

철도차량 실물 화재시험 사례 연구

Review of the real scale fire test of Rolling Stocks

이덕희* 정우성** 김정석*** 조희기**** 이은경***** 정종철*****

Lee Duck-Hee, Jung Woo-Sung, Kim Jung-Suk, Cho, Hee Ki Jung Jong-Cheul

ABSTRACT

In this study we reviewed the real scale fire tests of rolling stocks around the world. Especially the tests of NIST, CSIRO and the Japanese case were reported with the Mock Up tests conducted in Korea after the Dague Fire Accident. We also reported the composite car body case test briefly. Some promotion of the test system was considered on the composite body test for more credible results. More adjusted system is need for Fire Test of Real Scale rolling stocks.

1. 서론

철도차량의 화재안전성에 대한 평가 방법으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 것은 차량에 사용된 내장재 시편 및 부품단위의 연소특성을 검토하는 것이다. 이러한 방법은 오래전부터 설계 및 제작 단계에서의 안전성 검정방법으로 연결되어 왔다. 하지만 시편이나 단품 단위의 내화특성이 차량 전체에서도 지속적으로 안전성을 확보하여 줄 것인가에는 많은 의문이 제기된다. 화재사고의 기록에는 시편단위 시험기준을 통과한 부품을 사용한 경우에도 방화와 같은 예기치 않은 대화원에 노출되었을 경우 급격한 화재성장으로 이어지는 경우가 발생하고 있기 때문이다. 그래서 완성품 단계에서의 안전성 평가가 필요하다는 요구가 대두되었다. 하지만 실물 형태의 시험검사에는 많은 비용과 노력이 요구된다. 더구나 연소시험과 같이 반복시험이 불가능한 경우에는 실물 시험을 통한 검사기준의 적용이라는 것은 현실성이 없는 것처럼 보인다. 이에 따라 복잡한 화재현상을 단순하게 모델링한 컴퓨터 시뮬레이션 결과가 안전성 평가의 방법으로 많이 활용되고 있다. 그러나 전산해석의 충분한 신뢰성이 확보되려면 검증된 입력 데이터와 해석 프로세서의 신뢰성에 대한 검증 과정이 요구된다. 컴퓨터 모델링의 신뢰성을 검증하기 위해서는 아무래도 실물시험을 통한 충분한 데이터 확보가 당분간 요구된다. 이보다 더욱 집적적인 실물시험의 필요성은 화재안전성을 향상시키기 위한 각종 화재제어(Control) 설비의 성능을 검증하기 위한 것이다. 철도차량에 적용할 것을 목적으로 개발되고 있는 감지기 및 자동소화 시스템의 경우 적절한 성능검증 절차와 설비가 부재한 실정이다.

-
- * 책임저자 : 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원
 - ** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정희원
 - *** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원
 - **** 한국철도기술연구원 연구원
 - ***** 주식회사 한국화이바 공장, 정희원

이 경우에도 제품의 일반성능 사양을 통한 모델링 해석을 통하여 실차적용 시 성능을 검토하는 것이 가능하다고 하더라도 검사단계에서는 실물 시험이 더 적절하다고 보인다.

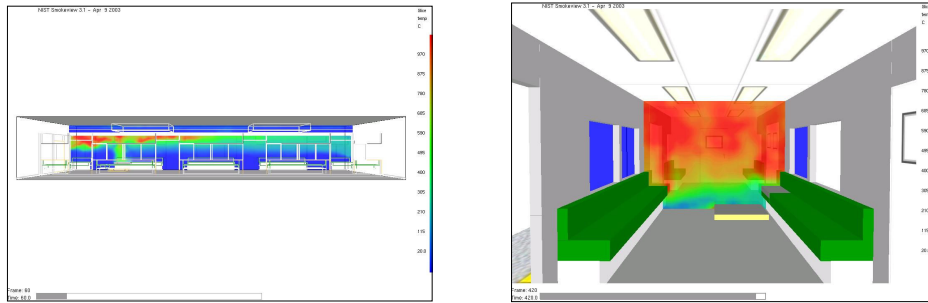


그림 1. 컴퓨터 모델링을 이용한 철도차량의 화재해석 사례

본 논문은 위와 같이 신뢰성 확보를 위하여 요구되고 있는 체계적인 실물시험 시스템 평가체계 구축과 기존에 수행되어 왔던 국내의 철도차량 실물화재 시험사례를 정리하고 국내에서 수행되어 목합(Mock Up) 차량의 시험사례를 소개하고자 하는 것이다.

2. 본문

2.1 국내의 기존 실물화재 시험 사례

화재시험에서 가장 핵심적인 평가요소는 대상물의 연소로부터 발생하는 시간대별 발열량과 연기량이다. 차량화재의 피해가 대형화 될 수 있는 지하구간이나 터널 내에서의 유동이 적절하게 예측되어야 피난시설이나 배연장치 등의 설치가 적절해지기 때문이다. 열과 연기의 발생량을 실험적으로 측정하기 위해서는 연소과정에서 발생하는 연소가스를 계측장치가 설치된 검사관으로 통과시켜야 한다. 그러나 실제로 철도차량의 연소시험에서 발생하는 최성기 규모의 연소가스를 모두 흡입할 만한 규모의 시험기는 세계적으로 드물다. 미국은 NIST(National Institute of Standard and Technology)의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)의 연구팀을 중심으로 1980년대 이후 철도차량의 화재안전도를 평가하기 위한 다양한 방법의 시험을 수행한 바 있다. 이 중 1984년 FRA에 의하여 지원되고 NIST의 전신인 NBS(National Bureau of Standard)에 의하여 Amtrak의 여객차량 실물화재 시험 사례가 대표적이다. 실험에 사용된 차량내 내장재의 각 재질은 1984년에 Amtrak 차량에서 일반적으로 사용되던 것들이었다.

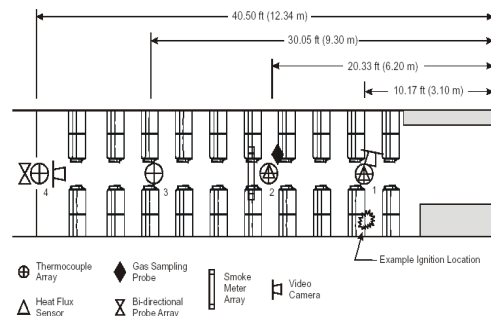


그림 1 배연덕트를 이용하여 발열량 평가를 시도한 사례

시편단위 시험(Small-scale test)에서 각 개별 물질의 발화, 화염확산, 연기생성, 열방출을 등을 평가하였으며, 그 결과를 실험시험(Full-scale test)의 결과와 비교하였다. 이 실험시험에서 특기할 만한 사항은 철도차량의 연소과정에서 발생하는 연소가스를 모아서 대표성 있는 연소가스를 평가하고자 한 점이다. 결국은 깨진 창문 등으로 방출되는 가스 때문에 성공하지는 못하였으나 의미 있는 시도라고 평가 할 수 있을 것이다.

호주는 연방과학산업연구소(CSIRO)의 FSTL(Fire Science and Technology Laboratory)을 중심으로 건축물과 교통 분야의 화재연구 및 실험을 수행하여 왔다. 호주는 주별로 다른 기준을 채택하고 있었는데 MTRC의 경우는 모든 표면 물질들이 방출하는 열들을 모두 합했을 때 항상 5 MW를 초과해선 안 된다는 사양을 가지고 있었다. 표면 물질들을 콘칼로리미터로 테스트하여 듀간(Duggan)의 계산법을 이용하여 왔다. 이러한 계산법은 많은 가정을 함축하는 한계를 가지고 있다. 최근 호주에서도 실험시험을 근거로 한 새로운 해석의 접근이 시도되었다. 2003년 브리즈번의 퀸스랜드 소방학교에서 수행한 철도차량 실험시험이 그러한 사례이다. 이 프로젝트의 최종 목적은 차량을 제작하기 전에 주어진 재료의 정보로부터 차량의 화재규모(Fire Size)를 예측할 수 있도록 하기 위한 것이다. 호주에서도 아직까지 철도차량 화재시험을 할 수 있는 규모의 터널이나 대형 시험동은 없다고 보인다. 다수의 온도센서(Thermocouple)가 차량의 내부와 외부에 설치되었고 열 복사량을 측정하기 위한 장치를 비롯하여 창문과 출입문에는 유량계가 설치되어 공기의 유동을 측정하였으며 부분적으로 가스 샘플러를 장치하여 연소가스의 성분분석(O₂, CO, CO₂)을 시도하였다.

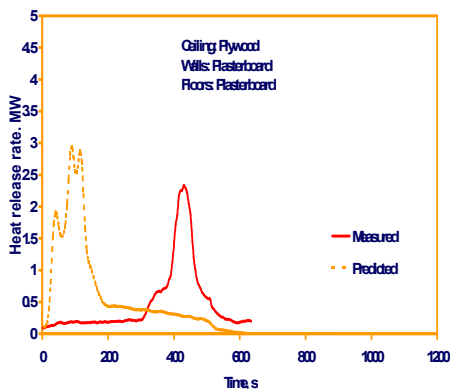


그림 2 화재시험 예측과 시험결과 평가사례(CSIRO)



그림 3 퀸스랜드 소방학교 실외 철도차량 화재시험 사례

일본은 2003년도 대구지하철 사고 이후 소방연구소와 와세다 대학의 연합으로 몇 가지 화재 시험을 수행하여 온 것으로 알려져 있다. 기존의 연구와 실험 결과로는 일본 철도차량의 경우도 대구에서와 같은 대형 화원에 노출되는 경우의 안전성에 대하여 검증된 바 없었기 때문이다. 소방 연구소에서 수행한 시험결과의 일부는 대책보고서에 수록되었다. 이 실험에서는 온도계측과 연소가스 분석을 통한 발열량 추정이 시도되었지만 주요 관찰점은 화원의 종류에 따른 화재성장 여부에 있었다. 승강문이 폐쇄되어 있는 상태와 개방되어 있는 상태에 대한 화재진행 상황의 조사가 포함되었으며 차량 천정부에는 일본에서 일반적으로 이용되고 있는 섬유강화플라스틱(FRP), 도장형 알루미늄 판넬, 멜라민 화장지 접합형 알루미늄판넬(MPAL)의 다른 내장재에 대하여 차량 내부의 연소 확대에 미치는 영향을 파악했다고 한다. 이 실험은 18×18×15(m) 규모의 소방연구소 실험동에서 수행되었고 실험 차량은 설비의 제약으로 인해 차량의 장 방향 중간 부분에서 절단하고, 대차 및 천정부의 에어컨과 유닛은 철거하였으며 차량의 절단면은 문 2쪽에 상당하는 개구 면적

만 남기고 강관으로 폐쇄했다. 국내에서 수행해 왔던 목합차량 화재시험시 단부를 열린 상태로 시험하던 점보다 실물에 가깝게 조정된 부분이다. 추가 시험에서는 차량간 출입문을 개방하고 인접 차량을 폐쇄하는 조건에서 통로연결막을 통한 화재의 전파에 관한 시험을 수행하였다.

그 동안 국내에서 수행하여온 철도차량 화재시험은 주로 1/3 규모의 목합차량을 활용하여왔다. 국내의 시험은 객관적인 차량 화재시험의 절차나 경험에 기반을 두지 않았었고 대구 지하철 사고 대책으로 진행된 내장재 교체사업의 실효성을 확인하는 정도의 목적만을 위하여 기획되었었다. 그 때문에 이러한 목합시험의 경우 내장재 개조사업의 성과를 확인하는 데는 부분적으로 성공하고 있으나 과학적인 차량시험의 절차로서는 몇 가지 근본적인 한계를 가진다고 보아야 할 것인데 바로 실차량과의 구조적 차이점과 시험 당시 온도환경에 대한 제어를 하지 못한 점이 그것이다.

철도공사(당시 철도청)는 2004년 11월 26일 가장 먼저 화재실연을 시작한 기관으로 이 때 사용된 차량의 규모와 점화원 등은 이후 시행되는 다른 시험의 기준 모델이 되었다. 화재실연의 목적은 내장재를 교체한 차량이 대구화재 사고에서와 동일한 정도의 대형화원에 노출되더라도 손상 없이 화재가 자연 소멸되는 과정을 보여주하고자 하는 것이었다. 기대했던 대로 가연성 화원의 연소가 종료되자 차량화재는 더 이상 진전되지 않고 자연 소멸되었다. 대구지하철 공사의 내장재 교체 차량 화재시험은 대구지하철 화재사고의 당사자가 시행하는 것으로서 당시 언론의 많은 관심을 받았다. 이 시험은 공사 이외에도 내장재 교체사업 시행자인 로템사와 철도기술연구원의 공동수행으로 이루어졌는데 국내에서는 철도차량 실화재 시험에서 온도 및 열화상 계측을 시도한 최초의 사례가 되었다. 화재시험 결과 천정부에 약 600℃까지 온도 상승이 계측되었으나 화원의 연소가 종료되자 차량의 화재는 진전되지 않고 스스로 소멸되었다. 연소가스의 경우 대표성을 확보하지 않는 것으로 판단하여 시편시험으로 대체되었다. 그러나 이 시험의 경우에도 철도청 시험과 마찬가지로 목합차량이 실차량과 비교하여 크기가 지나치게 단축된 점과 단부가 열려있어서 실제 상황과 다른 점, 실외 시험으로 인한 주변 기온의 영향 등에 있어 매우 제한적인 시험이라고 평가하여야 할 것이다. 서울지하철공사의 경우에도 내장재 교체차량에 대한 화재안전도를 실증하고자 2005년 2월 신너 1.8리터 방화조건으로 1/3 목합차량의 화재실연을 실시하였다. 이 시험의 경우 기존 철도차량에 대한 화재시험을 병행하여 내장재 개조효과를 가시적으로 비교 검증하도록 한 점에서 특징적이다. 예측했던 바와 같이 휘발유 방화에 대하여 폴리에스터 섬유강화플라스틱과 우레탄 폼 의자를 사용하였던 기존차량은 엄청난 연기와 유독가스를 뿜어내며 화재가 확대 성장하는 과정을 보여주었다.



그림 4 철도공사 개조차 목합시험 사례



그림 5 서울지하철 기존차량 목합시험 사례

그동안 국내에서 수행되어왔던 복합차량 화재 시험은 계획된 실물시험 기획으로부터 시도되었다기보다는 차량제작에 필요한 설계 검증 과정으로 제작된 복합차량을 활용하여 내장재의 개조 성과를 홍보하는 측면이 강했다고 보아야 한다. 따라서 제한적으로는 대형화원에 대한 실차 형태의 화재저항성을 검증하는 역할을 하여 왔지만 방화케이스 시험의 경우 기존차량은 화재의 성장이 확인되었다. 근본적인 한계를 포함하고 있다는 점을 가만하여 평가하여야 할 것이다. 특히 차량의 완전한 구조를 형성하지 못한 점과 제어되지 못하는 낮은 외기 환경에 의한 열방사 영향 등은 내장재의 열분해 특성을 저해하여 정상적인 화재진행을 저해하는 요인이 되어왔다. 그러한 측면에서 2006년 2월 한국화이버에서 수행된 틸팅 복합차의 화재시험의 경우는 차체의 온도를 일반적인 시험실 온도인 20~25 ℃까지 가열하여 동절기의 실외 시험으로 인한 열손실을 보상하도록 노력 하였다.

2.2 복합차체 복합차량 화재시험 사례

곡선선로가 많은 기존선에서 고속주행을 할 수 있도록 개발된 틸팅 차량의 경우 원활한 틸팅 기능의 구현을 위하여 차량의 경량화가 필수적인 요구사항이라고 할 수 있다. 이러한 경량화 요구에 따라 기존의 스테인리스 차체를 대신할 에폭시-탄소섬유 복합재료 차체가 개발되었다. 그러나 불연 금속재를 사용하던 기존 차량을 난연성 복합재료로 대체할 경우 발생할 수 있는 화재위험성에 대한 우려가 많았던 것으로 알려져 있다. 화재시험은 복합차량에 대해 발생 가능한 화염병 투척 및 차량내부 방화 시나리오로 나뉘어 실시되었다. 차체 노출시험은 1.8리터의 신너를 측벽에 투척한 후 점화하였으며, 내장재 설치 후 시험은 4리터의 신너를 이용하여 2인석 의자 4조와 바닥에 고무 도포한 후 점화하는 시나리오로 수행되었다. 모든 케이스의 시험에 대하여 화원의 연소가 종료된 후 차체 또는 내장판으로의 화재전파가 발견되지 않았고 화재가 스스로 소멸하는 현상을 확인하였다. 본 논문에서 검토하고자 하는 주요 내용은 시험방법 설정에 관한 사항이므로 이 시험의 보다 상세한 결과에 대하여는 다른 기회를 통하여 보고하도록 하겠다. 이 시험의 경우 기존 복합차량 화재시험에 비하여 몇 가지 개선사항이 검토되었다.



그림 8 복합차량 화재시험 전 가열장면

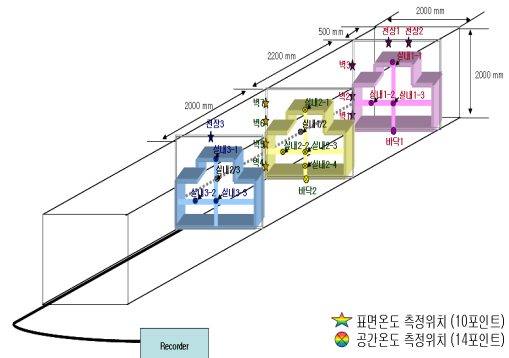


그림 6 화재시험 온도계측 위치도

우선 이 시험에서는 실외 온도가 낮은 동절기 시험임을 가만하여 열풍기를 활용하여 화재시험 전 차체 및 내장재의 온도를 20℃도 근처에서 유지시켰다. 그림7에 나타낸 바와 같이 차체의 표면에 설치된 온도센서를 통하여 이를 확인할 수 있었다. 두 번째는 측정설비 설치의 요구조건에 해당하는데 우선 화재의 진행에 영향이 없도록 설치되어야 한다는 점이다. 기존의 온도측정을 위해 설치된 센서 보호관은 영향력이 최소화 되도록 가급적 가는 재료를 사용하였다. 또한 표면온도

설치를 위하여 차체 및 내장판의 내측부로 삽입된 센서부로 화염이 직접 침투하지 않도록 보호 커버를 부착하였다.

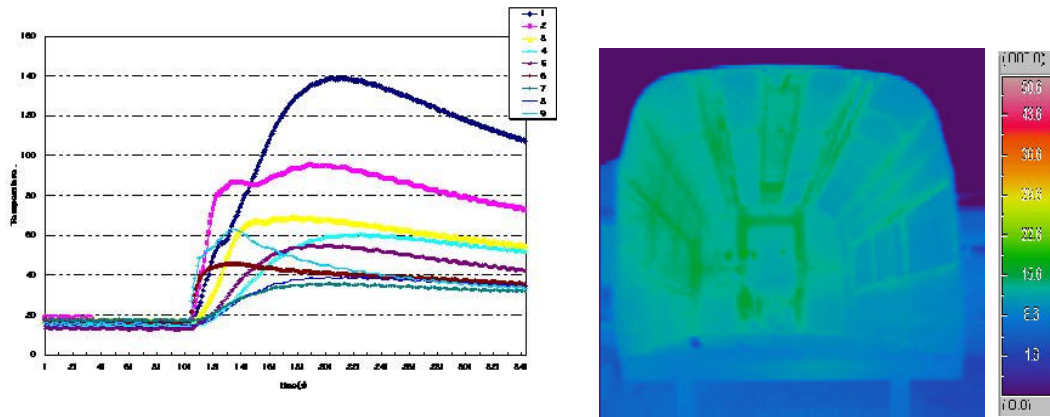


그림 7 복합차량 화재시험 표면온도 측정 그래프(좌)와 시험 시작전 차체온도(우)

3. 고찰

철도차량 실물화재 시험의 경우 시험체의 형상이 일반적인 원형 구조가 아니고 기다란 선형적 특성으로 인하여 현재 일반적으로 설치되고 있는 대형칼로리미터의 경우에도 시험하는 데 어려움이 있다. 일본 소방연구소의 사례에서 살펴보았듯이 이러한 문제로 인하여 차량의 일부를 절단하여 시험을 수행하게 되는 경우도 발생한다. 또 다른 문제점은 반복시험에 의한 재현성을 확인하기 어렵다는 점이다. 기존의 실물 시험에서는 최대 성장된 규모의 시험에서 시험체를 태워 버리기 때문에 근본적으로 반복시험이 불가능했으며 시험설비가 아닌 운행차량 실물을 활용하게 되므로 동일차량을 확보하는 것이 사실상 불가능 했다고 하겠다. 그러나 동일 시스템 내에서의 반복 가능성은 모든 시험설비의 일반적인 요구사항인 동시에 철도차량을 적용대상으로 개발된 화재감지 장치나 진화설비 등의 성능평가를 위한 시험 등에서는 매우 필수적인 사항이다. 따라서 동일설정의 반복시험이 가능하고 장방성이 있는 선형 구조의 차량 시험체에서 연기를 누출시키지 않고 흡입할 수 있는 배연구조를 가지는 차량용 실화재 시험설비의 개발이 요구되고 있다. 이러한 시험설비 개발을 위한 설비 사양 작성에 본 논문의 실물시험 조사 자료가 도움이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. ASTM E 2061-2003, "Standard Guide for Fire Hazard Assessment of Rail Transportation Vehicles"
2. Richard D. Peacock, NISTIR 6563, "Fire Safety of Passenger Trains;Phase III Evaluation of Fire Hazard Analysis Using Full-Scale Passenger Rail Car Tests"
3. IMO Res. A.653 "Recommendation on improvement fire test procedure for surface flammability of bulkhead, ceiling and deck finish materials"
4. Peter Kangedal, Daniel Nilsson, Fire safety on intercity and interregional multiple unit trains, Lund university Report 5117, 2002, Sweden