

열간 압연한 AZ31 마그네슘합금 판재의 미세조직 발달에 관한 연구

김수현*, 임창동*, 유봉선*, 서영명**, 정인상**
재료연구부, 한국기계연구원*
금속공학과, 경북대학교**

A Study on Microstructural Evolution of Hot Rolled AZ31 Magnesium Alloy Sheets

S.-H. Kim*, C.-D. Yim*, B.-S. You*, Y.-M. Seo** and I.-S. Chung**
Materials Technology Department, KIMM*
Department of Metallurgical Engineering, Kyungpook National University**

Abstract

Recently, a sheet forming process of Mg alloys is highlighted again due to increasing demand for Mg wrought alloys in the applications of casings of mobile electronics and outer-skins of light-weight transportation. Microstructure control is essential for the enhancement of workability and formability of Mg alloy sheets. In this research, AZ31 Mg alloy sheets were prepared by hot rolling process and the rolling condition dependency of the microstructure and texture evolution was studied by employing a conventional rolling mill as well as an asymmetric rolling mill. When rolled through multiple passes with a small reduction per pass, fine-grained and homogeneous microstructure evolved by repetitive dynamic and static recrystallization. With higher rolling temperature, dynamic recrystallization was initiated in lower reduction. However with increasing reduction per pass, deformation was localized in band-like regions, which provided favorable nucleation sites for dynamic recrystallization. Through post annealing process, the microstructures could be transformed to more equiaxed and homogeneous grain structures. Textures of the rolled sheets were characterized by {0002} basal plane textures and retained even after post annealing. On the other hand, asymmetrically rolled and subsequently annealed sheets exhibited unique annealing texture, where {0002} orientation was rotated to some extent to the rolling direction and its intensity was reduced.

Key words : Magnesium, hot rolling, microstructure, texture, dynamic recrystallization

1. 서론

마그네슘합금은 현재 사용되고 있는 구조용 금속재료 중에서 가장 가벼우며, 높은 비강도를 갖고 있어서 휴대용 전자제품이나, 에너지 절감을 위한 수송기기용 재료로서 사용되고 있으며, 그 응용분야는 향후 계속 확대될 전망이다. 지금까지 마그네슘합금 부품은 대부분 복잡한 형상의 제품을 대량 생산할 수 있는 다이캐스팅법으로 제조하여 왔다. 자동차용 동력전달장치, 에어백 하우징, 휴대폰 케이스 등의 제품에서는 다이캐스팅법이 적합한 공정으로 인식되었으나, 최근 박판의 대면적 형태를 갖는 제품군이 형성되면서 이러한 제품을 제조하는데 있어서 다이캐스팅법은 한계를 드러내었다. 따라서, 최근에는 가공 및 성형 공정을 이용하여 판재 형태의 마그네슘합금 제품을

을 제조하는 기술이 시도되고 있다. 2003년 Hitachi 금속에서는 마그네슘합금 판재 성형 기술을 이용하여 디지털 카메라 케이스를 제조하였으며(1), 독일의 자동차 회사들은 경량화를 위하여 마그네슘합금 판재를 자동차용 외판에 적용하려는 시도를 하고 있다(2). 다이캐스팅제에 비하여 높은 연신율을 갖는 가공용 마그네슘합금은 자동차용 판재로 사용하기에 더 적합하리라 판단된다(2).

그러나, 마그네슘합금은 일반적으로 상온에서의 가공 및 성형성이 불량하다. HCP 구조를 갖는 마그네슘은 상온에서 비저면 슬립의 임계분해전단응력이 커서 작동하기가 어려워 자유롭게 변형되기 위한 충분한 슬립계를 가지지 못한다. 따라서 마그네슘합금의 가공성 및 성형성 확보를 위한 제조 공정 개선 및 재료의 물성 제어가 필수적으로 요구된다. 일반적으로 비저면 슬립을 활성화하기 위해서 마그네슘합금은 고온에서 변형 및 성형을 하고 있으며, 열간 압연 공정을 이용하여 건전한 판재를 제조하고 이를 성형이 가능한 고온에서 프레스 성형하여 원하는 형태의 제품을 제조하는 방법이 제안되어 왔다. 또한, 성형성 향상을 위하여 재료의 미세조직 및 집합조직을 제어하려는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 마그네슘합금의 경우, 미세한 결정립을 가지게 되면 연신율 증가(3) 및 초소성(4) 등 가공성에 유리한 성질을 갖게 된다. 또한 집합조직은 판재의 성형성 및 이방성을 결정하는 중요한 인자이므로 성형성 향상을 위해서는 집합조직 제어 기술이 필수적으로 요구된다.

이 연구에서는 열간 압연법을 적용하여 AZ31 마그네슘합금 판재의 미세조직 및 집합조직 발달을 제어하고자 하였다. 압연 온도, 압하량, 패스당 압하량 등의 압연 조건을 변화시켰을 때 미세조직 및 집합조직의 발달 변화를 조사하였다. 또한, 비대칭압연법을 적용하여 판재에 전단변형을 가함으로써 발생하는 미세조직과 집합조직의 변화를 연구하였다.

2. 실험 방법

이 연구에서 사용한 재료는 AZ31 마그네슘합금으로서 3%의 알루미늄과 1%의 아연을 함유하고 있다. 압연을 위한 재료는 주조 후 400℃에서 24시간 균질화 처리한 시편이다. 압연은 지름이 250mm인 압연기를 사용하였으며, 압연롤은 140℃로 가열하였다. 시편은 매 패스마다 원하는 온도에서 15분간 가열한 후 압연하였다.

이 연구에서는 일반적인 압연 공정 외에 비대칭 압연을 시도하였다. 비대칭 압연은 상부롤과 하부롤의 선속도가 다른 압연 공정으로서 롤의 크기를 달리 하거나, 롤의 회전속도를 달리하여 압연하는 방법이다. 비대칭 압연은 대칭 압연과 달리 판재의 두께방향에 걸쳐서 모든 영역에 전단 변형을 가할 수 있는 방법이다(5). 비대칭 압연법은 알루미늄, 마그네슘 등의 판재의 미세조직을 제어하기 위한 공정으로서 제안된 바 있다(6,7). 이 연구에서는 상부롤과 하부롤의 크기가 다른 압연기를 사용하였으며, 지름은 각각 190mm, 128mm이다. 비대칭압연에서는 압연롤은 가열하지 않고 시편만 500℃에서 15분간 가열하였으며, 롤과 시편과의 마찰을 증가시키기 위하여 각각의 표면을 아세톤으로 탈지한 후 압연하였다.

압연 판재는 압연 상태와 어닐링 상태에서 미세조직과 집합조직을 조사하였다. 압연 판재의 어닐링은 300℃에서 1시간 동안 대기중에서 실시하였다. 압연 또는 어닐링한 시편은 압연 방향과 나란하게 절단한 면 (longitudinal section)을 연마하여, 초산, 피크릴 산, 에탄올, 물의 혼합액으로 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 판재의 집합조직은 X-ray 극점도로 측정하였으며, Cu 타겟을 이용하여 반사법으로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직

그림 1은 225℃ 및 325℃의 온도에서 시편을 가열하여 압연한 판재의 미세조직을 보여주고 있다. 패스당 압하율은 약 10%를 가하였다. 1패스 압연한 시편의 조직을 보면 초기에 조대한 결정

립으로 이루어져 있던 조직에서 쌍정에 의한 변형이 일어나고 있음을 알 수 있으며, 낮은 온도에서 압연한 시편은 동적재결정이 거의 일어나지 않은 반면, 높은 온도에서 압연한 시편은 쌍정경계에서 미세한 크기를 갖는 동적재결정립을 관찰할 수 있었다. 동적재결정 발생 여부는 압연온도, 변형량, 변형속도 등의 조건에 의해서 결정된다. 동적재결정이 일어나기 위해서는 충분한 변형에너지가 축적되어야 하며 이를 위한 임계 변형량 ϵ_C 은 다음과 같은 Zener-Hollomon 인자, Z 값에 비례한다(8).

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 은 변형속도, Q 는 활성화에너지, T 는 변형온도이다. 즉, 변형속도가 일정할 때 변형온도가 증가할수록 Z 는 감소하고 동적재결정의 임계변형량도 감소한다. 따라서 압연온도가 증가할수록 작은 압하량에서도 동적재결정이 일어나게 되며, 압연온도가 낮으면 동적재결정이 일어나기 위해서 더 큰 변형량을 필요로 한다.

한편, 그림 1을 보면 압연 패스수가 증가하면서 재료의 미세조직은 전체적으로 미세한 결정립을 갖는 구조로 변화하고 있음을 알 수 있다. 미세한 결정립의 형성은 동적재결정 뿐 아니라 정적재결정에 의해서도 발생한 것으로 판단되는데, 그 이유는 압연할 때 시편을 각 패스 중간마다 재가열을 했기 때문이다. 즉 압연 중에 축적된 변형에너지의 일부는 결정립계에 형성된 동적재결정립에 의하여 방출되고, 결정 내부에 축적된 에너지는 이후 중간재가열 과정에서 정적재결정에 의하여 방출된 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 최종 압연 판재의 미세조직은 변형조직, 동적재결정 조직, 정적재결정 조직으로 구성되나, 재료는 이미 반복적인 변형 및 어닐링 과정을 거쳤으므로, 이들을 최종 미세조직 상에서 구분하기는 어려웠다. 그러나 압연 온도가 낮을 때 쌍정이 많이 관찰되는 것을 보면 변형온도가 낮을수록 재결정되지 않은 변형조직이 많이 남아 있음을 알 수 있다.

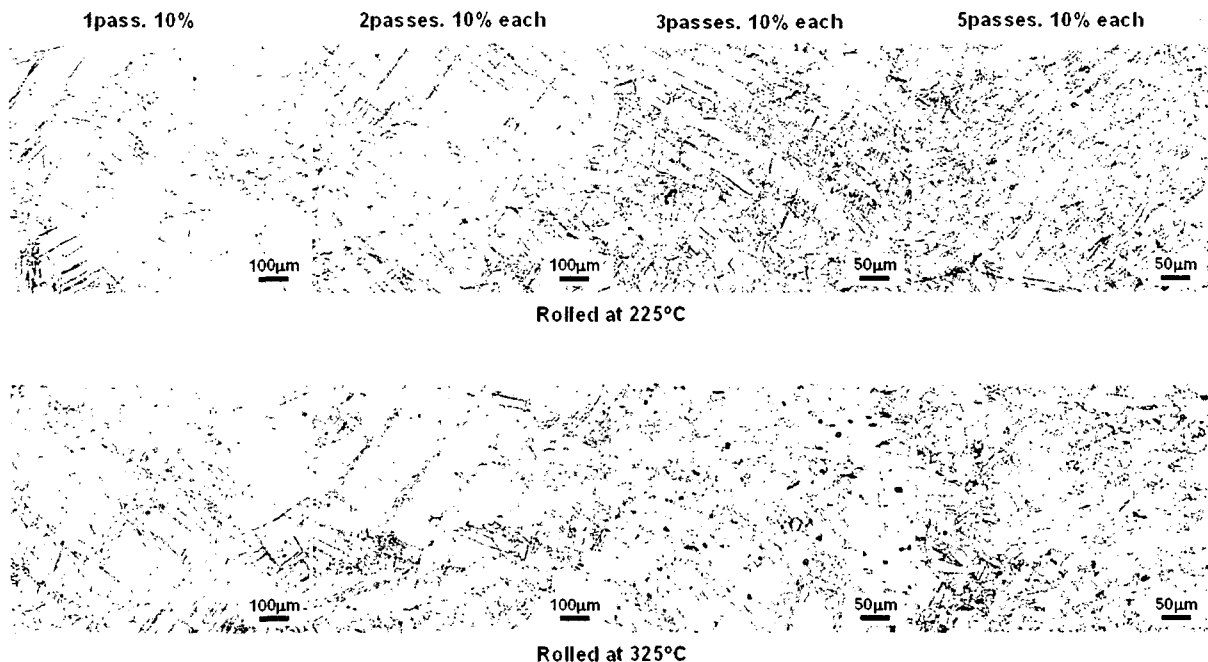


Fig. 1 Longitudinal section optical micrographs of hot rolled AZ31 sheets

그림 2는 패스당 10~25%의 압하율로 16패스에 걸쳐서 총 95% 압연하여 최종적으로 1mm 두께로 만든 판재의 미세조직을 보여주고 있다. 판재의 모서리 균열 발생을 억제하기 위하여 시편 가열 온도를 400°C로 하였다. 재료는 압연 상태에서 전 영역에 걸쳐서 균일하게 발달한 미세한 결정립

구조를 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 1의 시편에 비하여 높은 온도에서 압연하였으므로, 동적재결정이 더 촉진되었을 것으로 판단된다. 300°C에서 1시간 어닐링한 후의 미세조직은 재결정 또는 회복의 과정을 거쳐서 등축정 형태를 갖는 결정립 구조로 발달하였음을 알 수 있다.

그림 3은 400°C의 온도에서 11패스로 3.4mm 두께까지 압연한 후 다시 1패스로 1.25mm까지 압연한 시편의 미세조직을 보여주고 있다. 비교적 낮은 패스당 압하량으로 압연한 그림 2의 조직과는 달리 매우 불균질한 미세조직을 갖고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 불균질한 미세조직은 큰 압하량으로 압연한 판재에서 종종 관찰되었다(9,10). 이 조직은 압연에 의한 변형 조직과 압연 방향과 비스듬하게 배열한 동적재결정립 조직의 조합으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 동적재결정립이 관찰된 영역은 국부적으로 변형이 집중된 영역으로서 동적재결정이 일어나기 위한 충분한 변형에너지를 가지게 된 것으로 판단된다. 그림 2와 3의 결과를 종합해볼 때 열간 압연 미세조직은 변형 조직과 동적재결정 조직으로 이루어진 불균질한 조직을 가지게 되는데, 작은 변형량으로 여러 패스의 압연 및 어닐링 과정을 거치게 되면 재료 전체에 대하여 평균적으로 균일한 미세조직을 갖게 되는 반면, 큰 변형을 한꺼번에 가하게 되면 그림 3과 같이 변형조직과 재결정 조직을 구분할 수 있는 조직으로 발달하는 것으로 판단된다. 이 때 큰 변형을 한꺼번에 가하였으므로 이전에 받았던 정적재결정 효과는 무시할 수 있을 것이다. 결과적으로 균일한 미세조직을 얻기 위해서는 작은 압하량으로 여러 패스에 걸쳐서 압연하는 것이 유리함을 알 수 있다. 어닐링 후에는 이러한 불균질성이 감소하게 되며 등축상의 형상을 갖는 결정립 구조로 변화하였음을 알 수 있다.

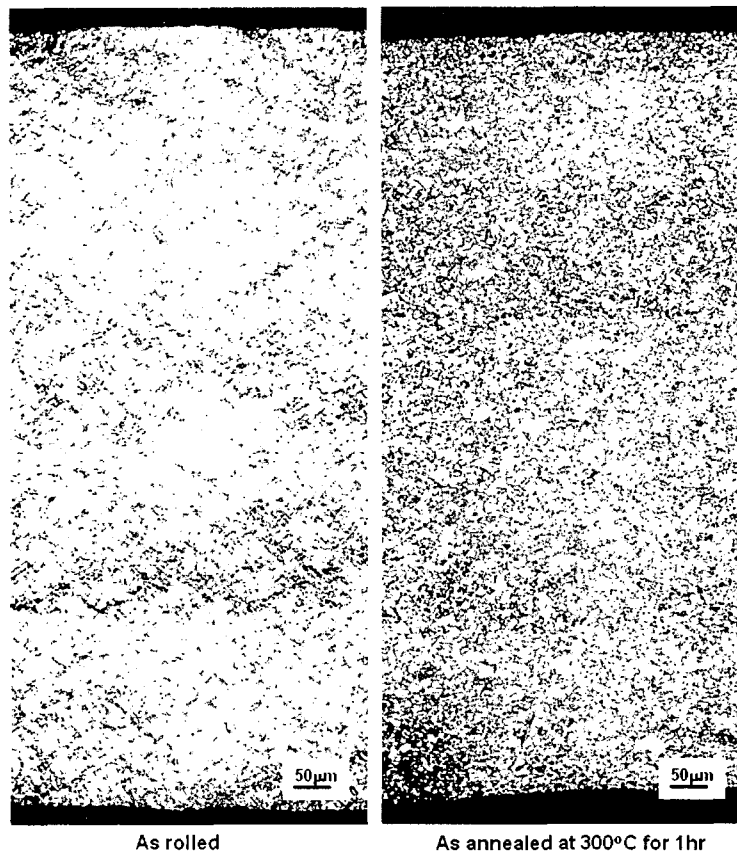


Fig. 2 Longitudinal section optical micrographs of AZ31 sheets rolled at 400°C by 95% through 16 passes

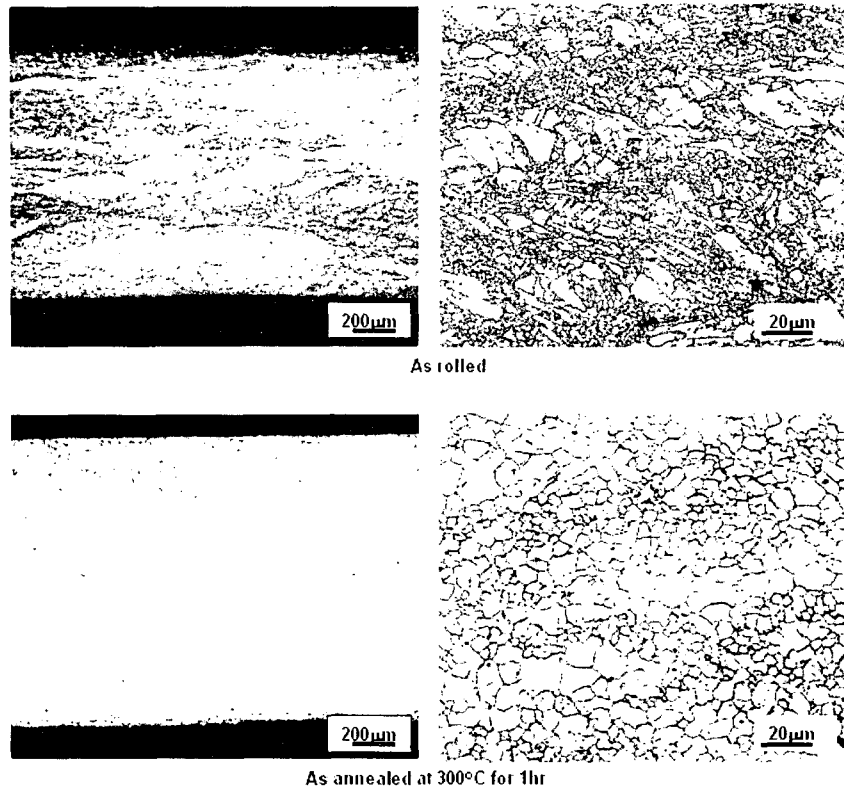


Fig. 3 Longitudinal section optical micrographs of AZ31 sheets rolled at 400°C with 63% from 3.4mm to 1.25mm thickness by single pass

그림 4는 비대칭 압연한 판재의 미세조직을 보여주고 있다. 1패스로 58% 압하량을 가함으로써 재료에 큰 평면변형과 전단변형을 가하였다. 재료의 미세조직은 매우 불균질함을 알 수 있는데, 판재의 두께를 가로지르는 밴드 형태로 국부적인 변형이 일어남을 알 수 있다. 이러한 조직은 전단 밴드 (shear band)와 유사한 형태라고 할 수 있다. 그림 3의 결과와는 달리 밴드를 따라서 동적재결정립이 관찰되는 않았다. 동적재결정이 일어나지 않은 이유는 매우 큰 변형 속도 때문이거나 아니면, 낮은 변형온도에서 기인한 것 같다. 비대칭 압연시 압연롤을 가열하지 않았기 때문에, 실제 압연 온도는 시편의 가열온도보다 상당히 낮았을 것을 판단된다. 어닐링 후에는 등축상의 결정립을 갖는 미세 조직으로 변화하였으며, 불균질성은 상당히 감소하였다.

3.2 집합조직

그림 5는 400°C에서 16패스로 1mm까지 압연한 판재(그림 2의 판재)의 압연 또는 압연 후 어닐링한 상태에서의 (0002)와 (10 $\bar{1}$ 1) 극점도를 보여주고 있다. 압연 판재와 어닐링 판재 모두 강한 {0002} 저면 집합조직이 발달함을 알 수 있다. HCP구조를 갖는 금속의 압연집합조직은 c/a 값, 즉 결정구조상의 a축에 대한 c축의 비에 따라 달라진다(11). 마그네슘과 같이 c/a값이 HCP의 이상적인 값인 1.633에 가까운 재료는 압연시 강한 {0002} 저면 집합조직이 발달하고, c/a>1.633인 아연이나 카드뮴 등은 {0002} 성분이 RD 양쪽으로 분리되어 이중 피크를 보이는 집합조직이 발달하며, c/a<1.633인 타이타늄이나 지르코늄 등은 {0002} 성분이 TD 양쪽으로 분리되는 집합조직을 보이는 것으로 알려져 있다(11). AZ31은 비교적 합금 성분 함량이 작아서 순수한 마그네슘과 비슷한 집합조직을 보임을 알 수 있다. 그러나 AZ31의 경우도 냉간압연을 하게 되면 RD 양쪽으로 분리된 피크를 갖는 (0002) 극점도가 보고된 바 있다(12). 압연집합조직을 결정하는 인자는 변형 모드와 변형 기구에 의해서 결정되는데, 이는 실제 압연시 압연 조건이나 압연 온도에 따라서 달라지게 된다.

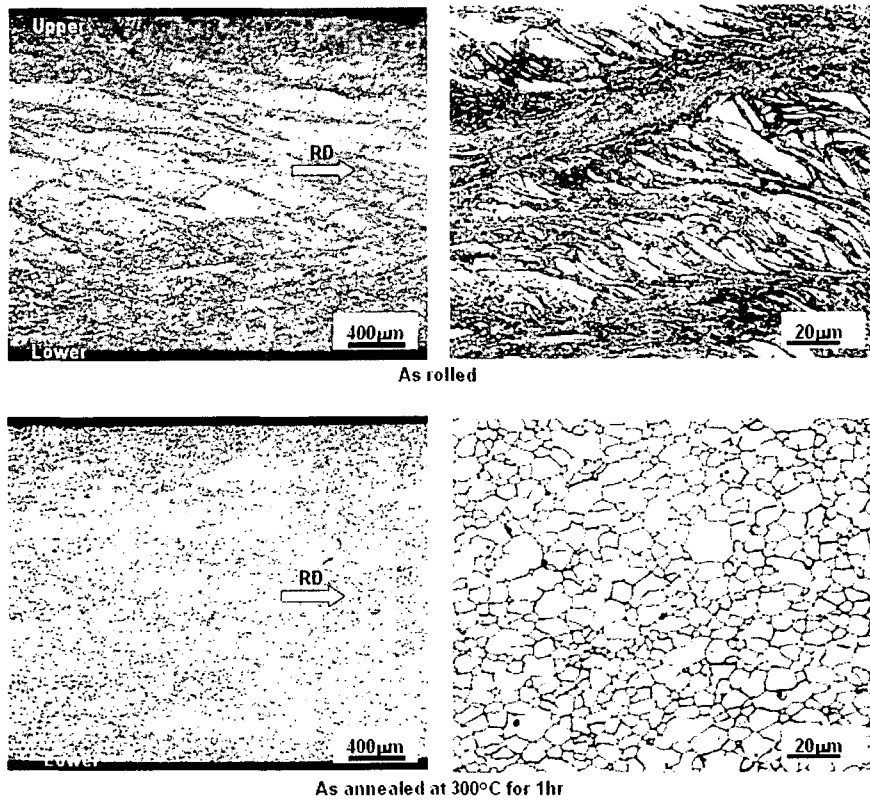


Fig. 4 Longitudinal section optical micrographs of AZ31 sheets asymmetrically rolled at 500°C with 58% from 5.3mm to 2.2mm thickness by single pass

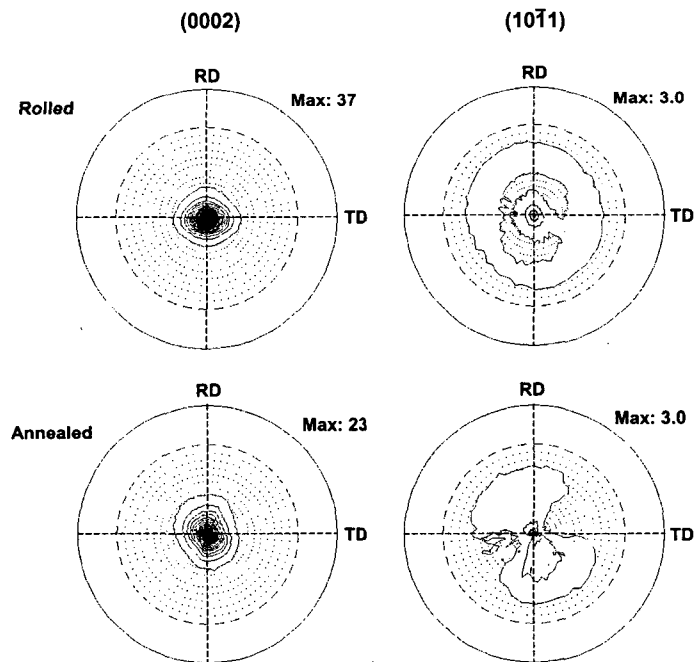


Fig. 5 X-ray pole figures of AZ31 sheets rolled at 400°C by 95% through 16 passes

그림 6은 400°C의 온도에서 11패스로 3.4mm 두께까지 압연한 후 1패스로 1.25mm까지 압연한 시편 (그림 3의 판재)의 극점도를 보여주고 있다. 그림 5의 결과에 비하여 매우 강한 {0002} 저면 집합조직이 발달하였으며, (10 $\bar{1}1$) 극점도 상에서 그 강도는 미약하지만 특정한 방향으로 배열된 집합조직이 발달함을 알 수 있다. 6회전 대칭으로 발달한 것은 결정 구조의 대칭성에 기인한 것으로 판단되며, ND 방향으로 발달한 {0002} 방위와 6회전 대칭으로 발달한 {10 $\bar{1}1$ }방위를 조합해 볼때, RD 방향으로 {10 $\bar{1}0$ }이 발달했을 가능성이 높다. 어닐링 후에는 {0002} 성분의 강도가 크게 감소하였다. 매우 강하게 발달한 {0002} 집합조직은 미세조직과 관련이 있는 것으로 판단된다. 한 패스로 63% 압연한 미세조직은 여러 패스로 압연한 판재에 비하여 중간 어닐링 효과를 배제할 수 있으므로 변형 조직에 가까운 미세조직을 갖는다고 할 수 있다. 따라서 강하게 발달한 집합조직은 강하게 발달한 변형조직에서 기인한다고 할 수 있다.

그림 7은 비대칭 압연한 판재의 (0002) 및 (10 $\bar{1}1$) 극점도를 보여주고 있다. 비대칭 압연은 판재의 상부면과 하부면에 가해지는 변형이 다르므로 각각을 구분하여 극점도를 측정하였다. 그림에서 보면, 상부면과 하부면 모두 강한 {0002} 저면 집합조직이 발달하는 것을 알 수 있으며 집합조직 발달에 미치는 전단변형의 영향을 관찰하기는 어려웠다. 이것은 {0002} 방위가 전단변형에 대하여 안정한 집합조직이거나, 가해진 전단변형량이 집합조직을 변화시키기에는 작았기 때문일 수도 있다. 다만, 상부면은 매우 강한 {0002} 집합조직을 갖는 반면, 하부면의 {0002} 성분의 강도는 상대적으로 작은 값을 보였다. 그림 6의 결과와 비교해 볼때, {0002} 성분이 강하게 발달한 상부면은 유사한 경향을 보이거나, 하부면은 약화된 집합조직을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 상부와 하부에 가해진 변형이 변형이 다르다는 것을 의미한다(5).

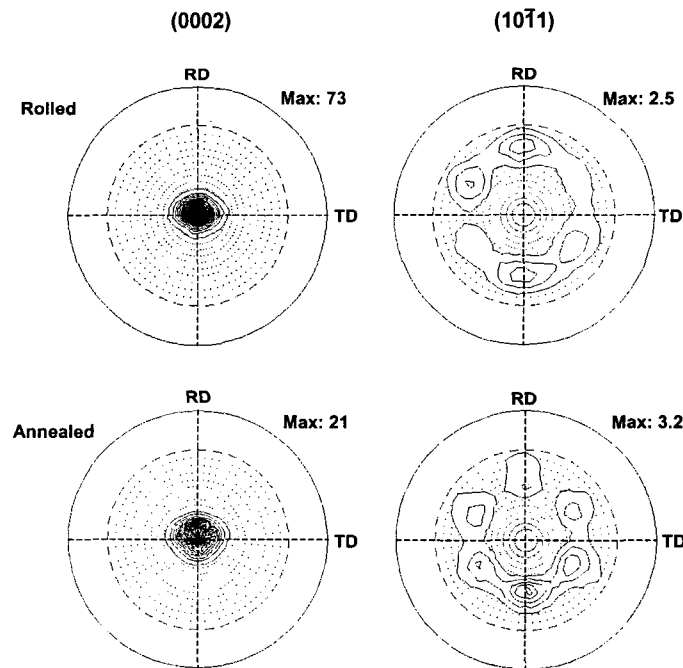


Fig. 6 X-ray pole figures of AZ31 sheets rolled at 400°C with 63% from 3.4mm to 1.25mm thickness by single pass

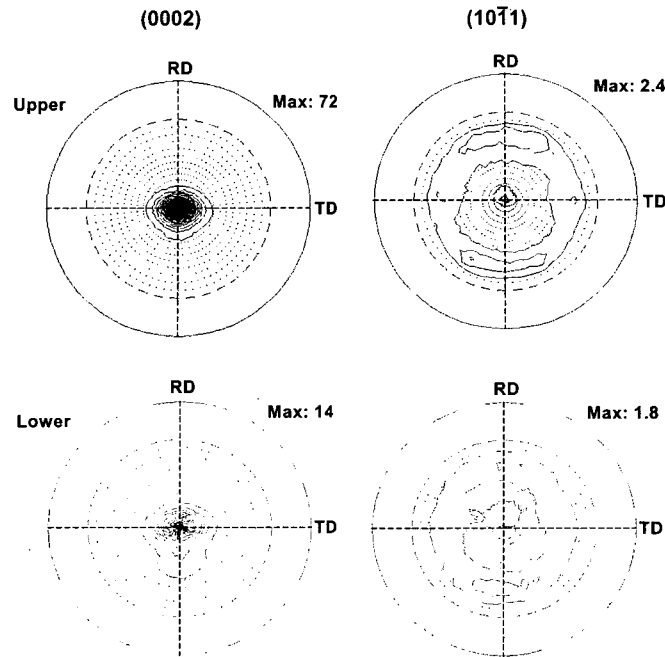


Fig. 7 X-ray pole figures of AZ31 sheets asymmetrically rolled at 500°C with 58% from 5.3mm to 2.2mm thickness by single pass

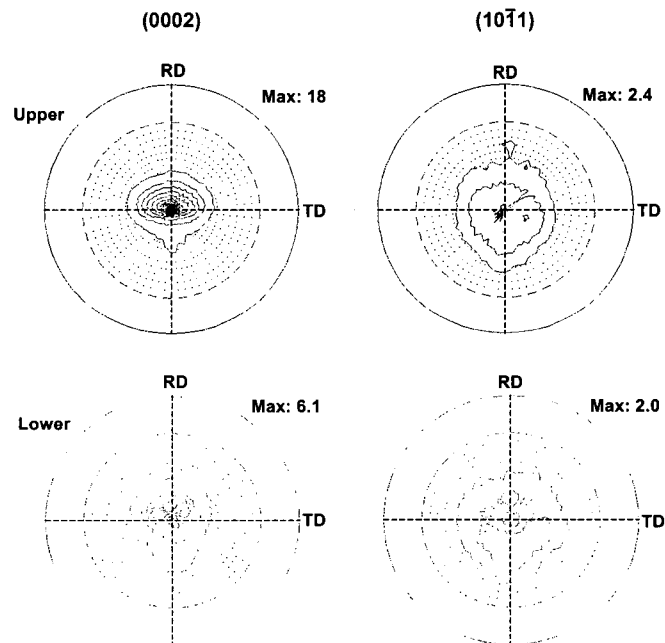


Fig. 8 X-ray pole figures of AZ31 sheets asymmetrically rolled at 500°C with 58% from 5.3mm to 2.2mm thickness by single pass and annealed at 300°C for 1hr

그림 8은 어닐링후의 비대칭 압연 판재의 집합조직을 보여주고 있다. 압연 상태에 비해서 {0002} 성분이 상당히 낮은 강도를 가짐을 알 수 있는데, 특히 하부면의 경우 집합조직이 매우 약화되었음을 알 수 있다. 또한, 상부면과 하부면 모두 {0002} 방위가 ND에서 RD 쪽으로 약간 회전하였으며 그 정도는 하부면에서 더 크게 나타났다. 지금까지 마그네슘 압연 판재의 어닐링 집합조직은 압연 집합조직과 유사한 것으로 알려져 있으나, 비대칭 압연한 판재에 있어서는 어닐링에 의하여 약간의 집합조직 변화가 있음을 알 수 있다. 이것은 비대칭 압연에 의해 가해진 변형이 대칭

압연과는 다르기 때문으로 판단되는데, 구체적으로 어떤 원인으로 이러한 결과가 발생했는지는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 그러나, 비대칭 압연 및 어닐링 공정을 통하여 강하게 발달하였던 {0002} 집합조직을 변화시킬 수 있다는 점은 흥미로운 결과라 할 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 여러 가지 열간 압연 조건을 적용하여 AZ31 마그네슘합금 판재의 미세조직과 집합조직을 제어하고자 하였다. 균일하고 미세한 결정립을 갖는 미세조직을 얻기 위해서는 작은 압하량으로 여러 패스에 걸쳐서 압연함으로써 반복적인 변형 및 어닐링 과정을 거쳐야 함을 알 수 있었다. 또한, 압연온도가 높을수록 낮은 압하량에서 동적재결정이 시작됨을 관찰하였다. 한편 패스당 압하량을 증가시키면 재료는 밴드형태를 따라서 국부적인 변형을 하는 불균질한 미세조직을 가졌으며, 심한 변형을 받은 밴드 조직은 동적재결정의 발생 장소를 제공하였다. 압연 판재의 집합조직은 강한 {0002} 저면 집합조직이 발달하였다. 어닐링 공정을 통하여 보다 균질하고 등축상의 형태를 갖는 미세조직을 얻을 수 있었으나, 집합조직은 여전히 {0002} 저면 집합조직을 나타내었다.

비대칭 압연한 판재는 밴드 형태의 국부적인 변형을 하는 불균질한 미세조직을 가졌으며, 집합조직은 {0002} 저면 집합조직을 가졌다. 그러나 압연후에 어닐링함으로써 {0002} 성분이 ND에서 RD쪽으로 약간 회전하면서 그 강도가 매우 약화된 집합조직을 발달시킬 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 기본연구사업의 일환으로 이루어졌으며, 비대칭 압연은 서울대학교 집합조직 제어연구실 (NRL)의 장비 사용 지원을 받았음을 밝히는 바이다.

참고문헌

1. IMA 2003 award winner, Germany, Stuttgart, 한국마그네슘연구조합 자료 제공.
2. P. Juchmann, S. Wolff, Proceedings of annual world IMA 2002 magnesium conference, Canada, Montreal, pp. 49-54 (2002).
3. T. Mukai, M. Yomanoi, H. Watanabe, and K. Higashi, Scripta Mater., vol. 45, no. 1, pp. 89-94 (2001).
4. P. E. Krajewski, GM research & publication center, R&D 9233 (2001).
5. K.-H. Kim, D. N. Lee, Acta Mater., vol. 49, no. 13, pp. 2583-95 (2001).
6. S.-H. Kim, J. K. Lee, and D. N. Lee, Proceedings of ultrafine grained materials, 2002 TMS annual meeting, USA, Seattle, pp. 55-63 (2002).
7. T. Imai et al., Proceedings of magnesium technology, 2004 TMS annual meeting, USA, Charlotte, pp. 91-96 (2004).
8. F. J. Humphreys and M. Hatherly, in Recrystallization and related annealing phenomena, Pergamon, 1995.
9. S. E. Ion, F. J. Humphreys, and S. H. White, Acta Mater., vol. 30, pp. 1909-19 (1982).
10. J. A. del Valle, M. T. Perez-Prado, and O. A. Ruano, Mater. Sci. Eng. vol. A355, no. 1, pp. 68-78 (2003).
11. Y. N. Wang, J. C. Huang, Mater. Chem. Phys., vol. 81, no. 1, pp. 11-26 (2003).
12. A. Styczynski, Ch. Hartig, J. Bohlen, and D. Letzig, Scripta Mater., vol. 50, no. 7, pp. 943-47 (2004).