

## 마찰교반용접기술의 개발과 응용

이창길·김성준  
(한국기계연구원 공정연구부)

## Development and Application of Friction Stir Welding Technology

C. G. Lee and S. J. Kim

### 1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, 이하 FSW) 기술은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 새로운 고상접합기술로 최근 그 연구가 활발히 진행되고 있다. 고상접합기술인 기존의 마찰압접기술도 FSW와 유사한 점이 있기는 하나 접합원리상 원형의 단면에만 적용할 수 있는 극히 제한적인 기술임에 비해 FSW는 보다 다양하고 쉽게 적용할 수 있는 기술로서 각광받고 있다. Fig. 1은 1980년 이후 20년간 일본 내에서 발표된 FSW를 포함한 마찰압접과 레이저 용접 관련 연구논문 수의 추이를 보여주는 것이다.<sup>(1)</sup> 레이저 용접과 관련된 연구논문의 발표는 1986년경부터 급격히 증가하고 있으나, 마찰압접에 관한 논문은 1990년대에 들어 증가하고 있는 것을 보여주고 있다. 특히 1998년 이후 FSW에 관한 논문이 급격히 증가하고 있어 1990년대 후반부터 일본에서는 FSW에 대한 연구가 본격적으로 진행되었음을 알 수 있다. 이와 함께 FSW에 관한 특허 출원의 수도 1996년 이후 약 10배 이상 급격히 증가하였으며, 1999년부터 2001년까지 세 차례의 대규모 국제 심포지엄이 열린데 이어 2003년 5월에 제4차 심포지엄이 개최되어 FSW 기술에 전 세계적으로 큰 관심이 집중되고 있음을 알 수 있다. 국내에서도 최근 일부 연구자들이 FSW 기술에 대한 연구를 수행하고 있다.

본 고에서는 지금까지의 FSW 관련 기술개발 현황과 실제 적용사례, 장래의 전망 등에 관하여 서술하고자 한다.

### 2. FSW의 접합원리와 특징

Fig. 2는 FSW의 접합 원리를 도식화하여 표현한 것이다. 나선산 형태의 돌기를 가지는 환봉 모양의 경질재료 tool을 고속으로 회전시키면서 피접합재의 접합부에 삽입하면 tool과 피접합재와의 상호마찰에 의해 열이 발생한다. 마찰열에 의해 tool 주변의 소재는 열적으로 연화되며 tool의 회전에 의한 강제적인 소성유동으로 혼합된다. 이와 같은 원리로 피접합재의 접합이 이루어진다. 따라서, MIG(metal inert gas) 또는 TIG(tungsten inert gas) 용접, GMAW(gas metal arc welding), 레이저 용접, 전자빔 용접 등과 같은 기존의 접합기술과는 달리 별도의 열원(heat source), 용접

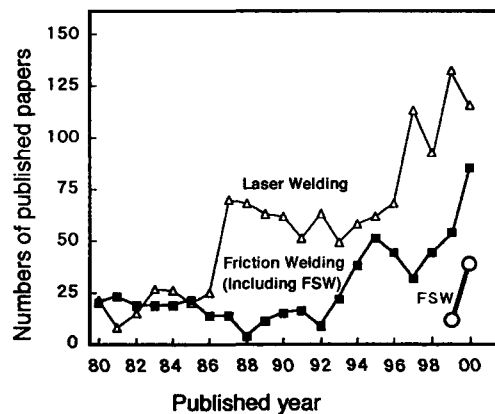


Fig. 1 Trend of number of papers for friction welding and laser welding in Japan<sup>(1)</sup>

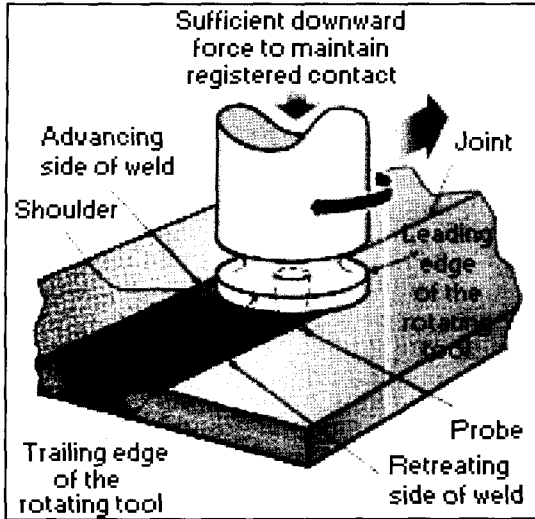


Fig. 2 Concept of friction stir welding

봉, 용가제(filler), flux 등이 불필요하며 접합 과정에서 유해광선이나 유해물질이 배출되지 않기 때문에 경제적이면서도 환경친화적인 접합기술로 평가 받고 있다. FSW의 특성 또는 장점을 열거해 보면 다음과 같다.

- (1) 고상 상태에서 접합하기 때문에 접합에 따른 변형이 매우 적다.
- (2) 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 티타늄 합금, 다이캐스팅 등으로 제조된 주조 제품, 금속기지 복합재료 등 기존 용접 기술의 적용이 거의 불가능했던 재료의 접합이 가능하여 피접합재에 대한 자유도가 높다.
- (3) 기존 용접과 달리 별도의 열원 발생장치, 용접봉, 용가제, flux, 분위기 가스 등을 사용할 필요가 없으며 접합부위의 전처리도 원칙적으로 불필요하다.
- (4) 용접시의 입열량은 동일한 용접속도에서 MIG 또는 GMAW 경우의 60% 이하로 낮다.
- (5) 용접부 또는 접합재의 기계적 강도는 모재의 70% 수준 이상을 나타내며, 특히 피로특성이 우수하다.
- (6) 용융 용접에서 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함이 거의 발생하지 않는다.
- (7) 접합 중 유해가스나 유해 광선이 발생하지 않아 작업환경이 친환경적이다.
- (8) 고속접합이 가능하고 접합에 필요한 에너지가 적어 원가절감이 가능하다.
- (9) 작업자의 숙련도나 기량에 크게 의존하지 않기 때문에 상당한 수준의 표준화와 자동화가

가능하다.

한편 FSW가 지나는 단점 또는 문제점을 열거해 보면 다음과 같다.

- (1) 복잡한 3차원 곡면 형상의 접합이 어렵다.
- (2) 접합부 종단에 tool 돌기부의 구멍이 남는다.
- (3) 접합부 뒷면에 마찰압력에 견딜 수 있는 back-up 재료가 필요하다.
- (4) 접합용 tool 재료의 제한으로 피접합 재료가 아직까지 경금속 또는 저융점 금속에 한정되어 있다.

이상과 같이 FSW 기술은 단점보다는 장점이 훨씬 많은 접합법으로 이해되고 있으며 위에서 지적된 단점들도 기술적으로 해결 또는 보완되어 가고 있으므로 빠른 시일 내에 폭 넓게 응용될 것으로 예상된다.

### 3. Tool의 재질과 형상

FSW 기술의 원리에서 알 수 있듯이 접합을 위한 마찰열의 발생에 있어 가장 중요한 요소는 tool의 재질과 형상이다. 특히 tool의 선단 돌기부에는 높은 마찰열과 전단응력을 가해지기 때문에 내마모성, 인성과 함께 고온 전단강도가 매우 중요한 인자이다. FSW 기술을 개발한 영국의 TWI에서는 주로 공구강재 tool을 사용하였기 때문에 알루미늄과 마그네슘 합금이 주요 연구대상이 되어왔다. TWI에서는 주로 공구강인 AISI-H13을 사용하며 일본 나고야대학의 Shinoda는 마르텐사이트계 스테인레스강인 SUC440을 이용하는 것으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 저자들은 SKD 공구강을 사용하고 있다. 향후 다양한 재료의 접합에 FSW 기술이 폭 넓게 적용되기 위해서는 피접합재의 특성에 적합한 tool이 개발되어야 하며, 실제로 tool 재료의 개발과 아울러 코팅 등에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

Tool의 재질 못지않게 중요한 것이 tool 돌기부의 형상이다. Tool 선단에 있는 돌기부의 길이, 즉 피접합재로 진입되는 길이는 피접합재의 두께와 같거나 약간 짧은 것이 일반적이다. FSW와 관련된 많은 특허가 돌기부의 형상 개발에 집중되고 있을 만큼 돌기부의 형상이 접합부의 특성에 큰 영향을 미친다. Fig. 3은 돌기부 형상의 한 예를 보여주는 것이다. 일반적으로는 아주 단순한 직선형의 편이나 약간의 경사가 있는 편이 이용 되는데, 대개의 경우 나사산을 가공하여 이용

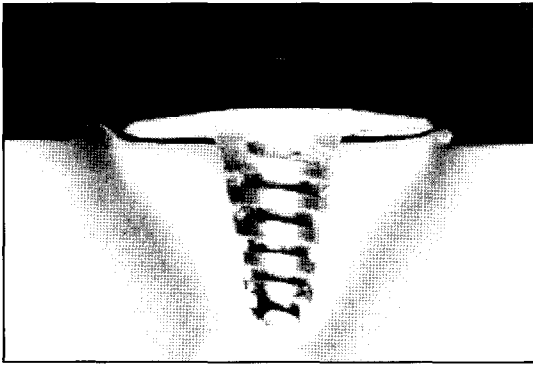


Fig. 3 Shape of tool for friction stir welding

하며 특이하고 복잡한 형상으로 가공하는 경우도 있다.

Tool의 shoulder는 돌기부의 전방에서 피접합재에 예비적으로 열을 가하고 tool의 진입시 절삭물의 배출을 막는 역할을 하기 때문에 필수적으로 존재해야 하는 부분이다. 돌기부와 연결되는 shoulder의 면을 약간 오목하게 가공하여 사용하는데, 이는 shoulder의 회전에 의해 접합부 표면직하에서의 소성유동을 촉진하고 혼합교반의 효과를 증대시키기 위함이다. 그러나 shoulder 면의 최적 형상에 관해서는 아직 알려진 바가 없어 이에 대한 규명이 필요하다.

한편 접합시 tool은 대부분의 경우 진행방향에 대하여 약 3~5° 정도의 전진각을 가지도록 설치한다. 전진각의 의미와 효과에 대해서는 아직까지 완전히 밝혀져 있지 않지만 tool의 수명 개선과 마찰에 의한 접합부의 소성유동 현상을 촉진하기 위한 것으로 생각되고 있다. Shinoda는 1100 및 5003 알루미늄 이종재 접합부 내에서의 마그네슘 분포를 분석하여 소성유동 현상에 미치는 전진각의 영향을 실험적으로 조사하였다.<sup>(2)</sup> 그는 tool 전진각이 클수록 교반력은 증대하고 접합부 내에서 소성유동이 정체되는 점(stagnant point of metal flow)이 상승함으로써 결함이 소멸되는 긍정적인 영향을 준다고 보고하였다. 그러나 판재 표면과 평행한 수평방향의 유동이 주체가 되며 상하방향의 유동은 인지되지 않는다는 주장<sup>(3)</sup>도 있어 이에 대해서는 보다 더 상세한 검토가 필요하다.

열원으로서의 tool의 역할을 고려할 때 재질과 함께 돌기부 및 shoulder의 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다. 지금까지의 FSW 기술 개발동향이나 관련 특허들을 살펴보면 tool의 형상과

재질에 많은 know-how가 있음을 알 수 있다. 현재 TWI에서는 tool의 형상과 재질을 연구하는 대형 group sponsor project를 수행하고 있다. 따라서 tool의 재질과 형상이 FSW 기술의 핵심이라 할 수 있다.

#### 4. 알루미늄 합금 판재의 접합

저자들은 자체적으로 설계하여 제작한 FSW 설비를 FSW 설비를 이용하여 다양한 알루미늄 합금 판재들에 대하여 접합실험을 수행하였으며, 5083(H32), 6061(T6), 7075(T6), 그리고 A356(T6) 알루미늄 합금을 사용하였다. 접합시 tool 회전속도는 1,000~2,500rpm, 접합속도는 100~500mm/min의 범위에서 실시하였다. Fig. 4는 FSW 기술을 적용하여 접합된 알루미늄 합금 접합재의 예를 보여 주는 것이다. 접합이 완료된 접합재들에 대하여 용접부 내의 결함 발생여부를 조사하였는데, 일부 접합 재에서 결함들을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 결함들은 Fig. 5에서와 같이 공동의 형태로 나타나는데, tool 회전에 따른 주변 재료의 소성유동이 원활하지 않기 때문에 발생하는 것이다. 이러한 결함들은 대체로 tool 회전속도 또는 접합속도가 지나치게 빠르거나 낮은 경우에 발생하고 있어 알루미늄 합금의 종류에 따라 적정한 접합조건이 범위가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 두께 8mm인 A356 합금과 6061 합금을 2-pass에 걸쳐 접합한 모습인데 접합부 내부에 어떠한 결함의 발생도 없이 건전하게 접합되어 있음을 볼 수 있다. 이는 이종(異種) 소재 접합의 한 예를 보여주는 것으로, 용융점의 차이가 그리 크지 않은 알루미늄 합금과 마그네슘

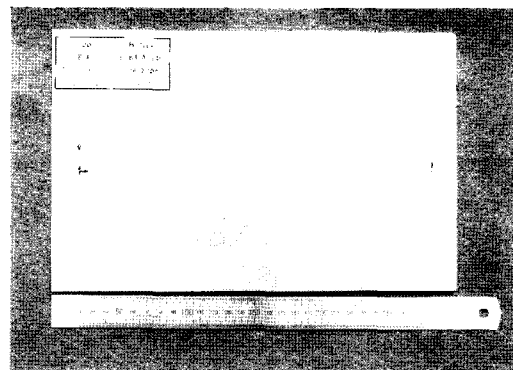


Fig. 4 A FSWed 6061 aluminum alloy plate

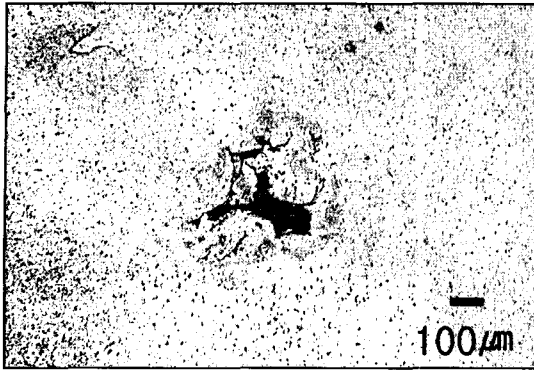


Fig. 5 Welding defect of FSWed aluminum alloy plate

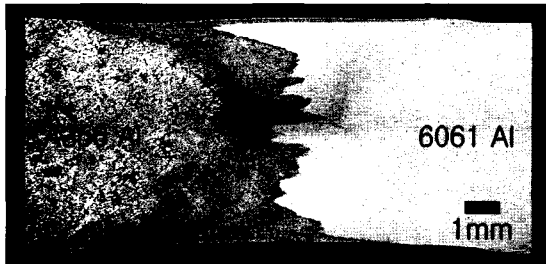


Fig. 6 Microstructure of a FSWed A356/6061 aluminum alloy plate

합금, 알루미늄 주조재 합금(casting alloy)과 알루미늄 전신재 합금(wrought alloy), 금속기지 복합재료(MMC)와 기지합금(matrix alloy) 등과 같은 다른 소재들 사이의 접합이 FSW 원리상으로 충분히 가능하다

### 5. 접합재의 미세조직과 기계적 성질

Fig. 7은 7075 알루미늄 합금 접합재의 매크로 조직과 함께 부위별로 미세조직을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 거시적으로 모재(A 영역), 열-기계적 영향부(B 영역, TMAZ, thermo-mechanically affected zone), 그리고 접합부(C 영역, weld nugget)으로 구분될 수 있으며, 모재와 TMAZ 사이에 열영향부(HAZ, heat-affected zone)가 존재한다. 그림에서 볼 수 있듯이 접합부 영역은 모재와는 완전히 다른 형태의 미세조직을 나타내는데, 크기 수 마이크로미터 미만인 등축형의 결정립들로 이루어져 있다. 이러한 미세조직은 동적 재결정에 의해 형성된다고 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 열-기계적 영향부에서는 소성변형과 국부적인 재결정 영역이 동반된다. 그리고 열영향부는 접합부로부터 전도된 열에 의한 영향으로 석출상의 조

대화 또는 분해, 회복 등이 발생한다.

Fig. 8은 2-pass에 걸쳐 접합된 두께 8mm A356 합금 판재의 미세조직을 관찰한 결과이다. A는 모재 영역을 나타내는 것으로 수지(dendrite)와 공정(eutectic) Si 입자들로 이루어진 전형적인 주조 상태의 미세조직을 가지고 있다. 반면, B로 표시된 접합부 영역의 미세조직에서는 주조조직이 완전히 파괴되어 수지상의 흔적을 관찰할 수 없고 공정 Si 입자들이 고르게 분포되어 있다. B와 같은 미세조직의 형태는 압연, 단조, 압출 등

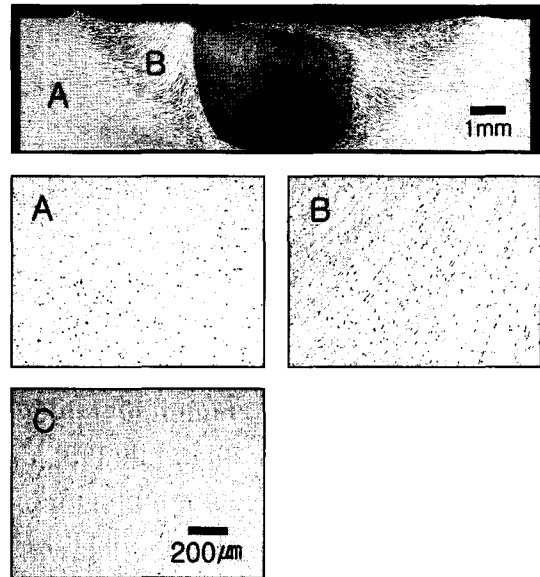


Fig. 7 Microstructure of FSWed 7075 aluminum alloy plate

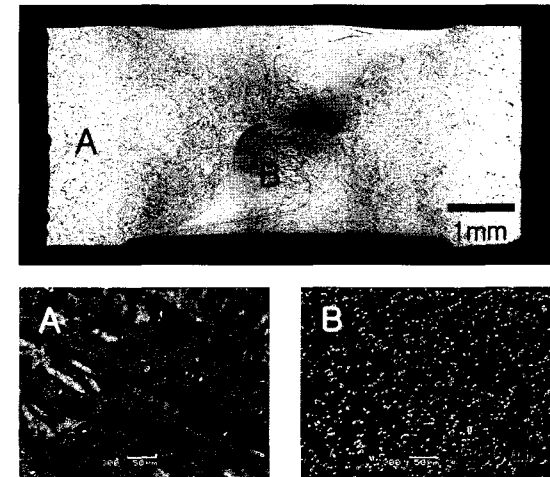


Fig. 8 Microstructure of FSWed A356 aluminum alloy plate

과 같은 일반적인 소성가공 과정을 통해서만 만들어지기 어려우며, tool 회전 에 따른 강력한 소성유동과 회전교반에 의해 형성된다. 이와 같은 마찰열의 발생, 소성유동과 회전교반, 이에 따른 동적 재결정 등의 미세조직 변화 효과를 조직 미세화 또는 2차상 입자의 분포 개선에 활용할 수 있을 것이다.

접합부 내에서의 미세조직 변화에 소성유동 및 회전교반과 함께 마찰열에 의한 온도상승이 직접적인 영향을 끼친다. 기본적으로 FSW는 비용융 상태의 고상접합으로 분류되지만 Bjorneklett는 접합과정에서 tool 돌기부와 shoulder의 바로 아래는 상당히 높은 온도까지 상승하기 때문에 70-30개의 알루미늄 합금의 경우 승온속도가 330°C/s 이상이 되면 국부적인 용해현상이 생길 가능성이 있다고 하였다.<sup>(1)</sup> 그러나 알루미늄 합금 접합과정에서의 온도상승에 대한 측정 결과를 보면 최고 온도가 대개 450~500°C 정도로 알루미늄의 용융 온도인 660°C 보다 상당히 낮아 고상에서 접합이 이루어진다.<sup>(5)</sup> FSW가 고상에서 이루어지는 것은 기존의 접합공정과 비교하여 소재에 가해지는 입열량이 낮기 때문이다. FSW는 GMAW 또는 MIG 등과 같은 기존의 접합 공정 보다 낮은 약 50% 정도의 입열량으로 접합이 가능한 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 이는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 다른 접합 공정에 비해 접합 후 변형을 극소화시키는 효과가 있으며, 접합시 최고온도가 낮다는 사실과 함께 낮은 입열량은 FSW의 가장 큰 이점 중 하나로 평가된다.

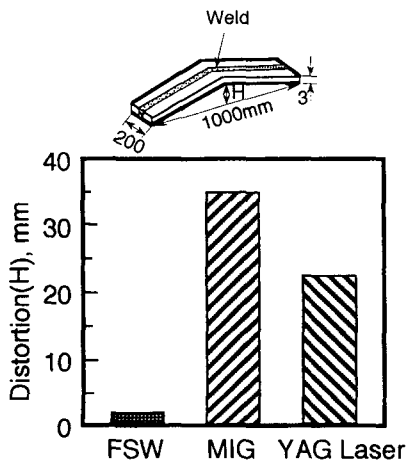


Fig. 9 Comparison for welding distortion with various welding methods<sup>(6)</sup>

접합재의 기계적 성질은 FSW 설비 또는 tool의 형상에 따라 많이 달라지므로 여러 연구자들로부터 얻어진 결과를 직접 비교하기는 어렵다. 특히 설비에 대한 의존성은 어떤 의미에서는 FSW를 시행하는 각 기업들의 know-how와도 관계되므로 기계적 성질의 추측은 가능하여도 실제 값에 얼마나 접근하는지에 대해서는 조심스럽게 판단해야 한다. 저자들이 수행한 연구의 경우 Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 접합재의 정적 강도특성은 모재의 약 70% 이상이며 5083 합금의 경우에는 모재와 거의 비슷한 수준을 나타낸다. Klugen 등<sup>(7)</sup>에 따르면, 여러 가지 접합공정으로 접합된 A6006 알루미늄 합금 접합재의 강도를 비교했을 때 플라즈마 용접의 경우 가장 높은 194 MPa이며 FSW를 적용한 경우에는 175 MPa가 얻어졌다. 그러나 연성은 가장 높은 값인 22%에 달하였다. 알루미늄 합금은 열처리형과 비열처리형으로 대별되는데 열처리형 합금은 용융용접을 할 경우 특성의 변화가 상당히 심하여 접합에 많은 문제점이 있었다. 그러나 항공기에 사용되고 있는 2000 및 7000계 합금에 FSW를 적용한 경우 피접합재를 미리 시효처리하여 접합한 재료와 접합 후 시효처리 한 판재 모두 모재의 80-90%에 달하는 높은 강도가 얻어져 FSW가 매우 유용한 공정임을 보여주고 있다.<sup>(8)</sup> 한편 일본에서 철도차량에 광범위하게 이용하고 있는 6000계 합금의 경우에는 접합과 시효처리의 순서가 기계적 성질에 많은 영향을 주는데 FSW 접합 후 시효처리를 하면 평균적으로 약 50 MPa 정도의 강도 증가가 이루어진다고 보고하고 있다.<sup>(9)</sup>

Table 1 Mechanical Properties of various FSWed aluminum alloy plates

Alloy	Yield Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation (%)
5083	147~150 (137)	298~300 (306)	15~18 (22)
6061	135~150 (246)	210~240 (311)	10~15 (15)
7075	303~322 (510)	473~481 (583)	10~12 (13)
A356	123 (207)	200 (283)	16 (10)

( ) : Properties of matrix alloy

## 6. FSW 기술의 적용

FSW의 응용분야는 해양개발, 석유화학, 전기 및 기계, 발전소, 철도, 원자력, 항공우주, 자동차, 공작기계, 그리고 금속재료업계 등에서 아주 다양하게 검토되고 있다. FSW가 최신의 접합공정 기술이므로 FSW를 응용하고자 하는 각 기업들은 이를 이용한 제품 개발을 극비에 진행하고 있다. 여기에 소개하는 예들은 공개된 TWI 자료와 FSW 국제심포지엄<sup>(10-12)</sup>에서 발표된 자료를 정리한 것이다.

### (1) 항공우주 분야

항공기 분야는 접합부의 기계적 특성 향상에 의한 박육화가 이루어지면 경량화에 따른 탑재화물의 증가가 가능하므로 절대적인 경제적 효과가 기대되어 가장 많은 투자가 이루어지고 있다. 적용이 비교적 용이하다고 판단되는 독립 부품들에 대한 연구개발이 가장 활발히 수행되고 있으며 항공기 기체에 적용을 위한 개발도 진행되고 있다.

- 로켓의 연료탱크 : 보잉사에서 Delta II 로켓의 중앙 동체부에 적용한 이후 Delta IV 로켓, space shuttle 등에서의 적용이 예정되어 있다. 지금까지의 평가결과에서는 과거에 비해 강도가 약 30~50% 증가하고 결함의 빈도는 약 10%로 줄어 생산 경비가 60% 정도 절감되는 효과가 있는 것으로 밝혀졌다.

- Airbus 3XX 대형 항공기의 날개 및 동체 일부 : 현재 접합부의 피로강도, 경년열화, 부식 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

- 착륙장치용 door : 7000계 알루미늄 합금으로 다수의 리벳 접합을 제거할 수 있다.

- 기타 전투기의 방향타용 부품이나 비행기 외장 등에 대한 개발이 진행 중에 있다.

### (2) 자동차 분야

대량 생산을 전제로 하는 자동차 분야에서는 일단 개발에 성공하면 파급효과가 매우 크기 때문에 극비리에 개발이 진행되고 있으며 최근 들어 개발 현황이 조금씩 알려지고 있다. 현재로서는 소량 생산되는 차종과 부품부터 일부 적용되고 있으며, 알루미늄 주물재와 마그네슘 합금 부품에의 적용도 검토되고 있다. 현재까지 알려진 개발 현황을 보면 space frame의 접합(Tower Automotive사), aluminum wheel(Kuka 등), intake manifold(Pipe & Die Cast사), 트럭용 유압 lift panel, seat frame(SAPA Volvo 등), engine

supporter mount(Tower Automotive사 등), suspension arm(최근 유럽의 여러 차종에 탑재), tailored blank(판 두께 차이 1:2), 로봇을 이용한 FSW 공정의 자동화(Neos, Giddings & Lewis, Hexapod, GKSS) 등이 발표되고 있다.

### (3) 해양 및 기타 분야

Marine Aluminum사는 FSW 기술을 최초로 실제 적용한 회사로서 선박용 대형부품, deck, helicopter 등의 알루미늄 제품에 적용하고 지금까지 실제 제품에 적용한 총 접합길이는 200 km 가까이 달하는 것으로 추정되고 있다. 고속 선박용 deck, 격벽, 어선용 냉동기의 냉각판, 철도차량의 내부, laser system 증추부의 초정밀 housing, 교량, 건물 외벽, curtain wall, motor housing, 내외장용 panel, portable cabin, speaker frame 등 많은 분야에서 적용을 위한 개발이 진행되고 있다.

앞으로는 FSW 설비의 개발에 따라 원자력 발전소 내 피폭재료의 보수, 항공기 부품, 액체수소 용기, 자동차 분야 등에 본격적인 응용을 시도하는 등 지금까지는 접근이 어려웠던 분야에의 적용을 향한 연구개발이 계속될 것으로 전망된다.

## 7. 결론

FSW는 기존 접합공정의 개념을 넘어선 획기적인 접합기술로 판재의 마찰 압접을 가능하게 하였으며 경제성, 환경친화성 등 여러 가지 측면에서 뛰어난 장점을 지니고 있어 향후 활발한 응용이 기대된다. 그러나 FSW 기술이 발표된 지 10년 이상 지났음에도 불구하고 아직 완전한 실용화를 위해서는 해결되어야 할 과제들이 많은 것도 사실이다. 특히 TWI가 순수 연구개발 기관인 대학이나 연구소에까지 연구개발에 대한 막대한 특허사용료를 요구하는 등 매우 배타적으로 특허권을 행사하고 있어 FSW 기술 발전에 커다란 걸림돌이 되고 있다. 그럼에도 불구하고 FSW 기술은 앞으로 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용될 것으로 기대되므로 향후의 기술개발 동향을 주시할 필요가 있다.

## 참고 문헌

- (1) T. Shinoda, 2002, "마찰교반접합의 특장과 금후의 전망", 마찰교반접합기술의 최신동향과 실용예, 일간공업신문사, 일본, pp. 7-15.
- (2) T. shinoda, 2001, "Friction Stir Welding의 기초와

- 실제”, 용접기술, 6 월호, 일본, pp. 16~21.
- (3) 佐藤裕, 粉川博之, 2001, “ 마찰교반접합부의 재료조직학적 특징 ”, 일본용접학회 춘계학술대회 강연개요집, 일본, p. 297.
- (4) Dowes, C. J., 1996, “Seam Welding Sheet and Plate, using Friction Stir Welding Process”, Proc. Of the 6th Int. Symp., Japan Welding Society, Nagoya, Japan, pp. 711~718.
- (5) Yang, H. S., 1998, “Microstructural Development in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys”, Proc. Int. ICAA, Toyohashi, Japan, pp. 1483~1488.
- (6) 青田, 舟生, 岡村, 江角, 1999, “ Friction Stir Welding 범의 입열량에 따른 접합부의 특성 ”, 일본용접학회 강연개요집, vol. 64, 일본, pp. 156~157.
- (7) Klucken, A. O. and Raney, M., 1995, “Aluminum Bridge Construction – Welding Technology and Fatigue Properties”, Svetsaren, vol. 50, no. 3, pp. 13~15.
- (8) 田中直, 熊谷正樹, 八太秀周, 吉田英雄, 佐藤廣明, 2001, “ 마찰교반접합된 항공기용 알루미늄 합금의 접합부 특성 ”, 일본경금속학회 강연개요집, 일본, pp. 241~242.
- (9) T. shinoda, 2001, “Friction Stir Welding 의 기초와 실제 ”, 용접기술, 9 월호, 일본, pp. 32~36.
- (10) 1999, Proc. Of the 1st Friction Stir Welding Symposium, TWI, Thousand Oaks, CA, USA.
- (11) 2000, Proc. Of the 2nd Friction Stir Welding Symposium, TWI, Gothenburg, Sweden.
- (12) 2001, Proc. Of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, TWI, Kobe, Japan.