한국소성가공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집 pp. 409~412

연속전단 압출가공된 알루미늄 합금의 성형성

이철원[1] · 고영건[2] · 신동혁[1#]

Formability of aluminum alloy fabricated *via* continuous-shear drawing process

C.W. Lee, Y.G. Ko, and D.H. Shin

Abstract

A study is made to put forward the new method of continuous-shear drawing (CSD), and investigate deformation behavior and microstructure evolution of aluminum alloy with a comparison of equal-channel angular (ECA) drawing. In contrast to ECA drawing, the die for CSD deformation can impart an additional strain to the workpiece since the diameter of the exit channel is narrower than that of its entrance channel. Although no significant crack occurs in all conditions during deformation, the sample deformed *via* CSD method showed better surface quality as compared to ECA drawing. This is mainly ascribed to the fact that the sample is significantly bent rather than sheared when deforming through ECA drawing.

Key Words: Continuous-shear drawing, equal-channel angular drawing, aluminum alloy, formability, microstructure

1. 서론

전단 변형을 통해 높은 변형량을 벌크 소재에 부과함으로써 초미세 결정립을 효과적으로 제어할 수 있는 강소성 가공법 중의 하나인 equal-channel angular (ECA) pressing 가공에 관해 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초미세 결정립 소재는 마이크로 수준의 미세한 결정립 소재에 비해서 상대적으로 우수한 기계적 물성을 갖는다고 알려져 있기 때문이다[1,2]. 또한, 이러한 가공법은 1 회 가공을 통해 높은 변형량을 부과할 수 있어 주조 조직(dendrite) 혹은 라멜라 구조를 분해하는데 효과적이라고 보고된 바 있다[3]. 하지만 ECA pressing 가공은 연속공정이 아니기 때문에 산업적인 적용이 제한된다는 단점이 있다. 이에 최근 Thomson 등[4]은 연속가공이 가능한 ECA drawing 법을 제안한 바 있다. ECA drawing 가공법은 전단 변형을 인발을 통해 부과하는 방법으로, 가공 시 plunger 의 buckling instability 가 발생하지 않으며 가공할 수 있는 시편의 길이에 제한이 없다는 장점을 갖고 있다. 그러나 유한요소 해석결과[5] 혹은 실험 결과[6,7]에 따르면, 1 회 ECA drawing 가공에서 극심한 corner gap 이 발생하여 유효 변형량의 분포가 전반적으로 균일하지 않았으며 시편의 국부적인 단면 감소가 발생하는 등 중요한 문제점들이 보고되었다.

이처럼 ECA drawing에서 필연적으로 발생하는 성형성에 관한 문제를 해결하기 위해서 continuous-shear drawing (CSD) 기법을 제안하였다. 동일한 직경의 채널을 연결하는 ECA drawing 법과 달리 CSD 가공법은 다른 크기의 직경을 갖는 채널을 연결한 금형을 사용하였다. 이로써 CSD 가공법은 소재에 전단과 인발 변형을 동시에 부여할 수 있을 것으로 기대된다. 즉, ECA drawing과 CSD 가공법의 차이는 출구 직경의 차이에 있다. 따라서 성형성에 미치는 출구 직경의 영향을 살

1. 한양대학교
2. 영남대학교
한양대학교, E-mail: dhshin@hanyang.ac.kr

펴보기 위해 전단 변형에 관련된 내각의 크기는 동일하였다. 본 연구에서는, 6063 알루미늄 합금에 CSD 변형을 부과하였으며 성형성 측면에서 ECA drawing 결과와 비교하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 압출재로 최종 직경이 10 mm 상용 6063 알루미늄 합금을 사용하였으며 초기 미세조직은 그림 1 과 같다. 미세조직은 등축의 결정립으로 구성되어 있으며 결정립도 분포는 비교적 균일하였다. 평균 결정립 크기는 ~ 50 μm 이다. ECA drawing 에 사용된 금형은 직경이 10 mm 인 두 개의 채널로 이루어져 있으며, 두 채널의 교차각(2ϕ)이 135° 가 되도록 그림 2(a)와 같이 설계하였다. 이는 ECA drawing 에 대한 기존의 상계해 해석[4] 및 유한요소 해석결과[5]에 따르면, 일반적으로 내각이 120° 보다 작은 금형을 사용하였을 때 시편에 불안정한 변형 혹은 가공 조건에 따라서 파단이 발생한다고 보고된 바 있기 때문이다. 반면 CSD 금형은 그림 2(b)에서 보이는 바와 같이 입구 및 출구 직경이 각각 10 과 9 mm 이며 내각은 135°이다. 이때 변형속도는 100 mm/s 이다. 변형 미세조직 관찰은 전단 변형특성이 잘 나타나는 길이방향에 대한 옆면(Y-plane)을 관찰하였으며, 광학 현미경 관찰을 하기 위해 Poulton 용액을 사용하여 에칭하였다.

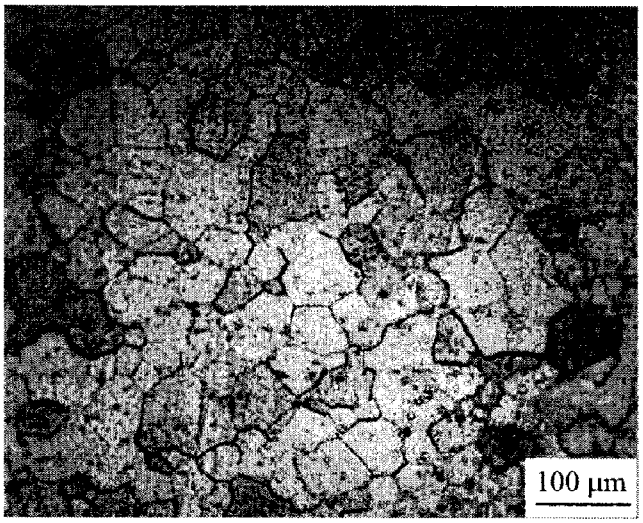

Fig. 1 Initial microstructure of 6063 aluminum alloy

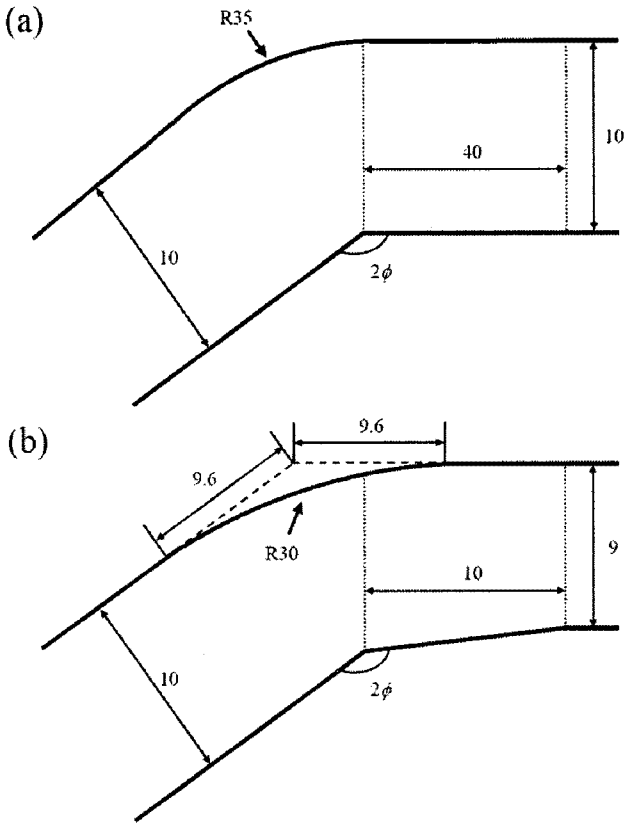

Fig. 2 Schematic diagrams of the dies used for (a) ECA drawing and (b) CSD technique

3. Continuous shear drawing (CSD)

그림 3 에 ECA drawing 변형 결과를 나타내었다. 전단 변형면 이후에 시편의 단면감소로 인하여 금형 내부에 빈 공간이 발생한 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 변형 거동은 가공 시 시편의 bending 과 unbending 구역의 발생 그리고 국부적으로 발생하는 인장응력과 밀접하게 연관되어 있으며, Alkorta 등[5]의 유한요소 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 비록 금형의 외각도 중요한 변수이지만, 가공 후 소재의 불균일성은 출구 채널의 직경과 더 연관되었다고 판단이 되어, CSD 가공용 금형은 굽힘 혹은 인장 변형에 의한 변형의 불균일성을 최소화시키기 위해 출구의 직경을 9 mm 로 설계하였다. ECA drawing 도중 발생하는 극심한 corner gap 을 줄임으로써 변형량의 분포를 비교적 균일하게 하고 국부적인 단면 감소를 피하기 위함이다. 더불어, CSD 가공법은 출구 직경의 감소로 인하여 전단 변형량 이외에 단면감소에 의해

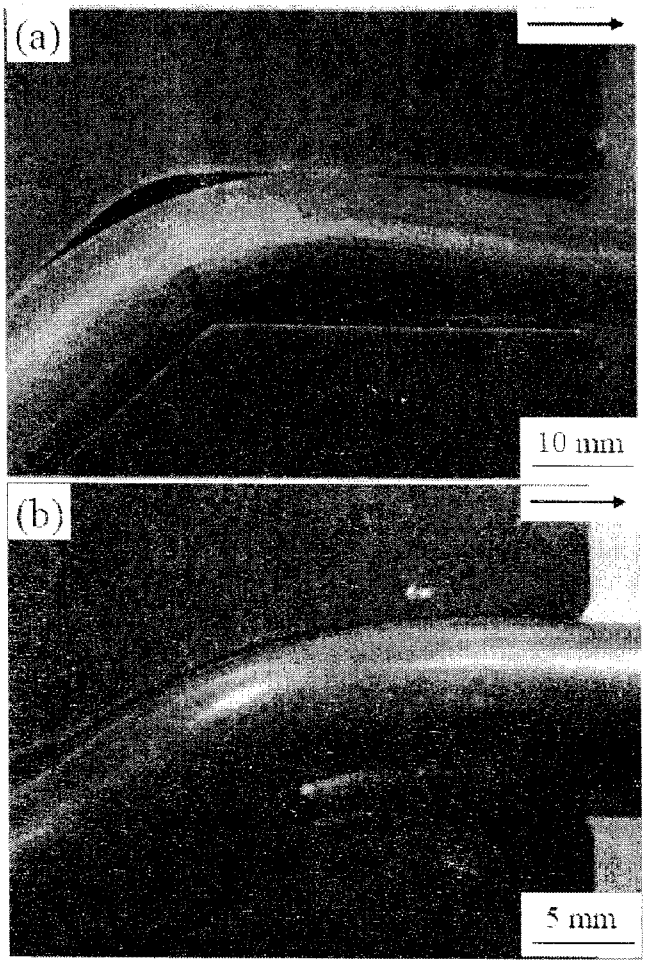

Fig. 3 Deformation behavior following ECA drawing and CSD processing of 6063 aluminum alloy

추가적으로 압출 변형량을 부과할 수 있는 장점이 있다. 따라서 총 유효 변형량은 전단 및 압출 변형량의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_T = \left(2/\sqrt{3}\right)\cdot \cot\phi + \ln\left(l_i/l_f\right) \qquad (1)$$

여기서 ϕ는 내각의 절반 값이며, l_i 와 l_f는 각각 시편의 가공 전 초기 직경과 가공 후 직경이다. Nakashima 등[8]에 따르면, 금형의 내각이 120° 이상인 경우 가공 도중 전단 변형량에 미치는 외각의 영향은 비교적 미비하기 때문에 위의 식 (1)에 포함하지 않았다. 본 연구에서 제안한 식 (1)을 사용하여 금형 조건에 따른 유효 변형량 결과를 표 1 에 정리하였다.

4. 실험결과

4.1 성형성

그림 3 은 알루미늄 합금의 ECA drawing 가공 후 시편의 변형양상을 보여주고 있다. ECA drawing 의 경우, 시편이 금형을 통과할 때 발생하는 corner gap 과 국부적인 변형으로 인해, 가공 방향의 단면(X-plane)은 일그러진 타원 형태로 가공이 되었다.

한편 CSD 가공 결과를 살펴보면, 그림 4 에 나타낸 바와 같이 금형 내부 채널 부근의 빈 공간이 발생하지 않았다. 이로써 ECA drawing 에서 발생하는 corner gap 에 의한 영향을 효과적으로 감소시켰으며 또한 균일한 변형을 부과하였다고 판단된다. 여기서 본 연구에서 제시한 CSD 가공의 두 가지 장점을 다시 확인할 수 있다. 1 회 가공을 통해서 ECA drawing 가공 보다 높은 변형량을 균일하게 부과할 수 있었으며, 표면에 균열이 발생하지 않는 소재성형이 가능함으로 반복가공(multi-pass)을 수행함에 있어서 ECA drawing 보다 더 효과적이라 생각된다.

4.2 미세조직

그림 4 는 135° 내각을 갖는 금형을 이용하여 1 회 CSD 가공된 알루미늄 합금의 미세조직 사진이다. 변형조직을 살펴보면 알루미늄 합금의 경우 길이 방향에 대해서 특정한 각도로 기울어져 있는데, 이는 인발 변형량 보다 전단변형에 의한 영

Table. 1 A description of two different dies and calculated effective stain

Die	Inner angle (°)	Shear strain(ε_s)	Diameter (mm)		Drawing strain (ε_d)	Total strain ($\varepsilon_t = \varepsilon_s + \varepsilon_d$)
			Entrance	Exit		
ECAD-135-10	135	0.48	10	10	-	0.48
CSD-135-9	135	0.48	10	9	0.11	0.59

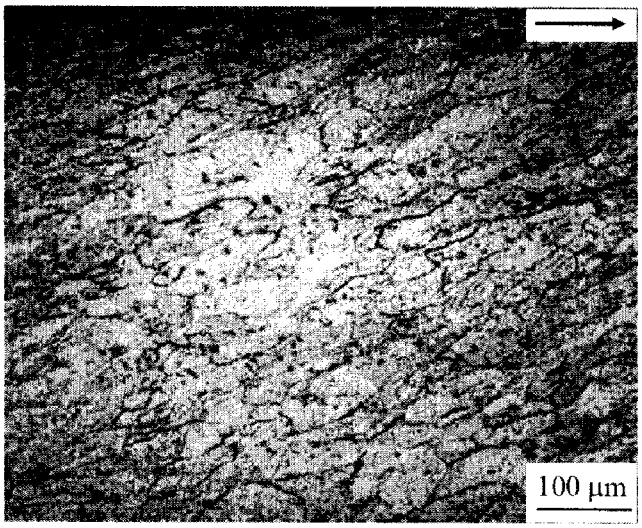

Fig. 4 OM image showing microstructural evolution after CSD processing of 6063 aluminum alloy

향이 상대적으로 우월하기 때문이다. 즉, 동일한 인발 조건에서 시편 내측부와 외측부의 materials flow 차이 때문에 시편에 전단 변형이 발생하는데, 이 때문에 미세조직은 특정한 방향성을 갖게 된다. 이러한 결과는 표 1 에 제시된 전단 변형량과 인발 변형량의 차이와 잘 일치한다.

5. 결론

본 연구에서는, 새로운 개념인 CSD 가공법을 제안하였으며 이러한 결과를 기존의 ECA drawing 결과와 비교하였다. 내각 및 출구 직경이 각각 9 mm와 135° 인 금형을 사용하여 가공하였을 때, 종래의 인발 혹은 ECA drawing 결과에 비해 높은 변형량에도 불구하고 시편에 극심한 결함없이 균일한 변형이 관찰되었다. 따라서, 연속공정인 CSD 가공법은 선재를 가공하는데 있어 잠재적인 가능성을 지니고 있기 때문에 향후 기계적 특성 평가 등의 체계적인 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 부분적으로 2007년 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-357-D00136)으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] A. Yamashita, Z. Horita, and T.G. Langdon, 2001, Improving the mechanical properties of magnesium alloy through severe plastic deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 300, pp. 142~147.

[2] Y.G. Ko, C.S. Lee D.H. Shin, and S.L. Semiatin, 2006, Low-temperature superplasticity of ultra-fine-grained Ti-6Al-4V processed by equal channel angular pressing, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 37, pp. 381~391.

[3] D.H. Shin, B.C. Kim, Y.S. Kim, and K.T. Park, 2000, Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing, *Acta Mater.*, Vol. 48, pp. 2247~2255.

[4] U. Chakkingal, A.B. Suriadi, and P.F. Thomson, 1998, Microstructure development of Al at room temperature, *Scripta Mater.*, Vol. 39, pp. 677~684.

[5] J. Alkorta, M. Rombouts, J.D. Messemaeker, L. Froyen, and J.G. Sevillano, 2002, On the impossibility of multi-pass equal-channel angular drawing, *Scripta Mater.*, Vol. 47, pp. 13~18.

[6] C.J. Luis Pérez, C. Berlanga, and J. Pérez-Ilzarbe, 2003, Processing of aluminum alloys by equal channel angular drawing at room temperature, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vols. 143~144, pp. 105~111.

[7] A.A. Zisman, V.V. Rybin, S.V. Boxel, M. Seefeldt, and B. Verlinden, 2006, Equal channel angular drawing of aluminum sheet, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 427, pp. 123~129.

[8] K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, and T.G. Langdon, 1998, Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing, *Acta Mater.*, Vol. 46, pp. 1589~1599.