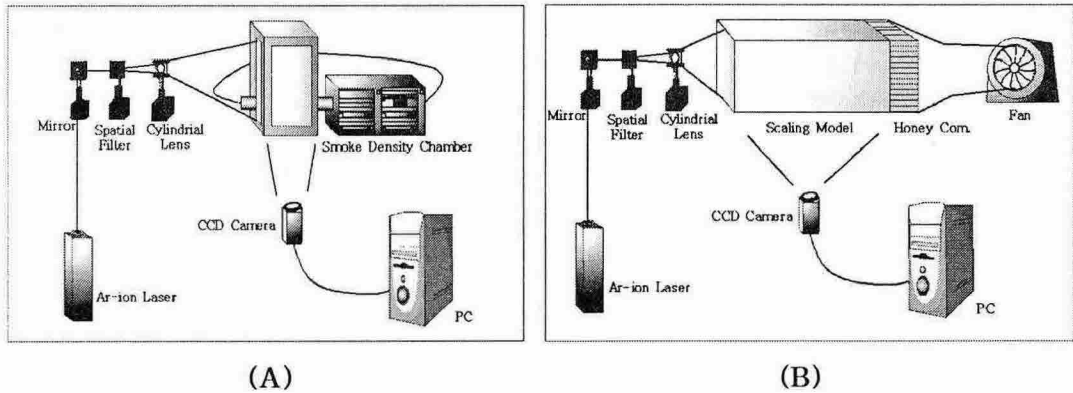


Fig.1 실험방법

3.2 실험방법

PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법의 기본원리는 주어진 측정시간동안 움직인 유동입자들의 변위정보를 CCD(Charge Coupled Device) 카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하는 것이다.⁴⁾ CCD 카메라로 촬영된 화상데이터는 농도변위계측 소프트웨어 Gray-vel 2.1로부터 휘도정보가 시계열적으로 해석되어진다. 광원은 5W, 514.5nm의 Ar-ion Laser를 사용하였다.

Fig.1의 (A)는 연기농도와 휘도와의 상관관계를 구하는 과정을 나타낸다. 연기농도 측정기의 측정 위치에 광원으로부터 빛을 투과시키고 1m 거리에 CCD 카메라를 설치한다. 연기농도 측정기에 연기를 충전시키고 쉘을 돌려 순차적으로 연기를 배출시키면서 투과율 0%부터 100% 사이의 화상데이터를 얻는다. 측정된 화상데이터를 Gray-vel 2.1를 사용하여 투과율 0%~100%의 화면에 대한 휘도 값을 계산한다. 각각의 투과율을 식(7)에 대입하여 소광계수 K를 구한 후, 식(8)에 대입하여 가시거리를 구한다. 여기서 C는 반사체로 3을 적용한다. 구해진 가시거리를 식(9)에 대입하여 최종적으로 연기농도 값을 계산하여 투과율에 따른 연기농도와 휘도와의 상관관계를 구한다.

Table 2와 Fig.2에 명시하였다. Fig.2에서 나타난 것과 같이 투과율 100%~30%까지는 농도와 휘도 모두 일정한 비율로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 휘도의 범위가 0~255까지이므로 투과율 30%~0%에서 연기농도는 급격한 상승을 보이나 휘도는 255 이하로 나타났다. 5W, 514.5nm의 Ar-ion Laser를 광원으로 사용한 경우, 미국 NFPA 130에 명시된 안전한계 대피연기농도인 $65\text{mg}/\text{m}^3$ 는 투과율 60%, 가시거리 5.87m이며 휘도는 120의 값으로 나타났다.

4.2 연기농도 측정법을 사용한 임계풍속 산정

Fig.3의 (A)는 자연대류 상태에서 모형터널의 화재를 PIV를 사용하여 측정한 결과를 나타낸다. 화원으로부터 발생한 연기는 수직으로 상승하여 천장을 타고 터널 양 방향으로 이동한다. Fig.3의 (B)는 (A)의 데이터를 Gray-vel 2.1 프로그램으로 계산하여 휘도로 나타낸 것이다. 총 10등분의 휘도로 구분하여 나타내었고 각각의 휘도 값은 Table 2에 명시되어 있다. Fig. 3의 (C)는 (B)의 휘도 측정 데이터를 연기농도로 환산하여 드 고선으로 나타내었다. 10등분의 농도로 나누어져 있으며 각각의 농도 값은 Table 2에 나타났다.

Fig.4는 임계풍속 적용시 모형터널의 화재를 나타낸다. Kennedy 식으로부터 계산된 임계풍속 값을 원심력 펌의 속도를 조절하여 -30%~30%의 값으로 바꾸어가며 측정하였다. 실험결과, Kennedy 식으로 계산된 축소모형터널 임계풍속 $0.302\text{m}/\text{s}$ 의 -10%인 $0.272\text{m}/\text{s}$ 적용시 발생 연기가 화재반경을 벗어나지 않고 안전하게 제어되는 것으로 나타났다. 따라서 Kennedy 식으로부터 계산된 임계풍속 값은 모형실험을 통하여 측정된 임계풍속 값보다 10% 높은 오차를 나타내는 결과가 나왔다.

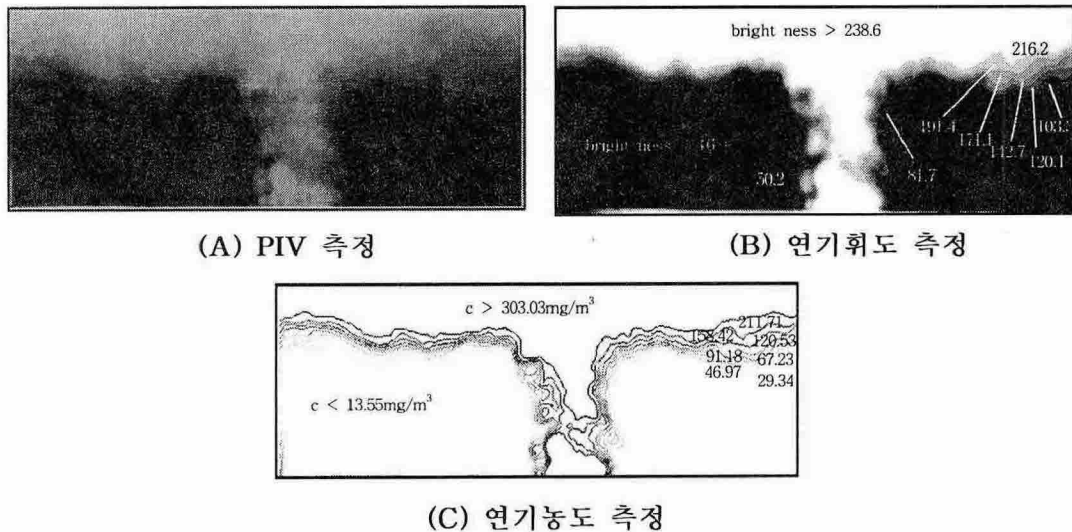
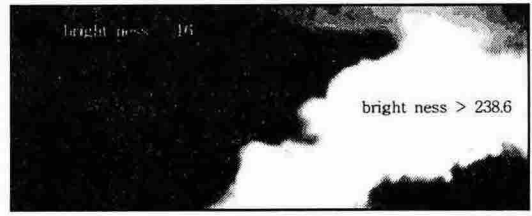


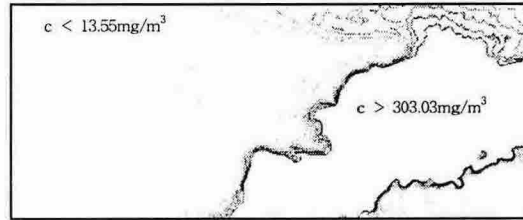
Fig.3 자연대류 시 터널화재



(A) PIV 측정



(B) 연기휘도 측정



(C) 연기농도 측정

Fig.4 임계풍속 적용시 터널화재

5. 결론

터널 내 화재발생시 축소모형 실험을 실시하여 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 연기농도와 휘도는 투과율 100%~30% 범위내에서 상관관계가 성립하며 투과율 30%~0%의 범위에서 연기농도의 상승과 무관하게 휘도 값은 255 이하로 나타났다.
- (2) 화재 시나리오에 따른 정량적인 연기농도분포도는 PIV를 사용하여 발생 연기농도와 휘도와의 상관관계로 부터 정량적인 연기농도를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- (3) Kennedy 식으로부터 계산된 임계풍속 값은 연기농도 측정법을 사용한 축척모형 실험을 통하여 임계풍속 값보다 약 10% 오차를 나타냈다.

참고문헌

1. Kennedy, W. D. and Parsons, B, 1996, Critical Velocity: Past, Present and Future, one Day seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, london, U.K.
2. 유영일, 이희근, "일방향 도로터널내 화재 발생시 역류를 막는 환기속도결정에 관한 축소 모형실험", 한국암반공학회, Vol. 8, 1998, pp. 107~117
3. Lacroxi, D., 1998, "The New PIARC Report on Fire and Smoke Control in Road Tunnels", 3rd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France, pp. 185~197