표면열복사율을 이용한 복합차체 철도차량 화재시뮬레이션

Fire simulation by HRRPUA method for composite material body structure train coach

김우태* 이덕희† 정우성** 이창현*** 유문천****

Kim Woo-Tae, Lee Duck-Hee, Jung Woo-Sung, Lee Chang-Hyun, Woo Mun-Chun

ABSTRACT

Larger amount of composite materials are used for light train. These days even the body structure of the coach was made by composite materials. In this study, we made the fire simulation with FDS by HRRPUA method for the passenger coach of carbon-epoxy composite material body structure. For the body structure fire resistance verification, 1.8 liters of gasoline were selected for fire source. For the interior fire case, 4.0 liters of gasoline fire source was selected as Daegu fire accident case.

1. 서 론

에너지 효율성을 높이기 위해 철도차량 역시 경량화 되어가는 추세이다. 철도차량의 경량화를 위하여 복합재료를 사용한 FRP 재료의 사용이 지속적으로 늘어왔으며 이제는 철도차량의 차체에까지 복합소재를 적용할 수 있게 되었다. 그러나 대구지하철 방화사건이나 스위스의 Gotthard-base, 영·불 해저 터널 화재와 같은 대형 철도차량 화재에 대한 관심이 고조되고 있는 상황에서, 기존의 불연재를 사용하던 차량에 비하여 복합소재를 사용한 차량의 화재 위험성이 높을 것으로 우려된다. 본 연구는 FDS를 이용한 화재시뮬레이션 방법 중 표면열방출율(HRRPUA) 방법을 적용하여 복합소재 철도차량의 화재시뮬레이션을 수행한 것이다. 본 연구에서는 차체의 화재성장에 대한 해석을 위하여 사용되는 여러 가지 화재해석시뮬레이터 중에서 NIST의 FDS_Ver 5.0을 이용하였다. FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용한 화재시뮬레이션 방법 중 표면열방출율(HRRPUA ; HRR Per UintArea) 방법을 적용하여 복합소재 철도차량의 화재시뮬레이션을 수행하였다. 2010년부터 상용하게 될 틸팅 복합차체 철도차량을 모델로 했으며, 차량 구조체와 페놀샌드 위치, 바닥재(rubber), 의자(moquette) 등의 내장재가 완전하게 설치된 차량에 각각 휘발유(Gasoline; C_5H_{12}) 1.8ℓ, 4ℓ를 연소하는 것으로 수행하였다. 내장재 각각의 물성치(thermal property)를 기반으로 전체적인 화재 양상과 특징을 모사하여서 화재의 성장을 해석하였으며, 또한 향후 진행할 연구방향을 함께 제시하였다.

† 교신저자 : 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 선임연구원
E_mail : dhlee27@krri.re.kr
TEL : (031)460-5371 FAX : (031)460-5279
* 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 연구원, 비회원
** 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 책임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 연구원, 비회원
**** 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 연구원, 비회원

2. 본 론

2.1 시뮬레이션 경계조건 및 Grid

화재해석공간은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 차량 1량을 모델로 시뮬레이션을 수행하였다. 차량의 갱웨이 부분은 제외 하였다. 차량을 중심으로 천정과 바닥, 그리고 한쪽 측면을 콘크리트라 가정하였고, Fig. 4의 그림과 같이 화재 시 피난이 예상되는 3개의 출입구를 개방(Open)한 상태로 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 격자수는 육면체의 격자로 약 881만개의 격자를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 3개의 다중격자를 사용하여 차량부분은 10cm의 격자크기로 차량을 중심으로 양쪽 터널부는 20cm로 격자크기를 설정하였다. Fig. 3은 격자 분포를 나타낸 것이다.

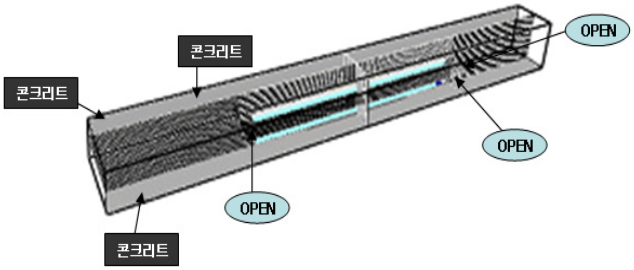


Fig. 1 시뮬레이션 경계조건

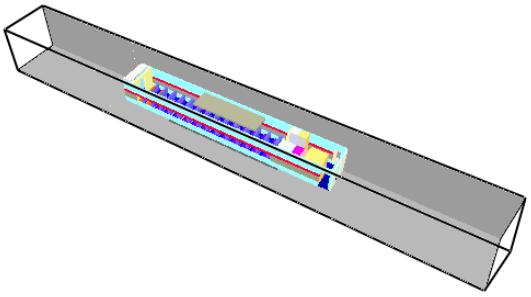


Fig. 2 차량 및 해석공간

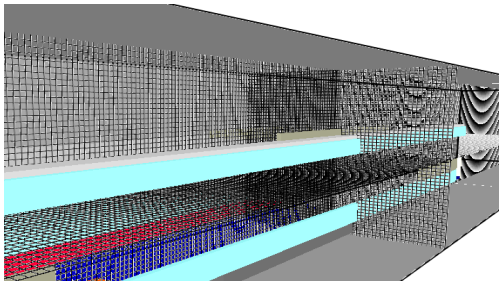


Fig. 3 FDS Grid

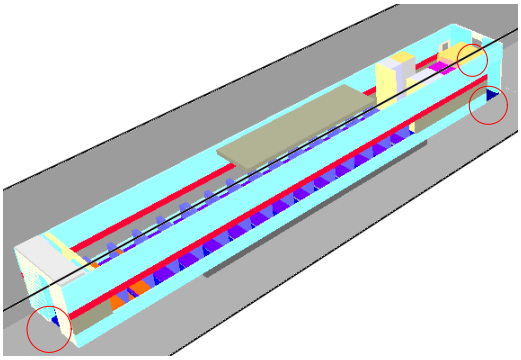


Fig. 4 화재 시 차량개방위치

2.2 화원설정 및 화재시나리오

본 시뮬레이션에서 설정된 화원(Fire Source)은 휘발유(Gasoline; C_5H_{12})이며, 차체방화 시나리오와 내장재 방화시나리오를 구분하여 설정 하였다. 차제시나리오에서는 1.8ℓ분량을 차량코너 부분 2㎡에서 발화하여 최초 60초간 연소하는 것으로 설정하였으며, 내장체 방화시나리오에서는 4ℓ분량으로 차량코너 부분 4㎡에서 발화하여 최초 22초간 연소하는 것으로 설정하였다.

- Fuel : Gasoline
- Specific gravity : 0.65-0.75 (대표값 0.7)
- Effective Heat of Combustion ($\triangle H_c$) : 43.7 kJ/g

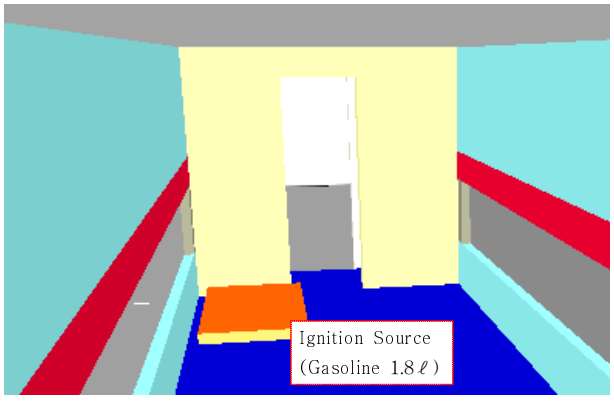


Fig. 5 Fire Source of Only Frame – 1.8ℓ, 2㎡

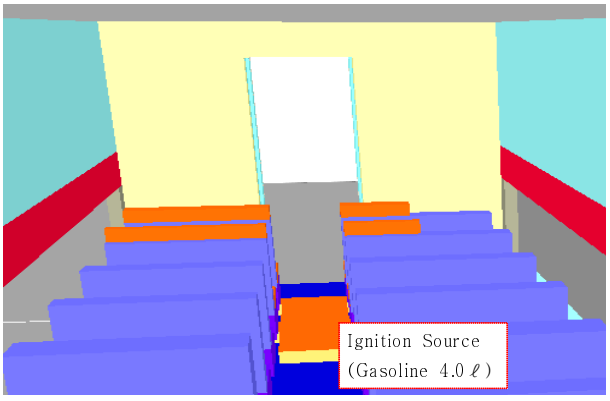


Fig. 6 Fire Source of Frame+interior – 4ℓ, 4㎡

화재시나리오의 경우 화재시뮬레이션에서 가장 중요한 부분으로 어떤 시나리오를 설정하느냐에 따라 상이한 결과를 얻는다. 본 연구에서는 틸팅 복합 철도차량의 목업(Mock Up)차량화재시험의 결과로부터 화원의 연소시간을 측정한 결과를 반영하였다.

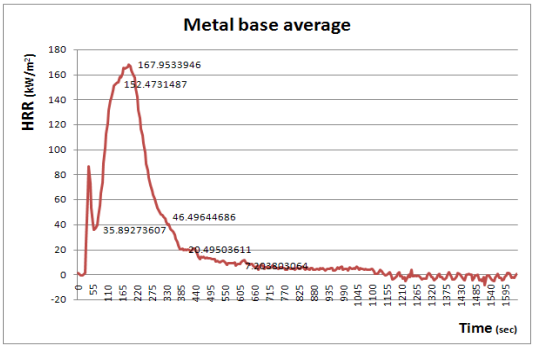
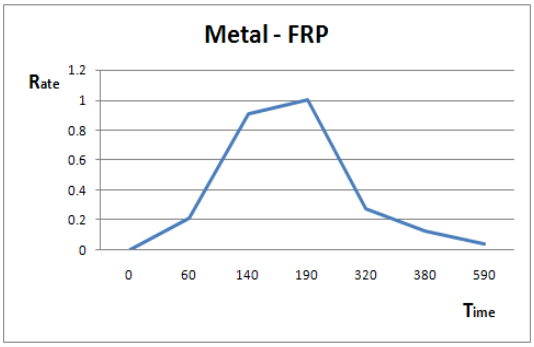
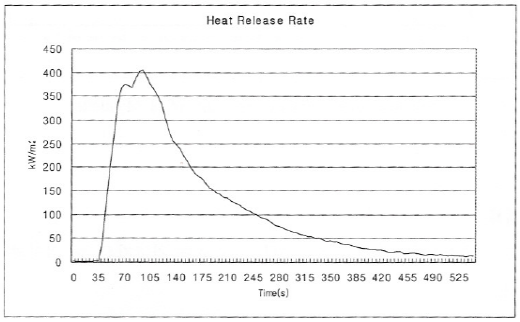
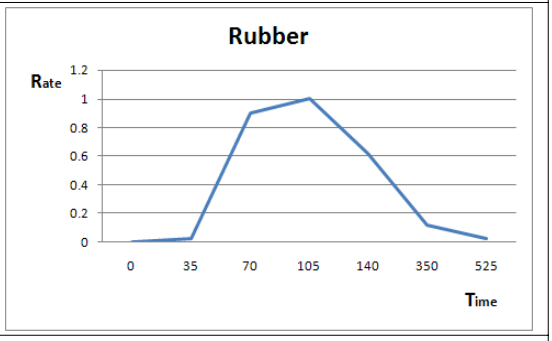
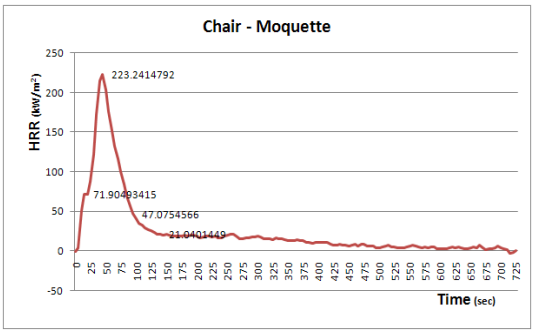
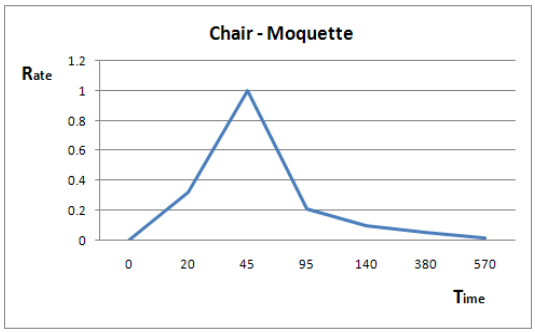
Table. 1 fire scenario Ⅰ, Ⅱ

차체 방화시나리오Ⅰ – 화원설정	내장재 방화시나리오Ⅱ – 화원설정
• Fuel Mass = 1.8ℓ(Volume) × 0.7(Specific gravity) = 1.26kg • Heat of Fuel Combustion = 43.7 kJ/g × 1.26kg = 55.06 MJ • Burning time : 60초(From Real Test) – 연소면적 $2m^2$의 경우 • Maximum Heat Release Rate per Unit Area ($\dot{q}''$) : 671.5 kW/m^2 • Heat Release Rate 671.5 Ramp T=0:F=0 Ramp T=2:F=1.0 Ramp T=20:F=1.0 Ramp T=60:F=0	• Fuel Mass = 4.0ℓ(Volume) × 0.7(Specific gravity) = 2.8kg • Heat of Fuel Combustion = 43.7 kJ/g × 2.8kg = 122.36 MJ • Burning time : 24초(From Real Test) – 연소면적 $4m^2$의 경우 • Maximum Heat Release Rate per Unit Area ($\dot{q}''$) : 1390 kW/m^2 • Heat Release Rate 1390 Ramp T=0:F=0 Ramp T=2:F=1.0 Ramp T=22:F=1.0 Ramp T=24:F=0

2.3 표면열방출율(HRRUA)-Material 설정

표면열방출율(HRRUA)을 근거로 하는 시뮬레이션 방법(simulation method)에는 콘 칼로리미터에서 얻어진 각 시편의 열 특성 테이터를 이용할 수 있다. 본 연구에서는 콘 칼로리미터를 시험을 이용하여 벽면재료인 에폭시수지(Epoxy Resin), 바닥 재료인 합성고무(Rubber), 의자재료인 울 모켓(Wool Moquette)의 HRR(kW/m^2)를 시험을 통하여 얻었다. 아래의 표는 콘 칼로리미터를 시험을 통한 HRR(kW/m^2)과 FDS에 입력하기 위하여 간소화해서 표현한 그래프이다.

Table. 2 콘 칼로리미터를 통한 각 시편의 HRR(kW/m^2)

	콘 칼로리미터를 이용한 HRR(kW/m^2)	FDS의 RAMP로 이용하기 위한 간소화
Ⅰ. Epoxy Resin		
Ⅱ. Rubber		
Ⅲ. Wool Moquette		

내장재의 열 특성 데이터 중 발화온도와 밀도는 시험 값을 사용하였고 열전도율과 비열은 재료의 문헌 값을 사용하였다. 해석에 사용한 내장재의 물성 값은 Table.2와 같다.

Table. 2 내장재 물성치

	Conductivity (w/m · K)	Density (kg/m³)	Specific heat (kJ/kg · K)	Ignition Temp. (℃)
Epoxy-carbon	0.19	70	1.04	340
Phenol	0.17	100	1.25	513
Glass fiber	0.068	20	1.13	.
Wool Moquette	0.1179	220	1.38	450
Form	INERT	INERT	INERT	.
Rubber	0.5245	1532	1.34	448

3. 결과 및 토의

해석결과 차체화재 시나리오의 1.8ℓ 경우 92초에 화재가 자연 소멸되는 것으로 예측되었다. 실내온도는 23초경에 860℃로 최고조에 달했으며, 차체 표면의 온도는 화염의 인근에서 160℃까지 상승하였다. 차체의 발화온도가 340℃이므로 에폭시 차체의 표면 온도와는 180℃의 차이가 유지되었음을 확인하였다.

내장재 화재시나리오의 경우 차량 출입구의 개방정도에 따라 화재가 성장하거나 소멸하는 것으로 나타났다.

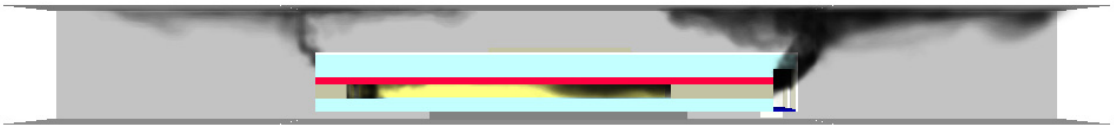


Fig. 7 차체 화재 시 24초에서의 연기 및 열 유동 분포

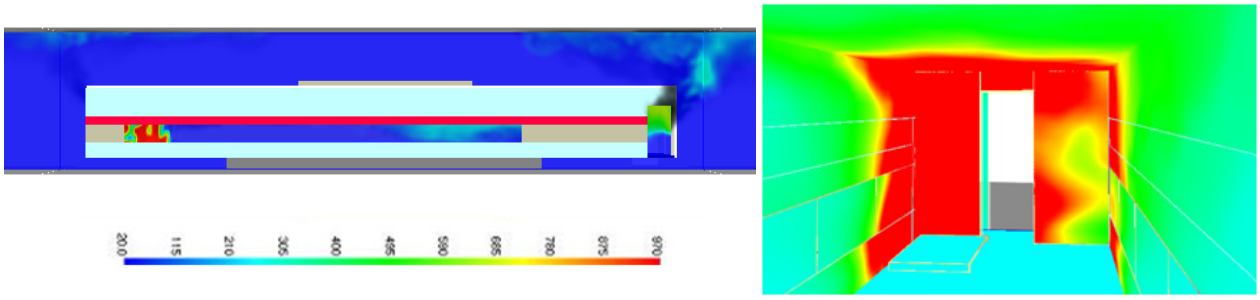


Fig. 8 차체 화재 시 24초에서의 실내온도 분포

Fig. 9 차체 화재 시 60초에서의 연기 및 열유동 분포

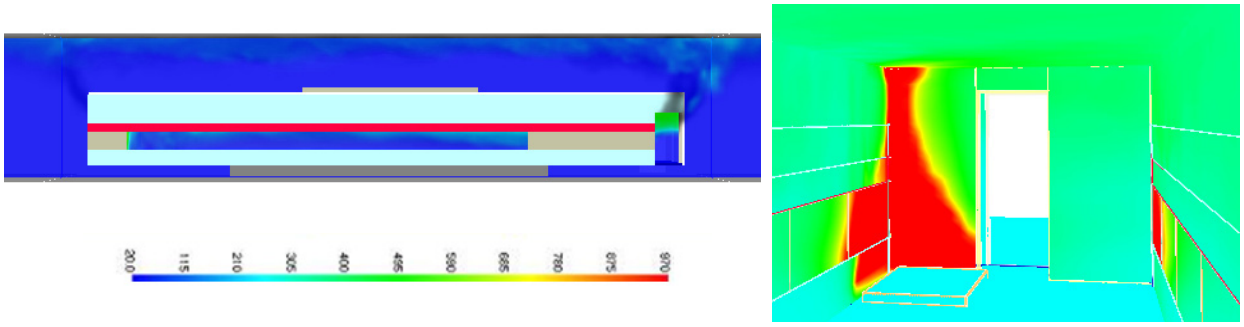


Fig. 10 차체 화재 시 60초에서의 실내온도 분포

Fig. 11 내장재 화재시 40초 연기 및 열유동 분포

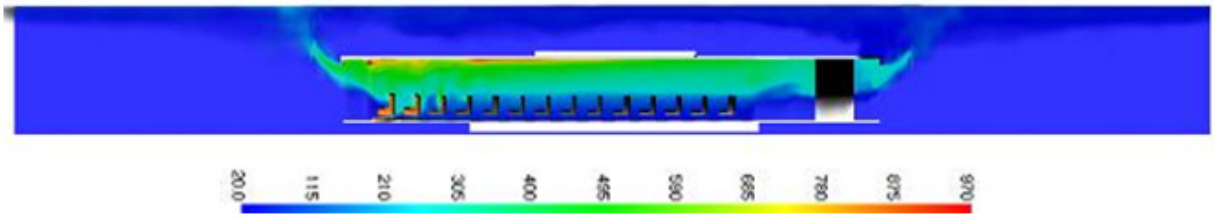


Fig. 12 내장재 화재시 40초에서의 실내온도 분포

4. 결 론

FDS의 표면열복사율 해석방법을 이용하여 복합차체 철도차량의 화재시뮬레이션을 수행하였다. 콘 칼로리미터를 이용한 발열량 시험을 통하여 철도차량 구조체와 내장재의 표면열복사율을 확보하였고, 기타 물성치 입력인자의 경우도 가급적 실험값을 이용하여 모델링을 수행하였다. 1.8리터 차체방화시나리오의 경우 화원의 연소가 종료됨에 따라 화재가 자연 소멸하는 것을 확인할 수 있었다. 4리터 내장재 방화시나리오의 경우 차량의 환기개방 상태에 따라 화재 성장의 결과가 상이하게 나타났다. 다만, 시뮬레이션에 사용된 문헌값을 이용한 물성값은 불확실성이 포함되어 있으므로 해석의 결과는 제한적인 의미를 가진다. 향후 물성값의 보완과 격자크기를 변경했을 때에 대한 보완작업과 열분해모델을 이용한 해석결과와의 비교 검토가 수행될 예정이다.

참고 문헌

1. Philip J. DiNeno, 외 “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering” 3td Edition(2002), SFPE
2. 정우성, “대구지하철 1호선 전동차 내장재 교체에 따른 화재안전도 평가”, 한국철도기술연구원, 2009
3. 이준호, 오범석, “ KSR-III 외피 단열에 대한 연구”, 항공우주기술 제1권 제1호, pp 128-134
4. Duck Hee Lee, Woo Sung Jung, Jung Suk Kim, Jung Ho Whang, “Mock-Up Scale Fire Test based on Arson Scenario for a Composite body Railway Passenger Coach” IAFSS Symposium, 2009