

## 환경모니터링이 가능한 3D 프린팅 소금쟁이 로봇

심가현<sup>1</sup> · 이기학<sup>1</sup> · 전경한<sup>1</sup> · 조찬섭<sup>2,+</sup> · 김봉환<sup>1,+</sup>

### 3D Printed Water Strider Robot with Environmental Monitoring

Ga-hyun Shim<sup>1</sup>, Kihak Lee<sup>1</sup>, Kyunghan Chun<sup>1</sup>, Chanseob Cho<sup>2,+</sup>, and Bonghwan Kim<sup>1,+</sup>

#### Abstract

Using 3D printing technology, we created a biomimetic water strider robot that can monitor environments. We found ways to increase the bearing capacity of the fluid-driven water strider robot by conducting experiments then comparing with more stable robots. The controller of the robot is based on Arduino, and can be controlled wirelessly with a Bluetooth module. The speed of the robot is 7.37 cm/s, and the bearing capacity is 29 g. A lithium polymer battery that can be charged with a solar cell was used as a power source, and both the charging and driving times were also explored.

**Keywords:** Surface tension, Buoyancy, Superhydrophobic, Bluetooth communication

#### 1. 서 론

소금쟁이는 6개의 다리로 구성되어 있으며, 앞다리는 먹이를 사냥하는 용도로 그 길이가 짧고, 가운데 다리와 뒷다리는 소금쟁이가 물에 빠지지 않고 수면 위에 떠서 이동할 수 있는 구조로 되어 있다. 특히, 소금쟁이 다리에 있는 무수한 잔털이 공기 쿠션을 형성하여 표면 장력을 극대화 시켜준다. 소금쟁이가 물에 떠 있을 때, 다리와 물의 표면이 맞닿는 형상을 보면 물의 표면이 오목하게 들어가면서 표면적이 넓어지고 다리는 물의 표면을 통과하지 않으며 물 표면에 원형의 윤곽을 나타낸다[1]. 소금쟁이가 떠 있을 때, 소금쟁이 체중(W)의 힘이 표면장력( $F_s$ )과 부력( $F_b$ )을 더한 힘과 같을 때 소금쟁이는 가라앉지 않고 물 위를 떠 있을 수 있다( $W=F_s+F_b$ ). 소금쟁이는 체중이 가볍고 아주 작은 곤충이므로 부력보다는 표면장력의 힘만으로 자기의 무게를 지탱해 물에서 뛰고 헤엄쳐 다닐 수 있다[2]. 물의 온도가

20°C 일 때, 소금쟁이 다리의 지지력은 물의 표면장력이 72.8 mN/m, 소금쟁이 다리가 8 mm, 중력을 0.1 [mN]라고 가정하면, 소금쟁이 한 다리가 자기 중력의 11배를 지탱할 수 있다[3]. 따라서 소금쟁이처럼 표면장력을 이용한 로봇들이 많이 연구되고 있다[2, 4-12]. 생체 모방형 로봇들의 종류로는 지상 유형(거미, 뱀), 수중 유형(물고기), 공중 유형(파리, 새)으로 크게 세 가지로 분류할 수 있다[13-16]. 이러한 로봇들의 활용도는 사람이 가지 못하는 오염된 곳이나 작은 공간에서 여러 가지 기능으로 활용 가능하며[8], 소금쟁이 로봇 같은 경우는 배나 보트와는 달리 얇은 물에서도 구동이 가능하다는 장점이 있다[17]. 하지만 강이 아닌 바다 같은 유속이 강한 경우에는 쉽게 전복될 수 있어 구동이 어렵다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 소금쟁이 로봇의 안정성을 위해 중간 다리에 부력을 위한 큰을 만들어 파도와 같은 장애물이 있어도 소금쟁이가 쉽게 뒤집히지 않도록 설계를 하였다. 물에서 구동되는 로봇을 제작하기 때문에 지지력은 가장 먼저 고려되어야 하는 점이다. 물과 다리가 접촉하는 표면적을 극대화하기 위해 본 논문에서는 소금쟁이 로봇 다리에 초소수성 코팅을 하여 물 표면과 다리의 접촉각을 키워 지지력을 높였다[3]. 표면을 초소수성의 구조로 만드는 것은 유동 저항을 감소시키면 점성 항력이 감소하여 유체에서 구동되는 로봇에서 유체와의 저항 또한 줄여준다[18]. 유체에서 구동할 수 있는 로봇을 만들기 위해, 소금쟁이 로봇의 본체와 다리의 제작은 쉽게 변형이 가능하고 서로 비교하기 쉬우며 mm의 단위까지 제어가 가능한 가벼운 PLA(Poly Lactic Acid) 소재를 쓰는 3D 프린트[ultimaker 2+, Ultimaker, USA]를 사용하였다. 본 논문에서는 3D 프린팅 기술을 사용해 소금쟁이 로봇을 제작하고, 그 특성을 평가한다.

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu Catholic University) 13-13, Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsangbuk-do 38430, Korea

<sup>2</sup>경북대학교 전자공학부(School of Electrical Engineering, Kyungpook National University) 80 Daehakro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: bhkim@cu.ac.kr, chocs@knu.ac.kr (Received : Nov. 20, 2019, Revised : Nov. 28, 2019, Accepted : Nov. 29, 2019)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 2. 소금쟁이 로봇 설계 및 제작

### 2.1 소금쟁이 로봇 설계 및 제작

소금쟁이 로봇 몸체의 도면은 Sketchup을 사용하였고, 3D 프린터는 ultimaker 2+를 사용하였다. 3D 프린터의 특성상 쉽게 제작이 가능하고 변경이 자유로워 비교 실험하기가 용이하며, 3D 프린터의 소재는 PLA(Poly Lactic Acid)를 사용해 무게 또한 가볍다. 이러한 이유들로 소금쟁이 로봇의 몸체를 3D 프린터를 이용하여 제작하였다.

소금쟁이 로봇의 디자인은 생체모방에 초점을 두었으며, 몸체의 디자인은 소금쟁이가 물 위에서 떠 있을 때의 형상을 모방한 디자인이며, 소금쟁이 로봇의 제어기의 사이즈에 맞게 몸체의 가로-세로 길이를 제작하였다. 코어리스 모터 (Coreless Motor)를 고정하기 위한 홀더를 몸체에 일체형으로 설계하였으며, 3D 프린터의 출력 한계로 한 번에 완성품이 출력이 되는 것은 불가능해, 다리와 연결되는 부분은 조립식으로 설계하였다. 다리의 설계는 긴 원기둥 형태의 소금쟁이 다리를 소형화하기 위해 나선형으로 변경, 다리의 잔털을 모방하기 위해 방사상의 돌기를 10°의 간격으로 36개 추가하였다. 다리의 사이즈는 34 mm × 34 mm × 1 mm이며, 하나의 다리의 길넓이는 1,910 mm<sup>2</sup>이다. 부력을 위해 디자인 된 콘의 사이즈는 44.2 mm × 44.2 mm × 15 mm이며, 부력은 15.01 mN 로 계산된다.

소금쟁이 로봇은 앞 뒤 대칭형의 3쌍 다리와 무게중심과 부력을 고려해 중심 콘을 장착, 총 6개의 다리와 1개의 콘으로 디자인 되었다. 최종 디자인 된 Fig. 1 소금쟁이의 사이즈는 11 cm × 10.7 cm × 3.4 cm이며, 무게는 20.9 g이다. 다리와 콘의 장착은 고정되어 있지 않고 제어기의 무게나 상황에 따라 변형이 가능하다.

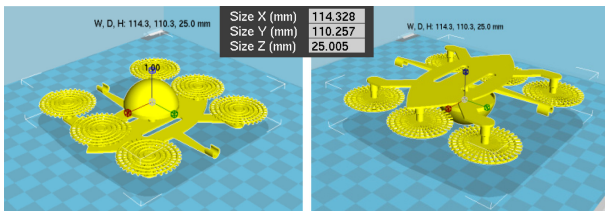


Fig. 1. Water strider robot body design.

### 2.2 소금쟁이 다리 디자인

물 위에서 구동되는 로봇에서 지지력을 아는 것은 중요하다. 이 부분에서는 소금쟁이가 얼마의 지지력을 가지며 그 지지력을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 보여준다. 곤충 소금쟁이의 다리는 실린더 형태로 묘사될 수 있으며, Fig. 2는 소금쟁이 다리가 물 표면에  $\theta_c$ 의 접촉각을 가진 채 부분적으로 잠기는 모습을 2차원 형태로 묘사한 그림이다.

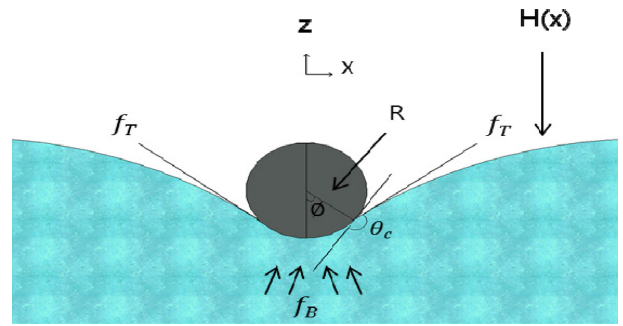


Fig. 2. 2-D model of water strider leg.

공기-물 계면의 압력은 Young-Laplace 방정식[19]을 사용하여 계산할 수 있다. 계산된 값을 x축을 따라 적분해주면 전체 힘을 알 수 있다. Young-Laplace를 사용하기 위해 기체와 액체는 모두 이상유체라고 가정한다. Young-Laplace 방정식으로부터, 공기-물 간의 폐곡면 압력 차이는  $\Delta P$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P = \gamma \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{1}$$

$\gamma$ -표면장력(0.0728 N/m),  $R_1$  과  $R_2$  는 점에서의 표면 곡률 반경이다. 소금쟁이 다리는 실린더( $R_2 = \infty$ )로 가정하여 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\rho g h(x) = \gamma \cdot \left( \frac{\frac{d^2}{dx^2} \alpha(x)}{\left( 1 + \left( \frac{d}{dx} \alpha(x) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \tag{2}$$

$\rho$ -물의 밀도,  $g$ -중력 상수이다. 식  $z=h(x)$ 는 물-공기 계면의 윤곽을 나타내는 것이다.  $h(x)$ 에 대한 경계조건은

$$\frac{d\alpha}{dx}(x_0) = \tan(\theta_c + \omega - \pi) \tag{3}$$

$$h(\infty) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{d\alpha}{dx}(\infty) = 0 \tag{5}$$

식 (2)를 풀기위해 필요한 경계조건은 두 개이므로 식 (5)는 무시한다. 나중에 식 (2)가 식 (5)를 만족한다는 것을 알 수 있다. 식 (2)를 풀기 위해  $\phi$ 값을 가정한다. 이 식을 풀면 실린더가 수면을 파괴하기 전 깊이를 알 수 있다. 만약 접촉각  $\theta_c \leq 90^\circ$  라면 수면파괴 조건은  $\phi = 180^\circ$  이고, 접촉각  $\theta_c > 90^\circ$  라면 수면파괴 조건은  $\phi = 270^\circ - \theta_c$  이라 가정한다. 위의 가정은

$$\frac{d\alpha}{dx}(x) = s = constant \tag{6}$$

식 (6)이 되며, 식 (2)는 위의 식(6)으로 인해

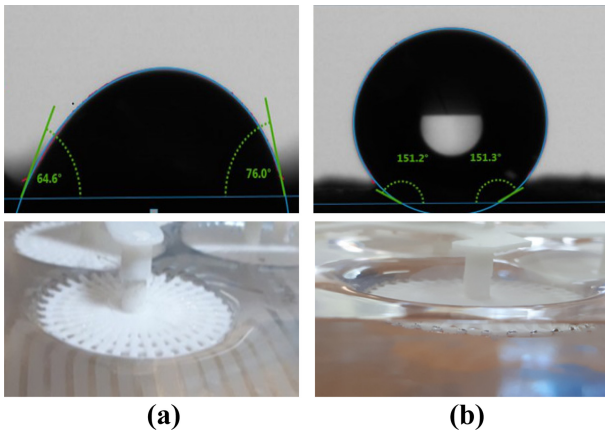


Fig. 3. (a) Uncoated leg, (b) Hydrophobic Coated leg

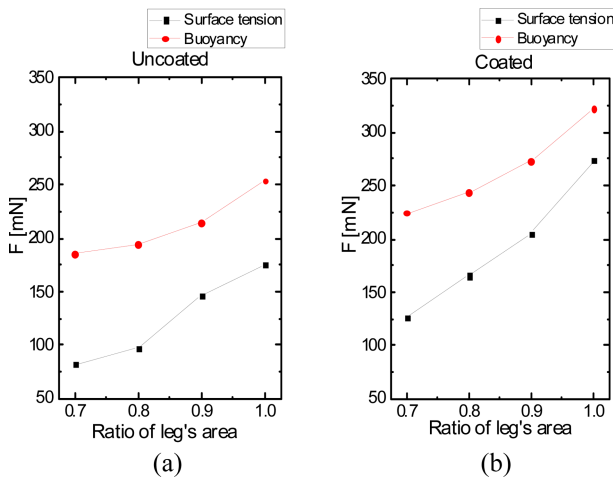


Fig. 4. (a) Bearing capacity of uncoated water strider robot, (b) Bearing capacity of coated water strider robot .

$$\frac{d^2}{dx^2}h(x) = \frac{\rho g(1+s^2)^{\frac{1}{2}}}{\gamma}h(x) \quad (7)$$

식 (7)이 된다. 이 식은 근사치이며, 수면이 파괴되기 전 곡률 반경을 구할 수 있다.

Fig. 3. 그림들은 초소수성 코팅을 하지 않은 다리와 초소수성 코팅을 한 다리의 접촉각을 sessil drop 방법으로 7 μl의 액체를 떨어뜨려 측정하였다. Fig. 3 (a)는 코팅을 하지 않은 다리의 접촉각과 수면이 깨어지기 전의 곡률 반경을 캡처한 것이며, 평균적으로 65°~75° 사이의 접촉각이 측정되었다. Fig. 3 (b)는 코팅을 한 다리의 접촉각과 수면이 깨어지기 전의 곡률 반경을 캡처한 것이며, 평균적으로 150°의 접촉각이 측정되어 코팅을 한 다리는 초소수성 성질을 가짐을 확인하였다. 수면이 깨어지기 전의 캡처는 육안으로 확인하였으며, 접촉각이 커지면 곡률 반경이 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 초소수성 코팅과 소금쟁이 다리의 지지력을 보여준다. Fig. 4. (a)는 초소수성 코팅을 하지 않은 소금쟁이 다리의

지지력을 측정한 것이다. 소형화된 소금쟁이 로봇을 위해 다리의 지름 비율을 0.1씩 감소시켜가며 지지력을 측정하였고, 부력의 필요성과 지지력 차이를 확인하기 위해 콘(부력, 15 mN)을 탈부착해가며 지지력을 측정하였다. 가장 높은 지지력 [253.82 mN]을 갖는 로봇은 부력과 1.0비율 (지름-34.8 mm) 여섯 개의 다리를 가진 소금쟁이 로봇이며, 가장 낮은 지지력[82.32 mN]을 갖는 로봇은 0.7비율 (지름-24.35 mm) 일곱 개의 다리를 가진 소금쟁이 로봇이다. 위 그래프에서 보듯이 부력을 위한 콘을 부착한 소금쟁이 로봇 지지력이 콘을 부착하지 않은 것 보다 월등히 높은 지지력을 가짐을 확인할 수 있다. 콘을 부착한 소금쟁이와 부착하지 않은 소금쟁이의 지지력 차이는 크게 2.25배 작게는 1.44배가 난다.

- 초소수성 코팅을 한 다리 1 mm<sup>2</sup>당 지지력(μN) : 40.9 μN
- 초소수성 코팅을 하지 않은 다리 1 mm<sup>2</sup>당 지지력(μN) : 26.2 μN

Fig. 4. (b)는 초소수성 코팅을 한 소금쟁이 다리의 지지력을 측정한 것이다. 초소수성 코팅의 효과를 알아보기 위해 Fig. 4 (a)와 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 가장 높은 지지력 [332.42 mN]을 갖는 로봇은 부력과 초소수성 코팅이 된 1.0비율 (지름-34.8 mm) 여섯 개의 다리를 가진 소금쟁이 로봇이며, 가장 낮은 지지력 [126.42 mN]을 갖는 로봇은 초소수성 코팅이 된 1.0비율 (지름-24.35 mm) 일곱 개의 다리를 가진 소금쟁이 로봇이다. 초소수성 코팅을 한 소금쟁이의 지지력 또한 콘을 부착한 소금쟁이 로봇의 지지력이 더 높은 지지력을 가짐을 확인할 수 있다. 콘을 부착한 소금쟁이와 부착하지 않은 소금쟁이 지지력 차이는 크게는 1.8배 작게는 1.2배 차이가 난다. 지지력을 극대화하기 위해 부력을 활용하여야 한다.

Fig. 4에서 두 그래프를 비교해보면, 초소수성 코팅을 한 다리와 초소수성 코팅을 하지 않은 다리의 지지력 차이는 크게 1.7배 작게는 1.4배 차이가 난다. 위의 Fig. 3에서 보았듯이 접촉각이 커질수록 곡률 반경이 더 커져 지지력이 높아짐을 확인하였다.

하지만, 소금쟁이 로봇의 지지력 값이 항상 Fig. 3의 값과 같지 않다. 다리와 수면의 수평이 일치하여야 가장 큰 값을 가지지만, 항상 수평일 수 없고 조립의 과정과 3D 프린터 출력의 문제로 인해 소금쟁이 로봇 바디마다 오차가 생길 수 있다. 여러 개의 소금쟁이 로봇을 조립하여 몇 번의 실험의 평균값이다. 이러한 이유로, 소금쟁이 다리의 면적은 일정한 비율로 감소하지만 위의 그래프 Fig. 4. (a), (b) 두 그래프는 선형적이지 않다는 것을 확인할 수 있다

### 3. 소금쟁이 로봇 구동 결과

Fig. 5는 제작된 소금쟁이 로봇을 보여준다. 소금쟁이 로봇의 구동을 위해 제어기는 쉽고 간편하게 제작할 수 있는 아두이노를 사용하였고 무선 제어를 위해 블루투스를 활용하였다. Fig.

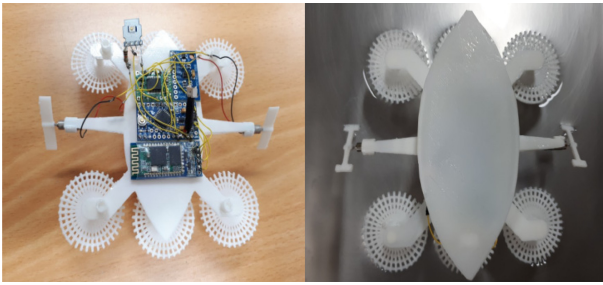


Fig. 5. Final water strider robot.

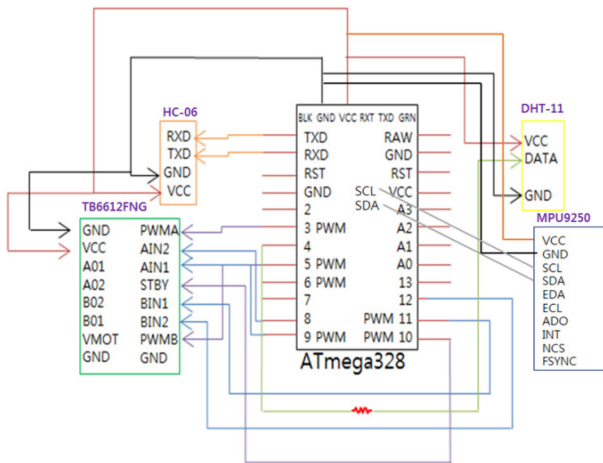


Fig. 6. Controller circuit diagram.

6는 제어기의 회로도를 나타내며, 제어기의 무게는 12 g이다.

Arduino Uno를 사용하기에는 무게 문제가 있어 Arduino Pro Mini(3.3 V)를 사용하였다. Arduino Pro Mini는 Atmega328을 기반 마이크로 컨트롤러 보드이며, 디지털 I/O 14개 핀 중 6개의 핀은 PWM(Pulse Width Modulation)이 가능하며 출력 전류는 40 mA이다.

모터 구동을 위해 사용된 모터드라이버 TB6612는 TB6612FNG를 MOSFET-H 브리지 구조에서 큰 전류와 2개의 출력과 모터를 구동 할 수 있는 드라이버 칩이며, PWM을 사용해 제어하기 편리하다. 환경모니터링을 위한 DHT-11센서는 온도 및 습도의 보정된 디지털 신호 출력을 포함하는 복합 센서이다.

무선통신을 위한 블루투스는 HC-06모듈을 사용하였으며, 이 블루투스 모듈은 직렬 무선 데이터 전송을 쉽게 수행 할 수 있으며, 작동 주파수는 가장 널리 사용되는 2.4 GHz ISM 주파수 대역 중 하나이다. 블루투스 Protocol은 Bluetooth 2.0 + EDR standard이며, 서로 다른 장치의 신호 전송 시간이 0.5초 간격으로 유지된다. 이 모듈의 출력 전류는 50 mA이다.

제어기와 안드로이드 간의 통신을 위해 Fig. 7과 같은 앱을 개발하였으며, 개발된 앱은 앱인벤터 소프트웨어에서 제작하였다. 앱 인벤터(App Inventor for Android)는 구글이 제공한 오픈 소스 웹 애플리케이션으로 지금은 MIT에서 관리 되고 있으며,

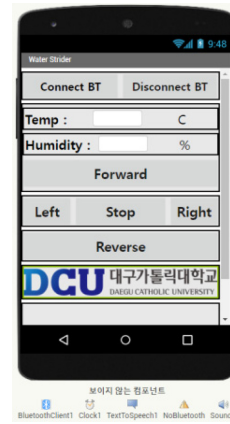


Fig. 7. Inventor Android Apps.

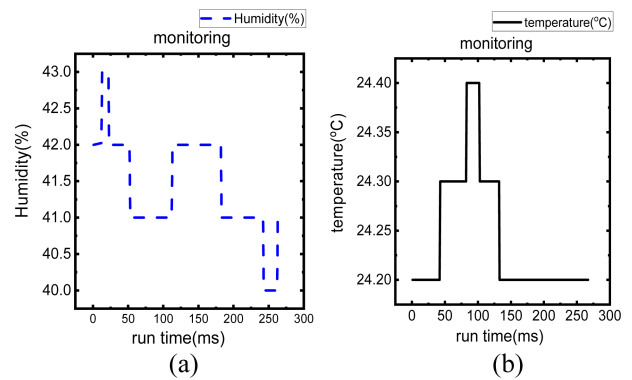


Fig. 8. (a) Humidity, (b) temperature - real time environment monitoring.

안드로이드 운영 체제용 응용 소프트웨어를 만들 수 있다. 제작된 앱은 실시간으로 온도 및 습도가 측정되며 로봇의 속도 제어가 가능하다.

Fig. 8은 온도, 습도에 대해 실시간으로 들어오는 환경 모니터링 데이터를 그래프화 한 것이며, 데이터는 블루투스를 사용해 무선으로 송수신이 가능하다. 아두이노 코딩은 쉽게 변경이 가능하여 사용자에게 따라 수정도 가능해 환경모니터링을 위한 데이터 수집을 상황에 맞게 조절 가능하다. 원하는 때에 데이터를 수집하게 할 수도 있으며, 실시간으로 들어오는 데이터를 수집할 수도 있다.

Fig. 9는 소금쟁이 로봇이 직진 구동을 할 때 yaw 값을 그래프화 한 것이다. Yaw는 무게중심을 중심으로 좌우의 회전을 나타내는 값이다. 물에서 구동하는 소금쟁이 로봇의 경우 yaw 값은 중요한 요소이다. 이 값을 받아내기 위해 MPU9250 가속도센서를 사용하였다. 이 센서는 MPU6050의 후속으로 가속도와 자이로센서, AK8963 지자기 센서가 포함되어 있는 9DOF(Degrees of freedom)센서이다. 소금쟁이 로봇을 직진 구동 실험 시 Fig. 9를 보면 직진을 하지 못하고 한 쪽을 휘는 현상이 나타났으며, 여러 번의 실험 결과 직진 구동 형상은 불규

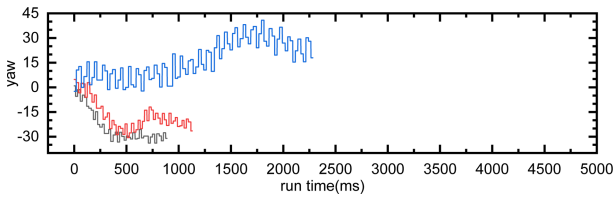


Fig. 9. Water strider robot driven shape.

칙적으로 나타났다. 이러한 문제는 무게중심, 모터, 수평의 불균형 등으로 나타날 수 있는 문제이다. 자이로-가속도센서를 사용해 제어기의 무게중심을 확인했을 때, 무게중심이 대각선 뒤로 있음을 확인하였고 제어기의 무게중심과 로봇 바디의 무게중심의 불균형을 해결하기 위해 피드백 제어인 PID제어를 하였다. PID 제어(Proportional-Integral-Differential Controller)는 실제 응용분야에서 많이 사용되는 대표적인 형태의 제어기법이며, 기본적으로 피드백제어기의 형태이다.

본 논문의 제어 대상은 로봇의 속도 MotorA\_speed, MotorB\_speed이며, 속도의 출력 값(output)을 측정하여 설정 값(setpoint)를 계산하고, 이 오차 값을 이용해 제어에 필요한 제어 값을 계산하는 구조이다.

본 논문에서는 비례 제어만으로도 안정적인 값이 나와 P제어를 하였다. 실험은 150 × 50 cm의 수조에서 진행하였으며, 0.5씩 P 게인 값을 증가시켜 P 게인 값2까지 실험을 했지만 별다른 형상의 차이가 보이지 않아 P 게인 값을 5로 늘려 실험을 해보았다. P 게인 값 5로 실험을 했을 때, 소금쟁이 로봇이 한 쪽으로 치우치는 현상이 보였으나 150 cm 길이의 수조를 끝까지 완주할 수 있었다. P 게인 값 5를 0.2씩 줄여 안정적인 값을 찾아갔고, 찾은 P 게인 값은 4.5였다. 이때, 소금쟁이 로봇은 7.37 cm/s의 속도로 구동하였으며, 좌우 범위가 -15 ~ 15 cm 정도 시작범위에서 벗어났다.

Fig. 10은 소금쟁이 로봇이 P 제어 직진 구동 시, yaw 값, yaw\_out 값, 양쪽 모터의 PWM 값을 나타낸다. 이 데이터들은 PC와의 블루투스 통신으로 실시간으로 받았다.

Fig. 10 (a)는 Fig. 9와 비교하였을 때, 소금쟁이 로봇의 좌우의 회전 값 yaw가 안정적으로 나아졌다는 것을 확인할 수 있으며, 육안으로 관찰 시 직진 구동을 무리 없이 할 수 있음을 확인하였다. Fig. 10 (b)는 P 게인 값 4.5로 yaw 값을 제어해 나온 제어 값 yaw\_out이다. Fig. 10 (c)는 양쪽 모터의 PWM 값이며 시작 값은 120으로 설정되어 있다. 이 데이터들은 150 cm의 수조를 직진 구동하였을 때 2,275개의 데이터를 PC에서 받았다. 소금쟁이 로봇을 구동하기 위해 본 논문에서 사용한 배터리는 충전이 가능한 리튬 폴리머 배터리를 사용하였다.

본 논문에서 사용한 리튬-폴리머는 3.7 V/80 mAh로 가벼운 제품을 사용하였다. 리튬 배터리 충전은 태양광을 이용하였다. 솔라셀은 필름형으로 3 V/50 mA 두개를 직렬 연결하여 충전하였다.

이 실험에서는 로봇이 구동되지 않는 마지막 잔여 전압과 정

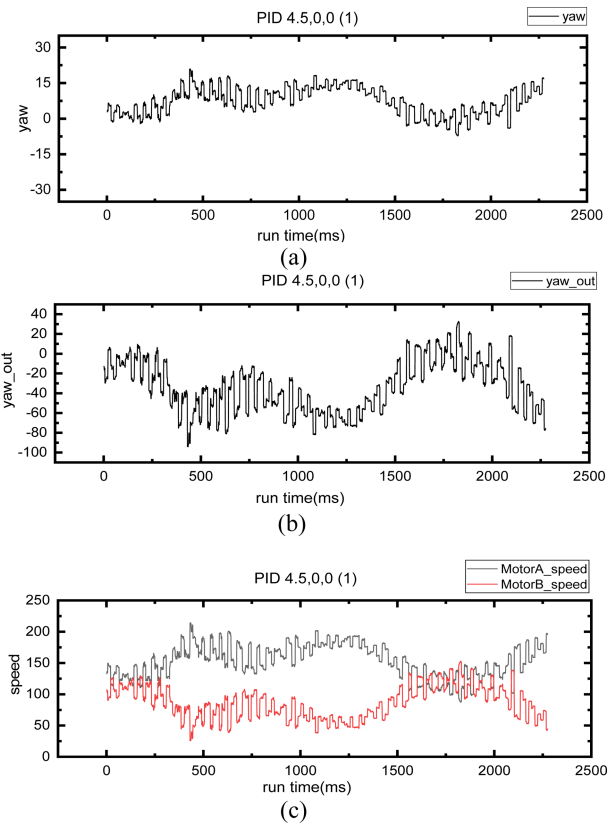


Fig. 10. P Control – (a) yaw, (b) yaw\_out, (c) MotorA\_speed, MotorB\_speed result.

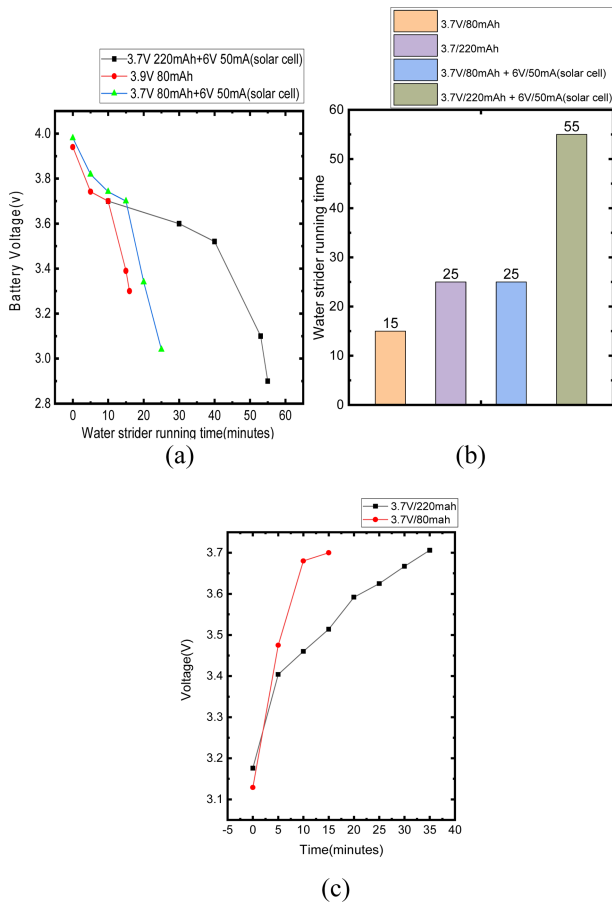
Table 1. Voltage and current of batteries

	Voltage	Current
Lithium polymer_1	3.7 V	220 mAh
Lithium Polymer_2	3.7 V	80 mAh
Solar cell	6 V	50 mA

확한 구동시간을 알 수 있다.

Fig. 11(a)는 지상에서 직진운동 시, 리튬 폴리머 배터리로 구동된 소금쟁이 로봇과 6 V/50 mAh 태양전지와 함께 구동된 소금쟁이의 잔여 전압에 대한 그림이다. 3.7 V/80 mAh 리포 배터리는 3.3 V에서 로봇의 구동이 멈추었으며, 태양전지와 함께 구동된 로봇은 3.04 V에서 구동이 멈추었다. 3.7 V/220 mAh 리포 배터리는 3.2 V에서 로봇의 구동이 멈추었으며, 태양전지와 함께 구동된 로봇은 2.9 V에서 구동이 멈추었다. 리포 배터리만 연결한 소금쟁이 로봇은 제어기의 아두이노 프로 미니 3.3 V의 전압에 맞춰 블루투스 통신이 끊어지며, 태양전지와 리튬 폴리머 배터리가 함께 구동이 되는 제어기에서도 전압이 충분하여도 전류가 작아 블루투스 송신이 원활하지 않게 되고, 결과적으로 블루투스 송신이 끊겨 소금쟁이 로봇이 구동이 되지 않게 된다.

Fig. 11(b)는 배터리에 따른 소금쟁이 로봇의 구동시간에 대한 그림이다. 3.7 V/80 mAh 리포 배터리만 구동시킨 소금쟁이



**Fig. 11.** (a) Battery residual voltage over time, (b) Battery powered water strider robot run time, (c) Solar charge time.

로봇은 15분 동안 구동 가능하며, 태양전지와 함께 구동된 소금쟁이 로봇은 25분 동안 구동이 가능하다. 3.7 V/220 mAh 리포 배터리만 구동시킨 소금쟁이 로봇은 25분 동안 구동 가능하며, 태양전지와 함께 구동한 소금쟁이 로봇은 55분 동안 구동이 가능하다. 소금쟁이 로봇이 구동되어야 하는 시간에 따라 배터리를 연결할 수 있다.

Fig. 11(c)는 태양광을 이용하여 리포 배터리를 충전하는 데 걸린 시간과 전압 변화 그래프이다. 3.7 V/220 mAh 는 충전이 되기까지 35분이 소요되고, 3.7 v/80 mAh 는 15분이 소요된다.

태양전지는 날씨 영향으로 일정한 파워를 공급하지 못해, 배터리에 연결하기 보다는 충전에 이용하고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 태양광 충전으로 동작 가능하고 환경모니터링 센서가 장착된 소금쟁이 로봇을 제작하였다. 태양전지, 센서, 통신용 모듈을 장착하기 위하여 소금쟁이 로봇의 물에 대한 지지력 향상에 초점을 두고 3D 프린터 기술을 이용해 소금쟁이 로봇

의 몸체를 제작, 아두이노를 사용해 블루투스 모듈로 무선 제어, 그리고 애플리케이션의 앱 제작으로 센서 값 송수신이 가능한 소금쟁이 로봇을 제작하였다. 로봇의 다리는 다리의 무게보다 5.875 배 무게를 지지 할 수 있다. 7.37 cm/s의 속도를 가지며, 충분한 지지력을 가지고 있으므로 본 로봇은 더 많은 센서를 장착해 활용이 가능하다.

#### 감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2017R1D1A3B03034258 and NRF-2016R1D1A3A03919627)

#### REFERENCES

- [1] L. Hines, D. Campolo, and M. Sitti, "Liftoff of a motor-driven, flapping-wing microaerial vehicle capable of resonance", *IEEE Trans. Robot.*, Vol.30, No.1, pp.220-232, 2014.
- [2] M. W. Denny, *Air and Water: The Biology and Physics of Lifes Media*, Princeton University Press, NJ, 1993.
- [3] S. Sun., "Water strider robot based on 3D printing and super-hydrophobic coating", M.S. dissertation, Daegu Catholic University, 2018.
- [4] R. B. Suter, O. Rosenberg, S. Loeb, H. Wildman, and J. H. Jr. Long, "Locomotion on the water surface: Propulsive mechanisms of the fisher spider dolomes triton", *J. Exp Biol.*, Vol.200, pp.2523-2538, 1997.
- [5] D. L. Hu, B. Chan, and J. W. M. Bush. "The hydrodynamics of water strider locomotion", *Nature*, Vol. 424, pp. 663-666, 2003.
- [6] X. Gao and L. Jiang. "Water-repellent legs of water striders", *Nature*, Vol. 432, No. 36, 2004.
- [7] J. W. M. Bush and D. L. Hu. Walking on water: Biocomotion at the interface. *Ann. Rev Fluid Mech.*, Vol. 38, pp.339-369, 2006.
- [8] J.E. Clark, J.G Cham, S.A. Bailey, E.M. Froehlich, P.K. Nahata, R.J. Full, and M.R. Cutkosky, "Biomimetic design and fabrication of a hexapedal running robot," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robot. Autom.*, Vol. 4, pp. 3643-3649, 2001.
- [9] N. Kagawa and H. Kazerooni, "Biomimetic Small Walking Machine," *Proc IEEE/ASME Int. Conf. on Adv. Intell. Mechatron.*, pp. 971-979, Como, Italy, 2001.
- [10] C. Menon, M. Murphy, and M. Sitti, "Gecko Inspired Surface Climbing Robots," *Proc. IEEE Int/ Conf. on Robot. Biomim/ (ROBIO)*, pp:431-436,Shenyang, China, 2004.
- [11] F. Chiu, J. Guo, J. Chen, and Y. Lin, "Dynamic characteristic of a biomimetic underwater vehicle;" *Proc. IEEE Int. Symp. on Underw. Technol.*, pp 172-177, 2002.
- [12] S. Guo, Y. Hasegaw, T. Fukuda, and K. Asaka, "Fish-like Underwater Microrobot with Multi DOF," *Proc. IEEE Int. Symp. on Micromechatron. Hum Sci.*, pp. 63-68, 2001.

- [13] D. Lentink, Biomimetics: Flying Like a Fly, *Nature*, Vol. 498, 306 (2013).
- [14] S. Kim, J. B. Clark, and M. R. Cutkosky. iSprawl: "Design and tuning for high-speed autonomous open-loop running". *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 25, No. 9, pp. 903-912, 2006.
- [15] Veaceslav Arabagi, Lindsey Hines, and Metin Sitti. "Design and manufacturing of a controllable miniature flapping wing robotic platform". *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 31, No. 6, pp. 785-800, 2012.
- [16] S. Floyd and M. Sitti. "Design and Development of the Lifting and Propulsion Mechanism for a Biologically Inspired Water Runner Robot". *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 24, No. 3, pp. 698-709, 2008.
- [17] Wu, Licheng, Lian, Zhipeng, Yang, Guosheng, Ceccarelli and Marco., "Water Dancer II-a: a Non-tethered Telecontrollable Water Strider Robot". *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 8. 10.5772/45704, 2011.
- [18] Xi-Qiao Feng, Xuefeng Gao, Ziniu Wu, Lei Jiang, Quan-Shui Zheng., "Superior Water Repellency of Water Strider Legs with Hierarchical Structures: Experiments and Analysis". *Langmuir*, Vol. 23, No. 9, pp. 4892-4898, 2007.
- [19] Yun Seong Song, S. H. Suhr and M. Sitti, "Modeling of the supporting legs for designing biomimetic water strider robots," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robot. Autom.*, pp. 2303-2310, Orlando, FL, 2006.