

조립식 루프 모듈 차체의 구조적 안전성에 대한 연구

A Study on the structural safety of bodysell bolted with a roof module

김승택*[†], 곽태호*, 이장욱*, 이강운*

Seung-Tech Kim*, Tae-Ho Kwak*[†], Jang-Wook Lee*, Kang-Wun Lee*

Abstract In a railway industry, a modularization means a sub-assembly system which consists of individual components are directly bolted to the bodysell. Nowadays, top rolling stock manufacturing companies has applied the modularization technology as a final vehicle construction method. This technology increases the efficiency of production as simplifying the process and improves the production quality through the management in a stage of a sub-assembly. The purpose of this study is that the structural safety of the bodysell bolted with a roof module is verified by a FE analysis and a static load test for the carbody structure built. The FE analysis and the load test are carried out according to the load cases defined in the “Technical Specification for Urban Railway Vehicle” in the revised “Railroad Safety Act”.

Keywords : Modularization, Roof module, Revised Railroad Safety Act, FE analysis, Static load test

초 록 철도차량 산업에서의 모듈화는 낱개의 부품들을 하나의 조립 부품 단위로 제작하여 차체에 볼트 접합하는 것을 의미한다. 현재, 선진 철도차량 제작업체들은 각 모듈을 최종 차량에 조립하는 방식을 적용하고 있다. 이를 통하여, 공정을 단순화하여 제작 효율성을 높임으로써 일정을 단축하고 조립 부품 단위로 선행 관리를 통하여 품질을 향상시키고 있다. 본 연구에서는 일반 도시철도차량에 루프 모듈을 적용 가능한 차체의 개발에 있어서, 유한요소법을 이용한 강도 평가와 실제 제작된 차체에 대한 정하중 시험을 통하여 구조적 안전성을 확인하는데 그 목적이 있다. 강도 평가 및 하중시험에는 개정된 신규 철도안전법의 도시철도차량기술기준의 하중 조건을 적용하였다.

주요어 : 모듈화, 루프 모듈, 개정 철도안전법, 유한요소법, 정하중시험

1. 서 론

철도차량에서 모듈은 “철도차량을 만드는데 필요한 수많은 낱개의 부품들을 unit화 또는 system화를 통해 복수의 부품을 하나의 부품 단위로 제작 후, 완성차 조립 단계에서 차체에 볼트 등으로 조립하는 제조방식”으로 정의할 수 있다. 현재의 모듈화 개발 이력을 살펴보면, 1990년 이전까지는 부품 단위로 직접 조립하였으며, 그 이후에 기능 중심으로 모듈을 구성하는 단계로 발전되었고, 2000년대부터 시스템 중심의 모듈화를 적용하였다. 2010년 이후부터는 복합 모듈 형태로 개발되고 있으며 선진 철도차량 제작업체들은 이러한 조립 방식을 적용하고 있다. 이를 통하여, 설계 및 공정을 단순화하여 제작 효율성을 높임으로써

† 교신저자: 현대로템 주식회사 기술연구소 (luke@hyundai-rotem.co.kr)

* 현대로템 주식회사 기술연구소

일정을 단축하고, 조립 부품 단위로 선형 검사를 통하여 품질을 향상시키고 있다.

본 연구에서는 일반 도시철도차량의 루프를 복합 모듈 형태로 적용 가능한 차체의 개발에 있어서, 유한요소법을 이용한 강도 평가와 실제 제작된 차체에 대한 정하중 시험을 통하여 구조적 안전성을 확인하는데 그 목적이 있다. 강도 평가 및 하중시험에는 개정된 신규 철도 안전법의 도시철도차량기술기준⁽¹⁾의 하중 조건을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 루프 모듈 구조 및 접합 방법

일반적인 철도차량의 작업은 루프 구조를 포함한 차체를 용접 구조물로 완성한 후에 천정 부품 등을 개별 조립공정에서 볼팅하는 방식이다. 이에 비해, 조립식 루프 모듈 방식은 차체의 육면체 중에서 지붕구조를 제외한 차체를 용접 구조물로 제작하고, 별도의 루프 구조물에 천정 부품을 부조립 형태로 제작 완성하여 차체에 일괄 볼트 조립하는 방식이다. 일반적인 방식과 현재 루프 모듈 적용방식은 Fig. 1에 비교하였다.

루프 모듈을 차체에 조립하는 방식은 측면 및 엔드 구조와 볼트로 접합하는 방식을 적용하였다. 루프 구조와 측면 구조는 Fig. 2와 같이, 캔트레일을 상부 및 하부로 분리하여 밥테일 볼트로 접합하는 방식을 사용하였다. 루프 구조와 엔드 구조는 엔드와 루프가 겹치는 구조로 밥테일 볼트로 접합하였다.

2.2 유한요소모델

조립식 루프 모듈이 적용된 차체에 대한 구조해석을 하기 위하여, 차체 전체에 대해서 유한요소 모델링 하였다.

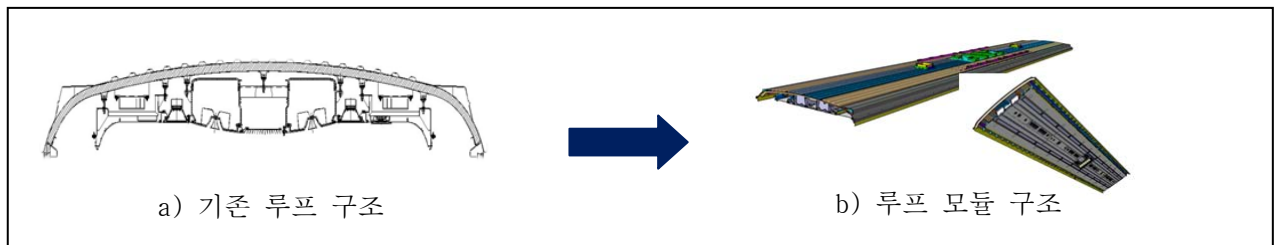


Fig. 1 Comparison of the roof structure between the existing design and the module design

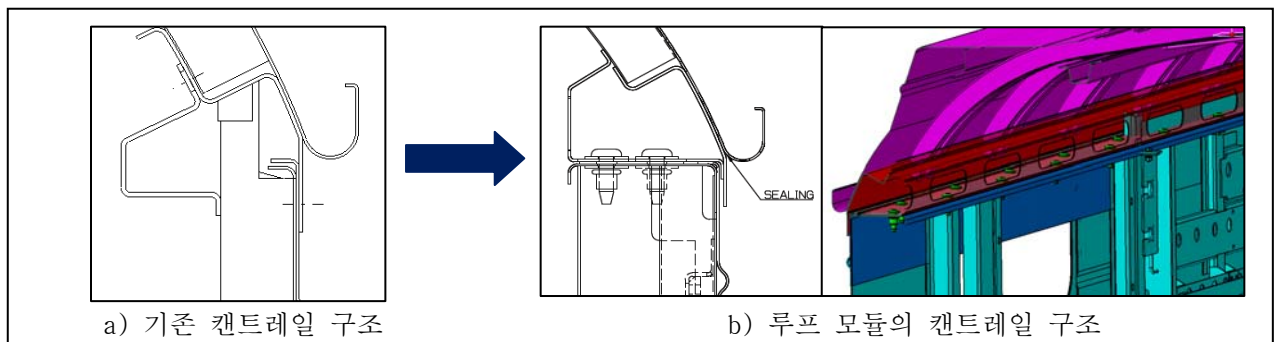


Fig. 2 Comparison of the cantrail structure between the existing design and the module design

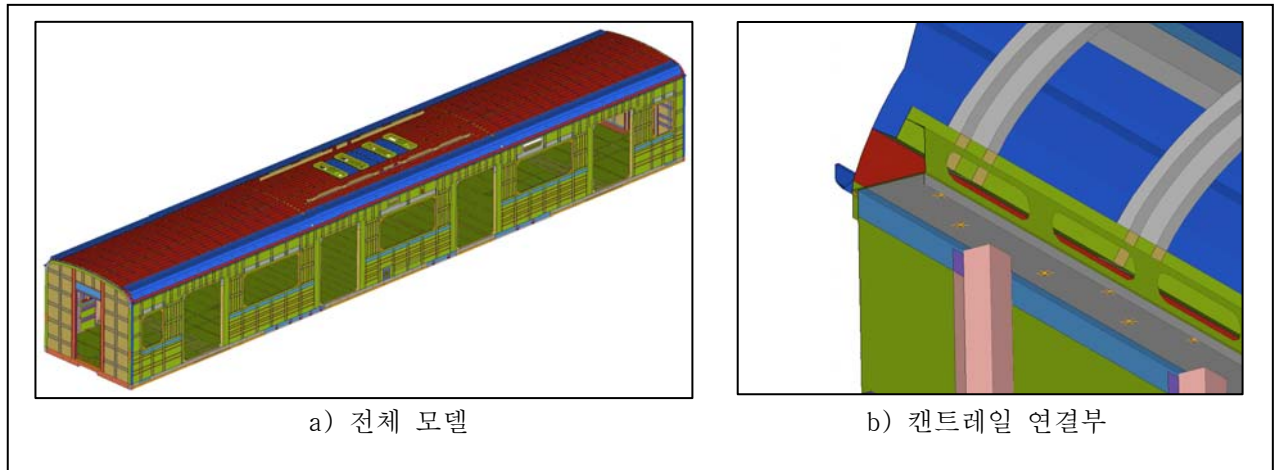


Fig. 3 Finite element models for the roof module design

대부분의 부재는 쉘 요소를 사용하였으며, 판재의 두께가 큰 연결기 취부 플레이트, 리프팅 패드 등은 솔리드 요소를 사용하였다. 또한 루프 모듈과 차체 구조가 볼트로 연결되는 부위는 리지드 및 빔요소를 사용하여 연결하였다. 유한요소 모델은 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 하중조건 및 재료의 기계적 성질

조립식 루프 모듈 차체에 적용된 정적 강도 조건 및 판단 기준은 개정된 철도안전법의 도시철도차량 기술기준을 적용하였다. 이는 참고 규격인 EN 12663-1:2010⁽²⁾의 category P-III와 동일하다. 구조해석 및 하중시험에 적용된 정적 하중조건 및 평가기준을 정리하면 Table 1과 같다. 조립식 루프 모듈 차체에 사용된 주요 재료의 기계적 성질을 정리하면, Table 2와 같다.

Table 1 Summary of static load cases

번호	하중 조건	하중 크기	평가기준	비 고
1	연결기 압축하중	압축하중 : 800 kN, 수직하중 : m_1 (대차체의 공차 중량)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	
2	연결기 인장하중	인장하중 : 600 kN, 수직하중 : m_1 (대차체의 공차 중량)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	
3	창문틀 높이 압축하중	압축하중 : 300 kN, 수직하중 : m_1 (대차체의 공차 중량)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	
4	캔트레일 높이 압축하중	압축하중 : 150 kN, 수직하중 : m_1 (대차체의 공차 중량)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	
5	최대수직압축하중	수직하중 : $1.3gX(m_1+m_4)$, (m_4 : 승객 하중)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$, 처짐 $\leq 1\%$ (대차간 거리)	
6	인장 조합하중	인장하중 : 600 kN, 수직하중 : 최대수직하중	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	
7	4 점 리프팅	수직하중 : $1.1gX(m_1+2m_2)$, (m_2 : 대차 중량)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	
8	One end 잭킹	수직하중 : $1.1gX(m_1+2m_2)$, (m_2 : 대차 중량)	$\sigma \leq \sigma_Y/S_1$	

σ : 계산 및 측정응력, σ_Y : 재료의 항복강도, S_1 : 안전계수 (시험수행 : 1.0 또는 시험 미수행 : 1.15, EN12663-1⁽²⁾)

Table 2 Mechanical properties of main frame (MPa)

재 질	항복강도	인장강도	탄성계수	비 고
SM490B	≥365	≥460	206,000	볼스터, 센터실
STS301L-HT	≥686	≥931	180,000	사이드 실 등
STS301L-ST	≥410	≥760	180,000	이외 부재

2.4 구조해석 결과

조립식 루프 모듈 차체에 적용된 각 하중조건 별로 최대응력이 발생된 위치에서의 응력분포 및 최대수직하중 조건에서의 사이드실 처짐 선도를 Fig.4에 나타내었다. 또한, 계산된 최대응력과 발생위치 및 허용기준은 Table 3에 정리하였다. 계산된 최대응력은 인장 조합하중조건에서 367 MPa 으로 사용된 재질 (창문코너, STS301L-ST)의 허용응력인 410 MPa 이내에 있다. 표에서와 같이, 계산된 모든 최대 응력 및 처짐량이 허용기준 이내에 있음을 확인할 수 있다.

2.5 하중시험 결과

하중시험은 현대로템주식회사 창원공장 내 연구시험동에서 실시하였다. 각 하중조건 별

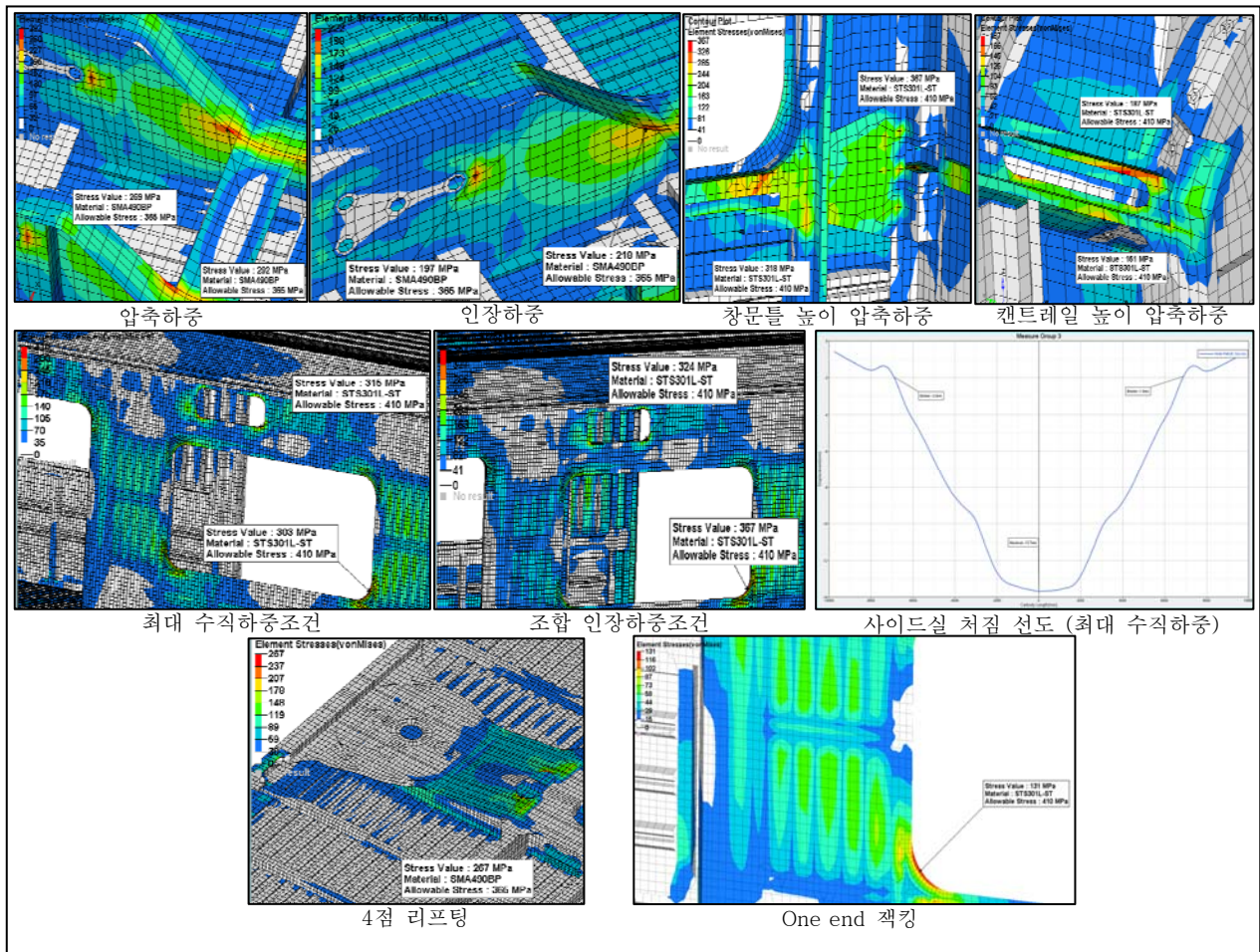


Fig. 4 Detail stress distribution for each load case and vertical displacement plot at side sill

Table 3 Maximum stress and location of the FE analysis for each load case (MPa)

번호	하중 조건	발생 응력	허용 응력	재 질	발생 위치	비 고
1	연결기 압축하중	292	365	SMA490BP	센터실	
2	연결기 인장하중	219	365	SMA490BP	센터실	
3	창문틀 높이 압축하중	367	410	STS301L-ST	Stiffener	
4	캔트레일 높이 압축하중	187	410	STS301L-ST	캔트레일	
5	최대 수직하중	315	410	STS301L-ST	창문 코너	
		사이드실 최대 처짐량 : 11.7 mm (13.8 mm 이내)				
6	인장 조합하중	367	410	STS301L-ST	창문 코너	
7	4 점 리프팅	267	365	SMA490BP	볼스터	
8	One end 잭킹	131	410	STS301L-ST	창문 코너	

하중시험 장면은 Fig. 4에 나타내었으며, 측정된 최대응력과 발생위치 및 허용기준은 Table 4에 정리하였다. 측정된 최대응력은 최대 수직하중조건에서 361 MPa으로 사용된 재질 (행선 지표시기, STS301L-ST)의 허용응력인 410 MPa 이내에 있다. 표에서와 같이, 측정된 모든 응력 및 처짐량이 허용기준 이내에 있음을 확인할 수 있다.

Table 4 Maximum measured stress and location for each load case (MPa)

번호	하중 조건	발생 응력	허용 응력	재 질	발생 위치	비 고
1	연결기 압축하중	290	365	STS301L-ST	키스톤플레이트	
2	연결기 인장하중	175	365	SMA490BP	센터실	
3	창문틀 높이 압축하중	262	686	STS301L-HT	엔드프레임	
4	캔트레일 높이 압축하중	164	410	STS301L-ST	캔트레일	
5	최대 수직하중	361	410	STS301L-ST	행선지 표시기	
		사이드실 최대 처짐량 : 11.9 mm (13.8 mm 이내)				
6	인장 조합하중	345	410	STS301L-ST	창문 코너	
7	4 점 리프팅	130	410	STS301L-ST	창문 코너	
8	One end 잭킹	126	410	STS301L-ST	출입문 코너	

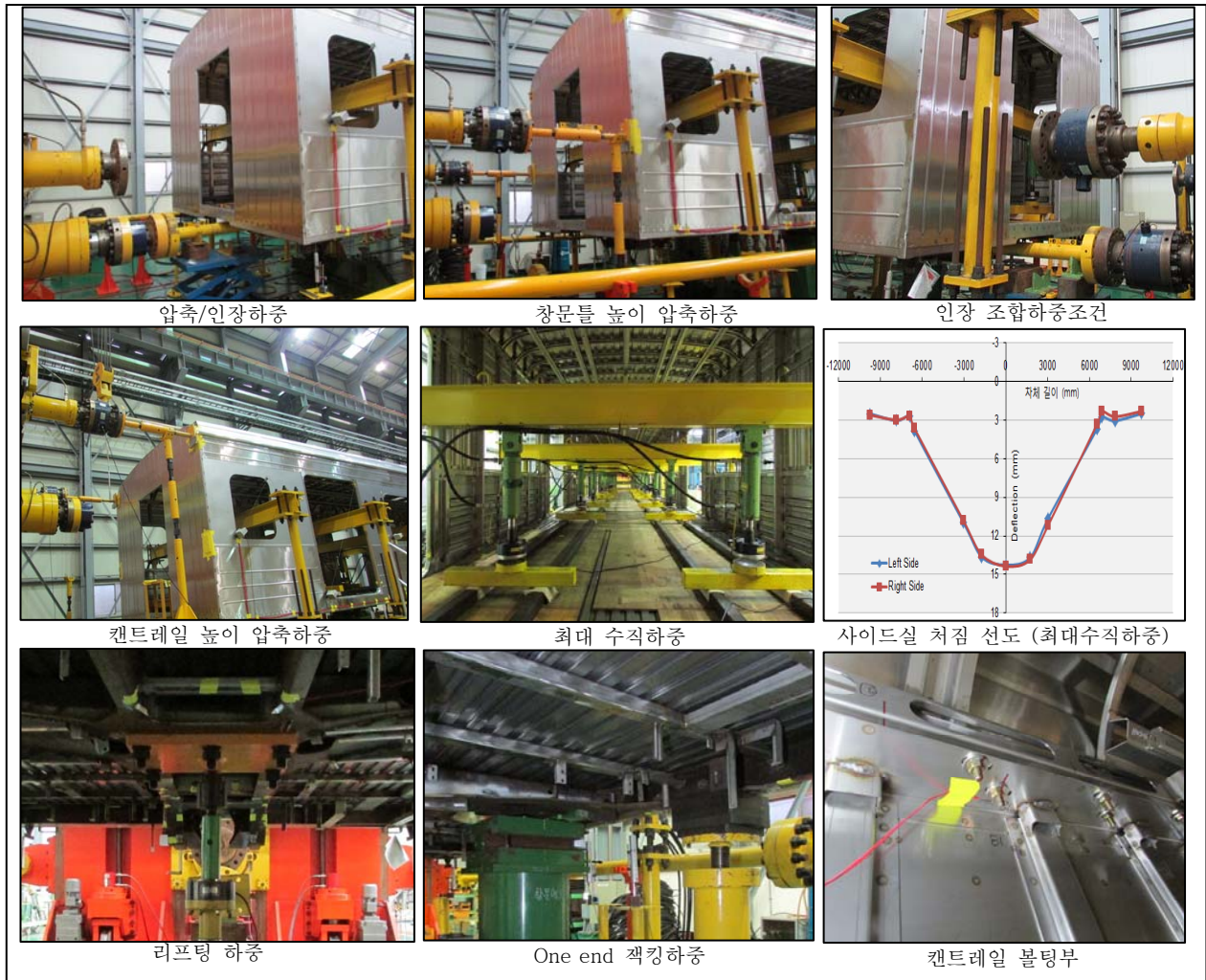


Fig. 4 Photos of load test for each case and vertical displacement plot at side sill

3. 결론

본 연구에서는 일반 도시철도차량의 조립식 루프 모듈을 적용한 차체에 대해서 유한요소법을 이용한 강도 평가와 실제 제작된 차체에 대한 정하중 시험을 통하여 구조적 안전성을 확인하였다. 강도 평가 및 하중시험에는 개정된 신규 철도안전법의 도시철도차량기술기준⁽¹⁾의 하중 조건을 적용하였다.

구조해석과 차체 하중시험 결과, 각 하중조건에 대해서 발생된 응력 및 처짐량이 법규에 정의된 허용기준을 만족하고 있음을 확인하였다. 그러므로, 조립식 루프 모듈이 적용된 차체는 충분한 강도 및 강성을 확보함으로써 구조적으로 안전하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] 철도안전법 철도차량기술기준 Part 51 (2016) 도시철도차량(전동차) 기술기준
- [2] EN12663-1 (2010), *Railway application – Structural requirements of railway vehicle bodies*