

Hair Pin Bending Machine 을 이용한 동 튜브 굽힘 성형가공에 관한 연구

강홍식*(충남대 대학원 기계공학과), 김동성(KIMM), 허신(KIMM), 홍성인(충남대 기계공학과)

A study about shape processing for the bend of the Copper-Tube that use Hair Pin Bending Machine

H. S. Kang(Graduate school. CNU), D.S .Kim(KIMM), S. Hur(KIMM), S. I. Hong(Mechanical Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the manufacturing technique on the U type Draw-Bending of inner grooved tube. This bending process make the U shape tube by Hair Pin Bending machine. 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 (드로우벤딩), Inner grooved tube (나선형 홈 튜브), Mandrel (맨드렐), U Shape tube (U 형 튜브), Split Hopkinson Pressure Bar (재료 고속변형 시험기).

1. 서론

국내 산업현장의 열교환기 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 국산화 방안이 요구되고 있다. 열교환기 부품의 주요 생산시스템을 살펴보면 냉각용 fin 을 가공하는 fin press 와, 냉매가 흐를 수 있는 U 형 튜브(tube)를 가공하는 HPBM(Hair Pin Bending Machine) 등이 있다. 이 장비들의 정확한 설계뿐만 아니라 굽힘 가공기술에 따라 열교환기의 성능 향상과 생산성을 향상시키는데 중요한 역할을 하므로 생산장비의 국산화를 위한 정밀한 굽힘가공 연구가 필요로 하다.

현재 국내에서는 튜브의 굽힘 가공에 대해 정밀한 형상을 제작하거나 Hydroforming 예비성형단계로서의 가공등 다양한 연구들이 이루어지고 있다.[1][2] 특히, Hydroforming 을 위한 예비성형단계의 경우 액압을 이

용하여 확장하는 형태를 사용하기 때문에 예비성형에 있어서 원하는 형태뿐만 아니라 튜브의 두께 분포가 매우 중요한 역할을 하게 된다. 하지만 많은 연구들이 굽힘시 재료에 대한 특성이 부각되어 있지 않고, 또한 고속변형에 따른 재료의 특성을 고려한 경우가 부족한 형편이다. 특히, 굽힘시험에 사용한 장비인 HPBM 은 고속회전에 의한 굽힘가공이 이루어지므로 재료의 고속변형 특성을 고려할 필요성이 있다. 또한 HPBM 에서 U 형 튜브를 굽힘 성형할 때 사용되는 맨드렐(mandrel)은 그 위치와 맨드렐 볼(mandrel ball)의 지름 그리고 맨드렐 볼과 튜브와의 간격이 제품성능에 큰 역할을 하므로 심도 있게 연구할 필요가 있다.

본 연구는 동 튜브 재료의 고속변형시험을 거쳐, 맨드렐의 조건에 따른 draw-bending 과정을 3 차원 유한요소해석을 통하여 튜브 두께 변화, 튜브 주름 여부, 맨드렐 볼 위치 등을 고찰하였다. 또한 굽힘시험 결과와 해석결과를 비교 및 분석함으로써 U 형 튜브의 굽힘 가공기술을 발전시키고 HPBM 국산화 개발에 직접 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 재료시험

U 형 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(Oxygen Free High Conductivity) Copper 를 상온 가공 후 잔류응력을 제거하기 위하여 온도 350℃로 질소 분위기 속에서 3 시간 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 copper 의 준정적 인장시험의 결과는 Table 1 에서와 같이 항복강도는 시험속도 2.5 mm/min 에서 265.0 MPa, 시험속도 400.0 mm/min 에서 283.6 MPa 이다.

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 copper 재료의 SHPB 고속변형 시험결과로서 Fig. 1 과 같은 변형률 속도 대 항복응력 곡선을 얻었으며, 해석모델로 사용한 식(1)의 Cowper-Symonds 구성방정식의 실험적 상수값인 p 는 2.27, C 는 710.0 의 값을 구하였다.

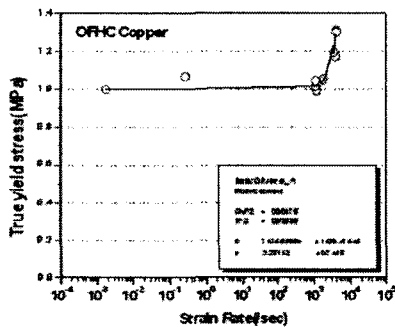


Fig. 1 Curve fitting of true yield stress vs strain rate of OFHC copper

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

여기서, σ_{yi} 는 동적 유동응력, σ_{ys} 는 정적 항복응력, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도를 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 존재하지 않는 평동관으로 설정하였다.

튜브의 외경은 9.52 mm, 7.0 mm 이고 두께는 0.3 ~ 0.4 mm 의 범위를 갖으며, 굽힘 반경은 10.5 mm 이다. 0.1 mm 두께의 오차범위는 bending machine 으로 U 형 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 mm 로 구분하였다.

맨드릴 사용 여부를 판단하는 식(2)에 의한 Bend Factor 는 11.7 ~ 15.6 으로서 맨드릴을 사용하지 않아도 되는 범위이지만[3], 본 연구 대상의 튜브는 단면형상 변화가 크기 때문에 이를 방지하기 위해 맨드릴을 사용하였다.

$$Bend\ factor = \frac{Outside\ diameter}{Wall\ thickness} / \frac{Bend\ Radius}{Outside\ diameter} \quad (2)$$

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 작으므로, 튜브 두께 0.3 ~ 0.4 mm 일 때의 튜브외경 7.0 mm 와 9.52 mm 에 대하여 맨드릴 볼 지름을 각각 6.1 mm, 6.0 mm, 5.9 mm 와 8.6 mm, 8.5 mm, 8.4 mm 로 설정하여 해석하였다.[4]

Table 2. Range of mandrel ball and body diameter

Tube Diameter (mm)	Wall Thickness (mm)	Ball Diameter (mm)	Body Diameter (mm)
Φ 7	0.3	6.04 ~ 6.15	6.22 ~ 6.27
	0.35	5.94 ~ 6.05	6.12 ~ 6.17
	0.4	5.84 ~ 5.95	6.02 ~ 6.07
Φ 9.52	0.3	8.51 ~ 8.67	8.74 ~ 8.79
	0.35	8.46 ~ 8.57	8.64 ~ 8.69
	0.4	8.36 ~ 8.47	8.54 ~ 8.59

굽힘공정시 튜브 외측은 인장에 의한 두께 감소가 발생되지만, 튜브 내를 흐르는 매질의 압력을 견디기 위해 두께 감소율 25%를 넘지 않아야 한다.[5] 그래서 우선 튜브 외경에 따른 각 두께 별로 맨드릴 볼 지름과 맨드릴 위치를 달리하여 해석을 하였다.

Fig. 2 는 굽힘공정시 맨드릴 위치와 두께변화율과의 상관관계를 보여주고 있다. Fig. 2 에서와 같이, 튜브 외경이 7.0 mm 인 경우는 Table 2 을 참고하여 설정한 맨드릴 볼 지름크기에서 모두 두께 감소율을 만족하는 맨드릴 위치범위가 존재한다. 하지만 외경이 9.52

mm 인 경우, 맨드릴 볼 지름이 8.6 mm 일 때 튜브 두께가 0.4 mm 이면 두께 감소율을 만족하는 맨드릴 위치가 존재하지 않는다. 또한, 맨드릴 볼 지름에 따른 두께 감소율만 살펴볼 때 맨드릴 볼 지름이 감소할수록 두께 감소율 25 %를 만족하는 맨드릴 위치 범위는 증가 하는 것을 볼 수 있다.

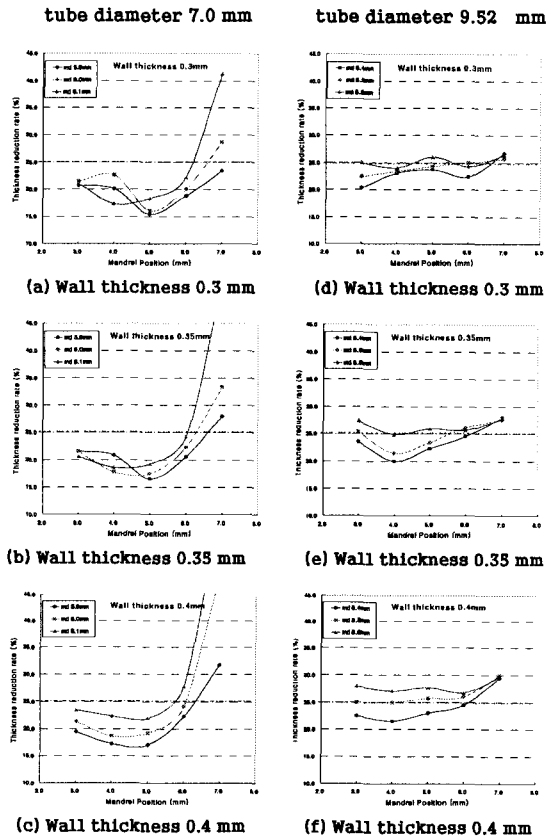


Fig. 2 The relation of mandrel position and thickness reduction ratio

굽힘후 두께 감소율을 25 % 이하를 만족하며, 주름이 없고 단면의 형상이 원형에 가까운 U형 튜브에 대한 결과를 얻기 위해 Fig. 3 과 같이 굽힘부 내측과 외측의 질점위치(node point)를 설정하였다.

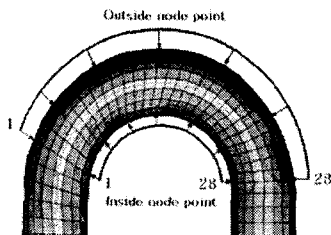


Fig. 3 Node point of inside and outside about bend-radius

그리고 단면의 형상이 전혀 변하지 않고 완전굽힘이 이루어진 가상튜브를 설정하고, 가상튜브를 기준으로 질점의 변위를 측정후 결과를 Fig. 4 와 같이 나타내었다. Fig. 4는 튜브 외경이 각각 7.0 mm, 9.52 mm 일 때, 두께변화에 대한 최적의 맨드릴 볼 지름 5.9 mm, 8.4 mm 결과를 나타낸 것이며, 최적의 맨드릴 위치는 5.0 mm 와 6.0 mm 임을 보여 주고 있다.

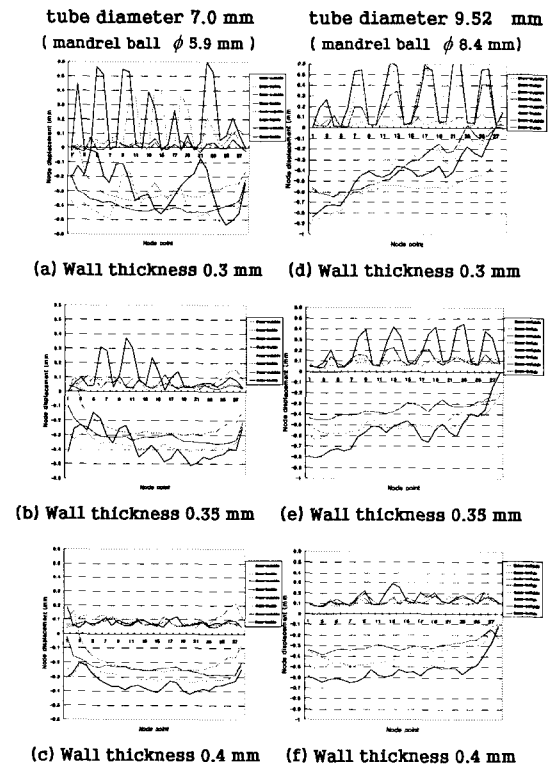


Fig. 4 Node displacement of inside and outside about tube bend-radius

2.2 굽힘시험 및 결과

컴퓨터 해석과 동일한 조건으로 Fig. 5 의 HPBM 을 이용하여 0.3 ~ 0.4 mm 두께범위를 갖는 inner grooved tube 를 draw-bending 하였다.

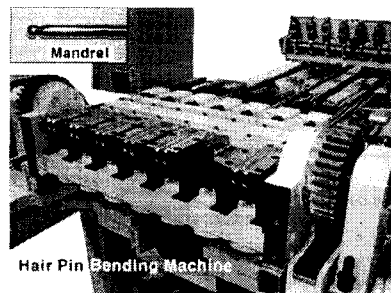


Fig. 5 Hair Pin Bending Machine and Mandrel

Fig. 5와 같이 one-ball 맨드렐의 볼 지름을 5.9 mm, 8.4 mm로 각각 가공하였으며, 맨드렐 위치는 각각 3.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm로 설정하여 시험하였다. 튜브의 두께를 임의로 조절할 수 없기 때문에 두께 변화에 대한 시험은 튜브외경 7.0 mm, 9.52 mm에 대하여 컴퓨터 해석 결과에서 얻은 각 튜브 두께에서의 25 %이내의 두께 감소율이 공통적으로 나타나는 각각의 맨드렐 위치 5.0 mm, 6.0 mm에서 볼 지름을 변경하여 시험한 후 두께를 측정하여 감소율을 만족하는지를 확인하였다.

튜브 굽힘 외측의 변화를 측정하기 위해 굽힘 가공 후 단면의 형상을 측정하였으며, 내측의 주름은 눈으로 확인하는 방법을 사용하였다. 두께 변화는 맨드렐 볼 지름이 5.9 mm, 8.4 mm 일 때, 측정하는 튜브의 변형전 두께는 각 0.35 mm, 0.36 mm으로 측정되었고, 굽힘후 변형된 단면의 외측 두께는 0.29, 0.28 mm로 같게 나타났다. 이 같은 결과는 컴퓨터 해석과 같이 두께 감소율 25 %이내의 조건을 만족시키며 맨드렐 볼 지름이 작을수록 두께 감소율이 작은 것을 보여 주고 있다.

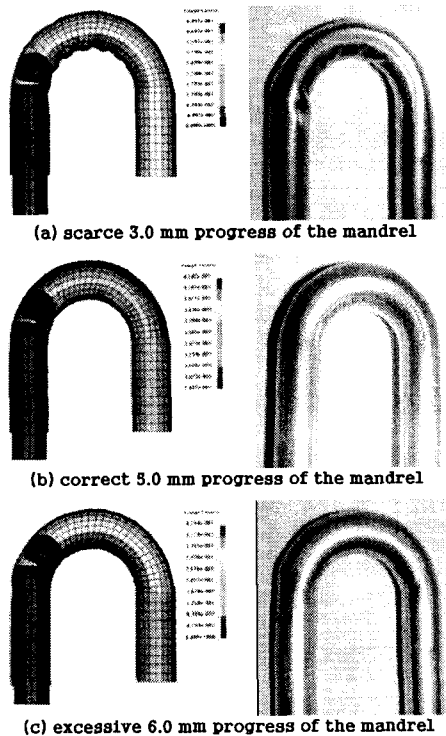


Fig. 6 Shape comparison of tube bending through mandrel position

Fig. 6는 컴퓨터 해석과 굽힘시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 6 (a),(b),(c)는 볼 지름이 5.9 mm인 맨드렐의 위치를 각각 3.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm로 설정하였을 때 주름의 발생과 튜브단면의 변형 관계를

비교한 결과를 보여 주고 있다. 맨드렐 위치 설정은 HPBM의 고정된 누름다이 앞면을 기준으로 맨드렐 볼 끝까지의 거리로 나타내었다. 해석과 시험 값이 맨드렐 위치가 만족되는 위치까지 도달하지 못하였을 때 주름이 나타나며, 또한 굽힘부 단면의 지름도 원형에 비해 많이 축소된 같은 결과 값을 볼 수 있다. 또한 맨드렐이 초과하여 진행했을 때 튜브가 맨드렐 몸체에 걸려 비대칭 형상이 됨을 알 수 있다.

3. 결론

Draw-bending 공정 생산장비인 HPBM을 이용한 튜브의 U형 굽힘에 대한 유한요소해석과 시험결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 외경이 7.0 mm, 9.52 mm인 튜브의 U형 굽힘 가공시 두께감소율(25%)을 만족하며 가공이 이루어지는 최적의 맨드렐 볼 지름은 각각 5.9 mm, 8.4 mm임을 알 수 있었다.

(2) 두께 감소율 범위에서 주름이 없고 단면형상이 원형에 가까운 최적의 U형 튜브를 성형하기 위한 맨드렐의 위치는 두께 0.1 mm의 오차범위와 맨드렐 볼 지름이 고정되는 것을 고려한 것으로, 누름다이 앞면과 맨드렐 볼 끝을 기준으로 튜브 외경이 7.0 mm, 9.52 mm일 때 각각 5.0 mm, 6.0 mm이다.

4. 후기

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

참고 문헌

- [1] 서영성, 김용완, 김종인, 2002, "나선형 증기 발생기 튜브의 정밀성형을 위한 스프링백 제어 연구", 한국소성가공학회지, 제 11 권 제 3 호, pp. 238 ~ 245.
- [2] 양재봉, 전병희, 오수익, 2000, "Hydroforming을 위한 굽힘 공정해석", 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 249 ~ 256.
- [3] Laurence Oldacre, 1997, "Introduction to Tube Bending for Hydroforming Applications", TPA's 2nd Annual Automotive Tube Conference, pp. 37 ~ 68.
- [4] American Society for Metals (ASM), 1969, Metals-Handbook, 8th edition, vol. 4(forming).
- [5] 산업기술개발 사업계획서, 2001, "열교환기용 Hair Pin Bending Machine 국산화개발", 재건정밀.