

<기술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.7.693

알루미늄합금 6061-T6의 마찰교반용접 조건에 따른 기계적특성 및 용접부 조직평가

장 석 기* · 박 종 식*

(2009년 1월 28일 접수, 2009년 6월 5일 수정, 2009년 6월 8일 심사완료)

Mechanical Characteristics and Microstructure on Friction Stir Welded Joints with 6061-T6 Aluminium Alloy

Seok-Ki Jang and Jong-Seek Park

Key Words: Friction Stir Welding(FSW ; 마찰교반용접), Heat Affected Zone(HAZ ; 열영향부), Thermo-Mechanically Affected Zone(TMAZ ; 열기계적영향부), Traverse Speed(용접속도), Rotating Speed(교반 속도)

Abstract

This paper shows mechanical properties and behaviors of macro- and micro-structures on friction stir welded specimen with 6061-T6 aluminum alloy plate. It apparently results in defect-free weld zone jointed at welding conditions like the traverse speed of 267mm/min, tool rotation speed of 2500rpm, pin inserted depth of 4.5mm and tilting angle of 2° with tool dimensions such as tool pin diameter of 5mm, shoulder diameter of 15mm and pin length of 4.5mm. The tensile stress $\sigma_T=228\text{MPa}$ and the yield point $\sigma_Y=141\text{MPa}$ are obtained at the condition of traverse speed of 267mm/min and tool rotation speed of 2500rpm. With the constant rotation speed, the higher traverse speed become, the higher tensile stress and yielding point become. Vickers hardness for welding zone profile were also presented.

1. 서 론

고강도 시효 경화형 Al합금의 접합특성은 많이 발전되어왔지만 아직도 실제 아크나 빔 용접의 기술적, 경제적 그리고 환경적 측면 때문에 선박 구조물의 경량화에 어려움이 존재한다. 예로서 MIG, TIG와 같은 용융용접법의 단점인 고온균열 및 큰 변형 등의 문제로 인해 용접이 어려웠던 Al합금에 대해 고상접합 공정인 FSW⁽¹⁻⁸⁾기술 개발은 생산 가공 공정에 크게 기여하게 될 것이다. 즉 고상접합공정의 기술적 효과가 뛰어나 용접이 어려웠던 Al합금에 대해 접합 특성이 양호하여 구조물의 경량화가 기대된다.

국내의 경우 FSW접합부의 특성을 개선하고 FSW 기법을 산업체에 적용하기위한 연구개발 활동과 관련하여 몇몇 대학과 연구소에서 관심과 진전이 있으나 아직 연구 개발 중에 있으며 산업계 적용은 Al합금 소비선진국들에 비해 상대적으로 뒤쳐져있는 실정이다. 따라서 FSW공정의 접합 기구를 이해하고 접합소재와 FSW공구와의 상호작용 기구 및 FSW⁽⁹⁻¹²⁾ 용접성에 대한 이해증진 그리고 용접부기계적 성질을 향상시키는 기술에 대한 다양한 자료의 축적이 요구된다.

본 연구는 고강도 시효 경화재인 Al6061-T6합금을 사용하여 공구 회전 방향과 교반속도, 용접속도 등 용접조건변화에 따른 접합부의 강도특성 및 용접성을 관찰하고 그 영향을 분석하였다. 또한 접합부 단면의 경도분포와 파단거동의 상관성 그리고 용접부 횡단면의 매크로적 거동, 미시적 조직의 변화 등을 고찰하였다.

† 책임저자, 회원, 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : jangsk@mmu.ac.kr
TEL : (061)240-7205 FAX : (061)240-7201

* 목포해양대학교

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.60	0.66	0.35	0.078	1.22	0.13	0.039	0.014	Balance

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 시험 재료

AA6061-T6재료의 화학적 조성은 Table 1과 같으며 항복점(yielding point)과 인장응력(tensile stress)의 값은 각각 $\sigma_Y = 274\text{MPa}$ 와 $\sigma_T = 322\text{MPa}$ 이고, 연신율(elongation)은 16.63%이며, 비커스경도는 112Hv이다.

2.2 실험 방법

2.2.1 용접시험

용접에 사용된 판재는 270×80×5mm의 2매를 1조로 사용하였다. FSW접합에 사용된 공구의 치수는 어깨지름이 15 및 20mm로, 핀의 직경은 4 및 5mm로, 핀의 길이는 4.5mm로, 핀 외주에는 나사피치 1.0mm의 오른나사로 제작하였으며, 2°의 전진각(Tilting angle), 반시계방향 및 시계방향, 핀의 삽입깊이 4.5mm, 교반속도 250~2500rpm이내 및 용접속도 41~267mm/min로 Table 2와 같은 용접조건으로 용접을 실시하였다.⁽¹³⁾

2.2.2 압입 경도시험

용접부의 압입변형저항을 측정하기 위하여 경도시험을 실시하였다. 용접부의 거시적 경도 경향 그리고 용접부내의 경도수준분포를 상세 규명하기 위하여 2종의 측정을 실시하였다. 즉 하나는 용접부 횡단면을 가로방향의 측정간격 1mm, 세로방향 1, 2.5 및 4mm 깊이에서 측정하였으며, 또 하나는 보다 조밀한 0.5×0.5mm 일정 간격으로 너깃, TMAZ, HAZ 및 경도연화온도영역 등에 대해서 경도를 측정 하였다. 이 시험에 사용된 마이크로 비커스 경도시험기는 SHIMADZU사의 HVM-2 시험기로서 배율은 X40으로, 135°의 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하여 하중 1.98N과 하중시간 10sec로 실시하였다.

2.2.3 인장시험

용접부의 항복점, 인장응력 및 연신율 등의 기

Table 2 Friction stir welding conditions and different tool dimensions

Tool Shape	Tool Dimension			FSW Conditions			
	Shoulder Dia. (ϕ)	Pin Dia (ϕ)	Pin Length (mm)	Rotation Speeds (rpm)	Traverse Speeds (mm/min)	Tilt Angle, Pin inserted Depth	Rotation Direction
Right handed Screw Type	15 20	4 5	4.5	250 800 1800 2500	41 87 124 267	2° , 4.5mm	Anti-clockwise or Clockwise

계적 성질을 구하기 위하여 인장시험을 실시하였다.⁽¹⁴⁻¹⁷⁾ 인장시험편은 한국공업규격KS B 0801 5호로 제작하였다.

이 시험에 사용된 인장 시험기는 유압식(INSTRON 8516)이며, series IX 프로그램을 이용하여 인장속도 0.2mm/min으로 인장하여 하중-변위 선도 및 응력-변형율 선도를 구했다.

2.2.4 용접부 횡단면 마크로 및 미세 조직시험

용접부에서의 기공이나 용접균열과 같은 결함 그리고 용접부 단면의 용접상태 및 용접 조직의 유동 거동 및 미세조직의 변화를 관찰하기 위하여 용접부 횡단면에 표면에칭을 다음과 같이 실시하였다. 즉 절단된 시편의 용접부를 #600으로 조연마, #2000으로 연마한 후 산화알루미늄을 사용하여 정밀 연마하였다. 에칭은 Keller용액에 20min동안 침적시킨 후 증류수로 세척⁽¹⁸⁾ 건조하였다. 광학현미경(X40) 및 SEM(X1000)으로 용접부 횡단면의 너깃, 열-기계적 영향부, HAZ등의 마크로 및 미세 조직의 촬영과 EDX분석을 실시하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 마찰교반용접의 건전한 용접 인자 및 기계적 특성 거동

2°전진각과 반시계방향으로 교반속도 250, 800, 1800 및 2500rpm마다 용접속도 41, 87, 124 및 267mm/min로 변화시켜 용접된 접합부에 대해 나안과 광학현미경으로 용접부위의 용접상태를 고찰하였다.

Fig. 1 사진에서 낮은 교반 속도 250rpm와 낮은 용접속도 41mm/min로 용접한 경우 교반부족

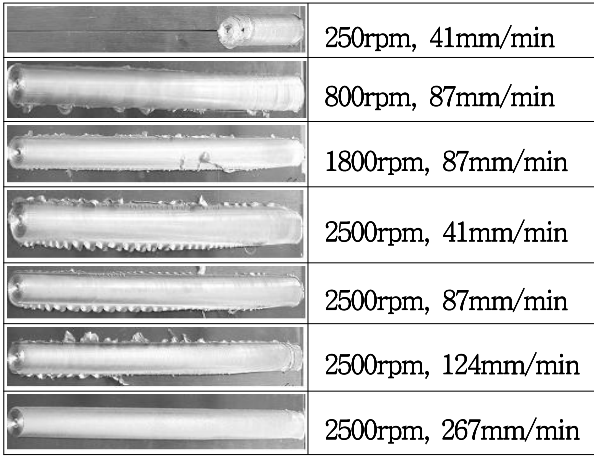


Fig. 1 Top surfaces of welded specimens

으로 마찰열이 높게 발생하지 않아 용융과 소성 유동이 부족하여 접합을 계속할 수 없었다. 1800rpm, 87mm/min 조건에서는 결함은 없으나 Table 3에 보인 바와 같이 기계적 특성치가 낮게 나타났다.

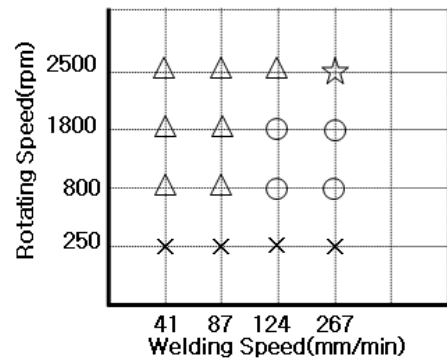
한편 교반 속도 2500rpm과 용접속도 267mm/min로 용접한 경우 용접표면은 매끄럽고 칩도 생성되지 않았으며 결함도 없었다. Table 3은 동일 실험 조건에서 3회씩 용접된 시편들의 평균값인 기계적 성질을 나타내고 있다. Fig. 2는 건전한 용접부를 얻기 위해 용접속도와 공구의 교반속도와의 관계를 나타낸 것이다.

800rpm 이상의 동일 교반속도에서 용접속도가 클수록 용접상태는 양호하였다. 250rpm과 같이 교반속도가 아주 낮은 경우에는 교반부족으로 용접속도에 관계없이 용접결과는 크게 불량하였다.

Fig. 1과 Fig. 2 그리고 Table 3에서 800~1800rpm과 124~267mm/min의 조건에서 용접한 경우가 용접부의 비드와 칩, 결함 유무 등 겉보기 양태와 기계적 특성으로 판단할 때 비교적 양호한 용접조건으로 판단된다. 하지만 회전수 2500rpm 및 용접속도 267mm/min 조건에서 용접된 용접부 표면 상태와 기계적 특성이 가장 우수하였다. Fig. 3은 41, 87, 124 및 267mm/min(이 용접속도의 경우 시계 및 반시계 방향에 대해)와 같은 각 용접속도에 대해 공구 교반속도를 증가시키에 따라 변화되는 인장 응력의 거동을 보여준 그림이다. 일반적으로 동일교반속도에서 용접속도가 클수록 인장응력은 크게 나타났다. 2500rpm, 267mm/min 조건에서 공구 회전방향에 따른 인장응력은 반시계방향은 228MPa이고 시계방향

Table 3 Mechanical properties of friction-stir-welded Al alloy 6061-T6 plate with different welding conditions

rpm	mm/min	Max Tensile Stress (MPa)	Yield Point (MPa)	Elongation (%)	Energy to Break point (N-mm)
250	41	Defect in welding			
	41	184	108	8.59	52019
800	87	199	121	6.92	45008
	124	207	128	6.64	44888
	267	200	138	4.67	24628
1800	41	169	113	3.97	21376
	87	197	123	4.74	28647
	124	208	130	5.35	34073
	267	228	140	7.36	54057
2500	41	190	114	6.64	40290
	87	194	120	4.95	29320
	124	165	128	7.47	50667
	267	228	141	7.20	53101
B/M	Transverse	322	274	16.63	188343



- ☆ : Defect Free, Very Good Mechanical Properties
- : Defect Free, Good Mechanical Properties
- △ : Defect Free, X : Defect

Fig. 2 Processing map for friction stir welding

은 225MPa로 되어 회전방향에 크게 영향을 받지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 4은 각각의 용접속도에서 교반속도변화와 공구의 회전방향에 따른 항복점의 거동을 나타낸 그림이다. 동일 용접속도에서 교반속도의 변화에 따른 항복점의 크기는 거의 일정하였으나 일정 교반속도에서는 용접속도가 클수록 항복점이 증가하는 것을 확인하였다.

또한 2500rpm와 267mm/min조건에서 시계방향과 반시계방향의 항복점은 거의 같게 나타났다.

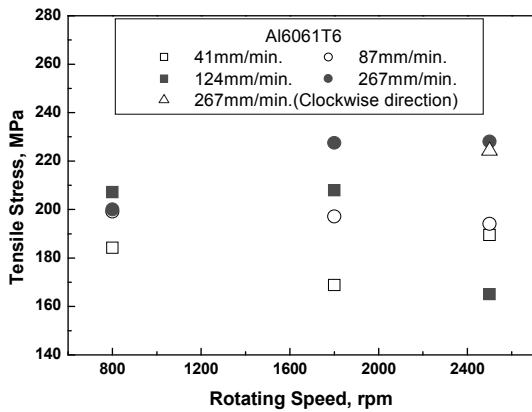


Fig. 3 Tensile stress vs rotating speeds according to welding speed, especially at 267mm/min with clock wise and anti-clockwise direction

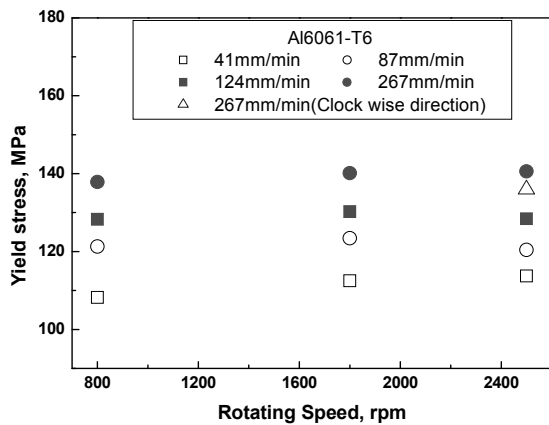


Fig. 4 Yield stress vs the rotating speed according to welding speed with anti-clock wise direction

6061-T6 Al합금과 같은 열처리형 합금 및 시효경화재는 비열처리합금인 AI5083O⁽¹⁸⁾와 반대로 교반속도와 용접속도가 클수록 항복점 및 인장응력이 크게 개선됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 2°전진각과 반시계방향으로 교반속도 2500rpm와 용접속도 267mm/min의 조건에서 용접된 3개의 시편에 대한 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 모재의 항복강도 274MPa에 비해서 항복점은 51%인 140MPa 모재의 인장강도 321MPa에 비해 인장응력은 71%인 228MPa, 연신율은 모재 16.6%에 비해 43%인 7.2% 및 파단시 까지 흡수에너지는 53101N-mm을 나타냈다. 설계기준 강도를 적용할 경우 모재의 71%의 강도를 갖는 FSW용접부 강도는 구조물 용접에 적용이 가능하

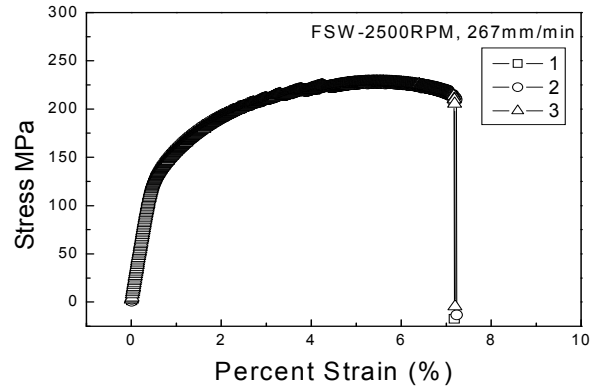


Fig. 5 Stress-strain curves under traveling speed of 267mm/min at constant rotating speed of 2500rpm

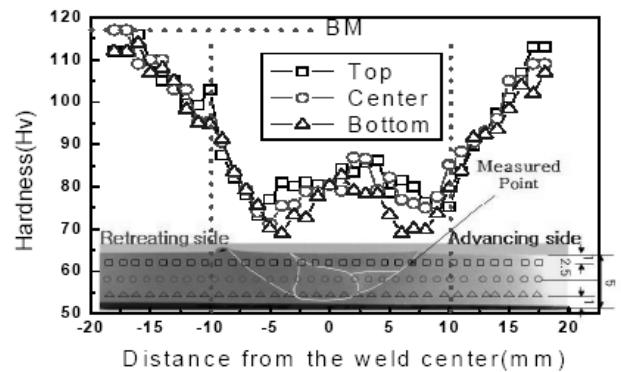


Fig. 6 Comparison of micro vickers hardness at horizontal profiles jointed by welding speed of 267mm/min and rotation speed of 2500rpm

다고 판단된다. 항복점과 연성은 크게 모재의 것에 비해서 저하됨을 알 수 있다. 이는 6061-T6 Al합금은 열처리형 합금 및 시효경화재로서 강도와 연성이 높았으나 마찰교반용접시 소성유동에 의한 용접부의 너깃, TMAZ 및 HAZ등의 마크로 조직의 생성, 마크로 조직내의 고용체 분포상태 및 각고용체의 화학조성 등의 변화 때문에 열영향부의 전위조직과 석출물 형상과 분포가 다르게 되어 용접부 경도가 저하되고 용접강도 및 연성이 크게 저하된 것으로 추정된다.

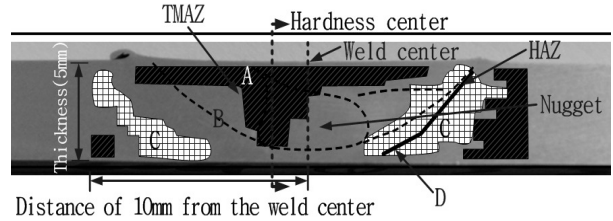
3.2 접합부 횡단면의 경도거동

Fig. 6은 2°의 전진각, 용접속도 267mm/min, 반시계방향의 교반속도 2500rpm조건에서 용접된

FSW시편의 용접부의 횡단면의 두께 1, 2.5, 4mm에서 수평방향으로 1mm 간격마다 측정된 경도분포거동을 나타낸 그림이다. 그림에서 용접부 횡단면의 마크로 형태 즉 너깃, TMAZ 및 HAZ가 거시적으로 잘 드러나 보인다.⁽¹⁸⁾ 대체적으로 공구의 교반마찰의 영향을 직접 받은 용접부의 경도는 모재경도 116Hv의 60~75%로 상당히 낮게 분포하였다. 용접부 저부에서의 경도는 모재의 60~65%로 매우 낮은 경도분포를 보였다. 특이사항은 용접선에서 공구어깨의 외주로부터 약 10mm 떨어진 영역까지 교반마찰열의 전도현상의 영향으로 낮았던 경도가 선형적으로 모재의 경도값까지 증가해가는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 용접중심으로부터 용접부의 좌우 횡단면의 경도를 0.5×0.5mm 등 간격으로 조밀하게 측정하여 너깃 TMAZ, HAZ 및 연화온도영역 등의 경도 수준(hardness level)분포를 시각적으로 나타내기 위한 그림이다. 특이점은 용접중심(weld center)에서 후퇴측(retreating side)으로 2mm 이동한 종축(hardness center line ; 경도중심선)을 기준으로 거의 좌우 대칭적으로 경도수준분포가 나타나고 있다. 그림에서 영역(A)는 어깨와 핀의 영향을 직접 받는 곳으로 모재경도의 70%~75%로서 너깃과 TMAZ경계 선 좌우에 걸쳐 T형으로 분포하고 있다. (A)영역 바로아래영역(B)은 모재경도의 65%~70%로서 전진측은 너깃(nugget) TMAZ영역에 걸쳐서 후퇴측은 너깃 TMAZ 및 HAZ영역에 걸쳐 분포하며 경도중심선의 좌우로 대칭적이다. (C)영역은 모재의 60%~65%인 비교적 낮은 경도로서 전진측은 HAZ와 경도연화온도영역(hardness softening temperature affected zone; HSTAZ)⁽¹⁸⁾에 걸쳐서 후퇴측은 경도연화온도영역에만 분포하였으며, 가장 낮은 경도는 모재의 60%미만으로 전진측(advancing side) (C)영역 내에 약 50° 경사진 실선(D)위에 분포하였다. 한편 경도중심선에서 멀어질수록 경도세기는 점점 선형적으로 증가하여 어깨외주로부터 10mm 떨어진 곳에서는 모재의 경도와 일치하였다. 교반마찰열이 경도에 미치는 영역은 상당히 넓으며 이 영역에서의 경도분포는 마크로 조직의 너깃 TMAZ 및 HAZ 등의 영역 안에서 서로 다른 경도크기를 나타내고 있다.

또한 전진측(advancing side) HAZ영역인 너깃저부에서 어깨외주로 이어지는 약 50°경사진 사선



A : 70% up to 75%, B : 65% through 70%, C : 60% through 65%, D : Less than 60%

Fig. 7 Distribution of hardness level measured at the traverse speed of 267 mm/min, and the rotation speed of 2500 rpm

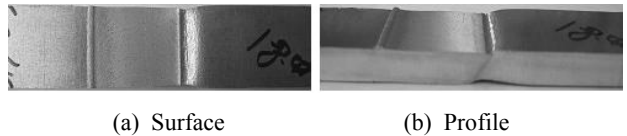


Fig. 8 Fractured configurations after tensile test with Al6061-T6

(D)위에 가장 낮은 경도 분포가 선상으로 존재함을 확인하였으며 재료의 기계적 특성으로 판단하면 경도가 가장 낮은 이곳에서 사선방향으로 시편이 파단 될 가능성이 높다고 판단된다.

Fig. 8은 인장시험 후 분리파단 순간의 인장시험편의 상부표면(a)과 측면(b)의 파손상태를 보여준 사진이다.

위에서 언급한 바와 같이 Fig. 7에서 HAZ영역의 경도가 가장 낮은 사선D를 따라서 파단 되었음을 확인하였다.(Fig. 8(b))

3.3 접합부 횡단면의 마크로 및 미세조직

Al6061-T6합금판재의 FSW용접부 횡단면의 에칭에 의한 거시적 및 미시적 거동을 관찰 하였다. Fig. 9(a)는 마크로 조직의⁽¹⁹⁾ 특성을 보여준 사진으로HAZ(b,c,d,l,m;열영향부), TMAZ(f;열기계적영향부), 너깃(h) 및 HSTAZ(n,o;경도연화온도영역)이다.

Fig. 9(b)는 관심 영역의 미세조직의 사진이다. 모재 B/M에는 에칭에 의한 부식으로 석출물 사이에 실같은 띠형의 분자입계가 보였으나 용접 시 마찰열 영향을 받은㉔와 ㉕에는 띠형의 분자입계가 나타나지 않았으며 어깨 및 핀 등에 의한 기계적 변형도 확인되지 않았다.

TMAZ(기계적 열영향부) ㉖는 비교적 큰 고용

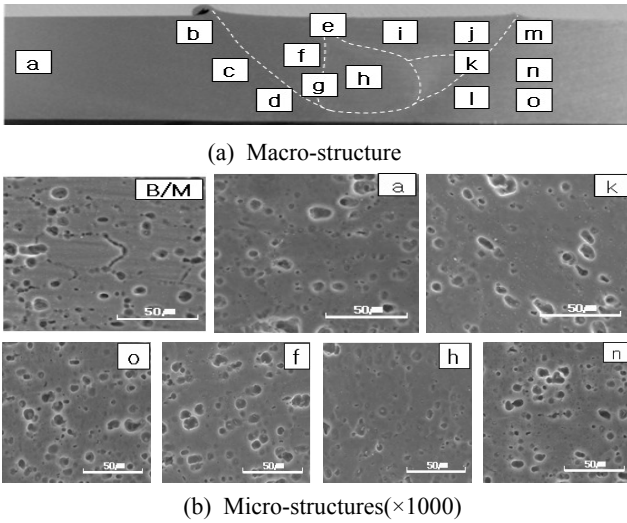


Fig. 9 Macro-and micro-structures on cross-section at traverse speed of 267mm/min and rotation speed of 2500rpm

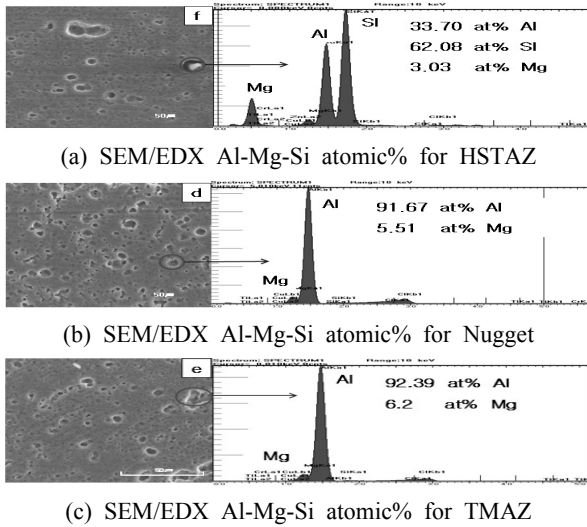


Fig. 10 SEM/EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) Analysis of Al-Mg and Al-Mg-Si

체가 45°방향으로 배열되었으며 영역 \square 은 교반부와 기계적 열영향부의 경계 부분이며, 영역 \square 는 핀의 외주에서 비교적 먼 영역으로서 약45°방향으로 조직이 재결정되는 소성유동 거동을 관찰할 수 있었다.

너깃부 \square 는 동적으로 재결정된 고용체로서 마이크로적으로 울챙이 같은 형상을 하고 있으며 고용체가 상대적으로 적게 분포하였다. 모든 영역에서 결합인 미소공동체(void)는 나타나지 않았다.

Fig. 10의(a)는 Fig. 9(a)의 \square 영역으로 어깨외주에서 6mm떨어진 경도연화온도영역이다. 온도만의 영향으로 이 영역의 미세조직은 모재의 미세조직에 비해 크게 변화하였으며, Al-Si-Mg(33.70 - 62.08-3.03 at %) 석출물이 극소량 발생한 것을 볼 수 있다.

너깃 \square 에는 Al-Mg(91.67 - 5.51 at %)의 석출물이 비교적 다량 포함되어있다. TMAZ \square 에는 Al-Mg(92.39 - 6.2 at %)의 석출물이 45°방향으로 재고용형태로 다량 분포하였다. 너깃과 TMAZ와 같이 열과 기계적 영향에 의한 EDX상의 결합고용상태와 온도 만에 의한 EDX상의 결합고용상태가 서로 다른 것을 알 수 있다. 결국 재고용거동, 조직형태, 조직분석을 통하여 용접과정동안 기계적 교반 및 마찰열로 인한 조직변형은 미세조직 기구의 형성에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다.

4. 결 론

두께가 5mm인 Al6061-T6 판재에 대해 교반마찰용접 후 용접부 특성에 대한 실험결과는 다음과 같다.

- (1) 2°전진각, 반시계방향, 공구교반속도 2500rpm 및 용접속도를 267mm/min으로 용접한 경우의 용접성이 가장 양호하였다.
- (2) 양호하게 교반용접된 인장시편의 항복점은 141MPa, 인장응력은 228MPa, 연신율 7.2% 및 파단 시까지의 저장에너지는 53101N·mm이다.
- (3) 실험교반속도와 용접속도가 높아질수록 항복점, 인장응력, 연신율 및 저장에너지 등의 기계적 성질은 개선되었다.
- (4) 용접부의 경도가 모재의 것에 비해 크게 낮아 졌다. 용접중심(weld center) 선에서 후퇴측(retreating side)으로 2mm이동한 축을 중심으로 경도가 좌우 대칭적으로 분포하였다.
- (5) HAZ의 전진측(advancing side)에 약 50°경사진 실선방향으로 경도(모재의 60%미만)가 가장 낮게 분포하였다. 이 경사선을 따라 파단 하였다.
- (6) 너깃과 TMAZ와 같이 열과 기계적 영향에 의한 EDX상의 결합고용상태와 온도만에 의한 EDX상의 결합고용상태는 서로 다르다. 용접과정동안 기계적 교반 및 마찰열로 인한 조직변형은 미세조직 기구의 형성에 크게 영향을 미친다.

참고문헌

- (1) Prado, R.A., Mur, L.E., Soto, K.F. and McClure, J.C., 2003, "Self-Optimization in Tool Wear for Friction-Stir Welding of Al6061+20% Al₂O₃ MMC," *Materials Science and Engineering A349*, pp. 156~165.
- (2) Hassan, Kh. A.A., Norman, A.F., Price, D.A. and Prangnell, P.B., 2003, "Stability of Nugget Zone Grain Structures in High Strength Al Alloy Friction Stir Welds During Solution Treatment," *Acta Materialia 51*, pp. 1923~1936.
- (3) Somasekharan, A.C. and Murr, L.E., 2004, "Microstructures in Friction-Stir Welded Dissimilar Magnesium Alloys and Magnesium Alloys to 6061-T6 Aluminum Alloy," *Materials Characterization 52*, Vol. 49-64.
- (4) Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung, 2003, "The Joint Properties of Dissimilar Formed Al Alloys by Friction Stir Welding According to the Fixed Location of Materials," *Scripta Materialia 49*, Vol. 423-428.
- (5) SHIGEMATSU, I., KWON, Y.-J., SUZUKI, K., IMAI, T. and SAITO, 2003, "Joining of 5083 and 6061 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding," *Journal of Materials Science Letters 22*, Vol. 353-356.
- (6) Byoung-Hyun Yoon, Heung-Ju Kim, Woong-Seong Chang, and Young-Gak Kweon, 2006, "Corrosion Behavior of Arc Weld and Friction Stir Weld in Al 6061-T6 Alloys," *Corrosion Science and Technology*, Vol. 5, No. 6, pp. 196~200.
- (7) H. T. Kim, S. H. Hwang, S. W. Nam, 1994, "Weld Cracking of High Strength Al-Zn-Mg Alloy Weldment," *Journal of KWS*, Vol. 12, No. 1, Mar.
- (8) Won-Bae Lee, Sang-Won Kim, Chang-Young Lee, Yun-Mo Yeon, 2004, "Effects of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al Alloy," *Journal of KWS*, Vol. 22, No. 3, June.
- (9) 熊谷 正樹, 田中 直, 1999, *溶接學會全國大會概要 第65集*, p. 554.
- (10) Mononen J., et al., 2001, "Cost Comparison of FSW and MIG Welded Aluminum Panels," *Proceedings of the 3rd Friction Stir welding Symposium*, Kobe, 27-28 Sept.
- (11) Seok-Ki Jang, Jeong-il Jeon, 2005, "Experimental Behaviors of Weld Zone Property of the Butt and Lap Jointed Specimen Friction-Stir-Welded with 2mm Thickness 1050 Aluminum Alloy Sheet," *Transactions of KSME*, Vol. 30, No. 2, pp. 187~193.
- (12) Seok-Ki Jang, Don-Chool Lee, Seong-Jong Kim and Jeong-il Jeon, 2005, "Micro-Structures in Friction Stir Welded Al 7075-T651 Alloy," *Proceedings of the KOSME First Conference*, pp. 331~338.
- (13) Seong-Jong Kim, Jong-Seek Park, Min-Su Han and Seok-Ki Jang, 2007, "Evaluating of Mechanical Properties in Friction Stir Welding for New Material Al Alloy," *Proceedings of the KOSME First Conference*, pp. 39~40.
- (14) Seok-Ki Jang et al., 2007, "Effects of Tool Rotation and Transition Speed During Friction Stir Welding of Al7075-T651 Alloy," *Transactions of KSME*, Vol. 31, No. 4, pp. 532~539.
- (15) Seok-Ki Jang et al., 2007, "Weldability and Properties Of Lap Joints By Pin FSW with Al 1050 Al Sheet," *Journal of KSME*, Vol. 31, No. 4, pp. 394~400.
- (16) Seong-Jong Kim, Seok-Ki Jang and Min-Su Han, 2007, "Evaluation of Mechanical Characteristic of Al Alloy for Ship's Welded with Various Welding Techniques," *J of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 13, No. 3, pp. 223~228.
- (17) Lim, S.G., et al, 2003, "Micro-Structural Evolution and Tensile Behavior of Stir Friction Welded Al Alloys," *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, Vol. 41, No. 11, pp. 743~749.
- (18) Seok-ki Jang and Jong-seek Park, 2009, "Mechanical Characteristics and Macro- and Micro-structures on Friction Stir Welded Joints with 5083O Al Alloys," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 51~58.
- (19) Threadgill, P., 1997, "Friction Stir Welds in Aluminum Alloys-Preliminary Micro-structural Assessment," *TWI Bulletin*, Mar/April.