

〈논 문〉

강-소성 유한요소법의 역추적기법을 이용한 정밀정형 셸 노우징 부품의 성형공정 개발과 실험적 증명

김상현* · 이진희** · 강범수** · 임학진***

(1995년 10월 9일 접수)

Process Development to Form Net-Shape Nosing Shells by the Backward Tracing Scheme of the Rigid-Plastic FEM and Its Experimental Confirmation

Sang-Hyun Kim, Jin-Hee Lee, Beom-Soo Kang and Hak-Jin Lim

Key Words : Net-Shape Nosing Shell(정형 노우징 셸), Rigid-Plastic FEM(강-소성 유한요소법), Backward Tracing Scheme(역추적기법), Loading Simulation(하중과정 시뮬레이션), Preform(예비성형체)

Abstract

A preform is designed by the backward tracing scheme of the rigid-plastic finite element method(FEM) for net-shape shell nosing components without machining after forming. The current process of the shell nosing requires cost-consuming machining to produce final products. Here, the backward tracing scheme of the rigid-plastic FEM, a novel method for preform design of metal forming processes, derives a sound preform for net-shape shell nosing product. The current process is simulated by the rigid-plastic finite element analysis to check the metal flow involved in the forming with a trial preform and its modified preform. The two preforms are found to be inadequate for net-shape shell nosing product. The first application of the backward tracing scheme derives a preform producing a net-shape product numerically, but it is difficult to be formed economically as a preform. Thus an improved preform is designed by the backward tracing scheme, which is suitable for net-shape manufacturing of the shell nosing components in view of economy of production and forming characteristics of the product. The preform in the current process and a modified preform are confirmed by a series of experiments and the results give the same deformation with the numerical ones. Finally the newly designed preform by the FEM was experimentally proved to be adequate in obtaining net-shape products.

1. 서 론

최근 소성가공 산업은 소재비 상승, 작업환경의

악화로 인한 숙련 기술자의 부족 및 다품종 소량생산 등의 문제점을 극복하기 위하여 생산성 향상, 예비성형공정과 최종성형 후 기계가공의 최소화를 통한 비용절감에 주력하고 있다. 그러나 실제 산업 현장에서는 설계자의 경험적 지침, 직관 및 시험에 의한 시행착오과정을 통하여 공정설계를 행하고 있으므로 시간과 비용면에서 효과적이지 못하며, 특

*대한항공

**회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

*** (주) 풍산

히 정밀성형이 요구되는 경우에는 심각한 문제가 된다. 따라서 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 정형(net-shape) 부품의 생산을 위한 소성가공 공정설계에 대한 관심이 고조되고 있다. 소성가공 공정설계는 공정의 결정, 다이설계 및 예비성형체(preform) 설계 등의 많은 영역을 포함하고 있다. 특히 일반적으로 원하는 최종부품을 한번의 성형공정으로 생산할 수 없는 경우가 많아 여러번의 예비성형공정이 포함된 다단계 성형공정이 요구되므로, 소성가공 공정설계에서 중요한 사항 중의 하나는 예비성형체와 공정절차의 설계이다.^(1~3)

따라서 산업현장에서의 시행착오를 줄이기 위하여 컴퓨터이용 설계방법들이 여러 가지 소성가공 공정설계에 활발히 이용되고 있다. 이는 크게 경험적 규칙, 문헌 및 핸드북 등을 재고찰하여 수립된 설계규칙과 초등해법, 상계법 등이 통합된 컴퓨터이용 공정 및 금형설계 시스템,^(4~6) 상계요소법(UBET)^(7,8) 및 유한요소법 등이 있으나, 일반적으로 공정 및 금형설계에 중요한 정보인 소재유동, 변형률분포 및 성형하중 등과 같은 자세한 정보를 제공하는 유한요소법의 적용이 확대되고 있다. 특히, Park 등⁽⁹⁾이 유한요소법의 능력을 이용하여 소성가공 공정에 있어서 초기소재 및 예비성형체 설계를 효과적으로 수행할 수 있는 역추적기법(backward tracing scheme)을 제안한 이후, 여러가지 소성가공 공정설계에 효과적으로 이용되었다.^(10~13)

쉘 노우징(shell nosing)은 금형으로 한쪽 끝이 열린 튜브형상의 소재를 가압하여 튜브의 선단을 오므리는 성형방법의 하나이다. 일반적으로 쉘은 사용목적에 따라 노우징 후에 벽두께분포, 형상, 크기 등이 규정되어 있고, 예비성형체 형상의 작은 변화가 최종제품의 형상에 많은 영향을 미치므로, 원하는 최종제품을 얻기 위한 예비성형체 설계에는 많은 시행착오가 요구된다. Nadai⁽¹⁴⁾는 노우징 후에 일정한 벽두께를 가진 쉘의 예비성형체 설계를 노우징의 변형률을 기초로 실시하였다. Onat과 Prager⁽¹⁵⁾는 노우징에서의 벽두께 변화를 고찰하였고, Singh⁽¹⁶⁾는 쉘 노우징의 선형화된 이론을 제시하여 von-Mises 이론에 근사함을 보여 주었다. Lahoti⁽¹⁷⁾는 예비성형체 설계 목적의 컴퓨터 프로그램 개발하였다. 최근 예비성형체 설계를 효과적으로 행할 수 있는 역추적기법을 제안한 Park 등⁽⁹⁾은 쉘 노우징에 역추적기법을 적용시켜, 균일한 벽두께를 가지는 최종제품을 성형할 수 있는 예

비성형체를 구하였으며, Hwang 등⁽¹⁸⁾은 이를 더욱 발전시켜 온도계산이 포함된 역추적기법을 이용하여 쉘 노우징공정에서의 예비성형체 설계를 하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 쉘 노우징 부품은 노우징 공정 후, 다른 부품과의 조립을 위한 나사가공(tapping)을 용이하게 하기 위하여 노우징 선단 부위를 기계가공하고 있다. 이러한 후속의 기계가공은 대량으로 생산되는 쉘 노우징 부품의 경우, 소재 및 생산시간 등에 많은 손실이 초래되므로, 기계가공이 없는 정형의 쉘 노우징 부품을 생산할 수 있는 예비성형체 설계가 요구된다. 따라서 최종제품의 치수정밀도를 만족시키고, 노우징 선단부분에 후속 기계가공이 최소화된 정형부품의 생산이 가능한 공정설계를 강-소성 유한요소법 및 역추적기법을 사용하여 수행하였다. 먼저 실제 현장에 적용되고 있는 현 공정의 예비성형체를 이용하여 하중과정 시뮬레이션(load simulation)을 행하였다. 이를 토대로 기계가공이 없는 정형부품의 성형을 위한 예비성형체를 역추적기법을 이용하여 구하였으며, 역추적 시뮬레이션으로 구한 예비성형체를 최종금형으로 하중과정 시뮬레이션을 행하여 정형의 최종제품으로 성형이 됨을 확인하였다. 또한 역추적기법을 사용하여 구한 예비성형체를 제작하여 쉘 노우징 실험을 행하였다. 이를 통하여 역추적기법으로 설계된 예비성형체로 정형의 최종제품을 성형할 수 있다는 것을 검증하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 역추적기법은 소성가공 공정설계에 있어서의 예비성형체 설계에 아주 유용함을 알 수 있었다.

2. 이론 해석

2.1 강-소성 유한요소 수식화

강-소성 유한요소법에 대한 이론과 수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 비압축성 조건을 만족시키기 위한 벌칙함수(penalty function) K 를 도입하면, 강-소성 재료에 대한 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

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

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}$, $\dot{\epsilon} = \sqrt{2/3}(\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$

σ'_{ij} 는 편차응력, f_i 는 표면외력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도이다.

표면외력으로 주로 작용하는 금형과 소재사이의 마찰의 처리를 위하여, 마찰면에서의 중립점 발생으로 인한 특이성을 피하기 위하여 다음의 식을 사용한다.

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

여기서, m 은 마찰상수, k 는 소재의 전단항복응력, \tilde{v}_r 은 금형에 대한 소재의 상대속도, α 는 \tilde{v}_r 에 비하여 아주 작은 양수이다. 변형체 내의 변형률속도가 영(zero)이거나 아주 작은 경우를 위하여, 유효 변형률속도가 가정한 유효 변형률속도 옵션 $\dot{\epsilon}_0$ 보다 작을 때는 다음과 같이 구성방정식을 수정한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_0}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \text{ for } \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0 \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면, 절점속도벡터 \tilde{v} 에 대한 비선형방정식이 된다.

$$\Omega(\tilde{v}) = K(\tilde{x}, \bar{\epsilon}, \bar{\sigma})\tilde{v} - F(\tilde{x}, \tilde{v}) = 0 \quad (4)$$

여기서, K 는 강성행렬(stiffness matrix), F 는

힘벡터(load vector), \tilde{x} 는 절점좌표벡터이다. 식 (4)는 Newton-Raphson법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법을 이용하였다.

2.2 역추적기법

역추적기법은 최종형상과 공정조건이 주어져 있을 경우, 변형과정중의 임의의 단계에서의 중간형상을 예측하는 것이다. 하중과정 시뮬레이션과 마찬가지로 역추적기법을 이용한 시뮬레이션에서도 유한요소법이 이용된다. Fig. 1은 역추적기법의 개념 및 하중과정과 역추적과정 동안의 형상변화를 도식적으로 나타낸 것이다.

강-소성 유한요소해석의 하중과정 시뮬레이션 동안의 좌표변화는 다음과 같다.

$$\tilde{x}_{0-1}((n-1)^{th} \text{step}) \xrightarrow{\Delta t} \tilde{x}_0(n^{th} \text{step}) \quad (5)$$

여기서, $\tilde{x}_0 = \tilde{x}_{0-1} + \Delta t \tilde{v}_{0-1}$ 은 $t = t_{0-1}$ 에서의 속도장이다. 식 (5)에서 보는 바와 같이 하중과정 시뮬레이션 동안의 형상변화는 임의의 n 번째 단계(시간 $t = t_0$)에서의 변형물체의 기하학적 형상 \tilde{x}_0 (Fig. 1의 점 Q)는 시간 $t = t_{0-1}$ ($n-1$ 번째 단계)에서의 형상 \tilde{x}_{0-1} (점 P)로부터 변형된 것이며, 시간 t_0 까지의 전 유효 변형률은 다음과 같이 정의된다.

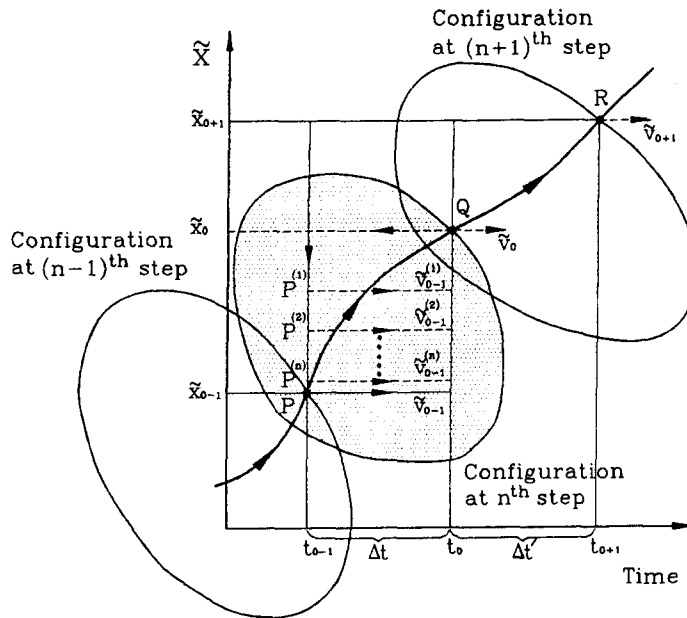


Fig. 1 Concept of the backward tracing scheme and change of the configuration during forward loading and backward tracing

$$\bar{\epsilon}_0 = \bar{\epsilon}_{0-1} + \int_{t_{0-1}}^{t_{0-1} + \Delta t} \dot{\bar{\epsilon}} dt = \bar{\epsilon}_{0-1} + \dot{\bar{\epsilon}}_{0-1} \Delta t \quad (6)$$

역추적 시뮬레이션 동안의 좌표변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{x}_0(n^{th} \text{step}) \xrightarrow{\Delta t} \bar{x}_{0-1}((n-1)^{th} \text{step}) \quad (7)$$

여기서, $\bar{x}_{0-1} = \bar{x}_0 - \Delta t \bar{v}_{0-1}$ 이다.

역추적기법의 경우, 식 (7)과 같이 임의의 n 번째 단계(시간 $t = t_{0-1}$)의 변형물체의 기하학적 형상 \bar{x}_0 을 근거로 하여 $n-1$ 번째 단계(시간 $t = t_{0-1}$)의 \bar{x}_{0-1} 를 구하는 것이다. 즉, 점 Q 에서의 기하학적 정보 \bar{x}_0 를 토대로 \bar{v}_{0-1} 을 결정하여 점 P 의 위치를 역으로 구하는 것이다. 또한 역추적($t \leq t_0$)의 경우, 시간 $t = t_{0-1} = t_0 - \Delta t$ 에서의 \bar{x}_{0-1} 과 $\bar{\epsilon}_{0-1}$ 는 식 (4)와 함께 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\bar{x}_0 - \bar{x}_{0-1} = \bar{v}_{0-1} \Delta t, \quad \bar{\epsilon}_0 - \bar{\epsilon}_{0-1} = \dot{\bar{\epsilon}}_{0-1} \Delta t \quad (8)$$

주어진 시간증분에 대해서, 시간 t_{0-1} 에서 식 (8)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$K(\bar{v}_{0-1}, \bar{x}_0, \bar{\epsilon}_0, \dot{\bar{\epsilon}}_{0-1}) \bar{v}_{0-1} - F(\bar{x}_0, \bar{v}_{0-1}) = 0 \quad (9)$$

여기서, \bar{x}_0 와 $\bar{\epsilon}_0$ 는 이미 알고 있는 값이며, $\dot{\bar{\epsilon}}_{0-1}$ 은 \bar{v}_{0-1} 의 함수이다. 따라서 식 (9)는 시간 t_{0-1} 에서의 경계조건들이 주어진다면 \bar{v}_{0-1} 에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 $t_{0-2}, t_{0-3}, \dots, t_{0-n}$

대한 해를 구해나가면, 임의의 이전 단계에 대한 변형물체의 형상을 구할 수 있다.

3. 문제정의 및 계산조건

현재 산업현장에서 사용되고 있는 쉘 노우징 제품의 생산공정은 Fig. 2와 같이 소재절단, indenting, 1차, 2차 드로잉(drawing), calibrating, 노우징 및 최종가공 순으로 되어있다. 특히 노우징 공정은 도면에 규정된 형상을 만족시키기 위해 노우징 후 노우즈의 끝단 부위를 정단, 드릴링 및 나사가공을 하여 다른 부품과 조립할 수 있도록 하고 있다. 즉, Fig. 2(f)의 A부분에서 보듯이 나사가공을 위해서 노우즈의 선단부분(검은 부분)을 기계가공하여야 한다. 따라서 현재의 생산공정은 노우징 후 기계가공을 하고 있기 때문에 노우징 공정에 직접 영향을 미치는 calibrating 전의 최종 드로잉형상을 그다지 중요시하지 않고 있다. 이로 인하여 노우징 후 제품의 형상, 치수 등이 불규칙하여, 후속의 기계가공으로 인한 인력, 재료 및 시간 등의 손실이 발생하고 있으므로, 기계가공을 최소화하는 정형의 쉘 노우징 제품으로 성형이 가능한 예비성형체(Fig. 2(d)의 2차 드로잉 후의 형상)의 설계가 절실히 요구된다. 따라서 2차 드로잉 공정 후의 형상을 적절히 설계한다면, 성형 후 기계가공이 거의 없는 공정설계가 가능할 것이며, 공정수 역시 줄일

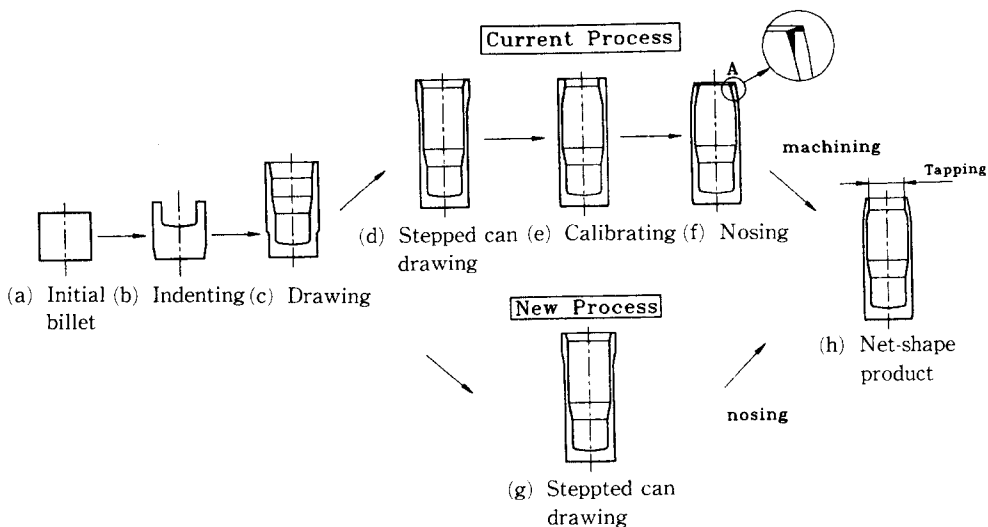


Fig. 2 The current process and newly suggested process of cold forging to form a shell nosing product

수 있다. 본 연구에서는 현 공정에서 2차 드로잉 공정 후의 형상을 예비성형하여 최종공정인 노우징 공정을 유한요소 하중과정 시뮬레이션을 행한 후, 이 결과를 토대로 기계가공을 최소화하는 정형의 노우징 부품을 성형할 수 있는 예비성형체를 역추적기법으로 구하여, 이를 쉘 노우징 실험을 통하여 검증, 예비성형체 설계에 있어서의 역추적기법의 유용성을 보이는 것이다.

유한요소 시뮬레이션 및 실험에 사용한 소재는 AISI 1018이며, 소재의 응력-변형률관계를 알기 위하여 실린더 압축시험을 행하였다. 시험장치는 SATEC 200 HVL 100톤 만능시험기를 사용하였다. 직경 10 mm, 높이 10 mm인 압축시편을 이용하여, 압축속도 5 mm/min로 높이 감소율이 70% 일 때까지 압축하였다. 실험으로 구한 하중-변위곡선에서 응력-변형률선도를 구한 후, 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 930.91(\bar{\epsilon})^{0.18} \text{ [MPa]}$$

다음으로 금형과 소재사이의 마찰상수를 구하기 위하여 링 압축시험을 수행하였다. 시편의 치수는 외경 24 mm, 내경 12 mm, 높이 8 mm로 외경 : 내경 : 높이의 비가 6 : 3 : 2로 하였다. 시편은 쉘 노우징 시험에 사용한 윤활제와 동일한 상태인 인산염 피막 후, 비누피막 처리를 하였다. 시험장치 및 속도는 실린더 압축시험과 동일하며, 실내온도는

20 °C였다. 높이감소율을 약 20%에서 60%까지 10%씩 증가시키면서 시편의 내경 및 높이를 측정하였다. 높이감소율과 내경변화율로 부터 얻은 관계곡선과 유한요소법으로 계산된 마찰상수 보정곡선을 비교하여 구한 마찰상수 m 은 0.1이다.

4. 쉘 노우징 공정설계

Fig. 3은 쉘 노우징 금형 및 최종제품의 형상 및 치수를 나타낸 것이다. 현 공정의 예비성형 공정수를 줄이면서, 노우징 선단부분에 기계가공이 없는 정형의 최종제품을 성형하기 위한 예비성형체를 구하기 위하여, 강-소성 유한요소 하중과정 및 역추적 시뮬레이션을 행하였다.

4.1 유한요소 하중과정 시뮬레이션

먼저 정형의 최종제품을 성형할 수 있는 예비성형체를 구하기 위하여, 실제 생산공정에 가장 영향을 많이 미치는 2차 드로잉 후의 형상(Fig. 2(d))을 시험 예비성형체로 하여 쉘 노우징 공정을 하중과정 시뮬레이션하였다. Fig. 4(a)는 시험 예비성형체의 형상과 치수이며, Fig. 4(b)~Fig. 4(d)는 Fig. 3(a)의 최종금형으로 노우징 공정을 시뮬레이션한 결과이다. 실제 최종제품(Fig. 3(b))과 시뮬레이션 결과의 형상을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 시뮬레이션 결과이며, Fig. 5(b)는

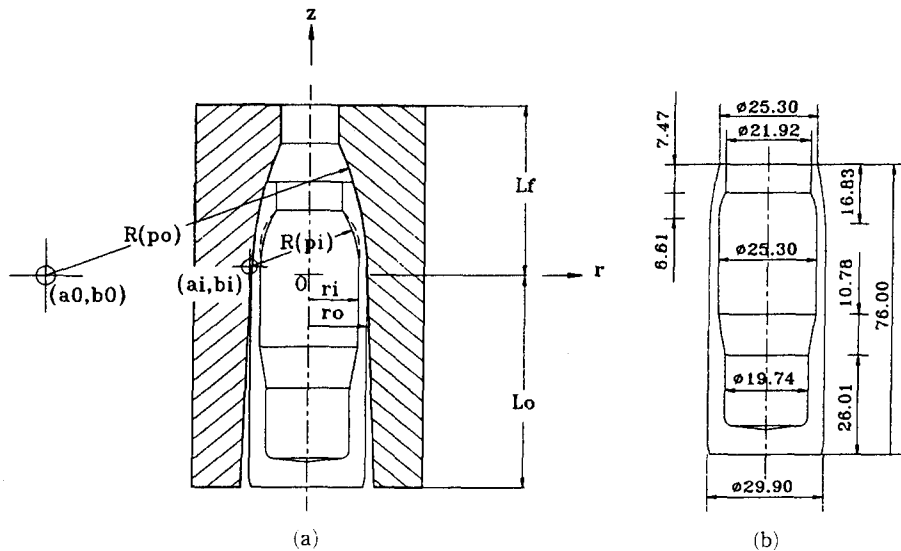


Fig. 3 Dimensions and configurations of die and final shell product: (a) die configuration and relevant dimensions, (b) dimensions of the final shell product

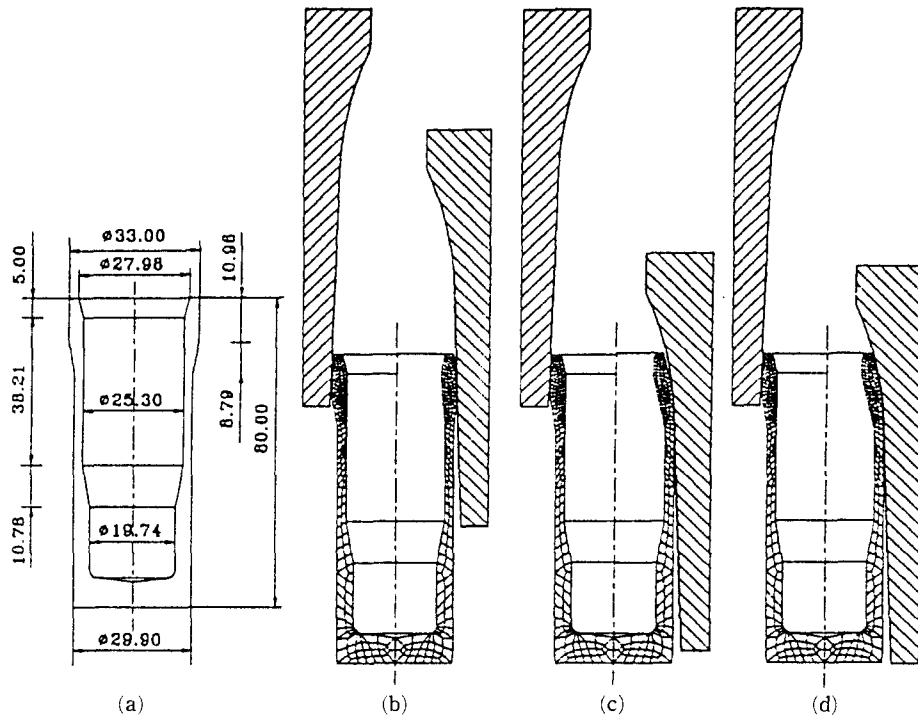


Fig. 4 Loading simulations of shell nosing for the first trial preform : (a) dimensions and configuration of the first trial preform, (b) dtroke of 42%, (c) dtroke of 85%, (d) dtroke of 100%

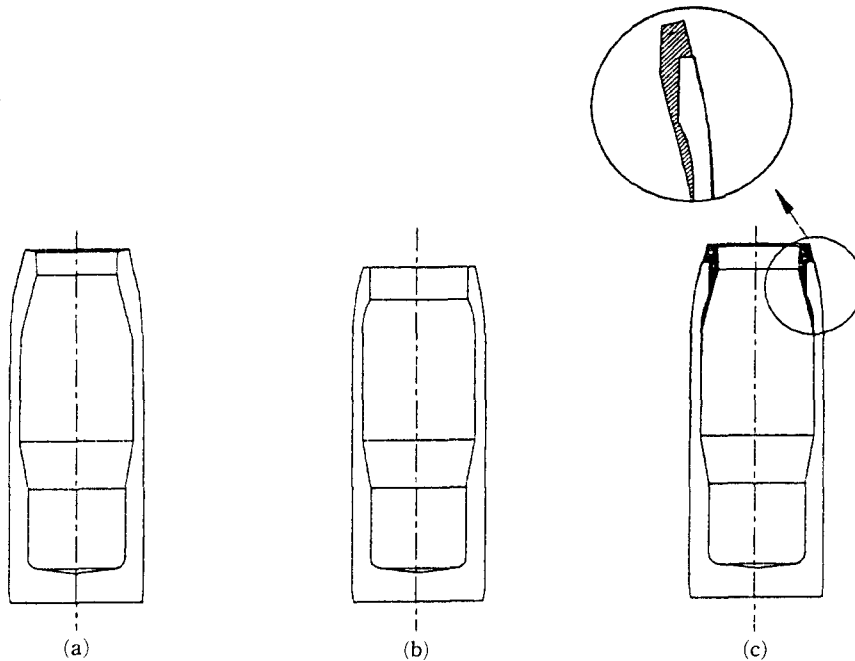


Fig. 5 The comparison between simulation result and final product : (a) simulation result of the first trial preform, (b) configuration of the final product, (c) the derivation between the final product and simulation result(The hatched area means the part to be machined away)

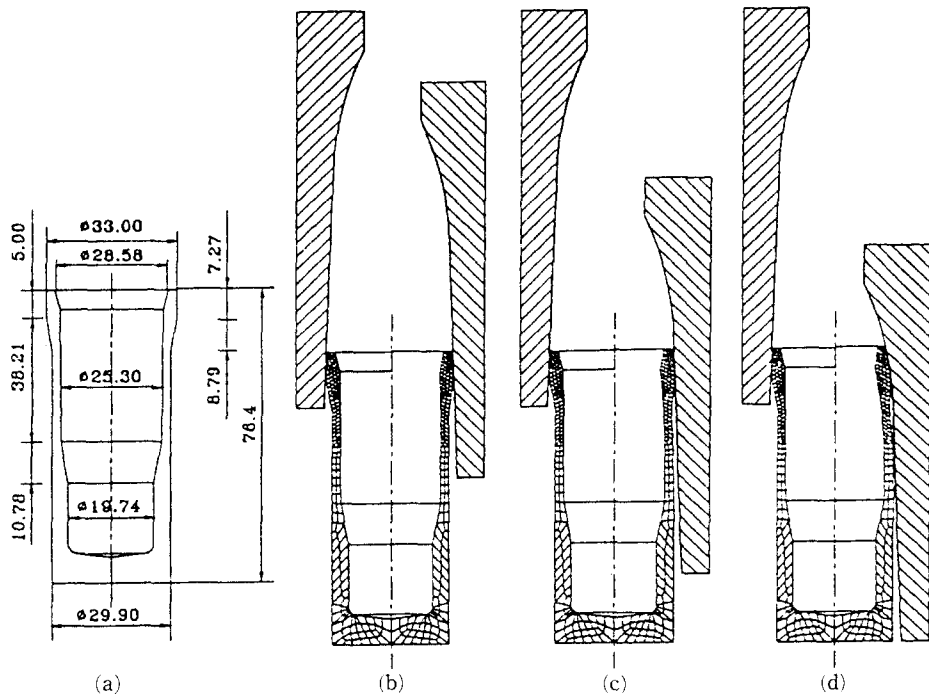


Fig. 6 Loading simulations of shell nosing for the modified preform : (a) dimensions and configuration of the modified preform, (b) stroke of 36%, (c) stroke of 72%, (d) stroke of 100%

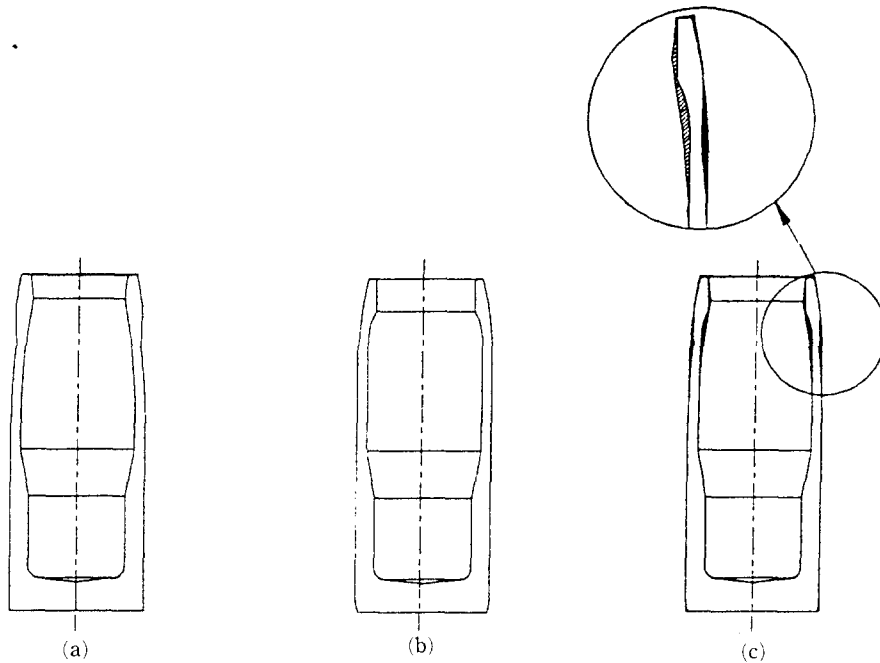


Fig. 7 The comparison between simulation result and final product : (a) simulation result of the modified preform, (b) configuration of the final product, (c) the derivation between the final product and simulation result (The hatched area means the part to be machined out and the darkened area means the part to be added)

최종제품의 형상이다. Fig. 5(c)는 최종제품의 형상과 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5(c)에서 보듯이 노우즈의 바깥쪽 형상은 최종제품과 거의 일치하지만, 노우즈의 안쪽과 선단 부분에는 기계가공이 필요한 부분(빗금친 부분)이 발생하였다. 이는 예비성형체 및 최종부품의 체적 계산을 통해서도 알 수 있었다. 특히, 나사 가공부위와 내부 원통부위를 연결하는 곳은 기계가공을 할 때, 인위적인 결합이 존재하여 사용중 가공부위가 위험의 요인이 될 수 있으므로 현재의 공정에서는 이 부위의 가공을 억제하고 있는 실정이다.

기계가공을 최소로 하는 최종제품을 구하기 위해

여 시험 예비성형체의 시뮬레이션 결과를 토대로 노우징 후, 기계가공되는 부분을 예비성형체에서 미리 제거하는 방법으로 수정된 예비성형체를 구하였다. 시험 예비성형체와 형상은 유사하지만, 체적이 최종제품과 동일하게 설계하였다. Fig. 6(a)는 수정된 예비성형체의 형상과 치수이다. Fig. 6(b)~Fig. 6(d)는 Fig. 3(a)의 최종금형으로 노우징 공정을 시뮬레이션한 결과이다. 최종제품(Fig. 3(b))과 수정한 예비성형체로 시뮬레이션 결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 시뮬레이션 결과이며 Fig. 7(b)는 최종제품의 형상, 그리고 Fig. 7(c)는 이들의 형상 차이를 나타낸 것이다.

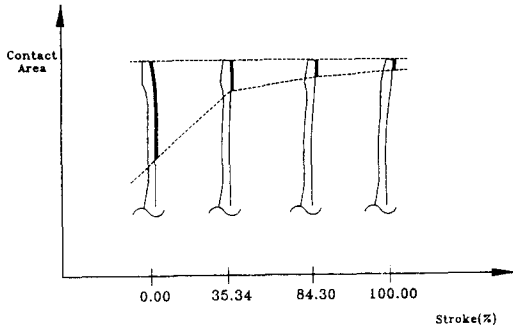


Fig. 8 Description of contact area between die and workpiece during backward tracing simulation

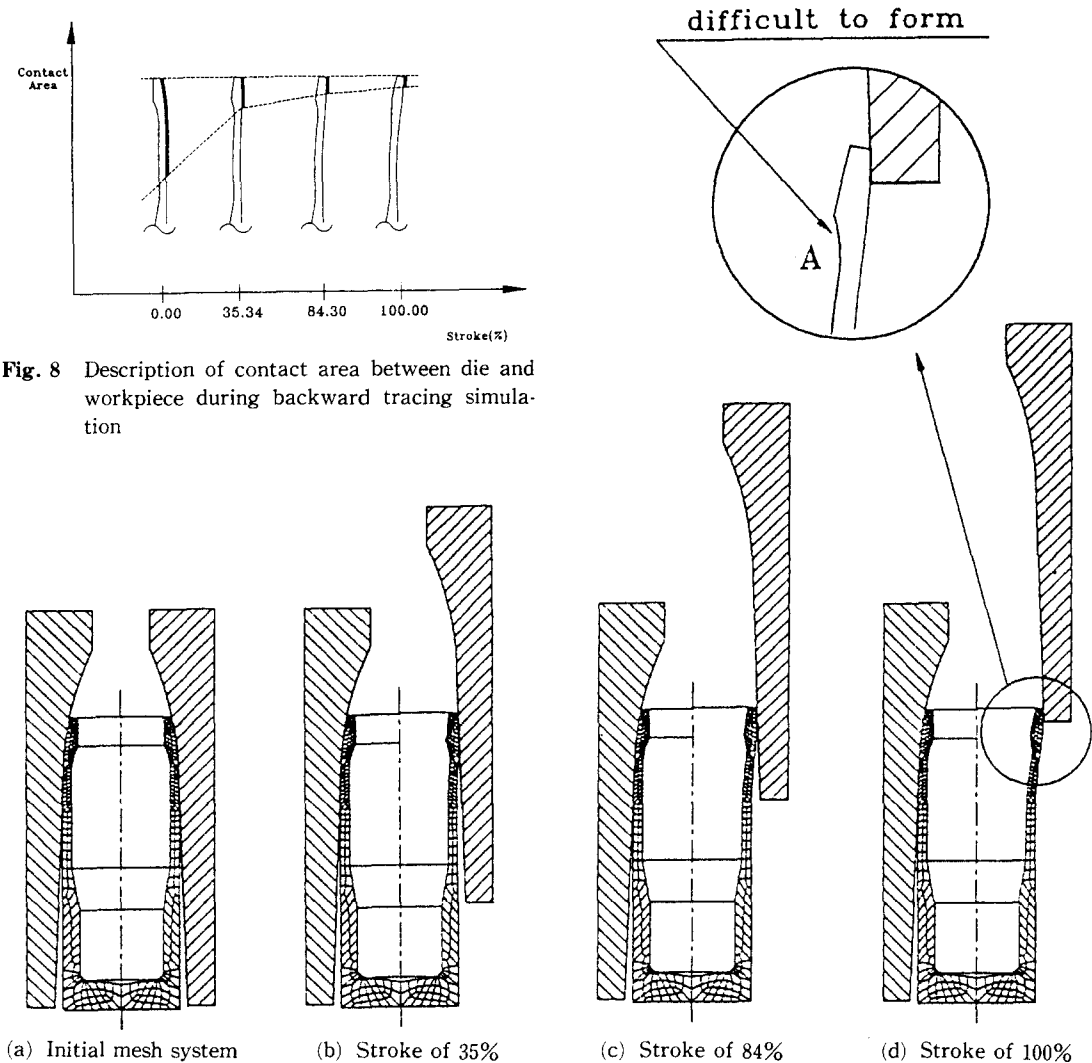


Fig. 9 Backward tracing simulation to get a better preform

목적하는 쉘의 형상과는 일치하지 않고 있으나, 초기 예비성형체의 시뮬레이션의 결과에 비해 개선된 결과를 얻었다. 노우즈의 내부에 기계가공이 필요한 부분(빛금친 부분)이 발생하였으며, 노우즈의 바깥쪽 부분(검은 부분)은 성형이 되지 않은 부분이 발생하였다.

4.2 역추적 시뮬레이션

시행착오를 통한 하중과정 시뮬레이션만으로 원하는 최종제품을 성형할 수 있는 예비성형체를 구하는 것은 어렵다. 따라서 앞의 하중과정 시뮬레이션을 토대로 정형의 최종제품을 얻을 수 있는 예비성형체를 구하기 위하여 역추적기법을 사용하였다. 역추적기법의 적용에 있어서 경계조건의 제어는 아주 중요한 문제이다. 경계조건은 하중과정 시뮬레이션의 정보를 토대로 사용자에게 의하여 적절히 제공된다. 제공된 경계조건에 따라 변형전 소재의 형상이 구해지므로, 하중과정 시뮬레이션에서 원하는 최종제품으로 성형되지 않는으나 근접한 형상을

얻은 경우, 변형된 최종형상을 원하는 최종형상으로 수정한 후, 역추적 시뮬레이션을 행하면 원하는 최종제품으로 성형할 수 있는 예비성형체를 구할 수 있다. 따라서 수정 예비성형체로 하중과정 시뮬레이션하여 구한 최종제품(Fig. 6(d))의 결점을 수정하여 실제 최종제품의 형상으로 변형하였다. 수정된 부분의 유효 변형률은 나머지 부분의 정보를 토대로 보간하였다. 역추적 시뮬레이션 동안의 경계조건의 변화는 하중과정과 반대이므로, 하중과정 시뮬레이션에서 다이와 소재의 접촉 및 분리 위치를 구하여, 역추적과정에서는 이와 반대로 절점을 제어하였다. 이에 대한 설명이 Fig. 8에 나타나 있다. 역추적 시뮬레이션에 필요한 그 이외의 모든 정보는 하중과정 시뮬레이션에서 얻은 결과를 이용하였다.

Fig. 9는 원하는 최종형상으로 성형되지 않는으나, 최종제품의 형상과 유사한 Fig. 6(d)를 앞의 설명대로 최종제품으로 수정, 역추적 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 9(d)와 같이 새로운 예비성형체를

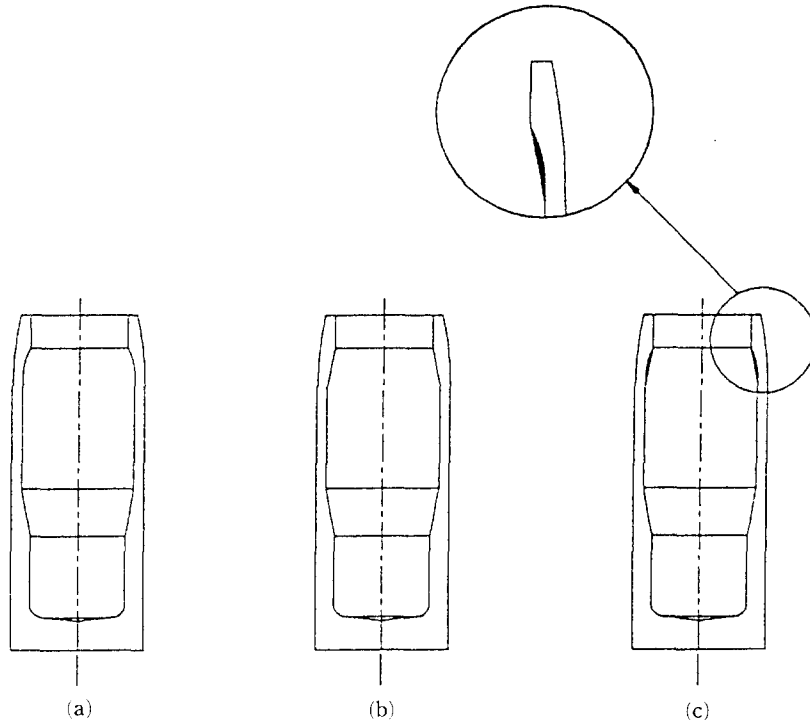


Fig. 10 The comparison between real final product and modified final product : (a) configuration of the real final product, (b) configuration of the modified final product, (c) the derivation between the real final product and modified final product.(The darkened area means a part to be added)

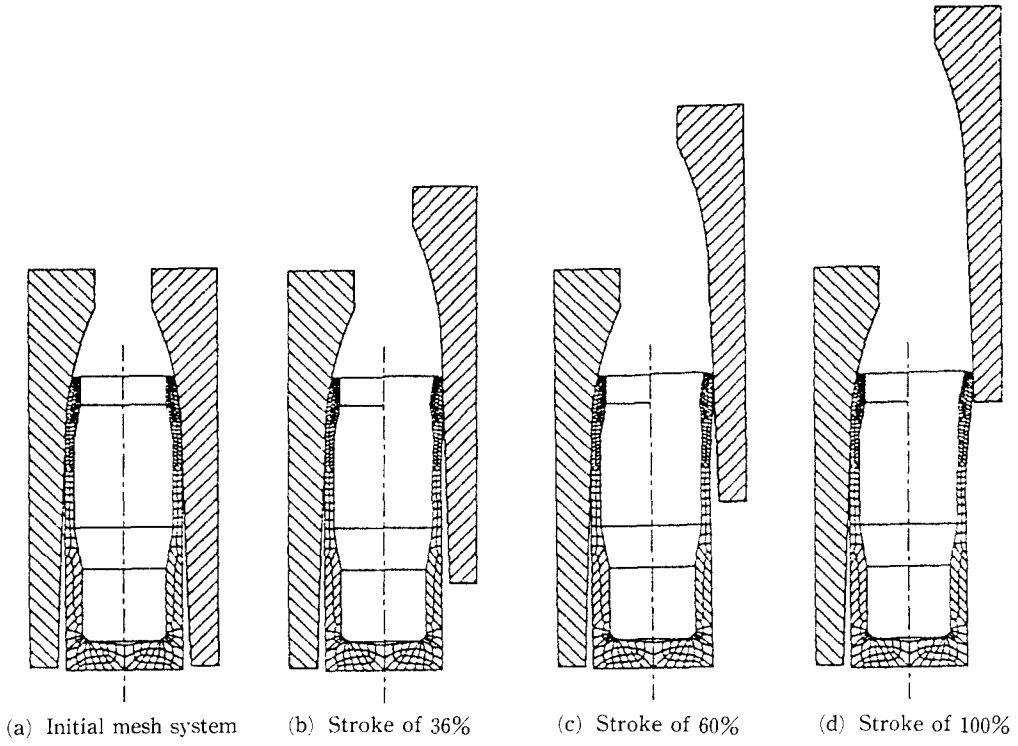


Fig. 11 The second trial of backward tracing simulation with modification to get a sound preform

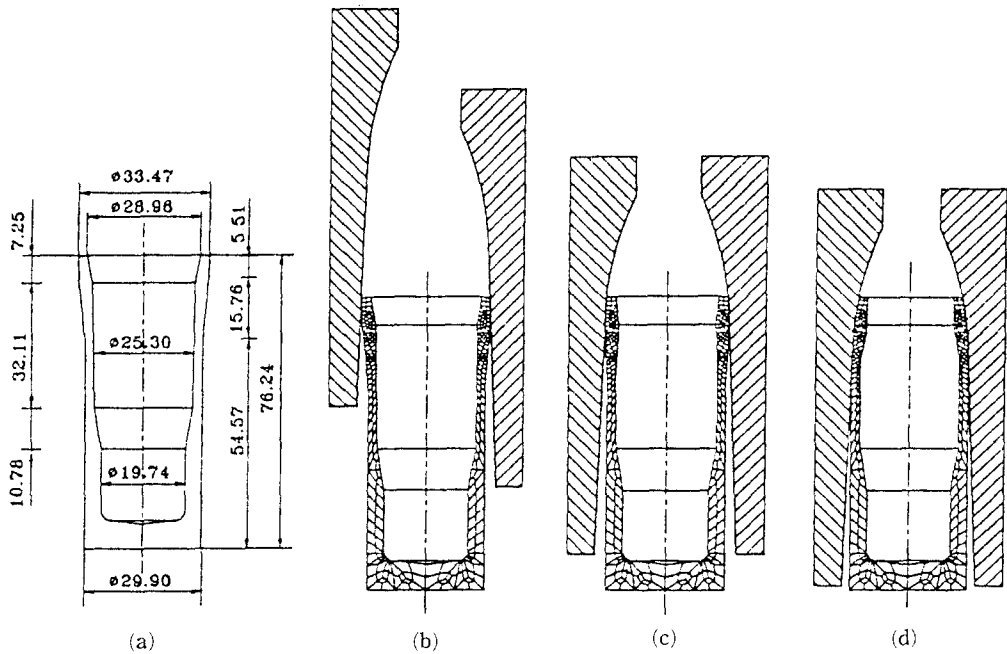


Fig. 12 The final forward loading simulation : (a) dimensions and configuration of the final preform derived from backward tracing simulation with modification, (b) stroke of 29%, (c) stroke of 66%, (d) stroke of 100%

구하였다. 그러나 여기서 구한 예비성형체의 형상은 Fig. 9(d)의 "A" 부분에서 보듯이, 실제 생산 현장에서 성형하기가 매우 어려우므로, 실제부품의 성능에 크게 영향을 미치지 않는 최종부품의 내부 곡률을 약간 증가시켰다. 이에 대한 설명이 Fig. 10에 나타나 있다. 최종제품의 내부곡률을 증가는 Fig. 9의 "A" 부분을 곡률부분을 감소시켜, 실제 현장에서 성형하기 쉬운 예비성형체를 구할 수 있을 것이다. Fig. 11은 수정된 최종형상으로 역추적 시뮬레이션을 행한 결과이다. Fig. 11(d)에서 보듯이 실제 현장에서 성형하는 데 어려움이 없는 새로운 예비성형체를 구할 수 있었다.

4.3 최종 하중과정 시뮬레이션

역추적기법을 통하여 설계된 예비성형체가 하중과정 시뮬레이션을 행하였을 때, 정형의 최종제품으로 성형되는지를 확인하여 보았다. 역추적기법을 통해서 구한 최종 예비성형체(Fig. 11(d))는 생산

현장의 상황을 고려하여 예비성형체의 곡선부분을 여러개의 직선으로 약간 수정하였다. Fig. 12(a)는 수정한 예비성형체의 형상과 치수이다. 처음에 제시한 공정도의 예비성형체와 유사하지만 노우즈의 선단부분에 약간의 차이가 있다. 이를 최종형상으로 하중과정 시뮬레이션을 한 결과가 Fig. 12(b) ~ Fig. 12(d)이다. Fig. 12(d)에서 보듯이 실제 부품과 거의 일치하게 성형되었고, 노우즈의 선단부분도 기계가공이 없이 나사가공이 되도록 성형되었다. 이를 자세히 살펴보기 위하여 실제 최종제품, 역추적 시뮬레이션을 통하여 수정한 최종제품 및 역추적으로 구한 예비성형체로 최종 하중과정 시뮬레이션한 결과를 Fig. 13(a)에 나타내었다. 수정한 최종제품 및 역추적으로 구한 예비성형체로 최종 하중과정 시뮬레이션한 결과는 거의 일치하며, 거의 실제 최종제품으로 성형되었음을 알 수 있다. Fig. 13(b)는 유효 변형률분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 노우즈의 하단부는 거의 변형이 없었으

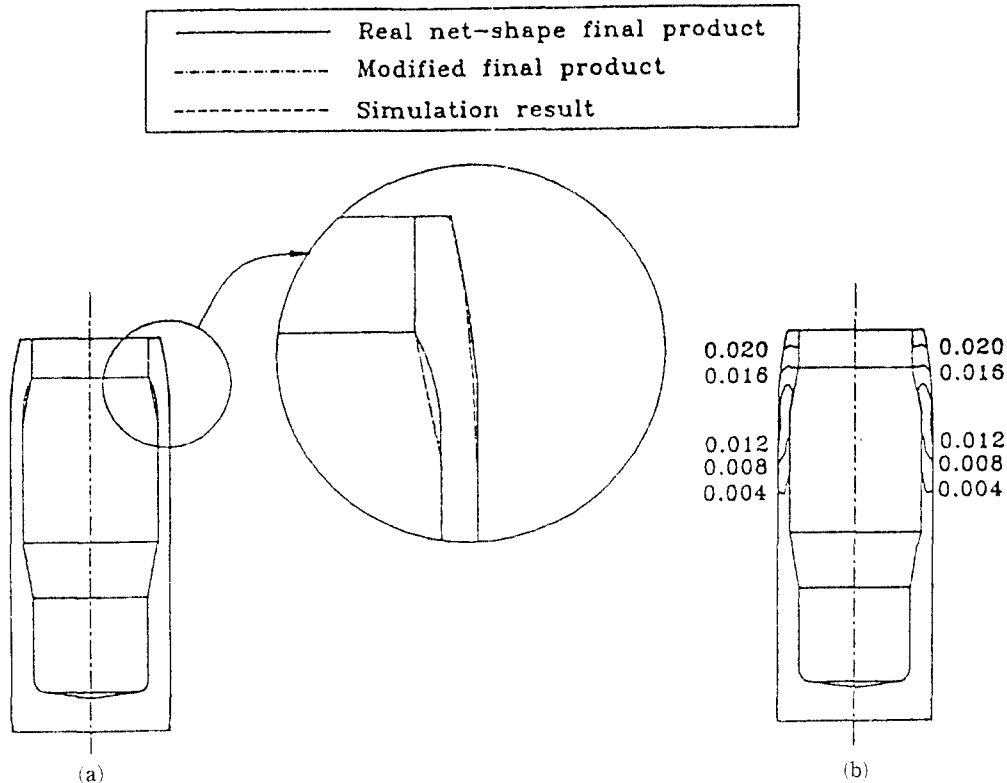
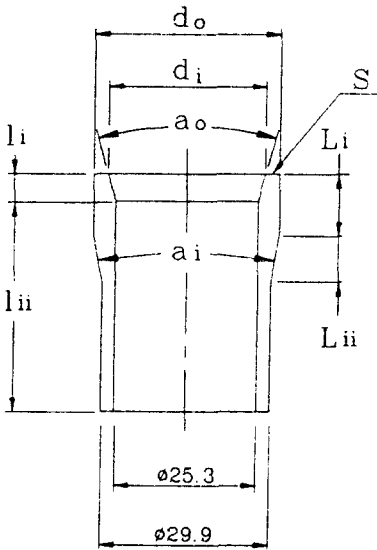


Fig. 13 Results of the final forward loading simulation : (a) the derivation of the real final product, modified final product and final shape to get simulation, (b) effective strain distribution of the final product

며 상단부로 올라갈수록 변형이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 최종 기계가공과 공정수를 줄이면서 정형의 최종제품을 성형할 수 있는 새로운 예비성형체를 역추적 시뮬레이션을 통하여 설계하였으며, 설계된 예비성형체를 다시 최종 하중과정 시뮬레이션으로 검증할 수 있었다.

5. 셸 노우징 실험 및 고찰

유한요소 하중과정 및 역추적 시뮬레이션을 통하여 설계한 예비성형체의 검증을 위하여 셸 노우징



Preform type	Dimension				
	d_o	d_i	a_o	a_i	l_i
First trial	33.00	27.98	30°	20°	5.00
Modified	33.00	28.58	36°	20°	5.00
Final	33.47	28.96	28°	13°	7.25

Preform type	Dimension			
	l_{ii}	L_i	L_{ii}	S
First trial	38.21	10.98	8.79	Straight
Modified	38.21	7.27	8.79	Straight
Final	32.11	5.91	15.78	Taper (10°)

Fig. 14 Dimensions of preforms for experiment

실험을 행하였다. 실험은 현 공정에서 사용되고 있는 2차 드로잉 공정 후의 형상(시험 예비성형체), 하중과정 시뮬레이션을 통해 설계된 수정 예비성형체 및 역추적 시뮬레이션을 통해 설계된 최종 예비성형체에 대하여 각각 행하였다. 각 예비성형체는 AISI 1018 열간 압출봉을 기계가공으로 제작하였고, 펀치와 예비성형체의 윤활은 BS1389 type I에

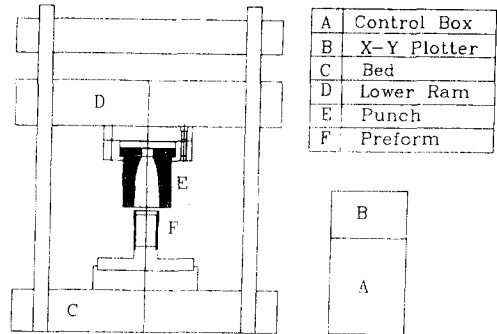


Fig. 15 Schematic diagram of test equipment

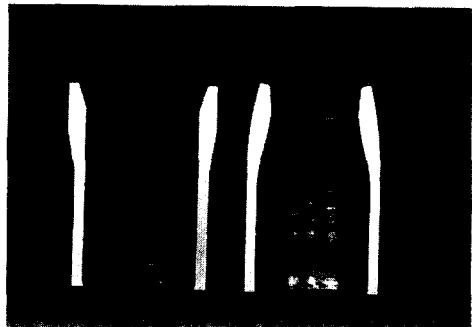


Fig. 16 Cross-section of nosed shell after nosing test (1/2 cut) : first trial preform and experiment result

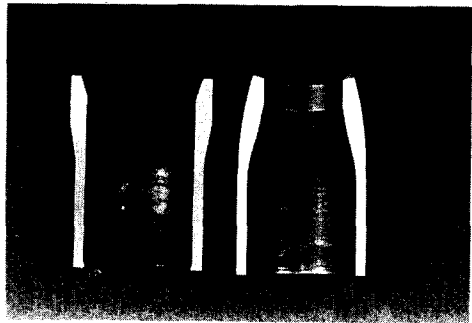


Fig. 17 Cross-section of nosed shell after nosing test (1/2 cut) : modified preform and experiment result

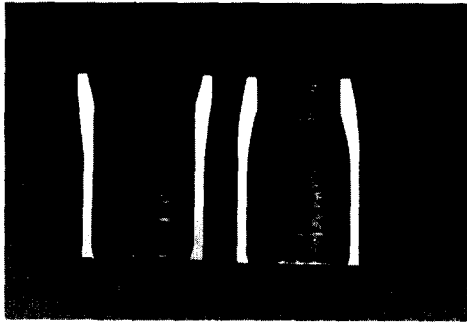


Fig. 18 Cross-section of nosed shell after nosing test (1/2 cut) : final preform derived from backward tracing simulation and experiment result

따라 인산염피막 후 비누처리를 하였다. Fig. 14는 실험에 사용한 예비성형체의 인산염피막 후 치수를 나타내며, 예비성형체의 전체길이는 유한요소 시뮬레이션의 결과, 쉘 하단부의 유효 변형률이 영 (Fig. 13(b) 참조)이므로 실험의 편의를 위하여 제거하였다. 실험은 동경시험기 제작소에서 만든 RH-50 유압식 만능시험기에서 행하였으며, 실험 장치의 개략도가 Fig. 15에 나타나 있다. 노우징에 사용된 펀치는 SKD-11종으로 열처리 후 경도가 HRC 60이며, 펀치 내부는 건식 래핑으로 표면조도 R_{max} 0.4로 가공하였다. 노우징 펀치는 고정치구로 만능시험기의 하부램에 고정하고, 시험기의 테이블에 예비성형체를 고정하였다. 램의 하강속도

는 25 mm/min으로 고정하였으며, 실험 후 치수 및 형상 측정을 위하여 1/2절개 후 절개면을 연마하였다.

Fig. 16, Fig. 17 및 Fig. 18은 각각의 예비성형체와 노우징 실험 후의 쉘을 1/2 절개하여 나타낸 것이다. Table 1은 실험 후의 제품치수와 최종제품의 치수(Fig. 2 참조)를 비교하여 나타내었다. Fig. 19는 노우징 실험 후의 형상과 최종제품 형상을 비교한 것이며, 세가지의 예비성형체를 실험한 결과, 외부윤곽은 다이내부의 곡률반경과 같은 83.5 mm를 이루고 있다. 노우즈 끝 부위는 초기 및 수정된 예비성형체를 노우징했을 경우, 노우즈 끝의 수직 및 수평 각도가 각각 12.50, 1.50 및 11.20, 3.80로 경사져 있으나, 최종 예비성형체의 경우는 수평과 수직을 이루고 있다. 나사가공 부위 길이는 6.1 mm, 6.7 mm, 7.9 mm로 최종제품의 규격인 최소 7.47 mm를 최종 예비성형체만이 만족함을 알 수 있다. 쉘 내부와 나사가공부위의 연결부는 초기 및 수정된 예비성형체의 경우는 각각 12.50, 12.00의 경사면을 이루고 있으나, 현장에서 제작이 용이하게 하기 위하여 쉘의 내부 곡면을 몇 개의 직선으로 수정하여 설계한 최종 예비성형체의 경우, 노우징 실험 결과 반경 28.3 mm의 곡면과 13.50의 경사면으로 연결되어 최종제품 규격을 만족하였다. 또한 오자이브(ogive : 노우즈부분의 곡선부) 길이는 각각 17.4 mm, 17.0 mm, 16.8 mm

Table 1 Dimensions of nosed shell after experiment

(Unit : mm)

	Specification	First trial preform	Modified preform	Final preform
Mouth Inner Diameter	21.9	17.9	19.5	21.8
Mouth Outer Diameter	25.3	24.0	25.0	25.3
Mouth Length	7.47 Min.	6.1	6.7	7.9
Radius of Outer Ogive[R(po)]	83.5	83.5	83.5	83.5
Radius of Inner Ogive[R(pi)]	28.2	Taper (12.5°)	Taper (12.0°)	Taper (13.5°-R28.3)
Length of Ogive	16.8	17.4	17.0	16.8

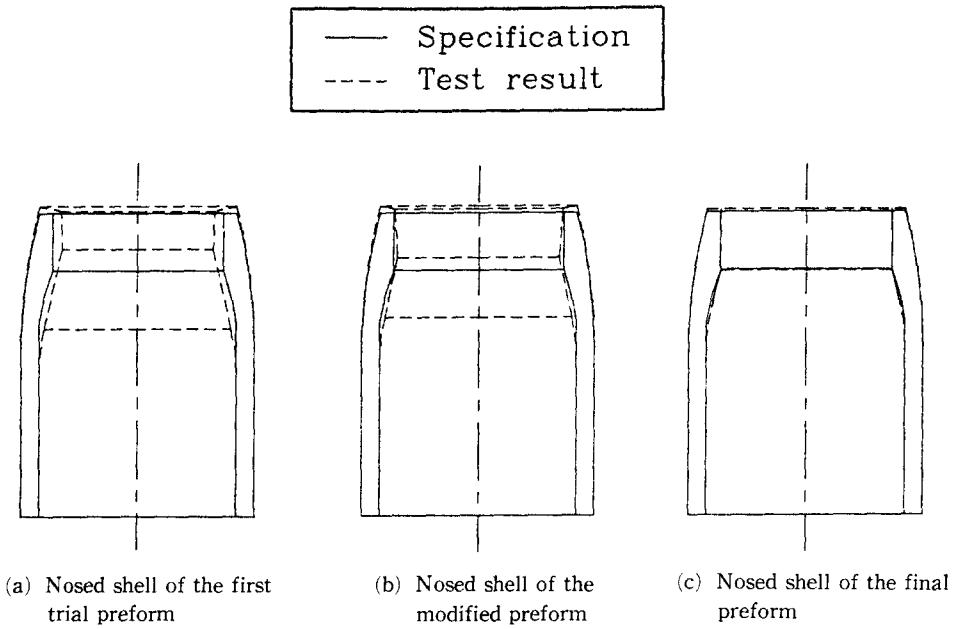


Fig. 19 Comparisons of ogive part between test results and the specification

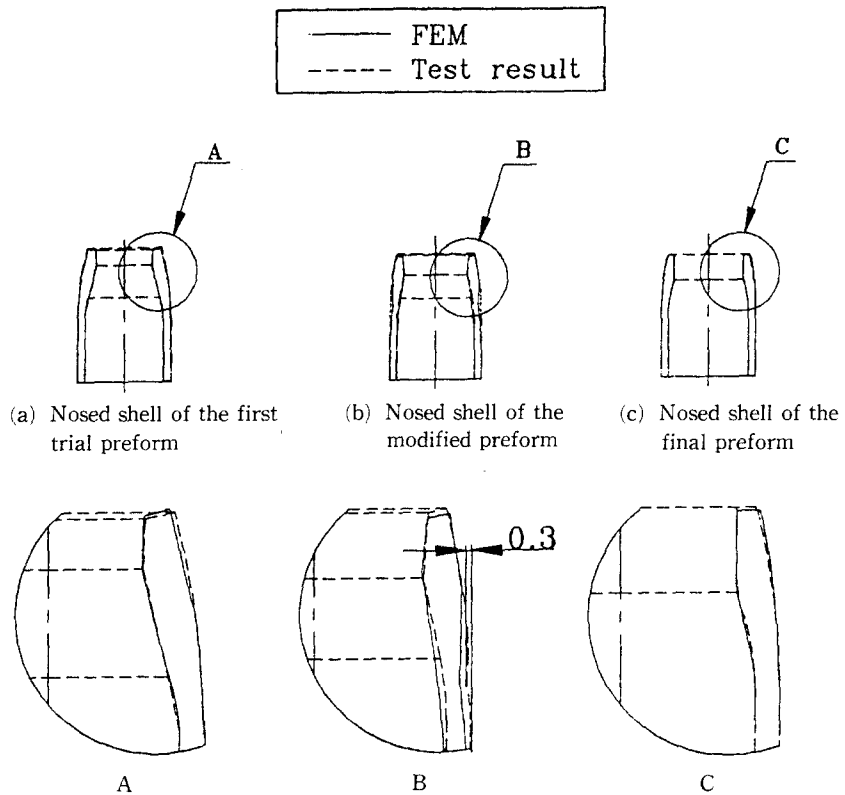


Fig. 20 Comparisons of shell configurations between test results and FEM simulations

로 최종 예비성형체만이 최종 규격을 만족함을 알 수 있었다.

Fig. 20은 각 예비성형체로 행한 시뮬레이션 및 실험 결과의 형상을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 초기 및 수정된 예비성형체의 경우 오자이브 외부형상은 시뮬레이션과 잘 일치하고 있으나, 오자이브 외부 끝, 나사가공부위 및 쉘의 길이 신장은 차이가 있다. 이는 실험용 예비성형체 제작시, 기계가공 공차에 따른 체적 차이로 인해 발생하였다. 그러나 최종 예비성형체로 실험한 것은 시뮬레이션의 결과와 거의 일치하였으며, 나사가공부의 길이가 시뮬레이션의 결과 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 실험과 시뮬레이션간의 최종형상 차이는 시뮬레이션과 실제 실험조건의 차이, 즉 실험용 예비성형체 제작시 가공공차, 가공면의 공구흔적, 시험장비의 강성 및 시험 후 쉘의 탄성회복 등에 의하여 발생하였다고 생각된다. 따라서 실험을 통해서도 기계가공이 없는 정형제품의 성형이 가능한 예비성형체를 역추적기법을 활용하여 유용하게 설계할 수 있음을 확인하였다.

6. 결 론

실제 생산현장에서 성형하고자 하는 축대칭 형상인 쉘 노우징 부품을 정형으로 성형하기 위한 공정설계를 강-소성 유한요소 하중과정 시뮬레이션 및 역추적 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 또한 쉘 노우징 실험을 통해서 역추적 시뮬레이션으로 구한 예비성형체의 타당성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 현재 실제현장에서 생산하고 있는 쉘 노우징 부품의 성형공정을 토대로 공정수를 줄이면서 후속의 기계가공이 없는 정형의 최종제품으로 성형할 수 있는 예비성형체를 하중과정 시뮬레이션 및 역추적기법을 이용하여 설계하였다.

(2) 현 공정에서 사용중인 2차 노우징 후의 형상을 시험 예비성형체로 하여 하중과정 시뮬레이션한 결과를 토대로 역추적 시뮬레이션을 수행하여 정형의 최종제품을 성형할 수 있는 예비성형체를 설계하였으며, 이를 위해서는 최종제품의 내부형상이 약간 수정되어야 함을 알 수 있었다.

(3) 유한요소 하중과정 및 역추적 시뮬레이션을 통하여 구한 예비성형체(시험 예비성형체, 수정 예비성형체, 최종 예비성형체)를 각각 제작하여 실험

을 행하였으며, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 특히, 역추적 시뮬레이션으로 구한 최종 예비성형체로 실험한 결과 정형의 최종제품을 성형할 수 있었다. 따라서 역추적기법을 이용한 예비성형체 설계의 타당성을 검증하였다.

(4) 현재 현장에서 적용하고 있는 쉘 노우징 공정에 본 연구에서 구한 예비성형체를 적용함으로써 공정과 인력 및 성형시간의 단축효과를 기대할 수 있다. 또한 위의 연구 결과는 이와 유사한 형상의 노우징 부품 공정설계에 유용한 정보로 제공될 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

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) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Osman, F. H. and Bramley, A. N., 1984, "Forging and Preform Design Using UBET," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp.

- 536~568.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Kang, B. S., 1991, "Process Sequence Design in a Heading Process," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 27, pp. 213~226.
- (13) 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.
- (14) Nadai, A., 1943, "Plastic State of Stress in Curved Shells : The Forces Required for Forging of the Nose of High-Explosive Shells," *Annual Meeting of the ASME*, New York (Nov. 29 through Dec. 3).
- (15) Onat, E. T. and Prager, W., 1954, *Nosing of Shells*, Technical Report DA798/15, Providence, R. I., Brown University, pp. 1~8.
- (16) Singh, M., 1964, "A Linearized Theory of Nosing of Shells," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 31, pp. 535~539.
- (17) Lahoti, G. T. et al, 1978, *Development of Computerized Mathematical Model for the Hot/Cold Nosing of Shells*, Report ARSCD-CD-78019 to U. S. Army Research and Development Command.
- (18) 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.
- (19) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, *Metal Forming and the Finite-Element Method*, Oxford.