

진공 흡착과 보행형 이동에 의한 벽면이동 로봇의 개발

박수현, 서경준, 김성관*
공주대학교 기계자동차공학부

Development of wall climbing robot using vacuum adsorption with legged type movement

Soo-Hyun Park, Kyeong-Jun Seo, Sung-Gaun Kim*

Department of Mechanical&Automotive Engineering, Kongju National University

요약 최근 전 세계적으로 고층건물의 외벽청소, 대형 구조물의 벽면검사, 조선에서의 벽면 용접 등 다양한 용도의 벽면이동 로봇들이 개발되고 있다. 기존에 개발된 벽면이동 로봇 중 바퀴형 이동로봇은 요철이 있는 벽면을 이동할 수 없다는 단점이 있으며 보행형 이동로봇은 복잡한 링크구조로 인해 많은 액추에이터가 필요로 하고, 더불어 제어가 복잡해지며 내구성의 문제가 발생한다. 또한 로봇의 무게가 무겁다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 간단한 구조를 가진 새로운 벽면이동 로봇을 제시한다. 본 논문의 벽면이동 로봇은 단 한 쌍의 축과 액추에이터를 이용하여 고릴라의 보행 방식을 모사하여 이동하며, 진공펌프와 흡착패드를 이용하여 벽면에 진공 흡착한다. 본 논문에서 개발한 로봇의 구성요소로는 이동을 위한 DC모터, 흡착을 위한 진공펌프, 제어를 위한 마이크로 컨트롤러, 기타 동력전달과 형체 유지를 위한 축과 프레임이 있다. 로봇의 성능은 수직 및 수평에서 실험적으로 검증하였다. 본 논문에서 개발한 벽면이동 로봇을 기반으로 다양한 장치를 탑재한 산업현장, 재난재해 현장에서 다양한 기능을 수행하는 로봇의 개발이 가능할 것이라 전망한다.

Abstract Wall-climbing robots have been developed for various purposes, such as cleaning skyscraper windows, maintaining large structures, and welding vessels. Conventional wall-climbing robots use movement systems based on wheels or legs. However, wheeled robots suffer from slipping effects, while legged systems require many actuators and control systems for the complex linkage structure, which also increases the weight of the robot. To overcome these disadvantages, we propose a new wall-climbing robot that walks based on gorilla locomotion. The proposed robot consists of a DC drive motor, a vacuum pump for adsorption, and a micro controller for controlling the system. The performance of the robot was experimentally verified on vertical and horizontal flat surfaces. The robot could be used for various functions in industrial sites or disaster areas.

Keywords : Gate pattern of gorilla, Legged type, Simplified mechanism, Vacuum adsorption, Wall climbing robot

1. 서론

벽면이동 로봇은 고층건물, 원자력 발전소, 교각과 같은 대형 구조물의 유지보수, 조선에서의 용접과 같은 다양한 산업분야를 위해 개발되고 있다[1].

벽면이동로봇의 개발은 벽면에서의 이동과 흡착방법이 관건이다. 기존에 개발된 벽면이동 로봇들은 이동방식과 부착방식의 두 가지 측면에서 살펴 볼 수 있다. 먼저 이동방식의 경우 바퀴형(wheeled type), 보행형

(legged type)이 있다. 바퀴형 이동방식의 경우 이동속도가 빠르고, 구조가 간단하여 제어가 용이한 장점이 있다. 하지만 복잡한 형상의 벽에서는 사용이 어렵고 강한 흡착 시 이동에 제한이 생기는 단점이 있다. 더불어 슬립 효과(slip effect)가 발생할 수 있다[2]. 보행형 이동방식의 경우 곤충이나 도마뱀의 보행방식을 모사하는 것들이 대부분이다. 보행형 이동방식을 가진 로봇들은 링크구조를 사용하여 벽면 이동 시 장애물을 극복 가능하다는 장점이 있다. 하지만 로봇의 구조 및 제어가 복잡해지며 로

*Corresponding Author : Sung-Gaun Kim (Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9253 email: kimg@kongju.ac.kr

Received July 7, 2017

Revised August 2, 2017

Accepted August 17, 2017

Published August 31, 2017

봇의 이동속도가 느리다는 단점이 발생한다[3].

부착방식의 경우에는 자석형(magnetic type), 정전기형(electrostatic type), 진공흡착형(vacuum suction type), 생물 모방형(biological inspired type)이 있다. 자석형의 경우 부착력이 우수하지만 비자성체의 벽은 부착할 수 없다[4]. 진공흡착형은 진공펌프나 임펠러를 이용하여 벽면과의 진공을 유지하는 방법이다. 단위 면적 에 대한 흡착력이 강하지만 상대적으로 높은 전력이 요구되는 문제가 있다[5]. 생물 모방형의 경우 벽면에 흡착 시 별도의 전원은 필요 없지만 흡착 메커니즘을 구성하기가 어려우며 큰 흡착력을 얻기 힘들다는 단점이 있다[6].

이처럼 벽면이동 로봇은 다양한 이동방식과 부착방식을 갖고 있으며 다양한 장단점을 지니고 있다. 따라서 로봇을 개발하기에 앞서 개발할 로봇의 사용 환경을 미리 알아야 하며 적절한 방식을 선택 하여야 한다.

본 연구에서는 금속과 비자성체의 벽에서도 등반 가능한 진공흡착방식과 고릴라의 모습을 모사한 보행형 이동방식을 적용한 벽면이동 로봇을 개발하였다. 일반적인 보행형 이동방식을 채택한 로봇의 복잡한 구조 대신 간단한 구조를 통해 이동 가능한 보행형 이동방식을 채택하였다. 2장에서는 로봇의 하드웨어 및 소프트웨어의 전반적인 구성을 소개하고, 3장에서는 로봇의 이동과 흡착에 대한 메커니즘을 소개한다. 마지막으로 4장에서는 개발한 로봇을 통해 실험과 결과를 나타내고자 한다.

Table 1. Material property of ADC12

Density	2.823 g/cc
Tensile Strength, Yield	165 MPa
Shear Strength	199 MPa
Hardness, Vickers	96

Table 2. Material property of ABS

Young's Modulus	1.80 GPa
Tensile Strength	38 MPa
Tensile Elongation	17 %
Charpy Impact, notched	8 kJ/m ²

2. 로봇의 구성

2.1 하드웨어

개발한 벽면이동 로봇은 Fig. 1과 같이 본체부와 한

쌍의 다리부, 다리이음부로 구성되어 있다. 로봇의 본체부에는 이동을 위한 DC모터, 흡착을 위한 진공펌프, 로봇의 제어를 위한 Arduino 보드, 전력공급을 위한 배터리 등을 탑재하였다. 본체부와 다리부의 프레임은 알루미늄 합금인 ADC12를 사용하여 SS400(밀도 7.8g/cc)을 사용한 prototype 대비 약 30%의 경량화를 실현하였다.

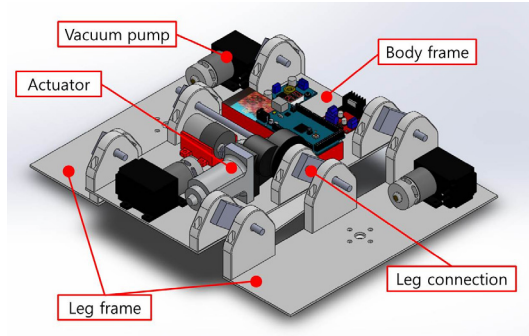


Fig. 1. Superstructure of the wall climbing robot

본체부와 다리부의 결합을 위해 다리 이음부를 설계하여 제작 하였다. 다리 이음부를 고정하는 부분은 형상의 특성상 3D프린트를 이용하여 제작 하였으며, 3D프린터로 성형할 수 있는 재료 중 강도가 높고 뛰어난 2차 가공성을 가지고 있으며 내충격성이 우수한 재료인 ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)를 사용하였다. 이러한 재질을 사용함으로써 로봇의 경량화를 가능하게 하고 높은 내구성을 갖추게 되었다[7].

Table 3. Resources of Arduino MEGA 2560

MCU	ATmega2560
Flash	256KiB
Digital	2pins for vacuum pumps 4pins for micro switches
PWM	1pin for DC motor

아래의 Fig. 2에 도시된 것과 같이 본체의 하부에는 2개의 진공패드와 부착 되어있고, 다리부에는 각각 1개의 진공패드가 존재한다. 진공패드와 진공펌프의 흡입구는 호스를 피팅(fitting)과 함께 연결하였다. 피팅은 진공펌프가 공기를 흡입할 때 공기의 손실을 막기 위해 사용한다. 또한 본체부 혹은 다리부의 상태를 진단하기 위한 마이크로 스위치를 본체의 하부에는 2개를, 다리부에는 각각 1개를 부착하였다.

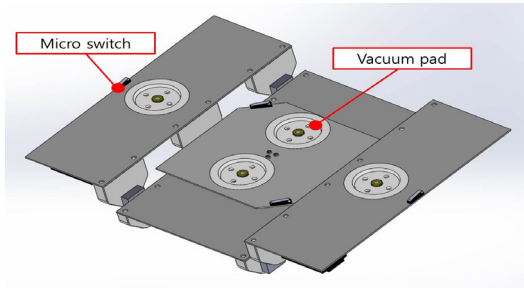


Fig. 2. Substructure of the wall climbing robot

2.2 소프트웨어

Arduino MEGA 2560 보드를 사용하여 로봇의 움직임을 제어하였다. Arduino MEGA 2560 보드는 C언어를 기반으로 하여 각종 actuator를 간단하게 제어할 수 있다는 장점이 있다. 보드의 작동전압은 5V이며 정격전압은 7~12V이다. 또한 다른 MCU (Micro Controller Unit)에 비해 저렴하다는 장점이 있다.

본 로봇에서는 Arduino MEGA 2560 보드를 이용하여 3개의 진공펌프와 1개의 DC모터, 4개의 마이크로 스위치를 제어하였다.

3. 로봇 메커니즘

3.1 이동 메커니즘

Fig. 3에 도시된 것과 같이 고릴라가 이동시 발로 땅을 짚고 몸통이 앞으로 이동하고 다시 발로 땅을 짚는 일련의 과정을 알 수 있다. 이처럼 고릴라가 이동하는 모습을 모사하여 보행형 이동 메커니즘을 실현하였다.

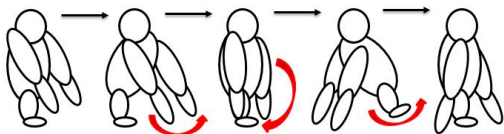


Fig. 3. The concept of gait pattern[8]

Fig. 4에 도시된 것과 같이 본체부의 DC모터와 축이 연결되어 있다. DC모터를 구동하면 연결된 축이 회전함과 동시에 다리이음부에 동력을 전달하여 다리가 움직이게 된다. 즉, 축의 회전운동으로 로봇이 벽을 등반 시에 본체부가 흡착되어 있는 상태에서는 다리가 앞으로

이동한다. 반대로 다리가 흡착되어 있는 상태에서는 본체부가 앞으로 이동한다. 이러한 방법으로 본체부와 다리가 번갈아 벽에 흡착하며 앞으로 이동하게 된다. 기존에 개발된 보행형 벽면이동 로봇들은 링크구조가 매우 복잡하고 많은 모터를 사용해 제어가 복잡하며 로봇의 무게 또한 많이 증가하였다. 하지만 본 논문의 벽면이동 로봇은 단 한 쌍의 DC모터와 축으로 로봇의 움직임을 구현 가능하며 제어가 간편하며 내구성이 뛰어난 장점이 있다.

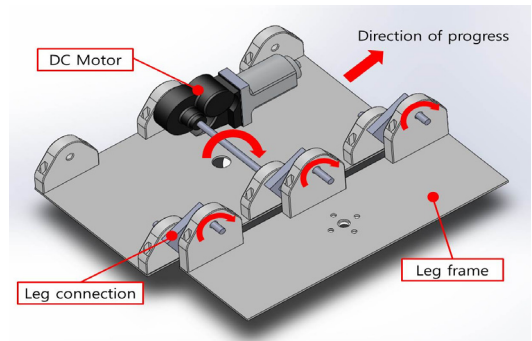


Fig. 4. Mechanism of movement

3.2 흡착 메커니즘

본 논문에서 제시하는 로봇의 흡착 메커니즘은 3개의 진공펌프와 4개의 진공패드로 구성되어 있다. 본체부의 진공펌프는 본체부 하부에 부착된 2개의 진공패드와 연결되고 다리부의 진공펌프는 각각 1개의 진공패드와 연결된다. 벽면에 흡착되기 위해서 진공펌프와 진공패드를 연결하여 진공상태를 형성하여야 한다. 이때 로봇의 자중과 진공펌프, 진공패드의 상관관계를 통해 벽에서 안정적으로 흡착이 가능하도록 계산하여야 한다. 벽면을 등반하기 위해서는 로봇의 자중에 비례한 흡착력이 필요하다.

사용한 진공패드의 단면적은 44.1786cm^2 이며, 진공펌프의 최대 진공도가 1.019716kgf/cm^2 이다. 이를 통해 최대 진공흡착력은 45.05kgf 임을 알 수 있다. 이때 벽면이동 로봇은 수평이 아닌 수직으로 있으므로 안정성을 고려하여 최대 진공흡착력의 약 25%의 안전율을 적용하였다. 안전율을 25% 적용하여 계산하면 진공패드 1개당 11.26kgf 의 최대 진공흡착력을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 로봇이 다리부만 벽에 흡착하였을 때, 본체부만 벽에 흡착하였을 때는 각 2개의 진공패드를 사용

하므로 22.52kgf의 진공흡착력을 가지는 것을 알 수 있다[9].

3.3 로봇의 구동

앞에서 설명한 이동 메커니즘과 흡착 메커니즘을 바탕으로 로봇의 전반적인 구동을 제시한다. 아래에 도시된 Fig. 5와 Fig. 6을 바탕으로 로봇의 움직임을 알 수 있다. Fig. 5에는 로봇에 부착된 진공펌프와 DC모터의 위치, 진공패드 위치가 도시되어 있다.

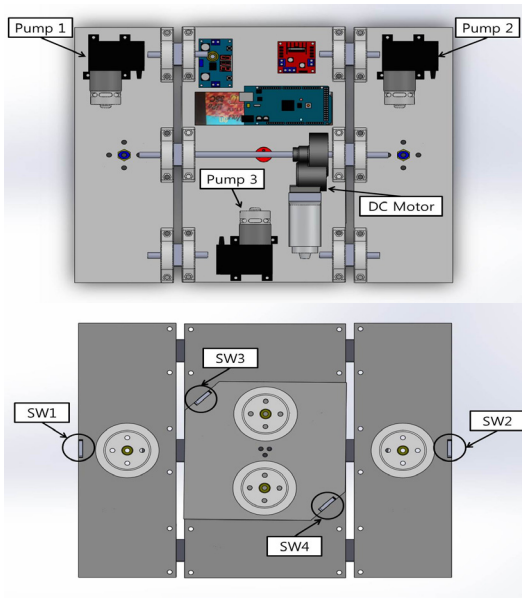


Fig. 5. Position of Vacuum pump and Micro switch

Fig. 6에는 로봇 구동의 flowchart가 나타나 있다. 초기에 로봇을 벽면에 부착하기 위해 3개의 진공펌프(Pump1, 2, 3)를 모두 구동하여 진공패드와 벽면사이의 진공을 생성해 부착한다. DC모터가 작동하면 다리부가 앞으로 이동하고 다리부의 진공펌프(Pump1, 2)가 구동되어 벽면에 부착한다. DC모터가 다시 작동하면 본체부가 앞으로 이동하고 본체부의 진공펌프(Pump3)가 구동되어 벽면에 부착한다. 이와 같은 방법으로 3개의 진공펌프와 DC모터를 통해 이동 및 흡착을 하여 로봇이 벽면을 등반하게 된다. 이러한 일련의 과정을 계속해서 반복한다.

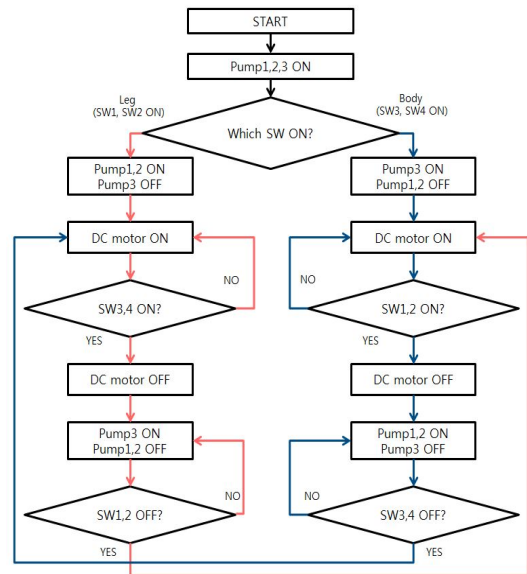


Fig. 6. Flow chart of the robot drive

4. 실험

앞에서 소개한 벽면이동 로봇의 성능을 확인하기 위해 로봇의 prototype을 제작하여 성능실험을 하였다. 로봇의 성능실험은 3가지 관점에서 수행하였다.

첫째로 로봇의 실제 환경 실험을 실시하였다. 유리와 같은 비자성체 벽면과 화이트보드와 같은 미끄러운 재질의 벽에서 주행실험을 실시하였다. Fig. 7은 실제 벽면에서의 등반 실험을 실시한 모습이다.

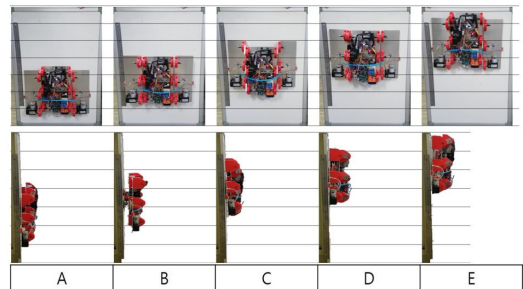


Fig. 7. Wall climbing experiment

유리창과 같은 비자성체 벽면과 화이트보드와 같은 미끄러운 재질의 벽면에서 로봇의 주행 실험을 한 결과 모두 동작 가능하며 환경변화에 의한 성능 저하는 발생

되지 않았다. 또한 수직에서의 주행이 가능할 뿐 아니라 천장과 같이 지면과 평행한 환경에서도 주행이 가능하였다.

다음으로는 로봇의 부착력 성능 평가를 수행하였다. 이를 위하여 수직 벽면에 로봇을 부착시킨 후 이때의 상태에서 견딜 수 있는 최대 하중을 측정하였다. 로봇 무게 중심에 부하하중을 0.2kg씩 증가시켜 실험한 결과 10kg의 하중을 추가하여도 로봇이 버틸 수 있었고, 10.2kg 이상을 부하 하였을 때 부착력이 불안정한 모습을 보였다. 로봇의 자중이 5.8kg이므로 총 15.8kg의 이르는 무게를 지탱할 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 로봇의 주행 속도를 측정하였다. 이때는 로봇이 갖는 순수한 주행 속도를 확인하기 위하여 외부 하중을 제외하고 측정하였다. 측정 결과 로봇의 주행 속도는 0.09m/s로 확인하였다[10].

Fig. 8은 벽면이동 로봇이 움직일 때 3개의 진공펌프와 1개의 DC모터의 전압을 시간에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 전압은 Arduino 보드와 호환되는 전압센서를 이용해 측정하였다. 사용한 전압센서의 측정범위는 DC 0~25V이다. 그래프를 보게 되면 STEP A~E까지 나타나 있고, 각각의 단계에서 구동되는 진공펌프와 DC모터를 알 수 있다. 이때 그래프에 도시된 Pump1, Pump2는 다리부의 진공펌프를 의미하고 Pump3은 본체부의 진공펌프를 의미한다. STEP A에서는 로봇의 본체부와 다리부가 모두 붙어있는 상태로 3개의 진공펌프가 모두 작동하

는 것을 확인할 수 있다. STEP B에서는 본체부가 붙어 있고 다리부가 전진하는 과정으로 본체부의 흡입펌프와 DC모터가 구동됨을 확인 할 수 있다. STEP C에서는 본체부와 다리부가 모두 벽면에 붙어있는 상태이고 STEP D에서는 STEP B와 반대로 다리부가 붙어있고 본체부가 전진하는 과정이다. STEP E는 본체부와 다리부가 모두 붙어있는 상태이다. STEP E에서 다시 STEP B로 돌아가게 되고 이러한 과정이 반복됨으로 로봇이 벽면을 이동하게 된다.

전압센서를 통해 전압을 측정한 결과 진공펌프의 경우 최소 10.57V, 최대 11.4V로 측정되었다. DC모터의 경우 최소 11.67V, 최대 11.72V로 측정되었다. 즉, 진공펌프와 DC모터의 전압의 변동이 작고 안정적인 것을 확인할 수 있다. 이처럼 전압이 안정적으로 출력됨으로 전류 또한 일정하게 흐르며 로봇의 진공펌프가 진공 발생 시 일정한 진공도를 발생시켜 안정적인 부착과 구동이 가능하다는 것을 확인하였다.

5. 결론

기존 벽면이동 로봇들의 문제점은 복잡한 메커니즘과 제어의 어려움이다. 본 논문에서 제시한 로봇은 하나의 DC모터와 단일 축을 이용해 보행형 메커니즘을 구사하고, 진공펌프와 진공패드를 이용해 흡착형 메커니즘을

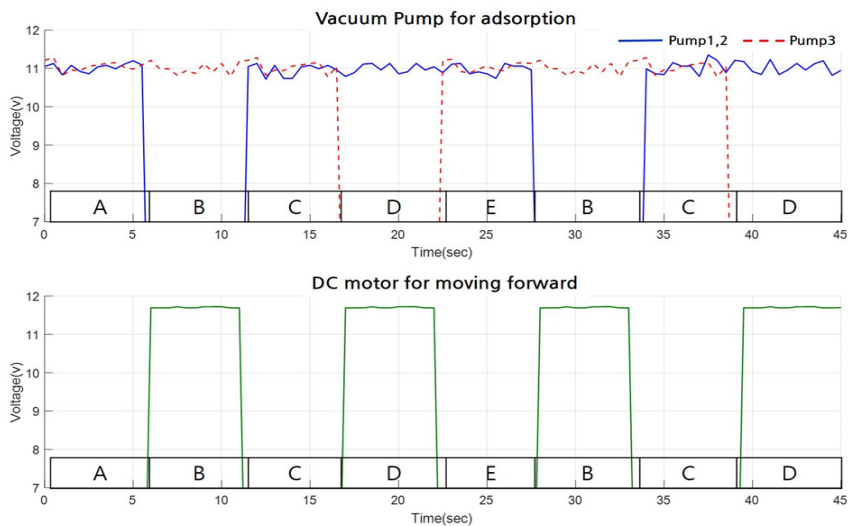


Fig. 8. Each actuator's Time-Voltage graph

실현하였다. 다른 벽면이동 로봇들에 비해 부피가 작고 가벼운 장점이 있다.

본 논문에서 소개한 방법을 기반으로 산업 현장이나 재난재해 현장 등 여러 환경에서 다양한 목적을 수행할 수 있는 벽면이동 로봇으로의 개발이 가능할 것이라 전망한다.

References

- [1] D. Schmidt, K. Berns, "Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—A survey of design aspects and technologies," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, pp. 1288-1305, Sept. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.002>
- [2] M. Tavakoli, L. Marques, A. T. de Almeida, "OmniClimber : an omnidirectional light weight climbing robot with flexibility to adapt to non-flat surfaces," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 280-285, Dec. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385454>
- [3] G. Peters, D. Pagano, D. K. Liu, K. Waldron, "A prototype climbing robot for inspection of complex ferrous structures," *Proceeding of the 13th International Conference. on Climbing and Walking Robots*, pp. 150-156, 2010. DOI: https://doi.org/10.1142/9789814329927_0020
- [4] D. Souto, A. Faina, A. Deibe, F. Lopez-Pena, R. J. Duro, "A robot for the unsupervised grit-blasting of ship hulls," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1-16, Jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/50847>
- [5] Y. K. Song, C. M. Lee, I. M. Koo, D. T. Tran, H. Moon, H. R. Choi, "Development of wall climbing robotic system for inspection purpose," *Proceeding of the International Conference. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1990-1995, Sept. 2008.
- [6] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, V. Mattoli, M. R. Cutkosky, "Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot," *Proc. of the International Conference. on Robotics and Automation*, pp. 1268-1273, April. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363159>
- [7] S. H. Park, K. J. Seo, J. R. Choi, D. H. Kwon, J. H. Bang, S. G. Kim, "Development of the wall climbing robot using New Mechanism," *KSPE 2016 Autumn conference*, pp. 150-151, Oct. 2016.
- [8] T. H. Kang, J. J. Park, H. S. Kim, H. R. Choi, "Self Contained wall-Climbing Robot with Closed Link Mechanism," *International conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1657-1662, Oct. 2002.
- [9] Y. S. Do, Y. J. Jeong, "Implementation of a window climbing robot using vacuum adsorption with sliding movement," *Journal of Advanced Information Technology and Convergence*, vol. 9, no. 6, pp. 1-10, Jun. 2011.

- [10] I. M. Koo, Y. K. Song, H. P. Moon, S. K. Park, H. R. Choi, "Design and Control of Wall Climbing Robot Using Impeller," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 5, no. 3, pp. 177-185, 2010.

박 수 현(Soo-Hyun Park)

[정회원]



- 2017년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)

<관심분야>

메카트로닉스, 로보틱스

서 경 준(Kyeong-jun Seo)

[준회원]



- 2017년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 공주대 대학원 기계공학 석사과정

<관심분야>

메카트로닉스, 로보틱스, 기계설계

김 성 관(Sung-Gaun Kim)

[정회원]



- 1992년 8월 : KAIST 기계공학 (공학사)
- 1995년 8월 : KAIST 기계공학 (공학석사)
- 2003년 2월 : GIST 기전공학 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

지능형제어시스템, 메카트로닉스, 로보틱스, 분자동역학