

철도화재 안전성능 평가 설비 구축 현황



이 덕 희
한국철도기술연구원 철도환경 연구실
선임연구원



권 태 순
한국철도기술연구원 시험인증 센터
선임연구원



박 원 희
한국철도기술연구원
철도환경연구실
선임연구원



김 학 범
한국철도기술연구원
철도환경연구실
선임연구원



정 우 성
한국철도기술연구원
철도환경연구실
수석연구원

서론

국토해양부는 2005. 8월부터 2011. 6월까지 6차년에 걸쳐 철도종합안전기술개발사업을 통하여 철도에서의 화재, 충돌, 탈선 등 중대사고 방지를 위한 안전성능평가 시험설비를 구축하고 있다. 이 중에서도 화재분야는 대구지하철 화재사고와 지하철 7호선 방화사건을 계기로 화재안전 규정을 대폭 정비하고 철도시스템의 화재안전성능평가 설비를 신속하게 구축하여 왔다. 본고에서는 그동안의 철도화재안전분야 시험설비의 구축현황을 소개하고자 한다.

본문

철도화재에 관한 성능기준을 정한 규격의 주요 대상은 대체로 철도차량에 집중되어 있다. 2004년 12월 개정된 도시철도차량안전기준에관한규칙의 별표와 2005년 12월 제정된 철도차량안전기준에관한지침의 별표조항이 대표적이다. 철도화재 안전성능 평가 설비는 이와 같이 법적 규정에 의하여 평가되어야 하는 항목에 대하여 우선적으로 구축하려는 목표를 가지고 있다. 표1은 철도차량안전 기준에관한지침의 별표에 규정된 성능기준 내용의 일부

다. 표1에 규정된 철도차량 화재안전성능 평가 항목은 산소지수(ISO 4589-2), 연기밀도(ASTM E 662, IEC 61034), 화염전파(ISO 5658-2), 독성지수(BS 6853 Annex B.1, B.2) 전선 수직화염전파(IEC 60332-3-24), 내화성능(KS F 2257-1, 5) 등 이다. 이러한 안전성능을 평가하기 위하여 차량 화재시험평가에만 모두 9종의 시험장비가 필요하다고 볼 수 있다. 이 외에도 화재시물레이션을 이용한 실규모 화재안전성 평가 방법의 적용을 위하여, 모델링에 필요한 차량 재료의 열특성치를 평가하는 칼로리미터, 발화온도 시험기, 전도도 평가 시험기 등의 부대장치 등이 있다. 이러한 화재시험평가를 위하여 구축된 시험설비에 대하여 시험항목과 특징을 차례로 소개하도록 하겠다.

〈표-1〉 철도차량안전기준에관한지침 별표1의 세부 평가 기준 일부

화재성능 요구기준	시험방법 시험규격	시험항목	합격기준				
			위험등급1	위험등급2	위험등급3	위험등급4	
내장판	ISO 4589-2	산소지수(LOI)	≥28	≥32	≥35	≥40	
	ISO 5658-2	Qasb(MJ/m2)	≥1.2	≥1.2	≥1.5	≥1.5	
	ISO 5658-2	CFE(kW/m2)	≥15	≥18	≥20	≥20	
	ASTM E 662	Ds(1.5min)	≤150	≤100	≤75	≤50	
	ASTM E 662	Ds(4.0min)	≤300	≤200	≤150	≤100	
	ASTM E 662	Ds(10min)	-	-	≤300	≤200	
전선	BS 6853 Annex B.2	독성지수(R)	≤3.6	≤2.7	≤1.6	≤1.6	
	내부용	IEC 60332-3-24	수직화염전파 (연소거리: m)	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5
		IEC 61034	연기밀도(투과율%)	≥25	≥50	≥50	≥70
	외부용	BS 6853 Annex B.1	독성지수(R)	≤3.6	≤2.7	≤1.6	≤1.6
		IEC 60332-3-24	수직화염전파 (연소거리: m)	≤2.5	≤2.5	≤2.5	≤2.5
		IEC 61034	연기밀도(투과율%)	-	≥25	≥50	≥50
BS 6853 Annex B.1		독성지수(R)	-	≤3.6	≤2.7	≤2.7	
차체 구조	바닥	KS F 2257-5 또는 ISO 834-5	내화성능 유지시간(분)	≥15	≥15	≥20	≥20
	단부, 지붕	KS F 2257-1 또는 ISO 834-1	차염성능 유지시간(분)	≥15	≥15	≥20	≥20
차체 외벽, 전두부 마스크	ISO 4589-2	산소지수(LOI)	≥24	≥28	≥28	≥28	
	ISO 5658-2	CFE(kW/m2)	≥10	≥10	≥15	≥15	
	ASTM E 662	Ds(1.5min)	≤200	≤100	≤100	≤100	
		Ds(4.0min)	≤400	≤200	≤200	≤200	
BS 6853 Annex B.2	독성지수(R)	≤3.2	≤3.2	≤3.0	≤3.0		

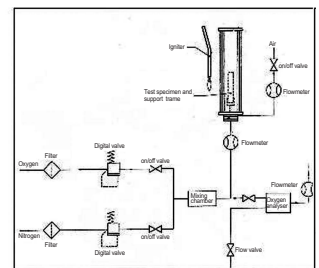
산소지수 시험기

시료의 연소가 지속되기 위해 필요한 최소한의 산소농도를 의미하는 산소지수(OI, Oxygen Index)는 난연성을

평가하는 전통적인 기준의 하나로서 활용되어 왔으며, 시험환경에 따라 상온 시험법(ISO 4589-2, ASTM D2863, NES 714)과 400℃의 고온에서 이루어지는 TOI (Temperature Oxygen Index, ISO 4589-3 및 NES 715)로 구분된다. 현재 국내 철도분야에서는 재료의 난연성을 평가하는 화재안전기준의 하나로 산소지수를 채택하여 적용 중에 있으며, 이와 관련하여 철도기술연구원에서는 그림 1와 같은 상온산소지수 시험기가 도입되어 운용 중에 있다. 산소지수의 측정은 산소/질소 혼합가스를 이용하여 23±2℃의 온도에서 이루어지며, 산소농도는 0.1%까지 조절가능하다. 시편은 수직으로 자립 가능하면 120×10mm (실두께), 자립이 불가능한 시편은 140×50mm(실두께) 크기로 홀더를 이용하여 수직 고정시키고, 이후 시편의 끝에 착화시켜 연소시간(180초) 및 탄화거리(자립 50, 비자립 80mm)를 기준으로 시험 산소농도에 O /×를 부과하고, 표.2와 같이 반복시험을 통하여 시험시편의 산소지수를 계산하여 보고한다.

〈표-2〉 시험결과표 예시 (자립가능 시험편)

· Nr series measurements									
Ni series measurements (8.6.1 and 8.6.2)		(8.6.3)			Ci				
Oxygen Concentration (%)	34.0	33.8		33.8	34.0	33.8	34.0	34.2	
Burning period (s)	>180			<180	>180	<180	<180	>180	
Length burnt (mm)	>50			<50	>50	<50	<50	>50	
Response	X			O	X	O	O	X	
k value from ISO 4589-2 Table 4 : -1.17									
Hence Ci = 34.2 k = -1.17									
LOI = Ci+kd = 34.2-1.17×0.2=33.97									



〈그림 1〉 산소지수 시험기

화염전파

소재의 화재특성을 평가하는 방법 중의 하나로 화염전파가 있으며, 대상 시편에서의 화염의 전파속도, 전파길

이 및 열방출률 등을 측정하여 특성을 평가하게 된다. 시험은 수직 혹은 수평방향으로 시험시편 및 복사 panel을 설치시켜 이루어지며, 대표적인 시험규격으로는 ISO 5658, IMO Resolution A.653, ASTM E162, ISO 9239, ASTM E648, ASTM E970 등의 시험규격이 있다. 현재 국내 철도차량분야에서는 ISO 5658-2(Reaction to fire tests - Spread of flame, Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration)에 의거하여 화재안전기준을 제시하고 있으며, 한국철도기술연구원에서는 수직형 화염전파시험인 ISO 5658-2와 ASTM E162를 통한 화염전파특성평가를 수행 중에 있다. 시험은 그림 2와 같이 고온 복사열이 시험편에 가해지는 상황에서 시험편에 착화된 화염이 시간에 따라 전파된 양상과 열방출량을 측정하는 것이다. ISO 5658-2에서는 화염전파거리, 소화점입계열류량(CFE, Critical Flux at Extinguishment), 연소 지속열(Qsb, Heat for sustained burning) 등을 시험결과로 보고한다.



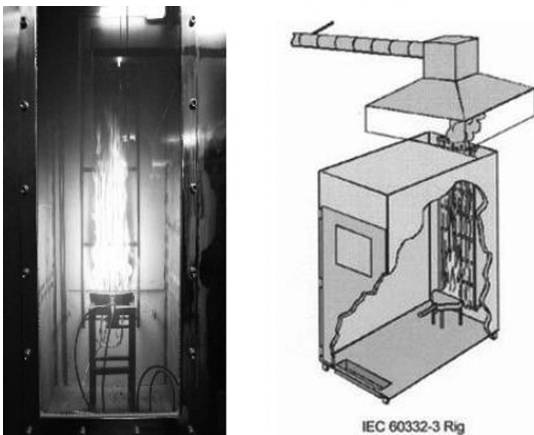
(그림 2) 화염전파시험기 : ISO 5658-2(좌), ASTM E162(우)

ASTM E162에서는 인화지수(flammability index) Is를 이용하여 결과를 보고하고 있으며, 인화지수는 화염확산속도에서 계산된 화염전파 요소 Fs와 열량 평가요소 Q를 이용해 계산하고(Is = Fs×Q) Is가 높을수록 인화성은 증가한다.

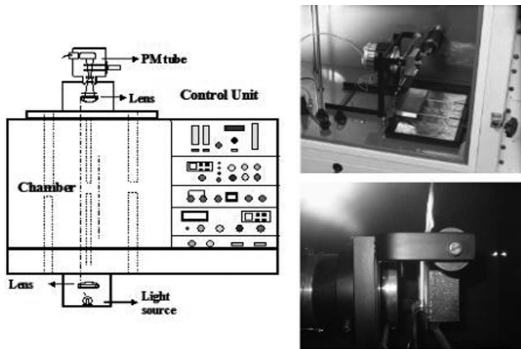
전선의 수직형 화염전파 시험은 IEC 60332-3-24(Category C) (EN 50266-2-4) 방법에 따른다. 시험 챔버는 높이 4m, 폭 1m, 깊이 2m 크기이며 바닥부에 400mm×800mm 크기의 개구부로부터 5m³/min의 공기가 주입된다. 리본형 프로판 가스 버너를 이용하여 95% 이상의 순도를 가지는 프로판 가스를 연료로 사용한다. 시험 장치의 최상층부에 부착된 풍속계에 의해 측정된 외부 풍속이 8m/s를 넘지 않아야 한다. 일반적으로 연소후 측정된 탄화 비율의 최대 정도가 2.5m를 초과하지 않아야 합격으로 인정된다.

연기밀도

연기밀도를 평가하는 방법은 연기상자법과 배기관법으로 구분되며, BS 6853, KS F 2271, ISO 5659 및 ASTM E662 등이 연기상자법에 해당한다. 철도차량안전기준에 관한 지침은 ASTM E662(Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials)에 의해 연기밀도 항목을 규제하고 있다. 현재 한국철도기술연구원에서는 동 규격에 의거 시험을 수행 중이다. 시험기는 그림 4와 같이 914×914×610mm 크기의 밀폐형 chamber 내에 위치한 수직형 Radiant heat furnace 및 제어 panel로 구성되어 있으며, 발생된 연기로 인한 빛 투과율 변화를 측정하기 위한 PM(Photo multiplier) 튜브가 chamber에 장착되어 있다. 연기밀도의 측정은 시험편(75×75mm, 두께상한 25mm)를 chamber 내에서 Radiant heat furnace(25kW/m²)에 노출시켜 발생된 연기로 인한 빛 투과율 변화를 식(1)에 적용하여 이루어진다. 시험은 복사열 존재 여부에 따라 연기 밀도를 측정하는 non-flaming mode와 flaming mode



(그림 3) 전선 수직 화염 전파 시험기 설치 사례



〈그림 4〉 연기밀도 시험기 구성도 및 시험사례

로 구성되며, 각각의 모드에서 3회의 반복 시험을 통하여 연기밀도 최대값이 최소값의 150% 이내일 경우에는 3회, 시험의 평균값을 150%를 초과할 경우에는 6회 시험의 평균값을 보고토록 되어있다.

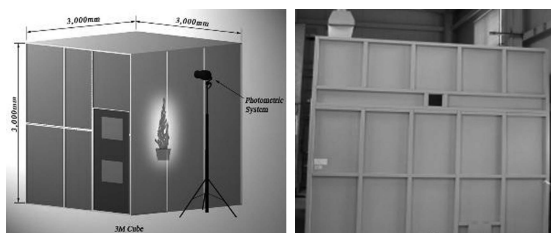
$$D_s = G \left(\log \frac{100}{T} + F \right)$$

$G = V / (A \times L)$ (V : volume of the Chamber, A : specimen surface area, L : light pass length)

T = transmittance of light

F = the density of the filter or 0 (Depend on filter condition)

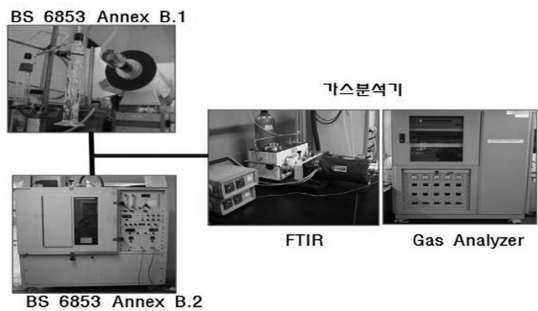
한편 전선의 경우 연기(광학)밀도 시험은 IEC 61034 방법에 따른다. 연소상자의 크기도 3M 입방체(3m×3m×3m) 크기로 확장된다. 케이블 점화용 연료는 90% 에탄올과 4% 메탄올 6% 물을 혼합한 것을 점화용 팬에 넣어 사용한다. 시편은 23℃, 55% 습도에서 16시간 이상 전처리한다. 시험시간은 40분으로 한다.



〈그림 5〉 연기밀도 시험기 구성도 및 시험사례

연기유독성

BS 6853 Annex B의 시험방법은 튜브형 전기로와 무게 기준의 시편을 적용하는 B.1 방법과 NBS 연기상자와 평면 면적 기준의 시편을 평가는 B.2 방법으로 구분된다. NBS 연기상자에서 ISO 5659 Furnace로 시편을 태워서 발생된 연소가스를 고온 포집관(heated line)을 통하여 분석한다. 분석방법은 가스별 전용 분석기나 Ion Chromatography, FT-IR Gas Cell 내에서의 분자 진동 모드에 따른 IR 선택 흡광 원리 등을 이용하여 분석한다. 다음 그림은 철도연구원에 설치된 FTIR 분석 시스템의 구성도이다.



〈그림 6〉 연소가스 독성지수 평가 장비

시편의 연소로부터 발생된 연소가스를 샘플링하여 8종의 유독성분을 정량/정성 분석한다. 표 3의 IDLH 값은 NIOSH Guide의 기준으로서 대기중에 각 가스의 농도에 30분간 노출되면 생명이나 건강에 위험하다고 알려져 있다.

$$\text{독성지수 } R = \sum r$$

$r_x = c_x / f_x$: the individual for the xth species,

c_x : the emission of the xth species, in the appropriate unites

f_x : the reference value for the xth species

(표-3) 독성시험에서의 임계농도 및 허용기준

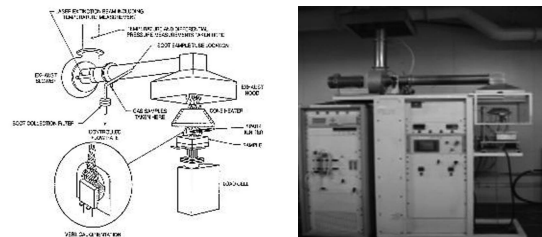
유해가스	NF X 70-100 임계농도 (mg/m³)	BS 6853 IDLH values		Ref. values mg/g or mg/m³	IMO MSC.41(64) 허용기준 (ppm)
		임계농도 (mg/m³)	임계농도 (ppm)		
CO	1,750	1,400	1,200	280	1,450
CO ₂	90,000	73,000	14,000	14,000	60,000
HCl	150	76	30	15	310
HBr	170	101	30	20	50
HCN	55	56	50	11	140
HF	17	25	30	4.9	590
SO ₂	260	270	100	53	120
NOX	-	38	20	7.6	350
Acrolein	-	-	-	-	1.7
Formaldehyde	-	-	-	-	3.2

발열량

콘칼로리미터를 이용한 발열량 시험방법은 ISO 5660 Part 1(Heat Release Rate) 시험법을 따른다. ISO 5660 콘칼로리미터의 원리는 산소소비량 측정을 이용한 발열량 평가 방식은 연소과정이 근본적으로 산소와 결합하는 화학방정식에 의하여 결정된다는 것에 착안한 것이다. 콘칼로리미터의 발열량은 다음 식에 의한다.

$$q(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{T_o}\right)(1.10)C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \frac{X_{O_2}^o - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}}$$

콘칼로리미터 시험기의 평가항목은 착화 후 180초 동안 평균 열방출률, 300초 동안 평균 열방출률, 최대 열방출률, 시편으로부터의 총 방출률, 시편의 점화시간과 소화시간, 착화에서 시험이 종료될 때까지의 시간동안 계산된 시편의 평균 질량 손실률 등이다. 콘칼로리미터는 발열량 평가와 별도로 ISO 5660 Part 2(Smoke Production Rate) 기준을 통하여 연기발생량 평가 장치로도 사용될 수 있으며 FTIR 가스분석기 등과 연결하여 연소가스의 독성평가 장비로도 활용된다.



(그림 7) 콘칼로리미터 구성도 및 장비 사례

중형화재시험설비 - 룸코너

의자나 벽체 구조 등의 조립체 단위의 화재 거동을 평가하기 위하여 2.4m×3.6m×2.4m 룸구조를 가지는 ISO 9705 룸코너 시험기가 사용된다. 룸코너를 이용한 화재성능 시험은 시편시험으로 확인할 수 없는 조립체 단계에서의 화재거동을 평가할 수 있다. 실화재 시험의 비용 측면에서 실규모 시험에 비하여 합리적이고 표준화된 산소소비량 측정 열량계 설비를 갖추고 있어 발열량 및 연기 발생량의 정량 요소를 측정할 수 있는 장점이 있다. 한국철도기술연구원은 2008년 11월 중형화재성능시험설비의 구축을 완료하여 의자 조립체의 성능시험과 내장재 설치 시험 등을 수행하였다. 차량 내장재 화재시험에는 EN 45545-1 Annex A에 대규모 화원으로 2분간 75kW 8분간 150kW를 가하는 방법이 활용되고 있다. 이 설비를 이용하여 시험체에서의 화재성장거동, 총열방출율, 실내 및 내장재 표면에서의 온도 변화 등을 측정할 수 있음이 확인되었다.

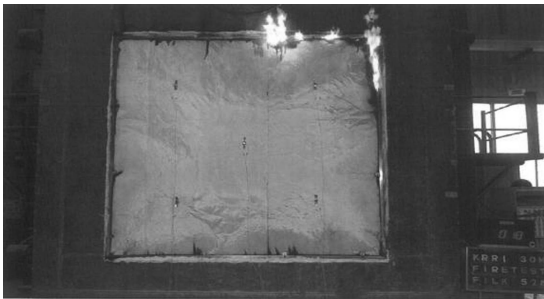


(그림 8) 중형화재성능평가설비 및 응용시험 사례

내화성능 시험설비

내화성능 시험설비는 하중을 가해지지 않는 구조에는 KS F 2257-1 또는 ISO 834-1 시험기준을 적용하고 하중이 가해지는 구조에는 KS F 2257-5 또는 ISO 834-5의 기준으로 평가하도록 규정하고 있다. 철도에서 활용되는 내화성능 평가 설비의 경우는 역사 구조물에 적용될 것이며, 이는 기존의 건축법 및 소방법의 관련 기준에 의하여 주로 시행되고 있다. 별도로 제정된 규정의 적용을 받는 철도차량의 경우에는 일반적으로 불연 금속재를 차체 구조로 사용하는 경우 내화성능 시험을 면할 수 있고 연소

성이있는 복합차체를 사용하는 경우에 한하여 평가하도록 하였기 때문에 시험의 빈도가 많지는 않을 것으로 판단되었다. 따라서 철도종합안전기술개발사업에서 구축하는 철도화재안전성능평가설비 항목에는 내화성능 설비를 별도로 설치하지 않고 국내 시험 및 연구시설에 기존 설치된 설비를 활용할 수 있도록 하였다. 현재 방재시험연구원이나 한국건설기술연구원, 전자재 시험연구원 등에 해당 내화성능 시험설비를 보유하고 있다.



〈그림 9〉 복합차체 내화성능 시험 사례(방재연, ISO 834-1)

터널 제연/배연 성능평가 시스템

철도시설 안전기준에 관한 규칙 제7조 5항에 제시되어 있는 제연/배연 설비의 성능시험을 수행하기 위하여 본 설비가 구축되었다. 이 설비를 이용하여 철도터널 화재 발생시 피해를 저감하기 위하여 설치되어 있는 제연/배연 시설 성능 및 도시철도건설규칙 제67조 3항 제연설비에서 규정된 연기기류속도(2.5m/s 이상) 검증할 수 있다. 본



〈그림 10〉 터널 제연/배연 성능평가 시스템의 세부시스템

시스템은 다채널 풍속/풍향/온도 계측 시스템, 화원 및 연기발생장치 시스템, 연기농도 측정 시스템 및 고성능 영상취득 시스템으로 이루어져 있다. 철도연은 성능평가 계측 시스템을 이용하여 서울메트로 9호선 본선터널 및 경부고속철 당리터널에서 시험을 성능평가 시스템의 검증 평가를 수행하기도 하였다.

결론

지금까지 국토해양부가 추진하고 있는 철도종합안전기술개발사업의 일환으로 한국철도기술연구원의 철도화재 안전성능시험소에 설치된 7개 항목 10여종의 시험설비에 대한 추진 현황을 소개하였다. 이들 시험설비가 효과적으로 활용되어 한국철도가 세계 최고수준의 안전한 철도로 거듭나는 데 온전하게 기여할 수 있기를 기대한다.