

特輯

“철도분야에서의 신소재 복합재 응용 기술”(총 7편) 중 - 제3편

복합재 철도차량 설계 기술

신광복*

1. 서론

철도차량의 차체 재질은 1세대인 강재, 스테인레스 강에서 출발하여, 2세대인 중공 압출재 알루미늄 그리고 1990년대 후반에는 3세대인 복합재료로 변화되는 추세이다. 강재, 스테인레스 강 그리고 중공 압출재 알루미늄을 사용한 차체 설계 및 제작관련 국내 기술은 선진국 수준에 도달하여 차량 개발이 활발히 이루어져 왔다. 복합재료의 경우, 국내에서 항공기, 선박 등에 응용되거나 철도차량 내장재로 사용된 바는 있으나 철도차량 차체와 같이 하중을 직접 지탱하고 견뎌야 하는 1차 부재에 사용된 바는 전무하다. 따라서, 국내의 복합재 철도차량 설계 기술은 선진국에 비해 많은 뒤처져 있는 실정이다[1].

이에, 한국철도기술연구원에서는 철도차량 경량화를 위해 한국형 고속 텀팅열차(TTX)에 복합재료를 적용한 차량 개발을 수행함으로써 국내의 복합재 철도차량 설계 및 제작 기술을 한 단계 높이고자 한다. 복합재 철도차량 설계 기술은 기존의 금속재 차량 설계와는 많은 차이점을 보이고 있다. 기존 금속재 차량과의 설계 방식 차이는 설계 담당자들에게 복합재 철도차량 설계를 수행함에 있어 기술적 장벽으로 작용하였으며 주로 차체와 의장 분야에서 두드러졌다. 또한, 차체의 제작성을 고려한 설계기술 확보에 많은 노력과 시간이 소요되었다.

본 논문에서는 차체와 의장 분야를 중심으로 기존의 금속재 차량과 복합재료를 적용한 한국형 고속텀팅열차와의 설계기술 차이점을 비교 분석하고 이를 토대로 확보된 하이브리드 복합재 차체 설계기술을 소개하고자 한다.

2. 철도차량의 설계기술

2.1 철도차량에서의 설계기술 분류

철도차량의 설계기술은 크게 차체, 의장, 기장 그리고 전기분야로 나누어진다.

차체는 차량의 기본 골격을 구성하는 골조를 총칭하며, 차량의 기능 및 안정성, 외관, 승차감, 소음 및 진동 등을 결정하는 가장 중요하고 기본적인 토대를 제공한다. 의장은 내장판, 실내설비 구조(화장실, 선반, 의자, 창문, 출입문, 냉방장치 등), 운전실 등과 같이 철도차량의 실내외 설비 설계 및 취부를 담당한다. 기장은 상하 및 옥상기기의 취부 및 배치 설계와 제동 및 전선 배관 설계, 그리고 급수 및 화장실 시스템 설계를 담당하며, 전기는 철도차량의 운행 및 서비스에 관련 전기기기들의 설계 및 인터페이스를 담당한다[2].

2.2 차체 설계기술

국내에서 운행 중인 철도차량용 차체의 재질은 객차에는 주로 일반 탄소강이, 전동차에는 스테인레스 강이 주종을 이루고 있으며, 근래에 와서는 알루미늄 합금으로 구성된 차체 개발이 완료되어, 일부 전동차와 고속 객차에 적용되고 있는 실정이다. 철도차량의 경우, 경량화에 대한 요구는 차량 운행비의 최소화, 선로에의 분담 하중 저감에 따른 유지 보수비 절감 등의 이유로 지속적인 연구를 진행하고 있는 실정이며, 복합재가 대안으로 제시되고 있다.

차량의 차체는 제작 공정상 구성 부위별로 언더프레임, 측골조, 지붕골조, 단부골조로 나누어진다.

일반적으로 철도차량의 차체 설계는 Fig. 1과 같은 과정으로 진행된다[3].

2.2.1 알루미늄 차체의 설계 특징

알루미늄 차체의 경우 구조상 대형의 중공형 압출재를 제작할 수 있어야 하며, 국내에서는 90년대 후반에 이를 개발할 수 있는 능력을 갖추 수 있었다. 차량 단면에서와 같이 총 17개의 대형 중공형 압출재를 차량 길이 방향으로 압출 제작하고, 이를 전 용접하여 조립하는 방식이다. Fig. 2는 알루미늄 압출재를 이용한 전형적인 차량 단면을 보여주고 있다.

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

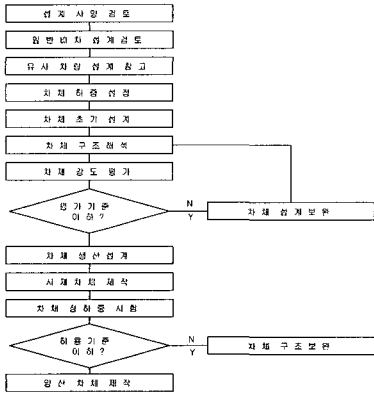


Fig. 1 철도차량 차체의 설계 과정.

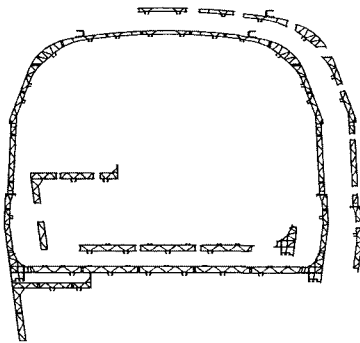


Fig. 2 알루미늄 차체 단면.

차체에 조립되는 각종 장치 및 설비품용 브라켓 (bracket)은 압출체를 설계할 때 고려되어야 하며, 하부구조에 있어서 언더프레임 하부에는 상하기 조립용 T-slot을, 언더프레임 상부에는 바닥재와 의자 등을 조립하기 위한 슬롯(slot)이나 기타 브라켓을, 축 골조에는 의자, 선반 등을 조립하기 위한 브라켓을, 캔트 레일, 지붕 골조에도 각각에 설치할 덕트나 장치용 브라켓의 크기와 위치를 고려하여 압출체의 단면형상을 결정하게 된다. 알루미늄 압출체의 차량 제작시 설계 단계에서 관련 취부 브라켓이 결정되어야만 압출을 위한 금형을 제작하고, 성형할 수 있기 때문에 금형 제작 전에 이에 대한 완벽한 준비가 되어야 하므로 제작 중에 설계변경의 애로점이 있다.

2.2.2 스테인레스강 차체의 설계 특징

스테인레스 강으로 제작되는 철도 차량 차체는 스테인레스 강이 가지고 있는 내식성 및 비강도가 우수하다는 특성을 주로 이용하고 있다. 스테인레스 강 종류는 판의 압연조건에 따라 기계적 특성이 변하게 된다. Fig. 3은 전형적인 스테인레스 강을 이용한 차체의 단면을 보여준다.

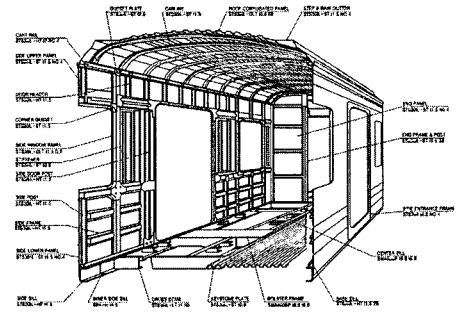


Fig. 3 스테인레스 강 차체 단면.

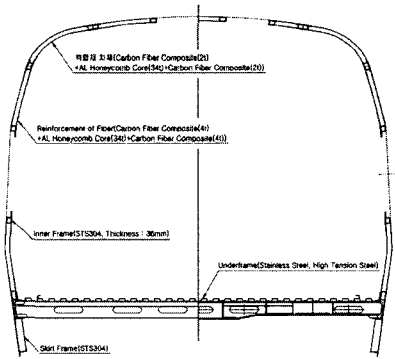


Fig. 4 TTX 하이브리드 복합재 차체 단면.

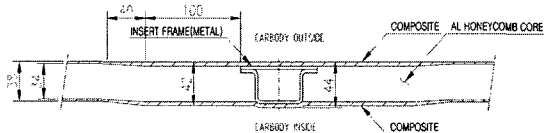


Fig. 5 샌드위치 복합재에 삽입된 보강 골조.

2.2.3 TTX 하이브리드 복합재 차체의 설계 특징

1) 차체 단면

Fig. 4는 차체를 구성하기 위한 TTX 하이브리드 복합재 차체 단면을 나타낸 것으로 차체의 구조는 카본/에폭시 면재(facesheet)와 알루미늄 하니컴 코어를 사용한 샌드위치 구조로 이루지고, 구조해석 및 시험을 통해 카본/에폭시 적층판 두께 및 알루미늄 코어의 두께를 결정하게 된다.

차체의 구성상 내외에 여러 설비 및 장치가 취부될 수 있도록 내부에 금속재의 부재(inner frame)를 삽입하여 이를 이용하여 각종 기기를 설치할 수 있도록 하였다. 복합재

내에 삽입되는 금속 부재는 그 자체로 서로 연결되어 골조를 형성하도록 하여, 하중 분담 역할도 할 수 있도록 하였다. 또한, Fig. 5에서 보듯이 금속부재가 삽입되는 부분은 복합재 스킨을 두겹게 하여, 이 부분이 취약해질 우려를 감소시켰다. 차량 내측에 취부되는 설비 브라켓 설치를 용이하게 하도록 2mm 정도 단차가 지도록 구성하였다.

2) 언더프레임

언더프레임은 강재 및 스테인레스 강으로 용접 조립되어 제작하고, 측 구조, 지붕 구조 및 단부 구조는 일체형의 샌드위치 복합재로 구성되어 언더프레임과 체결되는 방식으로 설계 및 제작되어진다. TTX 차량의 언더프레임의 간략한 형태는 Fig. 6과 같다.

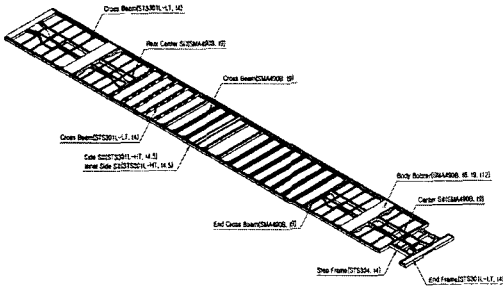


Fig. 6 언더프레임 구성도.

3) 복합재 차체와 언더프레임 체결 구성

Fig. 7은 복합재 차체와 금속재 언더프레임과의 체결구조를 나타낸 것이다.

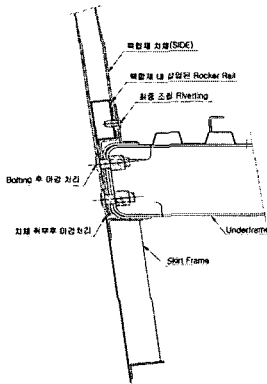


Fig. 7 복합재 차체와 언더프레임과의 체결 방법.

그림에서 보듯이 일체형의 복합재 차체를 언더프레임에 위치시킨 후 언더프레임의 사이드실과 볼트 조립을 수행하

고, 언더프레임 내측에서 취부 브라켓을 용접하여 이와 복합재 차체와 리벳 작업을 실시하여 조립하도록 하였다. 이때 복합재 차체와 언더프레임사이에는 기밀유지와 진동 저감을 위하여 추가적으로 접착제에 의한 체결방법이 사용된다.

4) 복합재 차체 보강을 위한 골조 삽입

Fig. 8은 복합재 차체의 강성 보강을 위해 삽입되어지는 금속재 골조를 나타낸 것이다. 먼저 각각의 블록을 제작하기 위하여 골조를 용접 조립하고, 금형에 이 골조와 복합재를 설치한 후 성형하게 된다. 각각의 골조는 선조립하고 치수 관리 및 하중 전달을 유연하게 할 수 있도록 서로 엮여져 있는 형태로 제작된다.

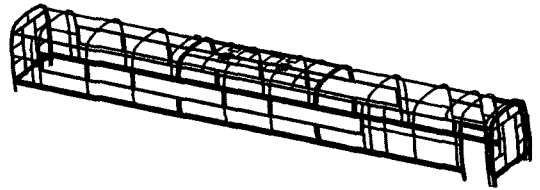


Fig. 8 복합재 차체내의 삽입 골조.

2.3 의장 설계기술

실내설비 취부 설계 관점에서 기존의 금속재 차량과 TTX를 비교하고 복합재 차체에서의 실내설비 취부기술을 소개하고자 한다.

2.3.1 금속재와 복합재 차량의 내부 골조 비교

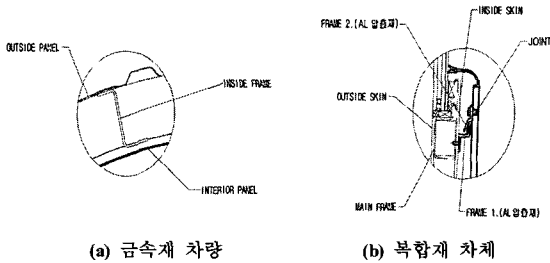
금속재 차량의 경우 차체를 구성하는 주 골조(main frame)외에 실내설비를 취부하기 위한 내부 골조(inside frame)가 “Z-bar” 형태로 구성되고 내장판(interior panel)이 내부 골조에 직접 취부되는 형태로 설비가 구성된다. 그러나, 하이브리드 복합재 차체의 경우 "외피(outside skin)/주골조 & 알루미늄 하니컴 코어/내피(inside skin)"의 형태로 골조 내외측을 복합재가 감싸는 형태로 구성되어 두께 44mm의 벽이 구성되므로 주골조에 내부 골조를 엮어서 용접구조로 구성하는 것이 불가능하다.

2.3.2 내장판 취부 방안

TTX의 경우 외피에서 내장판(interior panel)까지의 벽두께가 77mm로 구성되어 있으며 골조부위 44mm와 내장판 10mm 두께를 빼면 실제 21mm의 내부골조 구성가능 공간만이 남게된다.

두께 3mm 강판의 가공한계를 고려서 21mm의 공간만으로는 앵글 골조(angle frame) 형태로 구성이 매우 곤란한 실정이다.

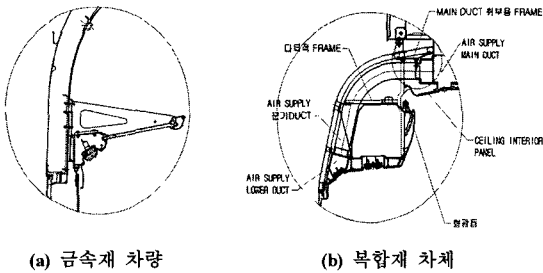
따라서, 하이브리드 복합재 차체의 특성을 고려하여 압출재로 내부골조를 설계하였으며 Fig. 9에서와 같이 주골조에 볼트 또는 리벳 체결로 구성하였다.



(a) 금속재 차량 (b) 복합재 차체
Fig. 9 내장판 취부골조 구성방법 비교.

2.3.3 선반 및 천장 내장판 취부 방안

금속재 차량의 경우 Fig. 10(a)와 같이 내장판에서 시작하여 용도에 적합한 형태의 선반걸이(baggage rack) 단면을 설계한 후 내장판과 맞닿아 있는 취부면에 내부 골조 단면을 구성하고 최종적으로는 길이방향으로 다른 내부골조 및 주골조와 엮는 방식으로 설계한다.



(a) 금속재 차량 (b) 복합재 차체
Fig. 10 선반 및 천장 내장판 취부방법 비교.

TTX의 경우 차체와 내장판 취부에서와 마찬가지로 내부 골조 구성공간에 여유가 없다는 문제가 공통적으로 존재한다. 특히 EMU 방식의 차량으로 상하에 전장품 취부 개소가 일반 객차보다 많아 냉방장치 및 공기공급 덕트(air supply duct)의 상하취부가 불가능하여 공기유동 관련 기기 모두가 천정부위에 설치된다.

또한 TTX는 항공기형 선반을 적용하고 있고 객실내 원할한 공기흐름을 위해 창문쪽으로 분기덕트가 설치되어 있는 특징이 있다. 이러한 구조적인 특징 때문에 금속재 차량의 경우보다 천정부위 취부설비가 복잡해졌고 천정부위 내부골조 설치공간이 매우 협소한 구조로 되어있다.

이러한 조건들을 고려하여 기취부되어 있는 주골조를 최대한 활용하고 일정수준의 강도를 유지하며 공기공급 덕트와 연계하여 천장판(ceiling panel) 및 형광등, 선반걸이 등의 다수 취부요소를 모두 가능한 형태의 용접구조물 형태의 골조를 Fig. 10(b)와 같이 구성하였다.

3. 복합재 철도차량 차체 및 의장 설계 특징

3.1 차체 설계 기술의 특징

하이브리드 복합재 차체 설계 및 제작은 국내에서 처음 시도되는 분야로 설계 기술 확보에 많은 어려움이 있었다. 소재 선택, 샌드위치 구조 구성, 두께 선정, 금속재 언더프레임과의 연결 방식, 보강재 삽입 위치 및 방식 등의 결정은 참고 모델이 없어 설계 기간이 예상보다 많이 소요되었다. 이런 문제점들은 해외 사례 분석과 국내 참여 연구원들간의 수많은 인터페이스 회의 등을 통해 설계 초안이 완성되면 수십 차례의 해석 및 시험을 통해 설계 보안을 수행하여 문제점을 하나씩 해결하였다.

3.2 의장 설계기술의 특징

실내설비 취부설계 관점에서 하이브리드 복합재 차체의 특징은 다음의 두 가지로 요약된다.

첫번째, 차체의 주골조 역할을 담당하는 복합재 측 벽 두께가 44mm이고, 이를 침범하면서 설비취부용 브라켓의 설치가 어렵고, 차량의 벽 두께에 포함되는 단열재 및 내장재 두께를 고려하면 별도의 내부골조를 형성하는 것이 곤란하다.

두번째, 금속재 차량에서와 같이 주골조와 내부골조를 용접구조로 엮어서 구성하는 것이 불가능하다. 따라서, 블록 형태의 조립구조를 갖는 내부 골조의 적용이 곤란하다.

이러한 특성을 감안하여 좁은 면적 내에서도 형상설계가 상대적으로 자유로운 압출재를 이용, 골조간에 걸어서 취부하는 방식을 적용하므로써 내부 골조의 역할을 대신할 수 있는 골조를 설계하여 해결하였다.

또한 이러한 압출재 골조를 주골조에 리벳 조립 후 압출재 사이를 별도로 고안된 골조(Fig. 10(b))로 조립 연결하여 기존의 내부골조의 역할을 대신할 수 있도록 설계하였다. Fig. 11은 문제 해결을 통해 얻어진 하이브리드 복합재 차체의 의장 설계에 대한 조감도를 나타내고 있다.

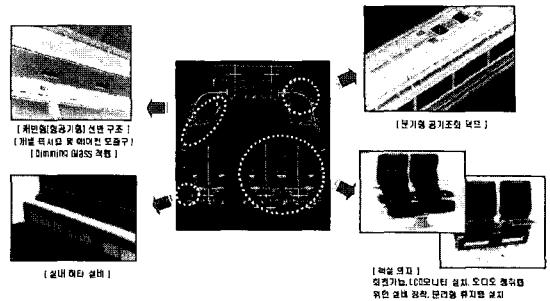


Fig. 11 TTX 의장 조감도.

4. 금속재와 복합재 철도차량의 설계기술 요약

참고문헌

금속재와 복합재 철도차량의 설계, 제작, 유지보수 등의 측면에서 특징을 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 보듯이 복합재 차체는 경량화, 제작비 절감, 내충돌성 등에서는 유리하나 소재 재활용성, 취부성, 설계 및 제작 변경, 차량 전기 접지 측면에서는 금속재 차체에 비해 불리한 것으로 나타난다. 따라서, 이들 항목에 대한 집중적인 연구개발이 필요할 것으로 사료된다.

- 1) K.B.Shin, S.J.Lee, “The development project of Korean Tilting Train eXpress with maximum design speed of 200km/h,” *The Korean society for composite materials*, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 62-65.
- 2) 전동차 기초설명집, 철도청, 2003.
- 3) 서승일, “스테인레스 강 철도차량차체 설계기술”, 한국철도학회지, Vol. 7. No. 2, 2004, pp. 39-47.

Table 1 금속재와 복합재 차체의 특징 비교

구 분	일반강	스테인레스 강	알루미늄	복합재
경량화	×	△	○	○
재료비 절감	○	○	△	○
제작비 절감	△	△	○	○
소재재활용	△	△	○	×
제작 작업성	○	△	○	○
실내설비 취부	○	○	△	△
상하기기 취부	○	○	△	△
육상기기 취부	○	○	△	△
차량 전체 기밀	△	△	○	○
부분 기밀	○	○	○	△
소음 차단 특성	○	○	△	△
차체 유지보수	○	○	×	△
내충돌성	△	△	○	○
설계, 제작 변경	○	○	△	×
차량 전기 접지	○	○	○	△
내부식	×	△	○	○
내화재성	○	○	△	○

× : 불리, △ : 보통, ○ : 유리

5. 맺음말

복합재 철도차량에 대한 설계는 기존의 금속재 차량과 많은 차이점을 보인다. 차체의 경우에는 샌드위치 구조의 선정, 금속재 언더프레임과의 체결, 보강재의 삽입, 충돌 안전성을 고려한 설계 기술확보가 어려웠으며 의장 분야에서는 내장재 취부를 위한 골조 설계, 선반의 취부 설계 등에서 어려움이 있었다. 설계상의 어려움은 기존 금속재 차체의 설계 기술에 대한 분석과 해외 개발 사례 분석 및 부품 시험, 3차원 설계에 의한 기구학적 검증 등을 통해 해결하였다. 따라서, 본 사업을 통해 확보된 하이브리드 복합재 차체에 대한 설계기술은 향후 국내 철도차량의 설계기술을 한 단계 높이는 계기가 될 것이다.