[논문] 한국소성가공학회지, 제 26 권 제 1 호, 2017
Transactions of Materials Processing, Vol.26, No.1, 2017
https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.1.11

맨드렐을 이용한 엘보우 성형 공정해석

오일영[1] · 박성환[1] · 박준영[1] · 이성훈[1] · 이의용[2] · 문영훈[#]

Process Analysis of Elbow-shaped Tubes using a Mandrel

I. Y. Oh, S. H. Park, J. Y. Park, S. H. Lee, E. Y. Lee, Y. H. Moon
(Received September 8, 2016 / Revised January 12, 2017 / Accepted January 16, 2017)

Abstract

In this study, process analysis of elbow-shaped tubes using a mandrel has been performed. To reach the final shape within the dimensional tolerance, the process analysis has been performed at various processing parameters such as tube dimensions, the curved cutting surface and the radius of curvature. The area outside the boundary of the target shape was expressed as a quantitative index to analyze the formability. The validation experiments have also been performed in order to increase the reliability of the process analysis. For the processing of elbow-shaped tubes, it is preferable to make the angle of the portion where the punch touches the tube smaller than the opposite angle. And the convex cutting surface is advantageous due to the increased contacts between the punch and the tube ends during the bending process. Elbow tube having larger radius of curvature shows higher dimensional accuracy due to the relatively uniform strain distribution.

Key Words : Mandrel, Elbow Tube, SUS304, Thickness Distribution, Finite Element Analysis

1. 서 론

튜브 소재는 항공우주, 조선, 자동차, 에너지 등 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 적용되는 부품으로써 재료와 구조 측면에서 높은 강도와 성능, 경량화를 갖춘 튜브 소재가 요구되고 있다[1]. 튜브 굽힘 기술은 튜브 형상, 소재와 성형 공차 등 다양한 요구에 부응하여 개발되어 왔다[2~4].

튜브 굽힘에 존재하는 문제점은 성형 중 튜브의 내호면과 외호면에 각각 발생하는 복잡하고 불규칙한 압축 및 인장응력이 소재에 주름, 찢어짐, 단면 비틀림과 스프링백 등 복합적인 결함을 야기한다. 튜브 성형과 관련된 제조 분야에서 이러한 물리적 현상들을 정확히 예측하고 효율적으로 제어하기 위한 연구들이 진행되어 왔다[5~10]. Li[5]는 주름, 두께 감소와 단면 비틀림에 대해서 튜브와 금형 사이의 간격에 따른 굽힘 거동을 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. Yang[6]은 곡률이 작은 굽힘 공정에서 발생되는 여러 가지 결함들로부터, 마찰력의 효과에 대해 실험과 유한요소해석을 통해 분석하였다. Kami[7]는 Levenberg–Marquardt 알고리즘에 기반을 둔 인공 신경 회로망 모델과 유한요소해석을 통해 실험 결과와 비교하여 굽힘 공정에서 발생하는 주름을 예측하였다. Zhang[8]은 굽힘 곡률과 내부 압력이 잠재적 주름 발생에 영향을 미치고 윤활제가 튜브 두께 분포에 상당한 관련이 있다는 것을 실험적으로 분석하였다. Goodarzi[9]는 작은 굽힘 곡률을 가진 튜브 전단 굽힘 공정에서 초기 두께에 따른 굽힘 특성을 튜브 두께 감소와 단면 변형 측면에서 분석하였다. Ren[10]은 굽힘 공정에서 용접부와 열 영향부가 굽힘 성형성에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 맨드렐을 이용한 튜브 굽힘 공정

1. 기계공학부 정밀가공시스템전공, 부산대학교
2. 품질보증팀, ㈜에스티밴드
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l University, E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

에서 발생되는 주름과 공정 후 튜브의 끝단부 불균일을 방지하기 위해 초기 튜브 형상을 제어하여 결함을 해결하고자 한다. 유한요소해석을 통해 공정 중에 재료의 유동을 예측하고 이를 초기 소재의 형상에 반영하여 최종 목표 형상에 근접한 성형품을 얻고자 하였다. 초기 형상을 정의하고 튜브의 치수, 끝단부 형상과 곡률 반경을 공정 변수로 하여 각각의 경우에 대해 해석을 실시하였다.

2. 선행공정해석

본 연구에서는 직경 267.mm, 두께 4mm를 갖는 엘보우 튜브 성형 특성을 분석하였다. 최종 목표 형상은 90도의 각도를 갖는 엘보우(elbow) 튜브이며, 공정 시스템은 맨드렐을 이용하여 곡률을 가진 다이 내에 튜브를 펀치로 밀어내어 굽히는 방식이다. 실제 공정에서 공급되는 튜브의 초기 형상에 따라 최종 제품의 형상에 많은 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는 원하는 엘보우 튜브를 성형하기 위한 초기 소재의 형상적인 측면을 분석하고자 한다. 상용 해석프로그램인 ABAQUS™를 이용하여 초기 소재 형상에 대한 최종품의 형상을 구현하고, 목표 형상에 도달하기 위해서 여러 공정 변수를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 실제 공정과 비슷한 해석 조건을 설정하고, 이를 바탕으로 공정 변수를 바꾸어 그 결과를 비교 분석하였다. 튜브의 치수, 절단면의 형상 및 곡률 반경을 공정 변수로 하여 각 조건별로 해석결과를 분석하였다. 튜브의 치수는 튜브 가압부의 각도를 변화시키며 4가지 조건으로 해석을 수행하였다. 절단 면의 형상은 오목, 볼록, 오목과 볼록이 복합적으로 적용시킨 4가지 조건으로 해석을 수행하였다. 곡률 반경은 튜브 직경의 1배, 1.5배, 2배로 3가지 조건으로 해석하였다.

2.1 선행공정 해석조건

기준 공정으로 선행 실험을 실시하여 얻은 성형 실험 데이터와 유한요소해석 결과와 비교하여 해석 신뢰성을 검증하였다. Fig. 1은 맨드렐을 이용한 엘보우 튜브 성형 공정을 도식적으로 나타낸 그림이다. 금형과 맨드렐의 곡률 반경 R은 곡률 중심점에서 맨드렐의 중심축까지의 거리로 튜브 직경과 동일하게 설계되었다. Table 1은 유한요소 해석에서 사용된 해석조건을 나타낸다.

Table 1 Analysis condition of FEM

Number of elements	24752
Type of elements	S4R (shell, 4 nodes, reduced intergration)
Friction factor	0.05
Punch speed	14.7mm/s

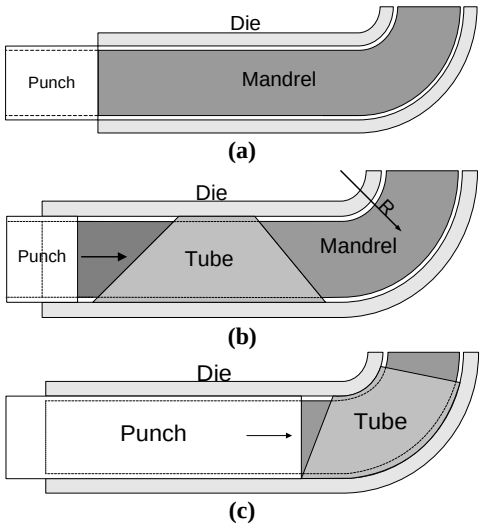

Fig. 1 Schematic diagram of the elbow bending process ; (a) before bending, (b) tube mounting, (c) after bending

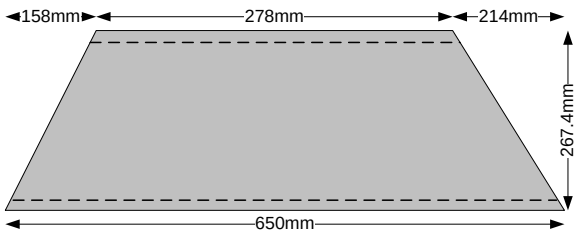

Fig. 2 Tube dimensions for the experiment

Table 2 Mechanical properties of SUS 304

YS (MPa)	TS (MPa)	E (GPa)	Poisson's ratio	Elongation (%)
215	505	193	0.29	70

공정 조건의 기준이 되는 튜브는 실제 현장에서 작업하는 것으로 치수는 Fig. 2에 나타내었다. 내호면과 외호면의 길이는 공정 중에 발생하는 압축응력과 인장응력을 고려한 치수이다. 해석에 사용된 소재는 외경 267.4mm, 두께 4mm의 SUS 304이고 기계적 물성치는 Table 2에 나타내었다.

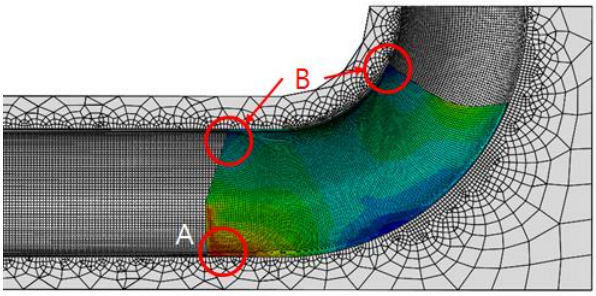

Fig. 3 Schematic drawing of the elbow mandrel process

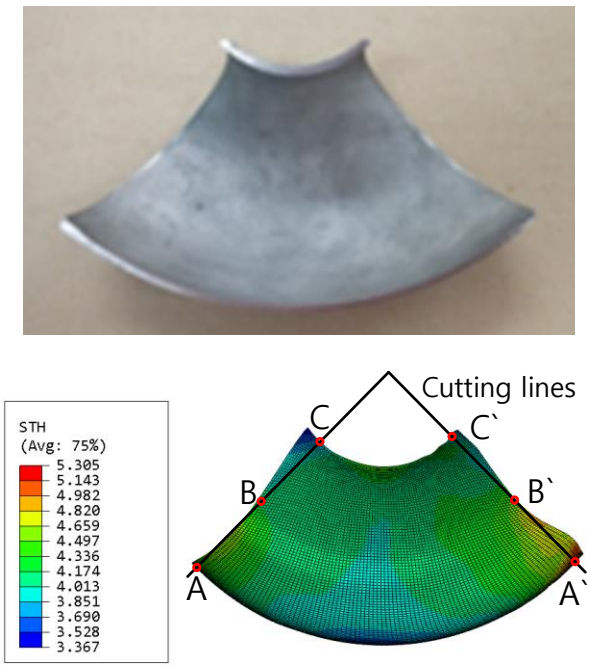

Fig. 4 Final shapes of specimen and simulation model

Table 3 Comparison of thickness distribution

Measuring spot	Thickness(mm)					
	A	B	C	A´	B´	C´
Experiment	4.8	4.4	3.5	4.5	4.8	4.4
Simulation model	4.3	4.4	3.8	5.1	4.5	3.8
Deviation	-0.5	0	+0.3	+0.6	-0.3	-0.6

2.2. 선행공정의 유한요소해석

Fig. 3는 엘보우 맨드렐 공정 중 소재 유동을 분석하기 위한 유한요소해석 결과이다.

펀치와 초기에 접촉되는 A 지점에 응력집중이 발생하며 두께가 상승하게 된다. 내측의 양 끝단인 B 지점은 펀치에 의해 구속을 받지 않기 때문에 내호면 중앙부에 곡률로 인한 압축 응력이 걸리면서 소재가 중심부로 유동하게 되어 두께가 감소하는 반면 내호면 중앙부는 두께가 증가한다. 외호면은 내호면에 비해 곡률이 크기 때문에 상대적으로 인장응력이 발생하면서 중앙부의 두께가 감소한다.

실제 가공품과 시뮬레이션 모델의 최종 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 또한 가공품의 각 부위별 두께는 Fig. 4에 표시되어 있는 지점을 마이크로 미터로 측정하였고, 유한요소해석 데이터와 비교한 것을 Table 3에 나타내었다. 두께 분포와 최종 형상을 비교하였을 때 유한요소해석 결과는 실제 공정과 평균 8.7% 수준의 오차를 보였으며, 이는 본 연구의 유한요소해석이 신뢰할 만한 수준임을 의미한다.

유한요소해석 결과, 두께 분포 범위는 3.55~5.20mm로 나타났고, 펀치와 맞닿는 부위가 상대적으로 두꺼웠다.

3. 유한요소해석

3.1. 공정 변수별 유한요소 해석조건

공정 변수별 유한요소해석에서 사용된 튜브 치수는 공정변수의 영향에 초점을 맞추기 위해 공정 중에 발생하는 압축응력과 인장응력을 고려하지 않은 내호면과 외호면의 길이로 해석하였다. 튜브의 내호면과 외호면의 길이는 다이 곡률의 내호면과 외호면의 길이와 일치시켰다.

3.1.1 튜브 치수

튜브의 치수를 공정변수로 나타낸 해석조건을 Fig. 5, 6과 Table 4에 나타내었다. 각 조건은 펀치와 접촉하는 튜브 끝단부의 각도 a를 변화시킨 형상을 나타낸다. 튜브의 우측만 펀치에 의해 힘을 받기 때문에 좌측과 소재 유동의 차이를 보일 것이라 생각된다.

펀치에 닿는 우측부의 경사각이 작아지고 좌측부의 경사각이 커지는 경우를 해석한다. 해석을 통해 튜브 양단의 최종 형상을 비교하는 것이 목적이다.

3.1.2 튜브 끝단부 형상

튜브의 끝단부 형상을 공정 변수로 나타낸 해석조건을 Fig. 7에 나타내었다. 튜브의 내호면과 외호면의 길이 차이와 절단면의 곡률차이로 인한 튜브 양단의 최종 형상을 분석하였다. Case1과 2는 각각

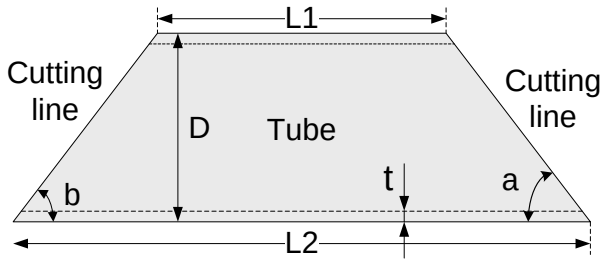

Fig. 5 Schematic drawing of the tube dimension

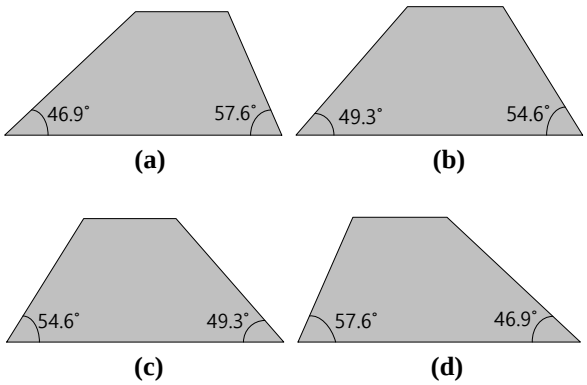

Fig. 6 The tube shapes for respective cases; (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4

Table 4 Dimensions of tubes

Case	L1	L2	a	b
1	210mm	630mm	57.6˚	46.9˚
2	210mm	630mm	54.6˚	49.3˚
3	210mm	630mm	49.3˚	54.6˚
4	210mm	630mm	46.9˚	57.6˚

오목과 볼록한 형상을 나타낸다. Case 3과 4의 경우 내호면과 외호면의 중심을 기준으로 위아래 곡률 방향을 달리 하였다. 4가지 Case는 각 Case는 각각의 형상을 비교한다는 목적보다는 각 형상이 가지는 특성이 미치는 영향에 초점을 두고 해석을 실시한다.

3.1.3 금형의 곡률 반경

금형의 곡률 반경에 따라 유동 특성을 알아 보고자 Fig. 8과 같이 소재 직경의 1배, 1.5배, 2배로 금형과 맨드렐의 곡률 반경을 변화시켰다. 이를 통해 내호면과 외호면의 곡률 반경의 차이가 성형성에 미치는 영향을 분석하였다.

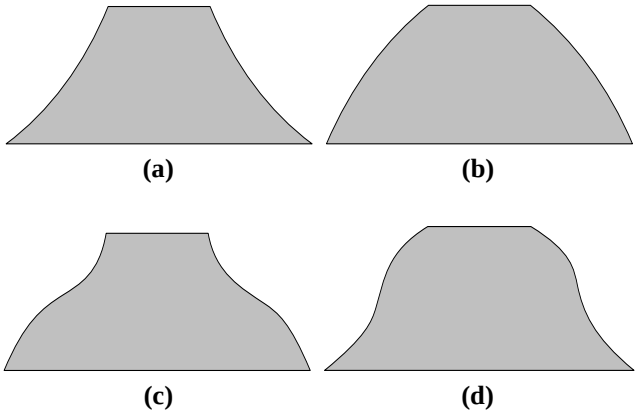

Fig. 7 The tube end profiles; (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4

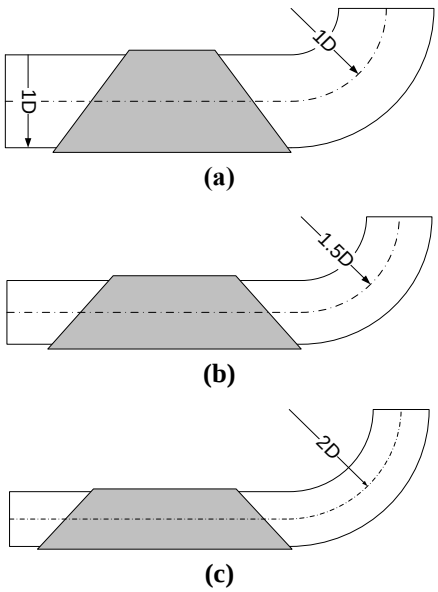

Fig. 8 Various radii of curvature of mandrels; (a) R=1D, (b) R=1.5D, (c) R=2D

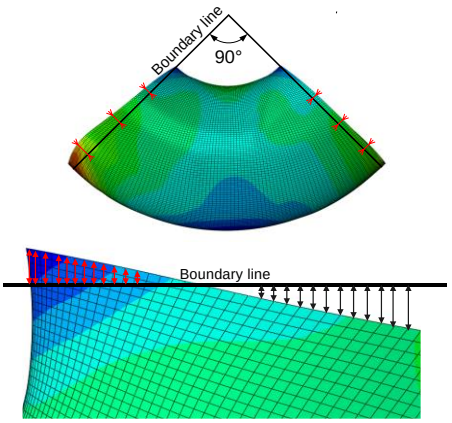

Fig. 9 Boundary lines of the target shape

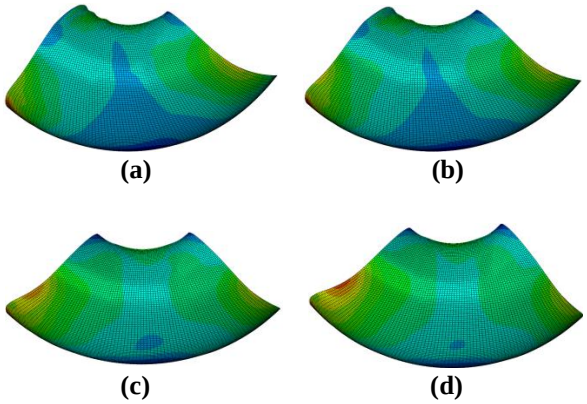

Fig.10 Formed shapes for respective cases; (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4

3.2. 최종 형상의 정량적 분석

해석을 통해 얻어진 튜브의 최종 형상을 정량적 지표로 비교하기 위해 목표 형상의 튜브 끝단부 경계선에서 벗어난 소재의 면적을 분석하였다. Fig. 9는 목표 형상의 경계선을 나타내고, 튜브 끝단부 노드와 경계선의 수직 거리를 계산한 데이터를 적분하여 면적을 구했다. 면적은 양쪽 끝단부에서 구한 면적을 더하였다.

3.2.1 튜브 치수

튜브 치수 별로 4가지 조건의 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 펀치의 힘을 받는 좌측 입구 쪽에 비해 우측이 압축응력을 덜 받기 때문에 양 단의 균일한 형상을 얻기 위해서는 치수를 조정해 줄 필요가 있다. 각 조건은 소재의 내호면 위치를 우측으로 20mm씩 옮겨서 해석한 결과이다. 목표 형상의 경계선을 벗어난 면적을 계산한 결과는 Table 5에 나타냈다. 조건 3이 가장 작은 값을 나타냈고 목표 형상에 근접한 형상을 나타내었다.

추가적으로 각 조건별 두께의 최대, 최소, 평균을 Table 6에 나타내었다. 내호면 위치로 인해 펀치와 닿는 좌측부의 경사각이 작을수록 상대적으로 심한 변형을 받게 되면서 최대 두께가 상승한다.

조건 1과 2의 경우 튜브 좌측 상단을 보면 주름이 발생한다. 이는 튜브의 좌측부 경사각이 클수록 발생되는데, Fig. 11을 보면 공정 초기에 A 지점에서 튜브 좌측 하단을 펀치가 밀어주지만 소재 유동 중에 B 지점에서 좌측 상단에 펀치의 영향을 받기 때문이다. 튜브의 좌측 상단은 공정 중에 소재 유동으로 인해 두께가 4mm 이하로 줄어들게 되는데 펀치의 힘을 받으면서 주름이 발생하게 된다.

Table 5 Area outside and inside the boundary of the target geometry

Case	1	2	3	4
Area (mm^2)	34990	21791	16392	22533

Table 6 Thickness distributions

Case	Max(mm)	Min(mm)	Average(mm)
1	5.19	3.63	4.16
2	5.19	3.63	4.17
3	5.16	3.53	4.12
4	5.13	3.52	4.12

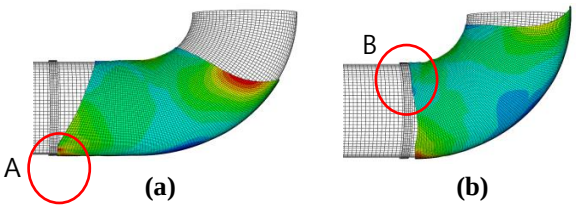

Fig.11 Changes of punch contact in the process; (a) before, (b) after

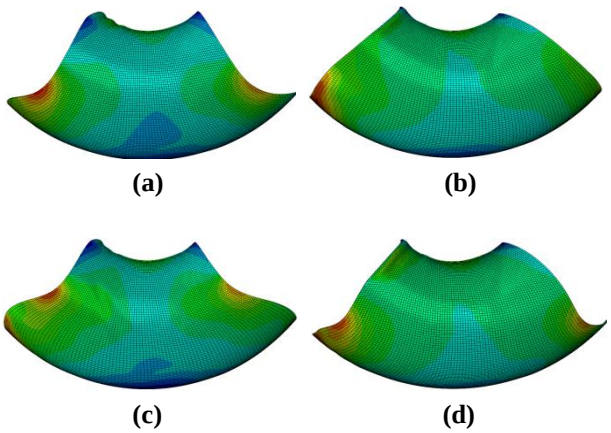

Fig.12 Formed shapes for respective cases; (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4

Table 7 Area outside and inside the boundary of the target geometry

Case	1	2	3	4
Area (mm^2)	32280	31356	32484	33550

3.2.2 튜브 절단면 형상

튜브 절단면 형상 별로 최종 형상과 표준 편차를

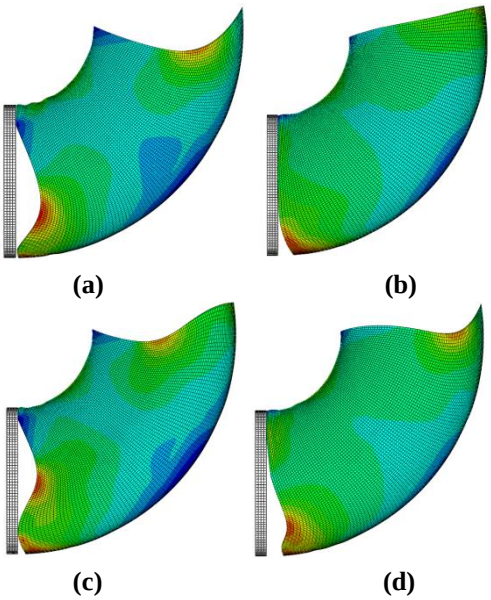

Fig.13 The contacts between the punch and tubes for respective cases; (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4

Fig. 12와 Table 7에 나타내었다.

또한 공정이 끝나는 시점에서 펀치와 튜브의 접촉상태를 Fig. 13에 나타내었다. 결과적으로 절단면이 볼록한 조건 2가 상대적으로 접촉상태가 균일하고 면적 값이 가장 작았다. 볼록한 절단면이 펀치로 인해 접촉부위가 완만하게 점점 평탄화 되면서 이상적인 형상을 만들었다.

3.2.3 곡률 반경

Fig. 14는 곡률 반경에 따른 해석결과를 나타낸다. Table 8은 각 곡률 별 표준 편차이다. 내호면과 외호면의 길이와 곡률반경 차이가 소재 유동의 불균일을 일으키는데, 곡률 반경이 클수록 그 차이가 감소하면서 소재 유동과 두께 편차가 완만하여 성형성이 좋은 결과가 나타났다.

4. 결론

(1) 맨드렐을 이용한 엘보우 튜브 성형시 초기 투입되는 튜브의 형상에 따라 펀치와 소재의 접촉 상태가 달라지고 곡률 반경에 따라 소재의 유동 편차가 변하므로, 금형과 맨드렐의 곡률 반경이 정해지면 소재의 내호면과 외호면의 길이는 응력상태를 고려하여야 한다.

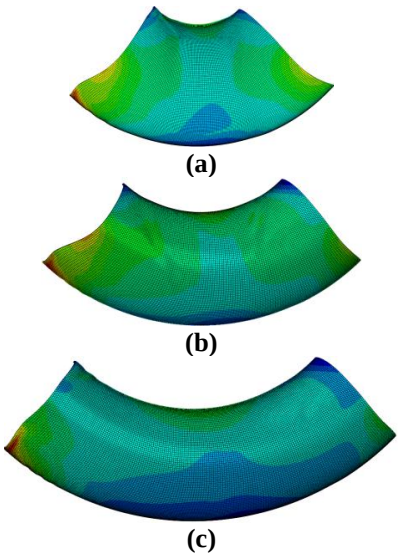

Fig.14 Formed shapes for respective cases; (a) R=1D, (b) R=1.5D, (c) R=2D

Table 8 Area outside and inside the boundary of the target geometry

Radius	R=1D	R=1.5D	R=2D
Area (mm^2)	39880	22988	13007

(2) 내호면의 위치는 튜브의 중간 지점을 기준으로 펀치와 닿지 않는 부위로 치우치는 것이 좋은데, 이는 펀치가 직접적으로 힘을 가하는 튜브 끝단에서 변형이 상대적으로 크기 때문에 튜브의 반대편 끝단부와 형상의 균형을 맞출 필요가 있기 때문이다.

(3) 튜브 절단면의 형상이 볼록할수록 최종 형상이 좋은데, 이는 공정 중에 튜브와 펀치의 균일한 접촉상태를 유지할 수 있기 때문이다.

(4) 동일 직경 대비 곡률 반경이 클수록 전체적인 소재 유동이 완만하여 균일한 두께 편차와 목표 형상으로 성형할 수 있다. 이는 곡률 반경이 커지면 튜브의 부피가 커지고 길이도 길어지기 때문에 곡률 반경이 작을 때보다 단위 면적당 변형률이 작아지기 때문이다.

(5) 굽힘 가공 후 타 부품과의 결합을 위해 튜브 끝단부에 트리밍(trimming)을 실시하기 때문에 끝단부 두께분포의 균일성이 중요하다. 본 연구 결과의 두께분포는 공인 규격을 만족하지만 제품의 안정성, 신뢰성과 재료이용 측면에서 중요하며 추후 균일한 두께분포를 위한 공정관리가 필요하다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

[1] H. Yang, Z. C. Sun, Y. Lin, 2001, Advanced Plastic Processing Technology and Research Progress on Tube Forming, J. Plast. Eng., Vol. 8, No. 2, pp. 83~85.

[2] H. YANG, H. Li, Z. Zhang, M. Zhan, J. Liu, G. Li, 2012, Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies, Chin. J. Aeronaut., Vol. 25, No. 1, pp. 1~12.

[3] F. Chinesta, E. Cueto, 2007, Advances in Material Forming: Esaform 10 Years on, Springer Sci. & Bus. Media, pp. 175~191.

[4] F. Vollertsen, A. Sprenger, J. Kraus, 1999, Extrusion, Channel, and Profile Bending: a Review, J. Mater. Process. Technol., Vol. 87, No. 1~3, pp. 1~27.

[5] H. Li, H. Yang, 2011, A Study on Multi-defect Constrained Bendability of Thin-walled Tube NC Bending under Different Clearance, Chin. J. Aeronaut., Vol. 24, No. 1, pp. 102~112.

[6] H. Yang, H. Li, M. Zhan, 2010, Friction Role in Bending Behaviors of Thin-walled Tube in Rotary-draw-bending under Small Bending Radii, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 15, pp. 2273~2284.

[7] A. Kami, B. M. Dariani, 2011, Prediction of Wrinkling in Thin-walled Tube Push-bending Process using Artificial Neural Network and Finite Element Method, Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf., Vol. 225, No. 10, pp. 1801~1812.

[8] Y. Zhang, D. Redekop, 2006, Shell Element Simulation of the Push Method of Tube Bending, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., Vol. 17, No. 1~2, pp. 301~304.

[9] M. Goodarzi, T. Kuboki, M. Murata, 2007, Effect of Initial Thickness on Shear Bending Process of Circular Tubes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 191, No. 1, pp. 136~140.

[10] N. Ren, M. Zhan, H. Yang, Z. Y. Zhang, Y. T. Qin, H. M. Jiang, X. P. Chen, 2012, Constraining Effects of Weld and Heat-affected Zone on Deformation Behaviors of Welded Tubes in Numerical Control Bending Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 212, No. 5, pp. 1106~1115.