

축대칭 다단계 디프드로잉 공정의 유한요소해석

윤정환, 유동진, 양동열 (한국과학기술원/정밀공학과),

김석관 (금성생산기술연구소)

Finite Element Analysis of Axisymmetric Multi-Stage Deep Drawing Processes

J.W.Yoon, D.J.Yoo, D.Y.Yang (KAIST / Precision Eng. and Mechatronics),
S.K.Kim (GS - PERL)

Abstract

Mathematical description of arbitrarily-shaped tool surface are introduced by parametric patch approaches along with the related contact search algorithm. In order to maintain the advantages of membrane elements and to incorporate the bending effect, a BEAM(Bending Energy Augmented Membrane) element is proposed. Computation are carried out for some complex axisymmetric multi-stage deep drawing to verify the validity and the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Multi-stage deep drawing(다단계 디프드로잉), BEAM element(굽힘효과가 고려된 박막요소), Parametric patch (매개변수패치)

1. 서 론

박판금속의 성형공정을 역학적으로 예측하기 위한 연구는 여러가지 방법에 의하여 진행되어 왔다. 성형공정을 역학적으로 예측하는 목적은 실제 금형을 제작하여 제품을 만들어 보기 이전에 여러 이론적 방법을 통하여 성형후 제품의 변형상태를 사전에 검토하여 제품의 설계, 프레스 금형 설계시의 자료로 활용하기 위함이다. 현재 박판 성형 공정 해석에 사용되고 있는 여러 방법중에서 차체판넬이나 가전제품등의 복잡한 형상의 제품을 성형해석 할 수 있는 유용한 방법은 유한요소해석법(Finite Element Method)으로 타 방법에 비해 적용의 범위가 넓으며 다양하고 자세한 해석결과를 얻을 수 있다. 이와 같은 실제 산업현장에서 생산하고 있는 가전제품이나 차체판넬 등의 복잡한 곡면으로 이루어져 있는 박판제품을 유한요소법에 의해 성형해석 하고자 할 때 중요한 문제중의 하나는 복잡한 형상의 금형면을 어떻게 묘사하느냐 하는 것이다.

$$\|\Delta U\| / \|U\| \leq \delta \quad (5)$$

여기서 $\|\cdot\|$ 는 유클리디언 벡터 놈(Euclidean vector norm)이고, δ 는 매우 작은 상수로 본 해석에서는 10^{-6} 으로 하였다.

2.3 절점스프링을 기본으로 한 굽힘에너지가 보강된 박막요소 (Bending Energy Augmented Membrane Element Based on Node Spring)

기존의 박막이론에 근거한 강소성 유한요소 수식화는 많은 수치적 장점에도 불구하고 굽힘효과가 지배적이고 형상변화가 심한 복잡한 문제에서는 요소에 수직인 방향으로의 회전강성의 결여로 인하여 실제 공정에서는 관측되지 않는 수치적 좌굴현상이 생기는 등의 문제점을 갖고 있다. 이러한 수치적 좌굴현상은 해의 수렴성과 직결되어 있어 좌굴현상이 더욱 심해지면 더 이상의 계산이 불가능하게 된다. 본 연구에서는 박막요소의 장점을 유지하면서 이러한 결점을 보완하기 위하여 절점스프링을 기본으로 한 굽힘에너지가 보강된 박막요소를 제안하고, 실제 성형해석에 적용하여 보았다.

회전굽힘강성행렬의 유도

Fig. 2 에서와 같이 한 단계동안의 미소변형을 가정하면 세절점의 변위에 대해 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\delta\theta = -\frac{1}{L_1} N_1 \cdot \Delta u_1 - \frac{1}{L_2} N_2 \cdot \Delta u_2 \quad (6)$$

여기서 Δu_1 은 절점2에 대한 절점1의 상대변위벡터이고, Δu_2 는 절점2에 대한 절점3의 상대변위벡터이다. L_1, L_2, N_1, N_2 는 각각 두 요소의 길이와 수직벡터를 나타낸다. 식 (6)은 다음과 같은 행렬 형태로 표시할 수 있다.

$$\delta\theta = [N] [U]^T \quad (7)$$

여기서

$$[N] = \begin{bmatrix} -\frac{n_{1x}}{L_1}, & -\frac{n_{1y}}{L_1}, & -\frac{n_{1z}}{L_1}, & \frac{n_{1x}}{L_1} + \frac{n_{2x}}{L_2}, & \frac{n_{1y}}{L_1} + \frac{n_{2y}}{L_2}, \\ \frac{n_{1z}}{L_1} + \frac{n_{2z}}{L_2}, & -\frac{n_{2x}}{L_2}, & -\frac{n_{2y}}{L_2}, & -\frac{n_{2z}}{L_2} \end{bmatrix}$$

$$[U] = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, u_3, v_3, w_3]$$

이다.

회전강성스프링이 절점2에 보강되었을 때의 회전강성을 K_r 이라 하면, 절점 스프링에 의한 회전굽힘 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta U_b = \frac{1}{2} K_r \delta \theta^2 \quad (8)$$

한 단계동안 K_r 과 $[N]$ 이 $[U]$ 에 독립적이라고 가정하고 (7)식을 (8)식에 대입하여 $[U]$ 에 대해 두번 미분하면 회전굽힘 강성행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K]_{9,9} = K_r [N]^T [N] \quad (9)$$

이상과 같이 세 절점만의 상대변위 개념으로부터 구해진 회전강성행렬은 세 절점과 관련된 기존의 자유도로서 나타내질 수 있으므로 전체 방정식 수에는 변함이 없게 된다.

강소성 재료에 대한 K_r 의 표현식

회전 굽힘강성 K_r 은 비탄성 좌굴해석에 쓰이는 가감계수(Reduced Modulus)를 도입하여 다음과 같이 표현하였다^[1](Fig.3).

$$K_r = \frac{E_r I}{L} \quad (10)$$

여기서

$$E_r = \frac{4E E_c}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_c})^2}, \quad I = \frac{bh^3}{12}, \quad E_c = \frac{d\bar{\sigma}}{d\epsilon}$$

3. 계산결과 및 토론

본 해석방법의 효용성을 입증하기 위하여 총 4공정으로 구성된 다단계 공정을 해석하였다. 본 공정은 세탁기의 모터 케이스를 제작하기 위한 공정으로 현재 금형 설계 단계에 있으며 설계의 검증 및 적합한 박판 재료의 선정등을 위하여 본 해석을 행하였다. 따라서, 본 해석을 통하여 설계의 정밀화 및 금형 설계 기간의 단축, 공정수 검증에 도움을 주고자 한다. 금형면을 적절히 묘사하기 위하여 충분한 갯수의 매개변수 패치를 사용하였다.

재료상수는 NUMISHEET '93에 사용했던 냉연강판을 사용하였다.^[5]

소재 : 냉연강판 , 초기 소재 두께 : 1.2 mm

응력-변형률 식 : $\bar{\sigma} = 565.32 (0.007 + \bar{\epsilon})^{0.2580}$ (kg/mm²)

수직이방성 계수 : $r = 1.77$, 쿨롱 마찰계수 : 0.1

Fig.4는 총4공정에 대해서 각 공정의 개략도와 모델링된 금형면을 보여주고 있다. Fig.4(a)는 1공정(보통 드로잉 과정)이며, Fig.4(b)는 2공정 제드로잉 과정으로서 제품을 길게 뽑는데 유리하다. Fig.4(c)는 3공정 역드로잉 과정으로 변형의 국부화를 막을 수 있으며, Fig.4(d)는 4공정으로 다시 역드로잉 과정을 통해 변형의 국부화를 막으면서 최종 형상을 얻는 공정이다. Fig.5는 초기 격자를 보여주고 있는데 총 100개의 요소를 사용하였고, 경계에서는 대칭조건을 만족하도록 하였다.

공정이 바뀔 때에는 해당 금형으로 교체하고, 단성 프로그램으로 초기 변위장과 초기 접촉상태를 새로이 생성하였다. 이렇게 해서 얻어진 초기변위장과 접촉상태를 가지고 강소성 프로그램으로 해당 스트로크(stroke)까지 진행하게 되고, 공정이 바뀔 때마다 위의 과정이 반복되게 된다.

Fig.6는 각 공정에서 단면의 변형형상을 보여주고 있는데 BEAM요소에 의해 굽힘이 잘 고려되고 있음을 보여주고 있다. Fig.6(a)는 1공정으로 플랜지 부분이 충분히 드로잉 되고 있음을 보여주고 있다. Fig.6(b)는 2공정으로 금형이 재료를 홀터 내려가면서 직경이 줄어드는 과정을 잘 묘사하고 있다. Fig.6(c)는 역드로잉으로서 박판이 굽어지는 모양을 보이고 있고, Fig.6(d)는 다시 역드로잉 과정으로 최종형상으로 성형되고 있는 과정을 잘 나타내고 있다.

Fig.7은 각 공정별 변형 형상을 보여주고 있는데 형상이 정확하게 묘사되고 있음을 알 수 있다. Fig.8은 각 공정별 성형 한계도로서 보통 성형성을 평가하는 척도로서 사용된다. 결과에서 볼 수 있듯이 주 및 부 변형률(major / minor strain)로 표시되는 계산결과가 성형 한계 곡선보다 충분히 안전한 범위에 있기 때문에 본 재료를 사용할 경우 파단은 발생하지 않을 것으로 추측된다.

Fig.9는 각 공정별 두께 변형률 분포를 보여주고 있다. Fig.9(a)는 1공정 보통 드로잉 과정으로 플랜지 부분의 재료 유입량이 많기 때문에 두께 감소는 크지 않았고, 플랜지 부분이 압축을 받았기 때문에 두께가 약간 두꺼워졌음을 알 수 있다. Fig.9(b)는 2공정 제드로잉 과정으로 제품의 직경이 급격히 감소하면서 중앙 부분의 두께가 급격히 얇아졌음을 알 수 있다. Fig.9(c)는 3공정 역드로잉과정으로 중앙부분은 2공정에 비해 두께변화가 거의 없으나 역드로잉 과정에서 압축을 받아 재료위치 20 - 40 mm 부분에서 두께감소가 완화되었음을 알 수 있다. Fig.9(d)는 4공정으로 다시 역드로잉 과정으로 부터 얻은 최종 두께 변형률 분포를 보여주고 있다. 중앙 부근은 두께 변형률 변화가 적고, 10 - 20 mm사이에서 공정의 특성상 압축을 받게되어 변형률의 국부화를 막을 수 있었으며 플랜지 부근으로 가면서 두께가 두꺼워지고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결과, 제드로잉이나 역드로잉과정은 변형률의 국부화를 막고 변형률 분포를 고르게 해주므로 본 제품을 제조하는데 있어서 생략될 수 없는 공정임을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안한 금형면의 표현방법과 BEAM 요소가 금형면이 복잡하고 굽힘효과가 지배적인 다단계 공정에 성공적으로 적

용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

입의 형상의 금형면을 복수개의 매개변수 패치로 묘사하여 박판성형 해석을 행하였다. 매개변수 패치를 이용해서 금형면을 일반적으로 묘사하였으며, 기존 박막요소의 결점을 보완한 절점스프링을 기본으로 하는 BEAM요소를 수식화하여 금형면이 다소 복잡하고 굽힘효과가 큰 다단계 공정의 성형해석에 적용하여 안정된 해를 얻는데 큰 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 다음과 같은 세부적인 결론을 얻었다.

1. 재드로잉이나 역드로잉과정은 변형률의 국부화를 막고 변형률 분포를 고르게 해주므로 본 제품을 제조하는데 있어서 생략될 수 없는 공정임을 알 수 있었다.
2. 다단계 공정의 유한요소해석을 통해 성형난이성을 평가하여, 공정의 정밀화 및 금형설계 기간의 단축, 공정수의 검증과 최적의 공정조건을 찾는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 '93~'94 (주)금성사의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자분들께 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. Yoo, D. J., Song, I. S., Yang, D. Y. and Lee, J. H., Rigid-plastic finite element analysis of sheet metal forming processes using continuous contact treatment and membrane elements incorporating bending effect, Int. J. Mech. Sci. Vol. 36, No. 6, pp. 513 - 546 (1994).
2. D.Y.Yang and Y.J.Kim, A rigid-plastic finite element formulation for the analysis of general deformation of planar anisotropic sheet metals and its applications, Int.J.Mech.Sci.28, 825 (1986).
3. W.J.Chung, Y.J.Kim and D.Y.Yang, Rigid-plastic finite element analysis of hydrostatic bulging of elliptic diaphragms using Hill's new yield criterion, Int.J.Mech.Sci.31, 193 (1989).
4. I.D.Faux and M.J.Pratt, Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood (1979) .
5. E. NAKAMACHI, Sheet forming process characterization by static-explicit anisotropic elastic-plastic finite element simulation. in A. MAKINOUCI, E. NAKAMACHI, E. ONATE and R.H. WAGONER (ed.), Proceedings of The 2nd

International Conference NUMISHEET'93, 109-123, Isehera, Japan(1993).

6. C.H.Lee and S.Kobayashi, New solutions to rigid - plastic deformation problems using a matrix method, J.Eng.Ind.,Trans. ASME, 95, pp. 865-873(1973).
7. N.M.Wang, A rigid-plastic rate sensitive finite element method for modelling sheet metal forming processes, Numerical analysis of forming processes, John Wiley & sons, Chichester, pp. 117-164 (1984).
8. Y.J.Kim, A rigid-plastic finite element formulation considering the effect of geometric change and material anisotropy with application to sheet metal working, Ph.D Thesis, KAIST (1985).
9. W.J.Chung, Rigid-plastic finite element analysis of sheet metal forming considering contact and friction, Ph.D Thesis, KAIST(1989).
10. N.M.Wang and B.Budianski, Analysis of sheet metal stamping by a finite element method, J.Appl.Mech.Trans ASME, vol.45, pp.73-82(1978).

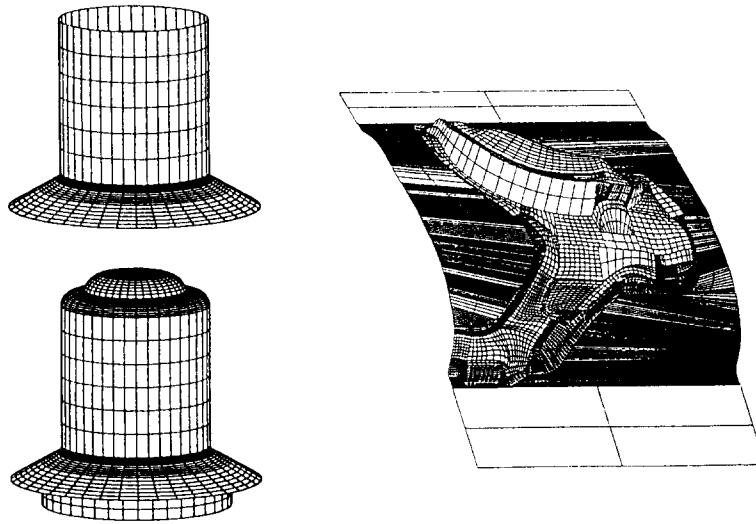


Fig. 1 Typical example of complex curved tool surface composed of parametric patches

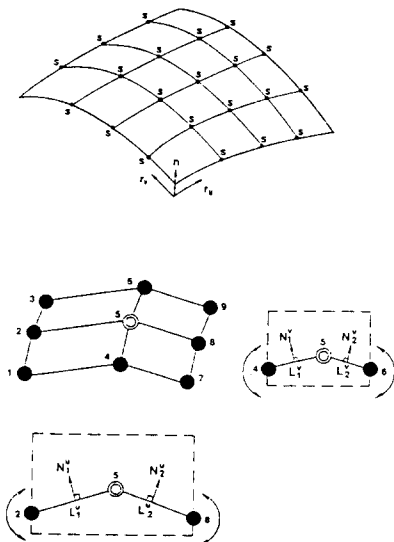


Fig. 2 Schematic description of BEAM :
 (a) a number of node springs located on the FEM mesh
 (b) procedures of appending rotational stiffness

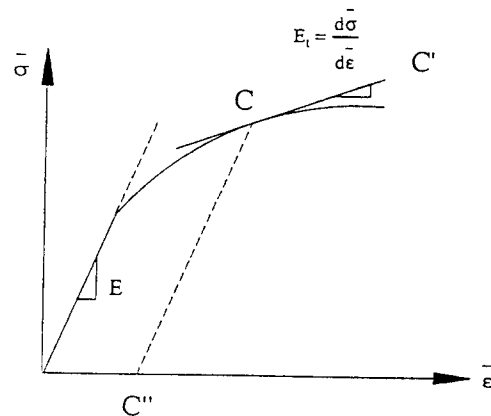
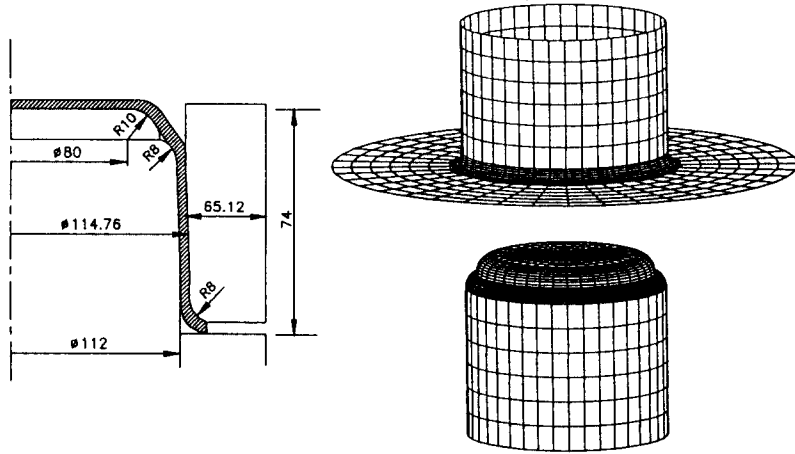
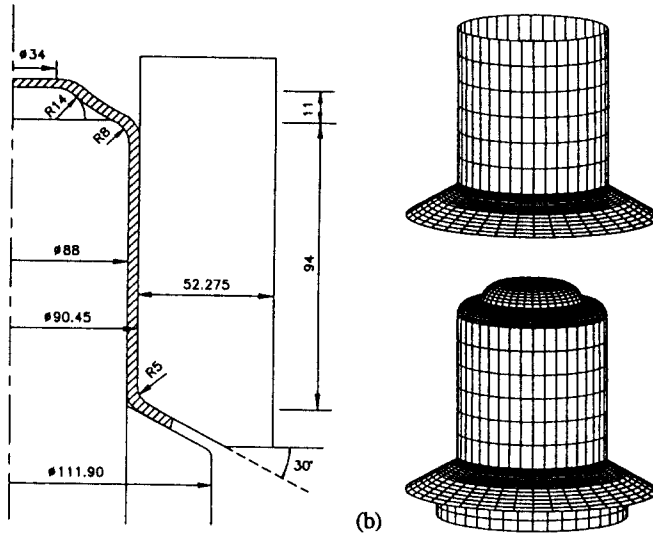


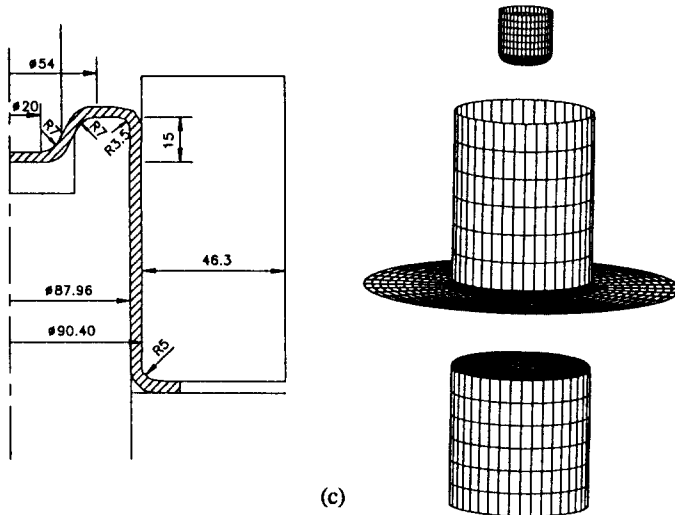
Fig. 3 Stress-strain curve for illustrating the concept of reduced modulus



(a)



(b)



(c)

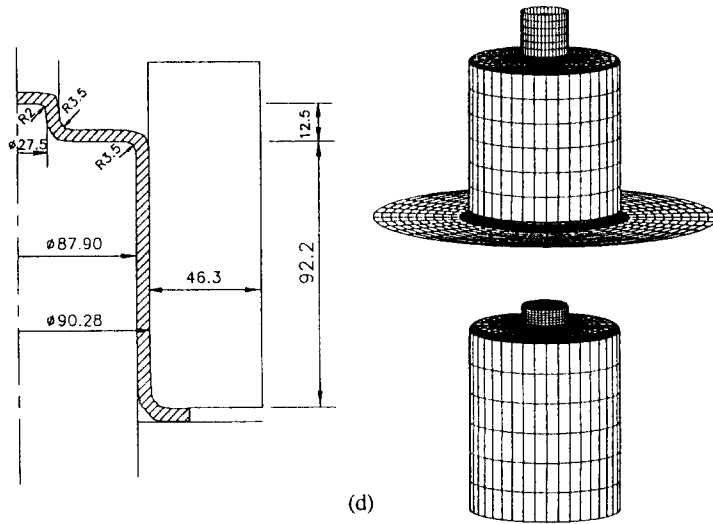


Fig. 4 Geometry of the tooling and schematic view of the tool surfaces described with parametric patches for multi-stage deep drawing :
 (a) 1st process (b) 2nd process (c) 3rd process (d) 4th process

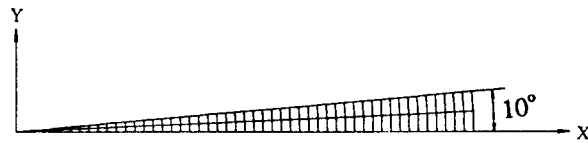


Fig. 5 Initial mesh system

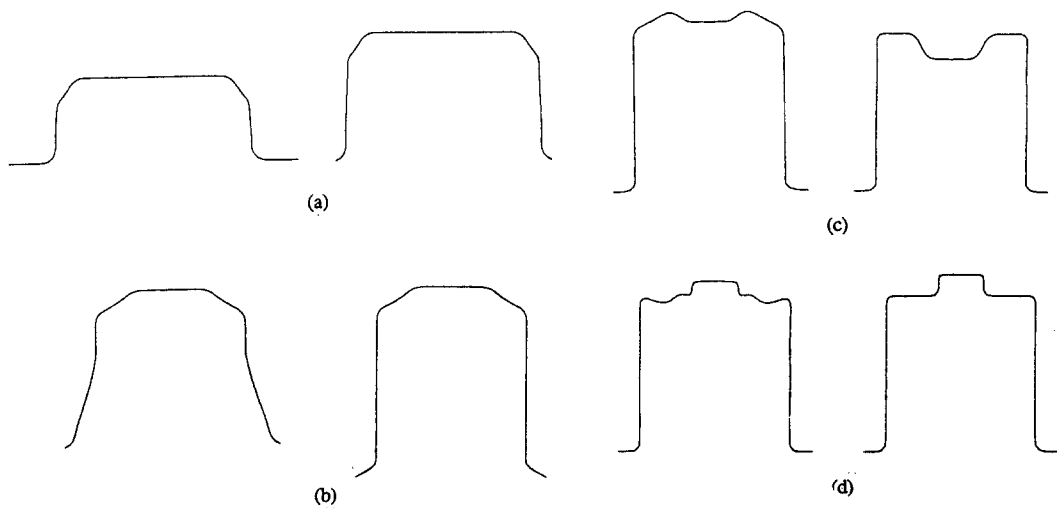


Fig. 6 Deformed shape of the symmetric section :
 (a) 1st process (b) 2nd process (c) 3rd process (d) 4th process

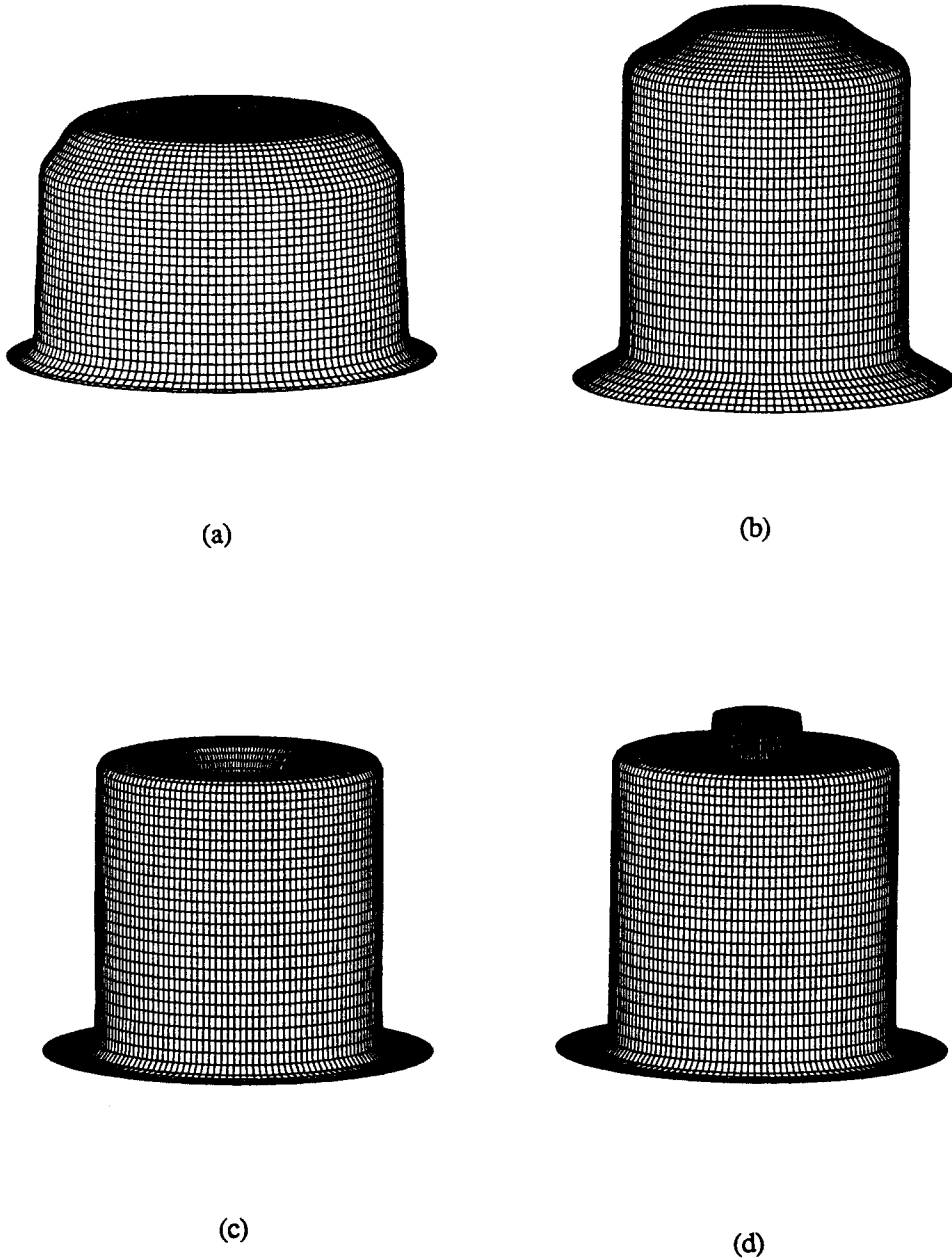
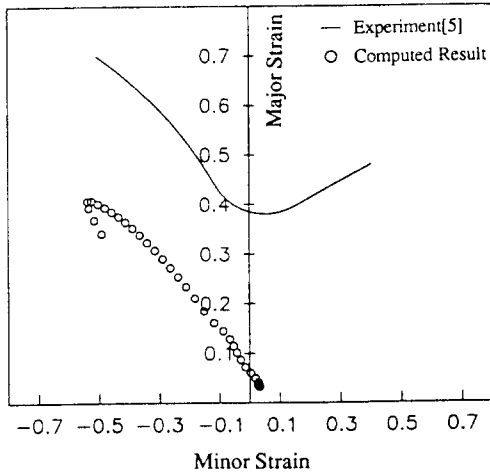
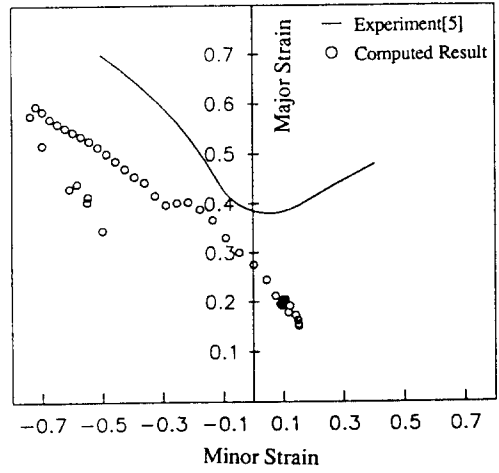


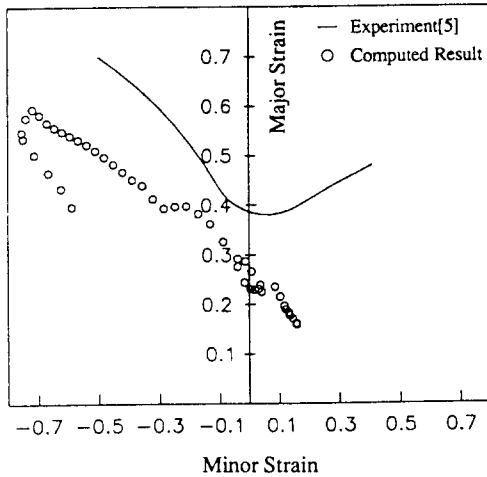
Fig. 7 Computed result for multi-stage deep drawing :
(a) 1st process (b) 2nd process (c) 3rd process (d) 4th process



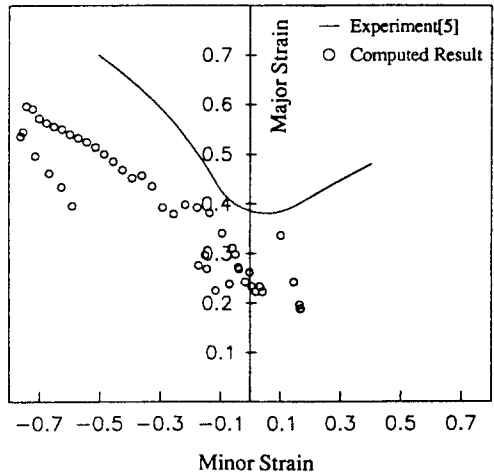
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Forming limit diagram for multi-stage deep drawing :

(a) 1st process (b) 2nd process (c) 3rd process (d) 4th process

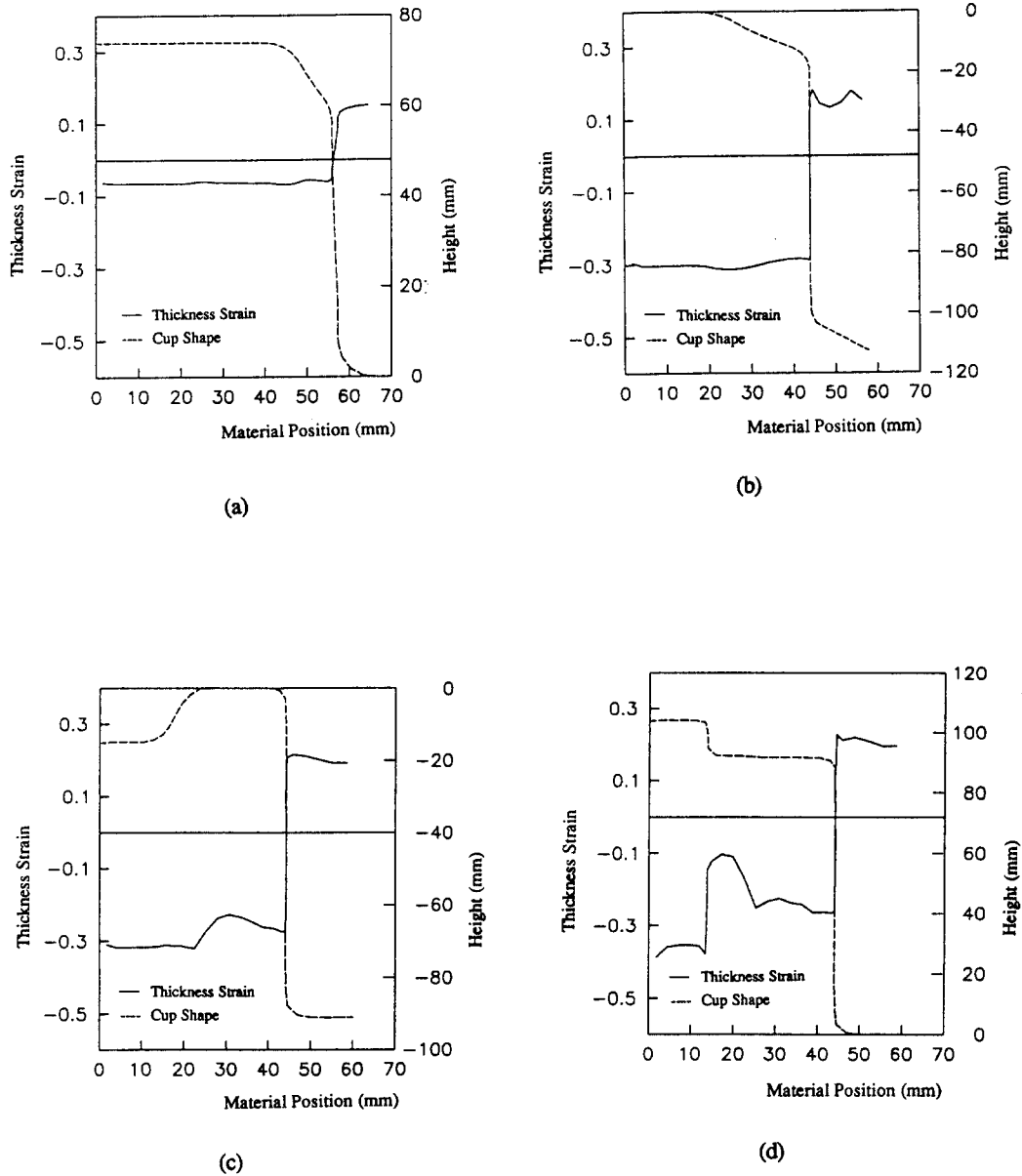


Fig. 9 Thickness strain distribution for multi-stage deep drawing :
 (a) 1st process (b) 2nd process (c) 3rd process (d) 4th process