

3 차원 벤딩 머신에서 정밀 성형을 위한 공정 개발에 관한 연구

김현진*(창원대학교 기계설계공학과 대학원), 임상현(창원대학교 기계설계공학과 대학원), 이춘만
(창원대학교 기계설계공학과)

A study on the process for precision forming by 3-dimension bending machine

H. J. Kim(Mecha. Design & Manuf. Eng. Dept. CNU), S. H. Lim(Mecha. Design & Manuf. Eng. Dept. CNU), C
M. Lee(Mecha. Design & Manuf. Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the bending process for manufacturing of sound pipe by 3 dimension bending machine. The arbitrarily-bended pipe is widely used in a heat exchanger system. The pipe should be formed precisely for assembling of heat changer. And, spring back effect and variation of the pipe thickness should be controlled effectively. We described the change of spring back amount and thickness variation of the pipe according to the change of bending radius and bending angle by FEM analysis. The analysis is adopted the elastic-plastic analysis and contact analysis on MARC software.

Key Words : Pipe bending (파이프 벤딩), Spring back (스프링백), Variation of the pipe thickness(파이프 두께 변화)
FEM (유한요소해석), Elastic-plastic analysis (탄소성 해석), Contact analysis (접촉 해석)

1. 서론

파이프의 벤딩 공정은 자동차, 항공기, 조선, 유공압기기, 보일러, 열 교환기 등 여러 산업분야에서 각종부품제조에 널리 이용되고 있다. 전통적으로는 노동집약적 공정이나 컴퓨터 기술 발달로 자동화가 가능하게 되어 현재 여러 형태의 벤딩 머신들이 개발되었다. 기존 벤딩 머신에서 더욱 발전된 형태인 3 차원 벤딩 머신(Three Dimension Bending Machine)은 동관 및 비철금속관을 3 차원으로 가공하는 관재 가공기계이며, 이탈리아의 Pedrazzoli-ibp 사, 미국의 BLM 사 등에서 개발되어 국내에서 수입하여 생산 현장에 도입하고 있다. 특히, 관재의 사용이 많은 에어컨의 경우에는 전 세계의 생산량의 18%를 차지하고 있으나, 국내의 경우 이에 관련된 기술개발은 미약한 실정이다. 현재, 국내 산업 현장의 배관 생산 시스템은 3 차원 벤딩 자동화 시스템이 도입되어있지만, 정밀한 제품생산을 위한 공정 데이터가 미비하여 품질의 산포가 심하며, 설비의 유지보수가 문제시 되는 실정이므로 다양한 재질과 직

경을 가진 관재를 결함없이 원하는 형상의 관으로 성형하는 것이 핵심과제이다. 파이프의 벤딩 공정의 대표적 방법은 압축 굽힘법(compressive type), 신장 굽힘법(ran type), 드로우 굽힘법(draw type)이 있으나 가장 성형력이 뛰어나 널리 사용하는 드로우 굽힘법을 채택하여 머신을 개발하였다. 드로우 굽힘법에서 기본적인 금형은 굽힘 다이(bending die), 회전 다이(rotating die), 고정 다이(clamp die)로 이루어져 있으며, 파이프를 금형에 위치시키고 고정 다이로 소재를 고정한 후 굽힘 다이를 따라 회전 다이가 회전하면서 굽힘을 진행하는 방법이다.

본 연구에서는 동 파이프의 벤딩 성형과정을 유한요소해석(FEM) 프로그램을 이용하여 모델링하고 탄소성 해석 및 접촉 해석을 수행하여 굽힘 반경, 굽힘 각에 따른 스프링백 양과 벤딩 성형 후의 파이프의 두께 변화를 살펴보고 그 관계를 규명하고자 한다. 해석을 통하여 얻어진 결과는 최대 두께 변화량을 파악하거나 스프링백 양을 측정함으로써 정밀한 정도의 파이프 생산을 위한 성형 공정 개발의 기본 자료로 이용될 수 있다.

2. 본론

2.1 굽힘 장치

3 차원 벤딩 머신은 크게 4 부분으로 구성되어있다. 관재가 감겨있는 롤(roll)로부터 관재를 공급시킬 때 지지를 해 주는 파이프 홀더 유닛(Pipe Holder Unit), 롤로부터 공급된 관재를 직선화 시켜주는 직선교정기, 벤딩을 하기 위해 필요한 관재의 길이만큼 제어를 해 주는 길이 제어 피딩(Feeding) 유닛, 마지막으로 3 차원으로 벤딩을 하기 위한 각도 제어, 회전 구동 유닛의 4 부분이다. 본 연구에서는 굽힘에 직접적 연관이 있는 각도 제어 및 회전 구동 유닛에 대해 연구하고자 한다. Fig. 1에서는 개발된 3 차원 벤딩 머신을 나타내고있다.

드로우 굽힘법을 채용하여 설계된 파이프 벤딩 장치는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 관을 일정한 반경으로 굽히기 위한 기준이 되는 벤딩 다이(bending die), 직관을 굽힘 형상으로 눌러주는 회전 다이(rotating die), 관을 고정시키는 클램프(clamp)로 구성된다. 파이프의 굽힘은 회전 다이가 벤딩 다이의 중심을 기준으로 일정한 각도 만큼 회전을 하면서 파이프가 굽힘 형상을 갖게 된다.

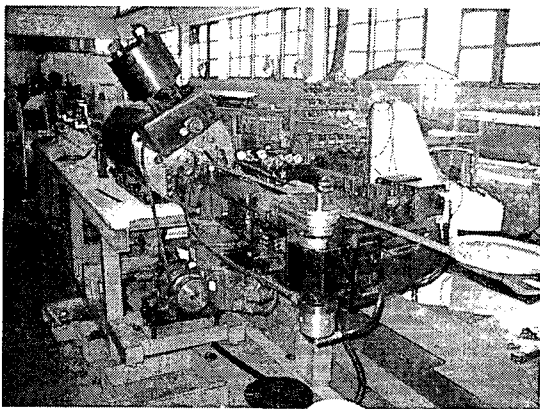


Fig. 1 3-Dimension Bending Machine

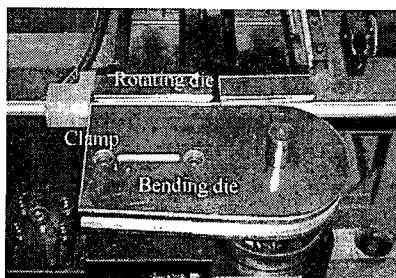


Fig. 2 Dies for pipe bending

2.2 유한요소모델

Fig. 3은 파이프 벤딩 장치의 유한요소모델이다. 다이는 소재와 접하는 면만을 모델링하여 간략화하였고, 굽힘 다이는 파이프의 굽힘 각 조절을 용이하도록 하기 위해 원형으로 모델링 하였다. 굽힘 다이와 회전 다이는 모두 공구강이므로 굽힘 소재인 동관보다 매우 강성이 크기 때문에 변형이 발생하지 않는다고 가정을 하여 강체(rigid body)요소로 모델을 정의하였다. 관재는 비선형해석이 가능한 shell 요소로 메시(mesh)를 하였다. 다이와 관재 사이에는 접촉조건을 주어 기계적 거동이 이루어지도록 하였으며, 관재에 비해 상대적으로 강성이 높은 회전 다이를 굽힘 다이를 따라 강제 회전 변위 시킴으로써 파이프의 굽힘 성형이 일어날 수 있도록 하였다. 파이프를 고정하는 클램프는 따로 모델링하지 않고 관재의 왼쪽 끝부분의 절점(node)의 각 방향 변위를 고정하였다.

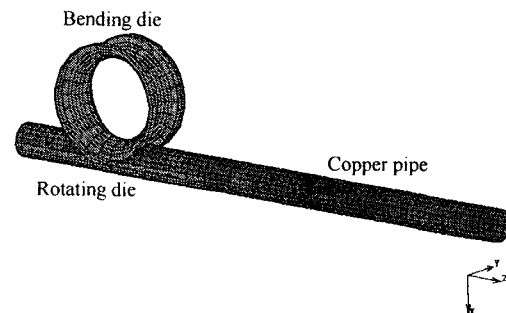


Fig. 3 Finite element model of pipe bending unit and workpiece

2.3 재료특성

개발된 3 차원 벤딩 머신은 알루미늄관, 동관, 스틸관 등을 성형할 수 있으나, 본 연구에서는 열전도율이 높아 열 교환기에 가장 많이 사용하는 동관을 재료로 하여 해석을 수행하였다. 실험에 사용된 동파이프는 KS D 5301에 의한 표준규격에 기준하여 생산된 것이며, 재질은 인탈산동(phosphorus deoxidized copper)으로 구리(Cu)에 인(P)이 소량 포함된 금속이다. 인장 시편은 KS B 0801에서 정해진 기준에 따라 제작하였다. 시편이 파이프 형상이므로 그림으로 고정했을 때 찌그러짐을 방지하기 위해 파이프의 양쪽에 플러그를 넣어 시편을 제작하였고, Instron 시험기를 이용하여 실험을 수행하여 응력-변형을 선도(stress-strain curve)를 구하였다. 소성 해석을 수행하기 위해서는 진 응력-변형을 선도(true stress-strain curve)가 필요하며, Fig. 4에 그래프로 나타내었다.

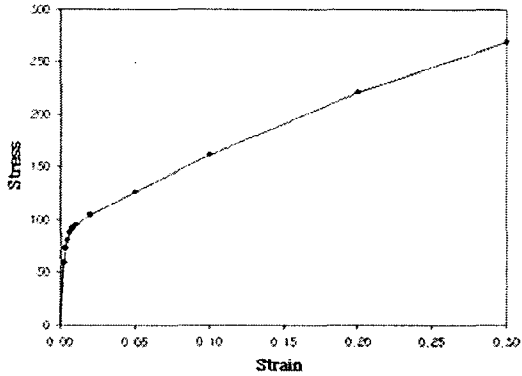


Fig. 4 True stress-strain curve of phosphorus deoxidized copper for analysis

3. 결과 및 고찰

3.1 굽힘 해석 및 고찰

해석에 사용된 파이프의 외경은 12 mm 이고, 두께는 0.8 mm 이다. 벤딩 해석은 생산하는 파이프 형상 중 비교적 많이 사용하는 굽힘 반경 20 mm, 40 mm 의 두 가지를 기준으로 굽힘 각도를 90° 에서부터 180° 까지 10° 간격으로 등분하여 각각의 경우 별로 해석을 수행하였다. 해석을 수행하기 위해서 몇 가지 가정을 하였는데 가공시 발생하는 열 변형 및 열전달은 무시하였고, 소재와 다이 사이에 발생하는 마찰은 쿨롱 마찰(coulomb friction)로 설정하였고, 냉간 가공에 일반적으로 적용하는 0.1 을 마찰 계수로 사용하였다. 벤딩 해석은 회전 다이를 원하는 각도만큼 강제 회전변위시킨 후 다이를 해제시켜 스프링백이 발생하도록 하였다. 굽힘 해석은 MARC® 프로그램을 이용하여 수행하였다.

Fig. 5 는 벤딩 각도에 따른 스프링백 각도를 그래프로 나타낸 것이다. 굽힘 각도가 커짐에 따라 스프링백 각도도 커지는 것을 확인할 수 있었고, 벤딩 반경에 대하여 비교해 보면 반경이 큰 경우에 스프링백 각도가 크게 나타난다는 것을 알 수 있었다. Table 1 에서 회전 다이를 90° 회전시켰을 경우와 180° 회전시켰을 경우의 스프링백 크기를 정리하였다.

벤딩 공정시 파이프의 외측(outside)은 인장에 의해 두께 감소가 일어나고, 파이프의 내측(inside)은 반대로 두께가 증가하였다. Table 2 는 굽힘 각도에 따라 굽힘 성형 후 파이프의 내측과 외측의 최대 두께 변화량을 나타낸 것이다. 두께 변화량은 굽힘 각도에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보이거나 거의 일정한 값을 갖고 있으며, 굽힘 반경에 대하여 비교해 보면 굽힘 반경이 작은 경우에 두께 변화량이 많은 것을 확인할 수 있다. 가공된 파이프

는 관내 흐르는 매질의 압력을 견디기 위해 두께 감소율이 최대 25 %를 넘지 않아야 한다.[3] Table 2 에 나타난 결과로부터 두께 변화량을 살펴보면, 최대 감소량이 0.0814 mm 이고 이는 25 %이내의 값이다.

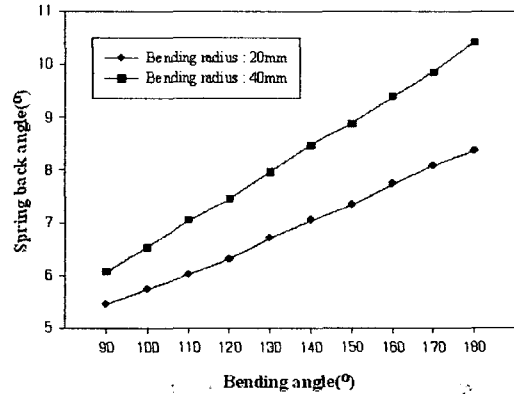


Fig. 5 Spring back angle vs bending angle according to bending radius changes

Table 1 Spring back angle at bending angle 90° and 180°

Bending radius (mm)	Bending angle (°)	Spring back angle (°)
20	90	5.44
	180	8.37
40	90	6.07
	180	10.43

Table 2 Variation of pipe thickness according to bending angle and bending radius

Bending angle (°)	Bending radius(mm)			
	20		40	
	Inside	Outside	Inside	Outside
90	0.1322	-0.0792	0.0634	-0.0513
100	0.1334	-0.0802	0.0633	-0.0513
110	0.1337	-0.0807	0.0631	-0.0514
120	0.1336	-0.081	0.0631	-0.0514
130	0.1335	-0.0812	0.063	-0.0514
140	0.1333	-0.0812	0.0629	-0.0514
150	0.1328	-0.0813	0.0629	-0.0514
160	0.1327	-0.0814	0.0628	-0.0514
170	0.1327	-0.0813	0.0629	-0.0514
180	0.1325	-0.0814	0.0628	-0.0515

3.2 벤딩 시험 및 결과

앞서의 해석 결과를 바탕으로 40 mm 의 굽힘 반경을 가진 90° 벤딩형 파이프와 180° 벤딩형 파

이프를 컴퓨터 해석 및 굽힘 시험을 하였다. 90° 벤딩형과 180° 벤딩형 파이프는 열 교환기에서 가장 보편적으로 많이 사용하는 형태이다. 90° 벤딩형상의 파이프를 얻기 위하여, 이때 발생하는 스프링백 크기를 감안하여 회전 다이를 6° 더 회전시켜 해석을 수행하였다. Fig. 6 은 회전 다이를 96° 회전시킨 경우의 결과이다. (a)는 다이 해제전의 변위 형상이고, (b)는 다이를 해제하여 스프링백이 일어난 후의 변위 형상이다. 스프링백이 일어난 후 파이프의 각도는 90.48° 이다. (c)는 파이프의 변화된 두께를 등고선으로 나타낸 것으로, 파이프 내측의 두께는 0.7487 mm 이다. (d)는 이러한 해석 결과를 바탕으로 실제 굽힘 실험을 한 결과 형상이다.

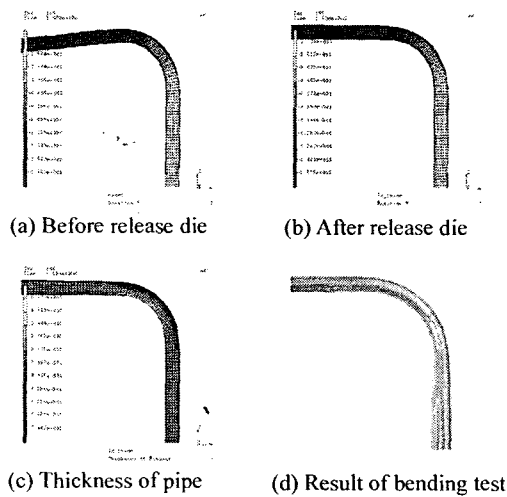


Fig. 6 Results of pipe bending when rotate bending die to 96° (bending radius : 40mm)

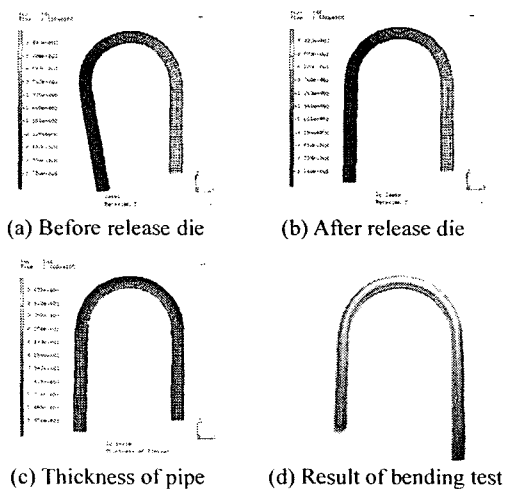


Fig. 7 Results of pipe bending when rotate bending die to 190° (bending radius : 40mm)

마찬가지로 180° 벤딩형상의 파이프를 얻기 위하여 회전 다이를 190° 회전시켜 해석을 수행하여 Fig. 7 에 그 결과를 나타내었다. 스프링백이 일어난 후 파이프의 각도는 179.91° 이고, 파이프 내측의 두께는 0.7486 mm 이다. 따라서 90° 벤딩형과 180° 벤딩형 파이프는 모두 규격 이내의 양질의 가공정도를 가진다.

4. 결론

3 차원 벤딩 머신을 이용한 인탈산동관의 굽힘 가공에서 굽힘 반경과 굽힘 각에 따른 유한요소 해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있으며, 이를 데이터 베이스화 하여 벤딩 머신 개발의 기초자료로 이용할 수 있다.

(1) 스프링 백은 굽힘 반경이 커질수록 크게 나타나며, 스프링백의 크기는 굽힘 각도에 따라 선형적으로 변화한다.

(2) 굽힘 가공 후의 파이프 두께 변화율은 파이프 내의 매질의 압력을 견디기 위한 두께 변화율 25% 이내가 되어야 하며, 본 연구에서 고려된 경우는 한계변화율 이내이다.

(3) 스프링백 양을 감안하여 회전시켜 가공한 90° 벤딩형과 180° 벤딩형 파이프는 형상각도와 파이프 두께 변화율이 규격 이내의 양질의 가공정도를 가짐을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. H.A. Al-Qureshi, "Elastic-plastic analysis of tube bending," International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) , pp. 87 - 104, 1998.
2. 양재봉, 전병희, 오수익, "Tube Hydroforming 을 위한 굽힘 공정해석," 한국 소성가공학회지, 제 9 권, 제 3 호, pp. 249-256, 2000.
3. 강홍식, 김동성, 허신, 홍성인, "Hair Pin Bending Machine 을 이용한 동 튜브 굽힘 성형가공에 관한 연구," 한국 정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1705-1708, 2003.
4. 김광영, 윤두표, "맨드럴을 사용한 굽힘 성형시 헤어핀용 동관의 변형 해석," 한국 정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1630-1633, 2003.