

論文

하이브리드 복합재 철도차량 차체의 화재 안전성 평가연구

김정석^{*,}, 이덕희^{*}, 정우성^{*}, 조세현^{**}

A Study on the Fire Safety of a Hybrid Composite Train Carbody

Jung-Seok Kim^{*,}, Duk-Hee Lee^{*}, Woo-Sung Jung^{*}, Sea-Hyun Cho^{**}

ABSTRACT

This paper explains fire safety tests of a hybrid composite train carbody with carbon/epoxy sandwich bodysshell and stainless steel underframe. In this study, a large scale mock-up was used to evaluate the fire safety of the composite train carbody. The test was conducted to the bare composite carbody mock-up without interior facilities and the fully equipped one. The fire propagation and temperature distribution of the carbon/epoxy bodysshell and the glass phenol interior panels was evaluated under the real fire accident scenario. The test scenario was based on the DaeGu subway fire accident. From the tests, both the surface temperature of the interiors and the composite bodysshell were lower than the ignition temperature. In addition, the fire spread along the surface of the interiors and bodysshell was not occurred.

초 록

본 논문에서는 탄소/에폭시 면재와 알루미늄 허니콤 심재를 갖는 바디와 스테인레스 언더프레임을 갖는 철도차량 차체에 대한 화재안전성평가 시험을 수행하였다. 이를 위해 실규모 차체를 제작하고 이를 이용하여 시험을 수행하였다. 시험에 적용된 차체는 내장재가 포함되지 않은 차체와 내장재를 포함한 차체 두가지를 이용하였으며 시험조건은 대구지하철 화재사고 시 나리오에 근거하여 설정하였다. 시험결과 차체 및 내장재 표면의 최대온도는 각각의 발화온도에 미치지 못함을 확인하였고, 차체 내부에 화염전파도 발생하지 않았다.

Key Words : 하이브리드 복합소재 철도차량 차체(hybrid composite train bodysshell), 화재(fire), 안전성(safety)

1. 서 론

복합소재는 우수한 기계적 성질과 경량화 효과에 의해 항공, 선박 및 자동차 분야에서 광범위하게 적용되고 있다. 철도차량분야에서도 복합소재는 전두부, 내장재 및 의자와 같은 하중을 감당하지 않는 2차부재로 활발히 적용되고 있다. 일반적으로 전두부의 경우 공기저항의 감소를 위한 공기역학적 형상설계를 위해 유선형과 같은 복잡한 형상 제작이 용이한 복

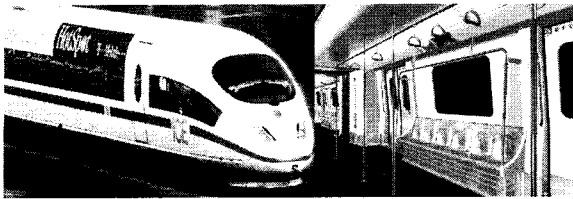
합소재가 주로 적용된다[1-2]. 그림 1(a)은 복합소재 전두부가 적용된 독일의 ICE열차를 나타낸 것이다. 이러한 전두부 구조에는 주로 유리섬유와 에폭시 수지가 적용된다.

내장재나 의자의 경우 역시 경량화 및 폭면성형에 유리한 특성 때문에 복합소재가 많이 적용되고 있다. 그러나 내장재나 의자의 경우 화재안전성 확보를 위해 주로 난연특성이 우수한 폐놀수지가 주로 적용된다. 그림 1(b)는 전동차에 적용된 복합소재 내장재와 의자를 나타낸 것이다.

^{*,} 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원, 교신저자(E-mail:jskim@krti.re.kr)

^{*} 한국철도기술연구원 환경화재연구실

^{**} 한국화이버 철도차량사업부



(a) ICE train with composite cab mask (b) Composite interiors

Fig. 1 Composite applications in railway vehicle.

국내 철도차량분야에서는 2003년 대구지하철 화재사고이후 차체 및 내장재 화재안전에 대한 요구조건이 점점 강화되고 있다. 대구지하철화재사고는 방화에 의한 사고로 192명이 사망하고 127명이 부상한 사고였다.



Fig. 2 The burned train carbody after Daegu subway accident.

최근에는 복합소재가 하중을 감당하지 않는 2차 부재 외에 하중을 감당하는 1차 부재인 철도차량의 차체에도 적용되면서 이러한 복합소재가 적용된 차체의 화재안전성에 대한 검증요구가 증가하고 있다.

복합소재의 화재성능에 대한 연구는 다수 진행되었으나 대부분의 연구[3-8]들은 주로 화염하에서 구조물의 거동연구, 화재 지연기술(fire retardant technology) 및 수치 해석적 연구이다. 이러한 연구들의 대부분은 시험편을 이용한 것으로 실차구조물에 대한 화재거동평가에 대한 연구는 막대한 비용이 소요되기 때문에 찾아보기 힘들다[9-10]. 시험편을 이용한 화재성능에 대한 검증은 관련 국제규격들이 정립되어 있기 때문에 규격[11-12]에서 제시한 시험편의 크기 및 시험조건에 따르면 된다. 그러나, 시험편을 이용한 시험결과는 실차에 적용시 시험편과의 두께나 조성(composition)의 약간의 차이가 차량전체의 화재 거동에 큰 차이를 발생시킬 수 있기 때문에 시험편 시험을 통해 화재안전성이 검증되었다 할지라도 반드시 실차시험을 통해 검증될 필요가 있다. 실차규모시험의 경우 국제규격화된 절차가 없기 때문에 각국에서는 그 나라의 현실을 반영한 독자적인 시험시나리오를 설정하여 시험을 수행하고 있는 실정이다. 국내에서도 대구화재사건 이전에는 이러한 실규모 화재시험은 거의 수행되지 않았으나, 대구화재사고 이후 대구화재사고 시나

리오를 하나의 기준으로 하여 실규모 화재시험을 수행하고 있다. 그 이유는 대구화재사고는 방화범이 4리터의 시너를 전동차 의자 및 바닥에 도포하고 점화시켜 발생한 것으로 현실에서 발생할 수 있는 가장 극심한 조건으로 볼 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 국내 최초로 탄소섬유/에폭시 복합소재가 적용된 한국형 틸팅열차 차체에 대한 실규모 화재시험을 통해 화재안전성을 평가하였다. 시험시나리오는 대구화재와 동일한 시나리오를 적용하였으며, 시험에 적용된 차체는 내장재가 설치되지 않은 차체바디 및 내장재와 의자가 설치된 차체에 대해 수행하였다. 이를 통해 차체내의 화염전파 여부 및 온도분포 등을 고찰하였다.

2. 틸팅열차용 복합소재 하이브리드 차체에 화재안전성 평가 시험

2.1 복합소재 하이브리드 차체의 특징

한국형 틸팅열차의 차체는 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재(CF1263 woven fabric carbon/epoxy face)와 알루미늄 허니콤 심재(aluminum honeycomb core)로 구성된 샌드위치 구조로 되어있다. 차체 측벽의 창문부위와 지붕구조의 에어컨 설치부분은 하중을 감당하는 부분이기 때문에 연강(mild steel) 내부골조가 삽입되어 복합재 차체부분과 동시성형(co-cured)되어 제작된다. 이렇게 제작된 차체의 상부구조는 스테인레스 재질의 언드프레임과 접착(adhesive bonding)과 리벳(riveting)의 이중접합에 의해 체결되어진다. Fig. 3은 복합재 적용 동력차 차체의 단면을 나타낸 것이다. 이와 같은 하이브리드형 차체는 복합소재의 장점인 경량구조와 금속재의 장점인 하부기설치의 용이성을 고려한 것이다.

틸팅열차의 실내설비들은 화재안전기준을 만족하기 위해 의자, 바닥재 및 커튼은 영국 화재안전기준인 BS6853에 제시된 화염전파(flame propagation), 연기밀도(smoke density) 및 독성(toxicity)기준에 적합한 재질을 적용하였다. 또한, 내장판의 경우에는 화재특성이 우수한 페놀수지를 적용한 유리/페놀(glass/phenol) 면재와 노멕스(Nomax) 허니콤 샌드위치 심재를 적용하여 역시 BS6853기준을 만족하도록 하였다. 차체의 경우 탄소/에폭시(carbon/epoxy) 면재와 알루미늄 허니콤 심재가 적용되었으며 차체의 화재성능을 향상시키기 위해 내화재(fire retardant)를 첨가하였으며, 실내벽부에는 [glass/aluminum foil/glass]r 로 구성된 화염전파 차단층(fire barrier layer)을 적용하여 화염의 전파 및 관통을 억제하도록 하였다.

2.2 화재시험조건

하이브리드 복합소재 차체의 실규모 화재시험을 위해 23m 길이의 틸팅열차 차체중 차체 단부를 포함하는 6m길의 시험차체를 Fig. 4와 같이 제작하였다.

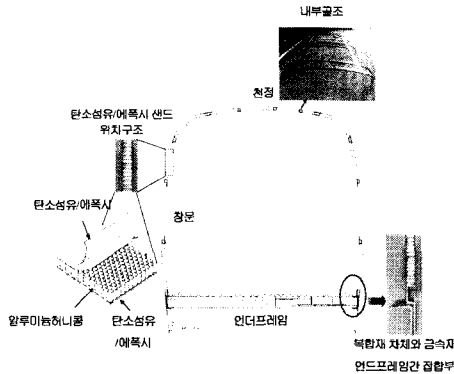


Fig. 3 Cross sectional view of the composite carbody for Korean tilting train.

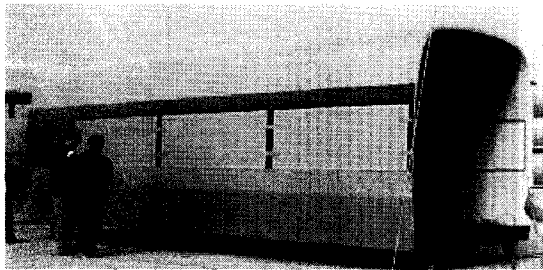


Fig. 4 Test carbody for the fire safety evaluation.

철도차량 차체에 대한 실규모 화재시험의 경우 외부 또는 내부에서 화염병 투척과 같은 테러와 대구지하철 사고와 같은 방화를 가정한 시나리오를 시험조건으로 철도차량 차체에 대한 화재안전성을 검증하고 있다.

본 연구에서도 이러한 조건하에서 내장재가 설치되지 않은 복합소재 차체와 내장재가 설치된 차체에 대해 아래와 같은 조건하에서 시험을 수행하였다.

● Case1. 복합소재 차체에 대한 화재안전성 평가

- 화원(fire source)
 - 시너 4.0 리터 (대구화재 사고조건) : 차체 벽면 및 바닥에 도포 후 점화
- 온도센서
 - 화재시험 중 실내 및 벽면에서의 온도측정을 위해 총 16개의 온도센서 설치(측벽 6개, 천정 3개, 실내 공간 7개)
- 시험을 위한 설치된 온도센서의 설치도는 Fig. 5와 같다.

● Case 2. 내장재를 포함한 차체에 대한 화재안전성 평가

- 화원(fire source)
 - 시너 4.0 리터 (대구화재 사고조건) : 차체 바닥에 2 리터 및 의자 각 조당 0.5리터 도포 후 점화

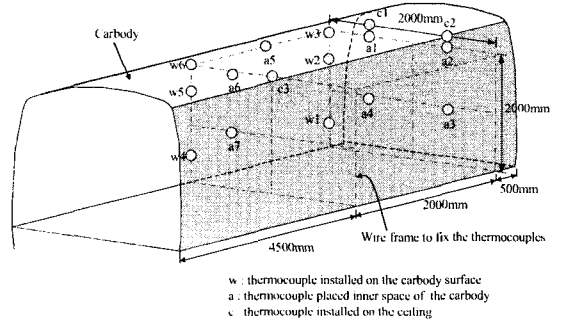


Fig. 5 Test carbody for the fire safety evaluation.

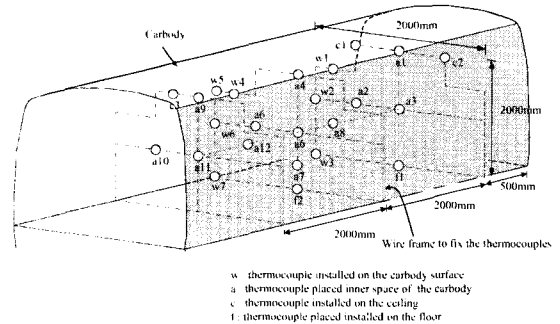


Fig. 6 Test carbody for the fire safety evaluation.

- 폴리에스터/울(polyester/wool) 커버와 우레탄폼(urethane foam) 쿠션을 갖는 의자 4조 : 시너에 의해 점화된 후 의자 커버와 우레탄폼이 발화하면서 제 2의 화원이 됨(본 시험에 적용된 의자는 실제 텀열차에 적용된 것이 아닌 내화성이 없는 일반의자를 적용)
- 온도센서
 - 화재시험 중 실내 및 벽면에서의 온도측정을 위해 총 24개의 온도센서 설치(측벽 7개, 천정 3개, 바닥 2개, 실내공간 12개)
- 시험을 위한 설치된 온도센서의 설치도는 Fig. 6과 같다.

본 시험을 통해서 화원 및 실내구조에 따른 화재거동, 차체 및 내장재 발화온도 접근성 및 실내공간의 온도분포 등이 측정되었다. 측정항목 및 사용된 장비는 Table 1과 같다.

Table 1 Measuring items for the fire tests.

평가항목	측정항목	측정장비
화재거동	시간별 화재거동 및 성장 여부	열화상카메라, 육안관찰
발화온도 접근성	표면온도 변화	열화상카메라, 온도센서
실내 공간내 온도분포	공간온도 측정	온도센서

Table 2 The large scale fire test result for the composite carbody without interior parts

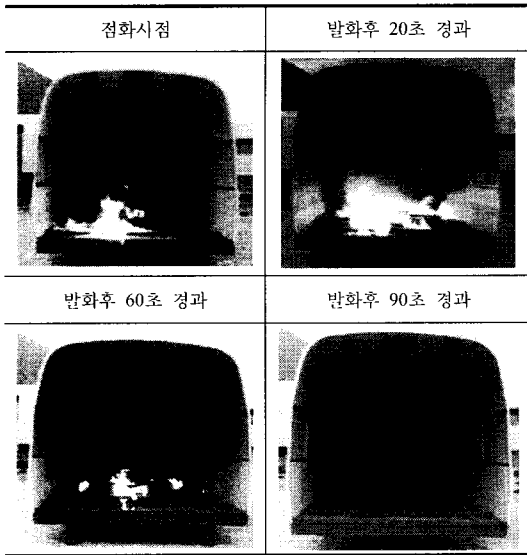


Table 3 Temperature distribution obtained from the fire test of the composite carbody without interiors

	Gas temperature		Surface temperature		
	Inside		Wall		Ceiling
a1	597	W1	70.4	C1	66.7
a2	546.9	W2	77.4	C2	69.9
a3	511.7	W3	65.5	C3	131.7
a4	507.5	W4	156.3		
a5	582.2	W5	66.8		
a6	591.4	W6	71.2		
a7	601.4				

3. 시험결과 고찰

3.1 내장재가 설치되지 않은 복합소재 차체

Table 2는 내장재가 설치되지 않은 복합소재 차체에 4리터의 시너를 도포하고 점화를 시킨후 시간에 따른 화재의 거동을 나타낸 것이다. Table 2에서 알 수 있듯이 화염의 거동은 점화 후 시너가 연소되는 20초까지 가장 활발했으며 시너의 연소가 종료되는 약 40초경과 후부터 점점 약해져서 약 90초 후에는 자연 소화되었다. 본 시험에서 시너에 의해 발생된 화염은 차체로 확산되지 않음을 확인할 수 있었다. 그 이유는 시험을 통해 측정된 차체 내부 및 표면온도분포를 나타낸 Table 3을 통해 설명될 수 있다. 차체 내부 공간의 모든 측정점에서 500도 이상이었으며, 최대온도는 Fig. 5의 차체 중앙부에 설치된 a7에서 측정되었으며

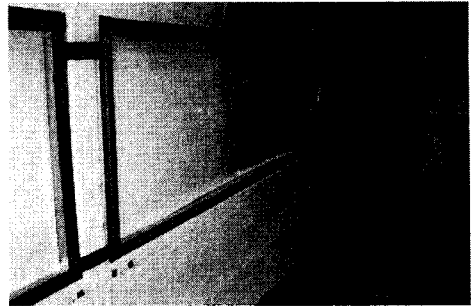
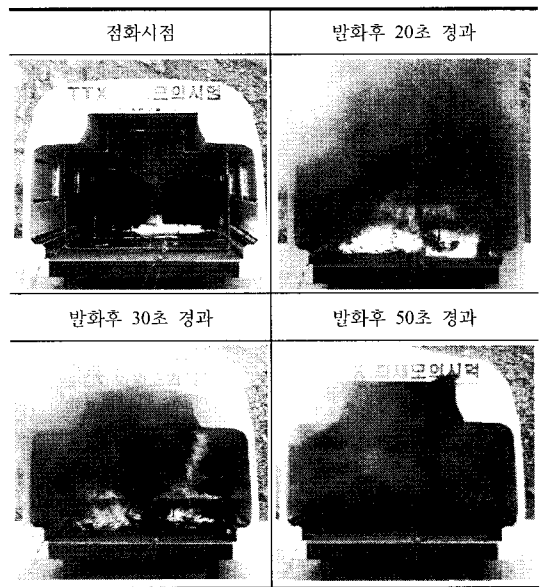


Fig. 7 Inside of the tested composite carbody.

Table 4 The large scale fire test result for the composite carbody with interior parts.



약 601도였다. 그러나, 차체의 화염전파여부를 결정하는 차체 표면의 최대온도는 측벽부의 경우 W4에서 약 156도(발화후 17초), 천정의 경우 C3에서 약 131.7도(발화후 9초) 였다.

본 시험에 적용된 차체재료의 표면발화온도는 450도 이상으로 본 시험을 통해 측정된 차체 표면온도조건이 차체 표면의 발화온도에 미치지 못하기 때문에 화염전파는 발생하지 않았다. Fig. 7은 시험완료 후 차체 내부의 모습을 나타낸 것이다. 이전에 언급한 바와 같이 화염의 전파는 없이 그늘음만 남아있다.

3.2 내장재가 설치된 복합소재 차체

Table 4는 내장재가 설치된 복합소재 차체에 4리터의 시너를 도포하고 점화를 시킨 후 시간에 따른 화재의 거동을 나타낸 것이다. 이 경우에도 이전과 유사하게 점화 후 20초에서

Table 5 Temperature distribution obtained from the fire test of the composite carbody with interiors

	Gas temperature		Surface temperature				
	Inside		Wall	Ceiling	Floor		
a1	633.4	W1	119.4	C1	191.2	F1	121.0
a2	544.2	W2	111.8	C2	307.2	F2	145.3
a3	561.8	W3	54.8	C3	216.6		
a4	780.8	W4	307.2				
a5	707.6	W5	142.6				
a6	702.8	W6	106.6				
a7	605.4	W7	105.4				
a8	657.1						
a9	692.8						
a10	447.4						
a11	408.3						
a12	506.4						

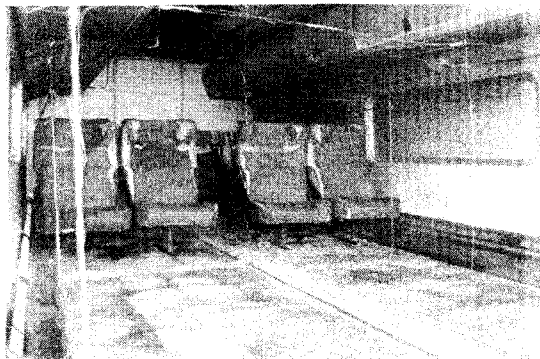


Fig. 8 Inside of the tested composite carbody with interiors.

40초 사이에 화염이 가장 강했으며 시너의 연소가 종료되는 약 40초경과 후부터 점점 약해져서 약 290초 후에는 자연 소화되었다. 자연소화까지 걸린 시간은 이전에 비해 약 3.2배 정도 긴데 이것은 본 시험에서는 이전과 달리 제2의 화원으로 의자를 설치했는데 시너의 연소가 완료된 이후에 의자에서 발화된 화염이 지속되었기 때문이다.

본 시험에서 측정된 차체 내부의 최대온도는 Table 5에서 확인할 수 있듯이 차체 중앙부에 설치된 a4에서 측정되었으며 약 780도(발화후 24초)였다. 화염전파여부를 결정하는 내장재 표면의 최대온도는 측벽부의 경우 W2, 천정의 경우 C2에서 약 307.2도(발화후 35초)였다. 본 시험에 적용된 내장재는 유리/페놀(glass/phenol) 적층판으로 표면발화온도는 570도 이상으로 본 시험을 통해 측정된 표면온도조건이 내장재 표면의 발화온도에 미치지 못하기 때문에 차체 내부로의 화염전파는 발생하지 않았다.

Fig. 8은 화재시험 완료후 차체내부를 나타낸 것이다. Fig.

8에서 알 수 있듯이 1차 화원인 시너4리터가 완전히 연소된 후 의자가 2차 화원으로서의 역할을 함으로써 의자의 커버는 거의 전소되었으며 일부 우레탄 폼도 연소의 흔적을 확인할 수 있었다.

그러나, 차체 내장재의 표면은 도막이 약간 벗겨지는 정도의 손상만이 발생했을 뿐 내장재의 표면에서의 발화나 화염전파는 발생하지 않았다.

4. 결론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서는 국내 최초로 탄소섬유/에폭시 복합소재가 적용된 한국형 텀링열차 차체에 대한 화재안전성을 평가하기 위해 국내 환경에 적합한 실규모 화재시험 시나리오를 설정하고 이에 근거하여 시험을 수행하였다.
- (2) 본 시험을 통해 내장재가 설치되지 않은 차체의 경우 최대차체 표면온도의 경우 약 156.5도로 차체의 발화온도 450도를 초과하지 않았으며, 내장재가 설치된 차체의 경우에도 최대 내장재 표면온도의 경우 약 307.2도로 내장재의 발화온도에 미치지 못했다. 이를 통해 차체의 표면에서 발화에 의한 화염전파는 발생하지 않았으며, 대구화재 시나리오 하에서 개발된 복합소재가 적용된 차체의 화재안전성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 김정석, 이재현, 정성균, “하이브리드 복합재 철도차량 차체 적용 적층판의 저속충격특성 연구,” 한국복합재료학회지, 제18권, 제3호, 2005, pp. 7-13.
- 2) 김정석, 정종철, 이상진, “하이브리드 복합재 철도차량 차체에 대한 시험적 연구,” 한국복합재료학회지, 제18권, 제6호, 2005, pp. 19-25.
- 3) George M., “Fire-safe composites for mass transit vehicles,” *Reinforced plastics*, Sept., 2002, pp. 26-30.
- 4) Dodds N., Gibson A.G., Dewhurst D. and Davies J. M., “Fire behavior of composite laminates,” *Composites Part A*, Vol. 31, 2003, pp. 689-702.
- 5) Zhaohui H., Ian W., Roger J., “Fire resistance of composite floors subject to compartment fires,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, 2004, pp. 339-360.
- 6) Andrew T. Nicholas A., Jonathan R., “Fire Characteristics of Cored Composite Materials for Marine Use,” *Fire Safety Journal*, Vol. 30, 1998, pp. 137-159.

- 7) Moodie K., Roberts T. A. and Willoughby D. B., "An assessment of fire performance testing of materials," *Proceedings of composites in fire, Center for composite materials engineering*, University of Newcastle, England, 15-16 September, 1999, pp. 89-104.
- 8) Knop K. and Krieger W., "Flame retarded gelcoats on composite laminates. Proceedings of composites in fire," *Newcastle upon Tyne*, England, 9-10 September, 2003, pp. 29-34.
- 9) White N, Dowling W and Barnett J., "Full-scale fire experiment on a typical passenger train," *8th international symposium on fire safety science*, Beijing, China, September 2005, pp. 18-23.
- 10) Haukur I., "Model scale railcar fire tests," *Fire Safety Journal*, Article in Press.
- 11) Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains, BS6853, 1999.
- 12) Fire tests on building materials and structures, BS476 Part 7, 1997.