

## 마찰교반점접합한 5454-O 알루미늄합금 판재의 접합부 거시조직 및 기계적 특성에 미치는 접합인자의 영향

최원호\* · 권용재\*\*† · 윤성욱\*\* · 강명수\*\* · 임창용\* · 서종덕\* · 홍성태\*\*\* · 박동환\*\*\*\* · 이광학\*\*

\*(주)신영 기술연구소

\*\*울산대학교 공과대학 첨단소재공학부

\*\*\*울산대학교 공과대학 기계공학부

\*\*\*\*울산대학교 자동차선박대학원

### Influence of Welding Parameters on Macrostructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Spot-Welded 5454-O Aluminum Alloy Sheets

Won-Ho Choi\*, Yong-Jai Kwon\*\*†, Sung-Ook Yoon\*\*, Myoung-Soo Kang\*\*,  
Chang-Yong Lim\*, Jong-Dock Seo\*, Sung-Tae Hong\*\*\*, Dong-Hwan Park\*\*\*\* and Kwang-Hak Lee\*\*

\*Technical Research Laboratories, Shin Young Co., Ltd., Ulsan 683-360, Korea

\*\*School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

\*\*\*School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

\*\*\*\*Institute of E-Vehicle Technology, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

†Corresponding author : yongjaikwon@ulsan.ac.kr

(Revised April 19, 2011 ; Revised May 24, 2011 ; Accepted October 31, 2011)

#### Abstract

Friction stir spot welding between 5454 aluminum alloy sheets with the different thicknesses of 1.4 and 1.0 mm was performed. In the welding process, the tool for welding was rotated ranging from 500 to 2500, and plunged to the depth of 1.8 mm under a constant tool plunge speed of 100 mm/min. And then, the rotating tool was maintained at the plunge depth during the dwell time ranging from 0 to 7 sec. The pull-out speed of the rotating tool was 100 mm/min. The increase of tool rotation speed resulted in the change of the macrostructure of friction-stir-spot-welded zone, especially the geometry of welding interface. The results of the tensile shear test showed that the total displacement and toughness of the welds were increased with the increase of the tool rotation speed, although the maximum tensile shear load was decreased. However, the change in the dwell time at the plunge depth of the tool did not produce the remarkable variation in the macrostructure and mechanical properties of the welds. In all cases, the average hardness in friction-stir-spot-welded zone was higher than that of the base metal zone. By the friction stir spot welding technique, the welds with the excellent mechanical properties than the mechanically-clinched joints could be obtained.

Key Words : Friction stir spot welding, Aluminum alloy, Tool rotation speed, Dwell time, Macrostructure, hardness properties, Tensile shear properties

#### 1. 서 론

최근, 자동차산업을 비롯한 다양한 산업분야에서 환

경오염 및 소비에너지의 저감 등을 위한 노력이 경주되고 있다. 특히, 자동차산업분야에 있어서는, 연비 향상 및 환경유해물질의 배출억제를 위하여 차량경량화기술에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 이 중

에서도 기존에 많이 사용되어 온 고 비중의 철계금속소재를 알루미늄합금과 같은 저 비중의 경량금속소재로 대체하는 기술이 많은 주목을 받고 있다. 이러한 경량 금속소재를 차량에 적용하기 위해서는 소재 자체의 특성향상을 비롯하여 주조기술, 소성가공기술 등과 같은 다양한 제조기술의 개발뿐만 아니라, 경량금속소재를 적용한 부품의 모듈화에 필요한 용접 및 접합기술의 확립이 중요하다.

알루미늄합금 부품의 모듈화에 있어서, 기존에 많이 사용되어 온 저항점용접기술을 적용하는 경우에는, 알루미늄합금의 특성, 즉 높은 열전도도 및 비열, 그리고 낮은 전기저항으로 인하여 용접부에서의 가열이 어렵기 때문에, 철계금속소재에 비하여 용접 시 높은 전류 및 가압력이 요구되며, 전극의 수명 저하 등이 문제점으로 제기되고 있다<sup>1-3)</sup>. 따라서, 이러한 문제점들을 극복하기 위하여, 기계적 크린칭(Mechanical Clinching, 이하 MC로 표기)<sup>45)</sup>, 셀프피어싱 리베팅(Self-Piercing Riveting; SPR)<sup>6,7)</sup>, 마찰교반점접합(Friction Stir Spot Welding, 이하 FSSW로 표기)<sup>8,9)</sup> 등과 같은 용접기술들이 개발되어 연구·개발 및 상용화가 활발하게 이루어지고 있다.

이 중에서도 마찰교반점접합기술은 1991년 영국의 The Welding Institute(TWI)에서 개발된 마찰교반점접합기술(Friction Stir Welding; FSW)을 응용한 신 기술로서, 일본 Matsuda사의 RX-8 차종의 리어 도어(Rear Door) 및 후드(Hood)의 제작에 적용됨으로써<sup>10)</sup>, 전 세계적으로 주목을 받아, 이에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>8-10)</sup>.

이러한 마찰교반점접합기술은, 알루미늄합금<sup>8,9)</sup> 뿐만 아니라, 마그네슘합금<sup>11)</sup>, 티타늄합금<sup>12)</sup>, 철강소재<sup>13)</sup>, 비정질금속소재<sup>14)</sup> 등에 이르기까지 다양한 소재에 적용하기 위하여 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 알루미늄합금에 있어서, Cho 등<sup>8)</sup>은 비열처리형 알루미늄합금 판재인 5052-H34의 겹치기접합에 마찰교반점접합기술을 적용하여, 2kN에 가까운 높은 인장전단하중을 갖는 접합부가 얻어졌다고 보고를 하였다. 한편, Yeon 등<sup>9)</sup>은, 전술한 Cho 등<sup>8)</sup>이 사용한 소재와 동일한 5052-H34 알루미늄합금 판재의 마찰교반점접합부로부터 약 3.3 kN의 최대평균전단인장하중을 얻을 수 있었다고 보고를 하였다. 이러한 연구결과들로부터, 피접합용 소재로서 동일 소재를 사용한다고 할지라도, 접합조건에 따라 상이한 특성을 갖는 접합부가 얻어진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 마찰교반점접합기술을 실구조물에 적용하여 실용화하기 위해서는 다양한 소재를 대상으로 접합인자, 접합부 형상 등에 대한

연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 동종소재 간의 접합에 있어서도, 실구조물에서는 이종두께를 갖는 소재 간에 접합부를 형성하는 경우도 있다. 또한, 본 연구에서 피접합재로 선정된 5454-O 알루미늄합금 압연판재의 경우에 있어서는 자동차 차체부품용 소재로 사용되고 있음에도 불구하고, 이 소재에 대한 마찰교반점접합기술에 관한 연구는 거의 이루어지고 있지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 현재 자동차 차체부품용 소재로서 적용되고 있는 이종두께, 즉 두께 1.4 및 1.0 mm의 5454-O 알루미늄합금 판재 간의 접합에 마찰교반점접합기술을 적용하여, 접합용 공구의 회전속도 및 삽입깊이에서의 유지시간 등과 같은 접합인자가 접합부의 외관형상, 단면조직, 경도특성 및 인장전단특성 등에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 현재 5454-O 알루미늄합금 판재를 적용한 양산부품의 모듈화에 적용되고 있는 MC 기술과의 비교를 위하여, 양산에서 적용되고 있는 접합조건과 동일한 조건에서 MC 접합체를 제조한 후 접합체 간의 기계적 특성을 상호 비교하였다.

## 2. 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에서의 실험방법을 나타낸다. 두께가 각각 1.4 및 1.0 mm인 5454-O 알루미늄합금 압연판재를 압연방향(Rolling Direction, 이하 RD로 표시)으로 길이 및 폭이 각각 100 및 30 mm가 되도록 기계가공한 후 피접합용 모재로 사용하였다. 먼저, 두께 1.4 mm의 판재를 상부에, 두께 1.0 mm의 판재를 하부에 위치하도록 백킹 플레이트(Backing Plate) 위에 고정시켰다. 이때, 피접합재의 겹침여유는 30 mm가 되도록 하였다. 접합용 공구는 회전속도를 500에서 2500 rpm까지 변화시켰으며, 접합 중 과잉의 버(Burr)가 발생하지 않도록 하기 위하여 상부 판재의 표면으로부터 1.8 mm까지 삽입하였다. 이때, 삽입깊이에서의 유지시간이 접합부 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 유지시간을 0에서 7 sec까지 변화시켰다. 접합용 공구의 삽입속도 및 제거속도는 100 mm/min으로 일정하게 유지하였다. 접합용 공구로서는 공구강 SKD61을 숄더(Shoulder)부의 직경이 12 mm이고, 길이가 1.8 mm인 프로브(Probe)를 M5의 나사모양으로 가공하여 사용하였다.

접합부의 단면조직을 관찰하기 위하여, 접합부의 중앙을 절단 및 경면연마한 후 상온에서 1% HF 수용액을 이용하여 에칭(Etching)하였다. 접합부의 경도분포를 조사하기 위하여, 접합부 중앙으로부터 좌우 11 mm

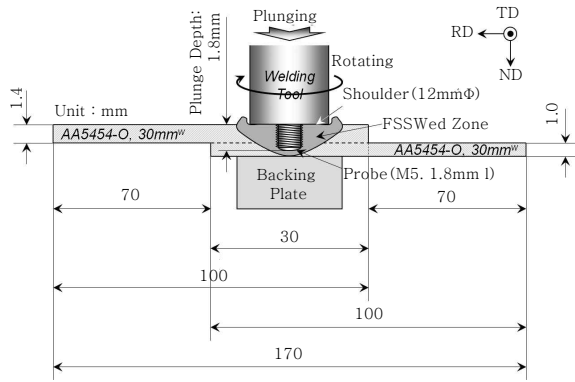


Fig. 1 Schematic illustration of the FSSW process in this study

씩 약 22mm의 범위 내에서 상부 및 하부 판재의 중앙부를 따라 0.5 mm 간격으로 비커스 미소경도(Vickers Micro-Hardness)를 각각 측정하였다. 이때, 부하하중 및 하중유지시간은 각각 100 gf 및 10 sec로 하였다. 또한, 접합체의 인장특성을 조사하기 위하여, 인장속도를 1 mm/min으로 일정하게 하여 상온인장전단시험을 실시하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 접합용 공구의 회전속도가 접합부 특성에 미치는 영향

접합용 공구의 삽입속도, 삽입깊이 및 삽입깊이에서의 유지시간을 각각 100 mm/min, 1.8 mm 및 3 sec로 일정하게 유지하고, 접합용 공구의 회전속도를 500에서 2500 rpm까지 변화시켜 접합체를 제작한 후, 접합용 공구의 회전속도가 접합부 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

##### 3.1.1 접합체의 외관형상

Fig. 2는 접합용 공구의 회전속도를 (a) 500, (b) 1500 및 (c) 2500 rpm으로 변화시켜 접합한 경우에 있어서, 접합부 부근에서의 상부 및 하부 표면의 외관형상을 각각 나타낸다. 접합 공정 중에 고속으로 회전하고 있는 접합용 공구와 직접 접촉한 접합부의 상부 표면은 프로브부분의 삽입 및 제거에 의해 형성된 홀(Hole)부분, 솔더부분과의 마찰에 의해 형성된 부분, 그리고 원형의 접합부 주위에 형성된 버부분으로 구성되어 있다. 한편, 접합용 공구와 직접적인 접촉이 일어나지 않는 접합부의 하부 표면에서는 접합용 공구의 솔더 및 프로브부분의 직경과 유사한 크기의 흔적이 관찰되지만, 모재부와 유사하게 평활한 상태를 유지하고 있

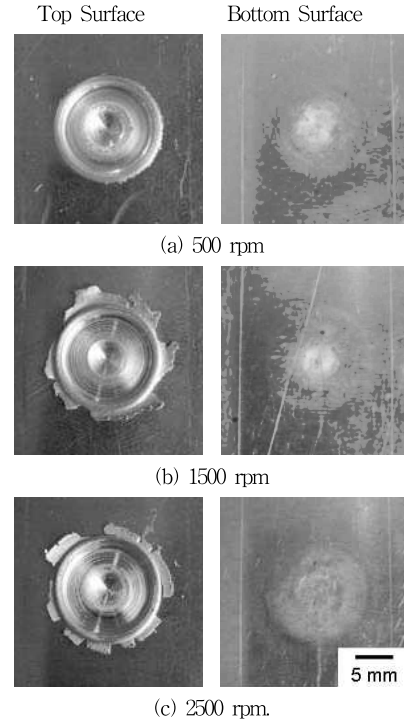


Fig. 2 Influence of the tool rotation speed on the appearance of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

다. 접합부의 상부 및 하부 표면의 외관형상을 관찰한 결과, 모든 회전속도에서 균열 등과 같은 육안으로 관찰 가능한 접합결함은 접합부 부근에서 형성되지 않았다. 그러나, (b) 1500 및 (c) 2500 rpm의 회전속도에서는 접합부 주위에 비교적 많은 양의 버가 발생하였으며, 이러한 결과는 회전속도의 증가에 따른 접합부의 온도 상승 및 소성유동량의 증가에 기인하는 것으로 추론된다.

##### 3.1.2 접합부의 단면조직

Fig. 3은 접합용 공구의 회전속도를 (a) 500, (b) 1500 및 (c) 2500 rpm으로 변화시켜 제작한 접합체에 있어서, 접합부 부근의 단면조직을 각각 나타낸다. 모든 회전속도에서 프로브부분의 삽입 및 제거에 의해 형성된 홀부분, 솔더부분과의 마찰에 의해 형성된 부분, 그리고 접합부 주위에 형성된 버부분으로 구성되어 있다. 또한, 모든 회전속도에서 균열 등과 같은 관찰 가능한 접합결함은 접합부 부근에서 형성되지 않았다. 한편, (a) 500 rpm의 경우에 있어서는 상부 및 하부 판재 간의 접합계면이 홀의 양측에서 초기의 직선적인 형태를 유지하고 있다. 그러나, (b) 1500 및 (c) 2500 rpm에서는, (a) 500 rpm의 경우와는 달리, 홀부분 주위에서 볼(Bowl) 형태의 조직이 형성되었으며, (b)

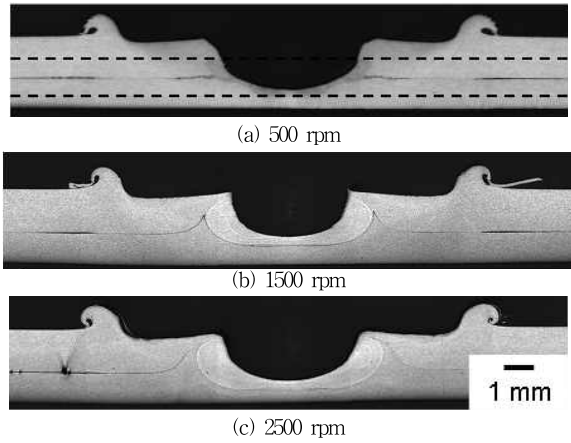


Fig. 3 Influence of the tool rotation speed on the macrostructure of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

1500 rpm에서보다 (c) 2500 rpm에서 볼 형상 조직의 크기가 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, (b) 1500 및 (c) 2500 rpm에 있어서는 접합면이 볼 형상 조직의 외곽부분을 감싸는 형태로 변형되어 있다. 이러한 결과는, 접합용 공구의 회전속도가 증가함에 따라, 마찰열의 발생량이 증가하고 접합부에서의 교반량, 즉 소성유동량이 증가하였기 때문인 것으로 추론된다.

### 3.1.3 접합부의 경도특성

Fig. 4 (a)는 접합용 공구의 회전속도를 500 rpm으로 하여 제작한 접합체에 있어서, 접합부 부근의 경도분포를 나타낸다. 이 때, 경도분포는 Fig. 3 (a)에 점선으로 나타낸 것과 같이, 상부 및 하부 판재의 중앙부를 따라 측정하였다. 회전속도 500 rpm에서는, Fig. 3 (a)에 나타낸 것과 같이, 접합부 내에서 볼 형상의 조직을 형성하지 않았음에도 불구하고, 상부 및 하부 판재의 접합부(FSSWed Zone)가 모재부(BM)보다 높은 경도를 나타낸다. 이와 같이, 접합부의 경도가 모재부보다 높게 나타나는 현상은, 5052 알루미늄합금 판재의 마찰교반점접합부<sup>8)</sup> 뿐만 아니라 마찰교반선접합부<sup>15)</sup> 에서도 나타나며, 이는 접합부의 결정립미세화에 기인하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 마찰교반점접합공정에 의해 경도값의 변화를 수반한 영역을 접합부로 취급하기로 한다. 또한, 하부 및 상부 판재의 접합부에서의 경도값을 비교해 보면, 하부 보다 상부 판재의 접합부가 비교적 높은 경도값을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 한편, 접합 공정 중에 발생하는 마찰열에 의해 접합부 주위에서 경도값이 모재부보다 급격히 저하되는 열영향부(Heat Affected Zone; HAZ)는 관찰되지 않는다.

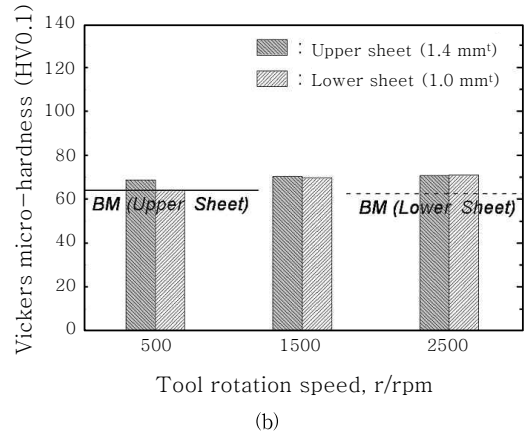
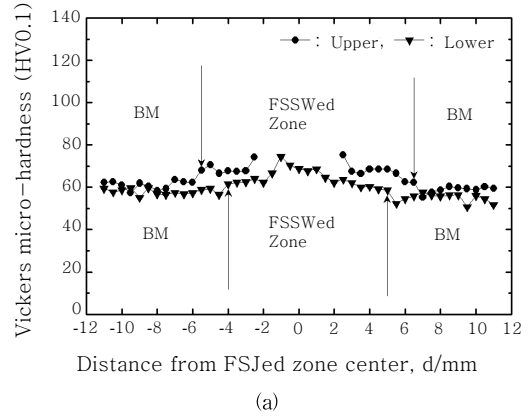


Fig. 4 (a) Vickers micro-hardness distribution near the FSSWed zone and (b) influence of the tool rotation speed on the average Vickers micro-hardness in the FSSWed zone of AA5454-O aluminum alloy sheets

Fig. 4 (b)는 접합용 공구의 회전속도를 500, 1500 및 2500 rpm으로 변화시켜 제작한 접합체에 있어서, 접합부 내의 평균 경도값을 나타낸다. 전술한 바와 같이, 500 rpm에서는 상부 판재의 접합부가 하부 판재의 접합부보다 높은 평균 경도값을 나타내지만, 1500 및 2500 rpm에서는 상부 및 하부 판재에서 유사한 접합부의 평균 경도값을 나타낸다. 또한, 모든 회전속도에서 접합부가 모재부 이상의 평균 경도값을 나타내지만, 접합용 공구의 회전속도를 변화시켰음에도 불구하고 접합부의 평균 경도값에는 큰 변화를 수반하지 않는다.

### 3.1.4 접합부의 상온인장전단특성

Fig. 5는 접합용 공구의 회전속도를 (a) 500, (b) 1500 및 (c) 2500 rpm으로 변화시켜 제작한 접합체에 대하여, 상온인장전단시험을 실시한 후의 접합부 부근의 형상을 각각 나타낸다. 모든 접합체에서 파단은 접합부 내의 홀부분 근처에서 일어났다는 것을 알 수 있다. 또한, 이러한 파단형태와 Fig. 3에 나타낸 접합

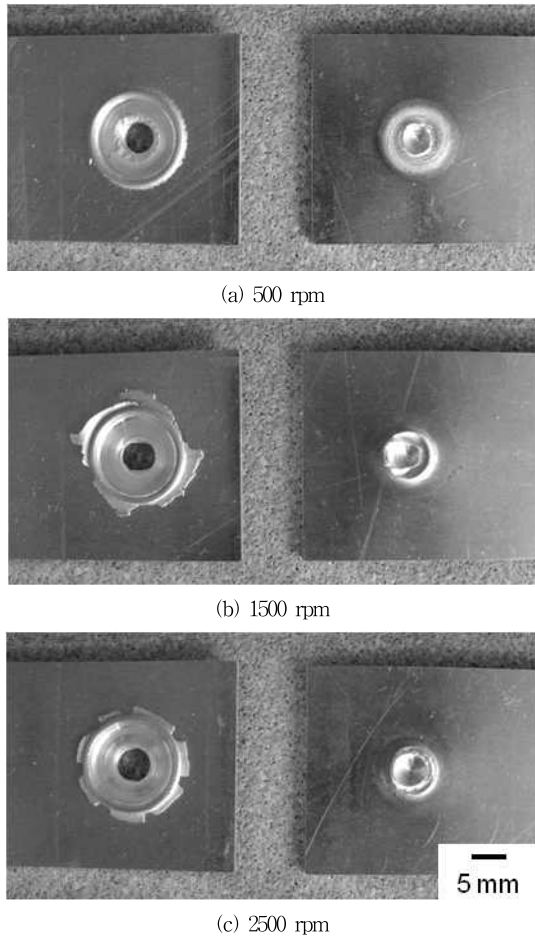


Fig. 5 Appearances of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets after tensile shear test

부 부근의 단면조직관찰의 결과로부터, 접합체의 파단은 인장하중의 증가에 따른 전단파단에 의하여 유기된 것으로 추론된다.

Fig. 6 (a)는 접합용 공구의 회전속도를 500 rpm으로 하여 제작한 접합체(FSSW) 및 MC 기술을 이용하여 제작한 접합체(MC)에 대하여 상온인장전단시험을 실시하여 얻어진 인장전단하중-변위곡선을 나타낸다. 두 경우 모두에 있어서 연성재료의 변형거동을 나타내었다. 최대전단하중값에 있어서는 FSSW 접합체가 MC 접합체보다 높은 값을 나타내지만, 최대전단하중값에 도달한 이후 파단에 이르기까지의 변위량에 있어서는 MC 접합체가 FSSW 접합체보다 높은 값을 나타낸다.

Fig. 6 (b) 및 (c)는 접합용 공구의 회전속도를 500, 1500 및 2500 rpm으로 변화시켜 제작한 FSSW 접합체 및 MC 접합체의 상온인장전단시험에 있어서의 평균 최대인장전단하중 및 0.2 mm의 소성변형이 일어났을 때의 평균 하중(0.2 mm Proof Load)을 각각 나타낸다. 여기에서, 0.2 mm Proof Load를 조사한 이유는, Fig. 6 (a)에 나타낸 것과 같이, 접합

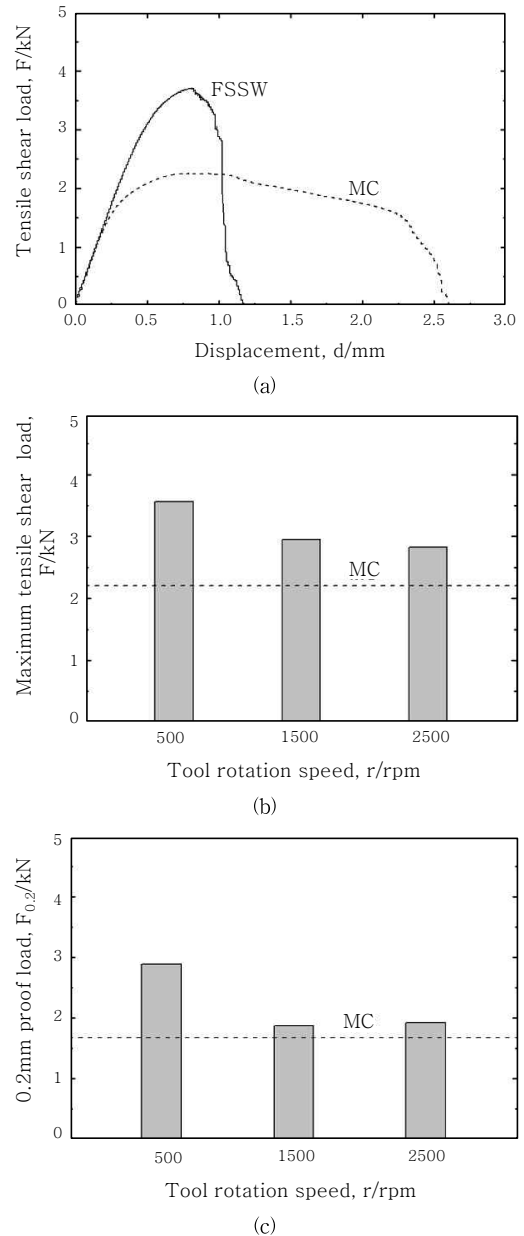


Fig. 6 (a) Typical tensile shear load-displacement curves and influences of the tool rotation speed on the (b) average maximum tensile shear load and (c) 0.2 mm proof load of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

체의 상온인장전단시험에 있어서 탄성변형영역으로부터 소성변형변형영역으로 천이가 일어나는 항복하중이 명확하게 관찰되지 않았기 때문에, 이를 대신하여 조사하였다. 모든 회전속도에서 FSSW 접합체가 MC 접합체보다 높은 평균 최대인장전단하중값을 나타낸다. 또한, 회전속도가 증가함에 따라 FSSW 접합체의 평균 최대인장전단하중값은 감소하는 경향을 나타내지만, 500 rpm에서 MC 접합체의 약 1.6배인 약 3.6 kN의 가장 높은 값을 나타낸다. 0.2 mm의 소성변형이 일어났

을 때의 평균 하중(0.2 mm proof load)에 있어서도 모든 회전속도에서 FSSW 접합체가 MC 접합체보다 높은 값을 나타낸다. 또한, 회전속도를 변화시켰음에도 불구하고, 1500 및 2500 rpm에서는 유사한 값을 나타내지만, 500 rpm에서는 MC 접합체의 약 1.7배인 약 2.9 kN의 가장 높은 값을 나타낸다. 이러한 결과로부터, 마찰교반점접합기술을 이용하면 MC 접합체보다 높은 인장전단하중 및 강성을 갖는 접합체의 제조가 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 (a) 및 (b)는 접합용 공구의 회전속도를 500, 1500 및 2500 rpm으로 변화시켜 제작한 FSSW 접합체 및 MC 접합체의 상온인장전단시험에 있어서의 파단에 이르기까지의 평균 최대변위량 및 인성을 각각 나타낸다. 여기에서, 인성은 상온인장전단시험으로부터 얻어진 인장전단하중-변위곡선(Fig. 6 (a))의 면적으로부터 산출하였다. 500 및 1500 rpm에 있어서는 FSSW 접합체가 MC 접합체보다 낮은 평균 최대변위량을 나타내었지만, 2500 rpm에서는 FSSW 접합체가 MC 접합체보다 높은 평균 최대변위량을 나타내었다. 또한, 회전속도가 증가함에 따라 FSSW 접합체의 평균 최대변위량이 증가하는 경향을 나타내며, 특히 2500

rpm에서는 MC 접합체의 약 1.4배인 약 3.3 mm의 가장 높은 값을 나타낸다. 한편, 평균 인성에 있어서는 500 rpm의 경우에는 FSSW 접합체가 MC 접합체보다 낮은 값을 나타내지만, 1500 rpm에서는 MC 접합체와 유사한 값을 나타내며, 2500 rpm에서는 MC 접합체의 약 1.2 배인 약 4.4 kN·mm의 가장 높은 값을 나타낸다. 즉, FSSW 접합체의 경우에 있어서는 회전속도가 증가함에 따라 인성이 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 인성의 증가는, Fig. 6 (b)에 나타난 것과 같이, 접합용 공구의 회전속도가 증가함에 따라 최대인장전단하중은 감소하지만, Fig. 7 (a)에 나타난 것과 같이, 파단에 이르기까지의 최대변위량이 증가하기 때문인 것으로 추론된다. 또한, 이러한 결과로부터, 마찰교반점접합기술을 이용하면 MC 접합체보다 높은 인성을 갖는 접합체의 제조가 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에 나타난 접합부 단면조직의 관찰 결과 및 Fig. 6과 7에 나타난 상온인장전단시험의 결과로부터, 접합용 공구의 회전속도는 접합부의 단면조직 및 인장전단특성에 큰 영향을 미치는 중요한 접합인자임을 알 수 있다. 또한, 높은 인장전단하중 및 강성을 갖는 접합부의 형성이 요구되는 경우에는 접합용 공구의 회전속도를 비교적 저속으로 하여 Fig. 3 (a)에 나타난 것과 같은 단면조직을 갖는 접합부를 형성시키는 것이 유리하고, 높은 변위량과 인성을 갖는 접합부의 형성이 요구되는 경우에는 접합용 공구의 회전속도를 비교적 고속으로 하여 Fig. 3 (c)에 나타난 것과 같은 단면조직을 갖는 접합부를 형성시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간이 접합부 특성에 미치는 영향

접합용 공구의 회전속도, 삽입속도 및 삽입깊이를 각각 500 rpm, 100 mm/min 및 1.8 mm로 일정하게 유지하고, 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 0에서 7 sec까지 변화시켜 접합체를 제작한 후 삽입깊이에서의 유지시간이 접합부 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

#### 3.2.1 접합체의 외관형상

Fig. 8은 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 (a) 0 및 (b) 7 sec로 변화시켜 제작한 접합체의 상부 및 하부 표면의 외관형상을 각각 나타낸다. 모든 유지시간에서 균열 등과 같은 관찰 가능한 접합결함은 접합부 부근에서 형성되지 않았다. 그러나, 접합용 공구의 회전속도를 변화시킨 경우(Fig. 2)와는 달리, 유지시간

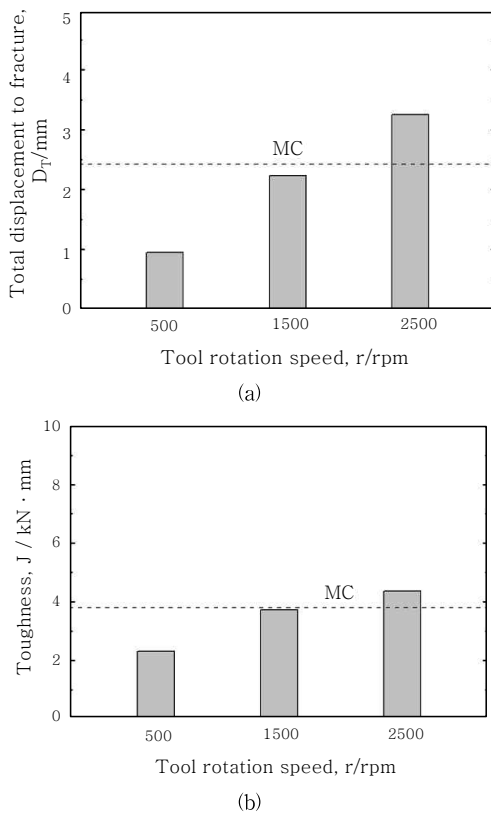


Fig. 7 Influences of the tool rotation speed on the (a) average total displacement and (b) average toughness of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

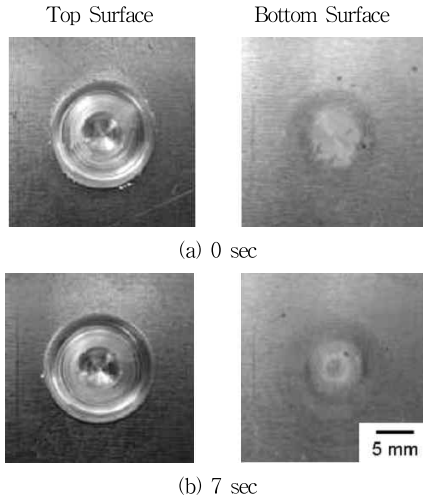


Fig. 8 Influence of the dwell time at the plunge depth of the tool on the appearance of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

을 변화시켰음에도 불구하고, 접합부의 상부 및 하부 표면의 외관형상에는 큰 변화가 수반되지 않으며, Fig. 2 (a)에 나타난 유지시간 3 sec의 경우와 유사한 외관형상을 나타낸다. 이러한 결과로부터, 삽입깊이에서의 유지시간은 접합부의 형상에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 접합부의 단면조직

Fig. 9는 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 (a) 0 및 (b) 7 sec로 변화시켜 제작한 접합체의 단면조직을 각각 나타낸다. 모든 유지시간에서 균열 등과 같은 관찰 가능한 접합결함은 접합부 부근에서 형성되지 않았다. 그러나, 접합용 공구의 회전속도를 변화시킨 경우(Fig. 3)와는 달리, 삽입깊이에서의 유지시간을 변화시켰음에도 불구하고, 접합부의 단면조직에는 큰 변화가 수반되지 않았으며, Fig. 3 (a)에 나타난 유지시간 3 sec의 경우와 유사한 단면조직을 나타낸다. 즉,

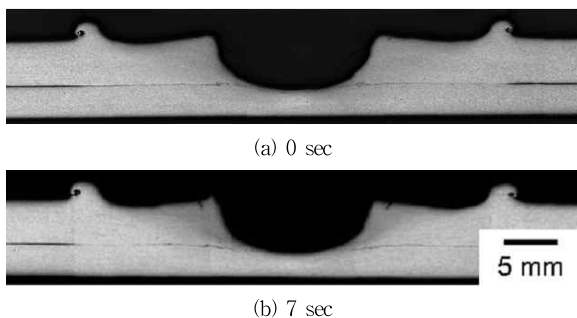


Fig. 9 Influence of the dwell time at the plunge depth of the tool on the macrostructure of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

접합부 내에서 불 형상의 조직은 명확히 관찰되지 않으며, 홀부분의 양측에 형성된 상부 및 하부 판재 간의 접합계면이 초기의 직선적인 형태를 유지하고 있다. 이러한 결과로부터, 삽입깊이에서의 유지시간은 접합부의 단면조직에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 접합부의 경도특성

Fig. 10은 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 0, 3 및 7 sec로 변화시켜 제작한 접합체에 있어서, 접합부 내의 평균 경도값을 나타낸다. 상부 판재의 접합부가 하부 판재의 접합부보다 높은 평균 경도값을 나타내며, 모든 유지시간에서 접합부에서 모재부 이상의 평균 경도값을 나타낸다. 그러나, 유지시간을 변화시켰음에도 불구하고 접합부 내의 평균 경도값은 특정한 경향을 나타내지 않으며, 유지시간이 7 sec인 경우에 있어서 상부 판재의 접합부에서 가장 높은 평균 경도값을 나타낸다.

3.2.4 접합부의 상온인장전단특성

Fig. 5에 나타난 접합용 공구의 회전속도를 변화시킨 경우와 마찬가지로, 상온인장전단시험에 의한 파단은 모든 접합체에서 접합부 내의 홀부분 근처에서 일어났다.

Fig. 11 (a) 및 (b)는 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 0, 3 및 7 sec로 변화시켜 제작한 접합체의 상온인장전단시험에 있어서의 평균 최대인장전단하중 및 0.2 mm의 소성변형이 일어났을 때의 평균 하중(0.2 mm Proof Load)을 각각 나타낸다. 모든 회전속도에서 FSSW 접합체의 평균 최대인장전단하중 및 0.2 mm의 소성변형이 일어났을 때의 평균 하중이 MC 접합체보다 높은 값을 나타낸다. Cho 등의 연구결

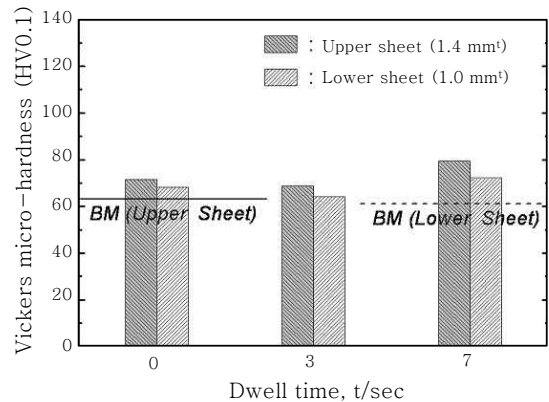
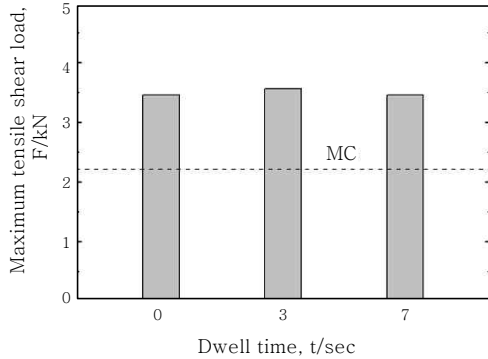
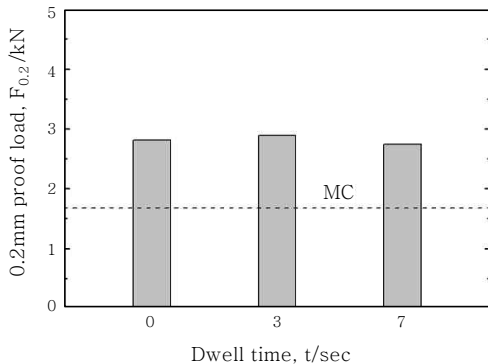


Fig. 10 Influence of the dwell time at the plunge depth of the tool on the average Vickers micro-hardness in the FSSWed zone of AA5454-O aluminum alloy sheets

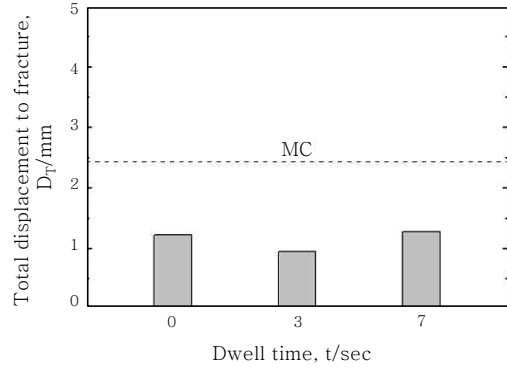


(a)

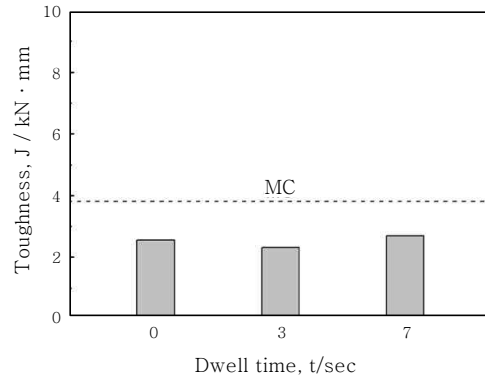


(b)

Fig. 11 Influences of the dwell time at the plunge depth of the tool on the (b) average maximum tensile shear load and (c) 0.2 mm proof load of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets



(a)



(b)

Fig. 12 Influences of the dwell time at the plunge depth of the tool on the (a) average total displacement and (b) average toughness of the FSSWed AA5454-O aluminum alloy sheets

과<sup>8)</sup>와는 달리, 유지시간을 변화시켰음에도 불구하고, 평균 최대인장전단하중 및 0.2 mm의 소성변형이 일어났을 때의 평균 하중에는 큰 변화가 수반되지 않고 유사한 값을 나타내지만, 유지시간이 3 sec인 경우에 있어서 각각 MC 접합체의 약 1.6 및 1.7배인 약 3.6 및 2.9 kN의 가장 높은 값을 나타낸다. 이러한 결과로부터, 마찰교반점접합기술을 이용하면 MC 접합체보다 높은 인장전단하중 및 강성을 갖는 접합체의 제조가 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 (a) 및 (b)는 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 0, 3 및 7 sec로 변화시켜 제작한 FSSW 접합체 및 MC 접합체의 상온인장전단시험에 있어서의 파단에 이르기까지의 평균 최대변위량 및 인성을 각각 나타낸다. 접합용 공구의 회전속도를 변화시킨 경우(Fig. 7 (a) 및 (b))와는 달리, 유지시간을 변화시켰음에도 불구하고, 평균 최대변위량 및 인성에는 큰 변화를 수반하지 않고, 모든 유지시간에서 MC 접합체보다 낮은 값을 나타낸다. Fig. 11 (a)에 나타난 것과 같이, FSSW 접합체가 MC 접합체보다 높은 최대인장전단하중을 나타냄에도 불구하고, FSSW 접합체가

낮은 인성을 나타내는 이유는, Fig. 12 (a)에 나타난 것과 같이, 낮은 변위량을 나타내기 때문인 것으로 추론된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는, 두께 1.4 및 1.0 mm의 5454-O 알루미늄합금 이중두께 판재 간의 접합에 마찰교반점접합기술을 적용하고, 접합인자가 접합부 특성에 미치는 영향을 조사하여, 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- 1) 모든 접합조건에서 접합부 부근에 균열과 같은 결함이 형성되지 않은 접합체가 얻어졌다.
- 2) 접합용 공구의 회전속도를 500에서 2500 rpm까지 변화시킨 결과, 500 rpm의 경우에는 접합계면이 초기의 직선적인 형태를 유지하고 있었지만, 1500 rpm 이상에서는 접합계면이 볼 형상 조직의 외곽부분을 감싸는 형태로 변형되어 있었다.
- 3) 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간을 0에서 7 sec까지 변화시켰지만, 접합부의 외관형상 및 단면조직에는 큰 변화가 수반되지 않았다.



4) 접합용 공구의 회전속도 및 삽입깊이에서의 유지 시간을 변화시켰음에도 불구하고, 접합부 내의 평균 경도에는 큰 변화가 수반되지 않았지만, 모든 접합조건에서 모재부 이상의 평균 경도값을 나타내었다.

5) 상온인장전단시험의 결과, 접합용 공구의 삽입깊이에서의 유지시간은 접합체의 인장전단특성의 변화에 큰 영향을 미치지 않았다.

6) 마찰교반점접합기술을 이용하면 MC 기술을 적용한 경우보다 우수한 상온인장전단특성을 갖는 접합체의 제조가 가능하였다.

## 후 기

본 연구는 울산광역시와 교육과학기술부의 지방과학 연구단지 연구개발사업 및 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 대한용접·접합학회편 : 용접·접합편람, 대한용접·접합학회, 2008, 322-322 (in Korean)
2. ASM International : ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993, 229-229
3. 溶接學會編 : 溶接·接合便覽, 溶接學會, 1998, 256-257 (in Japanese)
4. C. J. Lee et al., Materials & Design, 31-4 (2010), 1854-1861
5. J. Varis, Journal of Materials Processing Technology, 172-1 (2006), 130-138
6. L. Han et al., Materials & Design, 31-3 (2010), 1457-1467
7. B.K.Lim et al., Proceeding of KWJS, 46 (2006), 310-312 (in Korean)
8. H. J. Cho et al., Journal of KWJS, 24-1 (2006), 50-55 (in Korean)
9. Y. M. Yeon et al., Journal of KWJS, 24-1 (2006), 71-76 (in Korean)
10. 時末 光 : FSWの基礎と應用, 日刊工業新聞社, 2005, 148-150 (in Japanese)
11. H. J. Cho et al., Journal of KSW, 24-4 (2006), 285-289 (in Korean)
12. C.Y.Lee et al., Proceeding of KWJS, 46 (2006), 283-285 (in Korean)
13. C. Y. Lee et al., Journal of KWJS, 26-6 (2008), 556-561 (in Korean)
14. C.Y.Lee et al., Abstracts of KWJS, 49 (2008), 8 (in Korean)
15. Y. J. Kwon et al., Transaction of Nonferrous Metals Society of China, S1 (2009), 23-27