

# 마찰교반접합프로세스를 응용한 알루미늄합금의 결정립미세화

## Application of Friction Stir Welding Process to Grain Refinement of Aluminum Alloys

권 용재, Naobumi Saito

Institute for Structural and Engineering Materials,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya, Aichi 463-8560, Japan

**ABSTRACT** Commercially pure 1050 aluminum alloy with ultra-fine grain sizes was produced by a friction stir process. The maximum temperature in the friction stir processed zone decreased almost linearly with the tool rotation speed. In the friction stir processed zone, dislocation density was very low and fine equiaxed grains were observed. The grain size decreased with tool rotation speed. It is noteworthy that, for 560 rpm, a grain size decreased to even the submicron level with only the single pass of friction stir process. These fine grains resulted in improvement in hardness of the friction stir processed zone.

### 1. 서 론

마찰교반접합법(Friction Stir Welding; FSW)은, 1991년 영국의 TWI (The Welding Institute)에 의해 개발된 이래 [1], 금속재료의 새로운 고상접합법으로서 연구가 활발히 진행되어 있다 [2]. 이러한 마찰교반접합프로세스를 이용하면, ECAP (Equal Channel Angular Pressing) [3], HPT (High-Pressure Torsion) [4] 및 ARB (Accumulative Roll Bonding) [5] 등과 같은 종래의 강소성가공법과 같이, 재료에 강소성변형을 인가할 수 있다. 그래서, 본 연구그룹에서는, 마찰교반접합프로세스를 접합법이 아니라 강소성변형가공을 이용한 새로운 결정립미세화프로세스로서 제안하여 연구를 진행하고 있다. Fig. 1는 본 연구에 있어서의 마찰교반프로세스의 원리를 나타낸다. 즉, 고속으로 회전하고 있는 마찰교반프로세스용 공구의 핀 부분을 재료 내부에 삽입한 후 이동시키면, 공구와 재료 사이에서 발생하는 마찰열에 의해 재료의 온도가 상승하여 재료가 연화됨과 동시에, 재료 내부에 삽입되어 고속회전하고 있는 핀에 의해 재료가 기계적으로 교반되어, 재료에 강소성변형이 인가된다. 그 결과, 재료의 내부에서 재결정이 일어나고, 결정립이 미세화 된다.

본 연구에서는, 마찰교반접합프로세스를 이용하여 초미세결정립을 갖는 공업용 순 알루미늄합금(1050)을 제조함과 더불어, 공구의 회전속도가 마찰교반부의 온도변화, 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

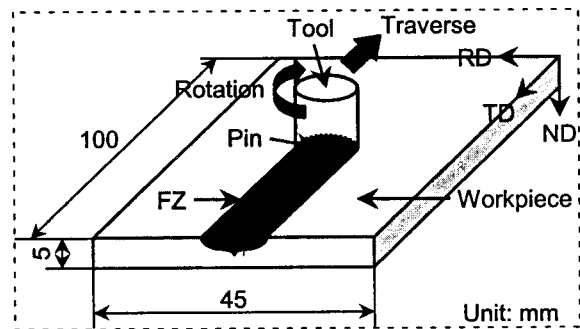


Fig. 1 Schematic illustration of the principle of the friction stir process (FSW) the present research. The friction processed zone is hatched and labeled FZ. The rolling, transverse and normal directions of the workpiece are labeled RD, TD and ND respectively.

### 2. 실험방법

원재료로서 사용한 1050 알루미늄합금은 냉간압연재이었으며, 길이 100mm, 폭 45mm, 두께 5mm이었다. 마찰교반프로세스용 공구는 쇼울더부의 직경이 7mm, 원추형의 핀의 높이 및 직경이 3mm이었다. 마찰교반프로세스는 공구의 이동속도를 155mm/min으로 일정하게 하고, 회전속도를 560rpm에서 1840rpm까지 변화시켜, 1회만 행하였다. 공구의 회전방향은 시계방향이었으며, 이동방향은 원재료의 압연방향에 수직인 방향, 즉 시료의 길이 방향이었다. 그리고, 마찰교반부의 온도변화를 측정하기 위하여, 열전대의 끝 부분이 고속으로 회전하면서 이동하는 핀의 선단 부근에 위치하도록 설치하였다.

조직관찰 및 경도 측정은 공구의 이동방향에 수직인 절단면에 대하여 행하였으며, 경도시험의 하중과 하중유지시간은 각각 100gf, 10초이었다.

## 2. 실험결과 및 고찰

### 2.1 최고도달온도

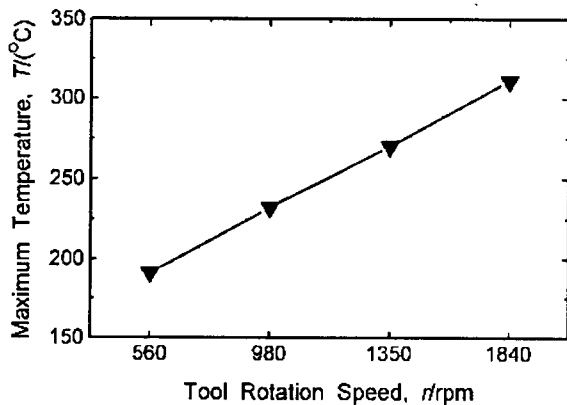


Fig. 2 Influence of the tool rotation speed on maximum temperature that the friction stir processed zone reached during processing.

Fig. 2는 공구의 각 회전속도에 있어서 마찰교반부의 최고도달온도를 나타낸다. 최고도달온도는 공구 회전속도의 증가와 함께 거의 직선적으로 증가하였지만, 어느 경우에 있어서도 1050 알루미늄합금의 용점 이하임을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에 있어서의 마찰교반프로세스가 알루미늄합금의 고상상태에서 이루어졌다는 것을 의미한다.

### 2.2 미세조직



Fig. 3 Typical optical macrograph of cross-section perpendicular to the tool trajectory direction of the friction stir processed specimen

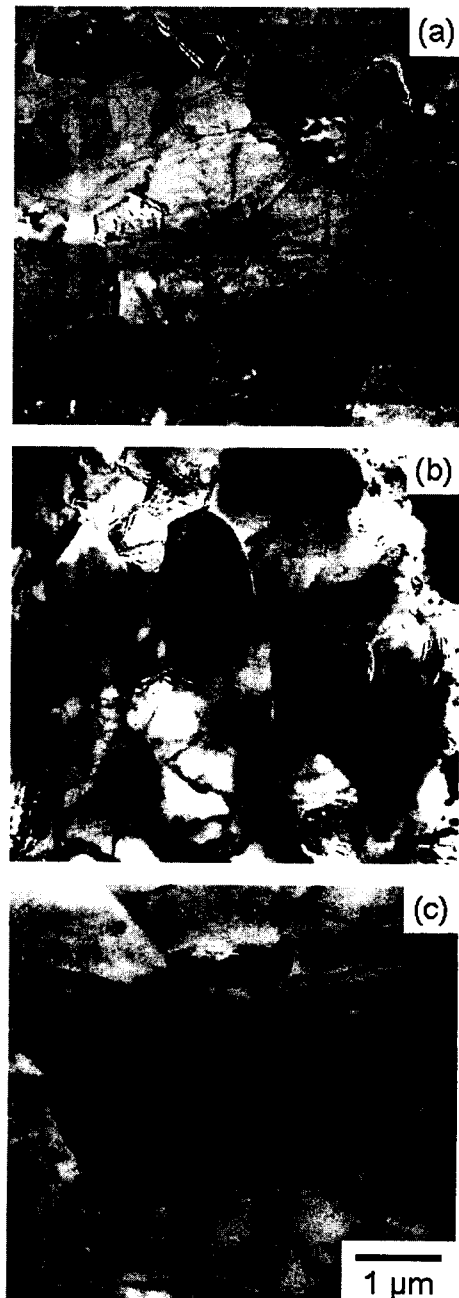


Fig. 4 TEM micrographs of the friction stir processed zone; (a) 560rpm, (b) 980rpm and (c) 1840rpm.

Fig. 3은 마찰교반부 부근의 광학현미경조직을 나타낸다. 미가공부(UZ)에서는 결정립이 원재료의 압연방향(RD)으로 신장된 전형적인 압연조직이 관찰되었지만, 마찰교반부(FZ)에서는 압연조직은 없어지고, 미가공부와는 전혀 다른 새로운 미세조직으로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 (a) 560rpm, (b) 980rpm 및 (c) 1840rpm에서 가공한 시편의 마찰교반부의 TEM 조직을 나타낸다. 마찰교반부에서는 전위밀도가 대단히 낮고, 미세한 등축정의 결정립으로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다. 마찰교반부에서의 결정립경은 공구의 회전속도와 함께 증가하였지만, 1840rpm에 있어서도 약  $4\mu\text{m}$  이하의 미세한 결정립이 얻어졌다. 특히, 560rpm에서는,  $1\mu\text{m}$  이하까지도 결정립경을 미세화하는 것이 가능하였다. 이러한 결과는, 마찰교반프로세스가 재료의 결정립미세화프로세스로서 대단히 효과적임을 나타내고 있다.

## 2.2 경도

Fig. 5는 평균경도를 나타낸다. 1840rpm에 가공한 시편의 마찰교반부는 미가공부보다도 낮은 경도치를 나타내었지만, 공구 회전속도의 감소, 즉 결정립이 미세화됨에 따라 경도는 현저히 증가하여, 560rpm에서는 마찰교반부가 미가공부보다 약 37% 높은 경도치를 나타내었다.

Fig. 5 Average Vickers microhardness of the unprocessed and friction stir processed zones.

## 4. 결 론

마찰교반접합프로세스를 이용하여 초미세결정

립을 갖는 1050 알루미늄합금을 제조함과 더불어, 공구의 회전속도가 마찰교반부의 온도변화, 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- (1) 마찰교반부의 최고도달온도는 공구의 회전속도의 증가와 함께 거의 직선적으로 증가하였지만, 어느 경우에 있어서도 1050 알루미늄합금의 용점 이하이었다.
- (2) 마찰교반부는 압연조직인 미가공부와는 달리, 등축정의 미세한 결정립으로 구성되어 있었으며, 공구 회전속도의 증가와 함께 마찰교반부의 결정립경도 증가하였지만, 560rpm에서는  $1\mu\text{m}$  이하까지도 결정립경을 미세화하는 것이 가능하였다.
- (3) 마찰교반부의 경도는 공구회전속도의 감소, 즉 결정립이 미세화됨에 따라 거의 직선적으로 증가하여, 미가공부보다 최대 37%나 높은 경도치를 나타내었다.
- (4) 이상의 결과로부터, 마찰교반프로세스가 재료의 결정립미세화에 따른 기계적 성질의 향상에 매우 효과적인 프로세스임이 확인되었다.

## 참고문헌

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith and C. J. Dawes: GB Patent Application No. 9125978.8, Dec. 1991, US Patent No. 5460317, Oct. 1995.
- [2] C. J. Dawes and W. M. Thomas: Weld. J. **75** (1996) 41-45.
- [3] T. G. Langdon, M. Furukawa, M. Nemoto and Z. Horita: JOM **52**(2000) 30-33.
- [4] I. V. Alexandrov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, R. K. Islamgaliev and R. Z. Valiev: Nanostruct. Mater. **10**(1998) 45-54.
- [5] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R.G. Hong: Scr. Mater. **39**(1998) 1221-1227.