

온간 ECAP 공정에서 Zr-702 합금의 변형거동해석

이강무*, 권기환(고려대 대학원 기계공학과), 채수원(고려대 기계공학과), 권숙인(고려대 금속공학과), 김명호, 황선근(인하대 금속공학과)

Deformation Behavior Analysis of Zr-702 Alloy during ECAP at Elevated Temperature

Kang Moo Lee*, Gi Hwan Kwon (Mech. Eng. Dept. KU), Soo-Won Chae(Mech. Eng. Dept. KU), Sook In Kwun(Met. Eng. Dept. KU), Myung Ho Kim and Sun Keun Hwang(Met. Eng. Dept. Inha Univ.)

ABSTRACT

Much research efforts have been made on the equal channel angular pressing(ECAP) which produces ultra-fine grains. In this paper the ECAP processes with Zr-702 alloy at elevated temperature and at room temperature are considered. Both two-dimensional and three-dimensional finite element analyses have been employed to investigate the deformation behaviors of specimen during ECAP process.

Key Words : Equal channel angular pressing (ECAP, 등통로각압축), Finite element method (유한요소법), Zr-702 alloy (지르코늄 702 합금), Elevated temperature (온간), Friction (마찰)

1. 서론

등통로각압축(ECAP, Equal Channel Angular Pressing) 공정은 다결정의 재료 덩어리를 두 채널(channel)이 일정하게 교차하는 형태의 금형속으로 통과시켜 단면적과 단면 형상의 큰 변화 없이 압출하는 성형법으로서, 다른 공정에 비해 상대적으로 낮은 압력으로 재료에 소성변형을 발생시켜 입자를 미세화할 수 있으며 재료 단면 형상의 변화가 없어 수회의 반복 공정을 통해 높은 변형률을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻²⁾

그러나 등통로각압축 공정은 이러한 기술적 장점에도 불구하고 아직 연구단계에 머물러 있으며, 이에 대한 연구는 실제 실험과 더불어 유한요소법을 이용한 이론해석이 병행되고 있다.⁽³⁻⁶⁾

등통로각압축 공정에 대한 실험을 통한 연구는 폭넓게 진행되어 채널각⁽⁷⁾, 압축 속도⁽⁸⁾, 압축 온도⁽⁹⁻¹²⁾ 등에 대해 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다. 반면에 유한요소법을 이용한 등통로각압축 공정의 연구들은 제한된 범위내에서 진행되어 왔다. 특히 압축 온도에 대한 연구는 등통로각압축 공정의 실용화와 비용의 절감 등을 목적으로 실험을 통한 온간 ECAP 법에 대한 연구가 이루어지고 있으

나⁽⁹⁻¹²⁾ 유한요소해석을 통한 이론적인 접근이나 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 3 차원 유한요소법을 이용하여 지르코늄 702 합금(Zr-702 alloy)의 실온(room temperature)과 온간(371℃)에서 등통로각압축 공정을 분석하고 마찰에 의한 재료의 변형거동 특성을 살펴보고 이를 2 차원 해석의 결과와 비교하고자 한다.

2. ECAP 공정

Fig. 1 은 ECAP 공정의 기본 개념을 나타낸 그림이다. 공정 중 재료의 형상이 크게 변화하지 않도록 ECAP 금형은 단면의 크기와 단면 형상이 동일한 두 채널(channel)이 일정한 각으로 교차하는 형태를 갖는다.

그리고 두 채널이 교차하는 곳에서 등통로각압축 공정시 중요한 의미를 갖는 두 개의 각을 정의할 수 있으며 재료의 변형거동에 있어 내각을 교차각(Φ)이라 하며 외측부의 원호가 이루는 각을 만곡각(ψ)이라 한다. Iwahashi 등⁽¹³⁾은 등통로각압축 공정에서 변형량에 대한 관련식을 제시하였다. 그러나 이들이 제시한 관련식은 재료내에서 순수전단이 발

생한다는 가정에 의한 것으로서 실제 등통로각압축 공정의 실험에서 얻어지는 결과 사이에 큰 차이가 있다. 따라서 최근의 연구에서는 등통로각압축 공정에 대한 더 정확한 분석을 위해 유한요소해석이 다양하게 시도되고 있다.⁽³⁻⁶⁾

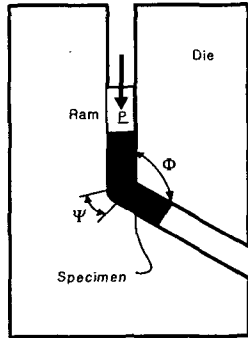


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP.

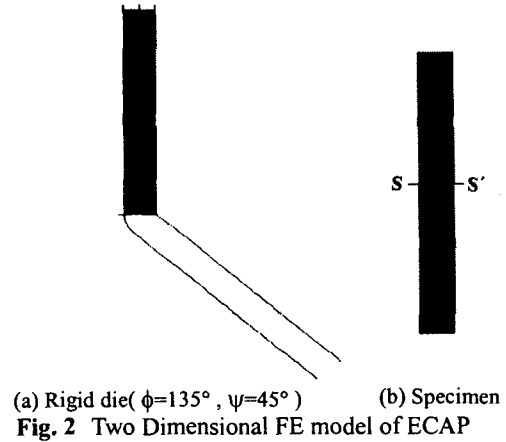
3. 해석 방법

본 연구에서는 지르코늄 702 합금의 등통로각압축 공정을 실온과 371°C에서 고려하였으며, 이때 재료의 변형거동을 2 차원과 3 차원의 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 이를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS™ 를 사용하였으며, 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 2 및 Fig. 3 과 같다.

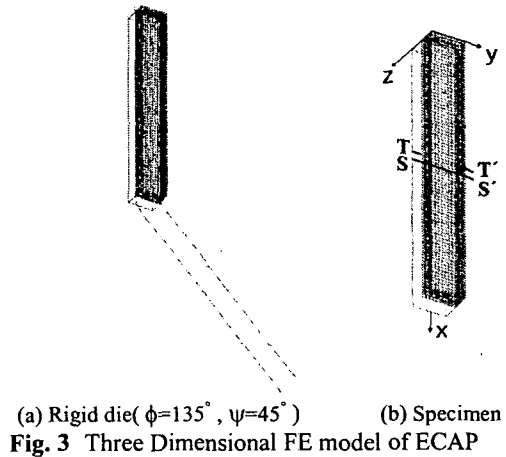
금형의 교차각(ϕ)은 135°, 만곡각(ψ)은 45°를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 시편은 2 차원 해석(Fig. 2)의 경우에 폭 5mm, 길이 40mm 이며 3 차원 해석(Fig. 3)에서는 폭 5mm, 두께 5mm, 길이 40mm 이고, 모델의 형상이 대칭인 점을 고려하여 시편의 두께 방향(z-방향)으로 절반만을 모델링하였다. 실온과 온간에서 마찰에 의한 재료의 변형거동을 연구하기 위해 금형은 강체로 가정하였다.

유한요소 모델은 2 차원 해석의 경우 4-절점 평면 변형률(plane strain) 요소를 사용하였으며, 3 차원 해석의 경우 8-절점 육면체 요소를 사용하였다. 요소수는 2 차원 해석의 경우 3,200 개($20 \leq 160$), 3 차원 해석의 경우 4,000 개($10 \leq 5 \leq 80$)를 사용하였다. 실온과 온간에서의 등통로각압축 공정에서 마찰의 영향을 알아보기 위해 유한요소해석을 위한 마찰계수는 0.0 과 0.1 을 적용하였다.

본 연구에서 사용한 지르코늄 702 합금의 물성 치로는 탄성-가공경화소성 모델을 사용하였으며, 그 값은 Table 1 과 같다.⁽¹⁴⁾



(a) Rigid die ($\phi=135^\circ, \psi=45^\circ$) (b) Specimen
Fig. 2 Two Dimensional FE model of ECAP



(a) Rigid die ($\phi=135^\circ, \psi=45^\circ$) (b) Specimen
Fig. 3 Three Dimensional FE model of ECAP

Table 1. Material properties of specimen (Zr-702 Alloy)

Temp.	E	Y.S	U.T.S
Room Temp.	99,200	321.1	468.1
371 °C	64,100	82.0	156.5

E: Young's modulus (MPa)
Y.S : Yield Strength (MPa)
U.T.S : Ultimate Tensile Strength (MPa)

4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 4 및 Fig. 5 는 교차각(ϕ) 135°, 만곡각(ψ) 45°의 금형에 대해 실온과 371°C에서 마찰계수(μ)가 각각 0.0, 0.1 일 때 등통로각압축 공정을 통해 변형된 시편내에서 발생하는 상당소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 2 차원과 3 차원 유한요소법을 통해 얻은 결과이다. 2 차원 해석은 시편의 단면(section S-S of Fig. 2(b)), 3 차원 해석은 시편의 단면 내부(section S-S of Fig. 3(b))와 단면 표면

(section T-T of Fig. 3(b))에서 각각 상당소성변형률을 얻었다.

Fig. 4의 2차원 해석 결과를 보면 상당소성변형률이 시편의 중간 부분에서 비교적 균일하게 분포하다가 상부에서 다소 커지는 경향을 보인다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 3차원 해석에서는 단면의 상부(T', S')로 갈수록 변형량이 점점 커지게 된다. 그리고 2차원과 3차원 해석에서 상당소성변형률의 크기는 마찰계수(μ)가 0.0인 경우보다 0.1인 경우에 더 크게 나타난다. 이는 마찰에 의해 상당소성변형률이 증가하는 것으로 기존 연구⁽⁵⁻⁶⁾에서의 결과와 동일하다.

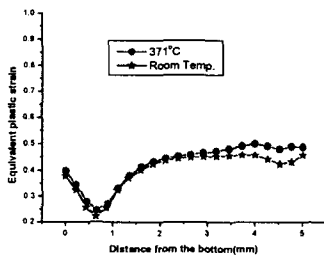
그리고 동일한 마찰계수(μ)에서 온도에 따른 상당소성변형률은 온간인 경우에 크게 나타나며, 이러한 경향은 3차원 해석 결과에서 더욱 뚜렷하다. 즉, 마찰계수(μ)가 0.1일 때 2차원 해석에서의 평균 상당소성변형률은 371°C에서 0.46이고, 실온에서는 0.43을 얻었다. 그리고 3차원 해석에서의 평균 상당소성변형률은 371°C에서 0.63이고 실온에서 0.55를 얻었다. 따라서 동일한 마찰 조건하에서 371°C인 경우가 실온인 경우보다 평균변형률이 2차원 해석에서는 약 7%, 3차원 해석에서는 약 15% 정도 향상되었다. 그리고 동일한 온도와 마찰계수를 적용한 상태에서 3차원 해석을 통해 얻은 평균 상당소성변형률의 크기는 2차원 해석에서 얻은 값보다 약 30~40% 더 크게 나타났다. 또한 단면내부

에서 상당소성변형률의 분포는 3차원의 경우 0.37~0.92로서 2차원의 0.29~0.61에 비해 그 차이가 훨씬 크고 불균일한 것을 알 수 있다.

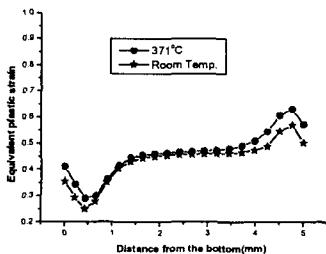
2차원과 3차원 해석에서의 이러한 해석 결과는 AA5056 Al-Mg 합금, 저탄소강 등의 재료에 대한 온간 ECAP 공정 실험에서 나타난 결과와 동일한 것이며, 온간 ECAP 공정을 통해 얻은 재료는 온도가 고온일수록 결정립의 크기(grain size), 연신률(elongation), 진변형률(true strain) 등이 증가하고 인장력(tensile strength)은 감소하는 것으로 보고되고 있다.⁽⁹⁻¹²⁾

2차원 해석은 실제 실험에서 중요한 공정 변수 중의 하나인 시료와 금형 측면 사이에 발생하는 측면 마찰(side friction)과 시편 두께 방향(z-방향)으로의 변화를 고려하지 않고 해석을 진행하므로 3차원 해석에 비해서 정확성이 떨어지게 된다. 3차원 해석 결과 시편의 단면 내부(S-S)와 단면 표면(T-T)에서 상당소성변형률의 분포가 다르고 평균 상당소성변형률의 크기가 2차원 해석의 경우보다 더 크다.

Fig. 6은 교차각(Φ) 135°, 만곡각(Ψ) 45°의 금형에 대해 실온과 371°C에서 마찰계수(μ)가 각각 0.0, 0.1일 때 이동 변위에 따라 램에 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 마찰계수(μ)와 관련없이 2차원과 3차원 해석의 두 가지 경우 모두 실온에서 측정된 하중값이 온간에서 측정된 하중값 보다 3배

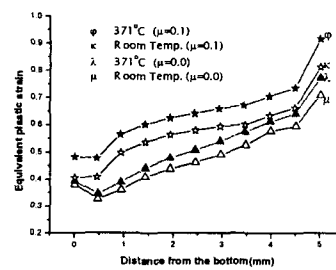


(a) Equivalent plastic strain($\mu = 0.0$)

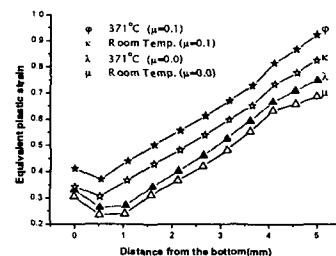


(b) Equivalent plastic strain($\mu = 0.1$)

Fig. 4 Equivalent plastic strain distribution (2-Dimensional FE analysis)



(a) Section T-T

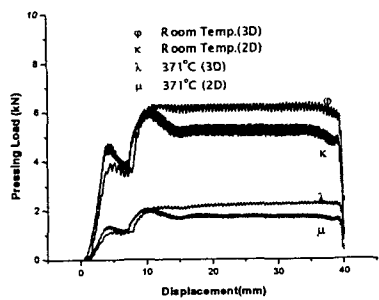


(b) Section S-S

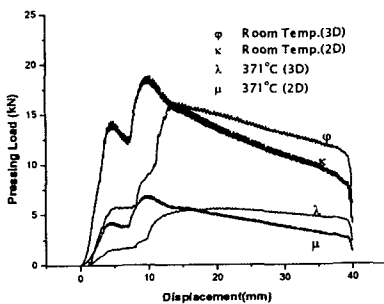
Fig. 5 Equivalent plastic strain distribution (3-Dimensional FE analysis)

정도 크게 나타났다. 또한 마찰계수가 0.1 인 경우 2 차원 해석 결과 최대하중은 실온에서 약 18.9 kN, 온간에서 약 6.9 kN 으로서 3 차원 해석 결과의 값보다 약 20%정도 크게 나타났다.

그리고 마찰계수(μ)가 0.0 인 경우에 2 차원 유한요소해석을 통해 얻은 실온과 온간(371°C)에서의 하중은 램이 12mm 정도 하강하였을 때 최고값에 이르렀다가 점점 줄어서 램이 15mm 정도 하강한 이후에는 일정한 값을 유지하지만, 3 차원 유한요소해석을 통해 얻은 실온과 온간(371°C)에서의 하중은 램이 12mm 정도 하강하였을 때 최고값에 도달하고 이 값은 공정이 종료될 때까지 지속되었다. 반면에 마찰계수(μ)가 0.1 인 경우는 2 차원과 3 차원 해석 결과 최고값에 도달한 하중이 점점 감소하였다.



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



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

Fig. 6 Pressing Load and Ram Displacement relation ($\phi=135^\circ, \psi=45^\circ$)

5. 결론

본 논문에서는 Zr-702 합금(Zr-702 alloy)에 대해서 실온(room temperature)과 온간(371°C)에서 등통로각 압축 공정을 2 차원과 3 차원 유한요소 해석을 이용하여 마찰에 의한 변형거동의 특성을 살펴보았으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 교차각(ϕ) 135° , 만곡각(ψ) 45° 금형에서 마찰계수가 0.1 일 때 Zr-702 합금 재료를 이용한 실온과 온간 조건의 3 차원 유한요소 해석 결과 변형량의 분포 형태는 유사하였으나, 변형량의 크기는 온간인 경우가 약 15% 정도 더 크게 나타났다.
2. 2 차원과 3 차원 유한요소해석 결과 마찰계수와 관계없이 실온에서 얻어진 하중값은 온간 ECAP 공정에서 얻어진 하중값 보다 약 3 배 정도 더 크다.
3. 온간 ECAP 공정의 경우 3 차원 해석 결과 시편 단면에서 상당소성변형률 분포 형태는 2 차원 해석 결과와 매우 상이하며, 단면 내부에서 변형률 분포의 차이도 더 크고 불균일하다.

후 기

본 논문은 2001 년도 원자력 기초 연구사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Furukawa. M., Iwahashi. Y., Horita. Z., Nemoto. M. and Langdon. T.G., "The Shearing Characteristics associated with Equal-Channel-Angular Pressing," *Mater. Sci. & Eng. A* 257, pp. 328~332, 1998.
2. 고흥석, 장주연, 최성규, 문인기, "구속전단가공법에서 전단 변형 특징," *대한금속학회지*, 제 37 권 제 4 호, pp. 441~447, 1999.
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. A* 287, pp. 87~99, 2000.
5. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "Pure-Zr 의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형거동과 금형에 미치는 영향," *한국정밀공학회지*, 제 18 권 제 6 호, pp. 136~140, 2001.
6. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "순수 지르코늄의 ECAP 공정에서 금형의 변형 및 채널각이 재료의 변형거동에 미치는 영향," *대한기계학회논문집 A*, 제 25 권, 제 11 호, pp. 1751~1758, 2001.
7. Nakashima. K., Horita. Z., Nemoto. M. and Langdon T.G., "Influence of Channel Angle on the

- Development of Ultrafine Grains in Equal-Channel Angular Pressing ,” *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1589~1599, 1998.
8. Berbon. P. B., Furukawa. M., Horita. Z., Nemoto. M. and Langdon. T.G., “Influence of Pressing Speed on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing,” *Metall. & Mater. Trans.* 30(A), pp. 1989~1997, 1999.
 9. Yamashita. A., Yamaguchi. D., Horita. Z. and Langdon. T.G., “Influence of Pressing Temperature on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing,” *Mater. Sci. & Eng. A* 287, pp. 100~106, 2000.
 10. Kawazoe. M., Shibata. T., Mukai. T. and Higashi. K., “Elevated Temperature Mechanical Properties of Al-Mg alloy Processed by Equal-Channel-Angular-Extrusion,” *Scripta Mater.*, Vol. 36, No.6, pp. 699~705, 1997.
 11. Shin. D.H., Park. J.J., Kim. Y.K., Park. K.T., Kim. Y.S., “Effect of pressing temperature on microstructure and tensile behavior of low carbon steels processed by equal channel angular pressing,” *Mater. Sci. & Eng. A* 323, pp. 409~415, 2002.
 12. 강효경, Bachelard. L., 김형욱, 강석봉, “온간 ECAP 법에 의해 제조된 5083 Al 합금의 미세조직과 기계적 특성,” *대한 금속·재료 학회지*, 제 39 권 제 5 호, pp. 553~559, 2001.
 13. Iwahashi. Y., Wang. J., Horita. Z., Nemoto. M. and Langdon. T.G., “Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Metals,” *Scripta Mater.*, Vol. 35, No.2, pp. 143~146, 1996.
 14. Wah Chang (An Allegheny Technologies Company), “[Http://www.alleghenytechnologies.com/WahChang/pages/products/data/zralloys.htm](http://www.alleghenytechnologies.com/WahChang/pages/products/data/zralloys.htm)”