

경사 터널내 화재시 임계속도에 관한 실험적 연구 An Experimental Study of Critical Velocity in Sloping Tunnel Fires

이성룡·김충익*·유홍선*†·김혁순**·전명배**

Sung-Ryong Lee · Choong-Ik Kim* · Hong-Sun Ryou*† ·
Hyuk-Soon Kim** · Myung-Bae Jun**

중앙대학교 기계공학부 대학원, *중앙대학교 기계공학부 교수, **중앙대학교 기계공학부
(2004. 1. 12. 접수/2004. 3. 16. 채택)

요 약

본 연구에서는 터널 화재시 임계속도에 대한 터널 경사의 영향을 파악하기 위하여 축소모형 실험을 실시하였다. Froude 상사를 사용하여 1/20로 축소된 모형터널에서 실험을 실시하였으며, 가연물질로는 에탄올을 사용하였다. 정사각형 풀을 사용하였으며 발열량은 2.47~12.30 kW이다. 임계속도가 발열량의 1/4승에 비례하여 증가하였다. 터널 경사가 증가할수록 굴뚝효과로 인해 연기의 유동속도가 증가하여 임계속도가 증가하였다.

ABSTRACT

In this study, reduced-scale experiments were conducted to analyze an effect of tunnel slope on critical velocity. The 1/20 scale experiments were carried out under the Froude scaling using ethanol pool fire. Square pools ranging from 2.47 to 12.30 kW were used experiments. Critical velocity varied with one-fourth power of the heat release rate. As the slope of the tunnel increases the critical velocity comes to be fast due to the increase of the chimney effect.

Keywords : Tunnel fire, Slope, Froude scaling, Critical velocity

1. 서 론

우리 나라는 국토의 약 70%가 산악 지역이며 간선 도로망의 정비에 있어서 산맥 등의 지형적 장벽을 극복하는 수단으로서 터널의 건설이 불가피하다. 터널의 채용은 도로 선형의 확보에 따른 주행 편익을 향상시키는 것은 물론 산악 지역의 험준한 경사에서의 낙석, 흩, 돌의 미끄럼 등의 자연 재해에서 교통을 보호하고 주행의 안전성과 확실성을 향상시키며 자연 경관의 보전에서도 유용하다. 한편 도시에 집중하는 교통을 처리하기 위한 도시내의 도로망 정비에 있어서도 터널은 생활 환경의 보전이나 토지의 입체적 활용 등의 관점에서 유용한 구조형식이다.

그러나 터널 안에서 1차 화재 또는 기타의 사고가 발생했을 때 신속히 사고의 발생을 터널 관리소에 통

보하고 신속한 조치를 취하지 않으면 사고가 확대되어 2차적인 화재를 발생시킬 위험성이 있다. 터널 화재는 자주 발생하지 않지만 최근 들어 증가 추세에 있으며, 발생 빈도에 비해 대형 참사를 초래하는 경우가 많다. 그러므로 터널 화재 현상의 이해와 터널내 화재 발생에 대비하여 적절한 배연설비 및 피난대책의 마련이 무엇보다 중요하다.

일반적으로 터널 화재는 터널의 형태, 경사, 배연 용량, 팬의 위치, 환기 및 풍압과 같은 외부 요인과 열 및 질량전달, 화학반응 등이 포함된 물리적 현상이기 때문에 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 그러나 아직까지 이러한 복잡한 현상을 명확하게 이해하지 못하고 있는 실정이다. 터널 화재에 관하여 대피자들의 안전한 피난과 연기를 제어하기 위한 연구들이 주로 이루어지고 있다. 자연 환기 터널의 경우 자연 환기력만으로 연기를 제어한다는 것은 불가능하므로 연기의 진행을 최대한 억제하는 방향으로 연구가 진행되고 있으며,

† E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

배연 효율을 증가시키기 위한 방법들이 연구중이다. 화재 발생한 고온의 연기는 천장을 따라 터널 출구 방향으로 이동하게 되는데, 화재 방향으로 신선한 공기를 불어넣어 대피자들의 피난 방향으로 진행되는 역기류를 막기 위한 최소 속도를 임계속도라 한다. 기계 배연 터널의 경우 배연 방식에 따른 배연 성능과 임계속도에 관한 연구들이 주로 이루어지고 있다.

터널 경사가 증가하게 되면 굴뚝 효과로 인해 연기의 유동 속도가 증가하게 되어 이를 고려한 배연 성능을 가지는 배연 설비가 고려되어야 한다. Swiss Guideline¹⁾에서 굴뚝 효과에 대해서 쉽게 이용 가능한 간단한 모델이 주어져 화재시 온도차로 인한 유효압력차를 계산하였다. Opstad 등²⁾은 벽으로의 열전도를 계산해 하류의 온도를 변화시켰으며 Swiss Guideline의 모델보다 화재 영역이 좁다 좁은 경우에도 적용 가능한 장점을 가지고 있다. Sprint³⁾는 배연 능력 설계의 도구로 고안된 1차원 모델로 터널을 작은 구획들로 분할하여 터널 내 온도를 계산하였다. Riess 등⁴⁾은 세가지 모델들의 굴뚝 효과로 인한 유효 압력차를 계산한 결과들을 비교하였는데 터널 경사에 따른 유효 압력차가 모두 유사한 결과를 보였다. Atkinson과 Wu⁵⁾는 터널 경사의 영향을 파악하기 위하여 축소 모형 실험을 실시하였다. 임계속도가 터널 경사에 따라 증가하였으나, 터널 경사를 더 증가시키더라도 임계속도가 거의 변하지 않는 구간이 존재함을 확인하였으며 온도분포 측정을 통하여 터널 경사가 하류의 혼합물에 두드러진 영향을 끼치는 것을 확인하였다.

이와 같이 터널의 경사가 임계속도에 영향을 끼치지 만 국내에서는 이에 대한 체계적인 연구가 진행되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 터널 경사의 영향이 임계속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 축소 모형실험을 실시하여 임계속도를 결정하였다. 이를 통하여 터널내 제연 시스템 설계시 이론적 정성적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험터널

폭 8 m, 높이 8 m, 길이 268 m 크기의 실물 터널 공간을 길이에 대해 1/20로 축소하였다. 축소 터널은 폭 0.4 m, 높이 0.4 m, 길이 10.4 m이며 두께 0.01 m의 투명 아크릴을 이용하여 제작하였으며 화원부의 천장은 열에 의한 변형을 방지하기 위해 방화 석고보드를 이용하여 제작하였다. 터널의 입구와 출구는 외부에 개방되어 있으며 터널내부의 유동이 없는 상태

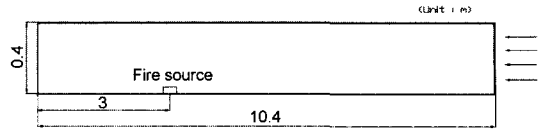


Fig. 1. Schematic of the reduced tunnel.

에서 실험을 실시하였다. 터널 입구에 풍동을 연결하여 배연 풍속을 유발시켰으며 전압을 조정하여 풍속을 조절하였다. Fig. 1에 실험터널의 개략도를 나타내었다.

2.2 실험 장치

터널 천장아래 2 cm 떨어진 위치에 5 cm 간격으로 열전대를 설치하여, 열전대들의 온도 변화를 이용하여 역기류의 길이를 측정하였다.⁶⁾ 열전대에서 발생된 신호는 Agilent 34970A Data Acquisition Unit과 Agilent 34910 채널을 통해 수집되었다. 데이터 수집 장치의 각 채널에서 수집된 데이터는 RS232를 통해 PC로 전송되었으며 LabView 프로그램을 이용하여 수집된 데이터를 처리하였다.

2.3 화원

일반적으로 풀 화재는 버너 화재나 고체 화재 등과 같은 다른 화재 장치들에 비해 실험 장치가 간단하고 연소 면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 장점이 있기 때문에 고정된 발열량의 확산 화염을 묘사하는데 있어서 널리 이용된다.⁷⁻⁹⁾ 본 연구에서는 6개의 풀을 사용하였으며, 정사각형으로 각 변의 길이가 각각 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 18 cm이고 풀의 높이는 2 cm이다. 가연물질로는 에탄올을 사용하였다. 에탄올의 밀도는 794 kg/m³이고 연소열은 26800 kJ/kg이다.¹⁰⁾

각 화원의 발열량은 로드셀을 이용하여 화재 실험시 증발된 연료의 양을 측정하여 산정하였다. 본 연구에서는 92%의 연소효율을 가정하였다.¹¹⁾ 발열량은 다음 식에 의해 결정하였다.¹²⁾

Table 1. Fire size of the ethanol pool fire

Hydraulic diameter [cm]	Q[kW]
8	2.47
10	3.84
12	5.63
14	8.27
16	9.96
18	12.30

$$Q = \chi \dot{m}_f \Delta H_c A \quad (1)$$

여기서, χ 는 연소효율, \dot{m}_f 는 연료의 증발량, ΔH_c 는 연소열, A 는 풀의 표면적을 나타낸다. 식 (1)에 의해 계산된 각 화원에서 발열량을 Table 1에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

천장 아래 2cm 떨어진 위치에 5cm 간격으로 열전대를 설치하여 연기의 위치를 측정하였다. 이를 바탕으로 임계속도와 역기류의 위치를 파악하였다.

Fig. 2에 9.96 kW 화재에 대하여 터널 경사가 0°일 때 배연속도에 따른 역기류의 길이를 나타내었다. 배

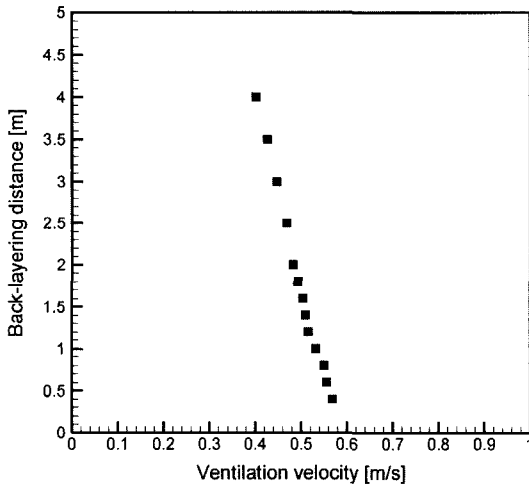


Fig. 2. Backlayering distance of 9.96 kW fire.

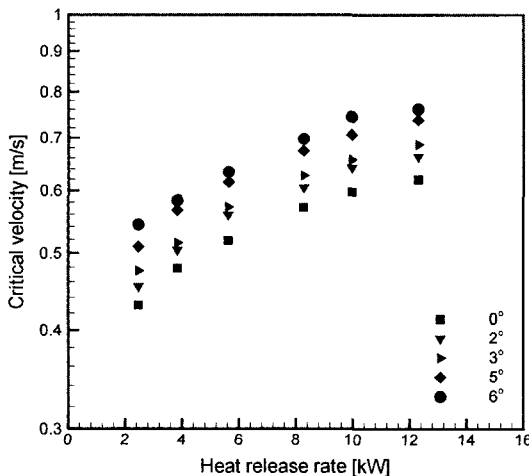


Fig. 3. Critical velocity with tunnel slope.

연속도가 증가함에 따라 역기류의 길이가 감소하고 있으며 화원에 가까워질수록 화원 자체의 영향으로 인해 기류가 증가하고 있다. 화원 부근의 역기류의 길이를 이용하여 선형보간을 실시해 임계속도를 계산하였다.

Fig. 3에 발열량의 변화에 따른 임계속도를 나타내었다. 발열량이 증가함에 따라 부력의 증가로 인해 임계속도의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 터널의 경사가 증가할수록 굴뚝효과로 인해 연기의 유동속도가 증가하여 연기를 제어하는데 보다 큰 배연속도가 필요함을 알 수 있다.

무차원 해석 방법을 이용하여 데이터의 분석을 실시하였다. 터널 수력직경을 특성길이로 사용한 Wu 와 Bakar⁶⁾가 제안한 무차원 발열량, Q'' 에 따른 무차원 임계속도, V'' 의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 무차원 발열량, Q'' 와 무차원 임계속도, V'' 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{gH}^5} \quad (2)$$

$$V'' = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (3)$$

여기서, Q 는 발열량, ρ_0 는 주위공기의 밀도, C_p 는 비열, T_0 는 주위공기의 온도, g 는 중력가속도, H 는 터널 단면의 수력직경, V 는 임계속도를 나타낸다. 터널 경사의 영향이 고려되지 않아 하나의 상관관계로 표현되지 않고 있다.

본 연구에서는 무차원 발열량, Q'' 과 터널 경사의 영향을 고려한 새로운 무차원 임계속도 V_s'' 를 사용하여

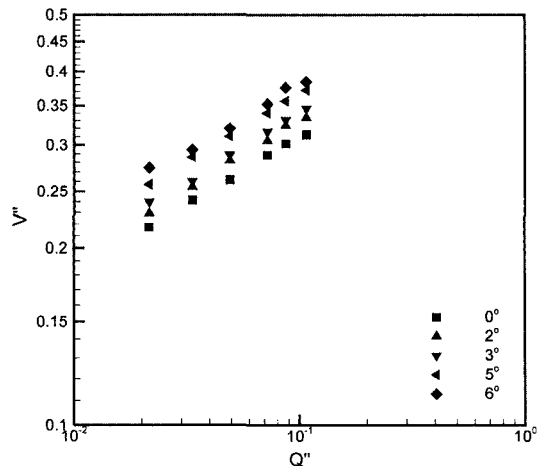


Fig. 4. Dimensionless critical velocity V'' against dimensionless heat release rate Q'' .

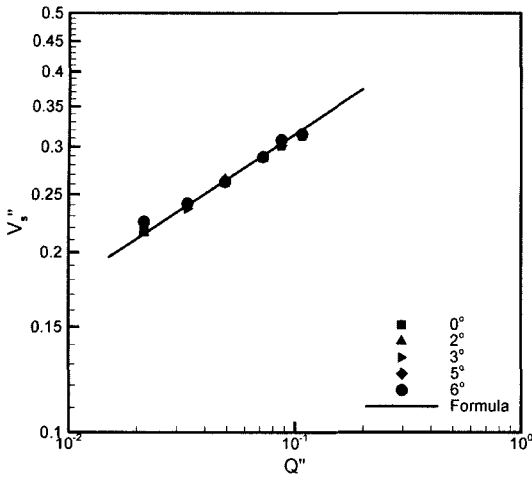


Fig. 5. Dimensionless critical velocity V_s'' against dimensionless heat release rate Q'' .

무차원 해석을 실시하였다. V_s'' 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_s'' = V''(1 - 0.03\theta) \quad (4)$$

여기서, θ 는 터널의 경사를 나타낸다.

Q'' 과 V_s'' 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 터널 경사의 영향을 고려한 결과들이 임계속도를 예측하는데 하나의 상관관계로 나타낼 수 있다. 이를 통하여 본 연구에서는 경사터널에 대하여 데이터들의 보간을 통하여 임계속도를 계산하는데 사용될 수 있는 상관관계식을 제안하였다. 터널 경사의 영향을 고려한 무차원 임계속도, V_s'' 가 무차원 발열량, Q'' 의 1/4승에 비례하여 증가한다. 상관관계 식은 다음과 같다.

$$V_s'' = 0.56Q''^{1/4} \quad (5)$$

본 연구에서는 소형 화재에 대하여 실험을 실시하여 위에 제안된 식의 사용범위를 $Q'' \leq 0.2$ 인 범위로 제한한다. 일반적으로 발열량이 커지게 되면 임계속도가 발열량에 무관하다고 보고되어 있는 바 추후 대형 화재에 대한 연구가 필요할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널내 화재 발생시 축소실험을 실시하여 임계속도에 대한 터널 경사의 영향을 파악하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 배연속도가 증가함에 따라 역기류의 길이가 감소한다.
2. 터널 경사의 증가에 따라 굴뚝효과로 인해 연기의 유동속도가 증가해 임계속도가 커진다.
3. 임계속도가 발열량의 1/4승에 비례하여 증가하며 무차원 해석을 통해 다음의 상관관계식으로 나타낼 수 있다.

$$V_s'' = 0.56Q''^{1/4}$$

4. 대형화재에 대한 임계속도를 결정하기 위해 추후 이에 대한 연구가 필요하다.

기호설명

- A : 플면적
- C_p : 정압비열
- g : 중력가속도
- \bar{H} : 터널의 수력직경
- Q : 발열량
- Q'' : 수력직경을 고려한 무차원 발열량
- T_0 : 주위 공기의 온도
- V : 임계속도
- V'' : 수력직경을 고려한 무차원 속도
- V_s'' : 터널 경사를 고려한 무차원 속도
- \dot{m}_f : 연료의 증발량
- ΔH_C : 연소열
- ρ_0 : 주위 공기의 밀도
- θ : 터널 경사
- χ : 연소효율

참고문헌

1. Bundesamt für Strassen : Richtlinie Systemwahl, "Dimensionierung und Betrieb von Tunnelluftungsanlagen", Dragt V5.0(2000).
2. K. Opstad, P. Aune, and J. E. Henning, "Fire Emergency Ventilation Capacity for Road Tunnels with Considerable Slope", 9.ICAVVT, Aosta, pp.535-543(1997).
3. I. Riess, M. Bettelini, and R. Brandt, "Sprint - A Design Tool for Fire Ventilation", 10.ISAVVT, Boston, pp.629-637(2000).
4. I. Riess, M. Bettelini, and R. Brandt, "Smoke Extraction in Tunnels with Considerable Slope", 4th International Conference Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, pp.503-512(2001).

5. G. T. Atkinson and Y. Wu, "Smoke Control in Sloping Tunnels", *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp.335-341(1996).
6. Y. Wu and M. Z. A. Bakar, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems - A Study of the Critical Velocity", *Fire Safety Journal*, Vol. 35, pp.363-390(2000).
7. X. C. Zhou and J. P. Gore, "Air Entrainment flow Field Induced by a Pool Fire", *Combustion and Flame*, Vol. 100, No. 1, pp.52-60(1995).
8. D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", A Wiley-Interscience Publication(1985).
9. E. J. Weckman and A. B. Strong, "Experimental Investigation of the Turbulence Structure of Medium-Scale Methanol Pool Fires, *Combustion and Flame*, Vol. 105, No. 3, pp.245-266(1996).
10. V. Babrauskas, "Burning Rates", *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2-1 to 2-15, USA (1998).
11. A. Tewarson, "Smoke Point Height and Fire Properties of Materials", NIST-GCR-88-555, National Institute of Standards and Technology, Available from National Technical Information Services, Springfield, VA 22161, USA(1998).
12. K. B. Edward, E. N. Harold, and D. E. David, "Simplified Fire Growth Calculation", *Fire Protection Handbook*, 18th Edition, NFPA FPH1897, Section 11, Chapter 10(1997).