

# 알루미늄 철도차량의 용접 기술

서 승 일

## Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks

Sung-II Seo

### 1. 서 론

알루미늄은 중량대 강도의 비가 여타의 구조용 재질에 비해 뛰어나고 가공 및 용접성이 양호하기 때문에 수송수단의 경량화를 위해서는 가장 좋은 재질로 인정되고 있다. 또한 표면의 산화막은 내부식성을 향상시키므로 차량의 수명 향상에 기여할 수 있고, 우수한 재활용성은 환경 보전에도 기여할 수 있다.

알루미늄은 경량화에 적합하나 가격이 비싼 것이 약점으로 지적되어 제작원가의 상승이 알루미늄 철도 차량의 개발을 주저하게 만든 요인이 되었었다. 초기의 알루미늄 차량은 판재를 절단하고 가공, 용접하여 차체를 제작하는 과정을 거쳤으므로, 차체의 제작원가는 재료비용의 상승만큼 상승하게 되어 가격 경쟁력이 뒤떨어진 것이 현실이었다. 그러나 알루미늄은 압출이 가능한 재질이므로 압출기술의 발전에 따라 대형압출재가 개발되어 상황이 변화하게 되었다. 소득 증가에 따른 인건비 상승은 차량의 제작비용 중에 인건비가 차지하는 비율을 증가시키게 되어 차체의 재료비를 상회하게 되었다. 따라서 대형압출재의 전면적인 채택에 따라 판재의 절단, 가공 및 용접에 따르는 생산시수를 대폭 절감하게 되면, 알루미늄의 높은 재료비용을 인건비 감소분에서 흡수할 수 있게 되어 차체의 총 제작원가를 감소시킬 수 있게 된다. 또한 알루미늄 차체를 채택하여 차체 중량이 감소하게 되면 운행에 따른 에너지가 절감되며 레일에 가하는 부하도 완화되어 차량의 전체 수명 기간을 고려하면, 여타 차량에 비해 알루미늄 차체는 큰 이득이 된다.

유럽이나 일본 등의 선진국에서는 위와 같은 알루미늄 철도차량의 장점으로 인해 고속전철과 통근형 전동차의 60% 이상을 대형 알루미늄 압출재를 적용한 철도차량으로 대체하여 실 노선에 투입하고 있다. 그런데, 국내에서는 1990년대에 들어서 고강도 스텐레스 강판

(SUS301L)을 적용한 전동차 및 객차를 개발하여 지하철 및 각종 노선에서 실용화시킨 실적이 있으나, 알루미늄 철도차량은 차체의 설계 및 제작 기술의 미비, 대형 압출재 생산을 위한 기반시설 및 기술이 갖추어지지 않아, 기타 수송 수단에 비해 다소 늦은 1990년대 중반부터 개발되기 시작하였다. 1994년부터 정부의 공업기반기술개발사업 지원하에 철도차량 제작3사와 알루미늄 압출소재 업체가 공동으로 알루미늄 철도차량 차체 개발을 시작하여 1997년 알루미늄 철도차량 차체를 성공적으로 개발하였다<sup>1)</sup>. 이후 정부의 전동차 표준화 사업을 통해 Fig. 1과 같은 알루미늄 차체를 채택한 통근형 지하철 전동차가 개발되어 성공적인 시운전을 완료하였다<sup>2)</sup>. 또한 G7 한국형 고속전철기술개발사업을 통해 알루미늄 고속전철이 성공적으로 제작되었고(Fig. 2 참조)<sup>3)</sup>, 이러한 기술 축적을 기반으로 최초의 상용 알루미늄 철도차량 차체가 광주시 지하철 전동차에 채택되었다. 본 보고에서는 일련의 개발 과정을 통해 얻어진 알루미늄 철도차량 차체의 제작과 관련한 소재 생산 및 용접, 제작 기술에 대해 소개하고자 한다.

### 2. 철도차량용 대형 알루미늄 압출재

철도차량은 Fig. 3와 같이 균일 단면의 차체가 연속



Fig. 1 Aluminum carbody of standard urban transit unit



Fig. 2 Korea High Speed Train made of aluminum alloys

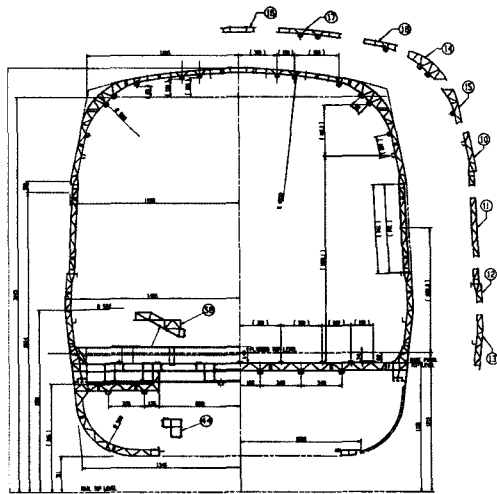


Fig. 3 Section view of aluminum high speed train

되므로 압출재를 적용하기에 유리한 구조이다. 차체 제작비용의 감소를 위해서는 대형 알루미늄 압출재의 적용이 필요한데, 압출재의 대형화를 위해서는 압출성이 우수한 알루미늄 소재와 대형 압출을 위한 프레스가 필요하다. 철도차량 차체용 대형 압출재의 재질은 압출성과 고강도, 용접성이 확보되어야 하므로, A6N01과 A6005A가 주로 사용되고 있다. A6N01은 일본에서 개발한 합금으로서 신간선과 전동차의 차체에 적용되며, A6005A는 유럽에서 개발된 합금으로서 독일 ICE 등에 적용된다. 압출재의 적용이 곤란한 전두부 등에서는 5000계열의 A5083 판재가 사용되고, 일부 고강도가 필요한 부분에는 석출경화형의 고강도인 A7003이 적용된다. 국내에서는 우수한 고강도와 압출성, 기술 제휴의 편리성 등의 관점에서 A6005A 합금을 기본으로 철도차량용 대형 알루미늄 압출재를 개발하였다. A6005A는 압출재를 그대로 사용하기에는 강도가 부족하므로 T6의 용체화 처리를 하게 된다. 대형 A6005A 압출재를 생산하는 과정은 Fig. 4과 같다.

먼저 시험용 용해·주조 설비를 이용하여 A6005A의 빌렛(billet)을 주조한 후에, 580°C 이하의 온도에서

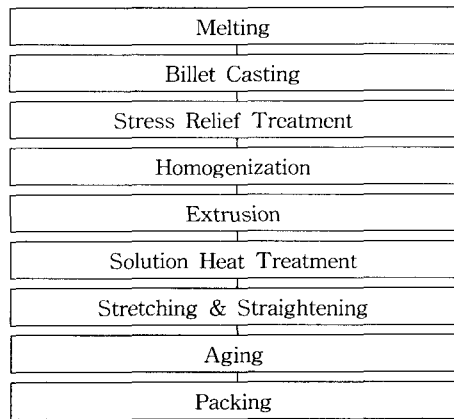


Fig. 4 Process to produce aluminum extrusion profiles

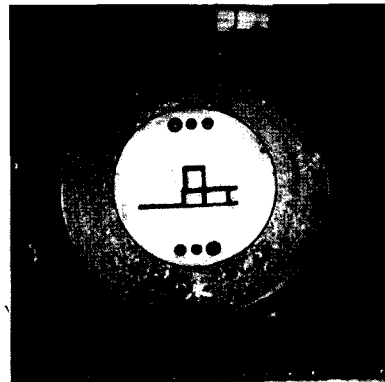


Fig. 5 Die for aluminum extrusion profile

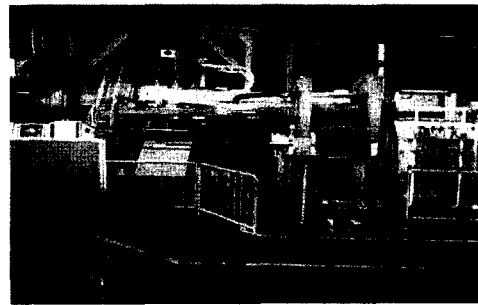


Fig. 6 Large press

14시간 이상 균질처리(homogenization)을 실시한다. 주조 및 균질처리가 완료된 빌렛은 압출기의 컨테이너 내부에 넣어져 램(ram)을 통해 압력을 받고 Fig. 5와 같은 금형을 통과하면서 압출형태로 바뀌게 된다. 단면 형상에 따라 압출에 소요되는 힘이 달라지므로 프레스가 달리 사용되는데, 단면폭이 350mm 이상되는 압출재는 Fig. 6와 같은 대형 프레스를 통해 압출된다. 현재 사용되는 대형 프레스는 최대 폭 600mm 깊이 85mm의 단면까지 압출이 가능하다<sup>1)</sup>. 금형을 통과하여 나온 압출재는 냉각매체를 이용하여 담금질(quenching) 처리하고, 스트레칭 작업을 통해 뒤틀림을 교정한다.

이후, 에이징 퍼니스에서 175~177(°C)로 8~9시간 정도 유지한 후 공냉시킴으로 인공시효경화처리를 실시하고 최종제품을 얻게 된다.

압출재 형상은 크게 솔리드(solid) 단면과 중공(hollow) 단면으로 나누어 볼 수 있는데, 중공 단면은 금형 내부에서 접합이 이루어지므로 접합부의 강도에 유의해야 한다.

### 3. 알루미늄 압출재 용접 방법

#### 3.1 가스메탈아크(Gas Metal Arc Welding) 자동 용접

철도차량은 단면이 균일하다는 특성이 있으므로 알루미늄 차체의 용접은 직선 용접이 주류를 이루고 있다. 알루미늄 압출재의 직선 용접은 자동화가 용이하므로 적절한 지그를 활용한 가스메탈아크(GMAW) 자동 용접이 차체 제작에 주로 적용되고 있다. 자유로운 압출재 단면 설계의 장점을 활용하여 용접부는 편면 일층 자동 용접이 가능하도록 용접부를 설계할 수 있다. 용입불량을 방지하기 위해 용접부의 개섩각을 충분히 크게 하고, 루트부의 두께를 감소시켜 완전 용입이 가능하도록 설계한다. 또한 GMAW 용접 시 용접부의 과도한 용융에 따른 용락을 방지하기 위해 용접부 뒷면에 백스트립(back strip)을 일체형으로 설계한다. Fig. 7은 대표적인 용접부의 형상이다.

자동용접을 위한 간단한 용접장치는 Fig. 8과 같이

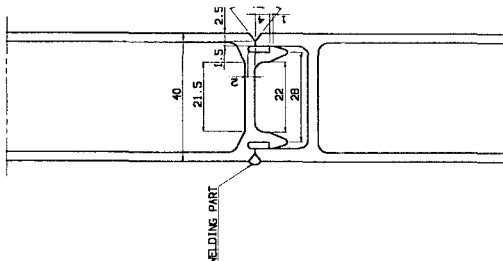


Fig. 7 Typical welding joint of aluminum extrusion profile



Fig. 8 Gantry typed automatic welding machine

캔트리형의 대차에 용접토치와 와이어 이송기구를 장착하고 레일 위를 정속도로 주행하는 것이다<sup>4)</sup>. 용접토치는 전방의 가이드 롤러를 따라서 자동으로 용접선을 추적하게 된다.

정밀한 용접선 추적을 위해 레이저 센서를 이용한 자동 용접 장치도 개발되어 적용되고 있다. Fig. 9은 현재 상용 알루미늄 철도차량 차체를 제작하기 위해 사용하고 있는 자동 용접 장치와 관련 지그이다. 홈을 센서로 인식하면서 토치가 진행함과 동시에 토치의 좌우 위빙(weaving)기능도 구현할 수 있다. 철도차량 차체 외판의 경우 압출재의 두께가 통상 2.5 mm ~ 4 mm 정도로서, 박판이라고 할 수 있는데, 두께가 얇아질수록 양호한 용접을 위해 펄스형(pulsed) GMAW로 용접하게 된다. 인버터 용접기내에 펄스 기능이 내장되어 선택 가능하게 된다.

#### 3.2 가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding)

철도차량 차체 제작 시에 자동 용접이 곤란하고 수동 GMAW를 적용하기에는 판두께나 기타 형상에 의해 어려움이 있을 때, 가스텅스텐아크(GTAW) 용접 방법을 적용한다. 특히 모서리 부분의 필렛 용접부에 유용하게 적용되고, 형재나 판재의 열변형을 유발하기 위해서도 적용된다.

### 4. 알루미늄 용접부의 특성

알루미늄 합금은 열처리계 합금과 비열처리계 합금으로 나눌 수 있다. 열처리계 합금의 경우 용접에 의해 투입된 열에 의해 열처리의 효과가 소멸됨으로 강도의 저하가 심각하게 된다. 열처리계 합금인 A6005A T6 압출재 용접부 시편에 대한 인장 강도 시험 결과는 Fig. 10과 같다.

열처리계 합금의 경우 용접부에서 30% 이상의 강도

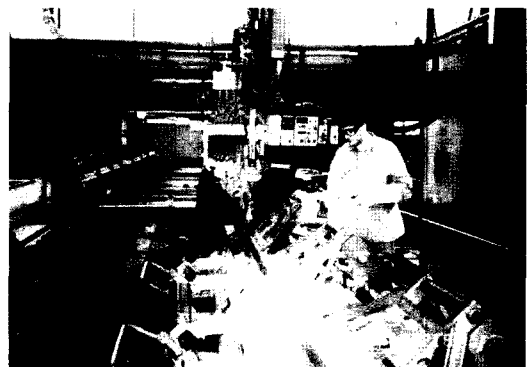


Fig. 9 Jig and machine for automatic welding

저하가 나타나므로, 강도 저하를 보상하기 위해 용접부의 두께를 증가시키는 것이 필요하다. 비열처리계 합금인 A5083 H112의 경우 Table 1에서 보듯이 용접부의 강도 저하가 발생하지만 열처리계 합금에 비해 그 정도가 심각하지는 않다.

알루미늄 합금은 고온 용융 상태와 상온에서의 수소 용해도 차이에 의해 용접 후 냉각 상태에서 용해되지 못한 수소 가스가 Fig. 11과 같이 기공을 형성하게 된다. 또한 알루미늄 합금은 고온에서 입계에 존재하는 액막이 결정립의 냉각에 따른 수축력을 견디지 못해서 Fig. 12와 같이 고온균열이 발생하게 된다. 기공과 고온균열은 알루미늄 합금의 용접부에서 발생하는 대표적인 결함이라 할 수 있다.

5. 알루미늄 압출재 용접 시의 변형

알루미늄 합금은 강재에 비해 선팽창계수가 3배이고, 인장강도는 1/2수준이므로, 용접 시 투입 열에 의한 불균일한 팽창 수축에 의해 변형이 형성된다. 알루미늄 압출재의 용접 시에 발생하는 대표적인 변형은 Fig. 13 및 Fig. 14과 같은 회전변형(rotational deformation)과 Fig. 15 같은 각변형을 들 수 있다. Fig. 13의 회전변형은 용접선을 중심으로 투입된 열에 의해 면내(in plane)에서 온도구배(temperature gradient)가 발생하고, 불균일한 팽창에 의해 회전 변형이 발생하여 루트 간격(root gap)을 크게 하므로 용접을 불가능하게 만든다. 또한 Fig. 14의 면외(out-of-plane) 각변형(angular deformation)은 상면 용접부의 수축력에 의해 생성된 초기 면외 변형이 하면(下面) 용접 이후에도 회복되지 못하고 잔류하는 것이다. 면외 변형은 공차를 유발하여 제작 시 인접 블록과의 조립을 곤란하게 만들고, 정확한 차체 단면 형성을 저해하며, 전장품 취부 및 배관 작업 상의 문제를 유발하게 된다. 따라서 변형 방지를 위한 대책이 필요하다.

6. 변형 억제를 위한 지그 설비

회전변형과 면외변형을 억제할 수 있는 실용적인 방

법은 적절한 구속 지그의 사용이라 할 수 있다. 루트부를 본용접전에 가접(tack welding)하여 회전변형을 억제할 수 있으나, 가접은 용접결함의 원인이 될 수 있으므로 피하는 것이 좋다. 회전변형 억제를 위한 지그는

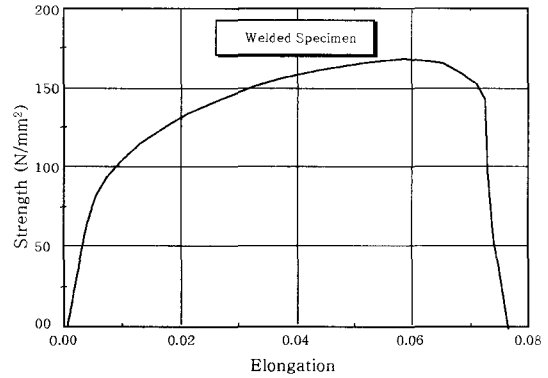


Fig. 10 Tensile strength of welded joint of aluminum alloy A6005A T6



Fig. 11 Porosities of aluminum welded joint



Fig. 12 Hot cracks of welded joint

Table 1 Mechanical properties of typical aluminum alloys<sup>5)</sup>

Material	Tensile strength(MPa)		Yield stress(MPa)		Elongation(%)
	Base metal	Weld joint	Base metal	Weld joint	
A6005A T6	260	165	215	115	8
A5083 H112	275	247	125	110	12

Fig. 16과 같이 사각형의 지그 내에 차체의 하부 구조물인 언더프레임을 위치시키고, 좌우 양단에서 봉을 통해 내측으로 힘을 가하여 용접 시에 생성되는 회전변형에 의한 루트간격 변화를 구속한다.

면외변형을 억제하기 위해서는 Fig. 17과 같은 클램프(clamp)나 Fig. 9에서 보여주고 있는 상부 암(arm)에 의한 상방향 변형을 구속하는 지그가 효과적이지만, 차체 언더프레임(underframe)이나 사이드프

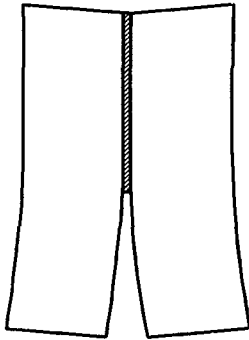


Fig. 13 Opening of root gap due to rotational deformation

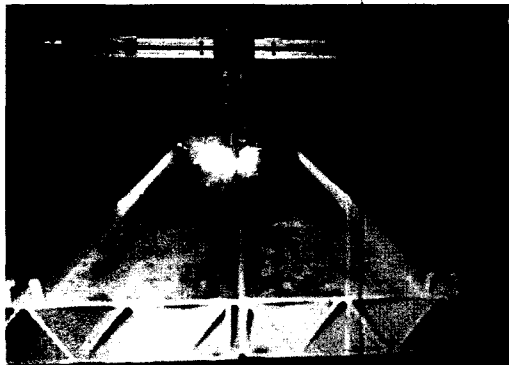


Fig. 14 Rotational deformation during welding

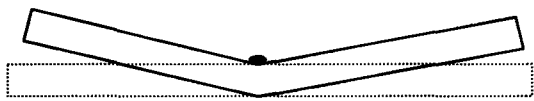


Fig. 15 Out-of-plane deformation after welding



Fig. 16 Jig to restrain rotational deformation



Fig. 17 Clamp to restrain out-of-plane deformation

레임(side frame)과 같이 폭이 큰 구조물의 경우에는 암의 길이도 길어지게 되어 구속효과가 저하되어 효과적이지 못하다. 언더프레임의 경우 진공 흡착에 의한 면외 변형 구속 지그가 효과적이므로 실제 차체 제작 시에 사용되고 있다.

### 7. 용접부 결함 방지를 위한 작업 대책

용접부의 기공을 방지하기 위해서는 수소원의 차단이 중요한데, 모재 또는 용접 와이어 표면의 수분이나 불순물을 제거하는 것이 중요하다. 용접부 표면에 존재하는 산화막은 모재의 용융 온도 이상이므로 원활한 용융 용접을 저해하는 요인이므로 사전 제거가 필요하다. 불활성 가스용접 직류 역극성은 청정작용(cleaning action)이 있으므로 산화막 제거에 유용하지만 적절한 용접부 품질을 위해서는 산화막 제거와 함께 용접부 표면의 수분 또는 먼지나 기름기와 같은 불순물 제거를 위해 와이어 브러쉬에 의한 용접부 표면 청소 작업을 실시한다. 표면 청소 작업 이후 8시간 이상 경과할 시에는 산화막이 다시 형성되므로 재작업이 필요하다. 용접 와이어는 작업 직전에 개봉한 것을 사용하고 개봉후 4시간 이상 경과된 경우에는 표면 수분 제거를 위해 용접 건조로에서 재건조후 사용하여야 한다. 불활성 가스의 순도도 용접부 품질에 영향을 미친다. 99.99% 이상의 순도를 가진 아르곤 가스를 사용하여야 하며, 공장 내에서관을 통해 공급되는 불활성 가스에는 전달 과정에서 수분이나 기타 불순물이 함유될 가능성이 많으므로 가급적 피하고 개별적인 병에서 공급받는 것이 유리하다. 실내 작업장에서 아르곤 가스의 정상적인 흐름을 저해할 수 있는 과도한 풍향을 방지하고, 먼지와 습도 조절에도 유의해야 한다.

고온균열은 용접 와이어의 선경과 깊은 관련이 있다. E5356 와이어는 용접성과 강도가 우수하여 6000계열과 7000계열의 구조물 용접 시에 널리 적용되는 용접

와이어이나, E4043 와이어에 비해 고온균열이 발생하  
는 빈도가 높은 편이다. 따라서 고온균열 방지 측면에  
서는 E4043 와이어의 사용이 필요하다.

### 8. 차체 제작 시의 유의 사항

알루미늄 철도차량 차체는 외관의 미려함을 위해 차  
체 표면의 비드를 제거하게 된다. 비드는 덧살을 형성  
하여 강도 증가에 기여하는 측면이 있는데, 비드가 제  
거될 시에는 강도 저하에 의해 파손의 우려가 있다.  
Fig. 18은 알루미늄 전동차 차체의 창문 프레임의 용  
접부에 표면 비드를 제거하고 하중 시험을 실시한 후에  
발생한 균열이다<sup>6)</sup>. 특히 완전 용입이 되지 않은 용접부  
에서 비드가 제거된 경우에는 루트부에서 균열이 바로  
진전하여 용접부 파괴에 이를 수 있으므로 주의하여야  
한다.

### 9. 마찰교반용접(Friction Stir Welding)

마찰교반 용접은 1990년대 이후 영국에서 개발되어  
적용 범위를 넓혀 가는 용접 방법이다. 마찰교반용접은  
Fig. 19과 같이 비소모식 회전 툴(tool)이 접합 모재  
에 삽입되어 회전하면서 마찰열을 발생시켜 모재의 변  
형 저항을 낮추어 연화시키기에 충분한 온도로 가열한  
후, 기계적인 힘에 따라 툴이 이동하면서 가열 부분을  
앞부분에서 뒤쪽으로 압출되게 하여 마찰열과 기계적

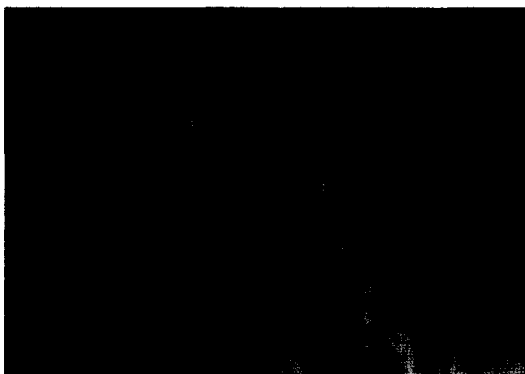


Fig. 18 Crack on frame joint

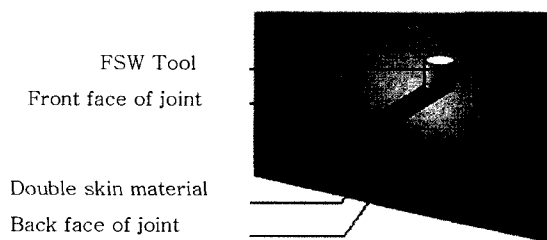


Fig. 19 Friction stir welding process to join aluminum extrusion profiles

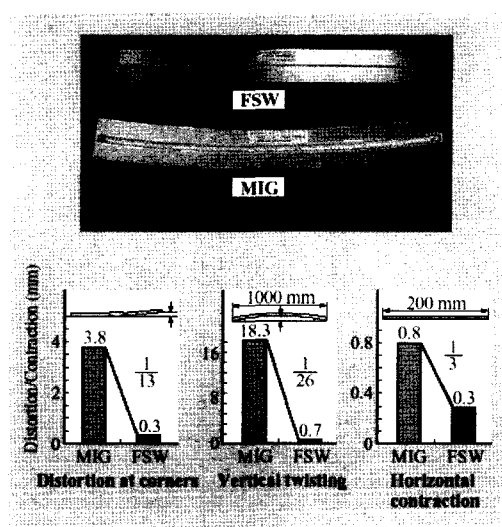


Fig. 20 Welding deformation in FSW & GMAW (MIG) welding

가공의 조합으로 고상접합부가 만들어지게 하는 접합  
방법이다.

마찰교반용접은 불활성 가스 용접과는 달리 차폐 가  
스를 필요로 하지 않고, 용가제도 요구되지 않는다. 또  
한 용접 중 흠의 발생도 없고 적외선 또는 자외선 등의  
유해 광선도 발생하지 않는 환경 친화적인 접합 방법이  
다. 마찰교반용접은 용융 용접이 아니므로 기공이나 고  
온균열 등의 용접 결함이 없고, 기계적인 접합이므로  
입열량이 적어 변형이 극도로 감소된다. Fig. 20은 마  
찰교반용접과 불활성 가스용접과의 발생 변형량을 비교  
한 그림이다<sup>7)</sup>.

마찰교반용접 시 교반에 의해 알루미늄 합금의 조직  
이 미세화되는 경향이 있어서 충격강도나 피로강도가  
증가되는 특성이 있다. 그러나 마찰교반용접 후에는  
용접부의 단부에 툴(tool) 돌기부의 구멍이 남게 되어  
End Tab을 제품의 바깥에 붙일 필요가 있으며, 비소  
모식 환봉인 툴을 이용하므로 덧살을 형성할 수 없는  
문제가 있으며, 필렛 용접은 원리적으로 불가능하게  
된다.

### 10. 마찰교반용접의 철도차량에의 적용

마찰교반용접을 철도차량 분야에서 가장 먼저 적용하  
여 실용화한 곳은 일본의 차량제작사이다. 히타치사는  
마찰교반용접의 장점을 살려서 Fig. 21과 같은 자기-  
지지 방식의 내장판넬 모듈(self-supporting interior  
panel module)을 적용한 A-Train을 개발하였다<sup>7)</sup>.  
A-Train은 마찰교반용접을 이용하여 제작된 변형이 최  
소화된 정밀 이중 구조(double skin)의 차체 내부에

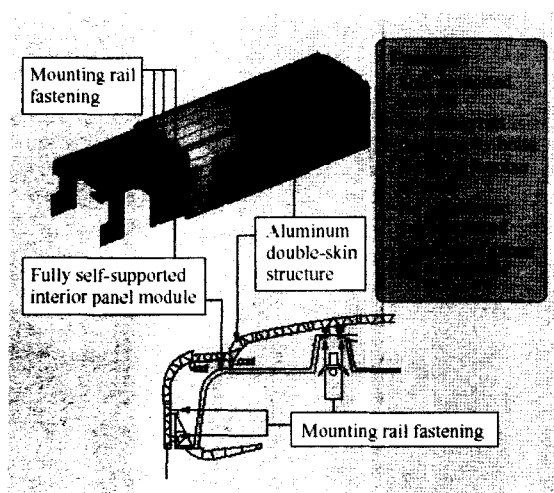


Fig. 21 Basic configuration of A-Train

자기-지지 방식의 모듈화된 내장 구조를 최소한의 볼트를 사용하여 삽입 체결한 차량으로써, Life-Cycle Cost가 감소되고 재활용성이 대폭 향상되는 특성이 있다.

히타치는 마찰교반용접을 이용하여 차체 언더프레임의 일면 용접이 가능하도록 이음부 설계 기술을 개발하여 7000계 신간선에 적용하였고, 실제 광폭 판넬을 제작하였다.

## 11. 결 론

알루미늄 차체는 경량화 및 제작의 편의성, 내구성, 재활용성 등의 측면에서 장점이 많으므로 철도차량 분야에서 활발히 적용되고 있다. 많은 장점에도 불구하고 국내 철도차량 분야에서 알루미늄 차체의 적용은 선진국에 비해 상당히 뒤떨어진 상태였으나, 독자 기술로 알루미늄 철도차량 기술이 개발되어 실용화되었다. 본

보고에서는 국내에서 최초로 알루미늄 철도차량 차체를 개발하는 과정에서 축적된 기술을 소개하였으며, 선진국에서 새롭게 개발하여 실용화하고 있는 차체 제작을 위한 신기술도 소개하였다. 알루미늄 차체의 제작을 위해 선행되어야 할 대형 알루미늄 압출재 생산 기술을 소개하였으며 차체 용접부 설계 방법, 용접 자동화 설비, 용접 결함 및 대책, 제작 과정의 변형 및 대책 등에 관하여 기술하였으며, 최근 일본에서 실용화한 마찰교반용접을 이용한 알루미늄 차체 제작 방법에 대해서도 소개하였다. 소재 기술부터 설계 및 생산 기술까지 국내 자체 기술로 개발된 알루미늄 철도차량은 상용화되고 있으며, 강력한 경쟁력을 바탕으로 국내외 시장 개척 및 점유에 크게 기여할 것으로 전망된다.

## 참 고 문 헌

1. 서승일, 박일철, 김진태, 이동현, 신돈수 : 알루미늄 철도차량 차체 설계 및 대형 알루미늄 압출재 생산 기술 개발, 한국철도학회지, 2-1 (1999), 1-15
2. 서승일, 최성호, 임영호, 이정수 : 표준화된 알루미늄 전동차의 개발, 한국철도학회지, 2-3 (1999), 54-60
3. 한국철도기술연구원 : 고속전철기술개발사업 기술자료집, 선도기술개발사업보고서 (2003)
4. 서승일, 박일철, 김진태, 이동현, 신돈수 : 알루미늄 철도차량 차체 제작 및 도장 기술 개발, 한국철도학회지, 2-2 (1999), 1-5
5. Deutsche Ind. Norm : Wrought Aluminium and Aluminium Extruded Sections, Part 1, DIN 1748, (1983)
6. 서승일 : 알루미늄 철도차량 차체의 손상 방지 설계를 위한 연구, 한국철도학회지, 5-3 (2002), 181-186
7. H.Ohaba, C.Ueda and K.Agatsuma : Innovative Vehicle - the A-train, Hitachi Review, 50-4 (2001), 130-133



- 서승일(徐承佚)
- 1962년생
- 한국철도기술연구원 고속철도사업단
- 용접구조물 설계 및 생산, 신뢰성평가
- e-mail : siseo@krri.re.kr