

# 초미세 결정립 조직을 만들기 위한 복합전단가공법에 관한 연구

A Study on the Hybrid-ECAP Process to Produce Ultra-Fine Materials

**이 주 현\***      **이 진 호\***  
Lee, Ju-Hyun      Lee, Jin-Ho

## ABSTRACT

The development of the equal channel angular pressing(ECAP) process in metals has recently provided a feasible solution to produce ultra-fine or nano-grained bulk materials with tailored material properties. However, ECAP process is difficult to scale up commercially due to requirements of an excessive load. In this paper, a new Hybrid-ECAP process with torsional die is considered to obtain materials of ultra-fine grain structure under low forming load. An upper bound analysis and numerical simulation (DEFORM 3D, a commercial FEM code) are carried out on the torsional die. By the upper bound analysis, analytical expression for the compression force and rotation speed are obtained. By the FEM analysis, the distribution of strain, stress and deformation are obtained. These results show that the Hybrid-ECAP is a useful process because this process can obtain the homogeneous deformations with relatively low forming load. Additionally, due to decreased forming load, die life can be improve.

주요기술용어(주제어) : Hybrid-ECAP(복합전단가공법), Upper Bound Analysis(상계해법), Finite Element Analysis (유한요소해석), Torsion(비틀림)

## 1. 머리말

오늘날 무기체계의 개발방향은 주로 기동성, 치명성, 생존성을 향상시키는데 역점을 두고 있다. 이를 구현하기 위하여 이들 무기체계의 구성품인 각종 기계부품가공 시에 설계 및 가공단계를 기존의 방법 보다 더 단순화시키면서도 가공의 효율성을 향상시킬

수 있는 친환경 · 고정밀 가공기술이 필요하게 되었다. 특히 일반기계에 비해 고강도 소재를 많이 사용하는 군용장비와 무기부품은 초미세 결정립 금속조직을 갖는 고품질의 소성가공기술을 적용한 효율적인 가공기술이 필요하게 되었다. 이 때문에 복합전단가공법과 같은 새로운 가공기술을 개발하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

그 예로써 나노 미터 수준이나 마이크로 미터 이하의 미세결정립의 재료를 얻기 위한 방법 중에는 극한소성가공법(SPD : Severe Plastic Deformation)과 구속전단가공법(ECAP : Equal Channel Angular

† 2008년 4월 4일 접수~2008년 5월 9일 게재승인

\* 육군3사관학교 기계공학과

주저자 이메일 : hyun0918@gmail.com

Pressing) 그리고 극한소성 비틀림가공법, 반복압연법, 다단단조법 등이 있다. 특히 Segal이 1980년에 개발한 ECAP가공법은 그 방법이 간단하면서도 초미세 결정립 소재를 만들 수 있는 유용한 방법이 될 수 있다는 가능성을 제시하였다<sup>[1]</sup>. ECAP가공법은 합금 원소를 첨가하여 고강도 재료를 얻는 기존의 방법과는 다르게 동일한 화학조성으로 재료의 조직을 제어하여 초미세 결정립을 얻기 위한 방법이다. 이 방법은 재료의 강도 및 인성을 높일 수 있으면서도 균일한 연신율과 초소성(super plasticity) 그리고 우수한 댐핑성(damping capacity)을 갖는 부품을 만들 수 있는 장점을 갖고 있다. 이 때문에 ECAP 가공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근의 ECAP 가공법에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그 결과 전단응력만을 이용한 소성가공을 할 경우에 미세한 결정립을 만들 수 있음을 밝혔다. 또한 낮은 압력 하에서도 높은 성형하중이 필요한 소재를 가공할 수 있다는 사실이 이론적으로 증명되었다<sup>[2-5]</sup>.

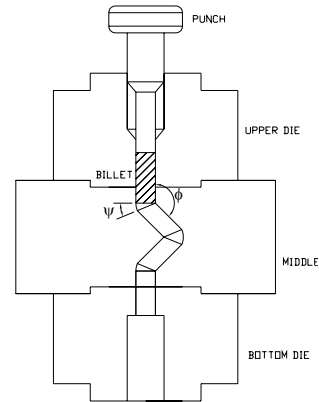
특히 Nakashima 등<sup>[6]</sup>은 실험적 연구를 통하여 연속 ECAP공정법의 유용성을 조사하였다. 그 결과 다단계 공정을 걸쳐서 반복적으로 가공해야하는 종전의 방법 보다 더 효과적인 방법임을 밝혔다. 그러나 이 가공법은 소재와 금형사이의 마찰로 인해 비균일 소성변형이 발생한다. 그 결과 성형하중이 증가하기 때문에 대형 소재를 가공하기가 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 Kim<sup>[7]</sup>등이 연구한 극한 소성 · 비틀림에 의한 변형기술과 연속 ECAP 공정법을 결합시켜서 초미세 결정부품을 효율적으로 가공할 수 있는 복합전단가공법의 특성을 이론 및 실험적 방법으로 구명하였다. 그리하여 비틀림을 이용한 복합 ECAP 가공기술의 공정해석 및 소성변형 특성을 파악하여 초정밀 무기부품 가공 시에 가공효율을 높일 수 있는 방안을 제시하는데 그 목적이 있다.

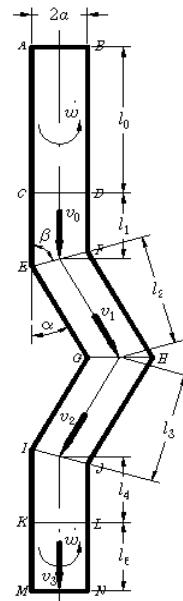
한편 본 연구는 소성 · 비틀림 가공기술과 연속 ECAP공정에 대한 상계해석법을 이용하여 조사하였다. 또한 비틀림이 성형하중에 미치는 영향과 최적의 공정조건을 제시하였으며, 각 공정별로 재료의 유효변형률을 분석하였다.

## 2. ECAP 공정의 상계해석

그림 1은 ECAP 공정법에 대한 개념도이다. 그림에서 두 채널이 교차하는 곳에서 생성되는 내각을 교차각( $\phi$ )이라 하고, 외측부의 원호가 이루는 각을 만곡각( $\psi$ )이라 정의하였다. 그리고 금형은 전체 세 부분으로 나뉘어져 있으며, 상부와 하부의 금형이 같은 방향으로 회전하도록 설계하였다.



[그림 1] Schematics of analytical models of the Hybrid-ECAP



[그림 2] Ideal case of deformation zone

그림 1과 같이 해석모델을 적용하여 ECAP 공정 중에 모든 변형은 그림 2와 같이 변형영역의 파라미터를 정의하였다. 그림에서 보는 바와 같이 면 EF와 면 GH, 면 IJ의 전단면에서 발생하는 전단변형과 전체 다이(die)경계면과 소재 사이의 마찰에 의한 변형, 그리고 완충영역 CDEF와 IJKL에서는 토션(torsion)에 의한 내부변형이 발생한다고 가정하였다.

한편 소성변형 시에는 재료의 체적변화가 없다. 따라서  $2av_0 = 2av_3$ 가 되므로  $v_0 = v_3$ 가 된다. 따라서 전단면에서 속도 성분은 식 (1), (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$|v_{s1}^*| = \frac{v_0 |\sin \alpha|}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)} = |v_{s3}^*| \quad (1)$$

$$|v_1| = \frac{v_0 |\sin \beta|}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)} = |v_2| \quad (2)$$

$$|v_{s2}^*| = \frac{2|v_0 \sin \beta \sin \alpha|}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)} \quad (3)$$

이때 완충영역(CDEF, IJKL)에서의 반경방향, 원주방향, 축방향의 속도성분은 각각 식 (4), (5), (6)과 같이 가정하였다.

$$v_r = 0 \quad (4)$$

$$v_\theta = r\dot{\omega} \frac{z}{l_{1,4}} \quad (5)$$

$$v_z = v_0 \quad (6)$$

여기서 금형의 파손가능성을 줄이기 위해  $l_1, l_4$  길이의 완충영역을 지정하였으며,  $\dot{\omega}$ 는 회전금형의 각속도이다. 그리고 완충영역에서 변형률속도는 식 (7), (8)이 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \dot{\epsilon}_{r\theta} = \dot{\epsilon}_{rz} = 0 \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{R} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{2} \frac{r\dot{\omega}}{l_1}, \quad \frac{1}{2} \frac{r\dot{\omega}}{l_4} \quad (8)$$

각 계면에서 부착마찰조건이 성립하며, 다이의 경계면과 소재 사이의 마찰에 의한 속도 차는 다음과 같다. 먼저, 다이가 회전하는 영역(ABCD, KLMN)에서의 속도는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$|v_{rotation}| = v_0 \quad (9)$$

이때 완충영역(CDEF)과 완충영역(IJKL) 그리고 경사진 영역(EFGH, GHIJ)의 속도성분은 각각 식 (10), (11), (12)와 같다.

$$|v_{buffering}| = \sqrt{v_0^2 + \left( \frac{a\dot{\omega}z}{l_1} \right)^2} \quad (10)$$

$$|v_{buffering}| = \sqrt{v_0^2 + \left( \frac{a\dot{\omega}z}{l_4} \right)^2} \quad (11)$$

$$|v_{slope_1}| = |v_{slope_2}| = |v_1| \quad (12)$$

따라서 식 (12)을 적용하면 비틀림을 이용한 ECAP 공정 시에 필요한 에너지소비율과 성형하중을 계산할 수 있다<sup>[8]</sup>. 그리고 경계조건을 적용하면 총에너지소비율은 식 (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$j^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (13)$$

여기서  $j^*$ 는 총에너지소비율,  $\dot{W}_i$ 는 내부변형에너지율,  $\dot{W}_s$ 는 전단변형에너지율,  $\dot{W}_f$ 는 마찰손실에너지이다.

또한, 두 완충영역(CDEF, IJKL)에서 내부변형에너지는 식 (14)와 같다.

$$\dot{W}_{i,z} = 2\tau \int_{r=0}^a \int_{z=0}^{L_1} \left( \frac{r\dot{\omega}}{2l_1} \right) (2\pi r dr) dz = \frac{2\sigma_0 \pi a^3 \dot{\omega}}{3\sqrt{3}} \quad (14)$$

여기서  $\sigma_0$ 는 재료의 항복응력값이고,  $\tau$ 는 단축항복응력으로  $\sigma_0$ 의  $1/\sqrt{3}$ 배이고,  $a$ 는 빌렛의 반지름이다.

한편, 불연속이 발생하는 면 EF와 면 IJ에서의 전단변형에너지율은 식 (15), 면 GH에서의 전단변형에너지는 식 (16) 그리고 총전단변형에너지율은 식 (17)

과 같다.

$$\dot{W}_{s_1} = \dot{W}_{s_3} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{\pi a^2}{\cos(\alpha/2)} \left( \frac{v_0 |\sin \alpha|}{\sin(180 - \alpha - \beta)} \right) \quad (15)$$

$$\dot{W}_{s_2} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{\pi a^2}{\sin(90 - \alpha)} \left\{ \frac{2|v_0 \sin \beta \sin \alpha|}{\sin(180 - \alpha - \beta)} \right\} \quad (16)$$

$$\dot{W}_s = \frac{\sigma_0 \pi a^2 |v_0|}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{2 \sin \alpha}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} + \frac{2 \sin \beta \sin \alpha}{\sin(90 - \alpha) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right\} \quad (17)$$

또한 마찰손실에너지율,  $\dot{W}_f$ 는 소재와 다이의 접촉면에서의 마찰에 의한 손실에너지율이다. 그리고 영역 ABCD, 영역 KLMN에서의 마찰손실에너지율은 식 (18)과 같다.

$$\dot{W}_{rotation_{1,2}} = \frac{2\sigma_0 \pi a m |v_0|}{\sqrt{3}} (l_0 + l_5) \quad (18)$$

그리고 이들 두 완충영역에서 마찰손실에너지율은 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{W}_{buffering_{1,2}} = \frac{2\sigma_0 \pi a m |v_0| l_1}{\sqrt{3}} \left\{ \sqrt{1 + \eta^2} + \frac{1}{\eta} \ln(\eta + \sqrt{1 + \eta^2}) \right\} \quad (19)$$

다이의 각속도에 대한 펀치의 하강속도를 무차원 변수  $\eta$ 로 정의하였으며, 두 경사면에서 마찰손실에너지율은 식 (20)과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{W}_{slope_{1,2}} = \frac{4\sigma_0 \pi a m |v_0| l_2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right) \quad (20)$$

따라서 총마찰손실에너지율은 식 (21)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{W}_f = \frac{2\sigma_0 \pi a m |v_0|}{\sqrt{3}} \left[ l_0 + l_5 + l_1 \left\{ \sqrt{1 + \eta^2} + \frac{1}{\eta} \ln(\eta + \sqrt{1 + \eta^2}) \right\} + 2l_2 \left\{ \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right\} \right] \quad (21)$$

외부에서 가한 에너지율  $j^*$ 는 수직방향 펀치(punch)의 이송과 다이(die)의 회전에(영역 ABCD, KLMN) 의한 에너지율로 식 (22)와 같다.

$$j^* = P_{ave} \times \pi a^2 |v_0| + M \cdot \dot{\omega} \quad (22)$$

여기서,  $P_{ave}$ 는 펀치에 걸리는 평균하중을 나타내며,  $M$ 은 재료와 다이 사이의 마찰에 의해 재료로 전달되어지는 회전에 의한 모멘트이다. 그리고 이 모멘트는 영역 CDEF과 영역 IJKL에서 발생한다.

$$M = 2 \int_{z=0}^{l_1} \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{a \dot{\omega} z / l_1}{\sqrt{v_0^2 + (a \dot{\omega} z / l_1)^2}} \cdot 2\pi a \, dz \quad (23)$$

$$= \frac{4\sigma_0 \pi a^2 m l_1}{\sqrt{3} \eta} (\sqrt{1 + \eta^2} - 1)$$

따라서 총에너지소비율은 식 (24)와 같이 계산할 수 있다.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f - M \cdot \dot{\omega}$$

$$= \frac{2\sigma_0 \pi a^3 \dot{\omega}}{3\sqrt{3}} + \frac{\sigma_0 \pi a^2 |v_0|}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{2 \sin \alpha}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} + \frac{2 \sin \beta \sin \alpha}{\sin(90 - \alpha) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right\}$$

$$+ \frac{2\sigma_0 \pi a m |v_0|}{\sqrt{3}} \left[ l_0 + l_5 + l_1 \left\{ \sqrt{1 + \eta^2} + \frac{1}{\eta} \ln(\eta + \sqrt{1 + \eta^2}) \right\} + 2l_2 \left( \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right) \right]$$

$$- \frac{4\sigma_0 \pi a^2 m l_1}{\sqrt{3} \eta} (\sqrt{1 + \eta^2} - 1) \dot{\omega} \quad (24)$$

결국, 성형하중은 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_{ave}}{\sigma_0} = \frac{2\eta}{3\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{2 \sin \alpha}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} + \frac{2 \sin \beta \sin \alpha}{\sin(90 - \alpha) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right\}$$

$$+ \frac{2m}{\sqrt{3}a} \left[ l_0 + l_5 + l_1 \left\{ \sqrt{1 + \eta^2} + \frac{1}{\eta} \ln(\eta + \sqrt{1 + \eta^2}) \right\} + 2l_2 \left\{ \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha/2) \sin(180 - \alpha - \beta)} \right\} \right]$$

$$- \frac{4ml_1}{\sqrt{3}a} (\sqrt{1 + \eta^2} - 1) \quad (25)$$

### 3. 유한요소해석과 실험

본 연구는 그림 3에서 보는 바와 같이 강소성 유한요소 프로그램인 DEFORM을 이용하여 풀림열처리

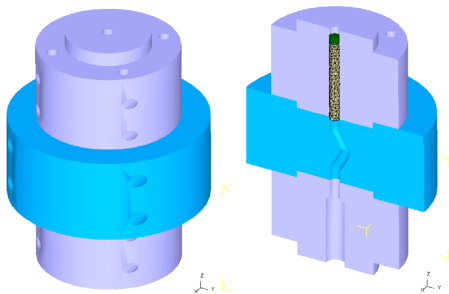
한 재료(Al 1100-O)를 인장실험으로 얻은 물성치를 적용하여 시뮬레이션하였다. 이때 다이의 회전에 대한 재료의 변형거동을 조사하기 위하여 금형을 강체(rigid body)로 가정하였으며, 시편의 격자(grid)수는 3,500개이고 삼각형 격자이다.

또한 채널각의 변화에 따라 성형하중을 조사하였다. 상부와 하부다이의 회전속도에 따른 유효응력분포와 유효응력변형율의 분포를 비교하여 각 채널을 통과할 경우에 변형율의 차이를 나타내었다. 그리고 2차원 평면변형해석을 통해 소재의 전단변형 상태를 파악하였으며, 시뮬레이션 조건은 표 1과 같으며, 해석에 사용된 유한요소모델은 그림 3과 같다.

본 연구에서는 금형내의 소재의 유동양상을 파악하기 위해 점토 계통의 하나인 영국의 Harbutt's Plasticine사의 제품인 플라스틱신을 모델재료로 사용하여 ECAP공정을 수행하였다. 플라스틱신의 기초 실험에 관한 유동특성은 Kim<sup>[9]</sup>의 연구에서 언급되었다. 플라스틱신의 유동양상은 열간상태에서의 강(steel)의 유동과 비슷하며, 그림 5와 같이 종래의 ECAP 모델

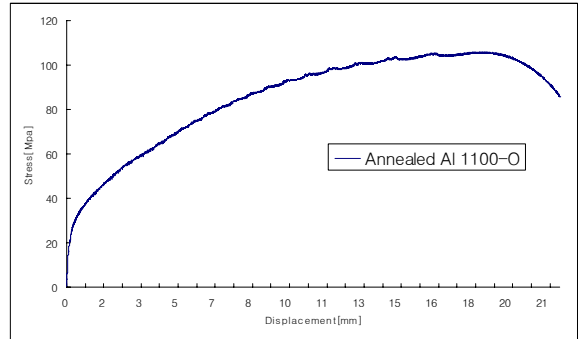
[표 1] The simulation conditions for Hybrid-ECAP

specimen size ( $h_0 \text{mm} \times d_0 \text{mm}$ )	friction factor	channel angle ( $\phi$ )	punch velocity ( $\text{mm/sec}$ )	angular velocity of die ( $\text{rad/sec}$ )
8×60	m=0.3	135°	1	0
		140°		0.4
		145°		0.8
		150°		1.2
		150°		1.6

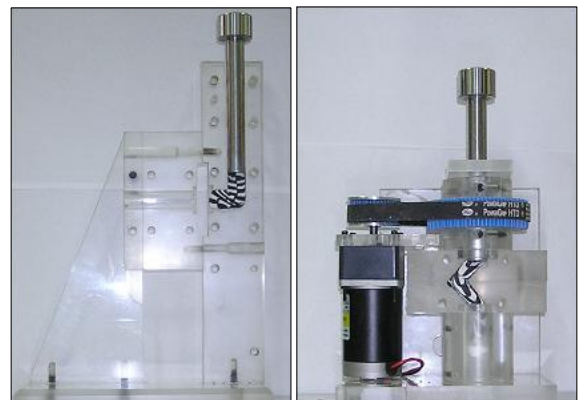


[그림 3] Three Dimensional FE model of ECAP

과 상부 금형에는 회전모터를 장착한 Hybrid-ECAP 모델을 제작하여 회전속도에 따른 재료의 변형특성을 조사하였다.



[그림 4] Stress-displacement curve for annealed Al1100-O in tension showing behavior

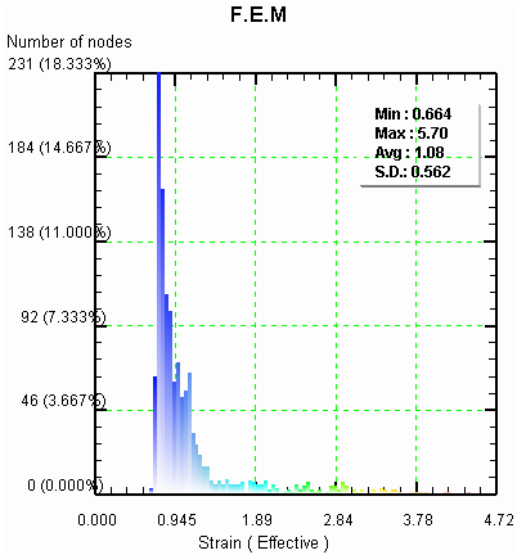


[그림 5] ECAP originated by Segal and Hybrid-ECAP with rotational dies using the plasticine

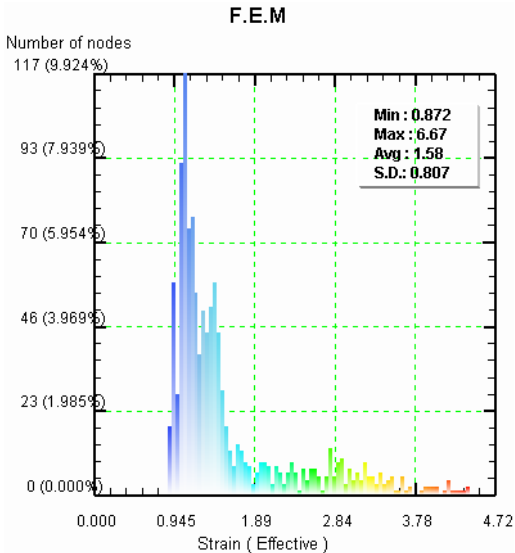
#### 4. 결과 및 고찰

그림 6은 단순 ECAP 공정과 비틀림 ECAP 공정에 대한 유효변형률의 분포를 나타낸 그림이다. 램(ram)이 70mm이상이었을 경우, 최종 채널을 통과하는 소재의 유효변형률의 분포를 조사한 것으로 각 절점마다 발생하는 변형률을 합산한 값을 표시하였다. 그리고 그림 6에서 보는 바와 같이 상하부의 금형에  $\dot{\omega} = 0.8 \text{ (rad/sec)}$  각속도로 회전을 가한 비틀림 공정 시

에 평균변형률이 1.58로 다이에 회전을 가하지 않았을 때의 평균변형률 1.08 보다 30% 이상 증가하였다. 이는 비틀림공정법의 경우 원주방향의 변형으로 인해 변형률이 크며 또한 균일하다. 따라서 비틀림 발생시



(a) Conventional ECAP



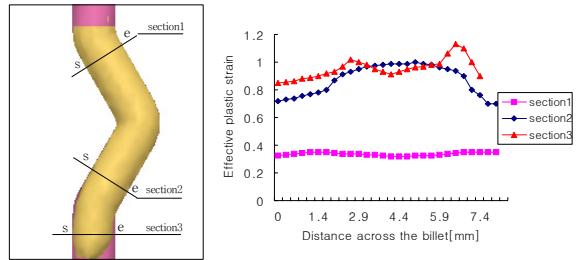
(b)  $\dot{w} = 0.8 (rad/sec)$

[그림 6] Effective strain distributions ( $\Phi = 135^\circ, \Psi = 45^\circ$ )

에 단순 ECAP 고정예 비해 크고 균일한 변형을 일으키기 때문에 주조조직 개선과 내부의 결함을 제거시킬 수 있는 효과를 가져온다.

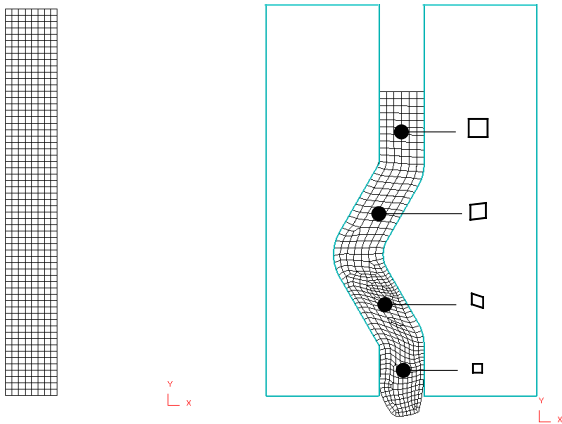
그림 7은 금형의 마찰계수가 0.3이고, 각속도가  $\dot{w} = 0.4 (rad/sec)$ 인 경우에 시뮬레이션의 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 응력이 발생하는 교차각 부근에서는 교차각  $150^\circ$ , 만곡각  $60^\circ$ 인 경우에 교차각 쪽의 양(+)의 값에서 만곡각 부근으로 갈수록 음(-)의 값이 된다. 이는 램의 가공력과 출구쪽 외부면의 반력이  $60^\circ$ 로 경사져 있기 때문에 시편이 교차각을 지날 때 굽힘 모멘트를 받아 시편의 안쪽에서 시편의 길이 방향으로 압축응력이 작용하고 바깥쪽에서는 인장응력이 작용한다. 이와 같이 ECAP 공정에서 순수 전단변형만 발생하는 것이 아니라 상당량의 인장력 및 압축력에 의한 소성변형도 발생한다. 이러한 변형 거동은 교차부에서 일정한 변형속도를 보장하지 못한다<sup>[10]</sup>.

한편, Section 1의 평균변형률에 비해 Section 2에서 61% 증가, Section 3에서 65% 증가하였다. 이는 2차원 평면변형 상태에서도 평균변형률의 증가함을 알 수 있다.



[그림 7] Effective strain distributions across the billet ( $\Phi = 150^\circ, \Psi = 60^\circ$ )

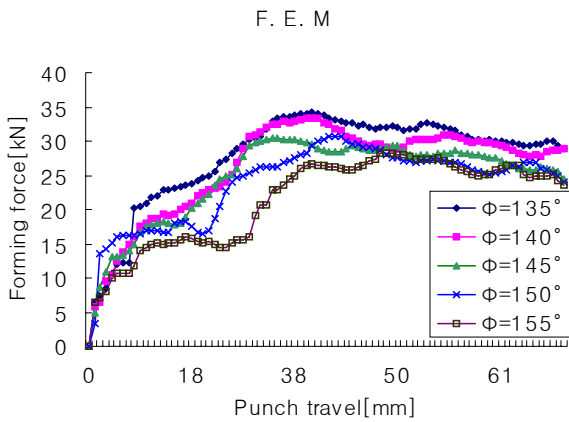
그림 8에서 보는 바와 같이 정사각형 요소의 변형을 극대화하기 위해서 마찰값 0.3의 조건으로 금형의 회전 없이 각 채널을 통과 시에 요소의 변형을 조사하였다. 그 결과 전단변형이 발생하는 두 채널을 통과하면서 각각 다른 대각선 방향으로 전단변형이 발생하고 마지막 채널을 통과하면서 입구부분 요소의 크기(1mm×1mm)에 비해 미세화된 등방성 형태의 요소(0.4mm×0.4mm)로 빠져 나오는 것을 볼 수 있다.



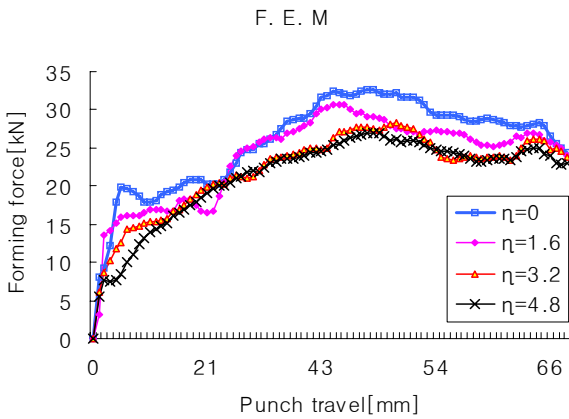
[그림 8] Deformed mesh during ECAP

그림 9는 마찰력 0.3의 조건 하에서 시뮬레이션한 결과, 펀치의 이송에 따른 성형하중의 변화를 나타낸 그림이다. 먼저 그림 9(a)는 채널각의 증가에 따라 역압력의 차이로 일정간격으로 성형하중과 시편의 변형량이 변화함으로써 가공력의 차이를 나타냈다. 그림 9(b)는 금형 회전속도의 증가에 따른 펀치에 걸리는 성형하중의 변화를 나타낸 그림이다. 금형의 회전속도가 증가함에 따라 프레스 하중이 감소함을 알 수 있다. 즉 펀치와의 접선 방향으로의 유동을 향상시킴으로 인해 성형하중이 감소함을 알 수 있다. 다이의 회전속도가  $\eta=3.2$  이상에서부터는 더 이상의 성형하중이 감소하지 않았다.

그림 10은 다이의 회전속도 변화에 따른 상대 성형하중을 나타낸 그림이다. 이때 마찰계수는 0.3이며, 다이의 각도는  $110^\circ$ 에서  $170^\circ$ 까지 변화시켰다. 그 결과 금형의 회전속도  $\eta=3.2$ 인 경우의 수치해석결과와 상계해법의 계산식에 의한 결과는 6~9%이내로 잘 일치하였다. 따라서 본 연구의 수치해석결과는 신뢰성이 높은 것으로 사료된다.

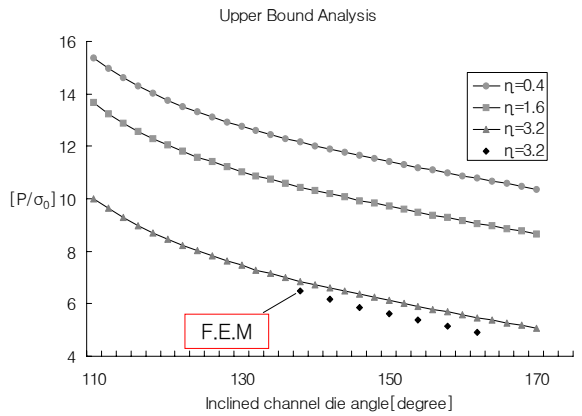


(a) various channel angle( $\phi$ )



(b) various torque( $\eta$ )

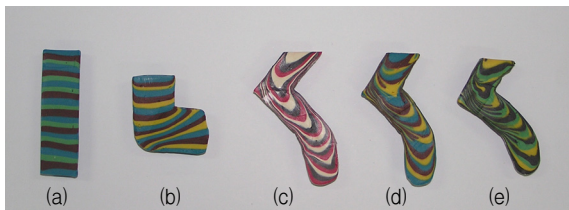
[그림 9] Forming force to the punch travel( $m=0.3$ )



[그림 10] Relative pressure [ $P/\sigma_0$ ] to the channel die angle

그림 11은 채널각이  $90^\circ$ 인 경우 소재의 아래 부분이 마찰의 증대로 인해 소재의 윗면이 길게 연신되는 불균일 변형이 발생한다. 그러나 비틀림 ECAP 금형의 경우 채널 통과 시에 변형 양상은 적게 나타나나 상부금형의 회전을 통해 전단변형을 증대시켰다. 금형의 회전이 없는 (c)와 비틀림을 발생시킨 (d), (e)

의 경우를 비교하면 채널각을 통과하는 부분에 단순 ECAP 공정에 비해 비틀림이 추가된 공정 (d), (e)에서 더 많은 유동이 일어남을 확인할 수 있다. 다이 벽면과의 마찰에 의해 소재 내부 유동이 외부에 비해 빠르게 진행되는 (c)에 비하여 점차 금형 회전속도를 증가시킨 (d), (e)에서는 금형의 마찰면과 내부의 소재 유동의 속도차가 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 이는 비틀림에 의한 변형이 소재 내부에 까지 영향을 미친 것으로 사료된다.



(a) initial specimen  
 (b) originated ECAP model from Segal  
 (c) conventional ECAP  
 (d) torsional ECAP at 0.524rad/s angular velocity  
 (e) torsional ECAP at 1.047rad/s angular velocity

[그림 11] Experimental results of internal deformed flow patterns in conventional and torsional ECAP

## 5. 맺음말

본 연구에서는 비틀림 ECAP 공정에 대한 상계해석을 수행하여 성형하중을 예측하였으며, DEFORM 2D, 3D를 이용한 FEM 시뮬레이션 및 모델재료인 플라스틱 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 유선함수를 이용한 속도장을 통해 다이의 회전에 의한 하중의 변화를 제시하였으며, 이는 FEM 시뮬레이션의 결과와 6~9% 이내로 잘 일치하였다.

둘째, 토션을 이용한 Hybrid-ECAP 공정은 단순 ECAP 공정에 비해 성형 하중을 줄일 수 있다. 따라서, 프레스의 용량을 줄일 수 있으며, 다이 면압을 낮춰 다이 수명을 향상시킬 수 있다.

셋째, 비틀림 발생은 소재 내부까지 큰 변형을 가

져 비교적 고른 유효변형률 분포를 얻을 수 있다. 이러한 결과로 더욱 미세화된 등방성 금속조직을 얻을 수 있으며 소재 내부의 결함 및 주조 조직을 개선할 수 있는 장점이 있다.

넷째, 다채널전달가공법 시에 소성비틀림 변형기술을 동시에 적용한 소성가공법은 기동무기의 구동부 등의 부품생산에 적합할 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

- [1] V. M. Segal, "Materials Processing by Simple Shear", Materials Science and Engineering A197, pp. 157~164, 1995.
- [2] Yoshinori Iwahashi et. al., "Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials", Scripta Materialia, Vol. 35, No. 2, pp. 143~146, 1996.
- [3] Y. Wu and I. Baker, "An Experimental Study of Equal Channel Angular Extrusion", Scripta Materialia, Vol. 37, No. 4, pp. 437~442, 1997.
- [4] 강효경, 김형욱, 강석봉, "ECAP법에 의해 제조된 6061 알루미늄 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 가공온도의 영향", 대한금속·재료학회지, Vol. 40, No. 2, pp. 168~176, 2002.
- [5] Akira Azushima and Koshiro Aoki, "Properties of Ultrafine-Grained Steel by Repeated Shear Deformation of Side Extrusion Process", Materials Science and Engineering A, Vol. 337, issues 1-2, pp. 45~49, 2002.
- [6] Kiaotaka Nakashima et al, "Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Pressing to High Total Strains", Materials Science and Engineering A, Vol. 281, issues 1-2, pp. 82~87, 1999.
- [7] Y. H. Kim, J. H. Park and Y. E. Jin, "An upper Bound Analysis for Torsional Upset Forging of Cylindrical Billets", Proceedings of the 6th Int. Conference on Technology of Plasticity. Advanced Technology of Plasticity,



- Vol. 2, pp. 859~864, 1999.
- [8] Y. H. KIM, X. Ma, P. D. Hodgson and M. R. Barnett, "Multi Equal Channel Angular Pressing with Rotation Dies", Material Science Forum, Vols. 426~432, pp. 2777~2782, 2003.
- [9] 박재훈, 변홍석, 김영호, "상계해석을 이용한 축대칭 후방압출 공정의 Corner Cavity 해석", 한국정밀공학회지, 제17권, 제2호, pp. 144~150, 2000.
- [10] 권기환, 채수원, 권숙인, 김명호, 황석근, "Pure-Zr의 ECAP 공정에서 마찰이 재료의 변형 거동과 변형에 미치는 영향", 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 182~187, 2001.