

마찰교반 점용접(FSSW)을 이용한 비철금속 접합기술의 연구 동향과 전망

김 영 식^{*,†}

^{*}한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원

Future of the Friction Stir Spot Welding Technology for Non-Ferrous Metal

Youngsik Kim^{*,†}

^{*}KISTI ReSEAT Program

[†]Corresponding author : yskim@hhu.ac.kr

1. 서 론

1990년대 초 영국 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 마찰교반용접 (Friction Stir Welding : FSW 이하 FSW라함)법은 마찰열만을 열원으로 한 고상접합법으로, 지금까지의 아크용접법과 비교하여 매우 작은 변형과 고강도의 양호한 접합품질, 그리고 숙련 기능을 필요로 하지 않는 탁월한 특징을 갖는 용접법이다.

마찰교반 점용접(Friction Stir Spot Welding : FSSW, 또는 Friction Spot Joining : FSJ, 이 글에서는 FSSW로 통일함)법은 FSW법의 응용기술로서 Mazda에서 개발되어 2003년 Mazda RX-8 자동차 뒷 도어 패널 생산에 처음 응용한 기술이다¹⁾. 이 방법은 재래의 저항 점용접과 유사하나, 접합과정에서 용융을 동반하지 않아 응고, 수축에 따른 균열 발생이 적고, 기공 등의 결함 발생이 적으며, 이종재료의 접합이 용이한 점 등에서 저항 점용접보다 우수한 특징을 갖는다.

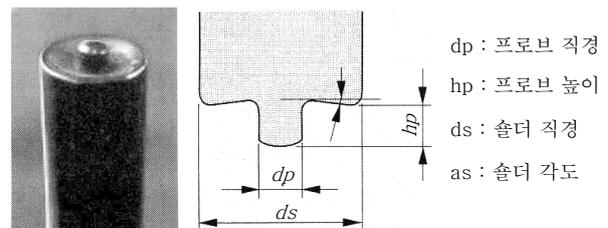
FSSW법은 현재 유럽과 일본에서 자동차 차체 제작 시 알루미늄합금 접합에 응용되어 시공성, 가격, 접합부의 성능에서 여타의 접합법을 능가하는 접합법으로 인정되고 있으며 생산공정에서 에너지절약, 환경부하저감의 실현에 공헌하고 있다.

FSSW법은 현재는 자동차의 경량화 목적으로 알루미늄 합금의 차체 제작에 국한되어 실용되고 있으나 알루미늄 합금 이외에 마그네슘 합금, 티탄 합금 등 비철재료의 동종이나, 이종재료, 또는 동종의 강이나, 강과 비철재료 간의 이종재료의 접합으로 빠르게 확대되고 있

다. 앞으로 자동차 이외에, 조선, 해양플랜트 및 철도차량과 이미 FSW가 적용되고 있는 항공기분야와 일반기분야에도 원가절감과 제품의 차별화 도구로서 그 응용이 크게 기대되고 있다.

2. FSSW의 접합기구

FSSW는 FSW와 마찬가지로 마찰교반현상을 이용한 점 접합법으로 접합에는 Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 선단에 프로브(probe)라고 하는 나사 가공된 돌기를 갖는 접합 툴(tool)이 이용된다. 툴 형상의 파라메타로서는 Fig. 1(b)와 같이 프로브직경, 프로브 높이, 숄더(shoulder)직경 및 숄더 각도가 있어서 접합하는 부재의 재질 및 상하의 판 두께에 따라 다르게 설계된다. 접합 프로세스는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 툴을 회전시켜 압입시킴으로써 마찰열을 발생시켜 재료를 연화하여 상하 재료 간에 접합이 이루어지게 하고 다음 동작으로 툴을 위로 뽑아 올리는 단순동작으로 이루어져 있다. 이 때문에 접합 툴의 형상이 피접합 재료 표면에 흔적으로 남게 된다.



(a) 접합툴의 형상

(b) 접합 툴의 파라메타

Fig. 1 접합툴(tool)의 형상과 툴 파라메타

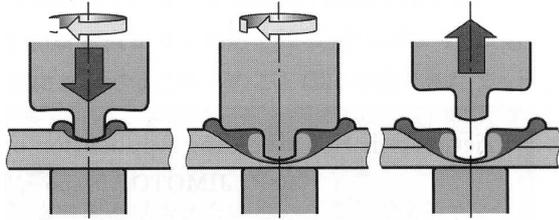


Fig. 2 접합 프로세스

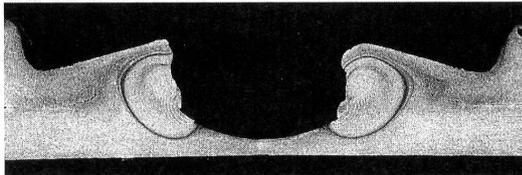


Fig. 3 접합부 단면 마크로 사진

이음부의 내부에서는 Fig. 3에 나타난 것처럼 틀이 압입된 영역에서 상하의 판 사이 계면이 없어지고, 프로브 구멍의 주변에 타원형의 접합영역이 형성되어 있다. 이 영역은 나사를 갖는 프로브의 회전 운동에 의해 틀 외연부의 재료가 프로브 외주를 나선상으로 아래 판 측으로 이동하여 나사 선단으로부터 배출됨으로서 형성된다²⁾.

3. FSSW 접합부의 특성

FSSW 공정에서 기본적인 접합변수는 접합시간, 틀의 회전속도, 축하중, 틀의 압입깊이, 틀의 제원을 들 수 있다. 따라서 접합재료에 따른 최적의 접합조건을 찾는 것이 중요하다. 1예로6000계 알루미늄합금인 A6061-T6 재의 판 두께 1mm의 겹치기 FSSW이음부에 대해 접합시간에 따른 인장전단강도 변화를 평가한 결과를 보이면, Fig. 4와 같다³⁾.

접합시간이 짧은 경우에는 접합영역이 충분히 교반되지 않아 낮은 강도를 나타내지만 접합시간이 길어짐에 따라 접합영역이 확대되어 접합강도도 높게 된다. 더욱 접합시간이 길어지면, 접합강도가 낮아지나 이것은 틀의 압입깊이가 크게 되어 윗 판재가 얇아지기 때문이다. 적절한 접합시간일 경우에 약 2900N의 인장전단강도를 얻을 수 있고 이 값은 매우 안정적이다.

적정 조건에서의 5000계열과 6000계열 알루미늄합금에 대한 FSSW접합부의 접합강도를 저항 점 접합부의 강도와 비교하면 Fig. 5와 같이 나타난다⁴⁾. 이 그림에서 보는 바와 같이 FSSW접합강도는 저항 점 용접부의 접합강도 보다 우수하다. 이것은 FSSW의 경우 접합부에서 용융이 일어나지 않고 다만 소성유동에 의

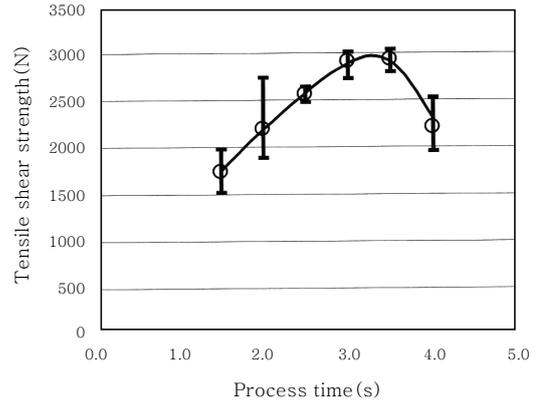


Fig. 4 접합시간과 인장전단강도의 관계³⁾

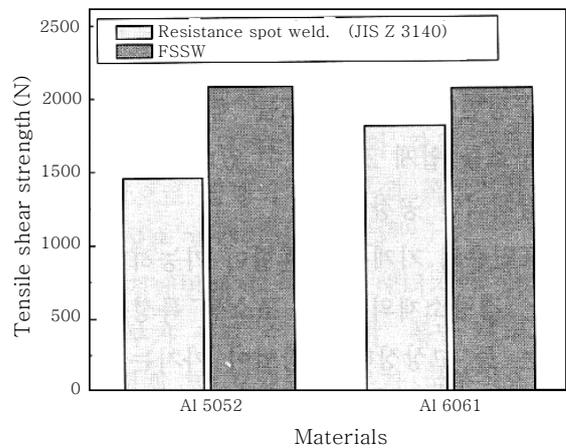


Fig. 5 저항점 접합부와 FSSW 접합부의 강도 비교⁴⁾

해서만 접합이 이루어지기 때문이다.

4. FSSW의 응용분야와 연구과제

FSSW는 재래의 저항 점용접과 비교하여 에너지효율이 높고, 흠(fume)발생이 적으며, 부재 겹침부의 표면 성상에 영향을 크게 받지 않는 점에서 가격 경쟁력이 높다. 또한 접합강도가 높은 우수한 접합 품질을 얻을 수 있는 점에서 특히 자동차의 차체 생산라인에서 재래의 저항 점 용접 공정의 대체 수단으로 빠르게 확산 될 것으로 기대되고 있다.

FSSW는 고융점 재료에 적용할 경우 접합 틀의 수명이 짧아 제한을 받는다. 현재로서는 주로 알루미늄합금의 차체 조립수단으로 응용되고 있으나 접합 틀의 재료 개발과 병행하여 철강소재 특히 스테인리스 강에 대한 적용, 항공우주산업에서 큰 비중을 차지하고 있는 Ti합금에의 적용, 경금속재료와 철강소재와의 이종재 접합에의 적용 확대 등에 대한 과제를 안고 있다.

FSSW에 관하여 현재 진행되고 있는 연구과제들을 열거하면, 교반접합시의 재료유동, 틀의 재질과 그 형

상, 공작물의 구속방법, 기계운동학과 로봇적용, 마찰교 반과정의 모델링, 야금학 및 역학적 특성평가, 비파괴 검사, 보수공정과 그 영향 등이다.

5. 연구개발 동향

5.1 학술정보분석

기술동향에 관한 학술정보 분석은 KISTI에서 제공되는 NDSL데이터 베이스를 이용하여 분석하였다. 마찰교 반 점용접은 국제적으로 Friction Stir Spot Welding 약해서 FSSW 또는 Friction Spot Joining 약해서 FSJ의 두가지 명칭이 쓰이고 있다. 따라서 문헌 검색은 두 가지 용어 모두에 대해 실시하였다. 먼저 검색식 TI:(friction stir spot welding or fssw) AND PY:(2000-2011)에 의해 2000년부터 FSSW에 관한 학술정보를 검색한 결과 논문 150건, 특허 63건이 검색되었다. 또한 TI:(friction spot joining or fsj) AND PY:(2000-2011)에 의해 검색한 결과 논문 49건, 특허 36건이 검색되었다. 이 중에서 앞서 검색한 것과 중복된 것과 관련이 없는 것을 제외하면 논문 43건, 특허 36건이 검색되어 합계 논문이 193건 특허 99건으로 집계되었다.

논문의 연도별 발표건수를 분석한 결과를 Fig. 6에 보인다.

2004년에 처음으로 6건이 보고된 이래 2006년부터는 2008년을 제외하고 30건 이상의 논문이 발표되고 있어 최근 4,5년 전부터 FSSW에 관한 관심이 커지고 있음을 알 수 있다.

논문의 연구 내용을 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 톨의 회전 속도, 톨의 압입깊이, 압입시간 등 공정변수와 관련한 내용이 39건으로 가장 많고 그 다음이 접합 톨의 설계 및 마모와 관련한 내용이 27건이며, 특히 후술하는 새로이 개발된 복동 톨로서 프로브 흔적을 남기지 않은 Re-filling 톨에 관한 논문이 10여건 발표되어 있어 이 톨에 관한 관심이 높아지고 있음을

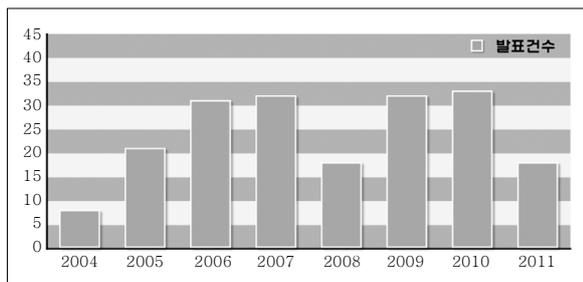


Fig. 6 FSSW관련 연도별 발표건수

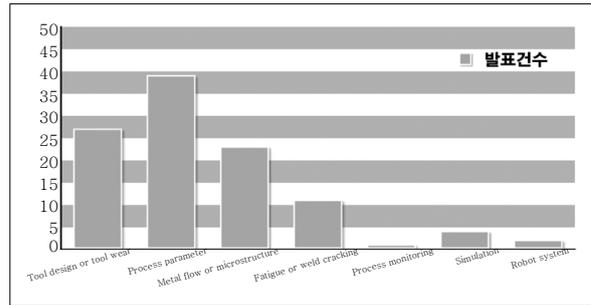


Fig. 7 분야별 발표건수

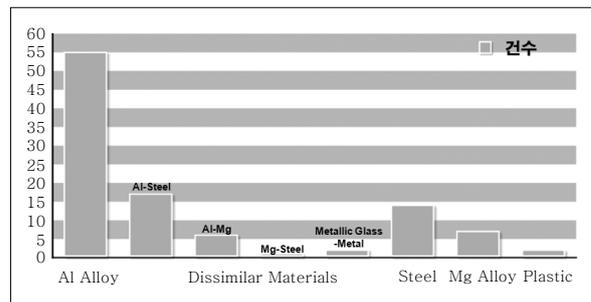


Fig. 8 대상재료별 분류

알 수 있다. 그 다음이 조직과 소성유동에 관한 내용으로 23건이, 균열 및 피로거동 관련 논문이 10건, 공정 시뮬레이션 논문이 3건, 로봇시스템에 관한 내용이 2건, 접합부 건전성 평가를 위한 공정의 모니터링 개발에 관한 내용이 2건이 발표되어 있다.

대상 재료별 연구건수를 분석한 결과를 Fig. 8에 보인다.

알루미늄합금에 대한 연구가 55건으로 가장 많고, 그 다음이 알루미늄과 강과의 이종재에 접합에 관한 건수가 17건, 고장력 강재를 위시한 강재에 대한 연구 14건, 마그네슘합금의 동종 접합에 관한 연구와 알루미늄과 마그네슘 이종재 접합 연구가 각각 8건이 검색되었고 폴리에치렌, 폴리프로필렌 등 플라스틱 접합연구도 2건으로 검색되었으며, 강과 마그네슘과의 이종재 접합 연구도 1건이 발표되어 있다.

5.2 접합 공정 변수에 관한 연구개발

앞서 기술한바와 같이 최적의 접합강도를 얻을 수 있는 톨의 회전 속도, 톨의 압입깊이, 압입시간 등의 공정변수를 확립하기 위해 많은 연구 들이 수행되었다. 그러나 이들 연구 결과 들은 아직 통일적인 공정변수를 확립하여 접합공정의 지침으로 제시할 단계에 이르지 못하고 있다. Zhang Z 등은 5052 알루미늄합금 판재 1mm 두께 겹침 이음부의 실험에서 톨의 회전속도와

툴의 압입 시간이 조직과 접합강도에 미치는 영향을 조사하여 툴 회전속도의 증가와 더불어 접합강도는 저하하고 툴의 압입시간은 접합강도에 크게 영향을 미치지 못함을 밝히고 있다⁵⁾. 이 실험에서 회전속도 1541rpm에서 최대 인장강도 2.8KN를 얻었다.

신형섭 등은 Mg합금판재에 대한 FSSW시 양호한 접합부 및 파단하중을 얻기 위해서는 툴의 회전 및 압입속도의 제어를 통해 입열량의 조절이 필요함을 밝혔다⁶⁾.

Karin Wiyhar 등은 이중재 알루미늄합금에 대해 FSSW 시 겹침부의 표면처리와 상하 두 판재 사이에 밀봉재를 도포하여 접합강도향상을 시도하였다. 그 결과 툴의 형상에 따라서는 표면처리나 밀봉재의 효과가 크게 나타날 수 있음을 보이고 FSSW의 평균 접합강도는 리벳 접합부에 비해 2.5배 정도 높다는 결과를 제시하였다⁷⁾.

철계합금의 FSSW에 대해서는 이창용 등이 저탄소강, 도금 강, 스테인리스 강, DP강 및 마르텐사이트계 AHSS 등에 이르기까지 거의 모든 철계 합금에 대해 접합변수와 미세조직의 관계, 미세조직과 경도 등 기계적 특성과의 관계를 2008년까지 발표된 연구논문을 토대로 정리하여 제시하고, 이 연구결과들이 실용화 단계까지 와 있음을 보고하였다⁸⁾.

5.3 접합 툴의 연구개발

Ikegami 등은 AZ31 마그네슘 합금 2mm 판 두께의 시험편을 이용하여 접합 툴의 프로브 형태가 나선형일 경우와 평활 프로브인 경우에 그 영향을 조사하였다⁹⁾. 그 결과 나선형일 경우에 굽은 형태의 접합계면을 갖고 더 많은 소성유동이 생기며, 결과적으로 더 높은 인장 전단강도를 나타낸다고 보고하고 있다.

Su 등은 3종류의 툴 형태, 즉 나선형의 프로브와 솔더를 갖는 툴, 평활 프로브와 솔더를 갖는 툴, 그리고 솔더가 없이 평활 프로브만 갖는 툴에 대해 조사하였다. 그 결과 교반 영역의 형성에는 단지 매우 작은 에너지만 소모되고 대부분의 에너지는 툴 부품, 클램프, 앤빌, 공작물의 가열에 소모되기 때문에 클램프와 앤빌의 재질 선택이 접합시의 에너지이용에 매우 중요하다고 발표하고 있다¹⁰⁾. 또한 프로브에서의 나사 존재는 FSSW 공정의 에너지 발생에 매우 작은 영향을 미친다고 보고하고 있다¹¹⁾. H. Badarinarayan 등은 5754 알루미늄합금의 마찰교반용접 시 툴의 솔더부와 프로브부에 대하여 최적의 형태를 조사하였다. 오목한 솔더부는 편평하거나 볼록한 솔더부보다 정적강도가 상승하였으며, 삼각형 프로브부는 실린더형 프로브부에 비해 더

높은 정적강도를 나타내었다¹²⁾.

Hirasawa, S. 등은 입자층정법을 이용하여 테이퍼 프로브, 역테이퍼 프로브, 삼각형 프로브, 볼록형 솔더, 오목형 솔더 등 툴의 형상에 따른 재료 유동과 후크(hook) 형성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 오목형 솔더를 갖는 삼각형 프로브의 형태가 접합부의 높은 인장전단강도를 나타낸다는 사실을 밝히고 있다¹³⁾.

Tozaki, Y. 등은 프로브가 없이 솔더 표면에 소용돌이 홈(scroll groove)을 갖는 툴을 개발하였다. 이 툴을 이용하여 알루미늄합금 6061-T4재료에 대해 접합시험을 실시한 결과 공작물에 프로브 홈을 남기지 않고 4.6KN의 인장전단강도를 얻음으로서 프로브형의 일반 툴에서 보다 더 높은 강도를 입증하였다¹⁴⁾.

Choi, D. H 등은 WC-Co 합금 접합 툴을 이용하여 용접 점수의 증가에 따른 툴의 마모현상을 비접촉 3D 측정방법으로 모니터링하여 툴의 마모특성과 접합강도의 변화를 연구하였다. 그 결과 마모된 툴의 형태에 따라 접합강도가 영향을 받으며 툴의 마모는 W-Fe-O 3원계 화합물의 생성과 WC의 산화마모, Co 바인더의 피로에 의해 마모가 진행된다고 보고하고 있다¹⁵⁾.

Kumagai M 등은 Fig. 9와 같은 복동식 툴을 개발하였다.

이 복동식 툴은 외측의 솔더 (직경 10mm)와 내측의 프로브(직경 5mm)를 별도로 구동하여 프로브 흔적을 없게 하는 방식이다. 이러한 복동식 툴을 이용하여 위의 판이 1~3mm의 박판에서 흔적구멍이나 뒤말림(burr)이 없는 충분한 강도의 겹침이음 접합이 가능하고 3매의 겹침 이음 접합이 가능하다¹⁶⁾.

복동식 툴을 이용하여 Uematse 등은 Al-Mg-Si 알루미늄합금에 대해 겹침이음 접합을 실시하고 프로브 구멍을 남기지 않은 접합부에 대해 전단인장강도와 피로 시험을 실시하였다. 그 결과 전단인장강도가 재래의

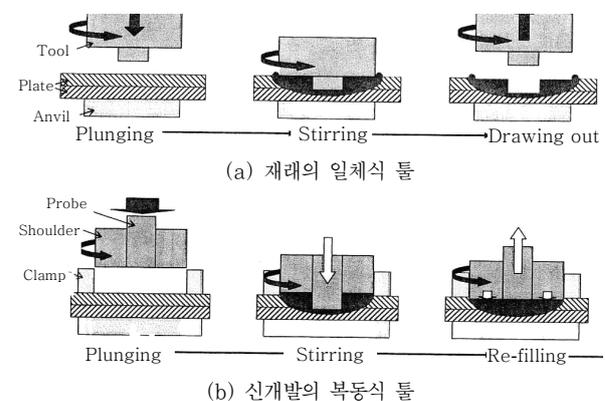


Fig. 9 재래의 일체식 툴과 신개발의 복동식 툴의 공정비교

프로브구멍을 갖는 접합부보다 높게 나타남을 입증하였다. 그러나 피로시험에서는 거의 같게 나타났고, 저 싸이클 고응력 조건에서는 오히려 더 낮은 피로강도를 보였다¹⁷⁾.

5.4 이종재 접합 연구개발

FSSW법에 의한 이종재 접합연구는 자동차 경량화를 목적으로 알루미늄과 강과의 접합 연구가 가장 많이 이루어지고 있다. 알루미늄과 강과의 FSSW법은 저항 점 용접법에 비해 보다 안정적이고 신뢰성 높은 접합부가 얻어진다. K. Tanaka 등은 두께 1mm의 6000계 T4 알루미늄합금과 0.7mm의 SPCC 연강과를 겹치기 FSSW법으로 용접하여 톨의 회전속도 1000rpm에서 인장전단강도 3.6KN/점을 얻었다. 이 값은 저항 점 용접의 평균값 2.15KN/점보다 훨씬 높은 값이다¹⁸⁾.

2003년에 Yoshikawa K.는 0.4mm 알루미늄 A1050-H와 0.2mm STS304 강과를 FSSW로 접합을 시도하여 적절한 접합강도를 얻기 위한 톨의 회전속도는 3500 rpm이라는 결과를 발표하였다. 그리고 접합 조건으로서 경계면에서의 온도 지배를 받는 확산 시간을 제시하였다¹⁹⁾.

Mazda Motor회사의 T. Gendo 등은 Fig. 10과 같은 방법으로 아연 도금강판과 6000계 알루미늄합금과의 FSSW를 실시하였다²⁰⁾.

그 결과 접합강도는 남아있는 도금층에 의해 좌우되며 따라서 도금층을 제거하기 위한 공정변수의 선택이 매우 중요하다는 결론을 도출하였다. 또한 강과 알루미늄합금과의 FSSW는 계면에서 생성되는 취약한 금속간 화합물 층에 의해 제한을 받으며, 금속간 화합물 층이 불연속적으로 존재할 때에 높은 접합강도를 얻을 수 있다는 결론에 도달하였다. 그리고 이 방법을 2005 Mazda MX-5 스포츠카의 트렁크 뚜껑 제작에 응용하였다. 알루미늄과 강과의 FSSW시 금속간화합물의 거동에 관한 유사한 연구가 다수 발표되어 있다^{21,22)}.

알루미늄합금과 비 코팅강과의 이종재 접합에 대해서는 K. Tanaka 등이 6000계 알루미늄과 비 코팅 강과

의 접합연구¹⁸⁾, K. Miyagawa 등이 WC-Co 톨을 이용하여 5052 알루미늄 합금과 SPC270C 연강과 접합 연구를 수행한 결과가 발표되어 있다²³⁾. 이들의 연구는 회전 톨이 강 측에는 접촉하지 않고 알루미늄 측에서만 교반이 이루어지도록 조건을 설정하였다. 또한 알루미늄과 강의 접촉계면에서 금속간화합물이 아닌 비정질 층이 관찰되었으며, 이것은 접합 시 고상의 확산접합이 이루어지기 때문인 것으로 추정하고 있다.

알루미늄합금과 마그네슘합금과의 FSSW에서 계면에 냉간 용사 코팅 층을 형성하여 접합강도를 높이는 연구가 발표되어 있다. Dustin J. 등은 AZ-31마그네슘합금과 Al 5754합금의 FSSW접합 시 알루미늄 합금 표면에 사전에 순수한 Sn, Cu-Sn합금, Al-Alumina로 냉간 코팅층을 다르게 제작하여 재래의 단순 톨을 사용한 경우와 리 필링(re-filling) 복동식 톨을 사용했을 때 접합강도에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 AL-Alumina 코팅으로 단순 톨에서 220 Newton, 복동식 톨에서 330 Newton의 인장 전단강도의 증가가 나타남을 확인하였다²⁴⁾.

알루미늄합금과 마그네슘합금간의 FSSW 이종재 접합에서 접합계면에 형성되는 금속간화합물 층이 접합강도에 크게 영향을 미친다는 결과가 발표되어 있다. Choi D. H. 등은 상기 두재료의 FSSW시 톨의 회전속도와 톨의 압입시간의 증가와 더불어 접합계면에서 Al_3Mg_2 , $Al_{12}Mg_{17}$ 등의 금속간 화합물 층이 두껍게 되고 이로 인해 접합강도는 저하한다고 보고하고 있다²⁵⁾.

6. FSSW의 로봇시스템 채용과 과제

자동차 생산라인에서의 용접장치로서는 산업용 로봇과 저항 점 용접 건의 조합이 주류를 이루고 있다. FSSW공정은 저항 점 용접에 톨의 회전 동작을 추가한 것과 동등하기 때문에 자동차 생산라인에 재래의 저항 점 용접과 거의 동등한 형태의 시스템화가 가능하다. Fig. 11은 일본의 Kawasaki 중공업에서 개발한 FSSW

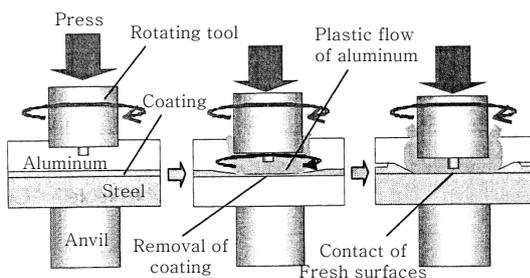


Fig. 10 도금강판과 알루미늄합금과의 FSSW 공정²⁰⁾

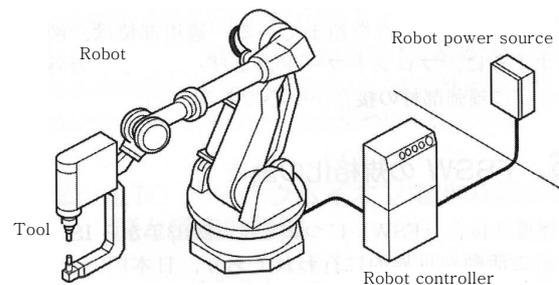


Fig. 11 FSSW로봇 시스템³⁾

로봇 시스템을 보인 것이다³⁾.

FSSW 로봇시스템은 Fig. 11과 같이 로봇 제어장치와 로봇, 그리고 회전 톨을 장착한 건(gun)으로 구성되어 저항 점용접에서의 용접전원이나 냉각장치가 필요하지 않다. 이 때문에 접합에 필요한 에너지는 매우 작게 되고 시스템 구성이 단순하여 고밀도의 배치가 가능하여 생산라인에서 부품의 반송을 최소한으로 억제할 수 있어 매우 경제적이다.

Toyota 자동차에서는 2003년에 하이브리드 차 생산에 FSSW 로봇시스템을 정식 채용하였다. 그 후 크라운, 렉서스 등 주력차종의 생산에 적용되어 누계 생산대수가 100만대를 넘고 있다. 적용부위는 프론트 후드 및 백 도어의 외주부 및 보강부재의 접합이 중심이 되어 있다.

이러한 FSSW 로봇시스템은 현재로서는 주로 자동차 생산라인에 채용되고 있으나, 항공기, 철도차량, 조선분야 등 제조업 전반에 걸쳐 에너지 절약, 환경보호의 차원에서 그 응용 분야가 급속히 확대해 갈 것으로 예상된다.

제조업에서 FSSW 로봇 시스템의 채용을 확대해 가기 위해서는 해결되어야 할 두 가지 문제점이 있다. 그 하나는 접합하고자하는 판 두께에 따라 프로브의 길이를 다르게 해야 하기 때문에 복수의 톨을 준비해 놓고 생산라인에서 톨을 효율적으로 교환할 수 있도록 톨 자동교환기능을 갖추어야 한다. 두 번째는 품질보증 모니터링기능이다. 이 기능은 이음부의 품질에 영향을 미치는 요인으로서 남아있는 판 두께에 착목하여 접합 중에 남은 판 두께를 제어하는 기능이 개발되어 있다³⁾.

7. 국내 연구개발 수준

7.1 국내 연구개발 동향의 문헌정보 분석

NDSL 데이터 베이스에 의하면 FSSW에 대해서 2005년 연운모 등에 의해 처음으로 대한용접학회지를 통해 소개되었다²⁶⁾. 그 이후 국내에서 발표된 논문은 17건으로 모두 대한용접학회지 또는 동학회의 학술 발표대회에서 발표된 논문들이다. 그리고 국제 학술지에 발표한 논문이 Choi D.H. 외 2인의 팀이 2건, Chang W.S 외 2인이 1건으로 검색되었다. 따라서 2000년 이후 NDSL에 FSSW 또는 FSJ(Friction Spot Joining)에 관하여 수록된 총 193건의 논문 중 내국인이 발표한 논문은 20건으로 총 발표건수의 10%에 이른다.

그 내용을 분석하면 대상 소재 별로 알루미늄합금 6

건²⁶⁻³⁴⁾, 마그네슘 3건^{6,35,36)}, 탄소강과 알루미늄합금 간의 이종재 3건³⁷⁻³⁹⁾, 알루미늄과 마그네슘합금간의 이종재 1건²⁵⁾, 스테인리스강을 포함한 철강재료 3건^{40,8,15)}, 음향방출을 이용한 용접공정모니터링 1건⁴¹⁾으로 나타났다.

FSSW관련 국내의 연구개발 활동은 외국에 비교적 저조한 현상에 있으며 보다 활발한 연구 활동이 요망되고 있다. 그러나 알루미늄합금의 경우에는 외국과 동등한 연구수준에 있으며, 외국에서 이루어지지 않고 있는 스테인리스 강의 FSSW 연구, 음향 방출법을 이용한 FSSW 공정 모니터링 연구는 괄목할만한 연구 성과로 생각된다. 한편, 접합강도 향상을 위한 공정변수 또는 표면처리 기법 개발이나 외국에서 매우 활발하게 이루어지고 있는 복동식 톨(Re-filling tool)을 포함한 톨 형상 설계 등에 관한 연구는 진무한 현상에 있다.

7.2 국내의 특허정보 분석

NDSL 데이터 베이스에서 2000년 이후 FSSW 및 FSJ 관련 특허는 총 99건이 검색되었다. 그 대부분은 접합방법과 장치, 접합 톨에 관련한 내용이다. 국가별로는 일본에서 출원한 특허가 52건으로 52% 정도이며, 미국특허가 20건, 유럽특허가 14건, 한국 특허가 13건으로 나타나 있다. 출원 업체 또는 기관별로는 일본의 Obara Co.에서 21건으로 가장 많고 Mazda Motor 16건, Sumitomo light metal에서 11건, 미국의 Boeing사 8건, Kawasaki 5건, Hitachi 4건, Toyota Motor 3건, 기타 유럽과 미국, 일본의 여러 업체에서 1,2건의 특허 등록 또는 출원이 되어 있다. 국내의 경우에는 포항 산업과학 연구소에서 10건과 성우 하이테크 1건, 외국업체에서 출원한 특허가 2건으로 검색되었다.

특허출원 기업체별 특징은 외국에서는 자동차회사, 항공업체, 중공업 업체가 두드러지게 나타나, FSSW기술을 현장에서 직접 적용할 목적으로 특허 출원이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 우리나라의 경우에는 제조업체와는 별개의 산업과학 기술 연구소에서 주로 특허출원이 이루어지고 있다. 이것은 국내 제조업체들의 FSSW에 관한 관심과 인식이 외국에 비해 매우 희박한 현상에 있음을 반영하는 것이라고 생각된다.

7.3 국내의 FSSW기술 현황과 과제

2003년부터 자동차 생산라인에 FSSW 로봇시스템을 채용하여 누적 차량 생산대수가 100만대를 넘어서고

있는 일본과는 달리 우리나라의 경우에는 FSSW 기술의 현장 적용사례가 없는 실정이다. 국내에서 FSSW의 원천기술인 FSW(마찰교반 용접) 설비를 처음 도입하여 개발한 (주) 원젠의 경우에도 개발을 시작한 것은 불과 4~5년 정도밖에 되지 않았으며, 장비가 개발되어 시장에 유통되기 시작한 것은 이제 2년에 불과하다. 이러한 실정으로 FSW의 응용기술인 FSSW 설비는 아직 국내에 유통되고 있지 않다.

이처럼 국내에서의 FSSW기술이 도입되지 않고 있는 것은 2가지 요인을 생각할 수 있다. 그 하나는 FSW의 TWI(The Welding Institute)에 대한 로열티문제를 들 수 있다. 접합설비 제작뿐만 아니고 그 장비를 이용하여 제조되는 제품에 이르기까지 모든 단계에서 TWI에 로열티를 지불해야 하기 때문에 이것이 장애요인으로 작용할 수 있다. 또 하나는 이 기술에 대한 정보가 부족하고 기술필요성에 대한 인식이 미흡하다는 것이다. 이 때문에 산업적용에 필요한 FSSW장비 (제품 고정 지그, 접합 툴, 로봇시스템)의 개발이 현재 전무한 현상에 있다.

8. 향후 FSSW기술의 전망

8.1 접합 툴의 개발

접합 툴의 장수명화는 FSSW 공정의 생산성 향상과 직결된 문제로 매우 중요한 문제이다. 또한 FSSW는 지금까지 주로 고강도 알루미늄합금의 접합에 응용되어 왔으나 공업제품의 80%를 차지하고 있는 소재인 철강 소재 특히 스테인리스강에 대한 적용, 항공우주산업에서 큰 비중을 차지하고 있는 Ti합금에의 적용, 이종재 접합에의 적용확대 등에 대한 과제를 안고 있다.

접합 툴의 장수명화와 고융점재료에 FSSW 적용 확대를 위해서는 고온 내마모성과 고온 내산화성, 고온 피로성 등 고온 안정성이 탁월한 툴 소재 개발이 필수적이다. 현재까지는 공구강, 초경합금 등 기존의 공구 재료가 툴 재료로 사용되고 있으나 새로운 소재로써 질화붕소다결정체(PCBN)나 PCBN/W-25%Re의 복합 재료가 개발되어 있다³³⁾. 또한 Co합금, Ir합금 등 새로운 소재가 개발되어 실용화에 단계에 이르고 있다. 앞으로 내열성, 내화성 등이 더욱 탁월한 새로운 툴 소재가 개발되어 스테인리스 강, Ti합금 등 고융점 재료의 접합이 가능하게 되고 또한 장수명화가 가능하게 될 것이다.

접합 툴의 형상설계에 있어서 프로브와 솔더의 형태에 대한 다양한 검토가 현재 진행되고 있다. 또한 접합

부에 프로브의 흔적이 남게 되어 강도를 저해하는 단동식 툴에서 흔적을 남기지 않는 복동식 툴이 개발되어 이의 신뢰성에 대한 검토가 진행되고 있다. 앞으로 접합부의 기계적 성질을 향상시키면서 더욱 장수명을 보장하는 새로운 형상의 툴이 등장하게 될 것이다.

8.2 이종재료접합

자동차, 철도차량, 선박, 항공기 등 각종 수송기계의 경량화 요구는 더욱 증대해 가고 있다. 이들 수송기계의 경량화를 달성하기 위해서는 철강소재와 경금속합금 간의 이종재료 또는 알루미늄합금과 마그네슘합금 간, 티탄합금 간의 이종 경금속간의 접합기술이 필수적이다. 또한 금속재료와 플라스틱 소재와의 이종 소재간의 접합이 매우 중요하다. 이러한 이종재료의 접합은 재래의 저항점용접으로는 재료마다 고유 저항 값의 차이로 인해 접합이 어렵기 때문에 FSSW공정이 가장 적합한 대안으로 떠오르고 있다.

현재 이종재료간의 접합은 다양한 연구가 진행되고 있으나 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다. 이종재료 접합에서 계면에서 생성되는 금속간 화합물이 접합강도를 저해하는 요인으로 작용하고 있음이 밝혀지고 있다^{21,25)}. 따라서 이의 제어방법이 확립되면 철강재료와 알루미늄합금, 또는 마그네슘합금 간의 접합방법이 확립되어 각종수송기계의 경량화에 크게 기여하게 될 것이다.

8.3 접합공정의 모니터링 기술

FSSW 공정을 생산라인에 적용하기 위해서는 접합부의 건전성과 신뢰성을 실시간으로 모니터링하는 기술이 필요하다. 그러나 이러한 기술은 현재 확립되어 있지 않다. 현재 이용하고 있는 방법은 알루미늄합금의 겹치기 이음의 경우에 프로브의 압입 시 위판의 잔여두께가 접합강도와 직선적인 관계가 있음에 착안하여 잔여두께를 제어하여 접합부의 강도를 보증하는 방법을 취하고 있다. 그러나 이러한 방법은 판재의 두께, 대상재료의 변화에 효율적으로 대응할 수 없다.

접합공정의 모니터링 방법으로 음향방출법(Acoustic emission)에 의한 모니터링 기법에 관한 연구가 국내에서 발표되고 있어³²⁾ 매우 고무적으로 생각된다. 모니터링 방법이 확립되기까지는 앞으로 이에 관한 많은 데이터가 축적되어야 할 것이다. 금후 이러한 음향방출법 이외에도 여러 가지 비파괴적으로 실시간 모니터링 기법 기술이 개발 확립될 것이다.

8.4 FSSW-레이저 하이브리드 공정개발

FSSW(마찰교반용접) 방법의 특징을 살려 고품점 소재의 FSSW접합을 위해 현재 FSSW-레이저 하이브리드 공정이 다양하게 연구 검토되고 있다. FSSW공정에 있어서도 이러한 하이브리드 시스템이 개발되어 고품점 소재 또는 두꺼운 판재의 접합 시 매우 유용하게 쓰일 것으로 예측된다.

8.5 로봇시스템화 기술

현재 FSSW의 로봇 채용은 일본의 Kawasaki 중공업에서 개발되어 Mazda자동차, Toyota 자동차 등 자동차 생산라인에 적용되고 있다. 그러나 이들 시스템은 공정의 모니터링이나 대상소재와 두께의 변화에 따른 톨의 자동교환 시스템 등에 미흡한 부분이 남아있는 것으로 파악되고 있다. 따라서 금후 이러한 시스템이 보완되고 보다 능률적인 로봇시스템이 개발될 것으로 예상된다.

8.6 향후 FSSW기술의 응용전개

현재 FSSW기술이 적용되고 있는 분야는 자동차분야에 국한되고 있는 것으로 파악되고 있다. 그러나 FSSW기술의 원천기술인 FSW기술이 이미 적용되고 있는 알루미늄 고속선박, 우주항공, 철도차량 분야에 FSSW기술이 빠르게 확산되어 갈 것으로 예상된다.

고속 선박 선체의 상부 구조, 선체 패널 등에 유럽에서는 현재 FSW기술이 적용되고 있다. 이를 FSSW기술로 대체함으로써 보다 효율성과 경제성을 증진할 수 있고, 이들 구조를 FSSW기술을 이용하여 알루미늄과 철강 또는 마그네슘 간의 이종 접합구조로 함으로써 경량화와 경제성을 동시에 만족하는 구조가 될 것으로 예상된다.

항공우주 분야에서는 미국의 Boeing사가 FSSW분야에서 가장 많은 특허를 등록 또는 출원하고 있다. 이 회사에서는 이미 로켓 연료탱크와 항공기 부재에 FSW기술을 적용하고 있다. 금후 FSW 기술의 연장 기술인 FSSW 기술은 항공기의 동체제작에 재래의 리벳접합을 대체 해 갈 만큼 크게 확산 되어갈 것으로 예상된다.

FSW기술을 응용하여 철도차량을 제작하는 기술은 일본이 가장 앞서 있어, 차량의 알루미늄 패널제작에 FSW기술이 폭 넓게 응용되고 있다. 이를 FSSW기술로 대체하면 효율성과 경제성의 증진을 가져올 수 있고, 알루미늄과 마그네슘 등 이종재료 접합구조를 사용

할 수 있어 강도나 내식성 등의 특성에 맞는 맞춤형 구조가 가능할 것으로 예상된다.

소형 휴대용기기, 냉장고, TV 등 가전 분야에서 기존의 저항 점용접의 대체기술로서 FSSW기술은 경제성, 효율성, 외관의 미려성을 만족할 수 있기 때문에 이 분야에서도 매우 많은 가능성을 지니고 있다.

9. FSSW기술의 국내 개발전략

9.1 FSSW기술의 국내 정착화와 인식제고

FSSW기술이 국내에서 확산 보급되지 못한 이유 중의 하나로 FSW(마찰교반용접)기술의 TWI와의 로열티 문제에 대한 오해를 들 수 있다. 그러나 FSSW기술은 FSW의 범주에 속하지 않음으로 로열티문제에서 자유롭다. 또한 FSW의 로열티 문제는 2015년에는 종료되기 때문에 국내에서도 이에 대응하여 개발전략을 세울 필요가 있다. 또 하나의 문제는 이 기술에 대한 인식 부족이다. 이를 극복하기 위해서는 이 기술에 관한 산, 학, 관, 연의 연구개발 위원회의 활동을 통해 인식을 확산시켜나갈 필요가 있다. 현재 대한용접접합학회내에 FSW연구위원회가 결성되어 매년 정기적인 활동이 이루어지고 있으나 이의 활동이 보다 활성화될 필요가 있다.

국내에서 FSSW접합부의 신뢰성 향상을 위한 연구개발활동이 보다 활성화되어야 한다. 다양한 소재를 대상으로 한 접합성 연구는 국내에서 이루어지고 있으나 접합강도를 향상시키기 위한 연구활동이 매우 미흡한 상황이다. 외국에서 이루어지고 있는 접합계면의 사전처리나, 복동 톨(Re-filling tool)을 이용함으로써 신뢰성 높은 접합강도를 얻기 위한 공정 개발에 관한 연구는 전무한 상황이다.

9.2 산학관연 협력연구체제의 구축

앞으로 선진국들과의 기술격차를 좁히고 중국, 인도, 브라질 등 후발국의 추격에 대응하기 위해서는 미래기술에 대한 중장기 개발과제를 도출하여 국내의 연구개발 역량을 집중시킬 수 있도록 산, 학, 관, 연이 협력하는 연구체제의 구축이 필요하다.

미국, 독일, 일본 등의 선진국들은 고도의 기술력과 연구인력을 갖춘 대형 제조업체가 많고 기업, 대학, 국공립연구기관들의 협력연구가 활성화되어 연구투자, 연구시설, 연구인력 등 연구개발 인프라에서 한국을 압도

한다. 이에 대하여 국내의 경우에는 연구인력이 중소기업체에 소량으로 한정되어 있어 연구의 질과 양에서 선진국들보다 매우 취약한 형편에 있다.

9.3 FSSW에 관한 규격화

신뢰성있는 FSSW 접합부를 얻기 위해서는 용접결합을 방지하고 고강도의 접합부를 위한 공정기준을 개발하여야 한다. 모델링과 시뮬레이션은 용접공정을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 이러한 결과를 통해 알루미늄이나 마그네슘 등 비철재료에 대한 FSSW공정의 가이드라인이 제시되어야 한다.

FSSW의 원천기술인 FSW의 경우에는 2003년부터 ISO규격화가 세계적인 활동으로 이루어지고 있다. FSSW에 관해서는 일본에서 위원회가 결성되어 가장 적극적인 활동이 이루어지고 있다. 국내에서도 이러한 세계적인 규격화 움직임에 능동적으로 동참해야 할 필요가 있다.

10. 결 론

1) 마찰교반 점 용접(Friction Stir Spot Welding : 이하 FSSW라 함)은 재래의 저항 점용접과 비교하여 에너지효율이 높고, 흠(fume)발생이 적으며, 부재 겹침부의 표면 성상에 영향을 크게 받지 않는다. 또한 접합강도가 저항 점용접보다 높고 우수한 접합 품질을 얻을 수 있는 경제적이고 고효율의 용접법이다.

2) 이 접합법은 2003년에 일본에서 실용화된 이래 Mazda, Toyota 등 자동차 회사에서 자동차의 차체 생산라인에 적용되어 경량화와 생산비 절감을 실현하고 있으며, 자동차 누적생산대수가 100만대가 넘을 정도로 실용화가 진척되고 있다.

3) NDSL 데이터베이스에 의하면 세계적으로 2006년부터 FSSW에 관한 논문이 2008년을 제외하고 30건 이상씩 발표되고 있으며, 2000년 이후 특허 출원건수는 99건에 이른다. 이중 52%정도가 일본 출원 특허이며, 우리나라의 연구논문 발표건수나 특허출원건수는 전체의 10% 정도에 이른다.

4) 현재 진행 중인 연구대상은 알루미늄합금 동종간, 알루미늄과 철강소재와의 이종재료 간 접합을 위한 최적의 접합공정변수 개발에 관한 연구가 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 접합 튜의 형상설계에 관한 연구가 그 다음을 차지하고 있다. 그러나 실용화를 위한 접합공정 변수의 가이드라인을 제시하는 수준에는 이르지 못하고 있다.

5) 우리나라의 FSSW 연구개발 활동은 논문발표건수나 특허 출원 건수에서 전체의 10% 수준으로 저조한 상태에 머물러 있고, 접합강도 수준도 외국에 미치지 못하고 있다. 또한 이 기술의 실용화 실적은 전무한 상태이다. 이것은 FSSW 기술의 인식 부족에 기인한 부분이 크다고 생각된다.

6) 금후 FSSW기술은 비철재료와 철강소재와의 이종재료 접합기술, 장수명 고효율의 접합 튜 소재 및 형상 개발, 접합품질 보증을 위한 공정 모니터링 기술, 레이저 광원과의 하이브리드 기술, 로봇 시스템화 기술 등의 개발 방향으로 발전되어 갈 것이다.

7) 현재 FSSW기술이 적용되고 있는 분야는 자동차 분야에 국한되고 있는 것으로 파악되고 있다. 그러나 FSSW기술의 원천기술인 FSW기술이 이미 적용되고 있는 알루미늄 고속선박, 우주항공, 철도차량 분야에 FSSW기술이 빠르게 확산되어 갈 것이다. 나아가 기존의 철강소재의 자동차, 선박, 가전 등 각종 산업분야에서 재래의 저항 점용접의 대체기술로서 빠르게 확산되어 갈 것으로 예견되고 있다.

후 기

본 기술해설은 한국과학기술정보연구원이 교육과학기술부의 과학기술진흥기금으로 수행하는 ReSEAT프로그램의 성과물입니다.

참 고 문 헌

1. Mishra, R.S. and M.W. Mahoney : Friction Stir Welding and Processing, Materials Park, ASM international (2007)
2. 藤本光生, ほか : 摩擦攪拌点接合で得られたアルミニウム合金継手における塑性流動に関する検討, Quarterly Journal of JWS, **26-1** (2008), 67-73 (in Japanese)
3. 藤本光生, ほか : ハイブリッド車におけるFSSW技術, Journal of JWS, **80-3** (2011), 227-230 (in Japanese)
4. 대한용접접합학회, 용접접합편람 III 공정 및 열가공(2007) 197 (in Korean)
5. Zang, Z. et.al : Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, Materials & Design, **32-8/9** (2011) 4461-4470
6. H.S.Shin, Y.C.Jung, K.Choi : Effects of Tool Speed on Joining Characteristics during Friction Stir Spot Welding of Mg-alloy(AZ31B) Sheet, Journal of KWJS, **29-2** (2011) 80-87 (in Korean)
7. Karin Witthar, et.al : Swept FSSW in Aluminum alloys through Sealants and Surface Treatments, Friction Stir Welding and Processing VII, TMS(The Minerals, metal & Materials Society), 2011

8. C.Y.Lee, D.H.Choi, Y.M.Yeon, W.C.Seo, S.B.Jung : Friction Stir Spot Welding of Steel Alloy, Journal of KWJS, **26-6** (2008) 556-561 (in Korean)
9. I. Ikegami, et.al. : Effect of Tool Geometry on Joint Strength of Mg Alloy by Spot Friction Welding, Preprints of the National Meeting of Japan Welding Society No.78 Spring 2006, Paper #215
10. Su, P. et.al : Energy utilisation and generation during friction stir spot welding, Science and Technology of Welding & Joining, **11(2)**, Mar.(2006) 163-169
11. Su, p. et.al : Energy Generation and Stir Zone Dimensions in Friction Stir Spot Welds, SAE technical Paper, 2006-01-971, SAE 2006 World Congress, April **3-6**, 2006, Detroit, MI, USA.
12. H. Badarinarayn : Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. International Jnl. of Machine Tools & Manufacture **49** (2009), 814-823
13. S. Hirasawa, et.al : Analysis effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method, Jnl. of materials processing technology., **210-11**(2010) 1455-1463
14. Y. Tozaki, et.al :A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. Jnl. of materials processing technology, **210**, -6/7 (2010) 844-851
15. Choi, D.H, Lee, C.Y, Ahn, B.W : Frictional wear evaluation of alloy tool in friction stir spot welding of low carbon steel plates, International Jnl. of refractory metals & hard materials, **27-6** (2009) 931-936
16. M. Kumagaki, K. Aoki : Development of Adjustable Friction Stir Spot Welding, Light metal welding, **44-12** (2006) 560-564
17. Y. Uematse, K. Tokaji : Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welding joint in Al-Mg-Si alloy, International Jnl. of fatigue, **30-10/11** (2008) 1956-1966
18. K. Tanaka, M. Kumagagai, H. Yoshida: Dissimilar joining of aluminum alloy and steel sheets by friction stir spot welding, Light Metal, **56-6** (2006) 317-322 (in Japanese)
19. K. Yoshikawa : A Joining Criterion for Lap Joining of Dissimilar Metal Materials of Aluminum and Stainless Steel, Proceedings of 4th International Symposium on Friction Stir Welding, May 14-16, Park City, Utah, USA (2003)
20. T. Gendo, et. al : Spot Friction Welding of Aluminum to Steel, 2007 SAE International (2007) 765-771
21. M. Watanabe, K. Feng, Y. Nakamura and S. Kumai : Growth Manner of Imtermetallic Compound Layer Produced at Welding Interface of Friction Stir Spot Welded Aluminum and Steel Lap Joint, Materials Transactions, **1-5** (2011), 953-959
22. K. Feng, M Watanabe, S. Kumai : Microstructure and Joint Strength of Friction Stir Spot Welded 6022 Aluminum Alloy Sheets and Plated Steel Sheets, Materials Transactions, **52-7** (2011) 1418-1425
23. K. Miyagawa, et. al : Lap Welding between Aluminum Alloy and Low Carbon Steel by Friction Stirring, Preprints of the National Meeting of Japan Welding Society, no.78 spring paper # 331(in Japanese)
24. Dustin J : FSSW of Mg to Al with a Cold Sprayed Interlayer, Friction Stir Welding and Processing VI, TMS, 2011, 409-424
25. Choi D. H, et.al : Formation of Intermetallic Compounds in Al and Mg Alloy Interface during Friction Stir Spot Welding, Intermetallics, **19-2** (2011) 125-130
26. Y.M.Yeon, C.Y.Lee, W.B.Lee, S.B.Jung, W.S.Chang : Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys, Journal of KWJS, **23-3** (2005) 16-20 (in Korean)
27. 연운모, 이창용, 이원배 : 마찰교반 점용접법을 이용한 5052Al 합금의 접합, Preprints of the National Meeting of KWJS, 2005 Spring (2005) 235-237(in Korean)
28. 표성은, 아창용, 최돈현 : 6XXX계 알루미늄 합금의 마찰교반 점용접시 접합변수에 따른 삽입하중 및 접합강도의 변화, Preprints of the National Meeting of KWJS, Nov. 15 (2007) 339-341(in Korean)
29. 권준모, 박경채, 고영봉 : 마찰점 접합을 이용한 알루미늄 5000계 합금의 접합특성, Preprints of the National Meeting of KWJS, 2005 Spring (2005) 169-170 (in Korean)
30. 조현진, 김홍주, 노중석 : 마찰교반점용접(FSJ)을 이용한 자동차용 Al합금의 접합성 평가, Preprints of the National Meeting of KWJS, 2005 Spring (2005) 177-179(in Korean)
31. 김특시, 조현진, 김홍주: 마찰교반 점용접(FSJ)을 이용한 Al 합금접합 Preprints of the National Meeting of KWJS, Oct.19, (2006) 219-221(in Korean)
32. Chang W.S, Choi H.J, Kim H.J, Evaluation of Friction Spot Joining Weldsbility of Al Alloy for Automotive, Materials Science Forum, v.539/543, **no.1** (2007) 411-416
33. C.K.Chun, H.J.Kim, W.S.Chang : Friction Stir Spot Joining on Aluminum Alloy for Transportation, Journal of KWJS, **26-6** (2008) 23-29 (in Korean)
34. 천창근, 박인규, 엄경수: 알루미늄압출재의 접합강도에 영향을 미치는 마찰교반점 용접 통형상에 관한연구, 한국철도학회 2009년도 춘계학술대회 논문집 특별세미나, May 21, (2009), 559-564(in Korean)
35. 정윤철, 박성수, 신형섭: 마그네슘합금판재의 마찰교반점용접시 틀속도가 접합특성 및 강도에 미치는 영향, Preprints of the National Meeting of KWJS, 2010, Spring Paper, May, **13**(2010) 63-64(in Korean)
37. 이창용, 이재홍, 이원배, 저탄소강과 5J32 알루미늄합금의 이중 마찰교반점용접, Preprints of the National Meeting

- of KWJS, 2006 Autumn Paper, Oct. 19, (2006) 115-116(in Korean)
38. Cheon C.G, Kim T.G, Rajesh S. R, Friction Spot Joining of Dissimilar Materials, Preprints of the National Meeting of KWJS, 2007, Autumn Paper, Nov. 15, (2007) 155-157
39. Chun C. K, Kim H.J, Kim T.K, Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32/A6022-T4, RIST Journal of R&D, **21-4** (2007) 281-286
40. 이창용, 이재홍, 이원배 : STS 304의 마찰교반 점용접, Preprints of the National Meeting of KWJS, 2006, Autumn Paper, Oct.19, (2006) 240-241(in Korean)
41. Y.W.Lee, H.C.Lee, J.W.Park : Development of Monitoring Process of Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys using Acoustic Emission, Journal of KWJS, **28-5** (2010) 10-14 (in Korean)
42. Surrendar Matya, Andrey Gumenyuk : 溶接における近年の進展, Journal of JWS, **79-4** (2010) 292-298 (in Japanese)



- 김영식
- 1944년생
- 한국과학기술정보연구원
- 용접부 파괴와 강도, 용접공정, 재료공학
- e-mail : yskim@hhu.ac.kr