



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

해상구조물 유지보수용 수중  
기동등반로봇에 관한 실험적 연구

제주대학교 대학원

에너지응용시스템학부 기계공학전공

임 은 철

2022 년 2 월

# 해상구조물 유지보수용 수중 기동등반로봇에 관한 실험적 연구

지도교수 고 진 환

임 은 철

이 논문을 기계공학 석사학위 논문으로 제출함

2021 년 11 월

임은철의 기계공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 \_\_\_\_\_ 정 지 현 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ 고 진 환 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ 장 인 성 \_\_\_\_\_ (인)

제주대학교 대학원

2021 년 11 월

# Experimental Study on A Underwater Pole Climb Robot for Maintenance of Offshore Structures

Eun-Cheol Im

(Supervised by professor Jin Hwan Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Master of Science

2021. 11.

This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director, Ji Hyeon Jung, Prof. of Mechanical Engineering

.....  
Thesis director, Jin Hwan Ko, Prof. of Mechanical Engineering

.....  
Thesis director, In Sung Jang, Director, of KIOST

.....  
Date

Department of Mechanical Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# TABLE OF CONTENTS

I. 서론	2
1-1. 기동등반로봇	2
1-2. 해상풍력발전기 자켓 구조물	3
1-3. 수중 기동등반로봇	4
II. 컨셉	6
2-1. 실험 장치	9
2-1-1. 단일 플랫폼 실험장치	9
2-1-2. 듀얼 플랫폼 실험장치	9
2-2. 수중 기동등반로봇 단일 플랫폼 모델링	10
2-2-1. 구동부	11
2-2-2. 구동부 회전 장치	12
2-2-3. 그리퍼 모듈	13
2-3. 수중 기동등반로봇 듀얼 플랫폼 모델링	14
2-4. 모터 제어	16
2-5. 실험 계획 및 방법	17
2-5-1. 단일 플랫폼 기능평가	17
2-5-2. 듀얼 플랫폼 기능평가	19
III. 결과 및 토의	21
3-1. 단일 플랫폼 평가 결과	21
3-2. 듀얼 플랫폼 평가 결과	27
IV. 결론	30
V. 참고 문헌	32
초    록	35

# Abstract

The reduction of the energy production efficiency of offshore wind turbines can be caused by long shutdown period, which occurs when repair works take a longer time as compared to onshore wind turbines. Therefore, preventive maintenance measures are required to increase the production efficiency. Thus, we proposed a wheel-based Underwater Pole Climbing Robot (UPCR) platform with three advantages: high speed, good mobility and low power consumption, which was aimed at the inspection and maintenance of the substructures of the offshore wind turbines. Structurally, a self-locking system was adopted to the platform using a gripper module. As a result, the robot was able to continuously climb, and maintained its position on the pole without consuming energy. The results of this research show that the UPCR has basic capabilities required for the underwater work.

**key words: underwater robot, pole climb robot, waterproof, gripper motion, dual platform, link module**

# I. 서론

## 1-1. 기둥등반로봇

기둥등반로봇 (Pole Climbing Robots: PCR)은 산업분야와 위험한 환경에서 다양하게 적용되고 있다. 원자력발전소의 수직 혹은 경사진 파이프, 전신주의 조사 그리고 높은 굴뚝 검사나 파이프의 내부의 검사 등 높은 곳에서 이루어지는 작업들은 이런 응용분야의 잘 알려진 예이다.[1]



Fig. 1. 작동 방식이 다른 기둥등반로봇 예시

기둥등반로봇의 작동 방법으로는 자기식, 공압식 접착, 그리퍼와 자연에서 영감을 얻은 방식(생체 모방) 그리고 액추에이터를 이용한 단계별 모션 방식 [3][4][15], 바퀴 기반의 연속적인 작동방식[1][2][5][12][13][14]이 있고, 이런 방식들을 이용한 병렬식 플랫폼[6],[7],[8],[9][12][14]방식 또한 존재한다.

하지만 위에서 언급했던 기둥등반로봇은 기둥을 오르는 간단한 작업에 적합한 모델이다. 따라서 기둥의 비파괴 검사 및 유지보수와 같은 복잡한 작업에 기둥등반로봇을 사용하기 위해서는 이러한 작업 특성에 맞는 새로운 로봇 플랫폼 모델이 제시될 필요가 있다.

## 1-2. 해상풍력발전기 자켓 구조물

최근 탄소중립 정책들이 주요국의 최우선 이슈로 대두되면서 재생에너지가 더욱 각광받고 있으며 그 중 바람에너지를 이용한 풍력발전, 특히 에너지 부존량이 더 풍부한 해상풍력발전이 큰 비중을 차지하고 있다. 해상풍력발전의 종류는 설치하고자 하는 위치의 수심에 따라 크게 고정식과 부유식으로 분류한다. 얕은수심 중에서 비교적 깊은 20~60m의 수심에서는 모노파일, 중력식, 트라이포드, 자켓(jacket)의 고정식 하부구조물 형식을 보이며, 그 이상의 깊은 수심에서 고정식 하부구조물 형태의 해상풍력발전기를 사용하기에는 하부구조물의 건설비용이 급격하게 증가하기 때문에 수심 60m이상의 위치에서는 부유식 해상풍력발전기를 사용한다. 현재 설치되어있는 기존의 해상풍력발전기 중 많은 비중을 차지하고 있는 것이 고정식 풍력발전기이며 깊은 수심으로 갈수록 설치환경에서 여러 외력을 버텨내야하기에 단순한 형태의 모노파일 구조에서 복잡한 형태의 자켓, 트라이포드 형태의 구조물을 사용한다. 형태가 복잡해 질수록 안정적이나, 조립비용이 많이 요구되고 무거우며, 트라이포드의 경우 피로수명에 취약하다는 단점이 있다.[18] 그리고 바다아래라는 환경이 원인이 된 부식, 오염, 그리고 생물오염과 같은 문제가 하부구조물에서 많이 나타난다.

풍력발전기의 작동 및 유지보수는 발전기의 에너지 비용에 중요한 기여를 한다.[19] 해상풍력발전기는 육상풍력발전기 대비 검사와 유지보수를 하기에 위험한 환경이고, 터빈 1대 수리하기 위해 많은 돈과 시간이 소모가 되기에 예방차원의 선제적 유지보수 조치 및 이를 위한 검사가 필요하다. 해상풍력발전기에 접근하기 위해서는 이동수단으로 배를 이용해야하기에 터빈까지의 왕복시간, 부품수리를 위한 터빈의 정지시간을 고려했을 때, 터빈의 정지 시간이 길어지게 되고 결국 에너지 생산 시간이 줄어들어 에너지 생산 효율이 감소하게 되는 것이 그 이유이다.

하지만 사람이 직접 검사하고 유지보수 작업을 하기에는 발전기 하부구조물까지의 접근성, 그리고 위험한 작업환경 등 많은 어려움이 존재한다.



Fig. 2. 해상풍력발전기의 자켓구조[16]

이 때문에 본 연구에서는 기존에 설치가 많이 되어있는 고정식 해상풍력터빈의 에너지 생산 효율을 증가시키기 위한 하부 구조물(자켓구조)의 예방차원의 유지보수와 이를 위한 검사에 초점을 둔 새로운 로봇 플랫폼을 제시하고자 한다.

### 1-3. 수중 기둥등반로봇

현재 수중에서 물체의 검사 및 유지보수를 하는 로봇은 보통 자기 접착식 방법과 스러스터(thruster)를 이용한 2가지 방식을 사용한다. 자기 접착식 방법은 빠르고, 강한 접착력 그리고 신뢰할만한 이동성을 갖지만, 오직 강자성 표면에만 사용가능하며 에너지 효율이 좋지 않다[10]. 스러스터 방식 역시 장시간 수중에서의 물체의 검사 및 유지보수 작업에 적합하지 않다.

그래서 이 연구에서 바퀴 기반의 그리퍼 기능을 탑재한 수중 기둥등반로봇(Underwater Pole Climb Robot: UPCR)을 제시하고자 한다.

현재 수중에서의 바퀴 기반 방식의 등반로봇 플랫폼은 흔하지 않다. 바퀴 기반 방식의 구동 방법은 면이 아닌 선 접지이며, 미끄러짐이 일어난다는 단점 때문이다.

하지만 바퀴 기반의 방식은 빠른 속도, 좋은 이동성, 저전력 소비라는 장점을 갖고 있다[9]. 그러나 자켓 구조에서는 나뭇가지 형태의 장애물 구조가 존재하기에, 기존에 있는 바퀴 기반 방식을 사용하기에 어려움이 있다. 그래서 본 연구에서는 듀얼 플랫폼(Dual Platform)의 구조를 택했고, 채택한 듀얼 플랫폼의 구조로 나뭇가지 형태의 장애물 극복이 가능할 것으로 예상된다.

다음으로 주목한 것은 선 접지 형태의 구동 방식에 따른 미끄럼 문제이다. 이는 그리퍼 기능과 부력을 이용 방식으로 접근했다. 첫째로, 그리퍼 기능으로 1점 지지(점, 선 접지)의 바퀴를 3점 지지 형태로 바꿔주었고, 그로 인한 3점 지지의 접착력으로 1점 접지 문제를 해결하고자 한다. 둘째로는, 수중에서 작업하는 로봇이기에 부력을 조절하는 방식으로 부력재를 수중등반로봇에 부착하여 로봇의 무게를 조절하고 바퀴의 미끄럼을 방지하고자 한다. 또한, 기존에 연구된 기동등반로봇 중에서 검증됐던 자가-잠금(Self-locking) 모델[11]을 채택하여 전력이 끊겼을 때, 수중등반로봇은 움직이지 않고 제자리에 위치해 있을 수 있도록 하였다. 최근에 개발된 자켓 유지보수용 로봇인 자켓 무한궤도 로봇(Jacket Crawler Robot)은 휠 타입-그리퍼 방식 기반의 로봇으로써, 위험한 작업공간에서 사람이 하는 작업을 대체하기 위해 개발된 로봇이며, 주된 업무는 자켓의 표면을 청소하고 자켓 구조의 부식성을 검사하며 결점이 있는 부분은 제거한다.[21] 이 로봇은 자켓구조에서 장애물 있어도 휠에 360도 회전기능이 있어서 회피가 가능하다. 하지만 나뭇가지 형태의 장애물에는 사용할 수 없는 한계가 있다.

본 연구에서는 수중에서 작업하는 것을 목적으로 바퀴-그리퍼 방식의 듀얼 플랫폼을 가진 메커니즘을 설계하기 위해, 필요한 단일 플랫폼(Single Platform)을 개발하고 제작한 프로토타입의 기능을 테스트하며 나온 결과를 가지고 성능을 평가한 후 듀얼 플랫폼(dual platform)의 개념설계를 진행해 검증해보고자 한다.

## II. 컨셉

단일 플랫폼(Single-Platform) 모델의 기본적인 컨셉은 자가-잠금(Self-Locking)에 기반한 형태이다. 자가-잠금은 마찰력과 외력의 강도에 관계없이 생기는 물리적인 현상으로, 기둥등반로봇이 기둥의 높은 곳에 위치해 있을 때, 에너지소비 없이도 현재의 위치를 유지할 수 있게 해주는 특징을 갖게 해주는 “시스템”이다.[11]

전력이 끊긴 위급 상황 시, 로봇의 위치를 유지 시켜주는 이 시스템은 자켓구조에서 요구되는 작업을 할 때, 필요한 기능이라고 판단되어 이 모델을 벤치마킹했다.

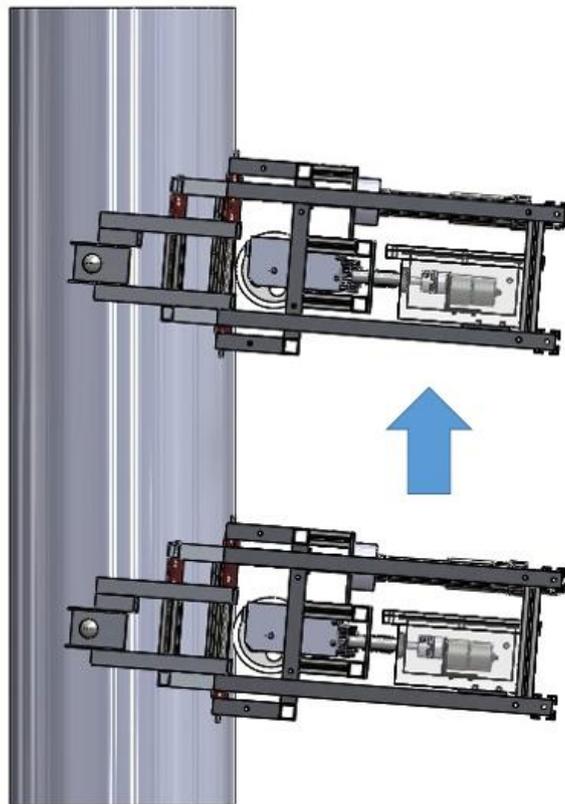


Fig. 3. 기둥을 오르는 기둥등반로봇

Fig. 3에 기둥을 오르는 기둥등반로봇의 작동 개념을 나타내었으며 자가-잠금의 원리는 다음과 같다. Fig. 4에서 로봇의 질량중심(center of gravity: CG)를 로봇의 측면으로 이동시켜 롤러 R<sub>1</sub>이 작동을 중지했을 때, 로봇은 제자리에 멈춰 있는 채 위치를 유지한다. Fig. 4에서 접촉지점인 C<sub>1</sub>, R<sub>1</sub>은 기둥으로부터 생기는 반력인 수직력 N<sub>1</sub>과 접선력 T<sub>1</sub>을 플랫폼으로 전달한다. 반면에, 다른 접촉지점인 C<sub>2</sub>, R<sub>2</sub>에서는 수직력 N<sub>2</sub>만 존재한다. a는 돌출부 거리 GC<sub>1</sub>을 의미하며, b는 접촉지점간 거리 C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>, d는 기둥의 직경,  $\theta$ 는 플랫폼의 기울어진 각도를 의미한다. 이 연구에서 R<sub>1</sub>은 구동부 바퀴, R<sub>2</sub>는 플랫폼을 지지하는 보조 바퀴로 정하고 설계를 진행하였다.

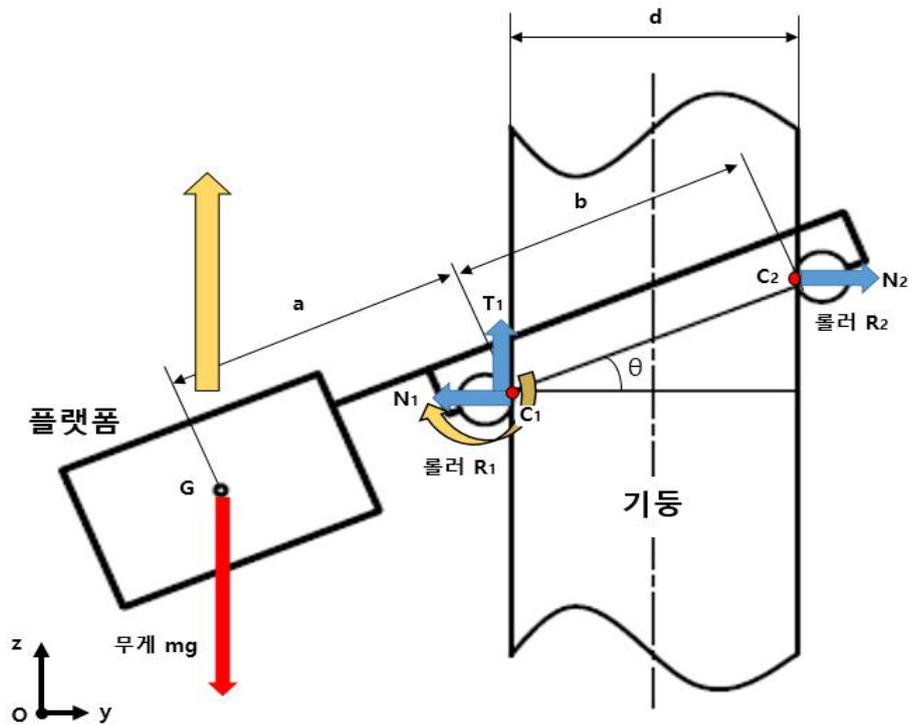


Fig. 4. 롤링 자가-잠금 시스템[11]

자가-잠금 조건은 기본적인 정역학의 원리에서 도출된다. 식 (1),(2)는 각각 Fig. 4에서 y축, z축의 힘의 평형에 의한 식이다.

$$N_1 = N_2 \quad (1)$$

$$T_1 = mg \quad (2)$$

식 (3)은 C1 지점에서 x축 주변의 토크의 합을 나타내며, 식 (4)는 C1 지점에서 미끄러지지 않는 조건이며, 쿨롱 마찰법칙을 기반으로 하였다.

$$mg \cos(\theta) = b \sin(\theta) N_2$$

(3)

$$T_1 \leq \mu N_1 \quad (4)$$

식 (5)는 식 (2),(4)를 통해 얻을 수 있으며,

$$N_1 \geq mg/\mu \quad (5)$$

식 (6)은 식 (1),(3)을 통해 얻을 수 있다.

$$N_1 = \frac{amg}{b \tan(\theta)} \quad (6)$$

따라서, 식 (5),(6)에서 롤링 자가-잠금 조건인 식 (7)을 알 수 있다.

$$a \geq \frac{b \tan(\theta)}{\mu}, \theta = \arccos\left(\frac{d}{b}\right)$$

(7)

식 (7)은 질량에 의존하지 않고 기하학적인 구조와 마찰 특성에 의존한다는 것을 나타낸다. 식 (7)은 자가-잠금은  $a$ 가 충분히 긴 경우 발생하며, 마찰값( $\mu$ )이 높을수록  $a$ 길이가 짧아져도 잠금이 유지될 수 있음을 보여준다. 또한 ( $\theta$ )가 감소하면  $a$ 길이가 짧아져도 잠금이 유지될 수 있는데 이는 각도( $\theta$ )가 감소할 때 법선력이 증가하기 때문이다.[11]

## 2-1. 실험 장치

### 2-1-1. 단일 플랫폼 실험장치

본 실험에서는 제주대학교 기계공학전공 융합기계설계 실험실에서 보유한 2000 x 1000 x 1000(mm) 크기의 수조를 사용하였으며, 수조의 높이를 기준으로 하여 높이 1000mm, 직경 200mm의 PVC관을 채택하여 실험장치를 구성하였다.

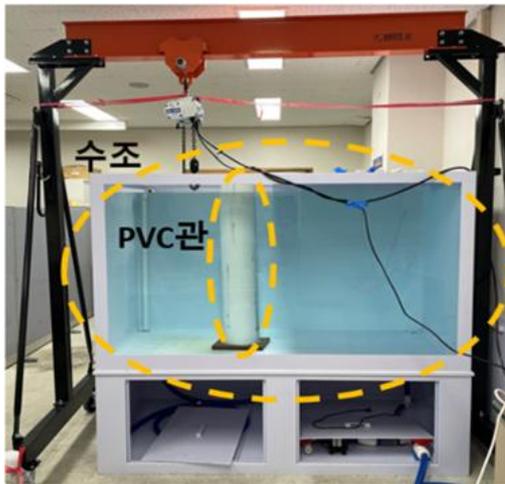


Fig. 5. 단일 플랫폼 실험 장치

	수조	PVC관
가로	2000 mm	직경 200 mm
세로	1000 mm	
높이	1000 mm	1000 mm

Table 1. 실험장치 치수

### 2-1-2. 듀얼 플랫폼 실험장치

실험실의 수조 조건을 고려하였을 때, 듀얼 플랫폼 실험을 진행하기 위해 직경 216mm, 길이 700mm PVC관 2개와 동일 직경의 길이 1500mm의 PVC관 1개를 사용하였으며 90도 조인트로 각 PVC관을 연결하여 Fig. 6와 같이 □형태의 구조물을 구성하였다. 이는 듀얼 플랫폼 장애물 회피 기능을 검증하기 위한 실험 목적의 장치이다.

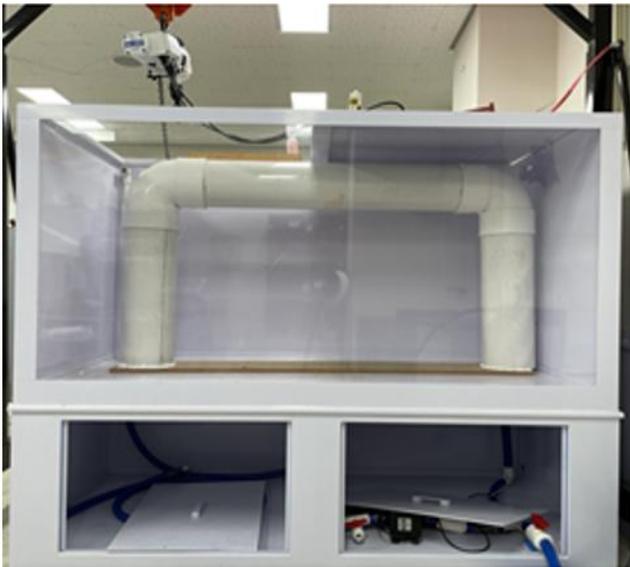


Fig. 6. 듀얼 플랫폼 실험 장치

	구조물
폭	1730 mm
높이	950 mm

Table 2. 구조물 치수

## 2-2. 수중 기동등반로봇 단일 플랫폼 모델링

수중 기동등반로봇은 크게 3개의 메인파트로 구성되어 있고 수중환경에서 작동 실험을 해야 하기 때문에 방수 여부가 중요하다. 3개의 메인파트는 구동부과 터렛축 그리고 그리퍼(gripper) 모듈이며 이 3개의 파트 모두 모터가 사용되므로 방수를 고려해야 한다. 이 제안된 모델은 그리퍼 모듈을 사용하고 있어, 기동을 따라 올라갈 때에 원뿔형태의 기동처럼 직경이 변하는 기동도 올라가는 것이 가능하다.

기동등반로봇의 경우 무게는 매우 중요한 고려사항이다. 그래서 로봇의 설계에서 무게 최적화와 수중에서도 원활한 작동을 위한 재료의 내식성을 고려하였다.

상용품을 제외한 로봇의 부품은 기계적 성질을 고려하여 중량대비 중간정도의 강도를 갖고 비교적 내식성이 좋은 A6xxx시리즈의 A6063S-T5, A6N01SS-T5 알루미늄으로 설계 및 제조되었다. A6xxx시리즈는 Al-Mg-Si 합금계로 내식성이 좋으며 A6063S-T5의 항복강도는 약 110MPa, A6N01SS-T5의 항복강도는 약 200MPa이다.[17] 설계된 단일 플랫폼의 CAD 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

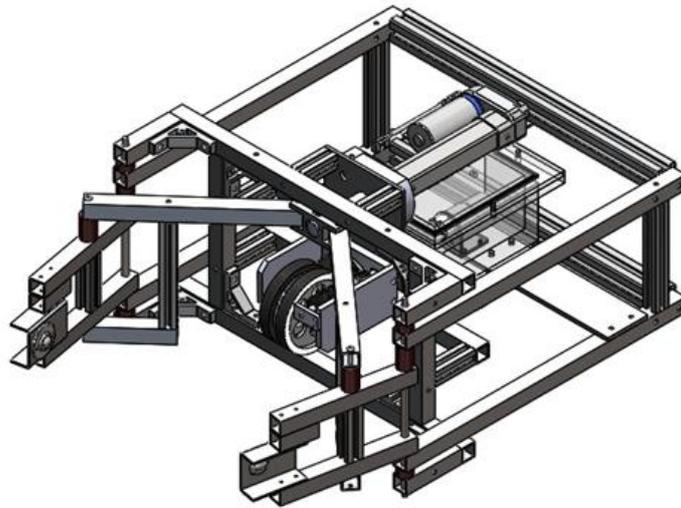


Fig. 7. 수중 기동등반로봇 단일 플랫폼

#### 2-2-1. 구동부

구동부에서는 바퀴의 마찰을 고려하여 고무 재질을 선정하였고, 직경 95mm, 폭 14mm의 휠을 사용했다. 모터는 정격토크 4.4Kgf.cm, 정격회전수 20RPM의 24VDC 기어드모터를 사용하였고, 전체 기어비를 2:1로 하여 바퀴의 속도를 줄이고 토크를 키웠다. 또한, 장애물 회피를 위한 구동부의 회전도 고려하였으며, 이를 위해 기어비 5:1의 스퍼기어와 기어비 1:10의 웜기어, 웜휠을 사용하였다. 그리고 수중에서의 원활한 작동에 중요한 요소인 모터 방수를 위해 80 x 180 x 75 (mm) 크기 아크릴 재질의 수밀박스를 제작하였고, 축 회전 시 박스 안쪽에서의 물의 침입을 방지하기 위해 2단립셀(lip seal)을 사용하였다. 구동부의 구성은 Fig. 8과 같다.

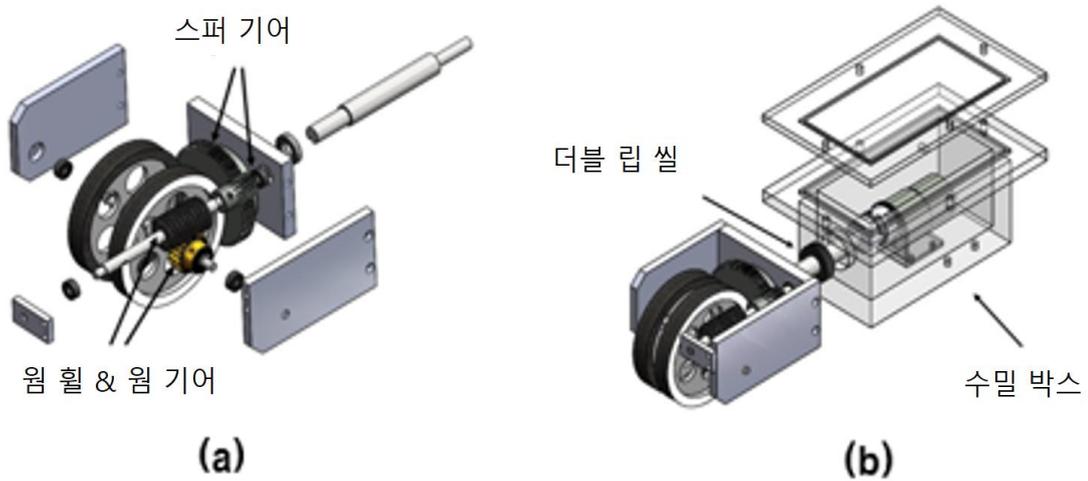


Fig. 8. 구동부 구성도 (a), 수밀박스 구성도 (b)

### 2-2-2. 구동부 회전장치

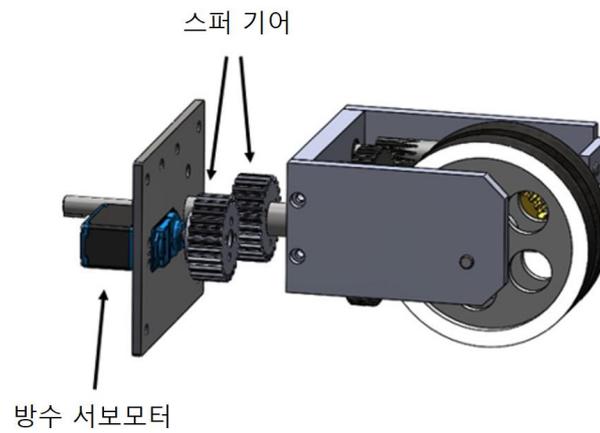


Fig. 9. 서보모터와 기어

구동부 회전장치는 실제 발전시스템 하부구조물에 있는 돌출형 장애물을 회피하기 위한 목적의 기능이다. 이를 위해 HIGHEST사의 C900W 방수 서보 모터 (Waterproof Servo Motor) 7.4V를 사용하였다. 7.4V일 때, 정격전압은 40.2Kg.cm, 속도는 0.09sec/60degree 이다. 모터의 제어는 Arduino Uno를 사용하였으며, 모터사양에 맞는 전압을 모터에 공급하여 모터의 원활한 출력을 얻기 위해 기존에 사용하던 전력변환기(SMPS)에 HOBBYWING의 UBEC-10A(2-66S)

를 연결하여 출력 전압을 6V에서 7.4V로 승압시킨 후 사용하였다.

### 2-2-3. 그립퍼(gripper) 모듈

그립퍼의 한쪽 끝에 볼 롤러를 부착하였다. 기둥에 부착해서 올라가는 수중 기둥등반로봇은 구동 바퀴에 의해서 기둥을 오르게 되는데, 그립퍼 끝단에 볼 롤러를 부착하여 2개의 추가적인 지지점을 만들어주는 동시에 휠 메커니즘을 이용하여 로봇의 기동성을 좋게 제작했다. 그립퍼는 1개의 리니어 액추에이터에 의해서 작동된다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 작동하는 그립퍼 모듈의 사양은 실험 구조의 직경 145mm를 최소 기준으로 했을 때 최대 직경 280mm 크기의 기둥을 집을 수 있다.

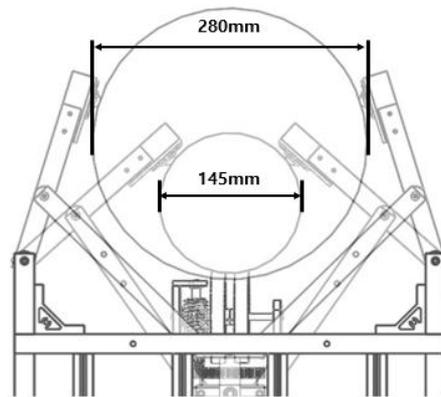


Fig. 10. 그립퍼 작동 범위

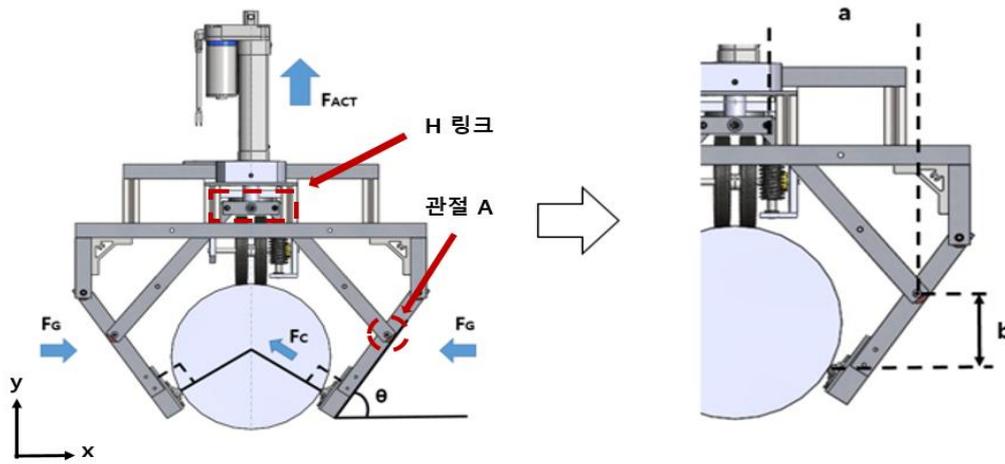


Fig. 11. 그립퍼 메커니즘

Fig. 11에서는 그립퍼 메커니즘을 보여준다. 관절A와 H링크의 접점까지의 거리를 a, 관절A와 기둥 파지점까지의 수직거리를 b라고 하였으며, 플랫폼의 팔과 기둥이 접했을 때, 팔과 x축이 이루는 각도를 접촉각( $\theta$ ), 접촉력을  $F_c$ , 파지력을  $F_G$ , 선형 액추에이터가 작용하는 힘을  $F_{ACT}$ 라고 하였다. 선형 액추에이터는 최대 500N의 힘이 작용되며, 액추에이터에 의한 그립퍼의 토크 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_{ACT} &= 2\left(\frac{b}{a}\right)F_G \\
 &= 2\left(\frac{b}{a}\right)F_C \sin\theta
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

이 식을 통해서 그립퍼의 악력(N)을 구할 수 있다[17]. 식을 통해 구한 그립퍼의 악력은 약 399.51N이다. 리니어 액추에이터의 경우 방수등급 IP69k/66s등급을 받은 (주)엘투에스사의 CAHB-10 제품을 사용하였다.

### 2-3. 수중 기둥등반로봇 듀얼 플랫폼 모델링

이 연구에서 주목적으로 하는 실제 해상풍력발전기 하부구조물에 있는 가지형태의 장애물을 회피 혹은 극복하고 기둥을 오르는 플랫폼을 설계하기 위해 기존에 입증한 수중 기둥등반로봇 단일 플랫폼을 활용했다. 가지형태의 장애물을 극복하기 위해서 2개의 단일 플랫폼을 링크로 연결해 듀얼 플랫폼 형태를 고안해냈다. 듀얼 플랫폼의 모델링은 Fig. 12.(a)와 같다.

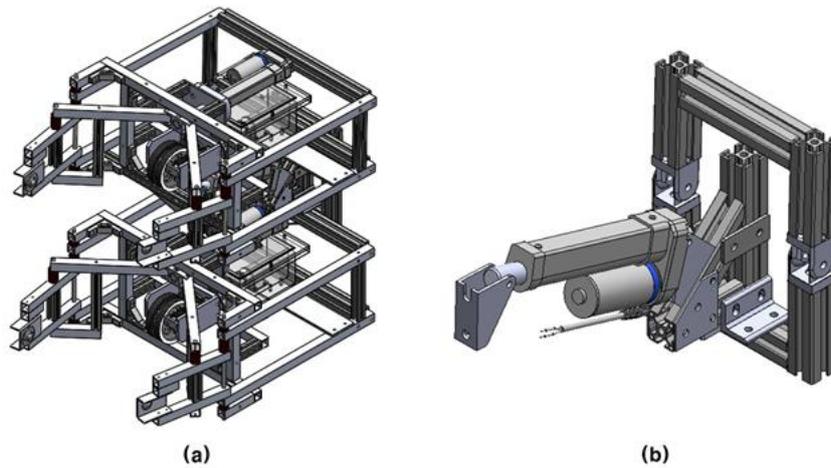


Fig. 12. 수중 기둥등반로봇 듀얼 플랫폼 (a), 연결 링크 (b)

듀얼 플랫폼은 기존 단일 플랫폼의 그리퍼 모듈과 구동바퀴의 회전기능을 지니고 있다. 플랫폼간 연결은 Fig. 12.(b)인 연결링크로 하였다. 연결링크는 꺾여있는 가지형태의 장애물을 극복하기 위해 듀얼 플랫폼이 각도를 가질 수 있도록 힌지형태로 설계하였으며, 단일 플랫폼 모델에서도 사용했던 (주)엘투에스사의 CAHB-10 제품을 이용하여 듀얼 플랫폼 위,아래 플랫폼간의 각도를 갖도록 했다. Fig. 13에서 볼 수 있듯, 듀얼 플랫폼은 최대 81.19도를 갖는다.

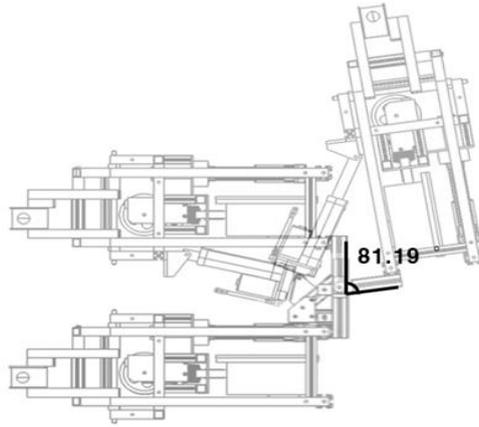


Fig 13 수중 기동등반 로봇의 작동 각도 범위

#### 2-4. 모터 제어

그리퍼와 듀얼 플랫폼에서 플랫폼 간 각도 제어를 위해 사용된 3개의 선형 액추에이터는 DC모터 드라이버에 부착된 가변저항기의 저항을 사람이 직접 조절하는 방식을 택했으며, 2개의 메인 모터 24VDC 기어드모터 역시 같은 DC모터 드라이버를 사용하여 모터의 속도를 제어했다. 메인 모터가 같은 속도로 움직이는지 확인하기 위해 속도 출력을 볼 수 있는 LED가 부착된 모터 드라이버를 사용했다.

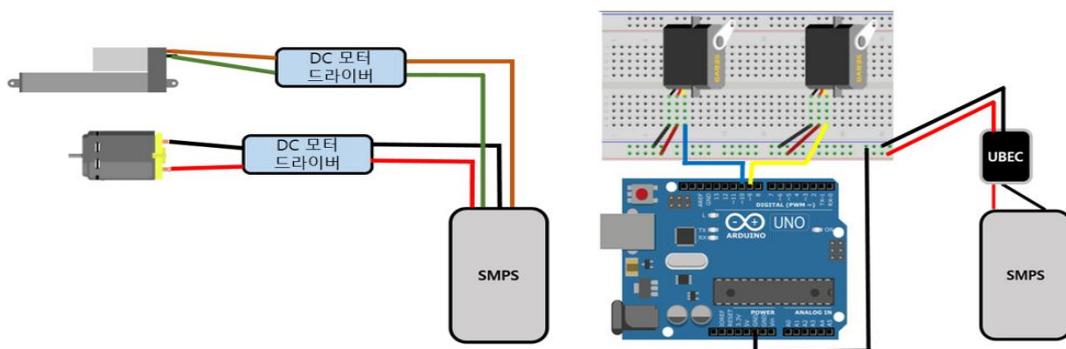


Fig. 14. 전장 구성 개략도

구동부 회전에 사용된 2개의 방수 서보모터도 마찬가지로 가변저항을 사용하였다. 가변저항의 저항값을 아두이노 신호로 받아 서보모터의 현재 각도를 확인하였다. Fig. 14와 같이 한 개의 아두이노에 병렬로 연결하여 2개의 서보모터가 같은 각도로 움직이게 하였다.

## 2-5. 실험 계획 및 방법

### 2-5-1. 단일 플랫폼 기능 평가

단일 플랫폼의 개념을 검증하기 위해서 자가-잠금 기능을 검증하고자 한다. 그 다음 기둥등반로봇에서 주의깊게 봐야 할 특성인 최대 적재하중과 적재하중 위치에 따른 속도변화 실험, 기둥에 붙어있는 돌출된 장애물을 회피하기 위한 플랫폼 회전기능 검증 실험을 통해 플랫폼의 기능들을 검증하고자 한다.



Fig. 15. 자가-잠금

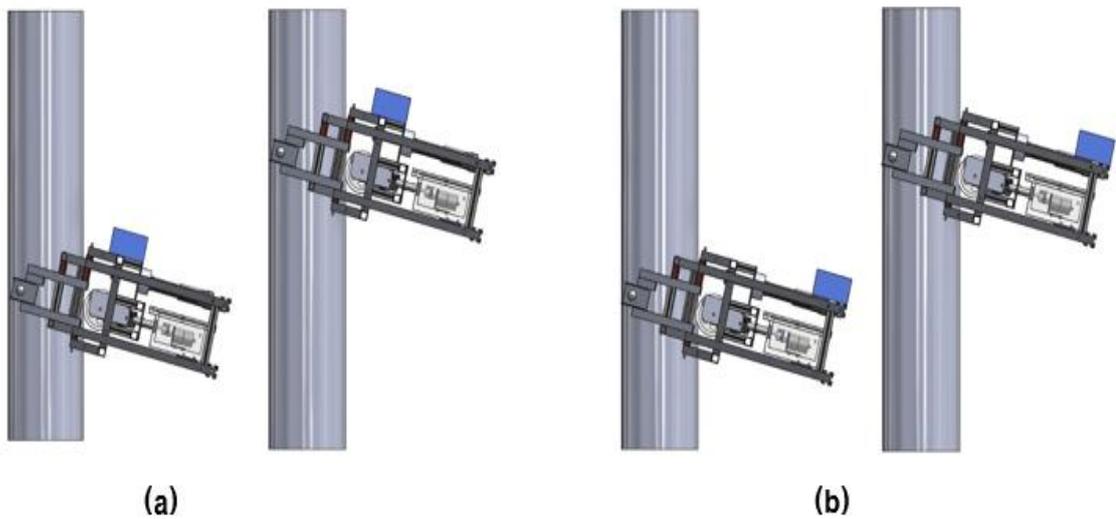


Fig. 16. 적재하중 위치에 따른 속도 변화

먼저 최대 적재하중을 알기 위해서, 적재하중을 플랫폼 바깥쪽에 두고 실험을 진행할 것이며, 그 이후 Fig. 15처럼 실험 결과에서 나온 최대 적재하중 무게를 기준으로 적재하중 위치에 따른 속도변화 차이 실험을 진행하고자 한다. 이 실험에서는 동일한 적재하중의 위치가 구동부 바퀴에서 멀어질수록 구동모터에 부하가 많이 가해져서 속도가 느려질 것으로 예상하고 실험을 진행했다. 그 이후 플

플랫폼의 컨셉인 자가-잠금 기능을 실험하기 위해 Fig. 16 와 같이 기둥에 붙어있는 상태에서 전력을 끊었을 때, 현재 위치에 머무르고 있는지를 실험하고자 한다. 플랫폼의 속도 계측을 위해 기둥에 길이 시작지점과 도착지점을 표시하였으며, 촬영한 실험영상을 사용하여 도착지점까지 도달했을 때의 시간을 측정하여 속도를 계산하고자 한다. 자가-잠금 기능은 전력을 끊은 이후에도 당시 위치에 머무르고 있으면 자가-잠금이 된다고 판단하고자 한다.

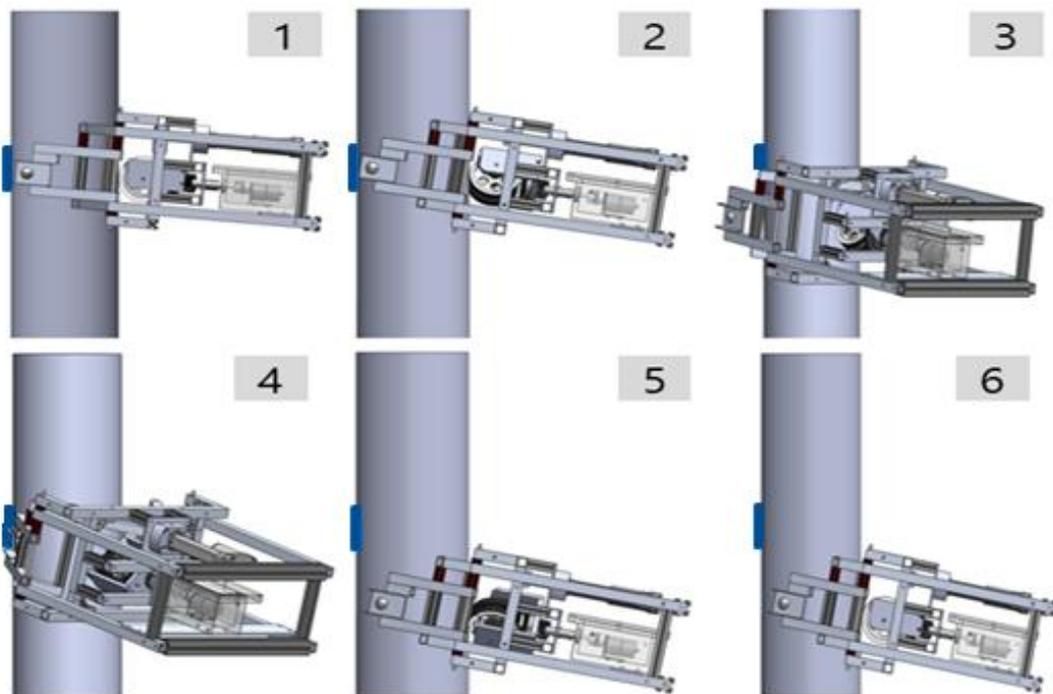


Fig. 17. 단일 플랫폼 회전기능 실험

기둥에 붙어있는 돌출된 장애물을 회피하는 기능을 검증하기 위해, 구동부에 연결되어 있는 서보모터를 이용하여 구동부를 회전시키고 플랫폼이 기둥을 회전하면서 이동 할 수 있는지 여부를 판별하는 실험을 하고자 한다. 플랫폼이 기둥에 매달려있는 상태에서 구동부가 회전하고, 이어서 플랫폼이 회전된 구동부의 방향으로 회전하게 되면 단일 플랫폼의 회전 기능 개념 설계가 검증되었다고 판단하고자 한다.

## 2-5-2 듀얼 플랫폼 기능 평가

이 실험에서 주된 목적으로 하는 듀얼 플랫폼이 실제 해상풍력발전기의 하부 구조물에 있는 가지형태의 장애물을 회피할 수 있는지를 알아보기 위해, 90도로 꺾여있는 기둥에서 작동테스트를 진행하고자 한다.

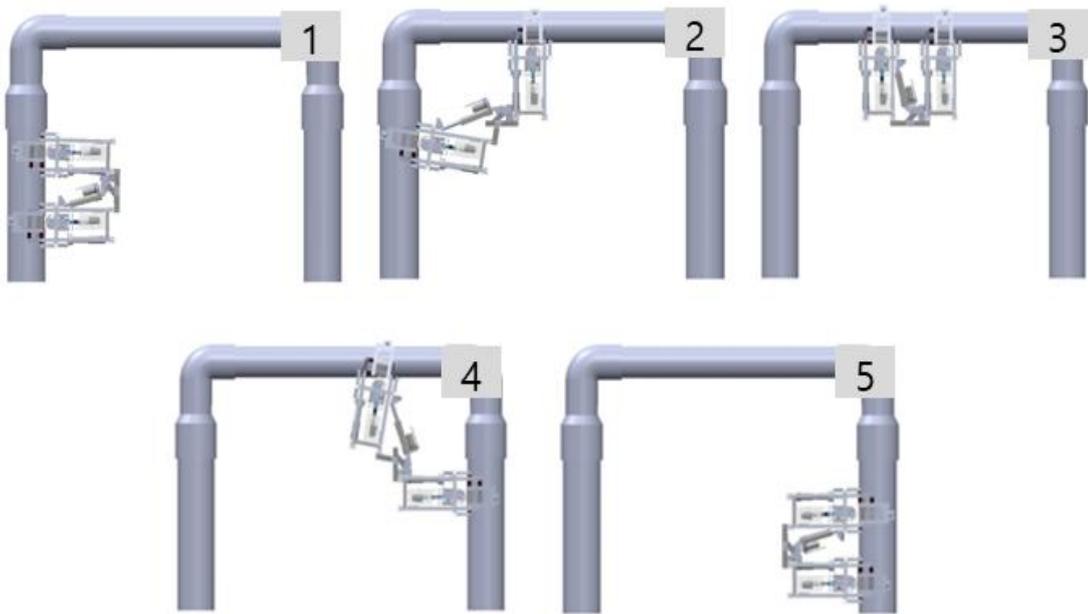


Fig. 18. 듀얼 플랫폼 작동 예시

듀얼 플랫폼의 작동테스트는 Fig. 18.(1)의 위치에서 시작하여 (2)의 작동 과정을 거쳐 (3)의 위치에 도달했을 때, 이 실험에서 목표로 하는 개념이 검증되었다고 판단하고자 한다.

### III. 결과 및 토의

#### 3-1. 단일 플랫폼 평가 결과



Fig. 19. 수중 기동등반로봇 단일 플랫폼 프로토타입

실제 제작한 수중 기동등반로봇 단일 플랫폼의 프로토타입은 Fig. 19., 로봇의 특성은 Table. 3과 같다. 물 속에서 중성 부력을 만들기 위해 약 5.54kg의 부력재를 사용했다.

Table. 3. 단일 플랫폼의 주요 특성

최대 치수(폭 x 높이 x 길이)	620 mm x 330 mm x 618 mm
최소 치수(폭 x 높이 x 길이)	620 mm x 330 mm x 570 mm
무게	8.85 kg
물속에서의 무게	5.97 kg
모터 개수	3 EA
재질	A6063S-T5, A6N01SS-T5
속도(무부하)	58.6 mm/s

먼저, 자가-잠금 기능 검증 실험을 진행했다.

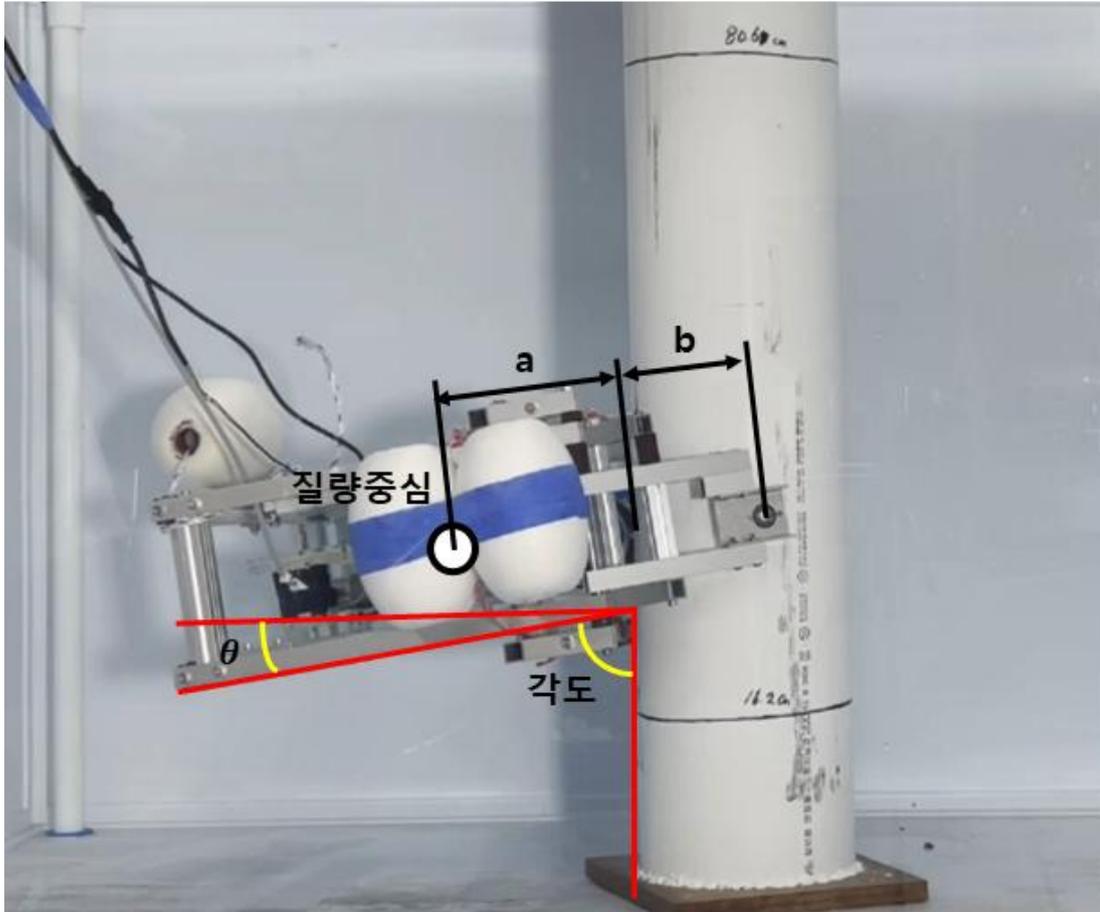


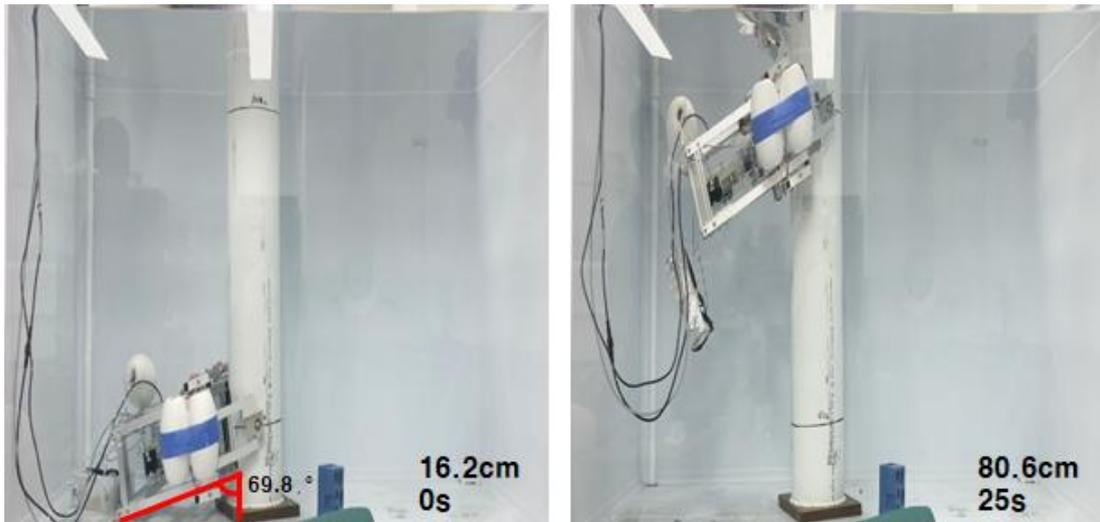
Fig. 20. 자가-잠금 실험

제작한 단일 플랫폼의 길이는  $a = 153.03\text{mm}$ ,  $b = 141.01\text{mm}$ 이며, 폴리우레탄 고무의 마찰계수  $\mu$ 는 0.4, 실제 측정된 플랫폼이 작동하기 위한  $\theta$ 는 약  $5.81^\circ \sim 14.9^\circ$  도로 이 값들은 자가-잠금 조건식(7)을 만족하였다. 그리고 실제 진행한 자가-잠금 실험에서 전력을 끊었을 때, 자가-잠금 기능이 일어남을 확인했다.

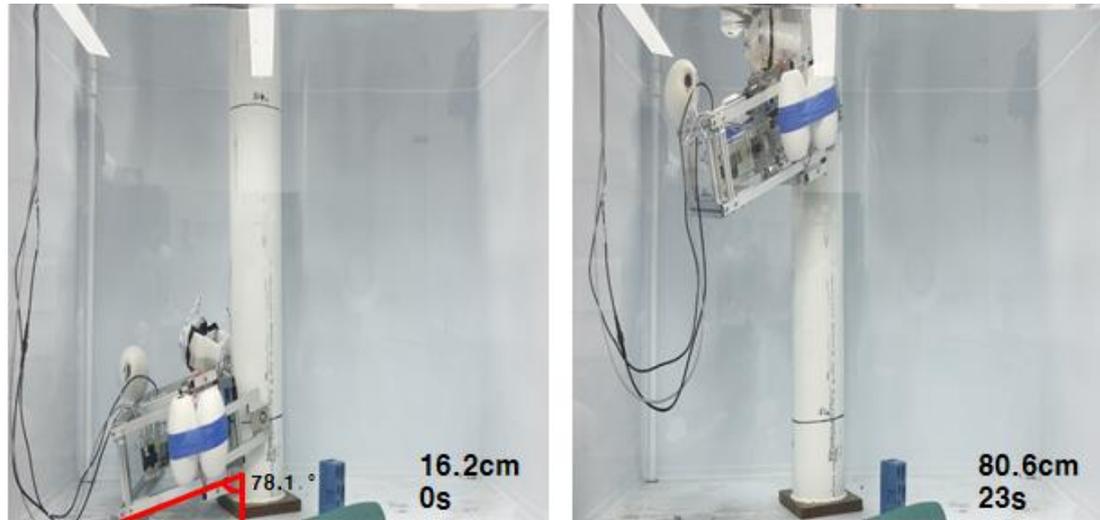


Fig. 21. 단일 플랫폼의 최대 적재하중 측정 실험

다음 실험인 최대 적재하중 측정 실험의 결과는 Fig. 21에서 확인할 수 있다. 적재하중 측정 실험에서는 제주대학교 융합설계실험실(MIMD.lab)에 있는 분동추를 사용하였으며, 육상 무게 기준 100g 단위로 무게를 측정하였다. 적재하중 무게가 0.45kg(수중 무게 기준)에서 잘 작동하였으며, 그 이상의 무게에서는 작동하지 않았다.



속도 : 25.76mm/s



속도 : 28mm/s

Fig. 22. 적재하중 위치에 따른 수중 기둥등반로봇의 속도 비교 결과  
(위 : 적재하중이 뒤에 있는 경우, 아래 : 적재하중이 앞에 있는 경우)

그 이후, 측정된 최대 적재하중 무게를 가지고 적재하중의 위치에 따른 단일 플랫폼의 속도비교 실험을 하였고 결과는 Fig. 22과 같다. Fig. 22을 보면 실험계획단계에서 예상했던 대로 적재하중의 위치가 기둥과 접해있는 구동부 바퀴와 멀어질수록 플랫폼의 속도가 감소했음을 알 수 있다. 이는 적재하중 위치에 따른 플랫폼과 기둥이 이루는 각도가 변하면서 플랫폼에 부과되는 수직력(Normal Force)가 변했기 때문이다.

마지막으로, 기동 표면에 돌출된 장애물 회피 목적의 단일 플랫폼의 회전기능 검증 실험을 하였다. 플랫폼 회전에 사용한 서보모터 아두이노 코드는 Fig.23과 같다. 아두이노 코드는 기본적인 서보모터 코드에서 서보모터 떨림을 방지하기 위한 오차 보정 코드를 추가하여 사용했다.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>
#define servoPin1 10
#define servoPin2 11
Servo mys1;
Servo mys2;
#define VAR A0
int conVAR=0;
int currentVar=0;
int previousVar=0;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  mys1.attach(servoPin1);
  pinMode(servoPin1, OUTPUT);
  mys2.attach(servoPin2);
  pinMode(servoPin2, OUTPUT);
}
void loop() {
  conVAR = map(analogRead(VAR), 0, 1023, 0, 179);
  currentVar = constrain(conVAR,10,170);
  Serial.println(currentVar);

  if((currentVar > previousVar+4) or (currentVar < previousVar-4))
  {
    mys1.attach(servoPin1);
    mys1.write(currentVar);
    mys2.attach(servoPin2);
    mys2.write(currentVar);
    delay(90);
    previousVar=currentVar;
  }
}
```

Fig. 23. 사용한 아두이노 코드

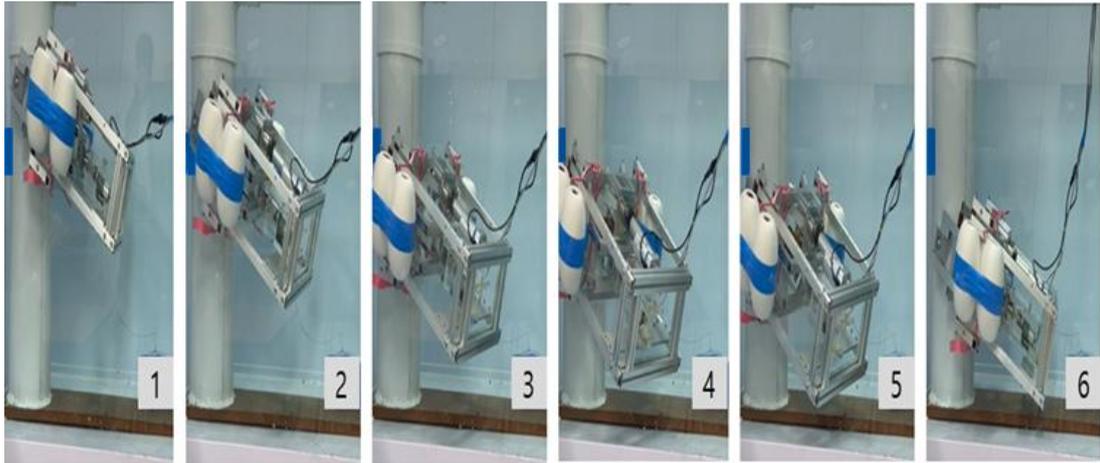


Fig. 24. 단일 플랫폼 회전기능 실험

Fig. 24에서 볼 수 있듯이, 플랫폼이 기둥에 붙어있는 파란색 장애물을 회피하기 위해 구동부가 시계방향으로 회전하였고(1-2), 이어서 구동바퀴를 작동시켰을 때, 움직인 구동부의 방향으로 플랫폼이 이동했음을 볼 수 있다(2-3). 이후, 기존의 기둥 축 방향기준의 위치로 돌아가기 위해 구동부가 반시계 방향으로 회전하였고(3-4), 움직인 구동부의 방향으로 플랫폼이 이동했다(4-5). 이 실험결과를 통해 기둥 표면에 돌출된 장애물을 회피하기 위한 단일 플랫폼의 작동성을 확인하였고, 단일 플랫폼 개념설계를 검증했다.

### 3-2. 듀얼 플랫폼 평가 결과

실제 제작한 수중 기동등반로봇 듀얼 플랫폼의 프로토타입은 Fig. 25, 로봇의 특성은 Table. 4에 그리고 구성한 전장부는 Fig. 26과 같다. 플랫폼의 중성부력을 만들기 위해 약 14.38kg의 부력재를 사용했으며, 실제 듀얼 플랫폼은 약 0.15kg~0.2kg의 음성부력을 가짐을 확인하였다.



Fig. 25. 수중 기동등반로봇 듀얼 플랫폼 프로토타입

Table. 4. 듀얼 플랫폼의 주요 특성

최대 치수(폭 x 높이 x 길이)	620 mm x 957 mm x 618 mm
최소 치수(폭 x 높이 x 길이)	620 mm x 628 mm x 570 mm
무게	25 kg
물속에서의 무게	10.47 kg
모터 개수	7 EA
재질	A6063S-T5, A6N01SS-T5, SUS304

Fig. 26에서 전력변환기1(SMPS1)에는 듀얼플랫폼의 아래쪽 플랫폼 모터 드라

이버들이 연결되어 있고, 전력변환기2(SMPS2)에는 위쪽 플랫폼 모터 드라이버와 연결링크 선형액추에이터 모터 드라이버가 연결되어 있다. 단일 플랫폼 실험을 진행할 때는 전력변환기1(SMPS1)만 사용하여 플랫폼을 작동시켰다.



Fig. 26. 플랫폼 전장부 구성

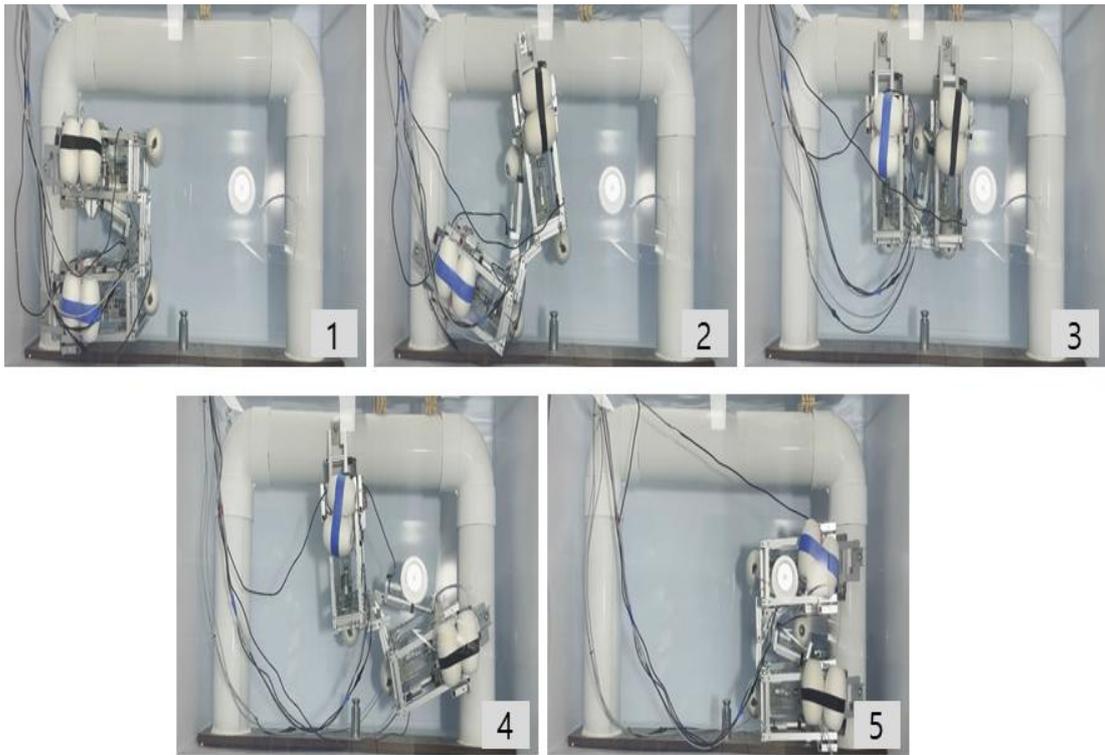


Fig. 27. 듀얼 플랫폼 기능 검증 실험

이번 듀얼 플랫폼 기능 검증 실험과정은 Fig. 27의 1-5 순서로 진행했다. 이번 실험을 통해 듀얼 플랫폼이 수직 기둥을 타고 올라간 후에, 수평 방향으로 분기된 기둥에 맞게 플랫폼 사이의 각도를 만들어서 분기된 기둥으로 이동할 수 있는 기능을 확인할 수 있다. 이 실험에서는 듀얼 플랫폼이 기둥을 올라간 후에 연결링크의 선형 액추에이터를 작동시켜 듀얼 플랫폼의 플랫폼 사이의 각도를 만드는 도중에 플랫폼 자체가 기둥 축 방향으로 회전하는 문제가 발생했다. 이는 바퀴 방식을 채택한 플랫폼이 기둥과 면 또는 선 접촉이 아닌 4개의 점 접촉으로 만나는 것과 플랫폼에 연결된 전선의 장력에 의한 영향 때문으로 추측된다. 이 문제는 실험 중간에 플랫폼의 기둥 축 방향을 사람이 직접 조절해주는 것으로 해결하였다.

## IV. 결론

기둥등반로봇(Pole Climbing Robot)은 여러 종류의 메커니즘을 적용하여 개발되어져 왔으며 각각의 메커니즘은 장점과 단점이 있다. 이 연구에서는 빠른 속도, 좋은 이동성, 그리고 저전력 소비라는 세 가지 장점을 갖는 바퀴(Wheel) 메커니즘을 채택했다. 이 메커니즘의 가장 큰 단점인 바퀴 미끄러짐 문제도 그리퍼를 이용한 4점 지지형태를 가지고 있으면서 이전에 증명된 자가-잠금(Self-Locking) 시스템을 벤치마킹, 이를 토대로 로봇을 설계하여 극복할 수 있었다. 수중로봇이기 때문에 모터의 방수처리 역시 중요했다. 메인 구동모터는 수밀박스와 2단 립셀을 사용해서 방수처리 하였고, 선형 액추에이터와 서보모터는 기존의 방수가 가능한 제품을 사용했다. 그 결과 수중에서도 로봇이 잘 작동함을 확인할 수 있었다.

타겟(Target)으로 했던 해상풍력발전기 지지구조물인 자켓(Jacket) 구조물은 트러스(Truss) 구조와 직경이 다른 기둥의 결합 형태로 되어있다. 본 연구에서 제안한 로봇 모델은 직경이 다른 기둥과 나뭇가지 형태의 장애물이 있는 트러스 구조를 그리퍼와 플랫폼의 회전기능을 이용해 오를 수 있도록 설계했다.

먼저 단일 플랫폼 실험을 통해 자켓 구조물의 트러스 구조, 나뭇가지 형태의 장애물을 극복하고 올라갈 수 있는 듀얼 플랫폼의 기초가 되는 단일 플랫폼의 개념설계 성능을 검증했다.

그 이후에는 검증된 단일 플랫폼을 사용하여 실제 나뭇가지 형태 장애물의 기둥을 올라갈 수 있는 듀얼 플랫폼을 개발, 제작하였으며 직접 제작한 90도로 꺾인 구조물을 사용하여 듀얼 플랫폼의 기능 검증 실험을 진행하였다. 이 실험 결과로 이번 연구에서 목적으로 한 듀얼 플랫폼의 기능과 개념설계를 검증하였다.

이번 연구를 통해 기존의 기둥 등반 로봇에서 사용 빈도가 낮았던 바퀴 메커니즘이 수중 로봇이라는 특수한 조건의 환경에서 운용되는 로봇 분야에 충분히 쓰일 수 있음을 보여주었다.

추후 연구로는 듀얼 플랫폼의 기능을 보완하는 설계를 진행하고, 가변저항을 직접 손으로 조정하던 방식에서 알고리즘을 이용한 모터 제어 방식으로 변경할

예정이다.

## V. 참고 문헌

- [1] Ali Baghani et al, "Kinematics Modeling of a Wheel-Based Pole Climbing Robot(UT-PCR)," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, April 2005
- [2] Al Rashed M et al, "Climbing Robots for NDT Applications," Human-Centric Robotics, Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on CLAWAR 2017, pp. 285-292, Aug 2017
- [3] Surachai Panich, "Development of a Wall Climbing Robot," Journal of Computer Science 6(10):1156-1159, Oct, 2010
- [4] Tin Lun Lam, Yangsheng Xu, "A Flexible Tree Climbing Robot: Treebot - Design and Implementation," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, May 2011
- [5] H. Hosokai and F. Hara, "Manoeuvrability Passing over Obstacles on A Pipeline by A Pipeline Inspection," in CLAWAR, Karlsruhe, Germany, 2001.
- [6] Roque Saltaren et al, "Using Parallel Platforms as Climbing Robots," Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications, ISBN 3-86611-286-6, pp. 702, December 2006.
- [7] Khaled R. Asfar, "Palm Tree Climbing Robot," Journal of Automation and Control Engineering, Vol. 4, No. 3, June 2016.
- [8] Amr Bekhit, "Parallel Platform-Based Robot for Operation in Active Water Pipes," Ph.D thesis, The university of Leeds School of Mechanical Engineering, West Yorkshire, England September 2015.
- [9] M. Almonacid et al, "Motion Planning of a Climbing Parallel Robot," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 19, NO. 3, June 2003.
- [10] Jianglong Guo et al.,- "A Concept Selection Method for Designing Climbing Robots," Key Engineering Materials, Vol. 649, pp. 22-29, 2015.
- [11] JEAN-CHRISTOPHE FAUROUX† , JOEL MORILLON, "Design of A

Climbing Robot for Cylindro-Conic Poles based on Rolling Self-Locking,”  
Industrial Robot, Vol. 37, Num. 3, May 2010.

• [12] Haite 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,  
1549(2020) 052017.

• [13] Tariq P. Sattar et al, “Mobile Wall Climbing and Swimming Robots to  
Inspect Aircraft, Storage Tank, Pressure Vessels and Large Infrastructure,”  
Conference: 24<sup>th</sup> ISPE International Conference on CAD/CAM, Robotics and  
Factories of Future(CARS&FOF), Koriyama, Japan, January 2008.

• [14] M. Tavakoli et al, “A Hybrid Pole Climbing and Manipulating Robot  
with Minimum DOFs for Construction and Service applications,” Industrial  
Robot 32(2), pp 171-178, April 2005.

• [15] Marc Osswald, Fumiya Iida, “Design and Control of a Climbing Robot  
based on Hot melt adhesion,” Robotics and Autonomous System, Vol 61,  
Issue 6, pp. 616-625, June 2013.

• [16] Ji Hyun Lee et al, “Design Optimization and Reliability Analysis of  
Jacket Support Structure for 5-MW Offshore Wind Turbine,” Journal of  
Ocean Engineering and Technology 28(3), pp. 218-226, June 2014.

• [17] 국가표준 - 알루미늄 및 알루미늄 합금 압출 형재, “KS D 6759” pp, 7-9.

• [18] Choi Jung Hyun et al. , “Slip Considered Design and Analysis  
Pincers-type Gripper for Seizing Heavy-weighted Cylindrical Objects,” Journal  
of Korea Robotics Society 10(4):193-199, June 2015.

• [19] 김만응, 이강수 , “해상풍력발전 기술 현황 및 전망, “대한조선학회지  
(BSNAK) Vol. 48, No. 3, September 2011.

• [20] Jannie Jessen Nielsen, John Dalsgaard Sørensen, “On Risk-based  
Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbine Components,” Reliability  
Engineering & System Safety, Vol. 96, Issue 1, pp. 218-229, January 2011.

• [21] “Robot Jacket Crawler, TotalEnergies in Denmark,” accessed Sep 28,

2021,<https://corporate.totalenergies.dk/total-denmark/better-energy-projects-denmark/robot-jacket-crawler>

## 초 록

해상풍력발전기의 에너지 생산효율 저하에는 육상풍력발전기에 비해 보수 작업에 걸리는 긴 정지기간이 원인 중 하나일 수 있다. 따라서 생산 효율성을 높이기 위한 효율적인 유지보수 조치가 필요하다. 이에 해상풍력발전기의 하부구조 점검 및 유지보수를 목적으로 고속, 이동성, 그리고 저전력의 세 가지 장점을 지닌 바퀴 기반의 수중 기동등반로봇 플랫폼을 제안하였다. 또한, 구조적으로 그리퍼 모듈을 사용하여 플랫폼에 자동 잠금 시스템을 기능을 탑재하였다. 그 결과 로봇은 지속적으로 기동을 오를 수 있었고, 에너지를 소모하지 않고 기동 위에서의 위치를 유지하였다. 본 연구 결과는 제안한 수중 기동등반로봇이 수중 작업에 필요한 기본 능력을 갖추고 있음을 보여준다.