

토션을 이용한 압출공정의 상계해석에 관한연구

박 철 우†

(원고접수일 : 2008년 3월 4일, 심사완료일 : 2008년 5월 15일)

A Study of the Upper Bound Analysis of Extrusion Process with Torsion

Chul-Woo Park†

Abstract : In this study, a extrusion process with torsion of the bottom die is investigated to improve the forming performance of conventional extrusion process. In the experiment, plasticine is used as a model material. The results of experiments are compared with the two numerical methods, the Experiment and the Finite Element Method(FEM). An attempt is made to link programs incorporating with the process variables obtained by commercial FEM software, DEFORM-3D a useful package. Numerical result is compared with experimental one. These results show that the torsional extrusion process is very useful process because this process can obtain the homogenous deformations.

Key words : Torsion(토션), Upper bound analysis(상계해석), Extrusion(압출), Angular velocity(각속도), Plasticine(플라스틱썬)

1. 서 론

냉간압출 공정은 높은 압력을 요하기 때문에 금형제작에 주의를 기울여야한다. 금속성형 공정에서 성형하중은 상당히 중요한 요소이다. 특히 냉간 성형 공정에서는 과도한 성형하중이 요구되며, 이는 다이 마모를 가속시키며 다이 수명 또한 짧게 만든다. 압출문제에 대한 유한요소법의 해석은 S-liwa^[1]이 정수압 압출에 대해 탄소성유한요소법으로 응력분포등을 구하였다. Min^[2]등은 축대칭 전방압출과 후방압출을 유한요소법으로 다룬바 있다. 이에 성

형하중을 감소시키기 위한 노력이 지속되고 있다. 전방압출 공정에서 기존의 압출공정에 회전공정을 추가함으로써 성형하중 감소와 성형성을 증가시키는 방법으로서 Kemin^[3], Kim^{[4],[5]}, Kong^[6], Loginov^[7]등에 의하여 연구되었다. Kemin은 업셋팅 공정에 회전공정을 추가하여 성형하중이 감소됨을 유한요소 해석(FEM)에 의해 검증하였고, Kong과 Hodgson은 전방압출 공정에 다이의 주기적인 회전(cyclic torsion)을 주어 성형하중이 감소됨을 검증하였다.

본 연구에서는 압출 공정에 다이의 회전을 추가

† 교신저자(부산대학교 기계공학부, E-mail:p016535@empal.com, Tel: 051)510-1013)

하여 실험과 해석을 적용해 보았다. 플라스틱신을 이용해서 실험을 수행하였다. 상계해석을 통하여 성형하중을 예측하였다. 제품의 성형성을 평가하기 위해서 소성전용해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용해서 해석을 수행했다.

2. 압출공정 이론해석

Fig. 1은 토션 압출 공정에서 원통좌표계에 의한 해석 모델이다. 펀치는 V_D 의 속도로 움직이고, 다이는 각속도 ω 로 회전하는 공정이다. (1) 펀치와 다이는 강체로 가정하였으며 재료는 등방성이고 강소성체이며, Von-Mises 항복조건을 따른다. (2) 재료는 비압축성조건을 만족한다. (3) 변형중

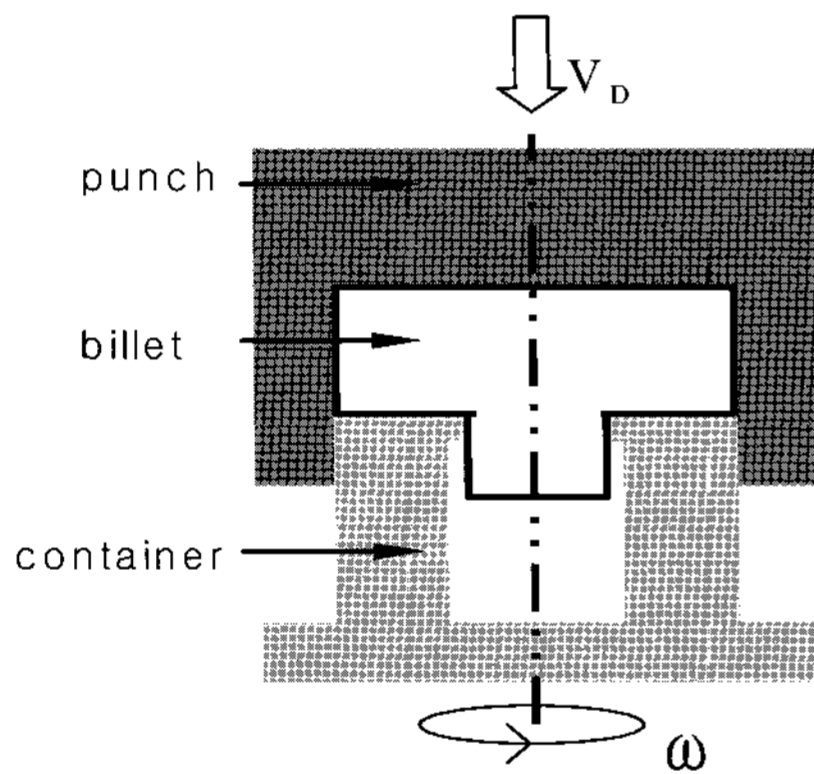


Fig. 1 Schematic view of equipment

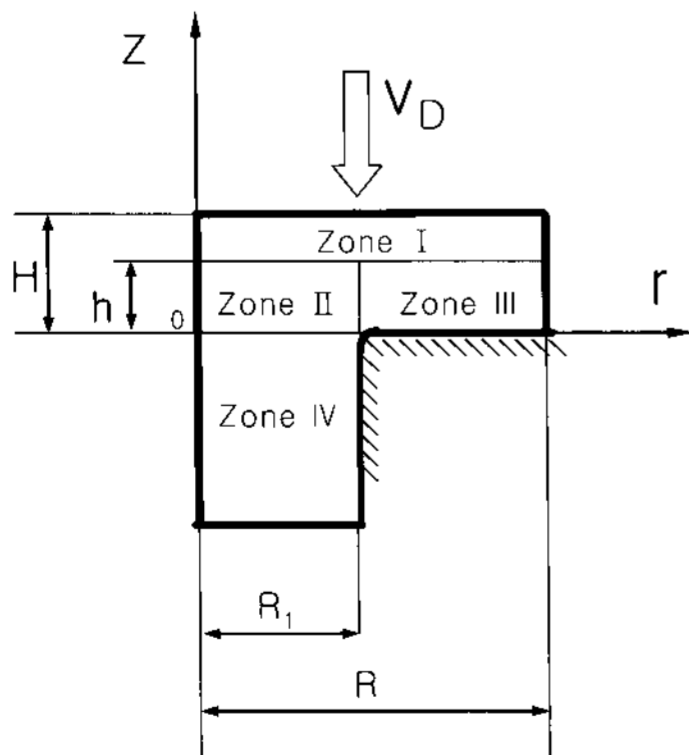


Fig. 2 Analytical model of Torsional extrusion.

I zone : Dead-metal zone II zone : Plasticity zone
 III zone : Plasticity zone IV zone : Rigid zone

의 온도변화 및 관성을 무시한다. (4) 재료의 상당 변형률 속도의 함수이다. (5) 마찰조건은 소성변형 동안 일정하며 $\tau = mk$, m 은 마찰 계수이며, k 는 순수전단항복응력이다.

Fig. 2는 토션 압출에 대한 해석 모델이다. 재료의 유동을 고려하여 다음과 같은 속도장을 가정하였다. 영역 I과 IV는 강성영역으로 가정하고 영역 II와 III은 변형영역으로 가정하였다. 변형영역 II에 대한 속도장을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 &(0 \leq r < R_1) \\
 &v_r = \frac{V_D r}{2h} \left[1 - \frac{R^2}{R_1^2} \right] \\
 &v_\theta = rw \left(1 - \frac{z}{h} \right) \\
 &v_z = -\frac{V_D z}{h} \left[1 - \frac{R^2}{R_1^2} \right] - \frac{R^2}{R_1^2} V_D
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, β 는 압출률(Extrusion ratio)을 나타내고 있다.

$$\beta = \frac{R^2}{R_1^2}$$

변형영역 III에 대한 속도장을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 &(R_1 \leq r < R_2) \\
 &v_r = \frac{V_D}{2h} \left[r - \frac{R^2}{r} \right] \\
 &v_\theta = R_1 w \left(1 - \frac{z}{h} \right) \\
 &v_z = -\frac{V_D}{h} z
 \end{aligned} \tag{2}$$

v_r 에 대한 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &v_r \Big|_{r=0} = 0 \quad (0 \leq r < R_1) \\
 &v_r \Big|_{r=R} = 0 \quad (R_1 \leq r < R_2) \\
 &v_r \Big|_{r=R_1} = \frac{V_D}{2h} \left[R_1 - \frac{R^2}{R_1} \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

(변형영역 II = 변형영역 III)

V_z 에 대한 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_z \Big|_{z=h} &= -V_D \quad (0 \leq r < R_1) \\
 V_z \Big|_{z=0} &= -\frac{R^2}{R_1^2} V_D \quad (0 \leq r < R_1) \\
 V_z \Big|_{z=h} &= -V_D \quad (R_1 \leq r < R_2) \\
 V_z \Big|_{z=0} &= 0 \quad (R_1 \leq r < R_2)
 \end{aligned} \tag{4}$$

V_θ 에 대한 경계조건을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_\theta \Big|_{z=h} &= 0 \quad (0 \leq r < R_1) \\
 V_\theta \Big|_{z=0} &= rw \quad (0 \leq r < R_1) \\
 V_\theta \Big|_{z=h} &= 0 \quad (R_1 \leq r < R_2) \\
 V_\theta \Big|_{z=0} &= R_1 w \quad (R_1 \leq r < R_2)
 \end{aligned} \tag{5}$$

$0 \leq r < R_1$ 에서의 유효변형률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{V_D}{2h} - \frac{V_D R^2}{2h R_1^2} \\
 \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{V_D}{2h} - \frac{V_D R^2}{2h R_1^2} \\
 \dot{\epsilon}_{zz} &= -\frac{V_D}{h} + \frac{V_D R^2}{h R_1^2} \\
 \dot{\epsilon}_{rz} &= 0 \\
 \dot{\epsilon}_{r\theta} &= 0 \\
 \dot{\epsilon}_{\theta z} &= -\frac{rw}{2h}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$R_1 \leq r < R$ 에서의 유효변형률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{rr} &= -\frac{V_D}{2h} + \frac{V_D R^2}{2r^2 h} \\
 \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= -\frac{V_D}{2h} - \frac{V_D R^2}{2r^2 h} \\
 \dot{\epsilon}_{zz} &= -\frac{V_D}{h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{rz} &= 0 \\
 \dot{\epsilon}_{r\theta} &= \frac{R_1 w}{2r} \left[1 - \frac{z}{h} \right] \\
 \dot{\epsilon}_{\theta z} &= -\frac{R_1 w}{2h}
 \end{aligned} \tag{7}$$

아래의 식을 통하여 총 변형 에너지율로부터 하중을 구한다.

$$P = \dot{W}_i / V_D \tag{8}$$

3. 압출공정 유한요소해석

본 연구의 유한요소해석에 사용된 소재는 Aluminum-2024이며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.^[2]

$$\bar{\sigma} = 357 \epsilon^{0.1588} [N/mm^2] \tag{9}$$

소재와 금형사이의 접촉면에서 마찰을 고려하기 위하여 마찰상수[m]은 Table 1과 같다. 제품의 크기는 60*40(H0*D0[mm])이다. Fig. 3은 마찰변화에 따른 성형하중의 분포를 나타내고 있다. case1에서의 성형하중은 1,000 [KN]이며, case2에서의 성형하중은 1,050 [KN]이며, case3에서의 성형하중은 1,100 [KN]이다. 마찰이 증가 할 수록 성형하중은 증가함을 알 수 있다.

Table 1 Process conditions for the simulation in axisymmetric extrusion

	Punch Velocity (mm/sec)	Friction (m)	Angular Velocity of container (rad/sec)
case 1	1	0	0
case 2		0.3	0
case 3		0.4	0
case 4		0	1
case 5		0.4	1
case 6		0.4	2

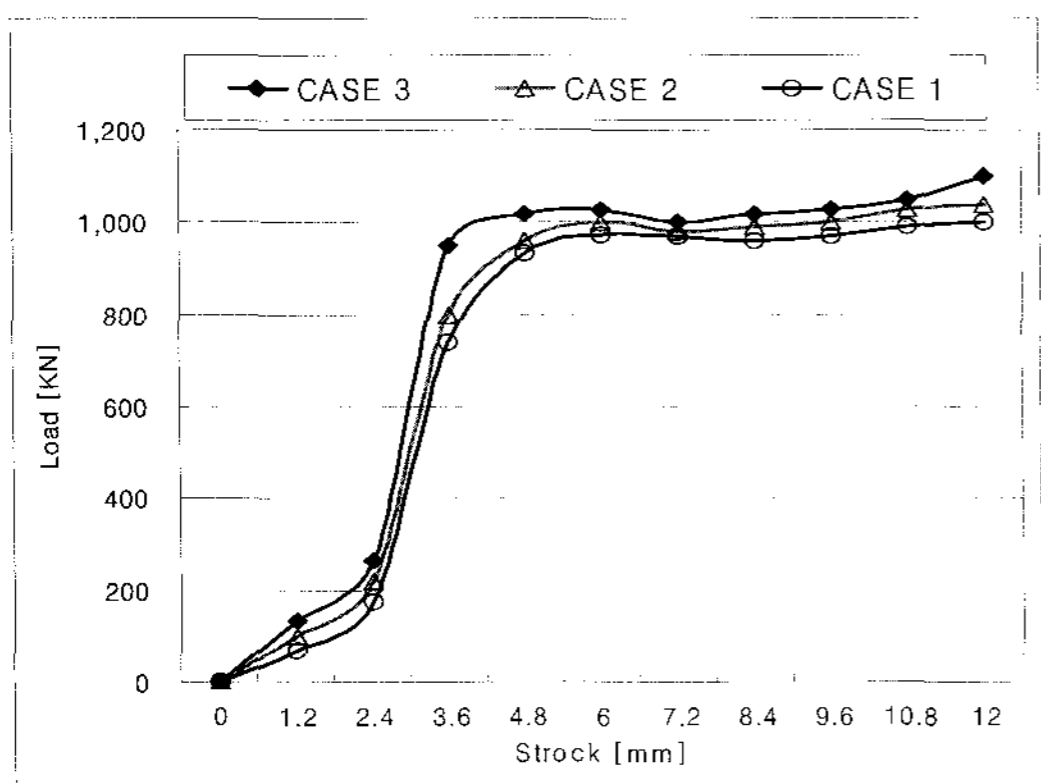


Fig. 3 Comparison of the Friction according to the forming load

Fig. 4~6은 각속도의 변화에 따른 제품의 유효응력분포를 나타내고 있다. case3에서의 유효응력분포는 [0~343MPa]이며, case5에서는 [0~340MPa]이며, case6에서는 [0~339MPa]이다. Fig. 7~9는 Total Velocity 분포를 보여주고 있다. 토션이 없는 상태($\omega = 0$ rad/sec)에서는 속도장의 벡터가 재료가 변형하는 방향으로만 작용하고 있다. 그러나, 토션이 작용하고 있는 상태($\omega = 1$ rad/sec, or $\omega = 2$ rad/sec)는 속도장의 벡터가 원주방향으로 이동함을 알 수 있다. 재료 변형방향과 각속도가 작용하는 방향으로 발생하고 있다.

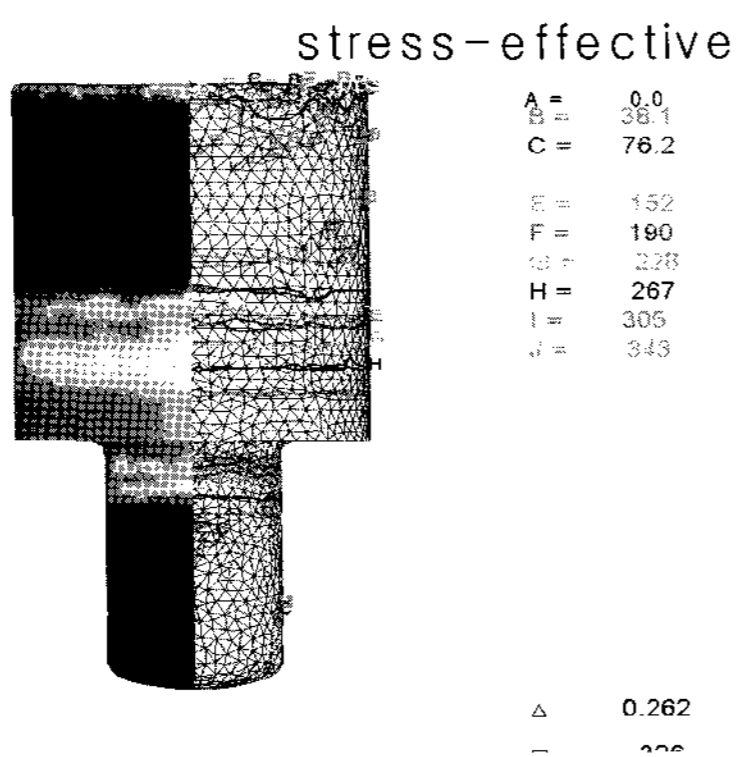


Fig. 4 Effective stress at $\omega=0$ rad/s, $m=0.4$

토션 압출의 경우 각속도에 영향으로 응력의 분포가 균일하게 발생하고 있다. 이것은 소재의 내부까지 응력이 균일하게 나타나고 있다. 또한 다이

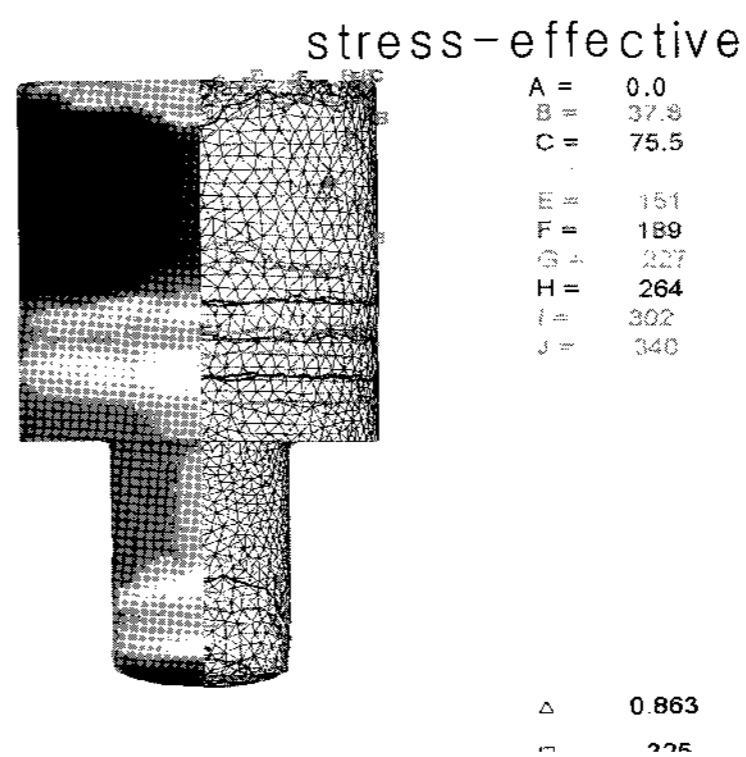


Fig. 5 Effective stress at $\omega=1$ rad/s, $m=0.4$

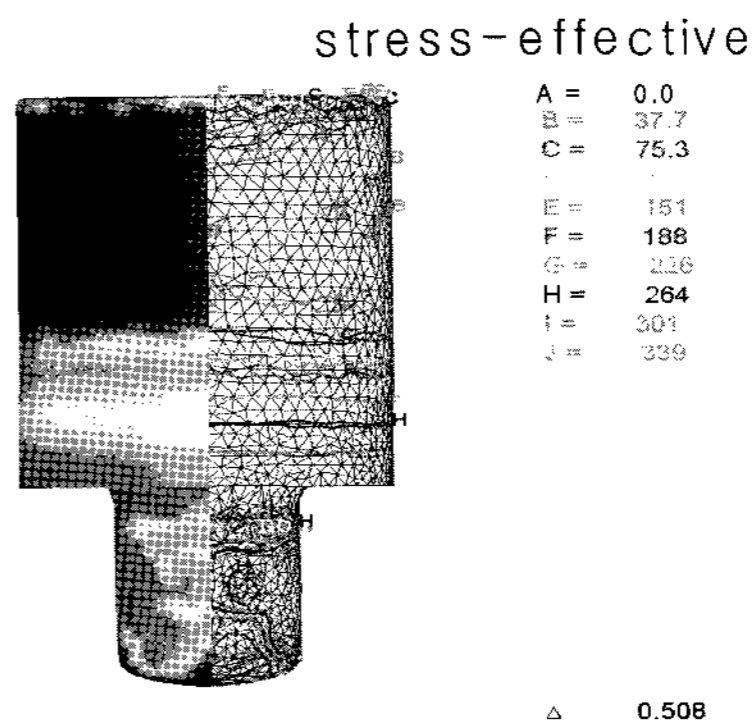


Fig. 6 Effective stress at $\omega=2$ rad/s, $m=0.4$

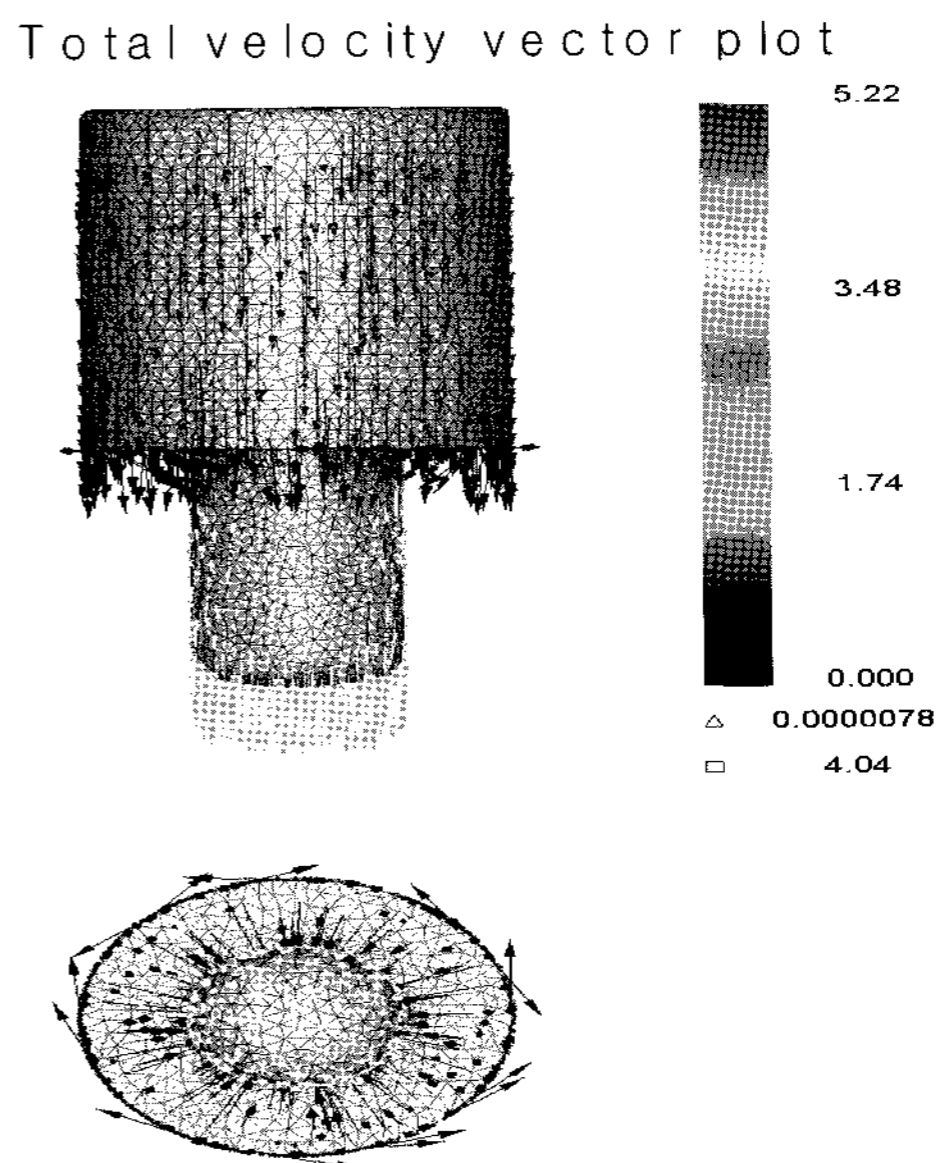


Fig. 7 Velocity at $\omega=0$ rad/s, $m=0.4$

랜드부에서의 응력집중이 각속도에 의해서 재료의 내부까지 응력을 분산시키고 있다.

Total velocity vector plot

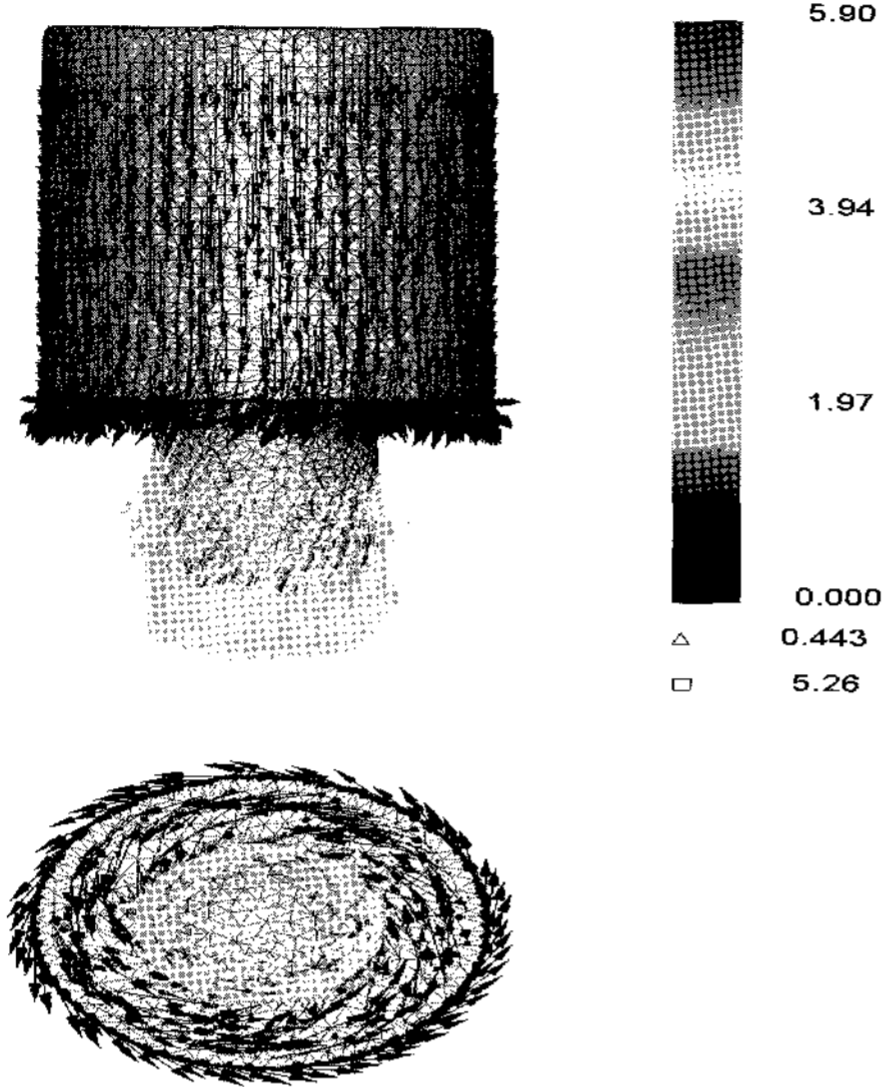


Fig. 8 Velocity at $\omega=1$ rad/s, $m=0.4$

Total velocity vector plot

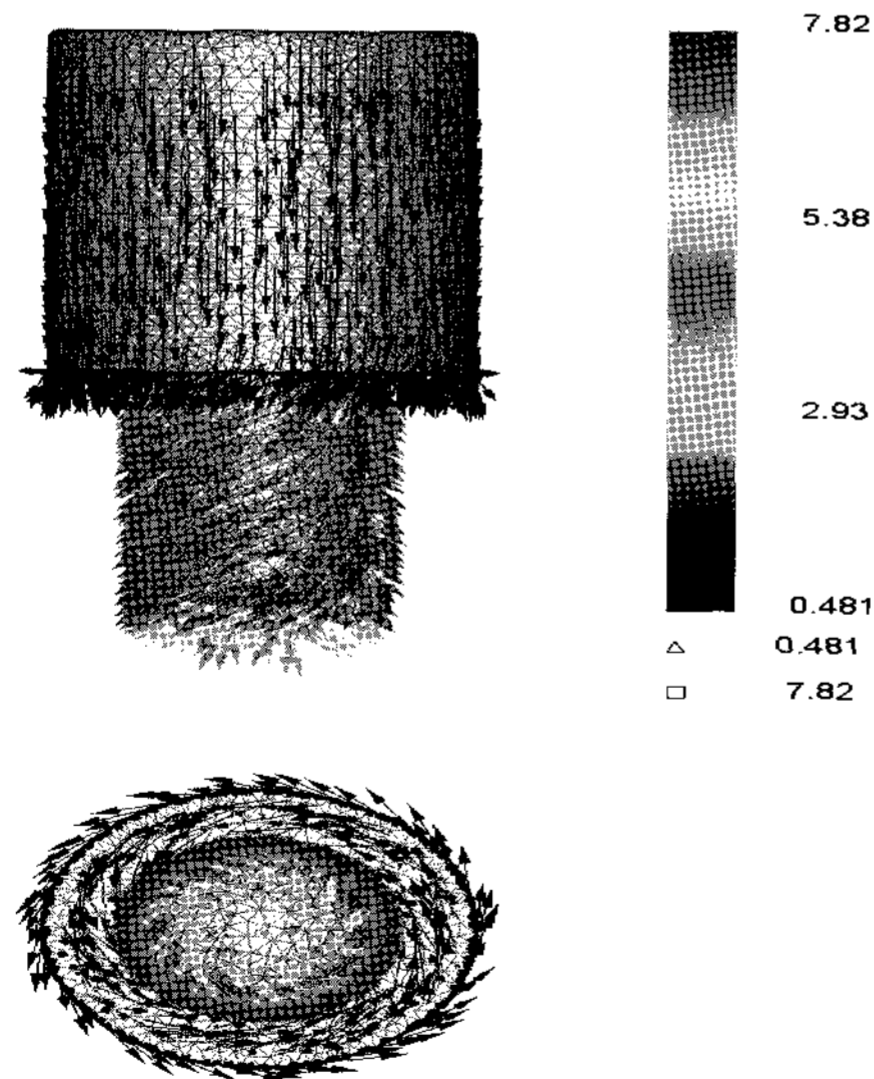


Fig. 9 Velocity at $\omega=2$ rad/s, $m=0.4$

토션이 없는 상태($\omega = 0$ rad/sec)에서는 속도장의 벡터가 재료가 변형하는 방향으로만 작용하고

있다. 그러나, 토션이 작용하고 있는 상태($\omega=1$ rad/sec and $\omega=2$ rad/sec)는 속도장의 벡터가 재료 변형방향과 각속도가 작용하는 방향으로 발생하고 있다. 펀치 랜드부의 원주 방향으로 속도 벡터가 작용하고 있다. 금형해석을 위한 재료로써는 DEFORM - 3D Material list의 AISI-D2재료를 선택하였다. Strock 10mm 이동 상태에서의 금형에 작용하는 응력상태를 해석했다.

stress-effective

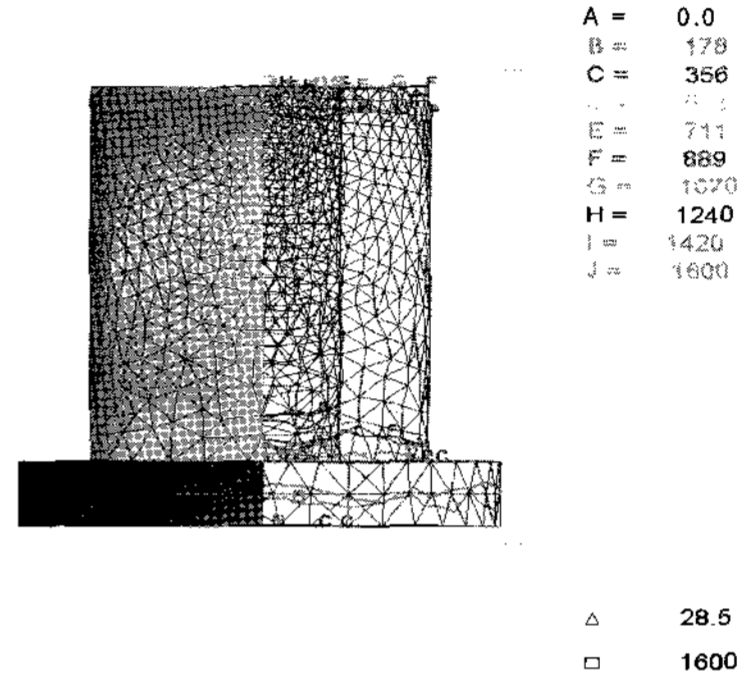


Fig. 10 Effective Stress of the die insert for the extrusion without Torsion, $\omega=0$ rad/s, $m=0.4$

Fig. 10과 Fig. 11는 금형의 유효응력 분포를 나타내고 있다. 토션이 작용 할 때 금형의 랜드부 위에서 응력분포가 작게 나타남을 알 수 있다. 각속도 ($\omega = 0$ rad/sec)에서는 금형의 랜드부위의 유효응력 1,600Mpa이 발생하며, 각속도($\omega = 2$ rad/sec)에서는 금형의 랜드부위의 유효응력 1,320Mpa가 발생하고 있다.

stress-effective

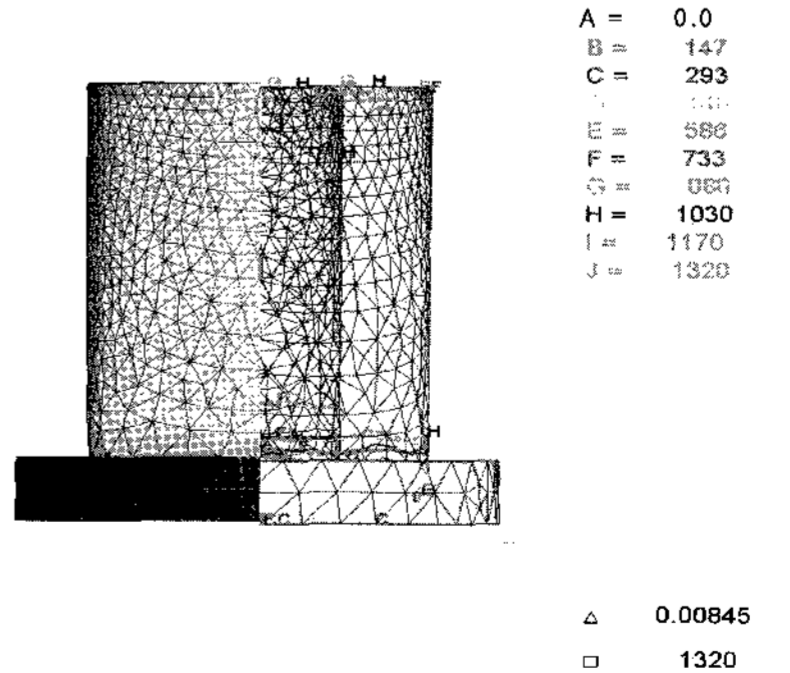


Fig. 11 Effective Stress of the die insert for the extrusion with the Torsion, $\omega=2$ rad/s, $m=0.4$

4. 실험

본 실험에서는 재료비용의 절감, 작은 용량의 프레스에서의 실험 가능하도록 다이를 제작하였다. 소재 내부의 유동상태를 관찰 할 수 있는 점토 계통의 하나인 플라스틱신을 모델 재료로 사용하였다. 실험장치구성은 하금형부분(Ring type punch)을 회전시키고 상다이(container)는 수직으로 힘을 가하여 움직이도록 하는 구조로 회전 금형장치를 제작하였다. Fig. 11은 MTS장치에 다이와 펀치를 고정시킨 상태를 나타내고 있다.

- * 시험 장치 : 25 KN [MTS]
- * 윤활제 : talc powder(m=0.4)
- * 다이속도 : 1 mm/sec
- * 빌렛지름 : 40mm
- * 빌렛높이 : 60mm
- * 각속도 변화 : 0, 1, 2 [rad/sec]

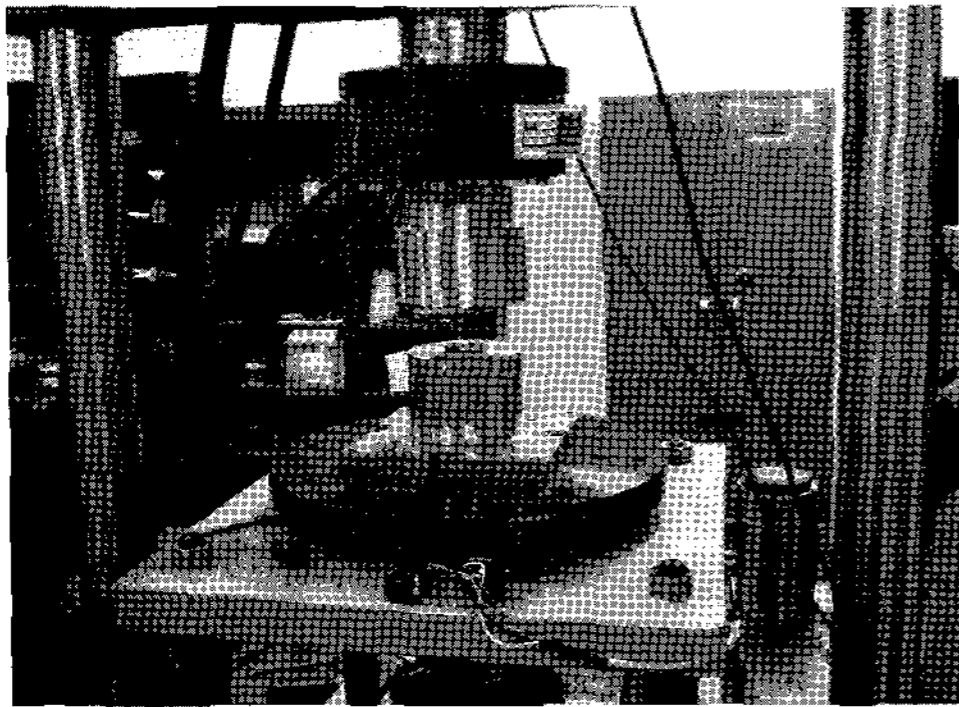


Fig. 11 MTS machine and die

Fig. 11와 같이 MTS시험 장치에 하부 다이가 회전 할 수 있는 장치를 고안하여 프레스에 장착하였다. DC서보 모터의 회전력이 기어트랙에 의해 전달되도록 하였다. MTS시험 장치는 펀치의 속도를 제어하며, 실험중의 성형하중을 체크할 수 있으며, 서보 모터에 의해서 장치의 각속도를 조절 할 수 있다.

실험은 실내온도에서 이루어졌으며, 재료의 유동상태를 관찰하기 쉽도록 Fig. 12(a)과 같이 두 가지 색깔의 플라스틱신을 반복 적층하였다. 아래의 초기 소재를 $\omega = 0, 1, 2$ (rad/sec) 의 각속도로

실험을 하였다. Fig. 12(c), (d)를 통해서는 재료에 토션이 작용하고 있다.

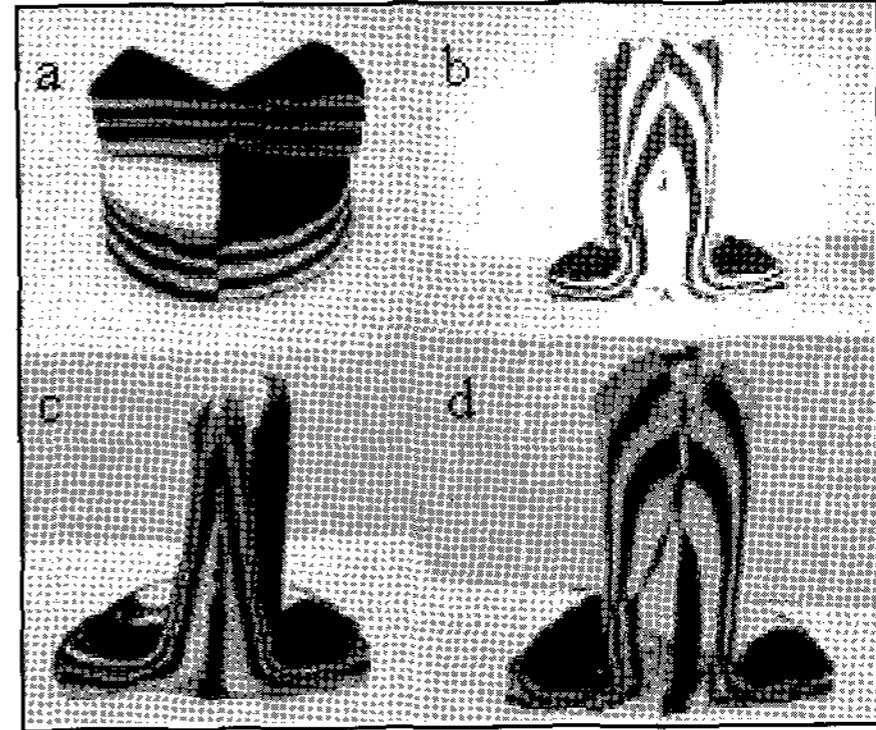


Fig. 12 Experimental results of deformed flow patterns in conventional and Torsional extrusion

- (a) : initial material (b) : $\omega = 0$ rad/sec
- (c) : $\omega = 1$ rad/sec (d) : $\omega = 2$ rad/sec

5. 결론

본 연구에서 토션 압출공정은 기존의 공정에 비해서 성형하중을 감소시킬 수 있으며, 회전에 의한 효과로 금형의 안정성도 평가할 수 있었다.

1. 마찰력이 증가 할 수 록 성형하중은 증가함을 알 수 있었다.
2. 토션 압출은 각속도(0 rad/sec=> 2 rad/sec)가 증가함에 따라서 성형하중이 10%감소함을 알 수 있었다.
3. 토션 압출은 각속도(0 rad/sec=> 2 rad/sec)가 증가함에 따라서 금형의 유효응력이 감소(1,600MPa => 1,320MPa)하며, 금형의 수명을 향상 시킬 수 있다.

참고문헌

[1] S. Alexandrov, G. Mishuris, W. Miszuris, R. E. S-liwa, "On the dead-zone formation and limit analysis in axially symmetric extrusion", International journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, pp. 367~379, 2001.

- [2] G. S. Min, J. Choi, J. C. Choi, B. M. Kim and H. Y. Cho, "Process Design in Cold Forging of the Backward and Forward Extruded part", Journal of the KSPE, Vol. 14, No. 8, pp. 57~64, 1997.
- [3] X. Kemin, W. Zhen and L. Yan, "FEM Analysis of Cylinder Twist-Compression Deformation Regularity", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 69, pp. 148~151, 1997.
- [4] Y. H. Kim, Y. E. Jin, J. H. Park, Y. Lee, "An Analysis of the Torsional Forming Process using the Dual Stream Function", Proceedings of the 8th Int. Con. on Metal Forming, Poland, pp. 741~745, 2000.
- [5] Y. H. Kim, W. B. Bae, J. H. Lee, J. H. Park, "A Study on the Process Design of Non-Axisymmetric Forging Components", Journal of the KSPE, Vol. 12, No. 10, 1995.
- [6] L. X. Kong, P. D. Hodgson, "Material Properties under Drawing and Extrusion with Cyclic Torsion", Material Sciences and Engineering, A308, pp. 209~215, 2001.
- [7] Yu. N. Loginov, S. P. Burkin, "Investigations of the Process of Extrusion through a rotating die", Steel in Translation, Vol. 25, No. 4, pp. 37~42, 1995.
- [8] S. C. An, G. A. lee, S. Y. Kim and Y. T. Im, "Elastic Analysis of Cold Extrusion Die Set with Stress Ring", Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 4, pp. 355~362, 2002.

저 자 소 개



박철우(朴哲雨)

1974년 4월생, 2001년 경일대학교 기계공학과(학사), 2006년 부산대학교 정밀기계공학과(공학박사), 2007년 부산대학교 기계공학부 NURI BAEM 사업단 교수, 관심분야: 소성가공, CAD/CAE/CAM, 금형설계해석