

비정상상태 이형재 인발공정의 3차원 강소성 유한요소해석

김 호 창*, 최 영**, 김 병 민***

Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Nonsteady State Shaped Drawing Process

H. C. Kim*, Y. Choi** and B. M. Kim***

ABSTRACT

In this paper, nonsteady state shaped drawing process has been investigated using the three-dimensional rigid-plastic finite element method. In order to analyze the shaped drawing process, a method to define straight converging die considering straight die part, die radius part and bearing part has been proposed. In addition, the modeling of initial billet and the generation procedure of mesh system have been suggested. The three-dimensional rigid-plastic finite element simulation has been performed for a square sectional drawing process and its result has been confirmed in comparison with the existing experimental one. Also, for the same process conditions, the effect of perimeter ratio in the shaped drawing process has been investigated.

Key Words : Shaped Drawing Process(이형재 인발공정), Nonsteady State(비정상상태), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Straight Converging Die(선형원추형 금형), Perimeter Ratio(둘레길이비)

1. 서 론

인발가공은 봉재, 선재 및 관재 등의 소재를 다이를 통하여 잡아 당김으로서 단면적감소와 길이를 증가시키는 기본적인 소성가공 방법으로, 외력으로 인장력을 작용시키나 다이벽면과 소재간에는 압축력이 작용한다. 최근에는 변압기 등과 같은 전기제품에 쓰이는 연결핀, 평케이블 등 전자제품 및 금·은 등의 귀금속 등을 가공하기 위하여 각재, 타원 등과 같은 이형단면의 형상이 많이 요구

되고 있으며, 이를 위한 이형재 인발공정의 해석 및 금형 설계 등에 관심이 높아가고 있다.

인발 및 압출금형은 제작과 단가를 고려하여 선형원추형 금형(straight converging die)이 주로 이용되고 있으며, 선형 다이(straight die)부, 다이곡률(die radius)부 및 평형부(bearing) 등으로 구성되어 있다. 이러한 선형원추형 금형을 이용한 인발공정의 해석을 살펴보면, Prakash 등^(1,2)은 정다각형단면 형상의 인발에 대한 상세해를 유도하였다. 그 후, Basily 등^(3,4)은 원형봉에서 정

* (주)정남금속, 기술연구소 개발1팀
** 부산대학교 기계기술연구소
*** 부산대학교 정밀 정형 및 금형 가공연구센터

다각형 단면형상의 인발공정에 대한 상·하계해를 이용하여 정다각형 단면의 인발공정에 대한 최적의 금형 형상을 제시하였고, 그 결과를 실험을 통해 검증하였다. Gunasekera 등⁽⁵⁾은 선적분법을 이용하여 선형원추형 금형 형상을 정의하고 인발 및 압출공정에 대한 상계해석을 수행하여 최적의 금형 형상을 결정하였다. 그리고 Boër와 Webster 등⁽⁶⁾은 이차요소를 사용하여 정상상태 유한요소해석하여 상계해와 비교하였다.

하지만 이들의 연구에서 제안된 선형원추형 금형은 다이코플부와 평형부를 고려하지 못하였다. 이러한 금형정의의 유한요소해석에서 이용하면 금형출구에서 소재가 금형면을 따라 유동하지 못하는 해석결과를 얻을 수 있기 때문에 유한요소해석을 위해서는 C'연속인 금형정의가 필요하다. 또한 기존의 연구는 상·하계법 및 정상상태 유한요소해석으로 인발응력을 예측하는 단계에 머무르고 있다.

따라서 본 연구에서는 다이코플부와 평형부를 고려하여 C'연속인 실제 선형원추형 인발금형 형상을 정의하고 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 원형봉의 이형제 인발공정을 비정상상태 해석하고자 한다. 이를 위해, 간단한 유한요소 격자구성법을 도입하고 이형제 인발공정을 해석할 수 있는 3차원 강소성 유한요소 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 원형봉의 각재형 인발공정에 적용하였으며, 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 실험결과와 비교하였다. 또한 공정변수로 둘레길이비(perimeter ratio)를 선정하여 각재형 인발공정을 비교·분석하였다.

2. 강소성 유한요소 수식화

본 연구에서는 3차원 강소성 유한요소법을 사용하였으며, 이의 수식화 과정은 여러문헌^(7,8)에 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 간략히 언급한다.

비압축성조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function), K를 도입하면 강소성 재료에 대한 일차 변분범함수는 다음과 같다.

$$\delta II = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{i}_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 구한다. 그리고 다이와

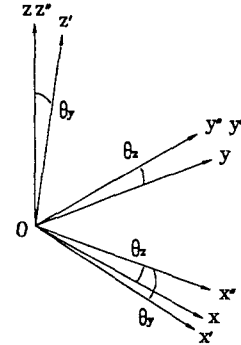


Fig. 1 Transformation from global coordinate system to skew coordinate system

소재 접촉면상에서 외력은 경계면의 접평면방향으로 규정되고, 속도는 수직방향으로 규정된다. 이러한 혼합경계조건(mixed boundary condition)을 부여하기 위하여 전역좌표계에 대한 경사경계조건을 사용한다. 따라서 Fig. 1은 전역좌표계에서 경사좌표계로의 변환을 나타낸 것이며, (x, y, z)는 전역좌표계이고 (x', y', z')는 변환된 경사좌표계이다.

좌표계의 변환 행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_z \cos \theta_y & -\sin \theta_z \cos \theta_y \sin \theta_y \\ \sin \theta_z \cos \theta_y & \cos \theta_z \sin \theta_y \sin \theta_y \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

3. 선형원추형 인발금형 형상의 정의 및 유한요소 모델링

3.1 선형원추형 인발금형 형상의 정의

원형봉의 각재형과 같은 이형제 인발공정을 해석하기 위한 선형원추형 인발금형 형상을 표현하는 방법을 제안하고자 한다.

선형원추형 인발금형의 형상을 표현하기 위하여 Yang 등⁽¹⁰⁾이 제안한 방법을 도입하여 금형의 입·출구형상을 푸리에급수(Fourier series)로 표현하였으며, 입구와 출구를 잇는 블렌딩함수(blending function)를 선형 다이

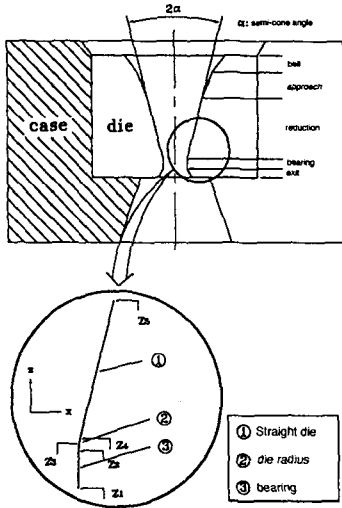


Fig. 2 A schematic diagram of a drawing die and a definition of numerical boundary of a drawing die

부, 다이꼭질부 및 평형부 등의 3개의 구간으로 구분하여 정의하므로써 다이꼭질부와 평형부를 고려한 실제 선형 원추형 금형 형상을 표현하고자 한다. 이를 위하여 각 구간의 경계에서 연속이고 기울기가 동일하도록 경계조건을 부여하여 블랜딩함수를 결정하였다. 따라서 입·출구 단면이 푸리에급수에 의한 해석함수 $R_i(\theta)$ 와 $R_o(\theta)$ 로 주어지면, 임의의 중간단면 형상 $R(\theta, z)$ 은 블랜딩함수 $v(z)$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$R(\theta, z) = R_i(\theta)v(z) + R_o(\theta)(1 - v(z)) \quad (3)$$

금형 형상의 표현식은 두 개의 매개변수를 이용한 원통 좌표계로 다음과 같이 표현된다.

$$r(\theta, z) = R(\theta, z) \cos(\theta) \hat{i} + R(\theta, z) \sin(\theta) \hat{j} + z \hat{k} \quad (4)$$

Fig. 2는 전형적인 각재형 인발금형 형상이며, 인발금형은 선형 다이부, 다이꼭질부 및 평형부의 3부분으로 구분하였다.

따라서 각 구간에 대한 블랜딩함수와 금형의 중간단면 형상 $R(\theta, z)$ 을 정의하면 다음과 같다.

1) 구간 1 : 선형 다이부

구간 1에서 블랜딩함수 $v_1(z)$ 의 경계조건은

$$v_1(z_5) = 1, \quad v_1(z_3) = 0 \quad (5)$$

이며, 여기서 z_5 를 좌표계의 원점에 위치하여 $z_5=0$ 가 되도록 수식을 유도한다. 식(5)의 두 경계조건으로부터 선형 다이부를 표현하기 위한 일차다항식인 블랜딩함수가 구성되며, 이 블랜딩함수로부터 금형의 중간단면형상은 입·출구사이에서 선형적으로 변화되는 함수로 표현된다. 유도된 블랜딩함수와 중간단면형상에 대한 식은 다음과 같다.

$$v_1(z) = 1 - \frac{z}{z_3} \quad (6)$$

$$R_1(\theta, z) = R_i(\theta)v_1(z) + R_o(\theta)(1 - v_1(z)) \quad (z_4 \leq z \leq z_5) \quad (7)$$

2) 구간 2 : 다이꼭질부

구간 2에서는 구간 1과 구간 3과의 경계조건을 고려하여 연속이고 기울기가 동일하도록 블랜딩함수를 정의해야 한다. 블랜딩함수 $v_2(z)$ 의 경계조건은

$$v_2(z_4) = 1, \quad v_2(z_2) = 0 \quad (8)$$

이고, 각 구간의 경계에서 기울기가 같은 미분가능한 연속식을 얻기 위해서 다음의 경계조건이 만족되어야 한다.

$$\left. \frac{\partial R_1(\theta, z)}{\partial z} \right|_{z=z_4} = \left. \frac{\partial R_2(\theta, z)}{\partial z} \right|_{z=z_4} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial R_2(\theta, z)}{\partial z} \right|_{z=z_2} = \left. \frac{\partial R_3(\theta, z)}{\partial z} \right|_{z=z_2} \quad (10)$$

식(9)과 (10)에 대해 유도된 각 구간의 경계에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial v_2(z)}{\partial z} \right|_{z=z_4} = \frac{1}{z_4 - z_3} = \alpha \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial v_2(z)}{\partial z} \right|_{z=z_2} = 0 \quad (12)$$

여기서, α 는 일정한 상수이다. 구간 1과 구간 3을 잇는 구간 2는 다이꼭질부를 표현하기 위하여 식(8), (11) 및 (12)의 4개의 경계조건을 만족해야 하므로 다음과 같은 3차다항식의 블랜딩함수가 결정된다.

$$v_2(z) = a_3z^3 + a_2z^2 + a_1z + a_0 \quad (13)$$

여기서, 3차다항식의 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$a_3 = -\left[\frac{2 - \alpha(z_4 - z_2)}{(z_4 - z_2)} \right]$$

$$a_2 = \frac{1}{(z_4 - z_2)^2} + \left[\frac{2 - \alpha(z_4 - z_2)}{(z_4 - z_2)} \right] (z_4^2 + z_4z_2 - 2z_2)$$

$$a_1 = \frac{2z_2}{(z_4 - z_2)^2} + \frac{z_2[2 - \alpha(z_4 - z_2)]}{(z_4 - z_2)^3} \left[3z_2 - \frac{2(z_4^2 + z_4z_2 - 2z_2^2)}{(z_4 - z_2)} \right]$$

$$a_0 = \frac{z_2^2}{(z_4 - z_2)} - \frac{z_2^2[2 - \alpha(z_4 - z_2)]}{(z_4 - z_2)^3} \left[2z_2 - \frac{(z_4^2 + z_4z_2 - 2z_2)}{(z_4 - z_2)} \right]$$

다이코플부를 표현하기 위한 3차다항식의 블렌딩함수가 결정되었으며 다이코플부의 시작단면 $R_1(\theta, z_4)$ 과 끝단면, 즉 금형의 출구 단면 $R_o(\theta)$ 에 대한 중간단면형상은 다음과 같다.

$$R_2(\theta, z) = R_1(\theta, z_4)v_2(z) + R_o(\theta)(1 - v_2(z)) \quad (z_2 \leq z \leq z_4) \quad (14)$$

3) 구간 3 : 평형부

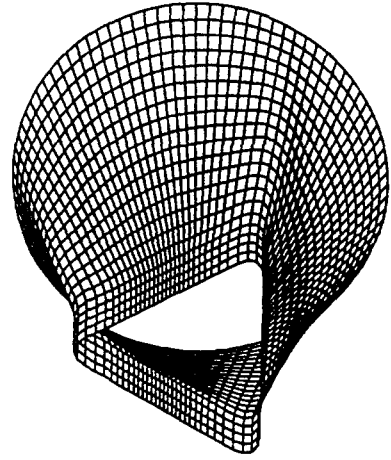
구간 2와 구간 3의 경계에서 연속임은 앞서 살펴보았다. 평형부에서의 블렌딩함수는 축방향에 대해 일정한 값을 가지므로 금형의 중간 단면형상은 다음 식과 같이 z방향에 무관하다. 따라서 중간단면형상은 출구형상 값만으로 표현된다.

$$R_3(\theta, z) = R_o(\theta) \quad (z_1 \leq z \leq z_2) \quad (15)$$

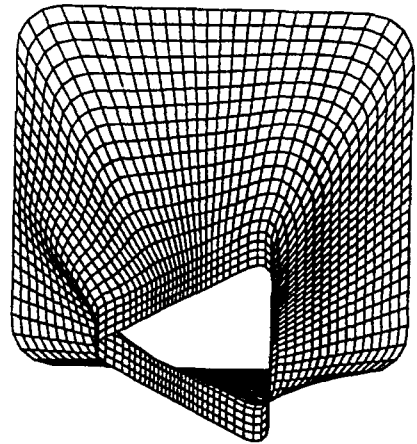
각 구간의 경계에서 θ 방향에 대한 경계조건도 만족해야 한다. 즉 구간 1과 2의 경계 및 구간 2와 3의 경계에 대해 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\left. \frac{\partial R_1(\theta, z)}{\partial \theta} \right|_{z=z_4} = \left. \frac{\partial R_2(\theta, z)}{\partial \theta} \right|_{z=z_4} \quad (16)$$

$$\left. \frac{\partial R_2(\theta, z)}{\partial \theta} \right|_{z=z_2} = \left. \frac{\partial R_3(\theta, z)}{\partial \theta} \right|_{z=z_2} \quad (17)$$



(a) The round-to-triangular shape die



(b) The square-to-triangular shape die

Fig. 3 Straight converging die defined by the present study

각 구간에서 식(11-12)와 식(16-17)은 모두 만족되므로 제시한 방법으로 정의된 선형원추형 금형은 C¹연속임을 알 수 있다.

이상과 같이 제안한 방법은 임의의 입구형상에서 임의의 출구형상을 갖는 선형원추형 인발금형을 정의할 수 있다. 또한 다이코플부 및 평형부를 표현하므로써 실제 금형 형상을 표현할 수 있다. Fig. 3은 본 연구에서 제시한 방법으로 정의된 선형원추형 인발금형 형상을 나타낸 것이다.

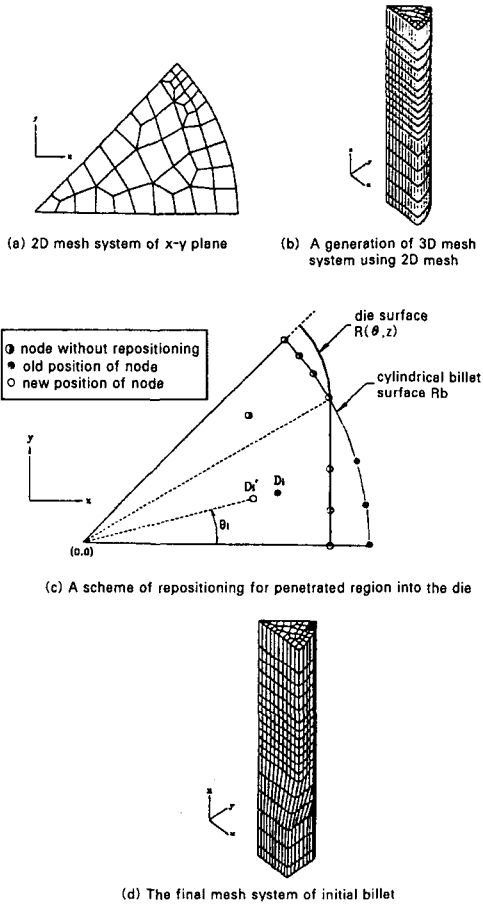


Fig. 4 A procedure of mesh system generation for shaped drawing process

3.2 초기소재의 유한요소 격자망 구성

인발공정의 3차원 유한요소해석을 위해서 소재의 3차원적인 유한요소 격자망의 구성이 필요하며, 다음과 같은 방법으로 구성한다.

먼저 Fig. 4(a)와 같이 2차원 평면상에서 임의의 소재의 단면에 대해 선형사변형 격자를 이용하여 적절한 유한요소 격자망을 구성한 후, 이를 Fig. 4(b)와 같이 z축방향으로 적층하여 3차원 선형육면체 유한요소 격자망을 구성한다. 인발공정에서는 초기소재가 인발금형의 출구로 빠져나와 있으므로, 이를 고려하기 위하여 Fig. 4(c)와 같이 원통형 소재를 금형내부에서 금형 형상에 맞게하기 위하여 금형을 파고드는 영역에 대해서 절점 좌표의 재구성(repositioning)을 통하여 새로운 유한요소 격자망을 구성한다. 절점의 좌표를 재구성하는 방법은 다음과 같다.

$$D'_i = \frac{R(\theta_i, z) \cdot D_i}{R_b}, \quad (i = 1, 2, \dots, n_p) \quad (18)$$

$$r_i(\theta, z) = D'_i \cos(\theta_i)\hat{i} + D'_i \sin(\theta_i)\hat{j} + z\hat{k} \quad (19)$$

여기서 n_p 는 절점좌표의 재구성이 요구되는 절점의 수, θ_i 는 임의의 절점의 x축에 대해 반시계방향으로 이루고 있는 각도, D_i 는 x-y평면상에서 절점좌표의 재구성되기전 절점의 원점에서의 반경방향 거리, D'_i 는 x-y평면상에서 재구성된 절점의 위치, R_b 는 초기 원통형소재의 반경이고 $r_i(\theta, z)$ 는 새롭게 재구성된 절점의 좌표이다. 절점의 좌표가 재구성된 이형체 인발공정의 초기소재의 최종 유한요소 격자망은 Fig. 4(d)와 같다. 이와 같은 방법은 간단 하면서도 효과적이기 때문에 유사 분야의 유한요소 격자구성에도 활용될 수 있으리라 생각된다.

3.3 이형체 인발공정의 초기 모델링

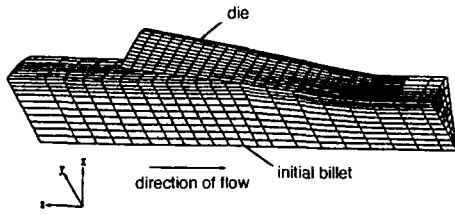
선형원추형 인발금형 형상을 정의하였으며, 초기소재의 유한요소 격자망의 구성시 소재 각도의 선정은 정육각형, 정사각형 및 직사각형의 단면에 대해 각각 30°, 45° 및 90° 단면으로 초기소재를 구성하였다. 각각의 단면 형상에 대한 인발공정의 유한요소해석을 위한 초기 모델링은 Fig. 5와 같다.

초기소재의 형상에서 인발척(chuck)에 물리기 위해 인발금형의 출구를 빠져나온 부분과 금형표면에 접촉한 부분 및 인발금형내부에 있지않은 초기 원형봉의 소재부분에 대해 조밀도를 달리하여 유한요소 격자망을 구성하였다. 또한 본 연구에서 제안한 방법에 의해 정의된 선형원추형 금형 형상을 가시적으로 표현하기 위하여 금형을 격자로 나타내었다. 선형 다이부는 물론 다이곡률부와 평형부가 고려되어 있음을 볼 수 있다.

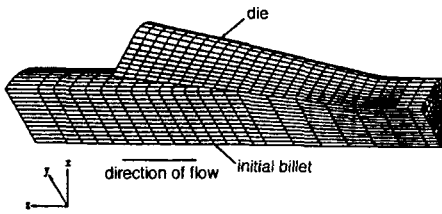
4. 결과 및 고찰

4.1 기존의 실험결과와의 비교

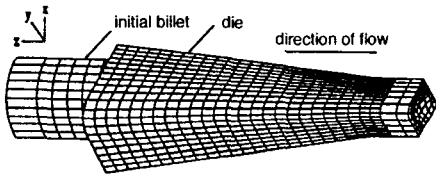
앞서 제시한 금형 형상의 표현방법으로 정의한 정사각형 인발공정에 대해 3차원 강소성 유한요소법을 통해 해석하고, 그 결과를 실험치⁽⁴⁾와 비교하고자 한다. 금형 형상은 Fig. 6(a)과 같으며, 금형의 입·출구형상이 모두 정사각형 단면인 선형원추형 인발금형 형상이다. 본 연구에서 제시한 방법으로 표현된 금형 형상은 Fig. 6(b)과



(a) The hexagonal drawing process



(b) The square drawing process



(c) The rectangular drawing process

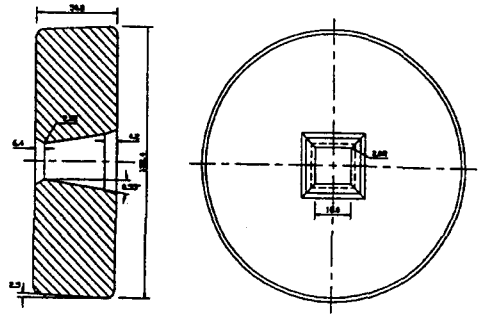
Fig. 5 Initial modeling in the shaped drawing of a polygonal section from a round billet

같으며 선형 다이부, 다이꼭질부 및 평형부가 연속인 선형원추형 인발금형을 나타내고 있다.

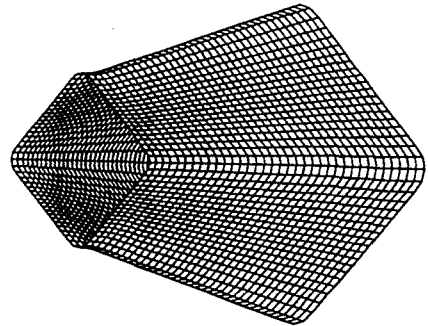
실험에 사용된 재료는 연강이며 응력-변형률관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 790.85\bar{\epsilon}^{0.2321} [MPa] \quad (20)$$

Basily⁽⁴⁾는 단면적감소를 37% 및 43%에 대해 실험을 수행하였으며, 각각의 실험결과에 대해 상계법으로 해석하여 비교하였다. 그 결과, 마찰상수 m 은 0.12이며 본 연구에서는 각각의 단면적감소율에 대해 마찰상수를 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 및 0.18로 시뮬레이션을 수행하여 기존의 실험결과와 인발응력을 비교하였으며, 각 단면적감소율에 대한 인발응력을 Fig. 7에 도시하였다.



(a) Dimensions of a drawing die by Basily (4)



(b) The square-to-square shape die constructed by the present study

Fig. 6 Comparison of (a) practical die and (b) die-modeling

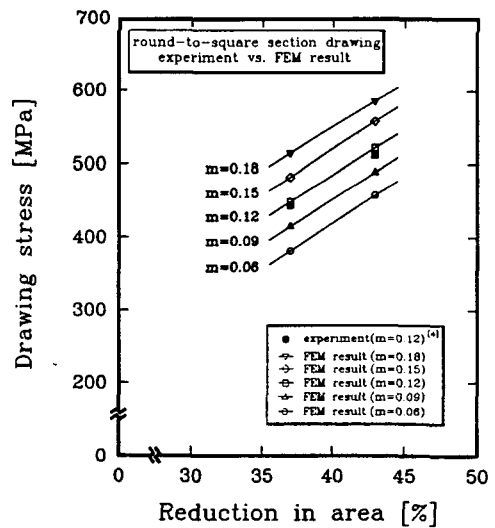


Fig. 7 Comparison between results of experiment (4) and FEM result

단면적감소를 37% 및 43%에 대한 실험결과는 각각 442 MPa 및 514 MPa이다. 각각의 단면적감소율에 대해 마찰상수를 달리하여 유한요소해석을 수행하였으며, 실험 조건과 동일한 마찰상수인 $m=0.12$ 에 대한 결과는 대략 449 MPa 및 522 MPa로써 실험결과와 비교적 잘 일치하므로 본 연구에서 수행한 유한요소해석 결과가 타당함을 알 수 있다.

4.2 각재형 인발공정의 유한요소해석 결과 및 고찰

4.2.1 공정조건 및 해석방법

본 연구에서 제안한 인발금형 형상을 이용하여 원형봉 소재의 각재형 인발공정에 대한 비정상상태 3차원 강소성 유한요소해석을 수행하여, 그 결과를 축대칭 공정인 원형 단면의 인발공정과 비교하고자 한다.

시뮬레이션에 사용된 재료는 구리(O.F.H.C. copper)이며 수치계산을 위해 근사화된 응력-변형률의 관계는 아래와 같다⁽⁹⁾.

$$\bar{\sigma} = 289.56 \left(1 + \frac{\bar{\epsilon}}{0.3518} \right)^{0.28} [MPa] \quad (21)$$

시뮬레이션을 위한 출구형상의 모델은 Fig. 8과 같으며 정다각형인 정육각형 및 정사각형과 비정다각형인 직사각형의 두가지 단면형상에 대해 동일한 공정조건, 즉 단

면적감소율은 35%, 다이반각은 8°, 마찰상수 m 은 0.1, 다이폭틀은 2.5mm이고 평형부길이는 1mm에 대해 2차원 축대칭 문제와 비교하고자 한다. 정사각형 및 직사각형 단면의 형상을 구분하기 위하여 장축(major axis)과 단축(minor axis)의 비인 종횡비(aspect ratio : A.R = 장축 / 단축)로 나타내면, 정사각형은 1.0이고 직사각형은 1.333과 1.667이 된다.

각각의 인발공정은 단면적감소율은 동일하지만 서로 다른 둘레길이기(perimeter ratio = 금형의 출구형상의 둘레길이 / 초기소재의 둘레길이)를 가지며, 이에 대한 영향을 조사하였다. 각각의 단면에 대한 둘레길이는 Table 1에 나타나 있다.

4.2.2 해석 결과의 비교 및 고찰

축대칭 인발 및 압출공정에서 단면적감소율은 중요한 공정인자이다. 하지만 3차원 인발 및 압출공정에서는 단면적감소율이 동일해도 입·출구형상에 따라 둘레길이가 다르기 때문에 이를 공정변수로 선정하여 그 영향을 조사하였다.

Table 1과 같이 단면적감소율 35%에 대해 둘레길이는 원형에 대해 0.806, 정육각형에 대해 0.828, 정사각형에 대해 0.855이고 직사각형에 대해 종횡비가 1.333, 1.667에 대해 각각 0.871, 0.896이다. 따라서 출구단면의 형상이 원형에 가까울수록 둘레길이는 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 공정에 대한 비정상상태 유한요소해석에 의해 스트로크에 대한 인발응력을 나타내고 있다. 인발응력은 점차적으로 증가하여 정상상태에 도달함을 볼 수 있다.

정상상태에 도달시의 인발응력은 Table 1과 같이 2차원 축대칭 문제인 원형 단면의 인발공정에서 인발응력은

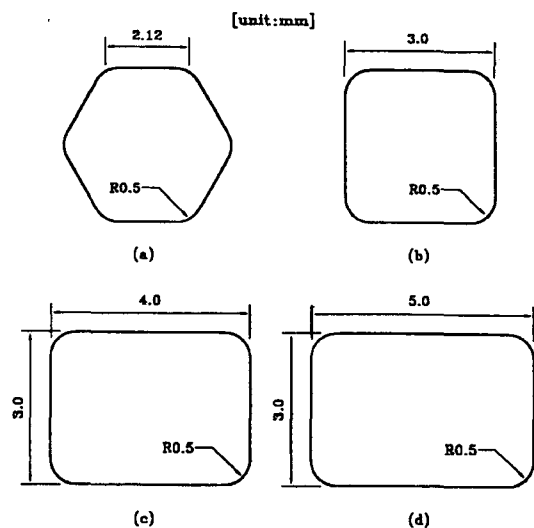


Fig. 8 The exit cross-sectional shape of die for simulation (a) hexagonal section (b) square section (c) rectangular sec.(1.333) (d) rectangular sec.(1.667)

Table 1 Results of each shaped drawing process

Section [aspect ratio]	Perimeter ratio	Drawing stress [MPa]	Increase of Perimeter ratio[%]	Increase of drawing stress [%]	Diameter of round bar [mm]
Circle	0.806	207.78	0	0	1.00
Hexagon	0.828	210.66	1.39	2.73	4.77
Square [1.0]	0.855	222.94	7.30	6.08	4.15
Rectangle [1.333]	0.871	248.17	19.44	8.06	4.80
Rectangle [1.667]	0.896	260.61	25.43	11.17	5.38

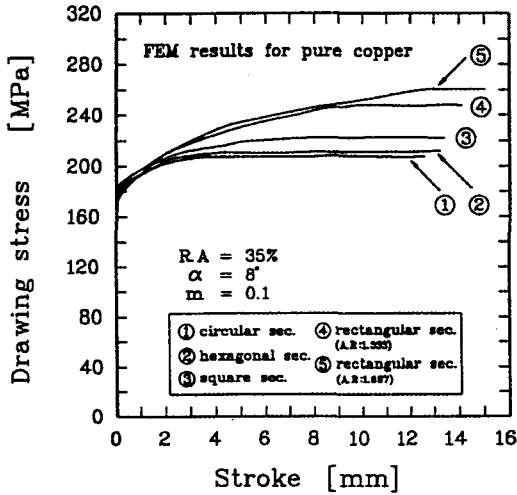


Fig. 9 Comparisons of drawing stresses for the shaped drawing process of the various polygonal sections and circular section rod

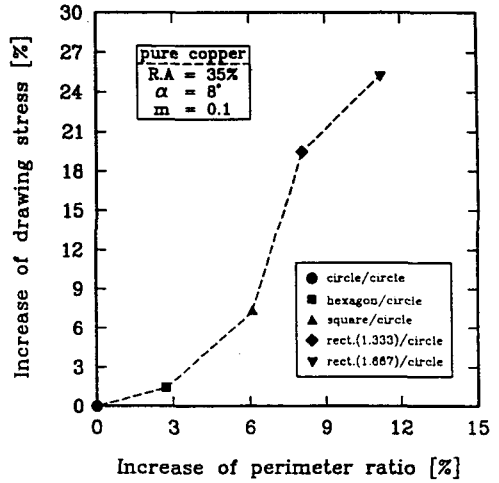


Fig. 10 Relationship between the drawing stress and the perimeter ratio

207.78 MPa이고 각재형 단면의 이형재 인발공정에서 인발응력은 모두 원형 단면 보다 높게 나타났다. 즉, 정육각형 단면은 210.66 MPa, 정사각형 단면은 222.94 MPa이고 직사각형에 대해 종횡비 1.333, 1.667에 대해 각각 248.17 MPa, 260.61 MPa이다. 이것은 동일한 단면적 감소를 가진 이형재 인발공정에서 출구형상이 다르기 때문이며 이를 본 연구에서는 둘레길이비로 나타낸다. 즉 출구 단면적이 같을 경우, 출구단면의 둘레길이는 출구단면형상의 복잡한 정도를 나타내고 이를 소재의 둘레길이로 나눈, 둘레길이비를 사용함으로써 이형재 인발공정에서 변형의 복잡한 정도를 나타낼 수 있다. 또한 둘레길이비가 증가하면, 마찰로 소비되는 에너지가 증가한다. 둘레길이비의 증가에 따라 인발응력의 증가를 알 수 있다.

Fig. 10은 축대칭 문제인 원형 단면의 인발공정에 대한 각재형 인발공정에서 둘레길이비의 증가에 따른 인발응력의 증가정도를 도시한 것이다.

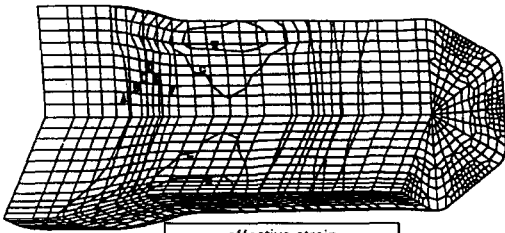
비록 동일한 단면적감소를 일지라도 원형 단면에 비해 둘레길이비가 큰 각재형 단면의 인발공정의 인발응력이 높음을 볼 수 있으며, 둘레길이비가 증가할수록 인발응력 또한 증가함을 볼 수 있다. Fig. 11은 각각의 인발공정에 대한 유효변형을 분포를 나타낸 것이다.

각 공정에 대해 정상상태가 되도록 충분히 인발하였으며, Fig. 9와 같이 모든 공정에서 유동방향으로 유효변형을 분포가 균일하기 때문에 정상상태에 도달하였음을 확

인할 수 있었다.

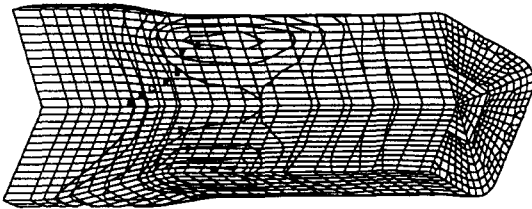
Fig. 11(a)은 정육각형단면의 인발공정에 대한 결과이다. 최대 유효변형률은 평형부를 빠져나온 소재의 변(edge)쪽 표면에 존재하며, 코너쪽보다 변쪽의 단면적감소가 크기 때문에 유효변형률이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 평형부를 빠져나온 소재의 코너쪽 유효변형률 분포가 표면에서 약간 안쪽에서 보다 높음을 알 수 있는데, 이것은 비정상상태 유한요소해석에 의한 결과로서, 코너부에서 소재가 완전히 채워지지 않았음을 알 수 있다. Fig. 11(b)은 정사각형단면의 인발공정에 대한 해석 결과를 도시한 것으로, 유효변형률 분포는 정육각형과 동일한 결과임을 볼 수 있으며, 평형부를 빠져나온 소재의 코너부 유효변형률 분포가 정육각형의 경우에 비해 표면에서 더 안쪽에서 높게 분포함을 볼 수 있는데, 이것은 정육각형에 비해 코너채움(corner filling)이 덜 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 원형봉의 각재형 인발공정에서 코너채움과 같이 코너부에서의 금속유동을 예측하기 위해서는 비정상상태 유한요소해석이 필요하다. Fig. 11(c), (d)은 직사각형단면의 종횡비 1.333, 1.667에 대한 결과이다. 최대 유효변형률은 평형부를 빠져나온 소재에서 장축쪽보다 단면적감소가 큰 단축쪽의 소재표면에 존재하며 그 값은 종횡비가 큰 단면형상의 인발공정에서 높게 나타남을 확인할 수 있다.

전체적으로 정육각형에 비해 정사각형 단면에서 유효변



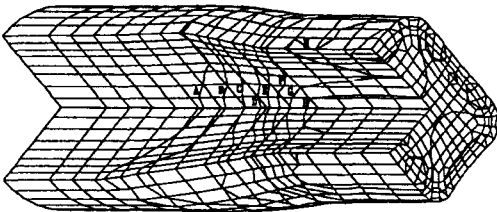
effective strain							
A	B	C	D	E	F	G	H
0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5

(a) The hexagonal section from a round billet



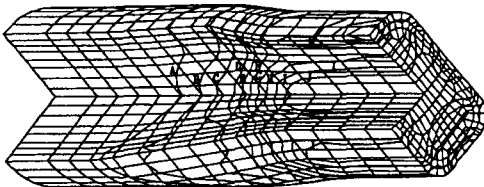
effective strain							
A	B	C	D	E	F	G	H
0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6

(b) The square section from a round billet



effective strain								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65

(c) The rectangular section from a round billet (aspect ratio: 1.333)



effective strain									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7

(b) The rectangular section from a round billet (aspect ratio: 1.667)

Fig. 11 Effective strain distribution by nonsteady state finite element analysis

형률이 높게 나타났으며, 정사각형 보다는 직사각형 단면에서 유효변형률이 높게 분포함을 알 수 있으며, 이것은 앞서 고찰한 인발응력의 결과와 동일하다. 즉, 둘레길이비가 높은 공정에서 유효변형률과 인발응력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 이형재 인발공정을 3차원 강소성 유한요소해석하기 위하여 선형원추형 금형 형상을 표현하는 방법 및 초기소재 모델링 절차를 제안하였으며, 이에 따라 정다각형 및 비정다각형 등의 각재형 인발공정을 해석하였다. 이상의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이형재 인발공정을 해석하기 위하여 다이코플부 및 평형부를 고려한 임의형상의 입·출구단면을 가진 선형원추형 인발금형 형상을 C¹연속인 함수로 표현하므로써 실제 금형의 형상을 정의하였다.

(2) 기존의 실험결과와 비교하므로써 본 연구에서 제시한 금형 형상의 표현방법 및 초기소재의 유한요소 격자망을 이용한 강소성 유한요소해석 결과의 타당함을 알 수 있었다.

(3) 3차원 강소성 유한요소해석에 의해 이형재 인발공정에서 둘레길이비는 중요한 공정변수임을 알 수 있었으며, 동일한 단면적감소를 일지라도 둘레길이비가 증가함에 따라 인발응력 또한 증가함을 보였다.

후 기

본연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. B. L. Juneja and R. Prakash, "An Analysis for Drawing and Extrusion of Polygonal Sections," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 15, pp. 1~30, 1975.
2. R. Prakash and Q. M. Khan "An Analysis of

- Plastic Flow through Polygonal Converging Dies with Generalized Boundaries of The Zone of Plastic Deformation," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 19, pp. 1~19, 1979.
3. B. B. Basily and D. H. Sansome "Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section Rod from Round Bar," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 201~208, 1976.
 4. B. B. Basily, The Mechanics of Drawing Polygonal Section Rod from Round Bar, Ph.D Thesis, University of Aston, Birmingham, UK, 1976.
 5. J. S. Gunasekera and S. Hoshino, "Analysis of Extrusion or Drawing of Polygonal Sections Through Straightly Converging Dies," *Trans. ASME*, Vol. 104, pp. 38~45, 1982.
 6. C. R. Bo r and W. D. Webster, Jr., "Direct Upper-Bound Solution and Finite Element Approach to Round-To-Square Drawing," *Trans. of ASME*, Vol. 107, pp. 254~260, 1985.
 7. O. C. Zienkiewicz, The finite element method, 3rd Ed. McGraw-Hill, New York, 1977.
 8. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, 1989.
 9. C. C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression," *Application of Numerical Methods to Forming Process*, Winter Annual Meeting of ASME, AMD 28, pp. 163~174, 1978.
 10. D. Y. Yang, C. H. Han and M. U. Kim, "A Generalized Method for Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Arbitrarily-Shaped Sections," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 28, pp. 517~534, 1986.