

# 트랙 타입 관내 주행 로봇의 자유도 해석 Mobility Analysis of Crawler Type In-pipe Robot

\*강윤구<sup>1</sup>, #양현석<sup>2</sup>, 박정완<sup>2</sup>

\*Y. K. Kang<sup>1</sup>, #H. S. Yang(hsyang@yonsei.ac.kr)<sup>2</sup>, J. W. Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 기계공학과, <sup>2</sup>연세대학교 기계공학과

Key words : Crawler type in-pipe robot, mobility, degree of freedom

## 1. 서론

일상생활이나 각종 산업에 중요한 물, 연료, 가스 등의 유체를 운반하는 파이프는 현대 사회의 매우 중요한 기반 시설들 중 하나이다. 이에 따라 파이프 내부의 상태를 검사 및 관리하기 위한 관내 주행 로봇들이 많이 개발되었다. 현재까지 무수한 종류의 관내 주행용 로봇들이 개발되었고 이와 관련된 연구들이 활발하게 진행되었지만[1-3], 시각적으로 내부를 관찰하기 힘든 파이프의 물리적인 특성상, 파이프 안을 주행하는 로봇들의 관내 주행을 수학적, 동역학적 이론을 통하여 분석한 연구 결과들은 그리 많지 않다. 하지만 수학적 모델링이 구현되어야 로봇의 동적 특성과 장단점, 제한사항 등을 쉽게 파악할 수 있고 더 나아가 보이지 않는 관 속에서 로봇이 어떠한 위치에서 어떠한 형상을 하고 있는지 파악할 수 있는 기반이 된다. 본 논문에서는 이러한 수학적, 동역학적 분석들 중 하나인 자유도 계산에 초점을 맞추어 이미 개발된 트랙타입 관내주행로봇인 PAROYS-II의 자유도와 관 내부에서 요구되는 자유도를 계산해서 이를 비교 분석해본다.

## 2. 관 내부의 제약 조건

각종 관들의 내부 환경은 일반적인 열린 환경과 다르게 많은 제약을 가지고 있다. 따라서, 관내 로봇의 개발과 로봇의 기구학적, 동역학적 해석을 수행하기 위해서는 파이프 내분의 제한 조건을 파악하는 것이 선행되어야만 한다. 우선 대부분의 관들은 원형으로 이루어져있으므로 대칭 형태의

절단면을 가지고 있다고 볼 수 있다. 따라서 관의 진행 방향을 중심으로 한 회전운동은 관내 주행 로봇이 주위 환경과 상호 작용을 하는 데에 있어 아무런 의미가 없다. 또한 관내 주행 로봇은 관 내부에서 관의 진행 방향을 따라 앞, 뒤 방향으로만 주행이 가능하며 좌우나 상하 방향으로의 공간적인 제약으로 인해 이동이 불가능하다. 그러므로 관 내부는 일반적인 3 차원 공간의 자유도인 6 개의 자유도 중 총 3 개의 자유도가 제거된 제한된 공간이라 할 수 있다. 따라서 남은 자유도는 3 개이므로 관 내부에서 관내 주행 로봇은 관에 대한 상대 운동이 1 개의 병진 운동과 2 개의 회전운동으로 표현이 가능하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결론을 통해 어떠한 로봇이 관 내부를 자유롭게 주행하기 위해서는 반드시 3 개 이상의 자유도가 필요하며 이보다 적은 자유도를 가지고 있으면 구조적인 조정으로 추가적인 자유도를 확보해야 한다는 것을 알 수 있다.

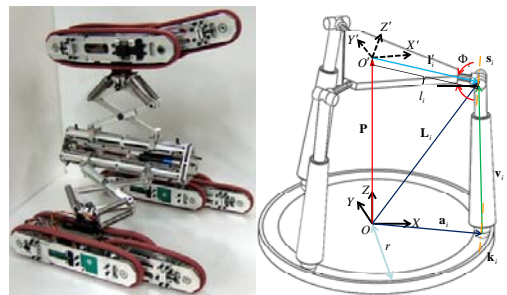


Fig. 1 Overview of PAROYS-II / Schematic of the parallel manipulator transformed from crawler type in-pipe robot

### 3. PAROYS-II의 자유도 해석

Fig. 1의 좌측 사진은 본 논문에서 자유도 계산을 위해 사용된 트랙 타입 관내주행 로봇인 PAROYS-II의 전체적인 모습이다. PAROYS-II는 특정한 사전자료 없이 수직관, 수평관, 곡관 내부를 이동할 수 있고 400mm에서 700mm의 지름을 가진 관에 자동적으로 적용할 수 있다. PAROYS-II의 자유도는 병렬형 로봇팔로 그 형태를 대체함으로써 보다 간단하게 계산할 수 있다[4]. 로봇 몸체의 평면을 병렬형 로봇팔의 움직임은 평면, 다리와 관이 닿아있는 점들로 이루어진 평면을 병렬형 로봇팔의 고정된 평면이라 가정하면 이러한 대체가 가능하다는 것을 알 수 있다. Fig. 1의 우측 그림은 PAROYS-II를 병렬형 로봇팔로 대체한 개략도이다. 로봇의 트랙과 관경 변화부는 병진 조인트로 대체되었으며 이 두 조인트는 회전 조인트로 연결되어 있다. 트랙과 고정 평면의 교차점은 로봇의 방위가 변함에 따라 계속 변화하게 된다. 트랙이 항상 관 내벽과 밀착되어 있으므로 이 교차점은 관 중심에서 관의 반지름 거리만큼 떨어져 있기 때문에 병렬형 로봇팔의 다리와 고정된 플랫폼의 조인트는 고정된 플랫폼의 중심에서 일정 거리를 따라 움직일 수 있는 슬라이딩 유니버설 조인트로 가정한다. 이러한 가정들로 인해 병렬형 로봇팔로 대체된 PAROYS-II의 자유도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{j=1}^g f_j$$

$$= 6(11 - 12 - 1) + 3(3 + 1 + 1 + 1 - 1) = 3$$

여기서  $n$ 은 링크의 개수,  $g$ 는 조인트의 개수, 그리고  $f$ 는 각 조인트들이 허용하는 자유도이다. 마지막 조인트 자유도 계산시 -1이 추가된 이유는 로봇의 트랙이 반드시 관의 내벽에 접촉되어 있어야 하기 때문에 관경 변화부의 자유도를 하나 제거한 것이다. 이 계산을 통해 PAROYS-II는 관 내부에서 이동하기 위해 필요한 3개의 자유도를 보장하고 있음을 입증할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 관 내부에서 필요한 자유도와 트랙 타입 관내주행 로봇인 PAROYS-II의 자유도를 계산하여 그 결과를

비교분석하였다. 계산결과 관 내부에서는 3 자유도가 필요하며 PAROYS-II 역시 병렬형 로봇팔로 대체하여 계산한 결과 자유도가 3개이므로 관 내부에서 이동하기에 적합한 자유도를 가지고 있음을 증명하였다. 또한 분기관을 지날 경우 트랙 타입의 관내주행로봇은 하나의 자유도를 잃게 되어 관내주행에 적합하지 않게 되므로 구조적인 수정으로 추가적인 자유도를 확보해야 하는 것을 예측할 수 있다.

### 참고문헌

1. Yuichi, N., Yukihiro, S., and Shigeki, T., "Development of an In-pipe Micro Mobile Robot Using Peristalsis Motion," *Journal of Mechanical Science and Technology* 24, 51-54, 2010
2. Yunwei, Z., Guozheng, Y., "In-pipe Inspection Robot with Active Pipe-diameter Adaptability and Automatic Tractive Force Adjusting," *Mechanism and Machine Theory*, 1618-16931, 2007
3. Tokuji, O., Tsuyoshi, S., "MORGER: A Vehicle Study and Realization for In-pipe Inspection Tasks," *IEEE J. Robotics and Automation*, 573-582, 1987.
4. Jung Wan, P., Woongsun, J., Yoon Koo, K., Hyun Seok, Y., and Hyuksung, P., "Instantaneous Kinematic Analysis for a Crawler Type In-pipe Robot," *Mechatronics (ICM)*, 2011 IEEE International Conference on, 381-385, 2011.