

태양광발전시설 무인 유지보수 로봇 개발

이현규*·이상순†

*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Development of Unmanned Cleaning Robot for Photovoltaic Panels

Hyungyu Lee* and Sang Soon Lee†

†School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

This paper describes the results of a study on the unmanned maintenance robot that simultaneously performs the cleaning and inspection of the photovoltaic panels. The robot has a special adsorptive device, an infrared sensor, a vacuum level sensor and a camera. The robot uses two SSC (Sliding Suction Cup) adsorptive devices to move up and down the slope. First, the forces generated when the robot moves up the slope are mechanically analyzed, and the required design and control of the adsorption system are suggested. The robot was designed and manufactured to operate stably by using the presented results. Next, the normal force between the panel and the wheel was measured to confirm that the robot was manufactured and operated as intended, and the robot motion was tested on the inclined panel. It has been proven that robots are well designed and built to clean and inspect sloped panels.

Key Words : Photovoltaic Generation, Sliding Suction Cup, Cleaning Robot, Maintenance Robot, Inspection Robot

1. 서 론

신 재생 에너지 발전 방법 중, 태양광 발전은 유지보수가 다른 신 재생에너지 발전에 비해 상대적으로 간단하고, 초기 설치가 간단해 각광을 받고 있다. 하지만 태양광 발전은 사용과정 중에 먼지에 의한 패널의 오염에 의해서 발전 효율이 30-40%까지 감소할 수 있다.[1-3] 이러한 손실을 줄이기 위해 주기적으로 태양광 패널을 청소해 주어야 하는데, 한국의 태양광 패널은 지표면에 대해서 약 30-40°의 경사를 갖기 때문에 먼지를 제거하는 청소가 쉽지 않다. 청소 방법으로는 자연적 청소 방법, 인력을 통한 청소 방법, 그리고 자동화 방식의 청소 방법 등이 활용되고 있다. 자연적인 청소방법은 청소 효율이 떨어지고 시간이 지날수록 오염이 누적된다는 단점이 있고, 인력을 통한 청소는 가장 효과적이지만 사람이 직접 해야 한다는

단점이 있다. 자동화 방식의 경우 운용비가 많이 드는 단점이 있다.[4] 따라서 이러한 문제점들을 개선한 방법으로 부착식 로봇을 이용한 태양광 패널 청소 방식을 제안할 수 있다.

경사면을 오르내리는 부착식 로봇에 사용된 기술들은 부착방식에 따라 4가지 정도로 분류할 수 있다: 자력에 의한 부착, 로봇 팔을 통한 부착, 생체모방을 통한 부착, 그리고 흡착 시스템을 통한 부착이다. 태양광 패널의 경우 패널의 특성상 자력이나 로봇 팔을 이용한 부착방식을 사용할 수 없다. 생체 모방형 로봇의 경우 큰 무게를 견딜 수 없고, 오염된 패널에서는 접착력이 떨어져 사용하기 어렵다. 태양광 패널의 특성을 고려할 때, 흡착식 로봇이 가장 가능성이 큰 것으로 예측되고 있다.

기존에 주로 사용되던 임펠라 방식의 흡착방식은 큰 팬이 끊임없이 돌아야 하기 때문에 전력 소모가 클 수 있다.[5] 이를 극복하기 위해 다이아프램 방식의 진공펌프가 사용되고 있는데, 해당 방식은 펌프내의 체크밸브에 의해서 차압이 유지되기 때문에 항상 팬이 돌지 않아도 된

†E-mail: sslee@koreatech.ac.kr

* 현재 KAIST 대학원 재학 중

다.[6] 그러나 해당 로봇처럼 단일 진공펌프와 스프링과 같은 수동적인 방법으로 수직항력 보상방법을 사용하는 경우 다양한 각도로 경사져 있는 태양광 패널을 안정되고 신속하게 청소하는 로봇으로는 효율적이지 않다.

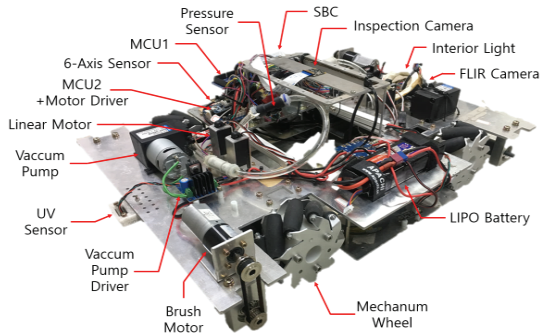


Fig. 1. Robot for maintenance of photovoltaic panel.

본 연구에서는 Fig 1에 나타나 있는 것처럼 경사면을 오르내리면서 평판을 청소하는 로봇을 개발하고 있다. 4개의 바퀴로 운행되는 로봇으로, 평판을 오르내릴 때 안정된 구동을 위해서 진공펌프로 작동하는 2개의 SSC (sliding suction cup)를 사용한 흡착 시스템을 장착하고 있다. 1개의 흡착기를 사용하는 시스템의 경우 경사에 의해 생기는 앞 바퀴와 뒷바퀴의 수직항력 차이를 보정할 수 없는 문제가 발생한다. 이러한 수직항력 차이는 앞 바퀴와 뒷바퀴에 작용하는 마찰력 차이를 크게 만들게 된다. 로봇을 주행시키는 추진력이라 할 수 있는 경사면과 바퀴 사이의 마찰력 차이가 커지면 주행이 불안정해진다. 따라서 흡착력 차이를 적절히 조절하는 게 매우 중요하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 2개의 흡착기를 사용하여 수직항력 차이를 개선하여 로봇의 방향제어가 힘들어지는 문제를 효과적으로 극복하고 있다. 하나의 흡착기는 앞 바퀴들의 사이에, 다른 흡착기는 뒤 바퀴들의 사이에 위치하고 있다. 로봇의 바퀴로 메카넘 휠을 사용하는데, 메카넘 휠은 일반 바퀴에 비해 진동 및 슬립현상이 있을 수 있지만, 흡착시스템에서 충분한 수직항력을 만들어내기 때문에 안정적인 구동이 가능하고 메카넘 휠을 사용하여 청소 시간이 단축되는 효과를 얻을 수 있다. 본 로봇은 청소 뿐만 아니라 패널 내부 및 외부를 검사할 수 있게 설계되어 있다. 이러한 기능들은 흡착 로봇 및 태양광 청소 로봇에서 처음으로 시도된 것이다.

해당 논문에서는 먼저 2개의 SSC를 사용하여 임의의 경사 각도에서 동작하는 로봇을 이론적으로 분석하고 관계식을 도출하고 있다. 도출된 관계식을 따라 설계된 로봇이 납득할 만한 성능을 내는지를 보이기 위해서 시뮬레

이션 및 실험을 통해서 확인된 결과를 설명한다. 마지막으로 앞으로 진행할 과제를 언급할 것이다.

2. 로봇의 역학 및 시스템 모델 분석

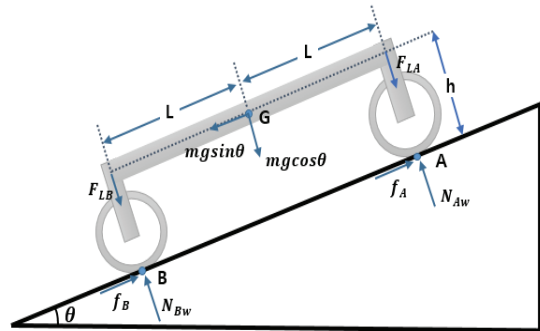


Fig. 2. Mechanical model of a robot climbing an inclined plane.

2.1 역학적 분석

경사각도가 θ 인 경사면에 오르는 로봇에 작용하는 흡착기의 영향을 살펴보기 위해서 흡착기가 2개인 로봇의 경우를 살펴본다. 2개의 흡착기들은 각각 앞 바퀴들 사이와 뒤 바퀴들 사이에 위치하고 있다. Fig 2는 로봇의 흡착기가 2개 달린 로봇의 자유 물체도인데, 측면에서 본 모습이다. Fig 2에서 바퀴A는 두 개의 앞 바퀴를 나타내고, 바퀴 B는 두 개의 뒤 바퀴를 나타낸다. 흡착력으로 인해 로봇에 가해지는 힘은 리니어 모터에 걸리는 내력 F_{LA} 와 F_{LB} 로 대체된 상태이다. Fig 2에서 L 은 로봇의 무게중심 G 점으로부터 바퀴까지의 길이를 나타내고, h 는 로봇 무게중심의 높이를 나타낸다. f_A 와 f_B 는 바퀴 A와 B에 작용하는 마찰력을 나타내고, N_{AII} 와 N_{BII} 는 바퀴 A와 B에 작용하는 수직항력을 가리킨다. 흡착기를 포함한 로봇의 전체 무게는 $W = mg$ 이다. 여기서 m 은 로봇의 질량을 나타내고, g 는 중력가속도를 가리킨다. Fig 2의 자유물체도에 대해서 정역학적인 평형방정식을 적용하면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$N_{AII} = W \cos \theta / 2 + F_{LA} - Wh \sin \theta / (2L) \quad (1)$$

$$N_{BII} = W \cos \theta / 2 + F_{LB} + Wh \sin \theta / (2L) \quad (2)$$

이 논문에서는, 미끄러지지 않고 로봇이 경사면을 오를 수 있는 흡착력을 구하기 위해서 쿨롱 마찰 모델을 사용한다. 흡착기와 경사면 사이의 마찰을 무시하면 다음과 같은 조건식이 주어진다.

$$W \sin \theta \leq \mu(W \cos \theta + F_{LA} + F_{LB}) \quad (3)$$

여기서 μ 는 로봇 바퀴와 경사면 사이의 마찰계수를 나타낸다. 식 (3)에서 보면, θ 가 커질수록 두 바퀴 사이에서 가해지는 흡착력이 커져야 로봇이 미끄러지지 않고 경사면을 오르내릴 수 있음을 알 수 있다. 또한 식 (1)과 식 (2)로부터 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$N_{BW} - N_{AW} = F_{LB} - F_{LA} + \frac{Wh \sin \theta}{L} \quad (4)$$

흡착력이 없을 경우, 경사각 θ 가 커질수록 앞 바퀴와 뒤 바퀴의 수직항력 차이가 커짐을 알 수 있는데, 이러한 수직항력 차이는 앞 바퀴와 뒷바퀴에 작용하는 마찰력 차이를 크게 만들게 된다. 따라서 흡착력 차이를 적절히 조절하는 게 매우 중요하다고 볼 수 있다. 이를 흡착기로 보정하려면 다음과 같은 관계식이 식 (4)로부터 얻어진다.

$$F_{LA} = F_{LB} + \frac{Wh \sin \theta}{L} \quad (5)$$

식 (5)를 만족시키면 로봇의 앞 바퀴와 뒤 바퀴에 발생하는 수직항력이 동일해지고, 결과적으로 각 바퀴에 작용하는 작용하는 마찰력이 동일하여 로봇이 안정하게 구동될 수 있다.

2.2 유체 시스템 모델링

Fig 3은 로봇의 썩션 시스템을 도식화 한 그림이다. 시스템은 공압 및 전자 시스템이 융합된 시스템이므로 효과적으로 모델을 분석하기 위해 bondgraph방법을 사용했다.[10] bondgraph method를 사용하는데 있어서 각 기계 요소들은 bondgraph 성분으로 변환하고 유동시스템을 모델링하여 연립 미분방정식을 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

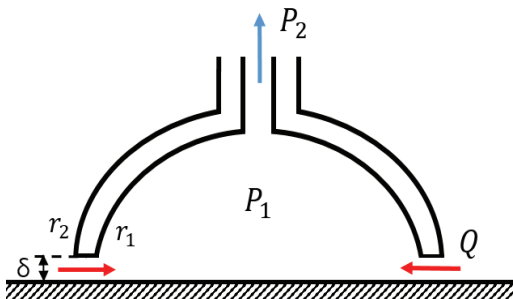


Fig. 3. Simplified model of suction system.

$$\frac{P_1(s)}{P(s)} = \frac{A}{s^2 + B_0 + C} \quad (6)$$

$$A = 1 / (C_1 C_2 R_r R_{12})$$

$$C = (R_r + R_{12} + R_0) / (C_1 C_2 R_r R_{12})$$

$$B = (C_1 R_4 R_{12} + C_1 R_4 R_r + C_2 R_4 R_r + C_2 R_r R_{12}) / (C_1 C_2 R_r R_{12})$$

- C_1 - 흡착기의 Capacitance
- C_2 - 배출구의 Capacitance
- P_1 - 흡착기의 내부 압력
- P_2 - 외부 압력
- R_C - 공기 유출로 인한 저항
- R_{12} - 통로에 의한 저항
- R_r - 썩션펌프에 의한 저항
- P_r - 썩션펌프로 인한 배출 압력

식 (6)를 통해 흡착력을 만드는 내부 압력 P_1 은, 입력 $P(s)$ 에 대해 2차 시스템응답을 보인다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 70kPa의 입력에 대한 P_1 의 응답을 나타낸다.

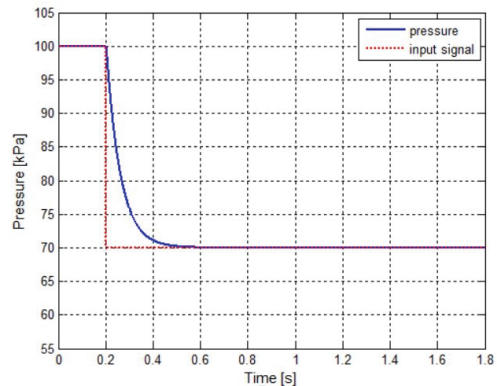


Fig. 4. System response of adsorber model to input 70kPa.

3. 태양광 패널 유지보수 로봇

Fig 1에 나타난 태양광 패널 유지보수 로봇의 하드웨어 및 제어파트를 살펴본다. 로봇은 7.4V 와 11.1V LIPO 배터리를 통해서 구동되는데, 로봇의 총 무게는 8.08kg이고 크기는 세로 54cm, 가로 40cm 높이 17.3cm이다.

로봇은 45도 각도의 패널에서도 안정적으로 구동할 수 있고 두 개의 썩션 모터는 직경 8cm의 흡착기들의 내부 압력을 최대 35kPa까지 낮출 수 있다. 이를 힘으로 환산하면 650N이고 이때 소요되는 시간은 대략 2초이다.

바퀴는 메카넘휠을 사용하여 전방향 주행이 가능하고,

로봇의 속도는 최대 50cm/s로 주행할 수 있다. 로봇의 상하좌우에는 적외선센서가 달려있어 패널을 무인으로 주행하게된다. 로봇이 주행하면서 브러시로 패널을 청소하고 동시에 패널의 내부 및 외부를 카메라로 검사하게 된다. 만약 문제가 있는 이미지가 있다면 사용자에게 이미지를 전송한다.

3.1 로봇시스템 구성

Fig 5는 로봇의 전체 구성도를 나타낸다. 본 로봇은 태양광 패널 위를 무인으로 주행하면서 패널을 청소 및 검사해야하기 때문에 검사, 흡착, 주행, 엣지감지, 청소 등 총 5가지의 기능이 필요하다. 해당 기능들은 SBC, MCU1, MCU2에서 제어된다.

검사는 SBC로 제어되는데, 일반 카메라와 FLIR카메라를 통해 패널의 외부 및 내부를 동시에 확인하여 패널의 효율을 감소 시키는 요인이 있는지 검사한다. 두개의 카메라가 SBC로 영상을 보내고 SBC에서는 이를 영상 처리한 후 문제가 있어 보이는 이미지를 사용자(Host PC)에게 무선통신을 통해서 보내준다.

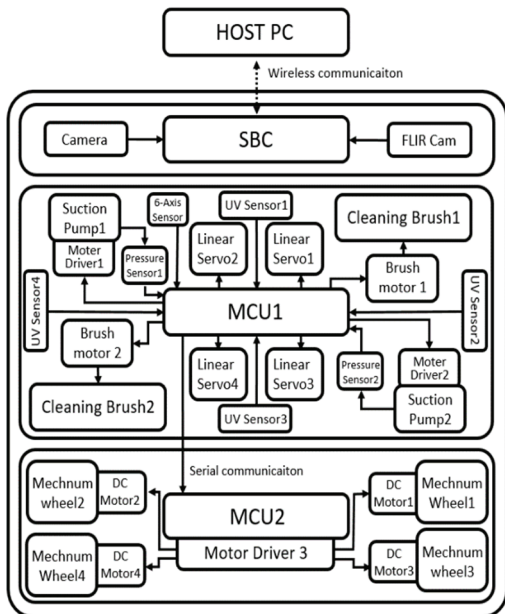


Fig. 5. Robot system configuration diagram.

흡착, 엣지감지, 청소는 MCU1으로 제어된다. 로봇은 경사각이 최대 45도에서까지 안정적으로 동작해야 하는데, 흡착력이 없는 경우 로봇은 27도에서 미끄러지기 시작하므로 흡착시스템이 필요하였다. 로봇이 패널을 올라갈 때

생기는 앞 뒤 수직항력 차이가 생기는데 이를 두 개의 흡착기를 채택하여 극복하였다. 또한 패널은 설치된 각도가 다르므로, 6축 센서를 통해서 패널의 각도를 측정하여 어떠한 각도에서도 적절한 흡착력을 사용하게 하여 필요 이상의 과도한 수직항력이 흡착기와 바퀴에 발생하지 않게 했다.

패널의 청소는 로봇 앞 뒤에 달린 나선형 브러쉬를 통하여 물리적인 방법으로 청소를 하게 된다. 로봇의 무인 주행을 구현하기 위해서는 로봇의 끝단을 감지하고 로봇이 현재 어떤 상황에 있는지 파악해야할 필요가 있는데 이를 위해서 적외선 센서를 사용하였다. 로봇의 상하좌우에 UV 센서 4개가 달려있는데, 이 센서들의 신호 조합을 통해서 로봇이 어떠한 상황에 있는지 판단하게 되고 이를 시리얼 통신을 통해서 로봇의 세 번째 부분인 MCU2에 보내주게 된다.

주행을 담당하는 MCU2는 시리얼통신을 통해 넘어온 데이터를 통해 상황을 판단한다. MCU2가 주어진 상황에 맞게 Motor Driver3에 명령을 주면 드라이버가 메카넘휠에 연결된 4개의 DC 모터를 제어하여 로봇이 무인으로 패널을 무인으로 주행할 수 있게 만들어준다.

3.2 흡착시스템 기구

Fig 6 (a)는 흡착 시스템의 분해도를 보여주는데, 흡착 시스템기구는 저마찰 썸션컵, 리니어 서보모터, 진공펌프로 이루어져있다. 태양광패널청소를 빠르게 수행하려면 로봇의 크기가 기존 흡착 로봇들에 비해 상대적으로 커야하고, 배터리 및 검사장치들과 같은 추가적인 무게들을 탑재하고 원활히 동작해야한다. 이번 연구에서는 패널의 매끄러운 표면이라는 특징을 잘 활용하여서 저마찰 썸션컵과 진공펌프를 활용한 SSC(Sliding Suction Cup) 방식을 사용하였다.

리니어 모터를 사용한 이유는 흡착 시스템의 자유물체도인 Fig 6 (b)에서 잘 나타나 있다. 리니어 모터가 없는 경우, 진공펌프에 의해 흡착기에 발생하는 흡착력(F_F)으로 인해 흡착기와 패널 표면 사이에는 수직항력(N_{suc})이 발생한다. 흡착력이 커질수록 수직항력도 커지고, 그로인해 흡착기와 패널 표면 사이에 마찰저항도 커진다. 따라서 수직 항력(N_{suc})을 줄이는 게 중요하다. 리니어 모터는 흡착기를 힘(F_L)로 위로 잡아당겨 수직항력(N_{suc})을 줄이거나 0으로 만드는 역할을 하게 된다. 로봇에 사용된 리니어 서보모터는 210:1의 기어비를 가지는데, 리니어 서보모터의 힘이 충분히 커서 모터의 정적 하중만으로 추가적인 전력 소모 없이 일정한 F_L 를 유지하게 된다.

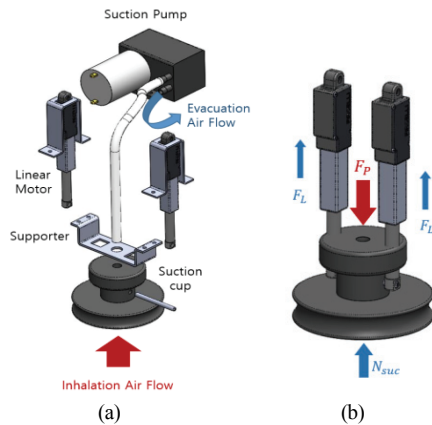


Fig. 6. (a) Decomposition diagram of adsorption system (b) Free body diagram of adsorber.

3.3 흡착시스템 제어

유체시스템 동적모델링을 통해서 해당 시스템은 외란이 작용하는 SISO(Single Input Single output)시스템인 것을 알 수 있다. 이때 시스템의 입력은 목표 압력이고 시스템의 출력은 흡착기 내부의 압력이다. 외란의 경우 의도치 않게 흡착기 내부의 압력을 증가시키는 요소인데, 여기서는

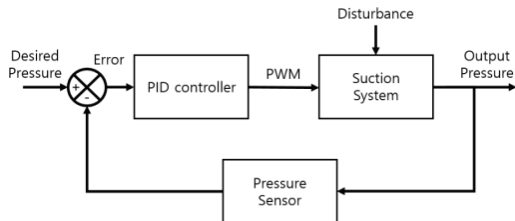


Fig. 7. Block diagram showing control of adsorption system.

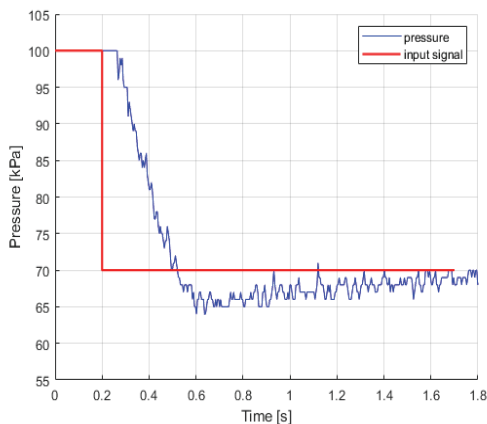


Fig. 8. Response of robot adsorption system.

패널의 거칠기, 크랙으로 인한 공기 유출, 리니어 모터에 의해 가해지는 외부힘 등이 있다. 해당 요소들을 고려하여 흡착시스템을 PID제어기를 통하여 제어하였다. 이에 대한 블록선도는 Fig 7과 같다.

Fig 8은 0도의 패널에 놓인 로봇에 70kPa의 입력신호가 들어왔을 때 PID제어기를 통해 제어되고 있는 로봇 흡착시스템의 응답을 나타낸 것이다. 해당 결과는 딜레이와 오버슈팅으로 인한 오차를 고려하면 식 (6)과 해당 식의 시뮬레이션 결과인 Fig 4와 일치한다.

4. 실험

Fig 9는 진행한 실험을 보여준다. Fig 9에 나오는 패널은 태양광 패널 모형으로, 크기는 가장 많이쓰이는 300kW급 태양광 패널과 같이 2m × 1m이다. 실험 결과 로봇은 사용자의 조작없이 45도의 태양광 패널 모형위에서 오르고, 회전하고, 옆으로 가고 내려오는 동작을 문제없이 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 로봇이 주행을 시작할 때부터 패널을 오르는데 10초, 전체 패널을 청소하고 검사하는데 30초가 소요되었다. 해당 실험을 통해 앞에서 도출한 식 들이 정확하며 로봇이 잘 설계되었다는 것을 확인할 수 있다.

로봇이 주행하면서 패널도 검사한다. 일반 카메라와 FLIR 카메라로 패널의 외부 및 내부를 동시에 검사한다. 만약 SBC가 문제가 있는 이미지를 찾으면 사용자에게 무선통신을 사용하여 알려주게 된다. 검사과정과 결과는 여기에서 생략하였다.

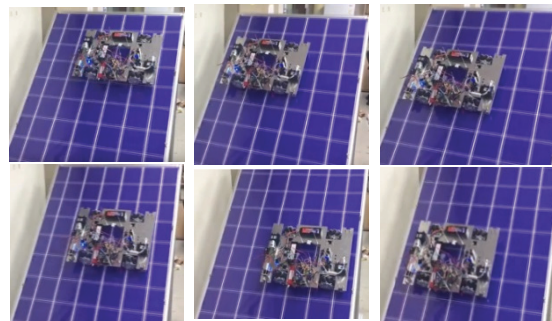


Fig. 9. Robot running on a solar panel model with a 45° tilt angle.

5. 결론

본 논문에서는 2개의 SSC(Sliding Suction Cup)를 사용한 흡착식 태양광 패널 유지보수로봇의 개발에 대해서 다루고 있다. 첫 번째로, 로봇이 경사면을 올라갈 때 발생하는

현상을 역학적으로 분석하였고, 이를 극복하기 위해 필요한 흡착 시스템 디자인 및 제어를 제시하였다. 제시된 결과들을 가지고 견고하게 동작되도록 로봇을 설계하였다. 여기에 로봇이 유지보수 로봇으로서 역할을 하기 위해 탑재된 청소, 검사, 무인구동 기능 등을 소개하였다.

제작된 로봇이 의도된 대로 제작되고 동작하는지 확인하기 위해 바퀴의 수직항력 측정실험과 모형패널 주행실험을 진행하였고, 그 결과 로봇이 의도에 맞게 훌륭하게 설계되고 제작됐다는 것을 검증할 수 있었다.

본 논문에서는 로봇거동 중 제일 중요한 로봇이 위로 올라가는 경우를 분석하고 있는데, 이후 연구에서는 회전하는 경우에 대해서도 분석 및 실험을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국기술교육대학교의 지원에 의해 이루어졌음.

참고문헌

1. Köntges, M. et al., "The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.95, pp. 1131-1137, 2011.
2. Chaichan, M. T., Bashar A. M., and Hussein A. K., "Effect of pollution and cleaning on photovoltaic performance based on experimental study," International Journal of Scientific and Engineering Research Vol.6 , pp.594-601, 2015.
3. Macomber, H. L., John B. R., and Frederick A. C., "Photovoltaic Stand Alone Systems," DOE/NASA/0195-1, 1981.
4. Sayyah, A., Mark N. H., and Malay K. M., "Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels," Solar Energy Vol.107, pp. 576-604, 2014.
5. Song, Y. K., et al., "Development of wall climbing robotic system for inspection purpose," 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008.
6. Miyake, T. and Hidenori, I., "Mechanisms and basic properties of window cleaning robot," Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference, Vol.2, 2003.

접수일: 2019년 9월 26일, 심사일: 2019년 9월 26일,
게재확정일: 2019년 9월 27일