

터널내 화재시 PIV를 이용한 연기제어 특성에 관한 연구

고재웅[†] · 김종윤^{*} · 서태범^{**} · 임경범^{***} · 이동호^{****}

인천대학교 안전공학과 대학원 · 인하대학교 기계공학과 대학원 · **인하대학교 기계공학과

한국소방안전협회 · *인천대학교 안전공학과

(2006. 3. 20. 접수 / 2006. 9. 20. 채택)

A Study on the Characteristics of Smoke Control using PIV in Tunnel Fires

Jae-Woong Ko[†] · Jong-Yoon Kim^{*} · Tae-Beom Seo^{**} · Kyung-Bum Lim^{***} · Dong-Ho Rie^{****}

Graduate School of Department of Safety Engineering, University of Incheon

^{*}Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University

^{**}Department of Mechanical Engineering, Inha University

^{***}Korea Fire Safety Association

^{****}Department of Safety Engineering, University of Incheon

(Received March 20, 2006 / Accepted September 20, 2006)

Abstract : This study aims to measure a smoke density and velocity by using the PIV method in case a fire occurs in tunnels. By doing so, this will estimate a critical velocity, examine its appropriateness, and present the basic materials necessary for designing a smoke control equipment. For this study, a visualization test was conducted based on the 1/20 miniature of a real tunnel according to the Froude scaling. As a part of basic experiments, a correlation between smoke density and brightness was analyzed here, and a critical velocity was estimated on the condition that a fire breaks out in tunnels. As a result, this study finds that there is a correlation between smoke density and brightness within a range of 100% to 30% transmittance, from which a quantitative smoke density can be obtained. The study also suggests that a critical velocity calculated from the Kennedy formula shows about 10% difference from that estimated in the test.

Key Words : critical velocity, PIV(particle image velocimetry), reduced scale experiment

기호설명

V_c : 임계풍속[m/s]

g : 중력가속도[m/s²]

Q : 화재 발열량[kW]

ρ_o : 주위 공기밀도[kg/m³]

C_p : 공기의 정압비열[kJ/kg · K]

T_f : 화재로 인한 공기의 온도[K]

T_o : 초기 공기의 온도[K]

Fr_c : Froude 수[-]

K_g : 구배보정계수[-]

T_o : 주위온도[K]

K : 소광계수[m⁻¹]

S : 가시거리[m]

A : 격자면적[m²]

ρY_s : 연기농도[mg/m³]

T : 투과도[%]

γ : 터널의 경사도[%]

1. 서론

터널 내 화재시 가장 중요한 사항은 환기시설 및 제연시설을 사용하여 발생연기를 제어함으로써 피난로의 가시거리를 확보하고 사람들이 안전하게 대피할 수 있도록 하는 것이다. 발생 연기를 제어하기 위한 방법으로 화재지역에서 대피 반대방향으로만 환기를 시키는 일방향 제연방식을 주로 사용되고 있다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
goodbear@hanmail.net

즉, 연기와 연소물질을 사람들이 대피하는 반대방향으로 유도시켜 사람들이 안전하게피할 수 있도록 하고 소방원들이 화재지역으로 접근하기 쉽도록 하는 것이다. 이러한 방법을 사용하는데 가장 중요한 사항은 화재에서 발생된 연기 및 연소물질이 피난방향으로 이동하지 못하도록 제어하는 임계풍속을 결정하는 것이다. 이러한 임계풍속을 결정하기 위하여 여러 나라에서 많은 실험들이 행하여져 왔으며 현재에도 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다^{1,2)}.

우리나라에서는 1996년에 FLUENT Code를 이용해 3차원적 모델해석을 실시하였다. 400m 일방향도로 터널 중심에서 화재가 발생하였을 경우 물농도가 1% 이상인 CO₂를 추적하여 매연의 역류를 막는 임계풍속을 계산하였다³⁾. 또한 1998년에 Froude 스케일링을 통한 축소모형터널을 제작하여 CO농도가 터널입구 방향에서 감지되지 않는 경우를 임계풍속으로 산정하였다⁴⁾.

본 연구에서는 가시화 기법인 PIV(particle image velocimetry)를 이용하여 연기농도와 휘도의 상관관계를 분석하였다. 분석결과를 축소터널모형 화재실험에 적용하여 연기유동의 추적을 통한 임계풍속을 산정함으로써, 실제 환기설비의 설계 및 제어설비 운영에 필요한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 스케일링 법칙 및 임계풍속 산정

2.1. Froude Scaling

터널 내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude No.가 가장 중요하며 이에 따라 본 축소 실험에서는 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 적용하였다⁵⁾.

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

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

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

Table 1. Test specifications

Classification	Width [m]	Height [m]	Length [m]	Heating value [kW]	Critical velocity [m/s]
Real tunnel	8	8	180	4,480	1.353
Scaling model	0.4	0.4	9	2.50	0.302

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

2.2. Kennedy's Equation

본 실험에 적용된 임계풍속을 계산하기 위하여 사용된 Kennedy 방식은 Vc를 구하기 위해 다음과 같은 반복계산식 시스템으로 표현된다⁵⁾.

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

$$T_f = \frac{Q}{\rho_o Cp A_r V_c} + T_o \quad (5)$$

$$K_g = 1 + 0.0374 \gamma^{0.8} \quad (6)$$

위 식을 통하여 계산된 임계풍속 값을 Table 1에 나타내었다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 축소모형터널

본 실험에 사용된 모형 터널은 폭 8m, 높이 8m, 길이 180m 크기의 실물 터널을 길이에 대해 1/20으로 축소시켜 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 9m의 내부공간에 1cm 두께의 투명 아크릴로 제작하였고, 전체 9m 중에 화재발생 지역을 포함한 1m를 촬영 분석하였다.

화원은 PIARC(Permanent Int. Association of Road Congress)보고서에서 제공하는 터널 내 화재 시나리오에 대한 화원의 크기 기준에서 Passenger car 1대가 완전 연소 하는 경우를 선택하여 적용하였다. Passenger car의 발열량은 4,480kW이며 이것을 축소법칙으로 환산하여 2.50kW를 실험에 적용하였다⁶⁾.

화재시 발생된 연기를 제어하기 위한 임계풍속은 실제터널의 제원을 Kennedy 식에 적용하여 계산하였다. 계산된 실제터널의 임계풍속인 1.353m/s를 Froude의 축소법칙에 적용하여 축소모형터널의 임계풍속 값 0.302m/s를 구하였다.

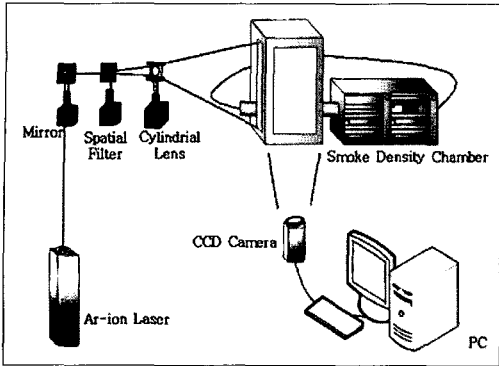


Fig. 1. Brightness and concentration measurement testing apparatus.

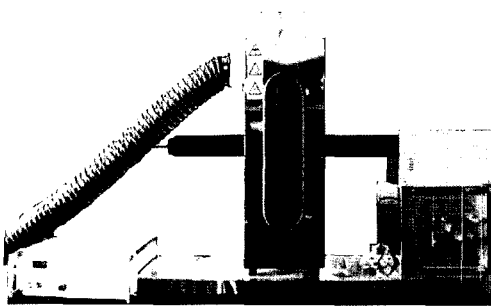


Fig. 2. Smoke density chamber (tester).

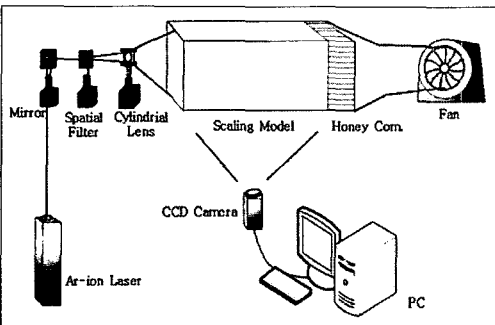


Fig. 3. Critical velocity measurement by model test.

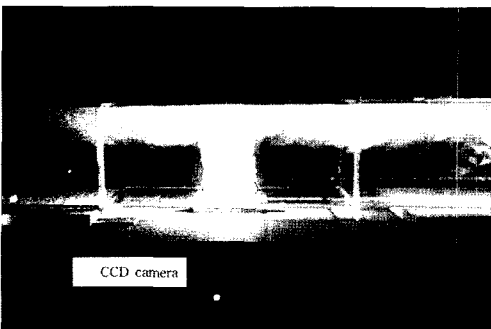


Fig. 4. Model tunnel testing apparatus.

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 것이다⁷⁾. CCD 카메라로 촬영된 화상데이터는 속도변위계측 프로그램 및 농도변위계측 프로그램에 의해 속도 및 휘도정보가 시계열적으로 해석되어진다. 본 실험에서 사용한 광원은 5W, 514.5nm의 Ar-ion Laser이다.

Fig. 1은 기초 실험으로서 연기농도와 휘도와와의 상관관계를 구하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 연기농도측정기의 측정 위치에 Ar-ion laser를 이용하여 2차원 단면 광을 투과시키고 장치로부터 1m 이격 거리에 농도측정기 내부의 연기를 촬영할 수 있도록 CCD 카메라를 설치하였다. 연기농도 측정기에 실험에 사용되는 연기와 동일한 연기를 공급하기 위하여 파라핀오일을 사용하여 연기를 발생하는 연기발생기로 연기를 가득 채운 후, 배출 팬을 이용하여 순차적으로 연기를 배출시키면서 투과율 0%부터 100% 사이의 화상데이터를 얻는다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 연기농도 측정기(smoke density tester)로 한쪽 면에서 약 28mm Φ 의 평행광속을 사출하고 임의의 위치의 시감도가 보증된 센서에서 인식하여 그 사이의 연기의 농도를 측정하는 장치이다.

측정된 화상데이터를 농도 계측프로그램인 Grayvel 2.1을 사용하여 투과율 0~100%의 화상에 대한 휘도 값을 계산한다. 각각의 투과율을 식 (7)에 대입하여 소광계수 K를 구한 후, 식 (8)에 대입하여 가지 거리를 구한다. 여기서 C는 일반적인 반사체를 기준으로 하여 C=3을 적용한다. 구해진 가지거리를 식 (9)에 대입하여 최종적으로 연기농도 값을 계산하여 투과율에 따른 연기농도와 휘도와의 상관관계를 구한다⁸⁾.

$$\ln\left(\frac{1}{T}\right) = K \cdot L \quad (7)$$

$$S = \frac{C}{K} \quad (8)$$

$$\rho Y_s = \frac{C}{K_m \cdot S} \quad (9)$$

Fig. 3은 모형터널에서의 임계풍속을 산정하기위한 실험장치를 나타낸다. 제작된 축소모형터널의 측면으로 2차원 단면의 Laser 광을 투과 시키고 전기화원을 이용하여 터널 하부로부터 약 2.5kW의 열량을 공급한다. Fig. 4는 화원 위치에서의 모형터널 실험장치를 나타낸다. 터널 한쪽 측면에 원심 축류팬과 허니컴을 설치하고 팬의 회전속도를 조절하여 공급 풍속을 변화시킨다. 이 때 연기의 거동을 CCD 카메라를 사용해 화상데이터로 저장한다. 저장된 데이터를 상용 프로그램인 Flow-vec 3.2를 이용하여 연기의 속도를 측정하고 Gray-vel 2.1를 이용하여 휘도 값을 측정한다. 기초실험의 결과를 토대로 휘도 값을 농도로 변환시킨 후 임계풍속을 산정함으로써 연기농도를 이용한 터널내의 연기제어를 검토한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 연기농도와 휘도와의 상관관계

Fig. 1의 기초실험을 반복하여 투과율에 따른 연기농도와 휘도와의 상관관계를 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 투과율이 100~30%로 감소함에 따라 농도와 휘도 모두 일정한 비율로 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 투과율이 30~0%의 범위에서는 연기농도는 급격한 상승을 나타내는 반면, 휘도는 범위가 0~255까지이므로 255보다 작은 값의 범위에서 선형적으로 증가하였다.

본 실험에서 광원이 5W, 514.5nm의 Ar-ion Laser인 경우, 미국 NFPA 130에 명시된 안전한계 대피 연기농도인 39.5g/m³에 대한 값은 투과율 약 74%, 가지거리 10m이며 휘도는 95의 값으로 나타났다.

4.2. 연기농도 측정법을 사용한 임계풍속 산정

Fig. 6의 (a)는 자연대류 상태에서 모형터널의 화재를 PIV를 사용하여 측정한 결과를 나타낸다. 화원

Table 2. Table for the relationship between soot concentration and brightness

Brightness table	Transmissivity (%)	Brightness	Extinction coefficient(K)	Visibility (m)	Smoke density (mg/m ³)
	0	253	-	-	
	10	238.6	2.303	1.303	303.03
	20	216.2	1.609	1.865	211.71
	30	191.4	1.204	2.492	158.42
	40	171.1	0.916	3.275	120.53
	50	142.7	0.693	4.329	91.18
	60	120.1	0.511	5.871	67.23
	70	103.3	0.357	8.403	46.97
	80	81.7	0.223	13.453	29.34
	90	50.2	0.103	29.126	13.55
	100	16	0	-	-

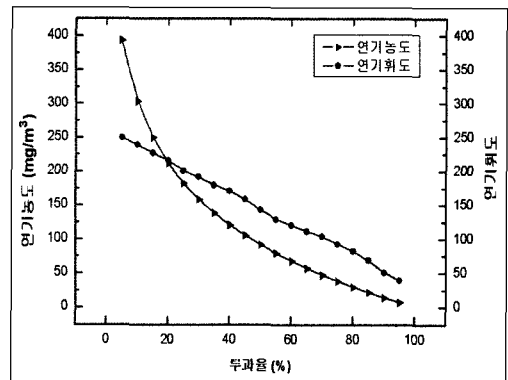


Fig. 5. Relationship between soot concentration and brightness.

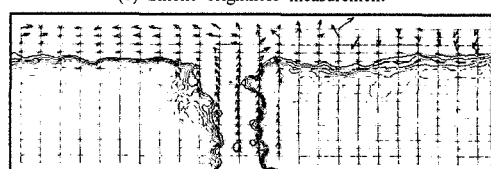
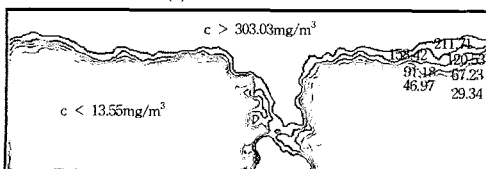
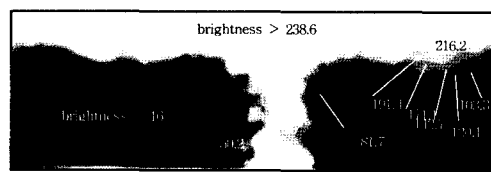


Fig. 6. Free convection in Tunnel fires.

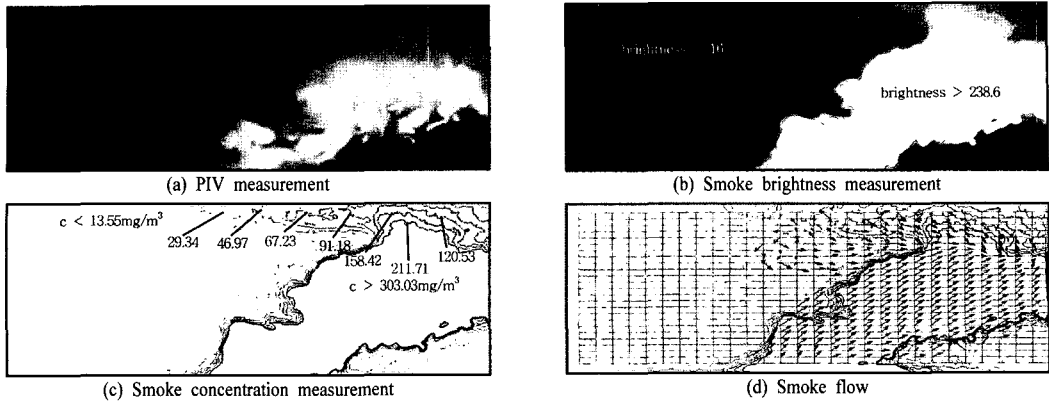


Fig. 7. Smoke control by critical velocity in tunnel fires.

으로부터 발생한 연기는 수직으로 상승하여 천장을 타고 터널 양 방향으로 이동한다. Fig. 6의 (b)는 (a)의 데이터를 Gray-vel 2.1 프로그램으로 계산하여 휘도로 나타낸 것이다. 총 10등분의 휘도로 구분하여 나타내었으며 각각의 휘도 값은 Table 2에 명시되어 있다. Fig. 6의 (c)는 (b)의 휘도 측정 데이터를 연기농도로 환산하여 등고선으로 나타낸 것이다. 10등분의 농도로 나누어져 있으며 각각의 농도 값은 Table 2에 나타내었다. Fig. 6의 (d)는 (a)의 데이터를 기류해석 Flow-vec3.2 프로그램을 이용하여 화재기류의 속도와 거동을 나타낸 것이다.

Fig. 7은 모형터널에서의 화재 발생시 임계풍속에 의한 연기제어를 나타낸다. Kennedy 식에 의해 계산된 임계풍속 값을 기준으로 원심 축류팬의 회전 속도를 조절하여 -30~30%의 값으로 바꾸어가며 측정하였다. 실험결과, Kennedy 식에 의한 축소모형터널 임계풍속 0.302m/s의 -10%인 0.272m/s 적용시 발생 연기가 화재발생 지점에서 속도가 0m/s이 되었으며, 농도가 0mg/m³인 것으로 측정되었다. 따라서 Kennedy 식으로부터 계산된 임계풍속 값은 모형실험을 통하여 측정된 임계풍속 값보다 10% 높게 나타났다.

5. 결론

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

1) 연기농도와 휘도는 투과율 100~30% 범위 내에서 상관관계가 성립하지만 투과율 30~0%의 범위에서는 연기농도는 급상승하는 반면 휘도 값은 255

이하 범위에서 선형적으로 증가하였다.

2) 화재 시나리오에 따른 정상적인 연기농도분포도는 PIV를 사용하여 발생 연기농도와 휘도와의 상관관계로부터 정상적인 연기농도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3) 동일한 실험에서 측정된 화상데이터를 연기농도 측정 프로그램과 기류속도 측정 프로그램으로 분석한 결과, 연기농도 0mg/m³의 위치와 기류속도 0m/s의 위치가 동일하게 나타남으로 연기농도 분석을 통하여 임계속도를 측정할 수 있음을 확인하였다.

3) Kennedy 식으로부터 계산된 임계풍속 값은 연기농도 측정법을 사용한 축소모형실험을 통하여 임계풍속 값과 약 10% 차이를 나타냈다.

감사의 글 : 이 논문은 2004학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음(과제번호 ; INHA-31607).

참고문헌

- 1) A. J. M. Heselden BSC., Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels, 2nd Int. Symp. on the Aerodynamics & ventilation of vehicle tunnels, 1976.
- 2) Lea, C. J., Bettis, R. J. and Jagger, S. F., A review of available data models for tunnel fires. HSE Project Report, IR/L/FR/94/12, Health and safety Executive, UK, 1995.
- 3) 윤성욱, 도로터널내 화재발생시 매연제거를 위한 모델해석, 서울대학교 석사논문, 1997.
- 4) 유영일, 이희근, 일방향 도로터널내 화재발생시 역류를 막는 환기속도결정에 관한 축소모형실험, 터널과 지하공간, Vol. 8, pp. 107~117.

- 5) Y. Oka and G. T. Atkinson, Control of smoke flow in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 25, 1995.
- 6) PIARC, Road Safety in Tunnel, PIARC Committee on Road Tunnel, 1995.
- 7) K. J. Hammad, M. V. Otugen, E. B. Arik, A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow, *Experiments in Fluids*, 26, pp. 266~272, 1999.
- 8) NFPA, "The SFPE handbook of fire protection engineering", NFPA Third edition, 2000.
- 9) PIARC, Fire and smoke control in road tunnels, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC, 1999.