

# 스테인레스 관재의 굽힘 특성 분석

이건엽<sup>1</sup> · 이해경<sup>1</sup> · 박성필<sup>2</sup> · 김윤규<sup>2</sup> · 문영훈<sup>#</sup>

## Analysis of Stainless Steel Tubes Bendability

G. Y. Lee, H. J. Lee, H. K. Yi, Y. K. Kim, Y.H. Moon

(Received Month Day, 2009)

### Abstract

Hydroformed parts have higher dimensional accuracy, structural strength, and dimensional repeatability. Particularly in the automotive industry, manufacturing of parts with complex shapes from tubular materials sometimes requires one or more pre-forming operations such as bending before the hydroforming process. The pre-bending process is an important factor for successful hydroforming in the case where the perimeter of the blank is nearly the same as that of final product. The bendability of a tube depends on the parameters such as the bending radius, variation of the diameter, thickness, hardness. This study shows the analysis of bending through the stainless steel tubes bent to rotary draw bending machine.

**Key Words** : tube hydroforming(튜브 액압성형), pre-bending(예비 굽힘), bendability(굽힘성), stainless steel(스테인레스 강)

### 1. 서론

일반적으로 액압 성형의 최종 제품에 이르기까지 예비 성형의 단계를 거치는데, 비대칭적 복합 튜브 부품의 액압 성형의 경우에 공정의 용이성을 위해 미리 예비 굽힘을 한 튜브를 액압 성형하는 경우가 많다. 굽힘 공정이 진행되는 동안 튜브의 원주 방향에 따른 불균일한 소성 변형으로 인해 튜브 단면의 중심축을 중심으로 두께의 변화가 발생하게 된다. 예비 성형 단계에서의 튜브의 두께 변화는 최종 제품의 두께 균일성 뿐만 아니라 액압 성형성에 영향을 미치므로 적절히 고려되어야 한다. 또한 예비 굽힘 공정은 소재의 탄성으로 인한 스프링 백(spring back)이 치수 정밀도에 영향을 미치므로 정량적인 스프링백의 분석이 요구된다. 본 연구에서는 최근 사용 확대되고 있는 스테인레스 강(stainless steel) 중 STS201, STS 304, STS 409 튜브재에 대한 굽힘 특성을 실험적으로 고찰하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 소재의 물성

본 연구의 실험에 사용된 스테인레스 강 튜브재의 기계적 특성과 화학성분을 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다. 본 실험에서는 용접방법에 따라 전기 저항 용접(ERW)과 텅스텐 불활성 가스(TIG) 용접으로 제작된 외경이 Ø42.7mm 두께가 2.0t 인 튜브를 사용하였다.

**Table 1 Mechanical properties of STS**

Material	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Uniform Elongation (%)	Total Elongation (%)	n-value
STS201 TIG	678	411	33.7	48.8	0.296
STS201 ERW	644	327	44.1	55.3	0.365
STS304 TIG	650	312	47.5	55.6	0.362
STS409 ERW	403	346	14.7	32.6	0.117

1. 부산대학교 기계공학부 / 정밀정형 및 금형 가공 연구센터  
 2. 하이스코 기술연구소  
 # 교신저자: 부산대학교, E-mail:yhmoon@pusan.ac.kr

**Table 2 Chemical composition of STS materials**

(Unit : wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
STS 201	0.047	0.628	5.62	0.032	0.002	18.05	3.8	2.16
STS 304	0.047	0.451	1.48	0.025	0.003	18.44	8.38	0.095
STS 409	0.009	0.592	0.293	0.025	0.001	11.74	0.119	0.069

2.2 스프링 백(Spring back)의 측정

로터리 드로우 벤딩(Rotary draw bending)을 이용하여 굽힘 가공한 소재들의 스프링 백을 측정하였다.

$$K_s = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_1} \quad (1)$$

스프링 백은 굽힘 전( $\alpha_1$ )과 굽힘 후( $\alpha_2$ )의 각도 변화율을 스프링 백 비(Springback ratio)로 나타내고 그 식은 (1)과 같으며,  $K_s$  값이 0에 가까울수록 스프링 백이 일어나지 않는다는 것을 의미한다. Fig. 1의 실험결과에서 인장강도가 다른 소재에 비해 큰 STS201 TIG 소재가 스프링 백 양이 가장 많았고 응력 수준이 비슷한 STS 201ERW 와 STS304 TIG 는 비슷한 양을 볼 수 있다. 상대적으로 높은 강도로 인하여 스프링 백의 양은 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

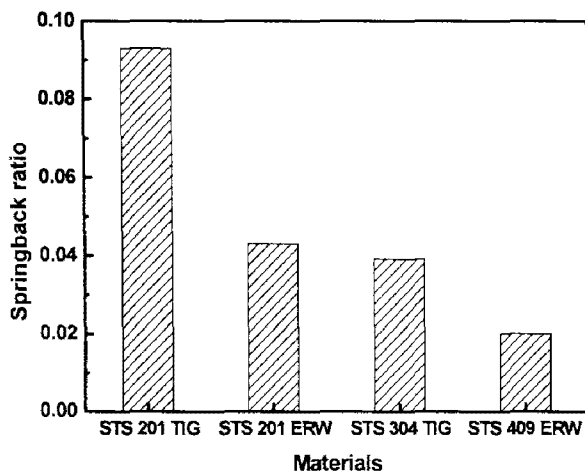


Fig. 1 Comparison of spring back ratio (R=60mm)

2.3 단면 난형도(Cross-section Ovality) 분석

단면 난형도는 관의 굽힘 공정 중의 소성 변형으로 인해 원형 단면이 평편해지는 현상을 말하

는 것으로 Fig. 2와 같이 단면 형상이 변하게 되고, 그 값은 굽힘 후의 가장 큰 지름( $D_2$ )과 가장 작은 지름( $D_1$ )의 차를 굽힘 전 관 지름( $D_0$ )으로 나눈 값으로 식 (2)와 같다.

$$Ovality(U) = \frac{D_2 - D_1}{D_0} \quad (2)$$

본 연구에서는 Fig. 3의 굽힘 가공된 소재들을 변형이 가장 많은 부분인 굽힘 중심부를 절단하여 Fig. 4에서 보이는 형상의 단면의 난형도를 분석하였다.

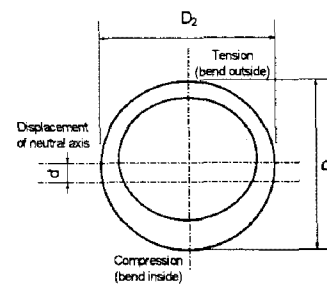


Fig. 2 Ovality Bent tubes

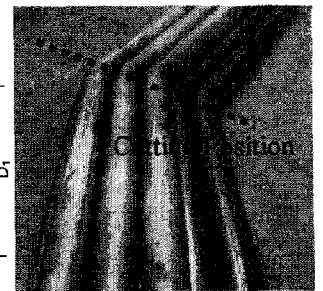
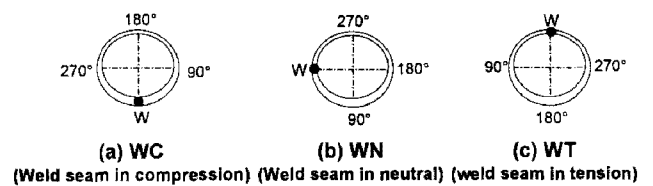


Fig. 3 Bent tubes



(a) WC (b) WN (c) WT

(Weld seam in compression) (Weld seam in neutral) (weld seam in tension)

Fig. 4 Classification of weld seam position

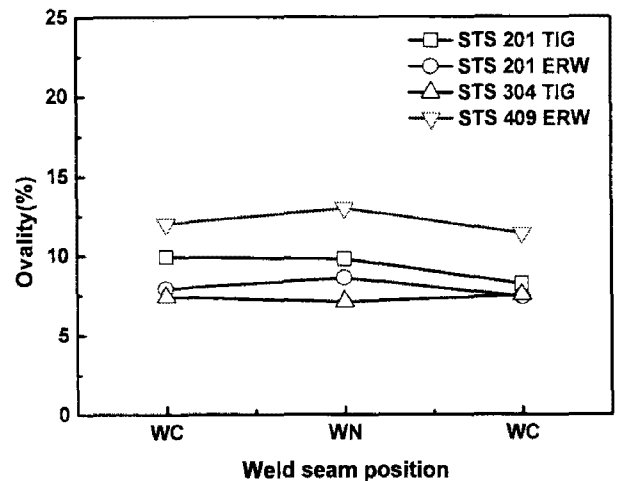


Fig. 5 Ovality variation with weld seam position (R=45mm)

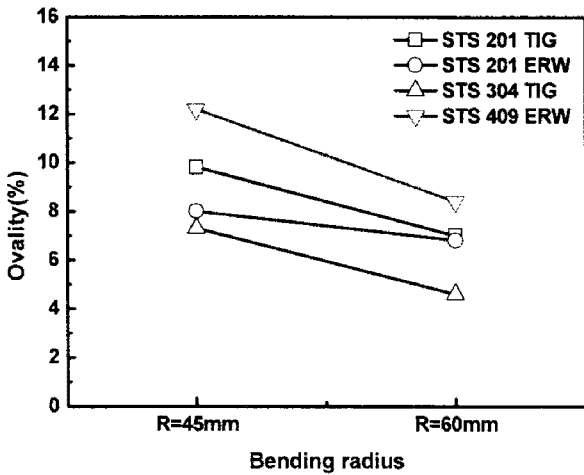


Fig. 6 Ovality variation with bending radius

Fig. 5에서는 굽힘 반경이 45mm인 소재들의 굽힘 시, 튜브의 길이 방향으로 용접선(weld line)을 달린 굽힘 중심부 단면의 난형도를 비교한 결과를 나타냈다. 용접부의 위치에 따른 차이는 미미하게 나타났는데 굽힘 공정 시 튜브 소재의 용접선 방향이 진원도에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 튜브 용접에서의 열영향부(heat affected zone)가 용접선 주위를 경화시켜 용접부의 연신율을 감소시키지만 전체적인 굽힘 형상에는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6에서 굽힘 반경이 45mm일 때가 60mm일 때 보다 더 큰 난형도 값을 보이는데 굽힘 반경이 작을수록 단면 형상의 난형도가 커짐을 볼 수 있다. 이는 굽힘 공정 시 굽힘 다이와 소재의 접촉 면적이 작아 굽힘 응력을 상대적으로 더 많이 받음으로 인해 소재의 유동이 많아져 변형이 크게 발생하기 때문이다.

### 2.3 굽힘 튜브의 두께 감소율

Fig. 7에서는 용접부(W)의 위치가 다른 굽힘 관의 단면의 두께 변화를 나타내었다. 굽힘 반경이 45mm 인 튜브를 용접선의 방향이 다른 굽힘 소재의 중심부 절단면에서 인장부의 두께 감소율을 비교하였다. STS409 ERW와 STS201 TIG 소재의 두께 감소율이 다른 소재에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있는데, 비균일한 소성 변형으로 인해 연신율이 작은 소재일수록 굽힘 시 소재의 축 방향 소성 유동과 원주 방향으로의 변형이 많아져 두께 변화에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 또한 용접선 방향이 중간부일 때보다 인장부와

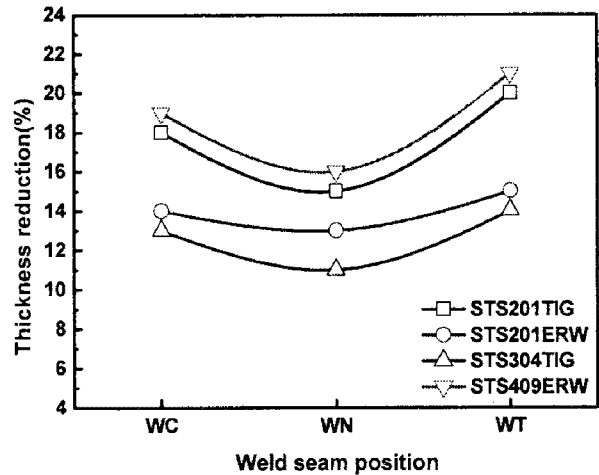


Fig. 7 Thickness reduction of tension zone variation with weld seam position (R=45mm)

압축부일 때가 두께 감소율이 높게 나타난다. 일반적으로 용접된 튜브는 용접부의 열 영향부으로 인해 용접선 주위가 경화되어 연신율이 감소하게 된다. 튜브 길이 방향으로의 부분적인 연신율 감소로 인해 굽힘 과정의 인장모드에 용접 선이 근접해 있을 경우, 변형에 대응하는 힘의 영향으로 소재 유동이 커져 두께의 감소를 야기시키기 때문으로 판단된다.

### 2.4 굽힘 튜브의 경도 분석

굽힘 소재의 가공 경화량을 알아보기 위해 굽힘 중심부의 절단된 단면의 비커스 경도를 측정하였다. 굽힘 소재의 측정부는 Fig. 8(a)의 단면 압축부와 같고, 굽힘 전 소재의 경도 값과 굽힘 반경이 60mm 인 소재의 측정 위치에 따른 경도 증가율을 Fig. 8(b)에 나타냈다. 인장강도가 큰 순서대로 모재부의 경도 값이 나타나는데 인장 강도와 경도가 비례적인 관계에 있음을 확인할 수 있다. 또한 굽힘 반경이 다른 경우를 비교해 볼 때, 굽힘 반경이 작을수록 소성 유동이 많아져 경도 증가율이 커짐을 알 수가 있다. 또한 소재의 인장부와 압축부에서 가공경화로 인하여 경도가 증가한 것을 볼 수 있는데, 일반적으로 가공경화지수는 연신율과 거의 일치하는 경향이 있고 연신율이 크다는 것은 소재가 국부변형 없이 균일 변형을 하는 능력이 좋고 경화율이 높은 경향이 있다는 것을 확인할 수 있다. 이런 점에서 볼 때 STS 201 ERW와 STS 304 TIG 소재가 가공성 측면에서 다른 소재에 비해 우수함을 판단할 수 있다.

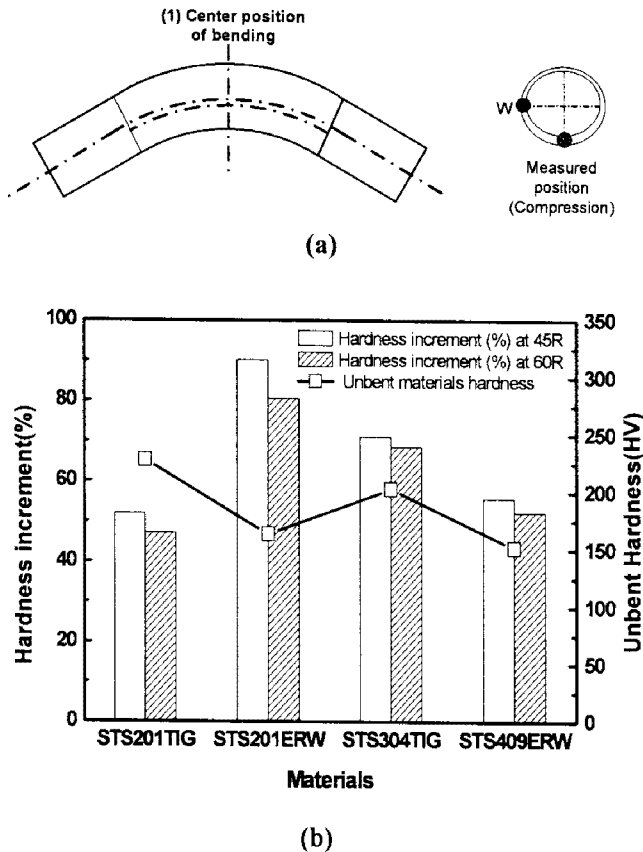


Fig. 8 (a) Measuring positions for hardness test, and (b) Work hardening of bent tube

### 3. 결론

본 연구는 최종 액압 성형된 제품의 성형성에 영향을 미치는 예비 굽힘 공정에서 가공된 4가지 스테인레스 강 굽힘 소재들의 실험적 접근을 통하여 다음과 같은 기계적 특성과 성형성에 대한 결론을 도출하였다.

(1) 튜브 굽힘 시, 인장강도와 항복강도가 상대적으로 높은 소재가 스프링 백 양이 더 많음을 확인하였다.

(2) 튜브 용접선의 방향이 굽힘 가공된 제품의 전체적인 형상에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있었다.

(3) 소재의 비균일한 소성유동으로 인해, 굽힘 반경이 커질수록 단면 난형도가 작아지는데 연신율이 작은 소재일수록 변형에 대응하는 힘이 약하여 외력에 더 민감하기 때문이다.

(4) 용접선 위치를 달리한 두께 감소율은 용접선의 방향이 중간부일 때보다 인장부와 압축부일 때가 두께 감소율이 높은 경향을 보였다. 이는 튜브 용접부의 열 영향부로 인해 용접선 주위가 경화되어 튜브 길이 방향으로의 부분적인 연신율 감소로 인한 것으로 판단된다.

(5) 굽힘 소재들의 경도 측정과 가공 경화량의 분석을 통해서 STS 201 ERW 소재와 STS304 TIG 소재가 가공성 측면에서 다른 소재에 비해 우수함을 판단할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가 핵심 연구 센터사업의 연구비 일부 지원으로 수행 되었음.

### 참 고 문 헌

1. M. Koç and T. Altan, 2002, Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, Issue 1, pp. 123~138.
2. J. b. Yang, B. H. Jeon, S. I. Oh, 2001, tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 175~181.
3. L. Gao, M. Strano, 2004, FEM analysis of tube pre-bending and hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, pp. 294~297.
4. H. J. Kim, C. M. Lee, 2007, A study on the Bending Process for Precision Pipe Forming, Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, NO. 6, pp. 58~65.
5. S. H. Lee, B. H. Jeon, S. I. Oh, 2000, A study on the Weld Line Position Optimization for Hydroforming, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 9, NO. 3, pp. 160~168.
6. G. Khodayari, Edited by Muammer Koç, 2008, Hydroforming for advanced manufacturing, Woodhead Publishing Limited, pp. 181~201.