

[Research Paper]

축소터널 철도차량 화재 설계 및 임계속도 측정연구

박원희^{*,**†} · 황선우^{***} · 김창용^{****}

^{*}한국철도기술연구원 철도안전연구팀 책임연구원, ^{**}과학기술연합대학원대학교 교통시스템공학 교수,

^{***}한국철도기술연구원 철도안전연구팀 학연학생

Design of Fire Source for Railway Vehicles and Measurement of Critical Velocity in Reduced-Scale Tunnels

Won-Hee Park^{*,**†} · Sun-Woo Hwang^{***} · Chang-Yong Kim^{****}

^{*}Principal Researcher, Railroad Safety Research Team, Korea Railroad Research Institute,

^{**}Professor, Transportation System Engineering, Korea University of Science and Technology (UST),

^{***}Student Researcher, Railroad Safety Research Team, Korea Railroad Research Institute

(Received March 13, 2020; Revised June 1, 2020; Accepted June 8, 2020)

요 약

본 연구에서는 축소모형을 이용한 철도터널의 화재안전성 평가 실험시 필요한 축소모형 철도차량의 화재에 대한 설계를 수행하였다. 기존의 철도터널 축소모형 실험시 활용된 방법의 단점을 극복하기 위하여 화재부력을 위하여서는 메탄올 화원을 이용하였으며, 연기 가시화를 위하여서는 스모크카트리지를 활용하여 철도차량 화재를 모사하였다. 지하철 철도차량의 열방출률의 모사를 위하여 다양한 메탄올 연료 팬에 대하여 콘칼로리미터(ISO 5660) 및 저울을 이용하여 열방출률을 측정하였다. 설계된 축소모형 철도차량 화원을 이용하여 축소모형 철도터널에서의 임계속도를 측정하였다. 화재 임계속도는 축소모형 터널 상부에서의 온도 및 레이저를 이용한 가시화 측정결과 등을 종합적으로 검토하여 선정하였다.

ABSTRACT

In this study, the authors designed a reduced-scale railway vehicle fire, which was necessary for evaluating the fire safety of railway tunnels using a reduced model. To overcome the shortcomings of the methods used in conventional reduced-scale railway tunnel tests, the authors simulated the fire source of a railway vehicle using a methanol fire source for fire buoyancy, and a smoke cartridge for smoke visualization. Therefore, the heat release mass consumption rates of various methane trays were measured using a cone calorimeter (ISO 5660). The critical ventilation velocity in the railway tunnels was obtained using the designed fire source of the railway vehicle, which was evaluated by the measured temperature at the top of the tunnel as well as laser visualization.

Keywords : Reduced scale test, Rail vehicle fire, Smoke-control in railway tunnel, Heat release rate, Smoke

1. 서 론

국내 철도터널의 경우 도로터널보다 화재에 대한 위험성이 상대적으로 낮다. 이러한 이유로 기존의 국내 철도터널의 경우에는 화재 발생 시 화재연기를 제어하기 위한 제연설비인 송풍기가 설치되어있는 터널이 많지 않았다. 국내 최초의 고속열차 터널인 경부고속철도 터널의 예를 들 수 있는데, 경부고속철도 중 최장 터널로 약 20 km 정도 되는 금정터널의 경우에도 수직갱 및 사갱이 본선 터널과 연

결되어 있으나 화재 발생 시 대응을 위한 송풍기가 설치되어 있지 않다. 최근에 설계된 철도터널의 경우에는 철도차량에 화재가 발생하여 터널에 비상정차하였을 경우 승객의 피난을 위하여 열차 중 화재차량의 위치 및 피난 방향에 따라 터널 내에 설치되어 있는 송풍기를 가동하는 제연모드가 동작된다. 송풍기로 인한 터널의 기류형성으로 화재 연기를 승객의 피난 방향 반대로 제어되어야 하는데 화재 연기의 역류(Back-layering)가 생기지 않도록 임계속도 이상의 기류가 확보되도록 송풍기의 용량이 충분하여야 한다.

[†] Corresponding Author, TEL: +82-31-460-5358, FAX: +82-31-460-5579, E-Mail: whpark@krii.re.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

이러한 예로 수도고속철도인 울현터널 등을 예로 들 수 있다. 철도터널의 송풍기는 철도시설의 기술기준⁽¹⁾의 철도터널의 안전성 분석 매뉴얼⁽²⁾에 따라 철도터널의 안전성 분석의 결과에 의하여 설계되고 있다. 또한, 이러한 안전성 분석 결과는 축소모형으로 검증되어야 하도록 법적으로 규정⁽¹⁾하고 있다. 국내에서는 철도터널에 설치되어 운용되는 송풍기 및 화재안전성 평가가 솔안터널⁽³⁾, 대곡-소사 복선 전철⁽⁴⁾ 등에서 수행된 바 있다. Yao 등⁽⁵⁾은 축소모형 및 중 규모 크기의 터널에서 부족 환기 특성을 연구했다. 헵탄 및 자일렌(Xylene)을 연료로 사용하였으며, 터널 입구의 개구부 크기를 조정하여 다양한 환기 속도에 대한 영향을 검토하였다. Zhao 등⁽⁶⁾은 축소모형 실험을 이용하여 경사진 터널 화재 진압 시 소화 활동에 위험이 있는 연기의 역류 현상(Back-layering)을 재현하였으며 이 현상에 영향을 끼치는 요인을 분석한 바 있다. 터널뿐만 아니라 다양한 형태의 화재 현상을 연구하기 위한 축소모형 실험이 널리 사용되고 있다. 이러한 축소모형을 이용한 화재실험은 화재의 간단한 플룸(화염 기둥)에서 화재 진압에 이르기까지 화재 연구의 거의 모든 분야에 적용되어 왔다. 다양하게 적용되는 단순한 형태의 축소모형 실험은 화재 역학에 대한 이해도를 극적으로 증진시켜 왔다. 화재현상 축소 상사법칙은 프라우드 상사법(Froude scaling), 압력상사(Pressure scaling), 유추상사(Analogy scaling)와 같이 세 가지 유형으로 구분할 수 있다. Heskestad⁽⁷⁾는 주로 압력 모델링과 프라우드 상사법을 중심으로 축소모형 실험 기법에 대하여 논하였다. 이 두 기법들이 주로 사용되는 축소상사 법칙이지만 가장 폭넓게 사용되는 기법이 프라우드 상사법이다. Quintiere⁽⁸⁾는 천장 Jets, 연소율, 화염 확산, 밀폐화재에 적용된 축소 상사기법에 대한 화재연구에 대하여 정리한 바 있다. 축소모형 실험이 사용되는 주된 이유는 실 규모 터널에서 소요되는 실험 비용에 대비하여 경제적인 장점을 가지고 있기 때문이다. 지난 20년 동안 많은 모형 규모의 터널 화재 실험이 수행되었는데 Bettis 등⁽⁹⁾은 샬터널(Channel tunnel)에서 화재 시 고발열 차량(HGVs)을 운송하는 데 활용되는 열차의 일부에서의 화재현상을 모델링하기 위하여 축소모형 터널 내에서 9건의 화재 실험을 수행했다. Oka와 Atkinson⁽¹⁰⁾은 축소 모형터널에서 임계속도에 대한 연구를 수행했다. 또한, Wu와 Bakar⁽¹¹⁾은 임계 속도에 대한 터널의 기하학적 형상을 조사하기 위한 연구를 수행했다. 또한, Ingason⁽¹²⁾은 개구부가 화재 크기에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 1:10 축소 모델 철도차량 터널 화재실험을 수행했다. Li 등⁽¹³⁻¹⁹⁾은 임계속도, 역류길이⁽¹³⁾, 천정의 최대 연기 온도^(14,15), 교차통로에서의 연기제어⁽¹⁶⁾, 긴 터널 안 구조 구역 연기 제어⁽¹⁷⁾에 관하여 여러 차례의 축소 모형 터널 화재 실험을 수행했다. Lönnemark 등⁽¹⁸⁾은 Brunsberg의 터널 실험⁽¹⁹⁾의 화재 실험을 준비하고자 1:3 비율의 축소 지하철 화재실험을 수행했다.

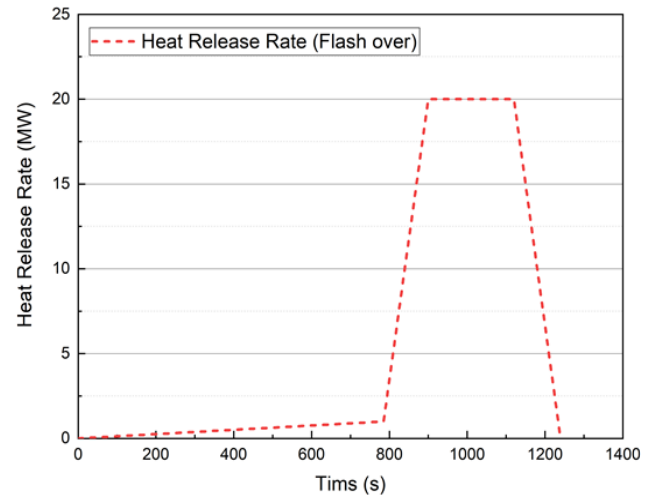


Figure 1. Heat release rate for new subway car⁽²⁾.

2. 본 론

2.1 축소모형 철도차량 화원

“철도시설의 기술기준⁽¹⁾”에서 철도차량 화재가 발생하여 터널 내에 정차하였을 때의 위험도를 정량적으로 평가하여 안전성을 확보하도록 하고 있다. 해당 기술기준의 부속서인 “철도터널의 화재안전성 분석 방법 매뉴얼⁽²⁾”에 차량 종류별 화재 크기를 설정하고 있으며, 본 연구에서는 열차 화원의 최대발열량을 20 MW로 설정하였다. 철도차량에 화재가 발생하였을 경우 화재로 인한 열뿐만 아니라 연기가 같이 발생한다. 축소모형 실험 시 유연한 실험 설계 및 수행이 가능하도록 화재로부터 발생하는 열과 연기의 분리를 고려하여 설계하였다. 또한, 축소모형을 이용한 터널 화재 실험 시에 연기가 발생하는 헵탄 및 가솔린 등의 액체연료를 사용하였을 경우 터널 내부가 오염될 우려가 있으므로, 반복적인 실험을 수행하기에는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 완전연소로 연기가 거의 발생하지 않는 메탄올을 사용하여 화재 시 발생하는 화재 열을 모사하였다. 신형 전동차의 최대 열방출률은 20 MW이며, 프라우드상사⁽⁹⁾로 축소모형에 적용되는 최대 열방출률은 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_f (l_m / l_f)^{5/2} = 20,000 \text{ kW} (1/50)^{(5/2)} = 1.13 \text{ kW} \quad (1)$$

여기서 \dot{Q} 및 l 은 각각 열방출률 및 길이를 나타내며 하첨자 f 는 실규모(Full scale)이며, m 은 모델을 나타낸다. 큰 연소 면적을 가진 액체연료의 열방출률은 연료를 담은 팬의 면적에 따라 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다⁽²⁰⁾.

$$\dot{Q} = H_c m''_{\infty} (1 - e^{-\theta}) A \quad (2)$$

여기서 H_c 는 연료별 연소열이며 m''_{∞} 및 θ 는 질량소모율을

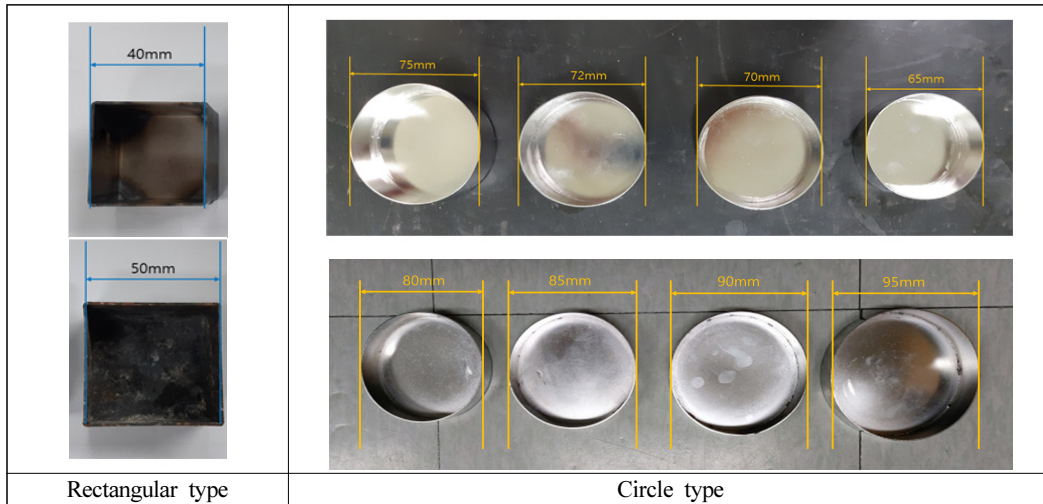


Figure 2. Various fuel tray.

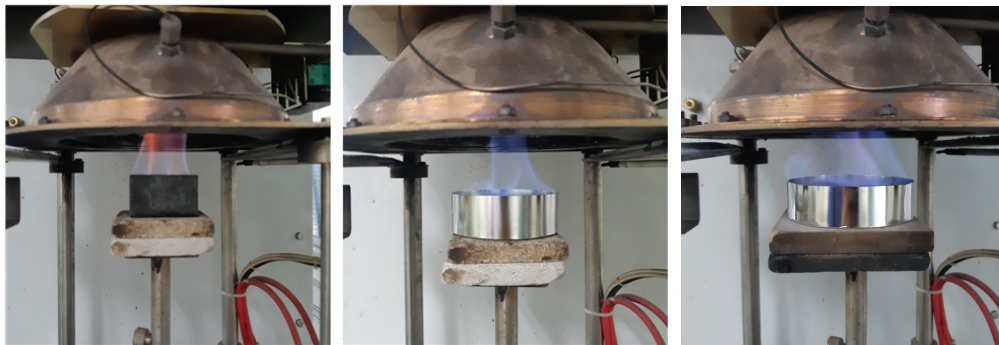


Figure 3. Measurement of heat release rate with cone calorimeter.

도출하기 위한 연료별 특성값이며 A 는 연료팬의 면적이다.

그러나 위의 식은 비교적 넓은 면적에서 만족하는 식이므로 이에 대한 검증이 필요하다. 이를 위하여 다양한 연료팬의 크기와 형태에 따라 ISO 5660 규격의 콘칼로리미터를 이용하여 열방출률을 측정하였다. 여기서 콘히터를 사용하지 않고 불꽃을 이용하여 강제 발화를 시킨 후 연소 시 발생하는 연소 가스를 포집하여 산소소모량을 측정하여 계산하는 산소소모법과 연료 팬 아래에 저울을 설치하여 측정하는 질량소모율을 이용하여 열방출률을 측정하였다. Figure 2와 같이 정사각형 연료 팬은 한 변이 40 mm, 50 mm인 높이 30 mm의 연료 팬 2개와 지름이 65 mm, 70 mm, 72 mm, 75 mm, 80 mm, 85 mm, 90 mm, 95 mm인 높이 25 mm의 원형 연료 팬 8개로 발열량을 측정하였다. 연료는 메탄올을 사용하였고, 높이 10 mm만큼 채워 3회 반복 수행하였다. Figure 3은 콘칼로리미터에서 메탄올 연료 팬별 열방출률을 측정하는 사진이다.

Table 1은 다양한 메탄올 연료 팬별 측정된 열방출률 및 지속시간을 보여주고 있다. 열방출률은 앞에서 언급한 바와 같이 연소로 인하여 소모된 질량소모율에 연소열을 곱하여 구한 열방출률과 콘칼로리미터에서 후드로 포집된 연소가

스를 분석하여 구한 열방출률 (괄호값)의 두 가지 값으로 표기하였다. 두 가지 방법의 측정 평균 열방출률을 비교하였을 때 질량소모율로 구한 열방출률을 기준으로 계산한 콘칼로리미터로 구한 열방출률의 상대오차가 7.68, 12.82, 6.33, 0.36, 12.97, 0.31, 2.55, 2.36, 3.74, 2.86%로 나타났다. 식 (2)의 화원면적 산출식에 의하여 구한 65 mm의 원형 팬의 경우 실측 열방출률이 평균 0.65 kW로 1.13 kW대비 43%의 오차로 본 연구에서 고려한 비교적 작은 연소면적의 열방출률을 제대로 예측할 수 없다는 것을 확인하였다. 콘칼로리미터의 풍도에서의 압력 측정, 산소농도 측정 등 다양한 오차를 포함할 수 있는 산소소모법으로 구한 열방출률보다 일정하게 연료가 소모되는 질량 질량소모율로 구한 열방출률을 고려하는 것이 좋을 것으로 판단하였으며, Figure 4는 질량소모율로 구한 열방출률 측정값이다. 이를 선형 보간한 그래프를 같이 도시하고 있는데 연료 팬 2종은 사각형으로 8종류는 원형으로 표시하였다. 연료가 메탄올일 때 1.13 kW의 열방출률을 나타내는 화원 연료 팬의 면적은 47.17 cm²로 결정하였으며, 이에 해당하는 연료 팬은 가로 120 mm × 세로 40 mm × 높이 40 mm 크기로 제작하였다. 면적이 48 cm²인 사각 팬의 선형화된 식으로 HRR을 산출

Table 1. Heat Release Rate for Various Methanol Trays

Type		Rectangular				Circle					
Area [cm ²] [mm]		16 [40 × 40]	25 [50 × 50]	33.18 [D = 65]	38.48 [D = 70]	40.71 [D = 72]	44.18 [D = 75]	50.27 [D = 80]	56.75 [D = 85]	63.62 [D = 90]	70.88 [D = 95]
HRR. (kW)	Test 01	0.45 (0.36)	0.71 (0.61)	0.656 (0.64)	0.75 (0.73)	0.77 (0.78)	0.89 (0.81)	1.22 (1.18)	1.40 (1.37)	1.59 (1.56)	1.83 (1.75)
	Test 02	0.45 (0.42)	0.70 (0.60)	0.660 (0.68)	0.72 (0.73)	0.77 (0.90)	0.83 (0.81)	1.25 (1.20)	1.41 (1.38)	1.61 (1.54)	1.83 (1.78)
	Test 03	0.45 (0.48)	0.71 (0.64)	0.640 (0.76)	0.73 (0.75)	0.78 (0.95)	0.82 (0.91)	1.20 (1.18)	1.39 (1.34)	1.68 (1.61)	1.80 (1.77)
	Avg.	0.45 (0.42)	0.71 (0.62)	0.65 (0.70)	0.73 (0.74)	0.78 (0.88)	0.85 (0.84)	1.22 (1.19)	1.40 (1.37)	1.63 (1.57)	1.82 (1.77)
Duration Time Avg. (s)		547	466	698	704	671	684	589	520	581	579

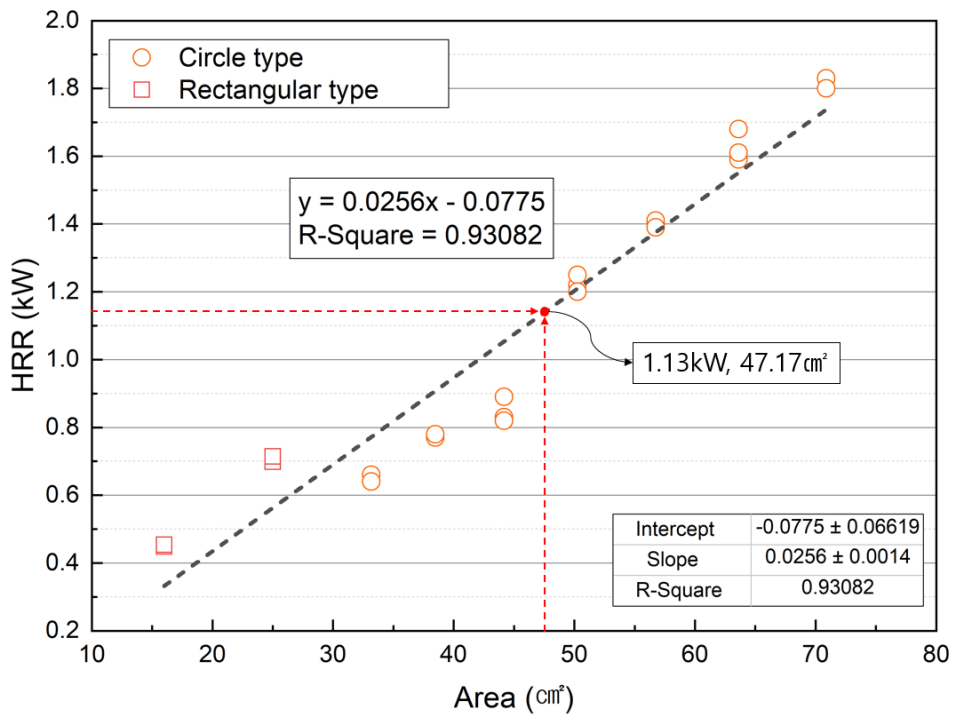


Figure 4. Heat release rate for various surface area.

하였을 경우는 1.15 kW이며 축소 전 실체 크기에서 열방출률 20.35 MW에 해당한다. 설계 값 20 MW와의 오차는 1.8%이다.

Dlugogorski와 Wilson⁽²¹⁾은 소형 pool 화재에서의 연료 상단부와 연료팬의 차이(Lip height)에 화원의 크기와 형태가 영향을 받게 된다고 하였다. 본 연구에서 제안한 연료 팬에서 연료의 높이에 따른 높이에 따른 열방출률 차이를 실험하였으며 Table 2에 연료 높이에 따른 열방출률 측정결과이다. Table 1에서와 같이 팔호안의 값은 콘칼로리미터로 측정된 값이다. 연료팬 끝의 높이는 40 mm이며, Figure 5와 같이 연료의 높이는 각각 10 mm와 20 mm 두가지 조건으

로 직전의 연료 팬 시험과 동일하게 수행하였다. 연료 높이 10 mm, 팬 끝의 높이가 30 mm일 때, 질량소모율로 산출한 평균발열량은 1.206 kW이며, 연료가 모두 소모되는 시간은 평균 527 s로 측정되었다. 연료 높이 20 mm, 팬 끝의 높이가 20 mm일 때, 질량소모율로 산출한 평균발열량은 1.25 kW이며, 연료가 모두 소모되는 시간은 평균 1163 s로 나타났다. 연료 팬 끝의 높이가 20 mm일 때는 30 mm보다 평균 발열량이 약 3.5% 높게 측정되었다. Figure 6은 연료 높이에 따른 질량소모율을 시간대별로 평균내었다. 점화 초기 20 s와 소화직후 20 s를 제외한 연료 높이에 따른 mass loss rate (g/s)의 평균값은 연료높이 10 mm, 20 mm일 때 각각

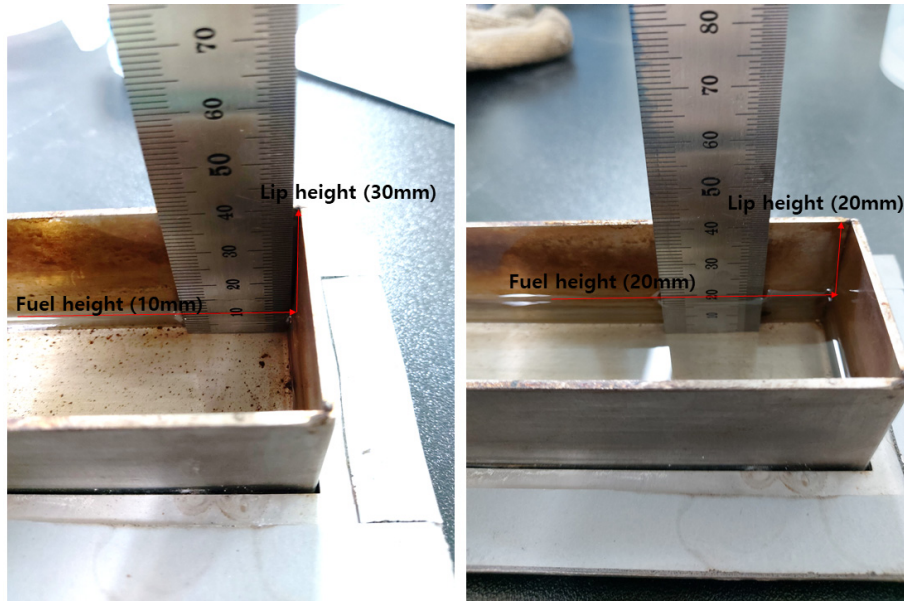


Figure 5. Mass loss rate according to fuel height.

Table 2. Heat Release Rate of Various Fuel Lip Heights

Type		Rectangular	
Area [cm ²] [mm]		47.17 [120 × 40]	
Fuel height [mm]		10	20
HRR. (kW)	Test 01	1.20 (1.16)	1.24 (1.21)
	Test 02	1.21 (1.17)	1.26 (1.23)
	Test 03	1.21 (1.19)	1.25 (1.22)
	Avg.	1.206 (1.17)	1.25 (1.22)
Duration time avg. (s)		527	1163

0.0606 g/s, 0.0604 g/s, 표준편차는 각각 0.005, 0.004로 나타났다. 본 연구의 축소모형 터널에서 사용된 연료의 높이는 10 mm로(연료팬 끝 30 mm) 동일하게 수행하였으며, 연료팬의 연료가 모두 소모되도록 하였기에 연료의 팬 끝의 높이가 점차 줄어들게 된다. 따라서 10 mm의 연료가 발화시점부터 모두 소모되는 시점까지의 발열량을 평균으로 측정하였고, Figure 6과 같이 점화 이후 연료가 소모되는 구간에서는 연료소모율이 일정하게 나타나므로 연료 팬 끝 높이에 따른 영향은 낮다고 판단된다. 제작된 연료팬의 화재열방출률은 측정된 질량소모율을 이용하였을 경우는 약 1.21 kW (실규모 21.3 MW), 연소가스를 이용하여 측정하였을 경우는 1.17 kW (실규모 20.7 MW)로 설계값 20 MW 대비 각각 약 3.4%, 6.6% 과설계되었다.

기존의 스모크 오일을 연소시키는 스모크 제너레이션을 사용하면 연기를 주입하는 가스의 유량과 온도 등의 변수가 발생하여 축소모형에서 화재 현상을 모사할 때, 유동이 왜곡되는 현상이 나타날 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 터널 내부에 설치할 수 있고, 추가

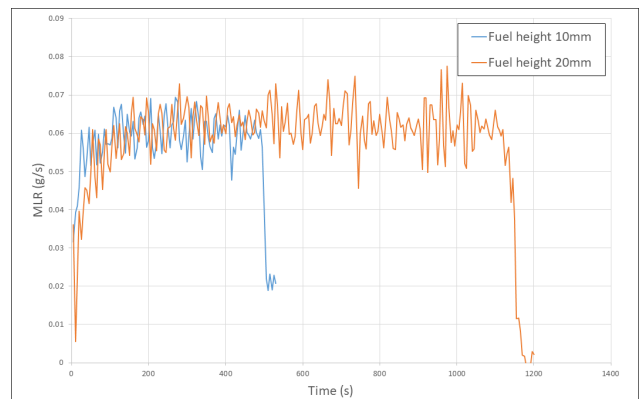


Figure 6. Mass loss rate of various fuel lip heights.

Table 3. Smoke Cartridge Specification

Item	Operating time	Diameter	Length
Smoke emitter	90 s	1.27 cm	2.86 cm

공기의 유입이 없는 카트리지를 이용하였다. 해당 스모크 카트리지는 고체 분말로 원통 모양이며, 직경 약 1.27 cm, 높이 약 2.86 cm의 크기로 되어있다. 스모크 카트리지 상단 표면에 화염을 접촉하면 카트리지 분말이 연소하면서 화염이 없이 다량의 연기가 발생한다. Table 3은 제조사에서 제공하는 스모크 카트리지의 규격이다. 화재의 열원을 주기 위한 연료팬과 스모크 카트리지로 인한 연기발생의 위치가 상이할 수 있으나 온도 및 가시화를 통한 임계속도 산정에는 무리가 없다라고 판단된다.

Figure 7은 화재가 발생한 철도차량(지하철) 설계 최고 열발출률 20 MW를 1/50 스케일로 모사하기 위한 철도차량 화재 모형이다.

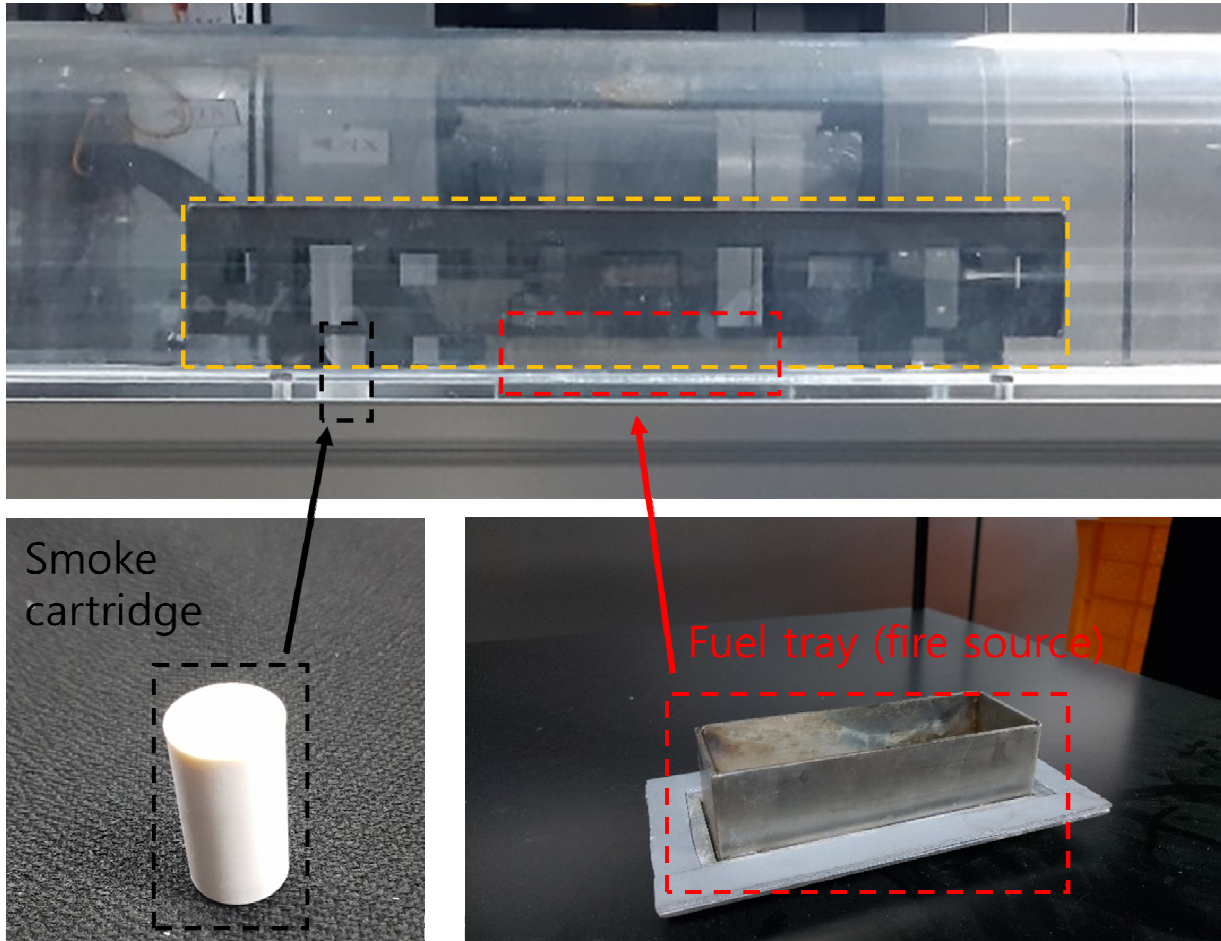
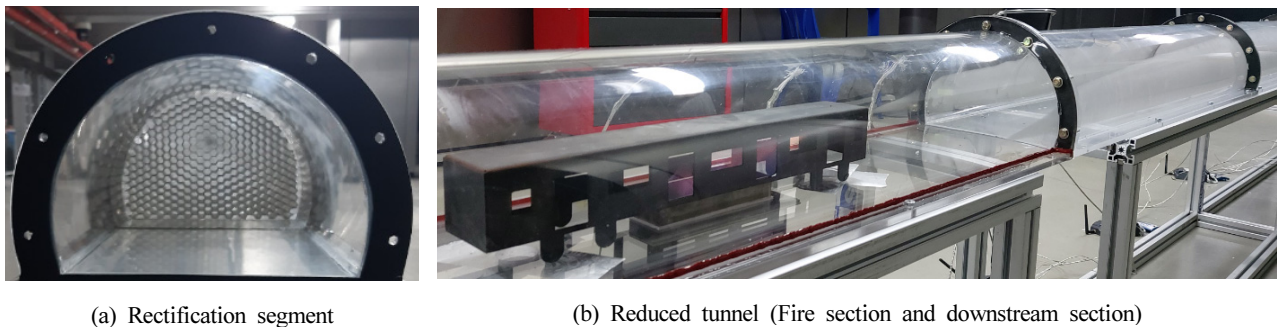


Figure 7. Reduced scale model of railway vehicle for fire source in reduced scale tunnel.



(a) Rectification segment

(b) Reduced tunnel (Fire section and downstream section)

Figure 8. Reduced scale tunnel for measurement of critical velocity.

2.2 임계 속도 측정

터널 내부의 화재 발생 시 화재 연기의 역류 현상을 방지하기 위한 터널 기류의 임계 속도를 측정하기 위하여, Figure 8과 같이 실제 터널 350 m 규모를 1/50 스케일로 축소한 축소 모형 철도 터널을 제작하였다. 축소한 철도 차량에 적용되는 화원을 기준으로, 상류 3 m는 가압 유동의 정류를 위한 허니컴 메쉬 구간 1 m, 기본 상류 구간 2 m, 중간부의 철도차량 화원 구간 1 m, 기본 하류 구간 3 m로, 총 7 m 규모의 축소 터널 모형을 제작하였다.

총 7 m 중 상류 3 m에서 화원 구간을 포함하여 하류 5 m까지 4구간, 11군데의 지점에서 Figure 9와 같이 화원의 천장 부분 원점을 기준으로 -120 cm, -80 cm, -40 cm, -20 cm, 0 cm, +20 cm, +40 cm, +80 cm, +120 cm, +180 cm, +220 cm 지점에 열전대를 배치하여 온도를 측정하였다. 축소 위치에서의 측정에 따른 실제 위치는 철도 차량 화원 기준 -60 m에서 +110 m까지 이다.

앞서 수행한 축소 화원 설계를 적용하여, 철도 차량 모형 안쪽으로 메탄올 화원을 설치하여 화원을 발생시켰다.

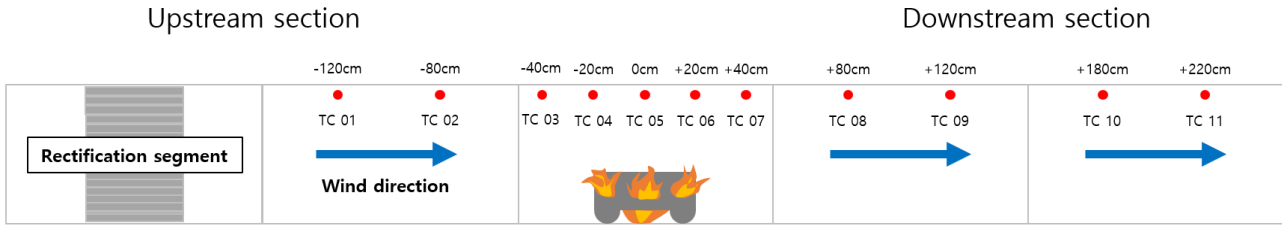


Figure 9. Schematic diagram of thermocouple position.

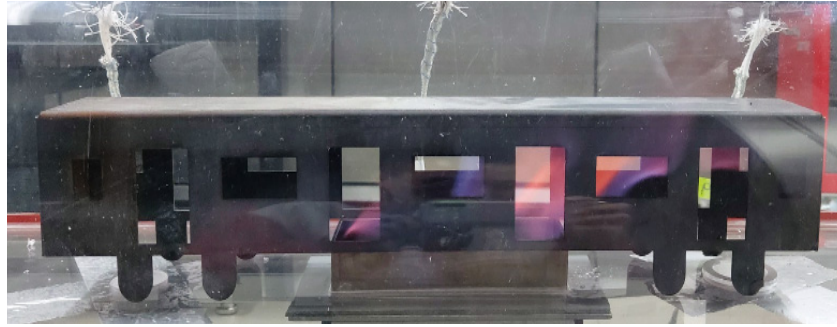


Figure 10. Fire in reduced scale railway vehicle at 2.5 m/s of tunnel flow.

터널 단면의 위치별로 속도가 일정하지 않으므로 보다 정확한 터널 기류의 속도를 판단하기 위하여, 260~1300 LPM 측정이 가능한 오리피스 유량계를 사용하였다. 프라우드 상사로 축소 모형에 적용되는 터널 기류 속도를 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$V_m / V_f = (l_m / l_f)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 V는 터널 기류 속도, l_m / l_f 은 축소비를 뜻한다.

실제 터널 단면적은 60.49 m²이고, 1/50 스케일로 축소하였을 경우 축소모형 터널 단면적은 0.02413 m²이다. 이에 해당하는 축소 실험에서의 풍량은 2.5 m/s일 경우 511 LPM, 2.2 m/s는 450 LPM, 2.0 m/s는 410 LPM 이다. Figure 10은 2.5 m/s일 때의 화염 거동을 나타내는 사진이다. 터널 기류 속도별로 각각 0.0 m/s, 2.0 m/s, 2.2 m/s, 2.5 m/s를 적용하여 온도 분포 측정 실험을 수행하였으며, 화재 연기의 역류 현상을 판단할 수 있는 지점을 축소 모형 철도 차량의 상류 부분인 TC-04 (화원 기준 -20 cm) 위치로 선정하였다. Figure 11는 TC-01부터 TC-11에서의 평균 온도 데이터를 도시하며, 여기서 평균 온도는 화재 발생 후, 화원 전소까지 측정된 온도를 의미한다. 터널 기류 속도 2.2 m/s와 2.5 m/s에서는 TC-04의 온도 변화가 발생하지 않았으나, 터널 기류 속도 2.0 m/s에서는 약간의 온도 상승(평균 15 °C 정도 상승)을 확인할 수 있었다. 터널 기류 속도가 0.0 m/s일 때는 철도 차량의 화재 구간을 중심으로 상·하류가 대칭적인 온도 분포를 볼 수 있었고, 2.0 m/s 이상의 터널 기류 속도의 경우, 화원 기준 상류 구간이 하류 구간보다 비교적 낮은 온도 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

터널 기류 속도를 2.0 m/s에서 단계별로 각각 높게 적용함에 따라 철도 차량의 화재 구간 앞쪽, 즉, 화원 기준 상류 구간과 0 cm 지점의 화재 발생 위치에서 온도는 낮아졌으며, 터널 기류 속도가 빨라질수록 화원 기준 하류 구간의 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향성으로 실제 터널에서 화재가 발생할 경우, 터널 내부의 온도 분포 경향을 파악할 수 있다. 임계 속도의 선정은 Figure 12에서 보여준다. 화재 연기의 역류 현상을 검토하기 위하여 가장 중요한 위치인 TC-04 (상류 20 cm, 축소 철도 차량의 상단 부분) 위치에서의 시간대별 터널 기류 속도별로 온도 분포를 통해서도 확인할 수 있다. 터널 기류 속도 0.0 m/s일 경우, 화재 발생 시점부터 최고 온도 220 °C로 비교적 높게 측정되었으며, 터널 기류 속도 2.0 m/s일 경우, 화재 발생 시점 120 s부터 역류가 발생하기 시작하였으며, 최고 온도 180 °C로 측정되었다. 터널 기류 속도 2.2 m/s일 경우, 3 °C가량의 미비한 온도 상승을 확인할 수 있었으나, 역류라고 판단될 만큼의 온도 상승으로는 판단할 수 없다고 사료된다.

터널 내부의 온도 측정으로 확인한 임계 속도를 연기 거동 가시화로 연기의 역류 발생을 확인하였다. Figure 13과 같이 축소 모형 터널 윗부분 약 1.5 m 위에 레이저 가시화 실험장치를 위치시켰으며, 터널 내부에는 철도 차량 모형과 화원을 위치시켰다. 화원 및 열차위치, 터널 길이는 온도 측정 실험 조건과 같으며, 화원의 부력에 의한 연기의 거동을 살피기 위한 목적으로 철도 차량 안쪽으로 스모크 카트리지를 설치하여 연기를 발생시켰다. 연기 가시화 실험에는 터널 기류 속도 0.0 m/s, 2.2 m/s를 적용하였다.

Figure 14는 화재 연기의 거동을 분석하기 위하여, 레이

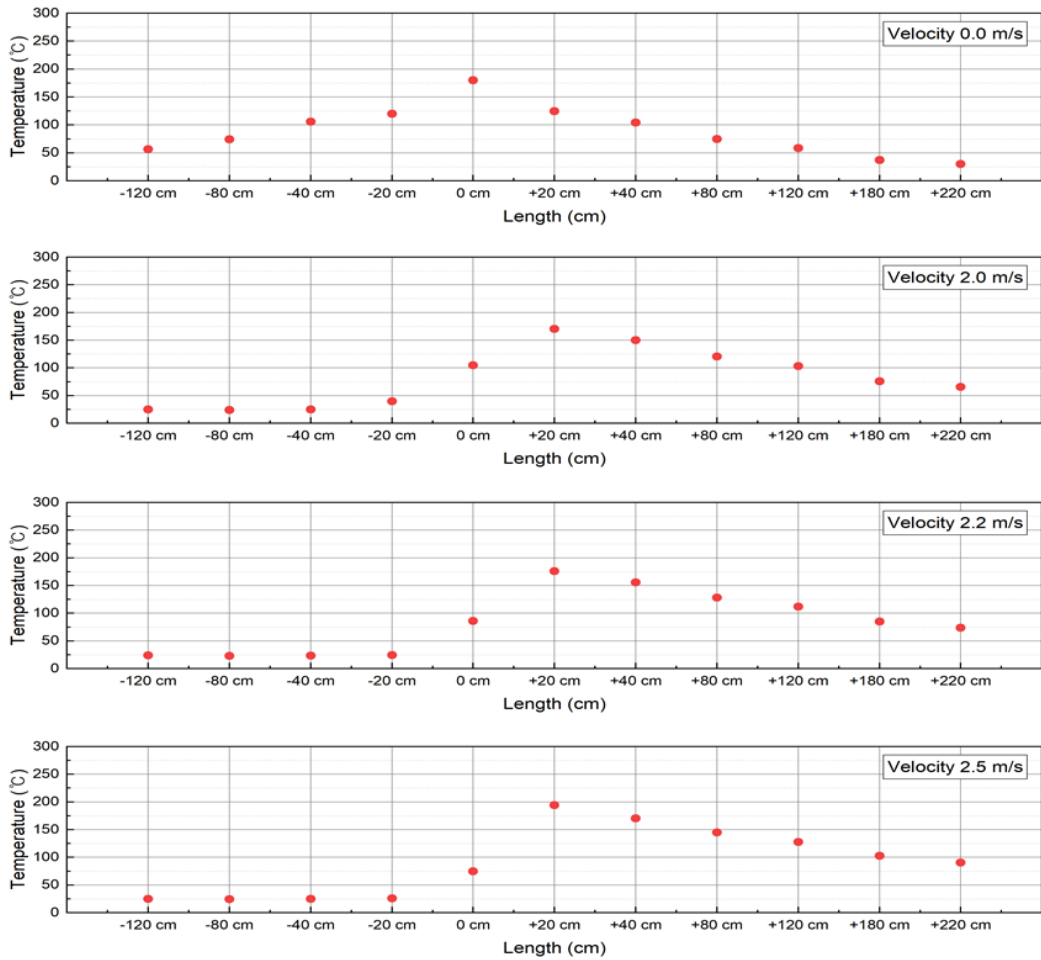


Figure 11. Averaged temperature distributions for various tunnel flow velocities.

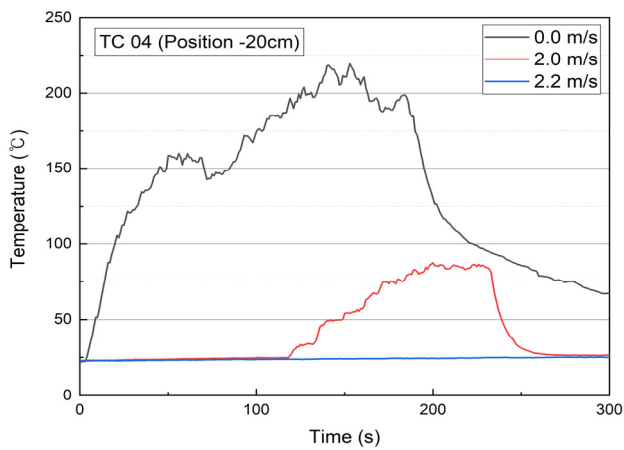


Figure 12. Comparison of back layering phenomena.

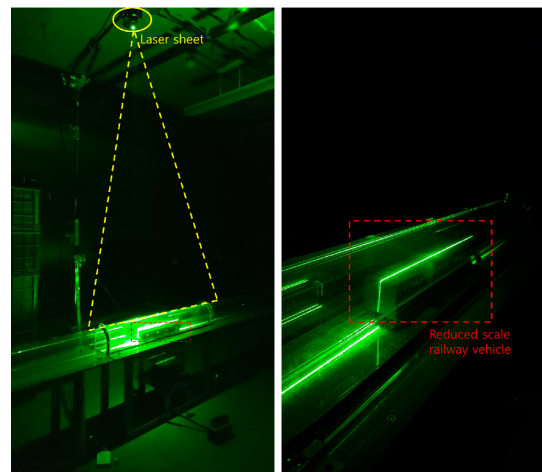


Figure 13. Visualization setting.

저 가시화를 적용하였을 때를 나타낸다. 터널 기류 속도는 각각 0.0 m/s, 2.2 m/s를 적용하였으며, 터널 기류 속도 0.0 m/s 적용 시에는 연기 거동이 화원의 부력에 지배되어 상하류 모두 골고루 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다. 터널 기류 속도 2.2 m/s 시에는 가시적으로 확인할 수 있듯이,

화원의 부력이 영향을 미치지 못하고 연기의 역류가 억제되는 것으로 판단된다. 이를 통하여 20 MW 크기의 화재 차량의 임계 속도는 2.0~2.2 m/s 사이에 있는 것을 확인할 수 있으며, 보수적으로 볼 때는 2.2 m/s로 선정할 수 있다.

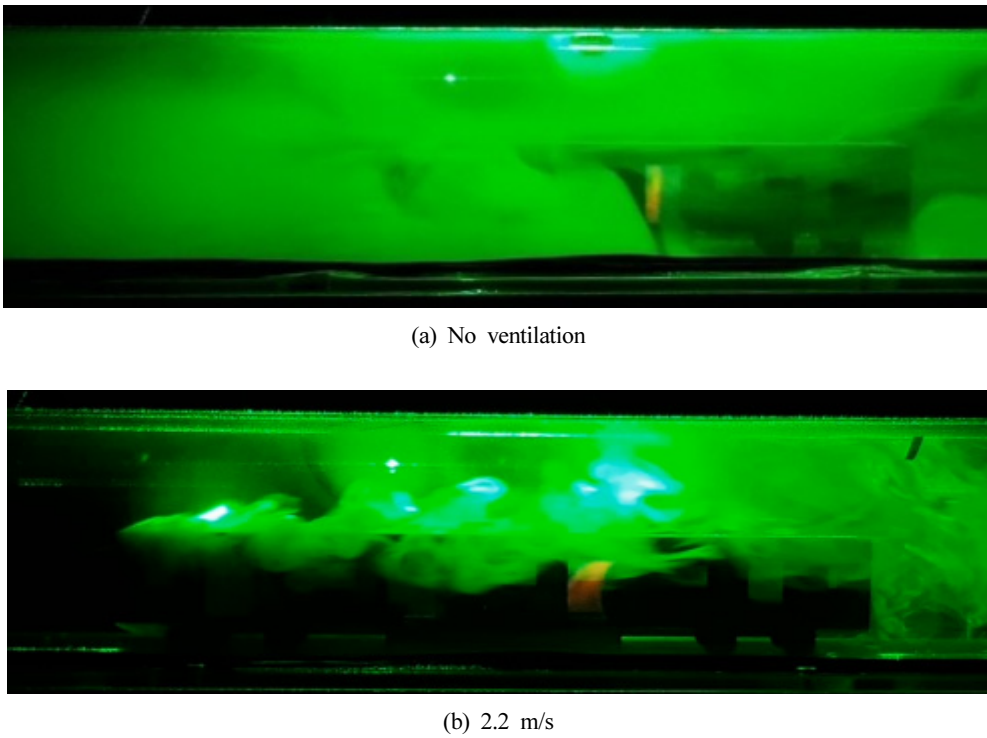


Figure 14. Visualization of reduced scale tunnel fire for various tunnel flow velocities.

3. 결론

축소모형을 이용한 철도 터널의 화재 안전성 평가에 필요한 철도 차량의 화재에 대한 설계를 수행하였다. 기존의 철도 터널 축소모형 실험 시 활용된 방법의 단점을 극복하기 위하여 화재 부력적용한 메탄올 화원과 스모크 카트리지를 이용한 연기 가시화를 수행하였다. 메탄올을 이용하여 다양한 화원 팬에 대하여 콘칼로리미터(ISO 5660) 및 저울을 이용한 연료 소모율을 이용하여 열방출률을 측정하였고, 스모크 카트리지를 활용하여 철도 차량 화재에 대한 화재 연기 거동을 모사하였다. 연료가 메탄올일 때 1.13 kW의 열방출률을 나타내는 화원 연료 팬의 면적은 47.17 cm²로 결정하였으며, 이에 해당하는 연료 팬은 가로 120 mm × 세로 40 mm × 높이 40 mm 크기로 제작하였다. 면적은 48 cm²인 사각 팬으로 선형화된 식으로 구하였을 경우는 1.15 kW이며 축소 전 실제 크기에서의 열방출률을 측정한 결과 21.3 MW로 설계값 20 MW와의 오차 3.4%를 나타냈다. 본 논문에서 측정한 열방출률은 터널내부에 위치한 철도차량의 화재를 정량화하기 위하여 환기가 원활한 콘칼로리미터 시험조건에서 수행되어 연료지배형 화재로 분류될 수 있다. 그러나 터널 내에 위치한 철도차량의 경우 화재발생 위치, 유리창 파괴 및 문 개방 및 터널내 제연 기류속도 등 다양한 조건에 따라 열방출률이 측정된 환기조건이 상이할 수 있어 화재크기가 측정된 값과 상이할 수 있다. 하지만 이러한 환기조건은 터널 내외에 위치한 실제 차량에도 매우 틀리므로 본 연구에

서 정량화한 철도차량 화재의 풀화재는 의미가 있다.

터널 내부의 화재 발생 시 화재 연기의 역류 현상을 방지하기 위한 터널 기류의 입계 속도를 측정하기 위하여, 실제 터널 350 m 규모를 1/50 스케일로 축소한 축소모형 철도 터널을 제작하였다. 터널 기류 속도가 높을수록 철도 차량의 화원 기준 상류 구간과 화원 상부 위치는 온도가 낮아졌다. 터널 기류 속도가 빨라질수록 화원 기준 하류 구간의 온도 분포가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 터널 기류 속도 2.0 m/s일 경우, 화재 발생 시점 120 s부터 역류가 발생하기 시작하였으며, 터널 기류 속도 2.2 m/s일 경우, 3 °C 가량의 미비한 온도 상승을 확인할 수 있었으나, 역류라고 판단될 만큼의 온도 상승으로는 판단할 수 없었다. 연기 거동을 시각화하는 레이저 가시화 실험을 진행하였고, 2.2 m/s일 경우, 화원의 부력이 영향을 미치지 못하고 연기의 역류가 억제되었으며, 20 MW 크기의 화재 차량의 입계 속도는 2.0~2.2 m/s 사이로 판단된다.

본 연구에서는 축소모형 철도차량의 화원에 대한 설계를 수행하였으며 이를 이용한 터널에서의 제연속도를 검증하였으며 이를 활용하여 축소모형을 이용한 철도터널에서의 화재 안전성 평가보다 정확하게 수행할 수 있을 것으로 평가된다.

후 기

본 연구는 소방청의 “현장중심형 소방활동지원 기술개발

발 사업(MPSS-소방안전-2015-66)”, “신안산 선 복선전철 터널 축소모형 모의화재 실험 연구” 및 철도연 주요 사업인 “철도차량 내 ESS 단위 화재안전 향상기술개발”의 지원을 받아 게재되었습니다.

References

1. Ministry of Construction & Transportation, “Technical Standard of Railway Facility” (2019).
2. Ministry of Construction & Transportation, “Manual of Fire-Safety Analysis Method in Railway Tunnel” (2014).
3. D. H. Kim, W. -H. Park, “Experiment by Using Reduced Scale Models for the Fire Safety of a Rescue Station in Very Long Tunnel in Korea”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 3-4, p. 303 (2006).
4. Korea Railroad Research Institute, “Daegok-Sosa Double Track Railway Underground Station and Tunnel Fire Model Test” (2018).
5. Y. Yao, Y. Z. Li, H. Ingason and X. Cheng, “The Characteristics of Under-ventilated Pool Fires in both Model and Medium-scale Tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 87, pp. 27-40 (2019).
6. S. Zhao, Y. Z. Li, M. Kumm, H. Ingason and F. Liu, “Re-direction of Smoke Flow in Inclined Tunnel Fires”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 113-127 (2019).
7. G. Heskestad, “Physical Modeling of Fire”, *Journal of Fire & Flammability*, Vol, 6, pp. 253-273 (1975).
8. J. G. Quintiere, “Scaling Applications in Fire Research”, *Fire Safety Journal*, Vol, 15, pp. 3-29 (1989).
9. R. J. Bettis, S. F. Jagger and Y. Wu, “Interim Validation of Tunnel Fire Consequence Models: Summary of Phase 2 Tests”, *Health and Safety Executive* (1993).
10. Y. Oka and G. T. Atkinson, “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 25, pp. 305-322 (1995).
11. Y. Wu and M. Z. A. Bakar, “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires using Longitudinal Ventilation Systems – A Study of the Critical Velocity”, *Fire Safety Journal*, Vol. 35, pp. 363-390 (2000).
12. H. Ingason, “Model Scale Railcar Fire Tests”, *Fire Safety Journal*, Vol 42, No. 4, pp. 271-282 (2007).
13. Y. Z. Li, B. Lei and H. Ingason, “Study of Critical Velocity and Backlayering Length in Longitudinally Ventilated Tunnel Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 45, pp. 361-370 (2010).
14. Y. Z. Li, B. Lei and H. Ingason, “The Maximum Temperature of Buoyancy-driven Smoke Flow Beneath the Ceiling in Tunnel Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 46, No. 4, pp. 204-210 (2011).
15. Y. Z. Li and H. Ingason, “The Maximum Ceiling Gas Temperature in a Large Tunnel Fire”, *Fire Safety, Journal* Vol. 48, pp. 38-48 (2012).
16. Y. Z. Li, B. Lei and H. Ingason, “Theoretical and Experimental Study of Critical Velocity for Smoke Control in a Tunnel Cross-Passage”, *Fire Technology*, Vol. 49, No. 2, pp. 435-449 (2013).
17. Y. Z. Li, B. Lei and H. Ingason, “Scale Modeling and Numerical Simulation of Smoke Control for Rescue Stations in Long Railway Tunnels”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 101-131 (2012).
18. A. Lönnemark, J. Lindstrom and Y. Z. Li, “Model-scale Metro Car Fire Tests”, SP Report 2011-33. SP Technical Research Institute of Sweden (2011).
19. A. Lönnemark, J. Lindstrom, Y. Z. Li, A. Claesson, M. Kumm and H. Ingason, “Full-scale Fire Tests with a Commuter Train in a Tunnel”, SP Report 2012-05, SP Technical Research Institute of Sweden (2012).
20. SFPE Engineering Guide, “Piloted Ignition of Solid Materials Under Radiant Exposure”, *Society of Fire Protection Engineers*, Bethesda, Maryland, January (2002).
21. B. Z. Dlugogorski and M. Wilson, “Effect of Lip Height on Properties of Small Scale Pool Fires”, *International Association for Fire Safety Science*, AOFST 2 (1995).