

Equal Channel Angular Pressing 가공 중 소성 변형에 미치는 재료의 초기 형상 효과

윤승채¹ · 서민홍² · 김형섭[#]

Preform Effect on the Plastic Deformation Behavior of Workpieces in Equal Channel Angular Pressing

Seung Chae Yoon, Min Hong Seo, Hyoung Seop Kim

(Received May 30, 2006)

Abstract

Preform design is an effective means of achieving the homogeneous deformation of workpiece materials and decreased load in metal forming. However, this approach has not been applied to equal channel angular pressing (ECAP). In this paper, plastic deformation behavior of workpieces having four different preform shapes during ECAP was investigated using finite element analyses. The results indicated that a preform design of the workpiece head has a beneficial effect on homogeneous deformation, reducing the maximum pressing load at the initial stage and eliminating folding defects at strain concentration points.

Key Words : Equal Channel Angular Pressing, Preform Design, Pressing Load, Finite Element Analysis, Severe Plastic Deformation, Folding Defect

1. 서 론

등통로각압축(Equal Channel Angular Pressing: ECAP) 공정은 교차하는 두개의 동일크기를 갖는 채널로 인해 재료의 초기 단면의 변화 없이 큰 변형을 가하는 강소성 공정(Severe Plastic Deformation: SPD) 중의 하나로, 최근 가장 활발한 연구가 이루어지고 있는 가공 영역이다. 이 공정은 최근 수년간 집중된 연구 성과를 이루었는데, 이는 반복되는 가공을 통해 분말이 아닌 진밀도를 갖는 벌크의 초미세결정립 구조재료(Ultra-Fine Grain Materials)를 제조할 수 있을 뿐만 아니라, 기존 상용 재료의 물성에 비해 매우 뛰어난 특성과 기능을 가진 소재 제조가 용이하므로 상업적으로 적용 가능성이

아주 높다[1~5].

이전의 ECAP 공정은 실험실 및 연구소 단위에서 연구 및 적용이 이루어져 가공 공정 기술의 발달되는 과정에서 나타난 몇 가지 제한 사항이 있었으나, 최근에는 상업적으로 매우 유용한 소재를 개발하고 있다. 또한, 다양한 종류의 초미세결정립 구조재를 생산하여 그 적용 영역을 확대되고 있으며, 공정을 통해 재료 낭비의 감소 및 균일한 미세 구조를 용이하게 얻고 산업에 적용 가능한 유효크기의 기능성 재료를 또한 얻을 수 있다는 큰 이점을 가지고 있으며, 이를 더 극대화하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[6~9]. 더 효과적인 구조용 소재로서의 기능을 갖기 위해서는 보다 큰 벌크 상태의 소재를 얻을 필요가 있는

1. 충남대학교 대학원 나노공학부

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 충남대학교 나노공학부, hskim@cnu.ac.kr

데, 이를 위해서는 공정 중 증가하는 하중 문제에 대한 효과적인 해결 방안이 모색되어야 한다. SPD 가공 중에 증가하는 하중은 재료의 크기 증가 제한 및 가공온도를 낮추는데 주된 방해 요소이며, 재료의 소성 변형이 이루어지는 동안의 하중은 소재의 크기 및 상태에 따른 가공 속도, 가공 온도를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다.

이런 문제를 해결하기 위해 재료의 초기 형상을 새롭게 설계하는 방법은 가공을 효과적이고, 경제적으로 시행하는데 고려 사항이며, 가공에서 발생하는 하중 문제를 해결할 수 있는 중요한 변수이나, 이러한 ECAP 가공에 적용한 사례는 극히 드물다[10~11]. 따라서 본 논문에서는 ECAP 가공이 이루어지는 동안 초기 형상 효과가 소재의 소성 변형 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 상용 FEM code 인 ABAQUS를 사용하여 조사하였다.

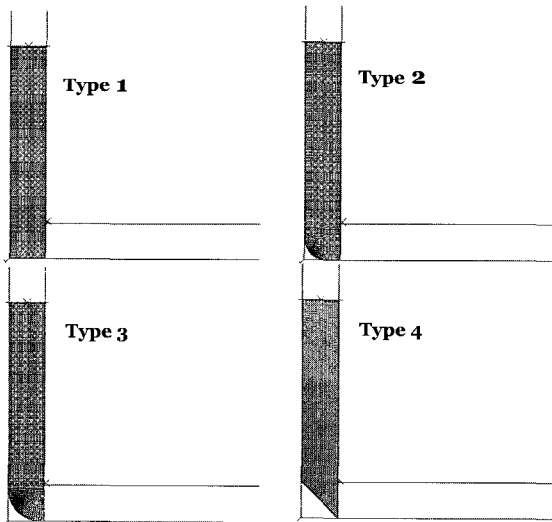


Fig. 1 FEM mesh for ECAP of four different preforms

2. 유한요소 해석 및 실험 방법

Fig. 1은 이번 계산을 위해 ECAP 가공 공정을 위한 초기 형상으로써 모두 4가지 형태를 고려하였다. Type 1의 경우는 가장 일반적으로 사용되는 형태이며, Type 4는 Kim 등 [11]이 제안한 초기 형상으로 재료 앞부분이 약 45°의 각 (Fillet 10mm)을 이루며 날카롭게 절단되어 있고, Type 2와 Type 3은 각각 초기 시편의 모서리 곡률반경을 6mm(round를 이루는 각 ~40°)와 9mm(~70°)로 가공한

형상이다. 유한요소법을 이용한 ECAP 가공공정의 계산은 두께 방향 변형률이 0인 평면변형 상태를 가정하였고, 시편의 크기는 10×10×60mm²로 고려하였다. 사용된 금형은 각각 모서리각 $\Psi=0^\circ$, 통로각 $\Phi=90^\circ$ 의 각을 이루고 있다.

가공에 있어서 초기 형상이 미치는 영향만을 고려하기 위해 등은 상태를 유지하였고, 변형 속도를 1mm/s로 일정하게 하였으며, 마찰은 0으로 하였다[12~18]. 총 50000의 4절점 요소를 사용하여 계산하였다. 계산을 위한 재료로써 등축의 약 50 μm 결정립을 가지는 어닐링된 Cu 재료를 선정하였는데, 일반적인 인장실험으로는 본 연구에 타당성 있는 응력-변형률 결과를 얻기가 어려우므로, 전위 셀 진화모델을 이용한 이론적 계산을 통해 얻은 응력-변형률 곡선을 사용하였다[19]. 계산은 슈퍼 컴퓨터 IBM690(666GFlops)를 사용하였다.

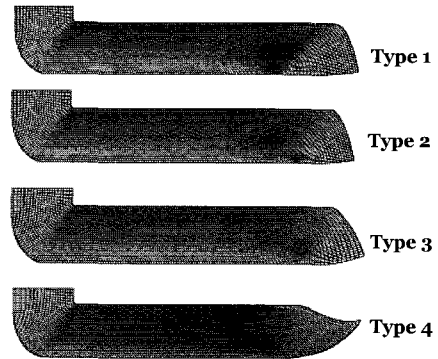


Fig. 2 Calculated deformed workpieces and mesh deformation shapes after ECAP

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 각 Type 초기시편들의 가공 이후 변형된 요소망인데, ECAP 가공 시 일반적으로 사용되는 형태인 Type 1의 경우에 발생하는 국부적 불균일변형영역이 재료 앞부분에 존재하게 되며, 이 변형 영역이 재료에 나타날 경우 하중 증가와 파괴를 야기시킬 수 있다[11]. 특히 Type 1은 초기 형상이 다른 Type에 비해 주변변형대에서 모서리틈이 발생하는 영역을 많은 부분 채우고 있음으로 인한 것으로 관찰되며, 이와 반대인 Type의 경우에는 국부적 불균일변형 영역이 발생하지 않았

데 이는 Fig. 3의 변형률 분포를 통해서 더 자세히 확인할 수 있다. 또한 재료의 정상상태 영역의 변형률 분포를 관찰하였을 때, 각 Type은 초기 형상에 관계없이 균일한 변형률 분포와 약 40°에 해당하는 동일한 크기의 모서리틈을 나타내고 있으며, Type 1에서 국부적 불균일변형이 나타나는 영역의 유효 변형률은 약 1.6으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

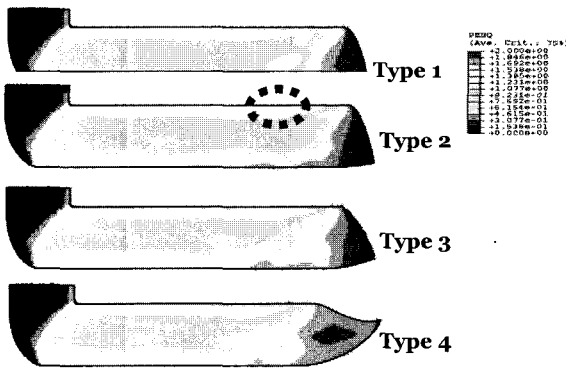


Fig. 3 Finite element method deformed effective strain distribution of four type shapes after ECAP(Maximum effective strain distribution is indicated inside the circle)

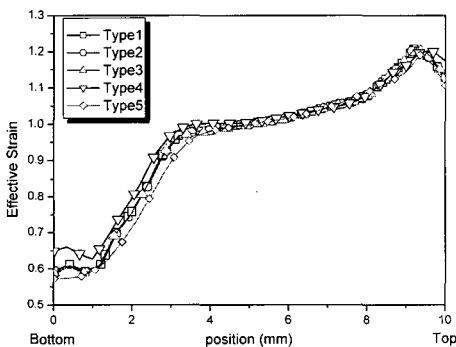


Fig. 4 The effective strain distributions along the path of the workpiece normal to the pressing direction in the steady state region

Fig. 4는 정상 상태에서의 재료 단면의 유효변형률을 나타낸 것인데, 각 Type 별로 큰 차이를 나타내고 있지는 않다. Type 4의 경우에는 다른 Type

에 비해 재료의 중심에서 윗 부분은 거의 같은 변형률 분포를 갖고 있으나, 바닥 부분의 변형률은 약간 높은 값을 가지고 있다. 이는 초기 형상이 모서리틈이 발생하는 영역을 상당부분 채우고 있지 않기 때문에 가공 중 재료 특성상 나타나는 일정한 모서리틈을 형성하기 위해서 약간의 변위 이동으로 인한 것으로 사료되나, 재료 전반에 걸친 변형률은 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5는 변위-하중 곡선으로써, 가장 일반적인 Type 1은 3단계의 변형-하중 분포를 가지고 있다. 초기 하중이 증가하는 영역(Stage 1)과 다시 감소하는 영역(Stage 2), 그리고 정상상태를 유지하는 영역(Stage 3)으로 나눌 수 있다[11,14~15]. Stage 1 영역에서는 재료가 주 변형대를 통과하기 시작하면서 재료의 파괴 증가와 내부의 응력 증가로 인해 하중이 올라가게 되고 이 때 재료의 국부적 불균일영역이 발생하게 되며, Stage 2 영역에서는 재료 앞부분이 주 변형대를 통과하여 출구 방향으로 구부러지기 때문에 최고하중에서 떨어지는 단계이고 이후 재료 유동으로 인한 일정한 모서리 틈을 형성하며 정상상태를 유지하게 된다. Fig. 5에서 관찰할 수 있듯이, 초기 형상이 주 변형대를 채우는 정도에 따라서 초기 최대 하중의 변화가 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉 정상상태에서 발생하는 모서리틈 영역을 초기 형상이 적게 채우고 있을수록 Stage 1에서 나타나는 최고 하중 증가 없이 변형이 가능함을 알 수 있다. 일반적으로 기본이 되는 형상(Type 1)의 경우 최대 하중은 약 2200N을 나타내는 것에 반해, Type 2의 경우는 초기 형상이 가지고 있는 모서리 각이 가공 중 발생하는 모서리틈의 각과 같기 때문에 Stage 1에서의 하중이 정상상태의 하중과 거의 유사하며, Type 3과 Type 4는 Stage 2 영역이 뚜렷이 나타나지 않으며 바로 정상상태를 유지하는 것으로 관찰된다. 각 Type 모두 정상상태인 경우는 1760N으로 모두 동일 하중을 갖는다. 또한 하중의 시작 값은, Type 1은 610N, Type 2는 260N, Type 3은 150N, Type 4는 거의 0인 것을 알 수 있는데, 이는 초기 시작 하중은 금형과 재료가 접촉된 면적에 상관 관계가 있음을 알 수 있다[11]. Type 1에서 유한요소 계산 결과에서 1.6에 해당하는 높은 변형률을 나타냈던 국부적 불균일변형 영역은 실제 실험에서는 Fig. 6과 같이 접힘 결함(Folding defect)와 같은 형상으로 나타나게 된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF-2005-202-D00 205) 지원으로 수행하였으며, 유한요소해석은 Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI)의 슈퍼 컴퓨터 제공에 의해 계산을 수행하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, 2000, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, Prog. Mater. Sci., Vol. 45, pp. 103~189.
- [2] V. M. Segal, 1995, Materials processing by simple shear, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 197, pp. 157~164.
- [3] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 2002, The use of severe plastic deformation for microstructural control, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 324, pp. 82~89.
- [4] T. C. Lowe, Y. T. Zhu, 2000, Observation and issues on mechanisms of grain refinement during ECAP process, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 291, pp. 46~53.
- [5] M. G. Glavicic, A. A. Salem, S. L. Semiatin, 2004, X-ray line broadening analysis of deformation mechanisms during rolling of commercial purity titanium, Acta Mater., Vol. 52, pp. 647~655.
- [6] V. V. Stolyarov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, R. Z. Valiev, 2001, Microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP and cold extrusion, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 303, pp. 82~89.
- [7] Y. H. Zhao, X. Z. Liao, Z. Jin, R. Z. Valiev, Y. T. Zhu, 2004, Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 52, pp. 4589~4599.
- [8] K. Furuno, H. Akamatsu, K. Ohishi, M. Furukawa, Z. Horita, T. G. Langdon, 2004, Microstructural development in equal channel angular pressing using a 60° die, Acta Mater., Vol. 52, pp. 2497~2507.
- [9] R. Z. Valiev, 2006, Some new trends in SPD processing for fabrication of bulk nanostructured materials, Mater. Sci. Forum, Vol. 503-504, pp. 3~10.
- [10] R. Yuan, T. D. Burleigh, 2004, Materials Science &

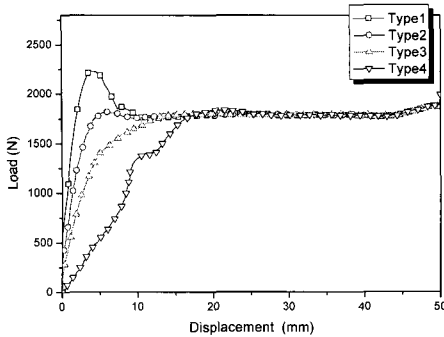


Fig. 5 Pressing load vs. ram displacement during ECAP



Fig. 6 The folding defect on workpiece head after ECAP

4. 결 론

본 연구를 통해 재료의 초기 형상이 ECAP 가공 중에 미치는 영향에 대해 유한요소법을 사용하여 고찰하였다. 초기에 각각의 4 가지 형상을 갖는 재료에 대해 ECAP 가공 중에 나타나는 변형률과 하중 곡선을 통해 소성변형 특성을 확인할 수 있었는데, 초기 형상이 주변형대 영역을 채우고 있는 정도에 따라서 국부적 변형 영역과 하중 증가 대한 정도를 예측할 수 있었으며, 최대 하중은 Type 1 > Type 2 > Type 3 > Type 4 순임을 나타낼 뿐만 아니라 가공 시작 하중은 금형과 재료의 접촉 정도에 따라 결정되는 것임을 확인할 수 있었다. 재료 가공시 초기 형상을 새롭게 설계함으로 증가하는 하중에 대해서 효과적으로 제어할 수 있었으며, 초기 재료가 가지는 모서리 각이 공정 중 나타나는 모서리 틈과 비슷한 경우에는, 최고 하중이 정상상태의 하중과 유사한 값을 나타내며, 파괴와 하중 증가를 야기시키는 국부적 불균일 변형영역 없이 균일한 변형률을 얻을 수 있었다.

- Technology Vol. II, AIST/TMS Proceedings, TMS, New Orleans, 431.
- [11] S. C. Yoon, M. H. Seo, H. S. Kim, 2006, Preform effect on the plastic deformation behavior of workpieces in equal channel angular pressing, *Scripta Mater.*, Vol. 55, pp. 159~162.
- [12] D. Yamagichi, Z. Hoita, M. Nemoto, T. G. Langdon, 1999, Significance of adiabatic heating in equal channel angular pressing, *Scripta Mater.*, Vol. 41, pp. 791~796.
- [13] H. S. Kim, 2001, Prediction of temperature rise in equal channel angular pressing, *Mater. Trans.* Vol. 42, pp. 536~538.
- [14] H. S. Kim, M. H. Seo, S. I. Hong, 2000, On the die corner gap formation in equal channel angular pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 291, pp. 86~90.
- [15] H. S. Kim, 2001, Finite element analysis of equal channel angular pressing using a round corner die, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 315, pp. 122~128.
- [16] B. S. Moon, H. S. Kim, S. I. Hong, 2002, Plastic flow and deformation homogeneity of 6061 Al during equal channel angular pressing, *Scripta Mater.*, Vol. 46, pp. 131~136.
- [17] H. S. Kim, 2002, Evaluation of strainrate during equal channel angular pressing, *J. Mater. Res.* Vol. 17, pp. 172~179.
- [18] H. S. Kim, 2002, Finite element analysis of deformation behaviour of metals during equal channel multi-angular pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 328, pp. 317~323.
- [19] Y. Estrin, L. S. Tóth, A. Molinari and Y. Bréchet, 1998, A dislocation based model for all hardening stages in large strain deformation, *Acta Mater.*, Vol. 46, pp. 5509~5522.