

소형선박용 5000계/6000계 알루미늄합금제의 마찰교반접합 특성 연구

조제형^{*,†} · 김명현^{**} · 최준웅^{*}

^{*}중소조선연구원

^{**}부산대학교 공과대학 조선·해양공학과

FSW Properties of Aluminum alloy 5000/6000 for Small Boat

Je-Hyoung Cho^{*,†}, Myung-Hyun Kim^{**} and Jun-Woong Choi^{*}

^{*}Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Busan 618-270, Korea

^{**}Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

[†]Corresponding author : jhcho@rims.re.kr

(Received January 19, 2014 ; Revised February 13, 2014 ; Accepted February 19, 2014)

Abstract

There are so many difficulties of melt bonding mainly applied for hull construction of a aluminum alloy small boat. For resolving this problem, Friction stir welding(FSW) in non-melting solid state welding Process generally is applied in the transport industry. This paper is studied the joining strength characteristics and macrostructure according to dissimilar aluminium 5000/6000 alloy joining for a small boat applied for this FSW technology. It is reported that difference of joining strength in accordance with the direction of rotation in case of friction stir welding between dissimilar metals(Al/Cu, Al/Fe) is also highly large. In this study, Test is carried out by making the specimen according to the direction of rotation of dissimilar aluminium alloy joining.

Key Words : Friction Stir Welding, Dissimilar aluminium alloy, Joining-characteristics, Macrostructure, Small Boat, Aluminum 5000 alloy, Aluminum 6000 alloy,

1. 서언

최근 국내외적으로 환경보호 및 에너지절감 등에 대한 요구가 높아짐에 따라 친환경, 경량화 소재가 대두되고 있으며, 관공선을 중심으로 경량 알루미늄합금제 소형선박 건조가 증가하고 실정이다.

이러한 소형 선박용 알루미늄합금제는 철강재 선체 소재에 비해 비강도가 높아 경량화에 의한 고속화가 가능하고 높은 내식성이 의한 유지보수가 용이하다. 또한, 폐선시 재활용이 가능하여 환경 친화적이라는 장점이 있다.

한편, 소형 선박에는 5,000계, 6,000계의 알루미늄 합금제가 주로 적용되고 있으며, 선체 조립은 MIG, TIG 등 용융접합으로 이루어진다. 하지만, 이러한 용

융접합은 인력 의존성이 높으며, 특히, 알루미늄선체의 용접 시공은 강재 선체에 비해 고도의 숙련 기술이 필요로 하며, 용융접합시 인체에 유해한 흡, 섬광 등의 발생과 용접 열변형에 의한 품질 저하 등의 작업 애로를 겪고 있는 실정이다.

알루미늄합금제 소형선박의 선체 건조에 주로 적용되고 있는 용융접합의 애로 사항을 해소하기 위해 최근 수송산업 분야에서 널리 적용되고 있는 비용융 고상접합공정인 마찰교반접합(FSW, Friction Stir Welding) 기술을 활용하여 소형 선박용 알루미늄합금제 5000계와 6000계의 이종 합금제 접합에 따른 접합강도특성과 미세조직을 고찰하였다.

또한, 이종 금속(Al/Cu, Al/Fe)간의 마찰교반접합 시 회전방향에 따른 접합강도의 차이가 매우 크다고 보고되고 있으며, 본 연구에서 이점을 고려하여 회전방향

에 따른 시험편을 제작하여 시험을 수행하였다.

2. Al5000/6000 마찰교반접합 시험편 제작

소형 선박용 알루미늄합금제 5000계와 6000계의 마찰교반접합을 통한 강도특성과 미세조직 관찰을 위해 마찰교반접합 장비를 활용하여 시험편을 제작하였다.

본 실험에서 사용된 마찰교반접합 장비는 ㄷ자 형태의 Gantry Frame을 중심으로 접합틀 본체와 각종 Travelling Unit 및 Table이 탑재된 장비이다.

시험편 재료는 선박용 알루미늄합금제인 Al 5083 - H321, Al 6061-T6를 사용하여 이종 마찰교반접합을 수행하였으며, 시험편의 크기는 각 100mm × 300mm × 5mm (L×W×T)로 맞대기 접합을 수행하였다. 시험편 재료의 화학조성과 기계적 물성치를 다음 표에 나타내었다.

마찰교반접합시에는 접합 변수에 따라 기계적 특성이 변화되지만, 본 실험에서는 툴형상, 스펀들의 틸팅각도 3°, 가압하중을 고정하고 회전수, 이송속도 및 툴의 회전방향을 달리하여 시험편을 제작하였다. 시험편 제작시 툴의 회전방향은 시계방향(A)과 반시계반향(B)으로 접

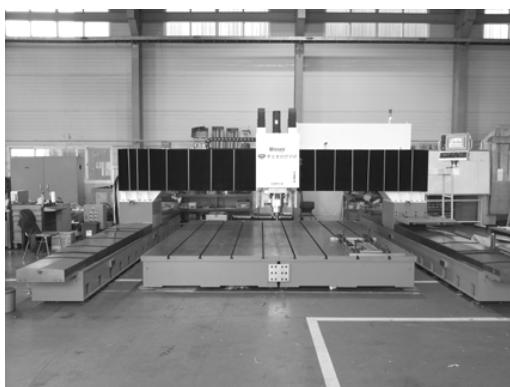


Fig. 1 Friction stir welding system

Table 1 Chemical composition of aluminium alloy for boat

Element Al alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083-H321	0.25	0.11	0.075	0.65	4.07	0.047	0.014	0.011	Bal.
6061-T6	0.5	0.6	0.3	0.15	1.0	0.2	0.15	0.15	Bal.

Table 2 Mechanical properties of aluminium alloy for boat

Division	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
5083-H321	260	340
6061-T6	245	295



Fig. 2 Shape of friction stir welding tool

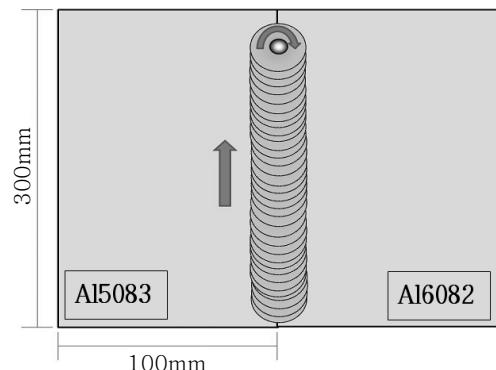


Fig. 3 Process of dissimilar aluminium alloy



Fig. 4 Scene of friction stir welding for aluminium alloy

Welding Speed Rotating Speed	3mm/sec	5mm/sec	7mm/sec
1600rpm			
1900rpm			
2200rpm			

Fig. 5 Clockwise direction(A) of friction stir welding specimen by conditions

Welding Speed Rotating Speed	3mm/sec	5mm/sec	7mm/sec
1600rpm			
1900rpm			
2200rpm			

Fig. 6 Counterclockwise direction(A) of friction stir welding specimen by conditions

합하였다.

또한, 선박용 이종 알루미늄합금제의 마찰교반접합과 기존 미그용접의 접합강도 성능을 비교하기 위하여 알루미늄합금제 5083-H321과 6061-T6를 미그 용접시험편을 제작하였다.

3. 인장강도 특성연구

인장시편은 KS B0801규격에 따라 MCT가공하였다. 또한 인장 시편은 모재의 압연 방향과 동일한 용접의 가공 방향의 수직 방향으로 제작하였다. 인장시편의 치수는 폭이 25mm, 두께 5mm, 표점거리 100mm로 5개씩 제작하여 그 결과 값을 평균하여 정리하였다.

인장시험 장비는 중소조선연구원의 인장시험기 Universal Testing Machine (50T) - UH-F500KNI (SHIMADZU)를 사용하였으며, Shimazu 인장 프로그램을 통하여 3mm/min의 일정 속도로 인장하는 시험을 실시하였다.

또한, 선박용 이종 알루미늄합금제의 마찰교반접합과 기존 접합방식인 미그 용접의 접합강도 성능을 비교하기 위하여 아래와 같이 Al 5083-H321과 Al 6061-T6의 미그 용접을 수행한 시험편을 Fig. 10과 같이 인장시험편을 제작하여 비드가 있는 시험편과 비드를 제거한 시험편의 인장시험을 수행하였다.

Al 5083-H321과 Al 6061-T6의 마찰교반접합의 A TYPE과 B TYPE의 인장시험 결과를 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

이종 알루미늄합금제 마찰교반접합에 있어서 시계방향으로 툴을 회전 이송하면서 접합한 A TYPE 시험편의 인장시험 결과는 이송속도 3mm/sec, 회전수 1,600rpm 조건을 제외한 대부분의 조건에서 206.7 MPa ~ 228.6 MPa 사이의 인장값들을 얻었으며, 접합 조건 중 7mm/sec, 1000~1900 rpm에서 228.6Mpa의 최대 인장결과 값이 나타났다.

반시계방향으로 툴을 회전 이송하면서 접합한 B TYPE

시험편의 인장시험 결과는 대부분의 조건에서 213.2 MPa ~ 232.9 MPa 사이의 인장값을 얻었으며, 최대 인장결과 값은 7mm/sec, 1000~1900rpm 조건에서 나타났다.

선박용 이종 알루미늄합금제의 마찰교반접합에 있어서 회전방향에 따른 시험결과는 이송속도 5mm/sec의 회전수 1900rpm, 2200rpm과 이송속도 7mm/sec의 1600~2200rpm 조건에서 시계방향인 A Type 보다 반시계방향인 B Type의 인장강도값이 약간 높게 나타났으며, 이는 접합 회전방향에 따라 설계 강도에 영향



Fig. 7 Universal Testing Machine (50T)

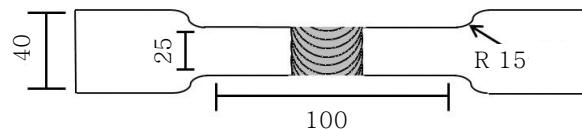


Fig. 8 Shape of tensile test specimen

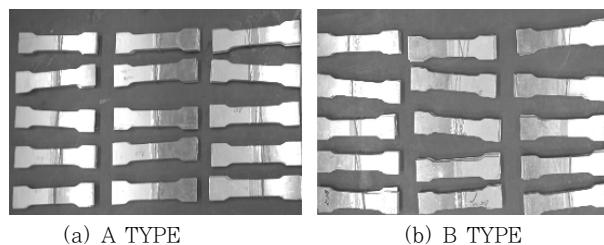


Fig. 9 Tensile test specimen of dissimilar aluminium alloy FSW

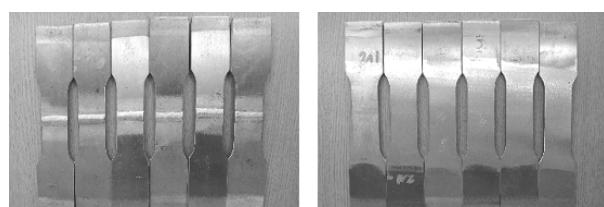


Fig. 10 Tensile test specimen of dissimilar aluminium alloy MIG

Table 3 Tensile test results of A type (6061/5083)

Welding Speed Rotating Speed	3mm/sec (MPa)	5mm/sec (MPa)	7mm/sec (MPa)
1600 rpm	153.3	227.2	216.2
1900 rpm	217.0	218.9	228.6
2200 rpm	217.0	215.1	206.7

Table 4 Tensile test results of B type (5083/6061)

Welding Speed Rotating Speed	3mm/sec (MPa)	5mm/sec (MPa)	7mm/sec (MPa)
1600 rpm	220.8	223.2	232.9
1900 rpm	213.2	223.3	230.5
2200 rpm	217.2	221.4	218.2

을 미치는 만큼의 큰 인장값의 차이를 보이지 않는 것으로 사료된다.

Al 5083-H321과 Al 6061-T6을 MIG로 이종 접합한 시험편의 인장시험 결과는 비드가 있는 시험편이 최대 인장값 186.1 MPa, 비드를 제거한 시험편이 최대 인장값 162 Mpa로 나타났다.

이는 기존에 마찰교반접합의 접합강도가 미그용접의 접합강도보다 10~20% 높다고 알려져 있는 바와 같이 본 실험에서도 마찰교반접합 시험편의 인장강도 결과 값이 미그용접 시험편보다 25~45MPa, 약 15%~25% 높게 나타났다.

4. 매크로조직(macrostructure) 특성 연구

마찰교반접합부의 매크로조직을 관찰하기 위하여 각 시험편을 접합방향에 횡방향으로 절단하였다. 또한, 절단시 열에 의한 조직변화를 방지하기 위하여 냉각수를 충분히 뿌리면서 절단톱으로 시험편을 가공하였으며, 연마와 정마 후 95%H₂O + 2.5%HNO₃ + 1.5%HCl + 1%HF에 10초간 부식한 후 광학현미경으로 관찰하였다.

Fig. 11은 Al 5083-H321과 Al 6061-T6를 시계방향으로 툴을 회전 이송하면서 접합한 A Type 접합부 매크로조직사진이며, Fig. 12는 반시계방향으로 툴을 회전 이송하면서 접합한 B Type 접합부 매크로조직사진이다.

접합 툴의 회전방향에 따른 두가지 조직사진을 살펴보면, 열처리형 Al 6061-T6 소재(밝은색)의 소성 유

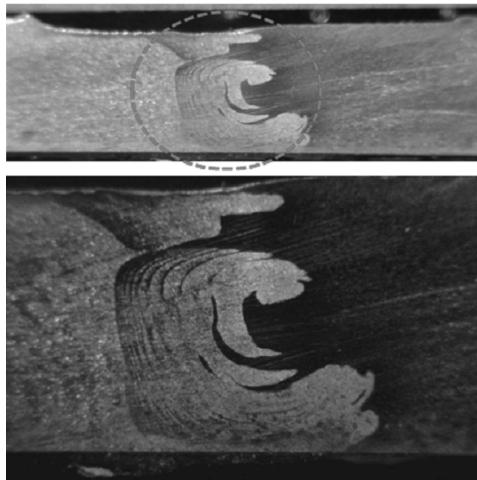


Fig. 11 Macrostructure of A Type joint (7mm/sec, 1900rpm)

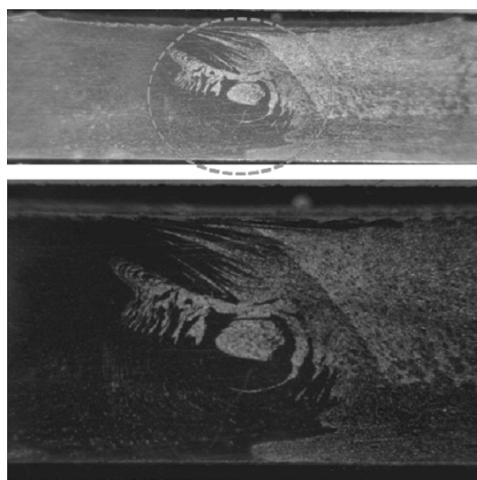


Fig. 12 Macrostructure of B Type joint (7mm/sec, 1900rpm)

동이 Al 5083-H321에 비해 더 많은 소성유동을 관찰할 수 있었다.

이는 비열처리형 Al 5083-H321에 비해 접합시 발생하는 입열에 의한 Al 6061-T6소재가 A5083-H321에 비해 더 연화되어 생기는 현상이라 판단되며, 반시계방향의 B Type이 시계방향의 A Type 보다 가는 물결 모양의 소성유동 면적이 넓게 분포하고 있어 A Type 보다 높은 결속력을 보이는 것으로 사료된다.

한편, Fig. 13과 Fig. 14는 회전방향에 따른 마찰교반접합부의 Advancing면과 Retreating면에 대한 소성 유동이 일어난 곳의 보다 자세한 Al 6061-T6와 Al 5083-H321의 합금간 접합 교반 분포를 관찰하기 위해 전자빔 미세 분석법 (EPMA) 장비를 사용하였다.

Al 5083과 Al 6061은 합금 조성비가 상당히 다른

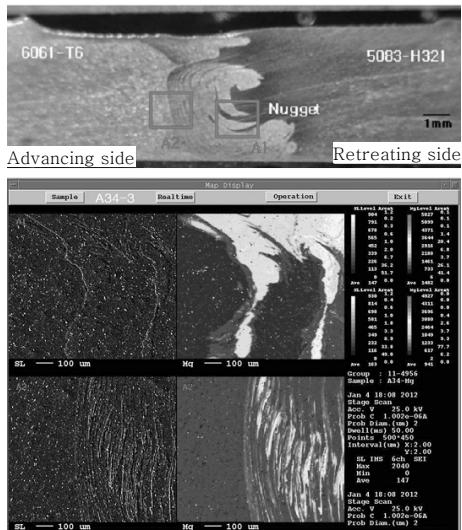


Fig. 13 Mg distribution by EPMA analysis of A Type joint A1, A2 (7mm/sec, 1900rpm)

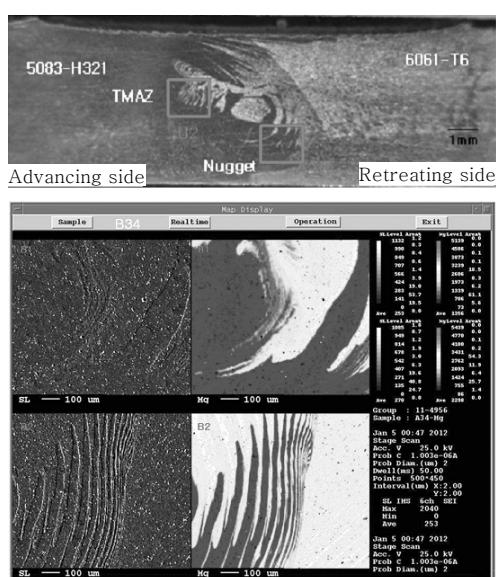


Fig. 14 Mg distribution by EPMA analysis of B Type joint B1, B2 (7mm/sec, 1900rpm)

마그네슘 조성을 이루고 있으며, 일반적인 마찰교반접합은 접합 공정시 소재간 융해되지 않기 때문에 금속간화합물 등의 물질이 발생하지 않는 것이 일반적인 견해이다.

따라서, 접합부의 마그네슘 분포를 Mapping 하여 Al 6061-T6와 Al 5083-H321의 이종 알루미늄 합금 마찰교반접합의 접합부에서 두 재료간 혼합 정도를 확인할 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 파란색에서 붉은색으로 변함에 따라 Mg의 분포가 구별되도록 되어 있다. 접합조건

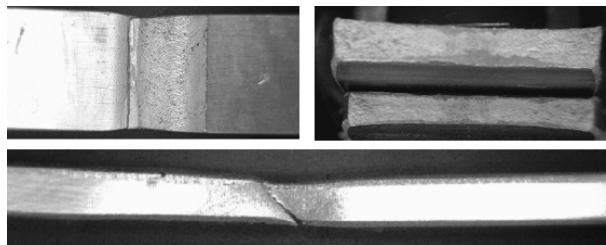


Fig. 15 Fracture appearance of B TYPE tensile specimen (1,900rpm, 7mm/sec)

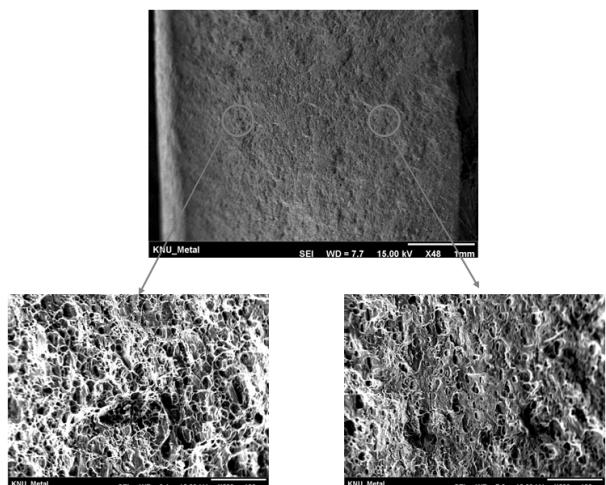


Fig. 16 SEM macrostructure of B TYPE tensile Fracture specimen (1,900rpm, 7mm/sec)

A Type의 경우 Mg의 분포도가 고르게 분포되어 있지 않고 한곳에 뭉쳐져 있는 현상을 확인하였다. 반면 B Type의 경우 완전한 분포는 아니지만 A Type에 비해 고른 분포를 나타내고 있는 것을 알 수 있다

또한, B TYPE (5083/6061)에서 가장 좋은 인장값이 나타난 1900rpm 7mm/sec 조건에서 파단면 조직을 분석하였다.

아래 사진에서 보는 것과 같이 Al 5083-H321에 비해 강도가 약하고 열에 의한 변형이 쉽게 발생하는 Al 6061-T6의 열영향부에서 파단이 일어난 것으로 판단되며, SEM조직에서는 전체적으로 딥풀(dimple)과 쉬어리프(shear lip)현상이 나타나 고른 연성파괴 형태가 관찰되었다.

5. 결 론

최근 수송산업 분야에서 널리 적용되고 있는 비용-용고상접합공정인 마찰교반접합(FSW, Friction Stir Welding) 기술을 활용하여 소형 선박용 알루미늄합금제 5000계와 6000계의 이종 합금제 마찰교반접합시

툴의 회전방향에 따른 접합강도특성과 매크로조직을 고찰하였다.

1) 선박용 이종 알루미늄합금제의 마찰교반접합에 있어서 회전방향에 따른 시험결과는 이송속도 5mm/sec의 회전수 1900rpm, 2200rpm과 이송속도 7mm/sec의 1600-2200rpm 조건에서 시계방향인 A Type 보다 반시계방향인 B Type의 인장강도값이 약간 높게 나타났으며, 이는 접합 회전방향에 따라 설계 강도에 영향을 미치는 만큼의 큰 인장값의 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

2) 기존 마찰교반접합의 접합강도가 미그용접의 접합강도보다 10~20% 높다고 알려져 있는 바와 같이 본 실험에서도 마찰교반접합 시험편의 인장강도 결과 값이 미그용접 시험편보다 25~45MPa, 약 15%~25% 높은 결과 값을 얻었다.

3) 접합 툴의 회전방향에 따른 접합부 미세조직은 열처리형 Al 6061-T6의 소성 유동이 Al 5083-H321에 비해 더 많은 소성유동을 관찰할 수 있었으며, 반시계방향의 B Type이 시계방향의 A Type 보다 가는 물결모양의 소성유동 면적이 넓게 분포하고 있어 A Type 보다 높은 결속력을 보이는 것으로 사료된다.

Reference

1. Je-Hyoung Cho, Myung-Hyun Kim and Jun-Woong Choi : Application of Friction Stir Welding Processes for Aluminum alloy Boat, Journal of KWJS, **30-2** (2012), 31-36 (in Korean)
2. Jun-Woong Choi, Kyeung-Chae Park, Young-Bong Ko : Joining Ability and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded A5052-H112 Alloy, Journal of KWJS, **28-1** (2010), 34-40 (in Korean)
3. Young-Bong Ko, Jun-Woong Choi, Chae-Won Kang, Kyeung-Chae Park : Characteristics of Friction Stir Lap Welded A5052 with Probe Length, Journal of The Korean Institute of Surface Engineering, **42-6** (2009), 294-300
4. Young-Bong Ko, Jun-Woong Choi, Je-Hyoung Cho, Hyen-Woo Kim, Kyeung-Chae Park : The Joining Characteristics of Butt Friction Stir Welded C1020/Al6063, Journal of The Korean Institute of Surface Engineering, **42-5** (2009), 240-245
5. Hideo Takai : Application of friction stir welding to rolling stock body shell, Journal of Light Metal Welding & Construction, **41-5** (2003), 13-17
6. Masaki Kumagai : Application of friction stir welding to airplanes, Journal of Light Metal Welding & Construction, **41-5** (2003), 18-24
7. RINA : Application of friction stir welding in the shipbuilding industry, 2000
8. Japan welding society : Friction stir welding - All of FSW -, 2006



- 조재형
- 1971년생
- 중소조선연구원
- 조선공학, 용접공학
- e-mail: jhcho@rims.re.kr



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



- 최준웅
- 1979년생
- 중소조선연구원
- 금속신소재공학
- e-mail: jwchoi@rims.re.kr