



동파이프의 굽힘변형 특성에 대한 연구

A study on Characteristics of Bending Deformation for the Copper Pipe

박환철* · 김범석** · 정지현****

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

(Received 03 April 2019, Revision received 18 June 2019, Accepted 18 June 2019)

Abstract: In general, copper tubes with high corrosion resistance, high thermal conductivity and high mechanical properties for the transfer of pressurized fluids are used in industry. However, when the copper pipe is being bended, wrinkles and wall thinning, and ovalization occurs in the pipe. In this study, we designed a pusher to apply compressive force to the upper end face of a copper pipe and heating system at upper side of the bending part. The performance of the pusher and heating system 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 reduce the thickness reduction rate on the upper side of the pipe.

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

1. 서 론

동관은 수분과 공기 그리고 토양에 대해 내식성 뿐 만아니라 열전도율이 우수하며 표면은 강관에 비해 거칠지 않기 때문에 유체와의 마찰저항이 작고 장기간 사용에도 유체에 의한 부식물이 관에 부착되는 경우가 적다. 또한, 강관에 비해 운반 및 취급이 용이하며 가공성이 우수하여 산업계에서 가압공기나 윤활유 등의 유체를 이송하기 위한 매개체로 광범위하게 활용되고 있다.

특히, 전기동을 인으로 탈산처리한 동관을 냉간인발법이나 가열압출법 등으로 제조한 인탈산동관의 연질동관은 수소취화가 거의 없어서 수소용접으로 가공하기 적합하고, 휨성과 전연성 그리고 열전도성이 좋아서 송유관, 가스관, 소화배관, 열교환기, 급수관 및 냉·온수관 등의 배관용으로 널리 사용되고 있다. 이러한 인탈산동관은 대형 현장작업에 적용 가능하도록 연속 작업이 용이하게 원형으로 감은 레벨 와운드 코일(level wound coil) 형식과 운반 및 취급이 용이하고 중량을 줄일 수

**** 정지현(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1585-2295):

교수, 제주대학교 기계공학전공

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

*박환철(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5670-7246) :

직원, 부경대학교 실습선

**김범석(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-8438-6670) :

교수, 제주대학교 대학원 풍력공학부

**** Ji-Hyun Jeong(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1585-22

95): Professor, Major of Mechanical Engineering, Jeju National university. E-mail : badaro@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3627

*Hwan-Chul Park(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5670-7246) : Staff, Training Ship, Pukyong National University.

**Bum-Suk kim(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-8438-6670) : Professor, Faculty of Wind Energy Engineering, Jeju National University.

있도록 짧은 길이로 제작한 팬케이크 코일(pan cake coil)형식 그리고 현장에 바로 설치 및 적용이 용이하게 제작한 직관(straight tues)형식 등이 있다. 이렇게 제작된 동관을 다양한 현장상황에 적용시키기 위해서는 리턴밴드(return bend)나 티이(tee), 엘보(elbow), 리듀서(reducer) 및 소켓(socket) 등의 동관 피팅(fitting)제품들과 서로 연결하여 사용된다. 피팅제품 중 엘보는 동관을 직관형태로 성형 후 필요한 길이로 컷팅(cutting)한 다음 벤딩기계로 90°도로 굽히는 벤딩공정(bending process)을 통해 제작되어 사용되고 있다^{1,2)}.

벤딩공정에는 클램프와 벤딩롤 그리고 슬라이드 바 등으로 구성되어 있는 벤딩기계를 이용한 벤딩공정과 포밍다이(forming die)와 압력다이(pressure die)로 구성된 벤딩기계를 이용한 벤딩공정 등이 주로 사용되고 있다. 하지만 상기 벤딩공정으로 제작된 엘보들은 벤딩 후 스프링 백(spring back), 곡면부가 얇아지는 현상(wall thinning) 및 외관의 주름(buckling)이나 타원변형(ovalization) 등의 문제로 곡면부의 유체저항 증가 및 곡면부의 파공현상 등이 발생하고 있다^{3,4)}.

김 등은 열교환기용 동관의 굽힘 공정을 벤딩다이(bending die)와 로테이팅다이(rotating die)로 구성된 벤딩기계를 이용하여 시뮬레이션하고, 스프링백 및 관의 두께변화를 측정하였고⁵⁾, 문 등은 동관 전용 벤딩머신을 이용하여 가공 중 응력을 맨드릴(mandrel)로 분산시켜 동관의 곡면부에 발생하는 주름 현상을 개선할 수 있었지만 재료의 직경이 작아지는 현상(타원변형)과 곡면부 외곽의 두께감소 현상은 개선하지는 못했다.⁶⁾ 본 저자의 이전 연구에서는 푸시어(pusher)를 설계하고 벤딩공정시 동관의 끝단에서 면력을 추가하였지만 상측부의 편평률(circular deformation rate)과 두께감소율(Thickness reduction rate)을 다소 개선하였지만 만족할 만큼의 결과는 얻지 못하였다.

본 연구에서는 벤딩 시 곡관 상측부의 두께감소율을 개선하기 위해 벤딩공정 시 동관의 끝단 상부에 압축력을 가해주는 푸시어의 적용과 동시에 재료를 국부적(곡면 상측부)으로 가열하여 시뮬레이션을 통해 곡관의 특성을 검증한다. 시뮬레

이션은 벤딩 전용 해석프로그램인 Deform 3D를 사용하였고 벤딩공정 시 가열온도와 압축력에 따른 두께 감소율과 편평율 등을 비교분석한다.

2. 장치 모델링 및 설계조건

2.1 벤딩시스템 설계

본 연구에서는 인탈산동관의 곡면부 두께를 향상시키기 위한 기초연구로 Fig. 1과 같이 푸시어를 추가하여 벤딩시스템을 설계하였다. 인탈산동관과 같은 연성재료의 변형을 최소화하기 위해 동관의 외경과 거의 같은 크기로 포밍다이에 홈을 만들고 그 홈 사이에 직관으로 성형한 동관을 삽입시킨다. 삽입된 동관이 벤딩공정 중 움직이지 못하도록 고정시키기 위해 압력다이를 설계하였다. 클램핑다이(clamping die)를 설계하여 벤딩공정 시 포밍다이의 외부 형상과 클램핑다이의 내부형상을 따라 동관이 90°로 벤딩될 수 있도록 하였다.

동관과 같은 연성재료의 특성상 기계적 외력에 의한 벤딩 시 곡면 하부측 외관의 주름이나 스프링 백 및 곡면 상부측의 관두께가 얇아지는 현상 그리고 곡면부의 타원변형 등이 발생할 수 있다. 벤딩공정 후 나타나는 이러한 곡면부 변형현상들을 향상시키기 위해서 Fig. 1과 같이 클램핑 다이가 벤딩공정 시 회전운동을 하며 동관을 벤딩시킬 때 동관의 곡면부 변형을 최소화시켜 줄 수 있도록 동관의 내부 형상에 맞춰 설계한 볼(ball)을 맨드릴 끝단에 연결하였다. 맨드릴은 봉형태의 스틱(stick)과 끝단에 볼과 스틱이 체결핀(connection pin)으로 연결되도록 구성되어 있다. 벤딩공정 시 클램핑다이의 회전운동과 동시에 맨드릴이 동관의 내부를 따라서 회전운동을 하도록 설계하였다.

상기와 같이 설계된 벤딩시스템은 벤딩공정 시 동관의 내부에 삽입된 맨드릴이 클램핑 다리와 동시에 포밍다이 외곽을 회전하기 때문에 곡면부의 내부마찰을 최소화할 수 있기 때문에 동관의 변형을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 맨드릴의 끝단에 동관 내경에 가까운 크기의 볼을 체결핀으로 연결하여 곡면부의 타원변형을 줄

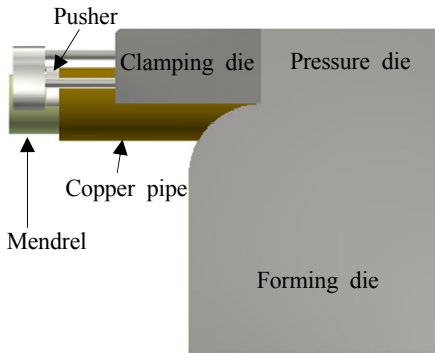


Fig. 1 Schematic diagram of bending system

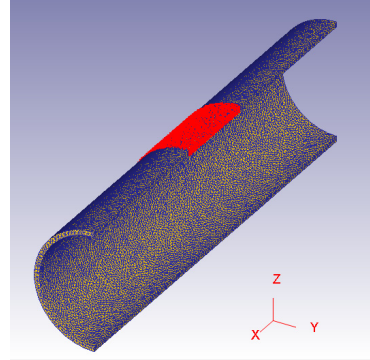


Fig. 2 Copper Pipe with Heating

일 수 있다. 본 저자의 이전 연구에서 이러한 형태로 설계한 맨드릴을 이용한 동관의 성형은 곡면부의 압력이 곡관의 전후에 고르게 분포되어 응력집중의 효과가 줄어드는 장점을 확인 할 수 있었다. 그러나 곡면 하부측은 원래의 두께보다 두께가 증가하였고 상측은 공학적 설계요건인 파이프 두께 감소율 12.5%보다 커서 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 따라서 곡면 상측부의 적정 두께감소율을 확보하기 위해서 벤딩 시 동관의 상측 끝단에 적절한 압축력을 부가하기 위해 Fig. 1과 같이 푸시어를 설계하여 시뮬레이션하였다. 푸시어를 이용한 동관의 벤딩실험 결과 곡면 상측부의 두께감소율을 다소 개선하였지만 편평률의 개선에는 효과가 미미함을 알 수 있었다.¹⁾

본 연구에서는 곡면 상측부의 두께감소율을 좀 더 개선 위해서 이전 연구에 사용한 벤딩시스템은 그대로 적용하고, Fig. 2와 같이 추가로 곡면 상측부에 국부적으로 가열하면서 벤딩하는 시스템을 설계하였다.

2.2 재료의 물성 및 실험조건

본 연구에서 사용하는 인탈산동은 내식성이 우수하고 표면조도 수치가 낮기 때문에 동관 내부를 흐르는 유체에 대한 마찰 저항이 작고 열전도율이 좋다. 또한 전성과 연성이 강관에 비해 우수하여 가공하기 용이하며 시공이 용이하다. 따라서 관, 봉, 관 등 다양한 형태로 제조되고 에어컨 냉매의 순환용 관으로 사용되고 냉각수의 열교환

기나 보일러의 급수관 및 유압이나 공기압장치들의 컨트롤 라인(control line) 등에 널리 사용되고 있다. 동관은 이음매 없는 인성동관과 인인탈산동관 그리고 무산소동관 등이 있는데 본 연구에서는 ks소재규격인 외경 28.88 mm, 두께 1.25 mm를 가지는 이음매 없는 인탈산동관을 사용하였다. 재료의 화학성분과 기계적 성질은 Table 1에 나타내었고, 시뮬레이션 조건은 Table 2에 나타내었다¹⁾.

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°

2.3 벤딩장치의 유한요소 모델

본 연구에서 설계한 동관의 벤딩장치에 대한 유한요소모델은 Fig. 3과 같다. 동관의 기하모델에서는 직선형 원통형이지만 모델에 대한 해석시간 단축을 위해 대칭되는 형상의 절반만 설계하였다. 설계한 동관은 x 축을 기준으로 좌·우 대칭성을 가지기 때문에 대칭면(symmetry plane)을 설정하고 한쪽(요소 수 : 300,000개, 메쉬타입 : tetrahedral mesh)만 유한요소모델을 만들어 해석하였다. 유한요소해석을 위해 사용한 소프트웨어는 동관의 두께 감소율 및 편평율까지 분석할 수 있는 상용 소프트웨어인 Deform 3D를 이용하여 FEM(Finite Element Method)을 수행하였다.

Deform 3D는 기본적으로 design modeler기능이 없기 때문에 CAD전용 tool인 Autodesk Inventor를 이용하여 동관의 벤딩시스템을 설계하고 Deform 3D상으로 import시켜서 모델링하였다. 동관이 벤딩되는 동안 푸시어에 의해 동관 끝단에 면압이

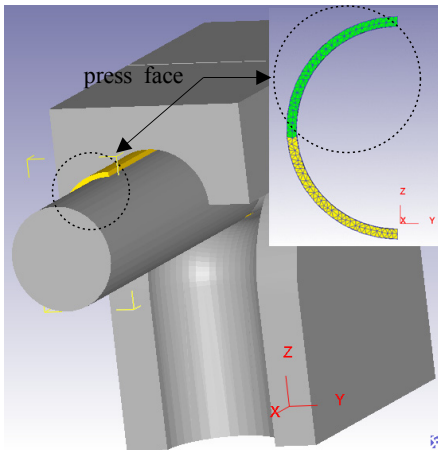


Fig. 3 Modeling of bending unit

Table 3 Material properties of model

Material	C1220
Young's modulus	264 MPa
Poisson's ratio	0.38
Thermal expansion coefficient	17E-6

지속적으로 형성될 수 있도록 Fig. 3과 같이 압력면(press face)을 설정하고 가압시켰다.

또한 Fig. 2와 같이 곡면 상측부가 될 위치에 국부적으로 가열되면서 벤딩될 수 있도록 하였다. 벤딩 시 변형되지 않는 동관의 제일 앞부분을 고정시키는 압력다이와 벤딩장치의 몸체에 해당하는 포밍다이의 요소들은 강체(rigid body)로 설정하였다. 시뮬레이션은 동관이 90°로 서서히 벤딩될 수 있도록 총 400 스텝(step)으로 설정하였으며, 유한요소해석에 사용된 동관의 물성치는 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 동관은 가공과 취급이 용이하지만 물리적으로 급격히 변형시키면 설계한 형상과 다르게 나타날 수 있다. 따라서 동관이 서서히 변형될 수 있도록 변형단계를 총 308단계로 나누어 시뮬레이션하였다. 원통형 동관을 x 축을 기준으로 대칭되는 좌측부분만 모델링한 후 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 Fig. 4와 같이 동관의 두께변화가 가장 큰 곡면 상측부 다섯 파트(part)의 동관 두께와 편평율(벤딩 전·후 동관 곡면부의 직경 차이)을 측정하고 그 평균값을 산출한 후 그림으로 나타내었다.

Fig. 5은 푸시어에 의한 면압을 1~5 MPa까지 계적으로 상승시키면서 상측 곡면부의 국부적 가열 온도에 따른 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 가열 온도가 올라가고 면압을 상승시킬수록 동관의 두께감소율이 급격히 감소하여 곡면 상측부의 두께가

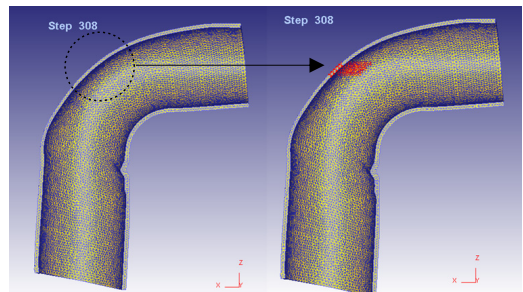


Fig. 4 Measuring point of bending pipe

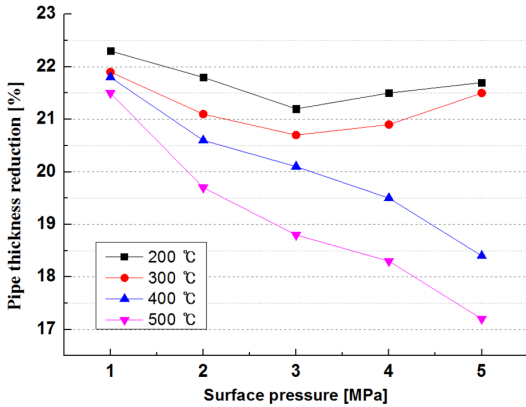


Fig. 5 Pipe thickness reduction variation according to surface pressure

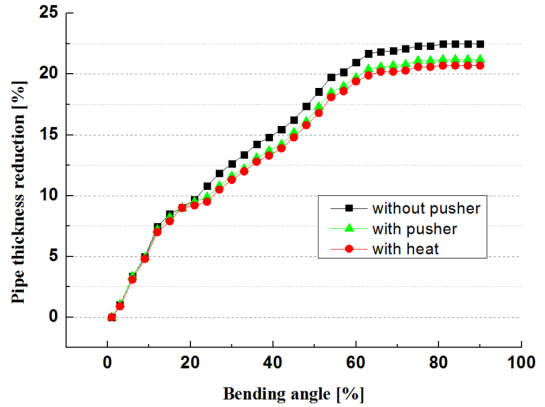


Fig. 7 Pipe thickness reduction variation according to bending angle

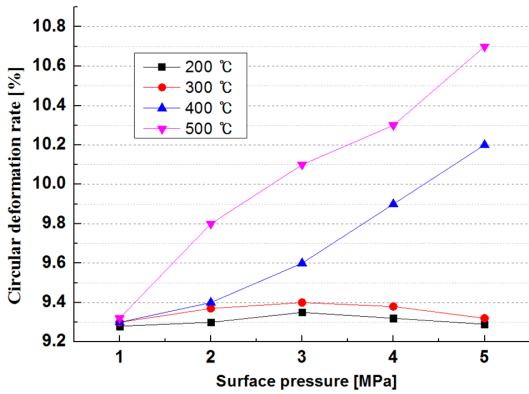


Fig. 6 Circular deformation rate variation according to surface pressure

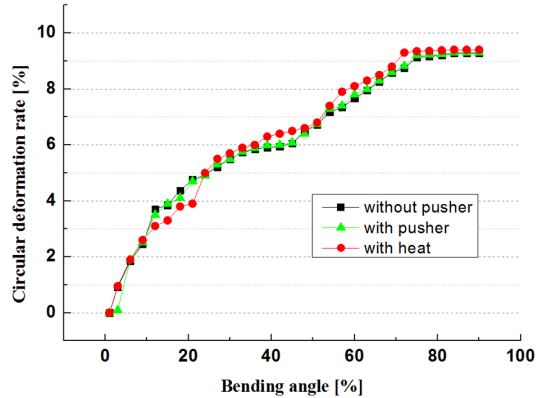


Fig. 8 Circular deformation rate variation according to bending angle

보증되는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 Fig. 6에서 가열온도가 400°C 이상인 경우, 면압 2 MPa 이상부터 동관의 곡면부에 급격한 타원변형이 발생함을 알 수 있었다. 이 결과는 동관을 400°C 이상 가열한 후 면압을 가하면서 벤딩시키면 열팽창계수가 높아진 곡면 상측부의 두께는 어느 정도 유지되지만 곡면부 전체의 형상은 타원형으로 일그러짐을 알 수 있다. 따라서 시뮬레이션 결과가 가장 적절한 두께감소율과 편평율은 가열온도 300°C와 면압 3 MPa에서 얻을 수 있었다.

동관 곡면부의 두께감소율과 편평율을 면압이 없는 상태(without pusher)와 면압(3 MPa)이 있는 상태(with pusher) 그리고 면압(3 MPa)과 국부적

가열 300°C)이 있는 상태(with heat)로 구분하여 시뮬레이션 결과를 벤딩 각도별로 비교해서 Fig. 8과 9에 나타내었다. 면압과 국부적 가열을 한 동관의 두께감소율은 20.7%로 면압이 없는 경우(22.48%)와 면압만 있는 경우(21.20%)보다 감소하였음을 알 수 있다. 또한 편평율은 최종 9.4%로 면압이 없는 경우(9.27%)와 면압만 있는 경우(9.3%)에 비해 약간 높은 수치가 나왔으나 그 차이가 미미함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 인탈산동관의 벤딩 시 발생하는

곡면 상측부의 두께감소율과 곡면부의 편평율을 개선하기 위해 동관의 끝단에 면압을 가하고 곡면 상측부를 국부적으로 가열하는 벤딩시스템을 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증하였다. 연성재료인 동관의 벤딩결과를 면압이 없는 경우와 면압이 있는 경우 그리고 면압과 국구적 가열이 있는 경우를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 푸시어에 의한 면압(1~5 MPa)과 상측 곡면부의 국부적 가열온도(200~500℃)를 단계적으로 상승시킨 결과 가열온도와 면압이 상승할수록 동관의 두께감소율이 급격히 감소하여 곡면 상측부의 두께가 보증되는 결과를 얻을 수 있었다.

2) 그러나 가열온도가 400℃ 이상과 면압이 4 MPa 이상인 경우 팽창계수가 높아진 곡면 상측부의 두께는 어느 정도 유지되지만 곡면부 전체의 형상은 타원형으로 일그러짐을 알 수 있었다.

3) 따라서 가열온도 300℃와 면압 3 MPa에서 면압이 없는 경우와 면압만 있는 경우에 비해 편평율변화는 미미하게 상승하였지만 두께감소율은 20.7%로 개선할 수 있었음을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

후 기

이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. H. Jeong; Writing-review & editing, B. S. Kim; Conceptualization, H. C. Park; Writing-original draft.

References

1. D. W. Jung, J. H. Jeong and 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)
2. H. C. Park, B. S. Kim and J. H. Jeong, 2018, "A study on Forming Analysis for Copper Pipe Bending Process Improvement", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 60-65.1.
(DOI:10.9726/kspse.2018.22.3.060)
3. J. W. Jeon, S. M. Lee, H. S. Jeong, and J. R. Cho, 2012, "Comparison of springback analysis and experiment for circular tube bending", Joint conference on The Korean Society of Mechanical Engineers, p. 266.
4. 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.
5. 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.
(DOI:10.9726/kspse.2007.24.6.009)
6. 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.
(DOI:10.5762/kais.2011.12.1.007)