

해상풍력발전 지지구조물의 유지보수용 수중 기동등반로봇에 관한 실험적 연구

Experimental Study on an Underwater Pole Climb Robot for the Maintenance of Offshore Wind Turbine Substructures

임은철¹, 고진환[†]

Eun Cheol Im¹, Jin Hwan Ko[†]

Abstract: Maintenance works of offshore wind turbines could take a longer time, which causes the reduction of their energy production efficiency, than those of onshore wind turbines owing to severe offshore environment. Subsequently, preventive maintenance measures are required to increase the production efficiency. Thus, we proposed a wheel-based Underwater Pole Climbing Robot (UPCR) platform, which was aimed at the periodic inspection and maintenance of the substructures of the offshore wind turbines, with three advantages: high speed, good mobility and low power consumption. In the proposed platform, a self-locking system using a gripper module was adopted for preventing slippery problem and a dual configuration was chosen for moving on a branched structure. As a result, the proposed robot was able to continuously climb, preserve its position at the pole without consuming energy, and move from the pole to the other branched pole. The results of this research show that the UPCR has basic moving capabilities required for the underwater work for the substructures of the offshore wind turbines.

Keywords: Offshore Wind Turbine, Substructure, Underwater Pole Climbing Robot, Gripper, Self-Locking, Dual Configuration

1. 서 론

최근 탄소중립 정책이 주요국의 최우선 이슈로 대두되면서 재생에너지 필요성이 더욱 부각되고 있다. 이러한 재생에너지 원 중 바람에너지를 이용한 풍력발전, 특히 에너지 부존량이 더 풍부한 해상풍력발전의 비중이 점점 확대되고 있다.

해당 설비 확대를 결정하는 중요한 요소인 에너지 비용 산정에 있어, 유지보수 업무는 중요한 기여를 하는 것으로 알려져 있다^[1]. 하지만, 해상풍력발전기는 육상풍력발전기와 달리 검사와 유지보수를 하기에 위험한 환경이며, 터빈 1대를 수리

하기 위해 많은 비용과 시간이 소모되기에 예방차원의 선제적 유지보수 조치 및 이를 위한 검사가 필요하다. 해상풍력발전기에 접근하기 위해서는 선박을 이용해야 하기에 터빈까지의 왕복시간, 부품수리를 위한 시간을 고려했을 때, 터빈의 정지 시간이 길어지게 되고 결국 에너지 생산 시간이 줄어들어 에너지 생산효율이 감소하게 되는 것이 그 이유이다.

에너지 생산효율을 높이기 위해 선제적 예방조치가 필요하지만, 사람이 직접 구조물을 검사하고 유지보수 작업을 하기에 과도 치는 영역(splashing zone)과 수중부(underwater zone)에 위치한 하부구조물로의 접근부터 위험한 수중 작업까지 많은 어려움이 존재한다.

이 때문에 본 연구에서는 현재 설치가 많이 되어있는 고정식 해상풍력발전기의 에너지 생산효율을 증가시키기 위한 하부구조물의 선제적 유지보수와 이를 위한 검사에 초점을 둔 새로운 기동등반로봇(pole climbing robot) 플랫폼을 제시하고자 한다.

기동등반로봇은 각 산업분야의 위험한 고소 환경에서 다양

Received : Feb. 25. 2022; Revised : Mar. 22. 2022; Accepted : Mar. 22. 2022

※ This research was supported by the 2022 scientific promotion program funded by Jeju National University

1. Intern Researcher, Center for Intelligent and Interactive Robotics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul, Korea (092606@kist.re.kr)

† Professor, Corresponding author: Mechanical System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea (jko@jejunu.ac.kr)

하게 적용되고 있다. 원자력발전소의 수직 혹은 경사진 파이프, 전신주의 조사 그리고 높은 굴퓏 검사나 파이프의 내부 검사 등 높은 곳에서 이루어지는 작업들은 이런 응용분야의 잘 알려진 예이다^[2].

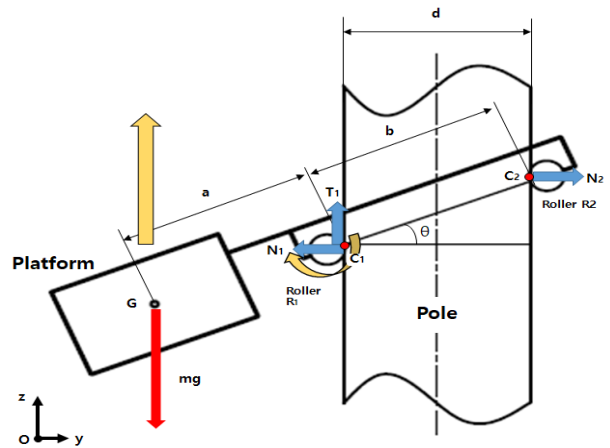
기동등반로봇의 작동 방법으로는 자기/공압 접착방식, 그리퍼(gripper) 방식, 생체 모방 방식, 액추에이터를 이용한 단계별 모션방식, 그리고 바퀴 기반의 연속적인 작동 방식이 있으며, 이러한 방식들을 이용한 병렬식 플랫폼 방식 또한 존재한다^[2-13]. 하지만 앞서 언급했던 기동등반로봇의 방식들은 기동을 오르는 간단한 작업에 적합하며 대부분 육상 작업 조건에 맞추어서 개발되었다. 따라서, 과도치는 영역과 수중에 위치하는 하부구조물의 비파괴 검사 및 유지보수와 같은 위험하면서도 복잡한 작업에 사용하기 위해서는 이러한 작업 특성에 맞는 새로운 로봇 플랫폼이 제시될 필요가 있다.

먼저 복잡하고 거대한 구조물에서의 이동성 확보가 일차적인 목표이기에 본 연구에서는 바퀴 기반의 플랫폼을 선택하였다. 개발된 기존 바퀴방식의 예시로, A. Baghani et al.^[2]은 단일 기동등반로봇 플랫폼(UT-PCR)을 제시하였으나 분기된 구조물에서의 이동에는 제약이 있다. Haite Cao^[9]은 듀얼 기동등반로봇 플랫폼을 제시하였으며 다양한 직경의 기동을 오르기에는 적합하지만, 이 역시 장애물 회피 기능에는 제약이 있다. 상기 설명한대로 바퀴 기반의 로봇은 장애물 극복 능력은 제한적이긴 하나, 전력소비가 낮으면서 높은 속도에 도달할 수 있으며 좋은 이동성을 가지고 있다^[14]. 하지만 기존의 바퀴 방식은 선 혹은 점 접지 형태로 작동하여 미끄러짐이 일어난다는 단점 때문에 드물게 사용되는 방식이다. 그리고, 해상풍력발전기의 하부구조로 많이 사용되는 자켓의 경우 나뭇가지 형태의 분기된 기동이 존재하기에 기존의 바퀴방식 플랫폼을 사용하기에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 바퀴 방식의 미끄럼 단점 극복을 위해 기존에 검증된 그리퍼(gripper) 포함 자가-잠금 시스템(self-locking system)^[15]을 채택하고 장애물 회피 기능 제한 단점의 경우 분기된 기동 구조물 이동이 가능한 기존 듀얼 형식(dual configuration)^[11]을 선택하여 융합한 새로운 플랫폼을 제안하고자 한다. 해당 플랫폼의 개발 과정에서는 먼저 단일 플랫폼을 제작한 후 실험을 통해 기능 검증하였으며 검증된 단일 플랫폼을 기반으로 듀얼 플랫폼을 제작, 실험 및 검증 하였다.

2. 제안 메커니즘(mechanism)의 기계적 구성

2.1 자가-잠금 시스템(self-locking system) 조건식

본 연구에서 제안하는 기동등반로봇 단일 플랫폼(single platform)의 기본적인 컨셉은 자가-잠금 시스템에 기반하고 있



[Fig. 1] Rolling self-locking system^[14]

다. 자가-잠금은 마찰력과 외력의 강도에 관계없이 편심된 자중에 의해 플랫폼이 기울어지면서 생기는 물리적인 현상으로, 기동등반로봇이 기동의 높은 곳에 위치해 있을 때, 에너지소비 없이도 현재의 위치를 유지할 수 있게 해주는 특징을 갖게 해주는 “시스템”이다^[15].

[Fig. 1]은 자가-잠금 시스템의 주요 용어와 구성을 보여준다. [Fig. 1]에서 G는 플랫폼의 질량중심이며, C₁과 C₂는 플랫폼과 기동 간의 접촉지점이다. 이 때의 C₁지점에서의 반력인 수직력을 N₁, 접선력을 T₁으로 표시하였으며, C₂지점에서의 반력인 수직력을 N₂로 표시하였다. 그리고 a는 G와 C₁사이의 길이, b는 C₁과 C₂사이의 거리, 그리고 θ는 플랫폼의 기울어진 각도를 의미한다. 먼저 자가-잠금 조건은 기본적인 정역학의 원리에서 도출된다. ‘식 (1)’과 ‘식 (2)’는 각각 [Fig. 1]에서 y 축과 z축의 힘 평형에 의한 식이다.

$$N_1 = N_2, \tag{1}$$

$$T_1 = mg. \tag{2}$$

‘식 (3)’은 C₁지점에서 x축 주변의 토크의 합을 나타내었고 ‘식 (4)’는 C₁지점에서 미끄러지지 않는 조건이며, 쿨롱 마찰 법칙을 기반으로 하였다.

$$mgacos(\theta) = bsin(\theta)N_2, \tag{3}$$

$$T_1 \leq \mu N_1. \tag{4}$$

‘식 (5)’는 ‘식 (2)’와 ‘식 (4)’를 통해 얻을 수 있으며, ‘식 (6)’은 ‘식 (1)’과 ‘식 (3)’을 통해 얻을 수 있다.

$$N_1 \geq mg/\mu, \tag{5}$$

$$N_1 = \frac{amg}{btan(\theta)}. \tag{6}$$

다음으로, ‘식 (5)’와 ‘식 (6)’에서 롤링(rolling) 자가-잠금 조건식인 ‘식 (7)’을 도출할 수 있다.

$$a \geq \frac{b \tan(\theta)}{\mu}, \tag{7}$$

여기서 $\theta = \arccos(\frac{d}{b})$.

‘식 (7)’은 자가-잠금이 질량에 의존하지 않고 기하학적인 구조와 마찰 특성에 의존한다는 것을 의미하고, 자가-잠금이 a 가 충분히 긴 경우 발생하며, 마찰계수(μ)가 클수록, b 가 짧을수록 그리고 기울기 각(θ)이 작을수록 잠금에 유리할 수 있음을 보여준다.

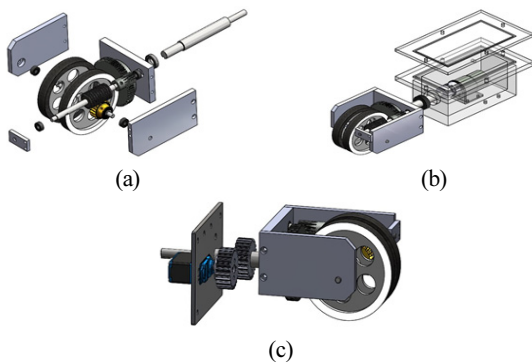
2.2 수중 기둥등반로봇(underwater pole climbing robot: UPCR) 설계

2.2.1 단일 플랫폼 설계

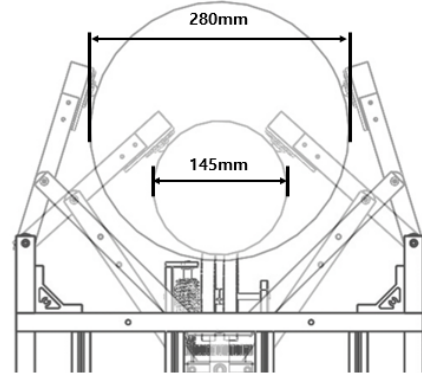
수중 기둥등반로봇의 구동부에서는 바퀴의 마찰력 증가를 고려하여 폴리우레탄 고무 재질을 선정하였으며, 구동 모터는 24VDC 기어드 모터(g geared motor)를 사용하였다. 플랫폼의 속도를 줄이고 토크를 높이기 위해 기어비를 2:1로 설정하였으며, 이를 위해 [Fig. 2(a)]와 같이 기어비 5:1의 스퍼기어와 기어비 1:10의 워털&워털기어를 사용하였다.

플랫폼이 수중에서 원활하게 작동할 수 있게 [Fig. 2(b)]의 아크릴 재질 수밀박스를 제작하여 사용했으며, 2단 립셀(lip seal)을 사용하여 축 회전 시 수밀박스 안쪽으로의 물의 침입을 방지하였다. 그리고, [Fig. 2(c)]에 나타난 바와 같이 기둥에 돌출된 장애물 회피를 위한 회전부(turret) 설계와 이를 위한 7.4 V의 방수 서보모터(servo motor)를 선정하였다.

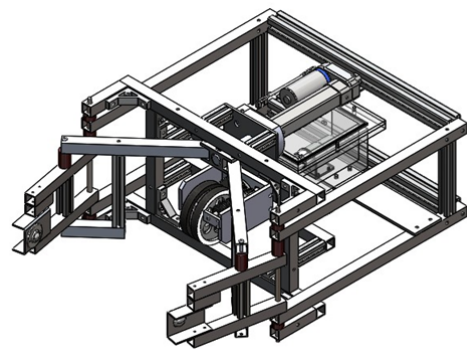
그리퍼(gripper) 모듈은 선 접지에 의한 미끄러짐이 발생하는 바퀴 기반 방식의 단점을 보완하기 위해 플랫폼에 적용되었고 그리퍼의 작동 범위는 [Fig. 3]과 같다. 그리퍼 작동을 위해 IP69k/66s 등급을 받은 500 N의 선형액추에이터를 사용했



[Fig. 2] 3D CAD of (a) driving part, (b) waterproof box, and (c) turret part



[Fig. 3] Operating range of gripper



[Fig. 4] 3D CAD of designed model

으며, 설계된 단일 플랫폼은 [Fig. 4]에 나타났다. 프레임과 그리퍼에 사용된 주요 재질은 무게와 부식성을 고려하여 알루미늄 계열인 A6063-T5과 A6N01-T5이 이용되었다.

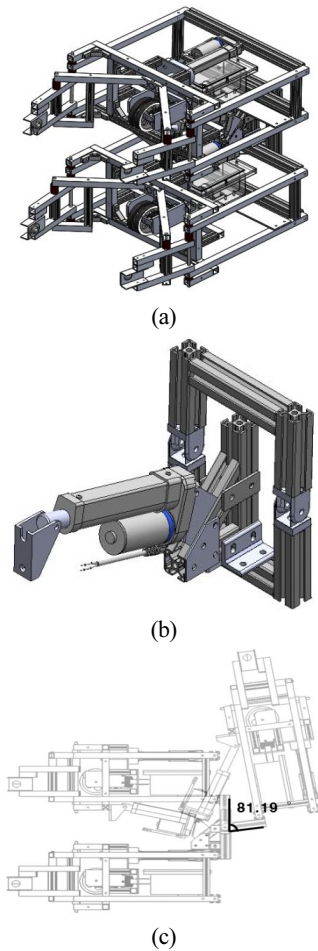
2.2.2 듀얼 플랫폼 설계

해상풍력발전기 하부구조물의 전형적인 형태인 자켓(jacket)에 신속한 작업을 위해서는 분기된 기둥으로 옮겨 이동하는 기능이 필수적이다. 이를 위해 앞서 설계한 단일 플랫폼을 기반으로 듀얼 플랫폼을 설계하였다.

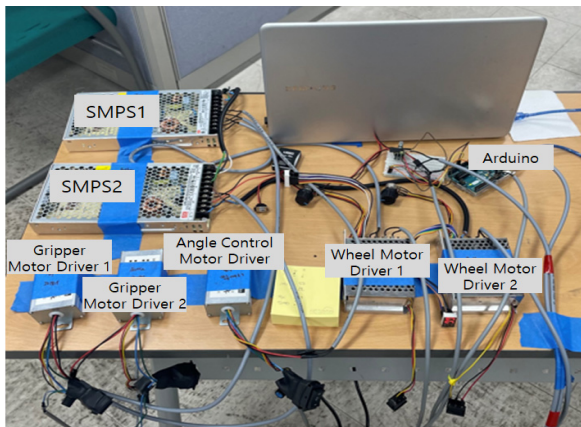
[Fig. 5]에 나타난 바와 같이 듀얼 플랫폼은 2개의 단일 플랫폼과 플랫폼 사이를 연결하면서 플랫폼간의 각도를 만들어 주는 연결링크로 구성되어 있다. 연결링크의 작동기로는 그리퍼에 사용된 선형액추에이터와 동일한 제품을 선정했고, 연결링크를 통해 듀얼 플랫폼은 플랫폼 간 최대 약 81.19°의 각도를 가질 수 있게 되었다.

2.2.3 제어부 설계

플랫폼 제어부는 [Fig. 6]과 같이 구성하였다. 플랫폼 작동에 사용된 세 개의 선형 액추에이터는 DC모터 드라이버(gripper motor driver 1, 2; angle control motor driver)에 연결된 스위치로 제어하였다.



[Fig. 5] (a) Dual platform , (b) connecting link and (c) range of operating angles between the single platforms



[Fig. 6] Configuration of the control unit

두 개의 구동모터도 출력이 표시되는 LED가 부착된 DC모터 드라이버(wheel motor driver 1, 2)를 사용하였으며 드라이버에 연결된 가변 저항(potentiometer)를 사용하여 속도를 제어하였다.

또한, 플랫폼의 구동부 회전에 사용된 서보모터는 아두이노 우노(Arduino Uno) 칩과 공개된 기본 코드로 제어했다.

3. 실험 결과

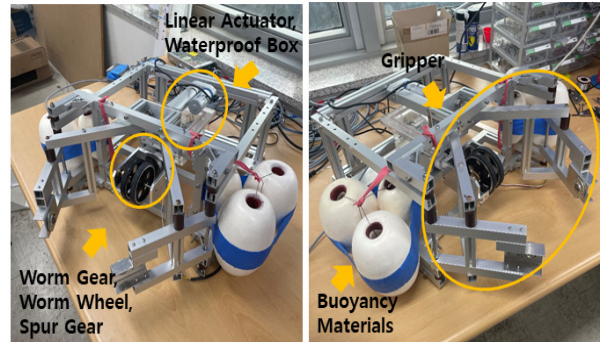
3.1 단일 플랫폼 기능 실험

제작된 수중 기동등반로봇 단일 플랫폼의 프로토타입은 [Fig. 7]에, 로봇의 특성은 [Table 1]에 나타냈다. 수중 이동성을 향상시키기 위해에서 중성 부력에 가까운 조건을 만들고자 하였고 이를 위해 5.54 kg의 부력재를 사용하였으며 최종 수중 무게 0.43 kg으로 조정하였다. 실험은 제주대학교 융합설계실험실에 있는 수조에서 진행하였으며, 실험에 사용된 기동 구조물은 [Fig. 8]과 같이 PVC 재질로 제작하였다.

먼저 [Fig. 8]에 나타낸 바와 같이 플랫폼의 컨셉으로 채택한 자가-잠금(Self-locking) 시스템 검증 실험을 진행하였다.

제작된 단일 플랫폼의 기하학적 치수는 $a = 153.03 \text{ mm}$, $b = 141.01 \text{ mm}$ 이며, 폴리우레탄 고무의 마찰계수(μ)는 0.4으로 자가-잠금 조건식 (7)을 고려했을 때, 23.5° 이상에서 자가-잠금 기능을 예상할 수 있다.

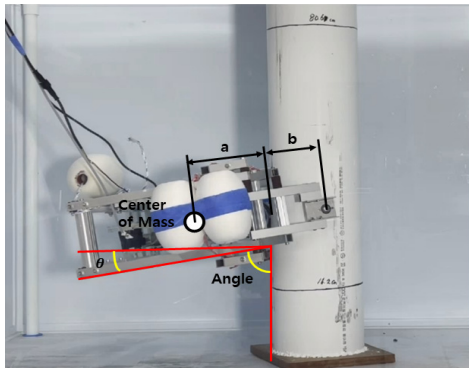
그리고 실제 진행한 자가-잠금 실험에서 전력을 끊었을 때, 기울기 각도는 약 13° 로 조건식 (7)인 $\theta \leq 23.5^\circ$ 를 만족하였으며 자가-잠금 기능이 작동함을 확인하였다.



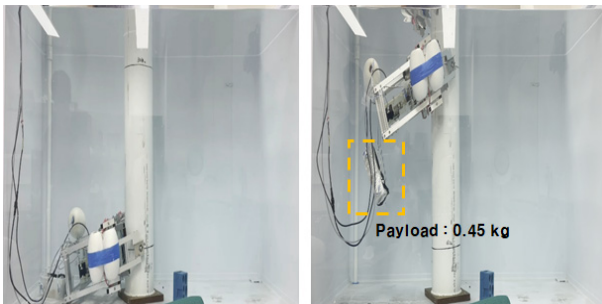
[Fig. 7] Single platform prototype

[Table 1] Main characteristics of single platform (min: gripper closed status, max: gripper open status)

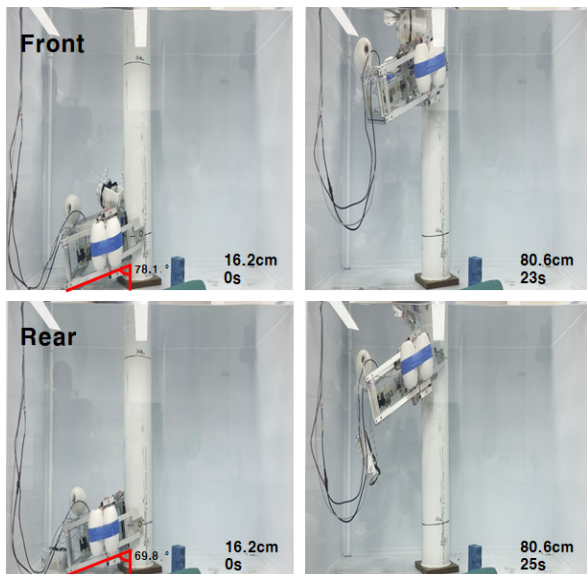
Dimension (W×H×L)	Max	620 mm×330 mm×618 mm
	Min	620 mm×330 mm×570 mm
Weight	Ground	8.85 kg
	Water	5.97 kg
Number of Motors	3 EA	
Material	A6063-T5, A6N01-T5	
Speed (No load)	5.86 mm/s	



[Fig. 8] Self-locking experiment



[Fig. 9] Maximum payload determination

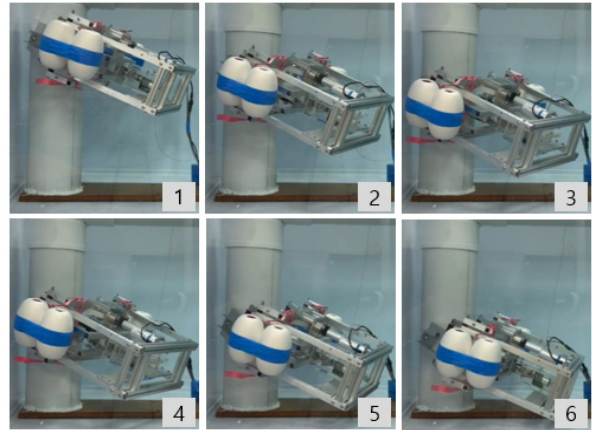


[Fig. 10] Speed change according to payload position

다음으로 단일 플랫폼이 수중에서 작동할 때의 최대 적재 하중 실험을 진행하였다. 최대 적재하중 측정 실험의 중량 부가는 분동추로 하였으며 육상무게 기준으로 100 g 단위로 무게를 측정하였다. 실험 과정은 [Fig. 9]에 나타내었고, 적재하중 무게가 0.45 kg(수중무게 기준)일 때까지 작동했으며 그 이상의 무게에서는 작동하지 않았다.

[Table 2] Comparison of speeds between front and rear position

Front location (mm/s)	28 mm/s
Rear location (mm/s)	25.76 mm/s



[Fig. 11] Single platform rotating experiment

그 이후, 상기 최대 적재하중의 위치에 따른 단일 플랫폼의 속도 비교실험을 했고, 진행과정과 결과는 [Fig. 10]에서 확인할 수 있다. [Fig. 10]과 [Table 2]에 표기한 바에 따라 적재하중 위치가 기둥에서 먼 경우에 플랫폼의 속도가 감소했음을 알 수 있다. 이는 적재하중 위치에 따른 플랫폼과 기둥이 이루는 기울기 각도가 변하면서(11.9°에서 20.2°) 플랫폼에 부가되는 수직력(Normal Force), N 이 변했기 때문으로 판단된다.

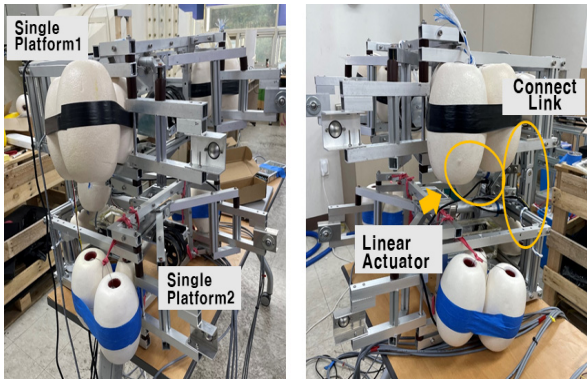
마지막으로 기둥 표면에 돌출형 장애물 회피 목적의 단일 플랫폼 회전기능 검증 실험을 진행하였다. 실험 진행과정은 [Fig. 11]에서 확인할 수 있다. 플랫폼이 기둥의 돌출형 장애물(가상)을 회피하기 위해 구동부를 시계방향으로 회전시켜 플랫폼이 이동한 것을 확인할 수 있으며(1-3), 기둥 축 방향기준의 원래 위치로 돌아가기 위해 플랫폼의 구동부를 반시계방향으로 회전 후 움직여 원래 위치로 돌아간 것을 확인할 수 있다(4-6).

이 실험 결과를 통해 기둥 표면에 돌출형 장애물을 회피하기 위한 단일 플랫폼의 작동성을 확인하였고, 단일 플랫폼의 목표 기능을 검증하였다. 또한 이 기능은 충돌 등의 돌발적인 상황에 원하지 않는 회전이 발생한 경우에 원래 위치로 환원되는 것을 가능케 한다.

3.2 듀얼 플랫폼 이동 실험

제작된 수중 기둥등반로봇 듀얼 플랫폼의 프로토타입은 [Fig. 12]에 로봇의 특성은 [Table 3]에 나타냈다.

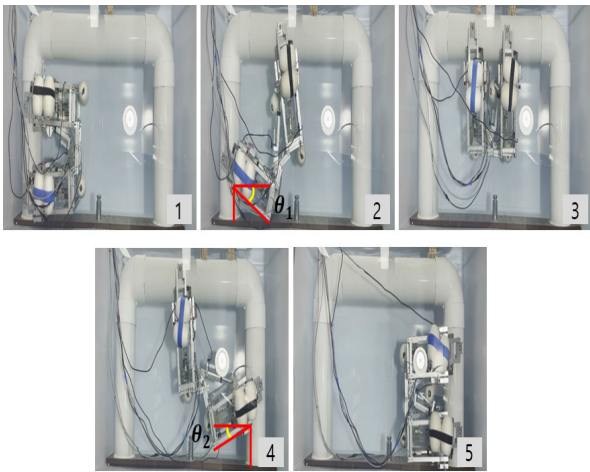
듀얼 플랫폼 역시 수중 이동성 향상을 위해 중성 부력에 가까운 조건을 만들려고 하였으며 이를 위해 14.38 kg의 부력재를



[Fig. 12] Dual platform prototype

[Table 3] Main characteristics of the dual platform

Dimension (W×H×L)	Max	620 mm×330 mm×618 mm
	Min	620 mm×330 mm×570 mm
Weight	Ground	25 kg
	Water	14.45 kg
Number of Motors	7 EA	
Material	A6063-T5, A6N01-T5, SUS304	



[Fig. 13] Functional experiment of the dual platform

[Table 4] Self-locking angle of the dual platform

θ_1	21.16°
θ_2	14.43°

사용하여 최종 수중무게 0.07 kg으로 조정하였다.

또한, 듀얼 플랫폼의 경우 연결 링크부 액추에이터의 반력을 견디기 위해 추가적인 강판을 부착했으며, 강판은 구조해석 진행 후 안전성이 확보되고 부식성이 적은 SUS304 재질로 선정하였다.

풍력발전기 하부구조물의 분기된 기둥으로 옮겨 이동할 수

있는지 확인하기 위해 [Fig. 13]과 같이 PVC 파이프로 만든 분기된 구조물로 듀얼플랫폼 기능 검증 실험을 수행하였다. 듀얼 플랫폼의 실험은 [Fig. 13]의 1-5 순서로 진행되었다.

실험 결과, 듀얼 플랫폼이 수직인 기둥을 타고 올라간 후에 수평 방향으로 분기된 기둥에 맞게 플랫폼 사이의 각도를 만들어서 분기된 기둥으로 이동할 수 있는 기능을 확인 할 수 있다. 좀 더 자세히 설명하면 [Fig. 13]의 2의 과정에서 분기된 기둥을 오르기 위해 플랫폼 사이에 각도가 형성되면서 전방 플랫폼이 수중에 떠 있게 되며 후방 플랫폼이 위로 움직이고 전방 플랫폼의 그리퍼가 열린 상태로 수평 기둥으로 이동 된다. 그리고 [Fig. 13]의 4의 과정에서 전방 플랫폼이 먼저 분리 되고, 후방 플랫폼이 오른쪽으로 움직이면서 후방 플랫폼의 그리퍼가 열린 상태로 오른편 수직 기둥으로 이동 된다.

이때, [Fig. 13]의 2, 4 과정에서 관측된 아래쪽에 위치한 플랫폼과 기둥이 이루는 각도 θ 는 [Table 4]에 나타난 바와 같이 약 21.16°와 14.43°로 자가-잠금 조건식 (7)로 얻어진 $\theta \leq 23.5^\circ$ 을 만족하였다.

4. 결 론

기동등반로봇(pole climbing robot)은 다양한 방식으로 개발되어져 왔으며 각각의 방식은 장점과 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 해상풍력발전기 하부구조물의 대형성과 복잡성을 고려하여 바퀴(wheel) 방식을 채택했으며, 이 방식의 단점인 바퀴 미끄러짐 문제의 경우 부력 조정과 함께 자가-잠금(self-locking) 시스템을 채택하여 극복하고자 하였다. 그리고 수밀성 확보를 위해 메인 구동모터는 수밀박스와 2단 립씰(lip seal)을 사용해서 방수처리했으며, 선형 액추에이터와 서보모터(servo)는 방수가 되는 제품을 사용하였다. 또한 해상풍력발전기 지지구조물의 대표적인 형식인 자켓(Jacket)이 갖는 분기된 기둥 형태에서의 이동성 확보를 위해 회전회피기능과 듀얼 플랫폼을 적용하였다.

먼저 기동등반로봇 단일 플랫폼의 프로토타입을 제작하고 단일 플랫폼의 자가-잠금 기능을 실험을 통해 검증하였다. 또한 최대 적재하중과 하중 위치에 따른 이동성도 확인하였다. 그 이후 검증된 단일 플랫폼을 기반으로 듀얼 플랫폼을 설계 및 제작 하였으며, 90도로 분기된 유사 구조에서의 실험을 통해 플랫폼의 분기된 기둥에 대한 이동 기능을 검증하였다.

본 연구에서는 기동등반로봇 중 바퀴 방식을 채택하였고 기존 방식의 단점인 미끄러짐과 제한적인 장애물 회피 성능을 그리퍼(gripper) 포함 자가 구속(self-locking) 시스템과 듀얼 플랫폼 구조를 융합하여 보완하였으며, 수중이라는 특수한 환경에서 바퀴 방식이 충분히 활용될 수 있음을 확인하였다. 또한 기존에 바퀴방식 기동등반로봇들과 다르게 분기된 기둥으로

의 이동 능력을 확인하였다. 추후에는 개발된 듀얼 플랫폼에 유지보수를 위한 매니플레이터를 추가하고자 하며, 가변저항을 조정하던 방식에서 알고리즘을 이용하는 모터 제어 방식으로 변경할 예정이다.

References

- [1] M. E. Kim and K. S. Lee, "Offshore Wind Power Technology Status and Prospect," *The Society of Naval Architects of Korea*, vol. 48, no. 3, pp. 44-50, September, 2011, [Online], <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO201106654856328&dbt=NART>.
- [2] A. Baghani, M. N. Ahmadabadi, and A. Harati, "Kinematics Modeling of a Wheel-Based Pole Climbing Robot (UT-PCR)," *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570423.
- [3] M. A. Rashed, M. Kimball, L. Vega, D. Vera, J. Soler, M. Correa, A. Garcia, G. S. Virk, and T. P. Sattar, "Climbing Robots for NDT Applications," *Human-Centric Robotics*, August, 2017, DOI: 10.1142/9789813231047_0036.
- [4] S. Panich, "Development of a Wall Climbing Robot," *Journal of Computer Science*, vol. 6, no. 10, pp. 1185-1188, October, 2010, DOI: 10.3844/jcssp.2010.1185.1188.
- [5] O. Reinoso, R. Aracil, and R. Saltaren "Using Parallel Platforms as Climbing Robots," *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*, pp. 663-676, December, 2006, DOI: 10.5772/4922.
- [6] K. R. Asfar, "Palm Tree Climbing Robot," *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 220-224, June, 2016, DOI: 10.18178/joace.4.3.220-224.
- [7] A. Bekhit, "Parallel Platform-Based Robot for Operation in Active Water Pipes," Ph.D. dissertation, The University of Leeds School of Mechanical Engineering, West Yorkshire, England, 2015, [Online], <https://etheses.whiterose.ac.uk/12674/>.
- [8] M. Almonacid, R. J. Saltarén, R. Aracil, and O. Reinoso, "Motion Planning of a Climbing Parallel Robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 3, pp. 485-489, June, 2003, DOI: 10.1109/TRA.2003.810238.
- [9] H. Gao, "Wheel Based Pole Climbing Structure Built for Replacing Manpower in Hazardous Environments and Creating a Platform for Telegraph Pole Deicing and Reconstruction," *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1549, June, 2020, DOI: 10.1088/1742-6596/1549/5/052017.
- [10] T. P. Sattar, H. León-Rodríguez, J. Shang, S. Mondal, S. Chen, B. Bridge, and Z. Zhao, "Mobile Wall Climbing and Swimming Robots to Inspect Aircraft, Storage Tank, Pressure Vessels and Large Infrastructure," *24th ISPE International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of Future*, Koriyama, Japan, 2008, [Online], <https://openresearch.lsbu.ac.uk/item/87q84>.
- [11] M. Tavakoli, M. R. Zakerzadeh, G. R. Vossoughi, and S. Bagheri, "A Hybrid Pole Climbing and Manipulating Robot with Minimum DOFs for Construction and Service applications," *Industrial Robot*, vol. 32, no. 2, pp. 171-178, April, 2005, DOI: 10.1108/01439910510582309.
- [12] M. Osswald and F. Iida, "Design and Control of a Climbing Robot based on Hot melt adhesion," *Robotics and Autonomous System*, vol. 61, no. 6, pp. 616-625, June, 2013, DOI: 10.1016/j.robot.2013.02.004.
- [13] T. L. Lam and Y. Xu, "A Flexible Tree Climbing Robot: Treebot - Design and Implementation," *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011, DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979833.
- [14] J. L. Guo, L. Justham, M. Jackson, and R. Parkin, "A Concept Selection Method for Designing Climbing Robots," *Key Engineering Materials*, vol. 649, pp. 22-29, June, 2015, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.649.22.
- [15] J.-C. Fauroux and J. Morillon, "Design of A Climbing Robot for Cylindro-Conic Poles based on Rolling self-Locking," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 37, no. 3, pp. 287-292, May, 2010, DOI: 10.1108/01439911011037695.



임은철

2020 제주대학교 기계공학과(학사)
2022 제주대학교 기계공학과(석사)

관심분야: 매니플레이터, 휴머노이드, 다관절 로봇



고진환

1995 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
1997 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
2004 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
2009.5~2011.3 서울대학교 BK조교수
2011.4~2015.2 한국해양과학기술원
선임연구원
2015.3~2017.8 한국해양과학기술원
책임연구원
2017.9~현재 제주대학교 교수

관심분야: 수중로봇, 해양발전, 시스템 해석 및 설계