

터빈로터 중심공 검사용 자기주행 공압형 로봇 개발 Development of Self-Driven Pneumatic Robot for Boresonic Examination of Turbine Rotor

강배준^{1,2} · 안명재² · 이철희^{1*}

Baejun Kang^{1,2}, Myungjae An² and Chul-Hee Lee^{1*}

Received: 06 Jan. 2021, Revised: 19 Feb. 2021, Accepted: 24 Feb. 2021

Key Words : Boresonic Examination(중심공 검사), Self-Driven(자기 주행), Pneumatic Robot(공압형 로봇), Compression Force(압착력)

Abstract: This study presents a new principle for driving the robot aimed at reducing the position error for the boresonic examination of turbine rotor. The conventional method of inspection is performed by installing manipulator onto the flange of the turbine rotor and connecting a pipe, which is then being pushed into the bore. The longer the pipe gets, the greater sagging and distortion appear, making it difficult for the ultrasonic sensor to contact with the internal surface of the bore. A pneumatic pressure will ensure the front or rear feet of the robot in close contact with the inner wall to prevent slipping, while the ball screw on the body of the robot will rotate to drive it in the axial direction. The compression force required for tight contact was calculated in the form of a three-point support, and a static structural simulation analysis was performed by designing and modeling the robot mechanism. The driving performance and ultrasonic detection ability have been tested by fabricating the robot, the test piece for ultrasonic calibration and the transparent mock-up for robot demonstration. The tests have confirmed that no slipping occurs at a certain pneumatic pressure or over.

기호 설명

U_1, U_2, U_3 : Compression force, N

F_1, F_2, F_3 : Applied force, N

γ : Angle, degree

g : Gravitational acceleration, 9.8 m/s²

m : Mass, kg

1. 서론

터빈 로터는 발전소 중요 설비로서 건전성이 입증

되어야 한다. 따라서, 발전소 터빈로터 중심공 검사는 10년 주기로 수행하게 되며, 중심공 내부 표면 균열과 체적결함을 검출하기 위하여 육안 검사 및 초음파검사가 수행되고 있다.

미국 민간 전력연구원인 EPRI에서, 1990년 경 발전 사업자에게 스팀터빈 로터 신뢰성 프로그램을 제안하여, 수명주기 분석과 검사의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이후, EPRI NDE 센터에서 다양한 결함 및 시험편을 제작하여 로터 제작사 및 검사 전문업체의 검사 시스템 평가에 활용하였다.¹⁾

로터 제작사 및 검사업체는 자체 검사 시스템을 개발 보유하고 있으며, 기존 방식으로는 터빈 로터 플랜지에 매니플레이터를 설치하고 파이프를 연결하여 중심공에 계속 밀어 넣으면서 검사를 수행하고 있다. 기존 플랜지 설치형 방식의 경우, 장축의 저압 터빈은 길이가 12m에 달하며, 센서를 이송하는 파이프들을 11m 이상을 연결하면 축 방향 처짐, 회전에 의한 비틀림 오차가 발생하며, 중심공 내벽에 초음파

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, 100 Inha-ro Incheon 22212, Korea

2 KEPCO KPS, Korea

Copyright © 2021, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

센서가 접촉이 잘 안되어 검사가 양호하지가 않다. 이를 보완하고자 강성을 크게 하기 위하여, 체적 및 중량, 모터 출력을 증가시켜야 하므로 설치 시 크레인이 필요하다.

기존 검사시스템을 개선하기 위해 중심공 내면에서 소형 로봇 주행을 고려 시 이동 메커니즘으로 바퀴 또는 궤도 구동 등이 적용되어 있으며, 원격 카메라에 의한 육안검사 방법이 사용되고 있다²⁾. 초음파 검사의 경우, 구동부와 주행면과의 상대적 미끄러짐이 존재 하므로³⁾, 중심공 검사에 필요한, 1mm 이내의 위치 오차 정밀도를 얻을 수 없다. 바퀴 구동, 궤도 구동 방식에서 정밀도를 높이는 방법으로서, 주행면과 접촉하는 구동 면을 요철 형태로 가공이 있으나, 호닝 된 중심공 내면을 손상시킬 수 있으므로 적용이 곤란하다.

본 연구에서, 기존 로봇의 바퀴 또는 궤도 구동과는 다른, 새로운 주행 원리를 제안한다. 공기압을 이용하여 로봇의 발을 중심공 내벽에 밀착하고, 로봇에 내장된 볼 스크류를 회전시켜 본체를 축 방향으로 이동시켜 주행한다.

밀착 시 필요한 압착력을 3점 지지 형태로서, 이론적으로 계산하였고, 로봇 기구부를 설계, 모델링, 정적 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 또한, 로봇, 초음파 보정시험편, 투명 중심공 목업을 제작하여 주행 실험과 초음파 검출 시험을 수행하였다. 측정 결과, 일정 공기압 이상에서 중심공 초음파 검사에 적합한 1mm 미만의 주행 위치 오차가 발생하였다.

2. 주행 원리

중심공 내부 벽면에 로봇 앞발은 회전모듈 회전이나, 뒷발의 축 방향 이동 하기 직전 중심공 내부 벽면에 밀착 접촉한다. 또한 앞발은 뒷발과의 간격이 최소가 되었을 때, 벽면에 이격한다. 뒷발은 볼 스크류 정회전 역회전으로 인해, 축 방향 이동하여 앞발과의 최소간격을 만들고, 발이 중심공 내벽에 밀착 후, 볼스크류 역회전으로 간격을 벌림과 동시에 로봇 본체가 전진하게 된다. 최대간격이 되면, 뒷발을 벽면에서 이격하여 볼 스크류 정회전으로 앞발 쪽으로 최소간격까지 한번에 이동시킨다. 이 때 앞발은 벽면에 밀착 접촉되게 하여야 한다. 구분 동작은 아래와 같다.

동작 1 : 앞쪽의 실린더에 공기압을 공급하면 실린

더에 연결된 앞발은 벽쪽으로 이동하여 벽면에 밀착, 고정된다. 뒤쪽의 실린더 및 연결된 뒷발은 공기압이 공급되지 않아 벽면에 이격되어 있다.

동작 2 : 볼 스크류를 정회전시키면, 스크류에 체결된 뒤쪽의 실린더 및 뒷발은 축 방향 앞쪽으로 이동한다. 앞발과 뒷발의 유효한 최소간격이 될 때까지 이동한 후 볼 스크류 회전을 멈추게 한다.

동작 3 : 뒤쪽 실린더에 공기압을 공급하면, 실린더에 연결된 뒷발은 벽쪽으로 이동하여 벽면에 밀착, 고정된다. 앞쪽 실린더에 공기압을 해제하면, 앞발이 벽면고정에서 풀리고, 벽쪽에서 이격된다.

동작 4 : 볼 스크류를 역회전시키면, 뒤쪽 실린더 및 뒷발은 벽면에 고정되어 있으므로 볼 스크류를 포함한 몸체 자체가 축 방향 쪽으로 이동한다.

이동간격은 초음파 검사 탐상 간격이며 이동한 후, 앞쪽 실린더에 공기압을 공급하여 내벽에 밀착 접촉한다. 이후 회전 모듈을 회전시켜서, 초음파 검사를 수행한다. 다음 간격으로 이동하기 위하여 앞 쪽 실린더에 공기압을 해제하여 앞발을 이격시킨다. 동작 4를 유효 최대간격이 될 때까지 반복한다. 동작 1부터 동작 4까지 반복하여 실시하면 계속 축 방향으로 전진하게 된다. 동작의 멈춤 및 다음 동작의 시작, 중지는 최소 간격, 검사 간격, 최대 간격이 될 때 실시하면 된다. 축 방향 후진은 볼스크류 회전을 반대로 하게 하면 된다. 최소간격, 유효 최대간격은 상세 설계에서 볼 스크류의 길이, 발의 축 방향 길이에 따라 정한다. 자기주행 원리를 Fig. 1에 나타내었다.

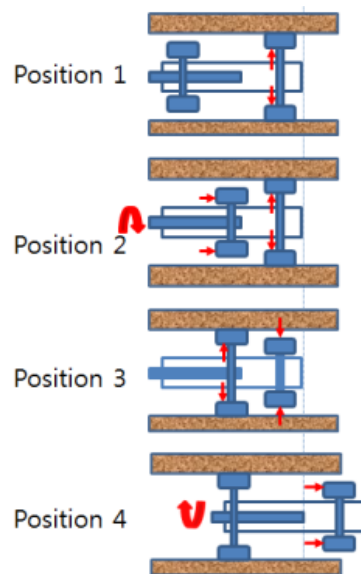


Fig. 1 Principle of Self-Driving

3. 압착력 분석 및 시뮬레이션 해석

3.1 압착력 분석

원주 벽면에 밀착하여 지지하기 위해 3발 구조가 안정적이며, 로봇의 발에 공기압을 가하여 발과 접촉하는 벽면에 밀착한다. 밀착에 필요한 공기압력을 설정하여야 하므로 역학적인 분석이 필요하다. 벽면의 경사면과 수평면이 이루는 각도가 90° 미만일 경우 안정되므로⁴⁾ 초기 위치를 2개의 발을 수평면 아래에 설정하는 것이 편리하다. 나머지 한 발은 중력 반대 방향으로 위치시키며, 발과 발의 각도는 120° 등 간격으로 한다.

기구부는 강체이며, 질량은 집중하중으로서, 가상선 \overline{OG} 상에 있다고 가정한다. 로봇의 질량중심 M이 Fig. 2과 같이 중심공 중심 O와 일치하게 되면, γ 는 60°이며, 식 1로 정리할 수 있다.⁵⁾

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U_3 = mg \cos 60^\circ \\
 F_2 \cos \gamma &= U_2 \cos 60^\circ \\
 F_3 \cos \gamma &= U_3 \cos 60^\circ \\
 F_2 = F_3 &= \frac{mg}{4 \cos \gamma} \quad (1)
 \end{aligned}$$

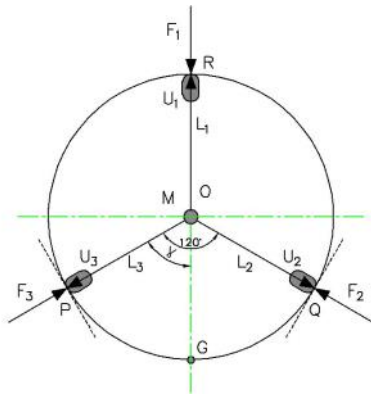


Fig. 2 Three point Support⁵⁾

중심 O에서 P, Q 까지 작용하는 압착력은 F_2, F_3 이며, U_2, U_3 은 공압에 의해 작용하는 힘이다. 압착력은 공압에 의해 동시에 같은 양으로 작용하므로 F_1 이 F_2, F_3 와 같다고 볼 수 있다.

$$F_1 = F_2 = F_3 = \frac{Mg}{2} \quad (2)$$

3.2 시뮬레이션 해석

실제 구현하는 기구는 강체가 아니므로, 압착력을

가할 시 구조적인 변형이 일어나므로, 정적 해석할 필요가 있다. 정적해석에서 정상상태이며, 변형 가능하며, 무게중심에 하중이 집중되어 있다고 가정한다. 자주로봇의 설계하중은 10 kg이며 앞발은 5 kg으로 하중이 걸린다. 앞발과 뒤발은 대칭이므로 앞발에 대해서만 시뮬레이션을 수행하였다. 좌표계는 원통좌표계(Cylindrical Coordinate System)를 사용하였으며 해석 경계조건은 Fig. 3과 같이 적용하였다. 부품의 물성은 Table 1에서 확인할 수 있다. 모든 모델에서 중심공과 Polyoxymethylene의 마찰계수의 중간값으로서, 0.144를 적용하였으며, 설계된 하중 49N(5 kg)을 적용하였다.

Table 1 Material Property of the components

Item	Polyoxy methylene ⁶⁾	AISI 1045 ⁷⁾
Model 1, 2	-	Body/Rotor/Foot
Model 3	Foot	Body/Rotor
Elastic Modulus (GPa)	2.80	206
Yield Strength (MPa)	66.0	530
Poissons ratio	0.363	0.290

압착력에 따라 모델 1, 모델 2를 수립하여 시뮬레이션 해석을 하였다.

- 모델 1 : 압착력 없음
- 모델 2 : 발에 각각 24.5 N

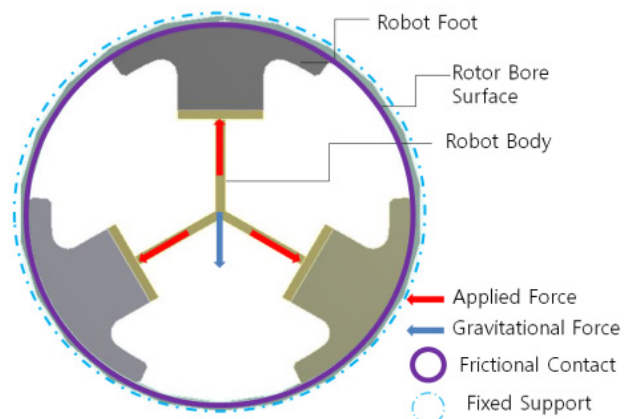
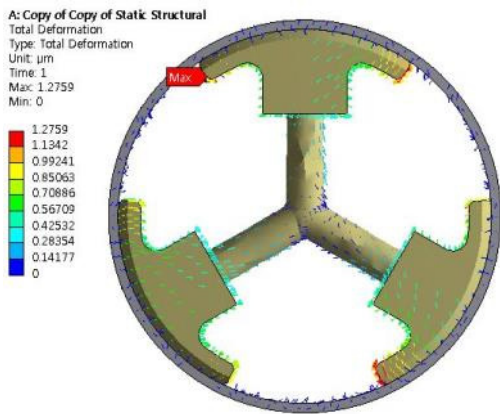


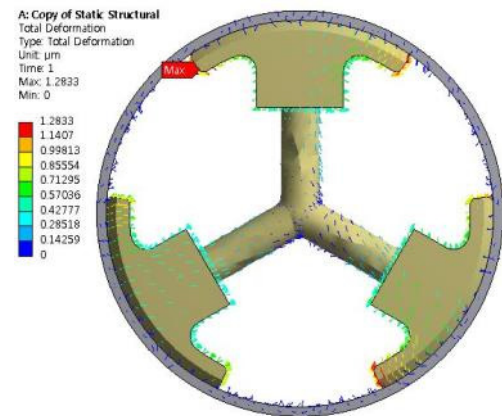
Fig. 3 Boundary condition for three point support structure

해석프로그램인 ANSYS로 경계조건을 설정하고, 시뮬레이션 한 결과, Fig. 4 (a)와 같이 압착력이 없을 경우의 모델 1에서, 방사 반대방향, 즉 원 중심방향

쪽으로 탄성 변형이 일어났으며, 최대치는 1.2759 μm 이다. Fig. 4 (b)와 같이 모델 2에서 3개의 발에 집중 하중의 절반에 해당하는 24.5 N을 방사방향으로 힘을 작용하였을 때, 방사방향으로 1.2833 μm 탄성 변형이 일어났다. 모델 1, 2에 대하여, 원통 좌표계에서 고정 조건(Fixed Support)에서의 방사 방향 반력 총합은 각각 48.98 N, 49.0 N이다. 자중만 적용한 모델 1과 세발에 힘을 가한 모델 2가 반력이 거의 차이가 없는 이유는 모델의 구조가 일체형 몸체이며, 부품의 탄성계수가 크기 때문이다.



(a) No Load (Model 1)



(b) Applied 24.5 N to each foot (Model 2)
Fig. 4 Deformation results of model 1, 2

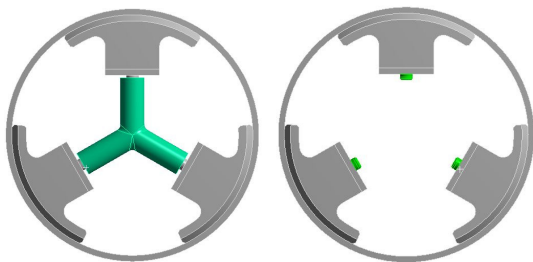
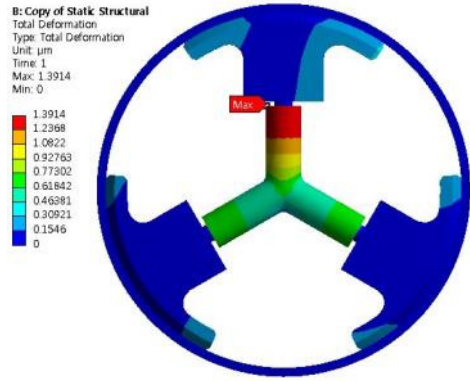
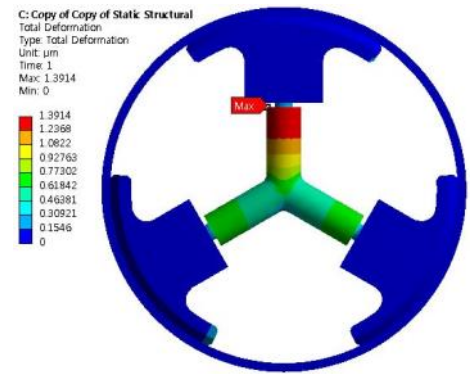


Fig. 5 Pipe(Body)-Piston Structure



(a) Applied Load 12.25 N (0.24 MPa)



(b) Applied Load 24.5 N (0.48 MPa)

Fig. 6 Deformation results of model 3

설계한 로봇 형상을 단순화 한 모델 3을 수립하여 변형 해석을 다시 수행하였다. 모델 3에서 Fig. 5과 같이 원 중심에 몸체를, 3개의 발에 각각 피스톤을 설치하여 각각 접촉시켰다. 공압에 의해 피스톤을 밀고, 피스톤에 연결된 발이 내벽에 압착하는 방식이다.

경계조건은 모델 1, 2과 동일하며, 다른 점은 공압에 의한 작용 방향은 각각의 피스톤 표면에 수직한 방향이다. 작용 힘의 피스톤 표면적은 50.01 mm²이며, 피스톤에 가한 힘(압력)은 각각 12.25 N (0.24 MPa), 24.5 N(0.48 MPa)이다. 시뮬레이션을 수행했을 때 전체 변형 중 최대치는 Fig. 6과 같이 1.3914 μm 로 동일하며, 반력은 방사 반대방향으로 각각 -13.0 N, -25.7 N으로 나타났다.

변형 방향을 보면, 원주방향, 축방향, 방사방향에서 3차원적으로 발 및 피스톤에서 변형 및 변위가 발생하였다. 3차원 변형 및 변위를 방지하고, 발의 변위를 압착력 방향인 방사방향으로만 허용하고 기타 방향은 구속하기 위해, 발에서 피스톤을 분리하고 피스톤이 공압에 의해 발을 방사방향으로 밀어냄과 동시에 주위 4곳에 발이 방사방향으로만 이동하도록 Fig. 7과 같이 가이드 4개를 추가하였다.

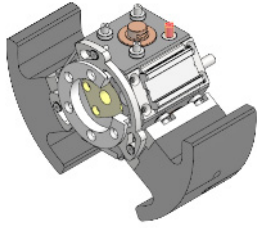


Fig. 7 Piston and four guides for Radial direction

4. 제작 및 성능시험

4.1 기구부 설계

자기주행 로봇은 주행 구동 모듈, 회전 모듈, 초음파 탐촉자 모듈로 구성하였으며, Fig. 8에 나타냈었다. 주행 구동 모듈은 공압을 이용하여 중심공 내부 원주 벽면에 접촉하고 주행 모터에 의한 스크류 회전에 의해 축 방향 이동한다. 회전 모듈은 회전모터에 의해 초음파 센서를 모터에 의해 회전시킨다. 초음파 모듈은 초음파 센서를 6개 달고 골고루 접촉을 유지하는 장치이다. 카메라 모듈은 두 개의 카메라와 LED 조명으로 이루어진 장치이며 중심공 내벽의 표면결함 검출을 목적으로 하며 조명에 의한 중심공 금속재의 반사광을 제거하기 위하여 편광 필름⁸⁾을 사용하였다.

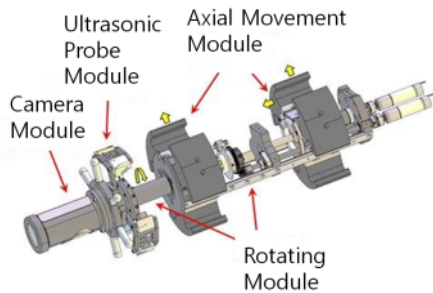


Fig. 8 Design of Self-Driven Robot

4.2 제어부 설계

제어시스템은 PLC, PC로 구성하였으며, PLC는 PLC 컨트롤러, 모터 드라이버, 허브, 공압 제어 밸브로 구분할 수 있다. Fig. 9는 PLC 및 외장 모터 컨트롤러 개략도이다. 소형이면서 고효율인 BLDC 모터⁹⁾를 사용하였으며, 모터를 제어할 EPOS 드라이버 2개를 PLC 확장 슬롯에 설치하였다. 드라이버 1개당 모터 1개를 제어한다. 또한, 공기압을 제어하기 위한 신호를 제공하여, 솔레노이드 밸브를 통해 공기압을 공급하거나 단속한다. 설치된 허브를 통해 PLC, 컴퓨터, 초음파장비와 상호 랜 통신한다.

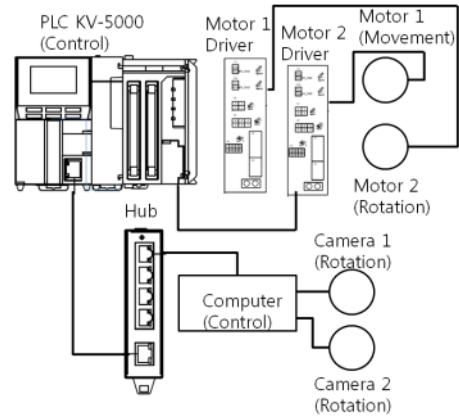


Fig. 9 PLC and External Motor Controller Block Diagram

PC는 PLC로부터 위치정보를 받아 육안검사 프로그램에서 위치정보를 제공 받아 영상으로 출력한다. 또한, 모터 운전 프로그램을 구동하여, PLC를 통해 자기주행로봇 모션을 제어한다. 초음파 장비는 PC와 연결되어 초음파 신호취득 프로그램에서 초음파 장비를 제어하여 초음파 신호 취득 저장하게 한다.

4.3 주행 로봇 및 성능시험용 관, 시험편 제작

설계대로 Fig. 10과 같이 주행로봇을 제작하였으며, 주행 성능 및 초음파 검출능 성능 시험을 위해 중심공과 같은 형태의 투명 아크릴 관, 초음파 성능 시험편을 제작하였다.



Fig. 10 Fabrication of Self-Driven Robot

4.4 주행 로봇 축방향 위치 오차

제어기의 화면 구성은 Fig. 11과 같이 하고 이동거리를 입력하여 로봇을 이동시킨다.

카메라 모듈 앞에 평판을 부착하고 아크릴 관 출구를 기준으로 로봇이 이동한 거리 즉, 평판의 이동 거리를 버니어 캘리퍼스로 측정하는 방식으로 하였다. 주행 속도는 70 mm/sec로 고정하고, 공기압력을 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa로 설정할 때

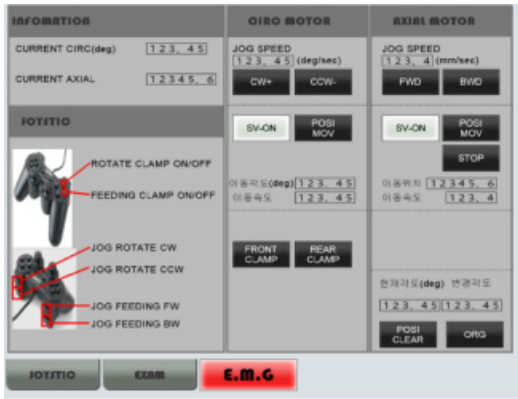
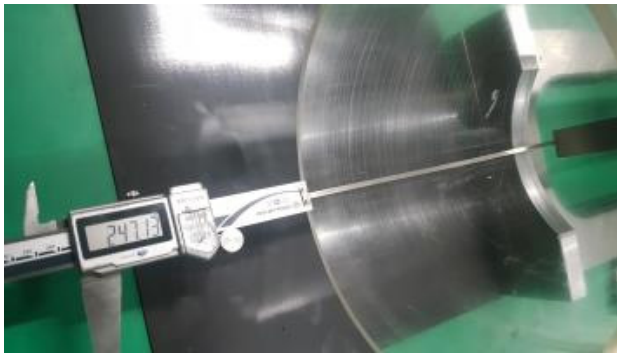
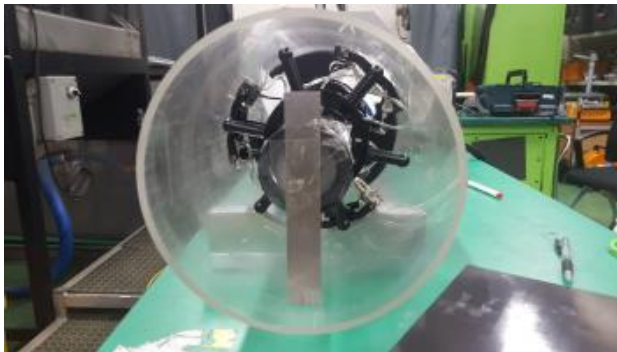


Fig. 11 User Interface of Robot Control



(a) Plan View from Tube



(b) Front View from Tube

Fig. 12 Positional measurement of Axial direction

다, 축 방향 160mm 거리에 대해서 거리 보정을 수행하였다. 제어 프로그램에서 10 mm 단위로 거리를 입력하여 축방향으로 이동하였고, Fig. 12와 같이 검교정 된 300 mm 버어니어 캘리퍼스로 실제 이동한 거리를 측정하였다.

제어기 입력한 거리와 실측거리를 Table 2에 나타내었다. 데이터에서 0.3 MPa, 0.4 MPa에서 0.5 MPa, 0.6 MPa에서 위치오차의 평균값은 -5.80 mm, -4.87 mm, 0.39 mm, 0.24 mm로 나타났다.

Table 2 Measurement of Axial Direction

Operated distance (mm)	Measured distance (mm)			
	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa	0.6 MPa
10	9.88	9.65	10.05	10.45
20	19.85	19.68	20.25	20.15
30	29.45	29.56	30.56	29.44
40	38.45	39.01	40.25	41.25
50	47.56	48.50	50.54	50.15
60	54.36	55.14	59.54	60.16
70	68.45	67.72	70.56	70.18
80	77.56	78.82	80.46	80.15
90	86.65	87.65	90.56	90.14
100	96.54	97.65	100.65	100.35
110	104.6	106.65	110.45	110.45
120	110.68	112.45	120.61	120.68
130	121.56	122.56	129.94	130.45
140	130.48	131.53	140.56	140.56
150	140.24	142.24	150.51	149.10
160	144.63	146.00	160.56	160.15
170	150.45	152.36	170.56	170.24

축방향 거리 입력값과 실측에 대한 오차를 Fig. 13에 나타내었으며, 공압 0.3 MPa 과 0.4 MPa 에서 오차가 많이 발생하였고 밀착이 안 되고, 미끄러짐이 발생하였음을 알 수 있다.

공압 0.5 MPa, 0.6 MPa에서 오차 범위는 각각 0.05~0.56 mm, 0.15~0.68 mm이며, 밀착이 잘되고 미끄러짐이 없다고 판단된다. 초음파 탐상 축방향 간격을 2 mm 로 설정 시 절반인 1mm 미만의 위치 오차는 허용이 되므로, 측정 결과로 볼 때, 0.5 MPa 이상의 공압을 부여하면, 자주로봇을 이용한 초음파 신호수집(검사)이 가능하다. 0.5 MPa 미만의 공기압에서 자주로봇의 볼 스크류 회전(본체 이동) 과 탐상차 모듈 회전 시 토크가 발생함으로써 미끄러짐이 존재한다.

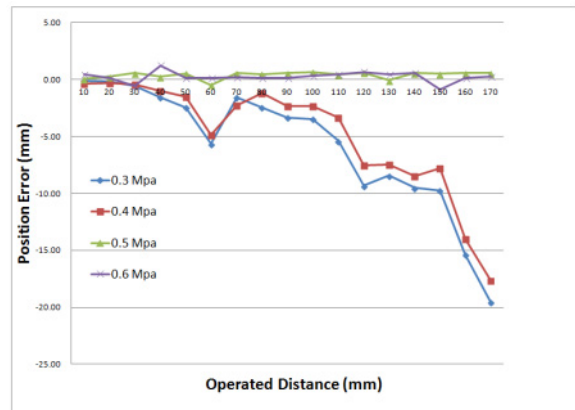


Fig. 13 Comparison of position error according to working pressure

4.5 초음파 위치 오차 측정

중심공 주행로봇의 최종 목적은 결합의 위치 측정의 정밀함이며, 보정시험편에서 초음파 신호를 취득하여 측정하여, 실제 위치와 취득 데이터의 위치 차이를 알 수 있다. 보정시험편에서 평저공(Flat Bottom Hole) 1번부터 7번까지 가공되어 있으며, 주행 로봇을 주행, 탐촉자 모듈을 회전시켜 초음파 신호를 취득하였다. 보정시험편 모서리에서 반사되는 초음파 Coner Signal과 평저공에서 반사되는 초음파 신호를 식별하기 위하여 보정시험편도면을 회색으로 신호 영상에 중첩시켜 Fig. 14에 표시하였다. #1~#8은 평저공이며, 점선으로 Corner Signal을 표시하였다. #8 평저공은 Bore ID에서 원주방향(θ 방향) 기준점으로 사용하였다. 데이터의 분해능은 원주 방향은 0.2mm이며, 축방향 간격은 2mm이다. 신호 분석 하여 측정 한 값과 실제 평저공의 위치와 비교한 결과, 위치 오차를 Table 3 및 Fig. 15에 나타내었다. 원주방향 위치오차는 평균 0.48mm, 평저공의 깊이 오차는 0.47mm로 나왔다. 내벽 표면(Bore ID)에서 원주방향으로 1.0 mm 이동 시 초음파 신호 취득하도록 하였으므로 허용오차 이내이므로 양호한 정밀도이다.

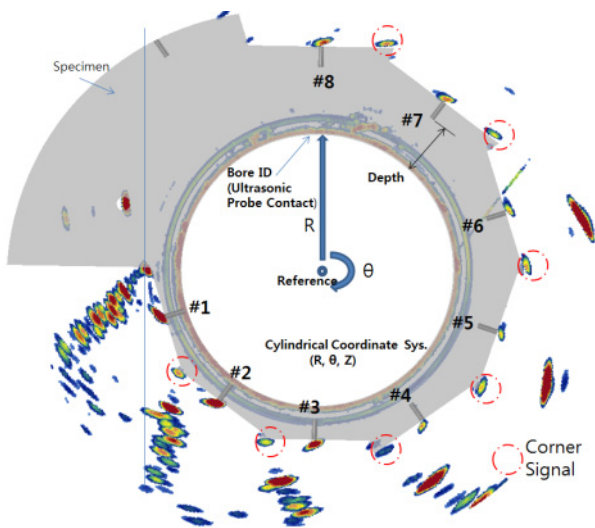


Fig. 14 Data Acquisition of Ultrasound

Table 3 Position Error from Flat Bottom Hole Data

Flat Bottom Hole #	Position Error
#1	0.4
#2	0.6
#3	0.4
#4	0.4
#5	0.6
#6	0.4
#7	0.6

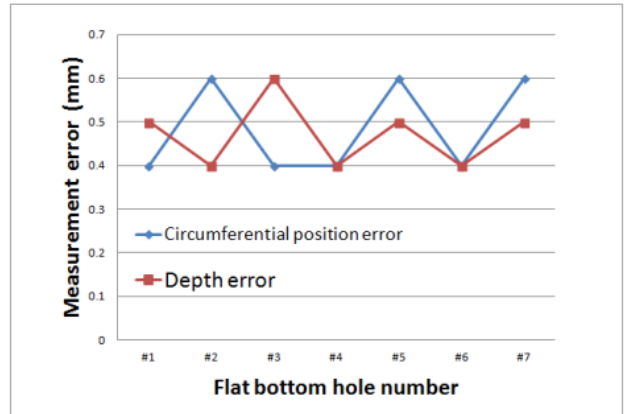


Fig. 15 Position Error of Flat Bottom Hole

5. 결론

본 연구에서 발전소 장축의 터빈 로터 중심공 초음파 센서 접촉이 양호하며, 처짐 및 비틀림이 없는 주행 로봇을 도입하였으며, 중심공 주행로봇의 바퀴 구동 또는 궤도 구동의 위치정밀도의 한계를 극복하고자, 새로운 로봇 구동 원리를 최초로 제안하였다. 주요 내용은 중심공의 기하학적 특성을 반영하여 공압에 의한 로봇 발의 내벽 밀착과 볼 스크류 회전에 의한 로봇 자체 이동 방식의 자기 주행 원리이다.

중심공 내벽 밀착 시 필요한 압착력을 3점 지지 형태로 이론적으로 계산하였고, 로봇 기구부를 설계하고 모델링하여 정적 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 자기주행 원리를 적용한 로봇을 제작하여 주행 실험을 수행한 결과, 일정 공기압 이상에서 주행 로봇의 위치오차 1 mm 이내이며, 초음파 검사를 양호하게 수행할 수 있음을 확인하였다.

이를 바탕으로 유사한 형상의 시험체에서 압착력 제공을 공기압 방식에서 자기 슬레노이드 방식으로 적용하면, 좀 더 작고, 가벼운 로봇이 제작 가능할 것으로 보이며, 소구경 배관 등에 응용이 가능하다.

후 기

이 연구는 2019년도 한전KPS(주)의 연구비(과제번호: R182003) 일부에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) P. Zayicek, "Evaluation of the AEA Technology Engineering Services AIS Rotor Bore Ultrasonic Imaging System," EPRI, 1013284(Technical Report), pp.1-1~1-3, 2006.
- 2) Eddyfi, "VT100 Vertical Crawler," Catalog. <https://www.eddyfi.com/product/vt100-vertical-crawler>
- 3) M. Tavakoli, L. Marques and A. Almeida, "OmniClimber : An omnidirectional light weight climbing robot with flexibility to adapt to non-flat surfaces," Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.280-285, 2012.
- 4) S. C. Han, H. C. Yi and E. C. Kim, "Study on the design constraints of the wall-climbing mobile robot using permanent magnetic wheels (part 1 - design guideline)," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol.21, No.9, pp.69-76, 2004.
- 5) D. W. Kim, "Development and control of pipe inspection robot," Master's Thesis, Pukyong National University, 2009.
- 6) MatWeb. "Mitsubishi Chemical Advanced Materials Ertacetal® C POM-C, extruded (ISO Data)," Catalog. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=41729a655cb24c949f1361cc6b5b1a5d>
- 7) MatWeb. "AISI 1045 Steel, cold drawn, 19-32 mm(0.75-1.25),"Catalog. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=cbe4fd0a73cf4690853935f52d910784>
- 8) M. K. Seo et al., "Development of a prototype monitoring module for steel bridge repainting robots," Journal of Drive and Control, Vol.17, No.4, pp.15-22, 2020.
- 9) H. Yun and S. Kim, "A study on cycle time and power saving effect of a hydraulic hybrid injection molding machine using a servo motor," Journal of Drive and Control, Vol.17, No.3, pp.15-25, 2020.