

〈論 文〉

평다이를 사용하는 자유 단조 공정의 최적 단조 조건에 관한 연구

조종래* · 김동권* · 이부윤* · 양동열**

Investigation of the Optimal Forging Condition in Open Die Forging with the Flat Die

Jong-Rae Cho, Dong-Kwon Kim, Boo-Youn Lee and Dong-Yol Yang

Abstract

The purpose of the open die press forging is to maximize the internal deformation for better structural homogeneity and center-line consolidation in case of the ingot. A two and three dimensional viscoplastic finite element analysis is carried out for the plate, cylinder and square forging with the flat die in order to study the forging effects during the process. Effect of die width, height reduction, and die staggering are studied through simulation of the process. Thus favorable working conditions are suggested for better and more desirable product quality.

Key Words : Open Die Forging, Flat Die, Mean Effective Strain, Die Width Ratio, Viscoplastic FEM

1. 서 론

터빈과 발전기의 로타, 선박용 축, 금형 강 등의 대형 기계 제품의 소재를 만들 때 첫 단계에서 제조되는 강괴(ingot)는 용도와 단조 작업성에 따라서 원형과 평판 형태가 있다. 대형 강괴는 자유 단조 작업을 통해서 제품을 형상화하는데, 이 때 자유 단조의 역할은 강괴 제조시에 발생하는 주조 조직을 없애고 강괴 내부의 기공을 압착시켜 제거하고 미세 조직의 편석을 소멸시키는

것이다. 이러한 자유 단조 작업은 다이의 형상, 압하 깊이(reduction height), 압하 순서(reduction sequence) 등을 어떻게 선택 하는가에 따라서 단조 효과에 큰 차이가 있기 때문에 공정 분석을 위한 체계적인 연구가 필요하다. 연구 방법으로는 현장의 실험적 방법(empirical method), 모델링 재료를 이용하는 실험 방법(physical modeling)과 수치 해석 방법이 있다.

수치 해석 방법 중에서는 현재 유한요소 해석법이 널리 사용되고 있는데, Park과 Kobayashi⁽¹⁾는 3차원 강점소성 유한요소법을 수식화하여 사각 블록의 압축에 적용하였으며, Yoon과 Yang⁽²⁾은 초기 속도장의

*한국중공업 기술연구소

**한국과학기술원 기계공학과

생성과 곡면 금형에서의 접촉 문제를 처리하는 방법을 개발하였다.

Tanaka 등⁽³⁾은 평다이를 사용하는 자유 단조 공정에서 기공 압착에 대해서 연구하였으며, Kiefer와 Shah⁽⁴⁾는 평다이를 사각 강괴를 단조할 때 다이폭비와 압하 깊이에 대한 영향을 분석하였고, Hung과 Kobayashi⁽⁵⁾는 원형 강괴의 단조 공정 설계에 대해서 연구하였다.

최근에 Cho와 Yang 등⁽⁶⁾은 열점소성 유한요소해석 프로그램을 개발하여 대형 원형 강괴의 코깅(cogging) 작업시 공정 변수인 다이 형상, 다이폭비, 온도 구배 및 압하량 등의 영향을 분석하고 적정 단조 조건을 제시하였다.

본 연구에서는 점소성 유한요소해석 프로그램을 이용하여 평다이의 평판 단조(plate forging), 원형(round) 및 각재(square) 단조를 해석하여 단조 효과를 평가하고 최적의 단조 조건을 구하는데 그 목적이 있다. 또한, 단조성을 평가하는 척도로서 평균 유효변형률 개념을 도입하여 현장에서 많이 사용하고 있는 단조비와의 상관 관계를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

2. 유한요소해석의 수식화

2.1 점소성 해석에 의한 변형 해석

Perzyna⁽⁷⁾의 점소성 이론에 의하면 재료가 강점소성, 등방성, 비압축성이며 Mises의 항복 조건을 따를 때 구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

탄성 효과를 무시하고 점소성 포텐셜 $E(\dot{\epsilon})$ 을 갖는 소재로 가정하면 편차 응력과 점소성 포텐셜의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{\partial E}{\partial \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (2)$$

비압축성 조건을 만족하기 위해 벌칙상수 K^* 을 도입하면 강점소성 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\Phi = \int_v E(\dot{\epsilon}) dV - \int_{s_f} f_i v_i ds + K^* \int \frac{1}{2} (\dot{\epsilon}_v)^2 dv \quad (3)$$

여기서, s_f 는 외력이 정의된 경계이고, f_i 와 v_i 는 정의된 외력과 속도 성분을 각각 나타내며 $\dot{\epsilon}_v$ 는 $\dot{\epsilon}_v = v_{i,j}$ 로서 체적 변형률 속도(volumetric strain-rate)를 나타낸다.

2.2 단조비와 평균 유효 변형률

소재가 단축 변형을 받고 있을 때, 변형률은 다음과 같이 지수 변형률(logarithm strain)로 표현된다.

$$\epsilon = \int_0^\epsilon d\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (4)$$

일반적인 경우 유효 변형률은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

자유 단조 작업을 하고 있는 현장에서 많이 사용되고 있는 단조비의 의미는 초기 단면적에 대한 단조후 단면적의 비(A_0/A)를 의미한다. 따라서 본 논문에서는 자유단조의 단조성을 평가하는 척도로서 평균 유효 변형률의 개념을 도입하여 단조비와의 연관성을 나타낸다.

단조 체적은 일정하므로

$$\epsilon_1 = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = -\epsilon_1, \epsilon_3 = 0 \quad (7)$$

따라서 변형 중인 소재의 단면에서의 평균 유효 변형률은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon}_{avg} = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (8)$$

3. 평판 단조 공정 해석

3.1 평판 단조 공정

금형강 소재와 같이 후판 형태의 제품은 사각 형태의 강괴를 만들어 단조 작업을 하고 있다. 예를 들어, 48톤 강괴의 치수는 $1160 \times 2430 \times 2150$ mm 인데 다이폭이 700 mm인 평다이를 사용하여 작업하고 있다. 다이폭 자체는 700 mm이지만 Fig. 1과 같이 다이의 양끝에 소재의 접힘을 방지하기 위한 둥근 모서리가 있고 단조 진행시의 진행폭(압하폭)은 300~400 mm 정도가 되고 있다.

3.2 계산 조건

자유 단조 공정은 일정량의 압하 깊이로

여러 패스에 걸쳐서 작업을 수행하기 때문에 연속적인 시뮬레이션을 해야 한다. 이것은 계산 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 전체를 모델링해야 하기 때문에 어려움이 많다. 따라서, 본 연구에서는 각 패스에서 충분한 단조 효과가 작용하도록 공정 설계를 하기 위하여 강괴의 높이(H), 다이폭(W)과 압하 깊이($\Delta H/H$)를 각각 다음의 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

$$\begin{aligned} H &= 600, 750, 950, 1160 \text{ mm} \\ W &= 300, 500, 700, 900 \text{ mm} \\ \Delta H/H &= 6, 9, 12\% \end{aligned}$$

해석에 사용된 소재는 금형강 소재 KP4A(JIS SCM440, AISI 4140)와 유사한 거동을 하는 소재로서 1200°C일 때 유동응

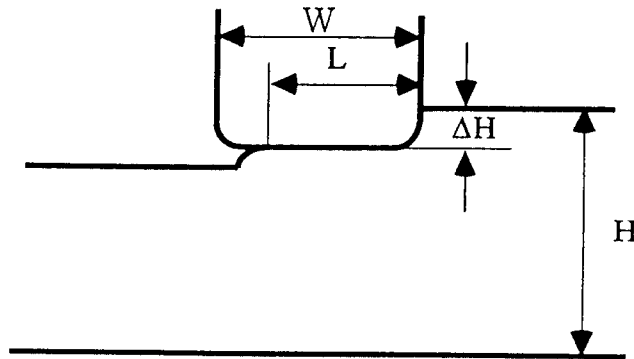


Fig. 1 Schematic diagram of the plate forging

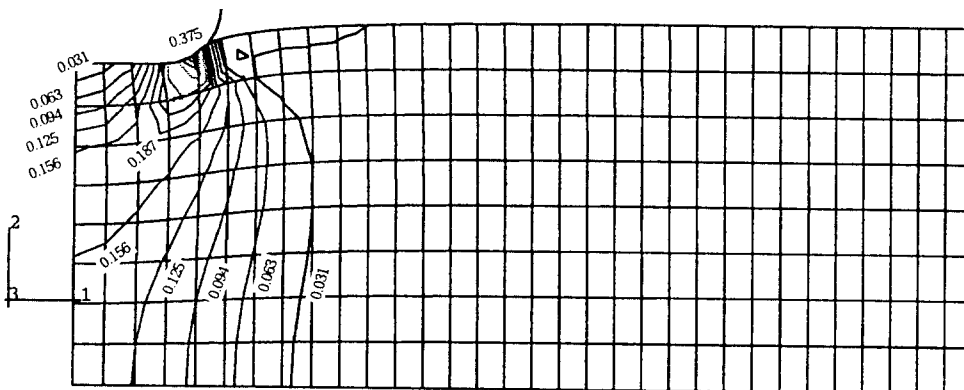


Fig. 2 The Distribution of effective strain for plate forging($H=750$ mm, $W=300$ mm, $\Delta H/H=12\%$)

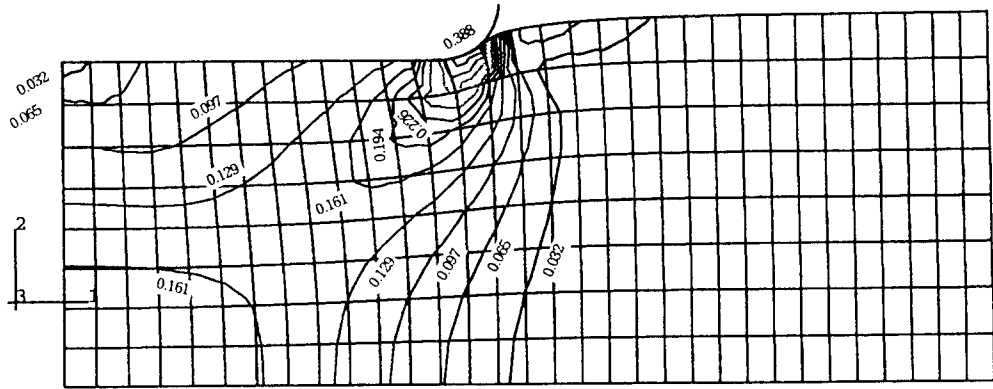
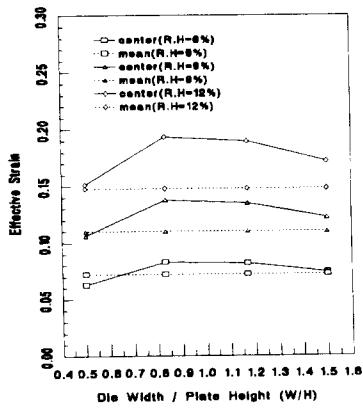
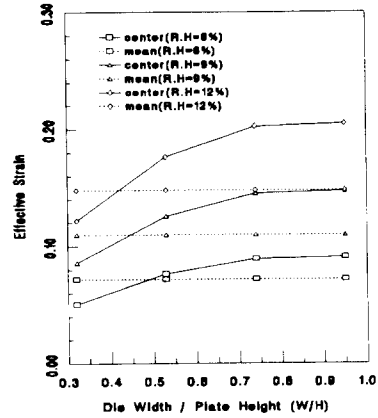


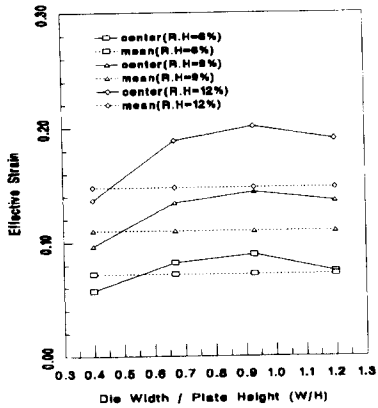
Fig. 3 The Distribution of effective strain for plate forging($H=750$ mm, $W=900$ mm, $\Delta H/H=12\%$)



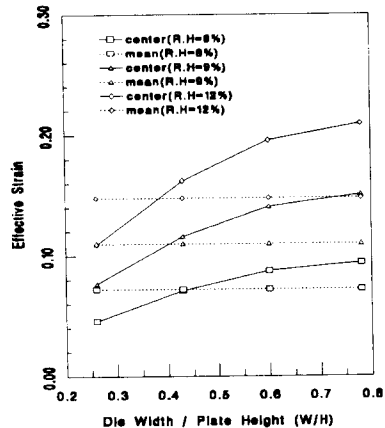
(a) $H=600$ mm



(c) $H=950$ mm



(b) $H=750$ mm



(d) $H=1160$ mm

Fig. 4 Effective strain for various plate heights

력은 다음과 같다. ⁽⁸⁾

$$\bar{\sigma} = 77.86(\bar{\epsilon})^{0.135} \text{ MPa} \quad (9)$$

평판 단조는 2차원 평면 변형(plane strain) 상태이며 대칭성을 고려하여 1/4만 해석하였다.

3.3 계산 결과 및 검토

Fig. 2와 3은 다이폭이 각각 300, 900 mm인 경우, 강과 높이가 750 mm이고 앞하 깊이가 12%일 때의 유효 변형률을 나타내고 있다. 압하 깊이가 12%일 때의 평균 유효 변형률($\bar{\epsilon}_{avg}$)은 0.148이다. 다이폭이 300 mm일 때에 소재 중심부의 유효 변형률은 0.137로 $\bar{\epsilon}_{avg}$ 보다 작은 값이며, 폭이 900 mm일 때는 0.19로 $\bar{\epsilon}_{avg}$ 보다 훨씬 크다. 따라서, 다이폭 900 mm일 때는 중심부에 충분한 단조 효과가 주어진다고 판단할 수 있다.

Fig. 4는 주어진 4가지의 강과 높이에서 압하폭비에 대한 중심부에서의 유효 변형률과 $\bar{\epsilon}_{avg}$ 를 비교한 것으로, 중심부에 단조 효과를 주기 위해서는 다이폭비가 0.6 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 그러나 0.9 이상에서는 오히려 $\bar{\epsilon}_{avg}$ 가 줄어들고 있고, Fig. 3에서 나타나듯이 다이와 접하는 부위에 강제 영역이 확대된다.

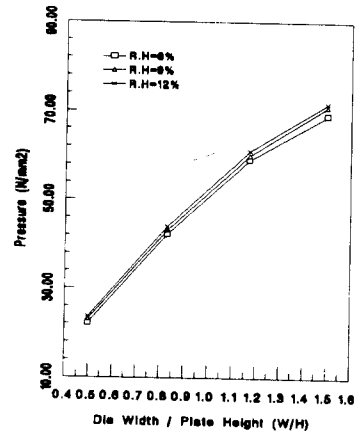


Fig. 5 Mean stress for plate height of 600 mm

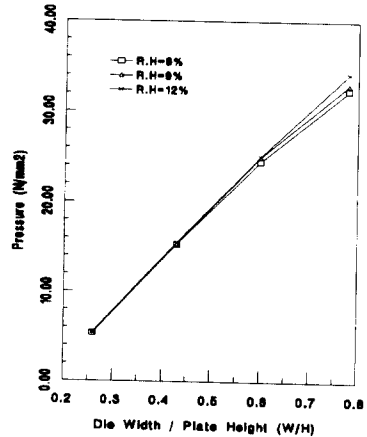


Fig. 6 Mean stress for plate height of 1160 mm

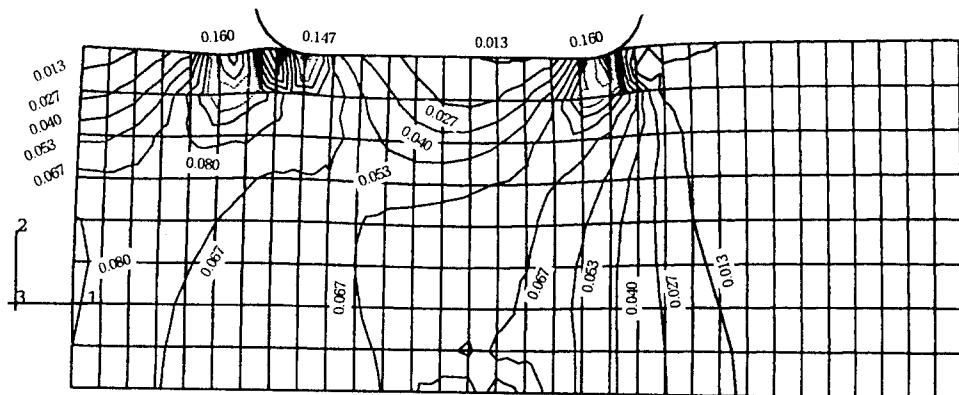


Fig. 7 The distribution of effective strain for the 1st path of the plate forging(H=750 mm, W=410 mm, $\Delta H/H=6\%$)

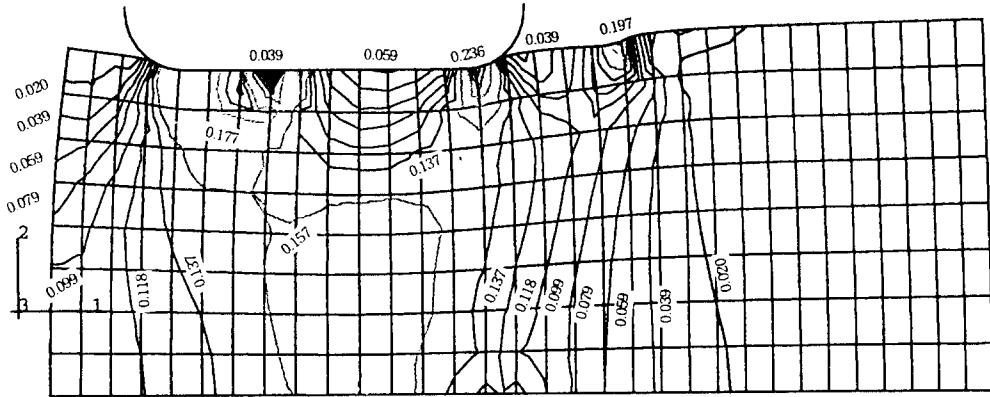


Fig. 8 The distribution of effective strain for the 2nd path of the plate forging(H=750 mm, W=410 mm, $\Delta H/H=12\%$)

Fig. 5와 6은 높이가 600, 1160 mm일 때 중심부에서의 압력(평균응력)을 나타내고 있다. 기공의 압착에 영향을 미치는 압력은 압하 깊이에는 영향이 거의 없고 다이폭비에 따라서 선형적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 7은 강괴 높이 750 mm일 때 Fig. 4(b)에서 구한 최소한의 다이폭인 410 mm로 압하 깊이가 6%일 때의 첫 패스($\bar{\epsilon}_{avg}=0.071$)에서의 연속 작업을 시뮬레이션한 것이다. 이것은 단조 효과를 중심부에 미치는 최소한의 다이폭이지만, 옆으로 연속 작업을 할 때 두 압하 지점 사이에는 $\bar{\epsilon}_{avg}$ 보다

낮은 영역이 주기적으로 발생한다. Fig. 8은 2번째 패스($\bar{\epsilon}_{avg}=0.148$)에서 다이 엇갈리기(stagerring) 작업을 한 결과로 유효 변형률이 균일하게 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 소재 높이 750 mm, 다이폭 300 mm, 압하 깊이가 6%일 때의 압하 하중을 기준으로 압하 깊이와 압하폭비에 대한 하중을 비교한 것이다. 동일 압하폭비에서 압하 깊이에 따른 하중의 증가는 매우 적지만 압하폭비의 증가에 대해서는 0.85배 정도로 증가함을 알 수 있다.

4. 원형과 사각 강괴의 단조 공정 해석

4.1 계산 조건

Fig. 10의 (a), (b)는 현장에서 비슷한 단조비로 단조를 한 제품이지만 (a)의 경우는 내부까지 충분한 단조 효과가 미쳐서 균질한 조직이 만들어진 경우이고, (b)의 경우는 중심부에서 직경의 1/2까지는 충분한 단조 효과를 받지 못하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11과 같은 원형 강괴와 사각 강괴를 평다이로 단조할 때의 단조 효과를 분석하기 위해서 다음의 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

$$H(D)=750, 950, 1100, 1250 \text{ mm}$$

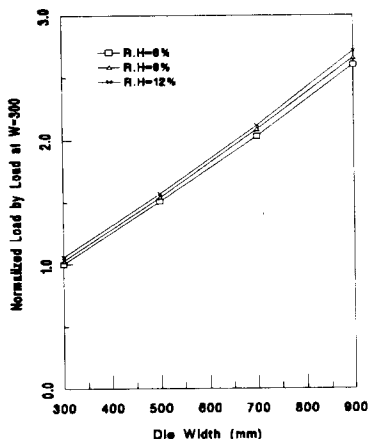


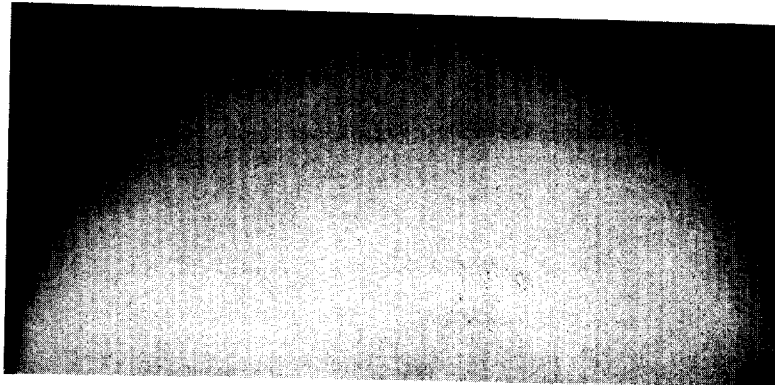
Fig. 9 Forging load normalized by load of H=750 mm, W=300 mm and $\Delta H/H=6\%$

$W=300, 450, 600, 800$ mm
 $\Delta H/H=6, 9, 12\%$

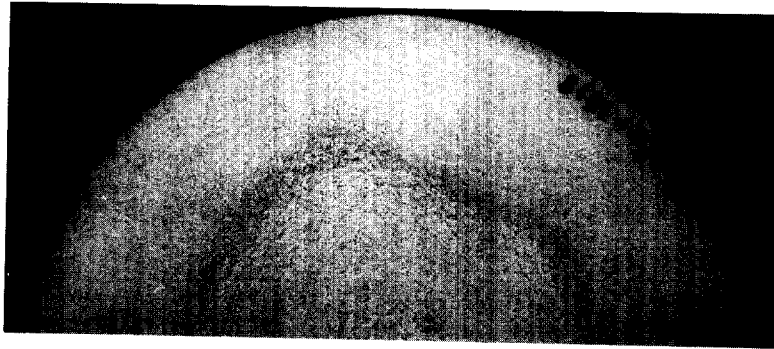
형 봉재와 높이가 950 mm인 각재의 경우, 다이폭이 600 mm이고 압하 깊이가 9%일 때의 변형 후 형상을 나타내고 있다. 봉재와 각재는 서로 유사한 유효 변형률 분포를 나타내며 중심부에서의 유효 변형률 또한

4.2 계산 결과 및 검토

Fig. 12와 13은 각각 직경 950 mm인 원



(a) homogeneous structure



(b) nonhomogeneous structure with defects

Fig. 10 Macrostructure of forged round bar

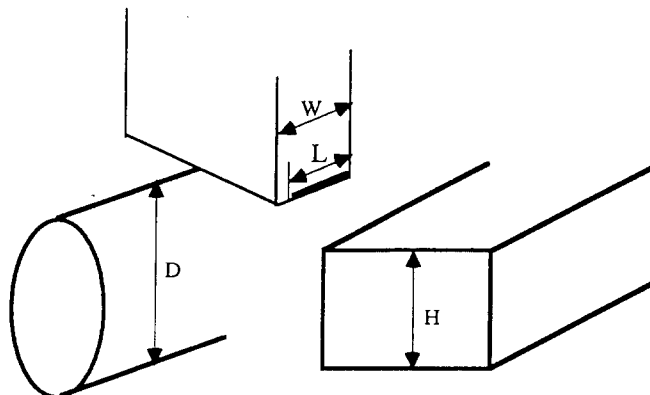


Fig. 11 Schematic diagram of the round and square forging

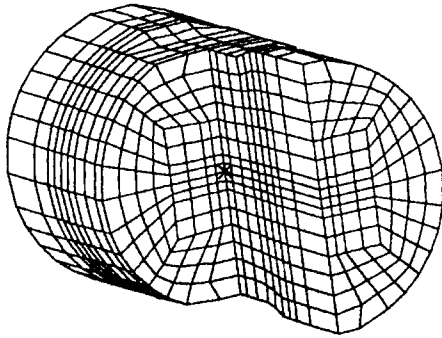


Fig. 12 Deformed Shape of round forging(D=950 mm, W=600 mm, $\Delta D/D=9\%$)

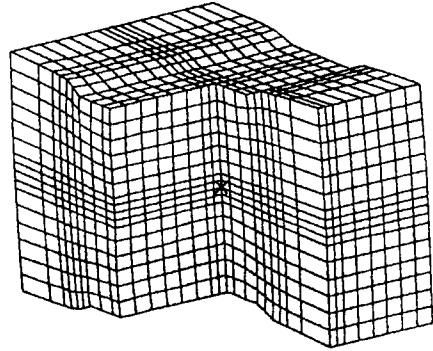
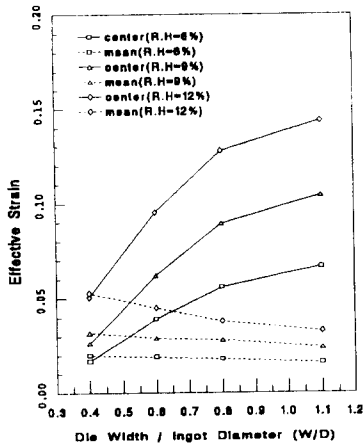
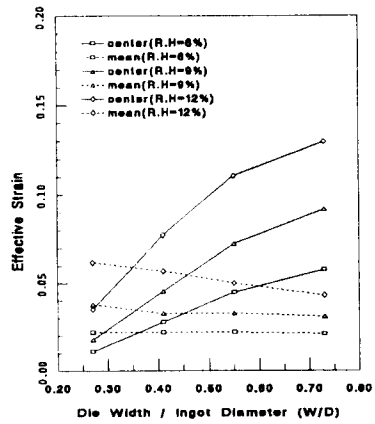


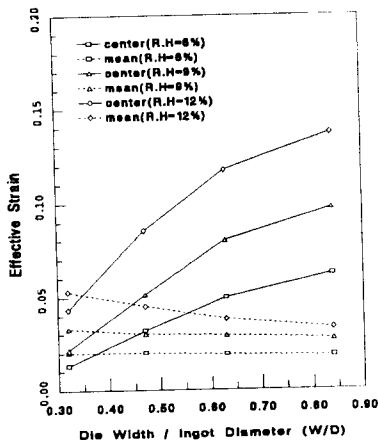
Fig. 13 Deformed Shape of square forging(H=950 mm, W=600 mm, $\Delta H/H=9\%$)



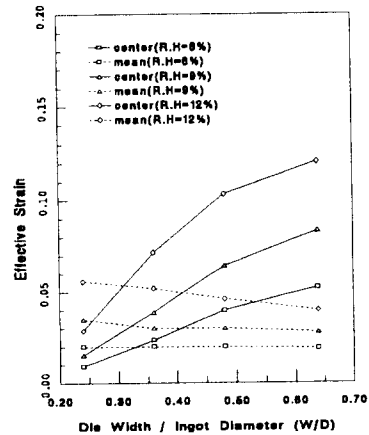
(a) D=750 mm



(c) D=1100 mm



(b) D=950 mm



(d) D=1250 mm

Fig. 14 Comparison of effective strain and mean effective strain for various Diameters

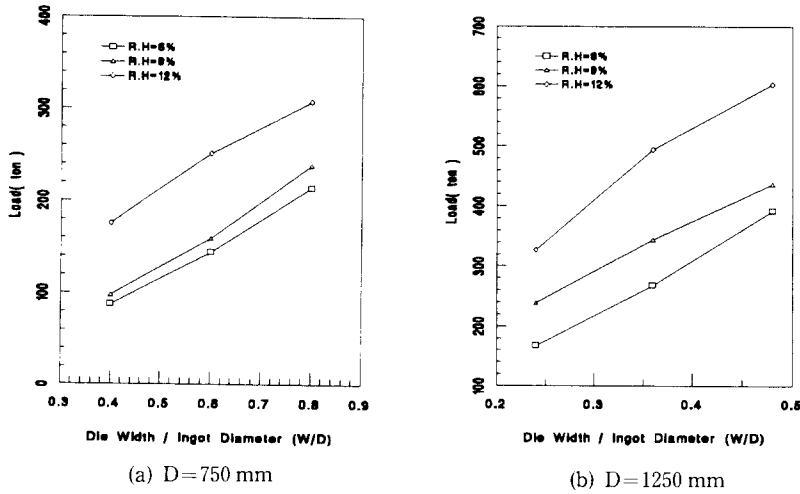


Fig. 15 Forging load of round ingot

유사한 값을 갖는다.

3차원의 경우도 2차원과 마찬가지로 압하 후의 단면적의 변화율을 계산하여 식 (8)에 따라 유효 변형률을 산출한다. Fig. 14는 4 종류의 봉재에서 다이폭비와 압하 깊이에 따른 유효 변형률과 평균 변형률($\bar{\epsilon}_{avg}$)을 비교한 것으로 적정 다이폭비는 0.5 이상이 되어야 하지만, 0.8보다 큰 값에서는 유효 변형률의 증가 경향이 낮아지고 있다. 그리고 다이폭비가 증가할수록 $\bar{\epsilon}_{avg}$ 이 낮아지는 것은 다이 마찰로 인해 길이 방향으로 변형이 적게 발생하기 때문이다.

Fig. 15에서 나타나듯이 압하 하중은 다이 길이가 증가하는 비율에 대해서 0.75배 정도로 증가하고 있다. 그러나, 압하 깊이에 따라서는 봉재의 경우에 있어서 접촉면이 급격히 증가하기 때문에 하중도 급격히 증가한다. 각재의 경우는 평판 단조에서와 마찬가지로 압하 깊이에 대해서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

5. 결 론

2차원, 3차원 점소성 유한요소법을 이용하여 평판, 봉재 및 각재 단조를 해석하였

고, 평균 유효 변형률을 제안하여 단조성을 평가하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 평판 단조의 경우 적정 다이폭비는 0.6~0.9이며, 봉재와 각재의 경우는 0.5~0.8이다.

(2) 다이 엇갈리기(staggering)작업은 소재에 균일한 단조 효과를 주기 위해 필수적인 작업이다.

(3) 평판 단조의 경우 단조 작업에 필요한 하중은 압하 깊이에 따라서는 큰 차이가 없지만 다이폭이 증가하는 비율에 대해서는 0.85배 정도로 증가하며, 각재 단조의 경우에는 0.75배 정도로 증가한다.

(4) 한 패스에서 다이의 겹침(overlapping)을 최소화하여 압하폭비를 최대화해야 한다.

참고문헌

- (1) Park, J. J. and Kobayashi, S., 1984, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Block Forging," Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, No. 3, pp. 165~176.
- (2) Yoon, J. H. and Yang, D. Y., 1988, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis

- of Three-Dimensional Forging by Considering Friction on Continuous Curved Dies with Initial Guess Generation," Int. J. Numer. Mech. Engng, 25, 67.
- (3) Tanaka, M., Ono, S., Tsuneno, M. and Iwadate, T., 1987, "An Analysis of Void Crushing During Flat Die Free Forging," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 11, pp. 1035~1042.
- (4) Kiefer, B. V. and Shah, K. N., 1990, "Three-Dimensional Simulation of Open-Die Press Forging," Trans. ASME, J. Engng Mater. Technol., 112, 477.
- (5) Hung, C. and Kobayashi. S., 1992, "Three-Dimensional Finite Element Analysis on Open-Die Block Forging Design," J. of Engng for Industry, November, Vol. 114, pp. 459~464.
- (6) Cho, J. R., Park, C. Y. and Yang, D. Y., 1992, "Investigation of the Cogging Process by Three-Dimensional Thermo-Viscoplastic Finite Element Analysis," Proc Instn Mech Engrs, Vol. 206, pp. 277~286.
- (7) Perzyna, P., 1966, Fundamental Problems in Viscoplasticity, Adv. Appl. Mechanics, Vol. 9, pp. 243~315.
- (8) Altan, T., Oh, S. I. and Geggel, H. L., 1983, Metal Forming: Fundamentals and Applications, ASM.