

종류식 배연 터널 화재시 배연속도가 연소율에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

양 승 신, 유 홍 선^{**}, 최 영 기^{*}, 김 동 현^{**}

중앙대학교 기계공학부 대학원, ^{*}중앙대학교 기계공학부, ^{**}한국철도기술연구원

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

Seung-Shin Yang, Hong-Sun Ryou^{**}, Young-Ki Choi^{*}, Dong-Hyeon Kim^{**}

Graduate School of Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

^{*}School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

^{**}Korea Railroad Research Institute, Gyeonggi 437-757, Korea

(Received July 6, 2005; revision received August 18, 2005)

ABSTRACT: In this study, the 1/20 reduced-scale experiment using Froude scaling were conducted to investigate the effect of longitudinal ventilation velocity on the burning rate in tunnel fires. The methanol pool fires with heat release rate ranging from 2.02 kW to 6.15 kW and the n-heptane pool fires with heat release rate ranging from 2.23 kW to 15.6 kW were used. The burning rate of fuel was obtained by measuring the fuel mass at the load cell. The temperature distributions were observed 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 methanol pool fire, the increase in ventilation velocity reduces the burning rate. On the contrary in n-heptane pool fire, the increase in ventilation velocity induces large burning rate. The reason for above conflicting phenomena lies on the difference of burning rate. In methanol pool fire, the cooling effect outweighs the supply effect of oxygen to fire plume, and in n-heptane pool vice versa.

Key words: Tunnel fire(터널 화재), Ventilation velocity(배연속도), Burning rate(연소율), Pool fire(풀 화재), Froude scaling(Froude 상사)

기 호 설 명

A_f : 화원면적 [m^2]

g : 중력가속도 [m/s^2]

\bar{H} : 수력직경 [m]

ΔH_C : 연소열 [kJ/kg]

L : 터널길이 [m]

\dot{m}_f'' : 연료증발량 [kg/m^2s]

\dot{m}_∞'' : 무한반경의 연료증발량 [kg/m^2s]

\bar{m}_f'' : 무차원 연료증발량

Q : 발열량 [kW]

\bar{Q} : 무차원 발열량

Δt : 시간 [s]

V : 속도 [m/s]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5280; fax: +82-2-813-3669

E-mail address: cfdmec@cau.ac.kr

\bar{V} : 무차원속도
 ΔW_f : Δt 동안 연료소모량 [kg]

상첨자

$x\theta$: 소화-흡수계수 [m^{-1}]
 D : 화원직경 [m]

하첨자

cv : 임계속도
 f : 연료
 F : 실물 터널
 M : 모형 터널
 v : 배연속도
 ∞ : 무한반경

1. 서 론

현대 산업사회의 급속한 발전에 따른 교통량의 증가 및 도시 집중화로 인하여 교통체증은 날로 심각해지고 있다. 이러한 교통난을 극복하기 위하여 도로나 철도 건설은 증가추세에 있으며, 우리나라와 같이 대부분이 산악지형으로 이루어진 곳에서는 터널이나 지하공간 활용에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 터널은 육상교통이 고속화되면서 선형 확보와 주행의 안전성을 위해 점차 장대화되고 있는 추세이며, 최근 국내에서 건설되고 있는 도로 및 철도 터널의 경우를 보더라도 향후 수적인 증가가 지속될 전망이다. 한편 터널과 같은 공간은 기하학적인 제약조건으로 공간 내의 위험요소 발생시 안정성 문제가 크게 대두되고 있다. 특히 터널에서 화재가 발생할 경우 중회비가 작고, 외기의 공급이 한정된 특수한 환경하에 있기 때문에 화재발생으로 인한 대량의 유독가스 및 연기에 의한 화재발생 위치를 파악하기 어렵다. 따라서 제한적인 진입구에 의해 소방활동이 어렵게 되고, 적절한 화재진압이 이루어지지 않을 경우 대형 인명사고를 초래할 수 있다.

이와 같은 대표적인 대형 터널 화재 사례로는 1999년 3월 24일 프랑스와 이탈리아를 연결하는 몽블랑 터널에서 마가린과 밀가루를 실은 화물차에서 자연발화하여 주변차량으로 확산되어 39명이 사망하고, 30명이 부상하는 사고가 발생했다.⁽¹⁾

2005년 6월 5일 최근에도 같은 터널에서 화재가 발생하여 2명이 사망하고, 다수가 부상당하는 등 터널사고 다발국이라는 오명을 뒤집어 쓰기도 했다. 2001년 10월 24일 스위스 생 고타르 터널에서 화물차량이 정면 충돌로 인하여 화재가 발생 11명이 사망하였다.⁽²⁾ 국내에서는 2003년 6월 6일 홍지문 터널에서 미니버스와 4륜차가 충돌하여 화재가 발생 40명이. 중경상을 입는 사고가 발생하였다. 이러한 사고사례에서 보는 바와 같이 터널 화재시 발생빈도에 비하여 대형 참사를 초래하는 경우가 많기 때문에 적절한 배연설비와 피난대책 마련은 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 터널 화재시 열 및 연기 거동을 제어하기 위한 방법으로는 자연배연방식과 강제배연방식이 적용되고 있으나, 최근 건설되고 있는 터널이 장대화되어 가는 추세이기 때문에 강제배연방식을 채택하고 있다. 이와 함께 터널 내 화재에 관한 연구도 앞에서 언급한 바와 같이 강제배연방식에 초점을 두고 연구가 진행중이다. 강제배연에 관한 연구는 Oka and Atkinson⁽³⁾의 축소 모형 실험을 통하여 무차원 발열량에 따라 무차원 임계속도(critical velocity)가 발열량의 1/3 승에 비례하는 구간과 무차원 발열량에 상관없이 일정구간이 존재한다는 것에 대하여 연구하였다. Atkinson and Wu⁽⁴⁾는 터널의 경사도에 따른 임계속도의 변화에 대하여 연구하였다. Wu and Baker⁽⁵⁾는 서로 다른 형상을 가진 모형 실험을 수행하였고 그 결과를 수치해석과 비교하여 임계속도의 상관관계식을 제시하였다. Kim et al.⁽⁶⁾은 축소 모형 터널을 이용하여 연기거동을 해석하고 이를 수치해석 결과와 비교하였으며, Lee et al.⁽⁷⁾은 터널의 중회비 변화에 따른 임계속도를 실험적으로 파악하고 이를 수치해석과 비교하여 중회비의 영향이 고려된 상관관계식을 제시하였다. 지금까지 터널 화재에 대한 연구는 터널의 형상 및 경사에 따른 임계속도와 연기거동에 관한 측면으로 진행되어 왔다. 하지만 실제 터널 화재시 배연속도가 화재성장에 미치는 영향을 고려한 연구는 아직도 초기 연구단계이다. 최근에는 Carvel et al.⁽⁸⁾은 Bayesian 방법론을 이용하여 배연속도의 강도에 따른 화재성장(fire development) 및 발열량 등을 추정하였다. Yang et al.^(9,10)은 모형 터널에서 연소열(heat of combustion)이 다른 연료를 사용하여 종류식 환기가 연소율에 미치는 영

향에 관하여 연구하였다. 하지만 아직도 터널 화재시 배연속도에 따른 발열량의 변화가 화재성장에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기에 부족한 실정이다.

본 연구에서는 터널에서 화재발생시 각각 다른 발열량을 가진 매탄올과 헵탄 연료가 종류식 환기방식의 배연속도에 따른 연소율 및 발열량 변화를 실험적 접근을 통하여 파악하고자 한다. 특히 축소 모형을 통하여 터널에서의 연소율 및 발열량 변화를 해석하여 배연속도에 따른 화재성장 특성을 파악하고 터널의 배연시스템 설계시 화재방재계획을 설정함에 있어서의 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모형 터널 및 실험장치

모형 터널 공간은 실물대상 폭 8m, 높이 8m, 길이 200m의 크기를 가진 터널을 1/20로 축소하여 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 10m의 투명 아크릴를 사용하였다. 화원부 구간은 열에 의한 변형을 막기 위하여 강철로 제작된 모형 터널을 이용하였다. 터널 내의 균일한 유속을 얻기 위하여 터

널 입구로부터 1m 떨어진 지점에 금속 메쉬를 설치하였다. 금속메쉬 각 셀(cell)의 면적은 1mm^2 로 균일하게 짜여져 있으며, 부식 및 열기로부터 손상을 방지하기 위하여 스테인리스(stainless) 재질을 사용하였다. 터널의 출구는 외부와 개방하였으며, 터널 입구에 풍동을 연결하여 인버터로 터널 내 배연속도를 조절하였다. 모형 터널 화재 실험대상의 공간형상 및 사진은 Fig.1과 같다.

Fig.2는 모형 터널에서 열전대 측정위치의 주요 치수 및 화원의 위치를 나타내고 있다. 터널 천정에서 온도분포를 측정하기 위하여 0.32mm 두께의 K형 열전대(크로멜-알루멜, 측정범위: $-200\sim 1,260^\circ\text{C}$)를 이용하였다. 터널 상류에서의 역기류 길이를 측정하기 위하여 천정에서 2cm 떨어진 위치에 길이방향으로 21개(TC1~21) 설치하였으며, 연층을 파악하기 위하여 화원을 중심으로 1m 떨어진 상류에서 4개(TC22~25), 화원에서 2m 떨어진 하류에서 6개(TC26~31)를 5cm 간격으로 설치하였다. 열전대에서 발생된 신호는 Agilent 34970A Data Acquisition Unit과 Agilent 34910A 채널을 통해 수집되었다. 데이터 수집장치의 각 채널에서 수집된 데이터는 RS232를 통해 PC로 전송되었으며 Labview Program을 이용하여 수집된 데이터를 처리하였다.

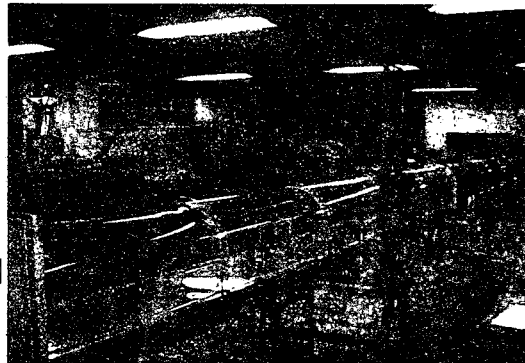
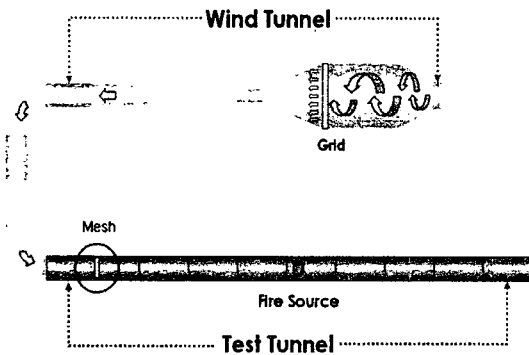


Fig. 1 Experimental setup of the tested tunnel.

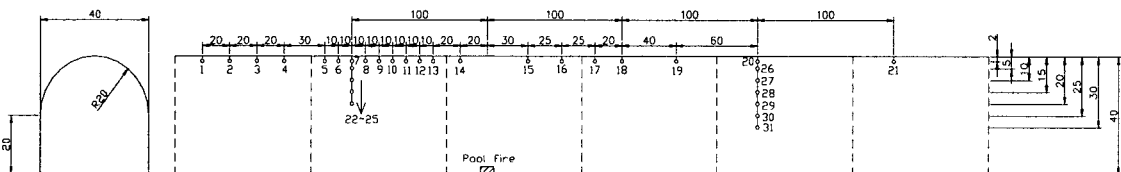


Fig. 2 Schematic view of the thermocouples arrangement in the model tunnel.

2.2 화원 및 발열량

일반적으로 풀 화재는 버너 화재 및 고체 화재 등과 같은 다른 화재장치들에 비해 실험장치가 간단하고 연소면적이 일정하며 발열량 산정이 용이한 장점이 있기 때문에 고정된 발열량을 묘사하는 데 있어 널리 사용된다.⁽¹¹⁾ 본 실험에서 적용된 연료는 발열량이 작은 Methanol(CH₃OH)과 발열량이 큰 n-Heptane(C₇H₁₆)을 사용하였다. 메탄올일 경우 적용된 화원은 각 변의 길이가 각각 8.5, 10.5, 12.5, 14.5 cm, 높이 2 cm, 헵탄일 경우 4.5, 5.5, 6.5, 8.5 cm, 높이 2 cm인 정사각형 풀을 제작하여 실제 화재발생 상황을 모사하였다. 종류식 터널에서 배연속도의 유·무에 따른 연소율 및 발열량을 비교하기 위하여 배연속도가 없는 경우의 고정 발열량(Q)과 배연속도의 변화에 따른 연소율을 고려하여 발열량(Q_{exp})을 각각 구하였다. 첫째, 고정 발열량을 얻기 위하여 Methanol pool fire, n-Heptane pool fire의 경우 연료의 증발량과 연소열을 이용하여 단위면적당 발열량을 산정하였다. 발열량 산정에 이용된 식은 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$Q = \dot{m}_f'' \cdot A_f \cdot \Delta H_C \quad (1)$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_\infty'' (1 - e^{-x\theta D}) \quad (2)$$

$$\dot{m}_\infty'' = 0.017 \text{ kg/m}^2 \text{ s (Methanol)}$$

$$\dot{m}_\infty'' = 0.101 \text{ kg/m}^2 \text{ s (n-Heptane)}$$

$$\Delta H_{C, \text{Methanol}} = 20000 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{C, \text{Heptane}} = 44600 \text{ kJ/kg}$$

$$x\theta_{\text{Methanol}} = 0, \quad x\theta_{\text{Heptane}} = 1.1 \text{ m}^{-1}$$

둘째, 터널 내 화재시 배연속도의 변화에 따라 화재의 성장 및 축소하는데 있어 영향을 줄 수 있는 요인이 되므로 본 실험에서는 로드셀을 이용하여 시간에 따른 연료의 감소량을 측정하여 연소율을 산출하였다. 연소과정은 연료의 특성상 화원의 크기에 따라 다소 차이를 보였으나 메탄올 및 헵탄의 경우 각각 120~150초, 160~250초 정도에서 준정상상태(quasi-steady state)에 도달하였으며 400~650초, 400~500초 전후로 완전히 전소되었다. 따라서 각 연료의 연소상태를 고려하여 시간에 따른 연료의 증발량을 측정하고 준정상상태일 때의 연소율을 산출하였다. 모형 터널 실험에서 적용된 화원의 연소율 및 발열량은 다

음 식에 의해 계산되어진다.⁽¹³⁾

$$\dot{m}_{f, \text{exp}}'' = \frac{\Delta W_f}{\Delta t \cdot A_f} \quad (3)$$

$$Q_{\text{exp}} = \dot{m}_{f, \text{exp}}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_C \quad (4)$$

2.3 축소법칙

모형 터널 실험의 결과를 실제 크기의 화재와 상사시키기 위해 Fröude scaling을 적용하기 위하여 실제 공간에서의 발열량을 산정하였다. 축소터널과 실험터널의 속도, 발열량 사이의 관계는 다음 식과 같다.⁽¹⁴⁾

$$\frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{5/2} \quad (6)$$

Table 1, 2는 메탄올과 헵탄의 화원 및 배연속도가 증가함에 따른 발열량 변화를 보여주고 있으

Table 1 Fire size of the n-heptane and methanol pool fire

n-Heptane case			Methanol case		
Pool size [cm]	Q _M [kW]	Q _F [MW]	Pool size [cm]	Q _M [kW]	Q _F [MW]
4.5	2.23	3.9	8.5	2.02	3.62
	4.43	7.92		1.81	3.23
	4.97	8.9		1.71	3.05
	5.94	10.6		1.08	1.93
5.5	3.71	6.6	10.5	3.20	5.72
	5.93	10.6		2.40	4.30
	6.31	11.3		2.29	4.10
	7.42	13.3		2.20	3.94
6.5	5.8	10.4	12.5	4.13	7.38
	7.35	13.1		3.31	5.92
	8.3	14.8		2.93	5.24
	9.57	17.1		2.80	5.01
8.5	10.95	19.6	14.5	6.15	11.0
	11.7	20.9		4.43	7.92
	12.9	23.1		4.00	7.16
	15.6	27.9		3.71	6.64

Table 2 Ventilation velocity n-heptane and methanol pool fire

n-Heptane case			Methanol case		
Pool size [cm]	V_M [m/s]	V_F [m/s]	Pool size [cm]	V_M [m/s]	V_F [m/s]
4.5	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0
	0.44	1.97		0.37	1.65
	0.87	3.89		0.74	3.31
	1.33	5.95		1.11	4.96
5.5	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0
	0.46	2.06		0.41	1.83
	0.92	4.10		0.81	3.62
	1.38	6.17		1.22	5.46
6.5	0.0	0.0	12.5	0.0	0.0
	0.48	2.15		0.47	2.10
	0.96	4.30		0.93	4.16
	1.44	6.44		1.40	6.26
8.5	0.0	0.0	14.5	0.0	0.0
	0.56	2.50		0.49	2.19
	1.12	5.01		0.97	4.34
	1.68	7.51		1.46	6.53

□ : Critical Velocity

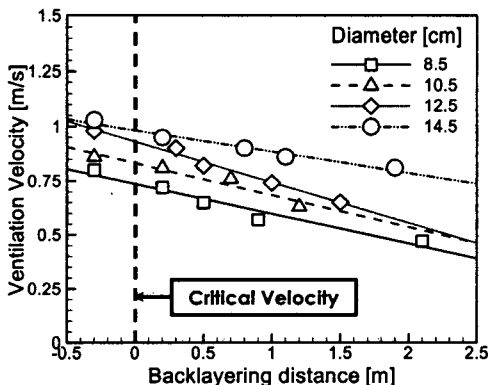
며 축소 모형 터널과 실제 터널에서의 발열량과 배연속도를 비교하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

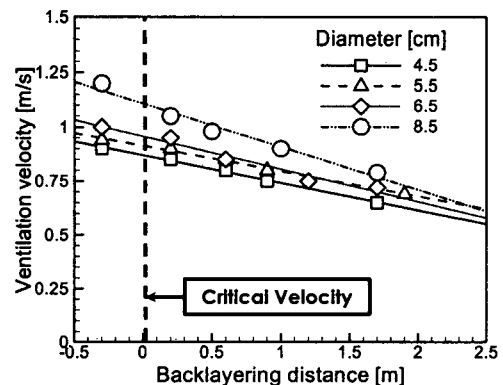
터널에서 화재가 발생할 경우 연기 및 온도 감지기가 작동하여 배연시스템은 환기모드에서 배

기모드로 변경하게 된다. 하지만 현재 터널에 설치된 배연시스템은 대부분이 배연속도의 증감에 따른 화재성장 및 축소에 미치는 영향을 고려하지 않고 설계되어진 곳이 많다. 이처럼 배연속도가 화재에 미치는 영향을 고려하지 않고 기존의 방식대로 배연시스템을 구축할 경우 화재의 성장을 촉진시킬 수 있는 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연소율(burning rate)이 서로 다른 연료(Methanol, n-Heptane)를 사용하여 화원 크기에 따른 임계속도를 결정하였으며, 배연속도가 임계속도의 증감(0, 0.5, 1.0, 1.5배)에 따른 연소율 및 발열량 변화를 파악하였다. Fig. 3은 메탄올과 헵탄 화원에서의 배연속도 증가에 따른 역기류 길이(back-layering distance)를 나타내고 있다. 배연속도에 따른 역기류 길이를 파악하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 화원을 중심으로 터널 상류에 열전대를 10 cm 간격으로 설치하였다. 임계속도는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 배연속도를 증가시키면서 열전대에 의해 측정된 연층의 온도를 통해 연기선단의 길이를 추정하였으며 이를 선형보간하여 메탄올 및 헵탄의 각 발열량에 대한 임계속도를 구하였다. 여기서 임계속도는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 역기류 길이(back-layering)가 0(zero)이 되는 배연속도를 의미한다. 메탄올 및 헵탄의 화원이 커질수록 임계속도는 증가하였으며, 상대적으로 발열량이 큰 헵탄이 메탄올보다 임계속도 값이 크게 나타났다.

Fig. 4는 배연속도가 임계속도의 0.5, 1.0, 1.5배로 증가할 때 메탄올 및 헵탄의 각 화원에 따른 무차원된 연소율을 나타내고 있으며, 여기서 \bar{V}



(a) Methanol pool fire case



(b) n-Heptane pool fire case

Fig. 3 Comparison of backlayering distance between ventilation velocity and pool size.

와 \overline{m}_f 는 무차원 배연속도 및 연소율로서 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{V} = \frac{V_{\text{ventilation velocity}}}{V_{\text{critical velocity}}} \quad (7)$$

$$\overline{m}_f = \frac{m_{f \text{ ventilation velocity}}}{m_{f \text{ critical velocity}}} \quad (8)$$

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 배연속도가 임계속도의 0.5~1.5배로 증가시켰을 때 메탄올 화재일 경우 무차원 연소율은 감소하는 경향을 보이고 있으나, 헵탄 화재일 경우 무차원 연소율이 증가함을 볼 수 있다. 풀 화재의 경우 화염 및 연소가스의 전도, 대류 및 복사열전달에 의해 연료의 증발이 이루어지게 된다. 배연속도를 증가시킬 경우 상대적으로 발열량이 작은 알코올 계열의 연료는 화원의 냉각 및 화염의 변형으로 인한 전도 및 복사열전달 감소에 의해 화원으로의 열전달이 상대적으로 적게 되며 이로 인해 연료의 연소율은 감소하게 된다. 하지만 탄화수소(hydrocarbon) 계열의 연료는 배연속도가 증가할수록 화원의 냉각 및 열전달 효과보다는 화원으로 공급되는 산소의 공급이 지배적이기 때문에 연소율은 증가하게 된다. 이러한 이유는 아래에 나타나 있는 메탄올(CH₃OH) 및 헵탄(C₇H₁₆)의 간단한 화학 반응식을 보더라도 알 수 있다.

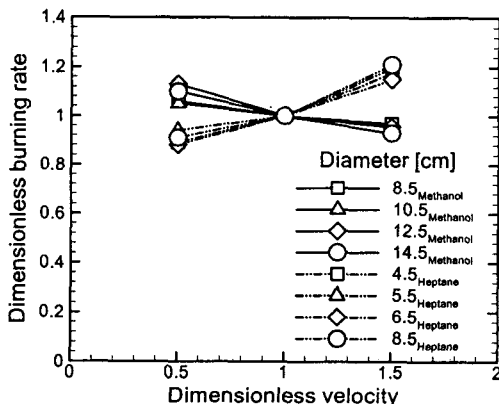
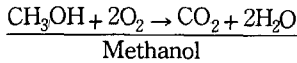
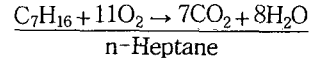


Fig. 4 Dimensionless burning rate with dimensionless velocity.



첫째, 메탄올일 경우 탄소(C) 함유량이 적고, 연료 자체적으로 산소를 가지고 있기 때문에 배연속도 없이도 거의 완전 연소가 가능하다. 하지만 배연속도를 증가시킬 경우 불필요한 산소 공급으로 화염 영역을 오히려 냉각시키는 원인이 되어 연소율은 감소하게 된다. 둘째, 헵탄일 경우 메탄올에 비하여 탄소(C)의 함유량이 많고, 발열량이 크기 때문에 완전 연소를 위해서는 산소가 많이 필요하다. 따라서 배연속도를 증가시킬수록 화염 영역으로 산소의 공급이 원활히 이루어지기 때문에 연소율을 증가시키는 원인이 된다.

Fig. 5는 무차원 발열량 \overline{Q}_{cv} 에 따른 무차원 임계속도 \overline{V}_{cv} 의 변화를 나타내고 있으며, 여기서 무차원 발열량과 무차원 임계속도는 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{Q}_{cv} = \frac{Q_{\text{exp}}}{Q} \quad (9)$$

$$\overline{V}_{cv} = \frac{V_{c \text{ exp}}}{V_c} \quad (10)$$

\overline{Q}_{cv} 는 임계속도일 때 고정 발열량(Q)과 실험에서 얻은 발열량(Q_{exp})의 비이며, \overline{V}_{cv} 는 Wu 등이 제안한 임계속도(V_c)와 실험에서 얻은 임계속도(V_{c,exp})의 비이다. 이전 연구동향을 보면 배연속도에 따른 연소율 변화를 고려하지 않고,

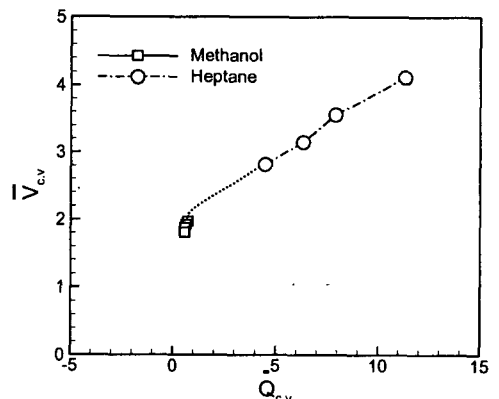


Fig. 5 Dimensionless heat release rate with dimensionless critical velocity.

발열량을 일정하게 고정하여 임계속도를 정의하였다. 하지만 실제 터널에서 화재발생시 Fig. 4에서도 언급하였듯이 배연속도가 증가함에 따라 연소율 및 발열량이 변하게 된다. 본 연구에서는 메탄올 및 헵탄 화재에서 식(1), (2)에서 얻은 고정 발열량과 식(3), (4)에서 얻은 변화된 발열량을 비교 분석하였다. 또한 Wu 등이 제안한 임계속도식을 이용하여 실험을 통해 얻은 임계속도와 비교 분석하였으며, Wu 등이 제안한 임계속도는 아래와 같다.

$$V'' = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \quad (11)$$

$$V'' = 0.4 \cdot 0.2^{-1/3} Q''^{1/3} \quad (12)$$

본 실험에서 사용한 무차원 발열량의 범위는 $Q'' \leq 0.2$ 이며, 무차원 해석방법은 Wu 등이 제안한 터널의 수력직경을 사용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 메탄올 화재인 경우 무차원 발열량이 약 0.55~0.69로 감소하였으며, 헵탄 화재인 경우 약 4.45~11.3으로 증가하였다. 이러한 이유는 Fig. 4에서 언급한 바와 같이 메탄올 화재인 경우 배연속도에 따라 냉각효과 및 열전달 효과가 지배적이기 때문에 임계속도일 때 고정 발열량(Q)보다 실험에서 얻은 발열량(Q_{exp})은 감소하게 된다. 헵탄 화재인 경우는 배연속도에 따라 냉각효과보다 화염영역에 산소공급으로 인하여 임계속도일 때 고정 발열량(Q)보다 실험에서 얻은 발열량(Q_{exp})이 증가하게 된다. 따라서 실제 터널에서 화재발생시 화재의 크기에 따라 배연속도를

조절할 필요가 있다. 이러한 이유는 고정 발열량을 기준으로 임계속도를 산출하여 배연시스템에 적용할 경우 화재가 더욱 성장할 수 있는 원인이 될 수 있거나 배연시스템의 불필요한 비용이 소요될 수 있다. Table 3은 화원 크기에 따른 무차원 발열량과 무차원 임계속도를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 배연속도에 따른 연소율 및 발열량 변화를 파악하기 위하여 축소 모형 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알코올 계열의 메탄올 화재는 배연속도에 따라 냉각효과 및 열전달효과 감소로 인하여 연소율 및 발열량의 감소를 가져왔으며, 무차원 발열량(\bar{Q}_{cv})은 약 0.55~0.69로 감소하였다.

(2) 탄화수소 계열의 헵탄 화재는 냉각효과보다 화염영역으로 산소의 공급으로 인하여 연소율 및 발열량의 증가를 가져왔으며, 무차원 발열량(\bar{Q}_{cv})은 약 4.45~11.3으로 증가하였다.

(3) 터널 내 화재발생시 고정 발열량을 기준으로 임계속도를 산출하여 배연시스템에 적용할 경우 화재가 더욱 성장할 수 있는 원인이 될 수 있거나 연기를 제어하는 데 있어 배연시스템의 불필요한 비용이 소요될 수 있다. 따라서 터널설계시 화재안전도를 확보하기 위하여 배연시스템의 설계 및 방재계획을 하는 데 있어 연소율 및 발열량을 고려하여 체계적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 국가교통핵심기술개발사업(03-안전-22) 지원으로 수행되었으며, 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S. R., Ryou, H. S. and Kim, C. I., 2004, An experimental study of smoke movement in tunnel fires with a vertical shaft, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 135-141.
2. Cha, C. H. and Kim, J. K., 1999, Smoke con-

Table 3 Comparison of dimensionless heat release rate and dimensionless critical velocity

Fuel type	Pool size [cm]	\bar{Q}_{cv}	\bar{V}_{cv}
Methanol	8.5	0.69	1.97
	10.5	0.61	1.92
	12.5	0.56	1.88
	14.5	0.55	1.81
n-Heptane	4.5	11.3	4.12
	5.5	7.90	3.56
	6.5	6.30	3.15
	8.5	4.45	2.82

- trol in subway tunnels, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 425-432.
3. Oka, Y. and Atkinson, G. T., 1995, Control of smoke flow in tunnel fires, Fire Safety Journal, Vol. 25, No. 4, pp. 305-322.
 4. Atkinson, G. T. and Wu, Y., 1996, Smoke control in sloping tunnels, Fire Safety Journal, Vol. 27, No. 4, pp. 335-341.
 5. Wu, Y. and Baker, M. Z. A., 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.
 6. Kim, S. C., Ryou, H. S., Kim, C. I. and Hong, G. B., 2002, A study of smoke movement in a short tunnel, Tunnel & Underground Space, Vol. 12, No. 1, pp. 31-36.
 7. Lee, S. R. and Ryou, H. S., 2004, An experimental study on the determination of back-layering distance in tunnel fires, Tunnel & Underground Space, Vol. 14, No. 4, pp. 269-274.
 8. Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W. and Drysdale, 2001, Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels, Fire Safety Journal, Vol. 36, pp. 569-596.
 9. Yang, S. S., Kim, S. C. and Ryou, H. S., 2005, An experimental study on the effect of longitudinal ventilation on the variation of burning rate in tunnel fires, Tunnel & Underground Space, Vol. 15, No. 1, pp. 55-60.
 10. Yang, S. S. and Ryou, H. S., 2005, An experimental study on the ventilation velocity of the variation of burning rate in tunnel fires - Heptane pool fire case, Tunneling Technology, Accepted.
 11. Zhou, X. C. and Gore, J. P., 1995, Air entrainment flow field induced by a pool fire, Combustion and Flame, Vol. 100, No. 1, pp. 52-60.
 12. Sardqvist, S., 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.
 13. Kim, S. C., 2003, An experimental and numerical study on interaction between fire plume and water mist, Ph. D. thesis, Chung-Ang University, Seoul, Korea.
 14. Quintiere, J. G., 1989, Scaling applications in fire research, Fire Safety Journal, Vol. 15, pp. 3-29.