

〈論 文〉

강-소성 유한요소 해석에서의 3차원 역추적 기법에 관한 연구

이진희* · 강범수* · 김병민*

(1995년 6월 30일 접수)

Feasibility Study on Three-Dimensional Backward Tracing Scheme of Rigid-Plastic Finite Element Analysis

J. H. Lee, B. S. Kang and B. M. Kim

Abstract

Preform design is one of the critical fields in metal forming. The finite element method(FEM) has been effective in designing preforms and process sequence, for which the backward tracing scheme of the rigid-plastic FEM has been explored. In this work a program using the backward tracing scheme by the rigid-plastic FEM is developed for three-dimensional plastic deformation, which is an extension of the scheme from two-dimensional cases. The calculation of friction between workpiece and die, and handling of boundary conditions during backward tracing require sophisticated treatment. The developed program is applied to upsetting of a rectangular block and to side pressing of a cylindrical workpiece. The results of the two applications show feasibility of the program on three-dimensional plastic deformation.

Key Words : Three-Dimensional Backward Tracing Scheme, Forward Loading Simulation, Rigid-Plastic Finite Element Analysis, Hexahedral Element, Upsetting, Side Pressing

1. 서 론

금속성형 공정설계에는 공정결정, 예비성형체(preform)설계, 금형설계 및 공정조건과 장비선정 등과 같은 많은 영역을 포함하고 있다. 특히 금속성형공정은 일반적으로

*부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

원하는 최종부품을 한번의 성형공정으로 생산할 수 없는 경우가 많으므로, 몇 번의 예비성형공정이 포함된 다단계 성형공정이 필요하다. 따라서 금속성형 공정설계에서 중요한 사항중의 하나는 예비성형체의 설계와 공정절차의 설계이다. 실제산업 현장에서는 이러한 사항을 설계자의 경험적 지침, 직관 및 실험에 의한 시행착오를 거쳐서 행하고

있다. 그러나 이러한 접근 방법은 다품종 소량생산으로 전환되고 있는 실정에서는 시간 및 비용 면에서 효과적이지 못하며, 특히 정밀성형이 요구되는 경우는 심각한 문제가 된다.^(1~3)

따라서 컴퓨터이용 설계방법들이 여러 가지 금속성형 공정설계에 활발히 이용되고 있다. 이는 크게 경험적 규칙, 문헌 및 핸드북 등을 재고찰하여 수립된 설계규칙과 초등해법, 상계법 등이 통합된 금속성형 공정 및 금형설계 시스템,^(4~7) 상계요소법(UBET)^(8,9) 및 유한요소법으로 나눌 수 있다. 컴퓨터이용 시스템들은 일반적으로 공정 및 금형설계에 중요한 정보인 소재유동, 변형률분포 및 응력분포 등과 같은 자세한 정보를 구하기 어려운 점이 있으므로, 이에 대한 자세한 정보를 제공하는 유한요소법의 적용이 확대되고 있고, 특히 예비성형체 설계에 중요한 방법으로 사용되고 있다. 그러나 보다 나은 공정 및 예비성형체를 구하는 문제는 여전히 어려움으로 남아 있다.

Park, , Rebelo 및 Kobayashi⁽¹⁰⁾는 유한요소법의 능력을 이용하여 금속성형공정에 있어서의 예비성형체 설계를 효과적으로 수행할 수 있는 역추적 기법(backward tracing scheme)을 제안하였다. 이 기법은 주어진 최종형상으로 부터 초기소재 또는 중간형상을 역으로 추적하는 것으로, 셸 노우징(shell nosing)공정에서의 예비성형체 설계⁽¹⁰⁾와 압연공정에서 발생하는 소재 끝부분의 소재손실을 없애기 위한 초기 소재형상의 설계에 이용되었다.⁽¹¹⁾

이후 역추적기법은 여러 가지 금속성형 공정설계에 효과적으로 적용되었다.^(12~17) Hwang 등⁽¹²⁾은 축대칭 디스크의 단조공정에서 금형과 소재 사이에 마찰이 존재할 경우, 소재의 자유표면이 균일하게 변형되는 디스크의 생산을 위한 예비성형체의 설계를 행하였으며, 이들은 이를 더욱 발전시켜 온도계산이 포함된 역추적기법을 이용하여 셸

노우징공정에서의 예비성형체 설계를 하였다.⁽¹³⁾ Kang 등⁽¹⁴⁾은 에어포일형 블레이드를 플래쉬없게 단조하기 위한 예비성형체의 설계를 행하였으며, Kim 등⁽¹⁵⁾은 축대칭 H-형상의 부품을 플래쉬없게 단조하기 위한 예비성형체의 설계를 행하였다. 또한 Kang 등은 다단계 헤딩공정⁽¹⁶⁾ 및 등속조인트 단조공정설계⁽¹⁷⁾에 역추적 기법을 이용하였다.

그러나 위의 연구들은 2차원 유한요소법을 이용한 역추적기법의 적용이었다. 최근 3차원 유한요소법이 실제 금속성형 공정해석에 적용되고 있으며, 이에 대한 계속적인 연구가 활발히 진행되고 있으므로,^(18~21) 역추적 기법을 3차원 유한요소법에 확장하여 도입할 필요가 있다. Kang 등⁽²²⁾은 3차원 링 압연공정의 해석에 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.

본 논문에서는 금속성형공정의 예비성형체 설계에 아주 유용하게 활용된 2차원 유한요소법을 이용한 역추적기법을 일반 3차원 유한요소법으로 확장, 개발하였으며, 3차원 강-소성 유한요소법에 포함된 역추적 기법을 이용하여 간단한 금속성형공정인 사각 블럭소재의 업셋팅(upsetting)과 실린더형 소재의 측면압축(side pressing)공정의 해석을 수행하였다. 위의 두 공정에 대한 전방하중과정 시뮬레이션과 역추적 시뮬레이션을 통하여 3차원 역추적 기법의 타당성과 일반 3차원 금속성형공정의 예비성형체 설계에 적용 가능성을 보였다.

2. 이론 해석

2.1 강-소성 유한요소 수식화

3차원 강-소성 유한요소법에 대한 이론과

수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다.⁽²³⁾ 비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수 (penalty function) K 를 도입하면, 강-소성 재료에 대한 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

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

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}$, $\dot{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, σ'_{ij} 는 편차응력, f_i 는 표면외력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다.

표면외력으로 주로 작용하는 금형과 소재 사이의 마찰의 처리를 위하여, 마찰면에서의 중립점 발생으로 인한 특이성을 피하여 수치해의 안정성을 고려한 다음의 식을 사용한다.⁽²⁴⁾

$$\bar{f} = -\frac{2}{\pi} m k \tan^{-1} \left(\frac{|\bar{v}_r|}{\alpha} \right) \frac{\bar{v}_r}{|\bar{v}_r|} \quad (2)$$

여기서, m 은 마찰상수, k 는 소재의 전단항복응력, \bar{v}_r 은 금형에 대한 소재의 상대속도, α 는 \bar{v}_r 에 비하여 아주 작은 양수이다.

변형률속도가 영(zero)이거나 변형체 내의 변형률속도 보다 아주 작은 경우를 고려하기 위하여 유효변형률속도가 가정한 유효 변형률속도 옴셋 $\dot{\epsilon}_o$ 보다 작을 때는 다음과 같이 구성방정식을 수정한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_o}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \text{ for } \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_o \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하여 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점 속도벡터 \bar{v} 에 대한 비선형 방정식이 된다.

$$\mathbf{K}(\bar{v}) = \mathbf{K}(\bar{x}, \bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}) \bar{v} - \mathbf{F}(\bar{x}, \bar{v}) = 0 \quad (4)$$

여기서, K 는 강성행렬(stiffness matrix), F 는 힘 벡터(load vector), \bar{x} 는 절점좌표 벡터이다.

본 연구에서는 유한요소 분할화과정에서 8절점 육면체요소(hexahedral element)를 사용하였다. 식(4)는 Newton-Raphson법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접 반복법을 이용하여 구한다.

2.2 3차원 역추적 기법

역추적 기법은 최종형상과 공정조건이 주어졌을 경우, 변형과정에 있어서 임의 단계에서의 중간형상을 예측하는 것이다. 전방하중과정 시뮬레이션과 마찬가지로 역추적 기법을 이용한 시뮬레이션 과정에서도 유한요소법이 이용된다.

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

강-소성 유한요소해석의 전방하중과정 시뮬레이션의 좌표변화는 다음과 같다.

$$\bar{x}_{o-1}((n-1)^{th} \text{ step}) \xrightarrow{\Delta t} \bar{x}_o(n^{th} \text{ step}) \quad (5)$$

여기서, $\bar{x}_o = \bar{x}_{o-1} + \Delta t \bar{v}_{o-1}$, \bar{v}_{o-1} 은 $t = t_{o-1}$ 에서의 속도장이다. 식(5)에서 보는 바와 같이 전방하중과정 시뮬레이션에서의 형상변화는 임의의 n 번째 단계(시간 $t = t_o$)의 변형물체의 기하학적 형상 \bar{x}_o (Fig. 1의 점 Q)는 시간 $t = t_{o-1}$ ($n-1$ 번째 단계)에서의 형상 \bar{x}_{o-1} (점 P)로부터 변형된 것이다.

또한 시간 t_o 에서의 유효변형률은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_o &= \bar{\epsilon}_{o-1} + \int_{t_{o-1}}^{t_{o-1} + \Delta t} \dot{\epsilon} dt \\ &= \bar{\epsilon}_{o-1} + \dot{\epsilon}_{o-1} \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\bar{\epsilon}_o$ 은 초기부터 시간 t_o 까지의 전 유효변형률을 나타낸다.

역추적 기법에서의 좌표변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{x}_o(n^{th} \text{ step}) \xrightarrow{\Delta t} \bar{x}_{o-1}((n-1)^{th} \text{ step}) \quad (7)$$

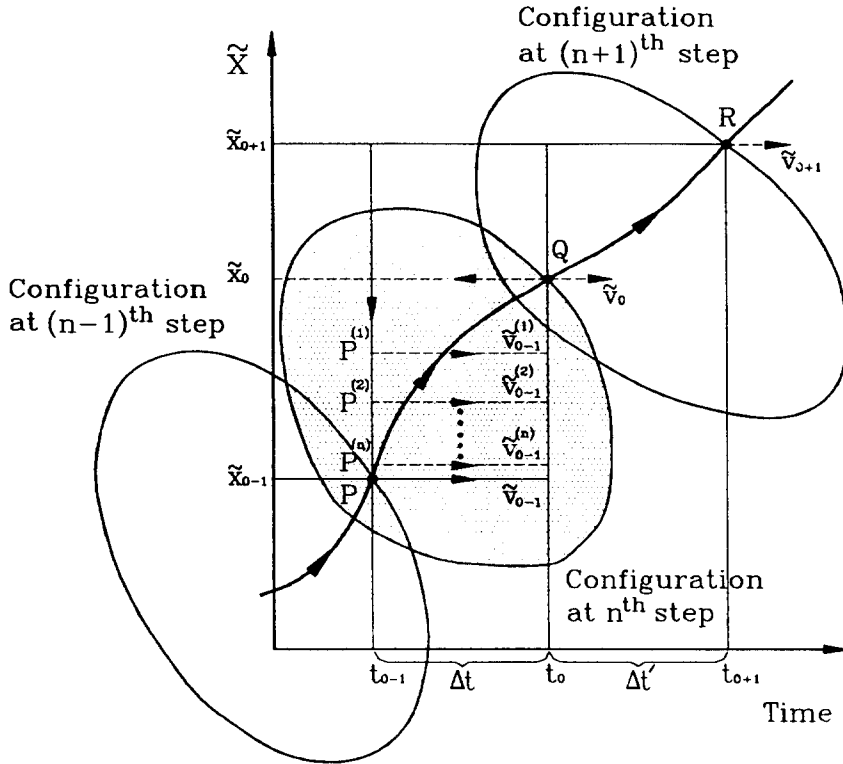


Fig. 1 Concept of the backward tracing scheme and change of the configuration during forward loading and backward tracing

여기서, $\bar{x}_{o-1} = \bar{x}_o - \Delta t \bar{v}_{o-1}$ 이다.

역추적 기법의 경우, 식(7)과 같이 임의의 n 번째 단계(시간 $t = t_o$)의 변형물체의 기하학적 형상 \bar{x}_o 을 근거로 하여 $n-1$ 번째 단계(시간 $t = t_{o-1}$)의 \bar{x}_{o-1} 를 구하는 것이다. 즉, 점 Q 에서의 기하학적 정보 \bar{x}_o 를 토대로 \bar{v}_{o-1} 을 결정하여 점 P 의 위치를 역으로 구하는 것이다.

Fig. 1에 나타나 있듯이, 임의의 한 단계에서의 역추적 기법은 다음과 같이 수행된다.

먼저 점 Q 에서의 전방하중과정의 해인 \bar{v}_o 를 구한다. 점 P 의 첫번째 반복은 $P^{(1)} = \bar{x}_o - \bar{v}_o \Delta t$ 이며, 하중과정의 해 $\bar{v}_{o-1}^{(1)}$ 은 $P^{(1)}$ 의 형상으로 부터 계산되고, Q 에서의 형상 \bar{x}_o 는 $P^{(1)} + \bar{v}_{o-1}^{(1)} \Delta t = Q^{(1)}$ 이 된다. 만약 Q 와 $Q^{(1)}$ 이 서로 충분히 근접하지 않

면, 두 번째 반복으로 $P^{(2)} = \bar{x}_o - \bar{v}_{o-1}^{(1)} \Delta t$ 가 계산된다. 이러한 반복계산은 $Q^{(n)} = P^{(n)} + \bar{v}_{o-1}^{(n)} \Delta t$ 가 충분히 Q 에 근접할 때까지 계속 수행된다.

또한 역추적($t \leq t_o$)의 경우, 시간 $t = t_{o-1} = t_o - \Delta t$ 에서의 \bar{x}_{o-1} 과 $\bar{\epsilon}_{o-1}$ 는 식(4)와 함께 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_o - \bar{x}_{o-1} &= \bar{v}_{o-1} \Delta t \\ \bar{\epsilon}_o - \bar{\epsilon}_{o-1} &= \dot{\bar{\epsilon}}_{o-1} \Delta t \end{aligned} \quad (8)$$

주어진 시간 증분에 대해서, 시간 t_{o-1} 에서 식(8)을 식(4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K(\bar{v}_{o-1}, \bar{x}_o, \bar{\epsilon}_o, \dot{\bar{\epsilon}}_{o-1}) \bar{v}_{o-1} \\ - F(\bar{x}_o, \bar{v}_{o-1}) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, \bar{x}_o 와 $\bar{\epsilon}_o$ 는 이미 알고 있는 값이며, $\dot{\bar{\epsilon}}_{o-1}$ 은 \bar{v}_{o-1} 의 함수이다. 따라서 식

(9)는 시간 t_{o-1} 에서의 경계조건들이 주어 진다면 \bar{v}_{o-1} 에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 $t_{o-2}, t_{o-3}, \dots, t_{o-n}$ 에 대한 해를 구해 나가면, 임의의 이전 단계에 대한 소재변형 형상을 구할 수 있다.

2.3 금형-소재 접촉면에서의 경계조건 처리

전방하중과정 시뮬레이션의 경우, 소재가 변형함에 따라 소재의 절점이 금형에 접촉 또는 분리된다. 접촉의 경우는 이전 단계에서 구한 절점의 속도벡터를 이용하여 절점이 금형을 파고들지 않는 정확한 시간증분을 구하여 절점이 금형에 접촉하게 하며, 분리의 경우는 금형과 접촉한 임의의 절점

이 금형면의 수직방향으로 양의 절점력(인장력)을 받으면 분리된 것으로 하여 경계조건을 변경하였다. 소재절점의 접촉, 분리로 인한 경계조건의 변화로 금형-소재 접촉면상의 마찰조건이 변화하므로 이의 계산을 행하여야한다.

식(2)를 식(1)에 대입하면 식(4)의 가운데 두번째 항은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{S_F} -mk \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\bar{v}_r|}{a} \right) \right) \frac{\bar{v}_r}{|\bar{v}_r|} N dS \quad (10)$$

여기서, N 은 형상함수 행렬이다.

식(10)을 계산하기 위하여 Fig. 2에서 보듯이 한 방향으로 5개의 적분점을 가지는 가우스 이중(Gauss quadrature)적분을 사용

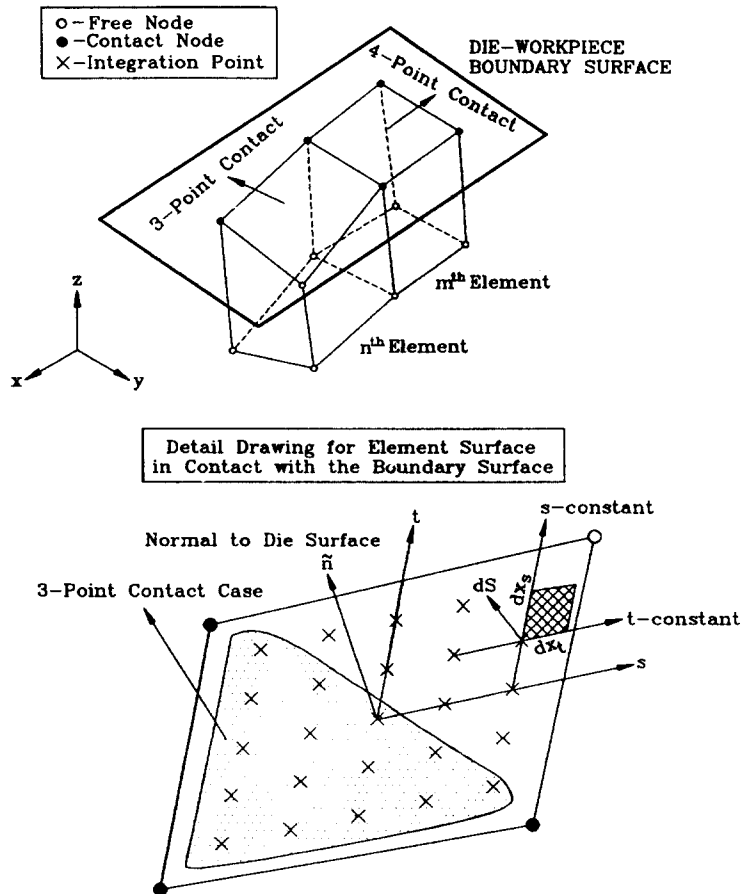


Fig. 2 Two-dimensional surface integration over the die-workpiece contact surface

하였으며, 요소의 한 면을 기준으로 3점 이상의 절점이 금형과 접촉하면 마찰력을 계산하였다.

Fig. 2에서 \hat{n} 은 금형-소재 접촉면상에 수직인 단위벡터, s 및 t 는 국부절점 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. 3차원 역추적기법의 적용 및 고찰

본 연구에서 개발한 3차원 역추적 기법 프로그램의 타당성을 보이기 위하여 사각블럭의 업셋팅과 실린더형 소재의 측면압축공정의 해석을 수행하였다. 전방하중과정 시뮬레이션은 3차원 강-소성 유한요소법을 이용하였으며, 역추적 시뮬레이션은 3차원 강-소성 유한요소법에 역추적 기법을 첨가하여 수행하였다.

시뮬레이션 과정에서의 계산조건은 다음과 같다.

다이와 소재사이의 마찰 조건 : 마찰상수 $m=0.1$ 을 사용

소재 : AISI 1018

유효응력-변형률 관계 : $\bar{\sigma}/Y_0 = (1.0 + 196.08 \bar{\epsilon})^{0.235}$

여기서, Y_0 는 초기항복강도이며, 200 Mpa이다.

3.1 사각블럭의 업셋팅 공정

사각블럭과 같은 단순한 형상의 업셋팅은 최종제품을 성형하기 위한 예비성형공정이나, 소재의 응력-변형률 관계를 구하기 위한 실험에 많이 이용된다. 먼저 본 연구에

서는 일반 3차원 유한요소 해석의 유용성을 보이기 위하여, 사각블럭 업셋팅의 전방하중과정 시뮬레이션을 수행한 후, 전방하중과정 시뮬레이션의 정보를 토대로 3차원 역추적 기법을 적용, 변형된 최종형상을 초기소재인 사각블럭으로 되돌리는 역추적 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 3은 사각블럭의 업셋팅공정의 전방하중과정 시뮬레이션을 위한 사각블럭의 형상과 치수 및 다이와 소재의 관계를 나타낸 것이다. 평다이를 사용하였으며, 소재가 x , y 및 z -축에 대하여 대칭이므로 1/8만 해석하였다.

Fig. 4는 사각블럭 업셋팅의 전방하중과

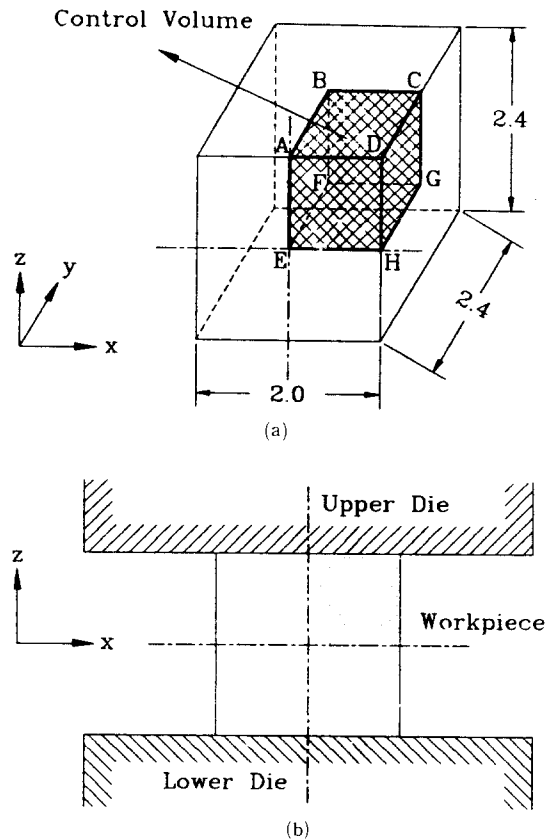


Fig. 3 Geometrical configuration of rectangular block upsetting process :
 (a) Workpiece geometry
 (b) Cross-sectional configuration of workpiece and dies

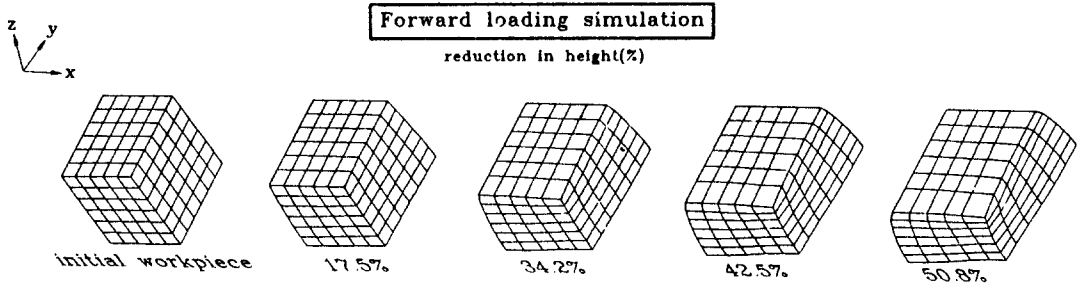


Fig. 4 Forward loading simulation of upsetting at various reduction in height

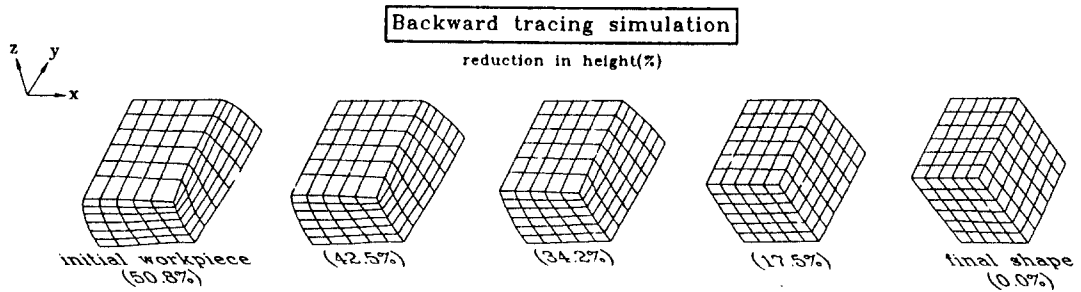


Fig. 5 Backward tracing simulation of upsetting at various reduction in height

정 시뮬레이션 결과를 소재의 높이 감소율에 따라 나타낸 것이다. 시뮬레이션은 높이 감소율 50.8%까지 수행하였다. 전형적인 사각블럭의 업셋팅공정에서 발생하는 변형양상을 보임을 알 수 있다.

다음으로 역추적 기법의 타당성을 보이기 위하여, 전방하중 시뮬레이션으로 구한 최종형상을 원래의 초기소재인 사각블럭으로 되돌리는 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 높이 감소율이 50.8%까지 성형된 최종형상을 초기소재로 하여 역추적기법을 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 나타내며, 괄호안의 높이 감소율은 전방하중과정 시뮬레이션을 기준으로 나타낸 것이다.

앞에서 언급하였듯이, n 번째 단계에서의 소재형상 및 속도장이 알려진 경우에 $n-1$ 번째 단계에서의 소재형상을 구하기 위해서는 적합한 경계조건의 부여가 이루어져야 한다. 그러나 사각블럭의 업셋팅 시뮬레이션에서는 초기소재의 한 면에 있는 절점들

이 다이와 접촉하는 순간 경계조건의 변화가 발생한다. 그 후 높이 감소율이 50.8%인 최종형상까지 변형하면서 다이와 소재 사이의 경계조건의 변화가 없으므로, 역추적 시뮬레이션에서는 경계조건의 변화가 시뮬레이션의 마지막 순간, 즉 초기형상으로 되는 다이행정에서만 발생한다. 그러므로 경계조건의 변화가 단순한 경우이다. 따라서 Fig. 4와 Fig. 5를 비교하여 보면, 동일한 높이 감소율에서의 비교가 가능하였으며, 각 대응되는 높이 감소율에서의 변형양상이 거의 동일함을 알 수 있다.

이를 자세히 살펴보기 위하여, Fig. 6에 z -축과 수직인 양 끝면(xy -평면), 즉 다이와 소재가 접촉하는 면(Fig. 6(a) — Fig. 3(a)의 단면 ABCD)과 중심면(Fig. 6(b) — Fig. 3(a)의 단면 EFGH)의 외곽선 변형양상을 전방하중과정과 역추적 시뮬레이션에 대하여 비교하여 나타내었다. 사각블럭 업셋팅공정에 대한 역추적 시뮬레이션의 경

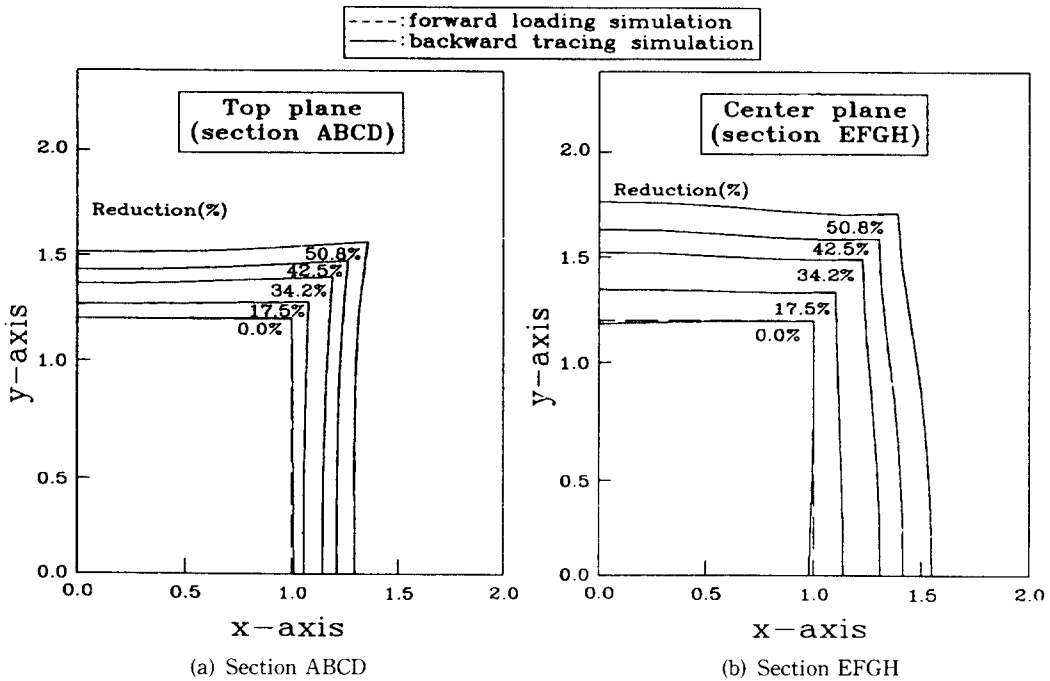


Fig. 6 Comparisons of the outer contours on xy cross section for the forward loading and backward tracing simulation of upsetting at various reduction in height

우, 경계조건의 제어를 시뮬레이션의 마지막 순간에만 행하였으나, 시뮬레이션 과정 동안에 발생하는 일종의 경계조건 변화라 할 수 있는 다이와 소재가 접촉하는 단면 ABCD의 변화를 살펴보면, 두 가지 시뮬레이션의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 y-축과 수직인 양 끝면(xz-평면), 즉 Fig. 3(a)의 단면 ADHE(Fig. 7(a))과 Fig. 3(a)의 단면 BCGF(Fig. 7(b))에 대한 소재의 초기격자와 역추적 시뮬레이션으로 구한 최종 격자변형(전방하중과정 시뮬레이션으로 구한 최종형상을 역추적하여 구한 초기형상)의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 거의 초기형상으로 역추적 되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 전방하중과정에서 소재의 높이 감소율이 34.2%인 경우와 역추적으로 구한 동일한 높이 감소율에서의 유효변형률 분포를 비교한 것이며, 유효변형률의 분포도 거

의 유사함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 사각블럭 업셋팅에서의 3차원 유한요소해석 및 역추적 기법의 적용 결과가 타당함을 알 수 있다.

3.2 실린더형 소재의 측면압축 공정

사각블럭의 업셋팅은 경계조건의 변화가 거의 없는 단순한 공정이므로, 성형중 경계조건의 변화가 약간 복잡한 공정에 역추적 기법을 적용하기 위하여 실린더형 소재의 측면압축공정의 해석을 수행하였다. 측면압축공정은 밀폐형단조나 복잡한 형상의 다이를 갖는 자유형단조를 위한 예비성형공정이거나, 소재의 성형성 측정을 위한 측면압축 시험 등에 이용된다.

Fig. 9는 실린더형 소재의 측면압축공정의 해석을 위한 소재의 형상과 치수 및 다이와 소재의 관계를 나타낸다. 실린더를 측면에서 압축하는 측면압축공정도 소재가 x,

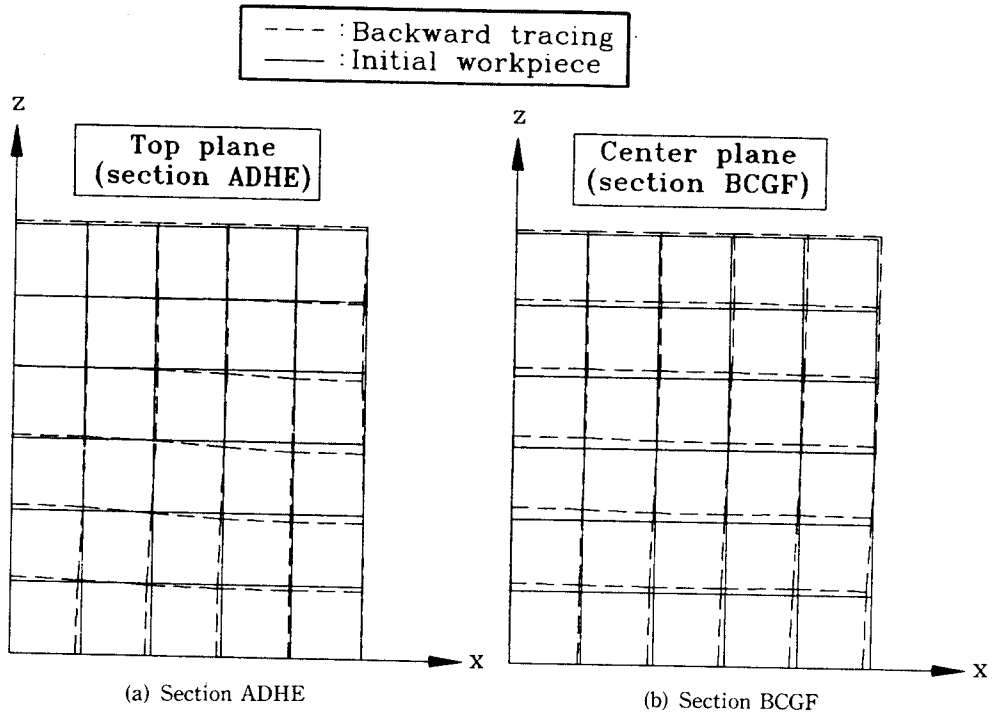


Fig. 7 Comparisons of grid distortion on xz cross section for the initial block workpiece and the final shape obtained from backward tracing simulation of upsetting

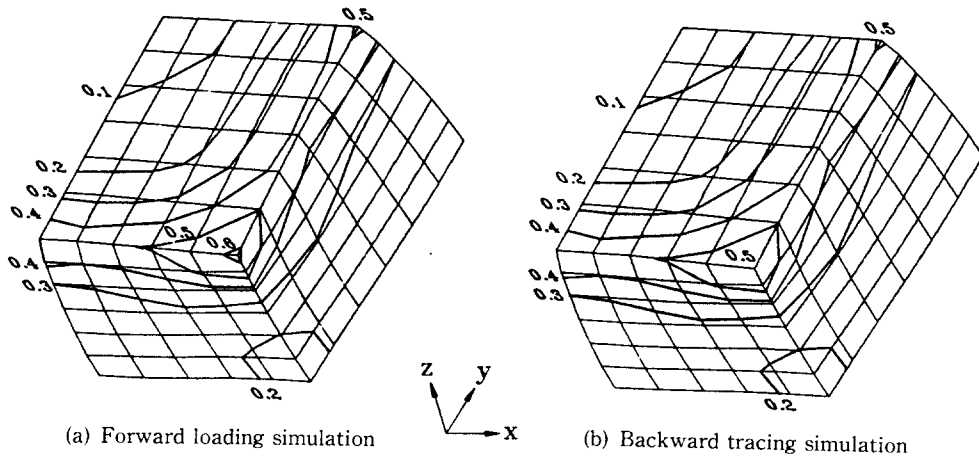


Fig. 8 Distributions of effective strain at 34.2% reduction in height of upsetting

y 및 z-축에 대하여 대칭이므로 1/8만 해석하였으며, 소재의 직경이 길이에 비하여 크므로 2차원으로 가정할 수 없는 경우이다.

Fig. 10은 측면압축공정의 전방하중과정

시뮬레이션의 결과를 소재의 높이 감소율에 따라서 나타낸 것이다. 시뮬레이션은 높이 감소율 52.0%까지 행하였다. 자유표면에서 일종의 배불림현상이 나타남을 알 수 있다.

다음으로 전방하중 시뮬레이션으로 구한

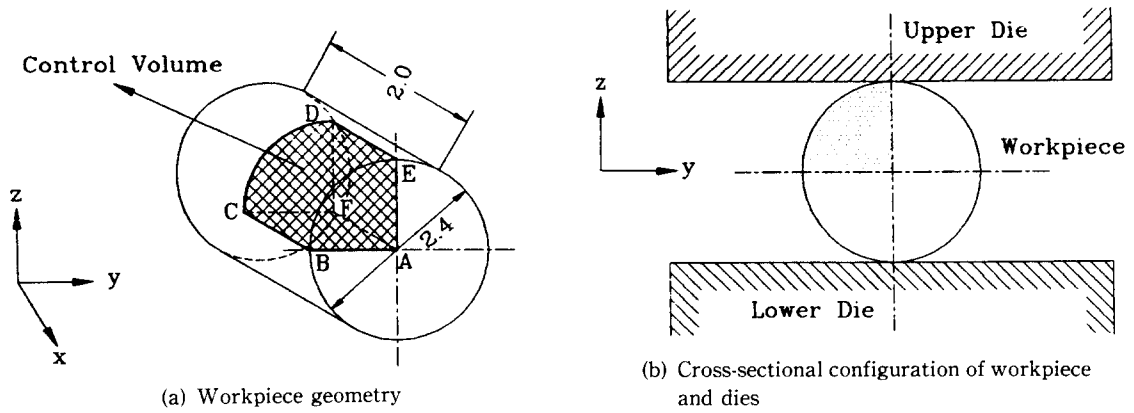


Fig. 9 Geometrical configuration of cylindrical workpiece side pressing process

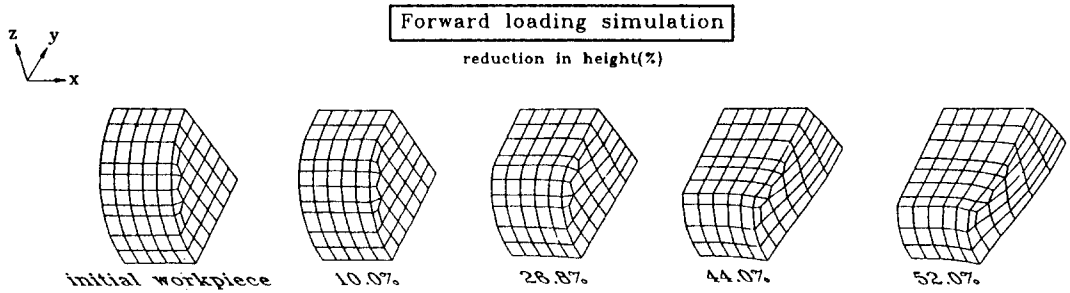


Fig. 10 Forward loading simulation of side pressing process at various reduction in height

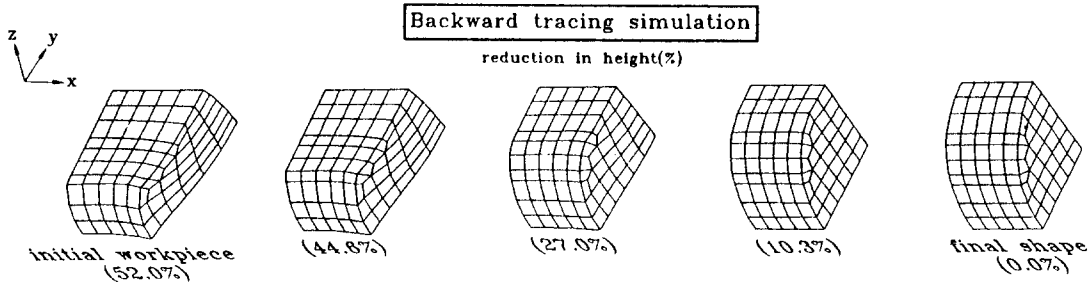


Fig. 11 Backward tracing simulation of side pressing process at various reduction in height

최종형상(높이 감소율 : 50.8%)을 초기소재로 하여 최종형상(전방하중 과정의 초기소재)으로 되돌리는 역추적을 수행하였다. Fig. 11은 역추적 기법을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 팔호안의 높이 감소율은 전방하중과정 시뮬레이션을 기준으로 나타낸 것이다. 전방하중과정 시뮬레이션 결

과인 Fig. 10과 비교하면, 거의 비슷한 높이 감소율에서 두 가지 시뮬레이션 결과를 구하였다. 각 대응되는 높이 감소율에서의 변형양상이 거의 동일함을 알 수 있다.

전방하중과정 시뮬레이션 동안의 다이와 소재사이의 경계조건 변화는 소재가 다이와 접촉하는 순간, Fig. 9(a)의 선분 DE에 준

재하는 절점이 모두 접촉한다. 다음으로 곡면 BCDE 상에 존재하는 절점들이 차례로 접촉하여 변형이 진행된다. 따라서 역추적 시뮬레이션 동안의 경계조건 변화는 다이의 진행방향이 하중과정 시뮬레이션과 반대이므로, 다이와 접촉한 절점들이 다이가 역으로 진행함에 따라 분리되어야 한다. Fig. 12는 하중과정의 결과를 토대로 구성한 역추적 동안의 다이와 접촉한 절점들의 분리순서를 나타낸다. 화살표 방향은 절점이 다이와 분리되는 순서이고, (·)은 절점들을 나타내며, 그때의 좌표는 절점이 분리되는 순간의 위치좌표이다. 역추적 동안의 절점의 분리순서는 하중과정과 반대이므로 하중과정 시뮬레이션에서 최초로 접촉한 절점들은 역추적과정에서는 가장 나중에 분리된다. 즉, z-축 값이 가장 큰 6개의 절점이 다이와 마지막으로 분리된다.

Fig. 13은 다이와 소재가 접촉하는 면 (Fig. 13(a))과 중심면 (Fig. 13(b) - Fig. 9(a)의 단면 ABCF)의 외곽선 변형양상을 전방하중과 역추적 시뮬레이션에 대하여 나

타내었으며, 변형양상이 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 14는 x-축과 수직인 양 끝면, 즉 Fig. 9(a)의 단면 ABE (Fig. 14(a))와 단면 FCD (Fig. 14(b))에 대한 소재의 초기격자와 역추적 시뮬레이션으로 구한 최종 격자변형을 비교하여 나타낸 것이다. 거의 초기형상으로 역추적 되었으나, 자유표면이 완전히 초기격자로 되돌아오지는 않았다. 경계조건이 사각블럭의 업셋팅공정에 비하여 복잡한 실린더형 소재의 측면압축공정의 역추적 시뮬레이션 결과가 초기형상에 접근하는 정도가 적음을 알 수 있다.

Fig. 15는 전방하중과정에서 소재의 높이 감소율이 26.8%인 경우와 역추적으로 구한 거의 동일한 높이 감소율(전방하중과정 기준: 높이 감소율이 27.0%)에서의 유효변형률 분포를 비교한 것이며, 유효변형률의 분포가 거의 유사함을 알 수 있다.

이상에서 실린더형 소재의 측면압축공정의 전방하중과정 및 역추적 시뮬레이션이 타당함을 알 수 있으며, 특히 역추적 기법

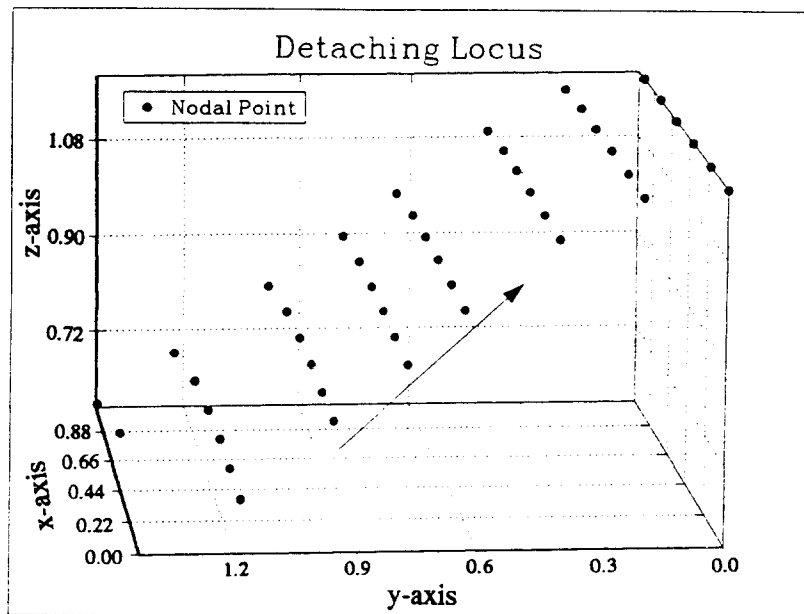


Fig. 12 The locus of boundary nodal points separated from the die during backward tracing

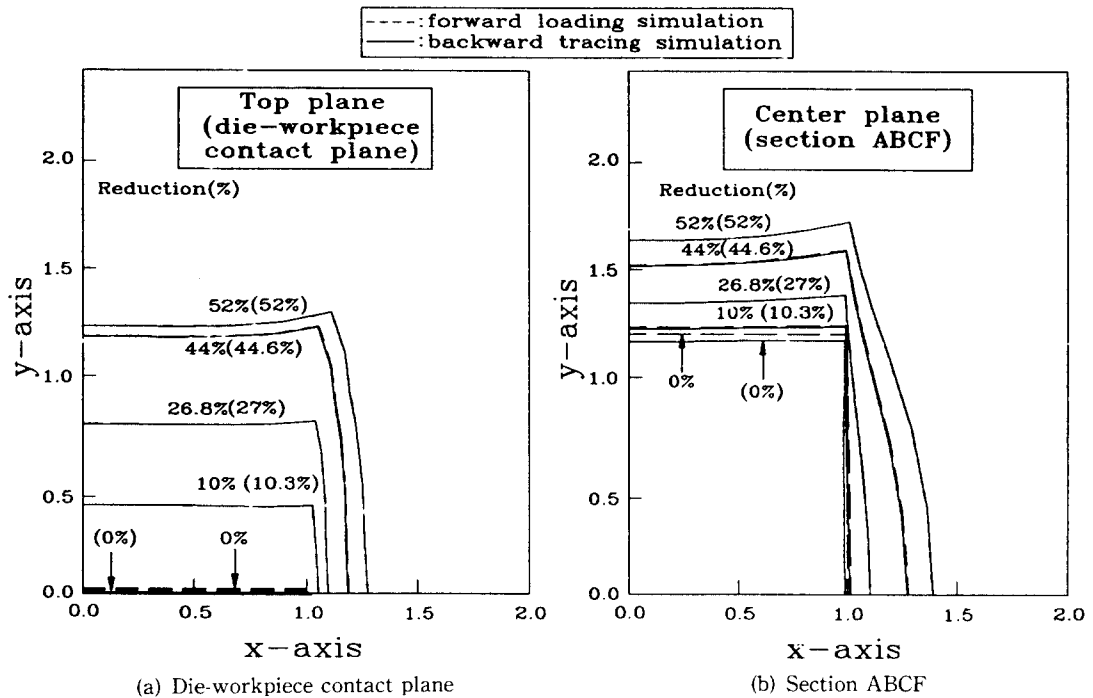


Fig. 13 Comparisons of the outer contours on xy cross section for the forward loading and backward tracing simulation of side pressing process at various reduction in height

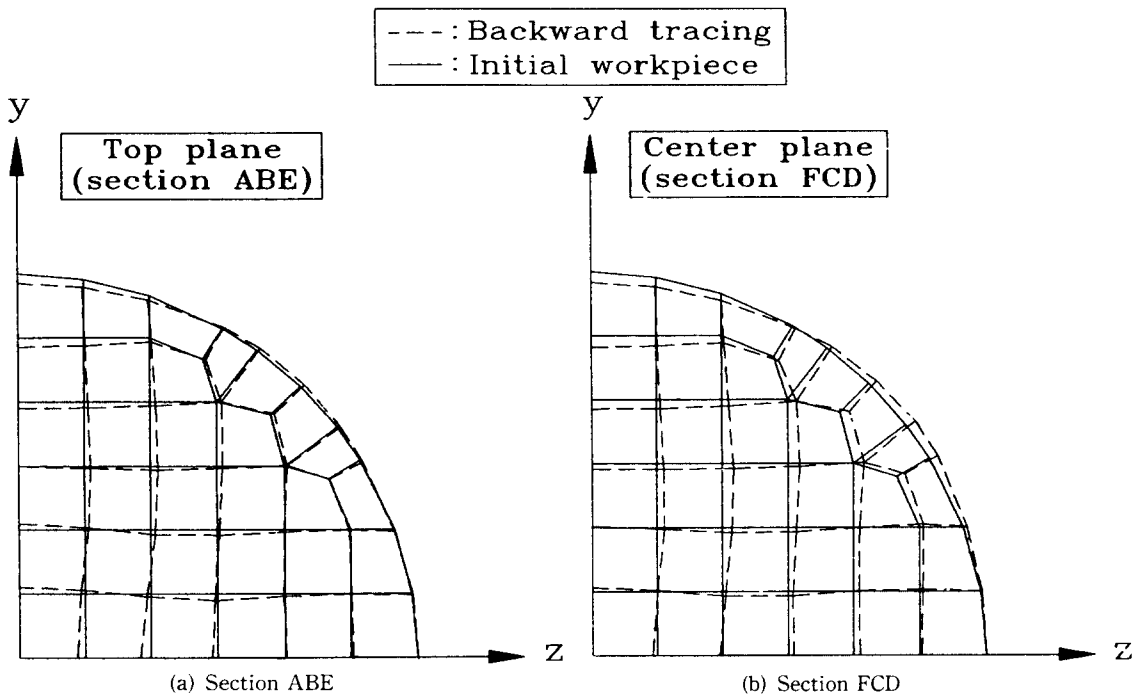


Fig. 14 Comparisons of the outer contours on yz cross section for the initial cylindrical workpiece and the final shape obtained from backward tracing simulation of side pressing process

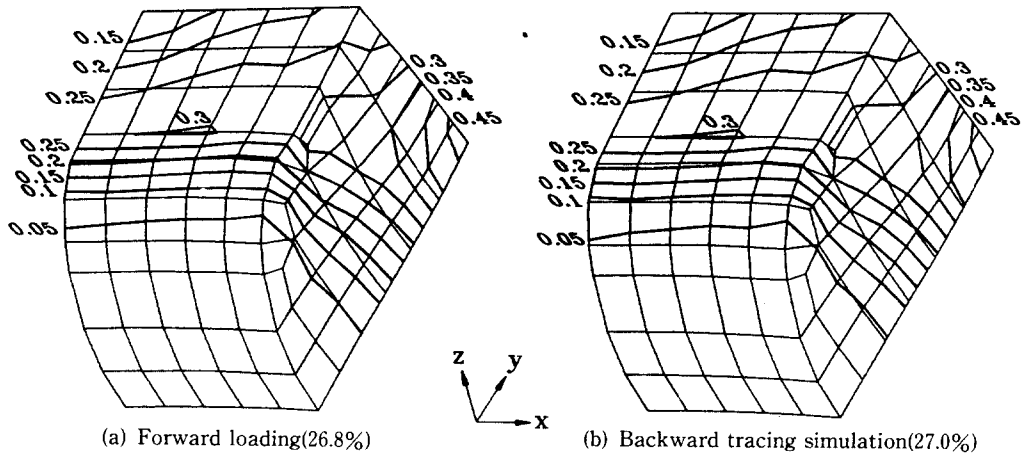


Fig. 15 Distributions of effective strain at about 27.0% reduction in height of side pressing process

의 적용에 있어서 경계조건의 제어는 아주 중요한 문제임을 알 수 있다. 이러한 경계조건은 전방하중과정 시뮬레이션의 정보를 토대로 사용자에게 의하여 적절히 제공될 수 있으므로, 제공된 경계조건에 따라 임의의 이전 단계에서의 변형형상이 결정된다. 따라서 전방하중과정 시뮬레이션에서 원하는 최종제품을 성형할 수 있는 초기소재 및 예비성형체의 결정이 어려운 경우, 변형된 최종형상을 원하는 최종제품의 형상으로 수정한 다음, 역추적 기법을 적용하여 시뮬레이션을 행하면 원하는 최종제품으로 성형하기 위한 초기소재의 형상 및 예비성형체를 결정할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 3차원 역추적 기법의 확대 적용은 주로 비대칭인 3차원 변형을 하며, 다단계 공정이 주를 이루고 있는 금속성형공정의 예비성형체 설계 및 초기소재의 결정에 아주 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 강-소성 유한요소법에 포함된 역추적 기법을 이용하여 간단한 금속성형공정인 사각블럭 소재의 업셋팅과 실린더형 소재의 측면압축공정의 해석을 수

행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원 금속성형공정의 예비성형체 설계에 효과적으로 이용된 역추적 기법을 3차원으로 확장, 개발하였다.

(2) 3차원 강-소성 유한요소법을 이용하여 사각블럭 소재의 업셋팅과 실린더형 소재의 측면 압축공정의 전방하중과정 시뮬레이션을 수행한 후, 3차원 역추적 기법을 적용하여 변형된 소재를 원래의 초기 소재형상으로 되돌리는 시뮬레이션을 수행하였다. 두 가지의 해석 결과인 소재의 형상변화 및 유효변형률분포등의 비교를 통하여 3차원으로 확장, 개발한 역추적 기법의 타당성을 보였다.

(3) 이상의 연구 결과는 간단한 금속성형공정의 해석을 통하여, 3차원 금속성형공정에 역추적기법의 적용 가능성을 보인 것이며, 이는 금속성형공정의 설계에 중요한 사항인 예비성형체 및 초기소재의 결정에 아주 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Lange, K., 1958, "Closed-Die Forging of Steel," 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) Biswas, S. K. and Knight, W. A., 1975, "Preform Design for Closed Die Forgings: Experimental Basics for Computer Aided Design," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 15, pp. 179~193.
- (5) Yu, G. B. and Dean, T.A., 1985, "A Practical Computer-Aided Approach to Mould Design for Axisymmetric Forging Die Cavities," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, No. 1, pp. 1~3.
- (6) Bariani, P. and Knight, W., 1988, "Computer-Aided Cold-Forging Process Design: A Knowledge Based System Approach to Forming Sequence Generation," Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 243~246.
- (7) Vemuri, K. R., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "BID: A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 29, No. 4, pp. 505~518.
- (8) Osman, F. H. and Bramley, A. N., 1984, "Forging and Preform Design Using UBET," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 536~568.
- (9) Sun, S. and Luan, Y. G., 1992, "Preform Design of Axisymmetric Forging Based on Reverse Simulation Technique of Die Forging Process," J. of Materials Processing Technology, Vol. 34, pp. 349~356.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Hwang, S. M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform Design in Shell Nosing at Elevated Temperatures," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 27, No. 1, pp.1~14.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) Kang, B. S., 1991, "Process Sequence Design in a Heading Process," J. of Materials Processing Technology, Vol. 27, pp. 213~226.
- (17) 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.
- (18) Park, J. J. and Kobayashi, S., 1984, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Block Compression," Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, pp. 165~176.

- (19) Surdon, G. and Chenot, J. L., 1987, "Finite Element Calculation of Three-Dimensional Hot Forging," *Int. J. Mech. Engng.*, Vol. 24, pp. 2107~2117.
- (20) 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.
- (21) 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.
- (22) 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.
- (23) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method," Oxford Univ. Press.
- (24) Chen, C. C. and Kobayashi, S., 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Method Analysis of Ring Compression," *ASME, AMD*, Vol. 28, pp. 163~174.