

마찰조건에 따른 원통형 강편의 자유단조 해석

정 동 원* · 김 귀 식*

Analysis of Free Forging of Cylindrical Billets According the Dissimilar Frictional Conditions at Two Flat Die Surfaces

Dong-Won Jung* and Gui-Shik Kim*

ABSTRACT

Finite Element Method is applied to the determination of the deformed bulge profile and strain distribution during upset forming of cylindrical billets. From the results of simulation. The bulging along the z-axis becomes more severe with increasing height reduction and with increasing friction at the die-material interface. The present method can be used for the simple prediction of the deformed shape and strain distribution in upset forging of cylindrical billets with dissimilar frictional conditions at the die-material interfaces.

Key words : Free forging, Finite element method, Cylindrical billets, Bulging, Frictional condition

1. 서 론

소성가공은 소재의 손실을 최소로 줄이면서 원하는 형상의 제품을 가공하는 가장 기본적인 금속성형 방식이다. 소성가공의 일종인 단조가공은 상부 금형과 하부 금형 사이에서 소재를 누름으로써 행해지는 데, 보통 열간에서 적당한 단조기계를 사용하여 목적하는 성형을 함과 동시에 재료의 결정입자를 미세화하고 조직을 균일하게 함으로써 재료를 강화하는 가공법이다.

단조 가공에는 간단한 형상의 앤빌(anvil)과 해머

(hammer)로 작업하는 자유단조, 단형을 사용하여 정해진 형상으로 성형하는 형단조 그리고 나사나 못의 머리를 두들겨 만드는 업셋(Upset) 단조가 있다¹⁾.

단조 작업중 가장 간단한 것은, 한 쌍의 편평한 재료를 서로 평행한 금형 사이에서 압축하여 성형하는 작업이다. 이와 같이 단순한 형상을 상하로 가압하여 성형하는 단조가공법을 자유단조라 한다. 재료를 가압성형하면 그 결정 조직은 재료의 유동 방향을 따라 섬유상조직이 되어 단류선(flow line)이 생긴다. 이 단류선의 방향으로는 인장강도, 연신율, 충격치 등의 기계적 성질이 크게 향상되므로 매우 튼튼한 기계부품을 만들 수 있다. 따라서 크랭크축, 프로펠러등 기계적 강도가 커야 하는 제품의 제작에 적합한 가공법이라 할 수 있고, 또 소재의 낭비가 매우 적어진다^{1),2)}.

* 제주대학교 기계공학과
Dept. of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ.

단조공정의 개선 및 소재의 결함 방지 등을 위해서는 금형의 설계 및 가공에 대한 연구가 필수적이며, 최근에는 컴퓨터의 발전과 더불어 CAD/CAM을 이용하여 금형의 설계 및 가공에 이르기까지 효율적으로 행할 수 있는 연구가 진행중이다. 일반적으로 단조에 이용되는 금형은 형상이 복잡하기 때문에 제작에 많은 시간과 비용이 든다. 이렇게 제작된 금형을 이용하여 단조 실험한 결과 제품의 불량이나 심지어 금형이 파손된다면 금형제작시 소모된 시간과 비용의 손실을 초래할 수 있다³⁾.

최근에는 컴퓨터를 이용하여 여러 가지 성형조건들을 바꾸면서 시뮬레이션을 시행하여 원하는 제품의 성형이 이루어졌을 때 실제 금형을 제작함으로써 금형의 설계 및 가공의 시행착오를 최대한 줄이는 방법이 사용되고 있다. 그 중 가장 많이 사용되는 방법이 유한요소법으로 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 자유단조해석을 수행하여 마찰 조건에 따른 변형률 및 변형형상을 파악하여 단조 공정에서의 마찰에 대한 영향을 고찰해 보았다^{3),4)}.

II. 이론해석

Fig. 1과 같이 원통형 좌표를 이용하여 원통형 강편 하부 표면의 중심에 좌표축이 오도록 설정하고, 상부 다이는 U_0 의 속도로 이동하고 하부 다이는 고정되어 있다. 원통형 강편의 자유 단조에서의 변형이 발생하면 다이 표면의 마찰 조건에 따라 각기 다른 형상을 보인다.

한 쌍의 서로 편평한 서로 평행한 다이 사이에서 재료를 압축하여 성형할 때 다이에 접하는 소재의 양 단면에 상당한 마찰력이 작용하고, 또 금형으로의 열 손실로 인한 냉각작용도 중간부보다 직접 금형에 접하는 양 단면부가 크므로, 양 단면부의 재료는 변형에 대한 저항이 커서 중간부보다 변형이 작다. 그 결과 Fig. 2 와 같이 소재는 중간부가 밖으로 불룩하게 배가 나온 모양이 되고 재료는 저항이 작은 방향으로 더 변형하게 된다.

본 해석에서는 양 단면에서의 냉각작용은 없고, 변형에 의한 온도상승도 없으며, 가압에 의한 좌굴도

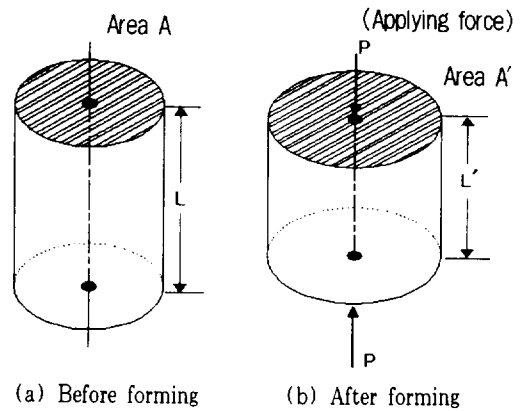


Fig. 1 Upset forging of a cylindrical billet with non-frictional conditions

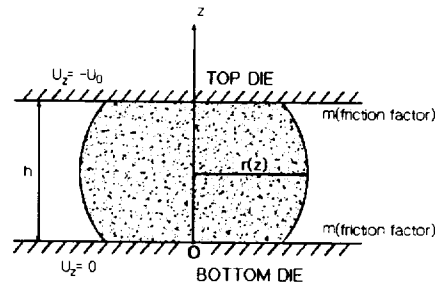


Fig. 2 Upset forging of a cylindrical billet with dissimilar frictional conditions at the top and bottom die-material interfaces.

없다고 가정하였다. 가압전의 재료는 직경 $D (= 2R)$, 높이 L 의 원주라 하고, 압축후 높이 L' 의 원주로 변형한다. 이때 마찰의 영향으로 중간부가 불룩나온 모양이 되므로 그 직경의 평균치를 $D' (= 2R')$ 로 한다. 원주방향으로는 변형률과 응력 모두 균일한 축대칭변형으로 취급한다.

평판에서의 마찰조건은 다음과 같은 축대칭 속도장조건에서 수정을 할 수 있다⁽⁴⁾.

$$U_\theta = 0 \tag{1}$$

$$U_r = \frac{U_0}{h} rA \left[\left(\frac{-4}{h^2} z^2 + \frac{4}{h} z + C \right) + B(m_1 - m_2) \frac{z}{h} \right] \tag{2}$$

B와 C는 효과적으로 활용되는 파라메타로 Z축을 따라 벌징이 증가됨을 의미한다. A는 속도경계조건에 대한 파라메타이고, m_1 , m_2 는 상부와 하부 다이의 마찰 계수이다.

원통형 좌표에서의 비압축성 조건은 다음과 같이 주어진다.

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

식 (1), (2)를 식 (3)에 대입하여 축방향의 속도성분을 알 수 있다^(4,5,6,7).

$$U_z = -\frac{2U_0}{h} A \left[\left(-\frac{4}{3h^2} z^3 + \frac{2}{h} z^2 + Cz \right) + B(m_1 - m_2) \frac{z^2}{2h} \right] + f(r) \quad (4)$$

주어진 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U_z &= 0 & \text{at } z &= 0 \\ U_z &= -U_0 & \text{at } z &= h \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 식 (1)~(4)에서 주어진 속도장으로 부터 상부와 하부 다이표면의 마찰조건이 주어지는 강편의 자유단조 해석을 할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

자유단조 해석을 위한 재료의 형상은 반지름(r)이 15mm, 높이(h)가 30mm 인 원통형 강편이다. 계산에 적용한 마찰상수 m ($m_1 = m_2$) 값은 0.001, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3으로 하였으며 매증분마다 다이의 압하 속도는 0.05(mm/sec)으로 하였다.

Fig.3는 초기 격자 모양으로 총 요소수는 36개, 총 절점수는 49개이다.

3.1. 마찰에 따른 변형 형상

한쌍의 편평한 서로 편평한 금형 사이에서 재료를 압축하여 성형시 재료와 금형의 가압면간에 마찰이 없으면 원주나 각주를 축방향으로 압축하면 재료의 각 부는 균일하게 변형하여, 그 측면이 평행한, 높이

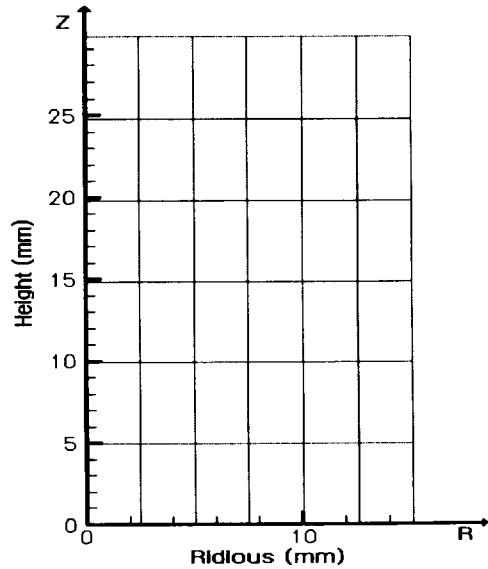
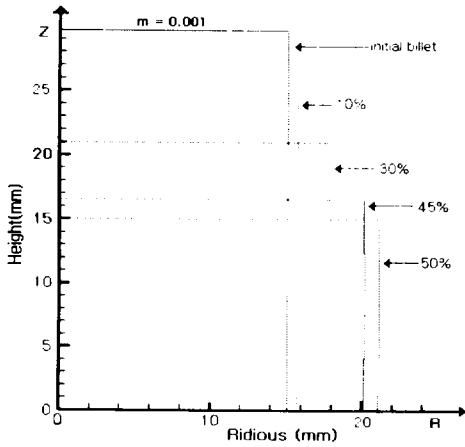


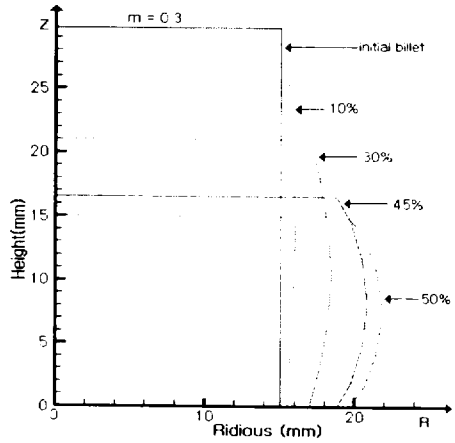
Fig. 3 Initial grid shape of material

가 줄어든 원주나 각주로 변형할 것이다. 그러나 실제로는 금형에 접하는 소재의 양 단면에는 상당한 마찰력이 작용하고, 또 금형으로의 열손실로 인한 냉각 작용도 중간부보다 직접 금형에 접하는 양 단면부가 크므로, 양 단면부의 재료는 변형에 대한 저항이 크고, 따라서 중간부보다 변형이 작다. 그 결과로 소재는 중간부가 밖으로 불룩하게 배가 나온 모양이 된다. 이것은 실제의 단조에 있어서 소재의 형상을 결정할 때 미리 고려할 필요가 있으며 또한 형단조의 경우 공정의 선정이나 금형의 설계시에 고려되어야 할 사항이다.

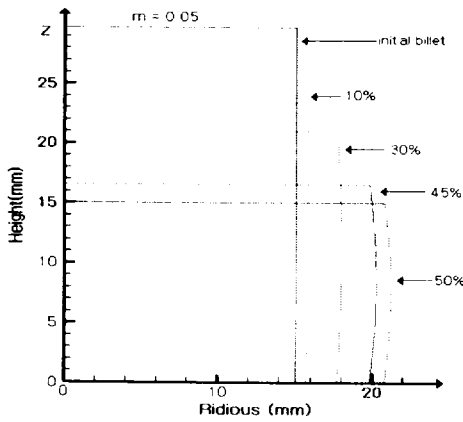
Fig. 4는 마찰 상수에 따른 변형 형상을 압축률이 10%, 30%, 45%, 50% 일 때 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 마찰 상수가 매우 작은 0.001일 때의 형상으로 50%의 압축이 이루어졌을 때도 형상의 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. Fig. 4(e)는 마찰 상수가 0.3으로 30% 압축이 일어났을 때도 심하게 변형된 것을 볼 수가 있다. 여기서 마찰상수가 커질수록 반지름 방향으로 벌징이 심하게 되는 것을 볼 수 있다. 이는 다이 표면마찰력으로 인해 저항이 작은 원통형 강편의 중심에서 반지름 방향으로 주로 밀려나가는 것이라 볼 수 있다.



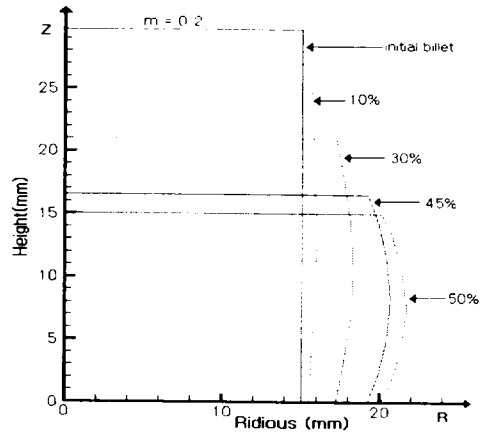
(a) $m = 0.001$



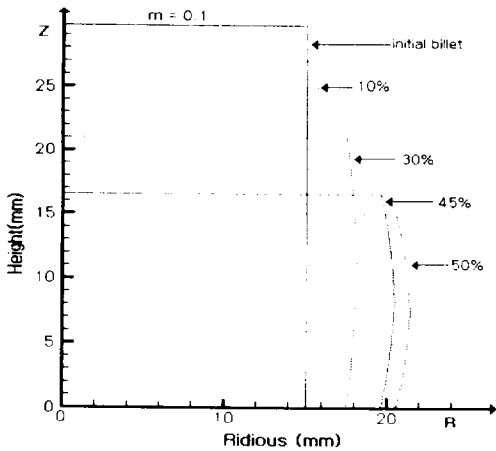
(d) $m = 0.2$



(b) $m = 0.05$



(e) $m = 0.3$



(c) $m = 0.1$

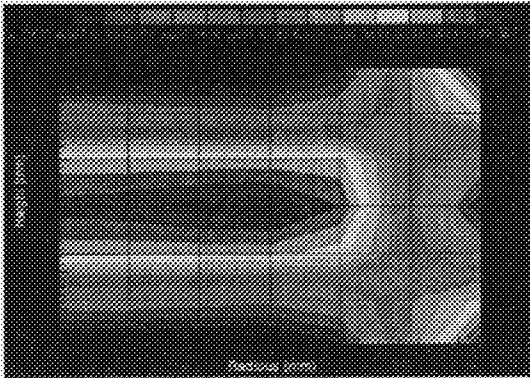
Fig. 4 Computed deformed profiles of the cylindrical billets for various height reductions

3.2 변형 형상에서의 변형을 분포

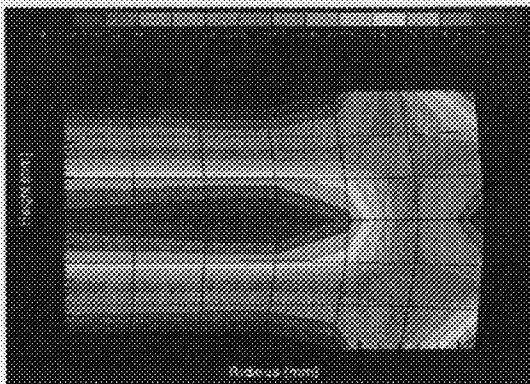
Fig. 5(a)는 마찰 상수가 매우 작은 0.001일 때 형상이 50%로 압축되었을 때의 변형을 분포를 나타낸 것이다. 분포도를 보면 원통형 강변의 중심부와 모서리 부분에 많은 변형이 되고 있음을 관찰할 수 있다. Fig. 5(b)의 분포도는 마찰 상수가 0.05일 때의 변형 형상이다. (a)와 비교시 중심부에서의 변형은 큰 차이가 없다. Fig. 5(d)는 마찰 상수가 0.2 일 때의 변형 형상으로 (a)와 비교시 중심부에서의 변형이 점차 확대

되는 것과 네 부분에서의 변형이 이루어지고 있음을 볼 수 있으며 모서리 부분에서는 변형이 줄어들고 있음을 볼 수가 있다. Fig. 5(a)는 압축률이 50%일 때의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 여기서 변형률이 가장 심하게 일어나는 부분이 원통형 강편의 중심임을 알 수 있다. 다이와 접촉이 있는 강편의 상부와 하부 단면에서는 재료의 유동이 제약되어 거의 변형이 일어나지 않고 있음을 알 수 있다. 원통형 강편의 중심부에서 변형이 일어나는 부분이 점차 확대가 되면서 큰 변형이 일어나는 부분이 (a)에서는 반지름이 8~11mm 사이에서 (c)에서는 반지름이 0~10mm 사이로 확대 이동되는 것을 볼 수 있다. 또한 단면의 가장 바깥 부분인 모서리 부분에서는 마찰 상수가 작을수록 변형되는 부분이 크고 마찰 상수가 커질수록 변형이 일어나는 부분이 작아지는 것을 볼 수 있다.

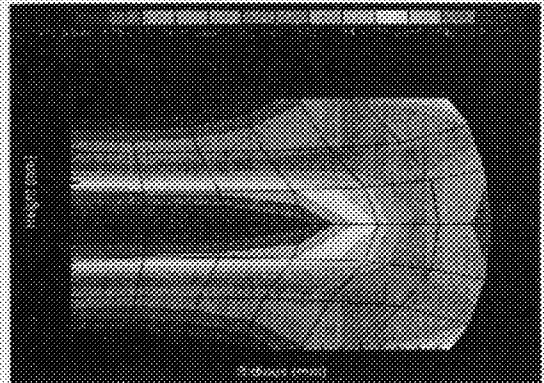
Fig. 6은 재료의 유동 대한 일반적인 형상을 알라



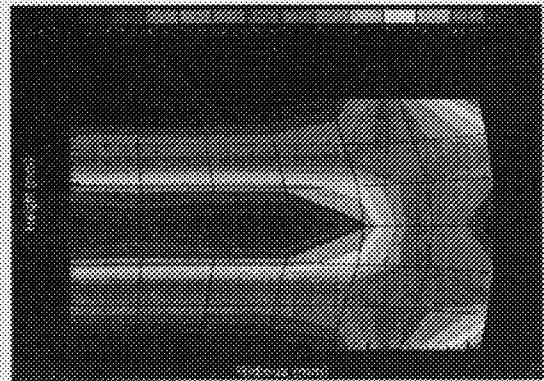
(a) $m = 0.001$ (H.R. = 50%)



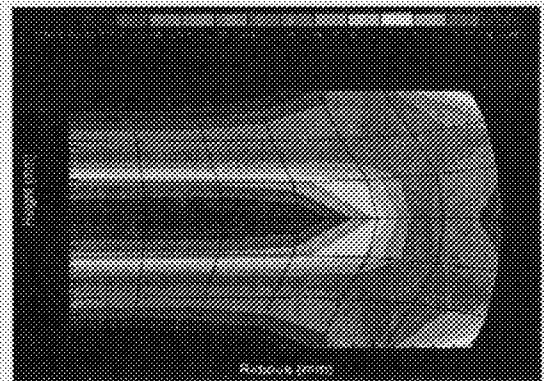
(b) $m = 0.05$ (H.R. = 50%)



(c) $m = 0.1$ (H.R. = 50%)



(d) $m = 0.2$ (H.R. = 50%)



(e) $m = 0.3$ (H.R. = 50%)

Fig. 5 Strain distributions of cylindrical billets for various frictions

는 것으로 벗겨져진 원추형 부분이 유동의 제약으로 인해 단면에서 거의 미변형된 부분이다. Fig. 5의 모

든 변형을 분포도를 보면 미변형된 부분이 이와 유사한 원추형의 형태를 띠고 있다. Fig. 7은 유한요소 해석절차를 플로어차트로 설명해 주고 있다.

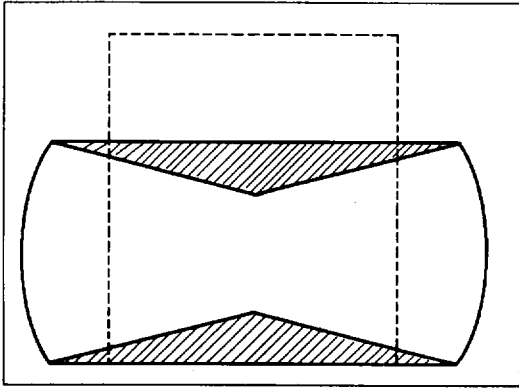


Fig. 6 Strain distributons of cylindrical billets

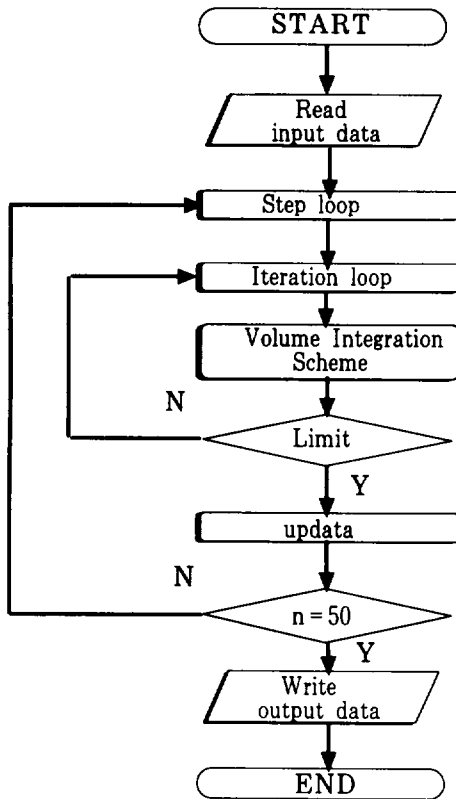


Fig. 7 Flow chart of the calculation procedure of finite element method

IV. 결론

유한요소법을 이용하여 두 개의 평판 다이표면의 마찰을 고려하여 원통형 강편을 자유단조시 속도장을 통하여 소재가 벌징되는 재료의 측면 형상과 유동방향, 소재의 형상 변화에 따른 변형을 분포를 얻을 수 있었다.

여러 높이 감소율로 다섯 개의 윤활조건 $m = 0.001, m = 0.05, m = 0.1, m = 0.2, m = 0.3$ 으로 변형된 옆면 변형 형상의 결과가 윤활 조건이 클수록 반지름 방향을 따라 형상이 심하게 벌징되는 것을 볼 수 있었다. 이는 표면의 마찰로 인해 저항이 작은 원통형 강편의 중간부에서 변형이 일어난 것이다. 변형을 분포에서는 다이와 접하는 부분에서 재료의 유동이 제약을 받아 변형률의 변화가 작고 중심부에서 많은 변화가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 원통형 강편의 모서리 부분에서 마찰 상수가 증가할수록 변형이 줄어드는 현상을 관찰할 수 있었다.

참고 문헌

- 1) 김동원, 1995, "기계공작법", 청문사.
- 2) 김동원, 1986, "소성학", 청문사.
- 3) 윤희도, 1991, "단위체 격자 재구성법과 전문가 시스템을 이용한 2차원 냉간 단조의 유한 요소 시스템", 한국과학기술원 석사학위논문.
- 4) D. Y. Yang, Y. Choi and J. H. Kim, 1991, "Analysis of upset forging of cylindrical billets considering the dissimilar frictional conditions at two flat die surfaces", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 3.
- 5) J. Y. Liu, 1971, "Upper-bound solutions of some axisymmetric cold forging problems," J. Engng Ind.
- 6) S. Kobayashi and E. G. Thomson, 1965, "Upper-bound solutions to axisymmetric compression and extrusion problems", Int. J. Mech. Sci. 7.
- 7) M. S. J. Hashmi, 1987, "Upsetting of cylindrical billets between flat platens having unequal frictional properties", Int. J.Mach. Tool Des. Res. 18.