

벽면이동 로봇의 진공흡착방식 개선 및 공기 역학에 관한 연구

신동호*, 박재민*, 김현섭*, 김형훈**, 김상훈*

*국립한경대학교 전기전자제어공학과

**삼성전자

e-mail: kimsh@hknu.ac.kr

A Study on Improved Vacuum Adsorption Method and Aerodynamics for Wall Climbing Robot

Dong-Ho Shin*, Jae-Min Park*, Hyeon-Sub Kim*, Hyung-Hoon Kim**, Sang-Hoon Kim*

*Dept. of Electrical, Electronic and Control Engineering, HanKyong Nation University

**Samsung Electronics Co., Ltd

요 약

본 논문은 벽면 이동 로봇의 진공흡착 방법 개선에 관한 연구로서, 로봇의 무게에 따른 중력을 견딜 수 있는 벽면에 흡착 및 이동할 수 있는 동작 환경을 시뮬레이션을 통해 효율적으로 설계한다. 이동로봇에 미치는 다양한 힘의 조건들을 판단하며 특히 벽의 수직방향으로 미는 힘과 챔버 내의 저압조건 등과의 상관관계를 고려하여 흡착 능력을 개선하기 위한 방법을 제시하고 실험을 통해 성능을 검증하였다. 또한 본 연구에서는 압력센서를 이용하여 실시간으로 압력을 체크 하면서 모터의 속도인 PWM의 한계치를 설정하여 압력에 따라 필요한 임펠러의 속도를 PWM으로 적절히 조절해줌으로써 흡착에 관련된 제어 능력을 개선하고 흡착에 필요한 일정 압력 값에 도달하지 못할 때 작업이 종료되는 기술을 개발하였다.

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. 대형 구조물들은 인류의 생활 어느 곳에서도 쉽게 볼 수 있다. 고층 아파트가 없는 도시가 없으며, 작은 다리 하나 없는 강은 찾아보기 힘들뿐더러, 컨테이너 선박과 대형 여객기가 없이는 지금의 활발한 산업활동이 존재할 수 없다. 이러한 대형 구조물들이 인류의 삶에 미치는 지대한 영향으로 인하여, 이러한 것들의 안전과 그 성능에 대한 검사 및 유지보수가 필요성에 의해 지속해서 수행됐다. 과거에도 수많은 대형참사, 특히 교량붕괴와 건축물의 붕괴 등으로 인한 인명 및 재산피해는 이러한 검사 및 유지보수 작업의 필요성을 잘 설명해 주고 있다.

그러나 그 규모의 문제로 인하여, 과거 지금까지 행하여져 온 많은 검사작업이 매우 위험한 환경에서 수행돼왔으며, 작업의 효율성 역시 높지 못하다.

교량과 교각을 검사하기 위하여, 임시 구조물을 설치하는가 하면, 건물의 상층부에서부터 매달려 내려오면서 작업하는 위험한 방식도 행해지고 있다. 이러한 과정은 검사작업자 이외의 부가적인 인력과 비용을 필요하며, 소요시간 또한 실제 검사에 필요한 시간에 비해 수십 배에 이른다.

이러한 검사 및 보수 작업의 위험성과 그 효율의 비합리

를 해소하기 위해 로봇을 이용한 검사작업이 제안되었다. 로봇을 이용한 작업자가 작업환경 속에서 처하게 될 위험을 로봇이 대신함으로써 작업자의 안전을 보장할 수 있으며 부가적인 시설물의 설치를 필요하지 않게 됨에 따라, 작업의 비용 및 시간을 현저히 줄일 수 있다.

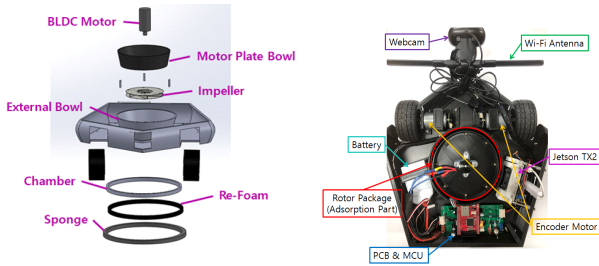
이러한 로봇은 벽에 부착 후 이동성이 중요하기 때문에 로봇의 흡착력과 이동속도에 영향을 주는 주요 물리량과 상호간의 관계를 분석한 후 공기 역학과 진공흡착방식을 개선하여 Impeller를 이용해 흡착을 높이기 위한 Mechanism을 구현했다[1][2][5][7].

2. 본론

2.1 로봇의 구성

(그림1)과 같이 설계된 벽면 흡착 시스템은 External Bowl과 Plate Bowl을 이용하여 공기의 흐름을 제어하며 로봇 밑면은 저압유지와 이동성을 위해 Chamber, Re-Form, Sponge로 구성되어있다.

무게를 줄이기 위해 3D프린터를 이용하여 전체 로봇 Flame을 제작하였고 바퀴구동 모터 2개를 사용하여 무게중심을 잡아 주기위해 로봇의 하단부에 BallCaster를 탑재하였다. 또한 Li-Po 배터리를 이용하여 전원을 공급해 주었다.

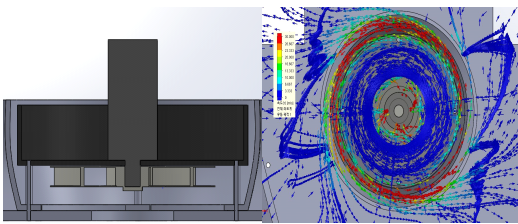


(그림1) 벽면 흡착 시스템 & 로봇 하드웨어 구성

(그림2)과 같이 설계된 접착 장치는 챔버로 둘러싸인 저압 영역을 생성하는 진공 로터 패키지에 의해 생성된 공기 역학 추력을 기반으로 한다.

임펠러의 고속 회전은 공기가 중심으로부터 멀리 떨어져 있는 로터의 바깥 둘레를 향해 가속된다. 그러면 공기가 장치를 향해 회전축을 따라 당겨져서 장치 앞쪽에 저압 영역 또는 부분적으로 밀폐된 경우 부분 진공 영역이 생성된다.

진공 로터 패키지를 이용하면 결과적으로 공기 배출이 장치 뒤쪽으로 향하게 되어 실제로 장치를 앞으로 밀어 넣어 흡착력을 높일 수 있다.



(그림2) rotor package

2.2 로봇의 동작 분석

로봇이 수직 벽면 상태에 있을 때 작용하는 힘을 분석하여 (그림3)과 같이 물리적 해석을 나타낼 수 있다[2].

x축 방향으로 작용하는 힘(흡착력)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Sigma F_x = F_{Thrust} + F_{Vacuum} = F_{Thrust} + PA \geq mg \quad (1)$$

P: chamber 내부 진공과 대기압의 차

A: R x R x π 로서 chamber 면적

R: chamber 반지름

t: 바퀴의 회전 토크

수직면에서 로봇의 정적인 평형상태를 정의하기 위해서는 y방향의 힘과 x축을 중심으로 한 모멘트의 평형을 모두 고려하여야 한다는 점이며 이에 관련된 수식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Sigma M = 0 = -hf_{Gravity} + r(F_{Thrust} + F_{Vacuum}) + t \quad (2)$$

$$hf_{Gravity} = r(F_{Thrust} + F_{Vacuum}) + t$$

$$\Sigma F_y = 0 = F_{Traction} - F_{Gravity} \pm F_{Friction} \quad (3)$$

$$F_{Traction} = F_{Gravity} \pm F_{Friction}$$

여기서

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

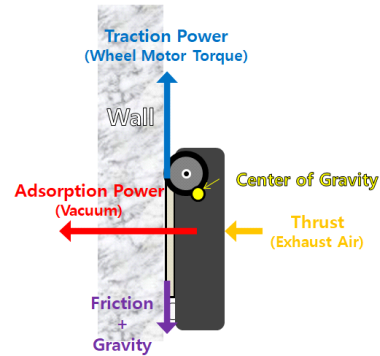
$$F_{Friction} = \mu N = \mu F_{Vacuum}$$

μ: 마찰계수

N: 수직항력

F_{Friction}은 로봇 전체의 움직임에 반대 방향으로 작용하므로, 상황에 따라서 그 부호가 바뀌게 된다.

위의 두 식은 정적 평형상태를 유지하기 위해서는 진공에 의해 생성되는 부착력뿐만 아니라, 바퀴를 이용할 경우 생기는 바퀴의 회전 토크 역시 고려하여야 함을 알 수 있다.



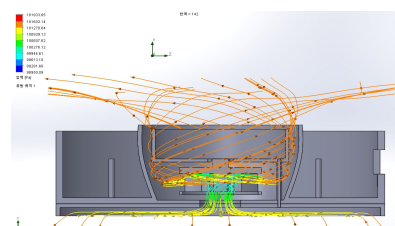
(그림3) 로봇에 작용하는 힘

3. 실험 및 고찰

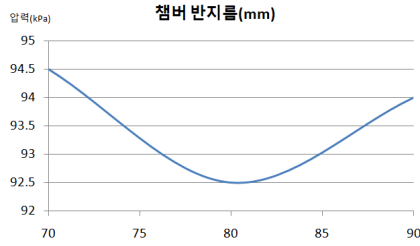
3.1 시뮬레이션

본 연구를 통해 계획된 진공흡착 방식의 구조물의 성능을 검증하기 위해 Solidworks Flow Simulation을 이용하였고 (그림4)에서 보이는 것과 같이 공기 흐름의 색상이 압력을 의미하고 챔버 안의 압력영역이 크게 생성되어있는 것을 볼 수 있다. 이 압력영역이 외부 압력보다 낮은 압력이 생기고 균일하고 넓게 분포되어 있을수록 흡착력을 향상시켜 주어 안정적으로 흡착하여 벽에 붙어 있을 수 있다.

벽에 안정적으로 흡착을 하기 위해서 Simulation을 이용하여 chamber 내의 가장 낮은 압력과 그 압력의 분포도를 고려해 chamber의 반지름과 높이, 벽과 로봇의 거리, 에어홀 최적의 조건을 찾았다.

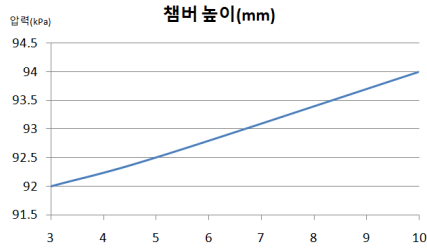


(그림4) Air Flow Simulation



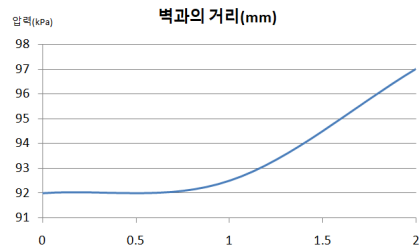
(그림5) 반지름에 따른 실험 결과

(그림5)는 챔버 반지름에 따른 압력 변화량이며 압력이 가장 낮은 80mm를 선정하였다.



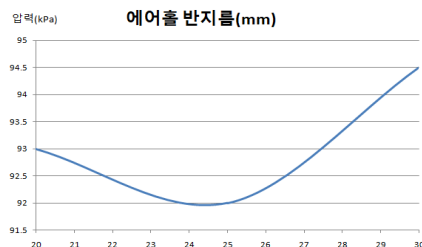
(그림6) 높이에 따른 실험 결과

(그림6)은 chamber의 높이에 따른 압력 변화량이며 chamber의 높이가 낮아질수록 압력이 낮아지는 확인 할 수 있다.



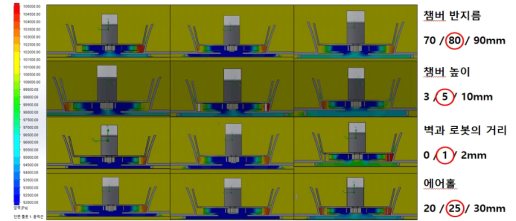
(그림7) 벽과의 거리에 따른 실험 결과

(그림7)은 로봇과 벽과의 거리에 따른 압력 변화량이며 벽과 로봇의 거리는 0mm가 가장 적합 했지만 로봇의 원활한 이동을 고려하여 1mm로 선정하였다.



(그림8) 에어홀의 반지름에 따른 실험 결과

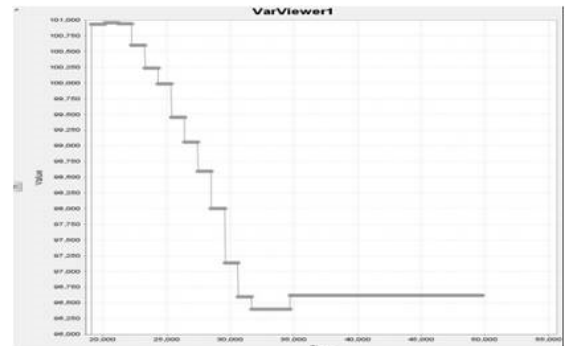
(그림8)은 공기를 흡입하는 에어홀의 반지름에 따른 압력 변화량이며 반지름 25mm 일 때가 가장 낮은 압력을 형성 하였다.



(그림9) Simulation 결과

3.2 Suction motor 회전에 따른 공기 역학 실험

(그림10)은 Suction motor의 회전에 따른 공기 역학의 변화를 알아보기 위한 실험 결과이다. Suction motor는 PWM 제어를 통해 12단계로 나누었으며 PWM 10번째 단계인 97.4kPa에서 로봇이 벽면에 흡착상태를 유지하게 된다. 마지막 12번째 단계인 96.6kPa에서 로봇이 벽면에 흡착한 상태에서 원활한 이동을 할 수 있었다.



(그림10) Suction motor 회전에 따른 압력 변화

4. 결론

본 논문에서의 설계된 벽로봇은 공기가 벽의 수직 방향으로 흘러 벽으로 미는 힘(추력)이 생기고 챔버의 저압 영역이 크고 균일하게 분포되어 있기 때문에 흡착 효과를 개선하는 것을 확인하였다. 로봇이 수직 벽면 상태에 있을 때 작용하는 힘을 분석하여 물리적 해석을 통해 정정 평형상태를 유지하기 위해서 진공에 의해 생성되는 부착력 뿐만 아니라, 바퀴를 이용할 경우 생기는 바퀴의 회전 토크 역시 고려 하였다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 로봇이 벽에 붙기 위한 최적을 조건을 도출하여 그 결과 챔버의 반지름이 80mm가 가장 적당했고 챔버의 높이는 낮을수록 저압이 균일하게 분포되었다. 그리고 벽면에 흡착과 동시에 이동하기 위해서는 벽면과 챔버와의 거리가 1mm 이하가 되어야 하고 에어홀의 반지름은 25mm 일 때 저압 영역이 가장 넓게 분포했다.

(표1)에서 로봇의 모든 flame을 3D프린터를 이용해 제작하여 기존 로봇의 중량에 비해 200g 이상 감소하였다.

본 연구에서는 압력센서를 이용하여 실시간으로 압력을 체크 하면서 모터의 속도인 PWM의 한계치를 설정하여 압력에 따라 필요한 임펠러의 속도를 PWM으로 적절히 조절해줌으로써 흡착에 관련된 제어 능력을 개선하고 흡착에 필요한 일정 압력 값에 도달하지 못하면 작업이 중

료되는 것이 가능함을 확인하였다. 이로 인해 <표1>에서 기존 로봇과 다르게 BLDC 모터의 출력을 제어함으로써 지능적이고 효율적인 전력관리 시스템을 구축하였다.

구분	무게	출력제어	전원공급	추력
NO_Crack (본 작품)	2.5kg	o	무선 (14.8V Li-Po)	o
LARVA (성균관대)	3.2kg	x	유선	x
RISE (한경대)	2.7kg	x	무선 (9V Li-Po)	x

<표1> 기존 로봇들과의 성능비교

참고문헌

- [1] City-Climber: A New Generation Wall-climbing Robots
Jizhong Xiao and Ali Sadegh The City College, City
University of New York US
- [2] Design and Control of Wall Climbing Robot Using Impeller, Ig Mo
Kool, Young Kouk Song, Hyungpil Moon, Sun Kyu Park, Hyouk
Ryeol Choi, Sungkyunkwan University
- [3] Improvement of Adhesion Force and Locomotion of Wall
Climbing Robot using Physical Analysis, Sanghoon Kim,
Jowhan Park, Dept. of Electrical Electrical, Electronic and
Control Engineering, HanKyong National University
Seokjeong-dong, Ansong-city, Kyunggi-do, Korea
- [4] Sang-Hoon Kim, Dong Sang Yoo, "Intelligent Embedded robot
for Warehouse Inspection", Korean Society For
Computer Game, p.131-135, Vol.26, No.1, 30 March (2013)
- [5] William Morris, Jizhong Xiao, "City-Climber: Development of a
Novel Wall-Climbing Robot", J Stud Res., 1, pp.40-45, 2008.
- [6] Embedded System for Wall Climbing Robot
Hyuk-Sung Kwon, Ji-Soo Lee, Sang-Hoon Kim
Dept. of Electrical, Electronic and Control, Hankyong
National University
- [7] City-Climber: Development of a Novel
Wall-Climbing Robot William Morris, Class of
2008, Major: Mechanical Engineering Mentor:
Jizhong Xiao, Department of Electrical
Engineering