

신소재 복합재 철도차량 차체 제작기술 및 구조강도 평가

Evaluation of manufacturing process and structural strength for the composites carbody

정종철* 이상진* 조세현* 서승일** 김천근***
Jeong, Jong-Cheol Lee, Sang-Jin Cho, Sea-Hyun Seo, Sung-Il Kim, Chun-Gon

ABSTRACT

This research presents the manufacturing process and the structural strength assessment for the hybrid composite carbody. In this study, the manufacturing process for carbody with length of 23m was explained. The composite carbody was fabricated as one body using autoclave with length of 30m and 5m diameter. The structural behavior of the carbody under the 3-point supporting and the natural frequency were evaluated as well. In addition, the test results were compared with the numerical one. From the tests, the structural strength of the hybrid composite carbody was assessed.

1. 서론

최근 운송물량의 확대와 운송시간 단축을 위한 철도차량의 고속화 요구에 따라 기존선 속도 향상 기술개발 연구가 진행 중에 있다. 특히 차량의 속도향상 및 에너지 절감을 위하여 차량의 경량화를 위한 연구 중 하나로 복합소재 차체 제작에 관한 연구가 진행되고 있다. 현재 복합소재 차체 제작에 관한 기술은 23m 길이의 대형구조물(차체 1량)을 일체형으로 제작 할 수 있는 공정이 확립된 상태이다. 복합소재 차체는 유한요소 해석을 이용하여 차체에 요구되는 하중 조건을 만족하는 강도와 강성을 갖도록 설계 하였다. 본 논문에서는 23m 일체형 복합소재 철도차량 차체의 제작과 철도차량 구조체의 하중시험을 통한 차체의 강도 및 강성 평가에 관한 내용을 기술하고자 한다. 하중시험은 JIS E7105(이후 JIS 규격이라 함)에서 규정하고 시험방법에 따라 수행하였다. 시험항목으로는 수직분포하중, 압축하중, 비틀림 하중, 3점지지 시험 및 고유진동수 측정시험이다.[1] 처짐량, 변형량, 격용 하중등을 측정하고 이를 유한요소 해석 결과와 비교하여 차체설계/제작공정에 대한 검증을 하였다.

* (주)한국화이바 철도차량사업부, 정회원

** 한국철도기술연구원 단장, 정회원

*** 한국과학기술원 교수, 정회원

2. 복합재 차체 제작

2.1. 기본구조

복합재 차체는 경량이면서 강성이 우수한 셸트워치 구조를 기본구조로 하였다. 심재로는 알루미늄 합금이나 강을 사용하였고 빈재로는 유리섬유직물(8매주자)/열경화성수지를 사용하였다. 차체의 두께 결정은 JIS E7105에서 규정하는 하중을 고려하여 유한요소 해석을 통해 결정하였다. 또한 충돌에 대한 안전성 확보와 각종 설비의 취부를 위한 보강프레임이 삽입된다. 복합소재 차체의 단면 기본구조는 그림 1과 같다.

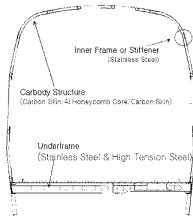


그림 1. 복합소재 차체 단면 구성

2.2. 제작공정

복합소재를 이용하여 차체를 제작하는 일반적인 방법으로는 필라멘트와인딩(Filament Winding)공법, RTM(Resin Transfer Molding)공법, 진공인퓨전(Vacuum Infusion)공법 및 오토클레이브(Autoclave)공법 등이 있다. 이들 중 고강도/고강성의 대형구조물을 일체로 제작 할 수 있는 오토클레이브 공법을 적용하여 차체를 제작하였다. 오토클레이브를 이용한 제품의 제작공정은 그림 2와 같이 크게 6단계로 나눌 수 있다.

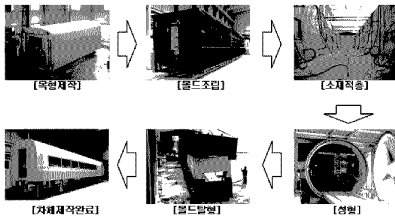


그림 3 복합소재 차체 제작공정

2.3. 조립공정

복합소재로 제작되는 차체와 금속으로 제작되는 언더프레임과의 조립은 일반적으로 적용되는 결합방식인 용접이 사실상 어렵기 때문에 특별한 체결방식이 요구된다. 특히 복합소재 차체에 걸리는 대부분의 하중은 결합체결부분에 작용하므로 체결부의 형상이나 체결방식을

선정함에 있어서는 충분한 안전율이 확보될 수 있도록 검토되어야 한다. 그림 3은 접합체결부의 조립 개념도이다. 여러 형상의 복합소재 접합부분의 구성안에 대한 유한요소 해석과 실험을 통해 적절한 접합 체결부의 형상을 결정하였으며 체결방식은 기계적 체결방식과 집착 방식을 동시에 적용한 하이브리드 체결방식을 채택하여 구조강도의 확보와 동시에 방수/방진/방음등과 같은 기밀유지성능이 확보될 수 있도록 하였다.

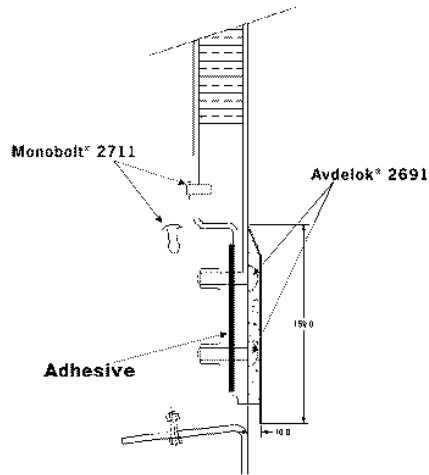


그림 4 접합부 조립 개념도

3. 차체정적하중시험

3.1. 시험하중

시험에 적용하는 하중은 차량에 취부되는 각종 설비 및 의장부품의 무게, 최대 승객 탑승 시 추가되는 무게등을 고려하여 계산되며 JIS규격에 따른다. 시험하중 계산에 사용한 차량 중량 자료와 계산된 하중에 대한 사항을 표.1에 나타내었다.

표 1 차량제원 및 시험하중

차량제원(중량)	공차중량	52ton
	Bareframe 중량	8.85ton
	대차중량	18.2ton
	최대승객하중	6.5ton
	동하중계수	0.2
시험하중	수직하중	39.3ton
	압축하중	24.7ton
		120ton
	3점지지시 하중	24.7ton
	비틀림 하중	4ton-m

3.2. 측정점 선정

시험을 진행하면서 측정해야 하는 값으로는 적용하중, 변형률 그리고 처짐량이다. 일반적으로 응력집중이 예상되는 부분이나 형상/단면의 변화가 심한 부분을 측정점으로 삼는다. 기존 금속계질의 차체 구조하중시험에서 나타나는 응력집중부위는 창문/출입구 모서리 부분, 센터실의 연결기 연결부분 등으로 알려져 있다. 복합소재 차체 역시 해석을 통해 이와 유사한 부분에서 응력이 집중됨을 예측 할 수 있었다. 해석에 사용된 유한요소모델링은 그림 4와 같이 기본적으로 2D 쉘요소를 사용하였으며 보강프레임, 언더프레임을 가로지르는 크로스 빔에는 1D 빔요소(B31)를 사용하였다. 모델링에는 MSC/PATRAN을 이용하였으며

사용된 절첩 수는 32953개, 요소 수는 38403개이다. 그림 5에 수직하중, 압축하중 작용 시 차체에 걸리는 응력의 분포를 나타내었다.



그림 5 차체의 유한요소 모델링 형상



그림 6 응력분포 : 수직하중(상), 압축하중(하)

해석결과를 통해 총 120개의 측정점을 선정하였다. 측정점의 자세한 위치를 그림 4에 나타내었으며 그림 5는 스트레인게이지 부착 모습을 나타내었다. 변형량 측정에 사용된 스트레인 게이지는 3축 게이지로 KYOWA, KFG-5-120-D17-11이며 변형률 측정장치는 CAS, AH600A 이다. 시험 중 발생할 수 있는 온도변화 등 여러 가지 측정값의 오차 발생을 줄이기 위하여 스트레인 게이지로부터 측정 장비까지 선통된 3코어 케이블을 사용하였다. 측정량은 나이알 케이지를 이용하여 하중이 작용되는 각각의 단계별로 측정하였으며 주요 측정 지점은 차체의 중앙부, 끝단부, 볼스타 지지부이다.

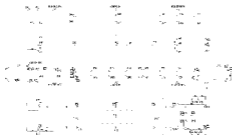


그림 7 스트레인 게이지 부착 위치

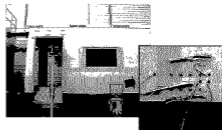


그림 8 스트레인 게이지 부착 모습

3.3. 하중시험설비

차체 경직하중시험 설비는 크게 차체 지지부, 하중이용부, 시험값 측정부로 나눌수 있다. 차체는 대차와 연결되는 곳에서 그림 8과 같이 차체 지지대로 4점 지지되며, 120ton의 압축하중이 작용하였을 때 차체가 밀리지 않도록 충분한 크기의 마력벽으로 고정된다. 압축하중 및 수직하중은 유압 실린더를 이용하여 적용한다. 수직하중의 경우 그림 9와 같이 18개의 실린더를 통해 언더프레임 상면에 골고루 분포시킨다. 압축하중용 실린더는



그림 9 차체 지지대

ENERPAC사의 제품으로 200tonf의 용량을 갖는다. 그림 10은 압축공기의 직용을 위한 실린더의 모습이다. 실린더의 작동은 그림 11과 같은 관네프로부터 자동으로 제어하며 로브센을 통해 적용 하중값을 확인할 수 있다.



그림 10 수직분포하중용 실린더



그림 11 압축하중용 실린더

측정을 위한 장비는 그림 12와 같이 동시에 96채널을 측정할수 있는 변형률 측정 장비와 측정값의 저장을 위한 컴퓨터로 구성된다.

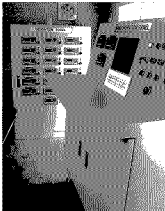


그림 12 하중전부채널



그림 13 변형량 측정 장비

4. 정적하중 시험

차체의 안정화를 위해 본격적인 하중시험에 앞서 예비하중 시험으로 최대 수직하중을 한 시간 정도 가한 후 실제 시험을 수행하였다. 수직하중은 6단계로 하중을 증가시켜 적용하였다. 압축하중시험은 먼저 공차중량을 수직하중으로 분포시킨 후에 120ton의 압축하중을 단계별로 적용시켰다. 시험결과가 어느 정도의 채연성을 갖는지 또는 시험중 발생할수 있는 오

차등을 고려하여 모든 시험은 3회~4회 반복 수행하였다. 그림 13은 압축하중시험시 적용한 하중에 따른 차체 주요부분에서의 변형량을 나타낸 것이다. 압축하중이 적용되는 부분인 드래프트스토퍼(Draft Stopper)가 부착되는 위치에서 가장 심한 변형률이 발생하나 항복응력이하로 안전함을 확인하였다. 이 경우 차체의 처짐량은 초기 수직분포하중 적용시 발생하는 처짐량(12mm)에서 압축하중이 작용함에 따라 약 5mm 복원하는 양상을 보였으며 이는 해석결과에서 예측한 바와 동일한 결과임을 확인하였다.

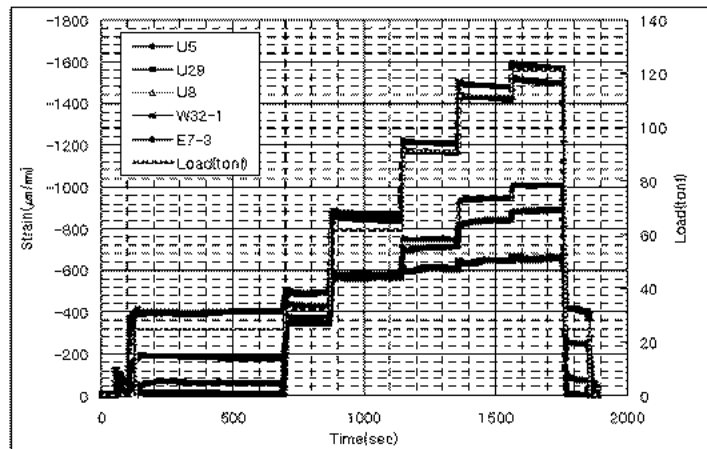


그림 14 압축하중에 따른 변형량 측정 결과

5. 결론

본 연구에서는 23m 일체형 복합소재 차체 개발과 관련하여 차체의 제작과정과 구조하중 시험에 대하여 기술하였다. 복합소재 차체는 경량화 하면서 구조적인 안전성을 확보하기 위해 오토클레이브 성형 방법을 통해 23m 일체형으로 제작되었다. 차체의 구조하중시험은 JIS 규격에 준하여 수행하였으며 각각의 시험을 위해 적절한 시험장비를 구축 하였다. 구조하중 시험 조건에 따른 해석 결과와 시험 결과는 대체적으로 잘 일치하였으며 이를 통하여 차체설계시 적용한 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.

6. 후기

본 연구는 건설교통부 철도기술연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] JIS E 7105, "Test method for static load of body structures of railway rolling stock," 1994.