

# 구조용 철강재료와 이종재료의 마찰교반접합 기술

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 유호천  
([yoocho278@reseat.re.kr](mailto:yoocho278@reseat.re.kr))

## 1. 서 론

자동차, 항공기 등의 수송기기에 관련된 산업에서는 친환경적인 CO<sub>2</sub> 절감과 연비향상을 목적으로 차체의 경량화가 추구하고 있는데, 현재 경량화를 뒷받침해 줄 수 있는 이종금속접합에 대해서 셀프피어싱(Self-piercing) 리벳, 마찰교반접합 등의 다양한 접합기술이 검토되고 있으며 실용화되어 가고 있다. 이 중에서 특히 마찰교반접합 기술이 실용화의 일환으로 주목을 받고 있으며, 최근 철강재료와 이종재료에 대한 하이브리드 구조에 더욱 관심을 보이고 있다.

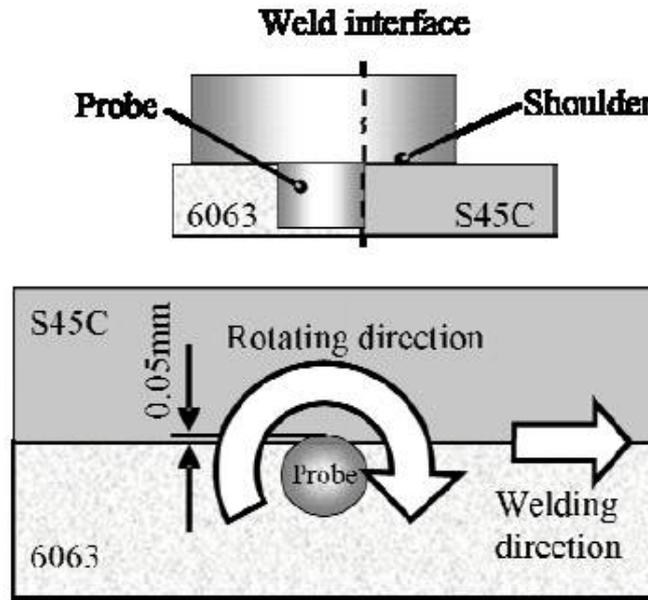
철강재료와 이종재료의 접합연구 및 개발은 아크, 레이저, 레이저브레이징, CMT(Cold Metal Transfer) 등의 방법으로 지금까지 활발하게 추진되어 왔다. 특히 접합면에 생성하는 금속간화합물 층의 두께를 수 $\mu$ m 이하로 얇게 함으로써 건전한 계면을 얻을 수 있는 마찰교반접합 기술의 확보는 국내 기업체에서 무엇보다 중요하다고 볼 수 있다.

본 보고서에서는 철강재료와 이종재료의 마찰교반접합 기술 중에서, 향후 국내 기업체에서 기술확보가 시급히 요구되고 있는 철강재료와 알루미늄합금, 아연도금강과 알루미늄합금, 철강재료와 PVC의 접합기술의 관해서 검토하였다.

## 2. 철강재료와 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술

### 2-1. 저합금강과 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술

철강과 알루미늄을 용융용접으로 직접 접합하면 취약한 금속간화합물이 접합면에 두껍게 형성하기 때문에 높은 접합강도를 얻을 수 없다. 그러나 마찰교반접합은 알루미늄의 소성유동현상을 이용한 고상접합법이기 때문에 초경합금제 스트레이트 핀 형상의 회전 톨을 사용하여 철강재료와 알루미늄합금을 <그림 1>에서 보는 바와 같이 이종금속을 서로 마찰교반접합할 수 있다. 접합 톨의 프로브가 철강재료에 약간 접해있는 상태에서 알루미늄합금 측에 삽입하고, 철강재료와 프로브 표면의 상대속도가 높아지는 방향으로 접합 톨을 회전·이동함으로써 접합이 이루어진다<sup>1)</sup>.



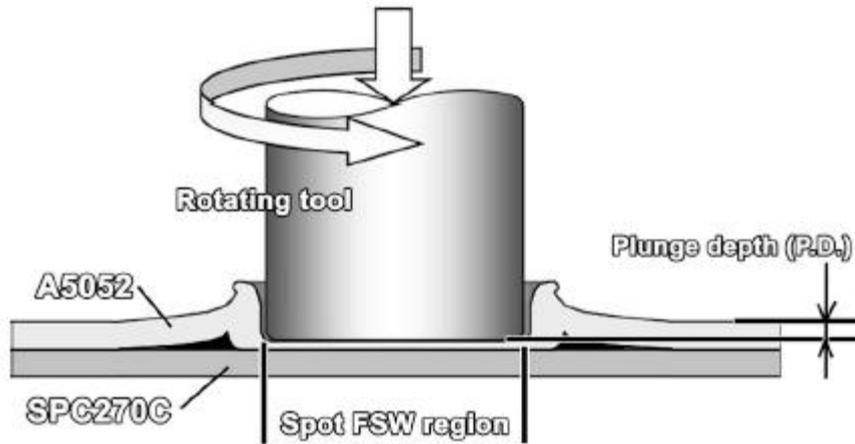
<그림 1> 회전 툴의 위치와 마찰교반접합 모습<sup>1)</sup>

Yasui Toshiaki 등<sup>1)</sup>에 의해 S45C 탄소강과 6063 알루미늄합금에 대하여 마찰교반접합한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 접합계면의 회전툴의 압입방향 및 접합선방향을 따라서 수백 nm의 반응층이 형성되었다. 인장시험 결과, 6063측의 모재 내에서 파단하기 때문에 이 반응층은 계면강도의 저하를 가져오지 않았다.
- ② 접합계면의 반응층은 Fe와 Al의 금속간화합물로 구성되었는데, 6063측에는 Al이 풍부한 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 상, S45C 측에는 Fe가 풍부한 FeAl 상이 구성되었다.
- ③ 접합속도를 변화시켜 접합계면의 반응층 구조를 변화시켰다. 입열량이 높은 500mm/min의 접합속도에서는 400nm폭의 화합물층이 생성되었으며, 입열량이 낮은 1000mm/min에서는 800nm 폭의 화합물 층이 생성되었다.
- ④ 툴의 솔더 직경을 크게 함으로써 최대 접합속도 1000mm/min까지의 고속접합이 가능하였다.
- ⑤ 툴회전수와 접합속도를 적절하게 조합시키면 결함이 없는 구조물의 제작이 가능하다.

## 2-2. 저합금강과 알루미늄합금의 마찰교반 점접합 기술

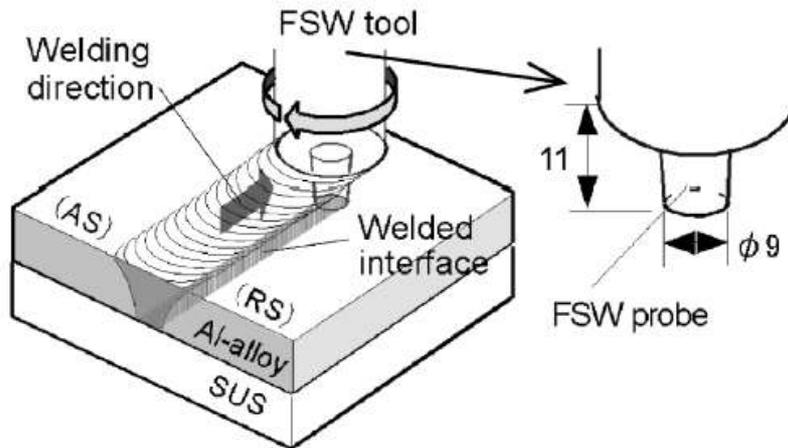
Okane Masaki 등<sup>2)</sup>은 강(SPC 270C)과 Al합금(A5052)에 대하여 툴의 직경 10mm, 툴의 회전속도 3000rpm, 툴의 펄런지 속도 0.83mm/sec, 유지시간 5초로 한 후에 <그림 2>에서 보는 바와 같이 마찰교반 점접합을 실시하여 피로시험을 실시한 결과, 펄런지 깊이(툴의 압입깊이)가 0.3mm, 0.1mm, 0.7mm의 순으로 장수명을 나타내었다. 이 결과로서 최적의 펄런지 깊이를 파악하는 것은 구조물의 피로수명의 향상에 중요한 인자임을 알 수 있다.



<그림 2> A5052/SPC270C에 대한 마찰교반 점접합의 모습<sup>2)</sup>

### 2-3. 스테인리스강과 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술

Hidehito Nishida 등<sup>3)</sup>은 <그림 3>과 같은 방법으로 SUS304와 A3003 겹치기 마찰교반접합을 하였는데, 아랫판을 SUS304, 윗판을 A3003으로 배치하고 지그로 고정한 후에, 프로브 길이 11mm, 프로브 끝부분 직경 9mm  $\phi$ 의 마찰교반접합 툴을 이용하여 겹치기 마찰교반접합을 하였다. 프로브에는 좌나사를 선정하였으며 접합조건으로서는 접합속도



<그림 3> 스테인리스강과 알루미늄합금의 마찰교반접합 모습<sup>3)</sup>

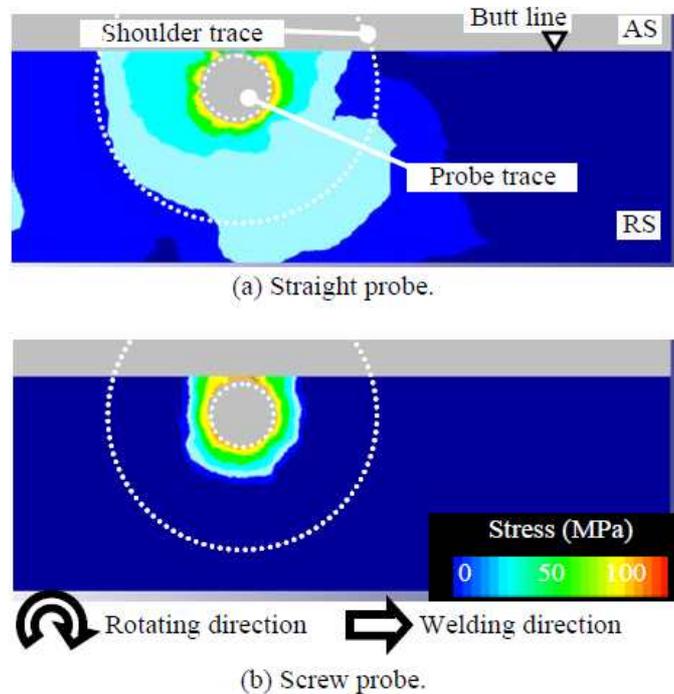
300mm/min, 툴 회전속도 900rpm, 툴 전진각 1.5° 로 하였다. 사용된 툴의 재질은 공구강(SKD61)을 선정하였으며 프로브의 표면은 고경도로 스테인리스강의 내용착성에 우수한 코팅을 실시하였다. 제작된 계면에 대하여 A3003측에서 방사선투과시험(RT)와 SUS 304측에서 초음파탐상시험(UT)을 행한 후 균열과 기공 등의 결함이 없는지 확인하였다.

## 2-4. 철강재료와 알루미늄합금의 틀의 제어방법

마찰교반접합 시에 안정된 접합상태를 관리하기 위해서 접합 틀의 삽입위치가 중요하다. 접합 틀의 삽입위치가 낮으면 금속유동영역이 작게 되어 금속간화합물도 형성되지 않고 접합강도도 약해진다. 반대로 프로브의 삽입위치가 깊어도 강에 결함이 발생하게 되어 접합강도가 저하하고, 접합 틀의 수명도 짧아진다. 사용되는 재료의 관두께의 편차와 지그를 포함한 마찰교반접합 장치 자체의 굴곡 등, 접합 시에는 다양한 요인이 복잡하게 영향을 미치기 때문에 접합상태를 정밀하게 제어하는 것은 어렵다. 일본 혼다 자동차(주)에서는 압력을 감지하면서 접합 틀의 삽입위치를 제어함으로써 접합상태를 관리하고 있다. 아울러 접합 틀의 재질에 Ni계 합금을 사용하여 틀의 내구성을 향상시켜 장시간 안정된 접합상태를 유지하였다<sup>5)</sup>.

## 2-5. 철강재료와 알루미늄합금의 응력분포

Yoichiro Shimoda 등<sup>6)</sup>은 SKD61제의 솔더( $\phi 20\text{mm}$ )와 초경합금제의 프로브( $\phi 5\text{mm}$ , 높

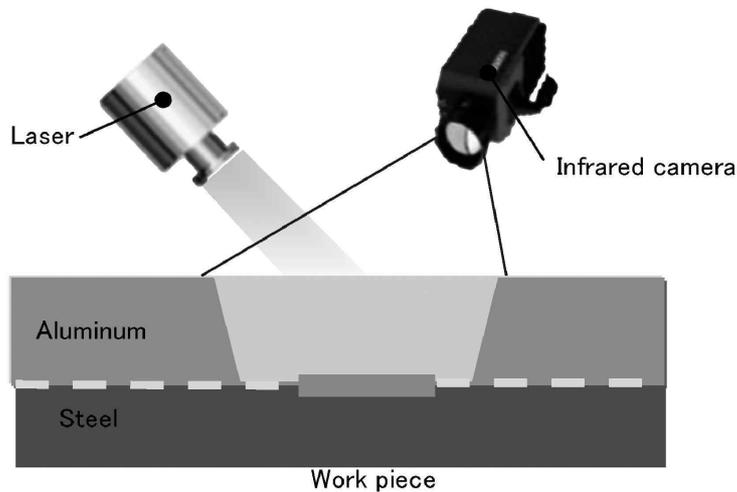


<그림 4> 표면에서 3mm에서 FEM분석에 의한 프로브와 솔더 주위의 응력분포<sup>6)</sup>  
 이 4.5mm)를 조합시킨 틀을 사용하여 틀의 회전수 2000rpm, 접합속도 500mm/min로 마찰교반접합하였는데, 철강재료(S45C)와 알루미늄합금(A6063)의 접합 급정지실험 및 유한요소법(FEM)에 의한 시뮬레이션을 행하여, 스트레이트 프로브와 나사 프로브의 재료유동현상을 실제의 접합체와 비교한 결과, ① 접합 급정지실험에서 나사 프로브를 사용한 경우, Fe조각은 접합계면에서 떨어진 RS로 퇴적하였으며, ② FEM에서는 스트레이트 프로브보다도 나사 프로브를 사용한 경우가 프로브 외주부에 응력이 집중되어 있으므로 철강재료/알루미늄합금의 접합계면형성에 기여한 것으로 파악되었다. FEM해석에 의한

응력분포결과, <그림 4>에서 보는 바와 같이 스트레이트 프로브를 사용한 프로브 주위에 최대응력을 나타내었는데 솔더 외경방향으로 응력구배가 분산되어 있다. 그러나 나사 프로브를 사용한 <그림 4(b)>의 경우, 응력구배는 프로브 외주부에 집중되어 있는 것으로 보아, 접합계면 형성에 더욱 기여한 것으로 판단된다.

### 2-6. 강과 알루미늄합금의 마찰교반접합 시에 품질관리 방법

혼다 자동차(주)에서는 마찰교반접합부의 품질관리는 <그림 5>에서 보는 바와 같이 활성적 적외선온도분포 영상법(thermography)의 원리를 채용하였다. 이것은 접합개소의 표면에 순간적으로 레이저를 조사하고, 열을 가해서 가해진 열에너지가 접합재의 하부까지 이동하여, 그 후에 반사해서 표면까지 도달할 때까지의 시간, 도달 시의 온도와 온도영역을 측정하였다<sup>5)</sup>.



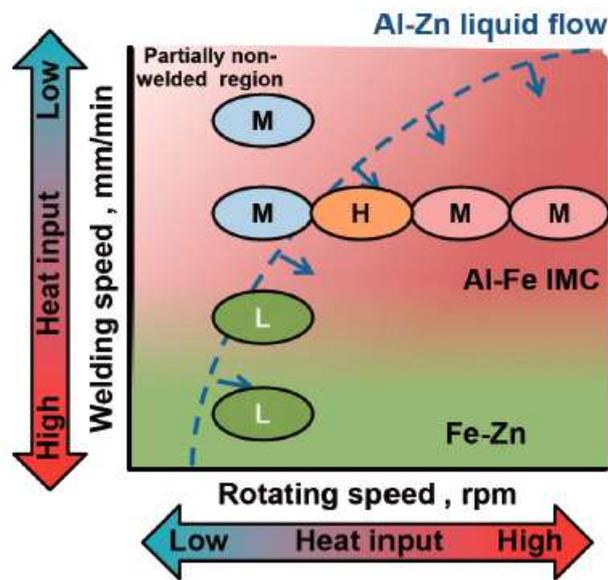
<그림 5> 레이저와 적외선을 이용한 이종재료의 품질관리 방법<sup>5)</sup>

접합상태(① 금속간화합부가 형성되어 견고한 접합상태, ② 상하의 이종금속과 밀착한 상태, ③ 실링재, 도장이 잔존한 상태)에 따라 반사하는 시간과 온도가 달라지는데, 이 위상차에 의해 접합상태를 판단한다. 위상차와 접합강도의 관계는 사전에 조사하여 평가시트를 사용하여 각 용접부의 품질을 관리한다. 또한 검사시간은 순간적이므로 생산공정을 지체시키지 않기 때문에 전수검사가 가능하다. 이러한 기술을 도입함으로써 GA 강/알루미늄합금의 복합재료 구조가 채용되어, 종래의 강제 서브프레임 구조물에 비해 25% 경량화를 달성하여 연비향상에 기여하였으며 동시에 접합제조 시의 전력소비량도 약 50% 절감하였다<sup>5)</sup>.

## 3. 아연도금강과 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술

### 3-1. 아연도금강과 알루미늄합금의 마찰교반접합

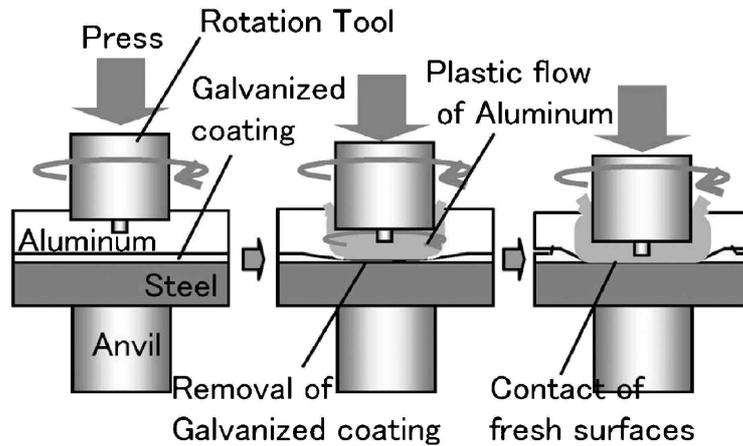
Yukio Miyashita 등<sup>7)</sup>은 아연도금강과 알루미늄의 마찰교반접합 시에 접합강도 특성에 미치는 각 인자 및 접합프로세스의 관계를 <그림 6>에 제시하였다. 마찰교반접합이 효율적으로 이루어지기 위해서는 미접합부가 없어야 하고, Zn과 Al-Zn 액상의 배출 및 A1100 알루미늄합금의 아연침투 현상이 발생되어야 하고, 입열량을 크지 않게 하여 금속간화합물의 성장이 적어야 한다. 동시에 Fe-Zn합금이 거의 생성하지 않는 정도의 속도로 접합하는 것이 유효하다. 또한 강도신뢰성이 높은 접합체를 얻기 위해서는 Fe-Zn 합금을 생성하지 않는 정도의 접합속도에서 접합이 이루어져야 하고, 동시에 Al-Zn액상의 배출 및 A1100에서 어느 정도의 아연침투 현상이 생기는 틀 회전수로 접합하는 것이 최선이다.



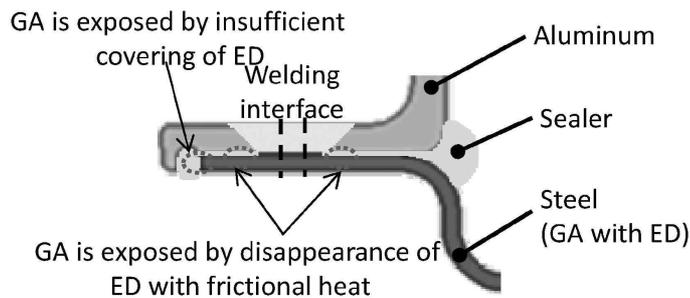
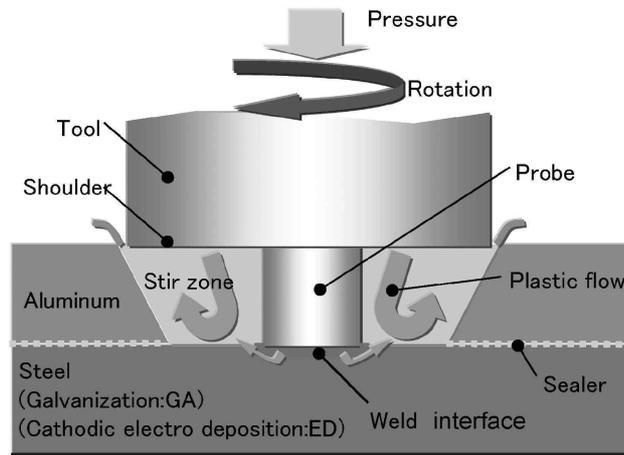
<그림 6> Zn도금강과 Al합금의 이종재료 마찰교반접합 시에 최적의 접합조건<sup>7)</sup>

(H; High strength, M; Middle strength, L; Low strength)

일본 마쯔다(Mazda) 자동차(주)에서는 <그림 7>과 같은 방법으로 아연도금 강과 알루미늄합금판의 마찰교반 점접합을 하였다. 접합 틀을 특정의 가압력으로 재료표면에 눌러서 접합 틀과 알루미늄합금판과의 교반 시의 마찰저항에 의한 발열로 상판의 알루미늄합금판과 도금을 연화시키고, 접합 틀에 의해 연화된 알루미늄합금판이 소성변형함으로써 접합계면의 산화피막이 파괴되고 동시에 계면의 도금도 제거되어 그 결과로, 도금이 없는 범위에서 강판과 알루미늄합금판의 신생면끼리 직접 야금학적인 접합이 가능하도록 하였다<sup>5)</sup>.



<그림 7> 마쯔다 자동차(주)의 아연도금 강판과 알루미늄의 마찰교반접합 모습<sup>5)</sup>

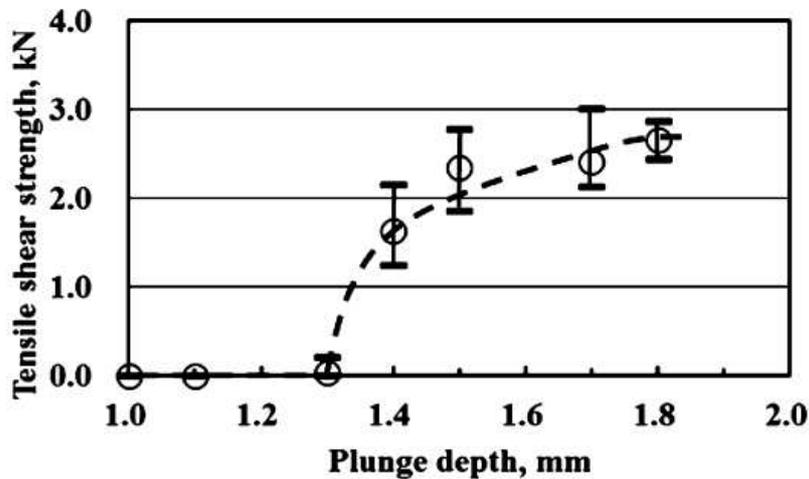


<그림 8> 혼다 자동차(주)의 GA강판과 알루미늄합금의 마찰교반접합 모습<sup>5)</sup>

일본 혼다(Honda) 자동차(주)에서는 2012년 미국수출용 가솔린 차의 어코드(Accord) 프런트 프레임에 보다 경량화를 위해서 <그림 8>와 같은 방법으로 GA강판과 알루미늄합금을 이종금속에 대하여 마찰교반접합기술을 채용하였다. 사용된 GA강판은 양이온 전착도장되었으며, GA강판과 알루미늄합금과의 사이에는 전식방지를 위하여 액형 변성 실리콘수지계 실링재를 끼워넣은 상태에 있었다. 회전하는 접합 툴의 프로브 끝부분을 GA강판의 표면에 삽입함으로써 강표면의 도금층, 도장, 실링재가 제거되고, 강표면에 신생면이 나타나, 알루미늄합금과 반응하여 금속간화합물층이 형성되어 접합되었다. 형성된 금속간

화합물의 두께를 1 $\mu$ m 이하로 제어함으로써 접합강도를 높일 수 있었다<sup>5)</sup>.

아연도금(GA)강과 알루미늄합금(A5052)과의 마찰교반접합 시에 접합 틀의 압입량과 인장전단강도의 상관관계를 <그림 9>에 나타내었다<sup>4)</sup>. 틀 압입량이 1.3mm까지는 인장전단강도가 거의 0kN/점인데, 1.4mm 이상에서는 틀 압입량의 증가에 따라서 인장전단강도가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있으며 1.8mm에서 약 2.7kN/점에 도달하였다. GA강에서는 틀 압입량이 1.4mm 이상에서는 강돌기의 형성에 의해 인장전단강도는 급격히 증가한다.



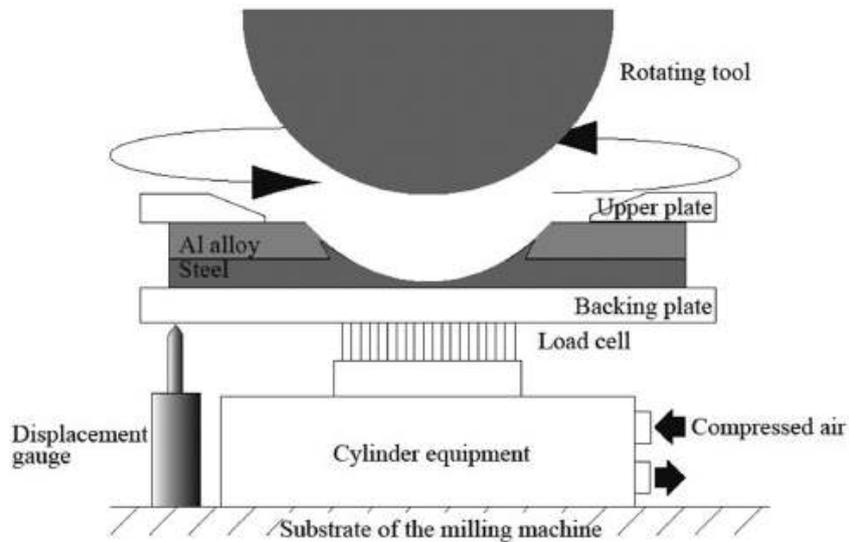
<그림 9> A5052와 GA강의 압입깊이에 따른 인장전단강도의 변화<sup>4)</sup>

### 3-2. 아연도금강과 알루미늄의 마찰교반 점접합

아연도금강과 알루미늄의 마찰교반 점접합에서의 모든 보고에서 접합 틀의 내구성의 관점에서 아랫판인 강을 적극적으로 교반하지 않는다는 특징이 있다<sup>4)</sup>. 마찰교반현상을 이용한 접합에 있어서 연구실적은 다음과 같다.

- ① 윗판에 알루미늄합금, 아랫판에 아연도금강을 배치하고 접합 틀을 아랫판의 아연도금강까지 압입하지 않고 접합하였다<sup>8),9)</sup>.
- ② 접합 틀을 강까지 압입하여 접합을 하였다는 사례<sup>10),11)</sup>도 있다.
- ③ Elrefaey 등<sup>10)</sup>은 마찰교반접합을 상판 순 알루미늄과 하판 아연도금강의 겹치기 계면에 적용하여 접합 틀의 끝부분을 강에 0.1mm 압입함으로써 접합강도가 크게 향상되었다.
- ④ Miyahira 등<sup>11)</sup>은 아연도금강과 ADC3 알루미늄합금과 겹치기하여, 알루미늄측으로부터 접합 틀을 삽입하고, 강측에 프로브 끝부분이 접하는 상태로 하여 선(line) 접합하는 방법을 개발하여 자동차 서브프레임의 경량화에 성공하였다.

수송기기 산업에서 연비향상을 목적으로 한 차체의 경량화가 추구하고 있는데, 현재 이종금속접합에 대하여 셀프피어싱 리벳, 마찰교반접합 등의 다양한 접합기술이 검토되고 있으며 실용화되고 있다. 이에 대한 실용화의 일환으로 철강재료와 알루미늄합금의 하이브리드 구조가 주목을 받고 있다. 수송기기에 이용되고 있는 철강재료의 많은 구조물에 방식을 위한 아연도금이 실시되고 있는데, 이러한 구조물을 경량화를 위한 이종금속 재료를 제조하는 경우에 접합대상으로서 아연도금강과 알루미늄합금과의 마찰교반 접합 기술의 확립이 필요한 시점에 있다<sup>12)</sup>.



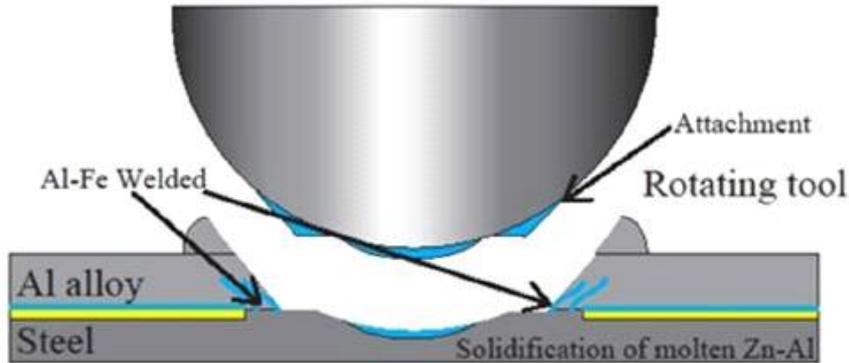
<그림 10> GI강판과 A5052알루미늄합금의 마찰교반접합 모습<sup>12)</sup>

Sakamura Masaru 등<sup>12)</sup>의 연구결과에 의하면 <그림 10>에서 보는 바와 같이 A5052(판두께 1.0mm)/GI강(판두께 1.2mm)을 겹치기하여 회전하는 구면의(spherical) 접합 툴을 이용하여 아래의 강판까지 압입함으로써 점접합을 실시한 결과는 다음과 같다.

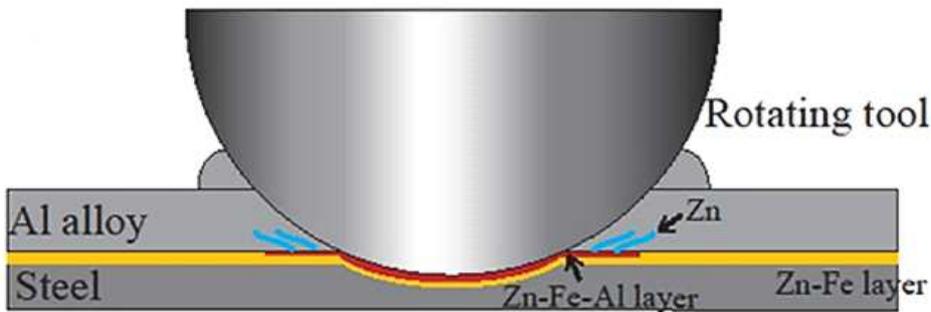
- ① 접합 툴을 A5052에 삽입된 마찰열에 기인하는 용융아연이 접합 툴의 끝부분에 존재하기 때문에 마찰발열이 불충분하게 되어 접합툴 압입량은 1.3~1.4mm가 되어, A5052 중에 강돌기를 형성할 수 없다. 또한 <그림 11>에서 보는 바와 같이 용융된 Zn가 A5052 중에 유입되어 Zn-Al공정에서 접합 툴에 응착이 발생되어 A5052의 결손이 발생한다. 그러나 Zn도금 층의 용융제거된 부위에서는 Fe와 Al의 접합이 실현되었다.
- ② A5052 중에 강돌기는 형성되지 않고, 강돌기에 의한 앵커효과는 발현되지 않지만, Zn도금층이 용융제거된 부위에서 Fe와 Al이 접합이 실현되었으며, 인장전단강도는 용입량이 1.3~1.4mm까지는 점차로 증가하고, 1.5~1.8mm에서 약 2.6kN/점으로 포화한다. 또한 Zn도금층이 용융제거되어 접합된 Al/Zn접합부의 접합면적이 클수록

인장전단강도는 증가하는 경향이 있다.

<그림 11> GI강판과 A5052알루미늄합금의 마찰교반접합 후에 도금이 부착된 상태의 모습<sup>12)</sup>



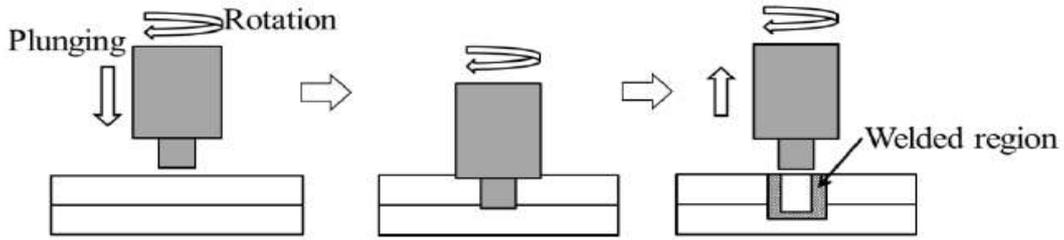
<그림 12>과 같은 방법으로 접합 틀이 A5052(1.0mm)를 통과하여 GA강(1.2mm) 표면에 도달하면 마찰열과 접합 틀에 의한 가압으로 인하여, Zn-Fe도금층은 Zn-Fe-Al층, 즉 FeAl(Zn) 금속간화합물을 함유한 층이 된다. 또한 이때에 발생하는 Zn액상의 일부가 A5052 중에 확산, 유입한다<sup>4)</sup>.



<그림 12> GA강판과 A5052 알루미늄합금의 마찰교반접합 모습<sup>4)</sup>

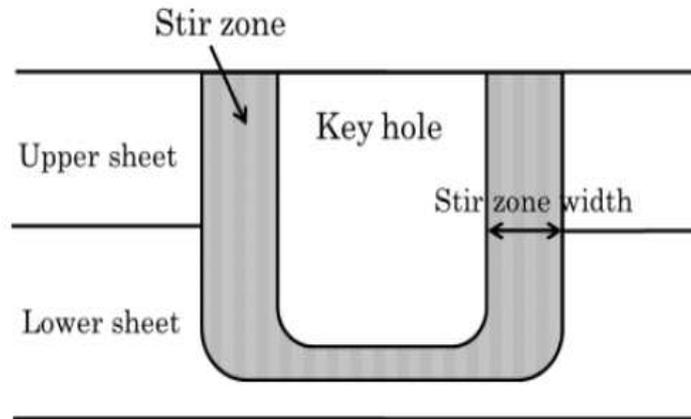
#### 4. 철강재료와 PVC의 마찰교반접합 기술

플라스틱재료는 화학적, 전기적 특성이 우수하여 생산성이 높고 저밀도이므로 최근 수송기기분야에 금속재료의 대체재료로 이용되고 있다. 그러나 플라스틱재료는 다른 구조재료와 비교해서 가공과 접합 시에 발생하는 열에 의해 기계적 성질이 쉽게 열화되기 때문에 서로의 단점을 보완하기 위하여 철강과 복합재료로 구조물로 적용하는데 관심이 집중되고 있다. 마찰교반 점접합(FSSW, Friction Stir Spot Welding) 모습을 <그림 13>에 나타내었는데, 회전시킨 틀을 피접합재료의 판두께방향으로 압입(plunging)시킨 후, 접합후 인발하는 방법이다. 이 접합법은 고에너지효율을 갖고 있으므로 종래에 실시해온 스폿접합의 대체기술로 주목을 받고 있다<sup>13)</sup>.



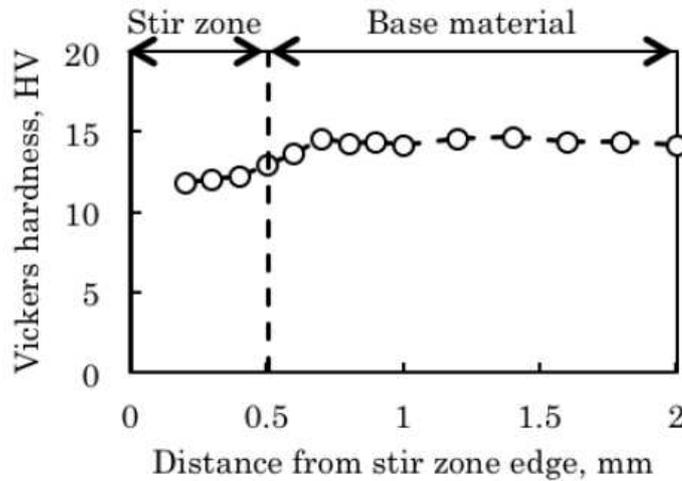
<그림 13> 마찰교반 점접합 모습<sup>13)</sup>

플라스틱재료 중에 일반적으로 광범위하게 사용되고 있는 PVC(Polyvinyl chloride)를 철강(SCM435, SUS304) 재료에 마찰교반 점접합하는 모습을 <그림 14>에 나타내었다<sup>13)</sup>. 접합부의 표면에서 5mm의 위치에서 백색과 흑색의 PVC가 혼재되어 희색으로 변색되어 있는 영역의 폭을 교반역의 폭으로 정의할 수 있는데, 회전속도 1240rpm 및 압입속도 15mm/min의 조건에서 얻어진 접합체의 교반역의 폭은 약 0.5mm이었다. 이 값은 Bilici 등<sup>14)</sup>에 실시된 HDPE(High density polyethylene)의 마찰교반 점접합 계면의 접합영역의 폭과 비교해도 매우 작다는 것을 알 수 있다. 아울러 PVC와 HDPE에 대한 경도는 각각의 재료에 대한 유리전이온도, 점도의 차이 등으로 인하여 변화되는 것으로 판단된다.



<그림 14> 철강재료와 PVC접합된 마찰교반 점접합부의 측면 모습<sup>13)</sup>

철강재료(SCM435, SUS304)에 대하여 회전속도 1240rpm, 압입(plunging) 속도 15mm/min 로 마찰교반점용접을 한 후에 접합부 부근에서 시험편표면에서 5.5mm의 위치에서 마이크로 비커스경도를 측정하여 <그림 15>에 나타내었다. PVC가 접합된 교반지역에서 경도가 낮게 나타났다<sup>13)</sup>.



<그림 15> 철강재료와 PVC접합된 마찰교반 점접합부의 경도(HV) 분포<sup>13)</sup>

향후 이종재료에 대한 마찰교반 점접합부의 품질평가의 주축이 되는 계면강도 특성을 확립하기 위해서는 톨 회전속도, 압입속도 및 유지시간, 교반지역과 모재의 경도분포 등의 제조인자에 관한 영향을 파악하여야 한다<sup>21)</sup>.

- ① 톨 회전속도의 변화는 프로세스 중의 최고온도에 크게 영향을 받는다. 그러나 교반역의 크기에 미치는 영향이 작기 때문에 계면의 최대인장전단하중은 거의 변하지 않는다.
- ② 압입속도는 프로세스 중의 최고온도 및 재료내부 온도분포에 크게 영향을 받는다. 이 때문에 압입속도의 변화에 의해 교반역의 크기가 변화하여 그 결과로서 계면의 최대 인장전단하중도 변화한다.
- ③ 모재에 비교하여 교반지역의 경도값의 분포를 측정함으로써 접합부의 강도특성을 어느 정도 파악할 수 있는 계기를 만들 수 있다.

## 5. 결 론

2015년에 영국 TWI의 마찰교반접합에 대한 기본특허 유효기간이 만료되는 시점을 계기로, 전세계적으로 마찰교반접합 기술이 급속히 실용화되어 가고 있다. 이에 부응하여 국내 기업체에서도 마찰교반접합 기술에 대한 우수한 경쟁력을 갖추기 위해서는 고용점 금속인 철강재료와 이종재료와의 접합기술의 확보가 무엇보다도 중요한 시점에 이르게 되었다.

철강재료와 이종재료의 마찰교반접합 기술 중에서, 향후 국내 기업체에서 기술확보가 시급히 요구되고 있는 마찰교반접합기술로서 철강재료와 알루미늄합금, 아연도금강과 알루미늄합금, 철강재료와 PVC의 접합기술로 분류하였다.

철강재료와 알루미늄합금의 마찰교반접합에서는 고속접합을 위한 조건(톨의 슬더 직경의 크기)의 확보, 적절한 톨 회전수와 접합속도, 압입깊이, 삽입위치가 중요한 인자가

될 수 있으며 응력분포의 측정기술도 중요하다.

아연도금강과 알루미늄합금의 마찰교반접합에서는 최적의 용입량, Zn도금층의 용융제거 및 Al/Zn접합부의 접합면적의 적절한 크기는 인장전단강도의 향상에 영향을 크게 미친다.

철강재료와 PVC의 마찰교반접합에서는 계면강도에 영향을 미치는 톨 회전속도, 압입속도 및 유지시간의 작업관리가 중요하며, 품질적인 측면에서 교반지역과 모재와의 계면부근에서의 경도분포에 대한 관리가 필요하다.

#### <참고문헌>

1. Yasui Toshiaki et al. "Microstructure Observation of Weld Interface between 6063 Al alloy and S45C Carbon Steel by Means of Friction Stirring" 溶接學會論文集 25(3) (2007) 426-430
2. Okane Masaki et al. "Fatigue Behavior of Aluminum Alloy/Steel Joints by Spot Friction Stirring" 溶接學會論文集 28(4) (2010) 395-401
3. Hidehito Nishida et al. "Study on anisotropy of mechanical properties of A3003/SUS304 lap FSWed joints" 輕金屬溶接 52(2) (2014) 61-68
4. Sakamura Masaru et al. "Dissimilar Spot Welding of Aluminum Alloy and Hot Dip Galvanized Steel by Metal Flow" 溶接學會論文集 34(1) (2016) 8-19
5. Kaoru Ohishi and Hidetoshi Fujii "Technical Topics and Automobile Applications of Friction Stir Welding" Materia Japan 53(12) (2014) 603-607
6. Yoichiro Shimoda et al. "Effect of Probe Shape on Material Flow during Friction Stirring Welding between Aluminum and Steel" Preprints of the National Meeting of JWS, vol. 2012s (2012)
7. Yukio Miyashita et al. "Fracture Process and Influencing Factors on Strength Characteristic in Friction Stir Welded Al100/Zn Plated Steel Dissimilar Materials Joint" Journal of the Society of Materials Science, 65(12) (2016) 862-868
8. M. Yamamoto et al. "Effects of interfacial microstructures on joint strength in friction stir spot welded 6061 aluminum alloy/zinc coated joints", Journal of Light Metal Welding 51(6) (2013) 223-232
9. K. Feng et al. "Microstructure and Joint Strength of Friction Stir Spot Welded 6022 Aluminum alloy Sheets and Plated Steel Sheets", Materials Transactions, 52(7) (2011) 1418-1425
10. A. Elrefaey et al. "Friction Stir Welded Lap Joints of Aluminum to Zinc-Coated Steel", Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 23(2) (2005) 186-193
11. T. Miyahara et al. "Development of Steel and Aluminum Continuous Welding Technology Using FWS and Application to Subframes, Honda R&D Technical Review, 25(1) (2013) 71-77

12. Sakamura Masaru et al. "Dissimilar Spot Welding of Aluminum Alloy and Hot Dip Galvanized Steel by Metal Flow" 溶接學會論文集 33(2) (2015) 187-193
13. Yohei KURABE et al. "Temperature distribution inside material during the process and the joining strength in friction stir spot welding of PVC" Transactions of the JSME (in Japanese), 80(817) (2014) 1-10
14. Bilici, M. K. et al., Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, Materials & Design, 33 (2012) 545-550



이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.