

정밀 금속 벨로우즈 성형 및 스프링백 해석

이상욱*

(2001년 11월 2일 접수)

Study on the Forming and Springback Analyses of a Precision Metal Bellows

Sang Wook Lee

Abstract

The manufacturing of a metal bellows consists of the four main forming processes; deep-drawing, ironing, tube bulging and folding. Among these, the bulging and folding processes are critically important because the quality of metal bellows is greatly influenced by the forming conditions of these processes.

In the present study, the finite element analysis technique is applied to the bulging and folding processes. The springback analysis is also carried out. From the analysis results, it has been revealed that around the crown point the stress state is in one-directional tension and one-directional bending mode. Meanwhile, around the inner point of metal bellows it is in two-directional bending mode. It has also revealed that the thickness of metal bellows around the crown point is nearly uniform.

Key Words : Bellows, Bulging, Folding, Springback, FEM, Explicit Method

1. 서론

벨로우즈는 일반적으로 임의 단면 형상을 가진 각종 재질의 튜브 표면에 일정한 피치로 주름이 성형되어 있어 신축이 자유로운 요소를 통칭한다. 이 중에서도 냉장고의 온도 제어에 쓰이는 금속 벨로우즈가 본 논문의 관심 대상이다.

금속 벨로우즈는 Fig. 1과 같은 네 단계의 성형과정을 거쳐 완제품이 된다. 초기 원형 블랭크를 딥드로잉(deep-drawing) 한 후 몇차례의 아이어닝(ironing) 공정이 가해지면 매우 얇은 벽면을 가진 원통 형상의 벨로우즈

제작용 기초 소재가 완성된다. 이 때 완전 어닐링(full-annealing) 과정을 거치므로 전 공정에서 발생한 소성경화 및 잔류응력이 완전히 제거된다. 이 후 두 단계로 이루어지는 주름 성형 공정, 즉 튜브 벌징(tube bulging) 공정과 접기(folding) 공정이 연속해서 이루어지면 최종 제품이 완성된다.⁽¹⁾

벌징 공정은, 튜브의 외곽에 판다이(plate die)를 설치한 후 튜브 내부에 집중하는 유압 P 를 가하여 벌징을 완성하는 공정이다. 이 때 판다이에 의해 구속되어 있는 부분에서는 벌징이 전혀 일어나지 않아서 결과적으로 여러개의 벌징 형상이 튜브 표면에 동시에 발생한다.

* 순천향대학교 기계공학과

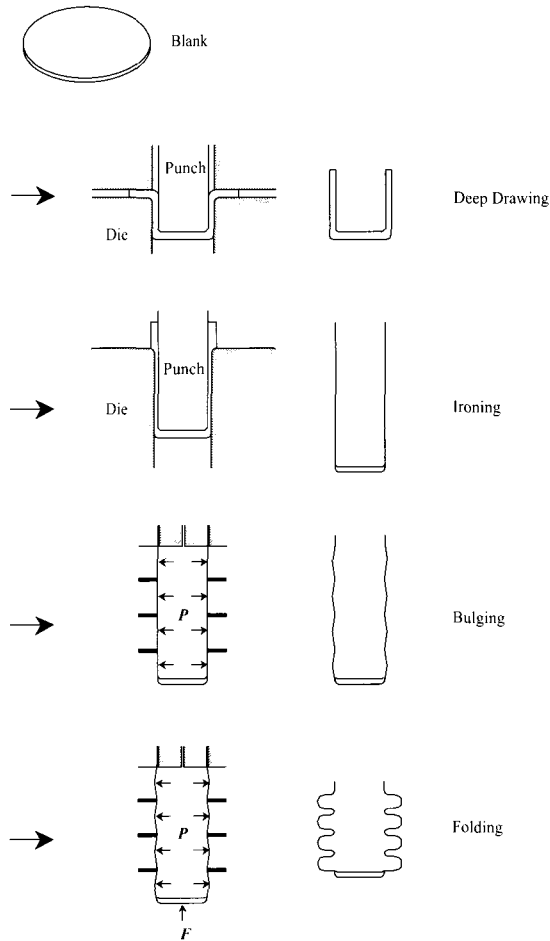


Fig. 1 Illustration of the overall bellows forming process

접기 공정은, 벌징된 튜브내의 유압 P를 일정하게 유지한 채 축 방향에서 압축력을 가하여 벨로우즈의 주름을 완성시키는 공정이다. 이 때 유압 유체가 일정하게 밖으로 배출되므로써 튜브내의 유압이 일정하게 유지된다.

마지막으로 튜브내의 유압과 축 방향의 압축력이 완전히 제거되면 탄성 복원에 의한 스프링백이 발생한 후 최종 완제품이 된다.

최근 벨로우즈에 대한 해석의 대부분은 성형 완료된 벨로우즈의 특성을 파악하는 데 있다. 주로 응력, 진동 특성, 피로 파괴 및 좌굴에 관한 것들이다.⁽²⁻⁴⁾

성형과 관련해서는 벌징 공정에 대해 유한요소법 혹은 상계해석법 등과 같은 다양한 방법으로 많은 연구가 이루어져 왔다.⁽⁵⁻⁶⁾ 접기 공정에 대해서는 상계해석법을 이

용한 연구가 보고된 바 있다.⁽¹⁾ 특수 롤러를 사용하여 벨로우즈를 가공하는 실험 연구도 보고되었다.⁽⁷⁾ 그러나 유압으로 성형되는 벨로우즈 제작 공정에 대해 일관되게 해석을 시도한 예는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 벌징 공정, 접기 공정 및 스프링백에 대한 일관된 유한 요소 해석을 시도하여 각 공정에서의 변형 및 응력 상태를 계산, 이를 비교 분석한다.

2. 유한요소 모델링

본 논문에서 해석하고자 하는 벌징, 접기 및 스프링백 해석에 대한 모델링과 그 해석 과정을 Fig. 2에 간략히 나타내었다. 해석은 주름 하나에 대하여 수행하였는데 대칭성을 고려하여 주름의 한가운데인 크라운점 (crown point)을 기준으로 반쪽에 대해서만 모델링하였다.

벌징 공정 중 튜브 내 유압은 P_0 에서 P_f 로 점증하며 벌징을 완성한다. 이 때 판다이는 초기 위치를 유지한다. 접기 공정 중에는 유압이 P_f 로 계속 유지된 채 판다이가 일정 속도 v 로 하강하여 주름을 형성시킨다.

유한 요소 해석에는 상용 박판 코드인 PAM-STAMP를 사용하였다. 따라서 벌징 공정 및 접기 공정은 외연적 유한요소법(explicit FEM)으로 수행하였고, 스프링백 해석은 내연적 유한요소법(implicit FEM)으로 행하였다.

해석에 사용한 요소는 이방성 탄소성 쉘 요소이며, 스프링백 해석을 수행하기 위해 두께 방향으로의 적분점 개수를 7개로 설정하였다.

사용된 재료는 인청동이며 재료 상수는 다음과 같다.

Material : Phosper Bronze (Full annealed)

Young's Modulus (E) : 92 GPa

Poisson's Ratio (ν) : 0.34

Lankford Value (R) : 1.0

Density (ρ) : $8.5 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

Stress-Strain Curve⁽¹⁾ :

$$\bar{\sigma} = 0.6362(0.00034 + \bar{\epsilon}^n)^{0.2341} \text{ GPa}$$

또한 해석에 사용된 공정 변수와 초기 블랭크의 크기는 Table 1과 같다.

벌징 공정 및 접기 공정은 순차적으로 이루어지는데 해석에서도 이를 그대로 반영하였다. 따라서 Fig. 3과 같은 시간 스케줄에 따라 외부 하중인 압력과 다이 스트로크를 가하였다.

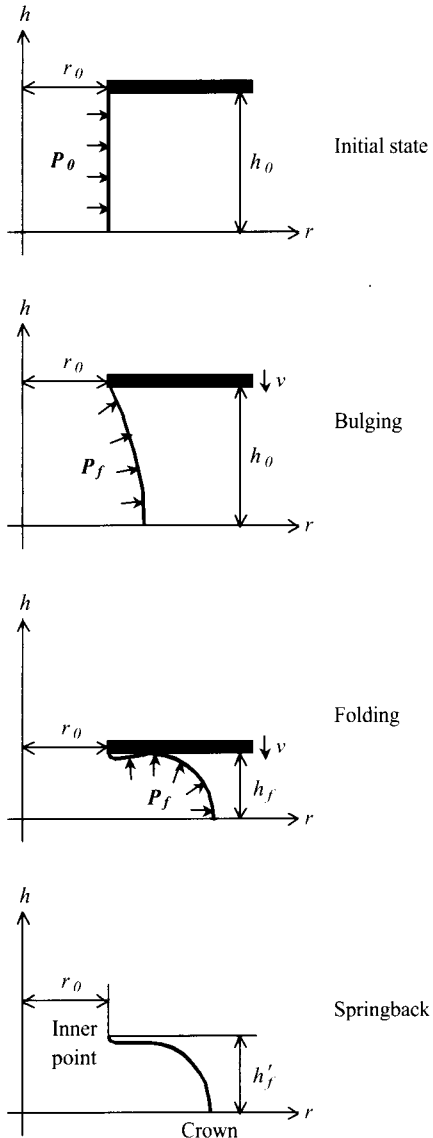


Fig. 2 Analysis modeling for the bellows forming process

3. 해석 결과

벌징 공정, 접기 공정 및 스프링백 직후의 각 단계별 형상 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 벌징 공정 직후의 크라운점의 반경은 초기 블랭크에 대해 약 111.7% 정도이고, 접기 공정 직후에는 약 152.7%가 된다. 스프링백 직후에는 약 151.7%이다. 따라서 탄성 복원에 의해 약 1% 포인트 정도 반경이 줄어들었음을 알 수 있다.

Table 1 Process parameters and initial blank information for the simulation of the bellows forming process

Process Parameters	Value
Plate Die Velocity (v)	0.1 mm/ms
Max. Die Stroke (h_0-h_f)	2 mm
Max. Pressure (P_f)	10.98 MPa
Initial Blank Radius (r_0)	4.5 mm
Initial Blank Height (h_0)	3 mm
Initial Blank Thickness (t_0)	0.1 mm

반면, 제품의 높이 변화는 상대적으로 큰데, 접기 공정 직후 초기 블랭크의 약 32.4%이던 높이가 스프링백 직후 약 37.5%로 커지면서 약 5% 포인트의 높이 변화를 보여주고 있다. 또한 접기 공정 직후에는 S자 형태의 주름이 형성되나, 스프링백 후에는 거의 U자에 가까운 주름으로 변화되고 있음도 알 수 있다.

스프링백 전후의 3차원 성형 형상에 대한 비교를 Fig. 5에 보였다.

주름의 최선단 점인 크라운점의 공정 시간에 따른 정규화된 반경 변화를 Fig. 6에 보였다. 내압만이 유일한 외력인 벌징 공정 구간에서 크라운점의 반경은 내압이 증가함에 따라 지수함수적으로 증가한다. 접기 공정 구간에서는 초기 증가세가 둔화되면서 거의 직선에 가까운 형태가 되는데, 공정 후반부에서는 약 1 ms 당 1.43%씩

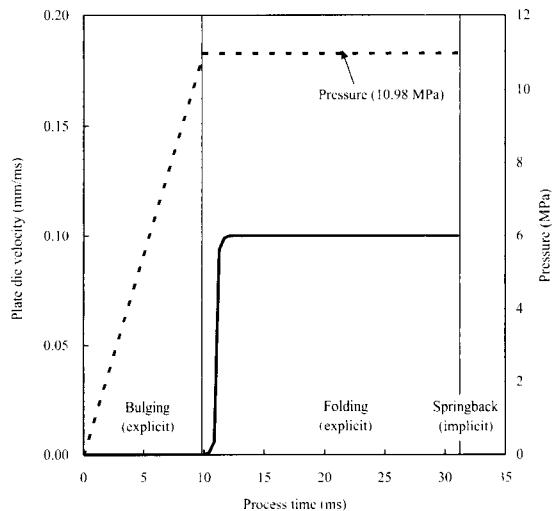


Fig. 3 Time schedule for the external loads in the simulation of the bellows forming process

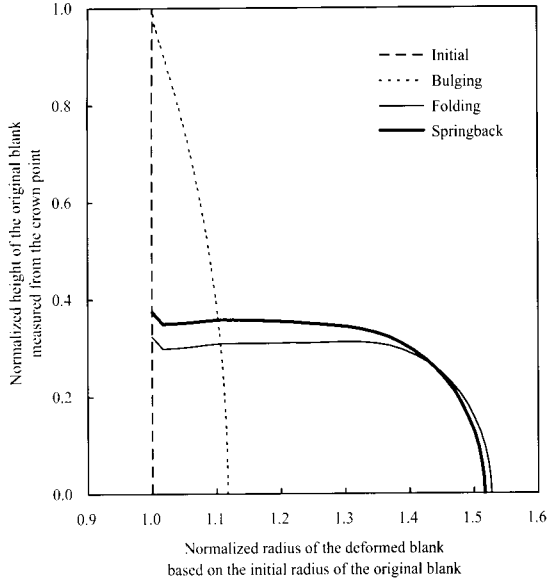


Fig. 4 Comparison of the deformation shape at the end of each process step

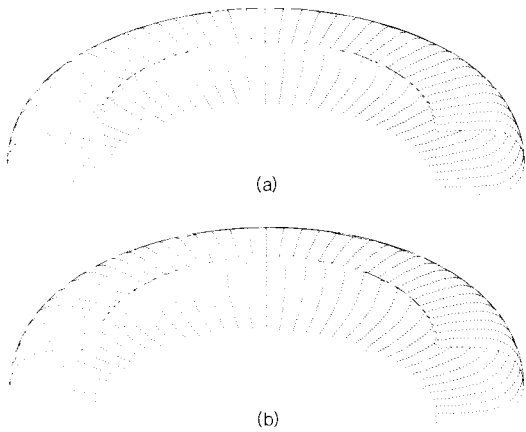


Fig. 5 Deformed shape of a convolution of the bellows before-(a) and after-(b) springback

반경이 증가하고 있다.

블랭크의 바깥쪽 표면에서의 주변형률과 부변형률의 분포 및 이것의 공정에 따른 변화를 Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 나타내었다. 두 그림의 스케일을 동일하게 하여 직접 비교할 수 있도록 하였다.

주변형률은 공정이 진행됨에 따라 크라운점을 최고점으로 하는 싸인 곡선 형태를 띄고 있다. 또한 스프링백 후에는 주변형률의 값이 약간 줄어 들었음을 알 수 있

다. 부변형률 값의 크기는 주변형률에 비해 매우 작으며, 별징 공정 중에는 대부분 양의 값을 가지나, 접기 공정과 스프링백 중에는 거의 0의 값을 나타내고 있다. 그러나 판다이가 접촉하고 있는 부위인 최상단에서는 강한 압축 변형률이 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 판

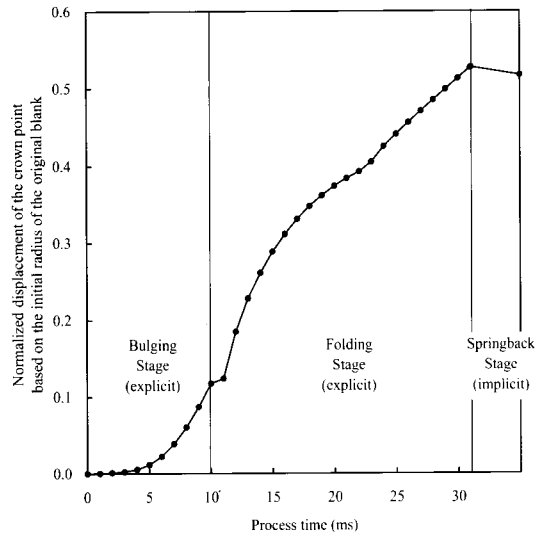


Fig. 6 Normalized displacement of the crown point along the process time

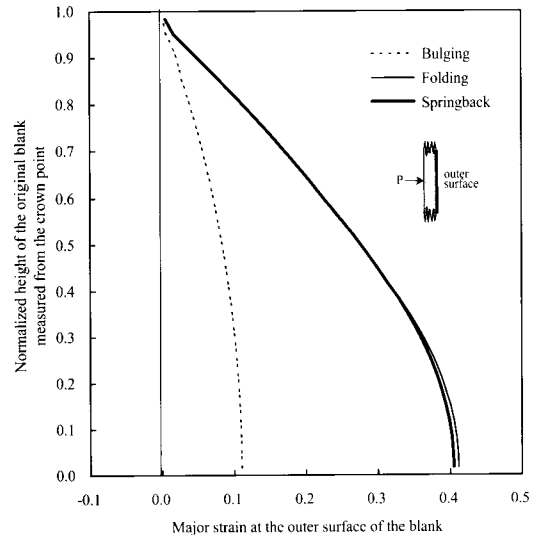


Fig. 7 Variation of the major strain at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

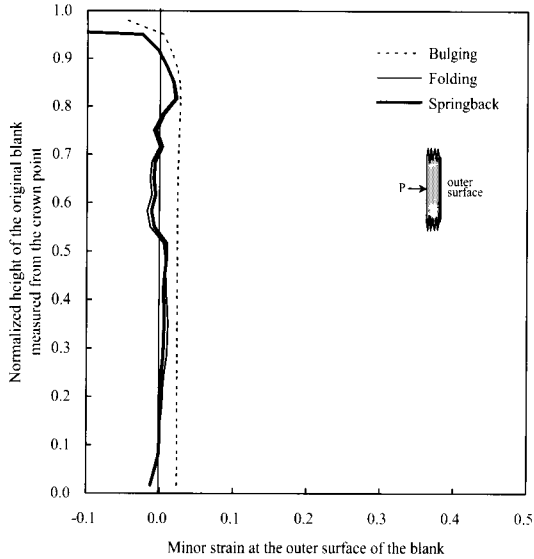


Fig. 8 Variation of the minor strain at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

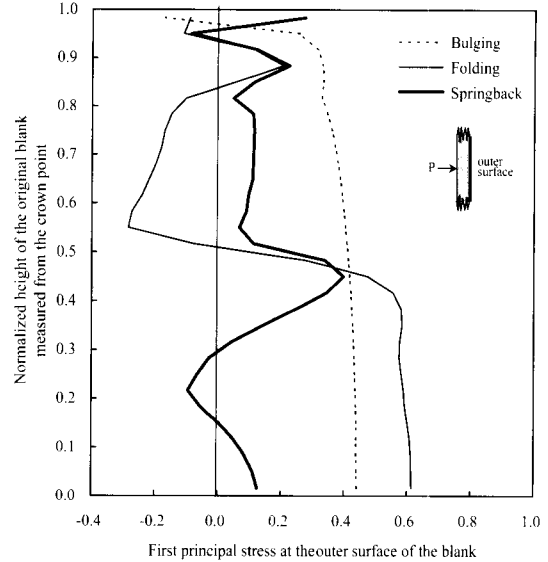


Fig. 10 Variation of the first principal stress at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

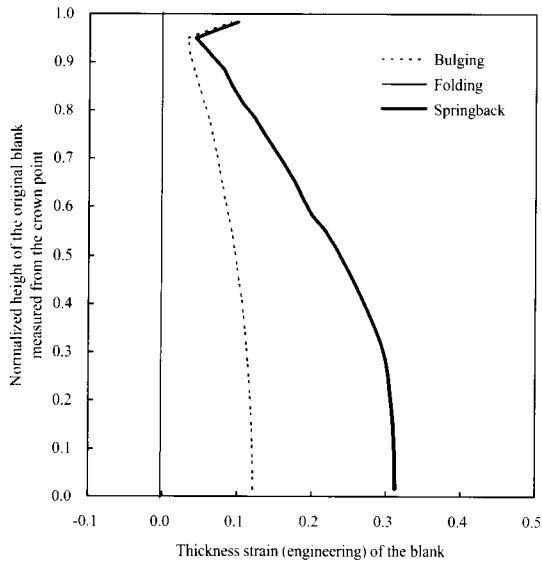


Fig. 9 Variation of the thickness strain (engineering) of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

다이의 구속에 의해 블랭크의 변형이 인위적으로 차단되었기 때문이다.

공정에 따른 블랭크의 두께 변화를 Fig. 9에 보였다. 주변형울의 분포와 유사하게 크라운점을 기준으로 싸인 곡선 형태를 띄고 있는데 전체적으로 블랭크의 모든 점에서의 두께는 얇아졌다. 그러나 초기 블랭크 높이의 30% 구간까지는 최종 두께가 거의 일정함도 관찰할 수 있다. 이는 별징 공정뿐만 아니라 집기 공정 중에서도 이 구간에서는 외력에 의한 구속이 없이 두께 감소가 거의 균등하게 지속적으로 유지되었기 때문이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 공정에 따른 블랭크의 바깥 표면에서의 주응력 분포와 부응력 분포를 각각 보여주고 있다. 또한 Fig. 12와 Fig. 13은 블랭크 안쪽 표면에서의 주·부응력 분포를 보여주고 있다. 여기서 주응력 방향은 블랭크의 높이 방향, 부응력 방향은 블랭크의 원주 방향을 의미한다. 별징 공정에서는 예상할 수 있는 대로 주·부응력이 모든 구간에서 인장 상태를 나타내고 있다. 집기 공정에서는 대략 초기 블랭크의 45% 높이에서 크게 두 개의 구간으로 응력 상태를 나누어 볼 수 있다. 우선 주응력의 분포를 보면 45% 위쪽 구간에서는 안쪽 표면에서 인장, 바깥 표면에서 압축 응력 상태가 되는데 이는 굽힘 모드에 해당한다. 그러나 45% 아래쪽 구간에서는 내·외부 표면 모두에서 인장 상태가 되는 인장 모드가 된다. 반면 부응력의 분포에서는 역시 45%를 기준

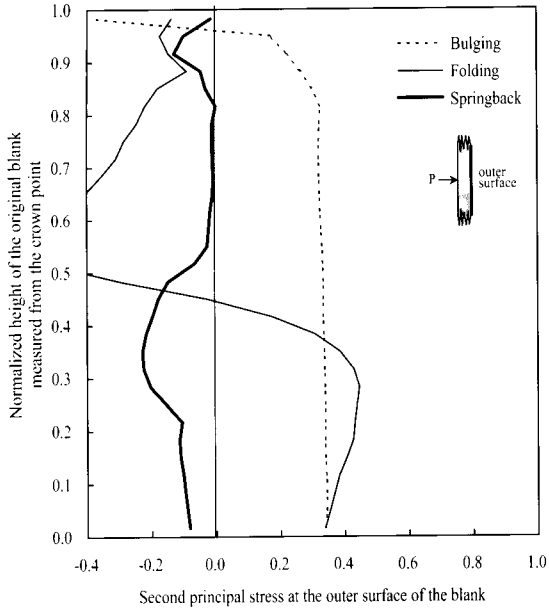


Fig. 11 Variation of the second principal stress at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

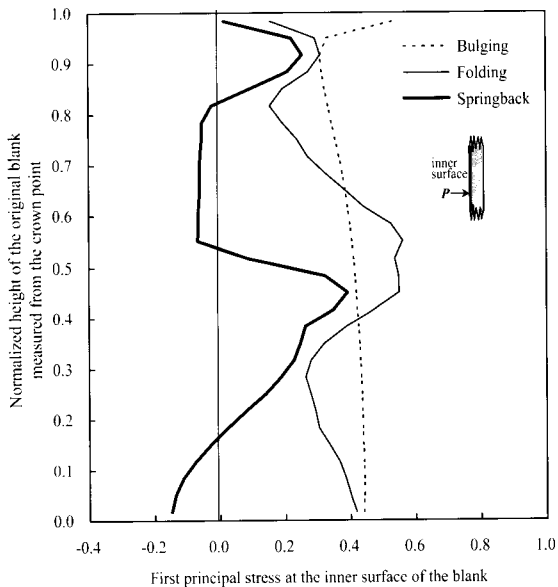


Fig. 12 Variation of the first principal stress at the inner surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

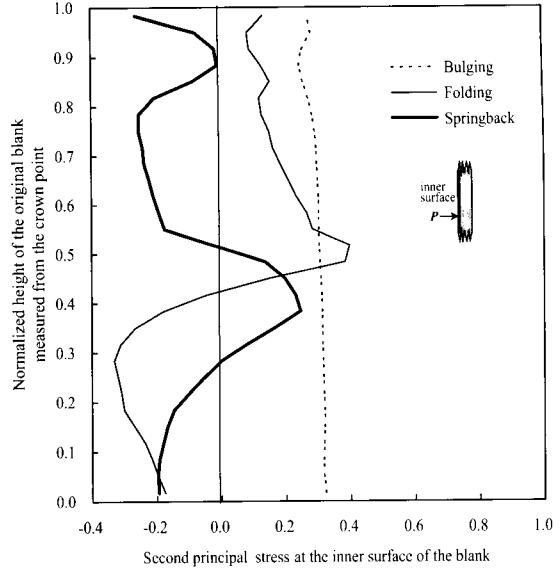


Fig. 13 Variation of the second principal stress at the inner surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

으로 볼 때 45% 위쪽 구간에서는 바깥 표면 쪽으로의 굽힘 모드, 45% 아래쪽 구간에서는 안쪽 표면 쪽으로의 굽힘 모드가 나타난다. 따라서 이를 종합해 보면 45% 위쪽 구간에서는 이축 굽힘 모드로서 굽힘이 지배적으로 나타나는데 이는 판다이와의 접촉점 (inner point) 부근에서 구속에 의해 블랭크가 심하게 굽어지는 현상 때문이고, 45% 아래쪽 구간에서는 일축 인장, 일축 굽힘 형태의 응력 상태인데 이는 접기 공정 동안 유압이 일정한 값으로 고정되어 있어서 이축 인장 상태를 지속시키기 위한 충분한 에너지를 제공하지 못하기 때문에 나타나는 현상이라 해석할 수 있다. 스프링백 후에는 응력의 절대값이 작아진 모습을 볼 수 있고, 잔류응력의 분포는 굽은 실선과 같다.

4. 결론

금속 벨로우즈 성형의 주요 공정인 벌징 공정과 접기 공정 및 이의 스프링백에 대해 유한 요소 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 크라운점의 변위는 벌징 공정 중 지수함수적으로 증가하나 접기 공정에서는 거의 선형적인 증가로 변화한다.
- (2) 최종 제품의 두께 분포에 있어서 크라운점을 기준

으로 초기 높이 대비 $\pm 30\%$ 의 구간에서는 거의 균일한 두께가 형성된다.

(3) 스프링백 시 판다이와의 접촉점에서의 높이 방향 탄성 복원량이, 크라운점에서의 반경 방향 탄성 복원량보다 크다.

(4) 초기 블랭크 높이 대비 45%의 위치에서 그 위쪽에서는 이축 굽힘 모드가, 그 아래쪽에서는 일축 인장, 일축 굽힘 모드가 나타난다.

후 기

이 논문은 2000년도 순천향대학교 대학 자체 학술연구비 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 이상욱, 1988, "벨로우즈 성형공정에 관한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원
- (2) Koh, B. K., Park, G. J., 1998, "Analysis and Optimization of Bellows With General Shape", J. Pres. Ves. Tech., Vol. 120, pp. 325~333.
- (3) Li, T., 1998, "Effect of the elliptic degree of Ω -shaped bellows toroid on its stresses", Int. J. Pres. Ves. Pip., Vol. 75, pp. 951~954.
- (4) Jakubauskas, V. F., 1999, "Added Fluid Mass for Bellows Expansion Joints in Axial Vibrations", Trans. ASME, J. Pres. Ves. Tech., Vol. 121, pp. 216~219.
- (5) Woo, D. M., 1973, "Tube-Bulging under Internal Pressure and Axial Force", Trans. ASME, J. Eng. Mat. Tech., pp. 219~223.
- (6) Yang, D. Y., Noh, T. S., 1987, "An Analysis of Axisymmetric Hydrostatic Bulging by the Upper-Bound Method", Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, No. 1, pp. 43~49.
- (7) 구현성, 김낙수, 1994, " Ω -형 벨로즈관의 성형을 위한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 3, No. 3, pp. 347~358.