

유한요소법의 역추적기법을 활용한 정밀정형 노우징 부품의 성형 공정설계

김 상 현*, 이 진 회**, 강 범 수**

* 대한항공, ** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

Process Design in Shell Nosing for Net-Shape Product by the Backward Tracing Scheme of the Rigid-Plastic FEM

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

* KOREAN AIR

** ERC for Net Shape & Die Manufacturing, Pusan National Univ.

ABSTRACT

A process is designed by the backward tracing scheme of the rigid-plastic FEM for net-shape shell nosing component without machining after forming. The current process of the shell nosing in industry requires cost-consuming machining to produce final product. The backward tracing scheme of the rigid-plastic FEM, a novel method in preform design of metal forming processes, derives a sound preform for net-shape shell nosing product. The current process is simulated to check the metal flow involved in forming with a trial preform and its modified preform. It is found that the two preforms are not suitable for net-shape shell nosing product. Finally, a preform is designed by the backward tracing scheme, which is suitable for net-shape manufacturing of the shell nosing component.

1. 서론

셸 노우징 공정은 컵형상의 셸을 원하는 형상의 금형으로 가압하여 끝부분을 오므리는 성형 공정으로 다른 여러 소성가공법과 같이 일반적으로 원하는 최종부품을 한번의 성형공정으로 생산할 수 없는 경우가 많다. 그러므로 예비성형체의 적절한 설계는 아주 중요하다. 다단계 성형 공정에 있어서의 예비성형체 설계는 대부분의 현장에서 경험을 바탕으로 한 시행착오를 통하여 수행하고 있으므로, 유한요소법과 같은 수치해법을 통하여 이를 줄일 수 있는 연구가 필요하다.

셸 노우징에 대한 연구는 셸과 금형형상의 단순성으로 인해 많이 연구되어 왔다. Nadai⁽¹⁾는 셸 노우징시의 하중에 관한 폭넓은 이론적 조사를 하였으며, Carlson⁽²⁾은 Nadai의 접근방법을 확장시켜 하중에 대한 속도의 영향을 연구하였고, Lahoti⁽³⁾은 예비성형체 설계를 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 최근 Kobayashi⁽⁴⁾은 유한요소법의 능력을 이용하여 소성가공에 있어서의 예비성형체 설계를 효과적으로 행할 수 있는 역추적기법(backward tracing scheme)을 제안, 이를 셸 노우징에서의 예비성형체 설계에 적용하였으며, Hwang⁽⁵⁾은 이를 더욱 발전시켜 온도계산이 포함된 역추적기법을 이용하여 셸 노우징공정에서의 예비성형체 설계를 하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 셸 노우징 부품은 노우징 공정 후, 나사가공(tapping)을 용이하게

하기 위하여 노우즈 선단 부위를 기계가공하고 있다. 그러나, 나사가공 부위도 기계가공 없이 동시에 성형할 수 있는 개선의 여지가 있다. 따라서 최종부품의 치수정밀도를 만족시키고 노우즈의 선단부분을 기계가공이 없는 정형의 부품으로 성형하기 위한 공정설계를 유한요소법을 사용하여 수행하였다. 먼저 현 공정도의 예비성형체를 이용하여 유한요소 시뮬레이션을 행하였다. 이를 토대로 기계가공이 없는 정형부품의 성형을 위한 예비성형체를 역추적기법을 이용하여 구하였으며, 역추적 시뮬레이션으로 구한 예비성형체를 최종 금형으로 하중과정 시뮬레이션을 행하여 이의 타당성을 보였다.

2. 역추적기법

역추적기법은 최종제품의 형상과 공정조건이 주어져 있을 경우, 변형과정에 있어서 임의 단계에서의 제품형상을 역으로 예측하는 것으로서 하중과정 시뮬레이션과 마찬가지로 유한요소법 이용된다. 강-소성 유한요소법에 대한 이론과 수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다⁽⁶⁾.

일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면 다음과 같은 비선형방정식이 된다.

$$\Omega(\tilde{\mathbf{v}}) = \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}, \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}, \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}})\tilde{\mathbf{v}} - \mathbf{F}(\tilde{\mathbf{x}}) = 0 \quad (1)$$

여기서, \mathbf{K} 는 강성행렬, \mathbf{F} 는 힘 벡터, $\tilde{\mathbf{x}}$ 는 절점좌표 벡터, $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 은 유효변형률, $\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}$ 은 유효변형률속도이다. Fig. 1은 역추적기법의 개념을 나타낸 것이다. 전방하중과정 시뮬레이션의 좌표변화는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{x}}_{o-1} \xrightarrow{t_{o-1} + \Delta t} \tilde{\mathbf{x}}_o \quad (2)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{x}}_o = \tilde{\mathbf{x}}_{o-1} + \Delta t \tilde{\mathbf{v}}_{o-1}$, $\tilde{\mathbf{v}}_{o-1}$ 은 시간 $t = t_{o-1}$ 에서의 속도장, $\tilde{\mathbf{v}}_o$ 는 시간 $t = t_o$ 에서의 속도장이다. 역추적 동안의 좌표변화는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{x}}_o(n^{\text{th}} \text{step}) \xrightarrow{t_o - \Delta t} \tilde{\mathbf{x}}_{o-1}(n-1^{\text{th}} \text{step}) \quad (3)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{x}}_{o-1} = \tilde{\mathbf{x}}_o - \Delta t \tilde{\mathbf{v}}_{o-1}$ 이다. 즉, 역추적기법은 식(3)과 같이 임의의 n 번째 단계($t = t_o$)에서 변형물체의 형상 $\tilde{\mathbf{x}}_o$ 을 근거로 $n-1$ 번째 단계($t = t_{o-1}$)에서의 형상 $\tilde{\mathbf{x}}_{o-1}$ 를 역으로 구하는 것이며, 시간 $t = t_{o-1} = t_o - \Delta t$ 에서의 $\tilde{\mathbf{x}}_{o-1}$ 과 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{o-1}$ 는 다음을 만족하여야 한다.

$$\tilde{\mathbf{x}}_o - \tilde{\mathbf{x}}_{o-1} = \tilde{\mathbf{v}}_{o-1} \Delta t, \quad \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_o - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{o-1} = \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{o-1} \Delta t \quad (4)$$

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

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{v}}_{o-1}, \tilde{\mathbf{x}}_o, \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_o, \dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{o-1})\tilde{\mathbf{v}}_{o-1} - \mathbf{F}(\tilde{\mathbf{x}}_o, \tilde{\mathbf{v}}_{o-1}) = 0 \quad (5)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{x}}_o$ 와 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_o$ 는 기지값이며, $\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{o-1}$ 은 $\tilde{\mathbf{v}}_{o-1}$ 의 함수이다. 따라서 식 (5)는 시간 t_{o-1} 에서의 경계조건들이 주어진다면 $\tilde{\mathbf{v}}_{o-1}$ 에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 t_{o-2} , t_{o-3} , \dots

t_{0-n} 에 대한 해를 구해나가면, 전 성형공정에 대한 변형전의 소재 형상을 유도할 수 있다.

3. 문제점의

Fig. 2는 셀 노우징 부품의 생산을 위한 다단계 성형공정을 나타낸 것이다. 현 공정(current process)을 이용한 셀 노우징 공정은 다른 부품과의 결합을 위한 나사가공을 위하여 노우즈의 선단부분을 최종 노우징 공정 후 기계가공을 행하고 있다. Fig. 2(f)는 현 공정도의 예비성형체로 구한 최종부품의 형상으로 “A” 부분을 보듯이, 나사가공을 위해서 노우즈의 선단부분(빛금친 부분)을 기계가공하여야 한다. 현 공정의 실험결과에 의하면 여러 공정 중에서 최종부품의 성형 결과에 가장 큰 영향을 주는 것은 드로잉공정 후의 예비성형체(Fig. 2(d))이다. 따라서 드로잉공정 후의 예비성형체를 적절히 설계한다면, 성형 후 기계가공이 없는 공정설계가 가능할 것이다. 본 연구에서는 현 공정의 예비성형체(Fig. 2(d))로 유한요소 시뮬레이션을 행한 후, 기계가공이 없는 정형의 노우징 부품을 성형하기 위한 예비성형체를 구하기 위하여 역추적기법을 이용하였다. Fig. 3은 셀 노우징 금형 및 최종부품의 형상 및 치수를 나타낸다. 시뮬레이션에 사용한 소재는 AISI 1018으로 유효응력-변형률관계는 $\bar{\sigma} = 255(1.0 + 50.0\bar{\epsilon})^{0.264}$ [MPa]이며, 마찰 상수 m 은 0.1로 하였다.

4. 셀 노우징 공정설계

4.1 전방하중과정 시뮬레이션

먼저 셀 노우징의 실험으로 구한 예비성형체(Fig. 2(d))를 최종형상으로 성형하는 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 4는 하중과정 시뮬레이션 결과이다. Fig. 4(a)는 예비성형체의 형상과 치수이며, Fig. 4 (b), (c)는 시뮬레이션 과정을 나타낸다. Fig. 4(d)는 최종부품의 형상(Fig. 3(b))과 시뮬레이션 결과의 차이(빛금친 부분)를 비교한 것으로, 노우즈의 바깥쪽 형상은 최종부품과 거의 일치하지만 노우즈의 안쪽과 선단부분에는 기계가공이 필요한 부분이 발생하였다. 이는 실제 체적계산에서도 알 수 있었으며, 생산현장에서는 이러한 차이만큼을 기계가공으로 제거하고 있다. 기계가공을 최소로 하는 최종부품을 구하기 위하여, Fig. 4의 시뮬레이션 결과를 참고로 최종성형 후의 기계가공 부분을 예비성형체에서 미리 제거한, 즉 현 공정의 예비성형체와 형상은 유사하지만 체적이 최종부품과 동일한 예비성형체를 설계하였다. Fig. 5(a)는 수정한 예비성형체의 형상과 치수이며, 이를 최종형상까지 시뮬레이션 한 결과가 Fig. 5(b), (c)이다. Fig. 5(d)에서 보듯이 최종부품의 형상과는 아직도 많은 차이가 있다. 노우즈의 선단에 기계가공이 필요한 부분(빛금친 부분)이 발생하였으며, 또한 노우즈의 바깥쪽 부분(검은 부분)도 최종부품의 형상과 일치하지 않았다.

4.2 역추적 시뮬레이션

시행착오를 통한 하중과정 시뮬레이션만으로 예비성형체를 구하는 것은 매우 어려우므로, 이 때까지의 하중과정 시뮬레이션을 토대로 보다 나은 예비성형체를 구하기 위하여 역추적기법을 사용하였다. 역추적기법의 적용에 있어서 경계조건의 제어는 아주 중요한 문제이다. 경계조건은 전방하중과정 시뮬레이션의 정보를 토대로 사용자에게 의하여 적절히 제공된다. 따라서 여기서는 하중과정 시뮬레이션으로 얻은 최종형상을 원하는 치수의 최종형상으로 수정한 후, 역추적기법을 적용하여 시뮬레이션을 행하였다. 경계조건은 하중과정 시뮬레이션에서 다이와 소재와의 접촉위치를 구하여 역추적 과정에서 다이행정에 따라 절점이 분리되도록 제어하였다. 이에 대한

설명이 Fig. 6에 나타나 있다. 역추적 과정에서 필요한 그 이외의 모든 정보는 하중과정 시물레이션에서 얻은 결과를 이용하였다. Fig. 7은 역추적 시물레이션의 결과이며, Fig. 7(c)와 같이 새로운 예비성형체를 구하였다. 그러나 여기서 구한 예비성형체의 형상은 Fig. 7(c)의 "A" 부분에서 보듯이, 실제 생산현장에서 성형하기가 매우 어려우므로, Fig. 7(d)에서 보는 바와 같이 실제부품의 성능에 크게 영향을 미치지 않는 최종부품의 내부내부 곡률을 약간 증가시켰다. Fig. 8은 수정된 최종형상으로 역추적 시물레이션을 행한 결과이다. Fig. 8(d)에서 보듯이 실제 현장에서 성형하는 데 어려움이 없는 새로운 예비성형체를 구할 수 있었다.

4.3 최종 하중과정 시물레이션

역추적기법을 통해서 구한 최종 예비성형체(Fig. 7(d))를 생산현장의 상황을 고려하여 예비성형체의 곡선 부분을 여러개의 직선으로 약간 수정하였다. Fig. 9(a)는 수정한 예비성형체의 형상과 치수이다. 처음에 제시한 공정도의 예비성형체와 유사하지만 노우즈의 선단부분에 약간의 차이가 있다. 이를 최종형상으로 하중과정 시물레이션을 한 결과가 Fig. 9(b)-(d)이다. Fig. 9(d)에서 보듯이 실제 부품과 거의 일치하게 성형되었고, 노우즈의 선단부분도 기계가공이 없이 나사가공이 되도록 성형되었다. Fig. 9(d)의 오른쪽은 유효변형률 분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 노우즈의 하단부는 거의 변형이 없었으며 상단부로 올라갈수록 변형이 증가됨을 알 수 있다. 본 논문은 기계가공이 없는 정형의 셀 노우징 부품을 성형하기 위한 예비성형체의 설계와 공정회수를 줄이기 위하여 노우즈 끝부분의 형상에 가장 큰 영향을 주는 1차 드로잉 공정 후의 예비성형체의 형상(Fig. 2(d))을 토대로 역추적기법을 도입, 2차 드로잉공정(Fig. 2(e)) 및 기계가공을 줄일 수 있다. 다음으로 역추적기법으로 구한 예비성형체가 현 공정으로도 기계가공이 없는 정형의 셀 노우징 부품을 성형할 수 있는 가를 조사하였다. 시물레이션을 통하여 구한 예비성형체의 형상을 이용하여 2차 드로잉(Fig. 10 참조)과 최종 노우징(Fig. 11 참조) 시물레이션을 행하였다. Fig. 11에서 보듯이 실제 부품과 거의 일치하게 성형되었고, 노우즈의 선단부분도 기계가공이 없이 나사가공 되도록 성형됨을 알 수 있었다.

5. 셀 노우징 제조비용 비교

기계가공, 현 공정 및 본 연구 결과(new process)의 세 가지 생산 방법에 대한 제조 비용을 전문가의 지식을 토대로 조사해 보았다. 비교 항목은 재료비, 생산 공구비, 노무비, 그리고 기타 비용등을 택하였으며, 이에 관한 설명이 Table 1에 있다. 셀 노우징 제품을 소량으로 생산할 경우(10,000개 이하)에는 새로운 생산방법이 다른 생산 방법에 비해 재료비 자체는 감소하지만 전체 단가는 증가한다. 하지만 대량생산인 경우(100,000개 이상)에는 재료비 뿐만 아니라 전체 제조단가도 크게 감소함을 알 수 있다. 본 제품은 단체 생산에 활용되며 100,000개 이상의 대량생산에 해당되므로, 유한요소 시물레이션의 결과를 이용한 셀 노우징의 새로운 생산방법은 기존의 제조공법이 가지고 있는 대량생산의 문제, 즉 소재의 손실과 생산시간의 감소에 공헌할 수 있을 것이다

6. 결론

- (1) 현재 생산현장에서 성형하고 있는 축대칭 형상인 셀 노우징 부품의 성형공정을 토대로 공정회수를 줄이면서 노우즈 선단부분의 기계가공이 없는 정형의 셀 노우즈 부품을 성형할 수 있는 공정설계를 강-소성 유한요소법과 역추적기법을 이용하여 설계하였다.
- (2) 현 공정의 예비성형체를 이용하여 하중과정 시물레이션을 행하였으며, 기계가공이 없는 정

형의 셸 노우징 부품을 정형으로 성형할 수 있는 예비성형체를 역추적기법을 이용하여 설계하였다. 또한 설계된 예비성형체를 현 공정조건으로 시뮬레이션 한 결과, 기체가공이 없는 정형의 부품으로 성형할 수 있었다.

- (3) 정형의 최종제품을 성형하기 위해서는 예비성형체의 노우즈 선단부분의 각도와 내부곡률의 수정 및 최종제품 형상의 수정이 필요함을 알 수 있었다.
- (4) 본 연구에서 구한 예비성형체는 실제 현장에서의 생산을 편리하게 하기 위한 단순한 형상으로 설계하는 데 주력하였으며, 공수, 제조단가 및 성형시간의 감소에 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

1. Nadai, A., "Plastic State of Stress in Curved Shells : The Forces Required for Forging of the Nose of High-Explosive Shells", presented at the annual meeting of the ASME, New York, Nov. 29 through Dec. 3., 1943.
2. Carson, R.K., "An Experimental Investigation of the Nosing of Shells", presented at the annual meeting of the ASME, New York, Nov. 29 through Dec. 3., 1943.
3. Lahoti, G.T. et al, "Development of Computerized Mathematical Model for the Hot/Cold Nosing of Shells", Report ARSCD-CD-78019 to U.S. Army Research and Development Command, September., 1978.
4. Park, J.J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. and Res. Vol.23, No.1, pp.71-79, 1983.
5. Hwang, S.M. and Kobayashi, S., "Preform Design in Shell Nosing at Elevated Temperatures", Int. J. Mach. Tool Manuf., Vol. 27, No. 1, pp. 1-14, 1986.
6. Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., *Metal Forming and the Finite-Element Method*, Oxford Univ. Press, 1989.

Table 1. Cost estimation on various production methods

(원/개)

항 목	제 조 방 법			비 고
	Machining	Current Process	New Method	
	Preform가공 → Nosing→ 최종가공	Billet→Indenting→ Drawing→Stepped Can Drawing→Nosing→ Machining	Billet→Indenting→ Drawing→Stepped Can Drawing→ Nosing	
재 료 비	573.50	166.32	137.52	
생 산 공 구 비	18.25	74.72	63.09	100,000 이상
	119.65	646.47	630.90	10,000 이하
기 타 비 용	1.60	19.43	19.43	
노 무 비	139.30	191.00	151.70	
계	732.65	451.37	371.74	100,000 이상
	834.05	1,023.22	939.55	10,000 이하

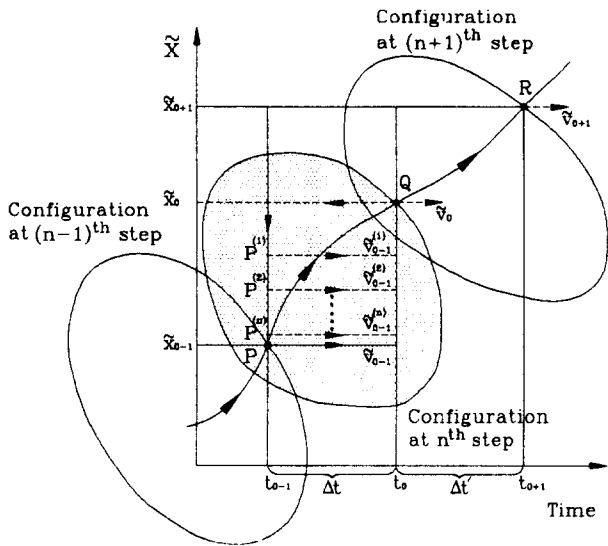


Fig. 1 Concept of the backward tracing scheme.

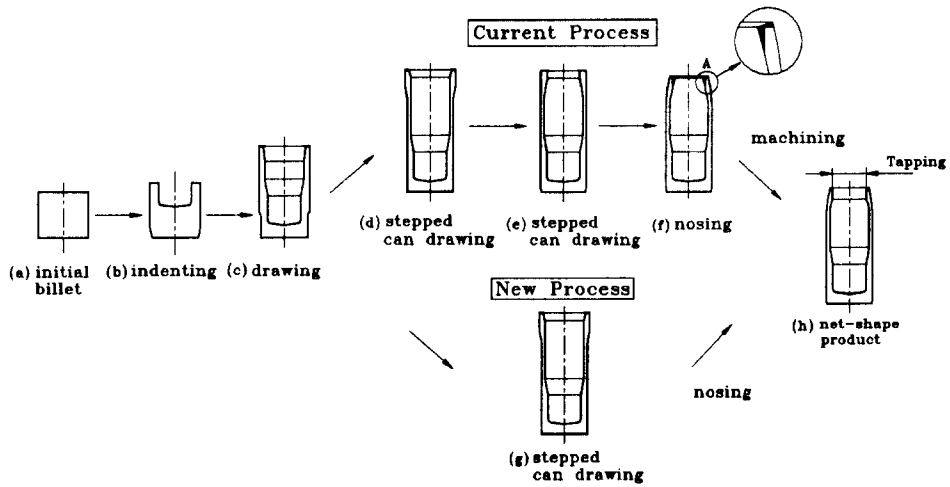
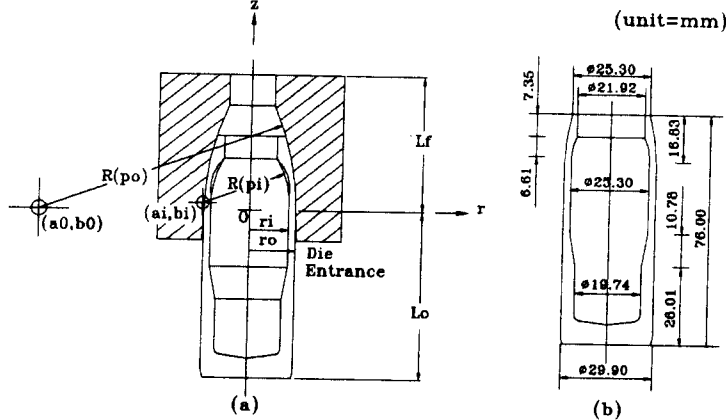


Fig. 2 The suggested process of cold forming to form a shell.



$Lo=55.72, Lf=44.28, R(po)=83.5, R(pi)=28.18, a0=581.85,$
 $bo=115.59, ai=814.98, bi=118.10, ro=14.95, ri=12.85$

Fig. 3 Configurations of die and final nosed shell: (a) die configuration and dimensions; and (b) dimensions of the shell product.

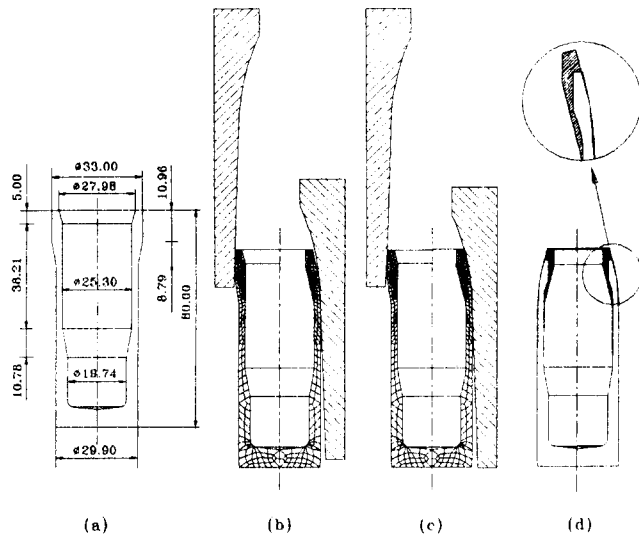


Fig. 4 Loading simulations of shell nosing for the first trial preform: (a) dimensions and configuration of the preform; (b) stroke of 85%; (c) stroke of 100%; and (d) comparison between simulation result and final product(The hatched area means the part to be machined away).

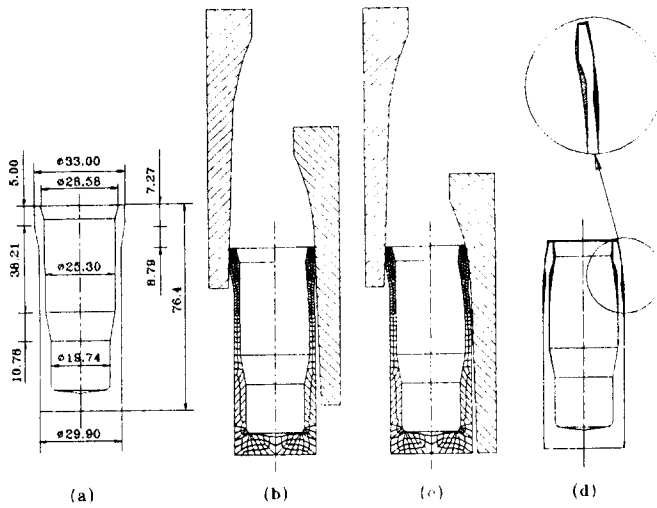


Fig. 5 Loading simulations of shell nosing for modified preform: (a) dimensions and configuration of modified preform;(b) stroke of 72%; (c) stroke of 100%; and (d) comparison between simulation result and final product(The hatched area means the part to be machined out and the darkened area means the part to be added).

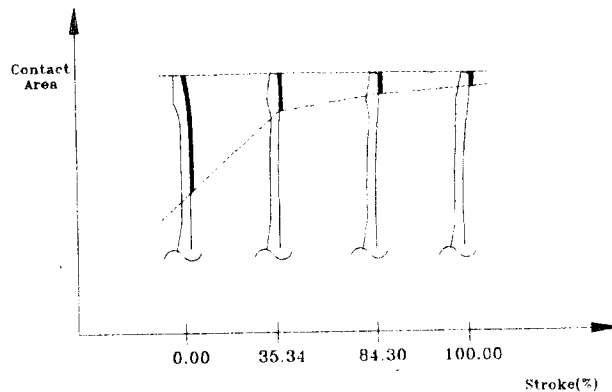


Fig. 6 Description of contact area between die and workpiece during backward tracing simulation.

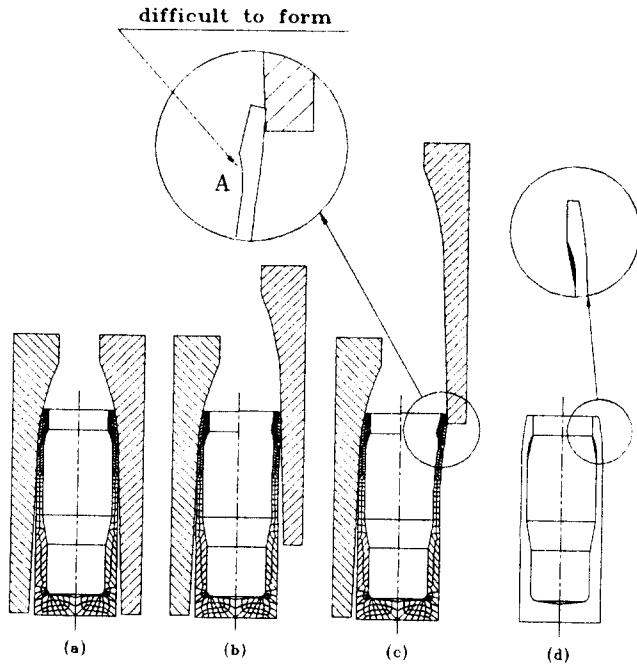


Fig. 7 Results of backward tracing simulation: (a) initial mesh system; (b) stroke of 35%; (c) stroke of 100%; and (d) derivation between the real final product and modified final product(The darkened area means a part to be added).

Fig. 8 Backward tracing simulation with modification to get the optimal preform: (a) initial mesh system; (b) stroke of 36%; (c) stroke of 60%; and (d) stroke of 100%.

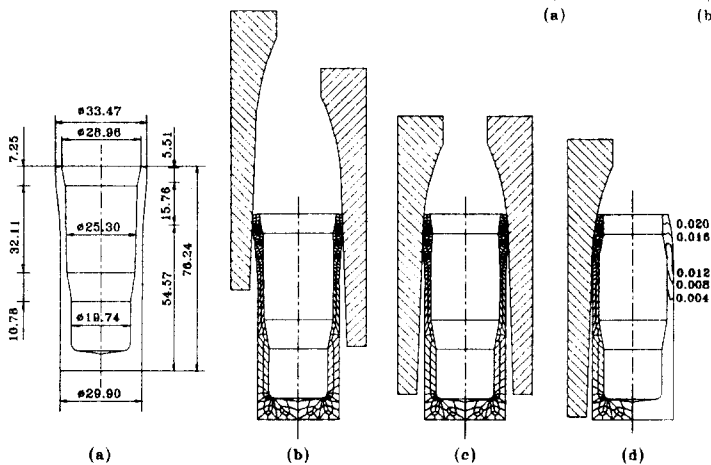
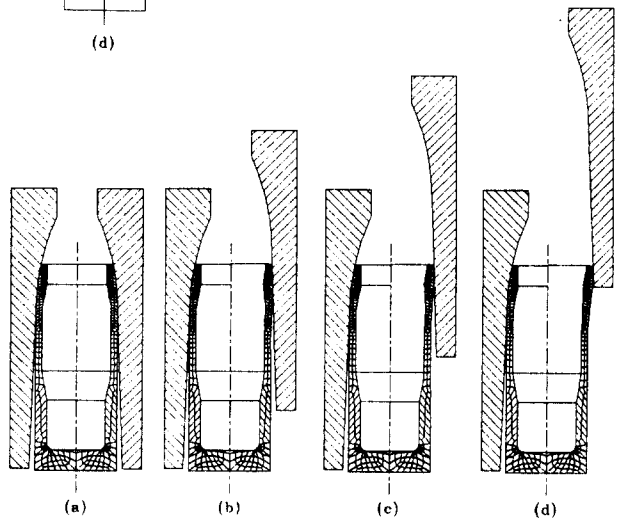


Fig. 9 Results of final loading simulation: (a) dimensions and configuration of the final preform derived from the backward tracing simulation with modification; (b) stroke of 29%; (c) stroke of 66%; and (d) stroke of 100%(left) and effective strain distribution (right).

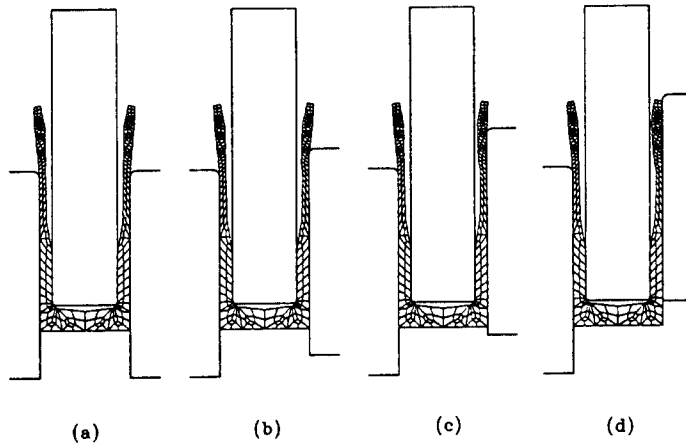


Fig.10 Simulation for the second stepped can drawing of current process with preform obtained from backward tracing.

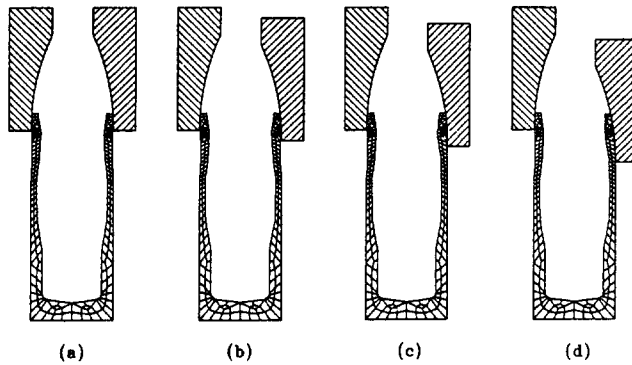


Fig.11 Simulation for shell nosing of current process.