

등통로각압축(ECAP) 공정에서 재료의 물성에 따른 변형 거동의 유한요소해석

배강호*, 권기환*, 채수원**, 권숙인***, 김명호****, 황선근****

Finite Element Analysis of Deformation Behavior due to Material Properties during Equal Channel Angular Pressing

Gang Ho Bae*, Gi Hwan Kwon*, Soo-Won Chae**, Sook In Kwon***, Myung Ho Kim**** and Sun Keun Hwang****

ABSTRACT

Much research efforts have been made on the equal channel angular pressing (ECAP) which produces ultra-fine grains. 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 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

재료 입자의 크기가 $1\mu\text{m}$ 이하인 초미세 결정 재료(ultra-fine grained material)는 그 물리적, 기계적 성질이 우수하여 최근들어 많은 주목을 받고 있다. 이러한 초미세 결정 재료를 얻기 위해 단조(forging), 압연(rolling), 압출(extrusion) 및 인발(drawing) 등과 같은 여러 방법이 연구 중에 있다.

그 중 Segal⁽¹⁾ 등에 의해 제안된 등통로각압축(ECAP, Equal Channel Angular Pressing) 공정은 단조나 압연 등과 같은 다른 공정에 비해 재료에 상대

적으로 낮은 압력으로 소성변형을 발생시켜 입자를 미세화할 수 있으며 재료 단면형상의 변화가 없어 수회의 반복 공정을 통해 높은 변형률을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 등통로각압축 공정은 이러한 기술적 장점에도 불구하고 아직 연구 단계에 머물러 있으므로 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 등통로각압축 공정에서 여러 가지 공정 변수의 영향에 대한 계속적인 연구가 필요하다.

등통로각압축 공정에 대한 기존의 실험을 통한 연구들에 의하면 변형량이 커질수록 결정립이 미세화 된다고 알려져 있다.⁽²⁾ 따라서 최근에는 유

2002년 2월 6일 접수
* 고려대학교 대학원 기계공학과
** 고려대학교 기계공학과
*** 고려대학교 금속공학과
**** 인하대학교 금속공학과

한요소해석에 의해 등통로각압축에서 공정 변수에 따른 시편의 변형거동 특성 즉, 소성변형의 크기와 분포를 규명하려는 연구가 이루어지고 있다.³⁻⁹⁾ 그러나 대부분의 유한요소법을 이용한 해석연구는 강소성 재료 등 물성치를 단순화하였거나 특정 재료의 경우에 대해 연구한 것으로서 다양한 재료에 적용하여 변형거동을 예측하기 어려운 문제가 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 최근들어 AI 재료에 대해 가공경화성이 금형과 소재 사이의 간격에 미치는 영향이 보고된 바 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 등통로각압축 공정에서 재료의 물성에 따라 변하는 소재의 변형거동 특성을 보다 상세히 규명하고자 하였다.

2. 등통로각압축 공정

Fig. 1 은 등통로각압축 공정의 기본 형상을 나타낸 것이다. 공정 중 소재의 단면 형상이 변화하지 않도록 동일한 단면을 가진 두 채널(channel)이 일정한 각으로 교차하는 형태를 갖는다. 그리고 두 채널이 교차하는 곳에서 등통로각압축 공정시 중요한 의미를 갖는 2 개의 각을 정의할 수 있으며 재료의 변형거동에 있어 내각(Φ)을 교차각이라 하고 외측부의 원호가 이루는 각(Ψ)을 만곡각이라 한다. Segal⁽¹⁾ 등과 Iwahashi⁽³⁾ 등은 이러한 금형의 외부형상을 통해 등통로각압축 공정에 대한 이론적 접근을 시도하였다. 먼저, Segal 등은 금형의 형상 중 교차각(Φ)만을 고려한 이론해석을 통해

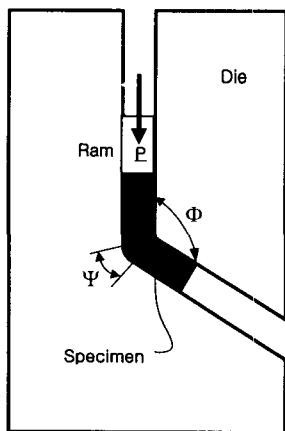


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP

관련 변형률식을 제시하였으며 Iwahashi 등은 교차각(Φ)과 만곡각(Ψ)을 함께 고려하여 관련 변형률식을 유도하였다. 식(1)은 Iwahashi 의 상당소성 변형률(equivalent plastic strain)식이다.

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

Iwahashi 의 변형률식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 교차각(Φ)과 만곡각(Ψ)에 따라 변형률이 변한다. 그러나 식(1)은 재료의 물성이나 마찰 등은 고려치 않고 단순히 금형의 형상을 고려하여 유도된 것이다. 이는 단면내에서 재료의 변형률이 재료의 물성과 관계없이 일정하다는 점을 전제로 한 것이다. 그러나 실제로 소재의 변형률은 단면내에서 균일하지 못하며 그 크기도 식 (1)의 값에 미치지 못한다.

이러한 문제점을 보완하여 보다 더 정확한 재료의 변형 거동을 예측하기 위해서 최근 등통로각압축공정에 대한 유한요소해석이 다양하게 시도되고 있다.⁽⁴⁻⁹⁾

3. 해석 방법

본 연구에서는 등통로각압축공정에서 물성에 따른 시편의 변형거동의 차이를 알아보기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS^{TM(11)} 를 사용하여 Fig. 2(a)-(b)에서 보는 바와 같이 순수 지르코늄(pure-Zr), Al 1100-0 그리고 플라스틱인 (plasticine) 재료에 각각 탄성-가공경화소성(elastic-hardening plastic), 강소성(rigid-hardening plastic) 및 완전소성(perfectly plastic) 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다. 여기서, 강소성의 경우 원활한 해석수행을 위해 실제 탄성계수의 10 배에 해당되는 값을 적용함으로써 강소성에 가까운 효과를 얻고자 하였다. Fig. 2 에 있는 재료의 물성치를 식(2)와 같은 응력-변형률 관계식으로 표현해 보면 순수 지르코늄(pure-Zr)은 $a = 1014$, $m = 0.39$ 이고 Al 1100-0 은 $a = 138$, $m = 0.23$ 이며 플라스틱인은 $a = 0.294$, $m = 0.18$ 이 된다.

$$\sigma = a\varepsilon^m \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Fig. 3 에서 보는 시편의 크기는 5mm x 30mm 이며, 여기 사용된 유한요소모델은 15,000 개(가로 5 개, 세로 30 개)의 4 절점 평면 변형률(plane strain) 요소이다. 금형은 교차각이 90° 이고 만곡각이 0° 인 강체로 가정하였고, 시편과 금형의 마찰은 없다고 가정하였다. 하중으로는 시편 상부의 변위를 아래 방향으로 26mm 이동시키는 변위 경계조건을 사용하였다. 이와 같은 해석을 통하여 재료의 물성에 따른 소재의 변형거동 차이를 분석하였다. 한편 순수 지르코늄 시편에 대한 물성치는 압축시험을 통해 얻었다. 압축시험에서 프레스 속도는 1.5mm/min 이며 상온에서 시편을 압축하였다. Al 1100-0 의 물성치는 참고문헌⁽¹²⁾을 참고하였다.

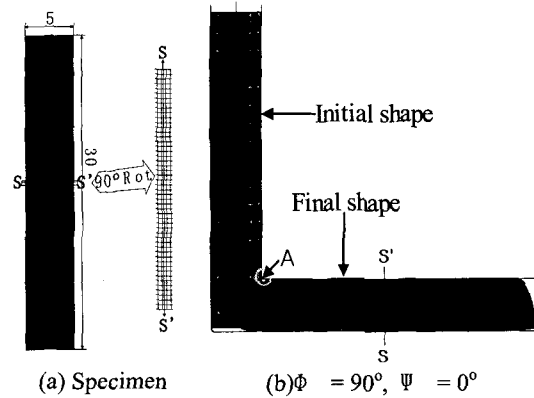


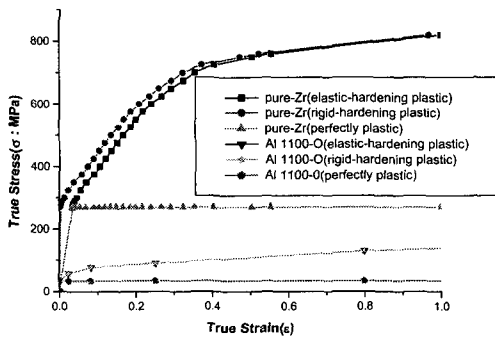
Fig. 3 FE model with rigid ECAP die

4. 해석 결과 및 고찰

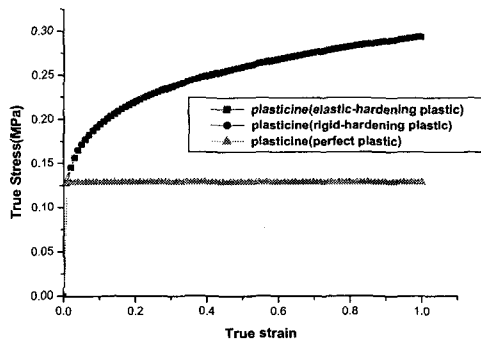
Fig. 4 - Fig. 6 은 순수 지르코늄, Al 1100-0 및 플라스틱인에 대해서 가장 일반적인 재료 모델인 탄성-가공경화 소성 모델과 이를 단순화한 강-가공경화 소성 및 완전소성 모델을 적용한 경우 등 통로각압축 공정 동안 변형된 모습을 나타낸다.

Fig. 4 - 6 을 살펴보면 재료의 종류에 따라서 또는 같은 재료에서도 물성모델에 따라 재료의 변형거동 형상이 다른 것을 알 수 있다. 먼저 Fig. 4(a) - 6(a) 와 Fig. 4(b) - 6(b) 사이에 큰 차이는 없으나, Fig. 4(a) - 6(a)가 Fig. 4(b) - 6(b)에 비해 금형과 소재와의 간격이 다소 크게 나타났다. 한편 Fig. 4(c) - 6(c)에서는 앞의 두 경우에 비해 변형 거동이 크게 차이 나는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 4(c) - 6(c) 에서와 같이 재료의 가공 경화성이 없는 완전 소성 모델을 사용할 경우 세 종류의 재료 모두에 대해 금형과 소재 사이의 간격이 거의 없음을 알 수 있다. 이는 기존의 연구 결과와도(10) 일치하는 것으로서 금형과 소재 사이의 간격 발생에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 재료의 종류에 관계없이 가공 경화성임을 알 수 있다. 즉, 가공경화지수(strain hardening exponent, m)가 작을수록 그 간격이 좁아지며 단면 내에서의 변형도 균일하다고 할 수 있다.

또한 Fig. 4(a) - 6(a) 에서 보는 바와 같이 가장 일반적인 모델인 탄성-가공경화소성 모델의 경우 금형과 재료 사이의 간격은 순수 지르코늄, Al 1100-0 및 플라스틱인의 순으로 크게 나타났으며,

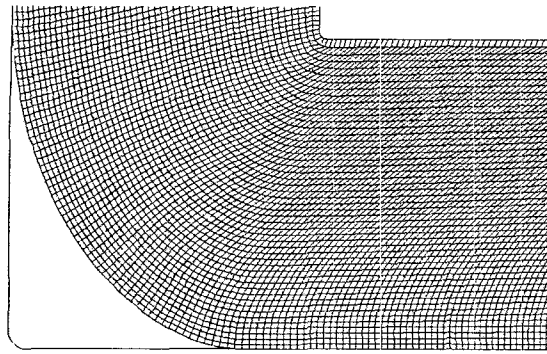


(a) pure-Zr and Al 1100-0

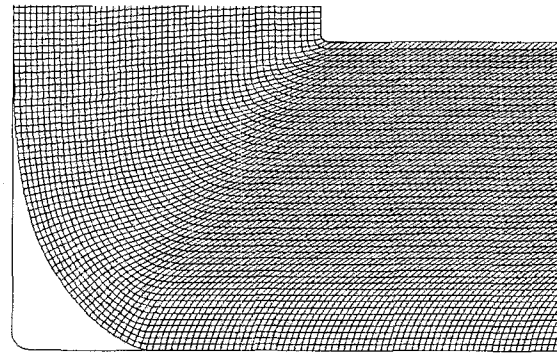


(b) pasticine

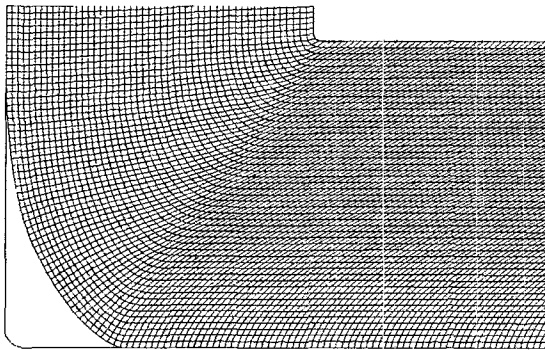
Fig. 2 Stress-strain relation



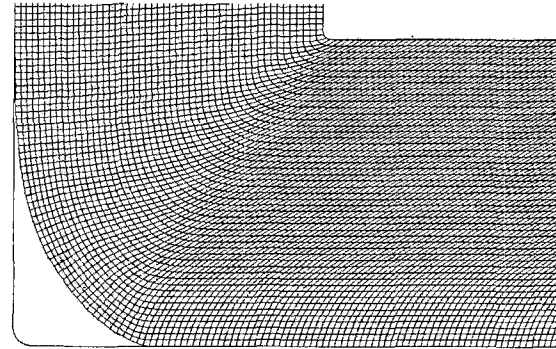
(a) Elastic-hardening plastic model



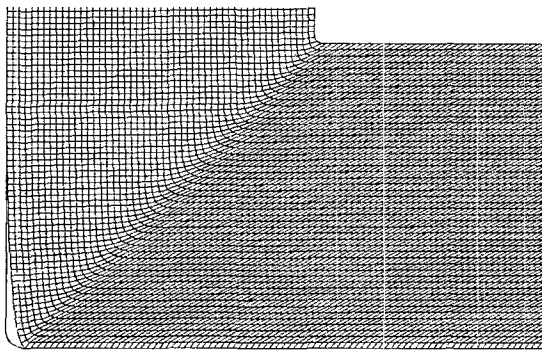
(a) Elastic-hardening plastic model



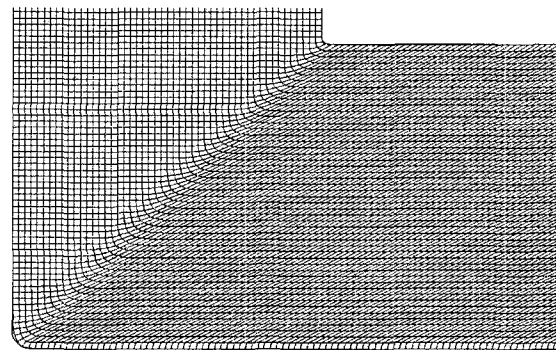
(b) Rigid-hardening plastic model



(b) Rigid-hardening plastic model



(c) Perfectly plastic model



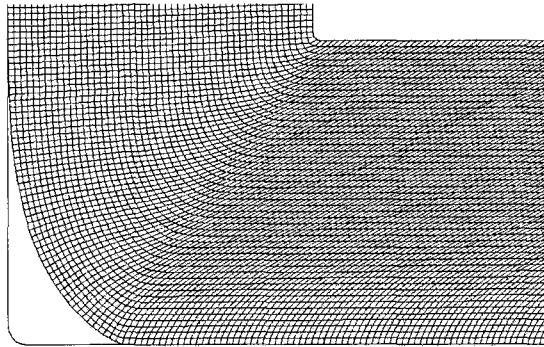
(c) Perfectly plastic model

Fig. 4 Deformed mesh during ECAP with pure-Zr

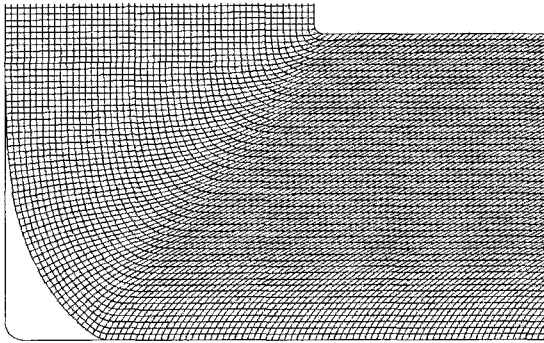
Fig. 5 Deformed mesh during ECAP with Al 1100-0

이는 재료의 가공 경화성, 탄성 변형량, 항복응력 등이 복합적으로 작용하여 나타난 것이라고 할 수 있다. 이 중 탄성 변형량의 영향은 탄성-가공경화

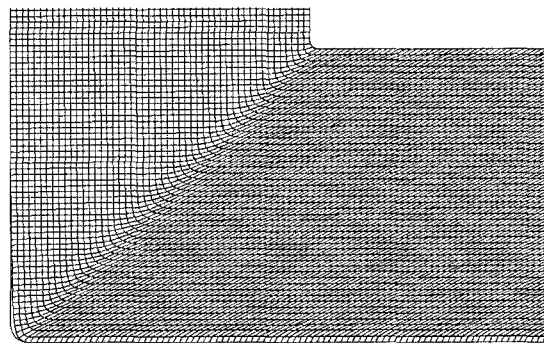
소성 모델인 Fig. 4(a), 5(a), 6(a)와 강-가공경화 소성 모델인 Fig. 4(b), 5(b), 6(b)를 비교해 보면 알 수 있다. 즉 Table. 1 에서 보는 바와 같이 각 재료에서



(a) Elastic-hardening plastic model



(b) Rigid-hardening plastic model



(c) Perfectly plastic model

Fig. 6 Deformed mesh during ECAP with plasticine

탄성 변형률(elastic strain)의 크기는 순수 지르코늄, 플라스틱인 및 Al 1100-0 의 순으로 0.035, 0.01, 0.0005 이므로 탄성 변형의 영향을 배제할 때,

Table 1 Material properties of pure-Zr, Al 1100-0 and plasticine

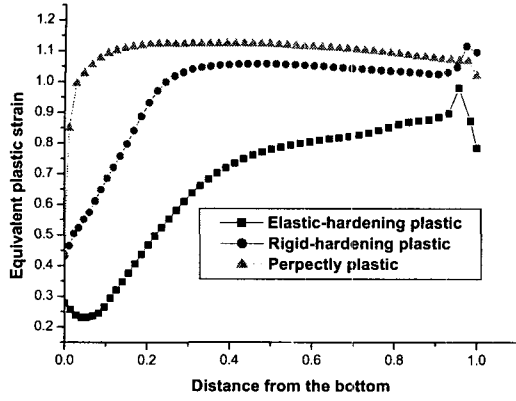
Materials	E	Y.S	U.T.S	E.S
Pure-Zr	7714	270	820	0.035
Al 1100-0	67120	33.56	154.76	0.0005
Plasticine	12.73	0.12857	0.2823	0.01

E : Young's modulus(MPa)
 Y.S : yield strength(MPa)
 U.T.S : ultimate tensile strength(MPa)
 E.S : elastic strain

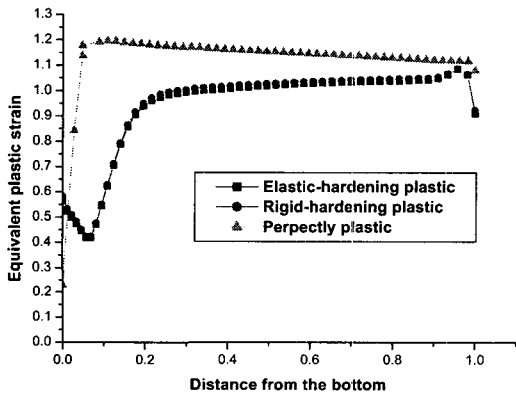
금형과 소재와의 간격은 탄성 변형률의 크기에 대략 비례하여 작아진다고 할 수 있다. 등통로각압축 공정에서 금형과 재료사이의 간격이 클수록 금형의 두 채널 교차부에서 재료는 금형의 형상을 따라 변형을 하지 않고 큰 원호를 따라서 변형한다. 이는 마치 만곡각이 있는 금형에서의 경우와 유사하다. 즉, 소재와 금형과의 간격이 클수록 금형의 만곡각이 큰 경우와 유사하므로, 소재의 아래쪽에서 소성 변형이 작은 영역이 증가하며, 변형도 균일하지 못하다. 따라서 이는 균일하고 또 큰 소성 변형을 얻고자 하는 목적에 부합되지 못하므로 소재와 금형사이의 간격을 줄이기 위해서는 가급적 가공경화성이 작은 재료를 사용해야 할 것이다.

Fig. 7 은 등통로각압축 공정중 Fig. 3(b)에서 정의된 단면 S-S'에서 상당소성변형률(equivalent plastic strain)의 분포를 나타낸다. Fig. 7 의 상당 소성변형률 분포는 Fig. 4-6 에서 나타난 재료의 변형 거동을 뒷받침해 주고 있다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이 완전 소성모델을 사용하는 경우 순수 지르코늄, Al 1100-0 및 플라스틱인의 세가지 재료에 대해 S-S'에서 상당소성변형률의 크기가 1.1~1.15 정도로 매우 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 4(c)-6(c)에서 보는 바와 같이 단면내에서 요소망의 균일한 변형 모습과도 일치한다. 또한 교차각 90°, 만곡각 0° 의 등통로각압축 공정에 대한 Iwahashi 등의 이론적 상당 소성변형률을 나타내는 식(1)에서 얻는 값 1.155 와 상당히 유사함을 알 수 있다.

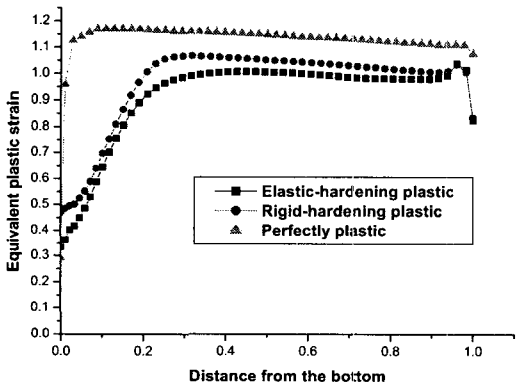
한편 Fig. 7(a)의, 순수 지르코늄 대로의 경우 완



(a) pure-Zr



(b) Al 1100-0



(c) plasticine

Fig. 7 Equivalent plastic strains at section S-S'

전 소성 모델, 강-가공경화 소성 모델 및 탄성-가공경화소성의 순으로 변형률이 큰 것을 알 수 있다. 이는 재료에 발생하는 변형률의 크기가 Fig. 4에서 보는 바와 같이 금형과 소재 사이의 간격의 크기와 그 순서가 같으므로 서로 상당히 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다. 그리고 탄성-가공경화소성 및 강-가공경화 소성 모델을 적용했을 때 S-S'단면에서의 변형률 분포가 불균일하며 시편의 하부에서 변형률이 작은 것은 Fig. 4(a), 4(b)에서의 요소망 변형 모습에서도 관찰할 수 있다.

Fig. 7(b)- 7(c)의 Al 1100-0 와 플라스틱인 재료의 경우에도 완전 소성, 강-가공경화 소성 그리고 탄성-가공경화소성의 순으로 변형률이 크게 나타나지만, Fig. 7(b)의 Al 1100-0에서는 강-가공경화 소성 모델과 탄성-가공경화소성 모델 사이의 변형률 차이가 매우 작음을 알 수 있다. 이는 또한 Fig. 5(a)-(b)에서 금형과 소재 사이의 간격의 차이가 매우 작다는 사실과 일치한다. 플라스틱인 재료의 경우 강-가공경화 소성 모델과 탄성-가공경화소성 모델 사이의 변형률 차이가 어느 정도 있음을 알 수 있으며, 이는 Fig. 6(a)-(b)에서 금형과 소재 사이의 간격 차이가 어느 정도 있다는 사실과 일치한다. 또한, Fig. 7(a), (b), (c)에서 보는바와 같이 단면 S-S'에서 시편의 변형은 시편이 교차각 부위를 지날 때 주로 발생한 것이다. 그러나 일반적으로 유한요소해석에서는 금형의 모서리 A 부근 (Fig. 3)에서 시편이 모서리를 불가피하게 침투하는 문제가 발생하게 되며, 이로 인해 이 부근에서 응력 및 변형분포가 다소 특이하게 나타나게 된다. 따라서 시편의 상부(시편 하부로부터의 거리가 5mm 부근)에 특이한 변형이 나타나게 되며, 이러한 불균일한 변형은 재료의 물성에 따라 그 분포가 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉, 탄성-가공경화소성 모델에서는 이러한 불균일한 변형의 영향이 가장 크게 나타났으며, 강-가공경화 소성 모델과 완전 소성 모델의 경우 이러한 불균일한 변형의 영향이 작게 나타났다. 즉, 국부적인 변형이 전 달되는 범위가 재료의 물성에 따라 다르다는 것을 보여 주는 것이다. 이와 같은 현상을 종합해 볼 때, 가공 정확성이 없는 완전 소성 모델, 즉 이상적인 모델에서는 재료의 종류에 관계없이 상당소성변형률이 단면내에서 거의 균일하고 이론해로 알려진 식(1)에서 얻은 값과 거의 일치하게 된다. 또한 Fig. 7(a)-(c)에서 보는 바와 같이 가공경화지

수가 큰 재료일수록 상당 소성변형률이 작아지게 되고 단면내에서도 불균일한 분포를 이루고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 재료의 탄성 변형량의 크기도 금형과 소재 사이의 간격에 영향을 미치며 탄성 변형량이 클수록 금형과 소재 사이의 간격이 커지고 또 단면내에서 변형이 불균일해진다.

5. 결론

본 논문에서 등통로각압축 공정에 대한 유한요소 해석을 통해 가공 경화성, 탄성계수, 항복응력 등을 고려한 물성의 변화에 따른 시편의 변형거동특성을 연구하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 등통로각압축 공정에서 재료의 물성은 소재의 변형거동에 큰 영향을 미친다. 특히 재료의 가공경화성, 탄성변형률, 항복응력 등이 영향을 미치게 되며, 이 중 재료의 가공경화성의 영향이 가장 크다.
2. 등통로각압축 공정에서 소재의 변형거동은 금형과 소재 사이의 간격과 밀접한 관계가 있다.
3. 재료의 가공 경화지수가 작을수록 등통로각압축 금형과 재료사이의 간격이 작아지며 재료에 상대적으로 균일하고 큰 변형률이 발생한다. 또한 가공경화지수가 0 일 경우, 재료의 변형거동은 기존의 이론식에서 예측한 것과 가장 유사하다.
4. 재료의 탄성변형 구간의 폭, 즉 탄성 변형률이 작을수록 금형과 재료사이의 간격이 작아지며 따라서 재료에 상대적으로 큰 변형률이 발생한다.

후 기

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

참고문헌

1. V.M. Segal, V.I. Rezenikov, A.E. Drobyshevskiy, V.I. Kopylov, "Plastic Working of Metals by Simple Shear," *Metally(Eng. Trans. : Russian Metallurgy)* Vol.1, pp. 99-105, 1981.
2. Kiyotaka Nakashima, Zenji Horita, Minoru NeMoto and Terence G. Langdon, "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.
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. Y. Wu, I. Baker, "An Experimental Study of Equal Channel Angular Extrusion," *Scripta Mater.* Vol. 37, No. 4, pp. 437-442, 1997.
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, "등통로각압축(ECAP) 공정의 유한요소해석," *대한금속·재료 학회지*, 제 38 권, 제 1 호, pp. 136-140, 2000.
8. 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.
9. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "순수 지르코늄의 ECAP 공정에서 금형의 변형 및 채널각이 재료의 변형거동에 미치는 영향," *대한기계학회 논문집 A*, 제 25 권, 제 11 호, pp. 1751-1758, 2001.
10. H.S.Kim, M.H.Seo, S.I.Hong, "On the die corner gap formation in equal channel angular pressing," *Master. Sci. Eng.* A291, pp. 86-90, 2000.
11. ABAQUS Standard User's Manual for version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket.
12. Stephen H. Crandall, Norman C. Dahl, Thomas J. Lardner, "An introduction to the mechanics of solids," Second edition, pp. 327.