

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.8.633

Crawling 방식을 이용한 관 탐사용 소형 로봇의 이동속도 해석

장기현* · 박현준* · 김병규†

(2007년 10월 11일 접수, 2008년 6월 17일 수정, 2008년 6월 23일 심사완료)

Theoretical Velocity Analysis of Micro Robot Based on Crawling Locomotive Mechanism for Pipe Inspection Micro Robot

Kihyun Jang, Hyunjun Park and Byungkyu Kim

Key Words : Crawling Robot(크로울링 로봇), Lead Screw(리드 스크류), Micro Robot(마이크로 로봇), Pipe Inspection(관 탐사).

Abstract

Recently, the necessity for diagnosis and management of pipes has emerged as the issue due to contamination of water supply generated by corrosion of pipes. Although inspection has been performed with industrial endoscopes, the method has limits for full diagnosis of pipes due to the lack of working range. As a solution for this problem, many locomotive mechanisms for a micro robot with endoscope functions were proposed. In this paper, we analyze the locomotive mechanism of crawling robot proposed as locomotive device for pipe inspection. Based on a mechanical modeling of motor and micro robot inside small pipe, the theoretical formula for velocity is obtained. This derived theoretical formula is demonstrated the feasibility through the comparison with experimental result. Also, we could find the most important element influencing the moving velocity of micro robot when the robot operates in small pipe. Consequently, it is expected that this study can supply useful information to design of crawling robot to move in small pipe.

기호설명

p : 나사선의 피치
 T_0 : 모터의 최대토크
 w_0 : 모터의 무부하 회전속도
 μ : 나사선과 이동부 사이의 동마찰계수
 μ_r : 관내면과 뒷다리 사이의 최대정지
 마찰계수
 μ_f : 관내면과 앞다리 사이의 동마찰계수

μ_h : 로봇 몸체의 구멍과 뒷다리 사이의
 동마찰 계수
 P : 앞다리 끝단에서의 추력
 P_1 : 뒷다리 끝단에서의 추력
 P_3 : 로봇 몸체의 구멍에서 발생하는
 저항력
 P_4 : 이동부의 이동을 방해하는 저항력
 ϕ : 관벽과 앞다리 끝단 사이의 접촉각
 ϕ_1 : 관벽과 뒷다리 끝단 사이의 접촉각
 L_r : 뒷다리 끝단과 무게중심 사이의 거리
 L_f : 앞다리 끝단과 무게중심 사이의 거리
 D : 나사의 외경
 W : 로봇의 무게
 h : 관벽면과 로봇의 무게중심 사이의
 거리

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학과

E-mail : bkim@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0101

* 한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학과

1. 서론

점차적으로 사회에서 물에 대한 중요성이 증대됨에 따라 상수도를 통한 가정으로 공급되는 물의 청결함이 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 상수도관의 부식이 관을 흐르는 물의 오염의 심각한 원인으로 대두되고 있는 가운데 이러한 관 내의 부식을 소형 마이크로 로봇을 이용하여 부식수준을 알아내기 위하여 지름 20mm 이하의 작은 관에서 쉽게 움직일 수 있는 로봇 제작에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 최근 MEMS 기술이 발전함에 따라 여러 가지의 구동방식을 가진 소형로봇이 개발되고 있다.⁽¹⁾ 특히 Crawling type,⁽²⁾ Inchworm type,^(3,4) Wheel type⁽⁵⁾ 등을 중심으로 그 연구가 진행되고 있는데 이번 연구는 관 탐사 목적으로 제작된 Crawling type 의 소형 로봇에 관한 것이다. 기존의 Crawling 방식의 마이크로 로봇의 연구에서 비슷한 원리를 가진 다양한 형태의 로봇이 제작되었지만 로봇의 이동속도와 같은 성능을 예측하고 설계하는 데에 유용하게 사용될 수 있는 이론적인 수식은 미비하였다. 그리하여 기존의 연구들은 주로 실험적인 방법에 의존할 수 밖에 없었고 최적의 성능을 내는 로봇을 제작하기 위하여 수 많은 시행착오를 겪어야만 했다. 그러므로 많은 시간과 노력이 소모되었다. 따라서 이번 연구에서는 Crawling 방식의 로봇에 대한 이론적인 수식을 정리하였다. 로봇의 이동속도 해석을 위하여 모터와 Lead screw, 관내에서 이동하는 로봇을 동역학적으로 모델링 하였다. 또한 유도된 모델링을 사용한 시뮬레이션을 통하여 제작된 로봇의 이동속도를 예측하고 이동속도에 가장 크게 영향을 미치는 변수를 찾아낼 수 있었다. 따라서 본 논문에 제시된 모델링 및 수식은 Crawling 방식의 소형관 내에서 이동하는 로봇에 대해 유용한 설계정보를 제공할 수 있었다.

제작된 로봇은 일반 DC 모터를 이용한 로봇으로서 모터의 회전운동을 직선운동으로 바꾸기 위해 Lead screw 가 장착되었다. 또한 Lead screw 위를 직선운동을 하면서 반복적으로 움직이는 Mobile cylinder 와 관 벽을 지지하기 위해 Mobile cylinder 와 Mobile cylinder 에 고정된 앞다리와 뒷다리 각각 3 개로 구성된다. 각각의 다리 끝에는 관 벽면을 지지하기에 충분한 마찰력을 보장받기 위하여 고무가 부착되어 있다. 로봇의 전체적인 구조가 Figure 1 에 표현되었고, 실제로 제작된 로봇의 모습을 Figure 2 에 나타내었다.

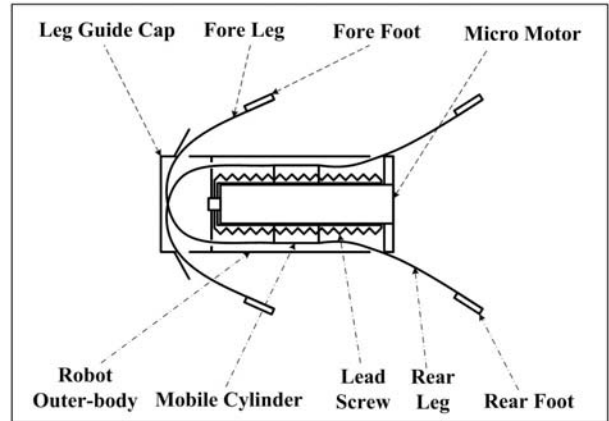


Fig. 1 Structure of micro robot

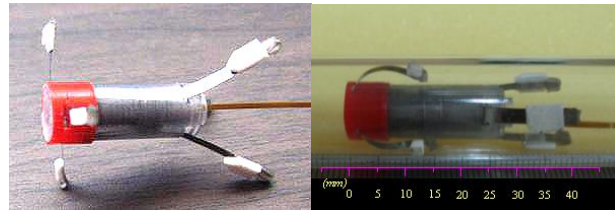


Fig. 2 Fabricated micro robot

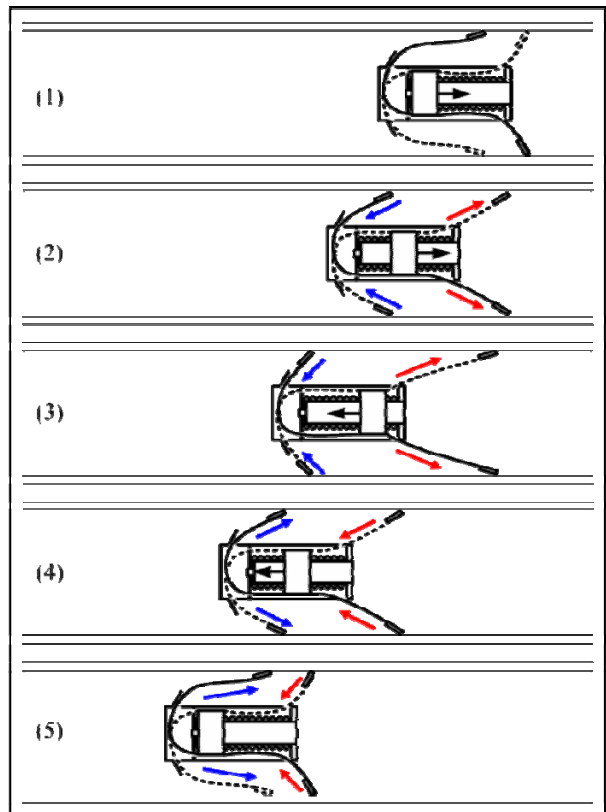


Fig. 3 Locomotive mechanism for fabricated micro robot

2. 이동 메커니즘

간단히 이동 메커니즘을 소개하자면 모터에 전압이 인가되면 모터에 부착된 Lead screw가 회전하고 Lead screw를 감싸고 있는 Mobile cylinder가 앞뒤로 움직이게 된다. 일례로 Mobile cylinder가 로봇의 뒤쪽으로 움직이게 되면 Mobile cylinder에 고정된 앞다리와 뒷다리 역시 같이 움직이게 된다. 뒷다리 끝쪽은 관 벽면을 지지하며 뒤로 나오게 되고 동시에 앞다리는 벽면에 끌리면서 로봇 몸체 내부로 들어오게 된다. 즉 Mobile cylinder가 뒤로 움직일 때 뒷다리의 끝과 벽면과의 마찰력이 앞다리의 끝과 벽면과의 마찰력보다 크게 되고 작용-반작용 원리에 따라 로봇은 앞으로 전진하게 되는 것이다. 이런 일련의 과정을 Figure 3에 표현하였다. Figure 3에 나타난 과정에 따라 살펴보면 다음과 같다.

(1) 이동 장치의 초기상태를 나타낸다.

(2) Mobile cylinder가 오른쪽으로 이동하면 이에 연결된 뒷다리는 관 내부 벽면을 지지하며 몸체에서 나오게 되고, 상대적으로 앞다리는 관 내부 벽면을 미끄러지며 몸체 안으로 들어오게 되면서 로봇은 왼쪽으로 이동하게 된다.

(3) Mobile cylinder가 오른쪽으로 끝까지 이동하게 되면 로봇은 Mobile cylinder가 이동한 거리만큼 왼쪽으로 이동한 후 멈추게 된다.

(4) 반대로 Mobile cylinder가 오른쪽으로 끝까지 움직인 상태에서 다시 왼쪽으로 이동하게 되면 앞다리는 몸체 밖으로 빠져 나오면서 관 내부 벽면을 지지하고, 뒷다리는 관 내부 벽면을 미끄러지면서 몸체 안으로 들어 오면서 로봇은 다시 왼쪽으로 이동하게 된다.

(5) Mobile cylinder가 왼쪽으로 끝까지 이동하게 되면 로봇은 다시 Mobile cylinder가 이동한 거리만큼 왼쪽으로 이동하게 되고 초기상태로 돌아오게 된다.

3. 동역학적 모형화

3.1 구동장치의 모델링과 이론속도

전체적인 로봇에 대하여 해석을 하기 위해 먼저 Lead screw와 Mobile cylinder를 먼저 해석하고 이를 전체적인 로봇 시스템에 적용한다.

일단 Figure 4에 Lead screw와 Mobile cylinder 두 개로 이루어진 모델링을 표현하였다. T 는 Lead screw에 가해지는 토크이고 w 는 Lead screw의 회전속도, D 는 직경, θ 는 피치각, p 는 피치, μ 는 Mobile cylinder key와 Lead screw 홈에 작용하는 운동마찰계수를 의미한다. Mobile cylinder의 이동을 방해하는 저항력 F_C 가 작용하는 상황에서

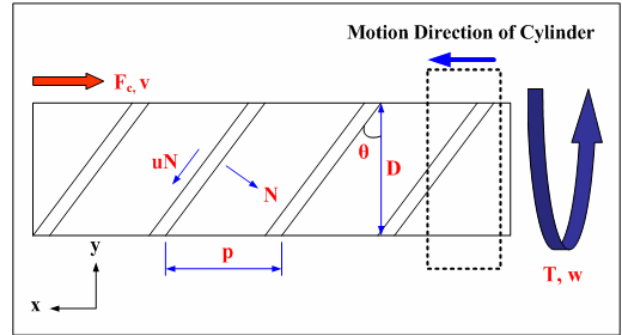


Fig. 4 Modeling for lead screw and mobile cylinder

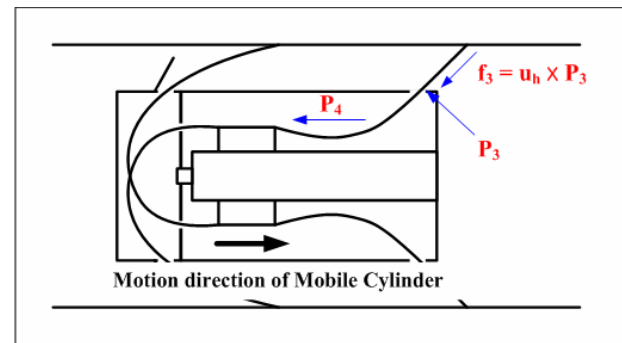


Fig. 5 Resistance force generated when micro robot fabricated

Lead screw가 일정한 T (토크)와 w (회전속도)로 회전한다고 할 때 실린더는 등속도로 이동한다. 그때 x 축 방향으로 운동방정식과 회전운동 방정식을 적용하면 다음과 같이 표현이 되고⁽⁶⁾

$$F_C = N \cos \theta - \mu N \sin \theta \quad (1)$$

$$T = \left(\frac{D}{2}\right)N \sin \theta + \left(\frac{D}{2}\right)\mu N \cos \theta \quad (2)$$

이 두 식으로부터 저항력 F_C 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_C = \frac{2T(\cos \theta - \mu \sin \theta)}{D(\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad (3)$$

한편 나선의 형상으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있고⁽⁷⁾

$$p = \pi D \tan \theta \quad (4)$$

이 관계식을 이용하면 저항력 F_C 는 다음과 같이 토크와 표현된다.

$$F_C = \frac{2T(\pi D - \mu p)}{D(p + \mu \pi D)} \quad (5)$$

또한 나선의 형상으로부터 회전속도(w)와 선속도(v) 사이에는 다음과 같은 관계가 성립하고⁽⁷⁾

$$\frac{D}{2} w \tan \theta = v \quad (6)$$

일반적인 DC 모터는 출력토크 (T) 와 회전속도 (w) 사이에는 다음과 같은 선형적인 관계가 성립한다.⁽⁸⁾

$$w = w_0 \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \quad (7)$$

여기서 w_0 는 무부하 회전속도, T_0 는 최대출력 토크로 회전속도가 0 일 때의 출력토크이다.

먼저 식 (6)을 w 에 대해 식 (5)를 T 에 대해 정리하고 식 (7)에 대입한 후 v 에 대해 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$v = \frac{pw_0}{2\pi} \left[1 - \frac{F_c D(p + \mu\pi D)}{2T_0(\pi D - \mu p)}\right] \quad (8)$$

이 식은 Mobile cylinder 의 이론속도가 된다. 하지만 이 식은 로봇이 조립된 상태에서의 저항력과 부하 등을 고려하지 않은 식이기 때문에 로봇이 완전히 조립된 상태와 로봇이 관 속에서 구동할 때 로봇에 작용하는 저항력과 부하까지 고려한 식이 필요하다.

3.2 로봇의 이론속도

모터가 로봇에 장착되면 여러 부가적인 저항력이 발생한다. 특히 Mobile cylinder 에 연결된 로봇의 다리가 관 속에서 벽면을 지지하기 위하여 몸체에 있는 구멍을 통해 로봇의 몸체 밖으로 빠져나간다. 이때 이 구멍에서는 마찰력이 발생하고 이는 저항력으로 작용한다. 또한 로봇의 다리가 굽어진 채로 로봇의 몸체를 빠져나가면서 강성을 가진 다리는 휘어지게 되고 이로 인하여 Mobile cylinder 의 움직임을 방해하는 저항력이 발생하게 된다. 이 같은 현상을 Figure 5 에 표현 하였다. P_3 는 뒷다리가 몸체를 빠져나갈 때 구멍에 작용하는 수직반력 이고, f_3 는 다리와 구멍 사이에 작용하는 마찰력이다. 그리고 P_4 는 로봇구동 중에 몸체 내에서 다리가 휘어짐으로써 Mobile cylinder 의 움직임을 방해하는 힘, 즉 Mobile cylinder 의 이동방향에 반대로 작용하는 저항력이다. 따라서 이 힘들을 위에서 구한 Mobile cylinder 의 이론속도 식에 저항력 항에 추가시켜 주면 모터가 로봇에 연결 되었을 때의 Mobile cylinder 의 이동속도를 구할 수 있다.

$$v = \frac{pw_0}{2\pi} \left[1 - \frac{(F_c + P_4 + f_3)D(p + \mu\pi D)}{2T_0(\pi D - \mu p)}\right] \quad (9)$$

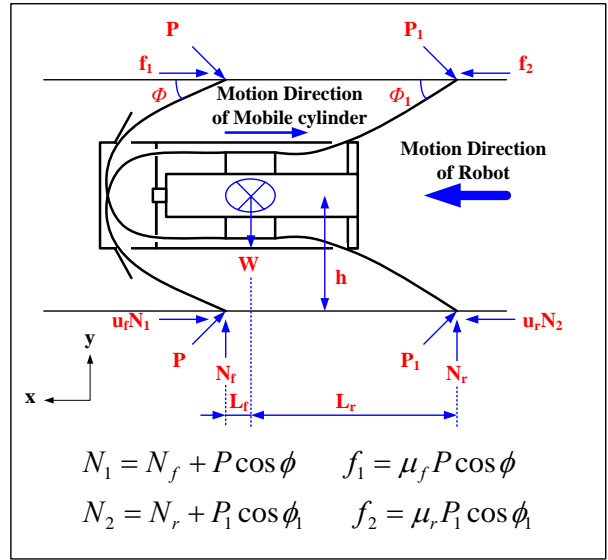


Fig. 6 Free body diagram of micro robot in pipe

3.3 관 내에서의 로봇의 이동속도

이번 해석의 기본적인 개념은 Mobile cylinder 의 이론적인 속도와 로봇의 속도는 같다는 것이다. 몸체 바깥으로 빠져 나오는 로봇의 다리에 충분한 강성이 있다면 관 내에서 구동 중에 다리의 휘어짐으로 인한 Stroke 손실은 무시할 만 하다. 따라서 다리가 벽을 지지 하면서 앞으로 나아가는 로봇의 이동 메커니즘을 고려해 볼 때 Mobile cylinder 의 이동거리와 로봇의 Stroke 는 같다고 할 수 있으며 속도 또한 같다고 볼 수 있다. 따라서 관 내에서 Mobile cylinder 의 이동을 방해하는 힘을 위 식의 저항력에 추가해 줌으로서 로봇의 이론적인 이동속도를 구할 수 있다. 먼저 관 내에서 이동하는 로봇을 Figure 6 와 같이 모델링 하였다. 또한 모델링 과정에서 사용된 변수에 대한 설명을 Table 1 에 간략히 정리하였다. 그리고 관 속에서 움직이는 로봇을 모델링하고 해석하는데 사용한 가정은 다음과 같다. 첫째로 수평관(2-D)에서 로봇이 앞으로 전진하고 있을 때, 즉 Mobile cylinder 가 뒤로 이동할 때를 고려하였고 수식의 복잡성을 피하기 위해 앞다리와 뒷다리 각각 2 개씩만 생각하였다. 둘째로 로봇은 이동 중에 불균형으로 인한 회전과 y 축 방향으로의 움직임은 없다고 가정하였다. 셋째로는 다리는 Stainless steel 의 재질로 되어있어 강성이 존재하기 때문에 관 벽면을 지지할 때 벽면을 미는 힘이 존재한다고 생각하였다. 하지만 다리의 휘어짐으로 인한 x 축 방향으로의 Stroke 손실은 상대적으로 작기 때문에 무시하였다. 넷째로는 로봇이 전진하는 순간 뒷다리와 관 벽면 사이에 충분한 최대정지마찰력이 발생하여 미끄러짐은 발생하지 않는다고 가정하였다. 로봇이 관 내에서 이동함에 따라 뒷다리가 벽을 지지하면서 발생하

는 부하, 앞다리가 끌려가면서 발생하는 마찰력 등으로 인하여 부차적인 속도 손실이 발생하게 된다.

Figure 6 에서 로봇의 진행을 방해하는 저항력은 다음과 같음을 알 수 있다

$$F_s = 2P \sin \phi + \mu_f (N_f + 2P \sin \phi) + \mu_r (N_r + 2P_1 \cos \phi_1) - 2P_1 \sin \phi_1 \quad (10)$$

여기서 수직반력 N_f, N_r 을 구하기 위하여 운동방정식을 적용하면

$$\sum F = ma_y : N_f + N_r = W \quad (11)$$

$$\sum M_{GZ} = I_{GZ} \alpha :$$

$$L_r N_r - L_f N_f + h(\mu_f N_f - \mu_r N_r) = 0 \quad (12)$$

여기서 y 축으로의 움직임은 없고 로봇은 회전하지 않는다. 즉 $a_y = 0, \alpha = 0$ 이다.

위 두 식으로부터 수직반력(N_f, N_r) 을 구하면

$$N_f = \frac{(L_r - h\mu_r)W}{L_r + L_f - h(\mu_r + \mu_f)} \quad (13)$$

$$N_r = \frac{(h\mu_f - L_f)W}{h(\mu_r + \mu_f) - L_r - L_f} \quad (14)$$

이 된다.

따라서 관 내에서 발생하는 저항력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_s = \mu_f \left(\frac{(L_r - h\mu_r)W}{L_r + L_f - h(\mu_r + \mu_f)} + 2P \sin \phi \right) + \mu_r \left(\frac{(h\mu_f - L_f)W}{h(\mu_r + \mu_f) - L_r - L_f} + 2P_1 \cos \phi_1 \right) + 2P \sin \phi - 2P_1 \sin \phi_1 \quad (15)$$

결국 이 저항력을 3.2 절에서 구한 이동속도 식에 추가해 주면 관속에서 이동하는 로봇의 이동속도를 구할 수 있다.

$$v = \frac{pw_0}{2\pi} \left[1 - \frac{(F_c + P_4 + f_3 + F_s)D(p + \mu\pi D)}{2T_0(\pi D - \mu p)} \right] \quad (16)$$

3.4 시뮬레이션 매개변수

위에서 구한 식들을 시뮬레이션 하기 위해서는 각각의 매개변수에 대한 수치가 필요하다. 매개변수 중 힘에 관련된 변수들은 각각의 상태를 로드셀을 이용하여 실험적으로 측정되었고 기하학적 변수들은 측정기를 이용하여 측정되었다.

Table 1 Parameters of simulation

Pushing force at the fore leg tip	P	17 g_f
Pushing force at the rear leg tip	P_1	18 g_f
Pushing force at the hole	P_3	15 g_f
Pushing force in housing	P_4	250 g_f
Friction force at the fore leg tip	f_1	-
Friction force at the rear leg tip	f_2	-
Distance from fore leg tip to center of mass	L_f	3 mm
Distance from rear leg tip to center of mass	L_r	30 mm
Distance from wall surface to center of mass	h	10.5 mm
Weight of micro robot	W	3.4 g_f
Angle between fore leg tip and wall surface	ϕ	20 degree
Angle between rear leg tip and wall surface	ϕ_1	40 degree
Coefficient of kinetic friction between fore leg and wall surface	μ_f	0.2
Coefficient of max. static friction between fore leg and surface	μ_r	0.8
Coefficient of kinetic friction between key and lead screw	μ	0.02
Coefficient of kinetic friction between rear leg and lead hole	μ_h	0.1
Pitch of lead screw	p	1mm
Diameter of lead screw	D	6mm

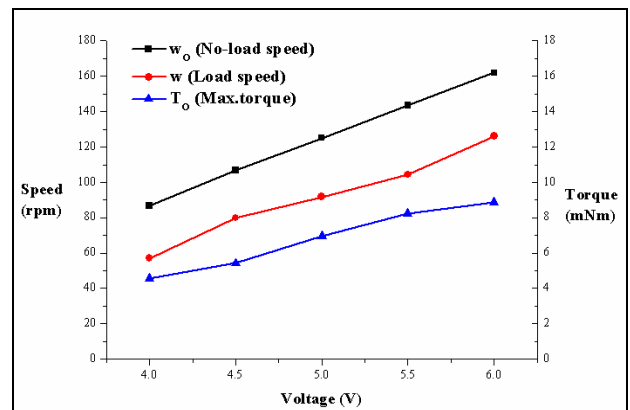


Fig. 7 No-load speed, load speed, and Max. torque according to input voltage

단, 기하학적 변수들 중에서 로봇의 구동 중에 변하는 L_f, L_r 은 평균값을 적용하였다. 또한 4 개의 마찰계수는 재료의 특성을 고려하여 적절한 수치를 적용하였다. 적용된 매개변수의 수치를

Table 1 에 나타내었다.

또한 로봇의 구동을 위해 필요한 모터의 매개변수는 모터에 인가되는 전압에 따라 그 특성이 변하기 때문에 인가되는 전압에 따른 모터의 성능을 실험적으로 측정하였다. 전압의 범위는 로봇이 구동하기 위하여 필요한 최소 전압 4V 에서 모터에 인가될 수 있는 최대 전압인 6V 까지 측정하였다. 결과는 Figure 7 에 표현하였다.

4. 결 과

4.1 로봇의 제원

마이크로 로봇의 외형은 Polycarbonate 를 사용하여 외경 11 mm 원통형으로 제작하였다. 로봇의 다리는 Stainless steel 0.04 mm 판재를 폭 2 mm 로 절단하여 사용하였으면, 다리 끝부분에 접촉된 발은 고무를 사용하여 관 내벽과의 마찰력을 높였다. 전체 로봇의 길이는 뒷다리가 몸체로 들어갔을 때는 약 35 mm 이고, 뒷다리가 몸체에서 나왔을 때는 약 45 mm 이다. 그 밖의 로봇의 재원은 Table 2 에 나타내었다.

4.2 시뮬레이션 및 실험 결과

모터에 인가되는 전압을 4V 에서 6V 까지 0.5V 간격으로 증가시키면서 내경 21mm 수평 관과 수직 관에서 이동속도 실험을 하였다. 그리고 위에서 유도된 식을 이용하여 각각의 전압에 따른 이론적인 이동속도를 구하여 실험으로 구한 속도와 비교하였다.

Figure 8 은 동역학적 해석결과와 실제 실험결과를 비교한 그래프이다. 첫 번째 값은 모터의 회전속도로만 계산된 수치로써 저항력을 고려하지 않은 모터의 회전속도를 식 (6)에 대입하여 계산하였으며, 최고속도는 2.7mm/s 이다. 두 번째 값은 모터를 로봇에 조립하고 관 밖에서 Mobile cylinder 의 이동속도를 실험을 통하여 측정한 값이며, 최고속도는 2.1mm/s 이다. 세 번째 값은 로봇의 조립 후의 저항력과 관내에서 이동 시 발생하는 저항력을 고려하여 계산된 식 (16)의 결과를 나타냈으며 최고속도는 1.9mm/s 이다. 네 번째, 다섯 번째 값들은 각각 수직 관과 수평 관에서 실제 로봇이 이동하는 속도를 측정한 결과이며, 최고속도는 수직 관에서 1.5mm/s, 수평 관에서 1.4mm/s 이다.

저항을 고려하지 않은 이론속도와 관 밖에서 로봇의 Mobile cylinder 이동속도, 저항을 고려한 이론속도를 비교해 보면 순차적으로 저항력이 추가될 수록 로봇의 이동속도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 저항을 고려한 이론속도와 관 속에서 이동하는 로봇의 이동속도와는 약간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이는 실제 이동 실험에서는 로봇의 다리 끝과 관 내벽 사이에 작은 양의

Table 2 Specifications of micro robot

Name	Dimension (mm)	Material
Robot body	Diameter : 11 Length : 28	Polycarbonate
Mobile cylinder	Diameter : 8 Length : 4.5	Polycarbonate
Fore leg	Width : 2 Length : 6~19 Thickness : 0.04	Stainless Steel
Rear Leg	Width : 2 Length : 8~21 Thickness : 0.04	Stainless Steel
Forefoot	Width : 2 Length : 2 Thickness : 1.5	Rubber
Rear Foot	Width : 4 Length : 6 Thickness : 1.5	Rubber
Lead Screw	Diameter : 6 Length : 17 Pitch : 1	Duralumin

미끄러짐이 발생하는 것을 알 수 있었지만, 이론식에서는 이러한 미끄러짐은 없다고 가정했기 때문에 발생한 오차이다. 또한 수평 관을 움직이는 로봇은 다리 끝의 미끄러짐 외에도 중력방향에 위치한 다리들이 로봇의 자중에 의해 더 많이 굽혀지며 이동하므로, 자연스럽게 세 쌍의 다리에 의해 자중이 분산되는 수직 관에서의 로봇의 이동보다 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이 역시 이론 식을 구할 때는 무시되었던 사항이다. 이러한 수직 관에서 수평 관보다 이동 성능이 좋게 나오는 로봇의 특징은 수평 관에서의 이동만을 고려한 이론 식을 가지고 로봇의 수직 관에서 이동 가능성을 확인할 수 있음을 보여준다.

위의 결과를 살펴보면 로봇이 관 내에서 이동하는 이론속도와 실제속도는 로봇의 다리와 관 내벽과의 미끄러짐과 로봇의 자중에 의한 다리의 굽힘으로 인해 차이가 발생함을 알 수 있다. 수치적으로 살펴보면 미끄러짐에 의한 속도손실은 0.4mm/s 이고, 다리의 자중에 의한 굽힘으로 인해 발생하는 속도손실은 0.1mm/s 임을 알 수 있다.

로봇의 각 상태에 따른 이동속도 효율은 Figure 9 와 같이 나타낼 수 있으며, 로봇이 관내에서 이동할 때의 이론적인 속도효율은 70.4%이며, 실험적인 속도효율은 55.6~51.9% 정도임을 알 수 있다.

또한 제안된 수식을 토대로 로봇의 이동속도에 가장 크게 영향을 미치는 요소를 찾아내기 위하여 각각의 변수에 대해 타당한 범위 내에서 Parameter study 를 하였다. 그 결과를 Figure 10 에 대략적으로 표현하였다.

먼저 제작된 로봇의 무게(W)는 3.4 g_f 으로 이동에 필요한 가장 기본적인 장치들만을 포함한 무게

이다. 추후에 탑재될 소형 배터리나 추진력을 증가시키기 위한 직렬형 로봇을 제작한다고 했을 때 그 무게는 약 2~3 배 정도 증가할 것으로 예측된다. 따라서 무게를 3 배 증가시켜 시뮬레이션 한 결과 속도의 감소는 약 1% 정도 수준이었다.

앞다리와 뒷다리 끝에서의 Pushing force(P, P_1), 로봇 몸체에서 다리가 빠져나가는 구멍에서 발생하는 Pushing force(P_3), 몸체 내부에서 다리의 휘어짐으로 인한 Pushing force(P_4), 이 힘들은 모두 다리의 강성에 의해 좌우되고 다시 강성은 로봇의 다리의 두께에 크게 의존한다. 제작된 로봇에 사용된 다리의 두께는 0.04mm 이고, 두께가 0.02mm 보다 더 작아지면 로봇을 지탱하지 못한다. 0.1mm 이상의 두께에서는 강성이 매우 커져 로봇이 관속에 끼어서 움직이지 못하는 현상이 발생한다. 따라서 다리의 두께를 0.02~0.1mm 로 변화시켜 가면서 그 때의 Pushing force 의 값을 측정 한 후 시뮬레이션을 한 결과 P 와 P_4 는 약 3~5% 수준 P_1 과 P_3 는 약 1% 수준의 속도 변화가 발생하였다.

다음으로 마찰계수는 접촉하고 있는 재질에 따라 달라지고 보통 0~1 사이에서 결정된다. 마찰계수를 이 범위 내에서 시뮬레이션 한 결과 변수 μ_f, μ_r, μ_h 에 대해서는 3~10%, μ 에 대해서는 약 30%의 속도변화가 발생하였다.

로봇의 무게중심에서 각 다리의 끝부분까지의 거리를 나타내는 변수 L_f, L_r 은 로봇의 안정적인 지탱을 이유로 변화시킬 수 있는 범위가 $\pm 5mm$ 로 제한된다. 이 범위 내에서 로봇의 속도변화는 약 1% 수준에 불과하다.

ϕ, ϕ_1 은 구조적으로 0~90 도 사이에서 정해지게 되는데 이 구간에서 속도의 변화는 약 3% 수준이다. h 는 관의 직경에 의존하는 변수인데 소형 관에서 움직이는 로봇이기에 약 2 배정도 변화시켜 시뮬레이션을 한 결과 속도변화는 1%도 채 안되었다. 반면 Lead screw 의 직경인 D 는 로봇의 크기에 제약을 받아 2 배 정도만 변화시킨 결과 약 7%의 속도변화가 발생하였다.

Lead screw 의 피치(p)의 증가는 로봇의 속도 상승에 기여할 수 있지만 속도가 상승한 만큼 로봇의 추진력이 감소하게 된다. 일단 최대속도가 발생하는 피치(p) 값을 찾기 위하여 제안된 로봇의 이동속도가 감소하는 범위까지 시뮬레이션 하였다. 피치가 작은 범위 내에서는 피치의 증가에 따라 로봇의 이동속도는 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 피치의 증가는 피치각(θ)의 증가를 의미하고 피치각의 계속적인 증가는 모터에 작용하는 부하를 증가시킨다. 그리하여 피치의

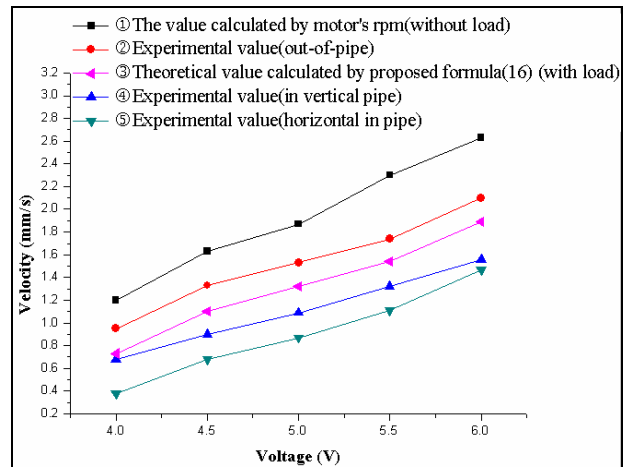


Fig. 8 Comparison of velocity according to applied voltage

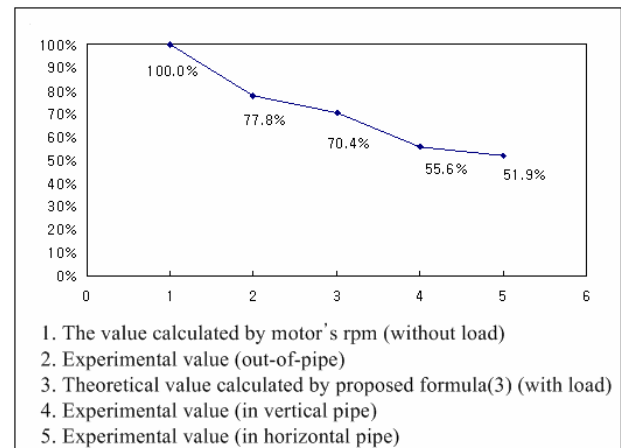


Fig. 9 Comparison of efficiency according to robot's status

증가에 따라 속도의 증가추세는 감소되고 피치가 8mm 에서 최고속도를 보이며, 피치 증가에 따른 최대 이동속도는 약 8mm/s 정도이다. 하지만 이와 같은 큰 피치의 증가는 로봇이 관내를 이동할 때 받는 저항력보다 추진력을 작게 발생시켜서 이동이 불가능 하므로 피치의 증가는 2mm 까지로 제한하였다. 이때 약 100%의 속도변화가 발생한다.

제작된 로봇이 마이크로 수준의 소형 로봇이기 때문에 로봇의 구동장치인 직류모터와 관련된 변수인 전압에 따른 최대토크(T_0)와 무부하 회전속도(w_0), Lead screw 에 관련된 변수인 Mobile cylinder 와 Lead screw 와의 마찰계수(μ)와 피치(p)가 로봇의 이동속도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그 중에서도 특히 Lead screw 의 피치가 로봇의 이동속도에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, Figure 11 에 그 영향수준을 수치적으로 표현하였다. 모든 시뮬레이션에서 입력

전압은 6V 를 인가하였고, 변화시키는 Parameter 이
 외의 모든 Parameter 는 Table 1 에서와 같은 수치로
 고정 시켰다.

5. 결 론

이번 연구는 관 탐사 목적으로 제작된 Crawling
 방식의 소형 로봇에 대한 이론적인 이동속도의 수
 식을 유도하는 것이었다.

먼저 로봇에 사용된 모터와 모터에 연결된 Lead
 screw 를 동역학적으로 모델링 하여 선형구동기인
 Mobile cylinder 의 이론적인 이동속도를 나타내는
 식을 유도하였고 다시 Mobile cylinder 에 로봇의
 다리가 연결되고 몸체가 조립되는 과정에서 발생
 하는 저항력을 찾아내어 수식적으로 표현하였다.
 그렇게 함으로서 조립된 로봇의 이론적인 이동속
 도를 유도하였다. 또한 로봇이 21mm 관 속에서
 구동할 때의 이론적인 이동속도를 구하기 위하여
 로봇이 관 속에 들어간 상태를 동역학적으로 모델
 링 하고 해석하였다. 여러 가정을 통하여 해석을
 단순화 시켰고 해석결과를 통해 얻은 이론적인 수
 식은 실험적인 데이터와 비교를 해봄으로써 해석
 이전에 했던 가정의 타당성을 검증할 수 있었고
 로봇의 이론적인 수식을 통해 로봇의 이동속도를
 근사적으로 예측하기에 충분하다는 결과를 이끌어
 낼 수 있었다. 따라서 이번 논문에서 유도한 수식
 은 비슷한 이동메커니즘을 가진 마이크로 로봇에
 활용될 수 있을 것이다.

또한 Parameter study 를 통하여 로봇의 이동속도
 에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 Lead screw 의
 피치(p)와 모터에 인가되는 전압(V), 그리고
 Mobile cylinder 와 Lead screw 와의 마찰계수(μ)로
 서 주로 로봇의 구동장치인 모터에 관한 것임을
 확인할 수 있었다. 따라서 로봇의 이동속도를 증
 가시키기 위해서는 저항력을 감소시키기 보다는
 보다 좋은 성능을 가지는 모터를 사용하는 것이
 유리할 것으로 생각된다. 하지만 아주 작은 관에
 서 움직이는 로봇이기 때문에 모터의 크기가 매우
 제한적이므로 성능 또한 제약을 받을 수 밖에 없
 다. 그러므로 가장 효율적으로 빠른 이동속도를
 가지기 위해서는 큰 피치를 가지는 Lead screw 의
 사용이 필요하다는 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

결론적으로 본 연구에서 유도된 이론적인 수식
 과 실험 결과와의 오차는 실험 환경에 의한 요인
 이라 할 수 있기 때문에 정리된 수식을 적용하여
 로봇의 이동성능의 평가가 가능하다고 생각된다.

추가적인 연구를 통해서 로봇이 관 속에서 이동
 할 때 로봇의 다리와 벽면 사이에 발생하는 Slip
 현상과 다리의 좌굴(buckling)현상으로 인한 Stroke
 손실에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각
 된다.

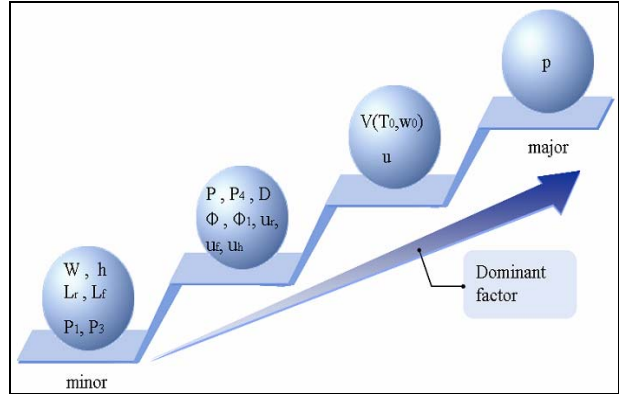


Fig. 10 The influence of each parameter on the locomotive velocity of micro robot

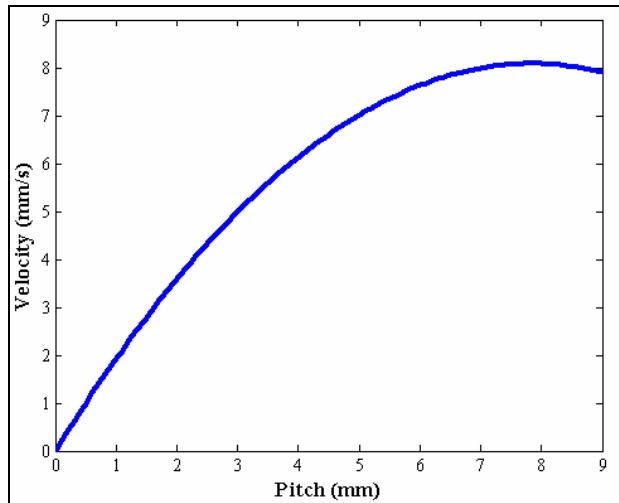


Fig. 11 Velocity according to pitch of lead screw

후 기

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업
 인 "Eco-STAR Project" 와 지식경제부 전략기술개
 발사업(과제번호:10030037)의 지원으로 수행되었으
 며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Shigeo Hirose, Hidetaka Ohno, Takeo Mitsui, Kijhi Suyama, 1999, "Design of In-pipe Inspection Vehicles for Ø25, Ø50, Ø150 pipes," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2309~2314.
- (2) Sukho Park, Hyunjun Park, Sungjin Park, Changyeol Jee, Jinseok Kim and Byungkyu Kim, 2006, "Capsular Locomotive Microrobot for Gastrointestinal Track," *In Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference*, pp.

- 2211~2214.
- (3) Young Pyo Lee, Byungkyu Kim, Moon Gu Lee and Jong-Oh Park, 2004, "Locomotive Mechanism Design and Fabrication of Biomimetic Micro Robot Using Shape Memory Alloy," in *Proceeding of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.5007~5012.
- (4) Byungkyu Kim, Sunghak Lee, Jong Hyeon Park and Jong-Oh Park, 2004, "Inchworm-Like Microrobot for Capsule Endoscope," in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 458~463.
- (5) Se-gon Roh, Hyouk Ryeol Choi, 2005, "Differential-Drive In-Pipe Robot for Moving Inside Urban Gas Pipelines," in *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, VOL. 21, NO. 1 FEBRUARY 2005, pp. 1~17.
- (6) William F. Riley and Leory D. Sturges, 1996, "Engineering Mechanics: DYNAMICS, Second Edition," WILEY, New York, pp. 245~324.
- (7) Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke and Richard G. Budynas, 2005, "Mechanical Engineering Design, 7th Edition," McGraw-Hill, New York, pp. 552~590.
- (8) Michael B. Hestand, David G. Alciatore, 1999, "Introduction to Mechatronics and Measurement Systems," McGraw-Hill, Boston, pp. 362~369.
- (9) Hyungjun Lim, Hyunjin Min, Byungkyu Kim, Soohyun Kim, 2002, "Flexible Loop Wheel Mechanism for Intestine Movement," *KSME Int. J.*, Vol. 26, No. 2, pp. 314~321.