

교량전차용 저유기에 사용되는 직경 16 mm 316L 스테인레스강 유압 튜브 굽힘 해석에 관한 연구

박일환, 김태우, 설상석, 홍대선*
창원대학교 기계공학부

A Study on the Bending Analysis of 16 mm Diameter 316L Stainless Steel Hydraulic Tubes used in the Reservoir for an AVLB

Il-Hwan Park, Tae-Woo Kim, Sang-Seok Seol, Dae-Sun Hong*
School of Mechanical Engineering, Changwon National University

요 약 파이프는 내부 유체의 이송용으로 다양한 산업에서 이용되고 있으며, 사용 환경에 따라 벤딩 공정을 거친 후 사용한다. 유압 기기에 사용되는 유압 튜브는 유압 기기의 설치 위치에 따라 간섭이 발생되지 않도록 벤딩 후 사용한다. 본 연구에서는 교량전차에 설치되는 유압 실린더용 저유기의 유압 튜브에 대해 벤딩 회전 각도에 따른 응력 분포 및 최대 응력을 평가한다. 이를 위해 저유기에 사용되는 유압 튜브 중 직경이 가장 큰 16 mm 직경의 스테인레스강 유압 튜브를 선정하고, 벤딩기를 이용하여 유압 튜브를 굽힘 성형한다. 이 때 5개의 벤딩 회전 각도에 따라 스프링 백을 고려하여 성형하고, 성형이 완료된 후 스프링 백 각도와 벤딩부 단면적 변화량을 측정한다. 다음으로 유압 튜브의 굽힘 성형과 동일한 조건에서 탄소성 모델을 이용하여 유압 튜브 벤딩에 대한 유한 요소 해석을 진행한다. 이를 통해 굽힘 성형으로 인한 스프링 백 각도와 단면적 변화량을 해석 결과와 비교한다. 마지막으로 벤딩 회전 각도에 따른 유압 튜브의 해석 결과 모델을 이용하여 각각 동일한 내압을 적용함으로써 벤딩 회전 각도에 따른 응력 분포 및 최대 응력을 평가한다.

Abstract Pipes are used in most industries for the transport of various fluids, and bending processes need to be carried out for practical use. In this process, it is essential that mechanical interference does not occur between adjacent tubes or components. This study evaluates the stress distribution and maximum stress of the hydraulic tubes used in a reservoir for an armored vehicle launched bridge (AVLB) according to the bending angles. For this purpose, a 16-mm-diameter 316L stainless steel hydraulic tube (the largest size used in the reservoir) was bent using a bending machine. Hydraulic tubes were then bent using five bending rotation angles in consideration of the spring back, and then the bending rotation angle and the cross-sectional area were measured after the bending. Subsequently, a finite element analysis of the bending was performed using an elasto-plastic model under the same conditions as the hydraulic tube bending. Then, the change in bending rotation angle and cross-sectional area due to bending were compared with the analysis results. The stress distribution and maximum stress according to the bending rotation angle were finally evaluated by applying the same internal pressure using the result of the analysis model of the hydraulic tube according to the bending rotation angle.

Keywords : AVLB, Elasto-Plastic Model, Hydraulic Tube, Pipe Bending, Reservoir, Spring Back

본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학협력 거점형 플랫폼(R&D)(S3025159)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Dae-Sun Hong(Changwon National Univ.)

email: dshong@changwon.ac.kr

Received October 12, 2022

Revised November 18, 2022

Accepted January 6, 2023

Published January 31, 2023

1. 서론

파이프 벤딩 제품은 내부 유체의 이송용으로 플랜트, 건설, 자동차, 선박, 방산 등 다양한 산업에서 이용되고 있다. 특히, 플랜트, 조선 등의 분야에서는 내부 유체의 압력 및 열적 팽창의 충격을 완화시킬 목적으로 파이프 벤딩 제품을 사용하고 있다. 또한, 파이프 구조의 티(tee)나 엘보우(elbow) 같은 연결부를 없애기 위한 굽힘 작업은 신뢰성 향상과 비용 절감 때문에 그 필요성이 더 커지고 있으며[1], 각종 단일 부품으로 유압 기기, 보일러, 열교환기 등에서도 널리 이용되고 있다[2]. 이 중 유압 기기의 파이프 벤딩 제품은 유압 튜브로 지칭되며, 유압 기기의 설치 위치에 따라 간섭이 발생되지 않도록 유압 튜브를 굽혀서 사용한다.

파이프 벤딩에 관한 연구로 재료의 탄소성 거동과 스프링 백을 고려한 다양한 연구들이 있으며, 벤딩 각도를 갖는 파이프의 열간 성형에 관한 연구[3]와 램-프레스(ram-press) 파이프 벤딩 공정에 관한 연구[4], 3가지 물성치에 대한 파이프 벤딩을 비교한 연구[5]가 있다. 그리고 파이프 벤딩 공정에 관한 연구로 작은 곡률 반경을 갖는 파이프 벤딩 공정 설계에 관한 연구[6]와 실험계획법을 이용한 파이프 벤딩 공정의 설계 인자에 관한 연구[7]가 있다. 이외에 파이프 벤딩 시 파이프의 두께 변화 및 단면 형상 변형에 관한 다양한 연구[8,9]가 수행되었다.

이상의 선행 연구는 재료의 탄소성 거동과 파이프의 스프링 백, 다른 물성치를 갖는 파이프 벤딩의 비교, 공정설계, 단면적의 두께 변화와 타원 변형에 대한 연구가 진행되었다. 그러나 파이프 벤딩의 설계 인자인 벤딩 회전 각도에 따라 상대적인 응력 비교에 대한 연구가 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 교량전차의 유압 실린더용 저유기(reservoir)에 설치되는 유압 튜브를 연구 대상으로 벤딩 회전 각도에 따라 각각의 유압 튜브를 성형하고 내부 압력을 가하여 상대적인 구조 안정성을 평가한다.

이를 위해 벤딩기를 이용하여 유압 튜브를 5종류의 각도에 따라 성형하고, 벤딩부를 절단하여 단면적을 측정한다. 그리고 유압 튜브의 탄소성 모델과 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 비선형 굽힘 해석을 수행하고, 해석 결과인 벤딩 각도와 벤딩 단면적은 실험치와 비교하여 검증한다. 굽힘 해석을 통해 벤딩된 유압 튜브 모델은 구조적 안전성을 비교하기 위해 동일한 내부 압력을 가하여 해석하고, 각 유압 튜브의 최대 응력을 상대적으로 비교한다.

2. 본론

2.1 교량전차용 저유기의 유압 튜브 굽힘 성형

2.1.1 유압튜브의 굽힘 장치

본 연구에서의 실험 대상은 Fig. 1(a)의 유압 실린더용 저유기에 사용되는 유압 튜브이다. 저유기는 Fig. 1(b)의 교량 설치 장갑차량인 교량전차에 설치되며, 설치 위치에 따라 유압 튜브는 다양한 각도로 벤딩 공정을 거친 후 사용된다.

저유기에 사용되는 유압 튜브를 벤딩하기 하기 위해서는 Fig. 2(a)와 같은 벤딩기를 사용한다. 여기서, 벤딩기는 유압 튜브를 고정하여 적정 위치까지 길이 방향으로 이동시키는 클램프(clamp), 요구되는 벤딩 반경으로 성형이 가능하게 하는 굽힘 다이(bending die), 회전 동작을 통해 벤딩 회전 각도로 성형하는 회전 다이(rotating die), 그리고 회전 다이에 의해 벤딩 동작 시 유압 튜브의 휘어짐을 방지하기 위한 고정 다이(fixing die)로 구성된다.



Fig. 1. Use location of the hydraulic tube
(a) Reservoir (b) AVL

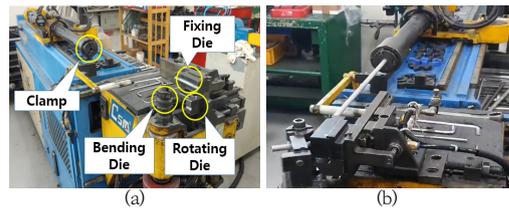


Fig. 2. A bending machine
(a) Components (b) Initial position for bending

Table 1. Specification and quantity of the specimen

| Items | Values | Items | Values |
|--------------------|----------|--------------------|--------|
| Material | STS 316L | Outer diameter(mm) | 16 |
| Inner diameter(mm) | 11.6 | Thickness(mm) | 2.2 |
| Length(mm) | 200 | Quantity(EA) | 5 |

저유기에는 다양한 직경을 가지는 유압 튜브가 사용되며 이 중 직경의 크기가 가장 큰 유압 튜브를 선정하고, 선정된 유압 튜브 시편의 상세 스펙과 수량은 Table 1과 같다. 그리고 Fig. 2(b)와 같이 벤딩기의 클램프에 유압 튜브를 고정하여 굽힘 다이의 회전 반경을 따라 회전 다이를 이용하여 벤딩을 진행한다.

2.1.2 유압 튜브의 굽힘 성형 결과

유압 튜브의 회전 반경은 굽힘 다이의 직경으로 정해지며, 사용된 굽힘 다이의 직경은 59 mm이다. 유압 튜브의 굽힘 성형은 굽힘 다이의 원주 방향으로 회전 다이가 회전함으로써 유압 튜브가 벤딩된다.

Table 2는 유압 튜브의 굽힘 성형 결과로 회전 각도에 따른 실제 굽힘 성형이 된 유압 튜브를 보여준다. 유압 튜브의 회전 각도는 성형 후 요구 회전 각도 θ_a (°)로 30도에서 150도까지 30도의 간격으로 5가지 경우에 대해 정의한다. 정의된 5가지의 요구 회전 각도에서 스프링 백을 고려하기 위해 각 회전 각도에 10 %를 더 회전하여 벤딩기의 입력 회전 각도 θ_b (°)로 사용하고, 굽힘 성형 후 실제 성형 각도 θ_c (°)를 측정하여 비교한다. 여기서, 입력 회전 각도와 실제 성형 각도의 차이를 통해 스프링 백 각도 θ_d (°)을 구할 수 있으며, 회전 각도가 커짐에 따라 스프링 백이 커짐을 알 수 있다. 특히 입력 회전 각도가 120도에 비해 150도일 경우 스프링 백의 크기가 약 2배 이상 크게 발생되었다.

Table 2. Bending angle and actual shape obtained from bending machine

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|---|---|---|---|---|
| Desired angles, θ_a (°) | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| Input angles, θ_b (°) | 33 | 66 | 99 | 132 | 165 |
| Bending angles, θ_c (°) | 29.3 | 60.2 | 90.7 | 123.0 | 147.9 |
| Springback angle, θ_d (°) | 3.7 | 5.8 | 8.3 | 9 | 17.1 |
| Shapes after bending |  |  |  |  |  |



Fig. 3. Cross-section of the hydraulic tube
(a) Cross-section before bending
(b) Cross-section after bending

Table 3. Experimental results of the cross-section

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W(mm) | 16.25 | 16.44 | 16.46 | 16.34 | 16.32 |
| H(mm) | 15.12 | 14.96 | 14.91 | 15.03 | 15.08 |
| Aspect ratio(W/H) | 1.074 | 1.099 | 1.104 | 1.087 | 1.082 |
| t_1 (mm) | 2.06 | 1.95 | 2.02 | 1.98 | 1.95 |
| t_2 (mm) | 2.40 | 2.33 | 2.31 | 2.38 | 2.35 |
| Thickness ratio(t_2/t_1) | 1.165 | 1.195 | 1.144 | 1.202 | 1.205 |

벤딩기를 이용하여 성형한 유압 튜브의 단면적 변화를 구하기 위해 Fig. 3과 같이 벤딩부를 절단하여 변형 전 유압 튜브와 변형 후 유압 튜브의 단면적을 비교한다. 벤딩으로 인한 변형은 타원 형상으로 성형되며 타원 형상의 폭 W(mm), 높이 H(mm), 얇아진 두께 t_1 (mm), 두꺼워진 두께 t_2 (mm)로 정의한다.

Table 3은 입력 회전 각도에 따라 변형된 단면적의 실측 데이터를 보여준다. 여기서 Case 3인 99도까지는 유압 튜브의 단면적이 폭은 커지고 높이는 낮아지는 타원 형상의 경향이 더 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 132도와 165도에서는 그 경향이 나타나지 않는데, 이것은 각각의 다이가 유압 튜브의 직경과 동일한 홈을 가짐으로써 닫힌 형태(close type)의 성형 방법을 사용했기 때문이다.

2.2 탄소성 모델을 이용한 유압 튜브의 굽힘 해석

2.2.1 탄소성 모델의 정의

본 연구의 유압 튜브 굽힘 성형은 탄성 영역을 벗어나 비선형 탄소성 영역에서 성형이 이루어진다. 따라서 유압 튜브의 굽힘 성형에 대한 유한 요소 해석을 위해서는 탄소성 모델을 적용해야 한다.

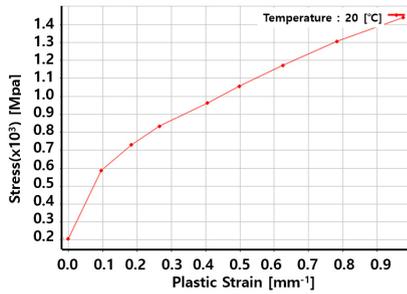


Fig. 4. True stress-strain curve of STS 316L used in ANSYS

Table 4. Material properties of STS 316L

| Properties | Values |
|----------------------|----------|
| Young's modulus(MPa) | 1.93E+05 |
| Poisson's ratio | 0.31 |
| Yield stress(MPa) | 210 |

탄소성 모델은 단면적 감소 효과를 고려한 진응력-변형률 곡선(true stress-strain curve)이 필요하며, 다음 Eq. (1)을 통해서 구할 수 있다[10].

$$\sigma_{True} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng}), \quad \epsilon_{True} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

Where, σ_{True} denotes true stress, ϵ_{True} denotes true strain, σ_{eng} denotes engineering stress, ϵ_{eng} denotes engineering stress

그러나 Eq. (1)을 통해 변형률 전구간에 걸쳐 진응력을 정확히 구할 수 없다. 따라서 인장시험과 유한요소해석의 반복 수행을 통해 진응력-변형률 곡선을 구한 연구 [10]의 결과를 이용한다.

본 연구에서 유한 요소 해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS Workbench를 이용한다. ANSYS Workbench에서는 비선형 해석을 위해 STS 316L의 진응력-변형률 곡선이 필요하며, 참고문헌의 진응력-변형률 곡선을 이용하여 다중 선형 등방성 경화 모델(multi-linear isotropic hardening model)로 Fig. 4과 같이 생성한다. 이 때 재료의 물성치는 Table 4와 같다.

2.2.2 유압 튜브의 유한 요소 모델링 및 경계조건

탄소성 모델을 이용하여 유압 튜브의 굽힘 해석을 위해 Fig. 5와 같이 유한 요소 모델을 생성한다. 생성된 모델에서 유압 튜브는 유한 요소 해석이 가능하도록 유연체로 모델링한다. 그리고 고정 다이, 회전 다이, 굽힘 다이는 냉간 공구강(STD-11)의 환봉으로 제작되어 유압

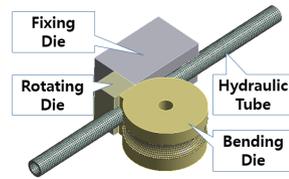


Fig. 5. Finite element model for the bending analysis

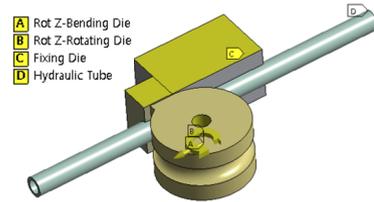


Fig. 6. Boundary conditions for the bending analysis

튜브의 단면적보다 7배 이상 크므로 강성이 상대적으로 매우 크기 때문에 변형이 발생하지 않는다고 가정하여 강제 모델을 적용한다.

유한 요소 모델을 생성한 후 Fig. 6와 같이 경계 조건을 설정한다. 여기서, 굽힘 다이와 회전 다이는 굽힘 다이의 중심 축으로만 회전되는 회전 조건 (A), (B)를 정의하고, 고정 다이를 고정 (C)하여 굽힘 성형 시 벤딩부 이외의 영역에서 유압 튜브가 변형되는 현상을 방지한다. 그리고 유압 튜브는 회전 다이와 굽힘 다이가 회전할 때 회전 반경을 따라 회전되어 성형되므로 유압 튜브의 중심 축 방향으로만 이동이 가능한 조건(D)을 정의한다. 그리고 가공 시 발생하는 열변형 및 열전달은 무시하고, 유압 튜브와 각각의 다이 사이에 발생하는 마찰은 쿨롱 마찰(Coulomb friction)로 설정하여 냉간 가공에서 일반적으로 적용하는 0.1을 마찰 계수로 사용한다[2].

2.2.3 유압 튜브의 굽힘 해석 결과 및 분석

유압 튜브의 굽힘 해석은 벤딩기의 입력 회전 각도인 33도, 66도, 99도, 132도, 165도와 같이 굽힘 다이와 회전 다이를 회전시켜 각각 Case 1부터 Case 5까지 5가지 경우에 대해 해석한다. 이 때 회전 속도는 벤딩기에서 실측된 값인 1.57(rad/s)을 사용하고, 회전 속도를 반영하기 위해 ANSYS Workbench의 과도 구조 해석(transient structural analysis)을 이용하여 시간에 따른 회전 각도를 정의하여 해석한다.

Table 5는 입력 회전 각도가 99도일 경우의 해석 단계를 보여준다. 여기서 첫 번째 단계로 해석 초기 위치를 보여주고, 두 번째 단계로 굽힘 다이와 회전 다이가 99도

회전한 위치를 보여준다. 마지막으로 세 번째 단계에서는 성형이 완료된 후 유압 튜브의 스프링 백 효과를 반영하기 위해 회전 다이를 유압 튜브와 접촉이 되지 않는 위치로 이동시킨다.

시뮬레이션 입력 각도 θ_{bs} (°)에 따른 유압 튜브의 굽힘 해석을 통한 시뮬레이션 성형 각도 θ_{cs} (°)의 결과는 Table 6과 같다. 이 때 시뮬레이션 입력 각도와 시뮬레이션 성형 각도의 차를 이용하여 스프링 백 각도 θ_{ds} (°)를 구한다.

Fig. 7은 굽힘 해석을 통한 스프링 백의 각도와 실제 벤딩기의 스프링 백 각도를 비교한 그래프이며, 해석을 통한 스프링 백의 각도는 선형적으로 증가하지만 벤딩기를 통한 스프링 백 각도는 입력 회전 각도가 99도까지는 선형적으로 증가하다가 165도에서는 2배 이상 증가한다.

Table 7은 굽힘 해석을 통해 나온 단면적 변화를 보여주며, 폭 W_s (mm), 높이 H_s (mm), 얇아진 두께 t_{1s} (mm), 두꺼워진 두께 t_{2s} (mm)로 정의한다. 여기서 중형비는 입력 회전 각도가 99도(Case 3)까지는 증가하고 165도(Case 5)에는 줄어들었으며, 두께 비율도 입력 회전 각도가 99도까지는 증가하는 것을 보여준다. 이것은 Table 3의 실제 벤딩기를 이용한 성형의 결과인 중형비와 두께 비율에서 유사한 경향을 보이며, 각 다이의 홈 직경이 유압 튜브와 동일한 크기를 가지는 닫힌 형태의 성형 방법을 이용함으로써 단면적 변형을 제한했기 때문이다.

Table 5. Simulation steps of bending about 99° rotation

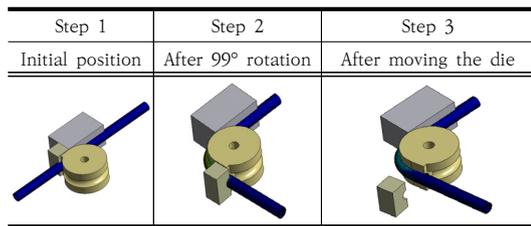


Table 6. Simulation results of bending angle

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Input angles, θ_{bs} (°) | 33 | 66 | 99 | 132 | 165 |
| Bending angles, θ_{cs} (°) | 31.4 | 63.6 | 95.8 | 128.2 | 160.7 |
| Springback angles, θ_{ds} (°) | 1.6 | 2.4 | 3.2 | 3.8 | 4.3 |

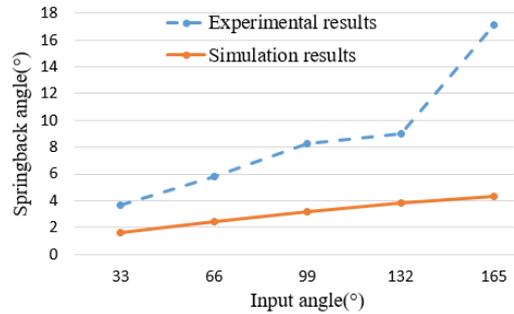


Fig. 7. Comparison of experimental results and simulation results for the springback angle

Table 7. Simulation results of the cross-section

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W_s (mm) | 15.98 | 15.96 | 15.98 | 15.97 | 15.97 |
| H_s (mm) | 15.46 | 15.40 | 15.39 | 15.39 | 15.41 |
| Aspect ratio(W_s/H_s) | 1.034 | 1.036 | 1.038 | 1.038 | 1.036 |
| t_{1s} (mm) | 2.05 | 2.02 | 2.02 | 2.02 | 2.02 |
| t_{2s} (mm) | 2.37 | 2.42 | 2.43 | 2.43 | 2.43 |
| Thickness ratio(t_{2s}/t_{1s}) | 1.156 | 1.198 | 1.203 | 1.203 | 1.203 |

2.3 유압 튜브의 굽힘에 따른 응력 해석

유압 튜브의 굽힘에 따른 응력을 해석하기 위해서는 굽힘 해석의 결과인 입력 회전 각도와 단면적의 변화가 반영된 모델이 필요하다. 이를 위해 ANSYS Workbench의 과도 구조 해석 모듈에서 수행한 비선형 탄소성 해석의 결과를 정적 구조 해석 모듈로 전달하여 변형된 모델에 대한 구조해석을 수행한다. 그리고 구조해석의 경계 조건으로 유압 튜브의 끝단을 고정하고, 입력 회전 각도에 따른 상대적인 응력을 비교하기 위해 단위 내부 압력으로 1 MPa를 가한다.

Table 8은 각 입력 회전 각도에 따른 굽힘 모델의 구조 해석 결과로 길이 방향 단면적에 대한 응력 분포를 보여준다. 여기서 벤딩 전 최대 응력이 3.8 MPa이며, 이보다 더 클 경우에 응력 분포를 적색으로 표시한다. 적색으로 표시된 응력 분포는 입력 회전 각도에 따라 벤딩부에 발생한 응력 집중을 보여주며, 그 때의 응력 집중부 길이를 측정하여 정리한다. 측정된 응력 집중부의 길이는 입력 회전 각도가 커질수록 50 mm에서 138 mm까지 벤딩부의 길이 방향으로 길어짐을 확인할 수 있다.

Table 8. Contour and length of the stress concentration

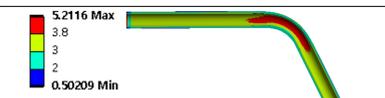
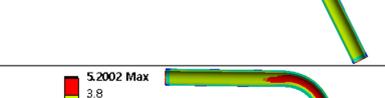
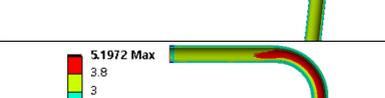
| Case | Contour | Length (mm) |
|------|---|-------------|
| 1 |  | 50 |
| 2 |  | 70 |
| 3 |  | 94 |
| 4 |  | 114 |
| 5 |  | 138 |

Table 9. Max. stress of the bending part

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Max. stress of original shape, σ_O (MPa) | 3.758 | | | | |
| Max. stress of deformed shape, σ_D (MPa) | 4.971 | 5.159 | 5.185 | 5.181 | 5.165 |
| $\sigma_M = \sigma_D - \sigma_O$ (MPa) | 1.213 | 1.401 | 1.427 | 1.423 | 1.407 |
| $\sigma_M/\sigma_O \times 100$ (%) | 32.3 | 37.3 | 38.0 | 37.9 | 37.4 |

Table 9는 구조 해석 결과로 유압 튜브 벤딩부의 최대 응력을 보여주며, 변형 전 최대 응력 σ_O (MPa)과 입력 회전 각도에 따른 변형 후 최대 응력 σ_D (MPa)을 보여준다. 그리고 각 최대 응력의 차이 σ_M (MPa)와 변형 전 최대 응력에서 늘어난 최대 응력의 비율을 정리한다. 여기서 변형 후 최대 응력은 약 30 % 이상 증가하였으며, 입력 회전 각도가 99도까지는 최대 응력의 비율이 증가하였고 132도와 165도에서는 조금 줄어들었다.

3. 결론

본 연구에서는 교량 전차에 설치되는 유압 실린더용 저유기의 유압 튜브에 대해 벤딩 회전 각도에 따른 응력 분포 및 최대 응력을 평가하였다. 이를 위해 저유기에 사용되는 유압 튜브 중 직경이 가장 큰 16 mm 직경의 스테인레스강을 선정하고 5개의 벤딩 회전 각도에 실험 및 해석을 수행하였다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 벤딩기를 이용하여 스프링 백을 고려한 입력 회전 각도로 굽힘 성형하고 각 입력 회전 각도에 따라 스프링 백 각도 및 단면적 변화량을 구하였다. 실험과 동일한 조건으로 유압 튜브 벤딩에 대해 비선형 탄소성 해석을 진행하였고, 해석을 통한 스프링 백 각도는 입력 회전 각도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하지만 벤딩기를 통한 스프링 백 각도는 입력 회전 각도가 99도까지는 선형적으로 증가하다가 165도에서는 2배 이상 증가하였다.
- 2) 단면적 변화량에서는 종횡비와 두께비를 해석과 실험 결과 비교한 결과 유사한 결과를 보였으며, 입력 회전 각도가 99도까지 증가하다가 165도에서는 감소하는데 이것은 각 다이의 직경이 유압 튜브와 동일한 크기를 가지는 닫힌 형태의 성형 방법으로 인한 결과로 사료된다. 그리고 벤딩 회전 각도에 따른 상대적인 응력 분포에 대한 평가로 비선형 탄소성 해석의 결과로 나온 변형된 모델을 하여 단위 내부 압력 1 MPa을 가하여 구조 해석을 수행하였다.
- 3) 구조 해석을 통해 벤딩 전 최대 응력이 3.8 MPa이었으며 이보다 크게 발생하는 응력 집중부를 표시하고 그 때의 응력 집중부 길이를 측정하였다. 측정된 응력 집중부의 길이는 입력 회전 각도가 커질수록 벤딩부의 길이 방향으로 길어짐을 확인할 수 있었다. 그리고 유압 튜브의 벤딩부에서의 최대 응력은 벤딩 전과 비교해서 약 30 % 이상 증가하였다.

이와 같은 결과를 이용하여 유압 튜브 벤딩 시 내부 유체의 압력에 따라 적절한 유압 튜브의 선정 및 벤딩 회전 각도에 대한 기초적인 설계 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 향후 더 다양한 직경과 소재를 가지는 유압 튜브에 대해 굽힘 실험과 해석을 추가하여 비교·검토할 예정이다.

References

- [1] K. H. Lew, *A study on pipe bending by high frequency local induction heating*, Ph.D dissertation, Pusan National University, Busan, Korea, pp.1, 2002.
- [2] H. J. Kim and C. M. Lee, "A study on the bending process for precision pipe forming", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.24, No.6, pp.58-65, June 2007.
- [3] Hu, Zhong, and J. Q. Li., "Computer simulation of pipe-bending processes with small bending radius using local induction heating", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.91, pp.75-79, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00425-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00425-7)
- [4] Sidun, Pawel and Łukaszewicz, Andrzej. "Verification of ram-press pipe bending process using elasto-plastic FEM model", *Acta Mechanica et Automatica*, Vol.11, No.1, pp.47-52, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1515/ama-2017-0007>
- [5] Zhong Hu, "Elasto-plastic solutions for spring-back angle of pipe bending using local induction heating," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.102, pp.103-108, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00443-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00443-X)
- [6] K. H. Ryu, D. J. Kim, B. M. Kim and D. J. Lee, "Analysis and process design of hot pipe bending process with small bending radius," *Journal of the Korean Society for technology of plastics*, Vol.10, No.4, pp.329-337, 2010.
- [7] H. W. Lee, S. Y. Jung, T. K. Woo and C. Kim, "An optimum design of pipe bending process using high frequency induction heating and dynamic reverse moment," *Journal of Korean Society for Transactions of Materials Processing*, Vol.19, No.2, pp.79-87, 2010.
- [8] Kale, A. V. and H. T. Thorat, "Control of ovality in pipe bending: a new approach," *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, pp.1-5, Dec. 2014.
- [9] D. W. Jung, J. H. Jeong and J. R. Cho, "A study on forming analysis for the soft pipe bending process," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.37, No.1, pp.66-71, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.5916/ikosme.2013.37.1.66>
- [10] H. D. Kweon, J. W. Kim, O. Song and D. Oh, "Determination of true stress-strain curve of type 304 and 316 stainless steels using a typical tensile test and finite element analysis," *Nuclear Engineering and Technology*, pp.647-656, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.014>

박 일 환(II-Hwan Park)

[정회원]



- 2007년 2월 : 창원대학교 대학원 기계설계공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 : 창원대학교 대학원 메카트로닉스공학부 (공학박사)
- 2007년 6월 ~ 2016년 8월 : STX 조선해양 연구원
- 2020년 11월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스연구원 연구교수

<관심분야>

로봇 및 생산 자동화

김 태 우(Tae-Woo Kim)

[준회원]



- 2022년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 기계설계공학 석사과정

<관심분야>

생산공학, 인공지능

설 상 석(Seol-Sang Seok)

[정회원]



- 2008년 2월 : 창원대학교 대학원 기계설계공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 창원대학교 대학원 기계설계공학과 (공학박사)
- 1998년 1월 ~ 2011년 12월 : (주)거백 대표이사
- 2012년 4월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스연구원 연구교수

<관심분야>

산업기계 재제조, 정밀가공

홍 대 선(Dae-Sun Hong)

[정회원]



- 1986년 2월 : 한국과학기술원 대학원 생산공학 (공학석사)
- 1995년 8월 : 한국과학기술원 대학원 생산공학 (공학박사)
- 1982년 1월 ~ 1997년 2월 : 삼성 항공산업(주) 수석연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 교수

〈관심분야〉

생산공학, 인공지능