

Friction Stir Welding의 특징과 적용기술

장용성 · 최기용 · 김숙환 · 권영각

Some Aspects of Friction Stir Welding and Its Application Technologies

Woong-Seong Chang, Ki-Yong Choi, Sook-Hwan Kim and Young-Gak Kweon

1. 서 론

최근 들어 지구환경보호와 에너지절감에 대한 요구가 높아짐에 따라 자동차, 항공기, 철도차량, 선박 등 각종 수송기기의 경량화를 위한 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며 이를 위해 Al, Mg 등 경량합금 부재의 적용이 빠른 속도로 확대되고 있다. 이들 외에도 건축, 토목분야에서도 경량합금의 도입이 증가하고 있다. 이러한 각종 기기 및 구조물의 조립은 용접 공정에 의해 이루어지는데 Al합금의 용접은 기술적, 경제적 그리고 환경적 측면에서 개선해야할 많은 문제점을 지니고 있다. 이러한 Al 합금의 용융용접시 문제를 해결할 수 있는 새로운 기술로서 비용음 고상접합공정인 Friction Stir Welding(이하 FSW) 기술이 최근 들어 다양한 산업분야에서 광범위하게 적용이 확대되고 있다. 지금까지 FSW 기술 개발이 Al 합금에 제한되어 왔으나 최근에는 Al 합금에 이어서 Ti, Mg, Cu 합금 등이 FSW 기술 개발의 대상이 되고 있으며 이 기술이 개발되면 탄소강 및 스테인리스강, Ni기 합금 그리고 금속간화합물에 역시 적용이 고려될 것이다.

이 기술은 1991년 영국 TWI에 의해 특허가 출원된 이래 90년대 중반부터 산업 적용이 시작되었다는 점에서 가장 짧은 기간에 새로운 용접 공정의 실용화가 이뤄진 기술로 간주된다¹⁾. TWI의 최초 특허는 이 기술의 원리와 개념만을 정의한 것으로 구체적인 접합 인자나 기기의 구성, 그리고 각종 응용기술에 대해서는 TWI가 주관한 3차례의 FSW symposium²⁻⁴⁾과 경금속 관련 국제회의⁵⁻⁷⁾, 각종 용접학회 발표대회⁸⁻⁹⁾ 등을 통해 많은 연구결과들이 발표되고 있으며 국내에서도 기초 연구 결과들이 용접학회¹⁰⁾를 통해 발표되고 있으며 이 기술의 응용 가능성에 대해 산업계의 관심도 점차 높아지고 있는 실정이다. Fig.1은 일본에 있어서 laser용접과 마찰용접에 대한 최근 연구동향을

나타내는데 지난 10년간 두 분야의 연구가 매우 급속히 증가하고 있음을 보여준다¹¹⁾. 특히, 지난 2년간의 연구결과에서는 마찰용접 연구의 40%가 FSW 기술 관련된 것으로 향후 이 분야 기술개발의 열기를 가늠할 수 있다.

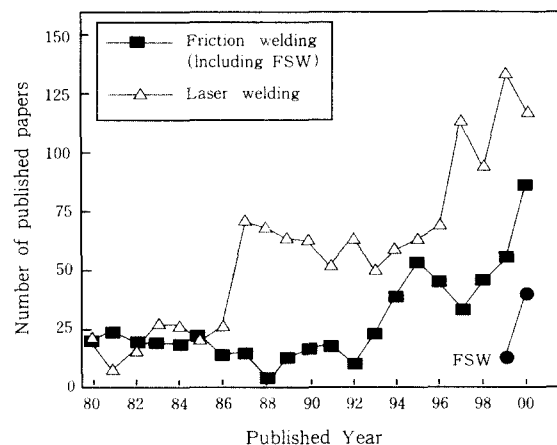


Fig. 1 Recent research trends of laser and friction welding in Japan

FSW기술은 기본적으로 에너지 절약 및 작업환경의 개선이라는 이점도 있어 향후 자원의 보존 및 지구온난화 문제 등으로 환경규제가 더욱 강화되어 갈 것이라고 본다면 이 기술은 고상접합기술로서 사용이 증대될 가능성이 매우 높은 기술이라고 생각된다. 본 특집 기사는 지금까지 발표된 연구논문 등을 중심으로 이 기술의 원리 및 특징, 그리고 현재의 기술개발현황에 대하여 기술한다.

2. FSW 접합원리와 특징

2.1 원리

FSW 공정은 Fig.2(a)에 나타나듯이 매우 간단하

면서도 독특한 일종의 연속공정으로서 접합모재를 고정시킨 후 이음부의 맞대기 면을 따라 특수 형상을 지니고 접합모재에 비해 경한 재질을 지닌 비소모식 회전 tool(또는 stir rod)의 일부분이 삽입되어 tool과 접합모재의 상대적 운동에 의해 마찰열을 발생시켜 모재의 변형저항을 낮추어 연화시키기에 충분한 온도로 인접한 접합부를 가열시킨다¹²⁾. 이로 인해 tool의 삽입된 부분(pin) 주위로 연화된 소위 'third-body'영역이 생기게 된다. 기계적 힘을 가하여 pin이 접합선을 따라 이동함에 따라 가열된 부위가 pin의 앞부분(Advancing side)에서 뒤쪽(Retreating side)으로 압출되게 되고 마찰열과 기계적 가공의 조합에 의해 고상접합부가 만들어진다. 이 접합공정의 순서는 Fig. 2(b)에 모식적으로 나타낸 순서에 의해 진행되는데 먼저 tool을 모재에 삽입하기 전에 회전을 시키고 난 후 tool이 모재와 접촉하여 열을 발생시킨다. 이어서 shoulder 부분이 접촉하여 가열 영역을 확대시키고 난 후 tool 또는 모재의 이동으로 tool 아래 부분의 소재가 유동하여 FSW nugget을 형성함으로써 접합이 이루어지게 된다.

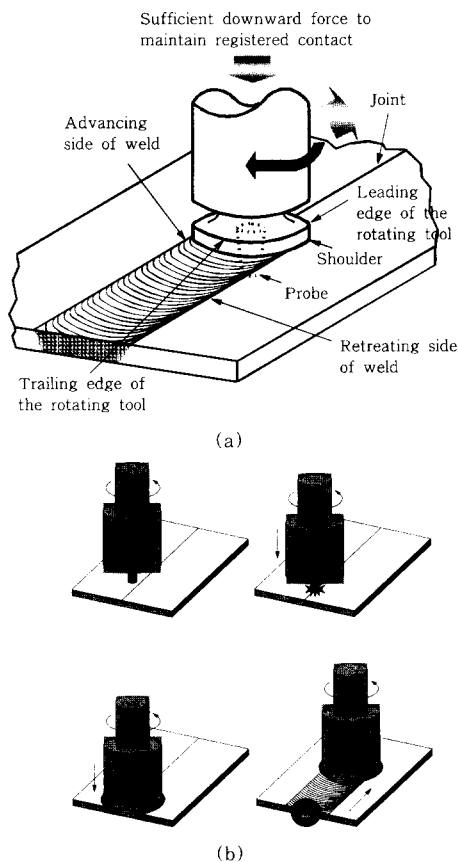


Fig. 2 Schematic diagrams showing (a) basic principle and (b) sequence of friction stir welding process

FSW 용접부에서는 용융은 일어나지 않으므로 미세한 결정립의 압출조직이 남아 있고 액상에서 고상으로의 변태에 따른 기공, 응고균열, 잔류응력 등과 같은 문제가 해결된다. 이외에도 낮은 입열량과 미용융 특성으로 기계적성질이 개선되고 용접전 처리기준이 덜 엄격하며 공정인자 역시 아크용접에 비해 단순한 점등 많은 이점들이 얻어진다.

Tool은 일반적으로 큰 직경의 shoulder부와 이보다 작은 직경에 특수한 형상으로 가공된 pin(또는 probe)부로 구분되며 pin 부분이 이음부로 삽입되면서 접합모재와 먼저 접촉하게 된다. Tool의 shoulder부와 접합모재의 접촉 역시 상당량의 마찰열을 발생시킬 뿐만 아니라 연화된 재료의 방출을 막아준다. Tool이 접합선을 따라 상대적으로 이동함에 따라 연화된 재료를 tool 후면에서 합체시켜 고체상태 이음부를 형성시키는 것이다. 이때 접합모재는 pin이 이음선을 따라 지나갈 때 맞대어진 이음면이 떨어지지 않도록 고정되어야 한다. 접합할 때 penetration 깊이는 tool의 shoulder 아래에 위치한 pin의 길이에 의해 조절되는데 맞대기 용접이 경우 pin의 길이는 대략 부재의 두께와 유사하다. 초기의 삽입시 마찰접촉에 의해 pin 인근의 재료가 가열되지만 일단 shoulder부가 접합모재의 표면과 접촉이 시작되면 상당한 추가적인 열이 용접부에 가해지게 된다. 게다가 접촉하는 shoulder는 적절한 형상으로 가공하여 연화된 재료가 밖으로 빠져나가는 것을 방지한다. FSW tool은 고온에서 정적, 동적 성질이 우수한 내마모재료를 사용하여 제조되는데 특히 pin 부근의 고온전단강도가 중요한 인자이다.

2.2 특징

FSW는 기존의 용융용접에 비해 다양한 특징을 나타내는데 Fig. 3에는 이러한 FSW의 특징을 정리하였다.

접합분위기는 AI의 경우 차폐가스가 필요하지 않고

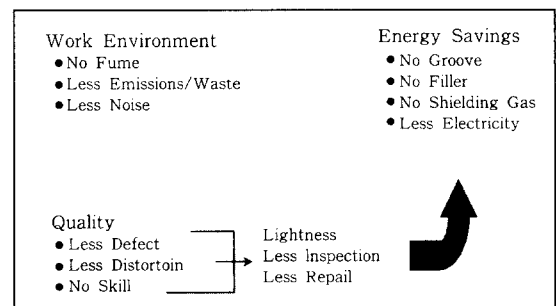


Fig. 3 Some aspects of FSW process

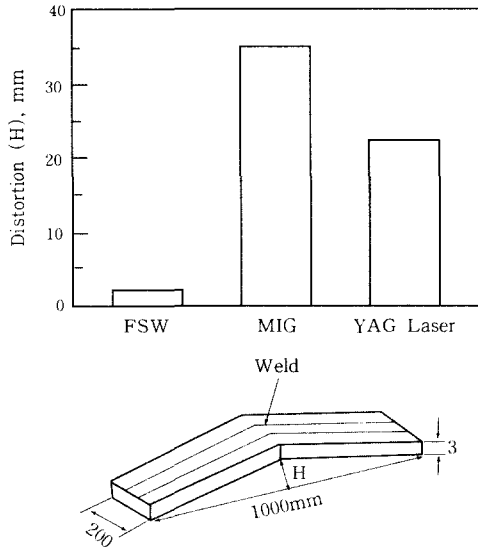


Fig. 4 Effect of welding processes on longitudinal distortion for 1m weld length plates (Material Al 6061, Length 1m, Thickness 3mm)

용가재 역시 요구되지 않는다. 게다가 매우 특징적인 것은 접합에 따른 변형이 없거나 있어도 용융용접에 비해 무시할 정도로 적다는 점이다. 접합 중에 흠의 발생도 없고 적외선, 자외선 등의 유해광선도 발생하지 않는 환경친화적 접합공정이다. 또한 기계적 에너지 효율이 높아서 판두께 12.5mm의 6000계 Al합금에 대해 3kW의 에너지면 충분하다고 한다¹³⁾. 본 기술의 단점은 접합부 종단에 tool 돌기부의 구멍이 남는다는 점이다. 이로 인해 제품의 보수 혹은 end-tab을 부착하여 종단부를 제품의 바깥쪽에 위치하도록 할 필요가 있다. 또한 비소모식 환봉인 tool을 이용하므로 여성을 형성할 수 없다. 이로 인해 지금까지의 설계기준을 만족하기 어렵고 필릿용접은 원리적으로 불가능하다. 그러나 이 새로운 접합법의 이음부 형성의 가능성에 대해서는 여러 종류의 형상이 제안되어 맞대기용접은 물론 필릿이음부, lap 이음부 등도 가능하여 특히 열용량 차이가 큰 대단면 부재의 접합이 가능하다는 사실이 흥미 깊은 점이다. Fig. 4는 FSW특징과 관련하여 동일한 구속조건으로 용접한 경우 FSW, GMAW 및 YAG laser 용접의 각변형량을 비교한 것이다¹¹⁾. 재질, 두께 및 접합재료에 따라 달라지지만 FSW의 각변형은 GMAW의 1/20~1/30 수준으로 적다.

최근 들어 FSW 공정에 대한 경제성 검토 결과들이 다양한 전제조건하에서 기존의 GMAW 공정과 비교하여 발표되고 있는데 Table 1은 두 접합공정에 대한 원가 비교 결과를 나타낸다¹⁴⁾. 여기서 용접은 Al 6000계 합금으로 2m 길이의 double skin형 panel을 제작하는 것을 기준으로 하였으며 FSW와 GMAW

Table 1 Cost calculation example for 50,000m annual weld production

	Unit	FSW	MIG
Machine cost	EUR/m	0.84	0.53
Weld length	m/yy	50000	50000
Weld speed	m/min	1.50	0.54
Arc time	h/m	0.0111	0.0309
Duty cycle	-	0.24	0.34
License cost	EUR/m	0.86	0.00
Labor wages	EUR/m	1.16	2.27
Tool cost	EUR/m	0.05	0.00
Filler cost	EUR/m	0.00	0.26
Energy cost	EUR/m	0.00	0.01
Shielding cost	EUR/m	0.00	0.19
Total cost	EUR/m	2.92	3.25

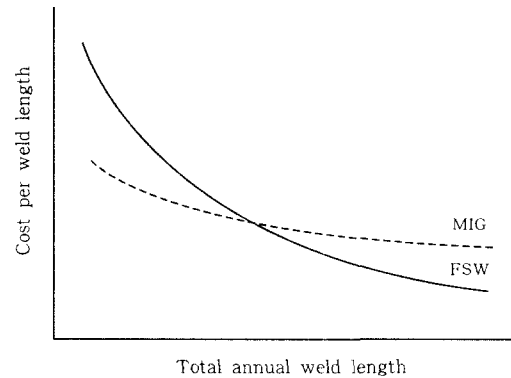


Fig. 5 Schematic presentation of FSW and GMAW welding cost per length versus total annual production

의 접합속도는 각각 1500mm/min, 540mm/min이었다. 그리고 직선 용접이므로 별도의 lining check이 요구되지 않음을 전제로 하였다. 이 경우 1년에 50,000m 용접을 한다고 가정하였을 경우 두 공정에 대한 원가계산 결과를 비교하였는데 FSW가 GMAW에 비해 단위길이당 원가가 약 10% 적게 소요되는 것으로 계산된다. 이 경우, 검사, 보수 비용이나 흠 가공비 등이 계산에 반영되지 않았다. 이러한 FSW의 경제성은 적은 양의 용접에서는 기대할 수 없으며 연간 용접길이가 일정한 수준을 초과할 때부터 GMAW를 추월할 수 있다는 것을 Fig. 5를 통해 알 수 있다.

3. FSW의 접합인자 및 조건

FSW에서는 피접합재에 외부로부터 주어지는 에너지는 기계적인 회전력뿐이므로 관리해야 할 변수는 아크용접에 비해 적지만 아크용접에서는 용융금속이 포

함되므로 이음부 정도는 FSW에 비해 여유가 있다. 따라서, 기존의 아크용접과는 다른 주의를 필요로 한다. Table 2에 접합변수를 나타낸다. 기본적인 접합 조건변수는 tool 형상, tool 회전수, 접합속도 및 접합재의 구속방법이다. 이러한 조건은 접합재의 재질, 형상 및 두께 등에 의해 적절히 선택되어야 한다. FSW 공정에서 tool의 회전속도와 접합속도는 재질에 따라서 차이는 있지만 비교적 넓은 범위에서 선택이 가능하다. 이 두 인자는 아크용접에서 용접전류/아크전압과 용접속도와 유사한 접합변수이다. 그러나 이들 변수의 조합에 의해 정의되는 아크용접 입열량에 필적하는 FSW의 열량은 현재까지 정의되지 못하고 있으며 향후 과제로 남아 있다.

Table 2 Process variables for FSW process

접합인자		내용
Tool 형상		재질, 형상, 두께
Tool 삽입깊이	Pin	접합재 두께와 동일하게 삽입
	Shoulder	접합재 표면에서 약간 삽입
Tilting 각도		전진각 적용
Tool 회전수		재질, 두께, pin 형상
접합속도		tool 회전수와 조합하여 결정
구속		이음부 정도 보증을 위해 구속부재의 Jig 설계

시공조건 중 접합속도는 tool 형상 및 접합재의 재질에 의존하므로 간단히 결정하기는 어렵지만 Al합금의 경우 일반적으로 GMAW와 동일하거나 약간 상회하는 수준이다. 따라서, 300mm/min~1000mm/min 범위의 속도 적용이 많은 편이다. 접합재의 재질에 따른 최고가능 접합속도의 계산 예를 Fig. 6에 나타낸다¹⁵⁾. 계산에 이용된 식은 다소 애매하지만 아래와 같다.

$$V_{FSW} = \phi_{FSW} \cdot \psi_{FSW} \cdot 1/t$$

여기서 ϕ_{FSW} 는 재료상수이고 ψ_{FSW} 는 tool 상수로서 일반적으로 1을 적용하고 고능률 tool 개발시 2를 적용한다. t는 mm 단위의 두께이다. ϕ_{FSW} 값은 Pb의 경우 3700이고 Al합금은 6000계가 1200으로 가장 높고 5000, 7000계는 각각 700, 600으로 주어지며 Mg, Cu, Ti은 각각 400, 300, 100의 상수를 적용한다. 판두께 5mm의 부재를 비교하면 Pb의 경우 700mm/min, Cu의 경우 100mm/min가 최고접합속도이다. Al합금은 합금종류에 따라서 500mm/min~150mm/min 범위의 최고접합속도를 보인다.

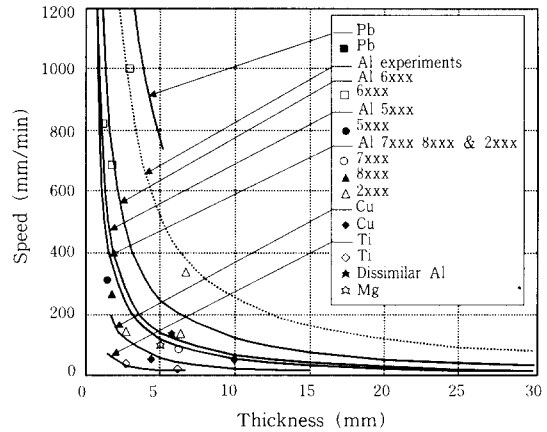


Fig. 6 Dependence of travel speed on alloy type and thickness

Fig. 7에 Al 합금 6000계 및 5000계의 경우 건전한 접합부가 얻어지는 접합속도와 tool 회전수와의 관계를 나타낸다¹⁶⁾. 6000계의 경우 5000계에 비해 건전한 접합부가 얻어지는 조건범위는 매우 넓다. 단, 제품에 적용하는 경우의 조건은 접합결함뿐만 아니라 접합부의 각종 특성, 신뢰성, 작업관리기준 등도 포함하여 엄밀한 선정이 필요하다. 이러한 적정접합조건을 벗어난 경우 접합부에서는 교반부족이나 교반과잉에 의해 결함이 발생하게 된다.

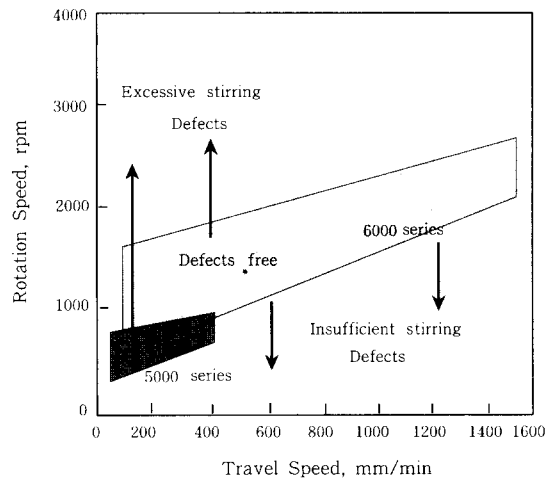


Fig. 7 Optimum ranges for FSW joining for Al alloys

4. FSW 접합부 온도분포와 조직

FSW 접합시의 온도이력에 대해서는 다양한 결과들이 발표되고 있지만 그 측정은 간단하지 않다. 그 이유는 접합재의 강한 소성유동에 의해 열전대 선단의 파손이 생기기 때문이다. 따라서, 접합부 근처의 측정값이 많은 편이다. Backlund는 tool 직경 15mm의

경우 판 두께 4mm의 6063 Al합금-T6재의 접합선 중앙에서 2mm 떨어진 지점에서 500℃를 초과하는 값이 기록되고 있다¹⁷⁾. 순Al의 경우 접합부 최고온도는 약 450℃로서 Al의 용점 660℃에 비해 용점 이하의 소성유동을 일으키는 온도라는 것이 밝혀져 있다. 또 다른 실험결과에 의하면 FSW 접합을 시작할 때에는 비소모식 tool이 모재에 마찰발열을 일으키면서 횡방향 이동이 없는 공회전 상태를 유지하는데 이 경우 공회전 시간과 그 주위의 최고도달온도를 계측한 결과에 의하면 최고 350~400℃가 되어 위의 결과와 유사한 값을 보인다. TWI의 실험결과에 있어서도 거의 용융점의 70% 정도가 최고온도로서 Al의 경우 550℃를 넘지 않는다고 하여 접합시의 최고온도는 500℃ 내외라고 생각된다.

한편, 6N01 합금에 대해 FSW와 GMAW의 용접 입열량을 측정하여 비교한 실험에 따르면 동일한 용접 속도에서 FSW가 GMAW에 비해 절반정도의 입열이 소요되며 이 경우 용접이음부 강도는 GMAW에 비해 FSW가 높고 게다가 연성도 같거나 그 이상으로 얻어진다고 보고되었다¹³⁾. FSW부의 온도측정결과를 GMAW 경우와 비교한 결과를 Fig. 8에 나타낸다¹⁶⁾. FSW의 최고가열온도는 480℃로 GMAW 용접부의 온도(>660℃)에 비해 매우 낮다.

TWI에서는 접합이음부의 단면 마크로 조직을 Al합금을 기준으로 4가지 영역으로 구분하여 정의하였다¹⁶⁾. 가장 뚜렷한 특징은 접합부 중앙에 잘 발달된 stir zone(D)이 존재하는 점인데 이 영역은 동적 재결정 영역이고 Al 합금 접합부에서는 뚜렷한 onion ring 형의 내부구조를 지니는 경우가 많다. Stir zone의 전체적인 형상은 사용 재료와 공정조건에 따라 매우

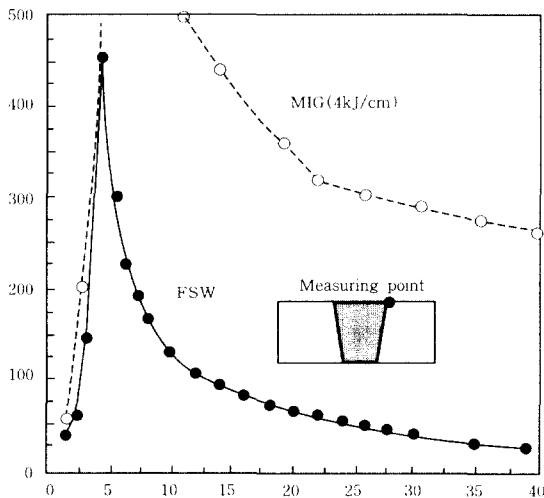


Fig. 8 Comparison of heat input between GMAW and FSW under the same welding speed

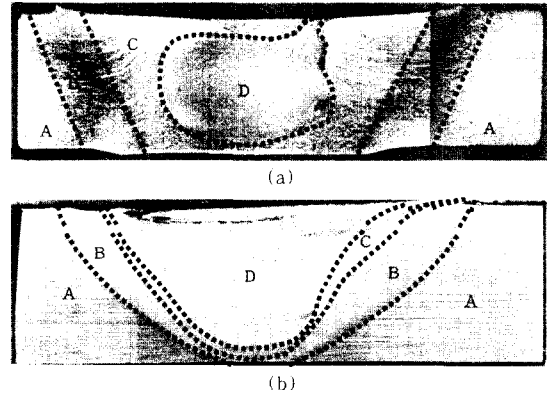


Fig. 9 Representation of microstructural regions in friction stir welds for (a) Al 6061 and (b) C-Mn steel

가변적이다. 일반적으로 복잡한 형상을 지닌 stir zone 부착물이 용접부 위 표면에서 자주 관찰되며 이는 tool shoulder의 끝단부까지 이어질 수 있다. Stir zone의 직경은 pin의 직경보다 약간 큰 것이 일반적이며 shoulder 직경보다는 훨씬 적다. 현재로서는 stir zone 형상에 대한 예측은 불가능하다. 이는 tool 설계, 접합조건 그리고 접합모재의 고온강도 등 다양한 인자에 의해 지배된다. Stir zone 외부의 마크로조직 역시 매우 독특한데 stir zone에 바로 인접해서는 소재의 극심한 소성변형이 일어나 연신된 결정조직이 90°까지도 회전할 수 있는 영역이 존재한다. 이 영역은 FSW 고유의 열-기계적영향역(C), TMAZ (thermomechanically affected zone)이라 부르며 소성변형에 의해 부분적인 재결정이 일어나는 곳이다. 이외에도 열영향부(B)는 변형이 가해지지 않지만 접합부의 열이 이 영역의 성질에 영향을 미친다. 가장 외각의 모재부(A)는 열이나 기계적변형의 영향을 받지 않은 영역을 나타낸다. 이러한 4가지 조직영역은 접합재의 재질에 따라서 차이가 나타나는데 Fig. 9는 Al합금과 탄소강 FSW 접합부 마크로조직 특성을 비교하여 보여준다.

5. 기계적 성질

접합부 기계적성질은 기기나 tool 형상에 의존하는 경우가 많으므로 각종 연구결과들에 대한 직접적인 비교는 어렵다. 지금까지의 연구결과를 종합하면 대략 FSW 접합부 기계적성질은 모재와 GMAW 용접부의 중간 수준이므로 기존 용접공정을 FSW로 교체하는 것이 비교적 용이하다고 생각된다. 2000계, 5000계, 7000계 등 Al합금의 FSW 이음부의 정적 강도특성은 모재와 동등한 수준이거나 경우에 따라서는 40% 정

Table 3 Tensile properties of FSW joint for Al alloys

Materials	Travel speed	Yield Strength, MPa	Tensile Strength, MPa	Elongation, %	Fracture location
2014-T6	-	247	378	6.5	HAZ
5083-O	-	142	299	23	PM
5083	9.2	144	-	16.2	WM
5083	13.2	141	-	13.6	WM
5083	6.6	156	-	20.3	WM
5083	9.2	154	-	18.8	WM
5083	4.6	143	-	19.8	WM
5083-H112	15.0	156	315	18.0	HAZ/PM
6082	75.0	136	-	8.4	HAZ/PM
6082	26.4	132	-	11.3	WM
6082	37.4	144	-	10.7	HAZ
6082	53.0	141	-	10.7	HAZ
6082	75.0	-	254	-	HAZ
6082-T5	-	-	260	-	-
6082-T4 aged	-	285	310	9.9	-
6082-T6	150	145	220	7	-
6082-T6 aged	150	230	280	9	-
6005-T4	-	94	175	22	-
6005-T4	Plasma welding	107	194	20	-
6005-T4	GMAW	104	179	18	-
6N01	25.0	199	133	12	HAZ/PM
7075-T7351	-	208	384	5.5	HAZ/PM
7108-T79	90	205	317	11	-

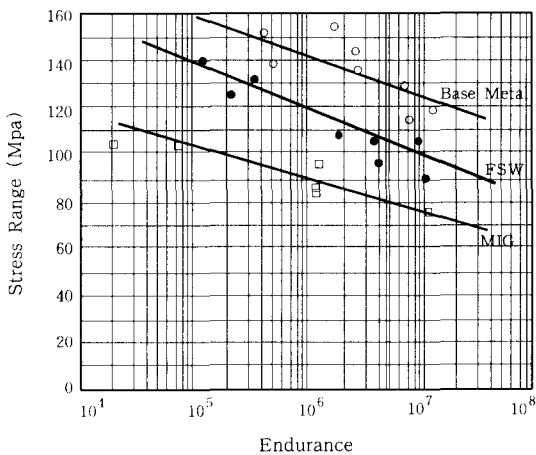


Fig. 10 Comparison of fatigue endurance test results

도까지 저하하는 것을 나타낸다. 설계기준으로서 모재의 인장강도 또는 항복강도를 적용하더라도 모재보다 약간 낮은 FSW 접합부는 설계기준의 소성변형에 충분히 견딜 수 있음을 시사하고 있다. 지금까지 발표된 Al합금의 FSW 접합이음부의 인장시험결과는 Table 3에 나타낸다¹⁹⁾.

Fig. 10은 두께 5mm의 6N01-T5재의 피로시험

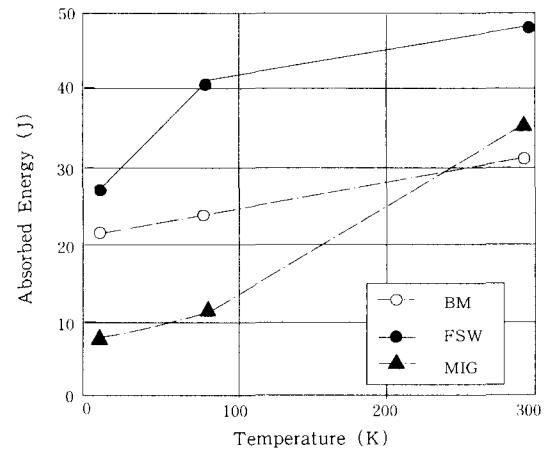


Fig. 11 Comparison of Charpy impact test results

결과를 나타내는데 전 시험범위에 걸쳐서 FSW 이음부는 GMAW에 비해 높은 파괴강도를 나타낸다²⁰⁾. 한편, 액체수소 저장용기용 합금 후보로 고려되는 Al합금 5083-O재의 2층 FSW 이음부에 대한 극저온 특성을 평가한 결과가 최근에 발표되었는데 Fig. 11에는 충격시험 결과를 나타낸다²¹⁾. FSW 접합은 판두께 30mm인 소재를 접합속도 40mm/min로 적용하였다. Charpy 시험에 의한 충격흡수에너지는 액체질소

및 액체헬륨온도에서 모재값을 상회할 정도로 우수하며 전 시험조건에서 연성파면을 보인다. 이에 비해, GMAW에서는 상온이외의 온도에서 모재값에 미치지 못한다. 이 연구에서 파괴인성을 K_{Ic} 로 평가하였는데 FSW 이음부가 충격시험과 마찬가지로 모재보다 높은 값을 지니고 인장강도 역시 GMAW에 비해 매우 높은 값이 극저온 환경에서 얻어진다. 이러한 극저온 기계적성질의 개선은 조직 미세화와 합금원소 편석 저감이 기인한 것으로 보인다.

6. FSW 응용기술

Al 합금의 생산가공 공정에 있어서 FSW 기술의 개발이 가져 온 가장 큰 기술적 효과는 이 공정이 피접합재의 용융점 이하의 온도에서 작동하는 고상접합 공정이므로 지금까지 고온균열 등의 문제로 인해 용융용접의 적용이 불가능하였던 고강도 시효경화형 Al 합금에 대해 리벳팅 대신 접합이 가능하게 된 점을 들 수 있다. 이들 합금은 1930년대 이후로 항공기 및 방탄용 소재로 사용되어 왔으며 최근에 이르기까지 이들 합금의 특성은 괄목할만한 발전을 이루어 왔다. 그러나, 실질적인 관점에서 이들 합금은 통상의 아크나 빔을 이용한 용접이 불가능하다는 한계로 말미암아 구조경량화를 위한 적용에 많은 제약이 따라왔다. 이러한 상황은 FSW 기술의 개발로 인해 거의 완벽하게 반전되어 실로 항공우주 산업에 있어서 생산가공기술의 paradigm이 바뀔 정도의 파급효과를 나타내고 있다.

미국과 EU에서는 우주항공 분야에서 FSW 기술과 관련한 대형 프로젝트를 진행하고 있는데 가장 최근에 EuroStir라는 프로젝트가 약 80억 예산 규모로 EU 여러나라가 공동으로 참여하여 FSW의 상업화 기술을 개발하고 있으며 WAFS, TANGO 등과 같은 대형 프로젝트가 우주항공 관련 대형사업으로 추진 중에 있다. 미국에서도 보잉사를 중심으로 Delta IV 로켓관련 프로젝트를 추진 중에 있고 일본도 최근에 국가 프로젝트로 채택하여 연구개발을 확대해가고 있다. 이러한 연구개발 활동을 통해 FSW에 대한 표준화, 박판 접합기술, 중후판 및 단조재 접합기술, 공정 modelling 등에 대한 연구를 진행 중에 있다. 항공기 동체 제작시 FSW를 적용하는 경우 기대되는 이점은 매우 다양한데 원가 절감과 관련하여 리벳팅보다 빠르고 조립이 단순하며 부품 재고를 줄일 수 있다. 이외에도 제작공정이 단순해지고 설계 허용도가 높아진다. 이러한 저원가 이점 외에도 FSW 이음부는 fastener, butt strap, doubler, bonding, rivet 등이 필요 없으므로 동체 중량이 가벼워진다. 이러한 장점을 살

리기 위해서는 이음부 품질이 모재와 유사한 수준의 강도를 얻으면서도 우수한 내식성을 지닐 수 있도록 현 수준보다는 개선되어야 한다. 또한 전체 구조에 있어서 피로나 내충격성 향상을 위해 낮고 균일한 응력 분포가 이루어지도록 해야 한다. 마지막으로 FSW 적용시 다양한 소재에 대한 용접이 가능하므로 용접구조물의 새로운 설계가 가능해진다. 대표적인 예를 들면 신, 구 항공재료(6013/6056, 2024, 2524, 7050, AlMgSc)용접, 이종합금(2524/7349, 6013, 6056/2024) 용접, 다양한 두께 범위의 박판, 후판, 압출재 용접, tailored blank 용접 등이 가능하다.

철도차량 관련분야는 일본이 가장 활발한 기술개발과 상업화를 이루고 있는데 특히, 700계의 신칸선 투입시기와 FSW의 개발시기가 거의 일치하였고 일본 정부와 관련업체의 과감한 정책적 판단에 의해 성공적으로 이 기술의 상업화가 이루어졌다. 1997년 가을부터 700계 신칸선의 floor판넬의 접합에 적용된 이래 지하철 신차량의 측면부재의 접합 및 선박용 부재의 접합 등에 적용시키고 있다. 대표적 용접구조용 Al재료인 6N01 및 5083합금을 FSW에 의해 접합하여 철도차량 및 선박용 광폭 형재를 제작 700계 신칸선(1300mm W, 5000mm L)의 floor판넬(6N01-T5, 4t) 및 선박판넬(5083-H112, 4t)로 공급하고 있다²²⁾. 이 방법은 종래의 GMAW 용접방법에 비하여 변형이 적고 평탄하므로 조립시의 용접시공성이 양호하여 1997년 가을부터 수행되기 시작하여 현재까지 문제가 생기지 않고 있다²³⁾. Fig. 12는 일본 히타치사에서 25m 길이의 double skin형 body shell에 편면 FSW가 가능한 이음부 설계를 개발한 예를 보여준다²⁰⁾. 이러한 경우 접합재의 회전이 필요없으므로 상당한 생산성 향상을 기대할 수 있다.

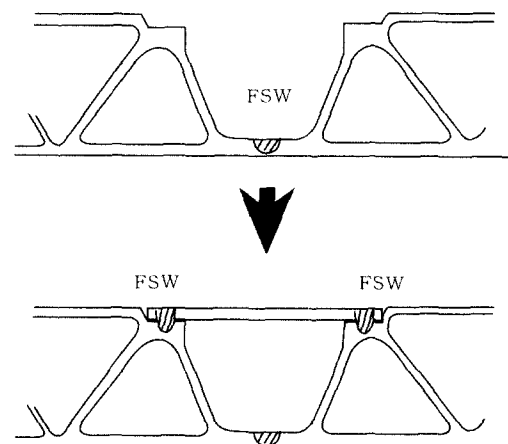


Fig. 12 One side FSW joint shape for double skin type body shell of rolling stock

이외에도 FSW 접합을 위한 압출재 이음부 형상은 이기존의 GMAW 이음부 형상에 비해 접합시 가해지는 하중에 견딜 수 있는 강도와 강성을 지녀야 하며 최소한의 gap과 smooth한 형상이 요구되는데 이에 대한 이음부 설계 및 제조기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

선박관련 분야에서는 FSW방법으로 접합한 선박용 대형 π 섹션(5083-H112)은 접합부에 결함도 없고 이면이 평탄하므로 덧살 및 변형의 제거가 필요치 않아 현장시공성이 양호하여 1997년부터 중형선박의 상부 구조에 사용되고 있으며 대폭적인 공정 단축이 가능하게 되고 있다²²⁾. 이들 외에도 FSW는 대형 열교환기(6063), 파라볼라 안테나용 광폭관(1100-0) 및 평탄도가 요구되는 교량상판(6N01)의 접합에 적용되고 있다. 스웨덴, 노르웨이 등 북유럽 국가에서도 주로 Al 선박제조에 FSW를 적용하고 있다²⁴⁾. 예를 들어 13x16m, 12.5x2.8m 등과 같은 다양한 크기의 미리 제작한 정형화된 Al 판넬을 선박 제조에 사용함으로써 높은 완성도를 갖춘 상업적 생산과 사용성능의 안정적 보장이 가능해진다. 또한, 환경친화적이고 폐널의 높은 직진성은 현장에서의 조립을 용이하게 하고 이로 인해 수동작업이 적어지게 된다. 현재 이러한 선박제조기술은 DNV, RINA, Lloyds 등과 같은 선급협회 인증을 받은 상태이다.

자동차 산업에 있어서도 FSW의 응용이 활발히 진행되고 있다²⁵⁾. 노르웨이, 호주에서는 차 wheel의 두 부분을 FSW로 접합하는 기술을 개발하여 상품화에 성공하였다. 기존의 wheel assemblies에 비해 용접 전후 처리가 단순하고 설계 자유도를 높여주고 치수 안정성과 관련한 문제를 향상시켜 준다. 또한 Al을 이용한 prototype 자동차 설계자들은 tailored Al blank를 고려하고 있는데 현재까지는 대부분 laser 용접에 의해 tailored blank 용접이 이루어지고 있으나 FSW를 이용한 이중두께간 접합이 개발되어 적용을 검토하고 있는 단계이다. 이 경우 낮은 입열량과 용접부 전반에 걸쳐 우수한 기계적성질로 인해 양호한 성형성을 나타내고 경사진 tool이 단차가 있는 이음부 쪽으로 삽입시킴으로써 완만한 두께 변화를 얻을 수 있다.

FSW 공정은 Al 이외에도 다양한 저용점재료 접합에 적용이 가능한데 여기에는 Pb, Zn, Cu, Mg 그리고 Mg/Al간 이중접합 등이 포함된다. 특히, 최근에는 Ti 합금과 Mg 합금에 대한 적용성 검토가 활발히 이루어지고 있는데 이스라엘에서는 Mg 주조합금인 AZ91D에 대해 FSW를 적용한 결과 결함 발생이 거의 없이 용접이 가능하다는 것을 다양한 조직 특성과

함께 발표한 바 있으며²⁶⁾ 독일에서는 복잡한 형상의 Mg 자동차 부품을 로봇을 이용한 자동 FSW 용접으로 접합하는 기술을 개발 중이다²⁷⁾.

7. 향후 전망

활발한 개발과 관심에도 불구하고 FSW는 여전히 새로운 접합공정이다. 이러한 관점에서 이 공정을 충분히 활용하기 위해서는 상당한 개발이 추가적으로 요구된다. 가장 두드러진 점은 이 공정의 물리현상은 가장 일반적인 용어로 정의되어 있을 뿐이다. 따라서 이 공정의 접합기구를 이해하고 정량화하며 증명하기 위해서는 많은 연구가 수행되어야 한다. 이러한 작업은 FSW 기술이 다른 재료 시스템에 효율적으로 이전되려면 반드시 필요한 부분이다. 이를 위해서는 FSW tool과의 상호작용 기구에 대한 이해 증진과 함께 온도 의존적인 열적, 기계적성질에 대한 정도 높은 process modelling이 필요하다. 이 기술을 보다 넓은 제조분야에 확대 적용하기 위해서는 공정 개선이 필요한데 특히, 생산성 향상을 위한 접합속도 향상에 큰 관심이 집중되어 있다. 이를 위한 tool 재질 및 설계기술 개발이 뒷받침되어야 하며 복잡 형상의 부품 및 구조물 제작에 적용하기 위한 비선형 3차원 접합 시스템의 개발도 필요한 과제이다. 최근에는 Al 합금에 이어서 Ti, Mg, Cu 합금 등이 FSW 기술 개발의 축이 되고 있는데 이 기술이 개발되면 철강, Ni기 합금 그리고 금속간화합물에 역시 적용이 고려될 것이다. FSW 기술은 기본적으로 에너지 절약 및 작업환경의 개선이라는 이점도 있어 향후 자원의 보존 및 지구온난화 문제 등으로 환경규제가 더욱 강화되어 갈 것이라고 본다면 이 기술은 고상접합기술로서 사용이 증대될 가능성이 매우 높은 기술중의 하나라고 생각된다.

8. 맺 음 말

TWI가 개발한 FSW 기술은 지금까지의 고정관념을 탈피하여 판재의 마찰압접이 가능한 획기적 접합법이다. 새로운 용접기술은 때때로 그 기술과 관련한 물리, 화학적 규명을 위한 기초과학이 발전하기도 전에 상업화되기도 하는데 FSW 기술이야말로 이러한 용접 기술 발전의 전통에서 벗어날 수 없을 듯 하다. 게다가 발표된 지 몇 년 지나지 않았는데도 불구하고 다양하게 실용화되고 있으며 적용 소재도 경량합금계의 복합재료나 철강부재의 접합에도 적용을 검토할 만큼 활발한 개발환경이 조성되고 있다. 현재 국내에서는 TWI가 특허로서 원천기술에 대한 권리를 보호하고

있는 상황이라서 활발한 기술 적용이 제한받고 있는 실정이지만 선진 각국에서는 다양한 응용기술에 대한 특허를 국내에 출원하여 이 기술에 대한 권리 범위를 확대해 가고 있는 실정이므로 이웃 일본의 경우처럼 정부와 관련업계 그리고 연구기관들이 유기적 협조체제를 구축하여 국가적 차원에서 효율적으로 이 기술의 개발과 상용화를 추진해 나가지 않으면 안될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. W. M. Thomas et al.: Friction Stir Butt Welding, International Patent Application No. PCT/GB92 Patent Application No. 9125978.8, 1991
2. TWI, Proceedings of Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16 June 1999
3. TWI, Proceedings of the 2nd Friction Stir Welding Symposium, Gothenburg, Sweden, 26-28 June 2000
4. TWI, Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27-28 September 2001
5. TWI, Proceedings of the INALCO Conference, Cambridge, UK, 16 April 1998
6. Proceedings of the Aluminium '97 Conference, Essen, Germany, Sep 1997
7. Proceedings of the 3rd World Congress on Aluminum, Limassol, Cyprus, 15-19 April 1997
8. Proceedings of 79~82 American Welding Society Annual Meeting, 1998-2001
9. 溶接學會全國大會講演概要 第62集-68集, 1998-2001
10. 대한용접학회 학술발표대회개요집, 제37, 38권, 2001
11. T. Shinoda et al.: Recent Trends of Research and Development of FSW Technology in Japan, Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27-28 September 2001
12. W.M. Thomas: Friction Stir Welding of Ferrous Materials:A Feasibility Study, Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16 June 1999
13. T. Shinoda: Friction Stir Welding의 靑勢, 靑金屬溶接, 37-9(1999) p.406
14. J. Mononen et al.: Cost Comparison of FSW and MIG Welded Aluminium Panels, Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27-28 September 2001
15. S. Kallee et al.: Knowledge-Base Software package for FSW, Proceedings of the INALCO Conference, Cambridge, UK, 16 April 1998, p.209
16. 岡村 久宜: 溶接學會誌, 69-7(2000) p.565
17. J. Backlund et al.: Proc. of INALCO, Cambridge, May 1998, p.171
18. P. Threadgill: Friction Stir Welds in Aluminium Alloys-Preliminary Microstructural Assessment, TWI Bulletin, Mar/April 1997
19. T. Shinoda: Friction Stir Welding의 基礎と實際-第4回 機械的性質, 溶接技術, 2001. 9, p.128
20. H. Takai et al.: Application of FSW to Rolling Stock Body Shell, Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27-28 September 2001
21. M. Hayashi et al.: Mechanical Properties of Friction Stir Welded 5083 Aluminium Alloy at Cryogenic Temperatures, Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27-28 September 2001
22. 熊谷 正樹, 田中 直, 溶接學會全國大會概要, 第65集, 1999, p.554
23. 古賀 信次: 溶接學會誌, 69-3(2000) p.17
24. O.T. Midling et al.: Industrialization of the Friction Stir Welding Technology in Panels Production for the Maritime Sector, Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16 June 1999
25. S. Kallee, D. Nicholas: Application of Friction Stir Welding to Lightweight Vehicles, Proc. of IBEC 98, Detroit, USA 29 Sept-1 Oct 1998
26. G. Kohn et al.: Friction Stir Welding Magnesium Alloys, Proceedings for the symposium Automotive Alloys 1999 from the 1999 TMS Annual Meeting, San Diego, CA, March 1-4, 1999.
27. A.V.Strombeck et al.:Robotic Friction Stir Welding-Tool Technology and Applications, The 2nd Friction Stir Welding Symposium, 27-28 June 2000, Gothenburg, Sweden



- 장용성(張雄成)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철재료 개발, 용접야금, 용접재료, 마찰교반용접
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 최기용(崔基瑢)
- 1971년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철재료 개발, 용접야금, 용접재료
- e-mail : moohangedo@hanmail.net



- 김숙환(金肅煥)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 고밀도에너지빔 용접, 고상접합, 용접야금
- e-mail : weldksh@rist.re.kr



- 권영각(權寧珪)
- 1952년생
- RIST 용접센터
- 파괴역학, 부식파괴
- e-mail : ygkweon@rist.re.kr