

순수 지르코늄의 ECAP 공정에서 금형의 변형 및 채널각이 재료의 변형거동에 미치는 영향

권기환*, 채수원†, 권숙인**, 김명호***, 황선근***

(2001년 2월 9일 접수, 2001년 8월 7일 심사완료)

Effects of Die Deformation and Channel Angle on Deformation Behavior of Materials During Equal Channel Angular Pressing with Pure-Zr

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

Key Words : Equal-Channel Angular Pressing(ECAP)(등통로각압축), Finite Element Method(유한요소법), Pure-Zr(순수 지르코늄), Die Deformation(금형의 변형), Channel Angle(채널각).

Abstract

Among severe plastic deformation processes, ECAP has drawn much attention due to its advantages including ultra-fine grain size material production. In this paper, ECAP process with pure-Zirconium is investigated due to its applicability to nuclear reactors. The finite element method is employed to investigate the deformation behavior of materials during ECAP process. In particular, effects of process parameters such as die deformation and channel angles on the material behaviors have been investigated. Experimental studies have also been performed to verify the numerical results.

1. 서론

초미립 금속은 입도가 $1\mu\text{m}$ 이하로서 100-500nm 정도의 입자들로 구성되어 있으며, 특히 강도 및 내식성 면에서 기존 소재의 속성 범위를 한 차원 뛰어넘는 특성을 갖고 있다.

초미립 재료의 제조 방법 중 극심한 소성변형을 발생시키는 ECAP(Equal Channel Angular Pressing)은 다음과 같은 장점들로 인하여 많이 연구되고 있다. 즉, ECAP 공정은 시료 내부까지 극심한 소성변형이 가능하며, 광범위한 온도 범위 안에서도 작업이 가능할 뿐만 아니라 공정 중에 정확한 온도 제어가 가능하다. 또한 ECAP 공정은

여러 공정 변수들(온도, 압력, 분위기, 가공 수, 가공 방향 등)의 제어가 용이하고 이것들의 조합에도 용이하다. 이러한 ECAP 공정의 장점 때문에 최근들어 알루미늄 및 공업용 철강 등의 재료에 대한 ECAP 공정에서 발생하는 재료의 변형거동에 대한 연구가 심도 있게 이루어지고 있다.

한편 지르코늄기는 고온 강도, 부식(corrosion), 중성자 조사 성장(irradiation growth) 및 크리프(creep) 등에 대한 저항성때문에 핵연료 피복관(fuel cladding) 또는 압력관(pressure tube) 등의 원자로 소재에 적용되고 있다. 그러나 지르코늄기의 분말 성형법을 통한 재료의 치밀화법 등에 대한 연구는 이루어진 바 있으나,⁽¹⁾ 지르코늄기에 ECAP 공정을 적용한 연구는 이루어진 바 없다. 따라서 본 연구에서는 순수 지르코늄에 대한 ECAP 공정에 대한 연구를 수행하였다.

ECAP 공정에 대한 연구는 주로 재료의 미세조직 변화에만 집중되었고, 최근에서야 ECAP 공정에 대한 유한요소해석이 시도되었다. Prangnell 등⁽²⁾은 평면 변형률 요소를 사용한 강소성 알루미늄 재료에 대하여 만곡각을 0° 로 하였을 때 교차각이

* 고려대학교 대학원 기계공학과

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

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

** 고려대학교 금속공학과

*** 인하대학교 금속공학과

90° 인 경우와 100° 인 경우의 ECAP 공정을 DEFORM[®]으로 마찰과 무마찰 조건에서 해석하였다. 김희수 등⁽³⁾은 ABAQUS[®]로 평면 변형을 요소 사용하여 마찰과 재료의 가공 경화를 무시하고, 교차각 90° 에서 만곡각의 변화에 따른 시편의 변형거동을 살펴보았다. Bowen 등⁽⁴⁾은 평면 변형률 요소를 사용한 강소성 알루미늄 재료에 대하여 만곡각을 0° 로 하였을 때 교차각이 90° 인 경우와 120° 인 경우의 ECAP 공정을 DEFORM[®]으로 마찰과 무마찰 조건에서 해석하였다. 서민홍 등^(5,6)은 평면 변형률 요소를 사용한 강소성 알루미늄 재료에 대하여 만곡각 90°, 교차각 90° 인 경우를 DEFORM[®]으로 마찰과 무마찰 조건에서 해석하였다. Liu 등⁽⁷⁾은 H62(Cu-38%Zn) 시편에 대하여 마찰을 고려하여 CCE(changing channel extrusion) 공정과 다단 ECAP 공정을 해석하였다. 이들 논문들은 주로 알루미늄과 같이 연성재료에 대한 것으로 강소성 모델을 사용하였다. 그 결과 유한요소해석에서 얻은 변형률과 순수전단이론에서 얻는 변형률은 대략 일치하는 것으로 보고되었다. 그러나 알루미늄보다 강성이 큰 재료에서는 시편의 변형거동에 차이가 발생할 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 ECAP 공정에서 순수 지르코늄에 대한 재료의 변형거동을 예측하고자 하였다.

유한요소해석에는 재료를 탄소성으로 모델링할 수 있는 ABAQUS[®]를 사용하였으며, 먼저 ECAP 공정에서 금형의 변형이 시편의 변형거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 강제 금형을 사용하여 교차각과 만곡각의 변화가 ECAP 공정에서 시편의 변형거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 한편 실제로 교차각 135°, 만곡각 45° 인 금형을 사용하여 순수 지르코늄에 대한 ECAP 공정 실험을 수행하고 이를 유한요소해석 결과와 비교 검토하였다.

2. ECAP 공정

ECAP 가공은 Segal 등⁽⁸⁾에 의해 처음 제안된 방법으로, 특별히 고안된 금형의 채널로 다결정 금속을 통과시켜 재료에 극심한 소성변형을 가함으로써 재료의 결정립을 미립화시키는 방법이다.

ECAP 공정에 사용되는 금형은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 거의 동일한 단면을 갖는 두 채널을 일정한 각도로 교차하는 특수한 형태를 가진다.

ECAP 금형의 두 채널이 교차하는 부분에는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 두 개의 각을 정의할 수 있다. 이 중 ECAP 공정에서 가장 중요한 변수는 두 채널이 이루는 각으로 이를 교차각(Φ)이라 정

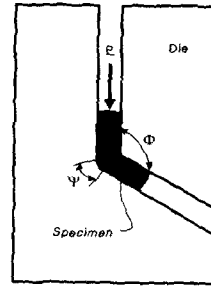


Fig. 1 Schematic diagram of ECAP

의한다. 그리고 ECAP 금형에서 두 채널이 교차하는 외벽 부분에 존재하는 원호를 정의하는 각을 만곡각(Ψ)이라 한다.

ECAP 공정에 의한 시편의 변형은 주로 단순전단 변형으로 Segal 등이 이에 대한 이론적 해석을 최초로 제시하였다. 그는 만곡각이 0° 인 금형에 대하여 금형과 재료의 마찰을 무시한 채 전단 변형률과 교차각의 관계식을 유도한 바 있다. 그리고 Iwahashi 등⁽⁹⁾은 이 식을 보다 더 일반화하였다. 즉, Iwahashi 등은 ECAP 공정에서 마찰이 없다고 가정하여 교차각과 만곡각에 따른 금형의 구조만 생각하고, 재료가 금형의 교차 부분을 통과할 때 발생하는 소성 변형량을 단순한 경로차에서 유도되는 전단 변형률(γ)로 식 (1)과 같이 수식화하였다.

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

Iwahashi 등에 의하여 유도된 식 (1)은 만곡각이 0° 일 때 Segal 등에 의하여 유도된 결과와 동일하며, 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 교차각과 만곡각이 작을수록 전단 변형률이 증가한다. 그러나 위의 이론값은 실제 ECAP 공정에서 얻어지는 결과와는 다소 차이가 있다. 특히 ECAP 공정은 여러 가지 공정조건에 따라 전단 변형뿐만 아니라 인장과 압축변형도 함께 발생하게 되며, 변형도 재료의 전체에 걸쳐 균일하게 발생하지는 않는다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 따라서 정확한 결과를 예측하기 위해서는 정밀한 유한요소해석이 필요하다.

3. 유한요소 모델링과 실험조건

3.1 ECAP 실험조건

ECAP 공정에 대한 실험은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 교차각이 135° 이고 만곡각이 45° 이며, 입

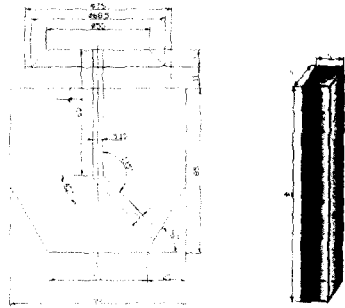


Fig. 2 Configuration of die and specimen for ECAP experiments

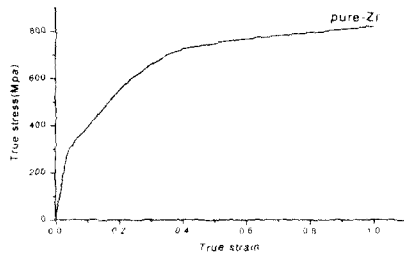


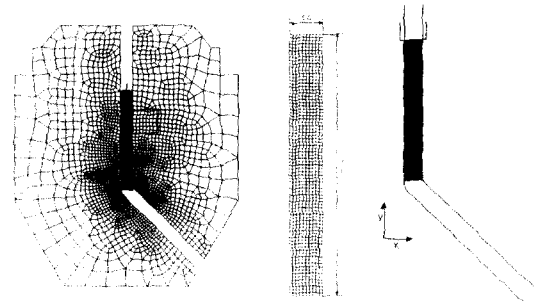
Fig. 3 Material properties of pure-Zr

구 쪽 채널의 면적이 5.15mm×5mm 이고 출구 쪽 채널의 면적이 5mm×5mm 인 ECAP 금형을 SK6 종으로 제작하였다. 입구쪽 채널의 단면적이 시편보다 큰 이유는 ECAP 공정시 발생하는 시편의 탄성팽창으로 인한 입구쪽 마찰을 줄이기 위함이다. 순수 지르코늄시편은 5mm×5mm×40mm 인 정사각기둥을 사용하였다. 가공 조건은 프레스 속도가 1.5mm/min 이고, 공칭 변형률은 0.003/sec 이며, 상온의 조건에서 ECAP 공정을 수행하였다. 또한 시편과 금형의 마찰을 줄이기 위하여 입도가 0.25 μm 인 Al₂O₃ 분말로 시편과 금형의 채널면을 연마하였다. 그리고 윤활제로 MoS₂ spray 를 사용하였으며 20 ton 급의 인장/압축시험기로 시편을 아래쪽으로 밀어내었다.⁽¹³⁾

순수 지르코늄의 물성치는 탄소성 모델로 압축 시험에서 얻은 결과를 사용하였다. Fig. 3 은 ECAP 공정에 대한 실험에 적용된 가공 조건과 동일한 조건의 압축시험에서 얻은 결과로서 순수 지르코늄의 응력과 변형률의 관계를 보여주고 있다.

3.2 유한요소 모델링

ECAP 공정에 대한 유한요소해석에서 시편과 금형은 4 결점 평면 변형률 요소로 모델링하였다. 먼저 금형의 변형이 ECAP 공정에 미치는 영향을 조사하기 위한 해석에서는 Fig. 4(a)과 같이 금형을 변형체로 모델링한 경우와 Fig. 4(b)와 같이 강체로 모델링한 경우에 대하여 해석을 수행하고 각 경우



(a) Deformable die (b) Rigid die
Fig. 4 FE models of ECAP

에 대하여 상당 소성 변형률 분포와 가공력을 비교하였다. 유한요소 모델에서 변형체 금형을 모델링하기 위하여 사용된 요소수는 2184 개이며, 시편에 사용된 요소수는 가로 10 개, 세로 80 개로 총 800 개이다. 경계조건으로는 금형의 외부를 모두 고정시키고 램에 변위 경계조건을 주어 ECAP 공정을 해석하였다. 변형체 금형의 물성치는 항복응력이 1480Mpa 이고 인장강도는 1800Mpa 이다. 변형체 금형과 강체 금형을 사용한 각 경우에 대한 ECAP 공정 해석에서 시편의 요소망은 동일하다. 한편 금형의 교차각과 만곡각의 변화에 따른 변형거동의 차이를 조사하기 위해 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 금형의 교차각과 만곡각의 변화를 여섯 가지로 분류하여 유한요소해석을 수행하였다. 즉, 금형의 교차각은 90°, 120°, 135° 로 변화시켰으며, 만곡각은 각각의 경우에 대해 0° 와 허용 가능한 최대값, 즉 90°, 60°, 45° 로 변화시켜 조사하였다. 한편 재료의 변형거동해석을 보다 정밀하게 수행하기 위해 시편을 모델링하는 요소의 수를 많이 사용하는 대신, 금형을 모두 강체로 가정하였고, 금형과 재료 사이의 마찰도 무시하였다. 시편의 크기는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 가로 5mm, 세로 30mm 이고, 이 때 사용된 요소의 개수는 가로 50 개, 세로 300 개로 총 15000 개이다. 해석 조건으로는 램을 아래로 30mm 만큼 이동하도록 변위 경계조건을 주어 램의 변위와 가공력의 관계와 Fig. 5(a)에 표시된 단면 S-S'에서의 상당 소성 변형률을 살펴보았다. 여기서 시편의 길이가 실험에 사용된 시편의 길이보다 짧은 이유는 시편의 길이가 시편 폭의 5 배 이상이면 변형거동에 대한 충분한 정보를 제공할 수 있기 때문이다.

4. 해석 및 실험결과에 대한 고찰

4.1 금형의 변형에 따른 영향

Fig. 6(b)는 변형체 금형과 강체 금형을 사용한 ECAP 공정에 대한 유한요소해석에서 각 경우에 대한 상당 소성 변형률을 Fig. 6(a)에 표기된 단면 A-A'에서 보여주고 있다. Fig. 6(b)에서 보는 바와

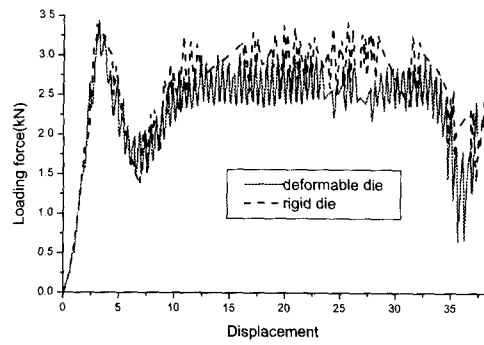
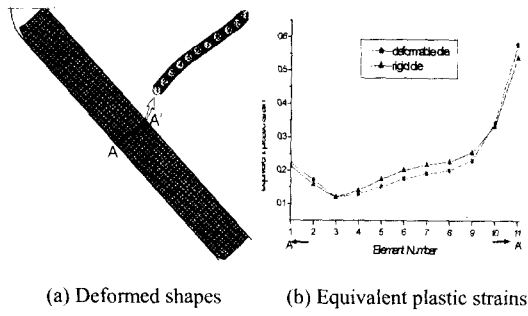
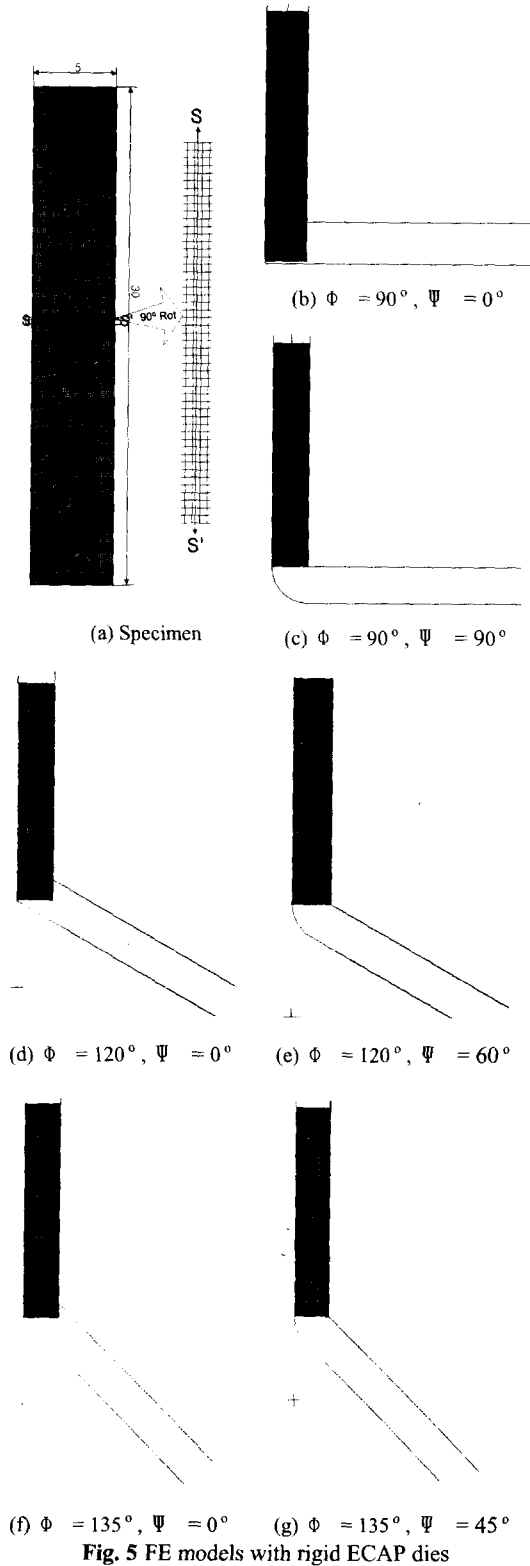
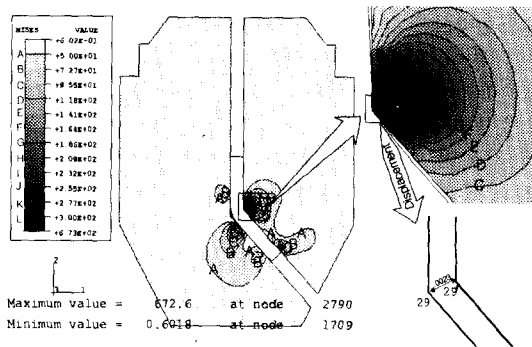


Fig. 7 Load-displacement relationships of deformable die and rigid die



같이 변형체 금형에서 얻어진 시편의 상당 소성 변형률은 강체 금형에서 얻어진 값에 비해 약간 작다. Fig. 7은 변형체 금형과 강체 금형을 사용한 ECAP 공정에 대한 유한요소해석에서 각 경우에 대한 가공력을 보여주고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 변형체 금형에서 얻은 가공력도 강체 금형에서 얻은 값보다 약간 작다. 그러나 이러한 차이는 무시할 수 있으며 전체적인 시편의 변형 거동은 거의 일치한다. 한편, Fig. 7에서 가공력의 변화가 심한 것은 두 접촉면의 간섭량의 차이로 인

해 변형량의 차이가 발생하기 때문이다. 즉, ABAQUS®에서 접촉면은 슬레이브(slave)와 마스터(master)로 구분되며 슬레이브의 절점들은 마스터의 접촉면을 침투할 수 없으나 슬레이브의 두 절점들을 잇는 요소의 모서리는 마스터의 접촉면을 침투할 수 있다. 이와 같은 간섭량은 매 단계마다 슬레이브의 두 절점들의 위치에 따라서 차이가 발생하며, 이로 인하여 시편의 변형량은 일정하지 않다. 이러한 변형량의 변동이 Fig. 7에서 보는 바와 같이 가공력의 변동을 가져오는 것으로 판단된다. 요소의 크기를 줄이면 슬레이브의 두 절점의 위치에 따라 간섭량의 변동폭이 줄어들고, 따라서 Fig. 13에서 보는 바와 같이 매끄러운 가공력 곡선이 된다. 금형의 변형은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 매우 적기때문에 시편의 변형거동에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 강성이 매우 큰 금형을 사용한 ECAP 공정에서 시편 변형거동에만 관심을 가지는 해석에서는 시편을 보다 정밀하게 모델링하기 위해 강체 금형으로 가정하였다. 그러나 실험에 사용된 금형의 물성치에 따라서 강체 금형과 변형체 금형에서 얻은 변형거동의 차이가 발생할 수 있으며, 또한 금형의 채널각 및 시편과 금형의 마찰의 크기에 따라서 금형의 응력상태나 변형정도의 차이가 발생하며, 경우에 따라서는 금형의 소성변형도 발생할 수 있다. 따라서 시편 변형거동의 차이와 금형의 응력상태나 변형정도 등을 평가하기 위해서는 금형을 변형체인 탄소성 요소로 모델링해야 한다.

4.2 재료의 변형거동

Fig. 9은 정상 상태에서 금형의 교차각과 만곡각의 변화에 따른 시편의 변형 형상과 상당 소성 변형률 분포를 채널의 교차부분에서 살펴본 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 교차각 90°인 Fig. 9(a)와 (b)에서 만곡각의 변화에 따른 시편 변형거동의 차이를 볼 수 있지만 그 외 다른 경우에는 만곡각의 변화에 따른 시편 변형거동의 차이를 거의 찾아볼 수 없다. 이와 같은 사실은 Fig. 10의 단면 S-S'에서의 상당 소성 변형률 분포를 보면 쉽게 알 수 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 단면 S-S'에서 교차각 90°인 Fig. 10(a)와 (b)에서 만곡각에 변화에 따른 상당 소성 변형률의 차이가 발생하지만, 그 외 다른 금형에서는 만곡각의 변화에 따른 미세한 차이는 발생하지만 교차각이 같으면 거의 같은 변형률 분포를 관찰할 수 있다. 이와 같이 만곡각의 변화가 순수 지르코늄 시편의 변형거동에 큰 영향을 주지 못하는 이유를 시편이 교차부를 지날 때의 변형 형상에서 찾아볼 수 있다. 즉, Fig. 9에서 보는 바와 같이 시편이 교차부를 지날 때 시편은 금형의 형상을 따라 변형

하지 못하고 외벽(S)쪽에 큰 틈이 발생하고 이로 인하여 시편이 실제로 경험하는 만곡각은 증가하게 된다. 이와 같이 ECAP 금형의 만곡각보다는 실제 시편에 경험하는 만곡각이 변형거동에 더 많은 영향을 끼친다.

앞에서 언급한 바와 같이 기존의 해석에서는 알루미늄과 같은 연성 재료를 사용하여 얻은 변형률과 Iwahashi의 이론식에서 얻은 변형률이 거의 일치하는 것으로 보고하였다.⁽²⁻⁴⁾ 그러나 본 연구의 순수 지르코늄의 경우에는 변형률이 순수전단 이론값과 상당한 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 주로 시편의 물성치에 따라 변형거동이 다르게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 순수 지르코늄에 대한 ECAP 공정의 유한요소 해석에서 얻은 결과와 Iwahashi의 이론값의 차이는 시편의 변형 특성에서 그 원인을 찾을 수 있다. Iwahashi 등은 교차부에서 발생하는 변형을 순수전단 변형으로 가정하고, 시편이 교차부를 지날 때 변형속도가 일정하다고 가정하여 상당 소성 변형률을 유도하였다. 그러나 ECAP 공정에 대한 유한요소해석에서는 시편이 교차부를 지날 때 S 쪽에서는 시편의 길이 방향으로 인장 응력이 작용하지만 S'쪽에서는 시편의 길이 방향으로 압축 응력이 작용하고 있다. 이와 같은 단면의 응력 분포에 의해 S 쪽의 변형 속도가 S'쪽의 변형속도보다 크다. 따라서 단면 전체에 걸쳐 균일한 속도 분포를 유지할 수가 없다. 이와 같은 사실은 Fig. 11의 시편의 소성 변형률 성분을 보면 쉽게 알 수 있다. 교차각 90°, 만곡각 0°인 경우와 교차각 135°, 만곡각 45°인 경우의 전단 변형률 성분의 크기도 다르지만, 시편 길이 방향의 소성 변형률 성분에서도 변형률이 교차각 90°, 만곡각 0°인 경우는 S 쪽에서 S'으로 갈수록 증가하여 모든 영역에 걸쳐 인장 변형이 발생하는데 비하여, 교차각 135°, 만곡각 45°인 경우에는 S 쪽의 양의 값에서 S'으로 갈수록 감소하여 음의 값이 된다. 이것은 교차각이 90°인 경우는 시편에 작용하는 외력이 일직선에 작용하지만, 교차각 135°인 경우는 램의 가공력과 출구쪽 외부면의 반력이 45°로 경사져 있기 때문에 시편이 교차부를 지날 때 굽힘 모멘트를 받아 S 쪽에는 인장, S' 쪽에는 압축 변형을 발생시킨다. 이와 같이 순수 지르코늄 시편은 ECAP 공정에서 Iwahashi 등이 가정한 것처럼 순수전단 변형만 발생하는 것이 아니라 상당량의 인장력 및 압축력에 의한 소성 변형도 발생한다. 이러한 변형 거동은 교차부에서 일정한 변형속도를 보장하지 못한다. 따라서 Fig. 12에서 보는 바와 같이 상당 소성 변형률은 이론값보다 작으며, 이러한 차이는 교차각이 클수록 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 채널각에 따른 가공력들을 보여주고 있다. 교차각이 증가할수록 변형량의 감소에 따라 가공력도 줄어든다는 것을 알 수 있다.

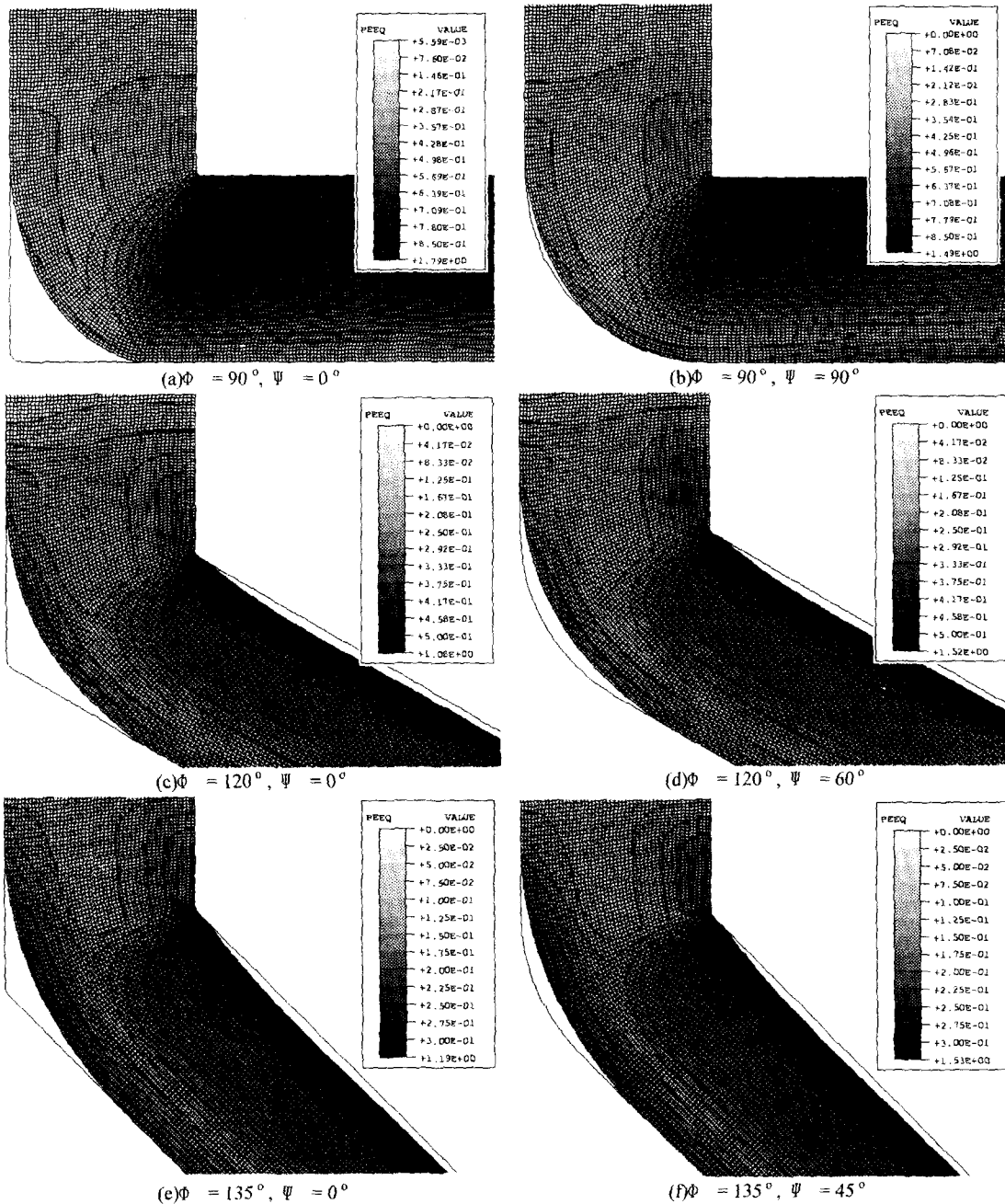


Fig. 9 Equivalent plastic strain distributions due to channel angles

4.3 해석과 실험의 비교

Fig. 14 에서 보면 교차각 135° , 만곡각 45° 인 ECAP 실험에서 얻은 가공력과 유한요소해석에서 얻은 가공력은 차이가 발생한다. 이러한 차이는 유한요소해석에서 마찰을 무시하였기 때문이다.

특히 2 차원에서 마찰해석을 고려하더라도 측면 마찰을 고려할 수 없다는 문제점이 있다. 또한 마찰이 존재 하면 출구쪽 채널에 역압력이 발생하며 이로 인해 변형량이 증가할 수 있다. 또 다른 이유는 유한요소해석에서는 2 차원 평면(x-y 방향)

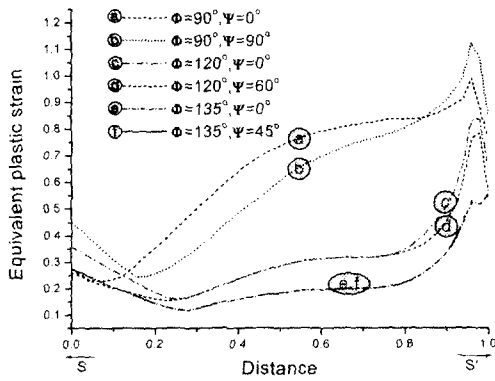


Fig. 10 Equivalent plastic strains at section S-S'

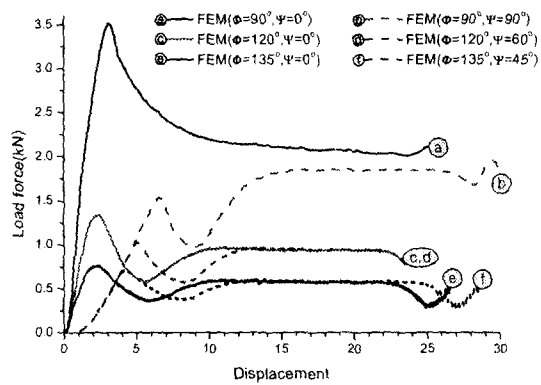


Fig. 13 Load-displacement relationships

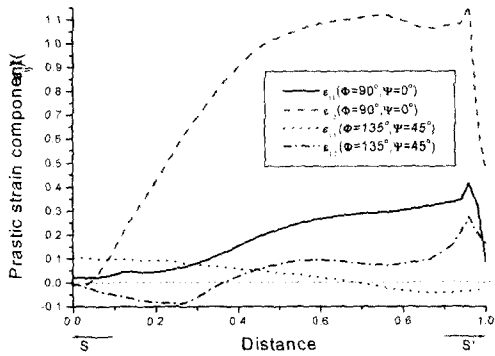


Fig. 11 Plastic strain components at section S-S'

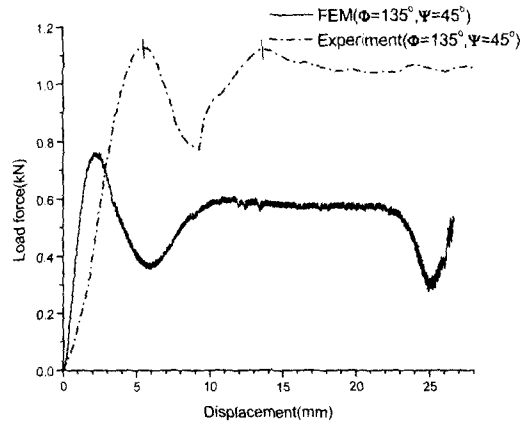


Fig. 14 Load-displacement relationships for finite element analysis and experiments

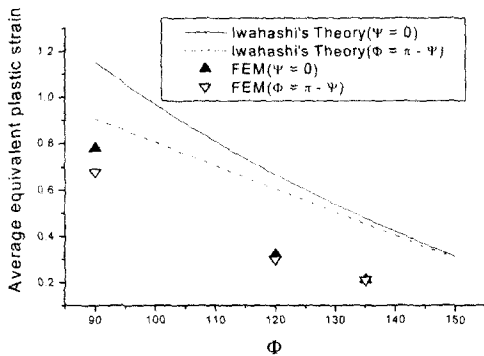


Fig. 12 Comparison between theoretical and FE solutions of average equivalent plastic strains

변형조건으로 고려하였으나, 실제로 시험에 사용한 금형은 제작시 어려움으로 인해 두께(z-축) 방향으로 분리된 금형을 체결하여 사용함으로써 완벽한 평면 변형조건을 얻지 못한 점도 하중과

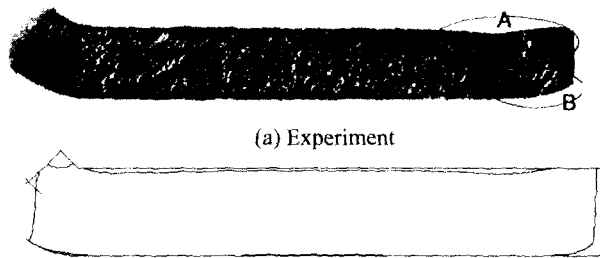


Fig. 15 Deformed shapes of a pure-Zr specimen

하중-변위곡선의 주요 특성은 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 15 에서 보는 바와 같이 시험편의 변형 후의 형상도 A 부분에서는 오목하게 되고, B 부분에서는 압축에 의해 찌그러지는 등 실제 실험과 유한요소해석 결과가 정성적으로 거의 같

은 특성을 보이고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 순수 지르코늄의 ECAP 공정에 대한 해석과 실험에서 금형의 변형이 시편의 변형 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 ECAP 공정에서 금형의 교차각과 만곡각의 변화가 시편의 변형거동에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 이들 유한요소해석 결과를 교차각 135°, 만곡각 45°인 금형에서의 순수 지르코늄의 ECAP 공정에 대한 실험과 비교 검토하였다. 이와 같은 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 충분한 강성을 같은 변형체 금형에서 얻어진 시편의 상당 소성 변형률과 가공력은 강체 금형에서 얻어진 값보다 약간 작지만 전체적인 변형 거동에는 거의 차이가 발생하지 않는다.

(2) 교차각이 클수록 시편이 교차부를 지날 때 받는 굽힘 모멘트는 증가한다. 이러한 굽힘 모멘트때문에 시편은 교차부에서 균일한 속도로 변형하지 못한다. 따라서 유한요소해석 결과와 Iwahashi의 이론의 차이가 발생한다.

(3) 강성이 큰 순수 지르코늄에서 변형거동에 대한 만곡각의 영향은 매우 적다. 또한 교차각이 클수록 만곡각의 변형거동에 대한 영향은 줄어든다.

(4) ECAP 공정에 의한 순수 지르코늄의 변형은 순수전단 변형이 아니라 인장력 및 압축력에 의한 소성 변형도 상당량 발생한다. 특히, 시편의 외부면, S 쪽에서는 전단 변형보다는 인장력에 의한 소성 변형이 우세하다.

앞으로 실제 산업현장에 적용하기 위하여 재료의 물성치 또는 다른 공정들에 따른 변형 특성 등에 대한 더욱 많은 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 '99 원자력 기초 연구사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 김홍기, 김기태, 1997, "지르코니아 분말 성형체

의 고온 치밀화 거동과 결정립 성장," 대한기계학회논문집(A), 제 21 권, 제 8 호, pp. 1175~1187.

(2) 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.

(3) 김희수, 서유진, 박종우, 1999, "Equal-Channel Angular Pressing에서의 변형거동해석," 대한금속학회지, 제 37 권, 제 9 호, pp. 1064~1068.

(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) 서민홍, 김형섭, 홍순익, 2000, "등통로각압축(ECAP) 공정의 유한요소해석," 대한금속재료학회지, 제 38 권 제 1 호, pp. 136~140.

(6) 서민홍, 김형섭, 2000, "등통로각압축(ECAP) 공정에서 다이 마찰 효과에 대한 수치적 해석," 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 219~225

(7) Liu Zuyan, Liu Gang, Z.R. Wang, 2000, "Finite Element Simulation of a new Deformation Type Occurring in Changing-Channel Extrusion," *J. Mater. Processing Tech.*, Vol. 102, pp. 30~32.

(8) Segal, V.M., Rezenikov, V.I., Drobyshevskiy, A.E. and Kopylov, V.I., 1981, "Plastic Working of Metals by Simple Shear," *Metally(Eng. Trans. : Russian Metallurgy)* Vol. 1, pp. 99~105.

(9) 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.

(10) 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, 2000, "Pure-Zirconium의 ECAP 공정에서 금형의 교차각과 만곡각에 따른 재료의 변형거동해석," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp 747~753.

(11) 박상석, 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, 2000, "Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰의 영향 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp 409~412.

(12) 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, 2001, "Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형 거동과 금형에 미치는 영향," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 6 호, pp. 182~187.

(13) 황선근 외, 2000, "컴퓨터 모델링과 신 공정 기술에 의한 초미립 조직의 원자로심형 고성능 금속소재 개발," 원자력 기초연구사업 보고서.