

# 알루미늄 철도차량 차체 제작 및 도장 기술 개발

## Development of Construction and Painting Technology for the Aluminum Carbody of Rolling stock

서승일<sup>1</sup>(Seo, Seung Il), 김진태<sup>2</sup>(Kim, Jin Tae), 박일철<sup>3</sup>(Park, Il Chul),  
이동현<sup>4</sup>(Lee, Dong Hun), 신돈수<sup>5</sup>(Shin, Don Su)

### ABSTRACT

Based on the development of designed technology for aluminum carbody, the prototype aluminum carbody has been constructed. All extrusion profiles required for the carbody has been produced and their quality has also been proven. For sound construction, welding technology to join aluminum extrusion profiles has been developed and jigs for precise assembly of blocks have been made. The aluminum carbody for urban subway train has been completed with the required chamber being set and the welding deformations being constrained by jigs. The safety of the carbody structure has also been proven by the static load test. And also, painting technology has been developed and the surface of the carbody has been pre-treated and painted. The developed technology to construct the aluminum carbody can be used in mass production of aluminum cars ordered by domestic and foreign customers.

**Key Words** : Aluminum Extrusion Profiles(알루미늄 압출재), Construction of Carbody(차체 제작), Welding Technology(용접 기술), Jigs(지그), Painting Technology(도장 기술), Static Load Test(정하중 시험)

### 1. 서 론

대형 알루미늄 압출재를 철도차량 차체에 적용할 경우에는 경량소재에 따르는 중량 감소가 가능하고, 부재의 형상 자체가 압출을 통해 생산되므로 차체 제작 시수가 절감되며, 압출재 형상 내에 T-슬롯 등을 설치함으로써 각종 내장품과 전장품의 취부가 용이하다는 장점이 있다. 한편 알루미늄 합금의 용접 시에는 수소에 의한 기공이 발생하고 고온균열이 생성하는 등, 용접

결함이 다수 발생하고 있다. 또한 표면의 산화막은 부식을 방지하는 역할을 하나 모재와 용융점이 달라서 용접성을 저해하고, 도장 작업 시 도료의 접착력을 저하시키는 등의 악영향을 초래한다. 알루미늄은 용접 시 강재에 비해 3배 이상의 변형이 발생하므로 제작 정밀성을 유지하기가 곤란하다.

본 연구에서는 이전에 발표된 알루미늄 전동차 차체의 설계 결과[1]를 바탕으로 차체를 제작하여 완성하고자 하였다. 차체에 소요되는 29종의 알루미늄 압출재를 생산하고, 기계적 성질, 공차 등의 검사를 통해 품질을 확인하였다. 결함이 없는, 건전한 차체 제작을 위해 알루미늄 압출재의 용접 기술을 개발하고, 기계적 강도 평가 및 단면 시험을 통해 용접부 품질을 확인하였으며, 용접에 따른 변형을 억제함으로써 차체 제작 정밀도를 향상시키기 위해 적절한 지그를

<sup>1</sup>(주)한진중공업 산업기술연구소, 수석연구원

<sup>2</sup>대우중공업(주) 철차연구소, 책임연구원

<sup>3</sup>현대정공(주) 기술연구소, 책임연구원

<sup>4</sup>(주)동양강철 기술연구소, 책임연구원

<sup>5</sup>두레어에메탈(주) 기술연구소, 수석연구원

개발하여 적용하였다. 완성된 차체에 대해서 정하중 시험을 수행하여 구조적 안전성을 검증하였고, 차체 표면의 부식 방지를 위한 알루미늄 차체의 도장 기술을 개발하였다.

## 2. 알루미늄 압출재의 용접 기술 개발

압출재의 용접부는 양호한 용접을 위해 뒷면 띠판(backing strip)을 압출 형상 내에 포함하고 있으므로 용입이 깊은 MIG용접법을 사용하여 편면 자동용접이 가능하다. 알루미늄 용접 시에 발생하는 기공은 모재 및 와이어 표면에 부착된 수분이나 보호가스 중에 고온된 수소 등이 고온 상태에서 수소로서 용착금속에 용해되었다가 응고 시에 용해도 차이에 의해 방출되어 잔류하는 것이다. 또한 용접 시 고온에서 입계에 존재하는 응고점이 다른 액막은 용착금속의 냉각 수축에 따라 균열로 성장하여 고온균열이 된다. 기공과 고온균열은 용접부의 인장강도 및 피로강도를 저하시키는 원인이 된다. 또한 알루미늄 압출재의 합금 A6005A T6은 용체화 처리된 재질이므로 용접에 의한 열에 의해 용접부에서 열처리 효과가 사라지게 되어 용접부 항복강도가 저하하게 된다.

알루미늄 용접부의 결함을 방지하기 위해서는 대기 중 습도가 낮은 곳을 작업 장소로 선택하여야 하며, 용접부 표면의 산화막을 와이어 브러쉬로 제거한 후 직류역극성의 청정작용(cleaning action)을 이용하고, 모재 표면과 와이어의 표면에 존재하는 수분을 완전히 건조시켜야 한다. 또한 고온균열은 용접부의 재질에 상당 부분 의존하므로 모재(A6005A T6)에 적합한 E5356 용접봉을 선택한다. 용접 전류 및 속도, 전압 등 용접조건은 아크가 안정하게 발생하고, 충분한 용착량이 생성되는 범위에서 선정하고, 보호가스의 유량은 와류가 발생하지 않는 범위 내에서 대기의 효과를 차단할 수 있도록 결정하게 된다.

압출재 시편에 대해 용접을 실시하고 용접부 단면 매크로 사진을 촬영한 결과는 Fig. 1와 같고, 용접부의 인장강도 시험을 수행한 결과는 Fig. 2와 같다. A6005A T6 재질의 용접부의 인장강도 기준( $16.3 \text{ kg/mm}^2$ ) [2] 및 항복강도 기준( $11.7 \text{ kg/mm}^2$ , 0.2% 업셋 기준)을 만족하고 있



Fig. 1 Macro-section of Welded Joint of Aluminum Extrusion (Welding Voltage = 210 V, Current = 24 A, Speed = 0.6 m/min, Wire = E5356 1.2 φ)

음을 알 수 있다.

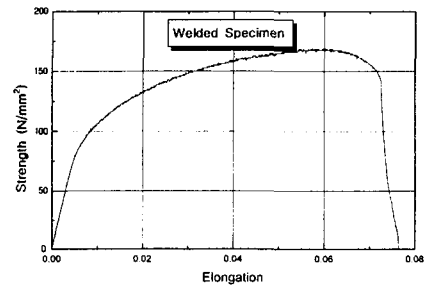


Fig. 2 Stress-strain relation of the welded specimen of aluminum alloy A6005A

## 3. 차체의 제작



Fig. 3 Jig for preventing in-plane rotational deformation of the underframe

차체는 언더프레임, 측구조, 지붕구조 및 단부구조 별로 제작되어 대조립함으로 완성된다. 알루미늄은 탄소강에 비해 선팅창계수가 2배 이상이 되므로 용접부의 변형이 통상 3배 정도 발생하고, 토치에 의한 변형의 교정이, 강도 저하로 인해 곤란하므로 변형을 최대한 억제할 수 있는 지그의 개발이 차체 제작의 핵심 기술이라고 할 수 있다.

언더프레임의 용접 시에는 직선 자동용접이 가능하나, 용접 중에 언더프레임 평면 내의 온도 분포 불균일에 의해 면내의 회전변형이 발생하게 된다. 회전변형으로 인해 루트 갭(root gap)이 과도하게 되면 용접이 불가능하게 되므로 회전변형을 구속할 수 있는 지그가 필요하게 된다. Fig. 3은 언더프레임을 용접하기 위한 지그로서 양단에서 면내의 변형을 구속하는 구조인데, 자동용접에 따른 회전변형을 억제하게 된다. 측구조의 조립 시에는 용접에 의한 각변형으로 인해 면외변형이 발생하여 차체 대조립을 곤란하게 만드는데 이를 방지하기 위해 Fig. 4와 같은 상하 방향 구속 지그가 필요하게 된다.

차체에 요구되는 캠버를 생성하기 위해서는 측구조 블록을 조립할 시에 상하방향의 루트 갭의 차이를 두고 용접하게 된다. 캠버는 12 mm를 기준으로 하였다.

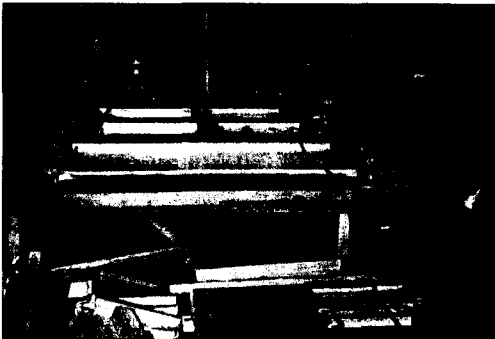


Fig. 4 Jig for preventing the out-of-plane deformation of the side structure

#### 4. 차체의 정하중 시험

완성된 알루미늄 차체의 안전성을 검증하기 위해서 규격[3]에 의거하여 정하중 시험을 실시하였다. 이미 제시한 구조해석 결과[1]를 바탕으로 응력 집중이 예상되는 120개 지점에 스트

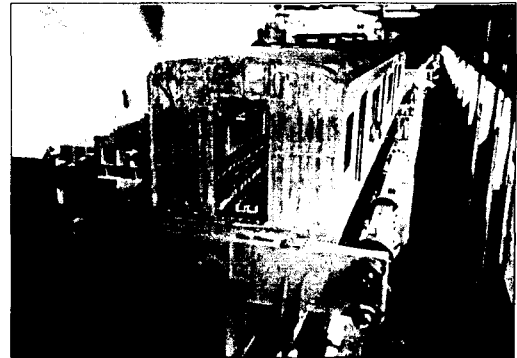


Fig. 5 Static load test of the aluminum carbody

레인게이지를 취부하고, 각 하중조건에 따라 단계적으로 하중을 가하여 스트레인 게이지(strain gage)로부터 응력을 계측하였다. 처짐의 계측을 위해서는 21개의 위치에 다이얼 게이지(dial gage)를 취부하였다. 정하중 시험 장면은 Fig. 5와 같고 측정 결과는 Table 1와 같다.

Table 1의 결과에 따르면 계측된 응력이 허용치인 재료의 항복응력 이내(모재22.9 kg/mm<sup>2</sup>, 용접부 11.7 kg/mm<sup>2</sup>)에 있음을 알 수 있다. 차단 압축 하중 작용 시에 센터셀의 변곡부에 고응력이 작용하고 있고 구조해석 결과와도 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 기하학적 형상 급변에 따른 응력 집중이라 판단되고 이 부분에 대해서는 형상을 좀더 완만히 변화하도록 설계를 변경하는 것(R200에서 R400이상으로)이 필요할 것으로 판단된다.

계측결과와 구조 해석 결과를 비교해 보면 대부분의 지점에서 20% 이내의 오차를 보이고 있으나, 차단 압축 하중 시의 센터 셀 부위 응력치와 고유진동수 결과치가 상당한 차이를 보이고 있다. 센터 셀 부위는 구조해석 시에 응력 집중 현상이 충분히 고려되지 못한 것으로 사료되며, 고유진동수 결과치가 차이가 난 것은 해석 시에 나타난 1차 모드가 전체 굽힘모드가 아니라 지붕구조를 중심으로한 국부적인 모드인데 비해, 시험 결과는 전체 굽힘 및 비틀림 진동의 고유진동수이기 때문이라 사료된다.

#### 5. 도장 작업

알루미늄 표면에 있는 산화막은 표면에서 도료의 정착을 저해하므로 제거해야 하는데, 산화

Table 1 Measured Results of Static Load Test  
(\* All deflections are in vertical direction)

Load Case	Load	Data	Measured Result	Analysis Result	Position
1	Vertical Load (55 ton)	Max. Stress	11.47 kg/mm <sup>2</sup>	9.88 kg/mm <sup>2</sup>	Lower Window Corner
		Max. Deflec. of Solebar	-8.64 mm	-9.19 mm	Center of Carbody
		Equiv. Bending Rigidity	$1.23 \times 10^{14}$ kg·mm <sup>2</sup>	$1.01 \times 10^{14}$ kg·mm <sup>2</sup>	Based on Maximum Deflection of Solebar
2	Compressive Load (50 ton)	Max. Stress	-12.11 kg/mm <sup>2</sup>	-5.60 kg/mm <sup>2</sup>	Transient Region of Center Sill
		Max. Deflec. of Solebar	-2.81 mm	-2.91 mm	End of Solebar
3	Twisting Load (4 ton-m)	Max. Stress	1.42 kg/mm <sup>2</sup>	1.51 kg/mm <sup>2</sup>	Upper Corner of Entrance Door
4	Bending Natural Freq.	First Mode	22.7 Hz	15.11 Hz	
5	Torsional Natural Freq.		12.9 Hz	7.22 Hz	

막 제거는 기계적인 방법과 화학적인 방법이 있다. 기계적인 방법은 블라스팅이나 그라인딩이 있으며, 화학적인 방법은 산세척(acid cleaning)이 있다. 화학적인 방법은 수질 오염등의 문제가 야기될 수 있으므로 환경적인 측면에서 기계적인 방법이 선호된다.

도장 작업에 앞서 전처리작업(pre treatment)이 필요한데, 전처리 작업은 먼저 차체 표면에 있는 기름 등의 불순물을 제거하기 위한 표면 세척부터 시작된다. 표면 세척 후에 남아 있는 물기는 도장 후에 기포로 잔류하여 도막 박리의 원인이 되므로, 건조에 특히 유의하여야 한다.

표면 세척 이후에는 외관으로 드러나는 측구조의 용접바드를 제거하여 용접부 평탄화 작업을 실시하고, 샌드 블라스팅 작업을 실시하여

산화막을 제거한 후, 먼지를 닦아 내어 전처리 작업을 완료한다. 샌드 블라스팅 작업 시에 염분이 섞인 모래는 부식의 원인이 되므로 사용을 금해야 한다. 블라스팅 시에 과도한 표면 손상을 방지하기 위해서는 적절한 입자 크기의 모래를 선정하여야 한다.

도장 작업 스케줄은 다음과 같다.

- (1) 60 m 두께의 에폭시 프라이머 코팅
- (2) 최대 300 m 두께의 필러를 이용한 국부적인 평탄화 작업
- (3) 60 m 두께의 폴리우레탄 그라운드 코팅
- (4) 40 m 두께의 폴리우레탄 마감 코팅

도장 작업에 대한 시험 평가를 위해 시편에 대해 접착 강도 시험, 경도시험, 내충격성, 내염수 분무 시험 등을 실시한다. 시편에 대한 성능이 입증되면 차체에 대해 도장 작업을 실시하고 도장 작업 완료 후에는 외관 검사, 도막 두께 측정 등을 실시하여 품질을 검사한다. 완료된 차체의 외관은 Fig. 6와 같다.



Fig. 6 Completely painted aluminum carbody

## 6. 결 론

본 연구에서는 저자들의 연구를 통해 이미 설계된, 대형 알루미늄 압출재를 사용한 통근형 지하철 전동차 차체[1]를 제작하고자 알루미늄 합금의 용접 기술을 개발하고, 차체 조립을 위한 지그를 개발하였으며, 정하중 시험을 통해 구조 안전성을 검증하였다. 또한 차체의 표면 처리를 위해 도장기술을 개발하여 차체에 적용하고 시험을 통해 도장 작업의 효과를 확인하였

다.

개발된 알루미늄 철도차량 차체 설계 및 제작 기술을 토대로 알루미늄 철도차량의 국산화가 가능하게 되었고, 향후 국내 및 해외에서 발주되는 알루미늄 철도차량의 수주가 가능하게 되었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 공업기반기술개발사업 “철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체 구조 개발”의 일부로 수행된 것임을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. 서승일, 김진태, 박일철, 이동현, 신돈수, “알루미늄 철도차량 차체 설계 및 대형 알루미늄 압출재 생산 기술 개발”, 한국철도학회지, 제2권, 제1호, 1999. 3.
2. “Wrought Aluminium and Aluminium Extruded Sections”, Part 1, DIN 1748, 1983.
3. “철도차량구체의 하중 시험 방법”, 일본공업규격 JIS E 7105, 1988.
4. “철도차량용 알루미늄합금 용접 이음의 설계 방법”, 일본공업규격 JIS E 4050, 1992.