한국철도학회논문집
제12권 제4호 2009년 | pp. 512-517

알루미늄 A6005 압출 패널의 마찰교반용접 특성 연구

A Study on the Friction Stir Welding Properties of A6005 Extruded Aluminum Panels

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

Abstract Extruded aluminium panels have been widely used for railway vehicle structures because of their light specific weight and other merits. 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 which is used for car body structures was chosen. The influences of main parameters on mechanical properties such as: pin (tool) rotating speed, pin transition speed, shoulder diameter, pin length and tilting angle were examined. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) observation, micro hardness tests, and tensile tests were carried out.

Keywords : Friction Stir Welding, Extruded Aluminium Alloy, Aluminium A6005

요 지 알루미늄합금 철도차량의 차체를 조립하기 위하여 적용하는 용접방식으로는 가스 메탈 아크용접과 가스 텅스텐 아크용접이 주로 적용되고 있다. 그러나 알루미늄합금은 강재에 비해 용접성이 불리하며, 용접결함을 제어하기 위하여 보다 엄격한 용접조건과 용접설비의 작업환경이 요구된다. 따라서 선진국을 중심으로 비 용융 고상접합 방식인 마찰교반용접(FSW)이 널리 상용화 되고 있다. 본 연구에서는 대형 중공형 알루미늄합금 차량에 적용되는 압출재 A6005 소재의 마찰교반용접 시 용접변수에 따른 용접부의 기계적 특성을 평가하고, 적용 공구에 대한 최적의 용접조건을 파악하고자 하였다.

주 요 어 : 마찰교반용접, 철도차량, 압출재 알루미늄합금, A6005

1. 서 론

철도차량이 고속화를 이루기 위해서는 차체 및 부품의 경량화와 각종 기기의 소형 고기능화, 고 효율화, 설계의 최적화가 필요하다. 특히, 알루미늄합금을 이용한 철도차량의 차체는 기존의 스테인리스와 강재 차체에 비해 경량화의 목적을 달성하기 용이하다. 대형 중공 형 알루미늄 합금을 이용한 철도차량의 제작기술은 소재기술, 압출기술, 용접기술이 중요하며[3], 특히 차체 조립에 필요한 용접기술은 철도차량 차체의 기계적 특성 향상에 큰 영향을 미친다. 국내에서도 대형 중공 형 알루미늄합금은 고속전철 및 지하철 차량에 적용하고 있다. 차체의 구조형태는 SSD(Sheet Stringer Design)방식과 AED(All Extrusion Design) 방식이 있으며, 최근에는 대형 중공 형 알루미늄합금 압출재를 이용한 AED 방식의 분할용접 조립방식을 채택하고 있다[6].

국내의 중공 압출재 알루미늄합금 철도차량의 차체 조립방식은 가스 메탈 아크용접(GMAW)과 가스 텅스텐 아크용접(GTAW)을 주로 적용하고 있으나, 높은 입열량으로 용접부에 고온균열 발생과 함께 압출재 조직의 미세한 변화가 있어 용접된 압출재의 기계적 특성이 저하하는 원인이 되고 있다. 따라서 알루미늄합금의 용접은 강재에 비해 보다 엄격한 용접조건과 용접설비 및 작업환경조건이 요구되나, 이에 대한 기술적 단점과 비용, 환경 등의 문제점이 있어 선진국을 중심으로 비 용융 고상접합 공정인 마찰교반용접(Friction Stir Welding)이 널리 연구 적용되어 지고

† 책임저자 : 정회원, KORAIL, 사원
E-mail : saebi309@naver.com
TEL : (042)259-2491 FAX : (042)628-7448
* 정회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원 교수
** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

있다. 이에 국내에서도 대형 중공 형 알루미늄 합금을 이용한 철도차량의 차체 조립 시 마찰교반용접 적용에 대한 연구의 필요성과 상업화가 대두되고 있다.

본 연구에서는 압출된 대형 중공 형 알루미늄합금(A6005)의 마찰교반용접부의 기계적 특성과 미세조직을 평가하고, 특히 용접변수에 따른 용접부의 인장 및 경도특성을 비교분석하여 적용공구에 대한 최적의 용접조건을 파악하고자 했다.

2. 마찰교반용접(FSW)의 원리 및 특성

마찰교반용접(Friction Stir Welding)은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 특허 출원된 이래 가장 짧은 기간에 여러 분야에서 실용화가 이루어졌다[8].

마찰교반용접의 원리는 회전하는 공구(Tool)의 핀(Pin)을 접합부에 삽입시키고, 모재와 공구 숄더 부의 마찰에 의해 마찰열이 발생하게 되면, 회전하는 공구를 용접선을 따라 전진시켜 용접을 하게 된다. 이때 모재에 삽입된 핀에 의해 연화된 모재는 교반되어 핀의 후부로 밀리면서 용접이 이루어진다(Fig. 1). 이는 기존의 알루미늄 합금에 이용되던 가스 메탈 아크용접과 가스 텅스텐 아크용접, 플라즈마 용접, 레이저 용접 등과 달리 전기적 에너지의 열원이 불필요하며, 별도의 용가제나 용제의 공급도 불필요하다. 또한 입열량이 일반 가스 텅스텐 아크용접이나 가스 메탈 아크용접에 비해 60% 수준으로 이에 따른 열변형 및 잔류응력의 발생이 적어 기계적 성질이 향상되는 특징이 있다[4]. 용접부에서는 일반 아크용접(GTAW or GMAW)에서 발생되는 고상화 균열이나 블로 홀 또는 기공 등이 발생하지 않으며, 용융이 발생되지 않아 미세한 압출조직이 남게 되고 양호한 용접이 이루어진다.

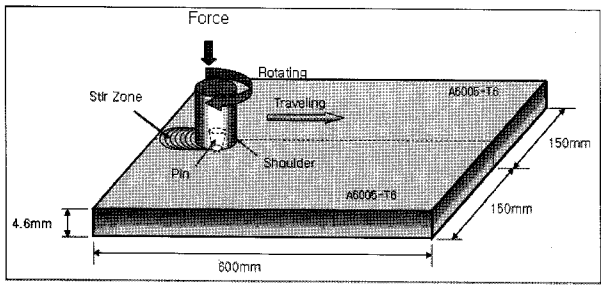


Fig. 1. Schematic illustration of the friction stir welding

에너지의 효율성은 전기저항용접의 1/5~1/10 정도이며, 용접변수의 제어가 용이하고 용접치수의 정밀도가 향상된다. 또 계면 마찰에 의한 표면 오염이 제거되어 용접 전처리 작업이 불필요하다. 용접금속 표면의 형상은 모재표면보다 높이가 낮아 여성이 없으며, 용접뒷면은 원 모재 형상의 변화가 거의 없다. 따라서 용접 완료 후 별도의 후처리 공정이 불필요하다.

Fig. 2는 FSW 장비를 이용한 용접작업과 툴의 형상이며, Fig. 3은 접합면의 앞, 뒷면 사진이다.

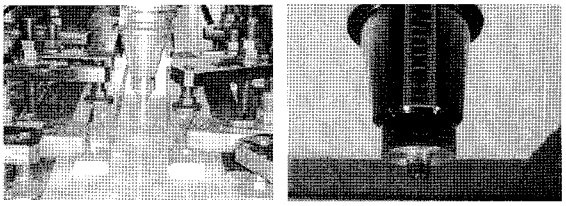
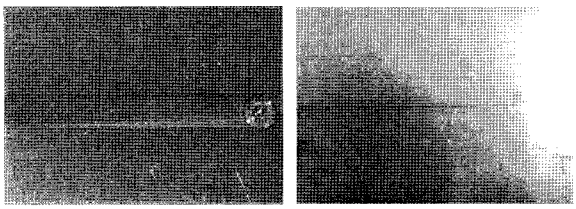


Fig. 2. Friction stir welding machine and tool

마찰교반용접에서 가장 중요한 요소는 공구의 재질과 형상이다. 일반적으로 공구(Tool)의 선단에는 높은 마찰열과 전단응력이 발생하므로 고온에서 동적, 정적성질이 우수한 공구강(SKD61)이나 마르텐사이트계 스테인리스강(STS440C)을 사용하며[1], 용접재료에 따라 그 형상을 달리한다.



(a) Front surface (b) Rear surface

Fig. 3. Appearance of friction stir welded A6005

3. 사용재료 및 실험방법

3.1 사용재료

Fig. 4는 용접된 부재로부터 인장시험편을 채취한 모식도이며, Table 1은 마찰교반용접에서 사용된 A6005의 화학적 특성과 기계적 특성을 나타내고 있다.

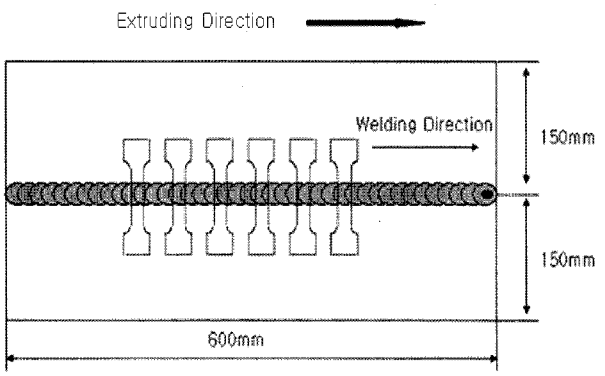


Fig. 4. Schematic diagram of the tensile specimens used in the present study

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of A6005

Chemical composition (weight) (%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.6 ~0.9	0.35	0.1	0.1	0.4 ~0.6	0.1	0.1	0.1	remains

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

철도차량용 차체 재료로 사용되는 알루미늄합금은 Al 5×××계열, Al 6×××계열, Al 7×××계열이 주로 사용되고 있으며[1, 2], 특히 차체의 재료로 압출성이 양호한 6×××계열의 알루미늄합금을 이용한 대형 중공형의 이중 구조체 적용이 증가하는 추세이다. 실험에 사용된 압출재 A6005는 철도차량의 바닥 판 및 지붕 판과 차체의 벽체로 사용되며 A7×××계열 합금보다 대형 압출성이 우수한 소재로 개발되었고[2, 3], 525°C 부근에서 고용화 처리 후 170°C 부근에서 3~15시간 인공시효 한 소재(4.4mm)를 600mm×150 mm의 크기로 절단하여 마찰교반용접을 시행하였다. 용접부재로부터 시험편의 채취는 시험의 정확성을 기하기 위하여 용접부재의 중심부에서 채취하여 가공하였다.

3.2 실험방법

압출재 A6005 소재에 대해 마찰교반용접 시행 시 용접변수에 따른 기계적 특성 및 용접성과 적용공구의 최적조건을 찾기 위해 Table 2와 같이 용접변수를 선정하여 실험을 수행하였다.

Table 2. Friction stir welding conditions for A6005-T6

Base metal (mm)	Shoulder dia (mm)	Rotating speed (rpm)	Welding speed (mm/s)	Pin length (mm)	Pin dia (mm)	Tilting angle (°)
4.4	15	900	5	3.5	4.9~ 4	2
		900	10			
		1200	5			
		1200	10			
		1600	5			
		1600	10			
		1800	5			
		1800	10			

일반적으로, 마찰교반용접의 기계적 성질에 영향을 미치는 용접변수는 용접속도(이송속도), 공구회전수, 공구의 형상, 접합재의 구속조건, 공구 숄더의 크기, 핀의 크기, 틸팅각 등이 있으며, 마찰교반용접 시 용접변수에 따라 용접부의 기계적 성질 및 용접성은 상이하다.

본 연구에서 사용된 공구의 재질은 공구강이며, 핀 부의 형상은 끝부분 직경이 작아지는 형상으로 나사의 형태는 핀의 절반만 있는 반 나사 형을 사용하였다. 알루미늄합금의 마찰교반용접 시 건전한 용접부를 얻기 위하여 많은 용접변수를 제어하게 되며, 특히 알루미늄합금의 종류와 모재의 두께에 따라 용접속도를 달리 적용하게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 경도시험

Fig. 5는 압출재 A6005의 마찰교반용접부를 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 측정한 경도 값의 분포도이다.

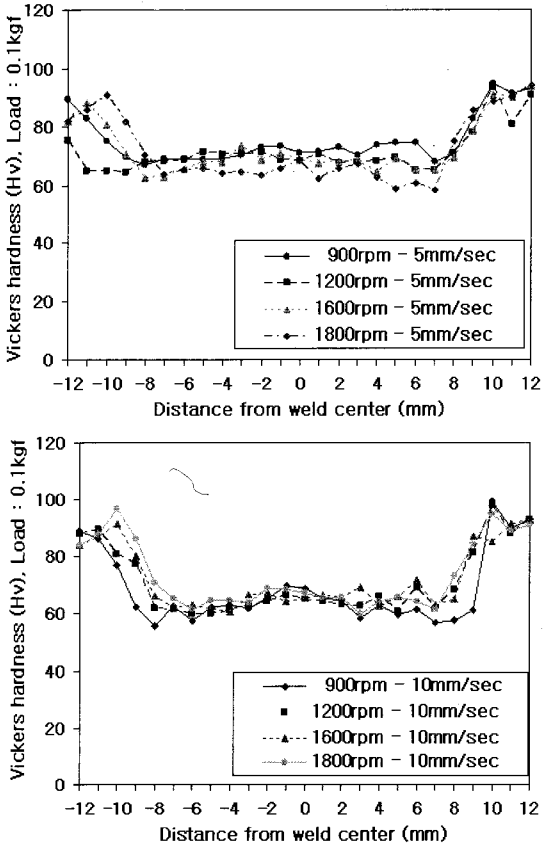


Fig. 5. Hardness distribution vs. rotating speed, welding speed

경도 값의 측정 범위는 용접 부 횡단면의 중심을 1mm 간격으로 25개소를 측정하였으며, 경도시험기의 배율은 ×40으로 135도 크기의 피라미드형 압자를 적용하였다. 시험하중은 0.1kgf이며, 적용시간은 30초를 주었다.

경도 값의 분포는 용접속도 5mm/s에서 공구의 회전속도가 낮은 경우, 다소 높게 측정되었으며, 용접속도 10mm/s

에서는 공구회전수의 변화에 따른 경도 값의 변화가 미미하였다. 특히 열기계적영향부(TMAZ)와 열영향부(HAZ)는 교반부(Stir zone)나 모재(Base metal)보다 경도 값이 낮게 나타났으며, 이는 광학현미경 시험결과, 공구의 회전 시 발생되는 마찰열에 의해 결정립의 조대화가 원인으로 나타났다. 또한 용접속도 10mm/s에서 용접면의 핀 부위의 경도 값이 다소 높게 나타났으며, 이는 핀의 회전에 의해서 결정립이 크기가 미세화 된 것으로 나타났다.

용접변수에 따른 용접부의 경도 값은 공구회전수 900 rpm, 용접속도 5mm/s에서 72Hv으로 가장 높게 측정되었으며, 공구회전수 1800rpm, 용접속도 10mm/s에서 55Hv로 가장 낮게 측정되었다.

4.2 인장시험

모재의 인장시험은 모재의 압출방향인 종 방향 시편과 압출방향과 수직인 횡 방향 시편을 제작하고, 마찰교반용접 변수에 따른 시편을 각각 제작하여 인장시험을 비교하였다.

Fig. 6은 용접변수에 따른 시험편의 인장시험 결과이다.

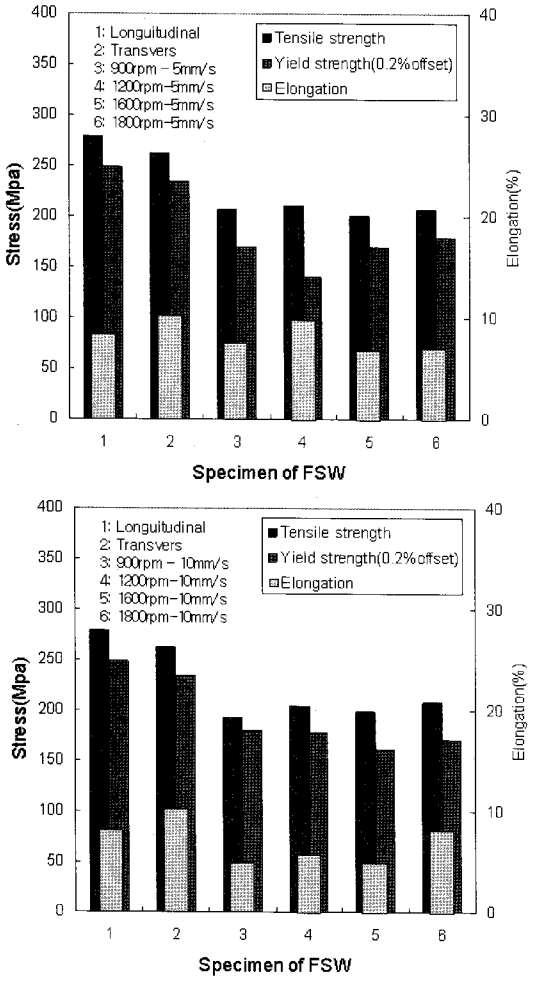


Fig. 6. Mechanical properties on various welding conditions

인장시험은 0.5mm/min의 속도로 프로그램 제어하에 시행하였으며, 주어진 최대 부하하중은 20kN, 인장시험 초기 변형속도는 0.8mm/min이다.

모재의 압출방향인 종 방향 시편의 인장시험 결과, 인장강도 279MPa, 항복강도 248MPa이며, 연신율 9.2%로 측정되었다. 압출방향과 수직인 횡 방향 시편의 인장시험결과, 인장강도 263MPa, 항복강도 235MPa이며, 연신율 12.6%로 측정되었다.

공구회전수와 용접속도의 변수에 따른 인장강도 최고값은 공구회전수 1200rpm, 용접속도 5mm/sec에서 211MPa 측정되었고, 항복강도 최고값은 공구회전수 900rpm, 용접속도 10mm/sec에서 180MPa로 측정되었다. 연신율은 공구회전수 1200rpm, 용접속도 5mm/sec에서 10.2%로 가장 높게 측정되었다. 전체적으로, 공구회전속도와 용접속도의 변화에 따른 인장강도의 변화량은 큰 차이가 없었으며, 측정된 인장강도는 모재의 77%이고, 항복강도는 63%로 측정되었다. 또한 기존에 철도차량 차체에 적용하던 직류 역극성 가스메탈아크용접과 비교하여, 마찰교반용접을 시행한 시험편의 인장강도는 1.4배, 항복강도 1.4배, 연신율 1.36배 더 높게 측정 되었다. 인장시험편의 파단은 용접부에서 발생하였으며, 이는 용접 중심부보다 경도 값이 낮게 측정된 열영향부(HAZ)나 열기계적영향부(TMAZ)에 집중되었다.

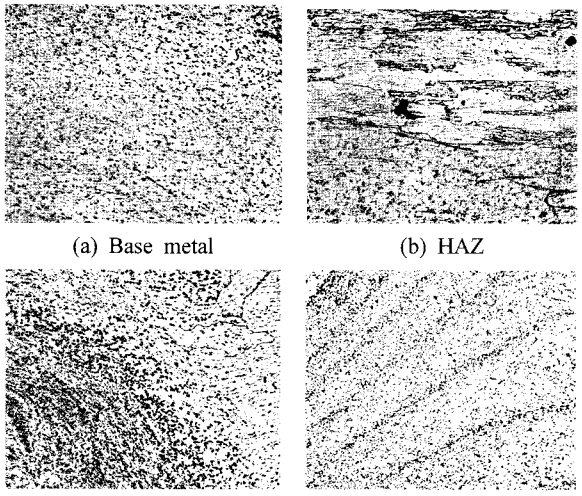
Table 3은 마찰교반용접과 가스메탈아크용접의 인장시험 비교표이다.

Table 3. Comparison of mechanical properties between FSW and GMAW

비교	용접방법	TS(MPa)	YS(MPa)	EL.(%)
실험자료	FSW	204	149	7.35
참고자료[7]	PC GMAW	185	113	7.3
	DCRP GMAW	146	105	5.4

4.3 용접부의 조직관찰

마찰교반용접부 횡단면의 미세조직은 광학현미경을 통해 관찰하였으며, 용접 조직은 열영향부(HAZ), 열기계적영향부(TMAZ), 교반부(SZ), 모재부(BM)로 대별된다. Fig. 7은 마찰교반용접부 횡단면의 중심을 광학현미경을 통하여 관찰한 용접부의 조직사진이다.



(a) Base metal (b) HAZ

(c) TMAZ (d) Stir zone

Fig. 7. Cross sectional views of friction stir welded A6005 (×100)

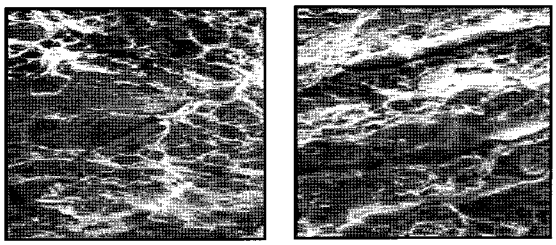
중공 형 압출재 A6005의 마찰교반용접 시 공구의 회전속도와 용접속도의 변수에 따라 교반부와 인접 지역에 다양한 모양의 변형조직들이 관찰되었다. 교반부는 핀의 회전에 의한 소성변형이 일어나 전체적으로 결정립이 미세하고 균일하게 나타났다. 열기계적영향부에서는 소성 변형과 부분적인 재결정 영역이 존재하였으며, 공구의 회전속도와 용접속도가 상승됨에 따라 석출물의 밀집현상이 나타났다. 이는 공구의 핀 회전에 의해 교반작용이 이루어지면서 회전력에 의해 모재 인접지역으로 석출물이 밀려 발생한 것으로 예측된다. 열영향부에서는 용접 시 발생한 마찰열에 의해 결정립이 조대화 되었으며, 조직의 분해와 회복 등이 발생하여 모재와 다른 조직이 형성되었다. 이러한 조직상은 인장시험 시 파단면과도 일치하였다. 특히, 용접 부 관찰을 위해 부식액을 적용한 결과, 공구(Tool) 회전속도 1200rpm, 용접속도 5mm/s와 공구회전속도 1200rpm, 용접속도 10mm/s에서 마찰교반용접 교반부(SZ) 영역에 나타나는 전형적인 Onion ring의 형태가 관찰되었다.

4.4 마찰교반용접부 인장 파단면의 SEM 관찰

4.4.1 모재 압출방향의 횡 방향 파단면

Fig. 8은 압출재 A6005 에서 압출 방향과 횡 방향(Transverse)으로 인장시험편을 채취 후, 인장파단 된 면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰한 미세조직 사진이다.

압출 모재의 횡 방향으로 인장시험 한 시험편의 연신율은 12%로 측정 되었고, 파단면의 SEM 관찰결과, 압출 표면의 아래 부위는 현저한 연신과 단면 수축현상을 동반하는 연성파단(딤플) 특성이 관찰 되었다. 파단면의 중심부위는 연성파단 특성과 소성변형을 거의 동반하지 않는 취성파단(Cleavage) 특성이 혼재된 양상을 나타냈다.

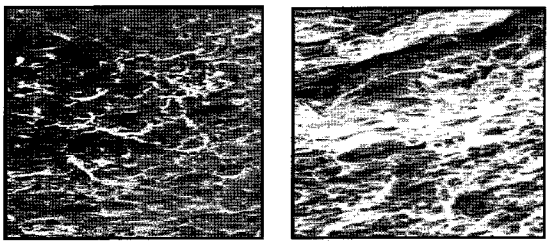


(a) Under zone of surface (b) Center of fractured

Fig. 8. SEM images of the fractured surface of extruded aluminum alloy (Transverse, ×200)

4.4.2 모재 압출방향(종 방향)의 파단면

Fig. 9는 압출재 A6005를 압출방향인 종 방향으로 시험편을 제작하여 인장시험 한 파단면의 SEM관찰 사진이다.



(a) Subsurface (b) Center

Fig. 9. SEM images of the fractured surfaces (Longitudinal, ×200)

모재의 종 방향(Longitudinal)으로 인장시험 한 시험편의 연신율은 9%로 측정되었으며, 파단부위에 전단응력과 인장 찢어짐 응력이 작용하여 딤플이 길게 연신된 형상이 관찰되었다.

일반적으로, 알루미늄 합금은 조직 내 많은 제 2 입자를 포함하고 있으며, 딤플을 형성하는 연성파괴를 일으킨다. 연성파괴는 보이드(Void)의 생성, 성장 및 조대화의 순서로 발생되고, 입자의 파괴와 입자계면에서의 재 접합에 의해 딤플을 형성하게 된다.

4.4.3 마찰교반용접부의 파단면

Fig. 10은 인장시험 후 파단된 시험편의 용접부를 SEM을 이용하여 관찰한 부위이다.

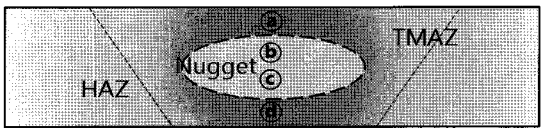
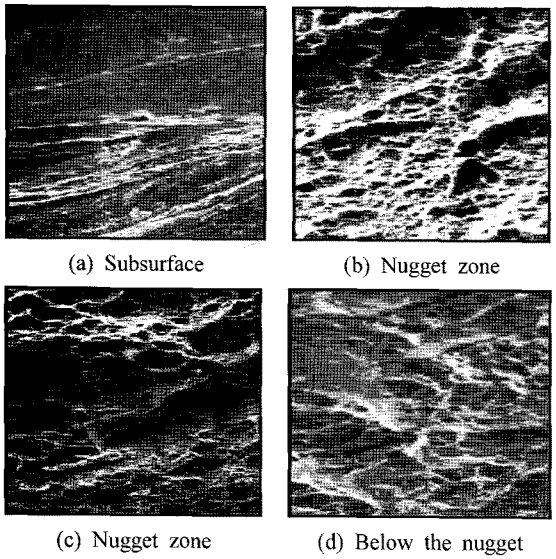


Fig. 10. Observed points of the fractured surface by SEM

Fig. 11은 마찰교반용접 한 모재에서 용접방향과 직각방향으로 시험편을 채취하여 인장파단 후, 파단면을 SEM을 이용하여 미세조직을 관찰한 사진이다. SEM 관찰 결과, 용

접된 표면부위는 공구숄더에 의해 국부표면개질이 발생되었고, 표면 직하 부위는 취성파면이 관찰되었으며, 교반작용이 발생하여 용접 너겟(Nugget)이 생긴 중심부위는 수직방향으로 균일한 인장응력이 작용된 등축 딤플이 관찰되었다. 또한, 너겟의 하단부위에서는 연성파단과 취성파단이 혼재된 양상을 나타냈다.



(a) Subsurface (b) Nugget zone

(c) Nugget zone (d) Below the nugget

Fig. 11. SEM images of fractured surfaces, 1200rpm-10mm/s (×200)

5. 결 론

철도차량용 중공 형 압출재 A6005에 대해 마찰교반용접을 시행 후, 시험한 결과는 다음과 같다.

(1) 마찰교반용접 된 인장시험편의 인장강도는 모재의 77%, 항복강도는 63%로 측정되었으며, 용접변수에 따른 인장강도의 최고값은 공구 회전수 1200rpm, 용접속도 5mm/s에서 측정되었다. 또한, 용접부에서는 용접결함인 보이드와 기공등이 관찰되지 않았다.

(2) 마찰교반용접부의 경도는 모재의 72% 수준으로 나타났으며, 동일한 공구회전속도에서 용접속도가 낮은 경우 더 높게 측정되었다.

(3) 광학현미경 시험 결과, 열영향부에서는 마찰열 에 의한 결정립의 조대화가 관찰되었고, 열기계적영향부에서는 소성변형과 부분적인 재결정 영역이 관찰되었다.

(4) 주사전자현미경 관찰결과, 모재의 횡방향 인장 시험편의 파단면은 연성파면과 취성파면이 혼재된 양상이 관찰 되었으며, 모재 압출방향 인장시험편의 파단면은 전단응력과 인장 찢어짐 응력이 작용하여 딤플이 길게 연신된 형상이 관찰되었다. 용접부의 파단면은 취성파면과 등축 딤플이 함께 관찰 되었다.

후 기

본 연구는 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과 석사학위 논문의 일부임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 한국과학기술정보연구원(2003), "마찰교반용접."
2. 서울대학교 신소재 공동연구소(1999), "고강도 알루미 늄 합금의 압출성 및 기계적 특성평가 (1단계 보고서)."
3. (주)동양강철(2000), "고강도 알루미늄 형강재 압출기술 개발 (2단계 1차년도 연차보고서)."
4. 김성준, 이창길, 김상식(2004), "마찰교반용접기술의 개발과 응용," 한국기계연구원.
5. 황원주, 김형진, 강부병, 허현무(2002), "알루미늄 압출재를 적용한 2층열차 차체의 기초설계 및 구조강도해석," 한국철도학회 학술대회논문집, pp. 364-369.
7. 이정국, 서창우, 오창록, 신동혁, 이동헌, 김용석(1994), "철도차량용 6005A 알루미늄 합금 압 출재의 미세조직 및 용접부 피로특성," 철도기술정보.
8. W. M. Thomas et al.(1991), "Friction Stir Butt Welding, International Patent Application," No. PCT/GB92 Patent Application No. 9125978.
9. 권태수, 이관섭(1998), "알루미늄합금을 사용한 차량 구조체 제작기술," 철도기술정보 16호
10. H. S. Yang(1998), "Microstructural Development in Friction Stir Welding Alloys," Proc. Int. ICAA. Toyohashi, Japan.
11. 철도차량기술(2000), "철도차량 구조용 소재의 특성 및 제작 기술동향," 봄호, pp. 67-87.
12. 서승일(2005), "알루미늄 철도차량 차체 용접부의 강도 특성에 관한 연구," 대한용접학회지, 제23권 제1호, pp. 35-40.
13. 서승일(2004), "알루미늄 철도차량의 용접기술," 대한용접학회지, 제22권 제3호, pp. 32-38.
14. Railway Gazette International(9991), "Aluminum invades Europe's main line coach market," June.
15. J. N. Pennington(1944), "Aluminum : Big gains coming from rail cars, bridges," Modern Metals, July.

접수일(2009년 3월 26일), 수정일(2009년 5월 6일),
게재확정일(2009년 8월 5일)