

한국형 고속전철 시제차량용 알루미늄차체 설계개선 및 시험평가

Design improvement and test and evaluation of aluminium carbody of
korea high speed rolling stock

이병현* · 정경렬** · 박형순***

Byung-Hyun Lee, Kyung-Ryul Chung and Hyung-Sun Park

Key Words : 알루미늄 프로파일(Aluminium profile), 압출재(extrude), 구체(Bear frame), 강도시험(Strength test)

ABSTRACT

In this paper, the design improvement for high speed train carbody, which made by aluminium alloy, was described. The design improvements was achieved in fields of economical efficiency, extrusion, welding, assembling, etc. This paper also describes the result of carbody test. The purpose of the test is to evaluate an safety under the load and operation condition. This strength test based on KTX and reference code is UIC 566 and JIS E 7105. The test results shows that aluminium carbody structural have enough strength for all part.

1. 서 론

선도기술개발사업(일명 G7사업)인 '고속전철기술개발' 사업을 통하여 제작되어 시험운전중인 시제차량의 최고 운행 속도는 350 km/h를 목표로 하고 있다. 이러한 주행 속도를 달성하기 위해서는 관련 전장품의 크기 및 중량의 증가가 발생되며 이를 상쇄하기 위한 차체 경량화가 요구된다. 한국형 고속전철에서는 차체 경량화를 위하여 경부고속전철(KTX)와는 달리 동력객차와 객차의 차체를 알루미늄 압출재를 사용하여 제작하여 20%의 중량감소를 달성하였다. 알루미늄 합금(Al alloy) 압출재를 이용한 차량의 생산을 위해서는 기존의 연강재(Mild steel) 차량 제작시 적용했던 차체 설계기술을 그대로 적용할 수 없을 뿐만 아니라 차체의 설계, 제작, 시험의 및 평가의 각 생산단계별로 기술적 특성을 고려해야만 한다.

본 논문에서는 알루미늄 차체 설계 및 제작을 위한 개선사항과 그 시험 및 평가 방안에 대해 소개하고자 한다.

2. 한국형 고속전철의 차량 특성

2.1 시제차량 편성

시제차량은 그림1 에서와 같이 총 7량으로 앞뒤 양끝에 2대의 동력차와 2대의 동력객차가 있으며 가운데 3대의 객차로 구성되어 있다. 동력차와 객차는 차간 연결장치를 사용하여 연결되어 있으며 동력객차와 객차, 객차와 객차간 연결은 관절대차(Articulation bogie)를 사용하여 연결되어 있다.^[1]

2.2 알루미늄 차체의 기본 구조설계

한국형 고속전철의 동력객차와 객차는 차량 고속화를 위해 차체 경량화 차원에서 연강(mild steel)으로 제작된 KTX와는 달리 알루미늄 합금 압출재를 사용하여 차체를 제작하였다. 알루미늄 합금을 적용한 차체는 철강재 차체나 스텐인레스 강재 차체에 비해 재료비가 비싼 단점이

* 한국생산기술연구원 시스템엔지니어링팀
E-mail : bhlee@kitech.re.kr
Tel : (041) 5898-256, Fax : (041) 5898-230
** 한국생산기술연구원 시스템엔지니어링팀
*** (주)로템

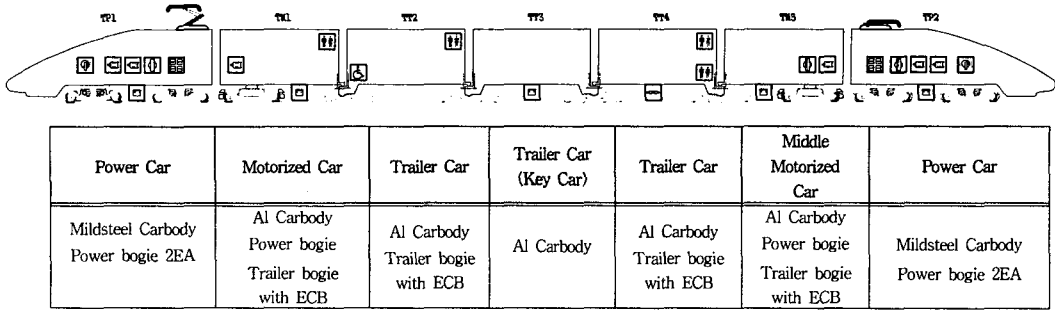


Fig. 1 Formation of HSR 350X

있지만, 근래 선진 각국에서 실용화를 완료한 대형 압출재를 활용한 차체 설계 및 제작 기술을 살펴볼때 소재의 가공 및 용접에 따른 작업 공수를 50% 이상이나 대폭적으로 절감 할 수 있다. 이를 통하여 인건비의 감소분이 재료비 상승분을 흡수할 수 있으므로 경제적으로도 결코 불리한 것은 아니다.

고려하였다.^[2]

3. 한국형 고속전철의 설계개선 내용

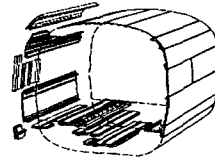
3.1 차체 생산성 측면의 개선내용

(1) 설계 개념

차체의 구조는 전 압출재 설계(all extrusion design) 또는 결합 설계(integral design) 구조라 불리는 응력외피 구조로서 외피와 일부 중동 부재가 일체형으로 되어 외피도 하중을 부담하는 구조이며 일반적으로 항공기 구조에 적용되는 구조이다. 강도적인 관점에는 UIC에 의한 축하중과 수직하중 및 조합하중 조건을 만족할 수 있도록 차체를 설계하였으며 미적인 관점에서는 독일의 ICE 시리즈처럼 측창과 프레임의 평면 수준을 같은 레벨로 설계하는 direct glazing 방식을 채택하여 차체가 미끈하도록 설계하였다.

압출재의 형상은 우선 압출기의 성능과 금형설계, 제작성을 염두에 두고 결정해야 한다. 압출재의 크기는 압출성형기의 콘테이너의 크기에 맞춰 외각 형상을 결정한 후 최소 두께를 고려하여 단면을 결정하게 된다.

차체 설계 단계에서 알루미늄 동력궤차 차체를 구성하는 각종 압출형재 단면 형상은 압출재 생산업체의 생산 가능한 용량 (압출재 외접원 지름550mm 이하)을 감안하여 압출성 측면, 경량화 측면, 강도적인 측면, 자동화 용접이 가능한 용접 이음부 설계, 용접시 발생하는 공차 흡수설계, 제작적인 측면 및 기기 취부의 적합성 측면을



Aluminium All Extrusion Design
"Integral Design"
Example: ICE Intermediate Coach

Fig. 2 Integral design structure

(2) 소재 선정

차체에 사용할 알루미늄 합금 소재는 강도적 측면, 압출성, 용접성, 소재의 수급 등을 고려하여 Al 6005A를 선정하였다. Al 6005A는 전 세계적으로 통용되는 소재로 유럽 지역에서 철도차량 소재로 널리 사용되고 있는 재질이다. Al 6005A는 압출재 소재로는 적합하나 판재로서의 가공이 곤란하므로, 차량 제작에 부분적으로 소요되는 판재는 구조용으로 널리 사용되는 Al 5083 소재를 선택하였다.

(3) 경제성

시제차량 개발 이후 본격적인 생산에 들어가는 양산차의 경우에는 시제차량에 적용되었던 설계내용중 많은 부분에 대하여 수정 및 재설계가 요구된다. 이 경우 시제차량용으로 제작된 다이(die)들의 상당부분은 사용이 불가능해 짐으로 다이 제작에 많은 비용이 소요되는 압출재의 사용을 최소화하고 기계가공품이나 Sheet Metal을

사용하는 부분으로 설계하는 것이 바람직하다. 또한 차량 구체의 전체 제작비용을 감소시키기 압출재의 형상이 짧고, 기계 가공이 필요하고 용접되는 서브어셈블리 부분은 양산차에서는 압출재 보다는 주물로 제작되는 것이 경제적이다.^[3]

(4) 압출 성형성

제작성을 검토하여 설계한 압출재라도 실제 제작시에는 설계와는 달리 일부 형상 및 금형 제작 기술에 문제가 발생되어 이에 대한 수정이 요구되는 경우가 있다. 아래 그림 3과 같은 설계는 각각의 면의 두께차이가 심하여 압출시 균일한 Metal Flow 형성이 곤란하기 때문에 실제로 생산시 불량품이 나올 확률이 높은 설계이므로 별도로 2개의 압출재를 제작하여 용접하는 설계로 변경하는 것이 바람직하다.^[4]

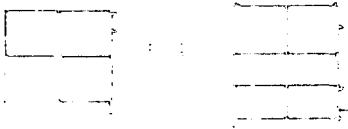


Fig. 3 Improved Al profile design
(1 piece → 2 pieces)

(5) 굽힘 가공성

그림 4와 같은 설계는 압출재를 굽힘 가공하는 것으로 일반적인 경우 압출재의 폭이 두꺼운 경우 R=500 이상의 반경으로 굽힘 가공하는 것은 곤란하다. 따라서 작은 부분으로 나누어 Box Shell을 제작한 뒤 용접하여 설계 형상을 구현하는 방안이 바람직하다.

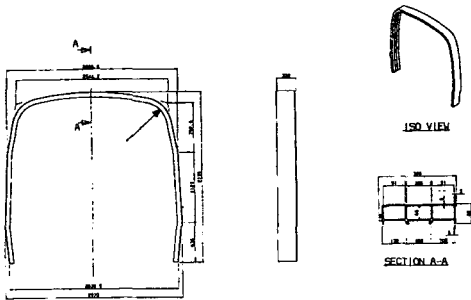


Fig. 4 Bad shape design for manufacturing

(6) 일체화

하부기와 객실내 부속물 및 덕트류의 취부 용이를 위하여 압출재에 T-Slot을 설치하여 부품 조립시의 조립공수 절감을 이루었다. 각 상하기기를 설치하기전에 미리 차체 하부 T-Slot에는 그림 5와 같은 구조로 볼트가 내장되어있는 볼트 캐리어 (Bolt Carrier)를 각각의 장비취부 위치에 설치하여 상하기기의 취부가 가능하도록 하였으며 볼트 캐리어는 차체프로파일과 동일한 재질을 사용하였다.

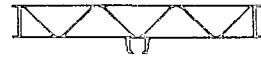


Fig. 5 T-slot and bolt carrier

(7) 공용화

객차 차체의 알루미늄 압출형재는 그림 6과 같이 압출재의 외접원 지름이 450mm 이상인 대형 압출재 8종, 250mm 이상 450mm 이하인 중형 압출재 14종, 250mm 이하인 소형 압출재 6종, 총28종의 압출재로 구성되어 있다. 주요 압출형재는 금형 소재비 및 생산설비 절감 및 제작성을 고려하여 객차와 동력객차 차체를 동일한 알루미늄 압출재를 사용할 수 있게 설계하였으나 상용화 되어 양산할 때에는 자기 역할에 맞도록 압출재를 재구성하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한 객차 연결부인 링 구조물의 의장 설계에 있어서도 고무주름막과 같은 품목들을 KTX와 공용으로 사용할 수 있도록 주력하였다.

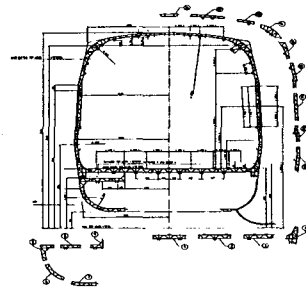


Fig. 6 Cross section of Al profile of carbody

3.2 차체 제작상 측면의 개선내용

(1) 용접성

차체조립에 있어서의 용접은 차체의 강도, 신뢰성 및 원가의 면에서 대단히 큰 위치를 차지하고 있다. 따라서 차체의 설계를 행하는 경우에는 용접성을 충분히 고려할 필요가 있다.

알루미늄 합금은 활성이 극히 높은 재질이므로 용융 시에 대기 중의 각종 기체와 결합하여 화합물을 형성하기 때문에 용접 시 대기의 차단과 화합물 억제제를 위해 불활성 기체를 사용하여 용접을 실시해야 하는 어려움이 있다. 또한 알루미늄 합금의 열전도도는 강재(steel)에 비해 3 - 5배 정도 높기 때문에 용접 시 발생하는 열은 알루미늄 모재를 통해 쉽게 방출된다. 따라서 알루미늄 합금의 낮은 용융온도에도 불구하고 용접 시 매우 크고 집중적인 입열량이 필요하다. 열이 집중되지 않으면 매우 넓은 열영향부가 발생하게 되고 이들 부위에서 재결정, 석출물들의 용해 등에 의해 강도가 감소하게 된다. 알루미늄의 선팽창계수는 강재의 2배가 되므로, 용접 후 냉각 시 구조물의 과도한 변형의 원인이 되고, 용접 균열 발생의 원인이 되기도 한다. 또한 알루미늄은 산소와 반응하여 용융온도가 2050 ℃에 이르는 산화 피막을 형성하게 되고 이 산화 피막은 산소의 확산을 억제하여 더 이상 알루미늄과 산소가 반응하지 못하도록 한다. 알루미늄 합금은 이러한 산화 피막 때문에 내식성이 우수하나, 용접 전에는 산화 피막을 제거해야 양호한 용접부를 얻을 수 있다.

한국형 고속전철의 차체는 범용 가공장비를 이용하여 가공하였으며, Under frame, Side frame, Roof frame, Ring frame으로 구분되어 반자동 또는 수동 용접으로 조립되었다. 올바른 용접 과정을 찾기 위해 각 차량마다 각각 다른 방법에 의해 용접을 수행하였으며 최종적으로 용접 변형을 최소화 시킬수 있도록 부재를 각 용접 공정마다 대칭방향으로 용접하였다. 이 경우의 용접 품질이 가장 우수한 것으로 나타났다.

(2) 공정의 단순화

KTX의 객차간 연결 구조는 운반링(carrying ring)이라는 특별한 차간 연결 구조물을 가지고 있다. 이 구조물은 차량을 기계적으로 결합하고 있는데 이는 기계 가공 부위가 많고 완전용입 용접을 해야하는 후판 용접 구조물이다. 이는 연결 부위만을 별도로 제작하는 것이 가능해지는 잇점이 있다. 그러나 이러한 구조물에서는 링과 객차간의 연결이 안전하고 균형 있게 이루어지도록 여러 가지 부수적인 결합 요소(sandwich rubber, hook,

safety pin 등)가 필요하므로 이를 제작하는 데는 많은 노력과 조립 공수가 소요된다. 이에 반하여 한국형 고속전철의 경우에는 운반링, 고정링 및 이차현수장치 지지부(support)등의 주요항목에 대하여 알루미늄 주물체 또는 판재 용접구성품을 단부에 직접 용접 또는 볼팅취부 설계하여 공정의 단순화를 도모하였다. (그림 7)

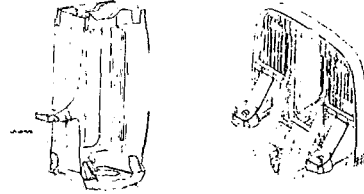


Fig. 7 Carring ringstructure(KTX (L), HRS350x (R))

(3) 부품의 간소화

객실내 window mask의 경우 2개의 창문 당 1개의 window mask 패널을 설치하고 하부는 끼워넣고 상부는 브라켓을 이용하여 소량의 너트를 사용 고정함으로써 최종 조립에 필요한 공수를 획기적으로 줄일 수 있게 되었다(그림 8). 또한 window mask 내부에 브라인드를 일체형으로 장착하여, 따로 브라인드를 장착하는 KTX에 비해서 조립공수를 줄였으며, 또한 무 몰딩(molding)으로 처리를 해서 미려하게 디자인했다.

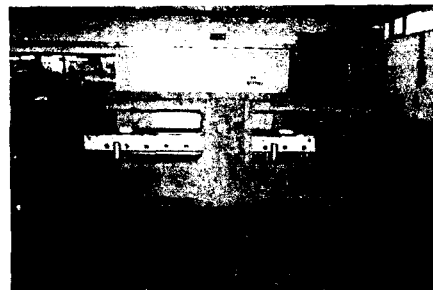


Fig. 8 Windows mask of passenger's room

(4) 부식방지

일반적으로 부식방지는 차체 제작분야의 업무라고 생각되고 있으나 실질적으로 부식방지는 차량설계의 한 분야로 접근되어야 한다. 알루미늄 합금 차량의 경우 이종 금속의 접촉 부위에서 금속간 전위차에 의한 부식이나 수분침투에 의한 부식이 이루어지기 쉬우므로 초기 설계 단계부터 이러한 사항이 고려된 설계가 이루어져야 한

다. 또한 제조 공정에서는 아래와 같은 부식방지 작업이 적용되어야 한다.^[5]

- Steel 계통의 재질에 도료를 도포
- 접촉부위에 PVC 계통의 LINER 삽입
- 크롬도금 및 아연도금된 정병류를 사용

4. 한국형 고속전철의 차체 시험평가

제작된 한국형 고속전철 AI 차체의 강도 및 강성을 확인하여 차체의 안전성을 입증하고자 동력객차와 객차의 차체 구조체(Bear frame)의 하중시험을 수행하였다.^{[6][7][8]}

4.1 하중시험 개요

시험과 관련된 적용규격은 UIC566과 JIS E 7105를 근거로 하였으며 동력객차와 객차의 각 차종별로 수직하중, 압축하중, 인장하중, 리프팅하중, 재킹하중, 굽힘과 비틀림 고유진동수 시험을 수행하였다. 그림 9와 그림 10은 각각 하중시험 장치 구성도와 하중시험 장면을 나타내며 표 1은 수행된 시험항목을 정리한 것이다.

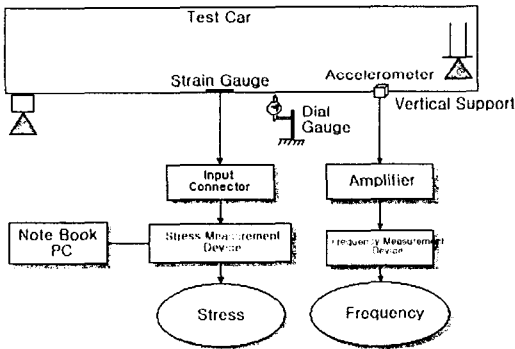


Fig. 9 Test equipment installment diagram



Fig. 10 Strength test of passenger's car

Table 1 Load case of strength test

Test Item	Measuring Item
Vertical Load (-Bogie load)	Stress, deformation
Compression (200 ton)	Stress, deformation
Tension (100 ton)	Stress, deformation
Lifting load (+Bogie load)	Stress, deformation
Jacking load (+Bogie load)	Stress, deformation
Bending frequency	Natural frequency
Torsional frequency	Natural frequency

4.2 소재 및 측정점 선정

차체에 사용된 알루미늄 합금의 소재는 AI 6005A-T6와 A-S7G0.6-T6로서 AI 6005A-T6는 차체 구조물에, A-S7G0.6-T6는 링 주물제품에 사용되었으며 항복강도는 AI 6005A-T6의 경우 모재부가 21.92 kg/mm², 용접부가 11.72 kg/mm² 이며 A-S7G0.6-T6는 29.26 kg/mm² 이다.

측정점 선정은 구조해석 결과 및 현차 관찰결과를 참조하여 강도 취약부로 예상되는 부분위주로 응력 측정점을 결정하였으며, 차체는 길이방향으로 좌우 대칭을 이루므로 좌우의 1/2 영역에 집중적으로 스트레인 게이지를 취부하였다. 스트레인 게이지는 1축 및 3축을 사용하였다.

사이드실의 처짐량은 차체거동의 대칭성을 확인하기 위해 사이드실 전체에서 다이알 게이지를 이용하여 측정하였으며, 처짐량 측정점은 10개소이고 고유진동수 측정을 위한 가속도계는 취부 위치는 사이드실 중앙과 끝의 2곳이다. 그림 11은 스트레인 게이지 취부도의 예이다.

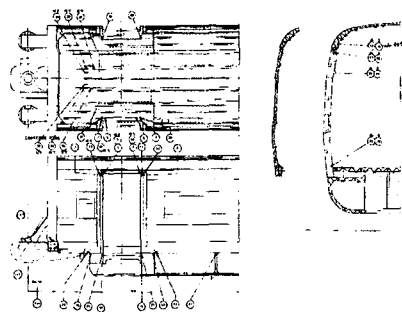


Fig. 11 Strain gauge installment diagram

4.3 시험결과

(1) 객차

최대응력은 압축하중 200톤 작용시 고정링부에서 24.54

kg/mm²로 이 값은 판정기준인 사용재질 (A-S7G0.6-T6)의 항복강도 29.26 kgf/mm² 이내에 있으므로 객차 차체는 구조적으로 안전한 것으로 평가되었다. 각 하중조건에 대한 최대응력을 표 2에 정리하였다.

Table 2 Trailer car strength test result (kgf/mm²)

Test Item	stress	yield stress
Vertical Load (-Bogie load)	- 7.94	11.72
Compression (200 ton)	24.54	29.26
Tension (100 ton)	16.99	29.26
Lifting load (+Bogie load)	-3.91	11.72
Jacking load (+Bogie load)	-3.87	11.72
Bending frequency	11.5 Hz	
Torsional frequency	12.0 Hz	

(2) 동력객차

최대응력은 압축하중 200톤 작용시 객실 통로(gang way) 하부 발판에서 -19.11 kg/mm²로 이 값은 판정기준인 사용재질(AI 6005A-T6)의 항복강도 21.92 kgf/mm² 이내에 있으므로 본 객차 차체는 강도적으로 안전하다. 또 각 하중조건에 대한 최대응력을 표3에 정리하였다

Table 3 Motorized car strength test result (kgf/mm²)

Test Item	stress	yield stress
Vertical Load (-Bogie load)	- 11.22	21.92
Compression (200 ton)	-19.11	21.92
Tension (100 ton)	11.45	21.92
Lifting load (+Bogie load)	7.03	21.92
Jacking load (+Bogie load)	-6.88	21.92
Bending frequency	10.5 Hz	
Torsional frequency	12.0 Hz	

5. 결론

본 논문에서는 한국형 고속전철 개발과정을 통해 달성된 알루미늄 차체 설계를 위한 개선사항과 그 시험 및 평가 방안에 대해 소개하였다. 한국형 고속전철은 차체 경량화를 위해 AI 압출재를 사용하여 차체를 제작하였으며 이를 통해 약 20%의 중량감소를 달성하였다. 이러한 AI 압출재를 이용한 차체의 제작은 기존의 연강재 차체의 제작과는 다른 설계 및 제작개념을 필요로 하며 이를 위하여 경제성, 압출성, 조립성, 용접성, 제작성 등의 다양한 분야에서 새로운 설계 개

념이 검토되고 적용되었다.

또한 완성된 AI 압출재를 사용한 차체 구조의 안전성을 검증하기 위하여 차체 하중시험이 수행되었다. 하중시험은 철도관련 국제규격인 UIC566을 근거로 7가지 시험항목에 대하여 수행되었으며 그 결과는 양호한 것으로 판정되어 제작된 차량의 안전성이 입증되었다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 "차량시스템 엔지니어링기술개발" 과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 정경렬 외, 2002, "차량시스템 엔지니어링기술개발" 연구보고서, 한국생산기술연구원
- (2) 송진 외, 2001, "객차 개발" 연구보고서, (주)로템
- (3) Alcan MTS, 2000, "Very High Speed Railway Design Recommendations", Technical report
- (4) 송진 외, 2001, "동력객차 개발" 연구보고서, (주)로템
- (5) Alcan MTS, 2001, "Very High Speed Railway Fabrication Recommendations", Technical report
- (6) 한국생산기술연구원 & (주)로템, 2002, "G7고속전철 기술개발사업 공장내 시험평가 결과 보고서", 내부기술자료
- (7) 한국생산기술연구원, 2002, "설계검증 해석 자료집", 내부기술자료
- (8) Alcan MTS, 2000, "Structural Analysis", Technical report