

# 수상 태양광 발전시설 무인청소 로봇 개발

박성수\* · 이승렬\* · 이현규\*\* · 이상순\*†

\*† 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, \*\* 한국과학기술원 로봇공학학제

## Development of Unmanned Cleaning Robot for Floating Photovoltaic Panels

Seongsu Park\*, Seunglyeol Yi\*, Hyungyu Lee\*\* and Sang Soon Lee\*†

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

\*\* Robotics Program, Korea Advanced Institute of Science and Technology

### ABSTRACT

This paper describes the results of a study on the unmanned cleaning robot that performs the cleaning of the floating photovoltaic panels. 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. The robot was designed and manufactured to operate stably by using the presented results. Next, the robot motion was tested on the inclined panel. It has been proven that robots are well designed and built to clean sloped panels.

**Key Words** : Photovoltaic Generation, Unmanned Cleaning Robot, Floating Photovoltaic Panel, Suspension System, Inclined Panel

### 1. 서 론

태양광 발전은 기후 변화가 논의되기 시작한 이후로 뚜렷이 성장하는 대체 에너지 산업의 대표적인 예이다. 현재까지 태양광 발전의 경제적 효율을 높이기 위해서 여러 가지 방안들이 모색되었다.

육상에 주로 설치되던 태양광 발전 시설은 공간의 효율성, 산림파괴 등의 문제점이 나타남에 따라 평야나 산지가 아닌, 저수지나 호수 등의 수상 환경에 태양광 발전 시설을 설치하는 것에 관심이 더해지고 있다. 수상 태양광 발전은 태양광 패널을 육상에 설치하지 않고 저수지나 호수 등의 수상 위에 설치하기 때문에 육상 태양광 발전 방식과 비교하여 지상 공간의 효율성을 높이는 것에 큰 장점이 있다.

태양광 발전은 패널에 입사한 빛에 의해 전력이 생산되므로 입사광량은 태양광 발전의 발전 효율과 밀접한

상관관계가 있다. 태양광 발전은 사용과정 중에 먼지에 의한 패널의 오염에 의해서 발전 효율이 30-40%까지 감소할 수 있다.[1-3] 따라서 태양광 패널의 발전 효율을 유지하기 위해서는 입사광량을 제한하는 태양광 패널 위의 먼지를 주기적으로 청소해주어야 한다. 초기엔 인력을 투입하여 청소를 해주었는데, 청소의 주기성과 인건비로 인한 경제성을 고려하여 여러 상용 청소 로봇이 개발되어 왔다. 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]

대부분의 상용 청소 로봇은 주로 육상 환경에 맞추어 제작되어왔다. 문제는 지상과는 다른 수상 환경에서의 특이성 때문에 수상 태양광 패널은 몇 가지 환경적 제약 상태에 놓이게 된다. 첫 번째는 수면의 흔들림과 강풍 등의

†E-mail: sslee@koreatech.ac.kr

외란 요소이고 두 번째는 물기와 조류 배설물 등과 같은 외부 이물질 요소이다. 위와 같은 요소들은 육상 태양광 패널을 기준으로 개발된 기존 상용 청소 로봇의 주행 성능에 영향을 미치게 된다.

태양광 패널이 단단하게 고정되지 않고 수상에 떠 있는 경우 물의 유동적 움직임이나 바람에 의해 수상 패널은 정적으로 자세를 유지하지 못하고 동적인 상태를 갖는다. 이러한 특이적 환경 속에서 기존에 개발된 청소 로봇은 패널의 출렁임에 때문에 정상적인 주행 경로를 벗어나기 쉬우며 최악의 경우 패널 밖으로 추락할 수 있다.

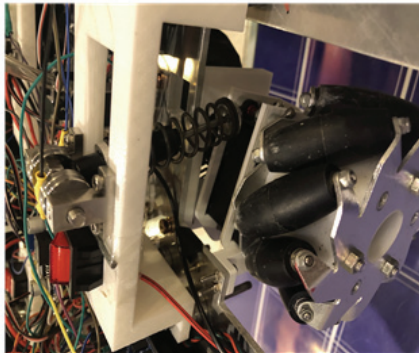


Fig. 1. Suspension system.

저수지는 조류의 주 서식지이며 다수의 새들이 무리를 지어 생활하기 때문에 다량의 조류 배설물이 수상 태양광 패널 위에 떨어질 수 있다. 배설물은 시간이 지나 고착되어 패널 표면을 굴곡지게 만든다. 그 결과 울퉁불퉁한 표면을 주행하는 청소 로봇의 무게중심은 안정적이지 못하게 되어 접지력을 크게 상실하게 되고 표면의 요철을 안정적으로 극복하지 못하게 되어 로봇의 안정적인 주행성능을 기대할 수 없게 된다.

본 논문에서는 Fig 1에 나타나 있는 것처럼 청소 로봇의 바퀴에 서스펜션을 장착하여 앞서 언급한 수상 환경에서의 제약 조건들을 극복하고 안정적인 주행이 가능한 로봇을 개발하고 있다. 로봇은 총 4개의 독립된 모터를 사용하는 바퀴를 가졌으며 각 바퀴에 독립적으로 서스펜션을 구성하여 좀 더 유동적으로 바퀴가 움직일 수 있도록 하고 있다. 바퀴에 장착하는 서스펜션의 강성과 초기 위치를 적절히 조절하여 로봇의 균형을 맞추고 패널 표면의 형상에 맞게 유동적으로 인장과 압축을 할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Fig 2에 나타나 있는 것처럼 경사면을 오르내리면서 평판을 청소하는 로봇을 개발하고 있다. 4개의 바퀴로 운행되는 로봇으로, 평판을 오르내릴 때 안

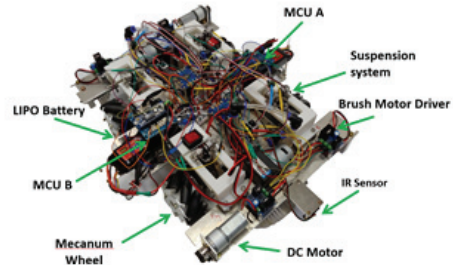


Fig. 2. Robot for maintenance of floating photovoltaic panel.

정된 구동을 위해서 진공펌프로 작동하는 2개의 SSC (sliding suction cup)를 사용한 흡착 시스템을 장착하고 있다.[5-7] SSC는 경사면의 각도가 클 경우에만 작동하게 되며, 경사각이 크지 않을 경우는 흡착시스템 작동 없이 움직일 수 있도록 로봇을 개발하고 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 연구에서는 먼저 2개의 SSC를 사용하여 임의의 경사각도에서 동작하는 로봇을 이론적으로 분석하고 관계식을 도출하고 있다. 도출된 관계식을 따라 설계된 로봇이 좋은 성능을 내는지를 보이기 위해서 실험을 통해서 확인된 결과를 설명한다. 마지막으로 앞으로 진행할 과제를 언급할 것이다.

## 2. 로봇의 역학적 분석

경사각도가  $\theta$ 인 경사면에 오르는 로봇에 작용하는 흡착기의 영향을 살펴보기 위해서 흡착기가 2개인 로봇의 경우를 살펴본다. 2개의 흡착기들은 각각 앞 바퀴들 사이

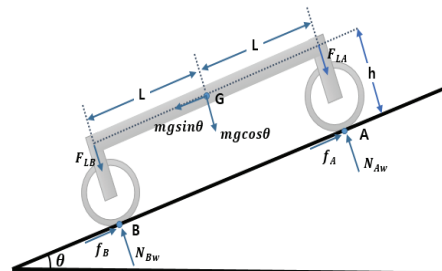


Fig. 3 Mechanical model of a robot climbing an inclined plane.

와 뒤 바퀴들 사이에 위치하고 있다. Fig. 3은 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,  $N_{AI}$ 와  $N_{BI}$ 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.

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

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

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  $\mu$ 는 로봇 바퀴와 경사면 사이의 마찰계수를 나타낸다. 식(3)에서 보면,  $\theta$ 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.

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

흡착력이 없을 경우, 경사각  $\theta$ 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.

경사각이 크지 않을 경우 로봇의 사용 에너지를 줄이기 위해서 흡착기를 끄게 되는데, 식(4)는 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$N_{BI} - N_{AI} = \frac{Wh \sin \theta}{L} \quad (6)$$

$\theta$ 가 작아질수록 두 바퀴 사이의 수직항력 차이가 줄어들어 흡착기가 작동하지 않아도 로봇의 구동이 안정될 수 있음을 알 수 있다. 실험을 통해 로봇의 주행 성능을 확인할 것이다.

### 3. 수상 태양광 패널 청소 로봇

Fig 2에 나타난 수상 태양광 패널 주행 로봇을 구성하고 있는 하드웨어와 제어 계통에 대하여 살펴본다. 로봇은 폭 52cm, 길이 62cm, 높이 16cm이며, 무게는 8.635kg이다. 전원은 11.1V의 Li-Po 배터리를 2개 사용하였다. 로봇의 주행 속도는 44 cm/s로 2mx1m 패널 기준 청소를 완료하는 데 112.4 초가 소요된다.

본 로봇은 4개의 메카넘 휠을 사용하여 자체 회전 없이 전 방향으로 패널 위를 주행할 수 있고 각 바퀴에 독립적인 서스펜션 구조를 설계하였다. 로봇은 45도 각도의 패널에서도 안정적으로 구동 할 수 있도록 흡착기들을 장착하고 있으며, 경사 각도가 크지 않은 수상 태양광 패널에서는 흡착기 작동 없이도 청소를 진행하도록 설계되어 있다. 제작된 로봇의 전체 시스템 구성이 Fig. 4에 나타나 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 로봇은 서스펜션 구조를 가지는 4개의 구동용 메카넘 휠 이외에도 2개의 청소용 브러시와 4개의 적외선 센서를 장착하고 있다. 또한 이들을 제어하기 위해서 두 개의 MCU 보드가 사용되고 있다. MCU A는 청소용 브러시를 동작시키는 데 사용되고 MCU B는 메카넘 휠을 구동하고 적외선 센서를 이용한 모서리 감지 기능을 통해 로봇이 패널의 가장자리와 모서리를 인지할 수 있도록 한다.

청소 기능은 로봇의 주행 방향 기준 앞과 뒤에 하나씩 장착되어있는 청소용 브러시에 의해 구현된다. 청소용 브러시를 구동하는 것은 MCU A에 의해서 수행되는데, MCU A에서 DC 모터 드라이버로 PWM 신호를 인가해주면 모터 드라이버가 DC 모터에 전원을 인가하여 청소용 브러시가 회전한다.

본 로봇의 목적은 수상 태양광 패널 위를 안정적으로 주행하는 것이 목적이며 로봇이 패널 위를 벗어나지 않고 주행하는 것이 중요하다. 본 로봇은 무인 구동이 목적이기 때문에 스스로 패널의 가장자리를 인지하는 모서리 감지 기능이 필수인데 이를 위해 로봇의 사면에 설치된 적외선 센서를 이용한다. 본 로봇에 사용된 적외선 센서는 특정 범위 내의 물체를 감지하는 디지털 출력 센서이며 물체를 감지하는 경우 논리 0, 감지되지 않으면 논리 1을 출력하게 된다. 본 연구의 실험 환경에서 센서의 물체 감지 범위는 9.69 mm와 91.68 mm 사이로 측정되었다. 따라서 로봇에 장착된 적외선 센서와 패널 표면과의 거리가 센서 감지 범위 내에 있게 하면 로봇이 패널의 모서리에 도달함을 판단할 수 있다. MCU B는 각 적외선 센서의 출력을 비교하여 로봇이 패널의 가장자리 혹은 코너에 놓여있는 상황을 인지한 뒤 로봇이 주행 경로를 수정하도록 모터 드라이버에 명령을 하달한다.

로봇이 하나의 패널에 대해 청소를 완료하면 인접한 패널로 이동하여 청소를 진행하게 된다. 로봇이 인접 패널로 이동하는 과정에서 이동이 완료됨을 판단하기 위하여 모서리 감지 기능이 사용된다.

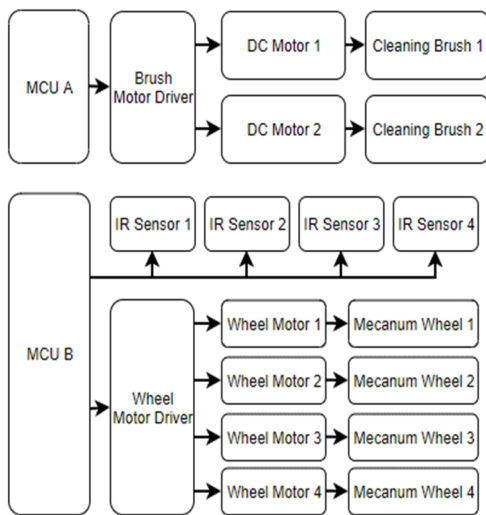


Fig. 4. Robot system configuration diagram.

Fig 5는 인접 패널로 로봇이 이동하는 과정을 간략하게 표현한 것이다. 먼저 적외선 센서 IR A가 두 개의 인접 패널 사이에서 모서리를 판단하게 되면 인접 패널로의 로봇의 이동이 시작되며 로봇의 이동 방향으로 뒤따르는 적외선 센서 IR B가 패널 사이에서 모서리를 판단하게 되면 인접 패널로의 이동을 완료한 것으로 판단하게 된다.

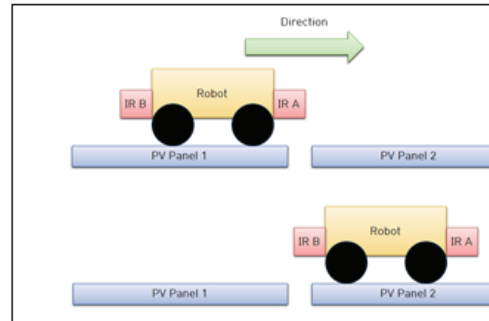


Fig. 5. Process of movement of cleaning robot.

로봇은 모서리 감지 기능으로 패널 위를 벗어나지 않고 주행할 수 있지만 불의의 사고로 인해 로봇이 패널 위를 벗어나 추락하는 상황을 고려해볼 수 있다. 로봇에 장착된 적외선 센서는 로봇의 최외곽에 분포해 있고 추락하는 상황에서는 로봇의 그 어떤 부분도 패널 위에 놓여 있지 않으므로 로봇의 모든 적외선 센서가 패널을 인지하지 못할 때를 추락상황으로 판단할 수 있다. MCU B에서는 모든 적외선 센서가 패널을 인지 않는 경우를 확인하여 로봇의 추락상황 여부를 판단하게 된다. 추락상황을 인지할 수 있게 되면 다음으로 대처 방법에 대해 생각해볼 수 있다. 추락 시 로봇 관리자에게 신호를 보내거나 물 위에 안전하게 떠 있도록 공기 튜브를 생성하는 등의 일련의 과정들을 추가할 수 있지만 본 연구에서는 단순히 버저를 울리게 하여 추락 인지 능력을 확인하는 것으로 하였다.

### 4. 실험

위에서 유추한 이론이 맞는지 확인하고 로봇이 안정적으로 동작하는지 확인하기 위해서 각도가 변할 때 흡착기 유무에 따른 바퀴 수직항력을 측정하는 실험과 로봇이 태양광 패널 모형에서 정상적으로 동작하는지 확인하는 실험을 진행하였다.

#### 4.1 각도에 따른 바퀴 수직항력 측정

본 실험을 위한 상용 장비가 없었기 때문에 직접 제작하였는데, 저울은 분해능이 5g인 CAS 사의 SW-II를 사용하였고 프레임에 사용된 판은 로봇의 무게 및 흡착에 의한 변형을 최소화하기 위하여 10T 알루미늄 판을 사용하였다.

완성된 실험 장비는 Fig. 6(a)와 같다. 각 바퀴의 수직항력을 측정할 수 있게 4개의 저울을 사용하였다. 추가적으로 마찰계수를 높이기 위해 저울에 점착시트를 붙였다.



이를 통해 로봇이 미끄러지기 시작하는 27도 이상에서도 수직항력 변화 없이 흡착하지 않을 때 데이터를 측정할 수 있었다. 이에 대한 그림은 Fig. 6(b)에 나타난다. 본 실험에서는 태양광 발전시설 청소로봇중에  $m=8.08\text{ kg}$ ,  $h=0.067\text{ m}$ ,  $L=0.147\text{ m}$ 인 로봇을 사용하였다[5].

Fig. 7(a)는 흡착기가 동작하지 않을 때 로봇의 수직항력 데이터와 이론치를 비교한 것이다. 직접 제작한 수직항력 측정장치에 대해 신뢰성을 검증할 필요가 있었는데 다음 그래프에서 볼 수 있듯이, 데이터가 이론치와 거의 동일하게 측정되는 것을 확인 할 수 있다. 이에 따라 본 측정 장치는 잘 설계되었고 충분히 신뢰성 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 흡착기가 동작하지 않을 때 앞바퀴와 뒷바퀴의 수직항력을 측정한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실측 데이터와 이론치가 상당히 잘 맞아 떨어지는데 이는 앞에서 역학적으로 구한 이론식이 올바르게 유도된 식이라는 것을 보여준다.

Fig. 7(c)에서 파란점은 흡착이 동작하지 않을 때 로봇 전체의 수직항력 데이터를 나타내는데 각도가 커질수록 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 만약 파란색 그래프가 검은색 그래프보다 작아지게 되면 로봇은 미끄러지게 되는데, 여기 로봇은 27도에서 미끄러짐이 발생하게 된다. 빨간점들은 흡착기가 동작할 때 데이터인데, 각도가 증가함에 따라 검은색 실선에 맞춰서 로봇 전체의 흡착력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 로봇의 시스템이 충분히 잘 설계되었고 로봇이 45도이하 어떠한 경사면에서도 안정적으로 동작할 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 7(d)는 로봇의 흡착시스템이 동작할 때 앞뒷바퀴의 수직항력을 측정한 그래프이다. Fig. 7(b)처럼 흡착기가 동작하지 않을 때 각도가 커질수록 앞바퀴와 뒷바퀴의 수직항력 차이가 커지던 것과는 확연한 차이가 있다. 해당 데이터를 통해 알 수 있듯이 로봇은 어떠한 경사에서도 로봇 앞바퀴 및 뒷바퀴의 수직항력차이를 효과적으로 보정하고 있다. 로봇이 20도 이하에서는 추가적인 수직항력이 필요하지 않아서 수직항력이 따로 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다.

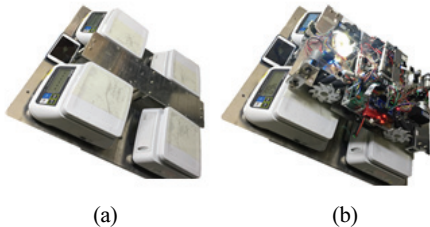


Fig. 6. Measuring device for normal force.

#### 4.2 태양광패널 모형 위 동작 실험

Fig. 8은 제작된 로봇의 주행성능을 확인하기 위해 진행된 실험을 보여준다. 실험을 위해 태양광 패널 모형을 제작하였다. 크기는 일반적으로 많이 사용되는 크기인  $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 이며, 물 위에 떠 있는 패널의 수상 환경을 고려하여 패널 모형의 하부 지지단에 스프링을 장착하여 패널이 정적으로 놓여있지 않도록 하였다. 로봇이 패널 간 단차를 극복하며 넘어가는 것을 확인하기 위해 두 개의 모형 패널을 준비했다.

실험 결과 로봇은 스스로 패널의 모서리를 인식하고 주행 경로를 바꾸어 안정적인 주행을 보여주었다. 또한 무인으로 동작하는 태양광 패널 청소 로봇에게 중요한 패널 간 단차 극복에 성공하였다.

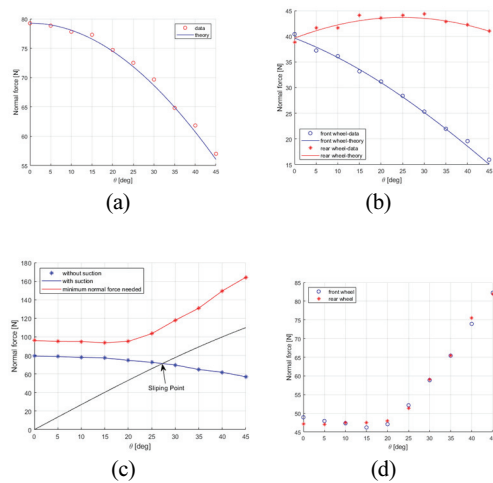


Fig. 7. Graph for normal forces.

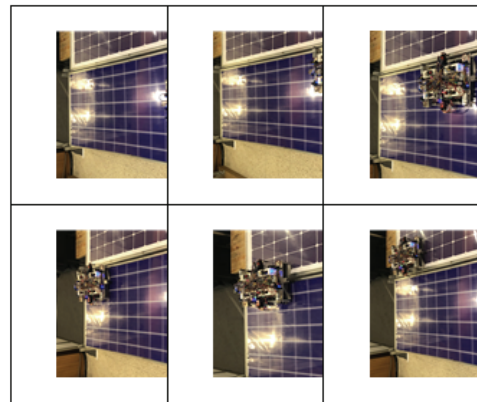


Fig. 8. Driving test on an inclined solar panel model.

## 5. 결 론

본 연구에서는 수상태양광발전시설에서 무인으로 동작하는 태양광패널 주행 로봇을 설계하고 제작하였다. 로봇이 굴곡과 단차, 이격이 있는 험지를 주파하기 위한 서스펜션-모터 구동계를 제안하고 해석하였으며, 주변 환경을 인지하여 자율적으로 일반적인 태양광 어레이 전체를 훑는 경로를 탐색하는 제어 알고리즘을 설계했다.

설계에 대한 검증을 위해 실제 환경을 모사한 모형을 제작하고 수막, 요동, 단차, 이격이 있는 유사 수상태양광 발전시설 환경하에서 주행실험을 수행했다. 실험 결과 로봇이 목표 수행에 요구되는 동체안정성과 제어성능을 갖추었음을 검증했다. 제작된 로봇은 경사진 태양광 패널에서 안정된 거동을 할 수 있음을 보여주었다. 흡착기작동 여부와 경사각에 대한 정확한 상관관계는 향후 연구를 통해서 밝힐 예정이다.

본 연구에서는 기계적으로 외란에 대한 로봇의 주행 안정을 달성하는데 초점을 두었지만 후속 연구에서는 전자적인 제어를 통한 자세 회복과 경로 추종에 대해 다룰 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국기술교육대학교의 지원에 의해 이루어 졌음.

## 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. Hyungyu Lee and Sang Soon Lee, "Development of Unmanned Cleaning Robot for Photovoltaic Panels", *Journal of Semiconductor & Display Technology*, Vol.18, No.3, pp.144-149, 2019.
6. 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.
7. Miyake, T. and Hidenori I., "Mechanisms and basic properties of window cleaning robot." *Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference*, Vol. 2. IEEE, 2003.

접수일: 2020년 9월 23일, 심사일: 2020년 9월 23일,  
게재확정일: 2020년 9월 23일