

유한요소법을 이용한 원통형 강편의 자유단조 해석

정동원*

*제주대학교 기계에너지생산공학부

Analysis of Free Forging of Cylindrical Billets by Using Finite Element Method

DONG-WON JUNG*

*School of Mechanical Engineering, Cheju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Free Forging 자유단조, Finite Element Method 유한요소법, Cylindrical Billets 원통형 강편, Bulging 벌징, Frictional Condition 마찰조건

ABSTRACT: The 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.

1. 서 론

소성가공은 소재의 손실을 최소화 하면서 원하는 형상의 제품을 가공하는 가장 기본적인 금속성형 방식이다. 소성가공의 일종인 단조가공은 상부 금형과 하부 금형 사이에서 소재를 누름으로써 행해지는데, 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 등 단조 그리고 나사나 못의 머리를 두들겨 만드는 업셋(upset) 단조가 있다(김동원, 1995).

단조 작업중 가장 간단한 것은, 편평한 재료를 한 쌍의 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 방향으로 인장강도, 연신율, 충격치 등의 기계적 성질이 크게 향상되므로 매우 튼튼한 해양기계부품을 만들 수 있다. 따라서 해양기계에 많이 쓰이는 크랭크축, 프로펠러 등 기계적 강도가 커야 하는 제품의 제작에 적합한 가공법이라 할 수 있고, 또 소재의 낭비가 매우 적어진다(김동원, 1986, 1995).

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 해양기계부품제작에 있어서 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 있다(윤희도, 1991).

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(정동원과 양경부, 1999; 정동원, 2001). 그 중 가장 많이 사용되는 방법이 유한요소법으로 본 논문에서는 기존의 연구결과(윤희도, 1991; Yang et al., 1991; Hashmi, 1978)를 이용하여 유한요소 프로그램을 개발하여 자유단조해석을 수행하였고 마찰 조건에 따른 변형률 및 변형형상을 파악하여 단조 공정에서의 마찰에 대한 영향을 고찰해 보았다.

2. 속도장 해석

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.

제1저자 정동원 연락처: 제주도 제주시 아라1동 1번지
064-754-3625 jdwcheju@cheju.ac.kr

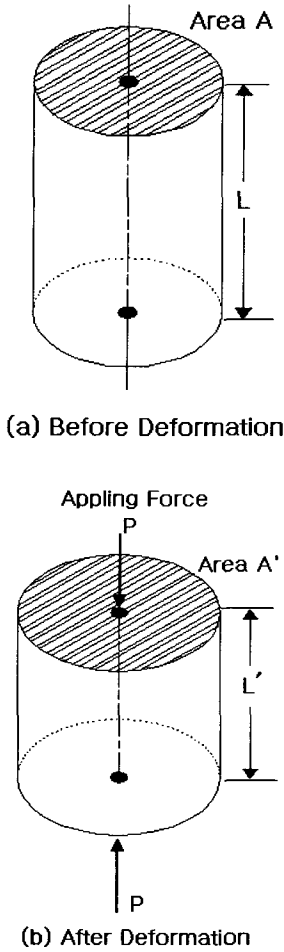


Fig. 1 Upset forging of a cylindrical billet with non-frictional conditions

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

본 해석에서는 양 단면에서의 냉각작용은 없고, 변형에 의한 온도상승도 없으며, 가압에 의한 좌굴도 없다고 가정하였다. 가압전의 재료는 직경 $D (= 2R)$, 높이 L 의 원주라 하고, 압축후 높이 L' 의 원주로 변형한다.

이때 마찰의 영향으로 중간부가 볼록나온 모양이 되므로 그 직경의 평균치를 $D' (= 2R')$ 로 한다. 원주방향으로는 변형률과 응력 모두 균일한 축대칭변형으로 취급한다. 평판에서의 마찰조건은 다음과 같이 축대칭 속도장조건에 맞도록 수정을 할 수 있다(Yang et al., 1991).

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

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

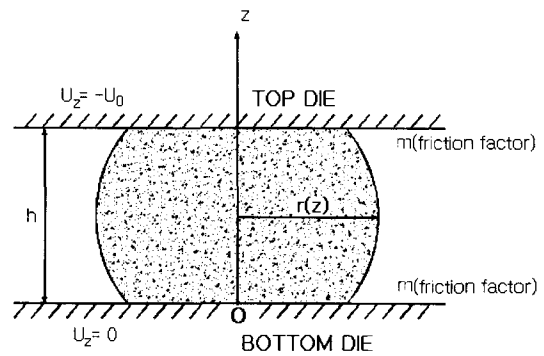


Fig. 2 Upset forging of a cylindrical billet with dissimilar frictional conditions at the top and bottom die-material interfaces

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.

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

식 (1), (2)를 식 (3)에 대입하여 축방향의 속도성분을 알 수 있다(Yang et al., 1991; Liu, 1971; Kobayashi and Thomson, 1965; Hashmi, 1978).

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

주어진 경계조건은 다음과 같다.

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

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

3. 유한요소 수식화

강소성 재료 모델에서 유한요소수식화를 위한 변분식은 다음과 같다(윤희도, 1991; 정동원과 양경부, 1999; Yang et al., 1991).

$$\int_V (\bar{\sigma} + \alpha \Delta t \bar{\epsilon} H) \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \bar{\epsilon}_{,i} \delta \bar{\epsilon}_{,i} dV - \int_{S_f} (f_i + \alpha \Delta f_i) \delta v_i dS = 0$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'}, \quad \bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}' \epsilon_{ij}'}, \quad \epsilon_r' = \epsilon_{ii}' \tag{6}$$

여기서 K, σ_{ij}' , H, α 는 벌칙 함수, 편차 응력, 가공 경화율, 가공 경화 효과를 고려하는 상수이다. 식(6)을 등계수 요소로 유한 요소화 하면 아래식과 같고 비선형방정식의 해를 구하기 위해 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)방법을 이용하였다.

$$K \Delta U^i = R - F^{(i-1)} \tag{7}$$

여기서 K 는 강성행렬이고 ΔU 는 변위, R 은 외력, $F^{(i-1)}$ 은 내력을 나타낸다.

축차는 아래의 조건을 만족시킬때까지 반복하게 된다.

$$\frac{\|\Delta U\|}{\|U\|} \leq \delta \quad (8)$$

여기서 δ 는 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 정도의 매우 작은 상수값이다. 경계에서의 마찰을 고려하기 위해서 다음 식을 적용한다.

$$f = -\frac{2}{\pi} mk \tan^{-1} \frac{|V_s|}{u_0} t \quad (9)$$

여기서 m 은 마찰 상수, k 는 전단응력, u_0 는 $|V_s|$ 와 비교하여 매우 작은 양의 상수이고, V_s 는 금형에 대한 소재의 상대 속도이다.

뉴턴-랩슨 방법으로 비선형 방정식을 풀 때에는 초기축척이 필요하므로 선형 점성 재료 모델로 가정한 초기축척법이 적용되었다(윤희도, 1991).

4. 계산결과 및 고찰

자유단조 해석을 위한 재료의 형상은 반지름(r)이 15mm, 높이 h 가 30mm인 원통형 강편이다. 계산에 적용한 마찰상수 m ($m_1 = m_2$) 값은 0.001, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3으로 하였으며 매층마다 다이의 압하 속도는 0.05 mm/sec로 하였다. Fig.3는 초기 격자모양으로 총 요소수는 36개, 총 절점수는 49개이다.

4.1 마찰에 따른 변형 형상

한쌍의 편평한 서로 편평한 금형 사이에서 재료를 압축하는 단조공정시 재료와 금형의 가압면간에 마찰이 없으면 원주나 각주를 축방향으로 압축하면 재료의 각 부는 균일하게 변형하며, 그 측면이 편평하고 높이가 줄어든 원주나 각주로 변형할 것이다. 그러나 실제로는 금형에 접하는 소재의 양 단면에는 상당한 마찰력이 작용하고, 또 금형으로의 열손실로 인한 냉각속도도 중간부보다 직접 금형에 접하는 양 단면부가 크므로, 양 단면부의 재료는 변형에 대한 저항이 커서 중간부보다 변형이 작다. 그 결과로 소재는 중간부가 밖으로 볼록하게 배가 나온 모양이 된다. 이것은 실제의 단조공정에 있어서 소재의 형상을 결정할 때 미리 고려할 필요가 있으며 또한 형단조의 경우 공정의 선정이나 금형의 설계시에 반드시 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 때 배부름현상이 거의 없음을 볼 수 있다. Fig.4 (e)는 마찰 상수가 1.3으로 심하여 30%의 작은 압축이 일어났을 때 심하게 배부름 변형된 것을 볼 수가 있다. 여기서 마찰상수가 커질수록 반지름 방향으로 중간부위의 벌짐이 심하게 되는 것을 볼 수

있다. 이는 다이 표면마찰력으로 인해 저항이 작은 원통형 강편의 중간부위에서 반지름 방향으로 주로 변형되어 밀려나가는 것이라 볼 수 있다.

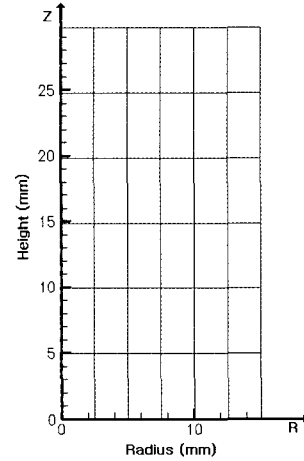
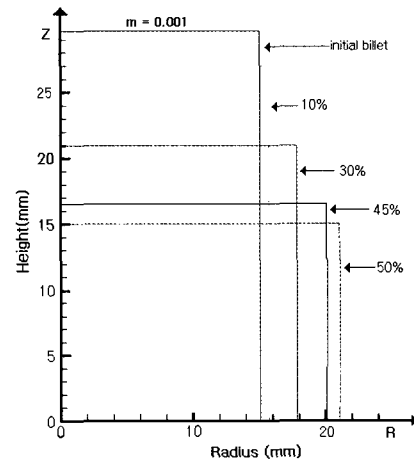
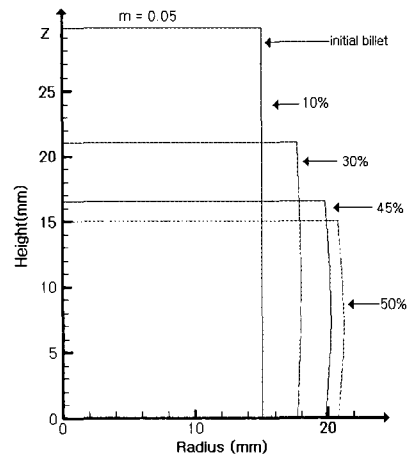


Fig. 3 Initial grid shape of material

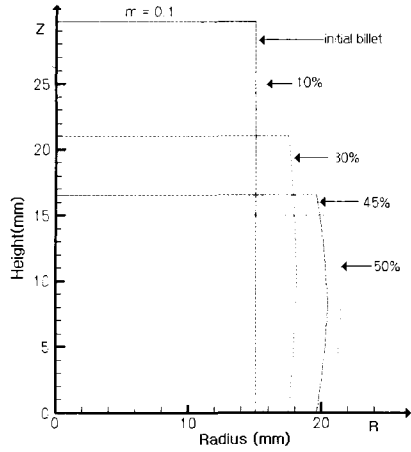


(a) $m = 0.001$

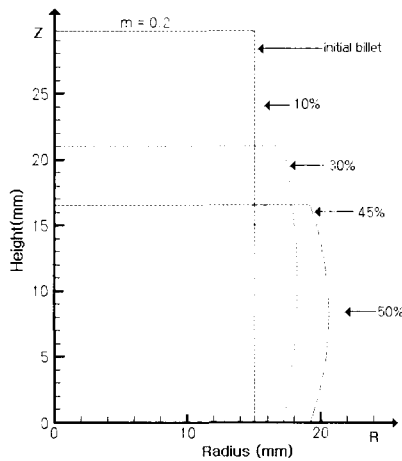


(b) $m = 0.05$

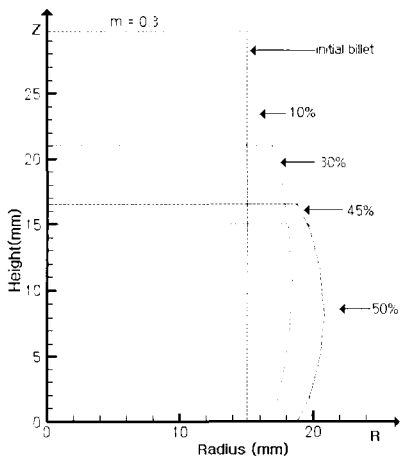
Fig. 4 Computed deformed profiles of the cylindrical billets for various height reductions with various frictions



(c) $m = 0.1$



(d) $m = 0.2$



(e) $m = 0.3$

Fig. 4 Computed deformed profiles of the cylindrical billets for various height reductions with various frictions (continued)

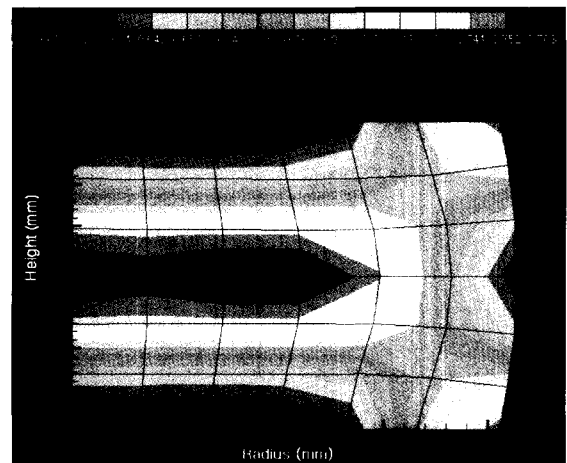
4.2 변형 형상에서의 변형률 분포

Fig.5 (a)는 마찰 상수가 매우 작은 0.001일 때 50%로 압축되

었을 때의 변형률 분포를 나타낸 것이다. 분포도를 보면 원통형 강편의 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 변형량은 큰 차이가 없다. Fig.5 (d)는 마찰 상수가 0.2 일 때의 변형형상으로 (a)와 비교시 중심부에서의 변형이 점차 확대 되는 것과 배 부분에서의 변형이 이루어 지고 있음을 볼 수 있으며 모서리 부분에서는 변형이 줄어들고 있음을 볼 수가 있다. Fig.5 (e)는 마찰상수가 0.3일 때 압축률이 50%일 때의 변형률 분포를 나타낸 것인데 여기서 변형률이 가장 높게 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 (e)에서는 반지름이 0~10mm사이로 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.

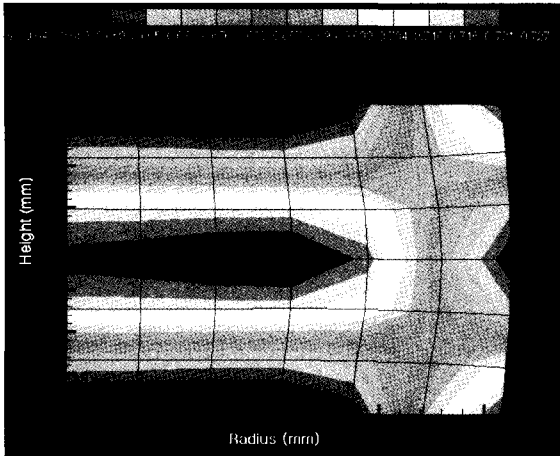


(a) $m = 0.001$ (H.R. = 50%)

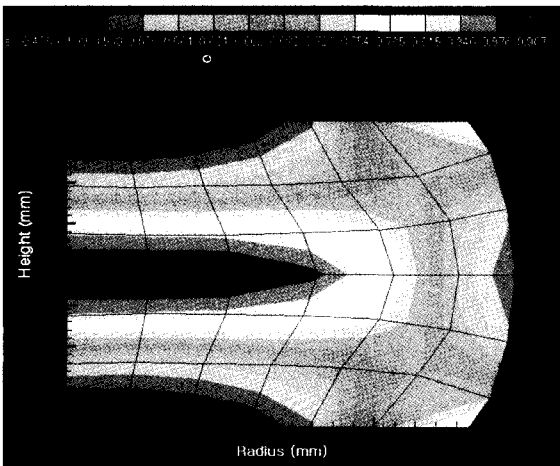


(b) $m = 0.05$ (H.R. = 50%)

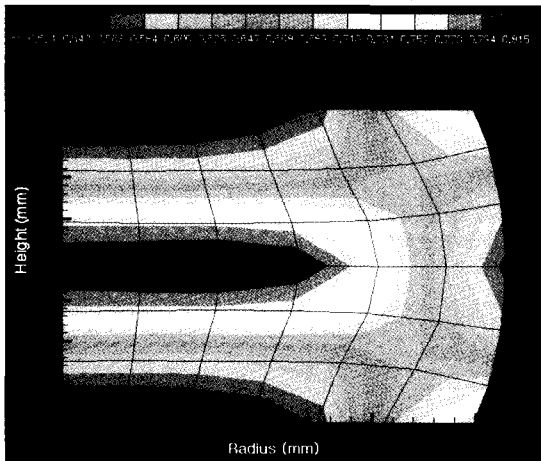
Fig. 5 Strain distributions of cylindrical billets for various frictions at 50% height reduction



(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 reductions at 50% height reduction (continued)

Fig.6은 재료의 유동에 대한 일반적인 현상을 설명하는 것으로 빗금쳐진 원추형 부분이 마찰에 의한 유동의 제약으로 인해 단면에서 거의 미변형된 부분을 나타내고 있다. Fig.5의

모든 변형률 분포도를 보면 미변형된 부분이 이와 유사한 원추형의 형태를 띠고 있다. Fig.7은 개발된 정적 내연적 유한요소프로그램의 구조와 해석과정을 순서대로 나타내었다. 해석과정이 시작되면 입력데이터를 읽어들이고 원하는 편치스트로크 만큼의 스텝루프를 반복한다. 한 스텝에서 정확한 해를 얻기 위한 수렴을 위한 축차루프를 반복하게 되는데 원하는 기준치를 만족하게 되면 축차루프를 빠져나가 변위와 변형율, 응력 등을 개정하고 다음 스텝을 수행하게 된다. 모든 스텝을 완료하면 결과를 출력하고 해석과정을 종료하게 된다.

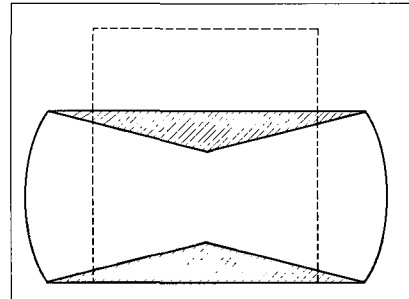


Fig. 6 Strain distributions of non-deformed area of cylindrical billet

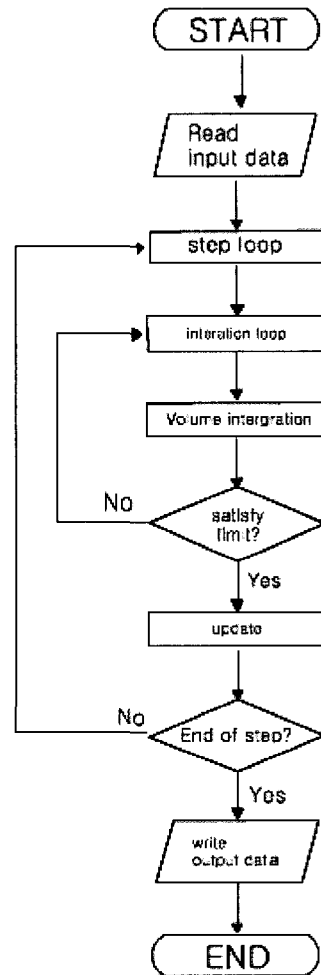


Fig. 7 Flow chart for Static-Implicit Finite Element Program

5. 결 론

기존의 연구결과(윤희도, 1991; Yang et al., 1991; Hashmi, 1978)를 이용하여 강소성 정적내연적 단조해석용 유한요소프로그램을 개발하였고 개발된 프로그램을 이용하여 두 개의 평판 다이표면의 마찰을 고려한 원통형 강편의 자유단조시 소재가 벌징되는 강편의 측면 형상과 유동방향, 강편의 형상 변화에 따른 변형률 분포를 얻을 수 있었다.

여러 높이 감소율로 다섯 개의 마찰조건, 즉 $m = 0.001$, $m = 0.05$, $m = 0.1$, $m = 0.2$, $m = 0.3$ 으로 변형된 측면 변형 형상의 결과가 마찰상수가 클수록 반지름 방향을 따라 형상이 심하게 벌징(bulging)되는 배불림현상을 볼 수 있었다. 이는 상하 다이와의 마찰로 인해 비교적 변형저항이 작은 원통형 강편의 중간부위에서 변형이 크게 일어난 것이다. 변형률 분포에서는 다이와 접하는 부분에서 재료의 유동이 마찰로 인해 제약을 받아 변형률의 변화가 작고 반면 중심부에서 많은 변화가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 원통형 강편의 모서리 부분에서 마찰 상수가 증가할수록 변형이 줄어드는 현상을 관찰할 수 있었다. 본결과는 유한요소해석으로는 처음으로 적용하여 보았고 향후 해양산업에 유한요소해석이 많이 적용되어 큰효과를 발휘하길 기대한다. 향후 실험을 수행하여 개발된 프로그램의 타당성을 검증 및 수정하여 실제 해양산업현장의 설계업무에 적용이 가능토록 할 계획이다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-002-E00018)

참 고 문 헌

- 김동원 (1986), 소성학, 청문사.
 김동원 (1995), 기계공작법, 청문사.
 정동원, 양경부 (1999), "박막, 셀 혼합요소의 판별조건과 강소성,탄소성 유한요소해석 적용에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제2호, pp 1-10.
 정동원 (2001), "평형해법을 이용한 트렁크 리드의 단면해석과 3차원 형상합성", 한국해양공학회, 제15권 제2호, pp 66-71.
 윤희도 (1991), 단위체 격자 재구성법과 전문가 시스템을 이용한 2차원 냉간 단조의 유한 요소 시스템, 한국과학기술원 석사학위논문.
 Hashmi, M.S.J. (1978), "Upsetting of cylindrical billets between flat platens having unequal frictional properties", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol 18, pp 189-196.
 Kobayashi, S. and Thomson, E.G. (1965), "Upper-bound solutions to axisymmetric compression and extrusion problems", Int. J. Mech. Sci., Vol 7, pp 127-143.
 Liu, J.Y. (1971), "Upper-bound solutions of some axisymmetric cold forging problems", J. Engng Ind., Vol 21, pp 1134-1144.
 Yang, D.Y., Choi, Y. and Kim, J.H. (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, pp 397-404.

2002년 5월 6일 원고 접수

2002년 11월 5일 최종 수정본 채택