

FSW된 이종알루미늄합금의 접합 특성 및 미세 조직

한민수* · 장석기¹

(원고접수일 : 2010년 11월 12일, 원고수정일 : 2011년 1월 6일, 심사완료일 : 2011년 1월 24일)

Mechanical Properties and Microstructure on Dissimilar Friction-Stir-Weld of Aluminium Alloys

Min-Su Han^{*} · Seok-Ki Jang¹

요 약 : 이종합금인 알루미늄 합금 6061-T6와 알루미늄 합금 5083-O의 용접을 위해 마찰교반 용접 기술을 사용하였다. 마찰교반 용접된 이종 접합부에 대하여 기계적 특성, 경도 및 조직변화를 관찰하였다. 용접재의 기계적특성은 후진 측에 위치한 알루미늄 합금의 교반영역에 형성되는 미세조직이 주요한 변수로 작용하였다. 이종 알루미늄 합금이 교차한 양과 모양 형상의 얇은 층을 이루었다. 미세조직관찰에서 공구회전방향과 무관하게 이종합금 접합부에 기공이 관찰되지 않았으나 6061-T6 쪽 열영향부 영역에서 결정립 조대화기 뚜렷하였다. 본 논문의 연구결과, 결함이 없는 최상의 용접조건은 Al 6061-T6를 공구 진행방향에 전진 측에, Al 5083-O를 후진 측에 위치하고, 이송속도 124 mm/min, 1250 rpm의 공구의 회전수, 5 mm의 프루브 직경, 4.5 mm의 프루브 길이, 20 mm의 공구어깨, 2°의 공구 경사각 이다. 이때 용접재의 최대인장강도는 231 MPa이었고, 항복강도는 121 MPa을 나타내었다.

주제어 : 마찰교반용접, 후진 측, 전진 측, 이종, 얇은 층

Abstract: Dissimilar joining of aluminum 6061-T6 alloy to aluminum 5083-O alloy was performed using friction-stir welding technique. The mechanical properties, hardness, macro- and micro-structure on dissimilar friction-stir-weld aluminium alloy were investigated. Mechanical properties of the weld mainly depend on which Al alloy is placed at the retreating sides of the rotating tool respectively during dissimilar friction-stir weld because the microstructure of stir zone was mainly composed of welded Al alloys of the retreating side. Onion ring pattern was observed like lamella structure stacked by each Al alloy in turn. It apparently results in defect-free weld zone that traverse speed was changed to 124 mm/min under conditions of tool rotation speed like 1250 rpm with 5 mm of tool's probe diameter, 4.5 mm of probe length, 20 mm of shoulder diameter, and 2° of tilting angle. The 231 MPa of ultimate stress and the 121 MPa of yield point are obtained about the friction-stir-welded Al 6061-T6(AS) to Al 5083-O(RS).

Key words: FSW (Friction Stir Welding), Retreating side (RS), Advancing side (AS), Dissimilar, Lamella

1. 서 론

우리나라의 경우 어업지도선 및 해양경찰선과

같은 관공선을 중심으로 알루미늄선박이 증가하고 있다. 이것은 알루미늄재가 환경친화적이며 경량화

* 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:mp949@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7412)

¹ 목포해양대학교 기관시스템공학부

가 가능하면서도 높은 내구성을 지니고 있기 때문이다. 그러나 알루미늄의 가격과 용접기술의 문제로 어선이나 중소형 선박에 FRP 재료를 대신하여 알루미늄이 도입되는 데는 좀 더 시일이 필요할 것으로 생각된다. 이와 같이 선박 구조물의 경량화를 위하여 알루미늄과 같은 비철금속의 이종합금의 접합이 조선공정에서 필요하다. 특히 알루미늄 합금 Al5083-O와 Al6061-T6재료는 내식성이 우수하여 알루미늄선박에 주로 사용되고 있다. 여기서 Al-Mg계 합금인 5000계열은 해수와 직접 접하는 선체외판으로, Al-Mg-Si계 합금인 6000계열은 선체상부의 구조재료 사용된다. 그러므로 알루미늄 선박의 건조에 있어 5000계열과 6000계열의 용접 공정이 요구된다. 일반적인 MIG나 TIG용접법을 이용하여 알루미늄에 용접을 할 경우 고온균열 및 큰 변형 등의 기술적으로 많은 문제점이 있다. 이를 개선하기 위하여 새로운 용접기술로 FSW기술이 주목받고 있다[1].

Al합금의 FSW기술의 개발이 생산 가공공정에 가져온 기술적 효과는 고상접합 공정이므로 미세한 결정립의 압출 조직이 남아 있고 액상에서 고상으로 변태에 따른 기공, 응고균열, 잔류응력 등과 같은 문제가 없다. 또한 낮은 입열량과 비용용 특성으로 기계적 성질이 개선되고 공정인자가 단순하다. 따라서 알루미늄 합금 간 용접뿐만 아니라 알루미늄과 스테인리스강 접합, 알루미늄과 티타늄 합금 접합 등에 FSW에 의한 많은 접합 시도가 되고 있다[2-3].

본 연구는 알루미늄합금 Al5083-O와 Al6061-T6 합금으로 이종접합을 실시하고 접합부의 응력 특성 및 용접성, 이들에 미치는 영향을 관찰한다. 또한 접합부 단면의 매크로적 및 미시적 조직 등을 관찰한다.

2. 사용재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

Al5083-O와 Al6061-T6재료의 화학적 조성비는 Table 1과 같으며 Al5083-O와 Al6061-T6 재료의 기계적 특성은 Table 2와 같다. 표에서 보여 주듯이 화학적 조성에서는 Mg 함량의 확연한

차이를 보였으며, 최대인장응력은 큰 차이가 없으나 Al5083-O가 Al 6061-T6보다 항복점은 낮으나 연신율은 더 크게 나타났다. 또한 비커스 경도도 낮은 값을 나타내었으므로 Al5083-O가 Al6061-T6보다 연성이 풍부함을 알 수 있다.

Table 1: Chemical compositions of Al 6061-T6 and Al 5083-O (Wt%)

Alloy	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Al
5083-O	0.08	0.18	5.32	0.05	0.64	0.25	Bal.
6061-T6	0.35	0.60	1.22	0.04	0.08	0.66	Bal.

Table 2: Mechanical properties of Al 6061-T6 and Al 5083-O

Alloy	Max. Tensile Strength, MPa	Yield Strength, MPa	Elongation %	Hv
5083-O	340	168	29.1	86
6061-T6	328	278	17.4	112

2.2 실험 방법

FSW 이종접합에 사용된 공구의 치수는 어깨지름이 20 mm, 프루브의 직경은 5 mm, 프루브의 길이는 4.5 mm, 프루브 외주에는 나사 피치 1.0 mm의 오른나사로 제작하였다. 두께 5 mm인 Al5083-O와 Al6061-T6 판재를 각각 270 × 80 × 5 mm의 2매를 1조로 용접하였다. 2°의 전진 각(Tilting angle), 반시계방향 및 시계방향, 프루브의 삽입깊이 4.5 mm, 공구 회전속도는 800, 1250 그리고 2500 rpm 및 용접 이송속도는 32, 87 그리고 124 mm/min의 용접조건에서 Al5083-O 판재가 전진 측(AS) 및 후진 측(RS)이 되도록 2회씩 용접을 실시하였다.

용접부 평가를 위하여 인장시험, 경도시험, 조직 관찰을 실시하였다. 우선 용접부의 항복점, 인장응력 및 연신율 등의 기계적 성질을 구하기 위하여 INSTRON 8516 장비를 활용하여 인장속도 0.2 mm/min으로 인장시험을 실시하였다. 용접부의 압입변형저항을 측정하기 위하여 경도시험을 실시한 후 용접부의 경도분포를 조사하기 위하여 용접 방향에 수직한 용접부 횡단면을 가로방향은 등간격

1 mm로, 세로방향은 1, 2.5 및 4 mm 깊이의 각 위치에서 경도 측정하였다. 이 시험에 사용된 마이크로 비커스 경도시험기는 SHIMADZU사의 HVM-2 시험기로서 하중 1.98 N과 하중시간 10 sec로 실시하였다. 또한 용접부에서의 기공이나 용접균열과 같은 결함 그리고 용접부 단면의 용접상태 및 용접 조직의 유동 거동 및 미세조직의 변화를 관찰하기 위하여 절단된 시편의 용접부를 #2000 까지 연마한 후 Al_2O_3 분말을 이용하여 경면연마 하였다. 이후 Al5083-O 조직상을 보기 위하여 Tucker 에칭용액을 사용하였으며, Al6061-T6의 조직상을 관찰하기 위하여 Keller 에칭용액을 사용하였다[4]. 광학현미경으로 용접부 횡단면의 모재(base metal, BM), 교반부(stir zone, SZ), 열기계적 영향부(thermo-mechanically affected zone, TMAZ), 열영향부(heat affected zone, HAZ) 등의 매크로 및 미세 조직의 촬영과 분석을 실시하였다.

3. 고찰

3.1 FSW된 이종합금의 접합성과 기계적 성질

이종합금의 마찰교반용접은 연질의 재료를 전진 측으로 할 것인지 후진 측으로 할 것인지에 대한 판단은 두 합금의 용접과 응력의 편차가 크면 연질 재료를 후진 측으로 배열하는 것이 추천되며, 용접과 응력의 편차가 적다면 연질의 재료를 전진측에 배열하는 것이 추천된다. 그러나 이와 반대되는 결과도 보고되고 있는데 이는 마찰교반용접의 특성상 공구 형상, 프루브 직경, 용접조건 등 다양한 변수를 가지고 있기 때문이다[5-6].

Figure 1은 이종합금의 마찰교반 용접방향에 대하여 Al 6061-T6를 후진 측에 Al 5083-O를 전진 측에 1조로 고정하고 용접조건마다 마찰교반 용접된 인장시편의 응력-변형율의 거동을 비교한 것이다. 공구회전수가 낮고, 이송속도가 빠르면 마찰교반용접에 필요한 소성유동 현저히 부족하여 용접이 불가능하게 되며, 공구회전수가 빠르고, 이송속도가 느리면 지나친 소성유동의 증가로 마찰교반 용접의 가장 큰 특징인 고상접합이 이루어지지 못하고 조성적 액화(constitutional liquation)로

금속간화합물이 다량 발생하여 오히려 기공결함(porosity)을 증가시킬 수 있다[7-8]. 이러한 이유로 인해 공구의 회전수를 800 및 2500 rpm으로 한 경우 용접 이송속도와 관계없이 용접이 불가능하였으며, 회전속도가 1250 rpm에서는 용접 속도 조건인 32, 87 그리고 124 mm/min에서 모두 용접이 이루어졌다. 특히 이송속도가 32와 87 mm/min의 경우 소성유동이 크게 발생하여 네킹 구간에서 변화의 폭이 상대적으로 적고 인성이 크게 나타나는 현상을 보였다. 그리고 용접 이송속도가 증가함에 따라 항복점과 최대인장응력은 상승하였으나 연신율은 감소하는 경향을 보였다. 이중 마찰교반용접된 인장 시험편의 과단은 교반부에서는 나타나지 않았으며 열영향부 영역에서 발생하였다.

Figure 2는 이종합금의 마찰교반 용접 방향에 대하여 Al 6061-T6를 전진 측에, Al 5083-O를 후진 측에 1조로 고정하고 마찰교반용접된 시편의 응력-변형율 선도를 비교한 것이다. Figure 1의 결과와 같이 공구의 회전수를 800 및 2500 rpm으로 한 경우 용접 이송속도와 관계없이 용접상태가 불량하였으나, 회전속도가 1250 rpm에서는 용접 이송속도가 32와 124 mm/min에서 용접이 양호하게 이루어졌다. 하지만 이송속도가 32 mm/min의 경우 용접부 육안검사에서는 양호하였으나

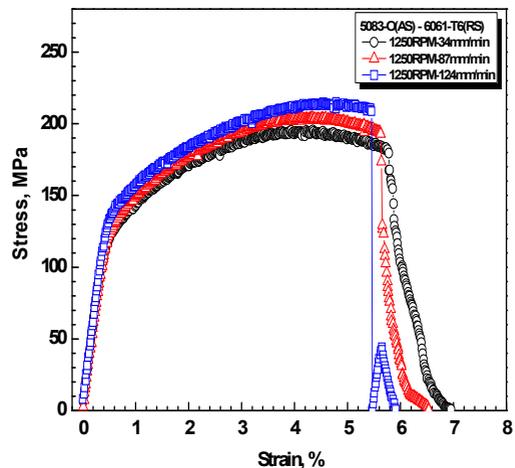


Figure 1: Stress strain diagrams for dissimilar friction-stir-welded specimen of Al 6061-T6(RS) and Al 5083-O(AS)

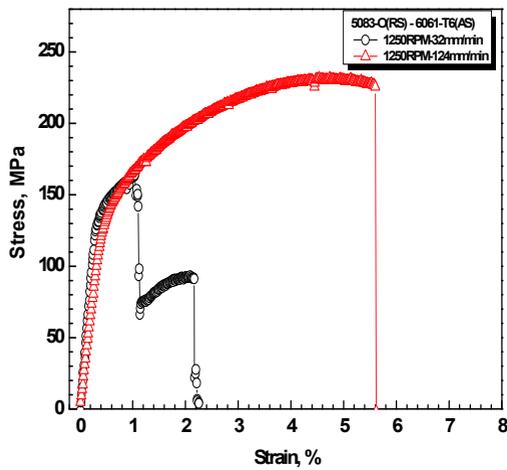


Figure 2: Stress strain diagrams for dissimilar friction-stir-welded specimen of Al 6061-T6(AS) and Al 5083-O(RS)

이종 합금의 완전한 교반 부족으로 만족할 만한 기계적 특성을 나타내지 못한 것으로 판단되며 과단면 또한 결함이 존재하고 있었다. Al 6061-T6를 후진 측에 고정하고 이종 용접을 실시한 조건들 중 1250 rpm에서 32 또는 87 mm/min으로 용접하였을 때 보다 124 mm/min의 경우 연신율은 낮지만 항복응력은 121 MPa와 최대인장응력은 232 MPa를 나타내어 실험한 용접 조건 변수 중 가장 우수한 기계적 특성을 보였다.

3.2 접합부 횡단면의 경도거동

Figure 3 및 Figure 4는 마찰교반 용접법으로 Al 5083-O합금과 Al6061-T6합금의 이종 용접된 시편의 용접방향과 수직한 용접부 횡단면의 경도 거동을 보이고 있다. 전진 측 또는 후진 측에 상관없이 Al 5083-O합금 측의 경우는 경도의 감소는 적으나 Al6061-T6합금의 경우는 경도의 감소폭이 크다. Figure 3은 Al 6061-T6합금을 후진 측에 고정하고 Al 5083-O합금 측을 전진 측으로 접합한 결과, 용접부의 후진 측 경도만이 크게 감소하면서 불규칙한 거동을 보이거나 전진 측은 경도의 변화가 균일하고 경도 저하가 비교적 적었다. 후진 측 Al 6061-T6합금 쪽 두께 중앙선 위치 HAZ에서 가장 작은 경도 값 즉, 모재 경도 112 Hv의 약

50 % 정도의 경도를 보였으나 전진 측인 Al 5083-O합금 쪽의 경도는 감소가 거의 없었다.

Figure 4는 Al 5083-O합금을 후진 측에 고정하고 Al 6061-T6합금을 전진 측으로 접합한 결과, Figure 3의 경우와는 반대로 용접부의 전진 측인 Al 6061-T6합금 경도만이 크게 감소하다가 Al 5083-O의 분자가 혼합된 기계적-열 영향부 및 교반영역에서 경도가 상당히 증가하고 Al 5083-O합금인 후진 측 교반부에서는 일정한 거동을 보이면서 모재인 Al 5083-O합금의 경도까지 점점 증가하였다. 또한 전진 측 열영향부에서 Al 6061-T6합금

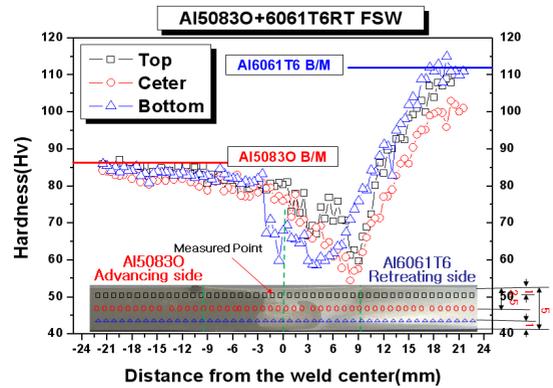


Figure 3: The micro vickers hardness profiles of the transverse cross-section welded zone perpendicular to the welding direction of the dissimilar weld for Al 6061-T6(RS) with Al 5083-O(AS)

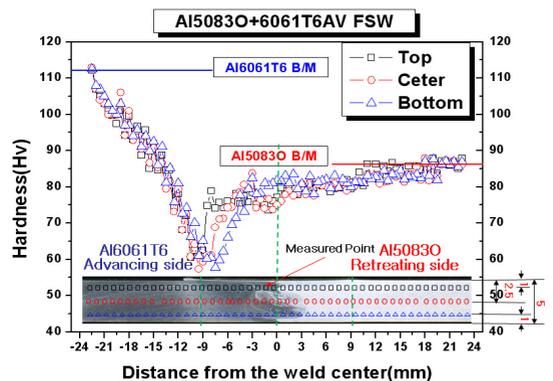


Figure 4: The micro vickers hardness profiles of the transverse cross-section welded zone perpendicular to the welding direction of the dissimilar weld for Al 6061-T6(AS) with Al 5083-O(RS)

의 경도가 가장 작은 값 56 Hv를 보였다. 결과적으로 경도 실험의 경우, 어느 알루미늄 이중합금을 후진 측에 고정하였느냐에 관계없이 Al 5083-O합금보다는 Al 6061-T6합금 쪽의 경도가 교반마찰에 따른 고온의 열과 기계적 소성유동의 영향을 크게 받는 것으로 특징지을 수 있다. 이것은 비열처리 합금인 알루미늄 5000계열과 달리 알루미늄 6000계열 합금은 열처리계 합금으로 마찰교반용접 과정에서 발생한 열에 의하여 열영향부에서 석출의 비평형상(GP zone)의 소멸과 과시효 효과로 인한 석출물의 성장으로 6000계열 쪽에서 응력저하에 따른 연하부를 생성한 것으로 사료된다[9]. 앞서 기계적 특성평가를 위한 1250 rpm, 124 mm/min과 같은 양호한 용접조건인 인장시험편에서도 파괴는 Al 6061-T6합금 쪽의 열영향부 영역에서 균열생성과 파괴가 관찰되었다. 따라서 상기 Al 합금의 이중용접된 기계나 구조물이 부하를 받게 되면 Al 6061-T6합금 쪽의 경도가 가장 낮은 열영향부 영역에서 파손이 발생할 것으로 예측 가능하다[10].

3.3 접합부 횡단면 조직

Figure 5는 마찰교반 용접법으로 이중인 Al 합금으로 용접된 판재의 FSW 용접부 횡단면의 마크로조직을 나타낸다. Al6061-T6합금을 후진 측에 고정시킨 경우, 교반영역 중 교반부의 마크로적 형상은 미완의 타원 형상을 보이며 색상으로 보아 Al5083-O 합금과 Al6061-T6합금들이 교대로 적층상태로 혼합되어 색상이 약간 넓게 된 것으로 보이며, 모재 Al6061-T6합금은 압연방향으로 80 ~ 120 μm 의 지름을 갖는 가늘고 긴 입자를 포함하고 있다. 교반부는 Al 5083-O합금과 Al6061-T6합금의 분자들이 용접공구 프루브의 교반 단조에 의하여 혼합된 것을 보인다. 그러므로 교반부는 이중합금의 혼합조직을 갖는다. Al5083-O 합금을 후진 측에 고정시킨 경우 교반부의 마크로적 형상은 완성된 타원 형상을 보이며 분명하게 타원형의 나무나이테(an annual ring)모양으로 Al5083-O 합금들과 Al6061-T6합금들이 교대로 배열된 적층상태를 특징적으로 보이고 있다.

Figure 6은 5083-O를 전진측에 위치하고 이중

용접된 시험편의 횡단면을 경면 연마 후 에칭 용액 (6ml HNO_3 + 3ml HCl + 6ml HF + 150ml H_2O)에 수초에서 수분 동안 침지하여 광학 현미경으로 마찰 교반된 용접부 횡단면은 Al6061-T6합금 측의 모재, 열영향부, 기계적-열 영향부, 교반부와 Al5083-O합금 측의 교반부, 기계적-열 영향부, 열영향부, 모재의 순으로 구분된다[8]. (a)의 모재 영역은 압연 가공됨에 따라 대략 30 ~ 40 μm 의 크기의 가로방향으로 결정립이 신장되어 있음을 알 수 있었으며, (b)의 열영향부 영역은 마찰 교반 용접 시 발생한 열에 의하여 결정립이 약 150 μm 정도의 크기로 관찰되어졌는데 모재 대비 4 ~ 5배 정도 조대화 되었다. 열영향부는 결정립의 조대화와 압연 가공 시 형성된 전위들의 소멸에 기인한 강도 저하로 용접부재의 가장 취약한 부분을 형성한 것으로 사료된다. (c)의 기계적-열 영향부에서는 마찰교반용접 공구의 회전에 의한 기계적인 변형이 일어나 결정립 배열의 변화가 45°의 각도로 조직이 배열되어 있었으며 부분적인 재결정현상으로 모재에 비해 다소 미세한 결정립을 관찰할 수 있었다. (d), (e)의 교반부에서는 6061-T6 결정립의 크기는 모재에 비해 대단히 미세한 결정립을 관찰할 수 있으며 이는 마찰 교반결과 기계적인 영향으로 재결정화에 따른 것으로 판단된다. 기존 알루미늄 마찰용접에 관한 연구[11-12]에 의하면 마찰교반 용접시 전진 측에 위치한 재료의 경우 보다 뛰어난 교반효과로 후진 측에 위치한 재료에 비해 내부 소성유동 거동이 활발하며 뚜렷한 계면을 생성하는 경향을 보였다. 이와 같이 전진 측에 위치한 6061-T6 재료는 (b)의 열영향부 결정립이 (a)의 모재와 비교하여 조대하게 성장하였으며 이는 용접 입열에 따른 영향으로 판단된다. 반면 (d), (e) 그리고 (f)에 나타낸 바와 같이 기계적 교반의 영향을 받은 영역은 모재대비 현저하게 미세화된 결정립을 확인 할 수 있다. 교반부와 기계적-열적 영향부 관찰결과 오른 나사의 교반에 기인하여 연화된 상태에서 교차한 소성유동 형상을 관찰할 수 있으며 두 재료간의 접합면에서의 결함은 전혀 관찰되지 않았으므로 매우 건전한 용접성을 나타낸 것으로 판단된다.

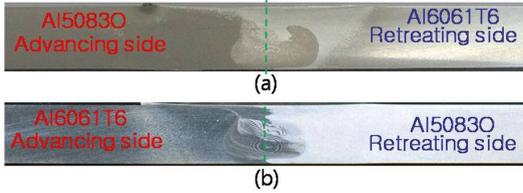


Figure 5: Macroscopic overview of the cross section of dissimilar friction-stir weld of Al alloy respectively; (a) Al6061-T6(AS) to Al 5083-O(RS) (b) Al 5083-O(AS) to Al 6061-T6 alloy(RS)

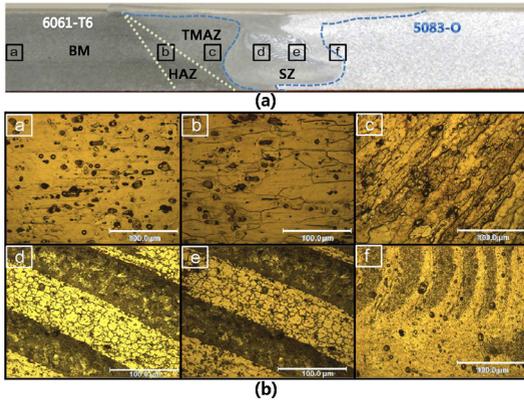


Figure 6: Photographs of (a) macro-structure and (b) micro-structure of dissimilar friction stir weld with Al 5083-O(AS) and Al 6061-T6(RS)

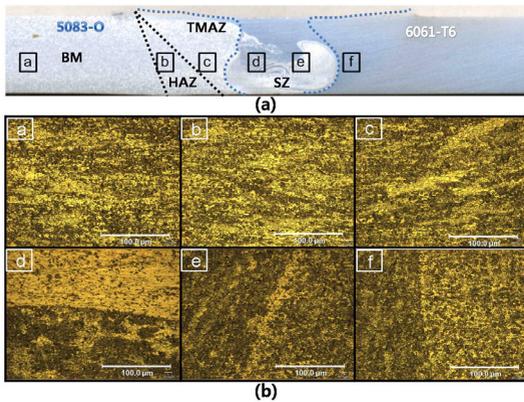


Figure 7: Photographs of (a) macro-structure and (b) micro-structure of dissimilar friction stir weld with Al 6061-T6(AS) and Al 5083-O(RS)

Figure 7는 Al 5083-O를 후진측에 위치하고 용접된 시험편의 횡단면을 에칭 액(Tucker)을 사

용하여 접합부 영역의 소성거동 및 미세 결정립을 관찰한 것이다. (a)의 모재는 미세한 피트(pit)가 압연방향으로 길게 늘어져있는데, 이는 에칭 시 부식손상에 의해 발생한 공식으로 사료된다[13-14]. 5083-O 시료는 Mg 함량이 5.32(wt%) 정도로 높은 편이며 활성금속인 Mg의 첨가는 금속간화합물을 균일하게 분산시킴으로써 결정립을 미세 화하고 젖음성(wettability)을 향상시키는 특징을 갖게 된다[12]. 그리고 Figure7은 Figure 6과 유사한 조직거동을 나타냈으나 기계적-열 영향부의 결정립 크기는 모재와 비교하여 큰 차이를 나타내진 않았다. 또한 열영향부 영역의 경우는 마찰 교반 용접 시 발생된 열에 의하여 재결정되어 모재보다 부분적으로 조대한 결정립을 관찰할 수 있었다. 5083-O (R.S)와 6061-T6(A.S)의 이중 마찰교반 용접된 경우도 두 재료간의 접합계면에서의 미세한 기공이 없으므로 매우 건전한 용접성을 나타낸 것으로 판단된다.

결과적으로 이중 접합 시 5083-O측에 비해 6061-T6측 열영향부 영역에서의 결정립 조대화가 대단히 뚜렷하며 이에 따른 강도 및 경도 저하로 앞서 인장시험 시 6061-T6 열영향부에서 파단이 발생한 사실과 상응한다.

4. 결 론

이 논문에서 이중 알루미늄 합금의 마찰교반 용접특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 적용 공구에 대하여 회전속도 1250 rpm, 용접속도 124 mm/min의 경우 Al 6061-T6를 후진측에 배열하고 용접하였을 때, 항복응력은 121 MPa와 최대인장응력은 232 MPa를 나타내는 가장 우수한 기계적 특성을 보였다. 또한 교반에 의하여 두 모재가 연화되어 교차한 모습을 관찰되었으나 공구 회전방향과 무관하게 이중합금 접합부에 기공은 관찰되지 않았다.

2. 이중합금 중 Al 5083-O합금보다는 Al 6061-T6합금 쪽의 경도가 교반마찰에 따른 고온의 열과 기계적 소성유동의 영향을 크게 받아 낮게 나타내었다. 이것은 5083-O 쪽에 비해 6061-T6 쪽 열영향부 영역에서 결정립 조대화가 대단히 뚜

러하며 이에 따른 용접부 강도 및 경도 저하를 초래한 것으로 사료된다.

3. 알루미늄 합금 용접에 있어 강도가 높은 재료를 후진 측에 배열하고 마찰교반용접을 이행하는 것이 좀더 바람직할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 박재철, 김성중, "5456-H116 합금에 대하여 최적 마찰교반 프로세싱 조건 규명 및 기계적 특성 평가," 한국표면공학회지, 제42권, 제1호, pp. 13-20, 2009.
- [2] 이원배, Gehard Biallas, Martin Schmuecker, 정승부, "마찰교반접한 오스테나이트계 스테인리스강과 6013 알루미늄 합금 이종 접합부의 접합 특성 및 계면 성질," 대한용접학회지, 제23권, 제5호, pp. 469-476, 2005.
- [3] S. Katsas, R. Dashwood, M. Jackson, R. Grimes, "Influence of subsequent cold work on the superplastic properties of a friction stir welded (FSW) aluminium alloy," Materials Science and Engineering A, vol. 527, no. 4-5, pp. 1022-1026, 2010.
- [4] 김정근, 김기경, 박해웅 공저, 금속현미경 조직학, 도서출판 골드, 1999.
- [5] 송상우, 김남규, 강정윤, "알루미늄합금의 이종 마찰교반접합," 대한용접접합학회지, 제27권, 제5호, pp. 480-485, 2009.
- [6] 강정윤, "알루미늄 이종용접의 마찰교반용접기술", 2008 Symposium of FSW, p.39, 2008.
- [7] 장석기, 박종식, 한민수, "1050 Al합금판재의 핀 마찰 교반용접에 의한 실험적 연구", 한국마린엔지니어링학회, 제31호, 제4호, pp.394-400, 2007.
- [8] 장석기, 김성중, 우용빈, 박종식, "FSW된 이종알루미늄합금의 접합특성 및 미세조직," 2009 춘계 한국마린엔지니어링학회, p.423, 2009.
- [9] P.M.G.P. Moreira, M.A.V. de Figueriredo, and P.M.S.T. de Castro, "Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 48, no. 2, pp. 169-177, 2007.
- [10] H. Lombard, D. G. Hattingh, A. Steiwer, and M. N. James, "Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy," Engineering Fracture Mechanics, vol. 75, no. 3-4, pp. 341-354, 2008.
- [11] 박재철, 손정호, 김성중, "이종 알루미늄 합금 (6061-T6:5052-O)에 대한 마찰교반용접시 이송속도 변수에 따른 기계적 특성," 2009 춘계 한국마린엔지니어링학회, p. 421, 2009.
- [12] 권용재, "마찰교반프로세스를 이용한 표면미세조직제어", 대한용접접합학회, 제25권, 제3호, pp. 6-11, 2007.
- [13] L. F. Mondolfo, Al Alloys Structure and Properties, London: Boston: Butterworths, 1976.
- [14] Ho John, Al Properties and Physical Metallurgy, American Society for Metals, 1984.

저 자 소 개



한민수(韓民洙)

1997년 목포해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2009년 목포해양대학교 기관시스템공학과 대학원(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부(전임강사).



장석기(張石基)

1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부(교수).