

# 유한요소법을 이용한 ECAP 공정에서 재료의 물성치에 따른 변형 거동 분석

배강호\*, 권기환\*, 채수원\*\*

## Finite Element Analysis of Deformation Behavior due to Material Properties during ECAP

Gang Ho Bae\*, Gi Hwan Kwon\* and Soo Won Chae\*\*

### ABSTRACT

A lot of investigations have been made in recent years on the equal channel angular pressing (ECAP) which produces ultra-fine grains (UFG). Among many process parameters such as channel angles, frictions, die deformations and materials employed, the effects of material properties on the deformation behavior have been investigated. The finite element method (FEM) has been used to investigate this issue.

**Key Words** Equal channel angular pressing (ECAP, 등통로각 압축), Finite element method (유한요소법), pure-Zr (순수 지르코늄), Material property(재료의 물성치), Deformation behavior (변형거동)

### 1. 서론

일반적으로 공업 재료의 강화 기구를 사용하여 강도를 증가시키면 재료의 인성은 반대로 줄어든다 따라서 주어진 금속학적 조건에서 재료가 고강도와 고인성을 모두를 나타내도록 하는 개선 방법이 필요하다 미세 결정립 재료에 있어서 강도와 인성의 우수성은 담금질(quenching)과 뜨임(tempered) 강합금의 미세조직을 노멀라이징(normalizing) 처리한 결정 조직보다 우수하다라는 견해가 수년동안 인식되어 왔으며 또한 검증되었다<sup>(1)</sup> 따라서 소재의 결정립을 미세화시켜 초 미립 금속을 얻는 방법에 대한 연구가 현재 진행되고 있다 최근 재료에 극심한 소성변형을 가할 수 있는 방법으로 CEC(Cycle Extrusion Compression), TS

(Torsion Straining under high pressure), ARB (Accumulative Roll-Bonding), ECAP(Equal Channel Angular Press)과 같은 극한 가공법이 알려져 있으며, 이들 중에서 ECAP 공정은 다른 공정들에 비해 다음과 같은 장점이 있다 즉, TS 공정이 풀러져 접해 있는 시료 부위와 시료 내부 간의 소성 변형량이 크게 다른데 비해 ECAP 공정은 시료 내부까지 극심한 소성변형이 가능하며, 또 ARB 공정이 청정 상태를 유지하기 위한 분위기 및 청정 조건의 제어가 매우 까다로운데 비해 ECAP 공정은 광범위한 온도 범위 안에서 작업이 가능할 뿐만 아니라 공정 중에 정확한 온도 제어가 가능하므로 소성변형시 온도의 제어도 용이하며, 또한 ECAP 공정은 여러 공정 변수들(온도, 압력 분위기, 가공 수, 가공 방향 등)의 제어가 용이하고 이것들

\* 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 고려대학교 기계공학부

의 조합에도 용이하다

그러나 ECAP 공정은 이러한 기술적 장점에도 불구하고 전 세계적으로 아직 연구단계에 머물러 있기 때문에 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 ECAP 공정에서의 여러 가지 금속 소재의 변형 거동에 대한 연구 등과 같은 기초적인 고찰과 더불어 ECAP 공정에 대한 가공 변수들의 영향 등과 같은 보편적인 연구가 필요하다. 국제적으로 이러한 시도가 AI 및 IT 강국의 재료에 대해 심도 있게 연구되고 있다

## 2. ECAP 공정

ECAP 가공은 Segal 등<sup>(2)</sup>에 의해 처음 제안된 방법으로, 다결정 금속을 특별히 고안된 금형을 통과시켜 재료에 극심한 소성변형을 가함으로써 재료의 결정립을 미세화시키는 방법이다. ECAP 가공에 사용되는 금형은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 거의 동일한 단면을 갖는 두 채널(channel)을 일정한 각으로 교차하는 특수한 형태를 가진다

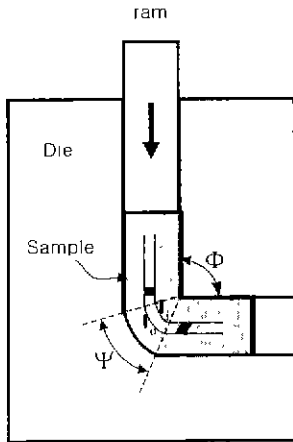


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP.

두 채널이 교차하는 부분에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 두 개의 각을 정의할 수 있다. 이 중에서 ECAP 공정에서 가장 중요한 변수는 두 채널이 이루는 각으로, 이를 교차각( $\Phi$ )이라 정의한다. 그리고 두 채널이 교차하는 외벽 부분에 존재하는 원호를 정의하는 각을 만곡각( $\Psi$ )이라 한다. ECAP 가공에서 재료는 두 채널이 교차하는 부분을 통과하면서 극심한 소성 변형을 한다. Segal 등

<sup>(2)</sup>은 ECAP에 의한 변형을 균일한 단순 전단 (simple shear) 변형으로 취급하여 이론적 해석을 최초로 제시하였다. 그는 만곡각( $\Psi$ )이  $0^\circ$ 인 금형에 대하여 금형과 재료의 마찰을 무시한 채 전단 변형률과 교차각( $\Phi$ )의 관계식을 유도하였다. 그리고 Iwahashi 등<sup>(3)</sup>은 ECAP 공정의 보다 일반적인 경우에 대하여 변형률을 이론적으로 계산하였다. 그는 금형과 시편의 마찰을 무시하고 시편이 채널의 교차 부근을 지날 때 경로  $l_1$ 와  $l_0$ 의 속도가 같다고 가정하고 이로 인하여 경로  $l_1$ 와  $l_0$  사이에 발생하는 단순한 경로차로써 전단 변형률을 수식화하였다<sup>(12,13,14)</sup>. 따라서 Iwahashi의 ECAP 공정에 대한 순수 전단이론은 식 (1)과 같이 금형의 교차각( $\Phi$ )과 만곡각( $\Psi$ )에 대한 함수이다. 특히 만곡각( $\Psi$ )이  $0^\circ$ 인 ECAP 금형에 이론 값은 Segal의 이론 값과 동일하다.

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi + \Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi + \Psi}{2}\right) \quad (1)$$

Iwahashi의 순수 전단 이론식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 교차각( $\Phi$ )과 만곡각( $\Psi$ )이 작을수록 전단 변형률이 증가한다. 그러나 순수 전단 이론에서 이루어진 가정으로 인하여 실제 ECAP 공정에서 얻어진 결과와 이론식에서 얻어진 값에는 차이가 발생하는 것으로 추정되고 있다. 특히 소성변형은 시편의 단면 전체에 걸쳐 균일하게 발생하는 것이 아니라 외벽 근처에서의 변형량은 상대적으로 감소하는 등과 같이 특정 영역에서는 상이한 형태의 변형 거동이 발생한다<sup>(4)</sup>. 따라서 보다 더 정확한 시편의 변형 거동을 예측하기 위해서 ECAP 공정에 대한 유한요소해석이 최근 들어 시도되고 있다. 이와 같은 ECAP 공정에 대한 연구는 Prangnell 등<sup>(5)</sup>이 1997년 처음으로 2차원 강소성 평면 변형률 요소를 사용한 알루미늄 시편에 대하여 ECAP 금형의 만곡각을  $0^\circ$ 로 하고 교차각이  $90^\circ$ 인 경우와  $100^\circ$ 인 경우를 DEFORFORM<sup>TM</sup>으로 마찰과 무마찰 조건에서 해석하였다. 그 후로 다음과 같은 연구들이 국내외적으로 이루어졌다. 김희수 등<sup>(4)</sup>은 2차원 평면 변형률 요소를 사용하여 ABAQUS<sup>TM</sup>로 금형과 시편의 마찰과 시편의 가공 경화를 무시하고 교차각  $90^\circ$ 에서 만곡각의 변화에 따른 시편의 변형 거동을 분석하였으며, Bowen

등<sup>(11)</sup>은 2 차원 강-가공경화소성 평면 변형을 요소를 사용한 알루미늄 시편에 대하여 만곡각을 0°로 하고 교차각이 90°인 경우와 120°인 경우의 ECAP 공정을 DEFRORM<sup>TM</sup>으로 마찰과 무마찰 조건에서 해석하였다. 서민홍 등<sup>(7,8)</sup>도 2 차원 강-가공경화소성 평면 변형을 요소로 사용한 알루미늄 시편에 대하여 만곡각 90°, 교차각 90°인 경우의 ECAP 공정을 DEFRORM<sup>TM</sup>으로 마찰과 무마찰 조건에서 해석하였다. 그리고 Liu 등<sup>(11)</sup>은 H62(Cu-38%Zn)에 대하여 마찰을 고려하여 CCE(changing channel extrusion) 공정과 다관 ECAP 공정을 해석하였다. 권기환 등<sup>(12,11)</sup>은 pure-Zr에 대하여 금형의 교차각과 만곡각의 변화에 따라 ECAP 공정을 ABAQUS<sup>TM</sup>으로 해석하였으며 마찰이 재료와 금형에 미치는 영향을 디각도로 분석하였다. 박상석 등<sup>(11)</sup>도 평면 변형을 요소로 사용한 pure-Zr에 대하여 ECAP 공정에서의 마찰 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 ECAP 공정에서 물성치에 따른 시편의 변형거동의 차이를 알아보기 위하여 기존에 주로 연구된 알루미늄과 최근 연구되고 있는 pure-Zr<sup>(12,13,14)</sup>을 사용하여 ABAQUS<sup>TM</sup>로 교차각 90°, 만곡각 0°인 금형에 대하여 해석하였다. 또한 재료의 완전소성(perfect plastic), 탄-가공경화소성(elastic-hardening plastic) 및 근사 강-가공경화소성(rigid-hardening plastic) 물성치에 따른 변형거동의 차이를 분석하였다. 여기서 사용된 금형은 강체로 가정하여 물성치에 따른 재료의 변형거동 연구에 초점을 맞추었다. 이 논문에서 쓰여진 용어의 일관성을 위해 참고문헌<sup>(9)</sup>의 방식을 따랐다.

### 3. 유한요소해석과 실험

변형의 이론해석을 위해서 재료의 물성치를 단순화하는 경우가 있다. 이는 실제 재료의 소성곡선은 정확하게 수식표현하기가 어려울 뿐 아니라 수식표현이 가능하더라도 그러한 복잡한 수식을 사용한 이론해석이 부득이 어려울 뿐더러 얻어진 이론치가 단순가정의 경우에 비해 그다지 정확, 신뢰할 만한 수준이 아니기 때문이다. 실제로 변형률( $\epsilon$ )이 0.1을 넘게 되는 큰 변형률을 다룰 때는 탄성변형률을 무시하는 경우가 많다. 그리고 가공경화를 무시하는 경우 이를 완전소성이라 하는데 열간소성기공 등의 고온에서의 변형은 실제로 원소소성에 가깝기 때문에 이러한 근사화한 가

정으로 이론 해석이 많이 시도 되고 있다<sup>(9)</sup>. ECAP 공정에서 재료의 물성치에 따른 시편의 변형 거동의 차이를 고찰하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 pure-Zr과 Al 1100-0에 각각 완전소성과 가공경화소성을 적용하였다. 가공경화소성에서는 실제 탄성계수(Young's Modulus)의 10배를 적용하여 강-가공경화소성에 가까운 효과를 주고자 시도하였으며 본 논문에서 근사 강-가공경화소성이란 용어를 사용하였다. 그리고 Fig. 3에서 나타나 있는 것처럼 교차각 90°, 만곡각 0°인 ECAP 금형을 사용하여 Al 1100-0과 pure-Zr 시편에 대하여 유한요소법으로 해석하였다. 유한요소 해석에서 시편들은 2 차원 4 절점 평면 변형률 요소로 모델링하였으며, 금형은 강체요소로 모델링하였다.

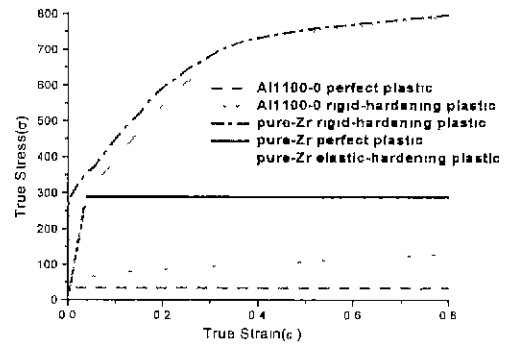


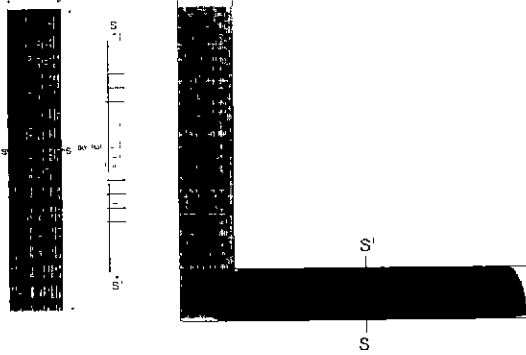
Fig. 2 Material properties of pure-Zr and Al.

해석에 사용된 시편의 크기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 가로 5mm, 세로 30mm 이고, 이를 모델링하기 위하여 가로 50 개, 세로 300 개, 총 15000 개의 평면 변형률 요소를 사용하였다. 유한요소 해석에 적용된 경계 조건으로는 램을 아래로 30mm 만큼 이동하도록 변위 경계를 주고 금형과 시편의 마찰은 무시하였다.

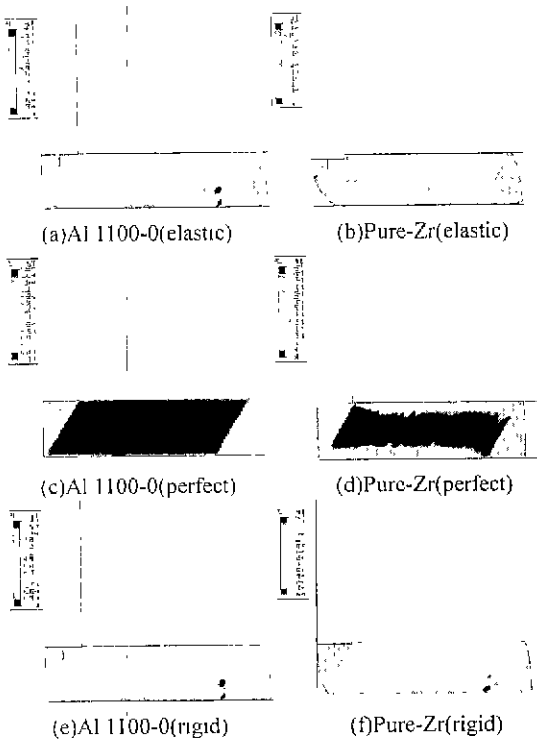
한편 pure-Zr 시편에 대한 물성치를 얻기 위하여 다음과 같은 조건에서 압축시험을 행하였다. 압축시험에서 프레스 속도는 1.5mm/min 이고, 공칭 변형률은 0.003/sec 이며, 상온에서 시편을 압축하였다. Al 1100-0은 참고문헌<sup>(10)</sup>을 참조하였다.

Fig. 4는 각각 완전소성 및 탄-가공경화소성 그리고 근사 강-가공경화소성을 적용하였을 때의 전단변형률 분포를 보여주고 있다. Fig 4에서 특히

주목해야 할 부분은 전단변형을 분포와 금형의 교차부에서의 금형 채움 상태이다. 먼저 전단 변형률 분포를 살펴보면 Fig 4(c)-(d)의 완전소성 물성치 적용시, 그 분포의 특징이 가장 두드러진다.



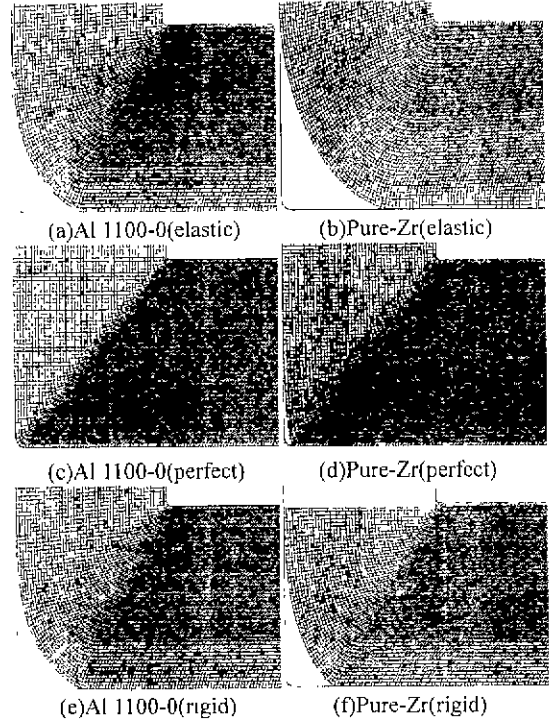
(a) Specimen (b)  $\Phi = 90, \Psi = 90$   
**Fig. 3** FE model with rigid ECAP die



(a) Al 1100-0(elastic) (b) Pure-Zr(elastic)  
 (c) Al 1100-0(perfect) (d) Pure-Zr(perfect)  
 (e) Al 1100-0(rigid) (f) Pure-Zr(rigid)  
**Fig. 4** Shear strain distributions

탄-가공경화소성 및 근사 강-가공경화소성을 적

용할 때에는 시편의 아래쪽 부분에서는 무전단 영역이 관찰되지만 원전소성에서는 무전단 영역이 나타나지 않고 시편의 전 영역에 걸쳐 균일한 전단 변형을 받고 있음을 보여준다. 한편, Fig 4(e)-(f)의 근사 강-가공경화소성 적용시, Al의 전단변형률 분포는 탄-가공경화소성 적용시와 비교하여 거의 차이가 없지만 보다 강성이 큰 pure-Zr에서는 무전단 영역대의 폭이 20-25% 정도로 탄-가공경화소성을 도입하였을 때의 pure-Zr의 40% 정도에 비해 줄어들고 있다. 또한 시편내부에서의 전단변형률 분포가 보다 균일함을 알 수 있다 이 사실은 Fig.6-7를 통해 확인할 수 있다 이러한 관찰로 미루어 강-가공경화소성 근사화는 강성이 큰 재료에서 그 차이점이 큰것을 짐작할 수 있다.



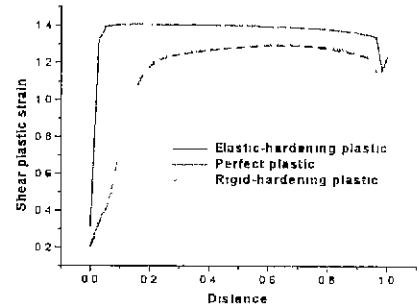
(a) Al 1100-0(elastic) (b) Pure-Zr(elastic)  
 (c) Al 1100-0(perfect) (d) Pure-Zr(perfect)  
 (e) Al 1100-0(rigid) (f) Pure-Zr(rigid)  
**Fig. 5** Mesh shape during ECAP process

다음 살펴보아야 할 부분은 금형의 교차부에서 시편의 채움 상태이다. Fig 5는 Al 시편이 교차부를 지날 때 형상을 보여주고 있다. 먼저 실제 물성치를 적용한 경우인 Fig. 5(a)-(b)를 살펴 보면 Fig 5(a)에서 보는 바와 같이 Al 시편의 변형 거동은 매우 좁은 영역에서 채널의 내부 교차점을 증

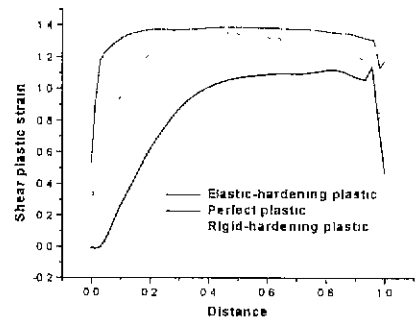
심으로 부채꼴로 분포하고 있다. 그리고 Al 시편이 부채꼴의 변형역에 도달하기 까지 시편의 좌측 일부 무전단 영역을 제외하고는 절점들이 거의 수직으로 이동하며 변형역에서 도달하면 채널의 내부 교차점을 중심으로 27°~30°의 원호를 그리며 변형한다. 이것은 급형의 기하학적 형상으로 인한 것이 아닌 시편 재료의 고유한 물성치 특성에 의한 만곡각이다. 그러나 pure-Zr 시편에 대한 ECAP 공정의 유한요소 해석에서는 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 Al 변형역에 도달하기 까지 시편의 좌측 일부 무전단 영역을 제외하고는 거의 수직으로 이동하지만 pure-Zr 시편에서는 시편 내부의 극히 일부 지역을 제외하고는 큰 원호를 그리며 변형역에 접근한다. Fig. 5(c)-(d)의 완전소성 적용시, 변형 형상을 살펴보면 Al의 경우 급형을 완전히 채용할 수 있으며 감성이 큰 pure-Zr에서도 거의 완전히 급형을 채용 급형의 교차부에서 절점들이 원호를 그리지 않고 수직으로 이동한다. 따라서, 재료의 물성에 의한 만곡각이 작아지므로 전단 변형률이 키지게 된다. 이는 Fig. 6(a)-(b)의 전단 변형률선도를 통해서도 알 수 있다. Fig. 5(e)-(f)의 근사 강-가공경화소성에서는, Al의 경우 그 형상이 실제 물성치를 적용한 경우와 비교하여 그 차이점이 미미하였으나 pure-Zr의 경우에는 급형과 시편의 틈이 눈에 띄게 줄어들었음을 알 수 있다. 그러므로, 만곡각이 줄어드는 효과로 인해 전단 변형률이 크게 높아지게 된다.

Fig. 6(a)-(b)에서는 원전소성 및 탄-가공경화소성과 근사 강-가공경화소성 적용으로 얻어진 전단 변형률 선도를 Al-1100-0와 pure-Zr로 각각 나누어 비교하였다. Fig. 6(a)에서 살펴보면 탄-가공경화소성을 적용한 Al 시편에서는 S-S'단면에서 S쪽의 20% 범위에서 전단 변형률이 급격히 증가함으로써 무전단역과 약 1.3 정도의 전단 변형률을 가지는 영역이 확실히 구분된다. 그러나 Fig. 6(b)선도 중, 실제 물성치를 적용한 pure-Zr 시편에서는 S-S'단면에서 S쪽의 55% 범위까지 전단 변형률이 점진적으로 증가하여 약 1.1의 전단 변형률을 가지는 영역에 도달한다. 따라서 Fig. 5(a)-(b)에서 보는 바와 같이 감성이 큰 pure-Zr 시편의 변형 거동은 연성 재료인 Al보다 넓은 지역에 변형영역이 존재하며 이로 인하여 pure-Zr 시편의 변형 거동에서는 시편이 교차부를 지날 때 급형의 형상을 따라가지 못하고 틈이 발생하면서 Al 시편에 비하여 큰 원

호를 그리며 변형한다. 그리고 시편이 교차부를 지날 때의 pure-Zr 시편의 변형 거동은 Al 시편보다 더 큰 원호를 그리며 변형함으로써 시편이 실제로 경험하는 만곡각은 증가한다. 만곡각의 증가로 인해, pure-Zr 시편의 전단 변형률이 Al 시편의 전단 변형률보다 작아짐을 Iwahashi의 순수 전단 이론식 (1)을 통해 알 수 있다.



(a) Al 1100-0



(b) Pure-Zr

Fig. 6 Shear strain components at section S-S' in Fig. 3

그러나 완전소성의 물성으로 해석수행하여 얻어진 Al과 pure-Zr 결과 선도에서는 실제 물성을 적용하여 해석한 결과와는 달리 전단 변형률의 급격한 증대를 보인다. 즉 시편 횡단면 전체에서의 전단 변형률이 비교적 균일하다. 이는 재료의 소성 영역에서의 가공경화를 무시한 효과에 따른 것으로 보인다. 이 밖에 근사 강-가공경화소성에서, Al 선도는 탄-가공경화소성 선도와 거의 차이점을 보이지 않았으나 Fig. 6(b)의 pure-Zr 선도에서는 탄-가공경화소성 선도와 현저히 다른 특성을 보여주

고 있다. 즉, 탄-가공경화소성 해석값에 비해 점진적 증가 구간이 짧으며 0.35-0.40에서 전단변형률이 약 1.4 정도의 최고치를 보이다 이후 완만히 하강한다 이는 탄-가공경화소성 pure-Zr 의 최대 전단변형률 1.1 보다 매우 큰 값이다 이것은 재료의 가공경화특성의 변화없이 단순한 탄성계수, 즉, 강성의 증가만으로도 전단변형률이 크게 증대될 수 있음을 말해 주는 것이다. 또한 그 효과는 강성이 큰 재질일수록 두드러진다 ECAP 공정에서 전단변형률은 매우 큰 의미를 갖는 것으로 이는 재료의 강성과 인성등, 기계적 특성 개선의 효과를 얻을 수 있다

#### 4. 결론

본 논문에서 ECAP 공정에 대한 유한요소 해석에서 가공 경화, 강성 등을 고려한 물성치 조건 변화에 따른 시편의 변형거동특성을 살펴보았다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1 탄-가공경화소성을 적용한 결과, 강성이 큰 재료는 연성재료에 비해 금형과 시편사이의 틈이 작으므로 전단변형률이 작고 시편 횡단면의 무전단영역대의 폭이 상대적으로 큰 것으로 나타났다
- 2 재질에 근사 강-가공경화소성을 적용하여 탄-가공경화소성 적용시와 비교하면, 강성이 큰 재료에서는 전단변형률이 증가하며 금형과 시편사이의 틈이 작아졌다 그러나, 강성이 작은 재료에서는 그 차이점이 미미하였다.
- 3 재질에, 완전소성을 적용하면, 시편의 횡단면에 상대적으로 균일하고 큰 전단변형률이 발생하며 무전단영역대가 거의 관찰되지 않았고 또한, 금형과 시편의 틈이 거의 발생하지 않았다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- 1 Richard W. Hertzberg. "Deformation and fracture mechanics of engineering materials," 3<sup>rd</sup> ed John

- Wiley & Sons, Inc.
2. V.M. Segal, V.I. Rezenkov, A.E Drobyshevskiy V.I Kopylov, "Plastic Working of Metals by Simple Shear," *Metally(Eng Trans. : Russian Metallurgy)* Vol.1, pp. 99~105,1981
3. Y Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto M and T.G Langdon. "Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Metals." *Scripta Mater.* Vol 35, No 2, pp. 143~146, 1996.
4. 김희수, 서진유, 박종우, "Equal-Channel Angular Pressing 에서의 변형거동해석," 대한금속학회지, 제 37 권, 제 9 호, pp. 1064~1068, 1999.
5. P.B Prangnell, C Harris and S.M. Roberts. "Finite Element Modelling of Equal Channel Angular Extrusion," *Scripta Mater.*, Vol 37, No 7, pp 983~989, 1997.
6. J.R Bowen, A Gholinia, S.M. Roberts, P.B Prangnell, "Analysis of the Billet Deformation Behavior in Equal Channel Angular Extrusion," *Mater. Sci & Eng.*, Vol(A)287, pp 87~99, 2000.
7. 서민홍, 김형섭, 홍순익, "등분로각압축(ECAP) 공정의 유한요소해석," 대한금속·재료 학회지, 제 38 권 제 1 호, pp 136~140, 2000.
8. 서민홍, 김형섭, "등분로각압축(ECAP) 공정에서 다이 마찰 효과에 대한 수치적 해석," 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp 219~225, 2000
9. 김동원, "소성론", 정문각, pp12~13, 1996
10. Stephen H Crandall, Norman C. Dahl, Thomas J Lardner, "An introduction to the mechanics of solids," Second edition, pp.327.
11. Liu Zuyan, Liu Gang, Z.R. Wang. "Finite Element Simulation of a new Deformation Type Occurring in Changing-Channel Extrusion," *J Mater Processing Tech.*, Vol. 102, pp 30~32, 2000
12. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "Pure-Zirconium 의 ECAP 공정에서 금형의 교차각과 만곡각에 따른 재료의 변형거동해석," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp 747~753, 2000.
13. 박상석, 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "Pure-Zr 의 ECAP 공정에서 마찰의 영향 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp 409~412, 2000
14. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "Pure-Zr 의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형거동과 금형에 미치는 영향," 한국정밀공학회지, 2001.6 게재예정