

**특집 : 마찰 교반 접합**

## 알루미늄 합금 FSW부의 조직 및 특성

연 윤 모 · 이 원 배 · 정 승 부

### Microstructures and Characteristics of Friction-Stir-Welded Joints in Aluminium Alloys

Yun-Mo Yeon, Won-Bae Lee and Seung-Boo Jung

#### 1. 서 론

최근 에너지절약 및 고속화 측면에서 수송기기의 경량화가 추진되면서 철도차량, 선박, 항공기, 자동차, 탱크 등에 알루미늄(Al)합금의 사용이 확대되고 있다. Al합금은 경량으로 비강도가 우수하여 수송기기 등의 구조재로서 이용이 기대된다. 그러나, 이들 기기에 Al합금을 적용하는 경우 Al합금의 용접은 매우 중요하다. 즉, Al합금을 용융용접하여 구조물을 만드는 경우 용접변형, 기공 및 응고균열 등의 용접결함이 발생하기 쉬워 변형방지를 위한 지그 준비, 불활성 가스에 의한 용접부 실딩, 용접전 산화막처리, 숙련된 용접기술자 등이 요구되어 왔다. 이와 같은 Al합금 용융용접상의 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 Friction Stir Welding이 최근 개발되어 수송기기 분야의 Al합금 용접에서 주목을 받고 있다.

Friction Stir Welding(FSW, 마찰교반접합)은 1991년, 영국의 TWI에서 개발된 새로운 접합방법으로서 회전마찰에 의한 가열 및 재료의 소성유동을 응용한 고상접합방법이다<sup>1-4)</sup>. FSW는 모재를 용융시키지 않아 변형이 극히 적으며 용가재 및 실딩가스를 사용하지 않는 비소모성 접합방법일 뿐만 아니라 용접결함, 흠, 소음 및 유해광선의 발생없이 고품질의 접합부를 얻을 수 있는 환경 친화적 접합방법이기도 하다. FSW는 이와 같이 종래의 용융용접방법에 비하여 접합방법 및 접합기구가 전혀 다르며 이에 따른 장점이 많고 Al합금의 용접에 매우 적합하여 경량화가 요구되는 철도차량, 선박, 항공우주기 등의 수송기기 분야에서 이미 수년 전부터 적용되고 있다<sup>5-10)</sup>. 이러한 분야에서의 FSW기술의 적용 및 FSW구조물의 건전성을 검토하기 위해서는 FSW부의 특성을 파악하는 것이 중요하며 이는 FSW부 조직과 밀접한 관련이 있다고 하겠다. 따라서, 본 보고에서는 Al합금의 FSW에 관한 조

직학적 보고를 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

#### 2. FSW부의 마크로 조직 및 소성영역

FSW는 용점이하의 고상접합방법이므로 FSW에 의해 형성되는 표면형상 및 조직은 종래의 용융용접방법의 경우에 비해 현저히 다르다. 6005 Al합금(4t)을 회전속도 1600rpm, 용접속도 342mm/min으로 맞대기 FSW후의 표면 및 이면상태를 Fig. 1<sup>11)</sup>에 나타낸다.

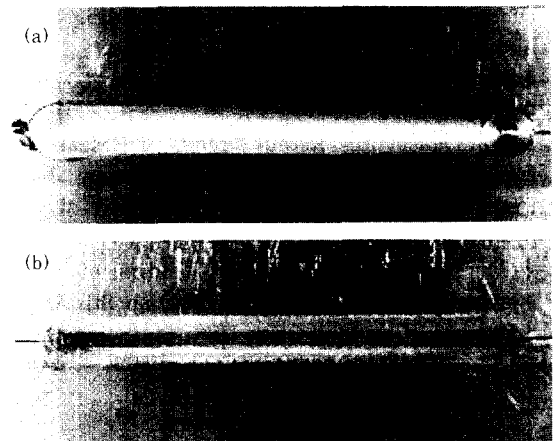


Fig. 1 Surface and back appearance of FSW butt joint(6005Al, 4t)

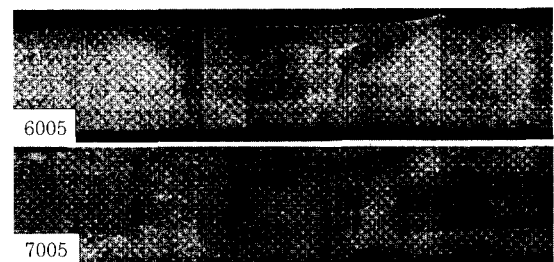


Fig. 2 Cross sectional macrostructure of FSW butt joint

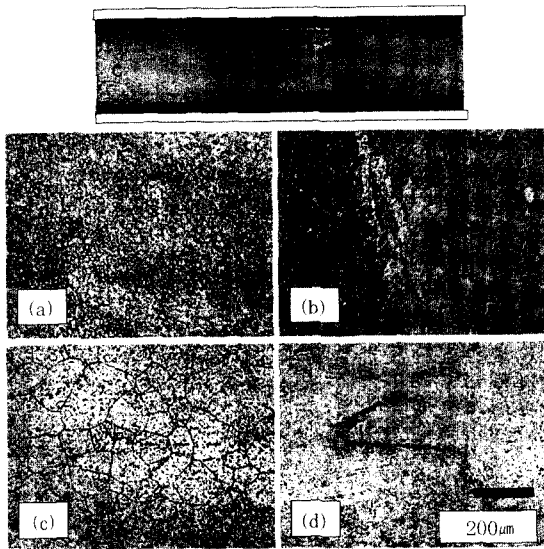


Fig. 3 Cross sectional microstructure of FSW butt joint(6005Al, 4t)  
(a)S.Z (b)TMAZ (c)B.M (d)kissing bond

접합재 표면(a)에는 접합방향으로 툴 숄더와 Al합금과의 마찰에 의한 리플선이 형성되면서 접합이 진행되고 오른쪽 접합 종단부에는 핀 흔적이 형성됨을 보여준다. 또한, 이면(b)에서는 접합부 중심을 따라 핀에 의한 흔적이 보이고 있다. 이러한 FSW부의 최대 폭은 솔더의 직경에 의해 결정되며 이는 또한, 용접속도의 영향을 받는다. Fig. 2<sup>11)</sup>는 6005 및 7005 Al합금의 FSW부 단면 마크로 조직을 나타낸다. Al합금의 FSW부에서는 용융용접시 나타날 수 있는 용접결함은 형성되지 않으며 중심부에서는 onion ring이 특이하게 형성됨을 알 수 있다. 6005 Al합금 FSW부의 단면조직사진을 Fig. 3<sup>12)</sup>에 나타낸다. 중앙부(a)에서는 결정립이 미세한 재결정 영역이 생기며 그 주변(b)에서는 동적 재결정과 소성유동이 동반된 영역이 형성된다. 또한 이들 주변에서는 열영향부가 존재하게 되고 중앙부의 동적 재결정 영역은 모재(c)에 비해 결정립이 매우 미세하며 이들 영역의 일부에서는 (d)에 나타내듯이 선상의 kissing bond도 관찰된다. 이것에 대

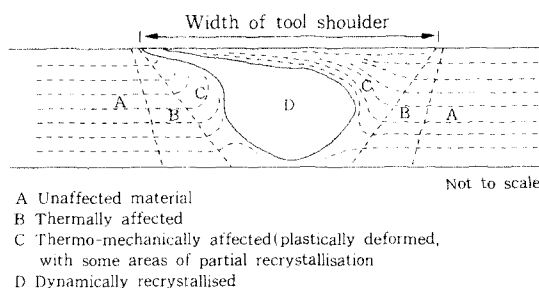


Fig. 4 Schematic representation of the microstructural regions in FSW butt joint

해서는 4절에서 기술하기로 한다. Dawes<sup>3)</sup>는 Al합금 FSW부에 일반적으로 형성되는 소성영역을 Fig. 4과 같이 분류하여 나타내었다. 즉, 단면의 중앙부(D)에서는 마찰열과 심한 소성유동에 의한 동적 재결정영역(SZ)이 생기고 그 주변(C)에서는 소성변형과 국부적인 재결정이 동반된 영역(TMAZ)이 형성되며 이들 주변에 열영향부(B) 및 모재(A)가 존재하게 된다. FSW중심부의 onion ring상의 조직은 Fig. 5<sup>13)</sup>에 나타내듯이 용접속도와도 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 즉, 용접속도가 느린 87mm/min의 경우에는 중심부의 ring지름이 작고 ring간 간격이 좁으나 용접속도가 증가함에 따라 ring지름이 커지면서 ring간 간격은 넓어지고, 용접속도가 비교적 빠른 342mm/min의 경우에는 ring간격이 매우 넓어져 일부에서는 ring이

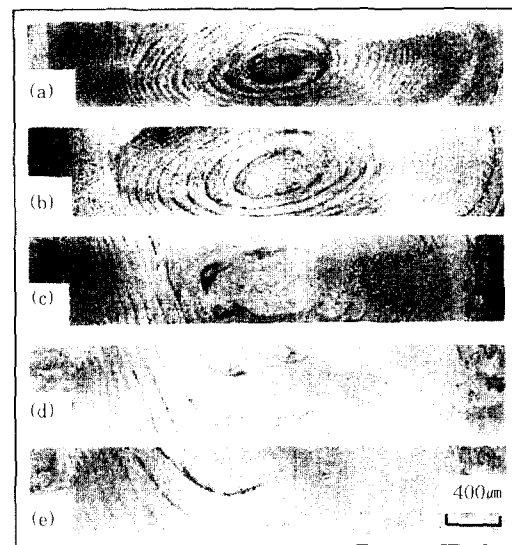


Fig. 5 Transverse cross section of FSW butt joints (5083Al, 4t)with travel speed  
(a)87 (b)127 (c)187 (d)267 (e)342(mm/min)

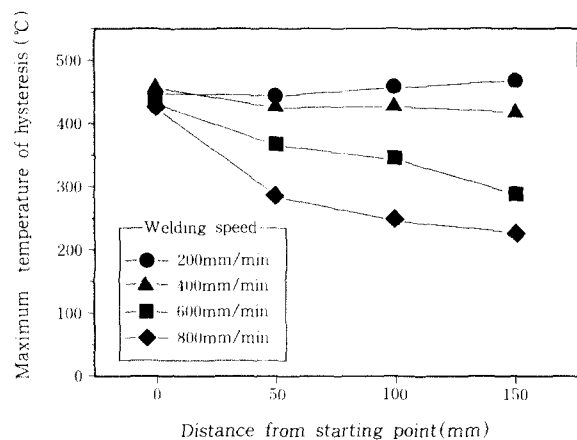


Fig. 6 Maximum temperature of hysteresis at various welding speed

끊겨짐을 알 수 있다. 6N01 Al합금의 경우, 회전속도 1500rpm에서의 FSW부 최고온도와 용접속도의 관계를 Fig. 6<sup>14)</sup>에 나타낸다. 접합시작점에서의 최고온도는 500℃미만으로 용접속도에 따른 변화가 크지 않으나 접합이 진행되어 시작점에서 멀어질수록 용접속도의 증가에 따라 최고온도는 일반적으로 저하함을 알 수 있다. 따라서 Al합금의 FSW중심부에 형성되는 onion ring은 500℃미만의 회전마찰열과 회전교반에 의해 강한 소성유동이 생긴 흔적을 시사한다.

### 3. FSW부의 경도분포, 결정입도 및 미세조직

#### 3.1 FSW부의 경도분포 및 결정입도

회전속도 1600rpm, 용접속도 342mm/min의 접합 조건으로 맞대기 FSW를 행한 6005(T6), 7005(T5) 및 5083(H112) Al합금(4t)의 경도분포를 Fig. 7<sup>11-13)</sup>에 나타낸다. 6005 Al합금의 경우, 접합부 중앙으로부터 약 5mm의 영역근방에서 최소경도치를 나타내며 접합부 중앙근방에서는 모재의 약 60%정도로 경

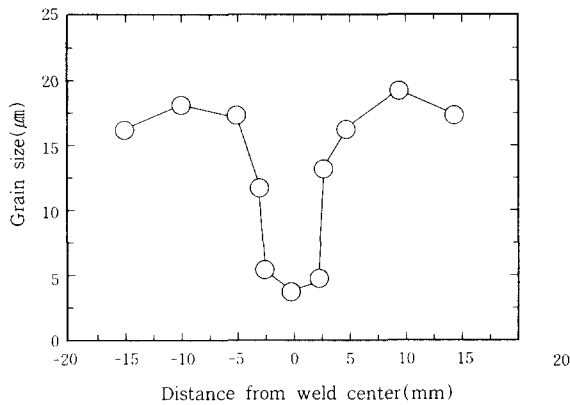


Fig. 8 Grain size distribution in friction-stir-weld of 5083 Al

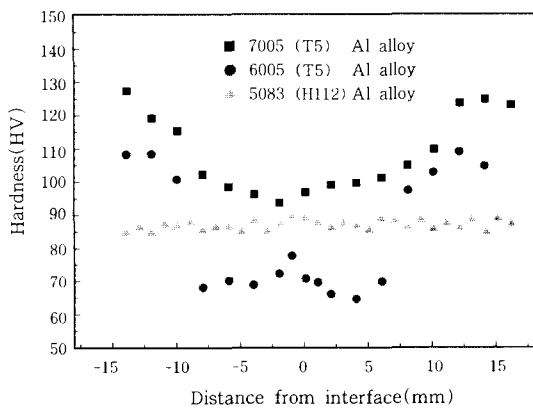


Fig. 7 Horizontal profiles of Vickers hardness in as-welded friction stir weld of Al alloys

도가 저하한다. 7005 Al합금의 경우도 6005 Al합금의 경우에 비해 정도는 약하지만 접합부 중앙근방에서 경도가 저하하는 경향은 비슷하다. 그러나, 5083 Al합금의 경우는 FSW중앙부 및 열영향부에 관계없이 거의 경도변화가 없음을 보여준다. 이는 Al합금의 종류에 따른 조직특성과 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다. 비시효성 5083 Al합금 FSW부의 결정립은 Fig. 8<sup>15)</sup>에 나타내듯이 중앙부에서 거의 모재의 절반이하로 미세화 되며 이러한 경향은 시효성 Al합금<sup>16)</sup>의 경우에도 비슷하게 나타난다.

#### 3.2 시효성 Al합금 FSW부의 미세조직

시효성 6063 Al 합금의 경우, 미세한 침상 석출물이 강도특성에 영향을 준다고 알려져 있다. Sato등<sup>16)</sup>은 6063 Al합금 FSW부의 미세조직을 상세히 조사하여 강화석출상(Mg<sub>2</sub>Si)의 크기, 형태, 밀도 등이 경도 변화에 크게 영향을 미침을 보고하였다. Fig. 9에 나타내듯이 모재부 근방영역(BM)에서는 다량의 미세한 침상 석출물과 봉상 석출물( $\beta'$ )이 관찰되나 침상석출물이  $\beta'$  보다도 많이 존재하며, 경도최소영역(MIN)에서는 소량의  $\beta'$  만이 관찰되고 연화영역(SOF)에서는 석출물이 전혀 관찰되지 않는다. 이러한 석출현상은 6005 Al합금 FSW부의 미세조직<sup>12)</sup>에서도 일부 관찰되고 있어 6005 Al합금의 경도저하는 이러한 미세 침상석출물의 양과 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

이상에서와 같이 시효성 Al합금의 FSW부는 재결정에 의한 미세한 결정립으로 구성되며 전위밀도도 크게 감소한다<sup>16)</sup>. 이에 따라 접합부와 열영향부에서 경도값은 저하하는데 이는 강화 석출상의 밀도와 관련이

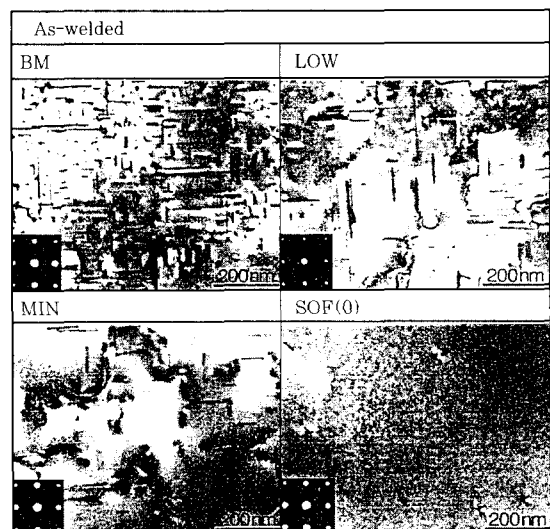


Fig. 9 TEM micrographs of the friction stir weld

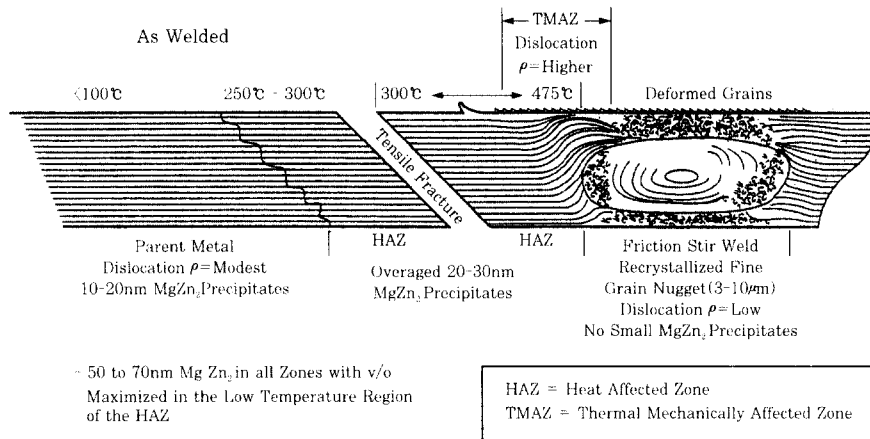


Fig. 10 Schematic illustration of friction-stir-weld zone microstructures, precipitate distributions and temperature ranges for 7075 T651 Al

깊으며 석출물의 분포는 주로 열 이력에 영향을 받게 된다. 즉, FSW과정 중, 발생하는 회전마찰열은 미세 조직에 상당한 변화를 야기시켜 접합부에서의 경도변화에 영향을 주게 된다. FSW를 행한 7075 Al합금 접합부의 미세조직, 최고온도 및 인장시험시 파단위치의 개략도를 Fig. 10<sup>17)</sup>에 나타낸다. 접합부 중심에서는 재결정에 의해 결정립이 매우 미세해지며 전위밀도도 낮으며 미세한 석출물(MgZn<sub>2</sub>)이 관찰되지 않으나 열영향부에서는 MgZn<sub>2</sub>의 조대화가 일어나 인장시험시, HAZ부에서 파단된다. 7075 Al합금에서의 이러한 경향은 시효성 Al합금에서 나타나는 현상이라 할 수 있다.

3.3 FSW부의 조직변화에 미치는 시효처리의 영향

6005 Al합금 FSW부의 시효시간의 변화에 따른 경도변화를 Fig. 11<sup>12)</sup>에 나타낸다. FSW상태 그대로의 경우는 접합 중앙부 근방에서 경도가 크게 저하하지만 시효처리온도(423K)에서의 유지시간이 증가함에 따라 경도는 점차 증가하여 72ks 시효처리의 경우, 접합부의 모든 영역에서 거의 모재 경도수준으로 회복된다. 이와 같이 FSW에 의해 석출물이 분해된 영역을 시효처리하면 경도변화에 영향을 주게 되는데 이는 석출강화상의 증가와 밀접한 관련이 있다.

6063Al합금 FSW부의 시효처리(448K:7.2, 43.2 ks)후의 TEM조직을 Fig. 12<sup>18)</sup>에 나타낸다. 모재 및 경도저하역에서는 석출현상에 큰 변화가 보이지 않지만 경도최소역(MIN) 및 연화역(SOF)에서는 7.2ks 시효의 경우(a),(b)에 보이던 점상의 미세석출물이 43.2ks시효처리에 의해 (c),(d)에 나타내듯이 침상의 석출물로 변화됨을 보여준다. 이는 시효초기단계에

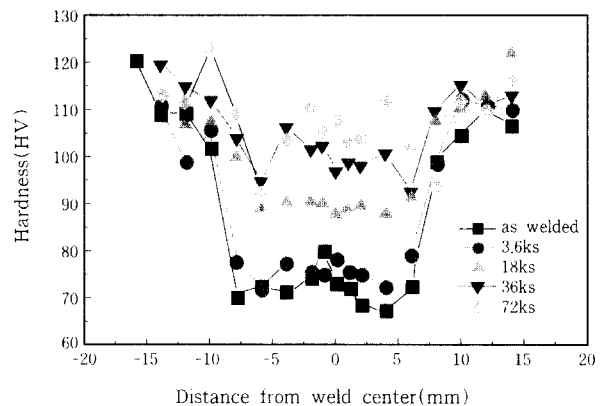


Fig. 11 Effect of postweld aging on horizontal hardness profiles in the weld

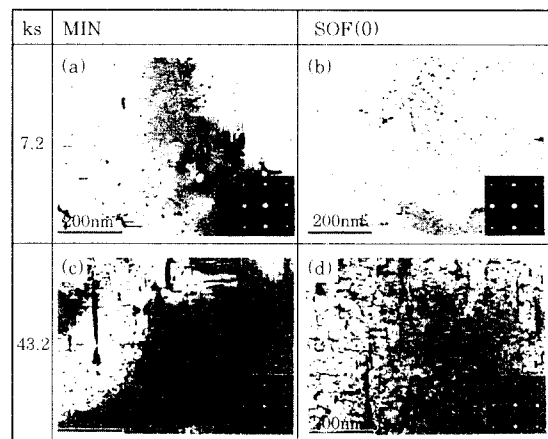


Fig. 12 TEM micrographs of the friction stir weld after postweld aging

서는 점상의 미세석출물의 석출에 의해 경도가 상승되고 시효시간이 증가함에 따라 점상 석출물이 침상 석출물로 성장함에 의해 경도가 더욱 상승하게 됨<sup>18)</sup>을 나타낸다.

### 4. FSW부의 산화물거동

Fig. 3에 나타냈듯이 FSW부의 중앙부(SZ)에서는 결정립이 미세화될 뿐 만 아니라 onion ring 또는 kissing bond 등이 형성되지만 이들의 조성 및 생성 기구 등에 관해서는 보고된 바가 없었다. 그러나 최근 岡村 등<sup>19,20)</sup>은 6N01 Al합금 FSW부에서 형성되는 산화물의 형태, 분포, 교반 및 성장기구에 관하여 조사하여 접합재 맞대기 표면의 산화막이 접합부내로 혼입되어 접합부내에서 ring 또는 선상의 형태로 잔존하게 된다고 보고하였다.

FSW부의 단면을 알루미늄계 산화물을 우선적으로 용해시킨다고 알려져 있는 NaOH용액(10%)에 의해 에칭한 후의 회전피치(용접속도/회전수, mm/r)에 따른 교반상태를 Fig. 13<sup>20)</sup>에 나타낸다. 회전피치가 0.15mm/r로 작은 경우는 Fig. 13(a)에 나타내듯이 마찰교반이 커, onion ring이 형성되면서 이들이 잘게 교반되는 경향을 나타내지만 회전피치가 0.5mm/r로 큰 경우는 Fig. 13(b)에 나타내듯이 접합부 표면으로부터 이면까지 거의 연속적이며 비교적 교반이 작아 선상으로 응집되는 경향을 나타낸다. Fig. 14<sup>20)</sup>는 선상으로 보이는 부분의 EDX분석결과를 나타낸다. 산화물의 혼적 부분(C)에서는 매트릭스(B)에서와 같이 Al만 검출되지만 산화물의 혼적부분(A)에서는 Al이외에 Mg, Si, O가 검출되며 산화물로 추정되는 것은 0.01~0.2 $\mu$ m 크기의 입자상 또는 입상으로 분산되고 이러한 입자상으로부터 Al, Mg, Si, O가 검출되므로 이들이 관련된 산화물로 보인다. 이와같이 Al합금 FSW부에 혼입되는 산화물은 대부분이 접합재 맞대기 표면에 있던 기존 산화막( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)로서 회전틀의 회전작용에 의해 파괴, 분쇄, 교반되는 과정에서 모재중의 원소(Al, Si, Mg), 석출상(Mg<sub>2</sub>Si) 및 대기중의 산소(O<sub>2</sub>)가 혼입되면서 응집 또는 반응하여 새로운 산화물로 성장하게 된다<sup>20)</sup>.

Al합금 FSW부에 형성되는 선상 형태 산화물의 성

장 및 교반모델<sup>20)</sup>을 Fig. 15에 나타낸다. 접합재 맞대기 표면에 존재하고 있는 기존의 산화막( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 회전틀의 회전작용에 의해 분쇄, 파괴 및 교반이 반복되면서 표면근방은 솔더에 의해 눌러 아래방향으로, 접합부 중앙부근의 산화막은 회전틀의 회전에 의해 상하 양방향으로 성장하며 접합부 이면근방의 접합재 맞대기 표면에 존재하고 있던 산화막은 핀의 회전작용에 의해 윗 방향으로 성장하게 된다<sup>20)</sup>. 이러한 교반작용에 의해 분쇄, 파괴 및 교반이 반복된 맞대기 접합표면의 산화막은 핀의 교반작용이 큰 경우(<0.2mm/r)는 ring상으로, 핀의 교반작용이 비교적 작은 경우(>

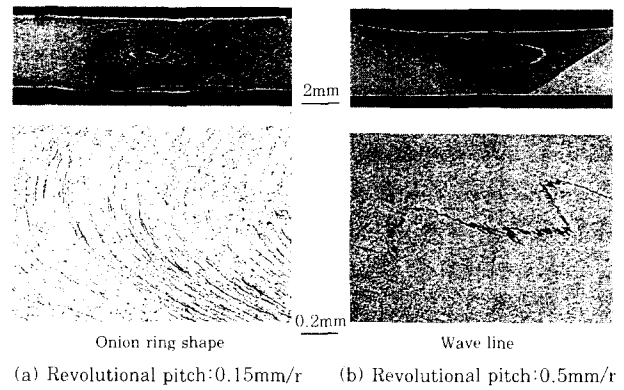


Fig. 13 Optical microscopic observation of oxide at various revolutionary pitch

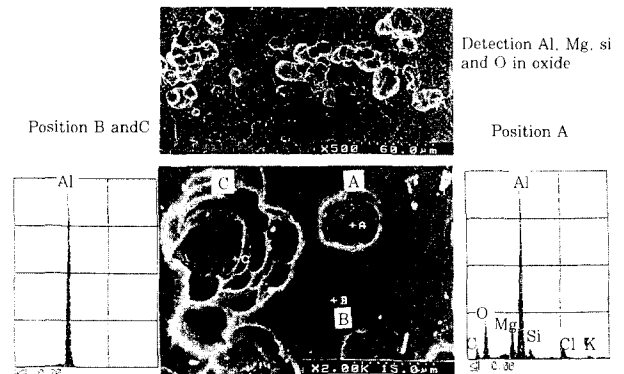


Fig. 14 SEM image and EDX analysis of oxide

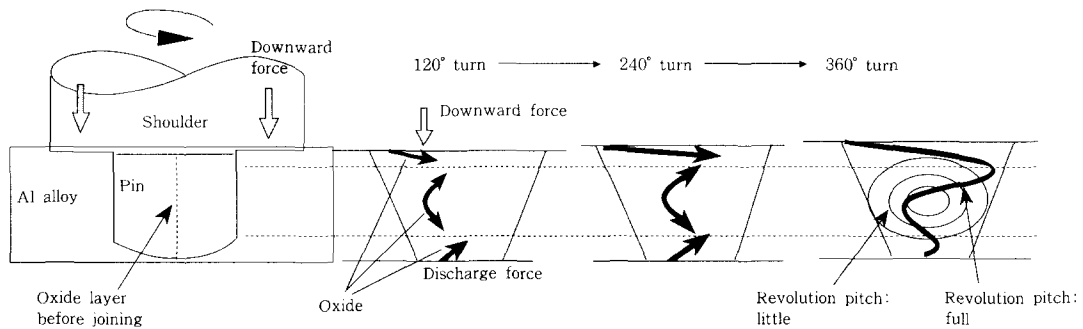


Fig. 15 Growth and stirring model of oxide during FSW

0.3mm/r)는 선상으로 분포하게 된다. 그러나, 교반 작용이 비교적 큰 경우에 형성되는 onion ring의 생성 기구에 대해서는 아직도 잘 밝혀지지 않고 있다.

### 5. FSW부의 인장 및 굽힘성질

#### 5.1 접합인자의 영향

5083 및 6005 Al합금을 회전속도 1600rpm에서 용접속도를 변화시켜 FSW를 행한 후의 인장특성을 Fig.16<sup>13)</sup> 및 Fig. 17<sup>11)</sup>에 각각 나타낸다. 5083 Al합금의 경우, Rt/V 약14 근방에서 최대 인장강도를 나타내지만 6005 Al합금의 경우는 용접속도가 증가함에 따라 인장강도도 증가함을 보여 준다. 즉, 회전속도가 동일한 조건에서도 Al합금의 종류에 따라 최대 인장강도를 나타내는 용접속도가 존재함을 알 수 있다. 6005 Al합금의 경우, 접합재의 인장시험후 파단 위치는 대부분이 열영향부이지만 접합재를 423K에

서 40ks이상 시효처리하면 인장시험후 모재부에서 파단될 정도로 접합강도가 향상된다<sup>12)</sup>. FSW방법으로 접합한 비시효성 5083 Al합금의 인장 및 굽힘시험(180°)후의 시편의 형상을 Fig. 18<sup>2)</sup>에 나타낸다. 인장시험후의 파단위치는 열영향부에서 어느 정도 떨어진 곳이며 굽힘시험 결과에서도 FSW접합부의 표면 및 이면 모두 접합이 양호함을 보여주며 시효성 6005 Al합금<sup>11)</sup> 및 7005 Al합금<sup>21)</sup>의 경우도 비슷한 경향의 굽힘성질을 나타낸다. 이처럼 FSW부의 인장 및 굽힘강도가 우수한 이유는 FSW부 중심부에 형성되는 미세한 재결정조직(약 3~5 $\mu$ m)의 형성과 밀접한 관련이 있으며 적합한 접합조건의 경우, 접합결함이 발생하지 않기 때문이라 할 수 있다.

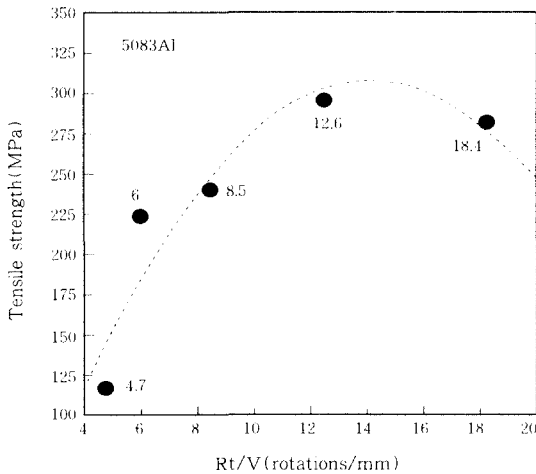


Fig. 16 Effect of Rt/V on tensile strength

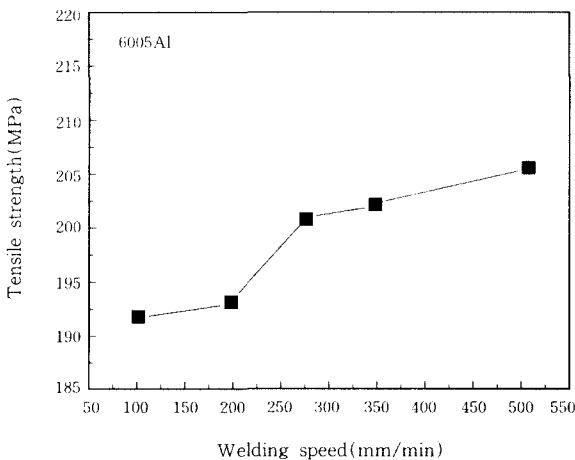


Fig. 17 Effect of welding speed on tensile strength

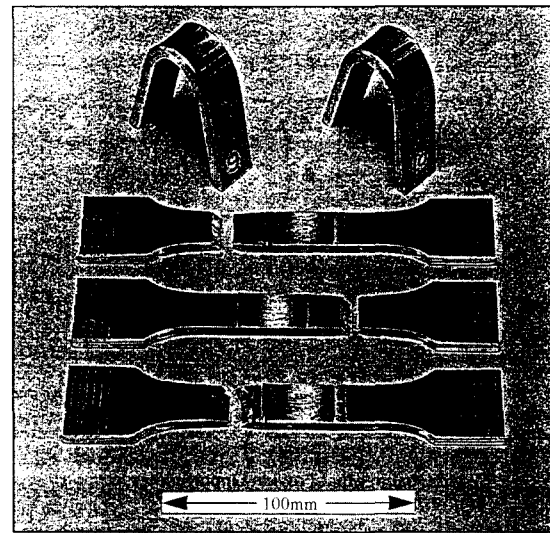


Fig. 18 A bend(180°) and tensile tested welds made in 5083Al welds

#### 5.2 산화물의 영향

6N01 Al합금 FSW부의 인장강도와 회전피치의 관계를 Fig. 19<sup>20)</sup>에 나타낸다. 회전피치 0.24~0.8mm/r의 범위에서는 MIG용접재 이상의 강도를 나타내며 파단위치도 전혀 산화물이 관여되지 않는 열영향부이다. 그러나 0.1 및 1.0mm/r의 회전피치에서는 강도가 전반적으로 저하하며 파단위치도 산화물이 생성되는 FSW부이며 1.0mm/r의 경우에는 파면에 접합결함이 나타난다. 이는 회전피치 0.1mm/r의 경우 마찰교반의 과잉으로, 1.0mm/r의 경우는 회전피치가 크므로 교반부족이 생겨 FSW부에 결함이 발생하기 때문이며 FSW결함이 발생하지 않는 FSW조건범위라면 인장강도에 미치는 ring상 또는 선상 산화물의 악영향은 없다<sup>20)</sup>고 볼 수 있다.

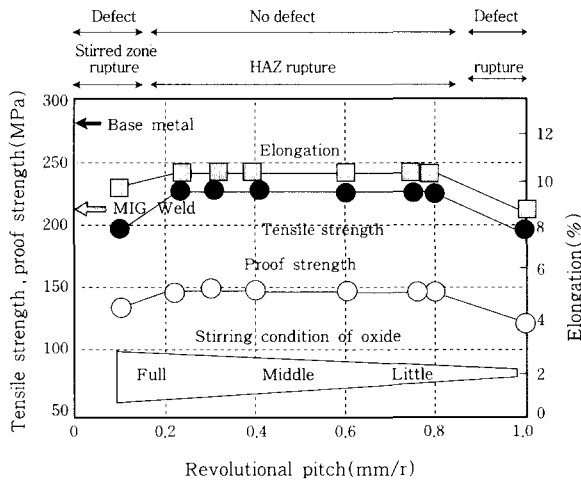
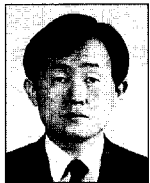


Fig. 19 Effect of revolutionary pitch on tensile properties

### 6. 맺는 말

FSW기술이 개발된지 약10년 정도 밖에 되지 않지만 Al합금 용접에의 적용은 매우 신속하여 철도차량, 선박, 항공우주기 등 경량화 및 고속화를 목적으로 하는 수송기 분야를 위주로 이미 사용되고 있다. 그동안 이러한 수송기 분야에의 FSW적용을 위한 여러 연구자들의 활발한 연구결과, 이상에서 기술했듯이 Al합금 FSW부의 기계적 특성에 영향을 미치는 미세조직(결정조직, 고용석출현상)에 관해서는 어느 정도 밝혀져 가고 있지만 FSW부 교반영역(SZ)에서의 동적 재결정립, onion ring의 생성기구 및 Al소재의 표면산화물 거동 등은 아직도 명확히 규명되지 않고 있다. 향후 이들을 면밀히 조사하여 이들 기구 및 거동이 밝혀진다면 FSW기술을 적용한 Al신제품 개발 및 제품의 신뢰성 향상에도 크게 기여할 수 있을 뿐만 아니라 FSW공정개선을 통한 FSW의 적용범위도 더욱 확대될 수 있으리라 생각된다.



- 연운모 (延倫模)
- 1953년생
- 수원과학대학 자동화용접과
- 마찰교반접합, 마찰용접
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr



- 이원배 (李阮培)
- 1973년생
- 성균관대학교 신소재공학과
- 마찰교반접합, 마찰용접
- e-mail : saba38@mail.skku.ac.kr

### 참고 문헌

1. C.J.Dawes : Welding & Metal Fabrication, 63(1995), pp.13-16
2. C.J.Dawes, W.M.Thomas : Welding J., 75-3(1996), pp.41-45
3. C.J.Dawes : Proc. of the 6th Int. Symp., JWS, (1996), Nagoya, pp.711-717
4. K.E.Knipstrom, B.Pekkari : Welding J., 76-9 (1997) pp.55-57
5. M.R.Johnsen : Welding J., 78-2(1999), pp.35-39
6. 岡村 久宜, 青田 炊也, 江角 昌邦 : 輕金屬, 50-4(2000), pp.166-172
7. 연운모, 정승부, 장웅성 : 대한용접학회지, 19-2(2001.4), pp.160-166
8. 연운모, 정승부 : 제3회 국방과학 학술대회 논문집(2000.9), pp.A39-46
9. 장웅성, 최기용, 강문진, 권영각 : 대한용접학회지, 18-6 (2000.12), pp.704-712
10. 연운모, 정승부, 박종목 : 한국철도학회 추계학술대회 논문집 (2000.11), pp.226-234
11. 이원배, 연운모, 정승부 : 대한용접학회 춘계학술발표대회 개요집, 37(2001), pp.117-119
12. 이원배, 연운모, 정승부 : 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, 1(2001), pp.245-248
13. 김성연, 연운모, 정승부, 서창제 : 대한용접학회 춘계학술발표대회 개요집, 37(2001), pp.120-121
14. 榎本 正敏 : 輕金屬溶接, 36-2(1998), pp.75-79
15. 佐藤 裕, 粉川 博之, 夏本 正敏, 成願 茂利, 橋本 武典 : 溶接學會全國大會講演概要 第68集(2001-4)pp.128-129
16. Y.S.Sato, H.Kokawa, M.Enomoto, S.Jogan : Metall. & Mater. Transaction A, 30-9(1999), pp.2429-2437
17. M.W.Mahoney, C.G.Rhodes, J.G.Flintoff, R.A.Spurling, W.H.Bingel : Metall. Mater. Trans.A, 29A-7 (1998), 1955-1964
18. Y.S.Sato, H.Kokawa, M.Enomoto, S.Jogan, T.Hashimoto : Metall. & Mater. Transaction A, 30-9 (1999), pp.3125-3130
19. 岡村 久宜, 青田 炊也, 坂本 征彦, 江角 昌邦, 池内 建二 : 溶接學會全國大會講演概要 第68集(2001-4)pp.130-131
20. 岡村 久宜, 青田 炊也, 坂本 征彦, 江角 昌邦, 池内 建二 : 溶接學會論文集, 19-3(2001)pp.446-456
21. 이원배, 방극생, 연운모, 정승부 : 대한금속·재료학회 추계학술대회 개요집(2001), pp.122



- 정승부 (鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 금속재료공학부
- 마이크로 접합, 마찰용접, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr