

## 수송기용 알루미늄 합금의 마찰교반점용접 적용 기술

천 창근·김 홍 주·장 응 성

## Friction Stir Spot Joining on Aluminum Alloy for Transportation

Chang-Keun Chun, Heung-Ju Kim and Woong-seong Chang

## 1. 서 론

최근 자동차나 항공기, 철도차량, 선박과 같은 수송기 산업에서 차체의 무게를 감소시켜 연비 향상과 배기 가스의 양을 줄이려는 목적으로 고강도 강판이나 알루미늄, 마그네슘, 플라스틱 등 경량재료를 이용한 구조화 기술에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다<sup>1,2)</sup>. 이러한 경량화 재료 중 알루미늄 합금의 사용이 가장 큰 폭으로 성장하고 있다. 알루미늄 합금은 철강 재료에 비해 비강성( $E/\rho$ )은 철과 거의 동등하나 비강도(specific strength)가 거의 2배이므로 구조재로 사용할 경우 경량화 효과가 크다. 하지만 열전도도 및 전기전도도가 철강 재료에 비해 3배 정도 높기 때문에 용접성에 영향을 미치게 된다. 자동차 산업에서 알루미늄 합금은 엔진 본체와 휠, 서스펜션암, 범퍼빔 등 구조재로 주로 사용되다가 최근에는 차체, 후드, 트렁크 리드 등 판재로 그 범위를 확대하고 있다<sup>3,4)</sup>. 알루미늄 압연재의 5000계열(Al-Mg)은 성형성이 우수하여 내판재로 주로 사용하고 6000계열(Al-Mg-Si) 합금은 열처리 도장에 의해 강도를 향상시켜 외판재에 사용한다. 항공기 산업에서 알루미늄 합금은 동체와 부품 등에 사용되며 강도가 우수한 A2024, A2524와 같은 2000계열(Al-Cu) 합금과 7000계열(Al-Zn-Mg) 합금이 주로 사용된다. 철도차량 용접구조용 알루미늄 재료는 6000계열(Al-Mg-Si) 및 A5083합금이 주로 사용되는데 6000계열은 압출이 용이하여 압출재로 사용되며 압출하기 어려운 부분에는 A5083 압연재를 사용하는 것이 일반적이다. 국내 철도차량에서 사용하는 알루미늄 압출재는 대부분 A6005를 T6열처리 하여 사용하고 있다.

한편 이러한 알루미늄 합금 판재에 저항점용접과 같은 용융 용접을 적용할 경우 몇 가지 문제점이 있는 것으로 알려져 있는데 저항점용접을 사용하여 알루미늄 합금을 접합할 경우 스틸에 비해 높은 전류가 필요하여

용접시스템의 설비비와 유지비가 상승과 산화피막과 전극과의 반응에 의한 잦은 드레싱으로 인한 전극수명 저하 요인이 있다. 또한 용융 응고과정에서 수소가 고용되지 못하여 발생하는 기공, 과도한 수축응력에 의한 응고결함 등이 있다<sup>5,6)</sup>. 그리고 리벳과 같은 기계적인 체결 방법을 적용할 경우 단가 상승이 문제가 된다. 따라서 최근에는 일본의 자동차사에서 알루미늄이 적용되는 트렁크나 본넷, 도어 등 차체의 무빙 파트에 마찰교반점용접 기술을 일부 적용하고 있으며 철도차량 제작사에서도 차체 일부분인 스커트 등에 적용하고 있다고 한다. 하지만 이러한 마찰교반점용접기술이 아직 국내 자동차사나 철도차량, 항공기 회사에서 적용하고 있는 실적은 없다.

이에 본지에서는 마찰교반점용접 기술에 대한 원리 및 시스템 특징에 대하여 설명하고 본 기술을 적용하고자 할 때 필요한 틀 설계 방법과 공정인자의 영향에 대하여 고찰한다. 그리고 수송기용 알루미늄 합금 소재에 대한 동종 및 이종용접에 대한 다양한 연구결과를 소개하고자 한다.

## 2. 마찰교반점용접 기술 개요

## 2.1 접합 공정 및 원리

마찰교반점용접의 공정은 그림 1에서와 같이 크게 4구간으로 나누어 접합이 진행된다.

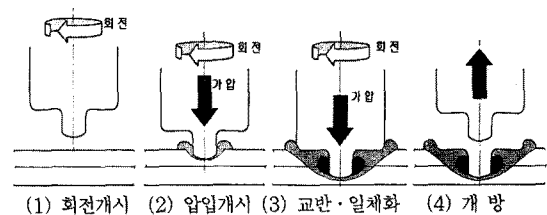


그림 1 마찰교반점용접 공정

(1) 접합 틀이 접합하려는 모재의 표면에 수직 부분에 위치한 후 적절한 속도로 회전한다.

(2) 회전하는 접합 틀이 저절 한 하중을 가지고 모재 표면을 눌러 마찰열을 발생한다. 마찰열이 발생하면 모재는 가열되어 연해져 틀 프로브(probe)가 재료 속으로 들어간다.

(3) 틀 프로브가 완전히 모재에 삽입되면 틀 솔더(shoulder)에 의해 더 많은 마찰열이 발생하고 솔더 직하 및 프로브 주위에서는 연화된 소재가 프로브의 회전방향과 수직방향으로 소성유동이 발생하여 교반이 이루어진다.

(4) 일정 시간이 지나면 접합 틀이 모재로부터 빠져나오고 접합이 완료된다.

2.2 접합부 조직

마찰교반점용접의 접합부는 그림 2와 같이 마찰교반용접과 유사하게 교반부(stir zone) A, 기계적 열영향부(thermo-mechanically affected zone) B, 열영향부(heat affected zone) C, 모재부(base meta) D로 구분되어진다. 교반부는 접합 중 모재와 틀 솔더의 마찰로 인해 열이 발생하고 틀 핀에 의한 기계적인 교반으로 소성유동에 의한 동적 재결정이 일어나 미세한 조직을 형성한다. 기계적 열영향부는 틀의 마찰열과 핀의 기계적인 영향을 간접적으로 받아 일부 동적 회복(dynamic recovery)이 일어나는 곳과 회전하는 방향을 따라 조직의 일부가 연신되어 거동이 같고리 형상을 한 "kissing bond"가 관찰된다. 기계적 열영향부 바로 옆에는 타 용접방법에서도 흔히 관찰할 수 있는 열영향부가 관찰되며 마찰열에 의한 영향을 받아 모재에 비해 결정립이 조대해져 관측된다.

2.3 마찰교반점용접 틀

마찰교반점용접에 사용되는 일반적인 틀의 형상은 그림 3에서와 같이 크게 솔더(shoulder)와 프로브(probe)로 나누어지는데 솔더는 접합시 발생하는 마찰

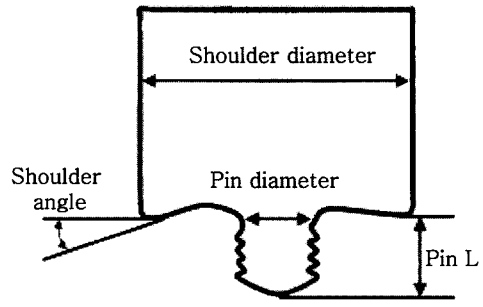


그림 3 마찰교반점용접 틀

열의 80~90%를 발생시키며 접합할 때 발생하는 재료의 상하유동 시 방출을 막아 교반이 이루어지도록 하는 역할을 수행한다. 접합하는 소재의 종류 및 두께에 따라 솔더 각을 조정하는 데 통상 5~12° 정도로 설계하면 적절하다. 프로브의 형상은 접합 시 재료의 상하 및 회전방향으로 직접적인 유동을 발생시키는 역할을 수행하며 다양한 모양으로 설계되어질 수 있다. 프로브의 길이는 소재의 두께 및 종류에 따라 달리 설계되지만 동일한 강종 및 두께의 경우 통상적으로 두 모재 두께의 65~80% 정도로 설계하여 제작된다. 틀의 소재 선정은 알루미늄이나 마그네슘과 같은 비철금속에 본 접합방법을 적용하는 경우 일반 공구강(SKD, SKH)에 열처리하여 사용하는 것이 일반적이며 스틸과 같이 용점이 높고 고강도 소재의 접합에는 초경합금(WC) 또는 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), PCBN(Poly Crystalline Boron Nitride)등을 사용하고 있다<sup>7)</sup>.

2.4 마찰교반점용접 시스템

소재를 겹쳐놓고 점 접합하는 방법은 크게 기계적인 접합과 용접 두 가지로 나눌 수 있다. 일반적인 기계적 접합 방법에는 리벳이나 셀프피어싱 리벳, 클런칭 등이 있으며 이러한 기계적인 방법의 가장 큰 장점은 접합부 강도가 매우 크며 접합할 때 작업환경이 깨끗하다는 것이다. 단점은 접합 비용이 증가하며 사전에 접합부 구멍을 내야하는 공정이 있으므로 작업시간이 과도하다는 것이다. 따라서 이러한 단점이 장점보다 크기 때문에 실제 점 접합을 사용하는 제조공정에는 저항점용접을 사용하는 것이 일반적이고 이중용접과 같이 저항점용접의 적용이 어려울 경우 기계적인 접합을 사용한다. 저항 점 용접 시스템의 구성은 그림 4에서와 같이 용접시 발생하는 높은 전류를 발생하는 전원반과 전극을 가압하는 압력 조정기, 전극을 냉각하기 위한 냉각수 배관, 오염된 전극을 손질하는 팁 드레서(tip dresser), C 프레임을 이동시키는 로봇 등 매우 복잡한 구조로



그림 2 접합부 조직

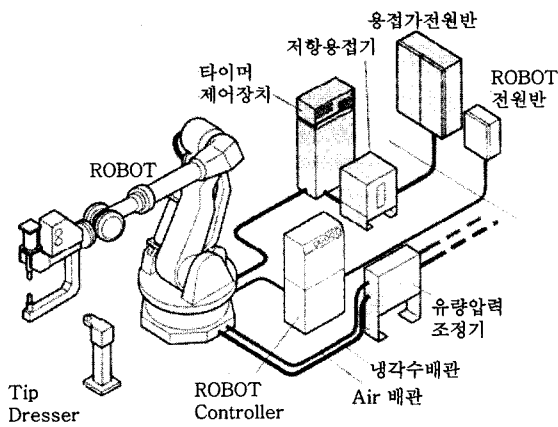


그림 4 저항점용접 시스템

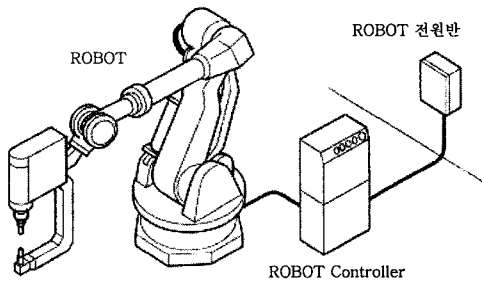


그림 5 마찰교반점용접 시스템

연결되어 있다. 경량고속과 같이 고전류 및 단시간 조건에서 용접이 필요한 경우 용접전원장치가 대형화되어야 하며 잦은 드레싱으로 인한 전극수명 저하 등의 문제점이 있다<sup>8,9)</sup>.

반면에 마찰교반점용접시스템은 그림 5에서와 같이 C 프레임을 이동시키는 로봇과는 별도로 접합 틀 회전을 위한 서보모터 1개와 틀의 축 방향 이동을 위한 서보모터 1개만 용접장치에 설치하고 로봇 제어기에 서보모터 제어를 추가 설치하는 매우 간단한 시스템 구성이 이루어진다. 또한 접합에 사용되는 접합 틀의 수명이 약 1,000,000 타점 정도가 예상되므로 틀을 정비하기 위한 추가적인 설비가 필요 없다. 따라서 전체적인 설비 구성이 간단하여 향후 예상되는 정비수가 줄어들 뿐만 아니라 설비비용도 저렴해지는 장점이 있다. 또한 접합 시 소요되는 에너지가 마찰열이므로 작업환경이 양호하고 접합 비용이 저항점용접에 비해 1/20 또는 그 이하라고 보고되고 있다<sup>8)</sup>.

### 2.5 공정인자

마찰교반점용접에서 접합부 강도에 영향을 미치는 공정인자는 솔더 직경이나 프로브 직경, 솔더 각도, 프로

브 길이 등과 같이 한 번 제작하면 조절할 수 없는 틀 사양과 같은 조절 불가능 공정인자와 틀 회전속도와 접합시간, 삽입깊이 등 작업자가 시험하면서 조절할 수 있는 조절 가능 공정인자, 접합 시 틀의 표면 온도나 Backing Plate 재질 및 표면온도, 스펀들 축 상태, 치구의 견고성과 같은 노이즈 공정인자로 구분될 수 있다. 따라서 사용용도에 맞게 프로세스를 설계하여야 한다.

그림 6은 설계 가능한 다양한 마찰교반점용접 틀의 프로브 형상을 보여주는 것으로 원통모양의 Regular 프로브에 나사산을 새겨 사용하는 것이 일반적이지만 Square나 Delta 모양의 프로브 등을 사용하는 데 Regular 프로브에 비하여 한정된 조건에서 인장전단강도는 높게 발생할 수 있으나 적절한 공정인자의 조정 폭은 좁은 것이 일반적이다. 그림 7은 이러한 프로브 형상별로 접합부 십자인장강도를 나타내는 것으로 본 연구결과에서는 Triangular 형상의 프로브를 사용한 결과 십자인장강도가 가장 크다고 보고 하였다<sup>10)</sup>.

그림 8은 솔더 또는 프로브의 직경과 솔더각 변경에 따른 인장전단강도의 변화를 나타내는 것으로 틀 사양 변경에 따라 접합부 인장전단강도가 각각 다르게 나타나는 것이 관측되었다. 솔더 직경의 크기가 변경되면 발생하는 마찰열과 표면으로부터 발생하는 소성유동의 양이 달라져 소재 내부 단면 조직에 영향을 미치게 되며 프로브 직경의 변화도 소재 내부에서 발생하는 소성유동의 크기를 변화시키는 역할을 수행하므로 교반영역의 크기에 영향을 미치게 되어 접합부 크기가 달라진다. 또한 솔더각 변경은 접합 소재 상판과 하판 계면에

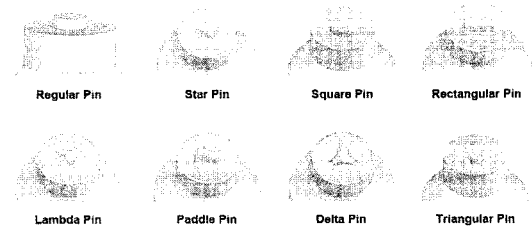


그림 6 마찰교반점용접 틀 핀 형상

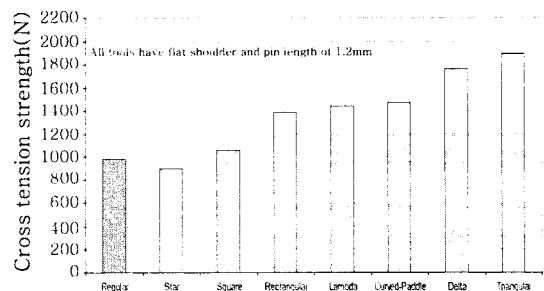


그림 7 틀 핀 형상에 따른 접합부 십자인장강도

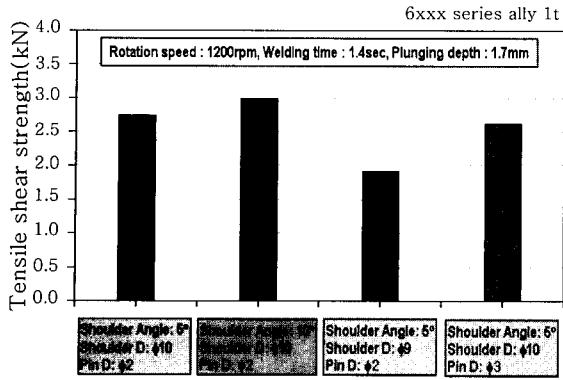


그림 8 틀 크기와 숄더각에 따른 인장전단강도

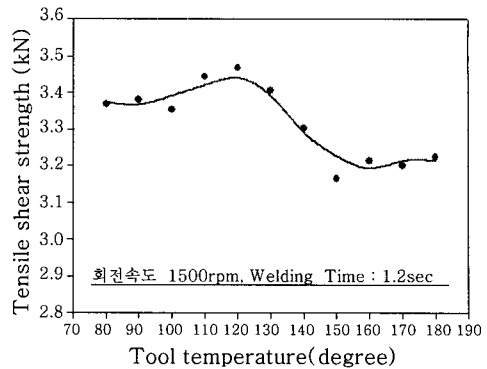


그림 10 틀 표면온도 변화에 따른 인장전단강도

서 나타나는 “kissing bond”의 형상 및 길이에 영향을 미쳐 접합부 강도가 다르게 나타나는 것으로 설명된다.

그림 9는 접합 틀이 만들어진 후 조절 가능한 대표적인 공정인자인 틀 회전속도와 접합시간, 삽입깊이가 접합부 인장전단강도에 미치는 효과를 실험계획법(DOE)에 의해 정량적으로 분석한 결과를 나타내는 것으로 틀 회전속도가 접합시간이나 삽입깊이보다 인장전단강도에 미치는 영향이 상대적으로 커서 주요 공정인자임을 알 수 있다. 또한 틀 회전속도가 증가하면 인장전단강도가 급격하게 떨어지는 현상이 발생하는데 이는 접합 시 발생하는 소재 내부 유동이 “kissing bond”의 형상을 변화시켜 접합부 강도에 영향을 미친다.

두께가 1mm 정도 얇은 소재를 마찰교반용접 시 소재 뒷면에서 소재를 지지하는 Backing Plate의 소재 종류가 열전달 특성 때문에 접합성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 마찰교반용접도 이와 비슷한 현상이 발생하며 Backing Plate 온도와 더불어 틀의 표면온도도 접합부 강도에 영향을 미친다. 그림 10은 틀의 표면온도 변화에 따른 접합부 인장전단강도를 나타

내는 것으로 틀의 표면온도가 120℃까지 상승할 때까지 인장전단강도도 증가하다가 이후 120℃이상 구간에서는 인장전단강도가 감소하는 것으로 나타났다. 마찰교반용접에서 이와 같이 틀 표면 온도가 인장전단 특성에 영향을 미치는 이유는 틀에 남아있는 열량과 새로이 발생하는 마찰열이 동시에 부재에 가해져 접합부에 가해지는 전체 입열량을 변화시키기 때문인 것으로 사료된다. 일반적으로 자동차 제조공정에 사용되는 점 용접 시간 간격은 1~3초 주기로 반복하는 데 마찰교반용접에도 동일한 주기로 점용접을 실시하면 틀의 표면온도는 약 180℃ 정도 일정하게 유지되고 접합부 인장전단강도도 최고점 대비 약 8% 떨어지는 현상이 발생한다. 따라서 이를 고려하여 에어와 같은 틀 냉각장치가 동반된다면 인장강도는 조금 상승시킬 수 있을 것이다.

### 3. 마찰교반용접 시험 결과

#### 3.1 알루미늄 압연재 동종

자동차용 알루미늄 압연재는 생산하는 회사별로 기계적 특성을 증가시킨 다양한 종류가 생산되지만 주로 5000계열과 6000계열 합금이 사용되고 있다. 이 중에서 A5052와 A6022는 내판재와 외판재로 사용되는 대표적인 소재이므로 동종 또는 이종 용접이 필요하게 된다. 그림 11은 두께 1mm A5052와 A6022 소재를 마찰교반용접을 이용하여 동종 접합을 실시한 단면조직을 나타내는 것으로 두 소재 모두 회전속도 1,000 rpm, 삽입깊이 1.7mm, 접합시간 2sec로 동일한 조건으로 실험한 결과이다. 두 경우 모두 접합부 단면에서 교반부와 기계적 열영향부, 열영향부가 뚜렷하게 관측되었으며 내부 및 표면에 크랙이나 홀이 없는 양호한 접합이 이루어졌다. 또한 A5052 소재 접합이 A6022 소재 접합보다 소성유동이 더욱 활발히 일어난 결과 교

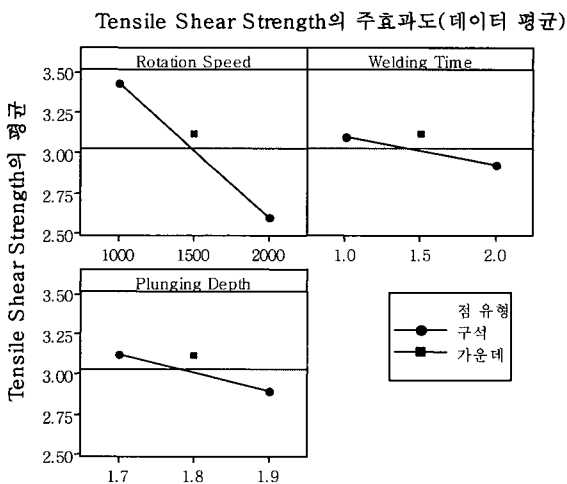


그림 9 인장전단강도의 주효과도

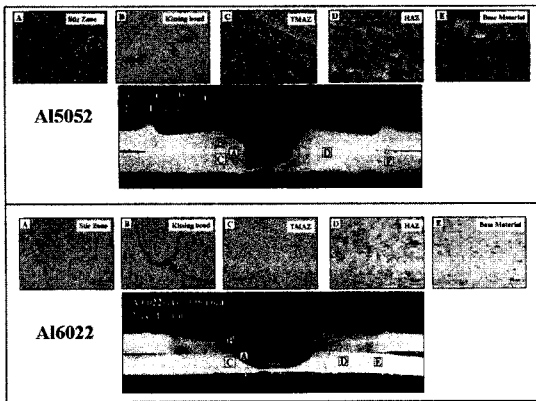


그림 11 알루미늄 압연재 동종 접합부 단면

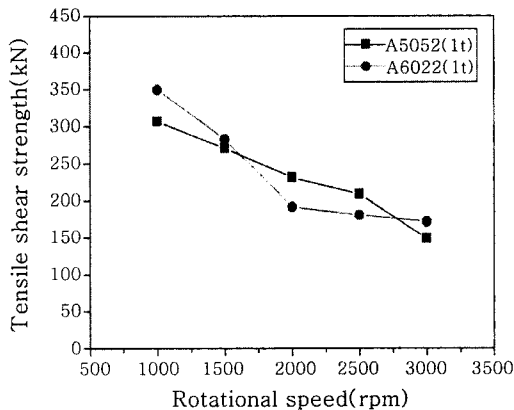


그림 12 알루미늄 압연재 동종 인장전단강도

반부 면적이 크게 나타나있는 것이 관측되었다.

그림 12는 동종 접합부의 인장전단강도를 나타내는 것으로 두 소재 모두 알루미늄 합금의 저항 점 용접 강도 표준 규격 JIS Z 3140에서 제시한 크기보다 약 150~200% 높게 나타났다. 모재 강도가 더 높은 A6022의 접합보다 A5052 접합부의 인장전단강도가 더 높게 나타나는 조건 구간이 발생하였는데 그 이유는 크게 두 가지로 설명 가능하다. 첫째 열처리된 6000계 알루미늄 합금이 접합 시 발생하는 온도 상승 및 하강에 의한 열처리 효과가 사라져 소재의 기계적인 물성이 저하되기 때문이다. 둘째는 접합 후 접합 단면 형상 때문인데 그림 11의 단면 사진에서 관찰한 바와 같이 A5052 동종 접합의 경우 접합이 이루어지는 온도에서의 소성유동과 소재의 변형이 A6022 동종 접합에 비하여 작게 발생하여 접합부 단면적이 증가하기 때문이다.

3.2 알루미늄 압연재 이종

그림 13은 A5052와 A6022 소재의 이종 마찰교반

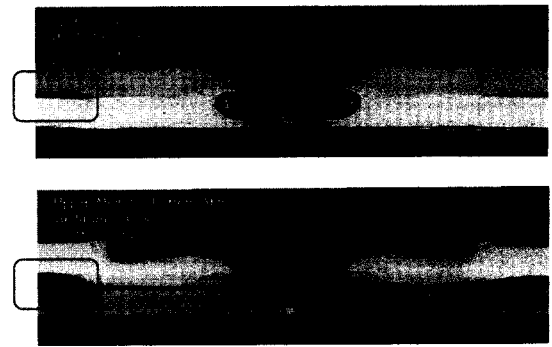


그림 13 알루미늄 압연재 이종 접합부 단면

용접 실시 단면 조직을 나타내는 것으로 상판이 A5052일 때와 A6022 일 때의 결과를 비교한 것이다. 동종 접합의 단면조직에서와 같이 상판이 A5052일 경우 A6022일 때보다 틀의 압흔 자국이 더욱 선명함과 동시에 열 변형이 심하게 나타났다. 하지만 두 경우 모두 프로브 주위에서 교반 영역이 발생하는 양호한 접합부 형상을 보인다<sup>11)</sup>.

A5052와 A6022의 이종접합의 인장전단강도는 그림 14에서와 같이 상판이 A6022인 경우가 반대의 경우보다 전반적으로 높게 나타났으며 이는 고온에서의 소재 변형이 A5052 소재가 A6022 보다 많은 것이 직접적인 원인인 것으로 판단된다.

3.3 알루미늄 압출재 동종

국내 수송기용 알루미늄 압출재는 주로 철도차량의 차체 제조에 사용되며 주요 소재는 A6005를 T6열처리 하여 사용하는 것이 일반적이다. 그림 15는 두께 2.8mm A6005-T6 소재를 솔더 직경  $\Phi 15$ , 프로브 직경  $\Phi 5$ , 솔더각 6°, 프로브 길이 4.5mm의 틀을 이용하여 마찰교반점용접한 단면사진을 나타내는 것으로 교반부는 제법 뚜렷하게 관측되었으나 기계적 열영향부와

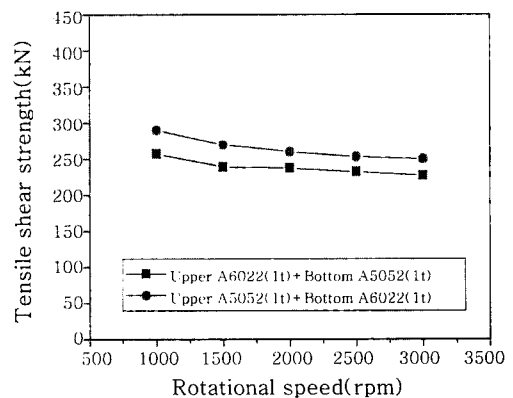


그림 14 알루미늄 압연재 이종 인장전단강도

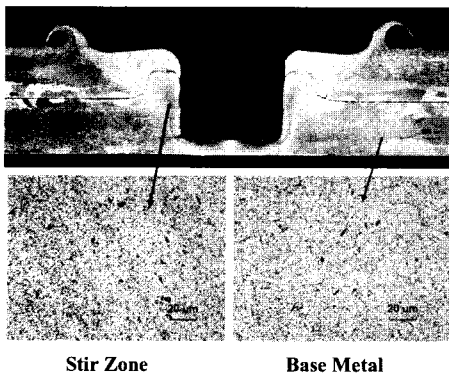


그림 15 알루미늄 압출재 접합부 단면

열영향부는 매우 희미하게 보이며 자세히 관측하면 모재의 결정립과 교반부의 결정립 크기는 제법 차이가 남을 알 수 있었다. 압출재도 압연재와 같이 접합부 표면 및 내부에 크랙이나 홀은 관측되지않는 양호한 접합이 이루어졌다.

그림 16은 접합부 단면의 경도 분포를 나타내는 것으로 상부와 하부로 나누어 측정된 것이다. 실험에 사용된 알루미늄 합금이 열처리한 석출경화형 합금이므로 모재보다 접합부 경도가 전체적으로 떨어지는 현상이 발생되었으며 열영향부는 마찰열에 의해 조직이 성장하여 경도가 많이 떨어지나 열영향부를 지나 교반영역에서의 경도는 모재 경도의 약 80%로 약간 회복되었다.

### 3.4 알루미늄-스틸 이종

스틸은 경제성은 물론 기계적 성질이 우수하여 종래 수송기용 재료로 많이 사용되어지고 있으므로 이러한 스틸과 수송기용 알루미늄 합금의 적절한 조합을 위한 구조화 기술이 필요하다. 하지만 스틸과 같이 강도가 우수한 소재에 알루미늄 합금과 같은 비철금속에 적용하는 마찰교반점용접 기술을 그대로 적용하면 접합 톨

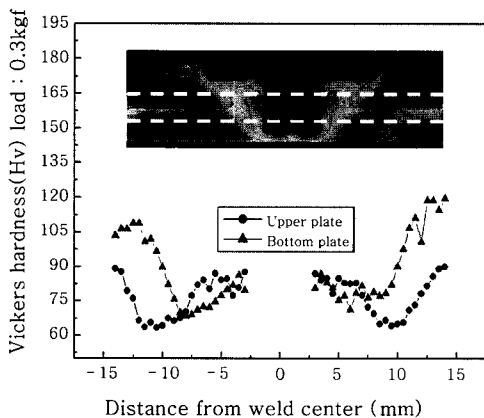


그림 16 알루미늄 압출재 접합부 경도

의 수명이 매우 짧아 비경제적이다. 따라서 최근에는 Koji 등과 같이 스틸을 관통하지 않고 마찰교반점용접하는 방법을 제안하는 사례가 늘고 있다. 그림 17과 같이 Koji 등은 알루미늄합금을 스틸 상부에 위치한 후 접합 톨 프로브가 상부 알루미늄 합금 두께의 약 90%만 관통하게 한 후 적절한 톨 회전속도를 가하여 시험하였다. 시험 결과 프로브 직하 두 소재의 표면에 존재하는 산화층이 파괴되어 원자간의 확산이 발생하여 그림 18과 같이 동일한 두께의 알루미늄 합금의 저항 점용접 필요 강도보다 우수한 3.6kN/weld의 인장전단강도를 얻었다고 한다. 또한 이종용접의 접합계면에서 흔히 발생하는 금속간 화합물이 발생하지 않고 2~4nm의 아몰퍼스 층(amorphous layer)이 발생하여 양호한 접합이 이루어졌다고 설명하였다<sup>12)</sup>.

### 4. 맺는 말

최근 국제학회나 세미나 등에 마찰교반점용접기술에 관한 연구내용이나 적용 사례 등이 점차 많이 보고되고 있을 뿐만 아니라 국내 자동차사와 철도차량 제작사에서 본 접합기술에 대한 관심이 고조되고 있는 것 같다. 이러한 사례로 보아 마찰교반점용접기술이 종래의 점용접기술에 비해 매력적인 기술임이 틀림없는 것 같

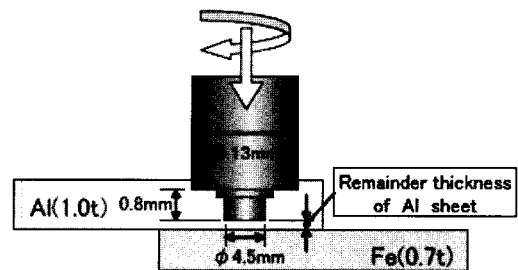


그림 17 알루미늄과 스틸의 이종용접

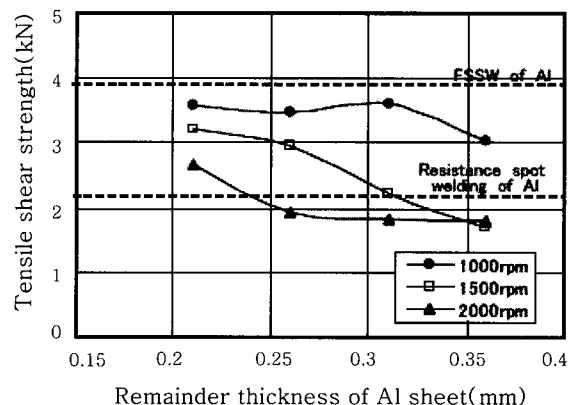


그림 18 알루미늄과 스틸의 이종 인장전단강도

다. 따라서 본 지에서는 마찰교반점용접기술에 대한 전반적인 특징과 연구결과를 고찰하였다. 검토 결과 마찰교반점용접기술은 타 용접방법 또는 기계적 체결방법에 비하여 우수한 경제성을 보유하고 있다고 판단되었다. 접합성 시험결과 알루미늄 압연재 및 압출재의 동종과 이종용접의 접합성은 타 점용접 방법에 비하여 우수한 접합성이 도출되었으며 알루미늄과 스틸의 이종용접에 대해서는 추가적인 연구가 필요하지만 비교적 긍정적인 결과가 도출되었다. 한편 현재 마찰교반점용접기술이 많은 장점이 있음에도 불구하고 아직 폭발적으로 보급되지 못하고 있는 것은 몇 가지 원인이 있는 데 대표적인 원인이 알루미늄이나 마그네슘 같은 경량 합금의 사용률이 아직 스틸에 비하여 현저히 떨어지기 때문인 것 같다. 또한 이러한 소재 사용의 비율이 향후 급격히 변화되리라고도 예측되지 않으며 한동안은 알루미늄 합금과 스틸의 공존이 계속될 것으로 예측되므로 본 기술이 지금보다 더 적극적으로 실용화되기 위해서는 알루미늄과 스틸, 알루미늄과 마그네슘과 같은 이종 소재 용접 기술에 관한 연구 개발에 초점이 맞춰져야 될 것 같다.

### 참 고 문 헌

1. Woong-Seong Chang, Ki-Yong Choi, Sook-Hwan Kim and Young-Gak Kweon : Some Aspects of Friction Stir Welding and Its Application Technologies, Journal of KWS, **19-6** (2001), 575-583 (in Korean)
2. Yun-Mo Yeon, Won-Bae Lee and Seung-Boo Jung : Microstructures and Characteristics of Friction-Stir-Welded Joints in Aluminum Alloys, Journal of KWS, **19-6** (2001), 584-590 (in Korean)
3. Hyeon-Jin Cho, Heung-Ju Kim, Chang-Keun Chun and Woong-Seong Chang : Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Al Alloys for Automotive, Journal of KWS, **24-4** (2006), 285-289 (in Korean)
4. Heung-Ju Kim, Chang-Keun Chun, Sook-Hwan Kim and Woong-Seong Chang : Microstructures and Mechanical Properties of the Friction Stir Welded Dissimilar Joint of AZ31B/A6061, Journal of KWS, **24-4** (2006), 290-294 (in Korean)
5. Yun-Mo Yeon, Chang-Yong Lee, Won-Bae Lee, Seung-oo Jung and Keun Song : Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A5052 Alloy Sheet, Journal of KWS, **24-1** (2006), 71-76 (in Korean)
6. Yun-Mo Yeon, Chang-Yong Lee, Won-Bae Lee, Seung-Boo Jung and Woong-Seong Chang : Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminum Alloys, Journal of KWS, **23-3** (2005), 228-232 (in Korean)
7. Ryoji Ohashi, Mitsuo Fujimoto, Shinji Koga, Rinsei Ikeda and Moriaki Ono : Friction Spot Joining of Steel Sheets with Silicon Nitride Tool, Proceeding 7th International Symposium on Friction Stir Welding Conference, Kobe, Japan, 2008
8. Kawasaki Robot : Introduction of Joining Process and Production Systems, 2004, 1-13
9. R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. Nagao, H. Kashiki : Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members, 3rd International Friction Stir Welding Symposium, September, 2001, 27-28
10. H. Badarinarayan, Q. Yang, F. Hunt and K. Okamoto : Effect of Pin Geometry on the Joint Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloys, Proceeding 7th International Symposium on Friction Stir Welding Conference, Kobe, Japan, 2008
11. Chang-Keun Chun, Heung-Ju Kim, Teuk-Gee Kim and Woong-Seong Chang : Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32/A6022-T4, Journal of RIST, **21-2** (2007), 153-159 (in Korean)
12. Koji Tanaka, Masaki Kumagai and Hideo Yoshida : Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stir Spot Welding, Proceeding 7th International Symposium on Friction Stir Welding Conference, Kobe, Japan, 2008



- 천창근
- 1968년생
- 포항산업과학연구원
- 마찰교반용접, 초음파, 용접공정 기술
- e-mail : ckchun@rist.re.kr



- 김홍주
- 1975년생
- 포항산업과학연구원
- 교상용접 응용기술, 용접부 구조해석
- e-mail : welding@rist.re.kr



- 장웅성
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철 용접성, 신용접용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr