

<論 文>

3 차원 변형을 고려한 클로버 형상 소재의 업세팅 단조해석

양 동 열* · 김 중 호**

(1986년 4월 3일 접수)

Analysis of Three-Dimensional Upset Forging of Clover-Shaped Disks

Dong-Yol Yang and Jong-Ho Kim

Key Words: Upset Forging(업세팅 단조), Clover-Shaped Disk(클로버 형상의 디스크), Three-Dimensional Deformation(3 차원 변형), Kinematically Admissible Velocity Field(동적가용속도장), Forging Load(단조하중)

Abstract

Upset forging of non-circular disks is characterized by the three-dimensional deformation with lateral sidewise spread as well as axial bulging along thickness. A kinematically admissible velocity field for the upset forging of clover-shaped disks is proposed. From the proposed velocity field the upper-bound load and the deformed configuration are determined by minimizing the total power consumption with respect to some chosen parameters. Experiments are carried out with annealed SM 15C steel billets at room temperature for different clover shapes and frictional conditions. The theoretical predictions both in the forging load and the deformed configuration are shown to be in good agreement with the experimental observations. Therefore, the proposed method of analysis in this work can be used for the prediction of forging load and deformation in upset forging of clover-shaped disks.

기 호 설 명

- A, B, C : J^* 의 최소화에 사용되는 변수들
- a, b : 클로버 형상 소재의 초기 최대반경과 최소반경
- h : 시편의 변형중의 높이
- h_0 : 시편의 초기높이
- $H.R.$: 높이감소율(height reduction)
- J^* : 실제공정에 필요한 전체 에너지율의 상계
- L : 단조하중
- m : 마찰상수(friction factor)

- r, θ, z : 원통좌표계
- Δt : 시간간격
- U_0 : 펀치 하강 속도
- U_r, U_θ, U_z : 원통 좌표계에서의 속도 성분들
- $|\Delta U|$: 속도불연속량

1. 서 론

업세팅 단조에 있어서 금속 유동과 단조하중은 가공물의 기계적 성질, 결함, 변형 형상 등에 많은 영향을 미치고 있기 때문에 이들의 예측은 매우 중요하다. 업

* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과
** 정회원, 경기공업개발대학 금형설계과

세팅 공정에 대한 해석은 지금까지 주로 축대칭 소재에 한해서 많은 연구가 되어 오다가 근래에 들어 비원형 단면의 시편에 대한 해석도 하게 되었다. 비원형 단면을 갖는 소재의 업세팅은 중심축에 수직인 평면내에서의 평면변형(sidewise spread)과 두께방향으로의 벌징(bulging) 변형을 갖는 3차원 변형이지만 해석의 초기에 있어서는 둘중의 하나만을 고려한 2차원 변형 문제로 제한하여 많은 해석을 하였다.

Avitzur⁽¹⁾는 평면 변형 문제로 직사각형 소재의 벌징을 해석하였고, Aku⁽²⁾ 등은 다각형 블록의 동적 압축 변형을 조사하기 위해 상온에서 플라스틱(plasticine) 재료를 사용하여 모범실험을 하였다. Kanacri⁽³⁾ 등은 Hill⁽⁴⁾에 의해 제안된 수식을 수정하여 평면문제 가정하여 직사각형 소재의 압축해석을 하였으며, Juneja^(5,6)는 정다각형 소재에 대해 적절한 속도장을 가정하여 2차원 변형 해석으로 상제해를 구했다.

최근 업세팅의 해석 방법으로는 유한요소법도 이용되고 있는데 Kitahara⁽⁷⁾ 등은 삼각주 요소에 의한 플래이트의 평면변형을 해석하였고, Park 과 Kobayashi⁽⁸⁾는 3차원 요소에 의한 유한요소법을 수식화하여 사각형 블록의 압축문제에 적용한 결과, 대체로 이론과 실험은 잘 일치하나 단지 시간이 많이 걸리는 것으로 나타났다. 최근 Kim 과 Yang⁽⁹⁾은 간단한 속도장을 가정하여 비교적 짧은 계산시간으로 정사각형 블록의 업세팅을 해석한 바 있다.

본 논문에서는 소재의 3차원 변형, 즉 평면변형(sidewise spread)과 벌징변형을 동시에 고려할 수 있는 간단한 동적가용 속도장을 제안하고 이를 클로버(clover) 시편의 업세팅 단조 해석에 적용해보기로 한다. 상제이론에 의한 전체 에너지 소비율을 최소화시키면서 그때 그때의 높이 감소에 따른 단조 하중과 변형 형상을 구한다. 실험은 SM 15 C 탄소강을 이용하여 시편의 형상과 윤활조건을 바꿔가면서 상온에서 수행한다.

2. 동적가용 속도장(Kinematically Admissible Velocity Field)

클로버 형상의 시편이 Fig. 1에 나타나 있으며 시편의 대칭성을 이용하면 단지 요소 $OABO'A'B'$ 만을 고려하면 된다. 요소 $OABO'A'B'$ 와 요소 $OBCO'B'C'$ 는 평면 $OO'B'B$ 에 대해 대칭이고, 평면 $OO'A'A$ 와 $OO'C'C$ 도 대칭면을 이루고 있기 때문에 이들면은 소성 변형 후에도 평면상태를 유지해야 한다. 즉 다시 말

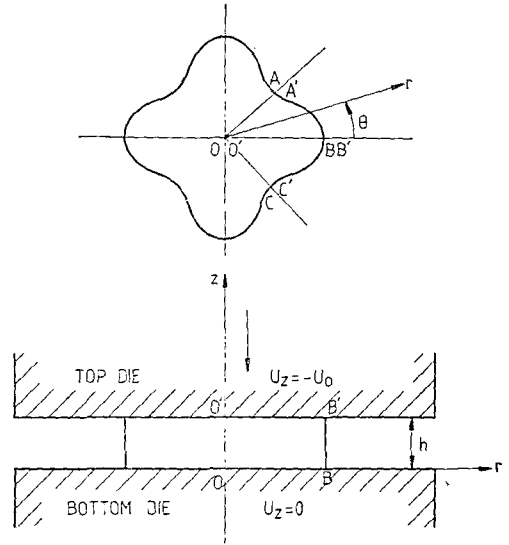


Fig. 1 Upset forging of a clover-shaped disk

하면 이들 평면상에서는 속도 불연속(velocity discontinuity)이 없어야 하고, 이들 평면에 수직인 방향으로의 속도 성분이 영(zero)이어야 한다. 따라서 이들 경계조건들을 만족시키고, 또한 z 축 방향으로의 벌징변형을 동시에 표현할 수 있는 2차 함수를 도입하면, Juneja⁽⁵⁾에 의한 것을 보다 더 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_r = \frac{U_0}{h} r A \left[\frac{1}{2} + \frac{a-b}{a+b} B \cos(4\theta) \right] \cdot \left[-\frac{4}{h^2} z^2 + \frac{4}{h} z + C \right] \quad (1)$$

$$U_\theta = -\frac{U_0}{h} r A \left[\frac{B(a-b)}{2(a+b)} \sin(4\theta) \right] \cdot \left[-\frac{4}{h^2} z^2 + \frac{4}{h} z + C \right] \quad (2)$$

여기서 A, B, C 는 매개변수들로, A 는 속도 경계조건으로부터 정해지는 변수이고 B 와 C 는 전체 에너지 소비율을 최소화시키는 데 사용되는 변수들이다. 그리고 a 와 b 는 클로버의 형상함수에서 초기 장반경과 단반경을 나타내는 것으로 a 와 b 가 같은 값을 가질 때는 원(circle)을 표현하는 것이다.

원통 좌표계에서의 비압축성 조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

또한 상하금형에서의 속도 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$z = h \text{에서 } U_z = -U_0 \quad (4a)$$

$$z=0 \text{에서 } U_z=0 \quad (4b)$$

식 (1)과 식 (2)를 식 (3)에 대입하고 식 (4a, 4b)의 조건식을 이용하면 다음과 같은 결과를 쉽게 얻을 수 있다.

$$A = \frac{1}{\frac{2}{3} - C} \quad (5)$$

$$U_z = -\frac{U_0}{h} z A \left[-\frac{4}{3h^2} z^2 + \frac{2}{h} z + C \right] \quad (6)$$

이렇게 하여 구해진 식 (1), 식 (2) 그리고 식 (6)은 비압축성 조건과 속도경계조건을 동시에 만족하고 있으므로 동적가용속도장이 되며, 따라서 이속도장은 클로버 소재의 업세팅 단조 해석에 적용할 수 있다.

3. 상계이론(Upper-Bound Theory)

Fig. 1은 클로버 시편의 업세팅 공정을 보여주고 있다. 상하금형은 강체로 간주되고 상부금형은 속도 U_0 로 하강하고, 하부금형은 정지상태에 있다. 재료는 등방성이고 비압축성이며, 강소성체(rigid-plastic)의 재질로써 von-Mises의 유동법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 시편과 공구 사이의 마찰응력은 일정한 것으로 간주한다.

상계이론은 식 (7)로 주어지며 여기서 J^* 는 실제속도장에 가깝도록 최소화되어야 하는 것이다⁽¹⁰⁾.

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_f \quad (7)$$

여기서 J^* 의 소성변형 영역에 대해 동적가용 속도장으로로부터 계산되는 총 에너지 소비율의 상계를 나타내고 있다. \dot{W}_i 는 변형도를 성분들에 의한 내부 변형에너지율을 나타내는 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} [(\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2)/2 + \dot{\epsilon}_r \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_\theta \dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_r \dot{\epsilon}_z]^{1/2} \quad (9)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 는 유효변형도율을 나타내고, $\bar{\sigma}$ 는 가공경화 재료에 대한 유효응력을 나타내는 것으로, 본 논문에서는 z 방향으로 분할된 임의의 (r, θ) 평면내에서 그 평면을 사각요소들로 나눈 후, 이들 각 요소에 대해 유효변형도와 유효응력을 계산함으로써 재료의 가공경화를 고려하였다.

금형과 시편 사이에서 마찰에 의해 발생하는 마찰에너지를 \dot{W}_f 는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{W}_f = \frac{m}{\sqrt{3}} \int_S \bar{\sigma} [|\dot{U}|_{z=0} + |\dot{U}|_{z=h}] ds \quad (10)$$

여기서 m 은 금형면상에서의 마찰상수를 나타낸다. 그리고 식 (1)과 식 (2)로부터 알 수 있는 것처럼 속도 불연속량 $|\dot{U}|_{z=0}$ 과 $|\dot{U}|_{z=h}$ 는 같은 값을 가지며

다음과 같이 주어진다.

$$|\dot{U}|_{z=0} = |\dot{U}|_{z=h} = [U_r^2 + U_\theta^2]_{z=0}^{1/2} \quad (11)$$

따라서 식 (8)을 이용하면 단조하중에 대한 상계해가 다음과 같이 결정된다.

$$L = \frac{J^*}{U_0} \quad (12)$$

위의 해석에서 상계해(J^*)는 2개의 독립변수를 포함하는데, 변수 B 는 (r, θ) 평면내에에서의 변형(sidewise spread)량을 조절하는 것이고, 변수 C 는 z 축 방향으로의 벌짐(bulging) 변형을 조절하는 변수이다. 업세팅 공정은 비정상 상태(nonsteady state)의 변형과정이기 때문에, 이의 해석을 위해선 초기 시편 높이를 조금씩 감소시키면서 그때 그때마다 상계해를 최소화시켜 단조하중과 변형형상을 구한다. 매단계에 있어서 누적되는 변형 형상의 좌표는 다음과 같이 주어진다.

$$r^{(i+1)} = r^{(i)} + U_r^{(i)} \cdot \Delta t \quad (13a)$$

$$\theta^{(i+1)} = \theta^{(i)} + U_\theta^{(i)} \cdot \Delta t / r^{(i)} \quad (13b)$$

$$z^{(i+1)} = z^{(i)} + U_z^{(i)} \cdot \Delta t \quad (13c)$$

여기서 $r^{(i)}$ 는 i 번째 단계에 있어서의 r 좌표를 나타내는 것이고 Δt 는 i 번째와 $(i+1)$ 번째 사이의 시간간격을 나타내는 것이다.

4. 실험

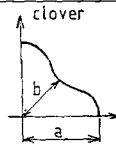
시편으로는 870°C에서 약 2시간 동안 풀립처리후 소생시킨 SM 15C 탄소강을 사용하였다. 시편의 클로버 형상은 wire-EDM 방법에 의해 가공되었으며 이들에 대한 치수가 Table 1에 나타나 있다.

시편의 응력-변형도 곡선을 구하기 위해 압축시험을 상온에서 행하였으며 그 시험결과 다음의 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 80.48 \bar{\epsilon}^{0.148} (\text{kgf/mm}^2) \quad (14)$$

소재와 금형 사이에서 마찰에 의한 에너지 소비율을 계산하기 위해서 마찰상수(friction factor, m)를 사용하는데 마찰상수는 보통 링 압축시험에 의해 구해지는

Table 1 Billet dimensions (unit : mm)

Billet shape	Major axis (2 a)	Minor axis (2 b)	Ratio (b/a)	Thickness (h)	Remark
Circle	20.0	20.0	1.0	10.2	
Clover	20.0	14.0	0.7	10.2	
Clover	20.0	10.0	0.5	10.2	

것으로 소성변형중에 일정한 값을 갖는다고 가정한다. 링 압축 시험결과 윤활제로 베프론 테이프를 사용한 경우의 마찰상수는 $m=0.1$ 의 값을 얻었고 무윤활인 경우엔 $m=0.3$ 의 값을 얻었다. 실험은 상온에서 150톤 용량의 유압 프레스를 사용했으며, 실험시의 하중과 상부금형의 이동거리가 동시에 측정되도록 로우드셀(load

cell)과 선형변위 측정기(linear displacement transducer)를 사용하였다.

5. 결과 및 토의

식 (12)로 주어진 상계하중의 계산은 분할된 각각의

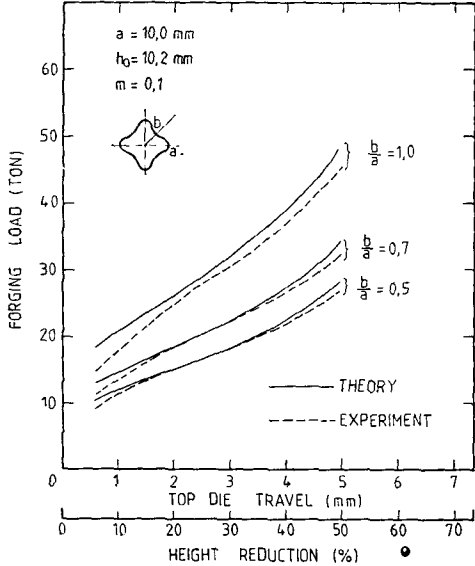


Fig. 2 Comparison between theoretical and experimental forging loads for annealed SM 15C steel; $h_0=10.2$ mm, $a=10$ mm, $m=0.1$

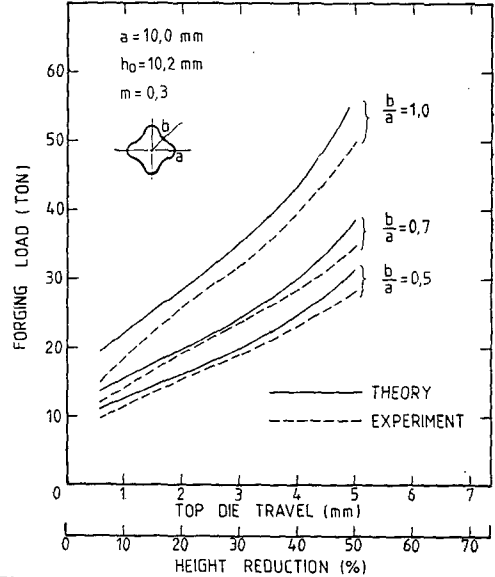


Fig. 3 Comparison between theoretical and experimental forging loads for annealed SM 15C steel; $h_0=10.2$ mm, $a=10$ mm, $m=0.3$

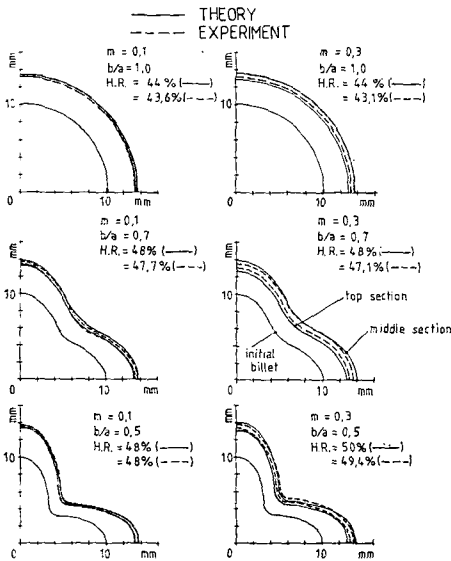


Fig. 4 Comparison of the sideways spreads between theory(solid curves) and experiment(dashed curves) for annealed SM 15C steel; $h_0=10.2$ mm, $a=10$ mm

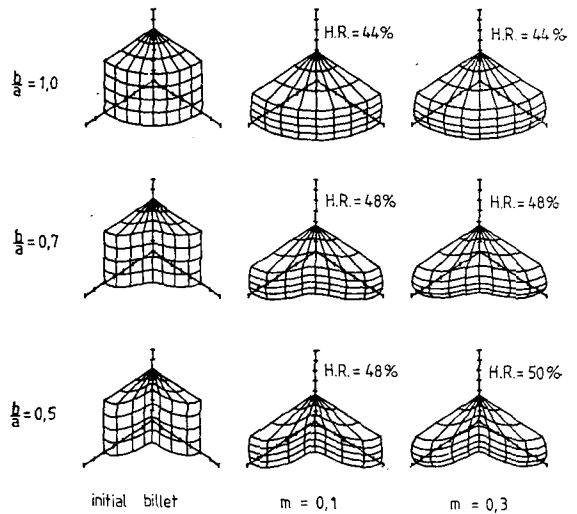


Fig. 5 Theoretically deformed configurations of the clover-shaped disks at several conditions; $h_0=10.2$ mm, $a=10$ mm

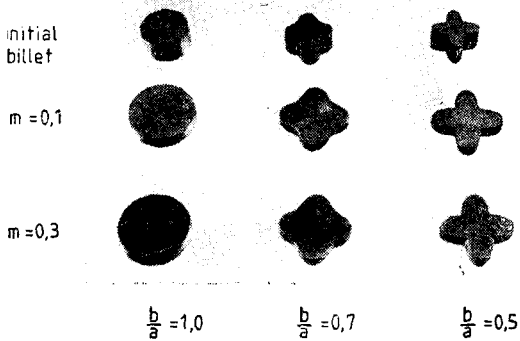


Fig. 6 Forged Products after upset forging of clovershaped disks; $h_0=10.2$ mm, $a=10$ mm

요소에 대해 가공경화를 고려하면서 수치계산으로 구한다. 수치적분에 사용된 요소의 수는 Fig. 1의 변형영역 $OABO'A'B'$ 에 대해 r, θ, z 방향으로 각각 $3 \times 8 \times 8$ 개로 나누었다. 상계하중은 최적화기법인 F.P.S(Flexible Polyhedron Search)법⁽¹¹⁾을 이용하여 2개의 변수들을 변화시켜가면서 최소화시켜 계산하였고, 그때의 최적화된 변수값들을 이용하여 변형된 좌표들을 구하였다. 이론 해석에 소요된 계산시간은 높이감소를 초기높이의 2%씩 진행시켜 50%까지 업세팅 했을 때 CDC 170-835 컴퓨터로 약 190 초가량 소요되었다.

식 (12)에 의해 계산된 이론 결과가 $m=0.1, 0.3$ 인 경우에 대해서 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타나 있다. 이들 결과로부터 단조하중에 대한 이론치와 실험치를 비교할 때 대체로 잘 일치하는 경향을 보여주고 있으며, 특히 마찰이 작은 경우가 마찰이 큰 경우보다 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 시편형상에 따라 $m=0.1, 0.3$ 인 경우에 대해서 각각 일정한 높이 감소를 후의 시편의 윗단면과 중간단면의 변형 형상을 그린 것이다. 마찰이 작은 경우엔 높이에 따라 벌징 변형이 마찰이 큰 경우보다 아주 작다는 것을 알 수 있으며 이론과 실험도 아주 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 마찰이 큰 경우엔 이론과 실험 사이에 어느 정도의 차이가 생기는데, 이는 본 논문에서 금형과 소재 사이에서의 접힘(folding)현상을 고려하지 못한 데에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 Fig. 4와 똑같은 이론 계산 조건의 상태에서 이론적으로 그린 시편의 3차원 변형 형상을 보여 주는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시편의 변형은 평면내에서의 변형(sidewise spread)과 두께 방향으로의 벌징 변형을 동시에 수반하고 있음을 알 수 있으며 이러한 현상은 Fig. 6의 실험제품들을 보아도 또한 잘 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제안된 속도장은 클로버형상의 업세팅 단조에 있어서 3차원 변형을 잘 표현하는 것으로 나타났으며, 단지 마찰이 아주 클 경우엔 보다 더 정확하게 변형 형상을 예측하기 위해 접힘 현상까지 고려할 수 있는 속도장의 개발이 향후 과제로 남아 있다.

6. 결 론

클로버형 시편의 업세팅시 3차원 변형을 표현할 수 있는 비교적 간단한 동적가용 속도장을 유도하고, 이로부터 상계이론을 적용하면서 전체 에너지 소비율을 최소화하였다. 실험은 풀립처리된 SM 15C 탄소강을 이용하여 여러 실험조건들에 대해 수행하였으며, 단조하중과 변형형상에 대한 이론과 실험을 비교할 때 대체로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 본 논문에서 가정한 동적 가용속도장은 실린더 또는 클로버형상 소재의 업세팅에 있어서 단조하중과 변형 형상을 예측하는데 적합하다는 것을 알았다.

참 고 문 헌

- (1) B. Avitzur, Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill, New York, 1968
- (2) S.Y. Aku, R.A.C. Slater and W. Johnson, "The Use of Plasticine to Simulate the Dynamic Compression of Prismatic Blocks of Hot Metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp.495~525, 1967
- (3) F. Kanacri, C.H. Lee, L.R. Beck and S. Kobayashi, "Plastic Compression of Rectangular Blocks between two Parallel Platens", Proc. of 13th International M.T.D.R. Conference, pp.481~490, 1972
- (4) R. Hill, "A General Method of Analysis for Metal Working Processes", J. of Mechanics and Physis of Solids, Vol. 11, pp.305~326, 1963
- (5) B.L. Juneja, "Forging of Polygonal Dics", Int. J. Mach. Tool Des. and Res., Vol. 13, pp.17~28, 1973
- (6) B.L. Juneja, "Forging of Polygonal Dics with Barrelling", Int. J. Mach. Tool Des. and Res., Vol. 13, pp.87~93, 1973
- (7) Y. Kitahara, K. Osakada, S. Fujii and R. Narutaki, "Analysis of Deformation of Plates in Free Forging Using Rigid-Plastic Finite Element Met-

- hod", Journal of Japanese Society of Technology of Plasticity, Vol. 18, No. 200, pp.753~759, 1977
- (8) J.J. Park and S. Kobayashi, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Block Compression", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, No. 3, pp.165~176, 1984
- (9) J.H. Kim and D.Y. Yang, "An Analysis of Upset Forging of Square Blocks Considering the Three-Dimensional Bulging of Sides", Int. J. Mach. Tool Des. and Res. Vol. 25, No. 4, pp.327~336, 1985
- (10) D.C. Drucker, "Coulomb Friction, Plasticity and Limit Loads", J. of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 21, pp.71~74, 1954
- (11) D.M. Himmelblau, Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, New York, 1972