

이동로봇을 이용한 곡관(Curved Pipes) 검사용 디바이스 설계

조현영*(연세대 대학원 기계공학과), 최창환(한국 원자력 연구소 로봇랩)
최용제(연세대 기계공학과), 김승호(한국 원자력 연구소 로봇랩)

Device Design for Inspection Curved Pipes using the Mobile Robot

H. Y. Cho(Mechanical. Eng. Dept. YSU), C. H. Choi(Robot. Lab. KAERI)
Y. J. Choi(Mechanical. Eng. Dept. YSU), S. H. Kim(Robot. Lab. KAERI)

ABSTRACT

High temperature and high pressure heavy water flows through the pipes in atomic power plants. The curved parts of pipes are critical parts in that they change the direction of steam flow, and these parts are especially affected by severe wear. Therefore, most pipes in atomic power plants are tested by non-destructive examination by workers who use ultrasonic sensors to measure the wall thickness of pipes. But not only are these pipes located in a very dangerous environment, but the space is also very limited. For the safety of workers, it is necessary to design a device that uses a mobile robot that can inspect curved pipes. This paper presents the design and construction of a small device that can generate the necessary contact forces between ultrasonic sensors and pipe walls in a limited space. And a mobile robot is used in place of the worker for successful non-destructive examination.

Key Words: An atomic power plant (원자력 발전소), The mobile robot (이동 로봇), Curved pipes (곡관), Ultrasonic sensor(초음파 센서)

1. 서론

오늘날 산업 현장에서는 작업자가 접근하기 어려운 극한 환경에서 주요 시설의 신뢰성 향상 및 안전성 제고 측면에서 작업자를 대신해 로봇에 의한 주요 시설 점검이 이루어지고 있다. 특히 대부분 발전소에 설치되어 있는 파이프들은 고온, 고압의 증기가 흐르고 있으며, 곡관 부분은 증기의 흐름을 바꾸어주는 부분이라 마모의 위험이 가장 크다. 그래서 정기적인 파이프의 두께 측정이 항상 요구된다. 그러나 이러한 파이프들은 작업자의 접근이 극히 제한되는 환경에 위치해 있고, 작업자의 안전이 절대적으로 요구되는 환경에서의 작업이 수행되어야 하기 때문에 로봇이 자율적으로 곡관을 주행하면서 파이프를 검사하는 디바이스 개발이 필요하다.

파이프의 외벽 두께 측정은 초음파 센서를 이용하면 쉽게 측정이 가능하다. 트랜듀서는 측정 대상에 고주파를 보내서 물질의 앞뒤 경계면에서 반사

되어 나오는 반사파를 받는데 사용된다. 그래서 이렇게 반사되는 시간을 측정하고 금속 재질속에서의 고주파 속도를 구하면, 파이프의 두께 측정이 가능하다. 신뢰성 있는 측정을 위해서는 재질의 속도를 알아야 하고 초음파 센서가 측정 표면에 수직하게 유지되어야 한다.

노이즈가 거의 없는 좋은 신호를 가진 실제적인 반사파를 얻기 위해서는 몇 가지 기교가 필요하다. 먼저 검사대상의 표면에 수직하게 접촉하여 일정 힘 이상을 유지시켜야 하고, 공기나 불순물이 들어가지 못하도록 표면 사이에 큐플러트(글리세린, 물)로 채워져 있어야 한다. 마지막으로 이러한 작업은 협소한 공간에서 이루어지므로 모든 장치는 검사대상의 크기에 맞게 충분히 작게 제작되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 원자력 발전소의 중수로 피더관을 기준으로 하여, 방사능 오염에 대한 작업자의 안전과 협소한 공간에 위치한 피더관의 외벽 두께 측정이 가능하도록 하는 소형의 디바이스 개발을 연구 목적으로 하고 있다.

2. 전자석 디바이스 설계

2.1 전자석 디바이스의 작동원리

본 논문에서 설계한 전자석 디바이스는 Fig. 1에서와 같이 구성하였다. 즉 플런저의 외벽 가운데를 코일로 감아 전자석을 만들었고, 속이 빈 가운데에는 초음파 센서가 장착된다. 자속의 흐름에 대한 자기 회로를 구성하였을 경우, 자속은 자기 저항이 작은 쪽으로 흐르는 성질이 있다. 그래서 전자석이 철심과 맞물리는 중심 위치에서 벗어났을 때 자기 저항이 커짐에 따라 전자석은 자기 저항이 작게 되는 방향인 철심의 중심으로 돌아오려는 복원력이 발생하게 된다.

힘을 모델링하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

<가 정>

- ① 자속밀도가 경로를 따라 항상 일정하며 자속은 전자석의 단면에 수직하게 지나간다.
- ② 누설자속과 플런징(fringing) 자속을 무시한다.
- ③ 전자석 코어와 철심은 포화되지 않는다.
- ④ 철심은 진공투자율에 비해 높은 투자율을 갖는다. ($\mu \gg \mu_0$)
- ⑤ g 가 r_1 에 비해 매우 작다.

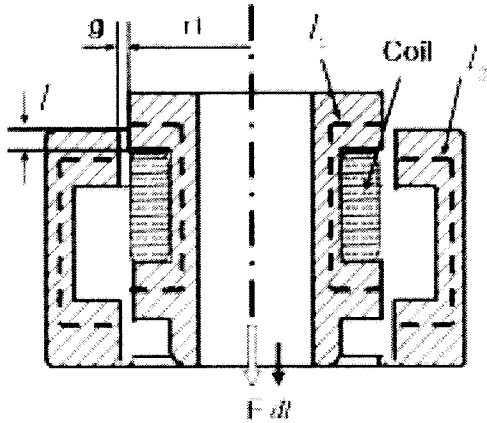


Fig. 1 Configuration of electromagnet devices

전자석의 자속 이동 경로의 총 길이를 l_1 이라 하고 철심을 지나는 자속 이동 경로를 l_2 라 한다. 공극의 크기를 g , 전자석에 감긴 코일의 턴수를 N , 강자성 재료인 철심의 투자율을 μ , 그리고 전자석에 전류 I 가 흐를 때, 플런저의 축 방향 힘을 구한다.

자속이 이동하는 경로의 면적(A)을 일정하다고 할 때, 자속밀도는 항상 일정하므로 다음의 관계가

성립한다.

$$B_f = B_g = B \quad (1)$$

B_f : 철심에서의 자속밀도

B_g : 공극에서의 자속밀도

철심과 공극에서의 자계의 세기는

$$H_f = \frac{B}{\mu}, \quad H_g = \frac{B}{\mu_0} \quad (2)$$

적분형태의 앙페르의 법칙을 암페어 고리를 통과하는 자유 전류의 총 합으로 나타내면

$$\oint H \cdot dl = NI \quad (3)$$

여기서 H 는 자기의 세기이고, dl 은 자속이 흐르는 경로이다.

식(2)와 식(3)으로부터 B 를 구하면 다음과 같다.

$$B \left(\frac{\mu_0 l_1 + 2g\mu + \mu_0 l_2}{\mu \mu_0} \right) = NI \quad (4)$$

가정 ④ ($\mu \gg \mu_0$)로부터

$$B = \frac{\mu_0 \mu NI}{\mu_0 (l_1 + l_2) + 2g\mu} \approx \frac{\mu_0 NI}{2g} \quad (5)$$

총 자속쇄고 λ (total flux linkage)은

$$\lambda = N\phi = NAB = \frac{\mu_0 N^2 A}{2g} = LI \quad (6)$$

이고, L 은 인덕턴스이다.

자계 에너지는

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0 N^2 A}{2g} \right) I^2 = \frac{\mu_0 N^2 AI^2}{4g} \quad (7)$$

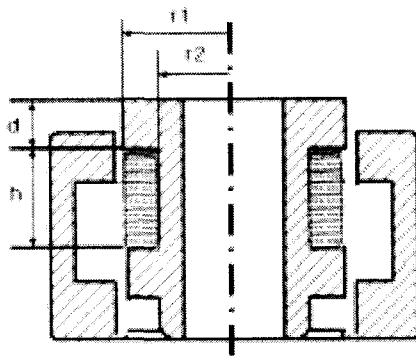
여기서 A 는 플런저와 튜브 모양의 철심이 겹치는 면적이다. ($A = 2\pi(r_1 + g/2)l$)

따라서 플런저에 작용하는 축 방향의 힘을 구하

기 위해 가상변위의 원리를 적용하면 다음과 같은 복원력을 구할 수 있다.

$$F = \frac{dW_m}{dl} = \frac{\pi\mu_0(r_1 + \frac{g}{2})N^2 I^2}{2g} \quad (8)$$

2.2 최적화 기법을 적용한 전자석 설계



- X(1) = r1 : 전자석의 반지름
- X(2) = r2 : 코일이 감기는 반지름
- X(3) = h : 코일이 감기는 단면적의 높이
- X(4) = d : core의 두께

Fig. 2 Design parameters of electromagnet devices

목적함수는 식(8)에서 구한 축 방향의 복원력을 취한다.

$$\text{Min}[-F(X)]$$

$$|F(X)| = \sqrt{\left[\frac{\pi\mu_0(r_1 - \frac{g}{2})N^2 I^2}{2g} \right]^2}$$

여기서,

$$N = \frac{h \times (r_1 - r_2)}{CA} = \frac{X(2) \times (X(1) - X(3))}{CA}$$

CA: 코일의 단면적

I: 입력 전류

제약 조건은 아래와 같다.

① 전자석 코어 및 코일의 부피는 일정하다.

$$V = \text{Const}$$

② 전자석의 너비는 일정치 이하이다.

$$h + 2d \leq \text{Const}$$

③ 모든 변수는 일정 이상의 길이와 최대 설정 치수 이하이다.

$$\text{low value} \leq X(i) \leq \text{upper value} \quad (i = 1, \dots, 4)$$

일정전류($I = 1A$)와 일정 공극($g = 0.3mm$), 전자석의 높이($h + 2d = 20mm$)와 코일의 단면적($0.2mm^2$)을 제한하고 초기 설계치 및 상, 하한치를 아래의 Table 1에서와 같이 결정하였다.

Table 1 Initial values and boundary values

Design Parameter	Initial Value (mm)	Low Value (mm)	Upper Value (mm)
r1	6	6	20
r2	5	5	20
h	2	2	20
d	4	4	10

Fig. 3은 일정 부피가 변함에 따라 결정되어진 설계 변수 값에 의해 계산되어진 전자석의 힘을 나타낸다.

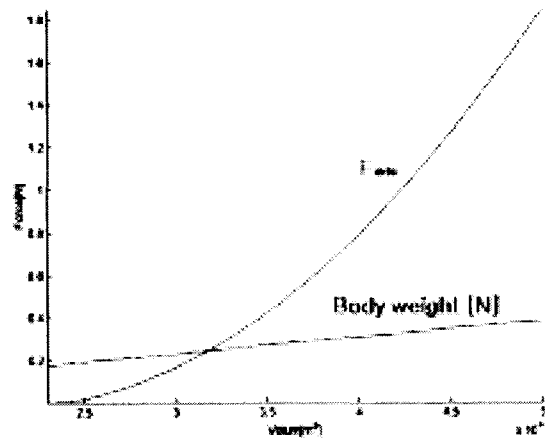


Fig. 3 Calculated forces by design value with constant volume

부피에 따라 결정되어진 전자석의 무게가 그래프에 나타나 있고, 그 무게를 충분히 움직일 정도의 힘이 발생하는 부피를 선택하고 그 부피에서 전자석의 설계 변수를 선택하였다. 전자석의 운동 범

위와 실제 제작 가능한 턴수를 고려하여 선택된 전자석의 사양은 다음과 같다.

Table 2 Design values of electromagnet

Design value	r1	r2	h	d	N
Unit(mm)	8	5	12	4	185

Fig. 4 는 선정된 전자석의 설계 값에서 공극의 크기와 전류의 세기에 따른 힘을 보여준다.

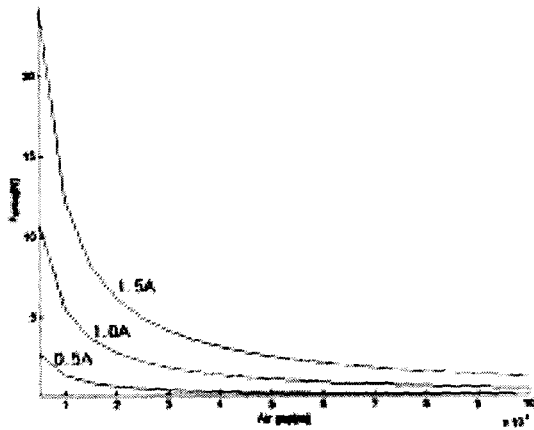


Fig. 4 Force with air gap and current

Table 2 에서 설계된 전자석은 0.5mm 이하의 공극에서 1.5A 이하의 전류로 초음파 센서를 파이프에 접촉하고 이동로봇을 파이프에 고정시키기 위한 충분한 접촉력이 발생한다. 전자석의 코아와 철심의 재료는 SM 20C 를 사용하였다.

3. 이동로봇 설계

3.1 이동로봇의 작동 원리

Fig. 5 는 이동로봇의 이동 메커니즘을 설명하기 위한 개략도이다. 이동로봇의 이동 방식 순서는 다음과 같다.

- ① Bracelet 1 이 파이프를 잡는다.
- ② Extender 가 Bracelet 2 를 앞으로 밀어낸다.
- ③ Bracelet 2 가 파이프를 잡는다.
- ④ Bracelet 1 이 파이프를 놓는다.
- ⑤ Extender 가 줄어들어 Bracelet 1 을 잡아당긴다.

이러한 이동로봇의 이동방식은 마치 자벌레가 이동하는 방식과 유사하다.

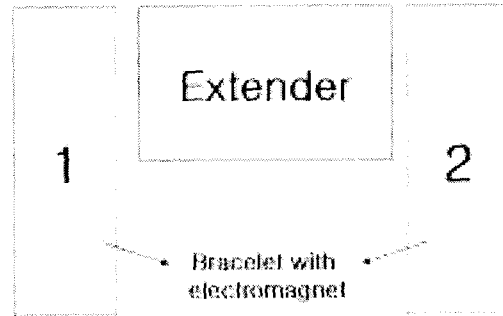


Fig. 5 Organization of the mobile robot

Extender 의 구동은 CD-ROM/RW, DVD 등에서 광 센서 헤드를 리니어하게 구동시켜주는 리드 스크류를 사용하였다.

3.2 이동로봇의 치수 설계

본 논문에서 제작한 이동로봇은 검사하고자 하는 파이프의 위치에 초음파 센서를 운반 및 접촉시켜 파이프의 두께를 측정하는 역할을 한다. 이동로봇은 전자석 디바이스가 부착된 두 개의 고리와 Extender 로 구성되어 있으며, 치수는 파이프의 지름과 곡률을 고려하여 결정하였다.

이동로봇에는 파이프의 이동을 자유스럽게 하기 위해 하나의 고리에 8 개의 볼 바퀴가 사용된다. 볼 바퀴는 파이프와의 접촉을 최소화하여 마찰을 줄이고, 항상 파이프와 고리 사이에 일정한 간격을 유지하여 이동시 구속이 걸리는 것을 방지해준다. 또한 볼 바퀴에 순응성을 부과하여 파이프의 단면이 진원이 아닌 곡률 부분에서도 쉽게 통과할 수 있도록 제작하였다. Fig. 6 은 이동로봇의 초기모델(prototype)을 보여주고 있으며, 이동로봇의 치수는 Table 3 에 나타나 있다.

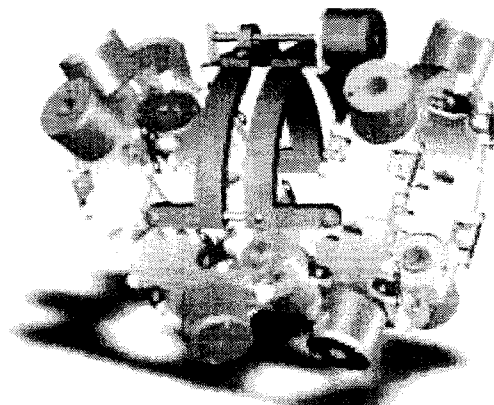


Fig. 6 Configuration of the mobile robot

Table 3 Design spec. of the Mobile Robot

The Outside Diameter of Bracelet 1,2	83mm
The Inside Diameter of Bracelet 1,2	76mm
Length of Lead Screw	40mm
Length of Maximum Extended Link	70mm
Length of Minimum Drawn Link	55mm

4. 결론

파이프의 두께 측정에서 가장 중요한 문제는 좋은 신호를 얻는 것이다. 특히 곡관 부분은 이러한 일을 더욱 어렵게 만든다. 그래서 좋은 신호를 얻기 위해서는 만족할 만한 데이터가 나올 때까지 세 번 혹은 그 이상의 두께 측정이 이루어진다.

본 논문에서의 전자석 디바이스 및 이동로봇은 원자력 발전소의 중수로 피더관을 기준으로 제작되었다. 전자석 디바이스는 일정 부피에서 가장 큰 힘이 발생하도록 최적 설계를 수행했고, 이동로봇은 곡관 이동에 적합한 자벌레 이동 메커니즘으로 설계했다. 이러한 이동방식의 장점은 초음파 센서를 항상 곡관의 전면부에 위치 시킬 수 있을 뿐만 아니라 초음파 센서를 원하는 위치에서 좋은 신호가 나올 때까지 여러 번 측정이 가능하기 때문에 만족할 만한 데이터를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 한국 원자력 연구소 로봇랩의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Herbert C. Roters, "Electromagnetic Devices", First Edition, pp 116 - 227.
2. Eric Lavoie, Gilles Rousseau, Jean Lessard, Alain Drolet, "Hydro-quebec METAR Inspection Bracelet", Canadian Nuclear Society's 5th International Conference on CANDU Maintenance.
3. SIMD report no N-01461-97551, "Performance Assessment of SIMD Feeder Ultrasonic Inspection System-Phase", September 1997.
4. Yoshiro Jizo et al "Analysis of lift and drag forces in electromagnetic levitation system" IEEJ vol-B-97.4. 215-222, 1997.
5. Ing-Yann Albert Wang, Ilene Busch-Vishniac, "A New Repulsive Magnetic Levitation Approach Using Permanent Magnets and Air-Core Electromagnets", IEEE Trans. Magn., Vol. 30. No.4, 1994.
6. M.-C. Jeong and I.J.Busch-Vishniac, "A Magnetic

Micro-Levitation Robot", ASME DSC-vol.19, Microstructure, Sensors, and Actuators, pp.69-81, 1990.

7. J. Boehm, R. Gerber, N.R.C. Kiley, "Sensors for Magnetic Bearings", IEEE Trans. Magn, Vol. 29. No. 6, 1993.
8. Colin D.Simpson, "Principles of Electronics", Prentice-Hall, 1996.
9. David J. Griffiths, "Introduction to electromagnetics", Prentice-Hall, 1989.
10. Duffy, J., "Statics and Kinematics with applications to Robotics", Cambridge University Press, 1996.