

## 터널 화재시 연기이동 가시화에 기초한 임계풍속산정에 관한 실험적 연구

김종윤, 서태범, 임경범\*, 김하영\*\*, 이동호\*\*, 유지오\*\*\*

인하대학교 기계공학과, 한국소방안전협회\*, 인천대학교 안전공학과\*\*, 신홍대학 건축설비과\*\*\*

### Experimental Study on Calculation of Critical Velocity Based on Smoke Movement Visualization in Tunnel Fires

Jong-Yoon Kim, Tae-Beom Seo, Kyung-Bum Lim\*, Ha-young Kim\*\*,  
Dong-Ho Rie\*\*, Ji-Oh Yoo\*\*\*

Department of Mechanical Engineering Inha University, Korea Fire Safety Association\*,

Department of Safety Engineering University of Incheon\*\*,

Department of Building Mechanical Engineering Shinheung College\*\*\*

#### 1. 서론

터널 화재 발생 시 환기시스템은 연기를 제어하여 대피자의 탈출과 소방활동을 원활하게 하기 위한 안전경로를 확보하는 목적으로 사용되어진다. 화재시 연기의 제어는 횡류식, 반횡류식 환기방식으로서 연기를 화재공간으로부터 완전히 제거하는 배연(smoke exhaust)방식과 종류식 환기방식으로서 대피하고자 하는 반대방향으로 기류를 형성하여 대피공간을 확보할 수 있도록 제어하는 제연(smoke control)방식이 있다. 우리나라 터널의 대부분은 종류식 환기방식을 적용하고 있어 화재 발생 시 연기의 유동을 터널 내부에서 제어하는 방식을 주로 채택하고 있다. 그러나 종류식 환기방식은 환기량에 따라 연기의 확산이나 역류로 인한 대피자의 안전에 영향을 미치기 때문에 정확한 제연이 가능하도록 임계풍속을 산정하는 것이 중요하다. 현재 임계풍속 산정에 대한 대부분의 기존 연구는 온도의 변화 및 CO의 농도측정을 통한 임계풍속 산정방법을 택하고 있다. 본 연구에서는 연기의 유동가시화 및 온도와의 상관관계에 의해 임계풍속을 산정함으로써 터널 설계 시 효과적인 방재시스템을 구축하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

#### 2. Scaling Law

터널 화재시 연기유동의 성층화를 유지하면서 열기류의 역류현상을 억제하기 위한 최소풍속을 임계풍속(Critical Velocity)이라 한다. 이 임계풍속은 Froude (Fr) 수를 변수로 하는 관계식에 의해서 계산하고 있으며, 터널방재시 사용하는 Fr수는 수정된 Fr수로 표현된다.<sup>1)</sup>

$$Fr = \frac{gH(\rho_o - \rho_f)}{\rho V_f^2} = \frac{\text{부력}}{\text{관성력}} = \frac{gH}{V_f^2} \left(1 - \frac{T_o}{T_f}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 Fr수가 일정하다고 가정하면 기하학적 상사법칙과 역학적 상사법칙이 성립하며 축척과 관계없이 일정한 유체의 유동성질이 나타난다. 따라서 축소터널과 실제터널의 길이  $L_m$ 과  $L_f$  발열량  $Q_m$ 과  $Q_f$ , 속도  $V_m$ 과  $V_f$  사이의 관계는 다음 식과 같다.<sup>1)</sup>

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

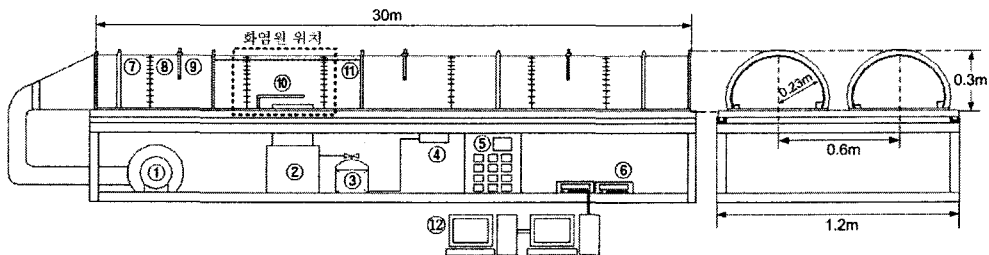
$$\frac{V_m}{V_f} = \left(\frac{L_m}{L_f}\right)^{1/2} \quad (3)$$

본 실험에서는 위 식을 이용하여 실제 터널 및 화원에 대한 축소법칙을 적용하여 모형터널을 제작하여 가시화 실험을 통한 임계풍속을 산정하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

모형 터널은 실제터널의 약 1/29의 축소 모형으로 높이 0.3 m, 폭 0.454 m, 길이 30 m 인 쌍굴 모형의 터널이다. Fig 1.에 본 연구에서 사용된 모형터널의 개략도를 나타낸다. 터널본체는 두께가 3 mm인 투명 아크릴로 제작하였으며, 열원부근에서는 두께 3 mm의 투명유리를 성형 제작하였다. 또한 열원부는 유리가 열에 의해 파손되는 것을 방지하기 위하여 터널 본체 외부에 물분사 노즐을 설치하여 냉각하였다.



1	유량 공급 팬	5	컨트롤 패널	9	열선 풍속계
2	가스버너	6	데이터 수집장치	10	연기 분사장치
3	LPG 가스	7	압력 측정계	11	수평 열전대
4	유량/질량 측정계	8	열전대봉	12	제어 컴퓨터

Fig. 1 모형터널 실험장치의 개략도

화재모사를 위한 화원은 0.4 m × 0.2 m 크기의 세라믹 LPG히터로 제작하였으며, 터널입구기준 약 7.5 m지점에 설치하였다. 세라믹 LPG 히터는 1~20 kW크기의 발열을 하며, 실제터널에서 5~100MW의 화재강도로 모사하였다.

화재 시 발생하는 연기를 모사하기 위해서 연기발생기(Smoke generator)를 사용하였으며, 열원위에 매니폴더를 설치하여 파라핀오일로 생성된 연기를 공급하고 열부력에 의해서 연기가 상승할 수 있도록 하였다. 또한 터널의 화원부 정면에 디지털 비디오카

메라를 설치하여 연기의 유동을 측정하였다.

(가) 터널내 공기유량 공급

터널을 소정의 풍속으로 유지하기 위해 소형팬을 이용하여 유량을 공급하도록 하였으며 인버터를 사용하여 일정량의 풍량이 공급 되도록 설정하였다.

풍속의 크기는 실제 풍속 0~10 m/s 에 대하여 Froude의 상사 법칙을 적용하여 0~1.83 m/s를 공급 할 수 있도록 하였으며, 유량과 실제 풍속을 비교 할 수 있도록 3곳에 열선 풍속계를 설치하였다.

(나) 온도의 측정

화재 실험 시 터널 내부의 온도측정을 위하여 터널 전체에 총 220개소의 열전대를 설치하였다.

화원부근은 총 100개의 열전대(K-type)를 삽입하여 측정한 후 컴퓨터를 이용하여 측정데이터를 기록하였다. 온도측정을 위해 터널본체에 일정간격으로 열전대를 삽입하여 터널단면상에서의 높이방향으로의 온도분포를 측정하였다. 화원부의 천장에는 10 cm간격으로 36개소에 열전대를 설치하여 연기의 역류(Backlayer)에 의한 온도변화를 측정할 수 있도록 하였다.

2.2. 실험방법

본 실험을 위해 사용한 모형터널에 대한 실험범위를 Table 1에 나타낸다.

터널 유량 공급장치의 팬 회전수를 인버터에 의해 제어하여 터널 내 풍속을 일정하게 유지한 후 히터를 점화하여 가스공급시스템의 유량계를 이용하여 일정량으로 열 발생량이 되도록 가스를 공급 하였다. 연소상태가 정상상태에 도달하면 터널본체에 히터를 밀어 넣은 후 온도측정을 실시하였다. 이 때 연기발생기를 이용하여 일정량의 연기를 공급하였으며 온도와 연기유동의 변화를 측정하였다. 온도는 각 조건별로 320초 이상 측정하여, 컴퓨터 및 데이터 수집장치를 이용하여 데이터를 기록 하였다.

화재강도는 원형화재강도 5MW~50MW에 대한 축소화재강도인 1~10 kW에 대하여 실험을 수행하였으며, 실험조건의 풍속은 Kennedy식<sup>2)</sup>에 의해서 임계풍속을 계산한 후 이를 기준으로 하여 전후의 5 조건 정도 범위에서 측정을 수행하였다. 연기의 역류 현상을 육안으로 확인하여 역류가 발생하지 않는 풍속까지 실험을 실시하였으며, 터널의 1m 이격거리에 디지털 비디오 카메라를 설치하여 촬영 하였다.

Table 1. 실험범위

구분	원형	모형
터널내 풍속	0~10 [m/s]	0~1.83 [m/s]
풍량	~300 [m <sup>3</sup> /s]	~3.65 [m <sup>3</sup> /min]
화재강도	5 [MW]	1.07 [kW]
	10 [MW]	2.15 [kW]
	20 [MW]	4.29 [kW]
	30 [MW]	6.44 [kW]
	50 [MW]	10.73 [kW]
연기발생량	80 [m <sup>3</sup> /s]	17.66 [ℓ/s]

유량변동에 따른 연기발생기의 연기의 유동과 터널 천정부의 수평온도 분포를 비교하여 연기의 유동가시화 및 온도와의 상관관계에 따른 임계풍속을 산정하였다.

#### 4.결과 및 토론

Fig. 2는 화재강도의 변화에 따른 연기유동분포를 나타낸다.

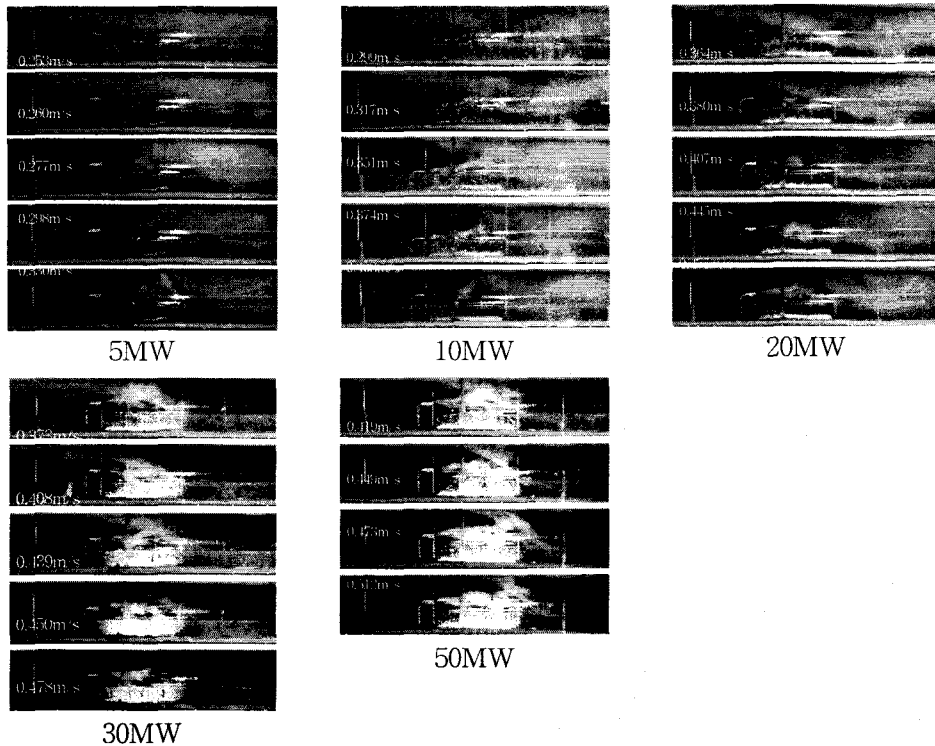


Fig. 2 화재 강도에 따른 연기의 유동

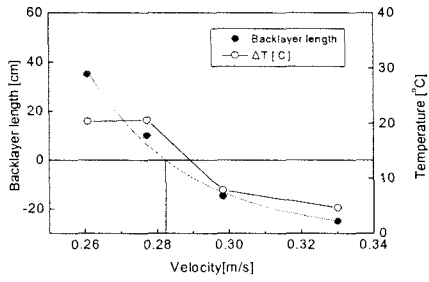
연기를 제어하기위한 공급 풍속은 인버터에 의하여 0.02~0.04 m/s 간격으로 조정됨에 따라 임계풍속의 전후의 결과 값을 측정하였다. 화재강도가 30MW 이상이 됨에 따라 파라핀오일의 기화 현상으로 인하여 화원 하류방향에서 연기가 사라지는 현상이 나타났다. 화재강도가 커짐에 따라 임계풍속은 증가하는 경향이 나타났다.

Fig. 3은 온도와 연기유동에 따른 임계풍속 산정 결과를 나타낸다.

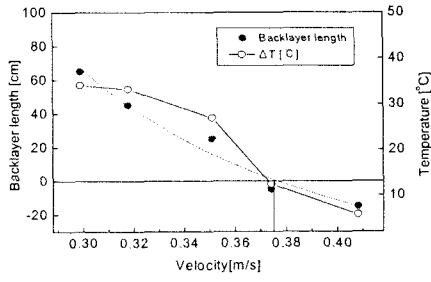
그래프의 X축에 공급풍속을 표시하였으며 Y축에 연기의 역류길이 및 온도의 변화를 표시하였다. 온도는 화원의 수직상부 천정온도이며, 상온에서부터 온도의 증가분  $\Delta T$  값으로 표시하였다.

화원상부의 천정온도는 임계풍속에 도달하여도 복사열에 의하여 크기는 상온과 50℃ 이상의 차이를 나타냈다.  $\Delta T$ 는 공급풍속이 임계풍속보다 작을 때 높은 값을 유지하지만 임계풍속보다 커짐에 따라 급속히 감소하는 경향을 나타내었다.

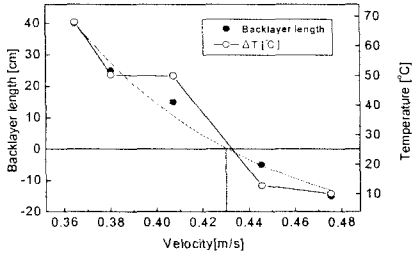
연기의 유동은 공급풍속이 증가함에 따라 연기의 역류길이가 감소함을 나타내었으며  $\Delta T$ 가 급속히 감소하는 구간에서 연기의 역류가 제어되는 현상이 나타났다. 그러나  $\Delta T$ 와 연기의 유동은 경향성은 비슷하지만 서로 일치 하지 않게 나타났다. 따라서  $\Delta T$ 가 급감하는 구간을 토대로 연기의 역류길이가 0이 되는 값을 임계풍속으로 산정하였다. 다만 화재강도 30MW의 경우 약 0.45m/s에서 역류길이 및  $\Delta T$ 가 급속히 감소하므로 이를 임계풍속으로 산정하였다.



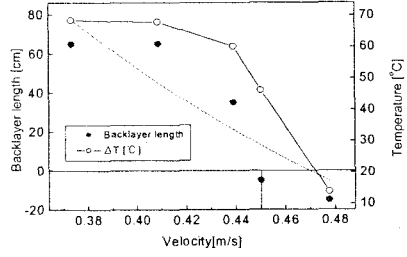
(a) 5MW



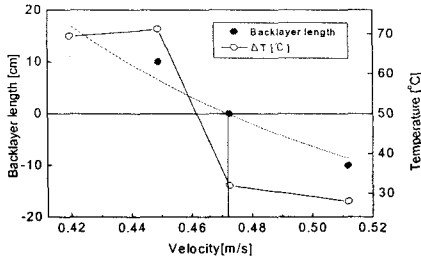
(b) 10MW



(c) 20MW



(d) 30MW



(e) 50MW

Fig. 3 화재강도에 따른 온도분포 및 연기분포

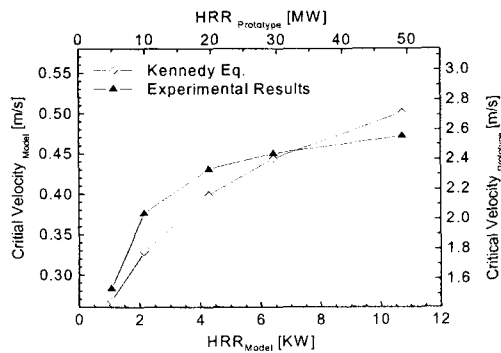


Fig. 4 화재강도에 따른 임계풍속 비교

Fig. 4는 화재강도에 따른 임계풍속 실험결과 및 Kennedy식의 계산결과를 비교한 그래프이다.

화재 강도가 20MW이하의 경우 실험결과가 계산결과보다 크게 나타났으며 강도가 증가함에 따라 실험결과는 증가폭이 감소하여 50MW에서는 실험 결과가 계산결과보다 더 작게 나타났다. 그러나 두 임계풍속 값은 약  $\pm 5\%$ 이내의 차이를 보이고 있어 두 결과가 근사함을 나타내었다.

## 5. 결론

- 가. 터널화재 시 연기 역류의 제어는 화원상부의 천정온도  $\Delta T$ 가 급속히 감소하는 구간에서 결정된다.
- 나. 연기 발생기에 의한 연기의 유동과  $\Delta T$ 는 경향성은 비슷하지만 일치하지 않으며, 연기의 역류길이가 0이 되는 값을 임계풍속으로 산정할 수 있다.
- 다. 터널화재 실험결과와 Kennedy식의 계산결과 비교 시 두 결과는  $\pm 5\%$ 이내의 차이를 보이고 있어 임계풍속의 산정이 타당함을 밝혔다.

## 참고문헌

1. Oka Y. and Atkinson G.T., "Control of smoke flow int tunnel fires", Fire Safety Journal, 25, pp.305-322., 1995
2. Kennedy, W. D. and Parsons, B, "Critical Velocity: Past, Present and Future", one seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, london, U.K., 1996
3. Y. Wu and M.Z.A Baker, "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity.", Fire Safety Journal, 35, pp. 363-390., 2000