

# Hydroforming을 이용한 Tube의 예비 가공형 설계

이승희\*, 이한남\*\*, 전병희\*\*\*, 오수익\*\*\*\*

## Preform Design in Tube by Using the Hydroforming

S. H. Lee\*, H. N. Lee\*\*, B. H. Jeon\*\*\*, S. I. Oh\*\*\*\*

### Abstract

Hydroforming is a forming process enabling circular metal tubes to be produced in complex cross sections along curved axial paths. With the availability of advanced machine design and control, tube hydroforming has become an economic alternative to various stamping processes. They offer advantages over stamped sheet metal in lower tooling cost and structural mass. The technology is relatively new so that there is no large knowledge base to assist the fundamentals of tube hydroforming technology. The purpose of this paper is found that adaptive bending condition and contact condition for bended part has uniform thickness distribution.

Key-word : cross section, axial path, hydroforming, bending condition

#### 1. 서론

현재 우리나라 완성차 업계에서는 내수시장의 침체로 인한 소비심리의 위축과 고급리로 인한 투자 심리의 위축, 밖으로는 각종규제의 강화로 인한 수출의 어려움과 자동차 배기 가스등에 의한 환경 친화적 정책문제 등의 이중고를 겪고 있는 실정이다.

뿐만아니라, 세계 각국에서는 규제 강화로 인한 자국의 자동차 공업의 어려움을 타개하기 위해 hydroforming, tailor welded blanks(TWB), 고장력 강관의 적용기술을 연구·적용하고 하고 있다. 미국 및 유럽의 자동차 선진국에서는 이미 상용화하고 있는 이러한 신기술 개발을 위하여 우리나라에서도 신기술의 하나가 원형의 tube 소재<sup>(4)</sup>를 이용한 hydroforming과 일반 박판의 조합을 이용한 승용차용 부품 개발에 심혈을 기울이고 있다.

본 연구에서는 현재 완성차 업계에서 몇가지의 부품에 대하여 hydroforming 기술을 적용하

기 위하여 tube를 이용한 부품을 설계하고, 이를 성형하기 위한 기술개발<sup>(2)</sup>을 하고자 한다.

이는 기존 내·외판으로 구성된 판제성형 제품을 tube 재를 이용하여 단 공정으로 생산함으로써 생산이 용이하고, 성형성이 증가하여 제품의 강성이 향상되는 잇점이 있다.

Hydroforming으로 생산될 제품을 생산하기 위하여는 제품의 선정, 프레스 용량 결정, 가압장치 설계, 시스템 integration 등의 hardware 적인 분야와 한 공정에서 생산될 제품의 개수, 가공압력, closing force, axial feeding 량 및 cycle-time의 결정 등의 software 분야의 연구가 필요하며 이들의 기술개발을 하기 위하여 연구를 수행하였다.

일반적으로 sequence에 의한 성형방법<sup>(3)</sup>은 고압을 이용한 방법보다 아래와 같은 장점이 있으며 그 성형과정은 Fig. 1과 같다.

- (1) 동일제품인 경우 성형 압력이 낮다.
- (2) 두께분포가 균일한 제품을 얻을 수 있다.
- (3) 성형 후 재료의 가공경화 영역이 좁다.
- (4) 작은 프레스 용량으로 생산이 가능하다.
- (5) 정밀한 제품의 생산이 가능하다.

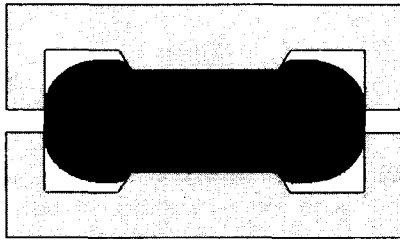
\* 강원대학교

\*\* (주)윤영 기술연구소

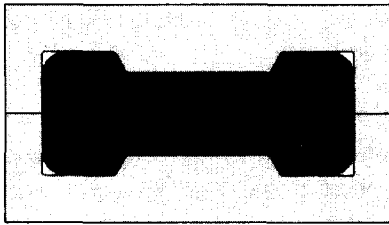
\*\*\* 인덕대학

\*\*\*\* 서울대학교

본 연구에서는 곡률 부분에서 같은 반경을 가 공할 경우 고압에 비하여 closing force 및 성형 압력이 작고, 블랭크 압력과 성형력을 자유롭게 조절 할 수 있는 Fig.1에서 보이듯이 double liquid press를 사용하는 sequence 프레스에 의한 방법을 사용하였으며 해석에 사용된 프로그램은 LS-DYNA3D를 이용하였다.



(a) 1st pressure stage



(b) 2nd pressure stage

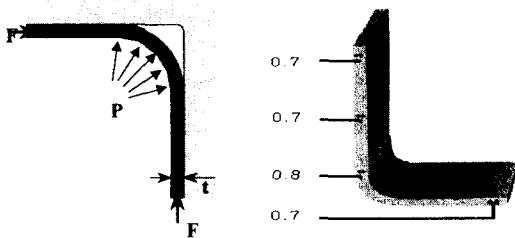


Fig 1. Sequenced Pressure Forming System

## 2. 본론

### 2.1 재료시험

본 연구에서는 tube 재료로 사용되는 STKM 11A를 roll forming 후에 pipe로 성형된 제품을 이용하여 Fig. 2에 나타난 바와같이 인장 시험편 규격 ASTM (American Society for Testing and Materials) B 557M-84를 사용하였다.

시험편은 와이어 방전가공(wire EDM)에 의하여

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



Fig 2. Test Specimen of Tube

Table 1. The properties of STKM 11A

Density	7,800 Kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	206,000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Yield Stress	215.1 MPa
K	468.3 MPa
n	0.206
$\epsilon_0$	0.02186

### 2.2 경계조건

Fig. 3과 같에서 보이는 계산모델은 y 방향을 종축으로 바깥지름이 42mm 두께가 2mm인 튜브가 x와 z축으로 6번 bending 된 형상을 가지고 있다.<sup>(6)</sup> 해석에서 사용된 내부압력 및 closing speed 는 2차원 해석<sup>(6)</sup>을 통해 얻어진 값을 기초로 하여 전체 단면을 성형할 수 있는 Fig. 4와같은 적합 조건을 적용하였고, 예비 성형된 튜브에 대해 해석을 수행한 후 여기에서 도출된 성형 조건을 기초로 하여 성형 시 축 방향의 axil feeding 효과가 미치는 부분까지의 길이에 대해서 여러 가지 벤딩 조건과, 유입 조건에 의하여 Table 2.와 같이 여러 가지 경우에 대한 해석을 수행하였다.

Table 2. The cases of forming analysis

Contact Coddion	Feeding Condition	Model
inner bending	without feeding	case 1
	with feeding	case 2
outer bending	without feeding	case 3
	with feeding	case 4
outer bending	without feeding	case 5
	with feeding	case 6

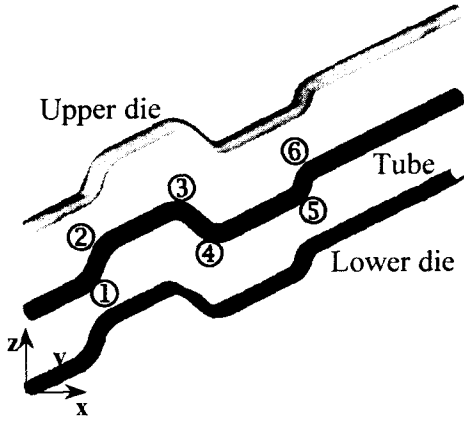


Fig. 3. Finite Element Model

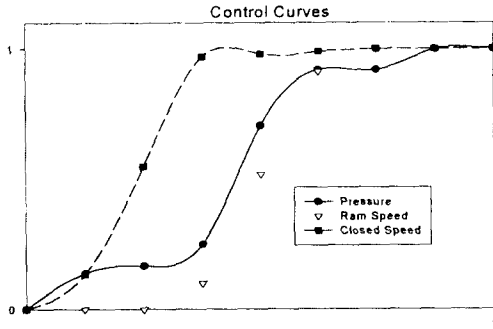


Fig. 4. Input data for FE Analysis

### 2.3 성형해석 결과

3D해석에서는 2D 해석에 얻어진 압력, closing speed를 기초로 하여 축 방향의 유입이 없음으로 인한 성형도중 여러 가지 문제점을 없애기 위해 축 방향의 유입량, closing speed 및 internal pressure 3가지 성형인자에 대한 3D 해석을 수행하였다.

여러 차례의 반복해석을 통해 최종 생산 제품이 die 형상과 일치하도록 input data를 수정하여 성형해석을 수행하였다.

이 해석 결과를 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. 전체 모델의 해석을 통해서 알 수 있듯이 벤딩 시에 나타나는 전형적인 문제인 압축 모드를 받는 안쪽부근에서 두께가 두꺼워지고, 인장모드를 갖는 튜브의 바깥쪽은 두께가 얇아지는 결과를 나타내고 있다.

이는 tube의 pre-bending 시의 초기 두께분포가 완제품의 성형시에 많은 영향을 끼친다는 것을 알 수 있었다. 특히, 벤딩 부위를 중심으로 가압 조건 axial feeding, closing condition 에 따라 성

형도중 소재가 Buckling, Wrinkling, Bursting 등의 failure가 발생되기도 한다.<sup>(6)</sup>

이러한 불량원인을 제거하기 위해서는 벤딩 부분의 두께 분포가 곡률 부분에서 원주 방향을 따라 어떻게 분포되는지를 살펴야하며, 불량이 발생하지 않는 조건하에서 압축이 발생하는 벤딩의 안쪽보다는 인장이 발생하는 바깥쪽의 두께분포가 균일 할 때 완성품의 강성과 장착 후 충돌시에도 보다 많은 에너지를 흡수하여 승객보호의 안전성 측면에서도 보다 더 좋은 결과를 보일 것으로 예측된다.

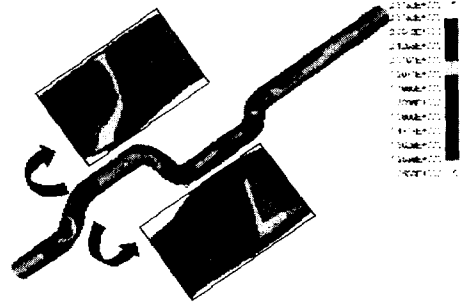


Fig. 5. Thickness Distribution

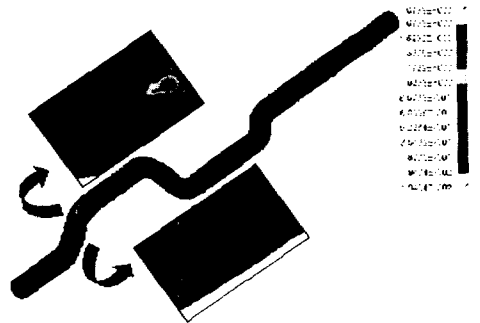


Fig. 6. Plastic Strain Distribution

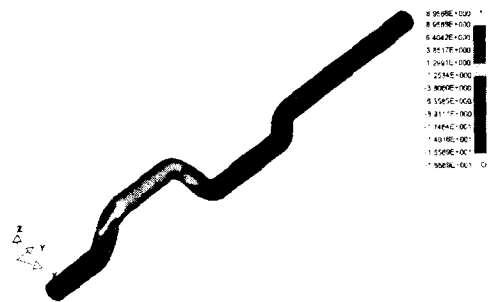


Fig. 7. Displacement distribution of Y direction

Fig. 7에서 보이듯이 Fig. 4에 주어진 control curves를 이용하여 성형해석을 실시한 결과 축 방향의 유입은 Fig. 3 튜브의 시점에서 ①②, ⑤⑥에서 종점까지 길이에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 최종 성형 후 제품의 형상으로 보아⑤⑥의 벤딩 부위보다는 ①②③④벤딩 부분의 각도가 큰 것으로 도면상에 나타났다. 유입의 영향은 ②벤딩 부분까지이므로 성형해석은 시점에서 ②의 벤딩 부분까지 해석하는 것이 이 전체의 모델을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단되어 Fig. 8과 같이 Tiebar를 다시 모델링 하여 Table 2에 표기된 바와 같이 Case별 해석을 실시한 결과를 아래에 표기하였다.

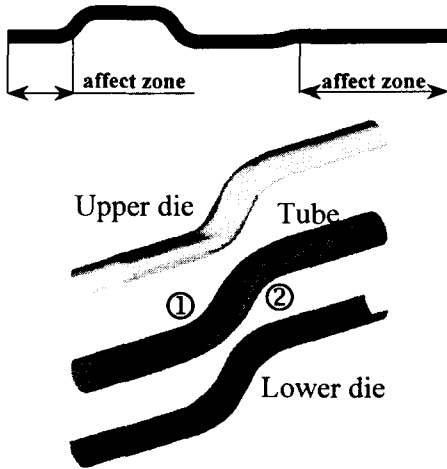


Fig 8. Die-set F.E. Model

Fig. 9는 Fig. 3에서 보이는 ①, Fig. 10은 ②에서의 성형 후의 두께분포에 대하여 실험 및 성형 해석 결과를 나타낸 것이다.

두께 측정에 사용된 장비는 초음파 두께측정기를 이용하였다. 전체적인 두께는 실험에 의한 값보다 해석에 의한 두께 값이 더 얇게 나타났으며, 이는 실험시의 가공조건 internal pressure, axial feeding, closing speed 와 다이와 소재 사이의 마찰계수에 대한 영향에 기인한 것으로 판단된다. 특히, axial feeding 량은 두께분포를 결정하는데 중요한 인자이므로 이에 대한 분석이 요구된다고 할 수 있다.

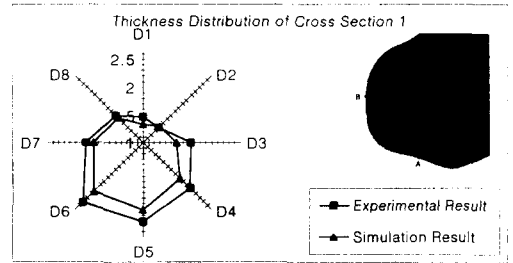


Fig 9. Thickness Distribution of Cross Section 1

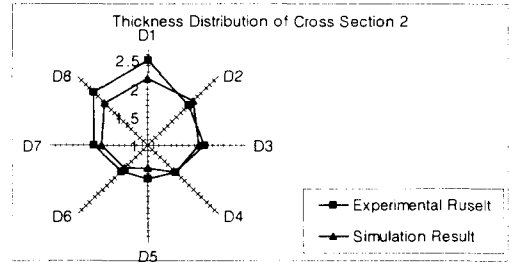
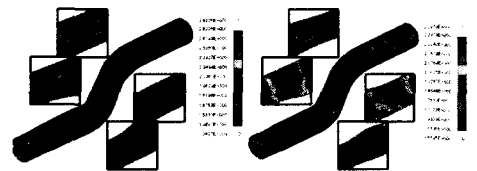


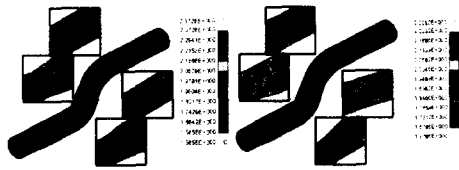
Fig 10. Thickness Distribution of Cross Section 2

벤딩에 있어서 가장 중요한 전단면에서의 소재의 이동으로 인한 두께분포가 실험 치와 해석 값의 경향이 같음을 알 수 있다. Fig. 9에서 D6 부분은 튜브단면 C와 D에 해당하는 부분으로서 튜브 벤딩 시 B~D 사이의 재료가 D~B 사이보다 두꺼워지고 성형해석 중 최종 다이의 형상이 C와 D 사이에 재료를 유입시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 그러므로 단면 윗 부분의 두께가 현저하게 얇게 나타났다.

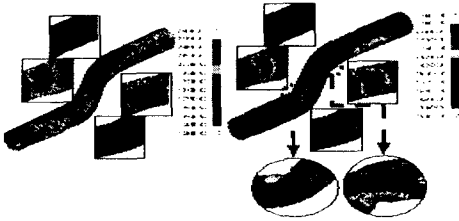
Fig 11의 각 case별 해석에 대한 두께분포를 보면 알 수 있듯이 축 방향의 유입이 있는 경우와 없는 경우에 대한 결과를 살펴보면 유입이 있는 부분의 두께가 없는 경우보다 5.5%정도 두께 스트레인이 증가한 것을 알 수 있다



(1)with feeding (2)without feeding  
(a) result of inner contact bending



(1)with feeding (2)without feeding  
(b) result of die-set bending



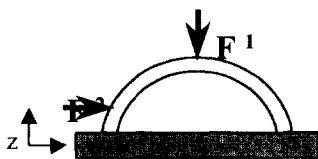
(1)with feeding (2)without feeding  
(c) result of outer contact bending

Fig 11. simulation result

Fig. 11에서 표시된 결과를 살펴보면 hydroforming 시 성형품의 두께편차를 줄이는 방법은 벤딩 후 발생하는 두께차를 최소화하는 것이며 이것은 벤딩기를 사용하는 것보다 다이를 이용한 벤딩<sup>(5)</sup>이 두께분포 측면에서 효과적인 것으로 나타났다.

Fig. 11 (c) 에서 보이듯이 유입이 있는 경우와 없는 경우의 결과를 살펴보면 다음과 같다.

유입이 없는 경우에는 ①, ② 벤딩부의 안쪽에 wrinkling이 발생하나 이는 소재가 하부 다이에 접촉 시 아래 Fig. 12와 같은 구조물에 힘을 가하고 있는 것과 같은 현상으로써, 안정적인 구조물에 외력 ( $F_1$ )을 가함으로써 재료의 최초의 상이한 두께 분포로 wrinkling이 발생하게된다. 이를 제거하기 위해서는 y축 방향으로의 소재에 유동을 부여함으로써 소재가 이동하면서 wrinkling 모드가 없어진 것으로 판단된다.



y  
Fig 12. Concept Picture

일반적으로 스텝핑에서 두께로 인한 변형의 증가와 강성의 저하를 보상하는 방법은 보강판을 사용하는 방법이 있다. 그러나 hydroforming에서는 성형 특성상의 어려움으로 인해 완제품의 내부에 보강판을 사용할 수 없다. 즉, 초기 성형에서부터 두께편차가 적게 가공하는 방법을 사용하여야 하는데 이중 하나는 성형 중에 축 방향으로 유입을 주어 소재의 유입이 없는 부분에 소재를 유입시키는 방법이 있다. 그렇지만 이는 한정된 부분에 일부 효과를 부여하는 방법이며 전체적인 두께의 변화를 가져올 수 없다. 즉 전체적인 두께의 변화를 요할 때는 튜브의 최초 벤딩단계에서 곡률반경을 조절하여야 한다.

이러한 경우에 대한 결과를 아래 그래프에 표기하였다. Fig. 13에서 나타나듯이 y축 방향에 직각인 단면에서 원주 방향을 따라 분포된 두께분포를 볼 수 있다.

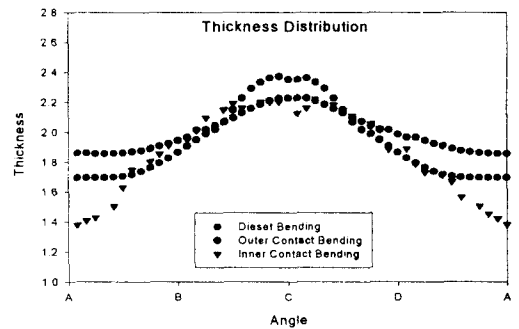


Fig 13. The Thickness Distribution of Tube Contact Cases

Fig. 13 에서 보면 제품의 벤딩시 최소곡률( $R_{min}$ )에 의한 접촉 조건에 따라 두께 차이는 0.38mm에서 0.87mm까지 2.29 배의 두께차이가 얻어졌으며, 이는 성형시 제품이 성형이 되지 않고 두께가 국부적으로 얇아져 바깥쪽 부분에서 bursting이 발생될 것으로 예측된다.

이러한 두께 편차를 가지는 제품을 가지고 성형 해석을 수행한 결과 Fig. 14와 같은 두께분포를 얻어지는 최종제품이 성형되었다. 마찬가지로 다이를 이용한 벤딩의 경우가 최종 성형 제품에서도 균일한 두께분포를 갖는 것으로 나타났다.

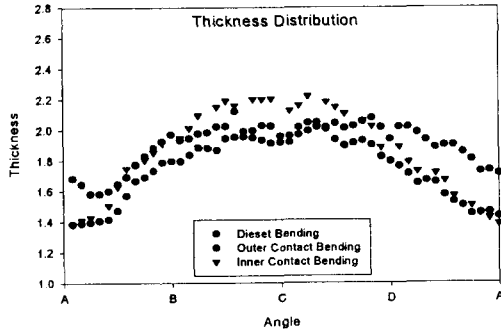


Fig 14. The Thickness Distribution of After Axial Feeding

### 3. 결론

벤딩부의 양호한 두께 분포를 갖기 위한 벤딩 조건 결정하기 위하여 bending 후의 형상을 이용하여 성형해석을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (가) 튜브의 접촉조건에 따라 최종 성형제품의 두께분포가 상이하게 나타났다.
- (나) 튜브가 다이에 접촉될 때 제품의 벤딩시 최소곡률( $R_{min}$ )이 작을수록 압력, 성형성 측면에서 가공이 쉽다.
- (라) 두께분포가 균일한 제품을 성형하기 위해서는 다이를 이용하여 성형한 제품이 가장 고른 두께분포를 갖는다.
- (마) 벤딩부에 발생하는 wrinkling을 없애기 위해서는 반드시 축 방향의 유입이 필요하다.
- (바) 벤딩기를 이용한 벤딩시는 다이의 외측 접촉 조건이 좋으나 이 경우는 성형압력이 커지며 생산성 측면에서 좋은 결과를 얻을 수 없다.

### Reference

- (1) Prof. Dr.- Ing. Fritz Dohmann "Tube Hydroforming Research and Practical Applications" TPA 2nd International Conference on Innovations in Hydroforming Technology pp3-4. 1997.
- (2) Longwu Wu and Yong Yu. "Computer Simulations of Forming Automotive Structural Part by Hydroforming Process", pp326-329. NUMISHEET'96.
- (3) Dusseldorf "Tube Hydroforming

Advancements Using Sequenced Forming Pressures" TPA 96

(4) H. J. Kim, B. H. Jeon, H. Y. Kim, and J. J. Kim, "Finite Element Analysis of the Liquid Bulge Forming Processes", Advanced Technology of Plasticity, pp545-550, 1993

(5) E. s. Kim, H. J. Park, B. H. Jeon, S. I. Oh "Analysis of Pre-Bending for Hydroforming" 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 pp. 27-31

(6) S. H. Lee, B. H. Jeon, S. I. Oh "Forming Parameters Study on the Tube Hydroforming" 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 pp. 32-36