

Hydroforming을 위한 Tie-bar의 예비굽힘성형 해석

강대철*, 전병희**, 성부용***

Pre-Bending Analysis of Tie-Bar for Hydroforming

DaeCheol Kang*, ByungHee Jeon**, BooYong Sung***

* Graduate School, Kangwon National University

** Induk Institute of Technology

*** Korea Institute of Industrial Technology Evaluating and Planning

Key words : bending, hydroforming, tie-bar, FE analysis

ABSTRACT

Tube bending is one of the conventional manufacturing process. Recently, tube bending was highlighted in automotive industry by hydroforming. Tube hydroforming process is divided into pre-bending process and hydroforming process. It's initial state is very important in die cavity of first hydroforming process. So tube bending is important factor of the hydroforming process.

In this paper, two pre-bending simulations, by a rotary draw bending machine and a bend die. This paper presents the simulation results in pre-bending process that is used to form an automotive part, tie-bar.

1. 서론

튜브 굽힘 공정은 전통적으로 노동집약적이고, 작업시간이 긴 공정이었다. 그러나 컴퓨터 기술의 비약적인 발달로 자동화가 가능하게 되었다. 이러한 튜브 굽힘 공정은 자동차 뿐만 아니라, 항공기, 조선, 열교환기, 발전소, 건축등 여러 산업분야에 다양하게 사용되어지고 있다.

현재 자동차업계는 주행과 운송이라는 자동차의 기본적인 기능 외에 승차감, 안전성, 경량화라는 요구에 대응하기 위해 hydroforming, tailor welded blanks(TWB), 고장력 강판의 적용

기술등 신기술을 연구·적용하고 하고 있다. 미국 및 유럽의 자동차 선진국에서는 이미 상용화하고 있는 이러한 신기술 개발을 위하여 우리나라에서도 원형의 튜브 소재를 이용한 hydroforming 과 일반 박판의 조합을 이용한 승용차용 부품 개발에 심혈을 기울이고 있다.

Hydroforming에 대한 연구는 현재 자동차 업계와 대학연구소에서 활발하게 진행되어지고 있다. 김형중, 전병희^[1] 등은 T형 부품을 성형하는 데 있어서 내압과 압축력 등의 공정 조건의 영향을 유한요소법을 사용하여 해석한 바 있다. 또한 Ohio 주립대학의 ERC/NSM 에서는 PAM-STAMP를 사용하여 튜브 벌정(tube bulging) 시 각 공정 조건간의 상호 관계를 연구하였다. 또한, 하이드로포밍 설계기술의 향상을 위해서, Bruggemann^[2] 등은 하이드로포밍 공정의 설계변수 와 최적화 대상에 관해서 연구한 바 있다. 그리고, Murray Moson^[3] 은 하이드로포밍을 자동차 부품에 적용시켰을 때, 기존 부품과의 강성을 비교한 바 있다. 그리고, J.D.Greig^[4] 는 굽힘성형한 기본 도면에서 하이드로포밍 성형한 후 중심축 보정과 지식기반 엔지니어링을 통한 시스템을 개발하였다. 그러나, 이 시스템은 단면이 나온 상황에서 보정하는 역할을 하기때문에 한계를 지닌다. 한편, Morphy^[5] 는 elongation이 많이 발생하는 하이드로포밍 성형에서 부분적인 확판과 감소등을 보여줌으로써 성형할 수 있는 단면을 제시하고자 했다. 그리고 양재봉^[6] 등은

굽힘 공정에 대한 유한요소해석과 튜브 용접선에 따른 두께분포를 연구하여 용접선 배치에 대한 연구를 수행하였다.

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. 굽힘 공정을 거치면서 소재는 상당한 양의 소성 변형을 받게 된다. 타이바와 같이 소재와 제품 간의 둘레 길이 변화가 별로 없는 경우에는 굽힘 공정에서의 변형이 성형 한계를 결정하는 요인이 될 수도 있다.

본 연구에서는 hydroforming 을 적용하기 전 단계로서 굽힘 가공 시 mandrel에 따른 두께분포를 비교하여 그 영향을 평가한다.

2. 굽힘해석

2.1 타이바의 구조

타이바는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 승용차의 앞쪽 부위에 횡방향으로 위치한 부재이다. 타이바는 스티어링 휠(steering wheel)의 진동을 억제하고, 충돌시 차체 구조를 지지하며, 인스트루먼트 패널(instrument panel)이 조립된다.^[7]

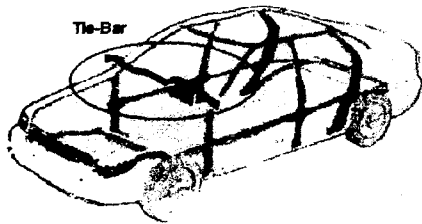


Fig.1 Tie-bar

Fig. 2 에 타이바와 이에 부착되는 브라켓(mounting bracket)의 CAD 모델을 나타내었다.

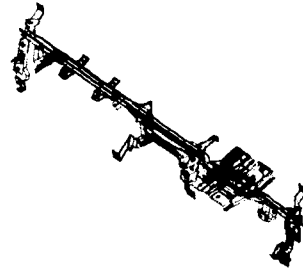


Fig.2 Tie-bar CAD Model

2.2 유한요소 해석

튜브의 굽힘에는 압부식 굽힘, Roller식 굽힘, mandrel 굽힘 등 다양한 방법이 있으나, 그 중에서도 mandrel 굽힘(또는 rotary draw bending)이 가장 널리 사용되고 있다. Fig. 3 은 mandrel 굽힘의 개략도를 나타낸 것이다.

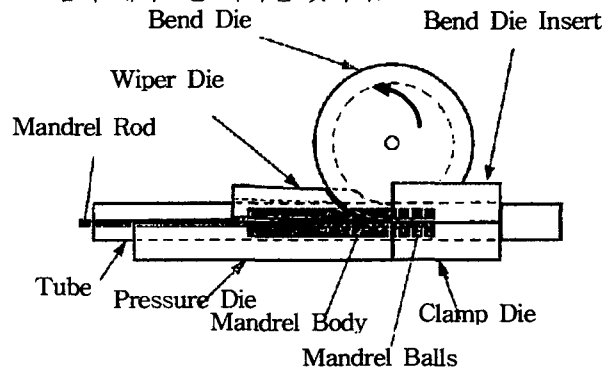
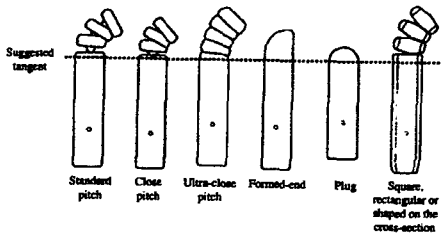


Fig. 3 Mandrel Bending Machine

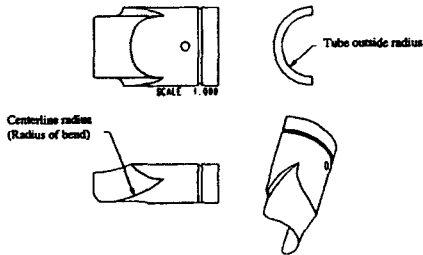
Mandrel과 wiper die의 사용은 생산 비용을 증가시키는 요인이 되므로 가능한 한 이들의 사용은 회피하는 것이 바람직하다. Mandrel을 사용하지 않는다면 튜브의 단면 형상의 변화가 커지지만 이후의 하이드로포밍 공정에서 보정될 수 있으며, 소재 외측의 두께 감소가 적어지므로 성형 시 유리하게 작용할 수 있기 때문이다. Mandrel 사용의 필요성 여부를 판단하는 가이드라인으로서 bend factor가 사용된다.

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

Bend factor가 12보다 작은 경우에는 mandrel을 사용하지 않는 것이 좋으며 20보다 큰 경우에는 mandrel과 wiper die가 사용된다. Bend factor가 12와 20 사이라면 mandrel을 사용하지 않아도 되나 이 경우 상당한 단면 형상 변화가 발생하게 된다.^[7] Fig. 4 에 mandrel 과 wiper die를 나타내었다.



(a) Mandrels



(b) Wiper dies

Fig. 4 Mandrel and wiper die

타이바에 사용되는 소재는 STKM 11A로서 판재를 둥글게 말아 용접한 것이다. 소재의 외경은 48 mm, 두께는 2 mm이다. 인장 시험편은 ASTM (American Society for Testing and Materials) B 557M-84에 정해진 바에 따라 와이어 방전가공(wire EDM)에 의하여 튜브로부터 채취하였다. 이 때 시험편은 길이 방향과 평행하도록 하고 용접 부위를 피하여 4개소에서 채취하였다. 시험편의 게이지 길이(gage length)는 25 mm이고 헤드의 속도는 1.2 mm/min로 하였다. Fig. 5 에 시험편의 형상을 나타내었다. Fig. 6 은 하중-변위 곡선으로부터 넥킹 발생 이후의 값을 무시하고 구한 변형률-응력 관계이다.

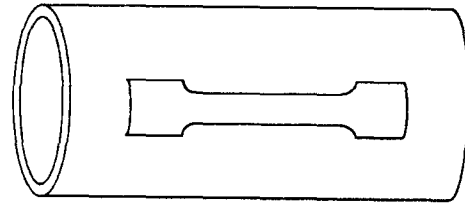


Fig. 5 Specimen of pipe

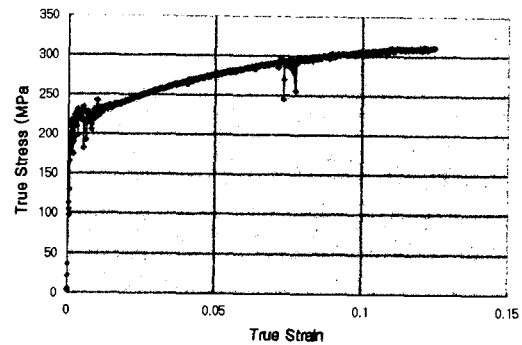


Fig. 6 True $\sigma - \epsilon$ graph of STKM 11A

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

Table 1. STKM 11A의 기계적 특성

density	7.8 ton/m ³
Young's modulus	206.0 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield Stress	215.1 MPa
K	468.3 MPa
n	0.206
ϵ_0	0.02186

해석할 타이바는 굽힘 반경이 76.2 mm이고 굽힘 각도는 42.3° 이다. 해석은 굽힘 부위만을 모델링하였으며 PAM-STAMP를 사용하여 계산을 행하였다. Fig. 7 에 해석 모델을 나타냈다. Mandrel을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 모두에 대하여 행하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 각각 mandrel을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 초기 형상과 최종 형상을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 10 은 굽힘 공정이 끝난 후 굽힘 부위의 단면 형상을 나타낸 것이다.

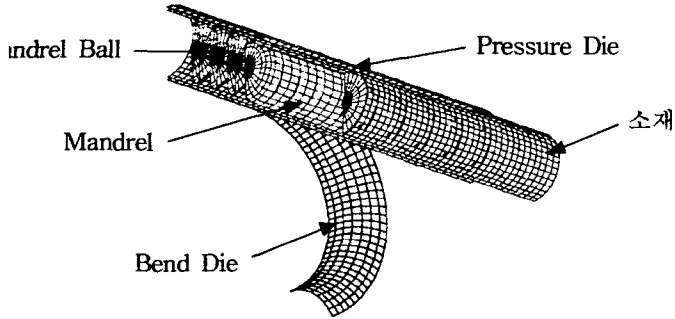
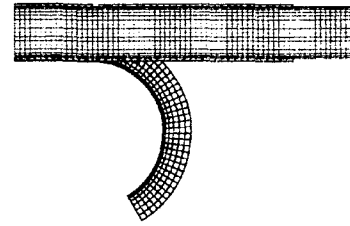
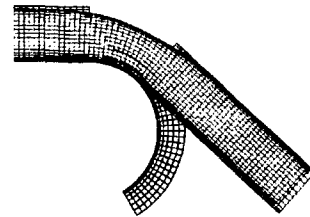


Fig. 7 굽힘 해석 모델

Fig. 10 에서 보듯이 mandrel을 사용한 경우에는 단면의 장축의 길이는 38.8 mm, 단축의 길이는 38.5 mm로서 단면 형상이 원형을 유지하는 반면 mandrel을 사용하지 않은 경우에는 상당히 변하였음을 알 수 있다.

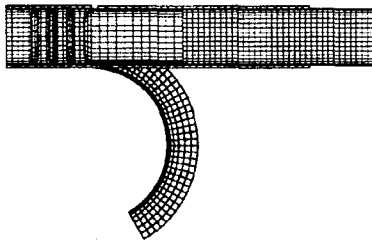


(a) Initial state

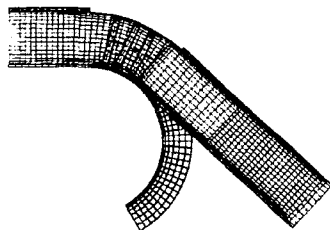


(b) Final state

Fig. 9 Shape of bent tube without mandrel

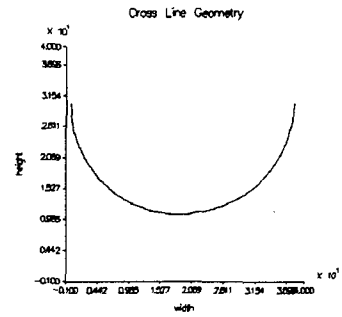


(a) Initial state

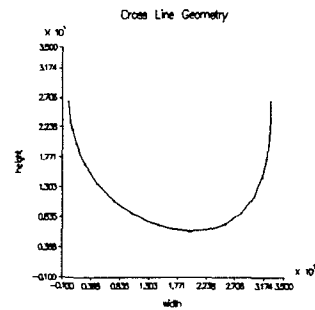


(b) Final state

Fig. 8 Shape of bent tube with mandrel



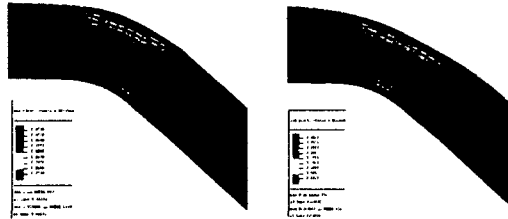
(a) With mandrel



(b) Without mandrel

Fig. 10 Final shape of section

Fig. 11은 각각의 경우에 대한 소성변형률 분포를 나타낸다. 최대변형률은 (a)의 경우 31%, (b)의 경우 26%로서 인장 부위의 재료 이동으로 인하여 최대변형률이 감소하는 것을 보여준다.



(a) With mandrel (b) Without mandrel
Fig. 11 Strain distribution after bending

따라서 타이바는 mandrel을 사용하지 않고 굽힘 가공을 하는 것이 타당하며 단면 형상의 변화에 의하여 두께 감소가 줄어들어 이후 하이드로포밍 공정에서 유리하게 작용하는 것을 예측할 수 있다.

타이바의 개략적인 형상과 각 단면 형상을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 보듯이 굽힘각이 35°, 58°, 52°인 굽힘부가 각각 2개씩, 총 6개의 굽힘 부위가 있다. Bend radius는 76mm이며, 적용 튜브의 외경은 48mm이고 두께는 2mm이다. Rotary draw bending machine과 튜브의 초기 해석 모델을 Fig. 13에 나타내었다.

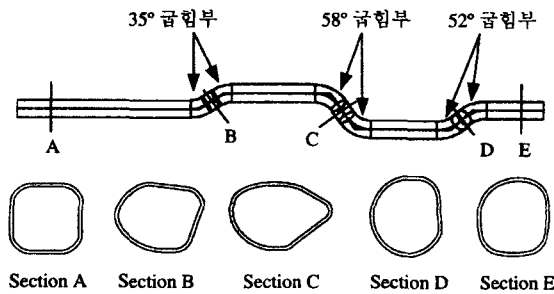


Fig. 12 Shape of tie-bar and sections

타이바의 bend factor를 구해보면 15.1이 되며 이는 조건에 따라 튜브 내부에 주름이 발생할 수 있는 경우이다. 주름은 튜브의 굽힘공정시 압축력을 받는 부위에서 발생하며 wiper die와 mandrel을 사용하여 주름의 발생을 억제할 수 있다.

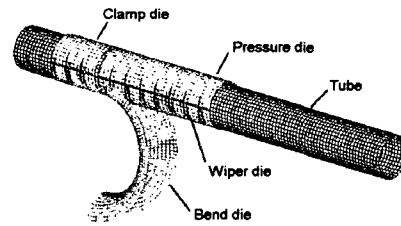
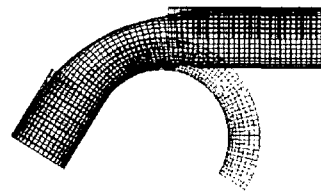
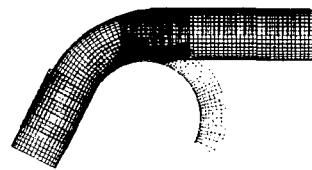


Fig. 13 Initial FE mesh of bending process

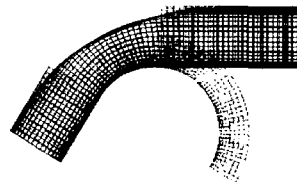
Fig. 14 (a)는 wiper die와 mandrel이 없을 경우 튜브 내부에 주름이 발생한 모습을 나타내며, Fig. 14 (b)는 mandrel을 사용하였을 경우 주름이 발생하지 않은 모습을 나타낸다. Fig. 14 (c), (d)에서 보듯이 wiper die와 튜브간의 간격이 0.6mm 보다 큰 경우에는 주름이 발생하였으며 간격이 이보다 적은 경우 주름이 발생하지 않았다. 따라서 Wiper die를 이용하여 주름의 발생을 방지하려면 wiper die를 튜브에 밀착하여야 함을 알 수 있다.



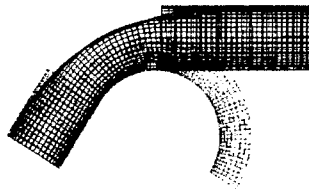
(a) without wiper die and mandrel



(b) with mandrel



(c) with wiper die
(gap between tube and wiper die : 0.2mm)



(d) with wiper die

(gap between tube and wiper die : 0.6mm)

Fig. 14 Control of wrinkling in rotary draw bending machine

Fig. 15 는 mandrel을 사용하지 않고 전체 6개의 굽힘 공정을 끝낸 후의 튜브 두께 분포를 나타낸다. Mandrel을 사용하지 않았으므로 굽힘시 인장을 받는 부위에서 튜브 내측으로 좌굴이 발생한 것을 볼 수 있다. 굽힘각이 58° 인 곳의 인장을 받는 부위에서 두께가 1.7mm로 최소이며, 압축을 받는 부위의 두께는 2.4mm로 최대이다.

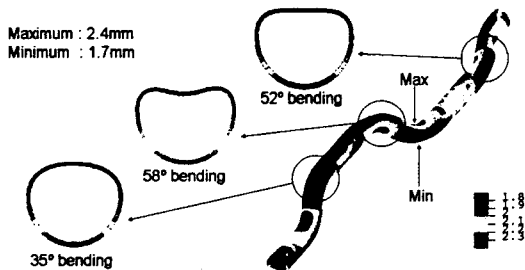


Fig. 15 Predicted thickness distribution

Rotary draw bending machine으로 예비 굽힘 공정을 수행할 경우 6번의 굽힘 공정이 필요하게 되며, 인접한 굽힘 부위 사이의 간격이 좁은 경우 bending machine에 의한 굽힘이 어려울 수 있다. 금형을 이용할 경우 같은 굽힘각을 가진 2개의 굽힘부가 동일 평면 내에 위치함으로써 한번의 공정으로 성형이 가능하게 되어 총 3번의 굽힘 공정으로 전체를 성형할 수 있게 된다. Fig. 16 은 굽힘 금형의 해석모델을 나타낸다. Fig. 17 은 금형을 이용하여 3번의 굽힘 공정이 끝난 후의 파이프 최종 형상과 두께 분포를 나타낸다. 굽힘각이 58° 인 곳의 인장을 받는 부위에서 두께가 1.83mm로 최소이며, 압축을 받는 부위의

두께는 2.3mm로 최대이다. Fig. 21 은 소성변형을 분포를 나타낸다.

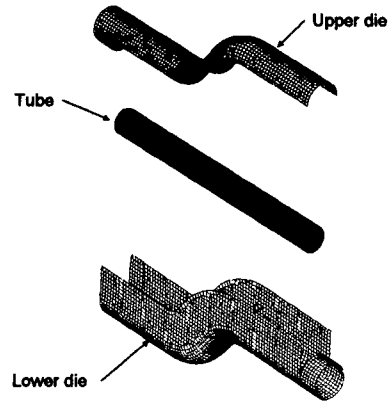


Fig. 16 Initial FE mesh of bending process

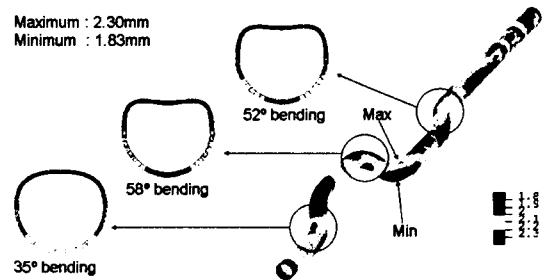


Fig. 17 Predicted thickness distribution

Fig. 18 에서는 35°, 58°, 52° 굽힘 부위의 단면형상을 나타내었다. Fig. 18 (a)는 bend radius 가 76mm인 경우이고 Fig. 18 (b)는 bend radius가 55mm인 경우이고 Fig. 18 (c)는 mandrel을 사용한 경우이며 Fig. 18 (d)는 mandrel 이 없는 굽힘 금형에 의한 경우이다.

Bend radius가 작고 굽힘각이 클수록 좌굴량이 큰 것을 알 수 있으며, mandrel을 사용한 경우 단면형상이 원형에 가까운 것을 알 수 있다. 금형에 의한 경우의 단면형상이 draw bending machine에 의한 경우 보다 좀더 원형에 가까운 것을 알 수 있다.



(a) Without mandrel (bend radius 76mm)

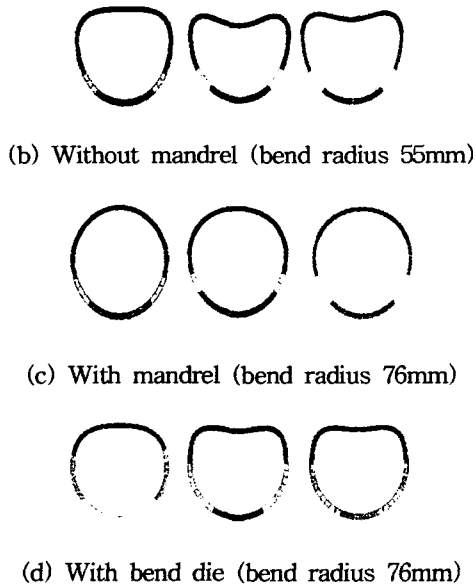


Fig. 18 Section shapes at 35°, 58°, 52° bending angle

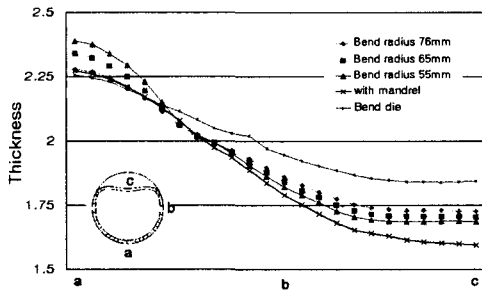


Fig. 19 Thickness distribution in section at 58° bending angle

Fig. 19 는 58° 굽힘 부위에서의 두께를 bend radius가 76mm, 65mm, 55mm인 경우와 굽힘에 의한 경우에 대하여 나타낸 그래프이다. 이 그래프의 두께분포를 보면 금형을 이용한 굽힘 공정에서 튜브의 두께분포가 가장 좋은 결과임을 알 수 있다.

3. 결론

Hydroforming 의 예비 성형 공정인 튜브의 굽힘 공정을 rotary draw bending machine과 금형을 이용한 경우에 대하여 각각 해석하였다.

Rotary draw bending machine을 이용한 경우 bend radius가 76mm, 65mm, 55mm인 경우에 대하여 각각 해석하였다.

Hydroforming 시 두께 변형률에 따라서 mandrel 을 넣지 않고 성형한 것이 유리할 수 있다.

Wiper die가 없을 경우 튜브 내부에 주름이 발생하는 것을 알 수 있었으며, wiper die를 사용한 경우 주름발생이 억제된 결과가 나타남을 알 수 있었다.

튜브의 단면형상과 두께분포를 비교함으로써 금형에 의한 굽힘 결과가 가장 좋은 결과임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. H.J. Kim, B.H. Jeon, H.Y. Kim, J.J. Kim, "Finite Element Analysis of the Liquid Bulge Forming Processes ", *Advanced Technology of Plasticity*, pp. 545-550, 1993.
2. Charles Bruggemann, Sanjay shah "Hydroforming Product and Process - Requirements and Implementation" Tube & Pipe Association's 2nd Annual Automotive Tube Conference : Tube Hydroforming, Producing, Bending, Welding.
3. Murray Mason, "Advancements Using Sequenced Forming Pressures" Innovations In Hydroforming Technology, Tube and Pipe Association International, 1996.
4. J.D.Greig "The Development of an ICAD KBE Application for Hydroformed Tube Design", SAE 932886.
5. Gary Morphy "Hydroforming High Strength Steel Tube for Automotive Structural Applications Using Expansion", 96MJA436.
6. 양재봉, 전병희, 오수익, "Tube Hydroforming 을 위한 굽힘공정 해석", 한국소성가공학회지 제9권 제3호, pp.249~256, 2000.
7. (주)윤영, "Hydroforming 기술을 적용한 승용 차용 부품의 개발", 2차년도보고서, pp.9~10, 1999.
8. Laurence Oldacre, "Introduction to Tube Bending for Hydroforming Applications", TPA's 2nd Annual Automotive Tube Conference, pp.37~68, 1997.