6061-T6 합금의 최적 마찰교반 용접 조건 규명 및 전기화학적 특성 평가

김성종*, 장석기

목포해양대학교 기관시스템 공학부

Evaluation of Electrochemical Characteristic and Investigation on Optimum Condition in Friction Stir Welding for 6061-T6 Al Alloy

Seong-Jong Kim*, Seok-Ki Jang

Division of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University, Jeonnam 530-729, Korea

(Received September 22, 2008 ; revised October 23, 2008 ; accepted December 30, 2008)

Abstract

In friction stir welding for 6061-T6 with various traveling speed and rotation speed conditions, the best mechanical characteristics presented in traveling speed of 507 mm/min and rotation speed of 1100RPM. The maximum tensile strength and yield strength increased with the increasing of traveling speed. The result of the electrochemical characteristic evaluation in friction stir welding at optimum conditions for 6061-T6 Al alloy presented a good characteristics compare to base metal.

Keywords: 6061-T6 Al alloy, Friction stir welding(FSW), Mechanical characteristic, Electrochemical characteristic

1. 서 론

최근 국내외적으로 환경에 관한 규제가 강화되면서 FRP재를 이용하여 건조된 선박은 친환경적인 방법으로 폐선할 수 있는 방법이 없으며, 화재에 취약하기 때문에 많은 인적, 경제적 손실을 입힌 사고가 다발하였다¹⁾. 따라서 이에 대한 대안으로 강선에 비하여 비강도가 높아 경량화에 의해 고속화가 가능하며, 추진용 연료의 절감, 높은 내식성에 의한 유지 보수가 용이하고 폐선 시 재활용이 가능하여 환경 친화적인 재료로 알루미늄 합금에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다²⁾. 이러한 경량합금을 사용한 수송기기의 건조는 반드시 용접공정에 의해 이루어지며 기존의 용접방법에 비하여 환경 친화적일 뿐만 아니라 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 마찰교반 용접기술(Friction stir welding 이하 FSW)은³⁻⁵⁾ 1991년 영국의 용접기술 연구소(TWI)에서 개발되어⁶⁾ 금속의 고상접합 방식으로 연구와 개

발이 활발히 진행 중에 있다⁷⁻¹¹⁾. 알루미늄 선박은 항상 해양성 분위기에 노출되어 있기 때문에 부식에 대한 저항성이 필요하며, 특히 용접부는 모재에 비하여 전기화학적으로 열악하기 때문에 많은 부식을 유발하여 왔다. 따라서 본 연구에서는 6061-T6 합금에 대하여 다양한 이송속도 및 회전속도를 변수로 하여 마찰교반 용접을 실시한 후 기계적 특성을 로봇을 이용한 MIG용접과 비교하였으며, 규명된 최적 조건에서 모재부와 용접부에 대하여 전기화학적 경향을 파악하여 실제 적용에 응용하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

알루미늄 선박용 재료로 사용되는 6061-T6(Al-Mg-Si 합금) 시편에 대하여 마찰교반용접을 실시하였다. 이때 용접조건은 공구의 어깨 직경은 20Φ, 핀 길이와 압입 깊이는 4.5 mm, 핀 직경은 5Φ, 피치는 1.0 mm, 전진각은 3°로 하였으며, 전나사형 공구를 반시계 방향으로 실시하였다. 또한 다양한 회전속

*Corresponding author. E-mail : ksja@mmu.ac.kr

Table 1. Parameter of friction stir welding

Rotating speed (RPM)	Traveling speed (mm/min)
210	22, 87
500	22, 87
800	22, 87, 124, 342, 507, 720
1100	22, 87, 124, 342, 507, 720
1600	22, 87, 124, 342, 507, 720
1800	22, 87, 124, 342, 507, 720

도와 이송속도를 변수로 하여 실시하였으며, 그 내역을 표 1에 나타냈다. 한편 동일 재료에 대하여 로봇을 이용하여 147A, 20.6V 그리고 42 cpm 조건으로 미그용접을 실시하였으며 실험에 사용된 모재인 6061-T6와 용접재료(ER5183, ER5556)의 화학조성을 표 2에 나타내었다. 용접재료는 ER5183과 ER5556을 사용하여 용접하였으며 용접된 시편과 마찰교반용접을 실시한 것과 상호 비교하였다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이 인장시편은 용접 방향에 수직으로 가공하였으며, 평행부 65 mm, 표점거리 50 mm, 두께는 5 mm로 가공하였다. 인장시험은 대기 중에서 0.2 mm/min의 인장속도로 3회 실시하여 최대인장강도, 항복강도, 연신율, 파단되는데 걸리는 시간 그리고 흡수에너지의 평균을 상호 비교하여 최적의 마찰교반용접 조건을 규명하

Fig. 1. Schematic diagram of FSWed direction and tensile test specimen.

였다.

전기화학적 실험 시 사용된 시험편의 노출면적은 1 cm^2 로 하였으며, 시험편 표면은 에머리페이퍼 600 번까지 연마하고, 시험 직전 초음파 세척기를 이용해 아세톤과 증류수를 사용하여 세척하였다. 분극 시험 시 기준전극으로 은/염화은 전극(SSCE)을, 대극은 백금전극을 사용하여 2 mV/s의 주사속도로 천연해수 용액조건에서 실시하였다. 양분극실험 시에는 개로전위에서 0 V에서 3.0 V까지, 음분극실험은 개로전위에서 -2.0 V까지 실시하였다. 타펠분석 실험에서는 개로전위를 기준으로 250 mV 분극시켜서 부식전위와 부식전류밀도를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 다양한 조건에서 마찰교반용접을 실시하였으며 그 중 회전속도가 1100 RPM인 경우 이송속도에 따른 시편 외관을 나타내고 있다. 대부분 적용된 이송속도 조건에서 아주 매끄러운 용접면은 물론 초기부터 종료시까지 보이드가 전혀 관찰되지 않았다. 반면, 가장 낮은 이송속도인 22 mm/min의 경우 용접면에 보이드는 형성되지 않았으나 많은 칩이 관찰되었다. 또한 마찰교반 용접 종료 시에 형성되는 버튼의 형상은 87 mm/min과 124 mm/min의

Fig. 2. Appearance in friction stir welding for 6061-T6 specimen surface with traveling speed in 1100 RPM.

Table 2. Chemical compositions of 6061-T6 and welding materials

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061-T6	0.60	0.66	0.35	0.078	1.22	0.13	0.039	0.014	Bal.
ER5183	0.40	0.40	0.10	0.5-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15	Bal.
ER5556	0.25	0.40	0.10	0.5-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	0.285	0.05-0.20	Bal.

Fig. 3. Stress-elongation curves with traveling speed at 1100 RPM.

조건의 경우 정원과 유사한 형상을 나타내었으나, 그 외 다른 조건에서는 정원이 아닌 변형된 형상을 나타내었다. 그리고 720 mm/min의 경우 이송에 따른 용접면의 폭이 좁아지거나 불규칙적인 형상을 나타내었다. 이는 과도한 이송속도로 인하여 입열량이 부족하고 교반효과가 원활하지 못하였던 것으로 사료된다.

그림 3은 회전속도 1100 RPM에서 이송속도 변수에 따른 응력-변형을 곡선을 나타내고 있다. 적용된 이송속도 조건 중에서 124, 342, 507 mm/min의 경우는 용접면 관찰에서도 대체적으로 양호한 형상을 나타냈던 조건으로 응력-변형을 곡선에서 상대적으로 양호한 기계적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 507 mm/min의 경우가 최대인장강도 및 항복강도가 가장 양호한 조건임을 알 수 있다. 또한

연신율은 낮은 이송속도 22 mm/min과 87 mm/min에서 가장 높은 값을 나타내었다. 그러나 22 mm/min의 경우는 사진 관찰에서 칩의 생성이 다량 관찰되었으며 버튼의 변형도 많이 발생한 조건으로 인장 시험 시 현저한 최대인장강도와 연신율의 저하를 관찰할 수 있었다.

표 3은 1100 RPM에서 이송속도변수에 따른 기계적 특성을 상호 비교하였다. 이상과 같이 여러 이송속도와 회전수 변수에 따라 인장실험을 실시하여 각 기계적 특성을 로봇을 이용하여 ER5183과 ER5556 용접재료로 미그 용접한 경우와 상호 비교하였다. 결과적으로 미그 용접한 경우보다 마찰교반 용접된 경우 507 mm/min의 이송속도 조건에서 보다 양호한 기계적 특성을 나타내었음을 알 수 있었다.

Table 3. Comparison of result after tensile test in FSWed and MIG welded for 6061-T6 Al alloy

	Maximum Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Time-To-Fracture (min)	Absorption Energy (Kgf-mm)
Rolling Direction	316.03	291.19	18.15	45.64	20452
Vertical Direction	312.59	275.21	17.02	42.78	18946
ER5183	218.40	143.91	7.47	20.73	5191
ER5556	217.50	141.90	7.29	20.61	5066
1100 RPM 22 mm/min	165.15	84.36	10.58	30.20	5631
1100 RPM 87 mm/min	186.69	113.66	8.46	25.59	4962
1100 RPM 124 mm/min	204.63	131.83	7.09	21.18	4644
1100 RPM 342 mm/min	223.35	139.87	7.03	18.25	5189
1100 RPM 507 mm/min	225.29	145.41	8.04	21.11	6049
1100 RPM 720 mm/min	164.49	138.11	2.50	7.29	1231

Fig. 4. Comparison of Max. tensile strength after tensile test.

그림 4는 다양한 마찰교반용접 조건에서 인장실험을 실시한 후 최대인장강도를 상호 비교한 그래프이다. 먼저 모재의 경우 롤링방향은 316.03 MPa를 나타냈으며, 롤링방향과 직각방향에서는 312.59 MPa를 나타내어 거의 비슷한 값을 나타냈다. 먼저 22 mm/min인 경우 회전속도 변화에 따라 210 RPM이 가장 낮은 152.36 MPa를 나타냈으며, 가장 높은 값은 500 RPM으로 169.48 MPa를 나타내었다. 전체적으로 거의 차이가 없으며, 이송속도 변수 중 가장 낮은 값을 나타내는 조건임을 알 수 있다. 대부분 동일 이송속도에서는 회전수 변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있었다. 또한 720 mm/min인 경우만 제외하고 전체적으로 이송속도가 증가할수록 높은 최대인장강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 ER5183과 ER5556의 용접봉을 사용하여 로봇에 의한 용접을 실시한 경우는 각각 217.8 MPa와 217.5 MPa를 나타냈다. 그러나 마찰교반용접을 실시하여 이보다 높은 최대인장강도를 나타낸 800, 1100, 1600 그리고 1800 RPM에서 342

Fig. 5. Comparison of yield strength after tensile test.

mm/min과 507 mm/min으로 나타났다.

그림 5는 다양한 마찰교반용접 조건에서 인장실험을 실시한 후 항복강도를 상호 비교한 그래프이다. 먼저 모재의 경우, 롤링방향의 경우는 291.19 MPa를 나타냈으며, 롤링방향과 직각방향에서는 275.21 MPa를 나타내어 롤링방향의 경우가 16 MPa 정도 높은 값을 나타냈다. 전체적으로 회전수 변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이와 같이 124 mm/min의 이송속도에서는 그다지 높지 않는 항복강도이나 이송속도가 증가할수록 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 한편 342~720 mm/min인 경우는 전체적으로 높은 항복강도를 나타냈으며, 800과 1100 RPM에서는 507 mm/min의 경우가 가장 높은 값을 나타냈고, 1600과 1800 RPM에서는 720 mm/min의 경우가 가장 높은 항복강도를 나타냈다. 전체적으로 동일 이송속도에서는 회전수에 크게 영향을 받지 않았으며, 이송속도가 빠를수록 높은 값을 나타냈다. 가장 높은 항복강도는 가장 높은 회전수와 이송속도인 경우가 가장 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이

Fig. 6. Comparison of elongation after tensile test.

Fig. 7. Comparison of time-to-fracture after tensile test.

는 회전피치(이송속도/회전수)는 1회전 시 이동하는 거리를 나타내는 것으로 그 값이 클수록 입열이 감소한다는 것을 의미한다. 그러나 회전피치가 클수록 입열이 감소하여 열에 의한 연화 현상이 적게 되어 높은 강도를 나타낸 것으로 판단된다. 본 실험에 사용된 재료 6061-T6 합금은 열처리에 의해 석출경화형 알루미늄 합금이며¹²⁾ 열처리 방법은 용체화처리나 시효처리에 의해 강도를 향상시키는 것이 가능하다. 또한 ER5183과 ER5556의 용접재료를 사용하여 로봇에 의한 용접을 실시한 경우는 각각 143.91 MPa와 141.9 MPa를 나타냈다.

그림 6은 다양한 마찰교반용접 조건에서 인장실험을 실시한 후 연신율을 상호 비교한 그래프이다. 먼저 모재의 경우, 롤링방향의 경우는 18.15%를 나타냈으며, 롤링방향과 직각방향에서는 17.02%를 나타내어 롤링방향의 경우가 1.13% 정도 높은 값을 나타냈다. 앞에서 언급한 최대인장강도와 항복강도의 경우는 이송속도가 빠를수록 높은 값을 나타낸 반면 연신율은 이송속도가 늦을수록 대체적으로 그 값이 상승한다는 사실을 알 수 있었다. 이는 회전피치가 작을수록 입열이 증가하여 그에 따른 연화가 커지면서 강도는 저하하나 연신율이 향상된 것으로 사료된다. 그러므로 전체적으로 22 mm/min인 경우가 회전수에 무관하게 가장 높은 값을 나타냈다. 또한 ER5183과 ER5556의 용접재료를 사용하여 로봇에 의한 용접을 실시한 경우는 각각 7.47%와 7.29%를 나타냈다. 모재에 비하여 낮은 연신율을 보인 이유는 파단 부위에서 Mg_2Si 상의 군집과 조대화 정도가 인장특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 군집된 조대한 Mg_2Si 상에서 우선적으로 공공이 형성되고 이러한 초기 공공과 공공들이 전단에 의해 연합되는 현상이 나타나 연신율이 저하하는 것으로 사료된다¹³⁾.

그림 7은 다양한 마찰교반용접 조건에서 인장실험을 실시한 후 파단시간을 상호 비교한 그래프이다. 먼저 모재의 경우 롤링방향의 경우는 45.64분을 나타냈으며, 롤링방향과 직각방향에서는 42.78분을 나타내어 롤링방향의 경우가 높은 값을 나타냈다. 전체적으로 이송속도가 가장 낮은 22mm/min인 경우가 가장 높은 값을 나타냈으며, 이송속도가 빠를수록 낮은 파단시간을 나타내어 연신율과 비슷한 경향을 나타내고 있음이 확인되었다. 또한 ER5183과 ER5556의 용접 재료를 사용하여 로봇에 의한 용접을 실시한 경우는 각각 20.73분과 20.61분을 나타냈다.

그림 8은 다양한 마찰교반용접 조건에서 인장실험을 실시한 후 흡수에너지를 상호 비교한 그래프이다. 먼저 모재의 경우 롤링방향과 롤링방향에 직각인 경우 각각 20452와 18946 kgf-mm를 나타냈다. 모재의 다른 기계적 특성과 마찬가지로 롤링방향의 경우가 직각방향에 비해 보다 우수한 기계적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 이송속도가 가장 낮은 22 mm/min인 경우가 전체적으로

Fig. 8. Comparison of absorption energy after tensile test.

Table 4. The traveling speed observed good mechanical characteristics in FSW better than MIG by ROBOT

Rotating speed (RPM)	Maximum Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Time-To-Fracture (min)	Absorption Energy (Kgf-mm)
210			22	22	
500			22 87	22 87	22 87
800	342 507	507	22 87 342	22 87 342	22 342
1100	342 507	507	22 87 507	22 87 124 507	22 507
1600	342 507	342 507 720	22 87	22 87	22
1800	342 507	342 507 720	22 87	22 87 124	87 507

가장 높은 값을 나타냈으며, 이송속도가 빠를수록 낮은 흡수에너지를 나타내어 연신율이나 파단시간과 유사한 경향을 나타내고 있음이 확인되었다. 이는 회전피치가 클수록 입열이 저하하는데 이송속도가 느릴수록 입열이 증가하게 된다. 이때 입열에 의해 재료가 연화되면서 연신율이나 파단시간은 증가하나, 연화에 의해 강도는 저하하게 된다. 그러나 이러한 연화에 의해 연신율이나 파단시간이 증가에 의한 영향이 강도 저하에 의한 영향보다 크게 영향을 미쳐서 흡수에너지가 증가한 것으로 판단된다. 또한 ER5183과 ER5556의 용접봉을 사용하여 로봇에 의한 용접을 실시한 경우는 각각 5191과 5066 kgf-mm를 나타냈다.

지금까지 다양한 조건에서 마찰교반용접을 실시한 경우, 로봇을 이용한 용접과 비교하여 우수한 특성을 나타낸 것을 요소별로 이송속도를 표 4에서 상호 비교하였다. 각 요소별 특성을 비교한 경우 최대인장강도와 항복강도는 대체적으로 이송속도가 높을수록 높은 값을 나타냈으며, 회전수와는 큰 특징이 나타나지 않은 사실을 확인할 수 있었다. 그러나 연신율과 파단시간은 반대로 이송속도가 낮을수록 높은 값을 나타내어 최적 조건을 규명하는데 많은 애로가 있었다. 이러한 6061-T6의 경우는 열처리 합금으로 다른 재료에 비하여 모재 대비 현저히 낮은 용접부의 기계적 특성을 보여 주었다. 이를 향상시키기 위해서는 시효처리 등과 같은 다양한 열처리 기술을 적용함으로써 그 특성을 향상시켜야 할 것으로 사료된다. 결국 최대인장강도와 항복강도는 800 RPM~1800 RPM의 빠른 회전수와 342, 507 mm/min의 빠른 이송속도를 보인 조건에

Fig. 9. Comparison of open circuit potential for BM and FSWed specimens of 6061-T6 during 86,400 s in natural sea water solution.

서 우수한 특성을 나타낸 반면, 연신율과 파단시간 그리고 흡수에너지는 모든 회전속도에서 낮은 이송속도인 경우가 양호한 특성을 나타냈다. 결국 모든 기계적 특성을 만족시키는 조건은 1100 RPM, 507 mm/min인 경우가 최적의 마찰교반용접 조건으로 규명하였다.

지금까지 다양한 조건을 변수로 하여 마찰교반용접을 실시한 결과 가장 우수한 기계적 특성은 1100 RPM, 507 mm/min 조건으로 나타났다. 따라서 전기화학적 특성 평가는 가장 우수한 특성을 나타낸 조건에서 평가하였다.

그림 9는 최적 조건에서 마찰교반용접한 용접부와 모재부에 대한 해수용액에서의 86,400초(24시간) 동안 자연전위 측정 결과를 비교한 그래프이다. 모재부와 마찰교반 용접된 시편 모두 초기부터 안정

된 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 용접부가 모재부에 비하여 대략 20~30 mV 정도 귀한 전위를 나타냈으며, 용착부는 대체적으로 안정된 전위를 유지하고 있는 반면 모재부는 초기부터 전위의 헌팅현상이 계속 관찰되었다. 이는 해수 용액 내 포함된 염소이온에 대한 저항성이 용접부가 강한 것을 의미한다. 또한 해수 용액 내에서 갈바닉 전지가 형성되었다 할지라도 모재부에서 부식이 발생하기 때문에 대음극-소양극 현상은 발생하지 않아 양호한 전기화학적 거동을 보일 것으로 판단된다. 그러나 전 연구에서 5456-H116 합금의 경우는 해수 용액 내에서 초기에 급격히 전위가 귀방향으로 이행하였으며, 용접부와 모재부는 각각 1200 초(-0.695 V)와 4000초(-0.755 V)에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 이는 해수에 침적과 동시에 시편 표면에 부동태 피막 형성으로 인하여 전위가 상승한다는 사실을 알 수 있었다. 이후 20,000초 정도까지 부동태 피막의 재생성으로 인하여 전위는 꾸준히 귀방향으로 이행하였다¹⁴⁾. 마찰교반용접을 시행한 경우가 모재에 비하여 전위가 높게 나타난 이유는 조대한 Mg_2Si 상이 소성 유동에 의해 동적 재결정 밖으로 밀려남으로 인해 피팅부식의 원인이 되는 조대한 석출상들이 동적재결정부에 존재하지 않게 되어 높은 전위를 나타낸 것으로 사료된다¹⁵⁾.

그림 10은 최적 조건에서 마찰교반 용접한 용접부와 모재부에 대한 해수용액에서의 양분극 곡선을 비교한 그래프이다. 개로전위 주위에서는 거의 유사한 거동이 관찰되었다. 개로전위(Open circuit potential)에서 귀방향으로 이행한 경우 모재부는 전류밀도의 감소 현상이 관찰된 반면 용접부는 꾸준한 전류밀도의 상승현상이 관찰되었다. 여기서 모재의 경우는 중성용액 내의 알루미늄은 Al_2O_3 나

$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ 와 같은 피막이 형성되어 전류밀도가 감소하여 부식이 되지 않으나, 해수환경 하에서는 해수 속에 포함되어 있는 염소이온은 부동태 피막을 파괴시키나 다시 재생성된 피막에 의해 전류밀도의 감소 현상이 관찰되는 것으로 사료된다^{16,17)}. 따라서 해수 환경 하에서 응력부식균열에 대한 저항성에 관한 전기화학적 측면에서는 모재부가 용접부에 비하여 양호한 거동을 보일 것으로 판단된다. 타 연구자의 3.5% NaCl 용액에서 저변형을 인장시험에 의한 응력부식균열에 관한 연구에서 마찰교반 용접을 실시한 경우 동적재결정부와 열영향부 사이의 전위차에 의해 이 부위에서 응력부식균열은 발생하나 실제 인장 파단은 상대적으로 강도가 낮은 열영향부에서 일어남으로 인해 응력부식균열이 인장 파단에 영향을 미치지 않았다는 연구 결과도 있다¹⁵⁾.

그림 11은 최적 조건에서 마찰교반용접한 용접부와 모재부에 대한 해수용액에서의 음분극 곡선을 비교한 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 모든 시험편에 대한 전체적인 경향은 개로전위에서부터 용존산소환원반응($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)에 의한 농도분극과 $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ 의 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈다. 두 시험 모두 용존산소환원반응에 의한 농도분극은 개로전위에서부터 -1.6 V정도까지 나타났다. 이후 용존산소 환원반응과 활성화분극의 변곡점은 -1.6 V으로 나타났다으므로 이 전위는 음극방식 적용 시 한계전위에 해당된다. 또한 양분극곡선과 비교하여 양극방식에 비해 음극방식의 경우가 용존산소의 농도분극의 영역에서 보다 훨씬 낮은 전류밀도를 나타냈으며, 방식전위 영역도 넓기 때문에 양극 방식에 비해 음극방식의 경우가 효과적일 것으로 판단된다.

Fig. 10. Comparison of anodic polarization curves for 6061-T6 BM and FSWed specimens in natural sea water solution.

Fig. 11. Comparison of cathodic polarization curves for 6061-T6 BM and FSWed specimens in natural sea water solution.

이후 수소가스 발생에 의한 활성화분극을 나타낸 전위에서는 용접부와 모재부 모두 거의 유사한 전류밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 전 연구에서는¹⁸⁾ 알루미늄 내에 포함된 잔류응력이 마찰교반용접으로 인하여 발생한 열에 의해 잔류응력의 일부가 제거됨으로써 내식성이 개선되는 효과에 관해 연구한 바 있다. 또한 고장력강의 수소취화에 관한 연구에서¹⁹⁾ 개로전위에서 활성화해반응의 경향을 보인 후 용존산소환원반응에 의한 농도분극과 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈으며, 농도분극과 활성화 분극의 변곡점은 대략 -1.0 V (SCE)로 나타났다. 그러나 본 시편은 이보다 훨씬 낮은 -1.6 V를 나타냈으므로 내식성은 물론 수소취화에 대한 저항성이 우수한 금속임을 재확인할 수 있었다. 또한 고장력강의 수소취화에 관한 연구에서는 변곡점보다 높은 전위에서 수소취화 현상이 관찰되었는데 이는 원자성 수소의 영향에 기인한 것임을 입증한 바 있다.

그림 12는 최적 조건에서 마찰교반 용접한 용접부와 모재부에 대한 해수용액에서의 개로전위에서 0.25 V 분극시켜 그린 그래프를 타펠분석을 실시하여 비교하였다. 용접부의 경우는 모재부에 비하여 부식전위는 높게 나타났으나 부식전류밀도는 거의 비슷한 값을 나타냈다. 먼저 갈바닉 전지 형성 시 용접부가 약간 높은 전위를 나타내기 때문에 모재부에서 부식이 발생할 것으로 판단된다. 일반적으로 타 용접 방법의 경우 용접부 전위가 낮으며, 부식전류밀도가 높아서 용접부에서 우선적으로 부식되는 것²⁰⁾이 일반적이거나 본 연구 결과는 용접부가 양호한 전기화학적 거동을 보여 주었음을 알 수 있었다.

그림 13은 최적의 마찰교반용접조건에서의 면적

Fig. 12. Comparison of the polarization trends Tafel analysis for BM and FSWed specimens of 6061-T6 in sea water solution.

Fig. 13. Time-current curves between BM and FSWed at galvanic experiment in natural sea water solution.

비에 따른 시간-전류 곡선을 나타내고 있다. 면적비가 가장 큰 1:20(WM ; BM)인 경우는 초반부터 가장 높은 전류를 나타낸 후 실험 종료 시까지 지속되는 경향을 나타냈다. 그러나 1:5와 1:10인 경우는 거의 비슷한 경향을 나타냈으며, 1:1인 경우는 초기부터 대단히 낮은 전류값을 나타낸 후 6500 초 전후에서 서서히 상승한 후 안정된 값을 실험 종료 시까지 지속되었으며, 실험 종료 후에도 가장 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 14는 최적 조건에서 마찰교반 용접된 6061-T6 합금의 해수용액에서의 모재와 용접부 사이의 24시간동안 갈바닉 실험 후 양단간 흐르는 전류량을 상호 비교한 그래프이다. 면적비(BM/WM)가 1:1인 경우는 10^{-6} A 정도의 전류량이 흘렀으며, 모재의 면적이 증가함에 따라 거의 직선적으로 양단간 흐르는 전류량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 1:20

Fig. 14. Comparison of flowing current at both side during 24 hours after galvanic experiment between BM and FSWed in natural sea water solution.

인 경우는 $6 \times 10^{-6} \text{A}$ 정도의 전류가 흐름을 알 수 있었다. 전체적으로 모재에 비하여 용착부가 귀한 전위를 나타냈기 때문에 용접부에서의 집중 부식은 발생하지 않으나, 인접한 모재부에서의 부식을 간과할 수 없으므로 주의를 요한다.

4. 결 언

알루미늄 합금 선박용 재료인 Al-Mg-Si계 6061-T6 합금에 대하여 마찰교반 용접 기술 적용 시 회전속도 및 이송속도 등 다양한 공정변수를 적용함으로써 최적의 조건 규명과 동시에 천연 해수에서의 전기화학적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다양한 마찰교반용접 조건에서 인장실험을 실시한 후 최대인장강도를 상호 비교한 결과, 모재의 경우 롤링방향은 316.03 MPa를 나타냈다. 대부분 동일 이송속도에서는 회전수 변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않았으나, 이송속도가 증가할수록 높은 최대인장강도를 나타냈다.

2. 항복강도를 상호 비교한 결과, 전체적으로 동일 이송속도에서는 회전수에 크게 영향을 받지 않았으며, 이송속도가 빠를수록 높은 값을 나타냈다. 결과적으로 최대인장강도와 항복강도의 경우는 이송속도가 빠를수록 높은 값을 나타낸 반면 연신율은 이송속도가 늦을수록 대체적으로 그 값이 상승하였다.

3. 파단시간은 모재의 경우 롤링방향의 경우가 높은 값을 나타냈으며, 마찰교반용접을 실시한 경우는 전체적으로 이송속도가 가장 낮은 22 mm/min인 경우가 가장 높은 값을 나타냈으며, 이송속도가 빠를수록 낮은 파단시간을 나타내어 연신율과 비슷한 경향을 나타냈다. 전체적으로 6061-T6 합금에 대하여 회전속도 1100 RPM에서 이송속도 변수로 마찰교반용접을 실시한 결과, 507 mm/min인 경우 가장 우수한 기계적 특성을 나타냈다.

4. 최적 조건에서 마찰교반 용접된 시편에 대하여 전기화학적 실험을 실시한 결과, 자연전위 경향은 모재부와 마찰교반 용접된 시편 모두 초기부터 안정된 전위를 나타냈으며, 전체적으로 용접부가 모재부에 비하여 대략 20~30 mV 정도 귀한 전위를 나타냈다.

5. 음분극 실험 결과, 전체적인 경향은 개로전위에서부터 용존산소환원반응에 의한 농도분극과 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈다. 용존산소환원반응과 활성화분극의 변곡점은 -1.6 V으로 나타났으므로 이 전위는 음극방식 적용 시

한계전위에 해당된다. 또한 양분극곡선과 비교하여 양극방식에 비해 음극방식의 경우가 용존산소의 농도분극의 영역에서 보다 훨씬 낮은 전류밀도를 나타냈으며, 방식전위 영역도 넓기 때문에 양극 방식에 비해 음극방식의 경우가 효과적일 것으로 판단된다.

6. 타펠분석 결과, 부식전류밀도는 거의 비슷한 값을 나타냈으며, 갈바닉 전지 형성 시 용접부가 약간 귀한 전위를 나타내기 때문에 모재부에서 부식이 발생할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성중, 장석기, 한민수, 해양환경안전학회, 13 (2007) 223.
2. 김성중, 한국마린엔지니어링학회지, 30 (2006) 540.
3. K.-E. Knipstrom *et al.*, Welding Journal, 76 (1997) 55.
4. H. Uzun, C. D. Donne, A. Argagnotto, T. Ghidini, C. Gambaro, Materials and Design, 26 (2005) 41.
5. C. M. Chen and R. Kovacevic, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44 (2004) 1205.
6. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith, C. J. Dawes: GB Patent Application No. 9125978.8, (1991), US Patent No. 5460317, (1995).
7. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, Materials & Design, 18 (1997) 269.
8. A. Sanderson, C. S. Punshon, J. D. Russell, Fusion Engineering and Design, 49-50 (2000) 77.
9. O. V. Flores, C. Kennedy, L. E. Murr, D. Brown, S. Pappu, B. M. Nowak, J. C. McClure: Scr. Mater., 38 (1998) 703.
10. G. Liu, L. E. Murr, J. C. McClure: Master. Sci. Eng., A 271 (1999) 213.
11. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling, C. C. Bampton: Scr. Master., 36 (1997) 69.
12. S. C. Wang, M. J. Starink, N. Gao, Scripta Materialia, 54 (2006) 287.
13. 임성근, 김상식, 이창길, 김성준, 대한금속재료학회지, 42 (2004) 29.
14. S.-J. Kim, J.-Y. Ko, The Korean Journal of Chemical Engineering, 23 (2006) 847.
15. 임성근, 김상식, 이창길, 김성준, 대한금속재료학회지, 43 (2004) 217.
16. E. Delmon, M. Pourbaix, Comportement électrochimique de l'aluminium. Diagrammes d'équilibres tension pH du système Al-H₂O à 25°C (Rapport technique RT.42 of CEBELCOR, (1955).
17. J. Heyrovsky, J. Chem. Soc., 117, (1920) 27.

18. S.-K. Jang *et al.*, Proceeding of the Korean Society of Marine Engineers, (2004) 139.
19. S.-J. Kim *et al.*, Metals and Materials International, 11 (2005) 63.
20. S.-J. Kim *et al.*, Journal of the Korean Society of Marine Engineers, 24 (2000) 750.