하이브리드 복합재 차체 구조물의 성형공정에 관한 연구
A Study on the manufacturing process for Hybrid Composite Carbody Structures

신광복* 조세현** 이상진**
Shin, Kwang-Bok Cho, Se-Hyun Lee, Sang-Jin

ABSTRACT

The hybrid composite carbody structures were considered as the carbody system of Korean Tilting Train eXpress(TTX) to achieve the lightweight design. The TTX carbodies are composed of the carbody shell made of the sandwich composite structure and the underframe made of the metal structure. The sandwich structures were used to minimize the weight of carbody, and the metal underframe was used to modify the design easily and to keep the strength of underframe by the installation of the electrical equipments. The sandwich carbody structures will be cured in an autoclave. In this paper, the manufacturing processes of the TTX carbody structures were introduced briefly.

1. 서 론

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 부게 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 부게 중심 설계에 의한 안전성 확보, 단순화된 구조 설계에 의한 최적수의 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 1980년대부터 지붕(roof), 사이드 구조(side structure) 및 차체(carbody structure)와 같이 하중을 적절 지탱하는 1차 부재로 사용이 확대되고 있다. 이런 복합재 구조물에 대한 성형방법은 대상 구조물의 운영조건, 사용 재료 그리고 보유 장비 등에 따라 다양한 방법이 존재하기 때문에 설계 단계에서 성형방법을 결정하여 설계에 반영한 후 이에 따라 적절한 성형방법을 통해 복합재 구조물을 제작하여야 한다. 한국형 고속 틸팅열차(TTX)는 국내 최초로 하이브리드 복합재 차체 개발을 수행하게 되어 이에 따른 설계 및 제작 기술은 사업 성공을 위해 매우 중요한 요소이다. 하이브리드 복합재 차체에 대한 설계 기술은 기존의 금속재 차체 설계 기술, 해외 기술 분석 그리고 참여 연구원들의 노력에 의해 확보되었으나, 하이브리드 복합재 차체에 대한 제작 기술은 설계 기술 확보만으로는 쉽게 해결될 문제는 아닌 것이다. 하이브리드 복합재 차체 제작은 소재, 성형 방법 및 시설, 설계 완성도, 작업공간, 숙련된 기술자 등의 주변 여건이 모두 해결되어야 가능하다.

본 연구에서는 오토클레이브(autoclave) 성형기법에 의한 1:1 시제용 하이브리드 복합재 차체 제작과정을 통해 복합재 차체 제작 기술 확보뿐만 아니라 실제 차체 제작에 앞서 발생할 수 있는

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 선임연구원, 정회원
** 한국화이바(주) 철도차량사업부

문제점을 사전에 해결하고자 한다.

2. TTX 하이브리드 복합재 차체 제작을 위한 주요 조건

2.1 차체 제작 개념도

TTX 하이브리드 복합재 차체의 설계 및 제작은 연구개발 초기에 제작 개념도를 기초로 시작하게 된다. TTX 하이브리드 복합재 차체의 제작 개념도는 국내 제작 여건(장비 보유 현황, 기술자 등), 해외 동향, 제작비용, 양산성 등을 고려하여 설계 전문가, 철여업체, 참여연구원들 간의 회의를 통해 결정하게 된다. 그림 1은 하이브리드 복합재 차체에 대한 단면 구성도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 차체는 카본/에폭시 외피와 알루미늄 하니컴 코아로 구성된 샌드위치 구조로 이루어지 있으며 언더프레임은 스테인레스 강을 사용하고 있다. 차체와 언더프레임은 접착제와 리벳 체결을 동시에 사용하는 체결방법을 사용하게 된다.

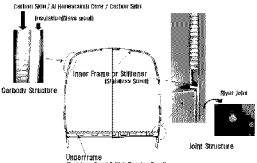


그림 1. TTX 하이브리드 복합재 차체 단면 구성도

2.2 차체 성형 방법

복합재료를 이용한 철도차량의 차체 제작 방법은 매우 다양하다. 공정의 다양한 선택범위는 복합소재 제조자들에게 생산 제조 비용의 효율화를 가능하게 하며 특별한 제조 공정은 생산된 부품들의 형태에 따라 적절히 선택되어야 한다. 일반적인 복합재 차체 제작 공법들은 아래의 방법들이 주로 사용된다.

- 필라멘트 와인딩(Filament widing)
- RTM(Resin Transfer Molding)
- Vacuum Infusion
- 오토클레이브 성형
  (Autoclave vacuum bag)

필라멘트 와인딩 공정은 그림 2와 같이 스위스의 쉰들러 왜그웅(Schindler Waggon)에서 140km/h급의 철도차량 차체 제작에 응용된 바 있으나 차체의 강성이 요구조건을 만족시키지 못한 것으로 알려져 있다[1].

그림 2. 필라멘트 와인딩 공법에 의한 차체 제작

Vacuum infusion 방법의 장점은 저가의 제작방법으로 20m 이상의 대형부품을 제작할 수 있으며 복잡한 구조의 부품을 제작할 수 있다는 것이다. 또한, 적층판과 심재 등의 2차 성형이 필요 없고 전공과정이므로 제품내의 기공(void)을 제거하여 균일한 물성을 얻을 수 있다. 그러나, 몰드와 같은 부수 장비들의 비용이 비싼 편이며 섬유의 체적비가 다른 방법들에 비해 상대적으로 적고 제작 시간이 길어 상당한 양을 수작업에 의존하게 된다는 단점을 가진다. 그림 3은 Vacuum Infusion에 의한 철도차량 전두부 제작 공정을 보여주고 있다.

RTM 공정은 저가의 설비와 장치로도 복잡한 형상의 대형 부품의 성형이 용이하며 다품종 소량 생산에 적합한 복합재료 성형 기술이다. 생산비가 저렴하며 vacuum infusion 공법에 비해 성형시간이 짧으며 보강섬유 함유율을 훨씬 더 높일 수 있는 장점이 있으나 프리폼 제조기술이 중

요하며, 수지의 유동성 예측 모델링을 하여 고른 수지 분포가 이루어지게 해야 한다. 또한 복잡한 형상의 경우 몰드 설계 기술이 문제가 될 수 있으며 최적성형조건 설정이 선행되어야 하는 단점이 있다.

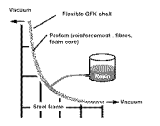


그림 3. Vacuum Infusion에 의한 선두부 제작 공정

한국형 고속틸팅열차(TTX)의 차체는 다양한 성형 방법 중에 오토클레이브 성형방법을 채택하여 제작된 것이다. 오토클레이브 성형 공정은 고품질과 대형 구조물 제작이 요구되는 우주항공용 복합재 구조를 제조할 때 주로 사용되는 방법으로 국내의 경우 오투클레이브 성형 기술이 세계적인 수준이고 대형 장비의 보유와 장비 안정화가 이루어져 가장 적합한 차체 제작 공법으로 선택하였다.

2.3 오토클레이브 장비

TTX의 경우, 1량의 길이가 약 25m로 기존에 국내에서 보유한 오토클레이브 장비의 최대 길이는 10m 정도이다.

초기 TTX 하이브리드 복합재 차체 제작은 그림 4에서 보듯이 3개의 블록(block)을 나누어 체결하는 방식을 선택하였다. 그러나, 3개의 블록에 의한 차체 제작 방식이 차후 파로나 진동 특성에 문제가 발생할 수 있다는 판단을 하여 일체형으로 제작할 수 있는 대형 오토클레이브 제작을 추진하게 되었다.

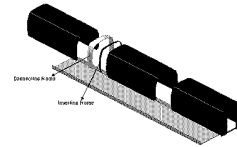


그림 4. 기존의 TTX 차체 제작 개념도

그림5는 현재 제작중인 오토클레이브 장비의 모습을 나타내고 있다. 제작중인 오토클레이브의 사양은 길이 30m, 직경 5m, 설계압력 5kg/cm^2 그리고 설계온도 160℃이다.

그림 5. 30m 대형 오토클레이브 제작 모습

2.4 3차원 설계

하이브리드 복합재 차체 제작을 위해서는 제작 개념도, 시설 확보, 성형 방법 등의 결정보다 중요한 요건은 설계의 완성도이다. 기존의 설계방식은 2차원에서 도면 작업을 한 후 바로 제작도면을 작성하여 차량 제작을 하면서 문제점을 해결하는 현장위주 방식으로 진행되었다. 그러나, TTX의 경우에는 CATIA V5를 이용한 3차원 설계를 먼저 진행하여 기구학적 인터페이스 확인을 한 후 2차원 도면을 출력하는 방식으로 진행하였다. 이런 3차원 위주의 설계방식은 설계 기간이 다소 늘어날 수 있는 단점이 있으나 설계의 완성도를 높여 차량 제작 시 수정사항이 줄어들어 결국 총 개발시간과 제작비용이 단축된다는 장점이 있다[2]. 그림 6은 TTX 구동차에 대한 3차원 도

면을 나타내고 있다.

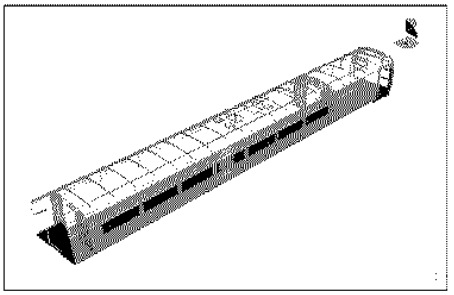


그림 6. TTX 구동차에 대한 3차원 모델

3. 구조시험용 하이브리드 차체 제작

TTX 하이브리드 복합재 차체에 대한 상세설계는 앞에서 언급한 바와 같이 완료되었고 차체 제작을 위한 세반 사항 역시 모두 준비되었다. 실제 차체 제작을 위해서는 1:1 시제차체를 제작하여 설계 검증을 거쳐야 한다. 설계 검증은 차체에 대한 요구 조건 즉, 처짐량, 강성 및 강도, 고유진동수 등의 기계적 특성과 서브 시스템과의 기구학적 인터페이스 점검, 외형 치수 등을 주로 확인하게 된다.

하이브리드 복합재 차체 제작 공정은 크게 4단계 즉, 설계, 목형제작, 몰드 제작, 차체 제작으로 나누어진다.

3.1 설계

설계단계에서는 상세설계를 바탕으로 목형 및 몰드 제작을 위한 도면을 생성해야 한다. 이때 목형과 몰드 제작 시 발생하는 기구학적 고려사항(두께, 곡조 삽입, 지그 등)을 충분히 반영해야 한다. 그림 7은 상세설계를 바탕으로 설계된 목형 제작도을 나타내고 있다.

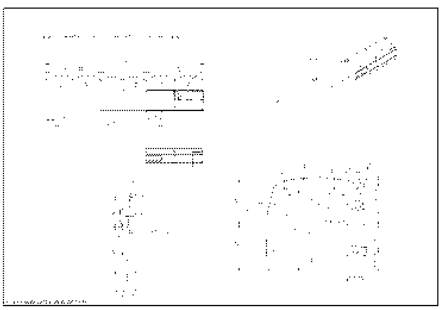
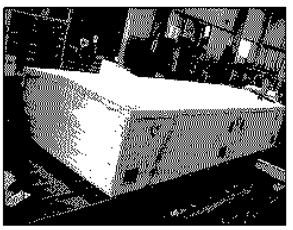


그림 7. 차체 제작을 위한 제작도

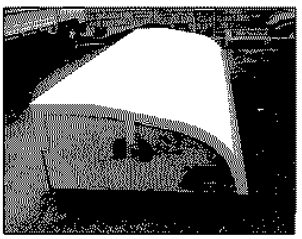
3.2 목형 제작

FRP 몰드 제작을 위한 준비 단계로 목형은 25m의 일체형 목형 제작이 어려워 3개의 블럭으로 제작된다. 목형 제작 과정을 간략히 설명하면 먼저 합판 및 목재로 기준면을 제작(그림 8(a))한 후 표면에 가공용 수지를 적층(그림 8(b))하게 된다. 그 후 CNC 밀링/보링 가공 등을 통해 외형면을 생성(그림 8(c))하게 되고 가공이 끝난 각각의 목형을 조립하여 최종적인 목형을 완성(그림 8(d))하게 된다.

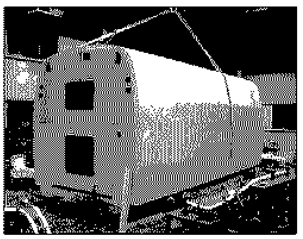
(a)목재 기준면



(b)가공용 수지 적층



(c) 외형면 생성



(d) 목형완료

그림 8. 목형 제작 과정

3.3 FRP 몰드 제작

목형 제작이 완료되면 복합재 차체 제작의 전 단계인 FRP 몰드 제작이 수행된다. FRP 몰드의 제작 단계는 다음과 같다.

- 목형준비 및 이형 처리
- 겔 코팅(gel coating) (그림 9(a))
- 적층 (그림 9(b))
- 보강프레임 설치(그림 9(c))
- 성형(그림 9(d)) 및 후경화
- 탈형

(a) 겔 코팅

(b) 적층

(c) 보강프레임 설치

(d) 성형

그림 9. FRP 몰드 제작 과정

이때, FRP 몰드의 재료는 글래스 페브릭/에폭시 복합재(glass fabric/epoxy)를 사용하였고 두께는 20mm이다. 성형조건은 상온에서 4~5일 경화 후 60~80℃ 분위기 온도에서 4시간동안 후경화(post-cure)하였다. 그림 10은 탈형된 FRP 몰드의 일부 모습을 나타내고 있다.

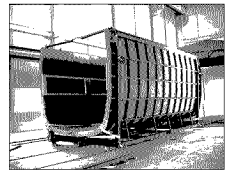


그림 10. 탈형 후 FRP 몰드

3.4 복합재 차체 제작

복합재 차체는 완성된 FRP 몰드를 사용하여 30m 대형 오토클레이브에서 일체형으로 성형 제작될 것이다. 복합재 차체는 2mm 두께의 카본/에폭시 복합재 층과 36mm 두께의 알루미늄 하니컴 코어를 갖는 샌드위치 구조로 구성된다. 이때, 제작된 복합재 차체와 금속재 언더프레임은 그림 11과 같이 접착제와 리벳 체결을 동시에 사용하여 조립하게 된다.

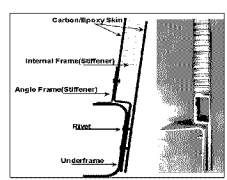


그림 11. 차체 접합부위

3.5 구조시험용 하이브리드 복합재 차체의 완성

복합재 차체 제작이 완료되면 금속재 언더프레임과 체결하여 하이브리드 복합재 차체를 완성하게 된다. 완성된 하이브리드 복합재 차체는 그림 12의 구조시험 장비를 이용하여 복합재 차체와 금속재 언더프레임간의 체결방

식(그림 11)에 대한 검증과 기계적 특성 검증(응력, 변위, 고유진동수) 등을 수행한 후 실제 차량 제작을 할 것이다.

4. 결 론

한국형 고속틸팅열차(TTX)는 차체 경량화를 위해 샌드위치 복합재 차체와 금속재 언더프레임으로 구성된 하이브리드 차체 방식으로 제작된다. 샌드위치 복합재 차체의 경우, 1량의 차체 길이가 약 25m의 대형 구조물이므로 기존의 성형 장비로는 일체성형을 할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 차체의 일체 성형을 위해 길이 30m의 대형 오토클레이브를 제작하고 있으며 오토클레이브 성형을 위한 목형 및 FRP 몰드 제작을 완료하였다. 또한, 복합재 차체의 설계 및 제작 검증을 위한 구조시험 장비도 제작 중에 있다.

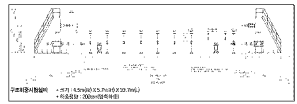


그림 12. 하이브리드 복합재 차체 구조시험 장비

참고문헌

1. K.B.Shin, S.J.Lee(2004), "The case and technique on lightweight of railway vehicle system using composite materials," The Korean society for composite materials, Vol.17, No.4, pp.82-86.
2. PLM Network, Vol. 21, July 2004, pp.46-48.

후 기

본 연구는 철도청의 철도기술연구개발사업에 의해 지원되고있으며 이에 감사합니다.