지하철 내장재료의 재료특성에 따른 화재안전도 평가
Fire safety evaluation of the subway car's interior materials

이덕희* 정우성** 이철규* 김선옥***
Lee, Duck-Hee Jung, Woo-Sung Lee, Cheul-Kyu Kim, Sun-Ok

ABSTRACT

We investigated the fire characteristics of the subway electric car's interior materials and evaluated the safety of it. The testing methods are ISO 4589-2 for Limited Oxygen Index, ISO 5658-2 for surface flame spread, ISO 5660-1 for Heat Release Rate, ASTM E 662 for smoke density and BS 6852 Annex B.2 for gas toxicity. The materials of seven organization including KNR were tested. Most of the materials are under the levels of the foreign country's demand. We also reported the test methods of other countries and compared it to ours.

1. 서론

지하철 시스템은 교통요금이 저렴하고 정시성의 장점으로 인하여 도시교통의 주요 수단으로 자리 잡고 있으나, 도심분리나 소음진동의 피해를 줄이기 위하여 대부분의 구간을 지하로 운행하고 있어서 화재가 발생할 경우 매우 심각한 피해가 우려되어 왔다. 결국 우리는 지난 대구지하철 사고를 통하여 이백 여명의 사망자라는 엄청난 대가를 치르고 말았다. 이번 사고는 국내철도의 화재 대책에 대한 다양한 문제점을 노출시켰는데, 사고상황에 적절하게 대처하도록 훈련되지 못한 기관사와 사령담당자들, 충분한 난연성을 확보하지 못했으며 엄청난 연기와 유독가스를 배출한 차량내장재, 차량으로부터 발생한 연기와 가스를 충분히 제거하지 못하여 결국 많은 사람들이 탈출에 실패하도록 한 원인이 된 제연설비 등이 가장 큰 문제점으로 지적되었다. 본 연구는 이중에서 가장 근원적인 문제점이라고 할 수 있는 철도차량 내장재의 안전도를 평가한 것이다.

그동안 국내에 사용된 차량내장재는 비교적 간단한 난연성 평가만을 수행하여 화재안전도가 충분히 검증되지 못한 상태로 사용되어 왔고 이는 지난 대구지하철 화재사고가 대형 인명피해로 이어지는 주요 원인이 되었다. 이에 대한 대책으로 현재 사용중인 국내 철도차량 내장재에 대한 화재안전도 재평가와 내장재 교체, 신규차량에 대한 내장재 사용기준 강화 등이 요구되고 있다. 우리는 기존철도 차량 내장재를 품목별로 수거하여 화재특성 시험을 수행하고 화재안전도를 점검하였다. 또한 국내에서 사용하여 오던 안전도 평가 기준과 해외에서 적용하고 있는 평가방법을 비교하여 향후 국내에 적용할 만한 평가방법을 선정하였다. 각 내장재의 시편시험(small scale test) 결과로부터 철도차량 전체의 화재안전도를 평가하는 방법에 대하여 소개하도록 하겠다. 철도차량의 화재안전도를 설계 단계에서 미리 검토하기 위하여 사용되고 있는 화재 모델링에 의한 시뮬레이션 방법과 시편시험결과로부터 철도차량의 화재안전도를 산출할 수 있는 보다 간단한 방안에 관하여도 모색하여 보도록 하겠다.

* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

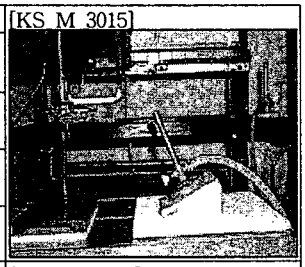
2. 철도차량 내장재와 화재안전도 평가방법

기존에 사용되고 있던 철도차량 내장재는 표1에 정리한 바와 같다. 내장판은 주로 불포화 폴리에스테르계 수지를 사용한 FRP판재가 사용되었으며 바닥재는 염화비닐수지, 시트쿠션은 우레탄 폼, 단열재는 폴리에틸렌 등이 사용되었다. 철도차량 내장재에도 기본적으로 화재에 취약한 합성 고분자 재료가 많이 사용되어 왔음을 알 수 있다. 이들 재료의 안전도를 평가하는 방법은 주로 KS M 3015로 대표되어 왔는데 역시 표에 정리하였다. 그러나 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 내장품에 따라 상이한 시험방법을 적용하여 개별 내장재가 가지는 특성을 비교하여 평가할 수 없고 각 내장재가 차량에서의 실화재에 기여하는 정도나 특성을 파악하기 어려운 문제를 가지고 있다.

표 1. 기존 국내철도차량 내장재 재료 및 시험규격

구 분		재료	시험법 및 기준
내장판		불포화폴리에스테르계 FRP	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 모케트	KS K 0582, JIS Z 2150 방염 2급 이상
	쿠션	우레탄 폼	FMVSS 302 자기소화성 이상 (100㎜/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	가교 폴리에틸렌 전선 : 난연재 KS C 3004 : 5초이내 소멸

[KS M 3015]



[KS F 2271]

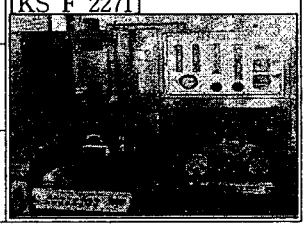


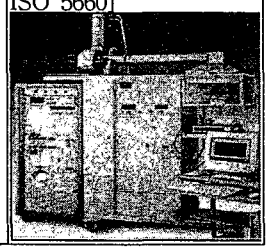
표2에는 미국을 포함하여 프랑스, 영국 등의 나라에서 현재 철도차량용 재료를 평가하는 방법을 소개하였다. 미국의 경우 NFPA 130 기준을 중심으로 연기는 ASTM E 662 연기챔버 방식을 사용하고 있으며, 화염전파를 포함한 연소성 평가는 ASTM E 162 방법을 사용하고 있다. 프랑스의 경우는 NF F 16 101기준을 중심으로 NF C 20 - 455 Glow wire test, NF T 51-071 oxygen index, NF X 70-100 toxicity 등을 사용하고 있다. 가장 까다롭고 많은 나라에서 적용하고 있는 화재기준을 가지고 있는 것으로 평가되고 있는 영국의 경우 BS 6853기준을 중심으로 BS 476-6 화염전파, BS 476-7 표면전파 3미터 입방체 시험을 통한 연기평가와 NF X 70-100 또는 prEN 2824~2826을 통한 연소가스 독성지수 평가방법을 사용하고 있다. 현재 유럽에서 추진중인 것으로 알려질 통합규격에서는 화염전파 ISO 5658-2, 발열량 및 연기 ISO 5660 등을 초안으로 채택하여 ISO 기준을 중심으로 검토하고 있는 것으로 알려져 있다. 위와 같은 점을 고려하여 모든 내장재에 가능한 동일한 시험법을 적용하여 평가결과를 비교할 수 있도록 하며, 다양한 항목의 종합평가가 되도록 하기 위한 새로운 시험방법을 선택하였다. 철도차량 내장재료의 화재안전도를 평가하는 시험방법이 나라마다 상이하여 국제적인 표준화 작업을 요구받고 있는바, 가능한 ISO 기준이거나 향후 추진이 예상되는 시험방법을 위주로 선정하였고 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), 발연량(ISO 5660-2)과 가스유독성(BS 6853 Annex B.2) 시험이다.

표 2. 해외 철도차량 내장재 재료 및 시험규격 사례

구 분		재료	시험법 및 기준
내장판		페놀계 FRP, 알루미늄판 등	- NFPA 130(미국) : ASTM E 662 smoke density, ASTM E 162 flammability etc. - NF F 16 101(프랑스) : NF C 20 - 455 Glow wire test, NF T 51-071 oxygen index, NF X 70-100 toxicity etc. - BS 6853(영국) : BS 476-6 Fire propagation, BS 476-7 surface flame spread, Annex D smoke test, Annex B(NF X 70-100 or prEN 2824~2826) toxicity etc. - STARR Project(유럽) : ISO 5658-2 fire spread, ISO 5660-1, -2 HRR & Smoke opacity etc.
바닥재		난연성 합성고무계	
시트	커버	난연 울 모케트	
	쿠션	안티반달계, 실리콘 등	
통로연결막		합성고무, 실리콘계	
단열재		유리섬유	

ISO 5658-2

ISO 5660



3. 시편시험을 통한 재료별 화재안전도 평가

현행 운영중인 철도에서 사용하고 있는 내장재의 시편을 수거하여 2절에서 선정된 시험방법에 따라 시험한 결과를 표 3에 정리하였다. 그러나 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 있었다. 각 시험결과들을 선진 철도의 기준값과 비교하기 위하여 표 4와 같이 기준값을 정하여 달성율을 평가한 결과는 대체로 50~ 70% 사이의 달성율을 보여주고 있었다.

표 3. 기존 철도차량 내장재 시편시험 결과(사례)

구분		Cone-Calorimeter		산소지수	화염전파		
		착화 시간(s)	THR (MJ/m^2)	LOI	착화 시간(s)	연소거리 (mm)	CFE (kW/m')
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

표 3. 계속

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 졸타포린
	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	

각 내장재료들의 달성율로부터 산출한 철도차량의 안전도는 기준값을 만족하는 내장재로 설계된 기준차량 대비 약 65% 수준으로 평가되었다. 그림1과 그림2에는 내장재별 산소지수와 CFE 값을 비교하여 수록하였다.

표 4. 내장재별 달성율 평가 기준값 선정 사례

구 분		콘칼로리미터			산소지수	화염전파		연기밀도		독성
		착화 시간(s)	THR (MJ/m²)	TSR (m²/m²)	LOI	착화 시간(t)	CFE (kW/m²)	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	7.0	-	100.0	1.6
	쿠션	6.0	20.0	238.0	28.0	2.0	7.0	-	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								

이와 같이 시편에 대한 시험평가를 통한 재료별 적절성 평가는 보편적이고 유용한 차량 내장재 화재안전도 관리방안으로 활용되고 있다. 최근 유럽연합을 중심으로 철도차량 내장재 시험방법의 표준화 작업이 추진되고 있는 것으로 알려져 있어 그 성과가 기대되는 바다.

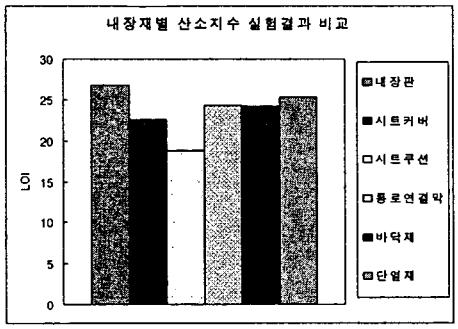


그림 1. 각 내장재의 산소지수 비교

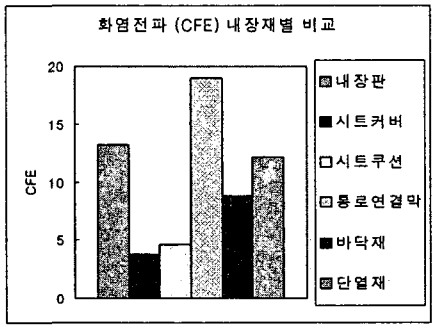


그림 2. 각 내장재의 CFE 비교

4. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 화재안전도 평가

시편시험에 의한 평가는 시험방법의 차이를 극복하기 어려운 문제점 이외에도 시편에 대한 평가결과가 차량의 실화재(real fire)에 그대로 반영된다고 보장할 수 없는 문제점이 있다. 철도차량의 화재위험도를 평가하려는 선행연구들은 각 내장재들간의 상호작용 및 실화재에서의 나타나는 특성이 시편시험에서 얻어진 시험결과와는 많은 차이가 있다고 평가하였다. 따라서 이러한 차이를 극복하기 위하여 차량에 대한 실대형 시험(full scale test)을 수행하거나, 내장재들 사이의 상호연관성을 계산하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 활용되고 있다. 미국의 경우에는 ASTM E 2061기준을 통하여 차량 화재위험도 평가의 4단계 가이드라인을 제시하고 있다. 우선 평가의 목적을 설정하고 그에 따른 화재 모델링 및 화재 시나리오에 대한 적절한 평가와 차량 디자인의 안전도 평가 등이 그것이다.

본 연구에서는 내장재의 교체에 의한 화재성능의 변화를 검증하기 위하여 NIST에서 개발한 FDS 3.1을 이용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 각 내장재에 대한 콘칼로리미터 시험결과 및 관련 자료들을 활용하였고, 초기 화원은 대구지하철 방화조건과 근사하도록 가솔린 점화 조건을 입력하였다. 기존 내장재는 앞의 표 1에 정리한 재료를 사용하였고 개량된 신조차량의 내장재는 페놀계 FRP 내장판, 합성고무 바닥재 등으로 안전도가 개선된 신규 내장재의 입력자료를 사용하였다. 그림 3과 그림 4에 해석결과를 비교하여 나타내었다.

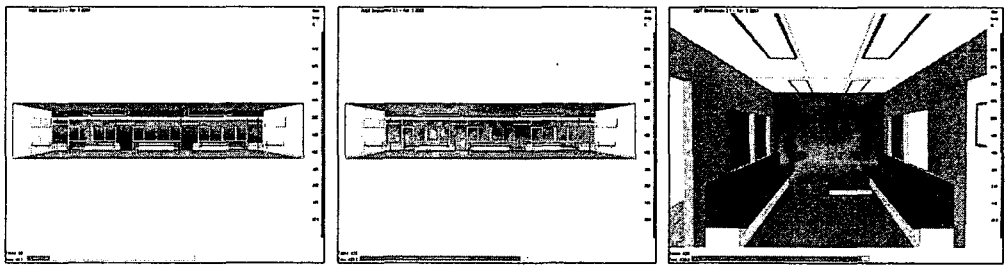


그림 3. 기존 내장재 철도차량의 화재해석(좌 60s, 중 420s 횡단면, 우 420s 종단면)

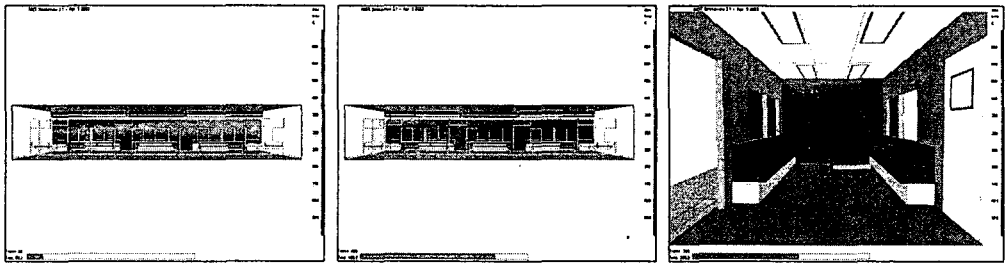


그림 4. 신규 내장재 철도차량의 화재해석(좌 60s, 중 420s 횡단면, 우 420s 종단면)

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 화염이 자체 소멸되는 것으로 나타났다. 연기층의 경우도 화재 발생과 동시에 급속히 확대되었다가, 화원이 연소를 멈춘 후 다시 상승하여 회복하는 것을 볼 수 있었다.

3. 결론

국내외 철도차량에 적용되고 있는 재료와 화재안전도 평가 방법을 비교하여 정리하였다. 또한 국내 철도차량 재료로 사용되고 있는 내장재의 시편을 샘플링하여 산소지수, 화염전파, 발열량, 연기밀도, 가스유독성 시험을 수행하고 시편시험(small scale test) 결과를 정리하였다. 기존에 사용되고 있는 내장재료가 선진 철도에서 사용하고 있는 재료에 비하여 난연성 면에서도 미흡하고 특히 연기특성이 취약함을 알수 있었다. 각 내장재가 나타내는 특성을 비교하여 평가할 수 있도록 해외 철도의 허용기준을 참조하여 기준값을 선정하고 달성율을 이용한 차량 안전도 평가를 수행하였다. 또한 내장재가 나타내는 시편시험의 한계를 극복하는 방안으로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 안전도 평가를 수행하였다. 내장재의 발열량 및 발화점, 비열 등을 이용한 화재모델링 및 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 새로운 내장재로 신규차량을 제작할 경우 대구 방화와 같은 조건에서도 차량화재가 확산되지 않고 자체 소화될 수 있음을 확인하였다. 화재모델링을 이용한 차량의 화재안전도 평가기법이 보다 보편적으로 사용되기 위해서는 입력인자, 발화요인 및 화염크기, 차량 도어의 개폐상태 등에 설정조건에 대한 기준 확립이 요구되어 진다. 시뮬레이션을 이용한 차량 화재안전도를 평가방법은 화재 시나리오 및 평가 대상모델을 구체화할 경우에 매우 유효한 평가 방법으로 활용될 수 있을 것이다. 보다 단순하고 개략적인 평가방법으로 기준값과 측정값을 비교한 달성율을 활용하는 방법도 항목간 가중치나 기준값 등의 설정이 명확하게 표현된다면 유효한 평가방법이 될 수 있을 것이다. 그러나 이러한 계산방법은 향후 실제 철도차량에 대한 적절한 실화재평가를 통하여 그 신뢰도가 검증되어야 할 필요성이 있다. 국내에서도 조속히 대형 시험설비 및 평가방안이 마련되어 철도차량의 화재안전도가 완전하게 확보되어야 할 것이다.

참고문헌

1. NFPA. *Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems* NFPA 130 : 2000, National Fire Protection Association
2. BS. *Code of practice for fier precautions in the design and construction of passenger carrying trains.* BS 6853 : 1999, British Standards Institution
3. ASTM. *Guide for Tire Hazard Assessment of Rail Transportation Vehicles.* ASTM E 2061-03. West Conshohocken, PA, 2003.
4. W. K. Chow, Assessment on Heat Release Rate of Furniture Foam Arrangement by a Cone Calorimeter, J. Fire Sci. Vol. 20(2002).
5. Young, R. "Behaviour of Rail Vehicles Components in Fires". Proceedings of Materials in Mass Transport, May 26, 1988. Rapra Tech Limited, UK.1998.
6. 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.