

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

오메가형 벨로즈관의 성형공정을 위한 유한요소해석

이정훈*, 김낙수**, 전병희***

Finite Element Analysis for Forming Processes of Ω -Type Bellows Tubes

Junghoon Lee*, Naksoo Kim**, Byunghee Jeon***

ABSTRACT

The study presents a computer-aided analysis and its design for the forming process of Ω -type bellows tubes. Finite element analysis was carried out to perform the process simulation. Based on the analytic results of various conditions, the forming conditions used for angled U-type bellows tubes were determined. The 3-D modeling was constructed by I-DEAS and the process simulation was constructed by PAM-STAMP. It is concluded that the difference of height between die and bellows during the forming process causes a non-uniform shape of the bellows and also influences Ω -shape. These results can be utilized for the process design.

Key Words : Bellows tube(벨로즈관), Process simulation(공정해석), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

단면의 모습이 주름진 산과 골의 형상을 갖는 벨로즈(bellows)는 주로 배기, 배관계통에 흐르는 고온, 고압의 유체에 의해 발생하는 축변형량을 흡수하여 변형 및 파손을 방지하는 완충장치의 하나로 산업기계용, 수송기계용으로 사용된다. 최근에는 산업이 발전함에 따라 사용용도가 다양해져 발전소, 화학플랜트의 신축이음의 용도로 사용되며, 항공기, 승용차, 디젤차량의 소음, 진동 저감을 위해 벨로즈가 필수적으로 장착되어 있다. 벨로즈는 단면의 형상에 따라서 U-형, S-형 및 Ω -형으로 분류되며 이들의 형상은 Fig. 1과 같다. 그 중에서 Ω -형 벨로즈는

고부가가치의 제품으로 가장 성능이 우수한 반면에 형상이 복잡하고 가공공정이 어려워서 아직 국내에서는 설계 및 생산이 되지 않고 있으며 전량을 수입에 의존하고 있는 실정이다.

벨로즈에 관한 연구동향을 살펴보면 U 및 S-형 벨로즈는 1971년에 최초로 생산되었으며, 1978년 고리 원자력



(a) U-형 (b) S-형 (c) Ω -형

Fig. 1 벨로즈의 종류

* 서강대학교 대학원 기계공학과
 ** 서강대학교 기계공학과
 *** 인덕전문대 기계설계과

발전소용 EJMA(Expansion Joint Manufactures Association)규격⁽¹⁾에 따른 대형 Expansion Joint가 국산화되었다. 또한 고정도가 요구되는 방위산업체용 벨로즈를 생산하기에 이르러 선진국과 비교될 만한 기술력을 가지고 있다^(2,3). 뿐만 아니라 벨로즈를 대량생산하기 위한 유압식 나선관 성형장치⁽⁴⁾를 개발하여 생산자동화가 된 상태이다. 승용차에 사용되는 벨로즈의 경우는 진동특성에 관한 연구^(5,6)가 활발히 진행된 바 있다. 또한 U-형 벨로즈관의 피로수명에 대한 연구⁽⁷⁾도 최근에 발표되고 있다. Ω -형 벨로즈의 성형을 위한 실험적 연구⁽⁸⁾도 보고되고 있다. 이러한 상황에서 Ω -형 벨로즈를 생산하기 위한 많은 시도가 있었으나 Ω 와 S-형의 중간형상만이 생산되고 있다. 따라서 이들의 문제점을 찾아낼 수 있는 지속적인이고도 체계적인 연구가 필요하게 되었다.

외국의 경우 최근의 벨로즈 성형기술은 용도·크기에 따라 다양한 가공법으로 제조를 하고 있다. 과거에는 outer-in식 과 in-outer식 Roller성형법을 많이 사용하여 왔다. 대량생산이 요구되고 산의 수가 많은 경우에는 유압을 이용한 성형법을 사용한다. 그리고 직경이 아주 커서 위에서 설명한 방법으로는 제조하기가 곤란한 경우에는 로올러(roller)를 사용하고 있다.

본 연구에서는 Ω -형 벨로즈 제작시 시행오차를 줄이기 위해 상용프로그램인 I-DEAS를 이용해 3차원 모델링을 하여 3차원 Explicit Code인 PAM-STAMP로 성형 해석을 수행함으로써 Ω -형 벨로즈 성형용 금형설계에 유용하게 쓰일 수 있도록 하였다.

2. 성형해석

2.1 개요

본 연구에서 고려한 Ω -형 벨로즈의 성형과정은 Fig. 2에서 나타낸 것처럼 기존의 U-형 벨로즈로부터 하부가 각이진 U-형 벨로즈를 성형한 후 최종형상인 Ω -형 벨로즈를 성형하는 것으로서, 두 번째 단계인 하부가 각이진 U-형 벨로즈를 성형하는 과정을 PAM-STAMP를 이용하여 해석한다.

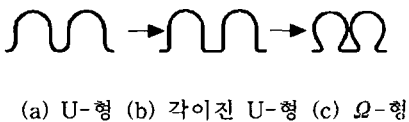


Fig. 2 Ω -형 벨로즈 성형과정

문헌⁽⁸⁾에서 제안한 실험적인 성형방법은 Fig.3과 같이 반지름이 다른 여러 개의 성형다이로 성형을 하며 각각의 성형다이를 거칠 때마다 점진적으로 벨로즈 산의 높이가 줄어들어 U-형을 Ω -형으로 만드는 것이다. 이 방법에서 성형다이의 벨로즈와 접촉하는 부분은 반지름의 변화가 없으므로 해석시에는 성형다이가 회전운동과 동시에 벨로즈의 반지름 방향으로 직선운동이 있다고 모사할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 PAM-STAMP로 해석시 성형다이의 복잡한 운동경로의 정의에 문제가 있으므로 성형과정을 단순화하였다. 즉 성형중 벨로즈는 원주방향으로의 변형이 없다고 가정하여 원형이 아닌 직선형의 하부가 각이진 U-형 벨로즈로 정의하였고(Fig. 4) 따라서 성형다이의 회전운동은 벨로즈의 길이방향(Fig. 5의 X방향)으로의 직선운동으로 정의하였고 성형다이의 벨로즈 중심방향으로의 운동은 Fig. 5의 Y방향 직선운동으로 바꾸어 주었다.

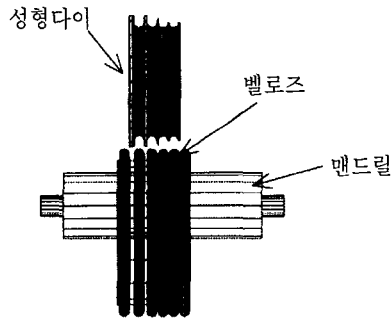


Fig. 3 벨로즈 성형기의 모습

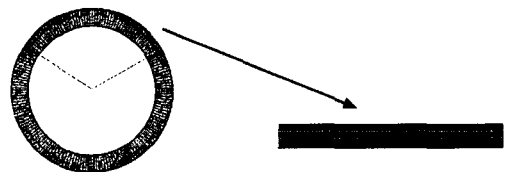


Fig. 4 단순화된 직선형의 벨로즈

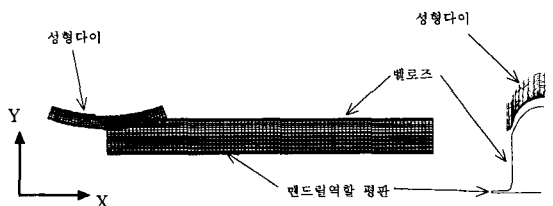


Fig. 5 단순화된 성형과정

2.2 형상정의 및 모델링

원형의 벨로즈를 직선으로 단순화한 하부가 각이진 U-형 벨로즈의 형상과 치수는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a)의 A-A'축을 중심으로 벨로즈는 좌우대칭을 이루므로 해석의 효율을 높이기 위해 대칭면을 기준으로 한쪽만을 유한요소 모델링하여 해석에 이용하였다.

성형다이는 성형과정의 단순화로 인해 X와 Y방향의 직선운동만 하며 벨로즈와 접촉하는 부분은 한정되어있으므로 벨로즈와 접촉하는 부분만을 모델링하였다. 성형다이의 형상은 문헌(9)를 참조하였고 그 형상과 치수는 Fig. 7과 같다.

Fig. 3에서 맨드릴의 역할은 성형다이가 벨로즈를 눌러줄 때 지지해주는 역할을 하므로 단순화된 모델에서는 단순히 벨로즈를 바쳐주는 평판으로 바꾸어 주었다.

벨로즈와 성형다이, 맨드릴역할 평판의 절점 및 요소수는 Table.1과 같다.

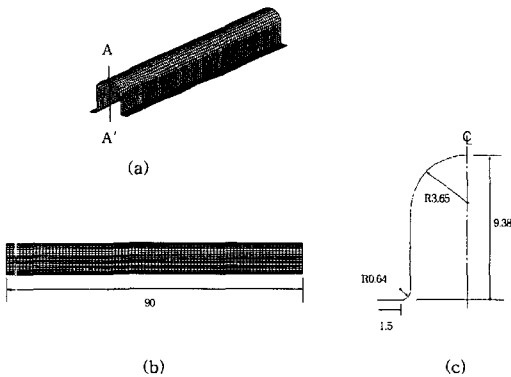


Fig. 6 직선형 벨로즈의 형상 및 치수

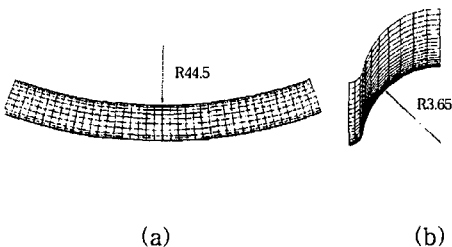


Fig. 7 단순화된 성형다이의 형상 및 치수

Table. 1 절점 및 요소수

	성형다이	벨로즈	맨드릴역할 평판
절점수	656	5656	403
요소수	600	5500	360

2.3 소재의 물성치

벨로즈는 보통 금속박판을 소재로 제관(piping)후 성형하는데, 일반적으로 사용되는 성형재료로는 고급의 스테인레스판인 STS304가 사용되고 있다. STS304는 오스테나이트계 스테인레스강으로서 보통 크롬, 니켈이 철과 합금된 것이다. 비자기성이고 뛰어난 내식성을 갖지만 응력부식균열에는 대단히 민감하며, 냉각가공에 의해 경화된다. 모든 스테인레스강 중에서 가장 연성이 크며 쉽게 성형된다.

STS304의 유동응력식은 다음의 식(1)과 같으며,

$$\bar{\sigma} = 23.112\bar{\epsilon}^{0.266} kg_f / mm^2 \quad (1)$$

수직이방성을 고려하여 압연방향과 0°, 45°, 90°에 대한 3가지 시편을 사용하여 얻은 평균소성변형률비는 다음의 식(2)로 계산된다.

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2)$$

따라서 20%의 연신률을 기준으로한 변형률비는 $R_0=0.876$, $R_{45}=1.053$, $R_{90}=0.515$ 이고 따라서 평균 Rankford 값 (\bar{R})은 $\bar{R} = 0.845$ 이다(9).

STS-304의 물성치는 Table.2에 나타내었다(10).

Table. 2 소재의 물성치

Poisson's ratio	0.283
Yield Stress (MPa)	205
Young's Modulus (GPa)	193
Density(g/m ³)	8.0×10 ⁶
Thickness (mm)	0.4

2.4 해석 및 경계조건

원형의 벨로즈는 성형시 원주방향으로 변형이 없다는 가정아래 직선형 벨로즈로 해석을 수행하므로 이에 따른 경계조건이 추가된다. 즉 단순화된 직선형의 벨로즈의 양 끝단(Fig. 8의 A부분)은 길이방향으로 변위가 없게 되므로 끝단의 절점은 X방향으로의 변위를 고정하였다. 벨로즈 옆면의 다음 벨로즈산과 이웃하는 부분(Fig. 8의 B부분)역시 변위가 없으므로 끝단의 절점의 Z방향의 변위를 고정하였다. 벨로즈 대칭면에 대해서는 이에 따른 대칭경계조건을 추가하였다.

Q-형상은 성형다이가 여러번에 걸쳐 벨로즈를 통과하

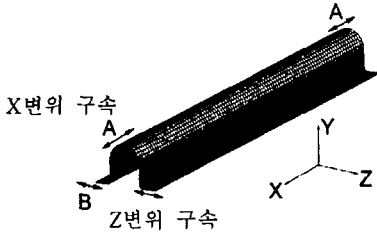


Fig. 8 경계조건

면서 얻어진다. 즉 벨로즈성형기의 성형다이가 3개라면 단순화된 모델에서는 성형다이가 벨로즈를 세 번에 걸쳐 점진적으로 벨로즈 산을 압축하며(Y방향 직선운동) 마지막 한번은 전체적으로 고른 Ω -형상을 위해 Y방향 운동 없이 X방향 운동만을 한다. 따라서 최종의 Ω -형상을 얻기 위해서는 성형다이를 2mm압축해야 하므로 3개의 성형다이의 경우를 예를 들면 3번성형다이가 지나갈 때 각각 0.667mm압축을 해야한다.

본 연구에서는 성형다이의 개수가 2개,3개,4개인 경우에서의 해석을 통해 이에 따른 Ω -형상을 비교해 보았다. Fig. 9에서 각각의 조건에 따른 성형다이의 시간에 따른 Y방향 변위를 나타내었다.

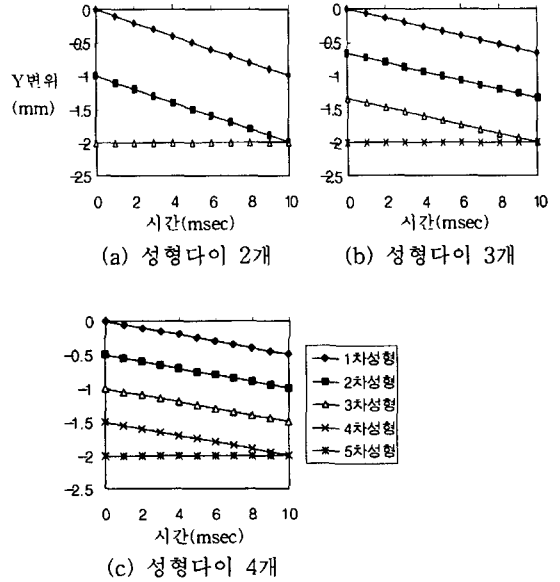


Fig. 9 성형다이의 Y방향 변위

3. 해석결과

각각의 성형조건에 따른 성형 후 벨로즈의 형상은 Fig. 10에서 보는 것과 같다. Fig. 10(a)에서 보는 것과 같이

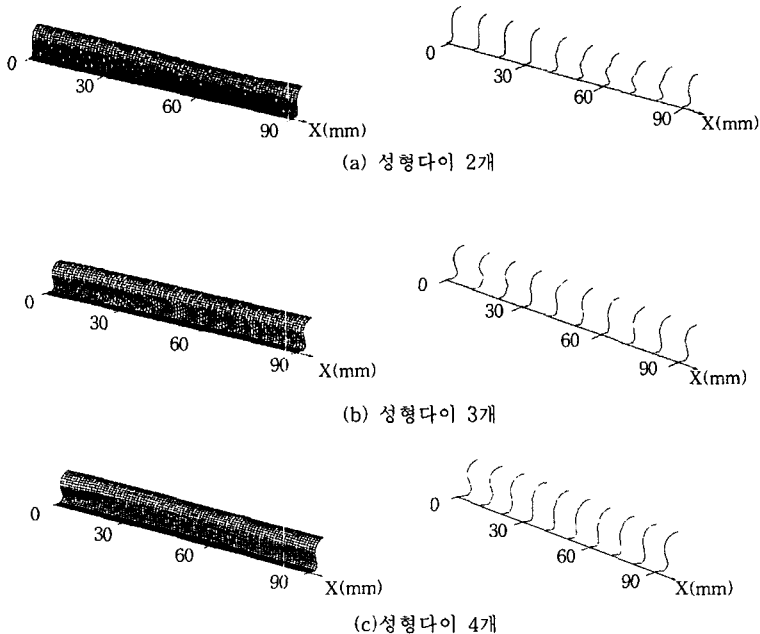


Fig.10 성형 후 벨로즈의 형상

성형다이의 개수가 2개인 경우 2번째 성형에서 벨로즈가 원하는 형상으로 성형되지 않기 시작함을 알 수 있다. 이에 비해 성형다이가 3개, 4개인 경우의 벨로즈는 Ω -형상으로 성형된 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 10 (b), (c)의 성형된 벨로즈의 단면의 형상을 살펴보면 성형다이가 진입하는 부분인 0~25mm의 형상이 다른 부분의 형상과 비교해 볼 때 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 1차 성형 후에 2차 또는 그 다음의 성형시 성형다이의 진입높이(Y 방향)와 벨로즈산의 높이 차이로 인해 벨로즈를 점진적으로 성형할 수 없기 때문이다. 이를 실제 성형공정으로 생각한다면 성형다이가 회전하면서 압축할때 말려들어오는 벨로즈산의 높이가 갑자기 높아지므로 이 부분에서 벨로즈의 Ω -형상이 다른부분에 비해 차이가 생기는 것이다. Fig. 11에서 성형다이가 3개인 경우와 4개인 경우에서 진입하는 부분의 단면과 벨로즈 끝단의 단면을 비교하였다. 이 결과에서 보면 성형다이가 4개인 경우가 3개인 경우보다 두 단면의 차이가 작음을 알 수 있다. 위의 결과는 여러 개의 성형다이를 성형시 최종의 벨로즈형상에서 주름이 발생하는 것을 감소시킬 수 있음을 보여준다. 이러한 결과를 볼 때 성형 후 형상을 결정짓는 중요한 인자로서 반지름 방향으로 압축하는 성형다이의 속도를 생각할 수 있다. 즉 성형다이의 개수를 늘리는 방향보다는 성형시 반지름 방향의 압축속도를 조절함으로써 벨로즈의 형상을 보다 향상시킬 수 있음을 보여주는 것이다. Fig. 12의 (a)와 (b)는 최종성형 후 비교적 점진적인 성형이 되었다고 볼 수 있는 벨로즈 끝부분의 단면이다. Fig.

12(c)의 기대되는 형상과 비교해 보면 벨로즈 하부에서 변형이 집중적으로 일어나지 못하여 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 본 해석은 벨로즈를 1회전하여 최종형상을 얻는 것이다. 따라서 같은 성형다이의 개수라도 여러 번에 걸친 회전으로 점진적으로 성형한다면 보다 균일한 Ω -형상을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 제안한 성형공정을 직선형으로 단순화 하였으므로 실제 성형공정과는 차이가 생길 수 있고, 그 요인을 살펴보면 실제 성형에서는 벨로즈와 맨드릴의 접촉이 단순화된 모델에서 처럼 평면적이지 않으므로 벨로즈 안쪽에도 변형이 일어나게 된다. 이러한 영향으로 인해 실제공정으로 제작된 벨로즈 형상과 해석결과와의 벨로즈 형상이 차이가 생길 수 있다.

4. 결 론

Ω -형 벨로즈를 성형하기 위한 방법의 하나로 성형다이를 각각 2개, 3개, 4개 이용한 성형과정을 제안하였고 이를 토대로 성형해석을 수행하였다. 성형다이의 개수를 변화시켜가며 성형된 벨로즈의 형상을 비교한 결과 성형다이를 2개로 하여 성형해석을 한 경우는 점진적인 성형이 이루어지지 않아 Ω -형상을 얻을 수 없었으나 이에 비해 성형다이가 3개, 4개인 경우는 Ω -형상을 얻어 낼 수 있었고 4개의 성형다이를 성형했을 때 기대했던 Ω -형상과 가장 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

이 결과로부터 성형시 반지름 방향으로 압축하는 성형다이의 속도가 형상을 결정짓는 중요한 인자라는 것을 확인하였으며, 따라서 원하는 벨로즈의 형상을 얻어내기 위해서는 벨로즈 주위를 성형다이가 여러바퀴 회전하며 점진적인 변형을 주어야 한다는 것을 알았다.

향후 성형공정을 직선으로 단순화하였으므로 이에 따른 오차를 해소하기 위해 보다 실제 성형공정과 유사한 경계 조건의 제시가 필요하며, 또한 벨로즈의 탄성회복량에 대한 정량적인 고찰과 더불어 성형속도, 성형다이의 형상 및 초기 벨로즈의 형상에 따른 성형 후 Ω -형상의 비교가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Standard of the Expansion Joint Manufacturers Association, 6th Edition, 1993.
2. 금속관의 주름부 성형장치, 출원번호 1992년 실용

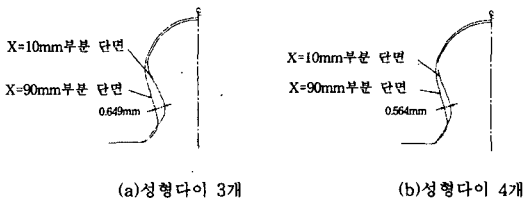


Fig. 11 성형 후 단면비교

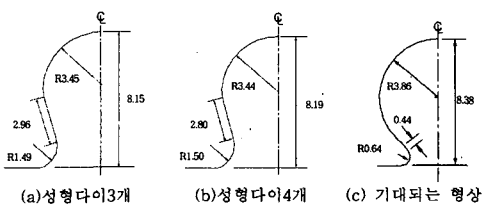


Fig. 12 최종형상

- 실안 등록출원 제335호, 기계장치 특허 93년 933347호.
3. 금속관의 주름부 성형장치, 출원번호 1992년 실용 실안 등록출원 제28576호.
 4. 나선관 성형장치, 출원번호 1993년 특허출원 제 14178호.
 5. 김민수, 이귀영, "부분구조 합성법을 이용한 배기계의 진동해석", 대한기계학회논문집, Vol.17, pp. 1833-40, 1993.
 6. 이승섭, 이장명, "배기계 Hanger 위치결정 및 Bellows 효과에 관한연구", I-DEAS Users's Conference, 1993.
 7. G.Subramanian and Char Raghunandan, "On improving the fatigue life of U-form bellows", Journal of Materials Processing Technology, 41 pp. 105-14, 1994.
 8. 구현성, 김낙수, "Ω-형 벨로즈관의 성형을 위한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 3 No. 3, pp. 347-58, 1994.
 9. 김낙수, 전병희, "Ω형 벨로즈관의 성형을 위한 유한요소해석", 학술진흥재단 자유공모과제 중간보고서, 1995.
 10. American Society for Metals, Metal Handbook, Ohio, 1985.