

산업배관의 이물질 청소를 위한 배관청소로봇의 개발

Development of Pipe Cleaning Robot for the Industry Pipe Facility

이재열¹, 홍성호², 정명수³, 서진호⁺, 정구봉⁴,
한경룡⁵, 최일섭⁶

Jae-Youl Lee¹, Sung-Ho Hong², Myeong-Su Jeong³, Jin-Ho Suh⁺,
Goo-Bong Chung⁴, Kyoung-Ryoung Han⁵, Il-Seob Choi⁶

Abstract In this paper, we introduce the pipe cleaning robot developed to clean the gas impurities of the iron manufacturing equipments. The pipe cleaning robot is composed of two driving modules and one cleaning module. 2-DOF joint units were developed for connections among the modules. To maximize the traction power of the driving parts, it became caterpillar type. The extension links have been developed to maintain the traction force in case the pipe inner diameters change. Three cleaning modules were developed for the effective cleaning in the pipe. The driving and cleaning performance tests of the pipe cleaning robot were proceeded in the field of the iron manufacturing equipments.

Keywords In-pipe cleaning robot, pipe diameter adaptation robot, COG pipe cleaning tool

1. 서론

산업의 고도화에 따라 플랜트에 적용된 산업배관은 설계 기준 및 요구 조건에 따라 매우 다양한 형태로 구성되어 있으며, 이런 배관들은 설비의 운전 조건 및 관내 이송 물질에 따라 배관 내벽에 이물질이 침착 후 고착화되어 관내 폐색이 발생하게 된다. 관내 폐색으로 인해 설비의 운전 효율이 나빠지면 설비의 중단 후 인력을 투입한 배관 내부 청소 작업이나 극단적인 경우 배관의

교체를 통해 설비의 운전 효율을 확보하는 실정이다. 배관 내부의 이물질을 제거하기 위한 노력은 산업 배관에서 가정용 상하수도 배관에 이르기까지 인력과 장비를 투입하여 관내 폐색을 해결하는 기술이 많이 개발되고 있으나, 협소 공간에서의 작업, 매설 배관, 고소 배관 및 내부 이물질의 생화학적 독성으로 인력의 투입을 대안할 수 있는 노력이 필요한 실정이다. 배관 내부를 검사하는 로봇의 개발은 국내외에서 많은 연구가 진행된 실정이며, 배관 내부를 청소하는 로봇은 상하수도 배관을 유지보수 할 수 있는 로봇의 개발이 이루어지고 있다¹⁻⁴⁾.

배관 내부를 주행하기 위한 배관 로봇은 구동 형태에 따라 Fig. 1과 같이 분류할 수 있으며, Fig. 1(a)는 피그형태로 배관 내부에 흐르는 유체의 압력차를 이용하여 이동하며 주로 도시가스 배관의 검사를 위해 사용된다⁶⁾. Fig. 1(b)는 배관 내면 지지 형태로 3개 또는 4개의 구조체가 배관 내면을 밀착하여 로봇이 항상 배관의 중심에 위치하여 이동한다. 벽면지지형태의 로봇은 다양한 형

Received : Oct. 28. 2016; Revised : Jan. 16. 2017; Accepted : Jan. 18. 2017

※This project was funded by the POSCO, and is currently supported by the POSROBOT Research Program

⁺Corresponding author: Field Robotics R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence, Jigok-ro 39, Nam-Gu, Pohang, Korea (suhgang@kiro.re.kr)

¹Korea Institute of Robot and Convergence (jylee0914@kiro.re.kr)

²Korea Institute of Robot and Convergence (hong6286@kiro.re.kr)

³Korea Institute of Robot and Convergence (jms86@kiro.re.kr)

⁴Korea Institute of Robot and Convergence (goobongc@kiro.re.kr)

⁵POSCO Technical Research Laboratories (kevinhan75@posco.com)

⁶POSCO Technical Research Laboratories (i.s.choi@posco.com)

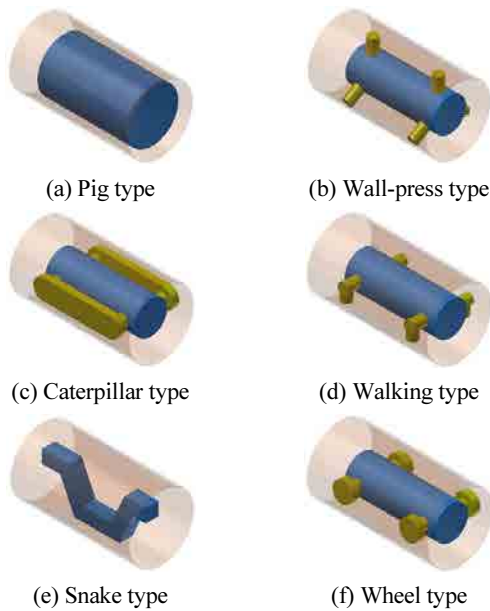


Fig. 1. Categorization of pipe robots according to the type of drive

태의 곡관 및 수직/수평의 배관에 적용이 가능하므로 원통형의 배관에 적용하기 용이하다^[7,8]. Fig. 1(c)는 무한궤도형으로서 접지면적이 큰 장점으로 지면과의 마찰을 극대화하여 로봇의 이동성이 좋고 방향전환이 용이하다. 하지만 많은 에너지를 필요로 하며 주행 장치 내에 이물질이 침투되면 주행 장애가 발생하는 단점이 있다^[9-11]. Fig. 1(d)는 다리형태의 로봇으로 수평배관에서는 이동이 가능하나 수직배관에서는 이동이 힘들고 부수적인 장비를 탑재하기가 어려우며 기구 구조의 복잡성 등의 단점이 있다^[12,13]. Fig. 1(e)는 스네이크 형태로서 자유도 높은 관절 구조로 이루어져 있어 곡관 및 분지관 등 다양한 형태의 배관을 이동하기에 용이하다. 하지만 많은 모듈로 인한 로봇의 투입 및 유지보수의 어려움이 있다^[14,15]. Fig 1(f)는 바퀴형태로서 구조가 간단하며 직관에서 빠른 이동 성능을 보이지만 다리 형태와 마찬가지로 수직배관에서의 이동이 힘들다^[16,17].

본 연구에서는 제철 설비에 연료관인 COG (Cokes Oven Gas) 배관에 대한 이물질 청소를 위한 청소로봇의 개발을 수행하였다. 일관제철소의 단위공장에서는 노내(internal furnace)의 분위기 온도 유지를 위하여 화염연료가스로 COG를 사용하고 있다. 철강 생산 공정은 크게 제선, 제



Fig. 2. The impure of COG pipe line

강, 연주 그리고 압연 공정으로 나누어진다. 이중 COG의 생산은 제선공정 중 화성공장에서 이루어지며, 용선을 만들어 내기 위해서는 철광석을 가공하는 소성, 소결 공정과 열원인 석탄을 가공하는 코크스, 화성공정으로 나누어진다. 원료탄을 코크스로에 장입하여 1,000~1,300℃의 고온으로 구어 내는 과정에서 다량의 독성물질이 함유된 가스가 발생하게 되는데 이것이 COG이다. COG에는 타르, 나프탈렌, 황화수소, 암모니아, BTX 등의 유독물질을 함유하고 있으며, 이러한 가스들을 정제하고, 부산물(타르, 유황, 조경유 등)을 회수하여 정제된 청정 COG를 제철소 공장의 열원으로 이용하고 있다. 하지만 정제된 COG에 대하여 공급 배관의 길이 및 지관 이송으로 환경 변화, 온도 변화와 더불어 공급 설비에 따라 타르, 이물질, 철분, 수분, 나프탈렌 등 여러 분순물이 배관 내부에서 반응하여 배관 내벽이나 밸브, 노즐 등에 고착되어 관내 폐색이 빈번히 발생되고 있는 실정이다. 이를 해결하고자 필터를 이용한 여과분리 장치가 지속적으로 개발되고 있으나 효율적 문제로 그 활용도가 높지 못하고 있는 실정이다^[5]. 현재는 설비의 효율을 높이기 위하여 Fig. 2와 같이 인력을 이용하여 배관을 절단 또는 플랜지를 개방 후에 수공구를 이용하여 이물질(타르, 나프탈렌을 포함한 COG 분순물)을 제거하고 있다.

본 논문에서는 제철소 내 COG 배관의 이물질을 효율적으로 제거할 수 있는 배관청소로봇(이하 PCR: Pipe Cleaning Robot)을 개발하여 혼합가스로 인한 부산물의

제거 및 인력 작업을 대체하는 로봇의 개발에 대한 연구 내용을 기술하였다.

2. 관내 이물질 제거를 위한 배관 로봇의 개발

산업 현장에 사용되는 배관의 크기는 사용 유체의 종류, 압력 운전 조건, 유속 등을 고려하여 다양한 관경이 설치되어 있다. 단위 제철 설비의 배관은 주관에서 분기된 이후 부스터장치, 안전 차폐장치 그리고 필터 장치를 거쳐 다양한 크기의 배관과 직관, 곡관, 분기관 그리고 밸브 종류 들로 다양하고 복합적으로 구성되어 있다. 또한, 청소 대상 물질은 유/수분을 포함한 미분 입자 형태로 침착 또는 고착화 된 형태로 배관 내부에 존재하게 된다.

PCR은 직관 및 곡관 그리고 분기관의 정형화된 공간을 주행하기 위한 구동부 개발, 배관 관경 변화에 대응하기 위한 링크부 개발 그리고 배관 내부에 고착된 이물질의 제거를 위한 청소모듈의 개발이 필요하다. 또한 공급 전원 케이블 및 이물질 이송호스 등의 부가장치를 이동시키기 위한 충분한 견인력과 현장 적용 성능의 극대화를 위한 안정적인 전력 공급 및 원활한 로봇 제어 환경 또한 구축되어야 한다.

3. PCR의 기구 개발

3.1 PCR-1

배관청소를 위한 PCR은 모듈화 설계를 통하여 크게 주행과 청소모듈을 구분한 단위 설계를 진행하여 개발하였다.

설계된 PCR은 전방 청소 모듈, 중앙 구동 모듈, 후방 구동 모듈과 후방 연결 모듈로 구성하고 각 모듈은 2자유도 관절 유닛으로 연결하였으며, Fig. 3에 나타내었다. PCR의 구동 모듈은 유지보수 효율을 높이고 주행 및 청소 성능 시험 중 발생하는 문제에 빠르게 대응하기 위하여 단위 유닛 형태로 설계, 제작 하였다. Fig. 4는 중앙 구동 모듈의 3개 유닛에 대해 나타내었으며, 메인 하우징 유닛, 관절 구동 유닛 그리고 링크 동작 유닛(구동 캐터필러 유닛 포함)으로 구성되었다.

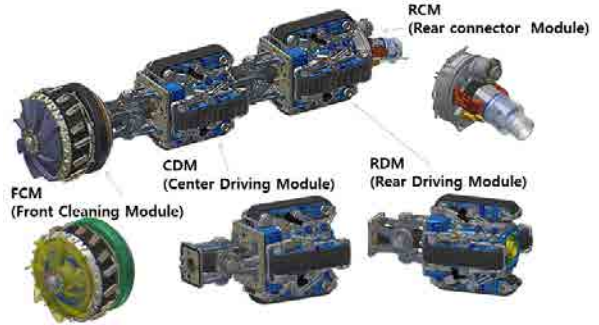


Fig. 3. Constitution of the pipe cleaning robot system by modules

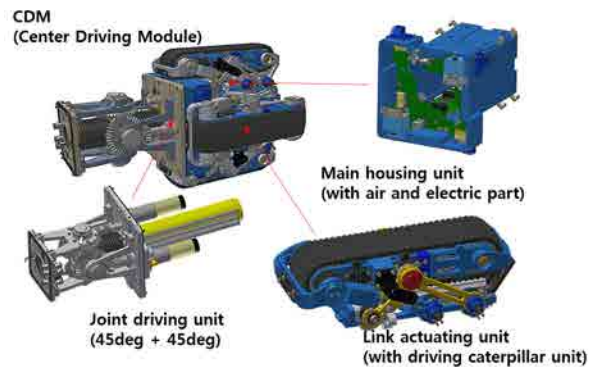


Fig. 4. Constitution of the center driving module by units

3.2 구동 모듈의 관절 유닛의 기구 개발

곡관 주행을 위하여 개발된 관절 유닛의 구성은 Fig. 5와 같이 구성되었으며, 2자유도 관절의 구동을 위하여 입력된 2개의 개별동력을 이용하여 구동 원점에서 베벨기어를 구동 기준점으로부터 $\pm 45^\circ$ 구동 범위를 가지도록 개

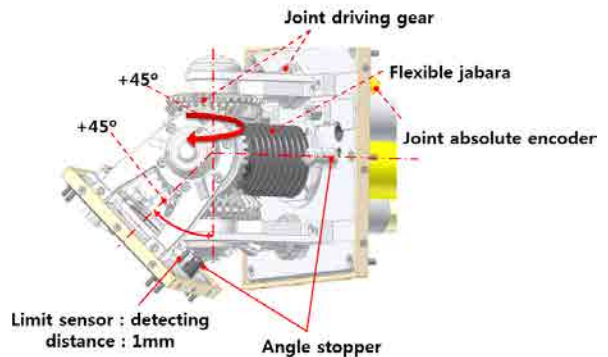


Fig. 5. Constitution of the joint driving unit



Fig. 6. Section view of pipe cleaning robot system

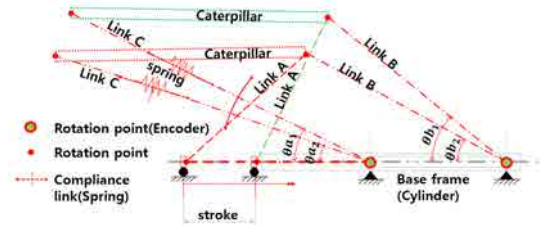
발되었다. 관절의 위치 제어를 위하여 절대각 엔코더를 기어 구동부에 고정 배치하였고, 오동작의 방지를 위하여 우레탄 각도 제한 블록을 장착하고 근접센서를 부착하여 관절 각도에 대한 정보를 인식하도록 하였다.

흡입 장치의 효율적인 로봇의 구성 배치를 위하여 관절 유닛은 중공 타입으로 개발하였으며, 관절 사이에 케블라 섬유가 포함된 우레탄소재의 유연호스를 성형 제작하여 관절 이음에도 흡입 장치가 유연하게 구성될 수 있도록 개발하였다. Fig. 6은 중공 형태로 구성된 배관로봇의 단면을 나타내었으며, 점선은 이물질의 흡입 및 이송 경로를 나타내었다.

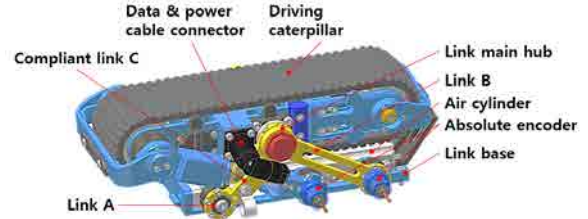
3.3 구동 모듈의 링크 동작 유닛의 기구 개발

배관 내부에서 청소로봇의 주행을 위한 구동유닛은 Fig. 7(a)에 나타난 링크 메커니즘으로 개발되었으며, 견인력을 높이고 배관 환경의 변화에 대응하기 위하여 공압 실린더를 이용한 링크 구동부를 구현하고 링크 연결부에 스프링을 장착하여 주행 시 구동 캐터필러의 배관 접지면이 항상 평행하도록 구성하였다. 또한, 베이스 링크의 회전각을 인식하여 접지면 정보를 인식하기 위하여 절대각 엔코더를 장착하였다.

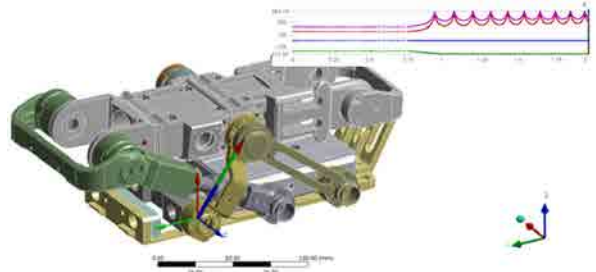
적용된 링크 동작 유닛과 구동 캐터필러의 형태는 Fig. 7(b)와 같으며, 공압 실린더의 추력을 기준으로 동역학 해석을 통해 구동 캐터필러와 배관 내벽에 작용하는 접지력을 계산하였다. 공압 실린더의 추력 330 N이 작용할 경우 링크의 각도에 따라 최소 30 kg에서 최대 78 kg 까지 접지 하중 성능을 갖는 것으로 Fig. 7(c)와 같이 확인하였다. Fig. 7(d)는 강체 동역학 해석 결과를 바탕으로 유연체 동역학 해석을 수행하여 링크 작동 하중에 대한 강성 및 강도 평가를 수행한 결과를 나타내었다. 링크에 적용된 소재는 AL6061-T6 소재를 적용하였으며, 해석 결과를 판단하기 위하여 재료의 항복강도(276 MPa)를 기준



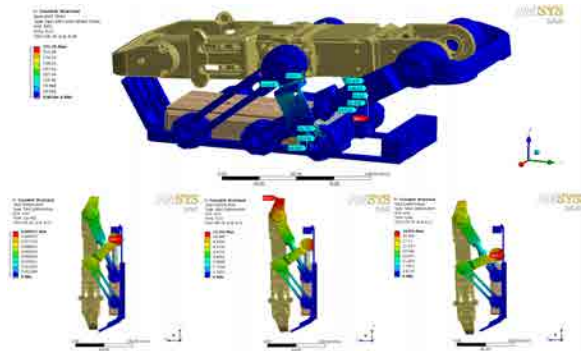
(a) Schematic of link actuating mechanism



(b) Constitution of the link actuation unit



(c) Rigid dynamic analysis of the link actuation unit



(d) Flexible dynamic analysis of the link actuation unit

Fig. 7. Development of the link actuation unit

으로 최대 등가 응력은 주 링크에서 182 MPa의 값이 계산되었다. 평가 결과 소재의 소성 변형 또는 파손의 위험은 없는 것으로 파악되었다.

3.4 대상 이물질에 따른 청소 모듈의 기구 개발

배관 내부에 고착된 이물질의 형태는 Fig. 2, 8과 같이 배관 단면 방향으로 폐색된 형태와 배관 하단에 적층된

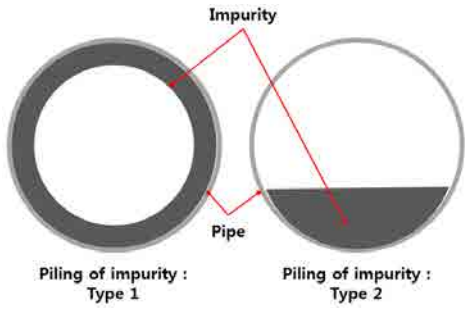


Fig. 8. Piling of impurity (type 1 and 2)

형태로 나누어 질 수 있으며, 퇴적물의 고착화 정도 및 유분과 수분의 포함 여부에 따라 퇴적경도가 환경에 따라 매우 다양하게 존재한다.

청소 모듈의 개발은 청소 대상물 인 이물질의 형태에 따라 구성하였고, 공기압 증폭기를 이용하는 방법과 진공 흡입을 이용하는 방법 및 스크레이퍼 시스템을 구현하는 방법으로 나누어 개발하였다. 공기압증폭기는 좁은 틈새에 대기압 이상의 압력을 작용하여 틈으로 분출되는 공기장을 이용하여 압력흐름을 생성하고 베르누이 및 코안다 효과(bernoulli and coanda effect)를 이용한 흡입 장치이다.

본 연구에서는 Fig. 9와 같이 설계/유동해석 및 제작 후 성능 시험을 거쳐 로봇에 적용하였다. 시험 결과 10 m 이내 호스 길이에서는 제공 압축공기의 압력이 8~10 bar 인 경우 원활한 흡입 및 이송 성능을 보이는 것으로 확인 되었으나 10 m를 넘는 흡입 호스에서는 원활한 이송 특성을 얻을 수 없었다. 이송호스의 길이가 길어지면 유동 마찰로 인하여 이송효율을 급격히 떨어지는 것을 확인 하였다. 10 m 이상의 흡입/이송이 필요한 경우에는 진공 흡입장치를 이용하여 배출하는 방법을 고려하였다.

다양한 이물질의 형태를 극복하고 배관 내부의 이물질을 원활하게 제거하기 위한 메커니즘은 물리적 힘으로 이물질을 분쇄하고 흡입하여 배출하는 방법과 이물질을 절단하여 배관 외부로 강제 이송 시키는 방법으로 구상하고 Fig. 10과 같이 세가지 청소모듈을 개발하였다.

Fig. 10(a)는 내부 이물질의 형성이 Fig. 8의 Type 1과 같은 형태로 생성된 경우 배관 내부의 이물질을 원활히 제거하기 위한 청소모듈로 전방 그라인딩 툴에서 이물질을 분쇄하고 회전 브러쉬를 통해 이물질을 집하여

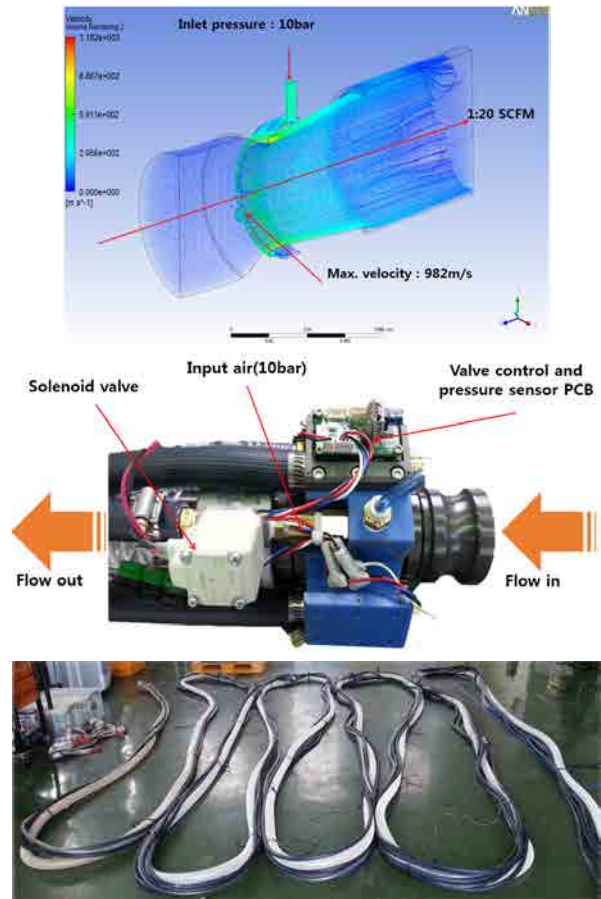
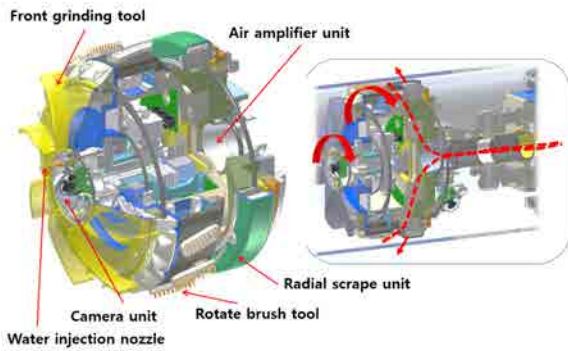


Fig. 9. Development of air mover system

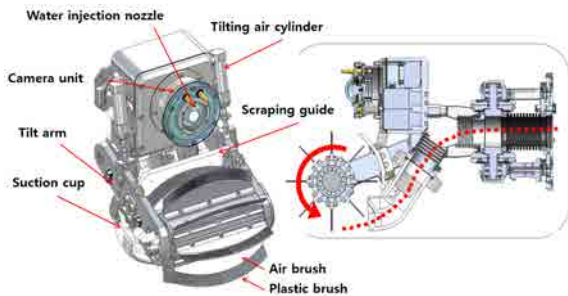
분쇄된 이물질을 공압 증폭기를 이용하여 흡입 후 호스 내부로 이동 시켜 이물질을 배출하는 개념으로 설계되었다. 이물질이 청소모듈 넘어가는 현상을 최대한 방지하기 위하여 회전 스크레이퍼 유닛을 장착하여 배관 내벽에 밀착 시키는 메커니즘 또한 구성하였다. Fig. 10(b, c)는 내부 이물질의 형성이 Fig. 8의 Type 2과 같은 형태로 생성된 경우 배관 내부의 이물질을 원활히 제거하기 위한 청소모듈로 Fig. 10(b)는 전방 공기압 그라인더에서 이물질을 분쇄하고 흡입구를 통해 이물질을 진공 흡입하여 분쇄된 이물질을 배출하는 시스템이다. Fig. 10(c)는 스크레이퍼를 부착한 형태로 이물질을 절단 후 이송하여 외부로 배출하는 장치를 구성하였다.

3.5 로봇스테이션 및 외부 장치의 개발

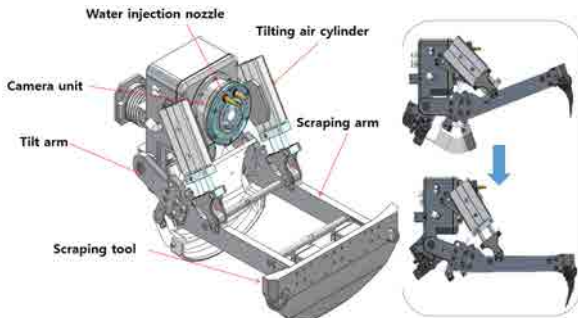
PCR을 제어부는 현장이동 시 원활한 이동과 작업 효



(a) Cleaning module with air mover system



(b) Cleaning module with vacuum suction system



(c) Cleaning module with scraper moving system

Fig. 10. Design of cleaning modules

을 높이기 위하여 휴대가 가능한 형태의 로봇 스테이션(portable robot control station)을 개발하였다. 경량화를 목적으로 대부분의 재료를 ABS 플라스틱으로 제작하고, 방수/방진 설계를 수행하여 외부 현장에서 발생하는 먼지 및 기타 이물질로부터 스테이션을 유지보수 효율을 증대하였다. 내부에는 SBC (Single Board Computer)를 탑재하고 로봇의 카메라 통신을 위한 이더넷 및 CAN 인터페이스 모듈을 장착되었으며, 로봇의 원활한 제어를 위한 다양한 형태의 스위치 적용하였다. Fig. 11은 개발된 제어 스테이션과 사용자 구동 소프트웨어를 나타내었다.



Fig. 11. Portable robot control station and GUI software

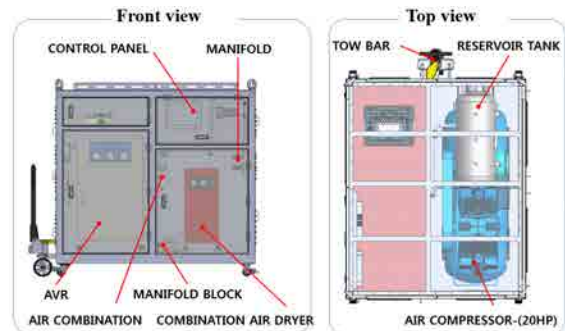


Fig. 12. Design of the ASU (auxiliary support unit)

PCR의 현장 투입을 위한 장치의 구성은 로봇과 제어 스테이션 그리고 외부보조장치로 구성된다. 개발된 PCR의 외부보조장치는 청소방법에 따라 대용량/압축공기 (7~10 bar)가 필요하고, 로봇에 공급되는 전원의 안정적인 공급 및 전압 강하 조건을 만족하기 위한 전원안정기 등이 필요하게 된다. 또한 PCR과 컨트롤 스테이션과 통신 및 데이터 저장, 보조장치 구성품의 전원제어 및 공기압 제어 등을 위하여 산업용 컴퓨터를 장착하였다. Fig. 12는 외부보조장치의 구성에 대해 나타내었고, PCR 및 제어 스테이션 그리고 외부보조장치를 이용한 시험장치 구성은 Fig. 13에 나타내었다.

3.6 곡관 주행을 위한 모션 해석

배관로봇은 적용된 배관의 곡관 및 분기관에 크기에 따라 배관 로봇의 모듈간의 길이 및 최소 배관로봇 직경이 결정된다. 개발된 PCR의 모듈 관절 간의 길이 및 최



Fig. 13. Test environment of pipe cleaning robot with robot, control station and ASU

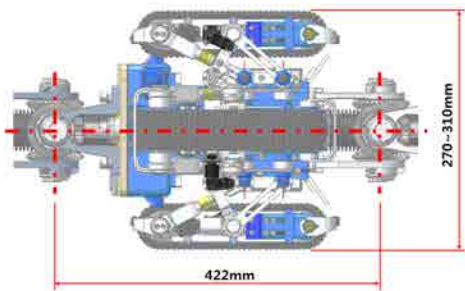


Fig. 14. Size of the driving module for negotiation the elbow

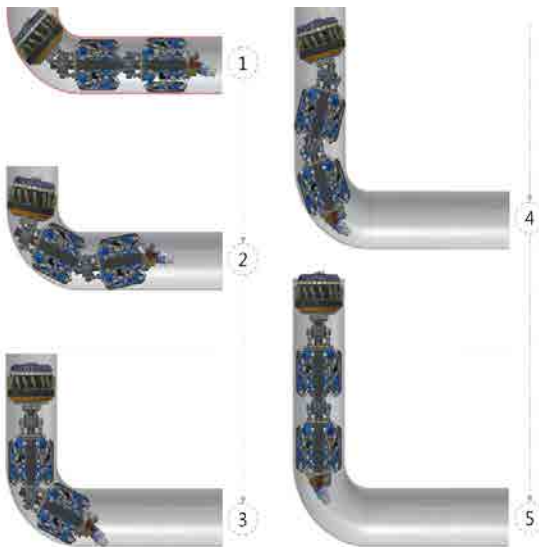


Fig. 15. Motion analysis for drive 300A short elbow pipe

소 로봇 직경은 300A 1.5D 곡관을 기준으로 설계되었으며, Fig. 14에 나타내었다.

청소모듈을 장착한 PCR의 곡관 주행 가능성을 분석하기 위하여 각 관절 및 구동 링크의 구동 각도를 선정하고 300A 좁은 곡관 주행 가능성을 Fig. 15와 같이 가상공

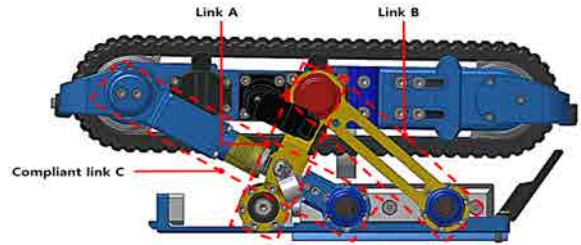


Fig. 16. Composition of linkage for response of pipe size

간의 CAD Mock-up 모델을 사용하여 검증하였다.

3.7 관경 변화에 대응하기 위한 로봇의 구성

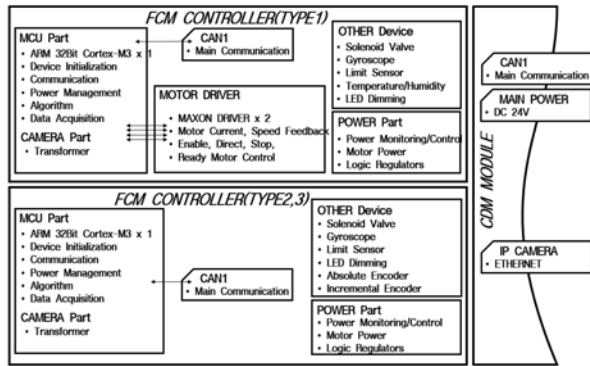
개발된 PCR은 300A 곡관 통과를 기준으로 높이 270 mm~300 mm 그리고 길이 422 mm로 설계되었다. 제철소 내에 설치되어있는 PCR의 적용이 필요한 배관은 250A에서 500A의 배관이 있는 것을 확인하였고 이를 위한 관경 대응형 링크부의 개발이 필요하다.

개발된 링크 동작 유닛은 Fig. 16과 같이 Link A와 Link B 그리고 Compliant link C로 구성되어있으며, 변화된 관경에 대하여 3개 링크의 길이 변화를 통한 링크 동작 유닛을 확장하여 적용할 수 있다. 확장된 링크 동작 유닛의 빠른 교체를 위해 메인 하우징 유닛과 슬라이딩 형태로 체결이 되도록 설계를 하였으며, 모터케이블의 경우 원터치 커넥터를 사용하여 쉽게 분해 조립이 가능하다. 링크 동작 유닛의 변경으로 적용 가능한 배관의 관경은 250A의 직관과 300A, 350A, 400A, 500A 배관의 직관 및 곡관에 적용 가능하다.

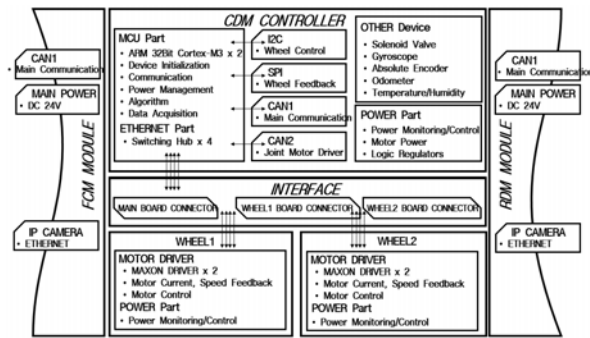
4. PCR의 회로 및 S/W 개발

4.1 하드웨어 시스템 구조

Fig. 17(a)는 3가지 청소 방식을 가지는 개발 청소 모듈에 공용으로 사용된 전자 하드웨어 블록 다이어그램(Block diagram)이며, Fig. 17(b)는 2개의 구동 모듈의 하드웨어 블록 다이어그램을 나타내었다. 두 모듈은 주 제어기로서 고성능의 32Bit MCU (Micro controller unit)를 적용하고, 주 통신 장치는 CAN을 사용하였다. IP 카메라는 이더넷(Ethernet) 통신을 이용하여 영상 정보를 전달하고, 각 하부 제어 모듈에는 전원관리 기능이 포함



(a) Front cleaning module block diagram



(b) Driving module block diagram

Fig. 17. Block diagram of PCR controllers

하여 전체 시스템에 DC 24V를 공급하면 모터 및 각 논리회로(Logical circuit)에 전원을 공급한다.

청소모듈은 청소 공구(그라인더, 브러쉬, 스크레이퍼) 동작을 위한 모터제어, 공기압제어, IMU (Inertial Measurement Unit)센서 정보를 이용한 로봇의 자세 확인, 조명을 이용한 카메라의 영상획득, 구동기 센서(위치 및 회전각 센서 등)에 의한 주변환경 인식을 할 수 있도록 구성하였다. 구동 모듈은 2개의 MCU (Micro controller unit)를 이용하여 구동을 위한 모터의 속도제어, 관절운동을 위한 위치제어, 링크 동작을 위한 공기압 제어, 자동 주행을 위한 주행 기록계(Odometer)측정, 링크의 구동 각도 확인을 위한 센서 등 다양한 인터페이스 방법을 통하여 외부 모듈과 연결 할 수 있도록 설계되었다.

4.2 PCR의 회로 설계

PCR은 배관로봇의 구조적 단점을 극복하기 위하여 제한된 공간 내부에 전자, 제어, 센서계측 등 다양한 부품을 포함해야 함으로 시스템이 복잡하게 구성된다. 복

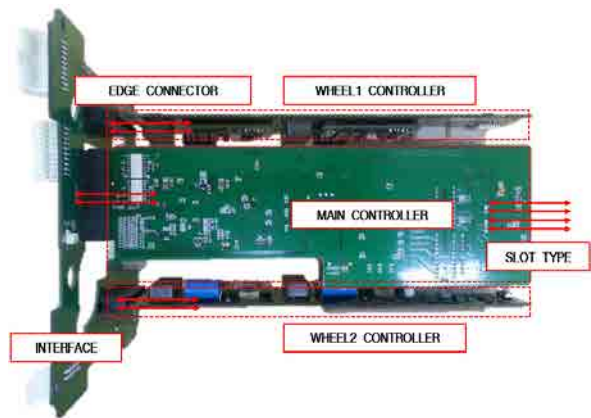


Fig. 18. Composition of Center Driving Module controller

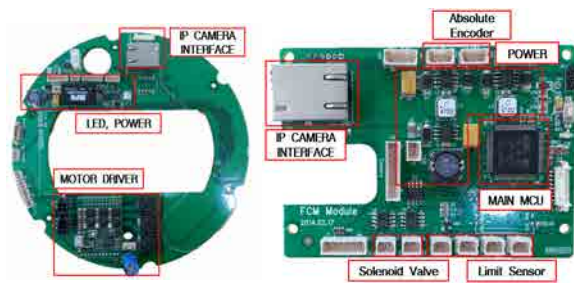
잡한 시스템은 로봇의 개발, 현장적용, 유지보수에 있어서 많은 시간소요로 인한 임무 효율성을 저하시키며, 문제 발생시 원인 파악 및 수정의 어려움을 겪을 수 있다. 유지보수 효율의 극대화 및 부품 구성의 단순화를 위하여 Fig. 18과 같이 구동모듈의 주 제어기와 구동부 제어기를 모듈화하여 인터페이스 보드에 연결할 수 있도록 설계하였다. PCB에 직접 패턴을 삽입하여 슬롯 형태로 제어기를 탈-부착이 용이하도록 설계 되었으며, 제어기의 문제 발생 시 해당 제어기에 대한 쉬운 교체를 통하여 유지보수에 용이하며 중공형태의 PCR의 공간을 효율적으로 사용할 수 있다.

4.3 PCR의 회로 개발

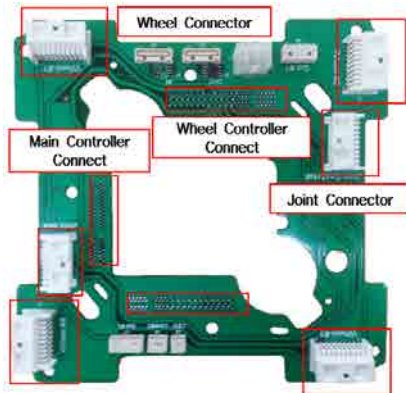
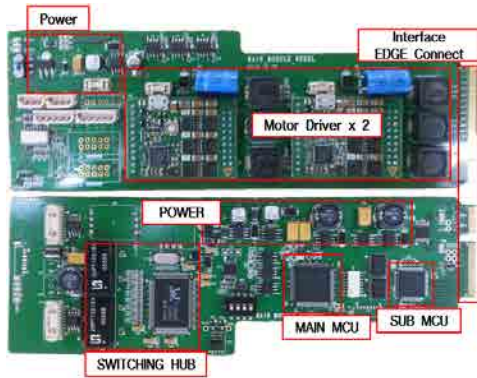
Fig. 19는 청소모듈과 구동모듈에 적용된 제어회로를 이며, Fig. 19(a)는 청소 모듈에 적용되는 제어회로, Fig. 19(b)는 구동모듈에 적용되는 제어회로를 나타내었다. 두 제어회로는 통신, 센서 계측, 공기압제어 등의 기능은 동일하다. 청소모듈은 2가지로 개발되었으며, Fig. 10(a)와 같이 Air mover가 적용된 청소모듈의 경우에는 그라인더의 구동을 위한 모터드라이버가 추가 되어있고, Fig. 10(b, c)와 같이 브러쉬 및 스크레이퍼를 포함한 청소모듈의 경우에는 청소 툴의 각도 확인 및 공기압 모터를 이용한 브러쉬의 회전속도를 확인하기 위하여 회전각센서가 추가하였다.

구동모듈은 주 제어기를 통하여 모든 제어가 이루어지며, 구동부 제어기는 모터 구동을 위한 모터드라이버

와 부가회로를 포함하였다. 주 제어기는 I2C, SPI 통신 인터페이스를 통하여 구동을 위한 모터제어, 곡관 주행을 위한 관절의 모터제어를 담당하고 링크의 각도에 따른 공기압 실린더의 가동 여부를 결정하는 솔레노이드 밸브 제어, 주행거리에 대한 누적 이동 거리를 산출하기 위한 회전각 센서에 의한 이동거리 확인, IMU를 통한 로봇의 자세유지를 위한 회로를 설계 및 구성 하였다.



(a) Front cleaning module controller



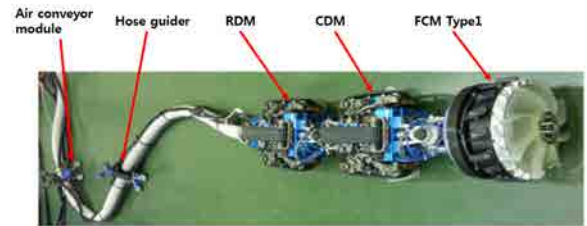
(b) Driving module controller

Fig. 19. Composition of pipe cleaning robot controller

5. PCR의 주행 및 청소 성능 시험

청소 모듈의 형태에 따라 3가지 모델로 구성된 PCR은 Fig. 20과 같으며, 공기압증폭기가 포함된 PCR의 형태는 Fig. 20(a)와 같으며, 회전 브러쉬 및 진공 흡입을 위한 청소 체계가 구성된 PCR의 형태는 Fig. 20(b)와 같이 구성하였다. Fig. 20(c)의 PCR 형태는 스크레이퍼 시스템이 포함된 청소로봇 시스템을 나타내었다.

각각의 PCR 형태에 대한 성능 검증을 위하여 주행 및 청소 시험을 수행하였고, 수평 및 수직관 주행 특성, 곡관 주행 특성 및 배관 내부 이물질 제거 성능 시험을



(a) Pipe cleaning robot with air-mover system



(b) Pipe cleaning robot with vacuum suction system



(c) Pipe cleaning robot with scraping unit system

Fig. 20. Type of pipe cleaning robot system



Fig. 21. Test platform of pipe cleaning robot system

진행하였다. 또한, 산업현장의 배관 상황을 모사하기 위하여 300A sch. 40 배관을 Fig. 21과 같은 형태로 구성하고 주행 및 청소 성능 시험 시 로봇의 상태를 파악하기 위한 관제 시험 시스템을 구성하였다.

5.1 PCR의 주행 성능 시험

PCR의 주행은 배관 내벽에 관경 대응 링크 체계의 작동으로 밀착되는 고무궤도를 포함한 구동 장치에서 발생하는 출력으로 견인력이 발생하게 된다. 배관 내부는 퇴적된 이물질의 형태에 따라 유분 또는 수분을 포함한 타르 형태로 대부분 존재하게 되는데 이를 극복할 수 있는 주행 능력이 필요하게 된다. 주행 중 견인력 시험을 위하여 300A 배관 내벽에 이물질이 없는 상태와 수분을 포함한 이물질(소결 분진)을 배관 내벽에 부착하고 수평 및 수직 배관에서 로봇의 주행 속도와 견인하중을 측정하였다. 시험된 결과는 Table 1에 나타내었다. 시험 결과 수평 배관을 이동하는 경우 최대 속도는 11 m/min, 최대 견인하중은 168 kg이고, 수직 관을 이동하는 경우 최대 속도는 9.2 m/min, 최대 견인하중은 131 kg의 특성을 나타내었다.

PCR의 곡관 주행 통과를 위하여 Fig. 22와 같이 곡관

Table1. Test results of driving speed and traction weight

	Driving speed (m/min)		Traction weight (kg)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Horizontal pipe	0.45	11	134	168
Vertical pipe	0.45	9.2	107	131

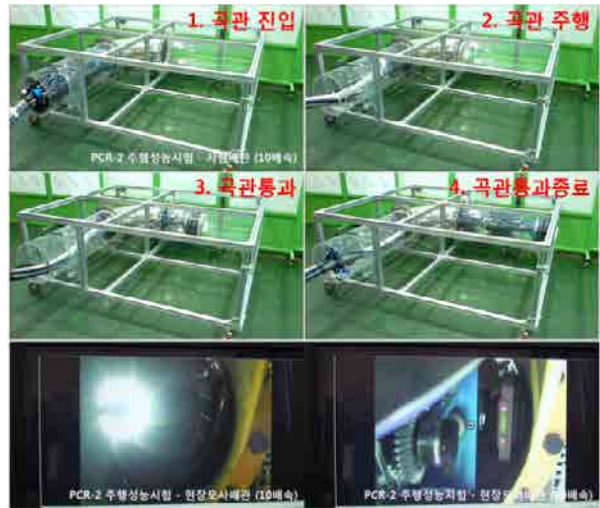


Fig. 22. Driving test of 300A elbow pipe using pipe cleaning robot

주행 시험 장치를 구성하였다. PCR의 곡관 진입에서 배관 내벽과 청소모듈과의 접촉으로 관절 구동 모터의 부하를 인식하고 전류제어 방식을 통해 관절의 능동 제어가 가능하도록 구성하였다. 또한, 곡관 내부의 구동 궤도의 위치에 따른 주행 속도를 IMU 정보를 기준으로 곡관 진입 시 로봇의 기울기를 인식하고 곡관 내벽과 구동 궤도의 접촉 위치에 따른 주행 속도비를 다르게 적용하여 각 구동 유닛의 궤도 주행 속도를 결정하였다.

5.2 PCR의 청소 성능 시험

PCR에 대한 청소 성능 시험은 청소 모듈의 형태와 청소 방법에 따라 시험을 진행하였다. 청소 대상 이물질은 제철 설비 배관에서 배관 이물질과 철광석 및 수분이 함유된 슬러지(Sludge) 형태의 이물질을 적용하였고, 이에 대한 PCR을 이용한 흡입 및 이송 시험을 수행하였다. 정량적 시험 평가를 위하여 300A 배관 내부의 폐색률 40%를 가정하고 힘 설비 중 아크릴 배관 내부에 적재하여 퇴적 및 폐색을 모사하였다.

Fig. 23의 시험은 Fig. 20(a)의 구성으로 이물질을 제거하기 위한 청소모듈과 공기압증폭기를 사용하여 이물질의 흡입 및 이송을 시험하였다. 시험 결과 청소모듈의 전방의 이물질을 분쇄 후 측면 흡입구로 이동이 청소 대상물의 입자가 작은 경우 흡입이 원활 하였으나, 입자

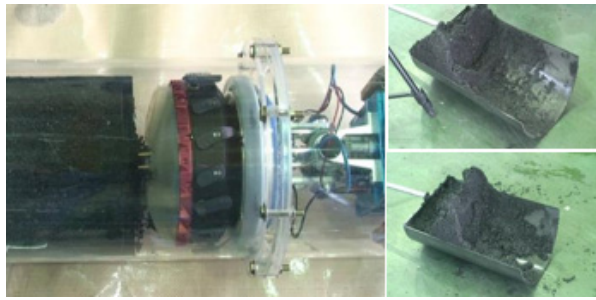


Fig. 23. Cleaning test of pipe cleaning robot with air mover system



Fig. 24. Cleaning test of pipe cleaning robot with vacuum suction system



Fig. 25. Cleaning test of pipe cleaning robot with scraper moving system

가 크거나 밀도가 큰 경우 흡입 되지 못하고 배관에 잔존하는 경향이 보였다. 또한, 전방 분쇄 기구의 특성 상 이물질이 주행방향으로 밀려 쌓이는 현상이 발생하였다.

Fig. 24는 Fig 20(b)의 구성으로 이물질을 제거하기 위한 청소 모듈과 진공흡입장치를 사용하여 이물질의 흡입 및 이송하는 배관 청소 방법을 시험하였다. 시험 결과 청소모듈의 브러쉬의 이물질 분쇄 후 진공 흡입구로 이송이 원활히 진행되는 것을 확인하였다.

Fig. 25는 Fig 20(c)의 구성으로 이물질을 제거하기 위한 청소모듈을 사용하여 이물질의 절단 및 이송하는 배관 청소 방법을 시험하였다. 시험 결과 청소모듈의 스크레이퍼 공구의 이물질 절단 이후 이송 과정이 원활히 진행되는 것을 확인하였다.

Table 2. Test results of driving speed and traction weight

Robot type	Air compressor	Vacuum equipment	Air mover equipment
Type 1	○	×	○
Type 2	○	○	×
Type 3	○	×	×



Fig. 26. Field test of the PCR using scraper moving system

5.3 PCR의 산업 현장 적용을 위한 효율성

PCR에 배관 내부 이물질 제거를 위한 시험을 진행하기 위하여 3가지 청소 방법에 대한 설비는 Table 2와 같이 구성되었다.

공기압증폭기를 이용하여 이물질을 이송하는 PCR 시스템은 고압의 공기압을 이용하여야 함으로 적용 산업 현장에서 공기압 공급이 가능한 경우와 이물질 제거 거리가 20 m 이내에서 배관 폐색률이 높은 경우 적용 효율이 높을 것으로 사료된다. 배관 내부 이물질 제거 거리가 20 m 이상이고 현장 설비에 공기압 제공이 어려운 경우 그리고, 실외 설비인 경우에는 진공흡입장치를 적용하는 것이 효율적이다.

이 두 가지 방법은 Fig. 12와 같이 설비의 제공이 반드시 필요한 PCR 시스템으로 배관청소를 위한 설비가 복잡하고 양이 많아 현장 적용을 활발히 적용하기 어려운 문제가 있다. Fig. 20(c)의 구성의 경우 물리적 청소 방법을 이용한 배관 내부의 이물질을 외부로 배출되는 시스템으로 로봇을 운영하는 설비와 보조도구 정도만 필요하기에 현장 이동성은 우수하다. 하지만 주행 후 이물질

을 회수 해야 하는 작업이 반복되므로 청소 시간이 길어 지는 단점이 있다.

현장 모사 시험을 바탕으로 제철 설비 중 소결공장의 가열로 연료가스관의 내부 이물질 제거를 위한 현장 적용 시험을 Fig. 26와 같이 진행하였다. 구성된 PCR 시스템은 Fig. 20(c)로 구성하였고, PCR을 적용하기 전과 후로 청소 성능을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 산업 현장의 배관 내부 이물질 제거를 위한 배관청소로봇에 대한 설계 및 제작 내용과 청소 방법에 대한 정의 및 시험을 통한 검증, 300A 관경에 대응이 가능한 배관청소로봇에 대한 연구개발결과를 기술하였다. 실제 산업 현장에서 개발된 배관청소로봇을 사용하여 인력을 대체하여 작업을 수행할 수 있음을 확인하였으며, 향후 개발된 배관청소로봇에 대해 배관 내부 이물질의 상태에 따라 다양한 청소 공구의 개발과 주행 견인력 및 속도를 고려한 최적 개발을 진행할 예정이다.

References

- [1] Hirose, S.; Ohno, H.; Mitsui, T. & Suyama, K., "Design of in-pipe inspection vehicles for ϕ 25, ϕ 50, ϕ 150 pipes," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics, Automation, pp. 2309-2314, 2000.
- [2] Jung-Sub Lee, Dong-Hyuk Lee, Se-Gon Roh, Hyungpil Moon, Hyouk Ryeol Choi, "Internal Pipeline Exploration of an In-pipe Robot Using the Shadow of Pipe Fittings," Journal of Korea Robotics Society, vol. 5, no. 3 pp. 251-261, 2010.
- [3] Schempf, H. and Vrdis, G., "Explorer: Long-range untethered real-time live gas main inspection system," Presented at Proc. Conf. GTI. [Online]. Available: <http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/explorer>, 2005.
- [4] Yunwei Zhang, and Guozheng Yan, "In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting," Mechanism and Machine Theory, vol. 42, pp. 1618-1631, December 2007.
- [5] Kim Seung Joo and Choi Sang Hyeong, "Main Factors of Design and Operation for Cokes Wastewater Treatment System in Steel Mill Plant," DAEWOO engineering technical paper, vol. 26, no. 1, pp. 14-24.
- [6] Kim, H. M. Rho, Y. W. Yoo, H. R. Cho, S. H. Kim, D. K. Koo, S. J. and Park, G. S. "A study on the measurement of axial cracks in the magnetic flux leakage NDT system," In: 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, p. 624-629, 2012.
- [7] Hayashi, I. and Iwatsuki, N. "Micro moving robotics", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. of Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 41-50, 1998.
- [8] Roh, S. G. Ryew, S. M. Yang, J. H. and Choi, H. R. "Active steerable inpipe inspection robots for underground urban gas pipeline", Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 761-766, 2001.
- [9] Roman, H. T. Pellegrino, B. A. and Sigrist, G. R. "Pipe crawling inspection robots: an overview", IEEE Trans. of Energy Conversion, pp. 576-583, 1993.
- [10] Granosik, G. Hansen, M. G. and Borenstein, J. "The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance", Industrial Robot: An International Journal, vol. 32, Iss: 2, pp. 139-148, 2005.
- [11] Karabegović, I. Karabegović, E. Mahmić, M. and Husak, E. "INTELLIGENT SYSTEMS-SERVICE ROBOTS FOR MAINTENANCE OF PIPING SYSTEMS".
- [12] Neubauer, W. "A Spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes," Int. Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1178-1185, 1994.
- [13] Pfeiffer, F. Robmann, T. and Loffer, K. "Control of a tube crawling robot," Int. Conf. control, oscillations, and chaos, vol. 3, pp. 586-591, 2000.
- [14] Fukuda, T. Hosokai, H. and Uemura, M. "Rubber gas actuation driven by hydrogen storage alloy for in-pipe inspection mobile robot with flexible structure," Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 1847-1852, 1989.
- [15] Hagen, S. and George, V. "Explorer: Untethered real-time gas main assessment robot system," In: Proc. of Int. Workshop on Advances in Service Robotics, ASER, 2003.
- [16] Scholl, K. U. Kepplin, V. Berns, K. and Dillmann, A. "An articulated service robot autonomous sewer inspection tasks," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. of Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 1075-1080, 1999.
- [17] Tătar, O. Mandru, and D. Ardelean, I. "Development of

mobile minirobots for in pipe inspection tasks”,
Mechanika, 6.68: 60-64, 2007.

- [18] Han Seung-Hee, Hwang Jong-Myung and Lee Jang-Myung, “Estimation of the Pipe Thickness using the Variation of the Group Velocity”, Journal of Korea Robotics Society, vol. 5, no. 1 pp. 32-40, 2010.



이재열

2006 한밭대학교 기계설계공학과 학사
2008 한밭대학교 기계설계공학과 석사
2014 ~ 현재 한밭대학교 기계설계공학과 박사과정
2007 ~ 2011 (주)태성에스엔이 FEA사업부

2011 ~ 현재 한국로봇융합연구원 선임연구원



홍성호

2005 한밭대학교 전자공학과 학사
2017 한양대학교 지능로봇학과 석사
2005 ~ 2012 (주)이디 개발실장
2012 ~ 현재 한국로봇융합연구원 선임연구원



정명수

2012 한경대학교 정보제어공학과 학사
2017 한경대학교 미래융합기술대학원 정보통신융합전공 석사
2012 ~ 현재 한국로봇융합연구원 주임연구원



서진호

1993 한양대학교 수학과 학사
1998 부경대학교 기계환경해양공학 석사
2002 일본 도쿄공업대학교 제어시스템공학과 박사
2006 ~ 현재 한국로봇융합연구원 수석연구원

2013 ~ 현재 포항공과대학교 기계공학과 겸직교수



정구봉

1998 한양대학교 제어계측공학과 학사
2000 한양대학교 전자전기제어계측 석사
2005 한양대학교 전자전기제어계측 박사
2006 ~ 2007 Carnegie Mellon Univ. Post-doc. Fellow
2008 ~ 현재 한국로봇융합연구원 책임연구원



한경룡

2002 포항공과대학교 전자전기공학과 학사
2004 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
2011 포항공과대학교 전자전기공학과 박사
2004 ~ 2006 삼성중공업 생산기술연구소 선임연구원

2011 ~ 현재 포스코 기술연구원 책임연구원



최일섭

1990 부산대학교 전기공학과 학사
1992 부산대학교 전기공학과 석사
2006 Sheffield Univ. 제어시스템공학과 박사
1992 ~ 현재 포스코 기술연구원 수석연구원