

< 논문 >

등통로각압축 공정에서 금형의 단면형상이 공정에 미치는 영향

고성광* · 김성용* · 채수원† · 권숙인** · 김명호*** · 황선근***
(2005년 9월 13일 접수, 2006년 5월 4일 심사완료)

Effects of Sectional Shape of Die During ECAP Process

Sung-Kwang Ko, Seong-Yong Kim, Soo-Won Chae, Sook-In Kwun, Myung-Ho Kim
and Sun-Keun Hwang

Key Words : Equal Channel Angular Pressing(ECAP, 등통로각압축), Three Dimensional Finite Element Method(3 차원 유한요소법), Circular Section(원형단면), Square Section(사각 단면), Pure-Zr(순수 지르코늄), Zr-702(지르코늄 702 합금)

Abstract

Much research efforts have been made on the equal channel angular pressing (ECAP) which produces ultra-fine grains. Along with the experiments, the finite element method has been widely employed to investigate the deformation behavior of specimen during ECAP and the effect of process parameters of ECAP. In this paper, sectional shape change has been investigated during ECAP with the pure-Zr, Zr-702 by using three-dimensional finite element analysis. The results have been compared with experimental results.

기호설명

Φ : 교차각(channel angle)
 Ψ : 만곡각(corner angle)

1. 서론

최근 새로운 소재의 개발을 위해 기존 재료의 결정립을 미세화하여 기계적, 물리적 특성을 개선할 수 있는 결정립 미립화법이 하나의 방안으로 고려되고 있다. 결정립 미립화법을 통하여 얻을 수 있는 초미립 금속은 입도(grain size)가 1 μm 이하인 입자들로 구성되어 있으며 고강도, 초소성 변형, 고내식성 등과 같은 물리적 또는 기계적으로 매우 우수한 특징을 가진 초금속(super metal)으

로 알려져 있다. 이러한 초금속에 대한 관심이 전 세계적으로 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 방법으로써 다른 공정에 비해 상온에서 재료에 대해 상대적으로 낮은 압력으로 형상의 큰 변화 없이 소성변형을 발생시켜 입자를 미세화할 수 있으며 재료의 단면 형상에 변화가 없어 수회의 반복 공정을 통해 높은 변형률을 얻을 수 있는 것으로 분석되고 있다. 등통로각압축공정의 이러한 기술적 장점을 실제 산업현장에 적용하기 위하여 다양한 금속 소재들에서 공정 중에 발생하는 변형 거동의 특성 등에 대한 기초적인 분석⁽²⁻⁴⁾과 더불어 등통로각압축공정에 대한 가공변수의 영향⁽⁵⁻⁷⁾ 등과 같은 실제적인 연구가 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다.

최근 등통로각압축(ECAP)공정에 대한 연구 동향은 실제 실험과 더불어 유한요소법을 이용한 이론해석⁽⁸⁾이 병행되고 있다. 그러나 지금까지의 유한 요소해석을 통한 등통로각압축공정에 대한 연

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : swchae@korea.ac.kr

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

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 고려대학교 금속공학과

*** 인하대학교 금속공학과

구들은 모델을 2 차원 강소성 평면 변형률(plane strain) 요소로 단순화하여 재료의 변형거동 및 변형률 등의 분석을 실시하여 왔다. 이때 2 차원 모델의 한계상 등통로각압축공정에서 재료의 변형거동에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단되는 시편 재료의 측면과 금형간의 측면 마찰(side friction)에 대한 영향 등은 무시되었다. 이를 보완하기 위해 최근에는 등통로각압축공정에 대한 3 차원 유한요소해석 또한 실시되고 있다.

본 연구에서는 원자로심용 Zr 소재를 개발하기 위하여 순수 지르코늄(pure-Zr)과 현재 원자로심으로 사용중인 Zircaloy 의 등통로각압축 공정에서의 변형 거동 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 pure-Zr 은 상온에서 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45°를 고려하였고, Zircaloy 와 기계적 성질이 유사한 지르코늄 702 합금(Zr-702 alloy)은 온간(350°C)에서 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20°로 등통로각압축공정을 수행하였다. 특히 단면적과 부피가 동일한 시편에서 단면 형상이 사각형일 경우와 원형일 경우를 비교하여 이를 실제 실험을 통해 비교 검증하였다.

2. 등통로각압축 공정

Fig. 1 은 등통로각압축공정의 기본 개념을 나타낸 그림이다. 공정 중 재료의 형상이 크게 변화하지 않도록 금형은 단면의 크기와 형상이 동일한 두 채널(channel)이 일정한 각으로 교차하는 형태를 갖는다. 두 채널이 교차하는 곳에서의 내각을 교차각(channel angle, Φ)이라 하며 외측부의 원호각이 이루는 각을 만곡각(corner angle, Ψ)이라 한다.

Iwahashi⁽²⁾ 등은 교차각(Φ)과 만곡각(Ψ)을 함께 고려하여 일반적인 상당소성변형률(equivalent plastic strain)식을 (1)과 같이 유도하였다. 그러나 식 (1)은 재료의 물성이나 마찰 등은 전혀 고려치 않고 단순히 금형의 형상을 고려하여 단면 내에서 재료의 변형이 금형 내의 위치에 관계없이 일정하다는 전제하에서 유도된 것으로서 시편 재료의 부위에 따른 불균일한 변형거동 등을 나타내지 못해

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

실제 등통로각압축공정에서 얻어지는 결과와는 차이를 보이게 된다.

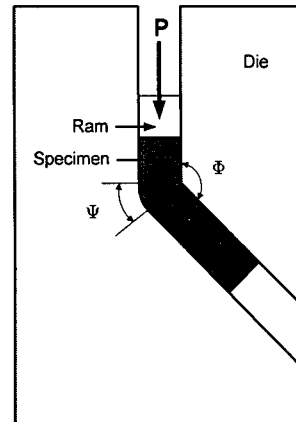


Fig. 1 A schematic diagram ECAP

3. 유한요소해석

본 연구에서는 순수 지르코늄(pure-Zr)과 지르코늄 702 합금(Zr-702 alloy)의 등통로각압축공정에서 마찰에 따른 재료의 변형거동을 고려하여 금형의 단면 형상이 사각형일 경우와 원형일 경우를 비교 분석하였다. 이를 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUSTM를 사용하였으며 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 2 및 Fig. 3 과 같다.

금형은 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45°인 경우와 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20°인 경우 두 가지를 고려하였다. Fig. 2 의 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 금형에 사용된 시편은 사각 단면이 폭 5mm, 두께 5mm, 길이 40mm 이고, 원형 단면은 단면적과 부피가 동일하도록 지름 5.642mm, 길이 40mm 로 하였다. Fig. 3 의 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20°에서 사용된 시편 역시 동일하다. 고려된 시편의 형상이 모두 대칭인 점을 고려하여 시편의 두께 방향(z-방향)으로 절반만을 모델링 하였다. 단면 형상 변화에 따른 재료의 변형거동 특성을 보다 효율적으로 살펴보기 위하여 금형은 강체로 가정하였다.

유한요소해석 시, 시편과 금형과의 마찰계수(μ)는 0.05 을 적용하였다. 이는 4 장에서 언급된 바와 같이, 실제 실험과 수 차례의 유한요소해석 결과를 비교하여 얻은 값이다.

본 연구에서 사용한 재료는 탄성-가공경화소성 모델로서 그 물성치는 Table 1 및 Fig. 4 와 같다. 이는 순수 지르코늄(pure-Zr)과 지르코늄 702 합금(Zr-702 alloy)을 변형률 속도 $10^{-3}/\text{sec}$ 로 각각 실온과 온간(350°C)에서 인장 실험하여 얻은 결과이다.

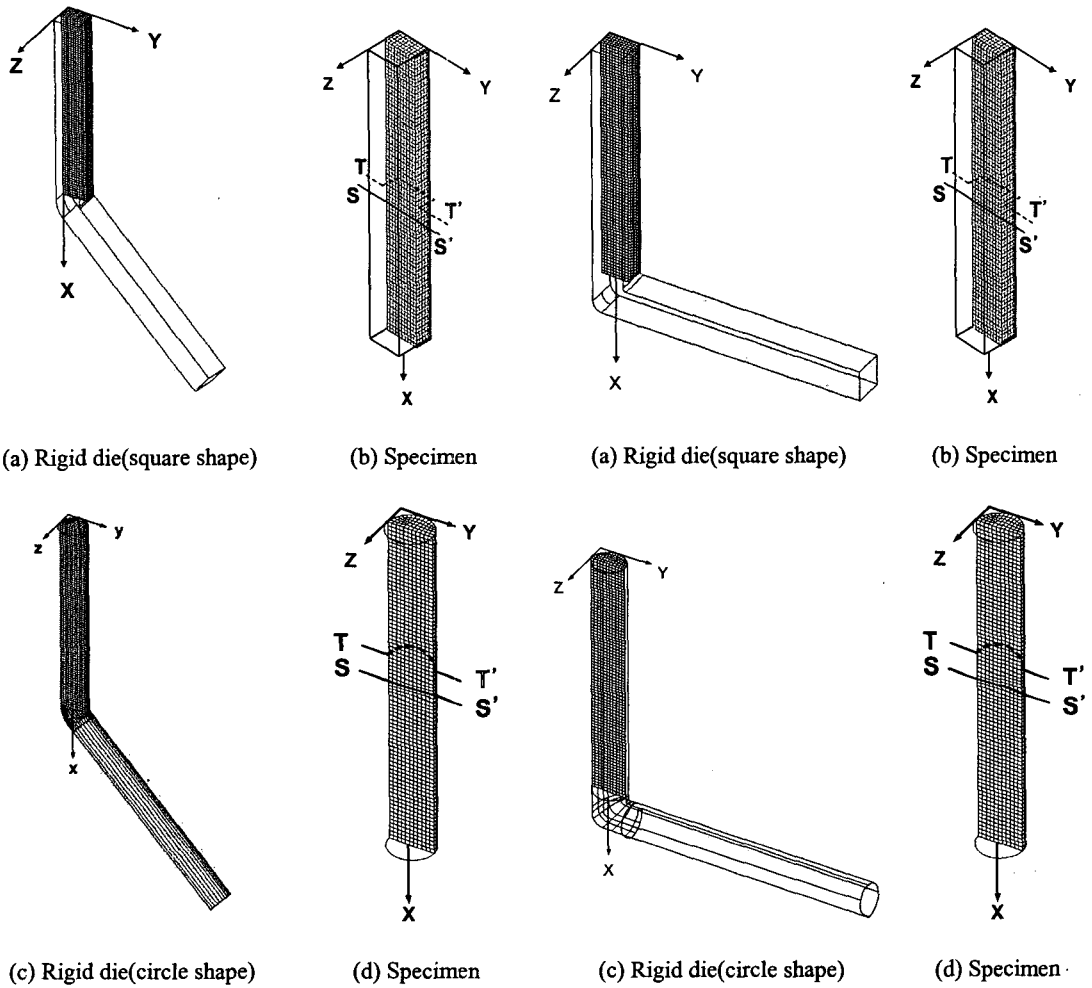


Fig. 2 FE model of ECAP($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ$)

Fig. 3 FE model of ECAP($\Phi=90^\circ, \Psi=20^\circ$)

Table 1 Material properties

Mechanical Properties	Materials	
	Pure-Zr (Room Temp.)	Zr-702 (350°C)
Young's Modulus(GPa)	28.73	6.98
Yield Strength(MPa)	180	116
Ultimate Tensile Strength(MPa)	270	195

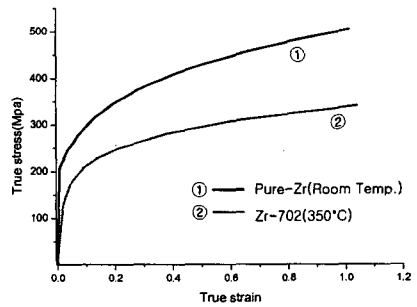
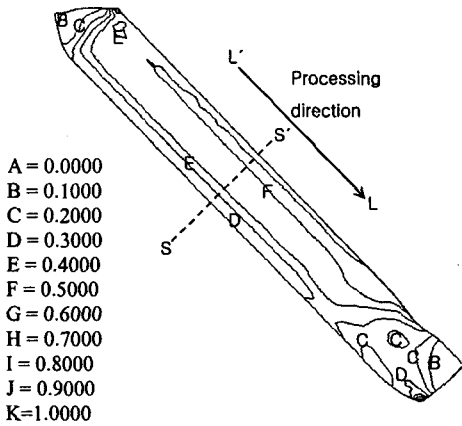
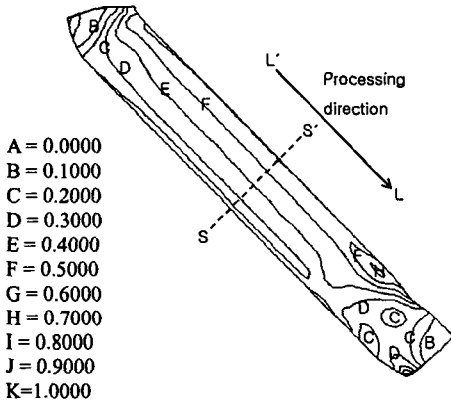


Fig. 4 True stress-strain diagram for specimen



(a) Square section



(b) Circular section

Fig. 5 Equivalent plastic strain distribution innerside ($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ, \mu=0.05$)

일반적으로 인장 실험으로는 본 계산에서 발생하는 유효변형률을 얻기 어려우므로 외삽 과정을 거쳐 변형률을 1 까지 구하여 사용하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

(Pure-Zr)

Fig. 5 는 교차각(Φ) 135° , 만곡각(Ψ) 45° 인 금형에 대해 마찰계수(μ)가 0.05 일 경우 실온에서 등통로 각압축공정을 통하여 변형된 시편 내부(S-S')에서 발생하는 상당소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 각각 나타냈다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이 시편 내부에서 사각 단면의 변형률 분포와 원형 단면의 변형률 분포가 전반적으로 비슷한 양상이 나타난다.

Fig. 6 에는 단면에서 상당소성변형률을 비교하였다. 기하학적 특성 때문에 사각 시편과는 다르

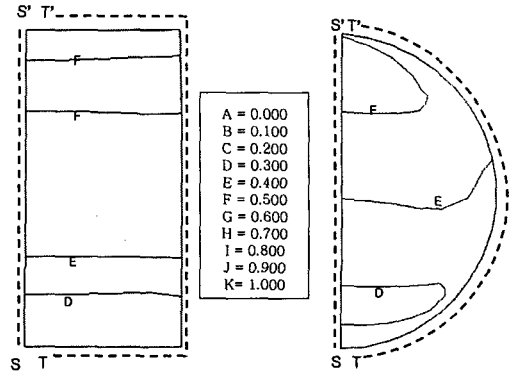
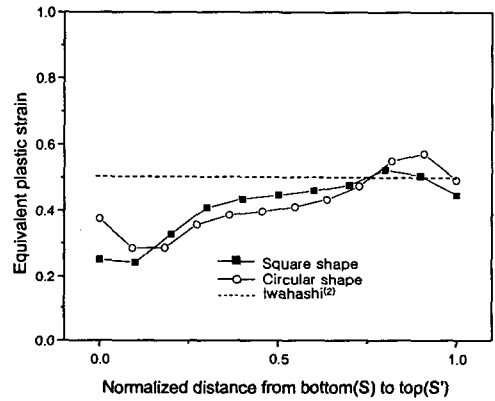
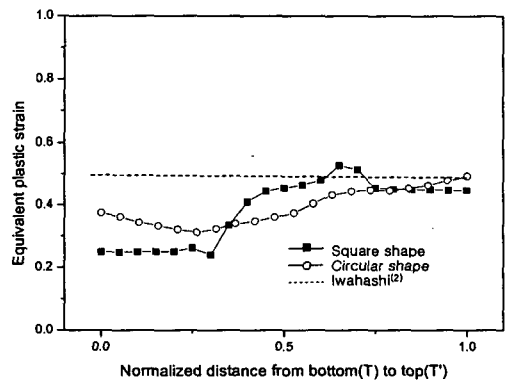


Fig. 6 Cross sectional equivalent plastic strain distribution ($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ, \mu=0.05$)



(a) Inner section S-S' ($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ, \mu=0.05$)



(b) Outer section T-T' ($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ, \mu=0.05$)

Fig. 7 Equivalent plastic strain distribution

게 원형 시편에서 시편 내부와 시편 외부의 상당소성변형률이 균일하지 않게 나왔다.

식 (2)를 통하여 두 단면의 평균 상당소성변형

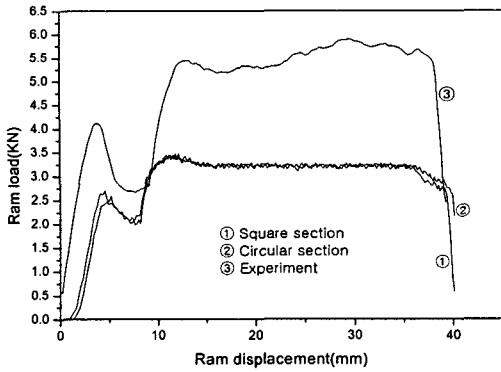


Fig. 8 Pressing load($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ, \mu=0.0$)

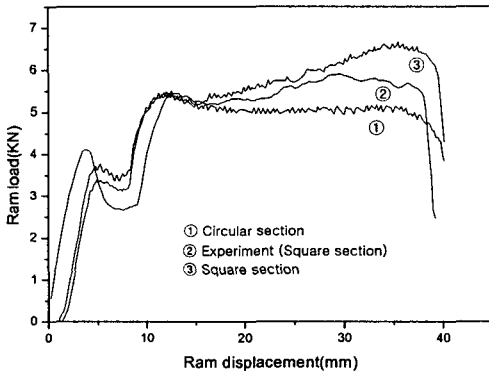


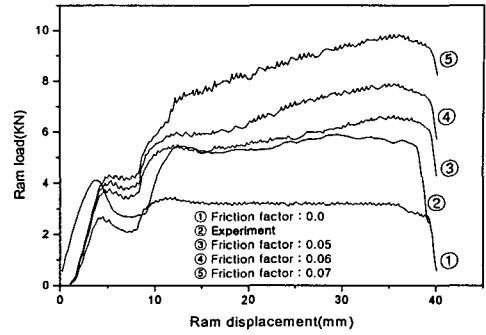
Fig. 9 Pressing load($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ, \mu=0.05$)

를 나타낸 결과 사각단면은 0.417, 원형단면은 0.406 으로 사각단면의 변형률이 2.7%정도 더 크게 나타났다. 이를 통하여 사각 시편에서 원형 시편보다 평균적으로 약간 큰 상당소성변형률이 나타남을 알 수 있다.

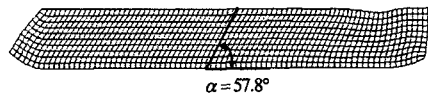
$$\epsilon_{average} = \frac{\sum A_i \cdot \epsilon_i}{\sum A_i} \quad (i: \text{요소번호}) \quad (2)$$

Fig. 7 은 각 시편 중앙 부분의 단면 내부(inner section S-S')와 외부(outer section T-T')에서 시편의 아랫면에서 윗면까지의 무차원 거리에 대한 상당소성변형률 분포를 나타낸다.

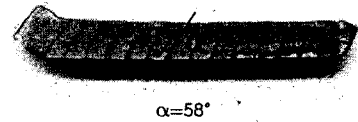
시편 아랫면과 윗면에서 사각 시편이 원형 시편보다 작은 상당소성변형률을 보이고, 시편 가운데에서는 반대로 사각 시편의 상당소성변형률이 더 높아졌다. Fig. 7 의 (b)를 통해 원형 시편과 사각



(a) Pressing load($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ$)



(b) Specimen after square shape



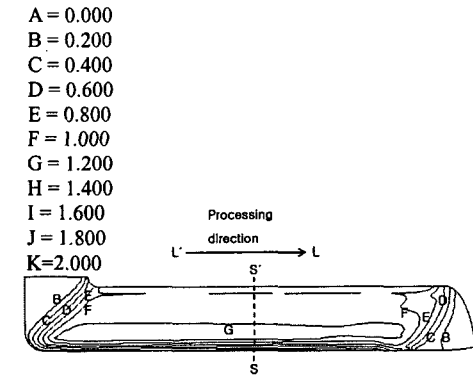
(c) Specimen after square shape(experiment)

Fig. 10 Pressing load($\Phi=135^\circ, \Psi=45^\circ$) & Deformed shape of specimen

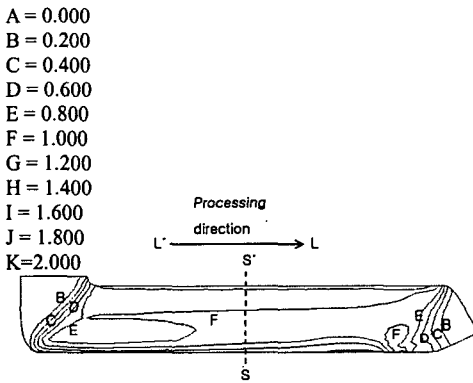
시편의 아랫면에서 저변형 영역이 발생함을 알 수 있다. 사각 시편이 원형 시편보다 다소 넓은 영역에서 저변형이 발생하고, 상당소성변형률은 원형 시편보다 사각 시편에서 더 낮게 나타난다. Iwahashi⁽²⁾가 제안한 상당소성변형률에 관한 식 (1)의 값인 0.453 은 Fig. 7(a)와 (b)에서 시편의 윗면의 상당소성변형률과 유사한 결과를 보였다.

Fig. 8 은 마찰계수(μ)가 0.0 인 해석에 의한 가공력과 램 이동거리를 나타낸다. 이는 마찰로 인한 손실되는 하중이 포함 되지 않은, 순수 변형에 의한 하중이기 때문에 실제 실험의 가공력과는 큰 차이를 보였다. 원형 시편과 사각 시편을 비교 시, 가공력은 약 3.25 KN으로 거의 차이가 나지 않았다. 식 (2)를 통한 시편 단면의 평균 변형률도 원형단면에서는 0.383, 사각단면에서는 0.380 으로 차이가 별로 없었다.

Fig. 9 에서 마찰계수(μ)를 0.05 로 하여 원형 시편과 사각 시편의 램 이동거리에 따른 가공력을 알아본 결과, 사각 시편이 원형 시편에 비해 더



(a) Square section



(b) Circular section

Fig. 11 Equivalent plastic strain distribution inner side ($\Phi=90^\circ, \Psi=20^\circ, \mu=0.05$)

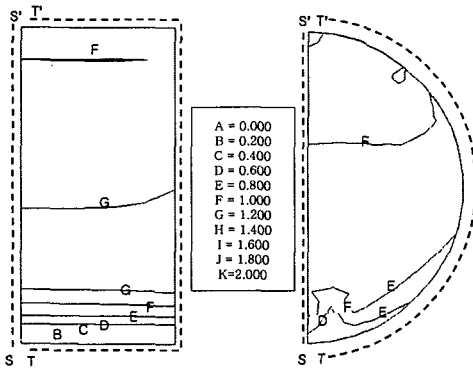
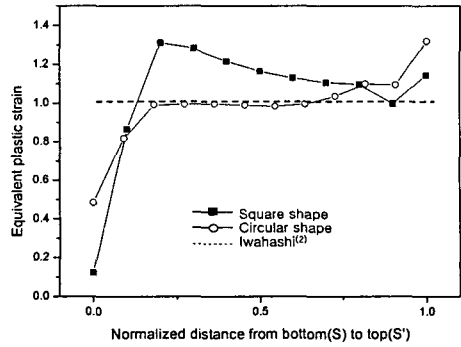
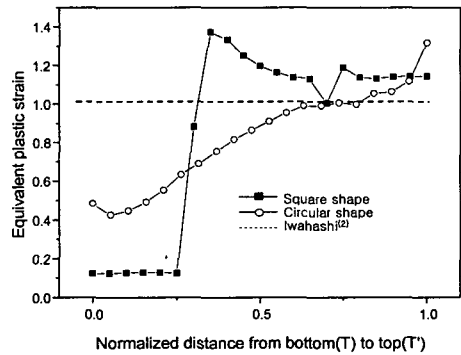


Fig. 12 Cross sectional equivalent plastic strain distribution

큰 가공력이 발생함을 확인할 수 있다. 여기서 가공력은 시편의 변형 하중과 마찰에 의한 손실 하중으로 이루어진다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이



(a) Inner section S-S' ($\Phi=90^\circ, \Psi=20^\circ, \mu=0.05$)



(b) Outer section T-T' ($\Phi=90^\circ, \Psi=20^\circ, \mu=0.05$)

Fig. 13 Equivalent plastic strain distribution

순수 변형에 의한 하중과 변형률은 거의 차이가 나지 않은 것으로 보아, 원형 시편과 사각 시편의 가공력 차이는 마찰력에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 8 의 마찰 계수가 0.0 인 해석은, 실제 실험과 많은 차이가 있으므로, Fig. 10 에서는 사각 시편의 마찰 계수(μ) 변화를 통한 가공력 비교와 해석 후의 시편 변형 모습과 실제 사각 시편 실험의 변형 모습을 비교를 통해 마찰 계수를 판단하였다.

Fig. 10(a)에서 마찰계수가 0.05 일 때, 실제 실험에서의 가공력이 비슷한 양상을 보이고, Fig. 10(b)의 유한요소해석 후 시편이 변형된 모습과 Fig. 10(c)의 실제 실험에서 변형된 모습을 비교하면 값이 거의 일치하므로, 마찰계수(μ)의 추정치인 0.05의 사용이 타당함을 알 수 있다.

(Zr-702)

Zr-702 에 대해서는 교차각(Φ) 90° , 만곡각(Ψ) 20° 인 금형을 사용하고 공정 온도는 350°C (온간)로 사용하였다. Fig. 12 에는 Zr-702 를 교차각(Φ) 90° , 만곡각(Ψ) 20° 의 금형에 대해 마찰계수(μ)는 0.05 일 때 온간(350°C)에서 등용로각압축공정을 통해 변형된 시편에서 발생하는 상당소성변형률(equivalent

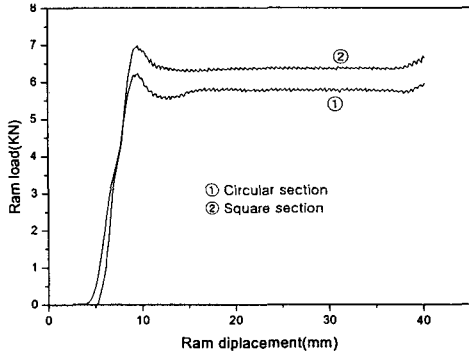


Fig. 14 Pressing load($\Phi=90^\circ, \Psi=20^\circ, \mu=0.0$)

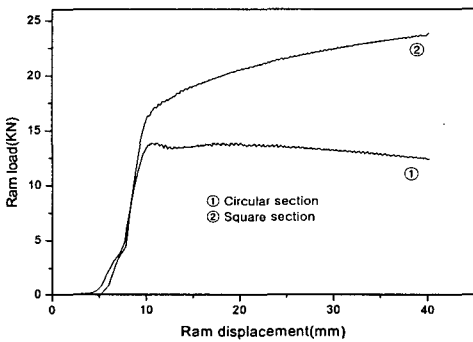


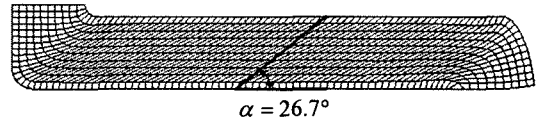
Fig. 15 Pressing load($\Phi=90^\circ, \Psi=20^\circ, \mu=0.05$)

plastic strain)의 분포를 나타내었다.

Fig. 11 에서 보는 바와 같이, 사각 단면의 변형률 분포와 원형 단면의 변형률 분포가 시편의 처음과 끝부분에서 비슷한 양상이 나타나지만, 가운데 부분에서는 사각 시편의 변형률이 더 높게 나타난다.

Fig. 12 는 단면에서의 상당소성변형률을 나타낸 것으로, 식 (2)를 이용하여 평균 변형률을 계산한 결과 사각 시편에서 1.088, 원형 시편에서 0.960 으로 사각 시편에서 13.3%정도 큰 평균 변형률이 나타났다.

Fig. 13 은 각 단면 중앙 부분의 내부(S-S')와 외부(T-T')에 일어나는 상당소성변형률의 분포를 나타냈다. 시편의 외부와 내부 모두 교차각(Φ) 135° , 만곡각(Ψ) 45° 인 금형 해석 때와 마찬가지로 시편의 아랫면과 윗면에서는 사각 시편에서 원형 시편보다 더 적은 상당소성변형률이 나타나고, 시편의 중앙부분에는 사각 시편이 더 크게 나타난다. Fig. 13(b)에서 보면 사각 단면과 원형 단면 모두 아랫부분에서 저변형이 발생하고, 원형에 비해 사각의 상당소성변형률이 0.2 정도 더 작게 나타난다. 저변형 영역에서 교차각(Φ) 135° , 만곡각(Ψ) 45° 인



(a) Specimen after square shape



(b) Specimen after circular shape(experiment)⁽⁸⁾

Fig. 16 Deformed shape of specimen

금형 해석보다, 원형 시편과 사각 시편의 상당소성변형률 차이가 더 크며, 더 좁은 영역이 발생한다.

교차각(Φ) 90° , 만곡각(Ψ) 20° 인 경우 원형 시편에서 Iwahashi⁽²⁾ 가 제안한 식 (1)에 의한 상당소성변형률 1.055 와 시편의 중간부 즉, 상당소성변형률의 값이 일정한 값을 보이는 정상 영역에서 비슷하게 나타난다.

Fig. 14 를 통해 마찰계수(μ)가 0.0 인 해석을 통한 순수 변형 가공력과 램 이동거리를 알아 본 결과, 교차각(Φ) 135° , 만곡각(Ψ) 45° 인 금형 해석과는 다르게 금형의 기하학적 차이로 인하여, 원형 시편에서는 약 5.7KN 이, 사각 시편에서는 6.5KN 으로 약 14% 정도의 차이가 발생하였다. 단면의 평균 변형률 또한 사각 시편에서 0.878, 원형 시편에서 0.817 로 약 7.5% 정도 사각 시편이 더 크게 나왔다.

Fig. 15 에는 공정 중 램에 작용하는 하중을 나타낸 것으로 사각 단면이 원형 단면에 비해 더 큰 가공력이 나타났다. 램 이동거리와 가공력을 가공 에너지로 표현을 하면 사각 단면 가공 시 666 KJ, 원형 단면에서는 431 KJ 이며, 약 55% 정도의 에너지 차이를 보인다. Fig. 14 에서 나타난 순수 변형에 의한 가공력의 차이를 제외한 추가적인 가공력 차이는 마찰에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 16(a)에서 3 차원 해석 후 시편이 변형된 모습과 Fig. 16(b)⁽⁸⁾의 실제 온간 실험에서 변형된 원형 단면 시편의 모습을 비교해 보면 그 값이 약 27° 로 일치함을 알 수 있다. 교차각(Φ) 135° , 만곡각(Ψ) 45° 와 비교해 보면 하중과 변형률이 높게

나타나고, 시편의 변형에 의해 기준면과 이루어지는 각(α) 역시 크다.

5. 결론

본 논문에서는 등통로각압축공정에서 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 인 경우 상온에서 pure-Zr 과 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20° 인 경우 온간에서 Zr-702 이 금형이 단면 형상이 사각형일 경우와 원형일 때를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 인 경우와 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20° 인 경우에서 사각 시편이 원형 시편보다 더 큰 평균 상당소성변형률을 얻을 수 있다.

(2) 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 인 경우와 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20° 인 경우에서 순수 변형에 의한 차이보다 금형의 마찰에 의한 차이에 의하여 사각 시편의 가공력이 원형 시편보다 더 크게 나타났다.

(3) 사각 시편과 원형 시편에서 가공력과 시편 단면의 평균 상당소성률은 밀접한 관계가 나타나며, 가공력이 크게 나타난 해석에서 시편 단면의 평균 상당소성률이 크게 나왔다.

(4) 마찰력을 0.0 으로 하는 순수 변형에 대한 해석 시, 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 인 경우는 사각 시편과 원형 시편에서 변형률과 가공력이 거의 차이가 나지 않은 반면, 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20° 인 경우에는 변형률과 가공력이 원형 시편보다 사각 시편에서 더 크게 나타난다.

(5) 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20°, Zr-702 온간 인 경우는 교차각과 만곡각에 의한 영향으로 사각 단면과 원형 단면 시편의 하부에서, 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 금형의 해석보다 더 좁은 영역에서 저변형이 발생한다.

(6) 교차각(Φ) 90°, 만곡각(Ψ) 20° 금형 해석과 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45° 금형 해석 모두 원형 시편보다 사각 시편에서 더 넓은 영역에서 저변형이 발생하고, 상당소성변형률 또한 사각시편이 작다.

후 기

본 논문은 2004 년 원자력 기초 연구 사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

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 of 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 Modeling 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) Kwon, G. H., Chae, S. W., Kwun, S. I., Kim, M. H., Hwang, S. K., 2001, "Frictional Effects on the Deformation Behavior of Materials and Die during Equal Channel Angular Pressing(ECAP) with Pure-Zr," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 6, pp. 182~187.
- (6) Bae, G. H., Kwon, G. H., Chae, S. W., Kwun, S. I., Kim, M. H., Hwang, S. K., 2002, "Finite Element Analysis of Deformation Behavior due to Material Properties during Equal Channel Angular Pressing," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 8, pp. 187~193.
- (7) Kim, H. S., 2001, "Finite Element Analysis of Equal Channel Angular Pressing Using a Round Corner Die," *Mater. Sci. & Eng.*, A415, pp. 122~128.
- (8) Yu, S. H., Chun, Y. B., Cao, W. Q., Kim, M. H., Chae, S. W., Shin, D. H. and Hwang, S. K., 2005, "Comparison of Equal Channel Angular Pressing and Cold Rolling in the Evolution of Microstructure and Texture in Zirconium," *J. Metals and Materials - International*, Vol. 11, No. 2, pp 101~112.