

Inner groove tube의 U형 Draw-Bending

가공기술에 관한 연구

강홍식*·김동성**·허신**·홍성인***

Manufacturing Technique on the U Type Draw-Bending of Inner Groove Tube

H.S. Kang, D.S. Kim, S. Hur and S.I. Hong

Abstract

The purpose of this study is to investigate the manufacturing technique on the U type Draw-Bending of inner groove tube. The U type tube requires the quality of product that satisfy sufficient conditions for a heat exchanger. The mandrel components act the important roles that prevent wrinkles and keep the shape of cross section of bended tube at bending process. We performed the FEM simulation using LS-DYNA software and the bending test of inner groove tube and then, compared bending simulation with bending test results about mandrel ball diameter, mandrel position and optimal clearance between mandrel and tube.

Key Words : draw bending, copper, mandrel, inner groove tube, LS-DYNA, shpb

1. 서 론

현재 열교환기의 국내 산업현장 생산 시스템은 부분적으로 자동화 시스템이 도입되어 있지만, 많은 부분이 노동집약적인 방법에 의존하여 제품을 생산하기 때문에 전체적인 시스템의 자동화가 시급한 과제로 남아있고, 또한 생산장비를 수입하여 생산현장에 도입하기 때문에 성형기술의 발전과 자동화 시스템의 국산화 방안이 요구되고 있다. 열교환기의 주요 생산시스템은 냉각용 fin을 가공하는 fin press, 냉매가 흐르는 U형 튜브를 가공하는 Hair pin bending machine(HPBM) 등이 있다.

본 연구에서는 HPBM에서 성형되어지는 U형 튜브 굽힘 가공기술에 대하여 알아본다. U형 튜브를 굽힘 성형할 때 사용되는 맨드렐(mandrel)은 그 위치와 맨드렐 볼(mandrel ball)의 지름 그리고 맨드렐 볼과 튜브와의 간격이 제품성능에 큰 역할을 하게 된다.

동튜브 재료의 고속변형시험을 거쳐, 맨드렐의 조건에 따른 draw-bending과정을 3차원 해석하여 튜브 두께 변화, 튜브 주름 여부, 맨드렐 볼 위치 등을 고찰하였다. 또한 굽힘시험 결과와 해석결과를 비교·분석함으로써 HPBM국산화 개발에 직접 활용하고, U형 튜브의 굽힘 가공기술 발전에 기여하고자 한다.

* 충남대학교 대학원 기계공학과
** 한국기계연구원 신교통신시스템그룹
*** 충남대학교 기계공학과

2. 본 론

2.1 재료시험

U형 굽힘 가공시 사용되는 재료의 특성을 파악하기 위해 다음과 같이 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. ASTM 표준시험 기준에 따라 굽힘 가공시 사용되는 등방성 재질인 고순도 전기동(99.95%) 재료 OFHC Copper를 상온 가공후 잔류응력을 제거하기 위하여 온도 350℃로 질소분위기 속에서 3시간 유지 후 노냉시키는 열처리를 시행하여 인장시편과 충격시편을 제작하였다. 또한 Instron 만능시험기를 이용하여 준정적 인장시험을 수행하고, SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)장비를 사용하여 재료의 고속변형 시험을 수행했다.

OFHC copper의 준정적 인장시험의 결과는 Table 1에 서와 같이 항복강도는 시험속도 2.5 mm/min에서 265.0 MPa, 시험속도 400.0 mm/min에서 283.6 MPa이다.

Table 1 Quasi-static tensile test results of OFHC copper specimen

Velocity (mm/min)	Yield stress (MPa)	Strain-rate (/sec)
2.5	265.0	0.00167
400.0	283.6	0.267

또한 OFHC copper재료의 SHPB고속변형 시험결과로서 Fig. 1과 같은 변형률 속도 대 항복응력 곡선을 얻었 으며, 해석모델로 사용한 식(1)의 Cowper-Symonds 구 성방정식의 실험적 상수값인 p는 0.3, C는 700.0의 값을 구하였다.

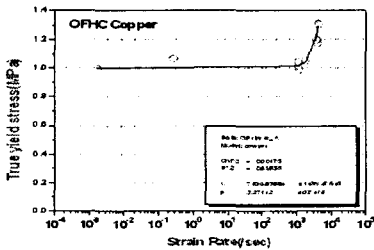


Fig. 1 Curve fitting of true yield stress vs strain rate of OFHC copper

$$\sigma_{yi}/\sigma_0 = 1 + [\dot{\epsilon}/C]^{1/p} \quad (1)$$

여기서, σ_{yi} 는 동적 유동응력, σ_0 는 정적 항복응력, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률속도를 나타낸다.

2.2 굽힘해석 및 고찰

튜브의 내경면은 열전달 표면적을 증가시키기 위해서 나선상의 홈(inner groove)으로 가공되어 있다. 하지만 홈이 0.03 mm 이하로 미세하기 때문에 해석시 홈이 존 재하지 않는 평동관으로 설정하였다.

튜브의 외경이 7.0 mm이고, 두께는 0.3~0.4 mm의 범 위를 갖으며, 굽힘 반경은 10.5 mm이다. tube의 0.1 mm 두께 차이는 bending machine으로 U형 튜브를 성형할 때 제품의 품질에 영향을 미치므로, 두께 변화에 따른 정확한 결과 값을 얻기 위해서 두께를 각각 0.30 mm, 0.35 mm, 및 0.40 mm로 구분하였다.

맨드릴 사용의 필요성 여부를 판단하는 식(2)가 Bend Factor를 사용하지 않아도 되는 범위인 11.7~15.6 이지 만 단면의 형상 변화가 크기 때문에 다음과 같은 조건에 따른 맨드릴을 가정하였다.⁽¹⁾⁽²⁾

Bend Factor

$$= \frac{\text{Outside Diameter}}{\text{Wall Thickness}} / \frac{\text{Bend Radius}}{\text{Outside Diameter}} \quad (2)$$

튜브 굽힘시 적합한 one-ball 맨드릴의 지름은 Table 2 와 같이 튜브의 안쪽 지름보다 몸체는 0.13~0.18 mm, 볼은 0.25~0.36 mm 작게 제작된다는 것을 참고하여, 튜브 두께 0.3~0.4 mm 일때의 맨드릴 볼 지름을 각각 6.1 mm, 6.0 mm, 및 5.9 mm 설정하여 해석하였다.⁽³⁾

Table 2 Ball & Body diameter of the mandrel

Wall thick	Ball diameter	Body diameter
0.3 mm	6.04~6.15 mm	6.22~6.27 mm
0.35 mm	5.94~6.05 mm	6.12~6.17 mm
0.4 mm	5.84~5.95 mm	6.02~6.07 mm

굽힘공정시 튜브 외측은 인장에 의한 두께 감소가 발 생되지만, 튜브 내를 흐르는 매질의 압력을 견디기 위해 두께 감소를 20 %를 넘지 않아야 한다.⁽⁴⁾ 그래서 우선 각 두께별로 맨드릴 볼 지름과 맨드릴 위치를 달리하여 해석을 하였다.

Fig. 2는 굽힘공정시 맨드릴 위치와 두께변화율과의 상관관계를 보여주고 있다. Fig. 2 에서와 같이, 맨드릴 볼 지름이 5.9 mm, 6.0 mm인 경우 튜브의 각 두께마다

두께 감소율 20 %이하의 맨드릴 위치 구간이 존재 하지만, 튜브 두께가 0.4 mm일 때 지름 6.1 mm의 볼을 사용하는 맨드릴의 위치가 어느 곳에 있더라도 두께 감소율은 20 %를 넘게 되는 것을 볼 수 있고, 지름이 6.0 mm일 경우 감소율 20 %이하 구간이 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 두께 0.4 mm에서 맨드릴 볼 지름이 증가할수록 두께 감소율도 증가하는 경향이 나타난다.

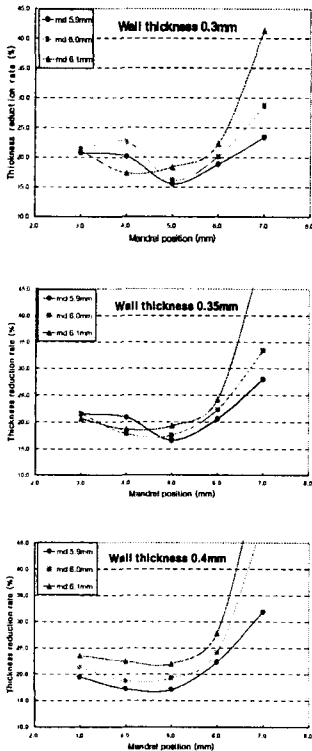
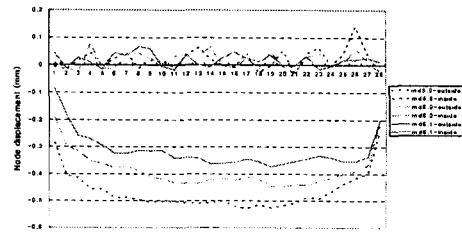


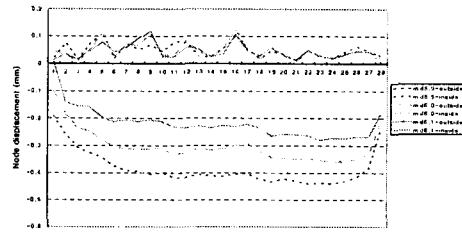
Fig. 2 The relation of mandrel position and thickness reduction ratio with (a) 0.3 mm (b) 0.35 mm (c) 0.4 mm tube wall thickness

두께 감소율 20 % 이하의 튜브로 굽힘되는 맨드릴 위치를 분석하여 각 두께마다 튜브에 주름의 발생이 최소인 공통된 위치를 설정하고, 그 설정된 위치에서의 튜브 굽힘부 외측과 내측을 해석한 결과를 Fig. 3으로 나타냈다. Fig. 3에서 보여주는 굽힘부 외측과 내측의 질점 변위는 튜브 단면 형상을 나타내는 결과 값으로 맨드릴 볼 지름이 커질수록 변위 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 튜브의 두께가 증가할 수록 같은 맨드릴 볼 지름에서 변위가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 지름 증가와 두께 증가에 따른 해석 결과 값을 살펴보면, 맨드릴 볼

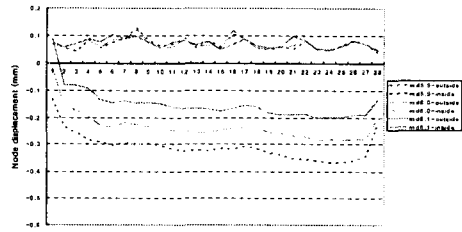
과 튜브 내경면의 간격에 따른 결과 값이라는 것을 알 수 있다.



(a) Tube wall thickness 0.3mm



(b) Tube wall thickness 0.35mm



(c) Tube wall thickness 0.4mm

Fig. 3 Comparison of node displacement that node locate inside and outside of tube bending radius

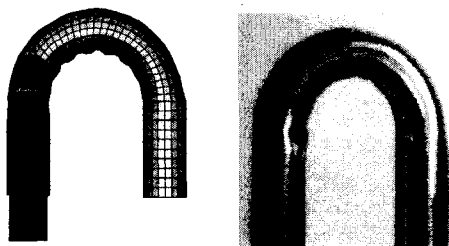
즉, 맨드릴 볼과 튜브 내경면의 간격이 작아 질수록 변위 값이 작아진다는 것을 알 수 있는데, 이것은 맨드릴 위치가 고정되어 있을 때 튜브와 볼 간격이 커질수록 단면의 형상이 타원형으로 변하고 간격이 가깝게 될수록 원형에 가깝게 변한다는 것을 알 수 있다.

2.2 굽힘시험 및 결과

컴퓨터 해석과 동일한 조건으로 Hair pin bending machine을 이용하여 0.3~0.4 mm 두께의 inner groove tube를 draw-bending 하였다.

One-ball 맨드릴의 볼 지름은 6.0 mm, 5.9 mm로 가공되었으며, 맨드릴 위치는 각각 3.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm로 설정하여 시험하였다. 튜브의 두께를 임의로 조절할 수 없기 때문에 두께 변화에 대한 시험은 컴퓨터 해

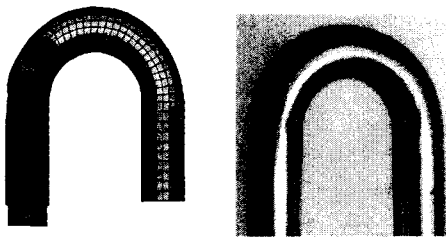
석 결과에서 얻은 각 튜브 두께에서의 20 %이내의 두께 감소율이 공통적으로 나타나는 맨드릴 위치인 5.0 mm에서 볼 지름을 변경하여 시험한 후 두께를 측정하여 감소율을 만족하는지를 확인하였다. 튜브 굽힘 외측의 변화를 측정하기 위해 굽힘 가공후 단면의 형상을 측정하였으며, 내측의 주름은 눈으로 확인하는 방법을 사용하였다. 두께 변화는 맨드릴 볼 지름이 5.9 mm, 6.0 mm일 때, 측정하는 튜브의 변형전 두께는 각 0.35 mm, 0.36 mm으로 측정되었고, 굽힘후 변형된 단면의 두께는 0.29 mm로 같게 나타났다. 이 같은 결과는 컴퓨터 해석과 같이 두께 감소율 20 %이내의 조건을 만족시키며 맨드릴 볼 지름이 작을수록 두께 감소율이 작은 것을 보여 주고 있다.



(a) scarce 3.0 mm progress of the mandrel



(b) correct 5.0 mm progress of the mandrel



(c) excessive 6.0 mm progress of the mandrel

Fig. 4 Shape comparison of tube bending through mandrel position

Fig. 4는 컴퓨터 해석과 굽힘시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 4 (a),(b),(c)는 볼 지름이 5.9 mm인 맨드릴의 위치를 각각 3.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm로 설정하였을 때 주름의 발생과 튜브단면의 변형 관계를 비교한 결과를 보여 주고 있다. 해석과 시험 값이 맨드릴 위치가 만족되는 위치까지 도달하지 못하였을 때 주름이 나타나며, 또한 굽힘부 단면의 지름도 원형에 비해 많이 축소된 같은 결과 값을 볼 수 있다. 또한 맨드릴이 초과하여 진행했을 때 튜브가 맨드릴 body에 걸려 비대칭형상이 됨을 알 수 있다.

3. 결론

Draw-bending 공정으로 튜브 굽힘할 때 맨드릴의 조건에 따른 컴퓨터 해석과 굽힘시험을 바탕으로 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 굽힘공정시 맨드릴 볼 지름과 맨드릴의 위치 범위 그리고 튜브와 맨드릴 간격을 해석 및 고찰하여 두께 감소율이 20 %이내가 되는 외경 7.0 mm, 두께 0.35 mm의 U형 튜브를 생산하기 위한 맨드릴 볼의 지름이 5.9 mm~6.0 mm 범위임을 확인하였다.
- (2) 두께 감소율 범위에서 맨드릴 위치 변화를 주어 주름이 없고 단면형상이 원형에 가까운 최적의 U형 튜브를 성형하였다.

4. 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 지역특화 기술개발사업 중 공통핵심 기술개발사업인 "열교환기용 Hair Pin Bending Machine 국산화개발" (주관기관: 재건정밀) 사업의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) Laurence Oldacre, 1997, "Introduction to Tube Bending for Hydroforming Applications", TPA's 2nd Annual Automotive Tube Conference, pp.37~68.
- (2) 양재봉, 이한남, 전병희, 오수익, 1999, "Hydroforming을 위한 Tube bending에 관한 연구", 한국소성가공학회 1999 춘계학술대회논문집, pp.35~38.
- (3) American Society for Metals (ASM), 1969, Metals-Handbook, 8th edition, vol. 4(forming).
- (4) 산업기술개발 사업계획서, 2001, "열교환기용 Hair Pin Bending Machine 국산화개발", 재건정밀.