

Pure-Zr 의 ECAP 공정에서 마찰에 따른 금형의 소성 변형

배강호*, 권기환(고려대 대학원 기계공학과), 채수원(고려대 기계공학과), 권숙인(고려대 금속공학과), 김명호, 황성근(인하대 금속공학과)

Plastic Deformation of Die due to Friction during Equal Channel Angular Pressing

Gang Ho Bae*, Gi Hwan Kwon(Mech. Eng. Dept. KU), Soo Won Chae(Mech. Eng. Dept. KU), Sook In Kwun(Met. Eng. Dept. KU), Myung Ho Kim, Sun Keun Hwang(Met. Eng. Dept. Inha Univ.)

ABSTRACT

Recently equal-channel angular pressing (ECAP) has been employed to produce ultra-fine grain size materials. In this paper pure-Zirconium is considered due to its applicability to nuclear reactors. Among many process parameters of ECAP frictional effect on the plastic deformation of die has been investigated. The back pressure effect due to friction increases the stress level of die especially at the crossing area of channels, which may result in plastic deformation of die. The finite element method has been employed to investigate this issue.

Key Words : Equal channel angular pressing (ECAP, 등통로각 압축), Finite element method (유한요소법), pure-Zr (순수 지르코늄), Plastic deformation(소성변형), Friction(마찰)

1. 서론

최근, 입자의 크기를 100nm 이하로 미세화하여 재료의 물리적, 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 여러 방법이 연구되고 있다. 그 중 Segal⁽¹⁾ 등에 의해 제안된 ECAP(Equal Channel Angular Pressing)공정은 단조(forging)나 압연(rolling) 등과 같은 다른 공정에 비해 재료에 상대적으로 낮은 압력으로 형상에 큰 변화없이 소성변형을 발생시켜 입자를 미세화할 수 있는 것으로 분석되고 있다.

그러나 ECAP 공정은 이러한 기술적 장점에도 불구하고 전세계적으로 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 보다 실제적인 연구가 필요하다. 최근, ECAP 공정에 대한 연구의 동향은 실제 실험과 더불어 유한요소법을 이용한 이론해석이 병행되고 있다.⁽²⁻⁶⁾ 하지만, 현재의 실험과 유한요소해석을 통한 ECAP 공정에 대한 연구들은 대부분 재료의 변형거동 및 변

형률 등의 분석에 초점이 맞춰져 왔으며 공정 중 금형에 가해지는 외력 및 금형의 소성변형 가능성 등에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 특히, 유한요소법을 이용한 연구들에서는 ECAP 금형을 어떠한 외력에도 변형이 발생하지 않는 강재 금형으로 가정하고 있다. 그러나, ECAP 공정 중 pure-Zr 과 같이 강성이 큰 재료를 사용할 때, 금형과 시편 재료 사이에 작용하는 마찰에 의하여 금형에 소성변형이 발생할 가능성은 상당히 크며 만약, 소성변형이 발생하게 된다면 ECAP 설계시 의도한 공정의 목적을 성취하기 힘들 것이다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 원자로심의 소재로 사용되는 pure-Zr 의 ECAP 공정에서 마찰에 의한 금형의 변형거동 특성을 살펴보고자 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 동일

한 두 채널(channel)이 일정한 각으로 교차하는 형태를 갖는다.

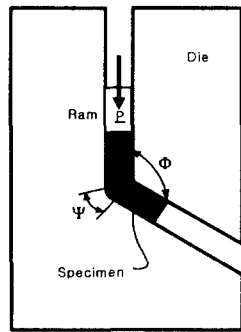


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP.

그리고 두 채널이 교차하는 곳에서 ECAP 공정 시 중요한 의미를 갖는 2 개의 각을 정의할 수 있으며 재료의 변형거동에 있어 내각(Φ)을 교차각이라 하며 외측부의 원호가 이루는 각(ψ)을 만곡각이라 한다. Segal⁽¹⁾ 등과 Iwahashi⁽²⁾ 등은 이러한 금형의 외부형상을 통해 ECAP 공정에 대한 이론적 접근과 함께 관련식을 제시하였으며 최근 연구에서는 ECAP 공정에 대한 보다 더 정확한 분석을 위해 유한요소해석법이 많이 시도되고 있다.⁽³⁻⁶⁾

3. 해석 방법

본 연구에서는 ECAP 공정에서 pure-Zr 시편 재료 사용시 마찰에 따른 금형의 소성변형 발생과 그로 인한 영향을 알아보기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS™ 를 사용하여 Fig. 2 와 같은 유한요소모델로 해석을 수행하였다.

금형의 교차각(Φ)은 135° , 만곡각(ψ)은 45° 를 사용하였으며 원활한 해석수행을 위해 금형 출력의 폭은 5mm 로 하여 시편의 폭 5mm 와 같지만 금형 입구의 폭은 5.1mm 로 약간의 공차를 주었다. 금형과 재료에 모두 4 절점 평면 변형률(plane strain)요소를 사용하였으며 요소수는 금형에 2643 개, 시편 재료에 800 개이다. 유한요소해석을 위한 마찰계수는 0.0, 0.2, 0.25 를 적용하였다. Table 1.은 본 연구에서 사용한 금형과 시편 재료의 물성치를 나타낸 것이다. 금형의 재질은 항복강도 1480MPa, 최고인장강도(ultimate tensile strength) 1800MPa 의 SKD6 강이며 시편 재료의 재질은 항복응력 270MPa, 최고인장강도 820MPa 의 pure-Zr 을 사용하였다. Pure-Zr 의 물성치는 프레스 속도 1.5mm/min, 공칭 변형률 속도 0.003/sec 인 조건의 압축시험을 통해 얻어진 결과이다.

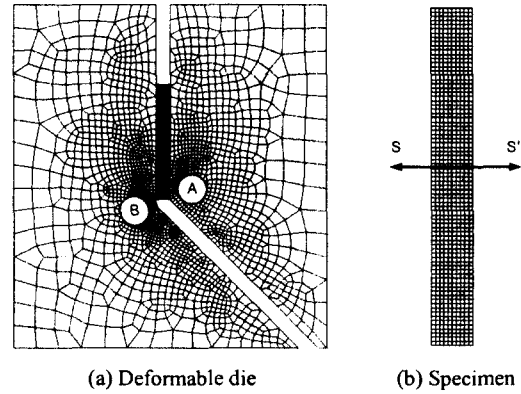


Fig. 2 FE models of ECAP

Table 1. Material property of die(SKD6) and specimen(pure-Zr)

Materials	E	Y.S	U.T.S
Pure -Zr	7714	270	820
SKD6	200000	1480	1800

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

4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 3 과 Fig. 4 는 각각 마찰계수(μ)가 0.0, 0.25 일 때 램의 변위상태에 따른 금형의 von Mises 응력의 분포를 나타낸 것이다. 램이 아래방향으로 40mm 내려왔을 때를 최종변위상태로 하여 공정 단계를 4 등분하였다. 각각의 단계는 25%, 50%, 75%, 100% 공정이 진행되었을 때의 응력 분포 상태이다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 마찰력이 작용하지 않는 경우, 관찰결과 Fig. 2 에 표기한 금형의 상부 A 지점에서는 램이 총변위의 약 90% 정도 아래로 내려왔을 때 가장 큰 von Mises 응력이 작용하고 금형의 하부 B 지점에서는 램이 총변위의 약 20% 정도 아래로 내려왔을 때 가장 큰 von Mises 응력이 작용하는 것으로 나타났다. 최종 변위상태까지 금형에 작용하는 응력의 최대값은 A 지점에서의 약 570MPa 이며 이는 일반적인 steel 의 항복강도(300~400MPa)보다는 높고 본 해석에 적용된 SKD6 강 항복강도에는 못 미치는 수준이다. 따라서, 무마찰 조건에서는 금형에 소성변형이 발생하지 않음을 짐작할 수 있다.

Fig. 4 는 마찰계수(μ)가 0.25 일 때 금형에 작용하는 von Mises 응력을 살펴본 것이다. Fig. 3 의 무마찰인 경우에 비해 금형에 작용하는 응력의 크기와 범위가 커짐을 쉽게 알 수 있다.

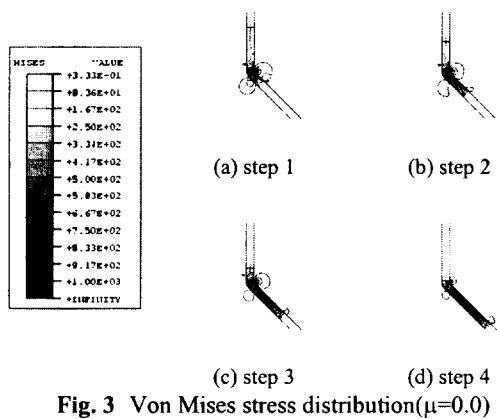


Fig. 3 Von Mises stress distribution($\mu=0.0$)

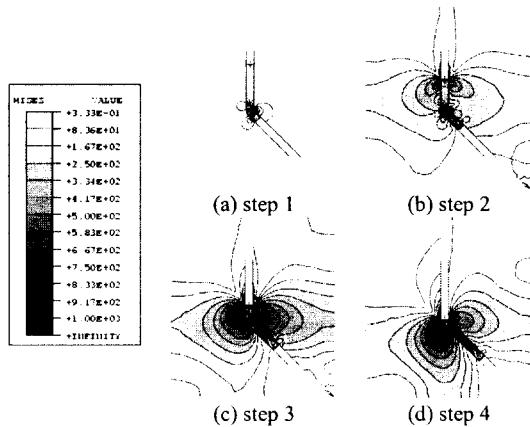


Fig. 4 Von Mises stress distribution($\mu=0.25$)

유한요소해석을 통한 관찰 결과, 금형의 상부 A 지점에서 발생하는 최대 von Mises 응력은 약 1490MPa 이며 이것은 램이 최종변위의 약 90-95% 지점까지 하강할 때 발생한다. 그리고 금형의 하부 B 지점에서 발생하는 최대 von Mises 응력은 약 1500MPa 이므로 B 지점의 응력이 보다 크며 램이 최종변위상태에 도달할 때 까지 응력은 계속 증가한다. 이때 발생한 응력 값은 본 해석에서 금형의 재료로 사용된 SKD6 강의 항복강도를 상회하는 값으로 금형의 소성변형 가능성을 의미한다.

그리고 Fig. 3의 무마찰인 경우와 비교하여 Fig. 4의 마찰계수가 0.25인 경우 step 1과 step 2 사이의 단계, 즉 램이 최종변위의 25%에서 50%지점까지 하강하는 동안 von Mises 응력의 분포영역이 크게 넓어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 von Mises 응력이 급격히 증가하기 시작하는 시점을 정밀하게 관찰하기 위해 ECAP 공정 중 램에 작용하는 하중을 분석하였다.

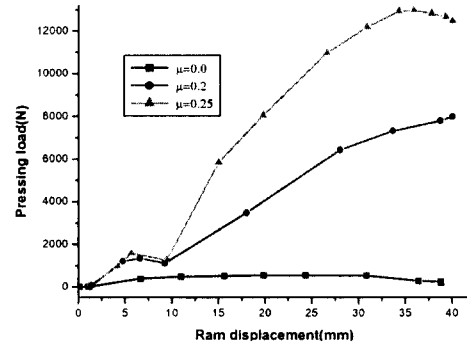


Fig. 5 Pressing load and ram displacement relation

Fig. 5는 각각 마찰계수(μ)가 0.0, 0.2, 0.25 일 때 이동 변위에 따라 램에 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 관찰 결과, 무마찰인 경우에 비해 마찰력이 작용하는 경우 그 하중의 편차가 크다. Fig. 5를 살펴보면 마찰력이 작용하는 경우, 램이 최종변위의 약 23% 지점으로 하강하였을 때부터 램에 작용하는 하중이 급격히 증가한다. 이는 Fig. 4(a)의 단계에 해당되며 시편 재료가 채널의 교차부를 지나 출구부로 압출되기 시작하는 지점이다. 그 이후 출구부의 채널과 시편 재료의 접촉면적이 증가함에 따라 마찰력과 그에 따른 역압력(back pressure) 효과는 커지는 것으로 보인다.

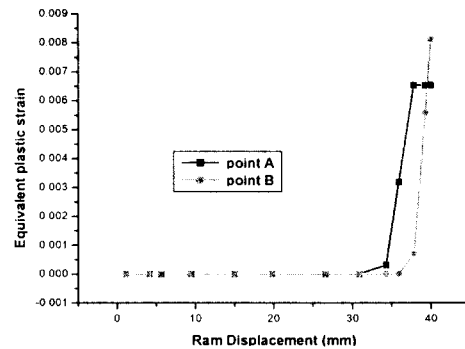


Fig. 6 Equivalent plastic strain change during ECAP

Fig. 6는 마찰계수가 0.25일 때 ECAP 공정 중 가장 큰 von Mises 응력이 발생하는 금형의 상부 A와 하부 B에서 램의 이동거리에 대한 상당소성변형률(equivalent plastic strain)의 발생 경과를 살펴본 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 A 지점에서는 램이 최종변위의 약 80%까지 하강했을 때부터 상당소성변형률이 증가하기 시작하여 최대 약 0.0065

의 변형률 값을 가지며 B 지점에서는 램이 최종 변위의 약 90% 이하였을 때부터 상당소성변형률이 증가하기 시작하여 최대 약 0.008의 변형률 값에 도달한다. 비록, 최종상태에 도달할 때까지 상당소성변형률량은 0.01보다 작은 미세한 값이지만 이것은 ECAP 금형에 소성변형이 시작되고 있음을 의미한다. 이러한 소성변형의 원인은 시편 재료와 금형의 마찰로 인해 출구부에 역압력 효과가 발생하고 이러한 역압력 효과에 의해 시편 재료의 압출과정이 방해받기 때문이다. 그리고 Fig. 5를 통해 살펴본 바와 같이 시편 재료와 출구부 채널의 접촉면적이 넓어짐에 따라 램에 작용하는 압력이 증가한 것처럼 상대적으로 역압력 효과도 커지게 될 것이다. 금형 채널의 교차부는 이러한 역압력으로 인한 효과를 가장 크게 받게 되어 소성변형의 발생 가능성이 가장 높을 것으로 추정된다. 또한, 이러한 역압력 효과는 금형뿐만 아니라 시편 재료의 변형에도 영향을 미칠 것이라 생각된다.

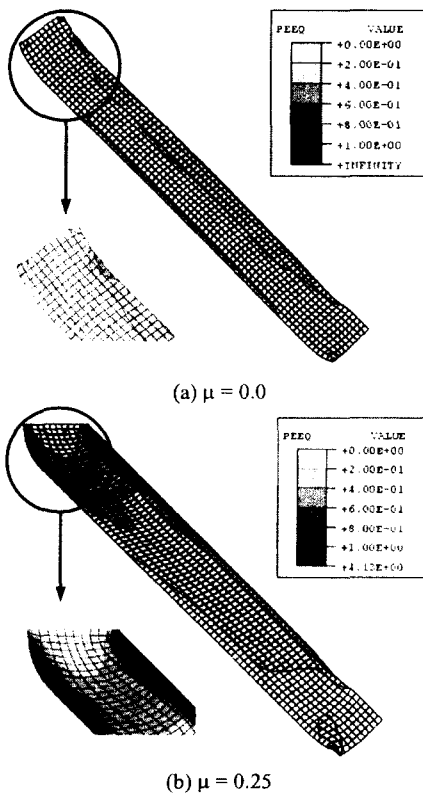


Fig. 7 Equivalent plastic strain distribution in specimen

Fig. 7에서 시편 재료의 상당소성변형률 분포를 관찰하면 Fig. 7(a)의 무마찰인 경우에 비해 Fig. 7(b)

의 마찰계수가 0.25인 경우 시편의 상단에서 요소망의 변형이 매우 크며 변형률이 국소적으로 높은 것을 알 수 있다. 이것은 마찰로 인한 역압력 효과로 인해 시편 재료의 상단부에 매우 큰 외압이 작용했기 때문이며 상대적으로 재료와 접촉하고 있는 금형 또한 큰 외압을 받았으리라 추측할 수 있다.

5. 결론

ECAP 공정에 대한 유한요소 해석을 통해 마찰의 변화에 의한 금형의 소성변형 가능성을 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. ECAP 공정 중 출구부 채널과 시편 재료의 접촉면적이 커질수록 마찰에 의한 역압력 효과는 급격히 증가한다.
2. 마찰에 의한 역압력 효과가 커질수록 ECAP 금형에 작용하는 응력이 증가한다. 이로 인해 채널의 교차부에서 소성변형이 발생할 가능성이 가장 높다.

후 기

본 논문은 2000년도 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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 김희수, 서진유, 박종우, "Equal-Channel Angular Pressing에서의 변형거동해석," *대한금속학회지*, 제 37권, 제 9호, pp. 1064~1068, 1999.
6. 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황성근, "Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형거동과 금형에 미치는 영향," *한국정밀공학회지*, 제 18권 제 6호, pp. 136~140, 2001.