

강소성변형된 미세립 AM60 마그네슘 합금의 피로거동

유인동 · 이만석* · 김호경***

서울과학기술대학교 철도전문대학원 · *서울과학기술대학교 자동차공학과 대학원

**서울과학기술대학교 자동차공학과

(2011. 12. 14. 접수 / 2012. 2. 2. 채택)

Fatigue Behavior of Fine Grained AM60 Magnesium Alloy Produced by Severe Plastic Deformation

In-Dong You · Man-Suk Lee* · Ho-Kyung Kim***

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology

*Graduate School, Seoul National University of Science and Technology

**Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received December 14, 2011 / Accepted February 2, 2012)

Abstract : The fatigue behavior of AM60 magnesium alloy produced by equal channel angular pressing(ECAP) process was investigated through fatigue lifetime and fatigue crack propagation rate tests. The grain structure of the material was refined from 19.2 μm to 2.3 μm after 6 passes of ECAP at 493 K. The yield strength(YS) and ultimate tensile strength (UTS) increase after two passes but decrease with further pressing, although the grain size becomes finer with increasing pass number. The softening effect due to texture anisotropy overwhelmed the strengthening effect due to grain refinement after 2 passes. A large enhancement in fatigue strength was achieved after two ECAP passes. The current finding suggests that two passed material is better than the multi-passed material in view of the static strength and fatigue performance.

Key Words : AM60 magnesium alloy, ECAP, microstructure, fatigue crack propagation rate, fatigue lifetime

1. 서론

마그네슘 합금은 최경량 구조용 금속 재료로 비강도 및 가공성이 우수할 뿐만 아니라 진동, 충격 및 전자파 등을 차단하는 기능으로 인하여 가전제품, 자동차, 항공산업 등으로 그 응용범위가 점점 넓어지고 있다. 그러나 마그네슘 합금은 면심입방격자나 체심입방격자구조에 비하여 상대적으로 적은 슬립계를 가진 조밀육방격자(HCP, hexagonal close-packed lattice)이므로 슬립이 발생할 확률이 적다. 이로 인하여 가공성이 좋지 않은 난성형성(difficult-to-work) 재료인 단점을 갖고 있다¹⁾. 따라서 Mg 합금 부품은 소성성형 보다는 주로 다이캐스팅과 같은 주조성형법으로 제조가 이루어지고 있다. 만일 마그네슘 합금을 자동차 부품으로 적용을 확대하기 위해서는 우선적으로 소성가공성 및 강도의 향상이 필요하다.

최근 20여년간 강소성변형법(severe plastic deformation)을 적용하여 금속 혹은 합금의 미세조직을 미세화하는 방안으로써 등통로각 압축법(ECAP, equal-channel angular pressing)이 큰 부피의 재료의 제조가 가능한 방법으로 특히 각광을 받고 있다²⁾. 이 방법은 Fig. 1에서와 같이 단면이 동일한 ECAP 가공법은 동일한 단면적을 갖는 두 개의 채널을 가진 금형을 통해 소재를 압출하는 가공 방법으로, 두 채널이 만나는 교차 지점을 통과시 소재에 매우 심한 전단변형을 가하는 간단한 가공 방법이다. 이때 두 통로 내부 교차각 ϕ 와 두 통로의 외부 교차각 ψ 는 변형률 크기에 영향을 주는 주요 인자이다. 압출되어 나온 빌렛은 Fig. 1에서와 같이 연속적으로 통로를 통과할 경우 결정립의 미세화가 지속적으로 이루어진다.

ECAP 공법을 마그네슘에 적용할 경우 결정립을 미세화하여 소성가공성과 강도를 향상시키는 것이 가능하다. 그러나 ECAP로 가공한 미세립 마그네슘

* To whom correspondence should be addressed.
kimhk@seoultech.ac.kr

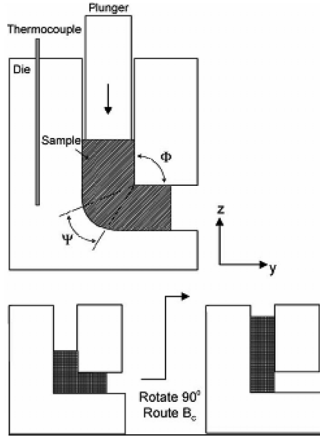


Fig. 1. Principal of ECAP processing.

합금의 경우 구조용 재료로 사용하기 위해서는 설계시에 피로강도에 대한 평가가 안전성 확보를 위하여 중요하다. 지금까지 국내외적으로 마그네슘의 ECAP 공정에 대한 많은 연구^{3,4)}가 진행되고 있으나 피로강도 평가에 대한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 ECAP으로 가공된 미세 결정립의 AM60 마그네슘 합금의 인장 및 피로 물성치를 평가하고자 한다. 이를 위하여 미세조직, 인장 물성치, 피로 강도 및 균열전파속도 등을 평가하고자 한다. 특히 미세 결정립의 AM60의 산업에서의 적용을 위하여 피로 물성치를 중점적으로 평가하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1. 재료

AM60 마그네슘 합금의 압출재를 ECAP 가공을 위하여 13 mm × 13 mm × 100 mm의 사각봉 빌렛으로 가공하였다. ECAP 공정은 온도 498 K에서 내각 φ = 90°이고 외각 ψ = 20°인 다이를 적용하여 수행하였다. 1회 패스를 할 경우 빌렛에 가해진 변형률 ε_N은 다음의 식 (1)에 의하여 약 100%에 해당한다⁵⁾.

$$\epsilon_N = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2\cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \right] \quad (1)$$

통로의 방향은 Fig. 1과 같이 B_c로 ECAP으로 빌렛을 통로로 통과(pass) 후에 나온 빌렛을 다시 90도로 회전 후 다시 ECAP 가공하는 방식을 채택하였다. 빌렛에는 MoS₂를 윤활재로 사용하였으며 ECAP 속도는 5 mm/min으로 6패스까지 가공을 하였다.

2.2. 미세조직관찰

압출재 및 ECAP 가공된 빌렛의 압출 방향에 직각방향의 단면에 대하여 광학현미경을 사용하여 미세조직을 관찰하였다. 미세조직 관찰을 위하여 최종적으로 0.05 μm의 알루미늄 산화물을 연마재로 사용하여 경면연마를 하였다. 미세조직 관찰을 위하여 4.2 g 피크릭산, 10 mL 아세트산, 10 mL 증류수, 70 mL 에탄올을 혼합한 부식액을 사용하였다.

2.3. 인장 및 피로실험

ECAP 가공된 빌렛을 길이 방향으로 게이지 길이 8 mm, 폭 4 mm, 두께 1 mm의 소형 인장시험편을 와이어 방전가공법을 적용하여 가공하였다. 인장 실험은 상온에서 초기 변형률 속도 2 × 10⁻³/s로 수행하였다. 게이지 길이 25 mm, 직경 5 mm, 어깨 부 반지름 5 mm의 피로 시험편을 빌렛 길이 방향으로 가공하여 일정하중 조건에서 실험을 통하여 응력-수명(S-N) 선도를 작성하였다. 이때 응력비 R = -1, 주파수 15 Hz로 수행하였다.

피로균열전파속도 실험을 한쪽면에 노치가 있는 SEN(single edge notched) 타입의 시험편을 이용하여 수행하였다. 시험편의 치수는 길이 75 mm, 폭 13 mm, 두께 3 mm로 가공하였다. 피로균열실험은 응력비 R = 0.05, 주파수 10 Hz로 수행하였다. 모든 인장 및 피로 실험은 유압서보 피로시험기(Instron 8516)로 수행하였다. 균열길이 측정을 위하여 배율 50배의 이동식 현미경을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 미세조직

AM60 마그네슘 합금의 미세조직을 광학현미경

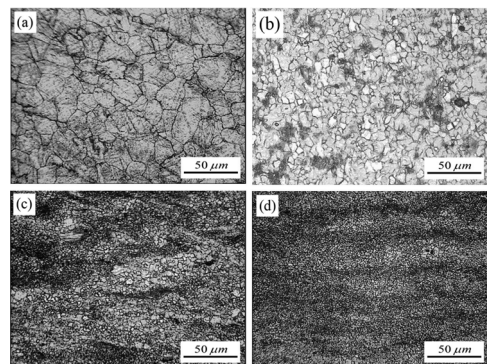


Fig. 2. Microstructure of AM60 after (a) extrusion, (b) 2 ECAP passes, (c) 4 ECAP passes and (d) 6 ECAP passes.

으로 관찰한 결과는 각각 압출재와 ECAP으로 2, 4, 6패스 가공한 경우 각각 Fig. 2(a), (b), (c), (d)와 같다. Fig. 2(a)의 압출재의 경우 평균 결정립 크기가 19.2 μm 이며 등축정(equiaxed) 조직을 나타내고 있다. 2, 4, 6패스 후에 평균 결정립 크기는 각각 8.8 μm , 3.3 μm , 2.3 μm 로 미세화 되었음을 알 수 있다. 따라서 AM60 마그네슘 합금의 경우 ECAP 공정을 통하여 결정립 미세화 효과가 있음을 알 수 있다.

3.2. 인장 물성치

Fig. 3은 압출재와 ECAP 가공한 AM60 마그네슘 합금의 상온에서의 인장 응력-변형률 선도이다. 다음과 같은 두 가지 중요한 경향을 관찰하였다. 인장 및 항복강도가 2패스에서는 증가하였으나 그 이후에는 비록 결정립의 크기는 감소하고 있으나 강도 또한 감소한다는 것이다.

통상적으로는 금속 합금의 경우 유명한 Hall-Petch 식에 의하여 결정립의 크기가 감소하면 항복강도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 2패스 이후에는 Hall-Petch 식과는 상반된 실험결과를 보이고 있다. 2패스한 AM60의 인장강도는 319 MPa로 이는 압출한 원소재에 비하여 34.5 MPa 증가한 값이다.

둘째로 패스 수가 증가하면서 연신율은 증가하는 것으로 나타났다. 6패스 후에는 연신율이 26%로 압출한 원소재의 17%에 비하여 50% 이상 증가하였다. 인장 및 항복강도, 연신율, 결정립 크기를 Table 1에 요약하였다.

조밀육방격자 구조로 된 마그네슘 합금의 항복강

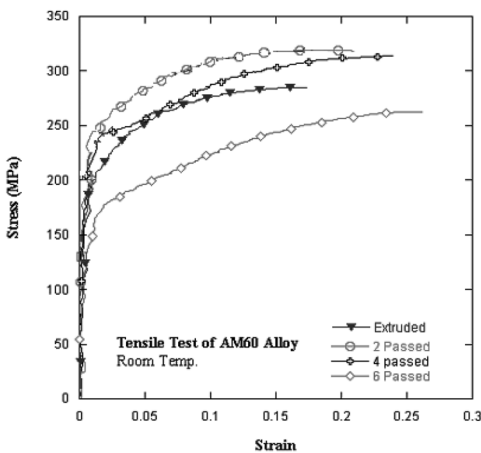


Fig. 3. Stress-strain curves of extruded and ECAPed AM60 alloys.

도는 결정립 크기와 집합조직(texture)과 상관관계가 있다. 압출 원소재와 비교하여 ECAP으로 6패스 가공한 마그네슘 합금의 경우 결정립이 좀 더 미세하나 항복강도는 낮은 것으로 나타났다. 이 경우 항복강도가 결정립 크기에 반비례하는 Hall-Petch 관계식이 성립이 안된다. 이와 같은 이유로 ECAP 가공을 하면서 집합조직이 변화하면서 집합조직에 의한 강도의 저하로 판단된다. 2패스 이후에 항복강도는 지속적으로 저하하는 것으로 나타났다.

통상적으로 마그네슘 합금의 경우 각 결정립은 ECAP 가공중 우선배향(preferred orientation)을 갖는 경향, 즉 집합조직이 형성된다. 상온에서 Mg은 기저면인 (0001)면에서 가장 조밀한 방향으로 1차 슬립이 일어난다. 순수 Mg이나 Mg 합금의 경우 기저면은 Fig. 4(a)와 같이 압출 후 압출방향과 평행하는 경향이 있다⁶⁾. 이는 압출방향으로 인장시에는 기저면에서의 슬립이 어려워지며 제한된 기저면 이외의 면에서의 슬립 활동으로 강도는 증가하게 된다.

그러나 ECAP 가공한 마그네슘 합금의 경우 Fig. 4(b)와 같이 ECAP 가공중에 (0001) 기저면에서의 기저축(basal pole)이 압출방향으로 약 45도 회전하여 만일 ECAP 가공한 빌렛을 압출방향으로 인장시에는 쉽게 슬립이 발생하여 항복강도가 낮아진다는 것을 보고되었다⁶⁾. ECAP 가공을 하면 이러한 축이 압출방향에 45도 방향으로 기울어지는 경향이 2패스 후에는 패스 수가 증가하면서 같이 증가한다. ECAP으로 2패스 후에 패스 수가 증가하면서 항복강도는 지속적으로 감소하게 된다. 따라서 항복강도의 경

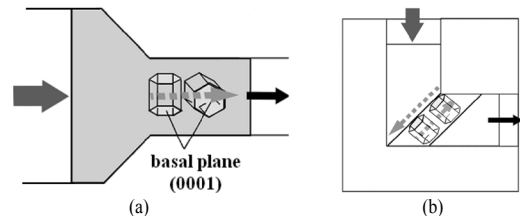


Fig. 4. Schematic illustration developing the basal plane orientation in magnesium through (a) the conventional direct extrusion and (b) ECAP.

Table 1. Grain size and room temperature mechanical properties of extruded and ECAPed AM60 alloy

Condition	Grain size (μm)	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elong. (%)	σ_e (MPa)
Extrud.	19.2	284.8	186	17	79
2 Pass	8.8	319.3	236	20	125
4 Pass	3.3	313.9	230	23	N.A
6 Pass	2.3	262.6	164	26	95

우는 조직의 이방성에 의한 연화 효과가 결정립 미세화에 의한 강화 효과보다 크다고 판단된다.

3.3. 피로 물성치

Fig. 5는 압출재와 2, 6패스로 ECAP 가공한 AM 60 합금의 S-N선도이다. N=10⁶에서의 피로한도는 압출재와 2패스, 6패스 ECAP 가공한 시험편 경우 각각 79 MPa, 125 MPa, 95 MPa로 결정하였다. 압출재에 비하여 ECAP 가공한 재료가 피로한도가 높음을 알 수 있다. 2패스 ECAP 가공한 시험편이 압출재에 비하여 피로한도가 58% 정도의 증가하였다. 6패스 가공한 재료나 압출재보다 항복강도가 가장 높은 2패스 ECAP 가공한 시험편이 피로한도가 가장 높다. 따라서 압출재와 ECAP 가공한 마그네슘 AM60 합금의 경우 항복강도가 피로수명과 연관성이 있는 것으로 판단된다.

한편 인장강도에 대한 피로비(fatigue ratio)는 압출재와 2패스 및 6패스 ECAP 가공한 시험편 경우 각각 28%, 39%, 36%에 해당된다. 이는 철강의 약 50%에 비하면 낮은 값으로 평가된다. 압출재에 비하여 ECAP 가공한 시험편의 경우 높은 항복응력은 하중 제어 피로시 거시적인 소성변형을 억제시켜 결국 균열발생수명 구간을 증가시킨다. 그러므로 ECAP 가공한 시험편에서의 피로 한도의 증가는 주로 높은 항복강도로 인한 균열발생 저항의 감소에 의하여 나타났다고 판단된다.

압출재와 2패스 6패스 ECAP 가공한 소재의 응력비 R=0.05에서의 피로균열전파속도(da/dN)-ΔK 선도는 Fig. 6과 같다. 응력비 R=0.05에서 낮은 ΔK 범위에서는 미세립의 2패스 및 6패스 ECAP 가공한 시험편의 균열전파속도가 조대 결정립의 원소재의 균열전파속도에 비하여 높게 나타났다. 이와 같은 사실은 ECAP 가공하여 미세립화된 알루미늄 합금이나 철강의 경우 조대 결정립 조직보다 균열전파속도가 빠른 거동과는 유사하다⁷⁾. 그러나 ΔK > 6 MPa√m에서는 ECAP 가공한 시험편의 균열전파속도가 압출재보다 더 느렸다. 비록 균열전파속도 선도가 실험적으로 하한계값 ΔK_{th}에 도달하지 않았으나 압출재와 ECAP 가공한 시험편의 균열전파 하한계값은 약 3.0 MPa√m로 거의 유사하다.

사이클당 균열전파크기는 소성유기 균열단합에 의하여 균열선단개구 변위(CTOD, crack tip opening displacement)에 비례한다고 가정하면 균열전파속도는 Dugdale의 모델에 의하여 다음의 식 (2)와 같이 상관관계로 표현할 수 있다⁸⁾.

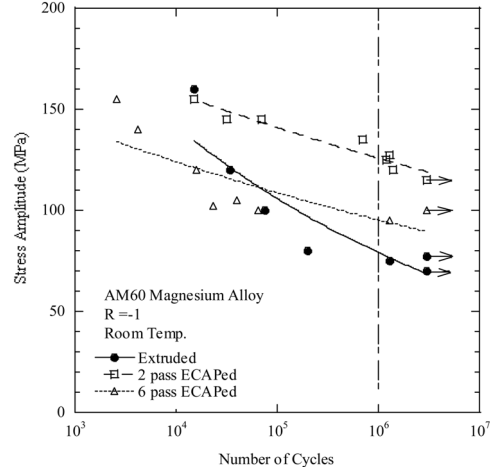


Fig. 5. The S - N curves for the extruded and ECAPed AM60 alloys.

$$\frac{da}{dN} \approx \Delta CTOD = \frac{\Delta K^2}{\sigma_y E} \quad (2)$$

여기서 ΔK는 응력확대계수폭, E는 탄성계수이다. 이식을 통하여 낮은 항복강도는 동일한 ΔK값에서 빠른 균열전파속도를 야기시킨다는 사실을 알 수 있다.

낮은 항복강도(= 164 MPa)를 갖는 6패스 ECAP 한 시험편이 높은 항복강도(= 236 MPa)를 갖는 2패스 ECAP한 시험편보다 균열전파속도가 전체적인 영역에서 빠르다는 사실은 식 (2)로 설명이 가능하다. 그러므로 2패스 및 6패스 ECAP 가공한 재료의 경우 소성유기 균열단합 효과가 균열전파속도를 주도하는 주요 인자로 판단된다. 그러나 높은 항복강도(= 236 MPa)를 갖는 2패스 ECAP 가공한 시험편이

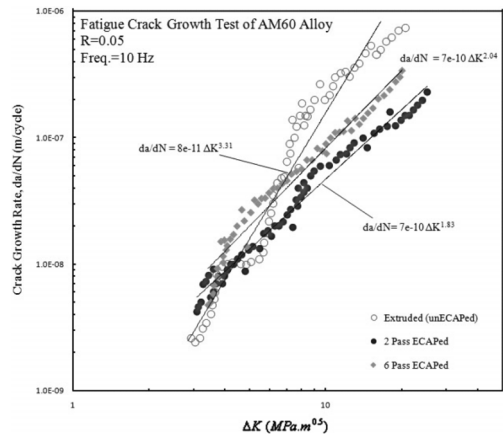


Fig. 6. da/dN-ΔK curves of extruded and ECAPed AM60 alloys.

이보다 낮은 항복강도(= 186 MPa)를 갖는 압출재보다 균열전파속도가 낮은 ΔK 영역에서 높은 것으로 나타났다. 따라서 압출재 시험편의 경우 소성유기 균열달힘 효과는 균열전파속도를 주도하는 주요 인자가 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

AM60 마그네슘 합금에 대하여 ECAP 공법을 적용하여 미세조직, 인장 및 항복강도, 피로강도, 피로 균열전파속도에 관하여 평가하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

- 1) AM60 마그네슘 합금에 ECAP를 적용하여 결정립을 6패스 후에 약 2 μm 까지 미세화가 가능하였다.
- 2) 최대인장강도와 항복강도, 피로한도 측면에서 2패스한 빌렛이 가장 강도가 높았으며 그 이후 6패스까지 증가시켜도 집합조직의 영향으로 인장 및 항복강도는 점차 저하하였다.
- 3) 2패스한 이후 6패스까지 결정립이 증가함과 더불어 연신율이 점차적으로 증가하였으며 6패스 후에는 연신율이 26%로 압출한 원소재의 17%에 비하여 50% 이상 증가하였다.
- 4) ECAP 가공한 재료의 경우 소성유기 균열달힘 효과가 균열전파속도를 주도하는 주요 인자로 판단된다. 그러나 압출재 시험편의 경우 소성유기 균열달힘 효과는 균열전파속도를 주도하는 주요 인자가 아닌 것으로 판단된다. 또한 미세립화된 ECAP 가공한 시편의 균열전파속도가 조대 결정립의 압출재에 비하여 $\Delta K > 6 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 에서는 더 느린 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) B. L. Mordike, and T. Ebert. "Magnesium Properties-applications-potentials", Mater Sci. Eng., Vol. A302, pp. 37-45, 2001.
- 2) R. Z. Valiev, and T. G. Langdon, "Principles of Equal-channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement", Progress in Materials Science, Vol. 51, No. 7, pp. 881~981, 2006.
- 3) S. M. Masoudpanah, and R. Mahmudi "The Microstructure, Tensile, and Shear Deformation Behavior of an AZ31 Magnesium Alloy after Extrusion and Equal Channel Angular Pressing", Materials & Design, Vol. 31, No. 7, pp. 3512~3517, 2010.
- 4) H. K. Kim, and W. J. Kim, "Microstructural Instability and Strength of an AZ31 Mg Alloy After Severe Plastic Deformation", Materials Science and Engineering A, Vol. 385, No. 1-2, pp. 300~308, 2004.
- 5) Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, "The Process of Grain Refinement in Equal-channel Angular Pressing", Acta Materialia, Vol. 46, No. 9, pp. 3317~3331, 1998.
- 6) W. J. Kim, S. I. Hong and Y. S. Kim, "Texture Development and its Effect on Mechanical Properties of an AZ61 Mg Alloy Fabricated by Equal Channel Angular Pressing", Acta Materialia, Vol. 51, No. 11, pp. 3293~ 3307, 2003.
- 7) A. Vinogradov, S. Nagasaki, V. Patlan, K. Kitagawa and M. Kawazoe, "Fatigue Properties of 5056 Al-Mg Alloy Produced by Equal-channel Angular Pressing", NanoStruct. Mater. Vol.11 No.7, pp. 925~934, 1999.
- 8) D. S. Dugdale, "Yielding of Steel Sheets Containing Slots", Journal of Mechanics and Physics of Solid, Vol. 8, pp. 100~104, 1960.