

## 다단 ECAP 공정에서 단면 형상의 영향 연구

고성광\* (고려대 대학원 기계공학과), 채수원(고려대 기계공학과),  
권숙인(고려대 금속공학과), 김명호, 황성근(인하대 금속공학과)

### A Study on the Effect of Sectional Shape Change during Equal Channel Multi-Angular Pressing Process

S. K. Ko, S. W. Chae(Mech. Eng. Dept. Korea Univ.), S. I. Kwun(Mate Sci. & Eng. Dept. Korea Univ.),  
M. H. Kim and S.K. Hwang(school of Mater Sci. & Eng. Inha Univ.)

#### ABSTRACT

Equal channel angular pressing has been employed to produce materials with ultra-fine grains that have high strength and high corrosion resistance properties. Along with the experiments, the finite element method has been widely performed to investigate the deformation behavior of specimen and the effects of process parameters of ECAP. In general, several steps of ECAP have been repeatedly executed. In this paper, the effects of sectional shape change have been investigated during ECMAP (RouteA, RouteC) with pure-Zr by using three-dimensional finite element analysis. The results have been compared with the experimental results.

**Key Words:** Equal Channel Multi-Angular Pressing(ECMAP, 다단등통로각압축), Three dimensional finite element method (유한요소법), pure-Zr (순수 지르코늄), Circular section(원형단면), Square section(사각단면)

#### 1. 서론

초미립 금속은 그 물리적 또는 기계적 성질이 매우 우수하여, 이를 제조하기 위한 여러 방법들이 전세계적으로 증가되고 있는 추세이다. 그 중, Segal<sup>(1)</sup> 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 미세화 할 수 있으며, 재료의 단면형상에 변화가 없어 수회의 반복 공정을 통해 높은 변형률을 얻을 수 있는 장점이 있다. 등통로각압축공정의 이러한 기술적 장점을 실제 산업현장에 적용하기 위하여 다양한 금속 소재들에서 공정 중에 발생하는 변형 거동의 특성 등에 대한 기초적인 분석<sup>(2-4)</sup>과 더불어 등통로각압축 공정에 대한 가공변수의 영향<sup>(5)</sup>등과 같은 실제적인 연구가 활발히 이루어 지고 있다.

등통로각압축공정에 대한 연구로는 유한요소법

을 이용한 이론해석<sup>(6)</sup>을 통해 2 차원 강소성 평면 변형률 등의 분석을 실시한 것이 있다. 이때 2 차원 모델의 한계상 등통로각압축공정에서 재료의 변형 거동에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단되는 시편 재료의 측면과 금형간의 측면마찰(side friction)에 의한 영향 등은 무시되었다. 최근에는 이러한 점을 보완하여 등통로각압축공정을 3 차원으로 실시하였다.<sup>(6)</sup>

ECAP 공정의 장점은 가공 후 재료의 단면이 가공 전과 같다는 것이다. 따라서 여러 번 재가공이 가능하고, 이러한 연속공정을 통해 더 큰 소성변형을 가함으로써 궁극적 목표인 초미립 금속을 얻을 수 있다. 이렇게 수 차례에 걸쳐 ECAP 공정을 반복하는 방법을 다단등통로각압축(ECMAP, Equal Channel Multi-Angular Pressing)공정이라고 한다. 다단 ECAP 공정에 대한 기존 연구<sup>(7)</sup>에서는 사용된 재료의 1 차 공정이 끝나기 전에 2 차 공정이 시작되어 두 공정이 동시에 진행되므로 실제보다 역압력의 효과가 과장되어 나타나는 문제가 있었다. 따라

서 본 연구에서는 1 차 공정이 완료된 후 2 차 공정이 진행되도록 하여 이러한 문제를 해결하고자 하였다. 이를 위해 다단등통로각압축공정에 대해 3 차원 유한요소해석을 이용하여 단면적과 길이, 부피가 동일한 시편에서 단면이 사각형일 경우와 원형일 경우를 비교하여 보고, 경로 A 와 경로 C 에서 순수 지르코늄(pure-Zr)의 변형거동 특성을 살펴보고 실험 결과와 비교 검증해 보고자 한다.

### 2. 다단등통로각압축공정

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,  $\Phi$ )이라 하며 외측부의 원호가 이루는 각을 만곡각(corner angle,  $\Psi$ )이라 이 두 개의 각은 재료의 변형거동에 있어 중요한 의미를 가지고

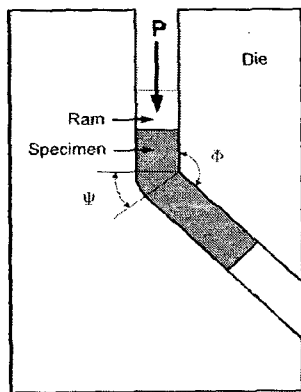


Fig.1 A schematic diagram of ECAP

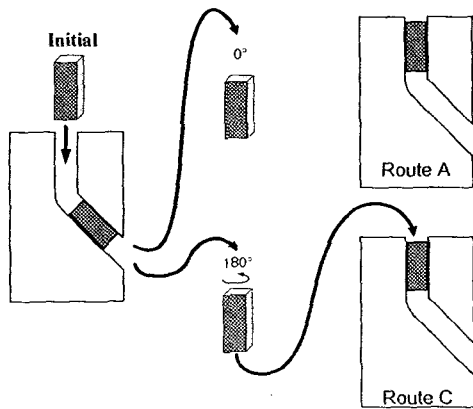


Fig.2 A schematic diagram of two ECMAP routes

있다.

Fig. 2 는 다단등통로각압축(ECMAP)에서 경로 A 와 경로 C 의 개략도이다. 그림과 같이 경로 A 는 1 차 ECAP 공정 후 시편의 방향을 변화 없이 동일한 방향으로 2 차 공정을 실시하고, 경로 C 는 1 차 ECAP 공정 후 시편의 방향을 180° 회전하여 2 차 공정을 실시한다. Iwahashi 등<sup>(2)</sup>은 등통로각압축공정에서의 변형량에 대해 교차각( $\Phi$ )과 만곡각( $\Psi$ )을 함께 고려하여 식(1)과 같은 일반적인 상당소성변형률(equivalent plastic strain)을 유도하였다. 그러나 식 (1)은 재료 내에서 전단변형이 균일하게 발생한다는 가정에 의한 것으로서 실제 등통로각압축공정에서 얻어지는 결과와는 큰 차이가 있다.

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

(N: 공정 횟수)

### 3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 순수 지르코늄(pure-Zr)의 다단등통로각압축공정 중 경로 A 와 경로 C 에서 금형단면이 사각형일 경우와 원형일 경우를 3 차원 유한 요소법을 이용하여 해석하고 이들 재료의 변형거동을 비교 분석하였다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS™ 를 사용하였으며 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 3(경로 A) 및 Fig. 4(경로 C)와 같다.

금형은 교차각( $\Phi$ ) 135°, 만곡각( $\Psi$ ) 45° 를 사용하였고 경로 A 와 경로 C 그리고 단면 형상의 변화에 따른 재료의 변형거동 특성을 보다 효율적으로 살펴보기 위하여 강체로 가정하였다. 시편은 사각 단면이 폭 5mm, 두께 5mm, 길이 40mm 이고 원형 단면은 단면적과 부피가 동일하도록 지름 5.642mm, 길이는 40mm 로 하였으며 시편의 형상이 모두 대칭인 점을 고려하여 시편의 두께 방향(z-방향)으로 절반만을 모델링 하였다. 시편의 요소는 8-절점 육면체 요소를 사용하였으며, 요소수는 사각단면인 경우 4000 개이고, 원형단면인 경우 4960 개이다. 유한요소해석시 금형과 시편과의 마찰계수( $\mu$ )는 0.06 으로 적용하였다. 이는 실제 실험과 수 차례의 유한 요소 해석결과를 비교하여 얻은 값이다.

본 연구에서 사용된 재료는 탄성-가공경화소성 모델로서 그 물성치는 Table 1 과 같다. 이는 순수지르코늄(pure-Zr)을 변형률 속도 10<sup>-3</sup>/sec 로 인장 실험하여 얻은 결과이다.

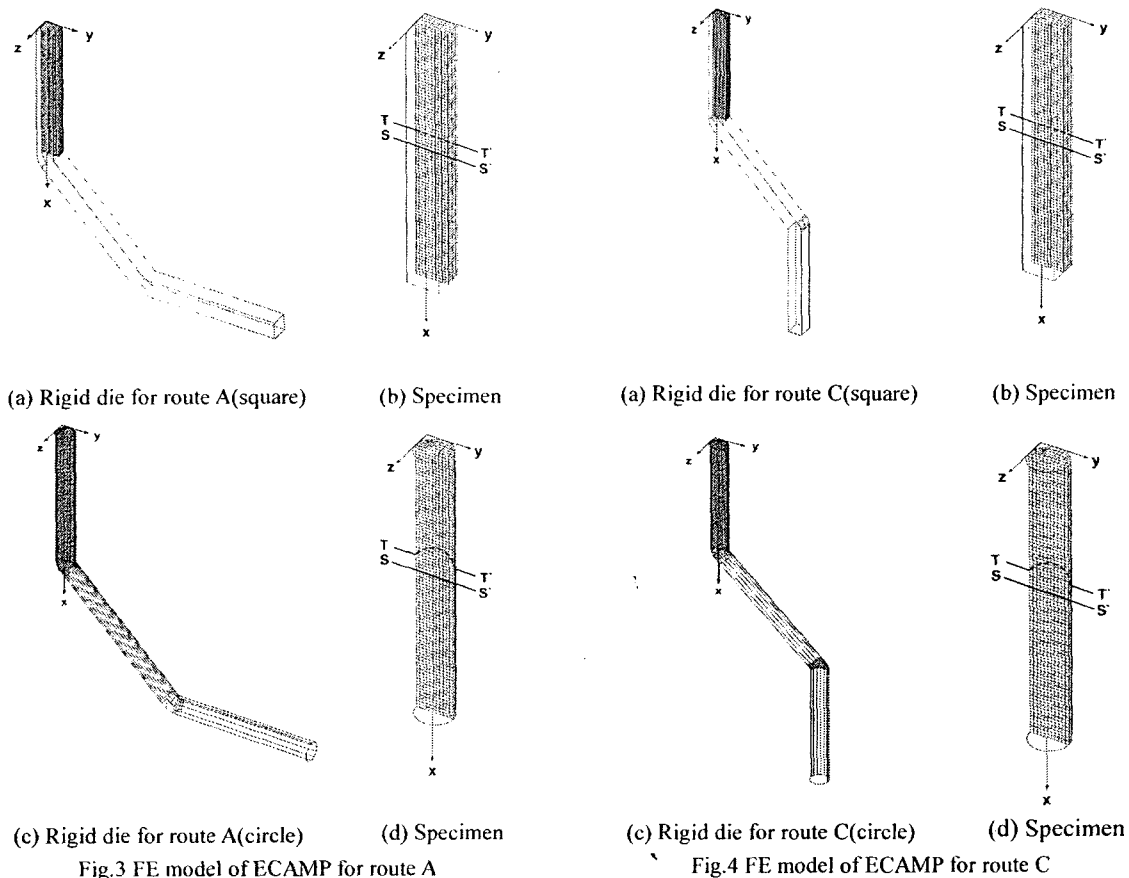


Fig.3 FE model of ECAMP for route A

Fig.4 FE model of ECAMP for route C

Table I Material Properties of pure-Zr

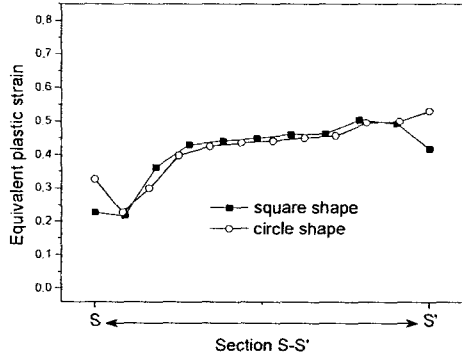
Young's modulus(MPa)	28,730
Yield Strength(MPa)	180
Ultimate Tensile Strength(MPa)	270

4. 해석 결과 및 고찰

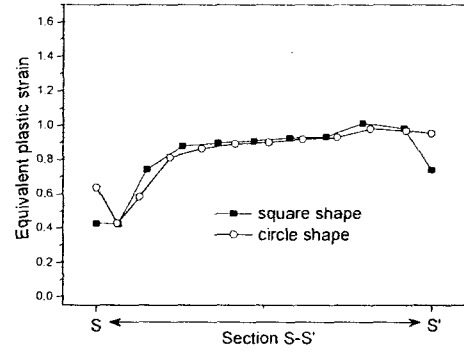
Fig. 5 는 교차각( $\Phi$ )  $135^\circ$  , 만곡각( $\Psi$ )  $45^\circ$  인 금형에 대해 마찰계수 ( $\mu$ )가 0.06 일 때 1 차 공정 후 사각시편과 원형시편 내에 발생한 상당소성변형률 (equivalent plastic strain)을 보여준다. Fig. 5(a) 는 각각 시편내부(S-S')의 상당소성변형률을 비교하고, Fig. 5(b) 는 시편외부(T-T') 즉 공정시 금형과 접촉이 발생하는 곳의 상당소성변형률을 비교한 그래프이다. 사각단면과 원형단면의 T-T'단면과 S-S'단면의 길이가 서로 다르므로, 이를 같은 길이로 변환하여 비교하였다. Fig. 5 와 같이 시편내부에서는 사각단면의 상당소성변형률이 전체적으로 조금 높게 나타나지만, 원형단면에서 시편이 금형과 접촉되는 부분인 양끝단에서는 사각단면보다 높게 나타나는 걸

알 수 있다. 시편외부(T-T')에서는 원형단면의 변형률이 눈에 띄게 높게 나타나는데, 이는 기하형상의 영향으로 사각단면보다 외측부의 부피가 작기 때문에 즉, 저항으로 작용하는 부피가 작기 때문인 것으로 예상된다. Fig. 6 은 공정 중 RAM에 작용하는 가공력(Pressing Loads)을 나타낸 것으로 굵은 선으로 나타낸 실제 실험값과 사각단면, 원형단면의 소요된 힘과 거동이 비슷하다. 따라서 0.06 으로 추정했던 마찰계수( $\mu$ )가 타당함을 알 수 있다.

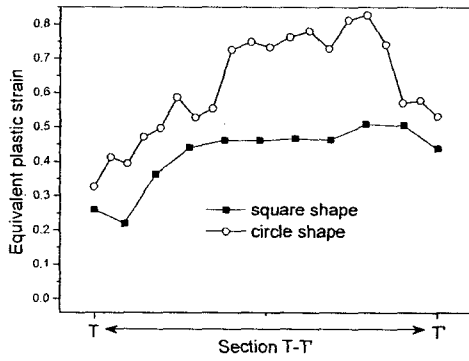
Fig. 7 은 다단등통로각압축 경로 A 공정 후의 결과들을 보여준다. 각 단면에서 변형이 시편의 상부에 집중되어 발생하였고, 시편의 하부에는 거의 변형이 일어나지 않아 전체적으로 매우 불균일하다. Fig. 7(a) 시편의 내부와 Fig. 7(b) 시편의 외부 변형률 그래프를 보면 더 자세히 알 수 있다. 또한 1 차 공정 때 나타났던 원형단면의 외측부 변형의 특이 현상 역시 관찰할 수 있다. Fig. 8 는 경로 A 의 실험값과 유한요소해석의 가공력을 비교한 그래프이다. 사각단면과 원형단면의 가공력은 비슷하나 원형단면의 경우 시편의 최초 끝부분이 금형의 교차된 곳을 통과한 후부터 가공력이 계속적으로 줄어든다.



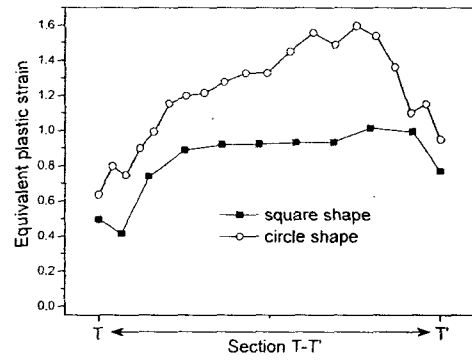
(a) Equivalent plastic strain of section S-S'



(a) Equivalent plastic strain of section S-S'



(b) Equivalent plastic strain of section T-T'  
Fig. 5 Equivalent plastic strain after 1st pass



(b) Equivalent plastic strain of section T-T'  
Fig. 7 Equivalent plastic strain after route A

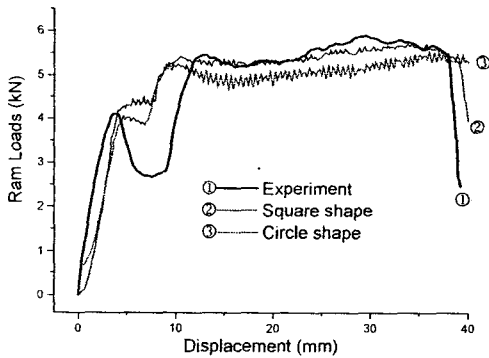


Fig. 6 Pressing load for 1st pass

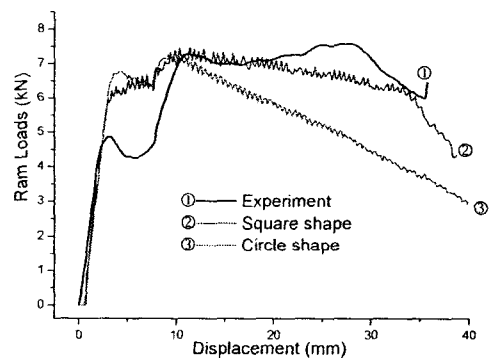
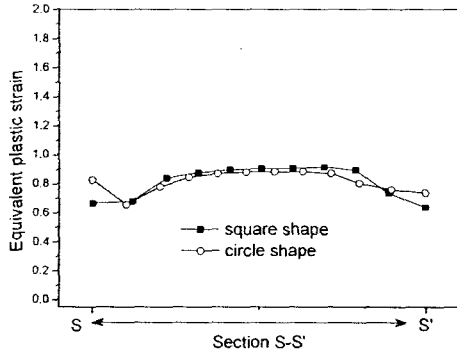


Fig. 8 Pressing load for route A

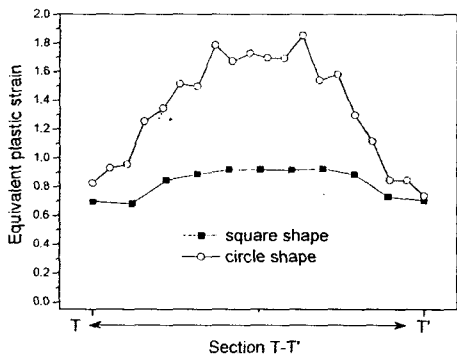
이는 시편의 외측부에서 변형률이 큰 폭으로 증가하는 것과 관계가 있다고 생각되며 저항력의 감소가 그 원인으로 예상된다.

Fig. 9 은 다단등통로각압축 경로 C 공정 후의 결과이다. 상당소성변형률 분포를 경로 A 와 비교해보면 전반적으로 균일하게 변형이 일어난 것을 알 수 있다. Fig. 9 (a) 시편외부에서(S-S')와 Fig. 9 (b) 시

편외부(T-T')의 그래프에서도 알 수 있듯이 금형과 마찰이 있는 곳을 제외한 모든 곳에서 변형률이 비슷한 것을 알 수 있고, 경로 A 와 같이 시편내부에서는 사각단면이, 시편외부에서는 원형단면이 높게 나타났다. Fig. 10 은 경로 C 의 램 하중을 비교한 그래프이다. 원형단면의 경우 경로 A 와 마찬가지로 하중이 점차적으로 떨어지는 경향을 볼 수 있다.



(a) Equivalent plastic strain of section S-S'



(b) Equivalent plastic strain of section T-T'

Fig.9 Equivalent plastic strain after route C

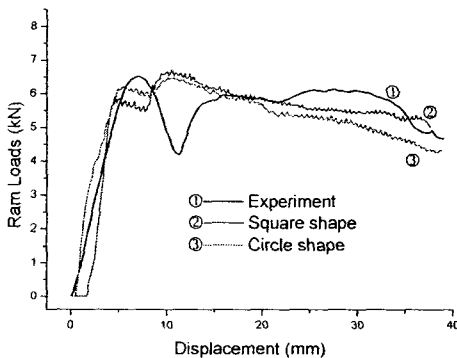


Fig.10 Equivalent plastic strain after route C

#### 4. 결론

본 논문에서는 다단등통로각압축공정시 단면형상의 영향을 알아보기 위해 교차각( $\Phi$ )  $135^\circ$ , 만곡각( $\Psi$ )  $45^\circ$  일 때 경로 A와 경로 C에서 사각단면과 원형단면에 대한 변형 거동 특성을 3 차원 유한요소해석을 통해 살펴보았으며, 실제실험과 비교 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2 차 공정 후 사각단면에서 발생하는 상당소성변형률은 경로 A의 경우 시편상부에 집중되어 일어나고, 경로 C의 경우 시편 전체에 고르게 분포하며, 경로 A와 경로 C의 램 평균값은 실제 실험값과 비슷한 값을 보인다.
2. 2 차 공정 후 원형단면의 경우 시편내부에서는 사각단면보다 변형이 적게 일어나고, 시편외부에서는 사각단면보다 두드러지게 높게 나타나며, 램 하중은 경로에 상관없이 비슷한 양상을 보인다.

#### 후 기

본 논문은 2004년도 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., "Plastic Working of Metals by Simple Shear," *Metally(Eng. Trans : Russian Metallurgy)* Vol.1, pp. 99-105, 1981.
2. Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T. G., "Principle of Equal-Channel Angular Pressing of the Processing of Ultra-Fine Grained Metals," *Scripta Mater.*, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146, 1996.
3. Prangnell, P. B., Harris, C. and Roberts, S. M., "Finite Element Modelling of Equal Channel Angular Extrusion," *Scripta Mater.*, Vol. 37, No. 7, pp. 983-989 1997.
4. Bowen, J. R., Gholinia, A., Roberts, S. M., Prangnell, P. B., "Analysis of the Billet Deformation Behavior in Equal Channel Angular Extrusion," *Mater. Sci. & Eng.* Vol(a) 287, pp. 87-99, 2000.
5. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황성근, "Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형거동과 금형에 미치는 영향," *한국정밀공학회지*, 제 18 권 제 6 호, pp. 136-140, 2000.
6. 노일주, 채수원, 권숙인, 김명호, 황성근, "ECAP 공정에서 금형의 단면형상이 공정에 미치는 영향," *한국정밀공학회 04 춘계학술대회 논문요약집*, pp. 81-81, 2004
7. 서민홍, 김형섭, 2001, "연속 다단 ECAP 공정의 유한요소 해석," *대한 금속·재료학회지*, 제 39 권 제 3 호, pp. 360-366