

2. 해설기사

알루미늄 선박용 재료와 용접기술

The material and welding technology for Al ship



김성종

Seong-Jong Kim

- 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수
- E-mail : ksj@mmu.ac.kr

1. 머릿말

최근 국민소득 증대와 주5일 근무제 시행 등으로 향후 해양레저선박의 수요가 급격하게 증가할 것으로 예상된다. 이러한 중소형 해양레저선박 및 바다 낚시 선박을 지금까지는 FRP재료로 만들어 왔으나 해양사고 예방과 해양환경 보호를 위하여 장차 FRP로 만든 선박들은 감소되고 환경 친화적인 재료로 만든 선박이 주종을 이룰 것으로 예측된다.

해양환경오염규제라는 국제 규정의 발효로 인하여 FRP 선박의 건조가 감소하고 있으며, 점차 환경친화형의 신소재 선박 건조가 증가하고 있다. 특히 최근 중소형 선박의 건조에 있어서 알루미늄 재료는 환경 친화형의 재료로 각광을 받고 있으나, 아직 우리나라 중소형 조선소에서는 영세성으로 인하여 알루미늄 선박 건조에 대한 신기술 개발과 인력 양성이 체계적으로 이루어지지 못하고 있다.

그러나 국내에서는 알루미늄 선박에 적합한 재료 선정에 관한 기술이 전무한 실정이며, 알루미늄만의 용접기술자는 전국에 20여명에 불과하고,

그 기술도 대단히 미흡하여 이에 대한 장단기 대책이 필요한 실정이다. 다음 표 1은 FRP선과 비교하여 알루미늄 선의 장단점을 비교하였으며, 표 2는 중소형 선박의 현재와 미래에 관하여 열거하였다.

○ 국외 동향

유럽, 호주, 일본 등의 선진국은 이미 수 십년 전부터 자원의 재활용을 통한 해양 환경문제에 적극적으로 대처하고자 관공선을 비롯한 어선에 이르기까지 소형선박을 알루미늄제로 건조할 것을 적극 권장하고 있다. 상업용 고속선으로 1950년대에 수중익선이 이탈리아에서 그리고 공기부양선이 영국에서 처음 개발됐다. 1960년대에는 수중익선과 공기부양선의 고속화와 대형화를 위한 기술개발이 미국, 구소련 등에서 이뤄졌으며, 일본의 미쓰이 조선소에는 영국에서 기술을 도입해 공기부양선을 건조했다. 1970년대는 고속선의 성능을 향상시키기 위한 각종 장비가 개발된 시기로 미국 보잉사는 수중익선의 운항자세 제어시스템을 개발했다. 일본의 가와사키 조선소는 이 기술을 도입해 제트포일(Jetfoil)선을 건조하였다.

표 1 FRP선 대비 알루미늄선의 장단점

구 분	장 점	단 점
FRP선	<ul style="list-style-type: none"> - 다양한 선형 건조 가능 - 낮은 작업속련도 - 건조공법 용이 - 대량 양산 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 폐선처리에 애로 - 열악한 작업환경 기피 현상 증가 - 화재취약 - 유지보수의 어려움 - 해양환경 오염 - 국제, 국내 흐름에 역행
알루미늄선	<ul style="list-style-type: none"> - 해양환경 보호 환경친화적 재료 - 연료 절감형 고부가가치 선박임 - 경량, 고속성능 우수 - 적재량 증가 - 자원 재활용 - 선박운용비 절감 - 내구성, 내식성 등 FRP 대비 우수 - 인체에 무해 	<ul style="list-style-type: none"> - 선주의 폐선처리에 대한 관심 없음. - 소형 어선은 현저한 경량화 장점이 적음 - 선형한계 - 초기선가 고가 - 용접시공 등 전문기술 필요 - 재료, 장비 수입 의존

표 2 중소형 선박의 현재와 미래

현 재	미 래
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 국내연안을 항해하는 최고 속도 25노트 이상의 고속 여객선과 고속화물선(총톤수 500톤 이상)에 대하여 화재에 취약한 FRP 재질 사용이 금지됨. ▶ 해양수산부는 2004년 해상화재로 인한 인명피해를 사전에 예방하기 위해 해양인명 안전협약(SOLAS)의 국제 고속선 기준(HSC Code)을 수용하여 고속선 기준(10월 6일 고시)을 개정하고, 2004년 11월부터 강제 적용기로 함. 따라서 환경 친화적이며, 화재에 강한 연료절감형 고부가가치 소형선을 겨냥한 신소재 개발이 대두됨. ▶ FRP선과 목선은 크기가 작고, 레이더파를 반사시키는 강도가 약하므로 중, 대형 선박이 탐지하지 못하여 충돌에 의한 해난사고 다발. ▶ 1998년-2002년 사이의 선박 사고 발생율은 어선에 의한 해양사고가 약 72.4%를 차지하고 있으며, 어선에 의한 충돌건수가 약 58%를 차지. 그러므로 FRP선의 알루미늄선박으로의 대처는 보다 가속화 될 것으로 예측. 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 알루미늄선박이 주종을 이룰 것으로 판단 <ul style="list-style-type: none"> - 여러 재료에 비해 비강도가 높아 경량화에 의해 고속화가 가능. - 추진용 연료의 절감, - 높은 내식성에 의한 유지 보수가 용이, - 폐선 시 재활용이 가능, - 환경친화적임. - 화재에 강함 ; 화재로 인한 대형사고 발생 염려 없음. - 인체에 무해 ▶ 국내에는 많은 도서지역과 갯벌 등 무한한 해양자원을 보유하고 있으며, 특히 중소형 선박의 건조가 많은 FRP선 및 목선을 대체할 수 있는 기술의 기반이 되는 환경친화적인 알루미늄선박에 적합한 재료를 선정하고 바람직한 용접기술을 개발하여 체계화 하는 과정은 필수적. ▶ 알루미늄 선박으로의 전환은 불가피한 상황임.

일본은 알루미늄 여객선과 고속 여객선은 매년 지속적으로 증가하는 추세이며, 알루미늄의 선형, 건조공법, 용접시공법 개발 등의 관련 연구가 활발하게 진행 중이다. 1980년대에는 여러 선진 조선기술국에서 초고속선을 개발하기 시작했다. 이제까지 고속선은 영국, 이탈리아, 미국, 구소련 등에서 주로 개발됐으나, 상업용 고속선의 수요증가로 노르웨이, 독일, 네덜란드 등에서 독자적인 개발과 상품화를 시도했다. 1980년대 말부터는 일본, 노르웨이, 프랑스 등은 21세기 해상화물 수송의 큰 역할을 예상해 초고속 화물선의 개발을 정부의 재정 지원하에 수행하기 시작했다. 일본은 대형 7대 조선소가 연구조합을 결성해 1천t의 화물을 싣고 파고 5m의 해상에서도 50노트(시속 93km)의 속력으로 운항할 수 있는 테크노 슈퍼라이너라는 초고속화물선을 정부와 조선소의 지원으로 89년부터 개발하기 시작했다.

○ 국내동향

일부 조선소에서 경비정을 수 척 건조한 후 현재 비철금속을 이용한 소형선박 건조는 거의 단절된 상태이며, 국내 용접 기술자가 20여명에 불과하므로 체계적인 용접조건 등의 연구가 절실히 요구된다. 최근 국제적으로 환경규제가 강화되고 자원 재활용에 대한 관심이 고조되면서 기존 FRP재는 환경문제, 화재에 취약, 폐선처리 방법이 없는 등 많은 문제점이 발생하고 있기 때문에 알루미늄 합금 재료의 전환은 불가피할 것으로 예측된다. 또한 우리나라는 반도국가로서 수천 개의 섬을 가지고 있는 국가이며, 또한 주 5일 근무제 도입으로 인하여 레저 보트, 레저 요트 등을 이용한 여가 선용 측면에서도 알루미늄 선박에 사용되는 재료의 개발은 아주 중요한 문제로 대두된다. 중소조선기술연구회 자료에 따르면 국내 중소형 조선소는 대략 185개(강원지역-10, 경기지역-12, 경북지역-9, 경남지역-72, 전남지역-59, 전북지역-4, 충청지역-13, 제주지역-6) 정도인데 이중 1/3이 전남에 위치하고 있으며, 대부분의 조선소에서 FRP선을 건조 중이나 알루미늄 선박건조와 관련 재료의 특성 파악, 도료의 선택 그리고 용접 기술력 부족 등의 이유로 쉽게 착수하지 못하고 있는 실정이다.

다. 알루미늄은 내식성이 뛰어나기 때문에 도장만으로 충분한 방식이 이뤄지는 것으로 판단하여 전기방식을 전혀 실시하지 않으나, 실체는 도막 파괴 등으로 인한 응력부식균열의 위험성이 있기 때문에 그에 대한 기술력 확보는 대단히 중요하다.

2. 알루미늄 합금의 종류와 선박의 종류

2-1 선박용 알루미늄 합금의 종류

선박용 알루미늄 재료로서 5000계열의 Al-Mg 합금이나 6000계열의 Al-Mg-Si 합금이 적용되고 있다. 종래 5000계 합금은 주로 구조용, 6000계 합금은 의장용으로서 사용되어 왔다. 최근은 상부 구조용으로서 압출성이 양호한 6N01-T5도 이용 가능하게 되었다. 표 3은 주요 선급 협회규격으로 규정되어 있는 선박용 알루미늄 합금을 나타내고 있다.[1-5] 여기서 O는 어닐링한 경우를 의미한다.

일본의 NK(일본 해사협회)규격보다 상위의 규정으로서 운수성 해상 기술안전국 규정의 <고속선 구조 기준>[6]이 있고, 표 4에 규격합금을 정리하여 나타내고 있다.[7] 그 기준에는 5456 합금이 새로 첨가되었다.

한편 2000년도의 NK 규격에서는 국제 선급 협회 규격 : IACS-W25(1998)에 합금이 변경되었다. 1995년에는 채용되어 있던 5052나 5456, 6N01 합금이 삭제되어 새로운 5754, 6005 A, 6082 합금이 추가되었다. 5754 합금은 거의 응력부식균열(SCC)이 없는 합금으로 5052 합금보다 강도가 높다. 지금까지의 5052나 5154 합금의 대체로서 적용가능하다. 또 6005A 합금은 Mn + Cr의 하한치가 필요 성분으로 규정되어 있는 것 이외는 6N01 합금과 합금 조성이 거의 같다. 6082 합금은 Cu 양을 0.1 % 미만으로 규제하고, Mn, Cr을 첨가한 섬유상 조직으로 한 합금이며, 6061 합금보다 높은 강도를 갖고, Cu를 규제하여 내식성을 향상시킨 것으로 로이드 선급협회와 노르웨이 선급협회 규격으로 주요 선각 재료로 사용되고 있다. 선박용 압출재로서 국제적인 사용 실적이 많은 합금이다. 그러나 일본에서

표 3 주요 선급협회 규격에 채용되고 있는 알루미늄 합금 재료

합 금	NK		ABS		LR		BV		DNV	
	판	형재	판	형재	판	형재	판	형재	판	형재
5052			○ H112 H32 H34				○ H111 H22-H32 H24-H34		○ H111 H32 H34	
5154A							○ H111		○ H111	
5754	○ H111						○ H111 H24		○ H11 H24	
5454			○ H112 H32 H34				○ H111 H22-H32 H24-H34		○ H112 H32 H34	
5083	○ H111 H112 H116 H32 H321	○ H111 H112	○ H112 H116	○ H111 H112	○,F H321		○ H111 H116		○ H111 H116 H321	
5086	○ H111 H112 H116 H32 H321	○ H111 H112	○ H112 H116	○ H111 H112	○,F H321		○ H111		○ H111 H116 H32 H34	
5456			○ H112 H116	○ H111 H112						
5383									○ H111 H116 H321	
6005A		T5 T6							T6	T5 T6
6060									T6	T5 T6
6061		T5 T6	T451 T62 T651	T62 T6511		T6		T6		T4 T5 T6
6063										T5 T6
6082		T5 T6				T6		T6		T4 T5 T6

는 선박재료로 6N01 합금이 주류이고, 필요에 따라 6005A 합금도 사용될 것으로 예측된다. 또 조질로서 5083 합금의 판재에서 H111, H112,

H116이나 5086 합금에서 O, H111, H116, H32, H321 등이며, 6000 계열에서는 T6, T5가 추가된다.

표4 고속선 구조기준에 인정되고 있는 선박용 알루미늄 합금 재료

품종	규격	합 금
판	JIS H 4000	5052P, 5083P, 5086P, 5154P, 6061P, 5456(ASTM)
형재	JIS H 4100	5052S, 5083S, 5086S, 6061S, 6N01S, 5456(ASTM)
관	JIS H 4080	5052TE, 5052TD, 5056TE, 5056TD, 5083TE, 5053TD

한국선급 규격의 합금 조성을 표 5에, 기계적 성질을 표 6에 나타내고 있다. [8] 한국선급과 NK 규격은 선체 구조와 액화가스 선박 탱크에 사용되는 재료로 적용하기 위해 200mm 두께까지 기계적 성질의 규격으로 되어 있다. 선박용 알루미늄 합금으로서 일본에서는 주로 5083 합금이 이용되고, 5052나 5086 합금이 이용되어 왔다. 조질로서는 H32나 H321, 혹은 O가 사용되고, 압출재에서는 H112가 사용되어 왔다. LNG용 탱

크로서 당초는 5083-O재가 주로 사용되어 왔으나, O재보다 강도가 높은 H321재가 적용되고 있다.

2-2 알루미늄 선박의 종류

(1) 국내 하이제트훼리(주)의 [하이제트호] ; 총 톤수 267톤, 최대속력 45노트, 전장 27.36미터, 기관은 가스터빈 2대, 워터제트 추진기 2대, 최대 탑재인원은 222명(승무원 8명/여객 214명)이다.

표 5 주요 선박용 알루미늄 합금의 화학성분

재료기호	화학성분(%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	불순물 ⁽¹⁾		Al
									각각	합계	
5083P 5083S	0.40 이하	0.40이하	0.10 이하	0.40 ~1.0	4.0~ 4.9	0.05~ 0.25	0.25 이하	0.15 이하	0.05이하	0.15이하	나머지
5086P 5086S		0.50이하		0.20 ~0.7	3.5~ 4.5						
5754P ⁽²⁾		0.40이하		0.50 이하	2.6~ 3.6	0.30 이하	0.20 이하				
6005AS ⁽³⁾	0.50 ~0.9	0.35이하	0.30 이하	0.40 ~0.7	0.10 이하						
6061P 6061S	0.40 ~0.8	0.7이하	0.15~ 0.40	0.15 이하	0.8~ 1.2	0.04~ 0.35	0.25 이하	0.15 이하			
6082S	0.7~ 1.3	0.50이하	0.10 이하	0.40 ~1.0	0.6~ 1.2	0.25 이하	0.20 이하	0.10 이하			

비고 (1) 불순물은 통상의 분석과정에서 함유된 것으로 인정하는 경우에 한하여 분석한다.
 (2) 0.10 ≤ Mn + Cr ≤ 0.60
 (3) 0.12 ≤ Mn + Cr ≤ 0.50

표 6 한국선급 규격에 의한 선박용 알루미늄 합금 재료의 기계적 성질
(a) 압연재

재료기호	열처리 ⁽²⁾	두께 t (mm)	인장시험		
			항복강도 (N/mm^2)	인장강도 (N/mm^2)	연신율(%) ⁽³⁾ ($L = 5.65 \sqrt{A}$)
5083P	O	$t \leq 50$	125이상	275 ~ 350	15 이상
		$50 < t \leq 80$	120 ~ 195	275 ~ 345	
		$80 < t \leq 100$	110이상	265 이상	14 이상
		$100 < t \leq 120$		260 이상	
		$120 < t \leq 160$	105이상	255 이상	12 이상
		$160 < t \leq 200$	100이상	250 이상	10 이상
	H 111	$t \leq 50$	125이상	275~305 이상	15 이상
	H 112			275 이상	10 이상
	H 116		215이상	305 이상	
	H 32			305 ~ 380	
	H 321	$t \leq 50$	200~295	285~380	9 이상
$50 < t \leq 80$					
5086P	O	$t \leq 50$	100 이상	240 ~ 310	16 이상
	H 111				
	H 112	$t \leq 12.5$	125 이상	250 이상	-
		$12.5 < t \leq 50$	105 이상	240 이상	9 이상
	H 116	$t \leq 50$	195 이상	275 이상	
	H 32		185 이상	275 ~ 335	
H 321					
5754P	O	$t \leq 50$	80 이상	190 ~ 240	17 이상
	H 111				
6061P	T 6	$t \leq 6.5$	245 이상	295 이상	-

(b) 압출형재

재료기호	열처리 ⁽²⁾	두께 t (mm)	인장시험		
			항복강도 (N/mm^2)	인장강도 (N/mm^2)	연신율(%) ⁽³⁾ ($L = 5.65 \sqrt{A}$)
5083S	O	$t \leq 50$	125 이상	270 이상	12 이상
		$50 < t \leq 130$	110 이상	275 ~ 355	
	H 111	$t \leq 50$	110 이상	270 이상	
H 112	125 이상				
5086S	O	$t \leq 50$	95 이상	240 ~ 320	16 이상
	H 111			240 이상	12 이상
	H 112				
6005AS	T 5	$t \leq 50$	215 이상	260 이상	6 이상
	T 6				
6061S	T 5	$t \leq 50$	240 이상	260 이상	8 이상
	T 6				
6082S	T 5	$t \leq 50$	260 이상	310 이상	8 이상
	T 6				

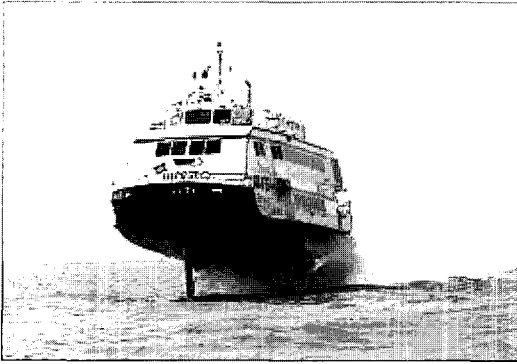


Fig. 1 하이제트호

(2) 알루미늄 라사이클재를 사용한 요트 일본 [산토리 마메이드호] : 1973년 단독 무기항 세계 일주 항해에 성공한 일본인이 2회째 도전에 사용된 [산토리 마메이드호] 이고, 선체는 알루미늄 합금(5083)의 리사이클재가 사용된 요트이다. 전장 13m(43ft), 전폭 2.4m, 계수 3.0m, 총배수량 4.4톤(킬 1.7톤), 속도 평균 5-6 노트이다.

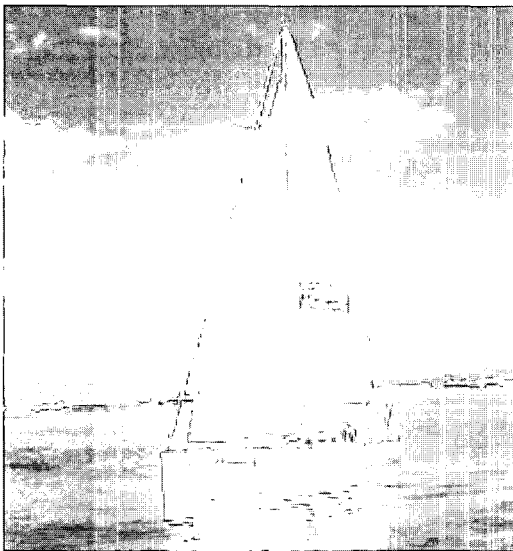


Fig. 2 산토리 마메이드호

(3) 일본 광역감시정 [오오미네호] : 2002년 6월 준공의 오오사카 세관 감시정, 워터젯트 추진으로 최고속력 45.2노트. 밀수입 단속을 강화하기 위해 건조한 선박이다.

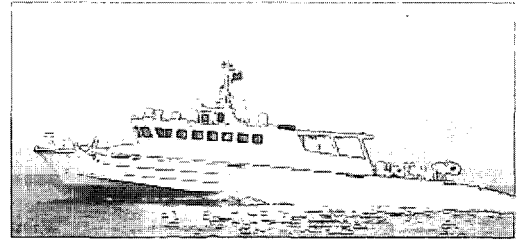


Fig. 3 오오미네호

(4) 일본 어업단속선 [미사끼호] : 2002년 7월 준공. 항상 비상 대기상태로 최대 속력 37.5노트 이상이며, 선체는 모두 알루미늄 합금, 추진장치는 일제 워터젯트로 하여 시운전 최대 속력 45.8노트를 실현시켰다. 고속어업 단속선이며, 전장 23.91m, 폭 4.8m, 깊이 2.4m, 총톤수 39톤 그리고 항해속력은 39.5노트이다.

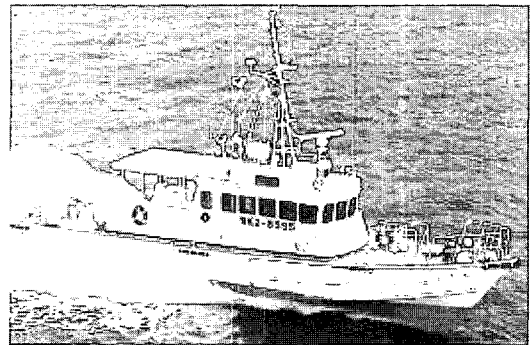


Fig. 4 미사끼호

(5) 일본 방위청 미사일정 [하야부사호] : 방위청이 2002년 3월 준공. 기준배수량 200톤, 전장 50m, 가스터빈 3대, 3축, 출력 16,000ps, 워터젯트 추진으로 최고속력은 44노트이상이다.

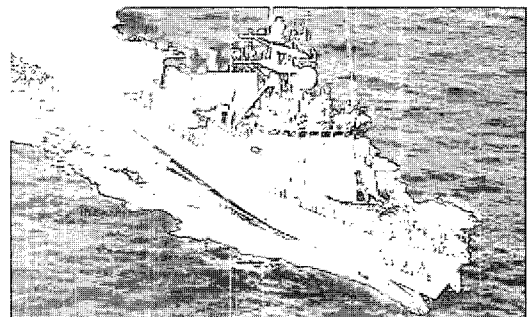


Fig. 5 하야부사호

(6) 위그선 : 해면효과익선(海面效果翼船) 또는 익선이라고도 함. Wing In Ground Craft의 약자로, 수면 위에 뜬 상태로 움직이는 초고속선. 물 위를 빠른 속도로 달리는 초고속 선박 기술과 수면에서 부상한 상태로 이동하는 항공기술이 접목된 첨단 선박이다. 시속 550km까지 속도를 낼 수 있으며, 비행기가 나는 기본원리인 양력과 함께, 날개가 해수면에 가까워질수록 선체를 떠받치는 공기 양력이 커지는 지면효과를 이용한다. 날개 끝 아래에 판이 달려 있어 날개와 수면 사이에 공기가 갇히는 현상이 발생해, 해수면 바로 위에서 더 쉽게 날아가는 것이다. 처음에는 '선박인가 비행기인가'라는 문제를 둘러싸고 논란이 있었으나, 1990년대 말 국제해사기구(International Maritime Organization/IMO)의 분류에 따라 선박으로 분류하고 있다. 위그선은 일반 배보다 몇 배나 빠르면서도 비행기보다는 훨씬 적은 연료로 운항할 수 있고, 수륙양용이라는 장점이 있다. 그러나 파도가 높을 때는 수면에서 뜰 수 없기 때문에 현재까지는 주로 호수나 하천에서 운용되고 있다.

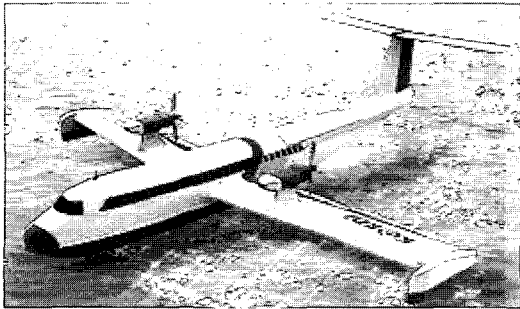


Fig. 6 위그선

3. 알루미늄 선박 건조 시 용접 방법 및 부식 특성

3-1 용접방법

(1) 조선소에서 알루미늄선의 용접은 주로 미그(MIG) 용접과 티그(TIG) 용접을 사용하고 있다. 선체의 구조형상, 판두께, 강도 및 용접량 등

을 고려하여 용접기법을 선택한다. 미그용접은 품질, 작업성이 양호하여 선체 주요부에 적용되며, 티그용접은 박판의 용접, 가접, 각용접, 좁은 장소, 의장품 취부 등 그다지 강도가 요구되지 않은 부위에 주로 적용된다. 그러나 알루미늄의 경우 열적 변형이 아주 심하기 때문에 티그용접이나 미그용접을 적용하였을 경우 열적 변형에 의해 대단히 큰 변형으로 많은 어려움을 겪고 있으며, 이러한 사유로 조선소의 도산을 초래한 선례도 있다.

(2) 따라서 이러한 문제점을 극복할 수 있는 신 용접기술이 마찰교반용접(Friction Stir Welding, 이하 FSW)라는 기술이 있다.

그 공정은 Fig. 7과 같이 매우 간단하면서도 독특한 일종의 연속공정으로서 접합모재를 고정시킨 후 특수 형상을 지니고 접합모재에 비해 경한 재질을 지닌 비소모식 회전 공구(tool 또는 stir rod)의 일부분이 모재에 삽입되어 이음부의 맞대기 면을 따라 공구와 접합모재의 상대적 운동에 의해 마찰열을 발생시켜 모재의 변형저항을 낮추어 연화시키기에 충분한 온도로 인접한 접합부를 가열시킨다.

이로 인해 공구 삽입된 부분인 핀(pin 또는 probe) 주위로 연화된 영역이 생기게 된다. 기계적 힘을 가하여 핀이 접합 선을 따라 이동함에 따라 가열된 부위가 핀의 앞부분(Advancing side)에서 뒤쪽(Retreating side)으로 압축되게 되고 마찰열과 기계적 가공의 조합에 의해 고상접합부가 만들어진다[9]. 이 접합공정의 순서는 Fig. 8에 모식적으로 나타낸 순서에 의해 진행된다. 먼저 공구를 모재에 삽입하기 전에 회전을 시키고 난 후 공구가 모재와 접촉하여 열을 발생시킨다. 이어서 어깨(shoulder) 부분이 접촉하여 가열 영역을 확대시키고 난 후 공구 또는 모재의 이동으로 공구 아래 부분의 소재가 유동하여 FSW 너겟(nugget)을 형성함으로써 접합이 이루어지게 된다. 먼저 공구를 모재에 삽입하기 전에 회전을 시키고 난 후 공구가 모재와 접촉하여 열을 발생시킨다. 이어서 어깨(shoulder) 부분이 접촉하여 가열 영역을 확대시키고 난 후 공구 또는 모재의 이동으로 공구 아래 부분의 소재가 유

동하여 FSW 너겟(nugget)을 형성함으로써 접합이 이루어지게 된다.

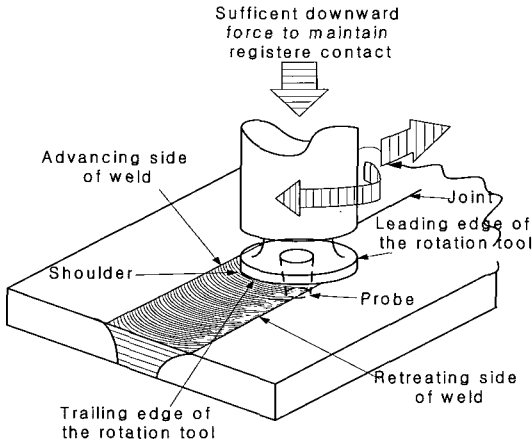


Fig. 7 마찰교반 용접 개략도

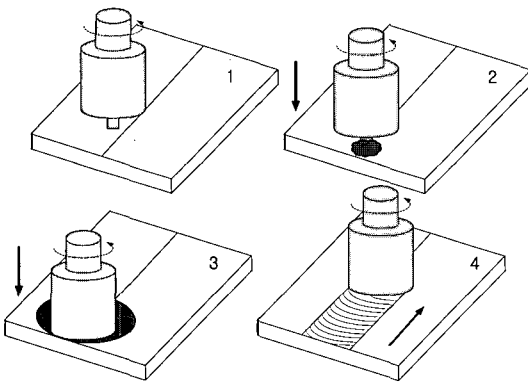


Fig. 8 마찰교반 용접 공정

(3) 기존 용접과 마찰교반용접과의 비교

기존의 용접방법에 비하여 마찰교반용접은 대단히 깨끗한 용접면을 얻을 수 있으며, 환경친화적인 방법이며, 경제적인 용접방법이라 할 수 있다. 또한 용접 시 열에 의한 변형은 기존 용접방법의 1/20-1/30에 불과하기 때문에 적용 가능한 우수한 용접방법으로 인정받고 있다. Fig. 9는 알루미늄 합금에 대한 기존 용접법(MIG)과 마찰교반용접 결과를 비교하였다.

(4) 알루미늄 합금의 접합기술에 관한 일본의 로드맵을 표 7에서 정리하였다.

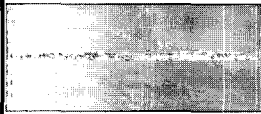

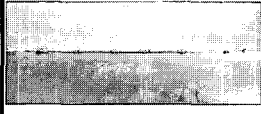
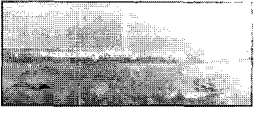


MIG	FSW
	
(a) 전면	(a) 전면
	
(b) 후면	(b) 후면
	
(c) 측면(변형정도)	(c) 측면(변형정도)

Fig. 9 용접 후 형상 비교

3-2 부식 특성

○ 알루미늄은 내식성이 뛰어나기 때문에 도장만으로 충분한 방식이 이뤄지는 것으로 판단하여 전기방식을 전혀 실시하지 않고 있다. 그러나 실제로는 도막 파괴 등으로 인한 부식 및 응력부식균열의 위험성이 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 선체 방식 측면에서 최적 방식 기술 개발이 필요하다. Fig. 10은 실제 부식사례를 보여주고 있다.

(1) 내식성

일반적으로 Al-Mg계 합금은 뛰어난 내식성을 갖고 있다. 마그네슘은 내공식성을 향상시키는 효과와 산화피막의 성장을 촉진시키는 효과를 갖고 있다. 약산성 환경에서의 Al-Mg계 합금의 내식성은 순수 알루미늄보다 약간 열악하며, 염소이온이 많은 환경에서의 내식성은 다른 합금계열에 비하여 대단히 우수하다. 천연해수는 약알카리성이기 때문에 공식발생과 피막성장기 일어나나 바이어라이트의 피막은 성장하지 않고, 베이마이트 피막의 단계에서 정지한다. Al-Cu계 합금이나 Al-Zn-Mg계 합금에서는 결정입계 부분이 선택적으로 부식하는 입계부식이 발생하며, Al-Mg계 합금에서도 마그네슘이 5% 이상이 되면 입계부식이 발생하는데 그 이유는 입계에 석출한 Al_3Mg_2

나 Mg_2Si 가 우선적으로 용해하기 때문이다. 또한 알루미늄의 E-pH 다이어그램(10)을 보면 부식전위가 산성이나 알칼리성 모두에서 수소발생영역에 있으므로 수소발생형 부식이 발생한다. 즉, 강산성영역에서는 물을 분해하여 수소발생을 동반하는 Al^{3+} 로서 용해하고, 알칼리성 영역에서는 물을 분해하여 수소발생을 동반하는 AlO_2^- 로 용해한다. 어느쪽이든 수소발생을 동반하기 때문에 이것이 공식이나 균열내의 좁은 영역에서 일어난다면 불충분한 확산이기 때문에 pH값의 변화가 일어난다(Fig. 11). 또한 해수의 경우 pH는 8.0 전후이므로 알루미늄의 E-pH 다이어그램에서는 방식영역으로 판단되었으나 해수 속에 포함된 Cl^- 이온은 강한 부동태 피막을 파괴하는 역할을 하기 때문에 타 중성용액과는 다른 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

표 7 알루미늄 합금의 용접기술 로드맵 정리

접합 기술명	현재 상황	시기	비고
미그, 티그, 플라즈마 용접	▶전원소형화, 미드 미세용입가능 ▶용접속도 5m/min ▶이음매 강도저하 적음. 변형이 큼	▶2010년 ▶2015년 ▶2010년	장래 완전한 로봇에 의한 용접 작업이 가능하게 된다.
마찰교반용접	▶4mmt판을 2D 용접장치로 5m/min로 용접 ▶4mmt 판을 3D용접장치로 2m/min로 용접	▶2005년 ▶2007년	현재 미그용접과 같이 일반적으로 사용된다.
레이저 용접	▶LD(5km) 미그용접 중간정도의 용접품질 ▶고흡수율(6%up) 개발 ▶용접속도 10m/min	▶2010년 ▶2015년 ▶2015년	발전기의 진화에 의해 고품질의 이음매가 얻을 수 있게 됨. 또한 에너지 소비량이 저감됨.
저항용접	▶전원교류 인버터 ▶편면에서 용접 ▶6000계 합금으로 전극 수명10,000점 이상 ▶철의 중간전류로 용접	▶2003년 ▶2007년 ▶2010년 ▶2010년	새로운 전원설비의 개발됨.
납땜	▶브레이징 시트 두께 현상의 20% 감소 ▶대기중 플럭스 없는 브레이징 ▶고Mg 진공 납땜 ▶저온 납땜	▶2010년 ▶2015년 ▶2010년 ▶2020년	저온납땜이 450℃ 근방에서 할 수 있게 됨.
기계적 접합	▶요철이 적은 접합법 ▶전식문제 해결	▶2010년 ▶2015년	금후 보다 한층 일반적이 접합방법이 됨.
접착 접합	▶비용, 수명, 내수성, 강도의 방향성 등의 문제 해결 ▶전공정의 로보트화 ▶하지처리 없음	▶2015년 ▶2020년 ▶2020년	금후 신뢰성이 향상하고, 용융과 같이 널리 알루미늄 접합에 사용됨.

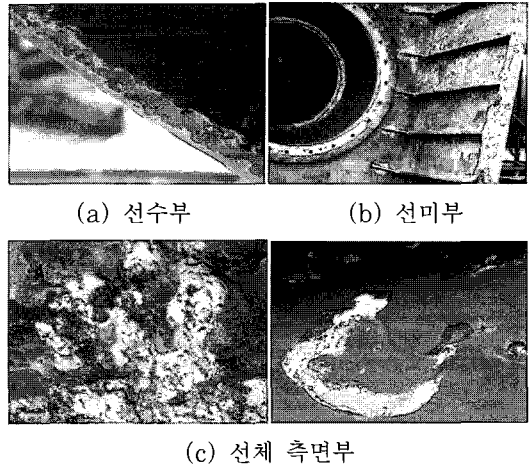


Fig. 10 알루미늄 선박의 부식 사례

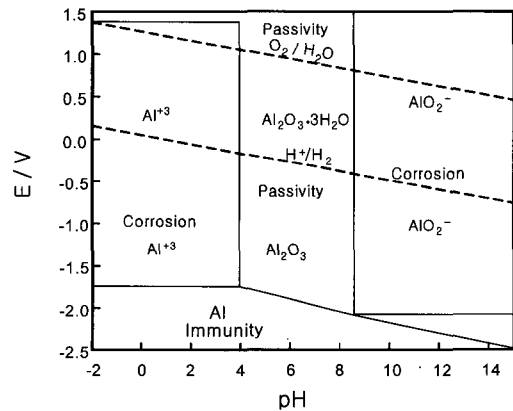


Fig. 11 알루미늄의 E-pH 도

(2) 해수중에서의 부식

Fig. 12는 천연해수 중에서 대표적인 알루미늄 합금 판을 10년간 침적시험결과를 나타내고 있다. 선박용 재료는 무도장으로 사용되어도 해수중에서 안정적인 성능을 보여 주었다. 부식형태는 약간 넓은 공식인 반면, 304 스테인리스강은 해양생물이 부착하는 환경에서 극히 단시간에 관통되어 구멍이 발생하였다.

(3) 바리부식

5000계 합금은 바리시험법으로서 ASTM G 66-95에 의한 시험이 일반적이다. 그 부식액은 먼저 미국 연방규격의 바리 시험액과 유사한 조성으로 공식도 동시에 조사할 수 있다.

(4) 입계부식

5000계 합금의 입계부식 감수성 시험법은 ASTM G67-93에 의한 시험이 일반적이다. 또 염수분부시험(ASTM B 117-95)에서도 평가된다. 6000계열에서는 ISO/DIS 11846(B법)이나 식염수중에서 약 $\sim 100\mu A/cm^2$ 정도의 아노드 전류를 시험편에 일정시간 인가하는 정전류 전해법도 촉진 시험법으로 행해지고 있다.

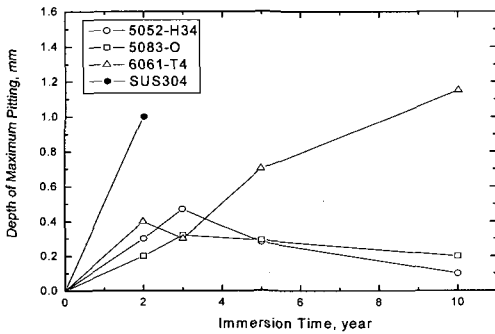


Fig. 12 천연해수중 침적시험에 의한 최대공식깊이의 경시변화.

(5) 응력부식균열

Al-Mg계 합금의 SCC 감수성에 미치는 열처리 온도의 영향으로서 대표적인 Dix 등의 연구결과에 따르면 H12 재는 Mg 3.5% 이상에서 SCC 감수성이 나타나고, O재에서는 Mg 4.5%에서 거의 SCC 감수성이 나타나지 않는다. 그러나 냉간 가공 후 66°C에서 180°C에 장시간 방치하면 SCC 감수성이 증가하기 때문에 Mg 양이 3.5%를 넘는 5000계 합금에서는 경우에 따라 66°C 이상에서의 사용이 금지되고 있다. 또한 이 SCC 감수성의 증가는 저온도에서의 시효 시 마그네슘이 입계에 확산하여 얇은 피막상의 Al_3Mg_2 상으로서 연속적으로 석출하기 때문이며, 이 상은 Al-Mg 매트릭스보다 전위적으로 대단히 낮아 우선적으로 부식되기 쉽다.

(6) 열처리에 의한 응력부식균열과 수소취화 특성

5083F(Al-Mg 합금) 시편에 대하여 경도와 전기화학적 특성을 평가하여 최적의 열처리 조건을

규명하기 위하여 다양한 열처리를 실시하였다.[11]

그 결과 최적의 석출경화처리 조건은 용체화 처리시 420°C에서 2시간 동안 열처리를 실시한 후 수냉을 실시하고, 인공시효온도는 180°C에서 4시간 동안 실시하는 경우로 나타났고, 최적의 어닐링 온도는 410°C이며, 유지시간은 120분인 것으로 규명되었다. 그 결과 천연해수 용액 조건에서 0.001mm/min. 속도로 저변형을 인장시험을 실시한 결과 최적의 석출경화 조건에서는 열처리를 실시하지 않은 경우에 비하여 응력부식균열 특성은 10.20% 개선되었으며, 수소취화 특성은 9.51% 개선되었다. 그리고 최적의 어닐링 처리 조건에서 실시한 경우, 응력부식균열 특성은 24.75% 개선되었으며, 수소취화 특성은 15.99% 개선되었다. 따라서 응력부식균열(SCC)과 수소취화(HE) 특성은 어닐링이 석출경화처리에 비해 우수한 것으로 나타났다.

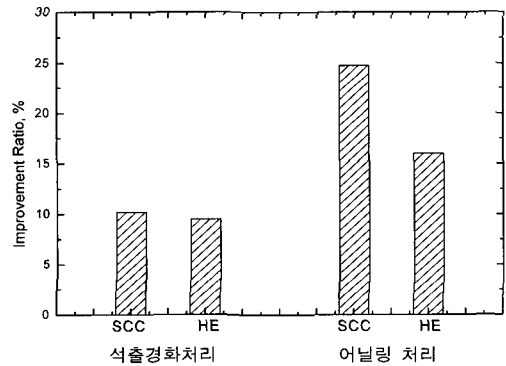


Fig. 13 알루미늄-마그네슘 합금(5083F)의 응력부식균열과 수소취화에 관한 열처리 효과

4. 맺음말

(1) 최근 환경보호 측면에서 친환경적인 선박 재료를 요구하는 바, 그에 적합한 재료로서 알루미늄 합금이 대두되고 있다. 알루미늄 합금은 FRP 선에 비하여 여러 장점이 있으나 실제 적용시 대두되는 문제는 용접 방법 및 최적 재료의 선정에 관한 기술력 확보가 중요하다.

(2) 기존의 용접방법을 적용할 경우 국내의 용

접기술자는 극소수에 불과하므로 그와 관련된 중장기적인 대책으로 용접기술자 양성 프로그램 개발 및 그에 따른 시행이 필요하며, 또한 그에 대한 대체 방법으로 기술력에 크게 영향을 받지 않는 마찰교반용접이나 로봇용접으로의 적용에 관한 연구가 필요하다.

(3) 마찰교반용접 적용 시 공구개발은 물론 형상 등에 영향을 받지 않는 휴대 가능한 용접기 개발이 절실히 요구되며, 나아가 2차원이나 3차원 용접이 가능한 로봇용접을 접목한 마찰교반용접기 개발이 절실히 필요하다.

참고문헌

- [1] 日本海事協會, 鋼船規則, K編 材料, 8章 Al 合金材, 2000
- [2] American bureau of shipping : Rules for Building and classing Al vessels, 1975
- [3] Bureau veritas : Rules for the construction and classification of high speed craft, 1995
- [4] Loyd's register of shipping : Rules and regulations for the classification of ships, Part 2 manufacture, Testing and Al alloys, 1996
- [5] Det Norske veritas : Rules for classification of shipping new building, Materials and welding, Part 2 Chapter 2 Metallic materials, 1996
- [6] 運輸省, 高速船 構造基準, 海檢81號, 1966
- [7] 永田修身, Symposium Al 합금선의 현상과 장래동향, 일본경금속구조협회, 1998, 55
- [8] 한국선급, 선급 및 강선규칙 제 2편 재료 및 용접, 79-83, 2004
- [9] TWI, Proceedings of Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16 June 1999
- [10] M. Pourbaix, Atlas of electrochemical equilibria, NACE, 168-176, 1974.
- [11] 김성중, 소형 선박용 알루미늄 합금의 열처리에 의한 응력부식균열과 수소취화 특성 개선에 관한 연구, 전남 테크노파크 최종연구보고서, 2006. 6.