

등통로각압축 (ECAP) 공정에서 다이 마찰 효과에 대한 수치적 연구

서민홍* · 김형섭**

(1999년 9월 28일 접수)

A Numerical Investigation of the Effect of Die Friction in ECAP (Equal Channel Angular Pressing)

M. H. Seo and H. S. Kim

Abstract

Equal channel angular pressing (ECAP) is a convenient forming process to extrude material without substantial changes in the sample geometry and this deformation process gives rise to produce ultrafine grained materials. The properties of the materials are strongly dependent on the plastic deformation behaviour during ECAP. The major process variables during ECAP are 1) die geometries, such as a channel angle and coner angles, and 2) the processes variables, such as lubrication and deformation speed. In this study, the plastic deformation behaviour of materials during the ECAP has been theoretically analysed by the finite element method (FEM). The effect of the die friction on the plastic deformation behaviour during the pressing is discussed by means of FEM calculations.

Key Words : Equal Channel Angular Pressing, Friction Effect, Inhomogeneous Deformation, Finite Element Analysis, Ultrafine Grained Materials

1. 서 론

미세한 조직을 가지는 재료의 물리적, 기계적 특성은 최근 많은 연구자들에 의해 관심을 받고 있다.⁽¹⁾ 결정립 크기 1 μm 이하의 초미세결정재료 (Ultrafine Grained

Materials)나 100 nm 이하의 나노결정재료 (Nano-crystalline Materials)들은 상온에서 고강도와 낮은 탄성 계수 및 낮은 온도와 높은 변형속도에서 초소성을 나타 내어⁽²⁾ 경제성이 있는 성형가공법으로의 가능성을 높게 하고 있다.

* 충남대학교 대학원 금속공학과

** 충남대학교 금속공학과

미세한 결정립을 갖는 재료를 제조하는 방법으로 최초로 Gleiter에⁽³⁾ 의해 기체응축법 (Gas Condensation Method)이 제안되었고 다른 방법으로는 대량생산이 가능한 기계적 합금법 (Mechanical Alloying)이 많이 사용되고 있다. 하지만 이러한 분말을 이용하는 방법은 압분을 한 후에도 제품에 기공이 잔류하거나 기공을 제거하는 공정에서 결정립이 성장하는 경우가 많아 덩어리 (Bulk) 형태의 건전한 초미세 재료를 제조하기가 쉽지 않다.

최근에 덩어리 형태의 미세한 결정립을 갖는 재료를 제조하는 방법으로서 심한 소성변형법 (SPD, Severe Plastic Deformation)⁽³⁻⁸⁾으로 대표되는 등통로각압축법 (ECAP, Equal Channel Angular Pressing)^(4,6-8), 반복압연법 등이 제안되어 탄성성질, 강도, 미소경도, 초소성, 자기적 성질 등에서 우수한 특성의 재료가 발표되고 있다.

이 중 본 연구에서는 다결정 덩어리 형태의 일반 재료를 특수하게 설계된 다이를 통과시켜서 심한 소성변형을 주어 단면 형상의 변화 없이 1 μm 이하의 결정립을 갖는 초미세결정 재료 - 심지어는 나노결정 재료 -를 제조할 수 있는 ECAP 공정을 연구 대상으로 삼고 있다.

ECAP 공정으로 제조된 초미세결정 재료는 압분공정이 따르는 나노결정 재료의 분말을 이용한 방법과는 달리 재료에 잔류기공이 없게 된다. 또한 초미세한 결정을 갖는 재료의 우수한 물리적, 기계적 성질(강도, 탄성계수⁽⁹⁾, Debye 온도⁽¹⁰⁾, Curie 온도⁽¹¹⁾)을 나타내어 많은 재료 (Al⁽¹²⁾, Cu⁽¹³⁾, Mg⁽¹⁴⁾, Ni⁽¹⁵⁾, 공정합금⁽¹⁾, 금속간화합물⁽¹⁶⁾ 등)에서 응용이 시도되고 있다. ECAP 공정 중에 조대한 결정립을 가지는 재료는 심한 소성변형, 즉 전단변형을 받게 되고 미세한 조직으로 변하게 된다. 그러므로, 압축 후 재료가 미세한 균일조직을 가지기 위해서는 공정 중에 재료 전체에 균일한 전단변형이 발생해야 한다. 하지만, 여러 논문에서 보고된 플라스티션 등을 이용한 ECAP 공정의 모의 실험결과^(17,18)에서는 ECAP된 시편의 외측 부에 전단변형이 거의 없는 무전단 변형대가 관찰되었다. 이에 대해 Ko 등⁽¹⁷⁾은 시편의 하단 부에 집중적으로 나타나는 마찰효과로 설명을 하였다. 재료내의 불균일한 변형은 미세조직에 나쁜 영향을 미치므로 공정조건에 영향을 고려하여 재료가 균일한 변형을 하도록 조절해야 한다. 그러므로, Ko 등이 제안한 마찰효과 등에 관련하여 이론적, 실험적 연구가 필요한 상태이다. 그러나, 현재까지 ECAP 공정에서 마찰에 대한 연구는 Ko와 Liu⁽¹⁹⁾등의 논문 외에는 없는 실정이다.

따라서, 이번 연구에서는 유한요소법을 이용하여 ECAP 공정에서의 소성변형거동을 해석하고, 다이 마찰이

ECAP 공정 중 재료의 변형에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. ECAP 이론

ECAP 공정의 개략도를 Fig 1에 나타내었다. 동일한 단면적과 단면형상을 갖는 두 개의 통로는 서로 동일하게 교차되는 경사각 $\phi=2\phi$ (이후 교차각)와 외측모서리각 ψ_0 를 이룬다. ϕ 와 ψ_0 는 재료가 통로를 통과할 때 받게 되는 전체적인 전단변형량을 결정하는 중요한 공정변수이다. 또한, 내측 모서리각 ψ_i 도 중요한 공정변수로 고려되어야 하지만 본 연구에서는 기존의 연구결과들과 비교하기 위해 ψ_i 를 0으로 놓았다. 유면체 시편의 폭은 W, 길이는 L이며, 시편의 두께는 재료의 변형방향과 직각을 이루어서 두께 방향의 변형률이 0이므로 (평면변형 상태) 고려하지 않아도 된다.

Segal⁽¹⁵⁾은 ECA 다이가 가지는 기하학적 형상을 고려하여 $\phi=2\phi$ 그리고, $\psi_0=0$ 일 때의 전단 변형률 γ 를 식 (1)으로 표시했고, Iwahashi 등⁽²⁰⁾은 외측모서리 각을 고려하여 ($\psi_0 \neq 0$) 재료가 받는 전단 변형률 γ 를 식 (2)로 나타냈다.

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi_0}{2}\right) + \psi_0 \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi_0}{2}\right) \quad (2)$$

그러나, 위의 변형률 식 (1)과 (2)는 시편의 평균변형률을 나타내는 식으로 실제의 실험에서 관찰되는 ECAP된 시편의 처음 끝과 마지막 끝 부분의 국부적인 변형 및 중간 부분의 상하 불균일을 나타내지 못하고 급형과 재료간의 마찰 효과를 포함하고 있지 않다. 따라서, ECAP 공정 중에 재료의 변형거동을 정확히 이해하기 위해서는 재료 내의 국부적인 변형 불균일도 예측할 수 있는 유한요소해석이 필수적이다.

3. 해석방법

ECAP 공정을 정확히 해석하기 위해 본 연구에서는 상용의 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D⁽²¹⁾를 사용하였다. Fig 2는 계산에 이용된 초기 유한요소망을 나타낸다. 초기의 요소는 1582개의 4절점 사각형요소

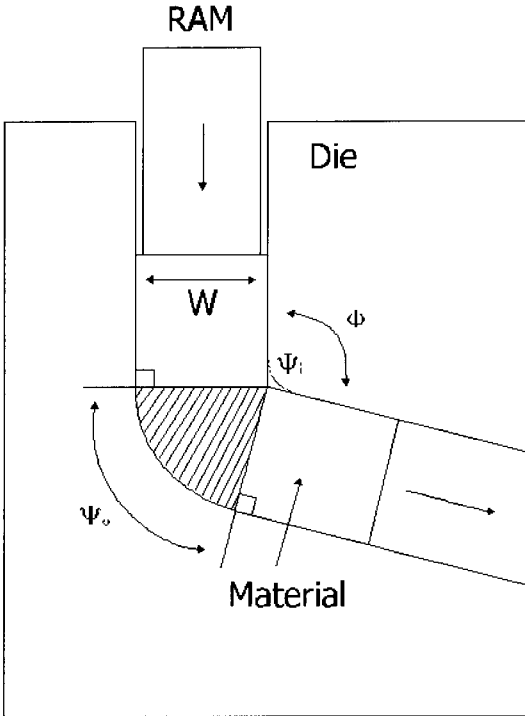


Fig. 1 Schematic illustration of ECAP showing the channel angle Φ and the inner coner angle Ψ_i and the outer coner angle Ψ_o .

이고, 요소 수를 변화시켜 가며 계산한 결과 충분히 작은 크기의 초기 요소임을 확인하였다. 금형의 형상은 교차각 $\Phi=90^\circ$, 외측모서리각 $\Psi=90^\circ$ 의 경우를 해석하였다. 육면체 시편의 폭은 $W=15\text{ mm}$, 길이는 $L=120\text{ mm}$ 이며 계산 중에 국부적으로 심한 변형을 받는 영역에서 요소의 과도한 찌그러짐을 막기 위해 자동요소재구성 기능을 이용하였다. 해석 재료는 어닐링된 Al1100으로 재료물성은 DEFORM-2D의 재료 데이터베이스에서 얻었고 참고문헌⁽²²⁾에서 얻은 유동곡선을 참조했다.

시편의 두께방향으로는 변형이 없는 평면변형조건을 적용하였다. 시편과 다이와의 마찰 효과를 고려하기 위해 무마찰 ($m=0$)인 경우와 금속의 냉간가공시 일반적인 값의 범위인 $0.05\sim 0.15$ ^(21,23)중에서 큰 값인 마찰상수 $m=0.15$ 인 경우를 계산하였다. 계산 수행시간은 Sun UltraSparc1 Workstation에서 5 시간 정도이다.

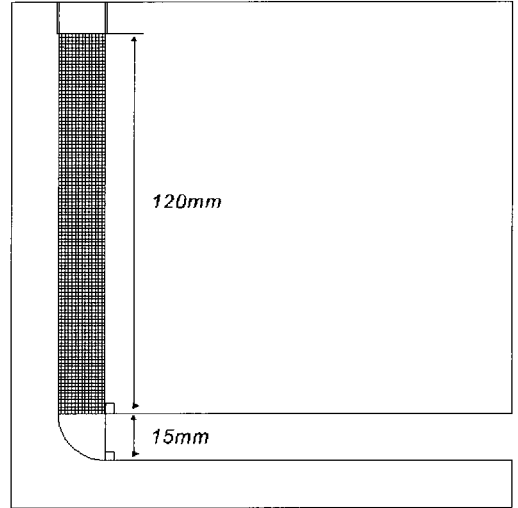


Fig. 2 Finite element mesh system for the plastic deformation analysis

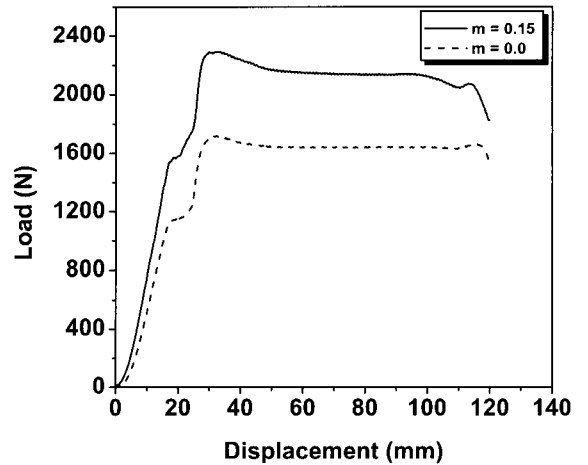


Fig. 3 Calculated Pressing load versus ram displacement during ECAP

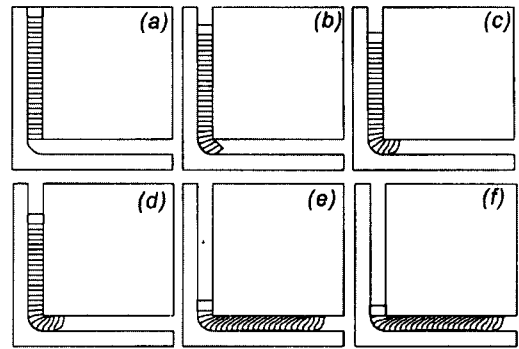
4. 결과 및 고찰

Fig 3은 ECAP 공정 중에 램의 이동거리와 부과된 하중의 계산결과이다. 마찰이 없는 $m=0$ 인 경우와 마찰상수

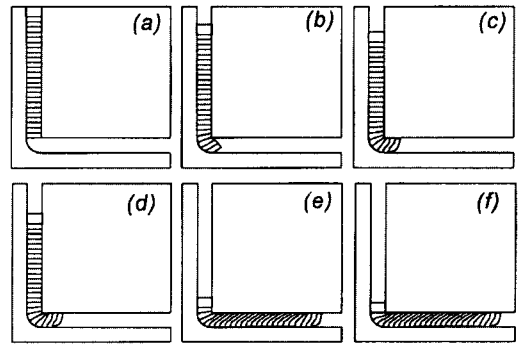
$m=0.15$ 인 경우에 하중곡선의 변형양상은 큰 차이를 보이지 않고 마찰에 의한 하중의 증가만이 나타난다. 하중 곡선과 관련하여 ECAP 공정 중 재료의 변형을 5단계 과정으로 설명 할 수 있다. 이러한 변형 중 하중이 정체 또는 느리게 증가하는 부분이 발생하는 하중이력 곡선은 황동의 ECAP 실험⁽¹⁹⁾에서도 관찰된 바 있다.

1단계 (Fig 4의 (a)~(b))는 시편의 앞면이 Fig 1에서 빗금으로 표시된 주변형 영역을 통과하는 단계이다. 2단계 (Fig. 4의 (b)~(c))는 시편의 앞면이 주변형 영역을 빠져나온 후 출구쪽 통로 안에서 위쪽으로 구부러지는 단계이다. 주변형 영역을 빠져나온 시편의 앞부분은 출구쪽 통로의 윗면과 접촉하기 전까지는 큰 구속이 없기 때문에 하중은 완만히 증가하게 된다. 이 때 구부러지는 시편은 출구쪽 통로를 완전히 채우지 못하고 출구 통로의 윗면과의 사이에서 틈이 발생한다. 이 단계에서의 하중 곡선은 $m=0.15$ 일 때 마찰의 영향으로 하중이 증가하여 무마찰인 경우 보다 급한 증가기울기를 가진다. 3단계 (Fig. 4의 (c)~(d))에서는 구부러지는 시편의 앞부분이 출구쪽 통로 다이 윗면과 접촉하면서 접촉부의 구속으로 인해 하중이 급히 증가한다. 시편이 출구 통로의 윗면과 충분히 접촉한 후에는 하중은 증가하지 않고 평형을 이루는 4단계 (Fig. 4의 (d)~(e))가 된다. 평형단계 중에 압축이 진행되면서 하중이 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있는데 마찰이 있을 경우 더욱 두드러진다. 평형 단계에서의 하중 감소는 압축이 진행되면서 입구 통로 안에서 압축응력을 받는 시편의 부피가 감소하기 때문으로 생각한다. 그리고 $m=0.15$ 일 경우에 하중 감소가 더욱 큰 것은 입구쪽 통로 안의 시편 부피가 줄면 다이와 시편간의 접촉면적이 줄어들고 따라서 하중에 영향을 주는 다이 마찰효과 역시 감소하기 때문이다. 2단계에서 나타난 시편과 출구 통로 윗면 사이의 틈은 평형단계에서 압축이 진행됨에 따라 점점 증가하게 된다. 또 출구 통로의 아랫면과 시편 사이에서도 틈이 발생한다 (Fig. 4의 (D),(E) 참조). 마지막 5단계 (Fig. 4의 (E)~)는 시편의 뒷부분이 변형영역을 빠져 나오면서 하중이 급격히 감소하는 단계이다. 하중 곡선의 경우 ECAP 공정 조건에 따라 다양한 형태로 나타날 수 있으며 하중에 큰 영향을 미치는 단계가 서로 다를 수 있으나, 위의 다섯 단계의 변형 양상은 동일 할 것으로 예상된다.

Fig. 4는 마찰상수가 0인 경우와 0.15인 경우의 변형 요소망이다. 변형이 완료된 후의 요소망의 관찰 결과 무마찰인 경우에도 시편의 하부 (폭의 약 1/4)에서 전단변형이 없는 무전단 변형대가 나타남을 알 수 있다. 금속 및 플라스틱을 이용한 여러 실험^(17,18)에서도 이와 같은



(A) $m=0.0$



(B) $m=0.15$

Fig. 4 Deformed geometry changes during ECAP

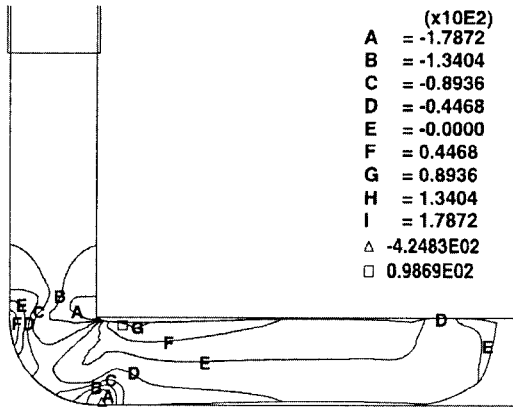
무전단 변형대가 나타남이 알려져 있는데 이에 대한 설명으로 Ko ⁽¹⁷⁾ 등은 재료와 금형 간의 마찰 효과를 제안했다. 하지만, 마찰이 재료의 변형에 영향을 미치면 재료의 유동을 방해하는 방향으로 작용하게 된다. 만약, Ko 등의 설명에서처럼 시편의 하부에 마찰 효과가 집중적으로 작용한다면 오히려 시편 하부면을 유동방향의 반대방향으로 미는 효과로 나타나서 무전단 변형대가 줄어들어는 경향이 되어야 할 것이다. 그리고, 두 경우 모두 같은 변형 요소망을 보이며 마찰에 의해 시편의 변형 상태가 변화하지 않고 있음을 알 수 있다. 그러므로, 무전단 변형대가 나타나는 원인은 마찰 효과에 의한 것이 아니라 ECAP 다이 형상에 의한 시편 안쪽 및 바깥면 (변형전 재료의 오른쪽과 왼쪽면)의 서로 다른 변형 이력에 그 원인이 있다고 말할 수 있다. 즉, ECAP 공정 중에 시편

의 양쪽 면이 주변형 영역을 지나가는 거리가 서로 다르기 때문에 전체적으로 전단이 발생하게 되고 하부 다이의 외측 모서리각을 지나가는 시편의 바깥 부분이 상부 다이의 코너 각에 의해 구속을 받게 되는 안쪽 부분보다 더 빠른 속도로 변형영역을 통과하게 되므로 무전단 변형대가 나타나게 된다. 만약 재료의 상부 및 하부 모두가 같은 속도로 주변형 영역을 통과하게되면 무전단 변형대는 나타나지 않을 것이다.

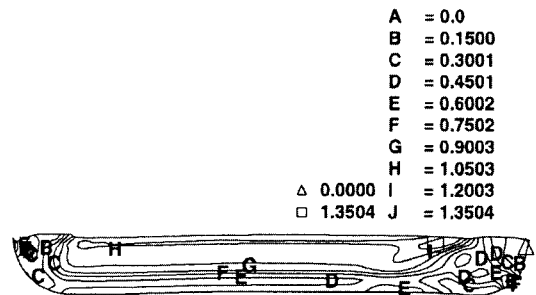
ECAP 1회 공정이 끝난 후의 재료의 변형된 요소망에서 불균일 변형이 나타나는 현상, 즉, 시편의 앞끝과 뒤끝 부분의 변형양상이 다르며 평형영역에서도 상하대칭이 아닌 것은 시편이 받는 응력 상태가 비대칭적이기 때문에 발생하는 현상으로서 응력상태의 고찰로 설명할 수

있다. Fig. 5는 정상상태에서의 평균응력분포로서 주변형 영역에서 상부 다이의 모서리각을 통과하는 초기시편에서의 오른쪽 면과 하부 다이의 외측 모서리각을 통과하는 왼쪽 면이 받는 응력 상태가 서로 반대임을 알 수 있다. 즉 시편의 오른쪽 부분은 주변형영역을 통과하는 동안 압축응력을 받고 모서리 부근서 최대 압축응력이 발생한다. 그리고, 출구 통로로 들어서면 인장응력상태로 바뀌게 된다. 반면에 초기시편에서의 왼쪽 부분은 압축 응력 상태에서 굽힘에 의한 인장응력 상태로 바뀐 후 변형영역을 빠져나오는 부분에선 강한 압축응력 상태에 놓이게 된다. 즉 변형 전 시편의 오른쪽 면과 왼쪽 면이 변형 중에 받는 변형경로 및 응력이력이 서로 다르기 때문에 최종 변형 후의 시편의 요소 변형 및 변형률 등이 다를 수밖에 없다.

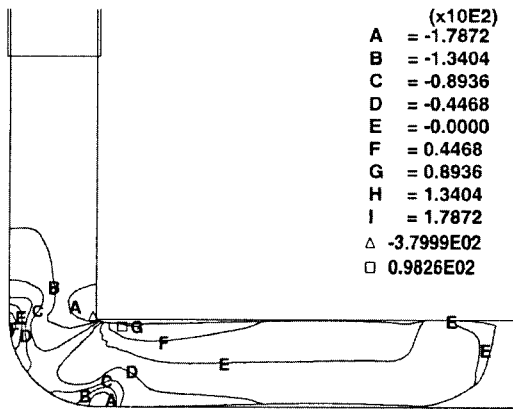
Fig. 5에서 $m=0.15$ 인 경우에도 시편의 국부적인 압축과 인장응력값이 무마찰인 경우 보다 조금 작을 뿐 평균응력분포는 서로 거의 같다. ECAP 다이의 기하학적 형상



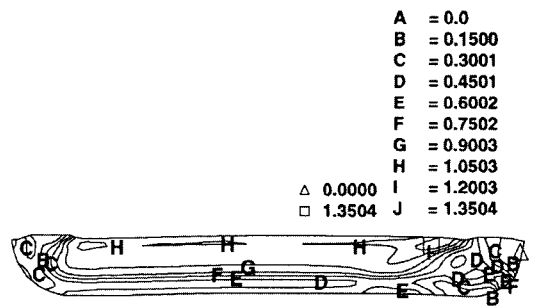
(A) $m = 0.0$



(A) $m = 0.0$



(B) $m = 0.15$



(B) $m = 0.15$

Fig. 5 Distribution of mean stress during ECAP

Fig. 6 Distribution of effective strain in the specimen

을 고려한다면, 시편의 단면이 변화하는 공정이 아니고 재료 후방면, 즉 램이 미치는 부분의 변형이 같으므로 마찰에 의한 재료 형상의 변화가 거의 없고 응력분포도 다르지 않게 된다.

Fig. 6은 변형된 후의 시편에서의 유효변형률 분포이다. 시편의 앞쪽 부분과 시편의 뒷부분에서 말단효과에 의한 변형률이 적은 부분이 나타난다. 그리고 시편의 중간부분에서 시편의 길이방향과 평행한 등고선을 가지는 정상영역이 나타난다. 시편의 밑부분인 무전단 변형대에서는 역시 낮은 값의 변형률을 보였다. 시편의 앞끝과 뒤끝 부분(시편 폭의 약 3배)에서는 변형률 분포가 약간 차이 나는데 무마찰인 경우가 국부적으로 더 큰 변형률 분포를 보였다. 하지만, 정상영역에서는 무마찰과 마찰이 있는 경우 모두 동일한 변형률 분포를 보였다. 정상영역에서의 변형률 분포가 상하 불균일하기 때문에 평균 변형률 자체를 논하기 어렵지만 시편의 중간부분에서의 변형률을 정상영역에서의 평균 변형률로 본다면 0.90으로서 식(3)에 의해 구한 이론적 변형률인 0.90과 잘 일치했다.

4. 결 론

ECAP 공정에서 다이 마찰이 시편의 소성변형 거동에 미치는 효과를 고찰하기 위해 금형 형상이 교차각 $\Phi=90^\circ$, 외측모서리각 $\psi_0=90^\circ$ 인 경우 마찰상수를 각각 $m=0$, $m=0.15$ 으로 가정하고 강소성유한요소 해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ECAP 공정 중 시편의 각 영역의 변형경로 및 유동속도의 차이로 인해 전단변형이 발생한다. 즉, 시편의 안쪽 면이 바깥 면보다 빠른 속도로 주변형 영역을 빠져나와 출구 통로로 이동하기 때문에 전단변형을 받게 된다.

(2) 하부 다이의 외측 모서리각을 지나는 시편 바깥 면은 압축-인장-압축의 응력을 받으며, 상부 다이의 교차각을 지나는 시편의 안쪽 면은 압축-인장의 응력을 받는다.

(3) 마찰 증가에 의해 하중은 증가하지만 정상상태에서의 평균응력 및 유효변형률 분포는 변화가 없다. 즉, 다이 마찰 효과는 재료의 변형 양상에 큰 영향을 주지 않는다.

(4) 무전단 변형대는 다이 마찰에 관계없이 나타나며

이는 다이의 기하학적 형상 및 시편의 변형이력 차이에 의해 발생하는 현상이다.

참 고 문 헌

- (1) R. Z. Valiev, Mater. Sci. Forum, 1997, A207, p. 243.
- (2) K. Higashi, Mater. Sci. Eng., 1993, A166, p. 109.
- (3) H. Gleiter, Prog. Mater. Sci., 1989, 33, p. 223.
- (4) R. Z. Valiev, N. A. Krasilnikov and N. K. Tsenev, Mater. Sci. Eng., 1991, A137, p. 35.
- (5) A. Korznikov, B. Guenther, H. Shen and R. Z. Valiev, Ann. Chim. Fr., 1996, 21, p. 391.
- (6) M. Furukawa, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, N. K. Tsenev, R. Z. Valiev and T. G. Langdon, Acta Mater., 1997, 45, p. 4751.
- (7) Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, Acta Mater., 1998, 46, p. 3317.
- (8) H. J. Cui, R. E. Goforth and K. T. Hartwig, J. Metal(e-journal), 1998, 50.
- (9) N. A. Akhmedeev, N. P. Kobelev, R. R. Soifer, M. Ya and R. Z. Valiev, Acta Metall. Mater., 1993, 41, p. 1041.
- (10) R. Z. Valiev, R. R. Mulyukov, V. V. Ovchinnikov and V. A. Shabashov, Scripta, Metall. Mater., 1991, 25, p. 841.
- (11) K. Y. Mulyukov, S. B. Khaphizov and R. Z. Valiev, Physica Status Solidi. 1982, (a) 133, p. 447.
- (12) J. Wang, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto, R. Z. Valiev and T. G. Langdon, Acta Mater., 1996, 44, p. 2973.
- (13) R. Z. Valiev, E. V. Kozlov, Y. F. Ivanov, J. Lian, A. A. Nazarov and B. Baudelet, Acta Metall. Mater., 1994, 42, p. 2467.
- (14) M. Mabuchi, H. Iwasaki and K. Higashi, Mater. Sci Forum., 1997, 547, p. 243.
- (15) V. M. Segal, Mater. Sci. Eng. 1995, A197, p. 157.
- (16) S. L. Semiatin, V. M. Segal, R. L. Goetz, R. E. Goforth and T. Hartwig, Scripta Metall. Mater. 1995, 33, p. 535.
- (17) H. S. Ko, J. Y. Chang, S. G. Choi and I. G. Moon, J. Kor. Inst. Met. & Mater., 1999, 37, p.

441.

- (18) Y. Wu and I. Baker, Scripta Mater., 1997, 37, p. 437.
- (19) Z. Y. Liu, Z. Wang and E. Wang, Mater. Sci. Eng., A1999, 262, p. 137.
- (20) Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, Scripta Mater., 1996, 35, p. 143.
- (21) SFTC, DEFORM ver. 5.2 .
- (22) T. Altan, S-I. Oh and H. L. Gegel, Metal Forming, Fundamental and Applications, ASM, OH, 1983, p. 85.
- (23) 이동녕, 소성가공학, 문운당, 1996, p. 129.