

이중 볼 맨드릴에 의한 동파이프의 굽힘변형 특성 연구

A Study on Characteristics of Bending Deformation for the Copper Pipe by Double Ball Mandrel

박환철* · 정지현**†
Hwan-Cheol Park* and Ji-Hyun Jeong**†

(Received 23 July 2020, Revised 7 August 2020, Accepted 10 August 2020)

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. When the copper pipe is being bended, wrinkles and wall thinning, and ovalization occurs in the pipe. In this study, a double ball mandrel was designed to improve the thickness reduction rate and the circular deformation rate, which occurs when bending the copper tube. The performance of the bending system with double ball mandrel has been verified by the simulation that is performed by using Deform 3D to compare with the thickness reduction rate and the circular deformation rate according to the bending angle of the soft material. As the result of simulation, it has been verified that it can reduce the circular deformation rate and damage value on the upper side of the pipe.

Key Words : Bending system, Copper tube, Double ball mandrel, Circular deformation rate

1. 서 론

구리, 알루미늄합금, 강철 및 티타늄 등의 재질을 이용해서 제작한 금속튜브는 연료, 오일, 냉매, 산소 및 유압 라인 등에 널리 사용된다. 그 중에서 구리를 이용한 동관은 수분과 공기 그리고 토양에 대해 내식성뿐만 아니라 열전도율이 우수하며 표면은 타 배관 자재에 비해 매끄럽고, 장기간 사용에도 유체에 의한 부식물이 관에 부착되는 경우가 적어 마찰손실이 작다. 또한 중량이 가볍고 운반 및 취급이 용이하며, 굽힘 및 절단 등의

가공성이 우수하여 시공 시간을 크게 단축할 수 있다. 그리고 신축성이 좋고 열변형률이 낮으며 진동에 강해서 가압공기나 윤활유 등의 유체를 이송하기 위한 매개체로 광범위하게 활용되고 있다. 특히 동합금관이나 무산소동관에 비해 인으로 탈산처리한 동피를 압출 또는 냉간인발법 등에 의해 제조한 인탈산동관은 수소취화가 거의 없어서 수소용접으로 가공하기 적합하고, 기계적 특성이 우수하여 송유관, 가스관, 소화배관, 열교환기 및 냉·온수관 등의 배관용으로 널리 사용되고 있다.^{1,2)} 인탈산동관은 원형으로 감은 레벨 와운드 코일

**† 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>) : 1등기관사, 부경대학교 실습선 가야호

**† Ji-Hyun Jeong(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-1585-2295>) : 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>) : First Engineer, Training Ship Kaya, Pukyong National University.

(level wound coil)형식과 짧은 길이로 제작한 팬케이크 코일(pan cake coil)형식 그리고 직관(straight tubes)형식 등이 있고, 다양한 현장상황에 적용시키기 위해서 피팅(fitting)제품들과 서로 연결하여 사용된다. 굽힘공정(bending process)을 통해 제작되는 피팅제품인 엘보(elbow)는 굽힘공정 후 스프링백(spring back), 곡면부가 얇아지는 현상(wall thinning) 및 외관의 주름(buckling)이나 타원변형(ovalization) 등의 문제로 곡면부의 유체저항 증가 및 곡면부의 파공현상 등이 발생하고 있어 이런 현상들을 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.^{3,4)} 최근에는 경량화를 위한 성형가공의 대표적인 기술로 가공 중 압입실린더를 이용한 내압진동방식인 튜브하이드로 포밍(Tube Hydro-Forming) 가공기법에 대한 연구도 지속적으로 진행되고 있다.

김 등은 동관의 굽힘 공정을 벤딩다이(bending die)와 로테이팅다이(rotating die)로 구성된 벤딩기계를 이용하여 시뮬레이션하고, 동관의 두께변화를 연구하였고,⁵⁾ 문 등은 동관 전용 벤딩머신을 이용하여 가공 중 응력을 맨드릴(mandrel)로 분산시켜 동관의 곡면부에 발생하는 주름 현상을 개선할 수 있었지만 곡면부의 타원변형률과 두께감소 현상은 개선하지는 못했다.⁶⁾ 또한 이 등은 곡면부에 국부적인 온도로 재료를 가열하고 공정속도를 제어하여 곡관의 두께 감소율을 향상시켰으나 재료가 강관이기 때문에 고온에서 유동특성이 큰 동관의 굽힘공정에는 적용시키기 어렵다.⁷⁾

본 저자의 이전 연구에서는 동관의 두께보증형 벤딩머신을 개발하기 위한 기초연구로 벤딩틀인 맨드릴을 자체 설계제작하고 그 성능을 검증하였다.⁸⁾ 또한 굽힘공정 시 동관의 끝단 상부에 압축력을 가해주는 푸시어(pusher)의 적용과 동시에 재료를 국부적(곡면 상측부)으로 가열하여 시뮬레이션을 통해 가열온도와 압축력에 따른 두께 감소율과 편평율 등이 개선되었음을 확인하였다.^{7,8)} 하지만 회전과 동시에 가압 및 가열하는 장치를 제작하기에는 현실적으로 어려움이 있어 본 연구에서는 현장에 쉽게 적용 가능한 이중 볼 맨드릴(double ball mandrel)을 설계하여 시뮬레이션을 통

해 곡면부 형상의 특성을 검증한다. 시뮬레이션은 굽힘공정 전용 해석프로그램인 Deform 3D를 사용하고 벤딩공정 시 두께 감소율과 편평율 등을 비교 분석한다.

2. 장치 모델링 및 설계조건

2.1 벤딩시스템 설계

본 연구에서는 인탈산동관의 곡면부 형상을 향상시키기 위한 기초연구로 Fig. 1과 같이 이중 볼 맨드릴을 설계하고 이전 연구에서 설계한 Fig. 2와 같은 굽힘공정시스템에 적용하였다. 굽힘공정 시스템은 벤딩 완료 후 동관의 형상과 같은 형상으로 포밍다이(forming die)에 반원 홈을 만들고 그 홈 사이에 직관으로 성형한 동관을 삽입시킨다. 압력다이(pressure die)는 삽입된 동관이 굽힘공정 중 움직이지 못하도록 고정시키는 역할을 한다. 클램핑다이(clamping die)를 설계하여 굽힘공정 시 포밍다이의 외부 형상과 클램핑다이의 내부형상을 따라 직관형태의 동관이 90°로 굽힘될 수 있도록 하였다. 동관과 같은 연성재료의 특성상 굽힘공정 시 기계적외력에 의한 곡면부 변형현상들을 향상시키기 위해서 Fig. 2와 같이 굽힘공정 시 클램핑 다이와 맨드릴이 동시에 회전운동을 하며 동관을 굽힘시킬 때 동관의 내부 형상에 맞춰 새로이 설계한 이중 볼을 맨드릴 끝단에 연결하였다. 이중 볼 맨드릴은 봉형태의 스틱(stick)과 스틱의 끝단에 일차 볼(first ball)과 체결핀

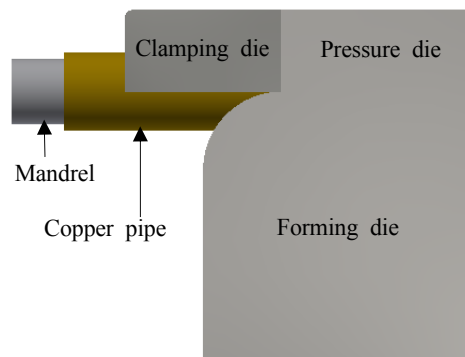


Fig. 1 Schematic diagram of bending system

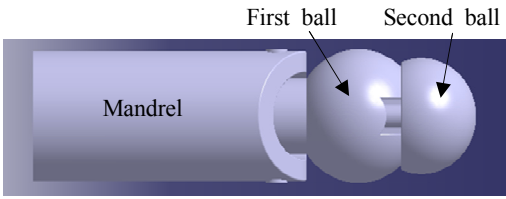


Fig. 2 Mandrel with double ball

(connection pin)으로 연결되어 일차 볼(second ball)이 약 45°로 회전운동을 할 수 있도록 구성되어 있다. 일차 볼의 끝단은 이차 볼이 회전운동을 할 수 있도록 직선 홈을 파고 체결핀으로 이차 볼과 연결할 수 있도록 설계하였다. 이차 볼은 반구형태(type of semisphere)로 일차 볼의 외곽을 회전운동할 수 있도록 내부는 구형의 홈으로 되어 있다. 상기와 같이 설계된 굽힘공정시스템은 굽힘공정 시 동관의 내부에 삽입된 맨드릴의 일차 볼이 동관의 곡면부와 접촉하면서 동관의 변형을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 저자의 이전 연구에서 일차 볼의 형태로 설계한 맨드릴을 이용한 동관의 성형은 곡면부의 압력이 곡관의 전후에 고르게 분포되어 응력집중의 효과가 줄어드는 장점을 확인할 수 있었다. 그러나 동관의 굽힘실험결과 곡면 상측부의 두께감소를 및 편평률의 개선에는 효과가 미미함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 굽힘공정시스템의 최종 목표인 곡면 상측부의 두께감소를 개선 및 편평률 개선 중에서 먼저 편평률 개선에 초점을 맞춰 이중 볼 맨드릴을 설계하고 이전 연구에 사용한 굽힘공정시스템에 적용하였다.

2.2 재료의 물성 및 실험조건

본 연구에서 사용하는 인탈산동은 표면조도 수치가 낮아 동관 내부를 흐르는 유체에 대한 마찰저항이 작고 전성과 연성이 강관에 비해 우수하여 가공 및 시공이 용이하다. 본 연구에서는 ks소 재규격인 외경 28.88 mm, 두께 1.25 mm를 가지는 이음매 없는 인탈산동관을 사용하였다. 재료의 화학성분과 기계적 성질은 Table 1에, 시뮬레이션 조건은 Table 2에 나타내었다.

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 굽힘공정시스템에 대한 유한요소모델은 Fig. 3와 같다. 동관의 기하 모델은 직선 원통형이지만 모델에 대한 해석시간 단축을 위해 대칭되는 모델의 절반만 설계하였다. 설계한 반 원통형 동관은 *x*축을 기준으로 좌-우 대칭성을 가지기 때문에 대칭면(symmetry plane)을 설정하고 한 쪽(요소 수 : 300,000개, 메쉬타입 : tetrahedral mesh)만 유한요소모델을 만들어 해석하

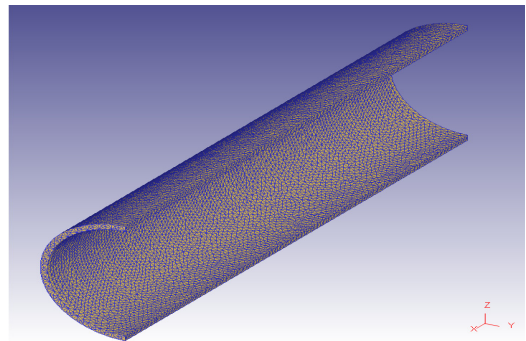


Fig. 3 Symmetry plane for pipe

Table 3 Material properties of model

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

Table 4 Friction set for the material

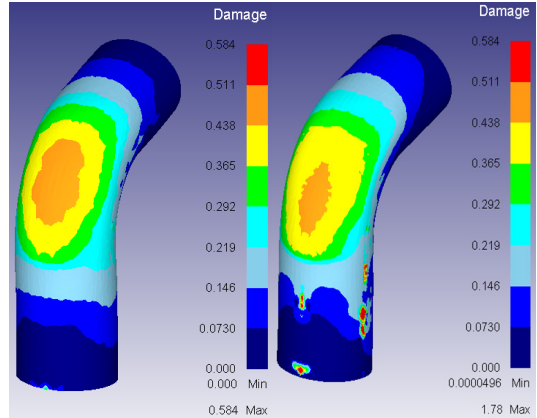
Relation	Friction
Forming Die - Tube	5.0
Pressure Die - Tube	0.7
Clamping Die - Tube	0.12
Shaft Mandrel - Tube	0.08
First Ball - Tube	0.7
Second Ball - Tube	0.7

였다. 유한요소해석을 위해 사용한 소프트웨어는 재료의 성형분야에서 널리 사용되고 있는 상용 소프트웨어인 Deform 3D를 이용하여 FEM(Finite Element Method)을 수행하였다.

동관이 굽힘공정되는 동안 클램핑 다이와 맨드릴 그리고 두 개의 볼은 포밍다이의 곡면 형상을 따라 회전하도록 설정하였다. 또한 일차 볼의 끝단에 연결된 이차 볼이 일차 볼의 홈을 따라 움직일 수 있도록 독립적으로 설계하여 회전하도록 설정하였다. 굽힘공정 시 변형되지 않는 압력다이, 포밍다이, 클램핑 다이 그리고 맨드릴 및 이중 볼의 요소들은 강체(rigid body)로 설정하였다. 시뮬레이션은 동관이 90°로 서서히 굽힘될 수 있도록 총 300 스텝(step)으로 설정하였다. 유한요소해석에 사용된 동관의 물성치는 Table 3에 나타내었고 동관과 굽힘공정시스템 사이의 접촉관계는 Table 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 동관은 물리적 특성상 급격한



(a) Single ball (b) Double ball

Fig. 4 Damage after bending

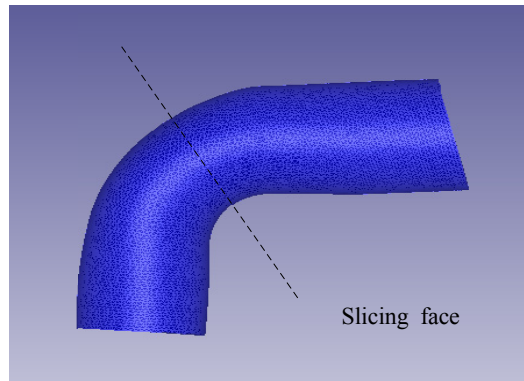


Fig. 5 Slicing face of bending pipe

외력에 의한 변형 시 설계한 형상과 다르게 나타날 수 있기 때문에 동관이 서서히 변형될 수 있도록 변형단계를 총 300단계로 나누어 시뮬레이션 하였다. 원통형 동관을 x축을 기준으로 대칭되는 좌측부분만 모델링한 후 시뮬레이션한 결과를 분석하여 그림으로 나타내었다.

Fig. 4는 벤딩 후 동관에 균열(crack)의 원인을 제공하는 손상(damage) 정도를 해석하여 나타내었다. 일차 볼 및 이중 볼을 사용한 굽힘공정 시뮬레이션 결과, 곡면부 상측 중심에서 동일하게 손상 정도가 가장 심한 것으로 나타났다. 하지만 이중 볼을 사용한 경우 손상 정도가 가장 큰 부위의 면적이 일차 볼의 경우보다 작게 나타났다.

이 결과는 굽힘공정 과정 중 맨드릴에 연결된

일차 볼이 동관을 일차적으로 변형시킨 후 이차 볼이 변형면을 지지하는 역할을 충분히 발휘한 것으로 사료된다. 일차 볼을 사용했을 때보다 최대 손상 정도가 큰 값으로 나타났지만 이 수치는 곡면부가 아닌 클램핑 부위에 나타나서 곡면부의 손상으로 볼 수는 없는 값으로 판단된다.

Fig. 5와 같이 동관의 두께변화가 가장 큰 곡면 상측부(45°)를 전단면으로 설정하고 부근 다섯 파트(part)의 두께와 편평율(벤딩 전·후 동관 곡면부의 직경 차이)을 측정하고 그 평균값을 Fig. 6~7에 나타내었다.

Fig. 6은 동관의 내부에 유체가 흐를 경우 그

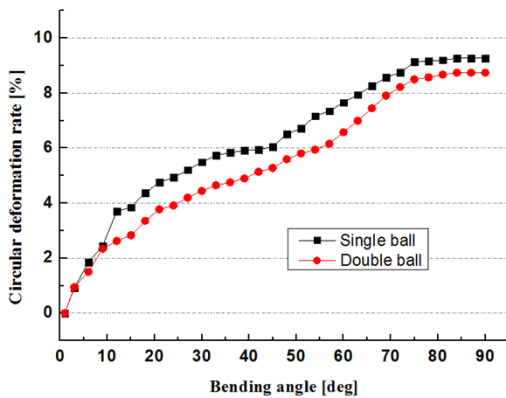


Fig. 6 Circular deformation rate variation according to bending angle

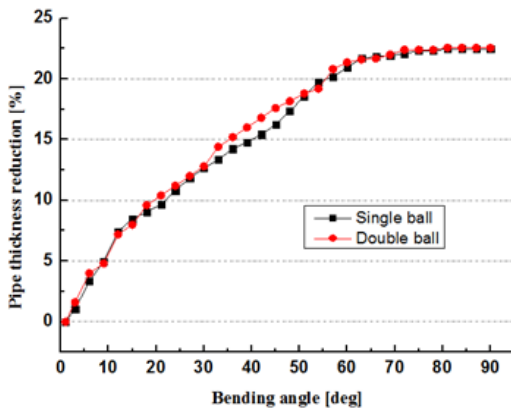


Fig. 7 Pipe thickness reduction variation according to bending angle

유체에 압력저항 및 난류를 유발시키는 요인으로 작용하는 편평율을 나타내었다. 전단면 부근의 편평율을 동관의 굽힘각도에 따라 측정한 결과 일차 볼 및 이중 볼 모두 국내 편평율의 규제한도인 15%를 모두 만족하였다. 일차 볼을 사용한 경우 전단면의 최소직경 평균값이 25.93 mm로 편평율이 약 9.27로 나타났으며, 이중 볼을 사용한 경우 전단면의 최소직경 평균값은 26.08 mm로 편평율이 약 8.74로 측정되었다. 이중 볼을 사용한 경우가 일차 볼을 사용하여 굽힘공정한 결과보다 약 0.74%의 편평율 개선효과가 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 동관 내부를 흐르는 유체와의 지속적인 마찰 등에 의해 발생하는 파공을 유발시키는 주요 원인이 되는 곡면부 상측 두께감소율을 비교하여 나타내었다. 곡면부 하측은 오히려 두께가 증가하여 그 결과를 표현하지 않았으며 곡면부 상측의 두께감소율은 일차 볼의 경우 22.48%, 이중 볼의 경우 22.56%로 두 경우 모두 공학적 설계요건인 두께감소율은 12.5%를 만족시키지는 못하였다. 이중 볼을 사용한 경우 약 0.08%의 두께감소율 향상이 있었지만 그 차이가 미미함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 연성재료인 인탈산동관의 굽힘 공정 시 발생하는 곡면 상측부의 두께감소율과 곡면부의 편평율을 개선하기 위해 이중 볼 맨드릴을 설계하여 시뮬레이션을 통해 곡면부 형상의 특성을 검증하였다. 일차 볼만 있는 맨드릴과 이중 볼이 있는 맨드릴을 사용한 동관의 굽힘공정 결과를 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일차 볼의 경우보다 이중 볼을 사용한 경우 손상 정도가 가장 큰 부위의 면적이 작게 나타났다. 이 결과는 굽힘공정 과정 중 맨드릴에 연결된 일차 볼이 동관을 일차적으로 변형시킨 후 이차 볼이 변형면의 추가 변형을 최소화할 수 있도록 내부적 지지역할을 충분히 발휘하였음을 알 수 있었다.

2) 이중 불을 사용한 경우, 전단면의 최소직경 평균값은 26.08 mm, 편평율은 약 8.74로 측정되어 일차 불을 사용하여 굽힘공정한 결과보다 약 0.74%의 편평율 개선효과가 있음을 확인하였다. 이 결과는 이중 불의 직경을 최적화시켰을 때 좀 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3) 곡면부 상측의 두께감소율은 일차 불의 경우 22.48%, 이중 불의 경우, 22.56%로 약 0.08%의 두께감소율 향상이 있었지만 그 차이가 미미함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2020학년도 제주대학교 교원성과지 원사업에 의하여 연구되었음.

Author contributions

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

References

1. 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.
2. 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.
3. C. W. Park, 2010, "A study on petronas of bending forming analysis", Autumn conference on The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 493-494.
4. 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.
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. (<https://doi.org/10.7736/KSPE.2007.24.6.058>)
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. (<https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.1.007>)
7. H. W. Lee, S. Y. Jung, C. kim, S. M. Han and H. Y. Cho, 2008, "A Study on Prevention of Molding Defects in 1.5D Hot Pipe Bending", Autumn Conference of Korean society for Precision Engineering, pp. 329-330.
8. 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. (<http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.1.66>)
9. 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. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspspe.2018.22.3.060>)
10. H. C. Park, B. S. Kim and J. H. Jeong, 2019, "A study on Characteristics of Bending Deformation for the Copper Pipe", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 51-56. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspspe.2019.23.3.051>)