

# 등통로각압축(ECAP)공정에서 순수 지르코늄의 변형거동에 대한 3 차원 유한요소 해석

이강무\* · 권기환\* · 채수원† · 권숙인\*\* · 김명호\*\*\* · 황선근\*\*\*

(2003년 2월 20일 접수, 2003년 6월 30일 심사완료)

## Three Dimensional Finite Element Analysis of the Deformation Behavior of pure-Zr during Equal Channel Angular Pressing

Kang-Moo Lee, Gi-Hwan Kwon, 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), pure-Zr (순수지르코늄), Side Friction(측면마찰)

### Abstract

A lot of researches have been performed 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 effects of process parameters of ECAP. In this paper, pure-Zirconium is considered for ECAP process by using three-dimensional finite element analysis. The results have been compared with those of previous two-dimensional analysis and with the experimental results

### 기호설명

$\Phi$  : 교차각(channel angle)

$\Psi$  : 만곡각(corner angle)

### 1. 서론

초미립 금속은 입도가 100~500 nm 정도인 입자들로 구성되어 있으며 고강도(high strength), 초소성 변형(superplastic deformation), 고내식성(high corrosion resistance) 등과 같은 물리적 또는 기계적

으로 매우 우수한 특징을 가진 초금속(super metal)으로 알려져 있다. 이러한 초금속에 대한 관심이 전세계적으로 증가되고 있는 추세이며 이를 제조하기 위한 여러 가지 방법이 연구되고 있다. 그 중 Segal 등<sup>(1)</sup>에 의해 제안된 등통로각압축(ECAP, Equal Channel Angular Pressing) 공정은 다른 공정에 비해 재료에 상대적으로 낮은 압력으로 형상에 큰 변화없이 소성변형을 발생시켜 입자를 미세화할 수 있는 것으로 알려져 있다

최근 등통로각압축 공정에 대한 연구는 실제 실험과 더불어 유한요소법을 이용한 이론해석이 병행되고 있다.<sup>(2-8)</sup> 그러나, 유한요소해석을 통한 등통로각압축 공정에 대한 기존 연구들은 주로 재료를 2 차원으로 단순화시켜 재료의 변형거동 및 변형률 분석을 실시하여 왔다. 따라서 실제 실험에서 발생하는 시편의 측면과 금형 사이의 마찰의 영향을 고려한 연구는 거의 없는 실정이다. 그러나, 등통로각압축 공정 중 금형과 시편 재료의 측면 사이에 작용하는 마찰은 시편 재료의 변형거동

\* 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

에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 연구에서는 3 차원 유한요소법을 이용하여 원자로심의 소재로 사용되는 순수 지르코늄(pure-Zr)의 등통로각압축 공정에서 재료의 변형거동 특성을 살펴보고 이를 2 차원 해석의 결과 및 실험 결과와 비교 검증해 보고자 한다.

### 2. 등통로각압축 공정

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. 두 채널이 교차하는 곳에서 내각을 교차각(channel angle,  $\Phi$ )이라 하며 외측부의 원호가 이루는 각을 만곡각(corner channel,  $\Psi$ )이라 한다.

Iwahashi 등<sup>(2)</sup>은 교차각( $\Phi$ )과 만곡각( $\Psi$ )을 함께 고려하여 일반적인 상당소성변형률(equivalent plastic strain)식을 식 (1)과 같이 유도하였다. 그러나 식 (1)은 재료의 물성이나 마찰 등은 전혀 고려치 않고 단순히 금형의 형상을 고려하여 단면 내에서 재료의 변형률이 재료의 물성과 관계없이 일정하다는 전제하에서 유도된 것이다. 따라서, 재료에서의 순수전단 발생 가정에 의한 이론해석과 실제 ECAP 공정에서 얻어진 결과 사이에는 큰 차이점이 나타나게 된다.

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

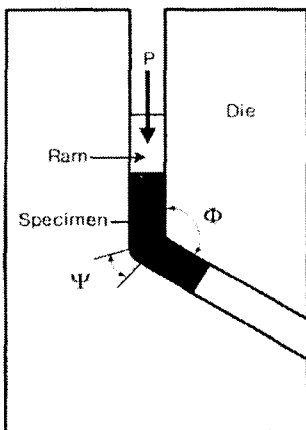


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP

### 3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 순수 지르코늄의 등통로각압축 공정에서 마찰에 따른 재료의 변형거동을 3 차원 유한요소법을 이용하여 해석하고, 이를 2 차원 해석 결과와 비교 분석하였다. 이를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS™를 사용하였으며 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 2 및 Fig. 3 과 같다.

금형은 교차각( $\Phi$ ) 135°, 만곡각( $\Psi$ ) 45°를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 시편은 2 차원 해석(Fig. 2)의 경우에 폭 5mm, 길이 40mm이고 3 차원 해석(Fig. 3)에서는 폭 5mm, 두께 5mm, 길이 40mm이며, 모델의 형상이 대칭인 점을 고려하여 시편의 두께 방향(z-방향)으로 절반만을 모델링 하였다. 마찰에 의한 2 차원과 3 차원 해석에서의 재료의 변형거동을 연구하기 위해 금형은 강재로 가정하였다.

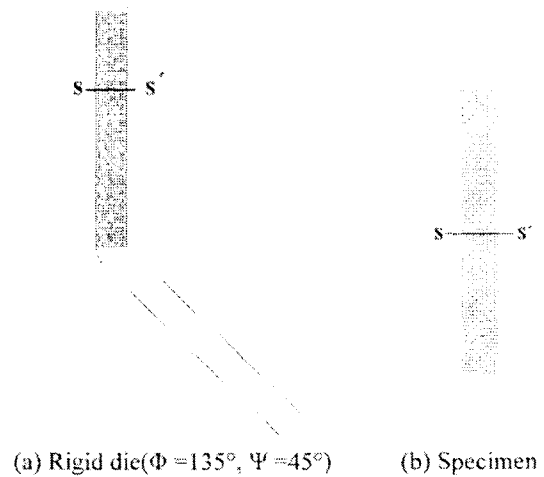


Fig. 2 Two dimensional FE model of ECAP

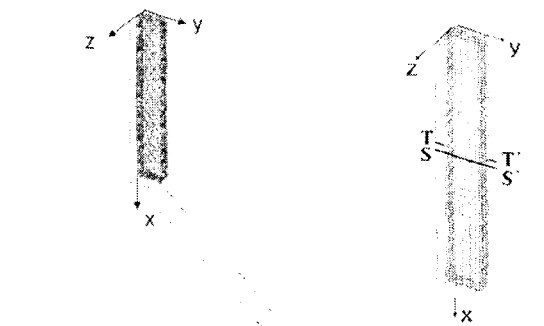


Fig. 3 Three dimensional FE model of ECAP

Table 1 Material properties of pure-Zr

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

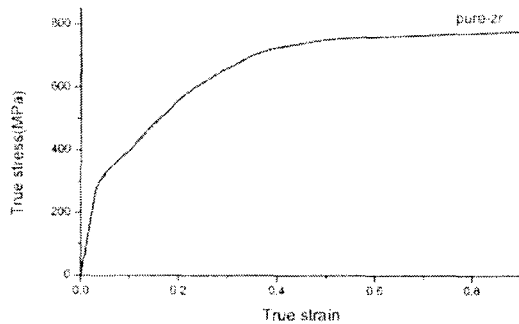


Fig. 4 True stress-strain diagram for pure-Zr

시편은 2차원 해석의 경우 4-절점 평면 변형률(plane strain) 요소를 사용하였으며, 3차원 해석의 경우 8-절점 육면체 요소를 사용하였다. 요소수는 2차원 해석의 경우 800개(10×80), 3차원 해석의 경우 4,000개(10×5×80)를 사용하였다. 유한요소 해석을 위한 마찰계수는 각각 0.0, 0.1, 0.15, 0.2를 적용하였으며, 이는 다양한 마찰계수를 적용한 수회의 해석 결과와 실제 실험을 통해 추정되는 마찰계수를 서로 비교하기 위함이다.

본 연구에서 사용한 재료는 탄성-가공경화소성 모델로서 그 물성치는 Table 1 및 Fig. 4와 같다. 이는 순수지르코늄을 프레스 속도가 1.5mm/min인 압축시험을 통해 얻은 결과이다

#### 4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 5와 Fig. 6은 20ton급의 인장/압축 시험기를 이용하여 상온에서 Pure-Zr에 대한 등통로각압축 공정을 실시한 후 금형 내부에 위치한 시편의 모습과 금형에서 분리된 시편의 모습이다.

Fig. 7은 교차각( $\Phi$ ) 135°, 만곡각( $\Psi$ ) 45°인 금형에 대해 마찰계수( $\mu$ )가 0.0, 0.1, 0.15, 0.2일 때 시편에서 상당소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 나타낸 것이다.

3차원 해석을 통해서 2차원 해석으로는 알 수 없었던 시편의 두께 방향(z-방향)에서의 변화를 조사하고자 하였다. 따라서 시편의 표면하 25mm 단면 내부(section S-S' of Fig. 3(b))와 시편의 단

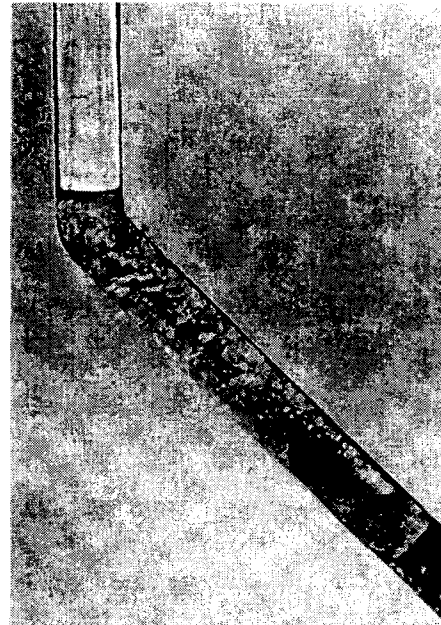


Fig. 5 Specimen and die during ECAP



Fig. 6 Specimen after ECAP

면 표면(section T-T' of Fig. 3(b))에서 각각 상당소성 변형률을 측정하였다.

2차원 단면에서의 상당소성변형률 분포를 보면 시편의 상부(S' 방향)에서 그 값이 시편의 다른 부분에 비해 비교적 크게 나타났으며, 3차원 해석 결과와 비교해 볼 때 전체적으로 3차원 단면의 내부 및 표면에서의 값들의 중간에 해당하는 값을 알 수 있다. 한편 3차원 단면에서 상당소성 변형률 분포는 단면의 두께 방향(z-방향)으로 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 단면 내부(S-S')에서의 분포를 보면 시편의 하부(S 방향)와 중간부에서는 2차원 해석결과에 비해 변형량이 작게 나타났으나, 상부(S' 방향)에서는 2차원 해석을 통해 얻은 값에 비해 매우 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 반면에 시편의 표면(T-T')에서는 하부(T 방향)와 중간 부에서 변형량이 2차원 해석에 비해 크게 나타났으나, 상부(T' 방향)에서는 2차원 해석에서 보다 작게 나타났다. 3차원 해석 결과에서 보면 단면내(S-S')에서 마찰계수( $\mu$ )가 0.1일 경우 Fig. 7(b)에서와 같이 변형률 분포가 0.11~0.85로 2차원 해석에서 0.12~0.44에 비해 그 차이가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

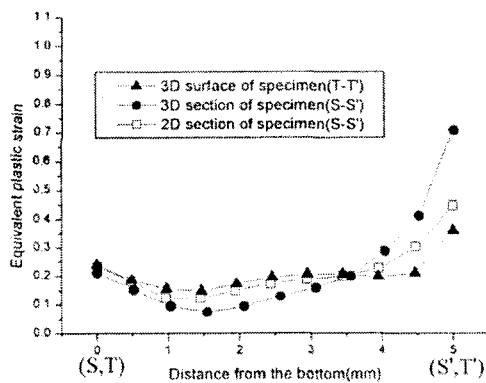
한편 시편내에서 평균 상당소성변형률은 마찰계수가 증가함에 따라 커진다. 즉, 2차원과 3차원 해석에서 평균변형률을 비교해 보면 2차원 해석

에서 마찰계수( $\mu$ )가 0.0, 0.1, 0.15, 0.2 이면 평균 상당소성변형률이 각각 0.214, 0.243, 0.260, 0.291 로 증가하고, 3 차원 해석에서도 시편의 표면(T-T)에서 0.207, 0.232, 0.250, 0.275 이며 시편의 단면 내부(S-S')에서도 이 값이 0.229, 0.266, 0.305, 0.308 로 마찰계수가 증가함에 따라 평균 상당소성변형률이 증가함을 알 수 있다. 따라서 2 차원 해석보다 3 차원 유한요소해석에서 더 큰 상당소성변형률이 발생함을 알 수 있다. 참고로, Iwahashi 의 상당소성변형률식(1)에서는 마찰과 무관하게 0.453 의 값을 얻는다.

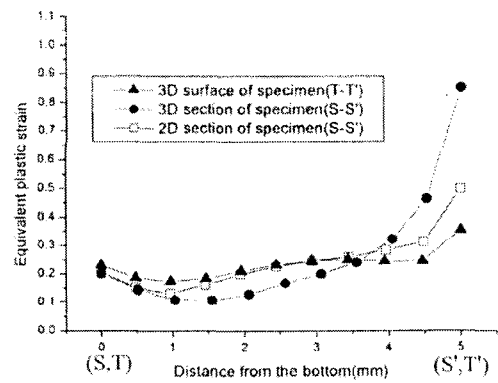
Fig. 8~Fig. 11 은 마찰 계수( $\mu$ )가 0.0, 0.1, 0.15, 0.2 일 때 2 차원 해석과 3 차원 해석에서 램이 약 20mm 정도 내려갔을 때의 변형된 모습을 보여준다. 마찰계수가 0.0 일 때 2 차원과 3 차원 해석의 변형 형태(Fig. 8)는 만곡부(A, A')에서 시편과 하부 금형 사이에 존재하는 틈의 크기와 시편 상단부와

상부 금형 사이의 간격(B, B')이 유사하여 2 차원과 3 차원 해석이 동일하게 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 실제 실험 결과를 통해서도 시편 상단부와 금형 사이의 간격이 존재함을 확인할 수 있으며, 이와 같은 결과는 마찰을 고려하지 않은 기존의 유한요소법을 이용한 연구 결과와 일치한다.<sup>(7,8)</sup>

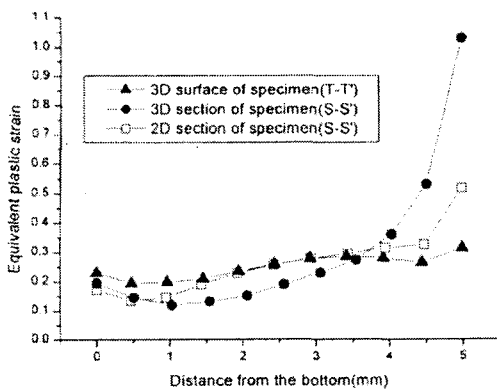
그러나 마찰계수가 증가하면서 2 차원과 3 차원 해석의 변형거동 형태가 조금씩 달라지고 마찰계수가 0.15 가 되면 2 차원과 3 차원 해석에서 변형거동 형태에는 많은 차이가 발생한다. 즉, 마찰계수가 0.15 이면 2 차원 해석의 결과(Fig. 10(a)) 시편과 만곡부에 존재하는 틈(C)의 크기가 현저하게 줄어들고 시편 상단부와 상부 금형간에 간격(D)이 거의 발생되지 않지만, 3 차원 해석의 결과(Fig. 10(b))에서 보면 시편과 만곡부에 틈(C)이 여전히 존재하고 시편의 상단과 상부 금형 간에 간격(D)



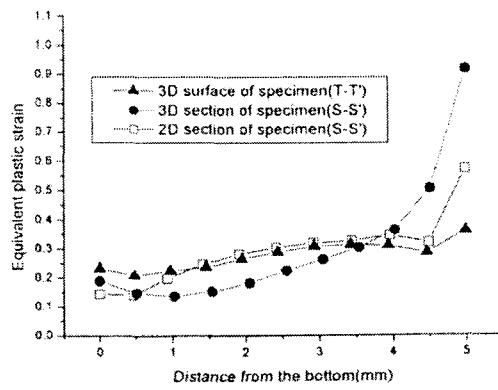
(a) Equivalent plastic strain( $\mu = 0.0$ )



(b) Equivalent plastic strain( $\mu = 0.1$ )



(c) Equivalent plastic strain( $\mu = 0.15$ )



(d) Equivalent plastic strain( $\mu = 0.2$ )

Fig. 7 Equivalent plastic strain at Section S-S' and T-T'

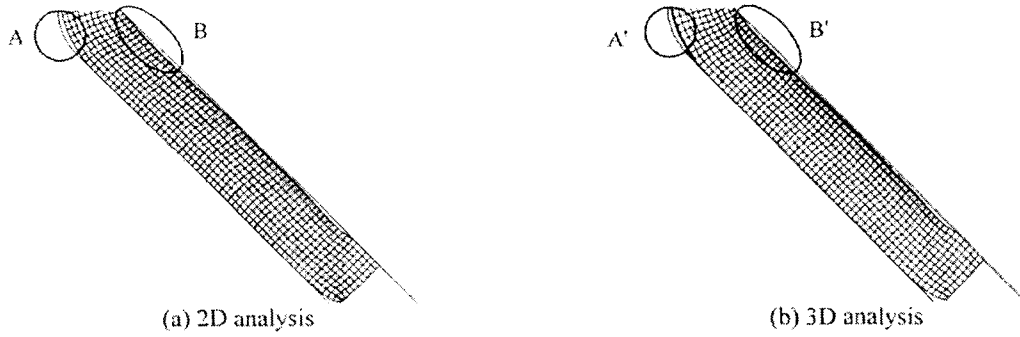


Fig. 8 Deformed mesh ( $\mu = 0.0$ )

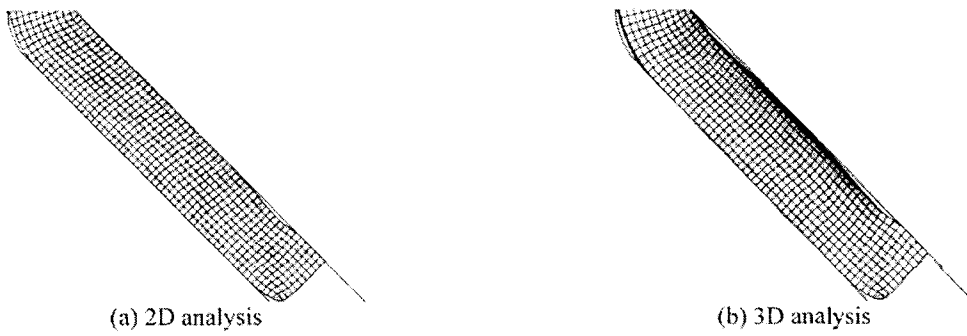


Fig. 9 Deformed mesh ( $\mu = 0.1$ )

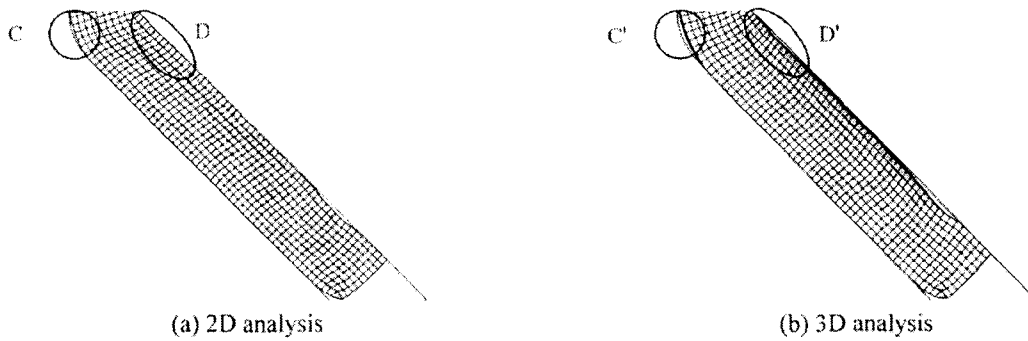


Fig. 10 Deformed mesh ( $\mu = 0.15$ )

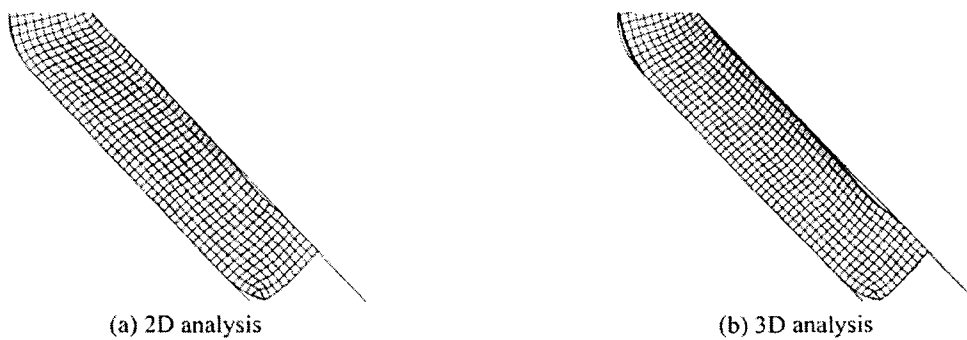


Fig. 11 Deformed mesh ( $\mu = 0.2$ )

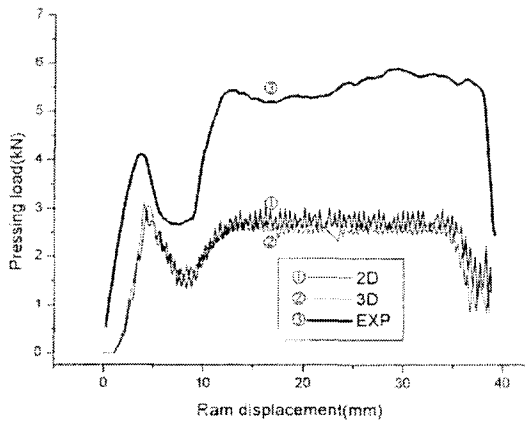
도 여전히 발생된다. 이것은 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 실제 실험 결과와도 일치하는 것으로서 마찰이 존재하는 등축로각압축 공정을 통해 얻은 시편은 상부 금형과의 사이에 틈이 발생됨을 확인할 수 있다.

이러한 사실은 마찰을 고려해서 등축로각압축 공정을 해석하기 위해서 시편과 금형을 2 차원의 평면 변형률(plane strain) 요소로 가정하여 해석을 실시해 온 기존 연구 결과<sup>15,9)</sup>가 실제의 실험 결과와 일치하지 않음을 나타내는 것이다. 즉, 마찰을 고려한 등축로각압축 공정의 경우 시편 재료의 측면과 금형과의 측면마찰(side friction)에 의해 변형 거동이 영향을 받게 된 것이다.

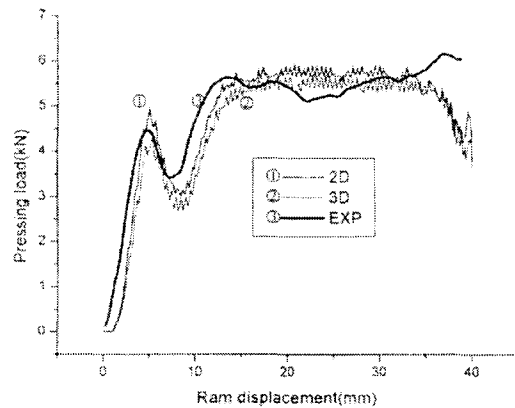
마찰이 없거나 작을 때는 측면마찰의 영향이 없거나 매우 미세하여 2 차원 해석과 3 차원 해석의 결과가 유사하게 나타난다. 그러나 마찰이 증가하면 2 차원 해석에서 고려되지 않았던 측면마찰의

영향으로 시편의 표면과 내부에서 변형거동이 서로 상이하게 진행되므로 단순히 2 차원 평면요소로 가정하여 실시한 해석 결과와 3 차원 해석의 결과가 서로 다르게 나타나는 것이다.

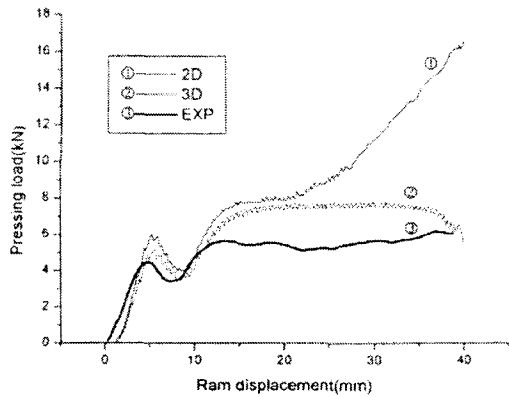
Fig. 12 는 교차각( $\Phi$ ) 135°, 탄곡각( $\Psi$ ) 45°인 금형에 대해 마찰계수( $\mu$ )가 각각 0.0, 0.1, 0.15, 0.2 일 때 이동 변위에 따라 램에 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 마찰계수( $\mu$ )가 0.0 인 경우(Fig. 12(a))와 마찰계수( $\mu$ )가 0.1 인 경우(Fig. 12(b))에는 2 차원 해석과 3 차원 해석을 통해 얻어진 하중이 매우 유사한 형태를 나타낸다. 반면에 마찰계수( $\mu$ )가 0.15, 0.2 인 경우(Fig. 12(c), (d))에 2 차원 해석과 3 차원 해석을 통해 얻어진 하중 간에는 많은 차이가 있었다. 특히, Fig. 12(c)와 Fig. 12(d)에서 2 차원 유한요소해석을 이용한 기존 연구<sup>9)</sup>에서는 마찰계수가 커질수록 역압력(back pressure) 효과가 커져서 하중이 증가한다고 했으나, 3 차원 해석의 결과에서



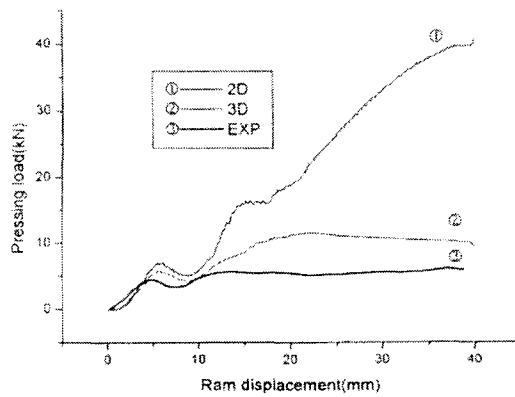
(a) Pressing load ( $\mu=0.0$ )



(b) Pressing load ( $\mu=0.1$ )



(c) Pressing load ( $\mu=0.15$ )



(d) Pressing load ( $\mu=0.2$ )

Fig. 12 Relationship between pressing load and ram displacement

는 역압력(back pressure) 효과를 관찰할 수 없었다. Fig. 12 에서 굵은 선으로 나타난 ③번 곡선은 20 ton 급의 인장 압축 시험기로 실제 실험을 수행하여 구한 결과이다. 시편과 금형의 마찰을 줄이기 위해 입도가 0.25  $\mu\text{m}$  인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말로 시편과 금형의 채널을 연마하고 ECAP 가공시에는 시편과 금형의 채널면에  $\text{MoS}_2$  spray 윤활제를 도포하여 실험을 진행하였으며, 이와 같은 방법으로 실험하여 얻어진 결과는 마찰계수( $\mu$ )를 0.1 로 가정하여 유한요소해석한 결과와 유사하여 실제 실험에서의 마찰계수( $\mu$ )는 이와 유사할 것으로 추정된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 등통로각압축 공정에 대한 3 차원 유한요소 해석을 통해 마찰에 의한 변형기동의 특성을 살펴보았으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 교차각( $\Phi$ )  $135^\circ$ , 만곡각( $\Psi$ )  $45^\circ$  인 금형에서 시편 재료내에 발생하는 상당소성변형률은 2 차원 유한요소해석 보다 3 차원 유한요소해석에서 더 큰 값을 나타낸다.
- (2) 3 차원 유한요소법을 이용한 등통로각압축 공정에서 단면 표면에서의 상당소성변형률 분포는 2 차원 해석 결과와 유사하지만, 단면 내부에서는 분포의 차이가 훨씬 크고 불균일하다. 마찰계수가 증가할수록 이러한 경향은 뚜렷해진다.
- (3) 2 차원 유한요소해석을 이용한 기존 연구에서는 마찰이 작용하면 상부 금형과 소재의 접촉면적이 증가하고 역압력(back pressure) 효과가 커진다고 하였으나 실제 실험과 3 차원 해석 결과 금형과 소재 사이의 간격은 계속 존재하며 역압력(back pressure) 효과는 관찰되지 않았다.

### 후 기

본 논문은 2002 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) Kwon.G.H., Chae.S.W., Kwun.S.I., Kim.M.H., Hwang.S.K., 2001, "Effects of Die Deformation and Channel Angle on Deformation Behavior of Materials During Equal Channel Angular Pressing with Pure-Zr," *Trans. Of KSME*, Vol. 25, No. 11, pp. 1751~1758.
- (6) Seo.M.H., Kim.H.S., Hong.S.I., 2000, "Finite Element Analysis of Equal Channel Angular Pressing," *J.Kor.Inst.Met.&Mater.* Vol. 38, No. 1, pp. 136~140.
- (7) Kim. H.S., 2001, "Finite Element Analysis of Equal Channel Angular Pressing Using a Round Corner Die," *Mater. Sci. & Eng.*, A315, pp. 122~128.
- (8) Srinivasan. R., 2001, "Computer Simulation of the Equichannel Angular Extrusion(ECAE) Process," *Scripta Mater.*, Vol. 44, No. 1, pp. 91~96.