배관 검사 로봇 시스템 개발

백상훈† · 류성무* · 노세곤** · 최혁렬***

(2001년 3월 14일 접수, 2001년 10월 17일 심사완료)

Development of Inpipe Inspection Robot System

Sanghoon Baik, Sungmoo Ryew, Se-gon Roh and Hyoukryeol Choi

Key Words: Inpipe Robot(배관 검사 로봇), Double Active Universal Joint(이중능동유니버설관절) Virtual Map(가상지도)

Abstract

Recently, various inpipe inspection robots are developed and its effective values are increased in industrial use. However, it is so difficult to make a inpipe inspection robot system which has flexible mobility and accuracy of inspection in pipelines. Especially, it is very important to know the exact crack position. In this paper, we are to present a lately developed inpipe inspection robot system which can resolve the above problems. The robot is configured as an articulated structure like a snake. Two active driving vehicles are located in front and rear of the inspection robot respectively and passive modules such as a nondestructive testing module and a control module are chained between the active vehicles. Special feature of the robot system is a ground interface, which is able to show informations of robot and pipelines. By using this, so called virtual map in this paper, user is able to know the pipelines' feature and crack position.

1. 서 론

배관은 가스나 기름과 같은 많은 양의 유체를 빠르고 안전하게 수송하는 수단으로 현대 산업에서 혈관과 같은 존재이다. 석유화학공장, 발전소 등과 같은 장치산업의 배관뿐만 아니라, 우리의 생활과 밀접하게 관계되어 있는 가스관, 난방용 열배관, 상수도관, 하수도관 등은 모두 배관으로 설치 운영되고 있다. 위와 같은 여러가지 배관을 크게 분류한다면, 산업플랜트의 배관과 운송용 장거리 배관으로 나눌 수 있다. 가스관이나 송유관과 같은 운송용 장거리 배관은 주로 매설배관이며 특히 13,000Km를 상회하고 있는 국내의 도시가스배관은 1980년경에 집중적으로 설치되기 시작하여 현재에도 지속적으로 건설되고 있다.

그러나 과거에 매설된 배관의 경우 노화, 부식으로 인한 결함이나 타공사로 인한 손상 등으로 배관의 안전성에 많은 문제점을 발생시키고 있으며 대형사고의 주요한 원인이 되고 있다. 최근 정부는 지하매설 도시가스배관에 대하여 15년 주기로검사, 보수 및 교체를 의무화하는 규정을 발표하여 배관 관리의 중요성을 강조하고 있으나 지하매설 배관의 관리는 막대한 경제적 부담과 고도의 기술이 요구되는 반면 대부분의 국내 도시가스회사들이 중소기업 형태로 되어 있으므로 쉽게 대응하기 어려운 실정이다. 따라서 효과적이고 경제적인 검사 및 관리방법이 시급하게 요구되고 있다. 그 중에서도 경제적인 검사기술 및 관련장비의 개발이 시급한데, 지하에 매설된 배관을 검사하는데는 검사부위에 접근하기 어렵다

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과
E-mail : baiksh@me.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7481 FAX : (031)290-7507
* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과
** 회원, 성균관대학교 대학원 메카트로닉스협동과정
*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

는 점과 검사시편 채취를 위한 가스의 중단, 굴착 및 시편 채취 후 재시공 등의 부대작업으로 인한 경제적, 시간적 손실이 막대하다는 어려움이 있다. 또한 정확한 굴착지점을 찾기 힘들기 때문에 그러한 부대작업은 가중될 수밖에 없는 상황이다. 이러한 문제점을 다소나마 해결할 수 있는 방법은 지하매설 가스배관의 경우 매설된 상태로 배관 내부에서 검사하는 것이 가장 적합한 기술이다. 따라서 검사장비를 탑재하고 배관 내부를 주행하면서 검사를 수행할 수 있는 시스템의 개발이 요구되며, 실제로 이와 같은 시스템에 관하여 많은 연구가 수행되고 있다.

배관검사시스템은 크게 능동적 시스템과 수동적 시스템의 두 가지로 나눌 수 있다. 대표적 수동적 시스템으로는 지능형 피그를 들 수 있는데, 이 시스템에 사용되는 주행체(Pig)는 배관 내부를 흐르는 유체의 압력에 의하여 수동적으로 구동된다. 그러나 지능형 피그는 형상이 복잡하고 저압의 가스가 공급되는 국내 도시가스배관에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.[1] 한편 능동적 시스템은 로봇기술을 응용한 것으로써 복잡한 배관 내부에서 적합한 운동성과 기능성을 갖고 수평관뿐만 아니라 곡관, 분기관, 수직관, 밸브, 축소관 등이 혼재하여 시공되어 있는 도시가스 배관의 내부를 자유롭게 이동하며 검사를 수행할 수 있는 능력이 요구되며 또한, 장거리 및 장시간 운영하며 결함의 위치를 정확히 알아내어 사용자에게 알려 주어야 할 필요성이 있다. 그러나 현재까지의 많은 연구자들에 의하여 개발된 다양한 종류의 로봇들은 앞서 언급한 유연한 운동성과 검사의 정확성, 기능성 등을 동시에 갖추지 못하고 있는 실정이다. 따라서 장거리 주행이 가능하며 다양한 배관의 형상에 대응하여 주행할 수 있는 운동성을 갖추고, 배관 검사중 가상지도를 통한 배관 결함 부위 및 로봇의 현재 위치를 사용자에게 알려줄 수 있는 로봇의 개발이 절실하며 그러한 로봇의 실용화는 보다 경제적이고 정확한 배관 검사를 수행할 수 있도록 할 것이다. 본 논문에서는 2장에서 지금까지의 기존 연구를 살펴보고 3장에서는 개발된 배관 검사 로봇 시스템에 관련하여 주요 메커니즘과 구동 방식에 관하여 설명하며, 4장에서 가상지도를 통한 원격진단 기술을 소개한 후 5장의 실험을 통한 결론을 마지막 장에서 맺고자 한다.

2. 기존 연구

관내 검사 시스템은 제한적인 관 내부에서의 운동성, 검사 시스템과의 장거리 통신의 문제, 사용자 중심의 운영환경 등 여러 가지 문제점을 동시에 해결해야 하는 기술 집약적인 연구분야이다. 이러한 관내 검사 시스템 중 자율이동로봇시스템은 구동 메커니즘에 따라 보행형, 바퀴형, 무한궤도형, 자벌레형으로 구분할 수 있으며 각각의 특징 및 개발사례를 요약하면 다음과 같다.

Neubauer의 거미형태로봇 등은 보행형의 한 예이며 여러 관절로 이루어진 다리를 가진 이동체이다.[2] 이러한 로봇은 수평관 및 거친관 내에서 이동이 가능하며 수직관에서 자중을 버틸 수는 있으나 CCD카메라 이외의 검사장비를 탑재하기가 어려우며 분지관, 가지관 및 수직관 내에서의 이동이 불가능하여 실용성에서 의문이 제기되고 있다.

바퀴형은 관경 150mm 이상의 주철관에서 사용할 수 있는 자석바퀴 차량형 이동체인 Kawaguchi 등의 Magnetic wheel robot,[3] 바퀴형 이동체중 상용화된 제품으로 Visual Inspection Technology의 Rovver 시리즈를 들 수 있다. 바퀴형은 조향이 자유롭고 이동속도가 빠른 반면 수직관이나 분지관등의 이동에 어려움이 있다는 단점이 있다.

무한궤도형은 Inuktun 사의 MiniTrace와 MicroTrace를 들 수 있으며, 이동성이 좋고 방향전환에서의 강인함을 구현할 수 있어서 많은 연구가 시도되었으나 주행시에 많은 에너지를 필요로 하며 궤도내에 이물질이 들어가면 주행의 장애가 올 수 있는 단점이 있다.

자벌레형은 최혁렬 등의 version 0(Mock-up)을 들 수 있으며,[4] 배관 벽면에 압착력이 좋아 탁월한 견인력을 갖고 있으나 검사대상인 도시가스배관 대부분이 수평관으로 되어 있는데 비해 수평관에서 속도가 떨어지는 단점이 있어 효용성이 떨어지는 것으로 판명되었다.

비교적 이동속도가 빠르고 경제적인 바퀴형이나 무한궤도형의 구조에 있어서 자중을 이기고 수직관을 오르기 위해서는 배관 벽면에 일정한 힘으로 압착을 해야 하므로 동시에 신축형 구조를 필요로 하며 이것은 관경 변화시에 일정한 압착력을 구현하기 위한 복잡한 메커니즘을 구현해

야 하는 문제가 있다. 이러한 방식의 대표적인 연구들은 Okada와 Kanade가 개발한 세개의 바퀴를 이용하여 관내를 이동하며 관경의 변화에 따라 이동체의 높이를 조정할 수 있는 신축형 이동체 FERRET-1을 들 수 있으며,[5] 제어의 편이성을 구현하고 관경 변화와 경사면의 이동시에 중력을 극복하기 위한 방편으로 개발된 로봇은 Okada와 Sanemori의 3점형식 이동로봇 MOGRER를 들 수 있다.[6]

한편 이미지 프로세싱을 통한 관경 및 균열의 길이 측정등 조작자에 친숙한 검사환경을 제안한 Jorge Moraleda 등의 Water Pipe Robotic System이 개발되었다.[7]

이렇듯 90년대에 들어서 관내 검사 시스템에 관한 많은 연구가 수행되어져 왔으나 곡관, 수직관, 분지관 등 다양한 관 내부의 형상에 대응하여 검사를 수행할 수 있는 운동성을 갖춘 자율이동로봇의 개발은 최혁렬과 류성무에 의한 조향이 가능한 능동 유니버설 조인트를 가진 벽면 압착 메커니즘의 로봇을 발표함으로써 그 기초가 다져졌으며,[8] 검사 시스템과의 장거리 통신과 사용자 중심의 운영환경의 개발은 최근 최혁렬 등이 이 중능동 유니버설 조인트 구조의 지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템을 소개함으로써 시스템 전반에 걸친 원형이 완성되었다.[9]

3. 배관검사로봇 시스템

3.1 개발시 고려사항

배관검사로봇 시스템을 개발할 때는 대상으로 하고 있는 환경과 요구되는 기능요소를 함께 고려해야 한다. 여러 가지 배관 형상에 적응하여 움직일 수 있는 유연하고 강인한 이동능력을 갖춘 시스템이라 할지라도 사용자의 입장을 고려한 기능요소가 불충분하다면 실제 산업현장에서 활용되기가 어렵기 때문이다. 여기서 대상 환경은 이동 및 조향 메커니즘에 관련된 사항이며 요구되는 기능요소는 사용자 측면에서 활용의 편이성 및 유용성에 관련한 사항이다.

우선 대상 환경을 살펴본다면, 원통형으로 이루어진 배관이 수평관 만으로 이루어진 경우에는 일반 차량처럼 바퀴를 가진 간단한 이동로봇으로 충분할 것이다. 그러나 대상으로 하는 배관은 수평관 뿐만 아니라 수직관, 곡관, 분기관, 축소관, 밸브 등으로 이루어진 복합 구조물이다. 또한 예상치 못한 외적인 요인에 의하여 손상을 입은 배관이 존재하는 경우도 있기 때문에 유연하고 강인한 이동성과 기능성을 갖추기 위해서는 적절한 로봇의 크기의 결정, 원활한 곡관부 이동을 위한 메커니즘, 관경 변화의 대응성, 자중 이외에 검사장비를 견인할 수 있을 만큼의 충분한 견인력, 검사속도를 고려한 주행속도 등을 고려해야 한다.

한편 사용자 측면에서 요구되는 기능 요소를 살펴본다면 누구나 쉽게 조작을 할 수 있는 편이성이 요구되며, 검사를 통하여 발견된 결함의 정확한 위치나 로봇의 현재 위치를 알 수 있어야 한다. 검사를 마치고도 결함의 위치를 알 수 없다면 검사의 의미 자체를 잃기 때문이다.

본 논문의 저자들은 지난 수년간 배관검사로봇에 관하여 수행한 연구결과를 통하여 이미 이동에 관련하여 고려해야 할 사항들을 소개한 바 있으며 요구조건을 충족하는 메커니즘을 개발하여 그 효용성을 입증하였다.[10]

3.2 시스템 개요

Fig. 1은 개발된 시스템의 개략도를 나타내며 Fig. 2(a)는 이동체의 실제 모습, (b)는 지상조작부를 보여준다. 배관내부검사 시스템은 견인로봇(driving robot), 제어부를 포함하는 주행체와 공급선(tether cable), 지상조작부(ground station)로 구성되며, 배관검사로봇은 각각 모듈별로 분절형의 구조를 가지고 연결되어 있다. Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 견인로봇은 주행체의 앞과 뒤에 각각

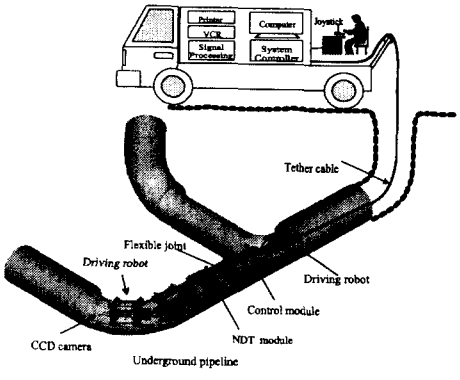
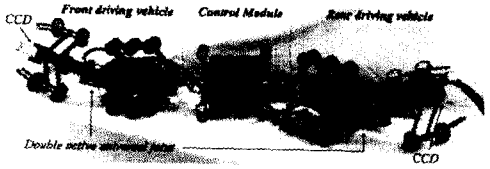
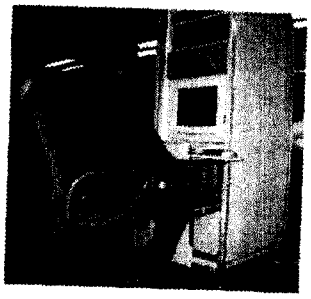


Fig. 1 Schematic of proposed system



(a) Inspection robot



(b) Ground station

Fig 2 Robot System

두 대가 배치되어 전후진시에 견인 및 조향을 할 수 있도록 되어 있으며, 그 사이에 비파괴 검사 장비와 제어부가 2단 유니버설 관절로 연결되어 있다. 로봇이 앞으로 전진할 경우 전방 견인로봇은 주행체를 끌고 후방 견인로봇은 미는 힘을 주게되며, 후진을 하는 경우는 전후방 견인로봇의 역할이 서로 바뀌게 된다. 견인로봇은 다양한 형상의 배관에 대응하여 주행할 수 있도록 두 개의 몸체가 2자유도 조향 메커니즘으로 연결되어 있으며 다음절에서 상세하게 설명하도록 한다. 견인로봇은 제어부에 의하여 제어되며 광케이블을 통하여 지상조작부와 통신을 한다. 제어부는 산업용 Pentium급 컴퓨터를 내장하고 있으며 광통신을 위한 OE· EO 컨버터 및 모터 구동을 위한 모터 드라이버를 또한 내장하고 있다.

한편 주행체에 공급되는 전원과 지상 조작자와의 통신은 공급선을 이용하여 이루어진다. 공급선은 직류전원을 공급하기 위한 전원선, 영상신호와 디지털정보를 전송하기 위한 광케이블(optical fiber)로 구성된다. 시스템의 사양은 Table 1과 같다.

3.3 견인로봇 및 주요 메커니즘

Table 1 Specification of inpipe robot system

Items	Specifications
검사대상	내경 8인치 도시가스 배관관
검사속도	3~5m/min
탑재검사장비	CCD Camera(조명포함 전후면 각 1대)
검사거리	왕복거리 최대 500m
이동능력	수평관, 수직관, 곡관, 분기관 주행, 10%관경변화 대응
견인능력	자중포함 20kg
구동메커니즘	바퀴형 벽면압착구조, 분절형이동체
조향메커니즘	이중능동유니버설 관절
전원	tether cable을 통한 외부공급
제어방식	원격제어(joy stick 및 컴퓨터)
제어기	산업용 pentium급 제어기
통신방식	RS-232C를 이용한 광통신

3.3.1 견인로봇

견인로봇은 검사장비를 견인하고 검사를 수행해야 하므로 강인한 견인력을 갖추고 복잡한 배관내부를 주행할 수 있을 만큼의 유연성을 갖추도록 설계· 제작되었다. 견인로봇은 두 개의 독립적인 이동체가 이중능동 유니버설 관절(Double Active Universal Joint)이라고 하는 2자유도 능동 조향 메커니즘으로 연결되어 있다. 각 분절형 이동체는 3개의 바퀴가 달린 링크로 구성되며 이 링크들은 원주방향으로 120° 의 간격을 두고 배치되어 있다. 두개의 독립적인 이동체로 연결된 견인로봇 중에서 구동력을 갖는 이동체는 후면의 이동체이며 전면의 이동체에는 배관을 육안으로 검사할 수 있도록 CCD카메라 및 조명이 부착되어 있다. 구동력을 갖는 후면의 이동체는 웜 및 웜휠에서 전달되는 구동력을 타이밍벨트로 각 세 방향 링크에 부착된 바퀴에 전달하여 구동한다.[3]

3.3.2 구동 메커니즘

구동의 기본 메커니즘은 분절형 벽면 압착식 메커니즘으로 미끄럼 관절과 랙토그라프 메커니즘의 변형을 조합하여 고안된 다리 메커니즘, 웜 및 웜휠을 이용한 메커니즘으로 설계되었다. Fig. 3은 벽면 압착 메커니즘의 기구학적 개념도이며 이차원 구조로 간략화한 것이다. 여기서 관경의 크기에 따라 변화하는 각 θ와 구동부의 각 바퀴가 배관의 내면에 가하는 압착력 F_p는 다음과 같다.

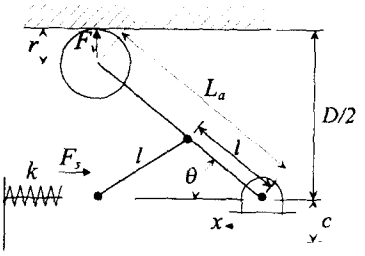


Fig. 3 Link mechanism

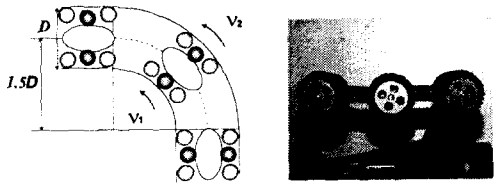


Fig. 4 Navigation in elbow

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{D-2r-2c}{2L_a}\right)$$

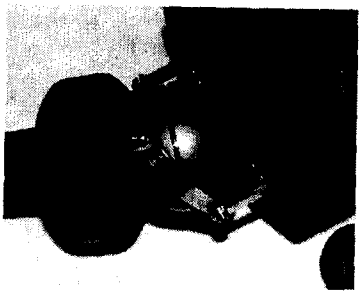
$$F_v = \frac{k}{3}\frac{l}{L_a}(2l\cos\theta - x_s)\cos\left(\frac{\pi}{2}-2\theta\right)$$

이때 D는 배관의 직경, L_a는 링크의 길이, c는 로봇의 중심에서 링크의 회전축까지의 거리, 그리고 r은 이동 바퀴의 반지름이다.

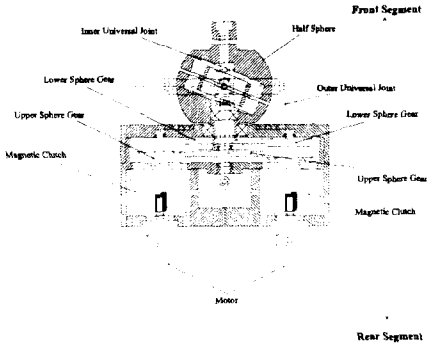
한편 Fig. 4는 곡관 주행시 관의 내경에 닿는 바퀴와 외경에 닿는 바퀴의 속도차가 요구됨을 나타내고 있다. 자연스러운 속도차이를 구현해 내기 위한 방안으로 Fig. 4처럼 구동 바퀴 중간에 구동 바퀴의 높이보다 낮게 자율 구동 바퀴를 부착하였다. 구동방식은 곡관 주행시 관 내측의 구동 바퀴는 관벽에 닿지 않고 떨어진 상태로 회전하며 중앙의 자율 구동 바퀴가 관벽에 닿게 되고 외측은 구동 바퀴가 벽면에 닿아 회전하게 되므로 관의 내측과 외측의 속도차이가 생기게 되며 자연스럽게 속도차이를 구현하며 주행할 수 있게된다.

3.3.3 조향 메커니즘

조향 메커니즘은 이중능동유니버설관절(Double Active Universal Joint : DAUJ)이라고 불리우는 2자유도 관절로 설계되었으며[11] 선택적 조향을 할 수 있도록 자기 클러치 구조를 첨부하였다. 또한 전면부 링크 구조는 유선형을 모사한 구조로 곡관 이동의 유연성을 확보하였다.



(a) Real view



(b) Schematic view

Fig. 5 Double Active Universal Joint

Fig. 5는 이중능동유니버설관절의 모습 및 그 상세도이다. Fig. 5에서 보이는 것과 같이 이중능동유니버설관절은 수직축에 대해 기울어진 두 개의 반구와 이를 감싸는 외측의 유니버설관절로 이루어져 있으며 두 개의 반구를 모터를 사용하여 각각 구동함으로써 원하는 방향으로 조향을 할 수 있도록 되어있다. 한편 두 개의 각 모터는 자기 클러치가 첨부됨으로써 선택적으로 조향을 할 수 있다. 이는 굳이 사용자에 의한 조향이 필요하지 않는 곡관의 경우 클러치의 OFF상태로 수동조향을 하게 해주어 사용자 편이성을 도모할 수 있다. 이중능동유니버설관절의 특징은 조향 전· 후를 비교하여 볼 때 진행방향의 rolling을 억제하여 tether cable이 꼬이는 현상을 방지할 수 있다는 점이다.

3.4 제어기

시스템을 제어하기 위한 컨트롤러가 구동 로봇 중간에 탑재되어 원격지에 있는 조작자와 상호 데이터 교환 및 통신을 하며 로봇을 제어한다.

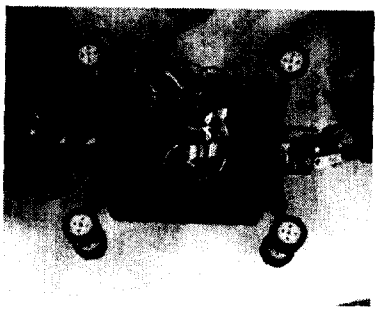


Fig. 6 Control module

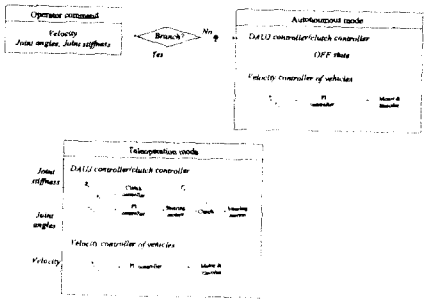


Fig. 7 Control sequence diagram

컨트롤러가 탑재된 이동체는 구동능력이 없으며 단지 벽면에 압착하여 중심을 유지한 채 앞· 뒤 구동로봇에 이끌려 움직이게 된다. 시스템에 사용되는 컨트롤러는 PC104라는 팬티엄급 산업용 PC이다. 제어모듈에는 주 컨트롤러 외에 광 통신을 하기 위한 OE/EO 컨버터 및 자체 제작한 모터 드라이버 회로, 조명이나 클러치 등을 ON/OFF하기 위한 릴레이 회로등이 탑재되어 있다. Fig. 6은 컨트롤러가 탑재된 이동체의 모습이며 Fig. 7은 제어 프로그램의 순서도중에서 timer interrupt에 의하여 수행되어지는 control loop의 구조를 나타낸 그림이다. 제어 명령은 구동모터의 속도 명령과 조인트 모터의 조향 명령으로 나누어지며 제어를 위하여 간단한 PI 제어기를 사용하였다. PI제어기는 응답시간이 늦은 대신에 상대적 안정도를 개선하고 동시에 정상상태오차를 개선하는 효과가 있어서 직관이나 수직관에서 정속주행을 하는 속도 제어와 조향을 위한 위치제어 시의 떨림을 막기에 적합하다.

3.5 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스는 로봇의 원격조작을 가능하게 하며 배관의 형상, 전면 및 후면의 CCD이미지, 비파괴 검사장비로부터 측정된 데이터 등을 쉽게 알아볼 수 있도록 개발되었다. 사용자는 조이스틱 및 마우스를 통하여 외부에서 조작을 하게 되며 사용자 환경은 로봇 제어 및 배관에 관한 정보를 한눈에 알아볼 수 있다. 사용자 인터페이스의 좌측 상단은 로봇을 조작할 수 있는 조작환경이며 중앙 상단부는 로봇의 각종 센서로부터 얻는 정보를 보여주는 결과창, 우측 상단은 비파괴 검사장비로부터 얻은 데이터를 기준 배관 두께와 비교하여 백분율의 막대 그래프로 나타내는 검사창, 좌측 하단부는 로봇이 진행하면서의 배관 형상을 보여주는 가상지도창, 우측 하단부는 전후면의 CCD이미지를 나타내는 창으로 구성되어 있다. CCD 이미지창은 검사과정을 실시간으로 보여주며 그 밖의 창들은 100 msec에 한번씩 얻은 정보를 갱신하여 나타낸다. 이 중에서 가상지도 시스템은 현재 로봇의 위치 및 결함의 위치 등을 알기 위한 중요한 요소인데, 로봇에 부착된 센서들로부터 로봇의 자세 등을 파악하여 이동 거리 및 관경의 크기 및 형상을 사용자가 쉽게 알아볼 수 있도록 그려내며 다음 장에서 자세히 설명한다.

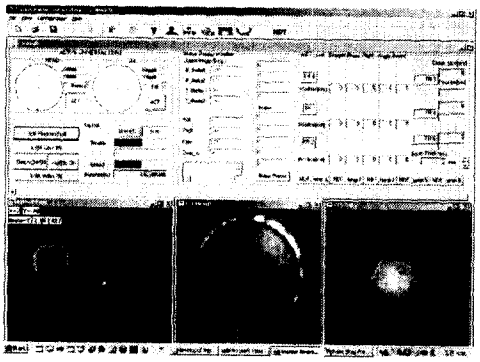


Fig. 8 Graphic user interface

4. 가상지도

사용자 인터페이스에서 가장 특징적인 부분은 좌측 하단부의 가상지도창이다. 여기서 가상지도라 함은 사용자 측면에서의 절대적인 좌표상의 매설배관의 모습을 말하며 사용자 환경 중에서 가상지도는 현재 로봇의 위치 및 결함의 위치 등을 알기 위한 중요한 요소이며 전술했던 바와 같

이 사용자 측면에서 로봇의 기능 및 활용부분에서 상당히 유용하게 활용될 수 있다.

한편 검사대상인 배관은 지하에 매설되어 있으며 강관으로 이루어진 구조물이기 때문에 일반 차량에서 사용되어지는 GPS 시스템은 사용할 수 없고 로봇 자체의 센서로 지도를 생성해야 하는 제한사항이 있다. 이번 장에서는 이러한 제한적인 조건에서 로봇 자체의 센서로 지도를 생성하는 알고리듬에 관하여 설명하고자 한다.

4.1 로봇 자세 측정

가상 지도를 생성하기 위해서는 로봇의 자세를 측정하여 절대적인 좌표에 대한 상대적인 로봇의 자세를 알아내야 한다. 원통형의 관의 특징상 로봇의 자세에 따라서 지도의 상하좌우가 결정되기 때문이다. 즉, 로봇이 바로 놓여있을 경우의 좌우는 로봇이 뒤집혀져 놓여있을 경우의 좌우와 반대가 된다. 여기서 로봇의 자세가 바뀌는 경우는 수평관에서 수직관을 주행한 후에 다시 수평관을 주행할 경우 생기게 된다. 즉, 수평관만을 주행한다면 로봇의 자세는 진행을 시작할 때의 자세와 동일하게 유지가 되지만 수직관을 주행한 후 수평관으로 진입하게 될 때 자세의 변화가 생기는 것이다. 한편 정확한 로봇의 자세를 결정하기 위해서는 Roll, Pitch, Yaw의 모든 각을 측정해야 한다. 만일 강관으로 이루어진 배관이 아니라면 지자계를 이용한 방향측정이 가능할 것이나 강관으로 이루어진 배관 내부에서 작동 가능한 센서는 중력을 이용한 센서로 한정되므로 방향을 나타내는 Yaw는 측정이 불가능하다. 결국 Roll, Pitch의 각만으로 로봇의 진행에 따른 지도를 생성해야 하며 생성된 지도는 절대적인 방위가 결정된 지도가 아닌, 로봇의 진행에 따라 생성된 상대적인 지도가 된다. 그러나 외부에서 배관검사로봇을 투입한 사용자는 최초 로봇의 진행방향을 알고 있으며 이중능동유니버설관절을 통한 조향각 또한 알 수 있으므로 로봇의 진행중 생성된 지도의 방위는 결정되어진 것과 다름이 없다.

중력을 이용하여 배관검사로봇의 자세를 측정하기 위하여 Fig. 9에서 나타낸 것과 같이 구동로봇에 3축 방향으로 수직하게 포텐쇼미터를 설치하여 추를 이용한 로봇의 자세를 측정하도록 하였다. Fig. 9에서 로봇의 진행방향은 $+x$축 방향이다.

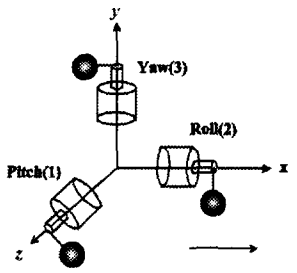


Fig. 9 Orientation sensor

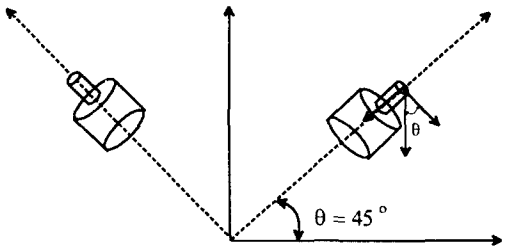


Fig. 10 Definition of gravity plumb

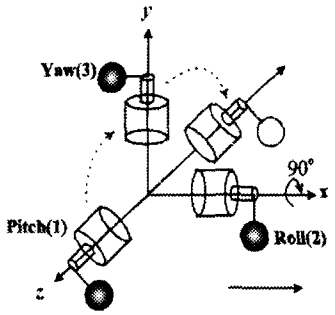


Fig. 11 Change of gravity sensor

여기서 추 무게는 다음과 같이 결정할 수 있다. Roll, Pitch, Yaw에 위치한 포텐쇼미터 각 각도의 측정범위는 $\pm 45^{o}$이내 이거나 $135^{o} \sim 225^{o}$ 이내가 되어야 Pitch와 Roll의 각도를 측정할 수가 있으며(Fig. 10참조), 포텐쇼미터가 추무게 20g 이상에서 작동한다고 가정을 하면 각 포텐쇼미터의 측정범위가 $\pm 45^{o}$가 되어야 하므로 실제 사용되는 추의 무게는 $20 \times \frac{1}{\cos 45^{o}} = 28.8$, 약 30g 이 되어야만 한다.(Fig. 10참조)

한편, Fig. 11에서 보이는 것과 같이 Roll을 측정하는 센서는 로봇의 진행축 방향으로 설치되어 있고 나머지 센서는 그 축에 대해 수직한 방향에 설치되어 있으므로 수평관을 지날 경우 Roll 각도의 값에 따라서 Pitch와 Yaw를 담당하는 센서는 그 역할이 바뀔 수가 있으며 또한 센서의 작동여부도 달라질 수 있다. 따라서 Pitch와 Yaw의 측정값 중에서 추의 작동 범위 내에 속하는 것을 선택하여 그때의 Roll값을 찾도록 한다. 이때 기준의 위치는 다음과 같이 정한다.

(1) Roll(Fig. 9의 2번 센서) : Fig. 9에서 보이는 것처럼 중력방향으로 추가 놓였을때 0^o로 정의하고 x축 방향으로 시계 반대방향으로 각이 증가하도록 설정한다.

(2) Pitch(Fig. 9의 1번 센서) : Fig. 9에서 보이는 것처럼 중력방향으로 추가 놓였을때 0^o로 정의하고 z축 방향으로 시계 반대방향으로 각이 증가하도록 설정한다.

(3) Yaw(Fig. 9의 3번 센서) : z축 방향으로 추가 놓였을때 0^o로 정의하고 y축 방향으로 시계 반대방향으로 각이 증가하도록 설정한다.

정의된 기준의 위치로부터 로봇의 Roll, Pitch를 결정하는 방법은 다음과 같다.

(1) Roll, Pitch, Yaw에 해당하는 센서의 값을 모두 읽는다.

(2) Pitch (Fig. 9에서 1번 센서)와 Yaw (Fig. 9에서 3번 센서) 중 포텐쇼미터의 각 측정범위인 $\pm 45^o$이내 이거나 $135^o \sim 225^o$이내가 되는 센서를 찾아 Pitch각으로 정하고 그때 Fig. 9의 2번 센서로부터 읽은 값을 Roll값으로 정한다.

(3) 두 센서의 값이 같은지 확인한다.

만약 두 센서 모두 포텐쇼미터의 각 측정범위인 $\pm 45^o$이내 혹은 $135^o \sim 225^o$이내의 범위를 벗어난 경우이면서 두 센서의 값이 90^o나 270^o로 같으면 로봇은 수직관 내부를 주행하는 경우가 된다. 또한 이때의 Roll값은 수직관을 주행하기 전의 Roll값과 같다. 한편 두 센서 모두 포텐쇼미터의 각 측정범위인 $\pm 45^o$이내 이거나 $135^o \sim 225^o$이내의 범위를 벗어난 경우이면서 두 센서의 값이 위의 90^o나 270^o가 아닌 값으로 같다면 로봇의 Roll값은 Fig. 10에서 보이는 것과 같이 $45^o, 135^o, 225^o, 315^o$ 중 하나의 값으로 귀결되며 측정값과 비교하여 가까운 값을 Roll값으로 결정함으로써 센서 오차를 줄인다.

만약 두 센서 모두 포텐쇼미터의 각 측정범위인 $\pm 45^o$이내 혹은 $135^o \sim 225^o$이내의 범위 내에 속해 있으면 Roll값의 범위에 따라 Pitch를 나타내는 센서를 선택한다. 즉, Roll 센서값이 $\pm 45^o$이내에 속해 있으면 1번 센서의 값을 Pitch로, $135^o \sim 225^o$이내에 속해 있으면 3번 센서의 값을 Pitch로 결정한다.

4.2 가상지도 생성 알고리듬

가상지도는 구동모터의 엔코더로 이동거리를 계산하고 그 이동거리 만큼 지도를 그리게 된다. 지도를 생성할 때는 앞절에서 측정한 로봇의 자세에 따라서 좌표변환을 해주며 지도를 생성하고 곡관이나 분지관 같이 조향이 생기는 곳은 이중능동유니버설관절의 센서값으로 조향각을 알 수 있으므로 그 조향각 만큼 배관을 꺾어서 그리게 된다.

5. 실 험

5.1 주행실험

Fig. 12는 이중능동 유니버설 관절을 이용하여 곡관을 주행하는 모습을 나타낸 것으로 상부 좌측과 하부의 원은 주행하는 로봇의 단면을 표시한 것이다. 이 경우 이중능동 유니버설 관절의 클러치는 OFF되어 수동 관절의 역할을 한다. 즉 곡관처럼 굳이 조향을 위하여 모터를 움직이지 않아도 되는 경우는 수동 관절로의 전환을 통해 조향 모터의 기어헤드에 부리가 가지 않고 단지 관벽의 기하학적 형상에 적절하게 순응하며 Roll이 없는 조향을 하여 조작자의 별도 조작 없이 주행이 가능한 장점이 있다. 한편 Fig. 13은 이중능동 유니버설 관절을 이용하여 분지관을 직진하는 모습을 나타낸 것이다. 이 경우 이중능동 유니버설 관절의 클러치는 ON되어 능동 관절의 역할을 한다. 그러나 조향을 필요로 하지 않고 직진하는 경우므로 조향 모터는 입력토크 없이 주행할 수 있으며 필요한 경우 조향 모터에 구동부 앞 모듈을 중력방향에 반하여 들 수 있을 정도의 토크를 주어 이동할 수도 있다.

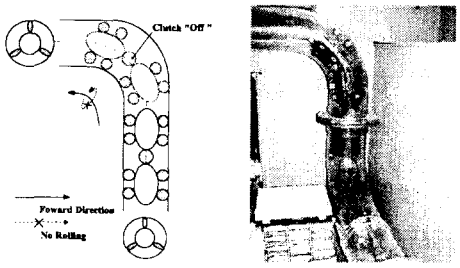


Fig. 12 Navigation test in elbow

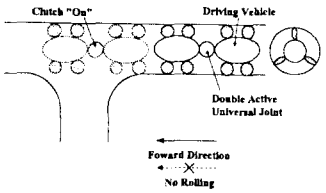
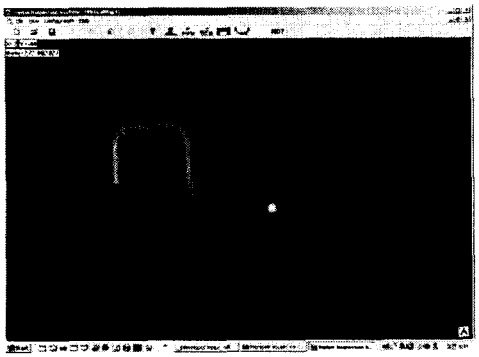


Fig. 13 Navigation test in branch

5.2 가상지도 동작실험

아크릴 테스트 베드에서 주행중 그리게 되는 가상지도의 동작실험을 하였다. 아크릴 테스트 베드의 전경은 Fig. 14의 (a)와 같으며 수평관 수직관, 진행방향에 수직하게 굽어져 있는 곡관, 마지막으로 지면방향으로 분지관으로 구성되어 있다. 관들은 일반 도시가스 배급관과 같은 크기의 8 inch관으로 되어 있으며 보통의 시공방법과 같게 모두 90°각도로 꺾어 설치하였다. 사용자 인터페이스의 가상지도 부분을 확대하여 나타낸 모습을 Fig. 14의 (b)에 보이고 있다. 실험의 결과에서 보이는 것과 같이 제안한 방법에 의한 가상지도는 실제 배관과 같은 형상을 나타내며 사용자에게 알려줌을 알 수 있다. 이 가상지도 부분은 사용자가 쉽게 알 수 있도록 확대 및 축소, view point의 회전 등 다양한 기능을 갖추고 있으며 사용자는 키보드의 화살표 키와 마우스로 위와 같은 조작을 할 수 있다.

(a) Test pipe of inpipe robot system



(b) Virtual map

Fig. 14 Test of virtual map generation

6. 결 론

최근 배관 내부 검사용 로봇 개발의 필요성이 증대되어 많은 연구자들에 의하여 개발되었거나 개발중이며 실용화하기 위한 노력을 아끼지 않고 있다. 그러나 지금까지 개발된 배관 내부 검사용 로봇 시스템은 그 이동의 유연성과 강인성의 부족으로 다양한 배관의 형상에 적응하여 검사를 수행하는 것이 제한적이었다. 또한 배관에 관한 검사가 단지 CCD카메라를 통한 육안 검사에 국한되어, 결함 발견시 그 위치를 대략적인 추정에 의하여 판단하기 때문에 검사를 마치고도 검사물 채취를 위한 부대작업에 상당한 오류가 뒤따랐다. 본 논문에서 개발한 배관검사로봇 시스템은 직관뿐만 아니라 수직관, 곡관, 분지관 등 다양한 관형상에 적응하여 이동할 수 있는 유연성과 자중 외에 비파괴 검사모듈 같은 검사장비를 탑재하여 이동할 수 있을 만큼의 강인성을 갖추었다. 또한 광케이블을 통한 데이터 송수신을 통하여 기존의 tether cable을 이용한 통신 거리보다 확장

된 장거리 검사가 가능하여 1km마다 지상으로 분기관이 생성되어 있는 국내 도시가스 배관의 검사에 유용하게 활용될 수 있다. 더욱이 본 논문을 통하여 제안한 가상지도를 통하여 지상에서 로봇을 조작하는 사용자는 매설되어 있는 배관 형상에 관한 정보와 배관 결함의 위치 등을 정확하게 알 수 있으므로 위치 추정 오류에 따른 부대작업을 줄일 수 있어서 통합적인 배관의 유지 및 관리, 검사가 가능할 것으로 기대된다. 실제로 외국에 비하여 상대적으로 영세한 국내의 도시가스 공급사들은 배관의 유지보수와 관리를 위하여 GIS나 그 밖의 장비로 오래전 매설한 배관의 지도를 만드는데 많은 비용을 소비하고 있으며 본 논문에서 제안한 가상지도는 이러한 부대비용의 절감에 큰 효과를 가져올 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 지원으로 수행되어진 것으로 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 김영환, 1998, "배관의 진단," 산업설비 안전성평가 연구센터 기술보고서 SAFE 97-3, pp. 87~130.

(2) 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.

(3) 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.

(4) 최혁렬, 송성진, 신현재, 전재욱, 류성무, 김학준, 1999, "소형로봇을 이용한 배관 비파괴검사 자동화기술," 제1회 배관안전진단 Workshop, pp. 35~47.

(5) Okada, 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.

(6) Okada, T. and Sanemori, T, 1987, "MOGRER : A Vehicle Study and Realization for In-pipe Inspection Tasks," 1987, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 6, pp. 573~582.

(7) Moraleda, J., Ollero, A. and Orte, M., 1999, "A Robotic System for Internal Inspection of Water Pipelines," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Sep. 1999.

(8) 최혁렬, 류성무, "지하매설 가스관 검사로봇 개발," 1998, 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 290~294.

(9) 최혁렬, 류성무, 백상훈, 조성휘, 송성진, 신현재, 전재욱, 2000, "지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제 17권 제2호, pp. 121~129.

(10) Ryew, S. M., Baik, 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.

(11) Sungmoo Ryew, Sangmoo Lee and Hyoukryeol Choi, 1999, "Design of Anthropomorphic Joint Mechanism," *The 3rd International Workshop on Advanced Mechatronics*, pp. 197~201.