

Al 5083O합금의 마찰교반용접부의 조직과 특성평가

장석기† · 박종식*

(원고접수일 : 2008년 8월 4일, 원고수정일 : 2008년 10월 17일, 심사완료일 : 2008년 12월 2일)

Mechanical Characteristics and Macro-and Micro-structures on Friction Stir Welded Joints with 5083O Al Alloys

Seok-Ki Jang† · Jong-Seek Park*

Abstract : This paper shows the behaviors of macro- and micro-structures and mechanical properties for specimen's welding region welded by FSW, according to welding conditions with 5mm thickness aluminum 5083O alloy plate. It apparently results in defect-free weld zone in case traverse speed was changed to 32 mm/min under conditions of anti-clockwise direction and tool rotation speed such as 800 and 1250 rpm with tool's pin diameter of 5 ϕ mm and shoulder diameter of 20 ϕ mm, pin length of 4.5 mm and tilting angle of 2°. The ultimate stress of $\sigma_T=331$ MPa and the yield point of 147 MPa are obtained at the condition of the travel speed of 32 mm/min with the tool rotation speed of 1250 rpm. There is neither voids nor cracks on bended surface of 180° after bending test. The improvement of toughness after impact test was found. The lower rotating and traverse speed became, the higher were yield point, maximum stress and elongation (%) with the stresses and the elongation (%) versus the traverse speed diagram. Vickers hardness for cross section of welding zone were also presented. The typical macro-structures such as dynamically recrystallized zone, thermo-mechanically affected zone and heat affected zone and the micro-structures of the transverse cross-section were also showed. However, the author found out that the region of 6mm far away from shoulder circumference was affected by friction heat comprehensively, that is, hardness softened and that part of micro-structures were re-solid-solution or recrystallized. the author also knew that there is no mechanically deformation on heat affected zone but there are the flow of plastic deformation of 45° direction on thermo-mechanically affected zone and the segregation of Al-Mg on nugget. The solid solution wt (%) of parent material as compared against of friction stir welded zone was comprehensively changed.

Key words : FSW(Friction Stir Welding : 마찰교반용접), Traverse speed(용접속도), Rotating speed(교반 속도), Tilting angle(전진각), Ultimate stress(최대응력)

† 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail : jangsk@mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7205)

* 목포해양대학교 대학원

1. 서 론

FSW⁽¹⁾⁽²⁾의 기술개발과 실용화와 관련된 선진 각국의 연구가 대단히 활발하다. FSW에 의한 Al 합금의 생산 공정은 피용접재의 용융점 이하의 온도에서 운영되는 고상용접공정이기 때문에 고강도 Al합금과 같은 재료에 대해 리벳팅을 대신하는 용접에 적용되고 있다. 스웨덴, 노르웨이 등에서 Al 선박제조에 FSW를 도입하여, 다양한 크기의 미리 제작된 정형화된 Al판넬을 선박제조에 적용함으로써 생산성 향상과 사용성을 확보하였다⁽³⁾⁽⁴⁾.

한편 국내의 경우 FSW^{(5)~(8)}기술의 연구개발에 관심과 진전이 있으나 그 개발과 산업계 적용이 Al 소비선진국들에 비해 상대적으로 뒤쳐져있는 실정이다. 또한 FSW에 대한 원리만 알려져 있고 세부적 기술이나 노하우는 비밀로 되어 실용화를 위한 연구기술개발이 요구되고 있다.

또한 다양한 피용접재에 대해 FSW용접부의 특성을 개선하기 위하여 이음부 용접성에 미치는 인자, 즉 공구교반속도, 용접속도, 공구회전방향, 전진각도, 공구형태, 주위환경 등 다양한 인자들을 변화시켜서 각 피용접재에 대한 최적의 용접조건 규명과 용접부 미세조직 형성기구인 재결정 등의 관찰에 대한 자료의 축적도 필요하다.

본 논문에서는 두께 5mm인 알루미늄 5083O에 마찰교반용접법을 적용하기 위하여 공구치수⁽²⁾ 및 공구의 형상⁽³⁾을 달리하여 용접용 공구를 제작하고, 용접교반속도, 용접속도 등의 용접조건에 변화를 주어 맞대기이음을 실시한다. 용접부의 비커스 경도, 인장최고응력, 항복점, 파단까지의 저장에너지 및 연신율을 비교하여 최적의 공구치수 및 용접조건을 규명하고 충격시험 및 형틀 굽힘 시험(Guided bending test)후 용접부의 변형결과 및 파단상태를 관찰 하여 마찰교반용접성을 판단한다. 최적의 용접조건에 대한 용접부 횡단면의 용접양태 및 조직의 변화를 비교하기 위하여 용접부 단면에 대한 마크로 및 미세조직 관찰을 실시하여 용접부 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 시험 재료 및 용접방법

이 실험에 사용된 재료는 두께가 5mm인 AA5083O 판재를 사용하였으며, 재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition (wt%) of Al alloy 50850

Element wt(%)	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
Test Result	0.08	0.18	5.32	0.05	0.64	0.25	0.01	Bal.
Cert.	0.02	0.12	4.53	0.02	0.63	0.41	0.01	Bal.

Fig. 1은 마찰교반용접용 공구명칭, 피용접재, 전진각 및 용접방향 등을 표현한 그림이다. 용접에 사용된 모재치수는 270mm × 80mm × 5mm의 2매를 사용 하였다. FSW접합에 사용된 공구는 어깨지름이 15 또는 20φmm, 핀의 길이와 지름이 4.5mm, 3~5φmm, 나사 피치 1.0mm의 오른나사로 가공하였다.

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloy 50850

Specimen Sampling Direction	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HMV)
L-T	168.32	340.25	29.12	86
T-L	159.20	338.38	32.09	86

L: Longitudinal(rolling direction)

T: Transverse

Table 3 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 depth	Rotation Direction
Right handed Screw Type	15 20	3	4.5	250	32	2° 4.5m m	Anti-clockwise or clockwise
		4		800			
		5		1250			
		3600					

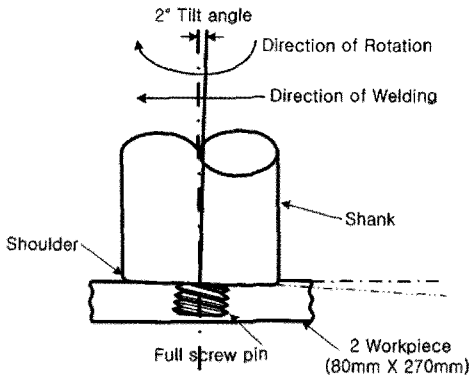


Fig. 1 Schematic view of a typical tool, tilt angle, and the direction of welding and rotation for friction stir welding

FSW용 최적의 공구와 용접조건을 찾기 위하여 각각의 공구에 대해 2°의 전진 각(Tilting angle), 핀의 삽입깊이 4.5mm, 시계 및 반시계방향, 교반속도 250~3600rpm, 용접속도 32~507 mm/min로 20가지의 접합조건으로 용접실험을 실시하였다. Table 3은 공구치수와 용접조건을 나타낸 것이다. 또한 FSW접합부의 용접성과 기계적 성질을 고찰하기 위하여 용접부 횡단면의 경도측정, 인장시험, 굽힘 및 충격시험 등을 실시하였으며 접합부 횡단면의 매크로적 거동 및 미세조직관찰을 위하여 그 단면을 에칭한 후 광학현미경 및 SEM으로 조직을 촬영하였다.

2.2 시험방법

2.2.1 인장시험

마찰교반용접된 판재 및 시험편 채취방향과 인장 시험편의 치수를 Fig. 2에 나타내었다.

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

2.2.2 경도시험

용접부의 변형저항을 측정하기 위하여 경도시험을 실시하였다. 이 시험에 사용된 마이크로 비커스 경도시험기는 SHIMADZU사의 HVM-2 시험기로서 배율은 X40으로, 135°의 다이아몬드 피라미드

압자를 사용하여 하중 1.98N과 하중시간 10sec으로 각각 측정하였다.

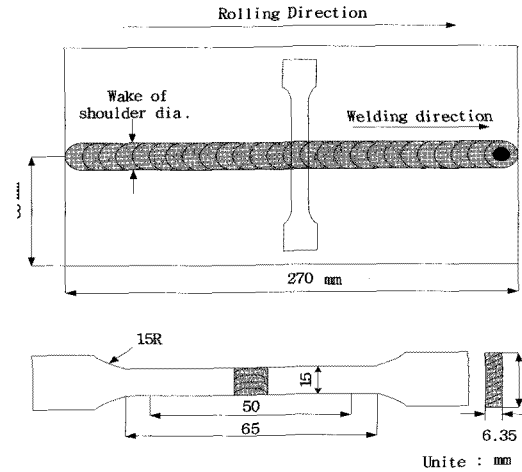


Fig. 2 Schematic of friction stir weld working direction and tensile test specimen

Fig. 3은 맞대기 이음 마찰교반용접된 용접부 횡단면의 경도 측정 위치를 나타낸 그림이다. 2°의 전진각, 반시계방향으로 용접된 시험편의 교반부(Stir zone)내의 너깃(Nugget) 중심을 기준점으로 열-기계적영향부(Thermo-mechanically affected zone; TMAZ)와 열영향(Heat affect zone; HAZ)부⁽⁹⁾순으로 가로방향의 측정간격 1mm로 46개소, 세로방향은 표면에서 1mm, 2.5mm 및 4mm의 깊이에서 측정하였다.

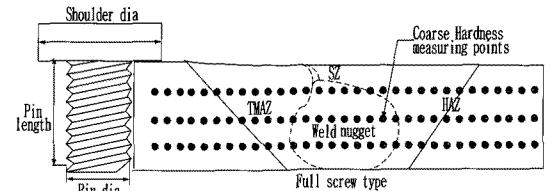


Fig. 3 Vickers hardness measuring positions of welding zone on butt-jointed specimen

2.2.3 형틀 굽힘 과 충격시험

180°변형 후 용접부 결함 유·무, 용접부 변형상태 및 파단거동 등을 관찰하기 위하여 형틀 굽힘 시험(DYHU-100TC-A/D)을 실시하였다. 3점 굽

합용 U자형 형틀 폭을 50mm로 고정하고 형틀위에 각각의 시편(200mm×30mm×5mm)을 올려놓은 후 15φmm 형 굽힘 지그를 사용하여 5.0mm/min의 속도로 굽힘 하중을 가하였다.

파괴기구의 변화와 용접부의 연성과 흡수에너지를 모재와 비교하기 위하여 충격시험을 실시하였다. 샤르피 충격시험기 용량은 30kgf-m, 해머 무게(Hammer weight) 22.25kg, 양각(Lift angle) 143°, 팔의 길이(Striking distance from rotation center to impact edge) 750mm이며 충격속도는 5.14m/sec이다. 시험편의 형상은 3호 시험편으로 길이는 55mm, 높이 10mm, 두께 5mm, 노치R1, 단면적 8mm로 제작하였다.

2.2.4 용접부 횡단면 마크로 및 미세 조직시험

용접부에서의 기공이나 용접균열과 같은 결함 그리고 용접부 단면의 용접상태, 용접 조직의 유동 거동 및 미세조직의 변화를 관찰하기 위하여 외관 검사 및 횡단면 표면에칭을 실시하였다. 절단된 시편의 용접부를 우선 #600으로 조연마, #2000으로 정밀연마한 후 산화알루미늄을 사용하여 연마포로 연마하였다. 에칭은 Keller용액에 2min 동안 침적시킨 후 증류수로 세척시켜 건조하였으며^[10], 광학현미경(×40) 및 SEM(×1000)으로 용접부 횡단면의 너깃, TMAZ, HAZ 등의 조직을 촬영하였다. 또한 EDX분석을 실시하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 마찰교반용접의 건전한 용접 인자

2°전진각과 반시계방향 일정에서 각 교반속도 250, 800, 1250, 2500 및 3600rpm 마다 용접속도 32, 61, 187, 507mm/min로 변화시켜 용접된 접합부에 대해 나안과 광학현미경으로 용접부위의 용접상태를 고찰하였다.

Fig. 4 사진에서 낮은 교반 속도 250rpm와 낮은 용접속도32mm/min 로 용접한 경우 교반부족으로 결함이 발생하였으며, 높은 교반 속도 3600rpm와 높은 용접속도 507mm/min로 용접

한 경우 교반과잉으로 용접표면은 거칠고 결함이 크게 발생하였다.

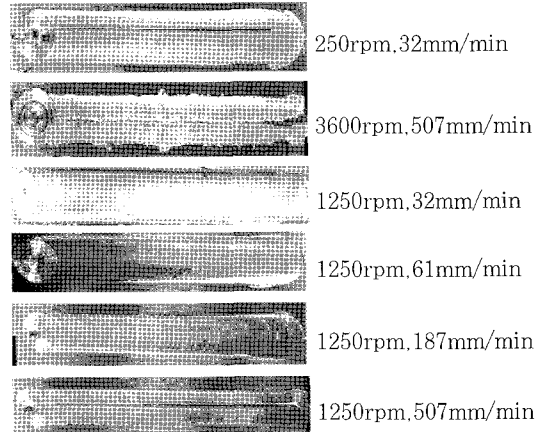


Fig. 4 Top surfaces of welded specimens

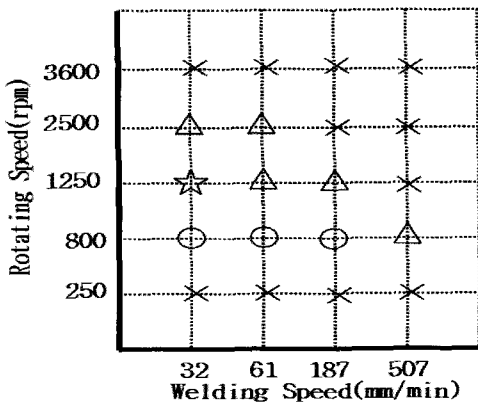
Table 4 Tensile properties of friction stir welded Al 5083O alloy with different welding conditions

		Max Tensile stress (MPa)	Yield Point (MPa)	Elong-ation (%)	Energy to break point (kgf-mm)
800 (rpm)	32	330	144.5	29.7	31439.65
	61	320.5	144.7	20.4	26321.69
	187	290.5	147.9	13.7	12114.29
	507	178.1	114.5	3.9	2745.91
1250 (rpm)	32	331	144.5	32	34085.84
	61	266.3	145.9	10.5	8368.42
	187	190	138.08	4.3	2508.00
	507	용접결함	-	-	-
2500 (rpm)	32	301.6	146.7	17.1	15972.66
	61	259.6	143.7	10.2	9187.84
	187	용접결함	-	-	-
	507	용접결함	-	-	-

* unit of welding speed is mm/min.

교반속도 1250rpm의 일정에서 이송속도가 증가할수록 용접표면은 거칠었으며 507mm/min에서는 용접결함까지 발생하였다. Table4는 교반속도 및 용접속도의 변화에 따른 용접부의 기계적 성질을 표로 나타낸 것이다. 교반속도 1250rpm와 용접속도32mm/min의 조건에서 인장응력은 모재와

비교하여 약 97%정도로 감소는 거의 없었다. 연신율에서는 모재에 비해 약 10%의 증가를 나타냈다. Fig. 5는 용접부위의 표면검사와 Table 4의 인장 시험결과를 근거로 용접속도와 교반속도에 따른 용접건전성을 나타내는 지도를 나타낸 것이다. 교반속도와 용접속도가 적절하게 제어되면 결함이 저하되거나 기계적 특성이 향상되는 것을 보여준다. 교반속도 800~1250rpm의 경우 용접속도가 낮을수록 용접건전성이 향상됨을 알 수 있다.



☆ : Defect free, very good mechanical properties, ○ : Defect free, good mechanical properties, △ : Defect free, × : Defect

Fig. 5 Processing map for friction stir welding

3.2 교반속도 1250rpm에서 용접속도에 따른 기계적 특성거동

Fig. 6은 1250rpm의 교반속도에서 용접속도 및 공구회전방향 변화에 따른 항복점, 최고응력 및 연신율 거동을 보여준 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 용접속도가 낮을수록 인장응력과 연신율은 높게 나타났다. 항복점은 용접속도에 영향을 거의 받지 않는 것을 확인하였다. 또한 용접속도 32mm/min에서 시계방향으로 교반한 경우의 인장응력 160MPa은 반시계방향의 회전에 의한 인장 응력 331MPa 보다 1/2절계 나타난 것을 확인하였다. Table 4와 Fig. 6으로부터 건전한 용접 조건은 전진 각 2°에서 반시계방향, 교반속도 800~1250rpm에서 용접속도 32mm/min일 때이며 최적 용접조건에서 항복점은 144.5MPa, 최고

응력은 331MPa, 연신율은 32% 및 파단까지의 저장에너지는 34085.84kgf·mm로 나타났다.

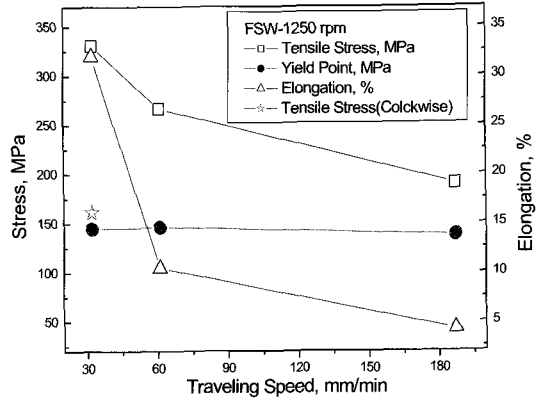


Fig. 6 Stresses and elongation vs traverse speeds at constant rotating speed of 1250 rpm

3.3 형틀 굽힘과 충격시험

Fig. 7은 형틀 굽힘 시험 후 용접면과 배면의 변형상태를 보인 것이다. 사진에 보인바와 같이 180° 변형 후 용접부의 표면에 공동(void)과 결함은 발견되지 않았으며 파손도 발생하지 않았다. 충격시험 후 모재의 파단면에는 덩플만이 존재하였으나 용접부의 파단면에는 덩플과 쉬어 립이 함께 존재하는 용접부의 연성과 파괴기구의 변화가 존재하였다. 모재의 흡수에너지 4.7 kg·m에 비해 용접된 시편의 흡수에너지는 5.5kg·m로 약간 증가하였다.

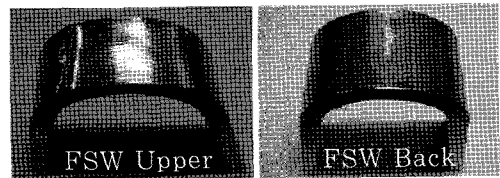


Fig. 7 Photographs of the deformed specimen after bending test

3.4 접합부 횡단면의 경도

Fig. 8은 2°의 전진 각, 반시계방향 1250rpm의 교반속도와 용접속도 32mm/min로 용접된 시편의 용접부 횡단면위에서 측정위치에 따라 경도 값

의 변화 정도를 거시적으로 비교한 그림이다. 용접 부중 너깃 중심에서 오른쪽으로 2mm떨어진 곳 (Advancing side)에서 두께의 표면에서 측정된 경도 값은 85Hv로 모재의 경도 값의 약99%를 보였다. 하지만 그이외의 너깃(Retreating side), TMAZ 및 HAZ의 경도 값은 대체적으로 모재보다 약간 낮게 분포하였으며 그 중에서 HAZ와 두께의 1/2곳의 경도분포가 가장 낮게 분포하였다.

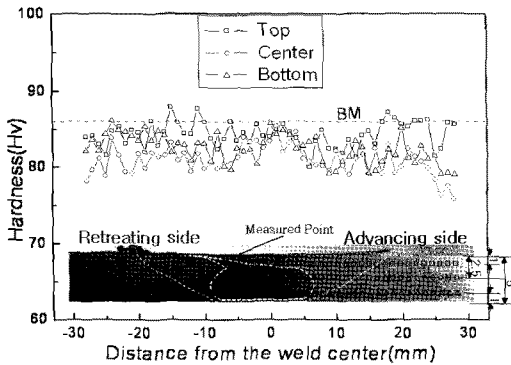


Fig. 8 Comparisons of hardness at horizontal profiles on the cross-section welded zone under the traverse speed of 32 mm/min. and the rotation speed of 1250 rpm

특이점은 전형적인 HAZ부가 아닌 곳 즉 공구어깨의주에서 6mm정도 떨어져고 시편두께의 2.5mm깊이에서의 경도는 낮게 분포(경도연화영역)하지만 표면1mm근방은 모재와 비슷한 경도분포를 보였다. 이것은 Al합금의 물리적 열전달특성인 우수한 열전도성과 열확산도 즉 어깨의 접촉면에 의해 발생된 높은 마찰열이 전도되고 동시에 표면에서는 열이 빠르게 확산되어 경도의 차이가 조성된 것으로 판단된다. 따라서 FSW용접부 횡단면에 대한 열영향부(HAZ)의 범위 및 경도연화영역에 대한 구체적인 분석과 해석이 요구된다고 사료된다.

3.5 접합부 횡단면의 마크로 및 미세조직

Fig. 9(a)는 2°, 반시계방향, 1250rpm 및 32mm/min로 용접한 시험편의 접합부횡단면 마크로 조직 특성과 영역구분을 보여준다. TWI에서

용접이음부의 단면의 마크로 조직 구분과 정의⁽⁶⁾를 한 것처럼 전형적인 마크로 조직을 보인다. [a]는 너깃(Dynamically re-solid solution weld nugget), [b] [c]는 TMAZ, [d] [e]는 HAZ이다. 다만 어깨의주에서 6mm떨어진 영역[f]까지도 교반 마찰열의 전도 및 확산 특성으로 모재와 비교하여 경도 및 미세조직의 변화가 발생한 것을 확인하였다. 또한 너깃은 일반적으로 동적 재결정 영역(Dynamically recrystallized zone)으로 알려진 영역으로 어깨와 핀의 모재와의 마찰열과 교반으로 발생된 고상 용융된 소재가 용접속도에 따른 공구의 이동에 따라 생성된 공구 뒤의 빈공간상에 채워지면서 새롭게 형성된 조직의 고용상태이다.

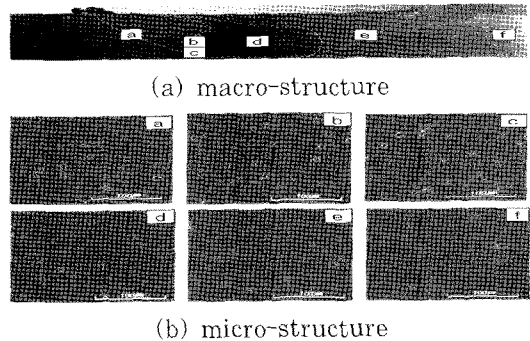
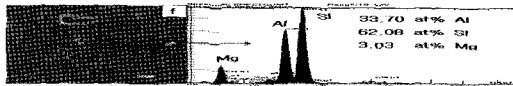


Fig. 9 Macro and micro-structures according to 32mm/min travelling speeds at 1250rpm rotation speeds

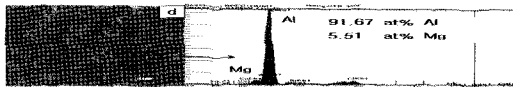
미세조직의 사진 Fig. 9(b)에서 너깃 [a]에 인접한 [b]는 소재의 극심한 소성유동 과 변형으로 연화된 결정조직이 45°경사진 방향으로 분포하였다. HAZ [d]는 기계적 변형이 존재하지 않았으며 [c]는 HAZ의 인접역인 TMAZ로 연신된 소성변형이 45° 방향으로 재고용됨을 볼 수 있다. 너깃 [a]에서 Al-Mg 석출물은 크기가 작고 불규칙하게 소량 존재 하고 있다. 모든 영역에서 미소공동(void)과 같은 용접 결함은 존재하지 않았다.

Fig. 10의 (a)는 Fig. 9(b)의 [f]역의 EDX분석결과를 보여준다. 어깨의주에서 6mm떨어진 영역으로 모재의 것과 비교하여 미세조직이 변화되었으며 Al-Si-Mg (33.70, 62.08, 3.03 at%) 및 Al-Mg(86.53, 5.97 at%)석출물이 극소량 발생

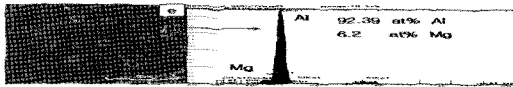
한 것을 볼 수 있다. 너깃 [a]에는 Al-Mg(91.67, 5.51 at%)의 석출물이 비교적 다량 포함되어 있다. TMAZ [c]에는 Al-Mg(92.39, 6.2 at%)의 석출물이 45°방향으로 재고용형태로 다량 분포하였다. 너깃과 TMAZ와 같이 열과 기계적 영향을 받은 EDX상의 결합고용상태는 온도만의 영향을 받은 HAZ의 결합고용상태가 서로 다른 것을 알 수 있다. 결국 용접시편의 기계적 성질, 경도분포, 고용상태 및 조직형태의 변화, EDX분석 결과로부터 용접조건에 따른 용접과정동안 기계적 교반 및 마찰열등은 미세조직 기구의 형성에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다.



(a) SEM/EDX Al-Mg-Si atomic% for HAZ



(b) SEM/EDX Al-Mg atomic% for Nugget



(c) SEM/EDX Al-Mg atomic% for TMAZ

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

4. 결 론

본 논문에서는 두께가 5mm인 Al 5083O합금판을 2°전진 각, 핀 압입깊이 4.5mm 및 공구를 반시계 방향으로 교반했을 때

1) 교반속도 1250rpm 및 용접속도를 32mm/min로 용접한 경우 표면결함이 없고 기계적 특성이 가장 양호하였다. 항복점은 모재의 88%인 147.3 MPa, 최고응력은 모재의 97%인 330.4 MPa 연신율은 모재의 105%인 30.5%, 파단 점까지 저장에너지는 34085.84kgf·mm이다. 또한 180°변형 후 용접부의 변형상태는 표면에 공동(Void)과 결함이 없고 파단도 발생하지 않았으며 충격시험에서 흡수에너지가 약간 증가하였다.

2) 또한 교반속도 800와 1250rpm에서 용접속도가 낮을수록 표면용접상태와 항복점, 인장응력, 연신율 및 파단까지의 저장 에너지 등의 기계적 특성은 우수하게 나타났다.

3) 어깨의 마찰열과 핀의 교반의 영향을 직접 받는 곳의 경도가 열전도 만에 의해 가열 변형된 곳의 경도보다 높게 나타났다.

4) 용접부 횡단면의 마크로 조직에서 공구어깨의 주에서 6mm 떨어진 영역도 너깃, TMAZ 및 HAZ와 같이 열전도에 의한 고용체의 변화 및 경도저하가 발생하였다. 또한 모재와 비교하여 Al-Si-Mg 및 Al-Mg석출물의 존재가 극소량 확인되었다.

5) 또한 TMAZ는 소성유동으로 45° 방향으로 재고용되고 석출물 성분은 Al-Mg가 존재하였으나 HAZ는 기계적 변형은 없고 석출물 성분은 Al-Mg-Si가 존재하였다.

참고문헌

- [1] R. A. Prado, L. E. Mur, K. F. Soto, and J. C. McClure, "Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al6061+20% Al₂O₃ MMC", Materials Science and Engineering A349, pp. 156-165, 2003.
- [2] Kh. A. A. Hassan, A. F. Norman, D. A. Price, and P. B. Prangnell, "Stability of nugget zone grain structures in high strength Al alloy friction stir welds during solution treatment", Acta Materialia 51, pp. 1923-1936, 2003.
- [3] 熊谷 正樹, 田中 直, 溶接學會全國大會概要, 第65集, p. 554, 1999.
- [4] J. Mononen et al., Cost Comparison of FSW and MIG Welded Aluminum Panels, Proceedings of the 3rd Friction Stir welding Symposium, Kobe, pp. 27-28 Sept. 2001
- [5] Seok-Ki Jang, Don-Chool Lee, Seong-

- Jong Kim, and Jeong-il Jeon, "Micro-structures in Friction Stir Welded Al 7075-T651 Alloy", KOMÉ, 2005.
- [6] Seok-Ki Jang et al., "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, 2007.
- [7] Seok-Ki Jang et al., "Weldability and properties of lap joints by pin FSW with Al 1050 Al Sheet", Journal of KSME, Vol.31, No.4, pp.394~400, 2007.
- [8] Seong-Jong Kim, Seok-Ki Jang, Min-Su Han, "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, 2007.
- [9] P. Threadgill, Friction Stir Welds in Aluminum Alloys-Preliminary Micro-structural Assessment TWI Bulletin, Mar/April 1997.
- [10] S.G.Lim et al., "Micro-structural Evolution and Tensile Behavior of Stir Friction Welded Al Alloys", J. Kor. Inst. Met. & Mater. Vol.41, No.11, pp. 743-749, 2003.

저 자 소 개



장석기(張石基)

1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1998. 1~1999년 2 University of South Carolina 연수 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수



박종식(朴鍾植)

1969년생, 2005년 대불대학교 컴퓨터응용기계과 졸업(공학사), 현재 목포해양대학교 대학원 기관시스템학부 응용역학·재료공학 석사과정.