

로봇으로 용접한 알루미늄 선박용 6061-T6 합금의 기계적, 전기화학적 특성

김성중† · 장석기*

(원고접수일 : 2008년 12월 23일, 원고수정일 : 2009년 3월 3일, 심사완료일 : 2009년 3월 9일)

Mechanical and Electrochemical Characteristics in Welding with Robot on 6061-T6 Al Alloy for Al Ship

Seong-Jong Kim† · Seok-Ki Jang*

Abstract : The construction of fiber-reinforced plastic (FRP) boats is decreasing trend since the application of international regulations on the control of marine environmental pollution, which recommended the use of environmentally friendly materials. The aluminum alloy used with material for ship is a superior to FRP. It is environmental friendly, easy to recycle, and provides a high added value to fishing boats. However, the welding for Al alloy materials have many problems, such as deformation by welding heat and effect of the working environment.

In this paper, it was carried out welding by robot with welding material of ER5183 and ER5556 on 6061-T6 Al alloy for ship. The mechanical and electrochemical characteristics evaluated for specimen welded by robot. The cathodic 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. The hardnesses of welding zone and heat affected zone are lower than that of base metal. At the result of tensile test, the specimen welded with ER5183 presented excellent property compared with ER5556.

Key words : 6061-T6 Al alloy(6061-T6 알루미늄 합금), Welding material(용접재료), Welding by robot(로봇용접), Mechanical and electrochemical characteristics(기계적 · 전기화학적 특성)

1. 서 론

최근 국내외적으로 환경규제가 강화되면서 FRP

선의 경우 폐선 시 환경유해 물질이 발생하여 그 처리 방법이 전무한 실정이며, 화재에 취약하여 많은 인적, 경제적 손실을 입힌 사고가 다발하였다.

† 교신저자(목포해양대학교 기관시스템 공학부, E-mail: ksj@mmu.ac.kr, Tel : 061)240-7226)

* 목포해양대학교 기관시스템 공학부

또한 FRP선의 경우, 구성 물질이 레이더 파를 반사시키는 강도가 약하기 때문에 중·대형선박이 위치를 파악하지 못하여 결국 충돌사고로 이어지는 사례가 전체 사고의 58%를 차지하고 있는 실정이며,^[1] 이에 대한 대안으로 알루미늄 선박에 대한 관심이 고조되고 있다.^[2] 알루미늄 선박은 강선에 비하여 비강도가 높아 경량화에 의해 고속화가 가능하다. 또한 추진용 연료의 절감, 높은 내식성에 의한 유지 보수가 용이하고, 폐선 시 재활용이 가능하여 환경 친화적인 재료이며, FRP선 대비 많은 장점을 가지고 있다.^[3-4] 이러한 알루미늄 선박용 재료로 5000계열(Al-Mg 합금)과 6000계열(Al-Mg-Si 합금)이 주류를 이룬다. 기존에는 주로 5000계열과 6000계열에 대한 다양한 용접방법을 연구하였으며, 또한 부식 특성, 응력부식균열과 수소취화를 방지할 수 있는 최적의 조건 등을 연구한 바 있다.^[5-12] 따라서 본 논문에서는 알루미늄 선박용 6061-T6 합금에 대하여 용접재료를 변수로 하여 로봇을 이용한 용접을 실시하여 기계적, 전기화학적 특성을 평가하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

본 논문에 사용된 재료는 알루미늄 선박에 사용되는 6061-T6 시편에 대하여 용접재료는 ER5356, ER5556, ER5183, ER5654, ER5554, ER4047 그리고 ER4043 등이 있으나 본 논문에서는 ER5183과 ER5556을 사용하여 로봇으로 미그용접을 실시하였다. 모재와 용접재료의 화학적 조성은 Table 1에 나타냈으며 용접부의 형상은 루트갭 5mm, 루트면 2mm로 하여 147A, 20.6V 그리고 42cpm의 용접조건으로 실시하였다. 인장시험을

Table 1 The chemical compositions of base metal and welding metal (%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6061-T6	0.71	0.44	0.24	0.01	1.06	0.13	0.01	0.01
ER 5183	0.40	0.40	0.10	0.5	5.2	0.05 -0.25	0.25	0.15
ER 5556	0.25	0.40	0.10	0.5	5.5	0.05 -0.20	0.285	0.05

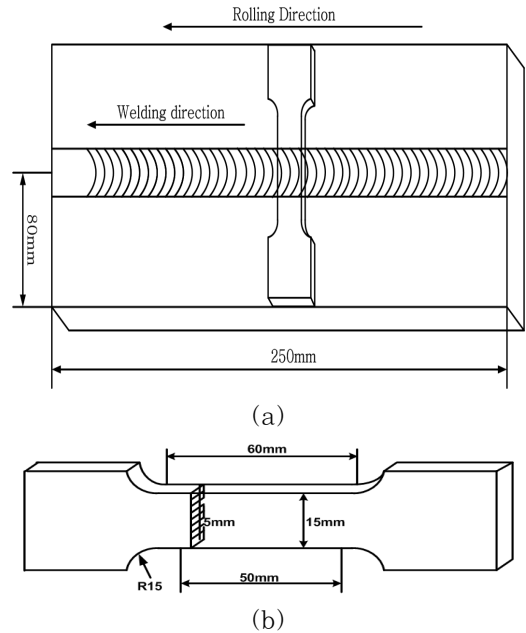


Fig. 1 Schematic diagram of tensile test specimen

위한 인장 시험은 JIS Z 2201의 12호 C 시험편을 응용하여 제작하였으며, 그 치수는 평행부 60mm, 표점거리 50mm, 두께 15mm로 가공하였으며, 익스텐소미터(Extensometer)를 사용하여 시험을 실시하였으며, 용접시편가 인장시험의 형상은 Fig. 1에 나타냈다. 또한 인장시험은 대기 중에서 0.2mm/min의 인장속도로 3회 실시하여 최대인장강도, 항복강도, 연신율, 파단되는데 걸리는 시간 그리고 흡수에너지의 평균을 모재와 상호 비교하여 알루미늄 선박 건조 시 참고자료로 활용하고자 한다. 또한 전기화학적 실험 시 사용된 시험편의 노출면적은 1cm²로 하였으며, 시험편 표면에 에머리페이퍼 600번까지 연마하고, 시험 직전 초음파 세척기를 이용해 아세톤과 증류수를 사용하여 세척하였다. 분극시험 시 기준전극으로 은/염화은 전극(SSCE)을, 대극은 백금전극을 사용하여 2mV/s의 주사속도로 천연해수 용액조건에서 실시하였다. 양분극 실험 시에는 개로전위에서 3.0 V까지 실시하였으며, 음분극실험은 개로전위에서 -2.0 V까지 실시하였다. 타펠 분석 실험에서는 개로전위를 기준으로 $\pm 250\text{mV}$ 분극시켜 부식전위와 부식전류밀도를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 다양한 조건에 대하여 인장시험을 실시한 경우 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 모재 롤링방향의 경우(a), 초기 인장 시험 시 연신율 변화에 따라 응력이 급격히 증가하여 300MPa 정도까지 상승한 후 거의 유사한 응력을 유지하면서 연신되었음을 알 수 있다. 그 경향은 대략 13% 정도까지 동일한 경향을 보인 후 연신율과 응력의 차이가 관찰되었다. 롤링방향에 대하여 직각방향으로 인장시험을 실시한 경우(b)는 롤링방향과 거의 유사한 거동을 보여 주었다. 파단은 평행부에서 발생하였으며, 연신되면서 파단 된 형상을 관찰할 수 있었다. 한편 ER5183 용접재료로 용접한 경우(c)는, 초기부터 연신율 증가에 따라 동일한 거동을

나타내다 6.6% 정도부터 차이를 보였으며, 전체적으로 모재에 비하여 현저히 낮은 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 용접면 내부에 용접결합 등의 발생이나 용접 시 열에 의한 영향으로 강도가 저하한 것으로 여겨지나 그 중 후자의 영향이 클 것으로 판단된다. 그 이유는 시편 초기부터 종료 시점까지 원만한 용접이 이루어져 재현성이 확보되었기 때문에 양호한 용접공정이 이루어진 것으로 판단되기 때문이다. 그리고 ER5556 용접재료로 용접한 경우(d), 초기부터 연신율 증가에 따라 거의 유사한 거동을 나타냈다. 인장 시험 후 파단 상부면에서는 용접부에서 약간 벗어난 부위인 열영향부에서 파단이 발생한 것으로 여겨지며, 하부면에서는 용접부를 벗어난 모재에서 파단이 일어난 것으로 판단된다. 그 이유는 용접비드가 상부면에 비

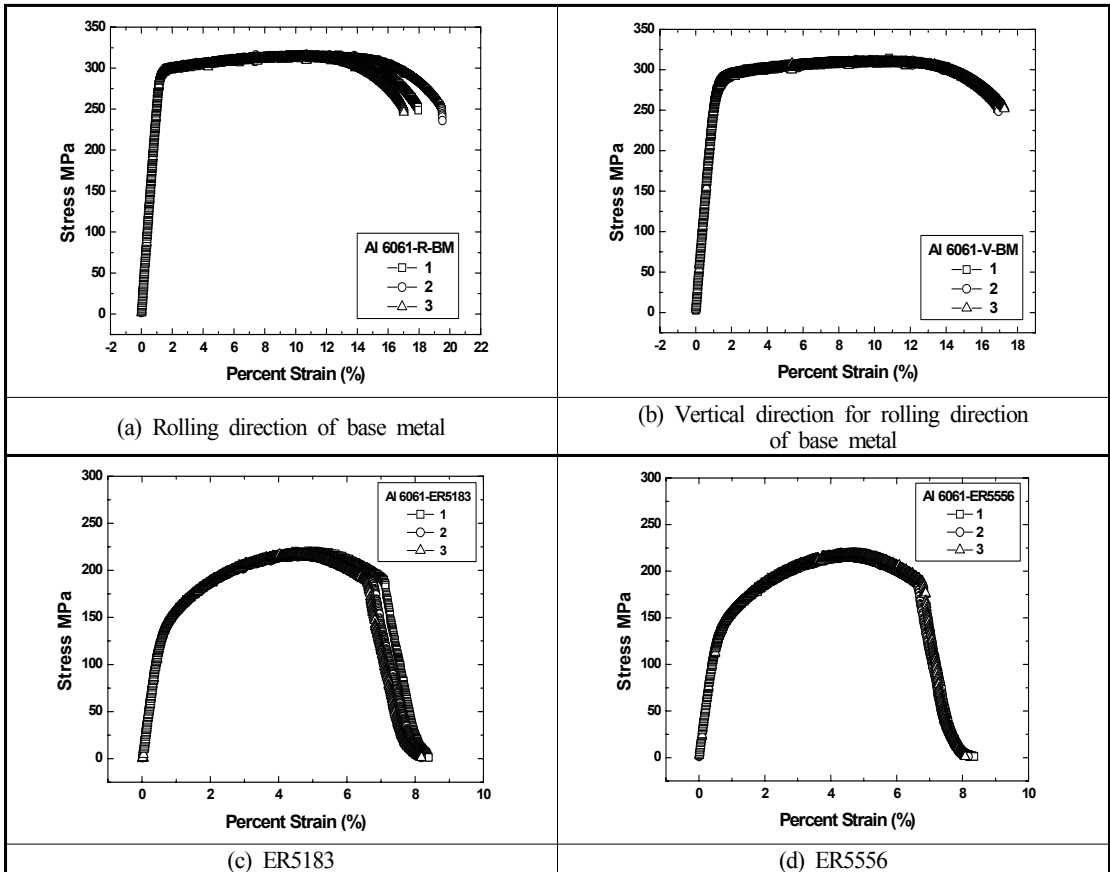


Fig. 2 Comparison of stress-elongation curves

하여 폭이 좁기 때문에 사료된다.

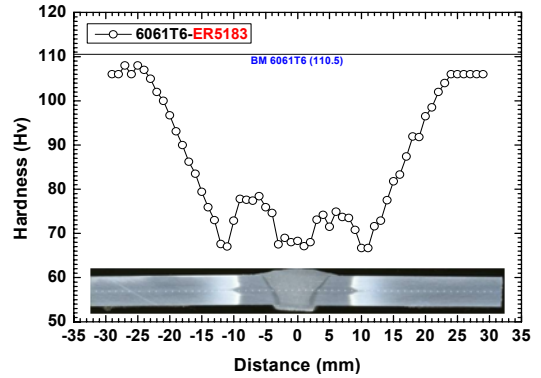
Table 2는 인장 시험 결과를 비교한 것이다. 먼저 모재의 경우 롤링방향의 경우가 그 직각방향에 비하여 모든 기계적 특성이 우수한 값을 나타냈다. 용접 재료 변수에 따라서는 거의 유사한 경향을 보였으나 ER5183의 경우가 약간 양호한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 용접부는 모재에 비해 현저히 낮은 경도를 나타냈는데 이는 용접열에 의해 연화되었기 때문에 사료된다.

Fig. 3은 6061-T6 합금에 대하여 용접재료 ER5183과 ER5556으로 로봇을 이용하여 용접한 경우 경도측정 결과를 나타낸 것이다. 용접부는 모재에 비하여 현저히 낮은 경도를 나타냈으며, 두 경우에서 동일하게 용접부 중앙을 중심으로 M형의 대칭적인 양상을 나타냈고, 용접부 중심에서 좌우로 용접부보다 약간의 경도 상승 구간이 관찰되었으며 모재가 현저히 높은 값을 나타냈다. 이는 용접 이상의 온도에서 합금의 재결정 형성 및 시효경화 효과의 소멸에 의한 영향으로 사료되며, 가장 낮은 경도를 나타낸 부분은 열에 의한 간접적인 영향에 기인한 강도 저하 현상으로 사료된다.^[13] 반면 동일재료에 대하여 마찰교반 용접한 경우는 용접부가 열영향부 보다 경도가 높은 특성을 나타내어 다른 양상을 보여주었다.^[14]

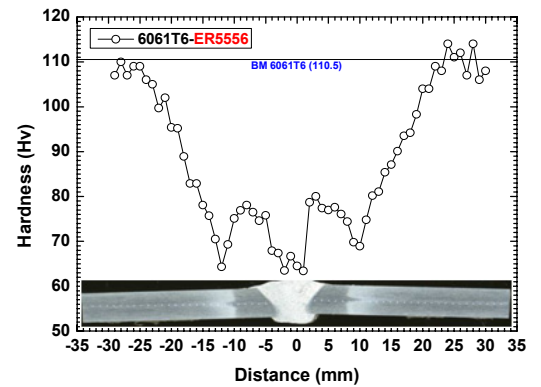
Fig. 4는 6061합금의 모재와 용접부에 대하여 86,400초 동안 자연전위 측정 결과를 나타낸 것이다. ER5183의 경우는 초기부터 약간의 변동은 있으나 대체적으로 안정된 전위를 실험 종료 시까지 꾸준히 유지하는 경향을 나타냈다. 그리고 모재는 침지초기에 염소이온에 의해 13,000초까지 서서히

Table 2 Mechanical characteristics after tensile test for 6061-T6

	Max. 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



(a) ER5183



(b) ER5556

Fig. 3 Results of hardness measurement in welded by ROBOT

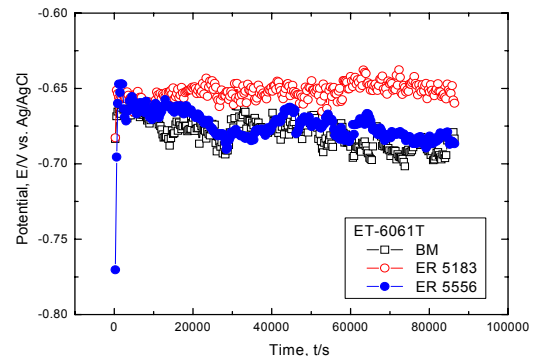


Fig. 4 Results of potential measurement for welded parts and base metal of 6061-T6

비방향으로 이행한 후 부동태 피막의 생성과 파괴에 의해 전위의 상승과 하강을 작은 폭으로 변화하는 경향을 나타냈다. 한편 ER5556의 경우는

18,000초까지 안정된 전위를 유지한 후 서서히 비방향으로 이행하다 이후 모재와 유사한 경향을 나타냈다. 전체적으로 ER5183의 경우가 가장 귀한 전위를 나타낸 반면 ER5556과 모재는 거의 유사한 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 전 연구에서 5456 알루미늄 합금에 대하여 마찰교반용접을 실시한 경우는 모두 침지 초기에는 급격히 전위가 귀방향으로 이행하였으며, 용접부와 모재부는 각각 1200초(-0.695 V)와 4,000초(-0.755 V)에서 가장 높은 값을 나타냈는데 이는 해수 내 침적과 동시에 시편 표면에 부동태 피막 형성으로 인하여 전위가 상승한 후, 해수 속에 포함된 염소이온에 의하여 부동태 피막이 파괴되어 다시 급격히 비방향으로 이행하였기 때문이다. 또한, 부동태 피막의 재생성으로 인하여 20,000초 정도까지 전위가 꾸준히 상승하는 경향을 나타내었다. 이후 용접부는 꾸준히 전위가 40,000초까지 상승하였으며, 모재부는 실험 종료 시까지 전위의 상승과 하강을 반복하였는데 이는 부동태 피막이 불안정하여 생성과 파괴가 반복되어 이러한 경향을 나타낸 것으로 판단되었다. 실험 종료 후 거의 유사한 전위를 나타냈으나 용접부가 대체적으로 전위의 헌팅이 적은 경향을 나타내어 보다 안정된 전기화학적 거동을 나타냈다.^[15]

Fig. 5는 6061 합금의 모재와 용접부의 양분극 경향을 나타낸 것이다. 개로전위에서는 거의 유사한 전위를 나타냈으며, 전위 상승에 따라 0V까지

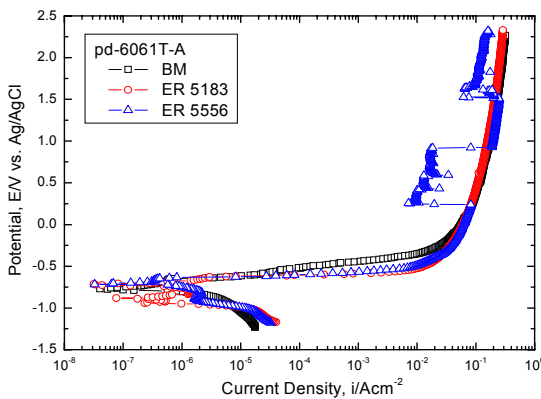


Fig. 5 Anodic polarization trends for welded parts and base metal of 6061-T6

는 모재의 경우가 가장 낮은 전류밀도를 나타냈다. 이후 거의 유사한 경향을 보이다 ER5556의 용접 재료로 용접한 부위는 급격히 전류밀도가 저하하는 부동태 구간이 나타났다. 그러나 전류밀도가 높기 때문에 양극방식 적용은 불가능한 구간이라 할 수 있다. 반면, ER5183의 경우는 이러한 경향을 나타내지 않았는데 이는 용접재료로 중성용액 내의 알루미늄은 Al₂O₃나 Al₂O₃·3H₂O와 같은 피막 형성으로 인하여 전류밀도가 감소되어 부식이 되지 않으나,^[16] 해수환경 하에서는 해수 속에 포함되어 있는 염소이온은 부동태 피막을 파괴시키거나 다시 생성된 피막에 의해 재부동태화 현상이 관찰되는 경우도 있다.

Fig. 6은 6061 합금의 모재와 용접부의 음분극 경향을 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 모든시험편에 대한 전체적인 경향은 개로전위에서부터 용존산소환원반응(O₂ + 2H₂O + 4e⁻ → 4OH⁻)에 의한 농도분극과 2H₂O + 2e⁻ → H₂ + 2OH⁻의 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈다. 용존산소환원반응과 활성화분극의 변곡점은 큰 차이는 나지 않으나 ER5556의 경우가 가장 낮은 값을, ER5183의 경우가 가장 높은 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 용존산소 환원반응에 의한 농도분극이 발생한 영역에서의 전류밀도는 모재의 경우가 가장 높은 값을 ER5183과 ER5556은 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 양분극 곡선과 비교하여 양극방식에

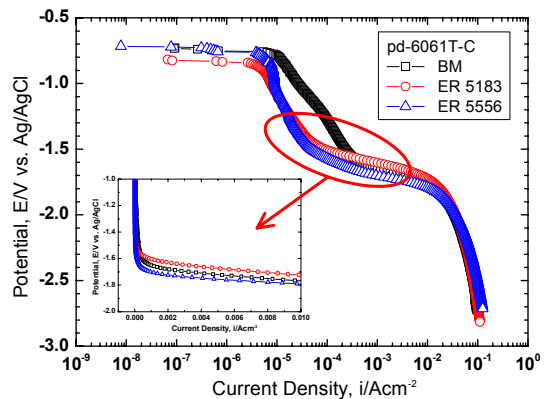
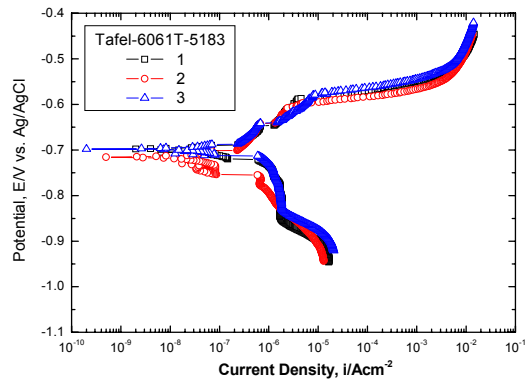


Fig. 6 Cathodic polarization trends for welded parts and base metal of 6061-T6

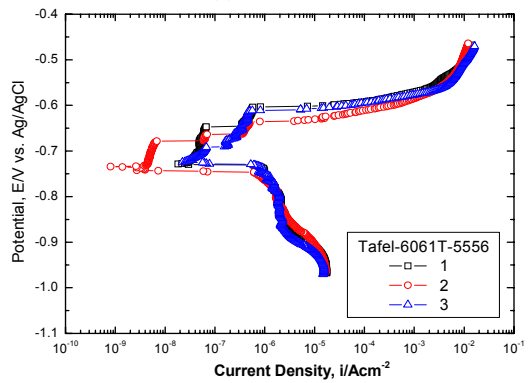
비해 음극방식의 경우가 용존산소환원반응에 의한 농도분극의 영역에서 보다 훨씬 낮은 전류밀도를 나타냈으며, 방식전위 영역도 넓기 때문에 양극 방식에 비해 음극방식의 경우가 효과적일 것으로 판단된다. 이후 수소가스 발생에 의한 활성화분극을 나타낸 전위에서는 용접부에 비하여 오히려 모재부가 낮은 전류밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 전위는 수소가스 발생에 의한 수소취화 현상이 발생하기 때문에, 방식전위에 해당되지 않는 과방식 전위이므로 고려 대상이 아닌 것으로 판단된다. 또한 전 연구에서는 알루미늄 내에 포함된 잔류응력이 마찰 교반 용접으로 인하여 발생한 열에 의해 잔류응력의 일부가 제거됨으로써 내식성이 개선되는 효과에 관해 연구한 바 있다.⁽¹⁷⁾ 또한 고장력강의 수소취화에 관한 연구에서 개로전위 이하에서 활성용해반응의 경향을 보인 후 용존산소환원반응에 의한 농도분극과 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈으며, 농도분극과 활성화 분극의 변곡점은 대략 -1.0V(SCE)로 나타났다. 그리고 변곡점보다 높은 전위에서 수소취화 현상이 관찰되었는데 이는 원자성 수소의 영향에 기인한 것임을 입증한 바 있다. 그러나 본 시편은 이보다 훨씬 낮은 -1.6V를 나타냈으므로 내식성은 물론 수소취화에 대한 저항성이 우수한 금속임을 재확인할 수 있었다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾

Fig. 7은 6061-T6합금에 대하여 용접재료 ER5556과 ER5183으로 용접된 시편의 타펠 분석을 위한 분극곡선을 나타낸 것이다. 음분극 경향은 ER5183의 경우, -0.729 V 전후에서 농도분극 발생구간에서 급격한 전류밀도의 상승이 관찰되었으며, 농도분극 발생 시의 부식전류밀도는 $5.901 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 을 나타냈다. 양분극 경향은 전위상승에 따라 완만하게 전류밀도가 상승하다 -0.58V 전후에서 공식발생으로 인하여 급격히 전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈다. 또한 ER5556의 경우도 유사한 경향을 나타냈는데 -0.736 V 전후에서 용존산소환원반응에 의한 농도분극 발생 구간에서 급격한 전류밀도의 상승이 관찰되었으며, 농도분극 발생 시 전류밀도는 $6.081 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 로 ER5183 용접재료와 유사한 값을 나타냈다. 양분극의 경우는 -0.65 V 전후에서 공식발생으로 인하여 급격히

전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 분극 곡선을 통하여 타펠 분석에 의한 부식전위와 부식전류밀도를 Table 3에서 정리하였다. 부식전위는 자연전위 측정 결과와 유사하게 ER5183의 경우가 가장 귀한 값을 나타냈으며, 모재와 ER5556은 거의 유사하나, 모재가 약간 비한 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 부식전류밀도는 전체적으로 모재인 경우가 가장 낮은 값을 나타냈으며, ER5183의 경우가 가장 큰 값을 나타냈다. 여기서 부식전류밀도는 부식속도와 직결되는 것이므로 부식전류밀도가 크면 부식속도가 빠르다고 할 수 있다. 그래서 용접부에서 부식이 발생할 것으로 판단할 수 있으나 부식전위는 모재인 경우가 가장 비한 값을 나타냈으므로 갈바닉 셀 형성 시 모재부에서 부식이 발생하므로 대양극-소음극 현상에 의해 선박 구조물 파괴에 이르는 큰 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.



(a) ER5183



(b) ER5556

Fig. 7 Polarization curves for Tafel analysis in welded with ER5183 for 6061-T6

Table 3 Results of Tafel analysis for welded parts and base metal of 6061-T6

	Corrosion potential (mV)	Corrosion current density(A/cm ²)
Base metal	-0.733	3.675×10^{-8}
ER5183	-0.706	4.13×10^{-7}
ER5556	-0.729	4.1×10^{-7}

4. 결 언

로봇을 이용하여 6061-T6 알루미늄 합금에 대하여 ER5183과 ER5556 용접재료로 용접한 경우 그 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인장 시험 결과, ER5183의 용접재료가 ER5556에 비하여 약간 양호한 경향을 나타냈다. 경도 측정 결과, 용접부 중앙을 중심으로 대칭적인 양상을 나타내었고, 모재부에서 현저히 높은 값을 나타냈다.

2. 자연전위 측정 결과, 전체적으로 ER5183의 경우가 가장 귀한 전위를 나타낸 반면 ER5556과 모재는 거의 유사한 전위를 나타냈다. 음분극 경향은 개로전위에서부터 용존산소환원반응에 의한 농도분극과 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈다. 용존산소환원반응과 활성화분극의 변곡점은 ER5556의 경우가 가장 낮은 값을 ER5183의 경우가 가장 높은 전위를 나타냈다. 또한 타펠 분석 결과, 부식전류밀도는 모재인 경우가 가장 낮은 값을 나타냈기 때문에 용접부에서 부식이 발생할 것으로 판단할 수 있으나 부식전위가 모재인 경우가 가장 비한 값을 나타냈으므로 갈바닉 셀 형성 시 모재부가 부식될 것으로 판단된다.

3. 용접재료 변수에 따른 실험결과, ER5183이 ER5556보다 귀한 부식전위 및 유사한 부식전류밀도를 나타냈으므로 ER5183의 용접재료가 보다 양호한 전기화학적 거동을 보일 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- [1] 김성중, 장석기, 한민수, 다양한 용접기술을 적용한 선박용 알루미늄 합금의 기계적 특성 평가, 해양환경안전학회지, 제13권, 제3호, pp.223-228, 2007.
- [2] 김성중, 알루미늄 선박용 재료와 용접기술, 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 제5호, pp. 14-25, 2006.
- [3] Sky Al products corporation, Foundation of Al alloy ship projects, 일본 경금속용접, Vol. 41, No. 11, pp. 544-545, 2003.
- [4] Zen-ichi Tanabe, Fumio Matsumoto, Actualities and problems of Al alloy for the environmental resistance, 일본 경금속용접, Vol. 39, No. 3, pp. 125-132, 2001.
- [5] 김성중, 고재용, 선박용 고강도 Al 합금 (5456-H116)의 최적방식전위 결정에 관한 연구, 한국마린엔지니어링학회, 제30권, 제1호, pp. 157-168, 2006.
- [6] Seong-Jong Kim, Jae-Yong Ko, Electrochemical properties of Al and Al alloys relevant to corrosion protection in sea water environments, The Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 847-853, 2006.
- [7] Seong-Jong Kim, Evaluation of mechanical characteristics of friction stir welded Al-Mg alloy(5083-O) for ship's, The sixth pacific rim international conference on advanced materials and processing(PRICM 6), pp. 143, 2007.
- [8] Young-Bin Woo, Min-Su Han, Jong-Seek Park, Jea-Cheul Park, Sung-Hyen Park, Seok-Ki Jang, Seong-Jong Kim, Electrochemical

- characteristics of FSWed 5083-O Al alloy for leisure ship, 17th World interfinish Congress & Exposition With 9th ICASE, pp. 337, 2008.
- [9] Jong-Seek Park, Seong-Jong Kim, Min-Su Han, Jeong-Il Kim, The electrochemical characteristics for FSWed specimen of new material (5083-O) for leisure ship, The 9th International Symposium on Eco-Materials Processing & Design(ISEPD 2008) pp. 180, 2008.
- [10] Seong-Jong Kim, Seok-Ki Jang, A slow strain rate test experiment to evaluate the characteristics of high-strength Al-Mg alloy for application in ship, Materials science forum, Vol. 510-511, pp. 162-165, 2006.
- [11] Seong-Jong Kim, Evaluating the electro-chemical properties in the protection potential of material for use in Al vessels in seawater, Materials science forum, Vol. 510-511, pp. 158-161, 2006.
- [12] Seong-Jong Kim, Jae-Yong Ko, Min-Su Han, Evaluation of the characteristics using slow strain rate tests of 5456 Al-Mg alloy for ship construction, The Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 1028-1033, 2006.
- [13] 윤종원, 이윤상, 이경돈, 박기영, 6061 알루미늄 합금 레이저 용접부 고온균열 발생에 미치는 용가재 조성의 영향, 2003년 추계 학술대회 발표 논문집, 대한용접·접합학회, pp. 98-100, 2003.
- [14] 박종식, 장석기, 김성중, 이돈출, 마찰교반용접부의 6061-T6 알루미늄 합금의 기계적 특성 평가, 2008년도 전기학술대회 논문집, 한국마린엔지니어링학회, pp. 361-362, 2008.
- [15] 장석기, 김성중, 마찰교반용접한 5456-H116 알루미늄 합금 용접부 표면의 기계적 및 전기화학적 특성, 한국표면공학회, 제41호, 제4호, pp156-162, 2008.
- [16] 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).
- [17] Seok-Ki Jang, Dong-Chool Lee, Seong-Jong Kim, Jeong-Il Jeon, Sang-Hwan Kim, Investigation of microstructures and properties for friction stir welded 1050 aluminum sheet, Proceeding of the Korean society of marine engineers, pp. 139-144, 2004.
- [18] Seong-Jong Kim, Masazumi, Okido, Kyung-Man Moon, The electrochemical study on mechanical and hydrogen embrittlement properties of HAZ part as a function of post-weld heat treatment in SMAW, Surface and coatings Technology, Vol. 169-170, pp. 163-167, 2003
- [19] Kyung-Man Moon, Myung-Hoon Lee, Ki-Jun Kim, Seong-Jong Kim, The effect of post-weld heat treatment affecting corrosion resistance and hydrogen embrittlement of HAZ part in FCAW, Surface and coatings Technology, Vol. 169-170, pp. 675-678, 2003.
- [20] Seong-Jong Kim, Seok-Ki Jang, Jeong-Il Kim, Electrochemical study on hydrogen embrittlement and optimum cathodic protection potential of welded high strength steel, Metals and materials international, Vol. 11, pp. 63-69, 2005.

저 자 소 개



김성종

1991년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1997년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2001년 한국해양대학교 대학원졸업(공학박사), 2005년 일본나고야대학 공학연구과 대학원 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사



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