〔논문〕 한국소성가공학회지(1997), 제6권 제5호
J. of the Korean Society for Technology of Plasticity Vol. 6, No. 5, (1997)

강-소성 유한요소법의 3차원 역추적 기법을 적용한 코이닝 공정설계

최한호* · 변상규* · 강범수**

(1997년 6월 7일 접수)

Process Design in Coining by Three-Dimensional Backward Tracing Scheme of Rigid-Plastic Finite Element Method

H.H. Choi, S.K. Byun and B.S. Kang

Abstract

The backward tracing scheme of the finite element analysis, which is counted to be unique and useful for process design in metal forming, has been developed and applied successfully in industry to several metal forming processes. Here the backward tracing scheme is implemented for process design of three-dimensional plastic deformation in metal forming, and it is applied to a precision coining process. The contact problem between the die and workpiece has been treated carefully during backward tracing simulation in three-dimensional deformation. The results confirm that the application of the developed program implemented with backward tracing scheme of the rigid plastic finite element leads to a reasonable initial piercing hole configuration. It is concluded that three-dimensional extension of the scheme appears to be successful for industrial applications.

Key Words : Three-Dimensional Backward Tracing Scheme(3차원 역추적 기법), Forward Loading Simulation(전방하중과정 시뮬레이션), Rigid-Plastic Finite Element Analysis (강-소성 유한요소 해석), Hexahedral Element(8절점 육면체요소), Coining Process(코이닝 공정).

1. 서 론

금속성형 기술은 제품설계, 공정설계, 소재, 윤활, 프레스 기계 등의 요소 기술이 조합된 총체적 기술이며, 이러한 기술들이 고도로 균형 있게 조화가 이루어지면 고정도 제품의 안정적 생산이 가능하다. 이중 공정설계에는 공정결정, 금형 설계, 예비성형체(preform) 설계 등과 같은 영역이 포함되며 여러 가지 공정이 조합된 다단계 공정으로 이루어진 복잡한 형상의 부품 개발에서 이의 효율적인 수행은 매우 중요한 요소라 할 것이다. 따라서 금속성형 공정의 설계에서 중요한 사항 중의 하나는 예비성형체의 설계와 공정절차의 설계이다. 현재 실제 산업에서는 이러한 사항을 설계자의 경험적 지침, 직관 및 실험에 의한 시행착오 과정을 거쳐서 행하고 있다. 그러나 이러한 접근방법은 다품종 소량생산으로 전환되고 있는 실정에서는 시간 및 비용면에서 효과적이지 못하며, 특히 정밀성형이

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

요구되는 경우는 심각한 문제가 된다.[1~3]

Park, Rebelo 및 Kobayashi[4]는 유한요소법의 능력을 이용하여 금속성형 공정에 있어서의 예비성형체 설계를 효과적으로 수행할 수 있는 역추적 기법(backward tracing scheme)이라는 새로운 접근 방법을 제안하였다. 이 방법은 유한요소법을 이용하여 주어진 최종 형상으로 부터 실제 성형공정에 있어서의 소재의 하중과정(loading path)변형을 역으로 추적하는 것이다. 또한 역추적 기법을 적용하여 셸 노이징(shell nosing)공정에서의 예비성형체 설계[4]와 압연공정에서 발생하는 소재 끝부분의 소재손실을 없애기 위한 소재형상의 설계를 하였다.[5]

이후 역추적기법은 여러가지 금속성형 공정의 설계에 광범위하고 효과적으로 적용되었다.[6~10] Hwang등[6]은 축대칭 디스크의 단조공정에서 금형과 소재사이에 마찰이 존재할 경우, 소재의 자유표면이 균일하게 변형되는 디스크의 생산을 위한 예비성형체의 설계를 행하였으며, 이들은 이를 더욱 발전시켜 온도계산이 포함된 역추적기법을 이용하여 휄 노이징공정에서의 예비성형체 설계를 하였다.[7] Kang등[8]은 에어포일형 블레이드를 플래쉬없게 단조하기 위한 예비성형체의 설계를 행하였으며, Kim등[9]은 축대칭 H-형상의 부품을 플래쉬없게 단조하기 위한 예비성형체의 설계를 행하였다. 또한 Kang등은 링, 다단계 헤딩 및 등속조인트 단조공정[10]의 설계에 역추적 기법을 이용하였다.

그러나 위의 연구는 모두 2차원 유한요소법을 이용한 역추적기법의 적용이었다. 최근 컴퓨터연산 기능의 급속한 향상과 3차원 자유곡면의 모델링 및 격자재구성 문제 등의 해결을 통한 3차원 유한요소법이 실제 금속성형 공정의 해석에 적용되고 있으며, 이에 대한 계속적인 연구가 활발히 진행되고 있다.[11~16] 그러므로 2차원 역추적기법을 3차원 유한요소법에 확장하여 도입할 필요가 있다. Kang등[17]은 3차원 링 압연공정의 해석에 최초로 역추적 기법을 확장 적용시켰으나, 이는 실제 격자시스템(actual mesh system)과 공간 격자시스템(spatial mesh system)을 이용하여 공간 격자시스템에서 구한 계산정보를 실제 격자시스템에 보간하는 방법을 이용한 링 압연공정에 한정된 연구였다. 또한 Kang등[18]은 간단한 금속성형 공정인 사각 블럭소재의 업셋팅(upsetting)공정과 실린더형 소재의 측면압축(side pressing)공정의 해석을 수행하였다. 위의 두공정에 대한 전방하중과정 시뮬레이션(forward loading simulation)과 역추적 시뮬레이션을 통하여 3차원 역추적 기법의 타당성과 일반 3차원 금속성형 공정의 예비성형체 설계에 적용 가능성을 보였다.

본 논문에서는 일반적인 3차원 강-소성 유한요소법에 역추적 기법을 포함한 일반 3차원 역추적 기법을 개발하였으며, 이 기법을 적용한 코이닝 공정설계를 수행하여 그 실용 가능성을 제시하였다. 코이닝 공정을 위한 초기 피어싱 홀(piercing hole)의 예비형상 설계를 전방하중 시뮬레이션과 3차원 역추적 기법을 이용하여 설계하였다.

2. 이론 해석

2.1 강-소성 유한요소법의 역추적 기법

금속성형 공정의 해석에 효과적이며, 현재 널리 사용되고 있는 수치해법인 3차원 강-소성 유한요소법에 대한 이론과 수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다[19]. 본 논문의 완전한 구성을 도모하기 위하여 강소성 유한요소법과 역추적 기법에 대하여 간단히 언급한다.

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 강-소성 재료에 대한 1차 변분범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma}\delta\dot{\bar{\varepsilon}}dV + K\int_V \dot{\varepsilon}_v\delta\dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i\delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}$, $\dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{2/3}(\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij})^{1/2}$, σ'_{ij}는 편차응력, f_i는 표면외력, u_i는 속도성분, $\dot{\varepsilon}_{ij}$는 변형률속도, $\dot{\varepsilon}_v$는 체적 변형률속도이다.

금형과 재료의 마찰력, 변형률 속도의 옵셋 정도 등을 고려하여 식(1)에 대입하고, 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점속도벡터 $\tilde{V}$에 대한 비선형 방정식이 된다.

$$\Omega(\tilde{V}) = K(\tilde{x},\bar{\varepsilon},\dot{\bar{\varepsilon}})\tilde{V} - F(\tilde{x},\tilde{v}) = 0 \quad (2)$$

여기서 K는 강성행렬(stiffness matrix), F는 힘 벡터(load vector), $\tilde{x}$는 절점좌표 벡터이다.

본 연구에서는 유한요소 분할화 과정에서 3차원 8절점 육면체요소(hexahedral element)를 사용하였다. 식(2)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

역추적 기법은 최종 제품의 형상과 공정조건이 주어져 있을 경우, 변형과정에 있어서 임의 단계에서의 제품형상

을 예측하는 것이다. 전방하중과정 시뮬레이션과 마찬가지로 역추적 기법을 이용한 시뮬레이션 과정에서도 유한요소해석이 이용된다.

Fig. 1은 역추적 기법의 개념 및 전방하중과정과 역추적 과정 동안의 형상변화를 도식적으로 나타낸 것이다.

전방하중과정 시뮬레이션 ($t \geq t_o$)의 경우는 시간 $t = t_o$에서의 식(2)의 해 $\tilde{V}_o$가 다음 단계인 $t = t_{o+1} = t_o + \Delta t'$에서의 해를 구하는데 이용되나, 역추적($t \leq t_o$)의 경우는 시간 $t = t_{o-1} = t_o - \Delta t$에서의 $\tilde{x}_{o-1}$과 $\bar{\varepsilon}_{o-1}$는 식(2)와 함께 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\tilde{X}_o - \tilde{X}_{o-1} = \tilde{V}_{o-1}\Delta t,\ \bar{\varepsilon}_o - \bar{\varepsilon}_{o-1} = \dot{\bar{\varepsilon}}_{o-1}\Delta t \tag{3}$$

주어진 시간 증분에 대해서, 시간 t_{o-1}에서 식 (3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$K(\tilde{V}_{o-1}, \tilde{X}_o, \bar{\varepsilon}_o, \dot{\bar{\varepsilon}}_{o-1})\tilde{V}_{o-1} - F(\tilde{X}_o, \tilde{V}_{o-1}) = 0 \tag{4}$$

여기서 $\tilde{x}_o$와 $\bar{\varepsilon}_o$는 이미 알고 있는 값이며, $\dot{\bar{\varepsilon}}_{o-1}$은 $\tilde{V}_{o-1}$의 함수이다. 따라서 식 (4)는 시간 t_{o-1}에서의 경계조건들이 주어진다면 $\tilde{V}_{o-1}$에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 $t_{o-2}, t_{o-3}\cdots$대한 해를 구해나가면, 전 성형공정에 대한 변형전의 소재 형상을 유도할 수 있다.

2.2 금형의 표시 및 금형-소재의 경계조건

3차원 형상의 금형을 표시하기 위해서, 본 연구에서는 네 절점을 가지는 사각형 패치(patch)를 사용하였다. 이때 한 패치는 네 절점 좌표의 입력값으로 부터 3차원 공간상에서 그 패치의 위치가 정해지게 된다. 이 패치의 위치는 네 절점의 좌표값으로 부터 얻은 법선벡터(normal vector)로 표시되며, 이 법선벡터로부터 그 패치를 포함하는 평면방정식을 구하게된다. 이때 평면방정식은 다이와 소재절점의 접촉시간을 구하는데 이용되며, 법선벡터는 다이와 소재의 접촉면의 경계조건을 정하는데 사용되어진다. 이러한 패치들의 많은 조합을 통해 3차원 형상의 다이를 표시하게 된다.

Fig. 2는 3차원 공간상에 위치한 한 다이패치의 그림이며, $\tilde{n}$은 패치의 법선벡터를 나타낸다. 패치의 평면방정식은

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{5}$$

로 표시되어지고, 이때 법선벡터 $\tilde{n}$=(A,B,C)는 x,y,z의 성분으로 표시되어진다. 패치의 법선벡터 $\tilde{n}$은 $\vec{ac}$와 $\vec{bd}$의 벡터곱으로 표시되어진다.

$$\tilde{n} = \vec{ac} \times \vec{bd} \tag{6}$$

여기서, $\vec{ac}$와 $\vec{bd}$는 다음과 같다.

$$\vec{ac} = (x_3 - x_1)\hat{i} + (y_3 - y_1)\hat{j} + (z_3 - z_1)\hat{k}$$
$$\vec{bd} = (x_4 - x_2)\hat{i} + (y_4 - y_2)\hat{j} + (z_4 - z_2)\hat{k}$$

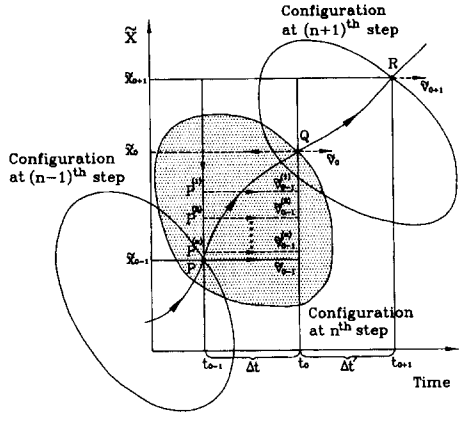

Fig. 1 Concept of the backward tracing scheme and update of the configuration during forward loading and backward tracing

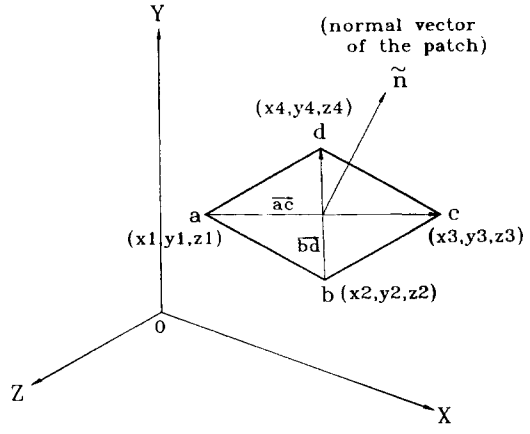

Fig. 2 A die patch represented by rectangular element

편의상 $\vec{ac} = (p_1, p_2, p_3)$, $\vec{bd} = q_1, q_2, q_3$로 표시할 때, 법선벡터 $\tilde{n} = (A,B,C)$의 성분은 다음과 같다.

$$A = p_1 \cdot q_3 - p_3 \cdot q_2$$
$$B = p_3 \cdot q_1 - p_1 \cdot q_3$$
$$C = p_1 \cdot q_2 - p_2 \cdot q_1 \qquad (7)$$

식(7)과 그 패치의 임의의 한절점 좌표를 식(5)에 대입하여 계수 D를 구함으로서 그 패치를 포함하는 평면 방정식을 구하게 된다.

전방하중과정 시뮬레이션의 경우, 소재가 변형함에 따라서 격자시스템의 형상이 변화하여 소재의 절점이 금형에 접촉(touching)하거나 분리(detaching)된다. 접촉의 경우는 이전 단계에서 구한 절점의 속도벡터를 이용하여 절점이 금형을 파고들지 않는 정확한 시간증분을 구하여 절점이 금형에 접촉하게 하며, 분리의 경우는 금형과 접촉한 임의의 절점이 금형면의 수직방향으로 양의 절점력(인장력)을 받으면 분리된 것으로 하여 자유절점(free node)으로 경계조건을 변경하였다. 소재 절점의 접촉, 분리로 인한 경계조건의 변화로 금형-소재 접촉면상의 마찰 조건이 변화하므로 이의 계산을 행하여야 한다.

마찰력을 금형-소재 접촉면상에서 적분을 행하면 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{S_F} -mk\left(\frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{|\tilde{V}_r|}{\alpha}\right)\right)\frac{\tilde{V}_r}{|\tilde{V}_r|} N \, dS \qquad (8)$$

여기서 N은 형상함수(shape function) 행렬이다.

식(8)을 계산하기 위하여 Fig. 3에서 보듯이 한 방향으로 5개의 적분점을 가지는 가우스 이중(Gauss quadrature)적분을 사용하였다.

요소의 한면을 기준으로 3점 이상의 절점이 금형과 접촉하면 마찰력을 계산하였고, 3점의 절점만이 금형과 접촉할 때는 대응하는 영역만을 고려하여 적분을 행하였으며, Fig. 3에서 $\tilde{n}$은 금형-소재 접촉면상에 수직인 단위벡터, s 및 t는 국부 절점 좌표계(natural coordinate system)이다. 역추적 기법의 경우는 전방하중과정 시뮬레이션과는 반대인 경계조건의 변화를 가지므로 전방하중과정 시뮬레이션 동안의 경계조건 변화에 대한 정보가 이용된다. 마찰력의 계산에서도 3점 미만의 절점이 금형과 접촉할 때, 마찰력의 계산이 수행되지 않게 하였다.

3. 코이닝 공정에의 3차원 역추적기법의 적용

본 연구에서 개발한 3차원 역추적기법 프로그램을 코이닝 공정설계에 적용하여 최종 피어싱 홀 반경내에 들어올 수 있는 코이닝 공정의 초기 홀 형상 설계를 수행하였다. Fig. 4는 코이닝 공정 순서를 나타낸 그림이다. 코이닝 공정시 홀 반경의 감소 및 찌그러짐을 고려하여 홀의 형상이 최종 피어싱 반경 2 mm 내에 들어올 수 있도록 초기 피어싱량과 홀형상을 결정하여야 한다. 이때 전방하중과정 시뮬레이션은 3차원 강-소성 유한요소법을 이용하였으며, 역추적 시뮬레이션은 3차원 강-소성 유한요소법에 역추적

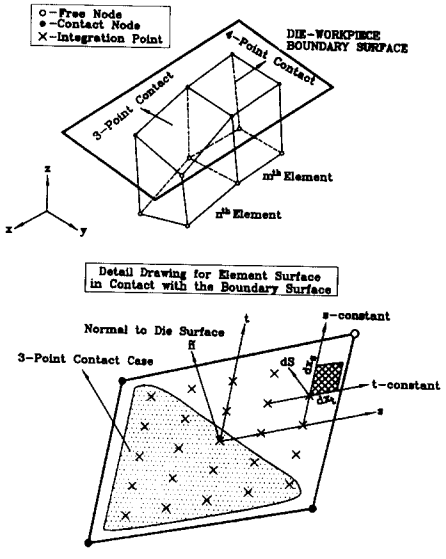

Fig. 3 Two-dimensional surface integration over the die-workpiece contact surface

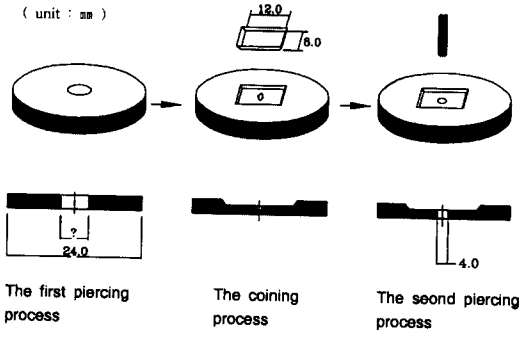

Fig. 4 The process sequence of piercing and coining

기법을 첨가하여 수행하였다.

시뮬레이션 과정에서의 계산조건은 다음과 같다.

◦다이와 소재사이의 마찰 조건 : 마찰상수 m=0.1을 사용

◦소재 : $\frac{\bar{\sigma}}{Y_o} = (1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{0.0051})^{0.235}$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, Y_o 는 초기 항복응력이며 $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률이다.

3.1 코이닝 공정의 1차 전방 하중과정 시뮬레이션과 역추적 시뮬레이션

Fig. 5는 코이닝 공정의 시뮬레이션을 위한 초기 소재와 금형의 형상을 나타낸 그림이다. 실제 시뮬레이션에서는 대칭 조건에 의해 전체 형상의 1/4을 선택하여 수행하였다. 코이닝 공정은 초기 두께가 2.5 mm인 소재를 직사각형의 금형을 사용하여 1.5 mm로 두께를 감소시키는 공정으로 이때 홀의 중앙으로 소재유동이 발생하여 홀의 크기를 감소시키게 된다.

Fig. 6은 초기 홀의 반경이 2.5 mm인 원형인 경우의 코이닝공정을 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 7은 Fig. 6의 시뮬레이션 과정 동안 홀의 변화를 나타낸 그림이다. 최종 홀의 형상이 좌우로 크게 변형하여 상하로 2.82 mm까지 홀이 찌그러졌으며, 최종 피어싱 반경 2 mm를 벗어나고 있다. 이것은 초기홀의 형상은 원형인 반면 금형은 상하, 좌우의 길이가 다른 직사각형의 형상을 가지고 있어 좌우 방향으로 금형과 소재의 접촉 면적이 더 넓기 때문이다. 그래서 좌우방향의 소재유동이 상하방향보다 더 많이 일어나 상하방향으로 홀이 크게 찌그러짐을 보이고 있다. 얻고자하는 최종홀의 형상은 최종 피어싱 반경 2 mm 안에

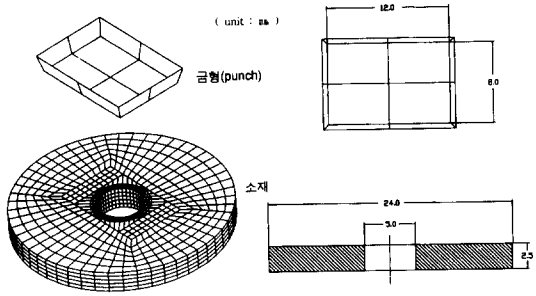

Fig. 5 Geometrical configuration of coining process

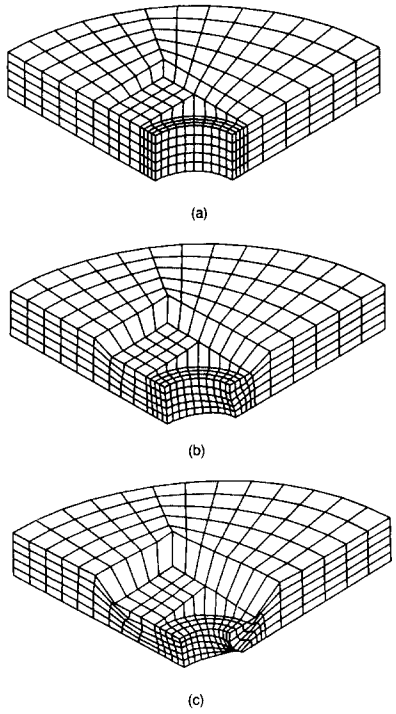

Fig. 6 The coining 3D simulation I.
(a) initial workpiece, (b) stroke=50%, and (c) stroke=100%

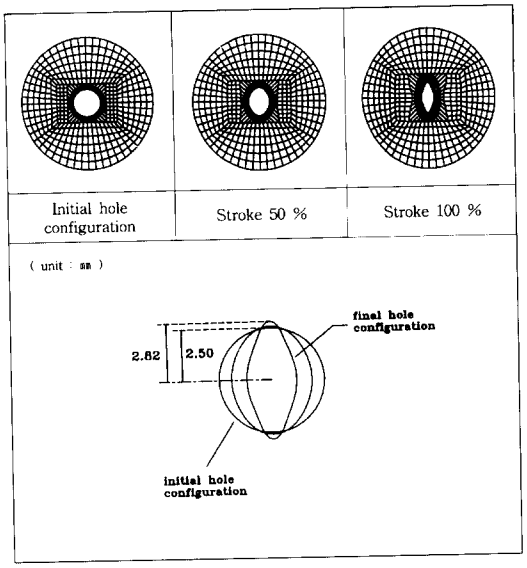

Fig. 7 Progressive hole configuration during the coining simulation I

들어오게 하는 것이다. 그래서 Fig. 8에 보는 바와 같이 얻고자 하는 최종형상(Fig. 8의 오른쪽 그림)으로 홀의 모양을 수정하여 역추적 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 9는 수정된 홀을 이용하여 3차원 역추적 시뮬레이션한 과정을 보여 주고 있다. 이때 Fig. 10의 왼쪽 그림은 역추적 시뮬레이션 과정에서의 홀의 초기모양과 시뮬레이션 후의 홀의 형상을 보여주고 있다. 바깥쪽이 역추적 시뮬레이션 후의 홀의 형상으로 코이닝공정의 초기 예비홀 형상이 될 수 있다. Fig. 10의 오른쪽 그림은 가공을 용이하게 하기 위하여 역추적 시뮬레이션의 최종 홀의 형상을

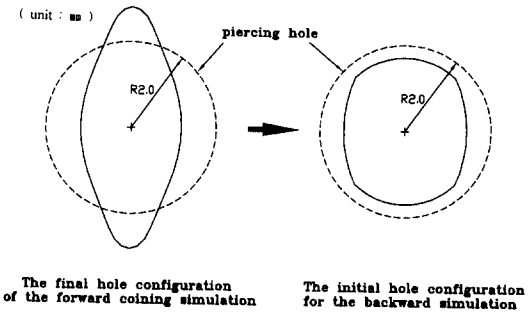

Fig. 8 The modified hole preform for the backward simulation

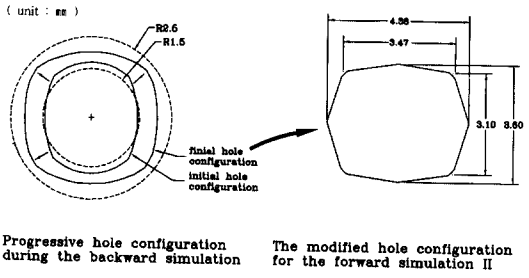

Fig. 10 Progressive hole configuration during the backward simulation and the modified hole configuration for the forward simulation II

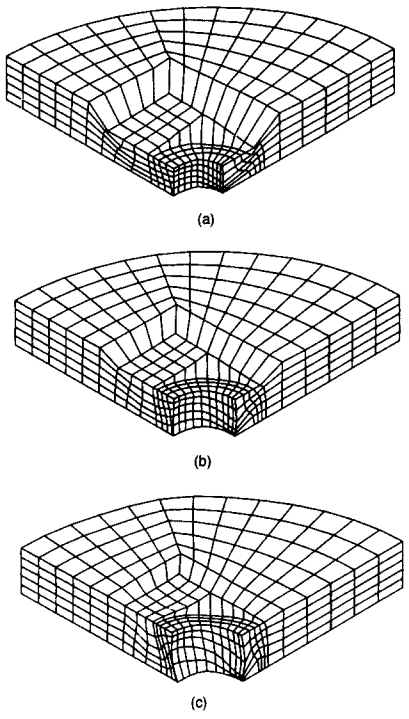

Fig. 9 Backward tracing simulation to get the optimal hole configuration. (a) initial workpiece, (b) stroke=50%, and (c) stroke=100%

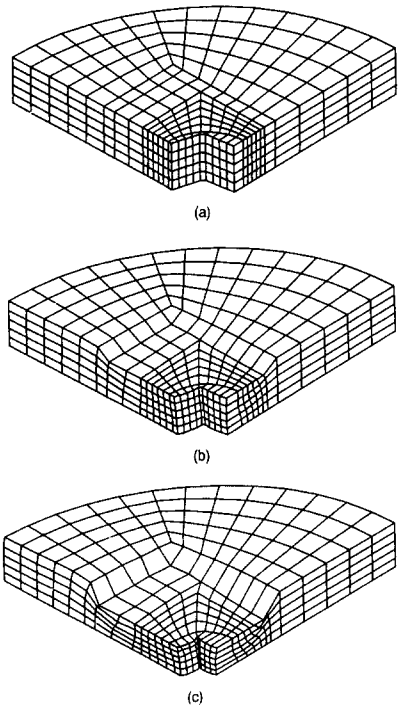

Fig. 11 The coining 3D simulation II. (a) initial workpiece, (b) stroke=50%, and (c) stroke=100%

수정하여 얻은 코이닝공정의 초기 예비홀 형상이다.

3.2 코이닝 공정의 2차 전방 하중과정 시뮬레이션

위의 결과에서 얻은 초기 예비홀의 형상으로 다시 전방 하중과정 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11은 2차 전방 하중 시뮬레이션의 과정을 나타내고 있으며, Fig. 12에서는 이때 홀의 형상 변화를 나타내고 있다. 바깥쪽의 홀이 초기 홀의 형상이고 가장 안쪽이 최종 홀의 형상을 나타내고 있다. 이때 최종형상의 홀이 역추적 시뮬레이션에서의 초기 형상과 다르게 나타난 것은 홀의 가공을 용이하게 하기 위해 홀의 모양을 직선으로 처리한 것이 각이 없는 곡선보다 홀형상 변화에 큰 변수로 작용한 것으로 생각되어진다. 그러나 최종홀은 최종 피어싱을 위한 허용 반경 2 mm 이내에 들어가고 있다.

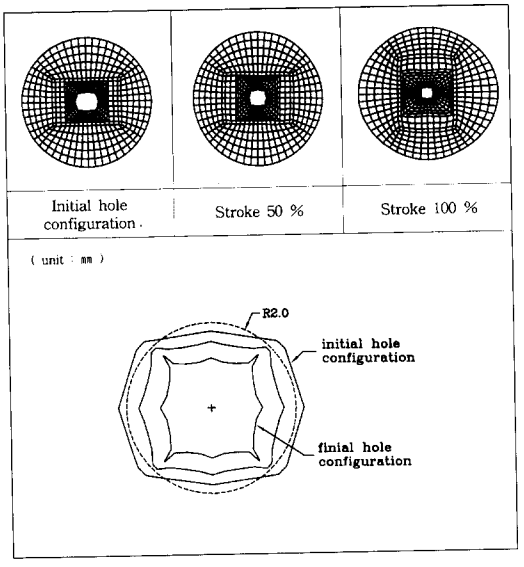

Fig. 12 Progressive hole configuration during the coining simulation II

4. 결 론

본 논문에서는 일반적인 3차원 강-소성 유한요소법에 역추적 기법을 포함한 일반 3차원 역추적 기법을 개발하였으며, 이 기법을 적용한 코이닝 공정설계를 수행하였다. 코이닝 공정을 위한 초기 피어싱 홀의 예비형상 설계를 전방하중 시뮬레이션과 3차원 역추적 기법을 이용하여 설계하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일반 3차원 강-소성 유한요소법에 역추적 기법을 도입하여 3차원으로 확장, 개발하였다.

(2) 3차원 역추적 기법을 이용하여 코이닝 공정을 위한 초기 피어싱 홀의 예비형상을 얻었으며, 이러한 초기 피어싱 홀을 가진 예비성형체로 최종 하중과정 시뮬레이션을 수행하여 개발된 역추적 기법의 타당성을 검증하였다.

(3) 이상의 연구 결과는 코이닝 공정의 해석을 통하여, 3차원 역추적 기법의 적용 가능성을 보인 것이며, 이는 금속성형 공정의 설계에 중요한 사항인 예비성형체 및 초기 소재의 결정에 아주 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Lange, K., 1958, "Closed-Die Forging of Steel(in German)", Springer-Verlag GmbH & Co. KG.

(2) Altan, T. Boulger, F.W., Becker, J.R, Akgerman, N. and Henning, H.J., 1973, "Forging Equipment, Materials, and Practices", MCIC-HB-03, Battelle-Columbus Laboratories, Columbus, OH.

(3) Van Tyne, C.J. and Avitzur, B., 1983, "Production to Near Net Shape", ASM, Metals Park, Oh.

(4) Park, J.J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 1, pp. 71~79.

(5) Hwang, S.M. and Kobayashi, S., 1984, "Preform Design in Plane-Strain Rolling by the Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 24, No. 4, pp. 253~266.

(6) Hwang, S.M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform Design in Disk Forging," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231~243.

(7) Hwang, S.M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform Design in Shell Nosing at Elevated Temperatures", Int. J. Mach. Tool Manuf., Vol. 27, No. 1, pp. 1~14.

(8) Kang, B.S., Kim, N.S. and Kobayashi, S., 1990, "Computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No. 1, pp. 43~52.

(9) Kim, N. and Kobayashi, S., 1990, "Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, No. 2, pp. 243~268.

(10) Kang, B.S. and Kobayashi, S., 1994, "Process Sequence Design in Cold Forging to Form a Constant Velocity Joint Housing", Int. J. Mach. Tools and Manufact. Vol. 34, No. 8, pp.1133~1146.

(11) Park, J.J. and Kobayashi, S., 1984, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Block Compression", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, pp. 165~176.

(12) Pillinger, I., Hartley, P., Sturgess, C.E.N. and Rowe, G.W., 1985, "An Elastic-Plastic Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Cold Forging of Rectangular Blocks and Experimental Comparison", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, No. 3, pp. 229~ 243 .

(13) Surdon, G. Chenot, J.L., 1987, "Finite Element Calculation of Three-Dimensional Hot Forging", Int. J. Mum. Mech. in Engng., Vol. 24, pp. 2107~2117.

(14) Yoon, J.H. and Yang, D.Y, 1990, "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique", Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 4, pp. 277~291.

(15) Coupez, T. and Chenot, J.L., 1992, "Mesh Topology for Mesh Generation Problems- Application to Three-Dimensional Remeshing", Proc. NUMIFORM '92, Chenot et al(eds), Valbonne, France, pp. 237~242.

(16) Lee, N.K., Yoon, J.H. and Yang, D.Y, 1992, "Finite Element Analysis of Large Deformation by Automatic Renoding as a Weak Remeshing Technique", Int. J. Mech. Sci., Vol. 34, No. 4, pp. 255~273.

(17) Kang, B.S. and Kobayashi, S., 1991, "Preform Design in Ring Rolling Processes by the Three~Dimensional Finite Element Method," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 1, pp. 139~151.

(18) Kang, B.S. and Lee, J.H. "Extension of the Backward Tracing Scheme of the Rigid Plastic FEM to Three-dimensional Deformation", The International Conference on Mechanics of Solids and Material Engineering, Singapore, June 1995.

(19) Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite- Element Method", Oxford Univ. Press.