

마찰교반용접기술의 개발과 응용

김성준, 이창길, 김상식 | 한국기계연구원 외

1. 서론

마찰교반용접(friction stir welding, 이하 FSW) 기술은 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 새로운 고상접합기술로 1991년에 특허로 등록되었으며 최근 유럽과 미국 및 일본을 중심으로 활발한 연구와 함께 상업화가 진행되고 있다. 기존의 마찰용접(friction welding) 기술도 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. 그림 1은 1980년 이후 20년간 일본 내에서 발표된 마찰용접 및 레이저 용접 관련 연구논문 수의 증가 추이를 보여주는 것이다.^[1] 레이저 용접과 관련된 연구논문의 발표는 1986년경부터 급격히 증가하고 있으나, 마찰용접에 관한 논문은 1990년대에 들어 증가하고 있는 것을 보여주고 있다. 특히 1998년 이후 FSW에 관한 논문이 급격히 증가하고 있고 일본에서는 1990년대 후반부터 FSW에 대한 연구가 본격적으로 진행되었음을 알 수 있다. 이와 함께 FSW에 관한 특허 출원의 수도 1996년 이후 약 10 배 이상 급격히 증가하였으며, 1999년부터 2003년까지 네 차례의 대규모 국제 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 적용사례, 장래의 전망 등에 관하여 살펴보고자 한다.

2. FSW의 접합 원리와 특징

그림 2는 FSW의 접합 원리를 도식화하여 표현한 것이다. 나사산 형태의 돌기(probe)를 가지는 환봉

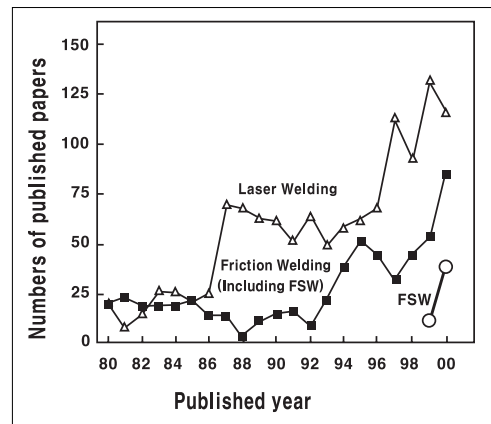


그림 1. 일본에서의 마찰용접과 레이저용접 관련 연구논문 수 증가 추이^[1]

모양의 경질재료 공구(tool)를 고속으로 회전시키면서 피접합재의 접합부에 삽입하면 공구와 피접합재와의 상호마찰에 의해 열이 발생한다. 마찰열에 의해 공구 주변의 재료는 열적으로 연화되며 공구의 회전에 의한 소성유동으로 접합면 양쪽의 재료들은 강제적으로 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, 용접봉, 용가제 등이 불필요하며 접합 과정에서 유해광선이나 유해물질이 배출되지 않기 때문에 경제적이면서도 환경친화적인 접합기술로 평가받고 있다.

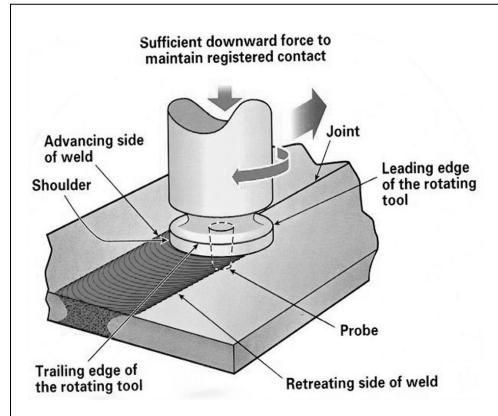


그림 2. 마찰교반용접의 기술적 개념

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, 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 높은 수준의 표준화와 자동화가 가능하다.

한편 FSW가 지니는 단점 또는 문제점을 열거해 보면 다음과 같다.

- 1)복잡한 3차원 곡면 형상의 접합이 어렵다.
- 2)접합부 종단에 공구 돌기부의 구멍이 남는다.
- 3)접합부 뒷면에 마찰압력에 견딜 수 있는 back-up 재료가 필요하다.
- 4)접합용 공구 재료의 제한으로 피접합 재료가 아직까지 경금속 또는 저용점 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. 공구의 재질과 형상

FSW 기술의 원리에서 알 수 있듯이 접합을 위한 마찰열의 발생에 있어 가장 중요한 요소는 공구의 재질과 형상이다. 특히 공구의 선단 돌기부에는 높은 마찰열과 전단응력이 가해지기 때문에 내마모성, 인성과 함께 고온 전단강도가 매우 중요한 인자이다. FSW 기술을 개발한 영국의 TWI에서는 주로 합금 공구강제 공구를 사용하였기 때문에 알루미늄과 마그네슘 합금이 주요 연구대상이 되어왔다. TWI에서는 주로 공구강인 AISI-H13을 사용하며 일본 나고야대학의 Shinoda는 마르텐사이트계 스테인레스강인 SUC440을 이용하는 것으로 알려져 있다.^[2] 향후 다양한 재료의 접합에 FSW 기술이 폭 넓게 적용되기 위해서는 피접합재의 특성에 적합한 공구가 개발되어야 하며, 실제로 공구 재료의 개발과 아울러 코팅 등에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

공구의 재질 못지않게 중요한 것이 돌기부의 형상이다. 공구 선단에 있는 돌기부의 길이, 즉 피접합재로 진입되는 길이는 피접합재의 두께와 같거나 약간 짧은 것이 일반적이다. FSW 기술과 관련된 많은 특허가 돌기부의 형상 개발에 집중되고 있을 만큼 돌기부의 형상이 접합부의 특성에 큰 영향을 미친다. 그림 3은 돌기부 형상의 한 예를 보여주는 것이다. 일반적으로는 아주 단순한 직선형의 핀이나 약간의 경사가 있는 핀이 이용되는데, 대개의 경우 나사산을 가공하여 이용하며 특이하고 복잡한 형상으로 가공하는 경우도 있다.



그림 3. 마찰교반용접용 공구의 형상

공구의 돌기부 주변 shoulder는 돌기부의 전방에서 피접합재에 예비적으로 열을 가하고 공구의 진입시 절삭물의 배출을 막는 역할을 하기 때문에 필수적으로 존재해야 하는 부분이다. 돌기부와 연결되는 shoulder의 면을 약간 오목하게 가공하거나 여러 가지 특수한 형태의 굴곡을 주기도 하는데, 이는 shoulder의 회전에 의해 접합부 표면적하에서의 소성유동을 촉진하고 혼합교반의 효과를 증대시키기 위함이다. 그러나 shoulder 면의 최적 형상에 관해서는 아직 알려진 바가 없다.

한편 접합시 공구는 대부분의 경우 진행방향에 대하여 약 3~5° 정도의 전진각을 가지도록 설치한다. 전진각의 의미와 효과에 대해서는 아직까지 완전히 밝혀져 있지 않지만 공구의 수명 개선과 마찰에 의한 접합 과정에서의 소성유동을 촉진하기 위한 것으로 생각되고 있다. Shinoda는 1100 및 5003 알루미늄 이종(異種)재료 접합부 내에서의 마그네슘 분포를 분석하여 소성유동 현상에 미치는 전진각의 영향을 실험적으로 조사하였다.^[2] 그는 공구 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^[3]도 있어 이에 대해서는 보다 더 상세한 검토가 필요하다.

열원으로서의 공구의 역할을 고려할 때 재질과 함께 돌기부 및 shoulder의 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다. 지금까지의 FSW 기술 개발동향이나 관련 특허들을 살펴보면 공구의 형상과 재질에 많은 know-how가 있음을 알 수 있다. 현재 TWI에서는 공구의 형상과 재질을 연구하는 대형 group sponsor

project를 수행하고 있다. 따라서 공구의 재질과 형상이 FSW 기술의 핵심이라 할 수 있다.

4. 접합재의 미세조직과 기계적 성질

그림 4는 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.^[4] 열-기계적 영향부에서는 소성변형과 국부적인 재결정 영역이 동반된다. 그리고 열영향부는 접합부로부터 전도된 열에 의한 영향으로 석출상의 조대화 또는 분해, 회복 등이 발생한다. 특히, 접합재의 미세조직에서 주목할 부분은 접합부인데 이 영역은 공구 회전전에 따른 강력한 소성유동과 회전교반, 그리고 마찰열의 발생에 의해 모재와는 전혀 다른 형태의 미세조직이 형성된다. 최근에는 일부 연구자들이 접합부에서의 미세조직 변화 효과를 조직 미세화, 2차상 입자의 분포 개선, 분말소결품의 미세조직 개선 등에 활용하고자 하는 연구를 진행하고 있다

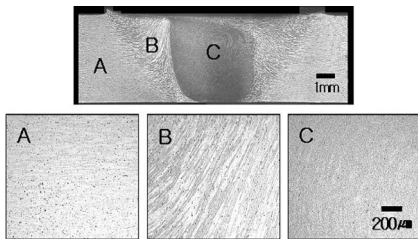


그림 4. 마찰교반용접된 7075 알루미늄 합금 판재의 미세조직

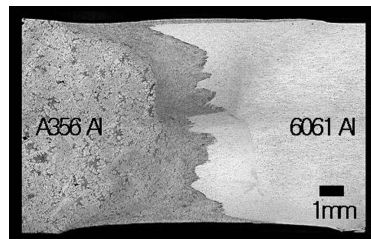


그림 5. 마찰교반용접된 A356/6061 알루미늄 합금 판재의 미세조직

그림 5는 두께 8 mm인 A356 합금과 6061 합금을 접합한 모습인데 접합부 내부에 어떠한 결함의 발생도 없이 건전하게 접합되어 있음을 볼 수 있다. 이는 이종재료 접합의 한 예를 보여주는 것으로, 용융점(melting point)의 차이가 그리 크지 않은 알루미늄 합금과 마그네슘 합금, 알루미늄 주조재 합금(casting alloy)과 알루미늄 전신재 합금(wrought alloy), 금속기지 복합재료(MMC)와 기지합금(matrix alloy) 등과 같은 서로 다른 재료들 사이의 접합이 FSW 원리상으로 충분히 가능하다.

접합부 내에서의 미세조직 변화에는 직접적으로 소성유동 및 회전교반과 함께 마찰열 발생에 의한 온도상승이 영향을 끼친다. 기본적으로 FSW는 비용융 상태의 고상접합으로 분류되지만 Bjørneldt는 접합 과정에서 공구 돌기부와 shoulder의 바로 아래는 상당히 높은 온도까지 상승하기 때문에 7030계 알루미늄 합금의 경우 승온속도가 330°C/s 이상이 되면 국부적인 용융이 생길 가능성이 있다고 하였다^[1]. 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 이루어짐을 알 수 있다.^[5] 접합이 고

상에서 이루어지는 것은 기존의 접합공정과 비교하여 재료에 가해지는 입열량이 낮기 때문이다. FSW는 GMAW 또는 MIG 등과 같은 기존의 접합 공정보다 낮은 약 50% 정도의 입열량으로 접합이 가능한 것으로 알려져 있다.^[6] 이는 그림 6에서 보는 바와 같이 다른 접합공정에 비해 접합 후 변형을 극소화시키는 효과가 있으며, 접합시 최고온도가 낮다는 사실과 함께 낮은 입열량은 FSW의 가장 큰 이점 중 하나로 평가된다.

접합재의 기계적 성질은 FSW 설비 또는 공구의 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 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 6061, 7075 및 A356 합금 접합재의 정적 강도 특성은 모재의 약 70% 이상이며 5083 합금의 경우에는 모재와 거의 비슷한 수준을 나타낸다. Klugen 등^[7]은 여러 가지 방법으로 접합된 A6006 알루미늄 합금 접합재의 강도를 비교하였는데, 플라즈마 용접의 경우 가장 높은 194 MPa이며 FSW를 적용한 경우에는 175 MPa인 반면 연성은 22%로 가장 높은 값을 가진다고 보고하였다.

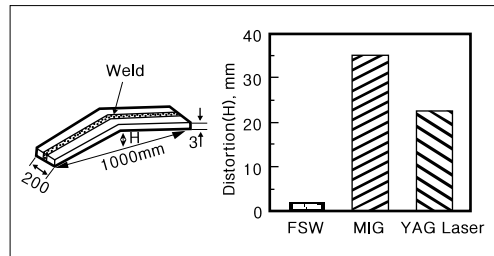


그림 6. 용접 방법에 따른 용접변형의 비교^[6]

표 1. 마찰교반용접된 알루미늄 합금 판재들의 기계적 성질 ((): 모재의 기계적 성질)

Al 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(140)	200(244)	16(13)

알루미늄 합금은 열처리형과 비열처리형으로 대별되는데 열처리형 합금은 일반적인 용융용접을 할 경우 특성의 변화가 매우 심하여 접합에 많은 문제점이 있었다. 그러나 항공기에 사용되고 있는 2000 및 7000계 합금에 FSW를 적용한 경우 피접합재를 미리 시효처리하여 접합한 판재와 접합 후 시효처리 한 판재 모두 모재의 80~90%에 달하는 높은 강도가 얻어져 FSW가 매우 유용한 공정임을 보여주고 있다.^[8] 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 정도 강도가 증가한다고 보고하고 있다.^[9]

5. FSW 기술의 적용

FSW의 응용분야는 해양개발, 석유화학, 전기·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, 기술설명회 등^[10-13]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.

그림 7은 항공우주 분야에서 FSW 기술을 적용한 예들을 나타낸 것으로, 특히 그림 7(c)는 FSW를 적용하여 개발된 최초의 상업용 항공기인 Eclipse 500 기종이다.

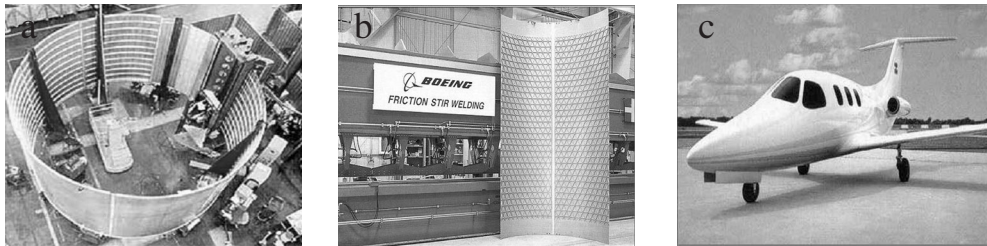


그림 7. 항공우주 분야에서의 FSW 기술 적용예
 (a) Space shuttle 외부 연료탱크 부품 (b) Delta II 로켓 연료탱크 부품 (c) Eclipse 500 상업용 항공기

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), wheel rim, 로봇을 이용한 FSW 공정의 자동화(Neos, Giddings & Lewis, Hexapod, GKSS) 등이 발표되고 있다. 그림 8은 FSW를 적용하여 제작된 wheel rim, suspension link, suspension arm

등으로 화살표는 FSW 접합부를 표시한 것이다.

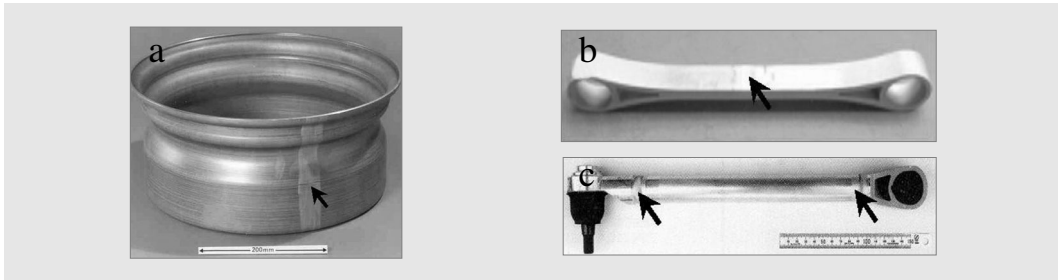


그림 8. 자동차 분야에서의 FSW 기술 적용에 (a) Wheel rim, (b) suspension link, (c) suspension arm.

3) 해양 및 선박 분야

Marine Aluminum사는 FSW 기술을 상업적으로 적용한 최초의 회사로서 선박용 대형부품, deck, floor, helipot 등의 알루미늄 제품에 적용하고 지금까지 실제품에 적용한 총 접합길이는 200 km 가까이 달하는 것으로 추정되고 있다. 이와 함께 고속 선박용 deck, 격벽, 어선용 냉동기의 냉각판 등이 FSW를 적용하여 개발되고 있다. 그림 9(a)는 선박의 deck나 floor 등에 사용되는 알루미늄 panel로 사다리꼴 모양들 사이에 보이는 선들이 FSW 접합부이다. 그림 9(b)는 FSW를 적용하여 제작된 module을 조립하여 대형선박을 건조하는 모습이다.

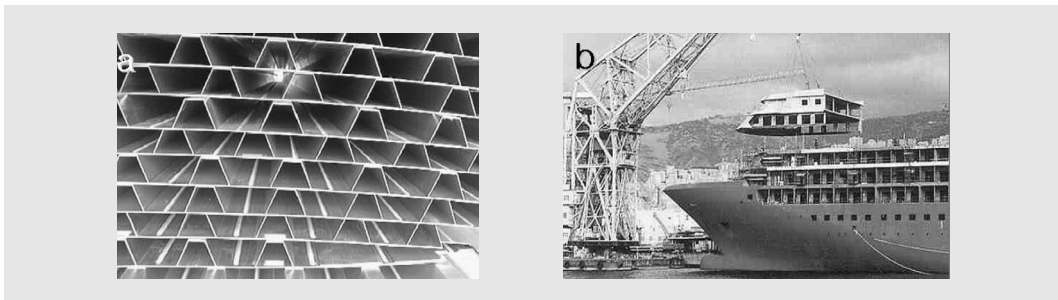


그림 9. 해양 및 선박 분야에서의 FSW 기술 적용에 (a) 선박용 알루미늄 panel. (b) FSW 적용 대형선박용 module

4) 철도차량 분야

철도차량 분야에서의 FSW 적용은 일본이 가장 적극적으로 추진하고 있다. Hitachi사는 고속철도(신칸센)와 경전철 객차의 벽체, roof 및 floor에 사용되는 알루미늄 double skin 구조를 FSW 기술로 제작하고 있다. 그리고, 유럽의 Hydro Aluminum사는 TGV 객차의 roof를 FSW 기술로 제작하여 Alstom사에 제공하고 있다. 그림 10(a)는 경전철 객차에서 FSW로 제작되는 부분들을 나타

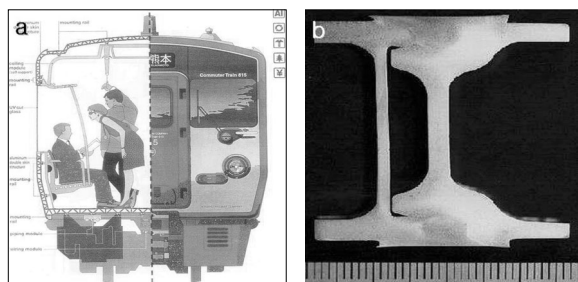


그림 10. 철도차량 분야에서의 FSW 기술 적용에 (a) 경전철 객차 동체에서의 FSW 적용 부위 (b) 알루미늄 double skin 구조의 FSW 접합

낸 것이며, 그림 10(b)는 알루미늄 double skin 구조를 FSW로 제작하는 예를 보여 주는 것이다.

5) 기타 분야

전술한 분야들 이외에 laser system 중추부의 초정밀 housing, 교량, 건물 외벽, curtain wall, motor housing, 내외장용 panel, portable cabin, speaker frame 등 많은 분야에서 적용을 위한 개발이 진행되고 있다. 그림 11은 FSW를 적용하여 제작된 기타 분야 제품들의 예를 나타낸 것이다.

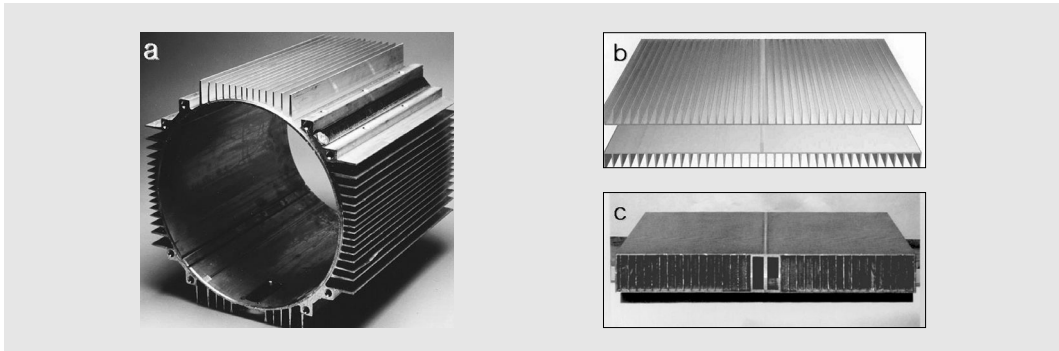


그림 11. (a) Motor housing, (b) 알루미늄 heat sink panel
(c) 알루미늄 honeycomb panel

앞으로는 FSW 설비기술의 발전에 따라 원자력 발전소 내 피폭재료의 보수, 항공기 부품, 액체수소용 기, 자동차 분야 등에 본격적인 응용을 시도하는 등 지금까지는 접근이 어려웠던 분야에의 적용을 향한 연구개발이 계속될 것으로 전망된다.

6. 결 론

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 연구 개발에 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.

참 고 문 헌

- [1] T. Shinoda, “마찰교반접합의 특장과 금후의 전망”, 마찰교반접합기술의 최신동향과 실용예, 일간공업신문사, 일본 (2002) 7

- [2] T. Shinoda, "Friction Stir Welding의 기초와 실제", 용접기술, 6월호, 일본 (2001) 16
- [3] 佐藤裕, 粉川博之, "마찰교반접합부의 재료조직학적 특징", 일본용접학회 춘계학술대회 강연개요집, 일본 (2001) 297
- [4] C. J. Dowes, "Seam Welding Sheet and Plate, using Friction Stir Welding Process", Proc. Of the 6th Int. Symp., Japan Welding Society, Nagoya, Japan (1996) 711
- [5] JH. S. Yang, "Microstructural Development in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys", Proc. Int. ICAA, Toyohashi, Japan (1998) 1483
- [6] 青田, 舟生, 岡村, 江角, "Friction Stir Welding 법의 입열량에 따른 접합부의 특성", 일본용접학회 강연개요집, vol. 64, 일본 (1999) 156
- [7] A. O. Klugen and M. Raner, "Aluminum Bridge Construction Welding Technology and Fatigue Properties", Svetsaren, vol. 50, no. 3 (1995) 13
- [8] 田中直, 熊谷正樹, 八太秀周, 吉田英雄, 佐藤廣明, "마찰교반접합된 항공기용 알루미늄 합금의 접합부 특성", 일본경금속학회 강연개요집, 일본 (2001) 241
- [9] T. Shinoda, "Friction Stir Welding의 기초와 실제", 용접기술, 9월호, 일본 (2001) 32
- [10] Proc. of the 1st Friction Stir Welding Symposium, TWI, Thousand Oaks, CA, USA (1999)
- [11] Proc. of the 2nd Friction Stir Welding Symposium, TWI, Gothenburg, Sweden (2000)
- [12] Proc. of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, TWI, Kobe, Japan (2001)
- [13] TWI 기술설명회, TWI, 서울 (2003)



김성준

- 한국기계연구원 공정연구부 책임연구원
- 관심분야 : 금속상변태, 철강재료 신합금 개발, 재료의 가공열처리
- E-mail : sjkim@kmail.kimm.re.kr



이창길

- 한국기계연구원 공정연구부 책임연구원
- 관심분야 : 상변태, 재료의 기계적성질, 미세조직 분석
- E-mail : cglee@kmail.kimm.re.kr



김상식

- 경상대학교 재료공학부 부교수
- 관심분야 : 경량금속의 기계적 성질과 미세조직과의 관계
- E-mail : sang@nongae.gsnu.ac.kr