



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

상수도 배관용 진공흡입식 청소로봇  
시스템에 관한 연구

A Study of Vacuum Suction Type Cleaning Robot System for  
Water pipes



指導教授 吳 珍 錫

2018 年 2 月

韓國海洋大學交 大學院

메카트로닉스공학과

咸 然 宰

本 論文을 咸然宰의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長 蘇明玉



委員 柳熙漢



委員 吳世駿



委員 鄭柄健



委員 吳珍錫



2017 年 12 月 21 日

韓國海洋大學校 大學院

# 목 차

Contents .....	i
List of tables .....	iv
List of figures .....	vi
Abstract .....	ix
Nomenclatures .....	xiv
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 동향 .....	4
1.3 연구 내용 및 구성 .....	8
제 2 장 진공흡입식 배관 청소로봇 시스템 .....	9
2.1 배관 청소로봇 시스템 개요 .....	9
2.2 배관 청소로봇 구성 .....	11
2.2.1 세척부 .....	13
2.2.2 주행부 .....	19
2.2.3 로터리 조인트 .....	23
2.2.4 유니버설 조인트 .....	23
2.2.5 진공 흡입부 .....	24
2.2.6 외부 연결부 .....	25
2.2.7 보조 캐리어 .....	26
2.2.8 배관 청소로봇 설계사양 .....	27
2.3 외부 지원시스템 .....	28
2.3.1 워터제트 장치 .....	28

2.3.2	진공 지원 장치 .....	29
2.3.3	공기 압축기 .....	31
<b>제 3 장</b>	<b>구조해석 및 유동해석 .....</b>	<b>32</b>
3.1	개요 .....	32
3.2	로봇 구조해석 .....	33
3.2.1	선형 구조 및 유한요소 이론 .....	33
3.2.2	구조해석 .....	37
3.2.2.1	주행부 .....	37
3.2.2.2	유니버설 조인트 .....	39
3.2.2.3	소형 볼 조인트 .....	40
3.2.2.4	대형 볼 조인트 .....	41
3.2.3	구조해석 및 고찰 .....	42
3.3	지원 장치 유동해석 .....	44
3.3.1	유동해석 .....	44
3.3.2	유동해석 및 고찰 .....	45
<b>제 4 장</b>	<b>제어 및 모니터링 시스템 .....</b>	<b>46</b>
4.1	통합 제어 및 모니터링 시스템 .....	46
4.2	데이터 수집 및 신호처리 시스템 .....	51
4.2.1	압력측정 장치 .....	52
4.2.2	영상취득 장치 .....	57
4.2.3	전원공급 장치 .....	63
4.2.4	장치 구성 .....	64
4.3	GUI 기반 모니터링 시스템 .....	65
4.3.1	장치 구성 .....	67
<b>제 5 장</b>	<b>실험 및 실험 결과 .....</b>	<b>69</b>
5.1	실험 환경 .....	69

5.2 주행 시뮬레이션 .....	71
5.3 실험 및 고찰 .....	72
5.3.1 로봇 성능 실험 .....	72
5.3.2 주행 속도 실험 .....	75
5.3.3 세척 속도 실험 .....	76
5.3.4 워터젯트 분사 실험 .....	76
5.3.5 통합 제어 및 모니터링 시스템 실험 .....	77
5.3.6 성능 실험 및 고찰 .....	84
 제 6 장 결 론 .....	 85
참고 문헌 .....	87
감사의 글 .....	90



## List of tables

<b>Table 1.1</b>	Aggressive cleaning methods for water pipe .....	3
<b>Table 2.1</b>	Dimension of applicable pipes .....	9
<b>Table 2.2</b>	Characteristics of various spray patterns .....	13
<b>Table 2.3</b>	Theoretical spray range of the injection distance .....	16
<b>Table 2.4</b>	Specifications for the injection nozzle .....	17
<b>Table 2.5</b>	Trade-off study of the driving motors .....	22
<b>Table 2.6</b>	Specifications of the air motor .....	22
<b>Table 2.7</b>	Specifications of the vacuum suction pipe cleaning robot .....	27
<b>Table 2.8</b>	Specifications for the water-jet system .....	28
<b>Table 2.9</b>	Specifications for the vacuum support system .....	31
<b>Table 2.10</b>	Specifications for the air compressor .....	31
<b>Table 3.1</b>	Mechanical properties for SUS 304 .....	38
<b>Table 3.2</b>	Deformation results of the driving unit .....	39
<b>Table 3.3</b>	Deformation results of the universal joint .....	40
<b>Table 3.4</b>	Deformation results of the small ball joint .....	41
<b>Table 3.5</b>	Deformation results of the large ball joint .....	42
<b>Table 3.6</b>	Structural analysis results of the major parts .....	42
<b>Table 3.7</b>	Flow analysis conditions for the cyclone .....	44
<b>Table 4.1</b>	Specifications of the PLC controller .....	49
<b>Table 4.2</b>	Pressure measuring positions and ranges .....	52
<b>Table 4.3</b>	Error rate of the communication rate (%) .....	54
<b>Table 4.4</b>	Specifications of MCU (PIC16F873) to the DAQ module .....	57
<b>Table 4.5</b>	Specifications of the camera module .....	59
<b>Table 4.6</b>	Specifications of the remote video transmitter and receiver .....	60
<b>Table 4.7</b>	Comparative study on FTP cable and UTP cable .....	61

Table 4.8 Specifications of the frame grabber ..... 62  
Table 5.1 Test results for the pipe cleaning robot system ..... 84





## List of figures

Fig. 1.1	Flow rate reduction rate due to pipe aging .....	2
Fig. 1.2	Configuration of robo series .....	5
Fig. 1.3	Configuration of MRINSPECT series .....	6
Fig. 1.4	Conventional pipe cleaning method with the scrapping tools .....	7
Fig. 1.5	Configuration of the water-jet cleaning robot for WARECO .....	7
Fig. 2.1	Layout of the pipe cleaning procedure .....	10
Fig. 2.2	Configuration of the cleaning robot .....	11
Fig. 2.3	Principle of the vacuum suction and discharge for the scale .....	12
Fig. 2.4	Various spray patterns of the nozzle orifice .....	15
Fig. 2.5	Theoretical spray range from the nozzle orifice .....	16
Fig. 2.6	Configuration of the injection nozzles and the scrapping tools .....	18
Fig. 2.7	Angle of the injection nozzle and spray .....	18
Fig. 2.8	Configuration of the screw driving wheel units .....	19
Fig. 2.9	Configuration of the support wheel set .....	20
Fig. 2.10	Stroke of air cylinder for the screw driving unit .....	21
Fig. 2.11	Stroke of air cylinder for the auxiliary wheel set .....	21
Fig. 2.12	Configuration of the rotary joint .....	23
Fig. 2.13	Configuration of the universal joint .....	24
Fig. 2.14	Configuration of the vacuum suction part .....	24
Fig. 2.15	Principle of the vacuum pressure control .....	25
Fig. 2.16	Structure of the external connection devices .....	26
Fig. 2.17	Configuration of the auxiliary carrier .....	26
Fig. 2.18	Prototype of the pipe cleaning robot .....	27
Fig. 2.19	Flow diagram of the water-jet system .....	29
Fig. 2.20	Vacuum suction principle in the pipe .....	30

Fig. 2.21 Configuration of the vacuum support system .....	30
Fig. 3.1 Structural analysis procedure .....	32
Fig. 3.2 Structural analysis for the major components .....	37
Fig. 3.3 3D modeling of the driving unit .....	38
Fig. 3.4 3D modeling of the universal joint .....	39
Fig. 3.5 3D modeling of the small ball joint .....	40
Fig. 3.6 3D modeling of the large ball joint .....	41
Fig. 3.7 Equivalent stress of the major parts .....	43
Fig. 3.8 Cone angles of the cyclone .....	44
Fig. 3.9 Streamlines at particle tracking .....	45
Fig. 4.1 Diagram of the integrated control system .....	46
Fig. 4.2 Flowchart of the integrated control system .....	47
Fig. 4.3 P & ID of the integrated control system .....	48
Fig. 4.4 Concept of the integrated monitoring system .....	50
Fig. 4.5 Configuration of the integrated monitoring system .....	51
Fig. 4.6 Data rate and cable length of RS-485 .....	53
Fig. 4.7 Concept of the pressure measuring equipment .....	55
Fig. 4.8 PCB design of the DAQ module .....	55
Fig. 4.9 Schematic of the DAQ module .....	56
Fig. 4.10 Configuration of the image acquisition device .....	58
Fig. 4.11 Power supply system of the signal processing module .....	63
Fig. 4.12 Prototype of the signal processing module .....	64
Fig. 4.13 Prototype of the video frame grabber and receiving device .....	65
Fig. 4.14 GUI-based monitoring program .....	66
Fig. 4.15 Source code of the GUI-based monitoring program .....	67
Fig. 4.16 Prototype console of the integrated control and monitoring system ..	68
Fig. 4.17 Prototype of the DAQ module .....	68
Fig. 5.1 Major test equipments of the pipe cleaning robot system .....	69
Fig. 5.2 Dimension of test bench for the pipe cleaning robot .....	70

Fig. 5.3	Configuration of test bench for the pipe cleaning robot .....	70
Fig. 5.4	Configuration of the vacuum suction type pipe cleaning robot .....	71
Fig. 5.5	Movement in the elbow (Max. 45°) .....	71
Fig. 5.6	Layout of performance test for the pipe cleaning robot .....	73
Fig. 5.7	Dimension of the observation pipe (300A) .....	73
Fig. 5.8	Observation pipes in the test bench .....	74
Fig. 5.9	Configuration of the performance tests .....	74
Fig. 5.10	Driving speed test of the pipe cleaning robot .....	75
Fig. 5.11	Cleaning speed test of the pipe cleaning robot .....	76
Fig. 5.12	Injection pressure test of the water-jet unit .....	77
Fig. 5.13	Water-jet injection test of the pipe cleaning robot .....	77
Fig. 5.14	SPI Communication waveform of the DAQ module .....	78
Fig. 5.15	SPI Communication expanded waveform of the DAQ module .....	79
Fig. 5.16	SPI Communication requests waveform of the DAQ module .....	79
Fig. 5.17	SPI Communication response waveform of the DAQ module .....	80
Fig. 5.18	RS-485 Communication to transmit pressure data waveform .....	81
Fig. 5.19	RS-485 Communication to transmit pressure data expanded waveform ..	81
Fig. 5.20	GUI-based integrated management monitoring .....	82
Fig. 5.21	Pneumatic pressures of the air motor - forward direction .....	83
Fig. 5.22	Pneumatic pressures of the air motor - backward direction .....	83
Fig. 5.23	Internal state of pipe after cleaning by pipe cleaning robot .....	84

# 상수도 배관용 진공흡입식 청소로봇 시스템에 관한 연구

함 연 재

Department of Mechatronics Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## 초 록

산업현장에 적용되고 있는 배관시스템으로는 상수도관, 하수도관, 송유관, 가스관, 선박의 배관 등이 있으며, 각각의 사용 목적에 따라 직간접적으로 매우 다양하게 우리 생활에 영향을 미치고 있다. 이 중에 상수도관은 우리 실생활에 직접적으로 관계하는 주요 사회기반시설로 양질의 수돗물을 공급하기 위해서는 노후화를 예방하고 최적의 상태로 보수 유지하여야 한다.

전 세계 수많은 국가에서 상수도 배관의 노후화란 문제에 직면하고 있어서 보다 효율적으로 상수도 배관을 유지보수하기 위한 청소로봇기술 개발에 상당한 노력을 기울이고 있으며, 우리나라도 정부 차원에서 ‘배관 청소로봇에 대한 국산화 개발’을 산업핵심기술개발사업으로 선정하여 적극 지원하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 상수도 배관내부의 청소공정과 세척공정을 단일화하고, 배관을 정량적으로 깨끗하게 청소할 수 있도록 배관청소와 동시에 슬러지를 외부로 배출할 수 있는 신개념의 진공흡입식 배관 청소로봇에 대하여 연구하였다.

진공흡입 및 배출기술은 기존의 다른 배관청소 로봇 연구에서는 제시되지

않은 새로운 방식이며, 본 진공흡입 및 배출기술에 대한 보다 지속적이고 심도 있는 연구를 진행하여 최대 45° 곡관에서의 주행성능, 세척성능 및 배출성능에 대한 성능개량이 이루어 질 경우 실제 상수도 유지보수 현장에서 능률적인 갱생작업이 가능할 것으로 기대한다.

본 연구를 통하여 개발한 배관 청소로봇 및 관련 지원 장치들의 작동 및 청소작업 상태 등을 통합적으로 제어 및 감시할 수 있으며, 향후 다른 로봇 시스템으로도 확장 적용이 가능한 ‘GUI 기반의 통합 제어 및 모니터링시스템’을 개발하였다.

최대 45° 곡관이 있는 상수도관내에서 배관 청소로봇의 주요 부품 상호간의 간섭도 및 작동 상태 확인하기 위하여 시제품 제작 전에 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과를 설계에 반영하였다. 또한 실제 시제품을 제작하여 매설 상수도관과 같은 조건의 테스트벤치에서 아래 주요 성능실험을 수행한 결과, 초기 연구 목표를 만족함을 확인하였다.

- 상수도 배관 내 주행 성능
- 청소 성능
- 슬러지 배출 성능
- 통합 제어 및 감시시스템 성능

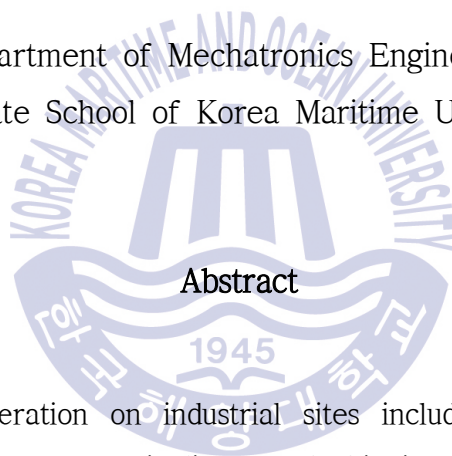
본 연구의 진공흡입 배출기술을 통하여 상수도관 갱생작업 공정 단축 및 효율적인 배관 청소작업이 가능할 것으로 확인하였으며, 향후 진공흡입기술에 대한 보다 많은 연구를 수행할 경우 2000A 이상의 대형배관 청소로봇 등 다양한 분야에 활용 가능할 것으로 기대한다.

**핵심 단어** : 진공흡입기술, 배관청소로봇, 상수도 배관, 워터제트 청소, 통합 제어 및 모니터링시스템

# A Study of Vacuum-Suction-Type Cleaning Robot System for Water pipes

Youn-Jae Ham

Department of Mechatronics Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University



## Abstract

Pipe systems in operation on industrial sites include water supply pipes, waste pipes, oil pipelines, gas pipelines, and shipping pipelines; due to their different intended uses, their direct and indirect influence in our lives is very diverse. As a key part of social infrastructure, water pipes are directly related to our daily lives. To supply high quality water, aging has to be prevented and an optimal situation has to be maintained.

Many countries in the world are facing the problem of water pipe aging, and much effort is being invested to develop technology that can more effectively maintain water pipes. In Korea as well, on the government's side, 'Local development of pipe cleaning robots' was selected as an industry core technology development enterprise and is being actively supported.

This research puts forward the novel concept of a vacuum-suction-type pipe cleaning robot that can simultaneously clean pipes and discharge sludge outside, so that the cleaning and flushing processes of the water pipe are simplified and performed in a single process.

The use of vacuum suction and discharge techniques in pipe-cleaning robots has not been adequately investigated to date. Hence, in-depth studies on this method are needed to enable efficient maintenance at actual water supply sites. Such studies would result in improvements in driving, cleaning, and discharge performance with maximum 45° elbow.

This study developed a GUI-based system to control and monitor the operation and cleaning status of pipe-cleaning robots and supporting equipments in an integrated manner, which can be extended to other robotic systems in the future.

A computer simulation was performed prior to manufacturing a prototype in order to determine any interference between the major components of the pipe-cleaning robots, as well as to identify their ability to operate in water pipes with maximum 45° elbows. The results of the computer simulation were then incorporated into the prototype design. The manufactured prototype met the initial research goals, per the results of the primary performance tests described herein that were conducted on a test bench under the same conditions as buried water pipes.

- Travelling performance inside the water pipe
- Cleaning performance
- Performance in discharging sludge
- Performance of an integrated control & monitoring system

Through the vacuum-suction-type discharge technology proposed in this research, it was possible to confirm that pipe cleaning was effective and that the water pipe rehabilitation process was shortened. In the future, research on vacuum-suction-type technologies that can be applied to cleaning robots use in water pipes larger than 2000A, is required.

**KEY WORDS** : Vacuum-suction technology, Pipe cleaning robot, Water pipe, Water-jet cleaning, Integrated control and monitoring system





## Nomenclatures

$d$	: 직경	[mm]
$r$	: 반경	[mm]
$v$	: 노즐 분사량	[liter/min]
$\rho_a$	: 공기의 비중량	[kg/m <sup>3</sup> ]
$a$	: 단면적	[m <sup>2</sup> ]
$c$	: 유량 계수	
$P_1$	: 절대 압력	[kPa]
$T$	: 절대온도	[K]
$\theta$	: 노즐 분사각	[°]
$P_{in}$	: 분사 압력	[MPa]
$V_s$	: 흡입 유량	[m <sup>3</sup> /min]
$P_s$	: 흡입 압력	[MPa]
$V$	: 체적	[m <sup>3</sup> ]
$S$	: 표면적	[m <sup>2</sup> ]
$f$	: 단위부피 당 분포힘 벡터	[N/m <sup>3</sup> ]
$T$	: 표면력 벡터	[N/m <sup>2</sup> ]
$P$	: 하중	[N]
$dV$	: 미소 체적	[m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: 수직응력	[N/m <sup>2</sup> ]
$\tau$	: 전단응력	[N/m <sup>2</sup> ]

$\phi$	: 변위장	[mm]
Q	: 변위 벡터	[mm]
D	: 재료의 물성치 행렬	
K	: 강성행렬	
$D_T$	: 전체 변형량	[mm]
E	: 탄성 계수	[GPa]
$Y_p$	: 탄성 항복강도	[MPa]
$\rho$	: 질량 밀도	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	: 프와송비	



P&ID	: Piping & Instrument Diagram
PLC	: Programmable Logic Controller
DAQ	: Data Acquisition
GUI	: Graphic User Interface
SMPS	: Switching Mode Power Supply
ADC	: Analog to Digital Converter
SPI	: Serial Peripheral Interface
MCU	: Micro Controller Unit
ICD	: In-Circuit Debugger
NTSC	: National Television System Committee
FTP	: Foiled Twisted Pair
UTP	: Unshielded Twisted Pair
CSV	: Comma Separated Value
AVI	: Audio Video Interface
MOSI	: Master Output Slave Input
MISO	: Master Input Slave Output

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

산업현장에 적용되고 있는 배관시스템으로는 상수도관, 하수도관, 송유관, 가스관, 선박의 배관 등이 있으며, 각각의 사용 목적에 따라 직간접적으로 매우 다양하게 우리 생활에 영향을 미치고 있다. 이 중에 상수도관은 우리 실생활에 직접적으로 관계하는 주요 사회기반시설로 양질의 수돗물을 공급하기 위해서는 노후화를 예방하고 최적의 상태로 유지 보수하여야 한다. 상수도관의 매설 연수가 경과하면 부식이나 노후화는 필연적으로 일어나게 되고 이에 기인된 문제 발생은 상수도관망의 기능 유지에 지장을 초래함은 물론 에너지 소비를 증가시키는 결과를 가져온다.

약 100여년의 긴 역사를 가지고 있는 국내 상수도 시설은 노후화가 이미 상당히 진행되어 있고, 향후에도 시설의 노후화는 지속될 것으로 예상된다. 우리나라의 전국 상수관망 총 연장은 2015년 말 기준 약 92,228 km 이며, 이중 약 29.6%를 차지하는 20년 이상 된 노후 상수관에 대해서는 환경부 수도 정책과의 ‘수도정비기본계획 수립지침’에 따라 지속적으로 갱생작업을 수행하고 있다.

전 세계 수많은 국가에서 상수도 배관의 노후화란 문제에 직면하고 있어서 보다 효율적으로 상수도 배관을 유지보수하기 위한 기술 개발에 상당한 노력을 기울이고 있다. 최근 로봇 및 관련 기술이 급속하게 발전함을 따라 배관 갱생작업에 로봇을 활용하는 기술개발에 대하여 국제적으로 관심이 높아지고 있으며, 우리나라도 정부 차원에서 ‘배관 청소로봇에 대한 국산화 개발’을 산업핵심기술개발사업으로 선정하여 적극 지원하고 있는 실정이다.

현재 전 세계의 노후관 갱생시장은 매년 수십조 원 이상이며, 미국에서만 상하수도 갱생에 매년 수조원 이상을 투자하고 있으며, 중국, 인도, 동남아 등의

노후 상수도관의 갱생시장을 포함할 경우, 배관 청소로봇의 국내 및 해외에서의 시장성은 충분할 것으로 예상된다.

‘수도정비기본계획 수립지침’에 따르면 상수도 관로의 결함내역 및 파손율은 각각 연결관 불량(34.8%), 이음부 불량(30.9%), 관 침하 및 파손(13.5%), 타관 통과 (2.8%), 토사퇴적 및 기타장애(18.0%) 등으로 나타나고 있다. 노후화가 진행된 배관내부와 경과연도에 따른 통수량은 Fig. 1.1과 같다.



Fig. 1.1 Flow rate reduction rate due to pipe aging

현재 대형 배관의 경우 전문 청소인력이 배관 내에 들어가 직접 청소작업을 수행하거나, 인력 투입이 불가능한 소형 배관의 경우 굴착작업을 한 후 특수 청소 공구를 배관 내부에 삽입하여 유지보수작업을 수행하고 있는 실정이다. 이에 따라 교통체증 유발, 작업비용 상승, 막대한 예산의 투입 및 작업 효율 저하와 같은 추가적인 문제들이 발생하고 있는 상황이다. 상수도 배관 시설의 유지보수 작업특성을 고려해 볼 때, 사람이 작업하기에 매우 열악한 환경이며

안전사고 등에 노출되기 때문에 로봇을 이용한 상용화 기술 개발이 절실히 요구되고 있다[1, 2]. 국내에 엄청난 양의 상수도 배관이 형성되어 있고, 그 직경과 길이 또한 매우 다양하여 기존의 방법으로는 유지보수 작업의 효율이 떨어져 노후화된 상수도관의 청소가 매우 어려운 것이 현실이다. 이와 같은 문제를 해결하는 방법 중의 일환으로 국내 노후 상수도관 중 가장 많이 매설되어 있는 공칭직경 300 A급 상수도관 내부를 청소하는 진공흡입식 청소로봇에 대한 연구를 수행하고자 한다. 단단한 부식층을 제거하여 통수 능력을 회복하기 위하여 기존에 수행해 온 노후관의 연마세관(abrasive cleaning) 방법은 Table 1.1 과 같이 크게 3개의 공법으로 분류할 수 있다.

Table 1.1 Aggressive cleaning methods for water pipe

Cleaning Method	Rehabilitation Method	Applicable Pipes
High pressure water-jetting	After inserting the hose into the pipe, a high-pressure water-jet of about 15 MPa is sprayed to clean the scale.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicable diameter: <math>\Phi 80\sim 200</math> mm</li> <li>- Above <math>22.5^\circ</math> can not be bent</li> <li>- Daily workload: about 200-300 m</li> </ul>
Pressure scraping	Grinding the scraper tool forward with hydraulic pressure	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicable diameter: <math>D \geq \Phi 450</math> mm</li> <li>- Driving speed: 1 km/hr</li> <li>- Maximum workload: 7 ~ 8 km/cycle</li> </ul>
Abrasive pigging	By using a water pressure, several pigs with different diameters are polishing and grinding while advancing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicable diameter: <math>\Phi 80\sim 3,000</math> mm</li> <li>- Maximum workload: 2 km/cycle</li> </ul>

## 1.2 연구 동향

배관 내부에서 배관 청소용 장비의 이동 방법에 따라 능동적 시스템과 수동적 시스템으로 크게 구분된다. 수동적 시스템으로는 배관 내부를 흐르는 유체에 의하여 이동하는 주행체(pig) 등이 있으며, 능동적 시스템으로는 기계적 메커니즘을 적용하여 자력으로 이동하는 배관로봇시스템이 있다[3]. 능동적 시스템은 수평관, 곡관, 분기관, 수직관 등이 혼재된 배관 내부에서의 운동성과 기능성이 우수하기 때문에 많은 연구들이 이루어지고 있다[3]. 배관 로봇의 이동과 관련하여 구동 메커니즘 측면에서의 분류는 보행형, 바퀴형, 무한궤도형, 자벌레형으로 구분되며 각각의 특징은 아래와 같다[1, 4].

- 보행형은 여러 관절로 이루어진 다리를 이용하는 형태로 수평관 및 거친 배관 내부 이동은 유리하지만 가지관 및 수직관 이동에 적합하지 않다.
- 바퀴형은 조향이 자유롭고 이동속도가 빠르다는 장점이 있지만 분기관 및 수직관 이동에 어려움이 있다. 이와 관련한 대표적인 사례는 주철관 내부의 이동을 위해 마그네틱 휠을 사용한 연구이다[5].
- 무한궤도형은 바퀴형과 마찬가지로 이동성과 조향성이 우수하지만, 전력소비가 많고, 궤도에 이물질이 끼이게 될 경우, 주행에 어려움이 있다는 단점이 있다[5].
- 또한 자벌레형은 견인력이 탁월하여 수직관 이동은 용이하지만, 이동속도가 늦다는 단점이 있다[6].

국내의 경우 상용화를 위한 선행개발 측면의 배관로봇은 대부분 카메라를 이용하여 배관 내부의 육안검사를 주목적으로 연구개발이 진행되어 오고 있으며, 상수관로를 대상으로 한 전용 배관로봇이 개발되어 도입 및 운영된 바는 없다. 또한 국내 대부분의 배관로봇은 바퀴형이 많아 직관에서의 이동성은 좋으나, 곡관, 분기관, 수직관 등과 같은 구간에서의 이동성이 나쁘기 때문에 현장에서는 주로 국부적인 모니터링용으로 사용되고 있는 상황이다.

그러나 최근 배관 검사로봇에 대한 수요의 증가와 관련 제도의 확립으로

인하여 검사로봇 시장이 크게 성장할 것으로 전망되고 있어 관련 기업을 비롯하여 학계 등에서 투자 및 연구개발의 움직임이 진행되고 있으며, 대표적인 검사로봇의 특징은 다음과 같다.

로보시리즈(robo series)는 Fig. 1.2와 같으며 주로 하수관 및 산업용 배관, 선박 배관 등의 검사가 용이하도록 카메라부의 높낮이의 상하 조정, 각 구동 바퀴의 독립 구동방식으로 구성되어 있다. 또한 각 장비들은 방수 및 방진성능, 내구성 및 카메라 기능이 매우 뛰어난 것으로 평가받고 있다.

MRINSPECT 시리즈는 Fig. 1.3에서 보는 바와 같이 3축 독립 구동방식을 채택하여 곡관부에서의 뛰어난 주행성을 가지고 있으며, 또한 자기위치인식 기능 및 매핑(mapping) 기능을 가지고 있다. 그러나 현재는 실험실 차원에서의 개발 단계이며, 실제 작업현장에서의 작동성능에 대하여는 다양한 검증 및 지속적인 연구개발을 할 경우 상용화 가능성이 큰 것으로 평가받고 있다.



Fig. 1.2 Configuration of robo series



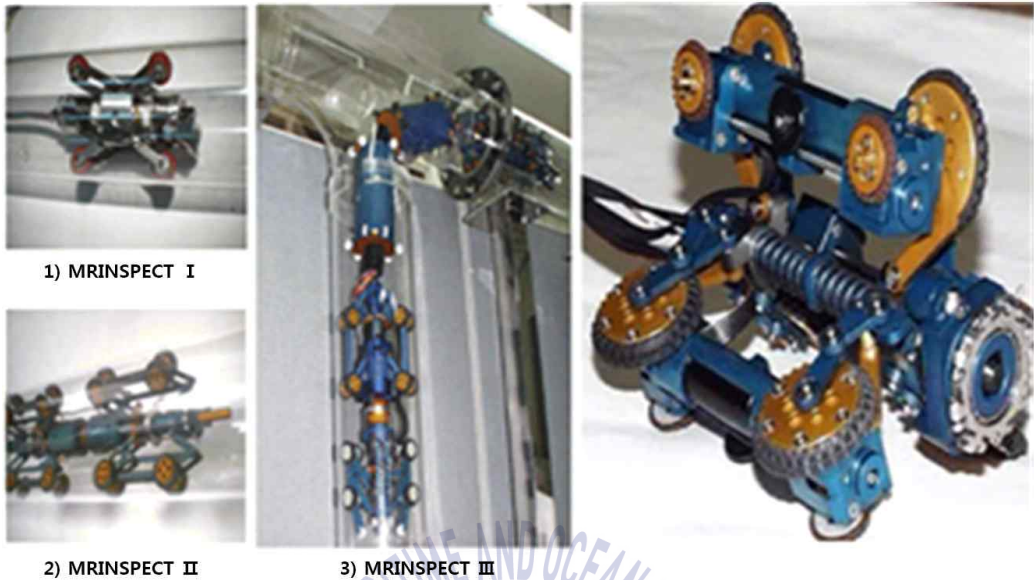


Fig. 1.3 Configuration of MRINSPECT series

현재까지 배관 로봇에 대한 연구개발 기술은 국내와 해외의 기술격차가 비교적 크지 않은 것으로 확인되고 있으나, 해외에서는 배관검사에 필요한 진단 센서와 같은 하드웨어 및 분석기술과 같은 소프트웨어 측면에서의 다소 앞서 있는 것으로 분석되고 있다.

기존 재래식 상수도관 청소방법으로 Fig. 1.4와 같이 전문 인력이 스크레핑 공구와 원치를 이용하여 배관내부의 녹을 긁어내는 방식으로 상수도 노후관을 갱생하고 있다.

또한, 우리나라의 상수도 관망을 위탁관리하고 있는 수자원기술주식회사 (WARECO) 에서는 Fig. 1.5와 같이 고압 워터제트를 이용한 소구경용 배관 청소로봇을 개발하여 운영하고 있다. 이 로봇은 주행에 필요한 동력원 없이 내부 청소에 사용하는 고압의 워터제트를 후방으로 나선식으로 회전 분사할 수 있도록 구성하여 배관 내부 청소와 동시에 주행력(driving force)을 확보할 수 있도록 개발된 소형배관 청소로봇이다. 이 로봇은 주행 보조 바퀴의 마찰력과

워터제트의 분사압력이 일정한 관계로 유지하여야 청소에 적합한 주행 속도를 유지할 수 있어 깨끗한 청소가 가능하나, 스케일이 불규칙하게 형성된 상수도 관 내에서는 주행 속도를 일정하게 제어하기가 곤란하여 균일한 청소가 어려운 단점을 가지고 있다.



Fig. 1.4 Conventional pipe cleaning method with the scraping tools



Fig. 1.5 Configuration of the water-jet cleaning robot for WARECO

### 1.3 연구 내용 및 구성

상수도관의 효과적인 유지 및 보수를 위해서는 직관(straight pipe) 및 곡관(elbow)으로 구성된 배관내부를 원활하게 주행할 수 있어야 하며, 배관 내부검사 및 스케일 제거 기능을 포함한 제반작업을 수행할 수 있어야 한다. 그러나 이와 같이 검사와 청소작업을 동시에 수행할 수 있는 배관 청소로봇은 거의 없으며, 특히 배관 내부의 슬러지를 외부로 배출할 수 있는 배관 청소로봇에 대한 연구개발 사례는 없는 것으로 확인되어 본 연구를 수행하고자 한다.

본 연구에서는 상수도 배관내부 청소(cleaning)와 세척(flushing)공정을 단일화하고, 정량적으로 깨끗하게 배관을 청소할 수 있도록 배관청소와 동시에 슬러지를 외부로 배출할 수 있는 신개념의 진공흡입식 배관 청소로봇에 대하여 연구한다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 배관 청소로봇의 각 주요 부분의 동작상태 및 가상 배관 환경에서의 작동성능을 확인한 후 제작한 시제품(prototype)을 이용하여 실제 매설 상수도 배관과 같은 환경의 테스트벤치(test bench)에서 주요 성능실험을 수행하여 시뮬레이션의 타당성을 확인한다.

본 논문의 구성은 1장에서 본 연구에 대한 배경, 동향 및 연구 내용 등에 대하여 논하며, 2장에서는 연구하고자 하는 배관 청소로봇 본체의 기술사양 및 구성 등에 대해서 기술한다. 3장에서는 청소로봇의 주요부에 대한 구조해석 및 지원 장치의 유동해석에 대해서 기술한다. 4장에서는 청소 로봇을 원활하게 제어하고 모니터링 할 수 있는 통합 제어 및 감시시스템에 대해 기술하며, 5장에서는 로봇 시제품의 주요 성능을 확인하기 위한 실험 및 결과에 대해서 고찰한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구를 통해 확인된 연구결과에 대하여 요약한다.

## 제 2 장 진공흡입식 배관 청소로봇 시스템

### 2.1 배관 청소로봇 시스템 개요

배관 청소로봇의 적용 배관은 국내 상수도관 중에 가장 많이 매설되어 있으므로 향후 유지보수에 대한 수요가 가장 많은 것으로 알려진 상수도관으로 사양은 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 Dimension of applicable pipes

Items	Specifications
Water pipes	300A, 350A, 400A
Shape of pipes	Straight pipes Elbows (22.5° & 45°)
Cleaning range	100 m/cycle

배관 청소로봇은 지하에 매설되어 있으며 오랜 기간에 걸쳐 스케일이 고착되어 있는 상수도관 내벽을 깨끗하게 청소할 수 있도록 아래와 같은 주요 성능을 만족할 수 있도록 구성한다.

- 상수도 배관 내 주행 성능
- 청소 성능
- 슬러지 배출 성능
- 통합 제어 및 감시시스템 성능

배관 청소로봇을 이용하여 상수도관 청소작업을 수행할 경우, 배관 청소로봇과 관련 지원 장비들은 Fig. 2.1과 같이 배치하여 운영하고 있으며, 유지보수에 대한 경제성을 확보하기 위하여 한 번에 약 100 m 를 청소할 수 있도록 한다.

배관 청소작업 과정은 Fig. 2.1과 같이 약 100 m 길이의 상수도관 양측에 사람이 접근할 수 있도록 굴착작업을 하고, 한쪽 끝에 진공브레이크(vacuum breaker)를 설치하여 진공을 형성할 수 있도록 준비한다. 청소로봇을 배관 내에 삽입하기 전에 별도의 탐사로봇을 이용하여 상수도관 내부 상태를 확인하여 배관 청소로봇의 작동 조건을 설정한 후 배관청소 작업을 수행한다. 청소로봇을 전진방향으로 운전하면서 감시카메라를 통한 작업 상태 감시, 워터제트와 같은 청소도구를 이용한 스케일 제거 및 진공 흡입력을 이용한 슬러지 배출 등을 동시에 수행하고, 후진방향으로 운전하면서 감시용 카메라를 통하여 청소상태를 검사할 수 있도록 구성한다.

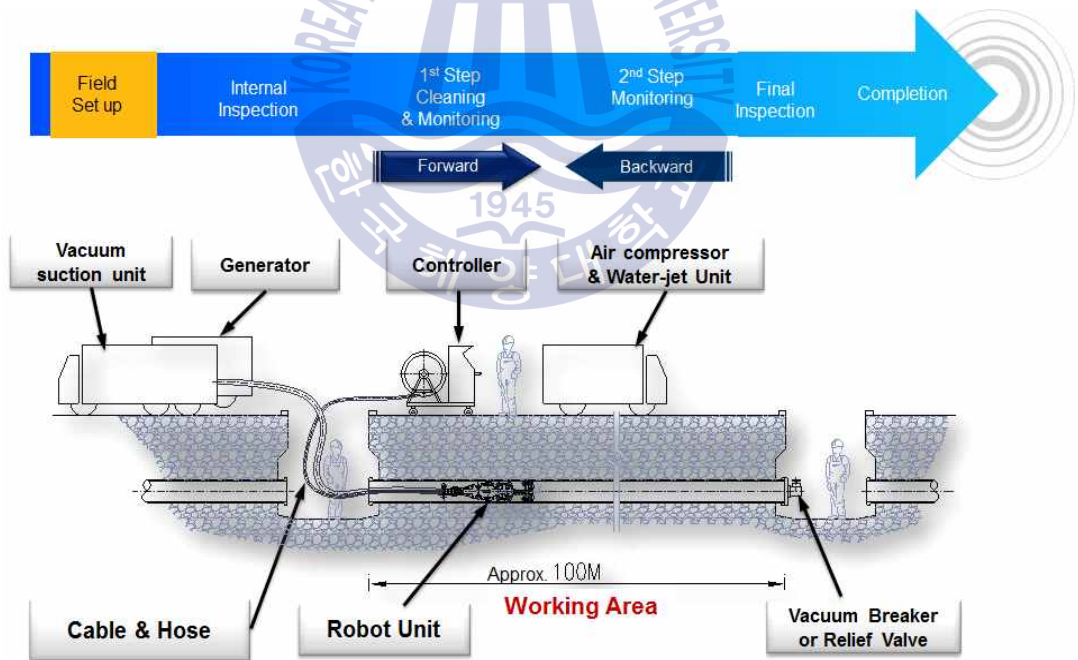


Fig. 2.1 Layout of the pipe cleaning procedure

## 2.2 배관 청소로봇 구성

본 연구의 배관 청소로봇은 스케일이 고착되어 있는 상수도관 내부를 원활하게 전진 및 후진할 수 있는 구조로 상수도관 내벽을 깨끗하게 청소하면서 동시에 슬러지 등 이물질들을 진공 흡입하여 외부로 배출할 수 있도록 구성한다.

배관 청소로봇의 본체는 Fig. 2.2와 같이 앞단부에서 부터 워터제트 분사부(water-jet injection part), 나선식 주행부(screw type driving part), 조인트부(joint part), 보조 바퀴부(auxiliary wheel part), 진공흡입부(vacuum suction part) 및 외부장치 연결부(external device connection part) 등의 순서로 구성한다.

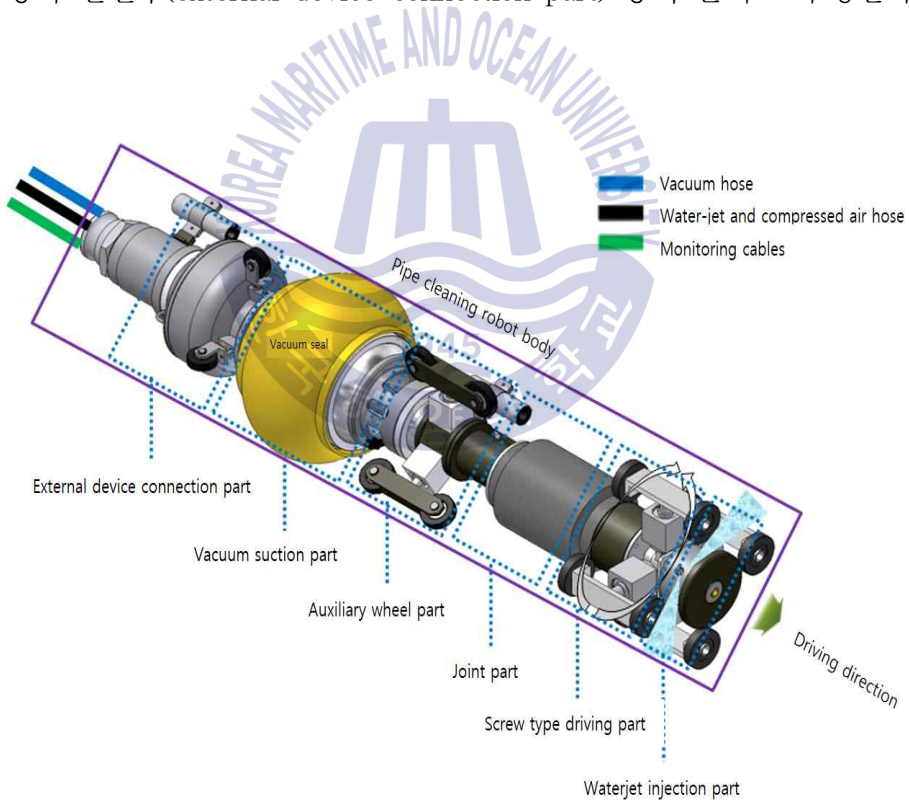


Fig. 2.2 Configuration of the cleaning robot

워터제트 분사부는 전진방향으로 주행하면서 고압의 워터제트를 나선형으로 회전하면서 일정한 압력과 유량으로 분사하고, 조인트부 최대 45° 곡관을 부드럽게 통과할 수 있는 구조이며, 보조 바퀴부는 로봇의 중심을 유지하면서 로봇의 주행성능을 향상시킬 수 있는 구조로 설계한다. 진공흡입부는 배관내부의 슬러지를 용이하게 흡입할 수 있는 구조이며, 외부장치 연결부는 로봇 본체와 외부 지원 장치를 연결하는 부분으로서 진공호스(vacuum hose), 압축공기용 호스(compressed air hose), 워터제트용 호스(water-jet hose) 및 모니터링 케이블(monitored cables) 등을 용이하게 연결하기 위한 구조로 설계한다.

배관내부의 슬러지는 Fig. 2.3과 같이 외부에 설치된 진공 지원 장치를 가동하여 로봇 본체에 설치된 진공밀봉(vacuum seal)과 배관라인 끝단부에 부착된 진공 브레이커 사이에 진공을 형성시키고, 진공이 형성된 구간 내에 있는 슬러지를 진공 흡입구를 통하여 흡입한 후 진공호스를 통하여 상수도관 외부로 배출시킨다.

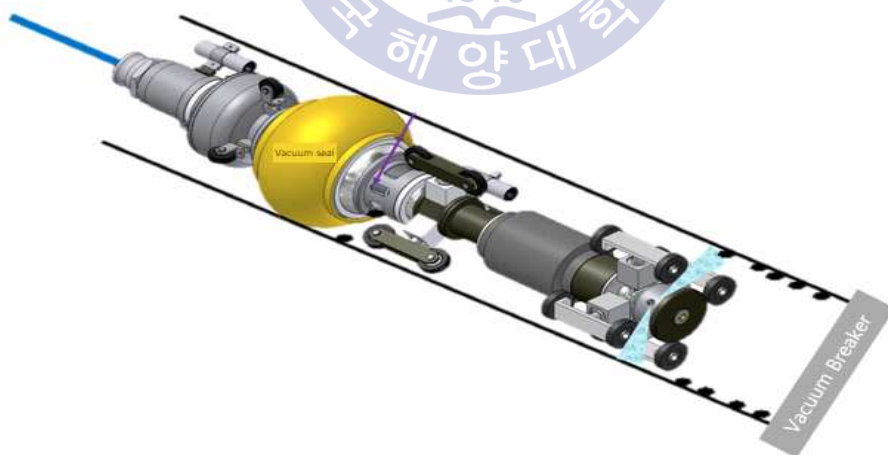


Fig. 2.3 Principle of the vacuum suction and discharge for the scale

## 2.2.1 세척부

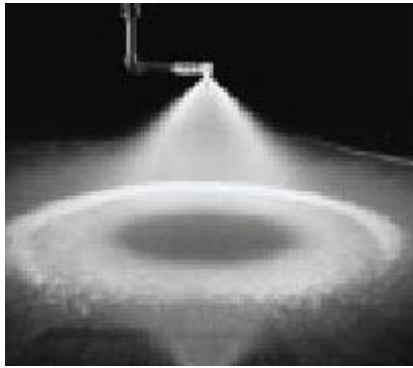
로봇의 형상 및 주행방식 등을 고려하여 상수도관 내벽에 고착된 스케일을 효율적으로 제거할 수 있도록 워터제트의 분사압력, 분사노즐 형상 및 분사방식 등을 선정한다. 또한 워터제트로 청소가 불가능 할 정도로 고착된 스케일도 청소할 수 있는 스크래핑 공구(scraping tools)도 적용할 수 있도록 한다.

청소로봇의 분사노즐에 적용 가능한 6-종류의 분사방식(spray patterns)에 대하여 Table 2.2 및 Fig. 2.3과 같이 비교 검토한 결과, (e) flat spray pattern 을 적용한다.

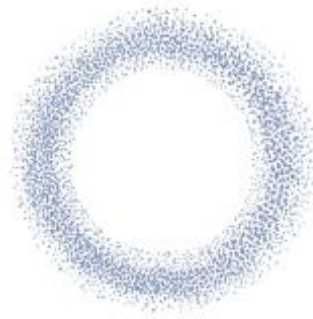
Table 2.2 Characteristics of various spray patterns

Spray Patterns	Injection efficiency (%)	Impact force	Particle diameter (μm)	Remarks
Hollow cone	55	전 충격효율은 낮으나, 실제 표면이 집중식이므로 단위면적당 충격은 원형 분사형태 보다 높다.	200~5000	Fig. 2.4 (a) 참조
Full cone	57~94	속도효율 및 충격효율은 분사각도에 따라 변한다.	500~22000	Fig. 2.4 (b) 참조
Solid stream	96~99	충격 효율이 가장 높다.	diameter of nozzle	Fig. 2.4 (c) 참조
Flat tapered edge	95~98	낮은 압력에서 높은 충격력을 얻을 수 있다.	200~5000	Fig. 2.4 (d) 참조
Flat non-tapered edge	80~90	분사각도가 넓어 충격력이 적다.	200~8000	Fig. 2.4 (e) 참조
Flat	90~97	충격효율이 높다. 분사각도가 적을수록 충격효율이 높아진다.	200~7000	Fig. 2.4 (f) 참조





(a) Hollow cone spray pattern

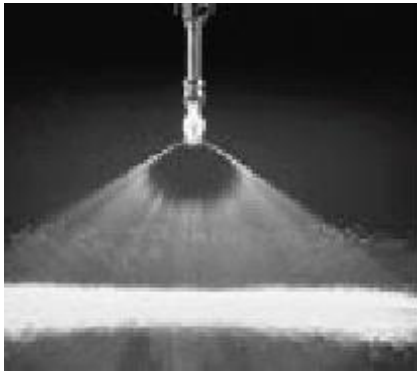


(b) Full cone spray pattern

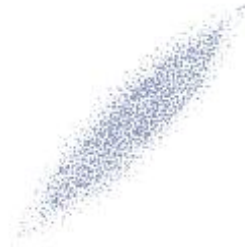


(c) Solid stream spray pattern





(d) Flat tapered edge spray



(e) Flat non-tapered edge spray



(f) Flat spray pattern

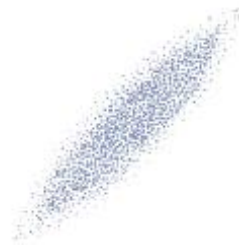


Fig. 2.4 Various spray patterns of the nozzle orifice

이론적으로 계산한 분사 각도와 분사 거리의 관계는 Fig. 2.5와 같으며, 분사 각도 및 분사 거리를 이용하여 분사범위를 설정하여 분사노즐의 상세 사양을 결정한다. 로봇 본체 중심으로부터 분사 노즐의 끝단이 반경방향으로 약  $r = 50 \text{ mm}$  정도에 위치하는 것을 기준하여 분사거리와 스프레이각도를 고려한 이론적인 분사범위는 Table 2.3과 같다.

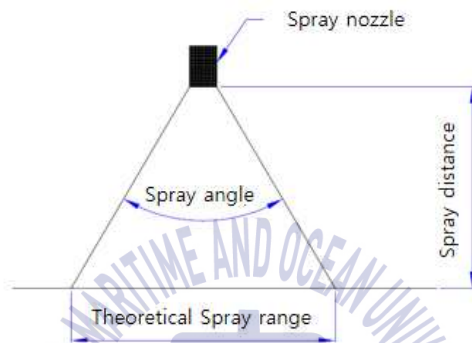


Fig. 2.5 Theoretical spray range from the nozzle orifice

Table 2.3 Theoretical spray range of the injection distance

Spray angle	Theoretical spray range with the injection distance (cm)					
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
5°	0.4	0.9	1.3	1.8	2.2	2.6
10°	0.9	1.8	2.6	3.5	4.4	5.3
15°	1.3	2.6	4.0	5.3	6.6	7.9
20°	1.8	3.5	5.3	7.1	8.8	10.6
25°	2.2	4.4	6.7	8.9	11.1	13.3
30°	2.7	5.4	8.0	10.7	13.4	16.1
35°	3.2	6.3	9.5	12.6	15.8	18.9
적용 공칭직경	250A	300A	350A	400A	450A	500A

또한 워터젯 노즐 분사량 ( $V$ ) 은 다음 식(1)과 같이 계산한다.

$$V = \frac{237.6}{\rho_a} \times \frac{a c P_1}{\sqrt{T}} \quad (1)$$

여기에서,  $V$  : 노즐 분사량 [liter/min]

$\rho_a$  : 공기의 비중량 [1.2 kg/cm<sup>3</sup>]

$a$  : 노즐 단면적 [mm<sup>2</sup>]

$c$  : 유량 계수 [100 % = 1]

$P_1$  : 절대압력 [P+1.03323 kgf/cm<sup>2</sup>]

$T$  : 절대온도 (t [°C] + 273)

본 로봇에 적용한 분사노즐의 사양은 Table 2.4와 같으며, 청소 배관의 내부 상황에 따라 분사노즐을 용이하게 교체 적용할 수 있도록 Fig. 2.6과 같은 구조로 구성한다.

**Table 2.4** Specifications for the injection nozzle

Items	Specifications
Shape of nozzle	Flat spray pattern
Diameter of nozzle (d)	Φ 1.0 mm
Injection angle of nozzle (θ)	25°
Quantity	4 ea

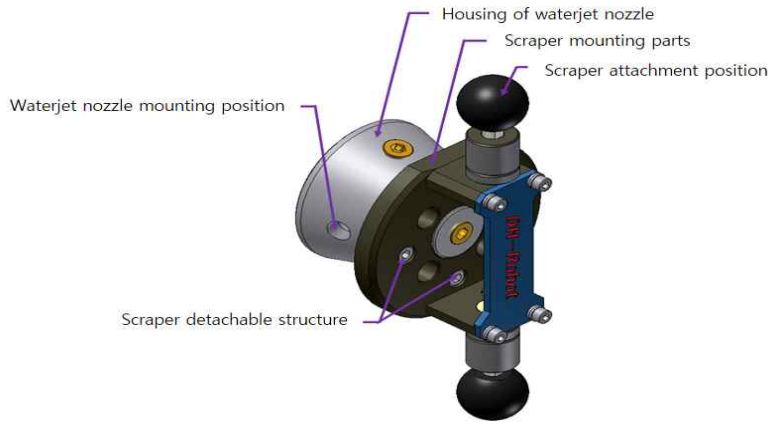


Fig. 2.6 Configuration of the injection nozzles and the scraping tools

또한, 상수도관 내의 스케일의 고착상태가 매우 심해서, 고압의 워터제트만으로는 고착된 스케일을 깨끗하게 제거할 수 없을 경우를 대비하여 별도의 기계식 스크래핑 공구(scraping tool)를 설치할 수 있도록 구성한다.

워터제트의 회전 분사 시, 고압 분사력에 의해 주행 능력을 보장할 수 있고, 또한 벽면의 슬러지가 진공 흡입구 쪽으로 모일 수 있도록 Fig. 2.7과 같이 분사노즐의 설치각도를 후방 45° 로 향하게 설치한다.

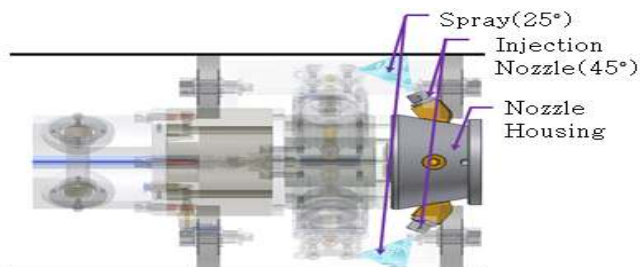


Fig. 2.7 Angle of the injection nozzle and spray

## 2.2.2 주행부

배관 청소로봇은 매립된 지 10년 이상 된 상수도관과 같이 습기가 많고 고착된 스케일이 많은 환경 및 직관뿐만 아니라 45° 곡관에서도 원하는 주행 속도로 전진방향 및 후진방향으로 원활하게 정속 주행할 수 있는 구조이어야 한다.

나선식 주행부는 나선산의 원리를 이용하여 Fig. 2.8과 같이 전진방향으로 주행할 경우에는 오른쪽 방향으로 회전시키고, 후진방향으로 주행할 경우에는 왼쪽 방향으로 회전하는 구조로 설계한다. 또한 각 구동바퀴에는 구동 마찰력을 임의로 조정할 수 있도록 각각 에어실린더를 설치한다.

로봇의 주행 속도를 단순하게 제어할 수 있도록 구동모터의 회전속도를 일정하게 유지하고 각 구동 바퀴의 피치각도를 1° ~ 10° 범위 내에서 임의의 각도로 조정함으로써 주행 속도를 제어 할 수 있는 구조로 설계한다.

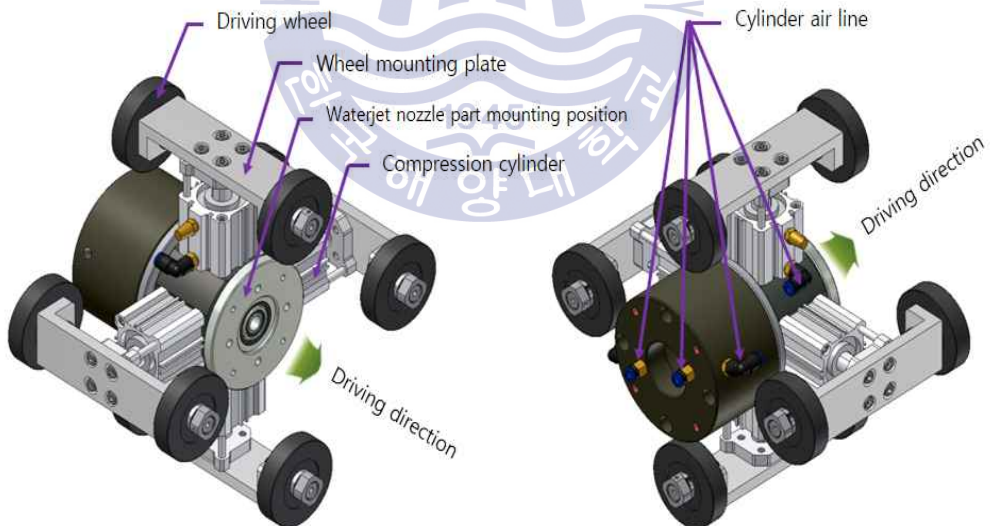


Fig. 2.8 Configuration of the screw driving wheel units

진공 흡입부의 위치를 유지하기 위하여 Fig. 2.9와 같이 진공흡입부 앞단에 보조바퀴를 3-방향으로 설치하며, 나선식 구동바퀴의 동력원인 에어모터를 설치할 수 있도록 보조 바퀴부의 내부를 중공 구조로 설계한다. 또한, 나선식 주행부로의 동력전달은 로터리 조인트를 설치하여 주행 유연성을 확보할 수 있도록 구성한다.

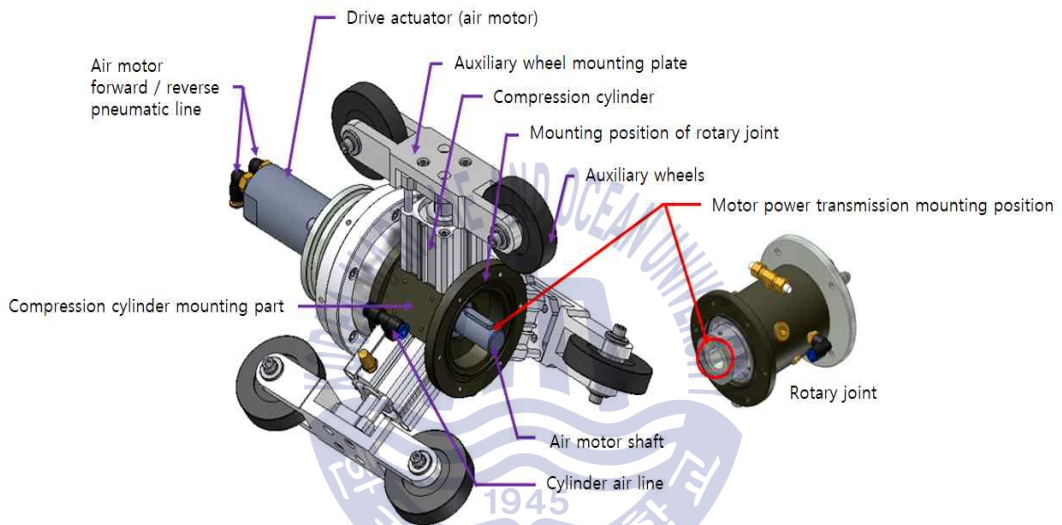


Fig. 2.9 Configuration of the support wheel set

Fig. 2.10 및 Fig. 2.11과 같이 300A 배관 내부에서의 나선식 주행 장치와 보조 바퀴 세트에는 배관 내부와의 구동 마찰력을 확보하기 위하여 각 구동 바퀴 하부에 약 50 mm의 스트로크를 갖는 에어실린더를 각각 설치한다. 구동 바퀴의 반경방향 행정(stroke)은 300A 배관 내경을 기준하였으며, 350A 또는 400A의 배관을 청소할 경우에는 에어실린더 하부 고정부에 각각 약 25 mm 또는 50 mm 두께의 블록(block)을 삽입할 수 있도록 구성한다.

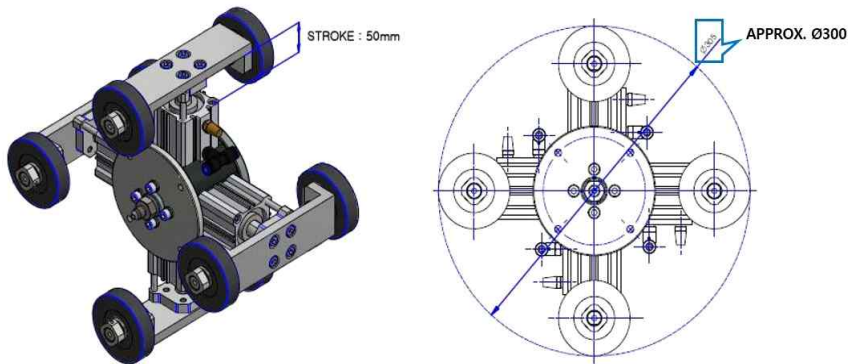


Fig. 2.10 Stroke of air cylinder for the screw driving unit

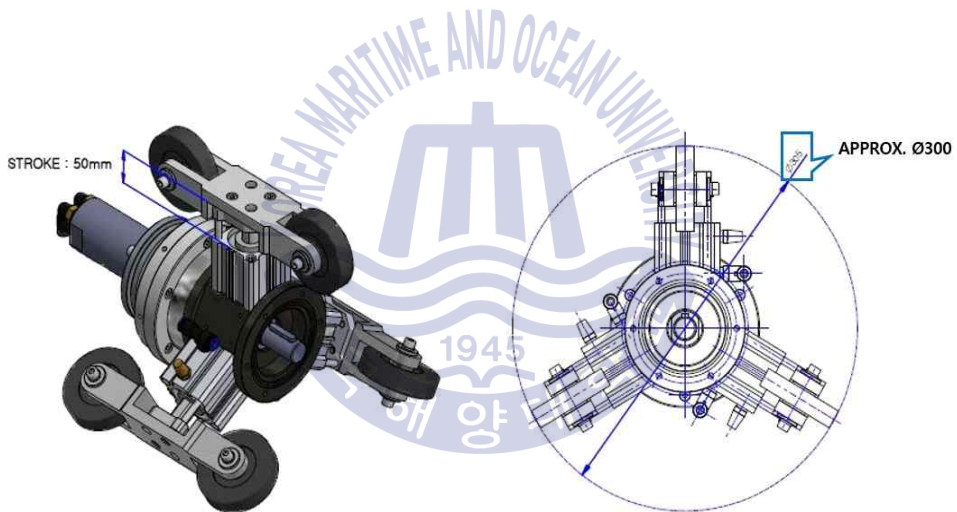


Fig. 2.11 Stroke of air cylinder for the auxiliary wheel set

본 로봇에 적용 가능한 구동모터들에 대하여 Table 2.5와 같이 장단점을 비교 분석한 결과, 본 로봇의 구동모터로는 방수성 및 보수 유지성이 우수하며, 가혹한 환경 하에서도 필요한 주행 속도를 유지할 수 있도록 Table 2.6과 같은 사양의 에어모터를 선정한다.



**Table 2.5** Trade-off study of the driving motors

Items	Air motor	Servo Motor	Underwater Motor
Waterproof	○	×	○
Maintenance	○	△	×
Economics	○	△	×
Specifications	△	○	△
Speed control	△	○	△
Power supply	Air hose	Waterproof cable	Underwater cable

**Table 2.6** Specifications of the air motor

Items	Specifications
Model no.	LZB 46 AR0010-11
Max. power	0.60 kW
Speed at max power	50 RPM
Torque at max power	115 Nm
Min. starting torque	125 Nm
Free speed	95 RPM
Air consumption at max power	14.5 liter/sec
Weight	2.70 kg

### 2.2.3 로터리 조인트

로터리 조인트는 Fig. 2.12와 같이 회전하지 않는 로봇 몸체부로부터 회전되는 워터제트 노즐부로 고압의 워터제트를 공급하기 위한 유연 조인트(flexible joint)이며, 중공식(hollow type) 으로 설계하여 내측에 구동용 에어 모터를 설치할 수 있도록 구성한다.

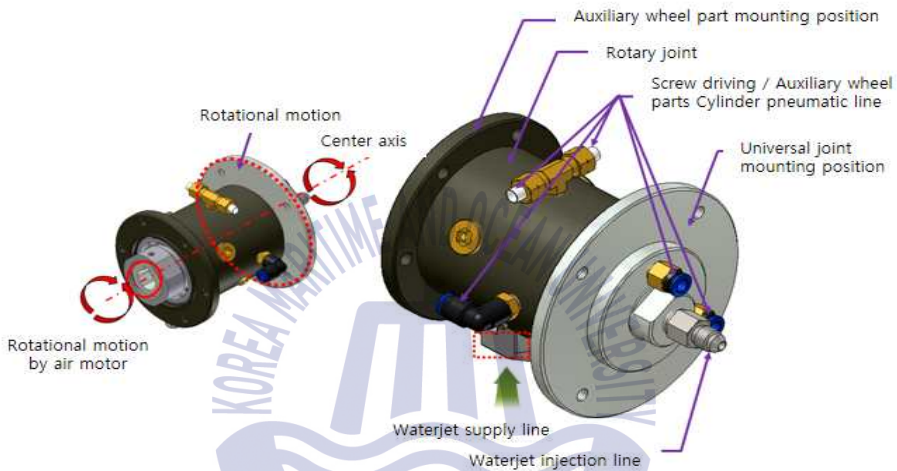


Fig. 2.12 Configuration of the rotary joint

### 2.2.4 유니버설 조인트

일반적으로 상수도 배관 설치기준이 최대 22.5° 로 이내로 설치하도록 규정되어 있으나, 다른 용도의 배관 등에도 적용 가능하도록 본 유니버설 조인트는 최대 45° 의 곡관에서도 주행할 수 있도록 설계한다.

직관은 물론 45° 곡관부에서도 구동 에어모터의 회전력을 구동 바퀴로 원활하게 전달하고, 에어 호스, 워터제트 호스 및 배선 등이 통과할 수 있도록 Fig. 2.13과 같이 3단 중공식 유니버설 조인트를 특별한 구조로 설계한다.

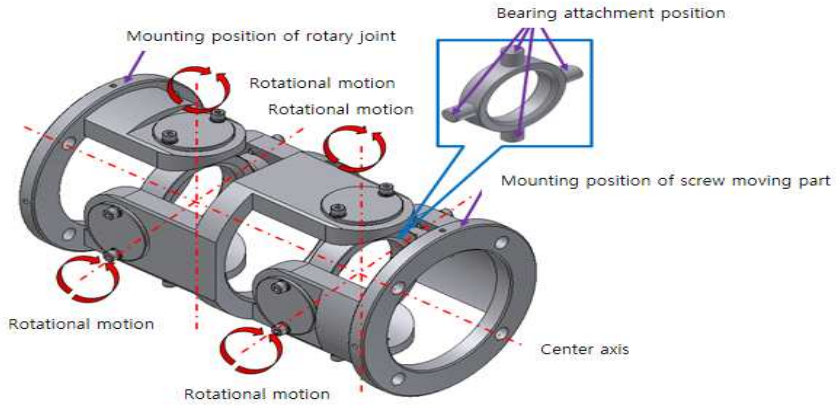


Fig. 2.13 Configuration of the universal joint

### 2.2.5 진공 흡입부

진공 흡입부는 Fig. 2.14와 같이 슬러지를 용이하게 흡입할 수 있도록 배관 내부의 진공압력을 유지하는 진공밀봉과 진공밀봉 설치부의 곡관에서의 유연성을 확보할 수 있도록 형상 설계하고, 볼조인트 및 슬러지를 흡입하는 이물질 흡입구 등으로 구성한다.

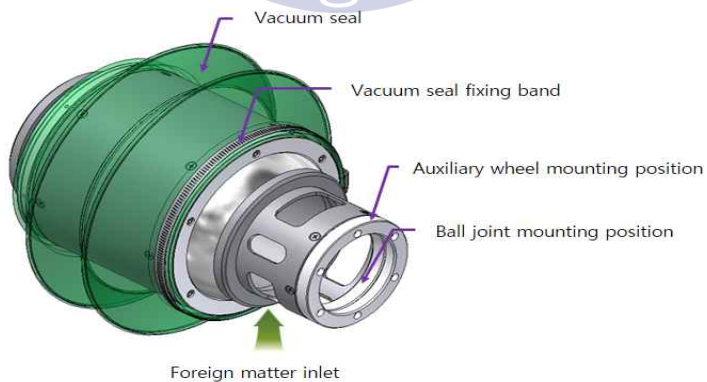


Fig. 2.14 Configuration of the vacuum suction part

Fig. 2.15와 같이 3-way 솔레노이드 밸브를 통하여 대기압력 청소구역압력 및 진공밀봉 내부압력 등 3-구역에서 압력관계를 일정하게 유지할 수 있도록 구성하며, 이물질 흡입구는 상수도관 하부의 슬러지를 용이하게 흡입할 수 있도록 형상 설계한다. 진공밀봉은 직관 및 곡관에서도 진공압력을 유지할 수 있도록 다양한 형상(요철형 및 구면형) 및 구조(한쪽 개방형 및 양쪽 폐쇄형)에 대해서 다각적으로 검토한 결과, 구면 형상의 양쪽 폐쇄형 구조로 결정하며 진공밀봉의 재질은 물기가 많고 다소 거친 배관 내면과의 마찰에 의한 마모 등을 고려하여 우레탄 재질을 선정한다.

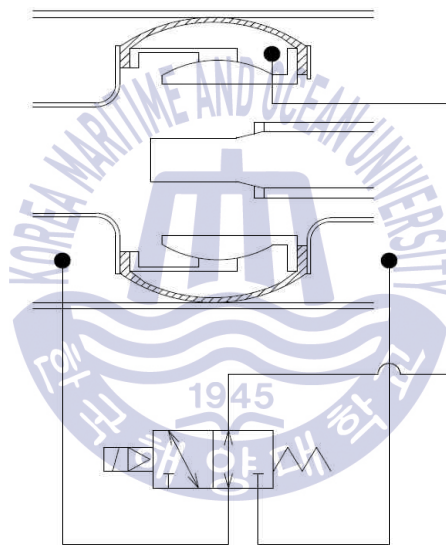


Fig. 2.15 Principle of the vacuum pressure control

## 2.2.6 외부 연결부

외부장치 연결부는 Fig. 2.16과 같이 외부 지원 장치로부터 배관 로봇의 청소 작업 필요한 워터젯용 고압수, 압축공기, 진공압력 및 감시용 카메라 전원 등을 공급 받기 위한 호스류 및 케이블 등을 로봇 본체에 확실하게 연결시킬 수 있는 구조로 설계한다.

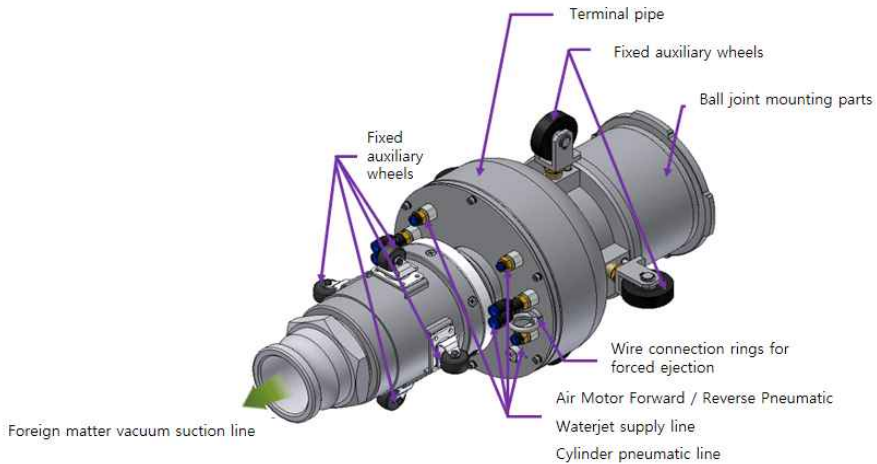


Fig. 2.16 Structure of the external connection devices

### 2.2.7 보조 캐리어

로봇 본체에 DAQ(Data Acquisition) 카드 및 영상카메라 등과 같은 보조 장치들을 연결할 수 있는 보조 캐리지를 Fig. 2.17과 같이 구성한다.

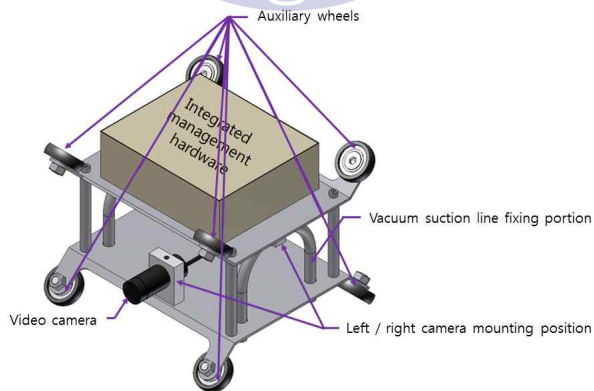


Fig. 2.17 Configuration of the auxiliary carrier

### 2.2.8 배관 청소로봇 설계사양

본 연구를 통하여 제작한 배관 청소로봇의 시제품과 설계사양은 각각 Fig. 2.18 및 Table 2.7과 같다.



Fig. 2.18 Prototype of the pipe cleaning robot

Table 2.7 Specifications of the vacuum suction pipe cleaning robot

Items	Specifications
Driving unit	Compressed air motor
Travelling speed	Max. 2.0 m/min
Water-jet injection	High pressure water-jet
Scrapping unit	Double ball rotating cutter type
Vacuum unit	Vacuum seal + Vacuum breaker
Monitoring unit	CCTV
Weight	Approx. 70 kg
Power	AC 220 V, 1 $\Phi$ , 60 Hz
Applicable pipes	300A, 350A, 400A (22.5° & 45° elbow)
Cleaning range	Approx. 100 m/cycle

## 2.3 외부 지원시스템

배관 청소로봇이 상수도관 내에서 원활하게 작동할 수 있도록 관련 지원시스템을 구성한다.

### 2.3.1 워터제트 장치

상수도관 내벽에 단단하게 고착된 스케일을 효율적으로 제거하기 위해서는 분사압력이 높을수록 스케일 제거능력이 좋을 것으로 생각되나, 10년 이상 된 노후 상수도 배관에 대하여 과도한 압력으로 워터제트를 분사할 경우, 부식이 심한 부분에서는 파공이 될 우려가 있다. 따라서 스케일 제거 효율과 부식 배관부의 보호 등을 고려하여 배관 내부 상태에 따라 적당한 분사압력과 분사유량을 갖는 워터제트를 공급할 수 있도록 구성한다.

현재, 선박 및 저장탱크 등과 같은 구조물의 외부 청소용으로 약 100 MPa 정도의 분사압력을 사용하고 있으나, 상수도관 청소용으로는 내부의 부식상태 및 스케일 고착상태 등을 고려하여 약 15 MPa 정도의 분사압력이 적당한 것으로 확인되었다.

본 로봇의 워터제트 지원 장치의 흐름도 및 주요 사양은 각각 Table 2.8 및 Fig. 2.19와 같다.

Table 2.8 Specifications for the water-jet system

Items	Specifications	Remarks
Injection pressure ( $P_{in}$ )	15 MPa	Max. 100 MPa
Injection flow rate (V)	Max. 100 liter/min	-
Power	37 kW, AC380 V, 3 $\Phi$	-

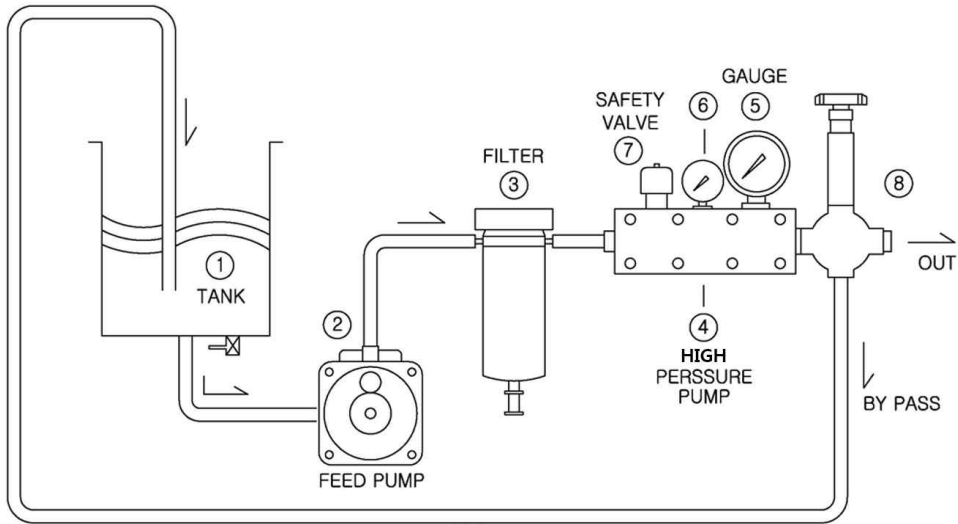


Fig. 2.19 Flow diagram of the water-jet system

### 2.3.2 진공 지원 장치

상수도관(Max. 400 A)을 기준으로 약 100 m의 청소구간 내에서 적정 진공압력을 형성하고 슬러지를 흡입 및 외부로 배출시킬 수 있는 충분한 진공압력을 공급할 수 있도록 구성한다.

상수도관 내에서의 워터제트의 분사에 의한 영향, 슬러지의 배출 등을 고려하여 적정 진공압력을 형성시키기 위한 원리는 Fig. 2.20과 같다.

청소 구간에서 적정 진공압력을 형성시키기 위해서 청소 로봇이 들어가는 반대 쪽 끝단에는 적정 진공압력을 유지할 수 있도록 진공브레이크를 설치한다.

진공 지원 장치는 청소 배관 내에 일정한 진공압력을 형성하고 슬러지를 용이하게 배출할 수 있는 흡입압력을 공급하는 주요 지원 장비로, Fig. 2.21과 같이 사이클론(cyclone), 백필터(bag-filter), 소음기(silencer) 및 진공펌프(vacuum pump) 등으로 구성되며, 기술 사양은 Table 2.9와 같다.



이중 사이클론은 원심력과 와류 특성을 이용하여 배출된 슬러지 중에서 입자가 큰 슬러지들은 더스트 백으로 떨어뜨리고, 입자가 작은 슬러지는 백필터로 분류시키는 기능을 하는 주요 구성품으로 별도의 유동해석을 통하여 유동효율이 우수한 최적의 형상설계를 한다.

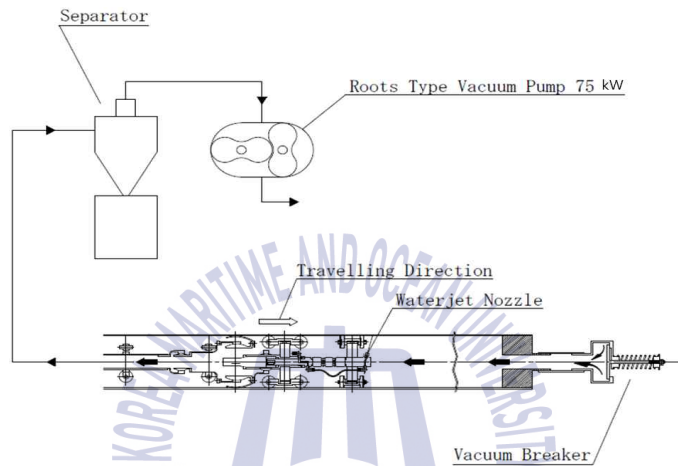


Fig. 2.20 Vacuum suction principle in the pipe

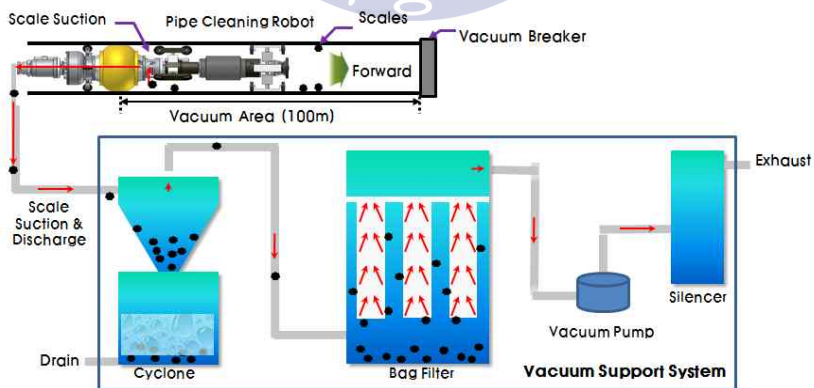


Fig. 2.21 Configuration of the vacuum support system

**Table 2.9** Specifications for the vacuum support system

Items	Specifications
Vacuum pump	Dry root blower
Dust collection unit	Bag filter
Suction volume ( $V_s$ )	Approx. 50 m <sup>3</sup> /min
Suction pressure ( $P_s$ )	Max. -61 MPa
Flow rate of cyclone	50 m <sup>3</sup> /min
Power	75 kW, AC 380 V, 3 $\Phi$

### 2.3.3 공기 압축기

구동 에어모터의 동력원 및 구동 휠세트용 에어실린더로의 압축공기의 공급원으로 Table 2.10과 같은 사양의 공기압축기를 사용하며, 압축공기 내의 수분으로 인한 오작동을 예방하기 위하여 압축공기 배관 상에 수분 제거기를 설치한다.

**Table 2.10** Specifications for the air compressor

Items	Specifications
Flow rate	More than 1.0 m <sup>3</sup> /min
Pressure	500 ~ 800 kPa
Air hose	Approx. 120 m

## 제 3 장 구조해석 및 유동해석

### 3.1 개요

본 배관 청소로봇의 각 부품에 대한 기능적인 부분의 설계내역은 2장에서 설명하고 있다. 본 장에서는 주요 부품에 대한 안전성을 확인하기 위하여 Fig. 3.1과 같은 절차에 따라 구조해석을 수행하며, 진공 지원장치의 주요 기능품인 사이클론(cyclone)에 대하여 유동해석을 수행하여 형상설계에 반영한다.

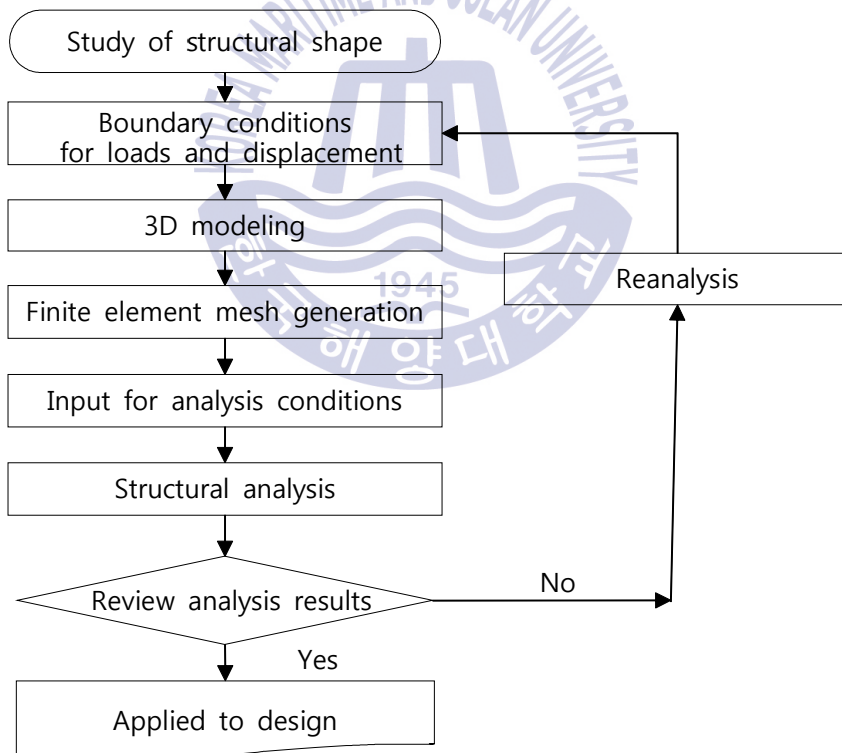


Fig. 3.1 Structural analysis procedure

## 3.2 로봇 구조해석

### 3.2.1 선형 구조 및 유한요소 이론

본 로봇에 대해서는 선형 탄성재료, 미소 변위 조건 및 하중 속도 무시라는 3개의 가정 하에 구조해석을 수행한다. 즉, 선형 탄성재료 조건으로 응력과 변형률은 정비례하며 탄성영역 내에서 거동하며, 하중을 제거하였을 때 잔류응력과 변형률은 없는 것으로 가정한다. 또한 미소변위 조건은 하중의 결과로 발생하는 변위는 크지 않음을 말한다. 지배방정식의 유도과정에서 대변형은 고려하지 않았으며, 정적 영역의 해석이므로 하중의 속도를 무시하는 것으로 가정한다. 안정성을 평가하기 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 탄성영역에서의 선형 구조해석을 수행한다.

경계조건과 하중이 정적으로 작용하는 탄성체라는 조건으로 선형 구조해석을 수행하여 모델의 변위, 변형률, 응력 및 반력 등을 구하고, 안전계수(factor of safety)를 적용하여 소성 및 파괴 여부를 확인한다. 구조해석 과정은 Roert D. Cook 및 O.C. Zienkiewicz의 유한요소 이론[32, 33]에 따라 수행하며, 선형 응력해석은 후크의 법칙(Hook's law)을 기본 식으로 한다.

체적이  $V$  이고 표면이  $S$  인 임의의 3차원 물체에서 한 점( $X$ )에서 일어나는 변형은 다음과 같이 변위의 세 성분으로 표현한다.

$$X = [u, v, w]^T \quad (1)$$

단위부피 당 무게와 같은 단위 부피당 분포 힘  $F$  는 벡터  $f$  로 표현한다.

$$F = [f_x, f_y, f_z]^T \quad (2)$$

그리고 표면력 벡터  $T$  는 표면상의 임의 점에서 벡터의 성분 값으로 나타낼 수 있다.

$$T = [T_x, T_y, T_z]^T \quad (3)$$

응력벡터는 한 점  $i$ 에 작용하는 하중  $P$  는 세 성분으로 표현된다.

$$P_i = [P_x, P_y, P_z]_i^T \quad (4)$$

미소 체적  $dV$  에 작용하는 응력텐서는  $(3 \times 3)$ 대칭행렬의 형태로 성분을 정렬하여 표현할 수 있다.

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{xy}, \tau_{yz}]^T \quad (5)$$

여기에서,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  는 수직응력이고,  $\tau_{zx}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$  는 전단응력이다.

체적의 평형을 고려하여 응력이 작용하는 면적과 응력을 곱하여 면에서 작용하는 힘을 구한다.  $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0$  으로 취합하여  $dV = dx dy dz$  를 이용하여 다음과 같은 평형방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

위 식을 Galerkin 방법으로 다시 쓰면,

$$\int_V \left[ \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x \right) \phi_x + \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \phi_y + \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) \phi_z \right] dV = 0 \quad (7)$$

여기에서  $\Phi = [\phi_x, \phi_y, \phi_z]^T$  는  $u$  의 경계조건과 일치하는 임의의 변위이다. 만약  $n = [n_x, n_y, n_z]^T$  가 표면상의 점  $x$  에서 수직방향인 단위벡터라면 부분적분을 적용하면 식은 다음과 같이 된다.

$$\int_V \frac{\partial \alpha}{\partial x} \theta dV = - \int_V \alpha \frac{\partial \theta}{\partial x} dV + \int_S \alpha \theta n_x ds \quad (8)$$

여기에서  $\alpha$  와  $\theta$  는  $(x, y, z)$  의 함수이다. 이 식을 사용하여 식 (7)을 부분적분

하고 각 항을 다시 정리하면 다음의 식으로 된다.

$$\begin{aligned}
 & - \int_V \sigma^T \epsilon(\Phi) dV + \int_V \Phi^T f dV + \int_S [(n_x \sigma_x + n_y \sigma_{xy} + n_z \sigma_{xz}) \phi_x \\
 & + (n_x \sigma_{xy} + n_y \sigma_y + n_z \sigma_{yz}) \phi_y + (n_x \sigma_{xz} + n_y \sigma_{yz} + n_z \sigma_z) \phi_z] dS = 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기에서

$$\epsilon(\phi) = \left[ \frac{\partial \phi_x}{\partial x}, \frac{\partial \phi_y}{\partial y}, \frac{\partial \phi_z}{\partial z}, \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y}, \frac{\partial \phi_z}{\partial z} + \frac{\partial \phi_x}{\partial x}, \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial \phi_z}{\partial z} \right]^T \tag{10}$$

는 임의의 변위장  $\Phi$ 와 일치하는 변형률이다. 경계조건에서

$T_x'(n_x \sigma_x + n_y \tau_{xy} + n_z \tau_{xz}) = T_y'(n_x \tau_{xy} + n_y \sigma_y + n_z \tau_{yz}) = T_z'(n_x \tau_{xz} + n_y \tau_{yz} + n_z \sigma_z)$ 의 관계식이 성립하므로 집중하중에서  $(n_x \sigma_x + n_y \tau_{xy} + n_z \tau_{xz}) ds$ 는  $P_x$ 로 바꾸어 쓸 수 있다. 따라서 식 (9)로부터 3차원 응력해석을 위한 약형(weak form)으로 유도된다.

$$\int_V \sigma^T \epsilon(\phi) dV - \int_V \Phi^T f dV - \int_S \Phi^T T dS - \sum_i \Phi^T P = 0 \tag{11}$$

$\Phi$ 는  $u$ 의 지정된 경계조건을 만족하는 임의의 변위이다. 여기에서 첫째항은 내부 가상일을 나타내고 나머지 항은 외부 가상일을 나타낸다. 이산화된 영역에서, 위의 식(11)은 다음과 같이 된다.

$$\sum_e \int_e \epsilon^T D \epsilon(\Phi) dV - \left( \sum_e \int_e \Phi^T f dV + \int_L \Phi^T T dS + \sum_i \Phi^T P \right) = 0 \tag{12}$$

보간 순서에 따라,

$$\Phi = N \Psi \tag{13}$$

$$\epsilon(\Phi) = B \Psi \tag{14}$$

이 된다. 식 (12)의 내부 가상일 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_e \epsilon^T D \epsilon(\Phi) t dA = \int_e q^T B^T D B \Psi t dA \tag{15}$$

여기에서  $B$ 와  $D$ 의 모든 항이 상수라는 점을 고려하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_e \epsilon^T D \epsilon(\Phi) dV &= q^T B^T D B \int_e dV \Psi \\ &= q^T V_e B^T D B \Psi \\ &= q^T k^e \Psi \end{aligned} \quad (16)$$

가 된다. 위의 식에서  $k^e$ 는 요소의 강성행렬로 다음과 같이 주어진다.

$$k^e = V_e B^T D B \quad (17)$$

재료의 물성치 행렬  $D$ 는 대칭이므로 요소 강성행렬과 역시 대칭이다.  $k^e$ 의 강성 값을 전체 행렬의 위치에 더하면,

$$\sum_e \int_e \epsilon^T D \epsilon(\Phi) dV = \sum_e q^T k^e \Psi = \sum_e \Psi^T k^e q = \Psi^T K Q \quad (18)$$

전체 강성행렬  $K$ 는 대칭이고 띠를 이룬다. 외부 가상일 항의 처리는 퍼텐셜 에너지 정식화에서 하중 항의 처리에 포함되는 단계를 따라 수행되고,  $u$ 는  $\Phi$ 로 대체된다. 따라서

$$\int_e \Phi^T f dV = \Psi^T f^e \quad (19)$$

이고, 변분 정식화 속의 각 항들은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{내부 가상일} = \Psi^T K Q \quad (20 \text{ a})$$

$$\text{외부 가상일} = \Psi^T F \quad (20 \text{ b})$$

Galerkin식으로부터의 임의성 때문에

$$K Q = F \quad (21)$$

가 되고, 여기에서  $K$ 와  $F$ 는 경계조건에 의해 수정되며, 이 선형 연립방정식은 가우스 소거법이나 또는 다른 수치기법으로 계산하여 변위벡터  $Q$ 를 구할 수 있다.

### 3.2.2 구조해석

본 로봇의 구조적 안정성을 확인하기 위하여 로봇이 배관내부에 투입되어 청소 작업을 수행할 때 부하를 많이 받을 것으로 예상되는 특정한 요소부에 대해서 변위 및 응력을 확인하기 위하여 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 Fig. 3.2와 같이 각 주요부분에 대한 구조해석을 수행한다.

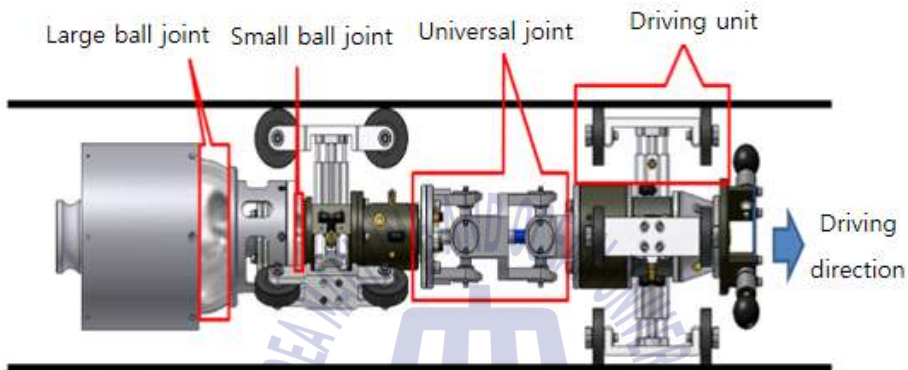


Fig. 3.2 Structural analysis for the major components

구조 해석은 ANSYS 로 3D 모델링하여 각 주요 부품의 재질에 대한 물성치와 예상 하중을 적용하여  $X, Y, Z$  방향에 대한 각각의 변형과  $X, Y, Z$  방향의 각 변형을 제공하여 더한 값에 제곱근을 구한 값 즉,  $D_T = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}$  으로 전체 변형량(total deformation) 및 등가응력 (equivalent stress) 을 계산한다.

#### 3.2.2.1 주행부

주행부의 구조해석은 Table 3.1과 같이 SUS304 의 물성치를 적용하고, 주행부에 작용하는 자중과 실린더로 밀어 주는 수직방향의 힘 등을 고려하여 Fig. 3.3 과 같이 3D 모델링을 이용하여 변형량과 등가응력을 계산한다.



Table 3.1 Mechanical properties for SUS 304

Items	Mechanical Properties
Material	SUS 304
Mass density ( $\rho$ )	8,000 kg/m <sup>3</sup>
Modulus of elasticity (E)	200 GPa
Tensile yield strength (Y <sub>p</sub> )	215 MPa
Poisson's ratio ( $\mu$ )	0.29

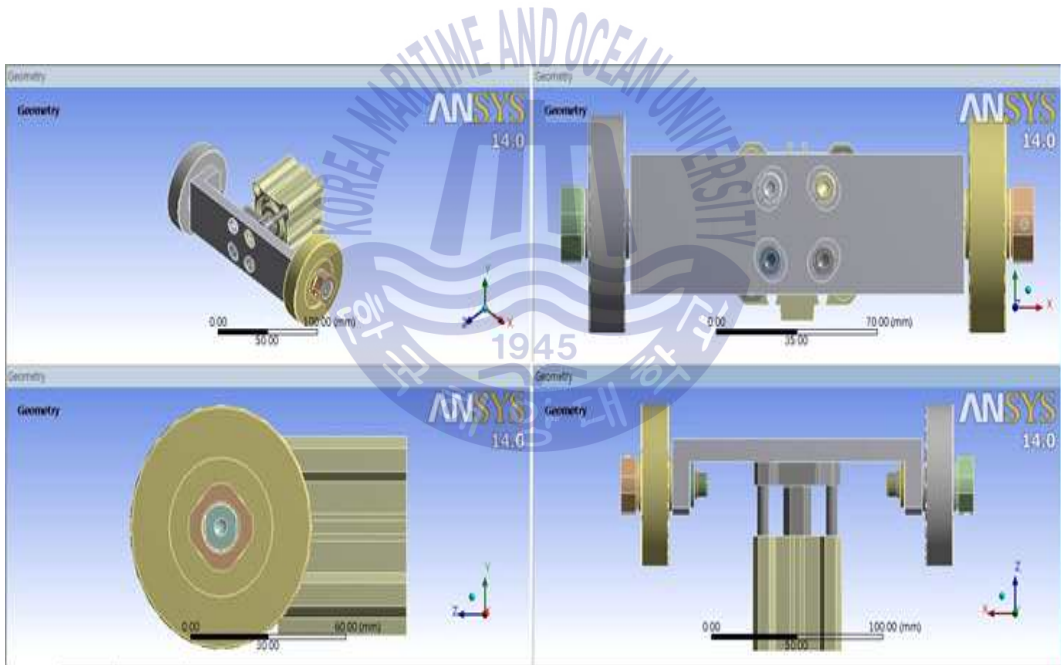


Fig. 3.3 3D modeling of the driving unit

구조해석 결과, 주행부의 X, Y, Z 방향 변형과 전체 변형량은 Table 3.2와 같으며 등가응력은 최대 11.87 MPa이다.

Table 3.2 Deformation results of the driving unit

Direction	Minimum [mm]	Maximum [mm]
X	-0.0003	0.0003
Y	-0.00027	0.00028
Z	$-1.76 \times 10^{-5}$	0.002
Total	0	0.002

### 3.2.2.2 유니버설 조인트

유니버설 조인트의 재질은 SUS304로 Table 3.1의 물성치를 적용하며, 유니버설 조인트에 작용하는 하중을 고려하여 Fig. 3.4와 같이 3D 모델링을 이용한 구조해석을 수행한다.

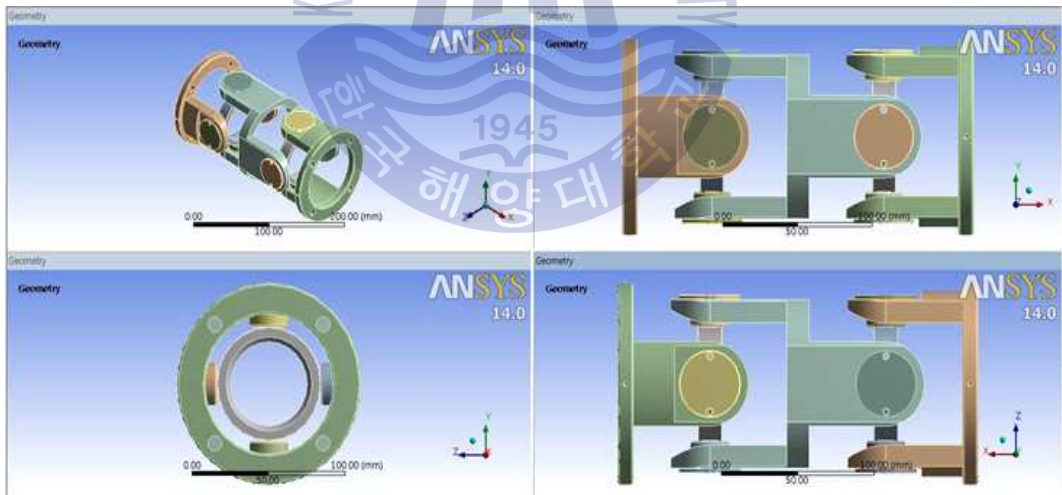


Fig. 3.4 3D modeling of the universal joint

구조해석 결과, 유니버설 조인트의 X, Y, Z 방향 변형과 전체 변형량은 Table 3.3과 같으며 등가응력은 최대 27.82 MPa이다.

Table 3.3 Deformation results of the universal joint

Direction	Minimum [mm]	Maximum [mm]
X	-0.0005	0.026
Y	-0.003	0.003
Z	-0.003	0.003
Total	0	0.026

### 3.2.2.3 소형 볼 조인트

소형 볼 조인트의 재질은 SUS304로 Table 3.1의 물성치를 적용하며, 소형 볼 조인트에 작용하는 하중을 고려하여 Fig. 3.5와 같이 3D 모델링을 이용한 구조 해석을 수행한다.

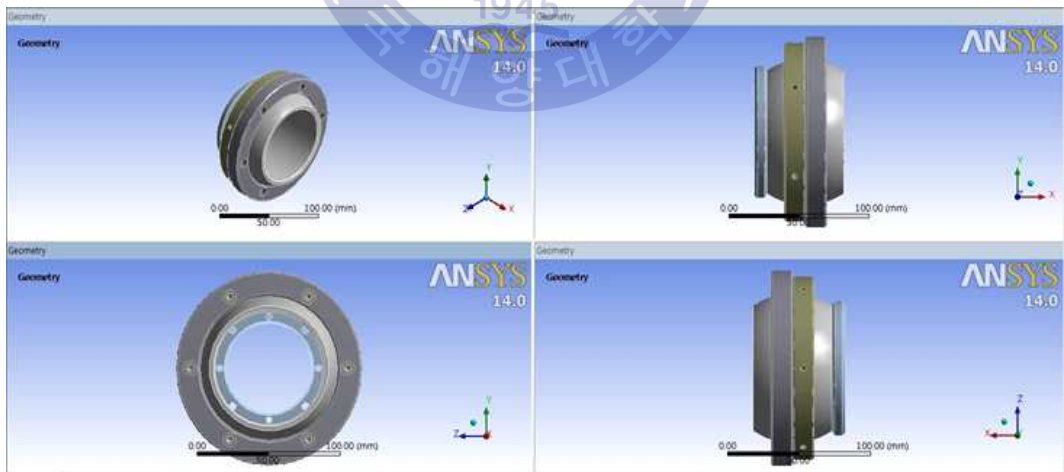


Fig. 3.5 3D modeling of the small ball joint

구조해석 결과, 소형 볼 조인트의  $X, Y, Z$  방향 변형과 전체 변형량은 Table 3.4와 같으며 등가응력은 최대 0.98 MPa이다.

Table 3.4 Deformation results of the small ball joint

Direction	Minimum [mm]	Maximum [mm]
X	$-4.44 \times 10^{-7}$	$9.77 \times 10^{-5}$
Y	$-3.35 \times 10^{-5}$	$3.39 \times 10^{-5}$
Z	$-3.44 \times 10^{-5}$	$3.48 \times 10^{-5}$
Total	0	$1.03 \times 10^{-3}$

### 3.2.2.4 대형 볼 조인트

대형 볼 조인트의 재질은 SUS304로 Table 3.1의 물성치를 적용하며, 대형 볼 조인트에 작용하는 하중을 고려하여 Fig. 3.6과 같이 3D 모델링을 이용한 구조 해석을 수행한다.

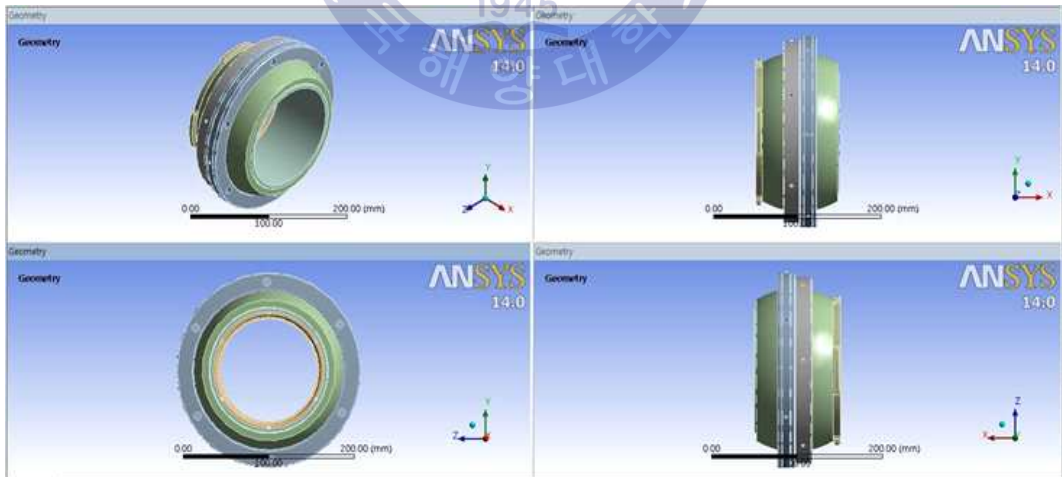


Fig. 3.6 3D modeling of the large ball joint

구조해석 결과, 대형 볼 조인트의  $X, Y, Z$  방향 변형과 전체 변형량은 Table 3.5와 같으며 등가응력은 최대 0.23 MPa이다.

**Table 3.5** Deformation results of the large ball joint

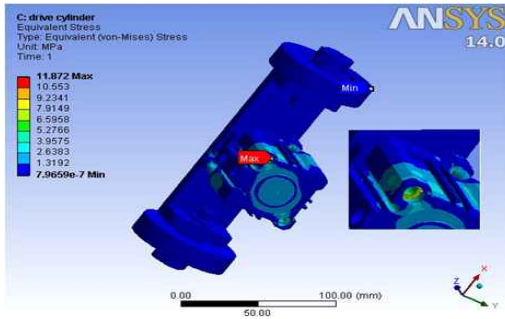
Direction	Minimum [mm]	Maximum [mm]
X	$-1.68 \times 10^{-7}$	$2.95 \times 10^{-5}$
Y	$-7.36 \times 10^{-6}$	$7.24 \times 10^{-5}$
Z	$-7.18 \times 10^{-6}$	$7.56 \times 10^{-6}$
Total	0	$2.95 \times 10^{-5}$

### 3.2.3 구조해석 및 고찰

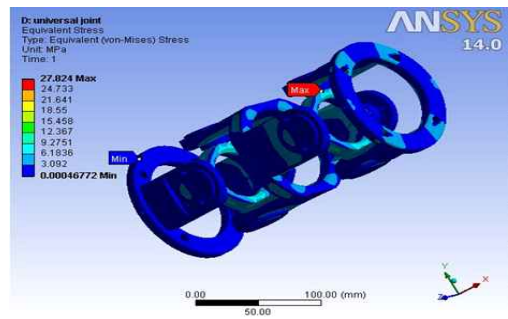
각 주요 부품에 작용하는 등가응력과 변위에 대한 구조해석 결과는 Table 3.6과 같으며, 최대 응력치 및 최소 응력치와 각각의 작용 위치는 Fig. 3.7과 같다.

**Table 3.6** Structural analysis results of the major parts

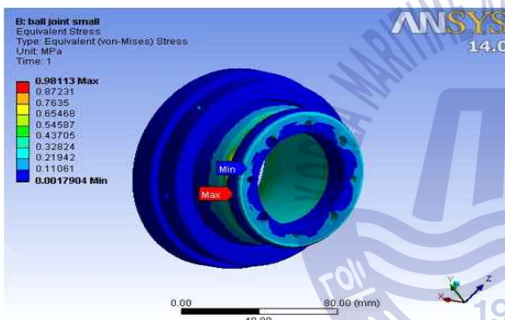
Items	Structural analysis results	
	Max. deformation [mm]	Max. stress [MPa]
Driving part	0.0020	11.87
Universal joint	0.0260	27.82
Small ball joint	0.0010	0.98
Large ball joint	0.0003	0.23



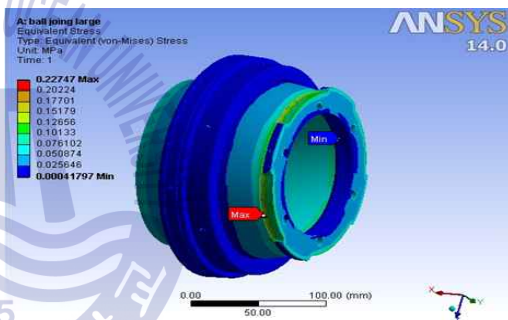
< Driving unit >



< Universal joint >



< Small ball joint >



< Large ball joint >

Fig. 3.7 Equivalent stress of the major parts

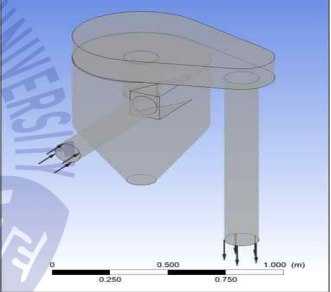
구조해석 결과로부터 주행부의 등가응력은 인장강도의 5.52%, 유니버설 조인트의 등가응력은 인장강도의 12.94%, 소형 볼 조인트의 등가응력은 인장강도의 0.46%, 대형 볼 조인트의 등가응력은 인장강도의 0.12% 이므로, 전체적으로 작용 하중에 대하여 각 주요 부품들은 모두 구조적으로 안전하게 설계된 것으로 판단된다.

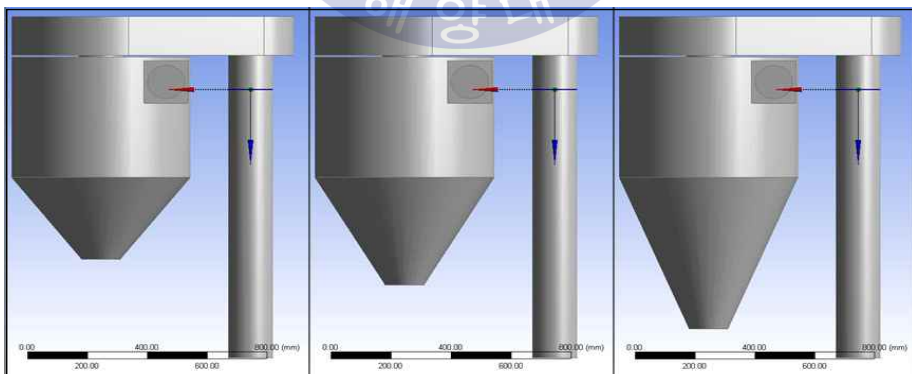
### 3.3 지원 장치 유동해석

#### 3.3.1 유동해석

외부로 배출되는 슬러지를 보다 효율적으로 분리시킬 수 있는 사이클론을 설계하기 위하여 Table 3.7과 같은 해석 조건으로 Fig. 3.8과 같이 사이클론의 콘(Cone) 각도가 45°, 60° 및 75° 일 경우에 대하여 사이클론 내에서의 유동 해석을 수행한다.

Table 3.7 Flow analysis conditions for the cyclone

Items	Flow analysis conditions	Remarks
Computational condition	Transient (unsteady state)	
Turbulent model	SST model	
Inlet flow rate	50 m <sup>3</sup> /min	
Inlet pressure	100 kPa	
Outlet pressure	57 kPa	



(a) 45°

(b) 60°

(c) 75°

Fig. 3.8 Cone angles of the cyclone

### 3.3.2 유동해석 및 고찰

3-종류의 하단부 경사각을 갖는 사이클론에 대한 각각의 유동해석 결과는 Fig. 3.9와 같다.

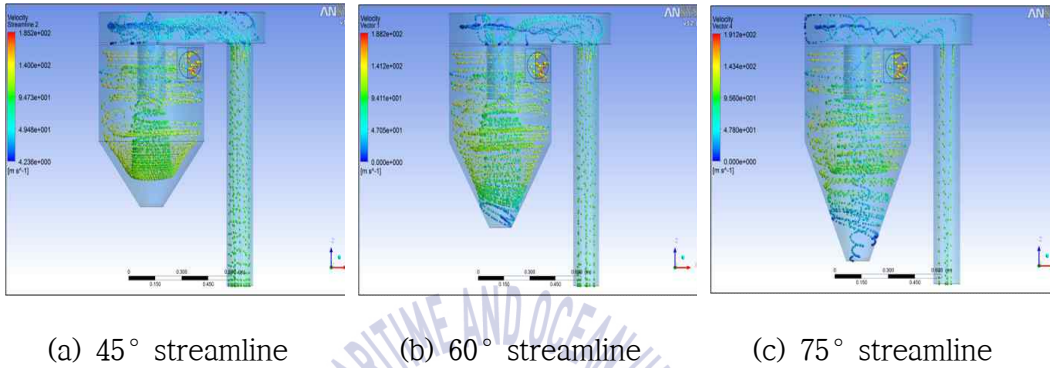


Fig. 3.9 Streamlines at particle tracking

Fig. 3.9 (a) 와 같이 하단부 경사각이 45° 인 경우, 공기 보다 가벼운 입자 또는 무거운 입자 모두 원심력에 의하여 충분히 가속된 후, 하단부에서 서로 분리되기 전에 출구 쪽으로 빨리 들어감을 알 수 있다. 이는 하단부의 각도가 작음에 따라서 길이가 짧아 입자의 분리를 위한 충분한 거리가 확보되지 못했기 때문이라 판단된다.

이에 반하여 (c) 와 같이 하단부 경사각이 75° 인 경우, 하단부의 길이가 출구의 위치에 비하여 상대적으로 너무 길기 때문에 분리된 공기보다 가벼운 입자가 출구 쪽으로 빠져 나가지 못하고 통속에서 맴돌이를 하고 있음을 알 수 있다

(b) 와 같은 하단부 경사각이 60° 인 경우, 무거운 입자는 하단부로, 가벼운 입자는 상부로 보다 잘 분리되므로 본 사이클론에는 하단부 경사각을 60° 로 설계한다.



## 제 4 장 제어 및 모니터링 시스템

### 4.1 통합 제어 및 모니터링 시스템

본 장에서는 앞에서 설계한 배관 청소로봇을 효율적으로 제어하기 위한 제어 및 모니터링 시스템에 대해서 연구한다. Fig. 4.1은 청소로봇의 제어시스템의 구성도로 진공펌프 및 워터제트를 구동하는 지원 장치 제어시스템과 로봇 본체를 제어 및 모니터링 하는 통합제어시스템으로 구성된다.

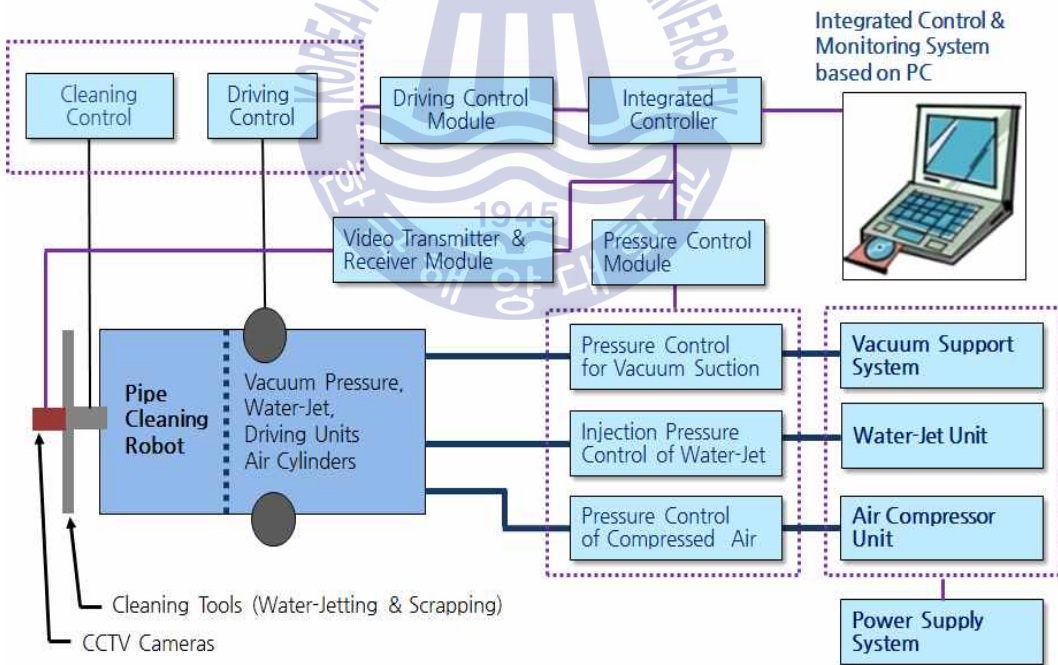


Fig. 4.1 Diagram of the integrated control system



먼저 제어 프로그램이 준비되었는지 확인하고 수동/자동 모드를 선택한 후 배관 청소를 위해 진공펌프를 이용하여 청소로봇의 전·후단 압력차를 발생시킨다. 압력차는 청소로봇에 설치되어 있는 압력계를 통하여 사용자가 실시간으로 모니터링화면을 통하여 볼 수 있도록 구성한다.

본 배관 청소로봇시스템의 P&ID(Piping & Instrument Diagram) 는 Fig. 4.3 에서와 같이 크게 4-종류의 제어부로 구성한다.

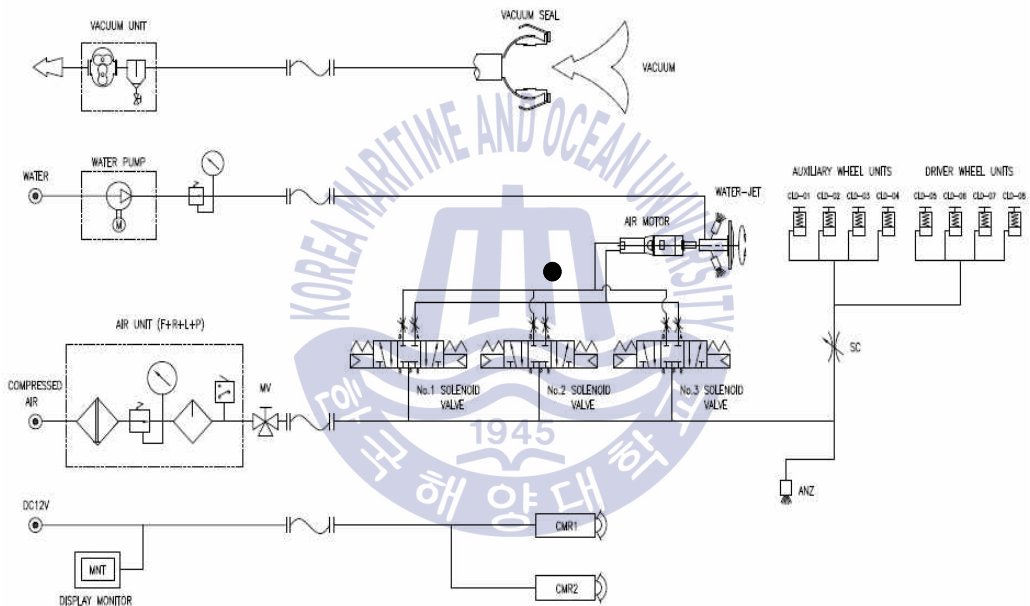


Fig. 4.3 P & ID of the integrated control system

① 진공 지원 장치 제어부

- . 청소구간 진공압력 유지용 및 슬러지를 흡입용 진공압력 제어

② 워터제트 제어부

- . 배관 내부 스케일 청소용 고압 워터제트 압력 및 유량 제어

③ 구동부 제어부

. 구동부 작동용 압축 공기 압력 및 유량 제어

④ 통합 모니터링 시스템

. 배관 내부 청소상태 실시간 확인용 감시 장치 제어

배관 청소 로봇 제어에 사용한 제어기는 습기 및 온도에 강한 특성을 갖추고 있어서 본 청소로봇의 사용 환경에서 안정적으로 사용할 수 있는 제어기로 판단되어 Table 4.1과 같은 LS 산전의 PLC(Programmable Logic Controller) 제어기를 사용한다.

통합 모니터링 시스템은 로봇의 동작 상태, 청소작업 결과를 점검하기 위한 신호처리 모듈 및 로봇의 작동 데이터들을 사용자가 쉽게 볼 수 있도록 전시 (display)하고 데이터베이스(data base)에 저장할 수 있는 GUI(Graphical User Interface) 기반의 모니터링 프로그램으로 구성한다. 신호처리 모듈은 로봇의 후방부에 설치하여 로봇과 함께 배관 내부를 주행하면서 로봇의 운전 상태 파악용 압력 자료와 청소작업 상태 확인용 카메라 모듈로부터의 영상자료 등을 취득하여 모니터링 프로그램으로 전송한다.

Table 4.1 Specifications of the PLC controller

Items	Specifications
Model	K7M-DR60U
PLC commend	Ladder diagram
Type of control	System control, vehicle operation control, I/O control
Driving units	Air Motor / cylinder
Control items	Driving motor control : 1-axis, air cylinder control : 8-axes
Digital I/O	Input : 60 points, output : 60 points
Analog I/O	Input : 8 points, output : 16 points
Input power	AC220 V. 1 $\Phi$ , 60 Hz
Environment	Temperature : 0~45 $^{\circ}$ C, humidity : less than 90% RH

GUI 기반의 모니터링 프로그램은 신호처리 모듈로부터 취득한 데이터를 사용자가 파악하기 쉽도록 GUI 화면에 전시하고, 취득한 압력자료 및 영상자료 등을 데이터베이스에 저장하여 청소 작업 전후의 배관 내부 상태를 감시 및 분석할 수 있도록 구성한다.

통합 모니터링 시스템의 개념도 및 구성도는 각각 Fig. 4.4 및 Fig. 4.5와 같으며, GUI 기반의 모니터링 프로그램이 구동되는 패널 PC를 중심으로 각 구성 장치들은 USB를 통해 연결되도록 구성한다.

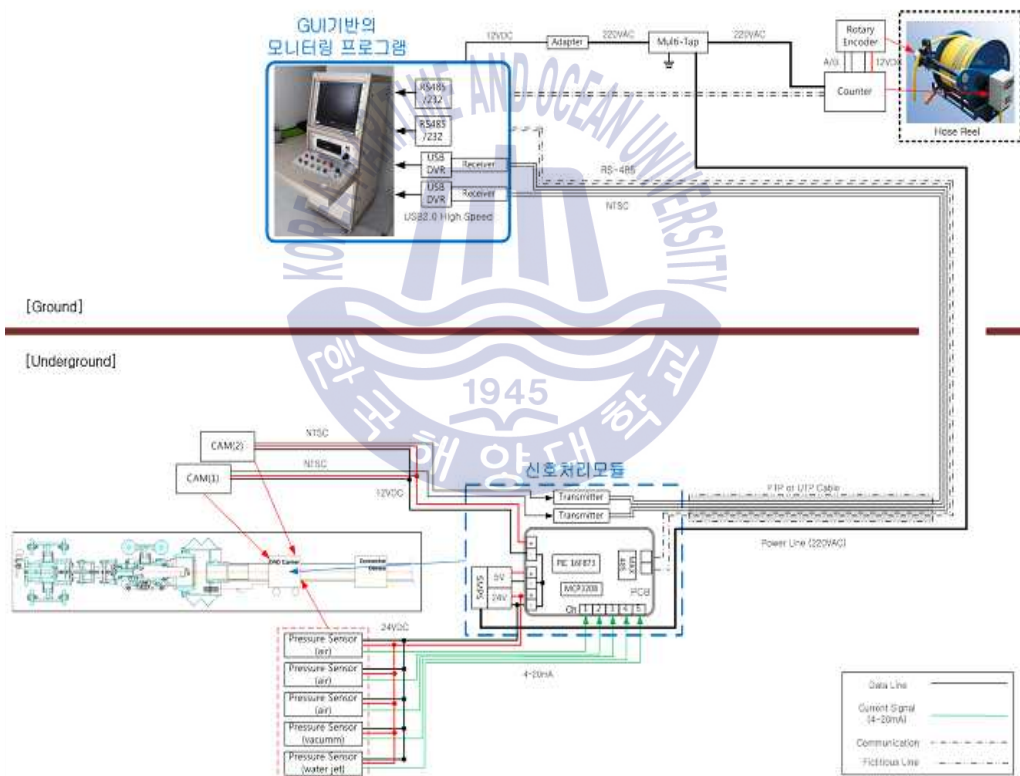


Fig. 4.4 Concept of the integrated monitoring system

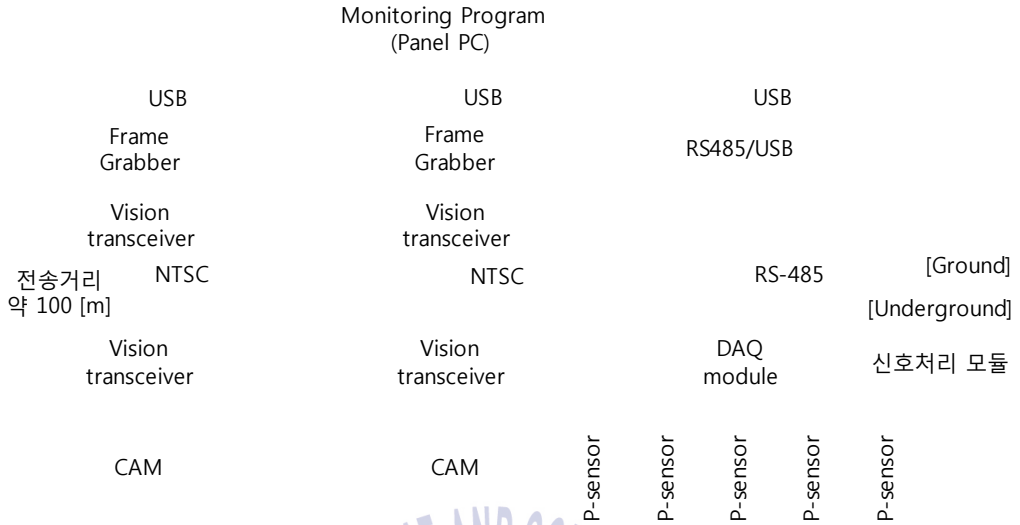


Fig. 4.5 Configuration of the integrated monitoring system

## 4.2 데이터 수집 및 신호처리 시스템

신호처리 모듈은 앞서 언급한 바와 같이 로봇의 동작 상태와 청소 작업 결과 데이터를 수집하기 위하여 개발한 것으로 크게 신호처리 장치, 영상전송 장치 및 전원공급 장치 등으로 구성된다.

로봇의 동작 상태는 5개의 압력센서로부터 계측한 압력 자료를 통하여 파악하고, 청소 작업 결과는 로봇의 후방에 설치된 카메라 모듈 2대로부터 취득한 영상 자료를 통하여 파악한다. 따라서 신호처리 모듈은 압력센서에서 취득한 압력 자료를 RS-485 통신으로 변환하여 전송할 수 있는 장치와 카메라 모듈로부터 수집한 영상자료를 원거리 전송할 수 있는 장치를 포함한다. 이와 더불어, 상용전원(AC220 V)을 공급받아 카메라와 압력센서 등에 직류 전원을 공급하는 SMPS(Switching Mode Power Supply)도 신호처리 모듈에 포함된다.

신호처리 모듈은 로봇 후부에 위치한 별도의 보조 캐리지에 탑재할 수 있도록 가능한 소형으로 설계 제작하고, 배관 내부의 가혹한 외부 환경으로

보호되도록 방수 및 방진기능(IP66)이 있는 박스(IP box) 내부에 설치한다.

#### 4.2.1 압력측정 장치

로봇 주행용으로 공압(pneumatic pressure)을 사용하고, 슬러지 흡입 배출용으로 진공압력(vacuum pressure)을 사용하며, 배관내부 청소작업용으로 고압의 워터제트(water-jet)를 사용하므로 로봇의 정상 동작 상태를 확인하기 위한 가장 효율적인 방법은 로봇 운전 시 각 부분에서 계측한 압력과 설계 압력을 비교하는 것이다. 따라서 압력 제어 프로그램은 각 부분에서의 계측압력이 비정상적으로 변화를 할 경우 즉각적으로 대응할 수 있도록 구성한다.

로봇의 작동상태를 확인하기 위한 압력센서의 사양 및 설치 위치는 Table 4.2와 같다. 로봇의 배관 내부에 설치되는 압력센서는 워터제트 및 로봇의 구동 의해 발생하는 진동, 로봇으로 공급되는 상용 전원 그리고 각종 전기 기기들로 인한 잡음(electric noise) 등에 노출되기 때문에 이러한 잡음에 영향이 적은 전류 출력의 압력센서를 선정하며, 그 중에서도 협소한 공간에 설치하기 위한 소형의 압력센서를 선정한다.

Table 4.2 Pressure measuring positions and ranges

Measuring position	Measuring purpose	Pressure range	Input power	Output signal
Pneumatic (forward)	Check the operation conditions of robot	0 ~ 1000 kPa	DC 11~28 V	Current 4~20 mA
Pneumatic (backward)				
Pneumatic (cylinder)				
Vacuum pressure	Check the cleaning conditions	-100 ~ 0 kPa		
Water-Jet pressure		0 ~ 150 kPa		

압력센서로부터 측정된 압력 자료들을 GUI 기반의 모니터링 프로그램으로 전송하는 과정은 다음과 같다.

- 압력센서로부터 측정된 압력 값을 전류신호(4~20 mA)로 출력
- 전류신호는 자체 개발한 DAQ(Data Acquisition) 모듈 내부의 정밀 저항 (250  $\Omega$ , 1%)을 거쳐 전압 신호(1~5 V)로 변환
- 전압신호는 ADC(Analog-to-Digital Converter) chip을 통해 12-bit의 정밀도로 인식
- ADC chip으로부터 측정된 압력 자료는 SPI(Serial Peripheral Interface) 통신을 통하여 MCU(Micro-Controller Unit)로 취득
- MCU는 취득한 압력 자료를 정해진 프로토콜(protocol)에 맞추어 RS-485 트랜시버 칩(transceiver chip)을 통해 RS-485통신 데이터로 원거리 전송

본 연구에서 RS-485 통신의 전송 거리는 약 100 m, 데이터 전송 속도는 19,200 bps로 설계한다. 일반적으로 RS-485 통신의 전송 거리는 데이터의 전송 속도와 관련이 있으므로 전송 속도가 19,200 bps인 경우에는 아래 Fig. 4.6과 같이 1,200 m 정도의 거리까지 통신이 가능하다.

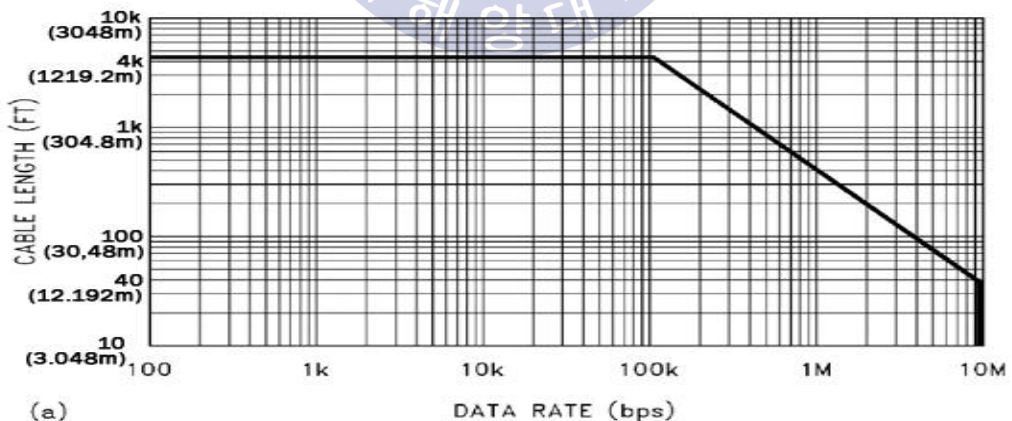


Fig. 4.6 Data rate and cable length of RS-485



또한 20 MHz의 오실레이터를 사용한다면 Table 4.3에서 볼 수 있듯이 오차율을 0.16 %까지 낮출 수 있다. 따라서 RS-485 통신의 전송 거리와 데이터 전송 속도에 대한 오차율을 고려한 시스템을 구현할 수 있다.

Table 4.3 Error rate of the communication rate (%)

Baud rate (K)	$F_{osc} = 20 \text{ MHz}$			$F_{osc} = 16 \text{ MHz}$			$F_{osc} = 10 \text{ MHz}$		
	K (baud)	Error (%)	SPBRG value (decimal)	K (baud)	Error (%)	SPBRG value (decimal)	K (baud)	Error (%)	SPBRG value (decimal)
0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	-	-	-	-	-	-	2.4	1.71	255
9.6	9.6	0.16	129	9.6	0.16	103	9.6	0.16	64
19.2	19.2	0.16	64	19.2	0.16	51	19.5	1.72	31
28.8	29.1	0.94	42	29.4	2.13	33	28.4	1.36	21
33.6	33.8	0.55	36	33.3	0.79	29	32.9	2.10	18
57.6	59.5	3.34	20	58.8	2.13	16	56.8	1.36	10
High	4.9	-	255	3.9	-	255	2.4	0	255
Low	1250.0	-	0	1000.0	-	0	625.0	0	0

압력센서로부터 출력된 신호를 변환하여 통신으로 전송하는 역할을 하는 DAQ 모듈은 150 ms 주기로 압력 값을 취득하여 RS-485 통신으로 전송하며, 신호처리 모듈의 SMPS로부터 공급받은 24 V 전압을 카메라에 공급되는 12 V로 변환하는 정전압 레귤레이터(regulator)도 내장하고 있다. 신호처리 모듈은 배관 내부에서 운용되므로 공간의 제약이 크기 때문에, 압력측정 장치의 DAQ 모듈도 최소화 되도록 설계한다. PCB 설계 도면과 DAQ 모듈의 회로 도면은 각각 Fig. 4.8 및 Fig. 4.9와 같다.

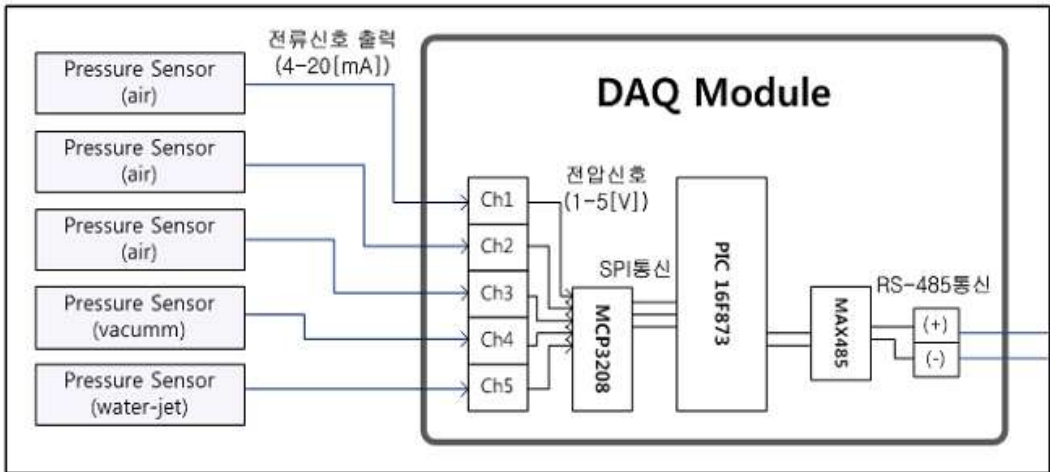


Fig. 4.7 Concept of the pressure measuring equipment

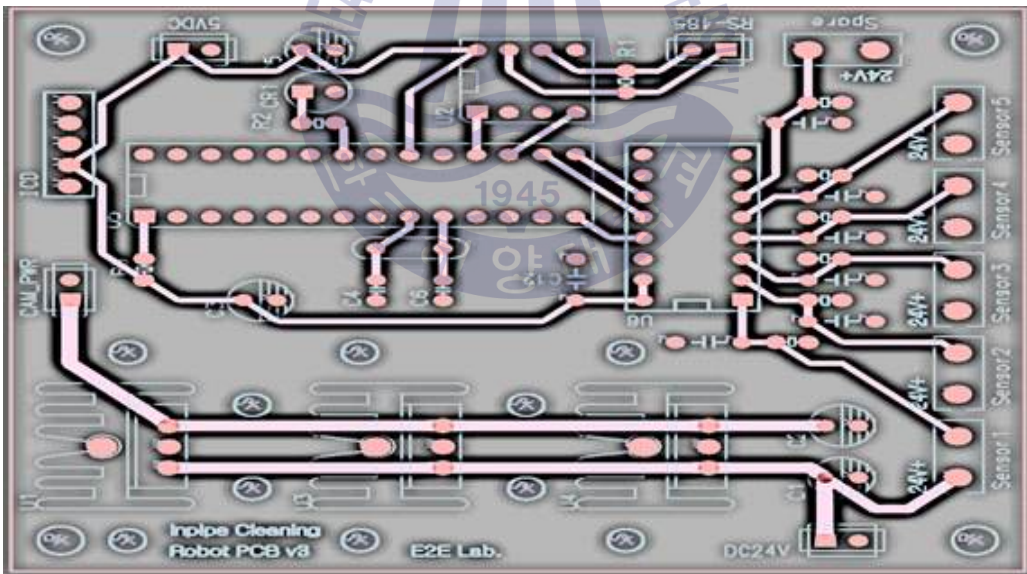


Fig. 4.8 PCB design of the DAQ module

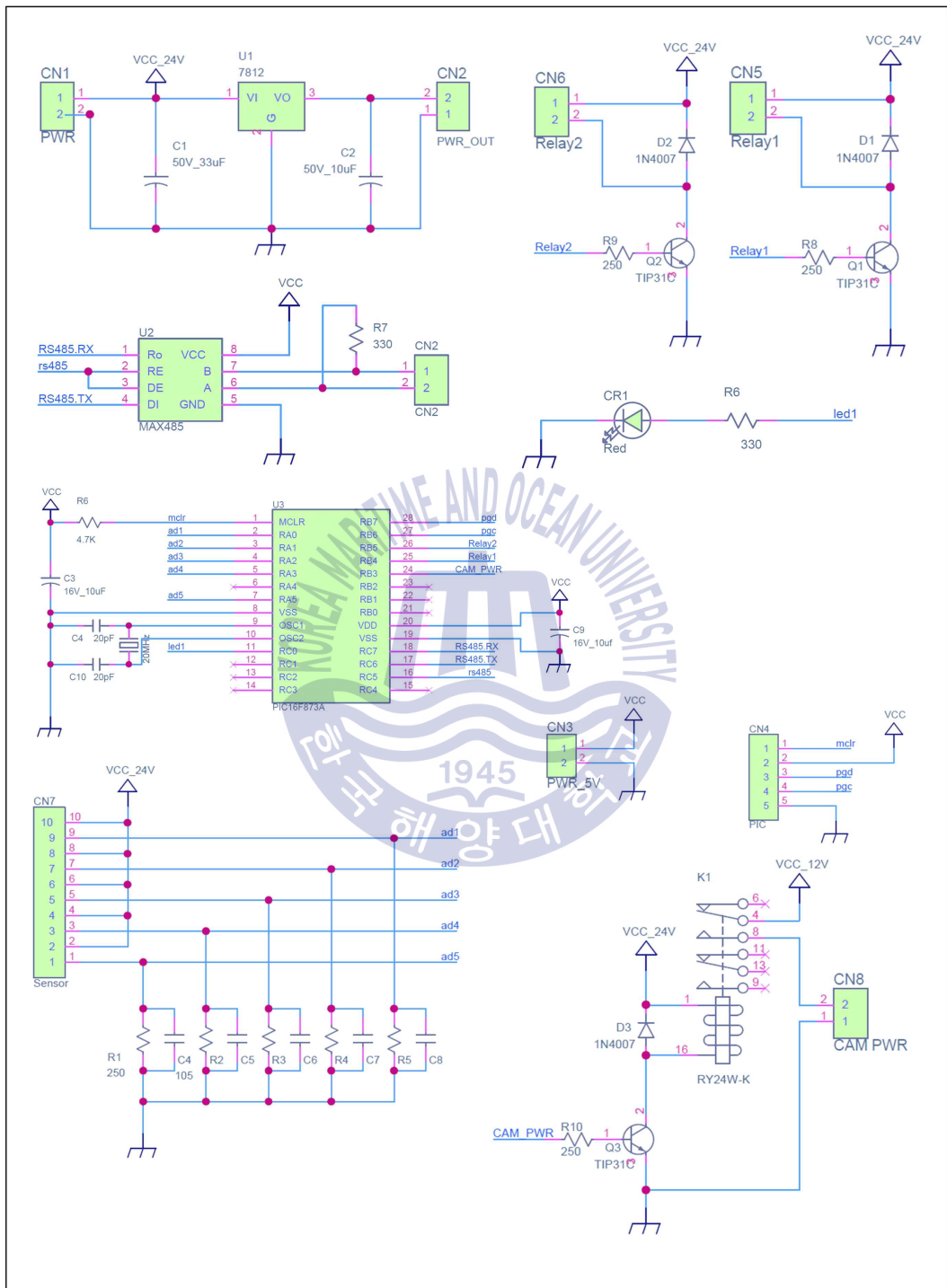


Fig. 4.9 Schematic of the DAQ module

**Table 4.4** Specifications of MCU (PIC16F873) to the DAQ module

Key Features	PIC16F873
Operating frequency	DC - 20 MHz
Resets (and delays)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash program memory (14-bit words)	4 K
Data memory (bytes)	192
EEPROM data memory	128
Interrupt	13
I/O ports	Ports A, B, C
Timers	3
Capture / compare / PWM modules	2
Serial communications	MSSP, USART
Parallel communications	-
10-bit Analog-to-Digital module	5 input channels

DAQ 모듈에서 사용된 MCU(PIC16F873)에는 10-bit 해상도의 ADC가 있지만, 압력 측정의 정밀도를 높이기 위하여 ADC칩(12-bit, 8ch)을 별도로 사용하였다. 로봇의 동작 상태를 판단하기 위하여 필요한 압력 값은 총 5개이므로 나머지 3개의 채널은 추후 장비의 확장성을 위하여 여분으로 남겨 둔다. 다른 센서가 추가될 것에 대비하여 DAQ 모듈의 MCU는 ICD(In-Circuit Debugger)를 통해 DAQ 모듈의 PCB에서 바로 내부 프로그램 수정이 가능하도록 설계한다.

#### 4.2.2 영상취득 장치

로봇이 배관내부의 청소작업을 수행한 후, 사용자가 배관 청소상태를 관찰하기 위하여 배관 내부를 촬영하고, 그 영상을 원거리 전송하여 GUI 기반의 모니터링 프로그램에 전시하도록 구현한다. 이러한 영상 취득 장치는 2대의 카메라 모듈로부터 배관 내부를 촬영하여 GUI 기반의 모니터링 프로그램으로

전송 할 수 있도록 Fig. 4.10과 같이 구성하며 각각의 세부 기능은 아래와 같다.

- 로봇에 설치된 2대의 카메라로 배관 내부를 촬영하여 영상신호 출력
- 출력된 영상은 원거리 영상전송 장치를 거쳐 원거리 전송
- 전송된 신호를 영상수신 장치를 통해 취득 후 프레임 그래버로 입력
- 입력된 아날로그 영상신호를 프레임 그래버(frame grabber)를 거쳐 디지털 신호로 변환
- 디지털 영상신호는 USB를 통해 GUI 기반의 모니터링프로그램에 전달
- GUI기반의 모니터링 프로그램에서 영상 디스플레이 및 압축코덱을 통해 저장

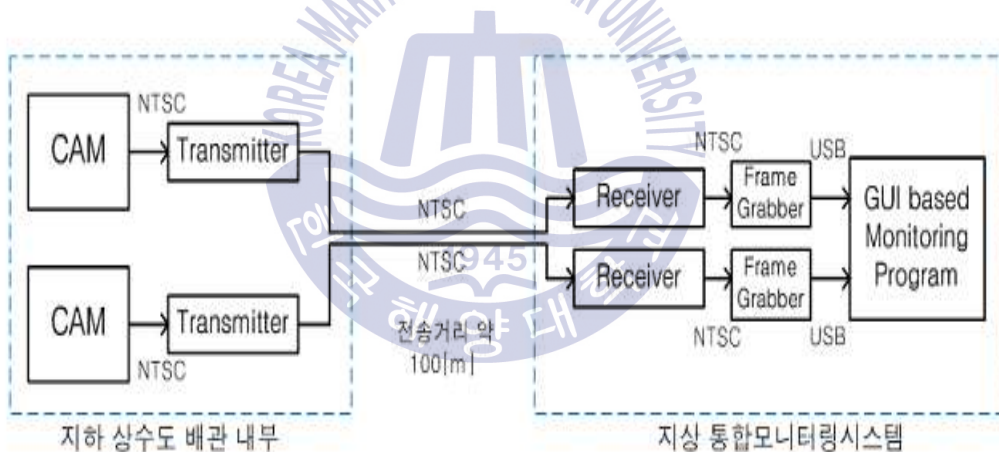


Fig. 4.10 Configuration of the image acquisition device

배관 내부에서는 어둡고 습한 환경 속에 워터제트로 청소 작업을 수행하기 때문에 카메라 모듈이 손상되기 쉽다. 따라서 카메라 모듈을 안전하게 사용하기 위하여 조명과 방수 케이스가 필수적이다.

또한, 카메라 모듈은 배관 내부의 표면을 관찰하여 청소 작업 결과를 관리자

에게 전시할 수 있을 만큼의 해상도를 가져야 하며, 공간적인 제한이 큰 배관 내부에서 사용되므로 크기가 작아야 한다. 따라서 선정된 카메라 모듈은 소형으로 LED가 내장되어 어두운 배관 내부에서 영상 취득이 가능하고, IP66 등급 이상의 방진 및 방수가 가능하여 다습한 배관 내부 환경에서 사용할 수 있도록 Table 4.5와 같은 사양을 갖는 제품을 선정한다.

2대의 카메라 모듈로부터 촬영한 영상을 GUI 기반의 모니터링 프로그램으로 보내기 위해서는 원거리 전송(100 m 이상)을 하여야 한다. 카메라 모듈로부터 출력되는 영상신호는 아날로그 NTSC(National Television System Committee) 방식이며, 이러한 아날로그 영상신호를 원거리 전송하기 위해서는 원거리 영상 전송 장치를 사용하여야 한다.

**Table 4.5** Specifications of the camera module

Items	Specifications
Imaging device	1/3" Color SONY Super head CCD II
Effective no. of pixels	410,000 pixels
Resolution	500 TV-line
Video output	1.0 V <sub>p-p</sub> (Sync. negative) termination 75 Ω ±10%
Angle of view	65°
Min. illumination	0 LUX - 4 m range / white LED on (6 EA)
Shutter speed	1/60 ~ 1/100,000 sec
IP grade	IP68
Input power	DC 12 V ±10 %
Current	Max. 300 mA (at DC 12 V) - LED ON
Type of lens	Fixed-focused lens (4~9 mm)
Dimension	Φ 27 × H 71.2 mm

아날로그 영상신호를 원거리로 송·수신하기 위한 장치로는 수동형(passive type) 과 능동형(active type) 송·수신 장치가 있으며, 각각의 특징은 Table 4.6 과 같다.

수동형의 경우, 컬러 영상을 최대 900 m 까지 전송할 수 있는 송신 장치(transmitter)와 수신 장치(receiver)로 구성되어 있으며, 송신 장치와 수신 장치에 별도의 외부전원을 공급하여야만 한다.

이와 달리 능동형의 경우, 송신 장치와 수신 장치의 구별이 없고, 별도의 외부 전원공급 없이도 컬러 영상을 최대 400 m 까지 전달할 수 있으므로, 본 연구에서는 상수도 배관 내 영상이 전달되는 거리인 약 100 m 이상을 만족하고, 로봇에 부착하는 송신장치로의 전원 공급이 필요 없는 능동형의 영상 송·수신 장치를 적용한다.

**Table 4.6** Specifications of the remote video transmitter and receiver

Items	Active Type		Passive Type
	Transmitter	Receiver	Transmitter / Receiver
Image input	CVBS 1.0 V <sub>p-p</sub> , at 75 Ω	51 Ω 1 ~ 2.5 V <sub>p-p</sub>	CVBS 1.0V <sub>p-p</sub> , at 75 Ω
Image output	51 Ω 1 ~ 2.5 V <sub>p-p</sub>	CVBS 1.0 V <sub>p-p</sub> , 75 Ω	
Input power	DC 12 V or AC 24 V	DC 12 V or AC 24 V	-
Current consumption	Less than 25 mA	Less than 25 mA	-
Transmission distance	Max. 900 m	Max. 900 m	Max. 400 m
Image ports	BNC-M / 4P Terminal Block	4P Harness / BNC-M	2P Terminal block or BNC-M
Dimension	56×17×17 mm	56×17×17 mm	56×17×17 mm

수동형의 영상 전송장치를 통해 전송된 영상은 FTP(Foiled Twisted Pair) 케이블을 거쳐 원거리로 전송되며, 전송된 영상을 수동형의 영상 수신 장치가 취득하여 프레임 그래버에 전달한다. 원거리 영상 전달 케이블로는 Table 4.6과 같이 일반 UTP(Unshielded Twisted Pair) 케이블에 비해 주위의 잡음이나 충격에 강해 신호를 안정적으로 전달할 수 있는 FTP 케이블을 적용한다. FTP 케이블은 총 8가닥의 선이 있으며, 이 중 4가닥이 영상신호를 전송하는데 활용되며, 2가닥은 RS-485 통신에 사용된다.

**Table 4.7** Comparative study on FTP cable and UTP cable

Items	FTP cable	UTP cable
Cable structure	Provides double interference protection layer as a conductive layer surrounding a twisted line	No separate conductive layer and only the circuit is twisted.
Error rate	Resistant to noise or shock and is hardly influenced by electromagnetic field	Data loss by electric device or magnetic device
Transmission distance	Approx. 150 m	Approx. 100 m
Data transmission speed	Max. 155 Mbps	Max. 100 Mbps
Applications	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Office, factory, outdoors, where high voltage current flows.</li> <li>• Where there is a strong shock</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No influence of electromagnetic fields on indoor contents</li> </ul>



수동형의 영상 수신 장치 및 FTP케이블을 통하여 전송된 영상은 프레임 그래버(frame grabber)로 전달된다. 프레임 그래버는 아날로그 영상 신호를 GUI 기반의 모니터링 프로그램이 구동되는 패널 PC가 인식할 수 있는 디지털 신호로 변환하는 역할을 한다.

현재 CCTV와 같은 감시 카메라 시스템을 운용하는데 있어 다양한 프레임 그래버가 사용되지만, 이러한 프레임 그래버는 주로 아날로그 영상신호를 디지털 신호로 변환하여 자체 데이터베이스에 저장하는 역할을 하며, 부피가 크고 고가여서 GUI 기반의 모니터링 프로그램과 연동하기에는 어려운 점이 많다.

이와 달리 본 연구에서 사용한 로봇 비전 시스템(robot vision system)용 소형 프레임 그래버는 아날로그 영상신호를 디지털 신호로 변환하는 역할만 수행하고 영상을 저장하는 하드웨어 없이 USB를 통하여 패널 PC와 연결되므로 모니터링 프로그램에서 실시간 영상 디스플레이 및 저장이 가능하다.

본 연구에 사용된 프레임 그래버의 기술 사양은 Table 4.8과 같다.

**Table 4.8** Specifications of the frame grabber

Items	Specifications
Image input	NTSC/PAL (RCA, S-Video)
Image capture	Capture 640 x 480 images at 30 frames per second
Image output	USB 2.0 high speed interface (480 Mbps)
Image formats	RGB16, RGB24, RGB32, Y8(gray), YUV422
Input power	Operation via USB port (using USB bus power)
Dimension	L55 x B54 x H24 mm
Remarks	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Video recording and video can be used as video input source</li> <li>• Multi-buffering enables continuous image processing</li> </ul>

### 4.2.3 전원공급 장치

로봇의 후방에 설치된 신호처리 모듈의 DAQ 모듈, 카메라 모듈, 압력센서에 전원을 공급하기 위해서는 원거리 전력 수송이 이루어져야 한다. 하지만 직류 전원을 원거리 전송할 경우 전압 강하가 발생하여 효율이 낮기 때문에 교류 전원을 공급하여 신호처리 장치에서 직류로 변환하여 사용한다. 교류전원은 일반 상용전원인 220 V를 공급하며, 신호처리 장치 내부에 탑재된 SMPS에 의해 직류(5 V 또는 24 V)로 변환된다. DC 5 V 전원은 DAQ 모듈의 MCU 및 각종 소자들을 구동하는데 사용되고, DC 24 V 전원은 압력센서에 공급된다. 카메라 모듈의 경우 SMPS에서 출력되지 않는 DC 12 V 전원을 공급하여야 하기 때문에 DAQ 모듈 내부에 12 V 정전압 레귤레이터를 병렬로 연결하여 DC 24 V 전원을 DC 12 V로 변환하여 사용할 수 있도록 Fig. 4.11과 같이 전원 공급 체계를 구성한다.

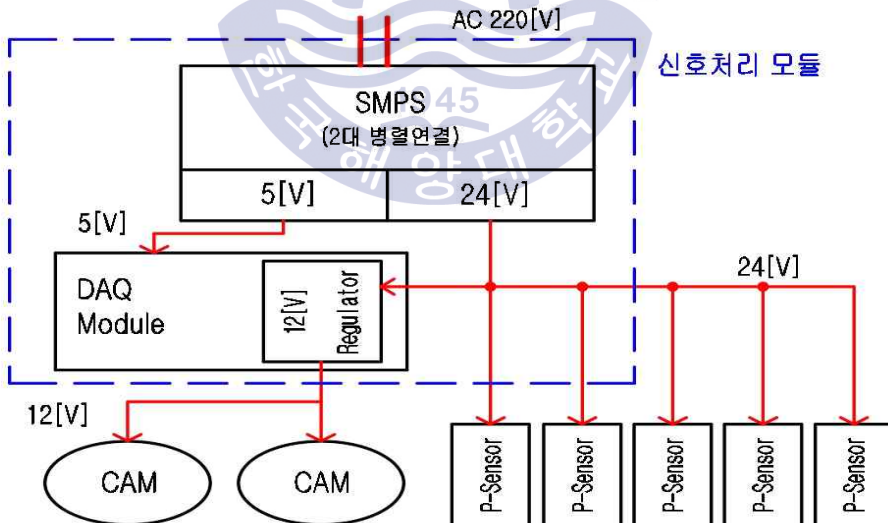


Fig. 4.11 Power supply system of the signal processing module

#### 4.2.4 장치 구성

통합 제어시스템의 신호처리 모듈은 다습한 상수도 배관 내부에서 사용되기 때문에 방진·방수 기능이 필수적이다. 따라서 Fig. 4.12와 같이 신호처리모듈을 IP66등급 이상의 방수·방진 기능을 가지고 있는 ABS재질의 박스 내부에 설치한다. 또한 신호처리모듈에 공급되는 전원선과 FTP 케이블은 박스에 케이블 그랜드(cable gland)를 설치하여 연결하며, 카메라모듈의 영상신호를 원거리로 전송하는 원거리 영상전송장치도 동일한 박스에 설치한다.

신호처리모듈에서 보낸 영상신호를 수신하는 영상 수신장치와 프레임 그래버도 신호처리모듈과 마찬가지로 산업현장의 외부 분진으로부터 보호하기 위해 Fig. 4.13과 같이 동일한 사양의 박스 내에 설치한다.



Fig. 4.12 Prototype of the signal processing module

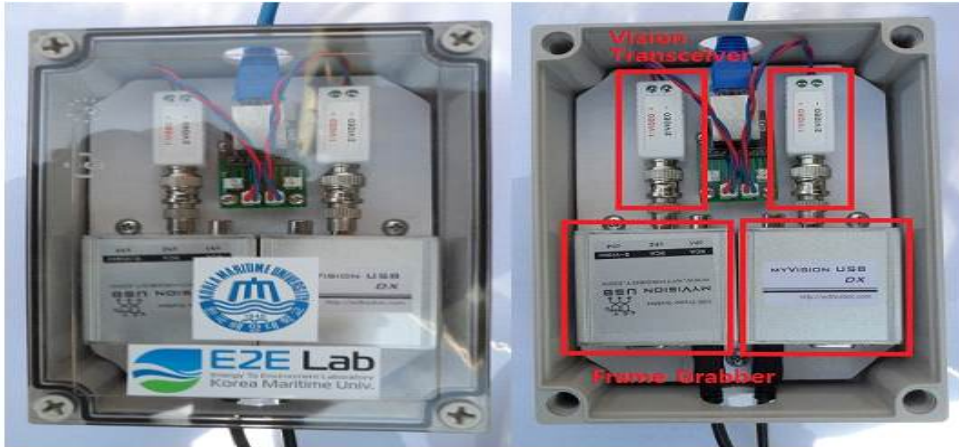


Fig. 4.13 Prototype of the video frame grabber and receiving device

### 4.3 GUI 기반 모니터링 시스템

GUI 기반의 모니터링 프로그램은 신호처리 모듈로부터 수집한 데이터를 사용자에게 전시하고 데이터베이스에 저장하는 역할을 한다. 로봇을 운용하는 사용자는 모니터링 프로그램에 전시되는 압력 값의 변화와 영상 자료를 확인함으로써 로봇의 동작 및 배관 내부의 상태를 확인할 수 있으므로 GUI 기반의 모니터링 프로그램은 아래와 같은 정보를 화면에 표시한다.

- 배관 내부의 카메라모듈로부터 취득한 영상
- 로봇의 주행을 확인하기 위한 공압
- 로봇의 청소작업용 진공압력 및 워터제트 압력

GUI 기반의 모니터링 프로그램은 LabVIEW로 작성하여 패널 PC에 설치하며, 패널 PC는 터치스크린(touch screen) 방식으로 동작되므로 산업현장에서 사용자가 다루기 편리하고 GUI 화면을 잘 인식할 수 있기 때문에 본 연구에서 다루고 있는 모니터링 시스템에 적합한 특성을 가지고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 압력 데이터는 RS-485 통신을 통해 전달되고, 영상

은 원거리 영상 전송장치를 통해 전달된다. 압력 데이터는 신호처리 장치의 DAQ 모듈로부터 전달받아 모니터링 프로그램에서 사용자가 인식하기 쉬운 압력 값(kPa 또는 MPa 단위)으로 변환한다. 변환된 압력 값은 인디케이터 및 숫자 값으로 전시되고, 전시된 값은 저장 날짜와 시간을 파일명으로 하는 CSV(Comma Separated Value) 파일로 데이터베이스에 저장된다. 이와 더불어, LabVIEW로 작성된 모니터링 프로그램에 실시간으로 영상을 전시하기 위하여 NI(National Instrument)의 영상처리 소프트웨어인 IMAQdx를 활용하여 영상을 GUI 기반의 모니터링 프로그램에 전시 및 AVI(Audio Video Interleave) 포맷으로 저장한다. 영상을 저장하는 과정에서는 데이터베이스에 저장되는 용량을 최소화하기 위하여 압축코덱(compression codec, Microsoft MPEG-4 Video Codec V2)을 사용한다. GUI 기반의 모니터링 프로그램의 운용화면 및 프로그램의 내부 소스코드(source code)는 각각 Fig. 4.14 및 Fig. 4.15와 같다.



Fig. 4.14 GUI-based monitoring program

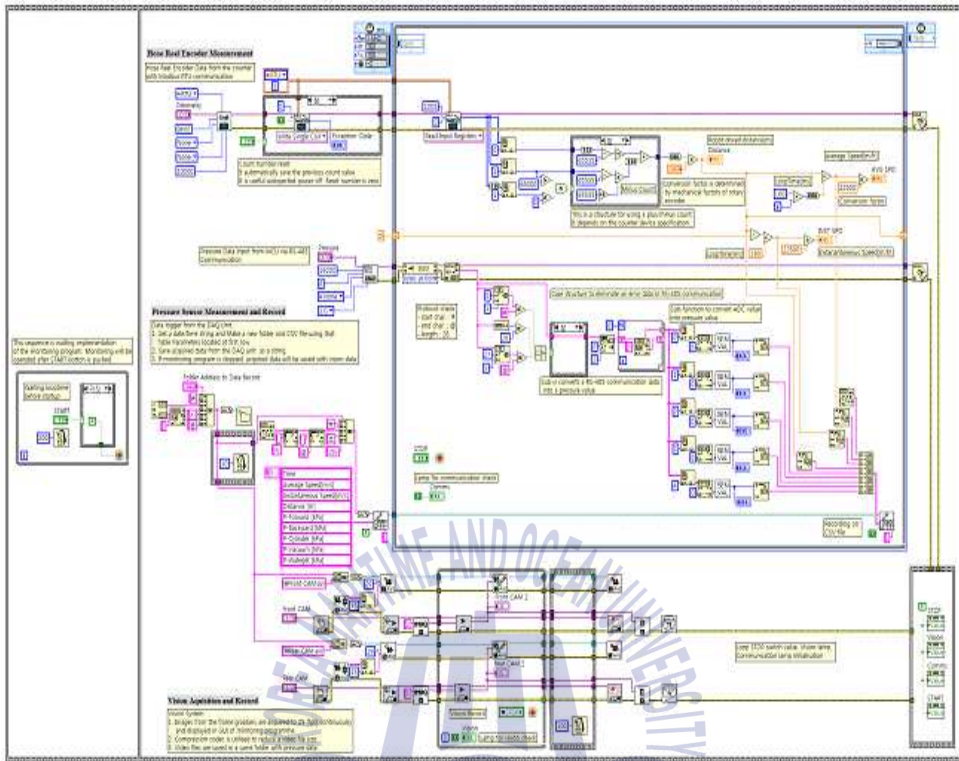


Fig. 4.15 Source code of the GUI-based monitoring program

### 4.3.1 장치 구성

본 로봇의 구동용 에어 모터 및 에어실린더들에 공급되는 압축공기의 압력과 유량을 제어 할 수 있도록 공압식 제어기를 구성하며, Fig. 4.16과 같이 로봇에 부착된 카메라를 통해 영상정보를 확인 할 수 있는 영상모니터 및 영상정보 저장장치를 한 대의 콘솔에 배치한다.

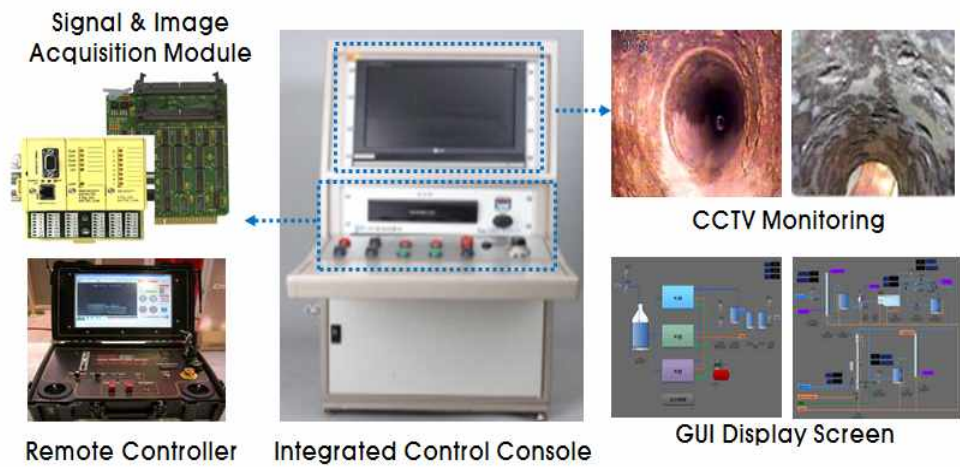


Fig. 4.16 Prototype console of the integrated control and monitoring system

입력 데이터를 취득하여 전송하는 기능을 갖는 DAQ 모듈은 Fig. 4.17과 같이 구성한다.

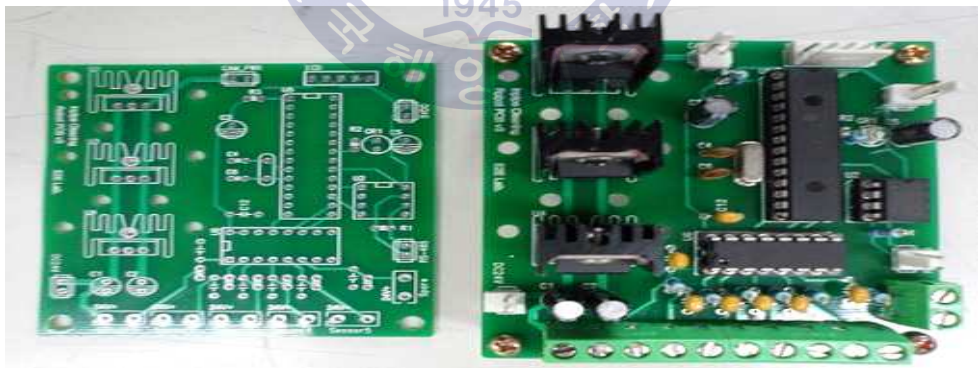


Fig. 4.17 Prototype of the DAQ module

## 제 5 장 실험 및 실험 결과

### 5.1 실험 환경

배관 청소로봇 시스템을 실험하기 위한 구성요소는 Fig. 5.1과 같이 크게 테스트 벤치, 배관 청소로봇, 외부장치 연결기, 로봇 제어기, 진공 지원 장치, 워터제트 지원 장치 등으로 구성된다.



Fig. 5.1 Major test equipments of the pipe cleaning robot system

본 실험에 사용된 테스트 벤치는 Fig. 5.2 및 Fig. 5.3과 같이 300A 직관 및 곡관(상·하 방향 22.5° 및 좌·우방향 45°)을 사용하여 실제 매설된 상수도관과 같은 형상으로 구성한다.



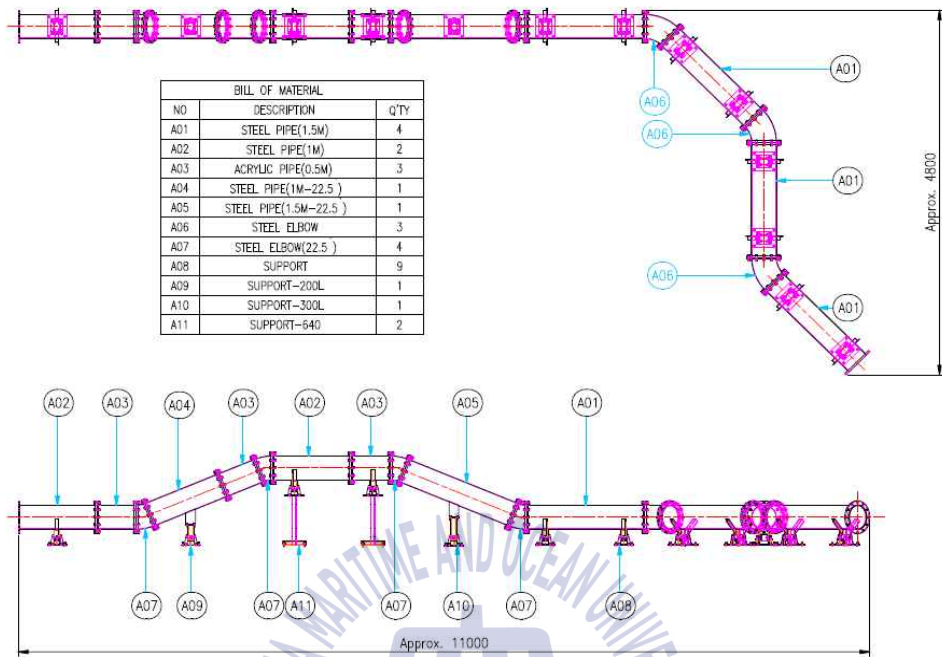


Fig. 5.2 Dimension of test bench for the pipe cleaning robot

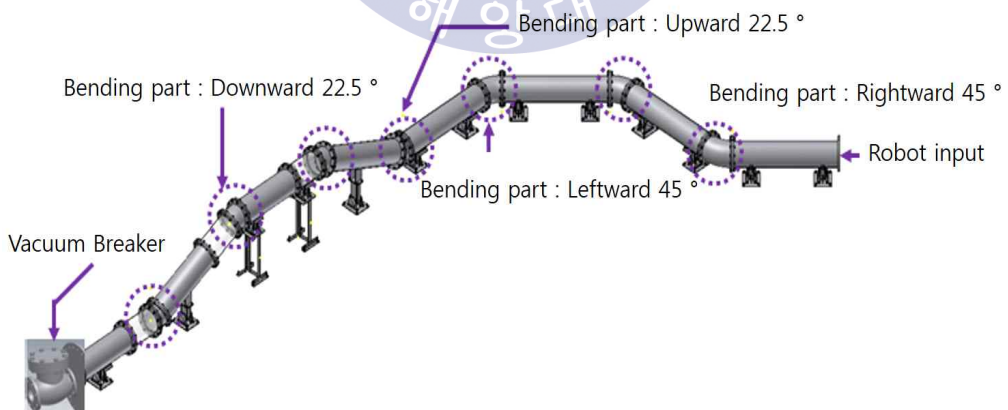


Fig. 5.3 Configuration of test bench for the pipe cleaning robot

## 5.2 주행 시뮬레이션

Fig. 5.4와 같이 조립한 로봇 본체를 300A 직선 배관 구간에 투입하여 전진 및 후진방향으로 이동하면서 Max. 45° 곡관부를 통과할 때의 각 부품들 간에 걸림 또는 간섭 여부 등을 확인하기 위하여 Fig. 5.5와 같이 Auto-CAD를 이용하여 2D 주행 시뮬레이션을 수행한다.

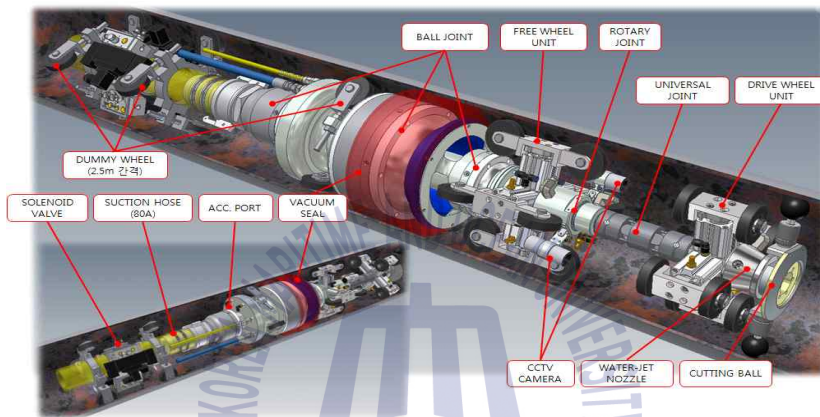


Fig. 5.4 Configuration of the vacuum suction type pipe cleaning robot

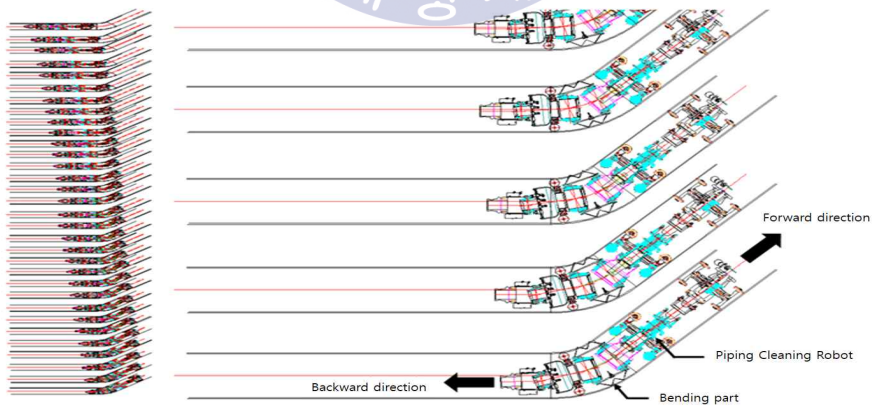


Fig. 5.5 Movement in the elbow (Max. 45°)

2D 주행 시뮬레이션 결과, 각 유연연결구들이 직관은 물론 Max. 45° 곡관에서도 원활하게 작동함을 확인하였다.

또한, 실제 설계형상으로 3D 애니메이션(animation)을 제작하여 배관 내에서의 각 구성품들의 작동 메카니즘들을 정밀 분석한 결과, 상호 간섭이나 곡관에서의 배관과의 걸림 등이 없음을 확인한 후에 시제품을 제작하였다.

## 5.3 실험 및 고찰

### 5.3.1 로봇 성능 실험

Fig. 5.6과 같이 실제 매립된 상수도관과 같은 환경을 구현할 수 있도록 직선부 및 곡관부(상하: 22.5°, 좌우: 45°)를 갖는 총 길이 12 m 인 테스트벤치를 이용하여 본 연구를 통해 개발한 배관 청소로봇 시스템에 대하여 아래와 같이 4-종류의 성능실험들을 수행한다.

- 주행 속도 실험
- 세척속도 실험
- 워터제트 분사 실험
- 통합 제어 및 모니터링시스템 성능실험

Fig. 5.7과 같이 300A 상수도관과 같은 규격의 아크릴 관측창 4 개를 테스트 벤치 곡관 전단부에 각각 배치하여 Fig. 5.8과 같이 각 관측창을 통하여 로봇이 곡관부를 통과할 때의 주행 거동상태를 보다 자세히 관찰할 수 있도록 구성한다.



Fig. 5.6 Layout of performance test for the pipe cleaning robot



Fig. 5.7 Dimension of the observation pipe (300A)



Fig. 5.8 Observation pipes in the test bench

본 성능시험에서 사용한 테스트벤치 및 관련 지원 장치들은 굴착작업을 제외한 거의 모든 부분에서 매립 상수도관에서의 청소작업 환경과 같은 실험환경을 구현할 수 있도록 Fig. 5.9와 같이 각 장비들을 구성한다.

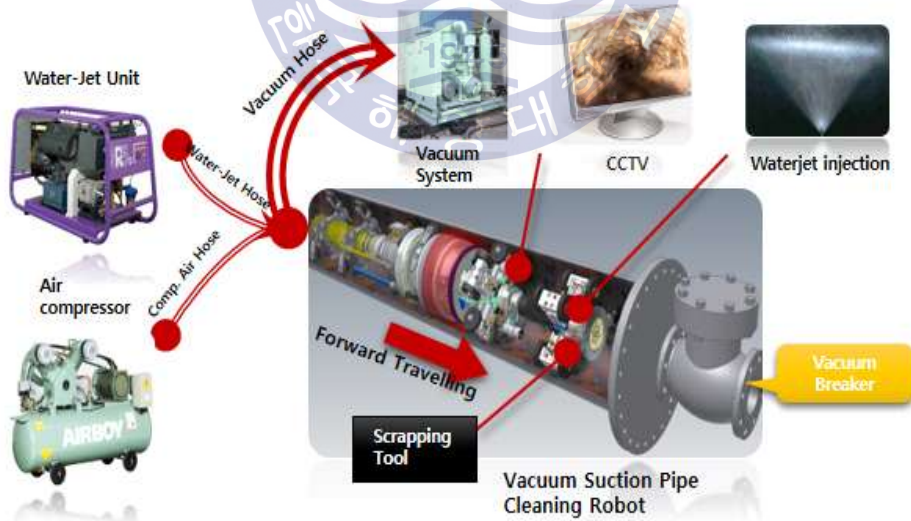


Fig. 5.9 Configuration of the performance tests

### 5.3.2 주행 속도 실험

본 실험은 테스트벤치에서 워터젯 분사 및 진공 압력의 구현 없이 로봇의 최대 주행 속도만을 측정하기 위하여 수행하였다. 청소로봇의 주행 속도는 테스트벤치 전체 길이와 로봇이 출발 지점에서 목표지점까지의 이동 시간을 측정하여 계산된 값과 실제 실험값을 비교하는 방법으로 측정하였다.

Fig. 5.10에서 보는 바와 같이 테스트 벤치의 총길이 12 m 를 주행하는데 3분 2초 소요된 것으로 측정되어 본 연구 로봇이 최대 3.75 m/min 로 주행할 수 있음을 확인하였으며, 본 연구에서의 목표 주행 속도 2.5 m/min 와 비교하여 약 50% 정도 더 빨리 주행할 수 있음을 확인하였다.



Fig. 5.10 Driving speed test of the pipe cleaning robot

### 5.3.3 세척 속도 실험

배관 청소로봇의 세척 속도 실험은 실제 청소작업과 같이 약 15 MPa 의 분사압력으로 워터제트를 분사하면서 주행 속도 실험과 동일한 측정방법으로 실험을 수행하였다.

Fig. 5.11에서 보는 바와 같이 테스트 벤치의 총길이 12 m 를 청소하는데 약 4분 7초 정도 소요된 것으로 측정되어, 세척 속도가 약 2.5 m/min 임을 확인하였다. 테스트벤치용 배관을 노후 배관이 아니고 신관으로 제작하여 배관 내부 세척도에 대하여 판단할 수는 없었으나, 워터제트를 균일하게 분사하면서 주행하였음을 확인하였다.

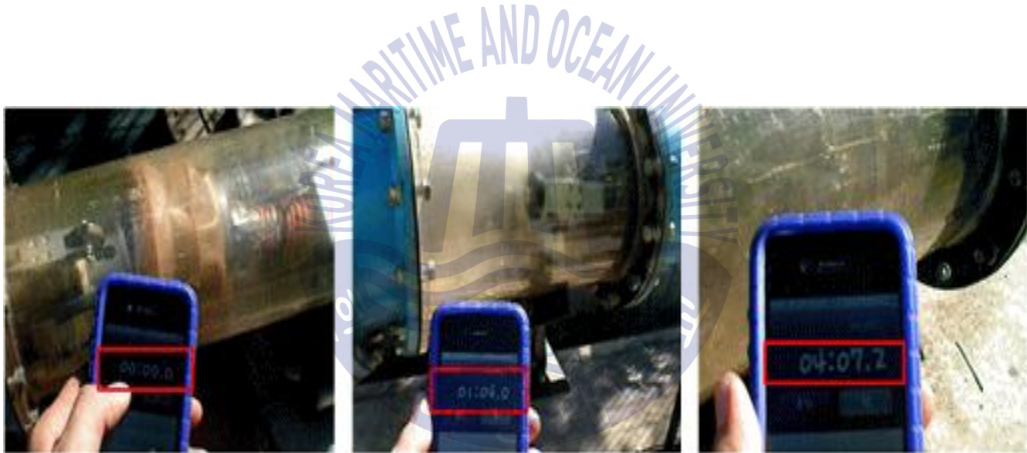


Fig. 5.11 Cleaning speed test of the pipe cleaning robot

### 5.3.4 워터제트 분사 실험

배관 청소로봇에 공급되는 워터제트 분사 압력에 대한 시험은 워터제트 지원 장치에 부착되어 있는 압력 게이지 값을 읽어서 확인하였다. Fig. 5.12에서와 같이 워터제트 분사압력을 10 MPa로부터 최대 100 MPa 까지 임의의 압력으로 조정하여 Fig. 5.13과 같이 실험한 결과, 로봇의 워터제트 분사노즐을 통하여 잘 분사됨을 확인하였다.

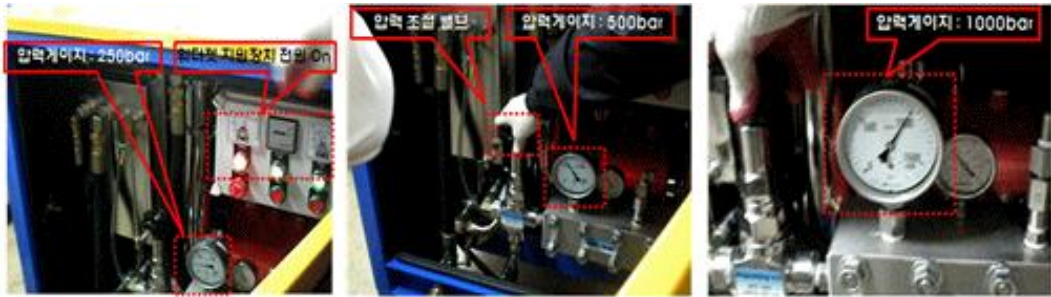


Fig. 5.12 Injection pressure test of the water-jet unit



Fig. 5.13 Water-jet injection test of the pipe cleaning robot

### 5.3.5 통합 제어 및 모니터링 시스템 실험

압력측정 장치의 DAQ 모듈의 동작 테스트를 수행하였다. DAQ 모듈에서 MCU는 ADC 칩(MCP3208)에 SPI 통신으로 압력데이터를 취득하며, 이를 위해서는 MCU(master 기능)가 클럭(clock)을 생성하여 ADC 칩(slave device)에게 공급한다. ADC 칩은 MCU로부터 클럭을 공급받아 동기화되며, MCU의 데이터 요청



에 따라 정해진 데이터를 응답한다. 이러한 DAQ 모듈 내부의 동작 파형은 Fig. 5.14 및 5.15와 같다. Fig. 5.14에서 제일 위쪽에 나타나는 파형은 MCU에서 ADC 칩으로 전송되는 클럭이며, 중간에 위치한 파형은 MCU가 클럭과 함께 ADC 칩에게 데이터를 요청(MOSI, Master Output Slave Input)하는 파형이다. 끝으로 제일 아래에 위치한 파형은 ADC 칩이 MCU가 요청한 데이터에 대한 응답(MISO, Master Input Slave Output)을 보내는 파형이며, 이 파형은 MCU가 요청한 채널에 대한 ADC 값을 의미한다. SPI 통신을 통한 데이터의 요청 및 응답에 대한 상세파형은 Fig. 5.16 및 5.17과 같다.

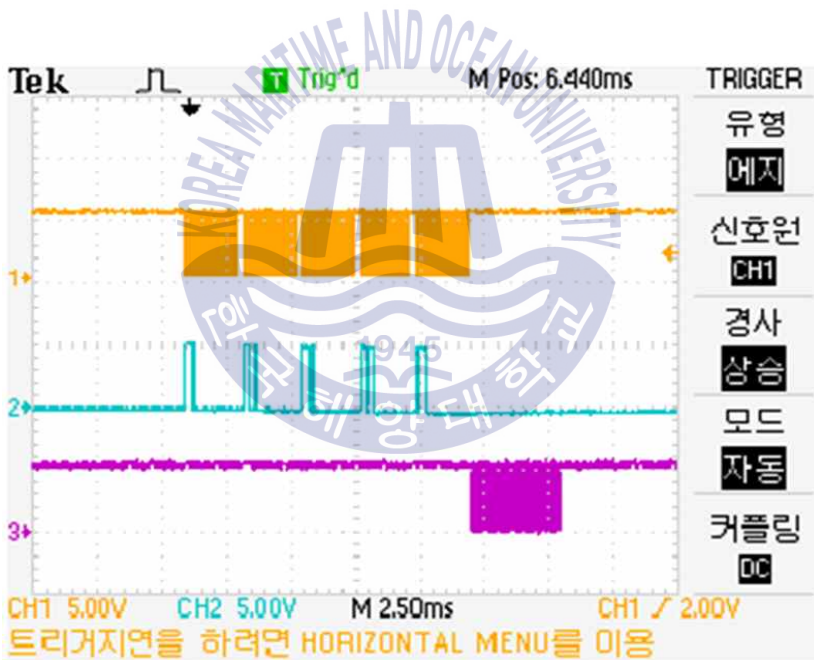


Fig. 5.14 SPI Communication waveform of the DAQ module

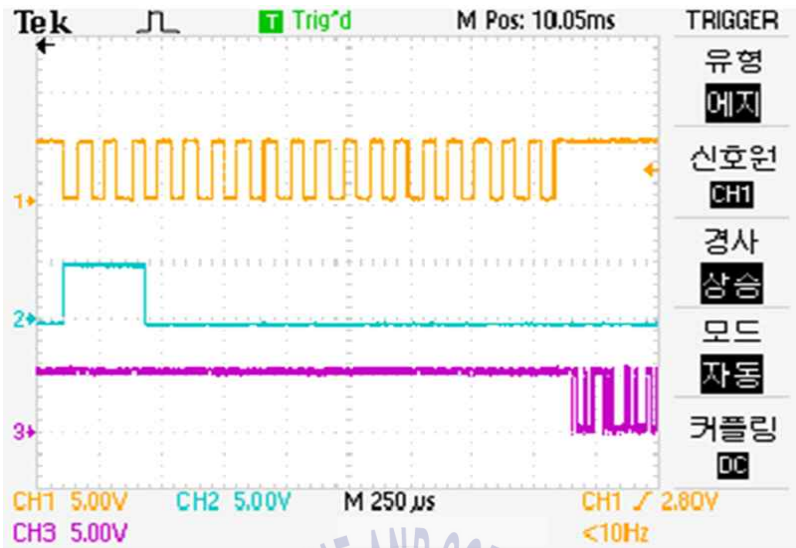


Fig. 5.15 SPI Communication expanded waveform of the DAQ module

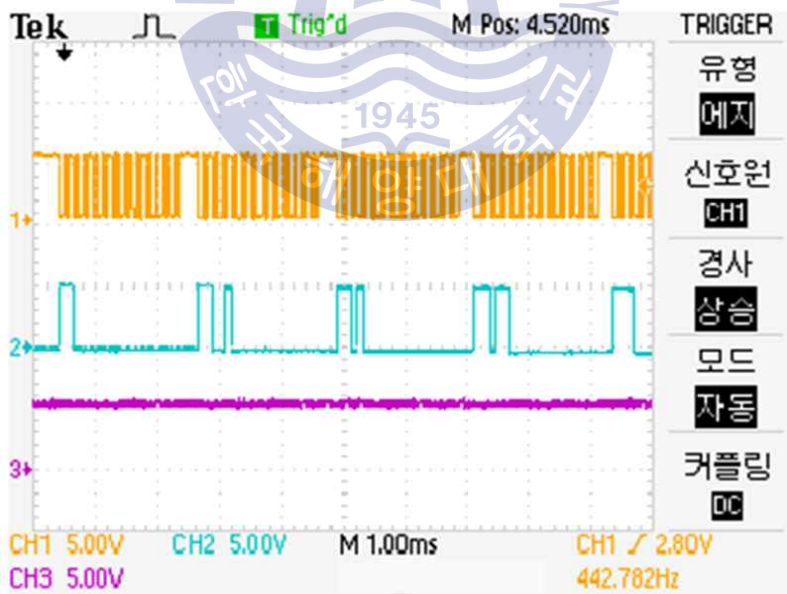


Fig. 5.16 SPI Communication requests waveform of the DAQ module

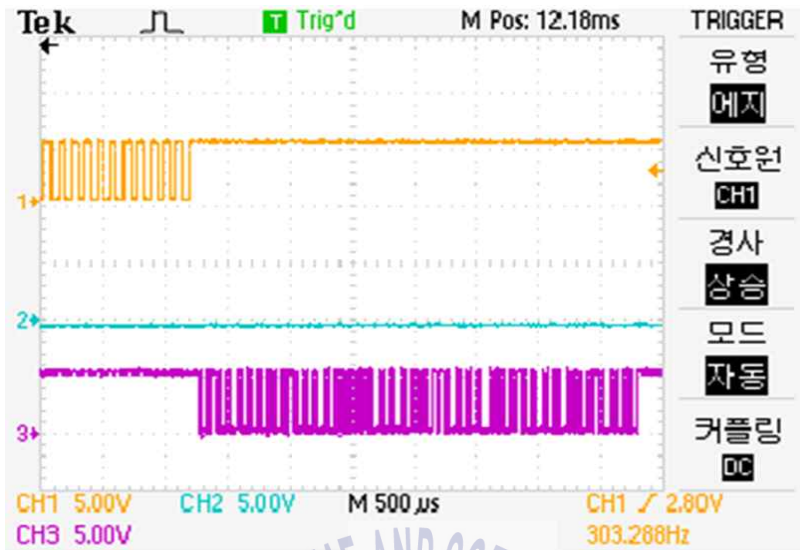


Fig. 5.17 SPI Communication response waveform of the DAQ module

ADC 칩과 SPI 통신으로 수집한 압력데이터는 MCU에서 사전에 약속된 프로토콜에 맞게 변환되어 RS-485 트랜시버(transceiver) 칩을 통해 모니터링 프로그램으로 전송된다. 이렇게 압력데이터가 RS-485 통신으로 전송되는 파형은 Fig. 5.18에 나타나 있다. MCU는 수집된 압력데이터를 약 200[ms]의 주기로 전송하며, Fig. 5.18의 위쪽 파형은 RS-485 통신파형을 나타내고 아래쪽 파형은 RS-485 트랜시버 칩의 송·수신을 결정하는 신호(high: 송신, low: 수신)를 나타낸다. 이와 같이 압력 측정 장치의 DAQ 모듈을 테스트한 결과 MCU가 요청한 5개의 채널에 대한 압력 값이 정상적으로 수집되었으며, ADC 칩 또한 정확하게 원하는 압력을 측정하여 ADC 값으로 출력하는 것으로 나타난다.



Fig. 5.18 RS-485 Communication to transmit pressure data waveform

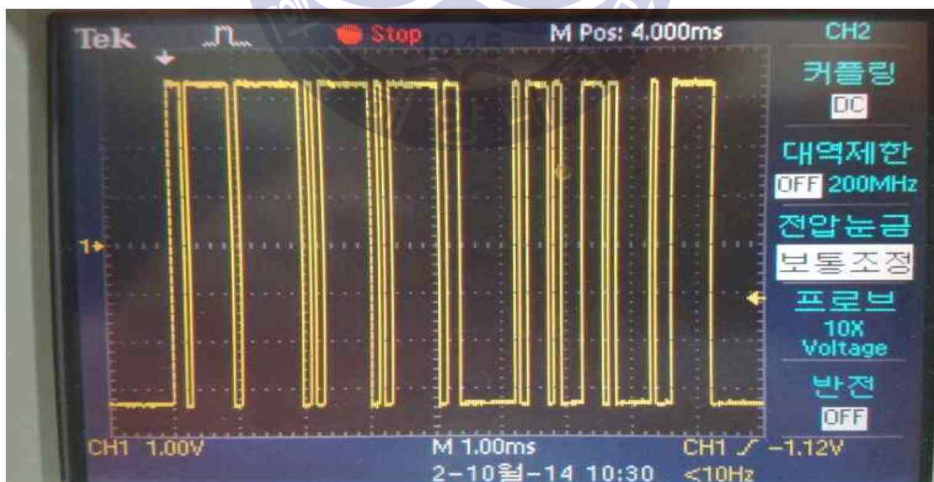


Fig. 5.19 RS-485 Communication to transmit pressure data expanded waveform

로봇의 구동 상태를 판단하기 위한 압력센서는 로봇의 후방에 설치되며, 신호처리 모듈과 카메라 모듈은 로봇의 후방에 이동을 위한 탑재 캐리지에 설치되어 로봇 이동 시 데이터를 수집한다. 신호처리 모듈로부터 수집된 압력 데이터와 영상 데이터는 통합 모니터링 시스템의 GUI 기반의 모니터링 프로그램에 표시되며, 그 화면은 Fig. 5.20과 같다.

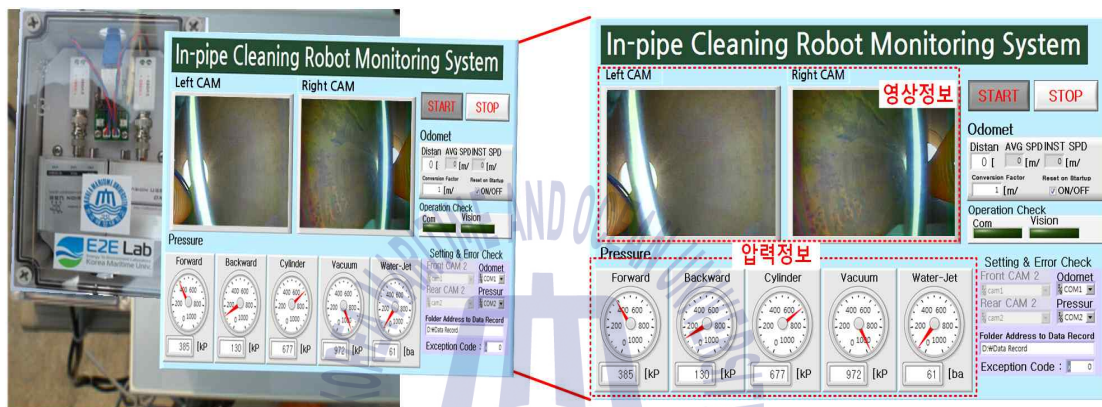


Fig. 5.20 GUI-based integrated management monitoring

실험을 통해 취득한 압력 데이터는 Fig. 5.21 및 5.22와 같으며 전진 시 압력(파란색 선), 후진 시 압력(붉은색 선) 및 실린더 압력(연두색 선) 용 공압은 동일한 공압 라인에서 분기되기 때문에 전/후진 동작 시 실린더 압력이 저하되는 것을 알 수 있다.

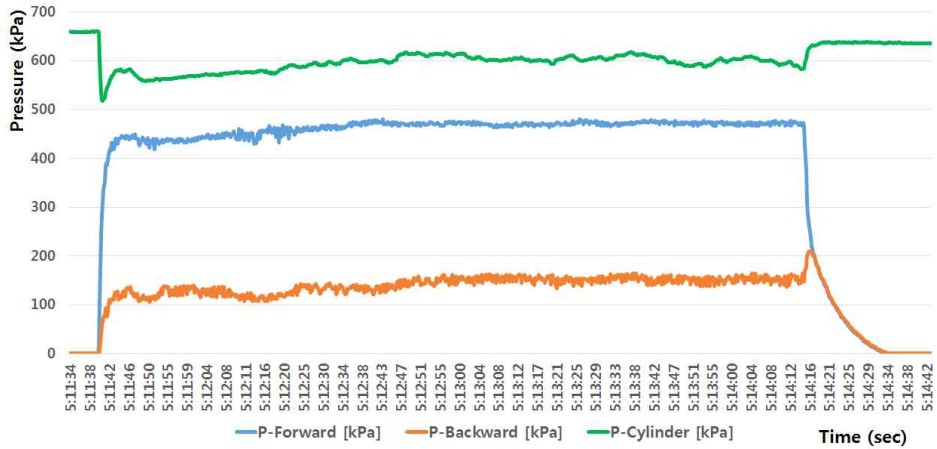


Fig. 5.21 Pneumatic pressures of the air motor - forward direction

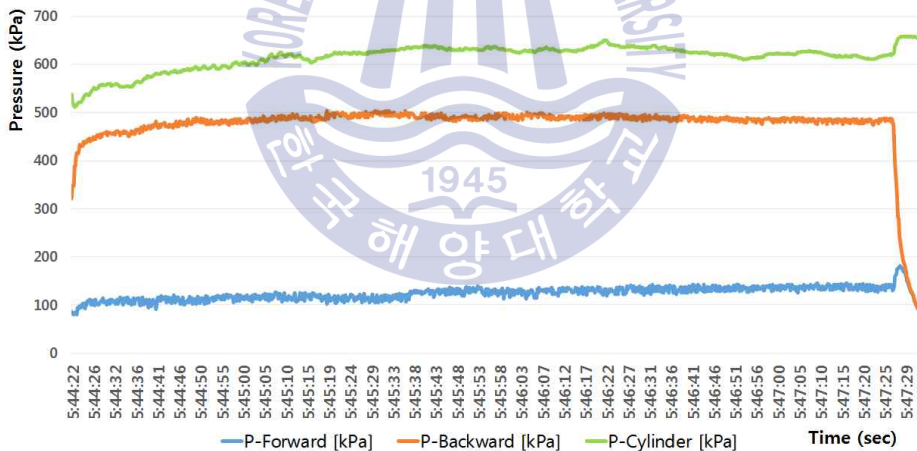


Fig. 5.22 Pneumatic pressures of the air motor - backward direction

또한, 카메라 모듈로부터 전송받은 배관 내부의 영상은 배관 내 모니터링 목표 사양이며, Fig. 5.23과 같이 좌·우측 양쪽으로 배치된 카메라를 통해서 배관 내부를 360° 관측이 가능하다.

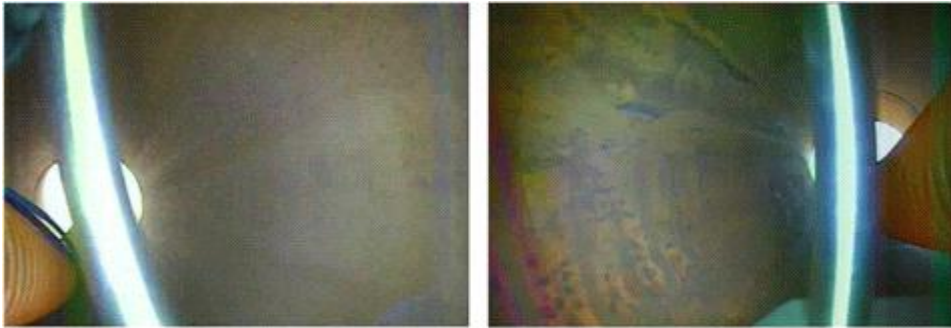


Fig. 5.23 Internal state of pipe after cleaning by pipe cleaning robot

### 5.3.6 성능 실험 및 고찰

테스트벤치에서 청소로봇에 대한 주요 성능실험을 수행한 결과, Table. 5.1과 같이 연구 초기에 계획했던 주요 기술사양을 만족함을 확인할 수 있었다.

Table 5.1 Test results for the pipe cleaning robot system

Items	Test results	Remarks
Travelling speed	Max. 3.75 m/min	2.5 m/min
Cleaning speed	2.5 m/min	2.5 m/min
Water-jet injection pressure	10 ~ 100 MPa	15 MPa
Integrated control & monitoring system	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integrated control system for the robot and the support systems</li> <li>- DAQ module</li> <li>· GUI based monitoring program</li> </ul>	-

## 제 6 장 결 론

현재 국내에서 수행하고 있는 상수도 배관 청소시스템에 대한 현황을 파악하고, 보다 효율적인 배관청소시스템을 개발하고자 본 연구를 수행하였다. 국내 상수도 갱생작업 현장에서의 실제 작업 조건을 정립하기 위한 선행조사를 수행하여 연구대상 배관 청소로봇시스템의 주요 기술사양을 도출하였다.

본 연구에서는 진공 흡입 및 배출 기술을 도입하여 청소와 동시에 슬러지를 상수도관 외부로 배출시킬 수 있도록 구성함으로써 청소와 세척을 한 번에 수행할 수 있게 되어 상수도관 갱생작업의 공정을 단축할 수 있었다.

배관청소 방법으로는 정량적으로 배관청소를 수행할 수 있도록 고압 워터 제트 노즐이 일정한 주행 속도를 유지하면서 나선식으로 분사할 수 있도록 구성하였으며, 스케일 고착 상태에 따라 선택적으로 스크래핑 공구를 이용한 기계식 청소가 가능하도록 워터제트 분사 노즐 전단부에 스크래핑 공구를 설치할 수 있도록 구성하였다.

‘GUI 기반의 통합 제어 및 모니터링시스템’은 배관 청소로봇 및 관련 지원 장치들의 작동 및 청소작업 상태 등을 통합적으로 제어 및 감시할 수 있으며, 향후 다른 로봇시스템으로도 확장 적용이 가능하도록 구성하였다.

시제품을 제작하기 전에 설계단계에서 각 주요부분에 대한 구조해석을 수행하여 설계 안전성을 확인하였으며, 곡관 주행 시 부품 상호간의 간섭도 및 작동 상태 및 등을 확인하기 위하여 2D 및 3D 시뮬레이션을 수행하였다.

또한, 시제품의 주요성능을 확인하기 위하여 실제 매설 상수도관과 같은 조건의 테스트벤치에서의 성능 실험을 수행하였으며 실험 결과, 주행성능, 청소성능, 워터제트 분사성능 및 통합 제어 및 모니터링시스템의 주요성능이 기준 조건을 만족함을 확인할 수 있었다.



본 배관청소 로봇에 적용된 진공흡입 및 배출기술은 기존의 다른 배관청소 로봇 연구에서는 제시되지 않은 새로운 기술이므로, 실제 상수도 갱생현장에서 효율적으로 활용할 수 있도록 본 기술에 대한 보다 심도 깊은 연구를 진행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

향후, 본 배관청소 로봇에 상수도관 내벽을 코팅할 수 있는 도장기술을 접목시킬 경우 배관 청소에서부터 도장까지 한 대의 배관청소 로봇을 이용하여 배관 보수작업 전체 공정을 수행 가능할 것으로 기대하며, 2000A 이상의 대형 배관을 청소할 수 있는 전문 배관청소 로봇으로 발전시킬 수 있을 것으로 생각한다.



## 참고 문헌

- [1] 김민욱, 이현석, 오진석, 2016. RS-485 통신을 이용한 배관청소 로봇의 모니터링 시스템 개발. 한국정보통신학회논문지, 제20권, 제5호, pp.923-930.
- [2] 최형식, 나원현, 강동완, 강형석, 전지광, 김현식, 2009. 배관 검사 및 청소 로봇의 개발. 한국마린엔지니어링 학회지, 제33권, 제5호, pp.662-671.
- [3] Srikanth, S. et al, 2005. Corrosion in a Buried Pressured Water Pipeline. Engineering Failure Analysis, pp.634-651.
- [4] 최형식, 김동호, 김동현, 이종훈, 황광일, 2008. 새로운 구조의 유연한 배관탐사 로봇 설계. 한국마린엔지니어링 학회지, 제32권, 제1호, pp.175-183.
- [5] Tomoyasu Ohya and Tokuji Okada, 2001. Development of the Wheel-Type Robot with Steering in Pipe. International Symposium on Robotics, pp.992-997.
- [6] Pfeiffer, F., Robmann, T. and Loffer, K., 2000. Control of a Tube Crawling Robot. Int. Conf. Control, Oscillations, and Chaos, Vol. 3, pp.586-591.
- [7] Neubauer, W., 1994. 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.
- [8] Kawaguchi, Y., Yochida, I., Kurumatani, H. and Kikuta, T., 1996. Development of an in-pipe inspection robot for iron pipes. Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 14, No. 1, pp.137~143.
- [9] Roman, H. T., Pellegrino, B. A., Sigrist G. R., 1993. Pipe Crawling Inspection Robots: an Overview. IEEE Trans. of Energy Conversion, pp.576-583.
- [10] Fukuda, T., Hosokai, H., Uemura, M., 1989. 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.
- [11] Horose, S., Ohno, H., Mitsue, T. and Suyama, K., 1999. Design of In-Pipe Inspection Vehicles for  $\Phi 25$ ,  $\Phi 50$ ,  $\Phi 150$  Pipes. Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, pp.2309-2314.

- [12] Scholl, K. U., Kepplin, V., Berns, K. and Dillmann, A., 1999. An Articulated Service Robot Autonomous Sewer Inspection Tasks. Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. of Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp.1075-1080.
- [13] Hayashi, I, and Iwatsuki, N., 1998. Micro Moving Robotics. Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. of Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp.41-50.
- [14] Roh, S. G., Ryew, S. M., Yang, J. H. and Choi, H. R., 2001. Active Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipeline. Proc. of IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, pp.761-766.
- [15] 정규원, 2002. “파이프 내부 검사를 위한 이동로봇의 유도방법. 한국 공작기계 학회 춘계학술대회 논문집, pp.480~485.
- [16] 최혁렬, 류성무, 백상훈, 조성휘, 송성진, 신현재, 전재욱, 2000. 지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발. 한국정밀공학회지, 제17권, 제2호, pp.121-129.
- [17] 최혁렬, 류성무, 1998. 지하매설 가수관 검사로봇 개발. 한국정밀공학회 추계학술 대회, pp.290-294.
- [18] 노세곤, 류성무, 최혁렬, 2001. 지하 매설 가스배관용 차동 구동형 배관검사 로봇의 개발. 대한기계학회논문집, A권, 제25권, 제12호, pp.2019-2029.
- [19] Okacia, T. and Kanade, T., 1987. A Three-Wheeled Self-Adjusting Vehicle in a Pipe, FERRET-1. The International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 4, pp.60-75.
- [20] Ryew, S. M., Bail, S. H., Ryu, S. W., Jung, K. M., Roh, S. G. and Choi, H. R., 2000. Inpipe Inspection Robot system with Active Steering Mechanism. Int. Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1652-1657.
- [21] Moraleda, J., Ollero, A. and Orte, M., 1999. A Robotic System for Internal Inspection of Water Pipelines. IEEE Robotics and Automation Magazine, Sep.
- [22] 강종규, 정경민, 이성욱, 서용철, 최창환, 정승호, 김승호, 2006. 소형 배관 이동이 가능한 다관절형 이동 로봇 개발. ICASE 대전충청지부 학술발표회.
- [23] 신호철, 정경민, 2009. 소형 직렬 다관절 로봇의 협소 배관 이동 연구. 한국정밀 공학회 추계학술대회 논문집, pp.143-144.

- [24] 최창환, 전풍우, 최용제, 정승호, 김승호, 2004. 자율 주행형 급수 배관 검사 로봇. 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.816-821.
- [25] 김도완, 노세곤, 이정섭, 이수환, 최혁렬, 2008. 클러치기반의 선택적 구동방식을 이용한 배관로봇의 개발. 대한기계학회논문집, A권, 제32권, 제3호, pp.223-231.
- [26] 정규원, 2002. 파이프 내부검사를 위한 이동로봇의 유동방법. 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.480-485.
- [27] 김성현, 윤지섭, 박병석, 조병위, 강이석, 1998. 하수관용 로봇의 검사 장치 설계 제작. 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.681-684.
- [28] Atsushi Sadamoto, Hajime, sudo, Hiroshi Yamadam Takashi Togasaki, Masanobu Kimura, Nobuaki Kawahara, Kazuhiro Tsuruta, Takayuki Shibata, Hiroaki Izu and Takahisa Sakakibara, 2001. Wireless Micromachine for In-Pipe Visual Inspection and the Possibility of Biomedical Applications. International Symposium on Robotics, pp.433-438.
- [29] Jon, M. and Nathalie, C., 1999. Inspection Systems for Leaks, Pits, and Corrosion. AWWA, pp.35-40.
- [30] Anthierens, C., Prelle, C., Jutard, A., Bétemps, M., 1998. Pneumatic Actuated Microrobot for In-Pipe Locomotion. 4th Japan-France/2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, Kitakyushu, Japan, 6-8october.
- [31] Aoshima, S., Tsujimura, T., Yabuta, T., 1993. Miniature Mobile Robot Using Piezo Vibration for Mobility in a Thin Tube. Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 115, pp. 270-278.
- [32] Roert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Pleshe, Concepts and Applications of Finite Element Analysis.
- [33] O.C. Zienkiewicz, R. I. Taylor, The Finite Element Method, Vol. 1, Basic Formulation and Linear Problems.

## 감사의 글

1978년 청량기계공고 정밀기계과를 입학하면서 기계분야에 발을 들여 놓은 지 벌써 40년이란 세월이 흘렀습니다. 공고를 졸업한 후에 공장과 설계사무소 등을 다니다가 대학에 다니는 친구들이 그냥 부러워서, 가정 형편을 핑계(?) 로 대학진학에 대한 꿈을 꾸어 보지도 못한 놈이 어머님께 대학을 가고 싶다고 말씀 드렸을 때, 어려운 형편에도 불구하고 흔쾌히 승낙해 주시고 학원비를 대주셨던 어머니가 생각납니다.

서울 촌놈이 대학배지 하나 달고 싶다는 의지 하나로 해양대학교에 유학 와서 조도 귀신이란 소리를 들어가면서 나를 열심히 공부하여 학부과정을 무사히 마치고, 국방과학연구소 연구원과 삼성중공업 중앙연구소에서 연구원으로 재직하면서 2번의 석사과정에 입학하였으나, 이런 저런 이유로 대학원을 자퇴하고 연구원시절을 마쳤던 기억이 새롭습니다.

국방과학연구소에서 연구원으로 같이 근무할 때부터 바른생활 사나이로 삶의 모범을 보이며 이끌어 주셨던 오진석 교수님의 적극적인 지도를 받으며 세 번째의 석사도전과 입학 8년 만에 박사학위를 받을 수 있어서 감사합니다.

30여 년 전에 부족한 서울 촌놈을 만나서 지금까지 변함없는 사랑으로 내조해 주고 있는 저의 평생 애인 이소영, 아직도 눈에 넣어도 아플 것 같지 않은 사랑하는 딸 함현아, 군 생활 잘하고 있는 믿음직한 아들 상병 함동빈, 언제나 처럼 부족한 막둥이를 변함없이 지켜 주시는 하늘에 계신 어머님, 객지에 나가 있는 막내 동생에게 항상 마음 써 주시는 큰형님과 작은형님 내외분, 어려운 경영환경에서도 부족한 저를 믿고 함께 해온 우리 임직원들 그리고 지금까지 저를 아껴 주고 배려해 준 모든 분들과 함께 감사드립니다.

본 논문을 정리하고 완성할 때까지 물심양면으로 배려해 주시고 지도해 주신 오진석 교수님, 많이 부족한 논문을 세세한 부분까지 지적해 주시고 가르쳐 주신 심사위원 교수님들과 여러모로 부족한 선배를 밀어 주고 도와 준 우리 E2E

연구실의 후배님들에게 무한한 감사의 마음을 전해 드립니다.

우리 회사의 새로운 먹거리 아이템이 될 수 있을 거란 큰 기대를 가지고 나름 많은 시간과 노력을 기울여 왔던 ‘진공흡입식 로봇시스템’ 기술이 약 10여년 만인 2018년에 드디어 중국 시장으로의 기술 수출과 산업현장에서의 상용화가 가능할 것 같습니다.

언제나처럼 ‘盡人事待天命’의 마음과 ‘하면 돼 - Everything is Possible’의 信念과 熱情을 가지고, 한 번의 실패를 거울삼아 더욱 더 ‘열심히 + 잘’ 노력해서 내실 있는 ‘Engineering Company’를 만들어 가도록 노력하겠습니다.

저를 사랑하고 아껴주시는 모든 분들 그리고 제가 사랑하는 모든 분들과 함께 서로 배려하고 배려 받으며 행복하게 어울려 나아가고자 하는 마음 간절합니다. 함께 할 수 있어서 감사합니다.

