

Laser-FSW Hybrid 접합기술을 적용한 이종재료(Al6061-T6/SS400) 접합부의 접합성 및 기계적 특성에 관한 연구

방한서* · 방희선*[†] · 김현수** · 김준형** · 오익현*** · 노찬승****

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

**조선대학교 대학원 선박해양공학과

***한국생산기술연구원 동력부품센터

****조선이공대학 선박해양·기계과

A Study on the Weldability and Mechanical Characteristics of Dissimilar Materials Butt Joints by Laser Assisted Friction Stir Welding

Han-Sur Bang*, Hee-Seon Bang*[†], Hyun-Su Kim**, Jun-Hyung Kim**, Ik-Hyun Oh*** and Chan-Seung Ro****

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

**Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

***Automotive Components Center, Korea Institute of Industrial Technology(KITECH), Kwangju 500-901, Korea

****Dept. of Naval Architecture & Mechanics, Chosun University College of Science and Technology, Kwangju 501-744, Korea

[†]Corresponding author : banghs@chosun.ac.kr

(Received August 9, 2010 ; Revised September 1, 2010 ; Accepted December 6, 2010)

Abstract

This study intends to investigate the weldability and mechanical characteristics of butt weld joints by LAFSW for dissimilar materials (Al6061-T6 and SS400). At optimum welding conditions, the tensile strength of dissimilar materials joints made by FSW is found to be lower than that of LAFSW. Due to the increase in plastic flow and formation of finer recrystallized grains at the TMAZ and SZ by laser preheating in LAFSW, the hardness in LAFSW appeared to be higher than that of FSW. Compared with FSW, finer grain size is observed and elongated grains in parent metal are deformed in the same direction around the nugget zone in TMAZ of Al6061-T6 by LAFSW. Whereas, at weld nugget zone, coarse grain size is appeared in LAFSW compared to FSW, which is owing to more plastic flow due to laser preheating effect. In dissimilar materials joints by LAFSW, ductile mode of fracture is found to occur at Al6061 side with fewer brittle particles. Mixed mode of cleavage area and ductile fracture is observed at SS400 side.

Key Words : LAFSW(Laser assisted FSW), Dissimilar materials butt joints

1. 서 론

범세계적으로 강력해진 환경규제로 인하여 21세기를 맞이한 현대사회의 각종산업분야에서 최대의 핵심 과제는 “환경과의 조화-녹색성장”일 것이다. 그중에서 이산화탄

소 증가로 인한 지구온난화는 심각한 문제로 지적되고 있다. 이러한 국제적 규제의 대응 및 문제 해결 방안으로 철도차량, 자동차, 선박, 항공기 등의 수송기계분야에 있어서는 이산화탄소 배출의 삭감에 기여하는 기술로서 엔진효율 및 연소방식의 개선, 수송기계의 중량저감, 동력전달의 효율화 등이 개발 및 적용되어지고 있

다. 특히, 수송기계 차체의 중량은 연비 및 이산화탄소 배출에 직접적인 영향을 미치고 있어 차체에 경량 소재 재료들의 적용에 대한 요구 및 관심이 빠르게 증가되고 있는 실정이다. 알루미늄합금의 경우 강에 대비하여 열전도도는 4배, 선팽창계수는 약 2배, 응고수축률은 1.5 배로서 이러한 물리적 특성이 상이한 이종재료(Al6061, SS400)간에 기존의 접합방법으로 리벳팅 및 바이메탈을 이용한 용융 용접법들이 적용되고 있으나 이에 소요 공정 시간의 증가 및 용접열에 의한 용접결함(변형, 잔류응력, 응고균열, 기공, 산화 등) 뿐만 아니라 금속간 화합물생성(AlFe₃)으로, 접합부의 강도저하로 건전한 접합부를 얻기가 어렵다.

따라서 본 연구는 저밀도이면서 비강도가 우수한 석출경화형 알루미늄 합금(Al6061-T6)과 일반 구조용압연강재로 우수한 가공성 및 강도를 지닌 Mild Steel (SS400) 이종재료에 Nd:YAG Pulse Laser(600W)와 FSW를 결합한 Hybrid 접합기술을 적용하여 접합을 수행하였으며, 아울러 기계적 특성(인장시험, 경도 시험) 및 금속학적 특성(광학현미경, SEM, EDX)을 파악하여 이종 재료의 접합성을 평가하고 수송기계 분야의 적용성을 고찰하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용한 재료는 열처리 석출경화형 합금인 Al6061-T6 및 일반구조용강 SS400을 시험편으로 사용하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 각 시험편의 제원은 길이 (L)=200mm, 폭(B)=100mm, 판두께(t)=3mm로 선정하여 접합면은 밀링 가공하여 제작하였다. 각 시험편의 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 1 및 2에 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 접합방법 및 조건

일반적으로 이종재료의 마찰교반접합시 접합부에 영

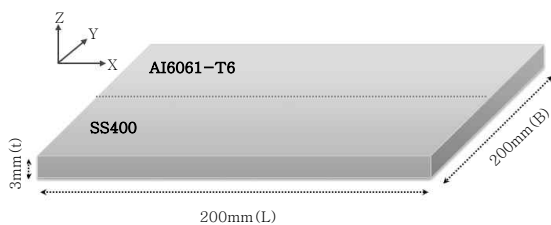


Fig. 1 Configuration of welded specimen

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical composition (wt%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Al6061-T6	0.70	0.64	0.28	0.08	0.37	0.19	0.01	0.05	0.05
SS400	C		Si		Mn		P		S
	0.1438		0.009		0.664		0.0129		0.0039

Table 2 Mechanical properties of Al6061-T6 and SS400

Material	Y.S(MPa)	T.S(MPa)	EI(%)
Al6061-T6	300	330	13
SS400	312	450	37

향을 미치는 주요공정 인자로는 접합 Tool의 회전속도, 이송속도, Pin의 삽입깊이 및 위치이다. 본 연구에서는 Laser를 보조열원으로 철강(SS400) 판재에 조사함으로써 물리적 특성이 상이한 접합부의 소성유동을 증가시켜 접합성을 높이는 방법으로 Laser의 출력, Laser 초점 위치, Laser 초점 심도, 보조가스의 유량 등을 주요 공정인자로 하여 접합특성을 고찰하였다. Tool의 핀 위치 및 회전방향은 Fig. 2와 같이 핀을 주로 알루미늄합금(Al6061-T6)측에 삽입 되도록 위치하였으며, 철강이 전진측(Advancing side), 알루미늄합금이 후진측(Retreating side)으로 하여 접합을 수행하였다. 또한, 주요 접합부 비드형상 및 접합 공정인자를 Fig. 3 및 Table 3에 나타내었다^{1,2)}.

실험에 사용된 틀의 재질은 WC-Co 초경합금(Co12%)로 핀의 형상은 길이가 2.65mm, 각각 상하부 직경이 4mm, 6mm인 Smooth frustum type이고, Shoulder는 직경이 18mm, 3°의 오목각을 주어 제작하였다.

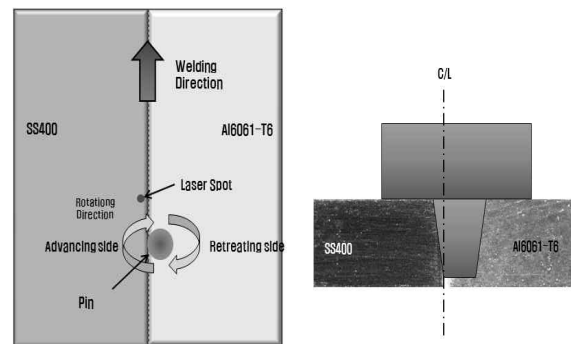


Fig. 2 Schematics of the tool position

Rotation speed (rpm)	Travel speed (mm/s)	Bead shape	Macro
300	1.6		
400	1.4		
500	2.0		

Fig. 3 Bead shape of LAFSW weldments

Table 3 Welding condition of specimen for Laser-FSW hybrid Welding

Welding condition		Values
Nd:YAG Pulse laser welding	Laser power	460W
	Pulse width	1ms
	Lens focal length	Below 1mm on surface
	Laser position	1 ~ 3 mm (at SS400)
	Insert angle of laser	45°
	Oscillation wave length	1.064μm
	Number of outputs per second	230 pps
FSW	Rotation speed	300 ~ 600 rpm
	Travel speed	0.8~2.4mm/s
	Insert depth of pin	2.65 ~ 2.75
	Tilt angle	2°
Laser-FSW Distance = 10 (mm)		
Direction of rotation = CW		
Leading condition = Laser leading		
Shield gas flow (Ar) = 0, 4, 20 l/min		
Room temperature = 20°		

2.2.2 기계적 특성 시험

Laser-FSW Hybrid(이하 LAFSW) 접합부의 강도 평가를 위해 KS B 0801- 13B호 규격으로 인장시험을 제작하였으며, 인장속도를 2mm/min로 하여 인장시험을 수행하였다.

경도시험은 135°의 다이아몬드 피라미드 압자를 이용한 비커스경도 시험기를 사용하여, 하중 500gf, 하중시간 10sec 조건으로 상부표면으로 부터 0.75mm, 1.75mm, 2.75mm 지점에서 0.25mm 간격으로 경도를 측정하였다.

2.2.3 접합부의 미세조직 관찰

접합시험편의 미세조직, 상거동 및 파괴특성을 파악하기 위해 접합부의 횡단면(Cross Section) 및 파단면을 광학현미경(Optical Microscope)과 주사전자현미경(SEM)을 이용해 관찰하였으며, 교반으로 인한 접합부의 성분분석을 위해 EDX 측정을 하였다. 광학현미경을 통한 접합부의 조직을 관찰하기 위해 시편을 미세 연마 후 Al6061-T6 합금을 질산(Nitric acid) 2.5ml, 불산(Hydro fluoric acid) 5ml, 염산(Hydro chloric acid) 5ml, 증류수 100ml 혼합용액을 이용하여 80sec 동안 에칭을 하였으며, SS400은 질산(Nitric acid) 5ml, 에탄올 100ml를 혼합시킨 나이탈 용액을 이용하여 45sec 동안 에칭 후 증류수 세척하여 미세조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부의 기계적 특성 평가

Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 FSW 및 LAFSW 접합시험편에서 각 접합변수에 따른 인장응력의 결과를 나타낸 것이다. LAFSW의 경우 단독 FSW 접합과 비교하여 동일한 Rotation speed에서 더 높은 Welding speed에 우수한 인장강도를 나타냄을 알 수 있다. 특히, 300rpm-1.6mm/s 및 400rpm-1.4mm/s에서는 알루미늄 합금의 모재강도를 상회하는 인장강도를 얻을 수 있다.

Fig. 5는 LAFSW 접합부의 인장강도가 가장 높게 나타난 Rotation speed가 400rpm, Travel speed가 1.4mm/s일 때의 경도값을 나타낸 것이다.

후진측(Retreating side)에 위치한 열처리 석출경화 합금(Al6061-T6)은 열영향에 의한 국부적인 소둔(Partial annealing)에 따른 석출경화 효과가 감소되어 경도가 하락됨을 알 수 있다. 특히, TMAZ 및 SZ의 경도는 HAZ에 비해 높으며, 이는 기계적 영향에 의

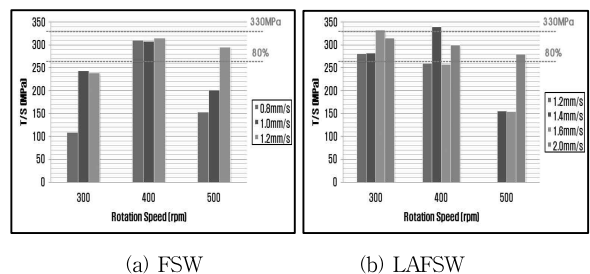


Fig. 4 Relation between the rotation speed and tensile strength

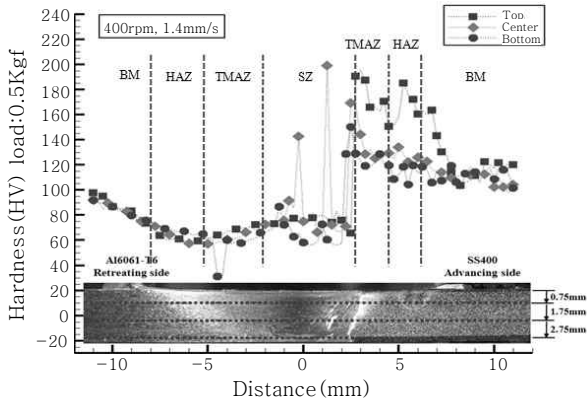


Fig. 5 Hardness distribution by Laser-FSW hybrid welded joints

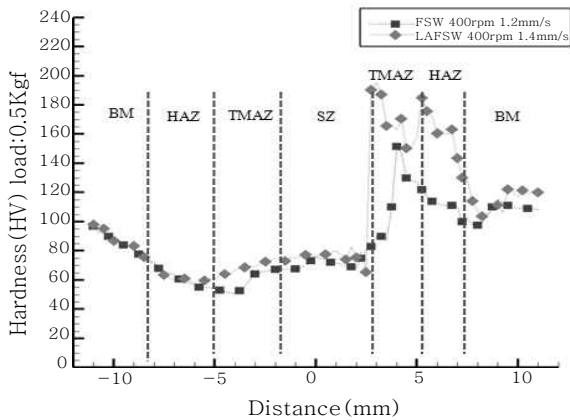


Fig. 6 Comparison of hardness distribution by FSW and Laser-FSW hybrid welded joints

해 조직의 미세화에 기인한 것으로 사료된다. 그리고 철강(SS400)측의 접합부의 경도 양상은 접합부 근처에서 모재와 비교하여 높게 나타난 것은 레이저열원 및 마찰열에 의한 상변태와 가공경화의 복합적 효과의 결과로 사료된다. 알루미늄 합금부에 경도가 급상승하는 것은 교반접합 시 알루미늄합금 기지 조직내부에 철강이 혼입되어 나타난 것이다.

Fig. 6은 각 접합조건에 따른 LAFSW 접합부 0.75mm 지점의 경도 분포를 나타낸 것이다. 알루미늄 합금측은 모재에 대비하여 경도가 감소하고 철강은 접합부 근방에서 모재보다 경도가 상승하는 전체적인 양상은 동일하나 LAFSW 접합부의 경도는 FSW와 비교하여 레이저 열원에 따른 접합부의 입열 증가에 따라 알루미늄 합금의 TMAZ, SZ 및 철강 측의 접합계면에서는 소성 유동의 증가에 따른 미세조직의 세립화 및 가공경화로 인해 경도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

3.2 접합부의 미세조직

Fig. 7 (a), (b)는 LAFSW 접합부 및 FSW 접합부의 매크로 단면사진을 나타낸 것이다. (a), (b) 모두에서 알루미늄 합금측은 일반적인 마찰교반 접합부의 형태인 HAZ, TMAZ, SZ가 관측되었고, 철강측은 편이 삽입된 접합계면 근방에서 소성유동에 의한 소성변형이 관측되었다. 반면에 접합계면 하부에서 LAFSW 접합부는 완전히 접합이 되었음을 확인할 수 있었지만, FSW 접합부에서는 접합이 되지 않았음을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 LAFSW 접합부 및 FSW 접합부의 각각의 위치별 마이크로 조직을 나타낸 것이다. HAZ

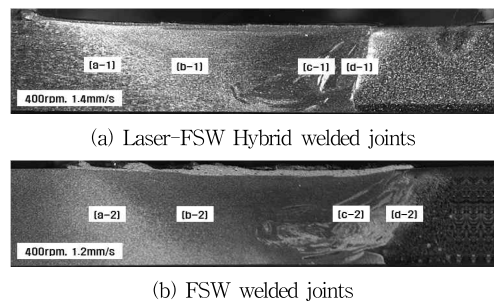


Fig. 7 Cross-sectional macrostructures of Laser-FSW hybrid and FSW welded joints

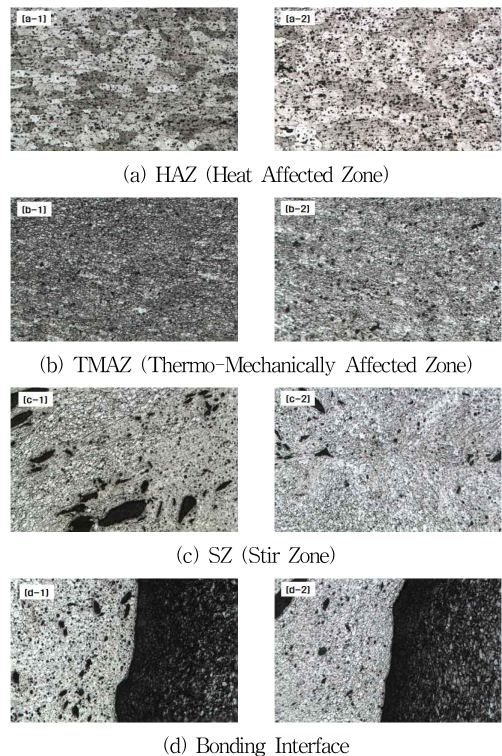


Fig. 8 Microstructures of Laser-FSW hybrid and FSW welded joints (10x)

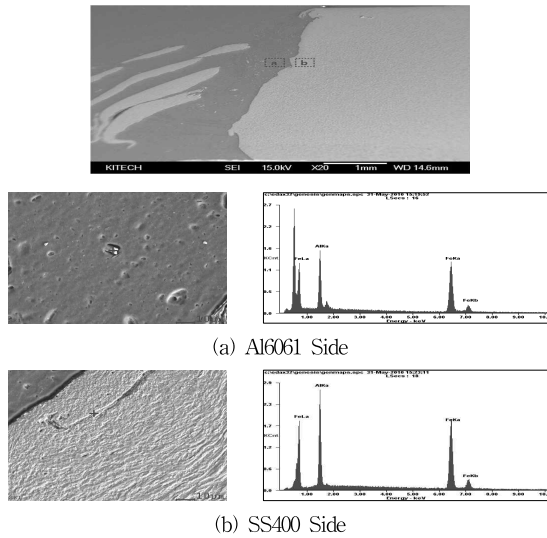


Fig. 9 SEM and EDX results of dissimilar materials welded joints by LAFSW

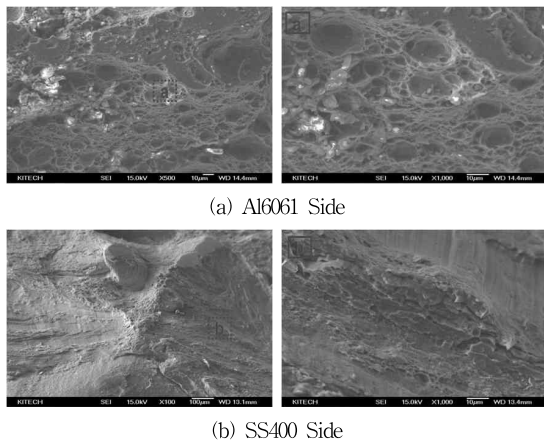


Fig. 10 Fractured specimens after tensile test for the LAFSW welded joints

및 TMAZ에서는 LAFSW 접합부가 FSW 접합부 보다 작은 크기의 결정립 관찰되었고, 특히 TMAZ는 기계적 영향에 따른 소성변형으로 인해 일정한 방향성을 가진 연신된 조직이 관찰되었다. 동적 재결정 영역인 SZ는 LAFSW 접합부의 경우 FSW 접합부에 비해 극심한 소성변형이 나타난 미세 재결정 조직이 관찰되었다. 이는 철강부에 조사된 레이저 열원의 열영향이 소성유동을 증가시킨 결과로 판단된다. 접합계면 (Bonding interface)의 경우 철강측에서 LAFSW 접합부가 FSW 접합부보다 펄라이트 조직이 넓게 분포 하였으며 더 미세한 결정립 형성이 관찰되었다.

Fig. 9는 400rpm, Travel speed 1.4mm/s 일때의 LAFSW 접합부 횡단면의 SEM 측정 및 EDX 분석결과를 나타낸 것이다. 접합계면 상부근방에서 금속

간 화합물이 관찰되었다는 보고가 있으며³⁾, 본 실험의 접합계면에 Al6061 및 SS400의 기지내에 혼입된 스틸 및 알루미늄의 탈락부의 성분 분석결과 Al(20Wt%), Fe(80Wt%)가 검출 되었으며 이는 Fe_3Al 계의 금속간 화합물 일 것으로 추정된다⁴⁾.

Fig. 10은 400rpm, Travel speed 1.4mm/s 일때의 LAFSW 접합부의 인장시험 파단면을 SEM 분석한 것이다. 파단은 알루미늄 합금측의 접합계면에서 발생되었음이 확인되었고, Al6061측은 딩플형상의 연성 파괴가 일어났음을 알 수 있고, SS400측은 벽계파괴인 취성파괴가 일어났음을 알 수 있다. 또한 Al6061측의 파단부에서 관찰된 구형형상의 파편들은 철강으로 분석되었다.

4. 결 론

1) LAFSW의 경우 단독 FSW 접합과 비교하여 동일한 Rotation speed일 경우 더 높은 Welding speed에서 우수한 인장강도를 나타내었다.

2) LAFSW 접합부의 경도는 FSW와 비교하여 알루미늄 합금측은 모재에 대비하여 경도가 감소하고 철강은 접합부 근방에서 모재보다 경도가 상승하는 전체적인 양상은 동일하나 레이저 열원에 따른 접합부의 입열 증가에 따라 알루미늄 합금의 TMAZ, SZ 및 철강 측의 접합계면에서는 소성유동의 증가에 따른 미세조직의 세립화 및 가공경화로 인해 경도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

3) 본 실험의 접합계면에 Al6061 및 SS400의 기지내에 혼입된 철강 및 알루미늄의 탈락부의 EDX 성분 분석결과 Al(20Wt%), Fe(80Wt%)가 검출 되었으며 이는 Fe_3Al 계의 금속간화합물일 것으로 추정된다. 또한, 인장파단의 SEM 분석결과 알루미늄 합금측의 접합계면에서 파단이 되었고, Al6061측은 딩플형상의 연성파괴, SS400측은 벽계파괴인 취성파괴가 되었음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-2006-531-D00054).

참 고 문 헌

1. M. Merklein, A.Giera : Laser Assisted Friction Stir

- Welding of drawable steel-aluminium tailored hybrid, International, Journal of Material Forming (2008)
2. Hidetoshi Fujii, Takahiro Tatsuno, Takuya Tsumura : Hybrid Friction Stir Welding of Carbon Steel Material Science Forum, 580-582 (2008), 393-396
 3. K.Kimapon, T.Watanabe : Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel, Welding journal, (2004), 277-282
 4. 천창근, 김특기, 김홍주, 장용성 : 마찰교반용접을 이용한 알루미늄합금과 아연도금강의 이종접합, RIST 연구논문집, 22-4 (2008), 254-258 (in Korean)