

메카넘 휠을 이용한 배관 로봇의 개발에 관한 연구

김대영^{*,**}, 박순욱^{*}, 이호중^{*}, 김종필^{*}, 정원지^{**,#}, 곽도훈^{**}

^{*}삼성중공업(주), ^{**}창원대학교

Development of Pipe Robot by Using Mecanum Wheels

Daeyoung Kim^{*,**}, Soonwook Park^{*}, Hojoong Lee^{*}, Jongpil Kim^{*},

Wonji Chung^{**,#}, Dohoon Kwak^{**}

^{*}Samsung Heavy Industries, ^{**}Changwon National University

(Received 13 October 2020; received in revised form 02 November 2020; accepted 14 November 2020)

ABSTRACT

Most pipe-inspection robots have fixed sizes and use a wired cable system. Pipelines are generally composed of various structures, including bent pipes, vertical pipes, branch pipes, and holes, and it is difficult to explore the insides of such modular piping structures. In an offshore plant pipeline, a robot that can pass through the pipe hole in the downward direction or avoid obstacles, such as a measuring instruments, has not been introduced yet. In this study, an inspection robot that can travel through most pipelines in offshore plants is proposed. This robot uses mecanum wheels; upward, downward, and rotary motion; and a novel rotatable mechanism. Moreover, the robot is designed to be compact and lightweight to include additional devices in the middle.

Key Words : Pipe Robot(배관 로봇), Mecanum Wheels(메카넘 휠), Inspection(검사)

1. 서 론

해양구조물의 배관은 선박이나 육상 플랜트의 배관보다 매우 복잡한 구조를 가지며, 한정된 공간에 모든 필요 배관(Process Pipe, Utility Pipe, Marine Pipe 등)을 설치한다. 설치 중이거나 설치가 완료된 배관은 각종 검사나 배관 내부 작업을 수행하는데, 아르곤 용접을 위한 Purging 댐을 설치하거나 용접 후 RT 검사를 수행하며, 완성된 배

관의 경우 내부 이물질이나 배관 상태를 확인하기 위해 육안 검사를 실시하거나 배관 내부의 이물질, 녹 제거 작업을 수행한다.

배관 라인의 검사나 여러 작업을 수행하기 위해 많은 로봇들이 개발되어 있으며, 이러한 로봇들은 이동 형태에 따라 몇 가지 형식으로 분류될 수 있다. 이러한 로봇들은 대부분 특정 용도에 사용할 수 있도록 디자인 되어 있다.

현장에서 가장 많이 사용하는 로봇을 이동하는 방법 중 하나는 배관 내부에 공기압을 가하여 이동시키는 것으로 일반적으로 낙하산 또는 피깅(Pigging) 작업이라고 불려진다. 이를 이용하여 배

Corresponding Author : wjchung@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-267-1138 Fax: +82-55-263-5221

관 내부 청소작업을 수행하거나 카메라를 장착하여 Visual 검사를 수행하기도 한다. 또 다른 이동 방법 중 하나는 바퀴를 사용하는 것으로 상용화된 많은 로봇들이 채택하고 있다. 그 외 캐터필러나 암 등을 이용한 이동 방법이 있다.^[1]

본 논문에서는 이러한 로봇 이동 방법을 해양 플랜트 배관에 적용 시 발생할 수 있는 문제점에 대해 짚어보고, 이를 해결하기 위한 이동 로봇의 디자인과 메커니즘을 제안한다.

2. 문제점 및 개선된 메커니즘

2.1 해양 플랜트 배관 현황

하수관이나 가스/오일 배관라인은 육상에서 수 km에 걸쳐 설치되며 분기관이 적고 직선관이 대부분을 차지한다. 반면 Fig. 1과 같이 해양 플랜트 배관은 배관과 배관의 간섭을 피하면서, 각종 설비들을 연결하기 위해 다양한 곡관과 분기관 그리고 수직관 등으로 구성된다. 여기에 각종 밸브류나 축소관, 플랜지 등이 더해져 일반적인 방법으로는 로봇이 이동하기 어려운 환경이다. 직관은 8A(1/4") ~ 1500A(60") 또는 그 이상의 크기가 있으나, 대부분의 해양 플랜트 배관은 950A(38") 이하로 설계된다. 각각의 배관은 배관의 용도에 따라 다양한 두께가 존재하며 대형관의 경우 100mm 이상의 두께를 가지는 배관도 존재한다. 배관의 규격은 ANSI B36.10M이나 ANSI B36.19M에 자세하게 기술되어 있다.

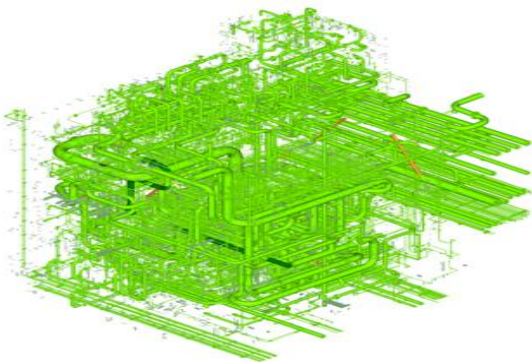


Fig. 1 Module pipe of LNG FPSO

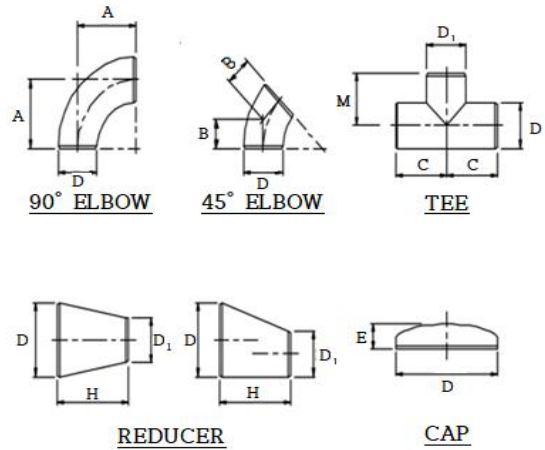


Fig. 2 Example of fittings

배관 연결을 위해 Fig. 2와 같은 다양한 피팅류를 사용한다. 곡관은 45도, 90도, 180도 관을 조합해서 사용하며 곡률에 따라 Long radius elbow, Short radius elbow로 구분한다. Short elbow는 중심의 곡률이 직경과 1:1의 관계가 있다. Long elbow는 중심 곡률이 배관 외경과 1:1.5의 비율을 가지고 있다. 여기에 소형관의 경우 1인치, 대형관의 경우 보통 2인치 많게는 12인치 이상의 외경 차이가 나는 Reducing elbow도 있다.

분기관은 Y형, T형, +형이 있는데 대부분 T형 분기관을 사용하며, 필요에 따라 Y형 분기관을 사용하기도 한다. T형 분기관은 분기방향이 동일한 직경을 가지는 1:1 Tee가 있고, 분기관이 감소되는 Reducing outlet tee가 있다. Reducing outlet tee는 입구보다 2인치 정도 작은 것이 보통이며, 관경이 작게는 입구 관경의 0.5 또는 0.3배 크기인 것도 있다.

축소관은 Concentric reducer와 Eccentric reducer로 나뉘어진다. 아쉽게도 대부분의 중대형 플랜트 배관의 축소관은 Eccentric reducer를 사용하고 있다. 이는 중력에 의한 유체의 흐름을 원활하게 하기 위함이다.

각 배관과 배관은 용접 이음하거나, 밸브나 플랜지로 연결하고 있다. 유체의 방향이나 유량, 압력 등을 제어하기 위한 밸브는 각각의 용도에 따라 적절한 밸브 형식으로 설계한다. 밸브의 종류

는 구조에 따라 Globe v/v, Gate v/v, Butterfly v/v, Ball v/v, Safety v/v, Check v/v 등으로 분류하며, 형상에 따라 더욱 세분하게 분류한다. 대부분의 밸브는 로봇이 통과하기 어려우며, 일부 볼 밸브만 로봇이 통과할 수 있는 구조이다.

2.2 배관 형상 제약에 따른 사양 선정

용접으로 이어지는 배관은 용접 비드가 배관 내부로 돌출되는데 보통 5mm이하로 규정되어 있으나, 경우에 따라서 10mm 정도의 높이를 가지는 경우도 있으며, 용접 불량인 배관은 불규칙한 형상으로 높은 용접 비드를 갖는 경우도 있다. 곡관의 경우 중심의 곡률이 배관 외경의 1:1 또는 1:1.5의 두 가지 경우가 있다. 대부분은 Long radius elbows이며, 경우에 따라서 Short radius elbows가 사용된다.

분기관은 유체가 흐르는 주 관로를 따라 흐르는 Run부와 지관으로 흐르는 Outlet부로 나누어진다. 대부분의 검사는 주 관로를 따라 이루어지며, 이동 로봇은 최소한 주 관로를 따라 이동할 수 있어야 한다. 여기서 지관이 상부나 측면으로 있을 경우 이동 로봇이 극복할 수 있지만, 지관이 아래에 있는 경우 대부분의 단일 모듈형 이동 로봇은 지관을 통과해서 주행할 수 없다. 지관이 주관 보다 작은 경우 단일 모듈형의 이동 로봇의 자세에 따라 통과할 수도 있지만, 1:1 분기관의 경우 현재까지 개발된 단일 모듈형 이동 로봇은 통과하기 어렵다. 해양플랜트 배관은 짧은 구간에 다양하고 많은 분기관이 있어, 배관 검사를 위해서는 이러한 분기관을 통과하여 주행할 수 있어야 한다.

또한, 대형 축소관의 경우 대부분 편심이며, 이를 수평관에서 이동할 수 있는 로봇은 있지만 수직관에서 이동할 수 있는 이동 로봇은 거의 없다. 편심 축소관은 이동에서 제외하고 최소 2"이하의 수평구간의 축소관은 극복할 수 있어야 한다.

밸브의 경우 Globe v/v나 Safety v/v, Check v/v는 이동 로봇이 지나갈 수 있는 구조가 아니다. 만약, Legged type의 소형 로봇이라면 Butterfly v/v가 수평구간에 설치되어 있는 경우라도 지나갈 수 있을 것이다. 이러한 밸브류는 이동 로봇이 지나

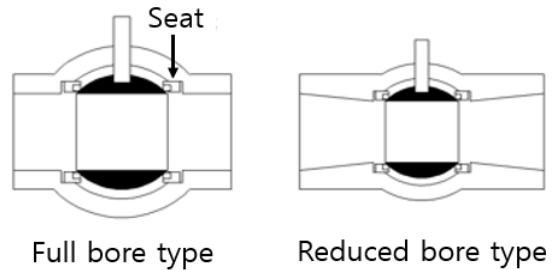


Fig. 3 Figure of ball v/v

갈 수 없는 배관으로 정의하고 Ball v/v를 대상으로 한다. Fig. 3과 같이 Ball v/v는 볼의 Bore 부분이 배관의 내경과 일치하기 때문에 밸브의 Seat를 넘어 갈 수 있다면 극복 가능하다. 이러한 Ball v/v도 여러 종류가 있으며 Reduced bore type은 파이프와 v/v의 내경 차가 2"이하이므로 2"정도의 Reducing은 극복할 수 있어야 한다. Ball v/v를 지나갈 때 추가로 고려해야 될 사항은 Ball v/v의 Seat와 Bore의 단차이다. 대부분의 Ball v/v의 Seat 높이는 Bore 보다 낮지만 Seat의 폭이나 낮은 정도는 제작사 마다 다르다. 따라서 이러한 단차에 대해서도 충분히 검토하여야 한다. 배관 형상에 따른 이동 로봇의 사양을 정리하면 용접 단차 10mm, 수평/수직 주행, 1D 이상의 곡관, 아래보기 1:1 T배관, 2"이하의 축소관, 2" 이하의 경사를 가지는 Ball v/v 등을 주행하여야 한다.

2.3 기존 이동 로봇 사양 검토

해양 플랜트 배관 검사용 장비는 이동 및 장비 투입 편의성을 위해 최대한 작고 가벼워야 한다. 여러 개의 모듈을 연결한 멀티 모듈 형태(Multi Module Type)의 장비는 길고 무거워 이동 및 배관 내부 투입이 불편하다. 반면 싱글 모듈 형태(Single Module Type)의 장비는 작고 가볍게 만들 수 있지만 T관 주행이 어려운 단점이 있다.

지금까지 알려진 싱글 모듈 형태 로봇 중 주행거리 80m, 1.5D 엘보(Elbow)관 3개를 포함하여 수직 구간을 주행 가능한 것도 있지만, 1:1 아래보기 T관을 주행할 수는 없었다.

배관 이동 로봇의 작업 범위는 NDT, Visual Inspection, Cleaning, Painting 등이며 NDT 중 RT

Inspection에서 사용하는 장비가 가장 대형이며 무거운 편이다. RT 장비는 X-ray 발생장치나 감마레이 장비 등이 있으며, X-ray 발생장치 중 휴대용 타입의 경우 $\phi 140 \times 715 \text{mm}$, 12kg 정도의 소형장치도 있으며 보통 $\phi 300$, 30kg 이상이 대부분이다. 반면 감마레이 장비의 경우 $\phi 126 \times 300 \text{mm}$, 23kg (Ir-192 Source Projector, 880DELTA SENTINAL) 이하이며 야외 촬영 등 이동이 필요한 경우 사용한다. Cleaning 및 Painting 작업을 하는 대부분의 배관 로봇은 유틸리티 호스만을 장착하여 이동한다.

이러한 장비나 유틸리티 호스를 운반하기 가장 좋은 디자인은 로봇의 중심에 이를 두는 것이다. 대부분의 로봇은 중심부에 스프링이나 모터 등을 배치하여 배관과 접촉하는 다리를 접거나 펼친다. 싱글 모듈 형태의 로봇은 중심부에 제어를 내장하기도 한다. 이는 3개 이상의 휠을 동일한 힘으로 펼치기 위한 메커니즘이 중심부에 배치되어야 하며, 이러한 이유로 중심부를 측정 장비를 위해 할애하기란 쉬운 것은 아니다.

무거운 웨이트(Weight)를 가지고, 가장 주행하기 어려운 아래보기 T관을 극복하려면 로봇 디자인에 변화를 주어야 한다. 현재 상용화된 장비의 대부분은 Wheel type, Crawler type이 주를 이루고 있다. Wheel type이나 Crawler type은 보통 3개 이상의 지지점을 가지고 있으며 많은 경우 8개의 지지점을 가지는 경우도 있다. 여기에 T관을 지나가기 위해 여러 개의 모듈을 결합하여 각각의 모듈의 협동 작업에 의해 T관을 지나가거나 90도로 꺾어 진행하기도 한다.^[2]

아래보기 T관을 주행하려면 T관의 분기관 양측면을 지지하고 주행하여야 하나 3점 이상의 지지점을 가지는 경우 주행하려는 방향의 아래 방향으

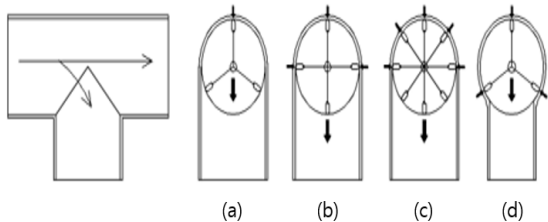


Fig. 4 Support at T fitting

로 힘 및 중력이 작용하게 되어 로봇의 바퀴가 분기관에 빠지게 된다. Fig. 4에서 (a), (b), (c)의 경우는 아래방향으로 지지해 주는 바퀴가 없어 모두 주행 불가하며, (d)의 경우 아랫방향으로 지지해 주는 바퀴가 있어 T관의 주행이 가능하다. 그러나 (d)와 같은 경우 T관의 분기관과 로봇의 바퀴 방향이 일치해야만 가능하며 실제 배관에서 이러한 조건을 만들기 위해서는 로봇이 회전 기능을 가지거나 여러 모듈이 있어야만 가능하다.

Fig. 4의 (b)나 (c)의 경우 좌우측의 지지 바퀴는 T관의 좌우 벽면을 지지하고 상하측의 지지 바퀴를 접어서 주행하더라도 중력에 의해 아래로 추락할 수 있다. 이러한 이유 때문에 T관을 주행하는 모든 로봇은 두 개 이상의 모듈을 장착하여 서로 협력하여 지나가는 것이다.

2.4 새로운 로봇 디자인 및 메커니즘 제안

싱글 모듈 형태의 이동 로봇이 T관을 주행하려면 2개의 지지점을 가지는 바퀴와, 배관의 분기 방향에 따라 회전하는 기능이 있어야 한다. 그리고 내부에 여러 가지 검사장비나 유틸리티 등의 장착 및 탈착이 용이하도록 이동 로봇의 중심에 비워진 플랫폼이어야 한다.

본 연구에서는 이러한 기능을 만족하기 위해 이동 로봇의 주행에 메카넘 휠을 사용한다. 메카넘 휠을 이용한 플랫폼의 속도 또는 힘 해석을 위해서는 롤러의 방향을 정확히 아는 것이 중요하다. Fig. 5와 같이 4개의 메카넘 휠을 장착한 플랫폼에서 평면도의 롤러의 방향과 단면도의 롤러의 방향이 서로 대칭임을 인지하여야 한다.

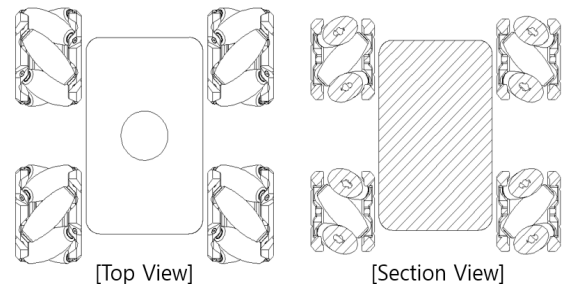


Fig. 5 Platform using 4 Mecanum Wheels

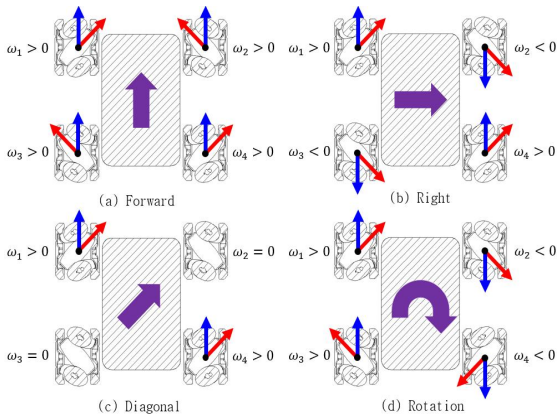


Fig. 6 Mechanism of Mecanum Wheels

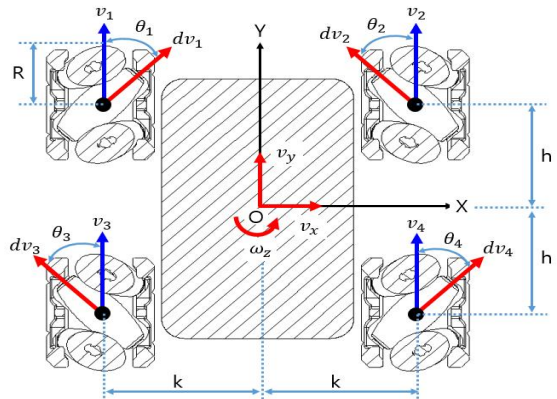


Fig. 7 Velocity of Mecanum Wheels

Fig. 6과 같이 메카넘 휠은 일반적으로 수평 바닥에서 4바퀴의 회전 방향을 조합하여 전진, 후진, 좌행, 우행, 대각행, 회전 등의 모션을 만들 수 있다. 배관의 형상을 무한의 평면이라고 가정한다면 배관 내에서도 이러한 기능을 사용할 수 있다. 여기서, $\omega_i > 0$ 는 전진 방향, $\omega_i < 0$ 는 후진 방향으로의 회전을 의미하며, $\omega_i = 0$ 는 정지이다.

v_x 와 v_y 는 이동 로봇의 X축, Y축 방향 선속도, ω_z 는 로봇의 Z축 기준 각속도다. R은 메카넘 휠의 반지름이고, k와 h는 로봇의 중심과 각 메카넘 휠 간의 X축, Y축 방향 간격이다. v_1, v_2, v_3, v_4 는 각각 왼쪽 앞, 오른쪽 앞, 왼쪽 뒤, 오른쪽 뒷바퀴의 주행속도이다.

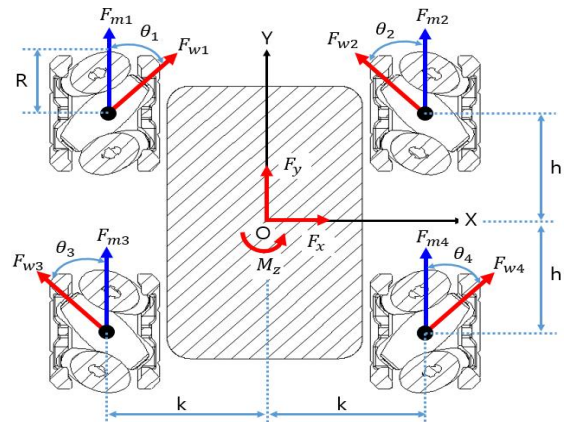


Fig. 8 Force of Mecanum Wheels

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(k+h) \\ -1 & 1 & (k+h) \\ -1 & 1 & -(k+h) \\ 1 & 1 & (k+h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 원리는 속도 기구학 식 (1)로 일반화된다.[2],[3],[4],[5],[6]

바퀴모터에 의해 발생하는 힘과 이동 로봇의 X축, Y축 방향 구동력, Z축 기준 회전 구동력 사이의 관계를 Fig. 8에서 표시된 메카넘 휠과 바닥면 사이에 작용하는 힘을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} |F_{m1}| \\ |F_{m2}| \\ |F_{m3}| \\ |F_{m4}| \end{bmatrix} = \frac{1}{4\alpha} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\frac{1}{(k+h)} \\ -1 & 1 & \frac{1}{(k+h)} \\ -1 & 1 & -\frac{1}{(k+h)} \\ 1 & 1 & \frac{1}{(k+h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)의 $F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}, F_{m4}$ 는 모터가 메카넘 휠을 회전시켜주는 힘이다. F_x 는 로봇의 X축 방향 구동력, F_y 는 Y축 방향 구동력, M_z 는 Z축 기준 회전력이며, α 는 동력전달 계수로 1보다 작거나 같다.[2],[3],[4],[5],[6]

평면상에서의 이동 메커니즘 Fig. 6을 원통형 배관에 적용하면, Fig. 6의 (b)우측 방향 이동은 배관 내 회전 운동으로 Fig. 6의 (c)대각선 방향 이

동은 배관 내 나선 운동으로 변환된다. Fig. 6의 (d)회전 운동은 배관 내에서 필요 없는 운동이다. 여기서 전방휠과 후방휠을 서로 반대 방향으로 회전하는 경우 평면 상에서는 힘의 균형에 의해 정지 상태가 되지만 배관 상에서는 위 또는 아래 방향의 힘으로 발생하며, 상기 내용을 표현하면 Fig. 9와 같다.

배관 내에서 이동 로봇이 수직주행을 하려면 Fig. 10과 같이 배관의 벽면을 지지해야 한다. Fig. 9의 회전 운동과 UP 운동에 대해 보다 현실적으로 표현하면 Fig. 10과 같다.

배관 내에서 메카넘 휠의 좌우 배치에 따라 다양한 운동이 나오며 각각의 특성 및 용도에 맞게 배열하여 적용하여야 한다. 평면에서와 동일한 바퀴 배치는 배관 내에서 다른 운동으로 나타나기 때문에 충분한 검토를 거친 후 메카넘 휠의 위치를 결정하여야 한다.

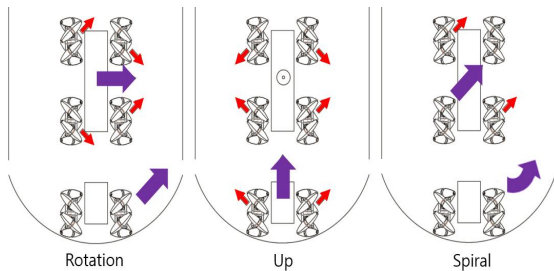


Fig. 9 Mechanism-I of Mecanum Wheels at pipe

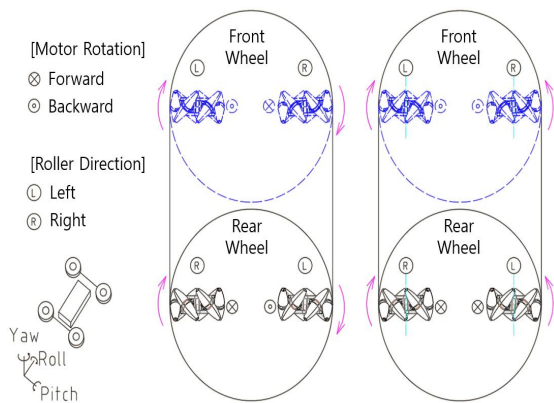


Fig. 10 Mechanism-II of Mecanum Wheels at pipe

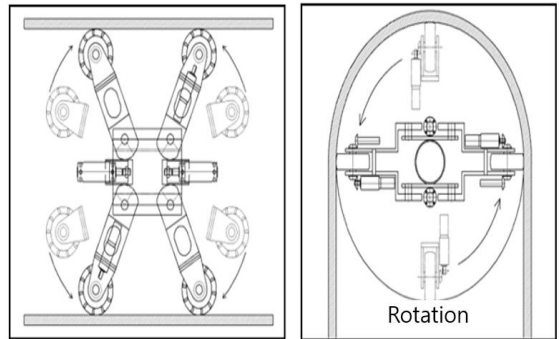


Fig. 11 Support pipe and rotation at Tee

메카넘 휠을 적용한 이동 로봇이 Fig. 11과 같이 T관을 만나는 경우 회전운동을 통하여 항상 배관의 벽면을 지지하여 주행할 수 있다. 여기서 T관이 아래 방향을 향하고 있을 경우 중력에 의해 로봇이 아래 방향으로 향하게 되는데 메카넘 휠의 Up 기능을 이용하여 아래 방향으로 향하는 힘을 상쇄시킬 수 있다.

이동 로봇이 곡관을 통과할 땐 T관을 통과할 때와 같이 곡관의 굽은 방향과 동일한 방향으로 이동 로봇을 회전하여 통과한다. 이때 좌우측의 회전 속도를 다르게 주어 주행해야 하며, 1.5D의 중심 곡률을 가지는 배관은 보통 2:1의 속도비를 가진다. 이는 배관의 두께에 따라 조금씩 다르다. 1D의 곡률을 가지는 배관은 3:1 정도의 속도비를 가진다.

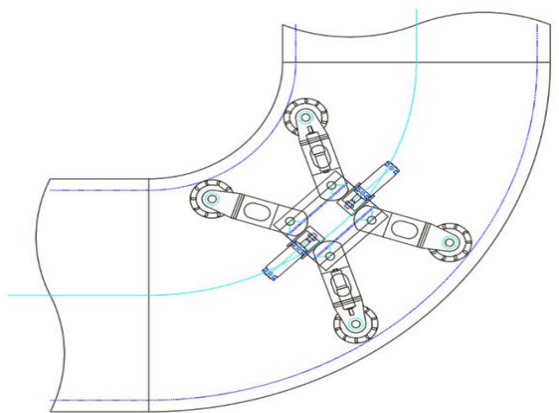


Fig. 12 Elbow driving

2.5 장비 제작 및 테스트 결과

본 연구에서의 이동 로봇을 배관 검사 장비 플랫폼으로 최초 적용하였으며, 배관 청소 및 사상 등의 장비로도 적용하면서, 다양한 배관 장비의 플랫폼으로 활용할 수 있음을 검증하였다. 장비의 기구부와 제어부는 Fig. 13, Fig. 14과 같다.

본 연구에서 개발된 장비를 실제 해양 플랜트 배관에 투입한 결과 Fig. 15, Fig. 16과 같은 배관 검사를 수행하였으며, 최장 주행거리 158m, 최대 곡관 통과 개수 15개, 최대 수직구간 개수 4개 등 현재까지 개발된 장비와 비교했을 때 최고의 성능을 발휘하였다. 장거리 주행을 위해서는 반드시 케이블 마찰을 저감할 수 있는 장치에 대해 충분히 검토하여야만 가능하다. 로봇 적용 시 초기 고려치 못한 배관의 문제점들이 배관 검사 도중 발견 되었다. 투입구가 축소관인 배관이 있는가 하

면, 로봇 투입을 위해 배관 입구를 개방할 때 주위의 의약품들에 의해 투입구가 매우 좁은 경우도 있었고, 플랜지와 플랜지가 조립 되지 않은 상태로 60mm의 간격이 있는 경우도 있었지만 무난히 통과하는 것을 확인하였다. 특히 투입구가 좁아도 이동 로봇을 인입할 수 있었던 것은 이동 로봇의 중심부에 검사 장치를 넣고 싱글 형태로 작게 만든 것이 매우 유효하였다.

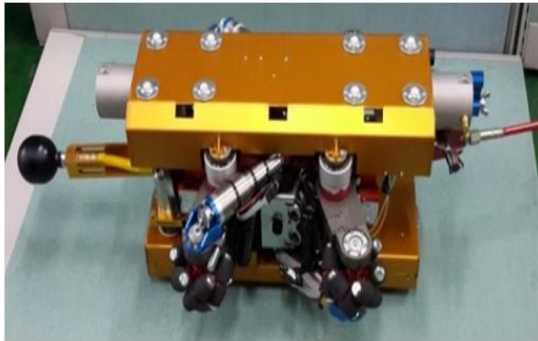


Fig. 13 Robot layout, 32kg, 500A~1200A



Fig. 14 Robot controller layout

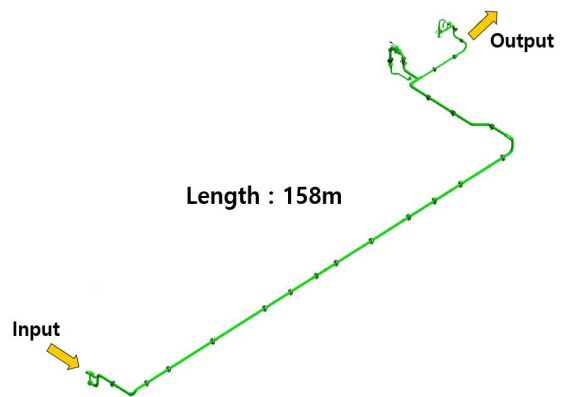


Fig. 15 FLNG 28" 158m, 8 Elbows, Visual inspection

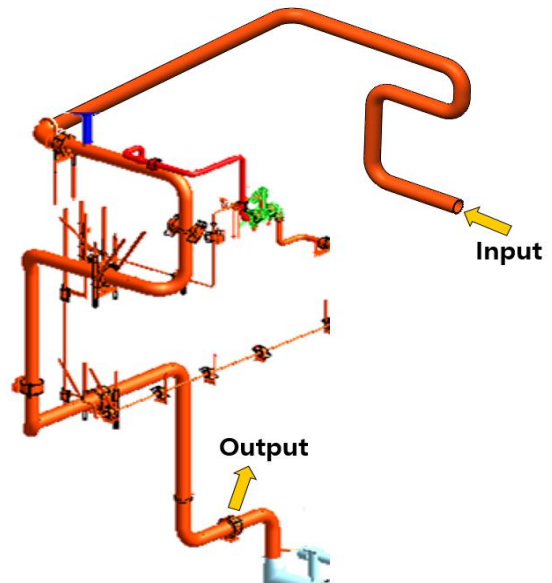


Fig. 16 FLNG 30" 88m, 15 Elbows, 4 Verticals

3. 결 론

기존의 배관 주행 로봇 중 대형 배관에 사용할 목적으로 개발된 장비들은 싱글 모듈 형태의 3점 지지방식이 주를 이루며 최대 8점 지지 이동 로봇도 있었다. 이러한 이동 로봇의 최대 단점은 아래 보기 T관을 지나갈 수 없으며, 계측기 등 장애물을 회피할 수 없다는 것이다. T관을 지나가는 멀티 모듈 형태의 이동 로봇은 좁은 작업장에서 배관 내부로 투입 자체가 불가능한 경우도 많다.

본 연구에서는 이러한 이동 로봇들의 단점을 극복하기 위해 싱글 모듈 형태의 이동 플랫폼을 가지면서 아래보기 T관과 장애물을 회피 할 수 있는 4점 지지 방식의 로봇 플랫폼을 개발하였다. 메카넘 휠을 적용하여 이동 로봇이 배관 내에서 전진, 후진, 상승, 하강, 회전 운동이 가능하도록 하였고 이론상 모든 배관을 주행할 수 있다. 또한 중심부를 비워 이동 로봇이 수행해야 하는 작업에 맞는 장비들을 장착할 수 있도록 하였으며, 배관 내부 청소, 검사 등의 다양한 작업을 수행할 수 있는 이동 플랫폼을 제안하였다.

개발된 장비는 최장 주행 거리 150m, 최대 곡관 통과 개수 15개로 현재 알려진 이동 로봇 중 최고 성능을 보여주고 있으며, 이는 메카넘 휠 주행 방식의 효율성을 증명한다. 곡관을 3개 이상 주행하려면 반드시 케이블의 마찰 부하를 줄여야 하며, 이에 대한 충분한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 T관을 주행하는 것으로 마무리 되었지만, 향후 T관의 분기관으로 주행하는 것을 계획하고 있다. 이것은 전방휠과 후방휠의 회전 방향 조합에 의해 충분히 가능한 동작이다. 즉 전방휠이 T관의 분기관 쪽으로 향하도록 모터를 구동 시키고, 후방휠은 전방휠의 방향에 맞추어 적당한 속도로 전진을 하면 T관의 분기관 방향으로 곡선을 그리며 주행하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 창원대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음”

REFERENCES

1. Hirose, S., Ohno, H., Mitsui, T., and Suyama, K., “Design of In-pipe Inspection Vehicles for ϕ 25, ϕ 50, ϕ 150 pipes”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2309~2314, 1999.
2. Doroftei, I., Grosu V., Spinu V., “Omnidirectional Mobile Robot – Design and Implementation”, Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots, I-Tech Education and Publishing, Vienna, pp. 511~528, 2007.
3. Cho, K. I., “The Development of an Automatic Tool Changing Concrete Polishing Robot Applying Mecanum wheel,” A Thesis for a Master's, Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea, 2016.
4. Kim, D. Y., “A Study on the Development of In-Pipe Robot Mechanism for RT(Radiography Testing) Inspection”, A Thesis for a Doctorate, Changwon National University, Republic of Korea, 2020.
5. Chu, B. S. and Sung, Y. W., “Development of Educational Robot Platform Based on Omni-directional Mobile Mechanism”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 11, pp. 1161-1169, 2013.
6. Kim, S. H., Lee, C. H. and Chu, B. S., “Slip Analysis and Experimental Verification for an Omni-Directional Mobile Robot based on Mecanum Wheels”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 37, No. 1, pp. 35-42, 2020.