선박용 이종 알루미늄 합금 미그 용접부의 기계적 및 전기화학적 특성 평가

우용빈^a, 김성종^{b*}

^a목포해양대학교 대학원 응용역학 · 재료공학전공, ^b목포해양대학교 기관시스템공학부

Evaluation of Electrochemical and Mechanical Characteristics in MIG Welding Parts of Dissimilar Al Alloys for Ship

Yong-Bin Woo^a, Seong-Jong Kim^{b*}

^aDivision of Marine Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, 571-2 Chuckyo-dong, Mokpo City, Jeonnan 530-729, Korea

^bDivision of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 571-2 Chuckyo-dong, Mokpo City, Jeonnan 530-729, Korea

(Received December 10, 2008 ; revised February 14, 2009 ; accepted February 27, 2009)

Abstract

In the study, it was carried out dissimilar metal welding on materials for Al ship. The electrochemical and mechanical characteristics evaluated for specimen welded by ROBOT. The hardness of welding zone is lower than those of heat affected zone and base metal. At the result of tensile test, the specimen welded with ER5183 welding material presented excellent property compared with ER5556. The polarization trend for the base metal and welding metal showed the effects of concentration polarization due to oxygen reduction and activation polarization due to hydrogen generation. At the Tafel experiments result, the corrosion density in welded with ER5183 welding material presented the lowest value.

Keywords: Dissimilar Al alloys, MIG welding, Mechanical characteristics, Electrochemical characteristics

1. 서 론

국민 소득 증대와 주 5일 근무제 시행 등으로 향후 해양레저선박의 수요가 급격하게 증가할 것으로 예상되며, 이러한 중소형 해양레저선박 및 바다낚시 선박을 지금까지는 FRP 재료로 만들어 왔으나 해양사고 예방과 해양환경 보호를 위하여 장차 FRP로 만든 선박들은 규제가 강화되고 있는 추세이다¹⁾. 최근 국내외적으로 석유 가격 폭등 및 환경규제가 강화되면서 재료의 경량화와 친환경성이 큰 문제로 대두되고 있다. 따라서, 중소형선박에서 많이 사용되고 있는 FRP 선박은 화재에 대한 취약성과 폐선시 환경유해 물질 발생 등으로 인하여 대체 선박으

로 알루미늄선이 많은 관심을 일으키고 있다. 알루미늄 선박은 경량화, 추진용 연료의 절감, 내식성 및 환경 친화적인 재료로 다른 선박에 비해 많은 장점을 가지고 있다^{2,3)}. 선진국은 이미 수 십년 전부터 자원의 재활용에 적극적으로 대처하고자 관공선을 비롯한 소형선박을 알루미늄 합금으로 건조할 것을 적극 권장하고 있으며, 선형, 건조공법, 용접시공법 개발등의 관련 연구도 활발하게 진행 중에 있다. 국내에서는 알루미늄 선박을 건조할 수 있는 조선소가 소수에 불과하며, 자체 기술력 축적과 기술개발은 기대하기 힘든 실정이다. 또한 전문 용접기술자도 극소수이며, 선체의 용접기술자 양성도 시급한 형편이다^{4,5)}. 알루미늄 합금의 종류는 용도에 따라 종류가 다양하므로 합금의 특성에 맞는 용접성을 고려해서 모재와 용접재료의 선정에 충분한

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

Table 1. Chemical compositions of 5083-O and 5456-H116

Elements Sample	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083-O	0.11	0.28	0.028	0.059	4.38	0.09	0.008	0.037	Bal.
5456-H116	0.13	0.31	0.06	0.62	4.90	0.09	0.05	0.02	Bal.

Table 2. Chemical compositions of welding materials

Elements Sample	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
ER5183	0.40	0.40	0.10	0.5-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15
ER5556	0.25	0.40	0.10	0.5-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	0.0285	0.05-0.20

주의와 관찰이 필요하다⁶⁾. 기존에 다양한 알루미늄 합금에 대하여 마찰교반 용접을 실시하여 기계적, 전기화학적 특성을 평가한 적이 있으며⁷⁻¹¹⁾, 본 연구에서는 ER5183과 ER5556 용접재료를 가지고 이중 알루미늄 합금에 로봇을 이용하여 MIG 용접한 경우, 기계적 특성과 전기화학적 특성을 평가하여 알루미늄 선박건조 시 용접재료 선정에 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 실험방법

알루미늄 선박의 선체에 사용되는 Al-Mg 합금인 5000계열 합금은 해수 환경하에서 내식성이 좋으며, 강도가 높은 합금으로 본 실험에서 5083-O와 5456-H116 재료를 사용하였다. 표 1에 모재의 화학적 조성을 나타냈고, 표 2에는 용접재료의 화학적 조성을 나타냈으며, 지름 1.2 mm인 것을 사용하였다. 용접조건은 ER5183의 경우 143 A, 19.9 V, 42 cpm 그리고 ER5556의 경우는 145 A, 20.0 V, 42 cpm으로 실시하였으며, 용접 개선은 30도 Y개선으로 갭은 1 mm 조건에서 실시하였다. 인장 시편은 평행부의 길이 60 mm, 표점거리 50 mm, 두께는 5 mm와 곡률 반경 R15로 가공하였다. 인장시험은 대기 중에서 0.2 mm/min의 인장속도로 3회 실시하여 최대인장강도, 항복강도, 연신율 상호 비교하였으며, 경도 측정 실험은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 인가한 하중은 9.807 N, 유지시간은 10초, 1 mm 간격으로 측정하였다.

전기화학적 실험 시 사용된 시험편의 노출면적은 1 cm²로 하였으며, 시험편 표면은 에머리페이퍼 2000 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. 타펠 분석은 개로전위에서 -0.25V~+0.25V의 범위에서 1 mV/sec의

(a) In welding with ER5183

(b) In welding with ER5556

Fig. 1. Comparisons of hardness for the cross-section of welding parts.

주사속도로 실시하여 부식전류밀도와 부식전위를 상호 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 이중알루미늄 합금 5083-O와 5456-H116에 대하여 로봇을 이용하여 ER5183과 ER5556 용접재료를 용접한 경우, 측면에서의 경도측정 결과

를 나타내고 있다. 모재의 경우 5456-H116은 93.9 Hv, 5083-O는 78.2 Hv의 경도 값을 나타냈다. 5083-O는 열간 가공후 풀림 처리한 합금이므로 재질이 연화되었으며, 5456-H116의 경우는 가공 경화시켜 강도를 향상시킨 재질이므로 5456-H116의 경우가 5083-O에 비하여 높은 경도를 나타낸 것으로 사료된다. ER5183 용접재료로 용접한 경우, 용접부에서는 가장 낮은 경도 값인 73.0 Hv와 가장 높은 경도값 77.8 Hv를 제외한 평균 74.9 Hv로 전반적으로 모재보다 낮은 경도를 나타냈다. 5456-H116 재료인 경우는 용접부와 가까운 열 영향부의 고용역에서는 용접부와 유사한 경도값을 나타냈으며, 열 영향부의 연화역부터 서서히 모재와 비슷한 경도값을 나타냈다¹²⁾. 5083-O인 경우는 용접부부터 모재와 유사한 경도값을 나타냈다. ER5556 용접재료로 용접한 경우 용접부에서 경도값은 73.6 Hv~75.9 Hv를 나타냈으며 평균값은 75.0 Hv로 전반적으로 모재보다 낮은 경도값을 나타냈다. 5456-H116 재료는 용접부와 유사한 경도값을 나타내다가 용접부와 멀어지면서 경도값이 상승을 하였으며, 5083-O인 경우

(a) In base metal with 5083-O, 5456-H116

(b) In welding with ER5183, ER5556 welding materials

Fig. 2. Stress-Elongation curves.

는 열영향부에서 경도값이 모재의 평균값보다 다소 상승한 경향을 나타냈다.

그림 2는 인장 실험 후 응력변형을 곡선을 나타냈다. (a)는 각 모재의 압연 방향과 압연방향의 수직방향을 비교한 것으로 최대인장강도와 항복강도는 5456-H116이 양호한 것을 알 수 있으며, 연신율은 5083-O 모재가 양호하였다. (b)는 두 가지 용접 재료를 가지고 MIG 용접 후 인장시험한 결과를 나타낸 것이다. 두 용접재료로 용접한 경우, 초기부터 연신을 증가에 따라 유사한 거동을 보이고 있으며, 전체적으로 모재에 비하여 낮은 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 용접부에 용접결함이 발생하여 강도가 저하하였거나, 용접 시 열에 의한 영향으로 강도가 저하한 것으로 여겨지나 후자의 영향이 클 것으로 판단된다. 그 이유는 시편 초기부터 종료 시점까지 원만한 용접이 이루어져 재현성이 확보되었기 때문에 양호한 용접공정이 이루어진

Fig. 3. Comparison of the maximum tensile strength and yield strength after tensile test (R : Rolling direction, V : Vertical direction for Rolling direction).

Fig. 4. Comparison of elongation and time-to-fracture after tensile test.

것으로 판단되기 때문이다.

그림 3은 인장실험을 실시한 후 각 조건별 최대 인장강도와 항복강도를 비교한 그래프이다. 모재와 용접시편에 대하여 3회 실험을 실시하여 그 평균값을 나타낸 것이다. 강도는 경도와 밀접한 상관관계가 있으며, 5083-O 모재에 비해 높은 경도값을 보인 5456-H116 모재인 경우가 롤링 방향과 롤링 방향에 대한 수직방향 모두 대략 20 MPa 정도의 보다 높은 강도값을 나타냈다. 두 알루미늄 합금을 수직방향에 ER5183 용접재료로 용접한 시편은 301.44 MPa으로 ER5556 용접재료로 용접한 298.96 MPa 보다 약간 높은 값을 나타냈다. 항복강도는 5456-H116 모재가 5083-O 모재에 비하여 현저히 높은 값을 나타냈으며, 롤링방향과 수직방향에서 약 23 MPa의 차이를 나타냈다. 용접한 시편은 모재에 비해 낮은 값을 나타내었으며, 용접재료를 변수로 한 경우 거의 유사한 값을 나타냈으나, ER5183 용접재료가 약간 높은 항복강도를 나타냈다.

그림 4는 인장실험을 실시한 후 각 조건별 연신

율과 파단 시간을 비교한 그래프이다. 5083-O의 경우가 5456-H116에 비하여 높은 값을 나타냈으며, 5456-H116 모재의 경우 압연방향에 따라 큰 차이를 나타낸 반면 5083-O는 거의 유사한 값을 나타냈다. 또한, ER5183 용접재료로 용접한 경우가 14.98%로 ER5556(14.78%) 용접재료를 사용하여 용접한 경우보다 약간 높은 값을 나타냈다. 용접부는 5083-O 모재의 수직방향 연신율에 비해 대략 57.2% 정도, 5456-H116 모재 연신율의 64.9% 정도를 나타냈다.

파단시간은 연신율과 비슷한 경향을 나타냈으며, 5083-O의 롤링방향의 모재가 80분 이상으로 파단되는데 걸리는 시간이 가장 길게 나타났으며, 5456-H116는 롤링 방향이 47분 그리고 수직방향의 경우는 62분 정도 소요되었다. 두 가지 용접재료로 용접한 경우 거의 유사하였으나, ER5183이 약간 긴 시간이 소요되었음을 알 수 있다. 지금까지 두 가지 용접재료를 용접한 경우, 기계적 특성 평가 결과 모든 특성에서 ER5183이 ER5556 용접재료 보다 양호한 결과를 나타냈다.

그림 5는 배율별 각 조건에서 파단면을 비교한 것이다. 5456-H116 모재를 보면 거의 유사한 덩플과 준벽개파면 형상이 관찰되었으나 쉬어립의 차이가 연신의 차이를 나타낸 것으로 사료된다. 5083-O 모재의 경우는 5456-H116 모재에 비하여 쉬어립이 많고 취성적인 특성을 나타내는 준벽개 파면이 적어서 높은 연신율을 나타낸 것으로 사료된다. ER5183과 ER5556의 파단면은 전체적으로 덩플 형상이 많으나 부분적으로 준벽개 파면 형상이 거의 유사하게 관찰되었다.

그림 6은 5083-O와 5456-H116 이중 알루미늄 합금에 대하여 용접 후 모재에 대한 각 기계적 특성의 비를 나타낸 것이다. 5083-O 모재에 비하여 최

(a) Base metal

(b) Welded metal

Fig. 5. Analysis of fractography after tensile test.

Fig. 6. Mechanical property ratios for base metal after tensile test in welding between dissimilar metal.

Fig. 7. Potential variation in welded for dissimilar metal specimen with ER5183, ER5556 in natural sea water solution.

대인장강도의 비가 현저히 높은 값을 나타냈으며 그 다음 항복강도와 연신율 순으로 나타났다. ER5183 용접재료를 사용한 경우, 항복강도는 5083-O의 90.2%, 5456-H116의 63.3%를 나타냈으며, 최대인장강도는 5083-O의 94.9%, 5456-H116의 89.3%를 나타냈다. 또한 연신율은 5083-O와 5456-H116 각각 56.5%와 88.6%를 나타냈다. 한편, ER5556 용접부의 항복강도에서는 5083-O의 89.5%, 5456-H116의 62.8%를 나타냈으며, 최대인장강도는 5083-O의 94.2%, 5456-H116의 88.5%를 나타냈다. 또한, 연신율은 5083-O와 5456-H116 각각 55.3%와 87.4%를 나타냈다. 5083-O 모재에 비해서는 항복강도와 최대인장강도의 비는 높은 값을 나타낸 반면 5456-H116 모재에 비해서는 최대인장강도와 연신율의 비가 대체적으로 높은 값을 나타냈다. 지금까지 두 가지 용접재료를 용접한 경우, 기계적 특성 평가 결과 모든 특성에서 ER5183이 ER5556 용접재료 보다 양호한 결과를 나타냈다.

그림 7은 다양한 조건에 대하여 천연 해수용액에서 자연전위 측정 결과를 나타내고 있다. ER5183 용접부 경우는 실험 초기 전위값이 -0.725 V 로 전위의 상승과 저하가 일어나고 있으나, 실험하는 동안 전반적으로 안정된 전위값을 유지하였다. ER5556 용접부 경우 초기에 -0.723 V 였으며, 약간의 전위 변동 현상이 관찰된 후에 10,000초부터 안정적으로 변화하기 시작하였다. 그러나, 15,000초 이후 전위가 비방향으로 이행하였으며, 35,000초 이후부터 전위가 $-0.764\sim -0.766\text{ V}$ 사이의 값을 나타내며 안정되어 가는 양상을 관찰할 수 있었다. 5083-O 모재의 경우, 실험 초기에 급격히 비방향으로 이행을 하였으며, 9,300초~22,800초까지 전위의 상승과 저하

를 반복한 후 안정된 값을 유지하였다. 한편, 5456-H116 모재의 경우, 초기부터 9,600초까지 급격히 비방향으로 이행을 하였으나, 그 이후에 표면에 부동태 피막의 생성으로 귀방향으로 이행을 하였으며, 49,800초부터 안정되면서 실험 종료까지 일정한 전위를 나타냈다. 일반적으로 중성용액 내의 알루미늄은 Al_2O_3 나 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 피막이 형성되어 전위는 귀방향으로 이행하며, 분극경향은 전류밀도가 감소되어 부식이 되지 않으나^{13,14}, 해수환경 하에서는 해수 속에 포함되어 있는 염소이온의 영향으로 형성된 피막이 파괴되어 전위가 비방향으로 이행하나, 자기수복(Self-healing) 기능으로 재생성된 피막에 의해 전위의 상승과 저하가 반복적으로 일어나고 있음을 알 수 있었다. 시험 종료 시 전위값은 BM 5456-H116, ER5183, BM5083-O, ER5556 순으로 낮아졌으며, 자연전위 측정결과 ER5183 용접부가 다른 실험 재료보다 양호한 특성을 보여주었다.

그림 8은 다양한 조건에 대한 천연 해수용액에서

Fig. 8. Anodic polarization curves for various conditions in natural sea water solution.

Fig. 9. Cathodic polarization curves for various conditions in natural sea water solution.

의 양분극 곡선을 나타내고 있다. 개로전위에서 양분극 시켰을 경우 전위 상승에 따른 전류밀도는 응력부식균열을 평가하는데 중요한 정보를 제공한다. 개로 전위에서 모든 조건에서 거의 유사한 값을 나타냈으며, 개로전위를 약간 넘는 영역에서 부동태 경향이 조금 관찰된 후 공식 전위 이상에서는 급격히 전류밀도가 상승하였으며, 모든 조건에서 거의 유사한 경향이 관찰되었다.

그림 9는 다양한 조건에 대한 천연 해수용액에서의 음분극 곡선을 나타내고 있다. 음분극 곡선에서는 용존산소 환원반응($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$)에 의한 농도분극과 $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ 의 수소 가스 발생에 의한 활성화 분극의 경향이 관찰되었다. 용존산소 환원반응을 보인 -1.0 V에서의 전류밀도는 BM 5083-O가 가장 낮은 값을 나타냈으며 다음, ER5183 용접부, BM 5456-H116, ER5556 용접부 순으로 나타났다. 한편 농도분극과 활성화 분극의 변곡점은 방식전위를 결정하는 중요한 전위인데 ER5183과 ER5556은 거의 유사하나 ER5183의 경우가 약간 비한 전위를 나타냈다. 전체적으로 동일 전위에서의 전류밀도는 ER5183이 가장 낮은 전류

Table 3. Comparison of average for Tafel analysis results

	Corrosion Potential (V)	Corrosion Current Density (mA/cm^2)
5083-O	-0.68714	1.22×10^{-6}
5456-H116	-0.70989	1.37×10^{-6}
ER5183	-0.70625	8.30×10^{-7}
ER5556	-0.65754	1.28×10^{-6}

밀도를 나타냈으므로, 양호한 내식성을 보일 것으로 판단된다. 또한 양분극 곡선과 비교하여 양극방식에 비해 음극방식의 경우가 용존산소 환원반응에 의한 농도분극의 영역에서 훨씬 낮은 전류밀도를 나타냈으며, 방식전위 영역도 넓기 때문에 음극방식이 효과적일 것으로 판단된다.

그림 10은 개로전위에서 ± 0.25 V 분극시킨 분극 곡선에 대하여 타펠 외삽법으로 구한 부식전위와 부식전류밀도의 평균을 비교한 것이다. 모든 시험편의 음분극 곡선에서는 용존 산소 환원반응에 의한 농도분극과 수소가스 발생에 의한 활성화분극 경향이 관찰되었다. 부식전위는 ER5556 용접재료가 가장 귀한 값을 나타냈으며, 5456-H116 모재가 가장 비한 부식전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 부식전류밀도는 모든 조건에서 유사한 값을 나타냈으나 ER5183 용접부가 가장 낮게 나타났다. 부식전류밀도가 낮을수록 부식속도가 낮아 부식에 대한 저항성이 좋다는 것을 의미한다. 타펠 분석 결과를 종합적으로 비교하면 ER5183이 ER5556 보다 양호한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 표 3에 각 조건별 타펠 분석 결과를 상호 비교하였다.

4. 결 론

5083-O와 5456-H116 알루미늄 합금의 ER5183과 ER5556 용접재료로 로봇을 이용하여 이중금속 용접 시 용접 재료 선정에 대한 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경도 측정 결과, 용착부는 모재에 비하여 낮은 경도값을 나타냈다. 용접부부터 5456-H116 측의 열영향부는 용접부와 유사한 경도 값을 나타냈다. ER5556 용접재료를 사용한 경우 열영향으로 인하여 5083-O 모재측 경도가 다소 높은 경도값을 나타냈다.

2. 전기화학적 실험에서 ER5183 용접재료와 ER5556 용접재료 모두 유사한 경향을 나타내었으나, 전체적으로 ER5183 용접재료로 용접한 경우가 양호한 특성을 나타냈다.

Fig. 10. Comparison of Tafel analysis results.

3. 이중 알루미늄합금 5083-O와 5456-H116을 로 붓을 이용하여 용접 시 부식전류밀도는 대체적으로 유사하나, ER5183 용접재료를 이용한 경우가 낮은 값을 나타냈다.

후 기

이 논문은 2008년도 호남지역 Sea Grant 사업단 연구개발사업 과제 및 교육과학기술부와 한국산업기술평단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

1. 김성중, 장석기, 한민수, 해양환경안전학회지, 13 (2007) 223.
2. Sky Al products corporation, 일본 경금속용접, 41 (2003) 544.
3. Zen-ichi Tanabe, Fumio Matsumoto, 일본 경금속용접, 39 (2001) 125.
4. 강병윤, 조제형, 대한용접학회지, 22 (2004) 235.
5. C. H. Lee and R. W. Chang, Journal of the Korean Welding Society, 11 (1993) 2.
6. 엄기원, 대한기계학회지, 19 (1979) 299.
7. 장석기, 이돈출, 김성중, 전정일, 한국마린엔지니어링학회 2005년 전기학술대회 논문집, (2005) 260.
8. S. J. Kim, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, (2007) 143.
9. 김성중, 한민수, 우용빈, 박종식, 김종신, 이경준, 2007년도 해양환경안전학회 추계 학술대회 발표 논문집, (2007) 207.
10. J. S. Park, S. J. Kim, M. S. Han, and J. I. Kim, The 9th International Symposium on Eco-Materials Processing & Design, (2008) 180.
11. S. J. Kim, S. K. Jang, and J. S. Kim, The 1st International Symposium on Hybrid Materials and Processing, (2008) 99.
12. S. T. Park, J. P. Jung, and C. J. Suhr, Journal of The Korean Welding and Joining Society, 12 (1994) 41.
13. E. Deltombe and 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).
14. J. Heyrovsky, J. Chem. Soc. 117 (1920) 27.