

배관 로봇을 이용한 배관 검사 자동화 기술

Automated Technology for Pipelines Inspection Using Inpipe Robot

노세곤*, 최혁렬**,*†

Se-Gon Roh* and Hyoukryeol Choi**,*†

초 록 : 현재까지 검사를 목적으로 하는 배관 검사용 로봇에 관한 많은 연구가 소개되어 왔다. 그러나 지하매설 배관의 복잡한 배관 요소 내에서 주행 할 수 있는 충분한 이동성을 갖추고 있는 로봇을 개발한다는 것은 여전히 어려운 것처럼 보인다. 배관 검사에 사용하기 위한 로봇은 수평관 및 수직관과 같은 기본적인 배관요소 내에서 자유롭게 주행해야 한다. 더불어 축소관이나 곡관에서 주행 할 수 있고 특히 분기관에서 조향 능력은 필수적이다. 본 논문에서는 배관 검사 로봇의 개발에 있어 필수적인 요소와 기술이 소개되며 지난 수년간 연구를 통하여 개발한 배관검사 로봇이 소개된다.

주요용어: 배관 로봇, 차동 구동형, 분절형, 조향 메커니즘

Abstract Up to now a wide variety of researches on inpipe robots for inspection have been introduced, but it still seems to be difficult to construct a robot providing mobility sufficient to navigate inside the complicated configuration of underground pipelines. The robot for the inspection of pipelines should freely move along the basic configuration of pipelines such as along horizontal or vertical pipelines. Moreover it should be able to travel along reducers and elbows, and especially the capability for steering in branches is essential to it. In this report, critical points and technologies in the development of the inpipe inspection robots are introduced and inpipe robots developed for last several years are introduced.

Keywords: inpipe robot, differential drive, articulated type, steering mechanism

1. 서 론

배관(pipelines)은 유류 및 가스의 운반수단으로 가장 널리 사용되고 있다. 도시가스, 상하수도, 송유관, 화학시설, 원자력 발전 시설 등에 사용되는 배관은 설치 후 시간이 경과함에 따라 물리적 손상, 열화, 부식 등의 현상에 의해 파손의 위험성이 증대되고 있다. 따라서 배관의 검사, 보수, 유지는 지속적으로 행해져야 하지만, 이러한

작업은 배관 주변에 설치된 시설 및 장치로 인하여 접근이 까다롭다. 특히 매설된 배관의 경우 배관의 내부를 통과하지 않고는 접근이 불가능하고 배관을 관리하고 검사하는 데에는 막대한 비용과 인원이 소요되므로 현실적으로 불가능한 상황이다. 이러한 이유로 배관의 보수, 유지를 위해서 로봇을 이용하는 것이 가장 효과적이고 적절한 방법으로 보인다. 이미 국외에서는 이러한 필요성에 입각하여 다양한 구조의 배관검사용 로봇을 연구 개발해오고

있으며 부분적으로는 상용화되고 있다[12-17]. 그러나 아직까지 충분한 기능을 발휘할 수 있는 시스템을 완성하는 것이 쉬워 보이지는 않는다. 이는 배관이라는 특수한 환경으로 인해 로봇은 특별한 구조를 가져야 하며 제한된 움직임만이 가능하기 때문이다. 그리고 외부와의 무선 통신은 전파방해로 거의 불가능하며 케이블을 이용한 통신 및 전원 공급은 긴 거리의 배관의 환경에서는 까다롭다는 것도 주요한 이유가 된다.

본 논문에서는 이러한 장애를 극복하기 위해서 수년에 걸쳐 연구한 배관 내부 검사를 위한 로봇을 위해 필요한 여러 가지 분석과 구성요소, 전략, 설계 등의 핵심기술을 요약, 종합하여 소개하며 그에 따른 개발 사례를 보여 줄 것이다. 그 밖의 세부적인 내용과 검사장비, 통신, 신호처리, 원격조작 기술, 제어기술, 전원은 참고문헌 [1-11]에서 확인 할 수 있다.

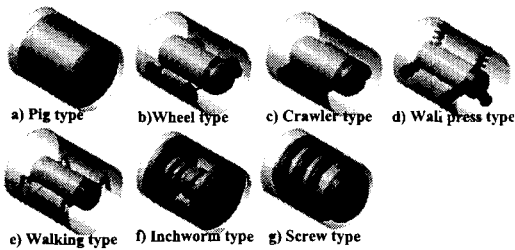


Fig. 1 Classifications of inpipe robots

2. 기존 연구

비파괴 검사장비 등의 검사 장비 탑재를 위한 배관 로봇의 주요한 관심사는 로봇의 작업영역과 그 주된 환경에서 얼마나 충분하고 적합하게 작업을 수행 할 수 있는지의 여부이다. 이러한 작업영역에서 충분한 능력을 발휘하기 위해서 로봇은 효과적인 주행성과 이동성을 확보해야만 한다. Fig. 1에서 나타난 것과 같이 배관로봇은 작업영역에 적합한 주행성과 이동성을 가진 구조적인 특징에 따라 다음과 같이 구분 할 수 있다.

a) 피그 시스템(Pig system)은 배관내에 흐르는 유체의 압력을 추진력으로 사용하며 직선으로 길게 배치된 송유관 등의 유류관에서 배관내부를 검사하는 상용화된 로봇 형태이다. b) 바퀴형(Wheel type)은 자동차와 같은 이동 메커니즘을 가지고 있으며 여러 로봇이 상용화되어 가고 있으며 단순한 구조와 이동성이 우수한 특징을 가

지고 있다. c) 무한궤도형(Crawler type)은 바퀴형의 바퀴 대신 캐터필러를 사용한다. d) 벽면 압착형(Wall press type)은 벽면을 압착하며 이로 인한 마찰력으로 수직관(vertical pipe)을 올라갈 수 있도록 설계되었으며 바퀴형이나 무한궤도형 중에도 이에 해당하는 것이 있다. e) 보행형(Walking type)은 다리를 가지는 형태이며 다양한 동작이 가능하지만 복잡한 구조로 인하여 아직 상용화와는 거리가 있다. f) 자벌레형(Inchworm type)은 매우 작은 단면의 배관이나 인간내부의 소화기에서 이동하기에 유용하다. g) 나선형(Screw type)은 다소 실험적인 주행 개념을 도입하여 볼트와 너트의 운동방법과 같은 형태로 배관내부를 주행한다. 대부분의 배관 로봇은 위에서 열거한 기본적인 로봇의 구조를 복합적으로 수용하고 있다.

지금까지 국외에서 개발되었던 다양한 배관 로봇들은 일반적으로 수평관에서 주행은 원활하지만 곡관(elbow)이나 수직관을 주행할 수 있는 경우는 흔하지 않고, 분기관(branch)에서의 조향, 선택 주행이 가능한 로봇은 아직까지 찾아보기 힘들다[12-17]. 이것은 이런 특별한 배관요소의 주행이 불필요하다거나 드물어서 주행 경로 상에서 배제하여 로봇을 설계했기 때문이라 생각할 수도 있겠지만, 사실 특수하고 다양한 작업공간을 갖는 배관의 전 요소를 주행시키도록 설계하는 것은 매우 까다로운 문제이다. 그러나 완전한 검사를 위해서 모든 배관요소에 적합하게 이동할 수 있는 자동화된 주행 기술을 가져야 하는 것은 자명한 일이다.

3. 배관 로봇의 핵심기술

배관 검사 로봇 시스템은 Fig. 2 에 나타난 것과 같이 종합적인 이동로봇 시스템의 개발을 필요로 한다.

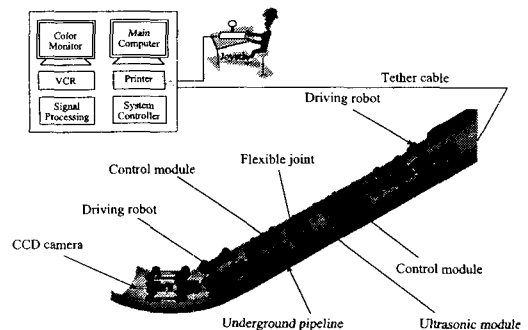


Fig. 2 Inpipe system in underground pipelines

매설된 배관 검사를 위해 각종 장비를 탑재해야 하고 검사장비, 통신, 신호처리, 원격조작 기술, 제어기술, 전원 등 다양한 분야의 기술이 통합되어야 한다.

본 장에서는 다른 로봇들과 구분되는 배관 로봇의 특수한 점과 이에 따른 주요 기술에 대해 소개한다.

3.1. 배관 요소의 분석

로봇은 배관이라는 환경에서 작업하게 된다. 배관은 로봇이 검사해야 하는 대상물이며 로봇의 움직임을 유도하는 주행 환경이면서, 동시에 로봇의 작업을 방해하는 장애 환경이 된다. 로봇이 원활하게 활동하기 위해서는 이러한 배관이라는 특수한 영역을 충분히 분석하고 이에 따라 로봇을 설계해야 한다.

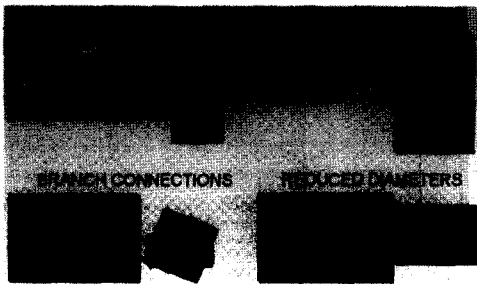


Fig. 3 Complicated configuration of pipelines

배관은 Fig. 3와 같이 배관의 대부분을 구성하는 수평관(horizontal pipe)과 수직관, 배관의 환경이 변하는 수축관(reducer), 밸브(valve), 플랜지(flange) 등이 산재하고 있다. 곡관은 배관 내 운송물질의 경로를 바꾸는 요소로 로봇이 극복해야 할 특수한 영역이다.

Fig. 4는 곡관의 형상이 어떻게 이루어져 있는가를 나타내고 있다. Circle A를 z 축을 중심으로 회전시키면 원환체(torus)가 생성되며 원환체의 일부분이 곡관이 된다.

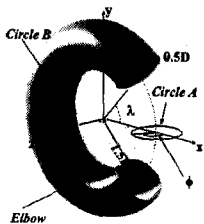


Fig. 4 Formation of an elbow

분기관은 배관이 교차할 때 유체의 흐름을 나누기 위해 사용된다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 곡관 두 개를 연결하고 곡관 사이에 직관을 결합한 특수한 형태의 구조와, 이 관들이 모이게 되는 부분에서, 세 개의 배관 외면을 포함하는 V 형태의 Area로 구성되어 있다.

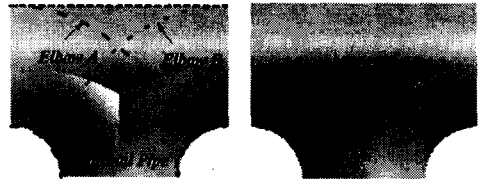


Fig. 5 Formation of a branch

3.2. 배관 요소에 따른 메커니즘과 주행 전략

배관은 좁은 공간과 장거리에 걸쳐 로봇이 주행해야 할 작업영역이다. 협소한 공간으로 인해 각종장비들은 하나의 차량에 모두 탑재하기 어렵다. 이 때문에 Fig. 2에서 나타내는 바와 같이 각종 장비들을 모듈별로 구성하여 연결한 기차와 같은 형상을 이루게 된다. 또한 장거리 이동이 가능해야 한다는 이동성 확보를 위해 바퀴형이나 무한궤도형이 채택되어 사용되고 있다. 그 중에서 배관 단면이 원이라는 특징으로 인해 배관 내면의 접촉성의 용이함과 구조적 단순함을 지닌 바퀴형이 일반적이다. 로봇이 주행해야 할 영역은 수직관이 산재하고 있다. 수직관에서 중력을 극복하면서 각 모듈을 견인하기 위하여 충분한 견인력을 확보해야 하며 로봇의 중심축에서 방사형으로 뻗어질 수 있는 벽면 압착식의 구조를 가지는 것이 효과적이다. 이러한 구조는 벽면과 로봇과의 접촉에 의한 마찰력으로 Fig. 6의 (a)와 같이 중력을 극복하면서 주행이 가능하게 할 수 있다. 배관 환경의 변화와 장애물의 극복을 용이하게 하기 위해서는 Fig. 6의 (b)와 같은

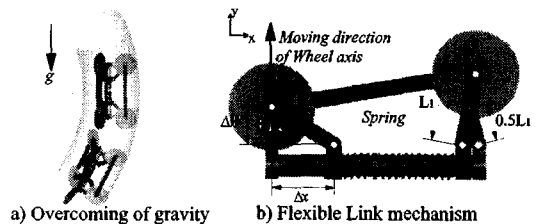


Fig. 6 Basic construction of an inpipe robot

메카니즘으로 횡방향으로 신축형 구조를 채택하여 배관 내면에 안정적인 접촉을 유지하여 추진력과 견인력을 제공하면서 주행을 원활하게 해야 한다.

Fig. 7은 로봇의 곡관 주행 양상을 설명하기 위한 그림이다. 로봇이 직관에 위치할 때는 로봇의 중심축은 배관 단면 중심을 통과하는 축과 일치한다.

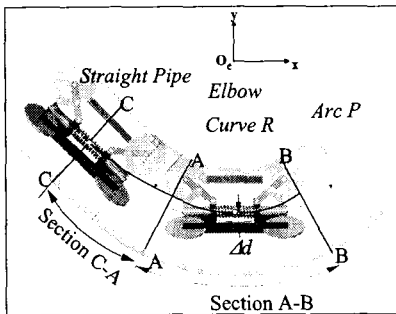


Fig. 7 Moving trajectory in an elbow range

로봇이 직관에서 곡관으로 진입하게 되면 로봇의 전방의 바퀴는 곡관 내에 위치하게 되고 후방의 바퀴는 직관에 위치하게 된다. 로봇이 곡관으로 진행함에 따라 로봇의 중심은 *Curve R*을 따라 이동하게 되며 배관 단면의 중심을 연결한 원호 궤적의 *Arc P*와 로봇의 중심 O_c 에서 Δd 로 서서히 오프셋(offset)을 가지게 된다. 여기서 Section C-A는 로봇이 직관과 곡관사이에 위치하게 되는 범위이며 Section A-B는 로봇이 곡관 내에만 존재하게 되는 범위이다.

곡관을 로봇이 주행하기 위해서는 기본적으로 로봇의 크기를 고려해야 하고[1,2,4] 효율적이고 원활한 주행을 위해서는 로봇의 바퀴가 접촉하는 곡관 안쪽면의 곡률이 다르다는 것을 고려해야만 한다. 곡관을 주행할 때 각 배관 면에 접촉하고 있는 바퀴의 속도가 모두 같을 경우 배관 곡률 반경이 큰 바깥쪽에서 접촉하고 있는 바퀴는 필연적으로 안쪽에 접촉하고 있는 바퀴와 진행과 보조를 맞추지 못하고 미끄러지면서 안쪽 바퀴의 추진으로 인해 끌려가게 된다. 따라서 타이어의 손상이 발생하고 기어 및 모터에 부하가 걸리게 되어 효율적이지 못한 주행을 하게 된다. 이런 문제점의 해결은 곡관의 형상에 따른 구동 바퀴비접촉을 유도하여(이러한 경우 공전바퀴(idle wheel)가 접촉한다) 로봇에 장착된 각 바퀴의 구동력 전달을 단속하거나[5-7] 곡관 형상에 대한 기하학적인 분석을 바탕으로 바퀴의 속도 조절 알고리즘을 적용하여 해

결할 수 있다[8-11].

Fig. 8은 분기관 주행 양상을 설명하기 위한 그림이다. 분기관을 주행하기 위해서 근본적으로는 곡관 주행을 위한 방법과 유사하게 생각할 수도 있다. 그러나 분기관 회전 주행 양상은 좀 더 복잡하고 그 주행 경로 (*Curve R_T*)를 산출하는 것은 매우 까다로운 문제이다. 이유는 다음과 같다.

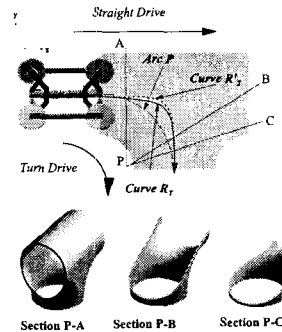


Fig. 8 Moving trajectory in a branch and various cross sections

첫째는 로봇은 방사형 구조의 바퀴가 배관 내면에 접하면서 주행하도록 설계되어 분기관에 진입하게 되면서 분기관의 형상으로 인해 바퀴의 일부가 배관내면에 접하지 못하는 구간이 발생하게 되어 바퀴의 이동 경로가 배관 내면을 따라 생성되지 않는다. 둘째, 로봇이 진행함에 따라 분기관에 바퀴가 접하게 되는 단면은 매우 다양하고 중력방향에 따라 여러 가지의 이동 궤적을 형성한다. 셋째는 분기관에서 회전 시 로봇은 3차원적인 회전이므로 배관 내면과 V형상의 평면 영역에 닿는 바퀴들에 비틀림이 발생하여 미끄러짐이 발생한다. 넷째는 분기관 회전 시 각 링크 간에 펼쳐지고 접혀지는 과정이 나타나면서 수식화 하기 어려운 궤적이 형성되며, 동시에 미끄러짐과 비틀림이 발생한다. 다섯째는 로봇의 회전할 방향이 중력방향에 대해서 어떠한 방향인지에 따라 궤적이 다르게 나타난다. 여기서 *Curve R_T*는 중력방향이 -y일 때의 로봇의 회전 경로를 나타내고 있으며 *Curve R'_T*는 중력방향이 +y일 경우를 나타내고 있다.

이러한 분기관에서의 회전 및 직진을 위한 조향을 위해서 Fig. 9의 (a)에서 나타낸 것과 같이 로봇은 특별히 설계된 능동 유니버설 조인트[3]와 조향 모듈을 장착하고, 이것을 조향을 위한 공간으로 진입시켜서 주행하게 되는

분절형(articulated type)이 일반적이다[1-7]. 특수하게는, 분기관의 기하학 적인 형상에 대한 분석을 바탕으로 고안되고 분기관 회전 알고리즘을 적용시킨 Fig 9의 (b)와 같은 3차원 속도차를 이용한 차동 구동형(differential drive type)이 개발되어 있다[8-11].

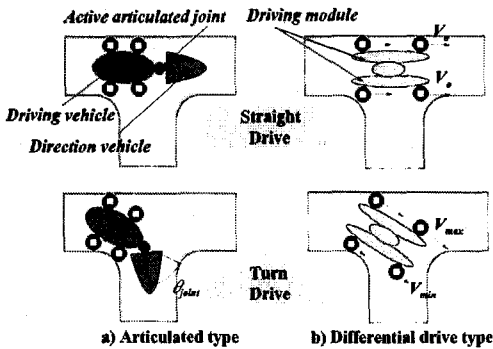


Fig. 9 Steerable robots

3.3. 기타 관련 기술

로봇은 현재 로봇의 위치 결함의 위치 등을 알기 위해 배관 안의 이미지를 전송하여야 하며 이동 거리, 환경의 크기, 로봇의 자세 등을 파악하여 사용자가 쉽게 인지 할 수 있도록 가상지도를 그릴 수 있도록 해야 한다. 배관이라는 특수한 환경을 감안한 가상지도는 CCD 카메라 외에 3축 방향으로 설치된 포텐쇼미터, 엔코더, 거리측정 센서, 중력센서 등에 관련된 기술의 집약이 필요하다[5-7].

배관이라는 특수한 환경은 전파방해를 동반하고 있으며 장거리 영역에 걸친 검사라는 측면으로 통신 및 전원 공급이 쉽지 않고 케이블의 무게와 장력, 꼬임현상은 배관 로봇이 반드시 해결해야 할 과제이다. 이를 위한 해결 방법은 배터리를 탑재한 자동 주행 검사 시스템이다. 다양한 각도로 이를 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 환경이 작은 배관의 경우 로봇 및 장비들의 소형화의 어려움으로, 완전한 배관 검사 시스템의 완성을 위해서는 관련 기술 분야의 비약적인 발전이 요구된다.

4. 개발사례

본 연구자들은 수 년 동안 MRINSPECT(Multifunctional Robotic crawler for INpipe inSPEction)의 명칭을 지닌 도시 가스 배관용 자동화 주행 로봇을 개발해오

고 있다[1-11]. Fig. 10에서 8인치 배관 로봇인 MRINSPECT II, III와 4인치 배관 로봇인 I, IV는 이동이 용이한 바퀴형 구조이며 공통적으로 수직관 주행성능 향상과 환경변화에 대응할 수 있는 벽면 압착식 신축형 메카니즘을 가진다. 각각은 곡관이나 분기관에서의 주행이 원활하도록 특별하게 고안된 메커니즘을 도입하고 있다. I은 수평관, 수직관, 곡관에서 효과적인 주행을 하며 환경변화에 대응하도록 설계된 초기 버전이다. II, III는 분기관 주행을 위해 고안된 분절형 메커니즘을 가지고 있고, 특히 III와 III plus는 다양한 센서, 통신 모듈, 비파괴 모듈, 컨트롤러, PC를 탑재한 통합 시스템으로 완성되었다. IV는 4인치 소형 배관을 위해 특별히 고안된 차동 구동형 메커니즘을 가지고 분기관 등의 각종 배관요소에서 효과적으로 주행한다.

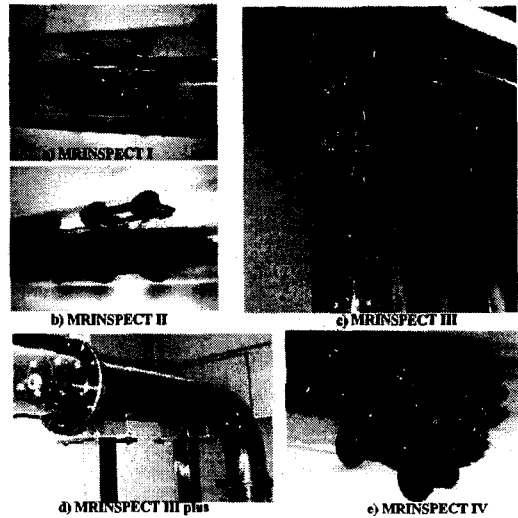


Fig. 10 MRINSPECT series

5. 결 론

최근 배관 내부 검사용 로봇 개발의 필요성이 증가하고 있으나 지금까지 개발된 배관 로봇들은 배관의 제한적인 요소들로 인하여 많은 문제점을 내포하고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있는 배관 로봇의 주요 핵심 기술을 설명하면서 배관로봇의 개발 방향을 제시하였다. 본 연구자들의 이러한 연구는 MRINSPECT라는 배관 로봇의 개발에 적용되었으며 많은 시행착오와 경험으로, 이후의 배관로봇 개발에 참고가

되는 연구 성과를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 많은 연구자들에게 도움이 되었으면 한다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 최혁렬, 류성무, "지하매설 가스관 검사로봇 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 290-294, (1998)
- [2] 류성무, 최혁렬, "가스관 내부검사용 주행로봇 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제23권, 12호, pp. 2216-2225, (1999)
- [3] S. M. Ryew, S. M. Lee and H. R. Choi, "Design of Anthropomorphic Joint Mechanism," The International Workshop on Advanced Mechatronics, pp. 197-201, (1999)
- [4] H. R. Choi, S. M. Ryew and S. W. Cho, "Development of Articulated Robot for Inspection of Underground Pipelines," Trans. of the 15th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT-15), Vol. 3, pp. 407-414, (1999)
- [5] 최혁렬, 류성무, 조성휘, 백상훈, 송성진, 신현재, 전재욱, "지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제17권, 2호, pp. 121-129, (2000)
- [6] S. M. Ryew, S. H. Baik, S. W. Ryu, K. M. Jung, S. G. Roh and H. R. Choi, "Inpipe Inspection Robot System with Active Steering Mechanism," IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems(IROS 2000), pp. 1652-1657, (2000)
- [7] 백상훈, 류성무, 노세곤, 최혁렬, "배관 검사 로봇 시스템 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 12호, pp. 2030-2039 (2001)
- [8] S. G. Roh, S. M. Ryew, J. H. Yang and H. R. Choi, "Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines," IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2001), pp. 761-766, (2001)
- [9] S. G. Roh, S. M. Ryew, and H. R. Choi, "Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas pipelines," International Symposium on Robotics(ISR2001), pp. 165-171, (2001)
- [10] 노세곤, 최혁렬, "지하 매설 가스 배관용 차동 구동형 배관 검사 로봇의 개발," 대한 기계 학회 논문집 A권, 제25권, 12호, pp. 2019-2029, (2001)
- [11] Se-gon Roh, Hyeokryoul Choi, "Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2002), pp. 2575-2580, (2002)
- [12] T. Okada and T. Kanade, "A three-wheeled self-adjusting vehicle in a pipe, FERRET-1," The International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 4, pp. 60-75, (1987)
- [13] T. Okada, and T. Sanemori, "MOGRER : A vehicle study and realization for in-pipe inspection tasks," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, No. 6, pp. 573-582, (1987)
- [14] W. Ilg, K. Berns, S. Cordes, M. Eberl, and R. Dillmann, "A Wheeled Multijoint Robot for Autonomous Sewer Inspection," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1687-1692. (1997)
- [15] S. Hirose, H. Ohno, T. Mitsui and K. Suyama, "Design of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ pipes," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2309-2314, (1999)
- [16] Atsushi Sadamoto, Hajime Sudo, Hiroshi Yamada, Takashi Togasaki, Masanobu Kimura, Nobuaki Kawahara, Kazuhiro Tsuruta, Takayuki Shibata, Hiroaki Izu, and Takahisa Sakakibara, "Wireless Micromachine for In-Pipe Visual Inspection and the Possibility of Biomedical Applications," International Symposium on Robotics(ISR2001), pp. 433-438, (2001)
- [17] Tomoyasu Ohya and Tokuji Okada, "Development of The Wheel-Type Robot with Steering in Pipe," International Symposium on Robotics(ISR2001), pp. 992-997, (2001)