



Al/Fe 이종재의 마이크로 마찰교반 맞대기용접 적용성 평가

유현정^{*,**} · 안영남^{***} · 이 성^{*} · 현승균^{**} · 김철희^{*,****,†}

^{*}포틀랜드주립대학 기계재료공학과

^{**}인하대 신소재공학과

^{***}현대로보틱스 용접솔루션개발팀

^{****}한국생산기술연구원 용접접합그룹

Review and Feasibility Study on Micro Friction Stir Welding of Al/Fe Butt Joints

Hyeonjeong You^{*,**}, Youngnam Ahn^{***}, Sung Yi^{*}, Soongkeun Hyun^{**}, and Cheolhee Kim^{*,****,†}

^{*}Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, OR 97229, USA

^{**}Department of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

^{***}Welding Solution Development Team, Hyundai Robotics, Gyeonggi-do, 13630, Korea

^{****}Joining R&D Group, KITECH, Incheon, 21999, Korea

[†]Corresponding author: chkim@kitech.re.kr

(Received March, 3, 2021; Revised April 12, 2021; Accepted April 23, 2021)

Abstract

In the automobile industry, there is an increasing demand for Al/Fe dissimilar metal joining. Friction stir welding (FSW) is an efficient solid-state welding method to achieve high-quality Al/Fe dissimilar metal welding. Here, we reviewed the previous studies on butt FSW of thin Al/Fe sheets and conducted feasibility tests to investigate the applicability of micro FSW with a base material thickness of 1 mm or less. Most of the past literature, except for one study that adopted 1.12 mm-thick specimens, has worked with a base metal thickness of 1.5 mm or more. Selecting appropriate parameters can lead to a weld strength that is more than 90% of the base metal strength. Through feasibility tests on 2 mm-thick specimens, we could derive the welding conditions to obtain sound welds and the required joint strength. An adequate range (0.5-0.75 mm/rev) of advance per revolution was recommended to ensure the weld strength. A feasibility test on 1 mm-thick specimens revealed the possibility of melting of Al base metal during FSW of 1 mm-thin sheets; moreover, a low tool rotation speed was found to be crucial in ensuring the weld joint strength. The maximum weld strength for 1 mm-thick specimens was 200 MPa, which is 117% of the required weld strength.

Key Words: Dissimilar metal welding, Aluminum alloy, Steel, Micro friction stir welding, Joint strength

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 슬더(shoulder)와 프로브(probe)로 구성된 경질의 비소모식 회전 툴을 모재에 삽입하여 마찰을 이용하여 모재의 변형 저항을 낮추고 고상에서 용접하는 방법이다¹⁾. 마찰교반용접은 알루미늄에 사용될 경우 우수한 용접 특성이 확인되었으며^{2,3)}, 고강도 철강소재⁴⁾와 이종재료⁵⁾의 용접으로의 응용연구도 확대되고 있다. 마찰교반

용접을 이용한 다양한 솔루션 개발을 위해서 전용 장비 개발⁶⁾, 리필 공법⁷⁾, 용접깊이 유지 제어기법^{8,9)}, 하이브리드 용접기법^{10,11)}, 해석 기법¹²⁾ 등에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

자동차의 경량화를 통한 연비 향상을 위해 철강재보다 비강도가 높은 알루미늄합금의 적용이 확대되고 있어 기존 강재와 알루미늄합금의 이종재료 용접 필요성이 증가하고 있다. Al/Fe의 이종재료 접합부에서는 금속간 화합물의 생성^{13,14)}, 전위차 부식^{15,16)} 발생 등으로 인해 접착이나 기계적 접합 등의 비용접기법이 선호

된다¹⁷⁾. 그러나 비용접기법 보다 용접 방법이 생산성이 더 높기 때문에 다양한 용접기법을 Al/Fe의 이종재료 접합부에 적용하기 위한 연구가 진행되었으며, 용융용접보다 금속간 화합물의 형성이 적은 FSW가 양산 자동차 부품에 사용되었다¹⁸⁾.

자동차 부품에서 테일러드 블랭크(tailored blank)는 자동차생산공정에서 동종이나 이종 소재/두께의 판재를 미리 용접한 후 성형 공정 등을 거쳐서 부품을 생산하는 방식으로 주로 맞대기 이음부를 사용한다¹⁹⁾. Al/Fe 이종재료의 맞대기 교반부에 FSW를 적용할 때는 주로 Al 측에 프로브를 삽입하여 공정의 온도와 금속간 화합물 생성을 최소화한다²⁰⁻²²⁾. 다양한 자동차 부품에 FSW 적용을 검토하면서 기존보다 얇은 판재에 대한 적용 필요성이 제기되고 있으며, 특히 모재의 두께가 1 mm 이하인 경우에는 마이크로 FSW²³⁻²⁶⁾라고 불리고 있는데 Al/Fe 이종재료 적용에 대한 관심이 높다. 최근 겹치기 FSW에서는 툴 경로 제어를 이용하여 0.7 mm 두께의 박판 부품에 FSW 공정을 개발한 사례가 있었으나²⁷⁾, 맞대기 용접의 경우 두께 1 mm 이하인 경우에 대한 연구수행 결과가 확인되지 않는다. 본 연구에서는 기존의 Al/Fe 박판 이종소재의 맞대기용접에 FSW를 적용한 사례를 분석하고, 1 mm와 2 mm 두께를 가지는 맞대기 교반부를 대상으로 마이크로 FSW 공정의 적용성 평가를 수행하였다.

2. Al/Fe 마이크로 FSW 맞대기용접기술 동향

FSW 공정에서는 비소모성의 원통형 툴을 사용하는 데 툴과 모재가 접촉하는 부분은 솔더와 프로브로 구성된다. 이중 솔더는 접합되는 재료 표면에 대해 하중 및 열을 가하고 프로브는 용접하고자 하는 소재 두께의 80%에서 90%까지 삽입되어 원하는 용접 깊이까지 재료를 교반한다. 고강도 재료일수록 소재가 변형에 저항하는 힘이 커져 용접시스템의 변형을 야기하고 지시한 깊이로 프로브를 삽입하기 위해서는 하중을 제어하거나 별도의 제어 방법을 채택하여야 한다²⁸⁾. 두께가 얇은 소재일수록 삽입 깊이에 따른 용접 품질의 차이가 발생하고 깊이의 제어가 정밀하게 이루어져야 한다. 삽입 깊이가 부족할 경우 유동의 부족으로 인해 키싱본드(kissing bond)와 용입부족(lack of penetration)이 발생할 수 있으며²⁶⁾, 삽입 깊이가 너무 깊을 경우에는 과도한 하중이 인가되어 재료가 가장자리로 밀리면서 표면에 연속적인 플래쉬(flash)를 형성하고 교반부가 얇아지는 현상이 발견된다. 모재가 박판의 경우 교반부 두께 감소가 하중전달 면적에 주는 영향이 크므로 접합 강도에 큰 영향을 줄 수 있다. 또한 박판에서 과도한

삽입은 소재의 유동성을 지나치게 야기하여 기공(void)과 터널(tunnel) 결함 등을 발생시킨다고 보고되었다^{29,30)}. 따라서 마이크로 FSW 공정에서는 정확한 삽입 깊이 유지와 아주 좁은 공정변수영역 내에서의 용접조건 선정이 필요하다. 3 mm 이하의 두께를 가지는 Al/Fe 이종재의 맞대기 FSW 공정에 대한 선행연구의 공정조건들을 정리하여 Table 1에 나타내었다. 여기에서 오프셋(offset)은 툴의 프로브 직경 중 강제쪽으로 삽입된 길이를 의미한다. 즉, 오프셋이 0.1 mm일 경우에는 프로브 전체 직경 중 0.1 mm 만 강제쪽으로 삽입된다.

Al/Fe 이종재료 FSW에서는 강제와 툴 사이의 마찰이 크게 발생하므로 초기논문²⁰⁾을 제외하고는 열처리 강이 아닌 모두 초경 소재로 제작된 툴을 사용하였다. 툴을 삽입할 때 프로브의 중심과 용접라인을 일치시키지 않고 Al 합금 쪽으로 오프셋을 주고 강제 쪽으로는 프로브 직경의 30% 이내로만 오버랩하여 열 발생을 감소시키고 Al 모재의 용융과 금속간 화합물의 생성을 억제하였다. 툴의 회전 방향에 대해서 강재를 회전의 앞부분(advancing side, AS)에 배치하고 Al 합금을 뒤쪽(retreating side, RS)에 배치하여 Al을 소성유동이 발생한 영역에서 교반이 용이하도록 하여 교반부 균열을 방지한다²⁰⁾. 솔더 직경은 소재 두께가 얇아질 때 줄어드는 경향이 있으며, 그룹 1,2에서는 모재 두께의 5-7.5배 직경의 솔더를 사용했으며, 그룹 3에서는 모재 두께의 8-16배 직경인 솔더를 사용했다. 프로브의 직경은 대체로 4-6 mm의 범위에 있으며, 프로브 길이는 대부분의 공정 조건에서 소재 두께 대비 80%에서 90%인 것을 사용했다. 공정 변수로는 회전속도를 250-1800 rpm, 용접속도가 23.5-480 mm/min으로 넓은 범위에서 평가되었으며, APR(Advance Per Revolution)도 0.025-0.3 mm/rev로 상당히 넓은 범위를 가진다. 접합강도는 각 논문에서 나타낸 여러 가지 실험 조건 중 가장 우수한 인장 강도를 갖는 값으로 나타내었으며, 괄호 안의 값은 알루미늄 모재 강도 대비 교반부 인장강도 백분율을 나타낸 것이다. 모든 연구 결과에서 모재 대비 인장강도가 70% 이상의 값을 가지고 있다.

3. 사용 재료 및 실험 방법

1 mm 두께와 2 mm 두께 맞대기 FSW 모두 강제로는 DP 780 소재를 사용하였으며, Al 소재로는 1 mm 두께에서는 5052-H32, 2 mm 두께에서는 5083-O를 사용하였다. 모재에 대한 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2에서 Table 4에 표기하였다.

Table 1 Summary of FSW data on thin Al/Fe butt joints

(unit: mm if not specified)

| Gr. | Base Material | | | Tool | | | | | Parameters | | | | | Strength (MPa) | Ref. |
|-----|---------------|------------|------|-----------|----------|-------|-------|------|------------|------------|---------------|----------------|----------|----------------|------|
| | AS* side | RT** side | T | Mater. | Shoulder | | Probe | | Tool | | WS*5 (mm/min) | APR*6 (mm/rev) | Offset*7 | | |
| | | | | | D | face | D | L | TA*3 (°) | RS*4 (rpm) | | | | | |
| 1 | A441 steel | 1100 | 3 | WC | 20 | CC*9 | 4 | 3.4 | 2 | 800 | 63 | 0.079 | 0.7 | 80 (90%)*8 | 29) |
| | STS 304 | 5050 | 3 | WC | 20 | N/A | 4 | 2.75 | 2 | 500 | 80 | 0.16 | 0.5 | 175 | 31) |
| | HSLA | 5052 | 3 | WC | 20 | FL*10 | 5 | 2.7 | 1.5 | 500 | 45 | 0.09 | 0.6 | 188 | 32) |
| | STS 304 | 6061 | 3 | WC | 15 | N/A | 3.5 | 1.8 | 2.5 | 710 | 30 | 0.042 | 0-0.7 | 260 (73%) | 33) |
| | STS 304 | 6061 | 3 | WC-Co 12% | 18 | N/A | 6 | 2.7 | 3 | 300 | 48 | 0.16 | 0.8 | 244 (78%) | 34) |
| | STS 304 | 6061 | 3 | WC-Co 12% | 18 | N/A | 6 | 2.7 | 3 | 300 | 48 | 0.16 | 0.8 | 290 (93%) | 34) |
| | Q2351 | 6061 | 3 | N/A | 20 | N/A | 6 | 2.7 | N/A | 950 | 23.5 | 0.025 | 0.8 | 196 | 35) |
| | Mild steel | 7075 | 3 | N/A | 12 | N/A | 4 | 2.9 | N/A | 500 | 100 | 0.2 | 0.3-0.4 | 333 | 21) |
| | St52 | 5186 | 3 | N/A | 18 | N/A | 4 | N/A | 3 | 355 | 56 | 0.158 | 0.2 | 246 (89%) | 36) |
| 2 | STS 304 | Pure | 2.5 | WC | 15 | N/A | 4 | N/A | 2 | 1000 | 50 | 0.05 | 0-0.8 | 61 (82%) | 37) |
| | SS 400 | 5083 | 2 | Steel | 15 | N/A | 2 | 1.9 | N/A | 250 | 25 | 0.1 | 0.2 | 237 (86%) | 20) |
| | 5754 | Mild steel | 2 | WC | 20 | N/A | 4 | 1.8 | 2 | 750 | 30 | 0.04 | 0.2 | 222 (92%) | 38) |
| 3 | TRIP steel | 6061 | 1.5 | WC-Co 10% | 12.7 | N/A | 3.91 | 1.2 | N/A | 1800 | 90 | 0.05 | 0.325 | 240 (85%) | 39) |
| | DP 600 | 6181 | 1.5 | WRe25 | 13 | CC | 5 | 1.35 | N/A | 1600 | 480 | 0.3 | 1.5 | 211 | 40) |
| | HSS | 6181 | 1.5 | WRe25 | 13 | CC | 5 | 1.35 | N/A | 1600 | 480 | 0.3 | 1.5 | 200 | 40) |
| | Mild steel | 6016 | 1.12 | WC-Co | 18 | CC | 7.33 | 0.75 | 1 | 900 | 250 | 0.278 | 0.665 | 210 (85%) | 41) |

* AS: Advancing side; ** RT: Retreating side; *3: Tilting angle; *4: Rotation speed; *5: Welding speed; *6 APR: Advance per revolution; *7 Offset: Probe overlap depth to steel side; *8: Tensile strength relative to Al alloy; *9 CC: Concave; *10 FL: Flat

Table 2 Chemical compositions of Al base materials (wt %)

| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 5052-H32 | 0.131 | 0.289 | 0.036 | 0.083 | 2.937 | 0.190 | 0.023 | 0.015 | Bal. |
| 5083-O | 0.087 | 0.269 | 0.029 | 0.669 | 4.678 | 0.089 | 0.023 | 0.015 | Bal. |

Table 3 Chemical compositions of steel base material (wt %)

| | C | Si | Mn | P | S | Fe |
|-------------|--------|-------|-------|--------|--------|------|
| DP780 steel | 0.0629 | 0.977 | 2.226 | 0.0082 | 0.0008 | Bal. |

Table 4 Mechanical properties of base materials

| | Ultimate strength (MPa) | Yield strength (MPa) | Elongation (%) |
|------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| Al5052-H32 | 240 | 186 | 7 |
| Al5083-O | 316 | 143 | 23 |
| DP780 | 839 | 532 | 20 |

FSW 전용으로 제작된 3축 직교시스템 마찰교반용 접기를 사용하였으며(화천기공, F1300), 용접 틀의 상세 정보는 Table 5에 표기하였다.

동일 두께의 소재를 볼트 체결식 가압지그로 맞대기 조인트로 고정하였으며, 강재를 AS 쪽에 배치하였다 (Fig. 1). 틀은 용접 방향으로 3도 기울여 프로브가 강재 쪽에 0.1 mm 만큼 오버랩되도록 삽입하였다.

틀 회전속도는 200-400 rpm으로 가변하였으며, 용접속도는 100-400 mm/min으로 가변하면서 평가를 수행하였다. 강성이 높은 FSW 전용 장비를 사용하였

Table 5 Details of FSW tool used (unit: mm)

| Base metal | Material | Shoulder | | Probe | |
|------------|-----------|----------|---------|-------|--------|
| | | dia. | face | dia. | length |
| 1 mm-thick | Si3N4 | 12 | flat | 2 | 0.98 |
| 2 mm-thick | WC-Co 12% | 12 | concave | 4 | 1.85 |

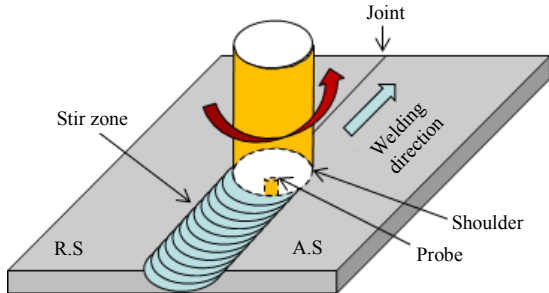


Fig. 1 Schematic diagram of FSW

으므로 Table 1의 조건 대비하여 높은 용접속도영역이며, APR도 0.25-2 mm/rev로 상대적으로 큰 값을 사용하였다.

용접 후 비드 표면 외관검사와 횡단면 절단을 통한 용접 단면 검사를 하였다. 인장강도를 측정하기 위해 “KS B 0801: 2007 금속재료 인장시험”의 규격을 참고하여 인장시험편을 채취하였다. 시편 제작 시에 표면 가공 없이 시편용접 상태에서 시편을 채취하였다. 인장 시험 시 시험 속도는 5 mm/min의 속도로 진행되었으며 각 조건당 3회씩 인장시험을 실시하였다. 2.0 mm의 두께, 용접속도 200 mm/min, 회전속도 300 rpm

의 조건에서 채취된 시편의 단면에서 비커스 경도를 측정하였다. 시험 하중은 0.49 N으로 설정하였으며 판재 두께의 절반 위치 즉 1.0 mm 위치에서 타점 간격은 0.5 mm로, 18개의 구간에 대해 경도를 측정하였다.

4. 비드 표면 및 단면

두께 2.0 mm의 이종재료 맞대기 교반부의 표면비드 형상 및 단면사진의 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 대부분의 조건에서 양호한 비드표면이 관찰되었으나 톨 회전속도 400 rpm, 용접속도 100 mm/min에서는 비드 후반부 표면에 연속적 결함이 관찰되었다. 용접 시작 부분에서는 알루미늄과 철의 교반이 적절히 이루어지다가 용접이 끝나는 부분에서 입열량 증가로 인해 적절한 교반의 범위를 벗어나 결함이 발생하였다. Zandsalimi et al.은 이러한 큰 표면 그루브와 플래쉬 형태의 표면 결함은 입열이 과도하여 소성 영역이 톨 슬더 범위를 벗어날 때 발생한다고 설명하였다⁴²⁾. 교반부 단면사진에서는 교반부의 알루미늄 쪽에서 철의 개재물이 확인되었지만 회전수가 높아질수록 양호한 교반이 관찰된다.

두께 1.0 mm의 이종재료 맞대기 교반부의 표면비드 형상 및 단면사진의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 표면 비드형상은 일부 플래쉬를 제외하고는 양호하였으나 단면에서는 모재의 용융 및 교반부 단면감소가 관찰된다. 용접조건 중 톨 회전속도가 빠르고 용접속도가 느린 경우, 즉 입열이 증가한 조건에서 알루미늄 모재의 용융이 발생하여 교반부 위로 불룩한 용융비드를 형성하였다. 이는 가장 입열이 많은 톨 회전속도 400 rpm, 용

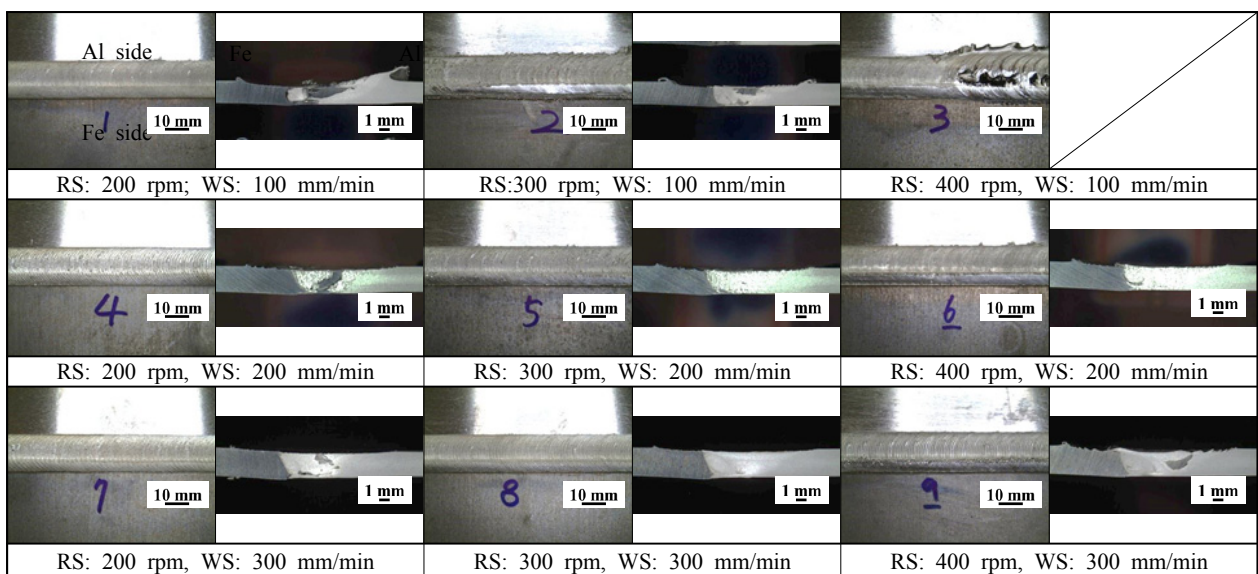


Fig. 2 Weld bead surfaces and cross-sections according to welding parameters (2.0 mm-thick specimen, RS: tool rotation speed, and WS: welding speed)

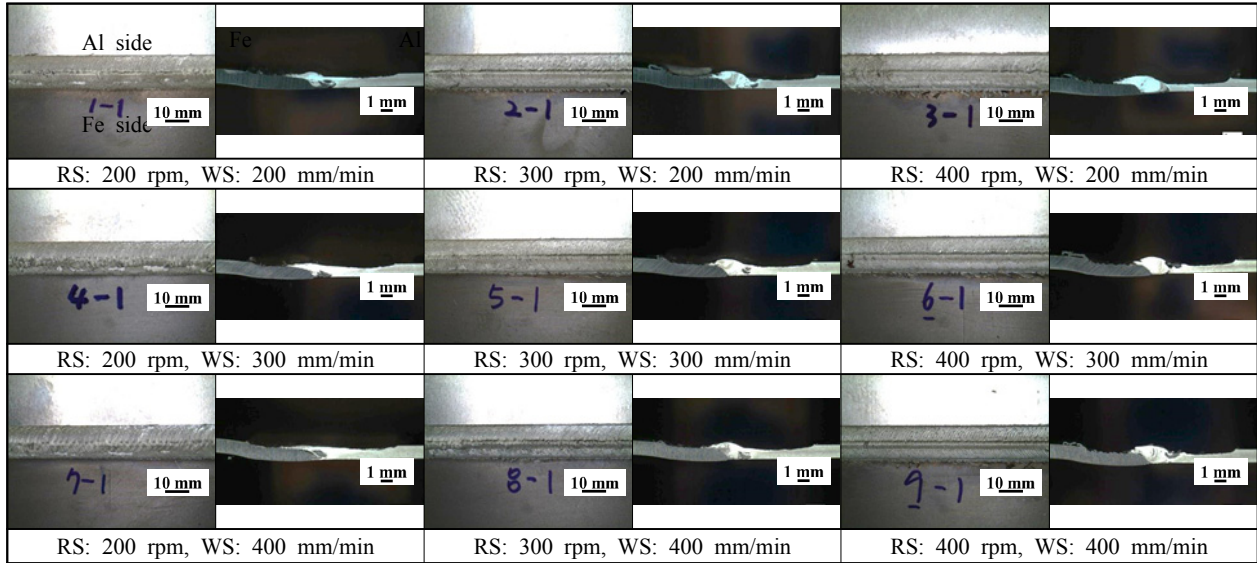


Fig. 3 Weld bead surfaces and cross-sections according to welding parameters (1.0 mm-thick specimen, RS: tool rotation speed, and WS: welding speed)

접속도 200 mm/min에서 가장 잘 관찰되는데, 알루미늄 용융에 따른 교반부의 두께 감소는 용접강도의 저하를 야기한다. 가장 입열량이 적은 툴 회전속도 200 rpm, 용접속도 400 rpm에서는 알루미늄 모재의 용융과 용접두께 감소가 거의 발생하지 않은 양호한 용접단면이 관찰되었다.

5. 기계적 특성

알루미늄 5083 합금과 5052 합금의 교반부는 각각 270 MPa과 170 MPa의 용접강도가 요구된다⁴³⁾. 두께 2 mm 용접시편에 대한 인장시험 결과 최소요구강도 대비 63%에서 100%의 강도가 측정되었으며, 모든 인장시험편은 교반부에서 파단되었다 (Table 6). 알루미늄 합금의 교반부 요구강도는 용융용접 기준으로 제안되었으므로 고상용접에서 교반부와 열영향부의 강도를 향상하고, 교반부 두께 저하를 방지하여 요구강도 이상으로 용접강도를 높일 수 있다. 용접 결함이 없는 교반부의 강도가 요구강도(270 MPa)와 모재강도(316 MPa) 사이로 예상되며 공정변수 최적화 등을 통해서 추가적인 용접강도 향상이 가능할 것으로 판단된다.

가장 높은 강도가 확인된 용접조건은 용접속도 100 mm/min, 회전속도 200 rpm의 조건이었다. 각 용접속도에서 가장 높은 강도를 가진 툴 회전속도의 데이터를 Table 6에 음영으로 표시하였는데, 높은 접합강도를 가지는 조건은 용접속도와 툴 회전속도 모두와 상관관계를 가지며 APR이 0.5-0.75 mm/rev에서 높은

Table 6 Tensile test results for 2 mm-thick FSW specimens

| Welding speed (mm/min) | Tool rotation (rpm) | APR (mm/rev) | Tensile strength (MPa) | Fracture location | Relative strength* (%) |
|------------------------|---------------------|--------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| 100 | 200 | 0.50 | 270 | Stir zone | 100 |
| | 300 | 0.33 | 179 | Stir zone | 66 |
| | 400 | 0.25 | N/A | N/A | N/A |
| 200 | 200 | 1.0 | 231 | Stir zone | 86 |
| | 300 | 0.67 | 261 | Stir zone | 97 |
| | 400 | 0.50 | 235 | Stir zone | 87 |
| 300 | 200 | 1.5 | 207 | Stir zone | 77 |
| | 300 | 1.0 | 171 | Stir zone | 63 |
| | 400 | 0.75 | 259 | Stir zone | 96 |

* Weld strength relative to the required strength (270 MPa)

용접강도가 관찰되었다.

1 mm 두께 시편에 대한 인장시험 결과 5052 합금의 교반부 요구강도의 81%에서 117%의 교반부 인장강도가 측정되었으며, 모든 조건에서 교반부에서 파단되었다 (Table 7). 각 용접속도에서 툴 회전속도가 200 rpm일 때 용접강도가 가장 높았으며, 모두 기준강도 이상의 값을 가짐을 확인하였다. Fig. 3에서 확인한 것과 같이 툴 회전속도가 200 rpm보다 커진 경우 알루미늄 합금의 용융 및 교반부 두께 감소가 확인되어 상대적으로 낮은 강도의 원인이 된다. 2 mm 용접시편에서 최대 용접강도가 요구강도 수준인 것에 비해 1 mm 용접시편에서는 요구강도(170 MPa)보다 높은 최대용접강도(200 MPa)가 확인된다. 이는 1 mm

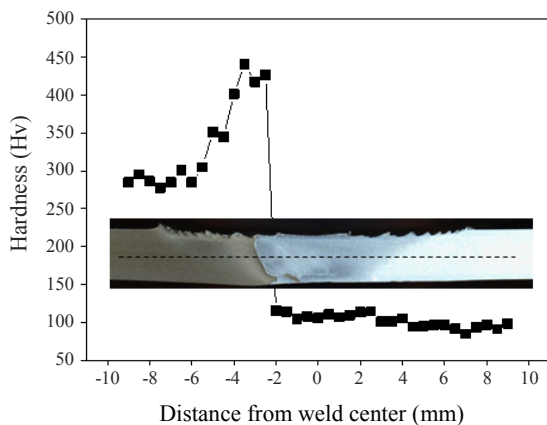
Table 7 Tensile test results for 1 mm-thick FSW specimens

| Welding speed (mm/min) | Tool rotation (rpm) | Tensile strength (MPa) | Fracture location | Relative strength* (%) |
|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
| 200 | 200 | 200 | Stir zone | 117 |
| | 300 | 153 | Stir zone | 90 |
| | 400 | 138 | Stir zone | 81 |
| 300 | 200 | 178 | Stir zone | 104 |
| | 300 | 165 | Stir zone | 97 |
| | 400 | 150 | Stir zone | 88 |
| 400 | 200 | 198 | Stir zone | 116 |
| | 300 | 158 | Stir zone | 93 |
| | 400 | 161 | Stir zone | 95 |

* Weld strength relative to the required strength (170 MPa)

시편의 Al 모재가 강도 240 MPa인 가공경화재이므로 교반부 두께 감소와 열 영향에도 불구하고 강도 확보에 상대적으로 유리하였다. 모재 강도보다 교반부 강도가 낮으므로 공정변수 최적화를 통해 더 높은 강도의 획득이 가능하다.

Fig. 4는 용접시편 단면에서의 경도분포로 강재의 모재경도 값은 약 290 Hv로 측정되었으며 기계/열적 영향부(TMAZ)에서는 약 450 Hv까지 상승하고 연화 영역은 거의 관찰되지 않는다. 이는 기계/열적 영향부에서 오스테나이트 변태온도 이상의 가열 및 이후 급냉으로 경한 조직이 형성되고⁴⁾, DP 780 소재의 경우 열영향부에서 연화가 심각하지 않기 때문이다⁴⁴⁾. 강재 쪽 교반부의 최대 경도는 약 432 Hv를 나타내며, 교반부의 경도는 알루미늄 모재쪽으로 이동하면서 알루미늄 합금의 경도 수준으로 급격히 하락한다. 모재가 어닐링된 소재이므로 알루미늄 열영향부의 연화는 발생하

**Fig. 4** Micro Vickers hardness profile (2.0 mm-thick, WS: 200 mm/min, and RS: 300 rpm)

지 않았고, 인장시험에서 교반부 파단의 원인은 교반부 강도 저하가 아닌 두께 감소 등 기하학적 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

박판 Al/Fe 이종재 맞대기 교반부에 대한 마이크로 FSW 용접기술에 대해 선행기술 조사와 DP 780소재와 알루미늄 5000계열 합금을 이용한 마이크로 FSW 적용성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 기존 맞대기 FSW 연구결과에서 1.12 mm 두께에 대한 적용성 평가가 있었으나 대부분의 연구는 1.5 mm 이상의 소재를 대상으로 하였다. 기존 연구결과에서 적절한 공정변수 선정을 통해 알루미늄 모재강도의 90% 이상의 양호한 용접강도를 가지고 있음을 확인하였다.

2) 2 mm 두께 시편에 대한 적용성 시험결과 입열이 과도하여 솔더 외부에서 소성변형이 일어나는 경우를 제외하고 양호한 비드 형상을 확인하였다. 0.5-0.75 mm/rev의 APR에서 높은 강도가 관찰되었으며, 알루미늄 합금 용접요구강도 수준의 최대강도를 확인하였다.

3) 1 mm 두께 시편에 대한 적용성 시험에서는 입열이 높을 경우 알루미늄 합금의 용융이 관찰되었다. 가장 낮은 톨 회전속도에서 가장 높은 교반부 강도가 확인되었으며, 최대 강도는 교반부 요구강도의 117% 수준이다.

Acknowledgement

This research was supported by the MOTIE (Ministry of Trade, Industry, and Energy) in Korea, under the Fostering Global Talents for Innovative Growth Program (P0008750) supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT).

ORCID: Hyeonjeong You: <https://orcid.org/0000-0002-0734-1743>

ORCID: Soong Keun Hyun: <http://orcid.org/0000-0002-3434-8465>

ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, 3: Welding and Related Processes, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2008) 189-191.
2. Y. M. Yeon, S. B. Jung, and W. S. Chang, Application of Friction Stir Welding to Aluminium Alloys, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 19(2) (2001) 23-29.
3. J. Cheon, M. Kang, J. Y. Yoon, and C. Kim, The Tensile Strength Comparison of 6xxx and 7xxx Series Aluminum

- Sheet Weldment Using Laser Beam Welding and Friction Stir Welding Process, *J. Weld. Join.* 37(3) (2019) 237-242.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.3.7>
4. H. Lee, C. Kim, and J. H. Song, An Evaluation of Global and Local Tensile Properties of Friction-Stir Welded DP980 Dual-Phase Steel Joints Using a Digital Image Correlation Method, *Mater.* 8(12) (2015) 8424-8436.
<https://doi.org/10.3390/ma8125467>
 5. M. Kang, J. Yoon, and C. Kim, Hook Formation and Joint Strength in Friction Stir Spot Welding of Al Alloy and Al-Si-Coated Hot-Press Forming Steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 106(5-6) (2019) 1671-1681.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04716-9>
 6. Y. P. Kim, C. Kim, Y. G. Kim, and S. M. Joo, Trends of Technology Development of Friction Stir Welding Machine, *J. Weld. Join.* 34(3) (2016) 1-5.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.1>
 7. J. Y. Yoon, S. Kang, S. Rhee, and C. Kim, Review of Keyhole Refilling Technology in Friction Stir Welding, *J. Weld. Join.* 36(4) (2018) 58-62.
<https://doi.org/10.5781/jwj.2018.36.4.6>
 8. J. Yoon, C. Kim, and S. Rhee, Compensation of Vertical Position Error Using a Force-Deflection Model in Friction Stir Spot Welding, *Met.* 8(12) (2018) 1049.
<https://doi.org/10.3390/met8121049>
 9. J. Yoon, C. Kim, and S. Rhee, Performance of Plunge Depth Control Methods During Friction Stir Welding, *Met.* 9(3) (2019) 283.
<https://doi.org/10.3390/met9030283>
 10. J. Cheon, T. Park, J.-Y. Yoon, and C. Kim, Evaluation of a High-Frequency Induction Heating Assisted Friction Stir Welding Process on Carbon Steel Sheets, *J. Weld. Join.* 37(5) (2019) 501-507.
<https://doi.org/10.5781/jwj.2019.37.5.10>
 11. J. Y. Yoon, J. Cheon, and C. Kim, Characteristic Evaluation of Coaxial High-Frequency Induction Heating Hybrid Friction Stir Welding Process on High Strength Carbon Steel Sheets, *J. Weld. Join.* 37(6) 585-590.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.6.8>
 12. J. Cheon, J. Y. Yoon, C. Kim, and S. J. Na, A Study on Transient Flow Characteristic in Friction Stir Welding with Real-Time Interface Tracking by Direct Surface Calculation, *J. Mater. Process. Technol.* 255 (2018) 621-634.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.01.021>
 13. M. J. Kang and C. H. Kim, Cold-Metal-Transfer Arc Joining of Al 6k32 Alloy to Steel Sheets, *Defect Diffus. Forum.* 334 (2013) 247-251.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.334-335.247>
 14. M. Kang and C. Kim, Joining Al 5052 Alloy to Aluminized Steel Sheet Using Cold Metal Transfer Process, *Mater. Des.* 81 (2015) 95-103.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.035>
 15. M. Kang, C. Kim, J. Kim, D. Kim, and J. Kim, Corrosion Assessment of Al/Fe Dissimilar Metal Joint, *J. Weld. Join.* 32(4) (2014) 55-62.
<https://doi.org/10.5781/jwj.2014.32.4.55>
 16. S. Kang, J. Y. Yoon, and C. Kim, Corrosion Properties and Failure Behavior of Al/Fe Self-Piercing Rivet Joint, *J. Weld. Join.* 36(3) (2018) 72-77.
<https://doi.org/10.5781/jwj.2018.36.3.11>
 17. T. Sakayama, Y. Naito, Y. Miyazakki, T. Nose, G. Murayma, K. Saita, and H. Oikawa, Dissimilar Metal Joining Technologies for Steel Sheet and Aluminum Alloy Sheet in Auto Body, *Nippon Steel Tech. Rep.* 103 (2013) 91-98.
 18. Y. Kusuda, Honda Develops Robotized FSW Technology to Weld Steel and Aluminum and Applied It to a MassProduction Vehicle, *Ind. Robot* 40(3) (2013) 208-212.
<https://doi.org/10.1108/01439911311309889>
 19. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, 1: Ferrous and Non-Ferrous Alloys, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2008) 293-294.
 20. T. Watanabe, H. Takayama and A. Yanagisawa, Joining of Aluminum Alloy to Steel by Friction Stir Welding, *J. Mater. Process. Technol.* 178(1-3) (2006) 342-349.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.117>
 21. T. Tanaka, T. Morishige and T. Hirata, Comprehensive Analysis of Joint Strength for Dissimilar Friction Stir Welds of Mild Steel to Aluminum Alloys, *Scripta Mater.* 61(7) (2009) 756-759.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.06.022>
 22. A. Simar and M.N. Avettand-Fénoël, State of the Art About Dissimilar Metal Friction Stir Welding, *Sci. Technol. Weld. Join.* 22(5) (2017) 389-403.
<https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1251712>
 23. Y. Nagasaka and T. Nisihara, Development of Micro-FSW, *The Proceedings of the Materials and Processing Conference 2003* (2003) 327-328.
<https://doi.org/10.1299/jsmemp.2003.11.327>
 24. A. Scialpi, L. a. C. De Filippis, P. Cuomo, and P. Di Summa, Micro Friction Stir Welding of 2024-6082 Aluminium Alloys, *Weld. Int.* 22(1) (2008) 16-22.
<https://doi.org/10.1080/09507110801936069>
 25. S. Papaefthymiou, C. Goulas and E. Gavalas, Micro-Friction Stir Welding of Titan Zinc Sheets, *J. Mater. Process. Technol.* 216 (2015) 133-139.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.029>
 26. Y. Huang, X. Meng, Z. Lv, T. Huang, Y. Zhang, J. Cao, L. Zhou, and J. Feng, Microstructures and Mechanical Properties of Micro Friction Stir Welding (MfsW) of 6061-T4 Aluminum Alloy, *J. Mater. Res. Technol.* 8(1) (2019) 1084-1091.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.10.010>
 27. J. Y. Yoon, C. Kim, and S. Rhee, Effect of Circumferential Tool Path Control on Friction Stir Spot Welding of

- Al/Fe Dissimilar Metal Joint, *J. Weld. Join.* 34(3) (2016) 6-11.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.6>
28. B. T. Gibson, D. H. Lammlein, T. J. Prater, W. R. Longhurst, C. D. Cox, M. C. Ballun, K. J. Dharmaraj, G. E. Cook, and A. M. Strauss, Friction Stir Welding: Process, Automation, and Control, *J. Manuf. Process.* 16(1) (2014) 56-73.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
 29. H. A. Derazkola, H. J. Aval, and M. Elyasi, Analysis of Process Parameters Effects on Dissimilar Friction Stir Welding of Aa1100 and A441 Aisi Steel, *Sci. Technol. Weld. Join.* 20(7) (2015) 553-562.
<https://doi.org/10.1179/1362171815y.00000000038>
 30. M. W. Safeen and P. Russo Spina, Main Issues in Quality of Friction Stir Welding Joints of Aluminum Alloy and Steel Sheets, *Met.* 9(5) (2019) 610.
<https://doi.org/10.3390/met9050610>
 31. M. Habibnia, M. Shakeri, S. Nourouzi, and M. K. B. Givi, Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 5050 Al Alloy and 304 Stainless Steel Plates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 76(5-8) (2014) 819-829.
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6306-5>
 32. K. K. Ramachandran, N. Murugan, and S. Shashi Kumar, Effect of Tool Axis Offset and Geometry of Tool Pin Profile on the Characteristics of Friction Stir Welded Dissimilar Joints of Aluminum Alloy AA5052 and HSLA Steel, *Mater. Sci. Eng. A* 639 (2015) 219-233.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.04.089>
 33. M. Ghosh, R. K. Gupta and M. M. Husain, Friction Stir Welding of Stainless Steel to Al Alloy: Effect of Thermal Condition on Weld Nugget Microstructure, *Metall. Mater. Trans. A* 45(2) (2013) 854-863.
<https://doi.org/10.1007/s11661-013-2036-9>
 34. H. Bang, H. Bang, G. Jeon, I. Oh, and C. Ro, Gas Tungsten Arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Al6061-T6 Aluminum Alloy and STS304 Stainless Steel, *Mater. Des.* 37 (2012) 48-55.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.018>
 35. X. Fei, X. Jin, Y. Ye, T. Xiu, and H. Yang, Effect of Pre- Hole Offset on the Property of the Joint During Laser-Assisted Friction Stir Welding of Dissimilar Metals Steel and Aluminum Alloys, *Mater. Sci. Eng. A* 653 (2016) 43-52.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.101>
 36. M. Dehghani, A. Amadeh, and S. A. A. Akbari Mousavi, Investigations on the Effects of Friction Stir Welding Parameters on Intermetallic and Defect Formation in Joining Aluminum Alloy to Mild Steel, *Mater. Des.* 49 (2013) 433-441.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.013>
 37. M. Ghosh, A. Kar, K. Kumar, and S. V. Kailas, Structural Characterisation of Reaction Zone for Friction Stir Welded Aluminium-Stainless Steel Joint, *Mater. Technol.* 27(2) (2013) 169-172.
<https://doi.org/10.1179/175355509x12608916825994>
 38. P. N. Karakizis, D. I. Pantelis, D. A. Dragatogiannis, V. D. Bougiouri, and C. A. Charitidis, Study of Friction Stir Butt Welding between Thin Plates of Aa5754 and Mild Steel for Automotive Applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 102(9-12) (2019) 3065-3076.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03388-9>
 39. X. Liu, S. Lan, and J. Ni, Analysis of Process Parameters Effects on Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel, *Mater. Des.* 59 (2014) 50-62.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.003>
 40. R. S. Coelho, A. Kostka, J. F. Dos Santos, and A. Kaysser-Pyzalla, Friction-Stir Dissimilar Welding of Aluminium Alloy to High Strength Steels: Mechanical Properties and Their Relation to Microstructure, *Mater. Sci. Eng. A* 556 (2012) 175-183.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.076>
 41. C. Mertin, A. Naumov, L. Mosecker, M. Bambach, and G. Hirt, Influence of the Process Temperature on the Properties of Friction Stir Welded Blanks Made of Mild Steel and Aluminum, *Key Eng. Mater.* 611-612 (2014) 1429-1436.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1429>
 42. S. Zandsalimi, A. Heidarzadeh, and T. Saeid, Dissimilar Friction-Stir Welding of 430 Stainless Steel and 6061 Aluminum Alloy: Microstructure and Mechanical Properties of the Joints, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 233(9) (2018) 1791-1801.
<https://doi.org/10.1177/1464420718789447>
 43. Det Norske Veritas, Rules for Ships/High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft, *Det Norske Veritas, Norway* (2010) Part 2, Chap. 3, Sec. 5.
 44. C. H. Kim, J. K. Choi, M. J. Kang and Y. D. Park, A Study on the CO₂ Laser Welding Characteristics of High Strength Steel up to 1500 MPa for Automotive Application, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 39(1) (2010) 79-86.