

特輯

철도차량 시스템에서의 복합재료 응용

신광복*, 유원희**, 문형석***

1. 서론

1) 한국철도기술연구원 소개

한국철도기술연구원(KRRI, <http://www.krri.re.kr>)은 철도현장에 필요한 기반 및 핵심기술을 시급히 확보하고 미래혁신개발을 통하여 우리나라 철도산업을 선진국 수준으로 발전시키고자 1996년 3월 '국유철도 운영에 관한 특례법'에 의거, 정부가 출연하여 설립된 국내 유일의 철도종합연구기관이다.

본 연구원은 연구본부, 사업단 그리고 철도안전 성능 시험인증센터로 나누어져 있다. 연구본부는 기관고유 임무에 맞고 공적 과급효과가 큰 특성화, 전문화 연구를 수행하고 있으며 사업단은 표 1과 같이 국책 연구개발사업을 수행하고 있다. 이외에도 남북철도연계기술개발사업과 국가교통혁신사업 등을 추진 중에 있다.

표 1 한국철도기술연구원 국책연구개발사업 소개

사업명	사업내용
고속철도 기술개발사업	- 기간 : 1996.12 ~ 2002.10 (1단계) - 사업비 : 2,874 억원 - 목적 : 350km/h급 한국형 고속철도 시스템 개발 및 핵심기술 확보
도시철도표준화, 국산화 연구개발사업	- 기간 : 1996. 3 ~ 2005. 12 - 사업비 : 599억원 - 목적 : 도시철도의 안정성 확보, 표준화 및 관련 핵심기술 개발
경량전철 시스템 기술개발사업	- 기간 : 1999. 1 ~ 2002. 12 - 사업비 : 442억원 - 목적 : 최적의 한국형 경량 전철 시스템 기술개발 및 보급
철도기술 연구개발사업	- 기간 : 2002. 8 ~ 2005. 7 (1단계) - 사업비 : 450억원 - 목적 : 180km/h급 한국형 틸팅 고속열차 개발

철도안전성능 시험센터는 ISO 9001과 ISO/IEC 17025에 의한 국제적인 공인시험기관으로, KOLAS로부터 인정받아 철도부문의 역학(차량 및 시설), 전기, 화학분야에 대한 123항목의 공인시험 업무를 수행하고 있다.

이와 같이 한국철도기술연구원은 원천기술 확보를 위한 기본연구부터 국가대형 연구개발사업까지 성공적으로 추진함으로써 철도기술혁신을 선도하며, 정부와 철도청, 차량제작업체에서 필요로 하는 각종 정책개발과 기술의 적기 지원을 통하여 철도의 경쟁력과 기술 향상을 도모하고 있다.

2) 복합재료의 철도차량시스템에서의 필요성

열차(train)라고 함은 일반적으로 차량 시스템, 선로 구축물 시스템 그리고 전기신호 시스템 등이 합쳐져 열차의 차륜이 레일 위를 정해진 궤도를 따라 주행하는 시스템을 말한다. 승객들이 열차를 이용할 때 민감하게 작용하는 인자들은 안락함(comfort), 속도(speed), 소음/진동, 쾌적함, 출발/도착의 정확성 등을 들 수 있다. 이런 인자들을 무시하거나 등한시 하게 되면 승객들은 항공기나 자동차 등의 타 운송수단으로 이동을 하게 되어 철도 전반의 수송 효율성 저하를 가져올 것이다. 따라서, 철도 제조회사들은 안락함, 쾌적함, 정확성을 유지하면서 속도 또한 향상된 열차 개발에 대한 필요성과 요구에 직면하게 되었다. 그러나, 고속차량용 차체 구조물을 개발하기 위해서는 해당 차량에 대한 경량소재 적용, 최적 구조설계, 구조안전성 평가방법들에 대한 기술개발이 선행되어야 한다. 이는 고속의 차량이 기존선로에서 운행될 경우, 속도향상에 따른 횡압(lateral pressure)의 증가가 예상되고 이는 궤도의 손상에 직접적인 영향을 미치는 요인이 될 수 있으므로 기존의 선로조건을 크게 변경하지 않는 상태에서 속도를 향상시키고 에너지 소모량을 줄이기 위한 차체 구조물의 경량화 및 최적 설계가 검토되어야 한다. 따라서, 최근에 경량화를 위해 철도차량 구조물 소재로 관심을 받고 있는 재료가 복합재료(composite material)이다.

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀, 선임연구원, 교신저자(shin955@krri.re.kr)

** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단장

*** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀 주임연구원

복합재료는 기존 금속재료에 비해 비강성, 비강도 특성이 좋고 낮은 열팽창계수 등의 장점 때문에 그동안 항공기, 위성체 등의 일부 응용 분야에서 많이 사용되어 왔으나[1,2] 철도차량에는 그 다지 많은 적용이 없었다. 그러나, 철도 시스템의 고속화 요구와 필요성에 의해 철도차량의 경량화는 중요한 설계인자로 대두되었다. 따라서, 본 논문에서는 그동안 국내의 철도차량에 적용된 복합재료의 적용 사례를 알아봄으로서 복합재료의 철도 차량 구조물 소재로의 응용에 대해 인식을 높이는 계기가 되길 바랍니다.

2. 철도차량 차체 구조물로서 사용되는 재료

철도차량 차체(car body)에 사용되는 재료는 기계적 성질이 좋아야 하고 내식성이 양호하며 용접성 및 압출성이 좋아야 하고 특히 외판(exterior panel)은 내식성이 우수한 재료를 사용해야 한다. 따라서, 일반적으로 철도차량 차체의 재료는 주로 연강재(mild steel)를 사용하여 왔다. 연강재 자체는 재료비가 싸고 연속 용접에 의한 기밀확보(열차가 터널 주행 시 사람의 귀에 압력 차에 의해 생기는 이명 현상을 없애기 위함)가 용이하며 재료의 탄성계수가 높아서 굽힘 강성을 높이는 설계가 용이한 장점을 가지고 있다. 반면 부식에 약하고 반드시 도장을 해야 하기 때문에 보수 비용이 높고 비강도(specific strength)가 낮아서 경량화가 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

따라서, 최근에는 연강재 차량의 단점을 보완하기 위해서 스테인레스, 알루미늄 합금 그리고 복합재료를 이용한 차체의 제작이 행해지고 있다[3].

1) 구조용 압연 강재

구조용 압연 강재는 국내뿐만 아니라 일본에서도 차체 구조용으로 널리 사용되는 탄소강이다. 구조용 압연 강재에는 일반구조용 압연강재, 용접 구조용 압연 강재와 내후성 열간 압연 강재가 있다. 이들 구조용 압연 강재중에서 국내에서 철도차량용으로 많이 사용되는 것은 용접 구조용 압연 강재인 SM490A와 일반 구조용 압연 강재인 SS400이다.

현재 국내에서 운행되는 기관차, 새마을 동차, 화차 등 주요 강도 부위에는 SM490A를, 그 이외에는 SS400을 사용하고 있다. 그림 1은 SM490A로 차체를 제작한 철도청의 새마을 동차 모습이다.

2) 스테인레스 강

스테인레스 강은 철(Fe)에 상당량의 크롬(~12%정도)을 첨가하여 녹이 슬지 않도록 만들어진 강으로서 여기에 필요에 따라 탄소(C), 니켈(Ni), 규소(Si), 망간(Mn), 모리브덴(Mo) 등을 소량씩 포함시켜 만든 합금강이다.



그림 1 철도청 새마을 동차.



그림 2 철도청 과천시 전동차.

국내에서 널리 사용되는 차체 구조용 스테인레스는 오스테나이트계 STS304와 STS301L이다. STS301L은 STS301 강에서 C 함량을 낮추어 용접부 부식성을 개선하고 낮은 C 함량에 의한 강도저하를 N첨가로 보강한 강(steel)이다.

STS304는 가장 널리 사용되는 강으로 내식성, 내열성, 저온강도, 기계적 성질이 양호하다. 현재 국내에서 운행되는 새마을 기관차, 새마을 객차, 전동차 등은 차체의 골조와 외판 모두 이같은 재질을 사용하고 있다. 그림 2는 STS304로 차체를 제작한 철도청의 과천시 전동차 모습이다.

3) 알루미늄 합금

알루미늄 합금은 비열처리용 합금과 열처리용 합금으로 나눌 수 있다. 비열처리 합금으로는 순수알루미늄(A1000계열), Al-Mn계(A3000계열), Al-Si계(A4000계열), Al-Mg계(A5000계열)가 있다. 열처리합금으로는 Al-Cu-Mg계(A2000계열), Al-Mg-Si계(A6000계열), Al-Zn-Mg계(A7000계열)가

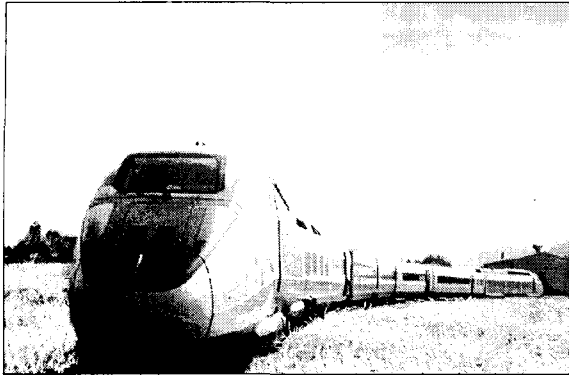


그림 3 G-7 고속철도.

있다. 이 중 철도차량 구조용 압출형재로 많이 사용되고 있는 소재로는 A7000계열의 A7N01, A7020과 A6000계열의 A6005A, A6N01, A6063을 들 수 있고, 판재로 많이 사용되고 있는 소재로는 A5000계열의 A5083, A5754 등을 들 수 있다. 차체에 사용할 알루미늄 합금 소재를 선정하기 위해서는 강도적 측면, 압출성, 용접성, 소재의 수급 등이 고려되어야 한다.

이런 점에서 압출재 소재로는 적절한 강도를 지니고 있고 압출성 및 용접성이 우수하며 내식성도 A5000계열 필적할 만한 A6N01, A6005를 들 수 있는데, A6005A는 전세계적으로 통용되는 소재로 유럽 지역에서 철도차량 소재로 널리 사용되고 있는 재질이며, A6N01은 일본에서 개발한 합금으로 강도, 압출성, 용접성, 내식성 등이 A6005A와 매우 유사한 합금이다.

A6005A는 압출재 소재로는 적합하나 판재로서의 가공이 곤란하므로, 차량 제작에 부분적으로 소요되는 판재는 A5083과 경부고속전철 사업(K-TGV) 시 국산화한 A5754를 들 수 있으나, 강도적인 면을 고려하면 A5083이 좋다. 그림 3은 A6005A로 차체를 제작한 G-7 고속철도의 모습이다.

4) 복합재료

철도차량의 구조재는 철강이 주력재료이나 그 결점이 부식과 중량이다. 물이 순환하는 부분의 국부적 부식은 차체보수의 대부분을 차지하며 차량 수명을 단축하는 요인이 된다. 또 차량 중량이 큰 것은 동력비 등 여러 가지 면에서 불리하므로 항상 차량의 경량화에 노력해 왔다.

그래서 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 등이 차량용 재료로서 우수한 특성을 가지므로 다양한 부분에 사용이 시도되고 있으며, 경량이고 조형성이 좋아 복잡한 형상의 부위나 디자인을 중시하는 선두부 등에 활용되고 있다.

그러나 열차에 열차화재 방지 측면에서 차체 구조물 및 내장재는 불연성이 아니면 안되도록 되어 주로 내부식성을 이용한 탱크류에 광범위하게 사용되어 왔으며, 불연성 FRP가 실용화되면서 부재 및 내장재로서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 FRP 자체에 해결해야 할 과제가 있기 때문에 주부재보다는 내장재나 일부 부품에만 사용되고 있는 실정이다.

철도차량 차체 구조물로서의 복합재료 응용사례는 미비하지만 일본과 유럽 등에서 연구개발 중에 있다. 일본에서는 신간선 차량 차체를 CFRP를 이용하여 제작하여 실용 예정에 있으며, AAR Composites과 Bombardier는 2004년 개발 목표로 고등복합재료(advanced composite materials)를 사용한 Las Vegas Monorail Car Body 개발에 착수하였다[4]. 국내에는 아직 차체를 복합재료로 제작한 예가 없으나 서서히 연구소와 산업계를 중심으로 관심이 일어나고 있는 실정이다.

3. 철도차량 전두부에 응용되는 복합재료 사례

전두부는 주행저항 및 압력소음을 감소하기 위한 유선형 형상과, 내장품의 탑재를 고려한 내부공간 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 경디한 충격에 의한 손상부위에 유지보수비가 저렴하고, 금속보다 우수한 비강도(specific strength)를 지닌 신소재 복합재료를 사용하는 것이 좋다.

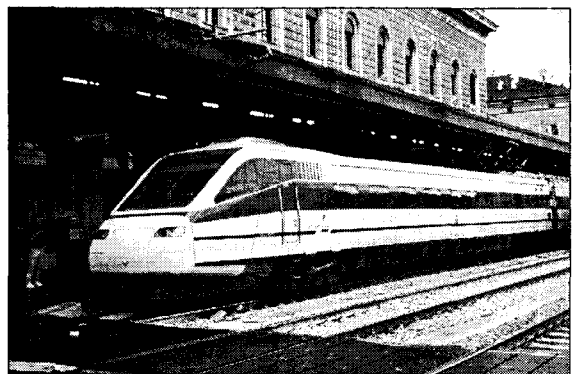


그림 4 ETR 460(이탈리아).



그림 5 X-2000 (스웨덴).

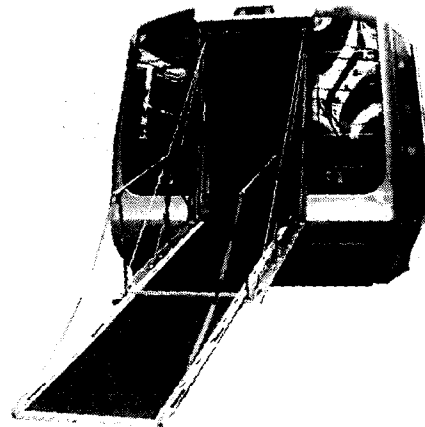


그림 8 홍콩 지하철 전동차의 전두부 형상.



그림 6 VT612(독일).

전두부에 FRP를 적용하여 제작한 열차들은 외국의 경우 ETR 460(이탈리아, 그림 4), X-2000(스웨덴, 그림 5), VT 612(독일, 그림 6) 등 많은 적용사례가 있다[5]. 국내의 경우에는 한국화이바(주) 철도차량사업부에서 인도 전동차 전두부(그림 7), 홍콩 지하철에 투입될 전동차의 전두부(그림 8)를 FRP로 오토클레이브(autoclave) 성형하여 제작한 사례가 있다. 또한, 광주 지하철에 투입될 차량의 전두부 형상도 FRP로 시제차를 제작중에 있다. 주로 전두부는 불연성 유리/페놀 프리프레그(non-flammable glass/ phenolic prepreg)를 오토클레이브 성형하여 제작한다.

4. 철도차량 내/외장재로 응용되는 복합재료 사례

4.1 복합재료 사용 시 장점

그림 9는 복합재료가 사용되는 주요 내/외장재 부위를 나타내며 복합재료를 철도차량의 내/외장재로 사용할 경우 장점은 다음과 같다[5].

가) 내부식성

여객차는 화장실, 세면장 등의 물이 사용되는 곳이나 비바람을 맞는 출입문이나 창 주변 등에 국부적 부식이 심하다. 또 물탱크나 오물 탱크가 설치되기 때문에 내부식성은 차량에 있어서 최대의 장점이 된다. 조형성이나 중량, 미관의 관점에서 내장이나 복잡한 형상의 오물탱크 등에는 FRP가 적당하다.

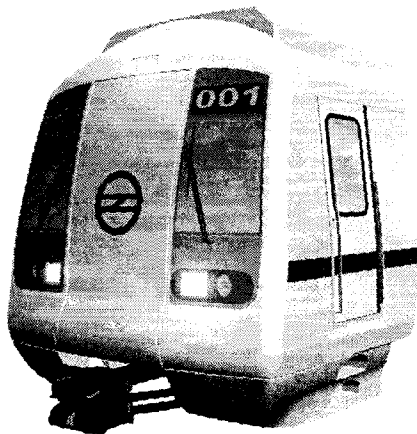


그림 7 인도 전동차 전두부 형상.

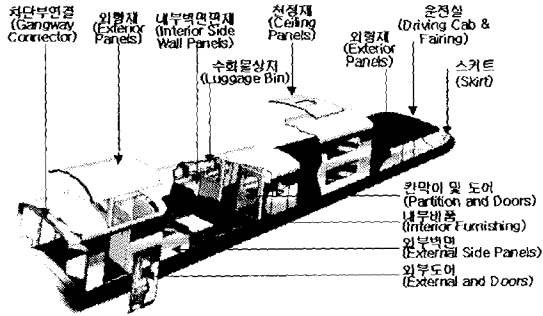


그림 9 복합재료가 응용되는 철도차량 내/외장재.

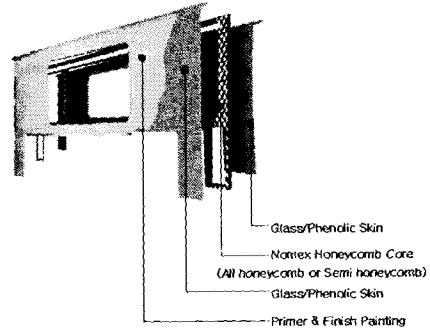


그림 10 윈도우 마스크.

나) 경량화

전동차나 여객차의 경량화는 동력비나 캐도 보수비의 절약 또는 승차감 향상 등의 측면에서 중요하다. FRP의 비중은 차량 경량화의 주력재료인 알루미늄 합금보다 가볍다.



그림 11 사이드 벽 패널 일부.

다) 조형성과 미관

기관차는 기계만 장착되지만 여객차에서는 승객들이 주거하는 것을 고려하여 외장설계(exterior design)나 내장설계(interior design)를 중시한다. 따라서 형상, 색채, 감촉 등에 자유도가 큰 FRP는 우수한 내장재로 되고 또 선두차등의 외장설계 등에도 속도감등이 자유롭게 표현될 수 있다.

4.2 적용 사례

노멕스 하니컴 샌드위치 구조는 경량이 요구되는 윈도우 마스크(window mask, 그림 10), 측면 벽 패널(side wall panel 그림 11), 라운드 패널(round panel)등에 사용되며 알루미늄 하니컴 샌드위치 구조는 우수한 굽힘 강성을 가지고 있어 도어(door, 그림 12), 천장판 등에 사용된다. 이외 의자(그림 13), 공기장화 커버(air conditioner cover) 등 광범위하게 사용된다.

라) 가공성

곡면을 포함한 복잡한 형상을 용이하게 선정할 수 있어서 생산 수량이 적은 경우나 선두차량 전면과 같은 대형의 것에 아주 좋다. 또, 화장실, 세면장 유닛과 같이 차체외부에서 일체 성형할 수 있는 것은 차체 기장작업이 용이하게 되어 공정도 단축할 수 있다.

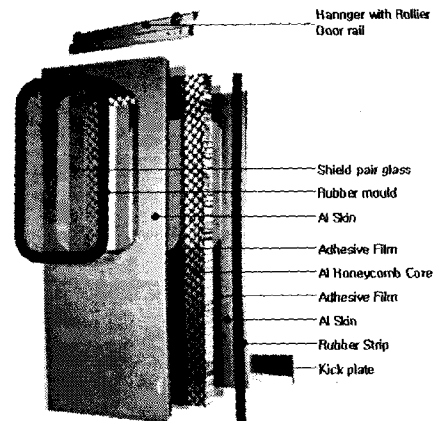


그림 12 도어 패널.

마) 단열성

습도가 높을 때 알루미늄 내장재에서는 표면에 결로가 발생한다. 단열성이 높은 FRP에서는 이것이 거의 발생하지 않는다. 냉방용 공기판에서도 안쪽의 단열재를 생략할 수 있다.

바) 절연성

직류전동차의 지붕은 전기절연을 시키게 되어있어 금속성의 통풍기나 냉각커버(cooler-cover)는 절연물을 개입시키고 있는데, 조형성이 좋은 FRP는 이런 곳에서도 활용될 수 있다. 상하 전기기기박스나 점검 커버에도 경량화, 내부식성을 위해 사용될 수 있다.

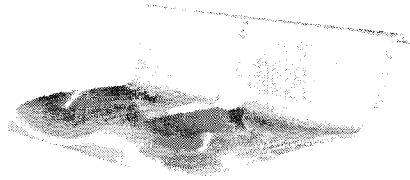


그림 13 FRP 의자.

기존선 고속화 실용기술 개발사업 1차년도 연차보고서, 한국철도기술연구원, 2002. 3.

4) Netcomposites, *NewLetters*, 2001. 6.

(<http://www.netcomposites.com>)

5) 유원희 외, “차량 시스템 엔지니어링 기술개발 통합 및 총괄,” 철도청 기존선 고속화 실용기술 개발사업 1차년도 연차보고서, 한국철도기술연구원, 2002. 3.

5. 맺음말

외국 선진국(유럽, 일본 등)에서는 전두부와 일부 내/외장품에 FRP와 샌드위치 구조 등을 적용하여 현재 운행 중인 차량들이 많이 있고 차량의 경량화를 위해 차체 구조물에까지 복합재료를 적용하여 개발 중인 사례(일본 신간선 700계, 미국 Las Vegas Monorail car 등)도 있다.

국내에서는 1990년대부터 철도차량에 복합재료 응용을 본격적으로 시작하여 기술 수준이 선진국과 비슷한 수준으로 올라와 있는 게 사실이다. 한국철도기술연구원에서도 철도청의 지원 하에 2005년 실용화를 목적으로 개발 중인 한국형 고속 텀팅열차(최대속도 180km/h)의 전두부에 FRP를 적용할 예정이며 기타 내/외장재에도 복합재료를 적용할 예정으로 있다. 본 연구개발 사업을 통해 아직 국내의 철도차량 구조물로서 복합재료 응용에 대한 인식과 시장이 성숙되지 않았지만 향후 산,학,연의 많은 관심과 연구가 있으면 활성화되리라 생각한다.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되었으며 논문 편집에 도움을 주신 한국화이바(주) 철도차량사업부 조세영 부장과 이상진 연구원에게 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Tennyson, R.C., “Composites in Space - Challenges and Opportunities.” *Proceedings of ICCM-10*, 1995.
- 2) K.B.Shin, C.G.Kim, C.S.Hong and H.H.Lee, “Thermal Distortion Analysis of Orbiting Solar Array Including Degradation Effects of Composite Materials.” *Composites Part B : Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 271-285, 2001.
- 3) 문영석, 유원희 외, “철도차량의 차체 구조물,” 철도청