

Friction Stir Welding의 기술원리 및 개발동향

Friction Stir Welding - The State of the Art -

장웅성, 최기용, 강문진, 권영각

RIST 설비용접연구팀

1. 서론

Friction Stir Welding(이하 FSW)은 영국 TWI에서 1991년에 특허를 출원한 비교적 새롭고 독특한 공정이다. 이 새로운 접합기술은 기존의 마찰용접(Friction Welding)이 원형단면부재의 접합에 한정된다는 고정관념을 타파한 점에서 많은 주목을 받고 있으며 심지어 금세기 최대의 AI 용접기술이라고 말해지고 있다. FSW는 양질의 편면 또는 양면 맞대기, T, lap 이음부를 만들 수 있는 고상용 접합기술로서 제조업계로부터 각광을 받고 있다. 또한, FWS은 금속은 물론 비금속까지 응용이 가능하며 동, 마그네슘, 아연, 납 등의 경금속재료, 이들간의 이종금속 조합, 주물재료와 플라스틱에도 적용 가능하지만 지금까지는 접합기술 개발수요가 높은 Al합금을 중심으로 응용연구가 활발히 진행되어 왔다. 최근에는 철강재료의 접합기술도 개발이 진행되고 있는데 최근 TWI에서는 판 두께 25mm의 일반강을 100~240mm/min 속도로 양면접합하고 판 두께 12mm의 12% Cr강을 1층 접합하여 건전한 접합부가 얻어짐을 보고한 바 있다. 적용분야 역시 상당량의 고강도 Al합금을 사용하는 항공산업을 중심으로 활발한 기술개발이 이루어져 왔으며 유럽에서는 FSW의 저변형 특징을 살려 경량 조선산업에 집중적인 투자를 하고 있으며 자동차 분야에서는 tailor-welded blank 분야를 중심으로 관심이 증대되고 있다. 본 발표는 지금까지 발표된 연구보고 등을 중심으로 이 기술의 원리 및 특징, 그리고 현재의 기술개발현황에 대하여 기술한다.

2. 본론

2.1 FSW 접합원리

FSW 공정은 Fig.1에 나타나듯이 매우 간단하면서 독특한 일종의 연속공정으로 접합모재를 고정시킨 후 이음부의 맞대기 면을 따라 특수 형상과 경한 재질을 지닌 비소모식 회전 tool(또는 stir rod)의 일부분이 삽입되어 tool과 접합모재의 상대적 운동에 의해 마찰열을 발생시켜 충분한 온도로 접합부를 가열하여 모재의 변형저항을 낮추어 연화시킨다. 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. 용접부에서 용융은 일어나지 않으므로 미세한 결정립의 압출조작이 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 점 등 많은 이점들이 얻어진다.

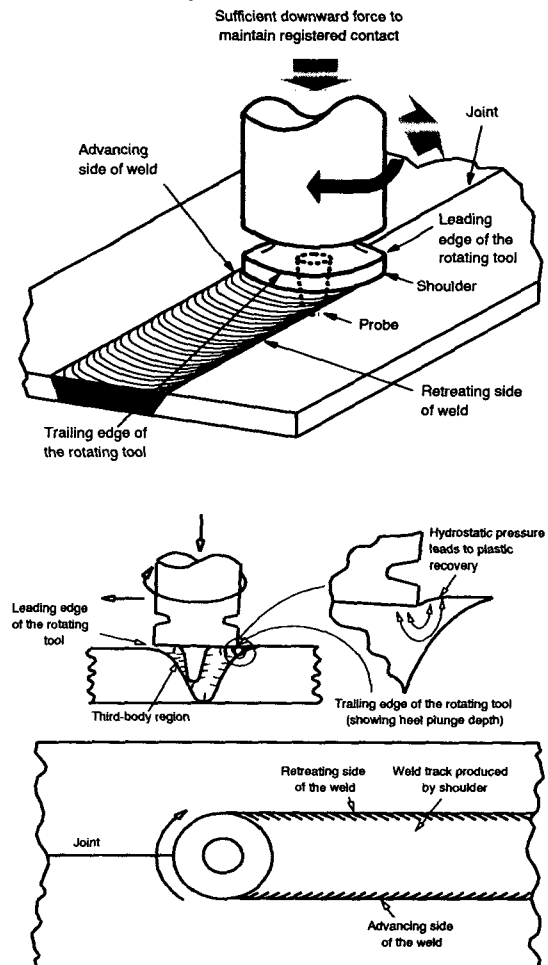


Fig. 1 Basic principle of friction stir welding

2.2 접합부 조직특성

TWI에서는 접합이음부의 단면 마크로 조직을 Fig. 2에 개념적으로 도시한 바와 같이 구분하여 정의하였다. 가장 뚜렷한 특징은 접합부 중앙에 잘 발달된 nugget(D)이 존재하는 점인데 이 영역은 동적재결정영역이고 AI 합금 접합부에서는 뚜렷한 onion ring 형의 내부구조를 지니는 경우가 많다. Nugget의 전체적인 형상은 사용 재료와 공정조건에 따라 매우 가변적이다. 일반적으로 복잡한 형상을 지닌 nugget 부착물이 용접부 위 표면에서 자주 관찰되며 이는 tool shoulder의 끝단부까지 이어질 수 있다. Nugget의 직경은 pin의 직경보다 약간 큰 것이 일반적이며 shoulder 직경보다는 훨씬 적다. 현재로서는 nugget 형상에 대한 예측은 불가능하다. 이는 tool 설계, 접합조건 그리고 접합모재의 고온강도 등 다양한 인자에 의해 지배된다. Nugget 외부의 마크로조직 역시 매우 독특한데 nugget에 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 가해가지는 않지만 접합부의 열이 이 영역의 성질에 영향을 미친다. 가장 외곽의 모재부(A)는 열이나 기계적변형의 영향을 받지 않은 영역을 나타낸다. 이상과 같이 열과 기계적변형이 복합적으로 영향을 미치는 복잡한 FSW 접합부 미세조직 특징에 대해서는 보다 깊이 있는 연구가 필요한 부분이다.

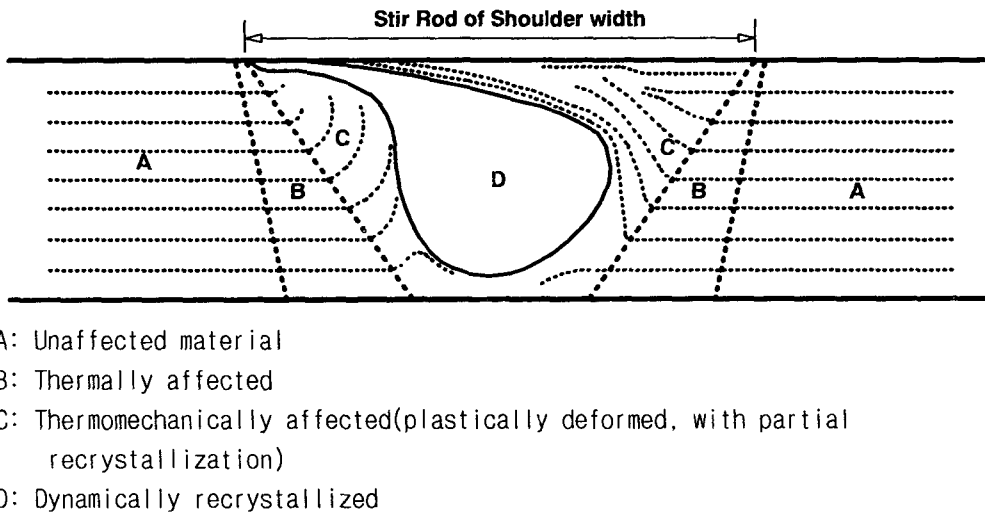


Fig. 2 Representation of microstructural regions in a friction stir weld

2.3 FSW의 특징

FSW는 기존의 용융용접에 비해 획기적인 장점들을 나타내는 반면 몇가지 해결해야 할 단점들도 있다. 접합분위기는 AI의 경우 차폐가스가 필요하지 않고 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 접합 공정이다. 또한 기계적에너지 효율이 높아서 판두께 12.5mm의 6000계 AI합금에 대해 3kW의 에너지면 충분하다고 한다.

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 대단면부재의 접합이 가능하다는 사실이 흥미 깊은 점이다.

2.4 FSW의 응용분야

FSW은 금속은 물론 비금속까지 응용이 가능하여 동, 마그네슘, 아연, 납 등의 경금속재료, 이들 간의 이종금속 조합, 주물재료와 플라스틱에도 적용 가능하지만 지금까지는 접합기술 개발수요가 높은 Al합금을 중심으로 응용연구가 활발히 진행되어 왔다. 최근에는 철강재료의 접합기술도 개발이 진행되고 있으며 적용분야 역시 자동차, 조선, 우주항공 등 다방면에 걸쳐 실용 생산가공기술로서 매우 빠른 속도로 보급되고 있다.

일본의 경우 FSW를 이용한 제품 상용화는 전동차 분야에서 가장 활발히 이루어지고 있는데 Hitachi사에서는 차세대 Al 전동차인 소위 A-train의 차체 제작시 20m 길이의 hollow extrusion 접합에 FSW 기술을 적용하여 상업 생산을 성공적으로 진행하고 있다. 이 경우 이점은 높은 생산성과 함께 Al계 복합재료에 적용할 경우 용융용접에서 문제가 되는 기공, 균열 등이 생기지 않고 접합이 가능하므로 앞으로 많은 연구개발과 실용화가 이루어질 것으로 기대된다.

스웨덴, 노르웨이 등 북유럽 국가에서는 주로 Al 선박제조에 FSW를 적용하고 있다. 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 패널의 높은 직진성은 현장에서의 조립을 용이하게 하고 이로 인해 수동작업이 적어지게 된다. 현재 이러한 선박제조기술은 DNV, RINA, Lloyds 등과 같은 선급협회로부터 인증을 받은 상태이다. 미국에서는 항공우주산업이 높은 관심을 나타내어 지금까지 용융용접이 불가능하다고 간주되어온 duralumin에 대해서도 적용이 가능하여 항공관계자의 재료 선택시 용접성을 고려할 필요가 없어졌다고 까지 단언하고 있는 실정이다. 예를 들어 Boeing사의 경우 항공기용 연료탱크를 FSW 기술만으로 제작하고 있으며 각종 패널의 조립에도 기존의 riveting 방식을 대체하는 접합기술로서 이미 상업적 생산에 적용하고 있다. Boeing사에 따르면 결함발생율은 GMAW의 경우 용접길이 840cm 당 1개인데 비해 FSW 적용시 1/10 수준인 7,620cm 당 1개로 감소하였다.

FSW의 robot화 및 portable화도 활발히 시도되고 있는데 특히 RIFTEC(Robotic Friction Welding Application and Technology Centre)가 독일과 스웨덴 기관간의 협력에 의해 설립되어 모델명 Tricept 600, 805 등의 Robotic FSW 장치를 개발하여 상용화하고 있다. Tricept 805의 경우 유압 스피들의 용량은 45kW, 5000 rpm이고 수직 하중 4,500 N, 수평하중 10,000 N 용량을 지닌다. 이러한 FSW의 robot화 및 portable화는 이 기술의 적용 분야를 한층 확대시키는 계기가 될 것으로 기대된다.

3. 맺음말

TWI가 개발한 FSW 기술은 지금까지의 고정관념을 탈피하여 판재의 마찰압접이 가능한 획기적 접합 방법이다. 새로운 용접기술은 때때로 그 기술과 관련한 물리, 화학적 규명을 위한 기초과학이 발전하기도 전에 상업화되기도 하는데 FSW 기술이야말로 이러한 용접기술 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 TWI가 특허로서 이 방법을 보호하고 있는 상황이라서 자유로운 연구가 이루어 지지 못하는 실정이지만 앞으로 이 기술의 유용성이 널리 인식되기 시작하면 광범위한 공업분야에서 사용이 기대되므로 동향을 주의 깊게 지켜볼 필요가 있다. 본 연구팀에서는 이 기술의 국내 전파 및 독자기술 개발 그리고 적용분야 확대를 위해 TWI와 공동연구를 수행하고 있으며 향후 그 결과가 국내 산업계에 적용될 수 있도록 노력할 계획이다.