

特輯

“철도분야에서의 신소재 복합재 응용 기술”(총 7편) 중 - 제2편

신소재를 이용한 철도차량 경량화 사례 및 기술

신광복*, 이상진**

1. 서론

철도차량에서 복합재료에 대한 활용은 날로 증대되고 있는 추세이다. 현저한 기술적 진보를 얻기 위해 철도차량은 더 가볍고, 강하고, 안전하며 전통적인 소재와는 차별화된 소재를 요구하고 있다. 복합재료의 철도차량에의 응용은 무게 감소, 이로 인한 속도 증가, 에너지 소비량 감소, 낮은 관성, 적은 트랙 마모 그리고 큰 유효 탑재량 등의 장점을 지니고 있으며 철도차량 디자인에 여러 다양함을 제공하고 낮은 무게 중심 설계에 의한 안전성 확보, 단순화된 구조 설계에 의한 좌석수의 증가 등의 장점을 지니고 있다. 또한, 모듈화 설계를 가능케 함으로서 제작 공정의 감소 및 유지보수 효율화를 얻을 수 있게 된다.

복합재료는 과거 철도차량에서 내장재, 전두부 등과 같이 2차 부재에 제한적으로 사용되어 왔으나 1990년대부터 지붕(roof), 사이드 구조(side structure) 및 차체(carbody structure)와 같이 하중을 직접 지탱하는 1차 부재로 사용이 확대되고 있다.

철도차량에의 복합재료 응용에 따른 장점은 다음과 같다.

- 1) 차체 경량화에 따른 열차 속도 향상
- 2) 적은 에너지 소비
- 3) 승객 안락함 및 미적 수려함 향상
- 4) 운영비 감소 및 유지보수 비용 절감
- 5) 피로내구성 증가
- 6) 우수한 충돌 특성 등

2. 철도차량에서 복합재료 적용 사례

2.1 전두부 적용 사례

전두부는 주행저항 및 압력소음을 감소하기 위한 유선형 형상과, 내장품의 탑재를 고려한 내부 공간 확보, 중량

감소 그리고 차체와의 결합 등을 고려하는 기능적 면과 더불어 미적인 면 등을 고려하여 제작하여야 한다. 이러한 점을 고려할 때 기존의 금속재료보다는 복잡한 형상을 용이하게 제작할 수 있고, 또한 아름다운 표면으로 처리할 수 있으며, 고속운행을 할 때 경미한 충격에 의한 손상부위에 유지보수비가 저렴하고, 금속보다 우수한 비강도(specific strength)를 지닌 복합재료를 사용하는 것이 좋다. 전두부에 복합재료를 적용하여 제작한 열차들은 외국의 경우 ETR 460(이탈리아), IC 2000(스위스, Fig. 1), Puma Express(독일, Fig. 2) 등 많은 적용사례가 있다.

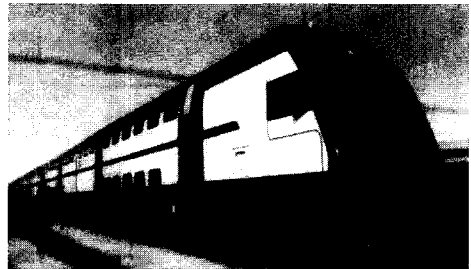


Fig. 1 IC 2000의 전두부 형상.

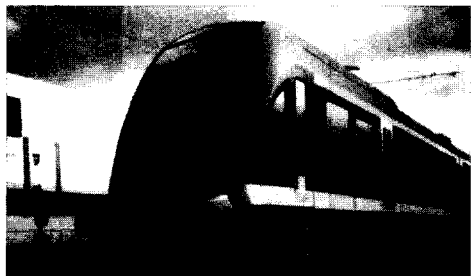


Fig. 2 Puma Express의 전두부 형상.

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀, 교신저자(E-mail:shin955@krii.re.kr)

** 한국화이바(주) 철도차량사업부

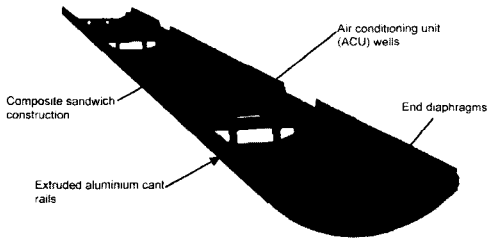


Fig. 3 Turbostar의 22m 복합재 지붕구조.

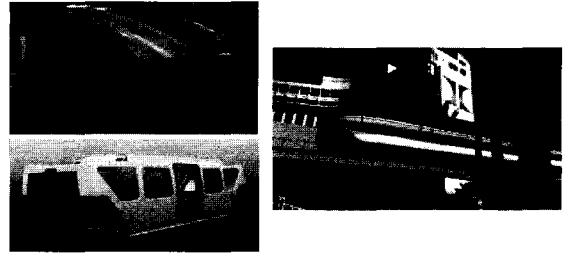


Fig. 5 Las Vegas monorail의 차체 구조.

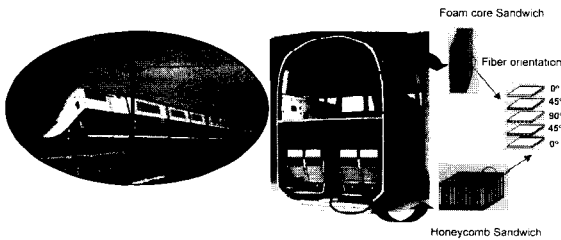


Fig. 4 TGV 이중열차의 차체 구조.



Fig. 6 상하이 자기부상열차.



Fig. 7 코브라 트램웨이.

국내의 경우에는 인도 전동차 전두부, 홍콩 전동차의 전두부, 광주 지하철의 전두부를 복합재로 제작한 사례가 있다.

2.2 지붕 구조에서의 적용 사례

1999년에 프랑스의 봄바디어(Bombardier) 사는 Fig. 3에서 보는 것처럼 영국의 Vosper Thornycroft 사의 복합재 기술연구소와 공동으로 영국에서 널리 운행하고 있는 최고운행속도 160km/h 통근열차인 Turbostar의 알루미늄 지붕구조를 복합재로 대체하기 위한 공동연구를 수행하였다. 복합재 지붕구조는 기존 알루미늄지붕구조에서는 분리 제작되었던 지붕구조와 공기정화장치(air conditioning unit)를 레진 인퓨전(resin infusion)성형으로 제작함으로써 제작비용 절감, 부품 수 감소 및 내구성을 향상시킬 수 있었다. 샌드위치 복합재 지붕구조에 적용된 재료로는 면재(skin)의 경우 glass/vinylester를 사용하고 심재(core)의 경우 PVC 폼을 사용하였다. 이렇게 제작된 샌드위치 복합재 지붕구조는 알루미늄 차체와 상온경화 에폭시를 사용하여 접합하였다.

2.3 차체에서의 복합재 적용 사례

철도차량의 차체 외각(bodyshell)은 중량과 제작비 측면에서 모두 큰 비중을 차지하는 부분이다. 과거에는 차량제작에 있어서 철이나 알루미늄과 같은 금속 재료를 사용했으나 최근에는 중량과 제작비를 줄이기 위해서 차체의각을

복합재료를 적용하는 사례가 증가하고 있다. 프랑스의 알스톰(Alstom) 사는 Fig. 4와 같이 최고운행속도 300 km/h급의 TGV 이중열차(double decker)의 차체를 샌드위치 복합재를 적용하여 제작하였다.

캐나다 봄바디어(Bombardier)는 미국의 AAR Composites사와 공동으로 Las Vegas 모노레일(monorail)의 차체와 전두부를 탄소/에폭시 적층 복합재를 적용하여 제작하였고(Fig. 5) 현재 상업운행 중에 있다. 차체의 길이는 약 8.8m이고 2.4×2.4m의 단면을 가진다.

스위스의 Alcan Mass Transportation System 사는 철도차량 제작사와 공동으로 알루미늄과 샌드위치 복합재 구조물을 결합한 하이브리드 차체를 제작하여 차량 경량화를 달성하였다. Fig. 6은 430km/h급의 상하이 자기부상열차로 새로운 레이저 용접 기술을 선보여 차량 기밀에 좋은 효과를 거두었으며 Fig. 7은 알루그립(alugrip)이라는 새로운 심합 방법을 적용한 코브라 트램웨이(cobra tramway)도 역시 하이브리드 차체 구조를 채택하였다.

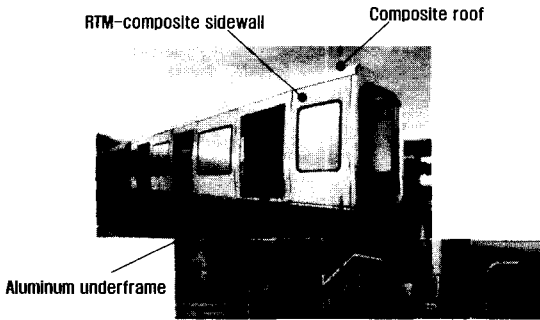


Fig. 8 전형적인 하이브리드 차체 구조.

앞에서 언급한 바와 같이 최근의 복합재를 응용한 차체 개발 추세는 Fig. 8과 같이 알루미늄이나 철을 단독으로 적용하기보다 부분적으로 복합재를 적용하는 하이브리드 설계(hybrid design)가 추세를 이루고 있다. 하이브리드 복합재 차체는 생산의 용이성, 짧은 개발 시간에 의한 시장 요구사항의 빠른 대응, 조립 비용 및 시간 단축, 유지보수 및 운영비 절감 그리고 높은 강성과 강도 등의 장점을 가지고 있다. 한국철도기술연구원에서 연구개발중인 180km/h급의 한국형 고속 텀팅열차(TTX)의 차체 구조 역시 하이브리드 설계 기법을 채택하였다.

3. 철도차량 경량화 기법

3.1 철도차량 경량화의 중요성

철도차량 경량화의 장점은 곡선주행 시 축중하중 감소에 의한 주행 안정성 향상과 차륜 마모 감소로 인한 유지비용 절감 및 에너지 효율 증가 등에 의한 비용 절감을 들 수 있다. 일반적으로 철도차량 구조물의 비용 대비 성능(performance per cost)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\text{성능}}{\text{비용}} = \frac{\text{구조성능}}{\text{재료비} + \text{생산비} + \text{운영비}} \quad (1)$$

식(1)에서 재료비와 생산비는 재료의 선택과 제작 방법에 따라 다르겠지만 차이가 크지 않을 것이다. 따라서, 경량화로 인해 얻을 수 있는 장점은 운영비 절감이고 이로 인해 가격 대비 성능은 향상 될 것이다. 즉, 30년 이상의 장기간 상업운행을 해야 하는 철도차량의 경우 차체 경량화는 매우 중요한 요구사항이다.

3.2 철도차량 차체 경량화를 위한 방법

경량화 차체 구조를 제작하는 방법은 다양하다. 어떤

방법을 사용하여 경량화를 이룰 것인가는 개발 책임자의 몫이지만 제작성, 제작비, 실용성 등을 감안해야 한다.

(1) 경량 구조 사용에 의한 경량화

첫 번째 단계로는 Table 1과 같이 경량구조 개념을 도입하는 방법으로 경량 재료의 사용, 경량 부품들의 사용 그리고 모듈화 설계 기법 도입 등이 있다. 이 방법은 차체 경량화를 위해 반드시 반영해야 하는 필수조건이라 할 수 있다.

Table 1 경량 구조 사용에 의한 경량화

	경량화 방법
Various method of building lightweight structure	The use of lightweight materials
	The use of lightweight components
	The use of modular systems

(2) 제작/조립방법에 의한 경량화

두 번째 단계로는 제작/조립방법에 따른 경량화방법으로 Table 2와 같으며 선택사항이다.

Table 2 제작 및 조립방법 선택에 의한 경량화

	제작방법	조립/접합 방법	비고
Construction method	Differential construction method	- screws or bolts - nails - rivets - sewn seams - spot welds	이종 재료/부품
	Integral construction method	- casting - forging - extruding - machining, etc.	단일제품/단일재료
	Integrating construction method	- bonding - gluing - welding	준등방성 부품
	Composite construction method	Fiber-reinforced composite construction method	
Sandwich construction method			면재+심재 구조
Hybrid construction method		- Hybrid joint	샌드위치 (또는 섬유강화 복합재)+ 금속재

차별적 제작방법(differential construction method)은 주로 이종재료와 부품들의 조립에 사용되는 방법으로 사용되는

접합방법은 Fig. 9에서 보듯이 볼트 체결, 리벳트 체결, 스파트 체결 등과 같이 포인트 형식의 체결방식(point-type fixing)을 채택하고 있다.

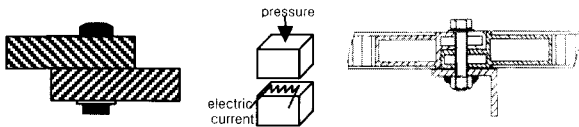


Fig. 9 차별적 제작방법에서 사용되는 접합방식.

일체형 제작방법(integral construction method)은 동일재료 및 난일부품 들의 조립에 사용되는 방법으로 Fig. 10과 같이 캐스팅(casting), 포징(forging), 기계가공(machining) 등과 같은 제작방식을 채택한다.

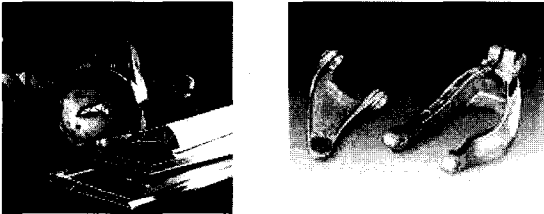


Fig. 10 일체 제작방법에서 사용되는 접합방식.

통합적 제작방법(integrating construction method)는 준-균질성 부품(quasi-homogeneous component) 형태로 조립되는 방법으로 Fig. 11에서 보듯이 본딩(bonding), 글루링(gluing), 용접(welding) 등과 같은 체결방식을 사용하고 있다.

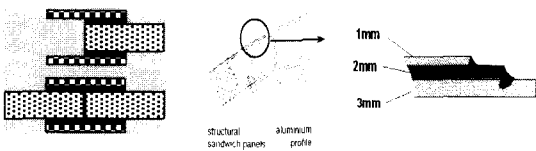


Fig. 11 통합적 제작방법에서 사용되는 접합방식.

복합재료에 의한 제작방법(composite construction method)은 섬유강화 복합재를 이용한 방법, 샌드위치 복합재를 이용한 방법 그리고 하이브리드 복합재 방법 등으로 구분된다.

섬유강화 복합재를 이용한 제작방법은 Fig. 12에서 보듯이 전두부와 지붕 구조와 같이 곡면 처리가 많이 요구되는 곳에 사용된다.

샌드위치 구조는 설계자에게 많은 새로운 선택권을 준다. 이것은 기술적으로 적은 무게, 높은 강도와 좋은 동적 특성이 요구되는 구조에 유용하게 적용된다. 철도차량에 응용되는 샌드위치 구조의 장점은 다음과 같다.

- 자연스럽고 부드러운 외장
- 나아진 안정성
- 증가된 피로 수명
- 복합 적층판에 비해 느린 균열 성장
- 단열 및 소음 저감 효과

샌드위치 구조는 위와 같은 특징 외에 소재 가격 또한 Fig. 13과 같이 하락하는 경향을 보여 철도분야에서 사용이 증가하는 추세이다. Fig. 14는 철도차량 구조에 주로 사용되는 코어(core) 종류를 나타내고 있다.

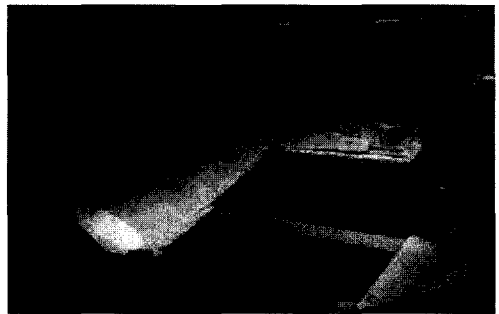


Fig. 12 섬유강화 복합재를 이용한 전두부 제작 모습.

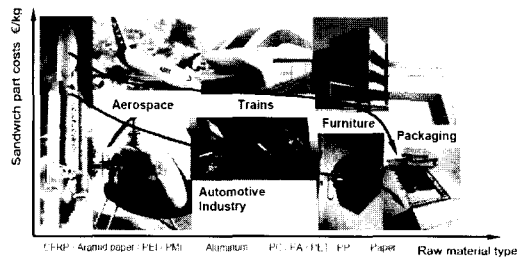


Fig. 13 샌드위치 구조재의 가격 변화 추이.

Sandwich Materials in Transportation Today

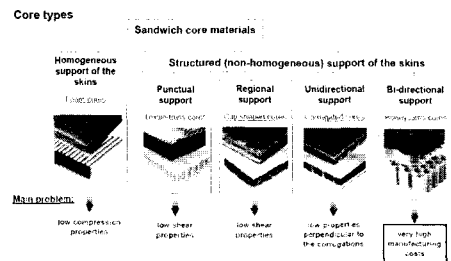


Fig. 14 철도차량에 사용되는 코어 종류.

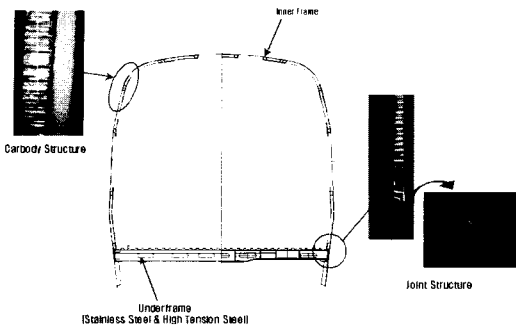


Fig. 15 TTX 하이브리드 차체 제작도.

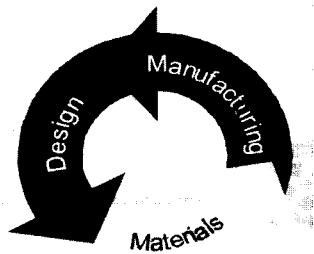


Fig. 16 경량화를 위한 설계변수.

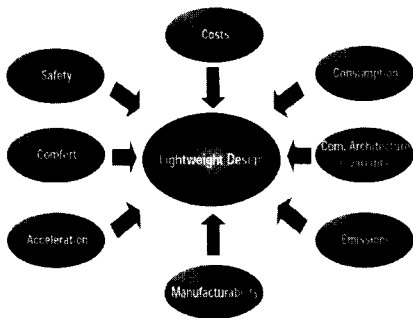


Fig. 17 경량화 설계 시 요구사항.

3.3 철도차량 경량화를 위한 설계 인자

철도차량의 경량화는 앞에서 언급한 바와 같이 여러 가지 방안 중에 적절한 경량화 달성 방안을 선택해야 한다. 특히, Fig. 16과 같이 설계/재료/제작방법 등이 중요한 설계인자로 작용하게 되고 Fig. 17과 같이 다양한 요구사항을 만족시켜야 한다.

4. 맺음 말

철도차량의 경량화는 고속 킬링열차 뿐만 아니라 경전철, 자기 부상 열차 등에서 반드시 달성해야 할 요구조건으로 대두되고 있다. 현재 국내외 철도차량 제작사들은 경량화를 위해 많은 자금을 투자해 연구개발 하고 있으며 특히 유럽의 경우 각국의 연구소들이 컨소시엄을 구성하여 철도차량 경량화를 위한 소재 개발, 설계 및 제작 기술 확보에 주력하고 있는 실정이다. 따라서, 한국철도기술 연구원에서는 한국형 고속 킬링열차 개발사업을 통해 철도차량 경량화를 위한 원천기술과 설계 및 제작 기술을 확보하여 국내 철도기술을 한 단계 높이는 계기를 삼으려 하고 있다.

금속재와 복합재를 결합하여 사용하는 하이브리드 제작기법은 주로 차체 외각(bodyshell)에 사용되어 차체 경량화, 생산 용이성 등의 많은 장점을 주고 있어 현재 유럽 등과 같은 철도 선진국에서 차체 제작 방법으로 많이 채택하고 있다. 한국형 고속 킬링열차(TTX)의 경우 역시 Fig. 15와 같이 하이브리드 제작 기법을 적용하여 차량 경량화를 달성할 계획이다.