

## 알루미늄 소형선박의 마찰교반접합 적용 연구

조 제 형<sup>\*.†</sup> · 김 명 현<sup>\*\*</sup> · 최 준 웅<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>중소조선연구원

<sup>\*\*</sup>부산대학교 조선해양공학과

### Application of Friction Stir Welding Processes for Aluminum alloy Boat

Je-Hyoung Cho<sup>\*.†</sup>, Myung-Hyun Kim<sup>\*</sup> and Jun-Woong Choi<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Research Institute of Medium & Small Shipbuilding

<sup>\*\*</sup>Pusan National University, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering

<sup>†</sup>Corresponding author : jhcho@rims.re.kr

#### 1. 서 언

최근 국내외적으로 환경보호 및 에너지절감 등에 대한 요구가 높아짐에 따라 친환경, 경량화 소재가 대두되고 있으며, 정부에서도 FRP선박에 대한 규제를 강화하고 있는 실정에 있다. 특히, 소형선박의 경우 FRP선박의 폐선처리가 문제시되면서 알루미늄 소형선박에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 알루미늄 소형선박의 건조는 FRP 및 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.

또한, 조선 산업의 알루미늄합금의 적용은 선체 구조부재로서 LNG극저온 탱크소재, 해양구조물의 헬리덱, 고급 크루즈 선박의 갑판 소재, 군함, 선박 등 상부구조재, 경합금 레저선박 등 다양한 분야에 적용되어 선박의 경량화, 복원성 향상, 구조강도 개선의 효과가 있다.

한편, 알루미늄 소형선박의 선체부재 조립은 MIG, TIG 등 용융 의한 인력 의존성이 높으며, 특히 알루미늄선체의 용접 시공은 강선체에 비해 고도의 숙련 기술이 필요로 하여 용접기능공의 인건비가 매우 높아 공급이 원활하지 못하다. 또한, 용융접합시 인체에 유해한 흡, 섬광 등의 발생과 용접 열 변형에 의한 품질 저하 등의 작업 애로를 겪고 있는 실정이다.

알루미늄 소형선박의 선체건조시 상당한 비중을 차지하는 용융접합으로 인해 발생하는 기술적, 경제적, 환경적 측면의 애로 사항을 해소하기 위해 최근 자동차, 항공기, 철도차량 등의 산업분야에서 적용되고 있는 비

용융 고상접합공정인 마찰교반접합(FSW) 기술의 알루미늄 소형선박에 대한 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

#### 2. 국외 알루미늄 선박의 FSW 적용 실태

마찰교반접합은 1991년 영국의 TWI에 의해 개발되어 현재 자동차, 항공, 우주, 군수 분야에 널리 사용되고 있는 용접을 대체 할 수 있는 접합기술이다. 고속으로 회전하는 톨에 의해 발생하는 500℃ 내외의 마찰열을 이용하여 용융상태로 고착시키는 원리로서 선박에 대한 적용 실태를 살펴보았다.

FSW의 첫 상업적 적용은 1996년 SAPA(덴마크)에서 어선에 수확된 고기의 냉동보존을 위한 속이 빈 알루미늄 패널제조에 적용되었다. 이 패널은 알루미늄 압출재가 이용되었으며, 최소한의 변형과 높은 재현성을 구현하기 위해 경제성과 매력적인 기술을 모두 갖춘 FSW가 적용되었다.

노르웨이 해우게순(Haugesund)에 있는 Marine Aluminium은 1996년에 접합 길이 110m에 이르는 고속 페리선박 건조를 위한 알루미늄 패널에 FSW를 적용 생산 공급하였다. 이 패널은 압출성형프레스에 의해 표준 크기의 압출재로 생산되고 FSW에 의해 조립

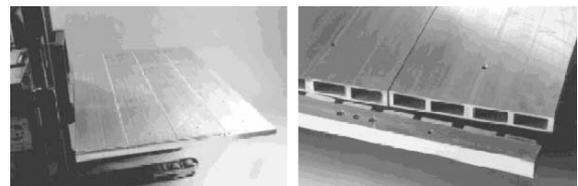


Fig. 1 어선 냉동창고 패널 건조에 FSW 적용(SAPA, 덴마크)



Fig. 2 노르웨이 Haugesund Marine Aluminium에서 FSW 적용 생산된 고속 패리용 패널 및 벽면구조

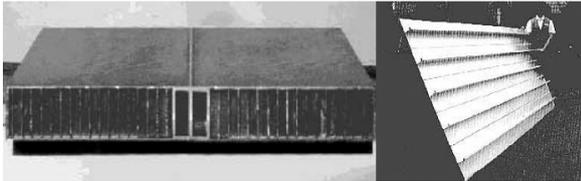


Fig. 3 스미토모의 선박용 허니컴 패널과 A5000계 대형 압출재 FSW 적용 예



Fig. 4 알루미늄 선박의 구조부재 접합을 위한 Esab Super Stir 장비

되어 용융용접과 비교할 때 낮은 입열량과 낮은 열응력으로 최소한의 변형이 이루어졌다.

일본 스미토모에서는 경금속 허니컴 패널과 A5083-H112 선체 패널에 마찰교반접합을 적용하였다. 너비 250mm의 알루미늄 5000계 압출재에 FSW를 적용하여 폭 1,250 × 길이 5,000mm의 선체 외판 부재를 제작, 선박에 적용하였다. 여기서, FSW 접합부가 상·하부 평탄도가 좋은 장점을 가지고 있기 때문에 선박용 외판에 FSW가 적용 개발되었다.

스웨덴 Esab사에서 선박의 16m 알루미늄 구조부재를 접합할 수 있는 마찰교반 장비를 개발하여 DNV(노르웨이선급), Lloyd(영국선급), RINA (이탈리아선급) 등 선급 승인을 획득하여 선박의 구조부재 제작에 활용하고 있다.

### 3. 선박용 알루미늄합금 재료 특성

선박에 주로 사용되는 알루미늄 종류는 용접성과 해

수 내식성이 뛰어난 Al-Mg계 비열처리합금의 5000계열과 Al-Mg-Si의 열처리합금의 6000계열이다. 이 중에서 특히 선박에 많이 사용되는 것은 5000계열의 5083재이다.

5083재는 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, 5083재는 다시 O재, H32재, H112재 등으로 나누어진다. O재는 소둔처리된 것으로 5083재 중에서 강도가 가장 약하기 때문에 강도를 많이 요구하지 않는 구조에 사용된다. 그리고 H32재는 냉간가공후 안정화처리를 실시한 1/4 경질의 가공경화재로 항복강도가 22~30kgf/mm<sup>2</sup>으로 강도가 높고 용접구조의 갑판, 외판, 내부 구조재로서 많이 이용된다. 용접부의 항복강도가 O재 보다 약간 높기 때문에 구조 경량화에 특히 유리하다. H112재는 압출 혹은 열간 압연한 것으로 5083계열 중에서 항복응력이 가장 낮은 11kgf /mm<sup>2</sup> 정도이며, 압출 형재에 많이 사용된다.

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

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

한편, 6000계열 재료로 선박에 주로 사용되는 재료는 6061, 6063 및 6N01재이다. 이 중 6061재는 리벳구조 선체 제작 시에 많이 사용되었으나, 알루미늄 용접기술의 발전과 함께 최근에는 거의 사용되지 않고 있다. 그리고 6063재는 압출성과 프레스 소입성이 뛰어나기 때문에 사다리, 현창, 마스트 등 기자재 제작에 주로 사용된다. 또, 6N01재는 압출가공성이 좋아 선체의 상부 구조의 압출형재로서 많이 사용되고 있다.

Table 1은 이들 재료의 모재와 용접부의 기계적 특성을 정리한 것이며, Table 2는 선박에 주로 사용되는 알루미늄재료의 종류와 사용부위를 예시적으로 나타낸 것이다.

### 4. 소형선박의 FSW 적용 방안

일반적으로 선박 선체의 부재 요소는 판재와 판재, 판재와 보강재(압출형재) 등이 용접에 의해 구조부재가 구성된다.

선체 구조부재 조립시 마찰교반용접(FSW)의 적용은 판재와 판재의 접합은 적절한 접합 조건하에서 가능하

**Table 1** 선박용 알루미늄합금의 기계적 성질

합금 (판)	재질	모재			용접부(맞대기용접)		
		기계적성질			기계적성질		
		$\sigma_b$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\delta$ %	$\sigma_b$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\delta$ %
5052	O	20.2	9.8	25	20.4	9.8	22
	H32	23.0	19.5	12	22.5	14.3	12.2
5083	O	30.0	15.0	22	29.2	14.8	17
	H32	37.4	27.7	15	31.3	19.4	8
5086	O	29.0	12.6	29	28.8	13.0	14
	H32	33.0	22.8	18	30.2	14.2	12
6063	T5	19.0	14.3	12	14.8	9.8	17
6061	T6	31.6	27.1	12	19.7	12.7	5
6N01	T5	30.0	27.2	10	24.0	15.0	9

**Table 2** 소형선박 주요 구조 부위별 알루미늄 합금 종류

구 분	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	5083, 6N01, 5052	판, 형재
블위크	5083	판, 형재
연통	5083, 5052	판
마스트	5083, 5052	판, 봉, 형재

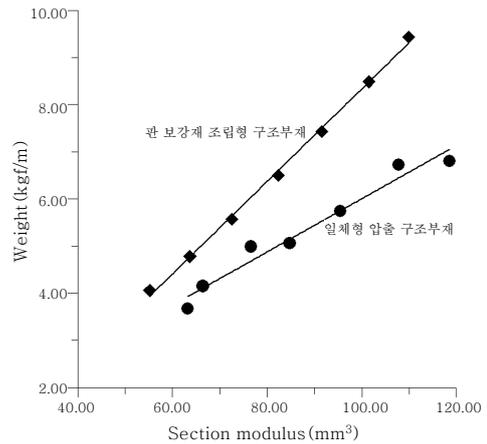
다, 하지만, 판재와 압출형재(L형, T형)의 접합은 FSW 접합시 틀이 삽입될 경우 접합되는 과정에서 압출부재 단면의 터짐 현상이 발생한다. 이런 현상을 보완하기 위해 새로운 압출 형상을 도출하여 맞대기 접합이 가능하도록 하여야 한다.

이 새로운 압출 형상은 아래의 표에서 보는 바와 같이 판과 구조부재가 하나로 이루어진 일체형 압출 구조부재이다.

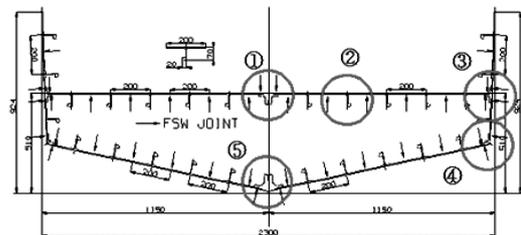
이 일체형 압출 구조부재를 알루미늄 소형선박에 FSW방식으로 건조 적할 경우 판, 보강재의 조립형 구조부재 보다 여러 가지 장점이 있을 것으로 판단되며, 일체형 압출 구조부재와 판 보강재 조립형 구조부재의

**Table 3** 일체형 압출 구조부재와 조립형 구조 부재 비교

구 분	일체형 압출 구조부재	판 보강재 조립형 구조부재
형 상		
접합공수	1공	4공
중 량 (동일 단면계수)	낮음(10~20%)	높음
용접변형	없음	뒤틀림변형 발생
합금종류	A6082/A5083	A5083



**Fig. 5** 조립형 구조부재와 일체형 구조부재의 단면계수에 대한 단위중량



**Fig. 6** 알루미늄 소형선박의 일체형 선체구조 부재 접합 FSW공법 적용 방안

형상, 용접공수, 중량 등을 아래 표에서 비교 정리하였다.

이 표에서 나타난 바와 같이 일체형 압출 구조부재는 판과 보강재가 일체형으로 압출 생산되어 판 보강재 조립형 구조부재보다 접합 공수가 3공수가 더 소요되어 그 만큼 인건비가 많이 들게 된다. 또한, 용접변형제어 측면에서도 일체형 압출 구조부재 보다 판 보강재 조립형 구조부재가 용접변형 제거에도 상당한 애로 상황이 발생할 것으로 생각되며, 구조부재에 용접변형이 발생하여 제품의 품질에도 좋지 않은 영향을 미치게 될 것으로 사료된다.

선체중량에 있어서도 같은 단면계수 일때의 구조부재의 중량을 비교하면 일체형 압출 구조부재가 판 보강재 조립형 구조부재 보다 약 10~20%정도의 중량을 경감

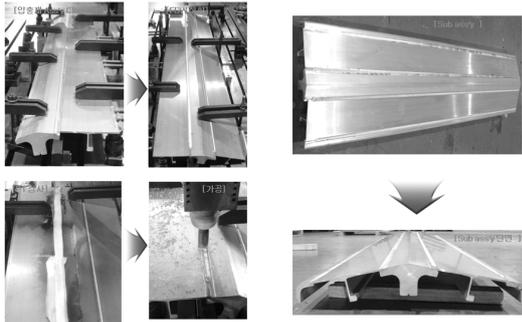


Fig. 7 FSW 접합된 일체형 압출 구조 부재형상

시킬 수 있어 알루미늄선체의 경량화를 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 일체형 압출 구조부재는 FSW접합의 적용이 가능하며, 판 보강재 조립형 구조부재는 FSW접합이 적용 불가능할 것으로 판단된다.

아래의 그림은 알루미늄 소형선박 건조에 있어서 FSW공법 적용을 위한 일체형 선체구조부재 형상을 나타내었다.

5. 선박용 알루미늄 합금의 FSW 최적 접합 조건 도출

알루미늄 소형선박의 건조시 FSW 적용 가능성을 살펴보기 위해 선박용 알루미늄 합금의 FSW 최적 접합 조건을 도출하였다.

본 실험에서 사용된 FSW 실험장치는 ㄷ자 형태의 Gantry Frame을 중심으로 용접기 본체와 각종 Travelling Unit 및 Table이 탑재된 장비이다. 마찰 접합을 위한 회전은 범용 밀링에서 사용하고 있는 Spindle Motor 직결 구동 방식을 채택하여 고속회전에 따른 소음을 최소화하는 구조이며, 상하 이송(Z-축)은 Servo Motor를 사용하여 Ball Screw를 이용한 Sliding방식으로 교반 접합을 위하여 장비 전면 기준으로 전진 Tilting Mechanism을 갖추고 있는 장비이고 FSW의 제원은 아래의 표와 같다.

Table 4 FSW장비 사양

항 목	사 양	
X-Axis	Stroke	3,500mm
	Speed	max : 2,500 mm/min
Y-Axis	Stroke	3,000mm
	Speed	max : 2,500 mm/min
Z-Axis	Stroke	360mm
	Speed	max : 2,500 mm/min
스핀들 속도	300 ~ 3,000 rpm	
TILTING	0° ~ 5°	
가압 하중	최대 사용압력 : 20KN(2Ton)	



Fig. 8 FSW 실험에 사용된 Tool 형상

Table 5 접합 변수에 따른 인장시험 결과

회전수	이송속도	접합 양호 영역	접합 불량 영역
		3mm/sec	5mm/sec
300rpm		256N/mm <sup>2</sup>	0
400rpm		309N/mm <sup>2</sup>	227N/mm <sup>2</sup>
600rpm		311N/mm <sup>2</sup>	243N/mm <sup>2</sup>
800rpm		315N/mm <sup>2</sup>	315N/mm <sup>2</sup>
1000rpm		291N/mm <sup>2</sup>	297N/mm <sup>2</sup>
120rpm		294N/mm <sup>2</sup>	326N/mm <sup>2</sup>
1500rpm		327N/mm <sup>2</sup>	313N/mm <sup>2</sup>
1800rpm		301N/mm <sup>2</sup>	323N/mm <sup>2</sup>

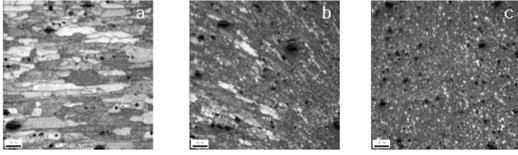
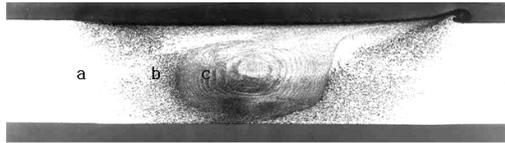
선박용 알루미늄합금 접합을 위한 FSW 실험에서는 많은 접합 변수가 요구된다. 일반적으로 회전수, 접합 이송속도, Tool형상, Tool의 틸팅각도, 가압하중 등이 있으며, 본 실험에서는 가압하중 1Ton과 Tool의 형상은 Fig. 8, 스펀들의 Tilting 각도는 3°로 고정하고 회전수, 이송속도를 접합 변수로 설정하였다.

시험편의 재료는 선박용 알루미늄인 Al5083 -H321을 사용하였으며, 시험편 크기는 50mm×100mm×5mm (L×W×T)로 맞대기 접합을 수행하여 시험편을 제작하고 인장시험을 수행하였다.

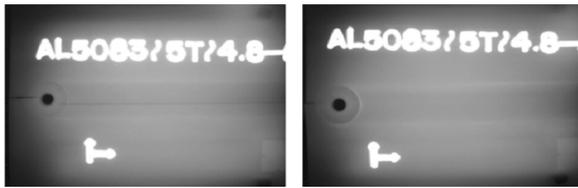
선박용 알루미늄합금의 FSW 접합 조건의 회전수, 이송속도에 따른 시험편의 인장시험 결과를 Table 5에 나타내었다.

이송속도 3mm/sec의 경우 300rpm 영역을 제외 하곤 전반적으로 높은 접합강도를 나타내었으며, 회전수 1,500rpm에서 327N/mm<sup>2</sup>의 최고 인장강도를 나타내었다. 또한, 5mm/sec의 경우 회전수 800rpm~1800rpm 인 전체 실험의 대부분 영역에서 인장강도 값이 모재 강도의 90%이상의 결과 값으로 나타났다. 이는 선체 구조 용접부로 아주 좋은 품질로 사료 된다.

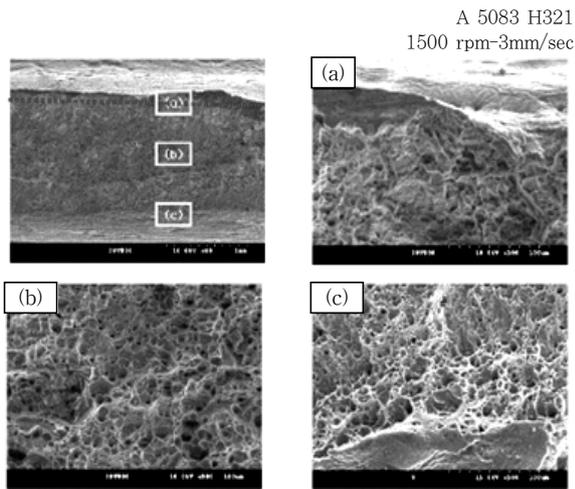
선박용 알루미늄합금 5083-H321의 FSW 접합부의 미세조직사진을 Fig. 9에 나타내었다. 모재는 압연된 판재의 팬케익과 같은 조직을 나타내며, 열적기계적 영향부의 경우 열에 의해 조직이 재결정이 일어난 형상과 금속조직이 미세화된 조직이 경계를 따라 연결되어 있다. 교반부의 경우 조직의 미세화가 이루어진 것을 확



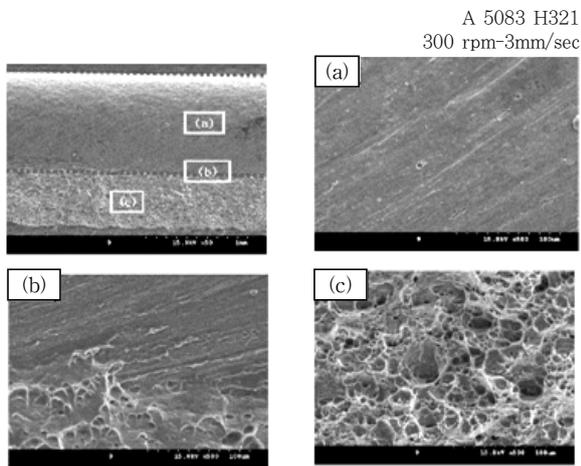
(a) 모재 (b) 열적기계적 영향부 (c) 교반부  
**Fig. 9** A5083-H321의 접합부 미세조직사진



(a) 400rpm-5mm/sec (b) 1500rpm-5mm/sec  
**Fig. 10** 접합조건에 따른 X-Ray검사사진결과



**Fig. 11** 파단면의 SEM사진 (1500rpm, 3mm/sec)



**Fig. 12** 파단면의 SEM사진 (30rpm, 3mm/sec)

인 할 수 있다.

접합 조건에 따른 X-Ray검사사진결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 400rpm-5mm/sec의 접합부에서 결함이 존재하고 있음을 확인하였다.

또한, 접합 조건에 따른 파단특성을 살펴보기 위해 각 조건별 파단 형상, 파단면과 미세조직을 관찰해 보았다. 접합강도가 가장 높게 나타난 회전수 1500rpm 이송속도3mm/sec의 조건은 접합계면의 변형이 없으며 접합면이 없고, 전영역에서 딥플과 쉬어립(shear lip)현상이 나타났다. 한편, 동일조건외 회전수 300rpm의 경우 접합계면의 변형이 심하고, 미접합면과 준벽계(quasi-cleavage) 취성파면이 넓게 발생했다. 이는 prove의 회전력이 적고 이에 따른 마찰 입열량이 낮아서 소성유동에 영향을 주기 때문에 접합부의 공공 및 미접합면을 발생시켰다고 사료된다. 일부에서 연성파괴 형태인 딥플(dimple)형상이 발견되었다.

### 6. 결 론

알루미늄 소형선박의 선체건조시 상당한 비중을 차지하는 용융접합으로 인해 발생하는 기술적, 경제적, 환경적 측면의 애로 사항을 해소하기 위해 최근 많은 산업분야에서 적용되고 있는 마찰교반접합(FSW) 기술의 알루미늄 소형선박에 대한 적용 가능성을 본 고에서 살펴해보았다.

이 결과로 마찰교반접합의 알루미늄 소형선박에 적용 확대 보급을 위해서는 다음과 같은 사항이 선결되어야 할 것으로 사료된다.

- 1) 국내 조선산업분야의 FSW기술 적용은 도입 단계에 있으며, 알루미늄선박 관련 규정 및 기준은 국토해양부의 알루미늄선 구조기준과 한국선급의 고속경구조선 규칙 등이 있으나 마찰교반접합을 선박에 적용하기 위한 관련 기준은 전무하여 이에 대한 기준 마련이 필요로 하다.
- 2) 마찰교반접합을 위한 고하중 다축 장비가 개발되어 대형선박에 비해 상대적으로 곡면부가 많이 있는 소형선박의 적용 연구가 같이 연구되어야 된다.
- 3) 알루미늄 선박의 마찰교반접합 적용을 위한 설계 기법 정립과 마찰교반접합의 최적 공정기법의 조속한 확보가 요구된다.
- 4) 선박용 알루미늄합금 5,000계, 6,000계, 이종재 등의 FSW접합부의 접합 조건에 따른 인장시험, 굽힘 시험, 충격시험, 피로강도시험 등 선체 구조부재 적용을 위한 기초실험 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 社団法人 溶接学会, “摩擦攪拌接合, -FSWのすべて-”, 2006 (in Japanese)
2. 高井 英夫, “鉄道車両の摩擦攪拌接合の適用”, 軽金属溶接, 2003 (in Japanese)
3. 態谷 正樹, “航空機の摩擦攪拌溶接の適用”, 軽金属溶接”, 2003 (in Japanese)
4. RINA, “Application of friction stir welding in the shipbuilding industry”, 2000
5. 住友軽金属工業, “アルミニウム合金製小型船舶施工 ハンドブック”, 1989 (in Japanese)
6. 軽金属溶接, “日本におけるアルミニウム合金船構造の軽量化に関する研究”, 1997 (in Japanese)
7. 軽金属溶接, “高速軽量船用新アルミニウム合金”, 1997 (in Japanese)



- 조 제 형
- 1971년생
- 중소조선연구원
- 조선공학
- e-mail: jhcho@rims.re.kr



- 최 준 응
- 1979년생
- 중소조선연구원
- 금속신소재공학
- e-mail: jwchoi@rims.re.kr



- 김 명 현
- 1968년생
- 부산대학교 조선해양공학과
- 구조해석, 피로파괴
- e-mail : kimm@pusan.co.kr