

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1087

강소성 가공 공정을 이용한 튜브 형상 재료의 결정립 미세화에 대한 연구

김경진[†] · 윤정환* · 양동열**

(2009년 7월 1일 접수, 2009년 7월 30일 수정, 2009년 8월 3일 심사완료)

Development of Ultrafine-Grained Aluminum Tubes Using Severe Plastic Deformation Process

Kyung-Jin Kim, Jeong Whan Yoon and Dong-Yol Yang

Key Words : Severe Plastic Deformation(강소성 가공), Grain Refinement(결정립 미세화), Aluminum Tube(알루미늄 튜브)

Abstract

A unique process was developed to improve the mechanical properties of a circular tube. In this proposed process, a large amount of strain is applied to the wall of tube, leading to grain refinement in the material. In order to investigate characteristics of microstructural evolution such as the distribution of grain size and misorientation angle during the process, an EBSD OIM analysis was carried out. The analysis confirms that the proposed process can very effectively produce a circular tube with ultrafine-grains.

1. 서론

금속 재료의 결정립 미세화는 강도 및 인성의 향상, 성형성의 증가, 낮은 열전도도, 초소성(super-plasticity) 등 기존의 조대한 결정립을 가지는 재료에 비해 월등히 우수한 기계적 성질을 가지게 되어 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 1 마이크로미터 미만의 또는 나노미터 단위의 초미세 결정립을 가지는 재료를 제조하는 방법 중 강소성 가공 공정(severe plastic deformation process)은 금속 재료에 큰 소성변형을 가하여 재료의 결정립을 미세화시키는 방법으로 대부분의 금속 재료에 적용할 수 있으며, 내부 결함이 없고 비교적 큰 소재를 제조할 수 있다. High Pressure Torsion (HPT),⁽¹⁾ Accumulative Roll Bonding (ARB),⁽²⁻⁴⁾ Equal Channel

Angular Pressing (ECAP)⁽⁵⁻¹²⁾ 등의 여러 종류의 강소성 가공 공정을 통해 봉재, 판재 및 각재와 같은 다양한 증실형 형상의 단면 형상을 가지는 소재의 결정립 미세화에 대한 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 강소성 가공 공정을 이용하여 원형 튜브와 같이 중공형 단면 형상을 가지는 금속 소재의 결정립 미세화에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 원형 튜브에 적용 가능한 새로운 강소성 가공 공정을 제안하고, 제안된 강소성 가공 공정을 통해 생산된 재료의 결정립 미세화 효과를 검증한다. 기존의 HPT, ARB, ECAP과 같은 강소성 가공 공정과는 달리 제안된 강소성 가공 공정에서는 튜브 형상의 시편을 사용한다. 제안된 강소성 가공 공정에서 사용되는 장치의 1/2 형상을 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 제안된 강소성 가공 공정은 튜브 형상의 시편을 금형과 맨드릴로 이루어지는 간격이 일정한 S형상의 측단면을 가지는 축대칭 형상의 채널을 통해 압출하면서 채널이 서로 교차하는 교차각을 이용하여 소재에 강한 전단소성변형을 가하는 방법이다. 튜브 시편과 같은 단면 형상을 가지는 편치에 의해서 압출되며 튜브 시편의 바깥쪽 형상은 금형에 의해 성형되고 안쪽 형상은 맨드릴에 의해 성형되어 튜브의 두께는 일정하게 유지되지만 외경과 내경은

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 경북지부 춘계학술대회 (2009. 5. 8., 경일대) 발표논문임]

[†] 책임저자, 회원, 경일대학교 기계자동차학부

E-mail : kkj@kiu.ac.kr

TEL : (053)850-7301 FAX : (053)850-7610

* ALCOA

** 한국과학기술원 기계공학과

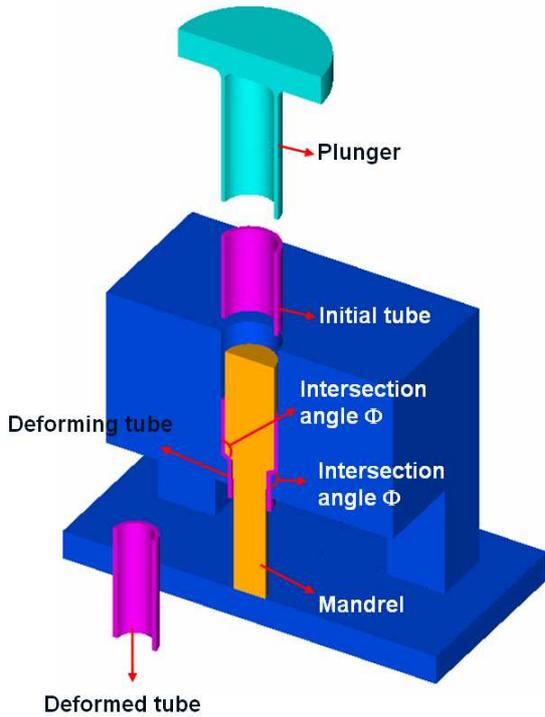


Fig. 1 1/2 geometry of the severe plastic deformation equipment for a circular tube

일정하게 감소한다.

소재는 채널을 통과하면서 2회의 전단변형과 동시에 원주방향으로의 압축 변형을 받는다. 초기 소재와 공정 후 소재를 EBSD OIM 분석하여 미세 조직의 변화를 정량적으로 측정하여 제안된 강소성 가공 공정의 유효성을 분석한다.

2. 실험 방법

2.1 알루미늄 튜브의 강소성 가공 공정

알루미늄 튜브를 강소성 변형시키기 위한 실험 장치는 볼트로 고정시키도록 두 부분으로 나뉘어져 있는 금형과 튜브 시편의 안쪽에 삽입되는 원형 맨드릴 그리고 튜브 시편과 같은 직경과 두께를 갖는 튜브 형상의 펀치로 이루어진다. 본 연구에서 사용한 장치에서는 금형과 맨드릴에 의해 생성되는 채널이 교차각 135°로 2회 교차한다. Fig. 2에 금형과 맨드릴, 펀치를 이용하여 알루미늄 튜브가 강소성 변형되는 공정을 나타내었다. Fig. 2에 표시된 ED, TD, ND 세 개의 축은 각각 튜브가 압출되는 방향, 튜브 시편 표면에 수직인 방향 및 ED와 TD에 모두 수직인 방향을 나타낸다. 실험에 사용된 재료는 공업용 AA1050 알루미늄으로 초기 튜브 시편은 봉재로 압출된 소재를 기계 가공하여 외경 40 mm, 두께 3 mm, 길이 70 mm의 원형

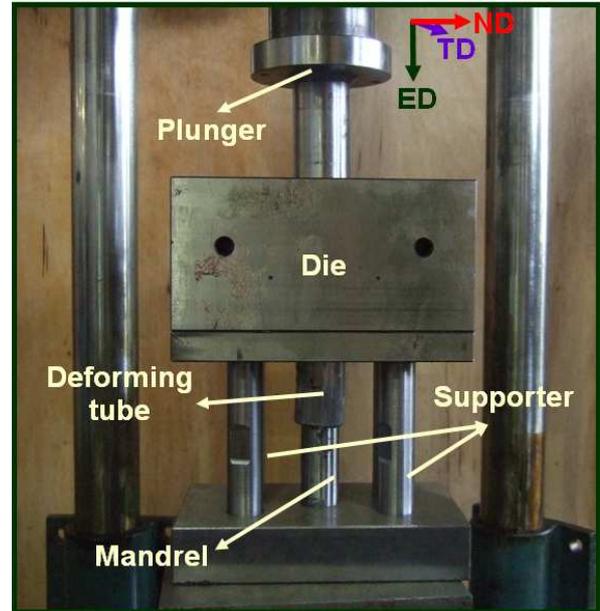


Fig. 2 Equipment for the severe plastic deformation equipment for a circular tube

튜브로 제작하였다. 가공 후에 튜브 시편의 외경은 36 mm로 감소되고 두께는 3 mm로 유지된다.

실험은 150-톤 프레스를 이용하였고 상온에서 이루어졌다. 실험 전에 펀치와 튜브 시편은 충분히 윤활하여 사용하였다.

알루미늄 튜브의 강소성 가공 공정에서 최대 하중은 약 45 톤이었으며, 금형에서 시편을 쉽게 제거하기 위해 여러 개의 시편을 연속적으로 압출하여 나중에 변형되는 시편이 이전의 시편을 금형에서 밀어내도록 하였다.

2.2 미세 조직의 측정

미세조직의 변화를 측정하기 위하여 초기 튜브 시편과 가공이 끝난 튜브 시편에서 미세조직 측정을 위한 5 mm 길이의 시편을 채취하였다. 공정의 초기와 마지막 부분의 불안정한 변형 영역을 피하기 위해 튜브 소재의 중간 지점에서 시편을 채취하였으며, 채취한 시편은 기계적 연마와 전기·화학적 연마를 한 후, ED에 수직인 면에서 EBSD (Electron Back Scattered Diffraction) 측정을 하여 OIM (Orientation Imaging Microscopy) 분석을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 토의

Fig. 3은 초기 튜브 시편과 가공 후의 튜브 시편의 모습이다. 초기 40 mm의 외경은 36 mm로 감소하였고, 길이는 70 mm에서 77 mm로 증가하였다.

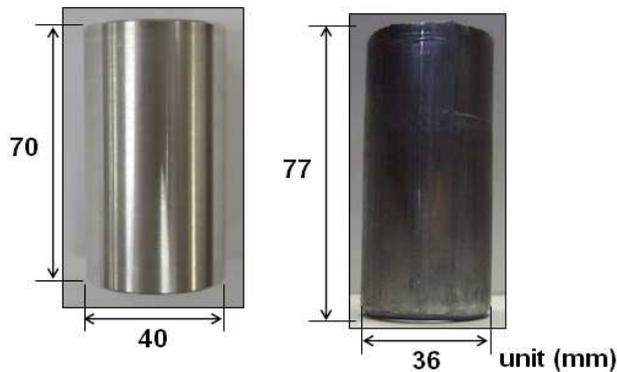


Fig. 3 Initial tube and deformed tube.

미세 조직의 특징을 결정짓는 중요한 인자로서 평균 결정립의 크기, 결정립 크기의 분포 그리고 misorientation angle의 분포 등이 있다. 이러한 요소들은 재료의 거시적인 기계적 성질을 결정하는데 중요한 역할을 하게 된다. Fig. 4에 EBSD OIM 분석을 통해 측정된 초기 튜브 시편과 공정 후 튜브 시편의 평균 결정립의 크기와 결정립 크기의 분포를 나타내었다. 본 연구에서 결정립의 크기는 측정된 결정립의 크기와 동일한 단면적을 가지는 원의 직경으로 표현하였다. 초기 튜브 시편의 평균 결정립의 크기 $2.46 \mu\text{m}$ 에서 제안된 강소성 가공 공정 후에 평균 결정립의 크기가 $0.93 \mu\text{m}$ 로 감소하였다. 1 마이크로미터 미만의 결정립의 비율은 0%에서 78%로 증가하였다. 초기 튜브 시편이 압출된 시편을 이용하여 제작되었기 때문에 초기 시편이 비교적 작은 크기의 결정립을 가지고 있었다. ECAP을 이용한 결정립 미세화에 대한 이전 연구(6, 11, 12)에 따르면 같은 크기의 변형율이 가해질 때 초기 소재의 결정립의 크기가 작을수록 결정립 미세화의 효율이 감소하며, 따라서 수 마이크로미터 크기로 작아진 결정립을 미세화 하기 위해서는 작은 변형을 반복해서 가하는 것 보다는 큰 변형을 한번에 가하는 것이 유리하다. 교차각이 90° 인 ECAP 공정에서 한 번에 가할 수 있는 변형율의 크기가 최대 $1.15^{(6)}$ 인 것에 비해 유한 요소 해석 결과에 따르면 제안된 강소성 가공 공정에서 발생하는 변형율은 약 2로⁽¹³⁾ 1회의 공정에서 가할 수 있는 변형율의 크기가 60% 이상 증가하여 기존의 강소성 가공공정에서는 반복적인 공정을 통해 얻어질 수 있는 결정립 미세화의 효과를 1회의 공정으로 얻을 수 있다.

Fig. 5에 초기 튜브 시편과 공정 후 변형된 시편의 misorientation angle의 분포를 나타내었다. 일반적으로 15° 보다 작은 misorientation angle을 가지는 결정립계(grain boundary)를 저각각입계(low angle boundaries), 15° 보다 큰 misorientation angle을 가지는 결정립계를 고각각입계(high angle boundaries)로

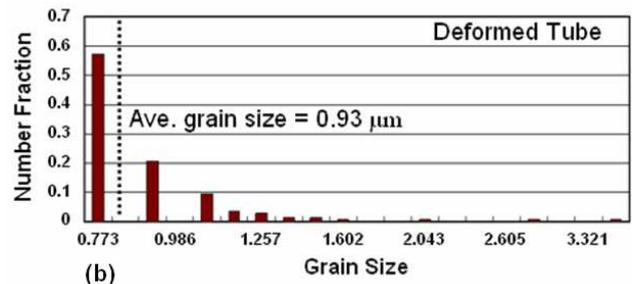
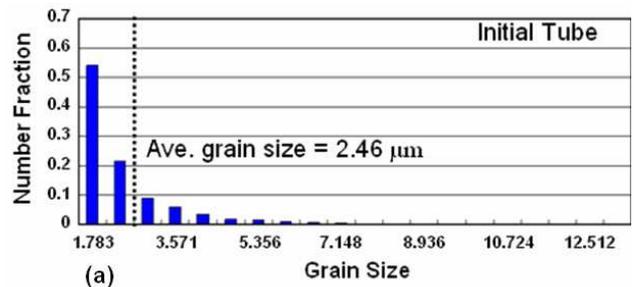


Fig. 4 Distribution of grain size of (a) initial tube, (b) deformed tube

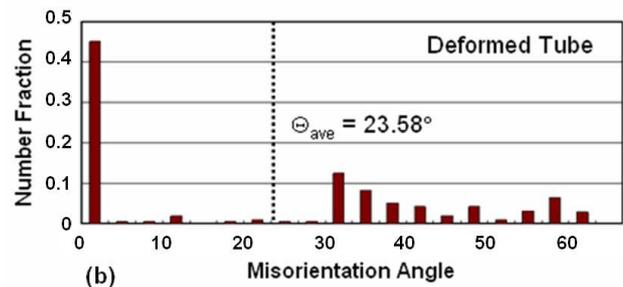
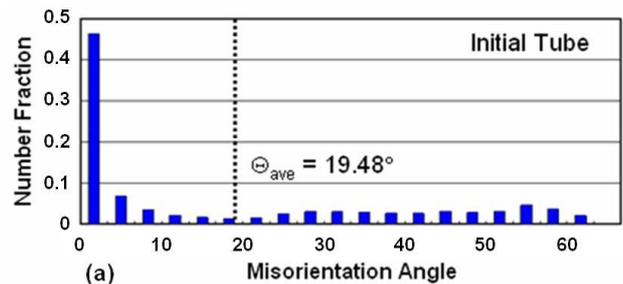


Fig. 5 Distribution of misorientation angle of (a) initial tube, (b) deformed tube

정의한다. 초기 튜브 시편의 평균 misorientation angle은 19.48° , 고각각입계의 비율은 41% 이었다. 제안된 강소성 가공 공정 후에는 평균 misorientation angle이 23.58° 로 증가하였고, 고각각입계의 비율도 52%로 증가하였다.

초기 소재의 misorientation angle의 분포를 살펴보면 $0 \sim 5^\circ$ 지점에서 최고점을 가지고 그 외의 영역에서는 변화가 거의 없다. 제안된 강소성 가공 공정을 거친 시편의 경우에도 $0 \sim 5^\circ$ 사이에 최고점

이 생성되지만 이 밖에도 30 ~ 35° 지점에서 다른 고점이 생성되었다. 강소성 가공 공정을 통해 결정립의 크기를 미세화 시키는 경우에는 소성가공에 의해 발생하는 결정립 내부의 전위(dislocation)에 의해 0 ~ 5° 사이의 misorientation angle은 항상 존재한다는 것을 고려했을 때, Fig. 5에서 고무적인 내용은 5 ~ 30° 사이의 misorientation angle 집단이 대부분 30° 이상으로 이동한다는 것이다. 30° 이상의 misorientation angle을 가지는 결정립계는 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding)에 매우 유리하다고 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 또한 기존의 강소성 공정을 이용한 결과와 비교해봤을 때, 제안된 강소성 공정이 고경각입계를 생성하는데 매우 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 강소성 가공공정을 이용하여 생산된 재료의 경우, 성형성 향상 또는 초소성 성질에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 원형 튜브에 적용 가능한 새로운 강소성 가공 공정을 제안하고, 제안된 강소성 가공 공정을 통해 생산된 알루미늄 튜브의 EBSD OIM 분석을 통하여 결정립 미세화 효과를 검증하였다. AA1050 재료로 제작된 알루미늄 튜브를 제안된 강소성 가공 공정을 통해 변형시켰을 때 평균 결정립의 크기는 초기 2.46 μm 에서 0.93 μm 로 감소하였으며 1 마이크로미터 미만의 크기를 갖는 결정립의 비율은 0%에서 78%로 증가하였다. 또한 평균 misorientation angle도 초기에 19.48° 에서 23.58° 로 증가하였고, 고경각입계의 비율은 41%에서 52%로 증가하였다. 이상의 결과에서 본 연구에서 제안된 강소성 가공 공정이 기존의 강소성 공정에서는 불가능했던 원형 튜브 소재에 적용 가능할 뿐만 아니라 기존의 공정에 비해 결정립 미세화에 매우 효과적임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Zhilyaev, A. P., Nurislamova, G. V., Kim, B. -K., Baró, M. D., Szpunar, J. A. and Langdon, T. G., 2003, "Experimental Parameters Influencing Grain Refinement and Microstructural Evolution During High-Pressure Torsion," *Acta Mater.*, Vol. 51, No. 3, pp. 753~765.
- (2) Saito, Y., Utsunomiya, H., Sakai, T. and Hong, R. G., 1998, "Ultra-Fine Grained Bulk Aluminum Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process," *Scripta Mater.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1221~1227.
- (3) Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N. and Sakai, T., 1999, "Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials-Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process," *Acta Mater.*, Vol. 47, No. 2, pp. 579~583.
- (4) Tsuji, N., Saito, Y., Utsunomiya, H. and Tanigawa, S., 1999, "Ultra-Fine Grained Bulk Steel Produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process," *Scripta Mater.*, Vol. 40, No. 7, pp. 795~800.
- (5) Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto M. and Landon T. G., 1998, "The Process of Grain Refinement in Equal-Channel Angular Pressing," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 9, pp. 3317~3331.
- (6) Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T. G., 1996, "Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials," *Scripta Mater.*, Vol. 35, No. 2, pp. 143~146.
- (7) Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T. G., 2000, "Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Pressing to High Total Strains," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A281, No. 1~2, pp. 82~87.
- (8) Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon T. G., 1997, "An Investigation of Microstructural Evolution During Equal-Channel Angular Pressing," *Acta Mater.*, Vol. 45, No. 11, pp. 4733~4741.
- (9) Sun, P. L., Kao, P. W. and Chang, C. P., 2000, "Characteristics of Submicron Grained Structure Formed in Aluminum by Equal Channel Angular Extrusion," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A283, No. 1~2, pp. 82~85.
- (10) Gholinia, A., Prangnell, P. B. and Markushev, M. V., 2000, "The Effect of Strain Path on the Development of Deformation Structures in Severely Deformed Aluminium Alloys Processed by ECAE," *Acta Mater.*, Vol. 48, No. 5, pp. 1115~1130.
- (11) Kim, K. J., Yang, D. Y. and Yoon, J. W., 2008, "Investigation of Microstructure Characteristics of Commercially Pure Aluminum During Equal Channel Angular Extrusion," *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A485, No. 1~2, pp. 621~626.
- (12) Nakashima, K., Horita Z., Nemoto M. and Langdon T. G., 1998, "Influence of Channel Angle on the Development of Ultrafine Grains in Equal-Channel Angular Pressing," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1589~1599.
- (13) Kim, K. J., 2007, "Investigation into the Texture Evolution and Deformation Induced Material Properties in the Aluminum Extrusion Processes," Doctoral Thesis, KAIST, Daejeon, pp. 126.
- (14) Huang, J. C., Hsiao, I. C., Wang, T. D. and Lou, B. Y., 2000, "EBSD Study on Grain Boundary Characteristics in Fine-Grained Al Alloys," *Scripta Mater.*, Vol. 43, No. 3, pp. 213~220.