

연속 회전 등통로각압축 공정의 유한요소해석

윤승채¹ · 서민홍² · 김형섭[#]

Finite Element Analysis of Continuous Rotary-Die Equal Channel Angular Pressing

Seung Chae Yoon, Min Hong Seo, Hyoung Seop Kim

(Received September 8, 2006)

Abstract

Although equal channel angular pressing (ECAP), imposing large plastic shear strain deformation by moving a workpiece through two intersecting channels, is a promising severe plastic deformation method for grain refinement of metallic materials, its batch type characteristic makes ECAP inefficient for multiple-passing. Rotary-die ECAP (RD-ECAP) proposed by Nishida et al. can achieve high productivity by using continuous processing without taking out the samples from the channel. However, plastic deformation behavior during RD-ECAP has not been investigated. In this study, material plastic flow and strain hardening behavior of the workpiece during RD-ECAP was investigated using the finite element method. It was found that plastic deformation becomes inhomogeneous with the number of passes due to an end effect, which was not found seriously in ECAP. Especially, decreasing corner gap with increasing the number of passes was observed and explained by the strain hardening effect.

Key Words : Rotary-die Equal Channel Angular Pressing, Multi-pass, Continuous Process, Finite Element Analysis, Severe Plastic Deformation, Grain Refinement, Deformation Homogeneity

1. 서론

나노 미터(10^{-9} m) 크기의 영역에서 거대한 분자 구조의 수준에 이르기까지 소재, 장치, 시스템 제작 등에 활용되는 나노 기술은 정보, 생명공학, 환경, 우주기술에까지 적용되며, 미래 국가산업을 선도할 첨단기술로서 국가의 주요 과학 정책으로 추진되고 있을 뿐만 아니라 거의 모든 과학/기술 영역에서 혁명적이라고 할 만큼이나 빠른 속도로 전개되고 있다. 이는 현 과학기술 중에 중요한 주제로 부각되고 있으며, 사회/경제적인 파급효과와 부가가치 창출에 엄청난 기여가 예상된다[1]. 이러한 파급효과는 소재 분야에서도 예외는 아니며,

이에 금속재료의 미세 구조 제어를 통해 강도의 증가와 동시에 인성, 연성도 개선되며, 통상의 상용재료에 비해 매우 우수한 기계적 특성을 얻을 수 있어, 공학적인 이목이 집중되고 있다[2].

금속재료에 있어서 결정립도는 재료의 여러 가지 물성들을 결정하는 중요한 인자 중의 하나인데, 최근 재료의 결정립도를 $1\mu\text{m}$ 이하에서 작게는 수십 nm에 이르기까지 제어하여 재료의 물리적, 기계적 특성의 향상을 꾀하려는 시도들이 많이 이루어지고 있다[3~4]. 이러한 초미세한 결정립 조직의 재료를 제조하기 위해서 기체응축법이나 불밀링법 등으로 미세한 분말을 제조한 후 분말 압출 혹은 소결 공정을 거치는 분말야금법이 많

1. 충남대학교 대학원 나노공학부

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 충남대학교 나노공학부, hskim@cnu.ac.kr

이 사용되고 있으나, 유효크기를 갖는 벌크재료를 만드는 과정에서 기공의 잔류, 결정립 성장, 또는 다른 물질로부터의 오염 등 문제가 있어 건전한 초미세구조 결정립의 재료 제조에 어려움이 있다 [5].

위와 같은 문제들을 해결하는 동시에 초미세 결정립 구조 재료를 제조하는 심한소성변형법 (Severe Plastic Deformation: SPD)이 개발되어, 재료의 결정립 제어에 성공적인 많은 연구와 우수한 논문들이 발표되고 있다[6~10]. 그러나, 많은 심한소성변형법에 대한 연구들 중에 실제 가공의 여러 변수와 공정해석 혹은 소성변형 특성에 대한 내용들은 미세조직과 기계적 성질에 대한 연구에 비해 미흡한 실정이다[10]. 또한 공정상 반복 가공이 필요한 경우에는 변형 경로와 재료의 변형양상, 따라서 미세조직 등이 달라져 최종 물성에 차이가 날 수가 있으므로 공정의 타당성을 높이기 위한 수치적 해석 접근 방법이 필요하다.

ECAP 가공의 경우 재료에 단면적의 변화 없이 심한소성변형을 부여함으로써 벌크 초미세결정립을 제어할 수 있는 큰 장점을 가지고 있는 반면에 연속 공정이 아니라는 단점을 가지고 있기 때문에 이를 극복하기 위해 conform 공정, 등통로각압축, 연속회전 등통로각압축 등 여러 장치들이 고안되어 발표되고 있다[10~13]. 그러나 이러한 새로운 장치 고안에 합당한 재료 유동 연구 및 소성 변형 특성 연구는 이루어지지 않고 있는 것이 실정이다.

이들 중 Nishida 등[11~13]이 고안한 연속회전 등통로각압축(RD-ECAP: Rotary Die Equal Channel Angular Pressing) 공정은, 시편을 압축 후 Fig. 1과 같이 다수의 통로가 있는 금형을 회전 시킴으로써, 한 번 가공된 시편을 꺼내어 다시 다음 공정을 위한 통로에 넣을 필요가 없게 되므로, ECAP와 같은 전단변형을 가하면서도 반복가공을 효과적으로 제어할 수 있다. 이 RD-ECAP 공정을 이용하여 여러 재료들을 가공 후 재료의 기계적 물성 및 미세조직의 평가는 약간 이루어지고 있는 반면, 재료의 공정 해석 및 재료 유동 특성에 대한 연구는 실시되고 있지 않다.

ECAP 공정 및 이의 변형된 공정, 특히 연속 혹은 다단의 공정을 적용함에 있어서는 재료의 기계 및 물리적 특성이 소성가공 중의 재료 변형 양상에 의존하므로, 금형 형상이나 가공방향 등의 공정변수들에 대한 영향을 체계적으로 고찰하는

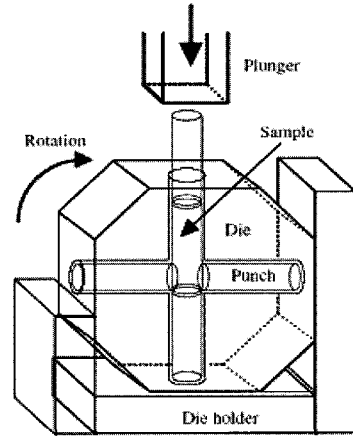


Fig. 1 Schematic diagram of rotary-die equal channel angular pressing[13~14]

것은 재료의 물성 향상을 위한 공정 조건 수립 및 금형 설계에 있어서 상당히 중요한 부분이다. 따라서 본 연구에서 이를 바탕으로 유한요소법을 이용하여 공정 특성을 연구하였다.

2. 유한요소 해석 및 실험 방법

Fig. 2는 유한요소해석에 사용된 초기 요소망이며, 이번 계산에는 총 1000개의 요소와 1111개의 절점이 초기에 사용되었다. 시편은 그림에 수직인 두께 방향(thickness direction) 변형률이 0인 평면변형 상태로 가정할 수 있도록 6×6×50mm의 사각막대 형태로 수행함으로써 계산의 효율성을 높일 수 있었다. 변형 경로는 RD-ECAP의 금형과 같이 설계하여 계산하였다. 실제 실험에서도 연속해서 4회 공정을 시행하는 것과 같이 본 계산에서도 4회를 연속적으로 계산할 수 있도록 하였다.

모든 교차각은 $\Phi=90^\circ$ 와 모서리각 $\psi=0^\circ$ 인 조건을 적용하였으며, 형상에 의한 변형 특성만을 고려하기 위해 재료와 금형 사이의 계면은 무마찰 조건으로 계산하였다. 변형 속도는 2mm/s로 일정하게 유지하였으며, 사용된 재료는 어닐링된 Cu 재료로써 일반적인 인장 실험으로는 본 계산에 필요한 대변형에서의 자료를 얻기 어려우므로, Fig. 3의, 전위셀 진화 모델을 적용하여 이론적 계산을 통해 얻은, 응력-변형률 곡선을 이용하였다[15]. 계산 수행 중에 국부적으로 요소의 심한 변형을 받는 영역에서 나타나는 계산 오차를 줄이기 위

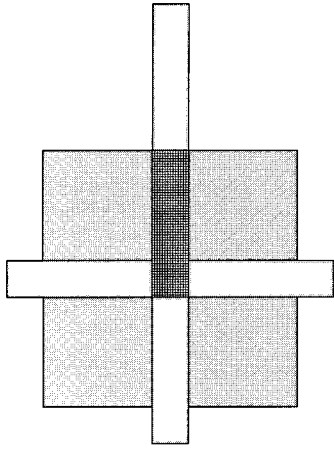


Fig. 2 Finite elements mesh system for the plastic deformation analysis

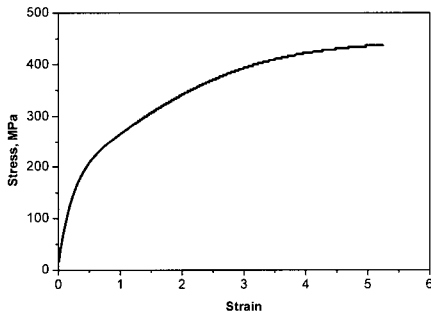


Fig. 3 Stress-strain curve of annealed pure Cu used in FEM simulations

해 요소망 재구성(remeshing) 기능을 사용하였으며, 계산은 상용의 2차원 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM2D를 이용하여 수행하였다[16].

3. 결과 및 고찰

ECAP 가공 공정에서 가장 주목할 만한 기술적 장점은 가공 전 후의 최종 재료의 단면 형상이 변화되지 않기 때문에 한번 가공한 시편을 그대로 이용할 수 있고, 반복가공을 통해 재료에 가해지는 변형률을 제어할 수 있으며, 가공 방향을 변화시킴으로 인해 다양한 미세구조와 조직을 부여할 수 있다는 점이다. ECAP는 가공 경로에 따라 경로 A, 경로 B_A, 경로 B_C, 경로 C가 있으며, 이

러한 다양한 가공 경로에 따라 재료의 결정립도 미세화를 이룰 뿐만 아니라 등축 구조를 제조할 수 있게 된다[17]. 그러나 1 회 공정이라도 두께 방향뿐만 아니라 폭 방향에서의 불균일 변형이 나타나게 되면, 그에 따라 다단 공정에서는 변형 불균형의 효과가 누적 혹은 상쇄될 수 있으므로 이러한 누적효과를 자세히 고찰할 필요가 있다.

RD-ECAP는 Fig. 1에서 관찰한 바와 같이 재료의 전단변형이 동일한 방향으로만 진행되는 경로 A에 해당하는 가공 공정이다. 그러나 일반적인 ECAP의 경로 A 공정은 모든 경로에서 시편의 앞부분이 계속 앞부분이 되지만, RD-ECAP에서는 매회 시편의 앞과 뒤가 거꾸로 된다는 차이점이 있다. 따라서, 시편 내부의 변형률 분포가 경로 A인 ECAP의 경우와 달라질 가능성이 있다.

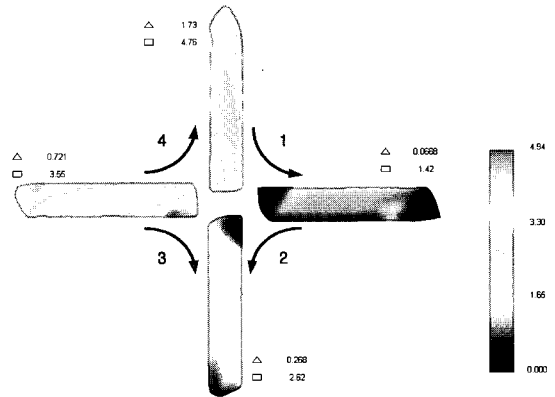


Fig. 4 FEM predictions of effective strain distribution during RD-ECAP

시편의 Fig. 4는 RD-ECAP의 패스 별 유효변형률 분포를 나타낸 것으로서, 시편 중앙부에서의 변형률이 약, 1, 2, 3, 4로서 일반 ECAP의 경우에서와 다르지 않음을 알 수 있다. 1 회 공정에서 시편 폭 방향으로의 불균일 변형과 길이 방향으로 앞 끝단과 뒤 끝단에 나타난 불균일 변형을 관찰할 수 있다[18~19]. 2 회 공정에서는 불균일 변형이 약간 감소하는 경향이 나타나지만, 3 회와 4 회를 거치면서 끝단의 효과가 재료의 중앙부까지 영향이 미쳐 오히려 심해지는 것을 알 수 있다. 이는 재료가 동일 방향으로 전단변형 되어 전단방향으로의 재료 회전이 나타나기 때문으로, 추후 일반 ECAP의 경우와 비교, 고찰할 필요가 있다.

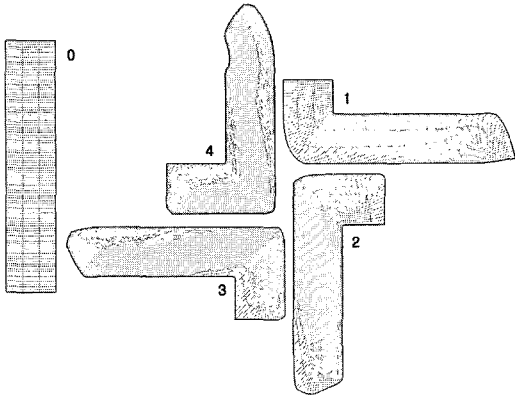


Fig. 5 FEM predictions of deformation geometry changes during RD-ECAP

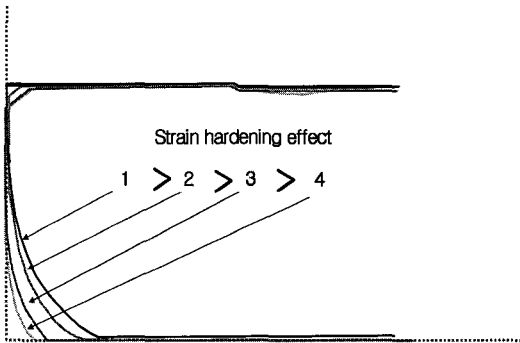


Fig. 6 FEM predictions of geometry changes along the path of the workpiece RD-ECAP

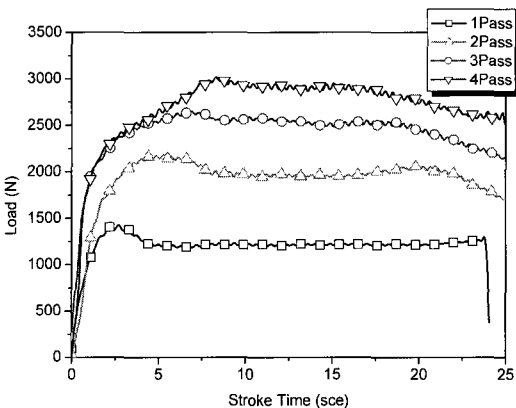


Fig. 7 FEM calculated pressing load versus stroke time during RD-ECAP

Fig. 5는 사각 격자로 나타낸 유효변형률 분포로써, 불균일 변형을 보다 자세히 관찰할 수 있다. 4회 공정 후에는 대각선 방향으로 길게 연신이 이루어진 변형영역과 앞, 뒤 끝단에 의한 불균일이 나타나는 영역이 명확히 대비되는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 6에서는 각 가공 패스가 진행됨에 따라 정상 변형 상태에서 나타나는 모서리 틈의 크기가 점점 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 재료에서 변형량이 커질수록 응력의 증가가 점점 둔화되어 일정 응력크기로 포화가 되는데, 이러한 경향은 Fig. 3의 응력-변형률 곡선에서도 나타나며, 모서리 틈은 재료의 가공경화와 연관되어 점점 작아진다[20]. 즉, 시편의 변형이 계속될수록 가공경화율은 감소하므로, 가공경화로 인하여 발생하는 모서리틈은 점차 감소하는 것이다.

Fig. 7은 시간에 따른 하중 이력을 나타낸 그림으로, 공정이 진행됨에 따라 증가되는 폭이 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이 역시, 응력-변형률 곡선에서 관찰된 바와 같이, 가공경화로 인해 변형률이 높아질수록 둔해지는 경향을 나타내고 있는데, 하중 증가 폭이 이를 반영하고 있다.

4. 결론

기존의 ECAP 공정의 단점인 낮은 생산성을 보완하기 위해, 연속 가공 공정이 가능하도록 고안된 RD-ECAP 공정에 대해서 유한요소법을 이용하여 재료의 소성유동 특성을 고찰하였다. RD-ECAP는 공정 상 재료에 가해지는 전단변형 방향이 동일하게 작용한 경로 A 공정으로써, 초기 1회 공정에서는 비교적 균일 변형된 재료를 얻을 수 있었지만, 시편의 앞 뒤에 발생하는 끝단 효과로 인해 재료 가공 공정 회수가 증가될수록 불균일 변형이 증가되는 것을 관찰할 수 있다. 재료의 가공경화 효과로 인해 각 회 가공공정이 진행됨에 따라 모서리 틈이 점점 작아지는 것을 관찰할 수 있었으며, 이에 따른 하중 증가폭도 감소되는 것을 관찰할 수 있었다. RD-ECAP는 연속공정이 어려운 기존의 ECAP 공정에 비하여 생산성 측면에서 매우 효과적으로 연속 가공이 가능한 공정이지만, 균일변형을 확보하기 위해서는 추가의 설계 고려가 필수적이다.

후 기

이 논문은 2006년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음, 이 논문은 2006년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] K. L. Choy, 2000, Vapor Processing of Nanostructured Materials, Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, edited by H.S. Nalwa, Academic Press, p. 533.
- [2] H. Gleiter, 1989, Nanocrystalline materials, Prog. Mater., Vol. 33, pp. 223~315.
- [3] O. Kabishev, R. Kabishev, G. Salishchev, 1993, Improvement of diffusion bonding joint by Ar ion bombardment, Mater. Sci. Forum, Vol. 423~425, pp. 113~118.
- [4] W. Y. Choo, 1998, Fine-grained steel- New challenge to develop ultrafine grain steel with 1 μ m grain size, J. Kor. Inst. Met. Mater., Vol. 36, pp. 1945~1958.
- [5] S. C. Yoon, H. S. Kim, 2006, Equal channel angular pressing of metallic powders for nanostructured materials, Mater. Sci. Forum, Vol. 503~504, pp. 221~226.
- [6] R. Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Tsenev, 1991, Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 137, pp. 35~40.
- [7] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, 1998, The process of grain refinement in equal channel angular pressing, Acta Mater., Vol. 46, pp. 3317~3331.
- [8] V. M. Segal, 1995, Materials processing by simple shear, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 197, pp. 157~164.
- [9] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, 1999, Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding(ARB) process, Acta Mater., Vol. 47, pp. 579~583.
- [10] M. H. Seo, H. S. Kim, 2001, Finite element analysis of equal channel multi-angular pressing, J. Kor. Inst. Met. Mater., Vol. 39, pp. 360~366.
- [11] Y. Nishida, H. Arima, J. C. Kim, T. Ando, 2001, Rotary-die equal channel angular pressing of an Al-7 mass% Si-0.35 mass% Mg alloy, Scripta Mater., Vol. 45, pp. 261~266.
- [12] Y. Nishida, T. Ando, M. Nagase, S.W. Lim, I. Shigematsu, A. Watazu, 2002, Billet temperature rise during equal channel angular pressing, Scripta Mater., Vol. 46, pp. 211~216.
- [13] A. Ma, K. Suzuki, Y. Nishida, N. Saito, I. Shigematsu, M. Takagi, H. Iwata, A. Watazu, T. Imura, 2005, Impact toughness of an ultra-fine grained Al-11 mass% Si alloy processed by rotary-die equal channel angular pressing, Acta Mater., Vol. 53, pp. 211~220.
- [14] A. Ma, N. Saito, M. Takai, Y. Nishida, H. Iwata, K. Suzuki, I. Shigematsu, A. Watazu, 2005, Effect of severe plastic deformation on tensile properties of a cast Al-11 mass % Si alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 395, pp. 70~76.
- [15] Y. Estrin, L.S. Toth, A. Molinari, Y. Brechet, 1998, A dislocation-based model for all hardening stages in large strain deformation, Acta Mater., Vol. 46, pp. 5509~5522.
- [16] SFTC: DEFORM2D
- [17] M. Furukawa, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, 1998, The shearing characteristics associated with equal channel angular pressing, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 257, pp. 328~332.
- [18] H. S. Kim, S. I. Hong, M. H. Seo, 2001, Effect of strain hardenability and strain rate sensitivity on the plastic flow and deformation homogeneity during equal channel angular pressing, J. Mater. Res., Vol. 16, pp. 856~864.
- [19] J. R. Bowen, A. Gholinia, S. M. Roberts, P. B. Prangnell, 2000, Analysis of the billet deformation behavior in equal channel angular extrusion, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 287, pp. 87~99.
- [20] H. S. Kim, M. H. Seo, S. I. Hong, 2000, On the corner gap in the equal channel angular pressing, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 291, pp. 86~90.