

지하 매설 가스배관용 차동 구동형 배관검사 로봇의 개발

노세곤* · 류성무* · 최혁렬**
 (2001년 3월 14일 접수, 2001년 10월 17일 심사완료)

Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas Pipeline

Se-gon Roh, Sungmoo Ryew and Hyoukryeol Choi

Key Words: Inpipe Robot(배관 검사 로봇), Differentially Driven(차동구동), Steering Mechanism(조향 구조)

Abstract

Up to now a wide variety of researches on inpipe inspection robots 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. This paper introduces a robot called MRINSPECT IV(Multifunctional Robotic Crawler for Inpipe inSPECTion IV) for the inspection of urban gas pipelines with a nominal 4-inch inside diameter. The proposed robot can freely move along the basic configuration of pipelines such as along horizontal or vertical pipelines. Moreover it can travel along reducers, elbows, and steer in the branches by modulating the speeds of driving modules. Especially, its capability for steering in the three-dimensional pipeline configuration has a competitive edge over the other ones and provides excellent mobility in navigation. Its critical points in the design and construction are introduced and results of experiments are given.

1. 서론

배관을 주행, 검사하는 로봇이 여러 연구를 통해 소개되고 있으나, 아직까지 충분한 기능을 발휘할 수 있는 시스템을 완성하는 것이 쉬워 보이지는 않는다. 이것은 배관이라는 특수한 환경으로 인해 로봇은 제한된 움직임을 가지게 되고 외부와의 통신이 극히 제약적일 수밖에 없다는 것이 주요한 원인이 된다. Fig. 1에서 보여지는 바

와 같이 본 연구자들은 이런 장애들을 극복할 수 있는 배관검사로봇을 수년에 걸쳐 연구, 개발해 오고 있으며 이미 여러 차례 소개하였다.⁽¹⁻⁶⁾

국외의 기존에 연구 개발되었던 다양한 메커니즘의 배관검사용 로봇들은 일반적으로 수평관에서 주행은 원활하지만 곡관이나 수직관을 주행할 수 있는 경우는 흔하지 않고, T관(분기관)에서의

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 메카트로닉스협동과정

E-mail : robotian@mecha.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7481 FAX : (031)290-7507

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

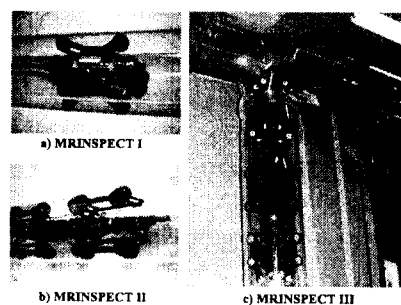


Fig. 1 MRINSPECT Series

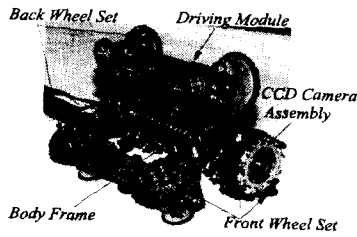


Fig. 2 MRINSPECT IV

조향, 선택 주행이 가능한 로봇은 아직까지 찾아 보기 힘들다.⁽⁹⁻¹⁴⁾ 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 배관요소를 주행해야하는 것은 자명한 일이다. MRINSPECT 로봇들은 이러한 다양한 배관요소를 자유롭게 이동할 수 있도록 개발되었다.⁽¹⁻⁸⁾

본 논문의 MRINSPECT IV 는 본 연구자들의 네 번째 모델이며 4인치 도시가스 배관 검사용 로봇으로 개발되었다. 그러나 8인치 배관 검사용 로봇인 MRINSPECT II, III를 4인치 배관에 맞도록 축소시키는 것은 설계 및 제작상의 여러 가지 문제로 인해 사실상 어려운 문제였다. 이러한 이유로 4인치 배관검사로봇은 기능은 유사하지만 매우 단순한 구조, 독창적인 주행방식, 새로운 조향 메커니즘을 가지고 있다. 특히 T관 주행 메커니즘은 매우 독특하며 탁월한 성능을 보여준다.

본 논문에서는 MRINSPECT IV로써 새롭게 연구된 기계적 구성 및 메커니즘, 주행 알고리즘에 대해서 주로 기술하였으며 실험결과 부분에서 전체 시스템 구성, 구동 소프트웨어, 주행 테스트 모습을 소개하였다. MRINSPECT IV의 배관 검사 로봇으로서의 많은 부분이 MRINSPECT I, II, III에서 도입되었으므로 배관 검사 로봇 시스템으로서의 관련된 이론, 검사, 통신, 제어 등의 여러 사항은 참고문헌에서 확인 할 수 있다.⁽¹⁻⁶⁾

2. 구조 및 특징

MRINSTECT IV는 4inch 배관 검사용 로봇 시스템에서 4인치 배관 검사용 장비를 견인 할 수

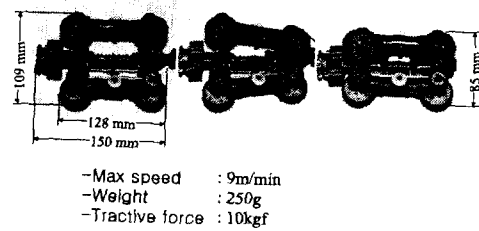


Fig. 3 Specification of MRINSPECT IV

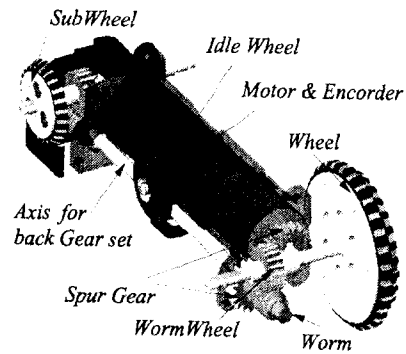


Fig. 4 3D model of Driving module

있는 driving vehicle이다(Fig. 2). 로봇은 가스배관의 대부분을 이루고 있는 수평관과 수직관을 주행해야 하고 비파괴 검사 vehicle의 탑재를 요구한다. 이것이 배관주행에 있어 가장 기본적인 조건이다. 특히, 중력을 극복하면서 수직관을 오르기 위해서는 충분한 견인력을 가지고 있어야 하는데, 이를 위해서 4.5W의 세 개의 모터를 사용하고 벽면 압착식 링크 메커니즘을 채택하였다. 그 결과 수직관에서 10kgf 무게를 견인 할 수 있다. Fig. 3은 로봇의 최대 주행 속도 및 무게와 크기를 보여주고 있다.

2.1 Driving module 의 구조

세 개의 driving module은 120 도 간격으로 방사형 구조로 배치되어 있다(Fig. 2, 3). Driving module은 DC motor, encoder, 감속기, 전후 wheel들에게 구동력을 전달할 수 있는 기어와 구동력 전달 축, idle wheel, 그리고 이를 감싸는 case로 이루어져 있다(Fig. 4). 각각의 driving module이 독립적이기 때문에 장착, 분리가 쉬워 운반 및 유지, 보수, 보완이 용이하며, 각각은 견고하게 body frame과 링크로 연결되어 있다.

2.2 링크 메커니즘

Body frame 은 CCD camera assembly를 장착하고 있으며 driving module 들을 링크로 연결하고 있다. Fig. 5 는 하나의 driving module의 한 쌍의 wheel 이 로봇의 중앙의 spring에서 발생하는 탄성력과 벽면의 반력의 작용으로 각각 독립적으로 y 축 방향으로 운동함을 보여주고 있다. 이러한 로봇 중심 축에서 wheel까지의 거리가 변하는 링크구조로 인해 관경이 변하는 배관내에서 벽면에 wheel이 효과적으로 접촉하여 안정적인 추진력과 견인력을 제공할 수 있도록 한다. 각 driving module의 전방의 wheel은 front wheel set을 이루어 서로 구속되어 있으며 back wheel set은 front wheel set과 대칭구조이다(Fig. 2, 3). 각 wheel set 내의 wheel들의 구속은 로봇이 중력에 영향을 받지 않고 로봇중심이 배관의 중심과 일치시키도록 한다.

기본적인 링크에 대한 해석은 다음과 같다.

$$\Delta W = \Delta x \tan \theta_{xy} = \sqrt{L_1^2 - \Delta x^2} \quad (1)$$

4인칭 배관 검사용 로봇의 링크 메커니즘은 위에서 열거한 장점 이외의 독특한 방식의 분기관 회전을 할 수 있도록 도움을 준다. Fig. 6는 MRINSPECT IV의 분기관 조향 방법을 나타내기 위해 이전에 개발된 MRINSPECT II, III의 조향 방식과⁽¹⁻⁶⁾비교한 그림이다(1은 T관 주행용이 아님). 좌측의 II, III 구조는 Double Active Universal Joint⁽⁴⁾(DAUJ)의 3차원 조향을 이용하여 조향 vehicle을 회전시켜 분기관을 회전하지만 MRINSPECT IV는 DAUJ와 조향 모듈이 없이 각 driving module의 속도차로 회전한다. Front wheel set과 back wheel set이 독립적인 구조로 벽면에 바퀴가 최대한 접지하고 있도록 링크를 구성하고 있는데, 이러한 구조는 로봇이 진행함에 따라 벨브, 플랜지, 수축관, 팽창관등과 같이 배관의

내경과 단면이 변화하는 위치에서 로봇이 벽면을 압착하는 힘을 독립적이면서 효과적으로 전달하여 충분한 견인력을 갖게 한다. 그리고 이러한 링크의 구조는 속도차를 이용하는 T관의 주행하는 메커니즘인 차동 구동형(differentially driven)방식에 있어 회전을 위한 지지점과 충분한 추진력을 제공하기 위해서는 필수적이다.

2.3 CCD camera assembly 의 기능

CCD camera assembly는 내부에 소형 CCD camera와 조명, 그리고 T관 회전을 원활하게 도와주는 역할을 하는 CCD wheel set으로 이루어져 있다(Fig. 7). T관 회전 시 배관에 닿아서 회전방향으로 로봇의 몸체를 유도하기 위해서 특별하게 설계되었으며 이 CCD wheel set의 역할로 인해 로봇이 T관내에서 고립되는 것을 방지하게 된다.

CCD wheel set에 장착되어 있는 8쌍의 CCD sub wheel들이 배관내면에 닿아 각각의 축을 중심으로 회전하고, 8쌍의 wheel들의 회전이 원하는 조향 방향으로 로봇을 유도하도록 CCD wheel set 전체가 Fig. 7에서 보여지는 바와 같이 x 축을 중심으로 회전한다. 이와 같은 CCD wheel set은 각

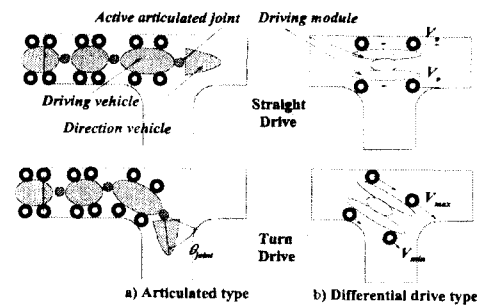


Fig. 6 Steerable robots

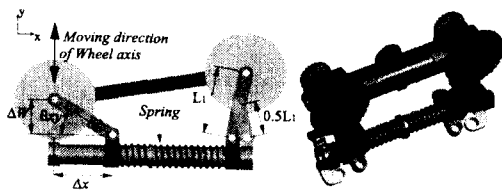


Fig. 5 Link mechanism

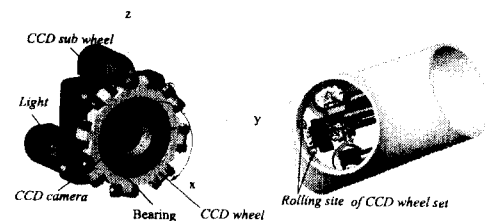


Fig. 7 Construction and function of CCD camera assembly

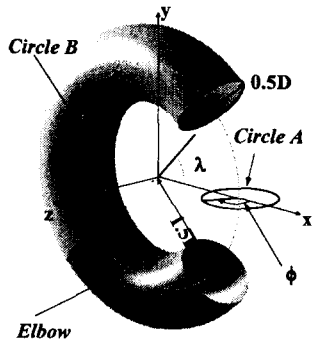


Fig. 8 Formation of elbow

driving module 의 속도차를 이용한 T관 회전을 가능하게 하는 데에 필수적인 요소는 아니라고 볼 수도 있지만, 로봇의 크기와 형상에 따라 배관내면과 로봇이 직접적으로 접촉을 하지 않게 하는 역할 외에, 회전하는 시점을 지나쳐서 driving module 의 추진력으로는 회전 가능한 경로를 산출할 수 없는 경우, 다시 말해 로봇이 직진방향으로 많이 진입하여 회전을 위한 공간을 준비하지 못하였을 때, 회전할 수 있는 지지점을 제공하면서 좀 더 원활한 회전을 가능하게 한다. 실제로 CCD wheel set이 없을 경우 로봇 조작자의 조작 미숙 등으로 T관 내부에서 회전을 실패하는 경우가 종종 있었는데 CCD wheel set의 장착 후에는 회전을 상당히 용이하게 하는 실험결과를 얻을 수 있었다.

3. 곡관 및 T관 주행을 위한 알고리즘

3.1 곡관 주행

Fig. 8 은 곡관의 형상이 어떻게 이루어져 있는가를 나타내고 있다. Circle A를 z 축을 중심으로 회전시킨 시키면 원환체(torus)가 생성되며 원환체의 일부분이 곡관이 된다. 곡관의 반경이 0.5D 이고 곡관의 곡률반경이 1.5D 일 때 이 원환체는 ϕ 와 λ 의 매개변수 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\phi, \lambda) = ([1.5D + 0.5D \cos \phi] \cos \lambda, [1.5D + 0.5D \cos \phi] \sin \lambda, [0.5D \sin \phi]) \quad (2)$$

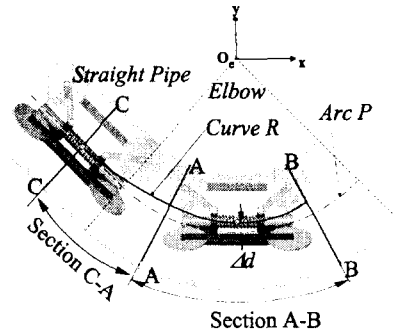


Fig. 9 Moving trajectory in elbow range

Fig. 9는 로봇의 곡관 주행 양상을 설명하기 위한 그림이다. 로봇이 직관에 위치할 때는 로봇의 중심 축은 배관 단면 중심을 통과하는 축과 일치한다. 로봇이 직관에서 곡관으로 진입하게 되면 로봇의 전방의 wheel(front wheel set)은 곡관내에 위치하게 되고 후방의 wheel(back wheel set)은 직관에 위치하게 된다. 로봇이 곡관으로 진행함에 따라 로봇의 중심은 Curve R을 따라 이동하게 되며 배관 단면의 중심을 연결한 원호 궤적의 Arc P와 0에서 Δd 로 서서히 offset을 가지게 된다. Section A-B 구간에서 로봇의 중심은 원호의 궤적(Fig. 10의 $ARC R_0$)을 갖게 된다. 여기서 Section C-A 는 로봇이 직관과 곡관사이에 위치하게 되는 범위이며 Section A-B 는 로봇이 곡관내에만 존재하게 되는 범위이다.

곡관을 로봇이 주행하기 위해서는 기본적으로 로봇의 크기를 고려해야 하고^(1,2,5) 효율적이고 원활하게 주행을 위해서는 로봇의 wheel이 접촉하는 곡관면의 곡률이 다르다는 것을 고려해야만 한다. 곡관을 주행할 때 각 배관 면에 접촉하고 있는 바퀴의 속도가 모두 같을 경우 배관 곡률반경이 큰 바깥쪽에서 접촉하고 있는 wheel은 필연적으로 안쪽에 접촉하고 있는 wheel의 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 로봇에 장착된 각 driving module 의 wheel의 속도조절로 해결할 수 있다. 각 wheel의 속도를 조절하려면 배관 내면에 닿는 각 wheel의 접촉 주행 궤적을 알아야만 한다.

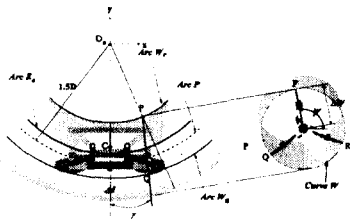


Fig. 10 Robot in elbow

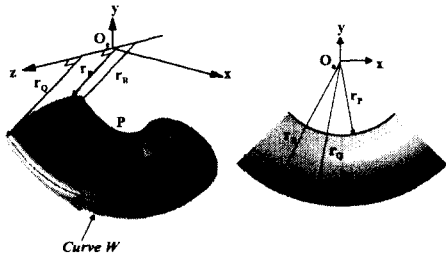


Fig. 11 Track of wheel

Fig. 10 과 11은 wheel의 주행 궤적을 설명하기 위한 그림이다. 설명의 단순화를 위하여 Fig. 9의 section C-A를 제외한 section A-B구간에서의 로봇의 곡관 주행을 설명한다. P, Q, R은 wheel이 배관면에 닿게 되는 접촉 위치를 나타내며 Arc W_p , Arc W_q , Arc W_r 은 z 축과 P, Q, R과의 거리 r_p , r_q , r_r 를 갖는 wheel의 이동 궤적인 원호를 나타내고 있다. 이 궤적을 알게 되면 곡관에서의 효율적인 주행을 위한 각 wheel의 속도비를 알 수 있다. 또한 그 속도비는 r_p , r_q , r_r 의 비와 같다. 이 궤적은 P, Q, R에서 유도가 되므로 이 세점의 위치를 결정해야만 한다. Curve W는 P, Q, R을 포함하는 평면과 곡관과의 교차 곡선이다. 로봇은 120도 각도로 로봇의 중심축에서 수직인 방사형 구조의 driving module을 가지므로 배관면에 닿는 각 wheel의 접촉점과 로봇의 중심축을 포함한 평면이 Fig. 10 또는 11의 zx 평면과 이루는 각도(Ψ)에 관계하면서 P, Q, R은 Curve W 상에서 위치하게 된다. driving module의 front wheel set, 또는 back wheel set 상의 wheel 들은 서로 구속되어 있으므로 P, Q, R은 Curve W 상에 내접하는 정삼각형의 꼭지점이며 로봇의 중심축과 P, Q, R의 거리인 ΔW 는

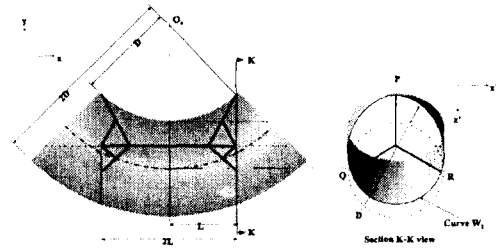


Fig. 12 Analysis for navigation in elbow

Ψ 에 따라 크기가 변한다. 이러한 관계를 고려해 볼 때, 결국 wheel의 궤적을 알기 위해서 필요한 P, Q, R 위치는 Curve W의 식을 알면 산출할 수 있음을 알 수 있다.

Curve W 식을 유도하는 것은 매우 복잡하고 까다롭다. 이것은 Fig. 10에서 Curve W를 포함하는 평면이 로봇 중심축에 수직인 평면과 γ 의 각도를 이루어 원환체 식 (2)의 ϕ , λ 로 이 평면을 나타내는 것이 어렵기 때문이다. 이를 간략화 하기 위하여 Fig. 12와 같이 링크와 wheel들은 선과 점의 이상적인 형태로 가정하였다. 로봇의 길이는 $2L$, 곡관의 곡률반경은 $1.5D$ 일 때 P, Q, R을 포함하는 평면의 x 좌표는 L 로 일정하다. P, Q, R을 포함하는 Curve W는 식 (2)의 x 좌표가 L 로 일정하다는 다음과 같은 식을 이용하여 유도할 수 있다.

$$(1.5D + 0.5D\cos\phi)\cos\lambda = L \quad (3)$$

식 (3) 과 식 (2)를 연립하고 정리하면 Curve W_f 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} W(\phi, \lambda) &= ([L], [(1.5D + 0.5D\cos\phi)\sin\lambda], \\ & [0.5D\sin\phi]) \quad (4) \\ &= ([L], [L\tan\lambda], [0.5D\sin\phi]) \end{aligned}$$

$$W(\lambda) = (L, L\tan\lambda, \pm \frac{0.5D}{\sqrt{1 - (\frac{L}{0.5D\cos\lambda} - 3)^2}}) \quad (5)$$

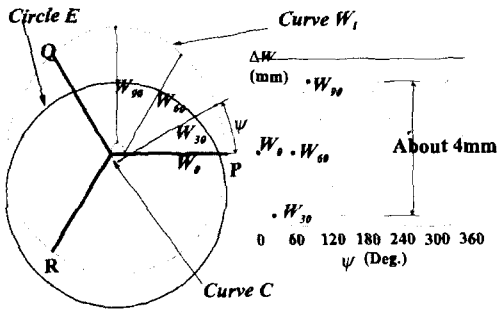


Fig. 13 Circle W_1 computed by 3D CAD

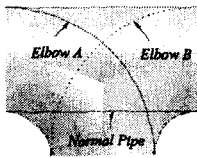


Fig. 14 Formation of branch

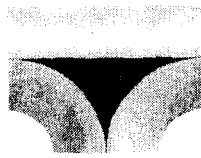


Fig. 15 Flat area of branch

Fig. 13 은 식 5를 프로그래밍하고 3차원 CAD 툴을 이용하여 산출한 $Curve W_1$ 와, ψ 의 값이 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 일때의 wheel의 접촉점 P의 위치를 도시한 것이다. $Curve C$ 는 ψ 에 따른 로봇의 중심축 위치의 궤적을 나타내는데 $Curve W$ 와 닮음꼴이다. $Circle E$ 는 로봇의 중심위치에서의 곡관의 단면인 원을 나타내고 있다. 여기서 $Curve C$ 는 항상 $Circle E$ 의 중심보다 위쪽에 있음을 알 수 있다. Fig. 13의 우측의 그림은 MRINSPECT IV의 경우에 있어 로봇의 중심축과 각 wheel의 배관 접촉점 P, Q, R까지의 거리 ΔW 는 ψ 에 따라 최대 약 4mm 정도의 차이를 보임을 나타내고 있다.

이와 같이 P, Q, R을 구하고 이 세 개의 점을 이용하여 wheel의 주행궤적을 산출하면 곡관에서 주행할 때의 각 wheel의 속도를 결정할 수 있다.

3.3 T관(분기관)

T관은 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. 14, 15).

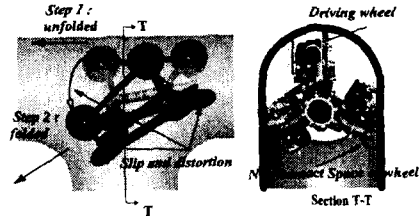


Fig. 16 Characteristic feature of turning in branch

Area V는 배관내에서 유일하게 곡면이 아닌 평면으로 원형의 배관 단면에 맞게 설계된 로봇에게는 특수한 장애가 될 수 있다.

MRINSPECT IV에 있어서 T관을 주행하기 위해서 근본적으로는 곡관 주행을 위한 방법과 유사하게 생각할 수도 있다. 그러나 T관 회전 주행 양상은 좀 더 복잡하고 그 주행 경로(Fig. 17의 $Curve R_T$)를 산출하는 것은 매우 까다로운 문제이다. 이유는 다섯 가지로 설명할 수 있다. 첫째는 로봇은 120도 방사형의 6개의 wheel이 배관내면에 접하면서 주행하도록 설계되어 T관에 진입하게 되면서 T관의 형상으로 인해 wheel의 일부분이 배관내면에 접하지 못하는 구간이 발생하게 되어 wheel의 이동 경로가 배관면을 따라 생성되지 않는다. 둘째, 로봇이 진행함에 따라 T관에 wheel이 접하게 되는 단면은 매우 다양하고 중력방향에 따라 여러 가지의 이동 궤적을 형성한다. 셋째는 T관에서 회전 시 로봇은 3차원적인 회전이므로 배관내면과 area V에 닿는 wheel들에 비틀림이 발생하여 slip이 발생한다. 넷째는 T관 회전 시 front wheel set과 back wheel set이 펼쳐지고 접해지는 과정이 나타나면서 수식화하기 어려운 궤적이 형성되며 또한 slip이 발생한다. 마지막으로, 4인치의 작은 배관에 맞도록 로봇의 크기를 작게 하기 어려운 제작상의 문제로, T관 회전 시 로봇의 몸체가 닿는 것을 방지하기 위하여 idle wheel을 장착하였는데, 이 wheel로 인해 T관 회전 시 Fig. 10, 13의 ψ 의 크기에 따른 배관내의 접촉 여부와 방향이 다르게 되면서 로봇을 유도하게 되어 수식화하기 어렵고, 또한 active drive를 기본으로 하는 로봇에 있어서 passive drive를 허용하게 되면서 로봇의 주행경로를 예측하는 것은 더욱 복잡하게 된다. Fig. 16, 17은 이와같은 내용을 나타내는 그림이다.

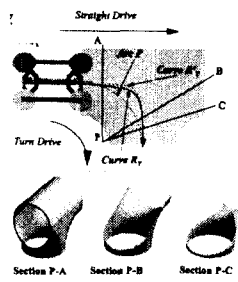


Fig. 17 Moving trajectory in branch and various cross section

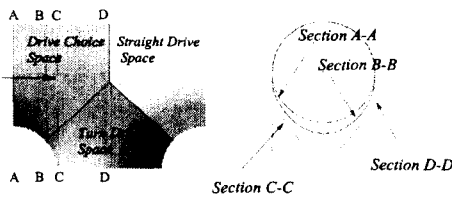


Fig. 18 Constraint space in branch

Fig. 17에서 $Curve R_T$ 는 중력방향이 -y일 때의 로봇의 회전 경로를 나타내고 있는데 ($Curve R'_T$ 는 중력방향이 +y일 경우), $Curve R_T$ 가 의미하는 바는 곡관의 $Curve R$ 이 의미하는 것과는 다르다. 곡관에서의 $Curve R$ 은 로봇의 wheel이 배관에 반드시 접한다는 사실로 인해 생성된 경로임에 반해, T관에서의 $Curve R_T$ 는 로봇이 회전을 하고자 할 때, T관에서 wheel 또는 wheel들이 배관에 접하지 않는 위치에 놓일 수 있다는 것과 가장 관계가 깊다. 이러한 이유로 본 연구자들은 T관 회전을 위한 주행을 곡관과 같은 방법으로는 구현하기 어렵다는 것을 인지하고 T관 주행을 위한 조향 알고리즘을 개발하기 위해 본 연구자들은 많은 실험과 관찰을 하였다. Fig. 18은 이를 설명하기 위해 로봇이 T관에 진입하여 조향하기 위한 과정을 나타내고 있다.

Front wheel set 이 section A-A를 지나 section B-B에 이를 때까지 환경 변화는 크지 않으며 로봇은 아직 속도차를 이용하여 회전할 수 없다. 그리고 section C-C에 위치하게 되면 환경의 변화는 심해지고 로봇의 진행방향도 서서히 turn drive space 방향으로 향하게 된다. 이것은 환경의 변

화에 따른 front wheel set의 위치가 turn drive space 쪽으로 치우치게 되기 때문이다. 이 위치에서도 속도차를 달리해도 로봇은 직접적인 회전을 하지 않는다. 왜냐하면 이 구간까지 로봇의 front wheel set은 여전히 배관내면에 접하고 있는 절대적인 구속을 받고 있기 때문이다. 따라서, 여전히 속도 차를 이용한 T관 회전을 구현할 수 없다. 실제적으로 이 구간 내에서 로봇 wheel의 속도를 달리해도 wheel이 배관내면에서 미끄러짐만 발생할 뿐 로봇은 자신이 이동할 방향으로 회전할 수 없다. 그러므로 로봇은 여전히 직진을 할지, 회전을 할지 선택할 수 있다. 이 공간이 drive choice space이다. Section D-D에 front wheel set이 근접하게 되면 turn drive space 쪽에 위치한 front wheel set의 하나의 wheel 또는 두 개의 wheel이 배관내면에 닿지 않으며, 이것은 turn drive space로 로봇의 회전을 방해하는 wheel의 배관내면 접촉이 발생하지 않게 된다는 것을 뜻하는 동시에, 로봇 중심 축이 배관의 중심 축과 일치하지 않고 기울기를 가지면서, section D-D 단면을 통과하는 어느 한 축을 중심으로 회전하지도 않게 되는 $Curve R_T$ 와 같은 수식화하기 어려운 궤적을 생성하게 되는 가장 주요한 요인이 된다. T관 회전알고리즘은 이러한 Section D-D에서 front wheel set이 근접하는 상태에서 회전 및 직진 주행이 가능하다는 점을 착안하여 고안된 방법이다. 다시 말해서, 로봇은 배관내면의 형상을 따라 진행을 하며 T관에서의 조향 및 직진을 위해서는 단지 section D-D 위치인 조향 및 직진 시점에서 로봇의 진행 방향 결정을 위한 유도만 하면, 주행 경로 산출은 필요 없이 원하고자하는 조향 및 직진이 가능하다는 것이 T관에서의 조향 알고리즘이다.

로봇이 T형 관에 진입을 하게 되면 전방의 CCD 카메라를 이용하여 회전을 해야 할 방향을 결정한 후 각 3개의 driving module의 wheel 회전 속도를 조절하여 로봇의 회전을 유도하게 된다. Fig. 19는 T관 회전을 위한 기초적인 개념을 설명하기 위한 그림이다. P_a, P_b, P_c 는 각 wheel이 배관내면에 접촉하는 점(각 wheel은 점 접촉을 한다고 가정)이며 P_a 지점의 wheel만 회전을 하고 나머지 두 개의 wheel은 회전하지 않을 때 로봇의 회전방향을 표현하고 있다.

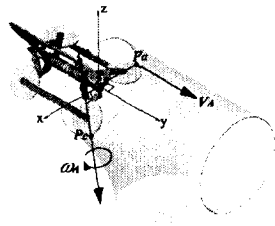


Fig. 19 Three-Dimensional representation of related velocity vectors

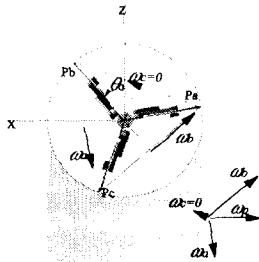


Fig. 20 Turning at section D-D

P_a 에서 속도가 V_A 이고 P_b, P_c 의 속도가 0 이라고 할 때 로봇의 회전 방향은 P_b, P_c 를 연결한 벡터를 축으로 ω_A 의 각속도를 가지고 회전하게 된다. Fig. 20 은 실제 T관 주행에서 이용되는 회전 메커니즘을 나타내고 있다. Section D-D에서 turn drive space 방향으로 회전하기 위해서 wheel의 회전 속도를 결정하게 되는데, 회전하고자 하는 방향(-z)에 가장 근접한 wheel의 배관 면의 접촉점 P_c 에서의 속도 $V_C = 0$ 으로 하며 z 축과 각 wheel이 이루는 각 ($\theta, \theta + 120^\circ, \theta + 240^\circ$)은 CCD camera에 의해 이미 알고 있다. 로봇이 회전하게 되는 각속도 ω_p 는 임의로 선택할 수 있고 필요한 것은 각 wheel의 이동 속도비 V_A, V_B 의 결정이다. 이를 위해 다음과 같은 관계식이 필요하다.

$$V_A = \omega_a \times \frac{3}{2} P_a \tag{6}$$

$$V_B = \omega_b \times \frac{3}{2} P_b \tag{7}$$

$$\omega_p = \omega_a + \omega_b \tag{8}$$

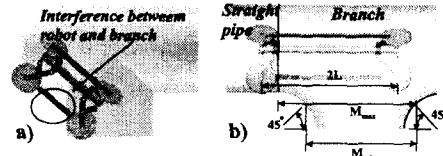


Fig. 21 Constraint in robot's design

$$\hat{i} \cdot \omega_p = -|\omega_p| \tag{9}$$

$$\angle P_aOP_b = \angle P_bOP_c = \angle P_cOP_a = 120^\circ \tag{10}$$

이와 같이 Section D-D 부근에서 로봇의 회전 방향으로 로봇을 유도만 하게 되면 T관 회전이 이루어지는 것을 알 수 있는데, 이러한 T관 회전 알고리즘이 가능한 이유는 로봇이 벽면 압착식 메커니즘의 특징으로 배관에 wheel이 접촉을 항상 유지하려고 동작을 하고, 배관이 로봇이 진행할 방향을 유지하기 위한 guide와 path 역할을 하기 때문이다. 결국, 여기서 언급한 관계식들은 로봇이 회전할 방향을 결정하기 위한 것이며 이 방향결정이 T관에서 로봇이 회전하게 되는 방법이 되는 것이다. 이 T관 조향 알고리즘은 T관의 turn drive space의 방향, 중력방향에 관계없이 모두 만족한다.

T관에서의 직진 주행은 각 wheel의 속도차를 같게 하면 된다. 여기서 직진주행시 T관의 turn drive space 방향과 중력 방향에 따라 로봇이 turn drive space 방향으로 조금 치우치게 되나 직진 주행에는 영향을 미치지 않는다.

3.4 설계시 고려사항 및 토의

이 논문에서는 속도차를 이용한 곡관 및 T관에서의 주행에 관해서 소개하였다. 이러한 주행 메커니즘은 MRINSPECT IV의 개발을 통하여 매우 만족할 만하다는 것을 입증하였다. 그러나 이러한 차동 구동 주행 방식이 도시가스 배관 외 다양한 산업시설용 배관에 그대로 적용시키는 것은 단순히 속도차를 이용한다는 개념으로는 가능하지 않다. 달리 말하면, 배관의 크기, 형상에 따라 로봇의 설계에 각별한 유의가 요구된다고 할 수 있다. 이것에 대해서는 이미 CCD wheel set, idle wheel에 대하여 언급한 바 있다. 이 절에서는 이러한 로봇의 설계시 고려해야 할 점에 대해 소개한다. Fig. 21의 a)에서 보여지는 바와 같은 T관 형상에서도 실험을 통해서 조향이 가능함을 알

수 있었다. 그러나 로봇의 형태는 T관 형상에 따라, 간섭이 없도록 제한 되게 설계되어야 함을 알 수 있다. Fig. 22의 b)는 로봇의 길이의 결정을 설명하기 위한 그림이다. 곡관 주행에 따른 로봇 크기 제한과 더불어^(1,2,5) 로봇이 T 관내에 진입하여 진진 주행을 하기 위해서는 driving module이 배관에 접하는 길이(2L)가 M_{min} 이상이어야 한다. 왜냐하면 M_{min} 보다 작을 경우, T관 회전은 용이하나 직진 주행 시 배관내에 하나의 모듈, 더 나쁜 경우로서 두 개의 모듈 전체가, 진행하면서 turn drive space 위치에서 고립되어 구동력을 상실하여 전진, 후진 회전 모두 불가능하게 되는 경우가 생길 수 있기 때문이다. 다시 말해서, 120도 간격의 방사형 링크 구조는 각 driving module의 두 개의 wheel 중 하나는 반드시 추진력을 얻을 수 있도록 배관에 접해야만 한다. 반대로 2L이 M_{max} 보다 클 경우에는 T관에서의 로봇의 직진 주행을 turn drive space에 고립되기 쉽지 않다는 특징으로 보다 원활하겠으나 회전 시에는 회전을 위한 공간이 협소하여 회전자체가 불가능하는 로봇의 자세가 발생 할 수 있다.

그리고, T관 회전을 살펴보면 back wheel set은 배관 내면에 접촉하고 있으면서 회전을 위한 추진력을 제공하게 되며 front wheel set은 로봇이 T관내에서 회전을 위한 guide 역할을 하는 것을 알 수 있다. Back wheel set의 어느 한 wheel이 배관내에 접하지 않으면 회전을 위한 충분한 추진력을 얻을 수 없다. 로봇의 자세에 따라 각 wheel이 배관단면에 닿는 위치가 다르게 되고 특히, area V 면에서 wheel은 접촉하지 않는 경우가 발생하게 되는데 이로 인해 로봇의 회전을 위한 구동력을 상실하게되고 로봇은 turn drive space 방향으로 회전을 하는 과정에서 정확한 방향으로 회전을 하지 못하며 치우치게 된다. 또한 직진하는 경우에 있어서도 구동력을 상실한 wheel 쪽의 driving module 전체가 turn drive space에 위치하게 되어 로봇전체가 turn drive space 쪽으로 치우쳐 직진시 약간의 장애를 가져 오게된다. 이를 보완하기 위하여 sub wheel을 장착하여 부가적인 구동력을 낼 수 있도록 하였다. Fig. 16의 우측 그림은 이와 같은 상황을 나타내고 있다. 차동 구동 회전방식에 있어서, driving module의 개수가 4개 이상일 경우를 고려할 수 있는데

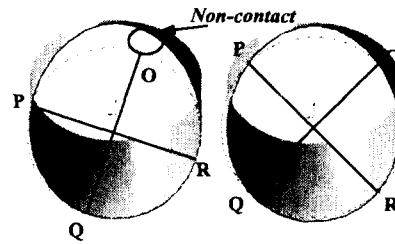


Fig. 22 Feature of four driving module

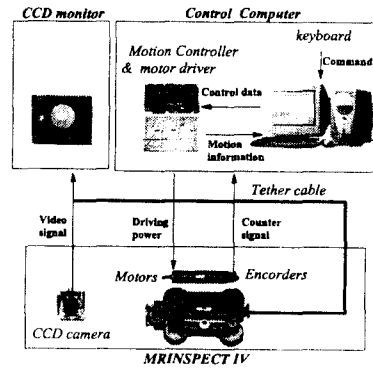


Fig. 23 Experimental system setup

배관의 과 wheel의 접촉점이 많아지면서 더욱 충분한 추진력을 가질 수 있다고 예기 할 수 있겠으나 실제로는 그다지 장점을 살릴 수 없다. Fig. 22의 좌측 그림에서 보여지는 바와 같이 곡관 주행시 4개의 driving module 중에서 3개만이 곡관 내면에 접하게 되는 경우가 일반적이며 4개 모두 접하게 되는 경우는 우측의 자세에서만 유일한 경우이다. 하나의 driving module이 접촉하지 않는다는 것은 3개일 때보다 나을 것이 없다는 것을 뜻한다. T관 회전에 있어서는 통상 하나의 driving module이 접촉하지 않는다는 것은 방사형 구조의 접촉이 아니기 때문에 벡터 힘을 이용한 T관 회전방향으로 유도하는 각 wheel의 속도비를 결정하는 것을 일반화 할 수 없다.

차동 구동방식의 배관로봇은 매우 단순한 구조로 인해 충분히 매력적인 메커니즘이다. 그러나 이 절에서 설명한 바와 같이 배관의 형태에 따라 충분한 관찰과 고려, 세심한 설계가 필요하다는 것을 간과하면 안된다.

4. 실험결과

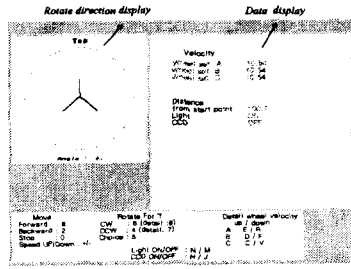


Fig. 24 User Interface

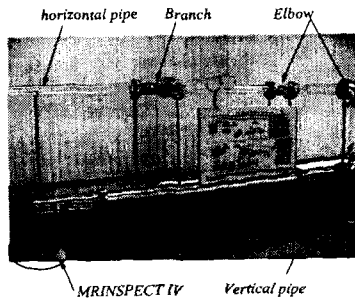


Fig. 25 Test bed

Fig. 23은 전체 시스템의 개략도를 나타낸다. 로봇은 외부 컴퓨터에서 컨트롤하게 되는데, 전원공급 및 배관내부를 촬영한 이미지 전송은 tether cable을 통해 이루어진다. 사용자는 CCD camera에서 전송되는 배관내 이미지를 모니터를 통해 관찰하면서 직관, 곡관, T 관에서의 로봇의 동작을 키보드를 통해 조절하게 된다. 키보드에서 입력된 값은 컴퓨터에서 계산하여 DA 보드와 motor controller를 통해 모터에 전압을 공급하며 각 driving module의 속도를 제어한다

배관내의 모든 구간에서 조작자가 로봇의 이동속도와 방향을 조정한다. 곡관 주행 및 T관내의 조향에 있어서는 사용자는 회전할 시점과 회전방향을 결정하면 각 driving module의 wheel 속도의 계산은 프로그램 내부에서 산출한다.

Fig. 24 는 볼랜드 사의 C++을 이용해 개발한 프로그램의 사용자 인터페이스 화면이다. 좌 상단은 T관내에서 회전을 위해 회전방향을 결정하는 창이다. 로봇의 일정한 방향을 기준 좌표축으로 결정하고 이를 기준으로 회전할 각도를 선택하게 된다. 우측 상단은 각 driving module의 wheel의 회전속도, 로봇의 이동거리, 조명과 CCD camera의 상태정보를 보여준다.

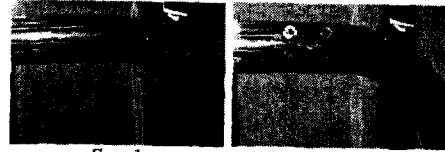


Fig. 26 Navigation in elbow

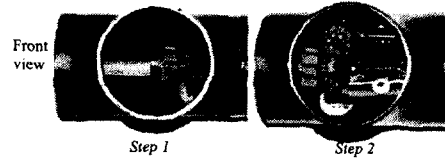


Fig. 27 Straight drive in branch

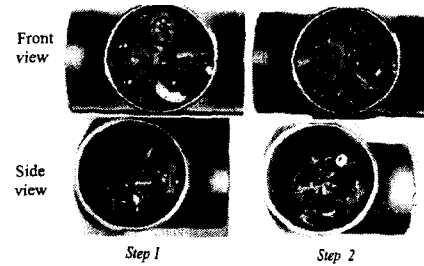


Fig. 28 Steering in branch

로봇을 테스트하기 위해서 우리는 테스트 bed 를 제작하였다. 직관 및 곡관은 투명 아크릴의 재질을 이용하여 제작하여 로봇의 주행상태를 관찰할 수 있도록 하였다(Fig. 25). 곡관 주행에 관한 실험 사진은 Fig. 26에서 보여주고 있다. T관에 있어서 직진하는 경우는 Fig. 27에서 보여주고 있으며 Fig. 28은 T관 내에서 회전하는 상태를 나타내고 있다.

5. 결론

이 논문에서 본 연구자들은 배관검사용 로봇의 driving vehicle 의 메커니즘과 특히, 곡관, T 관에 대해서는 세부적으로 기술하였다. 수직관, 수축, 팽창관 주행을 원활하게 하기 위해서 벽면 압착식 메커니즘을 적용하였으며 곡관, T관 주행을 위해서는 차동 구동방식을 고안하고 이를 위한 특별한 메커니즘으로 설계하여 제안 받은 가스

배관의 각 요소를 거의 완벽하게 주행하였다. MRINSPECT IV의 기본적인 메커니즘은 단순하고, 속도차를 이용하여 분기관을 주행할 수 있다는 실험결과를 토대로, 가스 배관 외에 수도관, 유류관, 하수관등의 일반적인 pipeline을 검사하는 로봇에 응용하여 적용시킬 수 있다.

현재 이 로봇은 단순한 구조와 뛰어난 주행 성능을 인정받아 국내 도시 가스 업체에서 인계하여 자동주행과 비파괴 검사 장비 등의 각종 장비 탑재를 위해 연구 개발중이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 최혁렬, 류성무, 1998, "지하매설 가스관 검사 로봇 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 290~294.
- (2) 류성무, 최혁렬, 1999, "가스관 내부검사용 주행로봇 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제23권, 12호, pp. 2216~2225.
- (3) 최혁렬, 류성무, 조성휘, 백상훈, 송성진, 신현재, 전재욱, 2000, "지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제17권, 2호, pp. 121~129.
- (4) Ryew, S. M., Lee, S. M. and Choi, H. R., 1999, "Design of Anthropomorphic Joint Mechanism," *The International Workshop on Advanced Mechatronics*, pp. 197~201.
- (5) Choi, H. R., Ryew, S. M. and Cho, S. W., 1999, "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.
- (6) 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," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems(IROS 2000)*, pp. 1652~1657.
- (7) Roh, S. G., Ryew, S. M., Yang, J. H. and Choi, H. R., 2001, "Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines," *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2001)*, pp. 761~766.
- (8) Roh, S. G., Ryew, S. M. and Choi, H. R., 2001, "Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas pipelines," *International Symposium on Robotics(ISR2001)*, pp. 165~171.
- (9) 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.
- (10) Okada, T. and Sanemori, T., 1987, "MOGRER : A vehicle study and realization for in-pipe inspection tasks," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 6, pp. 573~582.
- (11) Ilg, W., Berns, K., Cordes, S., Eberl, M. and Dillmann, R., 1997, "A Wheeled Multijoint Robot for Autonomous Sewer Inspection," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1687~1692.
- (12) Hirose, S., Ohno, H., Mitsui, T. and Suyama, K., 1999, "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.
- (13) Atsushi Sadamoto, Hajime Sudo, Hiroshi Yamada, 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(ISR2001)*, pp. 433~438.
- (14) Tomoyasu Ohya and Tokuji Okada, 2001, "Development of The Wheel-Type Robot with Steering in Pipe," *International Symposium on Robotics(ISR2001)*, pp. 992~997.