

## 물리적 해석을 통한 벽면 이동 로봇의 이동능력 개선

박주환 신재웅 김태환 선민주 정명수 김상훈  
 한경대학교 정보제어공학과  
 e-mail: pjh9132@naver.com

### Physical Analysis for Locomotion Improvement of Wall Climbing Robot

#### 요 약

본 논문은 진공을 이용한 흡착방식과 바퀴형 이동방식을 이용하고 환경 탐지용 센서를 부착한 벽면 이동형 로봇의 물리적 해석을 통한 이동 성능 개선에 관한 연구로서, 대형 구조물의 안전 검사 및 위험한 시설물의 보수 작업 등을 보조하기 위한 목적이 있다. 로봇의 무게에 따른 중력을 견딜 수 있는 강력한 진공흡착방식과 고성능 모터 제어에 의한 바퀴 이동방식을 혼합하고 효율적으로 평형을 유지 또는 제어하기 위하여 로봇에 미치는 다양한 힘과 모멘트를 분석하고 수식화 하였으며 기존의 수직이동 속도를 개선하기 위한 로봇의 물리적 변수를 추출하여 변수와 이동력간의 관계를 고찰하였다.

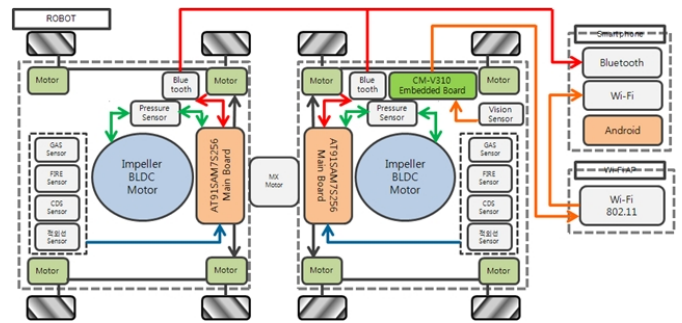
#### 1. 서론

문명과 산업이 발달함에 따라 자연스럽게 생긴 대형 구조물들이 우리 주변에서 차지하는 역할이 매우 중대해졌으며, 이와 더불어 그것들의 유지 및 보수 작업의 필요성 또한 중대해졌다. 하지만 위험한 환경과 부가적 인력, 비용 등이 비효율적이다. 이러한 검사 및 보수 작업의 위험성과 그 효율의 비합리성을 해소하기 위해서 벽면을 이용한 지능로봇에 대한 다양한 연구가 진행되었다[1][2][3][4]. 본 논문에서는 기존의 연구들에서 제안한 방식 중, 부착방식으로는 벽면 흡착방식을 하드웨어의 대형화 및 환경의존성을 개선하기 위해 유리하다는 이유로[5][6][7] 선택하였으며, 이동방식에서는 이동성을 고려하여 상용 모터를 활용한 바퀴이동식[6][7]을 선택함으로써 제어능력을 중요시하고, 이동성, 소형화 및 지능화를 목표로 하는 구현방식을 제안하였다.

최근 연구[8]에서 구현한 로봇과 같이, 충분한 부착력을 생성 할 수 있는 진공흡착방식과 높은 건물에서의 빠른 이동이 가능한 바퀴형 이동방식을 채택하였으나 현재 수직 벽면에서의 최대 이동속도가 5m/분 정도로 저속이므로 실용성을 높이기 위해서는 물리적인 분석을 통한 설계의 변화를 적용하여 흡착력과 이동능력과 안정성을 확보할수 있다.

#### 2. 로봇의 구성

로봇의 전체 시스템은 그림 1과 같이 2대의 로봇 본체, 로봇 제어를 위한 스마트폰, 영상처리를 위한 임베디드 보드로 구분 된다. 두 로봇간의 연결엔 MX 모터가 담당하며 로봇의 세부적인 구성 내용은 [8]에서와 같다.



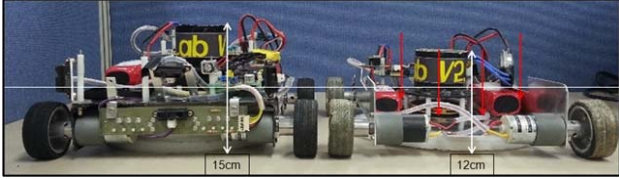
(그림 1) 개선된 이중로봇의 시스템 구성도(CVRise v.2)

#### 3. 로봇의 동작 분석 및 개선

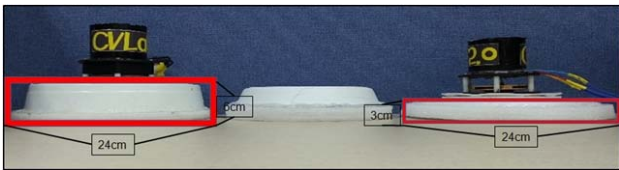
##### 3.1 공기흡착력 개선을 위한 로봇구조의 개선

그림2는 로봇의 부착을 위한 진공흡착시스템으로써 Suction Motor, Cover Plate, Impeller, Award Re-Foam, Isolation Rim, Bristle skirt로 구성된다. 전체적으로 2개의

로봇이 갖는 무게를 최소화하고 지면으로부터의 높이를 최소화하여 흡착력을 극대화하기 위한 목적으로 모든 부품과 기구부의 무게 및 기구 높이를 감소시켰으며, 특히 임펠러 및 챔버의 높이를 최소화하면서 압력 제어를 위한 전체 용량은 그대로 유지하는 노력을 하였다. 그림 2 에서 이전 로봇과 신규 로봇간의 외관의 변화를 비교하여 보여준다.



(a)



(b)

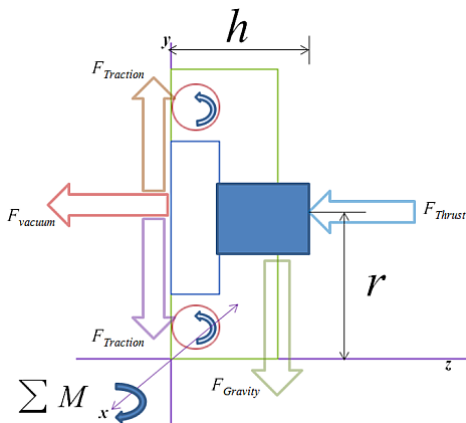
(그림 2) 무게 경량화와 흡착력 향상을 위한 개선 사항비교 (a) 전체높이 최소화(15cm→12cm) (b) chamber 높이 최소화(6cm→3cm)

여기서 설계된 원심력식 임펠러는 비교적 적은 양의 유체에 높은 압력을 상승시키는데 적당하다. 원심력식 임펠러를 사용함으로써 적은 공기의 양으로 높은 압력을 상승시키므로 챔버 내부의 기압은 저기압이 되고, 챔버 외부의 기압은 고기압으로 변함으로써 외부에서 챔버를 밀어주는 것과 같은 효과의 힘이 작용하게 된다.

### 3.2 로봇 흡착력 및 이동능력 개선을 위한 물리적 해석

3.1절에서와 같이 성능개선을 위해 구조의 개선을 위한 분석과정이 아래와 같이 수행되었다.

로봇이 수직 벽면상태에 있을 때 작용하는 힘을 분석하면 그림 3과 같이 물리적 해석을 나타낼 수 있으며 첫째는 y 축과 z축을 고려한 로봇의 흡착력과 이동력 분석, 둘째는 z축 중심의 모멘트 힘의 합에 대한 분석으로 요약된다.



(그림 3) 수직벽면에 부착된 로봇에 작용하는 힘의 표현

z축 방향으로의 힘 (흡착력)은 다음과 같이 표현되며,

$$\sum F_z = F_{Thrust} + F_{Vacuum} = 0 + PA \geq mg$$

P: chamber 내부 진공과 대기압과의 차

A: R x R x π 로서 chamber 면적

R: chamber 반지름

이식은 정적인 상태에서 벽의 흡착을 유지하기 위한 필요 조건이다.

y축 방향으로의 힘 (로봇의 벽에서의 전진 및 후진)은

$$\sum F_y = F_{Traction} \pm F_{Friction} - F_{Gravity}$$

여기서

$$F_{Traction} = \frac{t \times \text{감속비}}{\text{바퀴의 반지름}}$$

t: 토크

$$F_{Friction} = \mu N = \mu F_{Vacuum}$$

μ: 마찰계수

N: 수직항력

이다. 벽면에서의 마찰력은 흡착하는 힘  $F_{Vacuum}$  만큼의 수직항력N이 생기게 된다.

$$F_{Gravity} = mg$$

m: 로봇 무게

또한 x축 중심으로의 모멘트 힘의 합 (모멘트: 힘 \* 회전축에서 힘이 작용선에 긋는 수직선의 길이)은 아래의 식으로 표현된다.

$$\sum M = -h \times F_{Gravity} + r(F_{Thrust} + F_{Vacuum}) + t$$

h: 로봇의 높이

r: 로봇의 반지름

위에 그림3에서 중력의 힘 x 회전축에서 힘이 작용선에 긋는 수직선의 길이 h 만큼 아래 방향으로의 모멘트가 생기고 그것이  $-h \times F_{Gravity}$  이다.

또 (추력+부착력)힘에 의해 (추력+부착력) x 회전축에서 힘이 작용선에 긋는 수직선의 길이 r 만큼 위의 방향으로 모멘트가 생기게 되고 그것이  $r \times (F_{Thrust} + F_{Vacuum})$  이다.

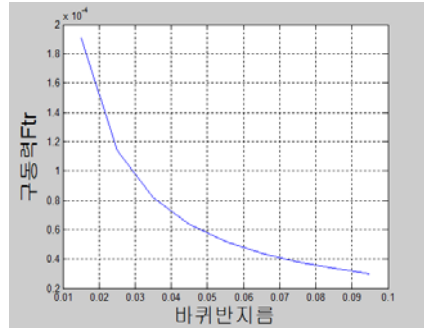
### 4. 실험 및 검토

본 연구에서는 그림4와 같이 벽로봇의 기구내 주요 물리량의 변화와 부착력, 이동력, 모멘트와의 관계를 분석하기 위한 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다.

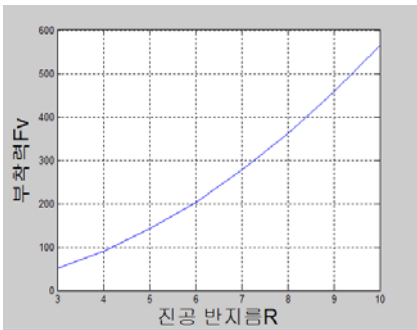
z축에 관한 실험



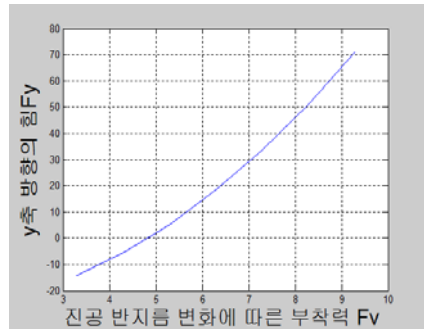
(그림4) 물리량 변화에 따른 흡착력, 이동력 관계를 분석하는 시뮬레이션 프로그램



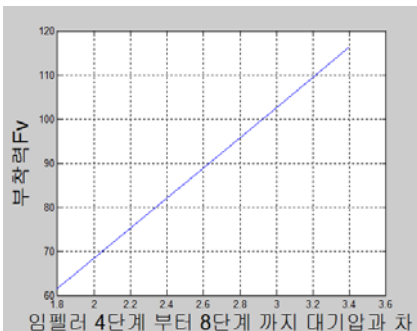
(그림7) 바퀴 반지름이 1.5cm에서 1cm 간격으로 증가 할 때 구동력  $F_{traction}$  변화



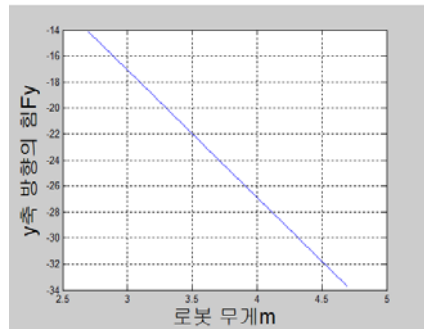
(그림5) chamber의 반지름 변화에 따른  $F_{vacuum}$  변화량



(그림8) y축 방향 힘의 chamber 반지름 증가에 따른 변화



(그림6) 은 chamber 공기압 변화에 따른  $F_{vacuum}$ 의 변화량



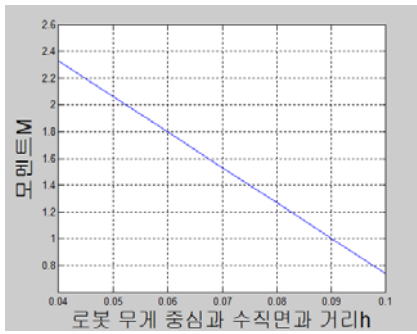
(그림9) 로봇 무게m이 0.5kg 증가에 따른 힘  $F_y$ 의 변화

그림5는 chamber의 반지름 변화에 따른  $F_{vacuum}$  변화량을 그림6은 chamber 공기압 변화에 따른  $F_{vacuum}$ 의 변화량을 상관관계 그래프로 표시하였다.

그림9는 로봇 무게 m의 증가에 따른 중력 힘의 증가로  $F_y$ 방향의 이동능력이 감소함을 보여준다.

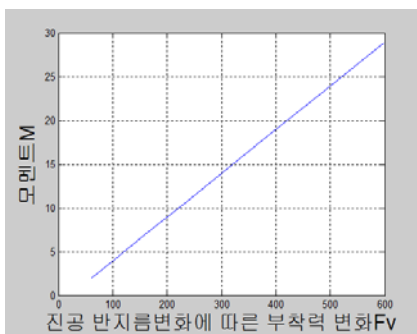
또한 수직벽면과 수평방향인 y축으로의 이동능력과 바퀴의 반지름감소 및 chamber 내 반지름 증가와의 관계를 각각 그림7과 그림8과 같이 실험 하였다.

그림10, 그림11, 그림12는 로봇 높이 h, 부착력변화 그리고 로봇의 반지름등이 모멘트 m에 미치는 영향을 각각의 상관 관계도로 나타낸 그림이다.



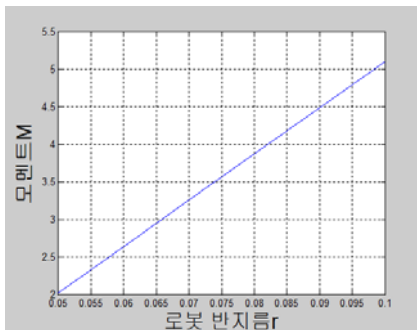
(그림10) 로봇 높이 h 변화에 따른 모멘트M의 변화

여기서 로봇 높이가 1cm 증가 할 때  $F_{Gravity}$ 가 증가하여 부착력에 대한 모멘트를 줄이는 것을 확인 할 수 있다.



(그림11) 부착력 변화에 따른 모멘트 변화

진공 반지름이 증가 -> 부착력 증가-> 모멘트 증가



(그림12) 로봇 반지름 변화에 따른 모멘트 변화

로봇 반지름이 증가하면 모멘트가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

## 5. 결론 및 향후 연구

본 논문은 진공을 이용한 흡착방식과 바퀴형 이동방식을 이용하고 환경 탐지용 센서를 부착한 벽면 이동형 로봇의 물리적 해석을 통한 이동 성능 개선에 관한 연구로서, 대형 구조물의 안전 검사 및 위험한 시설물의 보수 작업을 보조하기 위한 목적이 있다. 로봇의 무게에 따른 중력을 견딜 수 있는 강력한 진공흡착방식과 고성능 모터 제어에 의한 바퀴 이동방식을 혼합하고 효율적으로 평형을 유지 또는 제어하기 위하여 로봇에 미치는 다양한 힘과 모멘트를 분석하고 수식화 하였으며 기존의 수직이동 속도를 개선하기 위한 로봇의 물리적 변수를 추출하여 변수와 이동력간의 관계를 고찰하였다. 개선된 로봇벽면에서의

최대 부착력은 7kg이며 상승이동시 6m/min 속도로 이동 속도가 개선되었다. 향후 연구는 흡착과 이동 메카니즘을 좀 더 물리적으로 분석하여 개선함으로써 속도와 흡착력을 향상시키며 임베디드 보드에 탑재되는 지능적인 환경 탐지 기능과 자율적인 동작을 위한 알고리즘을 개선하는 일이다.

## 참고문헌

- [1] Clark, J; Goldman, D; Lin, P; Lynch, G; Chen, T; Komsuoglu, H; Full, R; Koditschek, D. (2007). Design of a Bio-inspired Dynamical Vertical Climbing Robot, *Proceedings of Robotics: Science and Systems 2007*, Atlanta, Georgia, USA, June, 2007, on line proceedings,
- [2] Hirose, S. & Tsutsumitake, H. (1992). Disk rover: A wall-climbing robot using permanent magnet disks, *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2074--2079, Raleigh, NC, 1992.
- [3] Li Jun, GAO Xueshan, FAN Ningjun, LI Kejie, JIANG Zhihong and JIANG Zhijian , CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING , “Adsorption Performance of Sliding Wall Climbing Robot” (2010)
- [4]Tomotuki Yamaguchi, Yoshiaki Sorioka, Sunhong Park, and Shuji Hashimoto , Department of Applied Physics, Waseda University “SIEN: Telescopic-Arm Climbing-Support Robot” (2009 .2)
- [5] Manuel F.Silva and J.A.Tenreiro Machado , Instituto Superior de Engenharia do Porto Portugal , “A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion“ (2006. 9)
- [6] Jizhong Xiao and Ali Sadegh The City College, City University of New York USA , “City-Climber: A New Generation Wall-climbing Robots“ (2008)
- [7] 강무진, 문형필, 최혁필, 석사논문, 성균관대학교, 메카트로닉스 협동 과정, “임펠러를 이용한 벽면이동로봇의 설계 및 제어에 관한 연구 (2010. 1)
- [8] 은영민,김민성,오세엽,신선웅,김상훈, 제37회 한국정보처리학회 춘계학술발표대회 논문집 제19권 제1호, “다중센서 기능을 갖는 벽면 이동 로봇” (2012. 11)