



250~500A 배관 내부 청소를 위한 로봇의 개발 Development of the Robot for In-pipe Cleaning from 250 to 500A Pipes

이재열* · 홍성호* · 정명수* · 한경룡** · 서진호****†
 Jae-Youl Lee*, Sung-Ho Hong*, Myung-Soo Jung*,
 Kyung-Ryoung Han** and Jin-Ho Suh****†

(Received 29 March 2017, Revision received 13 July 2017, Revision received 13 July 2017)

Abstract: In this paper, we introduce the pipe cleaning robot developed to clean the gas impurities of the steel manufacturing equipments. The pipe cleaning robot consists of three parts. The head part is composed of a cleaning unit, and the middle part is composed of four links and a driving units. The tail part is fixed to the control unit and connected to the external controller by the tether cable. A caterpillar type was used to maximize the traction power of the driving parts. The extension links have been developed to maintain the traction force in case the pipe inner diameters ranged from 250 to 500 A. The driving and cleaning performance tests for the pipe cleaning robot were proceeded with the field of steel manufacturing equipment.

Key Words : In-pipe cleaning robot, Pipe diameter adaptation robot, Industrial pipelines

1. 서 론

산업 현장에서 원료를 공급하는 배관 설비는 다양한 관경으로 구성되어 있으며, 이송물질과 설치 배관의 형태, 주변 환경 등의 영향으로 일정 주기가 도래되면 정비 등의 작업이 수행되고 있다. 배관 내부의 이물질을 제거하기 위하여 인력과 장비를 투입하여 관내 막힘을 해결하는 기술이 많이 개발되고 있으나, 인력의 투입을 대신할 수 있는 노력이 필요한 실정이다. 배관 내부를 검사하는 로봇의 개발은 국내외에서 많은 연구가

진행되고 있으며, 배관 내부를 주행, 검사 그리고 청소하는 로봇 기술 또한 근래 많은 연구 개발을 진행하고 있다. Roman은 배관 내부를 견인하는 방법에 대해 다양한 체계를 연구하였고,¹⁾ Hayashi는 소구경 배관 내부를 주행할 수 있는 배관로봇에 체계를 제안하였다.²⁾ Hirose는 25, 50, 150 직경 배관을 주행할 수 있는 로봇 체계를 제안하였고,³⁾ Roh는 도시가스 배관 검사를 위한 다기능 로봇 크롤러 체계에 대하여 나타내었다.⁴⁾

산업 현장에 배관청소로봇의 활용도 및 상용화를 위해 현장 전개 및 설치의 편의성, 다양한 규

**** 서진호(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
 E-mail : suhgang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6189

*이재열, 홍성호, 정명수 : 한국로봇융합연구원 제조로봇 연구본부

**한경룡 : 포스코 기술연구원

**** Jin-Ho Suh(corresponding author) : Dept. of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

E-mail : suhgang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6189

*Jae-Youl Lee, Sung-Ho Hong, Myung-Soo Jung : Manufacturing Robotics R&D Division, KIRO

**Kyung-Lyong Han : POSCO Technical Research Lab.

격의 배관의 대응(관경 치수 변화)이 필요하며, 실제로 제철소 현장에 설치된 다양한 크기 및 형태의 배관 중 주기적인 정비가 필요한 설비에 인력을 대체하여 투입 가능한 배관청소로봇이 요구되었다. 본 논문에서는 종래에 개발된 배관청소로봇 모듈의 한계를 극복하고자 250~500 A 배관 내경을 주행 및 청소할 수 있는 배관청소로봇의 개발 내용을 기술하였으며, 현장 적용 성능을 높이기 위한 상용화 수준의 배관청소로봇의 개발 내용을 나타내었다.



Fig. 1 The impure of COG pipe lines

2. 로봇을 이용한 배관청소 기술 개발

2.1 종래의 배관청소 방법

설비용 가스 배관 내부는 아래의 Fig. 1의 좌측 그림과 같이 연료 가스의 종류에 따라 침착되는 다양한 형태의 침전물로 인해 공급 가스의 효율 감소, 배관 내벽 부식의 가속화 등이 발생하며, 이를 방지할 경우에 가스공급의 극단적 저하로 인한 생산 차질, 배관 벽의 파공으로 인한 누출과 같은 안전사고 발생 등의 위험이 존재하게 된다.

설비용 가스 배관의 경우, 가스의 불순물 함유량에 따라 주관에서 지관으로 직관에서 곡관 및 분기관으로 이동될수록 유동 마찰 및 유량 변화로 인하여 배관 내 이물질이 특정 구간에서 퇴적된다. 특정 제철 설비의 경우, 가열로 인근 COG(Coke Oven Gas) 배관의 경우 최대 약 700시간 운전 후 약 40~50% 정도의 퇴적물이 발생하며 이를 방지하면 가열로 효율에 막대한 영향을 미치게 된다. COG 배관 내부에 퇴적되는 이물질을 최대한 제거하는 생산 단계에서 필터 기술이 많이 발전되어 왔지만, 노후 설비의 경우 이를 구현하는 기술적, 경제적 효율성이 좋지 않다. 현재까지 적용되는 배관 내부의 이물질 제거는 정비 기간 동안에 주관에서 가스를 차단하고 배관 내부의 퇴적물을 손쉽게 제거하기 위하여 고온수증기를 배관 내부에 일정 시간 노출하여 내부 퇴적물을 연화한다. 이후에, Fig. 1의 우측 그림과 같이 수공구를 이용하여 작업자가 직접 이물질을 제거하며, 폐기물로 처리하게 된다.

2.2 로봇을 이용한 배관청소 방법

배관 내부를 청소/관리하여 배관의 수명을 연장하고, 가스공급의 효율을 극대화를 통한 비용 절감효과, 잔류 가스의 위험 등 사람에게 유해한 환경을 로봇 작업으로 대체함으로써 설비 운용의 안전성 및 효율성을 기대할 수 있다. 배관청소로봇에게 필요한 주요기능은 직관 내부를 주행하고 곡관, 분기관 및 각종 밸브 등의 정형화된 장애물을 통과하는 주행 기능이 요구된다. 그리고 배관의 장애물 극복과 다양한 관경 변화에 대응하기 위한 구동부 관절 링크 기능이 요구되고 배관 내부에 고착된 이물질의 제거를 위한 청소기능이 필요하다. 배관 내부에 배관청소로봇을 작동하기 위하여 내/외부 전원을 공급받을 수 있지만, 통신 등의 문제를 고려하여 대부분 외부에서 전원 및 각종 동력원(전기, 유압, 공압 등)을 공급받는 형태가 널리 개발되고 있다. 따라서 공급 전원 케이블 및 이물질 이송호스 등의 부가 장치를 이동시키기 위한 충분한 견인력과 현장에 전개가 가능한 로봇운영 설비(안정적인 전력 공급, 원활한 로봇 제어 환경)가 반드시 필요하다.

종래에 개발된 제철소 COG 배관청소로봇으로 배관의 다양한 형태(곡관, 분기관 등)를 극복하기 위하여 배관 내벽을 지지하면서 추진하기 위한 모듈형 구조로 개발되어 현장 실험을 수행하였다.⁶⁾ 로봇의 특징은 2개의 주행 모듈과 1개의 청소 모듈로 구성되며, 청소 모듈을 통해 분쇄된 이물질을 로봇과 연결된 외부 진공 호스를 통하여

로봇이 배관 내부를 주행하면서 외부로 배출하는 형태로 개발되었다. 이 청소 로봇 시스템의 장점은 곡관 및 분기관 등의 장애물을 극복하여 주행 능력이 높다는 점과 배관 이물질의 고착상태에 따라 청소 모듈을 교체하여 청소 작업이 가능한 장점이 있으나, 로봇의 길이가 길어지고 무게가 무거워 현장 설치가 쉽지 않고 내부 이물질을 외부로 배출하기 위한 부가 장치가 반드시 필요하여 상용화 보급에 어려움이 발생하였다. 또한 투입 환경이 250~300 A에 제한되고 환경 변화를 대응하기 위하여 수동으로 확장 링크를 교체하는 단점이 있다. 종래에 개발된 배관청소로봇의 단점을 극복하고자 개량/현장 보급형 배관청소로봇의 개발이 요구되었고 설비 현장에서 로봇을 이용한 배관청소가 필요한 구간에 대해 조사를 수행한 결과, 대부분의 장애물(곡관 및 분기관)은 플랜지 형태로 조립되어 유지보수 상황에서 분리하여 청소하는 방안을 사용하므로 로봇에 대한 의존도가 높지 않았다. 하지만 직선관(250~500 A)의 경우 길이가 4~8 m 구간이 대부분 존재하는데, 인력을 통한 직선 구간 청소가 수공구로 이루어지기 어려운 환경이 대부분인 것을 확인하였다.

3. 배관청소로봇의 개발

3.1 요구조건 및 사양 정의

개발된 배관청소로봇의 적절한 현장 적용을 위하여 조사 결과, 250~500 A 직선관에 대하여 소형, 경량형 배관청소로봇의 개발이 필요한 것을 확인하였고 Table 1과 같은 요구조건 및 사양을 도출하였다. 제철소 현장 환경을 고려한 배관 내부의 이물질을 효과적으로 제거하기 위한 로봇 기술은 아래와 같이 구성될 수 있다.

- a) 배관 내부를 반자율 주행하는 로봇 구동부
- b) 내부 이물질의 형태에 따라 청소 효율이 높은 로봇 청소부
- c) 로봇의 주행 및 청소를 위한 조종부
- d) 물리적 청소를 위한 보조시스템(전원공급부, 작동원공급부(공압), 보조 장치)

Table 1 Requirement of pipe cleaning robot

Requirement	Target	Unit
Target pipe(straight type)	250~500	A
Robot weight	20 under	kg
Traction weight	80 over	kg
IP	54	-
Cleaning performance (Waste colorness 10~40% under)	90 over	%
System setup/recovery time	30 over	min

현장 환경은 가스 배관 내부에 고착되거나 쌓여 있는 이물질은 정비 기간 동안 신속히 제거하여 사람을 대신하여 인체에 유해한 이물질을 최소의 인력으로 최대의 효율로 제거하는 목적이 있으며, 이를 위하여 기술적으로 해결이 필요한 기술 접근방법은 다음과 같이 요약된다.

- e) 수평 직관의 이동이 가능한 구동부, 250~500 A 환경 대응
- f) 물리적 청소처리를 위한 100 kg 이상의 견인력
- g) 다양한 이물질의 물리적 형태에 따라 효율이 극대화된 청소 장치
- h) 배관 내 이물질의 영향을 받지 않고 최대의 견인력을 유지하는 구동장치
- i) 퇴적물의 분쇄와 흡입 및 이송을 통한 효과적인 이물질 배출 장치
- j) 산업 현장에서의 안정적인 전원 공급 및 원활한 로봇제어 환경
- k) 작업자의 원활하고 효율적인 작업을 위한 조작 장치

3.2 배관청소를 위한 로봇 플랫폼의 개발

3.2.1 배관청소로봇의 기구

1) 배관청소로봇의 전체 구성

250~500 A 환경 대응형 배관청소로봇은 Fig. 2와 같이 청소, 구동 및 연결 모듈이 일체화된 단일 모듈로 구성된다. 기능과 부착 위치에 따라 단위 기구(unit)로 구성되었으며, 선단부(front unit)는 청소기능을 담당하는 청소유닛, 중앙부는 구동 유닛(Driving unit), 후방부는 제어기 유닛(Control unit)

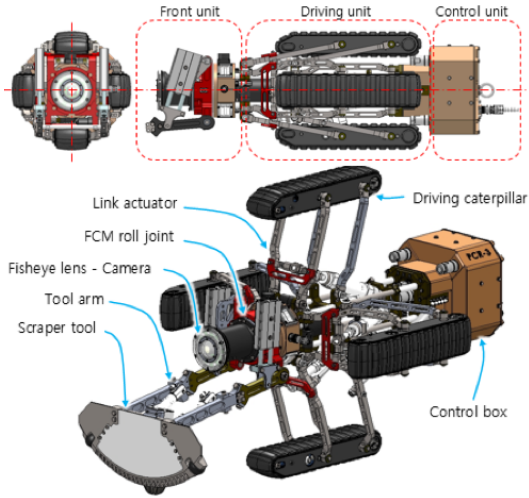


Fig. 2 Constitution of the pipe cleaning robot system

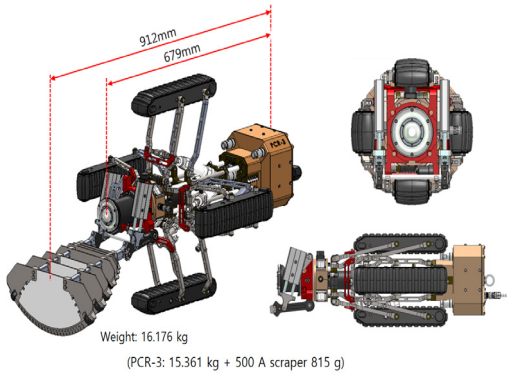


Fig. 3 Dimension of the pipe cleaning robot

으로 구성되었으며, 구동 유닛은 4개의 구동기를 링크 구조로 연결하여 환경 대응이 가능한 구조로 구성되었다.

Fig. 3은 개발된 배관청소로봇의 플랫폼의 구성 및 길이를 나타내었으며, 체계 길이는 현장 적용성을 높이기 위하여 길이 912 mm로 설계되고 설계 중량은 청소 공구를 제외하고 로봇의 중량은 15.36 kg 이내로 구성하였다. 청소 툴은 종래연구 내용 중 청소유닛의 개발에서 스크레이프 방식을 적용하였으며, 환경의 변화에 따라 사용자가 장착하는 방식을 적용하였다. 특히, 산업 배관 내부를 청소하기 위한 배관로봇은 내부 환경이 유수분 및 분진과 같은 이물질에 노출되게 되므로 작업

후 많은 이물질이 로봇에 부착된다. 이를 제거하기 위하여 압축 공기를 이용한 청소방법과 고압의 세척액을 분사하는 방법을 사용하게 되므로 로봇에 대한 방수 및 방진 설계를 고려하여 이물질의 내부 침입 및 세척액의 내부 침입이 발생되지 않도록 개발되었다.

2) 배관청소로봇의 구동 케도 유닛

전원, 통신, 공기압 그리고 흡입 호스와 같이 외부 연결선을 견인하는 로봇의 역할과 배관 내부 청소 시 발생하는 이물질 이탈력에 대해서 충분한 견인력을 요구하는 구동기의 형태는 배관 내부의 주행 효율을 높이기 위하여 Fig. 4와 같이 케도 형태의 구동기를 구성하였다. 구동 케도 유닛에는 BLDC 모터와 유성기어 감속기를 통과한 동력이 베벨기어와 평기어를 조합을 통하여 동력을 케도에 전달하는 형태로 구성하였다.

고무 케도는 내열성, 내화학성 및 고장력 특성이 보장되어야 하므로 EPDM 고무 소재로 적용하고 타이밍 벨트를 동시 성형하는 형태로 케도를 제작하였으며, Fig. 5와 같이 구성하였다.

구동 케도 프레임의 구조 안전성 검증을 위하여 구조 해석을 수행하였다. 적용된 소재인 알루미늄 합금(AL6061-T6)에 대한 소재 정의 및 최대 접지력이 작용한 상태에서 설계된 프레임의 강성과 강도를 평가하였고 Fig. 6과 같이 최대 변형이 0.1 mm 이내의 변형과 최대 응력 87 MPa 이내가 발생하도록 개발하였다.

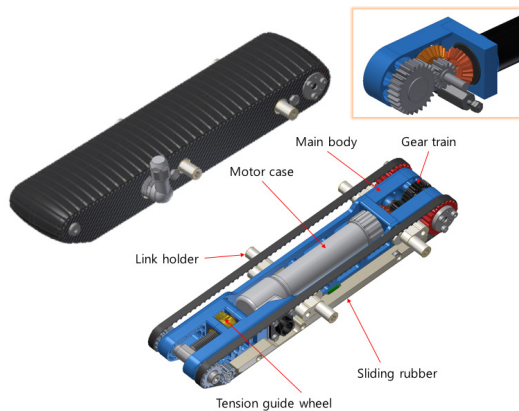


Fig. 4 Development of the drive caterpillar unit

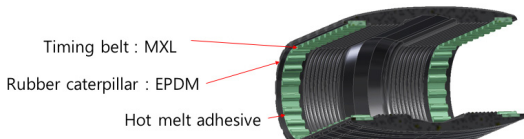


Fig. 5 Composition of rubber track part

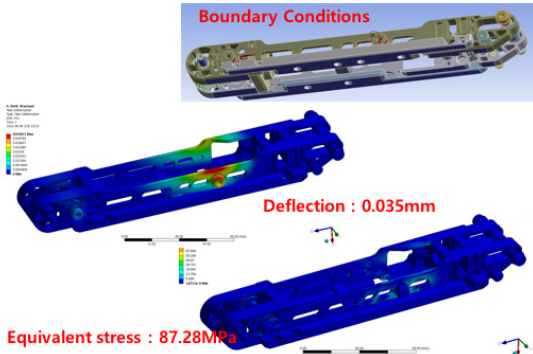


Fig. 6 Stiffness and strength analysis of drive unit frames

3) 링크 기구학 계산 및 설계

개발된 배관청소로봇은 250~500 A의 관경 변화가 가능한 링크 구조로 구성되며 최대 링크 확장 힘이 도출되기 위한 구조 분석을 수행하였다.

Fig. 7과 Table 2는 기구학 계산을 위한 초기 설계 단계에서 정의된 치수 정보를 나타내었고 계산을 통해 각 관경에 대한 링크의 최적 치수와 확

장 힘과 수축 힘을 계산하였다. 계산 결과 최소 적용 관경인 250 A의 경우 링크가 확장하기 전과 배관 내경과의 거리는 - 24.17 mm의 거리가 계산되었고, 링크 최대 확장 시 500 A 관경의 경우 - 4.18 mm의 거리로 계산되었다.

음수의 값은 배관 내경보다 크게 확장 가능한 것을 의미하며, 공압으로 위치제어를 하여야함으로 최대 확장 거리를 여유롭게 유지할 수 있도록 링크의 길이를 확정하였다. 해당 관경에 대한 최대 접지력 및 견인력에 대한 결과는 최대 Table 3에 나타내었으며, 자중에 대한 고려로 4면에 장착되는 링크의 구조는 하부 링크에 대해 약 1,156 N의 접지력이 적용되도록 구성하고 측면 및 윗면 링크에 대해 약 396 N의 접지력이 적용되도록 링크의 길이 및 공압 실린더의 용량을 확정하였다.

Table 2 Parameter of link actuating mechanism

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
BL1	124.00	BH	35.00
BL2	108.00	BS	36.46
BL3	118.00	SS	149.24
BL1'	124.00	CL1	174.80
PL1	60.00	CL2	14.00
PL2	140.00	AL1-MIN	179.00
CPL=PL1+PL2	200.00	AL1-MAX	228.49
CO	20.00	AL2-MIN	173.21
CA_TCK	55.00	AL2-MAX	223.00

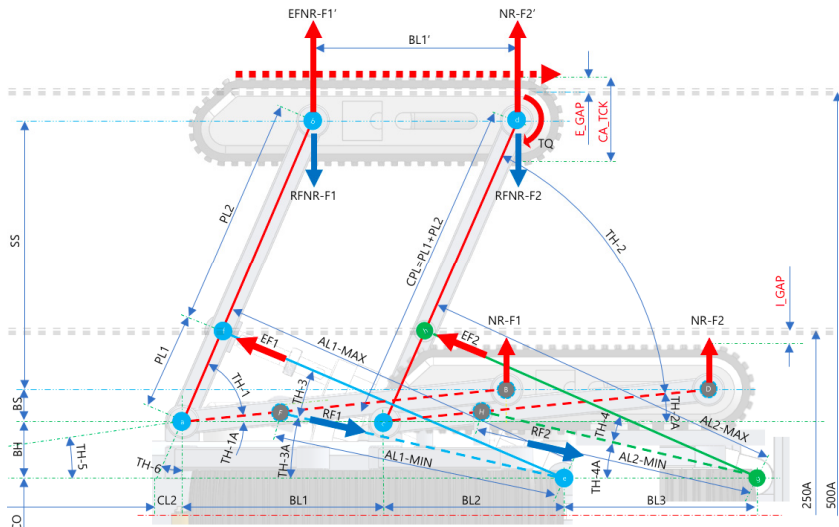


Fig. 7 Schematic of link actuating mechanism

Table 3 Results of link actuating mechanism

Parameter	Value	Note
I_GAP(250A)	-24.17mm	Intract position(gap dim.)
E_GAP(500A)	-54.18mm	Extract position(gap dim.)
EFNR-F1+EFNR-F2	396.39N	Contact force of fully extracting motion - Side link
EFNR-F1+EFNR-F2	1156.81N	Contact force of fully extracting motion - Under link(Total)

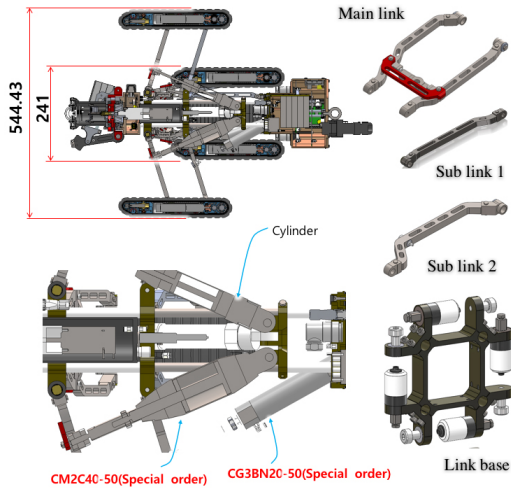


Fig. 8 Design of link actuate parts

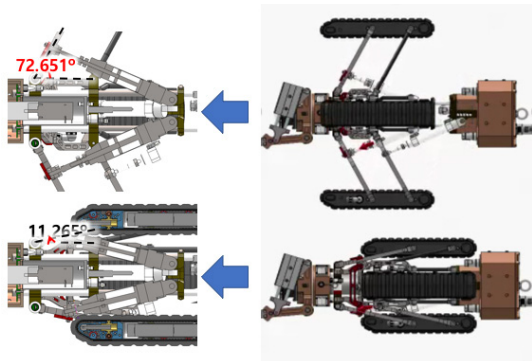


Fig. 9 Motion of link mechanism

적용된 실린더는 하부에 보어경 32 mm 선형 공압 실린더 1기와 보어경 20 mm 선형 공압 실린더 2기를 적용하고 측면 및 윗면 링크에 적용된 선형 공압 실린더는 보어경 25 mm를 적용하였다. 계산 공기압은 7 bar를 적용하였다.

최대 견인력과 함께 링크 형상 정의 및 치수 계산을 토대로 상세 설계를 수행하여 Fig. 8과 같은 형태로 최종 링크 구조물을 설계하였고, Fig. 9와 같은 형태로 동작 되는 것을 설계 단계에서 확인하였다.

링크의 작동은 공기압을 입력하여 링크 확장 선형 실린더를 이용하여 위치제어를 수행하는 방식을 적용하였다. 배관청소로봇은 주행 및 청소 작업을 위하여 배관에 중심에 로봇이 위치하는 것이 효율적이므로 사용자가 정의한 배관 치수에 로봇이 중심에 항상 위치할 수 있도록 위치제어를 수행하였다.

4) 청소유닛의 설계

배관청소로봇의 청소유닛은 선두부에 링크형태의 구조로 동작되며 스크레이퍼를 장착하여 배관 하단에 퇴적된 이물질질을 파단 후 외부로 이송

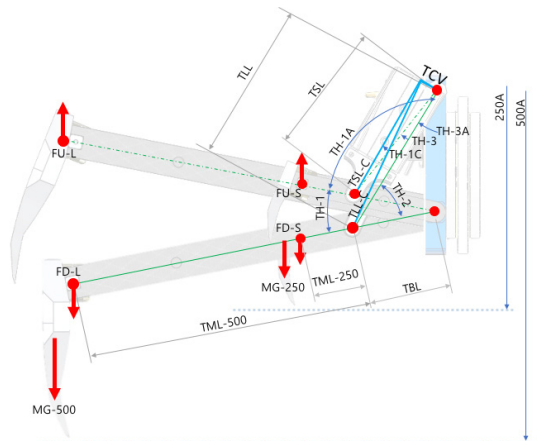


Fig. 10 Schematic of cleaning tool mechanism.

Table 4 Parameter of cleaning tool mechanism

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (deg)
DA	115	TH-1	26.32
TSL	125.794	TH-1A	78.08
TLL	155.545	TH-1C	8.23
TBL	80	TH-2	45.7
TSL-C	124.5	TH-3A	38.48
TLL-C	151	TH-3	8.58
TCV	18		
TML-250	50		
TML-500	270		

하여 배출할 수 있는 구조로 설계하였다. 적절한 공기압과 링크의 길이를 계산하기 위하여 Fig. 10과 같이 기구학 모델을 구성하고, Table 4와 같이 설계 변수를 선정하여 계산을 수행하였다.

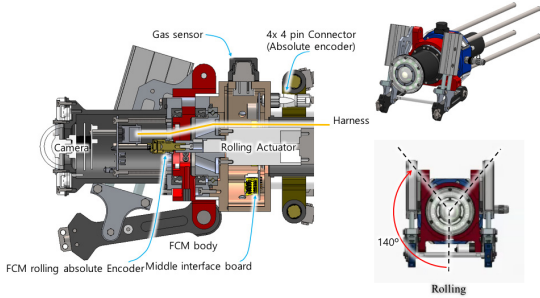


Fig. 11 Design of cleaning tool mechanism

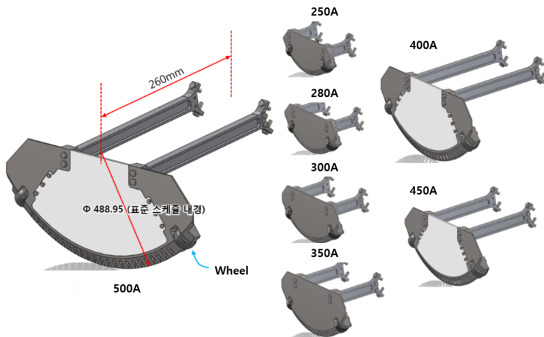


Fig. 12 Design of cleaning tools by pipe dimension

계산 결과, 청소유닛 양 측면 링크 동작을 위해 설치되는 선형 공압 실린더의 보이경은 15 mm로 선정하고 적용 압력 7 bar를 기준으로 250 A 배관의 최대 절단 힘은 301.3 N으로 계산되고 500 A 배관의 경우 최대 절단 힘은 140.4 N으로 계산되었다. 계산을 토대로 상세 설계를 수행하여 Fig. 11과 같이 구성하였으며 내부 구성은 청소유닛 중심축에 축의 회전을 위하여 모터와 감속기를 구성하여 축 중심에서 $\pm 140^\circ$ 회전이 가능한 형태로 구성하였다. 청소 도구는 배관의 직경에 따라 작업자가 변경하여 장착되는 형태로 구성하였으며 Fig. 12와 같이 환경에 대응할 수 있도록 개발하였다.

5) 컨트롤박스의 설계

배관청소로봇의 후방 컨트롤박스의 외부 구성은 Fig. 13과 같고, 내부 구성은 Fig. 14와 같이 구성하였다.

내부의 제어회로를 외부 환경으로부터 보호하기 위하여 방수/방진 설계를 적용하였다. 후방 컨트롤박스 내부는 각 구동기의 모터 제어기와 인터페이스 회로 및 공압 레귤레이터 및 솔레노이드 밸브, 주제어기가 단일 케이스에 구성하였다.

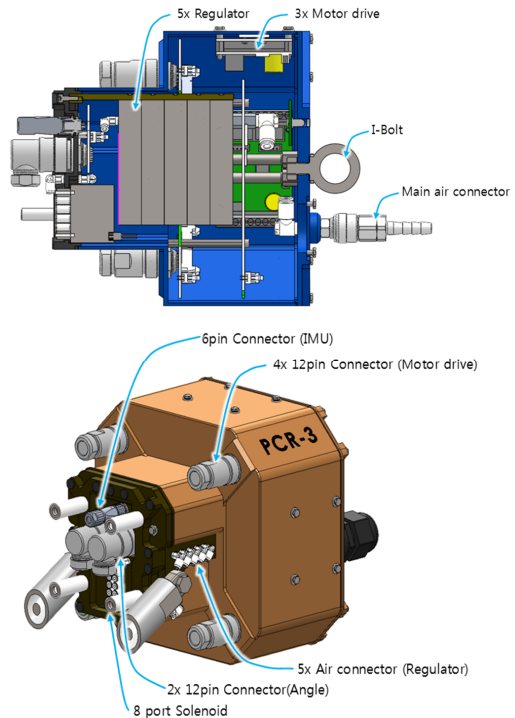


Fig. 13 Design of control unit

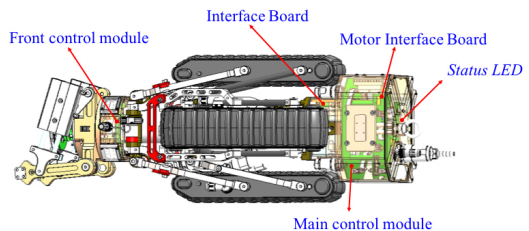


Fig. 14 Configuration of electronic hardware and control PCB

3.2.2 회로 및 소프트웨어 개발

1) 하드웨어 시스템 구성

개발된 배관청소로봇은 전방 제어기 및 주 제어기와 모터 및 센서 연결을 위한 인터페이스 보드로 구성된다. Fig. 14는 배관청소로봇에 적용된 제어기의 구성에 대해 나타내었다.

2) 하드웨어 시스템 구조 및 기능

전방 제어기는 배관 내부 영상 확인을 위한 조명 관리, 가스 농도 측정을 위한 센서 인터페이스, 링크 각도 및 청소 모듈의 회전 각도를 확인하기 위한 기능을 포함한다.

주 제어기와는 CAN 통신을 통해 데이터 전달이 이루어지도록 구성하고, 전방의 IP 카메라는 Ethernet 통신을 통해 영상을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 전방 제어기의 블록다이어그램을 나타내었다. 주 제어기는 Fig. 16의 구성과 같으며, 2개의 MCU를 적용하여 주행 및 청소 모듈 회전

모터 제어, IMU, 온도, 습도, 전류 등 내부 센서정보 습득, 링크를 접기 위한 솔레노이드 밸브 제어, 구동 모터 엔코더를 이용한 누적거리정보 계산, 로봇의 배관 중심에 위치하기 위한 공압 레귤레이터 제어의 기능을 수행한다. 메인 통신으로는 Ethernet을 사용하여 영상 및 로봇 정보를 확인할 수 있으며, 사용자가 로봇을 수동 조작할 수 있다.

3) 회로 개발

배관청소로봇 구동을 위한 제어기는 32 Bit급 MCU를 적용하여 캐터필러 구동 및 청소 모듈의 회전에 대한 모터의 제어, 공압을 통한 링크 각도 및 청소 툴의 제어를 수행한다. Ethernet을 주 통신으로 사용하여 로봇제어 및 영상을 확인할 수 있으며, 제어기 간 통신 및 모터드라이버와 통신을 위한 CAN 인터페이스, IMU 정보 획득을 위한 USART 인터페이스 등 다양한 주변 장치를 통해 센서정보를 습득한다. 각 제어기는 전원 레귤레이터를 적용하여 DC 24 V 전원을 공급하면 로직 및 센서에 공급하도록 설계하였으며, 과전류에 의한 제어기 파손을 보호하기 위한 회로도 포함한다. 제작된 회로는 전방 제어기와 후방 주 제어기 로 Fig. 17과 18에 각각 나타내었다.

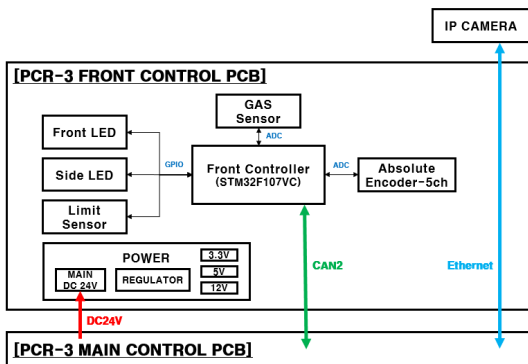


Fig. 15 Block diagram of Front controller

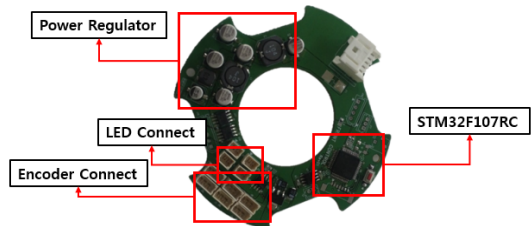


Fig. 17 Development of Front controller

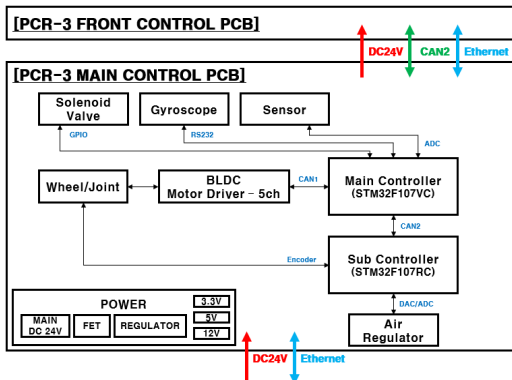


Fig. 16 Block diagram of Main controller

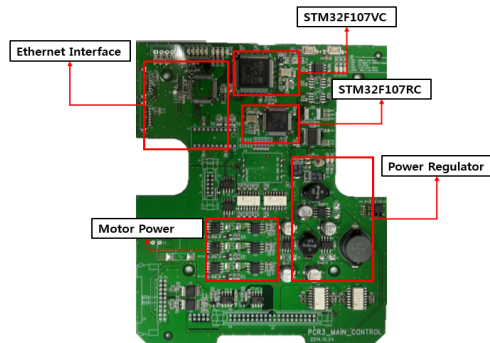


Fig. 18 Development of Main controller

4) 사용자 응용프로그램 구성

배관청소로봇의 사용자 응용프로그램은 Fig. 19와 같이 User interface application, Control assist application, Shared memory part로 구성된다.

User interface Application에서 표시되는 상태 정보 및 각 버튼 이벤트를 Shared memory에 저장하며, Control assist Application은 모든 제어 명령과 관련 센서 모니터링 그리고 자동모드 및 수동모드에 따른 로봇의 제어 등 정보를 저장한다. Shared memory는 중계 역할로 로봇제어 및 상태 등 다양한 정보를 공유한다.

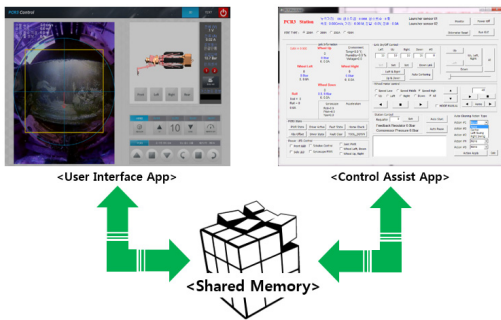


Fig. 19 Configuration of user application

5) 사용자 응용프로그램 개발

User interface application은 Fig. 20과 같이 영상부, 정보부, 제어부로 구성된다.

영상부는 OpenCV 라이브러리를 사용하여 영상을 출력 및 저장하며, 주행속도, 주행거리, 톨 위

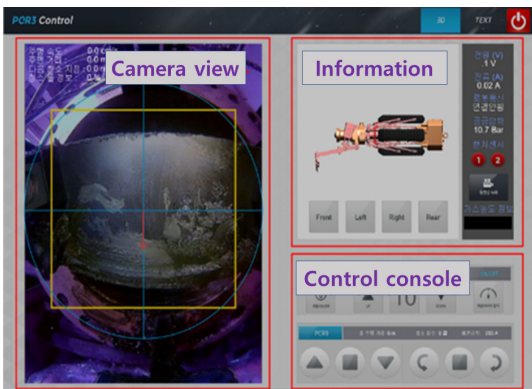


Fig. 20 Development of user interface application

치, 배관 내부에서의 로봇의 각도 등 사용자가 조작 시 필요한 기본적인 정보를 표시한다. 정보부는 배관 내부에서의 로봇의 자세, 로봇의 상세정보 등의 전체 시스템 정보를 표시하며 3D 모델 상태와 데이터 형태로 전환할 수 있다. 제어부는 로봇 및 스테이션을 수동조작하기 위한 버튼으로 구성되어 있다.

3.3 배관청소로봇의 제어 스테이션

배관청소로봇의 제어를 위한 제어 스테이션은 로봇의 전원 공급 및 원격 제어를 수행하는 기반 장치로 개발되었으며 Fig. 21에 나타내었다.

구성은 이동형 카트에 케이스 형태로 고정되는 방식을 적용하였다. 하부 케이스는 고압의 압축공기를 생성하는 공압 컴프레셔와 생성된 압축공기의 압력조절 및 필터링을 위한 장치가 구성된다. 상부 케이스에는 생성된 압축공기의 압력 측정 및 분배, 압력 조절이 가능한 레귤레이터와 전원 제어기, 통신 시스템이 구축되어 있으며 상위제어는 태블릿 컴퓨터를 적용하였다.

제어 스테이션의 제어기는 Ethernet 통신을 기반으로 공급압력, 출력압력, 센서 모니터링을 수행할 수 있는 기능이 구현된다. 사용자가 제어 스테이션을 통해 직접 로봇에 전원을 공급할 수 있으며 프로그램을 통하여 로봇 전원을 공급할 수 있도록 구성하였다. 또한 현재 시스템의 공급되는 전압 및 소비전류에 대한 모니터링 기능을 구현하였다. Fig. 22는 제어 스테이션의 계통도를 나타내었으며, Fig. 23은 제어기의 구성에 대해 나타내었다.

제어기는 Ethernet 통신을 이용하여 로봇과 통신하며 DAC와 ADC를 이용하여 공압 레귤레이터의 압력을 조절한다. 또한 GPIO를 이용하여 솔레노이드 밸브, 스위치 및 LED, 센서류를 제어하도록 구성되었다. 로봇 내부에 장착된 카메라의 영상을 획득하기 위하여 제어 스테이션 내부에는 듀얼 밴드의 무선 공유기가 탑재되고 제어 스테이션의 제어기와 로봇 제어기 및 카메라의 정보가 태블릿 컴퓨터로 전송되는 구조이다.

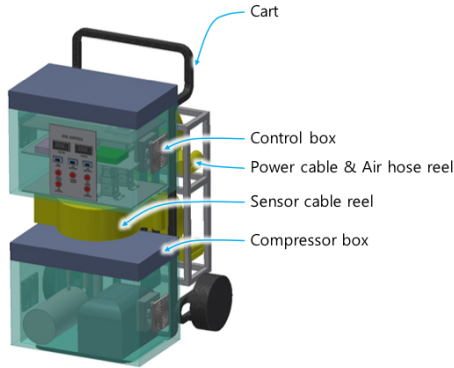


Fig. 21 Design of control station

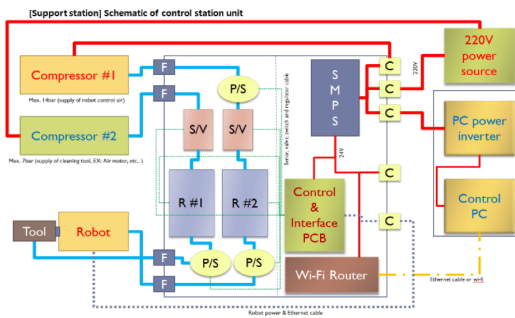


Fig. 22 Systematic diagram of control station

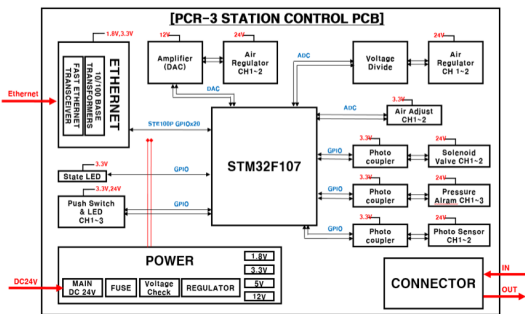


Fig. 23 Controller diagram of control station

3.4 배관청소로봇의 반입/회수 장치

배관청소로봇을 청소 대상 배관에 장착되는 방식은 로봇을 Fig. 24와 같이 구성된 반입/회수 장치 내부에 설치한 상태에서 배관 플랜지에 고정되는 방식을 사용한다. 반입/회수 장치는 로봇중양부 4면의 구동유닛지지 레일과 앞뒤의 플랜지 및 정지 위치 확인용 포토 센서 그리고 멈춤 블록과 케이블 가이드 롤러 블록으로 구성하였다.

배관청소로봇이 배관 내부에서 이물질을 외부로 배출하기 위하여 설치된 반입/회수 장치에서 대상 배관 내부로 주행하고 대상 이물질을 절단 후 스크레이핑 후 반입/회수 장치 하부에 설치된 회수 버킷으로 이물질을 낙하시키는 방식으로 청소방법을 고안하였다.

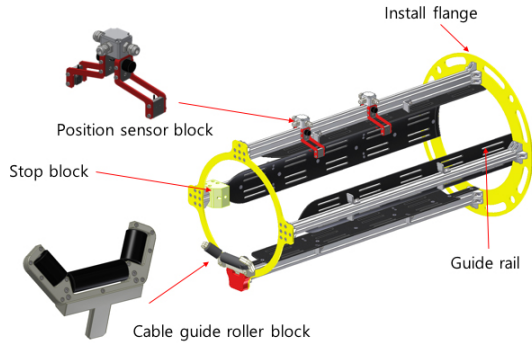


Fig. 24 Design of launcher/receiver equipment

4. 주행 및 청소 성능시험

4.1 자동중심위치 제어

배관청소로봇이 원활한 배관 내부 주행 및 이물질을 배출하기 위해서는 배관 내부에 중심에 로봇이 위치하여야 한다. 배관 중심에 로봇이 위치하기 위해서는 사용자가 직접 로봇을 배관 중심에 위치를 시켜도 되지만, 로봇 주행 및 이물질 배출과정에서 로봇이 배관 중심에서 벗어나는 경우가 발생한다. 이러한 문제점 해결하고자 배관청소로봇에는 자동으로 배관의 중심 위치로 유지할 수 있는 제어 알고리즘이 적용되어야 한다.

배관 크기에 따라 배관청소로봇의 링크 각도의 기준값이 다르며, 사용자가 배관 크기를 지정하면 내부에서 자동으로 배관 중심 제어 알고리즘이 동작되도록 구성하였다. 제어 루틴이 동작되면 각 링크는 설정된 배관의 크기에 따른 각도를 지속해서 제어하기 때문에 로봇을 중심에 위치시키기 위한 별도의 작업을 하지 않아도 된다. Fig. 25는 자동 중심 제어 시퀀스를 나타내었으며, 모든 링크가 접힌 상태가 초기자세이며 사용자가 배관

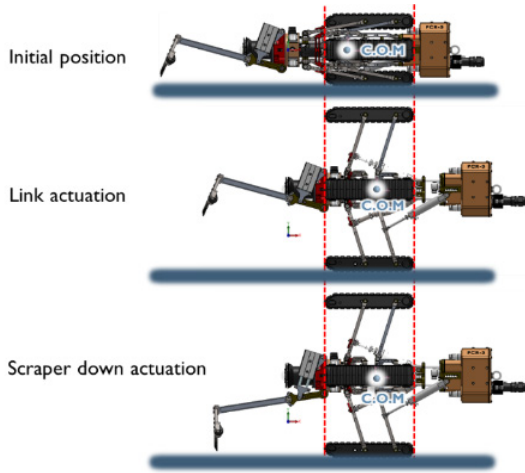


Fig. 25 Sequence for automatic centering control

크기를 지정하면 해당 각도로 링크가 펼쳐지고 로봇이 배관의 중심에 위치하면 스크레이퍼를 내려 청소 준비 자세로 위치한다. 제어를 위한 링크의 확장 순서는 배관청소로봇 하단에 위치한 링크의 선형 공압 실린더에 해당 관경에 대한 링크의 작동을 통하여 중심에 위치하기 위한 링크의 목표 각도를 설정하고 공압 레귤레이터를 통하여 목표 압력을 출력한다.

공압 실린더에 압력이 전달되고 작동 후 링크의 확장 각도에 따라서 하단 링크가 목표 위치에도달하면 좌우측 링크 및 상부의 링크가 확장하여 로봇을 배관의 중심에 위치할 수 있도록 제어한다. Fig. 26은 하부 링크에 대한 링크에 장착된 회전각센서의 정보 추출을 위한 기구학 모델과

Table 5 Desire value of PCR-3 for pipe center position

Pipe (A)	weight(kg)		Desire value (degree)	Target pressure (bar)
	Robot	Tool	TH-1T	
250	15.26	0.303	13.3	5.11
300		0.422	20.8	3.67
350		0.513	25.8	3.09
450		0.732	43.5	1.89

$$TH-1T = \text{asin} \left(\frac{SD - \frac{CA - TCK - CO - BH}{2}}{PL1 + PL2} \right) \quad (1)$$

파라미터 및 계산 결과를 나타내었으며, 기구학 계산식은 식 (1)에 나타내었다.

자동 중심 제어의 목표 위치에 대한 정확한 제어를 위하여 PID 제어를 적용하였다. 링크의 목표 각도에 대한 오차만큼 공급압력의 변화를 주어 해당 각도에 맞는 압력을 공급할 수 있도록 알고리즘을 설계하였다. 적용된 제어 알고리즘에 대한 제어 블록다이어그램은 Fig. 27에 나타내었다.

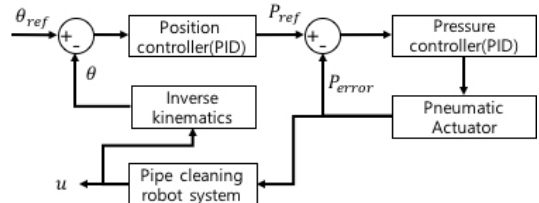


Fig. 27 Control block diagram of automatic centering control

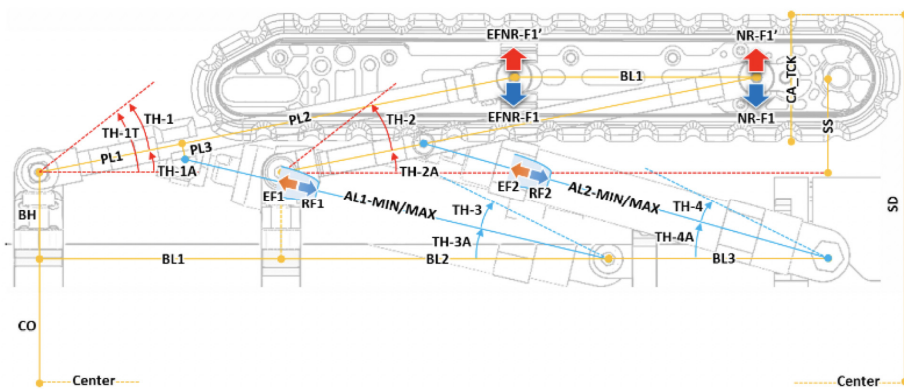


Fig. 26 Schematic of lower link actuation mechanism

4.2 주행 성능 실험

배관청소로봇의 통합 조립이 완료된 형태는 Fig. 28에 나타내었으며, 부가 장치인 반입/회수 장치 및 제어 스테이션과 통합 작업을 완료하였다.

로봇의 자중은 17.6 kg으로 측정되었으며, 350 A 배관 적용을 위한 청소 공구를 장착한 상태의 무게이고 공구를 제외한 중량은 15.26 kg으로 측정되었다. 배관청소로봇의 이동속도 및 견인력 시험을 위하여 Fig. 29와 같이 구성하였다. 견인 하중을 측정하기 위해 CAS 社의 CASTON-i 산업용 전자저울을 사용하였다. 시험 결과, 주행속도는 5.02 cm/s의 속도로 측정되었다. 이동속도의 측정은 주행거리 5 m 기준으로 주행 도달 시간을 측정하였다. 견인력 시험 결과, 450 A 관경에 대응하여 시험한 경우 최대 견인하중 92.5 kg이 작용하는 것을 확인하였다.

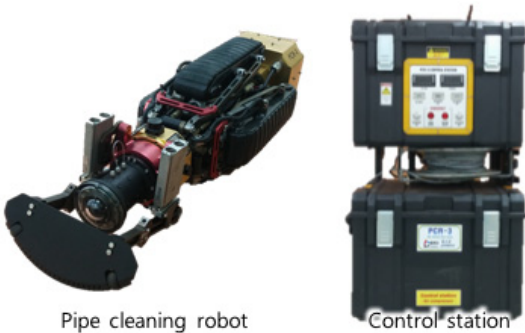


Fig. 28 Pipe cleaning robot with control station

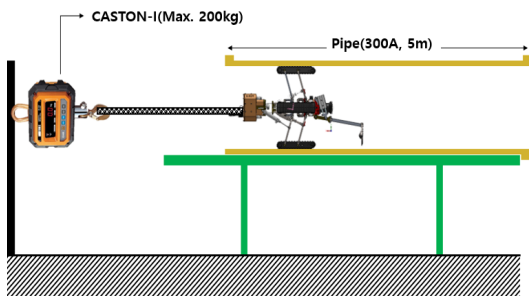


Fig. 29 Configuration for traction force measurement

4.3 자동 중심 자세 제어 시험

배관청소로봇의 자동 중심 자세 제어는 아래의

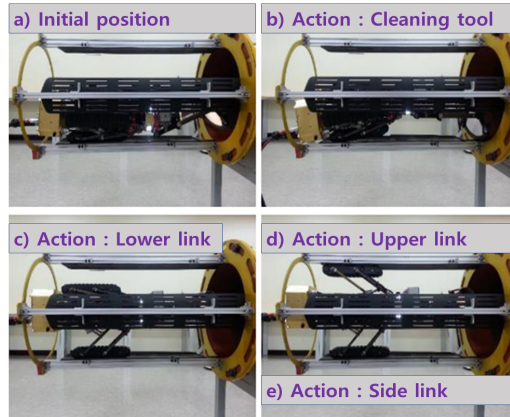


Fig. 30 Test of automatic centering control

순서로 동작되었으며, 250 A, 300 A, 350 A, 450 A의 배관에 대하여 적용실험을 진행하였다.

Fig. 30은 350 A 배관에서의 자동 중심 제어 동작 시험을 나타내었다. 제어 루틴에 따른 동작 순서는 a) 초기자세, b) 청소 툴 하강, c) 하부 링크 동작(자동중심위치 제어를 사용하여 목표 각도 유지), d) 상부 링크 동작(하부 링크와 상부 링크 각도 동기화), 좌우 링크 동작으로 동작 시험을 수행하였다.

4.4 현장 적용 청소 시험

배관청소로봇의 현장 적용 시험을 위하여 제철소 현장 내부 소결 공장(2개소, 300 A, 350 A)의 가열로 상부 배관(길이 6 m)을 대상으로 현장 시험을 검증하였으며, 시험 현장의 전개 구성은 Fig. 31과 같다.

또한 Fig. 32와 같이 반입/회수 장치를 설치하고 배관청소로봇을 투입하여 실제 현장에서 적용 성능, 통신, 주행 그리고 제어 전반에 대한 통합시스템 동작 시험을 진행하였다. 전체 시스템에 대한 동작 확인 후 자동 청소 제어 기반의 배관청소를 수행하였고, 대상 현장 2개소에 대한 청소 후 배관 내부 및 제거된 이물질은 Fig. 33 및 Fig. 34와 같다. 배관 내부 이물질의 폐색률이 10~40% 범위 이내인 배관에 대하여 99% 이상 퇴적물을 제거할 수 있었으며, 4.5 m 길이의 배관에 대하여 약 1시간 40분의 작업시간이 소요되었다.

배관청소로봇에 장착된 카메라를 이용하여 배관 내부 이물질 상태를 확인할 수 있었다. 촬영된 영상을 확인해보면 Fig. 35와 같이 배관의 처음 부분보다 끝부분으로 갈수록 퇴적된 이물질의 양이 많고 고착된 정도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 분석결과 설비 배관의 약 2 m 이후 부분에는 인력을 이용한 청소가 불가능하여 청소 불가영역이 발생한 것으로 판단되었다. 배관청소로봇을 이용하여 기존에 청소가 불가능한 공간까지 청소 영역이 확장할 수 있음을 검증하였다.

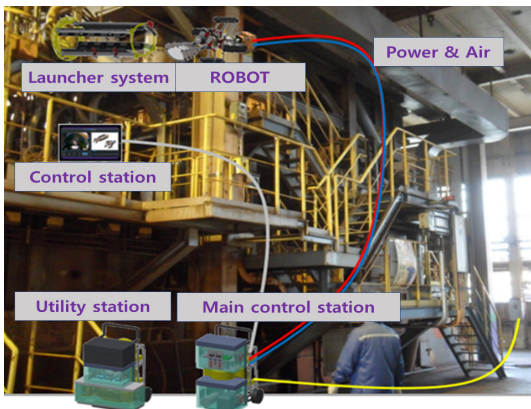


Fig. 31 Configuration for field test

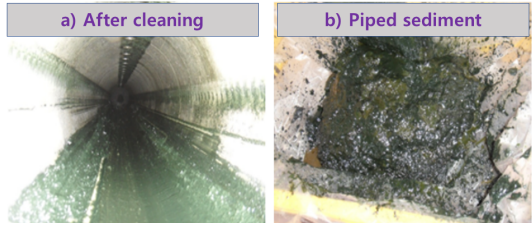


Fig. 33 Results of pipe cleaning(target pipe 1)

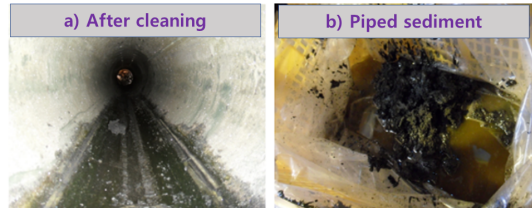


Fig. 34 Results of pipe cleaning(target pipe 2)

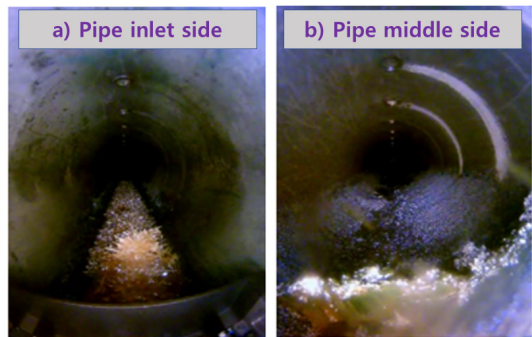


Fig. 35 The initial condition in-pipe

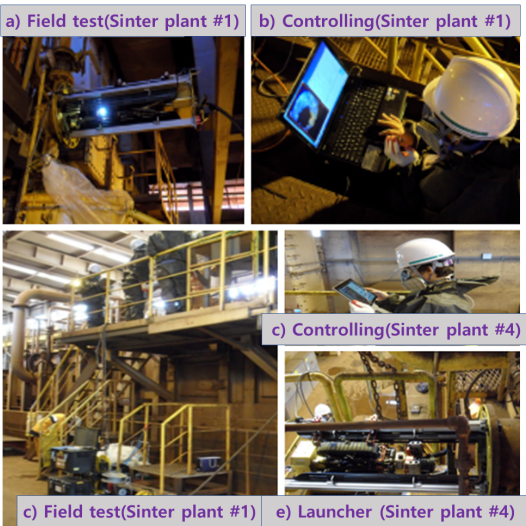


Fig. 32 Field test using pipe cleaning robots

5. 결 론

본 논문에서는 산업 현장의 배관 내부 이물질 제거를 위한 배관청소로봇에 대한 설계 및 제작

내용과 청소방법 및 로봇에 대한 작업자의 개입을 최소화하기 위한 자동제어와 성능실험 및 현장 실험에 관한 내용을 기술하였다. 개발된 배관 청소로봇은 종래에 개발된 제철소 COG 배관청소 로봇의 현장 적용성 문제점을 보완 개발하여 현장 전개성능 및 작업자 편리성, 청소 성능 증대의 효과를 검증하였다. 향후 다양한 배관청소로봇 전용 청소 공구의 개발과 현장 전개 효율 증대를 위한 지속적 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 ‘산업체 기술개발 위탁과제(POSROBOT Research Project)’ 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

1. H. Roman, B. Pellegrino and G. Sigrist, 1993, "Pipe Crawling Inspection Robots", IEEE Transaction of Energy Conversion, pp. 576-583.
2. I. Hayashi and N. Iwatsuki, 1998, "Micro-moving Robotics", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 41-50.
3. S. Hirose, H. Ohno, T. Mitsui and K. Suyama, 1999, "Design of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ Pipes", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2309-2314.
4. S. G. Roh, S. M. Ryew, J. H. Yang and H. R. Choi, 2001, "Active Steerable In-pipe Inspection Robots Founder Ground Urban Gas Pipeline", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 761-766.
5. Y. Zhang, and G. Yan, 2007, "In-pipe Inspection Robot with Active Pipe-diameter Adaptability and Automatic Tractive Force Adjusting", Mechanism and Machine Theory, Vol. 42, pp. 1618-1631.
6. K. J. Park, 2014, "Feasibility Study of Sludge Detection inside Pipes Using Torsional Guided Waves", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 100-105. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.5.100)
7. J. Y. Lee, S. H. Hong, M. S. Jung, J. H. Suh, G. B. Chung, K. R. Han and I. S. Choi, 2017, "Development of Pipe Cleaning Robot for the Industry Pipe Cleaning Robot for Industry Pipe Facility", Journal of The Korean Robotics Society, Vol. 12, No. 1, pp. 65-77. (DOI:10.7746/jkros.2017.12.1.065)