

경사터널내 화재 발생시 경사도가 임계속도에 미치는 영향에 관한 연구

An Experimental Study on the Critical Velocity Considering the Slope in Tunnel Fire

김승렬* · 장용준** · 유홍선†

Seung-Ryoul Kim · Yong-Jun Jang · Hong-Sun Ryou

Abstract An experimental study has been conducted to investigate the effect of tunnel slope on critical velocity by using the model tunnel of the 1/20 reduced-scale applying the Froude scaling law. the square liquid pool burners were used for methanol, acetone and n-heptane fires. tunnel. Tunnel slopes varied as five different degrees 0°, 2°, 4°, 6° and 8°. The mass loss rate and the temperatures are measured by a load cell and K-type thermocouples for tunnel slope. Present study results in bigger the critical velocity than the research of Atkinson and Wu using the propane burner. Therefore, when estimating the critical velocity in slope tunnel, the variations of the heat release rate is an important factor. The reason is the ventilation velocity directly affects variation of heat release rate when slope tunnel fire occurred.

Keywords : Tunnel Slope, Critical Velocity, Froude Scaling, Tunnel Fire

요 지 본 연구에서는 경사각에 따른 임계속도 변화를 파악하기 위하여 축소모형 실험을 수행하였다. Froude 상사를 사용하여 1/20 축소모델 실험을 수행하였고, 화원은 메탄올, 아세톤, 헵탄을 연료로하여 Atkinson과 Wu가 사용한 가스버너가 아닌 배연속도에 따라 달라지는 정사각형 풀을 사용하였으며, 터널의 각도는 0°, 2°, 4°, 6°, 8°에 관하여 실험을 수행하였다. 발열량과 온도는 로드셀과 K-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 실험결과 발열량 변화를 고려하지 않은 Atkinson과 Wu의 실험결과 보다 배연속도에 따른 발열량이 변화하는 풀화재를 사용한 경우가 더 큰 기울기 값을 얻었다. 따라서 배연속도는 화원의 연소율 변화에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 경사터널화재 발생시 연소율의 변화에 따른 임계속도의 영향을 고려하는 것이 중요하다.

주 요 어 : 경사터널, 임계속도, 축소법칙, 터널화재

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근에 교통 및 산업사회의 발달과 함께 교통 혼잡이 심각한 문제로 대두 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 공간의 활용성과 편의성을 높이는 터널건설의 필요성이 증대 되고 동시에 안정성의 확보에 대한 관심이 증가하고 있다.

우리나라는 국토의 대부분이 산악지형으로 이루어져 있으며 철도 및 도로건설에 있어 산악지형의 지형적 특성을 극복하기 위해 터널의 건설이 불가피한 실정이며 다양한 장대 터널 등이 건설 되고 있다.

이러한 상황에서 터널내 화재에 대한 안전성이 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 특히 터널에서는 공간적인 제한성과 외기의 공급이 한정된 특수한 환경 하에 있기 때문에 화재발생시 연기와 유독가스 발생으로 인해 대형 참사를 초래할 수 있다. 그러므로 터널 화재 현상의 이해와 터널내 화재 발생에 대비하여 적절한 배연설비 및 피난대책의 마련이 매우 중요하다.

대표적인 터널화재 사례로는 1999년 3월 24일 프랑스와

† 책임저자 : 정희원, 중앙대학교 기계공학부 교수
E-mail : cfmecc@cau.ac.kr
TEL : (02)813-3669 FAX : (02)813-3669

* 정희원, 중앙대학교 기계공학부

** 회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 선임연구원

이탈리아를 연결하는 몽블랑 터널에서 화물차의 엔진에서 연료가 누출 되어 화재가 발생되었고 주변 차량으로 확산 되어 39명이 사망하고 30명이 부상하는 사고가 발생했다. 2000년 11월 11일 오스트리아의 키츠슈타인호른에서는 케이블 열차에서 터널을 통과 할 무렵 히터에 화재가 발생하여 터널 위쪽으로 가던 사람들 150명은 모두 사망하였고 아래쪽으로 내려간 12명만 생존하였다. 스위스에서는 생 고타르 터널에서 트럭의 충돌로 인하여 화재가 발생 11명이 사망하는 사고가 발생하였고, 23대의 차량이 파괴되었다[1]. 이처럼 터널 화재는 공간적인 특수성으로 인하여 대형참사를 초래하는 경우가 많다.

일반적으로 터널화재는 터널의 형태, 경사, 배연용량, 팬의 위치, 환기 및 풍압과 같은 외부 요인과 열유동 및 물질 전달, 화학반응 등이 포함된 복합적인 현상이기 때문에 물리적 현상을 이해하는데 어려움이 있다. 특히 터널이 일정한 경사를 가지고 있는 경우 굴뚝효과로 인해 연기의 유동속도가 증가하게 되어 이를 고려하여 배연설비가 설계되어야 한다.

터널 화재에 대한 선행연구로는 Oka와 Atkinson의 축소모형 터널에서 화원의 모양, 크기, 위치를 변화시켜가며 임계속도에 관하여 연구하였고 [2], Atkinson과 Wu는 터널의 경사도에 따른 임계속도의 변화에 대하여 연구하였다[3]. Wu와 Baker는 서로 다른 형상을 가진 모형 터널에서 실험과 수치해석의 결과를 비교 분석하였다[4]. Carevel 등은 터널에서 배연속도가 풀화재에 미치는 영향을 Bayesian 방법으로 연구하였다[5]. 이성룡 등은 경사터널내 화재 발생시 임계속도에 대하여 연구하였지만 기울기에 따른 연료의 연소율 변화를 고려하지 않았다[6]. 이처럼 터널 화재에 대한 연구는 화원의 크기 및 터널 형상에 따른 임계속도와 연기거동 파악 등 다양한 측면으로 진행되어 왔다.

하지만 기존의 연구에서는 발열량을 고정하여 임계속도를 정의하였으며 실제 터널화재시 배연 속도가 화재 성장에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 또한 수평터널에 대한 연구는 많이 이루어졌지만 터널화재에서의 중요한 요인으로 작용하는 터널의 기울기에 대해서는 연구가 아직까지 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 경사진 터널에서 배연속도에 따른 발열량의 변화를 고려하여 경사터널내 화재 발생시 터널 경사의 영향이 임계속도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 축소 모형실험을 실시하였다.

2. 실험

2.1 모형터널

모형 터널은 실험대상 폭 8m, 높이 8m, 길이 200m의 크기를 가진 터널을 1/20로 축소하여 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 10m,

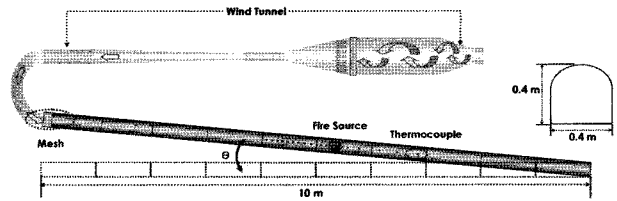


Fig. 1. Experiments setup of the model tunnel and ventilation system

두께 0.01m의 투명 아크릴을 사용하였다. 화원부 구간은 열에 의한 변형을 막기 위하여 강철로 제작된 모형 터널을 이용하였다. 터널내의 유입 배연 유동의 난류를 줄이기 위하여 터널 입구에 금속 메쉬를 설치하였다. 터널의 출구는 외부와 개방하였으며, 배연속도는 터널 입구에 풍동을 연결하였고, 인버터를 조정하여 터널내 배연속도를 조절하였다. Fig. 1은 실험터널의 개략도를 나타내고 있다.

2.2 실험장치

터널 천정에서 온도분포를 측정하기 위하여 0.32mm 두께의 K형 열전대(크로멜-알루멜, 측정범위 : -200~1260°C)를 이용하였다. 또한 터널 상류에서의 역기류(back layering) 길이를 측정하기 위하여 천정에서 2cm 떨어진 위치에 길이 방향으로 21개(TC1~TC21) 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 전송 되었으며 LabView 프로그램을 이용하여 수집된 데이터를 처리하였다.

2.3 화원

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[7]. 본 실험에서 적용된 화원은 methanol(CH₃OH) 과 n-Heptane(C₇H₁₆)일 때, 6.5cm, 8.5cm이고, acetone(C₃H₆O)일 때 6.5cm, 8.5cm, 10.5cm이고 높이가 2cm인 정사각형 풀을 사용하였다.

화원은 터널 입구에서 5.3m 떨어진 위치에 화재가 발생한 것으로 가정하였다. 터널내 풀화재는 배연속도의 증가에 따라 영향을 받기 때문에 로드셀을 이용하여 시간에 따른 연료의 잔량을 측정하여 연소율을 산출하였다. 모형 터널 실험에서 적용된 화원의 연소율 및 발열량은 다음식에 의해 계산되

Table 1. The heat release rate and ventilation velocity for model scale

Fuel		Methanol		Acetone		n-heptane	
Fire Size	Slope angle	\dot{Q}_M	V_M	\dot{Q}_M	V_M	\dot{Q}_M	V_M
6.5 cm	0°	1.11	0.51	3.13	0.73	9.16	0.95
	2°	1.10	0.58	3.25	0.80	9.17	1.03
	4°	1.38	0.61	3.30	0.88	9.22	1.07
	6°	1.47	0.67	3.31	0.94	9.26	1.16
	8°	1.32	0.69	3.63	0.98	10.79	1.23
8.5 cm	0°	1.49	0.69	4.50	0.82	13.02	1.07
	2°	1.51	0.72	4.55	0.91	14.55	1.16
	4°	1.74	0.73	4.95	0.97	14.13	1.23
	6°	1.83	0.79	5.07	1.01	13.94	1.30
	8°	1.85	0.84	5.21	1.06	15.60	1.36
10.5 cm	0°	-	-	5.88	0.92	-	-
	2°	-	-	6.69	1.06	-	-
	4°	-	-	7.30	1.12	-	-
	6°	-	-	7.54	1.19	-	-
	8°	-	-	7.99	1.30	-	-

어진다[8].

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

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

여기서, ΔW_f 는 Δt 동안 증발한 연료량, \dot{Q}_M 은 축소실험에서 사용된 발열량, \dot{m}_f 는 연료의 증발량, A_f 는 화원의 면적, ΔH_C 는 연료의 연소열을 나타내며 메탄올, 아세톤, 헵탄의 연소열은 각각 20,000 [kJ/kg], 25,800 [kJ/kg], 44,600 [kJ/kg]이다[9].

2.4 축소법칙

터널에서의 화재 실험에 있어서 물리적 문제들은 상당히 복잡하며, 여러 변수가 서로 유기적으로 연결되어 완전한 축소모델을 구하는 것은 거의 불가능하다. 물리적인 문제들을 해결하기 위하여 기하학적인 크기 비율뿐만 아니라 무차원 수들을 이용하여 주요 물리적 비율을 계산해야 한다.

화재는 중력에 의한 부력이 지배적이므로 Froude scaling을 적용하여 모형터널 실험의 결과를 실제 크기의 화재와 상사하여 실제 공간에서의 화재 발열량을 산정하였다.

Froude 수의 물리적 의미는 관성력과 부력의 비이고, 항상 보존 되어야한다. Froude 수는 다음과 같이 표현된다.

Table 2. The converted heat release rate and ventilation velocity for full scale

Fuel		Methanol		Acetone		n-heptane	
Fire Size	Slope angle	\dot{Q}_F	V_F	\dot{Q}_F	V_F	\dot{Q}_F	V_F
6.5 cm	0°	1.99	2.3	5.60	3.3	16.38	4.2
	2°	1.97	2.6	5.81	3.6	16.40	4.6
	4°	2.46	2.7	5.90	3.9	16.49	4.8
	6°	2.63	3.0	5.92	4.2	16.57	5.2
	8°	2.36	3.1	6.49	4.4	19.30	5.5
8.5 cm	0°	2.67	3.1	8.05	3.7	23.29	4.8
	2°	2.70	3.2	8.14	4.1	26.03	5.2
	4°	3.12	3.3	8.85	4.3	25.28	5.5
	6°	3.28	3.5	9.07	4.5	24.93	5.8
	8°	3.30	3.8	9.32	4.7	27.91	6.1
10.5 cm	0°	-	-	10.52	4.1	-	-
	2°	-	-	11.97	4.7	-	-
	4°	-	-	13.06	5.0	-	-
	6°	-	-	13.49	5.3	-	-
	8°	-	-	14.29	5.8	-	-

$$Fr = \frac{V_M^2}{gL_M} = \frac{V_F^2}{gL_F} \quad (3)$$

여기서, g 중력가속도, V 속도, L 터널길이를 나타내며 하첨자 M 과 F 는 각각 축소 모델과 실제 모델을 나타낸다.

축소 터널과 실제 터널의 발열량 \dot{Q}_M 과 \dot{Q}_F , V_M 과 V_F 사이의 관계는 다음과 같다[10].

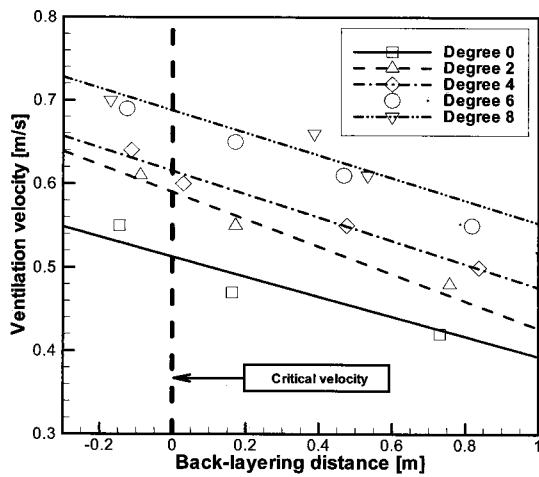
$$\frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2} \quad (4)$$

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

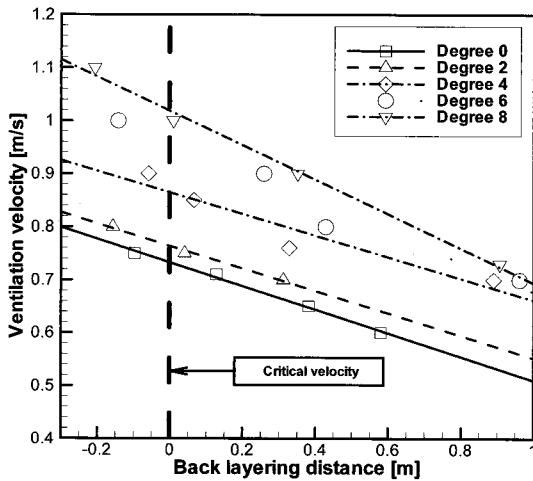
화원 크기의 증가에 따른 축소 모형 터널에서의 발열량과 실제 터널에서의 경사도에 따른 발열량 및 임계속도를 비교하여 Table 1과 2에 나타내었다.

3. 결과 및 토론

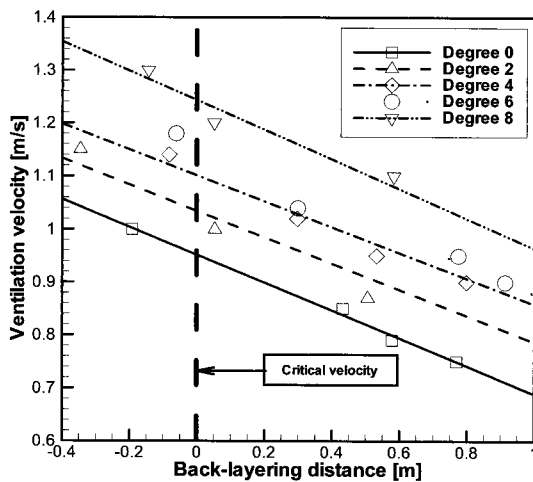
터널화재 발생시 높은 온도로 인한 주위의 공기와 밀도차에 의한 부력으로 인해 주위 공기의 유입이 이루어져 연기가 수직 상승하게 된다. 천정에 도달한 연기는 천정제트(ceiling jet)를 형성하게 되고 터널 길이 방향으로 전파된다, 이때 터



(a) methanol pool fire 6.5 cm



(b) acetone pool fire 6.5 cm



(c) n-heptane pool fire 6.5 cm

Fig. 2. Variation of ventilation velocity and back-layering distance

널 상류로의 역기류를 막기 위해 배연시스템이 환기모드에서 배기모드로 변경된다.

경사진 터널의 경우 화재발생시 상류로 이동하는 역기류는 수평터널에서 보다 더 큰 부력으로 인하여 굴뚝효과가 발생하게 되고 연기의 유동속도가 증가함에 따라 연기를 제어하는데 상대적으로 큰 배연속도를 요구한다.

본 연구에서는 터널 기울기에 따른 임계속도를 파악하기 위해 천정아래 일정 간격의 열전대를 설치하여 연기의 위치를 측정하였다.

Fig. 2는 6.5cm의 정사각형 풀을 사용한 메탄올, 아세톤, 헵탄의 배연속도에 따른 역기류 위치를 나타낸 것이다. 역기류 위치는 3회 반복 실험의 평균값을 통하여 나타내었다. 배연속도가 증가 할수록 역기류 길이는 감소하였고, 각도가 증가할수록 경사에 따른 굴뚝효과로 인해 보다 큰 배연속도를 요구하는 것을 알 수 있다.

경사터널에 대한 임계속도는 배연속도 증가에 따른 역기류의 길이 감소를 이용하여 화원 근처에서의 선형보간으로 계산하였다.

Fig. 3는 무차원 발열량 Q^* 에 따른 무차원 임계속도 V^* 의 변화를 나타내고 있다.

Wu와 Bakar는 터널의 수력직경을 특성길이로 제안하였으며, 무차원발열량(Q^*)와 무차원임계속도(V^*)를 다음과 같이 정의 하였다.

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

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

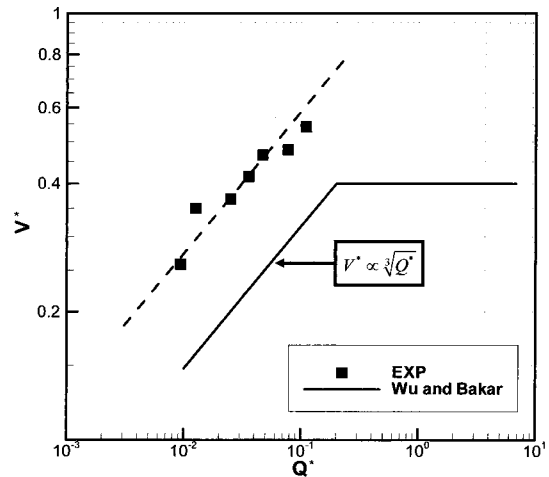


Fig. 3. Non-dimensional critical velocity as function of non-dimensional heat release rate

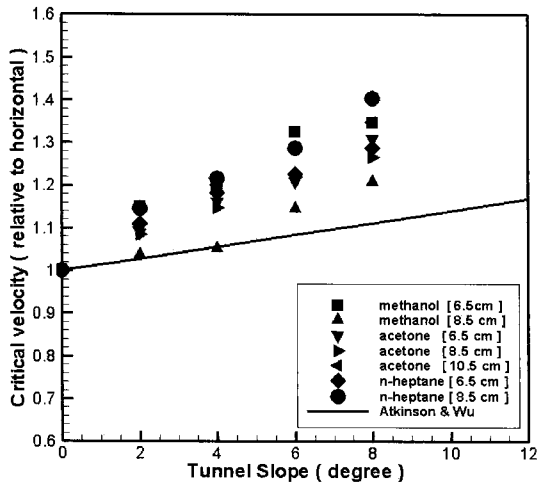


Fig. 4. Variation of Critical velocity versus Tunnel slope

여기서 ρ_0 는 주위 공기의 밀도, C_p 는 정압비열, T_0 는 주위 온도, g 는 중력가속도, \bar{H} 는 터널 단면의 수력직경을 나타낸다. 작은 발열량의 경우 V^* 는 Q^* 의 1/3승에 비례하고, 큰 발열량의 경우 V^* 는 Q^* 에 일정하게 된다[4].

본 실험에서는 무차원 발열량의 범위가 Q^* 가 0.2보다 작은 경우이며 터널의 각도가 0°일 때 Wu와 Bakar의 실험값과 비교하였다. 실험결과 무차원 임계속도 V^* 는 Q^* 의 1/3승에 비례하였다.

Fig. 4은 경사각에 따른 임계속도 변화를 나타낸 것이며, 경사 터널에서의 임계속도는 기울기가 증가함에 따라 임계속도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4에서 보는 바 같이, Atkinson과 Wu의 실험값과 본 실험에서의 결과는 많은 차이를 나타내고 있다. Atkinson과 Wu는 실험에서의 발열량을 일정하게 하기 위하여 프로판 버너를 사용하였고, 배연속도에 따라 연소율 변화에 큰 영향을 미치지 않는다.

본 실험에서는 연료로 메탄올, 아세톤, 헵탄을 사용한 풀화재를 사용하였다. 메탄올은 탄소 함유량이 적고, 연료 자체적으로 산소를 가지고 있기 때문에 배연속도 없이도 거의 완전 연소가 가능하다. 하지만 배연속도를 증가 시킬 경우 불필요한 산소 공급으로 화염 영역을 오히려 냉각시키는 원인이 되어 연소율은 감소하게 된다. 헵탄과 아세톤의 경우는 탄소의 함유량이 많고 발열량이 상대적으로 크기 때문에 완전 연소를 위해서는 산소가 많이 필요하다. 따라서 배연속도를 증가 시킬수록 화염영역으로 산소의 공급이 원활이 이루어지기 때문에 연소율을 증가시키는 원인이 된다[11].

이러한 풀화재의 특성으로 인하여 프로판 버너를 사용한 Atkinson과 Wu의 연구 보다 배연속도에 따라 발열량과 연소

율이 변화를 고려한 본 시험의 결과가 더 큰 기울기를 가진다. 그러므로 고정 발열량을 기준으로 산출한 임계속도를 사용하면 화재가 더욱 성장할 수 있는 원인이 될 수 있다. 따라서 경사터널화재 발생시 배연속도에 따라 연소율의 변화가 임계속도에 미치는 영향을 고려하는 것이 매우 중요하다.

본 실험에서는 무차원 발열량이 Q^* 가 0.2보다 작거나 같은 경우이며, 추후에 발열량이 높은 대형화재에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 경사터널 화재 발생시 기울기에 따른 임계속도 변화에 대하여 축소모형터널 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 터널의 경사가 증가함에 따라 굴뚝효과로 인하여 수평터널에서보다 더 큰 임계속도를 요구한다.
- (2) Wu등이 제시한 무차원 임계속도 V^* 는 무차원 발열량 Q^* 의 1/3승에 비례함을 알 수 있다.
- (3) 발열량을 고정시킨 Atkinson과 Wu가 제안한 식보다 배연속도에 따른 연소율과 발열량이 변화하는 본 실험의 결과는 더 큰 기울기를 가진다.
- (4) 배연속도는 화원의 연소율 변화에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 경사터널화재 발생시 연소율의 변화에 따른 임계속도의 영향을 고려하는 것이 중요하다.

5. 감사의 글

본 논문은 철도 종합 안전기술 개발사업(T305C1000005-05C0100-00512)과 2007년도 중앙대학교 우수 연구자 연구비에 의해 수행되었으며 관계제위에 감사드립니다.

참고 문헌

1. A. Beard, and R. Carvel (2004). "The handbook of tunnel fire safety"
2. Y. Oka, and G. T. Atkinson, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires," Fire Safety Journal, Vol.25, No.4, pp.305-322, 1995.
3. G. T. Atkinson, and Y. Wu (1996), "Smoke Control in Sloping Tunnels," Fire Safety Journal, Vol.27, No.4, pp.335-341.
4. 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.

5. 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*, 36: 569-596.
6. 이성룡, 김충익, 유홍선, 김혁순, 전명배(2004), “경사 터널내 화재 시 입계속도에 관한 실험적 연구,” *한국화재소방학회지*, 제18권 제1호., pp.49-53.
7. 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.
8. J.G. Quintiere (1997), “Principles of Fire Behavior, Delmar Publishers”.
9. Sardqvist, S. (1993), “Initial Fires”, ISSN 1102-8246
10. J.G. Quintiere, (1989), “Scaling Applications in Fire Research,” *Fire Safety Journal*, Vol.15, pp.3-29.
11. J.S. Roh, S.S. Yang, and H.S. Ryou, “Tunnel Fires : Experiments on Critical Velocity and Burning Rate in Pool Fire During Longitudinal Ventilation”, *Journal of Fire Sciences*, Vol.25, NO.2, pp.161-176.

(2007년 11월 19일 논문접수, 2008년 2월 12일 심사완료)