

## 철도차량 내장재의 화재안전도 평가방법 연구

이덕희, 정우성, 이철규, 김선옥, 노삼규\*  
한국철도기술연구원 철도환경연구그룹, 광운대학교\*

The study on the fire safety evaluation method of the train  
interior materials

Lee Duk-Hee, Jung Woo-Sung, Lee Cheul-Kyu, Kim Sun Ok, Roh Sam-kew\*  
*Korea Railroad Research Institute, Kwang Woon University\**

### 1. 서론

시내 교통의 주요 수단으로 자리 잡고 있는 지하철은 도심분리나 소음진동의 피해를 줄이기 위하여 대부분의 구간을 지하로 운행하고 있어 화재가 발생할 경우 심각한 피해가 우려되어 왔다. 그러나 국내 철도시스템은 화재위험에 대한 대비가 미흡했던 것이 사실이다. 특히, 차량내장재의 경우는 화재안전도가 충분히 검증되지 못한 상태로 비교적 간단한 난연성 평가만을 수행하고 사용되어 왔고 이는 지난 대구지하철 화재사고가 대형 인명피해로 이어지는 주요 원인이 되었다. 따라서 이에 대한 대책으로 현행 사용중인 국내 철도차량 내장재에 대한 화재안전도 재평가와 내장재 교체, 신규차량에 대한 내장재 사용기준 강화 등이 요구되고 있다.

본 연구는 기존철도 차량 내장재의 품목별 화재안전도 평가 및 철도차량의 화재안전도를 평가하기 위하여 수행한 시편시험 및 안전도 평가 사례의 일부를 정리한 것이다. 각 내장재의 시편시험(small scale test) 결과로부터 철도차량 전체의 화재안전도를 평가하는 두 가지 방법에 대하여 수행한 사례를 정리하였다.

### 2. 철도차량 화재안전도 평가

#### 2.1 내장재 화재특성 평가

기존에 사용중인 철도차량 내장재의 일반적인 재료와 시험방법을 표 1에 정리하였다. 철도청의 일부차량에 적용된 KS F 2271 방법을 제외하면 기존 KS 시험방법의 경우 기본적인 연소성만을 평가하는데 그쳐 화염전파, 연기밀도, 연소가스 유독성을 종합적으로 평가하도록 요구하는 선진적인 시험방법에 비하여 미흡하다고 평가되고 있다. 또한 내장품

에 따라 상이한 시험방법을 적용하여 개별 내장재가 가지는 특성을 비교하여 평가할 수 없고 각 내장재가 차량에서의 실화재에 기여하는 정도나 특성을 파악하기 어려운 문제를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 모든 내장재에 가능한 동일한 시험법을 적용하여 평가결과를 비교할 수 있도록 하며, 다양한 항목의 종합평가가 되도록 하기 위한 새로운 시험방법을 선택하였다. 현재 철도차량 내장재료의 화재안전도를 평가하는 시험방법이 나라마다 상이하여 국제적인 표준화 작업을 요구받고 있는바, 새로 선택된 시험법은 가능한 ISO 기준이거나 향후 추진이 예상되는 시험방법으로 하였고 요구되는 항목에 대한 적절한 국제기준이 없는 경우는 시험의 편이성 및 국내에서의 시험가능성 등을 고려하여 결정하였다. 이와 같은 검토사항으로 결정된 시험방법은 산소지수(ISO 4589-2)와 화염전파(ISO 5658-2), 발열량(ISO 5660-1), 연기밀도(ASTM E 662) 발열량(ISO 5660-2)과 가스유독성(BS 6853 Annex B.2) 시험이다.

표 1. 기존 국내철도차량 내장재 재료 및 시험규격

구 분	재료	시험법 및 기준
내장재	불포화폴리에스테르계 FRP	FRP : 난연재 / KS M3015 자기소화성 이상 KS F 2271('01년 이후) 난연 2급 이상
바닥재	염화비닐수지	KS M 3305 난연성 이상 / KS F 2271 난연 2급이상
시트	커버 폴리에스테르 모켓	KS K 0582, JIS Z 2150 방염 2급 이상
	쿠션 우레탄 폼	FMVSS 302 자기소화성 이상 (100mm/min)
통로연결막	염화비닐계 졸타포린	KS K 0580
단열재	폴리에틸렌 폼	P.E FOAM : 난연재 KS M 3808 난연성 합격 / KS F 2271 난연3급 이상
전선	가교폴리에틸렌 전선	가교 폴리에틸렌 전선 : 난연재 KS C 3004 : 5초이내 소멸

표 2에는 기존 철도차량에 사용되고 있는 내장재의 시편을 수거하여 선정된 시험방법에 따라 시험한 결과를 정리하였다. 여기에 정리된 시편은 국내 철도차량 내장재에 대한 전반적인 대표성을 검토하여 샘플링 된 것은 아니며 철도 운영기관으로부터 임의로 제공된 내장재 중 동종의 품목들에 대하여 평가한 것이다. 각 항목의 측정 결과는 차량의 제작년도와 제작업체를 구분하여 3~5개의 서로 다른 시편의 시험결과를 포함하고 있다. 시험결과는 같은 시험법을 적용하고 있는 선진 철도의 사용기준에 비하여 대체로 미흡한 수준을 나타내고 있었으며, 동일 계열의 재료를 사용한 내장재라도 제작년도 및 제작사에 따라 첨가제가 다르며 이에 따라 상당한 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 특히 내장판의 연기밀도 측정 결과의 경우 비교적 완화된 기준을 적용하고 있는 미국의 NFPA 130 요구조건인  $D_s(1.5min) \leq 100$ ,  $D_s(4.0min) \leq 200$ 에 비하여도 100%이상을 초과하고 있어 가장 취약한 부분으로 평가되었다.

표 2. 기존 철도차량 내장재 시편시험 결과(사례)

구분		Cone-Calorimeter		산소지수	화염전파		
		착화 시간(s)	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	LOI	착화 시간(s)	연소거리 (mm)	CFE (kW/m <sup>2</sup> )
내장판	범위	32.7~44.3	36.9~45.2	21.4~34.8	13~25	390~545	6.92~19.15
	평균	37.87	39.66	26.83	19.50	470	13.16
시트 커버	범위	14.7~19.5	6.7~13.63	20.2~28.4	3~552.5	552.5~740	0.02~7.03
	평균	17.35	9.75	22.60	5.60	656.79	3.74
시트 쿠션	범위	1~6	15.5~72.5	17.6~20.2	1~1	490~770	1.64~10
	평균	4.04	32.81	18.83	1	660.48	4.61
통로 연결막	범위	3.5~9	10.2~26.77	21.1~29.6	2~4	210~533.3	7.56~18.96
	평균	7.50	16.04	24.29	3.22	422.78	18.96
바닥재	범위	15.7~37.3	39~49.56	22~26.70	5.5~15	470~710	2.65~12.24
	평균	21.50	43.16	24.18	8.25	553.13	8.82
단열재	범위	12.6~31.3	10.43~13.8	23.9~28	1~1	470~480	11.29~12.93
	평균	21.97	12.08	25.37	1	475	12.11

구분		연기밀도			독성	비고
		Ds(1.5min)	Ds(4.0min)	Ds (max)	R	
내장판	범위	77.31~352.05	297~709.20	359.79~971.01	3.80~3.99	불포화 폴리 에스테르계 FRP
	평균	243.38	596.88	669.25	3.90	
시트 커버	범위	42.93~246.6	91.23~353.20	114.9~320.47	1.57~1.9	폴리 에스터
	평균	126.46	172.26	207.38	1.67	
시트 쿠션	범위	50.77~187.65	99.92~224.45	130.01~225.53	2.67~4.17	우레탄폼
	평균	91.54	141.72	158.87	3.30	
통로 연결막	범위	145.23~284.20	248.77~549.63	262.57~619.26	1.38~3.99	염화비닐계 출타포린
	평균	164.41	273.89	277.30	3.18	
바닥재	범위	66.52~260.53	276.40~897.53	335.18~1320.0	2.9~7.97	염화비닐수지
	평균	174.86	490.07	694.56	6.08	
단열재	범위	50.56~269.80	68.27~393.63	106.96~400.38	0.82~2.11	폴리에틸렌 폼
	평균	163.33	220.37	228.8	2.11	

이와 같이 시편에 대한 시험평가를 통한 재료별 적절성 평가는 보편적이고 유용한 차량 내장재 화재안전도 관리방안으로 활용되고 있다. 그러나 앞서 기술하였듯이 현재 철도 차량에 적용되고 있는 시편시험 방법은 국가마다 매우 다양하게 적용되고 있어서 시험방법이 상이한 경우 그 측정결과를 공유하기 어렵다는 문제점을 안고 있다. 최근 유럽연합을 중심으로 철도차량 내장재 시험방법의 표준화 작업이 추진되고 있는 것으로 알려져 있어 그 성과가 기대되는 바이다.

내장재 시편에 대한 세부항목별 평가는 시험방법의 차이에 대한 한계 이외에도 차량 전체의 화재안전도를 종합하여 평가하는데는 충분한 역할을 수행하지 못하는 어려움이 있다. 내장재의 시편에 대한 평가 결과가 차량의 실화재(real fire)에 그대로 반영된다고 보장할 수 없기 때문이다. 철도차량의 화재위험도를 평가하려는 선행연구들은 각 내장재들

간의 상호작용 및 실화재에서의 나타나는 특성이 시편시험에서 얻어진 시험결과와는 많은 차이가 있다고 평가하였다. 따라서 이러한 차이를 극복하기 위하여 차량에 대한 실험대형 시험(full scale test)을 수행하거나, 내장재들 사이의 상호연관성을 계산하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 활용되고 있다. 그러나 차량화재를 보다 정교하게 평가하려는 이러한 노력은 그 유효성에도 불구하고 다소 까다로운 절차를 요구하고 있어 간단하게 적용하기 어려운 면이 있으며, 평가 결과도 한정된 시나리오에 국한되는 경향이 있는 것으로 보인다.

따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 차량안전도 검증방법과 더불어 경우에 따라 시편 시험(small scale test)에 의하여 평가된 개별적인 내장재의 항목별 시험 결과로부터 간단하게 활용할 수 있는 차량 화재안전도 평가방법을 소개하고자 한다.

## 2.2 모델링 해석을 이용한 화재안전도 평가방법

내장재의 교체에 의한 화재성능의 변화를 검증하기 위하여 NIST의 FDS 3.1을 이용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 각 내장재에 대한 콘칼로리미터 시험결과 및 관련 자료들을 활용하였고, 초기 화원은 대구지하철 방화조건과 근사하도록 가솔린 조건을 입력하였다. 기존 내장재는 앞에서 표 1에 정리한 재료를 사용하였고 개량된 신조차량의 내장재는 페놀계 FRP 내장판, 합성고무 바닥재 등으로 안전도가 개선된 신규 내장재의 입력 자료를 사용하였다. 그림 1과 그림 2에 해석결과를 비교하여 나타내었다.

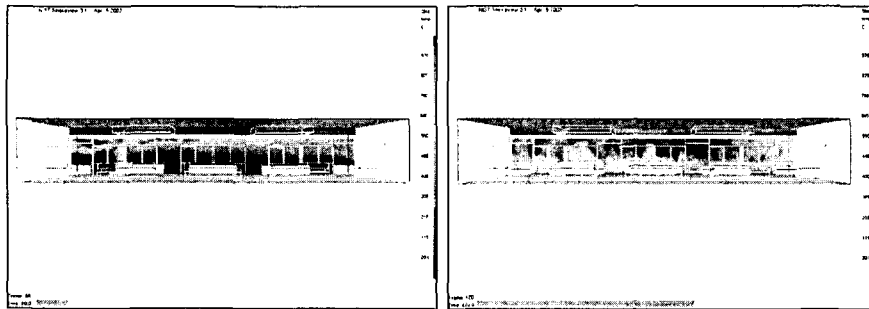


그림 1. 기존 내장재 철도차량의 화재해석(좌 60s, 우 420s)

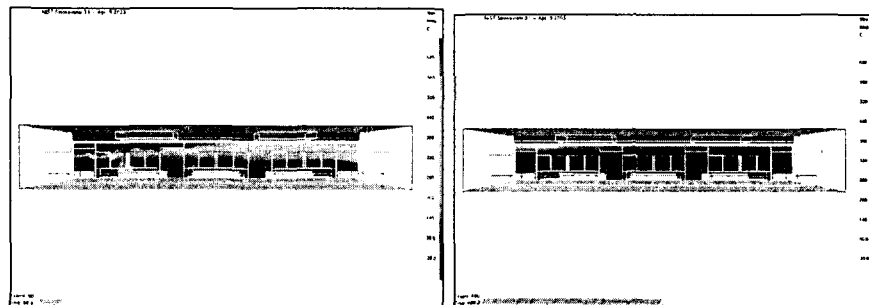


그림 2. 신규 내장재 철도차량의 화재해석(좌 60s, 우 420s)

시뮬레이션 평가결과 기존 내장재 차량의 경우 방화에 사용된 가솔린에 의해 벽면과 천정 내장재로 화재가 확산되며 플래시오버와 최성기(Fully developed Fire)의 상황이 진행되었으나, 신규 차량의 경우 화재 개시 후 천정면에 작은 발화가 있는 것으로 보이나 화재를 성장시킬 만큼의 추가 열량이 방출되지 않아 자체 소멸되는 것으로 나타났다. 연기층의 경우도 화재 발생과 동시에 급속히 확대되었다가, 화원이 연소를 멈춘 후 다시 상승하여 회복하는 것을 볼 수 있었다.

### 2.3 달성율을 이용한 화재안전도 평가방법

달성율을 이용한 안전도 평가방법은 시편시험(small scale test) 결과를 화재안전 기준치와 비교하여 물리량이 없는 달성율로 표현하고 이를 합산하여 차량의 화재안전도를 정량화하는 방법이다. 시편으로부터 측정된 시험값을 달성율로 표현하기 위해서는 각 시험에 대한 기준값이 필요한데 이는 규제기준이나 목표치 등을 사용할 수 있을 것이다. 표3에는 해외의 사용기준을 참조하여 본 연구에서 선정한 기준값 사례를 나타내었다. 항목간 가중값은 발열량, 산소지수, 화염전파 등의 연소성 부분과 연기밀도, 가스독성 등의 가스유해성 부분을 동등하게 1로 가정하였다. 표 4에는 2.1의 측정값과 표 3의 기준값을 사용하여 계산된 달성율로부터 산출된 내장재별 안전지표를 나타내었다. 각 지표값은 1을 기준으로 안전도가 기준값에 미달하는지 초과 달성하고 있는지를 판별할 수 있다. 표 5에는 각각의 내장재의 안전지표에 각 내장재가 차지하고 있는 면적이나 무게의 가중치를 곱하여 계산된 차량안전지표 값을 나타내었다.

표 3. 안전지표 달성도 기준값(사례)

구 분	콘칼로리미터			산소지수	화염전파		연기밀도		독성
	착화 시간(s)	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	TSR (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	LOI	착화 시간(t)	CFE (kW/m <sup>2</sup> )	Ds (1.5min)	Ds (4.0min)	R
내장판	58.0	16.0	1000.0	45.0	17.0	20.0	100	200.0	1.6
시트	커버	20.0	9.0	188.0	28.0	10.0	-	100.0	1.6
	쿠션	6.0	20.0	238.0	28.0	2.0	-	100.0	3.2
연결통로막	9.0	12.0	595.0	28.0	4.0	20.0	100	200.0	2.7
바닥재	42.0	41.0	1870.0	28.0	15.0	10.0	100	200.0	5.0
단열재	31.0	5.0	20.0	32.0	2.0	10.0	-	100.0	1.6
참조기준	UIC 564-2, NF F 16 - 101, IMO A.653(16), NFPA 130, BS 6853 Annex B.2								

표 4. 내장재별 재료안전지표 비교

구 분	Cone	산소지수	화염전파	I <sub>flame</sub> *	연기	가스독성	I <sub>gas</sub> *	I*
	I <sub>f-cone</sub>	I <sub>f-OI</sub>	I <sub>f-sp</sub>		I <sub>g-s</sub>	I <sub>g-t</sub>		
내장판	0.53	0.60	0.90	0.68	0.42	0.41	0.42	0.55
시트커버	0.90	0.81	0.55	0.75	0.65	0.96	0.80	0.74
시트쿠션	0.64	0.67	0.58	0.63	0.69	0.97	0.83	0.73
통로연결막	0.79	0.87	0.65	0.77	0.79	0.81	0.80	0.78
바닥재	0.73	0.82	0.70	0.75	0.67	0.82	0.74	0.75
단열재	0.25	0.75	0.81	0.61	0.56	0.76	0.66	0.63

\*I<sub>flame</sub> = (I<sub>f-cone</sub>+I<sub>f-OI</sub>+I<sub>f-sp</sub>)/3, I<sub>gas</sub> = (I<sub>g-s</sub>+I<sub>g-t</sub>)/2, I = (I<sub>flame</sub>+I<sub>gas</sub>)/2

차량의 안전도를 표현하는 지표는 해석의 편의상 기준값이 10이 되도록 가중치를 조절하였다. 이렇게 계산된 기존 내장재 차량의 안전지표는 6.43 또는 6.30으로 표현될 수 있을 것이다. 같은 방법으로 신규 내장재를 장착한 차량의 안전지표를 평가한 결과는 면적가중의 경우 24.8, 무게가중의 경우 25.0으로 등으로 평가되어 달성율을 이용한 안전지표 산출방법이 내장재 변화에 대한 차량의 안전도 변화를 평가하는 방법으로 활용될 수 있음을 보여주었다.

표 5. 기존 내장재 차량의 재료 안전지표 평가(사례)

구분	기준지표	면적가중 평가의 경우			무게가중 평가의 경우		
		면적(m <sup>2</sup> )	가중치	차량안전지표	무게(kg)	가중치	차량안전지표
내장판	1.09	106.0	1.70	1.85	440	2.36	2.57
시트	1.47	52.0	0.84	1.24	113	0.61	0.89
통로연결막	1.57	12.0	0.19	0.30	14	0.08	0.12
바닥재	1.49	48.0	0.77	1.15	220	1.18	1.75
단열재	1.26	93.0	1.50	1.89	144	0.77	0.97
합 계	6.89	311.0	5.00	6.43	931	5.00	6.30

### 3. 결론

기존 철도차량 내장재에서 일반적으로 사용되고 있는 재료에 대한 시편시험(small scale test) 결과를 정리하였다. 각 내장재가 나타내는 시편의 특성값을 활용하여 차량의 안전도를 평가할 수 있는 방법을 모색하였다. 첫 번째 방법으로는 내장재의 발열량 및 화재모델링을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 이용하여 내장재의 변화에 따른 차량내에서의 화재의 진행을 검토하였다. 시뮬레이션 방법은 평가 목적과 화재 시나리오 및 평가 대상모델을 구체화할 경우에 매우 유효한 평가 방법으로 활용되고 있다. 보다 단순하고 개략적인 평가방법으로는 기준값과 측정값을 비교한 달성율을 활용하는 방법이 가능할 것이다.

그러나 시편시험값의 달성율을 이용한 차량의 안전도 평가 방법은 실화재에서 내장재 상호간 상관관계나 실재 차량화재의 시나리오를 고려한 평가 방법은 아니다. 이러한 방법은 제한적으로 활용될 수 있으나 평가항목, 기준값, 항목간의 가중치 등의 설정값에 대한 명확한 표현이 첨부되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. R. D. Peacock, P. A Peneke R. W. Bukowski Fire Safety of Passenger Train ; Phase I, II, III, NIST Interim Report, NISTIR 6132(1994) 외.
2. ASTM. Guide for Tire Hazard Assessment of Rail Transportation Vehicles. ASTM E 2061-03. West Conshohocken, PA, 2003.
3. W. K. Chow, Assessment on Heat Release Rate of Furniture Foam Arrangement by a Cone Calorimeter, J. Fire Sci. Vol. 20(2002).
4. Young, R. "Behaviour of Rail Vehicles Components in Fires". Proceedings of Materials in Mass Transport, May 26, 1988. Rapra Tech Limited, UK.1998.