

## 마그네슘합금(AZ31B) 판재의 마찰교반 점용접시 접합특성에 미치는 툴 속도의 영향

신형섭<sup>\*,†</sup> · 정윤철<sup>\*</sup> · 최광<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>안동대학교 기계설계공학과

<sup>\*\*</sup>포항산업과학기술연구원

### Effects of Tool Speed on Joining Characteristics during Friction Stir Spot Welding of Mg-alloy(AZ31B) Sheet

Hyung-Seop Shin<sup>\*,†</sup>, Yoon-Chul Jung<sup>\*</sup> and Kwang Choi<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Mechanical Design Engineering, Andong National Univ., Andong 760-749 Korea

<sup>\*\*</sup>Steel Structure Research Lab., RIST, Hwasung 445-813, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : hsshin@andong.ac.kr

(Received November 18, 2010 ; Revised December 2, 2010 ; Accepted December 27, 2010)

#### Abstract

In this study, the friction stir spot welding (FSSW) of Mg alloy sheets has been tried using an apparatus devised with a CNC milling machine to give the precise control of joining condition including tool speed. The probe tool used is made of hard metal and composed of cylindrical shoulder and pin parts. The variation of morphologies formed after the friction stir spot welding depending on the plunge speed of the tool were investigated at each rpm of tool. The history of the temperature distribution and the vertical load induced during the spot welding with friction time were measured by using an Infrared Thermal Imager (THERMA CAMTM SC2000) and a loadcell located below the specimen fixture, respectively. Tensile-shear tests were also performed to evaluate the fracture load of welded specimens. In order to characterize the friction stir spot welding of Mg alloy sheets, the variation of the fracture load was discussed on micrographic observations, temperature distribution during the FSSW according to the plunge speeds of tool.

Key Words : Friction stir spot welding (FSSW), Mg alloy (AZ31B), Tool speed, Joining characteristics, Tensile-shear test

#### 1. 서 론

최근 녹색성장, 친환경, 지구온난화방지를 위해 환경 부하물질 저감, 기기 고효율화, 연비향상 등의 관점에서 항공기, 자동차 등 운송기계와 휴대용 전자제품 등 경량화가 요구되는 분야에서 경량합금의 사용이 급증하고 있다<sup>1)</sup>. 특히, 마그네슘 합금은 경량속 중 가장 낮은 밀도를 가지고 있고, 우수한 비강도, 리사이클성, 전자파 차폐성능 및 진동에 대한 감쇄능, 용이한 절삭성,

높은 열전도도 등으로 최근 주목을 받고 있다. 그러나 마그네슘 합금은 알루미늄 합금과는 달리 상온 성형성 및 접합성이 양호하지 않은 관계로 판재를 이용한 구조/기능성 부품의 제작을 위해서는 많은 연구와 기술 개발이 필요하다<sup>2,3)</sup>.

국내에서 최근 생산이 개시된 마그네슘 합금판재의 접합을 위해 아크 용접, 저항 점용접 등 용융 용접법을 시도하고 있지만 용접 잔류응력, 용융 및 재응고 과정에서 용접부의 조직변화, 기공의 존재 등 여러 문제가 발생하는 것이 알려져 있다<sup>3)</sup>. 최근 에너지 밀도가 높

고, 용접속도가 빠르고 용접부가 좋은 레이저 용접이 마그네슘 합금 판재에 적용하면 용접부 특성이 우수한 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>.

고상접합방식인 마찰 교반 용접(FSW)은 틀의 회전 마찰에 의한 가열 및 재료의 소성유동을 응용한 접합방법으로 용융용접에 비하여 접합온도가 낮아 변형이 매우 적으며 환경 친화적 특징을 가진다. 이러한 용접법을 사용하여 Al합금 등 경량판재에 적용하기 위한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되어 오고 있다<sup>5-7)</sup>. 한편 저자 등은 그간 과냉각액상영역에서 초소성 거동을 나타내는 벌크비정질합금(BMG)의 동종 및 경량합금과의 이종판재간 마찰교반점용접을 시도하였고<sup>8,9)</sup>, 틀의 삽입속도에 따른 거동을 명확히 할 수 있었다. 특히 경량합금판재와 이종재간 FSSW 특성을 파악하기 위해서 Mg합금 동종재의 FSSW 특성평가가 필요하다. Mg합금 판재의 겹치기 구조에 대한 마찰 교반 점용접(FSSW)시 입열량과 소성유동의 관점에서 틀의 회전 및 삽입 속도가 교반부 형성에 관한 연구는 중요하다. 본 연구는 마그네슘 합금(AZ31B-H24) 판재의 겹치기 구조에 대하여 마찰 교반 점용접을 시도하여 틀의 회전 및 삽입 속도에 따른 접합 특성 및 파괴하중에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 프루브 틀

실험에 사용된 마그네슘 합금은 스트립캐스팅과 압연 가공한 AZ31B-H24 판재로 그 화학조성과 기계적 물성치를 Table 1에 나타내었다. 두께 1 mm의 판재를 15×100 mm 크기의 쿠펜(coupon)형상으로 제작하여 Fig. 1과 같이 겹치기 형태(lap-joint) 점접합을 실시하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of AZ31B-H24

Chemical composition (%)			
Mg	Al	Zn	Mn
Bal.	3.1	0.9	0.4

Mechanical properties of Mg alloy			
Young's Modulus	Poisson's ratio	Yield strength	Thermal conductivity
45.0 GPa	0.35	120 MPa	96.0 W/m-K

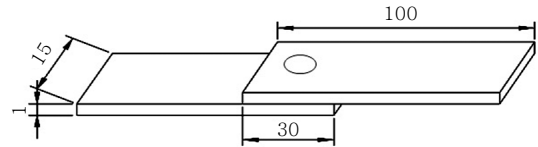


Fig. 1 Dimensions and geometry of welding part of lightweight alloy sheets specimen used

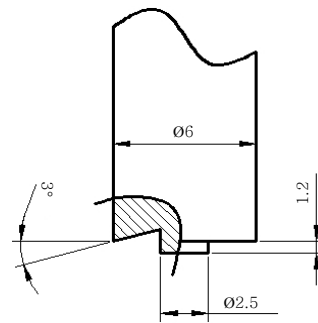


Fig. 2 Schematic view of probe tool used for friction stir spot welding

마찰 교반 점접합에 사용된 접합 틀은 Fig. 2와 같은 형상으로 직경 6 mm의 초경 봉재를 가공하였다. 프루브 틀의 핀(pin)부 직경과 높이는 각각 2.5 mm, 1.2 mm로 하였고, 어깨(shoulder)부는 시험편과 접촉하는 면이 안쪽으로 3° 들어간 형상으로 제작하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3은 Mg합금 판재의 마찰 교반 점용접에 사용된 소형 CNC 밀링머신을 나타내고 있다<sup>8,9)</sup>. 마찰 교반 점용접은 겹치기구조 판재 시험편을 약 30 mm 겹쳐 놓은 상태에서 고정용 지그(jig)를 사용하여 고정된 후, 일정한 속도로 회전하는 틀을 경사각 0°로 하여 시험편의 겹쳐진 부분 중앙에 강제로 교반 삽입하는 고상접합 방식이다. 이 때 틀의 회전속도를 포함한 접합조건을 Table 2에 나타내었다. 틀의 회전속도를 2,100, 2,700,

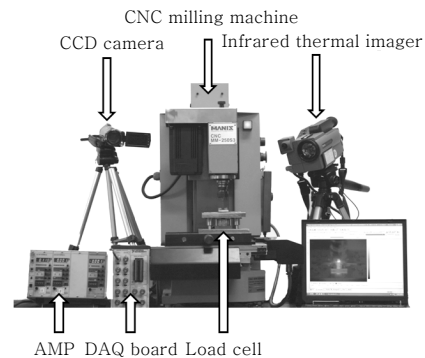


Fig. 3 Apparatus for friction stir spot welding

3,400 rpm으로 달리하였고, 각 rpm에서 톨의 삽입 속도를 4단계로 변화시키면서 이에 따른 교반부에 가해지는 입열량 차가 접합거동에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 톨의 삽입깊이를 1.8 mm로 일정하게 설정하였다.

시험편을 고정하는 지그 아래에 로드셀(loadcell: CAS, 5kN용량)을 설치하여 톨의 교반삽입에 의해 발생하는 수직방향 하중의 거동을 조사하였고, 동시에 적외선 열 화상카메라(THERMA CAMTM SC2000)를 사용하여 톨과 상부시험편 교반부 주위에서 발생하는 온도분포의 변화를 마찰시간에 따라서 측정하였다. 마찰 교반 점용접 후, 접합부 강도를 평가하기 위해 만능재료시험기를 사용하여 1 mm/min의 변위속도로 인장-전단 파괴시험을 실시하여 최대 파단하중을 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 마그네슘 합금 판재의 마찰 교반 점용접 시 접합 특성

Mg합금 판재의 마찰 교반 점용접 후, 톨의 회전 및 삽입속도에 따른 상부시험편에 형성되는 교반부와 접합부 단면형상을 Fig. 4에 나타내었다. 2,100 rpm의 경우, 톨의 삽입속도가 증가하면 버(burr)의 양이 감소하였고, 설정된 삽입 깊이까지 톨 삽입이 이루어지지 않았다. 반면 2,700, 3,400 rpm의 경우, 삽입속도가 증

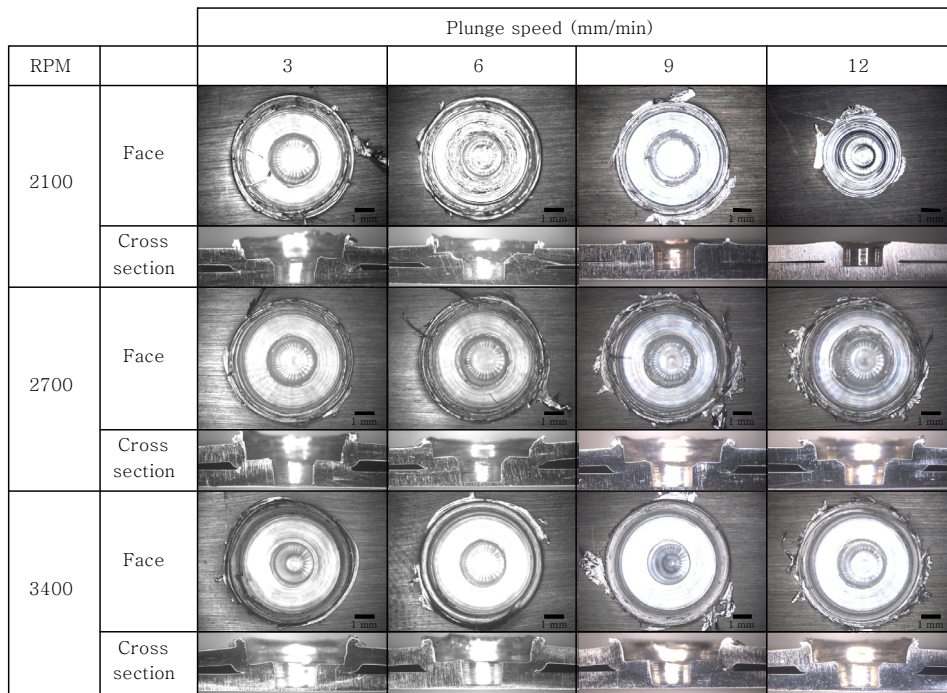
가하여도 유사한 접합부 양상을 나타내었고, 12 mm/min의 경우에도 톨 삽입은 충분히 이루어졌다.

마찰 교반 점용접 중 톨과 상부 시험편의 마찰 교반으로 인해 발생하는 교반부의 온도분포와 시험편에 부가되는 수직하중의 거동을 조사하여 톨의 회전속도에 따라서 Fig. 5 ~ 7에 각각 나타내었다. 이때 FSSW 공정의 접합영역에 해당하는 프루브 솔더가 상부시험편에 접촉하기 시작하는 순간을 점선으로 표시하였다. 이후, 온도분포 및 압력이 접합특성에 영향을 미치게 된다.

먼저 Fig. 5의 2100 rpm의 경우, 특히 (a)삽입속도 3 mm/min의 경우, 톨의 핀이 삽입되면서 하중이 증가하였지만 솔더부 접촉 이후에도 더 이상의 수직하중 증가는 나타나지 않았다. 반면, 온도는 서서히 증가하였고, 솔더부 접촉 후 급격히 증가하여 피크에 도달하였다. 톨의 삽입속도가 증가하면, 교반부의 최대온도는 감소하는 반면, 수직방향 하중은 증가하는 거동을 나타내었다. 즉, 삽입속도가 증가하면 마찰시간은 감소하여 마찰열 발생이 충분치 않게 되고, 이에 따라 교반

**Table 2** Joining condition for FSSW of Mg alloy (AZ31B-H24) sheets

Parameters	Joining conditions
Rotation speed (rpm)	2,100, 2,700, 3,400
Plunge depth (mm)	1.8
Plunge speed (mm/min)	3, 6, 9, 12
Holding time (sec)	1



**Fig. 4** Appearances of weld surface and cross-section after friction stir spot welding

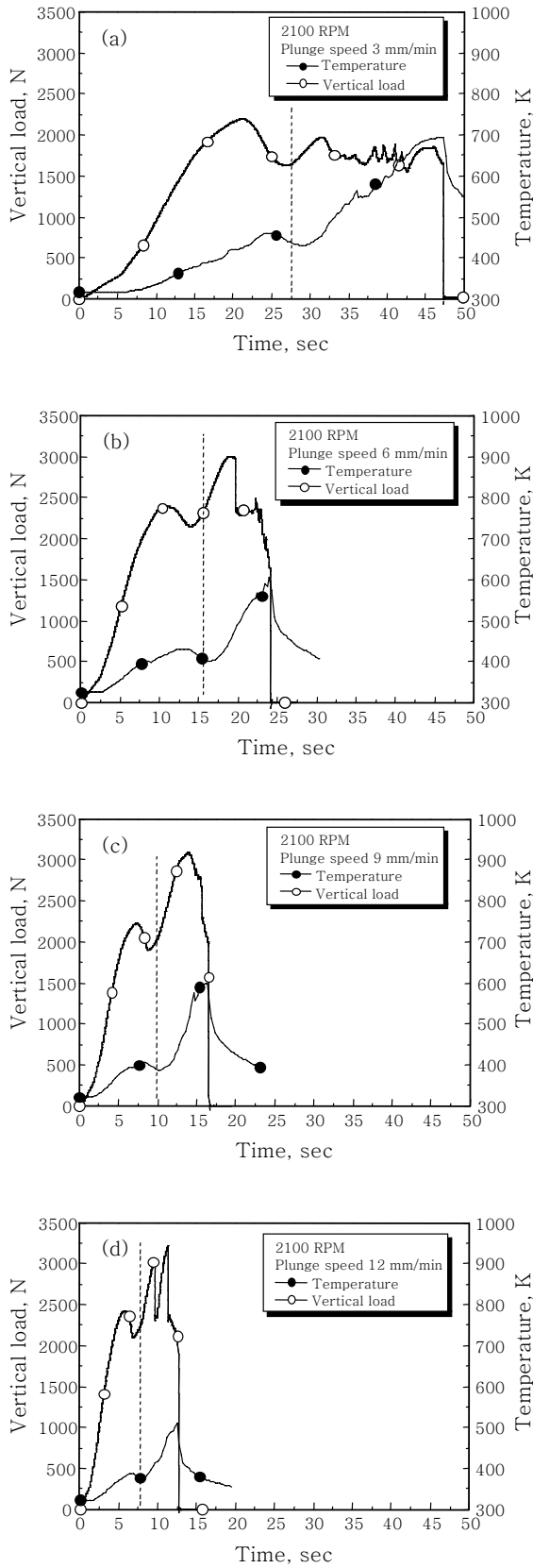


Fig. 5 Variation of vertical load applied and temperature during FSSW of Mg alloy sheets at 2,100 rpm

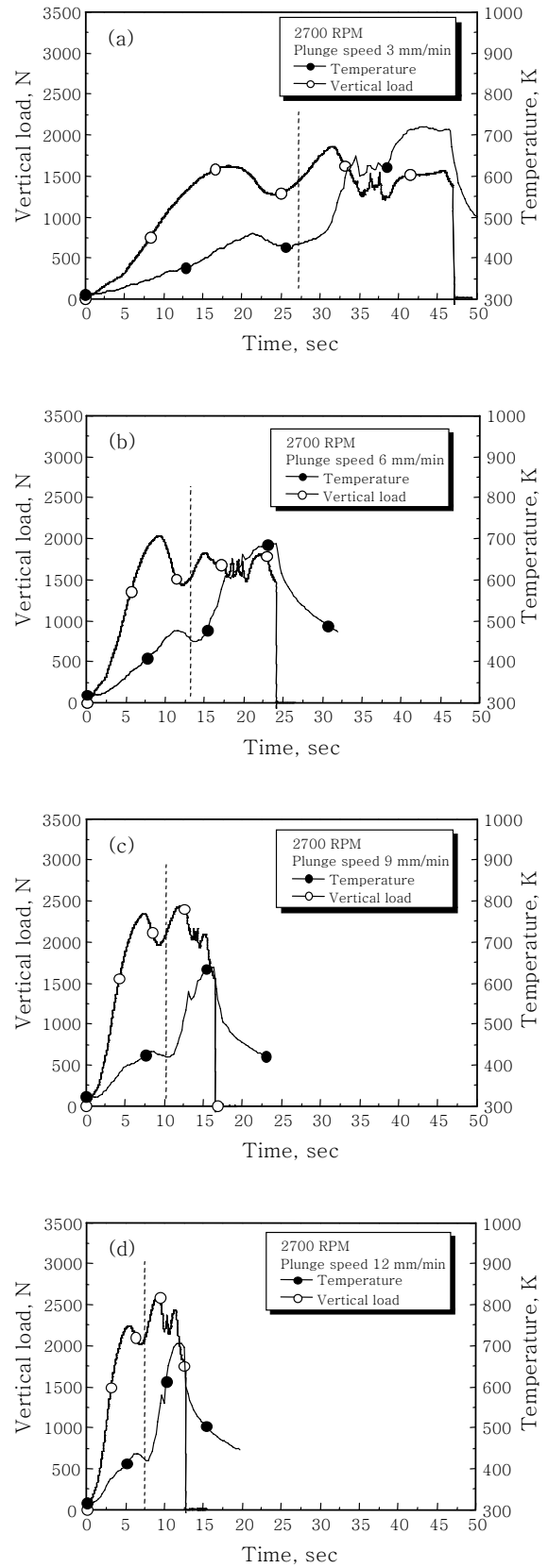
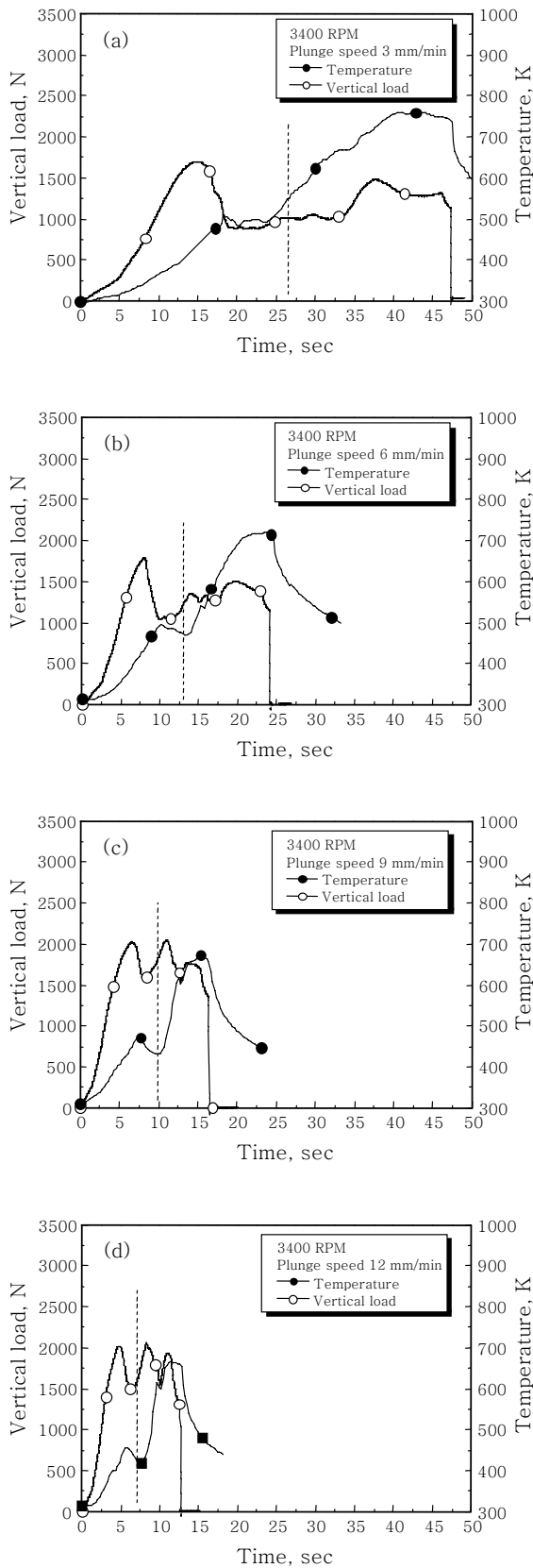


Fig. 6 Variation of vertical load applied and temperature during FSSW of Mg alloy sheets at 2,700 rpm

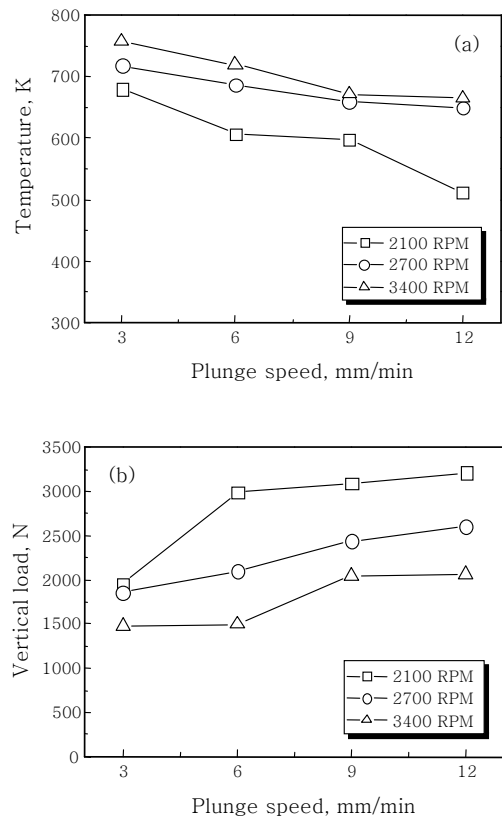


**Fig. 7** Variation of vertical load applied and temperature during FSSW of Mg-alloy sheets at 3,400 rpm

부 재료의 연화가 충분히 일어나지 않기 때문에 수직하중은 오히려 증가하는 거동을 나타내었다. 특히 (d) 12 mm/min의 경우, Fig. 4의 접합부 단면에서 볼 수 있듯이 설정한 깊이까지 삽입이 이루어지지 않은 것을 알 수 있다.

한편 톨의 회전속도가 2,700, 3,400 rpm으로 증가하게 되면, 톨 솔더가 상부면에 접촉한 이후 공정의 접합영역에서, 온도도 전체적으로 상승하는 반면 수직방향 하중의 더 이상의 급격한 상승은 나타나지 않았다. 그 경우 하부시험편에 톨이 설정한 깊이까지 완전한 톨 삽입이 이루어진 것을 볼 수 있다. 톨의 회전속도 (rpm)가 증가할수록 교반부로 입열량이 증가하면서 전체적인 온도 상승을 가져왔다.

톨의 삽입속도와 회전속도에 따른 최대온도의 변화를 Fig. 8(a)에 나타내었다. 톨의 회전속도가 낮고 삽입속도가 높을수록, 솔더 주위 교반부 온도는 감소하였다. Fig. 8(b)는 솔더 접촉후 접합영역에서 발생하는 수직방향 하중 최대치의 삽입속도에 따른 변화를 나타내고 있다. 톨의 회전속도가 증가할수록 수직방향 하중은 최대 온도와는 반대로 현저하게 저하하였고, 삽입속도의



**Fig. 8** Change of maximum (a)temperature and (b)vertical load according to plunge speed adopted at each rpm

증가에 따른 변화도 크지 않았다는 것을 알 수 있다. 따라서 톨의 회전속도와 삽입속도가 Mg합금에서는 교반부 입열량을 증대시켜서 접합부 온도에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

### 3.2 톨 속도와 접합부 파단하중의 관계

마찰 교반 점용접 후, 접합된 시험편을 사용하여 인장-전단시험을 실시한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 먼저 (a) 톨 회전속도 2,100 rpm의 경우, 삽입속도 6, 9, 12 mm/min의 경우 하중이 증가하다가 피크 값에 도달한 후 바로 전단파단이 일어났으나, 삽입속도 3 mm/min의 경우, 하중은 더욱 증가하였고, 피크 값에 도달 후 상부시험편 솔더 주위에서 plug out을 일으키며 하중이 유지되는 거동을 보였다. 즉, 톨의 삽입이 충분했던 3 mm/min의 경우, 전단 및 plug-out이 혼합된 파단 거동을 나타내었다. 그러나 톨의 삽입 속도가 높아서 삽입이 충분하지 않았던 나머지 경우에는 교반이 불완전하여 접합부 면적이 작고 전단파단만을 나타내어 낮은 파단하중을 보였다. 그러나 (b) 2,700, (c) 3,400 rpm에서는 전단파단과 plug out 거동이 혼합된 파단거동을 모든 경우에서 볼 수 있다.

각 RPM에서 파단하중과 톨 삽입속도의 관계를 정리하여 Fig. 9(d)에 나타내었다. 2,100 rpm의 경우, 삽입속도 3 mm/min의 경우에서 가장 큰 파단하중을 나타냈고, 톨 삽입속도가 증가하면서 파단하중이 감소하는 거동을 나타내었다. 한편, 2,700, 3,400 rpm의 경우, 톨 회전속도가 증가하면서 입열량이 증가하는 관계로 최대온도가 높았던 삽입속도 3 mm/min의 경우보다 최대온도가 다소 낮았던 9, 12 mm/min에서 보다 높은 파단하중을 나타내었다. 특히, Fig. 8(a)와 Fig. 9 (d)를 비교하면, 최대 온도가 680 K을 나타내는 접합조건(2,100 rpm - 3 mm/min, 2,700 rpm - 9 mm/min)에서 약 1 kN의 파단하중을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 마찰 교반 점용접 중 발생하는 교반부 온도분포가 교반 특성과 파단하중에 영향을 크게 미친다는 것을 나타내고 있다. 3400 rpm - 3 mm/min의 경우와 같이 750 K을 넘는 온도에서는 결정립 조대화 등으로 인해 오히려 접합부 강도의 저하를 가져왔을 가능성이 있다. 이에 대해서는 향후 결정립 크기 조사 등을 통해 명확히 하는 것이 필요하다.

Fig. 10에 나타낸 FSSW 가공한 시험편의 인장-전단 시험 후 파면사진으로부터 2,100 rpm의 경우, 톨

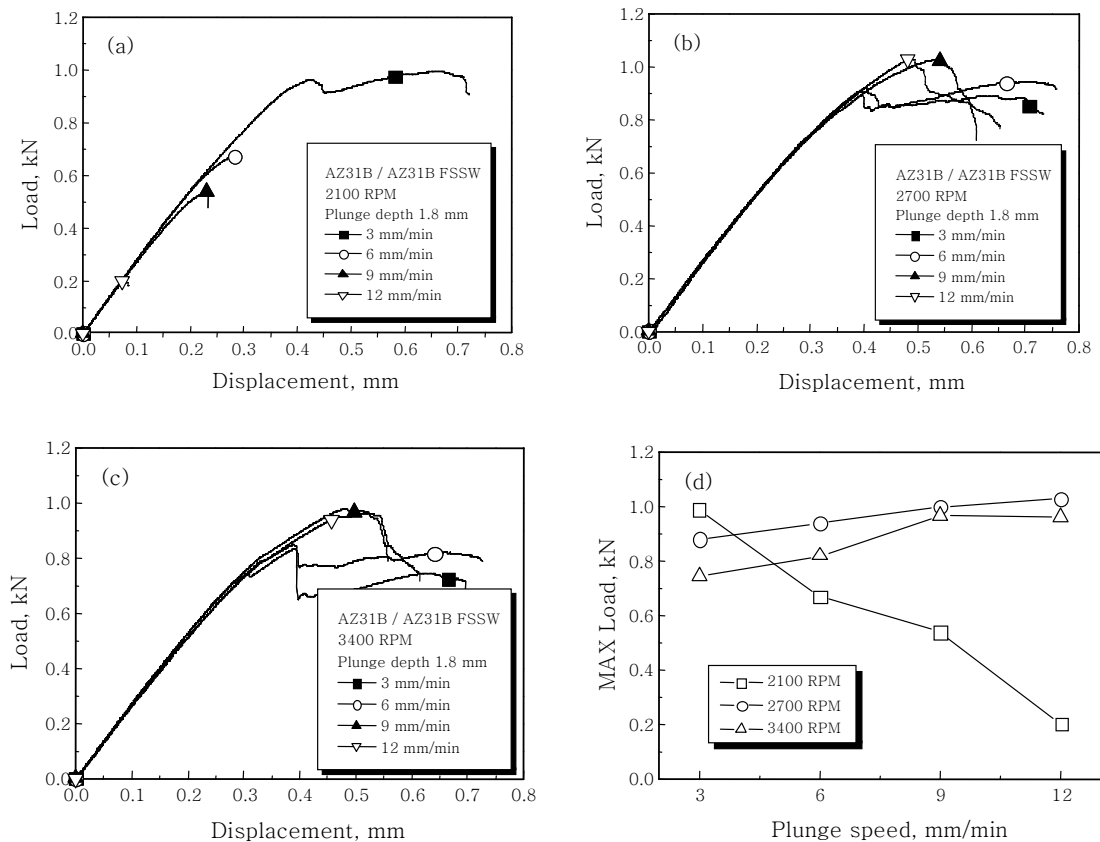


Fig. 9 Results of tensile-shear test after FSSW. (a) 2,100 rpm (b) 2,700 rpm (c) 3,400 rpm (d) Maximum fracture load according to plunge speed at each rpm of tool

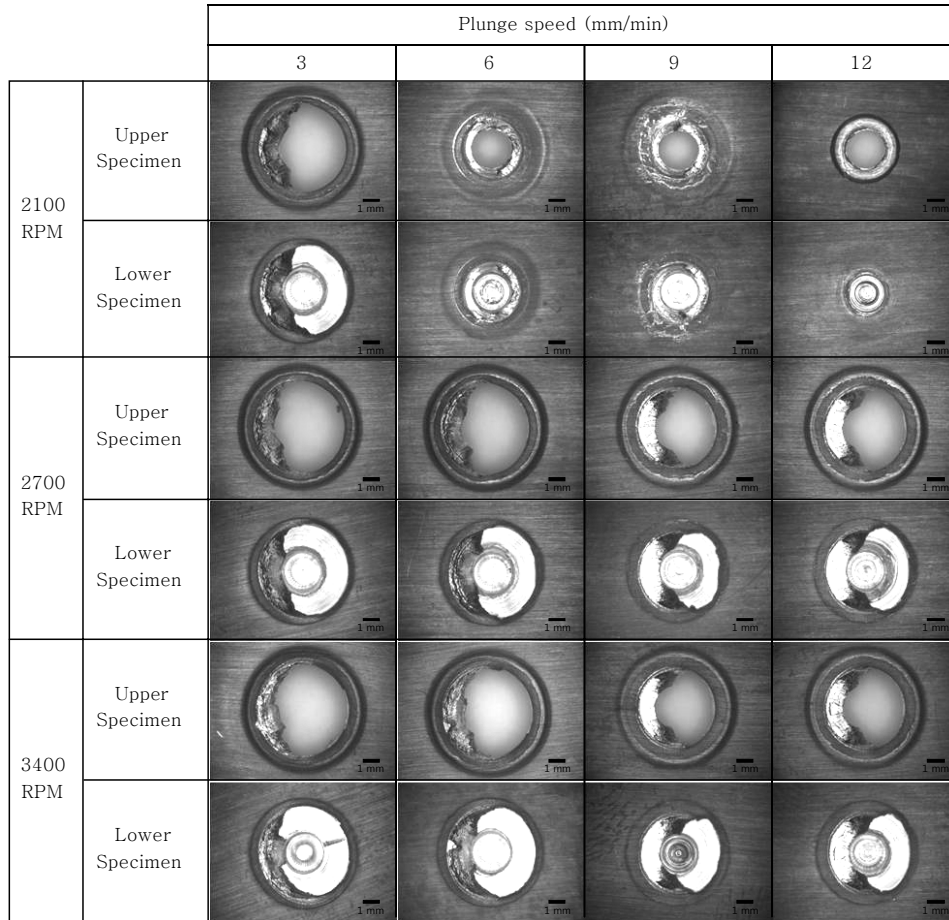


Fig. 10 Appearances of fracture surface after tensile-shear test of FSSWed specimens at each rotation speed (rpm) of tool

삽입 속도가 높아지면서 툴 삽입이 충분히 이루어지지 않아 교반 접합부영역(stir zone)이 툴 삽입부 주위에 제한되어 있는 것을 볼 수 있고, 2,700, 3,400 rpm의 경우에는 전단 및 접합부의 솔더부에서 plug-out이 함께 발생한 것을 볼 수 있다. 또한 파단하중이 높았던 경우에는 넓은 전단파면이 형성된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 접합부에서 유지할 수 있는 하중의 증대를 위해, 핀 길이의 변화를 부여하여 상부 시험편에서 솔더부의 삽입깊이를 달리한 실험이 필요하고, 이를 통해 접합부 파단하중의 증대가 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Mg 합금 판재의 겹치기 접합 방식으로 마찰 교반 점용접 후, 툴의 회전 및 삽입 속도에 따른 접합 특성 및 그에 따른 접합 하중을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 마찰 교반 점용접시 툴의 회전속도와 삽입속도에

따라 발생하는 온도와 수직하중의 관계를 파악하였다. 툴의 삽입속도가 낮거나 회전속도가 높을 경우 마찰 입열량이 증가하여 접합과정 동안의 접합부 온도를 상승시키면서 수직방향 하중의 감소를 가져왔다.

2) Mg합금 판재의 마찰 교반 점용접시 양호한 접합부 및 파단하중을 얻기 위해, 툴의 회전 및 삽입속도의 제어를 통해 입열량의 조절이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 툴 형상에서는 680 K의 교반부 온도를 제공하는 접합조건에서 약 1 kN의 양호한 접합부 하중을 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0024639).

#### 참 고 문 헌

1. W. J. Park, I. M. Park and N. J. Kim : Development

- in Light Weight Metals for Automotive Application J. KSAE, **16-4** (1994) 23-31 (in Korea)
2. E. S. Park, J. W. Kim and D. H. Kim : Recent Development of High Strength, High Toughness Magnesium Alloys, J. KFS, **18-2** (1998) 118-123
  3. S. Fukumoto, D. Yamamoto, T. Tomita, K. Okita, H. Tsubakino, A. Yamamoto : Effect of Post Weld Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of AZ31B Friction Welded Joint" Materials Transactions, **48-1** (2007) 44-52
  4. M. Y. Lee, C. S. Ryu and W. S. Chang : Trends in Application of Magnesium Alloy and Its Welding Characteristics with Laser, J. KWJS, **25-5** (2007) 485-491 (in Korean)
  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, J. KWS, **23-3** (2005) 228-232 (in Korean)
  6. H. J. Cho, H. J. Kim, C. K. Cheon and W. S. Chang : Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Mg alloys, J. KWS, **24-4** (2006) 285-289. (in Korean)
  7. H. Hori and H. Hino : Application of friction stir welding to the car body, Welding International **17-4** (2003) 287-292
  8. H. S. Shin and Y. C. Jung : Characteristics of Friction Stir Spot Welding of Zr-based Bulk Metallic Glass Sheets, J. Alloys Compound, **504** (2010) S279-S282
  9. H. S. Shin and Y. C. Jung : Characteristics of Dissimilar Friction Stir Spot Welding of Bulk Metallic Glass to Lightweight Crystalline Metals, Intermetallics, **18** (2010) 2000-2004