

터널 화재시 배연속도가 연소율 변화에 미치는 실험적 연구

— Heptane 풀화재 경우

An Experimental Study on the Ventilation velocity of the Variation of Burning rate in Tunnel Fires - Heptane pool fire case

유홍선*¹, 양승신²

Yang, Seung-Shin · Ryou, Hong-Sun

Abstract

In this study, the 1/20 reduced-scale experiments using Froude scaling were conducted to investigate the ventilation velocity of the variation of burning rate in tunnel fires. The heptane square pool fire with heat release rate ranging from 3.71~15.6 kW were used. The burning rate of fuel was obtained by measuring mass using load cell and temperature distributions were measured by K-type thermocouples in order to investigate smoke movement. The ventilation velocity in the tested tunnel was controlled by inverter of the wind tunnel. In heptane pool fire case, the increase in ventilation velocity increased the burning rate due to the direct supply of oxygen to the fire plume. For the same dimensionless velocity(\bar{v}), burning rate increased as the size of pool fire decreased.

Keywords: Tunnel fire, Froude scaling, Ventilation velocity, Burning rate, Heptane pool fire

요 지

본 연구는 터널내 화재시 배연속도가 연소율 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Froude scaling에 의해 1/20 크기로 축소된 모형화재 실험을 수행하였다. 화원으로는 4.5 cm~8.5 cm의 헵탄을 사용하였으며 발열량은 3.71~15.6 kW이다. 연소율은 로드셀을 이용하여 산출하였고, 연기거동을 파악하기 위하여 K형 열전대를 이용하여 온도분포를 측정하였다. 풍동은 터널 상류 한쪽부분과 연결하였고, 터널 공간의 배연속도를 제어하기 위하여 풍동의 인버터를 조정하였다. 헵탄 풀화재인 경우 배연속도가 증가할수록 충분한 산소의 공급으로 연소율은 증가하였으며, 같은 무차원 속도(\bar{v})일때 화원 크기가 작아짐에 따라 연소율은 증가하였다.

주요어: 터널화재, Froude 축소, 배연속도, 연소율, 헵탄 풀화재

*1 정희원, 중앙대학교 기계공학부 교수 (cfdmec@cau.ac.kr)

2 중앙대학교 대학원 석사과정

1. 서론

최근 들어 교통 및 산업사회의 발달과 함께 도로나 철도 건설의 수요가 증가하고 있으며 이러한 공간의 활용성과 편의성을 높이는 동시에 안정성의 확보에 대한 관심이 증대되고 있다. 우리나라는 국토의 약 2/3가 산악지형으로 철도 및 도로건설에 있어 산맥 등의 지형적 장벽을 극복하는 수단으로 터널의 건설이 불가피한 실정이다. 터널은 철도 및 도로의 선형확보와 대규모 도시에서의 복잡한 교통망을 원활히 하는데 있어 무엇보다 터널의 역할이 중요하다고 할 수 있다.

현재 국내에서 건설된 터널은 길이가 대부분 1 km미만이지만, 육상 교통이 점차 고속화 되면서 주행의 안정성을 위해 터널은 점차 장대화되고, 향후 수적인 증가가 지속될 전망이다. 2004년 4월에 개통된 고속철도의 경우를 보더라도 터널수는 83개소이고, 터널 전체 길이가 무려 189 km에 이른다 (이성룡, 2004). 그러나 종횡비가 작고 외기의 공급이 한정된 특수한 환경하에 있는 터널에서 화재 및 기타의 사고가 발생할 경우 대량의 유독가스 및 열기가 급속도로 퍼질 우려가 있다. 이러한 이유로 터널화재 발생시 내부의 상황 파악이 어렵고 적절한 화재진압이 이루어지지 않을 경우 2차적인 화재 및 폭발등으로 인하여 터널 시설과 인명 피해를 야기시킬 수 있다.

대표적인 터널화재 사례로는 1999년 3월 24일 프랑스와 이탈리아를 연결하는 몽블랑 터널에서 트럭의 폭발로 인하여 사망 39명, 부상 30명에 달하는 사상자가 발생하였다 (한국터널공학회보고서, 2004). 오스트리아의 키츠슈타인호른에서는 케이블 열차에서 터널을 통과 할 무렵 화재가 발생하여 155명이 사망하였고, 스위에서는 생고타르 터널에서 트럭의 충돌로 인하여 화재가 발생 11명이 사망하는 사고가 발생하였다 (차철현 외, 1999). 이처럼 터널 화재는 발생빈도에 비하여 대형참사를 초래하는 경우가 많기 때문에 적절한 화재감지설비, 배연설비 및 피난대책의 수립이 필수적이라고 볼 수 있다. 특히 터널과 같은 제한된 공간에서는 연기의 제어는 무엇보다 중요한 인자이기 때문에 배연 시스템 설계가 화재의 크기를 좌우한다 해도 과언이 아니다. 따라서 터널에서 화재 발생 시 소방진압 보다 배연 시스템이 중요하다고 할 수 있겠다.

터널 화재에 대한 연구로는 대표적으로 Oka와 Atkinson의 축소모형 터널에서 화원의 모양, 크기, 위치를 변화시켜가며 임계속도에 관하여 연구하였고 (Y. Oka 외, 1995), Atkinson과 Wu는 터널의 경사도에 따른 임계속도의 변화에 대하여 연구하였다 (Y. Wu 외, 1996). Wu와 Baker는 서로 다른 형상을 가진 모형 터널에서 실험과 수치해석의 결과를 비교 분석하였다 (Y. Wu 외, 2000). 김성찬 등은 축소모형 터널을 이용하여 연기거동을 해석하고 이를 수치해석 결과와 비교 하였으며 (김성찬 외, 2002), 이성룡 등은 터널의 경사에 따른 화재시 임계속도에 대하여 연구하였다 (이성룡 외, 2002). 이처럼 터널 화재에 대한 연구는 화원의 크기 및 터널 형상에 따른 임계속도와 연기거동 파악등 다양한 측면으로 진행되어 왔다. 최근에는 Carvel등이 터널내 서로 다른 화원에 대하여 배연속도에 따른 발열량 및 화재성장 (fire development) 등에 대하여 연구하였으며 (R. O. Carvel 외, 2001), 국내에서 양승신 등은 발열량이 작은 메탄올을 이용하여 종류식 환기가 연소율에 미치는 영향에 관하여 연구하였다 (양승신 외, 2005). 하지만 기존의 연구에서는 발열량을 고정하여 임계속도를 정의하였으며 실제 터널 화재시 배연속도가 화재 성장에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 특히 터널 화재시 배연속도가 연소율 변화에 미치는 영향을 정량적으로 파악하는데 연구가 미흡한 실정이며, 국내에서는 인식의 부족으로 이에 대한 연구는 아직도 초기 연구 단계이다.

따라서 본 연구에서는 축소모형 실험을 수행하여 터널 화재시 배연속도의 증가에 따른 발열량이 큰 헬탄의 연소율 변화 및 임계속도를 실험 접근을 통하여 터널의 방재계획 수립과 배연 시스템의 설계시 정성적인 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1 모형터널

모형 터널 공간은 실물대상 폭 8 m, 높이 8 m, 길이 200 m의 크기를 가진 터널을 1/20로 축소하여 폭 0.4 m, 높이 0.4 m, 길이 10 m, 두께 0.01 m의 투명 아크

털을 사용하였다. 화원부 구간은 열에 의한 변형을 막기 위하여 강철로 제작된 모형 터널을 이용하였다. 터널내의 균일한 유속을 얻기 위하여 터널 입구에서 1 m 떨어진 지점에 금속 메쉬를 설치하였다. 금속메쉬 각 셀(cell)의 면적은 1 mm² 로 균일하게 짜여져 있으며, 부식을 방지하기 위하여 스테인리스(stainless) 재질을 사용하였다. 터널의 출구는 외부와 개방하였으며 배연속도는 터널 입구에 풍동을 연결하였고, 인버터를 조정하여 터널내 배연속도를 조절하였다. Fig. 1은 모형 터널 화재실험 대상의 공간형상 및 사진을 나타내고 있다.

2.2 실험장치

터널 천정에서 온도분포를 측정하기 위하여 0.32 mm 두께의 K형 열전대 (크로멜-알루멘, 측정범위 : -200 ~ 1260 °C)를 이용하였다. 또한 터널 상류에서의 역기류 길이를 측정하기 위하여 천정에서 2 cm 떨어진 위치에 길이 방향으로 21개 (TC1~TC21) 설치하였으며, 연

층을 파악하기 위하여 화원을 중심으로 1 m 떨어진 상류에서 4개 (TC22~25), 화원에서 2 m 떨어진 하류에서 6개 (TC26~31)를 5 cm 간격으로 설치하였다. 열전대에서 발생된 신호는 Agilent 34970A Data Acquisition Unit과 Agilent 34910A 채널을 통해 수집되었다. 데이터 수집장치의 각 채널에서 수집된 데이터는 RS232를 통해 PC로 전송 되었으며 LabView 프로그램을 이용하여 수집된 데이터를 처리하였다. Fig. 2는 모형 터널에서 열전대 측정위치의 주요치수를 나타내고 있다.

2.3 화 원

일반적으로 풀 화재는 버너 화재나 고체화재 등과 같은 다른 화재 장치들에 비해 실험장치가 간단하고 연소 면적이 일정하며 발열량 산정이 용이한 장점이 있기 때문에 고정된 발열량을 묘사하는데 있어 널리 사용된다 (X. C. Zhou 외, 1995). 본 실험에서 적용된 화원은 각 변의 길이가 각각 4.5, 5.5, 6.5, 8.5 cm이고 높이가 2 cm인

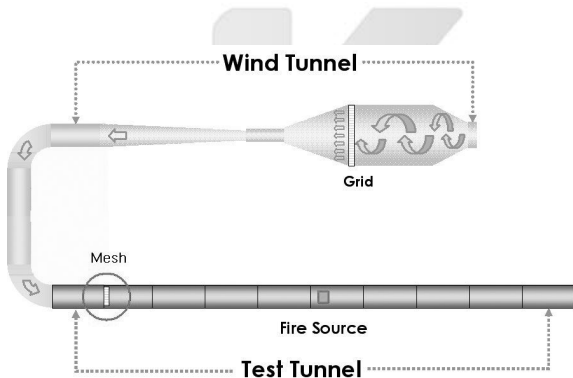


Fig. 4. Experimental setup of the tested tunnel

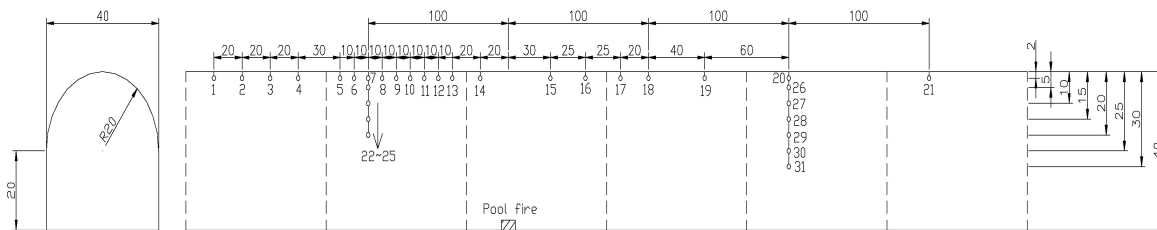


Fig. 2. Schematic view of the thermocouples arrangement in the model tunnel

정사각형 풀을 이용하였으며 연료로는 n-Heptane (C7 H16)을 사용하였다. 화원은 터널 입구에서 5.3 m 떨어진 위치에 화재가 발생한 것으로 가정하였다. 터널내 풀 화재는 배연속도의 증가에 따라 영향을 받기 때문에 로드셀을 이용하여 시간에 따른 연료의 잔량을 측정하여 연소율을 산출하였다. 헵탄의 연소과정은 화원의 크기에 따라 다소 차이를 보였으나 약 160~250 초에서 준정상상태 (quasi-steady state)에 도달하였으며, 400~500 초 전후로 완전히 전소되었다. 따라서 헵탄의 연소 상태를 고려하여 시간에 따른 연료의 증발량을 측정하고 연소율을 산출하였다. 모형 터널 실험에서 적용된 화원의 연소율 및 발열량은 다음식에 의해 계산되어진다 (김성찬, 2003, J. G. Quintiere, 1998).

$$\dot{m}_f'' = \frac{\Delta W_f}{\Delta t \cdot A_f} \quad (1)$$

$$Q_M = \dot{m}_f'' \cdot \Delta H_C \cdot A_f \quad (2)$$

여기서, ΔW_f 는 Δt 동안 증발한 연료량, Q_M 은 축소실험에서 사용된 발열량, \dot{m}_f'' 는 연료의 증발량, ΔH_C 는 연료의 연소열을 나타내며 헵탄의 연소열은 44,600 [kJ/kg]이고, A_f 는 화원의 면적을 나타내고 있다.

2.4 축소법칙

모형터널 실험의 결과를 실제 크기의 화재와 상사시키기 위해 Froude scaling을 적용하여 실제 공간에서의 화재 발열량을 산정하였다. 축소 터널과 실물 터널의 발열량 Q_M 과 Q_F , V_M 과 V_F 사이의 관계는 다음과 같다 (J. G. Quintiere, 1989).

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{5/2} \quad (3)$$

$$\frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{1/2} \quad (4)$$

화원 크기의 증가에 따른 축소 모형 터널에서의 발열량과 실제 터널에서의 발열량 및 배연속도를 비교하여 Table 1에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

터널내 화재 발생시 화원 근처에서의 급격한 온도 상승으로 주위 공기와의 밀도차에 의해 부력이 발생되고, 주

Table 1. Comparison of heat release rate and ventilation velocity between the model and full scale

Fire size [m]	Q_M [kW]	V_M [m/s]	Q_F [MW]	V_F [m/s]
0.045	2.23	0.0	3.9	0.0
	4.43	0.44	7.92	1.97
	4.97	0.87	8.9	3.89
	5.94	1.33	10.6	5.95
0.055	3.71	0.0	6.6	0.0
	5.93	0.46	10.6	2.06
	6.31	0.92	11.3	4.1
	7.42	1.38	13.3	6.17
0.065	5.8	0.0	10.4	0.0
	7.35	0.48	13.1	2.15
	8.3	0.96	14.8	4.3
	9.57	1.44	17.1	6.44
0.085	10.95	0.0	19.6	0.0
	11.7	0.56	20.9	2.5
	12.9	1.12	23.1	5.01
	15.6	1.68	27.9	7.51

위 공기의 유입이 이루어져 연기가 수직 상승하게 된다. 천정에 도달한 연기는 천정제트 (ceiling jet)를 형성하게 되고 터널 길이 방향으로 전파된다. 이때 터널 상류로의 역기류를 막기 위해 배연시스템이 환기모드에서 배기모드로 변경된다. 하지만 현재 터널에 설치된 배연 시스템은 대부분이 배연속도의 증가에 따른 연소율을 고려되지 않은 상태로 설계 되어졌다. 이러한 연소율을 고려하지 않고 기존의 방식대로 배연시스템을 설계할 경우 화재 공간에 원활한 산소의 공급으로 화재의 성장을 촉진시킬

수 있는 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모형 터널에서 화원 크기의 증가에 따른 연소율을 고려한 임계속도를 결정하였으며, 배연속도가 임계속도에 0, 0.5, 1.0, 1.5배로 증감에 따른 연소율의 변화를 파악하였다.

Fig. 3은 터널내에서 배연속도의 증가에 따른 천정 온도분포를 나타내고 있다. x축은 화원으로부터 떨어진 열전대의 위치를 나타내고 있으며, 화원을 중심으로 (-)방향은 터널의 상류이고, (+)방향은 하류를 의미한다. Fig. 3 (a),(b),(c),(d)에서의 천정 온도분포는 준정상

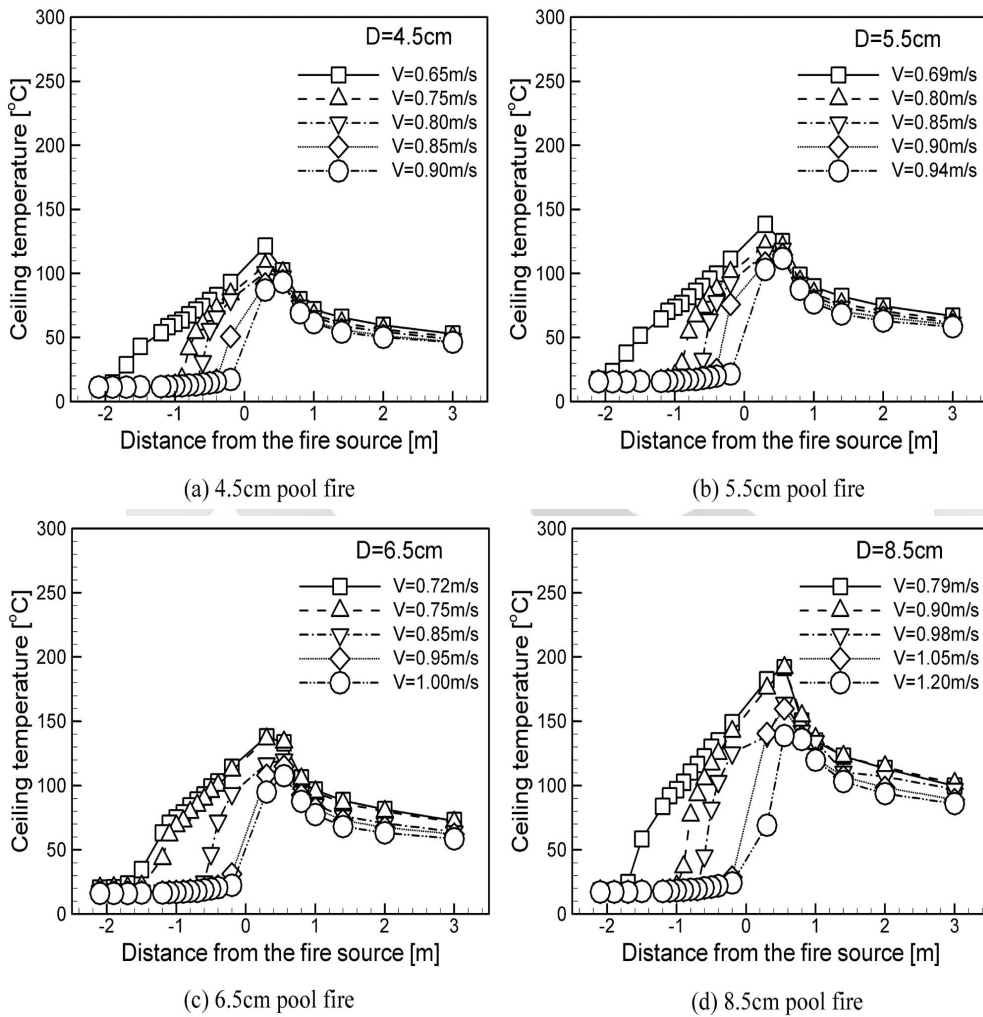


Fig. 3. Ceiling temperature distributions for different ventilation velocity

상태 (quasi-steady state)일 때의 평균온도 분포이며, 화원 중심으로 터널 천정 온도분포를 보면 연기가 터널 길이 방향으로 전파되면서 주위 공기와의 혼합 및 에너지 손실 등으로 온도가 감소함을 볼 수 있다. 또한 하류쪽의 온도분포를 보면 배연속도가 증가할수록 냉각 효과로 인하여 터널내 온도분포는 감소하였다.

Fig. 4는 각 화원의 배연속도 증가에 따른 역기류의 길이 (back-layering distance)를 나타내고 있다. 역기류를 파악하기 위해 Fig. 3에서 나타낸 천정 온도분포를 통하여 배연속도를 증가시키기에 따라 터널 상류에 설치된 열전대의 온도가 갑자기 상승하는 부분을 연기선단으로 보고 그때의 역기류 길이를 추정하였다. 따라서 본 실험에서는 배연속도가 증가 할수록 역기류 길이가 감소함을 알 수 있었으며 이를 선형보간하여 각 발열량에 대한 임계속도를 구하였다.

Fig. 5는 배연속도가 임계속도의 0, 0.5, 1.0, 1.5배로 증가할 때 각 화원의 연소율 및 발열량을 나타내고 있으며, 여기서 \bar{V} 는 무차원화된 배연속도로서 다음과 같이 정의하였다.

$$\bar{V} = \frac{V_{\text{Ventilation velocity}}}{V_{\text{Critical velocity}}} \quad (5)$$

Fig. 5에서 보는 바와 같이 배연속도가 없는 경우 화원의 크기가 증가 할수록 헵탄의 연소율은 증가함을 보이

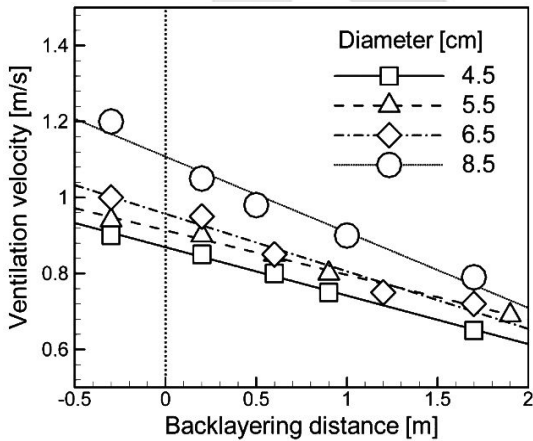


Fig. 4. Comparison of backlayering distance between ventilation velocity and pool size

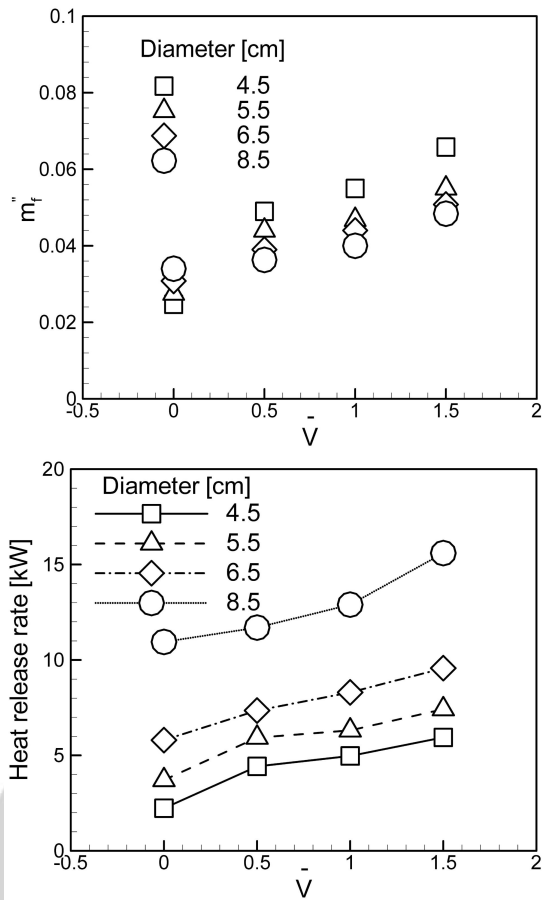


Fig. 5. Burning rate and heat release rate with dimensionless velocity

고 있다. 이러한 원인은 연소열 (heat of combustion) 값이 큰 탄화수소 (hydro-carbon)계열의 연료가 연소 시 높은 열을 방출함으로써 이때 화염으로 돌아오는 재복사율이 크게되며, 화원의 크기가 증가 할수록 재복사 및 복사강도가 증가하기 때문에 연소율이 증가함을 알 수 있다 (D. Drysdale, 1985). 그러나 배연속도를 임계속도의 0.5~1.5배로 증가 시켰을 경우 배연속도가 없는 경우보다 연소율이 약 1.5~3배로 증가함을 보이고 있다. 일반적으로 풀화재는 배연속도가 없는 경우 화염 및 연소가스의 대류, 전도, 복사 열전달등에 의해 연료의 증발이 좌우되지만, 터널내 배연속도의 증가시 화원의 냉각 및 열전달효과 보다는 화원으로 공급되는 산소의 공

급이 지배적이기 때문에 연소율 및 발열량은 증가한다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 화원이 작을수록 연소율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 터널 공간에 비해 화원이 작을 경우 충분한 산소 공급으로 인하여 배연속도의 증가에 따라 연소율은 증가하게 되지만, 화원의 크기가 커질수록 연소반응을 일으키기 위하여 많은 산소의 양이 필요하게 되고, 터널 공간에 비해 화원의 크기가 증가하면 배연속도가 증가 하더라도 작은 화원 보다 산소의 공급이 원활히 이루어지지 못하기 때문에 연소율은 감소하게 된다.

Fig. 6은 무차원 발열량 Q'' 에 따른 무차원 임계속도 V'' 의 변화를 나타내고 있다. 본 실험에서 사용한 무차원 발열량의 범위는 $Q'' \leq 0.2$ 이며, 무차원 해석 방법은 Wu와 Baker가 제안한 터널의 수력직경을 특성길이로 사용하여 무차원 발열량 Q'' 에 대한 무차원 임계속도 V'' 를 다음과 같이 나타내었다 (Wu 외, 2000).

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_o C_p T_o g^{1/2} H^{5/2}} \quad (6)$$

$$V'' = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (7)$$

Fig. 6에서 보는 바와 같이 Wu등의 실험과 본 실험에서의 결과는 무차원 임계속도 V'' 는 Q'' 의 1/3승에 비례하

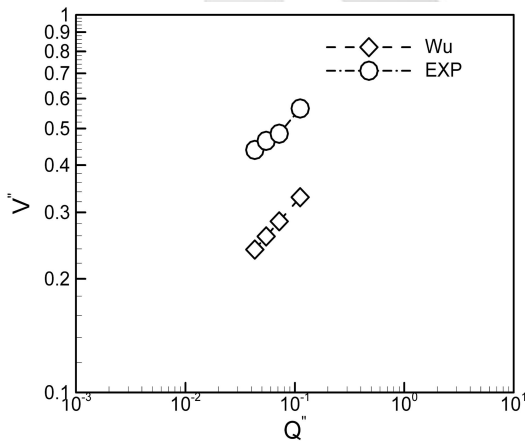


Fig. 6. Dimensionless critical velocity with dimensionless heat release rate

여 크기가 커지는 것을 알 수 있다 (Wu 외, 2000). 그러나 V'' 값이 Wu등의 실험과 비교하여 볼때 본 실험의 값이 약 2배정도 큰 값을 보여주고 있다. 이러한 차이의 원인은 몇가지로 나누어 설명할 수 있다. 첫째 Wu등은 화원 부근의 터널을 냉각시킨 반면 본 실험에서는 화원 부근의 터널을 냉각시키지 않았다. 따라서 냉각시키지 않은 터널은 냉각시키는 터널보다 주위 온도가 높고, 화원으로 돌아오는 재복사율이 크기 때문에 상대적으로 임계속도 값이 크게 나타날 것으로 사료된다. 둘째 터널의 기하학적 형상, 사용된 연료 및 배연조건과 같은 각종 실험조건의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 셋째 Wu등의 실험에서는 발열량을 일정하게 하기 위하여 프로판 버너를 사용하였으며 본 실험에서는 헵탄 풀화원을 사용하였다. 터널 화재 이론에 따르면 프로판가스 버너에서는 배연속도가 증가함에 따라 화염영역 (persistent regime)에서의 온도는 일정하고, 간헐연소 (intermittent regime) 및 부력플럼영역 (buoyant plume regime)에서는 온도가 변화한다 (McCaffrey, 1979). 따라서 프로판 버너의 경우 예혼합연소 (premixed combustion)로서 배연속도의 증가에 따라 연소율 변화에 큰 영향을 미치지 않지만, 풀화재의 경우 확산연소 (diffusion combustion)로서 배연속도의 증가에 따라 간헐연소영역 및 부력플럼영역에서 뿐만 아니라 화염영역에서도 온도의 증가로 인하여 연소율 및 발열량이 증가 할 것으로 사료된다. 따라서 헵탄의 풀화재인 경우 배연속도가 증가함에 따라 원활한 산소 공급으로 인하여 연소율 및 발열량이 증가하기 때문에 임계속도의 값은 Wu등 보다 큰 값을 가지게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 축소모형 실험을 통하여 배연속도의 증가에 따른 헵탄의 연소율 변화 및 온도분포를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널 내 배연속도가 없는 경우 상대적으로 발열량이 큰 탄화수소 계열의 헵탄은 화원의 크기가 증가할 수록 연소율이 증가하였으며, 배연속도가 0.5~1.5배

- 로 증가 할수록 화원으로의 산소 공급으로 인하여 연소율은 약 1.5~3배로 증가하였다.
2. Wu등이 제시한 것처럼 무차원 임계속도 V^* 는 Q 의 1/3승에 비례함을 알 수 있다.
 3. 터널내 화재 발생시 배연속도의 증가에 따른 연소율의 변화를 파악함으로써 터널 설계시 화재 안전도를 위하여 배연 시스템의 설계 및 방재 계획을 수립하는데 있어 연소율의 변화를 고려한 체계적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Nomenclature

- Q : Heat release rate [kW]
 m_f'' : Mass burning flux [kg/m^2s]
 ΔH_c : Heat of combustion [kJ/kg]
 A_f : Fuel area [m^2]
 V : Velocity [m/s]
 Δt : Time duration for fuel weight measurement [s]
 ΔW_f : Fuel weight difference during the Δt [kg]

Subscript

- F : Full scale
 M : Model scale

감사의 글

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업 (M10113000012-01A2-90000600)지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이성룡(2004), "중류식 배연 터널 화재시 임계속도에 대한 중형비의 영향에 관한 연구", 박사학위논문, 중앙대학교, pp. 1~7.
2. 한국터널공학회 (2004), "도로터널 방재시설(비상시설) 설치기준 개정(안) 작성 및 유지관리 매뉴얼 작성을 위한 연구", 최종보고서, 부록 1 주요터널 사고사례정리, pp. 1~18.
3. 차철현, 김진국 (1999), "지하철 터널에서의 제연", 공기조화 냉동공학, 제 28권, 제6호.
4. Y. Oka and G. T. Atkinson (1995), "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", *Fire Safety Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 305~322.
5. G. T. Atkinson and Y. Wu (1996), "Smoke Control in Sloping Tunnels", *Fire Safety Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 335~341.
6. Y. Wu and M. Z. A. Baker (2000), "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems - A Study of the Critical Velocity", *Fire Safety Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 363~390.
7. 김성찬, 유홍선, 김충익, 홍기배 (2002), "짧은 터널 내의 연기거동에 관한 연구", 터널과 지하공간, 제 12권, 제 1호, pp. 31~36.
8. 이성룡, 김충익, 유홍선, 박현태 (2002), "터널화재시 연기제어에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1894~1900.
9. R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt (2001), "The Influence of Longitudinal Ventilation Systems on Fire in Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 3~21.
10. 양승신, 김성찬, 유홍선 (2005), "터널화재시 중류식 환기가 연소율 변화에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 터널과 지하공간, 제 15권, 제1호, pp. 55~60.
11. X. C. Zhou and J. P. Gore (1995), "Air Entrainment Flow Field Induced by a Pool Fire", *Combustion and Flame*, Vol. 100, No. 1, pp. 52~60.
12. 김성찬 (2003), "화염과 워터미스트의 상호작용에 관한 실험 및 수치해석 연구", 박사학위논문, 중앙대학교, pp. 24~27.
13. J. G. Quintiere (1998), "Principles of fire behavior," New york, Delmar Pub.
14. J. G. Quintiere (1989), "Scaling Applications in Fire Research", *Fire Safety Journal*, Vol. 15, pp. 3~29.
15. D. Drysdale (1985), "An Introduction to Fire Dynamics", ACADEMIC PRESS, pp. 152~185.
16. B. J. McCaffrey (1979), "Purely Buoyant Diffusion Flame : Some Experimental Results", National Bureau of Standards, NBSIR 79~1910.



유홍선
중앙대학교 기계공학부 교수
cfdmec@cau.ac.kr



양승신
중앙대학교 대학원 석사과정
yangshim2128@naver.com

K C I