

Tube Hydroforming을 위한 굽힘 공정해석

양재봉* · 전병희** · 오수익***

(1999년 12월 30일 접수)

Tube Bending Analysis for Hydroforming Process

J. B. Yang, B. H. Jeon and S. I. Oh

Abstract

Tube hydroforming is recently drawing attention of automotive industries due to its several advantages over conventional methods. It can produce wide range of products such as subframes, engine cradles, and exhaust manifolds with cheaper production cost by reducing overall number of processes. Tube hydroforming process is divided into prebending process and hydroforming process. Tube bending is an important factor of the hydroforming process. The tube must be bent to the approximate centerline of the finished part prior to hydroforming process to enable the tube to be placed in the die cavity. This paper presents the theoretical analysis and the simulation results of the tube bending process. With some assumptions, approximate equations are derived to predict the thickness distribution on the cross section and the spring back of the bent tube. Bending simulations are carried out and compared to the analytical and experimental results.

Key Words : Tube bending, Hydroforming

1. 서 론

튜브 굽힘 공정은 자동차, 항공기, 조선, 유공압기기, 보일러, 열교환기, 발전소 파이프라인, 가구, 건축 등 여러 산업현장에서 각종부품제조에 널리 이용되고 있는 공정이다. 전통적으로 튜브 굽힘 공정은 노동집약적이고 작업시간이 긴 공정이었으나, 오늘날 컴퓨터 기술의 발달로 자동화가 가능하게 되었다.

튜브 하이드로포밍 공정은 90년대 들어서 자동차 부품산업에 이용되면서 급속히 발전하기 시작하였다. 자동

차에 대한 소비자의 요구는 승객 및 화물의 운송이라는 기본적인 기능 외에 외관, 주행 성능, 승차감, 안전성, 연비 및 환경문제 등 다양한 면으로 확대되고 있다. 이에 대응하여 미국, 일본, 유럽 등의 선진 자동차업체에서는 경쟁력 확보를 위하여 고안전 차체의 설계, 경량화 등 신기술 개발에 계속 박차를 가하고 있는데 하이드로포밍(hydroforming), 레이저 용접 판재(tailor welded blank), 스페이스 프레임(space frame), 알루미늄 차체 등이 그 대표적인 예 이다.

* 서울대학교 기계설계학과 대학원
** 인덕대학교 기계설계학과
*** 서울대학교 기계항공공학부

하이드로포밍은 경량화 및 안전성 확보에 대한 요구를 충족시키면서 가격 경쟁력이 있는 제품을 생산하기 위한 기술로서 횡방향 부재(cross member), 서브프레임(subframe), 필라(pillar) 등 자동차의 많은 부품에 적용될 수 있는 방법이며 기존의 스탬핑에 비하여 많은 장점이 있다. 스탬핑의 경우 2개의 판재를 따로 성형하여 스폿 용접에 의하여 결합하는 반면 하이드로포밍은 1개의 튜브를 사용하므로 부품 개수 및 공정수가 감소되며, 높은 강성을 갖는 부품을 생산할 수 있으며, 스폿 용접을 위한 플랜지가 없으므로 경량화 및 소재 수율 면에서 유리하며, 형상이 복잡한 부품을 생산할 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾

튜브 하이드로포밍 성형공정은 크게 예비 굽힘 공정과 액압 성형공정의 2단계로 나누어진다. 하이드로포밍 공정을 원활히 행하기 위해서는 소재가 다이 캐비티 내에 안착될 수 있도록 굽힘 공정을 거치게 된다. 이는 일종의 예비 성형 공정으로서 튜브의 굽힘 공정의 신뢰성과 재현성은 하이드로포밍에 있어 매우 중요한 요소이다. 예비 굽힘 공정에서 발생하는 두께와 단면형상의 변화는 최종 성형 제품의 품질에 큰 영향을 미치므로 성공적인 굽힘 공정의 수행여부가 튜브 하이드로포밍 공정에서 중요한 인자가 된다.⁽⁵⁻⁹⁾

튜브의 굽힘에는 다양한 방법이 있으나 그 중에서도 드로오 벤딩(Rotary draw bending)이 가장 널리 사용되고 있다. 기본적으로 사용되는 굽힘은 굽힘다이(bend die), 누름다이(pressure die) 및 고정다이(clamp die)이며 굽힘 반경(radius of bend)이 작거나 소재의 두께가 얇은 경우에는 맨드릴(mandrel)과 와이퍼다이(wiper die)가 사용된다. 이들은 튜브의 내측에 좌굴이 발생하지 않도록 지지하는 역할을 한다. 튜브를 굽힘에 위치시키고 고정다이와 누름다이가 소재를 고정한 후 굽힘다이가 회전하면서 굽힘이 진행된다.

맨드릴과 와이퍼다이의 사용은 생산비용을 증가시키는 요인이 되므로 가능한 한 이들의 사용은 회피하는 것이 바람직하다. 맨드릴 사용의 필요성 여부를 판단하는 가이드 라인으로서 다음과 같은 굽힘계수(bend factor)가 사용된다.

$$\begin{aligned} \text{Bend Factor} &= \frac{\text{Wall Factor}}{\text{Degree of Bend}} \\ &= \frac{\text{OD/Wall Thickness}}{\text{Bend Radius/OD}} \end{aligned}$$

굽힘계수가 12보다 작은 경우에는 맨드릴을 사용하지 않는 것이 좋으며 20보다 큰 경우에는 맨드릴과 와이퍼다이가 사용된다. 굽힘계수가 12와 20 사이라면 맨드릴을 사용하지 않아도 되나 이 경우 상당한 단면 형상 변

화가 발생하게 된다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 튜브 하이드로포밍 성형공정의 예비단계인 굽힘 공정에 대하여 컴퓨터 해석을 수행하여 굽힘 후 튜브의 두께 분포, 단면 형상, 스프링백 등을 구하였으며 굽힘 실험을 수행하였다. 또한 드로오 벤딩을 이용한 굽힘 공정에서 맨드릴과 와이퍼다이에 따른 주름의 발생유무와, 튜브 용접선(weld line)에 따른 단면 두께분포의 영향을 해석하였다.

2. 굽힘 이론

튜브의 굽힘 공정은 해석적인 방법으로 해를 구하기 어려운 공정이지만, 다음과 같은 가정을 통하여 단순화된 모델을 가정함으로써 튜브의 두께분포, 굽힘 모멘트, 스프링백 등에 대한 해를 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

- (1) 초기 응력을 무시한다.
- (2) 튜브는 순수 굽힘 모멘트만 받음
- (3) 튜브 단면이 굽힘 후에도 평면으로 유지된다고 가정한다.
- (4) 원형의 튜브 단면이 굽힘 후에도 원형으로 유지된다고 가정한다.
- (5) 다이와 튜브간의 마찰력을 고려하지 않는다.

Fig. 1에 굽힘 공정후 튜브형상과 단면형상을 나타내었다.

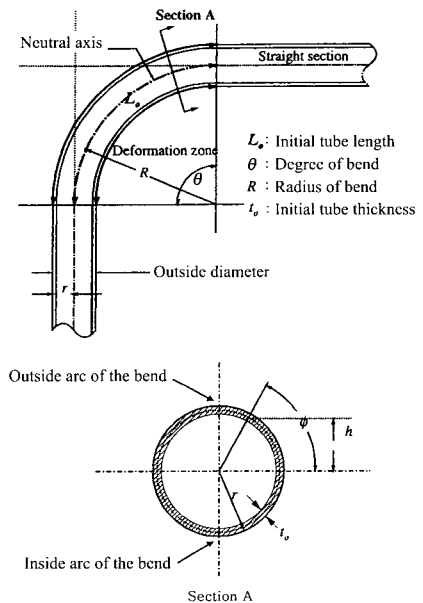


Fig. 1 Shape of the bent tube

굽힘부의 중심선 길이 L_0 가 굽힘 변형 후에도 변하지 않으므로 튜브의 축방향 변형률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{L}{L_0} = \frac{R+r\sin\phi}{R} \quad (1)$$

$$\epsilon_z = \ln(L/L_0) = \ln(1+r\sin\phi/R) \quad (2)$$

여기서 L : 튜브의 중심선 길이

R : 굽힘 반경

r : 튜브 반경

튜브에는 순수 굽힘 모멘트만 작용한다고 가정함으로써 축방향 응력만이 남게된다. 따라서 두께방향과 원주 방향의 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta = -\frac{1}{2} \epsilon_z \quad (3)$$

튜브의 두께분포는 아래와 같다.

$$\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = -\frac{1}{2} \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (4)$$

$$t = t_0 \left(\frac{L_0}{L}\right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{1+r\sin\phi/R}} t_0 \quad (5)$$

단면에 수직인 응력 σ_z 는 탄성 영역인 경우 다음과 같다

$$\text{만약 } \epsilon_z < \epsilon_Y \text{ 이면 } \sigma_z^e = E\epsilon_z \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \epsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E}$$

소성 영역인 경우 응력-변형률 관계가 다음과 같을 때 σ_z 는 다음과 같다

$$\bar{\sigma} = K (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (7)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} (\epsilon_z^2 + \epsilon_r^2 + \epsilon_\theta^2)} = \epsilon_z \quad (8)$$

만약 $\epsilon_z > \epsilon_Y$ 이면

$$\sigma_z^p = K \left[\epsilon_0 + \ln\left(1 + \frac{r\sin\phi}{R}\right) \right]^n \quad (9)$$

굽힘 모멘트 M_L 는 단면에 수직인 응력 σ_z 를 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_L &= 4 \int_0^{\pi/2} (\sigma t r d\phi) r \sin\phi \\ &= 4r^2 \left[\int_0^{\phi_Y} \sigma_z^e t \sin\phi d\phi + \int_{\phi_Y}^{\pi/2} \sigma_z^p t \sin\phi d\phi \right] \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{여기서 } \phi_Y = \sin^{-1} \left[\frac{R}{r} \left(e^{\frac{\sigma_Y}{E}} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

굽힘 공정에서 발생하는 스프링백은 제품의 치수 정밀도와 깊은 관련이 있다. 국부적인 치수 불량이 제품 전체의 형상에 큰 영향을 미칠 수 있다. Fig. 2는 굽힘 공정에서 스프링백 전과 후의 변형 모습을 그린 것이다. 그림에 표시한 바와 같이 θ_L 과 θ_U 를 각각 스프링백 이전과 이후의 굽힘각이라 하면 스프링백은 $\theta_L - \theta_U$ 이다. 굽힘 변형을 받은 튜브의 스프링백은 아래와 같이 구할 수 있다.

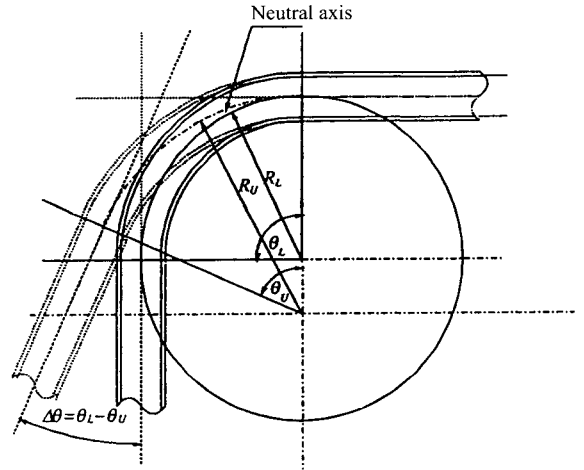


Fig. 2 Spring back of bent tube

$$\theta_U = \theta_L \frac{R_L}{R_U} = \theta_L \frac{K_U}{K_L} \quad (12)$$

$$\Delta K = K_L - K_U = \frac{M_L}{EI} \quad (13)$$

$$\theta_U = \theta_L \left(1 - \frac{\Delta K}{K_L} \right) = \theta_L \left(1 - \frac{M_L R_L}{EI} \right) \quad (14)$$

$$\Delta\theta = \theta_L \frac{R_L M_L}{EI} \quad (15)$$

여기서

$\Delta\theta = \theta_L - \theta_U$: 스프링백

θ_L : 스프링백 전의 굽힘각

θ_U : 스프링백 후의 굽힘각

R_L : 굽힘 반경

K_L : 굽힘 곡률

E : 탄성계수

I : 튜브의 관성모멘트

3. 굽힘 해석

3.1 재료시험

굽힘 시험에 사용된 소재는 STKM 11A로서 판재를 동글게 말아 용접한 것이다. 재료의 응력 변형을 관계는 인장시험을 통하여 구하였다. 인장 시편은 ASTM B 557M-84에 정해진 바에 따라 와이어 방전가공에 의하여 튜브로부터 채취하였다. 이때 시편은 길이 방향과 평행하도록 하고 용접 부위를 피하여 4개소에서 채취하였다. 시편의 게이지 길이(gage length)는 25mm이고 헤드의 속도는 1.2 mm/min으로 하였다.

소재의 변형률-응력 관계는 $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ 으로 표현되는 Krupkowsky의 경화식으로 근사화 하였으며 4회의 시험을 행한 후 평균을 통해 구한 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 The properties of STKM 11A

Density	7,800 Kg/m ³
Young's modulus	206,000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Yield Stress	215.1 MPa
<i>K</i>	468.3 MPa
<i>n</i>	0.206
ϵ_0	0.022

3.2 굽힘 해석

굽힘 해석에 사용된 튜브의 외경은 89mm이고 두께는 2.8mm이며 굽힘 반경은 215mm 이다. 굽힘 해석에는 드로오 벤딩 공정과 램 벤딩(Ram bending) 공정 두 가지 경우에 대하여 Pam-stamp를 이용하여 해석하였다. Fig. 3과 Fig. 4에 드로오 벤딩 공정과 램 벤딩 공정의 굽힘 해석 모델을 각각 나타내었다.

튜브의 굽힘계수를 구해보면 13.1이 되며 이는 조건에 따라 튜브 내부에 주름이 발생 할 수 있는 경우이다. Fig. 5는 램 벤딩 공정에 의한 굽힘 해석의 결과로서 90° 굽힘 후 튜브의 형상을 나타낸다. 굽힘부 내측에 주름이 발생한 것을 볼 수 있다. 램 벤딩 공정에서 발생하는 튜브의 주름을 억제할 수 있는 실용적인 방안이 없으므로 이후의 굽힘 공정은 드로오 벤딩으로 한정하였다.

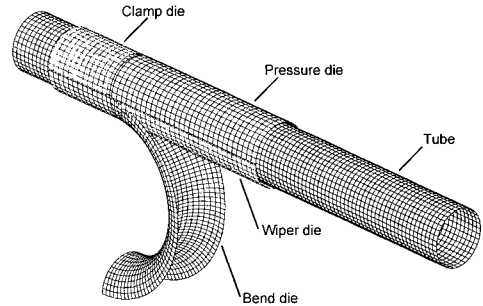


Fig. 3 FE mesh of draw bending process

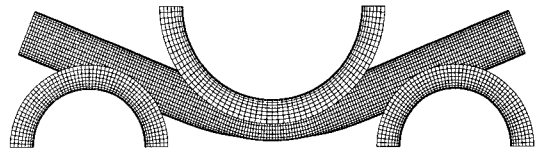


Fig. 4 FE mesh of ram bending process

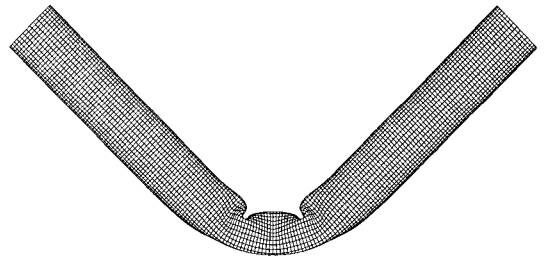
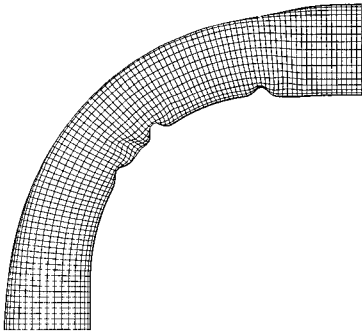
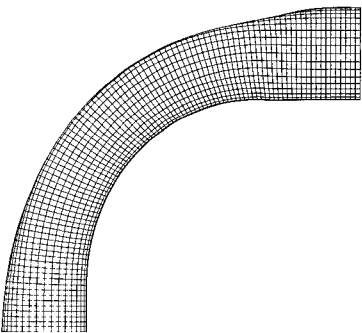


Fig. 5 Shape of bent tube (ram bending process)

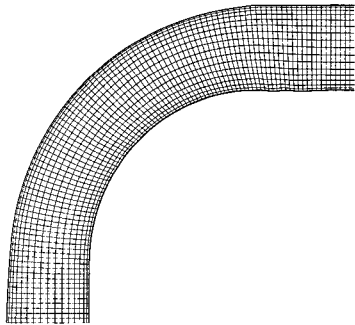
주름은 튜브의 굽힘 공정시 압축력을 받는 부위에서 발생하며 드로오 벤딩 공정에 의한 굽힘의 경우 와이퍼 다이와 맨드렐을 사용하여 주름의 발생을 억제할 수 있다. Fig. 6(a)는 와이퍼다이와 맨드렐이 없이 굽힘을 한 경우 튜브 내부에 주름이 발생한 모습을 나타내며, Fig. 6(b)는 와이퍼다이를 사용한 경우 주름의 발생이 억제된 튜브 형상을 보여주고 있다. Fig. 6(c), 6(d)는 맨드렐과 튜브의 간격(tolerance)이 각각 0.5mm, 2mm인 경우의 굽힘후 튜브 형상을 나타낸다. 맨드렐과 튜브의 간격이 2mm 인 경우 굽힘부 내측에 작은 주름이 많이 나타나는 것을 볼 수 있으며 간격이 0.5mm 인 경우 주름이 나타나지 않았다. 따라서 맨드렐을 이용하여 주름의 발생을 방지하려면 맨드렐과 튜브의 간격을 작게 하여야 할 것을 알 수 있다.



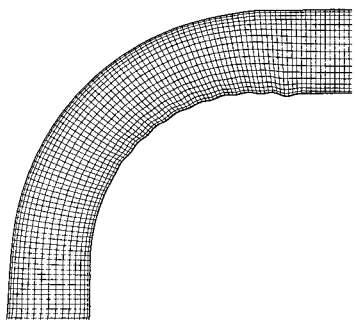
(a) without wiper die and mandrel



(b) with wiper die

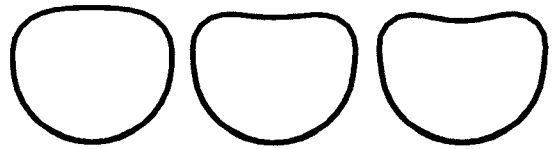


(c) with mandrel
tolerance of tube and mandrel : 0.5mm



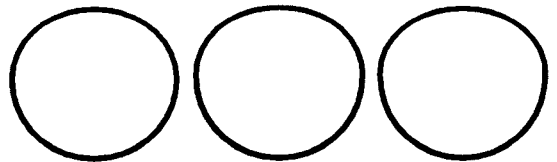
(d) with mandrel
tolerance of tube and mandrel : 2mm
Fig. 6 Shape of bent tube (draw bending process)

Fig. 7, 8은 굽힘 공정이 끝난 후 굽힘 부위의 단면 형상을 굽힘 각도에 따라 나타낸 것이다. Fig. 7은 맨드렐을 사용하지 않은 경우이고 Fig. 8은 맨드렐을 사용한 경우이다. 맨드렐을 사용하지 않은 경우 튜브 내측에서 지지하는 힘이 없으므로 인장력을 받는 부위에 좌굴이 발생한 것을 볼 수 있으며 굽힘 각도가 커짐에 따라 좌굴량이 커짐을 알 수 있다. 맨드렐을 사용한 경우의 단면형상은 굽힘각이 클수록 타원형으로 변하는 것을 볼 수 있다.



(a) 30° bending (b) 60° bending (c) 90° bending

Fig. 7 Section shape of bent tube (without mandrel)



(a) 30° bending (b) 60° bending (c) 90° bending

Fig. 8 Section shape of bent tube (with mandrel)

Fig. 9는 맨드렐을 사용하지 않고 굽힘을 수행한 경우 튜브의 단면 두께분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 굽힘 각도가 클수록 굽힘부 내측의 두께가 커지는 것을 볼 수 있으며, 굽힘각이 60° 이상인 경우 식(5)에서 예측된 두께분포와 잘 일치함을 알 수 있다. 굽힘부 외측의 두께는 굽힘 각도에 따른 변화가 없는 것을 볼 수 있으며, 식(5)에서 예측된 두께분포보다 0.05mm 정도 크음을 알 수 있다.

Fig. 10에 맨드렐을 사용하여 굽힘해석을 수행한 경우 튜브의 단면 두께분포를 실험결과와 함께 나타내었다. 해석에 의한 굽힘부 내측의 두께분포는 맨드렐을 사용하지 않은 경우와 동일하였으며, 굽힘부 외측의 두께는 식(5)에서 예측된 두께보다 0.07mm 정도 적음을 알 수 있다. 실험결과는 90° 굽힘후 측정된 결과로서 예측된 두께분포와 잘 일치함을 볼 수 있다.

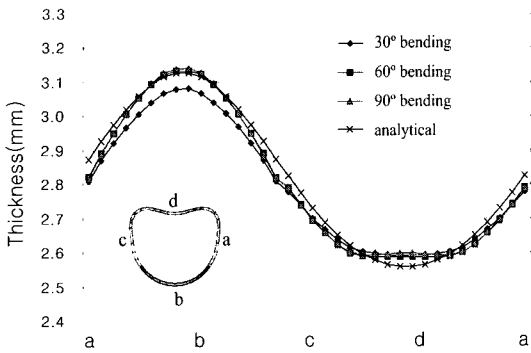


Fig. 9 Thickness distribution of section (without mandrel)

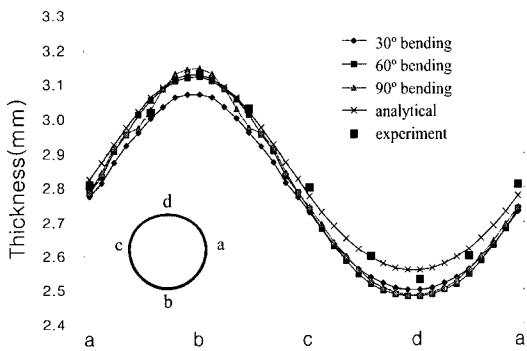


Fig. 10 Thickness distribution of section (with mandrel)

Fig. 11은 맨드렐을 사용하여 90° 굽힘실험을 수행한 후의 튜브형상을 보여주고 있다. 굽힘부 내측에 9개의 주름이 발생한 것을 볼 수 있다. Fig.12는 굽힘 해석후 튜브의 두께분포를 나타내고 있다. 두께분포에서 굽힘부 내측에 발생하는 주름을 잘 나타내고 있다.

Fig.13은 굽힘부 내측과 외측의 튜브길이 방향의 두께 분포를 실험결과와 함께 나타낸다. 맨드렐을 사용하여 해석한 경우 굽힘부 내측의 두께분포가 3.0mm에서 3.2mm사이에서 진동함을 볼 수 있으며 이는 이 부위에 발생하는 주름을 나타내어 준다. 굽힘부 외측의 두께도 0.03mm 정도의 진폭으로 진동함을 볼 수 있다. 측정된 실험결과와 해석으로 구한 두께분포가 잘 일치함을 알 수 있다.

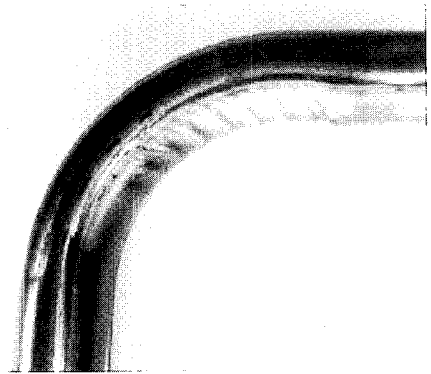


Fig. 11 Photo of bent tube (with mandrel)

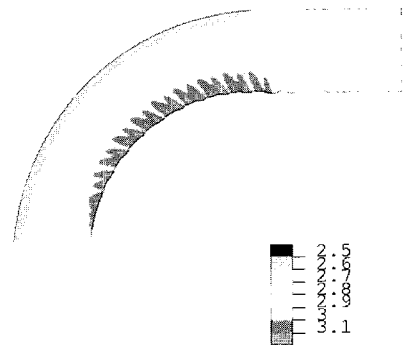


Fig. 12 Thickness distribution of bent tube

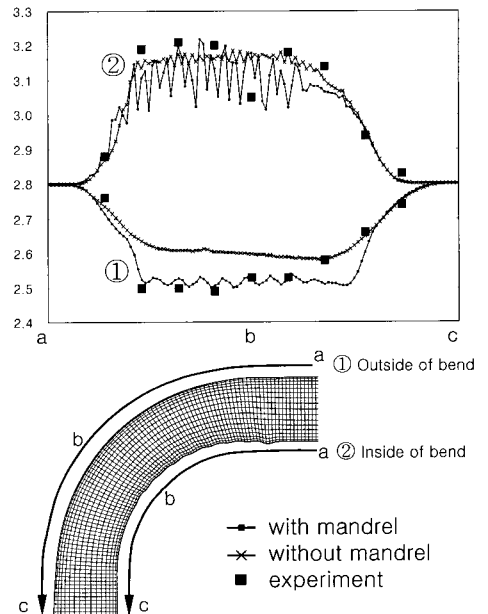


Fig. 13 Thickness distribution of bent tube

Fig. 14는 용접선의 위치에 따른 단면의 두께분포를 나타낸 것이다. 용접선이 굽힘시 변형이 가장 적은 곳인 중심선에 위치한 경우와, 굽힘부 내측, 외측에 위치한 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 용접선이 중심선과 굽힘부 외측에 위치한 경우의 단면의 두께분포는 용접선이 없는 경우와 큰 차이가 없었으며, 굽힘부 내측에 위치한 경우는 용접선부위의 두께가 0.1mm정도의 적게 나타났으며, 나머지 부위는 큰 차이가 없었다.

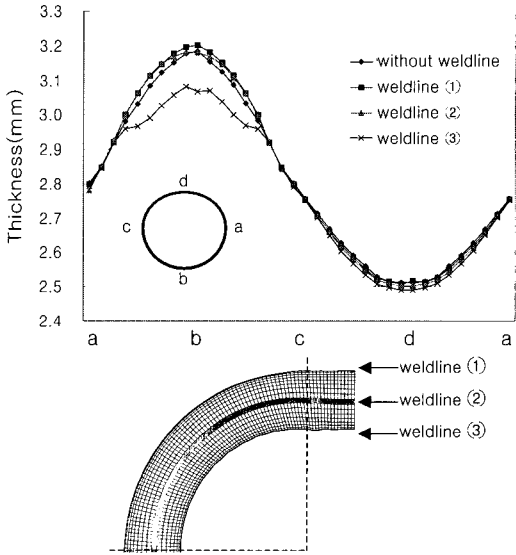


Fig. 14 Thickness distribution of section

Fig. 15는 맨드릴을 사용한 경우의 스프링백과 맨드릴을 사용하지 않았을 경우의 스프링백을 굽힘각에 따라 보여주고 있다. 또한 맨드릴을 사용한 경우 용접선을 추가하여 해석한 경우의 스프링백을 굽힘각에 따라 보여주고 있다.

맨드릴을 사용한 경우와 사용하지 않았을 경우의 스프링백의 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있으며, 또한 굽힘각이 클수록 스프링백이 증가함을 볼 수 있다.

용접선을 추가하여 해석한 경우의 스프링백은 추가하지 않은 경우 보다 굽힘각이 30°까지는 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있고, 굽힘각이 클수록 차이가 커짐을 볼 수 있으며, 굽힘각이 90°인 경우 0.2° 정도 적음을 볼 수 있다.

식 (15)에서 예측된 결과와 비교하면 FEM 해석결과보다 0.2° -0.4° 정도 적음을 알 수 있다.

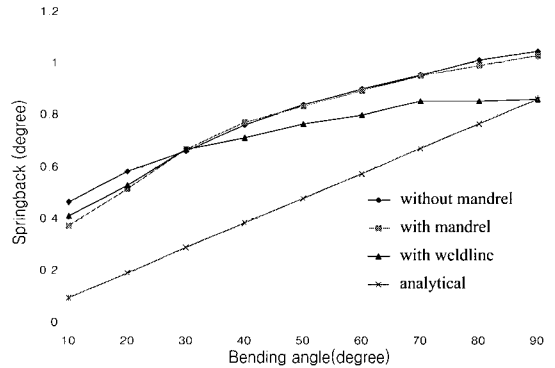


Fig. 15 Spring back of bent tube

5. 결론

본 연구에서는 튜브 하이드로포밍 성형공정의 예비단계인 굽힘 공정에 대하여 해석을 수행하여 굽힘 후 튜브의 두께 분포, 단면 형상, 주름 발생, 스프링백 등을 구하였으며 굽힘 실험을 수행하였다. 이상의 연구를 통하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 주름은 튜브의 굽힘 공정시 압축력을 받는 부위에서 발생하며 와이퍼다이와 맨드릴을 사용하여 주름의 발생을 억제할 수 있었다. 맨드릴과 튜브의 간격이 클수록 그리고 와이퍼다이와 튜브간의 간격이 클수록 주름이 크게 발생하였다.

(2) 굽힘 각도에 따른 굽힘 부위의 단면두께 분포는 변화가 거의 없었으며, 식(5)에서 예측된 두께분포와 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 맨드릴의 유무에 따른 두께 분포는 굽힘부 외측에서 맨드릴을 사용하지 않은 경우의 단면의 최소두께가 0.1mm 컸으며, 나머지 부위는 큰 차이가 없었다. 용접선이 굽힘부 내측에 위치한 경우는 굽힘부 내측의 두께가 0.1mm정도 적게 나타났다.

(4) 굽힘각이 클수록 스프링백이 증가하였으며, 식 (15)에서 예측된 스프링백은 FEM 해석결과보다 0.2° - 0.4° 정도 적었다. 맨드릴을 사용한 경우와 사용하지 않았을 경우의 스프링백의 차이가 거의 없었으며, 용접선을 추가하여 해석한 경우의 스프링백은 추가하지 않은 경우 보다 굽힘각이 클수록 차이가 커졌으며, 굽힘각이 90°인 경우 0.2° 정도 적게 나타났다..

참 고 문 헌

- (1) S. Nakamura, H. Sugiura, H. Onoe, K. Ikemoto, 1994, "Hydromechanical drawing of automotive parts", Journal of Materials Processing Technology, vol.46, pp.491~503.
- (2) Longwu Wu, Yong Yu, 1996, "Computer simulations of forming automotive structural parts by hydroforming process", Numisheet, pp.324~329.
- (3) F. Dohmann, Ch. Hartl, 1997, "Tube hydroforming -research and practical application", Journal of Materials Processing Technology, vol.71, pp.174~186.
- (4) M. Ahmetoglu, T. Altan, 1999, "Tube hydroforming-state-of-the-art and future trends", SAE, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan.
- (5) F. Dohmann, A. Böhm, K. Dudziak, 1993, "The Shaping of Hollow Shaft-Shaped Workpieces by Liquid Bulge Forming", Advanced Technology of Plasticity, pp.447~452.
- (6) S. Fuchizawa, 1990, "Deformation of Metal Tubes under Hydrostatic Bulge Forming with Closed Die", Advanced Technology of Plasticity, pp.1543~1548.
- (7) H.J. Kim, B.H. Jeon, H.Y. Kim, J.J. Kim, 1993, "Finite Element Analysis of the Liquid Bulge Forming Processes", Advanced Technology of Plasticity, pp.545~550.
- (8) D. Schmoekkel, C. Hessler, B. Engel, 1992, "Pressure Control in Hydraulic Tube Forming", Annals of the CIRP, vol.41, pp.311~314.
- (9) 양재봉, 이한남, 전병희, 오수익, 1999, "A study on tube bending for Hydroforming", 한국소성가공학회 99춘계학술대회논문집, pp.35~38.
- (10) Laurence Oldacre, 1997, "Introduction to Tube Bending for Hydroforming Applications", TPA's 2nd Annual Automotive Tube Conference, pp.37~68.
- (11) H.A. Al-Qureshi, 1999, "Elastic-plastic analysis of tube bending", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.39, pp.87~104.