

금속 벨로우즈의 성형 해석

이상욱*

Forming Analysis of a Metal Bellows

Sang-Wook Lee

Key Words: Bellows(벨로우즈), Bulging(벌징), Folding(폴딩), Springback(스프링백)
FEM(유한요소법), Explicit(외연적)

Abstract

The manufacturing of 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 to obtain information about the design parameters of a metal bellows.

1. 서 론

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 성형 과정을 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 잔류 응력이 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 점증하는 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.

접기 공정은, 벌징된 튜브내의 유압 P 를 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), (3), (4)}

성형과 관련해서는 벌징 공정에 대해 유한요소법 혹은 상계해석법 등과 같은 다양한 방법으로 많은 연구가 이루어져 왔다.^{(5), (6)} 접기 공정에 대해서는 상계해석법을 이용한 연구가 보고된 바 있다.⁽¹⁾ 그러나 스프링백까지 일관되게 해석을 시

* 순천향대학교 기계공학과

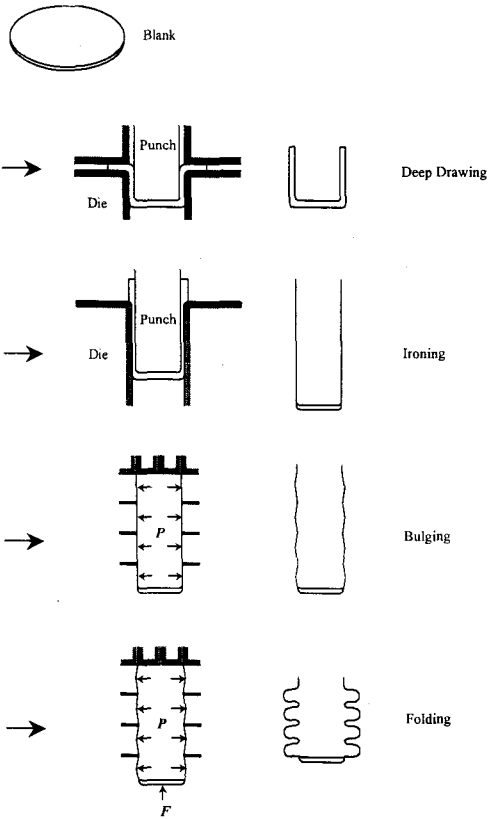


Fig. 1 Illustration of the overall bellows forming process

도한 예는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 별징 공정, 접기 공정 및 스프링백에 대한 일관된 유한 요소 해석을 시도한다. 이로부터 금속 벨로우즈 설계에 대한 중요 파라미터를 이해하는 바탕을 마련한다.

2. 유한 요소 모델링

본 논문에서 해석하고자 하는 별징, 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.

별징 공정 중 튜브 내 유압은 P_0 에서 P_f 로 점증하며 별징을 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 별징 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

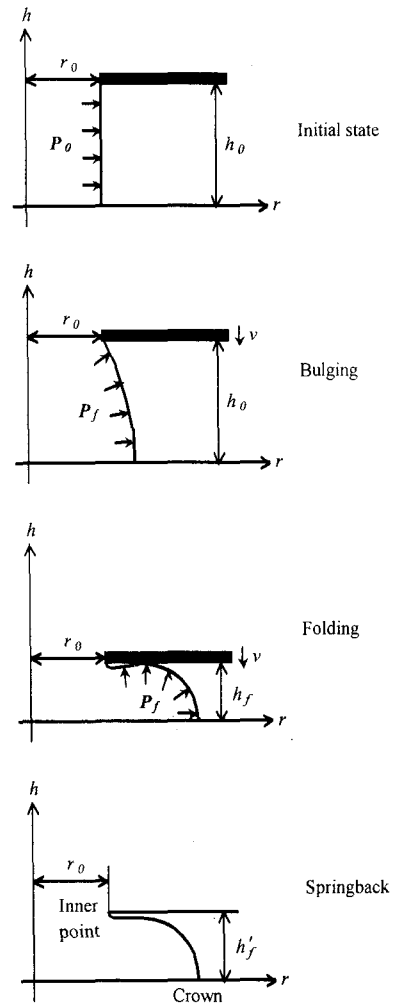


Fig. 2 Analysis modeling for the bellows forming process

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) : 8.5×10^{-6} kg/mm³
 Stress-Strain Curve⁽¹⁾ :

$$\bar{\sigma} = 0.6362 \bar{\epsilon}^{0.2341} \text{ GPa}$$

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

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

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. 반면, 제품의 높이 변화는 상대적으로 큰데, 접기 공정 직후 초기 블랭크의 약 32.4%이던 높이가 스프링백 직

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

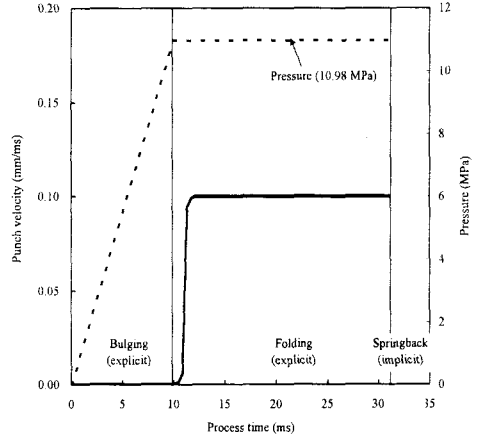


Fig. 3 Time schedule for the external loads in the simulation of the bellows forming process

후 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

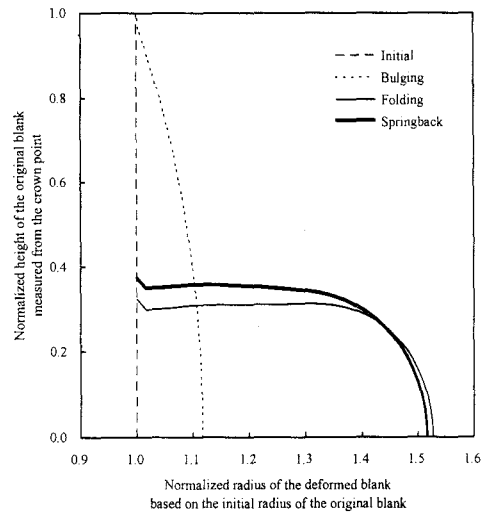


Fig. 4 Comparison of the deformation shape at the end of each process step

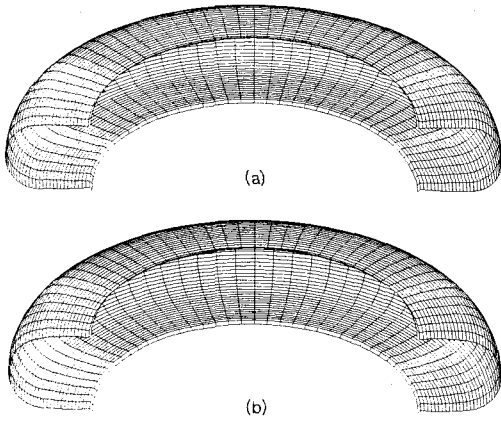


Fig. 5 Deformed shape of a convolution of the bellows before-(a) and after-(b) springback

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 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.

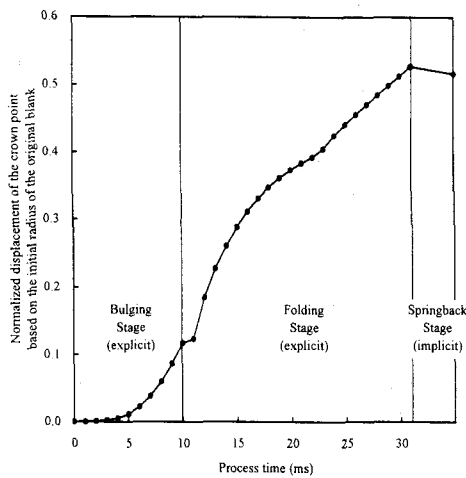


Fig. 6 Normalized displacement of the crown point along the process time

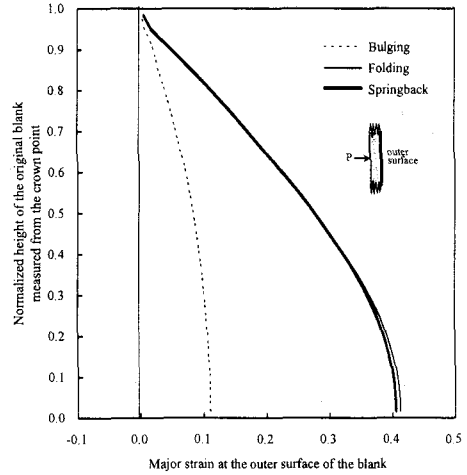


Fig. 7 Variation of the major strain at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

주변형률은 공정이 진행됨에 따라 크라운점을 최고점으로 하는 싸인 곡선 형태를 띠고 있다. 또한 스프링백 후에는 주변형률의 값이 약간 줄어들었음을 알 수 있다. 부변형률 값의 크기는 주변형률에 비해 매우 작으며, 벌징 공정 중에는 대부분 양의 값을 가지나, 접기 공정과 스프링백 중에는 거의 0의 값을 나타내고 있다. 그러나 판

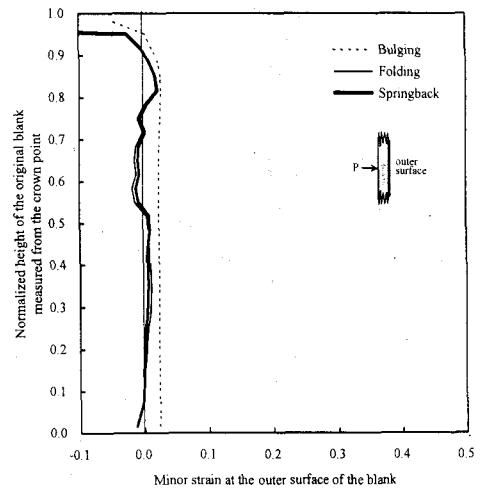


Fig. 8 Variation of the minor strain at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

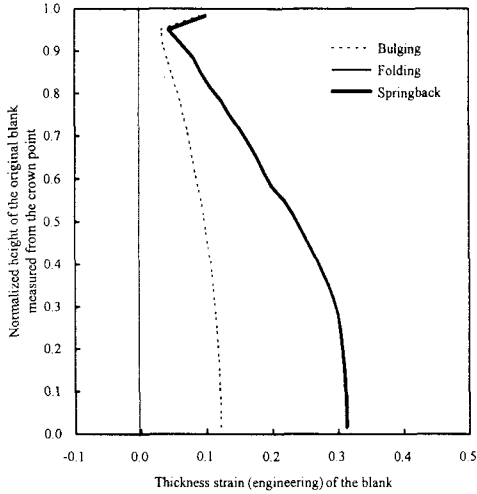


Fig. 9 Variation of the thickness strain (engineering) of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

다이가 접촉하고 있는 부위인 최상단에서는 강한 압축 변형율이 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 판다이의 구속에 의해 블랭크의 변형이 인위적으로 차단되었기 때문이다.

공정에 따른 블랭크의 두께 변화를 Fig.9에 보였다. 주변형율의 분포와 유사하게 크라운점을

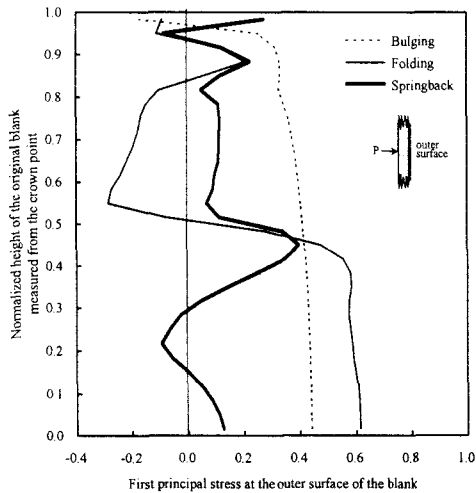


Fig. 10 Variation of the first principal stress at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

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 벌징 공정뿐만 아니라 접기 공정 중에서도 이 구간이 지속적으로 이축 인장 응력 상태를 유지하기 때문이다. 이 같은 사실은 바깥쪽 표면에서의 주응력과 부응력 분포를 살펴보면 알 수 있다.

Fig.10과 Fig.11은 공정에 따른 주응력 분포와 부응력 분포를 각각 보여주고 있다. 벌징 공정 중에서는 전 영역에 걸쳐 이축 인장 상태가 이루어지고 있다. 그러나 접기 공정에 들어간 후 블랭크는 바깥쪽 표면을 기준으로 크게 두 개의 구간으로 응력 상태를 나누어 볼 수 있는데, 초기 블랭크 높이의 약 45%까지는 이축 인장 응력 상태가, 그 나머지 부분에서는 이축 압축 응력 상태가 발생하고 있음을 알 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 요

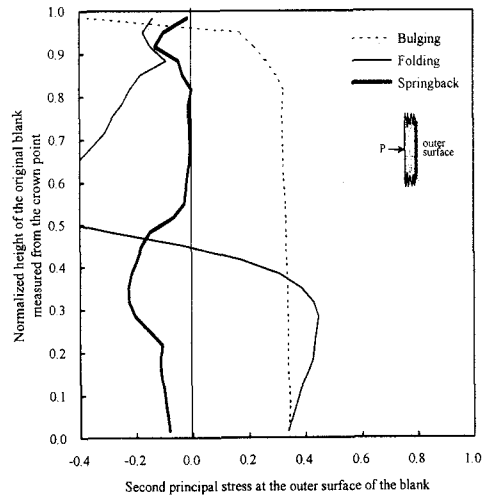


Fig. 11 Variation of the second principal stress at the outer surface of the blank along the normalized height of the original blank measured from the crown point

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

(3) 스프링백 시 안쪽점 (관다이와 맞닿아 있던 점)에서의 높이 방향 탄성 복원량이, 크라운점에서의 반경 방향 탄성 복원량보다 크다.

참고문헌

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