도시철도차량 화재 안전도 평가에 대한 연구(II) (화재시뮬레이션 평가 사례를 중심으로)

Fire simulation for the subway carriage to the replacement of interior materials

이덕희* 김종훈** 정우성*** 정용주**** 김운형** 안치헌*****

Lee, Duck-Hee Jeong Hun Kim, Jung, Woo-Sung Jung, Yong Ju Kim, Woon Hyung An, Chi Hun

ABSTRACT

In this study we conducted computer simulation with FDS V4.0.5 for the subway carriage of Seoul Metro to the replacement of interior materials. We tried to use the real data for the simulation by testing the interior materials in our Lab. From the result of the simulation we could confirm the fire resistance of the new interior replaced car to the chosen arson scenario case.

1. 서론

철도차량의 화재안전도의 사전예측이나 검증 작업은 차량화재 사고통계분석에 의한 검증 시나리오의 정립과 시험평가 방법의 선진화 및 컴퓨터 모델해석을 통한 안전도 평가기법의 발달에 따라서 차츰 신뢰성을 확보하여 가고 있다. 이러한 안전도 평가기법의 발달에 따라 최근에는 안전선진국을 중심으로 철도차량의 제작발주 시 차량의 화재안전도를 검증하도록 요구하는 사례도 증가하고 있다.

본 연구는 2003년에서 2006년 전반기에 거쳐 우리나라 전역의 도시철도에서 수행된 도시철도차량 내장재 개조사업의 일환이었던 수도권 전동차 개조사업의 안전도 평가 해석결과 사례를 정리한 것이다. 해석도구로는 FDS V4.0.5를 사용하였다. 해석에 사용된 기존 및 교체 내장재의 기초 물성자료는 운행중인 차량과 내장재 교체사업에 사용되고 있는 실물 내장재로부터 샘플링하여 한국철도기술연구원에서 콘칼로리미터와 발화온도시험기 등을 이용하여 직접 시험하였다. 이를 통하여 해석의 기초 입력치가 가능한 실질적인 내장재의 시험 값이 되도록 노력하였다. 모델해석은 내장재 교체 전후에 동일한 시나리오를 적용하고 그 결과를 비교 평가하여 내장재 교체 효과를 검증할 수 있도록 하였다.

2. 철도차량 전산화재해석 현황

철도차량 분야의 화재안전도 관리 기법으로 가장 전형적으로 사용되어온 방법은 내장재 각각의 재료 단위에서 화재특성 기준을 준수하도록 하는 것이다. 그러나 이러한 재료단위의 기준이 철도차량의 실물 단위에서도 화재특성과는 충분한 정량적 논리 연결성을 가지고 있지 못하다. 따라서 의자와 같

^{*} 한국철도기술연구원, 선임연구원, 정회원

^{**} 경민대학, 교수

^{***} 한국철도기술연구원, 책임연구원, 정회원

^{****} 한국철도기술연구원, 연구원, 정회원

^{*****} 서울매트로, 차량팀장, 정회원

은 중형 조립체나 실물 규모에서의 안전성 입증 요구가 대두되고 있다. 그러나 안전성 입증을 위해 실물 단위에서 화재시험을 수행한다는 것은 매우 많은 비용이 드는 효율성이 떨어지는 일이다. 이러한 문제를 해결해주는 방법이 신뢰성 있는 화재시뮬레이션 기법을 활용하는 것이다. 철도차량에 대한화재시뮬레이션 연구는 미국의 NIST나, 스웨덴의 SP 등을 비롯하여 각 국의 주요 화재연구기관에서시도하는 안전도 평가 기법이다. 미국의 경우에는 ASTM E 2061 가이드라인을 통하여 철도차량 화재위험도 평가의 4단계 가이드라인을 제시하여 왔다.

화재는 제어되지 않는 연소현상이라는 정의에 걸맞게 현재의 기술로도 정확한 모사가 거의 불가능한 분야라고 할 수 있다. 따라서 많은 간결한 모델화(simplified model) 작업이 도입되어 왔다. 철도차량 화재해석에 사용되어온 화재모델은 크게 두 가지 종류로 존 모델(Zone Model)과 필드 모델(Field Model)로 구분될 수 있다. 기존의 미국, 유럽 등의 차량화재 관련 연구의 경우는 대부분 CFAST라는 존모델을 사용하여 왔는데 존모델의 경우 내부공간을 동일한 검사체적으로 표현하여 2층의 영역으로 구분하고 그 평균값으로 표현하는 방법으로 연층 높이나 평균 발열량 처리 등을 매우 신속하게 처리하는 장점을 가지고 있어 건축 설계 및 소방, 화재사고 분석 등의 영역에 많이 사용되어 왔다. 미국의 NIST에서 수행한

그러나 존모델의 경우 공간의 평균값을 취하는 문제로 인하여 공간내부의 가연물에 의한 연소 시 발생되는 현상의 간단한 예측은 가능하나, 설정 공간에 해당하는 바닥, 벽, 천장의 내장재가 독립적으 로 연소에 가담하는 현상의 해석에는 어려움이 있어 왔다. 반면 필드모델의 경우 보다 세부적인 요소 를 고려하기에 적합하다. 필드모델로 화재전용으로 발표된 화재 전용 CFD 코드로는 JASMINE, SMARTFIRE, Fire Dynamic Simulator 등이 있으며, 현재도 화재공학 및 전산해석 연구자들에 의하 여 지속적으로 업데이트 되고 있는 상황이다. 이 중 현재 미국 NIST에서 개발하고 있는 모델인 FDS(Fire Dynamic Simulator)는 표면의 발화와 연소에 대한 고려가 가능한 기능이 있어 내장재의 안전성을 평가하려는 본 연구에는 매우 적합한 모델로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 전동차 내 장재 교체에 대한 안전성능 비교 평가를 위하여 FDS V. 4.0.5 를 선정 수행하였다. 이 프로그램은 일반적인 CFD 해석프로그램과 같이 열전달과 연기와 열에 의한 유체의 흐름을 Navier-Stokes equation에 기반하여 해석한다. 그 중에서도 재료의 특성이 적용된 연소재료 확대 모델링이 용이한 장 점이 있다. FDS는 화재에 의한 유체의 흐름을 간결하게 해석하기위하여, LES (Large Eddy Simulation) 기법과 DNS (Direct Numerical Simulation) 기법을 적용하여 계산하고 연소모델과 복사 열전달모델 등이 포함되어 해석 공간 화재의 열적 조건을 예측한다. 또한 FDS는 화재와 관련 다양한 자료들을 추출할 수 있으며, 여러 가지 시나리오를 검증할 수 있는 여건이 갖추어져 있고, 스프링클러 나 각종감지기의 성능을 임의로 구성하여 시험해볼 수 있는 등, 화재분야에 적합한 CFD 프로그램이 라 할 수 있다. 또한, 해석결과의 후처리 장치로 개발된 Smokeview의 지속적인 업그레이드를 통하여 시각적인 화재분석이 가능하다.

화재현상의 경우는 해석 범위가 넓기 때문에 일반적인 연소해석 모델로 계산하기에는 비효율적인 면이 있다. 그래서 FDS의 경우에도 계산의 효율성을 위하여 격자 구조를 육면체 형태로 간단하게 처리하도록 되어있으며 10센티미터 이하의 격자는 허용되지 않는데 본 연구에서 수행한 철도차량 내부 공간의 화재해석의 경우에도 이와 같은 해석코드 자체의 근본적인 한계는 포함되어 있다는 점을 미리말해 두고자 한다.

3. 내장재 교체에 따른 화재 시뮬레이션 수행

3.1 화원 시나리오와 기초 입력자료

화재해석의 신뢰성을 좌우하는 것은 화원 시나리오의 설정 및 내장재 재료의 특성치에 해당하는

기본 입력 자료의 신뢰도에 있다. 일반적으로 철도차량의 화재안전도 검토시 수행되는 방법은 탈출소 요시간과 화재확산에 따른 연층하강속도를 비교하여 가능한 모든 시나리오에 대하여 충분한 탈출시간을 확보하고 있는가를 검증 하는 것이다. 그러나 이러한 고전적인 경우의 해석은 우리나라에서 발생했던 방화와 같은 대형 규모의 화원 시나리오에 대하여 까지는 고려하지 않는 경우가 일반적이다. 우리 연구의 목적은 작은 규모의 다양한 화원 시나리오에 대피시간 확보 여부를 검증하려는 것은 아니다. 우리 연구의 목적은 가장 가혹한 방화 케이스에 대하여 내장재 교체효과에 따른 화재저항성의 비교에 있었다. 따라서 우리는 방화 시나리오에 대한 검증을 먼저 수행하였다. 만일 대상 차량이 가장가혹한 화재시나리오에 해당하는 방화시나리오에 대해서도 안전성이 입증되었다면 이외의 경우에 대하여는 검증작업을 생략할 수 있다고 판단하였기 때문이다. 선정된 화원 시나리오는 표1과 같다.

표 1 화원 시나리오 설정 및 발열량

화원설정	Mass Loss Rate(g/m²s)	Effective Heat (kJ/g)	Max HRR	Burning Time Area(s*m²)
가솔린 4리터(코너 바 닥) 방화	50	43.7	2185(kW/m ²)	60
가솔린 4리터(코너 바 닥 2리터, 코너 의자 2 리터) 방화	50	43.7	$2185(\mathrm{kW/m}^2)$	30*1 60*0.5
가솔린 1.8리터(코너 의자)	50	43.7	$2185(kW/m^2)$	54*0.5
신문지 1장(약23g) 방화	ISO 5660-1 Time variable Test Result 활용		11.07(kW)	-
신문지 2.7kg 방화			230(kW)	-

표 2 기존 및 교체차량 내장재료 및 요구기준

구 분		기존 내장재		교체 내장재		
		사용재료	요구기준	사용재료	요구기준	
내	장판	불포화폴리에스테 르 FRP	KS 3015, 자기소화성	세라믹코팅 알루미늄판	도시철도차량안전기	
바닥재		염화비닐수지	KS M 3305	합성고무	준에관한규칙	
의	커버	폴리에스테르 모켓트	JIS Z 2150	스테인리스	ISO 4589-2, ASTM E 662,	
자	쿠션	우레탄 폼	FMVSS 302	, – ,	ISO 5658-2,	
단열재		폴리에틸렌 폼	KS M 3808	유리섬유	BS 6853 Annex B.2	

기존 철도차량 및 교체 내장재의 시편을 수거하여 콘칼로리미터법을 이용하여 시험한 결과의 일부를 그림4와 그림5에 나타내었다. 표 3에는 해석에 사용된 철도차량 내장재의 재료특성값을 나타내었다. 비열의 경우 유사재료의 문헌값을 사용하였으며 기타 물성치는 시험값을 활용하였다. 추가 제한조건으로는 본 모델링의 결과는 창문의 파괴로 인한 공기유동 조건의 변화를 고려하지 않았으므로 POST-FLASHOVER 단계의 상황에 대해서는 예측하지 않았다. 외부기류는 안정된 상태로 설정하였으며 이는 내부 화재의 진행에 영향을 미칠 수도 있을 것이다. 실내외 기준 온도는 20℃로 설정하였으며 모든 가연물의 표면온도도 최초 20℃로 설정되었다.

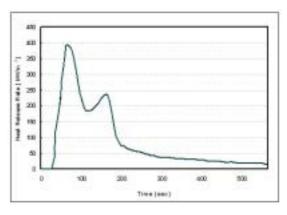


그림 4 기존차량 FRP 내장판 열방출 곡선

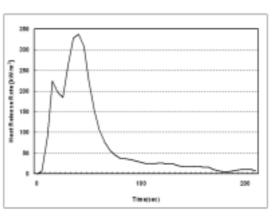


그림 5 기존차량 의자복합재 열방출 곡선

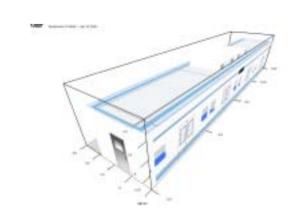




그림 6 해석차량 모델 및 내부 격자 구성 (298,350개)

표 3 차량내장재 재료 특성

구 분		Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Ignition Temperature (°C)	Specific Heat (kJ/kg · °C)	Max. HRR (kW/m ²⁾
내장판	불포화폴리에스테 르 FRP	2.9	1293	454	1.2	393.7
	세라믹코팅 알루미늄판	1.5	2455	-	0.896	-
바닥재	염화비닐수지	4.2	1812	487	1.34	130.4
	합성고무	4.2	2009	448	1.34	188.5
의 자	폴리에스테르 모켓트/우레판 폼	4.0	212.5	496	1.8	337.9
	스테인리스 스틸	1.5	7393	_	0.5	_

3.2 시나리오별 해석 결과

각각의 시나리오에 대한 해석결과를 표 4에 간략하게 정리하였다. 가솔린 방화 시나리오의 경우 휴대가 가능한 페트병 용량의 1.8리터 시나리오 이상의 경우 기존차량에서 모두 화재가 성장하여 3분 이내에 플래시오버에 도달하는 것으로 나타났다. 특히 다량의 신문지를 이용한 방화의 경우에도 가솔린 방화에 비하여 화재성장 속도는 느리지만 화재가 성장할 수 있음을 보여주었다. 내장재가 교체된 차량의 경우에는 가솔린 4리터 이하 모든 경우에 대하여 화재가 성장하지 않고 화원의 연소가 종료된 직후 화재가 스스로 소멸하는 것을 보여주었다. FDS 해석결과는 후처리 프로그램인 Smoke view에 의하여 그림 7, 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

표 4 시나리오별 화재해석 결과

51 Al 11 Fl	기존 차량		내장재 교체차량	
화원설정	실내공간 최고온도(℃)	화재거동	실내공간 최고온도	화재거동
가솔린 4리터(코너 바닥) 방화	1200 이상	2-3분경 Flashover	400 - 500	화재성장 없음
가솔린 4리터(코너 바닥 2리 터, 코너 의자 2리터) 방화	1200 이상	2-3분경 Flashover	400 - 500	화재성장 없음
가솔린 1.8리터(코너 의자)	1200 이상	3분경 Flashover	_	_
신문지 1장(약23g) 방화	30 이하	화재성장 없음	30 이하	화재성장 없음
신문지 2.7kg 방화	1200 이상	4-5분경 Flashover	_	_

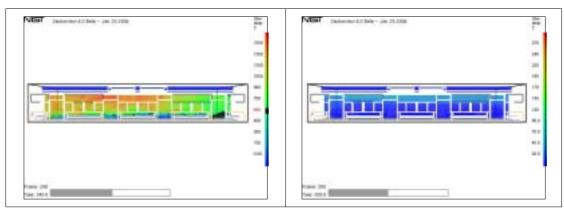


그림 7 가솔린 4리터 기존차량[좌], 내장재 교체차량[우] 화재해석 240초 공간온도 분포

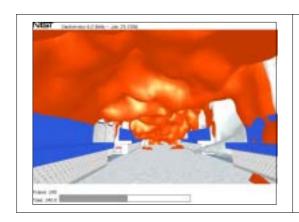




그림 8 가솔린 4리터 기존차량[좌], 내장재 교체차량[우] 화재해석 240초 ISO Surface

3. 결론

화재 시뮬레이션 기법을 이용하여 도시철도차량 안전기준의 개정에 따라 시행된 전동차 내장재 교체 사례에 대하여 화재 저항성을 비교하여 보았다. 해석결과의 신뢰성 확보를 위하여 실제차량의 도면을 활용하였으나 해석에 사용된 FDS 프로그램의 내재적인 한계를 내포되어 있다. 가급적 다양한 방화 시나리오에 대하여 평가하였다. 대구 방화사고의 경우에 해당하는 가솔린 4리터와 보다 용이하게 휴대가 가능한 페트병 용량의 1.8리터 시나리오의 경우와 신문지 방화의 경우에 대하여 평가하였다. 내장재가 교체된 차량의 경우에는 선정된 모든 경우의 시나리오에 대하여 화재가 성장하지 않음을 확인할 수 있었다. 다만 축적된 검증 데이터가 부족한 이유로 해석결과의 검증 작업은 수행되지 못하였다. 화재모델을 이용한 보다 신뢰성 있는 해석을 위하여 화재해석의 결과를 검증할 수 있는 시험평가 시스템의 확보와 데이터 축적이 지속적으로 요구된다.

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. 이덕희 외, 철도차량 내장재의 화재안전도 평가방법 연구, 2003년도 한국 화재 소방학회 추계학술 발표회 논문집
- 5. Fire safety on intercity and interregional multiple unit trains, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2002
- 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.