

## Al 6061 T6 합금의 이두께 마찰교반 용접에 관한 연구

An experimental study on the unequal thickness joint using FSW with 4mm<sup>t</sup> and 6mm<sup>t</sup> Al 6061 T6 plates

류덕희\*, 김재성\*\*, 진형국\*\*, 이재훈\*\*\*, 이보영\*\*\*

\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

\*\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

\*\*\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

**ABSTRACT** In order to demonstrate the friction stir weldability of the Al 6061 T-6 unequal thickness joint and determine optimum welding parameters, the relations between welding parameters and properties of the joints have been studied in this paper. The experimental results showed that the tensile properties of the joints are affected by the welding heat inputs and tool shape. In this study, the maximum ultimate strength of the as-welded joint is equivalent to 78% and 18hour aged joint is equivalent to 93% that of the base metal. Though the voids-free joints are fractured at the thermally affected zone on the advancing side, the fracture occurs at the weld center when the void defects exist in the joints.

### 1. 서 론

마찰교반 용접(Friction Stir welding)의 개발로 용접성이 좋지 않은 알루미늄 합금 및 알루미늄과 이종재료의 결합이 없는 용접이 가능해졌고, 근래에는 철강재에까지 그 적용이 확대되고 있다. 국내에서도 철도차량, 선박, 자동차 및 기타 다양한 분야에 마찰교반용접의 적용이 고려되고 있다. 마찰 교반 용접의 경우 회전하는 마찰 톨을 이용하여 재료를 고상에서 접합시키는 용접법이기 때문에 통상 용접 이음부 형태가 용접가능성을 결정하는 중요 변수이고, 최초 톨이 삽입되는 곳과 용접 끝단부의 핀 자국을 고려하여 용접부를 설계하여야 한다. 특히 이두께 용접부 및 필릿 용접부의 경우 용접부 형상에 따라 접합에 많은 제약이 있다. 본 연구에서는 Al 6061 T6 판재를 이용하여 4mm와 6mm로 두께가 다른 용접부에서 모재에 특별한 사전 가공없이 마찰교반이 가능한 용접 방법을 연구하고자 하였다.

었다. 접합용 시편의 크기는 길이 200mm, 너비 80mm로 가공하여 실험에 사용하였다.

**Table 1** Chemical composition of Al 6061 alloy

| composition | Si   | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Cr   | Al   |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| wt. %       | 0.62 | 0.45 | 0.24 | 0.10 | 0.84 | 0.17 | Bal. |

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 접합조건

마찰교반 접합은 일반 밀링머신을 개조하여 사용하였으며, 시편을 고정하고 다양한 측면각을 줄 수 있도록 밀링 베드(bed)위에 특수 지그(Jig)를 제작하여 용접을 실시하였다. 실험시 톨의 회전수, 전진각, 용접툴 설계시 고려한 측면각을 고정시킨 상태에서 베드의 이송 속도와 톨의 형상을 변수로 하여 접합부 특성을 연구하였다.

Fig 1은 마찰교반용접을 이용한 이두께 용접법의 개념을 나타내었고, Fig 2에는 본 실험에 사용한 shoulder를 블록한 형태로 제작한 톨의 형태를 나타내었다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 사용재료

본 실험에는 Al 6061 T6 4mm, 6mm 판재를 사용하였고, 그 화학적 조성은 Table 1에 나타내

#### 2.2.2 용접부 미세조직

용접부 미세조직은 증류수, 질산, 염산, 불산으로 구성된 켈러 용액으로 30초간 에칭하여 광학 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 용접부 중심의 Onion ring과 인장시험 파단부에 대하여서는 주사

전자현미경(SEM)을 이용하여 단면을 관찰하였다.

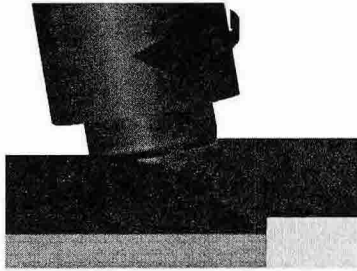


Fig 1. Schematic illustration of unequal thickness joining process with FSW



Fig 2. Shape of Friction stir welding tool  
(a) non thread pin (b) right hand thread pin  
(c) left hand thread pin

Table 2. Friction stir welding condition applied in this study

| Parameter                | Condition     |
|--------------------------|---------------|
| Tool material            | SKD 11        |
| Tool diameter            | 16mm          |
| Pin length, diameter     | 4.1mm, 5.0mm  |
| Tilting angle            | 3°            |
| Side angle               | 10°           |
| Tool rotation speed(rpm) | 1275          |
| Welding Speed(mm/min)    | 150, 300, 450 |

### 2.2.3 용접부의 기계적 특성

각 조건별로 용접한 시편을 150℃에서 12시간, 18시간, 24시간 인공시효 한 후 접합부 수직 단면의 경도 분포를 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 용접 하단부에서 2.5mm 지점을 300g의 하중으로 10초 동안 측정하였으며, 접합부의 인장 강도를 평가하기 위하여 접합부에 수직한 방향으로 방전 가공을 통하여 인장시편을 제작하였으며, 1mm/min의 실험 속도로 인장시험을 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 접합부 미세조직

Fig 2의 (a)와 같은 나사산 없는 틀, (b)와 같이 0.75mm 오른 나사를 가공한 틀은 fig 3의 (a), (b)와 같이 모든 용접 조건에서 핀 하단부에 기공이

발생하였으며 (c)와 같이 왼나사를 가공한 핀의 경우만이 결함이 발생하지 않았다. 이는 핀의 형태가 용접금속의 유동을 결정짓고 왼나사가 용접금속을 원활히 유동시켜서 결함없는 용접부를 형성하는 것으로 판단된다. 마크로 조직 분석 결과는 나사산이 없는 틀의 경우가 왼나사를 가공한 틀과 비슷한 형태의 유동을 보였으며, 오른나사를 가공한 경우는 (b)에서 보이는 것처럼 nugget과 onion ring의 형태가 관찰되지 않으면서 핀과 솔더 사이에 완만한 경사를 이루면서 용접되어진 것을 확인할 수 있다. Fig 3의 (c), (d), (e)는 왼나사를 가공한 틀의 용접속도에 따른 용접부 단면을 관찰한 것이다. 용접속도가 증가함에 따라 onion ring의 폭이 점차 넓어짐을 알 수 있다. Fig 4에는 용접 속도에 따른 용접부 중심의 nugget 부분의 미세 조직을 관찰한 것인데, 용접 입열이 더 많을수록 조직이 미세화하는 경향을 확인할 수 있었다.

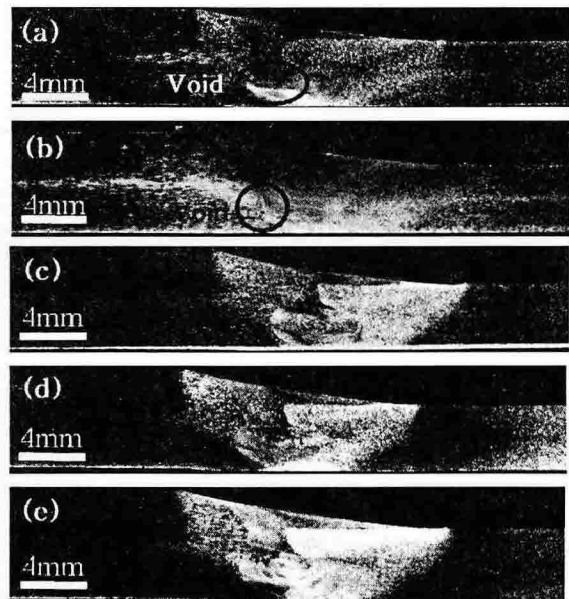


Fig 3. Cross section macro structure of FSW unequal thickness joint with travel speed. (a) non thread pin (b) right hand thread pin left hand thread pin - (c)150(mm/min) (d)300(mm/min) (e)450(mm/min)

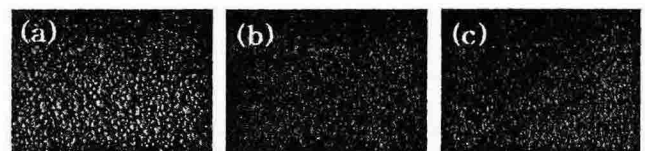


Fig 4. Micro structure of FSW nugget with travel speed. (a)150, (b)300 (c)450mm/min

2.3.2 용접부 경도

용접부 인성을 평가하기 위해 실시한 경도시험에서는 용접 속도가 느려 입열량이 많을수록 경도 저하가 커지는 경향을 확인하였으나, 그 영향은 미미하였고, 150℃에서 12시간 이상 시효 할 경우에는 용접부 중심의 경도가 모재 수준으로 회복되는 것으로 확인되었으며, 용접 입열이 작을수록 TMAZ에서의 경도상승의 폭이 큰 것으로 확인되었다. 이는 석출 경화형 합금인 6061 합금의 강화기구인 Mg<sub>2</sub>Si 석출물이 용접 입열로 인해 고용되었다가 인공 시효시 재석출 되는데 초기 용접 입열이 작을수록 고용되는 석출물이 작기 때문인 것으로 판단된다.

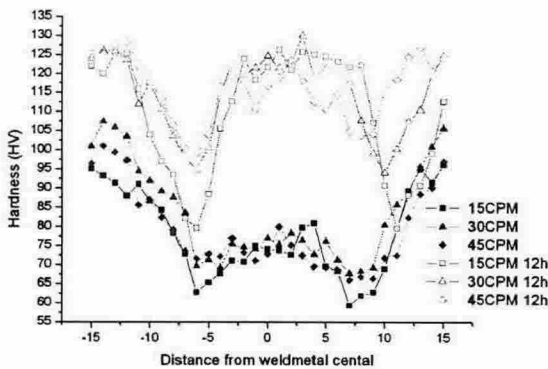


Fig 5. Effect of post weld aging on horizontal hardness distribution in the weld.

2.3.3 용접부 인장시험 결과

본 연구에 사용된 6060 T-6 판재의 경우 최대 인장강도가 322MPa, 연신율이 21.7% 였다. 마찰교반 용접을 이용하여 이두께 용접을 실시한 경우에도 용접 조건에 따라 모재부의 78%이상의 강도를 확보할 수 있었으며 가열로에서 150℃ 18시간 시효 하였을 경우에는 최대 93% 이상의 강도를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 시효하지 않은 경우에는 연신율이 5~6% 였으나, 150도에서 18시간 시효 하였을 경우에는 연신율이 3~4% 로 저하되는 것으로 확인되었다. 용접부의 파단위치는 시편의 두께를 4mm로 일정하게 가공하여 시험한 경우에는 advancing side의 연화역에서, 용접한 판재 상태로 시험한 경우에는 모두 retreating side인 4t 판재 용접비드 끝단에서 1.5mm 이상 떨어진 곳에서 파단하였다. 용접속도가 증가할수록 강도가 증가하는 것으로 판단되었으나, 450mm/min 시편의 경우 시편에 따라 일부 기공이 발생하기도 하였으며 기공이 발생한 경우에는 용접부 중심 nugget 부

에서 파단이 일어나는 것으로 확인되었다.

Fig 6은 용접 속도에 따른 용접 시편 인장 파단부의 형태를 나타내고 있다.

(a), (b)의 파단부는 전형적인 연성 덩플 파단면이 관찰되었으나, 결함이 있어 nugget부에서 파단된 (C)의 경우에는 입계가 떨어져 나가는 결정립계 파면을 형성하는 것이 관찰되었다.

Table 3. Tension test results

| Condition (mm/min) | As-welded |            | PWHT(18h aging) |            |
|--------------------|-----------|------------|-----------------|------------|
|                    | UTS       | elongation | UTS             | elongation |
| 150                | 215 MPa   | 5%         | 250 MPa         | 3.1%       |
| 300                | 245 MPa   | 5.7%       | 295 MPa         | 3.9%       |
| 450                | 250 MPa   | 5.6%       | 300 MPa         | 3.8%       |

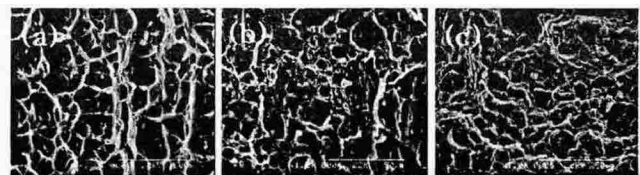


Fig 6. SEM image of Fracture section with different welding speed.

(a) 150, (b)300 (c) 450 mm/min

4. 결 론

두께가 각각 4mm 와 6mm인 Al 6061 T6 판재를 이용하여 맞대기 이두께 용접을 실시하여 미세조직 및 기계적 특성 등을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 틀의 형상과 측면각 등의 용접변수를 조절하면 특별한 가공 없이도 두께차가 50%이상인 평판에 용접비드가 양호한 이두께 용접이 가능한 것으로 확인되었다.
- (2) 이두께 평판재 용접시 틀의 형상과 용접변수 등에 따른 최적 용접조건이 있고, 인공시효 등의 열처리를 통하지 않고도 최대 78% 이상의 강도를 확보 할 수 있는 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. Tensile properties and fracture locations of friction -stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology(2003) 692-696 H.J.Liu, H.Fujii
2. 알루미늄합금 FSW부의 조직 및 특성, 대한용접학회지 2001, 연윤모, 이원배, 정승부