

## Pure-Zr의 ECAP공정에서 마찰의 영향

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

### Frictional Effect during Equal Channel Angular Pressing (ECAP) with Pure-Zr

S.S. Park(Mecha. Eng. Dept. Korea Univ.), G.H. Kwon(Mecha. Eng. Dept. Korea Univ.), S.W. Chae(Mechanical Eng. Dept., Korea), S.I. Kwun(Materials Sci. & Eng. Dept., Korea Univ.), M.H. Kim(Materials Sci. & Eng. Dept., Inha Univ.), S.K. Hwang(Materials Sci. & Eng. Dept., Inha Univ.)

#### ABSTRACT

Much research efforts have been made on the structure and properties of metals deformed to severe plastic deformation (SPD). Being deformed to SPD, ultra-fine grains (UFG) are usually formed, and UFG structure exhibits fundamental differences in original physical properties. One method often used to obtain SPD is equal channel angular pressing (ECAP). In order for this technique to be exploited, it is important to understand the deformation behavior during the ECAP processing with respect to friction. The finite element method (FEM) has been used to investigate this issue.

**Key Words** : severe plastic deformation(극심한 소성변형), ultra-fine grains(초립자), equal-channel angular pressing (ECAP)(등통로각압축), friction(마찰), FEM(유한요소법), pure-Zr(순수 지르코늄).

#### 1. 서론

초미립 결정을 갖는 재료들은 고강도(high strength), 초소성 변형(superplastic deformation), 고내식성(high corrosion resistance) 등과 같이 물리적, 또는 기계적으로도 아주 우수한 특징을 지닌 초금속(super metal)으로 알려져 있으며, 최근 전세계적으로도 이러한 초금속에 대한 관심이 증가되고 있는 추세이다. 이러한 초미립 재료들의 제조 방법은, 급속 응고법(rapid solidification), 기상 증착법(vapor deposition), 기계적 합금화법(mechanical alloying), 극저온 성형법(cryogenic metal forming), 극심한 소성변형법(intense plastic straining)과 같은, 특정한 공정기술의 도입에 의해서 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 방법들 중에서 분말을 이용한 제조 방법은 덩어리를 제조하는 과정에서 제품에 기공이 잔류해 있거나 이 기공을 제거하는 과정에서 결정립이 성장하는 등의 문제가 보고되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 따라서 덩어리 자체에서 결정을 미립화할 수 있는 극심한 소성변형법이 산업현장에서 실제 응용이 가능

한 것으로 고려되고 있는 추세이다.<sup>(1-3)</sup> 최근, 재료에 극심한 소성변형을 가할 수 있는 방법으로 CEC(Cyclic Extrusion Compression), TS (Torsion Straining under high pressure), ARB (Accumulative Roll-Bonding), ECAP(Equal Channel Angular Press)과 같은 극한 가공법이 알려져 있으며, 이들 중에서 ECAP 공정은 다른 공정들에 비해 대량 생산에 적합한 특징을 가지고 있다. 그러나 ECAP공정은 기술적 장점에도 불구하고 전세계적으로 아직 연구단계에 있으므로 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 ECAP 공정에 대한 기초연구가 필요하다.

ECAP 가공은 Segal 등<sup>(4)</sup>에 의해 처음 제안된 방법으로, 다결정 금속을 특별히 고안된 금형을 통과시켜 재료에 극심한 소성변형을 가함으로써 재료의 결정립을 미세화시키는 방법이다. ECAP가공에 사용되는 금형은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 거의 동일한 단면을 갖는 두 채널(channel)을 일정한 각으로 교차하는 특수한 형태를 가진다. 두 채널이 교차하는 부분에는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 두 개의 각을 정의할 수 있다.

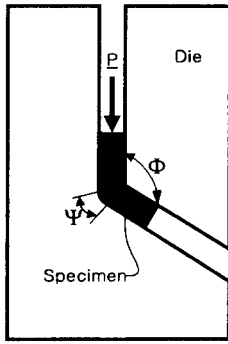


Fig. 1 A schematic diagram of ECAP.

이 중에서 ECAP공정에서 가장 중요한 변수는 두 채널이 이루는 각으로, 이를 교차각( $\Phi$ )이라 정의한다. 그리고 두 채널이 교차하는 외벽 부분에 존재하는 원호를 정의하는 각을 만곡각( $\Psi$ )이라 한다. ECAP가공에서 재료는 두 채널이 교차하는 부분을 통과하면서 극심한 소성 변형을 한다. Segal 등<sup>(4)</sup>은 ECAP에 의한 변형을 균일한 단순 전단(simple shear)변형으로 취급하여 이론적 해석을 최초로 제시하였다. Iwahashi 등<sup>(5)</sup>은 이 식을 보다 더 일반화하였다. 그러나 실제 ECAP에 의한 변형은 균일하지 못하다. 따라서 유한요소해석 등을 통한 변형거동의 분석이 필요하다.

ECAP에 대한 유한요소 해석은 최근에서야 시도되었으며, 이와 같은 연구에는, Prangnell 등<sup>(6)</sup>이 2차원 강소성 평면 변형률 요소를 사용하여 알루미늄 시편에 대하여 만곡각을  $0^\circ$ 로 하고 교차각  $90^\circ$ 인 경우와  $100^\circ$ 인 경우를 DEFRORM<sup>®</sup>으로 마찰과 무마찰 조건에 대하여 해석하였다. 한편 김희수 등<sup>(7)</sup>이 ABAQUS<sup>®</sup>로 2차원 평면 변형률 요소를 사용하여 마찰과 재료의 가공 경화를 무시하고 교차각  $90^\circ$ 에서 만곡각의 변화에 따른 시편의 변형 거동을 분석하였으며, Bowen 등<sup>(8)</sup>이 2차원 강소성 평면 변형률 요소를 사용하여 알루미늄 시편에 대하여 만곡각을  $0^\circ$ 로 하고 교차각  $90^\circ$ 인 경우와  $120^\circ$ 인 경우를 DEFRORM<sup>®</sup>으로 마찰과 무마찰 조건에 대하여 해석하였다. 서민홍 등<sup>(9,10)</sup>도 2차원 강소성 평면 변형률 요소를 사용하여 알루미늄 시편에 대하여 만곡각  $90^\circ$ , 교차각  $90^\circ$ 인 경우를 DEFRORM<sup>®</sup>으로 마찰과 무마찰 조건에 대하여 해석하였고, Liu 등<sup>(11)</sup>은 H62(Cu-38%Zn)에 대하여 마찰을 고려하여 CCE(changing channel extrusion) 공정과 다단 ECAP 공정을 해석하였다. 그러나 이들 논문들은 주로 알루미늄과 같은 연성 재료와 강재 금형을 사용하였다. 그러나 재료 물성치에 따라서 시편 변형 거동의 차이가 발생할 것으로 예상되며 금형에 작용하는 응력도 중요한 요소이다.

따라서 본 논문에서는 ECAP공정에 대한 유한요소 해석에서 알루미늄보다 상대적으로 강성이 큰 pure-Zr과 교차각  $135^\circ$ , 만곡각  $45^\circ$ 인 변형체 금형을 사용하여 ABAQUS<sup>®</sup>로 마찰에 따른 재료의 변형 거동과 전체 공정에서 가공력의 변화를 조사하였다. 이 때 교차각  $135^\circ$ , 만곡각  $45^\circ$ 인 금형에 대하여 실험하고 유한요소 해석 결과와 비교해 보았다.

## 2. 유한요소 해석 및 실험

ECAP에 대한 실험은 Fig. 2에서 보는 바와 같은 형상을 가지며 금형은 SK11 종을, 시편은 pure-Zr을 사용하였다. 실험 조건은 상온에서 플란저의 속도를  $1.5\text{mm/min}$ 으로 일정하게 주었으며 ECAP 금형의 채널과 시편은 모두 정밀 연마(polishing)하고 윤활제, MoS2 Spray를 사용하였다. pure-Zr의 물성치는 실험 조건과 동일한 속도의 압축시험에서 얻어진 것으로 Fig. 3에서 보여주고 있다. ECAP에 대한 유한요소 해석에서 일반적으로 냉간 가공의 마찰 계수 0.3 이하이므로, 마찰 계수를 0.0, 0.1, 0.2, 0.3로 하여 마찰의 영향을 분석하였다.

Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 마찰이 없을 경우는 시편의 폭에 따라서 유효 변형률의 차이가 발생하지만 시편 길이 방향으로는 비정상상태를 제외하고는 유효 변형률이 일정하다.

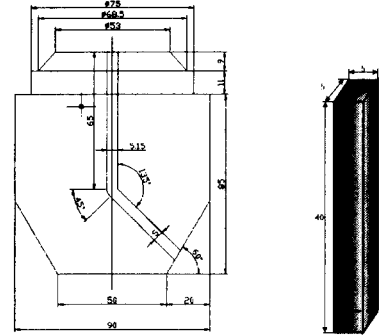


Fig. 2 Configuration of die and specimen for ECAP experiments.

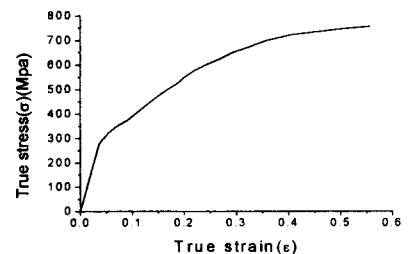


Fig. 3 Material property of pure-Zirconium.

그러나 마찰력이 존재할 경우는 Fig. 4(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 시편의 폭에 따라서 무마찰 경우와 같이 변형률의 차이가 발생하고 또한 시편 길이 방향으로도 비정상상태를 제외하고 후반부로 갈수록 변형률이 증가함을 알 수 있다. 그리고 마찰 계수 0.3 인 경우에 시편 상부의 양쪽 벽면의 요소가 매우 많이 찌그러져서 해석이 중단되었다. 또한 정밀 연마를 하지 않은 시편을 사용한 ECAP 실험에서도 고착에 의하여 가공이 중단되었다.

Fig. 5 은 ECAP공정에서 금형에 작용하는 Von Mises 응력을 보여주고 있다. 마찰이 증가하면 최대 Von Mises 응력은 약 500Mpa에서 약 1.5Gpa로 증가하고 응력이 금형에 미치는 부분도 증가한다는 것을 알 수 있다.

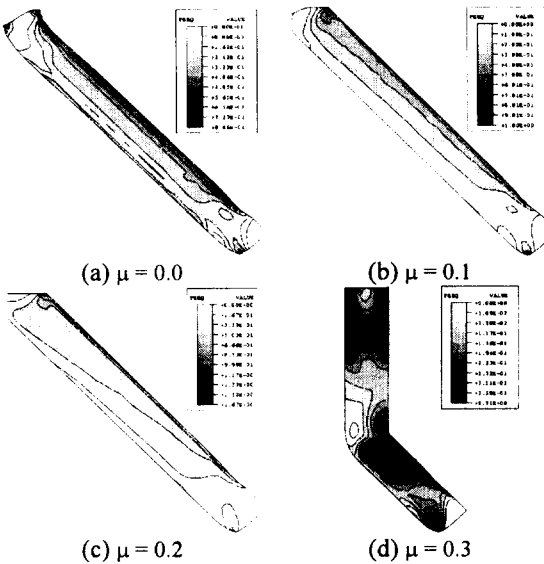


Fig. 4 Equivalent plastic strain distributions due to friction.

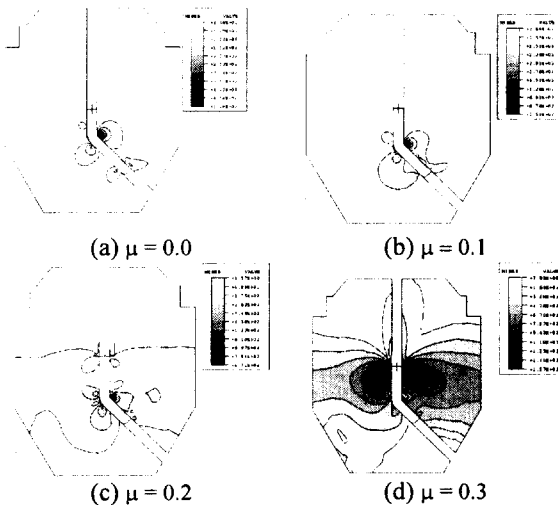


Fig. 5 Von Mises stress distributions of die due to friction.

일반적으로 두 채널이 만나는 교차부 근처에서 최대의 응력이 발생함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5(d)에서 보는 바와 같이 마찰 계수가 일정치 이상일 (본 논문에서 마찰 계수가 0.3 일) 경우에는 두 채널이 만나는 교차부만 아니라 시편의 상부에도 큰 Von Mises 응력 작용한다는 것을 알 수 있다.

### 3. 고찰

이상의 연구에서 마찰은 ECAP공정에 시편 길이 방향으로 재료의 변형 거동의 차이를 발생시키고 가공력에도 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다. 가공경로 방향으로 발생하는 변형 거동의 차이는 재료와 금형의 마찰 때문에 출구부에 역압력(back press)이 발생하고 이 압력에 의하여 시험편의 진행이 방해됨으로써 일어나는 현상으로 판단된다. 즉, 이와 같은 현상은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 두 채널이 교차하는 만곡부에서 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 무마찰의 경우 만곡부의 틈이 해석 초기나 말기에 동일한 간격을 유지하지만 마찰이 존재하는 경우에는 해석 초기에 존재하던 틈이 해석이 진행되면서 점차 줄어든다. 이렇게 만곡부에 존재하는 틈이 줄어들면 시험편에서 경험하는 만곡부도 줄어들고 이와 같은 만곡부의 감소는 변형률 증가의 한 요인으로 작용한다고 생각된다.

Fig. 7 은 마찰 계수가 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 인 경우의 해석 결과와 실험에서 얻어진 가공력(Fig. 7의 e)<sup>(12)</sup>을 보여주고 있다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 마찰이 증가할수록 가공력이 증가하며 또 마찰이 존재할 경우에는 변형이 진행될수록 가공력이 증가함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 플런저의 변위가 증가함에 따라 출구쪽 채널에 형성되는 역압력과 시편의 변형률이

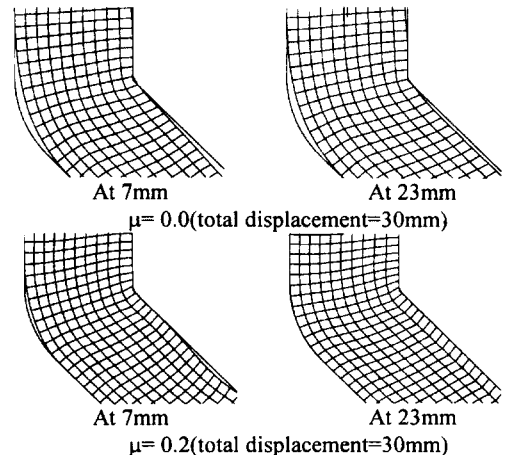


Fig. 6 Deformation behaviors at intersection area due to friction.

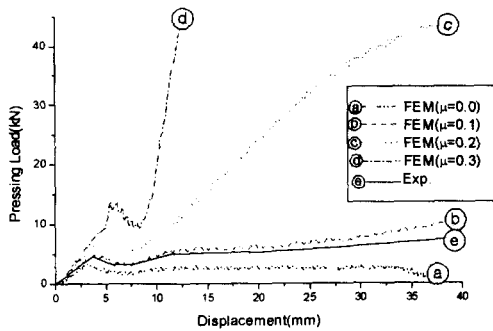


Fig. 7 Load-displacement relationships due to friction.(The load-displacements, a, b, c, d, are obtained by FEM, while load-displacement, e, is obtained by experiments.)

증가하기 때문이라고 생각된다. 실험에서 금형과 시험편의 정확한 마찰 계수는 측정할 수 없었지만 ABAQUS®의 해석 결과와 ECAP의 실험에서 얻어진 가공력을 비교해 보면 마찰 계수가 0.1 인 경우의 해석 결과와 실험 결과가 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서 ECAP공정에 대한 유한요소 해석에서 가공 경화를 고려하고 마찰에 따른 시험편의 변형 거동과 금형 응력 분포 상태를 살펴보았다. 그리고 유한요소 해석에서 얻어진 가공력과 실제 실험에서 얻은 결과를 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 마찰이 존재하면 시험편 길이 방향으로 플런저의 변위가 증가함에 따라 변형률이 증가한다. 이러한 현상은 마찰이 클수록 증가한다.
2. ECAP공정에서 전체적으로 균일한 재료 변형 거동을 얻기 위해 최대한 마찰을 줄여주어야 한다.
3. 마찰에 의한 출구쪽 역압력은 만곡부에서 시험편과 금형사이에 발생하는 틈을 감소시킴으로써 변형률을 증가시키는 것으로 판단된다.
4. 마찰이 클수록 금형의 교차부에 작용하는 응력이 증가한다. 또한 마찰 계수가 일정치 이상일 경우에는 두 채널이 만나는 교차부만 아니라 시험편의 상부에도 큰 응력 작용한다.
5. 마찰이 증가할수록 가공력이 증가하는 현상은 플런저의 변위가 증가함에 따라 출구쪽 채널에 형성되는 역압력과 시험편의 변형률이 증가하기 때문이라고 판단된다.
6. 마찰 계수가 일정치 이상일 경우에는 ECAP공

정이 불가능하다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. M. Furukawa, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon, "The Shearing Characteristics associated with Equal-Channel Angular Pressing," Mater. Sci. & Eng.(A), Vol. No.2, pp. 328~332, 1998.
2. 고흥석, 장주연, 최성규, 문인기, "구속전단가공법에서 전단 변형 특성," 대한금속학회지, 제 37 권 제 4 호, pp. 441~447, 1999.
3. 신동혁, 오개희, 김우진, 이상우, 주용용, "ECAP 강가공에 의한 0.15% C강의 결정립 미세화," 대한금속학회지, 제 37 권 제 9 호, pp. 1048~1054, 1999.
4. 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.
5. 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.
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. 김희수, 서유진, 박종우, 1999, "Equal-Channel Angular Pressing에서의 변형거동해석," 대한금속학회지, 제 37 권, 제 9 호, pp. 1064~1068.
8. 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.
9. 서민홍, 김형섭, 홍순익, "등통로각압축(ECAP) 공정의 유한요소해석," 대한금속. 재료 학회지, 제 38 권 제 1 호, pp. 136~140, 2000.
10. 서민홍, 김형섭, "등통로각압축(ECAP) 공정에서 다이 마찰 효과에 대한 수치적 해석," 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 219~225, 2000.
11. Liu Zuyan, Liu Gang, Z.R. Wang, "Finite Element Simulation of a new Deformation Type Occurring in Changing-Channel Extrusion," J. Mater. Processing Tech., Vol. 102, pp. 30~32, 2000.
12. 황선근 외, "컴퓨터 모델링과 신 공정 기술에 의한 초미립 조직의 원자로심형 고성능 금속소재 개발," 원자력 기초연구사업 보고서, 2000.