

# 로터리 드로우 벤더를 이용한 타원형 튜브의 유한요소 벤딩 해석

이호국<sup>1</sup> · Chester J. Van Tyne<sup>2</sup>

## Finite Element Bending Analysis of Oval Tubes Using Rotary Draw Bender for Hydroforming Applications

H. K. Lee, Chester J. Van Tyne

### Abstract

In manufacturing automotive parts, such as engine cradles, frame rails, subframes, cross-members, and other parts from circular tubes, pre-bending and pre-forming operations are often required prior to the subsequent tubular hydroforming process. During some pre-forming operations, the cross section of a bent circular tube is crushed into an oval-like shape to ensure proper geometry and sufficient clearance in the hydroforming dies. For such applications, the use of oval instead of circular tubes could be an effective means of eliminating the pre-forming step. The oval tube could also be produced with less thinning and with less strain on the outside of the bend when controlled by a booster system without the use of mandrel. Hence, the understanding of the issues that occur in the bending of oval tubes is worthy of investigation. This paper presents parametric studies on the bending of oval tubes without a mandrel. The finite element modeling technique is used to examine the deformation characteristics for both circular and oval tubes. In the simulations, the bending process parameters of bend radius, aspect ratio of the tube ovalness, and tube wall thickness are varied. Observations are made to obtain a hoop-buckle limit diagram in terms of a non-dimensional shape degradation factor. Suggestions based upon developed criteria are made on the acceptability of bend tubes suitable for hydroforming applications without the need of a pre-forming step or the used of a mandrel.

**Key Words :** Tubular Hydroforming, Rotary Draw Bending, Oval Tubes, Finite Element Modeling, Hoop-buckle Limit Diagram, Shape Degradation Factor

### 1. 서론

최근, 자동차 업계에서는 튜브 하이드로포밍 기술을 배기계, 샤시, 차체 및 안전부재 등 다양한 부품에 적극적으로 적용하고 있으며, 그 사용량도 점차 증가하고 있는 추세이다. 비록 하이드로포밍 기술 적용은 스탬핑 대비 낮은 생산성, 과도한 초기 설비투자, 공정 및 금형설계에 대한 지식기반 미확충 등과 같은 단점이 있지만, 우수한 구조적 안정성, 경량화, 소재 절감, 치수공차의 정확성 및

후공정 단순화 등과 같은 장점을 가지고 다양한 부품에 성공적으로 적용되어 왔다 [1, 2]. 통상적으로 조관, 튜브 벤딩을 포함한 예비성형 및 하이드로포밍의 3 단계 공정을 거쳐 부품이 생산된다. 소재가 이와 같은 성형과정을 거치면서 복잡한 변형 이력을 갖게 되고 변형경화에 의한 소재의 강도 또한 증가하게 된다. Aluminum Killed Draw Quality (AKDQ)의 예를 들면, 형상의 복잡성이나 성형조건에 따라 다르겠지만 각 공정별 변형 정도는 전형적으로 조관 5~15%, 벤딩 20~30%, 하이

1. POSCO 기술연구소, 자동차가공연구그룹

2. Dept. of Metallurgical and Material Engineering,  
Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, USA

드로포밍 5~15%로 보고되어 있다 [3]. 대부분의 변형은 벤딩 작업 동안에 발생하며, 굽힘영역 외측부에서의 두께감소율은 벤딩 반경이 튜브외경의 2 배 ( $D \text{ of Bend} = 2$ )일 때 약 20% 수준이고, 벤딩 반경이 튜브외경과 같은 경우 33% 정도라고 보고되어 있다 [3]. 벤딩 성형성은 기하학적 변수, 금형 형상 및 부스터 시스템의 능력에 좌우된다. 또한, 굽힘영역 외측부의 지나친 두께감소율이나 변형량을 줄이기 위하여 주요 영향인자가 정밀하게 제어되어야 한다.

자동차 업계에서는 주로 원형튜브를 이용하여 3 차원적 벤딩을 하여 하이드로포밍에 이용하며, 원가절감의 압력 때문에 타원형 튜브를 적용한 예가 거의 없다. 그리고, 타원 단면에 대해 장축 (Hard-way Bending)과 단축 (Easy-way Bending)의 두 방향으로 벤딩이 가능한 CNC 벤더가 개발되었으나 양산제조에 사용된 적은 없다. 이러한 제약에도 불구하고, 타원형 튜브 자체가 줄 수 있는 특이한 벤딩 특성을 조사하여 하이드로포밍 기술에의 적용 가능성을 찾는 것은 상당한 의미가 있다.

통상적으로 하이드로포밍에서 굽힘 가공된 원형 튜브는 금형의 캐비티 (Cavity) 면에 적정한 여유를 두고 핀칭 (Pinching) 되지 않고 안착될 수 있도록 예비성형 공정을 거치게 되는데, 이때 Fig.1 에서 보는 바와 같이 원형 단면이 타원 형태로 성형된다. 또한 예비 성형에 의해 다른 부품과 서로 결합되는 평평한 접면이 형성되기도 한다. 이러한 부품 적용을 위해 원형 대신 타원형 튜브의 사용은 예비성형 공정을 생략할 수도 있는 효과적인 방법이 될 수도 있으며, 부스팅 제어로 멘드럴없이 벤딩할 때 두께감소율과 변형률을 감소시킬 수 있다. 따라서, 타원형 튜브는 특정 HF 부품을 제조하기 위한 경제적인 방법일 수 있으므로, 벤딩시 발생하는 이슈나 특성 등을 이해할 필요가 있다.

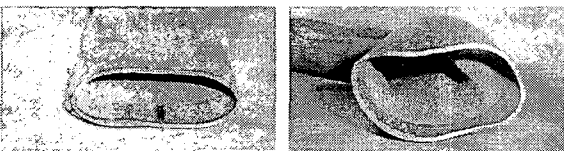


Fig.1 Cross-sectional shape of a tube after the pre-forming

본 논문은 멘드럴을 사용하지 않는 타원형 튜브의 벤딩 공정에 있어서 공정 변수의 변화에 따른 유한요소 해석을 수행하여 두께변화, 변형률, 편평 (Flattening) 및 함몰 (Collapse 또는 Hoop-buckle) 등과 같은 변형 특성을 조사하였다. 굽힘 반경, 타원형 튜브 단면의 기하학적 종횡비 (Aspect Ratio) 및 소재두께 등과 같은 공정 변수에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구를 통하여 타원형 튜브에 대한 Hoop-buckle Limit Diagram 를 얻었으며 예비성형없이 하이드로포밍에 적용 가능하다고 판단되는 타원형 튜브의 벤딩에 대한 수용 범위를 제안하였다.

## 2. 유한요소 모델

튜브 벤딩은 램 벤딩, 프레스 벤딩, 롤 벤딩 및 로터리 드로우 벤딩과 같은 다양한 방법으로 직선 튜브를 정해진 반경과 각도로 변형시키는 성형공정중의 하나이다. 여러 벤딩 방법 중에서 Fig.2 에 보여준 로터리 드로우 벤딩법은 비용절감 효과가 크며 두께가 얇으면서 벤딩반경이 작을 때 기하학적 정밀도가 높기 때문에 다양한 목적으로 사용되고 있다.

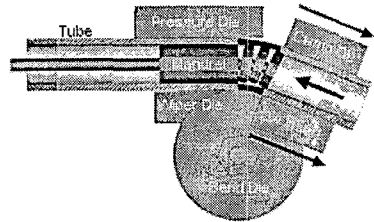


Fig. 2 Schematic of rotary draw bender (Eagle Precision Technologies Inc.)

벤딩 공정에 대한 유한요소 해석을 위해서는 벤딩금형의 기하학적 형상, 경계조건, 마찰특성 및 소재 물성과 같은 인자들이 정확하게 표현될 수 있어야 한다. 타원형 튜브의 벤딩거동을 예측하기 위한 해석용 소프트웨어로 Implicit 코드인 MARC 를 사용하였고, VRDB (Virtual Rotary Draw Bender)를 자체 개발하여 유한요소 해석모델 자동 생성 및 Post-processing 에 활용하였다. Table 1 은 유한요소 해석에 사용된 공정조건을 나타내고 있다. 각각의 시뮬레이션에 대하여 타원 장축의 길이 70mm, 벤딩속도  $\pi/4$  rad/sec, 벤딩각도  $90^\circ$  의 공통조건을 가지며 멘드럴은 사용

하지 않고, 타원 단면의 주축이 벤딩 평면과 평행하게 벤딩하는 Hard-way 벤딩 해석을 수행하였다. 또한, 튜브와 금형간의 마찰계수가 0.1 인 쿨롱마찰모형을 적용하였다. 소재물성은 직선튜브의 확장시험을 통해 얻었으며, Krupkowsky 구성방정식 형태로 표현하였다.

$$\sigma = K(\epsilon_e + \epsilon_p)^n \quad (1)$$

여기서, K는 강도계수 (732MPa),  $\epsilon_e$  오프셋 변형률 (0.3%), n 가공경화지수 (0.5) 및  $\epsilon_p$  유효 소형 변형률이다. 또한 탄소성 해석을 위해 영률 206GPa, 프와송비 0.3 을 사용하였다.

**Table 1 Process parameters for FEM simulations with fixed major axis of 70mm**

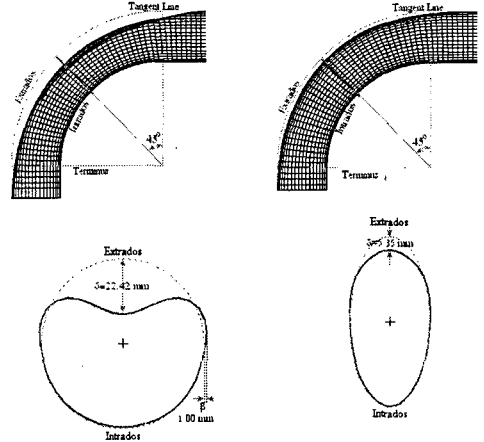
Bending radius $R_b$ (mm)	Aspect ratio $\gamma$ (-)	Wall Thickness $t_o$ (mm)
70.0	0.3	1.0
105.0	0.5	1.5
140.0	0.6	2.0
175.0	0.7	2.5
210.0	0.8	3.0
	1.0	3.5

### 3. 결과 및 토론

튜브 직경 대 두께의 비로 표현되는 Wall Factor 가 작은 경우 멘드렐을 사용하지 않더라도 벤딩 품질의 저하를 초래하지 않는다. 그러나, 대부분의 하이드로포밍 부품 제조에 사용되는 Wall Factor 가 25 이상인 튜브를 멘드렐없이 벤딩하는 경우 굽힘영역이 심하게 함몰되어 하이드로포밍시 상당히 높은 압력을 가하더라도 복원되지 않는 문제가 있다. 멘드렐은 벤딩하는 동안 튜브 내부를 지지함으로써 튜브 굽힘 형상을 양호하게 유지시켜 줄 뿐만 아니라 굽힘영역 내측부에 발생하는 주름 (Wrinkle) 및 굽힘영역 편평 변형이나 함몰 등을 방지하는 중요한 역할을 한다. 하지만, 멘드렐 지지로 인한 굽힘영역 외측부의 스트레칭이 크기 때문에 두께는 더욱 감소된다. 예를 들어, 벤딩반경이 튜브 직경의 2 배이고 Wall Factor 가 31.8 인 원형 튜브의 경우, 멘드렐에 의한 두께감소율은 멘드렐을 사용하지 않은 경우 대비 대략 6.5% 높다고 보고된 바 있다 [3].

Fig. 3 은 원형 및 타원형 튜브를 멘드렐없이 벤딩하였을 때 나타나는 굽힘영역의 변형 양상

을 비교한 것이다. 타원형 튜브의 Hard-way 벤딩은 단면 변형에 대한 저항이 원형 단면보다 크기 때문에 함몰되지 않고 그 양도 크지 않다.



(a) Collapsed circular tube (b) Flattened Oval tube

**Fig. 3 Comparison of deformed shapes**

벤딩반경이 증가할수록 굽힘영역의 편평량은 감소하고, 단면 중형비가 원형에 가까울수록 굽힘부의 함몰도 심해지고 그 양도 크게 나타나는데, 이는 굽힘부에서 원주방향 응력에 저항하는 강성 (Stiffness)이 충분하지 못하고 변형에너지를 최소화하는 방향으로 변형되기 때문이다. 대부분의 타원형 튜브는 굽힘영역의 함몰없이 편평 변형되며, 두께가 두꺼울수록 함몰의 심각성이 줄어든다.

유한요소 해석으로부터 얻은 결과를 토대로 벤딩품질 확보의 난이도를 표현할 수 있고 공정 변수가 굽힘영역 변형에 미치는 영향을 정의하는 무차원 인자인 Shape Degradation Factor ( $W$ ) 를 식(2)와 같이 제안하였다. 이는 Hard-way 벤딩에만 적용할 수 있다.

$$W = I_z / (R_b t_o)^2 \quad (2)$$

여기서,  $R_b$  벤딩반경,  $t_o$  튜브두께,  $I_z$  타원 튜브의 단면 2 차 관성모멘트이다.  $W$  가 증가할수록 굽힘영역 외측부는 벤딩중심 방향쪽으로 더욱 왜곡되어 변형되고, 원형 단면에 근접할수록, 즉  $I_z$  가 증가할수록 더 심한 편평 변형 혹은 함몰되는 현상이 나타난다. Fig.4는 해석에서 고려하는 90°로 벤딩된 모든 튜브의 변형 양상 및 정량적 해석결과 데이터를 토대로 Hoop-buckle 한계를 도시한 것이다. 그림에서 그림자 영역은

함몰되지 않고 편평 변형만 발생하는 영역인 반면 그 반대쪽은 함몰이 발생하는 영역을 표시한다. 예를 들어,  $R_b = 150\text{mm}$ ,  $t_o = 1.5\text{mm}$  로 동일하고 종횡비가 서로 다른 점 P ( $\gamma = 0.7$ )와 Q ( $\gamma = 0.5$ )를 비교하였다. 점 P 에서 Shape Degradation Factor,  $W_p = 5.88$  이고 Q 점에서  $W_Q = 4.71$  이다. 점 P 는 굽힘영역 단면부가 함몰되는 반면 점 Q 는 단지 편평 변형만 발생한다. 이로부터 동일 벤딩반경과 두께에 대하여 단면 형상의 타원도 (Ovality)에 따라 굽힘영역 단면의 편평 정도가 다를 수 있다.

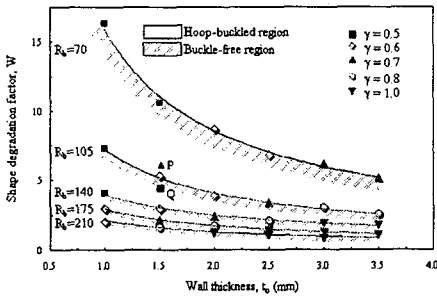


Fig. 4 Hoop-buckle Limit Diagram

굽힘영역의 편평 정도를 기준으로 하이드로포밍에 적용할 수 있다고 판단되는 영역을 Fig. 5에 표현하였다.  $t_o = 1.0\text{mm}$  인 대부분의 경우는 굽힘영역 외측부에서 재료가 변형되는 동안 스트레칭에 대한 기하학적 강성이 확보되지 못하여 심하게 함몰되거나 내측부에 주름이 발생한다.  $R_b$ 가 타원 주축의 2.5 배보다 크거나,  $\gamma \leq 0.5$  인 튜브는 굽힘영역에서 함몰되는 현상이 발생하지 않고 작은 양의 편평 변형이 발생하므로, 성형 난이도가 낮고 예비성형에 의해 타원형으로 변형되는 하이드로포밍 부품에의 적용 가능성이 크다고 볼 수 있다. 그림의 중첩된 부분은 천이영역으로 볼 수 있는데, 예를 들어, A 점의  $W_A = 1.45$  ( $R_b = 140\text{mm}$ ,  $\gamma = 0.3$ )는  $W_B$  ( $R_b = 170\text{mm}$ ,  $\gamma = 0.5$ )보다 0.21 크지만, 최대 편평 변형량,  $\Delta_{\max,A} = 4.99\text{mm}$  로  $\Delta_{\max,B}$  보다 0.36mm 작다. 따라서, 주어진 벤딩조건이 천이영역에 있는 경우, 그 적용성은 절대적으로 결정되지 않고 튜브 사이즈나 벤딩조건에 따라 결정된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 로터리 드로우 벤더에 의한 벤딩공정을 유한요소 모델링하여 타원형 튜브의 벤딩 특성을 조사하였다. 하이드로포밍에 의한 자동차부품 제조에 원형 튜브가 주로 사용되고 있지만 벤딩공정에서 멘드럴을 사용하지 않을 경우 심하게 함몰되는 현상이 발생한다. 이렇게 함몰된 단면은 예비성형 공정이나 하이드로포밍 상부금형이 클로징 (Closing) 될 때 더욱 압착되기 때문에 내부압력이 교정압력 (Calibration Pressure) 수준으로 증가하더라도 복원되지 않고 금형의 캐비티를 채우지 못한다. 하지만, 예비성형 공정에서 단면이 타원 형태로 성형되는 부품의 경우, 주어진 벤딩조건에 대하여 적절한 종횡비를 갖는 타원형 튜브를 선택함으로써, 멘드럴을 사용하지 않더라도 굽힘영역이 함몰되지 않고 주름 발생을 억제하여 벤딩형상 품질을 원형 튜브보다 크게 향상시킬 수 있다. 또한, 적절한 부스팅 제어로 굽힘영역에서 발생하는 편평 변형량을 대폭 감소시키고 두께감소율을 줄임으로써 타원형 튜브를 특정 하이드로포밍 부품에 응용할 만한 충분한 가치가 있다.

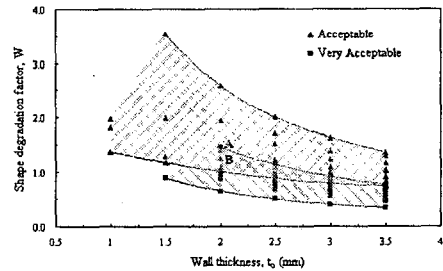


Fig. 5 Suggested acceptable regions of oval tubes for a suitable tubular hydroforming applications

#### 참고 문헌

- [1] M. Koc, T. Altan, An overall review of the tube hydroforming (THF) technology, J. Material Processing Technology, 108 (2001) 384-393
- [2] K. Manabe, M. Amino, Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydroforming, J. Material Processing Technology, 123 (2002) 285-291
- [3] H. Singh, Computer simulation of tubular hydroforming, Tube Pipe J. 11 (2000) 8-13, March.