

## 새로운 접합법, Friction Stir Welding의 최근 개발동향

장용성 · 최기용 · 강문진 · 권영각

### Up-and-Coming Friction Stir Welding

Woong-Seong Chang, Ki-Yong Choi, Moon-Jin Kang and Young-Gak Kweon

#### 1. 서 론

Friction Stir Welding(이하 FSW)은 영국 TWI에서 1991년에 특허를 출원한 비교적 새롭고 독특한 공정이다<sup>1)</sup>. 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. TWI의 최초 특허는 이 기술의 원리와 개념만을 정의한 것으로 구체적인 접합 인자나 기기의 구성에 대해서는 알려지지 않은 점이 많다. 그러나 최근 들어 TWI가 주관한 2차례의 FSW symposium<sup>2,3)</sup>, 경금속 관련 국제회의<sup>4~6)</sup>, 각종 용접학회 발표대회<sup>7~10)</sup> 등을 통해 FSW에 관한 발표건수가 증가하고 있어서 이 기술과 관련한 많은 기술적 know-how들이 점진적으로 밝혀지고 있다.

FSW은 양질의 편면 또는 양면 맞대기, T, lap 이음부를 만들 수 있는 고상용접기술로서 제조업체로부터 각광을 받고 있다. 또한, FWS은 금속은 물론 비금속까지 응용이 가능하여 동, 마그네슘, 아연, 납 등의 경금속재료, 이들간의 이종금속 조합, 주물재료와 플라스틱에도 적용 가능하지만 지금까지는 접합기술 개발 수요가 높은 AI합금을 중심으로 응용연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>11)</sup>. 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<sup>12)</sup>. 적용분야 역시 상당량의 고강도 AI합금을 사용하는 항공산업<sup>13)</sup>을 중심으로 활발한 기술개발이 이루어져 왔으며 유럽에서는 FSW의 저변형 특징을 살려 경량 조선산업<sup>14)</sup>에 집중적인 투자를 하고 있으며 자동차 분야<sup>15)</sup>에서는

tailor-welded blank 분야를 중심으로 관심이 증대되고 있다.

이 공정에 대해 일본에서는 마찰교반용접, 계면활성화접합법 등으로 불리고 있으나 국내의 경우 정확한 국문 용어가 정해져 있지 않으므로 본 해설에서는 약어인 FSW를 잠정적으로 사용하기로 한다. 본 해설은 지금까지 발표된 연구보고 등을 중심으로 이 기술의 원리 및 특징, 그리고 현재의 기술개발현황에 대하여 기술한다.

#### 2. FSW 접합원리

FSW 공정은 Fig.1에 나타나듯이 매우 간단하면서도 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 가열시킨다<sup>16)</sup>. 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 압출조각이 남아 있고 액상에서 고상으로의 변태에 따른 기공, 응고균열, 잔류응력 등과 같은 문제가 해결된다. 이외에도 낮은 입열량과 미용용 특성으로 기계적성질이 개선되고 용접 전 처리기준이 덜 엄격하며 공정인자 역시 아크용접에 비해 단순한 점 등 많은 이점들이 얻어진다.

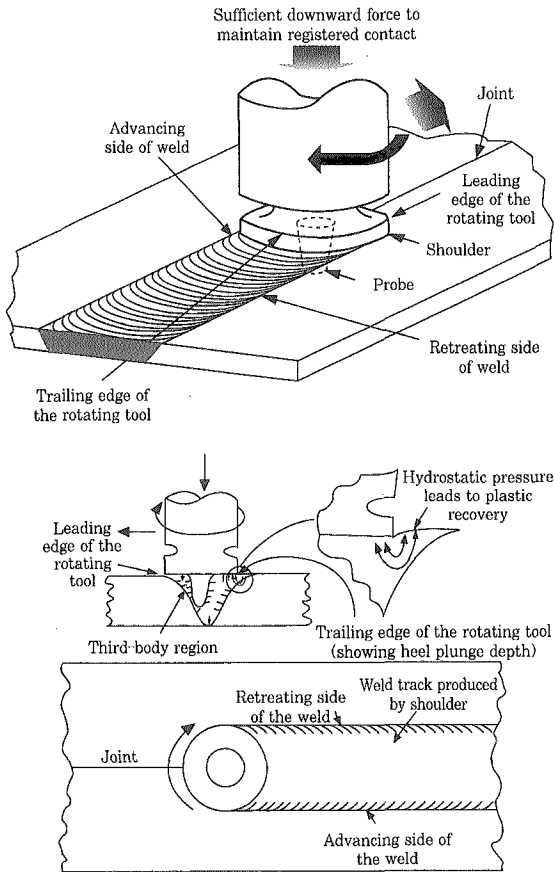


Fig. 1 Basic principle of friction stir welding

Tool은 일반적으로 큰 직경의 shoulder부와 이보다 적은 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 인자

이다. 지금까지 TWI에서는 Al, Mg 등 저융점 합금 접합용 tool은 공구강(AISI H13)을 사용하고 있다. 이외에도 마르텐사이트계 스테인리스강(STS440C), 공구강, SKD61 등을 이용한 경우도 보고되고 있다<sup>17)</sup>. 그 성능 기준을 예를 들면 5mm 두께의 6xxx 계열 Al 합금 용접시 tool 교환 없이 1000m의 용접이 가능하도록 제조한다. 접합하고자 하는 부재는 backing bar 위에서 수직 및 측면방향으로 발생하는 힘에 대해 견딜 수 있도록 고정시켜야 한다<sup>13)</sup>. Tool의 shoulder부는 Fig. 2에서 나타나듯이 평면이 아니고 약간 오목한 형상을 하고 있다. 이는 shoulder부의 회전에 의해 접합모재의 표면 바로 아래에서의 소성유동을 촉진하고 혼합교반의 효과를 증대시키기 위함이다<sup>17)</sup>. 그러나 표면형상의 최적화에 대해서는 검토가 진행되고 있는 과제이기도 하다. 한편, 75mm정도의 극후판에 대한 FSW 개발은 pin 표면에 나선형의 나선홈을 파서 접합금속의 교반력을 증가시키도록 하였다.

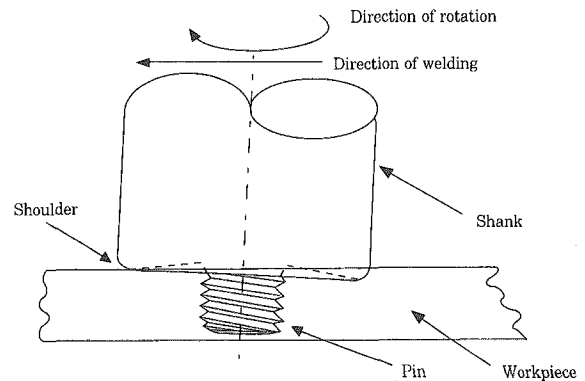


Fig. 2 Schematic of friction stir welding tool

### 3. 접합부 조직과 온도이력

TWI에서는 접합이음부의 단면 마크로 조직을 Fig. 3에 개념적으로 도시한 바와 같이 구분하여 정의하였다<sup>18)</sup>. 가장 뚜렷한 특징은 접합부 중앙에 잘 발달된 nugget(D)이 존재하는 점인데 이 영역은 동적재결정 영역이고 Al 합금 접합부에서는 뚜렷한 onion ring 형의 내부구조를 지니는 경우가 많다. Nugget의 전체적인 형상은 사용 재료와 공정조건에 따라 매우 가변적이다. 일반적으로 복잡한 형상을 지닌 nugget 부차물이 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, 접합 조건 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 외각의 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.

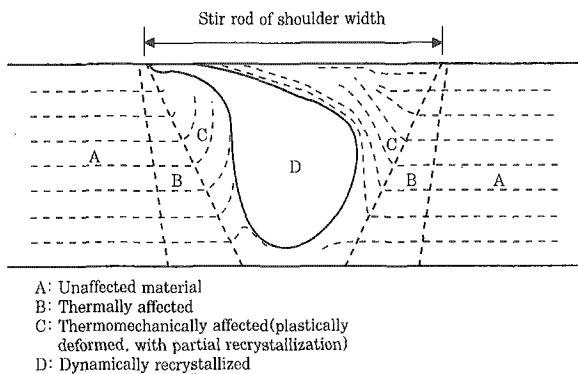


Fig. 3 Representation of microstructural regions in a friction stir weld

FSW 접합시의 온도이력에 대해서는 다양한 결과들이 발표되고 있지만 Backlund는 Fig. 4에 나타내듯이 tool 직경 15mm의 경우 판 두께 4mm의 6063 Al합금-T6재의 접합선 중앙에서 2mm 떨어진 지점에서 500℃를 초과하는 값이 기록되고 있다<sup>19)</sup>. 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 최고 도달온도를 계측한 결과에 의하면 최고 350~400℃가 되어 위의 결과와 유사한 값을 보인다. TWI의 실험결과에 있어서도 거의 용융점의 70% 정도가 최고 온도로서 Al의 경우 550℃를 넘지 않는다고 하여 접합시의 최고온도는 500℃ 내외라고 생각된다.

한편, 6N01 합금에 대해 FSW와 GMAW의 용접입 열량을 측정하여 비교한 실험에 따르면 동일한 용접속도에서 FSW가 GMAW에 비해 절반 정도의 입열이 소요되며 이 경우 용접이음부 강도는 GMAW에 비해

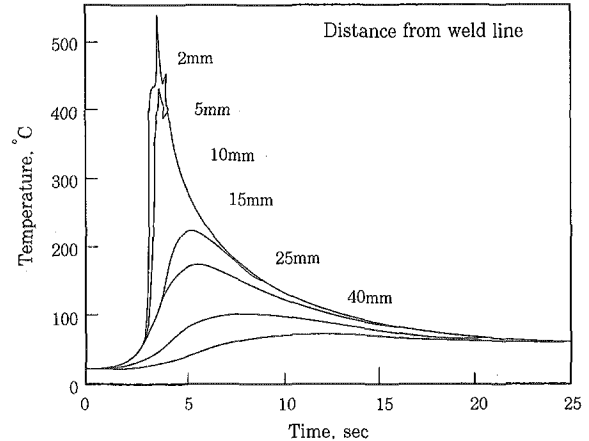


Fig. 4 Thermal cycles of FSW for A6063-T6 alloy

FSW가 높고 게다가 연성도 같거나 그 이상으로 얻어진다고 보고되었다.

#### 4. FSW의 특징

FSW는 기존의 용융용접에 비해 획기적인 장점들을 나타내는 반면 몇가지 해결해야 할 단점들도 있다. Table 1에는 이러한 FSW의 장단점을 정리하였다.

Table 1 Advantages and limitations of FSW technology

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 고상접합이다</li> <li>▶ 접합에 따른 변형이 없다</li> <li>▶ Duralumin, MMC 등 종래 용융용접이 곤란한 재료의 접합이 가능하다.</li> <li>▶ 차폐가스가 필요 없다.</li> <li>▶ 기계적성질이 우수하며 특히, 피로 특성은 뛰어나다.</li> <li>▶ 접합 중 fume 발생이 없고 적외선, 자외선 등의 유해광선도 발생하지 않는다.</li> <li>▶ 고속접합이 가능하다.</li> <li>▶ 용융용접시 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함은 발생하지 않는다.</li> <li>▶ 접합부 조직에 주상정 등이 생기지 않고 소성유동에 의해 결정립 미세화가 가능하다.</li> <li>▶ 접합에 필요한 에너지 효율이 높다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 여성을 만들지 않으므로 필릿 이음부를 만들 수 없다.</li> <li>▶ 접합부 끝부분에 pin의 구멍이 남는다.</li> <li>▶ 접합부재의 정렬 및 gap 제어가 요구된다.</li> <li>▶ 지금까지의 기술은 주로 경금속에 제한된다.</li> </ul>

접합분위기는 Al의 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 접합공정이다. 또한 기계적에너지 효율이 높아서 판두께 12.5mm의 6000계 Al합금에 대해 3kW의 에너지면 충분하다고 한다<sup>20)</sup>.

본 기술의 단점은 접합부 종단에 tool 들기부의 구멍

이 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.

## 5. FSW 적용재료

이미 언급하였듯이 FSW는 피접합재의 용융점 이하의 온도에서 작동되는 고상접합공정이므로 우주항공 산업에서 널리 사용되는 Al 합금, 예를 들어 2014, 2219, 7050 및 용융용접이 불가능한 Al-Li합금 등에 대해 매우 용이하고 경제적으로 고품질의 용접부를 구현할 수 있다. 또한, FSW에 의한 저변형 고상접합부는 아크 공정에 의해 이루어지는 용융용접부에 비해 우수한 금속학적, 기계적 특성을 나타낸다. 이중 Al 합금간의 용접, 예를 들어 2xxx/7xxx, 5xxx/6xxx 조합도 가능하다. Al 합금 용접에 있어서 차폐가스는 필요하지 않다. 이 공정은 Al외에도 다양한 저융점재료 접합에 적용이 가능한데 여기에는 Pb, Zn, Cu, Mg 그리고 Mg/Al간 이중접합 등이 포함된다. 최근에는 철강재료 및 금속기 복합재료에 대한 적용 가능성이 검토되고 있는 단계이다<sup>21)</sup>.

저융점재료의 접합을 위해서는 몇 가지 아래와 같은 재료적 인자들을 고려해야 한다.

- 1) 재료의 연화온도: 재료의 연화온도로부터 tool의 작업온도와 응력 조건을 정할 수 있다. 즉, tool의 적정성을 결정할 수 있다.
- 2) 재료의 열전달 특성: 열전달특성을 알면 접합을 위한 공정조건을 결정할 수 있다. 이는 열전도도, 열용량, 열확산도 등이다. 예를 들어 열확산도가 낮으면 일반적으로 열전달 속도가 감소하므로 느린 회전/이동속도와 큰 tool shoulder 직경이 필요하다.
- 3) 재료의 유효 소성역: 좁은 소성역(재료가 소성상태를 유지하는 온도 구간)은 공정의 경직성에 대한 대략적인 척도가 된다. 좁은 소성역을 지닌 재료는 필연적으로 FSW의 공정조건이 좁은 범위를 지닌다.

이와 같은 저융점재료에 대한 FSW 기술 개발은 초기 단계로서 Al 합금 수준의 FSW 기술 개발을 위해서는 상당한 개발이 필요하다.

고온재료에 대한 FSW 역시 많은 연구가 진행되고 있다. 예를 들어 Ti과 그 합금, 철강, Zr 합금 등을 들 수 있다. 이 경우 가장 큰 문제는 tool의 열적 안정성이다. 저융점재료에 비해 이들 재료 접합용 tool은 1000°C 이상 고온에서 작동한다. 이러한 온도에서는 tool과 관련한 아래의 특성들이 고려되어야 한다.

1) 작업온도에서의 tool의 기계적 안정성: 고온에서 tool은 적절한 접합을 위한 형상을 유지해야 한다. 적절한 tool은 접합온도에서 변형에 견디고 마모를 최소화해야 한다.

2) 금속적 공격에 대한 저항능: 선택된 tool은 접합과정에서 모재와 해로운 쪽으로 금속적 반응을 일으키면 안 된다. 이는 tool attack을 촉진할 수 있는 취약한 금속간화합물상이나 저융점화합물 형성을 포함한다.

이외에도 저융점재료에서 검토한 모든 재료인자들이 여기서도 고려의 대상이 되어야 한다. 마지막으로 이들 고온재료들은 필연적으로 모재와 tool의 산화를 방지하기 위한 차폐가스가 필요하다.

## 6. FSW의 응용분야

앞서 언급하였듯이 FWS는 금속은 물론 비금속까지 응용이 가능하여 동, 마그네슘, 아연, 납 등의 경금속 재료, 이들간의 이중금속 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 파급되고 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<sup>22)</sup>. 이 경우 이점은 높은 생산성과 함께 Al계 복합재료에 적용할 경우 용융용접에서 문제가 되는 기공, 균열 등이 생기지 않고 접합이 가능하므로 앞으로 많은 연구 개발과 실용화가 이루어질 것으로 기대된다.

스웨덴, 노르웨이 등 북유럽 국가에서는 주로 Al 선박제조에 FSW를 적용하고 있다<sup>14)</sup>. 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 현장에서 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<sup>15)</sup>. Boeing사에 따르면 결함발생율은 GMAW의 경우 용접길이 840cm 당 1개인데 비해 FSW 적용시 1/10 수준인 7,620cm 당 1개로 감소하였다.

유럽의 경우 EU 차원에서 항공산업에 있어서 FSW 응용기술 개발을 추진하고 있다<sup>23)</sup>.

민간항공기 제작에 있어서 FSW는 원가, 중량, 이음부 품질과 관련하여 큰 이점이 있는 것으로 판단되며 특히 동체의 길이 및 원주용접에 대해 개발이 진행 중에 있으며 이외에도 door reinforcement 등에 tailored blank 용접에도 적용을 검토 중이다. Fig. 5는 FSW 적용이 가능한 항공기 동체의 부분을 보여준다. 지금 현재 길이 방향 용접은 overlap connection 방식으로 매우 복잡한 riveting에 의해 이루어지며 rivet을 이용한 제조 방식(Airbus A340에 약 1백만 rivet 사용)은 이미 검증된 제조방식이므로 FSW가 위에서 언급한 장점들을 확인할 수 있어야 하고 또한 충격흡수력이나 내식성에 대한 기준도 만족해야 한다. 이를 위해 European project인 WAFS(Welding of Airframes using Friction Stir)를 통해 FSW에 대한 표준화, 박판 접합기술, 중후판 및 단조재 접합기술, 공정 modelling 등에 대한 연구를 진행 중에 있다.

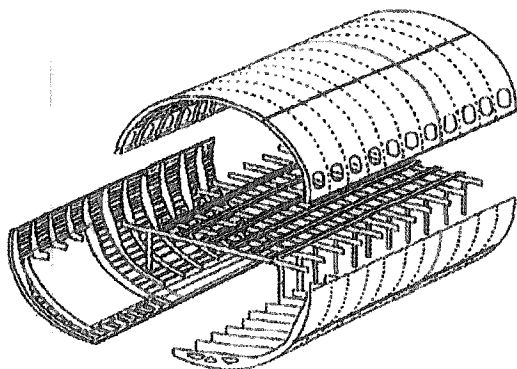


Fig. 5 Fuselage section showing possible FSW application

항공기 동체 제작시 FSW를 적용하는 경우 기대되는 이점은 매우 다양한데 원가 절감과 관련하여 riveting 보다 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 없어지므로 동체 중량이 가벼워진다. 이러한 장점을 살리기 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 응력분포가 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. 자동차 산업에 있어서도 FSW의 응용이 활발히 진행되고 있다<sup>13)</sup>. 노르웨이에서는 차 wheel의 두 부분을 FSW로 접합하는 기술을 개발하여 prototype 제작에 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 이종두께간 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 삽입시킴으로서 완만한 두께 변화를 얻을 수 있다. 이외에도 자동차 산업과 관련한 FSW의 응용 분야는 매우 다양하게 확대되고 있는데 재료측면에서 보면 현재까지는 주로 Al 합금에 한정되어 왔으며 최근 들어 Mg합금에 대한 적용 가능성이 검토되고 있는 단계이다. 이외에도 스웨덴에서는 FSW를 이용한 핵 폐기물 저장용 Cu canister 제작을 TWI와 공동으로 추진 중에 있는데 열전도도가 매우 높고 두께가 50mm인 Cu 후판에 FSW를 성공적으로 적용하여 기존의 전자빔 용접 기술과 병행하여 적용하고 있다<sup>24)</sup>.

FSW의 robot화 및 portable화도 활발히 시도되고 있는데 특히 RIFTEC(Robotic Friction Welding Application and Technology Centre)가 독일과 스웨덴 기관간의 협작에 의해 설립되어 모델명 Tricept

600, 805 등의 Robotic FSW 장치를 개발하여 상용화하고 있다<sup>25)</sup>. Tricept 805의 경우 유압 스피들의 용량은 45kW, 5000 rpm이고 수직 하중 4,5000 N, 수평하중 10,000 N 용량을 지닌다. 이러한 FSW의 robot화 및 portable화는 이 기술의 적용 분야를 한층 확대시키는 계기가 될 것으로 기대된다.

이상에서 언급한 대표적인 응용 분야를 포함하여 현재까지 FSW를 적용하여 상업적 생산이 이루어지고 있거나 적용을 검토하고 있는 예들을 Table 2에 정리하였다<sup>26)</sup>.

Table 2 Various industrial applications of FSW technology

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

### 7. FSW 관련 학술대회

미국용접학회(AWS)의 경우 1998년 학술대회에서 마찰용접 session에서 FSW에 대한 3편의 논문이 발표된 이래 99년에는 마찰용접 session의 전체 5편 논문 중 4편이 FSW에 대한 내용이었으며 금년에는 FSW와 관련한 독립 session이 개설되어 전체 6편의 논문이 발표되어 점차 관심이 증가되고 있음을 알 수

있다<sup>7-9)</sup>. Table 3에는 지난 3년간 AWS에 발표된 FSW 관련 논문의 제목을 정리한 것이다.

Table 3 Technical papers involving FSW presented at recent AWS meetings

년도	논문 제목	발표기관
1998	-Microstructural Evolution in Aluminum Friction Stir Welds	OSU
	-Friction Stir Welding of Large-Scale Cryogenic Tanks for Aerospace Applications	NASA
	-Back Surface Relief for Friction Stir Welding	NASA
1999	-A Heat Flow Model for Friction Stir Welding of Mild Steels	EWI
	-Analysis of Weld Formation Process in Friction Stir Welding	Battelle
	-Microstructural Evolution in Friction Stir Welds on 6061-T651	GE
	-Friction Stir Welding of Mild Steel	EWI
2000	-Residual Stresses in Friction Stir Welds of Al Alloy 6061	ORNL
	-Thermal and Material Flow Modeling of Friction Stir Welding	Battelle
	-Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Alloys	Ferris S.U
	-Friction Stir Welding of Aluminum Metal-Matrix Composites	"
	-A Rotating Plug Model for Friction Stir Welding	"
	-Microstructure in Friction Stir Weld of 6063 Aluminum	Marshall Tohoku U.

일본용접학회(JWS)에서도 1998년 춘계발표대회에서 FSW 용접현상과 관련한 1편의 논문이 발표된 이래 FSW 관련 발표 논문의 건수가 증가 추세에 있으며 1999년 추계발표대회부터는 FSW관련 독립 session이 개설되고 있다. 앞서와 마찬가지로 JWS 학술대회에서 그 동안 발표된 논문의 제목 및 발표기관을 Table 4에 정리하였다<sup>10)</sup>.

이러한 용접학회 발표대회나 경금속 관련 국제회의를 통한 발표 외에 TWI에서는 99년부터 매년 FSW symposium을 개최하여 관련 기업 및 연구기관 종사자들이 심도 있는 논의를 할 수 있는 장을 만들고 있어 FSW 기술과 관련한 많은 기술적 know-how들이 점진적으로 밝혀지고 있다<sup>2,3)</sup>. 제1회 symposium은 미국 LA근교 Thousand Oak에서 개최되었으며 매년 대륙별로 개최한다는 원칙 하에 제2회 국제회의는 최근 FSW기술이 활발히 상용화되고 있는 Scandinavia 3국의 공동 후원 하에 스웨덴에서 열렸다. 참고로 제3회 대회는 2001년 일본에서 개최될 예정이다. 저자 중 1명은 이미 개최된 2편의 FSW symposium에 참석하였는데 본 해설에서는 제2회 대회와 관련하여 간략히 소개한다.

Table 4 Technical papers involving FSW presented at recent JWS meetings

년도	논문 제목	발표기관
98.4	-Study of Friction Stir Welding	Nagoya U
98.10	-Microstructural Characteristics of Friction Stir Welded Aluminum Alloy	Tohoku U. / Showa Al
99.4	-Heat Input Energy and Joining Properties of Friction Stir Welding	Hitachi
	-Weldability of Al Alloy FSW(I)	Osaka U. / Showa Al
99.11	-Microstructural Evolution of 6063 Al during FSW	Tohoku U. / Showa Al
	-Application of Friction Stir Welding for Aluminum Alloy Wide Panels	Sumitomo
	-Friction Stir Welding of Magnesium Alloy Panel	芝浦工大
	-Friction Stir Welding of Aluminum Die Casts	Nagoya U.
	-Precipitation Sequence in Friction Stir Weld of 6063 Aluminum during Aging	Tohoku U. / Showa Al
	-Residual Stress in Friction Stir Welded Aluminum Alloy	Hitachi
00.4	-Inherent Strain Distribution Generated by Friction Stir Welding	九州工大 / Showa Al
	-Micro-texture analysis of friction-stir-weld of 6063 aluminum by EBSD/OIM	Tohoku U. / Showa Al
00.4	-Underwater Friction Stir Welding of Aluminum Alloy(No.1)	Hitachi
	-Metallurgical and Mechanical Properties of Al Alloy Joined by FSW	Hitachi

Sweden의 대표적인 산업도시이며 스톡홀름에 이어 두 번째 큰 도시인 예테보리의 Hotel 11에서 지난 6월 26일부터 28일까지 3일간 개최되었다. 이 호텔은 독특하게 과거 조선소 실내작업장을 개조해 만든 곳으로 아직도 주위에는 이곳이 바이킹의 후손들이 배를 만들던 곳이란 징표들이 남아 있어 흥미로운 곳이었다. 참석자는 모두 153명으로 국가별 구성은 Fig. 6에 도표로 표시하였다. 한국은 저자를 포함하여 2명이고 나머지는 모두 OECD 가입국 이상의 선진국들이 대부분이다.

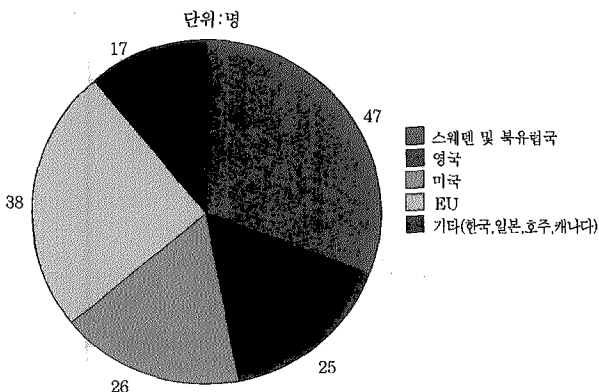


Fig. 6 Classification of participant nations in the 2nd FSW symposium

이는 아직 FSW 기술이 TWI의 특허권 문제 등과 관련하여 전세계적으로 광범위하게 확산되지 않은 단계이며 Al 등 경금속 산업이 활성화된 선진국을 중심으로 개발이 이루어지고 있음을 나타낸다고 생각된다. 논문발표는 단일 회장에서 진행되어 총 33건이 발표되었는데 그 내용별 구성은 Fig. 7에 나타내었다. 기업체에서는 주로 공정 및 응용기술 개발 관련 논문 발표가 주를 이루고 학계 및 연구소는 금속학적 특성과 modelling, 그리고 성능 평가와 관련한 발표가 많았다. 특히, Al 합금 외에 Cu, Ti, 철강 등 다른 재료에 대한 FSW 적용기술 개발이 활발히 진행되고 있음을 알 수 있었다.

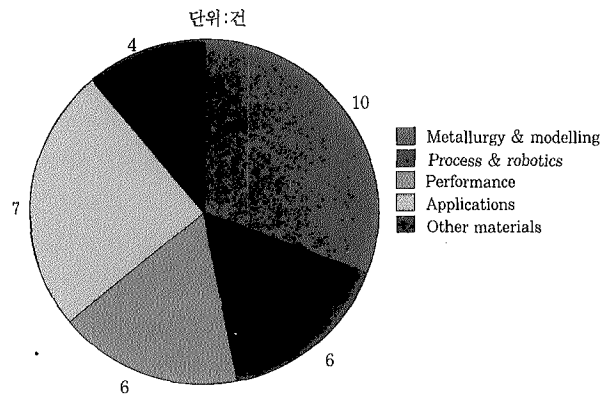


Fig. 7 Classification of presented papers by contents

주요발표내용을 분야별로 요약하면 우선 공정의 발전동향으로서 기존의 butt joint 중심의 용접공정 개발에서 한 단계 나아간 lap joint 용접기술 개발을 통해 우주항공, 전동차, 조선 분야 등에 걸쳐 그 응용범위가 획기적으로 확대되는 경향을 확인할 수 있었다. 한편, NASA에서 독자적으로 개발한 RPT(Retractable Pin Tool)을 이용한 용접시 부가하중 측정 및 제어에 대한 신기술이 소개되었으며 현재 이 기술은 FSW 기기 제작업체에 독점 이용권을 부여하고 있다. 그리고, 독일을 중심으로 자동차 생산공정에 이 접합기술 적용을 목표로 Robot를 이용한 FSW기술 개발에 대한 논문 발표가 있었는데 Robot 적용에 필요한 tool개발과 Spot용접기술, 보수용접 개발 등이 발표되었다.

두 번째로 응용 분야의 확대 분야에서는 일본 Hitachi사에서 FSW를 이용하여 차세대 "A-train" 제조기술 개발에 대한 소개가 있었으며 주로 전동차의 측면 조립에 실기 적용 중에 있다고 보고하였다. 미국의 경우 Boeing사를 중심으로 airframe 구조에 이 기술을 적용한 사례를 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있으며 EU차원에서 우주항공분야에 있어서 FSW기술의 확대적용 및 표준화에 대한 활발한 연구

개발이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 지금까지 FSW기술이 주로 Al 및 Al합금 중심으로 개발되어 왔으나 최근에는 적용 소재가 점차 다양해지고 있다. 그 예로써 TWI에서는 스웨덴 SKB와 공동으로 극후물 Cu소재를 이용한 핵폐기물 캔 제조기술을 개발하고 있는데 그 내용에 대한 발표가 있었다. 이외에도 Ti합금, Al MMC에 대한 기술 적용 사례와 Polymer재료에 대한 적용 가능성에 대해서도 검토가 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 접합부 특성평가와 관련하여 FSW 접합부의 파괴인성, 피로거동 및 부식특성에 대한 평가결과는 주로 연구소, 대학을 중심으로 진행되어 기존의 용융용접에 비해 대체로 우수한 성능 확보가 가능하다는 결론이 도출되었다. FSW 접합기구 규명을 위한 modelling은 주로 대학에서 기초연구로서 진행되고 있는데 Toronto 대학에서는 유체역학 이론에 근거한 접합부 3차원 model에 대한 기초연구결과를 발표하였으나 FSW 접합부의 구성이 기존의 용융용접에 비해 매우 복잡하여 현상 해석에 한계가 있음을 알 수 있었다.

본 국제학술회의 참가를 통해 느낀 소감은 FSW기술이 Al 및 Al합금의 차세대 용접기술로서 확실한 자리 매김을 마치고 선진 각국에서는 경쟁적으로 독자기술 개발과 적용분야 확대를 위해 노력하고 있음을 알 수 있었다. 이웃 일본의 경우 특유의 기술흡수력을 바탕으로 단시간 내에 이 기술의 응용분야를 개척하고 있으며 현재까지는 주로 차세대 전동차 분야에 주력하고 있는 듯 하였다. 지금까지 Al 및 Al합금을 중심으로 한 FSW기술 개발은 Ti, Cu, Mg 등 다양한 비철합금과 철강재료에의 적용 가능성을 검토하는 단계에 있음을 알 수 있었다.

## 8. 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 한다. FSW의 최대 도전목표는 고온재료 접합이라 할 수 있다. 개량 tool 개발이 선결 과제이다. Tool 수명 향상을 위해 열 관리가 중요하며 이는 tool에 대한 내부 또는 외부 냉각과 공정 조건의 정밀 관리를 포함한다. 최근에는 Al 합금에 이어서 Ti, Mg 등이 FSW 기술 개발의 축이 되고 있는데 이 기술이 개발되면 철강, Ni기 합금 그리고 금속간화합물에 역시 적용이 고려될 것이다.

## 9. 맺음 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 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 이루어지지 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.

## 참고 문헌

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 INALCO Conference, Cambridge, UK, 16 April(1998)
5. Proceedings of the Aluminium '97 Conference, Essen, Germany, Sep.(1997)
6. Proceedings of the 3rd World Congress on Aluminum,



Limassol, Cyprus, 15-19 April(1997)

7. Proceedings of 79th American Welding Society Annual Meeting, Detroit, 27-30 April(1998)
8. Proceedings of 80th American Welding Society Annual Meeting, St. Louis, 12-15 April(1999)
9. Proceedings of 81th American Welding Society Annual Meeting, Chicago, 25-27 April (2000)
10. 溶接學會全國大會講演概要 第62集-66集, (1998-2000)
11. W.M. Thomas et al.: Friction Stir-Where We Are, and Where We're Going, TWI Bulletin, 39-5/6 (1998) 44-50
12. W.M. Thomas et al.: Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Science and Technology of Welding and Joining, 4-6(1999), 365-372
13. S. Kallee, D. Nicholas: Application of Friction Stir Welding to Lightweight Vehicles, Proc. of IBEC 98, Detroit, USA 29 Sept-1 Oct(1998)
14. 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)
15. M.R. Johnsen: Friction Stir Welding Takes Off at Boeing, Welding J., 78-2 (1999), 35-39
16. W.M. Thomas: Friction Stir Welding of Ferrous Materials:A Feasibility Study, Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16 June(1999)
17. H. Tokisue, T. Shinoda: 輕金屬へのFriction Stir Welding의適用, 輕金屬, 49-6(1999), 258-262

18. P. Threadgill: Friction Stir Welds in Aluminium Alloys-Preliminary Microstructural Assessment, TWI Bulletin, Mar/April(1997)
19. J. Backlund et al.: Proc. of INALCO, Cambridge, May (1998), 171
20. T. Shinoda: 新接合法, Friction Stir Welding에關する最近의開發狀況, 溶接學會誌, 67-4(1998), 60-63
21. W.M. Thomas et al.: The Al to Zn of Friction Stir Welding-Fastest ...Thickest...and now in Ferrous Materials, Connect, Nov/Dec(1997)
22. T. Kawasaki et al.: Application of Friction Stir Welding to the Manufacturing of Next Generation "A-Train" Type Rolling Stock, The 2nd Friction Stir Welding Symposium, Gothenburg, Sweden, 26-28 June(2000)
23. D. Lohwasser: Application of Friction Stir Welding for Aircraft Industry, the 2nd Friction Stir Welding Symposium, Gothenburg, Sweden, 26-28 June(2000)
24. C-G Andersson, R.E. Andrews: Fabrication of Containment Canisters for Nuclear Waste by Friction Stir Welding, Friction Stir Welding Symposium, Thousand Oaks, USA, 14-16 June(1999)
25. 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
26. Friction StirWelding-Applications,<http://www.twi.co.uk/bestprac/datashts/fswapp.html>



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



- 최기용(崔基瑢)
- 1971년생
- RIST 설비용접 연구팀
- 철강재 및 비철금속의 용접야금
- e-mail : moohangedo@hanmail.net



- 강문진(姜紋珍)
- 1963년생
- RIST 설비용접 연구팀
- 용접 공정 및 자동화기술개발
- e-mail : moonjin@rist.re.kr



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