

Inchworm 원리를 이용한 배관 내부 검사 로봇 개발 Development of In-pipe Inspection Robot Using Inchworm Principle

*윤경현¹, #박영우¹

*K. H. Yoon¹, #Y. W. Park(ywpark@cnu.ac.kr)¹

¹ 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단 메카트로닉스 공학과

Key words : In-pipe Inspection, Inchworm Principle

1. 서론

발전 설비의 사용연수가 경과함에 따라 노후화로 인한 부식, 피로, 경년열화 등이 발생함은 물론, 배관 모재 내에 미세크랙이 존재할 수도 있으며, 만약 배관이 파손되어 문제가 발생할 경우 커다란 인적, 경제적 손실이 발생되므로 정기적 또는 부정기적으로 비파괴 검사를 통해 배관의 안전성을 검사하여야 한다. 따라서 배관의 검사 및 보수, 유지는 지속적으로 이루어져야 한다[1]. 그러나 이러한 배관 주변에 설치된 시설로 인하여 검사하기가 매우 까다롭다. 따라서 현재 배관 내부에서 검사하는 장치가 많이 개발되고 있는 추세이다.

지금까지 로봇을 이용하여 배관 내부를 검사 할 수 있는 시스템에 대해 많은 연구가 이루어져 왔는데 이러한 로봇들은 대부분 3 점지지, 바퀴형식, 전기적인 구동기 사용, 스프링을 이용한 압착식으로 이루어져 있다. 여기에는 많은 문제점이 있다. 바퀴형식의 로봇은 대부분 부피가 크고 전기적인 구동기를 사용하면 가스나 고압이 잔재하는 배관 내부에서 폭발의 위험성을 안고 있다. 또한 스프링을 사용한 구조는 필요한 힘에 대하여 역학적으로 조절하는데 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 공압 실린더를 이용한 100mm ~ 300mm 의 배관을 검사 할 수 있는 로봇을 개발하고자 한다.

2. 배관 내부 검사 로봇 설계

배관 내부를 이동하는 로봇을 설계하기에 있어서 다음과 같은 필요사항이 있다. 첫째, 가스나 고압이 잔재하는 배관에서 구동이 가능한 구동기를 사용하여야 한다. 둘째, 100mm ~ 300mm 에서 로봇이 이동 가능하여야 한다. 셋째, 수직으로 로봇이 이동 가능하여야 한다. 이러한 조건을 충족시키기 위하여 본 논문에서는 전기적인 구동기를 사용하지 않고 공압 실린더를 사용하여 폭발의 위험성을 배제 하였다. 또한 역학적인 계산을 통하여 수직으로 이동 가능한 힘을 제공해주는 공압 실린더를 선정하였고, two-bar 링크를 설계하여 로봇의 크기가 100mm ~ 300mm 에서 이동이 가능하도록 설계하였다.

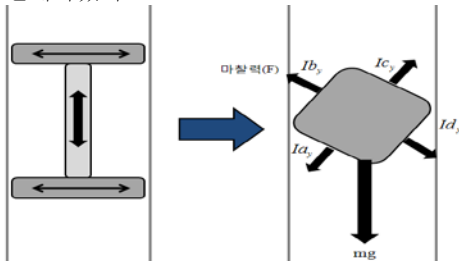


Fig. 1 Inchworm type In-pipe Robot

그림 1의 개념도에 나타냈듯이 로봇이 확장해서 배관을 지지하고 있는 상태에서는 모든 힘은 평형을 이룬다고 가정 할 수 있다. 여기에서 로봇의 무게는 약 5kg, 100m 이동을 가정시에 cable의 무게는 30kg 정도이다. 수식 (1)을 통해 로봇과 배관은 알루미늄과 스틸의 마찰계수 0.47, 안전계수는 2를 고려하여 로봇이 필요한 힘은 약 323N이 결정 되었다.

$$\sum F_y = 0; I_a y + I_b y + I_c y + I_d y - mg = 0 \quad (1)$$

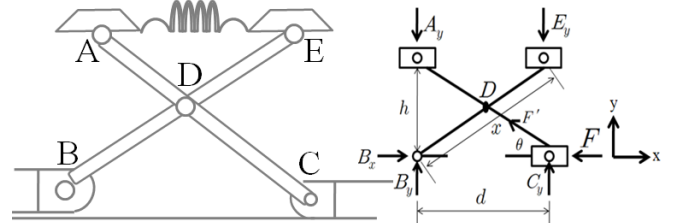


Fig. 2 Two-bar Link mechanism(FBD)

로봇이 100mm ~ 300mm 크기의 배관에서 크기가 가변이 되면서 이동이 가능 하려면 링크의 길이가 결정되어야 하고 실린더에서 낼 수 있는 출력이 결정 되어야 한다. 그림 2에서 각 링크의 길이를 x 라 할 때 이는 링크 EBC 를 통해 결정이 될 수 있다.

$$x = \frac{h}{\sin \theta}, \quad 30 \text{ mm} < h < 140 \text{ mm}, \quad 10^\circ < \theta < 68^\circ$$

, h 와 θ 가 로봇의 최대 확장 상태에서 각각 140mm 와 68° 의 값을 갖는다. 이렇게 결정된 링크의 길이에 맞춰 실린더의 크기가 결정되어야 한다. 또한 결정되어지는 실린더는 로봇이 구동하는데 필요한 힘까지 만족시켜야 한다. 본 논문에서는 공압기에서 7bar의 압력을 주었을 때 약 215.82N의 힘을 내는 실린더를 선정하였다. Two-bar 링크에서는 각각 이론적으로 53.95N의 힘을 내야 한다.

로봇이 배관 내부에서 최대로 확장하여 정지해 있을 때 모든 힘이 평형을 이룬다고 가정하고 정역학적인 해석을 하면 다음과 같다.

$$\sum F_x = 0; B_x - F = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_y = 0; A_y + E_y - B_y - C_y = 0 \quad (3)$$

수식 (2), (3)에서 실린더가 메커니즘에 전달하는 F를 통해 x, y 축에 대한 요소들을 나타내어 주고 있다. 힘뿐만 아니라 모멘트의 합도 0이 되어야 하는데 B, D에서의 모멘트의 합을 구하면 다음과 같다.

$$\sum M_D = 0; A_y \frac{d}{2} - E_y \frac{d}{2} - B_y \frac{d}{2} + C_y \frac{d}{2} + B_x \frac{h}{2} - F \frac{h}{2} = 0 \quad (4)$$

$$\sum M_B = 0; C_y d - E_y d = 0 \quad (5)$$

수식 (2), (3), (4), (5)를 통하여 A, B, C, E에서 작용하는 y 축 방향의 반력은 같다는 것을 알 수 있다.

여기에서 C 점에서의 해석을 통해 A, B, C, E의 값을 알 수 있다.

$$\sum F_x = 0; F' \cos \theta - F = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_y = 0; F' \sin \theta - C_y = 0 \quad (7)$$

$$C_y = F \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = F \tan \theta \quad (8)$$

수식 (6), (7), (8)을 통해 C 점에서의 반력을 구할 수 있고, 그 힘은 98.14N이다. 여기에서 스틸과 알루미늄의 마찰계수(0.47)를 고려하면 약 46.12N이 작용 함을 알 수 있다.

$$Ia_y = Ib_y = Ic_y = Id_y = 2A_y = 2B_y = 2C_y = 2D_y \quad (9)$$

수식 (9)에 볼 수 있듯이 two-bar 링크가 최종적으로 낼 수 있는 힘은 약 92.24N 이다. 따라서 마그네틱 로드레스 실린더가 연결된 상부와 하부에서 각각 two-bar 링크가 4 개씩 달려 있으므로 369.02N 의 힘을 낼 수 있다. 이 힘은 로봇이 수직으로 이동하는데 있어서 무리가 없음을 알 수 있다.

3. 제작

그림 3은 개발된 로봇의 전체 시스템을 나타내어 준다. 로봇은 상부 클램핑 장치, 하부 클램핑 장치, 확장 장치로 구성되어 있다. 상부와 하부 클램핑 장치는 4 개의 two-bar 링크로 구성되어 있고 배관내부의 벽을 지지하는 역할을 한다. 확장 장치는 이동하는데 있어서 필요한 장치로 전, 후진의 역할을 한다.

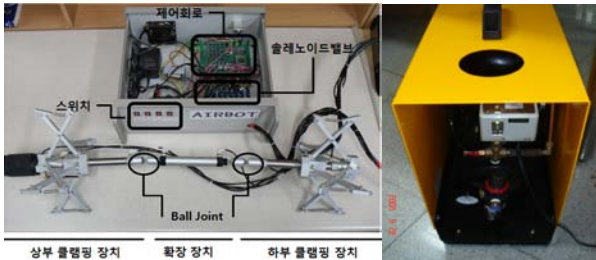


Fig. 3 Control System

컨트롤러는 ATmega128을 사용하여 공압기를 통해 들어오는 공기를 솔레노이드 밸브를 제어하고 실린더에 순차적으로 공기를 주입함으로써 이동을 할 수 있게 한다.

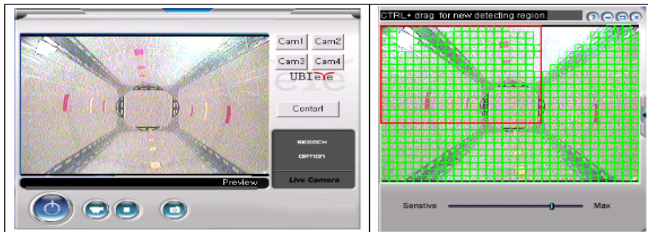


Fig. 4 User Interface

그림 4는 카메라로 촬영된 영상으로 카메라는 배관내부의 상태를 연속적으로 촬영하고 무선으로 영상을 송, 수신한다.

4. 작동 원리 및 실험

기존의 배관 내부 검사 로봇들은 바퀴형식의 구동방식을 채택하고 있다. 이러한 구동방식은 제어하기가 쉽고 이동속도가 빠르지만 부피가 커진다는 단점이 있다. 이러한 요인은 크기가 다양한 배관에 접근할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 inchworm 원리와 push-pull 구동방식을 이용하여 로봇이 크기가 변하면서 배관 내부에서 이동하는데 무리가 없게 하였다.

Inchworm 원리를 사용하면서 로봇은 상부 클램핑 장치, 확장장치, 하부 클램핑 장치의 순차적인 반복동작으로 이동을 한다. 로봇의 초기 상태는 상, 하부가 배관을 지지하는 형태이다. 상부가 수축하고 확장장치가 늘어나고, 다시 상부가 배관 내부를 지지하고 하부가 수축한다. 그 후에 확장장치가 수축하고 하부가 확장하여 초기 상태와 같은 상태로 돌아온다. 자발레가 이동하는 모습을 모방하여 일련의 순차적인 동작을 그림 6에서 볼 수 있듯이 로봇의 이동을 구현하였다.

Table 1 Speed Summary

Direction \ Speed	Upward	Downward
Average Speed	0.6 m/min	0.79 m/min



Fig. 5 Motion of Moving Forward

로봇의 이동 속도는 0.6 ~ 0.79m/min 으로 하향 속도보다 상향 속도보다 조금 빠른 것을 Table 1을 통해 알 수 있다. 하향 속도가 빠른 이유는 배관 내부에서 로봇의 미끄러짐은 없지만 조인트로 연결된 로봇이기 때문에 꺾이는 현상이 발생하는데 이를 방지하고자 공기의 양을 컨트롤 함에 있어서 클램핑 장치의 수축 정도를 줄여 지지부가 살짝 닿는 현상이 발생한다. 이로 인한 마찰력의 증가로 중앙의 확장 장치가 상향시에 최대 수축을 이루지 못하기 때문에 하향 속도가 조금 더 빠르다. 또한 그림 6에서 로봇이 이동 모습을 순차적으로 보여주지만 클램핑 장치가 축소하는 것은 외관상으로 크게 보이진 않는다.

5. 결론

본 연구는 배관의 내부 비파괴 검사를 위한 로봇으로 inchworm의 원리를 이용하여 가스화 고압이 잔재하는 배관 내부에서 폭발 등의 위험성을 배제하고 100mm ~ 300mm 사이즈의 배관내부를 검사 할 수 있는 로봇이다. 전기적인 구동기를 대체해서 공압과 공압실린더를 사용하여 배관내부를 유연하게 이동이 가능하다. 또한 기존의 개발된 로봇들은 곡관부에서 이동이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 하지만 본 연구에서 제작된 로봇은 2 개의 관절을 가지고 있고 부피의 확장 및 축소가 용이하기 때문에 곡관부도 무리없이 지나 갈 수 있다. 카메라를 통해 배관 내부의 이물질 등을 검출 할 수 있다. 추후 미세크랙, 경년열화 등의 문제점을 발견할 수 있도록 레이저 센서 등이 추가 되면 배관 내부의 문제점을 조금 더 확실하게 검사 할 수 있을 것이라 본다.

후기

본 연구는 전력산업원천기술개발의 일환으로 개발되었습니다.

참고문헌

- 정규원 “파이프 내부 검사를 위한 이동로봇의 유도 방법”, 한국 공작기계학회 2002 춘계학술대회 논문집, 02, 480 ~ 485, 2002
- 김윤중, 박영우, 윤경현 “다양한 배관크기에 적용 가능한 배관탐사로봇의 개발”, 한국정밀공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, 2009