

# 마찰교반접합한 알루미늄 합금과 스테인리스 강 이종접합부 계면 조직 및 접합부 강도

## Interface Analysis and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar joints between Stainless steel and Al alloy

이 원배\*, 이 창용\*, 연 윤모\*\*, 정 승부\*

\* 성균관 대학교 신소재 공학과

\*\* 수원 과학대 자동차 시스템과

**ABSTRACT** Dissimilar joining of Al 6013-T4 alloys and austenite stainless steel was carried out using friction stir welding technique. Microstructures near the weld zone and mechanical properties of the joint have been investigated. Microstructures in the stainless steel side and Al alloy were depended on the thermo-mechanical condition which they received. TEM micrographs revealed that the interface region was composed of the mixed layers of elongated stainless steel and ultra-fine grained Al alloy and intermetallic compound layer which was identified as the Al<sub>4</sub>Fe with hexagonal close packed structure. Mechanical properties were lower than those of 6013 Al alloy base metal, because tool inserting location was deviated to Al alloy from the butt line, which resulted in the lack of the stirring.

### 1. 서 론

비강도가 우수한 알루미늄 합금과 우수한 부식 특성, 높은 정적 혹은 동적 강도를 나타내는 스테인리스강 이종재료 접합부는 경량이며 우수한 기계적 특성을 동시에 보유 할 수 있기 때문에 자동차 및 항공기 부품 제작에 적용이 기대 된다<sup>1)</sup>. 그러나 아크, 레이저 등을 이용한 용융용접 (fusion welding)법을 이종재료의 접합에 적용할 경우, 두 재료의 상이한 물성 차이로 인한 접합 계면에 취약한 금속간 화합물 및 기공이 형성되어 접합부 기계적인 특성을 저하시키는 문제점이 있다. 따라서 두 재료의 용점이하에서 접합할 수 있는 고상 접합(solid state bonding)에 대한 필요성이 증가 하고 있다.

신 개념의 고상접합법인 FSW를 이용한 이종재료 접합의 경우, 기존의 공정으로는 건전한 접합부를 쉽게 얻을 수 없다고 알려 졌다. 본 저자들에 의하면<sup>2)</sup>, 물리적인 성질이 상이한 재료를 FSW한 경우, 접합 툴(welding tool)의 삽입위치를 두 재료를 맞댄 면이 아닌 연질 재료 쪽으로 약간 이동하여 접합한 경우가 더욱 우수한 접합부 특성을 나타낸다고 보고 하였다.

FSW한 이종재료의 계면 생성물의 양은 고상접합법의 특성상 용융용접 한 경우에 비해 상당히 미미하며 매우 얇기 때문에 이에 대한 분석이 용

이하지 않으며, 현재까지 이에 대한 보고가 거의 없다. 따라서 본 연구는 접합 툴의 삽입 위치를 이동하여 FSW한 오스테나이트계 스테인리스강과 알루미늄 합금 이종재료 접합부 근방의 미세 조직 및 기계적 강도를 측정하여 접합 특성을 파악하고 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM)을 이용하여 계면 생성물 및 계면 근방의 조직 분석을 하고자 한다.

### 2. 장 실험 방법

4mm 두께의 6013-T4 알루미늄 합금과 304 스테인리스강의 접합은 밀링 머신을 개조하여 제작한 마찰교반접합기를 이용하여 실시하였다. 접합조건은 툴 회전속도 800 rpm, 접합속도 80 mm/min 이었으며 접합 방향은 알루미늄 합금의 압연 방향과 평행한 방향으로 실시하였다. Fig.1 은 본 연구에서 적용한 접합 공정 및 인장 피로 시험편의 형상을 나타낸다. 이종재료의 마찰교반 접합은 일반적인 동종재료의 접합방식과는 다르게 접합 툴의 삽입 위치를 두 재료의 맞댄 면에서 연질인 알루미늄 합금 쪽으로 약 2mm이동하였다. 주로 알루미늄 합금을 교반 시켜 알루미늄 합금의 과열 및 툴 마모현상을 방지 하였으며 접합 핀의 가장자리 부분만이 스테인리스강의 교반에 관여 하였다.

접합 후, 접합부 근방의 조직학적인 특성을 분석하기 위해 광학현미경을 이용하였으며, 계면 특성을 파악하기 위해 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM)과 TEM 을 이용하여 관찰 하였다. FSW한 이종재료의 접합 계면은 두 재료 내 성분 원소의 상호 확산이 일어날 만한 온도 및 시간이 충분하지 않기 때문에 계면 생성물의 범위가 매우 작다. 따라서 분석 영역이 매우 협소하기 때문에 광학 및 주사 전자현미경을 이용한 분석이 거의 불가능하다. 따라서 높은 분해능을 가지고 있는 TEM (Philips EM 430, 300kV)을 이용하여 계면의 조직 및 상 분석을 행 하였다.

기계적인 특성은 경도, 인장강도, 피로강도시험을 통해 파악했다.

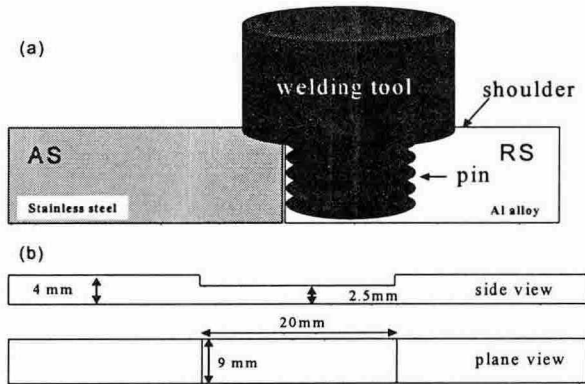


Fig.1 Schematic illustrations of friction stir welding process (a) applied to dissimilar metal joints between stainless steel and Al alloy and tensile (or fatigue) test specimen (b).

### 3. 장 결과

Fig.2는 FSW한 이종 알루미늄 합금과 스테인리스강 접합부의 거시 조직 및 알루미늄 합금측의 미세조직을 나타낸다. 접합 중심부에서는 틀의 교반 작용에 의해 맞댄 면에서 탈락한 스테인리스 강 입자들이 분산되어 있으며, 복합재료 (composite)와 같은 조직을 형성하였다. 6013 알루미늄 합금 모재(d)는 재료의 압연 방향과 평행하게 연신된(elongated)조직이 관찰되고 있으며, 제2상들이 입내에 골고루 분포하고 있음을 알 수 있다. 마찰열의 영향만을 받는 열 영향부(c)에서는 모재와 거의 유사한 조직을 유지하고 있었다. 열 및 기계적인 영향부(b)에서는 모재와 전혀 다른 방향으로 연신된 조직이 형성 되었으며, 국부적인 영역에서 매우 미세한 재결정 조직들이 관

찰되었다. 접합 틀 삽입영역 (a, 교반부)은 모재와 전혀 다른 등축의 미세한 재결정 조직이 형성 되었으며, 접합계면 근방에서 탈락된 스테인리스 입자도 동시에 관찰되었다.

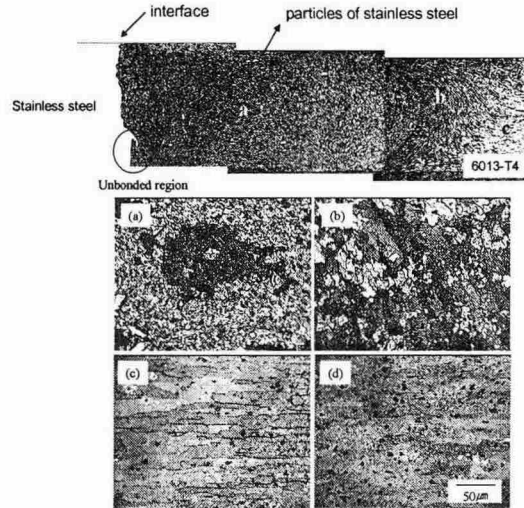


Fig.2 Macrostructure (upper) of FSWed dissimilar materials joints and microstructures on Al alloy side : (a) FSW center, (b) TMAZ (thermo-mechanically affected zone), (c) HAZ (heat affected zone) and (d) 6013 base metal

Fig.3은 접합부 근방 스테인리스강의 미세조직 변화를 나타내고 있다. 접합 계면에서 약 10µm 이내의 영역에서 소성유동조직이 관찰되었다. 그러나 접합 틀에 의한 소성변형이 미미하기 때문에 광범위한 조직 변화는 확인 할 수 없었다. Fig.3 (b-d) 는 각각 계면, 접합부에서 약 1mm 떨어진 영역, 스테인리스 강 모재의 광학 조직을 나타낸다. 스테인리스강 모재의 경우, 오스테나이트 조직을 나타내고 있으며, 쌍정(twin)조직도 관찰되었다. 접합부 계면 및 열영향부의 경우, 결정립 크기의 변화는 관찰할 수 없었으나, 쌍정의 밀도가 증가함을 알 수 있다. 접합부 근방의 경우, 미세한 입자의 밀도가 모재와 열영향부에 비해 상당히 증가함을 알 수 있다.

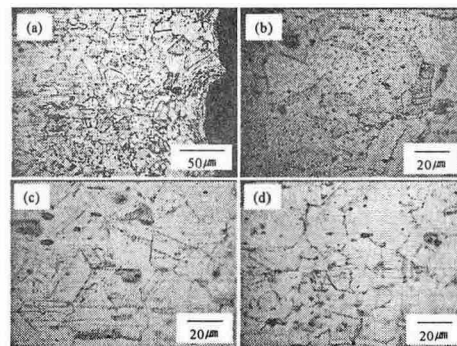


Fig.3 Microstructures on the stainless steel side: (a) lower magnification image of stainless steel at the interface, (b) higher magnification image of stainless steel at the interface, (c) region in 1mm away from the interface and (d) stainless steel base metal.

Fig.4은 TEM을 이용한 계면근방의 조직 사진을 나타낸다. 매우 복잡한 계면 양상을 나타내고 있음을 알 수 있으며 전체적인 계면 반응층의 두께는 약 3 $\mu$ m 정도임을 확인하였다. 점 1은 스테인리스강과 동일한 화학 조성을 나타내고 있으며, 알루미늄의 확산이 미치지 않는 영역임을 알 수 있다. 점 2 와 4의 영역에서는 스테인리스강을 구성하는 원소가 주로 검출 되었으며 미량의 알루미늄 원소도 포함되어 있음을 확인 하였다. 이 영역은 마찰교반에 의한 스테인리스강의 변형 조직임을 확인하였다. 그러나 점 3의 경우 알루미늄 원소가 주로 검출 되었으며 미량의 Fe, Ni, Cr 과 Mn등 스테인리스강의 원소들도 검출 되었으며 스테인리스강에서 알루미늄 합금 측으로 확산이 일어난 변형 조직임을 확인 하였다. 점 5 영역에서는 Al 과 Fe가 일정한 비율로 검출 되었으며 두 원소의 상호 확산에 의한 금속간 화합물이 형성된 영역이라 생각된다. 스테인리스강과 금속간화합물층 사이의 영역에서는 틀의 교반에 의한 소용돌이 형태(swirl or vortex)의 적층(lamella) 조직이 관찰 되었다. 점 6 영역에서는 알루미늄 합금의 성분 원소만이 검출 되었다.

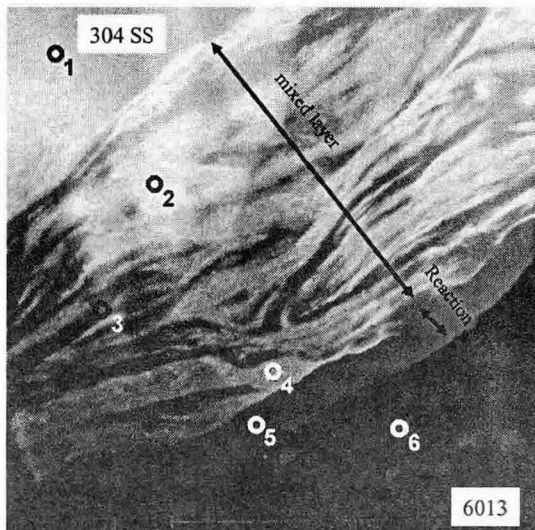


Fig.4 TEM micrograph including interface region between FSWed stainless steel (upper) and Al alloy(lower).

Fig.5는 스테인리스강과 알루미늄 합금의 접합부 및 6013-T4 모재의 피로특성을 나타낸 그래

프 및 시험 후 파단 된 시험편을 나타낸다. 접합 중심부와 피로 파괴가 일어난 영역은 일치하고 있지 않음을 알 수 있다. 6013-T4 모재 피로 특성과 비교한 결과, 이종재료 접합부의 피로 특성은 알루미늄 모재에 비해 약 40%정도 감소함을 알 수 있었으며, 고 주기 영역으로 갈수록 차이는 커 짐을 알 수 있다. FSW된 스테인리스강과 알루미늄 합금 접합부는 접합 틀의 삽입 위치가 알루미늄 합금 측으로 이동되어 있기 때문에 계면에서는 교반 부족(lack of stirring)이 현상이 나타나는데, 이 부위에서 균열이 시작되고 파괴가 진행됨을 알 수 있다. 따라서 틀 삽입위치의 이동으로 건전한 접합부를 얻을 수 있었으나, 교반 부족으로 인해 접합부 강도에 악 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

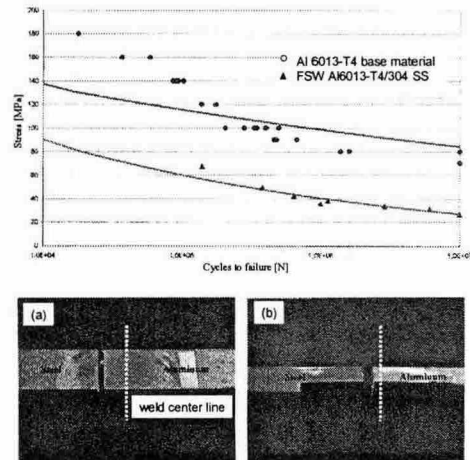


Fig.5 S-N curves for Al 6013-T4/stainless steel joint and Al 6013-T4 base metal and macroscopic views from : (a) top and (b) lateral of fatigue failure specimen.

### 참고문헌

1. Joining forces for multiple properties, Eureka February 2003 Available from: [www.eurekamagazine.co.uk](http://www.eurekamagazine.co.uk).
2. 15. Won-Bae Lee, Seung-Boo Jung: Void free friction stir weld zone of the dissimilar 6061 aluminum and copper joint by the shift of tool inserting location, Materials Research Innovation, 8-2 (2004), 93-96