

한국형 고속전철 객차 차체 설계에 관한 연구

A Study on Design of KHST trailer car with Aluminum Bodyshell

장동화* 박광복** 장대성*** 이장욱*
Chang, Dong-Hwa Park, Kwang-Bok Chang, Dae-Sung Lee, Jang-Wook

ABSTRACT

This study was carried out about the design and FEM analysis of articulated Trailer car with aluminum bodyshell for Korean High Speed Train of maximum operating speed of 350km/h. The integral design by extra-long extruded sections made possible through the use of aluminium alloys and continuous window shape with skin were adopted in the design of aluminium bodyshell. Articulated structures in each trailer's end were bolted laterally on end structure. FEM analysis showed that the design satisfied the specified load criteria. This study describes process and result of development of aluminum trailer bodyshell for KHST.

1. 서 론

세계 각국은 도시간에 대량의 인원과 화물을 신속하고 안전하게, 경제적이고 원활하게 수송하기 위해 철도차량의 경량화 및 고속화를 위한 연구 개발에 매진하고 있으며, 이를 위해 주행장치의 성능 향상 및 차량의 경량화에 경쟁적으로 많은 노력을 기울이고 있다. 그 중에서도 철도차량의 경량화는 철도차량의 고속화를 위해 가장 중요한 요소로 부각되고 있는데 이는 주행장치의 성능 향상에 대한 노력을 경감 시켜 줄 뿐 아니라 에너지 절약 측면, 동력비, 보수비의 절감 등 경제적인 측면 및 스피드 업에 의한 서비스 향상 등에서 이점이 있기 때문이다.

철도 차량의 경량화를 위해서는 구조의 경량 최적설계, 대차와 주전동기 등의 소형화와 같은 여러 가지 방법이 있는데 우선적으로 고려되는 것이 소재의 교체에 의한 경량화이다. 따라서 차체의 소

* 한국철도차량(주) 중앙연구소 주임연구원, 비회원

** 한국철도차량(주) 중앙연구소 수석연구원, 정회원

*** 한국철도차량(주) 중앙연구소 선임연구원, 비회원

재는 철강재료에서 스텐레스 강재로, 스텐레스 강재에서 알루미늄 합금으로 변천되었으며, 복합재료의 적용도 시도되고 있다.

설계 개념에 있어서는 하중을 전담하는 골조 및 실내/외부를 구분하는 역할을 하는 외피로 구성되는 일반적이고 고전적인 개념의 분할 설계(Differential Design) 구조에서 외피도 하중을 부담하는 결합 설계(Integral Design) 구조로 변천되어 가고 있다.

그러므로 차체의 경량화를 위해 중량대 강도비가 여타 재질에 비해 월등히 뛰어나며 결합 설계 구조의 설계가 용이한 알루미늄 합금은 철도 차량의 주요 재료로 활용되고 있다.

선진 각국에서 개발 경쟁을 벌이고 있는 고속 철도차량은 대부분 알루미늄 합금을 차체 재질로 선택하고 있다. 독일의 ICE는 ICE 1에서부터 알루미늄 합금을 적용하였으며, 프랑스의 TGV 역시 강재 차체에서 차세대 차량은 알루미늄 합금 차체로 추진되고 있는 상황이다. 일본의 신칸센(新幹線)도 알루미늄 합금 차체를 적용하고 있다.

알루미늄 합금을 적용한 차체는 철강재 차체나 스텐레스 강재 차체에 비해 재료비가 비싼 단점이 있지만, 근래 선진 각국에서 실용화를 완료한 대형 압출재를 활용한 차체 설계 및 제작 기술은 소

재의 가공 및 용접에 따른 작업 공수를 절반 이상이나 대폭적으로 절감 할 수 있게 되어 인건비의 감소분이 재료비 상승분을 흡수 할 수 있으므로 경제적으로도 결코 불리한 것은 아니다.

따라서 현재 진행 중인 고속전철기술개발사업(G7)에서는 객차 차량의 차체를 알루미늄 합금 재질로 설계를 진행하였다. <그림 1>은 객차 TT4 차량이다.

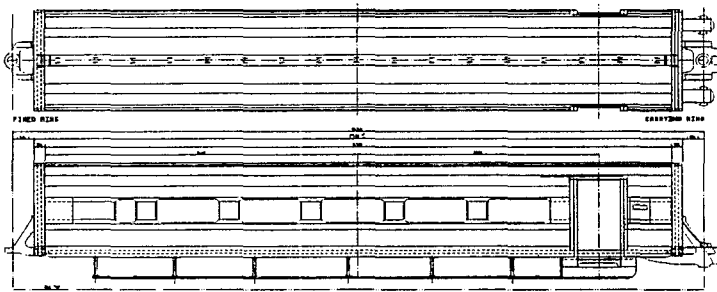


그림 1 G7 TT4 객차

2. 차체 구조용 알루미늄 합금 압출재의 설계

2.1 구조용 알루미늄 압출재의 선택

초기 알루미늄 차량 구조는 용접성을 고려하여 내식성이 우수한 비열처리합금 5083, 5052등의 판재를 많이 사용하였으나, 대형 압출기의 도입, 압출 기술의 발달 및 용접과 압출형재에 적합한 합금이 개발됨에 따라 압출성과 용접성이 우수한 중강도의 Al-Mg-Si계(6000계)합금이 주로 사용되게 되었으며 일부 고강도가 필요한 부분에 한해 7000계 합금이 사용되고 있다.

7000계 합금은 일반적으로 용접 후 열영향부의 강도가 급격히 저하되며, 전반적인 열처리를 거쳐야 일정 수준의 강도가 회복될 수 있다. 철도차량의 제작 공정에서 이러한 과정을 실시하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나 철도차량에 사용되는 7020, 7N01, 7003은 일반적인 7000계 합금과는 달리 용접 후에 상온 냉각시 강도가 급속히 회복되는 특성을 갖고 있어 철도차량 구조에 부분적으로 사용된다. 7003합금은 일본의 7N01합금의 압출성을 개량한 것으로 단면이 얇은 중공(Hollow Section)의 측벽, 캔트레일 등 외판용 압출재로 사용되기도 하였으나 7020이나 7N01과 같

이 내식성 면에서 도장이 필요하다.

압출성과 용접성이 우수한 6000계 합금의 경우, 유럽에서는 6005A를 일본에서는 6N01을 주로 사용한다. 이 두 합금의 압출성은 6000계 합금 중에서 압출성이 가장 우수한 6063과 두 번째로 우수한 6061의 중간 정도의 압출성을 갖으며 내식성도 거의 5000계열에 필적할 만큼 양호하다. 독일의 고속전철 ICE-V나 ICE 1의 경우 SOLEBAR등의 일부에 7020등이 사용되기도 하였으나, 최근 ICE 2, ICE 3, ICT등에서는 극히 일부 보조 부재를 제외하고 구조 부위에 관계없이 6005A를 사용하고 있다.

2.2 알루미늄 압출재 형상 설계

압출재의 형상은 차체의 외각 형상을 기본으로 압출기의 생산 능력과 금형 제작 가능성을 염두에 두고 결정하여야 한다. 국내의 경우 8,000톤급 압출기를 보유하고 있는 소재업체가 있으며 이 압출기를 이용할 경우 원형 컨테이너(Container)를 사용할 때는 압출재의 최대 직경이 500mm 내외, 사각 컨테이너를 사용할 때는 외각 치수 550mm x 100mm 내외가 현실적으로 적용 가능한 최대 압출재의 치수이며 이 범위를 벗어나면 소재업체와 적용 가능성을 협의하여야 하며 무리가 따를 수 있다는 점을 염두에 두어야 한다.

차체 구조용 압출형재는 팽폭을 선택하는 것이 작업 및 용접 공수를 줄이는데 유리하므로 차체 전체 구조에 있어서 용접부위를 적절하게 분배하고 합리적인 크기로 외각 형상에 맞추어 결정하여야 한다. 외각 형상을 결정한 후 생산 가능한 최소 두께에 맞춰 단면 형상을 결정하고 구조해석을 하여 강도를 검증하고 단면을 확정하게 된다.

압출재가 용접으로 결합되는 부위는 용접할 수 있도록 두께가 4mm 이상으로 설계하여야 하며 충분한 용입과 결합 발생을 억제하기 위해 용접 받침쇠(backing strip)를 포함하도록 설계한다.

2.3 알루미늄 압출재의 압출 방법

차량 설계자는 차량의 외형과 내부공간 그리고 강도 등을 고려하여 중공형 압출재 형상을 설계하게 된다. 복잡한 중공형 압출재의 압출 방법은 형재의 형상에 따라 여러 가지방법이 있으나 공통적인 금형의 원리를 간단히 설명하면, 압출 container에 투입된 알루미늄을 여러 가지 형상의 보조금형(porthole die, spider, bridge)으로 분리하고 다시 그 보조금형과 형상 금형 사이공간(welding chamber)에서 용접(압착 이음)이 되게 한 후 금형을 통과 시켜 원하는 형상의 압출재를 만들게 된다. <그림 2>에 금형 종류별 형상을 도식적으로 표현하였다. 압출시 발생하는 문제는 주로 보조 금형에 의한 불균형 체적 분배 그리고 welding chamber내로의 금속 유입 불량 등에 의해 발생할 수 있으며, 압출재 형상에 따라 결정되는 die mandrel의 형상은 압출성과 직접적으로 관련이 있다. <그림 3>는 대표적으로 다공 spider금형을 사용한 pipe 압출과정을 그린 것이다. 철도차량 대형 중공 압출재의 경우는 여러 곳으로 금속 유입을 유도해야 하므로 주로 porthole 금형을 사용하게 된다. 압출시 금속의 흐름에 영향을 주는 port의 체적, welding chamber, 금속유입 경로, bearing(금형 최종 출구 부근에서 마찰에 의한 금속 압출 속도를 조절하는 부분) 등의 설계가 건전한 압출재 생산에 영향을 준다. 뿐만 아니라 동일한 조건이라 하더라도 압출형재의 형상에 따라 압출성을 크게 좌우할 수 있으므로 압출 최적 조건의 형재 설계는 압출재의 물성과도 긴밀한 관계가 있다.

3.1 Under Frame

- (1) Floor는 3종의 BASE PANEL과 SOLE BAR로 구성되어 있으며 SOLE BAR가 Side BASE PANEL과 Slip Joint로 연결 조립되는 구조이다. BASE PANEL은 일반적으로 알루미늄 철도 차량에 적용되는 형상으로 높이 70mm, 폭 500 ~ 530mm로 설계되었으며, 상하기 및 배관 취부를 위한 하부 T-slot이 설치되어 있다.
- (2) SOLE BAR 상단의 용접 연결부는 Side Frame과의 용접 연결이 용이하도록 설계되었으며, SOLE BAR는 측 출입문 구조를 구성하기 위해 출입문 부위에서 절단되기 때문에 STEP FRAME을 그 절단 부위에 설치하여 보완하였다.
- (3) 차량 제작 후 조립 시 대차 Frame과 간섭이 발생하지 않도록 설계하였고 강도 또한 이상이 없도록 설계했다

3.2 Side Frame

- (1) Side Frame은 차체 길이 방향으로 용접 시 용접 변형과 좌굴 현상이 발생하지 않도록 차 길이 방향인 3종의 대형 압출재와 2종의 중형 압출재 그리고 측 출입구의 DOOR POST로 구성되어 있다. 압출재의 기본 두께를 50mm로 설계하고 특히 측 창문이 취부되는 부위는 압출재의 외피 두께를 5mm로 설계하여 터널 내에서 차량 교행시 발생하는 외측압에 견딜 수 있는 구조로 설계했다.
- (2) Side Frame은 외관상 미려도를 감안하여 전면유리창을 설치할 수 있도록 측면에서 안쪽 면으로 단차가 존재하도록 설계했으며 측 창문 취부시 기밀구조를 유지할 수 있도록 압출재 돌출 부위를 설계했다.
- (3) 선반 취부를 용이하게 하기 위하여 T-slot을 적정 위치에 설치하였으며 하단에는 공기조화(HVAC) 덕트를 설치하도록 SUPPORT를 설치하였다.

3.3 Roof Frame

- (1) Roof Frame은 3종의 Roof Panel과 CANT RAIL로 구성되는데 CANT RAIL에는 Door Engine의 취부를 고려하여 2개의 T-slot을 설치하였으며 Side Frame과 쉽게 용접 조립될 수 있도록 고려되었다.
- (2) 용접 변형을 흡수 할 수 있는 Slip Joint 위치는 중앙에 설치하였으며 천정 내장판 및 전선 Duct의 취부를 용이하게 하기 위하여 적정위치에 T-slot을 설치하였다.
- (3) Roof Panel은 조립 작업의 편의성을 향상시키기 위해 중량의 증가를 감소하고 중공형 압출재로 설계되었다.

3.4 Skirt Panel

- (1) Skirt 구조는 차량주행 시 하부기기를 보호하고, 유지보수가 용이하며, Skirt Door의 개폐 가능 및 차체를 구성하는 알루미늄 압출재와의 재질 연속성을 위해 20mm 두께의 알루미늄 압출재로 설계하였다.
- (2) Skirt Frame의 취부는 Sole Bar Frame의 하부에 설치된 T-slot에 Bolting Sheet를 삽입하고 난후 Bolt로 체결하는 구조이다.

3.5 BodyShell Assembly

- (1) Under Frame과 Side Frame은 SOLE BAR에 의해 용접 조립되고 Side Frame과 Roof Frame은 CANT RAIL에 의해서 용접 조립된다. Roof Frame및 Under Frame은 각 Frame에 Slip Joint가 설치되어 있으므로 용접 변형을 흡수 할 수 있어 차체 대조립 시에 발생하는 공차 적용 문제를 최소화 할 수 있도록 설계되었다.
- (2) 단부의 RING Frame에는 End Cross beam 및 End connection Frame이 있어 Under Frame, Side Frame 및 Roof Frame의 연결 조립 시 용접이 용이하도록 용접부가 공차를 흡수 할 수 있는 구조로 설계되었다.

3.6 차체 중량

- G7객차의 차체 중량은 약 7.6톤으로 차체구조를 알루미늄 압출재를 사용함으로써 K-TGV Mild 차량에 비해 중량을 약 15% 감소시켰다.

4. 객차 차체의 강도 평가

알루미늄 객차 차체 TT4차에 대한 강도 및 강성을 검토하여 차체의 안전성을 평가하기 위해 상용 유한 요소 해석 프로그램인 I-DEAS MS6.0을 사용하여 ONYX 10000에서 구조해석을 수행하였다. 객차는 폭 방향으로 대칭이므로 차체의 1/2에 대해 모델링하여 해석하였으며, 해석 좌표계는 폭 방향을 X 축, 높이 방향을 Y축, 길이 방향을 Z축으로 하였다.

모델링은 underframe, sideframe, roofframe, endframe, carrying ring 및 fixed ring을 포함하였으며, underframe의 슬롯 홀은 빔으로, 나머지 모든 구조는 쉘요소를 사용하였으며 해석에 사용된 빔 요소3,324개, 쉘 요소 79,672개이며, 절점수는 57,750이다.

4.1. 하중조건

(1) 계산중량

표 1. 계산중량

구 분	공차 중량	차체 중량	승객 하중	동하중 계수
하 중	21,032 kg 대차중량 제외	7,500 kg bareframe	4,200 kg 75 kg x 56명	0.3

(2) 하중 조건

표 2. 하중조건

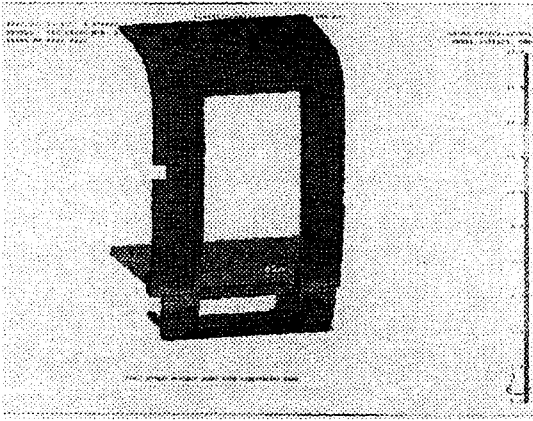
구 분	하 중	비 고
수직하중	32,801.6 kgf	
압축하중	2,000 kN	연결기 높이
Cantrail 압축하중	300 kN	Cantrail 높이
인장하중	1,000 kN	연결기 높이

4.2 판정기준

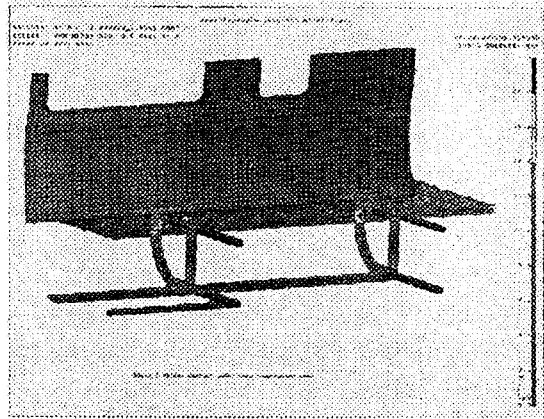
객차 차체의 구조는 알루미늄 6005A-T6 재질의 압출형재 및 5083-O 판재로 이루어져 있고 사용 재질의 기계적 성질 및 허용응력은 표 3와 같다.

표 3. 재질의 기계적 성질 및 허용응력

재 질	인장강도	항복강도	허용응력
AA 6005A-T6	26.5 kgf/mm ²	21.9 kgf/mm ²	21.9 kgf/mm ²
AA 6061-T6	27 kgf/mm ²	25 kgf/mm ²	25 kgf/mm ²
AA 5083-O	29.5 kgf/mm ²	14.8 kgf/mm ²	14.8 kgf/mm ²



<그림5> 압축하중 결과(출입문 하부)



<그림6> 압축하중 결과(SKIRT)

4.3 해석결과

표 4. 하중조건별 최대응력

(단위 : kgf/mm²)

하중조건	최대응력	허용응력	발생 부위
수직하중	14.5(14.8)	21.9	출입문 상부 모서리, (SKIRT)
압축하중	17.6(20.2)		출입문 하부 underframe 주변, (SKIRT)
Cantrail 압축하중	6.5		Sideframe Cantrail 부근
인장하중	12.9		출입문 하부 underframe

알루미늄 객차 차체에 대한 해석 수행으로 각 하중조건에 대한 최대응력은 압축하중에서 발생하며 그 값은 SKIRT부 20.2 kgf/mm², 출입문 하부 17.6 kgf/mm²로 사용재질(6005A-T6)의 허용응력 21.9 kgf/mm² 이내에 있으며 수직하중에서 차체 사이드실 부의 최대 처짐량은 7.9 mm(1.3g) 이다.

8. 결 론

- (1) 객차 차체에 적용한 알루미늄 합금 압출형재는 압출성, 강도, 용접성, 가공성 등을 고려하여 유럽에서 사용 실적이 많은 6005A-T6로, 판재는 5083-O를 선정하였다.
- (2) 차체 구조에 적용된 알루미늄 합금 압출형재는 외접원 450mm 이상의 대형이 8종, 250mm 이상 450mm 이하의 중형이 14종, 250mm이하의 소형이 6종 총 28종의 압출재가 사용되었으며, 차체의 중량은 약 7.6톤이며 기존 경부고속전철 객차 중량에 비해 15%의 중량이 감소되었다.
- (3) 설계된 차체에 대하여 구조해석을 실시하여 허용치 이하임을 확인하였다.
- (5) 알루미늄 압출재 차체 구조의 경량화 및 구조적 안정성을 발전 시키기 위한 지속적인 연구가 있어야 할것으로 판단 된다.

[참고 문헌]

1. (2000년), “고속전철 객차개발(2단계1차년도보고서)”, 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부,
2. (1998년), “철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발에 관한 연구(최종 보고서)”, 산업자원부,
3. 이동현 (1993년), “철도차량 경량화를 위한 최적구조 및 재료의 선택”, (주)대한항공
4. 이동현,박재홍 (1997년), “철도차량용 알루미늄 압출재 설계”, (주)동양강철
- 5.사단법인 경금속협회(1994년), “알루미늄 핸드북”, 쇼와(昭和)알루미늄(주), 제5판, P30-34
- 6.재단법인 산업연구소(1993년), “알루미늄鐵道車輛のリサイクルに関する調査研究”, P117-153
7. 金子幸雄,竹内勝治(1994년), “알루미늄合金製漁船の建造技術”, 사단법인 경금속용접구조협회

후 기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 고속전철기술개발사업의 “객차개발”과제의 일환으로 수행 된 것입니다.