

Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형거동과 금형에 미치는 영향

권기환*, 채수원**, 권숙인***, 김명호****, 황선근****

Frictional Effects on the Deformation Behavior of Materials and Die during Equal Channel Angular Pressing (ECAP) with Pure-Zr

G.H. Kwon*, S.W. Chae**, S.I. Kwun***, M.H. Kim****, S.K. Hwang****

ABSTRACT

Much research efforts have been made on the equal-channel angular pressing(ECAP) that produces ultra-fine grain size materials. Recently many materials have been tested for ECAP process, and in this paper pure-Zirconium is considered due to its applicability to nuclear reactors. Among many process parameters of ECAP, frictional effects on the deformation behavior of materials and on the stress distribution of die have been investigated. The finite element method has been employed in order to investigate this issue, and experiments have also been made to verify the numerical results.

Key Words : Equal-channel angular pressing (ECAP)(등통로각압축), Finite element method(유한요소법), pure-Zr (순수 지르코늄), Friction(마찰).

1. 서론

일반적으로 공업 재료의 강화 기구를 사용하여 재료의 강도를 증가시키면 재료의 인성은 반대로 줄어든다. 따라서 주어진 금속학적 조건에서 재료가 고강도와 고인성 모두를 갖도록 하는 개선 방법이 필요하다. 이러한 소재개발 방법 중에서 소재의 결정립을 미립화시켜서 초미립 금속을 얻는 방법에 대한 연구가 최근들어 진행되고 있다. 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. ECAP 공정은 다결정 금속을 특별히 고안된 금형을 통과시켜 재료에 극심한 소성변형을 가함으로써 재료의 결정립을 미립화시키는 방법으로 최근들어 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻³⁾

ECAP 가공에 사용되는 금형은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 거의 동일한 단면을 갖는 두 채널(channel)이 일정한 각으로 교차하는 특수한 형태를 가진다. ECAP 공정에서 두 채널이 이루는 각은 교차각(Φ)이라 하며, 두 채널이 교차하는 외벽 부분에 존재하는 원호를 정의하는 각을 만곡각(Ψ)이라 한다. ECAP 공정에서 재료는 두 채널이 교차하는 부분을 통과하면서 극심한 소성 변형을 한다.

2001년 3월 6일 접수
* 고려대학교 기계공학과 대학원
** 고려대학교 기계공학과
*** 고려대학교 금속공학과
**** 인하대학교 금속공학과

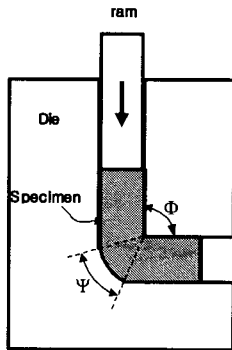


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP.

이에 대한 이론적 해석은 Segal 등⁽²⁾이 최초로 제시하였다. Segal 등은 ECAP 에 의한 변형을 단순 전단(simple shear)변형으로 취급하여 만곡각(Ψ)이 0° 인 금형에 대하여 금형과 재료의 마찰을 무시한 채 전단 변형률과 교차각(Φ)의 관계식을 유도하였다. 그리고 Iwahashi 등⁽³⁾은 ECAP 공정의 보다 일반적인 경우에 대한 변형률을 이론적으로 계산하였다. Iwahashi 등은 금형과 시편의 마찰을 무시하고 시편이 채널의 교차 부분을 지날 때 속도가 같다고 가정하고 이로 인해 발생하는 경로차로 전단 변형률을 수식화 하였다. 그러나 Iwahashi 의 순수 전단이론에서 이루어진 가정으로 인하여 실제 ECAP 공정에서 얻어진 결과와 이론식에서 얻어진 값에는 실제로 많은 차이가 발생한다. 특히, 소성변형은 시편의 단면 전체에 걸쳐 균일하게 발생하는 것이 아니고 외벽 근처에서는 변형량이 상대적으로 감소하는 등과 같이 영역별로 다른 변형 거동이 시편의 단면에 발생한다.⁽⁴⁻¹¹⁾ 따라서 보다 더 정확한 재료의 변형 거동을 예측하기 위해서 ECAP 공정에 대한 유한요소해석이 최근들어 시도되고 있다.

ECAP 공정에 영향을 미치는 공정 변수로는 금형의 교차각 및 만곡각 뿐만 아니라, 마찰, 재료의 물성치, 금형의 변형 등 여러 가지가 있다. 이 중 본 논문에서는 마찰이 재료의 변형거동과 금형에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 무마찰 조건으로 해석한 연구로, 김희수 등⁽⁴⁾은 ABAQUS[®]를 사용하여 재료의 가공 경화를 무시하고 교차각 90° 에서 만곡각의 변화에 따른 시편의 변형 거동을 2 차원으로 해석하였으며, 서민홍 등⁽⁵⁾도 재료의 탄성을 무시한 강소성 평면 변형률 요소로 모

델링한 알루미늄 시편에 대한 ECAP 공정을 DEFROFORM[®]으로 해석하였다. 마찰을 고려하여 해석한 연구로, Prangnell 등⁽⁶⁾은 강소성 평면 변형률 요소로 모델링한 알루미늄 시편에 대하여 ECAP 금형의 만곡각을 0° 로 하고 교차각이 90° 인 경우와 100° 인 경우를 DEFROFORM[®]으로 해석하였다. Bowen 등⁽⁷⁾은 강소성 평면 변형률 요소로 모델링한 알루미늄 시편에 대하여 만곡각을 0° 로 하고 교차각이 90° 인 경우와 120° 인 경우의 ECAP 공정을 DEFROFORM[®]으로 해석하였다. 서민홍 등⁽⁸⁾도 강소성 평면 변형률 요소로 모델링한 알루미늄 시편에 대하여 만곡각 90° , 교차각 90° 인 경우의 ECAP 공정을 DEFROFORM[®]으로 해석하였다. 이와 같이 기존의 유한요소 해석은 강체 금형을 사용하여 강소성 알루미늄 재료에 대한 마찰의 영향을 무마찰 해석과 단순 비교함으로써 마찰 계수의 변화에 따른 시편 변형거동의 차이에 대한 충분한 정보를 얻을 수 없었다. 또한 초미립 금속이 갖는 특성을 요구하는 원자로 부품에 많이 사용되는 Zr-기에 대한 ECAP 공정은 아직 연구된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 pure-Zr 에 대한 ECAP 공정에서 탄소성 재료모델을 사용하여 마찰계수에 따른 재료의 변형거동을 ABAQUS[®]로 분석하였다. 그리고 금형을 강체로 모델링함으로써 금형에 작용하는 응력이나 금형의 변형 등에 대한 정보를 얻을 수 없었던 점을 개선하기 위하여 금형을 탄소성으로 모델링하여 강체 금형에서 얻을 수 없었던 금형에 대한 정보를 분석하였다. 또한 pure-Zr 에 대한 ECAP 공정을 실험하고 이를 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

2. 유한요소해석과 실험

ECAP 공정에 대한 유한요소 해석에서 마찰이 재료 변형거동과 금형에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 교차각(Φ)이 135° 이고 만곡각(Ψ)이 45° 이며, 금형과 시편을 모두 탄소성으로 모델링하였다. 여기서는 금형을 모델링하기 위해 2184 개의 평면 변형률 요소를 사용하였으며, Pure-Zr 시편은 가로 10 개, 세로 80 개, 총 800 개의 평면 변형률 요소로 모델링하였다. 유한요소 해석에 적용된 경계 조건으로는 램을 아래로 40mm 만큼 이동하도록 변위 경계를 주었으며 금형의 채널면을 제외한 모든 외부 절점들을

모든 방향에 대하여 구속하였다. 그리고 냉간 가공에서 발생하는 마찰은 일반적으로 마찰 계수 0.3 이하이므로, ECAP 공정에 대한 유한요소 해석에서 금형과 시편의 마찰 계수를 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 으로 하여 마찰의 영향을 분석하였다. 한편 금형은 SK11 종으로 물성치는 항복응력이 1.48GPa 이고 인장강도는 1.8GPa 이며, pure-Zr 에 대한 물성치는 ECAP 공정에 가장 근사한 재료 시험인 압축시험에서 얻은 값을 사용하였다. 압축시험에서 프레스 속도는 1.5mm/min 이고, 공칭 변형률 속도는 0.003/sec 이며, 상온에서 시편을 압축하여 Fig. 3 과 같은 응력-변형률 선도를 얻었다.

Fig. 4 는 ECAP 공정에 의해 발생한 시편의 변형량을 상당 소성 변형률(equivalent plastic strain)로 보여주고 있다. 마찰에 따른 시편 변형거동의 차이를 살펴보면, Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 마찰이 없을 경우에는 시편의 폭을 따라서 상당 소성 변형률의 차이가 발생하지만 시편 길이 방향으로는 비정상상태를 제외하고는 상당 소성 변형률이 일정하다. 그러나 마찰이 존재할 경우에는

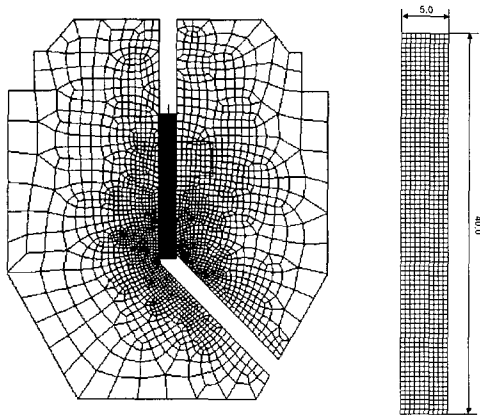


Fig. 2 FE model of ECAP with deformable die.

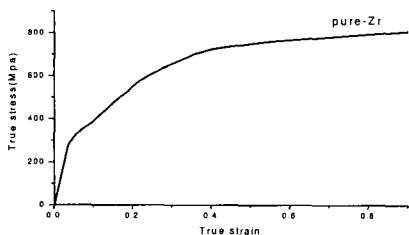


Fig. 3 Material property of pure-Zr.

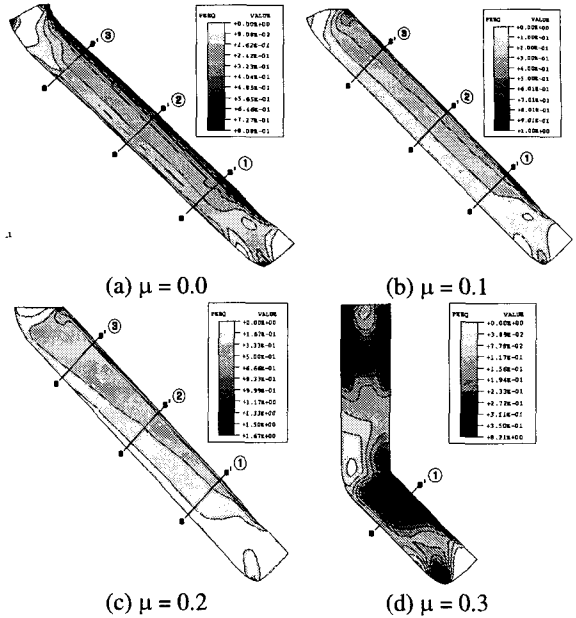


Fig. 4 Equivalent plastic strain distributions due to friction.

Fig. 4(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 마찰이 없을 경우와 마찬가지로 시편의 폭을 따라서 변형률의 차이가 발생할 뿐만 아니라 시편 길이 방향으로 비정상상태를 제외하고 시편의 상부로 갈수록 상당 소성 변형률이 증가함을 알 수 있다. 그리고 마찰 계수가 0.3 인 경우에는 시편 상부의 유한 요소들이 양쪽 벽면 근처에서 과도하게 찌그러져서 해석이 중단되었다. 이와 유사한 현상을 ECAP 공정에 대한 실험에서도 관찰할 수 있었는데 정밀 연마를 하지 않은 시편을 사용한 ECAP 공정에서 시편이 금형의 벽면에 고착되어 ECAP 가공을 할 수 없었다. 보다 자세한 재료 변형거동을 조사하기 위해 해석이 종료된 상태에서 Fig. 4 와 같이 시편의 단면①,②,③에서 상당 소성 변형률 분포를 각 절점에서의 값으로 살펴보았다. 단면①,②,③에서 상당 소성 변형률 분포를 살펴보면, Fig. 5 에서 보는 바와 같이 외부면 부근의 약간의 예외를 제외하고는 마찰에 상관없이 상당 소성 변형률이 금형의 외부면(S)에서 내부면(S')으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 마찰에 의한 단면①,②,③에서 상당 소성 변형률 분포의 차이는 가공경로 방향으로서는 마찰이 없을 경우에는 상당 소성 변형률이 일정한 데 비해 마찰을 고려할 경우에는 마찰이 증가할수록 시편의 상부로 갈수록

상당 소성 변형률이 증가한다. 이와 같이 상당 소성 변형률이 증가하여 약 0.33 정도에 도달하면, 변형률은 더 이상 증가하지 못하고 다만 단면에서 상당 소성 변형률이 약 0.33 인 범위가 외부면(S)으로 넓어진다는 것을 알 수 있다.

한편 기존의 ECAP 공정에 대한 해석에서는 강체금형을 사용함으로써 금형에 대한 정보를 얻을 수 없었으므로 본 논문에서 탄소성 금형으로 모델링하여 금형에 작용하는 von Mises 응력을 살펴본다. 금형에 작용하는 von Mises 응력은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 마찰이 증가하면 최대 von Mises 응력은 약 500MPa에서 약 1.4GPa로 증가하고 응력이 금형에 미치는 범위도 증가한다. 그리고 최대 응력은 일반적으로 두 채널이 만나는 교차부 근처에 작용한다. 그러나 Fig. 6(d)에서 보는 바와 같이 마찰 계수가 일정치 이상일(본 논문에서는 마찰 계수가 0.3 일) 경우에는 두 채널이 만나는 교차부만 아니라 시편의 상부에도 매우 큰 von Mises 응력이 작용한다는 것을 알 수 있다.

ECAP공정에 대한 해석이 중단된 경우를 제외하고는 금형에 작용하는 최대 von Mises 응력 약 871MPa로 금형의 항복응력(1.48GPa)보다 작으며, 또한 금형의 변형도 극히 미세하므로 충분히 큰

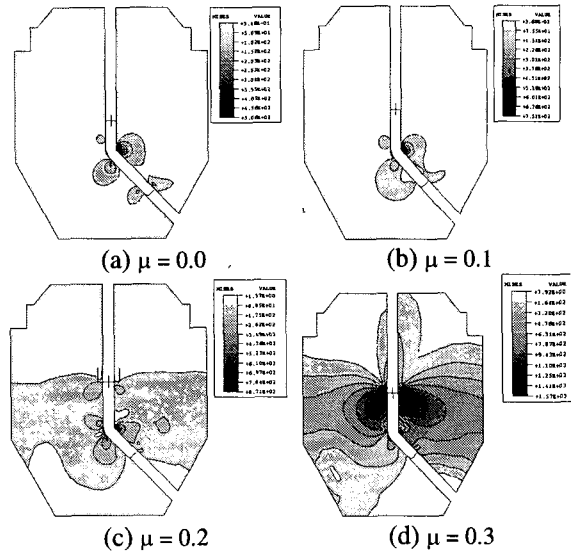


Fig. 6 Von Mises stress distributions of die due to friction.

강성을 가지는 금형을 사용한 ECAP 공정에 대한 유한요소 해석에서 금형을 강체 요소로 모델링하더라도 시편의 변형 거동에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 따라서 ECAP 공정에서 금형에 대한 정보가 필요한 경우에만 금형을 탄소성 모델링하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

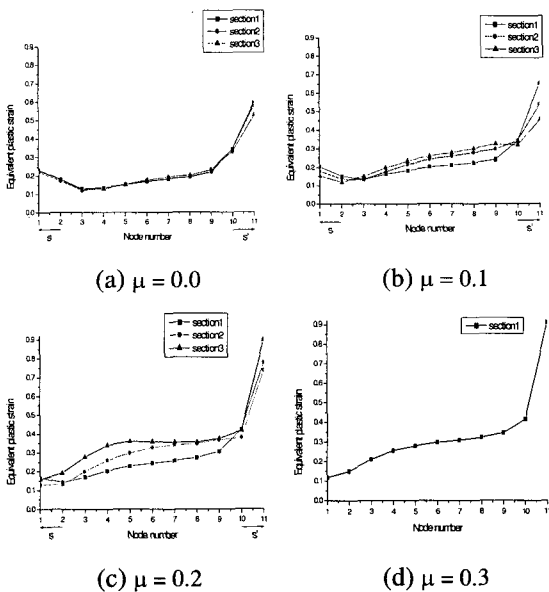


Fig. 5 Equivalent plastic strain distributions at sections S-S'.

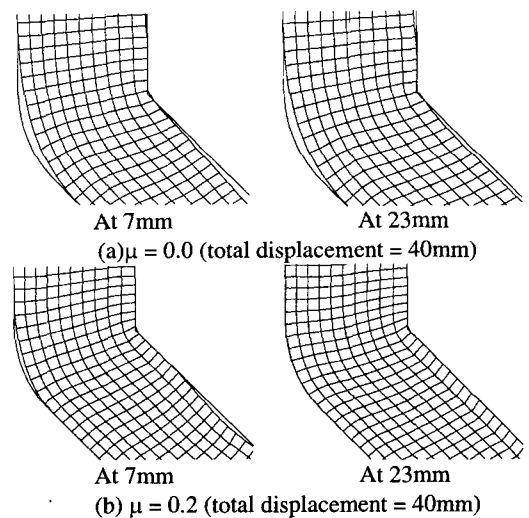


Fig. 7 Deformation behaviors at the intersection area due to friction.

이상의 연구에서 마찰은 ECAP 공정에 시편 길

이 방향으로 재료의 변형 거동의 차이를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 가공경로 방향으로 발생하는 변형 거동의 차이는 재료와 금형과의 마찰 때문에 출구부에서 역압력(back pressure)이 발생하고 이로 인하여 시편의 진행이 방해됨으로써 일어나는 현상으로 판단된다. 즉, 이와 같은 현상은 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 두 채널이 교차하는 만곡부에서 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 마찰이 없을 경우에는 시편과 만곡부에 존재하는 틈이 해석 초기나 말기에 동일한 간격을 유지하지만 마찰이 존재하는 경우에는 해석 초기에 존재하던 틈이 해석이 진행되면서 점차 줄어든다. 이렇게 만곡부에 존재하는 틈이 줄어들면 시편에서 경험하는 만곡부가 줄어들고 이와 같은 만곡부의 감소는 상당 소성 변형률 증가의 요인으로 생각된다.

유한요소 해석결과와 비교하기 위해 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 교차각(Φ)이 135° 이고 만곡각(Ψ)이 45° 이며, 입구 쪽 채널(channel)의 면적이 $5.15\text{mm} \times 5\text{mm}$ 인 출구 쪽 채널의 면적이 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 인 SK11 종-금형과 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 40\text{mm}$ 인 정사각기둥의 pure-Zr 에 대한 ECAP 공정을 실험하였다. 여기서 금형의 입구쪽 채널의 단면적이 시편의 단면적보다 큰 이유는 ECAP 공정에서 시편을 압축할 때 입구 쪽 채널에서 발생하는 시편의 탄성 팽창 문제에 인한 마찰을 줄이기 위함이다.

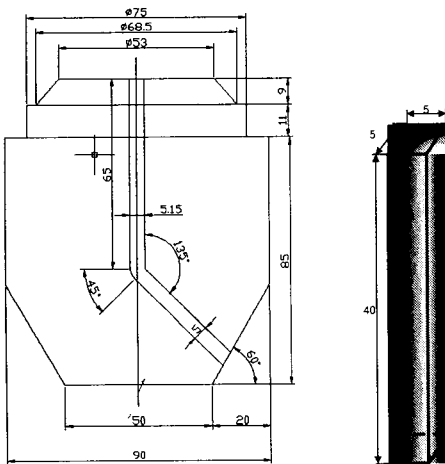


Fig. 8 Configuration of die and specimen for ECAP experiments.



Fig. 9 Shear pattern of a pure-Zr specimen.

또한 시편과 금형의 마찰을 줄이기 위하여 입도가 $0.25 \mu\text{m}$ 인 Al_2O_3 분말로 시편과 금형의 채널을 연마하고, ECAP가공 시에는 시편과 금형의 채널면에 MoS_2 spray 윤활제를 도포하였다. 가공 조건은 물성치를 얻을 때 사용된 조건과 동일하며 20 ton급의 인장/압축시험기로 시편을 밀어낸다.

ECAP공정에 대한 실험에서 1 회 ECAP공정 후 시편의 유효 변형률을 측정하기 위해 시편에 2mm간격으로 직선을 그은 후 ECAP가공하였다. 그 때의 시편의 상태는 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 약 60° 로 기울어졌으며, 아래쪽(S)에서 약 0.8~1mm 정도의 영역이 거의 수직으로 되어있는 것을 볼 수 있다. 실험에서 얻는 직선의 기울기로부터 상당 소성 변형률을 계산하면 약 0.33 정도이며 이 값을 유한요소 해석결과와 비교하면 Fig. 5 에서 마찰 계수가 0.2 인 경우에 근사하다. 그러나 얻어진 가공력(Fig. 10㉠)⁽¹¹⁾과 유한요소 해석 결과와 비교 보면 마찰 계수가 0.1 인 ECAP 공정의 해석에서

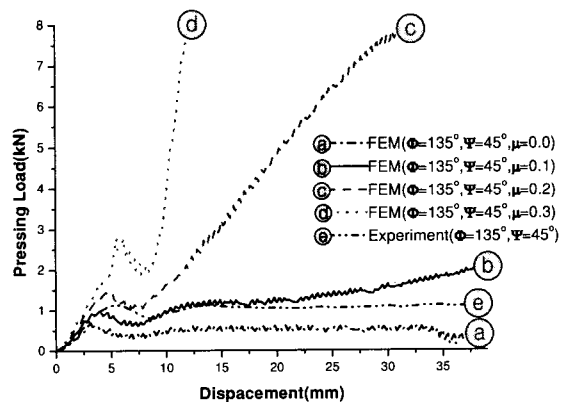


Fig. 10 Load-displacement relationships due to friction. (The load-displacements, a, b, c, d, are obtained by the FEM, while load-displacement, e, is obtained by experiments.)

얻어진 가공력의 크기와 패턴이 ECAP 공정 실험에서 얻어진 가공력의 그것과 매우 근사하다는 것을 알 수 있다. 이는 유한요소 해석에서 금형 채널의 교차부에서 시편이 금형을 침투함으로써 실험보다 적은 변형량을 얻어지는 것으로 판단된다.

마찰에 따른 가공력의 차이를 살펴보면, Fig. 10에서 보는 바와 같이 마찰이 증가할수록 가공력이 증가한다. 그리고 마찰이 존재할 경우에는 변형이 진행될수록 가공력이 증가함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 램의 변위가 증가함에 따라 출구쪽 채널에 형성되는 역압력이 증가할 뿐만 아니라 시편의 변형량도 함께 증가하기 때문에 더 큰 가공력을 필요로 한다.

3. 결론

본 논문에서는 ECAP 공정에 대한 유한요소 해석에서 마찰에 따른 시편 변형거동과 금형 응력 분포 상태를 고찰하였으며, 이를 실제 실험결과와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰이 존재하면 시편 길이 방향으로 램의 변위가 증가함에 따라 변형률이 증가한다. 이러한 현상은 마찰이 클수록 증가한다. 따라서 ECAP 공정에서 전체적으로 균일한 재료 변형 거동을 얻기 위해 최대한 마찰을 줄여 주어야 한다.
2. 마찰에 의한 출구쪽 역압력은 만곡부에서 시편과 금형사이에 발생하는 틈을 감소시킴으로써 변형률을 증가시키는 것으로 판단된다.
3. 마찰이 클수록 금형의 교차부에 작용하는 응력이 증가한다. 또한 마찰 계수가 일정치 이상일 경우에는 두 채널이 만나는 교차부만 아니라 시편의 상부에도 큰 응력이 작용한다.
4. 마찰이 증가할수록 가공력이 증가하는 현상은 램의 변위가 증가함에 따라 입구쪽보다 좁은 출구쪽 채널에 형성되는 역압력과 시편의 변형률이 증가하기 때문이라고 판단된다.

후 기

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

참고문헌

1. 장용순, 고대철, 김병민, "유한요소법에 의한 열간성형공정에서 강의 미세조직변화 예측," 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 7 호, pp. 129~138, 1998.
2. 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.
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 Pressing에서의 변형거동해석," *대한금속학회지*, 제 37 권, 제 9 호, pp. 1064~1068, 1999.
5. 서민홍, 김형섭, 홍순익, "등통로각압축(ECAP)공정의 유한요소해석," *대한금속·재료 학회지*, 제 38 권 제 1 호, pp. 136~140, 2000.
6. 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.
7. 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.
8. 서민홍, 김형섭, "등통로각압축(ECAP)공정에서 다이 마찰 효과에 대한 수치적 해석," *한국소성가공학회지*, 제 9 권, 제 3 호, pp. 219~225, 2000.
9. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "Pure-Zirconium의 ECAP 공정에서 금형의 교차각과 만곡각에 따른 재료의 변형거동해석," *대한기계학회 추계학술대회논문 A*, pp. 747~753, 2000.
10. 박상석, 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황선근, "Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰의 영향 연구," *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 409~412, 2000.
11. 황선근 외, "컴퓨터 모델링과 신 공정 기술에 의한 초미립 조직의 원자로심형 고성능 금속 소재 개발," *원자력 기초연구사업 보고서*, 2000.