

스테인리스 강관의 굽힘 특성 연구

이건엽¹ · 이호진¹ · 이해경¹ · 김윤규² · 문영훈[#]

A Study on the Bendability of Stainless Steel Tubes

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

(Received April 2, 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 process for the 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, welding methods, mechanical properties and hardness. Through the stainless steel tubes bent by rotary draw bending machine, this study shows the following : (1) The influence on spring back ratio variation with stress level in the welded bent tube . (2) The Cross-section ovality variation with weld seam position and bending radius. (3) The relation between elongation and thickness reduction of tension zone with weld seam position and bending radius. (4) Workability evaluation of bent stainless steel tubes through the hardness of materials and hardness increment. The results of this study may help to understanding of characteristics on bendability of stainless steel tubes.

Key Words : Tube Hydroforming, Rotary Draw Bending, Bendability, Stainless Steel

1. 서 론

관재 액압 성형(tube hydroforming)은 폐단면 형상의 원형 튜브 내부에 정수압을 가해 팽창시켜 원하는 외부 금형 형상에 따라 성형하는 가공 기술이다. 최근 고성능과 연비 향상을 위한 경량화 요구에 따라 자동차 부품 분야에서 많이 사용되고 있는 분야로써, 성형품 무게 대비 높은 구조 강성을 가지고, 치수 정밀도와 강성을 향상시키며, 용접부의 감소로 인한 복잡한 형상의 부품을 하나의 금형으로 생산 가능한 장점을 가진다[1~6].

일반적으로 액압 성형의 최종 제품에 이르기까지 예비 성형의 단계를 거치는데, 비대칭적 복합

튜브 부품의 액압 성형의 경우에 공정의 용이성을 위해 예비 굽힘 과정을 거친다. 최종 액압 성형 이전의 과정으로써 튜브의 예비 굽힘은 금형 내부 면에 적절히 놓여지고 최종 형상의 제품의 센터라인(centerline)에 안착 할 수 있게 한다. 굽힘 공정 동안 튜브의 원주 방향에 따른 불균일한 소성 변형으로 인해 튜브 단면의 중심축을 중심으로 두께의 변화가 발생하게 된다. 예비 성형 단계에서의 튜브 두께 변화는 최종 제품의 두께 균일성 만 아니라 곡관의 액압 성형성에 영향을 미치므로 적절히 고려되어야 한다. 또한 냉간에서의 예비 굽힘 공정은 소재의 탄성으로 인한 스프링 백(spring back)이 치수 정밀도에 영향을 미치며

1. 부산대학교 기계공학부 / 정밀정형 및 금형 가공 연구센터

2. 하이스코 기술연구소

교신저자: 부산대학교 기계공학부,

Email: yhmoon@pusan.ac.kr

Table 1 Mechanical properties of test materials

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

Table 2 Chemical composition of test 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

로 정량적인 스프링백의 분석이 요구된다. 근래에 자동차 부품 분야에서 적용 강종이 고급화, 고기능화 됨에 따라 내식성 스테인리스 강(stainless steel)의 사용량이 지속적으로 증가하고 있다. 자동차 산업 분야에서 현재 페라이트 스테인리스 강이 배기계에 널리 사용되고 있으며, 오스테나이트 스테인리스 강은 외장용으로 그 사용이 확대되어 가고 있다[7~9].

본 연구에서는 우수한 내식성과 내마모성 및 가공성을 이용하여 기계 구조용이나, 자동차의 머플러용 등의 장치 및 각종 배관 등에 사용되는 STS201, STS304 및 STS409 스테인리스 강 튜브 소재에 대한 굽힘 특성을 실험적으로 고찰해 보고자 하였다.

2. 실험 내용 및 방법

2.1 소재의 물성

본 연구의 실험에 사용된 스테인리스 강 튜브 소재의 기계적 특성과 화학성분을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

본 실험에서는 용접방법에 따라 전기 저항 용접(ERW)과 텅스텐 불활성 가스(TIG)용접으로 제작된 외경이 $\varnothing 42.7\text{mm}$ 두께가 2.0t 인 튜브를 사용하였다. STS 201 소재의 경우 용접방식에 따라 기

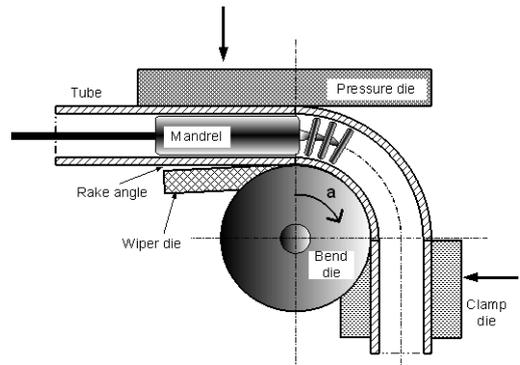


Fig. 1 Schematic of a tube rotary draw bender

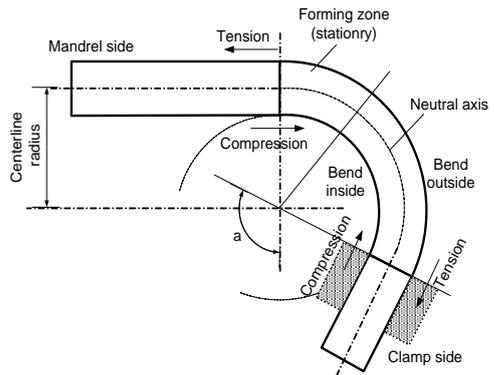


Fig. 2 Forming zone and bending terms

계적인 물성 차이가 나는 이유는 조관 시 고용화 열처리 단계에서 TIG 용접의 경우 조관과 동시에 열처리를 하는데 비해 ERW 용접방식의 경우는 조관 후 열처리가 이루어짐으로써 조건이 좀더 안정적이기 때문이다.

2.2 굽힘 공정

실험에 사용된 로터리 드로우 벤딩(Rotary draw bending)은 다양한 산업분야에서 사용되는 공정으로써 특히 생산 속도와 치수 정밀도가 상대적으로 우수한 장점을 가진다. 모멘트의 힘과 관축 방향 힘 사이의 상호 작용과 각종 금형(die)과 만드렐(mandrel)의 상호 작용으로 공정이 이루어지는데 튜브 축에 작은 각(rake angle)을 이루며 위치하는 와이퍼 다이(wiper die)는 벤딩 시에 마찰력을 감소 시킴으로써 압축력을 받는 곡관의 내측부의 주름을 방지하는 역할을 하게 된다. 곡관을 만드는 튜브 로터리 드로우 벤딩기 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 로터리 드로우 굽힘은 일정 반경으로 관

을 굽히기 위한 굽힘 다이(Bend die)를 중심으로 원하는 각도만큼 압력 다이(Pressure die)에 힘이 가해 이루어진다. 굽힘 다이의 직경에 따라 굽힘 반경도 변화하게 된다[10].

본 연구에서는 굽힘 각도를 일정하게 30°로 하여 굽힘 반경이 45mm와 60mm인 두 가지 굽힘 관을 비교하였으며, 굽힘 시 발생하는 소재의 거동에 따른 두께의 변화와 경도 변화를 분석하였다. 굽힘 튜브의 성형 양상을 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 스프링 백(spring back)의 측정

스프링 백은 튜브의 소성 변형 후 하중 제거 시 재료가 가지는 탄성복원으로 인해 변형이 일어나는 현상이다. 굽힘 가공에서의 스프링 백은 굽힘부의 곡률 반경 및 각도의 변화로 인해 발생하므로 제품의 형상 정도에 직접 관계되는 것이다. 벤딩 다이 반경, 굽힘 각도, 가공하는 소재의 강도 등이 스프링 백에 중요한 영향을 미치는 요인이다.

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

스프링 백(K_s)은 굽힘 전(α_1)과 굽힘 후(α_2)의 각도 변화율을 스프링백 비(springback ratio)로 나타내고 그 식은 (1)과 같으며, K_s 값이 0에 가까울수록 스프링 백이 일어나지 않는다는 것을 의미한다. Fig. 3에서는 스프링 백 현상이 일어나는 현상을 도시화하였다. 본 연구에서는 기계적 물성에 따른 각 소재들의 스프링 백의 양을 비교 평가하였다.

2.4 단면 난형도(Cross-section ovality) 및 두께와 경도 분석

단면 난형도는 관의 굽힘 공정 중의 소성 변형으로 인해 원형 단면이 평편해지는 현상을 말하는 것으로 중심축을 중심으로 굽힘부 바깥쪽은 인장력이 안쪽은 압축력이 작용함으로 인해 Fig. 4와 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.

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

Fig. 5에서와 같이 굽힘 가공된 소재들을 변형이 가장 많은 부분인 굽힘 중심부를 절단한 단면의 난형도를 분석하고 용접부(W)의 위치가 다른 굽

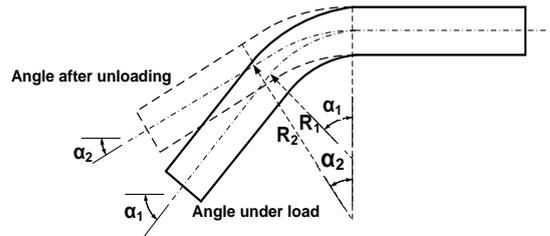


Fig. 3 Angular spring back characteristic of bent tube

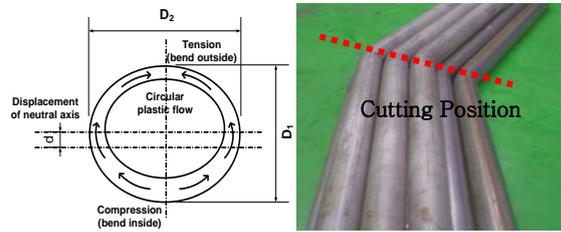


Fig. 4 Bent tubes

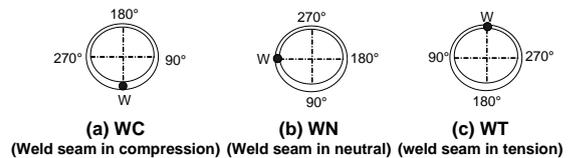


Fig. 5 Classification of weld seam position

힘 관의 단면의 두께 변화와 굽힘 반경에 따른 두께 변화를 살펴보았으며, 굽힘의 중심부 단면 압축부의 경도 측정을 통해 가공 경화량을 분석하였다[11].

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 스프링 백 양의 분석

굽힘 튜브들의 스프링 백 양을 분석하기 위해 굽힘 각도 30°, 굽힘 반경이 60mm로 굽힘된 소재의 스프링 백 양을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 인장강도와 항복강도가 다른 소재에 비해 큰 STS201TIG 소재가 스프링 백 양이 가장 많았고 STS201ERW와 STS304TIG는 비슷한 양상을 보이는 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 관재 굽힘 경우 소재의 응력 수준이 높을수록 스프링 백의 양이 많은데, 용접된 원형 관재에서도 굽힘 후의 스프링 백 양은 소재의 응력 수준이 높아짐에 따라 많아짐을 알 수 있다.

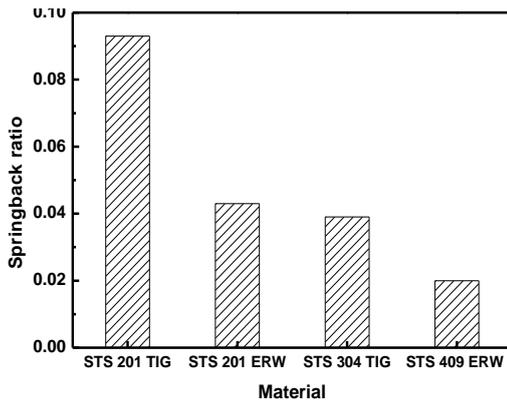


Fig. 6 Comparison of spring back ratio(R=60mm)

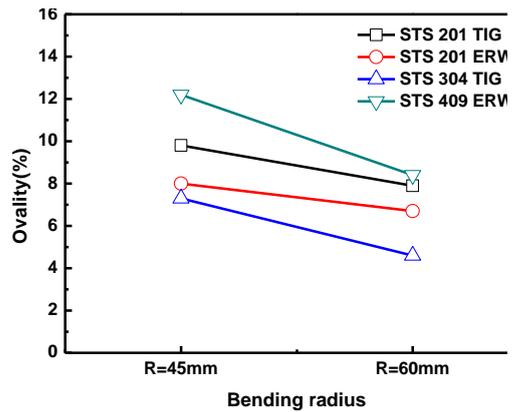


Fig. 8 Ovality variation with bending radius

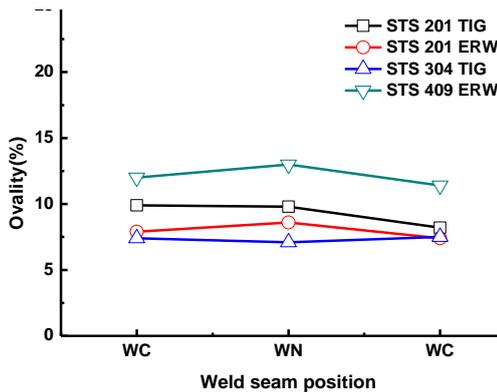


Fig. 7 Ovality variation with weld seam position (R=45mm)

3.2 굽힘 튜브의 단면 난형도 평가

Fig. 7 에서는 굽힘 반경이 45mm 인 소재들의 굽힘 시, 튜브의 길이 방향으로 용접선(weld line)을 달리한 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 부분적인 연신율을 감소시키지만, 관재의 굽힘 후 전체적인 형상에 미치는 영향은 적다.

Fig. 8 은 굽힘관의 중심부 단면에 대한 난형도를 보여준다. 난형도 값은 STS409, STS201, STS304 순이고, STS201 소재에서 용접 방법에 따른 난형도 값을 비교했을 때 TIG 용접 소재가 ERW 용접

소재보다 높게 나타났다. 또한 굽힘 반경이 작을수록 난형도 값이 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 연신율이 작은 소재일수록 응력에 대응하는 변형 저항이 약해 외력에 민감하게 작용하기 때문이다. 굽힘 공정 시 굽힘 다이와 소재의 접촉면적이 작아지면 축 방향 유동과 원주 방향의 응력이 상대적으로 높아져 난형도가 높아지게 된다. 작용하는 응력에 대응하는 소재의 유동이 최소로 일어남을 난형도를 통해 알 수 있다.

3.3 굽힘 튜브의 두께 감소율

Fig. 9 는 굽힘 반경이 45mm 인 튜브를 용접선의 방향이 다른 굽힘 소재의 중심부 절단면에서 인장부의 두께 감소율을 비교하였다. STS409ERW와 STS201TIG 소재의 두께 감소율이 다른 소재에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 또한 용접선의 방향이 중간부일 때보다 인장부와 압축부일 때가 두께 감소율이 높은 경향을 보인다. 일반적으로 용접된 튜브는 용접부의 열 영향부로 인해 용접선 주위가 경화되어 연신율이 감소하게 된다. 굽힘 시 튜브 길이 방향으로의 국부적인 연신율 감소를 야기시키고 굽힘 과정에서 인장모드에 용접선이 근접해 있을 경우, 변형에 대응하는 힘의 영향으로 소재의 원주 방향으로의 유동이 커져 두께의 감소율이 더 높아지기 때문이다. 연신율이 작아서 유동이 많은 소재의 원주 둘레를 따라 인장부 벽두께 변화가 심할 경우 후속 액압 성형시에 성형성에 영향을 미치므로 굽힘 공정의 설계 시에 튜브의 용접선 방향을 충분히 고려해야 한다.

Fig. 10 은 굽힘 시 다른 소재들에 비해 상대적

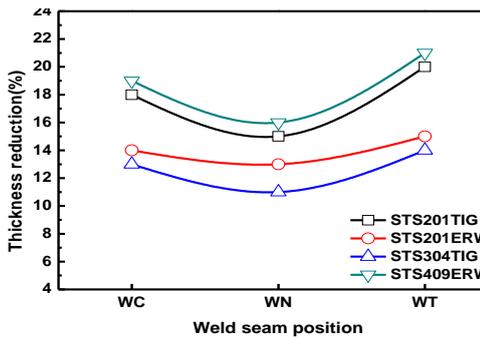


Fig. 9 Thickness reduction of tension zone with weld seam position (R=45mm)

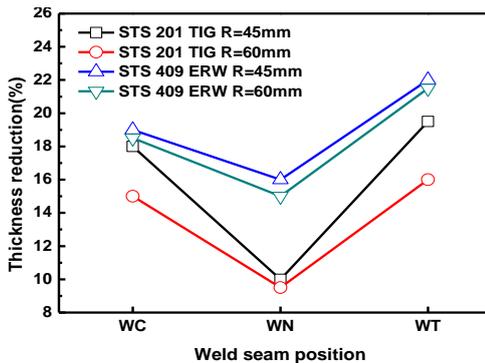


Fig.10 Thickness reduction variation with bending radius

으로 두께 변형이 많은 소재들의 굽힘 반경에 따른 인장부 두께 감소율을 비교하였다. 실험 결과에서 굽힘 반경이 작을수록 인장부의 두께 감소가 크게 나타남을 볼 수 있다. 원주 방향으로의 중립축 외측면에서 인장 응력이 최대로 발생하여 소재의 유동이 최대가 되므로 인장부의 균열 및 파손을 방지하기 위해서는 굽힘 외측에 일어나는 최대 응력을 한계치에 이르지 않도록 굽힘 공정 시에 축력, 굽힘 시 중립축의 이동 등이 적절히 고려되어야 할 것이다.

3.4 굽힘 튜브의 경도 분석

일반적으로 높은 연신율, 낮은 항복강도, 낮은 항복비(항복강도/인장강도), 높은 가공경화지수를 가진 소재는 가공성 면에서 유리하다. 반면에 경도가 높은 소재는 높은 강도와 낮은 연신율을 나타내는 경향을 보인다. 소재의 경도가 크면 굽힘 가공 시, 소성 변형이 발생하는 시점이 늦어지

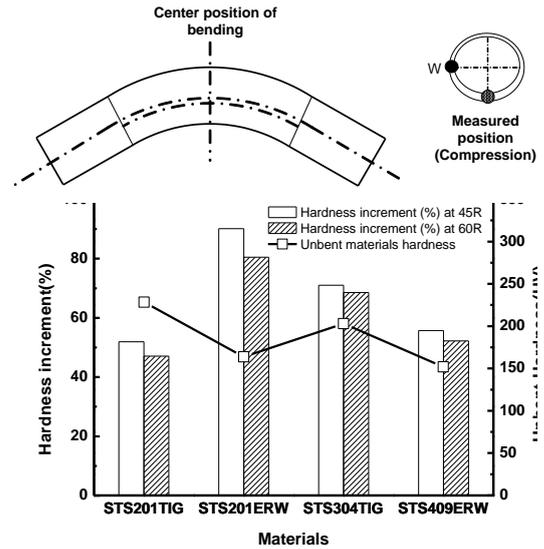


Fig.11 Comparison of hardness increment

므로 가공성 측면에서는 불리할 수 있다. 그러므로 굽힘 공정 시, 소재를 선택할 때에는 이러한 물성들이 종합적으로 고려되어야 할 것이다. Fig. 11 에서는 굽힘 반경이 60mm 인 원형관 모재부의 측정 정도와 굽힘 후 중심부 단면 압축부의 정도 변화를 나타냈다. 연신율이 비교적 크고 항복비가 상대적으로 낮은 STS304TIG 와 STS201ERW 소재가 경화율이 높으므로 가공성 향상에 유리함을 알 수 있다. 같은 용접 조건을 기준으로 할 때, 상대적으로 경도값이 낮고 가공 경화율이 높은 STS304 TIG 소재가 STS201TIG 소재보다 가공성이 우수함을 판단할 수 있다. 또한 비슷한 모재의 경도값을 갖는 STS201ERW 와 STS409 ERW 소재를 비교해 볼 때 상대적으로 낮은 항복비, 높은 연신율을 갖고 가공 경화율이 높은 STS 201ERW 가 가공성이 우수하다.

4. 결론

본 연구는 최종 액압 성형된 제품의 성형성에 영향을 미치는 예비 굽힘 공정에서 가공된 4가지 스테인리스 강관들의 굽힘 시 특성을 실험적 접근을 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 용접된 스테인리스 원형 관재의 굽힘 시, 일반적인 관재 굽힘과 같이 응력수준이 상대적으로 높은 소재가 스프링 백 양이 더 크게 나타난다.

(2) 스테인리스 강의 용접부는 열 영향부의 경화로 인해 부분적인 연신율을 감소시키거나 경화부의 비율이 튜브 전체에 있어서 작으므로 굽힘 부단면 형상에 미치는 영향은 전체 공정으로 볼 때 미미하다.

(3) 동일한 소재에서 굽힘 반경이 커질수록 단면 난형도가 작아진다. 난형도는 소재의 연신율로 인한 유동 변형이 최소가 됨을 보여주는 것으로써, 굽힘 공정 시 굽힘 부 내/외측의 불균일한 소성유동으로 발생한다.

(4) 용접선 위치를 달리한 두께 감소율은 용접부의 부분적인 연신율 감소를 야기시켜 용접선의 방향이 중간부일 때보다 인장부와 압축부일 때가 두께 감소율이 높은 경향을 보였다. 벽두께 변화가 심할 경우 후속 액압 성형 시에 성형성에 영향을 미치므로 예비 굽힘 시 용접선 방향은 중요하게 고려되어야 한다.

(5) 소재의 강도, 항복비, 연신율, 경도 및 가공경화율의 종합적인 관점에서 볼 때 용접 조건이 같을 경우, STS304TIG 소재가 STS201TIG 소재보다 STS201ERW 소재가 STS409ERW 소재보다 가공성이 우수하다.

후 기

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

참 고 문 헌

[1] Muammer Koç, Taylan 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] Ho kook Lee, C. J. Van tyne, David field, 2004, Finite element bending analysis of oval tubes using rotary bender for hydroforming applications, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 168, pp. 327~335.

[3] Seong-Chan Heo, Woo-Jin Song, Tae-Wan Ku, Jeong Kim and Beom-Soo Kang, 2007, Study on Application of Forming Limit Criteria for Formability on Hydroforming Parts, Journal of the Korean Mechanical Science of Technology, Vol. A-31, No. 8, pp. 833~838.

[4] Hyun Jin Kim, Choon Man 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] L. Gao, M. Strano, 2004, FEM analysis of tube pre-bending and hydroforming, Journal of Materials Processing Technology, Vol.151, pp. 294~181.

[6] Jae-bong Yang, Byung-hee Jeon, Sook-IK Oh , 2000, Tube Bending Analysis for Hydroforming Process, Transactions of Materials Processing, Vol. 9, No. 3, pp. 249~256

[7] Jae-bong Yang, Byung-hee Jeon, Sook-IK Oh, 2001, tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 175~181.

[8] Seung Hee Lee, Byung Hee Jeon, Soo Ik 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.

[9] Nader Asnafi, Tomas Nilsson, Gunnar Lassel, 2003, Tubular hydroforming of automotive side members with extruded aluminium profiles, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 93~101.

[10] G. Khodayari, Edited by Muammer Koç, 2008, Hydroforming for advanced manufacturing, Woodhead Publishing Limited, pp. 181~201.

[11] Wenyun Wu, Ping Zhang, Xiaoqin Zeng, Li Jin, Shoushan Yao, Alan A. Luo, 2008, Bendability of the wrought magnesium alloy AM30 tubes using a rotary draw bender, Materials Science and Engineering A 485, pp. 596~601.