

하이드로포밍 응용을 위한 벤딩튜브의 스프링백 특성

이호국¹, 박성호²

Springback Characteristics of Bent Tubes for Hydroforming Applications

H. K. Lee, S. H. Park

Abstract

Recently, the use of tubular hydroforming technology has seen increased usage and increased consideration for wide range of tubular automotive applications. In manufacturing hydroformed parts, bending and pre-forming operations are often required prior to the hydroforming process. Higher bending quality of bent tubes is crucial for the successful hydroforming operation because most of plastic strains and wall thinning at the extrados of bend area occur in the bending operation. Springback is also observed due to elastic recovery of tube material after bending. Proper correction of springback is required not only to well place the bent tube into a hydroforming die cavity but also to avoid pinching when the upper die is brought down to closing position. Therefore, prediction of springback at early development stage is one of the key factors to produce high quality hydroformed parts.

In this study, a variety of bending experiments has been carried out to investigate springback amount under change in bending angle and material boosting. Throughout the experimental approach, springback characteristics of bent tubes are quantified according to the change in various bending parameters, and a mathematical model to predict correction amount of springback to a given bend angle is found.

Key Words : Tubular Hydroforming, Tube Bending, Springback

1. 서 론

최근 튜브 하이드로포밍 부품은 고가의 생산 장비 도입에 따른 과도한 초기 투자비 및 스탬핑 대비 낮은 생산성에도 불구하고, 하나의 튜브를 사용하여 용접없이 부품을 일체화함으로써 조립 공정을 단순화할 수 있고 차량 안전성 및 강성을 향상시키며 경량화에 의한 연비 향상 및 복잡한 부품형상에 대한 높은 형상정밀도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 제품 불량률이 낮다는 장점에, 광범위하고 다양하게 개발되어 자동차의 차시계 부품 (Engine Cradle, Rear Subframe, Cross Member,

Side Rail, IP Beam, Radiator Support 등), Stainless 베기계 부품 (Exhaust Manifold, Down Pipe, Tail Pipe, Elbow, Y-Joint, Turbo Outlet 등), 엔진계통 부품 (Cam Shaft 등) 및 차체나 충돌안전 부재 (Roof Rail 류 등)에 널리 적용되고 있으며[1-3], 프리미엄급 냉장고 손잡이 등과 같은 가전 분야에도 기술의 응용 범위가 확대되고 있다.

해외의 하이드로포밍 시장상황을 살펴보면, 시작금형을 포함한 양산금형의 설계 및 제작 능력을 보유한 독일의 Schuler 나 Schaefer 등 해외 선진업체가 시장을 주도하고 있으며, 유럽과 북미의 자동차사 및 대형 부품사의 적극적인 요소기술

1. POSCO기술연구소 자동차가공연구그룹

2. POSCO기술연구소 자동차가공연구그룹 리더

개발을 통한 적용가능 부품이 점차 다변화되고 복잡해 지는 추세이다. Fig.1 은 북미지역의 하이드로포밍 부품의 적용 현황을 보여준다. 국내에서는 2001년부터 POSCO 자동차장재가공연구센터를 주축으로 하이드로포밍 부품개발을 주도해 오고 있으며, 제품제조원가 절감을 통한 고객만족을 실현하고 고객의 요구에 적극 대응할 수 있도록 금형 설계 및 제작기술 개발에 집중하여 해외기술에 의존하지 않고 국산화를 실현하고 있다.

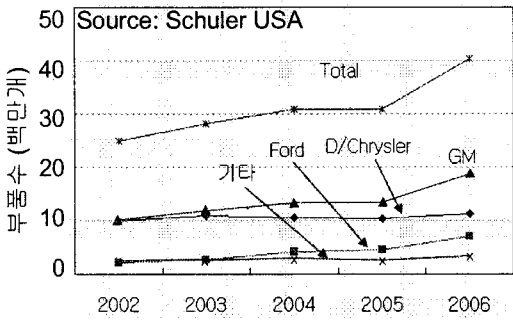


Fig. 1 The usage state of hydroformed parts in North America.

튜브를 이용한 하이드로포밍 부품은 통상적으로 로터리형 CNC 벤딩기 (CNC Rotary Draw Bender)를 이용하여 직선 튜브를 일정 반경으로 주어진 각도만큼 3 차원적으로 굽힘 가공하는 벤딩공정 (Bending Process)과 하이드로포밍 부품의 형상에 부합되도록 정형(Net Shape) 가공하여 금형의 캐비티에 안착되도록 성형하는 예비성형공정 (Pre-forming Process)을 거쳐 예비 성형된 튜브의 양끝을 밀폐시키고 내부에 고압의 수압을 가하여 원하는 형상으로 성형하여 제작된다.

로터리형 CNC 벤딩기는 타 벤딩법 대비 비용 측면에서 효과적이고 정밀한 형상을 얻을 수 있는 방법으로, 벤딩반경이 튜브직경 대비 엄격하고 얇은 두께의 튜브도 고품질의 3 차원 벤딩형상을 구현할 수 있기 때문에 하이드로포밍에 가장 널리 사용된다. Fig.2 는 Rotary Draw Bender 의 구동부를 도식적으로 나타낸 것이다. 압연된 소재가 조관, 벤딩, 예비성형 및 하이드로포밍의 순서로 성형되는 동안, 소재의 강도가 증가되고 더불어 복잡한 변형을 경로를 거치게 된다. 그 한 예로, AKDQ (Aluminum Killed Draw Quality)강의 전형적인 변형률은 조관 5~10%, 벤딩 20~30%, 하이드로

포밍 5~15% 수준이라고 보고된 바 있다[4]. 이러한 사실로부터 대부분의 소성 변형은 벤딩공정 중에 발생함을 알 수 있으며, 굽힘 영역 외측부 (extrados)의 길이방향 인장으로 인해 튜브 두께가 얇아지게 된다. 또한 튜브가 벤딩된 후에는 탄성 회복에 의한 스프링백 현상이 발생하며 예비성형이나 하이드로포밍과 같은 후공정의 작업성 및 형상정밀도를 저해하는 장애요인이 된다. 일반적으로 스프링백은 소재가 변형을 받은 후, 금형의 가하중이 제거되었을 때 소재 내부의 응력이 정적 평형상태를 유지하기 위하여 탄성적으로 회복되면서 발생하는 현상이다. 스프링백 보정은 벤딩된 튜브를 하부 금형의 캐비티 (Cavity)에 제대로 안착시키고 상부 금형이 닫힘 위치 (Closing Position)로 하향 이동할 때 소재표면의 핀칭 (Pinching)을 피하기 위해 반드시 수반되어야 한다. 따라서, 초기 부품개발 단계에서 주어진 벤딩조건에 대하여 스프링백에 의한 각도편차를 정확하게 예측하는 것은 고품질의 하이드로포밍 부품 생산을 위해 매우 중요하다.

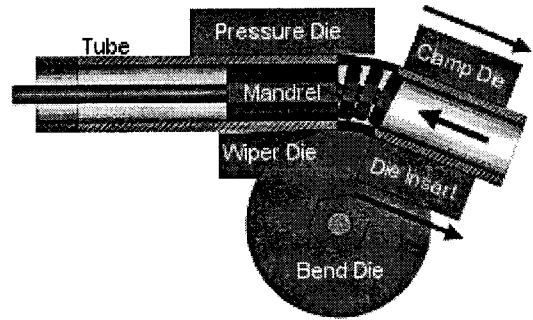


Fig. 2 Schematic diagram of rotary draw bender

본 연구에서는 벤딩 공정변수들이 튜브 스프링백에 미치는 영향을 조사하기 위하여 다양한 조건에서 벤딩 실험을 수행하였다. 이를 통하여 공정변수에 따른 스프링백 특성을 확인하였으며, 주어진 벤딩각도에 대한 스프링백 보정치를 예측할 수 있는 수학적 모델식을 구하였다.

2. 벤딩 실험

스프링백에 의한 각도편차를 조사하기 위하여, POSCO 에서 하이드로포밍용으로 개발한 열연 소재 (POS-HF370, 일반 탄소강)를 대상으로 ERW

(Electric Resistance Welding) 조건하였다. 표 1 은 POS-HF370 열연강판의 물성치를 보여주고 있다. 길이 1,000mm 로 절단된 튜브를 CNC 벤딩기를 이용하여 주어진 각도로 1 점 벤딩한 후 접촉식 (Touch Probe Type) 3 차원 스캐너로 벤딩된 각도를 측정하였다. Fig. 3 은 부스팅 6ton 및 설정각도 90deg 조건에서 굽힘 가공한 튜브를 보여주고 있는데, 측정된 각도는 88.5deg 였다.

Table 1 Mechanical Properties of POS-HF370

YS (MPa)	TS (MPa)	Total EL (%)	Uniform EL (%)	n (-)
237	370	43.1	21.3	0.2

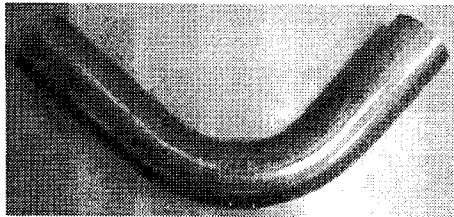


Fig.3 Illustration of a bent tube (90deg of bend angle)

실험에 사용된 벤딩금형 및 공정변수는 각각 표 2 및 표 3 과 같다. 직경 및 두께의 튜브조건과 벤딩각도, 반경, 부스팅(Boosting Force) 및 멘드렐 (Mandrel) 위치 등의 벤딩조건을 고려하여 공정변수 변화에 따른 스프링백에 의한 각도편차를 정밀 측정하기 위하여, 동일조건 하에서 벤딩을 2 회 실시하였고, 각각의 벤딩튜브에 대하여 각도를 3 회 측정한 후에 평균하였다. 또한, 각도 측정은 중심좌표 환산 알고리즘에 따라 벤딩된 튜브의 각도를 $\pm 0.02\text{deg}$ 정밀도로 측정하였다. θ_i 와 θ_m 을 각각 설정각도 및 측정각도라고 하면 스프링백에 의한 각도편차 ($\Delta\theta$)는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_m \quad (1)$$

Table 2 Tool-set used for the bending experiment.

OD / t (mm/mm)	Bend R (mm)	*DOB (-)
63.5 / 2.5	120.0	1.89
75.0 / 2.7	110.0	1.47

* D of Bend = Bend R / OD

Table 3 Process variables for the bending experiment

Variable	Range
Steel Grade	POS-HF370
Set Angle	22.5 ~ 90.0 deg
Boosting Force	1.2 ~ 6.0 ton
Mandrel Position	-10.0 ~ 5.0 mm
Bending Speed	17.25 ~ 69.0 deg/sec

3. 실험결과 및 고찰

벤딩 실험에서 얻어진 데이터를 토대로 주요 공정변수들이 스프링백에 미치는 영향을 분석하였다. 주어진 튜브 사이즈 및 벤딩반경에 대하여, 벤딩각도가 증가하면 변형 영역이 넓어지고 그에 따라 변형량이 누적되어 금형의 가하중이 제거된 후에 정적 평형을 유지하기 위한 탄성 회복 정도가 커지기 때문에 스프링백은 선형적으로 비례하며, 벤딩각도가 작으면 스프링백에 미치는 부스팅의 영향이 크지 않지만, 그 각도가 클 때 부스팅이 스프링백에 미치는 영향이 두드러짐을 확인하였다. 멘드렐의 위치나 벤딩속도의 변화에 따라 최대 약 0.1deg 의 각도편차가 발생하는데, 이러한 변수들은 통상의 작업범위 내에서 스프링백에 미치는 영향이 거의 없다고 볼 수 있다.

Fig.4 는 표 2 의 DOB=1.89 에 대하여, 벤딩각도의 변화에 따른 스프링백에 의한 각도편차의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 벤딩각도의 증가에 따라 스프링백에 의한 각도편차는 선형적으로 증가하여 90deg 의 벤딩각도에서 부스팅에 따라 약 0.8~1.5deg 의 스프링백 효과를 보이며, 부스팅의 증가에 따라 그 편차는 약간 감소하는 경향을 보이며 통상적인 하이드로포밍용 튜브 벤딩시 가하는 부스팅 (4.8~6.0ton)에 대하여 벤딩각도 22.5deg 에서의 각도편차 대비 90deg 에서 약 0.7deg 정도 감소함을 볼 수 있다. 표 2 에 주어진 외경 63.5mm, 두께 2.5mm 및 벤딩반경 120mm 에 대하여 벤딩각도 및 부스팅의 변화에 따른 스프링백에 의한 각도편차를 조사하여 특정 벤딩조건에서의 스프링백 보정량을 예측할 수 있는 수학적 모델식을 다중선형회귀 분석하여 식(2)와 같이 도출하였다.

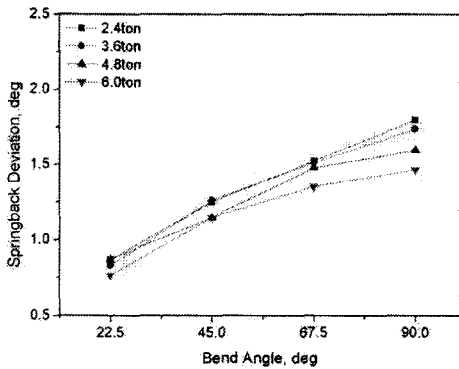


Fig.4 Springback as a function of bend angle for DOB=1.89

$$\Delta\theta = 0.815 + 0.012\theta_B - 0.05B_F \quad (2)$$

여기서 θ_B 는 벤딩각도, B_F 는 부스팅이다. 모델식 (2)의 R-Square 값이 95%로 스프링백에 의한 각도 편차 측정치와 모델식에 의한 예측치간의 상관성이 강하고, 스프링백 관리범위 $\pm 0.3\text{deg}$ 이내로 예측이 가능함을 확인하였다.

Fig. 6 은 표 2 의 DOB=1.47 에 대하여, 벤딩각도 및 부스팅 변화에 따른 스프링백에 의한 각도편차의 관계를 나타낸 것이다. 스프링백은 벤딩각도와 선형적 비례관계가 있으며, 통상적 부스팅 조건하에서 벤딩각도에 따라 약 3.2~5.2deg 까지 설정각도 대비 편차가 발생한다. 이는 굽힘 영역의 튜브 단면에 부가되는 부스팅 압력은 DOB=1.89 인 경우보다 낮지만 튜브 자체의 굽힘 인장응력이 높고 부스팅에 의한 변형도 이에 가세하여 DOB=1.89 인 경우보다 총 변형량이 커서 제하 후 탄성 회복 정도가 크기 때문이다.

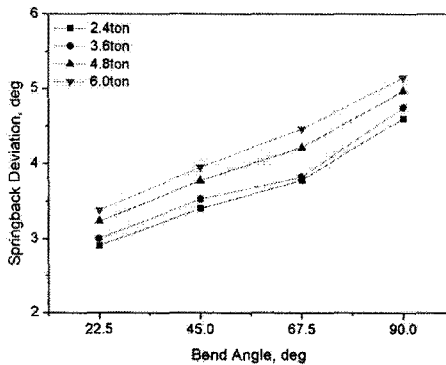


Fig. 6 Springback as a function of bend angle for DOB=1.47

DOB=1.47 에 대한 스프링백 보정량 예측을 위한 수학적 모델식은 식(3)과 같다.

$$\Delta\theta = 0.84 + 0.025\theta_B + 0.164B_F \quad (3)$$

모델식 (3)의 R-Square 값은 97%로, 측정치와 예측치간에 선형성이 매우 강하고, 동일한 튜브재질, 사이즈 및 벤딩반경에 대하여, 벤딩라인(Bending-Line) 설계치 대비 $\pm 0.3\text{deg}$ 이내로 예측이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

벤딩 공정변수들이 튜브 스프링백에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 다양한 조건에 대하여 벤딩 실험을 수행하였으며, 하이드로포밍용 열연강재 POS-HF370 의 공정변수에 따른 스프링백 특성을 조사하였다. 이로부터 벤딩각도가 스프링백에 미치는 영향이 가장 크고 선형적 비례관계를 가지며, 부스팅의 영향은 벤딩각도가 큰 경우에 그 효과가 크게 나타난다. 그러나, 멘드럴의 위치나 벤딩속도가 스프링백에 미치는 영향이 거의 없다. 또한 DOB=1.89 및 1.47 의 주어진 조건에 대하여 벤딩각도 및 부스팅의 변화에 따른 스프링백 영향도를 조사하여 벤딩 설계치 대비 $\pm 0.3\text{deg}$ 이내로 보정이 가능한 수학적 모델식을 도출하였다.

참고 문헌

- [1] M. Koç and T. Altan, 2001, An overall review of the tube hydroforming (THF) technology, J. of Materials Processing Technology, Vol. 108, pp. 384-393.
- [2] M. Ahmetoglu and T. Altan, 2000, Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends, J. of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp. 25-33.
- [3] M. Ahmetoglu, K. Sutter, X. J. Li and T. Altan, 2000, Tube hydroforming: current research, applications and need for training, J. of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp. 224-231.
- [4] H. Singh, 1999, Tubular hydroforming process and tool design optimization using computer simulation, Proceedings of the Automotive Tube Fabricating Conference: Focus on Hydroforming, Detroit, MI, April 26-27.