

다양한 용접기술을 적용한 선박용 알루미늄합금의 기계적 특성 평가

김성종* · 장석기** · 한민수***

*, **목포해양대학교 기관시스템공학부

***목포해양대학교 대학원

Evaluation of Mechanical Characteristic of Al Alloy for Ship's Welded with Various Welding Techniques

Seong-Jong Kim* · Seok-Ki Jang** · Min-Su Han***

*, **Division of Maritime Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

***Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 본 논문은 선박용 알루미늄 합금에 대하여 TIG, MIG 그리고 로봇을 이용한 용접 등과 같은 다양한 용접기술을 적용하여 기계적 특성을 평가하였다. TIG 용접을 실시하였을 경우는 항복강도, 인장강도 그리고 연신율은 모재에 비하여 각각 83.9%, 64.6% 그리고 21.9%를 나타냈다. MIG 용접은 ER5356 용접봉을 사용하여 용접한 경우 ER5183 용접봉을 사용한 경우에 비하여 기계적 특성이 대략 2-4% 정도 개선된 효과가 관찰되었다. 또한 로봇을 이용한 용접을 실시한 경우는 5456-H116 모재에 비하여 5083O 모재의 경우가 양호한 기계적 특성을 나타냈다.

핵심용어 : 선박용 알루미늄 합금, TIG 용접, MIG 용접, 기계적 특성

ABSTRACT : This paper investigated on mechanical characteristic of Al alloy for ship's welded with various welding techniques such as TIG, MIG welding and welding by robot. The yield strength, tensile strength and elongation in TIG welding present 83.9%, 64.6% and 21.9% compare to those in base metal, respectively. The MIG welding is carried out with welding eletrode of ER5183 and ER5356. The mechanical characteristics in ER5356 are improved at approximately 2-4% for ER5183. The mechanical properties of 5083O in welding by robot are better than those of 5456-H116.

KEY WORDS ; Al Alloy for Ship's, TIG Welding, MIG Welding, Mechanical Characteristic

1.서언

해양환경오염규제라는 국제 규정의 발효로 인하여 FRP 선박 건조가 감소하고 있으며, 점차 환경친화형 신소재 선박의 건조를 국가적 차원에서 권장하고 있다. 또한 국내 연안을 항해하는 최고 속도 25노트 이상의 고속 여객선과 고속화물선(총톤수 500톤 이상)은 화재에 취약한 FRP 재질 사용이 금지되었으며, 해양수산부는 FRP선의 2004년 해상화재로 인한 인명피해를 예방하기 위해 해양인명 안전협약(SOLAS)의 국제 고속선 기준(HSC Code)을 수용하였으며, 고속선 기준을 개정하여 강제 적용시켰다. 또한 FRP선은 크기가 작고, 레이더파를 반사시키는 강도가

약하므로 중, 대형 선박이 탐지하지 못하여 충돌에 의한 해난사고가 다발하고 있으며, 선박 사고 발생률은 어선에 의한 해양사고가 약 72.4%를 차지하였으며, 어선에 의한 충돌건수가 약 58%를 차지하였다(김 등, 2005). 또한 알루미늄은 비강도가 높아 경량화에 의해 고속화가 가능하고, 추진용 연료의 절감, 높은 내식성에 의한 유지 보수가 용이하며, 폐선 시 재활용이 가능하고, 화재에 기인한 대형사고의 발생 염려가 없는 등 여러 가지 면에서 강점을 가지고 있다(Sky, 2003; Zen-ichi, 2001). 그러므로 FRP선의 알루미늄 선박으로의 대처는 보다 가속화 될 것으로 예측된다. 이러한 강점으로 향후 중소형 선박 건조의 주종을 이루게 될 알루미늄은 기존의 용접 방법에 많은 문제점이 있으므로, 알루미늄 용접 시 열변형이 심하지 않으며, 작업자의 컨디션이나 환경에 크게 영향을 받지 않는 용접 기술 개발은 대단히 중요하다. 따라서 환

* 대표저자 : 비회원, ksj@mmu.ac.kr 061)240-7309

** 비회원, jangsk@mmu.ac.kr 061)240-7093

*** 정회원, mp949@mmu.ac.kr 061)240-7161

경 친화적이며, 화재에 강한 연료절감형 고부가가치 소형 선을 겨냥한 신소재인 알루미늄 합금의 적용이 절실히 필요하나, 우리나라 중소형 조선소는 영세하여 알루미늄 선박 건조 관련 신기술 개발과 인력양성이 체계적으로 이루어지지 못하고 있는 실정이다(강과 조, 2004).

그러므로 본 논문에서는 TIG 용접, MIG 용접 그리고 로봇을 이용한 용접 등과 같은 여러 가지 용접법을 적용하여 기계적 특성을 평가하여 최적의 용접 기술을 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 모재는 선박용 재료로 사용되는 Al-Mg 합금 중 50830과 5456-H116을 사용하였으며, 그 화학적 조성은 Table 1에 나타내고 있다. 로봇을 이용한 용접은 50830의 경우는 1패스 용접을 실시하였으며, Y형 그루브를 만들어, 42cpm의 용접 속도로 실시하였다. 또한 루트 간격은 1mm였으며, 이때 가해진 전압은 20.6V, 전류는 147A의 조건으로 실시하였다. 한편 5456-H116 시편의 경우는 2패스 용접을 실시하였는데 1패스에서는 135A, 19.4 V 그리고 42cpm으로 실시하였으며, 2패스에서는 145A, 20.2 V 그리고 42cpm으로 실시하였다. 그리고 이때 사용된 용접봉의 지름은 1.2mm였으며, 용접봉의 화학적 조성은 Table 2에 나타냈다. 용접된 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험을 실시하였는데 그 조건은 유압식 인장시험기(Instron 8516)이며, 0.2 mm/min의 인장속도로 실험을 실시하였다.

Table 1. Chemical compositions of 50830 and 5456-H116

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
50830	0.122	0.250	0.024	0.627	4.528	0.076	0.023	0.011
5456-H116	0.08	0.20	0.05	0.79	4.80	0.09	0.09	0.02

Table 2. Chemical compositions of welding materials

	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	0.1	0.5 -1.0	4.7 -5.5	0.05 -0.20	0.285	0.05 -0.20

3. 실험결과 및 고찰

3.1 TIG(Tungsten inert gas) 용접에 의한 특성 평가

Fig. 1은 Al-Mg 합금(50830)을 ER 5356 용접봉으로 TIG 용접을 실시한 시편의 형상을 보여 주고 있다. 알루

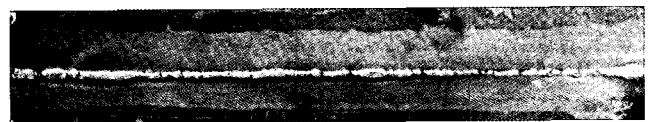
미늄 합금의 경우 용접 시 열에 의한 변형이 심하므로 이를 방지하기 위하여 지그로 고정하고 용접을 실시하였다. 먼저 시편 윗면의 경우 용접 시작 부위와 종료된 지점에서는 과도한 입열량의 영향으로 검게 시편이 탄 흔적이 현저하게 관찰되었으며, 원만한 비드의 형상이 관찰되었다. 그러나 백비드(back bead)의 경우 연속된 용접 공정에서 고르게 나타나지 않았으며, 이러한 용접부위로 인하여 인장시험 시 재현성이 확보되지 못할 것으로 예측할 수 있으며, 뒷면도 역시 용접열의 영향을 관찰할 수 있었다. 측면에서는 용접 전 열에 의한 변형을 방지하기 위해 설치한 지그의 영향으로 약간의 변형만 관찰되었다.

Fig. 2는 Al-Mg 합금(50830)을 ER 5356 용접봉으로 TIG 용접을 실시한 시편에 대하여 인장시험 결과를 나타내고 있다. 인장시험을 여러 차례 실시하였으나 그래프에서 보는 바와 같이 초기(대략 연신율이 1.5%정도)에는 거의 유사한 거동을 보였으나 연신을 증가에 따라 현저한 차이를 보여 거의 재현성이 확보되지 않았다. 그 이유는 비드가 완전히 용입되지 않는 부분이 있어 다양한 결과를 나타낸 것으로 사료된다.

Table 3은 Al-Mg 합금(50830)을 ER 5356 용접봉으로 TIG 용접 시편에 대한 인장 시험 결과를 나타내고 있다. 항복강도, 최대인장강도, 연신율 그리고 파단시간의 평균은 각각 134 MPa, 219 MPa, 7.03 % 그리고 18.82 min을 나타내어 모재에 비해 항복강도, 최대인장 강도 그리고 연신율의 경우 각각 83.9%, 64.6% 그리고 21.9%의 값으로 아주 낮은 값을 나타냈다. 게다가 인장 시험 결과 재현성은 확보하기 어려웠으므로 실제 알루미늄용접 적용 시 많은 어려움이 있을 것으로 판단되며, 또한 용접자의 컨디션, 날씨, 습도 등에도 크게 영향을 받는 용접법으로 알려져 있다. 인장 시험 후 파단은 용착부에서 관찰되었다. TIG 용접을 실시한 경우는 재현성이 확보되지 않을 뿐만 아니라 용입 불량 등으로 인하여 모재에 비하여 훨씬 낮은 특성을 보여 주었으므로 더 이상의 실험은 실시하지 않았다.



(a) Top side



(b) Bottom side



(c) Section side

Fig. 1. Specimen shape of welded 50830 by TIG welding method.

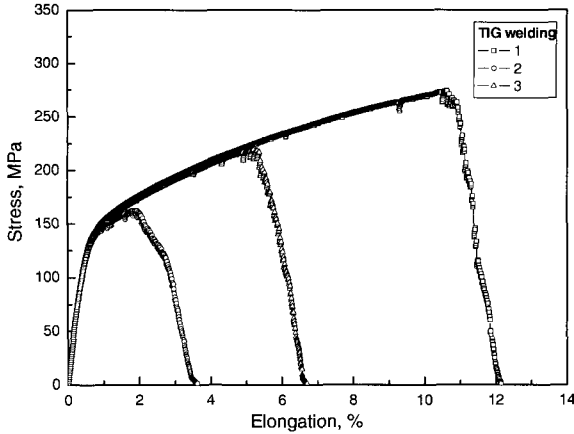


Fig. 2. Stress-elongation curves after tensile test for welded 5083O specimen by TIG welding method.

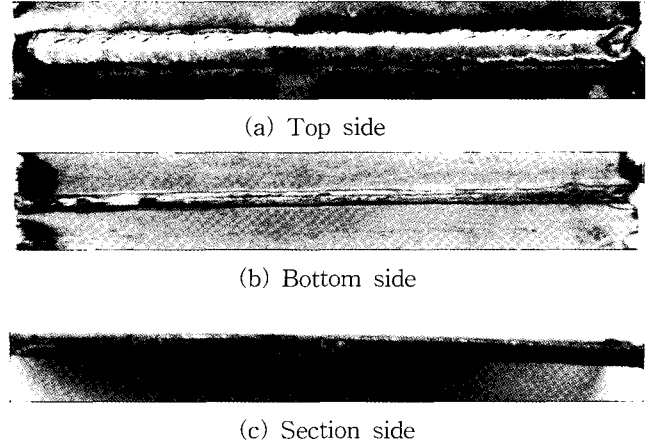


Fig. 3. Specimen shape of welded 5083O by MIG welding method with ER 5356.

Table 3. Tensile test result of welded specimen by TIG welding method for 5083O

	Yielding strength (MPa)	Maximum tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Time-to-Fracture (min)
5083O BM	159	338	32.09	
TIG welding	134	219	7.03	18.82

3.2 MIG(Metal inert gas) 용접에 의한 특성 평가

Fig. 3은 ER 5356 용접봉을 사용하여 MIG 용접을 실시한 경우 시편 사진을 보여주고 있다. 윗면에서 용접선을 따라 용접 열의 영향이 관찰되었으며, 뒷면에서는 용접 시작점과 종료 시점에서 약간의 용입 불량에 보이는 하나 대체적으로 양호하며, TIG 용접에 비하여 현저하게 양호한 용접이 이루어졌음을 알 수 있다. 한편 측면에서는 TIG 용접에서와 마찬가지로 지그를 장착하여 용접을 실시하였기 때문에 약간의 변형만 관찰되었다. 또한 ER 5183 용접봉을 사용한 경우에 비하여 ER 5356 용접봉을 사용한 경우가 용접열에 의한 영향은 비슷하나, 보다 양호한 비드형상과 적은 변형을 나타냈으므로 인장 시험 시 양호한 기계적 특성을 보일 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 ER5183, ER5356 용접봉으로 MIG 용접한 시편에 대한 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 용접봉 종류에 무관하게 거의 유사한 거동을 보여 주었고, 약간의 연신율의 차이를 발견할 수 있었으며, 그 시험결과를 Table 4에서 상호 비교하였다.

Table 1의 모재와 비교하면 모재가 가장 양호한 특성을 보여 주었으며, 2개의 용접봉 중 ER 5356의 경우가 양호한 특성을 보여 주었다. ER 5183 용접봉을 사용한 경우 모재에 비하여 항복강도, 최대인장 강도, 연신율은 각각

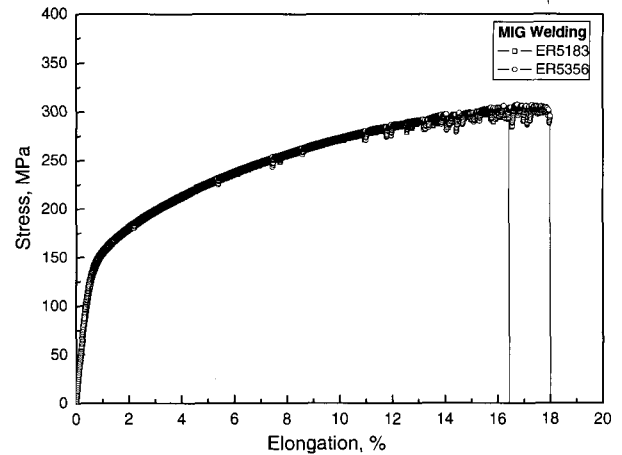


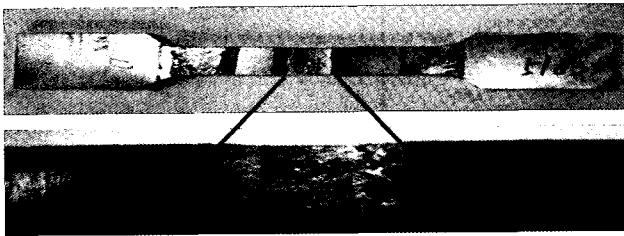
Fig. 4. Stress-elongation curves after tensile test for welded 5083O specimen by MIG welding method.

86.2%, 88.1% 그리고 51.2%를 나타냈으며, ER 5356 용접봉을 사용한 경우는 각각 89.5%, 90.6% 그리고 55.2%로 ER 5183 용접봉을 사용한 경우에 비하여 전체적으로 2-4% 정도 양호한 특성을 확인할 수 있었다.

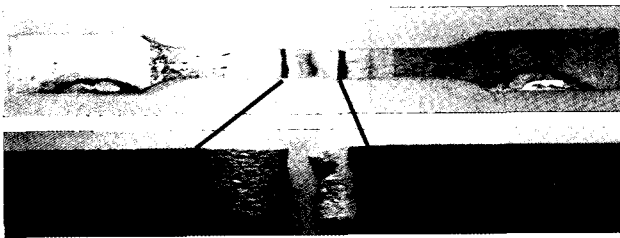
Fig. 5는 ER 5183, ER 5356 용접봉으로 MIG 용접한 시편에 대한 인장 시험 후 파단된 시편을 보여 주고 있다. 용접봉 종류에 무관하게 거의 유사한 거동을 보여 주었으며, 파단부위에서 약간의 연성의 차이를 발견할 수 있었다. 일반적으로 용접 시편의 경우 인장시험 시 열영향부에서 파단이 되는 경우가 많으나 본 용접법에서 두 가지 용접봉 모두 용착부에서 파단되었다. 지금까지 언급한 TIG나 MIG 용접 등과 같은 용융용접 시 용접부의 기계적인 특성이 현저히 저하하였다. 그 이유는 용융용접 시 다량의 열이 유입되어 취약한 응고조직의 형성으로 인해 가공경화성의 손실 및 미세 석출물의 고용 현상 등에 기인한 것으로 사료된다. 그 외에도 열전도율이 높고 알루미늄 합금 표면에 고용점의 산화 피막이 발생하기 때문에 용융이 어렵다는 보고가 있다(Sato, 2002)]. 이러

Table 4. Tensile test result of welded specimen by MIG welding method for 5083O

	Yield strength (MPa)	Maximum tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Time-to-Fracture (min)
ER5183	137	298	16.44	41.38
ER5356	143	307	17.72	44.53



(a) ER 5183



(b) ER 5356

Fig. 5 Specimens after tensile test for welded 5083O specimen by MIG welding method.

한 이유로 신뢰성이 높은 알루미늄 합금의 접합부를 얻는다는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다. 또한 알루미늄 용접으로 이용되고 있는 TIG 용접과 MIG 용접을 상호 비교하면 MIG 용접한 경우가 TIG 용접에 비하여 용입이 깊고, 용착량이 많기 때문에 TIG 용접은 주로 박판이나 용접이 연속되지 않는 경우에, MIG 용접은 중후판이나 용접이 연속하여 긴 경우에 적용하는 경우가 많다(박 등, 1994a; 박 등, 1994b). 따라서 본 연구에서도 TIG 용접에 비하여 MIG 용접을 실시한 경우가 양호한 특성을 보인 것으로 판단된다.

3.3 로봇 용접에 의한 특성 평가

3.3.1 5083O 시편의 용접 특성

Table 5는 로봇 용접 시 용접 변수에 따른 인장시험 결과를 나타내고 있다.

5083O 모재 시편에 대하여 수평방향(롤링방향)과 수직방향(롤링방향과 수직방향)인 경우에 대하여 인장 시험율이 8%까지는 거의 동일한 경향을 나타냈으며, 그 후

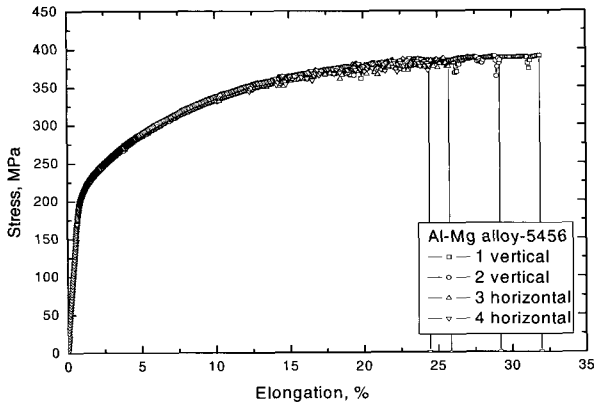
강도가 약간씩 차이를 보이거나 전체적으로 거의 유사한 Table 5. Tensile test result of welded specimen by robot for 5083O

		Yielding strength (MPa)	Maximum tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al-Mg alloy (5083O)	Vertical direction	159	338	32.09
	Rolling direction	168	340	30.58
ER 5183		152	316	20.02
ER 5556		149	324	23.08

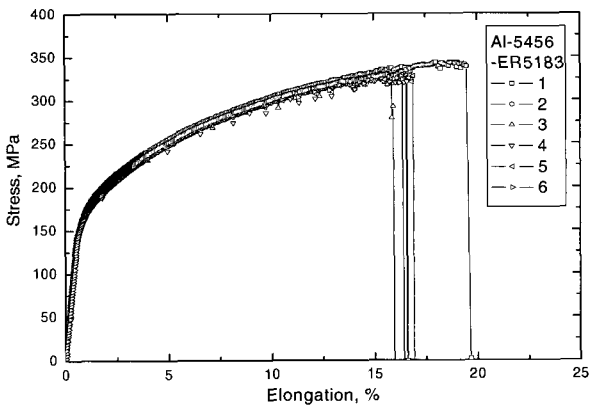
경향을 관찰할 수 있었다. 또한 ER 5183 용접봉과 ER 5356 용접봉을 6차례 실시를 하였으나 거의 유사한 특성을 나타냈다. 이는 모든 조건에서 거의 완전한 용접이 이루어졌기 때문으로 판단된다. 모재의 경우는 인장시험 가공 시 모두 수직방향으로 실시하였기 때문에 그것을 기준으로 상호 비교하였다. 먼저 ER 5183 용접봉을 사용하였을 경우는 모재에 비하여 항복강도, 최대인장강도 그리고 연신율의 경우 각각 95.2%, 93.5% 그리고 62.4%를 나타냈으며, ER 5556 용접봉을 사용하였을 경우는 각각 93.7%, 95.6% 그리고 71.9%를 나타냈다. 항복강도의 경우는 ER 5183 용접봉을 사용한 경우가 양호한 특성을 나타낸 반면 최대인장강도와 연신율의 경우는 ER 5556 용접봉을 사용한 경우가 우수한 특성을 보여주었으므로 ER 5556의 경우가 용접봉 선택 시 바람직할 것으로 사료된다. 판단된 시편 관찰에서는 알루미늄의 경우는 연성이 풍부한 재료이기 때문에 어느 정도의 연신에 의한 연성의 특성을 보인 후 파단되었다. 한편 ER 5183 용접봉을 사용하였을 경우는 열영향부에서 파단된 반면 ER 5556 용접봉을 사용하였을 경우는 열영향부와 용접부에서 파단되었다.

3.3.2 5456-H116 시편의 용접 특성

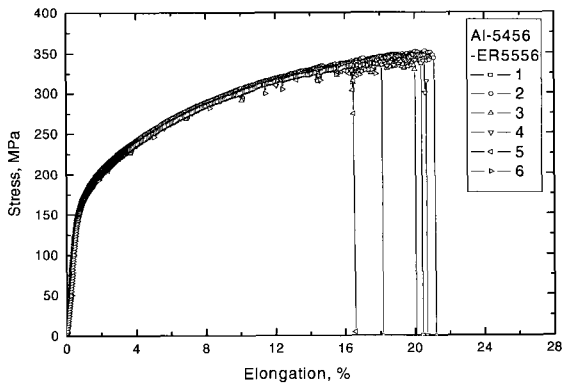
Fig. 6은 5083O와 마찬가지로 알루미늄-마그네슘 합금인 5456-H116 모재 시편에 대하여 수직, 수평방향(롤링방향)인 경우와 ER 5183, ER 5556 용접봉을 사용하여 용접을 실시하였을 경우 인장시험 후 응력-변형을 곡선을 나타내고 있다. 모재의 경우 두 가지 조건 모두 거의 유사한 응력을 나타내고 있으며, 그 이후의 연신율에서도 약간의 응력의 차이만 관찰되었다. ER 5183 용접봉을 사용하여 로봇으로 용접을 실시하였을 경우는 #1 시편인 경우만 제외하고 거의 유사한 곡선의 형태를 나타냈으며, ER 5556의 경우 응력은 거의 모든 조건에서 유사한 값을 나타냈으나, 연신율의 경우 차이를 확인할 수 있었다.



(a) 5456 BM



(b) ER5183



(c) ER5556

Fig. 6. Stress-elongation curves after tensile test in welding with base metal, ER 5183 and ER 5556 welding electrode for welded 5456-H116 specimen by robot.

Table 6은 5456-H116 시편 모재와 용접봉 변수에 따른 인장 시험 결과를 나타내고 있다. 모재의 경우 수직과 수평인 경우를 상호 비교해 보면 항복점과 최대인장강도는 거의 유사한 값을 나타냈으나 연신율의 경우 수직방향인 경우가 5.45% 높은 값을 나타냈다. 한편 ER 5183 용접봉을 사용한 경우와 ER 5556 용접봉을 사용한 경우, 항복점과 최대인장강도는 거의 유사하나 ER 5183인 경우가

약간 높은 값을 나타낸 반면 연신율은 ER 5556인 경우가 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 ER 5183 용접봉을 사용한 경우는 모재에 비하여 항복강도, 최대인장강도 그리고 연신율은 각각 79.0%, 88.2% 그리고 55.7% 정도를 나타냈으며, ER 5556 용접봉을 사용한 경우는 각각 78.7%, 84.9% 그리고 63.8%를 나타냈다. 5456-H116 시편의 모재와 용접봉 변수에 따른 인장 시험 후 파단 시편 관찰 결과, 50830 시편과 마찬가지로 수직 방향에서는 평행부에서, 롤링방향에서는 어깨부위에 가까운 평행부에서 파단되었으며, ER 5183과 ER 5556 용접봉을 사용한 경우 모두 용착부에서 파단이 발생하였으며, 모든 시편에서 인장시험 시 연성에 의해 인장되면서 파단 되었음을 확인할 수 있었다.

지금까지 실시한 TIG, MIG 그리고 로봇으로 용접을 실시한 경우 용접봉 변수에 따른 인장시험 후 모재인 경우와 비교하여 기계적 특성을 Table 7에서 상호 비교하였다. 모든 조건에서 기계적 특성이며, MIG 용접을 실시한 경우는 ER 5356 용접봉의 경우가 양호한 기계적 특성을 나타냈다. 한편 로봇으로 용접을 실시한 경우는 50830 시편이 5456-H116 시편인 경우 모두 항복강도비와 최대인장강도비의 경우 큰 차이가 나지 않았으며, 연신율의 경우는 크게 차이가 났는데 전체적으로 ER 5183인 경우에 비하여 ER 5556 용접봉을 사용한 경우가 양호한 특성을 보여 주었다. 또한 50830의 모재인 경우가 5456-H116 모재에 비하여 기계적 특성이 모두 양호한 용접 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 상기 조건을 모두 종합해 보면 50830 시편을 ER 5556 용접봉을 사용하여 로봇으로 용접을 실시한 경우가 가장 양호한 특성을 보여 주었음을 알 수 있다.

지금까지의 용접방법으로 용접을 실시하였을 경우 기계적 특성에 가장 많이 미치는 요소는 용접 시 생성되는 기공으로 알려져있다. 이러한 용접 기공에 의한 파단면의 면적 감소에 의해 용착금속에서의 횡축 인장강도는 거의 직선적으로 감소되는데 미세한 기공도 역시 큰 기공과 마찬가지로의 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

Table 6. Tensile test result of welded specimen by robot for 5456-H116

		Yielding strength (MPa)	Maximum tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al-Mg alloy (5456-H116)	Vertical direction	204	390	30.58
	Rolling direction	205	387	25.13
ER 5183		161	344	17.02
ER 5556		160	331	19.52

또한 이러한 이유 이외에는 기공에 의한 응력집중의 효과로 판단된다(박 등, 1994b; Shore and McCanley, 1970).

Table 7은 TIG, MIG, 로봇 용접 조건 그리고 마찰교반 용접 시 최적의 조건을 나타낸 조건에서의 결과를 모재에 대한 각 기계적 특성의 비를 나타낸 것이다. 용접봉 종류에 따라서는 ER 5356이나 ER 5556인 경우가 ER 5183에 비하여 우수한 기계적 특성을 나타냈다. 또한 TIG 용접에 비하여 MIG 용접이 우수한 특성을 나타냈으며, 로봇으로 용접한 경우는 50830의 경우가 5456-H116 시편에 비하여 모두 양호한 기계적 특성을 보여 주었다. 전체적으로 다양한 용접 방법 및 용접봉 변수별 최적의 조건에서 가장 높은 연신율 비는 50830 시편에 대하여 ER 5556 용접봉을 사용하여 로봇을 이용한 용접을 실시한 경우로 나타났다.

Table 7. Mechanical property ratios for base metal after tensile test with optimum welding method and welding electrode.

			Yielding strength ratio (%)	Maximum tensile strength ratio(%)	Elongation ratio(%)
TIG	50830	ER5356	83.9	64.6	21.9
MIG	50830	ER5356	89.5	90.6	55.2
	50830	ER5556	93.7	95.6	71.9
Robot	5456-H116	ER5556	78.7	84.9	63.8

4. 결론

선박용 알루미늄 합금 재료에 대한 여러 가지 용접기술을 적용하여 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) TIG 용접을 실시한 경우는 항복강도, 최대인장강도, 연신율 그리고 파단시간의 평균은 각각 134 MPa, 219 MPa, 7.03 % 그리고 18.82 min을 나타내어 모재에 비해 항복강도, 최대인장 강도 그리고 연신율의 경우 각각 83.9%, 64.6% 그리고 21.9%의 값을 나타내어 아주 낮은 값을 나타냈으며, 또한 재현성도 확보되지 않았다.
- (2) 2가지의 용접봉을 사용하여 MIG 용접을 실시한 경우, ER 5183 용접봉을 사용한 경우 모재에 비하여 항복강도, 최대인장 강도, 연신율은 각각 86.2%, 88.1% 그리고 51.2%를 나타냈으며, ER 5356 용접봉을 사용한 경우는 각각 89.5%, 90.6% 그리고 55.2%로 ER 5183 용접봉을 사용한 경우에 비하여 전체적으로 2-4% 정도 양호한 특성을 확인할 수 있었다.
- (3) 로봇으로 용접을 실시한 경우는 50830의 모재인 경

우가 5456-H116 모재에 비하여 기계적 특성이 모두 양호한 용접 결과를 나타냈으며, 50830 시편에 대하여 ER 5556 용접봉을 사용하여 로봇으로 용접을 실시한 경우가 가장 양호한 특성을 보여 주었음을 알 수 있다.

- (4) 모든 용접 변수 및 용접봉 변수별 가장 우수한 기계적 특성을 보인 조건은 50830 시편에 대하여 ER5556 용접봉을 로봇으로 용접을 실시한 경우로 나타났다.

Acknowledgement ; This research was financially supported by the MOCIE and KOTEF through the Human Resource Training Project for Regional Innovation.

참고문헌

- [1] 강병윤, 조제형(2004), 알루미늄 소형선의 구조와 시공주안점, 제22권, 제3호, pp. 39-44.
- [2] 김성중, 고재용, 장석기, 김정일(2005), 해양환경 하에서의 알루미늄 선박용 재료의 기계적 특성과 전기화학적 특성평가, 2005년 해양환경안전학회 춘계학술발표 초록집, pp.161-165.
- [3] 박성탁, 정재필, 서창제(1994a), 7000계열을 중심으로한 알루미늄 합금의 용접특성(1), 대한 용접학회, 제12권, 제1호, pp. 38-43.
- [4] 박성탁, 정재필, 서창제(1994b), 7000계열을 중심으로한 알루미늄 합금의 용접특성(2), 대한 용접학회, 제12권, 제2호, pp. 64-75.
- [5] Sato Y.S(2002), 알루미늄 합금 마찰교반 용접부의 재료조직학적 연구, 박사학위 논문(in Japanese) pp. 142
- [6] Shore R.J and McCanley R.B(1970), Effects of porosity on high strength Al 7039, Welding Journal, Vol. 49, No.7, Research Suppl. 311-S to 321-S.
- [7] Sky Al products corporation(2003), Foundation of Al alloy ship projects, 일본 경금속용접, Vol. 41, No. 11, pp.544-545.
- [8] Zen-ichi Tanabe, Fumio Matsumoto(2001), Actualities and problems of Al alloy for the environmental resistance, 일본 경금속용접, Vol. 39, No. 3, pp.125-132.

원고접수일 : 2006년 10월 30일

원고채택일 : 2007년 09월 10일