

艦艇用 構造用材에 關하여

최 광 재*

1. 서 론

함정 구조용재에는 철강, 목재, 알루미늄 등이 주로 쓰이며 FRP 나 ferro-cement 도 혹은 쓰인다. 대형 함정에는 강도가 크고 용접성이 양호한 철강재가 사용되며 부분적으로 목재가 선각에 사용되기도 한다. 소형함정 및 고속정에는 목재 및 알루미늄 등의 중량이 가벼운 재료가 쓰이며 알루미늄 고속정은 최근 월남전에 특히 많이 사용되고 있으며 여러가지 해결하여야 할 문제점 들을 야기시키고 있다.

본고에서는 함정 구조용 철강재에 관하여 일반적인 사항을 언급한 후 연구자들의 보고[1][2][3]를 토대로 알루미늄 합금에 대하여 상세히 살펴 보기로 한다.

2. 철강재에 관하여

철강재의 성질

철강은 함정구조재로서 가장 많이 쓰이는 것이며 어느 구조재 보다도 강도특성이 우수하고 단조, 주조 그리고 용접성도 좋아 그 신뢰성이 큰것이 특징이나 가장 큰 결함의 한가지는 내식성이 빈약하여 방식 정비유지에 쉬지않는 노력을 기우려야 한다는 것이다.

함정 구조용 철강재에는 mild steel, medium tensile steel, high tensile steel, special treatment steel 등이 있으며 소형함정 및 보조선에는 mild steel 및 medium tensile steel 그리고 중형, 대형 전투함에는 high tensile steel 및 special treatment steel 등이 사용되며 그 대표적인 화학성분이 표 1에 나타나 있다.

mild steel 은 경도와 강도가 그다지 요구되지 않고 재질의 변화없이 가열 작업을 할수 있는 것이며 medium tensile steel 은 mild steel 보다는 경도와 강도가 크나 공작 면에서는 그다지 차이가 없이 가공할 수가 있다. 구축함 이상의 전투함에는 H.T.S가 많이 사용되는데 이것은 medium tensile steel 보다 20~30% 가량 인장강도가 크며 U.T.S 50 kg/cm² 이상을 말한다. 그 화학성분에 있어 Mn 이 뚜렷하게 많은 것이 특징이고 Mo, Cu, V, Ti 등 항장력을 증가시키는 합금원소들이 들어있다. Mn 의 증가는 강도 및 경도를 증가시키기는 하나 연성 및 용접성을 감소시킨다.

표 1. 각종 철강 구조용재의 화학성분

화학조성	C	Si	Mn	P	S	Ni	기 타
Mild steel	0.12-0.19		0.6-0.9		0.04max	0.05max	
Medium tensile steel Mil-S-16113	0.25-0.30	0.15-0.30	0.6-0.9	0.45max	0.055max	0.25max	cu 0.35 max
High tensile steel Mil-S-16216	0.13	0.15-0.35	1.3	0.04	0.05	0.25	Cr:0.15, V:0.02, Mg:0.06 Cu:0.35, Ti:0.05
Special treatment steel Mil-S-20154	0.35max				Unknown		

※Mil-S; military specification

*海軍中領, 海軍工廠

방탄갑판, 방탄보호격벽 및 차폐강판 등에는 S.T.S가 사용되는데 H.T.S보다 Cr, Ni 등은 약간 적으나 고도의 toughness를 갖게끔 특수처리된 Ni 합금강이며 shearing이나 punching에 의한 절단이 어렵고 화염절단, drill, press 등으로 기계가공을 하며 화염절단부는 원재질 보다 경화되어 절단부의 손질은 grinding을 할 수 있으며 chiselling이나 chipping은 안된다. 그 조성은 알려지지 않고 있으나 0.34% 미만의 탄소와 Ni, Mo 등이 주요 성분으로 추측된다. 경도는 BHN 241 이상이며 인장강도는 74~81 kg/cm² 가량 된다.

상술한 구조용 강재에 있어 1" 두께 강판을 한가지씩 그리고 알미늄판 두가지와 그 인장강도 및 가격을 비교하여 본 것이 표 2에 나타나 있다.

표 2. 구조용 강재 및 알미늄합금의 강도 및 가격의 비교

재 료	성질 및 가격	U.T.S(kg/mm ²)	가 격(\$/ton)	단위 체적량 가격(\$/m ³)
Medium tensile steel Mil-S-16113		40.5	170	1,360.00
H.T.S. Mil-S-24094(Type 1)		64.68	330	2,640.00
S.T.S. Mil-S-20154 (Type 1)		81.04	610	4,880.00
Al-alloy 5086-H 32		31.00	1,010	2,686.60
Al-alloy 5083-H 111		35.15	1,050	2,793.00

구조용 철강재의 용접

철강재의 용접시 모재 사이에 적절한 용접봉의 선택은 표 3과 같이 권장되고 있다.

medium tensile steel에 관하여서는 일반적으로 많이 조사되어온 부분이므로 HTS 및 STS만 살펴보면

표 3. 각종 철강재간의 용접 선택

		M. T. S.	H.T.S.	S.T.S
Medium tensile steel	Arc:	Mil-E-15599 (Mil-6010, 6020, 6013, 6011)		
	Gas:	Mil-R-908 Class 1		
	Brazing:	Mil-C-20158		
H.T.S.	Arc:	(Mil-206-15(Class I) (Mil-7015 (Class I)	M.T.S와 같음	
	Gas:	Mil-R-908 (Class I)	M.T.S와 같음	
	Brazing	Mil-C-20158		
S.T.S	Arc:	Mil-E-16715	M.T.S와 같음	M.T.S와 같음
	Gas:			
	Brazing			

H.T.S는 arc, gas, brazing 세가지 방법을 다쓰며 주로 arc 용접을 실시한다. 용접봉은 저수소계이며 사용전에 피복재를 300°C에 가열 건조시킨다. 건조된 용접봉도 몇시간만에 습기를 받아 들이므로 오전 오후용으로 각각 건조함이 좋다.

자동용접재료의 flux, 소모 nozzle식 electro-slag 용 flux와 소모 nozzle도 사용전에 충분히 건조시키지 않으면 용접부의 blow hole 발생 원인이 된다.

자동 용접시에는 입열량이 커서 용접의 결정립이 조대화되며 모재의 용해부분이 커서 집합부의 항장력이 감소된다. 자동 용접시의 입열량을 증대시키는 것은 용접능율을 향상 시키는 것이므로 이에 수반되는 재질의

저하를 감소시키기 위하여 Mo wire, 철분 등의 삼입물을 사용하며 강염기성 flux 를 사용한다.

S.T.S의 용접은 arc 방식만 사용하며 표 3에 나타나 있는것 같이 어느 점에나 동일한 용접봉을 사용한다.

3. 합정 구조용재로서의 알루미늄 합금

알루미늄 합금이 조합재로 처음 등장한 것은 1891년이라고 하며 이것은 알루미늄이 처음 생산된 1825년부터 67년후이다. Switzerland의 2 hp Naptha 기관을 장치한 알루미늄선이 6kts의 속력으로 달릴 수 있었던 것이 그 다음해이었다. 최초로 큰 함정에 강력한 알루미늄 합금이 적용된 것이 1931년 영국의 55 ft express cruiser Diana II이며 이것은 아직도 그 상태가 양호하다고 한다.

조합용 알루미늄 합금의 성질

알루미늄 합금의 성질중 뚜렷한 것은 중량이 가볍다는 것이다. 즉 단위 중량에 대한 강도의 비가 크다는 것이며 이에 따라 연료 소모량은 감소되고 속력은 증가된다고 볼수가 있다. 몇가지의 조합용 알루미늄 합금을 철강 및 FRP와 비교하여 보면 표 4와 같다.

표 4. 각종 조합재료의 중량 및 강도의 비교 (참고문헌 3에서)

		WT(gr/cm ³)	U.T.S. (kg/mm ²)	Y.S. (kg/mm ²)	TME x 10 ³ (kg/mm ²)	U.T.S. /SP.WT
알 미 늬	5083-J113	2.66	32.34	23.4	7.2	12.16
	5086-H34	2.66	33.04	26.3	7.2	12.4
	6061-T6	2.75	31.64	28.5	7.0	11.5
철 강	Ship's steel ASTM A131	8.06	46.40	23.4	21.0	5.75
	Mild steel ASTM A100	7.78	39.7	21.6	21.0	5.1
FRP		1.72	22.5		0.9	13.0

대체로 보아 알루미늄 합금은 단위 중량에 대한 강도의 비가 철강재의 2배가량 된다는 것을 알 수가 있다.

이와같이 무게에 대한 강도의 비가 크다는 장점이 있으므로 군함에서도 소형 함정으로부터 대형 함정에 이르기까지 부분적으로 또는 전체의 구조용재로서 알루미늄 합금이 사용되고 있으며 함정별 사용량은 표 5와 같다.

표 5. 각종 군함의 알루미늄 합금 사용량

	Al 무게	총배수 톤수	주포의 크기
항 공 모 함	1,000 ton	20,000-70,000	16''-18''
	700 ton	30,000-70,000	
중 순 양 함	500 ton	9,000-15,000	12''
	300 ton	6,000-10,000	8''
구 축 함	115 ton	2,000- 3,500	5''
	PGM	180 ton	220
FB	20 ton	30	3''
			20 mm

PGM, FB 등은 전구조용재가 알루미늄합금으로 된 고속정으로 유사한 크기의 강선 보다 월등히 빠른 속력을 내고 있다.

적재량 면에서 비교하여 보면 1959년에 독일에서 제작된 Rhine강 tanker Alumina 호는 그 선체가 3% Mg

알루미늄 합금이고 크기가 223', 27', 7.5'인데 철강재를 구조재로 쓸때 보다 169톤의 dead wt. 적재 용량을 더 갖었다. 이 tanker의 load와 capacity를 비교한 것이 표 6에 나타나 있다.

표 6. 원유 Tanker Alnmina 호에 있어 철강재와 알루미늄제 사용시의 Load draft와 Capacity의 비교

Load draft (FT)	Capacity (원유톤)		Al tanker에서 load capacity의 증가
	철 강 Tanker	알 미 늬 Tanker	
7.5	761	930	+20 %
6.5	619	772	+25 %
4.6	335	477	+42 %

알루미늄 합금은 강인하고 복원성이 크며 소성변형율이 커서 충격을 받았을 때 철강재나 FRP 보다 훨씬 많이 변형된 뒤에 찢어진다. 철강재보다는 3배 가량 탄성이 크며 FRP 보다는 탄성은 적으나 elongation이 5배 가까이 크다.

또 알루미늄 합금은 타 금속에 충격되어도 불꽃이 생기지 않으므로 고옥탄가의 연료를 사용하여 격실에 가연성 기체로 차기 쉬운 고속경에 적합할 뿐 아니라 비자성이므로 소해정과 같이 비자성 선체구조가 요구되는 함정에도 적합하다.

알루미늄 합금은 내식성도 커 대기 중에서 표면에 산화알루미늄 피막을 형성하며 그 이상 산화침식이 방지되며 해수중에 장기간 잠겨 있으면 이종금속간에 전해부식이 생기나 5083, 5086 등 Mg이 함유된 재료는 전해부식에 대한 저항도 상당히 커 보고[4]에 의하면 5086-H34 합금을 6년간 해수에 담가 두어도 최대 침식공의 깊이가 0.034"에 불과하였다고 한다.

알루미늄 합금의 기호와 그 성질

알루미늄 합금의 표시는 4 숫자로 하는데 첫글자는 주 합금원소를 표시하며 그 기호가 표 7에 나타나 있다. 2×××에서 8×××까지는 주합금 원소를 표시하는 알루미늄 합금이며 기타 처리방법을 표시하는 기호로서 F, O, H, Tx 등이 있어 각각 기계적 성질이 다르다.

표 7. 알루미늄 합금의 기호

금 속	AA 번호
알루미늄 99.0% 이상	1XXX
주성분 합금	
구리	2XXX
망간	3XXX
규소	4XXX
마그네슘	5XXX
망간-규소	6XXX
아연	7XXX
기타	8XXX

- F : 제작된 그대로(as fabricated)
- O : aneling 된것(wrought alloy에서만)
- H : strain hardened(wrought alloy에서만)
- H₁ : strain hardening 만 된 것.

- H₂ : strain hardening 하고 부분적으로 annealing 한 것.
- H₃ : strain hardening 하고 저온 tempering 한 것.
- H_{XY} : Y: final degree of strain hardening (0~8까지)
- H_{XYZ} : Z: Y에 대한 variation(1~9까지)
- W : solution heat treated (unstable)
- T : solution heat treated & aged
- T₁ : as cast 에서 상온 aging 한 것.
- T₂ : as cast 에서 annealing 한 것.
- T₃ : solution heat treatment 하고 냉간가공 한것
- T₄ : 상온에서 자연 aging 하여 안정된 것.
- T₅ : as cast 상태에서 인공 aging 한 것.
- T₆ : 고용화 처리하고 인공 aging 한 것.
- T₇ : 고용화 처리하고 안정화한 것.
- T₈ : 고용화 처리하고 냉간가공 및 인공경화 시킨 것.
- T₉ : 고용화 처리 및 인공경화 후 냉간 가공한 것.
- T₁₀ : 고용화 처리하고 냉간가공 한 것.

대개의 알루미늄 합금은 500~520°C 에서 급냉하여 350~410°C에서 석출 경화시킨다.

알루미늄 합금의 선정

합정 구조용 알루미늄 합금은 해수에 대한 내식성이 크고 용접성이 큰 5000계의 비 열처리성 합금은 합금원소의 양과 가공경화의 정도에 의하여 그 기계적 성질이 좌우되며 5000 계에는 Mg가 주합금원소이고 합정에 주로 쓰이는 조성은 표 8 과 같다.

표 8. 구조용 알루미늄 합금의 조성

원 소	Mn	Mg	Cr	Si	Ti	Cu
합 금						
5052		2.5	0.25	—	—	—
5454	0.8	2.75	0.10	—	—	—
5554	0.8	2.8	0.10	—	0.10	—
5086	0.45	4.0	0.10	—	—	—
5083	0.8	4.45	0.10	—	—	—
5456	0.8	5.25	0.10	—	—	—
5356	0.10	5.0	0.10	—	0.10	—
5556	0.80	5.25	0.10	0.6	0.10	—
6061	—	1.0	0.2	0.4	—	0.25
6063	—	0.7	—	—	—	—

표 8에 두가지 열처리성 합금 6061 과 6063 이 있는데 이것은 열처리 방법과 합금원소량에 의하여 그 기계적 성질이 변한다. 열처리성 및 비열처리성 합금은 모두 용접에 의하여 강도가 감소되며 특히 열처리성 합금에 심하여 열처리성 합금은 일차 구조물에는 사용치 않는다.

또한 합정의 설계는 용접된 상태의 강도를 기준으로 되어야 한다.

대부분의 구조물이 알루미늄 합금으로된 해군합정인 PGM 84급 포함의 예를 들어 보면 다음과 같다.

over all length	164'-6"
beam	23'-10 ¹ / ₂ "
depth	13'-7"
draft	5'-1 ⁵ / ₈ "
displacement	216.17 tons
주갑판 덮개판 및 늑골	5086-H32
성형용 및	5086-H112
platform 및 내부격벽(판)	5456-H321
platform (성형)	5456-H311
deck house (sheet)	
0.08" 및 그 이하	6061-T6
0.125 이상	5456-H321
tubing	5086-H32
shape	5456-311
주 선체판	0.50"
주갑판하 첫 strake	0.313"
둘째 strake	0.375
멜딜 strake	0.5"
주갑판	0.5"
추진기관	15,000 hp gas turbine 1 개
무 장	40 mm 포 1 문
	81 mm 박격포 2 문
	3"/50 포 1 문

또 함정의 각 부분에 쓰이는 wrought 알루미늄 합금은 표 9와 같이 보고되고 있다.

표 9. 함정용 알루미늄 합금재의 용도

A.A. No.	Eeder의 spec	주합금원소	용 도
5052 -H32 sheet	QQ-A-250/8	2.5 % Mg	duct work furniture
5054 -H32 sheet, plate -H34 cold worked sheet -H111 extrusion	QQ-A-250/10 (sheet & plate) QQ-A-200/6 (extrusion)	2.75 % Mg	연돌등 65°C 이상의 열을 받는곳
5086 -O annedled -H32 sheet, plate (expt.hull) -H116 hull plate -H117 hull plate -H111 structural extrusion -H112 extruded pipe	QQ-A-00250/19 (sheet plate) QQ-A-200/5 (extrusion) WW-T-700/50 (drawn tube)	4 %	일반적인 구조용 합금재 선체갑판 mast, tank, superstructure

5083 -O annealed, cryogenic -H131 ballistic armor -H321 structural plate	QQ-A-250/6 (sheet & plate) QQ-A-200/4 (extrusion)	4.45 % Mg	장갑판, 냉동저장 탱크판
5456 -O annealed plate -H323 sheet plate -H343 plate -H321 deckhouse -H116 hull -H117 hull -H111 extruded strut -H112 extruded pipe	QQ-A-250/20 (sheet & plate) QQ-A-200/7 (extrusion)	5.25 % Mg	고장력 합금으로 선체 상부구조재 특수 고속정
6061 -T6 sheet -T651 stress relieved sheet -T6511 plate	QQ-A-250/11 (sheet & plate) QQ-A-200/8 (extrusions)	1 % Mg 0.6 % Si	pipe tube 기계적인 연결부
6063 -5 extrusion -T6 solution treated and aged	WW-T-700/60 (drawn tube) QQ-A-200/9 (extrusion)	0.7 % Mg 0.4 % Si	열 처리성 합금으로 furniture

알루미늄 합금의 접합

조합용 알루미늄 합금은 용접방법으로 접합 하는 것이 보통이며 1/4" 이하에는 공냉식 MIG 총을 사용하며 두꺼운 것은 수냉식 MIG 총을 사용하여 두께에 따라 적절히 전압과 전류를 조절하여 사용한다.

용접선은 모재에 적합한 것이라야 하며 저장할 때 grease, oil 기타 과도한 수분 그리고 오물과 접촉하지 말아야 한다.

또 부적합하거나 변질된 용접선을 사용하면 용접불량의 원인이 된다.

알루미늄 합금 구조재의 용접에 적합한 용접선의 선택은 표 10 과 같이 한다.

MIG 용접에서 사용되는 불활성 가스는 알곤, 헬륨 그리고 두가지의 혼합물이며 불활성 가스가 용접부의 산화를 방지하므로 용제가 불필요하고 용접부의 기초 및 부식성 잔재가 제거된다. 또 바닥, 수직, 수평, 천정 자세로 용접할 수 있는 장점이 있다.

알루미늄 합금의 부식문제

합금 구조재인 5000 계의 알루미늄 합금은 해수에 대한 내식성이 크다고 알려져 있으며 실험에 의하면 해수 중에서 1~2 년간에 생긴 pit 는 2~3 mils 정도라고 한다.

그러나 최근 월남전에 사용되는 미해군의 50 ft PCF 및 FB 정의 선체에 사용되는 5456-H321 및 H111 이 심한 박리성 부식(exfoliation corrosion)이 생겼다.

이에 대한 연구보고[4]에 의하면 Al-Mg 의 constituent 가 재료의 입계에 가공경화된 방향으로 석출되어 stress corrosion 을 일으킨 것이라고 하며 그 방지법은 아래와 같이 제시되고 있다.

- (1) 입계에 연속적인 석출상이 생기지 않게 한다.
- (2) 석출물을 불연속성 입자로 분산시킨다.

표 10. 각종 알루미늄 모재에 대한 용접선

모 재	5052	5154	5083	5086	5356	5454	5456	6061
5052	5356	5356	5356	5356	5356	5554 (5556)	5556	5356
5154	5356	5356	5356	5356	5356	5356	5556	5356
5083	5356	5356	5556	5556	5556	5356	5556	5356
5086	5356	5356	5556	5556	5556	5356	5556	5356
5356	5356	5356	5556	5556	5356	5356	5556	5356
5454	5554 (5183)	5356	5356	5356	5356	5554	5556	5554
5456	5356	5556	5556	5556	5556	5556	5556	5556
6061	5356	5356	5356	5356	5356	5554	5556	5356

제(1)의 방법으로 개선 된것이 5456-H117 이며 제(2)의 방법으로 개선된 것이 -H116 이다.

방식문제 때문에 5456-H321 및 5086-H32 알루미늄 합금을 치환시는 5456-H116 또는 -H117 로 하도록 제시 되고 있으며 급후 건조되는 합금의 구조재는 반드시 5456-H116 또는 -H117 로 건조 되게끔 되어 있다.

알루미늄 구조물의 음극보호 문제를 보면 종래에는 Al, Mg, Zn 등의 양극판을 설치하여 왔는데 현재에는 알루미늄 및 마그네슘은 아연으로 대체되고 있다. 그 이유는 Mg 가 용해되어 Mg(OH)₂ 의 알카리를 형성하므로 알카리에 약한 알루미늄 합금판을 침식하며 알루미늄 양극판은 때때로 부동태가 되기 때문이다.

적절히 음극보호가 된 알루미늄판은 수년간 해수에 잘 견딘다고는 하나 painting 을 하면 더욱 좋다.

한가지 특이한 점은 Hg 나 Cu 가 함유된 AF paint 를 사용하지 않아야 하며 Cu₂O 가 함유된 AF paint 를 사용하지 않는다.

기타 전해 부식의 방지를 위하여 철선에 직접 계류하지 말아야 하며 부이 계류시는 nylon rope 나 manila rope 를 사용하고 또 육상 전원을 쓸 때에는 1 : 1 분권 변압기를 사용하여야 한다는 것이다.

4. 결 언

합금 구조재로서 철강과 알루미늄 합금의 성질 및 접합방법 등을 고찰하여 보았는데 철강은 어느 재료보다도 최고의 강도를 갖는 구조재이나 강도에 대한 중량비가 커서 고속정에 최적의 재료라고 볼 수 없으며 또 내식성이 적다는 단점이 있다.

알루미늄 합금은 중량에 대한 강도의 비가 철강에 비하여 2 배에 가까우며 단위체적당 가격도 H.T.S 와 유사하다 또 내식성이 큰 점과 목재나 FRP 에 비하여 내열성이 우수하다는 점등에서 고속정에 적합한 구조재라고 볼 수가 있다. 단지 아직도 원인이 명확히 규명안된 부식문제는 더욱 연구되어야 하리라고 본다.

참 고 문 헌

- [1] Carl Walter Leveau: "Marine Aluminum Application" SNAME Feb, 8, 1964
- [2] Charles L. Wood: "Selection of Wrought Aluminum Alloy for Marinn Use" ALCOA June 1969
- [3] Kaiser: "Aluminum boat"
- [4] Carson L. Brooks; "Corrosion of 5456-H321 Plate In U.S. Navy 50 Ft PCF In Viet Nam."