

## 자동차용 경량 비철 소재의 마찰교반접합 기술 동향

최 돈 현 · 연 윤 모 · 정 승 부

### Friction Stir Spot Welding of Light Non Ferrous Metal for Automobile

Don-Hyun Choi, Yun-Mo Yeon and Seung-Boo Jung

#### 1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화에 대한 관심이 고조되면서 자동차 산업계에서도 제조 단가는 일부 상승하더라도 환경공해가 적고 연비효율이 높은 자동차를 개발해야 한다는 인식이 증가하고 있다. 이에 발맞추어 최근 자동차 개발 추세는 소형화·경량화·연비향상·고성능화·고안전화 등을 목표로 하고 있으며 따라서 자동차 경량소재 및 부품 관련 산업 또한 꾸준히 증가하고 있는 상황이다. 자동차의 경량소재 기술은 1) 자동차 부품의 콤팩트화를 위한 설계 및 해석 기술, 2) 기존 소재를 경량소재로 대체하기 위한 신경량소재 개발로 나눌 수 있다. 차체 설계 및 해석 기술의 경우 차체 경량화의 일정 부분에 대해서 영향을 미칠 수 있으나 가장 큰 영향을 미치는 부분은 근본적으로 차체 재료 즉 소재의 경량화가 가장 큰 것으로 알려져 있다.

자동차 경량 소재 및 부품관련 산업에서는 전통적인 자동차 소재인 철강 재료 등을 박육화 하거나 또는 경량소재(알루미늄·마그네슘·플라스틱)로 대체하는 기술이 핵심 기술로 부각되고 있으며 소재별로 나누었을 때 자동차 경량화 재료의 분류는 하기와 같이 나눌 수 있다<sup>1)</sup>.

- 박육 철강 소재 : HSST, UASS, STS, TRIP 등
- 경량 비철 소재 : 알루미늄, 마그네슘, 티타늄 등
- 고분자 소재 : 엔지니어링 플라스틱 등

이중 알루미늄 및 마그네슘 합금은 자동차 경량화에 따라 차체 재료로서 차지하는 비중이 점차 늘어나고 있는 추세이며 유럽 알루미늄 협회의 자료에 의하면 알루미늄 사용량이 유럽 자동차 시장에서 1990년 50kg에서 2010년에는 132kg으로 증가한 것으로 발표하였다<sup>1)</sup>. 또한 마그네슘 합금의 경우 미국 자동차 산업에서는 1990년 초에는 차량 한 대당 약 1.2kg의 마그네슘 합

금을 저용하였으며 그 사용량이 매년 15% 이상씩 증가하고 있는 추세로 발표되었다. 또한 산·학·연 컨소시엄(USAMP)을 구성하여 파워트레인, 인테리어, 차체 부품에 대한 적용을 추진하고 있으며 또한 'Magnesium Vision 2020'을 통해 마그네슘 합금 소재의 적용량을 2005년 5kg/대에서 2020년 160kg/대로 확대하기 위한 연구개발을 수행하고 있는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

하지만 알루미늄 합금은 강판에 비해 열전도도 및 비열이 높고 전기저항이 낮아 발열하기 어려우면서도 열이 방출되기 쉬워 용접하기가 쉽지 않았다. 이 때문에 기존의 점용접 기술로 알루미늄 합금 판재를 용접하는 경우, 고전류·고가압력·단시간의 용접이 필요하여<sup>2)</sup> 용접주변설비의 대형화가 요구된다. 또한, 알루미늄 합금 표면상에 존재하는 산화피막과 전극과의 반응에 의해 전극수명이 저하하는 문제점이 발생한다는 문제점이 있다<sup>3)</sup>. 또한 마그네슘 합금 판재의 경우에도 용접시 마그네슘 합금의 발화 문제, 용접부내에 생성되는 높은 잔류응력 및 기공 등의 문제점이 있다<sup>4)</sup>.

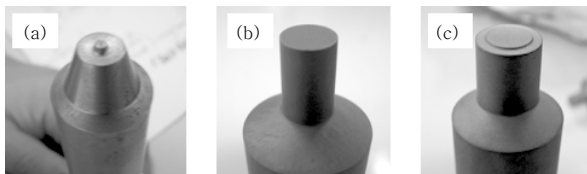
한편 2001년에 마찰교반접합법(Friction Stir Welding: FSW)의 원리를 응용한 마찰교반 접합(Friction Stir Spot Welding: FSSW) 기술이 개발되어 자동차 차체용 알루미늄 및 마그네슘 합금을 고상상태로 접합할 수 있는 새로운 점접합기술로서 주목받고 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 고상접합법이므로 접합부에서 용융이 발생하지 않기 때문에 기존의 용융 용접에 비해 많은 장점을 지니고 있으며, 가장 큰 장점으로는 주조 후 응고조직이 가지는 결함으로부터 자유롭기 때문에 기계적 특성이 매우 우수하다는 것이다. 이러한 장점을 바탕으로 현재까지 알루미늄 및 마그네슘 합금의 마찰교반접합에 대해서 많은 연구 결과가 보고되고 있으며<sup>5-13)</sup> 선진국의 경우에는 자동차의 후드, 트렁크, 도어 및 루프 등의 접합 부분에서 실용화 되고 있는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 알루미늄 및 마그네슘 합금의 마찰교반점접합에 있어서 지금까지 보고된 연구 결과를 조직 및 기계적 특성을 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

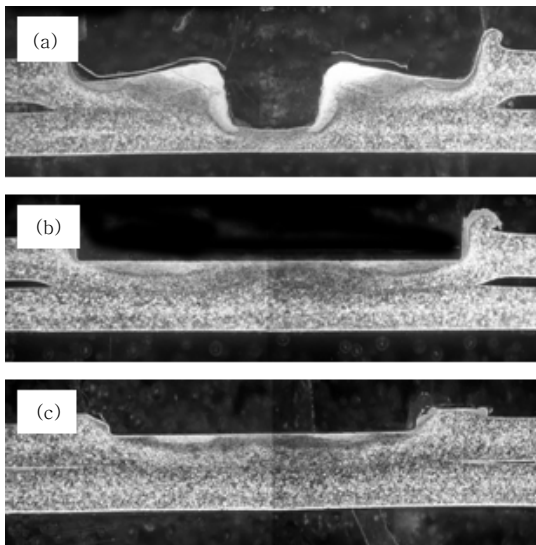
## 2. 알루미늄 합금의 마찰교반점접합

마찰교반점접합의 경우 전기저항점용접과 달리 회전하는 틀에 의하여 접합이 이루어지기 때문에 이러한 틀의 형상이 접합부의 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. D.H.Choi 등은 다양한 형상을 지니는 틀을 이용한 AA5J32 판재의 마찰교반점접합 결과를 보고하였다<sup>14)</sup>. Fig. 1에는 다양한 형상을 지니는 틀 형상을 나타내고 있다.

이러한 3종류의 형상을 지니는 틀을 이용하여 마찰교반점접합된 AA5J32 접합부의 단면 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 모든 접합 조건에서 접합부내에는 결함 및 크랙 등은 관찰 되지 않았으며 그림에서 보는 바와 같

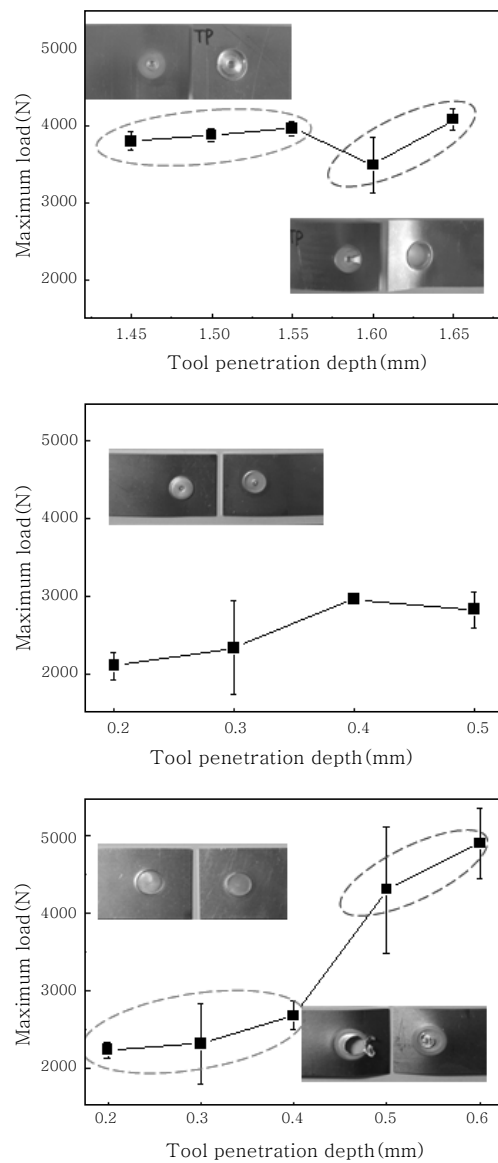


**Fig. 1** Shape of FSSW tool (a) TPT (Threaded Pin Tool), (b) CT (Cylindrical Tool) and (c) CTP (Cylindrical Tool with Projection) tools



**Fig. 2** Cross-sectional macro images of FSSW joints according to the tool geometry at selected tool penetration depths: (a) TPT, (b) CT and (c) CTP

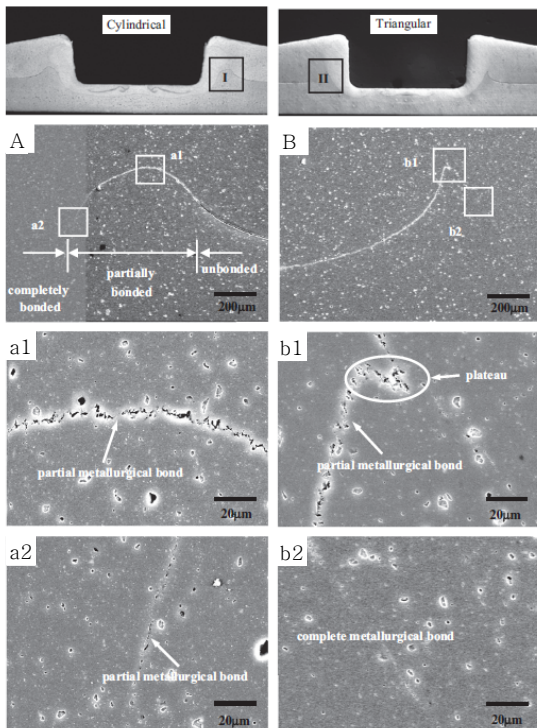
이 틀 형상에 따라서 접합부 단면의 형상은 서로 다른 형상을 나타내는 것을 관찰 할 수 있었다. TP 틀의 경우 삽입된 핀 주변부 부분으로 일부 교반 영역이 관찰이 되며 그 주변으로 상판과 하판이 압착되어 접합부를 형성하는 것을 관찰 할 수 있다. 하지만 CT 틀과 CTP 틀의 경우 접합부는 교반에 의해 접합된 형상보다는 마찰열과 압력에 의하여 압착에 의해 접합된 형상을 나타내고 있다. 각 틀 형상이 접합의 전단 강도에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. TP 형태 틀을 이용하여 접합하였을 경우 삽입 깊이에 따른 접합부의 전단 강도의 차이는 크지 않는 것을 관찰 할 수 있으며 삽입 깊이가 1.60mm를 기준으로 이보다 낮은 삽입 깊이에서는



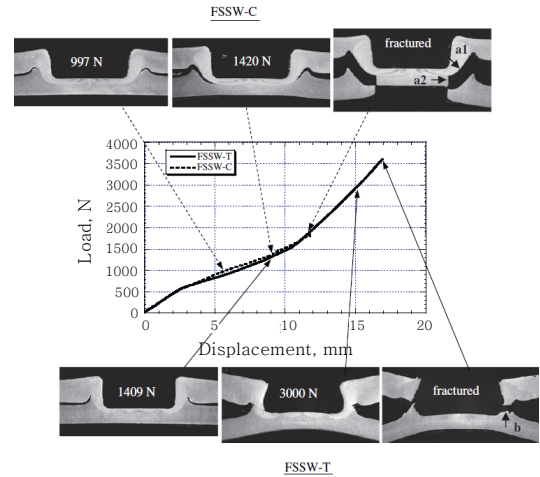
**Fig. 3** Variation of maximum tensile shear load according to the tool penetration depth and tool geometry: (a) TPT, (b) CT and (c) CTP

전단 파단 형태를 나타내었으나 이상의 깊이에서는 플러그 형태의 파단 형상을 나타내는 것을 관찰 할 수 있었다. CT 툴의 경우 삽입 깊이가 증가함에 따라 전단 강도가 일부 상승을 하였으나 최고 전단 하중 값은 다른 두가지 툴의 결과치보다 매우 낮게 측정되는 것을 관찰 할 수 있었으며 모든 접합 조건에서 전단 파단 형태를 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. CTP 툴의 경우에는 삽입 깊이 0.5mm를 기준으로 전단 하중 값이 약 1.5배 이상 상승 하는 것을 확인할 수 있었으며 전단 하중 값의 큰 증가와 함께 파단 형태도 전단 파단에서 플러그 파단 형태로 바뀌는 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 최대 전단 하중 값 또한 약 4.5kN으로 3가지 툴 중에서 가장 높은 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 H. Badarinarayan등은 cylindrical 및 triangular 핀 형태의 2가지 핀 형상을 지니는 툴을 이용하여 마찰교반점접합한 5083 알루미늄 합금의 특성을 보고하였다<sup>15)</sup>. Fig. 4에서 관찰할 수 있는 바와



**Fig. 4** Cross-sectional macrostructures of the welds: FSSW-C (left) and FSSW-T (right). (A) Magnified view of the hook geometry in region I for FSSW-C welds. (a1) and (a2) show partial metallurgical bonding within region I at the locations indicated. (B) Magnified view of the hook geometry in region II for FSSW-T welds. (b1) and (b2) show partial and complete metallurgical bonding in region II at the respective locations indicated



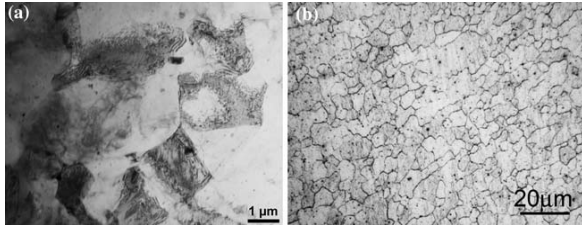
**Fig. 5** Load versus displacement relationship for the FSSW-C and FSSW-T welds during cross-tension. Cross-sectional macrographs show crack propagation during loading)

같이 접합부는 크게 3가지 영역 - completely bonded region, partially bonded region, and unbonded region 으로 나뉘어지는 것으로 관찰 되었으며 툴의 형상에 따라 이러한 영역에서 나타나는 접합 형태는 각기 다르게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 5는 각기 다른 핀 형상에 따른 마찰교반점접합부의 인장전단 시험 결과를 나타낸다. 시험 결과에서도 확인할 수 있는 바와 같이 cylindrical 핀의 경우 약 1700N을 나타내었으며 triangular 핀의 경우에는 약 3500N 으로 전단 하중이 약 2배 정도가 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 핀의 형상에 따른 전단 하중의 차이는 접합 후 형성되는 접합부의 크기 및 툴의 교반에 의한 소성유동 차이가 다르기 때문에 나타나는 현상으로 보고되고 있으며 연구 결과에서도 확인 할 수 있는 바와 같이 접합부의 특성에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

### 3. 마그네슘 합금의 마찰교반점접합<sup>16)</sup>

마그네슘 합금은 차체 재료로 사용될 수 있는 금속 재료 중에 가장 높은 비강도를 가지는 재료이지만 상대적으로 가공성과 용접성이 떨어져 차체 재료로서는 적용에 제한이 있는 상황이다. 하지만 최근에는 이러한 마그네슘 합금에 대해서도 마찰교반점접합을 이용하여 차체 재료로서의 적용 가능성을 나타내고 있다. 하지만 최근 마그네슘 합금의 마찰교반점접합 시 liquid penetration induced (LPI) cracking에 관한 문제가 연구를 통해서 제기되고 있으며 이러한 LPI 문제의 원인 및 해결 방안에 대하여 간략히 고찰하고자 한다. 마그네슘 합금



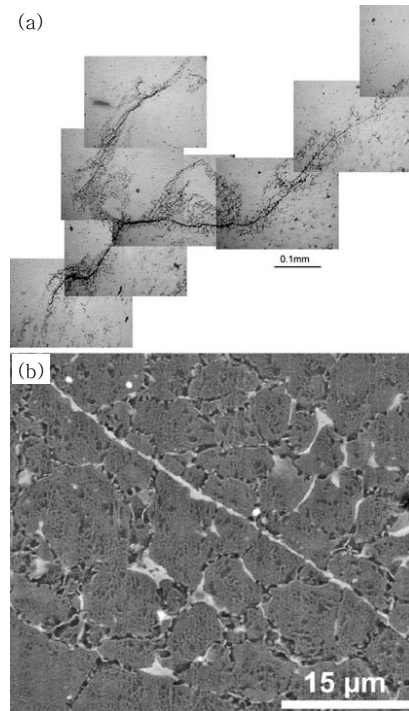
**Fig. 6** (a) TEM micrograph showing fine-grained a-Mg in the stir zone of an AZ31 spot weld; (b) Fine-grained a-Mg microstructure in the stir zone of an AM60 spot weld. In each case, the plunge rate was 2.5 mm/s, the tool rotational speed was 3000 RPM and the dwell time was 4 s

의 경우 일반적으로 수%의 알루미늄이 합금원소로 첨가가 되어  $L - Mg + Mg_{17}Al_{12}$ 의 공정반응을 가지게 된다. 이러한 공정반응에 의해서 마그네슘 합금의 마찰교반점접합 시 결정립 내에 액상의 공정 조직이 침투하여 접합 후 크랙을 발생시키는 것으로 알려져 있다. Fig. 6은 마찰교반점접합된 AZ31합금과 AM60합금의 접합부 미세조직을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 접합부는 동적 재결정에 의한 등축성의 미세 결정립을 나타낸다. 그러나 AZ91 접합부의 경우 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 결정립계를 따라 크랙이 생성된 것을 관찰 할 수 있다.

마그네슘 합금들의 마찰교반점접합 시 최고 온도를 측정 한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 AZ31 접합부의 경우 550°C와 514°C, AM60 접합부는 500°C 그리고 AZ91 접합부의 경우에는 437°C와 460°C로 측정되는 것을 관찰할 수 있다. Mg-Al 이원계 합금의 경우  $L - Mg + Mg_{17}Al_{12}$ 의 공정반응은 약 437°C에서 일어나는 것으로 알려져 있으며 AZ31

마찰교반점접합 시 최고 온도가 공정반응 온도와 유사한 것을 고려할 때에 마찰교반점접합 후 발생하는 LPI 문제는 모재내에 액상의 공정조직이 최대로 고용될 수 양과 관련이 있는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 9는 특정 온도대에서 Al-Mg 액상 공정조직이 마그네슘 모재내에 최대 고용이 가능한 두께를 나타내고 있다. 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 AZ91 합금의 경우 437°C 온도에서 4초 동안에 고용될 수 있는 액상 공정조직의 두께는 약 125nm로 나타났다. AZ91 마찰교반점접합부에서 결정립 내 형성되는 공정조직의 두께는 약 0.5~1.5μm로 상기 실험 결과를 고려할 때에 마찰교반점접합 시 공정조직은 모재 내에 고용되지 못하고 결정립계 내에 잔류하게 되는 것으로 사료된다.



**Fig. 7** (a) Penetration and cracking at grain boundary regions in the stir zone in the location close to its extremity; (b) Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> film outlining a grain boundary in the stir zone in the location close to its extremity. In AZ91 spot welds made using a tool rotational speed 3000 RPM and a dwell time of 4 s and plunge rates of (a) 25 mm/s (b) 2.5 mm/s

하지만 AZ31과 AM60 합금의 경우 동일한 두께의 액상 공정조직이 상대적으로 더 빠른 시간 내에 고용되는 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 결과는 각 합금내에서 알루미늄 원자가 마그네슘 모재내에 확산되는 확산 속도가 다른 것으로 해석이 되며 이러한 결과를 정량적으로 해석하기 위하여 Fick의 확산방정식을 이용하여 각 합금 내에서의 확산속도를 계산하였고 그 결과를 하기에 나타내었다.

$$D = D_0 \exp\left[\frac{Q}{-RT}\right]$$

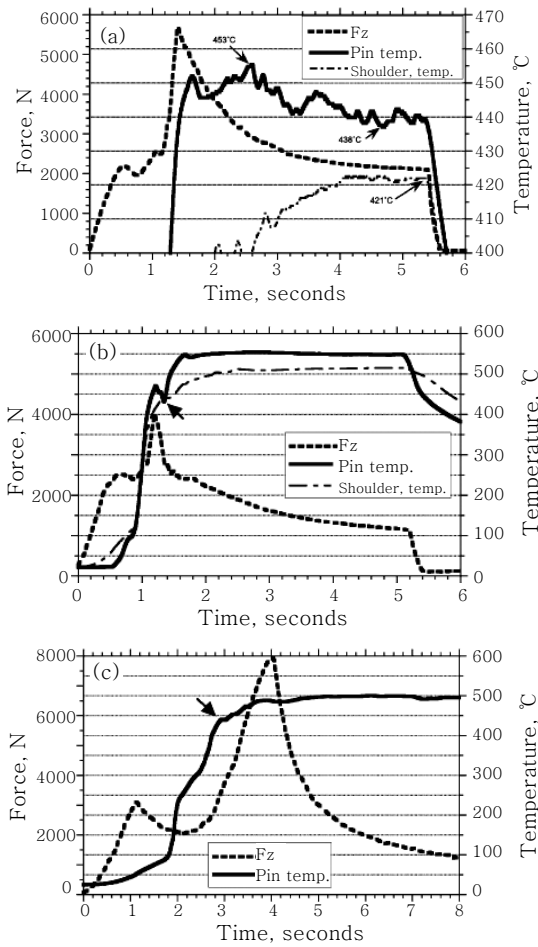
이때 기체상수  $R=8.314 \times 10^{-3}(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,  $D_0=1.53 \times 10^7 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ,  $Q=125\text{kJ/mol}$  이다.

AZ91 합금의 경우 :

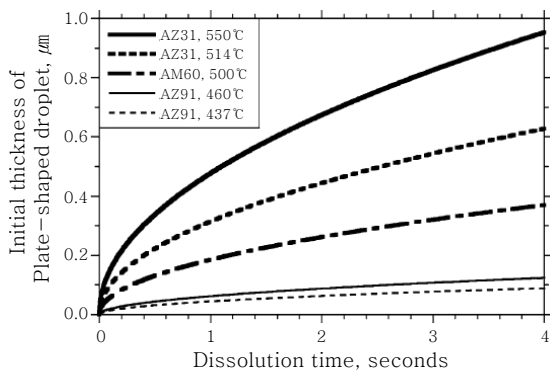
$$D_{\text{Al in Mg at 710K}} = 9.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/\text{s at 437°C}$$

$$D_{\text{Al in Mg at 733K}} = 1.89 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2/\text{s at 460°C}$$

AM60 합금의 경우 :



**Fig. 8** Temperature and axial force output during spot welding of (a) thixomolded AZ91, (b) wrought AZ31 and (c) thixomolded AM60. The tool rotational speed was 3000 RPM for AZ91 and AZ31, 2500RPM for AM60. The plunge rate was 2.5 mm/s for AZ91 and AZ31, 1 mm/s for AM60



**Fig. 9** Relation between the width of a plate-shaped film of melted eutectic and the dissolution time when temperatures of 437, 460, 500, 514 and 550°C are assumed

$$D_{Al \text{ in Mg at } 773K} = 5.47 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2/\text{s at } 500^\circ\text{C}$$

AZ31 합금의 경우 :

$$D_{Al \text{ in Mg at } 787K} = 7.73 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2/\text{s at } 514^\circ\text{C}$$

$$D_{Al \text{ in Mg at } 733K} = 1.78 \times 10^{-1} \mu\text{m}^2/\text{s at } 550^\circ\text{C}$$

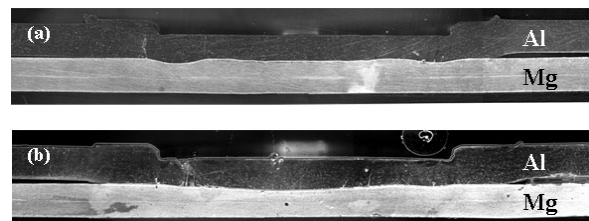
상기 계산결과에서 볼 수 있는 바와 같이 AZ91합금의 경우에 가장 느린 확산 속도를 나타내었으며 이는 상기 실험 결과와도 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 실험 결과들을 정리하자면 AZ31과 AM60 합금의 마찰교반점접합 시 툴 삽입 후 유지시간을 4초 이상으로 한다면 LPI 문제가 발생하지 않으나 AZ91 합금의 경우에는 이보다 더 오랜 시간을 필요로 하는 것을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 접합 시 추가적인 열원을 접합부에 가하거나 또는 접합 시 더 많은 마찰열이 발생할 수 있도록 마찰계수가 높은 툴 재질의 선정, 툴 형상의 디자인 등이 필요로 할 것으로 사료된다.

#### 4. 알루미늄 및 마그네슘 합금의 이종 마찰교반점접합

차체 경량재료로서 알루미늄 마그네슘 합금의 적용 시 동종 재료의 접합 뿐만 아니라 이종 재료의 접합 또한 필수 불가결한 접합 공정이나 기존 공정으로 알루미늄과 마그네슘의 이종 접합 시 조대한 금속간 화합물을 형성하는 것으로 알려져 있으며 이를 해결하고자 최근 이종 재료에 대한 마찰교반점접합 결과 또한 보고가 되고 있는 바이다. D.H.Choi등이 보고한 알루미늄 합금과 마그네슘 합금의 이종 마찰교반점접합 연구결과에 대하여 소개하고자 한다<sup>17)</sup>. Fig. 10은 상기 알루미늄 합금의 마찰교반점접합에서 소개한 CPS 툴을 이용하여 마찰교반점접합된 알루미늄(AA6K21) 및 마그네슘 합금(AZ31) 판재의 접합부 단면 형상을 나타내고 있다.

접합부 단면 형상에서 볼 수 있듯이 상판의 알루미늄 합금 판재와 하판의 마그네슘 합금 판재사이에서는 교



**Fig. 10** Cross-section image of joints: (a) 1050rpm-5 s, and (b) 1600 rpm-30 s



반된 영역을 관찰하지 않았으며 상하판 판재 사이에 계면을 형성하는 것을 관찰 할 수 있다.

접합부 내 알루미늄 합금과 마그네슘 합금 사이에서 생성된 계면 형상을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 상판과 하판사이에서는 계면 조직이 형성되었으며 그 두께는 툴 회전속도와 툴 삽입 후 유지시간이 증가함에 따라 3.5 $\mu$ m에서 최대 6.5 $\mu$ m 로 증가하는 것을 관찰 할 수 있으며 계면 조직이 가장 두꺼운 조건에서는 수평으로 크랙이 발생된 것을 관찰 할 수 있었다.

이러한 계면 조직을 EDS를 이용하여 성분 분석을 한 결과 크게 5개 층으로 나뉘어지는 것을 관찰 할 수 있으며 순서대로 나열하면 알루미늄 모재 영역- 알루미늄 친이 영역 - 반응 영역 - 마그네슘 친이 영역 - 마그네슘 모재 영역으로 관찰 되었다. 성분 분석 결과를 토대로 볼 때에 반응 영역에서는 알루미늄-마그네슘의 금속간 화합물이 형성된 것으로 사료가 된다. Fig. 11은 접합부의 파단면에 대한 XRD 분석 결과를 나타낸다. 분석되는 면은 분석 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 알루미늄 합금 판재 계면에서는 주로 Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>

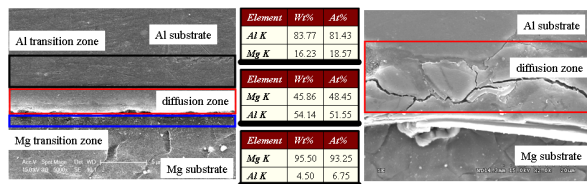


Fig. 11 Microstructure and chemical compositions in the interface between Al and Mg alloy: (a) 1050 rpm-5 s, (b) 1600 rpm-30 s

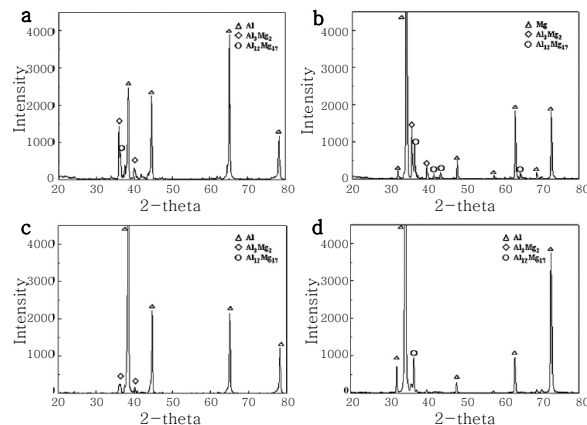


Fig. 12 XRD spectrum from the Al and Mg alloy fracture surface: (a) Al side/1050 rpm-5 s, (b) Mg side/1050 rpm-5 s, (c) Al side/1600 rpm-30 s, and (d) Mg side/1600 rpm-30 s

상이 검출되었고 반대로 마그네슘 합금 판재 계면에서는 Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> 상이 검출되었다. 이러한 결과는 접합부 계면에는 2가지의 금속간화합물이 형성되는 것으로 사료되며 열분석 결과에서도 볼 수 있는 바와 같이 알루미늄 및 마그네슘 합금 판재 계면에서는 각각 다른 금속간화합물이 형성되는 것을 확인 할 수 있다.(Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> 고용온도: 약 450 $^{\circ}$ C, Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> 고용온도: 약 437 $^{\circ}$ C) (Fig. 13).

Fig. 14는 접합부의 인장전단 시험 결과를 나타낸다. 접합부의 인장전단 시험 결과 모든 파단은 상판과 하판의 계면사이에서 발생이 되었으며 툴 회전속도 높을수록 그리고 툴 삽입 후 유지시간이 길어질수록 전단 하중은 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 마찰열이 더 많이 발생하는 조건에서 더 두꺼운 금속간화합물이 형성하기 때문에 나타나는 결과로 해석할 수 있다. 이러한 결과들을 토대로 정리해 볼때에 알루미늄 및 마그네슘 합금의 이중 마찰교반점접합의 경우 최대한 낮은 툴 회전속도 및 툴 삽입 후 유지시간 조건에서 가장 신뢰성이 높은 접합부를 구현할 수 있을 것으로 사료가 된다.

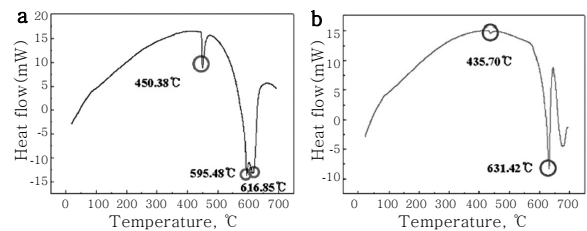


Fig. 13 TG-DSC curve from the Al and Mg substrate: (a) Al side/1600 rpm-30 s, and (b) Mg side/1600 rpm-30 s

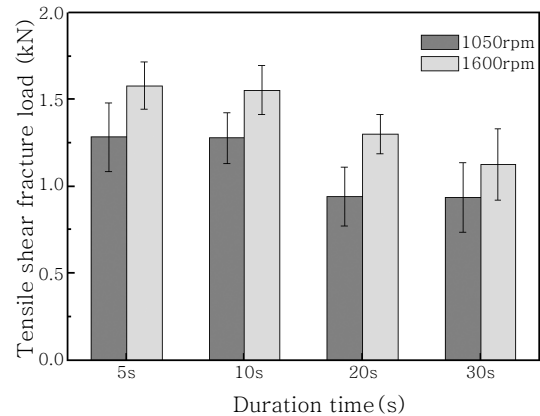


Fig. 14 Result of tensile test: joining strength with tool rotation speed and duration time

### 5. 맺 음 말

알루미늄 및 마그네슘 합금의 마찰교반점접합 결과에 대해 상기와 같이 조사·정리한 결과 이들 재료에 대한 접합 변수와 미세조직의 관계, 미세조직과 기계적 특성과의 관계 등의 분석 결과를 확인 할 수 있었으며 이에 따라 알루미늄 및 마그네슘 합금의 마찰교반점접합이 매우 실용적인 수준까지 연구가 진행 된 것을 확인할 수 있었다. 다만 생산 현장 적용 단계에서 보다 필요한 자료로 예상되는 공정 소요 시간 및 공정 장비 설계 등의 실질적인 연구 자료와 부식 및 피로 저항 특성 등 다양한 접합부의 신뢰성 평가에 관한 연구 결과가 부족한 상황으로 파악되었다. 향후 알루미늄 및 마그네슘 합금 차체 재료로서 차지하는 비중이 점차 늘어나는 것을 고려할 때 마찰교반점접합의 적용 확대를 위하여 보다 다양하면서도 세밀한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각되고, 특히 기술 국산화를 위한 국내 연구진들의 노력이 더욱 필요할 것으로 생각된다

### 참 고 문 헌

1. 소재기술백서 2010
2. 대한용접학회편 : 용접·접합편람, 대한용접학회 (1998) 256-257 (in Korean)
3. 溶接學(會編 : 溶接·接合便覽, 日本(溶接學(會 (1990) 1016-1017 (in Japanese)
4. S.A. Lcokyer and M.J. Russell: Third International Symposium on Friction Stir Welding, September, (2001, 9), Kobe, Japan
5. Y.M.Yeon, C.Y.Lee, W.B.Lee, S.B.Jung, W.S.Chang : Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys, Journal of KWS, **23-3** (2005), 228-232 (in Korean)
6. H.J.Cho, H.J.Kim, J.S.No, W.S.Chang, G.S.Bang :Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Al Alloys for Automotive, Proceedings of the 2005 Spring Annual Meeting of KWS, **44**(2005), 177-179(in Korean)

7. Y.M.Yeon, C.Y.Lee, W.B.Lee, S.B.Jung : Spot Friction Stir Welding of 5052Al Alloy, Proceedings of the 2005 Spring Annual Meeting of KWS, **44**(2005), 235-237 (in Korean)
8. A. Gerlich, P. SU, T. H. North: Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys, J. Mater. Sci., **40** (2005), 6473-6481
9. D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Panc, J. Chena, Z. Feng, M.L. Santella: Structure - properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum, Mater. Sci. Eng. A, **441** (2006), 79-96
10. Y. Tozaki, Y. Uematsum K. Tokaji: Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **30** (2007), 143-148
11. P. Su, A. Gerlich, T.H. North, G.J. Bendzsak, Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Welds, Metall. Mater. Trans. A, **38A** (2007), 584-595
12. D.A. Wang, S.C. Lee: Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets, J. Mater. Proc. Tech., **186** (2007), 297-297
13. H. Badarinarayan, Q. Yang, S. Zhu: Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy, Int. J. Mach. Tool Manu., **49** (2009) 142-148
14. D.H. Choi, B.W. Ahn, C.Y. Lee, Y.M. Yeon, K. Song, S.B. Jung: Effect of Pin Shapes on Joint Characteristics of Friction Stir Spot Welded AA5J32 Sheet, Mater. Trans., **51** (2010), 1028-1032
15. H. Badarinarayan, Q.Yang, S.Zhu: Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy, Int. J. Tools Manu., **49** (2009), 142-148
16. M. Yamamoto, A. Gerlich, T.H. North, K. Shinozaki: Cracking in the stir zones of Mg-alloy friction stir spot welds, J. Mater. Sci., **42** (2007), 7657 - 7666
17. D.H. Choi, B.W. Ahn, C.Y. Lee, Y.M. Yeon, K. Song, S.B. Jung: Formation of intermetallic compounds in Al and Mg alloy interface during friction stir spot welding, Intermetallics, **19** (2011), 125-130



- 최돈현(崔敦鉉)
- 1982년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마찰교반접합, 마찰교반점접합
- e-mail : cdh0326@skku.edu



- 정승부(鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마이크로조이닝, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.edu



- 연윤모(延倫模)
- 1953년생
- 수원과학대학 신소재응용과
- 마찰교반접합, 마찰교반점접합
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr