

배관 내부 검사를 위한 로봇 기술

노 세 곤, 오 기 용, 최 혁 렬
성균관대학교

1. 서론

배관(pipeline)은 가스나 기름과 같은 많은 양의 유체를 빠르고 안전하게 수송하는 수단으로 현대 산업에서 필수적인 요소이다. 석유화학공장, 발전소 등과 같은 시설의 배관에서부터 우리의 생활과 밀접하게 관계되어 있는 가스관, 냉난방용 배관, 상하수도관까지 널리 설치, 운영되고 있다. 이러한 배관은 시간이 지남에 따라 노화, 부식으로 인한 결함이나 공사 등으로 인해 손상이 야기되고, 결국 배관의 안전성에 많은 문제점이 발생하게 되어 대형사고의 주요한 원인이 되고 있다. 따라서 배관의 검사, 보수, 유지는 지속적으로 이루어져야 하는데, 이를 위한 작업은 배관 주변에 설치된 시설 및 장치로 인하여 접근이 매우 까다롭다. 특히 매설된 배관의 경우 배관의 내부를 통하지 않고서는 접근이 불가능 하고 배관을 관리하고 검사하는 데에는 막대한 비용과 인원이 소요된다. 이러한 이유로 배관의 보수, 유지를 위해서 로봇을 이용하는 것이 가장 효과적이고 적절한 방법으로 보인다. 이미 국외에서는 이에 관한 다양한 연구가 진행되고 있으며 부분적으로는 상용화[2, 16, 17, 18, 19, 20, 24, 25] 되고 있다. 그러나 아직까지 충분한 기능을 발휘할 수 있는 배관 검사 시스템을 완성하는 것이 쉬워보이지는 않는다.

배관 검사를 위해서는 기본적으로 시각(vision), 초음파(ultrasonic) 탐상기술과 같이 로봇이 가져야 하는 전형적인 기술을 바탕으로 한다. 더불어, 배관 로봇은 일반적인 로봇을 위해 필요한 이러한 기술 외에 특별한 요구사항을 필요로 한다. 배관이라는 고립된 환경은 로봇과 외부와의 무선통신을 거의 불가능하게 하며, 케이블을 이용한 통신 및 전원을 공급하는 방식도 긴 거리의 배관과 복잡한 배관요소의 환경에서는 까다롭다. 따라서 배관 로봇은 배관 내에서 조작자의 조종 없이 자율 주행[11, 13, 14, 15, 20, 25]을 하는 것을 궁극적인 목표로 해야 한다. 배관 내부 주행을 위해서, 배관 로봇은 수평관, 수직관, 축소관, 확장관, 플랜지(flange), 곡관(elbow, L관), 분기관(branch, T관)과 같은 다양한 배관 요소를 모두 이동할 수 있는 주행 기술을 가져야 하고, 결국 이러한 다양한 배관요소의 극복이 배관 내에서 고립 없이 주행을 하여 검사를 완성 할 수 있게 해준다.

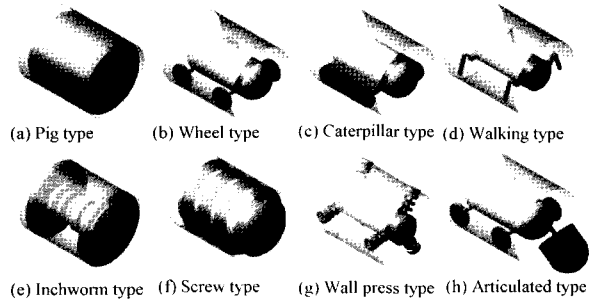


그림 1. 배관 로봇의 분류.

배관 로봇은 그림 1에서 보여 주는 바와 같이 이동하는 주행 메커니즘의 특징에 따라 다음과 같이 분류될 수 있다. (a) 피그형(pig type)은 배관내에 흐르는 유체의 압력을 추진력으로 사용하며 직선으로 길게 배치된 송유관 등의 유류관에서 사용되는 로봇 형태이다[1, 2]. (b) 바퀴형(wheel type)은 자동차와 같은 이동 메커니즘으로 여러 로봇이 하수관용 로봇으로 상용화되어 있으며 단순한 구조와 우수한 이동성을 가지고 있다[3-25]. (c) 무한궤도형(Crawler type)은 바퀴형의 바퀴대신 캐터필러(caterpillar)를 사용한다[26, 27]. (d) 보행형(walking type)은 다리를 가지는 형태이며 다양한 동작이 가능하지만 복잡한 구조로 인하여 아직 상용화되는 거리가 있다[29-32]. (e) 자벌레형(inchworm type)은 매우 작은 단면의 배관이나 인간 내부의 소화기에서 이동하기에 유용하다[33-42]. (f) 스크류형(screw type, helical drive type)은 바퀴들의 배열이 나선형 이루고 있고 수직관을 다소 유리하다[44-50]. (g) 벽면 압착형은(wall press type)은 중력방향에 관계없이 배관내의 이동을 원활히 하기 위해 채택되고 있다. (h) 분절형(articulated type)은 배관 로봇 특성상 다중 이동체(vehicle)가 기차와 같이 연결되어 있는 형태로서 채택되고 있으며 분기관의 이동에 용이하도록 설계 되었다. 이러한 로봇의 형태는 각각 개별적으로 채택되어 사용되거나, 위에서 열거한 기본적인 로봇의 구조를 조합하여 사용하고 있다. 지금까지 국내외에서 개발되었던 다양한 배관 로봇들은 일반적으로 수평관에서 주행은 원활하지만 곡관이나 수직관을 주행할 수 있는 경우는 흔하지 않고, 분기관에서의 조향, 선택 주행이 가능한 로봇은 아직까지 찾아보기 힘들다. 이것은 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. 그렇지만 자율주행과 배관내의 완전한 검사를 위해서는 모든 배관요소에 적합하게 주행할 수 있어야 한다.

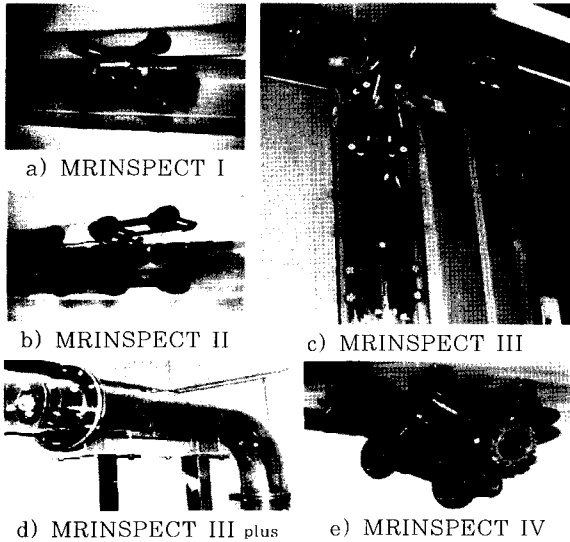


그림 2. MRINSPECT series.

본 논문에서는 배관요소에 적합하게 주행 할 수 있는 로봇의 개발에 필요한 주요 기술을 소개할 것이다. 여러 가지 산업용 배관 중에서 지하 매설 도시 가스 배관 로봇인 그림 3의 MRINSPECT I, II, III, IV의 개발 사례를 통하여 다양한 배관요소를 주행하고 극복할 수 있는 로봇의 구성 요소 및 설계, 주행 전략 등을 요약, 종합하여 소개한다 (자세한 내용은 참고문헌[57-72]에서 확인할 수 있다).

2. 배관 검사 시스템의 전체 구성

본 논문에서 배관 로봇(inpipe robot, in-pipe robot, pipe robot)이라고 통칭하고 있는 로봇은 일반적으로 CCD 카메라를 장착하고 조작자가 원격으로 감시(monitor)하는 구조를 가지고 있다. 좀 더 본격적인 배관의 세밀한 검사를 위하여 비파괴 검사(NDT : Non Destructive Testing) 장비를 탑재하기도 하며 드물게는 배관내에서 작업을 할 수 있도록 소형 로봇팔(manipulator)[9]을 탑재하는 경우도 있다. 이처럼 배관 로봇에 다양한 장비의 탑재가 요구됨에 따라 분절형 구조로서 여러 가지 모듈이 연결된 기차와 같은 형태를 가지게 된다. 전형적인 배관 검사 시스템은 그림 3에 나타나는 바와 같이 배관의 어느 일부분에서 로봇을 배관 내부에 진입시키고, 원격지에서 사용자가 배관 내부를 모니터링하면서 로봇을 조작하고 배관 내부 상태를 검사한다. 이러한 로봇은 케이블을 통하여 조작자와 통신하기 때문에 수십 미터이내에서만 주행이 가능하다. 이와 같은 단점을 보완

하기 위해 배터리, 비디오 녹화 장비, 레이저 스캐너, 비파괴 장비, 각종 센서 등을 탑재하여 자동으로 원거리 주행이 가능한 배관로봇도 최근 소개 되고 있다[13-15].

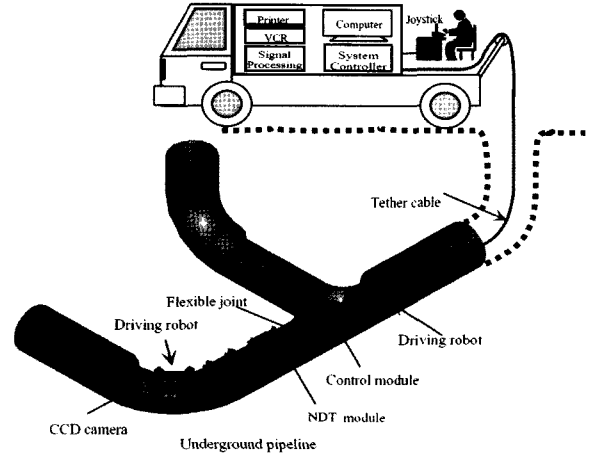


그림 3. 배관 검사 시스템.

3. 배관에 적합한 로봇의 구조

산업시설이나 주위에서 흔히 볼 수 있는 배관은 대부분이 원형의 단면을 가진 터널 모습의 동일한 형상이다. 따라서 특정 배관에서 주행할 수 있는 배관로봇이 어떠한 다른 용도로 사용되는 배관에서도 같은 방식으로 주행 할 수 있을 거라고 생각될 수도 있으나 배관내의 환경에 따라 로봇의 메커니즘이 선택되기도 한다. 예를 들어, 송유관에서 사용되는 배관 로봇은 배관내의 유류가 흐르고 있고 대부분의 배관 영역이 긴 수평관이라는 측면을 고려해서 설계되고 있다. 원통형으로 생긴 로봇의 구조는 프로펠러(propeller)를 장착하여 잠수함과 같이 유체를 밀어내면서 이동하는 능동식 구조를 갖고 있거나, 유류의 흐름에 의해 발생하는 유체의 압력에 의해 이동하는 수동형 구동 방식이 채택되고 있다. 그 외에 대부분의 상용화된 로봇은 구동 메커니즘이 단순하고 주행성능이 뛰어난 바퀴형을 채택하고 있다. 바퀴형을 주로 채택하고 있는 하수관에서 사용되는 배관 로봇은 수평 주행이 대부분이고 하수관 내의 이물질과 쓰레기들을 회피하고 극복하기 용이하도록, 그림 1 (b)와 같은 구조의 자동차와 유사한 형태로 상용화되어 있다. 이와 같이 배관내 환경이 로봇의 메커니즘을 결정하는 요인이 되기도 한다. 그렇지만 수도관, 가스관 등과 같은 대부분의 배관은 수직관, 곡관, 분기관, 확장관, 플랜지(flange) 등과 같은 다양한 배관 요소(fittings)를 가지고 있고 이러한 배관 요소가 로봇의 구조, 구동방식 등의 메커니즘을 결정하는 가장 큰 요인이 된다. 다음 장에서는 이러한 배관 요소를 분석하고 이러한 배관요소에 따라 어떻게 로봇의 구조와 주행 방법이 선택될 수 있는 가에 대하여 설명한다.

4. 배관 요소에 따른 로봇의 구조

4.1. 수평관, 수직관 주행 기술

배관 요소 중에서 원형의 단면을 가지는 원통형 관(pipe)의 축이 지면과 수평하게 놓여있을 때 수평관(horizontal pipe)이라고 통용하고 있으며 관의 축이 지면과 수직하게 놓여있을 때 수직관(vertical pipe)라고 한다. 배관의 대부분은 이 수평관과 수직관으로 이루어져 있다. 그러므로 기본적으로 수평관 내에서 자연스러운 이동을 할 수 있어야만 다른 배관요소에서도 주行的 유연성을 확보할 수 있다. 이러한 수평관 및 수직관에서 로봇이 이동하게 될 때, 로봇의 구동부가 닿는 배관 내면(inner surface)의 접촉면은 평면이 아닌 곡면이라는 사실이 고려되어야 한다. 예를 들어 바퀴를 구동메커니즘으로 가지는 로봇에 있어 타이어의 형상은 배관에 잘 접촉할 수 있는 모양을 가지고 있어야 충분한 견인력을 낼 수 있다. 또한 배관 단면이 원이라는 특징은 로봇의 바퀴 배치를 일반적인 평면에서의 이동체와는 다르게 설정하게 한다. 다시 말해서, 2차원 평면에서의 이동체는 바퀴가 평면에 수직하게 배치하지만 일반적으로, 배관로봇의 바퀴의 배치는 배관 단면인 원의 접선 방향으로 수직하게 로봇의 중심으로부터 방사형으로 펼쳐진 구조를 가진다. 이 방사형의 바퀴 배치 구조는 로봇이 이동하는 축 방향 중심으로 회전하는 것, 즉, 롤링(rolling)을 억제하면서 스프링으로 벽면을 압착하도록 링크가 구성되어 있다. 이러한 벽면 압착 방식은 뒤에서 언급할 다른 배관요소에서도 유용한 메커니즘이기도 하지만 특히 수직관을 주행할 시 반드시 필요한 메커니즘이다. 수직관에서 로봇이 주행한다는 것은 로봇이 이동시 중력이 항상 영향을 미친다는 것을 의미한다. 중력을 극복하면서 수직관을 오르기 위해서 로봇의 구조는 어떤 방식으로든 바퀴들이 벽면을 압착해야만 한다(강철관인 경우 때때로 자력을 이용하여 바퀴를 배관에 붙게 하는 방식도 사용되고 있다[8]). 이러한 벽면 압착구조에 있어서, 중력을 극복하여 주행 할 수 있도록 하기 위해서는 압착력을 발생시키는 스프링의 탄성력, 로봇 자체의 무게와 검사 장비를 수직으로 견인할 수 있는 견인력, 타이어의 마찰계수가 계산되어야 한다[57, 58, 63].

4.2. 환경이 변화하는 배관요소

배관 내부를 주행할 때, 로봇은 밸브, 축소관, 확장관, 플랜지 등과 같이 환경이 변화하는 배관 요소를 만나게 된다. 환경이 변화에 따라 유연하게 대처하면서 주행하기 위하여 로봇의 크기도 축소, 확장 되어 바퀴가 항상 배관내면에 충분히 접촉하게 하는 링크 구조가 필요하다. 기본적으로 슬라이더-크랭크(sliding-crank) 메커니즘을 변형하여 사용한다.

4.3. 곡관

곡관 이동시에는 곡관에서 로봇의 주행 바퀴가 닿는 위치

에 따라 각 바퀴의 주행 궤적이 달라진다. 따라서 곡관 주행시에는 이러한 주행 궤적이 달라져야 함을 고려해야 한다. 이를 극복하기 위하여 MRINSPECT III와 같이 곡관에서 바퀴의 접촉을 제한하거나 MRINSPECT IV의 기본 주행 개념인 각 바퀴의 속도를 달리하는 메커니즘으로 구성되어 야 로봇이 과부하나 구동부의 손상을 막을 수 있다.

4.4. 분기관

분기관은 곡관 두개를 연결하고 곡관 사이에 직관을 결합한 특수한 형태의 구조를 가지고 있다. 이러한 분기관에서의 주행은 로봇이 가고자 하는 방향으로 회전을 할 수 있도록 하는 조향(steering) 메커니즘이 필요하다. 조향이 가능한 로봇은 그림 5에서 보여주는 바와 같이 MRINSPECT II와 III와 같이 일반적으로 분절형(articulated type) 조향 메커니즘을 택하고 있다. 본 연구자들이 개발한 MRINSPECT IV은 특수하게 차동 구동형(differential drive) 조향 메커니즘을 택하고 있다.

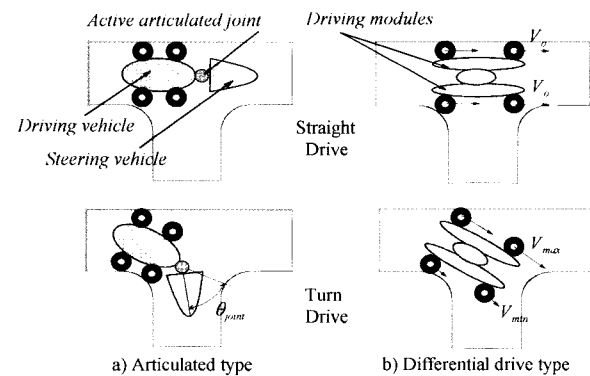


그림 4. 분기관에서의 조향 방법.

4.5. 배관 요소 주행을 위한 로봇의 크기

배관 요소 중 로봇의 주행에 있어 심각한 장애요소로 작용하고 있는 것은 곡관과 분기관이다. 현재 사용되는 곡관부 곡률반경은 관경의 1.0에서 1.5배이며 이동체의 길이가 길어지면 곡관부에서 휨현상이 발생하여 이동하지 못한다. 또한 분기관에서 고립되어 움직임이 불가능한 상황이 발생하지 않기 위해서는 조향이 가능한 적절한 크기를 가져야 한다[64].

5. 개발 사례별 특징

본 연구자들은 수 년 동안 도시 가스 배관 로봇을 개발해 오고 있다. 8인치 배관 로봇인 MRINSPECT II[58, 66, 67], III[59, 63, 68, 69]와 4인치 배관 로봇인 I[58, 65], IV[60, 61, 62, 63, 64, 70, 72]는 이동이 용이한 바퀴형 구조이며 공통적으로 수직관 주행성능 향상과 환경변화에

대응할 수 있는 벽면 압착식 신축형 메커니즘을 가진다. I은 수평관, 수직관, 곡관에서 효과적인 주행을 하며 환경 변화에 대응하도록 설계된 초기 버전이다. II, III는 분기관 주행을 위해 고안된 분절형 메커니즘을 가지고 있고, 특히 III와 IIIplus는 다양한 센서, 통신 모듈, 비파괴 모듈, 컨트롤러, PC를 탑재한 통합시스템으로 완성되었다. IV는 4인치 소형 배관을 위해 특별히 고안된 차동 구동형 메커니즘을 가지고 분기관 등의 각종 배관요소에서 효과적으로 주행한다.

5.1. MRINSPECT I

그림 5에 소개되는 MRINSPECT I은 배관 내부를 검사하기 위한 로봇의 초기 모델이다. 소형카메라와 한 개의 구동모터를 가지고 있다. 6개의 링크(link) 구성으로 각 링크의 끝에 모두 6개의 구동 바퀴가 부착되어 있다. 각각의 바퀴는 타이밍벨트를 사용하여 모터로부터 동력을 전달받는다. 각각 두개씩 쌍을 이루는 링크는 세 쌍이 120° 간격으로 배치되어 배관내에서 중심을 유지하고 각 바퀴가 골고루 배관면에 접촉하여 이동체가 비틀어지지 않도록 몸체를 유지하고 있다. 배관면의 접촉은 두개의 스프링이 각각 3개씩 링크를 똑같은 힘으로 밀고 있는 구조이다. 그림 6은 배관내에서 로봇이 주행하고 있는 모습을 보여 주고 있다.

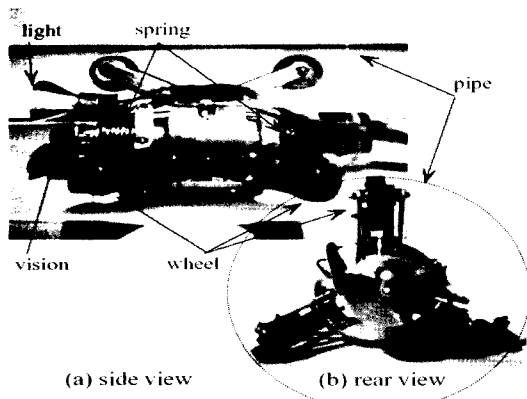


그림 5. MRINSPECT I.



그림 6. MRINSPECT I 실험.

5.2. MRINSPECT II

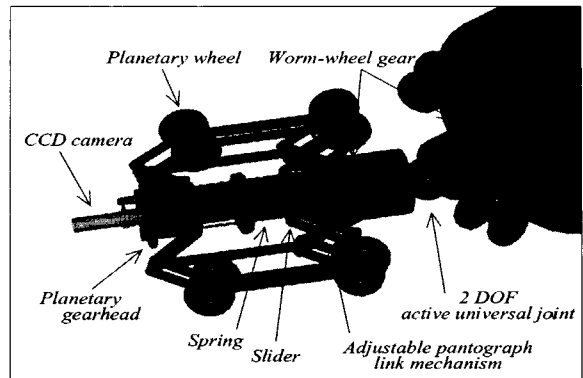


그림 7. MRINSPECT II.

그림 7의 MRINSPECT II는 관의 형상 및 환경변화에 능동적으로 변화하여 벽면에 일정한 힘을 유지하며 바퀴를 압착 할 수 있는 메커니즘으로 설계되었다. 링크 구조는 슬라이더를 스프링으로 밀어냄으로써 바퀴가 벽면 밀착 과정을 수행하고 일정한 압착력을 만들어 낸다. 각각의 바퀴는 중앙에 있는 모터와 타이밍벨트로 연결되어 구동된다. 이 로봇은 조향모듈과 구동모듈로 이루어져 있다. 두 모듈을 연결하는 조인트는 조향모듈을 조향하기 위한 자체 개발한 2자유도 능동 유니버설 관절(Active universal joint)이 사용된다[73]. 이 관절은 2자유도로 링크축을 중심으로 꼭지각 $\pm 44^\circ$ 의 원뿔내의 공간에서 운동이 가능하며 구동모듈에 연결되어 있는 조향모듈의 조향 방향을 결정 할 수 있다. 이 관절의 운동 영역은 $\pm 44^\circ$ 이므로 최소 1.5D의 곡률을 가진 대부분의 곡관, 분기관에서 뿐만 아니라 최소 1.0D의 곡률을 가진 곡관, 분기관까지 이동이 가능하도록 만들어 준다.

5.3. MRINSPECT III

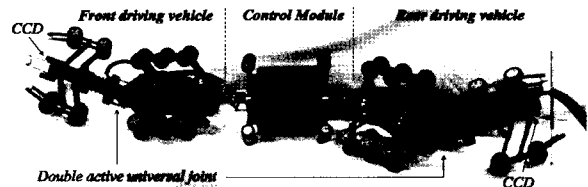


그림 8. MRINSPECT III.

MRINSPECT III은 그림 8에서와 같이 구동부의 앞과 뒤에 각각 두 대가 배치되어 전후진시에 견인 및 조향을 할 수 있으며, 그 사이에 비파괴 검사 장비와 제어부가 이중 유니버설관절로 연결되어 있다. MRINSPECT III의 링크 구조는 II와 유사한 구조로 로봇중심의 구동모터가 타이밍벨트로 연결로 되어 각 바퀴를 구동시킨다. 그림 9에서 보이는 바와 같이 링크의 3쌍의 바퀴 중 중앙의 한 쌍은 구동력이

없는 자율 회전(idle) 바퀴를 장착하였는데, 이 자율 회전 바퀴는 구동바퀴가 배관면에 닿는 높이보다 낮게 위치하고 있다. 이러한 구조는 곡관주행 시 곡률반경이 작은 배관면에 위치하는 링크 축에서는 자율 회전 바퀴가 접촉하게 하고 곡률반경이 큰 배관면에서는 구동 바퀴가 접촉하게 된다. 이러한 구조는 곡관에서 바퀴들의 접촉하는 궤적이 다르므로 인해 발생하는 바퀴면의 미끄럼을 막기 위해 고안된 메커니즘이다. 전면부 조향 모듈의 링크 구조는 유선형을 모사한 구조로 분기관에서 조향을 원활하게 도와준다.

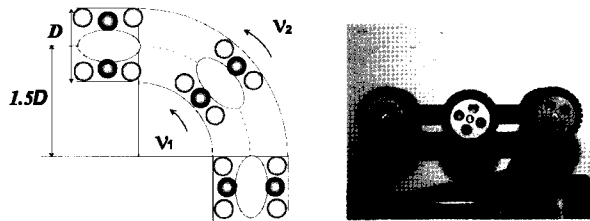


그림 9. 곡관에서의 자율 바퀴의 기능.

조향 메커니즘은 그림 10의 이중능동유니버설관절이라고 불리는 2자유도 관절로 설계되었다. 수직축에 대해 기울어진 두개의 반구와 이를 감싸는 외측의 유니버설관절로 이루어져 있으며 두개의 반구를 모터를 사용하여 각각 구동함으로써 원하는 방향으로 조향을 할 수 있도록 되어 있고, 진행방향의 축 중심의 회전 운동을 억제할 수 있다. 두 개의 모터의 기어부에는 자기 클러치(magnetic clutch)가 장착되어 있는데 조향이 필요하지 않는 곡관주행의 경우 그림 10에서 나타나는 바와 같이 자기 클러치가 능동 유니버설 조인트와 조향 모터와의 연결을 차단시켜 수동 조인트로 전환시킨다.



그림 10. 이중 능동 유니버설 조인트.

이러한 구조는 조향 모터의 기어부에 무리가 가지 않고 단지 배관 내면의 기하학적 형상에 적절하게 순응하며 조향하게 하여 조작자의 별도 조작 없이 주행을 가능하게 한다. 분기관에서 직선 주행이나 회전 주행(turn drive)의

경우 그림 12에서와 같이 이중 능동 유니버설관절의 클러치가 작동하여 능동관절의 역할을 한다. MRINSPECT III는 배관내에서 주행한 궤적을 추정하기 위하여 그림 13에서와 같이 가상지도 만들 수 있도록 설계되었다.

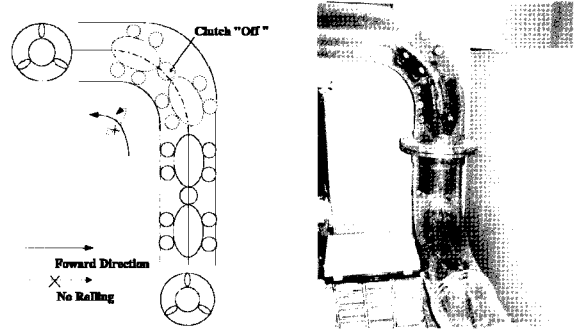


그림 11. MRINSPECT III의 곡관 주행.

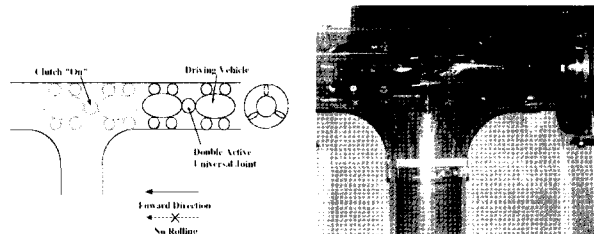


그림 12. MRINSPECT III의 분기관 주행.

지상에서 로봇을 조작하는 사용자는 매설되어 있는 배관의 형상에 관한 정보와 배관 결함의 위치 등을 추정하여 위치 추정오류에 따른 부대작업을 줄일 수 있기 때문에 통합적인 배관의 유지 및 관리, 검사가 가능해진다. 이러한 가상지도를 생성하기 위해서는 로봇의 자세를 측정하여 절대적인 좌표에 대한 상대적인 로봇의 자세를 알아내야 한다. 원통형의 관의 특징상 로봇의 자세에 따라서 지도의 상하 좌우가 결정되기 때문에 롤(roll), 피치(pitch)의 각을 측정해야만 로봇의 진행에 따른 상대적인 지도를 만들 수 있다.

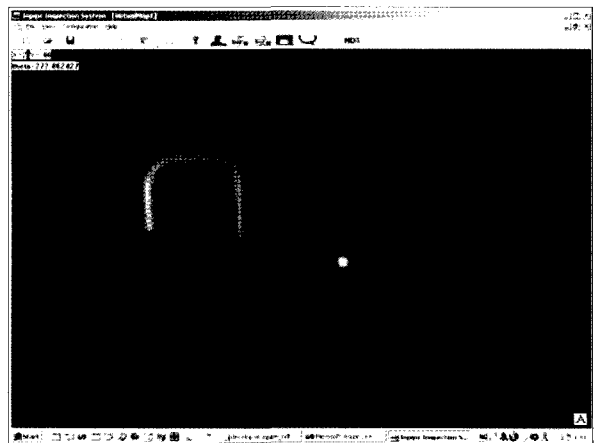


그림 13. 가상지도.

그러기 위해서 그림 14에서처럼 구동로봇에 x, y, z 3축 방향으로 수직하게 추에 포텐쇼미터(potentiometer)를 장착하여 로봇의 자세를 측정한다.

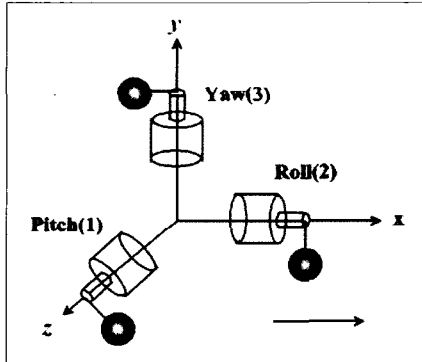


그림 14. 자세 추정 센서.

5.4. MRINSPECT IV

그림 15의 MRINSPECT IV는 4인치 배관을 검사할 수 있도록 하기 위한 로봇으로써, 상대적으로 작은 배관에서의 원활한 주행을 위해 독특한 메커니즘이 사용되었다. 이 로봇은 특징은 각 링크에 각각 세 개의 모터를 사용하여 링크에 부착되어 있는 바퀴에 독립적으로 구동력을 전달시킨다. 이러한 구조는 곡관에서 능동적인 속도차를 발생시켜 곡관에서 발생할 수 있는 구동부의 부하와 미끄러짐을 근본적으로 막아 줄 수 있는 메커니즘이다. 이러한 속도차를 이용한 주행 방식은 분기관에서의 조향도 쉽게 할 수 있는 구조를 가진다. 앞서 설명한 MRINSPECT II, III는 능동 유니버설 조인트를 사용하여 로봇의 구동과 별도의 모터를 장착하고 있는데 MRINSPECT IV는 구동부에 사용하는 모터만을 이용하여 로봇의 조향도 가능하기 때문에 로봇의 크기를 줄일 수 있고, 모터와 구동부와 직접적으로 연결되어 있기 때문에 구조도 단순화 시킬 수 있다.

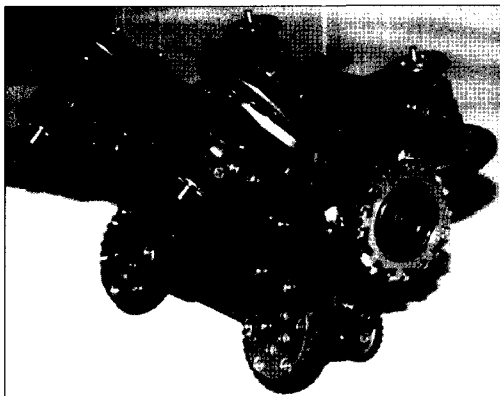


그림 15. MRINSPECT IV.

그림 16에 나타난 바와 같이 몸체 프레임은 각각의 세 개의 구동 모듈과 CCD 카메라부로 이루어져 있다.

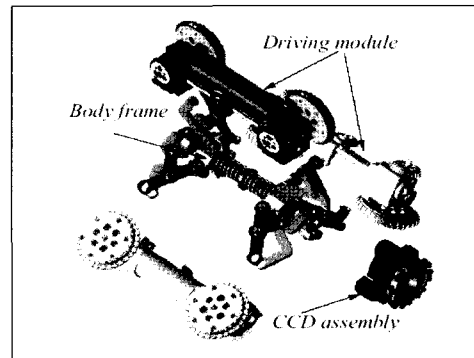


그림 16. MRINSPECT IV의 구성.

각각의 구동 모듈의 구동 바퀴는 그림 17에서 나타나는 바와 같이 서로 기어부로 연결되어 있으며 세 개의 구동 모듈이 링크로 연결되어 있다. 하나의 구동 모듈 전방에 위치한 바퀴들은 다른 두개의 구동 모듈의 전방에 위치한 바퀴들과 서로 링크로 구속되어있고 마찬가지로 후방에 위치한 바퀴들도 서로 구속되어 있다.

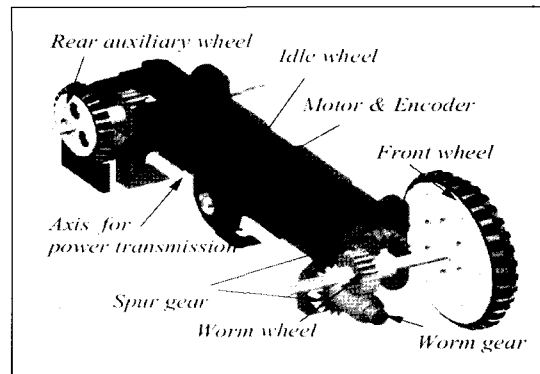


그림 17. MRINSPECT IV의 구동 모듈.

front wheel set과 rear wheel set이라고 명명한 바퀴부들은 그림 18에서와 같이 서로 독립적으로 링크가 움직이기 때문에 환경변화에 보다 유연하게 대처하여 보다 효과적으로 추진력을 생성하게 하는 구조를 가지고 있다.

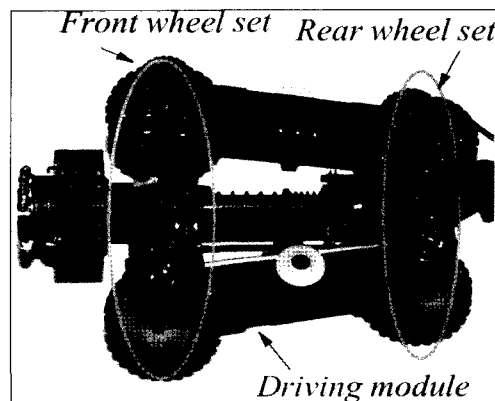


그림 18. MRINSPECT IV의 링크 구조.

이러한 독립적인 구동 모듈과 링크구조를 바탕으로 곡관에서의 주행 모습과 분기관에서의 주행 모습이 그림 19와 20에 나타나고 있다.

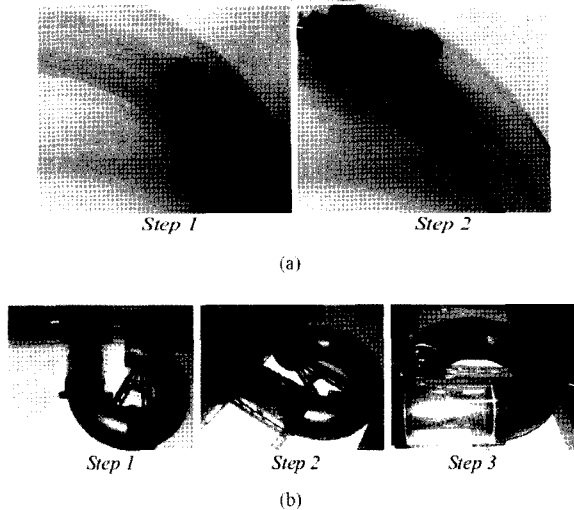


그림 19. MRINSPECT IV의 곡관 주행.

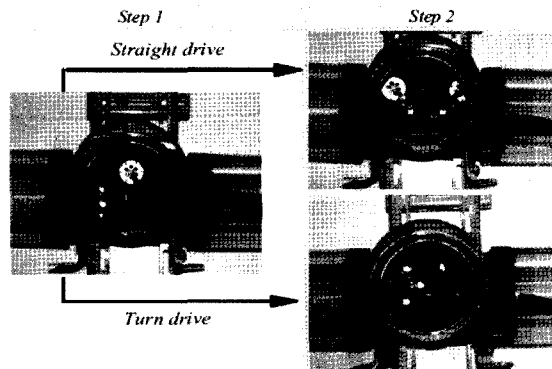


그림 20. MRINSPECT IV의 분기관 주행.

6. 결 론

본 논문에서는 배관 로봇의 개발함에 있어 고려해야 할 사항, 로봇의 메커니즘, 주행 방법 등의 주요 기술을 소개하였다. 각각의 기술들은 다양한 메커니즘의 배관 로봇 개발에 적용되었으며, 그 성과로 실용성이 확보된 상태이다. 본 연구자들의 다년간에 걸친 이러한 연구를 바탕으로 관련된 연구자들에게 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

1. J. Okamoto Jr, J. C. Adamowski, M. S. G. Tsuzuki, F. Buiochi, C. S. Camerini, "Autonomous System

For Oil Pipelines Inspection," *Mechatronics*, vol. 9, pp. 731-743, 1999.

2. <http://www.new-technologies.org/ECT/Mechanical/smartpigs.htm>

3. T. Okada and T. Kanade, "A Three-Wheeled Self-Adjusting Vehicle in a Pipe, FERRET-1," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 6, no. 4, pp. 60-75, 1987.

4. T. Okada and T. Sanemori, "MOGRER: A Vehicle Study and Realization for In-Pipe Inspection Tasks," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 6, pp. 573-582, 1987.

5. 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.

6. K. -U. Scholl, V. Kepplin, K. Berns, and R. Dillmann, "An Articulate Service Robot for Autonomous Sewer Inspection Tasks," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS '99)*, vol. 2, pp. 1075-1080, 1999.

7. K. Suzumori, K. Hori, and T. Miyagawa, "A direct-drive pneumatic stepping motor for robots: designs for pipe-inspection microrobots and for human-care robots," *IEEE. Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA)*, vol. 4, pp. 3047-3052, 1998.

8. Y. Kawaguchi, I. Yoshida, K. Iwao and T. Kikuta, "Sensors and Crabbing for an In-pipe Magnetic-wheeled Robot," *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 16-20, 1997.

9. K. Suzumori, T. Miyagawa, M. Kimura and Y. Hasegawa, "Micro Inspection Robot for 1-in Pipes," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 4, pp. 286-292, 1999.

10. Y. Kawguchi, I. Yochida, H. Kurumatani, and T. Kikuta, "Development of an In-pipe Inspection Robot for Iron Pipes," *J. of the Robotics Society of Japan*, vol. 14, no. 1, pp. 137-143, 1996.

11. V. Kepplin, K. -U. Scholl, K. Berns, "A Mechatronic Concept for a Sewer Inspection Robot," *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 724-729, 1999.

12. T. Tsubouchi, S. Takaki, Y. Kawaguchi, and S. Yuta, "A straight pipe observation from the inside by laser spot array and a TV camera," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, vol. 1, pp. 82-87, 2000.

13. K. -U. Scholl, V. Kepplin, K. Berns and R. Dillmann, "Controlling a Multijoint Robot for Autonomous Sewer Inspection," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA 2000)*, vol. 2, pp. 24-28, 2000.
14. M. Mhramatsu, N. Namiki, U. Koyama, and Y. Suga, "Autonomous mobile robot in pipe for piping operations," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, vol. 3, pp. 2366-2171, 2000.
15. J. K. Ong, D. Kerr, and Bouazza-Marouf, K., "In-pipe multi-robot system:Modular configurable co-operative semi-autonomous robotic units," *Proc. of the International Gas Research Conference (IGRC)*, Paper NoDo07, 2001.
16. <http://www.ka-te-system.com/html/homee.html>
17. <http://www.oge.co.jp/english/INDEX.asp>
18. <http://www.new-technologies.org/ECT/Civil/smartsew.htm>
19. <http://www.cuesinc.com/Default.htm>
20. <http://www.nygaz.org>
21. <http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/grislee/grislee.shtml>
22. <http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/explorer/explorer.shtml>
23. <http://www.nasatech.com/TSP2/cats.php>
24. <http://www.taris.ru/product/inspec/e prod.html>
25. <http://www.ais.fraunhofer.de/>
26. H. T. Roman, B. A. Pellegrino, W. R. Sigrist, "Pipe crawling inspection robots: an overview," *IEEE Trans of Energy Conversion*, pp. 576-583, 1993.
27. <http://www.robotics.com/robomenu/inel.html>
28. S. Nagano, Y. Oka, "Application of In-pipe Visual Inspection Robot to Piping Internal Surface Lining," *5th Int. Symposium. on Robotics in Construction*, pp. 897-906, 1988.
29. W. Neubauer, "A Spider-Like Robot that Climbs Vertically in Ducts or Pipes," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp. 1178-1185, 1994.
30. F. Pfeiffer, T. Robmann and K. Loffer, "Control of a Tube Crawling Machine," *Int. Conf on Control of Oscillations and Chaos*, vol. 3, pp. 586-591, 2000.
31. G. V. Kostin, F. L. Chernousko and N. N. Bolotnik, "Regular Motions of a Tube-Crawling Robot : Simulation and Optimization," *Proc. of Workshop on Robot Motion and Control*, pp. 45-50, 1993.
32. F. Nickols, D. Ho, S. O. Harrold, R. T. Bradbeer, L. Yeung, "An Ultrasonically Conrolled Robot Submarine for Pipe Inspection," *4th Annual Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 142-147, 1997.
33. T. Fukuda, H. Hosokai, M. Uemura, "Rubber gas actuator driven by hydrogen storage alloy for in-pipe inspection mobile robot with flexible structure," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA)*, vol. 3, pp. 1847-1852, 1989.
34. Y. Kondoh and S. Yokota, "Micro In-Pipe Mobile Machines by Making Use of an Electro-Rheological Fluid," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems(IROS 1997)*, vol. 3, pp. 1672-1677, 1997.
35. C. Anthierens, C. Libersa, M. Touaibia, M. Betemps, M. Arsicault and N. Chaillet, "Micro Robots Dedicated to Small Diameter Canalization Exploration," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems(IROS 2000)*, vol. 1, pp. 480-485, 2000.
36. K. Tsuruta, T. Sasaya, T. Shibata, and N. Kawahara, "Control Circuit in an In-pipe Wireless Micro Inspection Robot," *Proc. of Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pp. 59-64, 2000.
37. L. Jun, P. Sun and, X. Qin, "Study on Micro-Robot in Small Pipe," *Int. UKACC Int. Cof. control*, vol. 2, pp. 1212-1217, 1998.
38. L. Jun, P. Sun, L. Lian, X. Qin and Z. Gong, "Improvement of Characteristics of In-Pipe Micro Robot," *Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pp. 153-156, 1999.
39. S. E. Landsberger and B. F. Martin, "The Design of a Pipe Crawling Robot for Control of Zebra Mussel Infestations," *Proc. of Mastering the Oceans Through Techonology*, vol. 2, pp. 819-824, 1992.
40. A. Menciassi, Jong H. Park, S. Lee, S. Gorini1, P. Dario, Jong-Oh Park, "Robotic Solutions and Mechanisms for a Semi-Autonomous Endoscope," *Proc.of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1379-1384, 2002.
41. N. Mitsumoto, K. Tsuruta, T. Shibata, N.



- Kawahara, "Wireless Link System for Communication and Energy Transmission of Microrobot," *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pp. 107-112, 2001.
42. M. Takahashi, I. Hayashi, N. Iwatsuki, K. Suzumori, N. Ohki, "The development of an in-pipe microrobot applying the motion of an earthworm," *Proc. of International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 35-40, 1994.
 43. A. M. Bertetto, M. Ruggiu, "In-pipe inch-worm pneumatic flexible robot," *Proc. of IEEE/ASME International conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, vol. 2, pp. 1226-1231, 2001.
 44. I. Hayashi and N. Iwatsuki, "Micro Moving Robotics," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems(IROS 1998)*, pp. 41-50, 1998.
 45. H. Nishikawa, T. Sasaya, T. Shibata, T. Kaneko, "In-pipe Wireless Micro Locomotive System," *Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pp. 141-147, 1999.
 46. C. Anthierens, A. Ciftci, and M. Betemps, "Design of an electro pneumatic micro robot for in-pipe inspection," *IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics(ISIE)*, vol. 2, pp. 968-972, 1999.
 47. I. Hayashi, N. Iwatsuki, S. Iwashina, "The running characteristics of a screw-principle microrobot in a small bent pipe," *Proc. of Int. Symposium on Micro Machine and Human Science(MHS)*, pp. 225-228, 1995.
 48. I. Hayashi, N. Iwatsuki, K. Morikawa, M. Ogata, "An in-pipe operation microrobot based on the principle of screw-development of a prototype for running in long and bent pipes," *Proc. of International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pp. 125 -129, 1997.
 49. M. Horodincea, I. Dorftel, E. Mignon, and A. Preumont, "A simple architecture for in-pipe inspection robots," *Int. Colloquium on Mobile and Autonomous Systems, 10 Years of the Fraunhofer IFF, Magdeburg*, 2002.
 50. S. Iwashina, I. Hayashi, N. Iwatsuki, and K. Nakamura, "Development of in-pipe operation micro robots," *Proc. of Int. Symposium on Micro Machine and Human Science(MHS)*, pp. 41-45, 1994.
 51. K. Suzumori, S. Wakimoto, M. Takata, "A miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 2735-2740, 2003.
 52. S. Fujiwara, R. Kanehara, T. Okada, and T. Sanemori, "An articulated multi-vehicle robot for inspection and testing of pipeline interiors," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, vol. 1, pp. 509-516, 1993.
 53. K. Taguchi, N. Kawarazaki, "Development of in-pipe locomotion robot," 'Robots in Unstructured Environments', *Fifth International Conference of Japan Advanced Robotics(ICAR)*, vol. 1 pp. 297-302, 1991.
 54. Y. Kawaguchi, Y. Lju, T. Tsubouchi, and S. Arimoto, "An Efficient Algorithm of Path Planning for an Internal Gas Pipe Inspection Robot," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1155-1160, 1992.
 55. T. Fukuda, H. Hosoki, and N. Shimasaka, "Autonomous Plant Maintenance Robot(Mechanism of Mark IV and Its Actuator Characteristics)," *IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 471-478, 1990.
 56. T. Idogaki, H. Kanayama, N. Ohya, H. Suzuki, T. Hattori, "Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine," *Proc. of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 193-198, 1995.
 57. S. M. Ryew and H. R. Choi, "Double Active Universal Joint(DAUJ): Robotic Joint Mechanism for Humanlike Motions," *IEEE Transactions On Robotics and Automation*, vol. 17, no. 3, pp. 290-300, June, 2001.
 58. 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.
 59. H. R. Choi, S. M. Ryew, 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.
 60. S. M. Ryew, S. H. Baik, S. W. Ryu, K. M. Jung, S. G. Roh, 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.

61. S. G. Roh, S. M. Ryew, J. H. Yang, 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.

62. S. G. Roh, S. M. Ryew, H. R. Choi, "Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas pipelines," *International Symposium on Robotics(ISR2001)*, pp. 165-171, 2001.

63. S. G. Roh, H. R. Choi, "Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe robot," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002)*, pp. 2575-2580, 2002.

64. H. R. Choi, S. M. Ryew, "Robotic System with Active Steering Capability for Internal Inspection of Urban Gas Pipelines," *Mechatronics*, vol. 12, no. 5, pp. 713-736, 2002.

65. S. G. Roh, H. R. Choi, "Deferential Drive Inpipe Robot for Moving Inside of Urban Gas Pipelines," *IEEE Transactions on Robotics*, Accepted to be published, 2004.

66. 최혁렬, 류성무, 이정훈, "도시가스관 내부검사용 주행 로봇 개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 977-981, 1998

67. 최혁렬, 류성무, "지하매설 가스관 검사로봇 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 290-294, 1998.

68. 류성무, 최혁렬, "가스관 내부검사용 주행로봇 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제 23권, 12호, pp. 2216-2225, 1999.

68. 최혁렬, 류성무, 조성휘, 백상훈, 송성진, 신현재, 전재욱, "지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제 17권, 2호, pp. 121-129, 2000.

69. 백상훈, 류성무, 노세곤, 최혁렬, "배관 검사 로봇 시스템 개발," 대한 기계학회논문집 A권, 제 25권, 제12호, pp. 2030-2039, 2001.

70. 노세곤, 류성무, 최혁렬, "지하 매설 가스배관용 차동 구동형 배관 검사 로봇의 개발," 대한기계학회논문집 A권, 제 25권, 제12호, pp. 2019-2029, 2001.

71. 노세곤, 최혁렬, "배관 로봇을 이용한 배관 검사 자동화 기술," 비파괴검사학회지, Vol. 22, pp. 262-266, 2002.

72. 노세곤, 최혁렬, "차동 구동형 소형 배관 로봇의 개발," 삼성 휴먼테크 논문 대상 논문집, 제 9회, 2003.

..... 저자약력



〈노 세 곤〉

- 2000년 성균관대학교 기계공학과 졸업.
- 동대학원 석사(2002).
- 2002년~현재 성균관대학교 대학원 메카트로닉스공학 박사과정.

• 관심분야 : 퍼스널로봇, 배관검사로봇.



〈오 기 용〉

- 2004년 명지대학교 기계공학과 졸업.
- 2004년~현재 성균관대학교 기계공학과 대학원 석사과정.

• 관심분야 : 모바일로봇, 로봇프로그래밍.



〈최 혁 렬〉

- 1984년 서울대학교 기계공학과 졸업.
- 한국과학기술연구원 석사(1986).
- 포항공대 기계공학과 박사(1994).
- 1986년~1989년 LG Electronics 근무.

- 1993년~1995년 일본 교토대학 객원연구원.
- 1999년~2000년 일본 AIST 객원 연구원.
- 1995년~현재 성균관대학교 기계공학부 교수.
- 관심분야 : 이동메커니즘, 인공근육 액츄에이터, 다지 관절 로봇 손.