(3) 특집기사

Friction Stir Welding (마찰 이동 용접)의 개요와 그 응용

Introduction of the Friction Stir Welding and Its Application

김영식
Y-S Kim

• 한국해양대학교 교수

1. 서 언

일반적으로 Friction Welding(마찰용접법)이란 회전하는 물체의 마찰열을 이용하여 접합하는 것을 의미한다. 지금까지의 마찰용접법은 접합하고저 하는 두 개의 소재를 접촉시켜 놓고 한쪽 소재는 고정하고 다른쪽 소재에 회전과 가압운동 일으켜 접합시키는 일종의 고상접합 방법으로서 봉상(棒狀)의 정밀한 기계부품생산에 널리 이용되고 있는 방법이다. 따라서 지금까지의 마찰용접법은 판재가 아닌 봉재의 맞데음 용접에 국한되어 응용되어 왔다. 이에 비해 Friction Stir Welding (약해서 FSW)은 지금까지의 마찰용접법의 개념에서 탈피하여 소재의 형상이나 접합이음매의 형상에 거의 제한을 받지않고 거의 모든 경우에 응용이 가능한 새로운 개념의 마찰용접법이다. 이 방법은 영국의 케임브릿지에 있는 TWI(접합 · 용접연구소)에서 1991년에 발표한 독특한 마찰용접법으로서 현재 TWI가 국제특허를 갖고있는 용접법이다. 이 용접법의 명칭은 일본에서는 마찰 攪拌접합으로 표현하고 있으나 우리나라에서는 이의 용어가 아직 정립되어 있지 않다. 그러나 이 용접법의 기구로 볼 때 마찰교반용접법으로 일본에서 쓰는 말을 그데로 쓰는 것보다는 마찰이동(Stir)용접법으로 표현함이 적당할 것으로 사료된다.

현재 이 방법은 접합의 수요가 큰 Al합금을 중심으로 그 응용연구가 급속히 확산되고 있으나 그밖에도 동, 마그네슘, 티탄, 아연 등 비교적 유연한 금속 또는 이들의 이종금속이나 주물재료의 접합과 플라스틱류의 접합도 가능한 것으로 밝혀지고 있다. 또한 최근에는 철계재료의 접합가능성도 밝혀지고 있어서 새로운 재품의 개발, 새로운 분야의 설계생산 기술로서 그 자리를 넓혀 가고 있는 새로운 용접법이다. 현재 이 용접법에 관한 관심이 세계적으로 높아지고 있어서 미국의 경우 2000년도 미국용접학회(AWS)에서 가장 중요한 Technical session으로 다루어 다수의 연구논문이 발표되고 있고[1], 일본에서는 초전도 코일도체의 접합, 철도차량조립, Al합금판의 원통접합, 파라보라 안테나에의 응용등 다양한 분야에 응용이 시도되고 있으며[2], 일본용접학회지에 이 용접법에 관한 특집호를 2000년도 10월호에서 발간한 바 있다. 또한 2001년 4월 발표예정인 일본용접의 춘계전국학술대회에서는 이 용접법에 관한 Organized session을 준비하고 있다[3] 그러나 국내에서는 아직 이에 관한 연구사례나 응용례는 발표된 바 없으며, 대한용접학회지에 해설기사로 그 원리와 응용에 관해 소개되어 있는 정도이다[4].

이처럼 세계적으로 FSW에 관한 연구와 그 응용범위가 확산됨에 따라 열교환기를 위시한 각종 선

박용 기자재 부품의 새로운 생산기술로서도 그 가능성이 높아지고 있기 때문에 국내의 조선기자재 산업계에서도 이 새로운 용접법에 대한 관심과 연구개발노력이 요구된다고 생각한다.

2. Friction Stir Welding의 원리와 장치

FSW공정은 매우 간단하면서도 독특한 공정으로서 접합부에 용접 공구(Tool)를 삽입하여 회전시킴으로서 마찰열을 발생, 유지시키고, 재료가 연화되면 접합면에 따라 용접공구를 이동시켜 양쪽의 모재에 걸리는 밀착력에 의해 접합이 이루워지도록 하는 공정이다. 따라서 접합소재를 단단히 고정시키는 방법, 공구의 형상, 공구각도, 공구회전수, 공구의 이송속도등 역학계의 최적 조건을 충족시키는 것이 접합의 성패를 좌우하는 열쇠라 할 수있다. 또한 각각의 접합조건은 합금의 종류, 판두께, 접합형상에 따라 크게 다르지만, 일반적으로 압출(Extrusion)이 쉬운 재료일수록 접합조건의 허용도가 넓다고 할 수있다. 상세한 접합조건은 이 기술을 사용하는 각 업체의 기업비밀로 되어 있다.

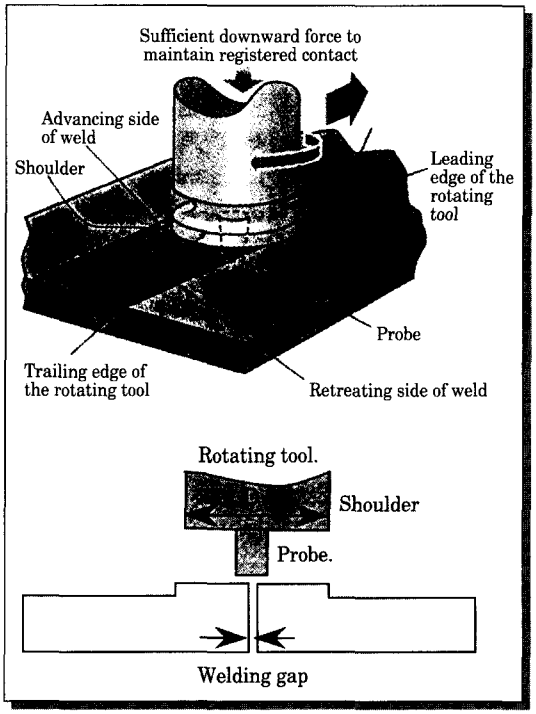

Fig. 1 Principle of Friction Stir Welding

Fig.1은 Al의 맞데음 용접을 예로 FSW공정을 설명하는 개요도이다[5] 먼저 두 재료는 접합공구가 압입될 때에 떨어지지 않도록 정반위에 단단히 고정시킨다. 마찰열은 재료의 접합선상에 압입되어 회전하는 공구에 의해 발생하며, 이 열에 의해 접합모재의 연화가 이루워진다. 그와 더불어 양단에서 가해지는 압입력에 의해 접합이 이루워진다. 접합부의 온도는 융점온도의 약 80%전후로 된다. 마찰열에 의해 충분히 연화된 재료는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 접합공구의 선단에 있는 프로브의 형상과 접합공구의 이송에 의한 유체압력효과에 의해 프로브주위로 유동하여 그 전방의 재료가 후방으로 이동하여 양 재료의 합일이 이루워 진다. 그리고 접합면에 접촉하면서 회전하는 쇼울더의 역할은 연화된 재료가 비산하는 것을 방지하고 재료와의 상대운동에 의해 마찰열을 발생시키고 또한 마찰열을 유지시키는 역할을 한다. 용입깊이는 거의 프로브의 길이와 일치하며, 맞데음 부재의 간격은 대략 접합모재 두께의 10%정도를 유지하도록 하고 있다. 이와 같은 공정에 있어서 접합모재의 표면 산화물은 매우 잘게 파괴되면서 접합부에 혼입되는 것으로 추정되고 있어 이것이 FSW공정에서 전처리 불필요의 이유로 되어 있다.

FSW 장치는 용접공구의 회전, 상하구동, 접합방향으로의 이동기구, 접합모재의 구속기구가 기본으로 되어 있으며, 그 밖에 필요에 따라 각종의 기구가 부속되어 있다. 이들의 구동기구, 구동방법, 접합모재의 구속용 장비는 접합체의 구조, 형상, 접합부에 요구되는 특성등에 따라 최적의 조건으로 선정되도록 설계되어 있다.

3. FSW 용접부의 특징

FSW공정에 의한 접합부의 기계적 특성은 인장특성, 180° 굽힘특성, 피로특성면에서 여타의 다른 용융용접법에 의한 것에 비해 대단히 우수한 결과를 보이고 있다. 특히 피로강도는 여러종류의 Al합금에서 모재에 필적하는 피로강도를 나타내고 있어 차량, 선박, 교량, 항공우주분야에서 그 응용이 활발히 검토되고 있다. Fig.2는 5000계열 Al 합금

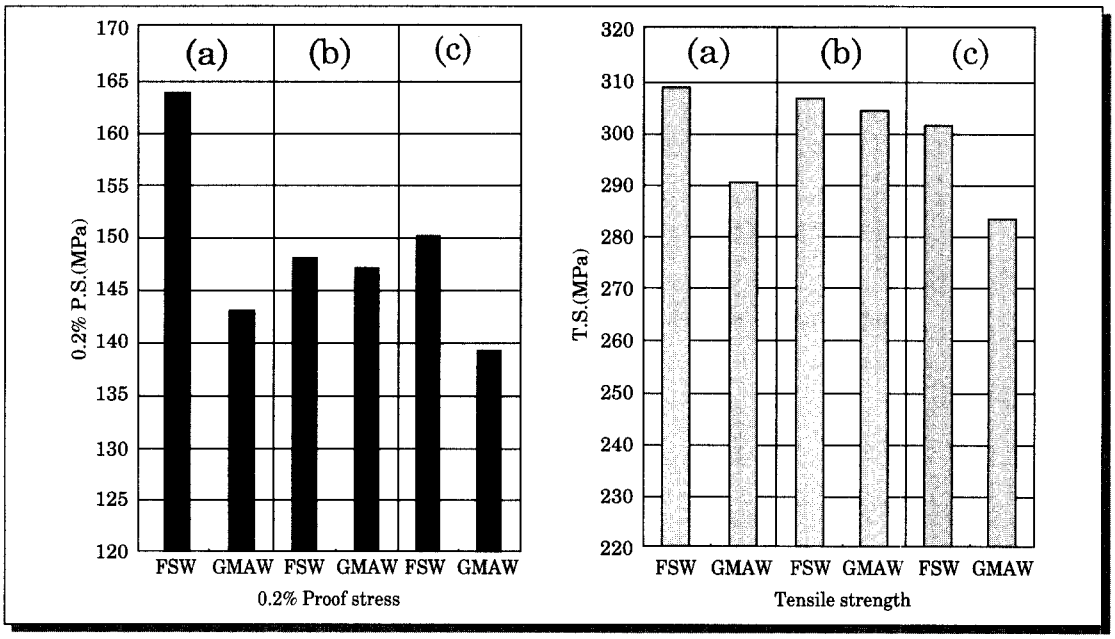

Fig. 2 Result of tensile test of A5083 welded part with various welding methods

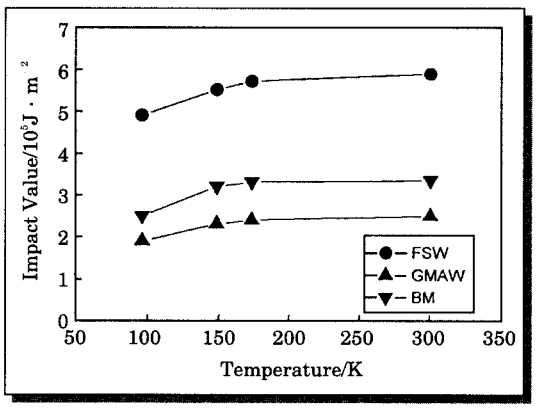

Fig. 3 Impact Test Result

의 FSW와 GMAW용접부위의 인장시험결과를 나타낸 것이다[6]. 이 도면에서 (a)는 용착금속부이고 (b)는 열영향부 (c)는 용접선에 직각방향의 인장특성을 나타 낸 것으로 3개의 부위 모두에서 FSW의 경우가 GMAW경우보다 우위에 있음을 나타내고 있다. Fig.3은 FSW의 충격시험결과를 나타 낸 것이다. 이 결과에 의하면 FSW의 충격특성은 모재나 GMAW에 의한 용접부위의 충격특성보다 매우 탁월한 결과를 보이고 있다.

또한 용접변형특성에 있어서도 GMAW는 물론이고 레이저 빔 용접에 비해서도 탁월한 결과를 보이는 것이 입증되었다. Fig. 4는 같은 구속조건으로 용접을 실시한 경우에 FSW, GMAW, YAG 레이저 용접부위의 角변형량을 비교한 것이다[7]. 재질, 판두께에 따라서도 다르지만 FSW의 각변형량은 GMAW의 1/20~1/30정도로 작아진다. 이것은 FSW의 경우 접합부의 온도가 여타의 용융용접법에 비해 현저히 낮은 상태에서 접합이 이루워 지기 때문인 것으로 이와 같이 변형을 최소화 시킬 수 있는 점이 FSW의 큰 장점이라 할 수있다.

FSW는 이와 같은 기계적 특성면에서의 탁월성 뿐만아니고 공정중 발생하는 결함 발생률 또한 여타의 용융용접에 비해 매우 작게 나타난다. 이것은 접합재의 융점이하에서 접합이 이루워지는 고상접합이기 때문에 여타의 용융용접법에서 발생하는 균열이나 블로우 홀(Blow hole)과 같은 결함이 발생되지 않기 때문이다.

이 용접법은 이상과 같은 탁월한 장점이 있으나 다음과 같은 단점도 있어 금후 해결되어야 할 과제로 남아 있다. 1) 접합재를 단단히 구속시킬 지그(jig)가 필요하다. 2)이음매 간격의 허용범위가 아

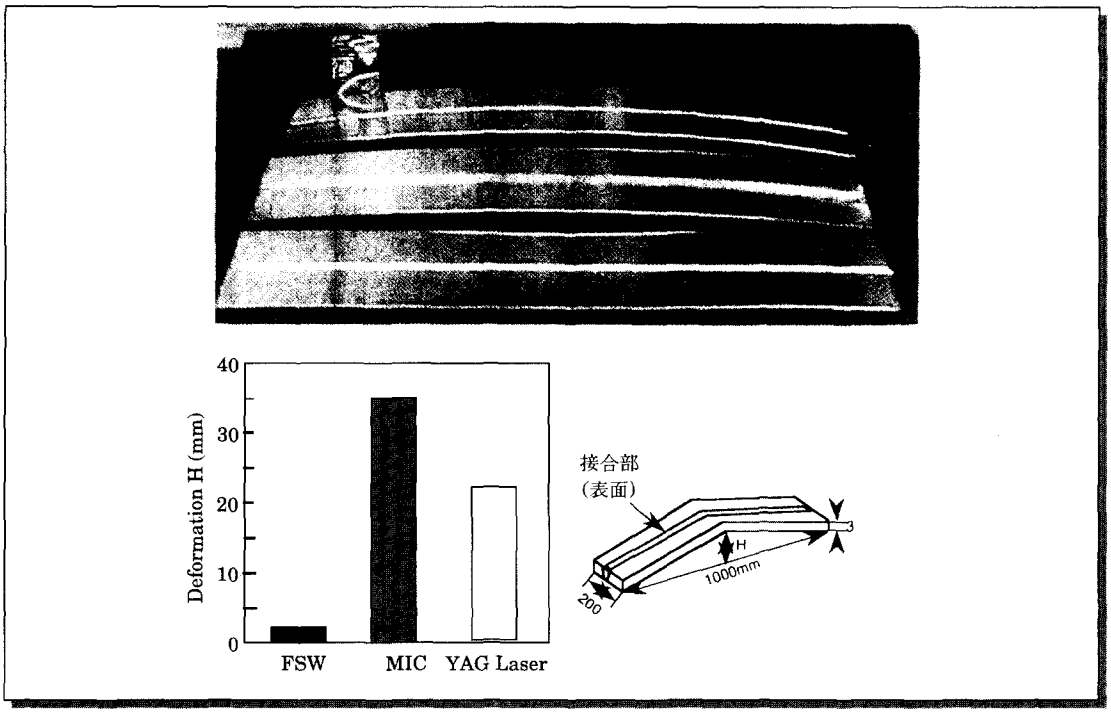

Fig. 4 Comparison of Deformation of FSW, MIG, YAG Laser Welding

크용접법에 비해 작다. 3) 접합부의 끝단에 구멍이 남는다. 4) 현재로서는 필렛용접부의 적용에 어려움이 있다.

4. FSW의 구조■조립 응용

이상에서 설명한 바와 같이 FSW는 결함 발생, 변형 및 기계적특성면에서 여타의 아크 용접법에 비해 탁월한 특성을 나타낸다. 뿐만아니고 아크나 용접 퓸(Fume)의 발생이 없어서 작업환경의 쾌적화면에 있어서도 장점이 많다. 또한 와이어 및 실드 가스가 필요치 않아 자원절약의 측면에서도 우수한 접합법이다. 따라서 금후 그 응용분야가 매우 다양한 방면에 급속히 확산될 전망이다. 현재 응용되고 있는 몇가지 분야를 예로 들면 다음과 같다.

4.1 철도 차량에의 응용

철도차량구조체는 경량화를 목적으로 Al 합금이 많이 사용되고 있다. 차량의 경우 길이가 긴 Al 합금의 판재를 용접으로 조립하기 때문에 접합부

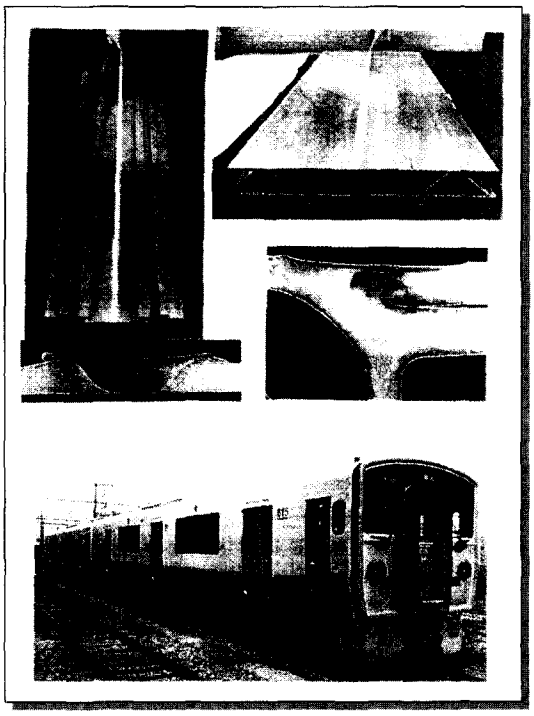

Fig. 5 Application of FSW in vehicle

는 직선부가 많다. 또한 Al합금 차량의 두께는 3~6mm로 비교적 얇기 때문에 특히 FSW에 적합한 구조체라고 할 수있다. Fig. 5는 Al합금 차량부재의 접합례를 나타 낸 것으로 여타의 다른 아크 용접법으로 조립된 차체에 비해 차량 전체의 변형량을 크게 줄일 수있어 매우 미려한 차체 제작이 가능하다.

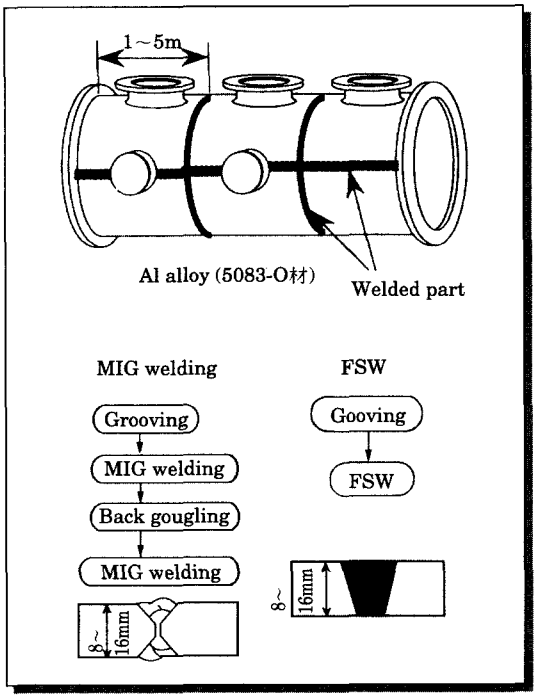

Fig. 6 Application of FSW to Cylindrical Tube and Comparision of Manufacturing Process of MIG welding and FSW

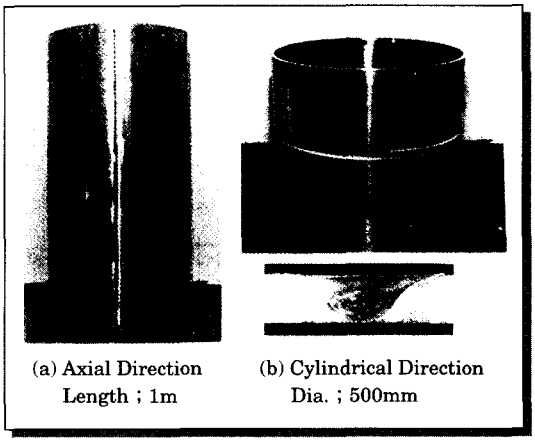

Fig. 7 Appearance of FSW part in Cylindrical Tube

4.2 Al 합금 원통관에의 응용

현재 Fig. 6과 같은 Al합금 원통관의 용접은 MIG용접으로 제작되고 있다. 이러한 원통관의 접합에 FSW법이 적용되면 1 패스 용접이 가능하며 변형도 매우 작게 할 수있기 때문에 제조 공정의 간소화에 따른 제작비 절감효과를 크게 기대할 수 있다. 따라서 용접 품질의 향상과 비용절감의 효과를 함께 걷울 수있다. Fig.7은 두께 10mm, 외경 500mm, 길이가 1000mm의 5083-O 재의 원통관을 FSW법으로 접합한 외관을 보인 것이다. 이 그림에서와 같이 축방향과 원주방향 다같이 1 패스 용접이 가능하다.

4.3 그 밖의 응용분야

이상에서 언급한 대표적인 응용분야를 포함하여 현재까지 FSW를 응용하여 상업적 생산이 이루워지고 있거나 응용을 검토하고 있는 예들을 열거하면 Table 1과 같다[4].

Table 1 Various industrial applications of FSW technology

산업분야	응용 예	
조선 · 해양	▶Deck, side, floor용 panel ▶Offshore accommodation	▶Al 압출재 ▶Mast, oom
우주 · 항공	▶날개, 동체, 꼬리날개 ▶군용 및 과학용 rocket	▶각종 연료탱크 ▶MIG 용접부 보수
철도	▶고속철도 ▶콘테이너	▶철도, 지하철 차량
자동차	▶엔진및 샤시 받침대 ▶Tailored blank ▶Mg,Mg/Al 접합	▶Wheel rim ▶연료탱크
건축 · 토목	▶Al 교량 ▶정면 panel(Al, Cu, Ti) ▶창문 틀 열교환기 및 에어콘 ▶발전소 및 화학산업용 Al 반응로	▶Al pipeline
전기	▶모터 housing ▶Electrical connectors ▶전자부품 Encapsulation	▶Busbars
기타	▶핵폐기물 보관용 Cu canister ▶냉장고 panel ▶가스 탱크 및 실린더 ▶가구, 요리도구 및 부엌용구	▶백색 제품

5. 결 언

FSW접합기술은 1990년대 들어 개발된 기술로서 앞으로 급속히 발전되어 갈 것으로 예측된다. 현재 일본에서는 철도차량, 유럽에서는 선박, 미국에서는 항공기 부품에의 응용이 진행되고 있으며, 앞으로 자동차를 위시한 모든 산업분야에 그 응용이 확산되어 갈 것으로 예견되고 있다.

지금까지는 Al합금에 응용되고 있으나, 철강재료의 접합도 현재 많은 연구가 진행중에 있기 때문에 머지 않은 장래에 실현될 것으로 예견되고 있다. 뿐만아니고 재래의 아크용접법으로는 불가능했던 각종의 첨단기기나 부품의 설계제작이 FSW법을 응용함으로서 가능하게 되어가고 있다.

국내에서는 아직 이에 관한 응용사례가 없는 현상이나 이에 관한 관심과 관련 연구가 시급히 요청되고 있다.

참고문헌

1) American Welding Society ; Abstracts of papers, Presented at 2000 AWS Convention Chicago, Illinois (2000, 4) p39
2) 日本熔接學會 ; 特輯, 摩擦攪拌熔接(FSW)技術, 日本熔接學會誌 Vol.69, No.7 Oct. 2000, p560
3) 日本熔接學會 ; 2001년 4월 춘계전국대회 발표 일정표
4) 장웅성, 최기용, 강문진, 권영각 ; 새로운 접합법, Friction Stir Welding의 최근개발동향, 대한용접학회지 Vol.18, No.6 (2000년)p33
5) Tetsuo FUKUDA ; 摩擦攪拌熔接(FSW)技術, 日本熔接學會誌 Vol.69, No.7 Oct. 2000, p560
6) Hisanori OKAMURA ; 摩擦攪拌熔接(FSW)の特徵と日本における適用狀況, 日本熔接學會誌 Vol.69, No.7 Oct. 2000, p565
7) Masatoshi ENOMOTO ; 材料メ-カ-におけるFSWの 適用, 日本熔接學會誌 Vol.69, No.7 Oct. 2000, p572