

# 누적압연접합(Accumulative Roll-Bonding, ARB)에 의한 A의 결정립 미세화와 마모 특성 연구

박관순\* · 이태오\* · 김용석\*

## An Investigation of Sliding Wear and Microstructural Evolution of Ultra-Fine Grained Pure Al Fabricated by ARB Process

K. S. Park, T. O. Lee and Y. S. Kim

### Abstract

Ultra-fine grains were produced in pure Al using an Accumulative Rolling-Bonding (ARB) process. After several cycles of the ARB process, pure Al sheets were filled with the ultra-fine grains whose diameters were several hundred nano-meters. With ARB cycles, the nature of grain boundaries of the ultra-fine grains changed from diffusive sub-boundaries to well-defined high angle boundaries. After 7 cycles, ultra-fine polycrystals with large misorientations between neighboring grains were obtained. Sliding wear tests using a pin-on-disk type wear tester were conducted on the ultra-fine grained pure Al. Wear rates of pure Al increased with the increase of ARB cycle numbers in spite of the increase in hardness. Worn surfaces and cross-sections were examined with optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) to investigate the wear mechanism of the ultra-fine grained pure Al.

**Key Words** : Ultra fine grain, Aluminum, Accumulative rolling-bonding (ARB), Sliding Wear

### 1. 서 론

최근 구조재료의 기계적 성질을 향상시키기 위해서 여러 가지 연구가 행하여지고 있는데, 그 중 대표적인

방법은 높은 소성변형을 통하여 재료의 결정립을 미세화시키는 방법이다. 이러한 높은 소성변형을 이용한 결정립 미세화 방법으로는 torsion straining, ECAP (equal-channel angular pressing) 그리고 mechanical milling

\* 국민대학교 금속재료공학부

형태를 유지하면서, 무한대의 소성변형을 가할 수 있어 수백 나노미터 이하의 결정립 크기를 갖는 재료를 제조할 수 있는 장점을 지닌다.<sup>(3,4)</sup> 현재 초미세립 소재의 마모 특성은 국내외적으로 연구 보고되어 있지 않으나, 일반적으로 높은 경도를 지닌 소재의 경우 내마모성 및 내마삭성이 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

본 연구는 ARB 공정을 통하여 기계적 성질이 우수한 초미세립 bulk 판재를 제조하고, 이러한 초미세립 bulk 판재 미세조직과 그 상온 미끄럼마모 특성을 분석코자 하는 목적으로 행해졌다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 ARB 공정 및 미세조직 관찰

본 연구의 원 소재로는 두께 2 mm의 pure Al 판재를 사용하였다. 본 소재로부터 폭 3 mm, 길이 50 mm의 판재를 가공하고, 가공된 시편을 529°C에서 열처리 한 후, 우수한 표면 접합을 유도하기 위해서 판재의 표면을 wire brushing 하고 아세톤 세척을 행하였다. 이후 시편 두 장을 겹치고 각 모서리에 드릴로 구멍을 낸 다음 가는 철사를 이용하여 판재를 동여매고 165°C에서 10분간 예열 후 50 %의 압하율로 압연하였다(Fig 1). 이러한 과정을 반복함으로써 초기 시편 크기의 변화 없이 가공량을 계속적으로 증가시킬 수 있었으며 본 실험에서는 7 cycle 까지 열간 압연을 반복하였다. ARB 공정 각 cycle 후 시편의 경도를 미소비커스경도계로 측정하였다.

ARB 7 cycle 까지의 변형량에 따른 시편 미세조직을 투과전자현미경(TEM)을 통하여 관찰하였다. ARB 공정 후 기계적 연마를 통하여 약 100 $\mu$ m 두께의 판상 시편을 얻은 후, 이를 다시 트윈 젯(twin-jet) 전해 연마기로 전해 연마하여 TEM 미세조직 분석용 시편을 준비하였다. 젯 연마(jet polishing) 용 용액으로는 90% Acetic Acid + 10% Perchloric Acid 용액을 사용하였다. TEM 조직은 Jeol 1210 투과전자현미경을 사용하여 가속 전압 120keV로 관찰되었다.

### 2.2 미끄럼마모 시험

미끄럼마모 시험은 pin-on-disk type의 마모 시험기를 사용하여 각 cycle 시편에 대하여 상온 대기 중에서 실인 스테인리스강 볼을 사용하였다. 마모 시험시 일정한 마모조건을 유지하기 위해서 미끄럼 속도는 0.05 m/s, 마모거리는 350 m로 일정하게 유지하였다. 마모 하중은 0.5 N~1.0 N으로 변화를 주었고, 시험 전 후의 시편 무

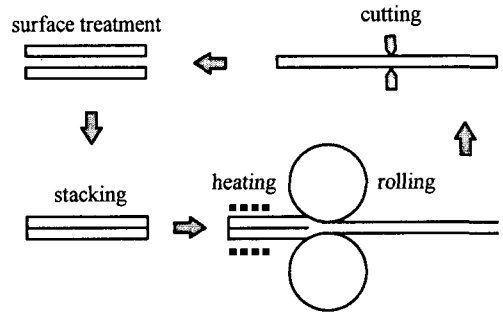


Fig. 1 The schematic plot of Accumulative Roll-Bonding Process

시하였다. 마모 상대재로는 경도값이 Hv 153 kg/mm<sup>2</sup> 계를 0.01 mg의 정밀도롤로 측정하여 마모량을 산출하였다. 마모면과 마모단면을 각각 SEM과 OM을 통하여 관찰하였고 TEM에 의한 미세조직과 연관지어 분석하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직 분석

ARB 공정 중 미세조직의 변화와 결정립 간의 상대적인 방위각의 차이를 관찰하기 위해서 pure Al 시편의 TEM 미세조직을 각 cycle 단계별로 분석하였다. Fig 2는 여러 cycle 후의 TEM 미세조직과 각각의 SADP (selected area diffraction pattern)를 보여주고 있다. Fig 2 (a)는 1 cycle 후의 pure Al의 미세조직 사진을 보여주고 있는데, 약간의 아결정립과 전위들이 모여 형성된 전위셀이 관찰되고 있으며, 전위 밀도가 높은 것을 보인다. 또한 1 cycle 후의 SADP는 single net pattern을 보여주고 있는데, 이로부터 아결정립과 전위셀들은 매우 비슷한 방위각을 지님을 알 수 있다. Fig 2 (b)는 ARB cycle이 점차 증가함에 따라 초기에 생성되었던 전위셀들이 점차 없어지고 아결정립들이 더 많이 생성되고 있음을 보여준다. SADP 분석으로부터 각 아결정립들 사이의 방위각은 여전히 작음을 확인할 수 있다. 그러나 점차적인 가공량 증가에 의해서 5 cycle의 경우, 전위 밀도는 점차 감소하고 방위각 차이가 큰 아결정립들이 생성됨을 알 수 있다(Fig 2 (c)). ARB 공정을 7 cycle 까지 행하였을 경우, Fig 2 (d)에서 보여 주듯이 아결정립과 전위는 거의 존재하지 않으며 매우 미세하고 결정립계가 깨끗한 700nm의 재결정립이 관찰되었다.

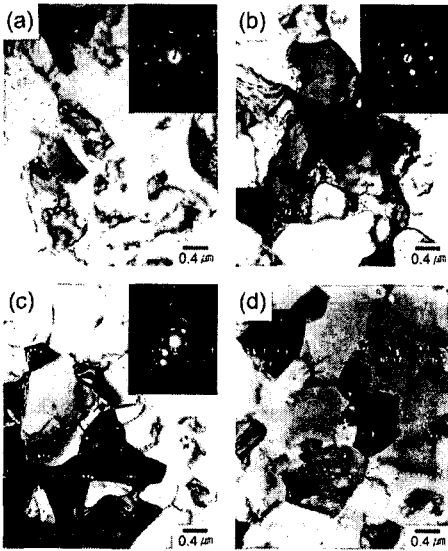


Fig. 2 TEM microstructures and corresponding SADP of the pure Al after ARB process : (a) 1 cycle, (b) 3 cycle, (c) 5 cycle and (d) 7 cycle

Fig 3은 각 cycle 단계별 미소비커스경도의 변화를 보여준다. ARB 공정 1 cycle 후 경도가 급격히 증가한 후 일정하게 유지되는 것이 관찰된다. ARB cycle 후의 급격한 경도 증가와 유지는 변형을 증가에 따라서 생성된 전위들과 후속되는 ARB 공정 중에 이들 전위들이 아결정립과 대각립계를 형성하고, 결정립이 미세화되며 나타난 결과로 고찰된다. 이러한 결과는 다른 Al 합금에 관한 연구에서도 확인되고 있다.<sup>(6)</sup>

### 3.2 미끄럼마모 결과

Fig. 4는 각 ARB 시편의 cycle과 마모하중 변화에 따른 마모속도의 변화를 보여주고 있다. ARB 공정 4~5 cycle 까지 변형량이 증가함에 따라 마모 속도가 점차 증가하고, 매우 미세한 재결정립을 보이는 7 cycle의 경우 다시 마모 속도가 감소하고 있다. 변형량의 증가에 따라 마모 속도가 증가하는 것은, cycle수 증가에 따른 높은 경도에도 불구하고, 연성이 감소하여 마모에 대한 임계변형율이 낮아 마모면에서 균열이 쉽게 발생한 때문으로 고찰된다<sup>7)</sup>. Fig. 5는 0.5 N 하중 하에서 마모 시험된 4 cycle과 7 cycle 시편의 마모면과 마모단면을 보여주고 있다. Fig. 5 (a), (b)로부터 마모속도가 높은 4 cycle 시편에서 마모속도가 낮은 7 cycle 시편에서보다 변형층 박리가 더 쉽게 일어남을 알 수 있고, 마모단면 사진은 더 깊은 균열을 보인다. 6~7 cycle 시편에서 마모 속도가 감소하는 현상은 대각립계를 지니는 미세한

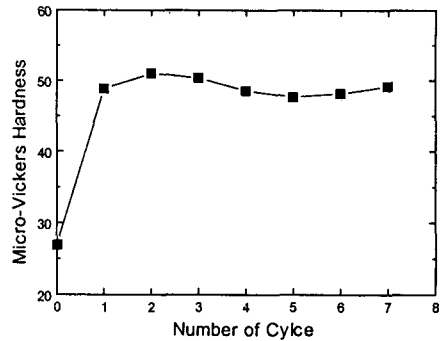


Fig. 3 Micro-Vickers Hardness of the pure Al after ARB process

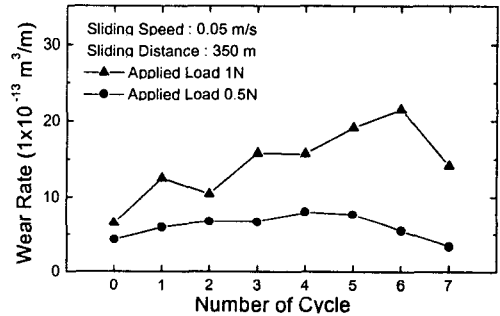


Fig. 4 Variation of wear rates of ARB processed pure Al as a function of applied load and ARB cycles

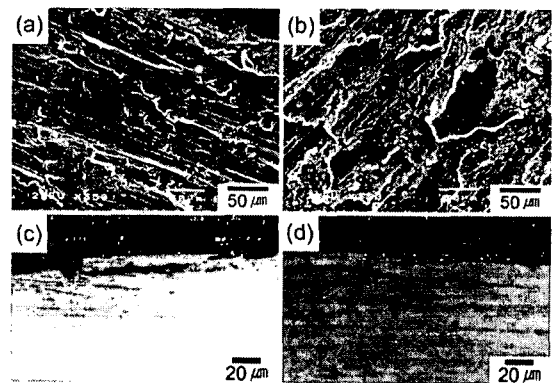


Fig. 5 Worn surfaces (SEM) and cross sections (OM) of the ARB processed pure Al : (a) 7 cycle(surface), (b) 4 cycle (surface), (c) 7 cycle (cross section) and (d) 4 cycle (cross section)

결정립과 연관된 것으로 추정되나, 이에 관해서는 좀 더 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

누적압연접합(ARB) 공정에 의하여 제조된 초미세립 pure Al의 미세조직을 분석하고 미끄럼마모 시험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Pure Al 판재에 7 cycle 까지 ARB 공정을 행하여 높은 변형율을 가한 결과, 초기 결정립에 비해서 매우 미세한 수백 nm 크기의 재결정립이 생성되었다.

(2) ARB 공정을 거친 pure Al 판재는 매우 높은 경도 증가를 보였고, cycle 수의 증가에 따라 경도는 증가하지 않고 일정하게 유지되었다.

(3) ARB 공정을 거친 pure Al 판재의 상온 미끄럼마모 속도는, 판재의 경도 증가에도 불구하고, ARB 공정 cycle의 증가와 함께 증가하였다.

#### 후 기

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 협동연구과제지원사업에 의하여 수행되었으며, 이의 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Sakai T., Saito Y., Hirano K. and Kato K., 1988, Trans. ISIJ, Vol.28, pp.1028.
- (2) Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Valiev, M.Z. and Langdon T.G., 1996, Acta Mater., Vol.44, p.4619.
- (3) Saito Y., Tsuji N., Utsunomiya H., Sakai T. and Hong R.G. 1998, Scripta Mater., Vol.39, p.1221
- (4) Tsuji N., Saito Y., Utsunomiya H. and Tanigawa S., 1999, Scripta Mater., Vol.40, p.795
- (5) Preece C.M., 1979, Treatise Mater. Sci. Technol., Vol.16, pp.249.
- (6) Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M. and Langdon T.G., 1997, Acta mater., Vol.45, p.4733.
- (7) Sytsggrlini G., Bonollo F., Molinari A. and T Iziani A., 1997, Wear, Vol.221, p.192.