

다단 ECAP 공정에서 pure-Zr 의 변형거동해석

노일주* · 권기환* · 채수원† · 권숙인** · 김명호*** · 황선근***

Deformation Behavior Analysis of pure-Zr during Equal Channel Multi-Angular Pressing

Ill-Joo Noh, Gi-Hwan Kwon, Soo-Won Chae, Sook In Kwun, Myung-Ho Kim and Sun Keun Hwang

Key Words : Equal channel multi-angular pressing (ECMAP, 다단등통로각압축), Three dimensional finite element method (3 차원 유한요소법), pure-Zr (순수 지르코늄)

Abstract

Equal channel angular pressing (ECAP) has been employed to produce materials with ultra-fine grains that have high strength and high corrosion resistance properties. In order to obtain super plastic deformation during ECAP, multi-pass angular pressing is frequently employed. In this paper, three-dimensional finite element analyses have been performed to investigate the deformation behavior of pure-Zr specimen and the effects of process parameters for equal channel multi-angular pressing (ECMAP) process. The results have been compared with some experimental results

기호설명

Φ : 교차각(channel angle)

Ψ : 만곡각(corner angle)

1. 서 론

초미립 금속은 입도(grain size)가 1 μm 이하인 입자들로 구성되어 있으며 고강도(high strength), 초소성변형(super plastic deformation), 고내식성(high corrosion resistance) 등과 같은 물리적 또는 기계적으로 매우 우수한 특징을 가진 초금속(super metal)으로 알려져 있다. 이러한 초금속에 대한 관심이 전세계적으로 증가되고 있는 추세이며 이를 제조하기 위해 여러 방법들이 연구 중에 있다.

그 중, Segal⁽¹⁾ 등에 의해 제안된 등통로각압축

(ECAP, Equal Channel Angular Pressing)공정은 극심한 소성변형법의 한 방법으로서 다른 공정에 비해 상온에서 재료에 대해 상대적으로 낮은 압력으로 형상의 큰 변화 없이 소성변형을 발생시켜 입자를 미세화할 수 있으며 재료의 단면형상에 변화가 없어 수회의 반복 공정을 통해 높은 변형률을 얻을 수 있는 것으로 분석되고 있다.

등통로각압축 공정은 이러한 기술적 장점에도 불구하고 전세계적으로 아직 초기 연구단계에 머물러 있으며, 이를 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 등통로각압축 공정 중 다양한 금속 소재들에 의해 발생하는 변형 거동의 특성 등에 대한 기초적인 분석⁽²⁻⁴⁾과 더불어 등통로각압축 공정에 대한 가공 변수의 영향^(5,6)등과 같은 보다 실제적인 연구가 필요하다

등통로각압축(ECAP) 공정에 대한 연구의 동향은 유한요소법을 이용한 이론해석⁽⁷⁾을 통해 모델을 2차원 강소성 평면 변형률(plane strain) 요소로 단순화하여 재료의 변형거동 및 변형률 등의 분석을 실시하여 왔다. 이로 인해 실제 실험에서 발생할 수 있는 시편 재료의 측면과 금형간의 측면마찰(side friction)에 의한 영향 등은 무시되어 왔다. 그러나 등통로각압축 공정에서 측면마찰은 재료의 변형거동에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

† 책임저자, 고려대학교 기계공학과

E-mail : swchae@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3367 FAX : (02)926-9441

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 금속공학과

*** 인하대학교 금속공학과

등통로각압축(ECAP)공정의 뛰어난 장점중 하나는 가공 후에 최종 시편의 단면 형상이 가공전 시편의 단면 형상과 같은 점이다. 이 장점을 활용하여 수 차례에 걸쳐 등통로각압축공정을 반복할 수 있고, 이와 같은 연속 공정을 통하여 재료에 극심한 소성 변형을 가함으로써 궁극적 목표인 초미립 금속을 얻을 수 있다. 이렇게 수차례에 걸쳐 ECAP 공정을 반복하는 방법을 다단등통로각압축(ECMAP, Equal Channel Multi-Angular Pressing)공정이라고 한다.

다단ECAP공정에 대한 기존연구⁽⁸⁾에서는 사용된 재료의 일차공정이 끝나기 전에 이차공정이 시작되어 두 공정이 동시에 진행되므로 실제보다 역압력의 효과가 과장되어 나타나는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 일차 공정이 완료된 후 이차공정이 진행되도록 하여 이러한 문제를 해결하고자 하였다. 이를 위해 ECAP공정을 반복적으로 적용하는 다단등통로각압축(ECMAP)공정에 대한 3차원 유한요소해석을 이용하여 원자로심의 소재등으로 사용되는 순수 지르코늄(pure-Zr)의 변형거동 특성을 살펴보고 실험결과와 비교 검증해 보고자 한다.

2. 등통로각압축공정

Fig. 1 은 등통로각압축 공정의 기본 개념을 나타낸 그림이다. 공정 중 재료의 형상이 크게 변화하지 않도록 금형은 단면의 크기와 단면 형상이 동일한 두 채널(channel)이 일정한 각으로 교차하는 형태를 갖는다.

등통로각압축 공정에서는 두 채널이 교차하는 곳에서 중요한 의미를 갖는 두 개의 각을 정의할 수 있으며 재료의 변형거동에 있어 내각을 교차각(Φ)이라 하며, 외측부의 원호가 이루는 각을 만곡각(Ψ)이라 한다. Iwahashi 등⁽²⁾은 등통로각압축

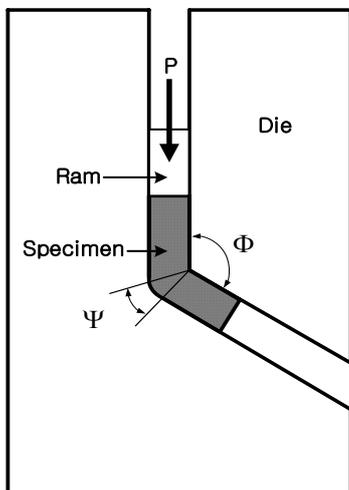


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP

공정에서 변형량에 대한 관련식을 식 (1)과 같이 제시하였다

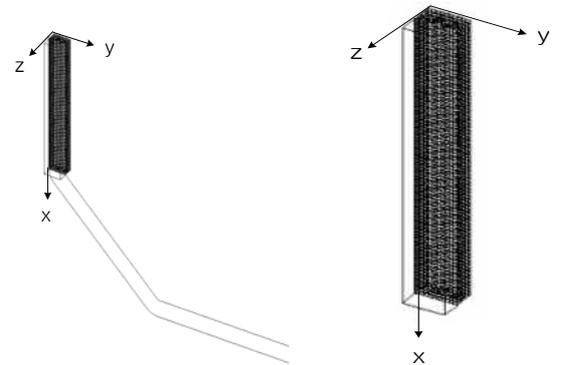
그러나 이들이 제시한 관련식은 재료내에서 순수전단이 발생한다는 가정에 의한 것으로서 실제 등통로각압축 공정의 실험에서 얻어지는 결과 사이에 큰 차이가 있다. 따라서 최근의 연구에서는 등통로각압축 공정에 대한 좀 더 정확한 분석을 위해 유한요소해석이 다양하게 시도되고 있다.⁽³⁻⁶⁾

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

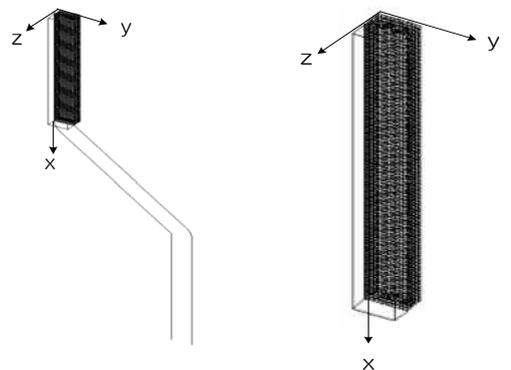
(N:공정 횟수)

3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 순수 지르코늄의 다단계등통로각압축공정중 경로 A 와 경로 C 에서 재료의 변형거동을 3 차원 유한 요소법을 이용하여 해석하고 이를 실제 실험 데이터와 비교 분석 하였다.



(a) Rigid die for route A (b) Specimen
Fig. 2 FE model of ECAP for route A



(a) Rigid die for route C (b) Specimen
Fig. 3 FE model of ECAP for route C

경로 A 는 가공 방향의 변화 없이 최초 공정과 동일한 방향으로 연속 반복 공정이므로, 전단 변형이 같은 방향으로만 진행 된다. 경로 C 는 매회 시편을 x-축(fig. 3)을 기준으로 180° 씩 회전시키면서 공정을 반복한 경우이다. 이들 상호간 비교를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS™ 을 사용하였고 해석에 사용된 유한 요소 모델은 Fig. 2(경로 A) 및 Fig. 3(경로 C)이며, 실험에 사용된 금형의 모델은 Fig. 4 와 같다.

금형은 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45°를 사용하였다. 본 연구에 사용된 시편은 폭 5 mm, 두께 5 mm, 길이 40 mm이며 모델의 형상이 대칭인점을 고려하여 시편의 두께 방향(z-방향)으로 절반만 모델링하였다. 경로 A 와 경로 C 에서 재료의 변형거동을 연구하기 위해 금형은 강체로 가정하여 유한요소 해석하였고 실제 실험에서는 조 가공후 강화

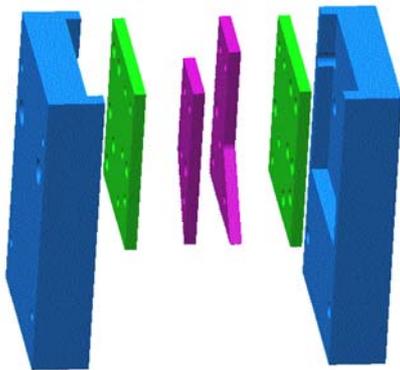


Fig. 4 3-dimensional CAD view of ECAP die

Table 1 Material properties of pure-Zr

Young's modulus (MPa)	7,714
Yield Strength (MPa)	270
Ultimate Tensile Strength (MPa)	820

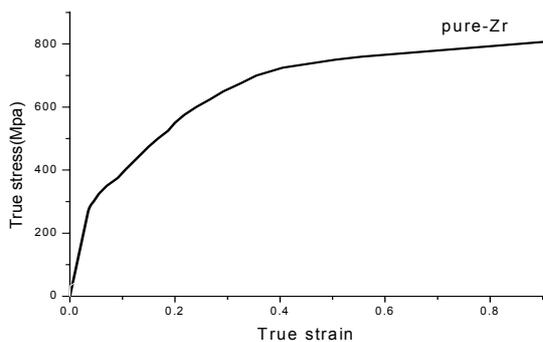


Fig. 5 True stress-strain diagram for pure-Zr

열처리 하였으며 교차각 부위는 방전 wire 가공으로 마무리한 SKD11 종을 사용하였다.

시편은 8-절점 육면체 요소를 사용하였으며, 요소수는 4000(10×5×80)개이다. 유한요소해석에서 마찰 계수는 0.1 을 적용하였으며, 이는 수회의 해석결과와 실제 실험의 비교를 통해 추정되는 값이다.

본 연구에서 사용한 재료는 탄성-가공 경화소성 모델로서 그 물성치는 Table 1 및 Fig. 5 와 같다. 이는 순수지르코늄을 프레스 속도 1.5mm/min 로 압축시험하여 얻은 결과이다.

4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 6 은 다단등통로각압축(ECMAP)공정에서 경로 A 와 경로 C 의 개략도이다. 그림에서 보듯, 경로 A 는 일차 공정된 시편을 방향의 변화 없이 동일한 방향으로 이차 공정하는 방법을 말하며, 경로 C 는 일차 공정된 시편을 180° 회전하여 이차 공정하는 방법을 말한다.

실험에서는 시편과 금형의 마찰을 줄이기 위하여 입도가 0.25 μm인 AL₂O₃ 분말로 시편과 금형의 채널을 연마하였으며, ECAP가공시에는 시편과 금형의 채널면에 MoS₂ spray 윤활제를 도포하여 실험을 진행하였다.

Fig. 7 은 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45°인 금형에 대해 마찰 계수(μ)가 0.1 경우 일차 공정후 시편에 발생한 상당소성 변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 나타낸 것이다. (a)는 시편의 위치를 나타내고 (b)와(c)는 시편에 발생한 상당소성변형률을

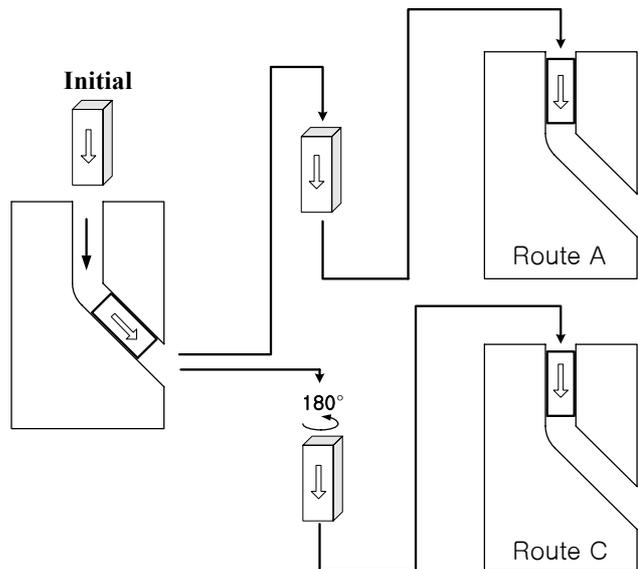


Fig. 6 A Schematic diagram of two ECMAP routes

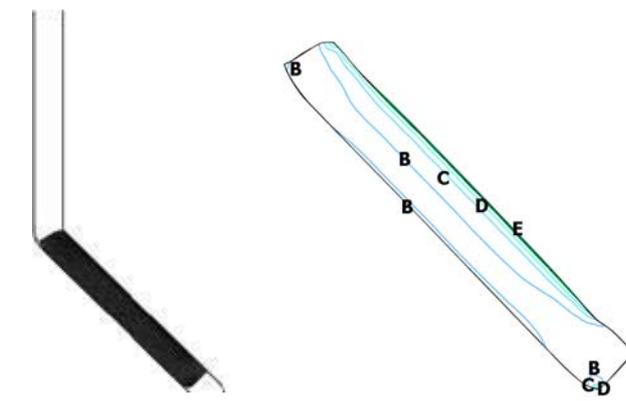
보여주고있다. 평균 상당소성변형률은 0.25 이며 시편 전체의 상당소성변형률의 분포 범위는 0.11~0.85 이다. 그림을 통해 변형이 시편의 상부에 집중적으로 발생한 것을 확인 할 수 있다. 첫번째 공정에서는 경로에 상관없이 동일한 변형률을 가지며, 참고로 Iwahashi 의 상당소성변형률식(1)에서는 0.453 의 값을 얻는다.

Fig. 8 와 Fig. 9 는 두번의 등통로각압축공정 후 시편에 발생한 상당 소성 변형률을 나타내고 있다.

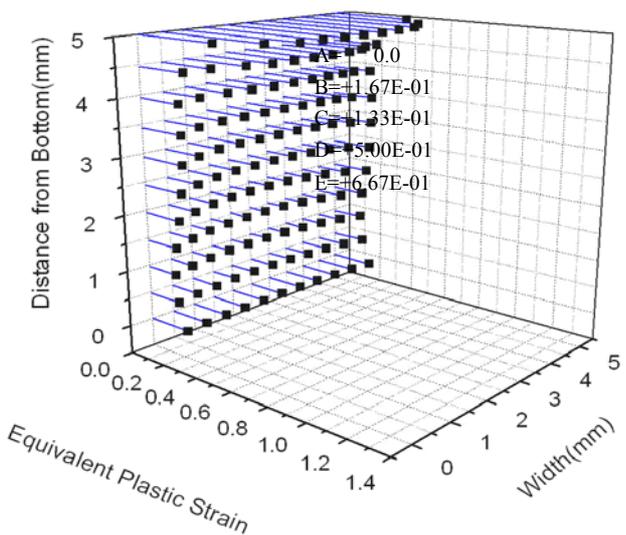
Fig. 8 은 일차 공정후 시편을 180°회전 시키는 경로 C로 이차공정 후 시편에 발생한 상당소성변형률을 나타낸 것이다. (a)는 시편의 위치를 나타내었고 (b)는 contour 로 변형률을 표시하였으며 (c)는 시편 단면에 발생한 상당소성변형률을 3 차원 그래프로 나타내었다. 그림에서 시편의 말단부를 제외한 대부분의 영역에서 상당 소성 변형률의 분

포가 상하(1 차공정후 시편의 위치를 기준) 대칭의 형태를 띄고 있음을 확인할 수 있다. 시편의 상당 소성변형률 분포는 0.25~0.91 이었으며, 평균상당 소성변형률은 0.46 으로 1 차 공정후의 값 0.25 와 비교해 1.84 배 증가 한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9 는 일차 공정된 시편을 회전 없이 최초 방향과 동일하게 가공하는 경로 A 로 이차 공정한 시편에 발생한 상당소성변형률을 나타낸 그래프이다. (a)는 시편의 위치를 나타내고 (b)는 상당 소성변형률을 contour 로 나타낸 그림이며 (c)는 시편 단면에 발생한 상당소성변형률을 3 차원 그래프로 나타낸것이다. Fig. 9 의(c)와 Fig. 8 의(c) 를 비교하면 그 양상에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 8 의(c) 경우에는 변형률의 분포가 시편의 양 끝부분을 제외 하고는 상하 대칭의 형태를 띄는데 반해 Fig. 9 의(c)의 경우에는 변형이 시편의 상부

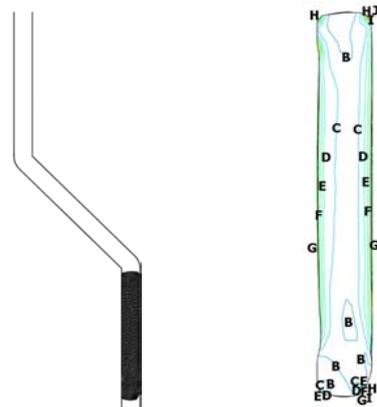


(a)Location of specimen (b)Equivalent plastic strain

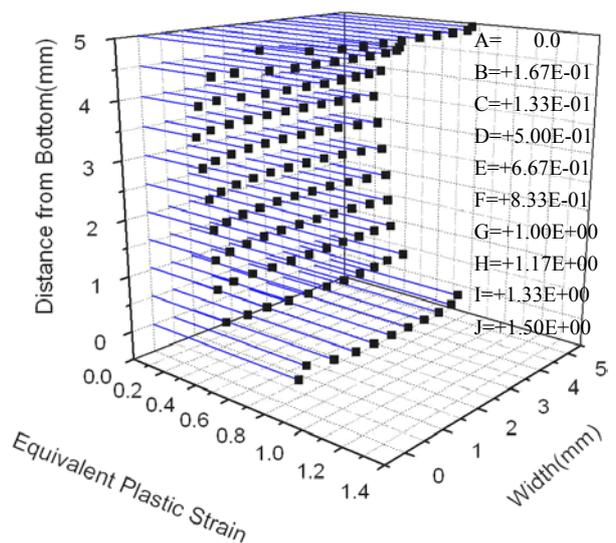


(c)Three dimensional view of equivalent plastic strain

Fig. 7 Equivalent plastic strain after 1st pass



(a)Location of specimen (b)Equivalent plastic strain



(c)Three dimensional view of equivalent plastic strain

Fig. 8 Equivalent plastic strain after 2nd pass for route C

에 집중되어 발생하였음을 알 수 있다. 경로 A 로 이차 공정후 시편에 발생한 평균상당소성변형률은 0.34 로 일차 공정후의 값 0.25 와 비교해서 1.36 배 증가 하였으나 경로 C 로 이차 공정후의 값 0.46 의 74%에 불과한 값이다. 시편전체의 변형률의 분포는 0.14~1.13 으로 일차 공정 및 경로 C 로 진행된 이차공정에 비해 그 차이가 훨씬 크고 불균일 하다는 것을 알 수 있다. 참고로, Iwahashi 의 상당소성변형률식(1)에서는 이차공정후 경로와 무관하게 0.906 을 얻으므로 실제 결과와 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 10 의(a)는 실제 실험과 유한요소해석에서 램의 변위와 가해진 하중과의 관계를 비교하는 그

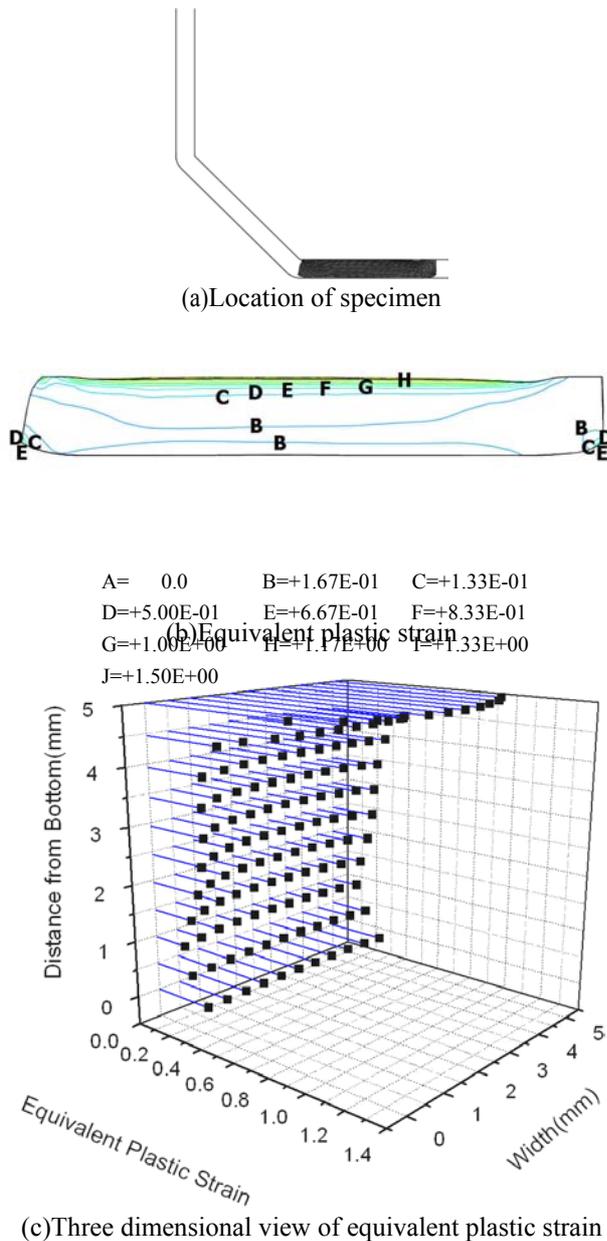
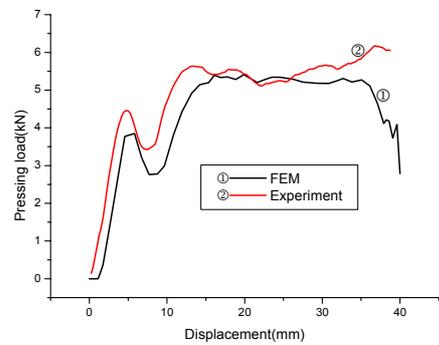


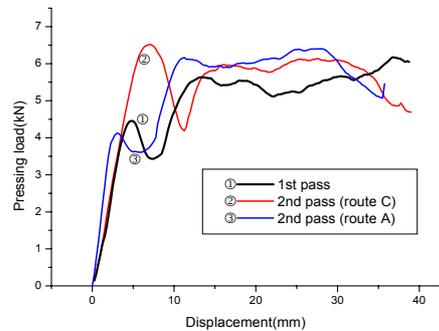
Fig. 9 Equivalent plastic strain after 2nd pass for route A

래프이다. 선①은 마찰계수(μ)를 0.1 로 가정하여 3 차원 유한요소해석을 통해 얻은 값이며, 선②는 실제 실험 에서 램에 가해지는 하중을 나타낸 선 이다. 그래프를 통해, 본 연구에서 가정한 마찰계 수(μ)의 값 0.1 이 비교적 타당한 값을 확인 할 수 있다.

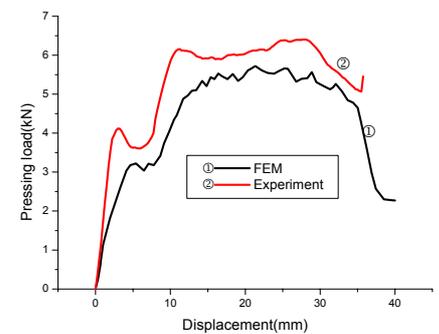
Fig. 10 의(b)는 실제 실험에서 이차공정시에 램 에 가해지는 하중을 경로별로 나타내어 일차 공정 과 비교한 것이다. 대체적으로 경로 A 로 이차 공 정시에 램에 작용하는 하중과 경로 C 로 이차공정 시에 램에 작용 하는 하중에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 경로 A 의 경우 일차 공정에서 주 변형 영역인 시편의 상부에 가공경화가 발생한후



(a) 1st pass ($\mu=0.1$)



(b) 2nd pass for route A,C and 1st pass



(c) 2nd pass for route A

Fig. 10 Pressing load and ram displacement relationship

이차 공정에서 역시 동일한 방향으로 변형되면서 같은 영역에서 두차례 연속으로 대 변형이 일어나, 주변형영역이 180° 반전되는 경로 C 의 경우 보다 가공경화의 영향을 많이 받게 되어, 보다 큰 하중이 작용하리라 짐작 했던 예상과 불일치 하는 결과로 시편의 가공경화 영향이 그다지 크다지 않다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 의(c)는 실제 실험과 3 차원 유한요소에서 경로 A 로 이차 공정시에 램의 변위와 램에 작용하는 하중과의 관계를 비교한 그래프이다. 이를 살펴 보면 유한요소해석을 통해 얻은 하중값이 실제 실험에서의 값에 비해 다소 작은 경향을 띄고 있음을 알 수 있으며, 평균 하중값은 유한요소 해석에서 4.1kN 으로 실험에서의 값 5.3kN 에 비해 대략 23%정도 작은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

결 론

본 논문에서는 다단계 등통로각압축 공정에서 경로 A 와 경로 C 에 대한 변형 거동 특성을 3 차원 유한요소해석을 통해 살펴 보았으며, 실제 실험과 비교 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 교차각(Φ) 135° , 만곡각(Ψ) 45° 인 금형에서 두차례의 공정 후 시편 재료내에 발생하는 상당소성변형량 분포는 경로 C 의 경우 시편의 상,하에서 유사한 크기로 분포 하지만, 경로 A 의 경우는 시편 상부에 집중되어 나타난다.
2. 두번째 공정에서 램에 작용하는 하중은 가공 경화에 의해 첫번째 공정에서 보다 증가하며, 경로 A 와 경로 C 중 어떤 경로를 통해 이차 공정하는지에 상관 없이 이차공정시에 램에 작용 하는 하중은 비교적 유사한 양상을 띄며 증가하는 하중의 양도 비슷하다.

후 기

본 논문은 2001 년도 원자력 기초 연구사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

- (1) Segal. V.M., Rezenikov. V.I., Drobyshevskiy. A.E., Kopylov. V.I., 1981, "Plastic Working of Metals by Simple Shear," *Metally(Eng. Trans. : Russian Metallurgy)* Vol.1, pp. 99~105
- (2) 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 Metals," *Scripta Mater.*, Vol.35, No.2, pp.143~146
- (3) Prangnell. P.B., Harris. C. and Roberts. S.M., 1997, "Finite Element Modelling of Equal Channel Angular Extrusion," *Scripta Mater.*, Vol.37, No.7, pp. 983~989
- (4) Bowen. J.R., Gholinia. A., Roberts. S.M., Prangnell. P.B., 2000, "Analysis of the Billet Deformation Behavior in Equal Channel Angular Extrusion," *Mater. Sci. & Eng.*, Vol(A)287, pp. 87~99
- (5) 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, 2001, "순수 지르코늄의 ECAP 공정에서 금형의 변형 및 채널각이 재료의 변형거동에 미치는 영향," *대한기계학회논문집*, 제 25 권, 제 11 호, pp. 1751~1758
- (6) Kim, H.S., 2001, "Finite element analysis of equal channel angular pressing using a round corner die," *Mater. Sci. & Eng.*, A315, pp. 122~128
- (7) Srinivasan. R., 2001, "Computer simulation of the equichannel angular extrusion(ECAE) process," *Scripta Mater.*, Vol.44, No.1, pp. 91~96
- (8) 서민홍, 김형섭, 2001, "연속 다단 ECAP 공정의 유한요소 해석", *대한 금속·재료 학회지*, 제 39 권, 제 3 호, pp. 360~366