

# 500~800 mm의 관경 대응이 가능한 고견인력 배관 로봇의 개발과 성능 검증

## Development of High Traction In-pipe Robot Adjustable 500~800 mm Pipe and Verification of the Capability

장민우\* · 정명수\* · 함제훈\* · 홍성호\* · 서갑호\* · 서진호\*\* · 이재열\*\*  
Minwoo Jang\*, Myung-Soo Jung\*, Jehun Hahm\*, Sung-Ho Hong\*,  
Kap-Ho Seo\*, Jin-Ho Suh\*\* and Jaeyoul Lee\*\*†

(Received 13 July 2021, Revision received 29 July 2021, Accepted 2 August 2021)

**Abstract :** Recently, various in-pipe robots have been developed, but they are difficult to apply to the field due to their short driving distance. In order to increase the mileage of the piping robot, traction is an essential element, especially for running in pipes. In this paper, we propose a high traction piping robot capable of running mid to long distance inside pipes. The running performance of the designed piping robot was confirmed through multi-body dynamics analysis, and structural stability of the robot was reviewed through structural analysis. In addition, the performance of the manufactured robot was verified by comparing the traction force of the manufactured robot with the analysis result, and the climbing performance was confirmed through a driving test on the pipe test bed. As a result, a high-traction pipe robot can tow 400 kgf of auxiliary equipment and can move vertical and horizontal curved pipes with a diameter of 500 to 800 mm up to 45 degrees.

**Key Words :** In-pipe traction robot, High traction, Driving long-distance, Hydraulic actuating, Multi-body dynamics

\*† 이재열(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3943-1441) : 책임연구원, 한국로봇융합연구원  
E-mail : jylee0914@kiro.re.kr, Tel : 054-240-2520  
\*장민우(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0878-8755) : 대학원생/연구원, 부경대학교 기계시스템공학과/한국로봇융합연구원  
\*정명수(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4407-1217) : 주임연구원, 한국로봇융합연구원  
\*함제훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0012-9181) : 선임연구원, 한국로봇융합연구원  
\*홍성호(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8539-8801) : 선임연구원, 한국로봇융합연구원  
\*서갑호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3471-8972) : 수석연구원/겸임교수/겸임교수, 한국로봇융합연구원/포항공과대학교/경북대학교  
\*\*서진호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8673-4528) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학과

\*† Jaeyoul Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3943-1441) : Principal Researcher, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence(KIRO).  
E-mail : jylee0914@kiro.re.kr, Tel : 054-240-2520  
\*Minwoo Jang(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0878-8755) : Graduate Student/Researcher, Dept. of Mechanical System Engineering, Pukyong National University/KIRO.  
\*Myung-Soo Jung(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4407-1217) : Assistant Researcher, KIRO.  
\*Jehun Hahm(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0012-9181) : Senior Researcher, KIRO.  
\*Sung-Ho Hong(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8539-8801) : Senior Researcher, KIRO.  
\*Kap-Ho Seo(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3471-8972) : Chief Researcher/Adjunct Professor, KIRO/POSTECH/Kyungpook National University.  
\*\*Jin-Ho Suh(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8673-4528) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

## 1. 서 론

압배관은 산업 기반 시설로 다양한 환경으로 구성되어 있으며, 비단 상수도 및 가스 등과 같은 유체에 국한되지 않고 기송관과 같이 검체와 시편을 운송하기 위한 배관 시설도 확충되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이러한 배관 시설의 장점은 물질의 신속한 전달과 편리한 확장성에 있다. 이와 같은 장점으로 생활 밀접 시설인 상수도관을 통한 수도의 전체 보급률은 최근 99.2%까지 지속적으로 증가해 왔으며, 천연가스 시설의 경우 2021년까지 94%의 보급률을 목표로 한다.<sup>3)</sup>

배관은 결함으로 인한 자원의 손실을 줄이고 안전하고 효율적인 설비 운영을 위하여 설치 및 유지관리에도 관심을 두어야 한다.<sup>4,5)</sup> 이러한 배관의 효율적인 관리를 위하여 다양한 배관 로봇이 개발되었지만, 짧은 주행거리와 다양한 배관의 크기로 인하여 효율성은 높지 않다. 주행거리가 짧아 굴착 작업이 빈번하고, 그 결과로 공사 시간 또한 지연되어 결국 초기 개발 목적을 충족시키지 못한다. 이와 같은 배관 로봇의 한계를 극복하고 효율적인 배관의 관리를 위해서 장거리 주행이 가능한 로봇 플랫폼의 개발이 요구되고 있다.<sup>6)</sup>

일반적으로 배관 로봇은 견인력을 발생시키기 위해 바퀴를 물리적인 힘으로 배관 내벽에 압착하여 배관 내를 주행하는데, 스프링으로 직접 바퀴를 압착하는 경우 바퀴를 수직으로 가압하여 스프링 힘을 온전하게 바퀴에 전달할 수 있지만, 대응 가능한 곡관이 한정적이고 로봇의 투입과 회수가 어려운 단점이 있다.<sup>7,9)</sup> 액추에이터 방식은 스프링 방식보다 선택 폭이 넓어 다양한 환경과 곡관에 대응이 가능하다. 그 중 공압 작동 방식은 공기의 압축성으로 인해 고견인력 대응을 위한 가압 응답이 불확실하고 부가적인 공급 라인을 필요로 하는 특징이 있다.<sup>10)</sup> 유압 액추에이터는 공압 구동 방식과 달리 비압축성 유체를 이용하므로 가압 응답이 확실하고 작은 입력으로 큰 출력을 낼 수 있지만, 부피가 큰 유압 발생 장치와 외부 공급 라인이 필요하다.<sup>11,12)</sup>

본 논문에서는 배관 로봇의 견인력 한계를 극복

Table 1 Required conditions for pipe robot

Requirements	Object	Unit
Target pipe	500~800	mm
Pipe bending angle	45	°
Robot traction	400	kgf
Travel distance	300	m
Weight	60	kg

하고 배관 내부에서 중장거리 주행이 가능한 로봇 플랫폼의 개발 내용을 기술하였고, 로봇의 주행 건전성 확보와 편리한 운용을 위해 Table 1과 같은 개발 목표 제원을 설정하여 로봇을 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 로봇 플랫폼에 대한 설계와 설계된 기계요소에 대해 검토하였고, 3장에서는 해석을 통해 로봇의 주행 능력과 안정성을 검증하였다. 4장에서는 제작된 로봇의 견인력과 주행 성능 시험 결과를 해석 결과와 비교하여 수행된 해석의 정확도를 분석하였다.

## 2. 고견인력 배관 로봇 플랫폼 개발

### 2.1 배관 로봇의 구성

고견인력 배관 로봇은 케이블 리더, 보조 모듈, 구동 모듈로 구성하였다. 케이블 리더로 전원 및 광 통신선이 접속되면 인버터를 통하여 이더넷 통신으로 변환되어 보조 모듈에 전달된다. 이때, 케이블의 저항으로 인한 구동 모듈의 주행 저항을 줄이고 공급 라인에 의한 전원 케이블의 단선 등 문제를 고려하여 작업 종단부에서 케이블 리더를 통과시켜 초입부의 보조 모듈과 연결한다.

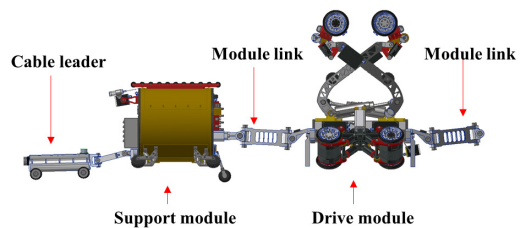


Fig. 1 Composition of high traction pipe robot

로봇 전체 시스템은 Fig. 1과 같이 구성되며 보조 모듈은 케이블 리더로부터 공급된 전원으로 유압 장치와 내부 쿨러 및 메인 제어기를 동작시키고 구동 모듈의 바퀴 모터 드라이브에 전원을 공급한다. 구동 모듈은 보조 모듈에서 생성된 유압이 유압실린더에 전달되어 각 실린더가 팽창하여 구동 바퀴가 배관 내면에 밀착된 후 바퀴를 회전시켜 전체 로봇 시스템의 구동력을 발생시키는 구조로 구성하였다.

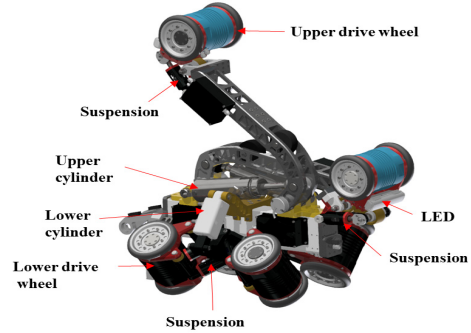


Fig. 3 Composition of drive module

### 2.2 구동 모듈의 이론 견인력

구동 모듈의 견인력에 대한 이론값을 계산하기 위한 자유물체도는 Fig. 2와 같다.  $F_d$ 는 바퀴에 의한 구동력,  $F_r$ 은 구름마찰력,  $F_0$ 는 요구 견인력,  $F_{DM}$ 은 구동 모듈 중량에 의한 주행 저항,  $F_w$ 는 물리적으로 바퀴에 가하는 바퀴 접지력으로 정의하였다. 로봇의 주행 가능 여부는 바퀴에 의한 구동력  $F_d$ 와  $F_r$ ,  $F_0$ ,  $F_{DM}$ 의 합으로 계산할 수 있다.

식 (2)는 구름 마찰력 계산식으로 무게에 의한 마찰력  $\mu_r m_d g \cos\theta$ 과 물리적으로 누르는 접지력에 의한 마찰력  $\mu_r F_w$ 의 합으로 계산되며, 식 (3)은 요구 견인력  $F_0$ 의 계산식으로 수평 배관 내면에서 끌고 가는 힘으로 배관 내면과 견인 물체 간 마찰계수와 상관관계가 있다. 로봇이 배관 내를 주행하기 위한 최소 구동력  $F_d$ 는 식 (5)와 같이 정리되며, 식 (5)의  $F_d$ 와 설계된 바퀴 타이어의 반경으로 모터 토크를 계산할 수 있다. 여기서,  $n$ 은

모터 개수,  $\mu_r$ 은 구름마찰계수,  $\mu_s$ 는 정지마찰계수,  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $m_d$ 는 구동 모듈의 질량(kg),  $m_0$ 는 견인 물체의 질량(kg)이다.

$T$ 는 모터의 요구 토크이며  $r$ 은 바퀴의 반경이고 보수적인 설계 요구조건을 위해 안전율 1.5배를 고려하여 설계 바퀴의 반경 60 mm 기준 요구 토크 55.2 Nm로 계산되었다. 최종 구동 모듈의 요구 견인력 고려한 설계 구성은 Fig. 3에 나타내었다.

$$6F_d - F_0 - F_r - F_{DM} = m \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

$$F_r = \mu_r (m_d g \cos\theta + F_w) \tag{2}$$

$$F_0 = \mu_s m_0 g \cos\theta \tag{3}$$

$$F_{DM} = \mu_r m_d g \sin\theta \tag{4}$$

$$F_d \geq \frac{F_0 + F_r + F_{DM}}{6} \tag{5}$$

$$T = F_d r$$

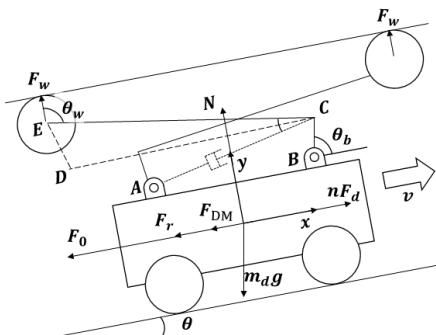


Fig. 2 Free body diagram of drive module

### 2.3 유압 액추에이터 선정

설계된 상부 링크를 구동하기 위한 실린더의 힘과 행정 길이를 결정하기 위한 기구학 링크 모델을 Fig. 2에 표현하였다.  $F_w$ 는 링크에 작용하는 실린더의 힘이 작용하여 발생하는 바퀴의 접지력으로 배관 내벽에 수직으로 작용한다. 그러므로 바퀴가 배관과 접촉하는 높이에 따라 지면과 링크 BC가 이루는 각  $\theta_b$ , 실린더와 링크 CE를 잇는

가상 부재가 이루는 각  $\theta_c$ ,  $F_w$ 와 가상 부재의 각  $\theta_w$ 가 증감된다.

$F_w$ 는 실린더 작용점에 모멘트로 작용하고 실린더의 힘도  $\theta_b$ 와  $\theta_c$ 에 의해 B점에 대한 모멘트를 발생시킨다. 계산한 실린더의 최소 힘  $F_c$ 는 식 (6)과 같이 기술할 수 있고, 이때 링크와 바퀴의 무게는 액추에이터 출력에 영향을 주지 않을 만큼 작다고 가정하였다.

$$F_c = \frac{F_w}{\cos\theta_c} \left( \cos(\theta_w) + \frac{CE \sin(\theta_w)}{BC} \right) \quad (6)$$

$$\theta_c = \cos^{-1} \left( \frac{BC^2 + CE^2 - AE^2}{2BCCE} \right) \quad (7)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4F_{c,max}}{\pi P_c}} \quad (8)$$

Fig. 4는 구동 모듈의 상부 링크를 매트랩으로 구성된 기구학 모델로 실린더 작용점인 점 C와 바퀴 점 E의 중심 경로를 파선으로 표시하였고  $F_w$ 를 부재에 작용하는 반력으로 나타내었다.

링크AC의 길이에 대한 최소, 최대값의 차이를 구하여 요구 행정 길이를 계산하였다. 계산 결과는 59.65 mm로 약 15%의 여유를 더해 70 mm 행정의 실린더로 설계하였고,  $\theta_c$ 에 대해서는 링크 AC, 링크AE, 링크CE의 길이를 계산할 수 있으므로 식 (7)로 정의하였다.

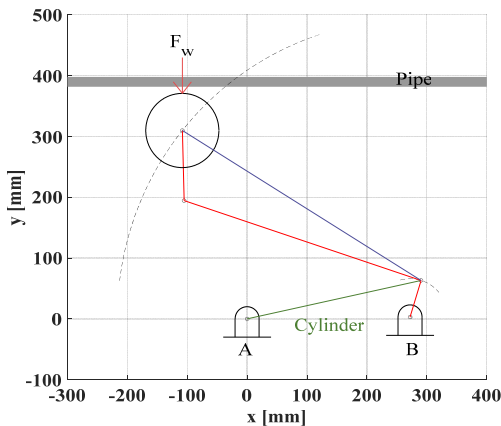


Fig. 4 Upper link kinematic model using MATLAB

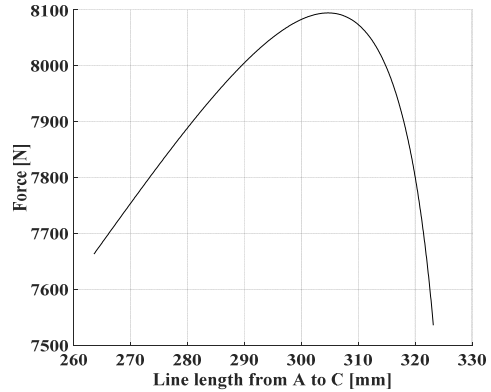


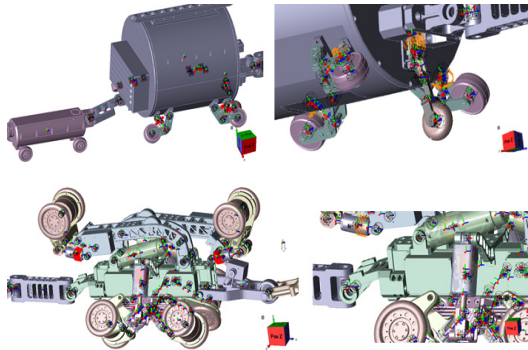
Fig. 5 Required cylinder force

Fig. 5에는 식 (6)을 이용하여 실린더에 요구되는 힘을 길이에 따라 나타내었다. 실린더가 300 mm 이상인 경우 실린더 힘이 최댓값으로 계산되었으며, 실린더 힘의 최댓값  $F_{c,max}$ 을 기준으로 실린더의 피스톤 헤드 직경은 식 (8)로 결정할 수 있다. 계산된 실린더 요구 수치는 41.44 mm이고 로봇에는 45 mm의 피스톤을 적용하였다.

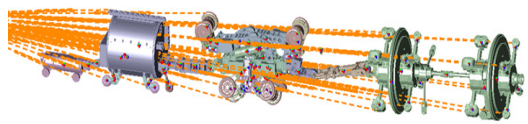
### 3. 고견인력 배관 로봇의 설계 검증

#### 3.1 시뮬레이션 초기 조건

설계된 배관 로봇의 구조적 안전성(Integrity)과 안정성(Stability)을 판단하기 위하여 다물체 동역학 해석과 동역학 해석을 통해 도출된 하중 지지점에 대한 힘 이력을 통해 구조 안전성 해석을 수행하였다. 곡관 주행 성능 검증을 위한 다물체 동역학 해석을 위한 경계 조건을 Fig. 6에 나타내었고, 500 mm와 800 mm 수직관, 수평관 및 45° 이형 곡관의 조합 배관에 대해 해석을 수행하였다. 해석은 다물체 동역학 상용 소프트웨어인 DAFUL MBD Pro를 사용하였다. 이때, 해석에 사용된 파라미터의 구체적인 값을 Table 2에 정리하였고, 구동 바퀴의 각속도에 사용된 T는 각 해석 케이스 동안 진행된 시간을 의미한다. 배관 내면과 바퀴 사이 마찰계수는 배관 환경이 습윤한 상태에서 사용하는 값 중 낮은 값으로 설정하여 배관을 주행하며 겪을 수 있는 악조건을 가정하고 해석을 수행하였다.



(a) Joint conditions



(b) Contact conditions (Robot to pipe)

Fig. 6 Initial conditions

### 3.2 해석 결과

해석 결과를 보면, 500 mm와 800 mm 수평 곡관을 통과하는 Fig. 7과 Fig. 9에서 6~16 sec 동안 로봇이 주행 방향으로 회전하는 현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 전체 바퀴 모듈의 회전 속도가 곡관의 최소 곡률과 최대 곡률 차에 대응하지 않고 일정한 속도로 주행하여 생긴 현상으로 판단되었다. Fig. 8과 Fig. 10은 500 mm와 800 mm 수직 곡관의 해석 결과를 나타내었으며, 로봇의 주행 방향으로 회전 없이 상향 주행하는 것을 확인하였다.

Table 2 Parameters for analysing multi-body dynamics

Parameters	Input Value
Hydraulic pressure	60 bar
Lower wheel spring	58.8 N/mm
Upper wheel spring	58.8 N/mm
Wheel friction coefficient	0.4
Drive wheel angular velocity	5.18 rad/T

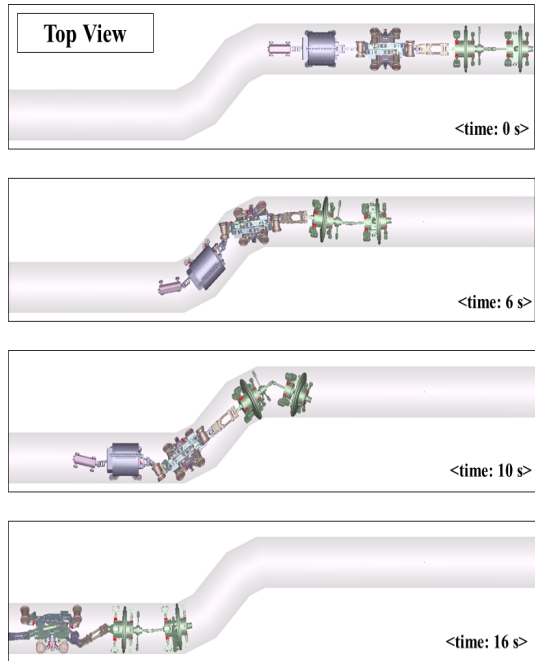


Fig. 7 Results of multi-body dynamics in 500 A horizontal bending pipe

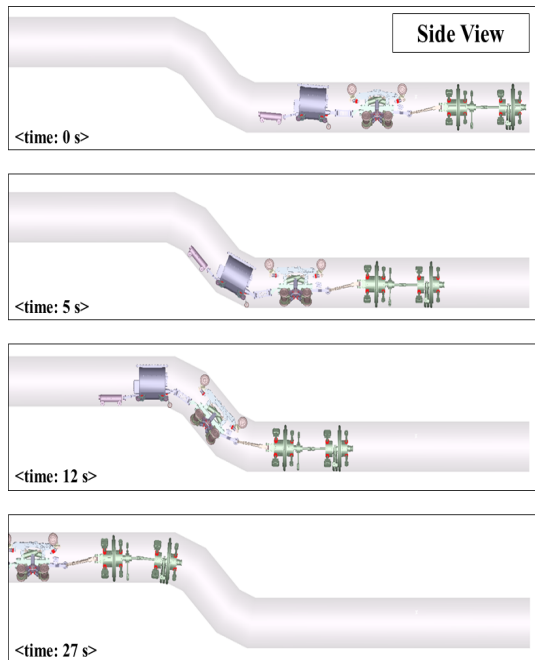


Fig. 8 Results of multi-body dynamics in 500 A vertical bending pipe

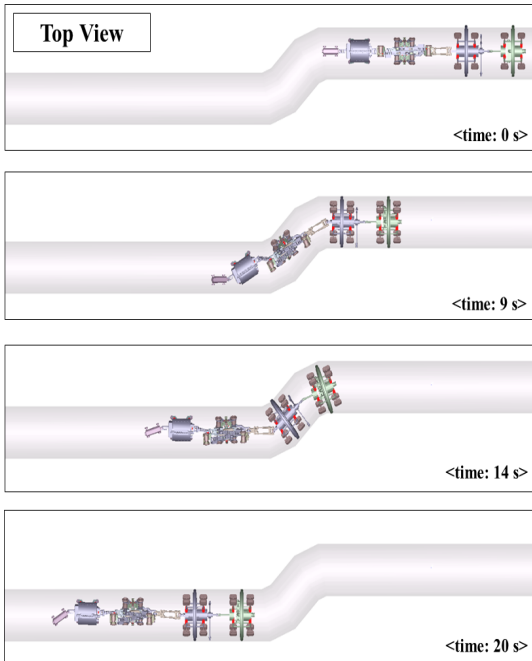


Fig. 9 Results of multi-body dynamics in 800 A horizontal bending pipe

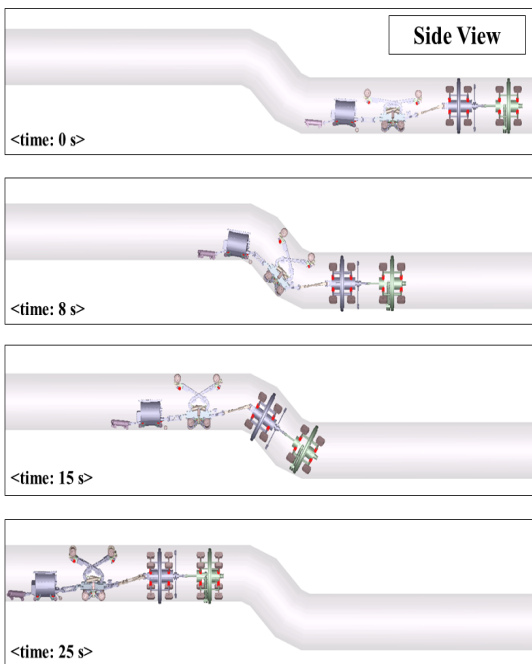


Fig. 10 Results of multi-body dynamics in 800 A vertical bending pipe

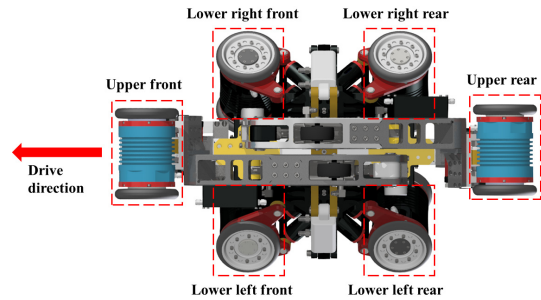


Fig. 11 Define of wheel position

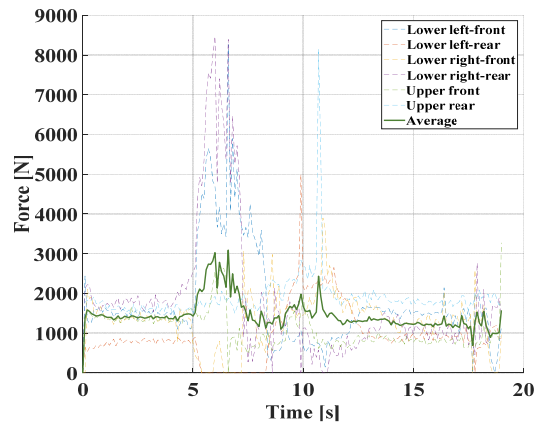


Fig. 12 History of contact force (wheel to pipe)

주행 바퀴의 위치를 도식화하기 위하여 Fig. 11과 같이 나타내었으며, Fig. 12는 바퀴의 접지력을 도식하였다. 해석 결과, 바퀴와 배관 내면 접촉 힘은 곡관 주행이 시작되는 5초부터 급격히 증가하고 곡관의 주행을 완료되는 13초 후에 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 해석 중 바퀴에 발생하는 토크의 변화 이력을 도식화하였다. 토크는 2.2절에 기술한 이론값 계산에서 접지력과 비례 관계인 것을 확인했고 해석 결과의 토크 이력 그래프에서도 접지력 이력 그래프와 동일한 증감 형태가 발생하는 것을 확인하였다.

### 3.3 구조 해석 결과

로봇의 구조적 안전성을 검토하기 위하여 수행한 구동 모듈 링크의 구조해석 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 링크는 로봇에서 견인력을 전달하는

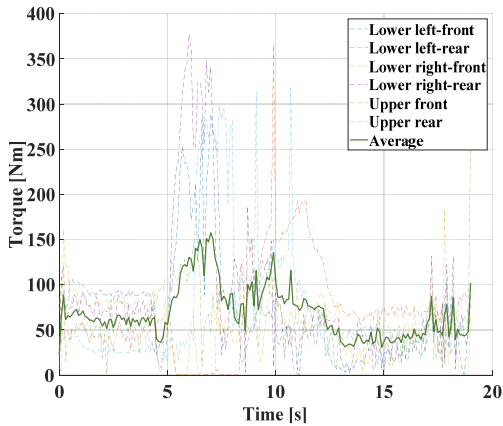


Fig. 13 History of wheel torque

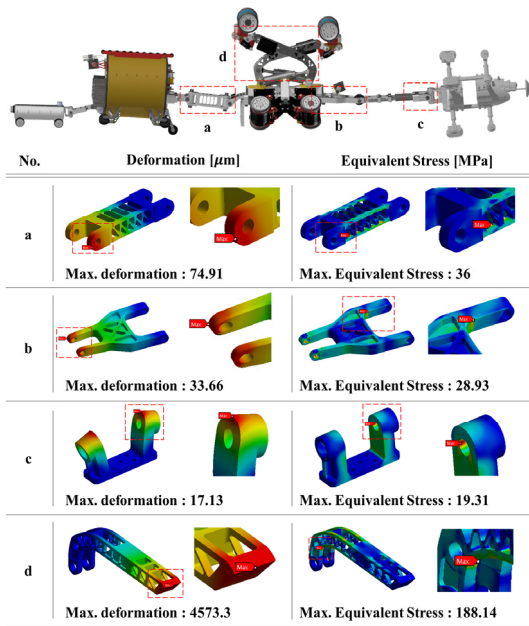


Fig. 14 Link structural analysis results

매개체이며 동시에 배관 내 장애물을 극복하기 위해 모듈이 유연하게 연결되어야 한다. 이러한 이유로 구동 모듈의 링크는 배관 주행 중 가해지는 변동 하중에 취약할 수밖에 없다. 따라서 로봇 부품 중 구조적으로 취약한 링크의 강성을 확인하여 전체 로봇의 구조적 안정성을 검증하였고, 구조해석을 위해 상용 해석 소프트웨어인 ANSYS v20을 활용하였다.

Table 3 Al6061-T6 material properties

Modulus of Elasticity	Ultimate tensile strength	Yield tensile strength	Poisson's Ratio
65 GPa	310 MPa	276 MPa	0.33

해석 경계 조건은 다물체 동역학 해석 상 보수적인 해석 결과를 도출하기 위하여 해석 대상 부품에 대한 조인트의 힘과 토크 이력을 기준으로 최대값을 선정하여 경계 조건으로 적용하였다.

Table 3은 구조해석에 사용된 링크 재료의 물성을 나타내었으며, 각 링크의 최대 응력 값으로 계산된 안전율은 링크 a는 7.67, 링크 b는 9.54, 링크 c는 14.29로 부재의 안전성을 확인하였다. 링크 d의 안전율은 바퀴 지지점과 실린더 작용점의 위치 차로 인해 굽힘 모멘트가 작용하여 다른 링크보다 상대적으로 낮은 1.46으로 계산되었다. 하지만 응력 발생 지점이 국부적이며 등가 응력 기준 항복강도 이내에 수치가 계산되었으므로 안전성을 확보한 것으로 판단하였다.

## 4. 배관 로봇의 성능 시험

### 4.1 500 mm 배관 견인력 시험 결과 비교

Fig. 15는 견인력 시험 결과와 비교하기 위한 해석의 초기 조건으로 다물체 동역학 해석을 진행하였다. 수평 배관에서 강성을 10,000 N/mm으로 정의한 스프링 요소를 구성하여 구동 모듈과 배관을 연결하였다. 견인력은 이 스프링 요소에 작용한 힘을 기준으로 계산하였으며, 이외의 조건은 3.1절 다물체 동역학 해석의 초기 조건과 동일하게 적용하였다.

Fig. 16은 해석 결과로 배관 주행 방향으로 이동하는 로봇과 연결된 스프링 요소의 하중 이력을 나타내었다. 해석 후 동작이 안정화된 후 값인 0.5초 이후 값부터 도시하였고, 해석 결과의 평균은 약 4,987.67 N으로 계산되었다.

견인력 시험은 수평 배관을 기준으로 코팅이 되지 않은 나관 상태의 배관을 적용하였으며 우레탄 바퀴와 나관 상태의 배관 내면의 마찰력을

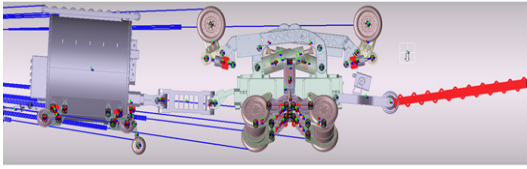


Fig. 15 Initial condition of multi-body dynamics

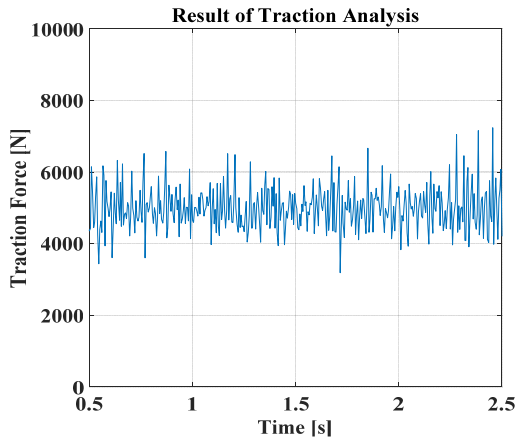


Fig. 16 Multi-body dynamics analysis result

극대화할 수 있도록 시험하였다. 견인력의 측정은 0.5 kg 단위로 측정되는 호이스트 저울을 적용하였다. 배관 로봇의 구동 모듈에 공급되는 유압은 60 bar로 적용하였다.

Fig. 17에는 시험 중 순간 견인력의 최대값을 나타내었고, 시험 결과는 최대 578.5 kgf(5,675.09 N)와 평균 410 kgf(4,022.1 N)로 측정되었다. 해석 결과와 시험 결과의 견인력 평균값의 오차는 약 11.49%로 계산되었는데, 로봇 구동에 의한 진동, 바퀴의 슬립, 해석을 위하여 구성한 스프링 요소와 실제 시험에서 사용된 슬링의 탄성계수 차이 등을 오차의 원인으로 판단하였다.

#### 4.2 배관 테스트베드 시험

통합 개발된 로봇의 곡관 주행 성능을 검증하기 위하여 Fig. 18에 배관 테스트베드의 구성과 주요 치수를 나타내었다. 테스트베드는 수직, 수평 직선관과 45° 이형 곡관의 조합으로 구성하였으며, 구성 배관은 상수관 건설에 사용되는 도복 강관으로 적용되었다.



Fig. 17 Maximum traction in 500 mm pipe

시험을 위하여 전원과 통신이 합쳐진 케이블 리더를 주행 중단부로부터 주행 초입부까지 통과시킨 후 로봇과 접속하여 시험을 진행하였다. 시험을 진행하며 보조 모듈 전방에 장착된 카메라로 배관 내부 환경을 실시간으로 확인하였고 보조 모듈에 장착된 누적거리측정 센서로 주행거리를 측정하였다.

Fig. 19는 테스트베드의 수직 곡관 진입 시 영상을 나타내었고 배관 내에서 로봇 위치를 표현하기 위하여 3D 모델 기준으로 주행 지점을 표기하였다. a~c는 상승 구간이며, c~e는 하강 구간으로 구성되어 45° 이형 곡관의 상승과 하강에 대한 성능 검증이 가능하였다. 시험 결과로, 두 구간 모두 주행하며 로봇의 상하월 주행 성능을 확인하였다.

Fig. 20은 45°와 90° 수평 곡관으로 이루어진 배관의 각 곡관 진입 시 영상을 나타내었으며, a~c는 45° 이형 곡관 통과 구간이고, c~e는 90° 이형 곡관으로 구성되었다. 두 곡관 모두 통과하여 45°

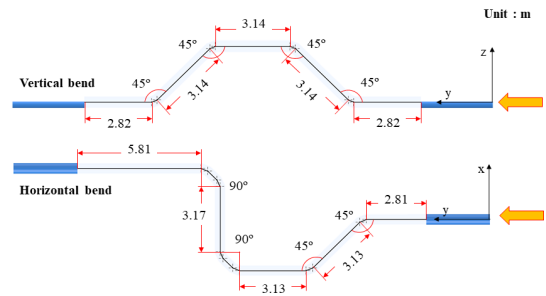


Fig. 18 Test-bed to examine the robot driving performance



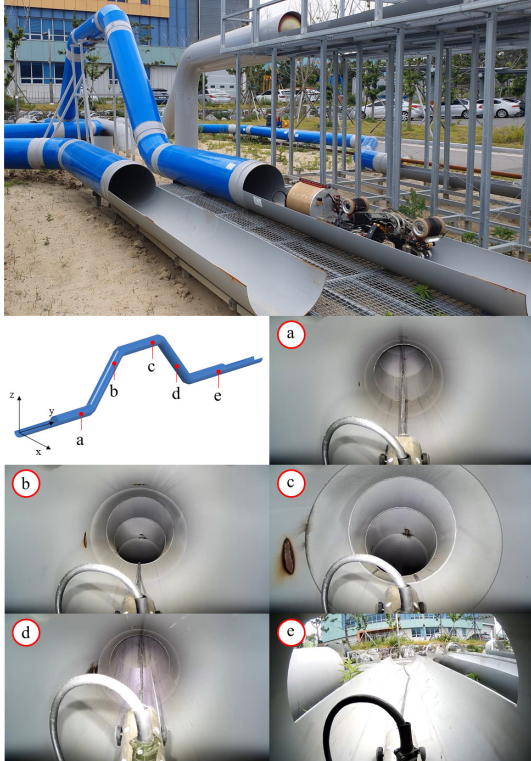


Fig. 19 Driving test of high traction robot in a vertical pipe

와 90° 수평 이형 곡관에 대한 로봇의 주행 성능을 확인하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 견인력의 한계를 극복하고 배관 내부에서 고견인력으로 주행이 가능한 로봇 플랫폼을 제안하였다. 설계된 로봇에 대한 다물체 동역학 해석을 통해 고려되는 배관에 대한 주행 특성을 확인하였다. 또한 주행 중 발생하는 최대 관절 토크를 기반으로 구조 해석을 수행하여 로봇의 안전성을 검토하였다. 실제 배관 환경을 모사한 시험 환경을 구축하여 성능 시험을 수행하였으며, 평균 410 kgf의 견인력 성능과 수직, 수평 이형 곡관에서 다물체 동역학 해석 결과와 유사한 형태로 배관 로봇이 주행하는 것을 확인하였다.

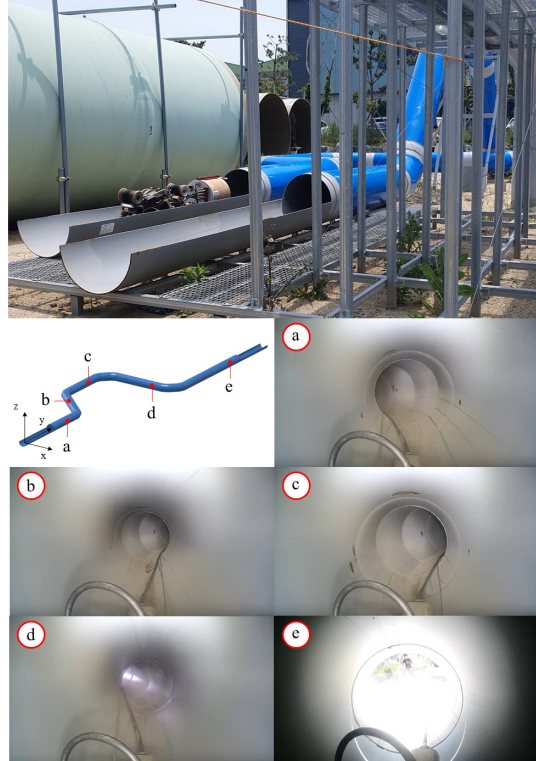


Fig. 20 Driving test of high traction robot in a horizontal pipe

배관로봇의 설계 검증 및 성능 예측을 위한 다물체 동역학 해석 결과의 신뢰성을 확인하였으며, 개발된 로봇의 성능 향상을 위해 300 m 장거리 배관 주행 특성 분석을 완료하여 상용 운전을 위한 개발을 추가 진행할 예정이다.

## Author contributions

M. W. Jang; Conceptualization and Writing-original draft. J. Y. Lee; Project administration. M. S. Jung; Formal analysis. J. H. Hahm; Funding acquisition. S. H. Hong; Investigation and Methodology. K. H. Seo; Resources. J. H. Suh; Writing-review & editing.

## References

1. J. H. Lee, D. S. Gu and B. K. Choi, 2008, "A Diagnosis and Solution Case of Structural Vibration caused by Pipe", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 18-22.
2. J. H. Lee, 2008, "Pneumatic Tube System", The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 37, No. 8, pp. 34-42.
3. Ministry of Environment, 2018, "2018 Statistics of Waterworks".
4. K. J. Park, 2013, "Analysis on the Likelihood of Axisymmetric Wave Propagation in Buried Water Pipes", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 36-41.
5. J. W. Cho, J. C. Lee, and Y. R. Choi, 2020, "Development of Ultrasonic Leakage Sensing Unit for the Detection of Gas Leakage in the Pipe", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 26, No. 7, pp. 517-525. (DOI:10.5302/J.ICROS.2020.20.0047)
6. D. Y. Kim, S. W. Park, H. J. Lee, J. P. Kim, W. J. Chung and D. H. Kwak, 2021, "Development of Pipe Robot by Using Mecanum Wheels", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 58-65. (https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.02.058)
7. H. J. Yeo, 2012, "Development of a Robot System for Repairing a Underground Pipe", Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 3, pp. 1270-1274. (https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1270)
8. D. W. Kim, S. G. Roh, J. S. Lee, S. H. Lee and H. R. Choi, 2008, "Development of In-Pipe Robot Using Clutch-Based Selective Driving Algorithm", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 32, No. 3, pp. 223-231. (DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.3.223)
9. B. S. Kang and C. S. Song, 2006, "The Estimation of Shape Parameter of Pneumatic Cylinders", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 127-132.
10. J. Y. Lee, S. H. Hong, M. S. Jung, K. R. Han and J. H. Suh, 2018, "Development of the Robot for In-pipe Cleaning from 250 to 500A Pipes", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 13-26. (DOI:10.9726/kspse.2018.22.5.013)
11. J. H. Kim, S. M. Han and Y. J. Kim, 2016, "Effects of Viscosity of Hydraulic Oil on the Performance of Actuator", Korean Society for Fluid Machinery, Vol. 19, No. 1, pp. 31-36. (http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2016.19.1.031)
12. K. Y. Bae and J. S. Jeoun, 2015, "Study on the Hydraulic Cylinder Flow Analysis of Orifice Type", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 54-59. (https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.6.054)