철도차량용 알루미늄 압출 패널의 마찰교반용접 특성에 관한 연구

A Study on Friction stir welding Properties of Extruded Aluminum Panels for Rolling Stock

박영빈* 구병춘** 구정서***
Park, Young-Bin Goo, Byeong-Choon Koo, Jeong-Seo

ABSTRACT

Extruded aluminium panels have been widely used for railway vehicle structures because of their light specific weight and other merit. In the past, GMAW (Gas Metal Arc Welding) and GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) were mainly used to join aluminium panels. But recently friction stir welding (FSW) is widely used. due to its lots of advantage. In this study aluminium A6005-T6 which are used for car body structures was chosen. The influence of main parameters such as : pin rotating speed, welding speed, shoulder diameter, pin length and tilting angle on mechanical properties was examined. Optical microscope observation, micro hardness test and tensile test were carried out. Tensile strength of the stir welded plates is 74% of that of the base material.

1. 서론

최근 철도차량의 경량화를 목적으로 알루미늄 합금의 차체 적용이 현저하게 증가하고 있으며 이는 철도차량의 고속화와 환경보호, 에너지 및 보수유지비 절감 등에 대한 요구사항에도 부합하고 있다. 국내에서도 알루미늄합금을 사용한 철도차량은 고속전철 및 지하철 차량에 적용되고 있으며 AED(All Extrusion Design)방식으로 분할용접 조립방식을 채택하고 있다. 용접방식으로는 주로 가스메탈아크용접(GMAW)과 가스텅스텐아크용접(GTAW)을 적용하고 있으나, 열 변형이 발생하여 강재에 비해 보다 엄격한 용접조건과 용접설비 및 작업환경조건이 요구되고 있다. 따라서 이에 대한 기술적 단점 및 비용, 환경 등의 문제점이 있어 선진국을 중심으로 비 용융 고상접합 공정인 마찰교반용접(FSW)이 널리 연구 적용되어 지고 있다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 압출 형 A6005-T6는 철도차량의 Floor panel 및 Roof panel 또는 차체의 벽체로 사용되며 A7XXX계열 합금보다 대형 압출성이 우수한 소재로 개발되었고, 525℃ 부근에서 고용화 처리 후 170℃ 부근서 3~15시간 인공시효 한 소재로 두께 4.4mm와 4.6mm를 600X150mm의 크기로 절단하여 마찰교반용접을 시행하였다. Table 1은 A6005-T6의 화학조성과 기계적 특성을 보여주고 있다.

---

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 한국철도공사, 정회원
E-mail : saebi309@naver.com
** 한국철도기술연구원 철도구조연구실
*** 서울산업대학교 철도전문대학원

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of A6005-T6

Chemical composition (weight) (%)										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	others (each)	others (total)	Al
0.6-0.9	0.35	0.1	0.1	0.4-0.6	0.1	0.1	0.1	0.05	0.15	remains

Mechanical properties		
Tensile Strength(Mpa)	Yield Strength(Mpa)	Elongation(%)
260(minimum)	240(minimum)	8.0

2.2 실험방법

마찰교반용접의 기계적 성질에 영향을 미치는 용접변수는 용접속도(Welding speed), 공구회전수(Rotating speed), 공구의 형상, 접합재의 구속조건 등이 있으며, 마찰교반용접 시 용접변수에 따른 용접부의 기계적 성질 및 용접성은 상이한 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 압출 형 A6005-T6 소재에 대해 마찰교반용접 시행 시 용접변수에 따른 기계적 특성 및 용접성과 공구의 최적화를 알기 위해 숄더 직경을 12mm, 핀 직경 4~3mm, 핀 길이 4.39mm및 3.95mm와 숄더 직경 15mm, 핀 직경 4.9~4mm, 핀 길이 3.5mm로 각 각 다르게 적용하였다. 공구 회전수(Rotating speed), 용접속도(Welding speed)등 마찰교반용접 시 주어진 변수는 Table 2와 같다.

Table 2 Friction stir welding condition for A6005-T6

Base metal(mm)	Shoulder dia(mm)	Rotating speed(rpm)	Welding speed(mm/s)	Pin length(mm)	Pin dia(mm)	Tilting angle(°)	Rotating direction (tool / screw thread)
4.4	Φ15	900	5	3.5	4.9~4	2	Right / Left
		900	10				
		1200	5				
		1200	10				
		1600	5				
		1600	10				
		1800	5				
		1800	10				
4.6	Φ12	800	5	4.39	4~3	2	Right / Left
		800	10				
		1000	5				
		1000	10				
		1200	5	3.95			
		1200	7				
		1500	5				
		1500	10				
		1800	15	4.39			
		1800	20				

인장시험에 사용한 시험편의 형상 및 치수는 KS B0801이며 만능재료시험기(YU-1000S Ⅲ)를 사용하였다. 광학현미경시험을 위해 용접부의 시편이 중간에 위치하도록 채취하여 마운팅 한 후 미세 결함과 스크래칭을 제거하기위해 시험편 표면을 연마 페이퍼(#600, #2000)와 1㎛와 0.03㎛ Al_2O_3 연마액을 이용하여 폴리싱 하였고, 부식액은 메탄올 50ml, HNO 20ml, HCl 30ml, HF 1drop을 사용하였다. 경도측정시험은 마이크로비커스 경도계를 사용하였으며 135° 압자를 이용하여 하중 0.1kgf에 시간은 30sec를 적용하였다. 측정간격은 용접부 횡단면의 중심을 1mm 간격으로 숄더 직경보다 넓게 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도시험

Fig.1 는 모재두께 4.6mm에 숄더 직경 12mm, 핀 직경 4~3mm, 핀 길이 4.39mm및 3.95mm를 사용하여 마찰교반용접 한 후 횡단면의 중심을 1mm 간격으로 마이크로 경도계를 이용하여 측정한 경도 분포이며, 동일한 공구회전속도에서 용접속도에 변화를 주었을 때 경도값의 차이를 알 수 있다. 실험결과에 의하면 공구회전속도 800, 1000rpm에 용접속도 5, 10mm/s에서는 경도값의 차이가 미미하였으나, 공구회전속도 1200, 1500, 1800rpm에 용접속도 5, 7, 10, 15, 20mm/s에서는 경도값의 변화가 측정되었고, 전체적으로 동일한 공구회전속도에서 용접속도가 낮을수록 경도값이 다소 높게 측정되었다. 또한 공구회전속도 1500rpm 용접속도 15mm/s에서 가장 높은 경도값 분포가 나타났다.

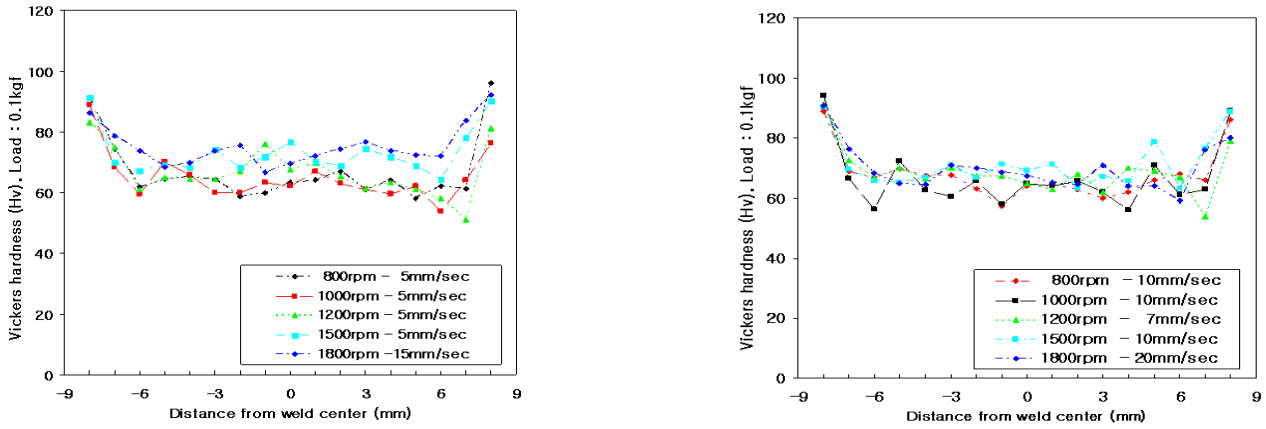

Fig. 1 Hardness distribution as a function of distance from weld center in A6005-T6(vs. rotating speed, welding speed)

Fig.2 은 모재두께 4.4mm에 숄더 직경 15mm, 핀 직경 4.9~4mm, 핀 길이 3.5mm를 사용하여 마찰교반용접 후 경도를 측정한 경도 분포도이며, 동일한 공구회전속도에서 용접속도에 따른 경도값의 차이를 나타내었다. 공구회전속도 900, 1200, 1600rpm에서는 용접속도가 낮을수록 경도값이 높게 측정되었으나, 1800rpm에서는 그 차이가 미미하였다. 열영향부(HAZ)에서는 모재(Base metal)나 교반부(Stir zone) 보다 경도값이 낮게 나타났으며 이는 열 영향에 의한 결정립의 조대화가 원인으로 나타났다. 또한 마찰 교반부(Stir zone)는 공구의 회전속도가 증가함에 따라 경도값의 분포가 낮게 나타났다.

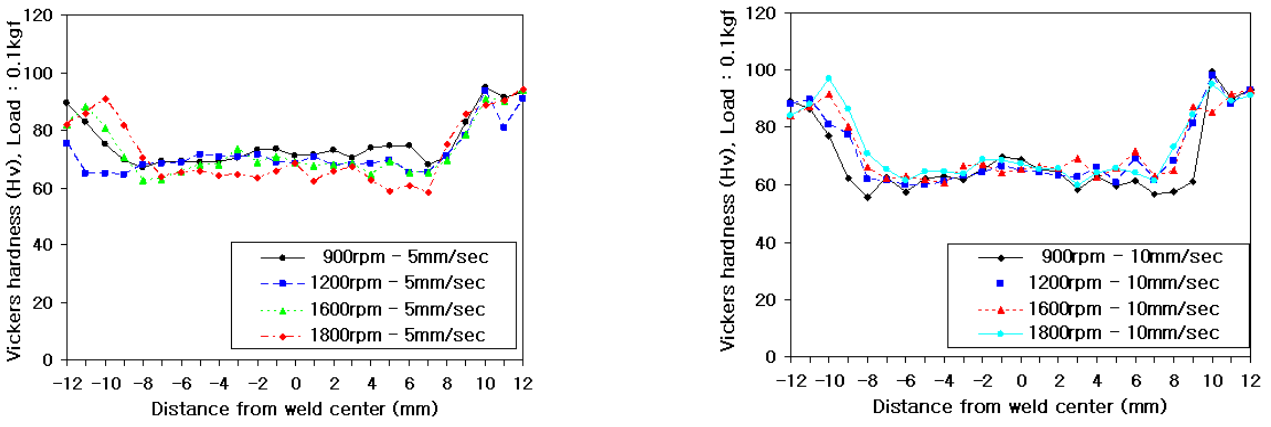

Fig. 2 Hardness distribution as a function of distance from weld center in A6005-T6(vs. rotating speed, welding speed)

3.2 인장시험

본 연구에서 모재의 압출방향(extruded direction)인 종방향(Longitudinal) 시편과 압출방향과 수직인 횡방향(Transverse) 시편을 제작하고, 마찰교반용접 변수에 따른 시편을 각각 제작하여 인장시험을 하였다. 최대 부하하중은 20kN이며 인장시험 초기 변형속도는 0.8mm/min이다. Fig. 3은 모재 두께 4.6mm에 숄더 직경 12mm, 핀 직경 4~3mm, 핀 길이 4.39mm및 3.95mm를 사용하여 공구회전수와 용접속도를 다르게 용접한 후 인장시험 한 결과를 도표로 나타내었다. 시험결과 인장강도는 1500rpm-10mm/s의 용접조건에서 가장 높은 값을 나타냈다. 그러나 전체적인 인장강도 측정치는 모재의 60%이하, 연신율은 모재의 45% 이하로 낮게 측정 되었다. 이는 용접부의 조직관찰결과 교반부족에 의한 결함과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.

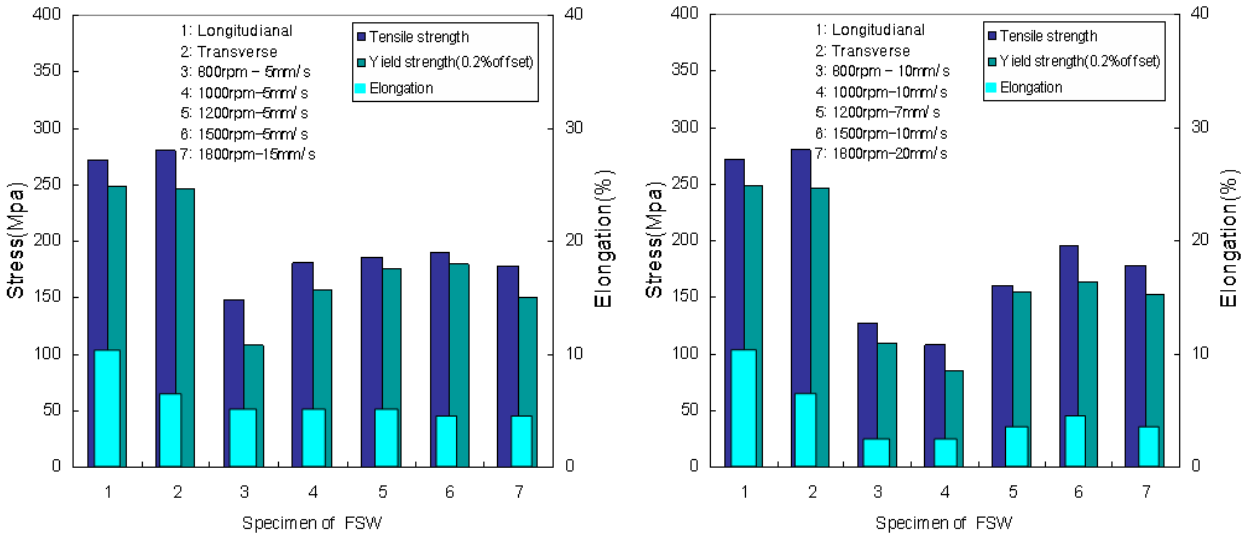

Fig. 3 Comparisons of tensile properties in FSW(Base metal: 4.6mm)

Fig.4 은 모재두께 4.4mm에 숄더 직경 15mm, 핀 직경 4.9~4mm, 핀 길이 3.5mm를 적용하였고 공구회전속도와 용접속도에 변수를 주어 마찰교반용접 한 시험편을 인장시험 한 결과를 도표로 나타내었다. 공구회전속도와 용접속도의 변화에 따른 인장강도의 변화량은 전체적으로 큰 차이가 없었으며, 측정된 인장강도는 모재의 74% 이며, 연신율은 모재의 72%로 측정되었다.

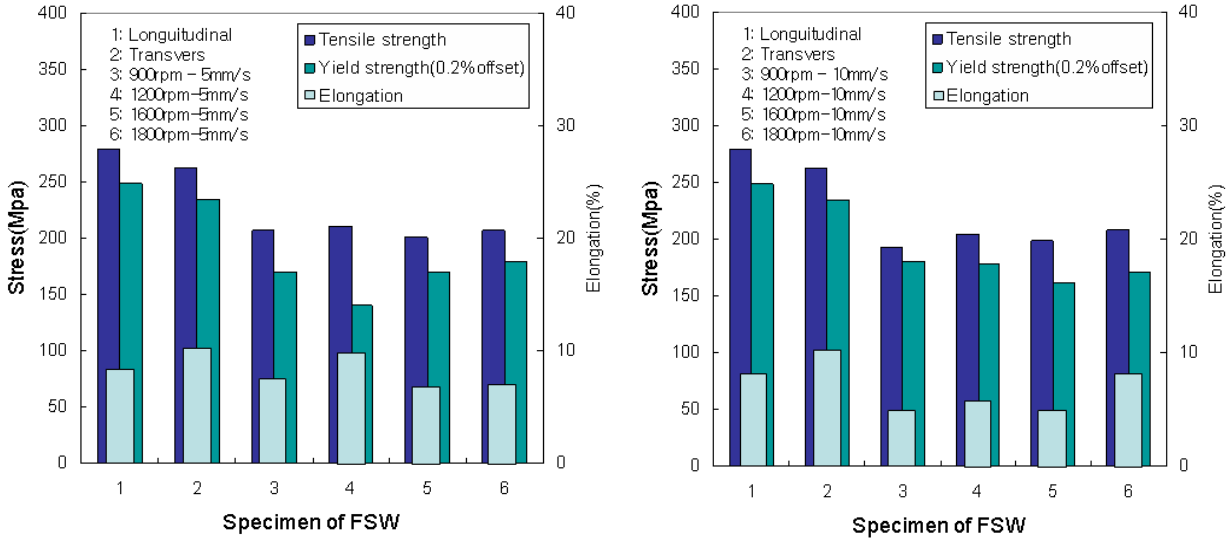

Fig. 4 Comparisons of tensile properties in FSW(Base metal: 4.4mm)

3.3 용접부 조직관찰

A6005-T6의 마찰교반용접부 횡단면의 미세조직은 광학현미경을 통해 관찰하였으며 Fig. 5와 같이 모재부(Base metal), 열기계적영향부(TMAZ), 교반부(SZ), 열영향부(HAZ)로 구별된다. A6005-T6 압출재에서는 마찰교반용접시공구의 회전속도와 용접속도의 변수에 따라 교반부와 인접 지역에 다양한 모양의 변형조직들이 관찰되었으며, 교반부는 Pin의 회전에 의한 소성변형이 일어나 전체적으로 결정립이 미세하고 균일하게 나타났다. 열기계적 영향부에서는 소성변형과 부분적인 재결정 영역이 존재하였으며 공구의 회전속도와 용접속도가 상승됨에 따라 석출물의 분포가 조밀하였다. 열영향부에서는 용접시 발생한 마찰열에 의해 결정립이 조대화 되었으며 조직의 분해와 회복 등이 발생하여 모재와 다른 조직이 형성되었다. 이러한 조직상은 인장시험 시 파단면과 일치하고 있다.

3.4 용접부 결함

Fig. 5의 용접결함 사진은 숄더 직경 12mm, 핀 직경 4~3mm, 핀 길이 4.39mm로 마찰교반용접 한 횡단면의 광학현미경사진(× 100)이다. 800rpm-5mm/s, 800rpm-10mm/s, 1000rpm-10mm/s의 용접범위에서 핀이 이송된 하단부에 대형 Void가 관찰되었으며, 800rpm-10mm/s에서는 마찰교반용접 중 핀이 절손되었다. Fig. 5의 대형 Void는 적정 용접조건보다 낮은 공구회전수와 높은 용접속도에 의해 교반부족으로 발생한 결함으로 Pin하부를 연화된 금속이 미쳐 채우지 못하고 전진하여 발생한 것으로 예측된다. 접합부의 외관은 1200rpm과 1500rpm에서 가장 양호 하였고 결함도 관찰되지 않았다.

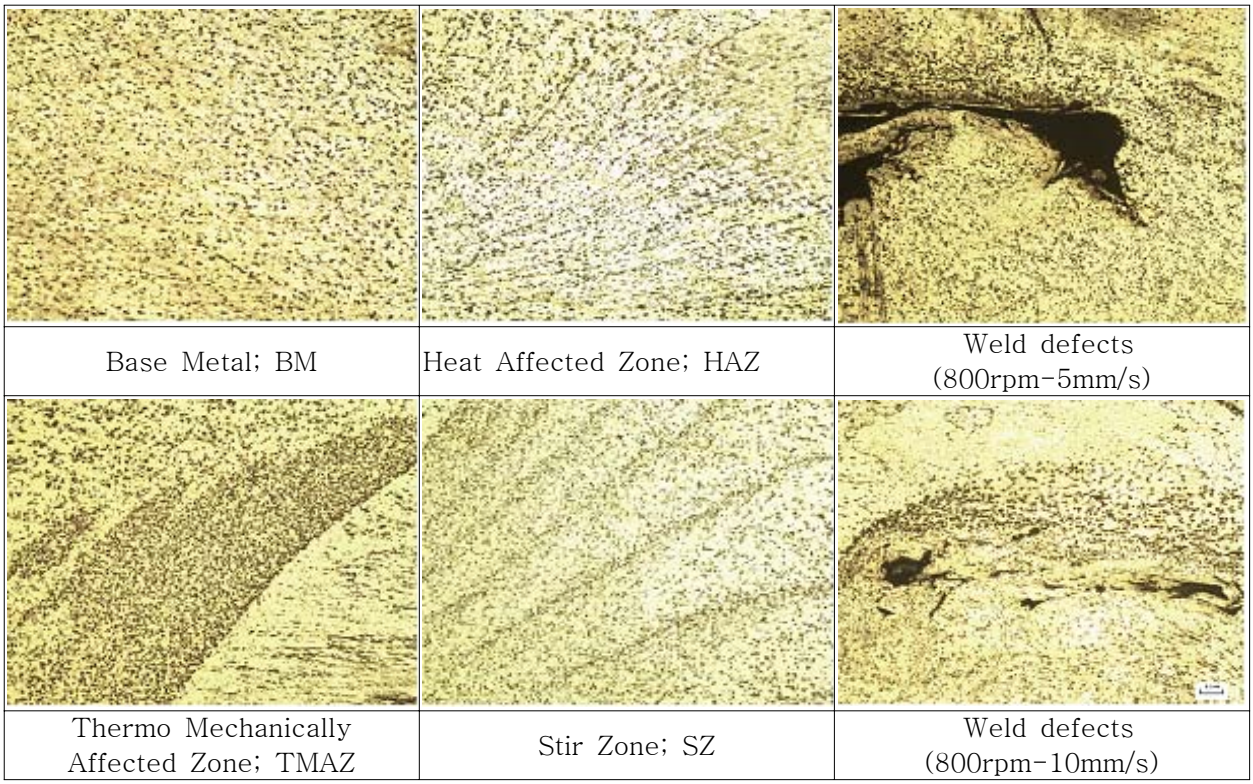

Fig. 5 Cross sectional view of friction stir welded A6005-T6 (×100)

모재두께 4.4mm에 숄더 직경 15mm, 핀 직경 4.9~4mm, 핀 길이 3.5mm를 사용하여 마찰교반용접한 횡단면에서는 상기와 같은 결함이 관찰되지 않았으며 건전한 용접부를 나타내었다. 알루미늄 합금의 마찰교반용접에서 건전한 용접부를 얻기 위한 공구회전수와 용접속도는 A6000계가 다른 알루미늄 합금에 비해 그 범위가 넓은 것으로 보고되고 있다.

4. 결론

철도차량용 압출재 A6005-T6의 마찰교반용접 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 숄더직경 12mm, 핀 직경 4~3mm, 핀 길이 4.39mm로 마찰교반용접 한 시험편의 인장강도는 모재의 60%이하이고, 연신율은 모재의 45%이하로 낮게 측정되었다. 또한 800rpm-5mm/s, 800rpm-10mm/s, 1000rpm-10mm/s의 용접범위에서 핀이 이송된 하단부에 용접결함인 대형 Void가 관찰 되었으며, 800rpm-10mm/s에서는 마찰교반용접 중 핀이 절손되었다. 이는 공구의 형상과 공구의 회전속도 및 용접속도가 용접성에 연관성이 있음을 나타낸다.
2) 숄더직경 15mm, 핀 직경 4.9~4mm, 핀 길이 3.5mm를 적용한 시험편의 인장강도는 모재의 74% 연신율은 모재의 72% 수준으로 숄더 직경 12mm를 적용한 용접조건보다 높게 나타났다.
3) 마찰교반용접부의 경도는 모재에 비해 72% 수준으로 나타났으며, 동일한 공구회전속도에서 용접속도가 낮은 경우 높게 측정되었다. 마찰교반용접부의 열영향부(HAZ)와 열기계적영향부(TMAZ)에서는 모재(Base metal)나 교반부(Stir zone) 보다 경도값이 낮게 나타났으며 이는 열 영향에 의한 결정립의 조대화가 원인으로 나타났다. 또한 숄더 직경 15mm를 적용한 마찰 교반부(Stir zone)는 공구의 회전속도가 증가함에 따라 경도값의 분포가 낮게 나타났다. 따라서 이에 대한 해석은 향후 SEM이나 EDS 실험의 필요성을 나타낸다.
4) 압출재 A6005-T6의 모재부 미세조직은 매우 다양하게 나타났으며, 마찰교반용접된 교반부(Stir Zone)에서는 전체적으로 결정립이 미세하고 균일하게 나타났다. 또한 교반부는 Pin의 회전에 의해 석출물이 고르게 분포되었고 모재와 경계위치에는 석출물의 밀집현상이 나타났다. 열영향부에서는 마찰열에 의한 결정립의 조대화가 관찰되었고 열기계적영향부에서는 소성변형과 부분적인 재결정 영역이 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. 한국과학기술정보연구원(2003, 12) “ 마찰교반용접”
2. 서울대학교 신소재 공동연구소(1999,10) “ 고강도 알루미늄 합금의 압출성및기계적 특성 평가” (1단계 보고서)
3. (주)동양강철(2000,10) “고강도 알루미늄 형강재 압출기술 개발” (2단계 1차년도 연차보고서)
4. 김성준, 이창길, 김상식 “마찰교반용접기술의 개발과 응용”
5. 황원주, 김형진, 강부병, 허현무 “알루미늄 압출재를 적용한 2층열차 차체의 기초설계 및 구조강도해석“ 한국철도학회지
6. 권태수, 이관섭 “알루미늄합금을 사용한 차량 구조체 제작기술” 철도기술정보 16호
7. 이정국외 5명(1999,4) “철도차량용 6005A 알루미늄 합금 압출재의 미세조직 및 용접부 피로특성” 한국소성가공학회지(2000), 제9권 제1호
8. 김선환(2007,2) “Al 6061-T651 합금의 마찰교반용접 용접성 연구”
9. 임성곤(2005,2) “마찰교반용접된 각종 알루미늄 합금의 부식및 기계적 특성”
10. 전정일(2005,8) “알루미늄 7075의 마찰교반접합 특성에 관한 연구”
11. 이진희(2000) “용접기술실무” 21세기사
12. 윤경근(2002) "용접기술사“ 일진사