모듈화를 위한 차체 볼팅 조립구조에 대한 고찰

The Review of Bolt-Assembled Car body Structure for Modularization

최 원 호* 장 동 화** 전 시 현***

Choi, Won-Ho Chang, Dong-Hwa Jeon, Si-Hyun

ABSTRACT

Recently, a rolling stock has been requiring more efficient manufacturing method than welding for the improved quality and the enhanced fabrication of car body structure. As an alternative, modularization of car body structure is being studied. Accordingly, rolling stock manufacturers need to make it possible to develop a variety of rolling stock vehicles made from modularized sub-blocks in order to meet various customer's demands.

The bolt-assembled car body structure for modularization is known to have many advantages over the existing weld-assembled method and is free from the possible welding defects, such as welds between dissimilar metals, crack, deformation and loss of strength. Consequently, we can have the improved overall quality, the reduced man powers for assembly and the satisfied strength of car body structure. The review is about the bolt-assembled car body structure for modularization to assure global competitiveness and an enhanced technique in terms of assembly methodology of car body structure.

1. 서론

최근 철도차량의 고급화, 고속화에 부흥하기 위하여 여러 각도에서 효율적인 차체제작 방법이 강구되고 있다. 이에 하나의 대안으로 제시되어 지고 있는 방법이 모듈화구조이다. 따라서 철도차량회사는 국내외의 다양해지는 수요처의 조건을 만족하기위하여 여러 가지 모듈을 조합하여 다양한 차량의 개발을 가능하게 해야 한다.

모듈화를 위한 차체 볼팅 조립구조는 기존의 용접 방식을 탈피하여 차체 주요 구성 품들을 볼팅 조립하여 이종금속 용접이나 용접 부 균열 및 변형, 강도 저항의 제약에서 자유롭게 된다. 따라서 강도 보증 및 차량의 품질향상과 작업 공수저하의 장점을 가질 수 있다. 본 고찰은 차량제작의 고급경쟁력과 기술을 확보하기위한 모듈화를 위한 차체 볼팅 조립구조에 대한 고찰이다.

차체의 주요 구성 품을 용접 구조가 아닌 볼팅 구조로 차체를 제작하므로 용접구조의 단점인 이종금속 용접이라는 원초적인 단점을 극복할 수 있어, 차체의 각 구성품의 역할과 위치에 따라 알루미늄 / Mild Steel / Stainless 재질을 복합적으로 구성할 수 있다. 용접 차체 대비 차체의 강도 보증이 보다 명확하게 되므로 차체제작이 용이하고, 용접부가 볼팅 구조로 대체되므로 용접 차체 대비 차량의 품질이 향상된다. 또한, 영구 일체형인 용접 차체에 대비하여 볼팅 차체는 주요 구성 품을 볼트 체결하므로 각 주요 부위의 모듈화가 가능하여 현재 국내외적으로 다양해지는 수요처의 요구 조건을 만족하고 여러 가지 모듈을 조합한 다양한 차량의 개발이 가능해진다.

* 책임저자 : (주)로템 기술연구소 연구원, 비회원

** (주)로템 기술연구소 선임연구원

*** (주)로템 기술연구소 책임연구원

2. 본론

2-1. 볼팅 차체 조립 개발 배경

전동차의 차체는 용접구조로 개발되었으나 차체 용접 후 용접 조립 부[HAZ]의 강도가 취약해지는 문제들이 있어서 차체 강도 설계에 커다란 제약이 되어왔으며, 또한, 용접 차체의 경우 차량 일부 - 전두 또는 단부의 손상이 될 경우 유지보수를 위해 차체 전체를 교정 또는 교체해야하는 문제점들이 있어서 이를 보완하기 위하여 차체 주요 파트간의 조립을 리벳 또는 볼팅으로 개발하게 되었다. 이 방식은 향후 차량의 모듈화 추진 시에 커다란 공헌을 하는 이점도 있어서 지속적으로 개선 발전되어졌다.

용접 구조가 아닌 조립 구조로 제작되어진 최초의 철도 차량은 1949년에 제작된 영국 “R49 LUL(London Underground Line) Stock 무도장 철도 차량이며, 볼팅, 리벳, 용접 조립구조로 개발되었다.

“R49 LUL”의 차체는 구성 - “Under frame“은 차체 강도를 유지하기 하여 재질을 ”Mild steel“로 선정하여 용접 구조로 이루어져있고, "Side Structure, Roof Structure, Cab Structure"의 재질은 차량 경량화의 목적으로 알루미늄 합금을 선정하였으며 알루미늄 각 구성품 ”Panel과 Post/Frame“은 리벳, 볼팅, 용접 방식을 혼용하여 제작된 방식이며, "Car Body” 최종 조립은 볼트 체결 방식으로 이루져있다.

그림1. R49 LUL stock 무도장 AL차체(1949년)

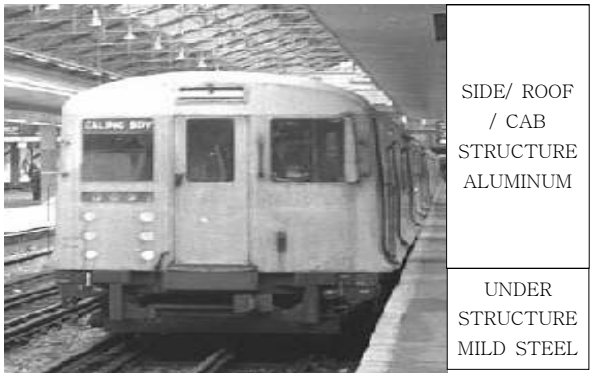

그림 2. R49 LUL stock 무도장 AL차체(1949년)

(가) 개발 초기

Under Structure (재질 : Mild Steel)과 그 외 구성품 (알루미늄합금: Single Skin)은 Panel과 Frame 조립시 리벳을 이용하여 제작되었다.

(나) 발전, “Pre-Crashworthiness“

알루미늄 압출 기술의 발전으로 기존 Single skin만 설계/제작되어진 것에서 발전하여 Double Skin으로도 설계/제작이 가능해지고 또한, 플러그 용접, 알루미늄 주강 제품과 Steel 재질의 구성품(Center Pivot/Bolster/Drag box etc...)등 조합/제작이 가능해지는 기술의 발달로 리벳 또는 볼팅 방식의 구조도 발전되어졌다.

(다) 현재 1단계, “Crashworthy able" (용접 모듈 구조)

차체의 재질은 알루미늄이며 조립은 모두 용접 방식으로 이루어지며, Cab 모듈과 End 모듈은 충돌 강도 조건을 만족하기 위하여 재질은 알루미늄이 아닌Steel을 사용하여 각 각의 모듈로 제작되어 조립되었다. 현재 대부분의 철도 차량 제작사에서 일반화된 제작 방식이다.

2-2. 차체의 일반구조

차체는 UNDER FRAME, END FRAME, ROOF FRAME, SIDE FRAME 으로 크게 4가지의 큰 구조로 이루어진다. 차체의 각 구조의 역할을 알아보자.

1) 언더프레임(Under Frame)

언더프레임 구조는 위로는 상 구조, 차 측, 단부구조의 토대를 제공하고 상 구조 및 차 측을 통해 전달되는 승객하중 및 차체하중을 지지하며, 아래로는 대차의 피봇(Pivot)을 위한 기본 골조를 형성시켜 주는 역할 및 각종 상하기기 및 배관의 취부를 위한 골조 역할을 한다. 차량의 편성 시에는 커플러(Coupler)를 통해 전달되는 전후 차량의 압축하중을 견디면서, 전해지는 하중을 골고루 분산시켜 차체의 안전성을 확보하는 역할을 담당해야 하는 차체의 기본 하부구조로서 그 중요성 또한 높다고 할 수 있다. UNDER FRAME 의 하중과 강도를 지지 하는 비중은 차의 구조에 따라 약간의 차이는 있지만 70%이상이다.

2) 차 측(Side Structure)

차 측 구조는 차량의 상하 하중(자중, 승객하중)을 우선적으로 부담하며, 차 측실(Side Sill) 등을 통해 전달되는 전후 충격하중, 차량의 하중 불균형 분포에 따른 비틀림 하중 등 각종 하중이 복합적으로 작용하여 강도 적으로 매우 민감한 부위이다. 따라서, 복합적인 하중에 의한 외판의 굴곡, 좌굴 등에 가장 유의해야 하는 부분이다. 또한 차 측은 외관상 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 외판의 미려함을 고려하여 재질 및 표면처리를 결정하여야 하며, 특히 외판의 평탄도와 용접 입열에 의한 국부적인 굴곡 등에 세심한 주의를 기울여야 한다.

3) 지붕(Roof Structure)

지붕은 위로 에어컨, 집전장치 등이 설치되는 것을 제외하면 하중에 대한 부담이 크지 않은 부위이다. 따라서 지붕 외판은 차 측이나 단부 외판에 비해 박판을 사용할 수 있어 스테인레스 차량의 경량화 가능성이 많은 곳이다. 그러나, 에어컨이나 집전장치의 기기하중을 일차적으로 부담하여 차 측 골조에 전달하기 때문에 지붕과 차측 연결부위는 이에 충분한 강도를 확보하고 있어야 하며, 이를 위해 캔트 레일(Cant Rail) 부재는 지붕의 타 부재에 비해 후판을 사용한다.

지붕 외판은 차체 강성의 유지 측면에서 일반적으로 Corrugated Panel를 사용하며, 집전장치나 에어컨 설치부위에는 용접 량이 많으므로 작업성 및 모재의 변형 방지를 위해 Corrugated Panel 보다 후판을 사용한다. 지붕 골조는 Cant Rail, Car Line, Purline, Foot Step, Rain Gutter 등으로 구성된다.

4) 단부(End Structure)

단부에는 차량과 차량을 통해 이동이 가능하도록 단부 출입문, 갱웨이(Gangway) 및 다이어 프레임이 설치되며, 전동차의 운전 차의 경우에는 운전실이 차 단부 쪽에 위치하게 된다.

2-3, Huck bolt

1) 차체의 주요 구성 품 조립에 사용되는 볼트는 Huck bolt이며, 이미 표준화되어 적용되어지는 방식이다.

(가) Huck bolt (Power bolt)

- 구성 : Bolt 와 Collar 두 가지로 구성됨.
- 재질 : Mild steel / Stainless / Al
- 사이즈 : 다양함.
- 조립 시 별도의 Tooling 기구가 필요.

(나) Huck Bolt 조립 순서

- 각 부재의 Hole 위치를 맞춘다.
- 볼트의 머리 방향을 정위치 시킨 후 Hole 에 삽입 한다.

- 정위치 된 볼트에 Collar를 끼운다.
- Tooling gun을 이용하여 볼트에 끼운다.
- Tooling gun을 작동시키면 Collar가 압착된다.
- Gun을 후퇴시키며 볼트의 불필요 부위를 제거한다.

(다) Huck bolt의 유용성

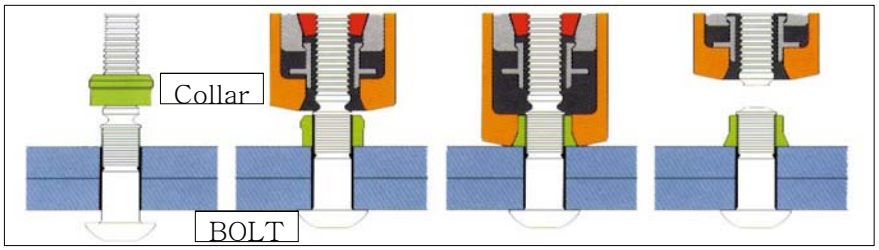

그림 3. Huck bolt (Power bolt)

Huck bolt의 경우 이미 표준 품으로 제작되어 각 볼트마다 보증하는 강도가 있으므로 설계에 의해 적절한 선택을 한 후 사용한다면 체결 후 별도의 보완 작업이 필요가 없기 때문에, Huck bolt 체결 방식은 토크 값 준수 및 볼트 풀림 방지 장치의 적용이 불필요하며, 한 번의 조립 체결로 연결 부재간의 확실한 연결을 보증할 수 있는 장점이 있다.

2-3, 차체의 모듈의 구성

Underframe, Side frame, Roof structure, End structure의 주요 구성품의 연결은 볼트 체결한다. Cab 모듈 과 End 모듈로 하중조건을 만족하기 위하여 재질은 Steel이며 각 각 모듈로 제작되어진다.

1) Body shell 모듈 구성

Under frame/ Side Block/Roof로 구성되어 있으며 Underframe을 위치한 후 Roof와 Side Block을 볼트 조립 부위와 일치하게 셋팅을 한 후 huck bolt를 이용하여 각 구성 품을 체결한다.

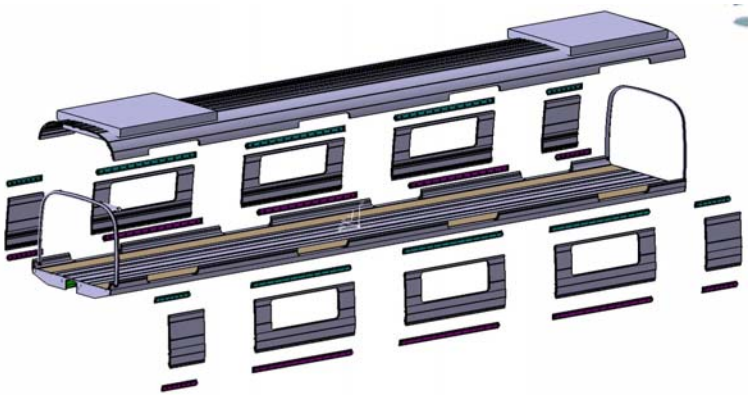

그림 4. Body shell 모듈 구성

2) Cab / End 모듈 구성

가) 그림 5와 같이 Cab Module은 운전실 골조를 제작하여 Cab Mask(FRP)를 취부 후, 운전실에 들어가는Desk, Back wall 및 기타 운전실에 취부되는 기기들을 제작 및 취부하여 Cab Module을 완성한다. 완성된 Module은 차량에 bolting 형식으로 조립 한다.

나) 그림 5와 같이 End Module은 End Structure를 제작하여 단부에 취부되는 각종 기기들은 선취부 작업 후 내장 판을 설치 후 End Module을 완성한다.
End Module과 차체와의 조립은 U/F 부는 Ensat을 이용하여 차체에 Bolting 체결하고, 그 이외의 부분은 Huck Bolt 이용하여 차체에 조립한다.

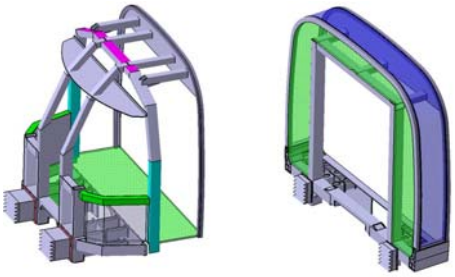

그림 5.Cab / End 모듈 구성

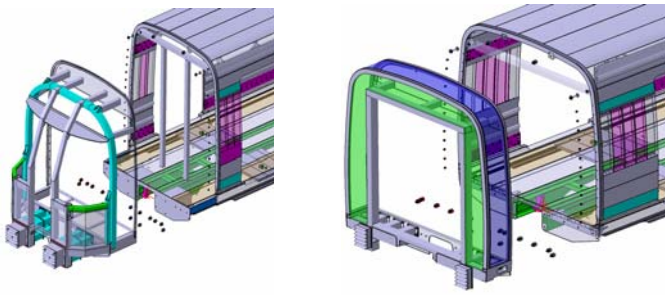

그림 6. Body shell과 Cab / End 모듈 조립

3) 차체 전체 모듈
이미 모듈 화하여 조립되어 있는 Body shell 모듈에 Cab / End 모듈을 그림 6와 같이 일반 볼트와 너트를 이용하여 조립한다, 조립 강성을 유지하기 위해 높은 전단응력을 가진 메인볼트와 누수방지 및 조립부의 벌어짐을 방지하기 위해 sealing 볼트를 이용하여 체결한다.

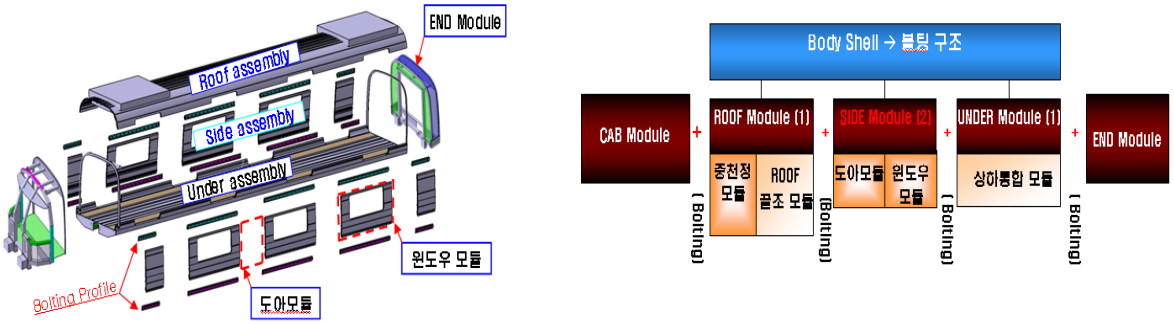

그림 7 차체 전체 모듈

2-4, 유한요소 해석을 통한 검증

해석에 사용된 프로그램은 상용 유한요소 해석 프로그램인 I-DEAS Master Series 8.0 이며 HP Visualize Engineering Workstation에서 수행되었다.

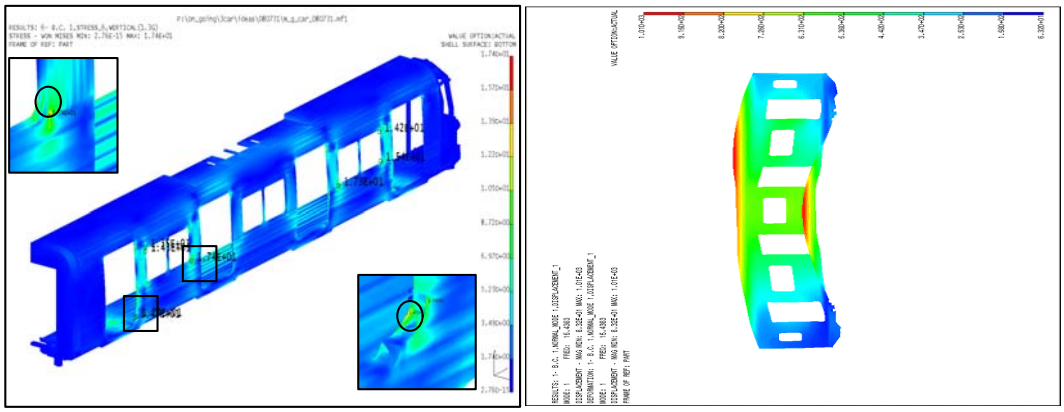

그림 8

1) 응력해석

차체는 수직하중, 수평압축 하중일 경우경계조건이 차체의 폭 및 길이방향으로 대칭이라고 가정하여 1/2을 모델링 하였으며 해석모델은 그림 8과 같다. 1차 굽힘 고유진동수의 경우 경계 조건이 차체 폭 방향으로 대칭으로 작용되므로 차체의 1/2을 모델링 하였다. 3점 지지 및 비틀림 하중에 대해서는 경계조건이 길이 및 폭 방향으로 비대칭인 점을 감안하여 전체를 모델링 하였으며 해석모델은 그림 8과 같다. 전체 모델에 사용된 총 절점 수는 353,643개이며 요소 수는 426,655개이다.

구 분	판 정 기 준		비 고
강 도	응 력	재질의 항복 강도 이하	성능시험의 구조체 하중시험 평가기준
강 성	Solebar의 최대처짐	13.8 mm 이하	제작규격서
고유진동수	1차 굽힘 고유진동수	10 Hz 이상	성능시험의 구조체 하중시험 평가기준

표 1. 평가 기준

2) 차체의 구조해석 결과

최대응력은 수직하중 시 재질의 허용응력 이내에 있어야 한다. 차체의 상대 처짐 량은 평가기준인 13.8 mm 이내를 만족해야 하고 1차 굽힘 고유진동수 또한 평가기준인 10 Hz 이상을 만족하여야 한다. 하지만 충분한 강도 및 강성을 확보하고 있다는 것을 검증할 수 있는 정량적인 결과를 아직 도출하지는 못하였다. 차체 볼팅 조립구조의 강도 보강 및 구조변경을 적용하여, 강도 및 성능을 보증할 수 있는 지속적인 연구/개발이 필요하다.

3. 결론

철도시장은 다양한 종류의 차량을 생산하고 리드타임 단축을 만족하면서 안전성과 저비용의 유지보수를 원하고 있다. 선진국들은 전략산업으로 철도분야로 설정하고, 차세대 기술을 선점하기 위해 국가적인 지원과 개발을 하고 있다. 국내의 경우에도 연간 막대한 교통시설 투자를 하여 교통체계를 효율화하기 위해서 철도분야의 기술개발에 노력을 기울이고 있다. 국내 전동차의 기술력도 제작 성, 안전성, 승차감 및 신뢰성 분야 등이 선진기술에 거의 근접하고 있지만 세계적인 인지도가 낮은 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 세계시장에서 선전할 수 있는 것은 동등 품질의 철도차량을 고객의 원하는 시점에 제작하여 공급한다는 것 이다. 차체 볼팅 조립구조를 이용한 모듈은 단 납기를 원하는 철도시장에 대응하기에 적합한 장점을 가지고 있고, 기존 용접구조의 단점을 보완하고 개선하여 차량의 신뢰성을 향상하고, 차체를 볼팅 조립구조를 이용하여 모듈화하기 때문에 기존 용접 제작 방식보다 생산 리드타임이 줄고 여러 가지 모듈을 조합하기 때문에 다양한 차량의 개발이 가능해진다. 또한 볼트 체결방식이고 모듈방식이기 때문에 유지보수성의 향상을 기하여 저비용, 무보수 기간의 확대로 운영과 정비의 효율성을 향상 시킬 수 있는 선점 기술이다. 향후 지속적인 설계 개선과 조립공법을 적용하여 노하우를 축척하여 정확하고 정량화된 구체적인 설계기법을 정립해야 할 것이다. 또한 모듈화가 가속되어 짐에 따라 구조적 강도만을 위한 설계가 아닌, 의장, 기장과의 동시적 모듈화를 통해 설계의 다양화를 추구하고 조립 프로세스의 다양성을 확보하여 효율성을 추구해야 할 것이다.

참고 문헌

1. 현대정공 기술 논문집
2. 연구 개발 기술 세미나 발표 자료집 (주)ROTEM
3. (주)ROTEM, (2007), “국내 전동차”
4. 1. 정종덕 외 4인, (2002),"도시철도차량의 스테인리스와 알루미늄 구조체 하중시험에 대한 안전성 평가", 2002년 한국철도학회 추계학술지, pp.126