

도로터널 화재시 경사도에 따른 임계풍속산정에 관한 실험적 연구

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

인하대학교 기계공학과 대학원 · 인하대학교 기계공학과 · 인천대학교 안전공학과

^{***}한국소방안전협회 · ^{****}신흥대학 건축설비디자인과

(2006. 3. 20. 접수 / 2006. 9. 15. 채택)

Experimental Study on Calculation of Critical Velocity in Accordance with Gradient of a Road Tunnel at Fire

Jong-Yoon Kim[†] · Tae-Beom Seo^{*} · Dong-Ho Rie^{**} · Kyung-Bum Lim^{***} · Ji-Oh Yoo^{****}

Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University

^{*}Department of Mechanical Engineering, Inha University

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

^{***}Korea Fire Safety Association

^{****}Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung College

(Received March 20, 2006 / Accepted September 15, 2006)

Abstract : This study provides a basic data necessary to design a facility of smoke management after calculating the critical velocity of the gradient scale model tunnel and reviewing its adequacy to establish an optimum disaster prevention system for a road tunnel at fire. The experiment is carried out by using Froude scaling to a scale model which is about 1/29 as big as the real tunnel, and its critical velocity calculation is calculated to the 0-2% gradient of the tunnel. The result shows that the higher the gradient is, the stronger the critical velocity, but that it doesn't affect the critical velocity so much when the gradient is less 2%. In addition, this result is studied in comparison with the results done by other researchers to review the adequacy of the critical velocity.

Key Words : critical velocity, gradient tunnel, reduced scale experiment

1. 서 론

국가경제의 성장과 함께 교통량의 증가로 인한 도로의 건설과 선형개량 사업의 증대는 터널에 대한 수요를 확대시켰으며, 이에 따라 터널에서의 평상시 안전운행의 확보 및 화재 등의 사고에 대비한 안전성의 확보에 대한 요구가 날로 증대되고 있는 실정이다.

터널은 반 밀폐구조로 터널 내부에서 화재발생시 온도상승과 함께 유독성 연기의 확산으로 인해 호흡과 시야장애 및 심리적인 공포감이 초래될 수 있으며, 피난 및 소화·구급활동이 제약을 받게 된다. 따라서 터널 화재 시 안전을 확보하기 위하여 소화설비, 피난설비, 통신 및 경보설비, 소화활동설비 등이

필요하며, 세계 각국은 터널방재의 중요성을 인식하고 방재시설의 설치 또는 설계기준을 제시하고 있으며, 방재시설의 설계에 대한 신뢰성 확보 및 효율적인 운영을 위해서 CFD 시뮬레이션, 모델 및 실험 실험 등 다양한 영역에서 많은 연구를 진행하고 있다¹⁻³⁾.

유럽공동체의 유레카(Eureka)계획의 일환으로 1992년에 노르웨이의 페팡에서 승용차, 버스, 가구를 적재한 화물차에 대한 실규모의 화재실험을 실시했으며, 미국에서는 ASHRAE Committee의 주관아래 1993년 9월~1995년 3월까지 Memorial Tunnel에서 실규모 화재실험인 Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP)을 실시하여 환기시스템과 화염강도에 따른 터널내 연기확산·온도분포를 분석하였다. 또한 Y.Oka와 G.T. Atkinson(1995)^{4,5)}은 축소모형

[†] To whom correspondence should be addressed.
sweat100@hanmail.net

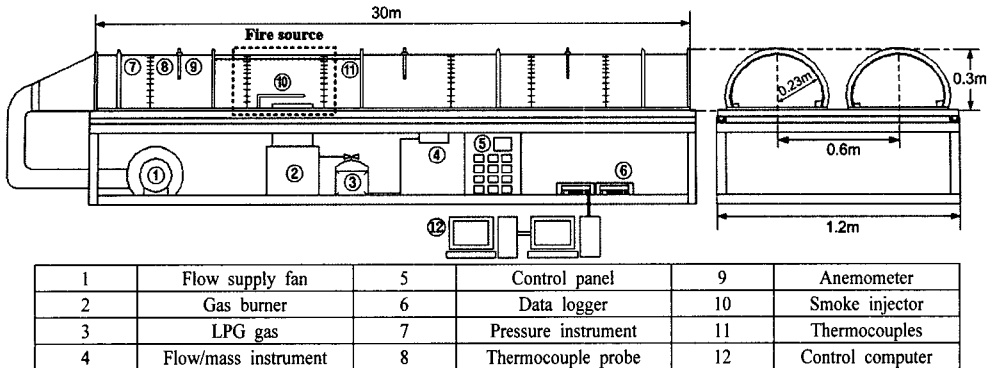


Fig. 1. Schematic of reduced scale tunnel.

실험을 통하여 임계풍속의 결정 및 Blockage Ratio의 영향에 관련된 실험을 실시하였으며 Y.Wu와 M.Z.A. Bakar(2000)⁹⁾는 종류식 환기 터널에서 단면형상의 변화에 대한 임계풍속 연구를 수행하였다.

본 연구는 도로터널에서의 화재 시 최적의 방재시스템을 구축하기 위하여 실제 터널의 축소모형을 대상으로, 경사터널에 있어서 사람들이 대피할 수 있도록 임계풍속의 적절성을 검토하며, 실제 터널에서 연기의 역류를 방지하여 대피시간을 확보하기 위한 제어설비의 설계에 필요한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험장치

모형 터널은 실제터널의 약 1/29의 축소 모형으로 높이 0.3m, 폭 0.454m, 길이 30m인 쌍굴 모양의 터널로 Fig. 1에 본 연구에서 사용된 모형터널의 개략도를 나타낸다.

화재모사를 위한 화원은 0.4m×0.2m 크기의 세라믹 LPG히터로 제작하였으며, 터널입구기준 약 7.5m 지점에 설치하였다. 터널본체는 두께가 3mm인 투명 아크릴로 제작하였으며, 열원부근에서는 두께 3mm의 투명유리를 성형 제작하였다. 또한 열원부는 유리가 열에 의해 파손되는 것을 방지하기 위하여 터널본체 외부에 물분사 노즐을 설치하여 냉각하였다.

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.

(가) 터널내 공기유량 공급

터널을 소정의 풍속으로 유지하기 위한 유량의 공급은 소형팬을 이용하여 공급하도록 하였으며, 유량공급계통의 관로(φ120mm)에 노즐타입의 유량계를 설치하여 노즐에 걸리는 차압을 측정하여 이를 유량으로 환산하였다. 유량은 유량공급관로에 피토티브(φ2mm)를 설치하여 환상 등면적분할법에 의해서 동압을 측정하여 유량으로 환산하여 보정계수를 구하여 터널공급유량을 보정하였다.

터널 공급유량은 인버터를 이용하여 주파수제어에 의해 팬의 회전수를 변동하여 조정하였으며, 인버터의 회전수는 A/D(ADLINK 9112)보드의 A/O신호(Voltage)로 일정량의 풍량이 공급 되도록 설정하였다.

풍속의 크기는 실제 풍속 0~10m/s에 대하여 Froude의 상사 법칙을 적용하여 0~1.83m/s를 공급할 수 있도록 하였으며, 유량과 실제 풍속을 비교할 수 있도록 상행선부 중요 위치 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 HP-34970A(2 EA)에 의해서 측정된 후 컴퓨터를 이용하여 측정데이터를 기록하였다. 온도측정을 위한 열전대(OMEGA사, XL-K-24)는 두께 2×3mm의 Wire type이며 터널본체에 일정간격으로 열전대를 삽입하여 터널단면상에서의 높이방향으로의 온도분포를 측정하였으며, 화원부의 천장에는 10 cm간격으로 36개소에 열전대를 설치하여 연기의 역류(Back-layer)에 의한 온도변화를 측정할 수 있도록 하였다.

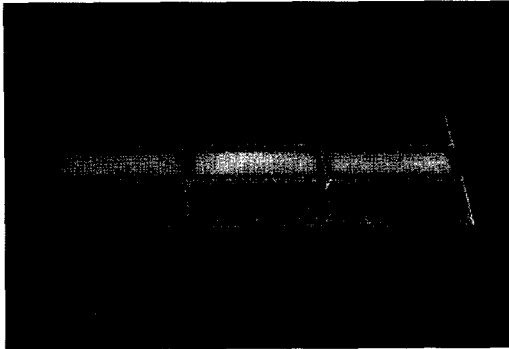


Fig. 2. Ceramic LPG heater.

(다) 가스유량 측정 및 화원

연료는 표준 발열량이 50.362MJ/kg인 LPG 가스를 사용하였다. 가스의 유량측정은 면적식 LPG 유량계(0.2~2LPM, 2~20LPM)에 의해 측정하였고, 가스 밀도는 유량계 입출구에 압력계 및 온도계를 설치하여 압력과 온도를 측정하여 보정하였다. 또한 가스의 연소량을 보다 정밀하게 측정하기 위해서 밸런스(scale : 1/20,000)를 이용하여 1g 단위로 공급되는 가스를 측정 후 이를 통해 유량계를 보정하였다.

Fig. 2는 본 실험에 화원으로 사용된 세라믹 LPG 히터를 나타낸 것으로 화원은 화재강도에 따라 4단계로 크기를 조절 할 수 있으며, 완전연소가 가능하도록 공기량을 조절할 수 있도록 제작하였다.

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 소정으로 열 발생량이 되도록 가스를 공급 하였다.

Table 1. Experimental range

Elements	Prototype	Scale model
Tunnel velocity	0~10m/s	0~1.83m/s
Wind flow rate	~300m ³ /s	3.65m ³ /min
Fire intensity	20MW	4.292kW
Smoke production rate	80m ³ /s	17.66L/s
Tunnel gradient	0%	0%
	0.5%	0.5%
	1%	1%
	2%	2%
Jet velocity	30m/s	5.48m/s

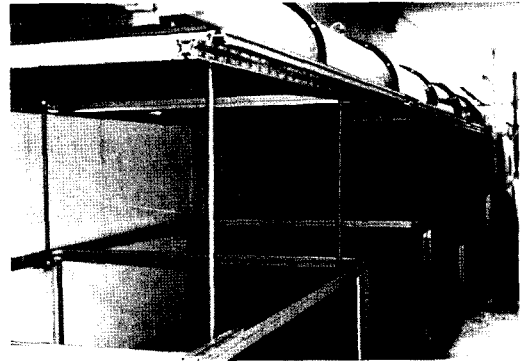


Fig. 3. Reduced scale Tunnel with 2% gradient

연소상태가 정상상태에 도달하면 터널본체에 히터를 밀어 넣은 후 온도측정을 개시하였다. 온도는 각 조건별로 320초 이상 측정하여, 컴퓨터 및 데이터 수집장치를 이용하여 데이터를 기록 하였다. 여기서 연기의 유동과 온도와의 관계를 비교하였으며, 온도 분포에 대한 연기의 유동을 결정 하였다.

화재강도는 원형화재강도 20MW에 대한 축소화재강도인 4.292kW에 대하여 실험을 수행하였으며, 실험조건인 풍속은 Kennedy식¹⁾에 의해서 임계풍속을 계산한 후 이를 기준으로 하여 전후의 5조건 정도 범위에서 측정을 수행하였다. 그리고 연기의 역류 현상을 화상으로 분석하여 역류가 발생하지 않는 풍속까지 실험을 실시하였다.

터널경사도는 터널 하부에 틸팅장치를 설치하여 0%, 0.5%, 1%, 2%의 기울기에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 3은 경사도 2%일 때 모형터널의 사진을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 모형터널의 최상부에서 축방향의 온도분포 및 매니폴더에서 공급되는 연기의 역류 발생여부를 가시화하여 임계풍속을 산정하였다.

Fig. 4에 풍속의 변화에 따른 연기유동을 나타낸다. 그림에 나타나는 바와 같이 모형터널에 임계풍속보다 작은 풍속을 공급 하였을 때 연기는 터널의 천정을 따라 화원의 전면으로 이동하여 연기의 역류 현상이 발생하며 터널 최상부의 온도는 증가하게 된다. 모형터널 내 기류속도가 임계풍속에 도달하게 되면 연기의 역류현상은 사라지게 되며 연기의 유동은 화원의 상층부에서 일정한 상태를 유지하게 된다. 본 실험에서 경사도 0%, 20MW(4.29kW)의 임계풍속은

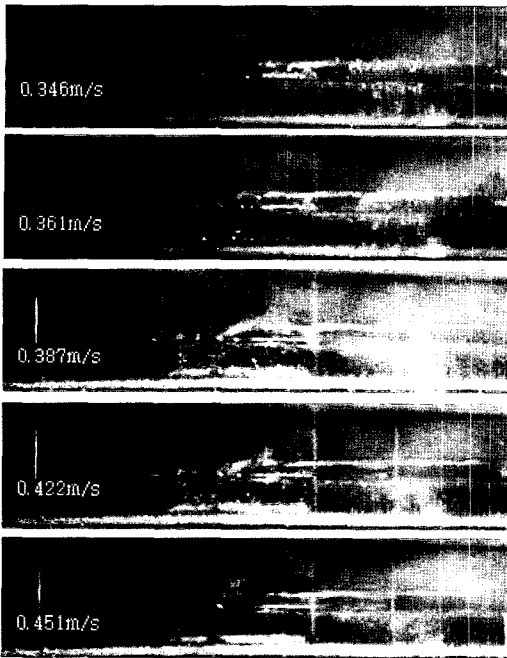


Fig. 4. Smoke flow from the change of wind velocity(0% 20MW).

약 0.422m/s로 Kennedy 식에 의해 계산된 임계풍속인 0.424m/s와 거의 일치하는 0.422m/s로 나타났다.

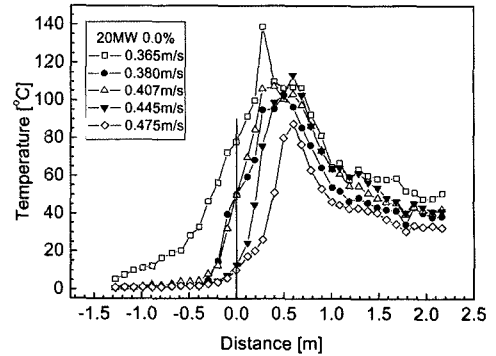
Fig. 5는 경사도의 변화에 따른 터널 천정에서 축방향의 온도분포를 나타낸다.

X축은 0~0.4m에 위치한 화원을 기준으로 하여 터널의 축방향 길이를 나타내며 Y축은 터널 최상부에서의 온도를 나타낸다.

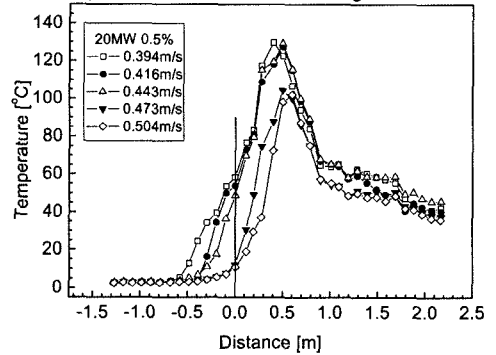
터널 내 최상부의 온도는 임계풍속보다 작은 풍속을 공급할 경우, 화원보다 전면부의 천정 온도가 증가하며 이에 따라 연기의 역류현상이 발생함을 유추할 수 있다. 그러나 임계풍속에 도달했음에도 불구하고 터널 천정 전면부에는 약간의 온도 상승이 발생하였다. 이것은 화원에서의 복사열등 주위의 영향에 의해 온도가 증가함을 나타낸다.

0m에 표시된 수직선을 기준으로 풍속의 변화에 따른 온도분포를 살펴보면 어느 시점 이후에 온도가 급격하게 감소되는 현상이 나타나며 이 때 연기의 역류 현상은 사라진다. 그 이후 온도의 변화는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 이 시점을 기준으로 최종적인 임계풍속을 산정하였다.

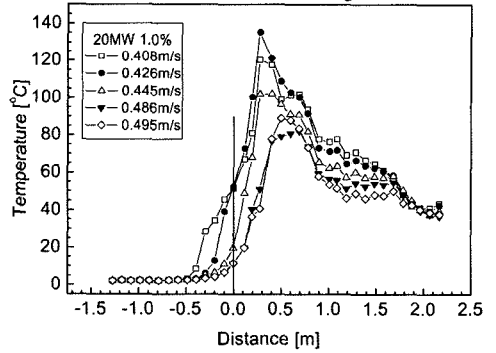
경사도에 따른 터널 최상부의 온도분포 경향은 0~2%경사에서 경사도의 변화에 대한 차이점은 크게 나타나지 않는다.



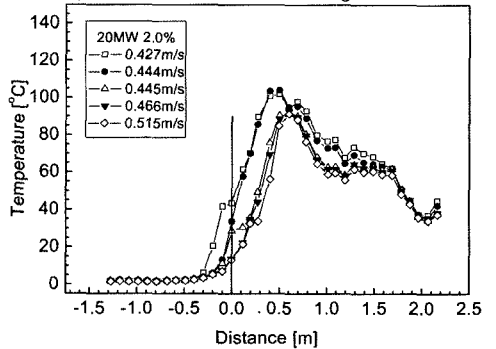
(a) Temperature distribution when the gradient is 0%



(b) Temperature distribution when the gradient is 0.5%



(c) Temperature distribution when the gradient is 1.0%



(d) Temperature distribution when the gradient is 2.0%

Fig. 5. Temperature distribution of the top tunnel from its gradient.

Table 2. Critical velocity from the tunnel gradient

Gradient [%]	Scale model [m/s]	Prototype [m/s]
0.0	0.422	2.287
0.5	0.431	2.333
1.0	0.444	2.407
2.0	0.446	2.418

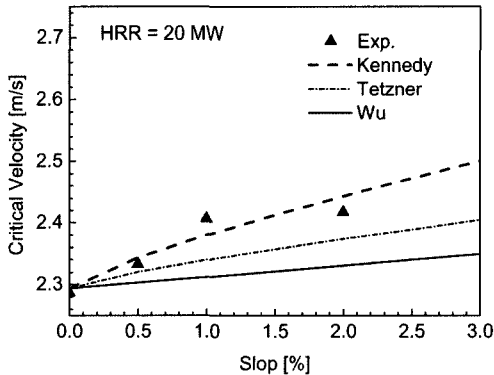


Fig. 6. Comparison of the critical velocity from the tunnel gradient.

각 경사도별 임계풍속을 비교 하여 보면 경사도가 증가함에 따라 임계풍속도 점차 증가하는 경향을 나타내지만 최대 풍속차가 0.025m/s 정도로 5.4% 정도의 차이를 나타낸다. 특히 경사도 1%와 2%의 경우에는 임계풍속 차이가 0.002m/s로 일치하는 결과가 나타났다. 따라서 터널 경사도가 2% 이하일 경우 임계풍속에 미치는 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Table 2에 본 실험에 의해 결정된 경사도에 따른 임계풍속을 나타낸다.

Fig. 6은 경사도에 따른 임계풍속 실험결과와 기존 연구자들의 결과^{1,2,6)}를 비교하여 나타낸다.

화재강도가 20MW에서의 경사도에 따른 임계풍속은 Kennedy식에 의한 결과와 가장 유사한 값을 나타내고 있다. 그러나 그래프의 기울기의 관점에서 보면 경사도 1% 이후의 데이터는 Wu가 제시한 보정계수와 일치함을 나타내었다.

따라서 터널의 경사도가 1% 이하일 경우 기울기가 증가함에 따라 임계풍속은 증가하지만 기울기가 1% 이상 증가할 경우 임계풍속 값은 거의 변하지 않는 결과가 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 도로 터널 내 화재 발생시 모형

실험을 실시하여 터널의 경사도에 따른 연기의 유동과 온도 분포를 분석하여 임계풍속을 산정 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 정리 할 수 있다.

1) 실험범위 내에서 경사도에 따른 임계풍속을 살펴보면 경사도가 증가함에 따라 임계풍속은 점차 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 경사도가 2%보다 이하일 경우 경사도가 임계풍속에 미치는 영향은 약 5.4%로 무시 가능함을 증명하였다.

2) 화재강도가 20MW일 경우 실험에서 얻은 임계풍속 값은 Kennedy 식에 의해 계산된 값과 유사하였다. 그러나 경사도가 1% 이상이 되는 경우 Wu 식의 보정계수 값과 일치하였다.

3) 풍속이 증가하여 어느 시점에 이르게 되면 화원 최상부의 온도는 급격하게 감소되는 현상이 나타나며 이 시점에서 임계풍속의 산정이 가능함을 밝혔다.

감사의 글 : 본 연구는 2005년 건설교통부 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(C03-01)의 “도로터널방재시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 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.
- 2) Tetzner, D., Pollak, R. and Sippel, M., “Critical Velocity Comparative assessment of test results and CFD simulation”, Int. Conf. on tunnel fire and Escape from Tunnels, pp. 181~190, Lyon, France, 1999.
- 3) Kunsch, J. P., “Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel”, Fire Safety Journal, 37, pp. 67~81, 2002.
- 4) Oka, Y. and Atkinson, G.T., “Control of smoke flow int tunnel fires”, Fire Safety Journal, 25, pp. 305~322, 1995.
- 5) Atkinson, G.T., Wu, Y., “Smoke Control in Sloping Tunnels”, Fire Safety Journal, Vol. 27, pp. 335~341, 1996.
- 6) Wu, Y. and Baker, M.Z.A, “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.