

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.3.223

클러치기반의 선택적 구동방식을 이용한 배관로봇의 개발

김도완* · 노세곤* · 이정섭* · 이수환* · 최혁렬†
(2007년 6월 18일 접수, 2008년 1월 31일 심사완료)

Development of In-Pipe Robot Using Clutch-Based Selective Driving Algorithm

Do Wan Kim, Se-gon Roh, Jung-Sub Lee, Soo Hwan Lee and Hyouk Ryeol Choi

Key Words : In-Pipe Robot(배관로봇), Clutch(클러치), Selective Driving(선택적 구동), Differential Driving(차동 구동)

Abstract

This paper introduces a robot called the MRINSPECT V (Multifunctional Robotic crawler for Inpipe in-SPECTion V) for the inspection of pipelines with a nominal 8-in inside diameter. Based on the mechanism of the previous model MRINSPECT IV, we developed a new MRINSPECT V by using the differential driving mechanism, so that just simply controlling the speed of each driving units helps the robot to travel effectively inside the pipelines. Furthermore, the robot uses clutches in transmitting driving power to wheels. This clutch mechanism enables MRINSPECT V to select the suitable driving method according to the shape of pipeline. In this paper, the critical points in design and construction of the proposed robot are described with the preliminary results to provide good mobility and increase the efficiency.

1. 서 론

효과적인 배관(Pipeline)의 유지 및 보수를 위해 많은 연구소 및 기업체에서 배관 내부를 주행하면서 배관의 상태를 검사할 수 있는 로봇을 개발하고 있다. 배관 내부는 일반적으로 좁은 공간으로 이루어져 있고 입체적인 형상을 가진 특수한 환경이기 때문에 로봇의 크기와 형상은 제한적일 수밖에 없으며 이동체가 원활하게 움직이기 어렵다. 그러므로 배관로봇의 개발에 있어서 모든 배관요소를 자유롭게 주행할 수 있는 이동성의 확보가 우선시 되고, 이를 위해 다양한 메커니즘에 대한

연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 이 중에서 바퀴형과 벽면 압착형이 조합된 형태가 가장 효과적인 이동성을 보여주는데, 대표적인 연구의 예로서 Okada와 Kanade가 개발한 FERRET-1을 들 수 있다.⁽¹⁾ FERRET-1은 세 개의 바퀴를 이용하여 관내를 이동하며 환경 변화에 따라 이동체의 높이를 조정할 수 있는 신축형 이동체이고, 이와 함께 Okada와 Sanemori의 3점 구동바퀴 접촉형식의 MOGRER는 링크 구조를 기본으로 하여 스프링을 이용하여 환경 변화에 적응할 수 있도록 설계된 이동 로봇이다.⁽²⁾ 이 밖에 최근 개발되고 있는 로봇으로 CMU, NREC, NASA 등에 의해 개발중인 Explorer는 분절형 구조로 개별적인 모듈로 구성되어 있는데, 바퀴와 연결된 암(arm)을 능동적으로 제어하여 배관 내면과 바퀴 사이의 압착력을 조절할 수 있고 6인치와 8인치의 배관에서 동시에 사용할 수 있다.⁽³⁾

기존에 연구되었던 배관로봇의 경우 직관과 곡

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hrchoi@me.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7449 FAX : (031)290-7507

* 성균관대학교 기계공학부

관은 이동할 수 있지만 분기관에서 조향할 수 있는 로봇은 극히 드물며 대부분 주행효율을 고려하지 않고 설계되었다. 본 논문에서 소개되는 배관 로봇인 MRINSPECT V는 이러한 점들을 개선하여 모든 배관요소에서도 주행할 수 있는 이동성을 갖추는 동시에 배관내부의 상황에 따라 유연하게 구동력을 변화시킬 수 있는 구동 메커니즘으로서, 보다 효율적으로 배관요소를 주행할 수 있다. MRINSPECT V는 본 연구자들이 개발해오고 있는 MRINSPECT 시리즈의 다섯번째 모델이며 8 인치 배관 검사용으로 개발되었다. MRINSPECT 시리즈는 공통적으로 벽면 압착형과 바퀴형이 조합된 형태를 가지며 특히 신축 메커니즘은 관경의 변화에 따른 각 바퀴의 압착력 차이를 최소화시킬 수 있다.⁽⁸⁾ MRINSPECT II, III는 구동모듈에 이중 능동 유니버설 관절(Double Active Universal Joint)에 의해 동작되는 조향모듈을 연결하여 분기관에서도 선택 조향이 가능하다.⁽⁹⁻¹¹⁾ MRINSPECT IV는 각 구동 바퀴의 속도를 독립적으로 제어하는 차동 구동방식(Differential Driving)의 개념을 채택하여 이전의 모델과는 달리 부가적인 조향모듈 없이 구동모듈만으로 조향과 추진을 동시에 할 수 있다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 현재 새롭게 개발된 MRINSPECT V 또한 MRINSPECT IV와 유사한 기계적 구성을 지니고 있으며 차동 구동방식의 주행이 가능하다. 더 나아가 MRINSPECT V는 구동유닛의 동력전달 메커니즘을 개선하여 클러치를 기반으로 한 새로운 주행방식인 선택적 구동방식>Selective driving)이라는 개념이 도입되어 배관 내에서의 이동성과 주행 효율을 향상시키게 되었다.

본 논문에서는 MRINSPECT V의 특징과 이를 구현하기 위한 기계적 구성 및 동력전달 메커니즘을 소개하고 새로운 주행알고리즘인 선택적 구동방식을 제시한다. 그리고 실제 배관에서의 실험을 통해 그 효과를 증명한다.

2. MRINSPECT V의 특징

MRINSPECT V의 전체적인 구성은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 3개의 구동유닛(Driving Unit)이 몸체 프레임(Body Frame)을 중심으로 120도 간격으로 방사형으로 배치되어 있고 바퀴의 벽면압착을 위한 링크-스프링 구조물에 연결되어 있다. 전체 구성은 이전 모델인 MRINSPECT IV와 유사하지만 MRINSPECT V는 구동유닛의 내부구성에 있어서 클러치를 추가함으로써 구동모터와 바퀴간의

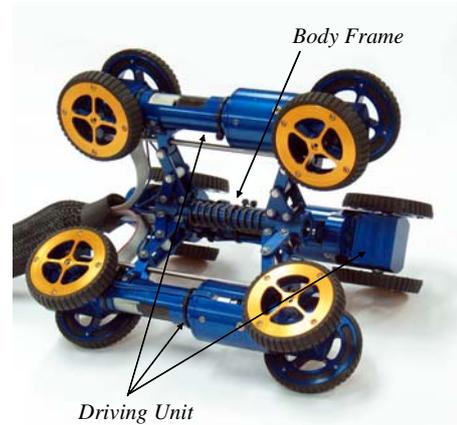


Fig. 1 MRINSPECT V

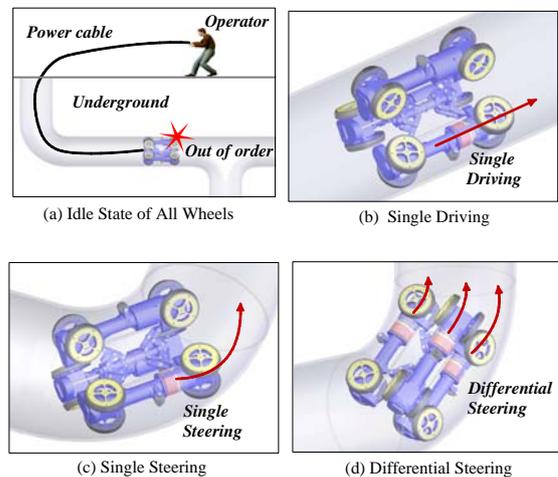


Fig. 2 Characteristics of MRINSPECT V

동력전달제어가 가능하다는 특징을 지니고 있다. 클러치를 제어하여 동력전달을 차단하게 되면 바퀴는 구동모터에 구속되지 않고 자유로운 회전이 가능하게 되는데, 바퀴의 공회전(Idle State)이라는 주행모드를 적용함으로써 Fig. 2(a)와 같이 로봇의 고장이나 예상치 못한 장애물에 의해서 배관 내에 고립될 경우 수월하게 사용자가 회수할 수 있다.

제안하는 로봇은 배관 내부를 효율적으로 주행하기 위해 클러치기반의 선택적 구동방식>Selective Driving)을 이용한다. 본 논문에서 제시하는 선택적 구동방식이란 클러치의 제어를 통해 선택된 구동유닛만을 작동시키고 나머지 구동유닛은 공회전 상태로 유지시켜 주행함으로써 선택적 구동과 차동 구동을 병행하여 이용하는 방식을 의미한다. 견인력을 크게 요하지 않는 수평관에서는 굳이 모든 구동유닛을 사용할 필요가 없기 때문에 Fig. 2(b)와 같이 임의의 단일 구동유닛만을 사용하여 주행한다. 곡관에서는 배관내면형상 자체가 이동체가

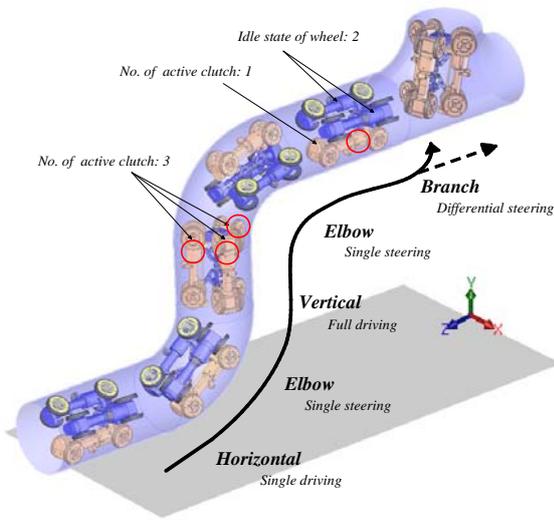


Fig. 3 Move with selective driving in pipeline

진행할 방향을 유지하기 위한 가이드와 경로 역할을 하기 때문에 기존 MRINSPECT IV 처럼 모든 구동유닛을 사용하는 차동 구동방식으로 주행할 필요가 없다. 대신 Fig. 2(c)에서 볼 수 있듯이 구동유닛 하나만을 사용하여 주행 효율을 높이게 한다. 반면에 수직관으로 진입하는 곡관의 경우 견인력이 많이 필요하기 때문에 구동유닛 하나만으로 주행이 어려울 수가 있다. 이 때에는 Fig. 2(d)와 같이 모든 구동유닛을 작동시켜 견인력을 확보하며 차동 구동방식으로 주행한다. 또한 수직관 에서도 로봇자체의 무게를 이겨내며 주행해야 하기 때문에 큰 견인력을 내기 위해 모든 구동유닛을 사용하여 주행을 한다. 분기관에서는 각 구동유닛의 속도차를 이용하여 조향하기 때문에 마찬가지로 모든 구동유닛을 작동시킨다.

Fig. 3 은 각 배관요소의 주행 중 로봇이 가장 주행하기 힘든 중력을 극복하여 진행되는 과정으로, 수평관, 곡관 및 수직관을 거쳐 분기관을 주파하기까지의 일련의 과정을 전체적으로 나타내고 있으며 앞서 설명한 각 구간에서의 선택적 주행방식이 도시되어 있다. 이러한 선택적 구동 방식을 적용시킴으로써 배관의 특성에 상관없이 모든 구동유닛을 사용해야 했던 이전 모델과는 달리 상황에 따라 특정 구동유닛만을 사용하기 때문에 각 배관을 주행하는데 있어서 유연성을 가질 수 있다. 특히 견인력을 크게 필요로 하지 않는 배관에서 단일 구동유닛만을 사용하여 전력효율을 향상시킬 수 있는데, 이 점은 독립전원인 배터리를 사용하는 자율 주행 배관로봇에 있어서 에너지 효율측면에서 매우 유용하다고 볼 수 있다.

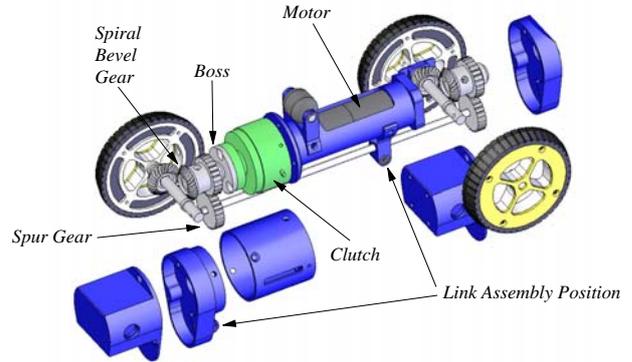


Fig. 4 Structure of diving unit

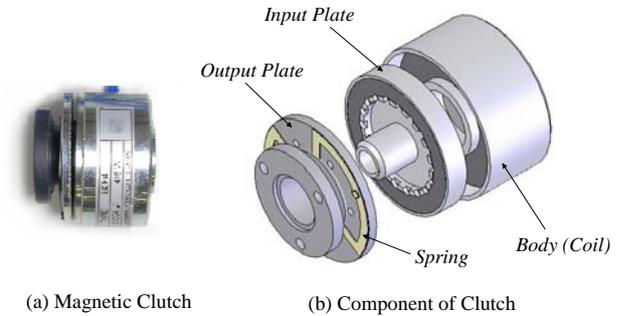


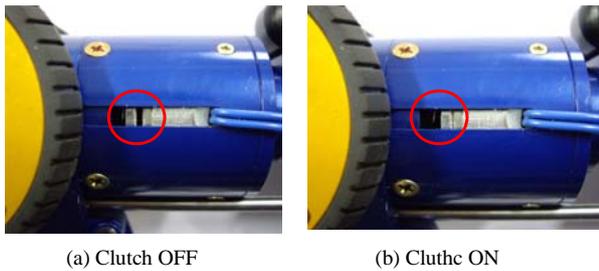
Fig. 5 Magnetic clutch

3. 구동유닛의 내부구성과 클러치시스템

본 장에서는 제시된 선택적 구동방식을 구현하기 위해 새롭게 설계된 구동유닛의 구조와 동력 전달 메커니즘에 대해 설명한다. 각 구동유닛의 내부는 Fig. 4 와 같이 감속기와 엔코더(Encoder)가 달린 DC 모터, 클러치, 기어, 후방 구동력 전달 축으로 구성되어 있으며 외부는 전후방에 각각 1 쌍의 바퀴, 공전바퀴 그리고 이를 감싸는 케이스로 이루어져 있다. DC 모터의 동력이 직접적으로 기어열을 통해 바퀴로 전달되는 MRINSPECT IV 와는 달리 MRINSPECT V 는 모터와 기어 사이에 클러치를 추가하여 동력의 전달을 차단하거나 연결시킬 수 있다. 또한 스파이어럴 베벨 기어(Spiral Bevel Gear)를 사용하여 바퀴 축으로 동력을 전달하게 되는데, 기어 특성상 동력 전달의 방향성이 없기 때문에 클러치가 동력을 차단하였을 때 구동바퀴가 작은 외부 힘으로도 독립적으로 공회전할 수 있다. Fig. 5 는 제안하는 로봇의 마그네틱 클러치(Magnetic Clutch)의 구조를 보여주고 있다. 전원을 인가하게 되면 클러치 본체의 내부코일에 강한 자기장이 발생하고 입력판(Input Plate)과 출력판(Output Plate)이 자기력에 의해 붙게 된다. 전원을

Table 1 Status of wheel

	Clutch	Motor	Status of Wheel
1	ON	ON	바퀴 회전
2	ON	OFF	바퀴 정지
3	OFF	-	바퀴 공회전

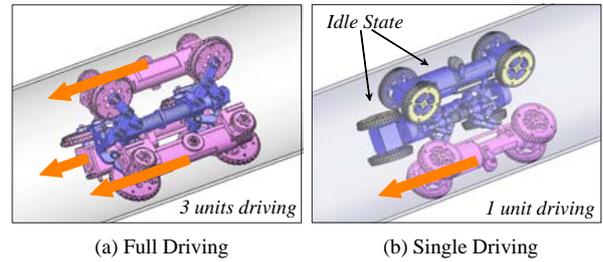
**Fig. 6** Behavior of clutch

차단하게 되면 자기력이 사라지고 판스프링의 복원력에 의해서 입력판과 출력판이 다시 떨어진다. Fig. 6 은 구동유닛에 장착된 클러치의 입력판과 출력판이 붙고 떨어지는 것을 외부에서 본 모습이다. 입력판은 모터의 구동축과 연결되어 있고 출력판은 바퀴의 축과 맞물린 기어열과 연결되어있기 때문에 Table 1 에서 볼 수 있듯이 모터와 클러치의 동작여부에 따라 바퀴의 상태가 결정된다. Table 1 의 1 번과 2 번은 클러치에 전원이 인가되면서(ON) 입력축과 출력축이 연결되어 바퀴의 움직임이 모터에 구속됨을 나타낸다. 즉, 기존 MRINSPECT IV 의 동력전달구조와 같으며 모터가 정지한다면 바퀴도 정지한 상태로 외부의 힘으로 회전시킬 수 없다. 클러치에 전원이 차단되면(OFF) 두 축은 서로 분리되고 모터의 동작과는 관계없이 바퀴가 공회전하게 된다. 따라서 MRINSPECT V 는 차별적으로 바퀴의 공회전 모드를 설정할 수 있으며 이를 이용하여 선택적 주행 알고리즘을 구현할 수 있다.

4. MRINSPECT V 의 주행 알고리즘

4.1 직관 주행

기존 배관로봇의 경우 Fig. 7(a)와 같이 각 구동바퀴에 동일한 속도를 인가하여 직관주행이 이루어진다. 그러나 수평관 같이 큰 견인력을 필요로 하지 않는 상황에서 모든 구동유닛을 작동시키는 것은 전력소모 측면에서 비효율적이며 기타 부가적인 문제점을 유발한다.

**Fig. 7** Single driving in straight

직관주행을 위해 각 구동유닛의 속도를 동일하게 제어한다고 하더라도 기계적 특성으로 인해 회전속도의 미세한 오차를 피할 수 없고 배관의 환경이 변하게 된다면 동일한 시간에 이동해야 할 각 구동유닛 바퀴의 회전수가 차이 나게 된다. 이러한 구동유닛간의 불균형 현상은 각 구동유닛이 벽면 압착을 위한 스프링-링크 구조물에 구속되어 있는 상황에서 바퀴가 미끄러지거나 역지로 회전하게 되는 문제점을 발생시키며 이는 동시에 구동유닛의 내부요소 즉, 기어, 모터, 클러치 등에도 물리적인 무리를 주게 된다. 주행에 있어서 기계적 부하와 이로 인한 추가적인 전력소모는 직관에 한정되지 않고 곡관 및 분기관에서도 발생하는데, 클러치 기반의 선택적 구동방식에 의해 개선될 수 있다. 기존의 MRINSPECT IV 는 Fig. 7(a)와 같이 직관주행을 위하여 각 구동유닛을 동일한 속도로 작동시켰지만 MRINSPECT V 의 구동모듈은 3 개의 구동유닛 중에서 1 개의 구동유닛에만 속도를 인가하게 된다. 즉, Fig. 7(b)에서와 같이 3 개의 구동유닛 중에서 하나의 구동유닛만 견인력을 발생시키고 나머지 두 개의 구동유닛은 공회전 상태로 두면서 직관에서의 주행이 가능하다. 이를 통해 다수의 구동유닛을 사용했을 때 발생하는 바퀴의 미끄러짐에 의한 기계적, 전기적 부하를 없앨 수 있으며, 또한 3 개의 구동유닛 중 단일 구동유닛을 사용하기 때문에 전력이득을 가진다.

4.2 곡관 주행

곡관에서도 수평관에서와 같이 두 개의 구동유닛의 클러치를 차단하여 바퀴를 공회전 상태로 놓고 한 개의 구동유닛만을 작동시켜 주행하게 된다. 속도비를 이용하여 곡관을 주파하는 차동 구동방식 또한 효과적인 주행방식이지만 견인력이 크게 필요하지 않은 곳 즉, 곡관에서 수직 아래 방향으로 탈출하는 구간, 중력극복이 필요하지 않은 수평으로 누운 곡관에서는 단일 구동유닛만을 사용한 선택적 구동방식이 여러 측면에서 더 유리하다

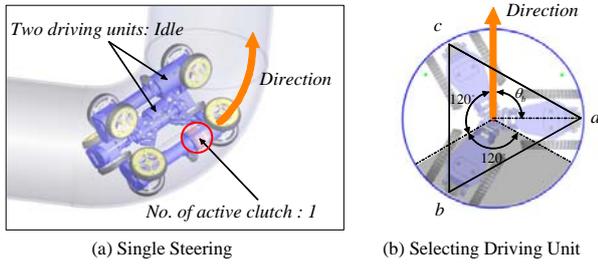


Fig. 8 Single driving in elbow

고 볼 수 있다. 즉 단일 구동유닛을 사용하기 때문에 전력소모를 줄일 수 있고 직관주행에서도 논의되었던 문제점인 불균형 현상에 의한 부하를 해결할 수 있다. 또한 곡률 반경에 관계없이 구동유닛만을 적절히 선택해주면 되기 때문에 차동 구동방식을 사용하였을 때 곡률과 로봇의 현재 자세에 따라 각 구동바퀴의 속도비를 계산해야 하는 제어 과정을 피할 수 있다. 제안하는 곡관에서의 선택적 주행을 위해서는 3 개의 구동유닛 중 어떤 구동유닛을 선택하여 주행할 것인가를 결정하는 것이 필요하다. 보다 효율적인 주행을 위해 단일 구동유닛 선택 시 가장 큰 견인력을 얻을 수 있도록 곡률반경 중심에 대해 가장 큰 회전반경을 갖는 구동유닛을 선택한다. 이를 위해서는 Fig. 8 에서 알 수 있듯이 먼저 곡관 진행 방향과 배관단면상에서 볼 때 로봇의 자세와 관계된 구동유닛과의 각도, 다시 말해서 기준이 되는 특정 구동유닛과 곡관 진행 방향과의 각도 θ_b 를 결정하는 것이 필요하다.

Fig. 9(a)와 같이 MRINSPECT V 는 전방 CCD 카메라에 입력된 영상을 통하여 각도를 산출하는 과정을 수행한다. 카메라 주위에 설치된 조명에 의해 배관의 굴곡지점에는 특정 형상의 그림자가 생기게 되는데 에지 디텍션(Edge Detection)과 패턴 매칭(Pattern Matching) 등을 사용한 영상처리(Vision Process)를 통하여 이 그림자 영역을 추출하게 된다. 추출된 그림자로부터 그림자 영역의 면적중심과 영상화면중심을 직선으로 이어 주었을 때, 이 직선과 영상화면의 세로축 중심 간의 각도 θ_b 를 추출할 수 있으며 이 각도는 배관로봇의 현재 자세에 따른 배관의 진행방향을 나타낸다고 볼 수 있다. 다음으로 곡관 주행을 위한 구동유닛을 선택해야 하는데 세 개의 구동유닛은 120 도 간격으로 배치되어 있으므로 곡관의 커브방향으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 구동유닛은 항상 커브반대 방향의 좌우로 60 도 범위 내에 존재하게 된다. 따라서 Table 2 에서 주어진 범위(Angle Range)와 곡관

Table 2 Selecting driving unit

Angle Range	Unit a	Unit b	Unit c
$0^\circ \leq \theta_b \leq 120^\circ$	OFF	ON	OFF
$120^\circ \leq \theta_b \leq 240^\circ$	ON	OFF	OFF
$240^\circ \leq \theta_b \leq 360^\circ$	OFF	OFF	ON

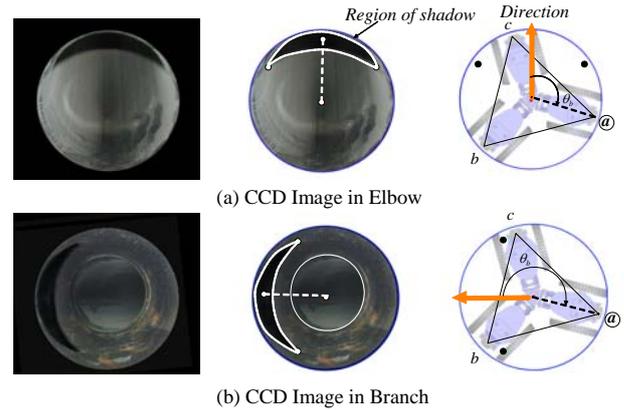


Fig. 9 Method using image for selecting unit

진행 방향에서 기준 축까지의 각도 θ_b 로부터 Table 2 와 같이 작동시켜야 하는 단일 구동유닛을 선택할 수 있다.

4.3 분기관 주행

분기관에서의 주행을 위한 조향 알고리즘은 이전 모델인 MRINSPECT IV 의 방식을 그대로 적용한다. 배관로봇이 분기관에 진입하게 될 때 회전 방향으로 전환하기 위해서는 3 개의 구동부의 클러치를 모두 작동시켜 동력을 전달하도록 하며 조향방향에 따라서 각각의 구동유닛의 모터에 속도 차이를 발생시켜 원하는 방향으로 주행할 수 있다. 실제로 로봇이 분기관에 진입하게 되면 Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 CCD카메라의 영상을 통해 회전할 방향이 결정된 후 각 구동유닛 바퀴의 회전속도를 조절하여 로봇의 회전을 유도한다. 분기관의 주행에 적용된 차동 구동방식에 대한 보다 구체적인 내용은 참고문헌에서 확인 할 수 있다.⁽¹⁵⁾

5. 실험

5.1 실험 시스템의 구성

Fig. 10 은 전체 시스템의 구성을 보여준다. 로봇은 외부에 위치한 조작자의 컴퓨터에서 제어하게 되는데 전원공급 및 제어를 위한 신호의 전송

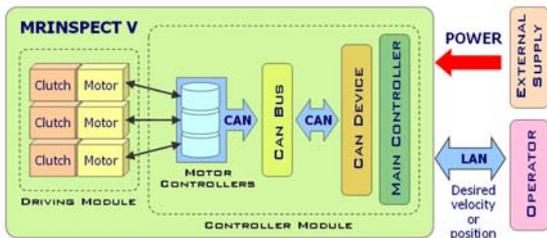


Fig. 10 Schematic of control system

은 케이블을 통해 이루어진다. 조작자는 로봇을 구동하기 위해 원격지에서 터미널 프로그램을 사용하여 로봇의 메인 컨트롤러(Single Board Computer: SBC)에 설치된 리눅스 시스템에 접속하게 되는데 여기서 제어 및 통신을 위한 프로그램 등을 설정하게 되며 이후 원격지 컴퓨터에서 GUI로 이루어진 윈도우 프로그램을 통해 다양한 동작 명령을 줄 수 있다. 원격지 컴퓨터에서 보내는 명령은 교차 랜 케이블(Cross LAN Cable)을 통하여 로봇의 메인 컨트롤러로 전달되며 이 명령은 다시 CAN 통신을 통해 구동유닛을 제어하는 하부의 모터 드라이버(Motor Driver)에 전달되어 구동유닛의 속도를 제어한다. 이와 동시에 클러치 구동을 위해 구성된 기계식 릴레이로 이루어진 클러치 제어보드(Clutch Control Board)를 통해 클러치의 동작을 결정하게 된다.

성능 테스트를 위하여 수평관, 곡관, 수직관, 분기관으로 구성된 8 인치 배관을 구성하였다. 주행용 테스트베드(Test Bed)는 로봇의 주행 성능을 보다 면밀하게 관찰하기 위하여 투명 아크릴로 제작되었다. 배관로봇은 모든 배관 요소에서 주행이 가능해야 하므로 테스트 베드에서의 예비실험과 다양한 주행실험을 실시하였다.

5.2 예비실험

본 논문에서 개발된 MRINSPECT V의 기본 제어원은 Table 3과 같다. MRINSPECT V는 향후 컨트롤 모듈 및 배터리 모듈, 검사모듈 등을 탑재하고 주행할 수 있는 자율형 배관로봇을 목표로 하고 있기 때문에 구동모듈은 추가적인 모듈을 견인할 수 있도록 충분한 견인력을 갖추어야 하며 약 10kgf의 견인력을 갖도록 설계하였다. 예비실험에서는 먼저 배관로봇이 주어진 견인력을 만족하는지 알아보기 위해 수직관에서 로봇에 무게 추를 달아 주행하는 방식으로 최대 견인 하중을 측정해보았다.

초기 실험에서는 견인력이 기준에 못 미치는 2.03kgf(로봇무게는 제외)으로써 그 이상 증가하게 되면 수직관에서 더 이상 앞으로 나아가지 못하거

Table 3 Specification of MRINSPECT V

주행관경	직경 8 인치 배관
메커니즘 형식	바퀴형+벽면압착형+선택적구동
로봇크기	길이: 228mm, 직경: 수축시 170mm, 확장시 210mm
로봇중량	2.8kgf
주행최대속도	수직관 주행시 1.8m/min 수평관 주행시 2.5m/min
견인력	약 10kgf

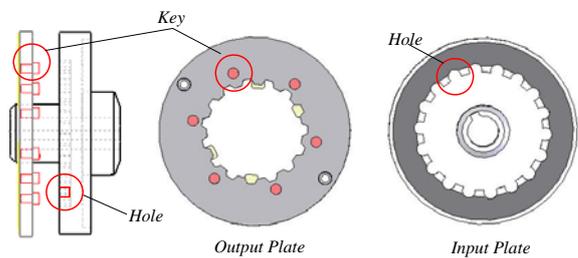


Fig. 11 Modification of clutch

나 미끄러지는 현상이 발생하였다. 바퀴가 배관내의 접촉면에서 미끄러지는 이유는 바퀴의 마찰력이 부족하기 때문이며 이는 이동체의 압착력과 관련이 있다. 압착 링크 메커니즘에 사용되는 스프링의 탄성계수가 바퀴의 압착력을 결정하게 되는데 이 계수에 따라 주행성능이 달라질 수 있다. 탄성계수가 큰 스프링을 사용하여 압착세기를 증가시킬 경우 견인하중 초과로 인한 바퀴의 미끄러짐을 막을 수 있지만 배관의 관경이 변하는 곳, 특히 곡관이나 분기관의 진입과 탈출 구간에서는 추진력을 저해하는 요소로 작용하여 쥘 현상이 일어날 수 있기 때문에 압착력 선정은 신중히 고려되어야 한다. 그러므로 반복적인 실험을 통해 최대 견인하중에서도 미끄러지지 않고 견딜 수 있는 스프링을 선택해야 한다. 다음으로 바퀴의 미끄러짐이 없는데도 불구하고 이동하지 못하는 현상은 클러치가 미끄러지면서 모터의 동력을 제대로 전달하지 못하였기 때문이다. 구동유닛의 내부 구성요소인 클러치의 경우 전체 로봇의 크기조건에 만족하여야 하므로 소형으로 제한되기 때문에 클러치의 최대 허용용량이 제시된 기준 견인력에 미치지 못하는 단점을 지니고 있다. 현재 시판되고 있는 클러치의 경우 작은 크기면서도 상대적으로 큰 견인력을 낼 수 있는 제품은 없었으며 이를 해결하기 위해 Fig. 11과 같이 기존의 마찰형 클러치를 키와 홀이 맞물리게 되는 치형 클러치로 수정 가공하게 되었다.



Fig. 12 Driving test in pipeline

초기 구동모듈의 클러치 용량 문제와 압착력의 한계를 해결하여 목표 견인력을 확보하였으며 이를 바탕으로 본 논문에서 제시된 클러치기 기반으로 한 선택적 구동방식을 각 배관요소에 대해서 실험해 보았다.

5.3 주행실험

Fig. 12(a)~(d)는 실제 배관 내에서의 단계별 주행과정을 보여준다. 전체적인 주행실험과정은 다음과 같다. 첫째, Fig. 12(a)와 같이 임의의 단일 구동유닛으로 수평관을 주행한다. 둘째, Fig. 12(b)와 같이 수평관에서 곡관 진입을 시도한다. 이때 조작자는 로봇의 현재 자세를 기준으로 곡관의 회전 방향에 대해 회전반경이 가장 큰 위치의 구동유닛을 선택하여 구동시키고 나머지 구동유닛은 공회전 시킨다. 셋째, 곡관을 거쳐 수직관을 이동하게 되는데, 이 때는 모든 구동유닛을 작동시켜 견인력을 최대한 확보한다. 넷째, Fig. 12(c)와 같이 다시 수직관에서 곡관으로 접어들게 되는데, 이 구간 또한 견인력이 많이 필요하기 때문에 모든 구동유닛을 작동시키고 곡관에서 효율적인 회전을 위해서 차동 구동방식으로 각 구동유닛의 속도비를 제어한다. 다섯째, Fig. 12(d)와 같이 분기관에서도 차동 구동방식이 그대로 적용된다. 모든 구동유닛을 사용하되 분기된 방향으로 로봇의 회전을 유도하기 위해 각 바퀴의 속도를 제어한다.

실험 결과 모든 배관요소에서 원활한 주행이 가능 하였으며 특히 곡관과 분기관에서 견인력의 부족이나 쥘 현상 없이 관경의 변화에 적응하여 자연스럽게 회전을 하였다. 또한 본 논문에서 새롭게 제시한 주행알고리즘의 적용 효과를 살펴 보기 위해서 차동 구동방식과 선택 구동방식의 전력효율성을 비교해 보았다. Fig. 13 과 Fig. 14 는 직관과 곡관 구간을 연속적으로 주행했을 때의 동일하게 인가된 전압에서의 전류 소모량을 비교해서 보여 주고 있다. 실험의 타당성을 위해 두 방식에서의 로봇의 주행속도를 동일하게 설정하여 실험을 진행하였다. 차동 구동방식으로 주행을 하게 될 때에는 클러치를 모두 작동시켜 항상 모든 구동유닛의 바퀴가 모터에 구속 되도록 하고 속도비에 따른 주행을 하게 된다. 또한 클러치는 기존 차동 구동방식에서는 필요가 없기 때문에 측정 시 클러치의 전류 소모량은 제외 시켰다.

Fig. 13 은 x 축의 시간 0~35 초까지의 수평관 구간에서의 전류소모량을 나타내고 있는데 모든 구동유닛을 작동하여 주행할 때(Full Driving)와 선택 구동방식을 적용하여 하나의 구동유닛으로 주

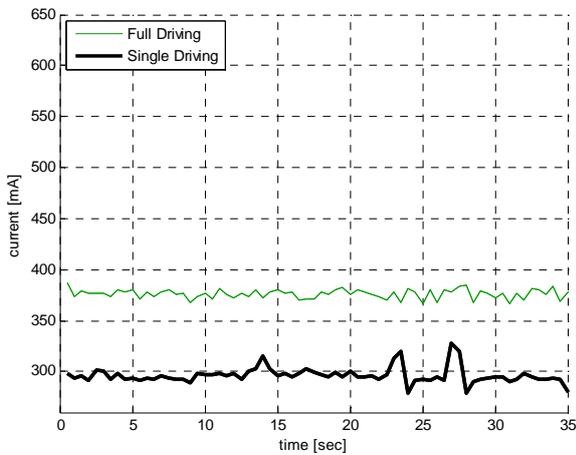


Fig. 13 Current consumption in horizontal

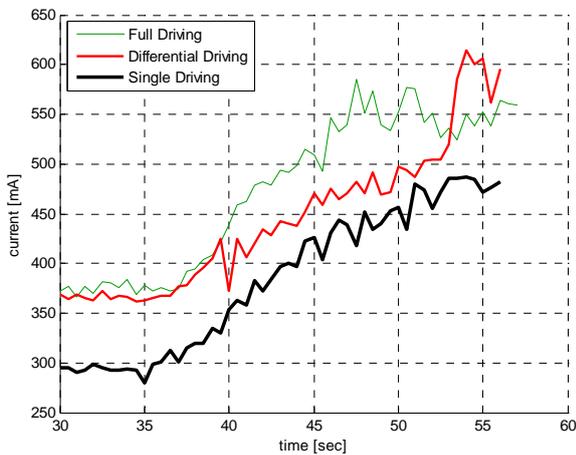


Fig. 14 Current consumption in elbow

행하였을 때(Single Driving)를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 14 에서는 수평관에 이어 x 축의 시간 30~57 초까지의 곡관 구간에서의 그래프로 차동 구동방식을 적용하여 주행할 경우를 추가하여 비교하고 있다. 두 그래프에서 볼 수 있듯이 수평관과 곡관 구간에서 선택 구동방식을 사용한 주행은 하나의 구동유닛만으로 주행하기 때문에 확실히 전력효율 면에서 뛰어나다. 구동방식에 상관없이 수평관보다 곡관에서 전류 소모량이 많아지는 것을 볼 수 있는데 이는 곡관으로 진입할 때 배관단면에 의해 진행방향이 바뀌게 되면서 벽면압착을 위한 링크-스프링 구조물이 수축되고 수평관과 동일한 주행속도를 내기 위해서 더 큰 견인력이 필요하기 때문이다. 곡관 주행에서 전 구동유닛의 속도를 같게 했을 때와 비교하면 차동 구동방식을 사용하게 되면 평균 10%의 전력이득을 볼 수 있고 선택 구동방식을 이용하면 평균 11% 이상의 추가적인 이득을 볼 수 있다. 수직관과 분기관에서는 모든 구동유닛을 작동시켜야 하기 때문에 클러치가 모두 사용되며 따라서 선택 구동방식의 전

류 소모량이 오히려 더 많아지게 되지만 클러치의 전류 소모량은 모터구동에 의한 전류 소모보다 상대적으로 작기 때문에 큰 차이는 나지 않는다.

6. 결론

배관 내부의 장거리 검사를 위해서 이동체는 다양한 배관요소에 대해 적응할 수 있어야 할 뿐만 아니라 케이블 없이 자체적으로 전원을 공급하며 주행해야 한다. 또한 무선통신이 불가능할 경우 원격 조작자의 지시 없이 자율적으로 판단하여 검사를 수행해 나가야 한다. MRINSPECT V 는 이러한 자율주행 배관검사роботов을 목표로 하고 있으며 본 논문에서는 배관내부에서의 이동성과 이동효율을 높이기 위한 구동모듈의 기계적 메커니즘과 주행알고리즘에 대해 제시하였다. 주행성능을 개선하기 위하여 클러치를 사용한 새로운 동력전달 메커니즘을 가지고 있으며 이와 같은 메커니즘에 적합한 선택적 구동방식의 주행 알고리즘에 대해 기술하였다. 또한 제어시스템 환경을 구성하여 여러 배관 요소에서의 실제 실험을 통해 선택적 구동방식의 주행성능을 증명해 보았다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 선택적 구동방식에 의한 주행은 전력효율 측면에서 유리하기 때문에 배관로봇이 배터리를 사용하는 독립 전원 시스템을 가질 경우 이 방식은 상당히 유용할 것이라고 본다. 현재 본 연구를 바탕으로 실제 배관 내부에서 자율적인 검사를 하기 위한 추가적인 모듈 개발과 영상처리에 기반한 주행 알고리즘에 대한 연구를 진행 중이다.

후기

본 연구는 교육인적자원부, 노동부, 산업자원부의 최우수 실험실 지원사업으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Okada, T. and Kanade, T., 1987, "A Three-Wheeled Self-Adjusting Vehicle in a Pipe, FERRET-1," *Int. J. Robotics Research*, Vol. 6, No. 6, pp. 60~75.
- (2) Okada, T. and Sanemori, T. 1987, "MOGRER: A Vehicle Study and Realization for In-Pipe Inspection Tasks," *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 6, pp. 573~582.
- (3) Schempf, H. and Vradsis, G., 2004, "Explorer: Long-Range Untethered Real-Time Live Gas Main Inspec-

- tion System,” in *Proc. Int. Conf. GTI*.
- (4) Roman, H. T., Pellegrino, B. A., Sigrist, W. R., 1993, “Pipe Crawling Inspection Robots: an Overview,” *IEEE Trans of Energy Conversion*, pp. 576~583.
- (5) Nagano, S. and Oka, Y., 1988, “Application of In-pipe Visual Inspection Robot to Piping Internal Surface Lining,” in *Proc. Int. Symp. Robotics in Construction*, pp. 897~906.
- (6) Neubauer, W., 1994, “A Spider-Like Robot that Climbs Vertically in Ducts or Pipes,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots, Systems*, pp. 1178~1185.
- (7) Tsuruta, K., Sasaya, T., Shibata, T., and Kawahara, N., 2000, “Control Circuit in an In-pipe Wireless Micro Inspection Robot,” in *Proc. Int. Symp. Micromechatronics, Human Science*, pp. 59~64.
- (8) Choi, H. R., Ryew, S. M., and Cho, S. H., 1999, “Development of Articulated Robot for Inspection of Underground Pipelines,” in *Proc. Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology*, Vol. 3, pp. 407~414.
- (9) 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,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robot and Systems*, pp. 1652~1657.
- (10) Ryew, S. M and Choi, H. R., 2001, “Double Active Universal Joint(DAUJ): Robotic Joint Mechanism for Humanlike Motions,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 290~300.
- (11) Roh, S. G., Ryew, S. M, Yang, J. H., and Choi, H. R., 2001, “Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 761~766.
- (12) Choi, H. R. and Ryew S. M, 2002, “Robotic System with Active Steering Capability for Internal Inspection of Urban Gas Pipelines,” *Mechatronics*, Vol. 12, No. 5, pp. 713~736.
- (13) Roh, S. G., Ryew, S. M, and Choi, H. R., 2001, “Development of Differentially Driven Inpipe Inspection Robot for Underground Gas pipelines,” in *Proc. Int. Symp. Robotics*, pp. 165~171.
- (14) Roh, S. G. and Choi, H. R., 2002, “Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive In-pipe Robot,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2575~2580.
- (15) Roh S. G. and Choi, H. R., 2005, “Differential-Drive In-Pipe Robot for Moving Inside Urban Gas Pipelines,” *IEEE Trans. Robotics*, Vol. 21, No.1, pp. 1~17.