



라인 레이저 이미지를 이용한 실시간 파이프 형상 측정 시스템 개발

정명진^{a,*}Development of Real-Time Pipe Shape Measurement System
Using Line Laser ImagingMyungjin Chung^{a,*}^a Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	August	2025
Revised	15	August	2025
Accepted	18	August	2025

Keywords:

Real-time
Pipe shape
Measurement system
Line laser image
Image processing

ABSTRACT

As the plant, home appliance, and automobile industries develop, the importance of piping technology using pipes is increasing along with material technology. During the bending process, pipe products stretch and the bending curvature changes due to spring back after bending. Assembly errors occur because of accumulated deviations in pipe shape during the bending of pipes with multiple bending points. In this study, we developed a measurement system capable of capturing pipe shape information in real time during the pipe bending process. The performance of the system was quantitatively verified through 45° and 90° pipe bending experiments and comparative measurements conducted by installing it on a bending device. The results confirmed that the developed pipe shape measurement system exhibited a maximum measurement error of 0.178° in bending angle and 0.254 mm in vertex position.

1. 서론

플랜트, 가전, 항공, 자동차 산업이 발달함에 따라 냉동기 냉매, 플랜트 유체, 베어링 윤활유 등 소재 기술과 더불어 파이프를 사용하는 배관 기술의 중요성이 증가 하고 있다. 파이프는 굽힘 과정에서 제품이 늘어나고 굽힘 후 스프링 백에 의해 굽힘 곡률에 변화가 발생하게 된다^[1-8]. Hea는 굽힘 특성과 튜브 굽힘의 여러 결함을 분석하여 내부 굽힘 불안정성, 외부 굽힘 벽의 얇아짐, 스프링 백 현상, 단면 변형, 성형 한계에 대해 정리하였다^[1]. Zhang은 ABAQUS를 사용한 시뮬레이션을 통해 작은 직경과 두꺼운 벽을 갖는 튜브의 굽힘 공정에서 스프링 백 효과를 규명하였다^[2]. Mun은 작업 시간을 줄이고 생산 용량을 향상시키기 위해 스프링 백 효과를 고려하

였다^[3]. Jeon은 분석을 통해 스프링 백 효과를 설명하고 원형 튜브 굽힘에 대한 실험을 통해 분석 내용을 검증하였다^[4]. Song은 명시적 방법과 암시적 방법을 결합하여 튜브 굽힘 공정에서 스프링 백을 예측하였다^[5]. Guo는 오류 역 전파 신경망과 스플라인 함수를 결합하여 굽힘 공정에서 스프링 백 굽힘 각도를 예측하여 스프링 백 굽힘 각도 예측 모델을 제안하였다^[6]. Mun은 굽힘 점이 많은 파이프의 굽힘 가공 중 누적된 오차로 인해 파이프 형상이 변형되고, 이로 인해 조립 공정에서 불량 발생을 확인하였다^[7]. 이와 같이 다단의 굽힘 부위를 갖는 파이프는 제작 후 스프링 백에 의해 위치가 틀어져 부품 조립 시에 연결이 되지 않는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 굽힘 작업 후에 스프링 백 등의 변형에 의한 파이프의 틀어짐을 측정할 필요가 있다. Ha는 디지털 이미지 기반

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-0461

E-mail address: mjchung@tukorea.ac.kr (Myungjin Chung).

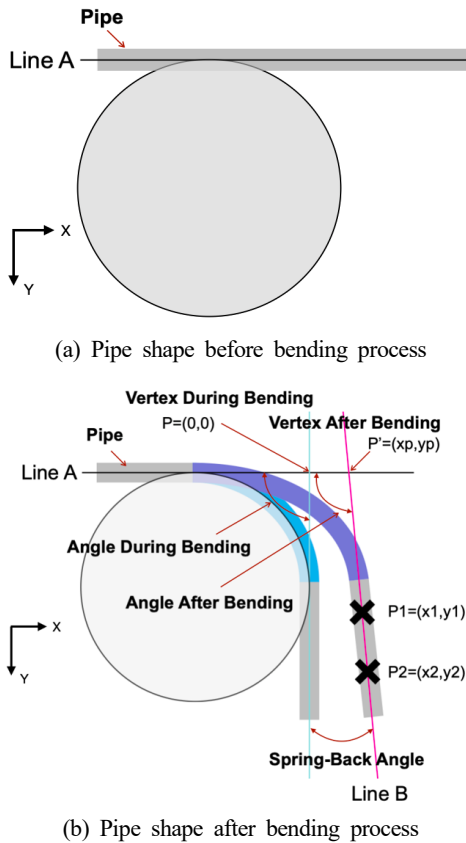


Fig. 1 Shape change due to spring back occurring in the pipe bending process

의 레이저 추적을 이용하여 회전 굽힘 공정에서 스프링 백을 측정하기 위해 굽힘 공정이 진행되는 튜브의 끝에 레이저를 설치하였다^[9]. Chung은 굽힘 전후에 대한 파이프의 형상을 측정하기 위한 방법을 제안하였으며^[10,11], 라인 레이저와 카메라로 구성된 측정 헤드를 적용하여 파이프의 형상 측정에 대한 가능성을 확인하였으나^[12], 굽힘 장비에서 요구되는 측정 오차 (굽힘 각도 0.3° 및 꼭짓점 위치 0.3 mm 이내)에 대한 정량적인 사양을 제시하지 않았다.

본 논문에서는 파이프 굽힘 공정에서 실시간으로 파이프 형상을 측정하기 위한 시스템을 개발하고, 개발된 측정 시스템을 굽힘 장비에 장착하여 45° 및 90°의 파이프 굽힘 실험을 통해 개발된 측정 시스템의 정량적인 사양을 제시하였다.

2. 스프링 백에 의한 형상 변화

Fig. 1과 같이 탄성 및 소성 특성을 갖는 파이프의 굽힘 공정에서 스프링 백에 의해 굽힘 각도 및 꼭짓점 위치와 같은 파이프 형상에 변화가 발생하게 된다. 따라서 다수의 굽힘 지점을 갖는 파이프는 각 공정에서 오차가 누적되어 조립 시에 불량 발생의 원인이 된다^[7].

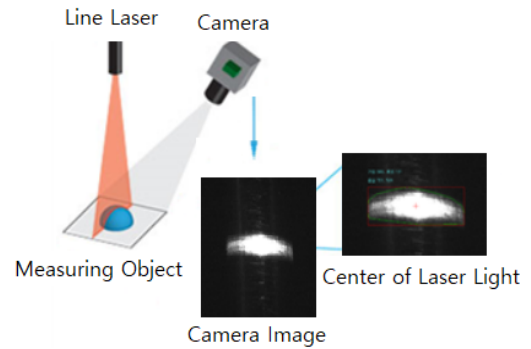


Fig. 2 Methodology for measurement of pipe shape

3. 파이프 형상 측정 방법

굽힘 공정과 굽힘 공정 후에 파이프의 형상을 측정하여 굽힘 각도 및 꼭짓점 위치를 계산할 수 있다. Fig. 2와 같이 라인 레이저와 카메라를 이용하여 측정 대상의 라인 레이저 반사 이미지를 카메라로 촬영하고, 이미지 처리를 통해 레이저 반사 이미지의 중심 위치를 계산할 수 있다. 2개의 라인 레이저를 사용하여 Fig. 1에 표시한 파이프의 레이저 반사 이미지 중심 위치인 P₁ 및 P₂의 좌표를 계산하고, 이 좌표를 사용하여 굽힘 공정 후의 파이프 굽힘 각도 및 꼭짓점 위치를 계산한다.

3.1 굽힘 각도

굽힘 각도는 식 (1)과 같이 굽힘 전 파이프의 두 중심을 연결하는 선 A와 굽힘 공정 후 스프링 백에 의한 파이프의 두 중심을 연결하는 선 B가 이루는 각도로 계산한다.

$$\theta_b = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (1)$$

여기서, x₁과 y₁은 측정 위치 P₁의 좌표이고, x₂와 y₂는 측정 위치 P₂의 좌표이다.

3.2 꼭짓점 위치

꼭짓점 위치는 식 (2)와 같이 굽힘 전 파이프의 두 중심을 연결하는 선 A와 굽힘 공정 후 스프링 백에 의한 파이프의 두 중심을 연결하는 선 B의 교차점으로 계산한다.

$$P' = (x_P, y_P) = \left(x_1 - \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} y_1, 0 \right) \quad (2)$$

여기서, P'는 굽힘 공정 후의 꼭짓점 위치이고, P는 굽힘 공정에서 스프링 백이 발생하기 전의 꼭짓점 위치이며 좌표를 (0, 0)으로 설정한다.

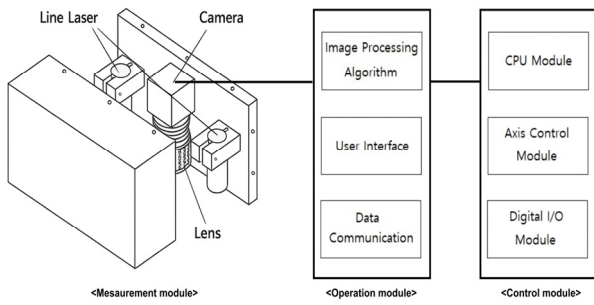


Fig. 3 Configuration of pipe shape measurement system

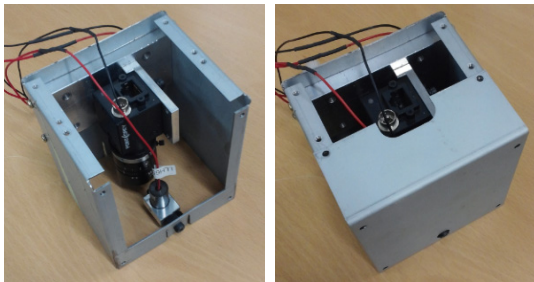


Fig. 4 Measurement module

4. 파이프 형상 측정 시스템

파이프 형상 측정 시스템은 Fig. 3과 같이 렌즈가 장착된 카메라와 2개의 라인 레이저로 파이프 반사 이미지를 촬영하는 측정 모듈, 촬영된 이미지를 처리하는 알고리즘과 사용자 인터페이스 및 데이터 통신을 위한 사용자 운영 모듈, 파이프 굽힘 공정을 제어하고 데이터를 저장하기 위한 제어 모듈로 구성된다. 파이프 굽힘 공정은 제어 모듈에서 굽힘 축 모터의 각도 제어로 시작되며, 측정 모듈에서 카메라로 촬영한 파이프 이미지는 운영 모듈로 전송되어 이미지 처리를 통해 파이프 형상 정보가 계산되어 저장된다.

4.1 측정 모듈

측정 모듈은 Fig. 4와 같이 650 nm 파장과 300 mm 초점거리를 갖는 2개의 라인 레이저, 1.2 Mega 픽셀과 1280*960 해상도 및 기가 이더넷 (GIGA ethernet) 통신 사양을 갖는 CMOS 카메라, 25 mm 초점거리와 15.1"x20" 시야 (field of view)를 갖는 렌즈로 구성하였다.

파이프 상의 2개 위치에서 반사 이미지를 촬영하기 위해 80 mm 간격으로 라인 레이저를 배치하였으며, 카메라로 촬영되는 이미지는 96 mm*128 mm의 측정 영역을 갖도록 카메라와 파이프 사이의 거리를 300 mm로 배치하였으며, 개발된 측정 헤드의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of developed measurement head

Item	Value
Measurement resolution	0.05 mm
Measurement area	96×128 mm ²
Working distance	300 mm



Fig. 5 Operation module

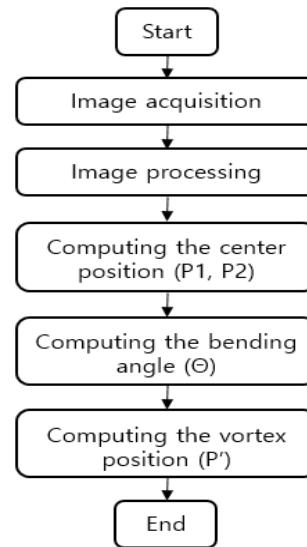


Fig. 6 Image processing flow for calculating pipe shape information

4.2 운영 모듈

운영 모듈은 Fig. 5와 같이 이미지 처리 알고리즘, 사용자 인터페이스, 데이터 통신 기능의 소프트웨어부와 HMI PC와 터치 LCD의 하드웨어부로 구성하였다.

측정 모듈에서 촬영된 반사 이미지는 운영 모듈로 전송되어 이미지 처리 알고리즘에서 Fig. 6과 같은 순서를 따라 파이프 형상에 대한 정보를 계산한다.

파이프의 레이저 반사 이미지 중심 위치는 Fig. 7과 같이 카메라 영역에서 촬영된 파이프 이미지를 사용하여 계산한다. 전역 좌표 (X-Y)로 표시되는 파이프의 중심 좌표(P_x, P_y)는 카메라 영역에

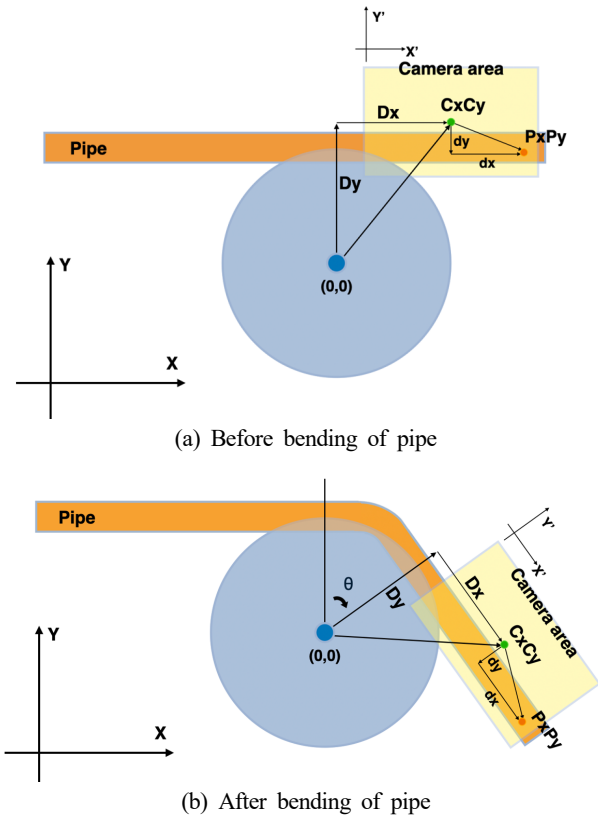


Fig. 7 Center coordinates of the pipe displayed in the camera area

고정된 지역 좌표($X'-Y'$) 및 굽힘 각도(θ)를 이용하여 식 (3)~(6)과 같이 계산한다. Fig. 7(a)는 파이프 굽힘 공정 전의 카메라 영역에서 촬영된 파이프 반사 이미지를 나타내며, Fig. 7(b)는 파이프 굽힘 공정 후의 카메라 영역에서 촬영된 이미지를 나타낸다. 파이프의 굽힘 공정에서 측정 모듈이 같이 회전에 따라 라인 레이저가 반사되는 파이프의 위치는 변화되지 않고 동일한 위치를 유지하게 된다.

굽힘 축이 회전하기 전에 카메라 영역의 좌표(지역 좌표)가 전역 좌표와 평행한 경우에, 굽힘 축의 θ 회전에 따른 전역 좌표로 표시되는 카메라 영역의 중심 좌표(C_x, C_y)는 식 (3)과 식 (4)와 같이 계산된다.

$$C_x(\theta) = (D_x) \cdot \cos(\theta) + (D_y) \cdot \sin(\theta) \quad (3)$$

$$C_y(\theta) = -(D_x) \cdot \sin(\theta) + (D_y) \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

여기서, D_x 와 D_y 는 전역 좌표 원점에서 카메라 영역 중심까지의 x 및 y 방향 거리이다.

굽힘 축의 θ 회전에 따른 카메라 영역에서 전역 좌표로 표시되는 파이프의 중심 좌표(P_x, P_y)는 식 (5)와 식 (6)과 같이 계산된다.



Fig. 8 Control module

$$P_x(\theta) = (D_x + d_x) \cdot \cos(\theta) + (D_y - d_y) \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

$$P_y(\theta) = -(D_x + d_x) \cdot \sin(\theta) + (D_y - d_y) \cdot \cos(\theta) \quad (6)$$

여기서 d_x 와 d_y 는 지역 좌표에서 라인 레이저 이미지로부터 계산된 파이프의 중심 좌표와 카메라 영역의 중심 좌표 사이의 x 및 y 방향 거리이다.

4.3 제어 모듈

제어 모듈은 Fig. 8과 같이 CPU 보드, 축 보드, 디지털 입출력(DIO) 보드로 구성하였다. CPU 보드는 축 및 DIO 보드 제어, 외부 장치와의 통신, 전원 공급 기능을 수행하고, 4축 제어가 가능한 축 보드는 파이프 굽힘 공정을 위한 모터의 위치 및 속도 제어, 엔코더 인터페이스, 제어 펄스 생성 기능을 수행한다. DIO 보드는 저역 통과 필터를 포함하는 디지털 입력, 증폭 기능이 있는 디지털 출력 및 노이즈 차단 기능을 수행한다.

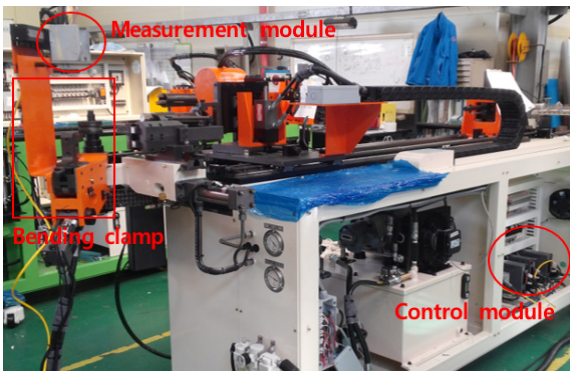
5. 실험 및 결과

5.1 실험 장치

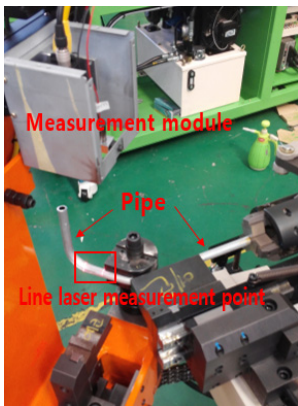
개발된 측정 모듈, 운영 모듈, 제어 모듈로 구성되는 파이프 형상 측정 시스템을 Fig. 9와 같이 파이프 굽힘 장비에 장착하여 성능 시험을 수행하였다. Fig. 9(b)는 파이프 굽힘 각도에 연동하여 회전하는 굽힘 클램프에 부착되어 굽혀진 파이프 영상을 촬영하는 측정 모듈을 나타내었다.

5.2 실험 결과

성능 시험은 10개의 파이프 시편 (외경 12 mm, 두께 2 mm, 외경 오차 ± 0.2 mm 이내)을 사용하여 45° 및 90° 의 굽힘 공정을 수



(a) Bending machine equipped with developed pipe shape measurement system

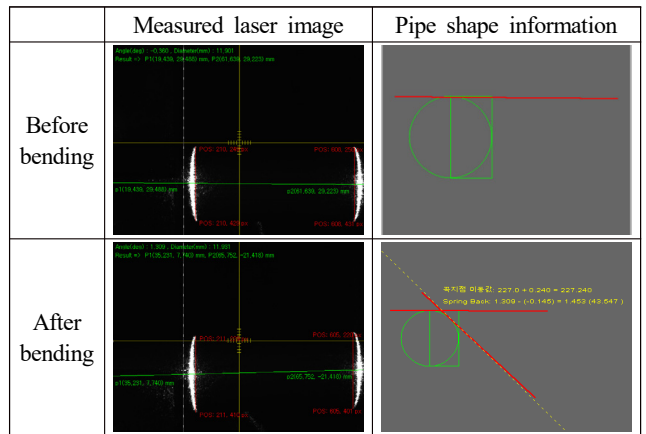


(b) Measurement module and bent pipe specimen
Fig. 9 Experimental setup

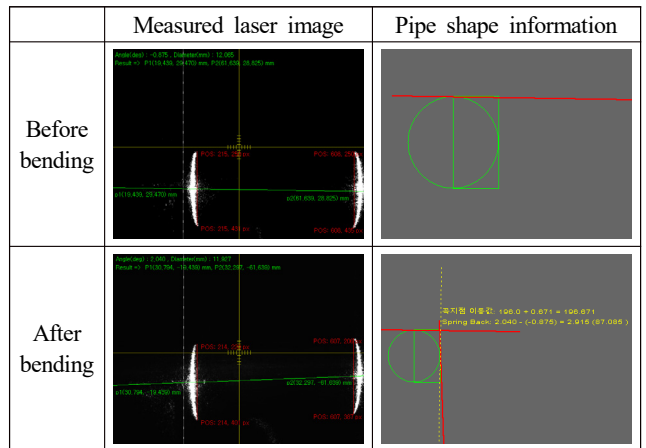
행하며, 굽힘 공정 전과 후에 대해 Fig. 6의 이미지 처리 절차를 통해 파이프 형상 정보인 굽힘 각도 및 꼭짓점 위치를 계산하였다. Fig. 10은 45° 및 90°의 굽힘 공정 시에 장비에 부착된 측정 모듈의 카메라로 촬영한 파이프의 레이저 반사 이미지와 운영 모듈의 이미지 처리 알고리즘으로 계산한 굽힘 각도와 꼭짓점 위치 정보를 각각 나타낸다.

굽힘 공정 전과 후에 카메라 영역에서 측정된 파이프의 레이저 반사 이미지로부터 두 지점에서의 파이프 직경의 중심 좌표를 계산하고 굽힘 각도와 꼭짓점 위치를 계산하였다. Fig. 11은 45° 및 90°의 파이프 굽힘 공정 후의 파이프 시편을 나타낸다.

개발된 파이프 형상 측정 시스템의 측정 오차를 검증하기 위해 0.1 μm의 정밀도를 갖는 3차원 측정기를 사용하여 굽힘 공정 후의 파이프 시편 10개 (45° 굽힘 및 90° 굽힘 각 5개)의 굽힘 각도와 꼭짓점 위치를 측정하였다. Fig. 12는 3차원 측정기의 파이프 측정 좌표의 기준점을 나타낸다. Table 2와 Table 3은 파이프 시편의 측정 결과를 나타내며, 측정값은 개발된 측정 시스템으로 굽힘 장비에서 공정 과정에 측정된 값이며, 기준값은 굽힘 공정으로 제작된 파이프를 3차원 측정기로 측정된 값을 나타낸다. 꼭짓점 위치는 Fig. 1(b)에서 파이프의 꼭짓점 위치(P) 기준 좌표와 3차



(a) 45° bending



(b) 90° bending

Fig. 10 Pipe shape information calculated by image processing procedure using measured laser images



(a) 45° bending

(b) 90° bending

Fig. 11 Pipe specimen after bending process

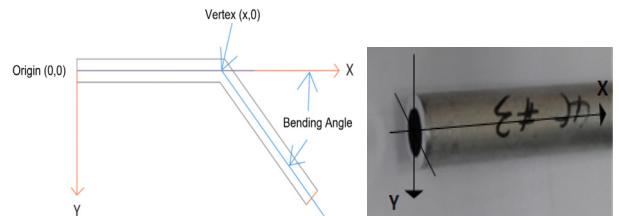


Fig. 12 Pipe measurement coordinate reference of a 3D measuring machine

원 측정 기준 좌표가 다른 이유로 3차원 측정값을 기준으로 개발된 측정 시스템에서 측정된 값에 45° 굽힘 실험에서 227 mm, 90°

Table 2 Measurement results of pipe shape information after 45° bending process

	Specimen	Measured value ①	Reference value ②	Difference ②-①	Unit
Bending angle	1	43.547	43.651	0.104	degree
	2	43.191	43.296	0.105	
	3	43.259	43.355	0.096	
	4	43.184	43.343	0.159	
	5	43.052	43.230	0.178	
Vertex location	1	227.240	227.156	-0.084	mm
	2	227.334	227.519	0.175	
	3	227.636	227.890	0.254	
	4	227.260	227.433	0.173	
	5	227.056	226.836	-0.220	

Table 3 Measurement results of pipe shape information after 90° bending process

	Specimen	Measured value ①	Reference value ②	Difference ②-①	Unit
Bending angle	1	87.126	87.174	0.048	degree
	2	87.085	87.151	0.066	
	3	87.183	87.102	-0.081	
	4	87.028	87.106	0.078	
	5	87.317	87.213	-0.104	
Vertex location	1	196.038	196.020	-0.018	mm
	2	196.671	196.884	0.213	
	3	196.835	196.858	0.023	
	4	196.898	196.704	-0.194	
	5	196.878	196.635	-0.243	

굽힘 실험에서 196 mm를 보정하였다. 측정된 굽힘 각도가 Table 2에서 43.052°에서 43.547°, Table 3에서 87.028°에서 87.317°로 스프링 백의 영향으로 굽힘 공정에서 설정된 45° 및 90°의 각도와 차이가 발생함을 알 수 있다. Fig. 13은 파이프 형상 정보에 대한 기준값과 측정값의 차이를 나타낸다. Fig. 13(a)에서 굽힘 각도의 차이는 45° 굽힘 공정의 경우에 최대 0.178°, 90° 굽힘 공정의 경우에 최대 0.104°이며, Fig. 13(b)에서 꼭짓점 위치의 차이는 45° 굽힘 공정의 경우에 최대 0.254 mm, 90° 굽힘 공정의 경우에 최대 0.243 mm이다. 굽힘 실험 및 측정 비교를 통해, 개발된 파이프 형상 측정 시스템은 Table 4와 같이 굽힘 각도에서 0.178° 및 꼭짓점 위치에서 0.254 mm의 최대 측정 오차를 가짐을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 파이프 굽힘 공정에서 파이프 형상 정보를 실시

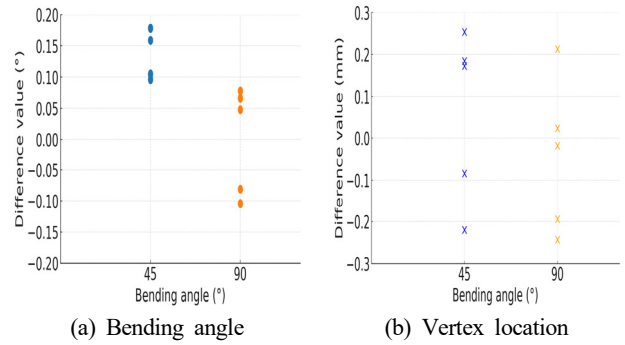


Fig. 13 Difference between the reference and measured values of pipe shape information

Table 4 Specifications of developed measurement system

Item	Value	Unit
Max. measuring error of bending angle	0.178	degree
Max. measuring error of vertex location	0.254	mm

간으로 측정하기 위한 측정 시스템을 개발하고, 굽힘 장비에 장착하여 45° 및 90°의 파이프 굽힘 실험 및 측정 비교를 통해 개발된 측정 시스템의 정량적인 성능을 검증하였다.

개발된 측정 시스템은 측정 모듈, 운영 모듈, 제어 모듈로 구성되었으며, 운영 모듈에 이미지 처리 알고리즘을 적용하여 측정 모듈에서 촬영된 레이저 반사 이미지로부터 파이프의 중심 좌표를 계산하고 파이프 형상 정보인 굽힘 각도와 꼭짓점 위치에 대한 데이터를 계산하였다.

개발된 측정 시스템으로 측정한 파이프 형상 정보와 3차원 측정기로 측정된 값의 비교를 통해 파이프 형상 측정 시스템은 굽힘 각도에서 0.178° 및 꼭짓점 위치에서 0.254 mm의 최대 측정 오차를 가짐을 확인하였다.

향후 연구에서는 굽힘 공정에서 사용되는 파이프의 직경 오차가 개발된 측정 시스템의 성능에 미치는 영향을 파악할 예정이다. 이외에 파이프 굽힘 공정에서 측정 시스템으로 스프링 백에 의한 굽힘 각도를 측정하고, 실시간으로 각도를 보정하기 위한 굽힘 각도 제어 방법을 적용할 예정이다.

References

- [1] Yang, H., Li, H., Zhang, Z., Zhan, M., Liu, J., Li, G., 2012, Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies, Chin. J. Aeronaut., 25:1 1-12, [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60356-7](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60356-7).
- [2] Zhang, S., Wu, J., 2016, Springback Prediction of

- Three-Dimensional Variable Curvature Tube Bending, *Adv. Mech. Eng.*, 8:3 1-13, <https://doi.org/10.1177/1687814016637327>.
- [3] Mun, H. J., Kim, C. S., Kim, J. D., 2008, A Study on the Development of the Continuous 3D Tube Bending Machine, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 32:8 701-706, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.8.701>.
- [4] Jeon, J. W., Lee, S. M., Jeong, H. S., Cho, J. R., 2012, Comparison of Springback Analysis and Experiment for Circular Tube Bending, *Proc. Korean society of Marine Eng. Autumn Conf.*, 266, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01907136>>.
- [5] Feifei, S., He, Y., Heng, L., Mei, Z., Guangjun, L., 2013, Springback Prediction of Thick-Walled High-Strength Titanium Tube Bending, *Chin. J. Aeronaut.*, 26:5 1336-1345, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.07.039>.
- [6] Guo, Z., Tang, W., 2017, Bending Angle Prediction Model Based on BPNN-Spline in Air Bending Springback Process, *Math. Probl. Eng.*, 2017:1 7834621, <https://doi.org/10.1155/2017/7834621>.
- [7] Mun, S. D., 2011, Development of Bending Machine With High Efficiency and Precision Forming, *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 12:1 7-14, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.1.007>.
- [8] Lee, H. K., Kim, S. H., Do, D. T., Kim, J. J., Kim, Y. S., 2022, A6014 Springback prediction using FEM(Finite Element Analysis), *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 31:3 177-184, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.3.177>.
- [9] Ha, T., Welo, T., Ringen, G., Wang, J., 2022, A Strategy for On-machine Springback Measurement in Rotary Draw Bending Using Digital Image-based Laser Tracking, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 119 705-718, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08178-w>.
- [10] Chung, M. J., Kim, C. Y., 2018, Apparatus for Measuring the Pipe Bending Angle, KR Patent: 10-1916753. <https://doi.org/10.8080/1020170057314>.
- [11] Chung, M. J., Kim, C. Y., 2016, Method for Real Time Automatic Measurement of Pipe Shape After Bending Process in the Pipe Bending Machine, *Proc. Korean Society of Mechanical Engineers Annual Meeting.*, 2613-2615, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07105163>>.
- [12] Chung, M. J., 2020, The Study on the Real-Time Measurement of Pipe Shape Applicable During Its Bending Process, *International Journal of Computer-aided Mechanical Design and Implementation*, 6:1 1-8, <https://doi.org/10.21742/IJCMDI.2020.6.1.01>.



Myungjin Chung

Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea. His research interest is Motion Control System such as Mobile Robots in Manufacturing Processes.

E-mail: mjchung@tukorea.ac.kr