

## 누적압연접합에 의한 5052 Al 합금의 결정립 미세화와 기계적 특성 연구

하종수\* · 강석하\* · 김용석\*

### An Investigation of Microstructural Evolution and Sliding Wear Behavior of Ultra-Fine Grained 5052 Aluminum Alloy Fabricated by a Accumulative Roll-Bonding Process

J.S. Ha, S.H. Kang, and Y.-S. Kim

#### Abstract

Microstructural evolution and dry sliding wear behavior of ultra-fine grained 5052 Al alloy obtained by an accumulative roll-bonding process have been investigated. After 7 ARB cycles, ultra-fine grains with large misorientations between neighboring grains were obtained. The grain size was about 0.2 $\mu$ m. The hardness, tensile and yield strengths of the ultra-fine grained alloy increased as the amount of accumulated strain increased with the ARB cycles. Sliding wear tests of the ultra-fine grained 5052 Al alloy were conducted at room temperature. Wear rate of the ultra-fine grained alloy increased in spite of the increase of hardness. Surfaces of the worn specimens were examined with SEM to investigate wear mechanism of the ultra-fine grained alloy.

**Key Words** : Ultra-fine grain, 5052 Al alloy, Accumulative roll-bonding(ARB), Sliding Wear

#### 1. 서론

최근 구조재료의 기계적 특성을 획기적으로 향상시키려고 하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 구조재료의 기계적 성질을 향상시키는 방법으로는 강소성 가공에 의한 결정립 미세화 방법과 합금 원소 첨가 방법 등을 들 수 있다.

강소성 가공에 의하여 소재의 결정립을 미세화시키면, 합금원소의 첨가 없이도 우수한 상온 기계적 특성을 얻을 수 있고, 이 같은 방법으로 결정립이 미세

화된 소재는 상대적으로 빠른 변형률 속도와 낮은 온도에서 초소성 거동을 또한 나타내는 것으로 보고되어 있다.<sup>1)</sup> 소재의 결정립을 초미세화 시키는 방안으로는 극한비틀림변형(STS)<sup>2)</sup>, 고속전단가공(ECAP)<sup>3)</sup>, 누적압연접합공정(ARB)<sup>4)</sup> 등의 방법이 보고되어 있다. 이 가운데 누적압연접합공정은 재료의 외형 변화 없이 단순 압연만으로 초미세립 Bulk판재를 제조할 수 있는 장점을 지닌다.

현재까지 강소성 변형에 의해 제조된 초미세립 Al 합금은 상온에서 높은 강도와 낮은 연신율, 그리고 미미한 가공경화능을 지닌 것으로 보고 되어 있으나,

\* 국민대학교 신소재공학부

그 마멸 특성은 국내외적으로 연구 보고 되어 있지 않다. 일반적으로 높은 경도를 지닌 소재의 경우 내마멸성 및 내마식성이 우수하며 소재의 표면 변형은 어렵고 이에 따라 마멸 속도는 일반적으로 낮다고 알려져 있다.<sup>9)</sup>

본 연구에서는 ARB 공정을 통해 초미세립 5052 Al 합금 판재를 제조하고, 그 미세조직과 상은 기계적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

누적압연접합공정에 의해 제조된 초미세립 소재의 미세조직과 결정립 간의 방위각 차이를 투과전자현미경 (TEM)을 이용하여 관찰하였다. TEM 시편은 초미세립 판재를 두께 100  $\mu\text{m}$ 까지 기계 가공 한 후, 80% 메틸알콜, 20% perchloric 산 용액으로 233K의 온도에서 twin-jet polishing을 통하여 제조하였다. TEM 미세조직은 Jeol 1210 투과전자현미경을 사용하여, 가속전압 120keV로 관찰하였다. 누적압연접합공정을 거친 시편과 거치지 않은 시편의 상은 인장시험을 행하고 미소 비커스 경도를 측정하여 시편의 기계적 특성을 측정하였다. 인장시편은 표점거리 25.4mm의 subsize 시편으로 제작하였다.

초미세립 5052 Al 합금의 미끄럼 마멸 시험은 pin-on-disk 마멸 시험기를 사용하여 상온 대기 중에서 STS 304 강구를 상대재로 실시되었다. 마멸 하중은 1N ~ 4N으로 변화시켰다. 마멸속도는 시험 전 후의 시편 무게 감량을 시편의 이론밀도로 나눈 후, 다시 미끄럼 거리로 나누어 단위 미터 당 마멸되는 부피로 계산 되었다. 마멸 시험 후 마멸면과 마멸단면을 각각 SEM과 OM을 통하여 관찰하고 그 마멸 기구를 분석하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

누적압연접합공정에 의해 제조된 초미세립 5052 Al 합금의 TEM 미세조직을 그림 1에 나타내었다.

ARB 공정 1 cycle ( $\epsilon = 0.8$ ) 후의 조직에서는 전위들이 모여 형성된 전위셀과 높은 전위밀도가 관찰된다. SADP는 이들 전위셀 조직들 간의 방위각 차이가 매우 작음을 보인다. ARB 공정수가 증가함에 따라 전위셀 조

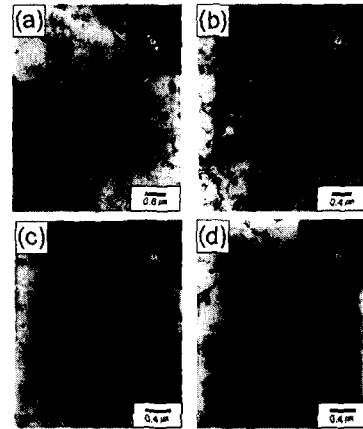


Fig. 1 TEM Micrographs and corresponding SAD patterns showing microstructural change of 5052 Al alloy during ARB at 573K: (a) 1 cycle; (b) 2 cycle; (c) 4 cycle; (d) 7 cycle

직은 점차 사라지고, 공정수가 4 cycle ( $\epsilon = 3.2$ )에서 약 0.2  $\mu\text{m}$  크기의 초미세립들이 생성되었다. 연신된 SADP 회절점들은 결정립들 간의 방위각 차이가 증가하였음을 나타낸다. 이와 같은 미세조직의 변화는 변형량이 증가함에 따라 시편내의 전위밀도가 증가하고 이에 따른 동적 회복에 의해서 전위들이 재배열하며 발생한 것으로 생각된다.<sup>9)</sup> 이후 ARB 공정수가 증가하면서 결정립계들은 더욱 명확해졌다. 이러한 미세조직의 발달 과정은 기 연구된 순알루미늄의 경우와는 차이가 있다. 순알루미늄의 경우 본 실험의 ARB 공정 온도보다 낮은 온도에서 ARB 공정이 행해졌음에도, 더 적은 변형량으로 초미세립이 발달하였다. 이러한 결과는 5052 Al 합금내의 Mg의 영향으로 전위의 이동도가 감소하여 ARB 공정시 동적 회복 속도를 늦춘 때문으로 해석된다.<sup>7)</sup>

그림 2는 ARB 공정 수에 따라 변화하는 5052 Al 합금의 미소 비커스 경도를 나타내고 있다. ARB 공정 1 cycle을 거친 시편의 경도값이 ARB 공정을 거치기 전보다 약 2배 정도 증가하였다. 이후 지속적인 변형을 증가에도 경도값은 거의 일정하였고, ARB 공정 4 cycle 이후 부터는 미미하게 감소하였다. 이러한 경도의 변화는 초기에는 증가된 높은 전위 밀도에 의해서 시편의 경도가 증가 되고 변형량 증가에 따라 재배열된 전위들에 의해 초미세립들이 생성되며 공정을 거치기 전보다 높은 경도값이 유지

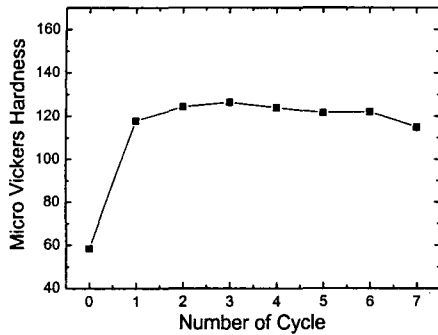


Fig. 2 Variation of microhardness of 5052 Al Alloy ARB processed as a function of the number of ARB cycle

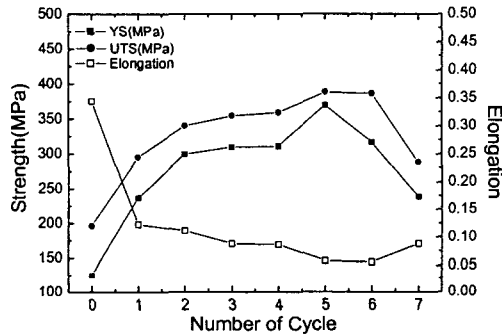


Fig. 3 Variation of ultimate tensile strength, yield strength and elongation of 5052 Al alloy ARB processed as a function of the number of ARB cycle

된 것으로 생각된다.<sup>8)</sup> 그림 3은 ARB공정 각 cycle을 거친 시편의 인장강도와 항복강도 그리고 신율의 변화를 cycle수의 함수로 보인다. 변형율에 따른 강도의 변화는 경도의 변화와 유사한 경향을 나타낸다. 그리고 ARB공정을 거친 시편의 경우 가공경화 거동은 거의 관찰되지 않았다. 초미세립이 생성된 ARB공정 4 cycle이후 경도의 감소와 ARB공정 6 cycle 이후 강도의 감소는 강소성 변형에 의해 제조된 초미세립계가 일반적인 결정립계와는 달리 불안정한 때문인 것으로 생각된다.

ARB공정을 거친 시편의 마멸속도 변화를 ARB공정 수의 함수로 그림 4에 나타내었다. ARB공정을 행

한 후 시편의 경도와 강도가 증가하였음에도 불구하고, ARB공정을 행하기 전의 시편보다 ARB공정을 거친 시편의 마멸속도가 높게 측정되었다. 마멸속도는 ARB공정 수가 증가할수록 증가하였다. 그러나 ARB공정 3 cycle이후 마멸 속도는 감소하고 있다. 이와 같은 결과는 ARB공정을 거친 시편의 강도와 경도가 증가했다는 것을 감안할 때 매우 흥미로운 결과로, ARB공정을 거친 시편의 마멸이 ARB공정 전과는 다른 기구로 발생하였음을 시사한다.

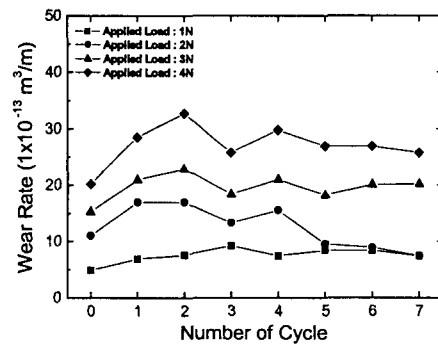


Fig. 4 Variation of wear rate of 5052 Al strip ARB processed as a function of number of ARB cycle

그림 5에 ARB공정을 통해 제조된 초미세립 5052 Al 시편의 마멸면(SEM) 사진을 나타내었다.

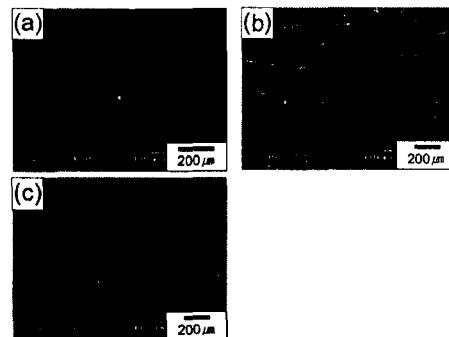


Fig. 5 SEM micrographs of worn surfaces of 5052 Al alloy ARB processed: (a) 0 cycle; (b) 2 cycle; (c) 7 cycle

ARB공정을 거치지 않은 시편의 마멸면은 변형보다는 연삭에 의해 마멸이 진행되었음을 보이고, 가장 높은 마멸속도를 보인 ARB공정 2 cycle후의 마멸면은 활발한 표

면변형에 따른 마멸면 박리 양상을 보인다. ARB공정 7 cycle후의 마멸면에서도 여전히 ARB공정을 거치기 전의 시편보다 심한 표면층 박리가 발생하였다. 마멸입자를 SEM으로 관찰한 결과, 표면층 박리가 일어난 ARB공정을 거친 후의 시편에서 더 큰 마멸입자가 관찰되었다.

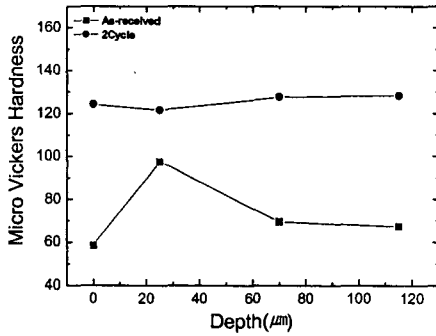


Fig. 6 Variation of microhardness of 5052 Al alloy ARB processed as a function of depth below worn surface

ARB 공정을 통해 제조된 초미세립 5052 Al 합금의 낮은 마멸저항성은 초미세립 소재의 낮은 가공경화능으로 설명될 수 있다. 일반적으로 가공경화지수가 낮은 소재는 마멸시험 중 두꺼운 표면 변형층을 생성하고, 그로 인해 마멸 저항성이 낮아지는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup> 이는 본 실험결과와 일치한다. 그림 6에 ARB공정을 거치기 전과 ARB공정 2 cycle을 거친 시편의 마멸면 직하의 깊이에 따른 경도값의 변화를 나타내었다. ARB공정을 거치기 전 시편의 마멸면 직하에서는 마멸 중의 가공경화에 의해 경도가 상승하였지만 ARB공정 2 cycle을 거친 시편의 마멸면 직하에서는 낮은 가공경화능에 의해 경도변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

5052 Al 합금의 결정립을 ARB 공정에 의해 초미세화

시키고, 그 기계적 특성과 미세조직 그리고 마멸 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ARB 공정 7 cycle 이후 5052 Al 합금의 평균 결정립 크기는 약 0.2 μm로 미세화되었다.
- 2) ARB공정 초기에는 전위셀로 여겨지는 유사 결정립이 관찰되었고, 이후 공정 수의 증가에 따라 비평형 결정립계와 평형 대각립계로 점차 변화하였다.
- 3) Mg의 영향으로 5052 Al 합금에서는 순 알루미늄에 비해 상대적으로 더 많은 변형량이 초미세 결정립을 얻기 위해 필요하였다.
- 4) ARB공정을 통해 5052 Al 합금의 경도, 인장강도와 항복강도는 크게 증가하였다.
- 5) 초미세립 소재의 낮은 마멸저항성은 초미세립 소재의 낮은 가공경화능으로 설명되었다.

#### 5. 참고문헌

1. Sungwon Lee, P.B. Berbon, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, N.K. Tsenev, R.Z. Valiev and T.G. Langdon; *Mater. Sci. Eng. A*, 272 (1999) 63
2. R.Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Tsenev; *Mater. Sci. Eng. A*, 137 (1991) 35-40.
3. V.M. Segal; *Mater. Sci. Eng A* 197 (1995) 157
4. Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai; *Acta Mater.*, 47 (1999) 579-583.
5. Preece C.M., 1979, *Treatise Mater. Sci. technol*, Vol. 16, pp.249.
6. C.P. Chang, P.L. Sun and P.W. Kao; *Acta. Mater.*, 48 (2000) 3377.
7. Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, *Met. Mater. Trans.* 29A (1998) 2503
8. N. Tsuji, Y. Saito, Ho Utsunomiya and S. Tanigawa; *Scripta Mater.*, 40 (1999) 795