

맨드릴을 사용한 굽힘 성형시 헤어핀용 동관의 변형 해석

김광영*(한국기계연구원), 윤두표(석화MET)

Deformation analysis of copper pipe for hair pin under the bending forming using the Mandrel

K. Y. Kim(KIMM), D. P. Yun(Sukwha MET Inc.)

ABSTRACT

Hair pin bending machine is pipe forming machine consisting of heat exchanger product system. Hair pin produced by these machine is pathway of refrigerant and play a important role improving the performance and productivity of heat exchanger. The core technology of hair pin bending machine is forming the straight pipe into U-type without any defaults. Therefore, this paper study the relation between the pipe bending forming and the shape and position of mandrel using the elastic-plastic finite element analysis and provide a foundation technology for which developing the hair pin bending machine. The results are followed

1. Mandrel located in front of rotating center of bending die minimized the circular shape variation of copper pipe.
2. Diameter change of mandrel hardly effect the pipe shape.

Key Words : Pipe bending machine(관재 가공기), Mandrel(맨드릴), Finite element analysis(유한요소해석), Elastic-plastic analysis(탄소성해석)

1. 서론

Hair Pin Bending Machine은 열교환기 생산 시스템을 구성하는 관재 가공기계로서 이 기계로 생산되는 헤어핀은 냉매의 이동 통로로 열교환기의 성능과 생산성을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 현재 hair pin bending machine은 일본의 TAIYO사, 미국의 OAK사 등에서 개발되어, 에어컨의 경우 전세계의 생산량 18% 이상을 차지하고 있으나 국내의 경우 이에 관련된 기술은 전무한 상태이며 특히, 고가의 장비로 인해 초기투자의 비용이 높고, 급형 기술 및 설계 기술의 미비로 인하여 개발하지 못하며 전량을 외국에서 수입하므로 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

이러한 Hair Pin Bending Machine은 다열을 동시에 수행할 수 있는 굽힘 기술, 맨드릴 설계 및 가공 기술, 각종 열 교환기의 모델에 따른 피치(pitch) 변경방식의 자동화 기술이 필요하며, 특히 핵심기술은 관재의 재질과 다양한 선경을 가진 관재를 결함없이 U형으로 성형하여 정밀한 hair pin을 가공하는 관재

의 굽힘 기술이다. 관재 굽힘가공의 대표적인 방법은 압축굽힘(compressive type), 신장굽힘(ram type), 드로우굽힘(draw type)등이 생산현장에 적용되고 있으나, 본 연구에서는 가장 우수한 성형력을 가지는 드로우 굽힘방식을 채택하여, hair pin bending machine을 개발하고자 한다. 하지만, 굽힘반경이 적고 소재의 무게가 얇은 hair pin의 제품 특징으로 인하여 좌굴을 억제하는 맨드릴을 사용하여 제품을 가공하게 되는 데, 이러한 맨드릴은 완제품의 품질에 상당히 영향을 미치고 있으나, 이와 관련된 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 모델의 치수틀 기본으로 관재의 굽힘시 발생하는 찌어짐과 과팽창을 방지하기 위한 맨드릴의 위치에 따른 관재의 굽힘 거동과 굽힘시 발생하는 응력 및 관재의 단면 형상 변화를 유한요소해석을 이용한 탄소성 해석과 접촉해석을 통하여 구하고, 이후 다양한 선경을 가진 관의 굽힘에도 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 본 론

2.1 드로우 굽힘장치

유압 실린더를 이용한 랙과 피니언으로 구동하는 굽힘장치, 스트리퍼(STRIPPER) 장치, 맨드렐(MANDREL) 장치, 벤더 이송 장치, 셔터(SHUTTER) 장치가 있으며 본 연구에서는 굽힘에 직접적인 연관이 있는 맨드렐 장치에 대해 연구하고자 한다. 개발된 hair pin bendign machine의 형상을 Fig. 1에 나타내고 있다.

일반적인 Hair pin의 형상은 곧은 관재를 180°로 굽힌 것으로 기능은 열교환기의 냉매가 흐르는 관으로서 열전도성과 냉각용 핀(fin)과의 접촉성이 좋아야 하며, 또한 관내에 있는 냉매의 누출을 방지할 수 있도록 충분한 안전성이 갖추어져야 한다.

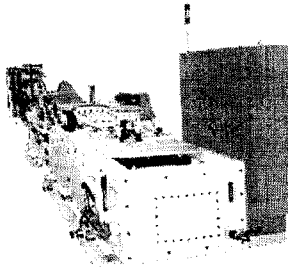


Fig. 1 The shape of draw type bending machine

2.2 유한요소해석

2.2.1 해석 모델

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 관재를 굽히기 위한 굽힘 다이(bending die)가 있으며, 또한 관재 내부에는 관재의 과도한 두께 감소를 방지하기 위한 역할을 하는 맨드렐이 존재한다. 그리고, 관재의 굽힘은 하부의 롤러가 굽힘다이의 중심축을 따라 180° 회전하게 되면 파이프가 굽힘 다이를 따라 굽힘을 일으키게 되고, 동시에 관재 내부에는 맨드렐 회전편을 중심으로 상하부 일정 각도로 회전이 가능한 맨드렐과 관재의 내부가 접촉을 일으키면서 국부적인 두께 변화없이 제품이 생성된다.

본 연구에서는 Fig. 3에서처럼 전체 모델을 메시하지 않고, 접촉이 발생되고, 또한 변형이 발생하는 부분만 간단하게 유한요소모델로 생성하였다. 맨드렐, 굽힘 다이와 회전다이는 모두 공구강이므로, 관의 소재인 동보다 매우 강성이 높다. 그러므로, 굽힘다이와 회전단이 본체는 거의 변형이 발생하지 않는다. 그래서, 굽힘 다이와 회전 다이는 접촉되는 표면에만 강체요소를 사용하여 변형이 발생하지 않도록 하였다. 또한, 관재는 비선형해석이 가능한 8절점 3자유도를 가지는 요소를 사용하여 메시를 하였다.

그리고, 각 부재들이 접촉하는 부분에는 접촉요소를 사용하여 부재들 사이에 발생하는 기계적 거동이 이루어지도록 해석을 수행하였다.

2.2.2 재료 특성

열교환기의 hair pin으로 사용되는 재료는 동으로 열전도율이 높으며, 또한 강도와 가공특성이 우수하여 열교환기에 많이 적용되고 있다. 실제로 사용되는 재료의 응력-변형률 선도(Stress-strain curve)를 인장 시험에서 구하고, 소성해석을 하기 입력값으로 실제 변형률보다는 적은 10%까지만 Fig. 4에 나타내었다. 맨드렐은 공구강으로 해석을 수행하였다.

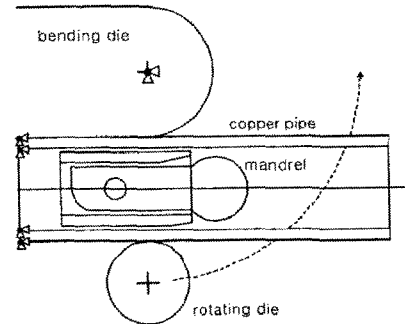


Fig. 2 Assemble shape and constraint of each part

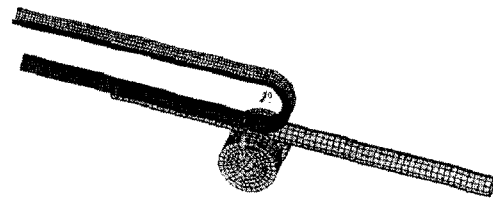


Fig. 3 Meshed shape of draw bending part with mandrel, bending die, copper pipe, etc.

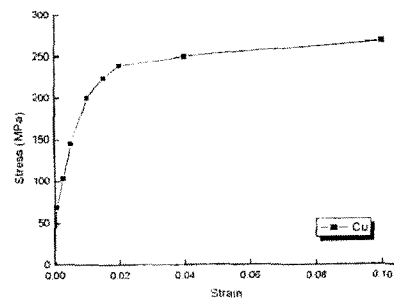


Fig. 4 Stress-Strain curve of copper for elastic-plastic analysis

3.2.3 하중 및 경계조건

관재에 비해 상대적으로 강성이 높은 볼러를 굽힘 다이를 따라 강제 변위시킴으로써 파이프가 밴딩을 일으킬 수 있도록 해석을 수행하기 위해, 우선 관 내부에 위치한 맨드릴은 권회부분의 회전방향만을 제외한 모든 부분을 고정하고, 자유롭게 회전이 가능하게 하였으며, 굽힘이 발생하는 초기에 맨드릴에 의한 관의 변형과 응력을 구하기 위해 회전 다이는 45° 만큼만 회전하도록 하였다. 그리고 관은 하부 다이에 의해서 아래방향으로 지지되고, 또한 관의 길이는 연장되어야 하므로, 관의 왼쪽끝은 모든 방향에 대해 전혀 움직임이 없도록 각방향의 변위를 고정하였다. 또한 굽힘 다이는 강체로 움직임이 전혀 없도록 고정하였다. Fig. 2에서는 굽힘 다이의 중심에 각 방향의 변위를 고정하는 것으로 나타내었고, 회전다이의 회전궤적은 점선으로 나타내었다.

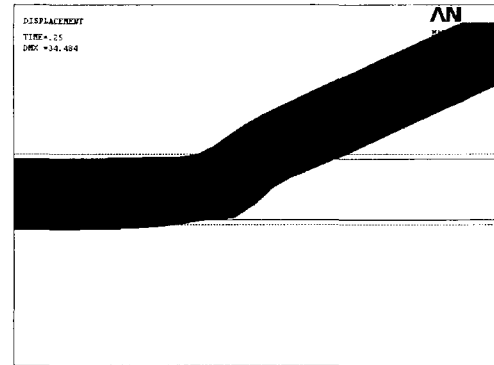
3. 결과 및 토의

맨드릴이 파이프의 회전 중심에서 어떠한 위치에 존재하느냐에 따라 접촉면적과 맨드릴 회전각의 영향으로 인하여 파이프의 밴딩이 영향을 받게 되므로 본 연구에서는 볼러의 회전중심과 맨드릴을 고정하는 핀의 회전중심의 간격과 맨드릴의 크기를 변화시키면서 관의 변형형상과 굽힘응력을 분석하였다.

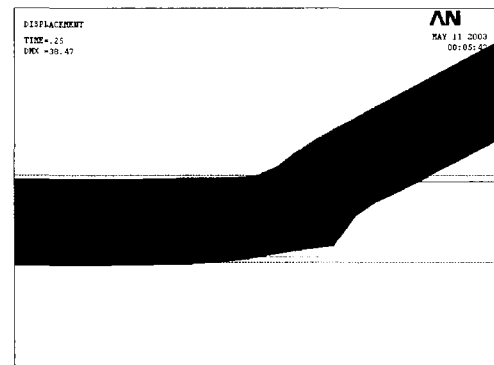
3.1 맨드릴 위치와 직경변화에 따른 변형

우선 맨드릴의 직경을 6mm로 고정하고, 맨드릴의 회전축 중심과 회전다이의 회전중심이 일치하는 경우를 중심으로 앞뒤로 0.5mm의 간격으로 2개씩 전체 모델을 5개로 설정하여 해석을 수행하였다. 각 모델의 변형된 형상을 Fig. 5에 나타내고 있다. 맨드릴의 회전중심이 -1mm 경우에는 맨드릴이 제대로 역할을 하지 못하여 관이 구부러지는 현상이 발생하고, -0.5mm에서는 맨드릴에 의하여 적절한 굽힘이 발생하고 있으며, 회전중심이 일치하는 경우에는 맨드릴에 의해서 과팽창이 발생이 나타나고 있으며, 이후 회전중심이 +0.5와 +1.0mm에서는 맨드릴에 의한 관의 과팽창이 발생하여 국부적인 두께변화가 심하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

그리고, 맨드릴의 직경이 5.8mm인 경우에는 직경이 6mm인 경우와 거의 유사한 변형 형상을 나타내고 있으나, 대체적으로 6mm인 경우보다 관의 구부러지는 현상이 초기에 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6과 7에서는 관의 길이에 따른 변형값을 나타내고 있다. 전체 길이 130mm중에서 맨드릴과 접촉하여 변형이 발생하는 40mm만을 확대해서 나타내었다. 그리고 변형된 값은 관의 내부 직경중 밑단이 변형되는 형상을 값으로 나타내었다.



(a) position : -0.5mm



(b) position : +1mm

Fig. 5 Deformed shape of pipe rotating to 45°

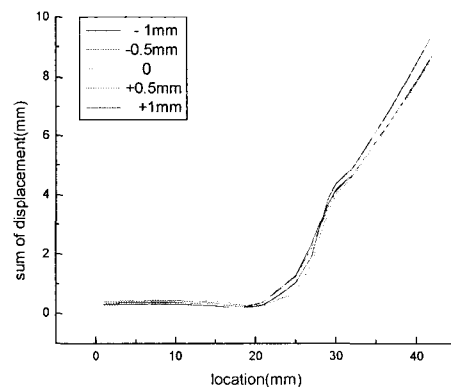


Fig. 6 Deformed value of inner pipe with mandrel diameter 6mm according to location of x-direction

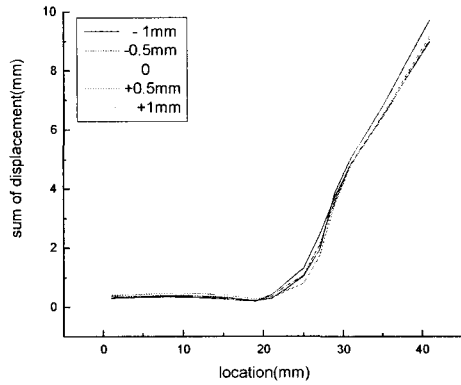
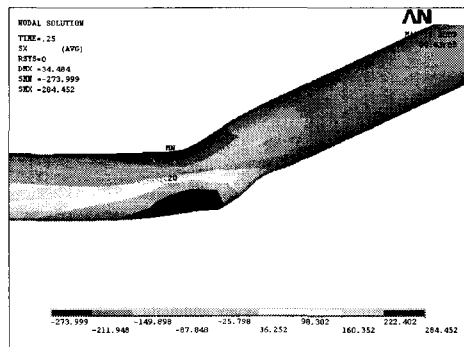
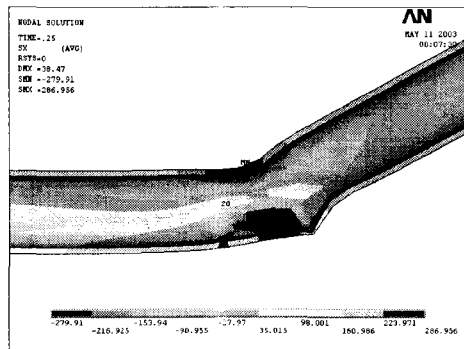


Fig. 7 Deformed value of inner pipe with mandrel diameter 5.8mm according to location of x-direction



(a) position : -0.5mm



(b) position : +1mm

Fig. 8 X-direction stress distribution of pipe rotating to 45°

3.2 맨드릴 위치와 직경 변화에 따른 응력

맨드릴의 직경을 5.8과 6mm인 경우 모두 동일한 응력분포를 나타내고 있으나, 맨드릴과 접촉지점에

따라서 최대응력이 발생하는 지점의 차이를 보이고 있다. Fig. 8에서는 맨드릴의 회전축 중심과 회전다이의 회전중심이 -0.5와 +1mm인 지점일 때의 최대굽힘응력을 나타내고 있으며, 굽힘응력값이 1mm인 경우에 약 2MPa정도 높게 발생하고 있으나, 이 값은 거의 무시할 수 있다. 그리고, -0.5mm는 관의 표면을, +1mm인 경우에는 관의 내부에서 발생하는 굽힘응력분포도를 나타내고 있다. 특히, 1mm인 경우에 관의 두께가 상당히 얇아진 현상이 확연하게 나타나고 있다.

4. 결론

관의 굽힘가공에서 맨드릴의 직경과 위치에 따른 관체의 변형 및 응력분포에 대해 탄소성해석을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 회전다이의 회전중심에 비해 맨드릴의 회전중심이 -0.5mm인 지점에 위치할 때, 관에서 발생하는 두께의 변화와 변형 형상이 가장 중격 발생하였다.
2. 맨드릴과 관사이에 공차가 있는 경우에 조기 변형의 발생위치는 앞으로 진전하고, 맨드릴에 의한 변형이 끝나는 지점에서 구부러지는 현상이 적게 발생하고 있다.
3. 맨드릴의 직경과 위치변화에 의하여 관체에 발생하는 굽힘응력값은 거의 유사하게 나타나고, 최대응력 발생지점은 맨드릴과 관체가 접촉하는 지점에 따라서 다르게 나타나고 있다.

참고문헌

1. 정상철, 최길봉, 신호철, 김남환, 이종수, "맨드릴을 사용한 전자기 축관성형의 해석", 한국기계학회지, 제17권, 제2호, pp.371-279, 1993.
2. 김현영, 신용승, 홍춘기, 전병희, 오수익, "자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접관재 유압성형에 대한 성형 해석", 제10권, 제1호, 한국소성가공학회지, pp.3-14, 2001.
3. 김성, 강범수, "유한요소법에 의한 관재 하이드로포밍 공정 해석 및 설계를 위한 수치적 연구", 제11권, 제 4호, pp.302-311, 2002.
4. Dohmann, F. and Hartl, C., "Tube hydroforming research and practical application", Journal of material Processing Technology, pp. 174-186, 1997.
5. Kristoffer, T., "Finite element simulation of the tube hydroforming process-bending, preforming and hydroforming", Journal of materials processing Technology, Vol.127, pp. 401-408, 2002.