

터널 화재시 종류식 환기가 연소율 변화에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

양승신¹⁾, 김성찬²⁾, 유홍선^{3)*}

An Experimental Study on the Effect of Longitudinal Ventilation on the Variation of Burning Rate in Tunnel Fires

Seung Shin Yang, Sung Chan Kim and Hong Sun Ryou

Abstract In this study, the 1/20 reduced-scale experiments using Froude scaling were conducted to investigate the effect of longitudinal ventilation on the variation of burning rate in tunnel fires. The methanol square pool fires with heat release rate ranging from 3.57 kW to 10.95 kW were used. The burning rate of fuel was obtained by measured mass using load cell and temperature distribution were measured by K-type theomocouples in order to investigate smoke movement. The wind tunnel was connected with one side of the tested tunnel, and longitudinal ventilation velocity in the tested tunnel was controlled by power of the wind tunnel. In methanol fire case, the increase in ventilation velocity decreased the burning rate due to the direct cooling of fire plume. For the same dimensionless velocity (\bar{v}), burning rate decreased as the size of pool fire increased.

KeyWords tunnel fire, longitudinal ventilation, froude scaling, pool fire, burning rate

초 록 본 연구는 터널내 화재 발생시 종류식 환기가 연소율 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Froude scaling에 의해 1/20크기로 축소한 모형화재 실험을 수행하였다. 화원으로는 8.5 cm~14.5 cm의 메탄올을 사용하였으며 발열량은 3.57~10.95kW이다. 연소율은 로드셀을 이용하여 산출하였고, 연기거동을 파악하기 위하여 K형 열전대를 이용하여 온도분포를 측정하였다. 풍동은 터널의 한쪽부분과 연결하였고, 터널 공간의 배연속도를 제어하기 위하여 풍동의 전압을 조절하였다. 메탄올 화재인 경우 배연속도가 증가할수록 냉각효과로 인하여 연소율은 감소하였으며, 또한 같은 무차원속도(\bar{v})일때 화원 크기가 커짐에 따라 연소율은 감소하였다.

핵심어 터널화재, 종류식환기, Froude 축소, 풀화재, 연소율

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전과 생활 수준의 향상으로 도로나 철도 건설의 수요가 크게 증가하고 있다. 그러나 우리나라는 국토의 약 70%가 산악 지형으로 철도 및 도로망의 정비에 있어서 산맥 등의 지형적 장벽을 극복하는 수단으로 터널의 건설이 불가피한 실정이다. 터널은 도로의 선형확보에 있어 주행 편익과 산악지형의 험준한 경사에서의 낙석 및 추락사고를 방지하고 주행의 안전성과 확실성을 향상시키며 자연경관의 보호에서도 유용하다. 또한 복잡한 도시에서의 원활한 교통망 확

보를 위해 무엇보다도 터널의 역할이 중요하다고 볼 수 있다.

현재 국내에서는 492개소의 철도 터널이 건설되고 있으며, 도로 터널은 269개소가 건설되어 사용되고 있다. 국내에서 건설된 대부분의 터널은 길이가 1 km미만이지만, 도로 터널 중 38개소가 1 km이상인 장대 터널이며 2004년 4월에 개통된 고속철도의 경우 터널 수는 83개소로 전체 터널 길이가 189 km에 이른다¹⁾. 이러한 추세로 볼때 최근 건설되는 터널들은 점차 장대화되고 향후 수적인 증가가 지속될 전망이다. 그러나 터널과 같은 공간에서 화재가 발생할 경우 외기의 공급과 공간이 한정된 특수한 환경하에 있기 때문에 대량의 유독가스와 열기가 발생되며, 터널 공간의 중형비가 작기 때문에 연기의 전파는 급속도로 퍼질 우려가 있다.

이러한 이유로 화재 발생시 유독가스와 연기로 인한 내부 상황 파악 및 화재 발생 위치를 파악하기 어렵고,

¹⁾ 중앙대학교 기계공학부 석사과정

²⁾ 중앙대학교 미래신기술연구소 박사 후 연구원

³⁾ 정회원, 중앙대학교 기계공학부 교수

*교신저자(Corresponding author) : cfdmcc@cau.ac.kr

접수일: 2005년 1월 18일

심사 완료일: 2005년 2월 21일

적절한 화재 진압이 이루어지지 않을 경우 2차적인 화재 발생으로 터널시설 및 인명 피해를 야기시킬 수 있다.

대표적인 터널화재 사례로는 일본에서 북륙터널화재(1972), 미국의 샌프란시스코의 해저터널화재(1979) 등이 발생하였으며 최근 5년 사이에 발생한 터널 화재로는 프랑스와 이탈리아를 연결하는 몽블랑 터널에서 트럭의 폭발로 인하여 사망 39명, 부상 30명이 발생하였고(1999), 오스트리아의 키츠슈타인호른에서 케이블 열차에서 터널을 통과할 무렵 화재가 발생하여 155명이 사망하는 큰 화재가 발생하였다(2000)²⁾. 스위스에서는 생 고타르 터널에서 트럭의 충돌로 인하여 화재가 발생 11명이 사망하였다(2001)²⁾. 이처럼 터널화재는 발생 빈도에 비하여 대형 참사를 초래하는 경우가 많기 때문에 적절한 화재감지설비, 소화설비 및 배연설비, 피난 대책의 수립이 필수적이지만 국내에서는 인식의 부족으로 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 특히 공간의 특성상 터널내에서의 화재시 소방진압 보다는 연기 제어가 더욱 중요한 인자이기 때문에 무엇보다 배연 시스템이 중요하다고 볼 수 있다.

터널에서의 대표적인 화재에 대한 연구로는 Oka와 Atkinson의 축소모형 터널에서 화원의 모양, 크기, 위치를 변화시켜가며 임계속도에 대하여 연구하였고³⁾, Me'gret와 Vauquelin은 터널 화재의 물리적 특성을 결정하기 위한 반경험적 모델을 제안하였으며⁴⁾, Atkinson과 Wu는 터널의 경사도를 변화 시켜가며 임계속도에 대하여 연구하였다⁵⁾. Wu와 Baker는 서로 다른 단면을 가진 모형터널에 대하여 실험과 수치해석의 결과를 비교하였다⁶⁾. 국내에서는 김성찬 등이 축소모형 터널에서 연기거동을 해석하고 이를 수치해석 결과와 비교하였으며⁷⁾, 이성룡 등은 축소모형 터널에서 종류식 환기의 유무에 따른 터널 내에서의 연기제어에 대한 연구를 수행하였고, 터널의 경사에 따른 화재시 임계속도에 대하여 연구하였다^{8,9)}. 이처럼 터널화재에 대한 연구는 화원의 크기 및 터널 형상에 따른 임계속도 및 연기거동 파악 등 다양한 방면으로 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 임계속도 및 연기거동 뿐만 아니라 터널 내에서의 배연속도에 따른 발열량을 고려한 연구가 진행되고 있다. 하지만 배연 시스템에 따른 터널 화재시 종류식 환기방식이 연소율 변화에 미치는 영향을 정량적으로 파악하는데 연구가 부족한 실정이며 특히 국내에서는 인식의 부족으로 이에 대한 연구는 아직 초기 단계이다.

따라서 본 연구에서는 터널에서 화재 발생시 종류식 환기 방식의 배연속도에 따른 메탄올 연료의 연소율의 변화 및 온도분포를 실험 접근을 통하여 파악하고자 한

다. 특히 터널 공간의 천정과 수직 온도분포를 측정하기 위하여 K형 열전대를 설치하였으며 연소율 변화는 로드셀을 이용하여 측정하였다. 이러한 축소 모형을 통하여 터널에서의 연소율 변화 및 온도분포를 해석하여 터널 화재시 배연 속도에 따른 화재 거동 특성을 파악하고 터널의 방재 계획 수립과 배연시스템의 설계시 기초 자료로 활용 하고자 한다.

2. 실 험

2.1 모형터널 화재실험

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 아크릴을 이용하였으며 화원부 구간은 열에 의한 변형을 방지하기 위하여 강철로 제작된 모형터널 모듈을 이용하였다. 터널의 출구는 외부와 개방되게 하였으며 배연속도는 터널입구에 풍동을 연결하였고, 인버터를 조정하여 풍량을 조절하였다. 또한 터널내의 균일한 유속을 얻기 위해 터널 입구에서 1 m 떨어진 지점에 매쉬를 설치하였다. Fig. 1은 모형 터널 화재 실험 대상 공간 형상 및 사진을 나타내고 있다. 터널내 온도분포 및 터널 상류에서의 역기류 길이를 측정하기 위하여 0.32 mm 두께의 K-type 열전대(크로멜-알무멜, 측정범위 : -200 ~ 1260 ℃)를 이용하였으며 열전대는 천정에서 2 cm 떨어진 위치에 수평 방향으로 21개 (TC1~21), 수직온도 분포를 측정하기 위해 화원을 중심으로 상류에서 4개 (TC22~25), 하류에서 6개 (TC26~31)를 5 cm 간격으로 설치하였다. 또한 터널입구로부터 0.7 m 지점에서 유속을 측정하기 위해 유속계(hot wire anemometer)를 설치하여 배연속도를 측정하였다. Fig. 2는 모형 터널에서의 열전대의 측정위치의 주요 치수를 나타내고 있다. 모형 터널 화재 실험에서 적용된 화원은 각 변의 길이가 각각 8.5 cm, 10.5 cm, 12.5cm, 14.5 cm이고 높이가 2 cm인 정사각형 폴을 이용하였으며 연료로는 메탄올(CH_3OH)을 사용하였다. 화원은 터널 입구에서 5.3 m 떨어진 위치에 화재가 발생한 것으로 가정하여 화원의 위치를 고

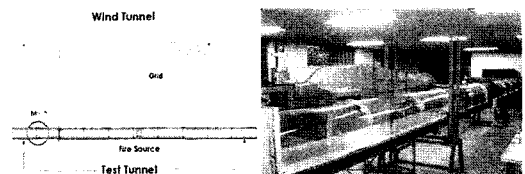


Fig. 1. Experimental setup of the tested tunnel

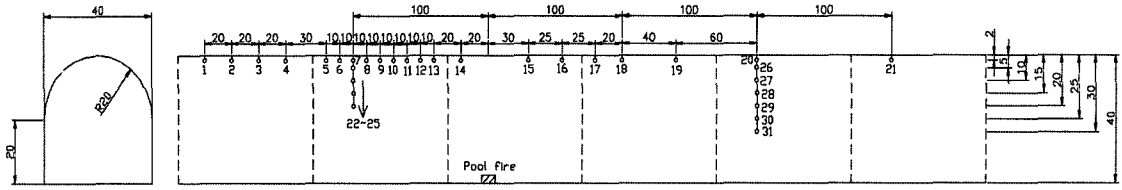


Fig. 2. Schematic view of the thermocouples arrangement in the model tunnel

정하였다. 연료의 연소율은 배연속도에 따라 영향을 받기 때문에 로드셀을 이용하여 시간에 따른 연료의 잔량을 측정하였으며 메탄올의 연소과정은 화원의 크기에 따라 다소 차이를 보였으나 120~150초 이후 준정상 상태(quasi-steady state)에 도달하였으며, 400~650초 전후로 연료는 완전히 연소되었다. 따라서 메탄올의 연소상태를 고려하여 시간에 따른 연료의 증발량을 측정하고 연소율을 산출하였다. 모형 터널 실험에 적용된 화원의 연소율 및 발열량은 다음 식에 의해 계산되어진다^{10,11)}.

$$\dot{m}_f = \frac{\Delta W_f}{\Delta t \cdot A_f} \quad (1)$$

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

여기서, ΔW_f 는 Δt 동안 증발한 연료량, Q_M 은 축소실험의 발열량, \dot{m}_f 는 연료의 증발량, ΔH_C 는 연료의 연소열을 나타내며 Methanol의 연소열은 20,000 [kJ/kg]이고, A_f 는 화원의 면적을 나타낸다. 모형터널 실험의 결과를 실제크기의 화재에 상사시키기 위해 Froude scaling을 적용하여 실제 공간에서의 화재 발열량을 산정하였다. 축소터널과 실물터널의 발열량 Q_M 과 Q_F , 속도 V_M 과 V_F 사이의 관계는 다음과 같다¹²⁾.

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

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

화원크기의 증가에 따른 축소 터널에서의 발열량과 실제 터널에서의 발열량 및 배연속도를 비교하여 Table 1에 나타내었다. 무차원 해석방법을 위해 터널의 수력 직경을 특성길이로 사용하여 Wu와 Baker가 제안한 무차원 발열량 Q'' 에 무차원 임계속도 V'' 를 사용하였으며, Q'' 와 V'' 는 다음과 같이 정의된다.

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

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

Fire size[m]	Q_M [KW]	Q_F [MW]	V_M [m/s]	V_F [m/s]
0.085	1.9941	3.57	0.0	0.0
	1.9941	3.57	0.37	1.654
	1.963	3.51	0.74	3.309
	2.05	3.66	1.11	4.964
0.105	2.95	5.28	0.0	0.0
	2.4	4.29	0.41	1.833
	2.5	4.47	0.81	3.622
	2.54	4.54	1.22	5.456
0.125	4.35	7.78	0.0	0.0
	3.55	6.35	0.47	2.102
	3.25	5.81	0.93	4.159
	3.2	5.72	1.40	6.26
0.145	6.12	10.95	0.0	0.0
	4.66	8.33	0.49	2.191
	4.53	8.10	0.97	4.338
	4.33	7.74	1.46	6.529

$$V'' = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (6)$$

여기서, Q 는 연료의 발열량, ρ_o 는 주위공기의 밀도, C_p 는 주위공기의 비열, T_o 는 주위공기의 온도, g 는 중력가속도, H 는 터널의 수력직경, V 는 임계속도를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 종류식 환기방식에서 화원 크기의 변화에 따른 터널에서의 역기류를 막기 위한 최소속도인 임계속도를 결정하였으며, 배연속도가 없는 경우와 임계속도의 0.5배, 1배, 1.5배일때 연소율의 변화를 파악하였다.

Fig. 3은 터널내에서의 배연속도에 따른 천정 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서 나타내고 있는 천정 온도분포는 준정상 상태일 때의 온도분포이며, 이때 각 화원의 크기에 따라 다소 차이는 보이고 있으나 그 도

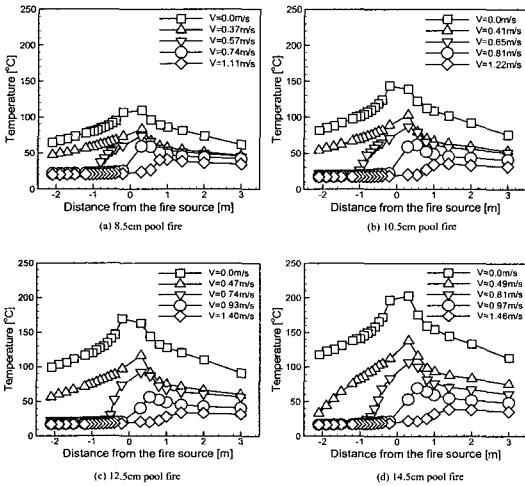


Fig. 3. Ceiling temperature distributions for different ventilation velocity

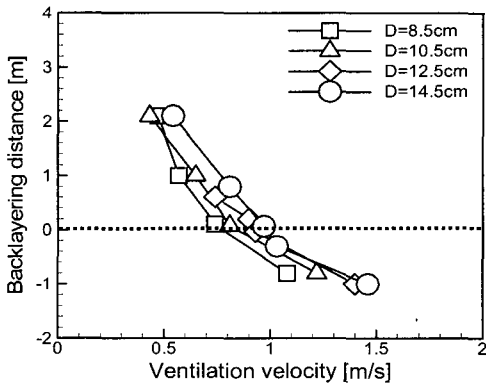


Fig. 4. Comparison of backlayering distance between ventilation velocity and pool size

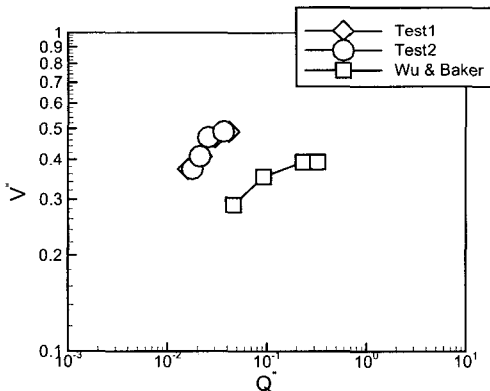


Fig. 5. Dimensionless critical velocity with dimensionless heat release rate

달 시간이 120~150초 정도가 된다. 또한 준정상 상태는 300~450초까지 지속 되었다.

Fig. 3에서 x축은 화원으로부터 떨어진 열전대의 위치를 나타내고 있으며 화원을 중심으로 (-)방향은 터널의 상류이고 (+)방향은 하류를 의미한다. Fig. 3(a),(b),(c),(d)에서의 터널 천정 온도분포를 보면 배연속도가 없을 경우 화원부근 온도가 가장 높게 나타났고, 연기가 터널길이 방향으로 전파됨에 따라 주위공기와 혼합 및 에너지 손실 등으로 인하여 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 배연속도 증가시 터널내 온도분포는 냉각효과로 인하여 감소함을 보였으며 화원의 크기가 증가함에 따라 배연속도 변화에 따른 온도차는 크게 나타났다.

Fig. 4는 각 화원에서의 배연속도에 따른 역기류의 길이를 나타내고 있다. 배연속도에 따른 역기류의 길이를 파악하기 위하여 화원을 중심으로 터널 상류에 열전대를 10 cm 간격으로 설치하였다. 임계속도는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 배연속도를 증가시키면서 열전대에 의해 측정된 연층의 온도를 통해 연기선단의 거리를 추정하였으며 역기류의 거리를 선형 보간하여 임계속도를 계산하였다. 따라서 본 실험에서는 화원 크기가 증가할 수록 터널내 온도는 상승하였으며, 배연속도를 증가 시킴으로써 역기류의 길이가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5는 무차원 발열량 Q 에 따른 무차원 임계속도 V 의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 무차원 발열량이 증가함에 따라 터널 상류로의 역기류가 증가하여 무차원 임계속도의 크기가 커지는 것을 알 수 있으며, Wu 등의 실험과 본 실험 모두 V 이 Q 의 비례하여 변화하는 것을 보여주고 있다. 그러나 V 값이 Wu등의 실험과 본 실험의 값이 약 1.8배정도 큰 값을 보여주고 있다. 이러한 차이의 원인은 Wu등의 실험에서는 화원 부근을 스테인리스 스틸로 제작된 터널을 사용하여 화원부근을 냉각시킨 반면 본 실험에서는 화원 부근이 스틸로 제작된 터널을 이용하였으며 터널을 냉각시키지 않았다. 따라서 Wu 등의 실험과 비교하여 볼 때 냉각 시키지 않은 터널이 상대적으로 냉각시키는 터널보다 주위 온도가 높고, 화원으로 돌아오는 재복사율이 커진다. 이로 인하여 부력은 증가하고, 터널의 역기류를 방지하기 위한 임계속도는 증가한다. 또한 터널의 기하학적 형상, 사용된 연료 및 배연조건과 같은 각종 실험조건에 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 배연속도가 임계속도의 0배, 0.5배, 1배, 1.5 배로 증가할 때 각 화원의 연소율 변화를 나타내고 있으며 \bar{V} 는 무차원화된 배연속도로서 다음과 같이 정의 하였다.

$$\bar{V} = \frac{V_{\text{Ventilation velocity}}}{V_{\text{Critical velocity}}} \quad (7)$$

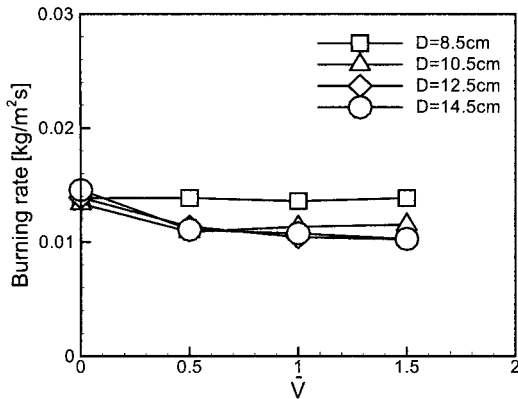


Fig. 6. Burning rate with dimensionless velocity

그림에서 보는 바와 같이 배연속도가 없는 경우 메탄올의 연소율은 화원 크기와 관계없이 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다¹³⁾. 그러나 배연속도가 임계속도의 0.5~1.5배로 증가 시켰을 경우 배연속도가 없는 경우보다 연소율은 감소함을 알 수 있으며 화원의 크기가 커질수록 연소율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 풀화재의 경우 화염 및 연소가스의 대류, 전도, 복사열전달에 의해 연료의 증발이 이루어지게 되는데 터널내로 배연속도를 증가시킬 경우 발열량이 작은 알코올 계열의 연료는 화원의 냉각 및 화염의 변형으로 인한 전도 및 복사열전달 감소에 의해 배연속도가 없는 경우보다 화원으로의 열전달이 상대적으로 적게 되며 이로 인해 연료의 연소율은 감소하게 된다. 이는 알코올 계열의 연료가 탄화수소(hydro-carbon)계 연료보다 연소열(heat of combustion)이 상대적으로 작기 때문에 화원에 의해 발생된 부력이 작고 상대적으로 배연의 영향이 지배적인 경우 연료의 증발률은 감소하게 된다. Fig. 6의 8.5 cm 화원을 보면 배연속도의 유·무에 따라 연소율의 감소는 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이는 터널 공간에 비해 화원 크기 및 발열량이 다른 화원에 비교하여 볼 때 상대적으로 작고, 화원으로 돌아오는 재복사강도가 작으므로 배연속도의 변화에 따른 연소율 및 연소시간에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 사료된다.

Table 2는 각 화원의 배연속도에 따른 연소시간을 나타내었다. 배연속도의 증가에 따른 연소율 감소로 인하여 연소시간도 길어지게 됨을 알 수 있다. 따라서 배연속도가 없을 경우 배연속도가 최대 일 때보다 화원 크기가 8.5 cm에서 14.5 cm로 커질수록 연소시간은 약 1.2~1.4배 정도 증가하였다. 메탄올 풀화재의 경우 배연속도가 증가 할 수록 연소율은 감소하였으며 화원의 크기가 커질수록 연소시간이 증가하였다. Wu 등은 일정한 발열량을 얻기 위하여 프로판가스 버너를 사용하

Table 2. Combustion time for different ventilation velocity

Pool size [m]	Fuel weight [kg]	Vent velocity [m/s]	Combustion time [s]	Pool size [m]	Fuel weight [kg]	Vent velocity [m/s]	Combustion time [s]
0.085	0.05	0.0	550.59	0.125	0.09	0.0	474.21
		0.37	646.70			0.47	543.94
		0.74	648.53			0.93	605.01
		1.11	652.43			1.40	619.40
0.105	0.07	0.0	504.15	0.145	0.11	0.0	391.33
		0.41	627.27			0.49	520.00
		0.81	630.53			0.97	524.80
		1.22	649.88			1.46	556.12

였다. Wu 등의 실험에서 프로판가스 버너에서는 배연속도가 증가함에 따라 화염영역(persistent flame regime)에서의 온도는 일정하다고 하였고, 간헐연소영역(intermittent regime) 및 부력플럼영역(buoyant plume regime)에서는 온도가 일정하지 않고 변화한다고 하였다. 하지만 본 실험에서는 화원을 풀(pool)을 이용하였으며, 풀화재에서는 배연속도가 증가함에 따라 간헐연소영역 및 부력플럼영역에서 뿐만 아니라 화염영역에서도 온도 변화가 있을 것으로 사료된다. 이러한 이유는 배연속도가 증가함에 따라 화원 부근에 공급되는 공기량 보다 화염영역에서 냉각효과가 지배적으로 작용하였기 때문에 배연속도가 증가 할수록 연소율이 감소하였으며 이는 연소시간을 지연시키는 원인이 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 배연속도의 증가에 따른 연소율의 변화 및 온도분포를 파악하여 축소 모형 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 터널내 배연속도가 없는 경우 발열량이 작은 알코올 계열의 메탄올은 화원 크기와 관계없이 연소율이 일정하게 나타났으며, 배연속도가 증가 할수록 냉각효과로 인하여 연소율이 감소 하였다.
- 2) 화원의 발열량이 증가함에 따라 부력의 증가로 임계속도의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 터널내 배연속도의 증가에 따라 냉각효과로 인하여 연소율의 감소를 가져 왔으며, 이러한 원인으로 배연속도가 없는 경우 보다 배연속도가 최대일 경우 연소시간이 증가하였다. 또한 화원의 크기가 8.5 cm에서 14.5 cm로 증가 할 수록 연소시간이 1.2~1.4 배 정도 증가하였다.
- 4) 터널내 화재 발생시 배연속도의 증가에 따른 연소율

의 변화를 파악함으로써 터널 설계시 화재 안전도 확보를 위하여 배연 시스템의 설계 및 방재계획을 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 (M1011300012-01A2-90000600)지원으로 수행되었으며 관계제위에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이성룡, 2004, 종류식 배연 터널 화재시 임계속도에 대한 중형비의 영향에 관한 연구, 박사학위논문, 중앙대학교.
2. 차철현, 김진국, 1999, 지하철 터널에서의 제연, 공기조화 냉동공학, 제28권, 제6호.
3. Y. Oka and G. T. Atkinson, 1995, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safety Journal, 25.4, 305-322.
4. O. Vauquelin and O. Me'gret, 2002, Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel, Fire Safety Journal, 37.5, 525-533.
5. G. T. Atkinson and Y. Wu, 1996, Smoke Control in Sloping Tunnels, Fire Safety Journal, 27.4, 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, 35.4, 363-390.
7. 김성찬, 유홍선, 김충익, 홍기배, 2002, 짧은 터널 내의 연기 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제12권, 제1호, 31-36.
8. 이성룡, 김충익, 유홍선, 박현태, 2002, 터널화재시 연기제어에 관한 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1894-1900.
9. 이성룡, 김충익, 유홍선, 김혁순, 전명배, 2004, 경사 터널내 화재시 임계속도에 관한 실험적 연구, 한국화재·소방학회 논문집, 제18권, 제1호, 49-53.
10. 김성찬, 2003, 화염과 워터미스트의 상호작용에 관한 실험 및 수치해석 연구, 박사학위논문, 중앙대학교.
11. J. G. Quintiere, 1998, Principles of fire behavior, New York, Delmar Pub.
12. J. G. Quintiere, 1989, Scaling Applications in Fire Research, Fire Safety Journal, Vol. 15, 3-29.
13. S. Sardqvist, 1993, RHR, Smoke Protection and CO Generation from Single Item and Room Fire Tests, Report, Department of fire Safety Engineering, Institute of Technology, Lund University.

양 승 신

2004년 충주대학교 에너지시스템공학과 공학사



Tel: 02-813-3669
E-mail: yangshim2128@naver.com
현재 중앙대학교 대학원 기계공학과 석사 과정

유 홍 선

1977년 서울대학교 항공우주공학과 공학사



1979년 서울대학교 항공우주공학과 공학석사
1988년 Imperial College(Univ.of London) 공학박사
Tel: 02-820-5280
E-mail: cfdmec@cau.ac.kr
현재 중앙대학교 기계공학부 교수

김 성 찬

1997년 한국해양대학교 조선공학과 공학사



1999년 중앙대학교 기계공학과 공학석사
2003년 중앙대학교 기계공학과 공학석사

Tel: 02-825-3669
E-mail: chan011@mail.metric.or.kr
현재 중앙대학교 미래신기술연구소 박사 후 연구원