

# 차세대 분산형 고속전철용 압출재 알루미늄 합금의 마찰교반접합 Friction Stir Welding in Extrusion Aluminum Carbody of HEMU-400X (Highspeed EMU-400km/h eXperiment)

장웅성\*    천창근\*\*    김홍주\*\*\*    박인규\*\*\*\*    백진성\*\*\*\*\*    노양환\*\*\*\*\*  
W.S Chang\*    C.K Chun\*\*    H.J Kim\*\*\*    L.G Park\*\*\*\*    J.S Paik\*\*\*\*\*    Y.H Ro\*\*\*\*\*

## ABSTRACT

Since its invention at TWI in 1991, Friction Stir Welding (FSW) has become a major joining process in the aerospace, railway and ship building industries especially in the fabrication of aluminium alloys. In an attempt to optimize the friction stir welding process of Al alloys for extrusion Aluminium carbody of HEMU-400X (Extrusion Aluminum 6xxx series), effects of joining parameters such as tool rotating speed, plunging depth and dwelling time on the weld joints properties were evaluated. Experimental tests were carried out for butt joined Al plates. A wide range of joining conditions could be applied to join Al alloys for Extrusion Aluminum 6xxx series without defects in the weld zone except for certain welding conditions with an insufficient heat input. The microstructures of welds have dynamic-recrystallized grain similar to stir zone in FSW weld. For sound joints without defects, at the rotation speed of 700 rpm with different welding speeds, the tensile strengths of the Stir Zone(SZ) were almost the same, 80% of those of the base metal. (JIS Z 2201)

## 1. 서 론

철도차량의 차체를 제조하는 재료는 일반강, 스테인레스강, 알루미늄 합금 3가지 재료가 주로 사용되고 있으나 최근 에너지 절감에 대한 요구가 높아짐에 따라 다른 수송수단과 더불어 철도차량의 차체 제조에도 경량합금인 알루미늄 합금의 사용 비율이 점점 높아지고 있는 추세이다.<sup>4)</sup> 알루미늄 합금은 중량 저감이나 내부식성 향상, 높은 회수율과 같은 장점이 있는 반면에 제조 원가의 상승 때문에 그동안 적극적인 사용이 주저되어 왔다. 하지만 알루미늄 압출이 가능한 이후부터 가공이나 용접에 대한 제작 공정의 단축 효과가 있어 신규 제조하는 차량에는 거의 모두 알루미늄 합금으로 제작하고 있다. 현재 국내 철도차량에 적용되는 알루미늄 차체 구조는 single skin에서 double skin으로 전환되고 있으며, 사용되는 소재 종류로는 압출재 A6005, 압출재 적용이 곤란한 전두부 등에는 A5083 판재를 사용하고 있다. A6005 합금은 압출성이 우수하나 강도가 떨어지기 때문에 T6의 열처리를 실시한다. 따라서 열처리 후 강도가 높아진 압출재를 MIG(metal inert gas) 용접과 같은 용융 용접을 실시할 경우

\* 포항산업과학연구원(Rist) 용접센터 수석연구원

\*\* 포항산업과학연구원(Rist) 용접센터 책임연구원

\*\*\* 포항산업과학연구원(Rist) 용접센터 선임연구원

\*\*\*\* 현대로템(주) 기술연구소 선행제품개발팀 책임연구원

\*\*\*\*\* 현대로템(주) 기술연구소 선행제품개발팀 주임연구원

\*\*\*\*\* 코레일 기술본부 차량기술단 고속차량개발팀 차장

E-mail : jspaik@hyundai-rottem.co.kr

TEL : (031)460-1940, FAX : (031)460-1787

열처리 효과의 소멸과 결합 때문에 항복강도 및 인장강도가 모재 강도에 비하여 약 40% 떨어지는 단점이 있어 강도저하를 보상하기 위하여 사전에 용접부 두께를 증가하여 구조 설계에 반영하고 있다.<sup>1)~2)</sup>

한편 이러한 용융 용접 시 발생하는 문제점을 획기적으로 극복 할 수 있는 접합가공기술인 마찰교반접합(Friciton Stir Welding ; FSW)이 1991년 영국의 TWI에 의해 개발되었다. 이 기술은 별도의 회전 tool을 부재의 맞대기면을 따라서 이동함으로써 마찰열과 소성유동 현상을 이용하여 고체상태에서 접합하는 방법이다.<sup>3)</sup> 마찰교반접합은 고상접합이므로 용융용접에서 발생하는 변형, 내부 기공, 강도저하 등 여러 가지 문제점을 해결할 수 있는 장점이 있어 급속히 보급되고 있다. 따라서 본 논문에서는 차세대 분산형 고속전철의 차체의 제조에 주로 사용될 알루미늄 압출재 A6005 소재에 대한 마찰교반접합을 적용하여 접합부 미세조직 관찰, 접합공정인자 변화에 따른 기계적 특성 평가 등을 실시하고자 한다.

## 2. 사용재료 및 실험 방법

실험에 사용된 알루미늄 소재는 A6005 압출재에 T6의 열처리를 실시하였으며 재료 두께는 2.8mm, 길이 200mm, 너비 95mm로 가공하여 마찰교반접합을 실시하였다. Table 1은 소재의 화학적 조성과 기계적 특성을 나타낸다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of A6005

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
%	0.78	0.13	0.01	0.16	0.5	0.1	0.03	0.02	Remainder
A6005A T6	Tensile Strength (MPa)			Yield Strength(MPa)			Elongation(%)		
	260			215			8		

마찰교반접합을 실시할 때 접합성에 영향을 미치는 접합 공정인자는 톨의 크기와 형상, 톨의 회전속도, 접합속도, 전진각 등이다. 본 실험에 사용된 톨의 사양은 솔더 직경 15mm, 핀 직경 4mm, 핀 길이 2.55mm이며 전진각은 3°로 고정하였다. 톨의 삽입깊이는 완전 용입이 되도록 모재 두께의 90%이상을 삽입하였으며 회전속도는 1800rpm으로 고정하고 접합속도를 300mm/min, 700mm/min, 1000mm/min, 1300mm/min으로 변화시키면서 실시하였다. 접합 후 접합부의 미세조직은 광학현미경을 사용하여 관찰하였으며 기계적 성질은 경도시험과 인장시험을 실시하여 접합부를 평가하였다. 인장시험편은 Fig. 1에 서와 같이 JIS Z 2201에 따라 가공하였으며 접합부의 표면비드 연마 없이 시험하였다.

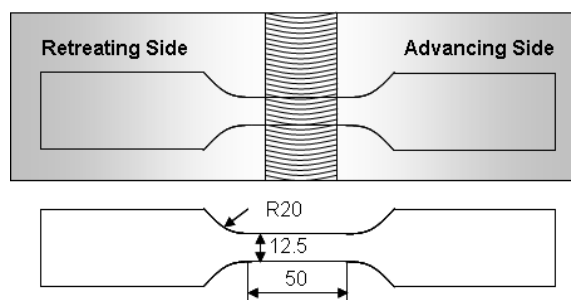


Fig. 1 인장시험시편(JIS Z 2201)  
- 981 -

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 접합부 조직

Fig. 2는 마찰교반접합 후 접합면의 표면비드형상을 나타내는 것으로 표면비드형상은 아크 용접에 비하여 편평함고 동시에 미려하다. 그러나 접합 조건에 따라 버르(burr)의 양이 다르다는 것을 알 수 있으며 접합속도가 느릴수록 버르가 적게 관찰되며 이는 접합면에 틀 유지시간이 길어짐에 따라 충분한 입열량이 제공되어 재료가 연화되고 내부에 충분한 교반 현상이 일어난 것으로 사료된다.


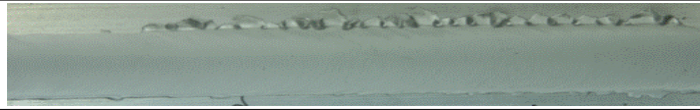


접합면 표면비드 형상	접합 조건
	1800rpm, 300mm/min
	1800rpm, 700mm/min
	1800rpm, 1000mm/min
	1800rpm, 1300mm/min

Fig. 2 접합면 표면비드형상

Fig. 3은 틀 회전수 1800rpm, 용접속도 700mm/min인 경우 용접부 근방 및 모재의 미세조직을 나타낸다. 접합부 (C)에서는 마찰가열과 기계적 교반에 의한 소성 유동에 의한 동적 재결정영역이 형성되었고, 기계적 교반 영향과 마찰에 의한 열영향을 받는 TMAZ영역에는 국부적인 재결정 영역이 동반된 영역이 형성 되었다. 그리고 이들 주변에 열 영향만을 받은 열영향부(B)가 존재한다. 그리고 접합부 중앙부인 교반(SZ)부에 kissing bond와 유사한 굴곡선이 관찰된다. 이는 A6005의 표면에 남아있던 oxide flim과 구성원소 중 Mg가 소성변형 시 위와 같은 형태로 잔존한 것으로 인장강도에 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 4는 접합속도에 따른 열영향부(HAZ)와 교반부(SZ) 특성을 나타낸다. 접합속도가 증가함에 따라 열영향부(HAZ)가 좁아지고 교반부(SZ)도 열영향부(HAZ) 영역에 가깝게 분포되는 것을 알 수 있다.

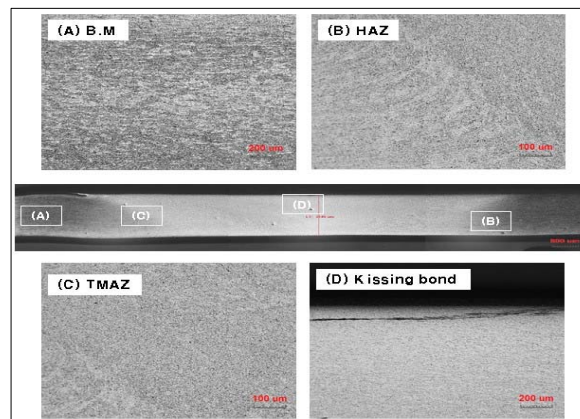


Fig. 3 The optical microstructure of FSW joint (A: base metal, B: HAZ, C: TMAZ, D: Kissing bond)

낮은 접합 속도에서 접합용 틀에 의한 마찰열과 교반이 직접적인 영향을 줌으로서 많은 내부 소성유동과 마찰에 의한 입열이 증가하여 접합부 영역이 조대화되는 것을 알 수 있다. 그리고 특정 접합 조건에서 교반부에 kissing bond와 유사한 굴곡선이 관찰되며 이는 A6005의 표면에 남아있던 Oxide flim과 구성원소 중 Mg가 소성변형 시 위와 같은 형태로 잔존한 것으로 인장강도에 큰 영향을 미치지 않음을 접합부 인장시험을 통해서 알 수 있었다. 그리고 압출재의 각 부위에 따라 동일한 압출 조건에서 제조된 시편임에도 불구하고 부분적으로 상당히 조대한 조직이 관찰되는 부분이 있었다. 이와 같은 표면의 조대한 결정립은 압출된 재료의 특징으로 압출다이와 재료의 마찰열에 의해 발생한 것으로 판단되며 또한 마찰교반접합 시 솔더에서의 고온의 열로 인해 SZ 중심보다는 결정립이 더 성장한 것으로 사료된다. 압출재의 미세조직 차이는 조직의 특성상 최대인장강도가 조대해진 결정립을 가지는 표면이 내부의 미세조직 부분보다 약 20~30Mpa정도 낮게 나타나는데 이는 철도차량용 구조로 사용시 신뢰성에 영향이 있으므로, 보다 균일한 조직을 가지는 압출재를 제조하는 연구가 요구되는 부분이다.

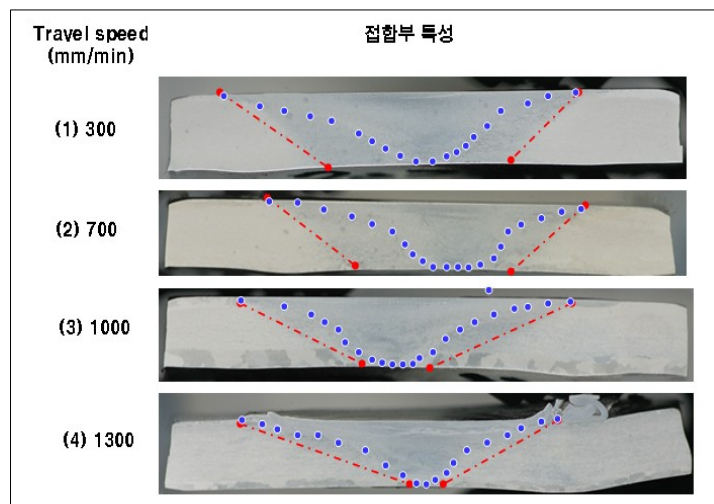


Fig. 4 접합속도에 따른 열영향부(HAZ)와 교반부(SZ) 특성. (Rotating speed: 1800rpm)

### 3.2 접합부 경도분포

접합부의 기계적 특성을 파악하기 위해서 인장강도값이 가장 높게 나타나는 조건인 접합속도 700mm/min일 때의 연속경도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 경도는 상부와 하부로 나누어 측정하였으며 하중은 0.3kgf, dwell time은 10초이다. 접합부 교반영역(SZ)에서의 경도 분포값은 83~93Hv값을 보이며, 이는 마찰교반용접시 틀에 의한 교반작용과 열에 의한 영향으로 교반부는 조직의 재결정과 소성유동이 일어나 미세한 조직을 이루고, 열영향부는 열에 의해 조직에 모재보다 크게 성장함에 교반부(SZ)영역에서 최고 경도값을 보인다. 그리고, 시편의 최상부에서 0.5mm위치에서의 교반부(SZ)의 폭은 약 6.5~7mm, 기계적열영향부(TMAZ)의 폭은 1.5~2.2mm, 열영향부(HAZ) 1.5~2.8mm 이다.

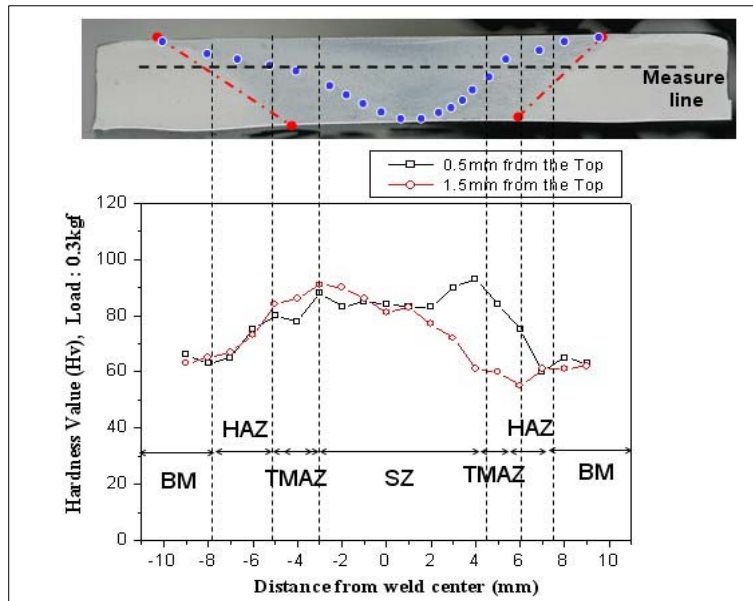


Fig. 5 접합단면의 경도분포

### 3.3 인장 시험

인장시험은 톨의 회전속도를 1800rpm으로 고정하고 접합속도를 300, 700, 1000, 1300mm/min으로 변화시키면서 실험을 하였으며 동일한 접합조건으로 3번씩 실험을 수행하여 정확도를 높이려 하였다. 인장시험 결과 접합속도가 700mm/min일 경우 인장강도 값이 평균 210Mpa 정도로 가장 높게 나타났으며 이는 A6005A-T6의 모재 인장강도 260Mpa의 80%에 해당한다. 기타 조건들의 경우도 모재 인장강도의 70~80% 수준을 나타내고 있어 대단히 우수한 접합강도 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

접합 조건		시편	Tensile strength (Mpa)	인장 시험편 파단 형상
Ratating speed (rpm)	Travel speed (mm/min)			
1800	300	2-1	185	
		2-2	186	
		2-3	186	
	700	1-1	213	
		1-2	206	
		1-3	212	
	1000	4-1	185	
		4-2	186	
		4-3	185	
	1300	3-1	210	
		3-2	203	
		3-3	206	

Fig. 6 조건별 인장강도와 파단형상

인장시험시 파단형상은 1300mm/min의 조건을 제외하고 대부분 열영향부(HAZ)와 열기계적 영향부(TMAZ)에서 연성 파단이 일어났기 때문에 접합 조건이 양호한 것으로 판단된다. 접합속도가 300mm/min, 700mm/min 일 경우 교반부의 표면층 부분과 열기계적영향부 사이에 Kissing bond가 관찰되고 인장시험 시 시작점이 되는 것으로 판단되며 접합속도가 1300mm/min의 경우 교반부 내부에 결함이 관찰되어 그 곳을 중심으로 파단이 일어났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 차세대 분산형 고속전철의 차체에 주로 사용될 알루미늄 차체의 주요 소재인 A6005-T6 압출재에 대하여 마찰교반접합을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) A6005-T6 압출재의 마찰교반접합부에서 마찰가열과 기계적 교반에 의한 소성 유동에 의한 동적 재결정영역이 형성되는 SZ 영역, 기계적 교반 영향과 마찰에 의한 열영향을 받아 국부적으로 재결정 영역이 관찰되는 TMAZ 영역, 이들 주변에 열 영향만을 받은 열영향부(B)가 뚜렷이 존재하는 것을 관찰하였으며 특히 소재의 표면에서 압연재에서 관찰되는 것보다 조대한 결정립이 관찰되어 인장강도에 미소하게 영향을 준 것으로 판단된다.

2) 틀의 회전속도 1800rpm, 접합속도 300~1300mm/min 구간에서 마찰교반접합을 실시하여 접합부 인장강도가 모재 인장강도의 70~80% 정도의 대단히 우수한 인장강도 특성을 얻을 수 있었으며 특히 접합속도 700mm/min에서는 최고 인장강도인 약 210Mpa를 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 관계자 여러분들의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 서승일 (2004년), “알루미늄 철도차량의 용접 기술”, 대한용접학회지, 제22권 제3호, pp.228-234
2. 서승일 (2005년), “알루미늄 철도차량 차체 용접부의 강도 특성에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제23권 제1호, pp.35-40
3. 장웅성 외 3명 (2001년), “Friction Stir Welding의 특징과 적용기술”, 대한용접학회지, 제19권 제6호, pp.575-583
4. Yasutomo ODA 외 3명(2007), “Fatigue Design Diagram for Weld Joints on Aluminum Alloy Railcar Body Shells,” The 10th International Conference on Joints in Aluminum, proceedings, pp.292-297