



동관의 벤딩공정 개선에 대한 성형해석 연구 A study on Forming Analysis for Copper Pipe Bending Process Improvement

박환철* · 김범석** · 정지현****

Hwan-Cheol Park*, Bum-Suk Kim** and Ji-Hyun Jeong****

(Received 26 March 2018, Revision received 05 June 2018, Accepted 06 June 2018)

Abstract: In general, industry uses copper tubes with high corrosion resistance, high thermal conductivity and high mechanical properties for the transfer of pressurized fluids. However, when the copper pipe is bending, wrinkles and wall thinning, and ovalization occurs. In this study, we designed a pusher to apply compressive force to the upper end face of a copper pipe which is a soft material to improve the thickness reduction rate of the upper side of the bending part. The performance of the pusher was verified by the simulation that was performed by using Deform 3D to compare with the thickness reduction rate and flatness ratio according to the bending angle of the soft material. As the result of simulation, it has been verified that can give a proper compressive stress to the end face of the pipe during the bending of the soft pipe and can reduce the thickness reduction rate on the upper side of the pipe.

Key Words : Bending system, Pusher, Copper tube, Press face, Pipe thickness reduction

1. 서 론

일반적으로 산업계에서 가압유체의 이송용으로 내식성이 크고 열전도율이 좋고, 기계적 성질이 높은 동관을 광범위하게 사용하고 있다. 특히, 인 탈산동관의 연결동관은 수소취화가 거의 발생하지 않아 수소용접으로 가공하기 적합하고, 휨성과 열전도성이 좋아서 열교환기, 냉난방기기, 급수관, 냉·온수관의 배관용으로 널리 사용되고 있다. 이러한 동관은 연속 작업 및 시스템에어컨 시공 등

의 대형 현장작업에 적합하도록 원형으로 감은 레벨 와운드 코일(level wound coil)형식과 중량이 가볍고 운반 및 취급이 용이하도록 15 m이하의 짧은 길이를 필요로 하는 곳에 사용할 수 있게 만든 팬케이크 코일(pan cake coil)형식 그리고 직관(straight tubes)형식 등으로 제작된다. 제작된 동관은 특정 분야에 적용시키기 위해 엘보(elbow), 소켓(socket), 티(tee), 리듀서(reducer), 리턴밴드(return bend) 등의 동관 피팅(fitting)제품과 용접하여 사용된다.¹⁻²⁾

**** 정지현(교신저자) : 제주대학교 기계공학전공

E-mail : badaro@jeju.ac.kr, Tel : 064-754-3627

*박환철 : 부경대학교 실습선

**김범석 : 제주대학교 대학원 풍력공학부

**** Ji-Hyun Jeong(corresponding author) : Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

E-mail : badaro@jeju.ac.kr, Tel : 064-754-3627

*Hwan-Cheol Park : Training Ship, Pukyong National University.

**Bum-Suk Kim : Faculty of Wind Energy Engineering, Jeju National University.

피팅제품 중 엘보는 동관을 벤딩공정(bending process)을 통해 제작된다. 일반적인 파이프의 벤딩공정은 용도에 맞게 관재를 이용하여 소성가공을 거쳐 필요한 형상으로 벤딩가공하기 위해 이용되는 가공 공정으로 건축용 배관의 이음관, 냉동 공조산업용 이음관과 자동차, 조선 등 다양한 분야에 다양한 형상과 규격의 파이프 제작에 사용되고 있다.³⁾ 벤딩롤과 클램프, 슬라이드 바 등으로 구성되어 있는 벤딩기계를 이용하여 벤딩하는 기존 동관의 벤딩공정은 벤딩 후 외관의 주름(buckling)이나 스프링 백(spring back), 곡면부가 얇아지는 현상(wall thinning), 타원변형(ovalization) 등이 발생하고 있다.⁴⁾

열교환기용 파이프의 굽힘 공정을 시뮬레이션을 통하여 굽힘 가공 시 영향을 미치는 인자들의 특성을 파악한 연구사례가 있었고, 맨드릴을 이용한 연결파이프 전용 벤딩머신을 개발하여 가공 중 응력을 분산시켜 연결 재료의 주름 현상을 저감할 수 있었지만 재료의 벤딩각도 증가에 따라 직경이 작아지는 현상(타원변형)을 극복하지는 못했다.^{4,5)} 또한 허 등은 곡관의 두께감소율 제어를 위한 벤딩공정의 체적화를 위해 금속의 고온 유동특성을 이용하여 국부적인 온도 비균일 분포 차별화방식으로 재료를 가열하고 공정속도를 조절하여 곡관의 두께 감소율을 향상시켰다. 그러나 재료가 고압용 고강도 강관이고 고주파를 이용한 고온 가열방법을 사용하였기 때문에 연결동관의 벤딩공정에는 적용시키기 어렵다.^{5,6)}

본 저자의 이전 연구에서는 동과 같은 연성재료의 두께보증형 고품질 정밀형 벤딩머신을 개발하기 위한 기초연구로 벤딩틀인 맨드릴(mandrel)을 자체 설계제작하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그 결과, 두께변화가 가장 심한 부분의 편평률(circular deformation rate)를 개선하였지만 곡관 상측부의 두께감소율(Thickness reduction rate)과 잔류응력은 개선하지 못하였다.⁷⁾

본 연구에서는 벤딩시 특정영역(곡관의 상측)의 두께감소율을 개선하기 위해 연성재료인 동관의 끝단 상부에 압축력을 가해 주는 푸시어(pusher)를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

시뮬레이션은 벤딩 전용 해석프로그램인 Deform 3D를 이용하여 연성재료의 잔류응력과 벤딩 각도에 따른 두께 감소율, 편평율 등을 분석한다.

2. 장치 모델링 및 설계조건

2.1 벤딩시스템 설계

본 연구에서는 연성재료의 두께보증형 벤딩머신을 개발하기 위한 기초연구로 Fig. 1과 같이 벤딩시스템을 설계하였다. 연성재료의 미세한 변형을 고려하여 연성재료의 외경보다 조금 큰 사이즈로 포밍다이(forming die)에 홈을 만들고 그 홈 사이에 연성재료를 삽입시키고, 삽입된 연성재료를 고정시키기 위해 압력다이(pressure die)를 설계하였다. 연성재료를 90°로 벤딩시키기 위해 클램핑 다이(clamping die)를 설계하여 벤딩공정 시 포밍다이의 외부 형상을 따라 회전할 수 있도록 구성하였다.

동파이프와 같은 연성재료는 그 재료의 특성상 벤딩 시 외관의 주름이나 스프링 백 및 곡면부가 얇아지는 현상과 타원변형 등이 발생한다. 이러한 변형현상들을 극복하기 위해서 Fig. 1과 같이 클램핑 다이가 회전운동을 하며 동파이프를 벤딩시킬 때 동파이프의 변형을 최소화시켜 줄 수 있도록 설계한 맨드릴(mandrel)을 삽입시키고, 클램핑 다이와 동시에 맨드릴이 회전운동을 할 수 있도록 설계한다. 맨드릴은 볼(ball)과 스틱(stick) 그리고 체결핀(connection pin)으로 구성되어 있다.

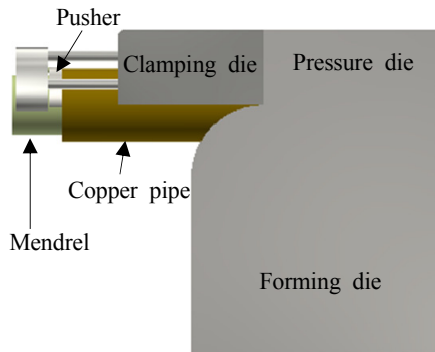


Fig. 1 Schematic diagram of bending system

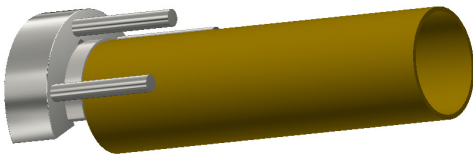


Fig. 2 Modeling of pusher unit

상기와 같은 벤딩시스템은 벤딩공정 시 연결재료의 내부에 삽입된 맨드릴은 클램핑 다이와 맨드릴이 동시에 회전하기 때문에 성형부 특히 곡면부의 내부에 마찰이 거의 발생되지 않아 재료의 변형을 최소화하는 장점을 가지고 있다. 또한 맨드릴의 끝단에 파이프의 내경에 가까운 볼을 체결핀으로 연결하여 벤딩부의 타원변형을 최소화할 수 있다. 이전 연구에서 이러한 형태의 맨드릴에 의한 성형은 벤딩부의 압력이 곡관의 전후에 분포되어 응력집중의 효과가 줄어드는 장점을 확인할 수 있었다. 그러나 곡면부의 하측은 오히려 두께가 증가하는 반면 상측은 공학적 설계요건인 파이프 두께 감소율 12.5%를 만족시키지 못하였다. 따라서 특정 영역(곡면부의 상측)의 두께 감소율을 해결하기 위해서 벤딩시 파이프의 상측에 적당한 압축응력을 부가할 필요성이 제기되었다.⁸⁾

본 연구에서는 특정 영역의 두께감소율을 보상하기 위해서 Fig. 2와 같이 푸시어(pusher)를 만들고 벤딩공정 시 클램핑 다이 및 맨드릴과 동시에 회전하면서 연결재료의 상부끝단에 압축응력을 부가할 수 있도록 벤딩시스템을 설계하였다.

2.2 재료의 물성 및 실험조건

본 연구에서 사용하는 연성재료인 동은 공기나 물 등에 대해 내식성이 뛰어나고, 표면은 매끄럽기 때문에 유체에 대한 마찰 저항이 적으며 열의 전도율이 좋다. 또한 전성과 연성이 좋아서 가공하기 용이하며 시공능률이 높다. 따라서 관, 봉, 관 등으로 제조되어 가정용 및 빌딩용 에어컨의 냉매가 이동하는 관으로 사용되고 열교환기, 급수관 및 유압이나 공기압 등의 컨트롤 라인(control line) 등에 널리 사용되고 있는 재질이다. 동관은 이음매 없는 인성동관, 무산소동관, 인탈산동관

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of material

Mechanical properties		Chemical composition				
Tensile strength (N/mm ²)	Hardness (HR30T)	Cu	Pb	Fe	P	Si
315	50.1	99.95	0	0	0.023	0

Table 2 Experimental conditions

Material	Cu pipe
Diameter	∅ 28.58 mm
Thickness	1.25 mm
Cycle time	1 cycle for 4 sec
Allowable thickness of bending part	1.0 mm
Bending degree	90°

등이 있는데, 본 실험에서는 이음매 없는 인탈산동관으로 ks소재규격인 외경 28.88 mm, 두께 1.25 mm를 가공재료로 사용하였다. 재료의 기계적 성질 및 화학성분은 Table 1에 실험조건은 Table 2에 나타내었다.⁸⁾

2.3 벤딩장치의 유한요소 모델

본 연구에서 제안하는 연성재료의 벤딩장치에 대한 유한요소모델은 Fig. 3와 같다. 연성 파이프의 기하모델에서는 길이가 긴 원통형이지만 해석시간의 단축을 위해서 Fig. 3과 같은 형태로 대칭되는 파이프의 절반만 설계하였다. 설계한 연결파이프는 x축을 기준으로 좌·우 대칭성을 가지기 때문에 대칭면(symmetry plane)을 설정하고 한 쪽(요소 수 : 200,000개, 메쉬타입 : tetrahedral mesh)만 유한요소 모델을 만들고 해석하였다.

해석 소프트웨어는 연결 파이프의 두께 감소율까지 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램으로서, 현재 널리 사용되고 있는 상용 소프트웨어인 Deform 3D를 이용하여 FEM(Finite Element

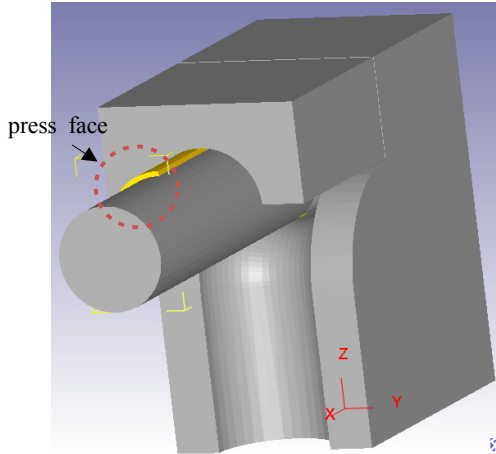


Fig. 3 Modeling of bending unit

Table 3 Material properties of model

Material	C1220
Young's modulus	264 MPa
Poisson's ratio	0.38
Thermal expansion coefficient	1.3E-4

Method)을 수행하였다. Deform 3D는 기본적으로 design modeler기능이 없기 때문에 CAD전용 tool인 Autodesk Inventor를 이용하여 연결 파이프의 벤딩장치를 설계하고 난 뒤 Deform 3D상으로 import시켜서 모델링하였다.

연성 파이프가 벤딩(벤딩각 90°)되는 동안 푸시어에 의한 면압이 형성되도록 파이프의 끝단에

압력면(press face)을 설정하고 클램핑다이의 회전 운동과 동시에 면압을 가하였다. 연결 파이프를 고정하고 있는 압력다이와 연결 파이프의 벤딩형상을 만들어 주는 포밍다이 그리고 클램핑다이의 요소들은 변형하지 않기 때문에 강체(rigid body)로 설정하였다. 시뮬레이션은 총 400스텝(step)으로 벤딩각 90°가 완성되도록 설정하였으며, 해석에 사용된 연결 파이프의 물성치는 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 인탈산동관은 가공하기 쉽고 취급이 요이하지만 무리하게 그리고 급격히 변형시키면 최종형상이 원래의 설계형상과 다르게 나타난다. 따라서 파이프의 변형이 최소한으로 이루어질 수 있도록 최종변형까지 306단계로 나누어서 서서히 벤딩되도록 시뮬레이션하였다. 전단면은 x축을 기준으로 좌측부분으로 하였고 시뮬레이션 결과 파이프의 두께변화가 가장 심한 부분을 다섯 파트(part)로 나눠서 Fig. 4에 나타내었다. 두께변화가 가장 심한 다섯 파트는 파이프 전단면의 두께 중에서 가장 얇은 곳으로 벤딩각도상 거의 45° 부근에 집중되어 있었다. 벤딩 시 파이프 두께변화율을 개선하기 위해서 파이프의 끝단면에 설계한 푸시어가 가할 수 있는 면압(1~30 MPa)을 단계적으로 상승시켜서 시뮬레이션한 결과를 Table 4에 나타내었다. 적용시킨 각 면압에 대해 파트마다 파이프 두께가 조금씩 차이는 보이고

Table 4 Pipe thickness according to surface pressure

surface pressure [MPa]	Part 1 [mm]	Part 2 [mm]	Part 3 [mm]	Part 4 [mm]	Part 5 [mm]	Mean value [mm]
1	0.989856	0.975687	0.975215	0.982563	0.985214	0.981707
2	0.985862	0.986251	0.975246	0.987165	0.985131	0.983931
3	0.990253	0.985356	0.976466	0.986214	0.986752	0.985008
5	0.990185	0.981562	0.974325	0.981287	0.985968	0.982665
7	0.991236	0.981126	0.975213	0.980925	0.983656	0.982431
9	0.990133	0.981345	0.976058	0.981304	0.983218	0.982412
15	0.990215	0.981810	0.970578	0.982852	0.983954	0.981882
20	0.990267	0.981585	0.975691	0.982088	0.984501	0.982826
30	0.990271	0.982032	0.975281	0.982251	0.984015	0.982770

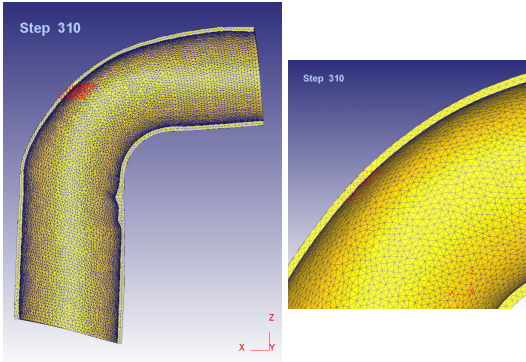


Fig. 4 Measuring point of bending pipe

있으나, 다섯 파트들의 평균값은 면압이 3 MPa인 경우에 파이프의 두께가 가장 두껍게 나타났다. 파이프의 끝단 면에 가한 면압을 점점 상승시켜 최대 30 MPa까지 가하였으나, 5 MPa 이상의 면압은 더 이상 파이프 두께변화 개선에 영향을 미치지 못했다.

Fig. 5는 파이프의 두께감소율을 파이프의 끝단에 면압을 가하지 않은 상태로 벤딩한 시뮬레이션 결과(without pusher)와 면압(3 MPa)을 가한 시뮬레이션 결과(with pusher)를 벤딩 각도별로 비교해서 나타내었다. 벤딩각도상 약 20°부터 면압을 가한 파이프의 두께감소율이 면압을 가하지 않은 파이프 두께감소율보다 낮아졌으며, 최종 결과값은 면압을 가한 파이프의 두께감소율이 21.20%로 면압을 가하지 않은 파이프의 두께감소율(22.48%)보다 약 1.28% 감소하였다.

Fig. 6은 파이프 내부를 흐르는 유체에 압력저항을 유발시켜 사용기기의 성능을 저하시키는 요인이 되는 파이프 단면의 편평률을 나타내었다. 파이프의 편평률은 파이프를 벤딩하기 전의 직경(D_0)에 대한 벤딩 전의 파이프직경(D_0)과 벤딩후의 직경(D_1) 차이($D_0 - D_1$)로 나타내었다. 벤딩각도와 파이프의 위치에 따라 편평률 또한 차이가 있기 때문에 벤딩 시 두께변화가 가장심한 곡면 중앙부(45°)를 전단면으로 하여 편평률을 나타내었다. 파이프의 편평률에 있어서 파이프의 끝단에 면압을 가했을 때와 가하지 않았을 때의 시뮬레이션 결과는 거의 차이가 없어 편평률을 개선시키는데 면압의 역할은 미미함을 알 수 있었다.

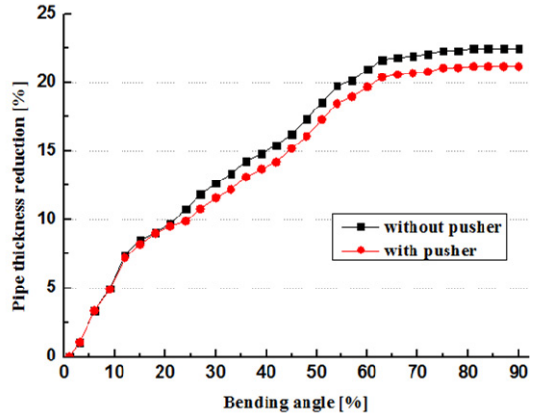


Fig. 5 Pipe thickness reduction variation according to bending angle

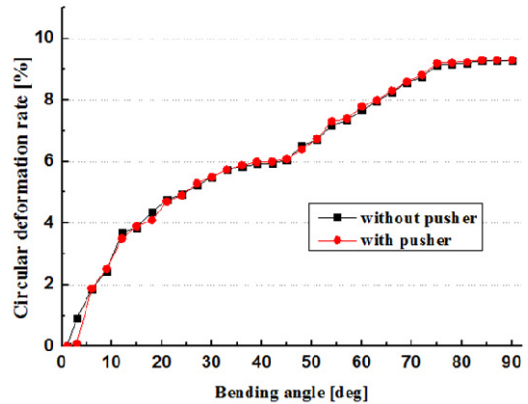


Fig. 6 Circular deformation rate variation according to bending angle

4. 결 론

본 연구에서는 벤딩시 곡관의 상측의 두께감소율을 개선하기 위해 연성재료인 동관의 끝단 상부에 압축력을 가해주는 푸시어(pusher)를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션은 벤딩 전용 해석프로그램인 Deform 3D를 이용하여 연성재료의 벤딩 각도에 따른 두께감소율, 편평율 등을 푸시어가 없는 경우와 비교하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 파이프의 끝단면에 면압(1~30 MPa)을 단계적으로 상승시켜서 시뮬레이션한 후 두께변화가

가장심한 부분을 다섯 파트로 분류하고 벤딩각도에 따라 두께를 측정된 결과, 다섯 파트들의 평균 값에 있어서 면압이 3 MPa인 경우에 파이프의 두께가 가장 두껍게 나타났다. 그러나 5 MPa 이상의 면압은 파이프 두께변화율 개선에 영향을 주진 못했다.

2) 벤딩 각도가 약 20° 근처에서부터 면압을 가한 파이프의 두께감소율이 면압을 가하지 않은 파이프이 두께감소율보다 낮아졌으며, 최종 결과 값은 면압을 가한 파이프의 두께감소율이 21.20%로 면압을 가하지 않은 파이프의 두께감소율(22.48%)보다 약 1.28% 감소하였다.

3) 벤딩 시 두께변화가 가장심한 파이프의 곡면 중앙부(45°)를 전단면으로 설정하고 전단면의 편평률을 분석한 결과, 국내 편평률의 규제한도(15%)는 만족하였지만, 파이프의 끝단에 면압을 가했을 때와 가하지 않았을 때의 편평률은 차이가 거의 없어 편평률 개선 시 파이프 끝단에 작용시키는 면압의 역할은 미미함을 알 수 있었다.

4) 따라서 연결 파이프의 벤딩시 파이프의 끝단에 적당한 압축응력을 부여해 줄 수 있는 푸시어(pusher)가 곡관 상측의 두께감소율을 줄일 수 있음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

후 기

이 논문은 2017학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. J. H. An, D. C. Ko, C. J. Lee, and B. M. Kim, 2008, "Spring back prediction in bending process based on DOE and ANN", Spring Conference on The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 171-176.
2. C. W. Park, 2010, "A study on petronas of bending forming analysis", Autumn conference on The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 493-494.
3. H. J. Kim and C. M. Lee, 2007, "A study on the bending process for precision pipe forming", Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 58-65.
4. S. D. Mun, 2011, "Development of bending machine with high efficiency and precision forming", Journal of the Korean Academic Industrial Society, Vol. 12, No. 1, pp. 7-14.
5. B. Y. Kim, and J. H. Jeong, 2014, "Development of an Anti-Seasickness Bed used in Vessel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 112-116. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.4.112)
6. B. S. Kim, C. N. Kang and J. H. Jeong, 2014, "A Study on High Efficiency Dryer for Food Waste", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 153-158. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.6.153)
7. D. W. Jung, J. H. Jeong, J. R. Cho, 2013, "A study on forming analysis for the soft pipe bending process of thickness guarantee", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 1, pp. 66-71. (DOI:10.5916/jkosme.2013.37.1.66)

1. J. H. An, D. C. Ko, C. J. Lee, and B. M. Kim,