

2차원 튜브벤딩의 단면 변형에 관한 실험적 연구: 인장, 벤딩 시퀀스 및 벤딩 각도 중심으로

하태광^{1,*}

An Experimental Study on Cross-sectional Deformation in 2D Tube Bending: Stretch, Bending Sequence and Bending Angle

T. Ha

(Received July 25, 2023 / Revised August 2, 2023 / Accepted August 2, 2023)

Abstract

While tube bending is a conventional forming technique, it is still used to make curved products for load-bearing members or aesthetically pleasing parts in various manufacturing industries such as automotive, aerospace, and others. Whole or local deformation of the final product such as springback, distortion, or local buckling are of interest in metal forming or precision manufacturing. In this paper, the factors affecting the cross-sectional deformation are explored. A 5-axis stretch bending machine was used for two-dimensional bending with extruded AA6082-T4 rectangular tubes. Three different bending sequences were employed: stretch before bending, stretch after bending, simultaneous bending and stretch. Furthermore, by considering both the stretch and bending angle, cross-sectional deformation was also analyzed. It was observed that employing stretch bending techniques can effectively reduce cross-sectional deformation and contribute to overall quality enhancement. Through this study, it was revealed that these factors have an impact on the cross-sectional deformation of the tubes.

Keywords : Cross-sectional deformation, Profile bending, Stretch, Bending sequence, Bending angle

1. 서 론

곡선 형태의 튜브는 자동차, 조선, 항공 등과 같은 여러 산업군에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 일반적으로, 이러한 곡선 형태의 튜브를 만들기 위하여 벤딩공정이 사용되는데 로터리 드로우 벤딩, 프레스 벤딩 등과 같은 방법이 있다[1]. 하지만 성형 후 제품의 탄성 회복이나 단면의 변형 및 두께 변화 등과 같은 치수 품질과 관련된 결함들이 발생할 수도 있다. 또한, 압출 공정으로 생산된 튜브의 경

우 외관 치수가 정밀하지 않기 때문에 벤딩공정 이후의 치수 또한 영향을 받게 되어 제품의 품질을 저하시킬 수도 있다.

벤딩 후 원래 상태로 회복하려는 스프링백 현상은 오랜 기간 연구가 진행되어 왔으며, 제품을 인장시켜 벤딩모멘트를 줄이고 스프링백을 감소시킬 수 있는 인장 벤딩도 개발되었다[2]. 일반적인 벤딩에서는 하나의 벤딩금형을 사용하여 금형의 형태대로 제품을 성형하지만[3, 4], 치수 품질을 향상시키기 위하여 두 개의 회전할 수 있는 금형을 사용하는 벤딩도 활발히 연구되고 있다. 또한, 2차원 인장 벤딩에서 스프링백을 예측할 수 있는 연구가 수행되었고[5], Frenet-Serret formula를 적용하여 3차원 인장 벤딩에서의 스프링백을 예측하였다[6]. 사각형 튜브의 새깅을 상계해석법을 사용하여 예측하거나[7], 벤딩

1. 텍사스A&M대학교 융합공학과
노르웨이과학기술대학교 기계공학과
현. 한화에어로스페이스 레이저체계팀 선임연구원
#Corresponding Author: Texas A&M University
Norwegian University of Science and Technology
(current affiliation, Laser system team, Hanwha Aerospace),
E-mail: hataekwang@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9810-6660

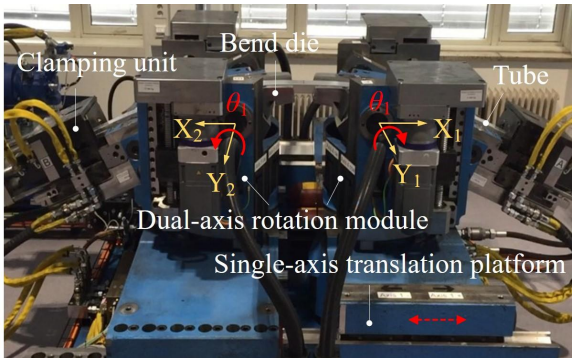


Fig. 1 Advanced stretch bending machine ($\theta_1=25^\circ$)

하중 경로가 스프링백과 새깅(sagging)에 미치는 영향도 연구되었지만[8], 다양한 인자들에 의한 단면 변형에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았다.

벤딩 후의 제품은 벤딩공정과 같은 인자들에 의해서도 국부적인 변형이 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 인장 벤딩장비를 사용하여 2차원 벤딩의 공정변화가 프로파일 단면 변형에 어떠한 영향을 주는지 파악하였다. 인장, 벤딩 시퀀스 및 벤딩 각도를 변수로 설정하고 튜브의 단면 변형에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석하여, 제품 품질을 향상시킬수 있도록 자료를 제시하고자 한다.

2. 사각 단면 튜브의 2차원 벤딩

2.1 인장 벤딩

서론에서 언급한 바와 같이, 두 세트의 금형을 이용하는 벤딩장비를 Fig. 1에 나타내었다. 각각의 금형 벤딩 반경은 약 1800mm이고 수평 및 수직으로의 2축 회전이 가능하다. 그리고 1축 이송이 가능한 플랫폼을 가지고 있어 점선 화살표 방향으로 움직일 수 있도록 설계되어 있다. 따라서, 5축 자유도를 가지면서 개별적으로 제어할 수 있기 때문에 복잡한 형상의 제품도 유연하게 벤딩할 수 있다.

벤딩을 하기 위하여 튜브를 장비에 장착하고 clamping unit에 의해 튜브의 양쪽 끝부분이 고정된 후 성형을 하는데, Fig. 1은 Y_1 축과 Y_2 축을 기준으로 각각 25° 의 각도로 벤딩하는 공정을 보여주고 있으며, 본 연구에서는 2차원 벤딩만을 고려한다.

2.2 벤딩 시퀀스

Fig. 1의 벤딩 장비는 여러 축의 성형자유도를 지니고 있기때문에 다양한 벤딩 시퀀스를 적용하여

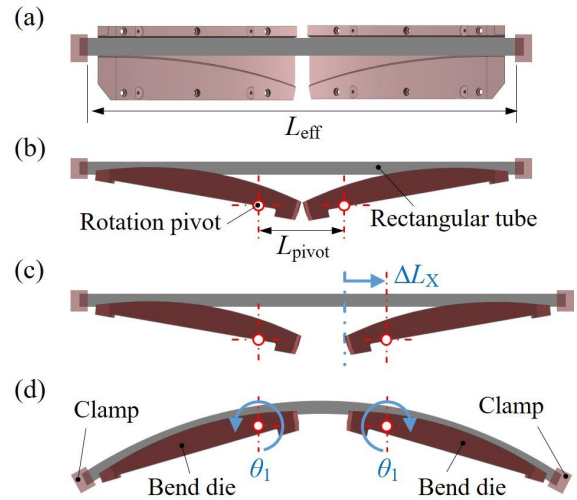


Fig. 2 Bending sequence: (a) top view; (b) front view; (c) pre-stretch before bending; (d) bending

Table 1 Sequences for stretch bending

	Bending process
SQ-1	Pre-stretch → bending
SQ-2	Bending → post-stretch
SQ-3	Simultaneous process (bending & stretch)

튜브를 벤딩할수 있다.

튜브를 인장한 후 벤딩하는 공정을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)와 (b)는 튜브가 벤딩금형에 장착되어있는 평면도와 정면도를 보여주고 있으며, L_{eff} 는 clamp에 의해 고정되는 부분을 제외한 실제 성형가능한 튜브의 길이이고 L_{pivot} 은 대칭으로 마주한 두 금형의 회전축 사이의 거리를 나타낸다. Fig. 2(c)는 벤딩하기 전 튜브를 인장 하는 공정이며 ΔL_x 는 Fig. 1의 single-axis translation platform의 이동량이 된다. 다음 공정으로는 각 회전축을 중심으로 벤딩금형이 회전시켜 금형의 형상대로 튜브가 벤딩된다.

Table 1에서 인장 벤딩을 위한 시퀀스들을 간략하게 분류하였다. 벤딩 전에 인장하는 공정을 SQ-1, 벤딩 후에 인장을 수행하는 공정을 SQ-2, 그리고 인장과 벤딩을 동시에 수행하는 공정을 SQ-3로 각각 명칭 하였다.

3. 실험

3.1 실험 소재

실험에 사용한 소재는 AA6082-T4로써 폭 60mm,

Table 2 Mechanical properties of AA6082-T4

	$E(\text{GPa})$	$K(\text{MPa})$	n	ε_0
SQ-1	72	501	0.26	0.0092

높이 40mm, 두께 3mm의 사각단면의 튜브이다. 모서리 내측 및 외측부 둥글기 반지름은 1mm와 2mm 이고, 1900mm 길이의 튜브를 사용하였으며 1%와 2%의 인장을 위한 튜브는 절단하여 사용하였다.

해당 소재의 물성치는 인장실험을 통하여 도출하였으며, 소성 구간에서의 응력-변형률 관계는 식 (1)에서와 같이 Swift식을 사용하여 나타내었다. ε_0 와 ε_p 는 탄성 및 소성변형률로써 각 파라미터값은 Table 2에 나타내었다.

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon_e, & (\text{elastic region}) \\ \sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n, & (\text{plastic region}) \end{cases} \quad (1)$$

3.2 실험 방법

첫 번째 실험은 인장과 벤딩 시퀀스에 따른 단면 변형 파악을 위하여 θ_1 을 25°로 설정하고 Table 1과 같이 SQ-1, SQ-2, SQ-3의 3가지 방법으로 벤딩을 하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 본 연구에 사용된 벤딩 장비는 1축 이송이 가능한 플랫폼(Fig. 1 참조)이 있기 때문에 사각 튜브를 인장할수 있다. 따라서, SQ-1, SQ-2, SQ-3의 인장공정에서 사각 튜브 길이의 0%, 1%, 2%만큼 인장하였다. 인장량 0%는 인장 공정이 없는 것을 의미하며 해당 튜브의 유효길이 L_{eff} 는 1835 mm이다. 인장을 부여하기 위하여 인장량 0%의 튜브를 절단하여 1%와 2%의 인장에 사용하는데, 절단된 각각의 튜브를 1%와 2% 인장할 경우 L_{eff} 는 1835 mm가 되어 인장량이 없는 0% 튜브의 L_{eff} 와 동일하게 된다.

두 번째 실험은 인장과 벤딩 각도에 따른 소재의 단면 변형을 파악하기 위하여 Table 1의 SQ-1을 적용하고, θ_1 은 5°, 15°, 25°의 3가지 경우를 사용하여 단면 변형을 파악하였다. 첫 번째 실험과 동일하게 0%, 1%, 2%의 3가지 튜브 인장량을 고려하였다.

3.3 단면 변형 측정

소재의 단면 변형을 측정하기 위하여 새깅, 폭, 높이를 Fig. 3과 같이 측정하였다. 튜브의 길이 방향의 대칭면을 기준으로 A, B, C 3개소를 버니어 캘리

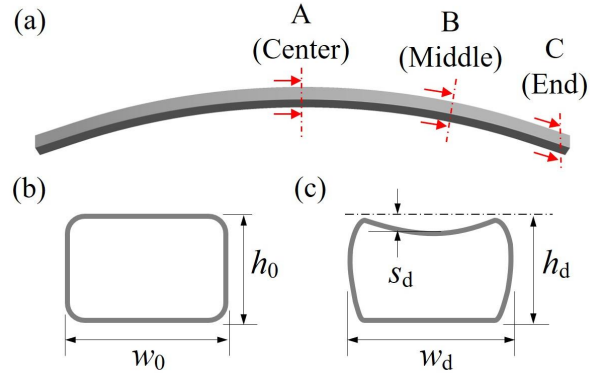


Fig. 3 Measuring local deformations: (a) measurement points; (b) initial shape; (c) shape after forming

퍼스를 사용하여 측정하였으며 A는 튜브의 대칭면, B는 대칭면 기준으로 튜브의 중간 부분, C는 클램핑 되는 끝단 부분이다. Fig. 3(b)는 초기 상태의 소재 단면 형상으로 w_0 와 h_0 는 튜브의 폭과 높이를 나타낸다. 단면 변형은 A, B, C 위치에서 Fig. 3(c)와 같이 s_d , w_d , h_d 를 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 인장과 벤딩 시퀀스에 의한 변형

Fig. 4는 인장과 벤딩 시퀀스에 따른 벤딩된 샘플들을 나타내고 있으며, 각각 세 번의 벤딩을 반복하였다. Fig. 4(a)의 0%와 2%의 pre-stretch의 경우 열 번의 벤딩을 반복적으로 수행하였고, 인장량 0%, 1%, 2% 세 가지 경우에 대해서 분석하였다. 그리고, 평균값과 표준오차를 사용하여 측정 결과를 나타내었다.

SQ-1의 0%와 2% pre-stretch 벤딩 샘플의 단면을 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었고, SQ-2의 2% post-stretch 벤딩 샘플의 단면은 Fig. 5(c)에 나타내었다. A, B, C는 Fig. 3(a)에서와 같이 튜브의 단면을 측정하는 위치이며, 튜브의 끝단 클램핑부위인 C에서는 A, B와 달리 새깅이 거의 없는 것을 알 수 있다.

인장과 벤딩 시퀀스에 따른 단면의 새깅값은 Fig. 6에 나타내었다. Table 1의 각각의 벤딩 시퀀스를 Fig. 6(a)-(c)에 나타내었으며 가로축의 A, B, C는 Fig. 3(a)의 새깅 측정 위치이며 인장량 0%, 1%, 2%에 대한 결과는 Line-0, Line-1, Line-2로 표시하였다.

Fig. 6(a)에서는 벤딩 전 0%, 1%, 2% 인장량에 의한 새깅의 변화는 유사함을 보였지만, Fig. 6(b)의 벤딩 후 튜브를 인장하거나 Fig. 6(c)의 인장과 벤딩을 동

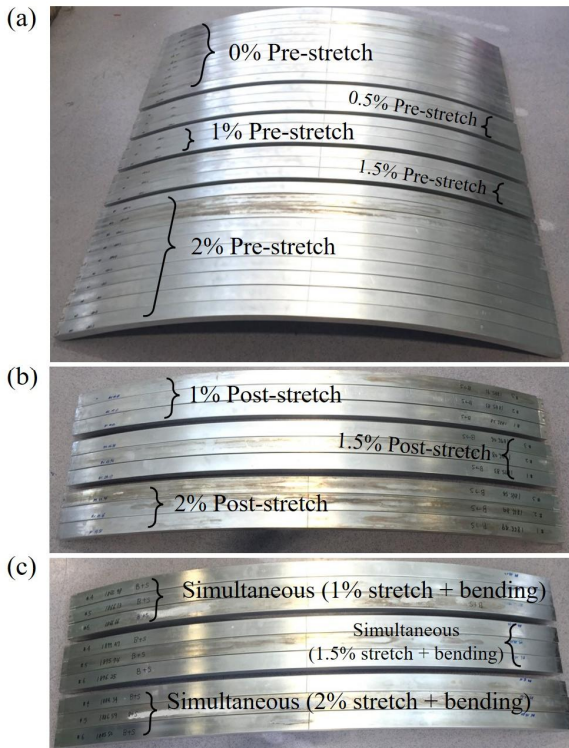


Fig. 4 Samples ($\theta_1=25^\circ$): (a) SQ-1; (b) SQ-2; (c) SQ-3

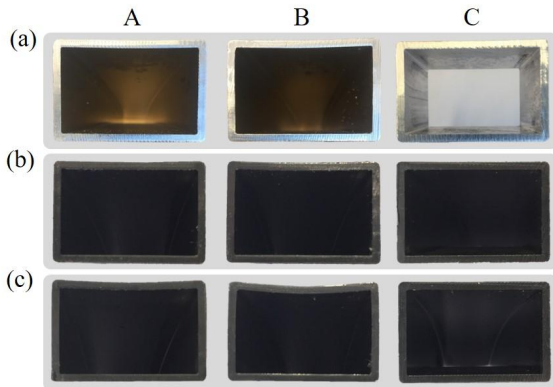


Fig. 5 Cross sections: (a) 0% pre-stretch in SQ-1; (b) 2% pre-stretch in SQ-1; (c) 2% post-stretch in SQ-2

시에 한 경우는 인장량이 커질수록 새깅에 많은 영향을 주었다. 또한, Fig. 6(b)의 벤딩 후 튜브를 인장하는 공정인 SQ-2는 다른 벤딩 시퀀스보다 새깅이 더 커지는 것을 확인하였다. 금형이 회전하며 벤딩할 때 Fig. 4(a)의 C 부분부터 벤딩되고 벤딩 각도가 커질수록 튜브의 B 부분을 지나 A 부분까지 벤딩되는 특징에 의해서, θ_1 이 25° 인 경우에는 B 부분의 새깅이 제일 큰 것을 알 수 있다.

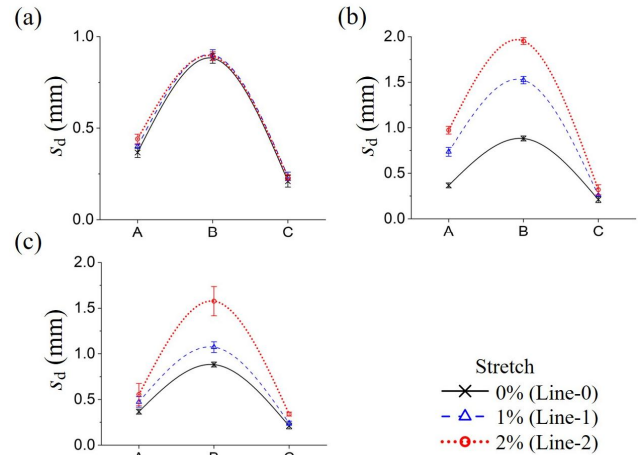


Fig. 6 Sagging: (a) SQ-1; (b) SQ-2; (c) SQ-3

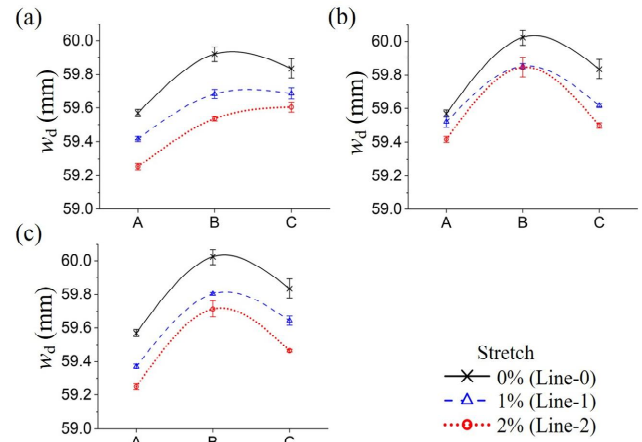


Fig. 7 Width: (a) SQ-1; (b) SQ-2; (c) SQ-3

Fig. 7에서는 단면의 폭을 그래프의 세로축에 나타내었다. 0% 인장량의 경우 벤딩 시퀀스에 의한 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 7(a)의 1%와 2% 인장의 경우, A와 B 영역의 폭은 벤딩 전 인장에 의해서 SQ-2와 3의 폭보다 많이 감소한 것을 알 수 있으며, 벤딩 시퀀스와 상관없이 인장량이 커질수록 단면의 폭 또한 전체적으로 감소하였다.

Fig. 8에서는 단면의 높이를 나타내었다. 전반적으로 C, B, A의 순서대로 높이가 감소하였고, C 영역은 클램핑에 의한 영향으로 감소량이 작음을 알 수 있다. Fig. 7과 마찬가지로 인장량이 증가할수록 높이 또한 감소하였지만, 벤딩 시퀀스에는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

4.2 인장과 벤딩 각도에 따른 단면 변형
벤딩 전에 인장 공정이 있는 SQ-1을 기준으로 0%,

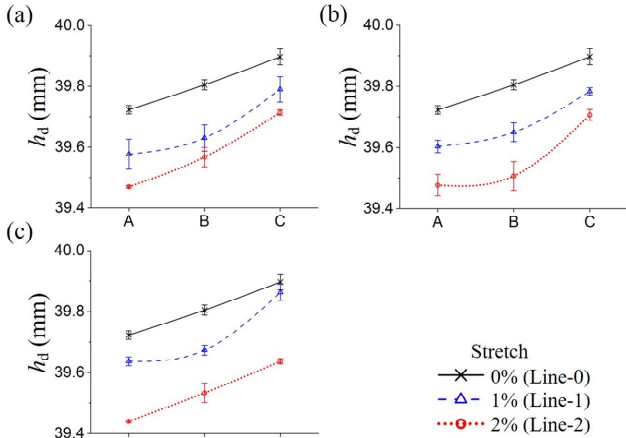


Fig. 8 Height: (a) SQ-1; (b) SQ-2; (c) SQ-3

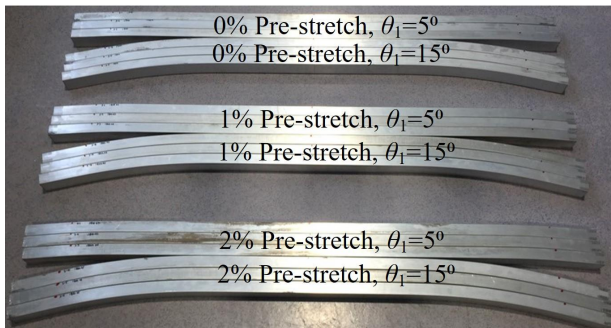


Fig. 9 Pre-stretched bent samples

1%, 2%의 인장량과 θ_1 이 $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 인 경우에 한하여 단면 변형을 파악하였다. Fig. 9와 같이 θ_1 을 5° 와 15° 의 각도로 조건당 세 번의 벤딩을 반복하였고, θ_1 이 25° 인 경우는 동일한 공정인 Fig. 4(a)의 데이터를 사용하여 분석하였다.

Fig. 10에서는 새깅 측정 결과를 나타내었다. Fig. 10(a)는 θ_1 이 5° 인 경우로 대부분의 변형은 클램프와 B 영역 사이에서 발생하므로 A 영역은 새깅에 덜 민감함을 알 수 있지만, 인장량이 커질수록 새깅 또한 커짐을 알 수 있다. Fig. 10(b)에서는 1%의 인장량에 의한 새깅이 0%와 2%의 인장에 의한 새깅보다 크지만, Fig. 10(b)와 (c)에서는 인장에 의한 새깅은 큰 차이가 없었다. 하지만, 벤딩 각도가 증가할수록 새깅이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11은 단면의 폭을 나타내며, 인장량이 커지고 벤딩 각도가 증가할수록 폭은 감소하였고, Fig. 12의 단면 높이 변화와 유사한 경향을 보였다. θ_1 이 5° 인 경우, 0% 인장량에서는 높이 변화가 거의 관찰되지 않았고, Fig. 11과 마찬가지로 인장량이 증가할수록

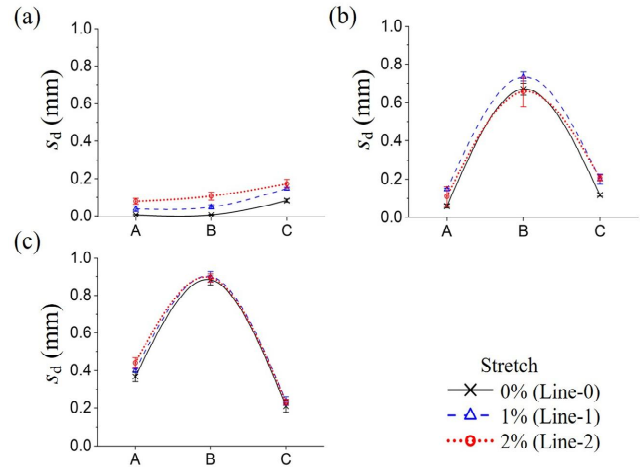


Fig. 10 Sagging: (a) $\theta_1=5^\circ$; (b) $\theta_1=15^\circ$; (c) $\theta_1=25^\circ$

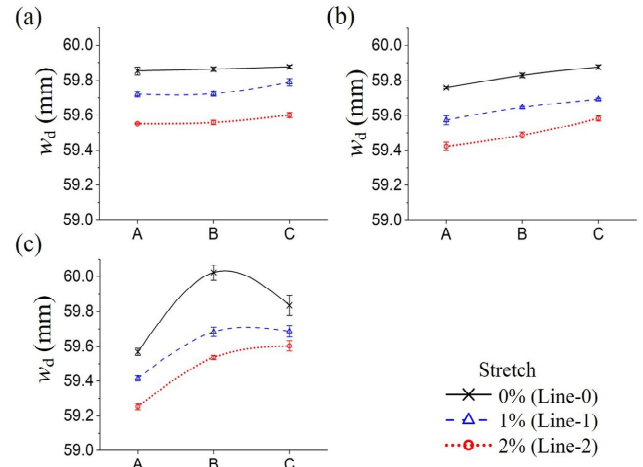


Fig. 11 Width: (a) $\theta_1=5^\circ$; (b) $\theta_1=15^\circ$; (c) $\theta_1=25^\circ$

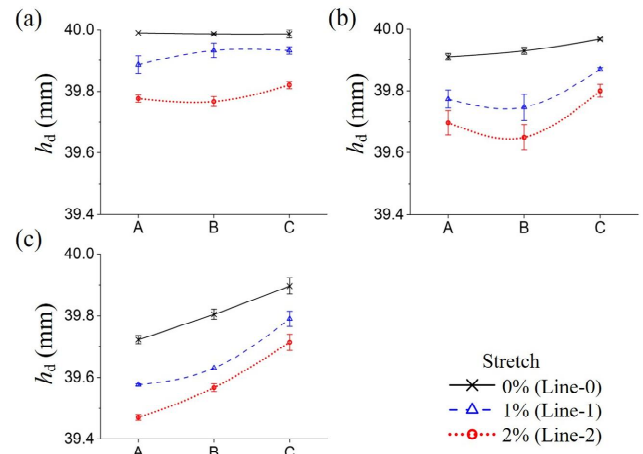


Fig. 12 Height: (a) $\theta_1=5^\circ$; (b) $\theta_1=15^\circ$; (c) $\theta_1=25^\circ$

Table 3 Cross-sectional deformation by stretch increase

	s_d	w_d	h_d
SQ-1	-	▽	▽
SQ-2	△	▽	▽
SQ-3	△	▽	▽
5° (θ_1)	▲	▼	▼
10° (θ_1)	▲	▼	▼
25° (θ_1)	-	▼	▼

높이는 감소하는 방향으로 변형이 발생하였다. 또한, 벤딩 각도가 증가할수록 변형이 많이 발생하기 때문에 단면의 높이 또한 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 11(a)의 Line-1을 제외할 경우, 벤딩 각도가 커질수록 B 영역의 높이가 먼저 감소하고 마지막으로 A 영역의 높이가 감소하였다.

Table 3에는 인장량이 0%에서 2%까지 증가할때, 벤딩 시퀀스와 각도에 따른 단면변형을 삼각형 심볼을 사용하여 정리하였다. 벤딩 시퀀스에 의한 영향은 △심볼을, 각도에 의한 영향은 ▲심볼을 사용하여 나타내었으며, 역삼각형은 초기 대비 치수가 감소하였음을 의미한다. SQ-1과 25°(θ_1) 벤딩공정을 제외하면, 인장이 커질수록 새깁은 증가하고, 폭과 높이는 감소함을 알 수 있다.

5. 결론

2차원 튜브벤딩에서 제품의 정밀한 치수를 얻고 치수 품질을 향상시키기 위하여 60 mm×40 mm, 3 mm의 AA6082-T4 사각 중공 튜브의 단면 변형에 관한 실험을 수행하였다. 5축 인장 벤딩 장비를 사용하여 벤딩 시퀀스 및 튜브 인장량에 따른 단면 변형을 파악하였다. 그리고 벤딩 각도와 튜브 인장량에 따른 영향도 고려하여 단면 변형에 영향을 미치는 요소들도 분석하였다. 인장, 벤딩 시퀀스 및 벤딩 각도에 따른 단면 변형에 관한 실험적 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 벤딩 전 인장(SQ-1), 벤딩 후 인장(SQ-2), 벤딩과 인장을 동시(SQ-3)에 하는 세 가지 벤딩 시퀀스에서 SQ-1이 단면 변형에 적은 영향을 주었다.

(2) SQ-1에서 새깁은 인장량이 증가하더라도 큰 영향은 없었으나, SQ-1, SQ-2, SQ-3에서 폭과 높이는

인장량 증가로 인하여 더 많은 변형이 발생하였다.

(3) 벤딩 각도가 증가할수록 새깁도 증가하고, 단면의 폭과 높이도 감소하였으며 동일한 벤딩 각도에서도 인장량 증가가 폭과 높이를 감소시켰다.

(4) 벤딩 전 인장 공정이 단면 변형에 적은 영향을 주지만, 인장량 증가는 단면 변형에 영향을 주기 때문에 생산 요구조건에 따라 인장량을 선정해야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 Norwegian University of Science and Technology(NTNU)의 장비를 이용하여 실험하였으며, 도움을 주신 NTNU의 Torgeir Welo, Geir Ringen, Jun Ma 교수님들과 Texas A&M University의 Jyhwen Wang 교수님께 저자는 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] F. Vollertsen, A. Sprenger, J. Kraus, H. Arnet, 1999, Extrusion, channel, and profile bending: a review, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 87, pp. 1-27, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00339-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00339-2)
- [2] J.E. Miller, S. Kyriakides, A.H. Bastard, 2001, On bend-stretch forming of aluminum extruded tubes—I: experiments, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 43, pp. 1283-1317, [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(00\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(00)00039-4)
- [3] A.H. Clausen, O.S. Hopperstad, M. Langseth, 1999, Stretch Bending of Aluminum Extrusions: Effect of Tensile Sequence, *J. Eng. Mech.*, vol. 125, pp. 521-529, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-399\(1999\)125:5\(521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-399(1999)125:5(521))
- [4] E. Corona, 2004, A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 46, pp. 433-448, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.03.010>
- [5] J. Ma, T. Welo, 2021, Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 160, 103653, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103653>
- [6] T. Ha, T. Welo, G. Ringen, J. Wang, 2023, On Kinematics in Sequential Three-Dimensional Stretch Bending: Analytical Springback Model, *J. Manuf. Sci.*

- Eng., vol. 145, 071009,
<https://doi.org/10.1115/1.4057027>
- [7] H. Zhu, K.A. Stelson, 2002, Distortion of rectangular tubes in stretch bending, *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 124, pp. 886-890, <https://doi.org/10.1115/1.1511170>
- [8] J. Ma, S.A. Tronvoll, T. Welo, G. Ringen, 2022, On Dimensional Control in Rotary Stretch Bending of Aluminum Profiles: Loading-Path Effects, *Manuf. Lett.*, vol. 33, pp. 242-248, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.031>