

## 소결분말 콘넥팅로드 단조의 예비성형체 설계

박종진 · 이정환\* · 정형식\*

홍익대학교 공과대학 기계공학과

\*한국기계연구원 소재성형실

### Preform Design for Forging of a P/M Connecting Rod

J. J. Park, J. H. Lee\* and H. S. Chung\*

Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University, Seoul 121-791, Korea

\*Materials Forming Lab., KIMM, Changwon 641-010, Korea

(Received December 21, 1994)

**ABSTRACT** Powder forging is a combined technology of powder metallurgy and precision hot forging. Recently, the technology is developing rapidly because of its economic merits, especially in automotive part manufacturing. In the present study, the finite element technique was developed to predict density variation during P/M forging and the technique was applied to analysis of forging of a P/M connecting rod. Although deformation mode of the connecting rod was quite complex, several sections were selected and analyzed under an assumption of asymmetric or plane strain deformation. It was found that some modifications were necessary on the cross section of the beam portion. Therefore, the cross section was modified repeatedly until a satisfactory result of the analysis was obtained. On the other hand, no modifications were necessary in the ring and the pin portions. It is anticipated that the developed technique can be used to optimize preform design and manufacturing processes in P/M forging, which are highly critical to produce successful products in practice.

## 1. 서 론

금속분말의 소결단조기술은 열간단조기술과 분말 야금기술을 접합하여 양자의 장점을 종합적으로 응용하는 새로운 기술이다. 이 기술은 특히 자동차부품의 제조에 많이 이용되고 있는데 자동차부품과 같이 철계합금의 정밀작동부품을 대량으로 소요하는 산업일수록 이 기술의 효과가 크기 때문이다. 지난 십여년간 주로 열간단조 혹은 기계가공에 의해 생산되어 왔던 부품들이 최근에 점차적으로 이 기술에 의해 생산되고 있는데 이는 정밀 프레스, 고압축성 분말, 공정기술의 개선 등에 의하여 보다 정밀하고 강도가 높은 제품의 경제적 생산이 가능하여지기 때문이다. 이 기술에 의해 생산되는 자동차부품은 오일펌프기어, 트랜스미션샤프트, 트랜스미션기어 및 부품, 콘넥팅로드 등이다. 앞으로 품질과 가격경쟁이

치열해짐에 따라 더 많은 부품이 분말부품으로 대체되고 강도의 증가를 위하여 이 기술에 의해 생산될 것인데, 예상되는 부품은 실린더라이너, 크랭크샤프트, 캠샤프트, 플라이휠, 유니버설조인트 등이다.

분말단조공정은 우선 분말을 믹서에서 골고루 섞은 다음 상온에서 예비성형체(preform)를 성형한다. 이와같이 성형된 예비성형체는 소결로로 운반되어 소결과정을 거친다. 소결과정에서 분말간의 결합강도가 증가되고 기공의 감소로 인하여 상대밀도는 0.80~0.85로 증가하게 된다. 이와같은 소결체는 단조프레스로 운반되어 압착된다. 단조가공 후의 콘넥팅로드는 전부분에 걸쳐 높고 균일한 밀도를 가져야 한다. 만약 밀도가 낮은 부분이 형성된다면 이 부분에서 인장강도와 피로강도의 감소로 인하여 실패하게 된다. 따라서 높고 균일한 밀도의 분포가 중요한 기술문제로 나타나게 된다. 이와같은 밀도조정은 주

로 단조공정에서 예비성형체의 초기밀도, 형상과 치수에 따라 가능하게 된다. 자동차의 콘벡팅로드의 경우에는 소결 후 예비성형체의 초기밀도가 약 0.83 정도라서 변화는 거의 없으므로 주요 설계요소(design factor)는 예비성형체의 형상과 치수가 된다. 종래에는 이러한 설계요소를 실험에 의존하여 결정하였다. 즉 설계자의 경험에 의하여 예비성형체를 설계하고 제작하고 단조한 후 강도실험과 밀도측정에 의하여 설계를 보완하였다. 이와같은 방법은 시간과 비용이 많이 들고 특히 밀도는 국부적인 정밀측정이 거의 불가능하므로 어려운 점이 많다. 최근에 소성가공시 금속의 변형을 비교적 정확하게 해석할 수 있는 수치해석기술 중의 하나인 유한요소해석기술(finite element analysis technique)이 개발되었다. 이 기술에 의하면 예비성형체의 형상, 치수, 상대밀도의 분포에 따라 단조중간 또는 후에 발생하는 예비성형체의 변형과 밀도분포를 예측할 수 있다. 따라서 이 기술을 사용하게 되면 실험과 경험에 소요되는 많은 시간과 비용을 절감할 수 있게 된다. 본 연구의 목적은 이 기술을 이용하여 분말단조 콘벡팅로드를 생산하기에 가장 적합한 예비성형체를 설계하는 것이다. 이러한 연구목적에 달성하기 위해서는 소결분말의 소성거동에 대한 이해, 구성방정식과 유한요소기본식의 유도, 컴퓨터 프로그램의 개발이 필요하다.

## 2. 유한요소 기본식

상대밀도가 100%인 재료의 항복에는 정수압응력의 영향이 없으며 소성변형중에 부피의 변화가 없다. 반면에 분말재료의 항복은 정수압응력의 영향을 받으며 부피의 변화를 동반한다. 그러므로 분말재료의 항복조건에는 정수압응력이 포함되어야 한다. 정수압응력은 주응력공간에서 세 개의 주응력 축과 같은 각도로 기울어져 있고 원점을 지나는 축위에 위치하게 된다. 따라서 분말재료의 항복함수는 정수압응력축에 기울기를 갖는 곡면으로 표시된다. 분말재료의 항복함수로 Drucker와 Prager,<sup>1)</sup> Suh<sup>2)</sup> 등은 von Mises나 Coulomb의 항복함수에 정수압응력을 더한 형태를 제안하였다. 이러한 항복함수는 지질역학에서 주로 사용되는데 분말의 마찰각이 이 함수의 주요변수가 된다. 소결금속 분말에서는 주로 상대밀도

가 항복함수의 변수가 되는데 Green,<sup>3)</sup> Kuhn과 Downey,<sup>4)</sup> Gurson,<sup>5)</sup> Shima와 Oyane,<sup>6)</sup> Corapcioglu와 Uz,<sup>7)</sup> Doraivelu<sup>8)</sup> 등이 항복조건을 제안하였으며 Im,<sup>9)</sup> Oh<sup>10)</sup> 등은 이러한 항복함수를 사용하여 유한요소법으로 축대칭응력하에서의 밀도분포의 변화를 해석하였다. Hwang<sup>11)</sup>은 항복함수를 정수압응력축에서 음의 방향으로 이동시켜 인장과 압축에서 항복현상이 다른 분말압축에서의 밀도분포를 해석하였다. Kim<sup>12)</sup>은 3차원 압흔공정을 유한요소로 해석하여 밀도의 분포를 계산하였다.

일반적으로 소결된 금속분말의 항복함수는 다음과 같은 형태의 식을 갖는다.

$$F = AJ_2' + BJ_1^2 = Y_R^2 = \delta Y_0^2 \quad (1)$$

$F$ 는 항복함수이며,  $A$ ,  $B$ 와  $\delta$ 는 상대밀도의 함수로 표시되고  $J_2'$ 은 편차응력의 제이불변량이며,  $J_1$ 은 응력의 제일불변량이다. 또한  $Y_R$ 은 분말재료의 항복응력이고  $Y_0$ 는 원재료의 항복응력이다.

윗 식에서  $Y_R$ 을 분말재료의 인장(또는 압축) 항복응력으로 정의한다면 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

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

식 (1)에 표현된 항복함수를 분말재료의 소성포텐셜(plastic potential)이라고 가정한다면 다음과 같은 유도법칙을 적용할 수 있다.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \lambda \quad (3)$$

여기서  $\partial$ 는 편미분을 뜻하고  $(\cdot)$ 은 시간에 대한 편미분을  $\sigma_{ij}$ 는 응력텐서의 성분들,  $\varepsilon_{ij}$ 는 변형률속도 텐서의 성분을 뜻하고  $\lambda$ 는 양의 비례상수이다. 항복함수를 식 (3)에 대입하고, 항복함수는 응력성분의 순수한 2차 함수인 것과 변형에너지의 평형을 고려하면 응력과 변형률속도와의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\dot{\varepsilon}}{2Y_R} (A\sigma'_{ij} + 2B\sigma_{mm}\delta_{ij}) \quad (4)$$

임의의 시간에 변형체의 체적이  $V$ 이고 경계면  $S_R$ 에는 경계조건이 힘  $T$ 로 지정되어 있고 경계면

$S_V$ 에는 경계조건이 속도  $V$ 로 지정되어 있다. 나머지 경계면인  $S_C$ 에는 마찰력  $f$ 가 작용하고 있다. 이 물체의 변형이 관성효과(inertia effect)에 영향을 받지 않는다고 가정하면 변형과정은 미소시간을 사용하여 정력학적으로 변형을 다룸으로써 추적할 수 있다. 이 때 변형체내의 임의의 질점은 평형조건을 만족하여야 하므로 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\int \sigma_{ij} \delta v_i dV = 0 \quad (5)$$

Divergence theorem과 응력텐서의 대칭성을 적용하고  $S_V$ 에서  $\delta v = 0$ 인 조건을 사용하고 식 (1)을 적용하면 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\delta \phi = \int \sqrt{\delta} Y_0 \delta \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F + S_C} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (6)$$

변형체의 체적  $V$ 를  $M$ 개의 유한요소로 이산화시킨다. 이 때에 체적  $V$ 에 분포된 절점은  $N$ 개이다. 등계수요소(isoparametric element)를 사용하면 요소내의 임의의 점의 속도성분은 그 유한요소를 형성하는 절점의 속도성분으로 표시할 수 있다. 또한 요소내의 임의의 점의 좌표는 절점의 좌표로 나타낼 수 있다. 식 (6)은 미지수  $U_i, V_i, W_i$ 를 갖는 일련의 비선형 대수식으로 나타나는데 편의상 체적부분, 하중경계부분, 접촉경계부분으로 다음과 같이 구분한다.

$$\delta \phi = \delta \phi_V + \delta \phi_S \approx \sum_{m=1}^M \{ \delta \phi_V^{(m)} + \delta \phi_F^{(m)} + \delta \phi_C^{(m)} \} \quad (7)$$

여기서

$$\delta \phi_V^{(m)} = \int_{V^{(m)}} \sqrt{\delta} Y_0 \delta \dot{\epsilon} dV = \Phi_\alpha^{(m)} \delta V_\alpha \quad (8)$$

$$\delta \phi_F^{(m)} = \int_{S_F^{(m)}} T_i \delta v_i dS \quad (9)$$

$$\delta \phi_C^{(m)} = \int_{S_C^{(m)}} T_i \delta v_i dS = \phi_\alpha^{(m)} \delta V_\alpha \quad (10)$$

일반적인 경계조건에 대한 유한요소식의 유도는 많은 문헌에 나와 있으므로 여기서는 설명을 생략한다. 다이와 재료의 접촉면  $S_C$ 에서의 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$v_n = v_D \cdot n \quad (11)$$

$$f_s = mk \frac{v_s}{|\Delta v_s|} \approx - \frac{2}{\pi} mk \cdot \tan^{-1} \left[ \frac{v_s}{u_0} \right] \quad (12)$$

여기서  $V_n$ 은 접촉면에서 수직방향으로의 다이의 속도성분이고  $f_s$ 는 접촉면에서 접선방향으로 작용하는 마찰응력이다. 또한  $v_D, n, m, k, v_s, u_0$ 는 각각 다이의 속도, 단위법선벡터, 마찰계수, 전단항복응력, 재료의 다이에 대한 상대 미끄러짐 속도, 매우 작은 양의 상수이다.  $V_s$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_s = (v_D - v_M) \cdot s = v_s \cdot s \quad (13)$$

여기서  $v_M$ 은 재료의 절점에서의 속도이고  $s$ 는 접촉점에서의 접선방향으로의 단위벡터이다. 재료의 절점에서 다이에 대한 상대 미끄러짐 속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$v_s = H_i v_i^s = H_i (V_i^s - v_D \cdot s_i) \quad (14)$$

여기서  $v_i^s$ 는 절점  $i$ 에서의 상대 미끄러짐속도이고  $V_i^s$ 와  $s_i$ 는 각각 절점  $i$ 의 접선방향으로의 속도이고 절점  $i$ 에서의 접선단위벡터이다. 식 (13)과 식 (14)를 사용하면 식 (10)에서 필요한 관계식을 유도할 수 있다.

### 3. 유한요소해석

본 연구에서는 분말콘벡팅로드의 생산공정중 소결과정이 끝난 예비성형체의 단조공정을 유한요소법에 의하여 해석하고 밀도분포의 변화와 필요한 하중을 예측하였다. 그리고 해석결과를 이용하여 예비성형체의 설계를 수정하였다. 이러한 기술의 개발로 인하여 공정설계자 또는 예비성형체 설계자는 예비성형체의 형상과 치수, 초기밀도, 단조금형의 형상, 치수, 그 밖의 금형배치, 속도, 마찰조건 등의 공정조건 등을 변화시켜 최적의 단조공정설계를 도모할 수 있게 되었다.

그림 1에 본 연구에서 선정한 콘벡팅로드가 나타나 있다. 콘벡팅로드는 세 부분으로 구분할 수 있다. 왼쪽의 작은 내경 부분은 피스톤의 핀(pin)과 연결되는 부분으로 단조공정중의 변형은 축대칭변형에 근사하다. 본 논문에서는 이 부분을 핀부분으로 호칭한다. 오른쪽의 큰 내경부분은 크랭크(crank) 축과 연결되는 부분이다. 본 논문에서는 이 부분을 크랭

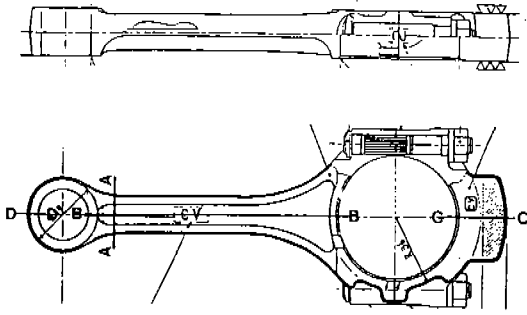


Fig. 1. Front and top views of the connecting rod under development and critical sections: A-A, B-B, C-C and D-D.

크부분으로 호칭한다. 이 부분은 단조 후 절단되어 크랭크 축과 연결된 후 볼트로 체결된다. 핀부분과 크랭크부분의 중간부분은 빔(beam)부분으로 호칭하며 단면은 "H"형으로 나타난다. 그림 2에는 단조금형 구성의 기본적인 두 가지 방법이 도시되어 있다. 상부에 도시되어 있는 방법은 상부금형에 핀과 크랭크부분의 코어가 고정되어 있다. 상부금형이 하강

함에 따라 단조가 진행되고 상부금형이 퇴진한 후 하부금형이 상승하여 부품이 추출되게 된다. 이러한 작동은 single action이라고 하고 단동형 프레스에서 가공이 가능하다. 하부에 도시되어 있는 방법은 상부금형과 코어들이 분리되어 있다. 단조공정이 시작되면 우선 코어들이 하강한다. 그 후 상부금형이 하강하여 단조를 수행하고 코어와 같이 퇴진한다. 하부금형이 상승하여 부품이 추출되게 된다. 이러한 작동을 double action이라고 하고 복동형 프레스에서 가공이 가능하다. 본 연구에서는 single action과 double action에 의한 단조공정을 해석하고 비교하였다.

소재는 C(0.4~0.55%), Cu(1.8~2.2%), Mn(0.3~0.5), P(0.04% Max), S(0.15% Max)의 탄소강으로써 AISI-1045와 유사하다. 소결 후 예비성형체의 상대 밀도는 0.833으로 균일하게 분포되었다고 가정하였다. 단조시 소재는 950℃로 가열된 후 약 300℃로 예열된 금형에 의하여 단조된다. 이 온도에서 소재의 유동응력은  $\sigma = 206.7 \bar{\epsilon}^{0.097}$  (MPa)로 표현된다. 일반적으로 열간단조는 금형속도가 200 mm/sec로 빠르

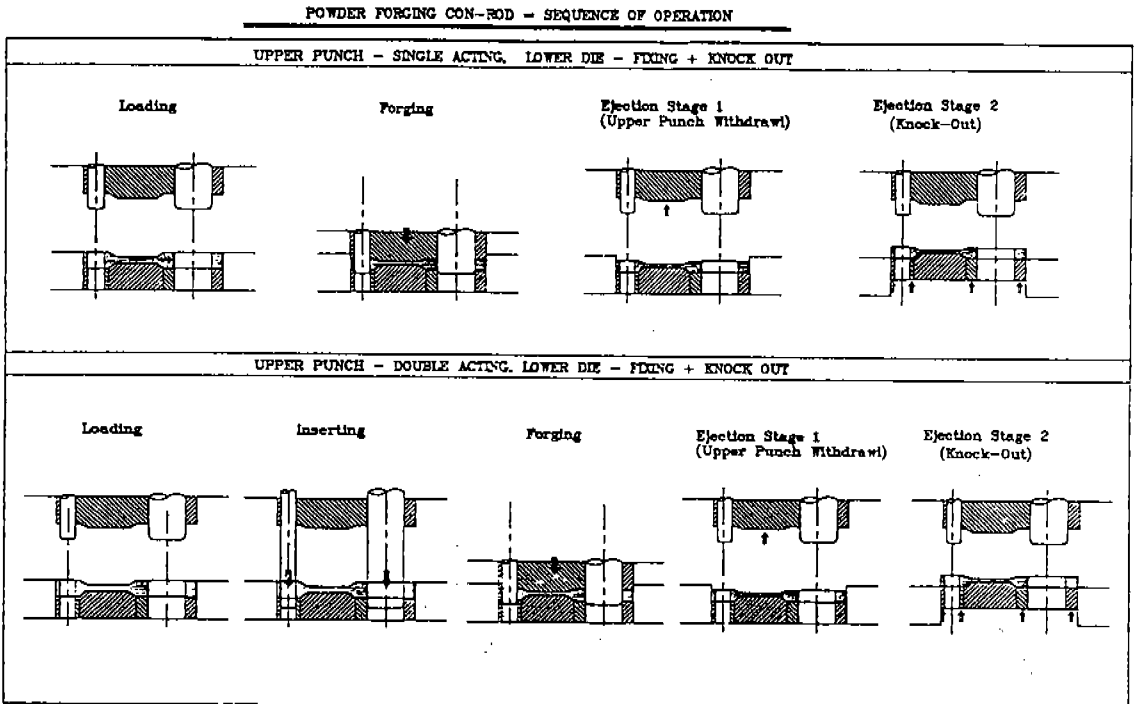


Fig. 2. Sequences of operation in single and double actions.

게 진행되는데 단조시간이 짧게 되므로 소재가 금형 또는 대기와의 접촉에 의한 열전달효과는 무시할 수 있다. 금형과 소재접촉면에서의 마찰계수는  $m=0.3$ 으로 가정하였다. 해석에 필요한 유한요소의 생성 (preprocessing)과 해석결과의 도시(postprocessing)에는 상용 전후처리 프로그램인 IDEAS를 사용하였다.

### 4. Single Action의 경우

이 경우는 상부금형에 핀과 크랭크부분의 코어가 고정되어 있다. 소결된 분말 콘벡팅로드의 단조해석은 그림 1에 도시되어 있는 단면 A-A, B-B, C-C와 D-D에 대하여 수행하였다. 단면 A-A는 빔부분의 좌우측에 대하여 수직인 단면이다. 이 부분은 단조시 평면변형을 변형과 유사하며 단면상에서 보면 좌우 대칭이므로 해석에서는 우측 반을 사용하였다. 단면 B-B는 빔부분의 좌우 측 단면으로 단조시 평면변형을 변형과 유사하다. 하지만 이 단면에는 대칭면이 없다. 단면 C-C는 크랭크부분이며 단면 D-D는 핀 부분으로써 단조시 축대칭변형과 유사하다. 해석에서는 대칭성을 고려하여 우측 반을 사용하였다. 빔부분은 단면 A-A와 B-B에 대한 해석을 평면변형을 변형가정하에 수행하여 예비성형체의 변형과 밀도 분포를 예측하였다.

#### 4.1. 빔부분 축과 수직단면

##### 4.1.1. 예비성형체(I)

그림 3에 상부금형이 하강함에 따른 밀도분포의 변화가 도시되어 있다. 초기에 10 mm인 웨브두께가 9 mm로 압축됨에 따라 리브는 하부금형과 접촉을 시작하였다. 이 접촉이 발생하게 되면 소재의 변형과 밀도분포는 상하대칭성을 상실하게 된다. 즉 하부금형은 정지하고 있음으로 소재는 하부보다는 상부로 용이하게 이동하게 된다. 웨브두께가 점차로 감소함에 따라 소재는 중앙부에서 우측으로 밀려 금형의 상하부로 이동되고 있다. 웨브두께가 5 mm가 되었을 때를 보면 상부는 거의 차 있는데 비하여 하부는 아직 덜 찬 모양을 보이고 있다. 웨브두께가 4.4 mm로 되면 상하부가 모두 차게 된다. 밀도분포의 변화를 보면 웨브부분이 먼저 단조됨에 따라 밀도

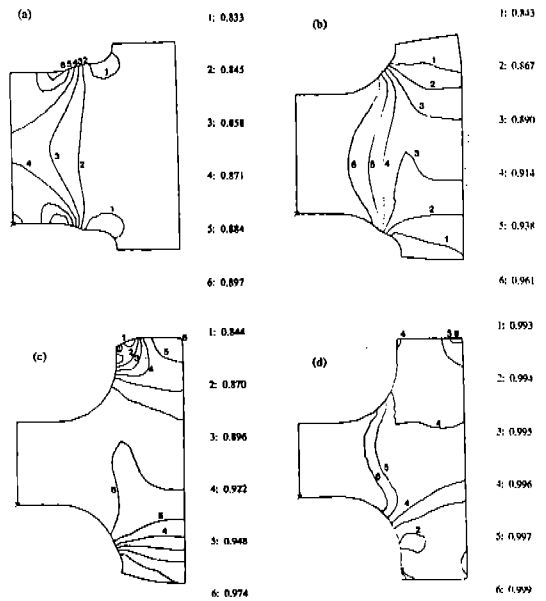


Fig. 3. Density variations in A-A section of the first preform at various web thicknesses: (a) 9 mm, (b) 7 mm, (c) 5 mm and (d) 4.4 mm.

증가가 발생하고 있다. 이러한 밀도의 증가는 웨브 두께가 점차로 감소할수록 리브쪽으로 이동되고 있다. 상부로의 소재이동이 용이함으로 인하여 상부의 밀도가 하부의 밀도보다 높게 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 만약 예비성형체의 무게분포(weight distribution)가 정확하게 이루어져 있지 않으면 단조시 예비성형체의 일부는 원하는 밀도수준에 이르지 못할 수가 있다. 이러한 결함은 즉 프레스하중의 한계와 단조금형과의 한계에 의하여 발생된다. 이러한 문제가 발생할 경우에는 리브하부에 밀도의 결함이 나타나게 된다. 또한 현재의 예비성형체는 코너부분의 반경이 접촉되는 금형코너의 반경에 비해 크게 작음으로 하부의 내부에 접힘(folding)결함이 발생할 가능성이 있다.

##### 4.1.2. 예비성형체(II)

예비성형체의 단면을 수정하였다. 즉 코너부분의 반경을 크게 증가시켜 금형코너의 반경보다 크게 하고 리브의 높이도 증가시켜 상하부로의 이동을 용이하게 하였다. 상부금형의 하강에 의한 변형이 도시되어 있다. 코너부분의 변형이 매우 부드럽게 진행되고 있으며 따라서 접힘결함의 발생가능성은

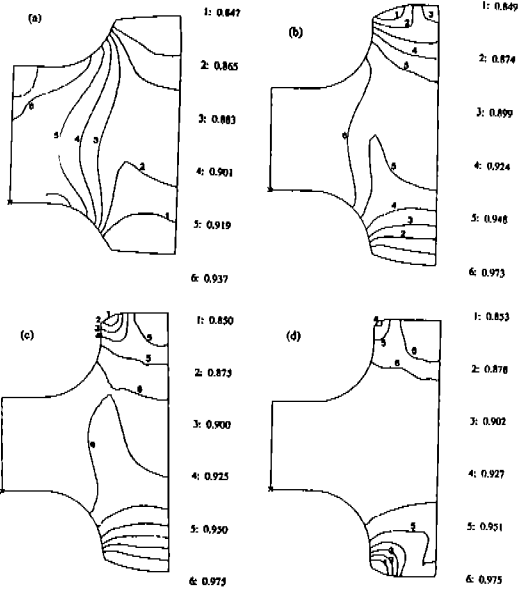


Fig. 4. Density variations in A-A section of the second preform at various web thicknesses: (a) 8 mm, (b) 6 mm, (c) 5.6 mm and (d) 5.3 mm.

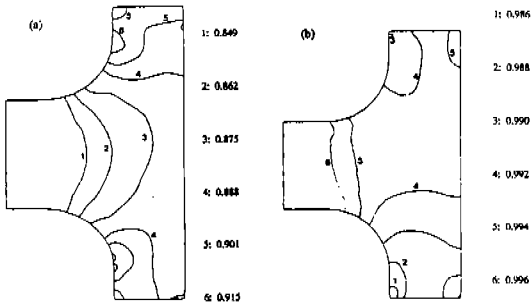


Fig. 5. Density variations in A-A section of the third preform at various web thicknesses: (a) 16.4 mm and (b) 15 mm.

없게 되었다. 상하부로의 소재이동도 약간 증진됨을 볼 수 있다. 상부금형의 하강에 따른 밀도변화가 그림 4에 도시되어 있다. 웹부분이 먼저 압축됨에 따라 밀도의 증가가 발생하고 있다. 밀도증가는 단조가 진행됨에 따라 리브쪽으로 이동되고 있다. 이 수정된 예비성형체는 코너부분에서 변형에 향상되었는데 리브부분의 밀도증가가 공정후반에 발생함으로 말미암아 밀도결함이 발생할 가능성이 있다.

4.1.3. 예비성형체(III)

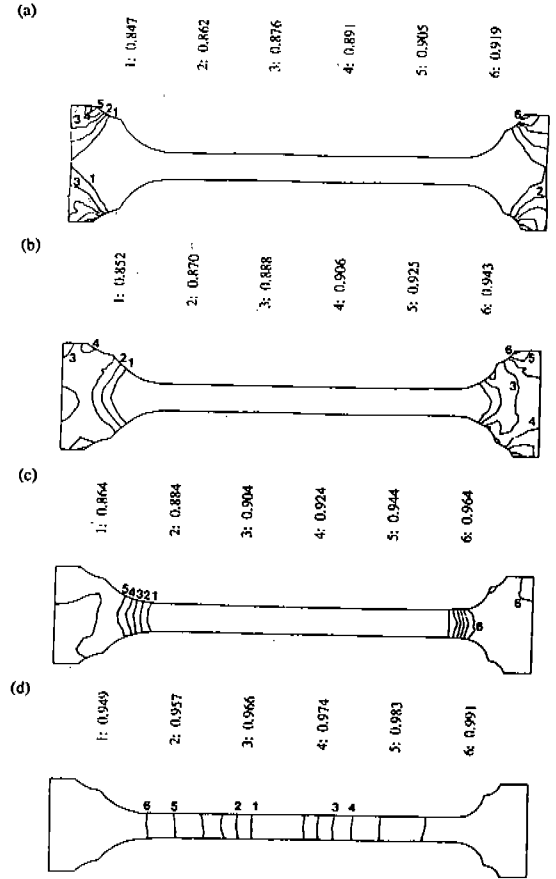


Fig. 6. Density variations in B-B section of the third preform at various heights (single action): (a) 25.6 mm and (b) 23.6 mm, (c) 21.6 mm and (d) 20.6 mm.

재차 예비성형체를 수정하였다. 이 예비성형체는 리브의 높이를 크게 증가시켜 단조시 웹부분보다 리브부분이 먼저 압축되도록 한 것이다. 콘벡팅로드는 사용시 전달되는 하중의 대부분을 리브부분이 받게 되므로 웹보다는 리브부분의 밀도 증가가 더 중요하기 때문이다. 그림 5에는 밀도분포의 변화가 나와있다. 리브의 초기 높이가 18.44 mm인데, 16.44 mm로 압축되었을 때 리브의 밀도는 0.88 이상을 유지하게 된다. 리브의 높이가 15.04 mm일 때는 리브와 웹의 밀도분포가 유사하게 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 밀도분포 변화의 경우에는 프레스의 하중체계나 금형과피에 의한 하중체계가 발생하여도 밀도분포의 편차가 작음으로 소재의 강도저하효과를 크게 감소시킬 수 있게 된다.

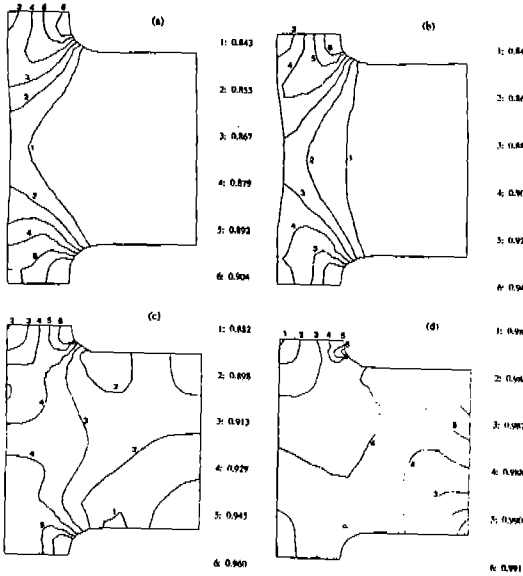


Fig. 7. Density variations in C-C section at various heights (single action): (a) 25.6 mm, (b) 23.6 mm, (c) 21.6 mm and (d) 20.6 mm.

4.2. 빔부분의 축단면

단면 B-B에서의 변형과 밀도분포를 평면변형률 변형의 가정하에서 해석에 의하여 예측하였다. 예비

성형체(III)의 경우를 선택하였다. 이 경우에는 빔부분에서 폭방향으로의 변형이 적음으로 폭방향으로의 변형을 무시하고 길이방향으로의 변형만을 고려한 평면변형률 변형으로 가정하게 되었다. 그림 6에 금형의 하강에 따른 밀도분포의 변화가 예측되어 있다. 좌우의 부분부터 변형이 시작되고 빔부분은 최후 1 mm의 스트로크에서 압축된다. 이러한 변형은 예비성형체(III)의 결과에서도 보여지듯이 리브부분에서 압축되어 밀도증가가 웨브로 이동됨으로 실제로 웨브가 압축되는 량은 약 1 mm에 불과하게 된다. 밀도분포의 변화를 보면 마지막 1 mm의 스트로크전까지는 좌우부분의 밀도증가가 0.95 이상이 되고, 빔부분은 0.86 이하로 되어있다. 마지막 1 mm의 스트로크 동안에 빔부분의 밀도도 증가하는데 중앙으로 갈수록 밀도가 감소되는 것을 볼 수 있다.

4.3. 크랭크부분

초기 높이가 27.55 mm인 이 부분은 상부금형의 하강에 따른 밀도분포의 변화가 그림 7에 도시되어 있다. 압축이 진행되면서 이 부분의 상부와 하부는 내벽(크랭크의 코어부분)과 접촉하고 굴곡현상이 발견되다가 높이가 21.55 mm가 되게 되면 거의 전면이

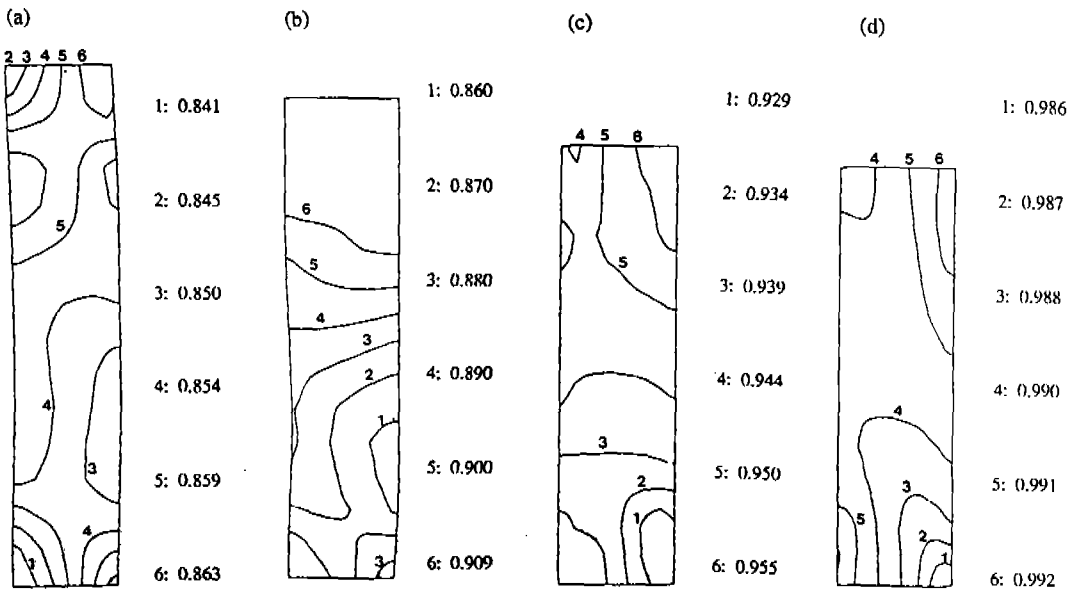


Fig. 8. Density variations in D-D section at various heights (single action): (a) 25.6 mm, (b) 23.6 mm, (c) 21.6 mm and (d) 20.6 mm.

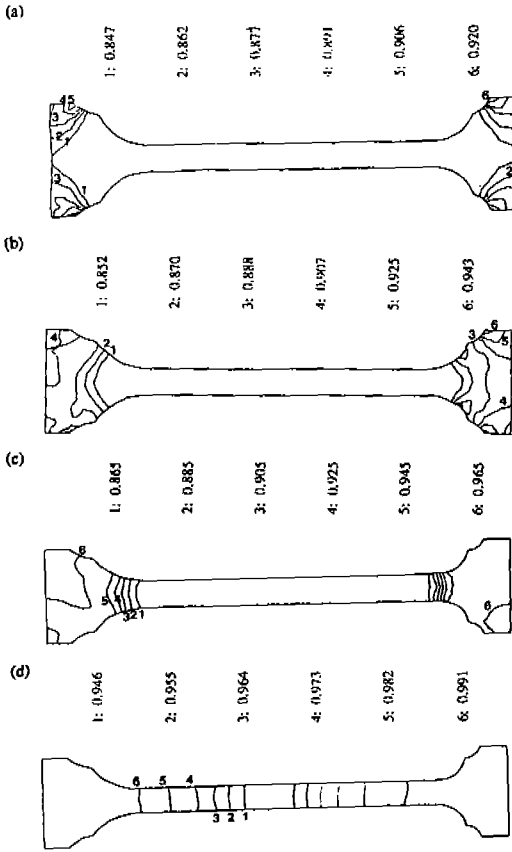


Fig. 9. Density variations in B-B section of the third preform at various heights (double action): (a) 25.6 mm, (b) 23.6 mm, (c) 21.6 mm and (d) 20.6 mm.

접촉하게 되고 압축에 의한 밀도증가로 발전하게 된다. 밀도의 증가는 내벽부분부터 진전되어 외부로 발전된다. 내벽의 상부와 외벽의 하부의 밀도가 가장 낮은 값을 나타낸다.

#### 4.4. 핀부분

단면 D-D에서의 변형과 밀도분포를 축대칭변형의 가정하에 해석에 의하여 예측하였다. 금형이 하강함에 따라 예비성형체는 바깥쪽으로 휘어지게 되어 외벽(단조하부금형)과 먼저 접촉한다. 그 후 내벽(핀의 코어부분)과 접촉하게 된다. 밀도분포의 변화가 그림 8에 도시되어 있다. 초반에서 밀도분포는 상하 대칭성을 나타내다가 외벽과 접촉이 발생한 후부터는 상부의 밀도분포가 높게 나타나고 있다. 최종밀도분포를 보면 외부하부에 밀도가 낮음을 알

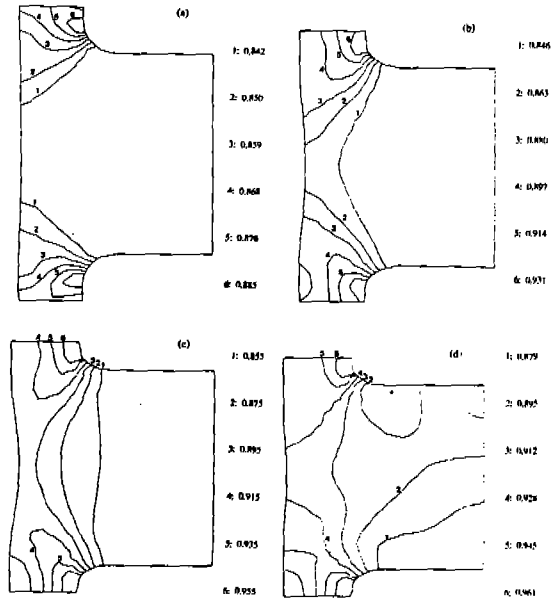


Fig. 10. Density variations in C-C section at various heights (double action): (a) 26.6 mm, (b) 24.6 mm, (c) 22.6 mm and (d) 21.6 mm.

수 있다.

### 5. Double Action의 경우

이 경우에는 상부금형과 핀과 크랭크부분의 코어들이 분리되어 있다. 작동이 시작되면 먼저 코어들이 하강하여 예비성형체의 핀과 크랭크 중심에 위치하게 된다. 따라서 상부금형이 하강하게 되면 예비성형체는 정지되어 있는 하부금형과 코어들로 이루어진 공간으로 유동된다.

#### 5.1. 빔부분의 축단면

그림 9에는 상부금형의 하강에 따른 밀도의 변화가 도시되어 있다. 그림 6의 분포와 비교하여 보면 대체적으로 유사하나, 높이가 21.55 mm일 때를 비교하여 보면 차이가 있음을 볼 수 있다. 전자의 경우는 좌우측의 하부가 낮은 밀도를 보이는 반면, 후자의 경우는 좌우측의 상부가 낮은 밀도를 보이고 있다.

#### 5.2. 크랭크부분

상부금형의 하강에 의한 밀도변화가 그림 10에 도시되어 있다. 그림 7과 비교하여 보면 좌굴과 같은



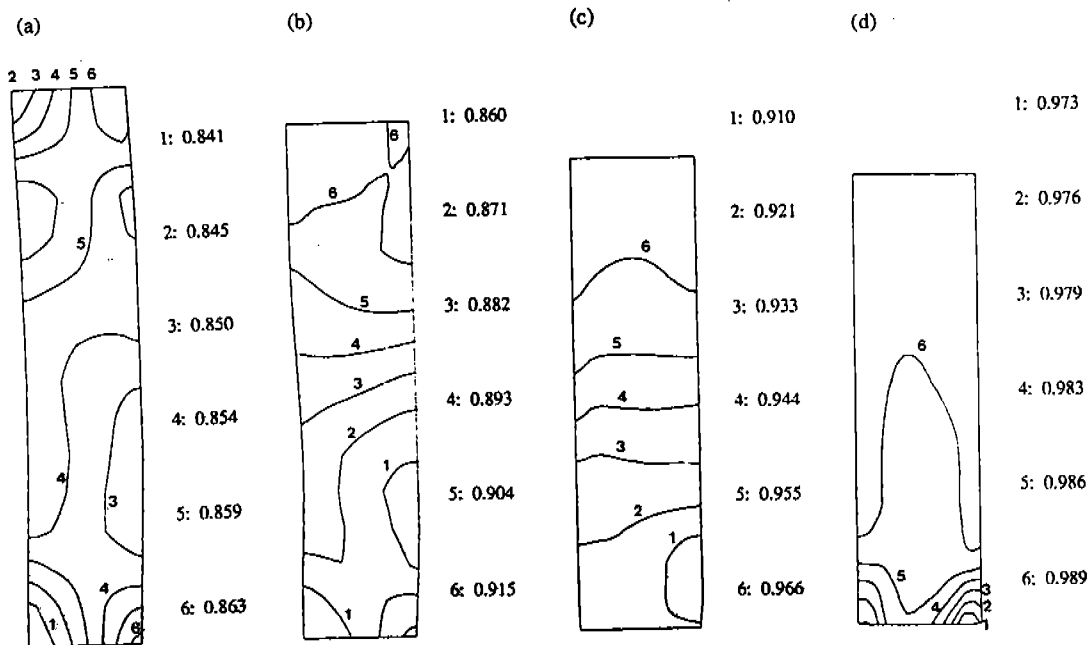


Fig. 11. Density variations in D-D section at various heights (double action): (a) 25.6 mm, (b) 23.6 mm, (c) 21.6 mm and (d) 20.6 mm.

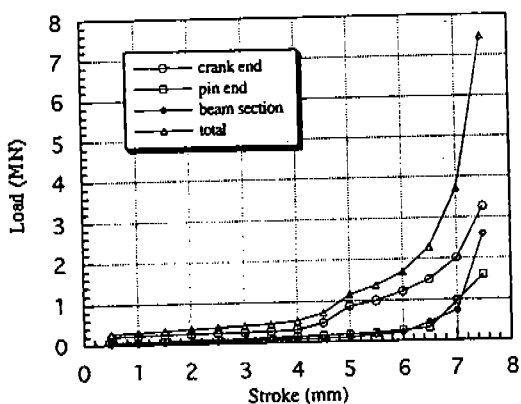


Fig. 12. Load vs. stroke curve in single action.

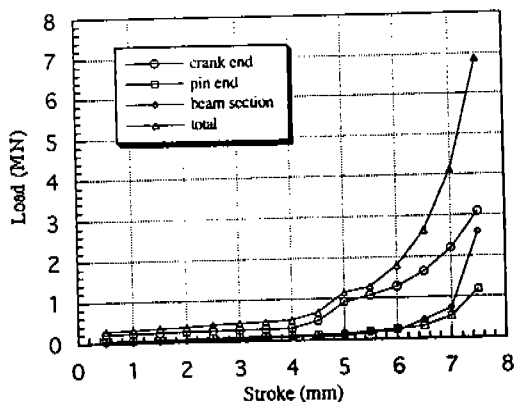


Fig. 13. Load vs. stroke curve in double action.

형태의 변형이 공정중에 계속적으로 존재하다가 마지막에 편편해지게 된다. 높이가 21.55 mm일 때 밀도가 가장 낮은 부분은 전자의 경우에는 좌우측 상부에 위치하고 있는데, 후자의 경우에는 좌측하부와 우측상부에 위치하고 있다.

### 5.3. 편부분

상부금형의 하강에 따른 밀도변화가 그림 11에 도시되어 있다. 그림 8과 비교적 유사함을 알 수 있다. 전자의 경우에는 밀도가 낮은 부분이 하부의 좌우측에 존재하는데 후자의 경우에는 우측하부에 위치하고 있다. 또한 전자의 경우에 밀도편차가 약간 더 심하게 발생하고 있는 것을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석기술을 분말콘택팅로드 단조해석에 응용하였다. 코어의 하강속도가 미치는 영향을 연구하기 위하여 single action과 double action의 경우를 해석하고 비교하였다. 콘택팅로드의 주요 단면을 선택하여 평면변형률 또는 축대칭변형으로 가정하여 해석을 수행하였다. 빔부분의 축과 수직인 단면("H" 단면)은 해석결과로부터 포착된 결합발생 가능성을 극복하기 위하여 2차에 걸쳐 수정을 하였다. 반면에 크랭크부분과 핀부분은 별 문제가 나타나지 않았다. Single action의 경우에는 코어가 상부금형과 같은 속도로 움직이나 double action의 경우에는 코어가 하부금형과 같이 정지되어 있다. 따라서 두 경우 예비성형체의 변형과 밀도분포의 변화에 차이가 발생하게 되는데 해석결과를 비교하여 보면 금형과 코어의 상대운동이 적은 부분에서 낮은 밀도가 나타나고 있음을 알 수 있다. 상부금형의 하강거리에 따른 하중의 변화를 그림 12와 13에 도시하였다. 두 경우가 유사하게 나타나는데 single action 경우가 약간 높게 나타나고 있다. 하중은 하강거리에 따라 증가하는데 최종단계에서는 밀도가 거의 진밀도(상대밀도=1.0)에 가깝게 되므로 매우 급하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

본 연구결과로 단조시 예비성형체의 변형과 밀도분포의 변화를 예측할 수 있게 되었고, 이를 이용하여 예비성형체의 설계를 이룰 수 있었다. 추후에는 해석기술을 삼차원해석으로 확대하여 개발하고, 빔부분과 크랭크 또는 핀부분의 연결부위의 밀도분포를

보다 정확하게 해석하고자 한다. 이를 이루게 되면 예비성형체의 설계를 보다 완벽하게 수행할 수 있게 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. D. C. Drucker and W. Prager : Q. Appl. Math., **10** (1952) 157
2. N. P. Suh : Int. J. Powder Metall., **5**(1) (1969) 69
3. R. J. Green : Int. J. Mech. Sci., **14** (1972) 215
4. H. A. Kuhn and C. L. Downey : Int. J. Powder Metall., **7** (1971) 15
5. A. L. Gurson : Ph. D. Thesis, Brown University, Providence, RI (1975)
6. S. Shima and M. Oyane : Int. J. Mech. Sci., **18** (1976) 285
7. Y. Corapcioglu and T. Uz : J. Powder Technology, **21** (1978) 269
8. S. M. Doraivelu, H. L. Gegel, J. S. Gunasekera, J. C. Malas, J. T. Morgan : Private Communication (1984).
9. Y. T. Im and S. Kobayashi : *Metal Forming and Impact Mechanics*, S. R. Reid (Ed.), Pergamon Press (1985)
10. S. I. Oh, W. T. Wu and J. J. Park : 2nd Int. Conf. Technology of Plasticity, Stuttgart, West Germany, August, (1987)
11. B. Hwang and S. Kobayashi : Int. J. Mach. Tools. Manufact., **31** (1991) 123
12. H. S. Kim and D. N. Lee : 단조 심포지움 '91, 한국소성가공학회, 한국단조공업협동조합 (1991) 7