

# 철도차량 알루미늄 압출재의 FSW 및 GMAW 용접부조직 및 경도 특성 연구 A Study on the Welding Material and Hardness Property of FSW and GMAW of the Extruded Aluminum Alloy for Rolling Stock Structure

\* #김 원경<sup>1</sup>, 원시태<sup>2</sup>, 구병춘<sup>3</sup>

\* #W. K. Kim(wkkim@krii.re.kr)<sup>1</sup>, S. T. Won<sup>2</sup>, B. C. Goo<sup>3</sup>

1한국철도기술연구원 시험인증센터, 2 서울산업대학교 금형설계학과, 3한국철도기술연구원

Key words : Friction Stir Welding, GMAW, Hardness Test

## 1. 서론

전 세계적으로 마찰교반용접이 가장 많이 쓰이고 있는 분야는 철도와 항공기, 조선, 자동차 등 수송 산업인데, 이는 차체를 가벼운 알루미늄으로 대체하여 에너지를 절약할 수 있게 됐기 때문이다. 1981년 영국의 용접연구소(TWI)에서 개발한 마찰교반 용접 (Friction Stir Welding) 방법이 현재 다양한 산업분야에 광범위하게 적용되고 있다 [1]. 마찰 교반 용접 기술은 마찰용접에서 유래되어 용접에 의한 변형이 적고 비소모성 접합 방법일 뿐만 아니라 용접 결함, 흠, 소음 및 유해광선의 발생 없이 고품질의 접합부를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 철도차량용 알루미늄 압출재의 용접특성을 살펴보기 위해 아크 용접을 했을 경우와 마찰교반 용접했을 경우의 용접부 재질 및 경도 특성을 모재와 비교하였다. 신뢰성 있는 시험결과를 얻기 위하여 각 경우 당 총 3개의 시편을 제작하여 반복 실험을 실시하였으며, 결과의 평균값을 각 경우의 대표값으로 사용하였다.

## 2. 마찰 교반 용접의 원리

Fig. 1은 마찰 교반 용접을 개념적으로 보여준다. 특수한 형상의 핀(pin)이 장착된 공구(tool)가 회전하면서 모재의 맞대기 틈새로 삽입되고, 용접선을 따라 움직인다. 공구의 숄더(shoulder)부는 일정 온도(200~300℃)로 예열되어 있으므로 숄더부와 접촉하는 지점에서 모재를 국부적으로 가열시킨다. 한편, 모재의 맞대기 틈새로 삽입된 회전하는 핀에 의해 모재와 핀 사이에 마찰열이 발생하게 되기 때문에 모재의 재질이 연화된다. 공구가 이동함에 따라 연화된 재질내부에 소성유동이 발생하게 되고, 서로 혼합되면서 결국 접합이 이루어진다. 이때 모재의 재질은 높은 온도에서 격렬한 소성 변형을 하게 되고 그 결과 미세하고 치밀한 재결정 조직(recrystallized grains)이 생성된다. 이 같은 용접부의 미세구조 때문에 마찰 교반 용접된 부재가 가스 및 아크 용접 등 기존의 방법으로 용접된 부재보다 기계적 강도 및 피로 성능이 우수한 특징을 보인다[2].

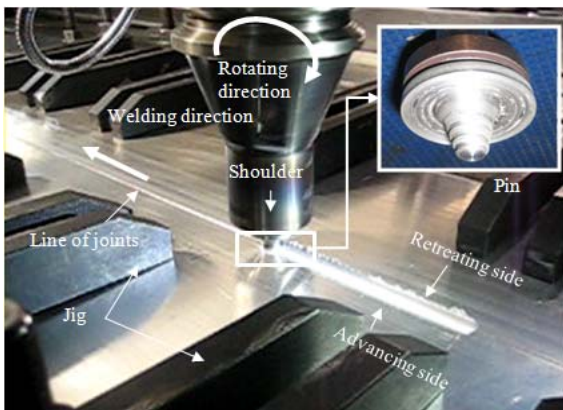


Fig. 1 Concept diagram of friction stir welding

## 3. 재료의 선정 및 시편 제작

본 연구에서는 철도차량의 Floor panel 및 Roof panel 또는 Side panel로 사용되는 A6005-T5 압출재를 대상으로 선정하였다. A16005-T5 합금은 압출성이 우수하나 용접했을 경우 항복강도 및 인장강도가 약 40%정도 저하되는 특성을 보인다.

A6005-T5 압출재를 아크용접과 마찰교반용접을 적용하여 접합하였다. 용접 종류별로 용접 도입부와 마무리 부를 제거한 상태에서 용접부의 표면 상태가 고른 부위를 골라 가로 55mm, 세로 25mm, 두께 4.8mm의 크기의 시편 3개를 제작하여 경도시험을 실시하였다

## 4. 경도시험 결과

모재, FSW 및 GMAW 용접부에 대한 경도를 비교하였다. 경도를 측정할 위치는 모재는 경도시편의 중앙부를, GMAW와 FSW는 접합부를 기준으로 하여 시편의 횡단면의 중앙을 1 mm 간격 (모재는 2 mm 간격)으로 증가시켰다. Fig. 2는 경도시험용 시편을 나타낸 것이다[3].

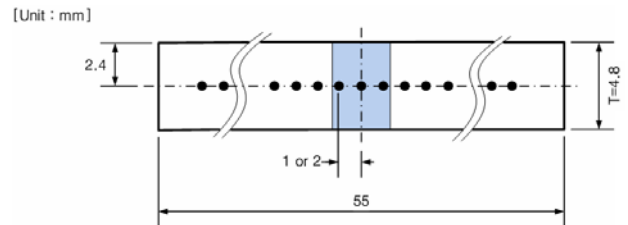


Fig. 2 Geometries of Hardness test specimen

Fig. 3은 모재, GMAW 및 FSW의 경도시험용 시편에 대한 경도시험 결과로 FSW의 경도가 GMAW에 비해 우수하지만 모재보다는 떨어진다는 것을 알 수 있다. 모재, GMAW 및 FSW의 경도 특성을 정량적으로 평가하기 위해 평가지표는 평균경도감소량(ΔHv)과 용접 열영향부 길이(LHAV)를 정의하였다.

모재의 경도는 평균 Hv97.8, 표준편차 Hv 3.1이며, GMAW 및 FSW의 경우에 용접열이 전달되지 않은 모재부는 평균 경도 Hv 95.5 ~ 99.4, 표준편차 Hv 2.6 ~ 4.3이므로 알루미늄 압출판재는 경도 측면에서 비교적 균질하다고 판단된다.

평균 경도감소량은 GMAW는 38.1, FSW는 최대 34.6, 최소 31.5, 평균 33.2로 GMAW의 평균 경도감소량이 FSW보다 9 ~ 13%가 큼을 알 수 있다. 또한, 최소 경도값에서의 용접 길이는 GMAW는 32.0 mm, FSW는 최대 24.0 mm, 최소 17.0 mm, 평균 20.7 mm로 GMAW의 최소 경도값에서의 용접 길이가 FSW보다 37 ~ 45%가 큼을 알 수 있다.

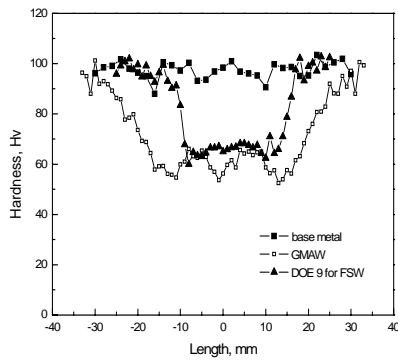


Fig. 3 Hardness distributions for base metal, GMAW and FSW

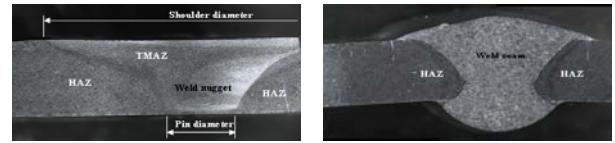
### 5. 접합부 조직

실체현미경(Olympus, SZX16)을 사용하여 FSW 및 GMAW 용접부의 거시적인 용접상태를 확인하였고, 광학현미경(Olympus, GX51)을 사용하여 모재, FSW 및 GMAW 용접 접합부의 조직을 200배 확대하여 미시적으로 관찰하였다.

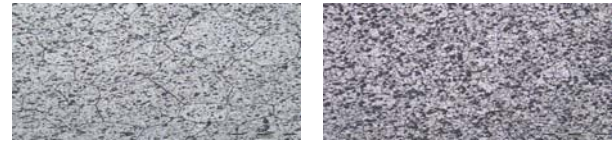
Fig. 4 (a)에서 보는 바와 같이 FSW의 접합부는 3개의 영역, 교반부(SZ, Stir zone), 가공열영향부(TMAZ, Thermo-mechanically affected zone)와 열영향부(HAZ, Heat affected zone)로 분류된다. 그림과 같이 교반부의 형상은 핀 주변에서 교반작용이 일어났기 때문에 거시적으로 양과형상의 타원으로 되어 있는 것을 알 수 있으며, 가공열 영향부와 영향부의 경계는 상면부는 공구 솔더의 직경과 하단부는 공구 핀의 직경과 거의 일치하고 있다.

Fig. 5은 모재, FSW(DOE9)의 교반부, 가공열영향부 및 열영향부, GMAW 용접 중심부에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 모재의 경우는 결정립(grain)의 크기가 100  $\mu\text{m}$  정도로 큰 결정립을 갖고 있으며, FSW의 경우는 Fig. 5 (b), (c)에서 보는 바와 같이 접합부는 3개의 영역에서 서로 다른 형상과 크기의 결정립을 갖고 있음이 확인되었다. 교반부에서는 평균 결정립의 크기가 약 20  $\mu\text{m}$  정도로 모든 방향의 결정입자의 길이가 거의 일정한 등축정(equiaxed) 조직으로 모재에 비해 결정립이 미세화 되어 있다. 이 미세화는 재료가 재결정 온도근방에서 공구에 의해 발생하는 강한 소성변형으로 인한 동적 재결정(dynamic recrystallization) 현상 때문으로 판단된다. 가공 열영향부에서는 Fig. 5 (c)에서 보는 바와 같이 교반부의 조직과 거의 같은 크기의 미세한 결정립과 거칠고 큰 결정립이 혼재되어 있으며, 열영향부의 조직은 결정립의 평균 크기가 약 70  $\mu\text{m}$  정도로 모재보다 약간 작은 결정입자를 갖고 있음을 확인할 수 있었다. GMAW의 경우는 Fig. 5 (d)에서 보는 바와 같이 알루미늄 합금과 용접봉에 포함된 함유물이 아크용점에 의해 용융된 후에 응고하는 온도의 차이 때문에 생기는 수지상 결정(dendrite)을 갖고 있음을 알 수 있다.

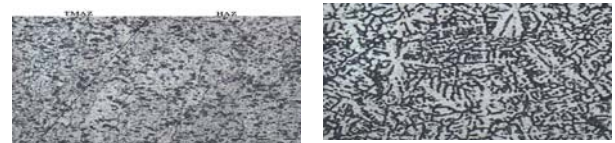
Fig. 5는 DOE9와 용접조건이 다른 2종류(DOE3 및 DOE6)의 FSW에 대한 교반부에서의 미세조직을 나타낸 것이다. FSW의 모든 경우에 대해 교반부는 미세한 등축정 조직을 갖지만 결정립의 크기는 약간의 차이를 갖고 있음을 Fig. 5 (b)와 Fig. 6에서 확인할 수 있다. DOE 3, DOE 6 및 DOE 9에 대한 결정립의 평균크기는 각각 약 15  $\mu\text{m}$ , 약 35  $\mu\text{m}$  및 약 20  $\mu\text{m}$ 로 DOE6의 경우가 가장 크고 DOE3의 경우가 가장 작으며, 이들은 용접조건에 의해 기인한 것으로 판단된다.



(a) FSW (b) GMAW  
Fig. 4 Macroscopic appearance of cross-section for FSW and GMAW



(a) Base metal (b) Stir zone of DOE9



(c) Thermo-mechanically affected zone and heat affected zone of FSW (d) GMAW

Fig. 5 Microscopic appearances for FSW and GMAW



(a) DOE3 (b) DOE6

Fig. 6 Microscopic appearances for DOE3 and DOE6 of FSW

### 6. 결론

상기와 같이 알루미늄 압출재의 FSW 및 GMAW 용접부에 대한 경도 및 재료의 조직특성을 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 모재, GMAW 및 FSW의 경도시험용 시편에 대한 경도시험 결과로 FSW의 경도가 GMAW에 비해 우수하지만 모재보다는 떨어진다는 것을 알 수 있다. 따라서, FSW가 경도특성 측면에서 GMAW에 비해 매우 우수하다는 것을 알 수 있다.

(2) FSW의 경우, 교반부의 결정립 크기는 공구의 회전속도와 경사각이 감소할수록 공구의 이송속도가 증가할수록 작아짐을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

1. Thomas, W. and Dawes, C., TWI bulletin 6 November /December, p.124, 1995.
2. Munoz, C.A., Ruckert, G., Huneau, B., Sauvage, X. and Marya, S., "Comparison of TIG Welded and Friction Stir Welded Al-4.5Mg-0.26Sc Alloy", Journal of Materials Processing Technology, 1, 97, 337-343, 2008.
3. 박영빈, "철도차량용 압출형 알루미늄 합금의 마찰교반용접특성에 관한 연구", 서울산업대학교 석사학위논문, 2009.