

강소성법을 이용한 미세립 Al-5083 합금의 피로균열전파 거동

김호경* · 양경탁* · 김현준*

서울산업대학교 자동차공학과 · *서울산업대학교 대학원
(2006. 12. 14. 접수 / 2007. 3. 29. 채택)

Fatigue Crack Propagation Behavior of Fine Grained Al-5083 Alloy Produced by Severe Plastic Deformation

Ho-Kyung Kim[†] · Kyoung-Tak Yang^{*} · Hyun-Jun Kim^{*}

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

^{*}Graduate School, Seoul National University of Technology

(Received December 14, 2006 / Accepted March 29, 2007)

Abstract : Fine grained Al-5083 alloy produced by equal channel angular pressing (ECAP) at 120°C was tested for investigating mechanical properties and crack growth propagation behavior. Also, FEM stress and strain analysis for the samples during ECAP were investigated, using a plastic deformation analysis software DEFORM 2-D. Coarse grained as-received samples exhibited UTS of 255.6MPa with a elongation to failure of 34.4%. By contrast, the ECAPed fine grained samples exhibited UTS of 362.0MPa with a elongation to failure of 12.9%. Fatigue crack growth resistance and threshold of fine grained samples were lower than that of as-received coarse grained samples. The higher fatigue crack growth rate in the fine grained ECAPed samples may partially arise from small roughness closure effect due to smoother fracture surfaces.

Key Words : 5083-Al alloy, fine-grained microstructure, FEM simulation, fatigue crack growth rate

1. 서 론

최근에 ECAP(equal channel angular pressing)이라는 아주 간단한 소성가공법이 구 소련의 Segal 등¹⁾에 의해 새롭게 개발되어 초미세 결정립 크기를 갖는 소재를 얻을 수 있는 가능성이 제시되었다. ECAP 가공법은 동일한 단면적을 갖는 두 개의 채널을 가진 금형을 통해 소재를 의정수압 상태에서 프레스싱(pressing)하는 가공 방법으로, 두 채널이 만나는 교차 지점을 통과시 소재에 매우 심한 전단변형을 가하여 미세조직을 파쇄하는 간단한 가공 방법이다. 또한 ECAP법은 지속적인 반복 변형으로 가공량이 증가하더라도 소재의 단면적 감소를 수반하지 않으므로 재료내에 높은 변형에너지를 축적시킬 수 있어 결정립의 초미세화가 가능하다. ECAP법으로 얻어진 소재의 경우 결정립 크기가 마이크로미터 이하

로 매우 미세하므로 초소성과 같은 부가적인 성질을 얻을 수 있으며 본 가공법의 적용은 Al, Cu, Mg, Ti 합금 및 철강 재료에 이르기까지 많은 소재에 대해 연구가 활발하게 진행되고 있다²⁻⁵⁾.

그러나 초미세립 재료의 피로거동에 관한 연구는 국내외적으로 매우 제한적으로 연구되고 있다. 이들 제한적인 연구도 주로 구리 혹은 알루미늄 합금에 대한 S-N 선도, 피로 반복 경화나 연화현상과 같은 연구가 대부분이다^{6,9)}. 기존의 재료에 비하여 초미세립 재료는 균열 발생에 대해서는 높은 저항성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 그러나 초미세립 재료는 균열전파속도에 대한 저항성은 낮아 결과적으로 기존 결정립이 큰 재료에 비해 작은 저주기 피로 수명을 갖는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 또한 초미세립 재료의 피로 특성에 관한 상반된 결과도 있다. 예로 초미세립 알루미늄 Al-1560 합금의 경우 저주기 피로 수명은 짧았으나 피로한도는 향상된 것으로 발표된 연구가 있다⁶⁾. 한편 ECAP 가공한 초미세립 Al-5056 합금의 경우 고주기 피로수명은 증가하였으나 피로

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimhk@snut.ac.kr

한도에서는 별 증가 효과가 없는 것으로 발표되었다⁸⁾. 이와 같은 상반된 결과는 부분적으로 초미세립 공정 방법과 공정 이후의 열적 기계적 후처리 방법, 금속 결정학적 조직에 의한 영향으로 판단된다. 최종적으로는 이와 같은 미세 결정구조는 제조된 기계부품의 내구 안전성에 중요한 영향을 끼친다.

본 연구에서는 결정립 미세화에 따른 기계적 성질 변화를 조사하기 위하여 상용 알루미늄 합금인 Al-5083 합금을 이용하여 ECAP 공정에 의해 결정립을 미세화한 조직의 인장강도 및 피로균열전파속도와 같은 기계적 특성을 고찰하였다. 특히 피로 시험을 통하여 응력비에 대한 균열전파속도의 영향을 중점적으로 고찰하고자 한다. 한편 상용 소성해석 소프트웨어를 이용하여 ECAP 가공 중에 발생하는 재료에 대한 변형률, 응력 분포도에 관하여도 병행하여 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1. ECAP 공정

본 연구에서 사용한 재료는 상용 Al-5083 합금으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 두께 25mm의 판재를 절단 후 선반으로 직경 14.5mm, 길이 85mm의 크기로 가공하였다. 가공 후 가공경화를 없애고 용체화 처리를 위하여 530℃에서 2시간 동안 가열 후 급냉하여 ECAP용 시험편을 제조하였다.

ECAP은 Fig. 1과 같이 내각 Φ 가 90도, 바깥각 Ψ 가 30도인 다이를 사용하였으며 다이는 SKD61 공구강으로 제작하였다. 이때 사용한 다이는 다음과 같은 공식 (1)에 의해 1 pass 당 유효 변형률은 약 100%에 해당 한다¹⁰⁾.

$$\epsilon = \frac{2\cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi\operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

다리와 고정구를 120ton 용량의 압출기에 고정시킨 후 pressing 공정을 수행하였다. ECAP공정 중 다리와 소재의 마찰력을 줄이기 위하여 사용된 윤활제는 MOS₂를 사용하였다. Al-5083 합금의 ECAP 공정은 120℃에서 램 속도를 2mm/s로 수행하였다.

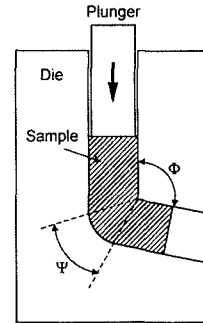


Fig. 1. Principle of ECAP processing.

2.2. ECAP 공정 모사 해석

ECAP 공정 중의 소재에 작용하는 응력, 변형률 분포 등에 관한 정보를 예측하기 위하여 모사 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 유한요소 프로그램은 상용 소성가공 해석 소프트웨어인 DEFORM-2D¹¹⁾로서, 평면변형률 조건(plane strain)을 적용하였다. 요소는 사각형 요소를 사용하였으며 절점수(nodes)는 총 696개, 요소(elements)수는 총627개로 구성되었다. 한편, 다이와 재료의 온도 조건은 120℃로 하였으며, 프레스 램 스피드는 2mm/sec로, 다이와 재료와의 마찰계수 μ 는 0.1로 설정하였다.

2.3. 인장, 피로 시험 및 미세 조직 관찰

인장 시험 시험편은 지름 10mm, 길이 50mm의 치수를 갖는 봉상 시험편으로 가공하여 시험하였다. 인장시험은 10ton용 유압 서보식 만능 시험기(Instron 8516)를 사용하였으며, 인장 속도는 1mm/min으로 시행하였다. 변형률의 측정은 게이지 길이 20mm의 변위 신장계(extensometer)를 이용하여 측정하였다.

원 소재(as-received) 및 ECAP 가공한 Al-5083 합금의 피로 균열전파속도 시험은 상온의 대기 중에서 인장시험에서 사용한 유압식 만능 재료 시험기를 사용하였으며, 하중제어 방식으로 응력비($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)가 0.05, 0.2, 0.4로 15Hz의 정현파형 반복 하중을 일정하게 가하여 수행하였다. 균열의 측정은 배율이 25배인 상하로 이동할 수 있는 이동식 현미경(traveling microscope, Mitutoyo, NRM-D2XY)을 사용하여 균열길이를 측정하였다. 한편 피로균열시험에 사용한 SEN(single edge notched) 시험편에 대한 응력확대계수 ΔK 의 계산식은 다음과 같다¹²⁾.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2 + \alpha)}{B\sqrt{W}(1 - \alpha)^{1.5}} \times (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.5\alpha^4) \quad (2)$$

Table 1. Chemical compositions of Al-5083 alloy (wt. %)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Ti	Al
Al-5083	0.08	0.19	0.02	0.57	4.45	0.06	0.01	0.02	bal

여기서 $\alpha = a/w$ 이며 B는 시험편 두께 ΔP 는 작용하중($P_{max}-P_{min}$)이다.

ECAP 공정 전·후의 미세조직 변화를 관찰하기 위하여 광학현미경(Model Union Versamet-3 Optical microscope)을 이용하였으며, 파단된 파면을 관찰하기 위하여 주사형 현미경(SEM, scanning electronic microscope, Joel Co. Model JSM 6400)을 사용하였다. 530°C에서 2시간 동안 가열 후 급냉하여 용체화 처리한 원 소재와 ECAP 가공 한 소재의 미세조직은 각각 Fig. 2.(a), (b)와 같다. 본 사진에서 보듯이 원 소재의 경우 석출물이 비교적 덩어리로 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 ECAP 가공 결과 매우 미세한 석출물들이 비교적 균일하게 분산되어 있는 것을 알 수 있다.

3. 결과 및 분석

3.1. ECAP 공정 simulation

유한요소 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하여 다이와 재료의 온도 조건 120°C에서 다이와 재료와의 마찰계수 $\mu = 0.1$ 을 적용한 상태에서 ECAP 공정을 모의 해석한 결과 변형된 격자의 모양을 Fig. 3에 나타냈다. 안쪽과 바깥쪽의 모서리 틈이 충전된 현상

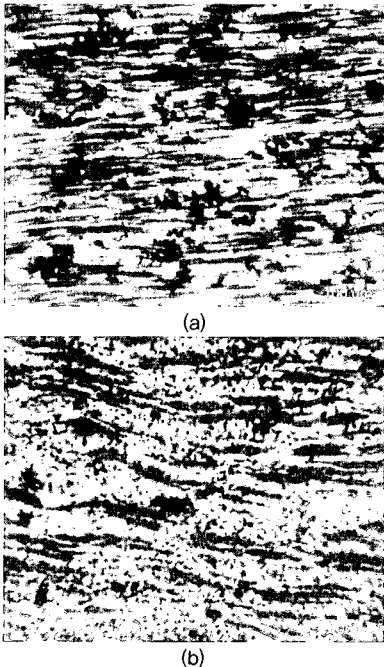


Fig. 2. Microstructure of (a) as-received and (b) ECAPed Al-5083 alloy.

을 보이고 있으나 2차 통로의 상단에서 약간의 틈새가 형성됨을 알 수 있다. 한편 압출재의 전두부의 경우 변형이 균일하게 이루어지지 않은 상태로 압출되었다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 4는 ECAP 공정중의 소재에 작용하는 유효 응력을 유한요소해석을 통하여 예측한 것이다. 소재가 만곡부를 통과하면서 응력이 균일하게 작용하나 외각부의 경우 응력이 증가함을 알 수 있다. 이는 마찰력에 의한 영향으로 판단되며 응력의 균일함을 위해서는 마찰계수를 감소시키는 것이 필요하다. Fig. 5는 유한요소해석을 통하여 ECAP 공정중의 소재에 작용하는 유효 변형률을 예측한 분포도이다. 소재가 2차 통로를 통과 후 상단에서 국부적으로 변형이 평균 변형률에 비해 증가하는 현상을 보이고 있다. 대부분의 구역에서 평균 유효 변형률이 1.118

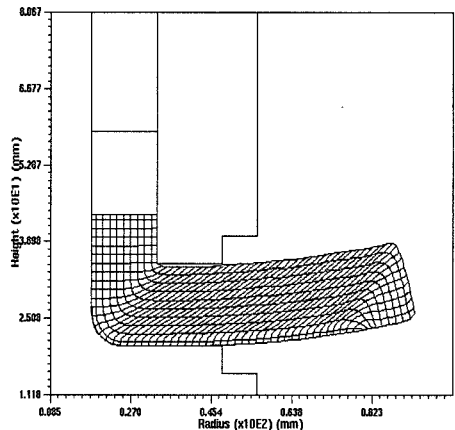


Fig. 3. Deformation of grids predicted from FEM analysis for ECAP.

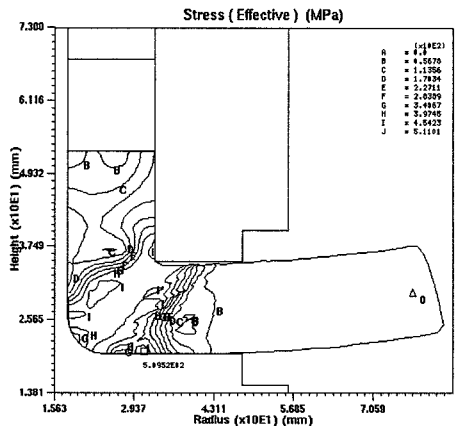


Fig. 4. Effective stress distribution for the Al-5083 alloy during ECAP.

로 나타나 있다. 이를 식 (1)에 의거하여 $\Phi = 90^\circ$, $\Psi = 30^\circ$ 를 대입하여 이론적으로 결정하면 $\epsilon = 1.016$ 으로 구해진다. 따라서 유한요소 해석을 통하여 얻어진 유효 변형률과 약 10%의 오차를 보임을 알 수 있다. ECAP 다이 벽면과의 마찰계수가 정확하지 않은 것을 감안하면 유한요소 해석이 정확히 예측함을 나타내고 있다.

한편 Fig. 6은 ECAP 공정 중에 램의 이송거리에 대한 하중의 변화를 나타내는 선도이다. 본 그림을 통하여 소재가 약 19.2mm를 프레싱 한 상태에서 작용하중이 최고점에 도달한 것을 알 수 있다. 이 시점은 소재가 1차 통로를 통과하여 2차 통로에 접어들면서 전단 소성 변형을 일으키는 단계로 판단되며 전단 소성변형 후 2차 통로와의 마찰력에 의해 톱

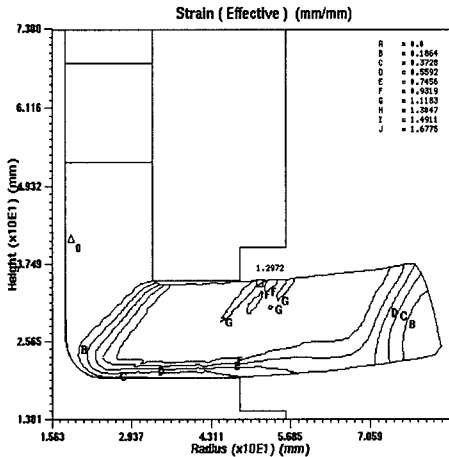


Fig. 5. Effective strain distribution for the Al-5083 alloy during ECAP.

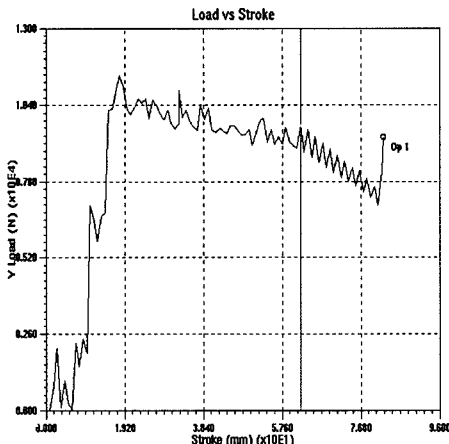


Fig. 6. FEM predicted load-stroke curve during ECAP.

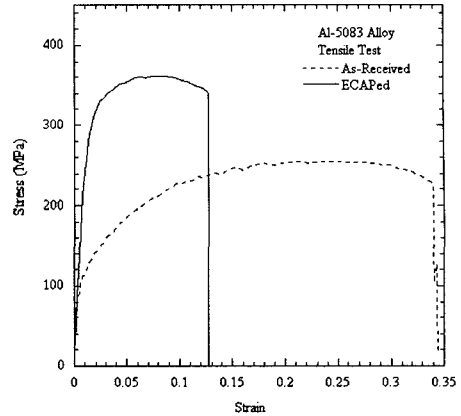


Fig. 7. Stress-strain curves of as-received and ECAPed Al-5083 alloy.

니형의 들쭉날쭉한 불규칙한 작용하중을 나타내며 점차적으로 작용하중이 감소하며 2차 통로를 통과하는 상태를 나타내고 있다.

3.2. 인장 시험

Fig. 7은 상온의 온도에서 인장속도를 1mm/min에서 게이지 길이 20mm의 변위 신장계를 이용하여 측정된 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 원 소재 및 ECAP 가공한 Al-5083 합금의 인장 시험 결과, 원 소재의 인장강도는 255.6MPa, 연신율은 34.4%이며, ECAP 가공된 미세립 소재의 인장강도는 362.0MPa, 연신율은 12.9%로 나타났다. 즉 ECAP 가공한 소재가 원소재에 비해 42%의 인장강도의 상승을 나타내었고, 연신율은 강도가 높아짐에 따라 약 63% 감소한 것을 볼 수 있다. 인장강도의 증가는 결정립이 미세화 하면서 강도가 증가한 것으로 판단된다.

3.3. 피로 균열전파속도 시험

원 소재 및 ECAP 가공한 Al-5083 합금의 응력비 $R = 0.05, 0.2, 0.4$ 에서의 피로균열전파속도 da/dN 는 Fig. 8과 같다. ECAP 가공한 초미세립 합금의 균열전파속도는 조대 미세조직을 갖는 원래의 소재에 비하여 빠르다는 것을 알 수 있다. 그러나 $\Delta K > 20\text{MPa}\sqrt{m}$ 에서는 ECAP 가공한 합금의 균열전파속도가 역전되어 진다. 이와 같은 역전 현상은 다른 초미세립 알루미늄 및 티타늄 합금에서도 보고된 바 있다¹³⁾. 한편, 원소재 합금은 Fig. 8의 I영역 선도에서 약간 ECAP 가공재에 비해 하한 응력확대계수폭, ΔK_{th} 값이 증가함을 알 수 있다. 이는 피로균열전파의 시작이 원소재가 좀 더 어렵다는 것을 의미한다. Fig. 7

에서와 같이 초미세립의 ECAP 가공한 합금이 단 순 인장강도 측면에서는 결정립 미세화에 의해 상당히 향상된 인장 강도를 나타내지만 피로균열 전파 속도 측면에서는 별 효과가 없음을 나타낸다. 이는 결정립 미세화가 Al-5083 합금의 피로균열전파 저항의 향상에는 별 효과가 없음을 나타낸다.

미세한 결정립을 갖는 재료는 피로균열 전파속도에 대한 저항이 작은 것으로 알려져 있다. 이는 역전 소성역 크기(reverse plastic zone size)⁶⁾와 같은 내적인 인자와 거칠기에 기인한 균열 닫힘효과와 같은 외적인 인자 측면에서 설명할 수 있다. 미세한 결정립을 갖는 재료에서의 소성 변형역은 통상적으로 결정립 크기보다 작기 때문에 하중이 제거되는 상황에서는 전위의 역전 슬립(reverse slip)이 종종 어려워져 반복 하중시 손상 축적이 증가한다. 또한 피로 균열 전파시 균열 경로가 결정립이 큰 재료보다 덜 왜곡된 관계로 균열 성장에 필요한 구동력을 효과적으로 낮추지 못하여 결과적으로 미세립 재료는 빠른 균열전파속도를 나타낸다. 그 예로 알루미늄과 티타늄 합금이 있다^{6,13)}. 그러므로 이와 같은 효과들이 결정립 크기가 감소하면서 균열전파에 대한 저항력과 하한 응력확대계수 폭을 감소시킨다. 본 연구 결과는 다른 초미세립 재료의 연구 결과와 일치한다^{6,13)}. 즉 미세 결정립을 가진 ECAP 가공한 Al-5083의 경우 조대 결정립을 가진 원소재에 비해 낮은 하한 응력확대계수 폭과 빠른 균열전파속도를 나타내고 있다.

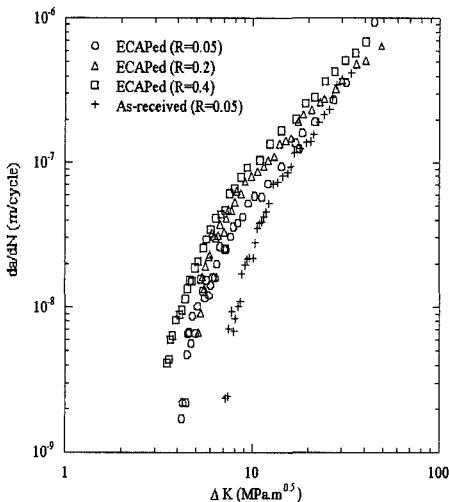


Fig. 8. Effect of stress ratio on the fatigue crack growth behavior of ECAPed Al-5083 alloy.

또한 Fig. 8에서 보는 바와 같이 ECAP 가공한 경우 비록 실험적으로 하한응력확대계수 폭 ΔK_{th} 에 도달은 하지 않았으나 균열전파속도와 하한응력확대계수 폭 ΔK_{th} 는 응력비 R이 증가하면서 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 응력비의 영향을 나타내는 거동은 일반적으로 널리 알려진 사실이며 이는 균열닫힘 효과가 뚜렷한 낮은 ΔK 에서의 사실로 설명이 가능하다¹³⁾. 그러나 Fig. 8에서 보듯이 II 영역에서의 균열전파속도에 대한 응력비의 효과는 R = 0.2와 0.4에서는 더욱 작아진다.

ECAP 가공한 재료의 경우 응력비가 증가하면서 균열전파속도가 증가하고 하한 응력확대계수 폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 응력비 R이 0.5 이상 혹은 0.7 이상에서는 그 효과가 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. 그러나 본 ECAP 가공한 Al-5083의 경우 응력비가 증가하면서 균열전파속도에 대한 응력비의 영향이 점차 줄어들음을 알 수 있다. 이는 결정립이 작으면 작을수록 균열전파 경로가 덜 왜곡되고 결과적으로 균열 개구하중(opening load) P_{op} 를 감소시킨다고 할 수 있다. 그러므로 이에 해당하는 K_{op} 는 감소하고 결과적으로 일정 하중 진폭의 피로시험에서는 K_{min} 이 작은 양의 응력비 증가에도 K_{op} 에 쉽게 접근할 수 있게 된다. 즉 균열 닫힘 효과가 소멸된다는 것이다. 그러므로 ECAP 가공한 Al-5083 합금의 대부분의 균열전파 구역에서의 관찰된 응력비 효과는 균열닫힘에 의한 것으로 판단된다.

한편 원재료와 ECAP 가공한 재료에 대한 3개의 응력비에서의 파단면을 주사형 전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 3가지의 응력비에 대한 ECAP 가공한 재료의 파단면은 별 차이가 없었다. 원재료와 ECAP 가공한 재료의 응력비 R = 0.05에서 $\Delta K \sim 9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 부근에서의 피로 파단면에 대한 주사형 전자현미경으로 관찰한 것은 각각 Fig. 9(a), (b)와 같다. 원 소재의 경우 Fig. 9(a)에서 보듯이 파면에 벽개파단(cleavage fracture)이 아닌 전단(shearing) 소성변형의 파단 양상의 거칠은 물결 모양의 shear ridge가 나타나는 양상을 보이고 있다. 이는 피로 균열이 부분적으로 균열면에 경사진 방향으로 소성 변형에 의한 전단이 발생하며 진행되었음을 암시한다. ECAP 가공한 재료의 경우 피로 파괴가 진행시 shear ridge가 거의 없는 상태에서 균열 파면이 거칠기가 비교적 편평하게 진행되었음을 알 수 있다. 따라서 원 소재의 소성 변형에 의한 균열전파 구동에

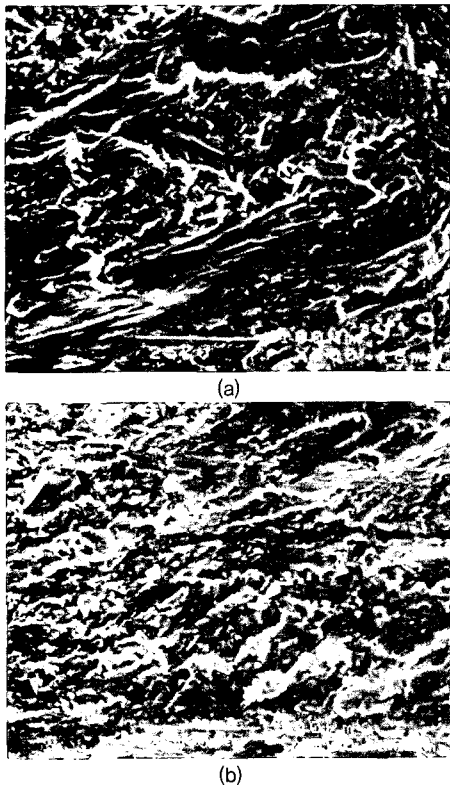


Fig. 9. Fatigue fracture surfaces of (a) as-received and (b) ECAPed Al-5083 alloy.

너지 흡수효과와 거칠기 유기 효과로 인하여 피로 균열전파속도가 미세립의 ECAP 가공한 재료 보다 느리게 진행되었다고 판단된다.

4. 결론

120°C에서 ECAP으로 강소성법을 이용한 미세립의 Al-5083 합금의 기계적 특성과 피로균열전파거동에 관하여 시험하였다. 또한, 상용 소성변형해석 소프트웨어인 DEFORM 2-D를 이용한 유한요소해석을 통하여 ECAP 공정을 해석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) ECAP 공정에 대한 2차원 유한요소해석 결과는 평균 등가 변형률이 1.118로 각도 $\Phi=90^\circ$, $\Psi=30^\circ$ 를 이용한 이론적 결과와 약 10%의 오차를 나타냈다.

2) 조대 결정립의 모재는 연신율이 34.4%, 최대인장강도 255.6MPa로 나타났으며, ECAP 가공한 미세립재의 경우 연신율 12.9%, 최대인장강도 362.0MPa

로 나타났다.

3) 미세립 Al-5083의 피로 균열하한값과 전파속도 저항값은 조대한 결정립의 모재보다 낮게 나타났다.

4) 미세립 Al-5083 재료의 경우 응력비가 증가하면서 균열전파속도가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 균열전파속도에 대한 응력비의 영향이 다른 합금재에 비해 낮은 것으로 나타났으며 이는 미세립재의 평편한 파단면에 기인하는 거칠기에 의한 균열달림의 효과가 작은 것이 일부 원인일 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) V.M. Segal, "Materials processing by simple shear", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 197, pp. 157~164, 1995.
- 2) M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, R.Z. Valiev, T.G. Langdon, "Microhardness measurements and the Hall-Petch relationship in an Al-Mg alloy with submicrometer grain size", Acta Metall. et Mater., Vol. 44, pp. 4619~4629, 1996.
- 3) S.L. Semiatin, D.P. DeLo, "Equal channel angular extrusion of difficult-to-work alloys", Mater. & Designs, Vol. 21, pp. 311~322, 2000.
- 4) M. Mabuchi, H. Iwasaki, K. Yanase, K. Higashi, "Low temperature superplasticity in an AZ91 magnesium alloy produced by ECAE", Scripta Mater., Vol. 36, No. 6, pp. 681~686, 1997.
- 5) D.H. Shin, K.H. Oh, W.J. Kim, S.W. Lee, W.Y. Choo, "ECAP가공에 의한 0.15%C강의 결정립 미세화", 대한금속학회지, Vol. 37, pp. 1048~1054, 1999.
- 6) M.K. Rabinovich, M.V. Markushev, "Influence of fine grained structure and superplastic deformation on the strength of aluminum alloys", J. Mater. Sci. Vol. 30, pp. 4692~4702, 1995.
- 7) S.R. Agnew, J.R. Weertman, "Cyclic softening of ultrafine grain copper", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 244, pp. 145~153, 1998.
- 8) V. Patlan, A. Vinogradov, K. Higashi, K. Kitagawa, "Overview of fatigue properties of fine grain 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel angular pressing", Mater. Sci. Eng. A Vol. 300, pp. 171~182, 2001.
- 9) S.R. Agnew, A. Vinogradov, S. Hashimoto, J.R.

- Weertman, "Overview of fatigue performance of Cu processed by severe plastic deformation", *J. Electronic. Mater.* Vol. 28, No. 9, pp. 1038~1044, 1999.
- 10) Y. Iwahashi, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, "Microstructural characteristics of ultrafine-grained aluminum produced using equal-channel angular pressing", *Met. & Mater. Trans. A*, Vol. 29A, pp. 2245~2252, 1998.
 - 11) DEFORM2D, Scientific Forming Technologies Corporation.
 - 12) ASTM E647-93: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.
 - 13) A. Vinogradov, S. Nagasaki, V. Patlan, K. Kitagawa, 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.
 - 14) S.K. Jha, K.S. Ravichandran, "Effect of mean stress (stress ratio) and aging on fatigue-crack growth in a metastable beta titanium alloy", *Met. & Mater. Trans. A*, Vol.3 1A, pp. 703~714, 2000.