

알루미늄 소형선의 구조와 시공 주안점

강 병 윤 · 조 제 형

Consideration for Structure and Fabrication Procedure of Aluminum Boat

Byoung-Yoon Kang and Je-Hyoung Cho

1. 서 언

최근 국내외적으로 환경규제가 강화되면서 소형선의 경우 FRP선의 폐선처리가 문제시되면서 알루미늄선에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 알루미늄선의 건조는 철강재 등 여러 재료에 비해 알루미늄은 비강도가 높아 경량화에 의한 고속화가 가능하고 높은 내식성에 의한 유지보수가 용이하며, 폐선시 재활용이 가능하여 환경 친화적이라는 이점이 있기 때문이다.

한편, 유럽, 호주, 일본 등의 선진국에서는 이미 십수년 전부터 자원의 재활용을 통한 환경문제에 적극적으로 대처하고자 관공선을 비롯하여 어선에 이르기까지 소형선박을 알루미늄제로 건조할 것을 권장하여 건조 실적도 매년 지속적으로 증가하는 추세이며, 알루미늄선의 선형, 건조공법, 용접시공법 개발 등의 관련 연구도 활발히 수행하고 있다.

하지만, 우리나라는 1980년대 초 일부 조선소에서 경비정을 수 척 건조한 실적은 있으나, 이후 지속적인 물량 창출이 이루어지지 않아 관련 기술이 단절된 상태이다. 이로 인해 알루미늄선을 건조할 수 있는 조선소는 최근 3-4개 업체에 불과하며, 대부분의 건조기술은 외주 업체에 의존하여 알루미늄선을 건조함으로써 자체 기술력 축적과 기술개발은 기대하기 힘든 실정이다. 또한, 선체를 용접할 수 있는 전문 용접 기술자도 국내에 20여명 남짓한 것으로 조사되어 향후 선체 용접기술자 양성도 시급하다.

이에 본 보고에서는 우리나라 알루미늄선의 건조 실태와 특성을 간단히 살펴보고, 알루미늄선의 구조와 시공상의 주요 고려사항을 정리했다.

2. 알루미늄선 건조실태

국내 알루미늄선 보급은 1980년대 대형조선소의 특

수선 사업부를 중심으로 대형 LNG 선의 탱크용재 등과 함정, 순시정 등의 상부구조물을 알루미늄으로 건조한 실적이 있으나, 지속적인 물량부족과 간접경비의 과다로 생산이 중단되고 기술인력이 분산 소멸되어 기술이 단절된 실정이다. 하지만 최근 국제적으로 환경규제가 강화되고 자원재활용에 대한 관심이 고조되면서 최근 정부가 소형관공선을 FRP제에서 알루미늄합금제로 전환하여 일부 중소형 조선소를 중심으로 서서히 수요가 확대되는 추세이다. Table 1은 최근 우리나라에서 건조된 알루미늄선의 주요 요목과 건조조선소를 보인 것이다. 표에서도 알 수 있는 바와 같이 수 척에 불과한 실정이며, 대부분 정부 발주의 관공선에 한정되고 있다.

이와 같이 우리나라의 경우 알루미늄선 보급이 지체되는 것은 알루미늄선의 경우에 용접 전문 기술자가 부족하여 시공비가 높은 한편, 재료 및 시공장비의 대부분을 수입에 의존하고 있어 FRP어선 대비 초기선가가 매우 비싸 어민들을 비롯한 일반 선주들에게 부담이 되기 때문이다. 그리고 용접시공, 변형제어 관련 기술개발의 미흡, 전문기술자와 관련자료 부족, 알루미늄 재료, 구성품 및 관련 기자재 생산기반 등이 취약하여 선박 건조과정에 많은 애로를 겪고 있다.

알루미늄선 보급 확대를 위해서는 우선 알루미늄 용접 기술자를 양성하여야함은 당연한 이치이다. 그리고, 알루미늄선이 초기선가면에서는 기존의 FRP선, 강선들과 대비하여 불리한 점이 있으나, 뛰어난 내구성과 내식성을 지녀 유지, 보수비가 절감됨에 따라 생애비용적 측면에서는 훨씬 더 유리하다는 점을 적극 홍보할 필요가 있다.

한편, 인접 일본의 경우 1950년경에 선박용 내식성 Al-Mg합금 5083을 개발하고 1954년 15m급 알루미늄 순시정 "아라카세"를 처음으로 건조하였다. 이후 1988년에는 최대 규모의 해상보안청 180톤급 알루미늄

Table 1 최근 국내 알루미늄 소형선 건조 실태

선종	Q/T (톤)	선속 (Kt)	L×B×D	건조 조선소	건조년도
해양경비정	25	31.5	19.8×4.6×2.1	삼광조선	2002
해양경비정	25	31.5	19.8×4.6×2.1	삼광조선	2003
조사선	30	32.0	22.0×4.8×2.3	삼광조선	2002
행정선	3.8	35.0	10.0×2.7×0.8	고려조선	2002
세관감시정	25	35.0	19.9×4.6×2.1	일홍조선	2001
어업지도선	30	35.0	22.0×5.0×2.2	일홍조선	2002
어업지도선	30	35.0	22.0×5.0×2.2	일홍조선	2002

Table 2 FRP선 대비 알루미늄선 장단점

	장점	단점
FRP선	<ul style="list-style-type: none"> - 다양한 선형 건조 가능 - 낮은 작업속련도 - 건조공법 용이 - 대량양산 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 폐선처리에 애로 - 열악한 작업환경 기피 현상 증가 - 화재취약 - 유지보수 애로
알루미늄선	<ul style="list-style-type: none"> - 경량, 고속성능 우수 - 자원 재활용, 선박 운용비 경감 - 내구성, 내식성 등 FRP 대비 우수 	<ul style="list-style-type: none"> - 선형한계 (차인선형) - 초기선가 고가 - 용접시공 등 전문기술 - 재료, 장비 수입의존

늄 순시정을 건조하기로 하였으며, 알루미늄제 관공선 만도 100여척에 이른다.

그리고, 알루미늄제 어선은 1976년말 4.9톤급 알루미늄 소형저인망어선 금비라환(金比羅丸)이 건조된 이래 1996년 총톤수 149톤의 가다랑어 알루미늄 낚시어선을 건조한 바 있으며, 총 3,000여척에 달하고 있다. 또한, 알루미늄선의 선형, 건조공법, 용접시공법 개발 등에 관한 연구도 활발히 수행하고 있다.

3. 선박용 알루미늄 재료의 종류

선박에 주로 사용되는 알루미늄 종류는 용접성과 해수 내식성이 뛰어난 Al-Mg계 비열처리합금의 5000계열과 Al-Mg-Si의 열처리합금의 6000계열이다. 이 중에서 특히 선박에 많이 사용되는 것은 5000계열의 5083제이다.

5083제는 약 4.5%의 Mg을 함유하고 있으며, 내식성 및 성형성이 우수하고 강도, 피로, 내식성, 용접성 등 모든 특성의 균형이 뛰어나기 때문에 선박용 구조재료로서 주류를 이룬다.

한편, 5083제는 다시 O재, H32재, H112재 등으로 나누어진다. O재는 소둔처리된 것으로 5083제 중에서

강도가 가장 약하기 때문에 강도를 많이 요구하지 않는 구조에 사용된다. 그리고 H32제는 냉간가공후 안정화처리를 실시한 1/4 경질의 가공경화재로 항복강도가 22~30kgf/mm²으로 강도가 높고 용접구조의 갑판, 외판, 내부 구조재로서 많이 이용된다. 용접부의 항복강도가 O재 보다 약간 높기 때문에 구조 경량화에 특히 유리하다. H112제는 압출 혹은 열간압연한 것으로 5083계열 중에서 항복응력이 가장 낮은 11kgf/mm² 정도이며, 압출 형재에 많이 사용된다.

또한, 5052제도 선박재료로 가끔 사용되는데, 내식성과 가공성이 5083보다 뛰어나지만 강도는 5083보다 낮아 구조재로서는 비교적 강도를 필요로 하지 않는 부분에 사용된다.

이밖에도 5086제는 우리나라에서는 거의 사용하지 않으나 미국 등에서는 5083보다 응력부식파괴의 염려가 적다는 이유로 많이 사용되고 있다.

한편, 6000계열 재료로 선박에 주로 사용되는 재료는 6061, 6063 및 6N01제이다. 이 중 6061제는 리벳구조 선체 제작시에 많이 사용되었으나, 알루미늄 용접기술의 발전과 함께 최근에는 거의 사용되지 않고 있다. 그리고, 6063제는 압출성과 프레스 소입성이 뛰어나기 때문에 사다리, 현창, 마스트 등 기자재 제작에 주로 사용된다. 또, 6N01제는 압출가공성이 좋아 선체의 상부 구조의 압출형재로서 많이 사용되고 있다.

Table 3은 선박에 주로 사용되는 알루미늄재료의 종류와 사용부위를 예시적으로 보인 것이며, Table 4는

Table 3 소형선박 주요 구조 부위별 알루미늄 합금 종류

구분	합금 종류	사용 형태
외판	5083, 5086	판, 형재
용골	5083	판
늑판, 격벽	5083, 6061	판
늑골	5083	형재, 판
기관대	5083	판
갑판	5052, 5083, 5086	판, 형재
조타실		판, 형재
블워크	5083	판, 형재
연통	5083, 5052	판
마스트	5083, 5052	판, 봉, 형재

Table 4 선박 알루미늄합금의 기계적 성질

종류	재질	모재			용접부(와대기용접)			용기재
		기계적성질			기계적성질			
		σ_b kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ %	σ_b kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ %	
5052	O	20.2	9.8	25	20.4	9.8	22	5154
	H32	23.0	19.5	12	22.5	14.3	12.2	5356
5083	O	30.0	15.0	22	29.2	14.8	17	5183
	H32	37.4	27.7	15	31.3	19.4	8	5556
5086	O	29.0	12.6	29	28.8	13.0	14	5183
	H32	33.0	22.8	18	30.2	14.2	12	5153
6063	T5	19.0	14.3	12	14.8	9.8	17	5153
6061	T6	31.6	27.1	12	19.7	12.7	5	5356
6N01	T5	30.0	27.2	10	24.0	15.0	9	5356

이들 재료의 모재와 용접부의 기계적 특성을 나타낸 것이다.

4. 알루미늄선의 구조특성

선박재료로서 알루미늄은 최근에 환경친화적 측면에서 수요가 많지만, 이전까지는 주로 경량화를 목적으로 사용되었다. 이에 따라 관련 선박의 구조규정에 있어서도 구조부재가 가급적 경량화 설계될 수 있도록 적당 강도와 내식성을 가지면서도 최소치수가 되도록 하는데 초점을 두었다

한편, 어떤 선박일지라도 강도기준의 첫번째 요건은 해상상태에서 선박 전체에 작용하는 전단력과 굽힘 모멘트에 견디어내야 한다. 하지만, 알루미늄선은 다행스럽게도 이것은 그다지 문제시되지 않는다. 왜냐하면, 알루미늄선은 관련 규정의 적용범위가 거의 소형선에 한정되어 있기 때문에 구성부재별로 작용하는 2차적인 하중조건만을 만족하여도 거의 대부분 전체강도를 만족할 수 있기 때문이다. 하지만, 알루미늄선은 대부분 경량화의 이점을 최대한 활용한 고속선에 주로 적용됨에 따라 전체강도를 검증할 때는 슬래밍 하중으로 전단력과 굽힘 모멘트에 대한 검토를 충분히 행하여야 한다.

Table 5 하니콤포넬과 평판구조의 단면성능비교

수평		수직	
중량 (kgf/m)		12.29	8.78
단면2차모멘트 I (cm ⁴ /cm)	종방향	1.19	1.20
	횡방향	0.58	1.20
단면계수 Z (cm ³ /m)	종방향	0.34	0.48
	횡방향	0.17	0.48

특히, 선저구조는 슬래밍 하중에 철저히 대비하여야 하는데, 선형에 따라 그 특성이 아주 다르기 때문에 영역과 크기를 제대로 파악하기란 결코 쉬운 것은 아니다. 하지만, 통상의 배수량형 선박은 최대 슬래밍 하중이 주로 선수와 선체 중앙부 사이의 중간지점 근처에서 발생되며 선저 경사각이 적을수록 그 영향은 더욱 더 크게 나타난다. 그리고, 선저늪판이나 거어더의 설계에 있어서도 이러한 슬래밍은 당연히 고려하여야 한다.

한편, 20노트 미만인 경우에는 규정상의 최대 하중조건이 실제보다 상당히 커 오히려 과대한 치수로 설계되기도 한다.

그리고, 고속선의 경우에는 설계가 어느 정도 진행되면 보다 상세한 응력해석을 행하는 경우가 많은데, 대표 횡단면의 2차원 평면해석을 통한 횡강도 검증, 3차원 유한요소법을 이용한 주요선체 구성부위 또는 배 전체에 대한 응력해석 하는 것이 그 예이다. 이를 토대로 주요구조부재가 허용응력을 기준으로 어느 정도의 안전율을 가지고 설계되어져 있는가, 또는 중량경감을 할 수 있는 저 응력 부위는 얼마만큼 여유가 있는가를 가늠할 수 있게 된다. 이때 알루미늄의 허용응력은 0.2% 내력을 기준으로 하는 것이 통례이며, 조합응력에 대해서는 Von mises의 항복응력을 기준으로 한다.

이밖에도 알루미늄 선박의 경우에는 단판구조 보다 강성확보와 경량화 조건을 동시에 만족할 수 있도록 격벽이나 갑판 구조부재로 허니콤형태의 샌드위치 패널을 가끔 사용한다. 이러한 알루미늄 샌드위치 패널은 얇은 알루미늄 시트 상태의 소재를 육각형 집합체인 벌집과 같이 접착성형한 것을 말한다. 그리고, 샌드위치 패널은 제작 방식에 따라 접착제에 의한 것과 브레징시트를 이용한 납땜방식의 두 종류가 있다. 대개 알루미늄 샌드위치 패널이라고 하면 코어와 면판을 접착제로 접합한 것을 일컫는 경우가 많다. 이러한 알루미늄 샌드위치 구조는 다른재료에 비해 강도 대비 중량비가 높고 제조시 접착제 등을 이용하므로 용접변형이 없으며, 우수한 절연성과 에너지 흡수성, 설계상의 융통성 등 구조적 효율성이 우수하다.

또한, 알루미늄 샌드위치구조는 평판보강재 용접조립 부재에 비해 경량화가 가능하다. 그 단면 성능 예를 Table 5에 보인 것이다.

5. 알루미늄선의 시공

5.1 개요

알루미늄선의 조립은 초기에 리벳공법에 의해 대부분이 이루어졌지만 용접성이 뛰어난 Al-Mg계합금(A5083)

의 개발과 불활성가스아크용접의 개발함에 따라 최근에는 거의 용접시공법을 채택하고 있다. 하지만 알루미늄 용접시공은 용접조건과 용접절차에 신중을 기하여야 한다. 이는 알루미늄합금에 대해서는 사양에서부터 철강재만큼 공작상의 여유가 없을 뿐만 아니라, 모든 강도 조건을 만족하기 위해서는 엄격한 품질관리가 필수적으로 뒤따라야 하기 때문이다.

특히, 소형선은 사용재료의 판두께가 얇아(3-5mm) 용접으로 인한 변형도 문제시되지만, 용접도중 타버릴 위험도 있기 때문에 특히 신중을 기하여 한다. 또한, 알루미늄합금 용접부의 내식성과 강도 특성도 용접조건에 따라 영향을 많이 받기 때문에 용접부 근처의 습기나 먼지를 제거하고 급속 냉각을 피하는 까다로운 시공 조건을 만족하여야 한다. 따라서, 용접시공 알루미늄선을 보다 용이하고 견고하게 제작하기 위해서는 용접조건, 절차, 후열처리 등 용접시공에 대한 기술 개발이 필수적이다

또한, 알루미늄합금의 용접부 성능은 피로강도만으로도 전체를 평가할 수 있을 정도인데, 이는 알루미늄합금의 고사이클 피로강도가 용접비드의 변화나 미세한 기포의 내재여부에 따라 아주 민감하게 변화하기 때문이다.

이밖에도 알루미늄은 FRP보다는 우수한 내화성을 지니고 있지만 철강재에 비해서는 뒤떨어지기 때문에 내화구조 부위에 대해서는 별도의 방열공사를 통해 보완하여야 한다.

한편, 조선소에서 알루미늄선의 용접은 주로 미그

(MIG)용접과 티그(TIG)용접을 사용하고 있다. 선체의 구조형상, 판두께, 강도 및 용접량 등을 고려하고 용접 기법을 선택한다. 미그용접은 품질, 작업성이 양호하여 선체 주요부에 적용되며, 티그용접은 박판의 용접, 가접, 각용접, 좁은장소, 의장품 취부 등 그다지 강도가 요구되지 않는 부위에 주로 적용된다.

5.2 용접이음특성

알루미늄선의 경우에도 기본적인 이음 형식은 강선과 마찬가지로 맞대기이음, T이음, 겹침이음, 모서리이음 및 변두리이음의 5종류가 있다. 이 중에서 선체 이음 90%이상을 차지하는 맞대기용접과 T이음의 특성을 살펴 본다.

(1) 맞대기이음

맞대기이음의 홈형상은 여러 가지 실제 조선소에서 많이 사용하고 있는 홈형상과 모재 두께 및 개선간격은 Table 6에 나타낸 것과 같다. 선체외판의 맞대기용접은 반자동미그용접인 경우에는 판두께 6mm까지는 홈형상을 I형 개선으로 하여도 가능하고 그 이상의 두께에서는 V형 개선을 한다. 그리고 그다지 두꺼운 판이 아니더라도 하향 이외의 자세는 개선하여 용접하는 것이 강도면에서 유리하다. 두께 8mm이상은 그림과 같이 X형 개선하여 양면 용접하는 것이 바람직하며, 양면 용접을 행할 경우에는 가우징을 정확하게 행한 후 뒷면 용접을 행해야만 한다. 가우징이 불충분할 때는 뒷면 용접시에 슬러그가 용융금속 중에 부상하여 결함의 원인이 되기도 한다.

Table 6 맞대기용접의 개선 형상과 주요 치수

이음 종류	개선 형상	모재 두께 (mm)	용접 중수	치수(mm)	
				티그	미그
맞대기 이음	I형	6 이하	1~2	$c \leq 3$	$c \leq 2$ 백킹제 $c \leq t$
	V형	4 ~ 25	1 이상	$c \leq 3$ $f \leq 3$ $\theta = (45 \sim 60)^\circ \pm 5^\circ$	$c \leq 3$ $f \leq 3$ $\theta = (45 \sim 60)^\circ \pm 5^\circ$
	X형	8 이상	2 이상	$c \leq 3$ $f \leq 3$ $\theta = (40 \sim 90)^\circ \pm 5^\circ$	

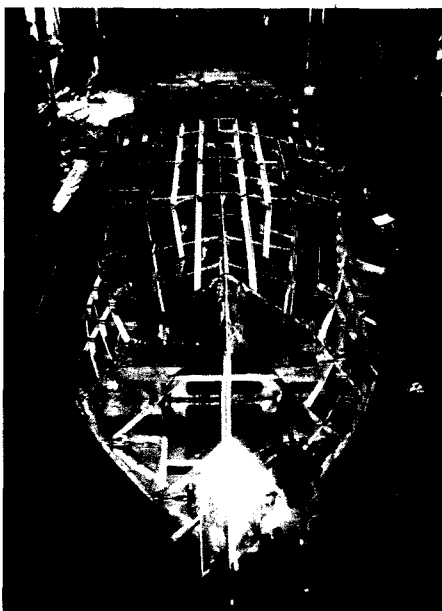


Fig. 1 알루미늄선체 용접시공 전경

(2) T이음

T이음은 두 개의 부재를 수직에 가깝게 조립하는 경우를 일컫는 것으로 외판과 보강재의 조립, 외판과 격벽 간의 이음이 그 예이며, 강도상 아주 중요하다. 이러한 T이음 개선유무와 형태에 따라 Table 7과 같이 T이음의 종류는 필릿, L형, K형 이음으로 나누어진다. 이 중에서 선체 각 부위에서 가장 많이 사용되는 이음 형태는 필릿이음이다.

한편, 필릿이음은 Fig.2와 같이 다시 양측연속, 병렬단속, 지그재그단속의 3종류로 세분된다. 이 중에서 양측연속 용접은 선저부와 기관대 등 진동이나 반복하중, 고응력부위 등을 대상으로 적용된다. 그리고, 강도를 그다지 용하지 않는 부재이거나 수밀이 요구되지 않는 보강재 등의 조립시에는 단속용접으로 한다. 하지만 단속용접시에는 용접변형의 발생이 작은 장점이 있지만 크레이터에 균열이 발생하기 쉽기 때문에 크레이터처리를 반드시 행해야만 한다.

끝으로 지그재그단속 용접이음은 선측조골과 선측중통재, 상갑판빔과 갑판하중통재 등의 각 교차부위에 있어서 각각 외판 혹은 갑판과의 필릿이음은 하중을 전달하기 위해서 끝부분에서 적당한 범위에 걸쳐 적용된다.

Table 7 T이음의 개선 형상과 주요 치수

T이음	개칭	개칭	개칭	개칭	
				개칭	개칭
T이음	필릿		1이상	1이상	$c \leq 2$
	L형		4~12	1이상	$c \leq 2$ $f \leq 2$ $\theta = 50^\circ \pm 5^\circ$
	K형		8~25	2이상	$c \leq 2$ $f \leq 2$ $\theta = 50^\circ \pm 5^\circ$

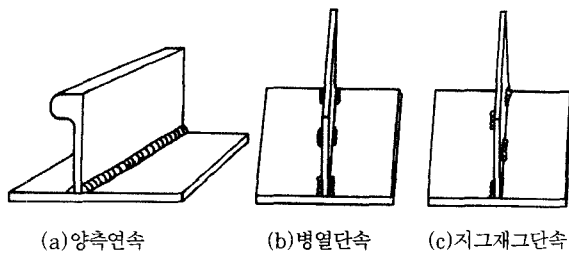


Fig. 2 필릿용접 종류

Table 8 T이음의 연속용접과 단속용접의 주요 치수

모재 두께 (mm)	(단위: mm)			
	연속용접	단속용접		
	각장 f	각장 f	용접길이 W	용접간격 P
~ 4	3	3		
4 ~ 5	4	4	50	200
5 ~ 6	4.5	4.5		
6 ~ 7	5	5		
7 ~ 8	6	5.5		
8 ~ 9	6	6		
9 ~ 10	7	6.5	80	250
10 ~ 14	7	7		
14 ~ 18	8	8		
18 ~ 20	9	9		

6. 결 언

최근 환경보호 관련 각종 규제가 강화되고 소형선에 대한 고속화 요구가 증대하면서 알루미늄제 소형선 개발, 보급에 대한 관심이 고조되고 있다.

하지만, 우리나라는 알루미늄선의 경우에 초기선가가 기존의 FRP선이나 강선에 비해 고가이고, 시공기술자도 국내에는 극소수에 불과하여 보급 확대에 많은 애로를 겪고 있다.

또한, 알루미늄선은 경량화 및 고속화 등의 요구조건과 관련하여 구조해석 등의 다양한 설계기법이 요구되고, 시공상으로는 까다로운 용접시공 기술과 품질관리가 동반되어야 한다.

이에 본고에서는 우리나라 알루미늄선 건조실태, 알루미늄 구조 및 시공특성 등을 살펴보았다. 이 결과로 알루미늄선의 보급 확대를 위해서는 다음과 같은 사항이 선결되어야 함을 알 수 있었다.

1) 알루미늄선의 초기선가 및 시공비 절감, 품질향상을 위한 알루미늄선 용접전문 기술자의 양성이 시급하며, 관련 교육프로그램의 확충이 요구된다.

2) 알루미늄선 경량화 설계기법 정립과 용접시공기법의 조속한 확보를 위해 선종/규모별 표준선형개발, 구조강도 해석 연구, 용접기법 및 기준 설정 연구 등이 요구된다.

3) 알루미늄선 건조시에 필요한 재료수급을 보다 원활히 하고, 경량화 성능 향상과 변형 경감을 위해서는 관련 소재 및 구성품, 구조부재의 국산화 생산기반 확보가 필요하다.

참고 문헌

1. 輕金屬溶接構造協會, “船舶・海洋とアルミニウム”, 1990년
2. 住友輕金屬工業, “アルミニウム合金製小型船舶施工 ハンドブック”, 1989년



- 강병윤(姜秉潤)
- 1958년생
- 한국중소조선기술연구소
- 조선생산기술
- e-mail: bykang@rims.re.kr



- 조제형(趙帝亨)
- 1971년생
- 한국중소조선기술연구소
- 선박용접
- e-mail: jhcho@rims.re.kr

3. 松野清孝, “我が國のアルミニウム合金船の現状と 將來動向”, 輕金屬溶接, 1998년
4. 姜秉潤, “高速船의 材料와 構造設計의 概要”, 船舶海洋技術 第3號, 1990년
5. 輕金屬溶接, “日本におけるアルミニウム合金船構造の輕量化に関する研究”, 1997년
6. 輕金屬溶接, “高速輕量船用新アルミニウム合金”, 1997년
7. Aluminum Assoc., “Forming and Machining Aluminum”, 1975년
8. 輕金屬溶接構造協會, “アルミニウム構造物の溶接 施工”, 1982년
9. E. H. Sims, “Boat building in Aluminium Alloy”, 1978년