

공압 gripper를 적용한 해양 건설 ROV 시스템 개발

박지현¹ · 황요섭^{2*}

Development of Offshore Construction ROV System applying Pneumatic Gripper

Jihyun Park¹ · Yoseop Hwang^{2*}

¹Senior researcher, Institute of Acoustic and Vibration Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513 Korea

^{2*}CEO, Department of General Affairs, CILAB. Corp, Yangsan, 50622 Korea

요약

대규모 해양 건설에 따른 해양 건설 작업자의 안전 및 해양 오염 문제가 발생하고 있다. 특히, 해양의 수중 건설 작업은 다른 작업에 비해 위험도가 높아 작업자의 안전을 고려한 무인 대체 시스템의 적용이 필요하다. 본 논문에서는 수중 무인 작업을 위해 해양 건설용 ROV 시스템을 개발 완료하였다. 수중 추진체의 제어를 통한 위치제어, 공압 gripper 그리고 수중 작업 모니터링을 위한 모니터링 시스템을 개발하였다. 성능평가 결과 ROV의 수중 이동속도는 최대 0.89m/s로 평가되었으며, 공압 gripper의 최대 하중은 80kg의 하중 허용 가능성을 확인하였다. 또한, 수중 ROV의 제어와 수중 영상 스트리밍에 필요한 네트워크 대역폭이 300Mbps 이상으로 평가되었으며, 유선 통신은 205m에서 92.7 ~ 95.0Mbit/s, 무선 통신은 78.3 ~ 84.8Mbit/s의 속도로 평가되었다.

ABSTRACT

The safety of marine construction workers and marine pollution problems are occurring due to large-scale offshore construction. In particular, underwater construction work in the sea has a higher risk than other work, so it is necessary to apply an unmanned alternative system that considers the safety of the workers. In this paper, the ROV system for offshore construction has been developed for underwater unmanned work. A monitoring system was developed for position control through the control of underwater propellants, pneumatic gripper, and monitoring of underwater work. As a result of the performance evaluation, the underwater movement speed of the ROV was evaluated to be 0.89 m/s, and it was confirmed that the maximum load of the pneumatic gripper was 80 kg. In addition, the network bandwidth required for underwater ROV control and underwater video streaming was evaluated to be more than 300Mbps, wired communication at 92.7 ~ 95.0Mbit/s at 205m, and wireless communication at 78.3 ~ 84.8Mbit/s.

키워드 : 공압 gripper, 해양 건설 ROV, 수중 위치제어, 수중 모니터링

Keywords : Pneumatic gripper, Offshore construction ROV, Underwater position control, Underwater monitoring

Received 23 September 2022, Revised 1 October 2022, Accepted 3 October 2022

* Corresponding Author Yoseop Hwang(E-mail:mmx001@cilab.kr, Tel:+82-55-785-0721)
CEO, Department of General Affairs, CILAB. Pte, Yangsan, 50622 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.11.1697>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

해양 산업의 발전으로 해상풍력, 해저 터널 그리고 교량 건설 등의 다양한 해양 구조물 건설이 증가하고 있다. 현재 해양 및 수중 건설은 종래의 잠수사를 활용한 방식으로 공기 오염, 잠수 질병, 수중 구조물 협착 등의 다양한 사고로 인해 연간 20여 건 이상의 사고가 발생하고 있다[1].

최근 해양 건설은 대규모로 이루어지고 있으며, 공사에 따른 통행 선박, 10m 이상의 수중 작업, 그리고 파도 등의 열악한 해상 조건으로 안전과 재해에 노출되어 있어 대책 마련이 시급한 상황이다. 잠수사의 사고를 방지하기 위해 최근 ROV(Remotely Operated Vehicle)가 적용되고 있다. 대표적인 시스템은 영국의 ATLANTIC MARINE에서 제작한 ROGE ROV로 무게는 3.5t으로 4,000m 심해작업용으로 유압 gripper를 적용하여 판매되고 있다[2]. 국내는 대륙붕이 발달한 해저지형으로 100m 내외의 해상 작업이 많으며, 유압 gripper의 해양 오염 위험도가 높아 고성능 고가의 제품은 작업 환경을 충분히 고려하여야 한다. 따라서 우리나라 해양 환경에 적합한 해양 건설용 ROV 시스템 개발이 필요하다.

본 논문에서는 국내의 해저 환경을 고려하여 ROV의 수중 위치제어와 공압 gripper를 적용한 해양 건설용 ROV 시스템을 개발하였다. 100m 내외의 수심에서 위치제어, 수심 호버링(hovering), 수중 카메라, 건설 작업 등의 다양한 작업 모니터링을 위한 모니터링 시스템을 개발하였다.

II. ROV 설계 및 제작

2.1. ROV 시스템 설계

해양 건설 작업용 ROV는 그림 1과 같이 선박 또는 바지선 위의 기중기와 결합하여 수중 작업을 수행한다. 그러므로 해양 건설 작업용 ROV는 필요에 따라 기중기, ROV 그리고 gripper의 결합과 분해를 할 수 있도록 설계 및 제작되어야 한다. 따라서 시스템 설계에서 주행 및 통신 등을 제어하는 전자제어 모듈은 ROV 상부에 위치하고 있으며, 하부는 건설 작업 모니터링을 위한 수중 카메라, 수중 라이트 그리고 공압 gripper로 구분하여 제작 설계되었다.

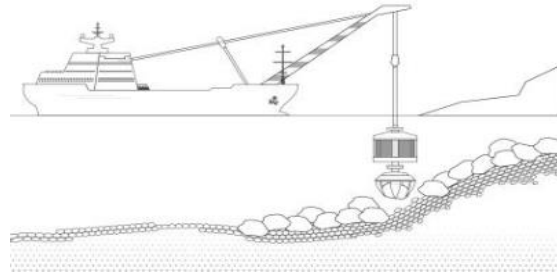


Fig. 1 Application of offshore construction ROV

해양 건설 작업용 ROV의 상부는 지상으로 ROV를 올릴 수 있는 크레인 연결고리와 하부 건설용 수중 gripper와 연결할 수 있는 체결 부위가 있다. ROV에 걸리는 하중이 중심에 있는 기둥으로 집중되게 하며, 그림 2의 상부에는 크레인과 연결하고 최하부에는 gripper와 연결할 수 있도록 설계하였다. 특히, 크레인 연결고리는 ROV, 건설용 수중 gripper, 바위 및 흙 등을 들어 올릴 때 모든 하중이 집중되므로 수치 모의실험을 통해 설계 및 제작하였다. 또한, 상부에 지상으로 부상 시 필요한 크레인 연결부와 체결할 수 있도록 설계하고, 중심 기둥 중간부위에 추진체 및 전자제어 모듈 탑재를 위한 상판을 고정할 수 있도록 설계하였다.

해양 건설 작업용 ROV의 하부 수중 gripper는 그림 3과 같이 제작하였으며, OPEN/CLOSE 타입의 건설용 수중 gripper이다. 수중 gripper는 최대 150°까지 OPEN 가능하며, 수중 바위 및 흙 등 작업에 쉽도록 건설용 수중 gripper의 버킷 홀을 설계하였다.

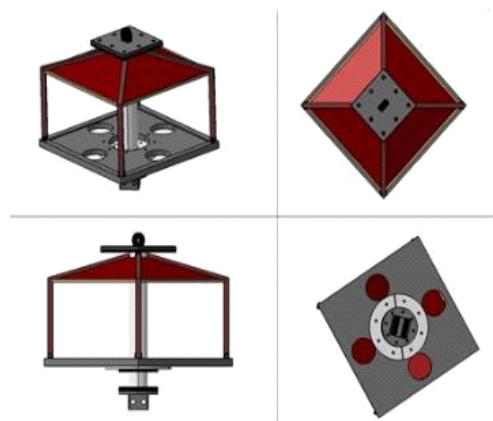


Fig. 2 Top schematic of offshore construction ROV

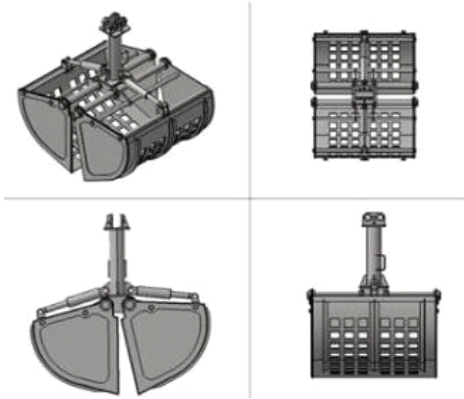


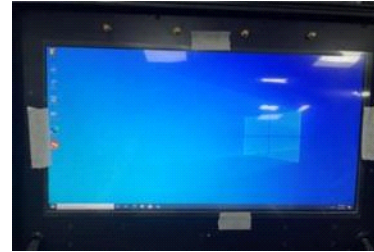
Fig. 3 Underwater pneumatic gripper for offshore construction ROV

바위의 경우 지상으로 올라올 때 물의 무게를 줄이기 위하여 버킷 부위에 홀을 뚫어 물이 빠질 수 있게 하였으며, 흙이나 모래 등을 작업하면 버킷의 홀을 막을 수 있도록 설계하였다. 또한, 수심 100m에서 운용할 수 있도록 특수 방수 실린더를 사용하였으며, 100kg의 물체를 들어 올릴 수 있도록 제작하였다. 수중 동작 중 고장에 따른 오염을 방지하기 위해 공기압을 적용한 공압 gripper와 gripper 제어시스템을 설계하였다.

2.2. 제어 및 통신 시스템 모듈

ROV의 제어 및 모니터링을 위해 그림 4와 같이 수중 건설용 ROV 모니터링 시스템 H/W를 제작하였다. 그림 4(a)는 ROV 모니터링 시스템으로 윈도 운영체제를 탑재하고 있다. 또한, 조종자의 편의성과 돌발상황에 대처하기 위한 제어패널은 그림 4(b)와 같다. 조이스틱 연결 및 데이터 전송을 위한 입/출력 인터페이스와 수중 작업 중에 발생할 수 있는 돌발상황에 대처하기 위한 비상 정지 및 전원 ON/OFF 등과 같은 각종 스위치를 구성하였다.

수중 건설 작업용 ROV 제어 및 모니터링 시스템을 통한 수중 영상 스트리밍을 위한 통신 중계기를 제작하였다. 수중 환경 요인으로 인하여 무선통신은 신호 간섭과 대역 제한으로[3] 인해 통신 중계기는 유선 통신 방식으로 제작하였다[4], 그림 5(a)와 같이 전원 모듈 및 전력선 통신 모듈, 유/무선 통신용 Router 등으로 구성된다. MT7628 통신 IC를 기반으로 제작된 전력선 통신 모듈은 타 통신 방식보다 장거리 통신이 가능하며 100m 이상의 유선 통신이 가능하다.



(a)



(b)

Fig. 4 Monitoring system; (a) display, (b) input/output panel

수중 건설 작업용 ROV와 중계기를 연결하는 통신 케이블은 그림 5(b)와 같이 ROV 수중 이동에 방해가 되지 않도록 자체적으로 부력을 띄는 재질로 제작하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Repeaters for offshore construction ROV; (a) wired/wireless communication module, (b) External view

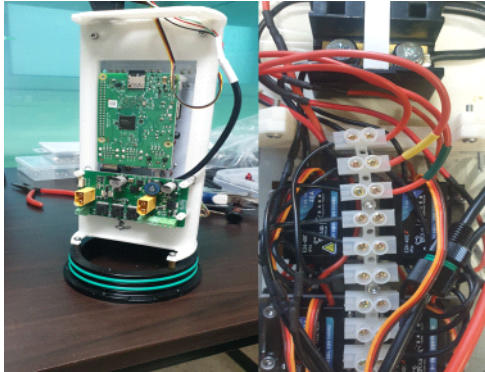
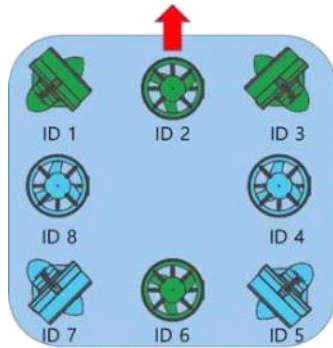
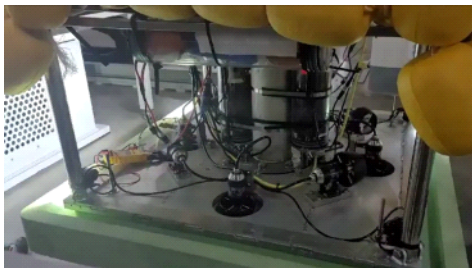


Fig. 6 Control module of offshore construction ROV



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Underwater motor layout of offshore construction ROV, (b) underwater motor application

또한, 조작 및 모니터링을 위해 ROV와 PC는 TCP/IP 통신을 통해 제어 및 수중 영상 스트리밍이 진행되므로, 전력선 통신 모듈에는 Ethernet 통신을 사용하기 위한 데이터 입/출력 회로를 구성하였다.

2.3. 추진 모듈 및 추진체 제작

ROV 제어부는 그림 6과 같이 수중 영상 스트리밍 및 ROV 제어를 담당하는 모듈, 중계기와의 통신 모듈, 전

원 공급 모듈로 제작되었다. 수중 추진체 제어부는 8개의 ESC(electronic speed control)와 수중 추진체 전원 분배용 단자대로 제작되었다. 해양 건설 작업용 ROV의 목표 출력을 위해 수중 추진 모듈 프로펠러와 노즐은 염수에 의한 부식 방지를 위해 알루미늄 및 스테인리스 스틸 소재로 구성된 수중 모터를 적용하였다. 또한, ROV의 수중 운동성을 높이기 위해 그림 7(a)와 같이 수중 모터를 배치하였으며, 초록색은 정방향 수중 추진체를 말하며, 파란색은 역방향 수중 추진체이다. 이와 같은 수중 추진체 배치를 통해 ROV는 추진체의 회전 방향에 따라 전진과 후진, 상승/하강, 좌/우 수평 운동, 제자리 회전이 가능하게 설계하였다. 그림 7(b)는 실제 수중 모터가 적용된 추진체이다.

2.4. 카메라 모듈 및 조명 모듈

수중 건설 작업을 위해 실시간 수중 영상 획득이 필요하지만, 기존의 국내외 ROV 제품의 경우 하나의 방수 모듈에 제어 장치와 카메라 모듈이 배치되어있다[5]. 본 논문에서 제작한 해양 건설 작업용 ROV는 다양한 각도의 수중 영상 촬영을 가능하도록 독립적인 형태의 카메라 모듈을 제작하였다. 그림 8과 같이 방수 모듈에 카메라 모듈을 장착하고, 수중 촬영 시 시야각을 최대한 확보하기 위해 카메라 모듈의 전면부는 돔 형태의 방수캡을 적용하였다. 또한, 해양 건설 작업용 ROV에 적용된 카메라 모듈은 USB를 통해 수중 영상을 전송하므로, 영상 데이터 전송 라인을 방수 케이블로 연장하여 ROV 제어부와 연결하였다.

국내 해양 환경은 탁도가 높으므로 해양 건설 작업용 ROV의 안정적인 운용과 수중상태 영상을 확보하기 위해 수중에서 시야를 확보할 수 있는 수단이 필요하다. 시야 확보를 위해 그림 9와 같은 조명 모듈을 개발하였다. 조명 모듈의 고정부는 조명 각도 조절을 위해 회전 방식으로 제작하였으며, 조명의 발광 각도는 120°, 발광 심도는 최대 200m이다.

2.5. 외부 전력 공급 장치 조명 모듈

ROV의 경우 기존에 수중에서 배터리로 운용되기 때문에 운용할 수 있는 시간이 짧다는 단점이 있다[6]. 그림 10은 외부 전력을 공급하기 위한 시스템의 구성도로 AC 220V를 DC 50V로 변환하는 AC/DC 변환기를 적용하였다.

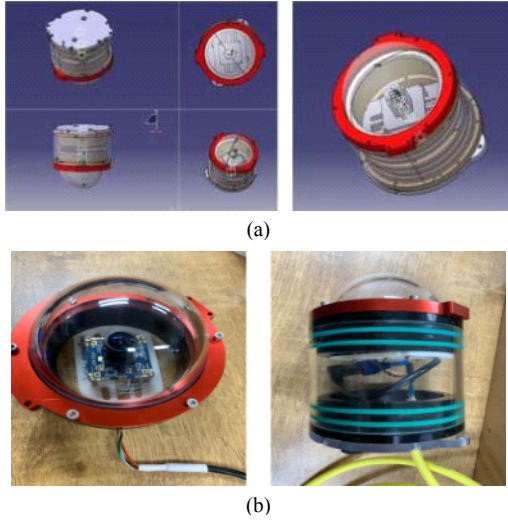


Fig. 8 Camera module of offshore construction ROV

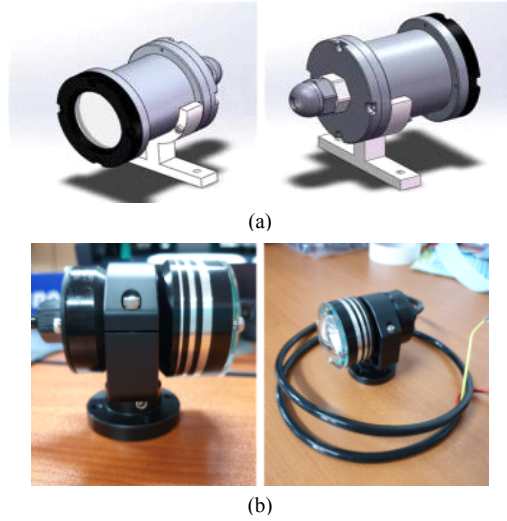


Fig. 9 Lighting module for offshore construction ROV

ROV는 DC/DC 변환기를 통해 동작 전압으로 변환되어 공급하도록 설계하였다. 그림 11은 제작된 외부 전력 공급 장치로 해상에서 장기간 수중에서의 작업을 진행하기 위해 외부에서 전원을 공급해줄 수 있는 외부 전력 공급 장치이다. 또한, 편리성과 이동성을 보장하도록 이동 케이스형으로 제작하였다.



Fig. 11 External power supply system

III. 성능 평가

해양 건설 ROV의 수치 모의실험을 위해 그림 12와 같이 Rhino를 이용하여 3D 모델링 설계 완료하였다. 설계 기반으로 ROV의 저항 성능 해석을 위해 Star-CCM+을 실시하였다.

저항성능 해석 조건은 3차원 정상상태 비압축성 점성 유동을 고려하였으며, 이에 대응하는 지배방정식은 아래의 연속방정식과 RaNS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방정식들인, 식(1)과 식(2)로 각각 고려

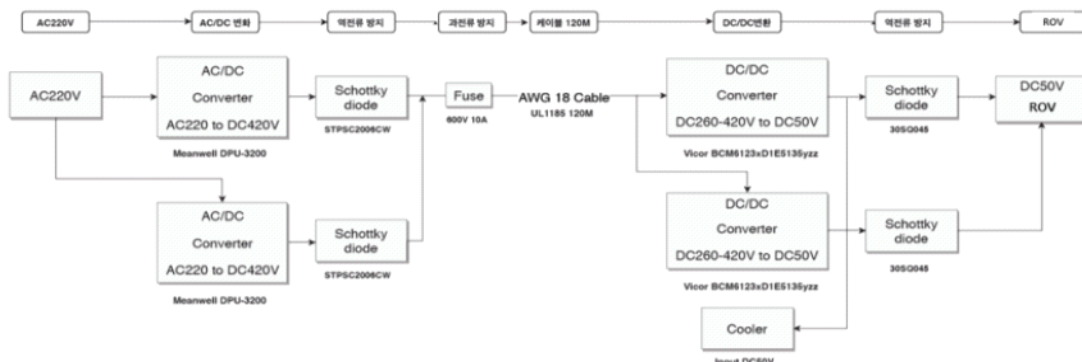


Fig.10 Configuration diagram of external power supply system

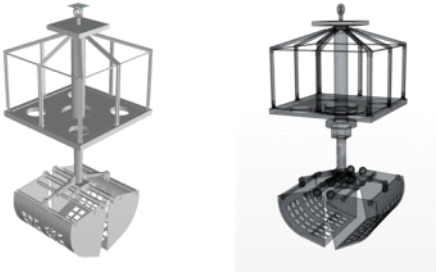


Fig. 12 3D modeling of offshore construction

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\overline{\rho u_i' u_j'}) + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, x_i 는 직각좌표계, u_i 는 유속, p 는 압력, μ 는 유체 이용이다.

경계조건의 경우 입점성계수, g_i 는 중력가속도, F_i 는 외력항이다. 또한, 식(2)의 레이놀즈 응력(Reynolds Stress)항인 $\overline{\rho u_i' u_j'}$ 은 공학 문제에 적용 이용되고 있는 2-방정식 난류모델인 *Realizable $\kappa - \epsilon$* 로 해석하였다 [7].

해석을 위한 격자 계는 Star-CCM+에서 제공하는 자동 격자생성 방법(Prism layer, Trimmed mesh, Surface re-mesh)으로 그림 13과 같으며, 총 150만 개 격자를 생성하여 수치 모의실험을 하였다. 표 1과 그림 14와 같이 구조물의 저항성능 해석에서 최대 압력 값은 속도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 45도 각도에서 조류가 작용할 때 최대 압력 값을 가지는 것을 확인하였다.

Table. 1 Resistance performance of structures

	Current		Max. Pressure (Pa)
	Velocity(knot)	Direction(°)	
Case 1	2	0	597
Case 2		45	651
Case 3		90	604
Case 4	4	0	2,381
Case 5		45	2,627
Case 6		90	2,391

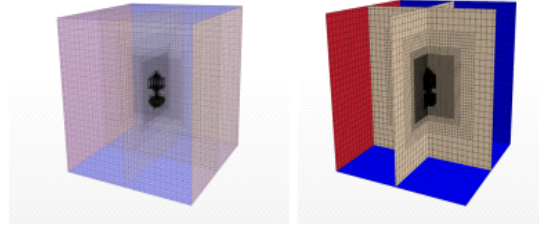


Fig. 13 Grid system in numerical simulation

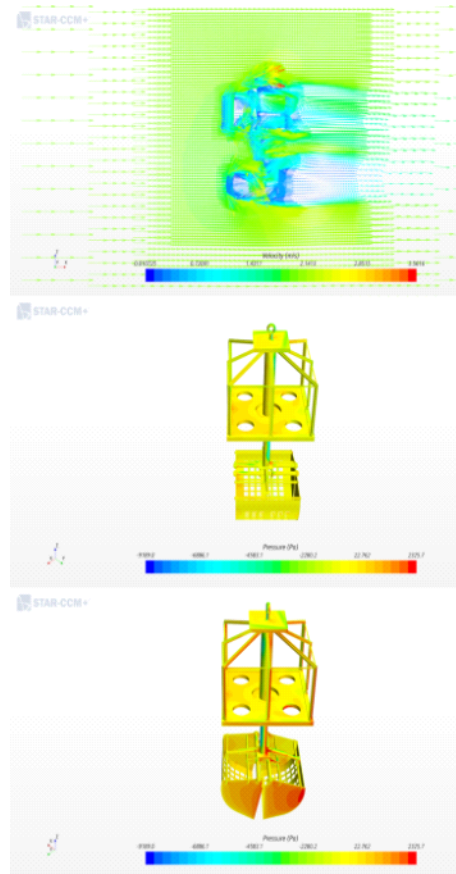


Fig. 14 Fluid analysis according to the analysis on the grid system in Case 5

경계조건 및 하중조건은 ROV 구조물에 대한 구조해석을 수행하기 위해 구조물 형상에 대한 구속 여부를 지정하고, 외부에서 가해지는 하중을 적용하였다. 구조물에 대한 구속조건은 상부 구조물 상단 연결부를 중심으로 설정하였다. 또한, 해석 결과에 영향이 미치지 않도록 응력 관심부 밖으로 설정하였다. 경계조건의 설정은

Table. 2 Load analysis of structures

구분	Case	중력 (mm/s ²)	화물적재 하중(N)	Equivalent Stress(MPa)
상부 하중	Top 1	9806.6	3,920	12.551
	Top 2			12.666
하부 하중	Bucket	9806.6	1,960	48.916
통합 하중	Full Model 1	9806.6	1,960	48.158
	Full Model 2			48.158

도출된 결과의 정확성을 좌우하는 가장 중요한 작업으로 구조물의 실제 이동과 가장 근접하게 설정하여 신뢰성을 확보하였다.

하중조건은 상부와 하부 그리고 통합 구조물에 대한 수치 모의실험을 하였다. 표 2는 하중조건에 따른 결과로 하부 Bucket 구조물에 실리는 화물 하중 및 구조물의 무게와 중력을 고려하여 설정하였으며, 하중은 구조물 자체 중량, 화물 적재하중, 중력 및 유체압력 등으로 화물 적재하중은 적재하고자 하는 화물의 무게를 기준으로 균일 하중을 적용하였다.

ROV 구조물의 부위 별 구조해석 결과 상부 구조물과 하부 구조물 그리고 통합 구조물에 대한 응력 전달 현상은 양호하였으며, 이는 하부 구조물인 Bucket에 걸리는 화물 적재하중이 구조물에 미치는 영향이 지대하여 타 하중조건에 의한 영향력이 미미하였기 때문으로 판단된다.

ROV 유/무선 통신 중계기를 사용한 통신 속도 테스트 결과는 그림 15와 같다. 통신 케이블의 길이 1m, 19m, 205m에 따른 통신 속도 측정 결과 205m에서 유선 통신은 92.7~95.0Mbit/s, 무선 통신은 78.3~84.8Mbit/s의 속도로 측정되었다. 이를 통해 유선과 무선 통신 방식을 고화질 수중 영상 스트리밍에 사용하기 충분한 속도를 가지는 것을 확인하였다. 또한, 데이터 전송량 측정 결과 ROV 제어시스템의 유선 네트워크 통신 시 네트워크 대역폭이 300Mbps 이상인 것을 확인하였다.

해양 건설 다목적 ROV의 운용 속도는 한국생산기술연구원 해양로봇센터의 수조에서 시험하였다. 그림 16은 ROV의 속도를 측정 장면으로 3번의 시험에서 측정된 속도는 각각 0.56m/s, 0.65m/s, 0.89m/s로 기존의 목표 운용 속도인 0.5m/s가 가능한 것을 확인하였다.



Fig. 15 Communication speed performance evaluation of wired/wireless communication repeater

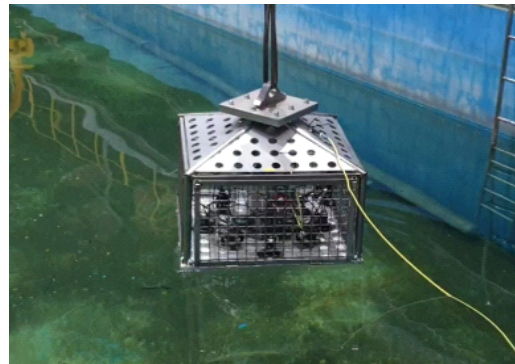


Fig. 16 Speed evaluation of offshore construction ROV

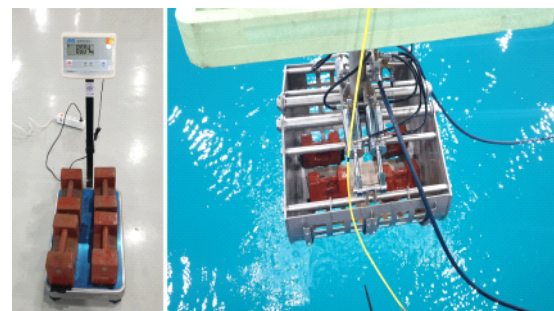


Fig. 17 Load evaluation of offshore construction ROV

그림 17은 ROV의 gripper 허용 하중을 평가하는 것으로, 수중 작업을 위해 공압 gripper에 80kg의 하중이 가능한지 시험하였다. ROV와 gripper를 결합 후 작업 그림 안에 80kg의 무게추를 넣고 그림이 물에 잠길 때까지 전수한다. 그 후 ROV와 그림, 무게추를 인양한 후 시료에 이상이 있는지 확인한 결과 gripper에 이상이 없으며 80kg의 하중이 허용 가능함을 확인하였다.

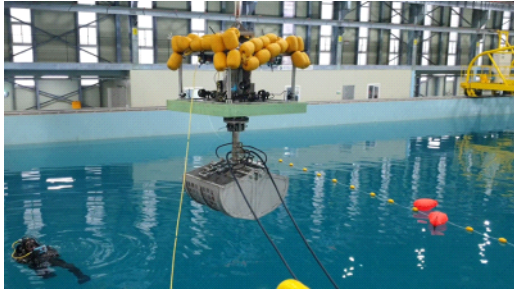


Fig. 18 Integrated evaluation of offshore construction ROV

그림 18은 통합 성능평가 장면으로 속도, gripper 허용 하중, 최고 속도, 운용 유속 등의 목표 성능을 만족하였다. 해양 건설 장비의 수중 작업에서 환경 오염 방지를 위해 공압 시스템의 설계 및 구축이 필요하다. 본 기술개발을 통해 개발된 해양 건설 작업용 ROV 플랫폼은 작업용 gripper 교체가 용이하여 다목적 활용이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 국내의 해저 환경을 고려하여 ROV의 수중 위치제어와 공압 gripper를 적용한 해양 건설 ROV 시스템을 개발하였다. 해양 건설 작업 ROV는 주행과 주요 전장비 등이 탑재되어 있어 수중에서 제어할 수 있도록 설계하였다. 또한, ROV의 수중 건설 작업 상황 및 수중 환경을 작업자가 지상에서 모니터링 할 수 있도록 유/무선 통신 중계기를 개발하였다. 그 외의 추진체, 카메라 모듈, 조명 모듈을 탑재한 해양 건설 작업용 ROV를 제작하고 성능평가를 실행하였다.

성능평가 결과, ROV의 수중 이동속도는 최대 0.89m/s로 평가되었으며, 공압 gripper의 최대 하중은 80kg의 하중이 허용 가능함을 확인하였다. 수중 ROV의 제어와 수중 영상 스트리밍에 필요한 네트워크 대역폭이 300Mbps 이상인 것을 확인하였으며, 205m에서 유선 통신은 92.7~95.0Mbit/s, 무선 통신은 78.3~84.8Mbit/s의 속도로 측정되었다.

개발한 ROV를 통해 해양 로봇 인력 확충 및 산업 활성화뿐만 아니라 해양 수질 모니터링을 통한 수중 쓰레기 수거에도 활용 가능할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National IT Industry Promotion Agency (NIPA), grant funded by the Korean government Ministry of Science and ICT(MSIT). Grant No. S1712-22-1001, for Web-based water quality and underwater inspection system using ROV.

This work was supported by the Technology development Program(S2719984) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea)

REFERENCES

- [1] S. Park and H. Yoon, "A Case Study on the Fatal Accidents of the Commercial Diving Activity in Korea," *Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, vol. 32, no. 5, pp. 1081-1062, Oct. 2020.
- [2] Y. Hwang, "Development of multi-purpose ROV system for offshore construction," Technology development Program (S2719984) funded by the Ministry of SMEs and Startups(MSS, Korea), Technical Report S2719984, 2021. [Internet]. Available: https://www.smtech.go.kr/front/csg/pr/preSearch01_detail.do?SBJT_ID=S2719984.
- [3] C. Lee, H. Jeong, K. C. Park, and J. Park, "Performance of selective combining according to channel selection decision method of frequency diversity in underwater frequency selective channel," *Korea Institute of information and Communication Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 436-442, Mar. 2022.
- [4] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. New Jersey, USA, Prentice Hall PTR, 2002.
- [5] R. D. Christ and R. L. Wernli Sr, *The ROV Manual*, Hungary, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [6] H. Seong and J. Lee, "Development of Underwater ROV for Crack Inspection of River Facilities," *Institute of Embedded Engineering of Korea*, vol. 16, no. 4, pp. 1081-1062, Aug. 2021.
- [7] D. Park and H. Yoon, "Effect of Grid, Turbulence Modeling and Discretization on the Solution of CFD," *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, vol. 20, no. 4, pp. 419-425, Aug. 2014.



박지현(Jihyun Park)

2002년 부경대학교 정보통신공학과 공학석사
2008년 부경대학교 정보통신공학과 공학박사
2017년~현재 부경대학교 음향진동공학연구소 책임연구원
2017년~현재 오션플랜 대표
※관심분야: 수중음향통신, 수중로봇, 음향신호처리



황요섭(Yoseop Hwang)

2012년 부산대학교 로봇협동과정 공학석사
2017년 부산대학교 전자전기컴퓨터공학 공학박사
2017년 부산대학교 특수환경 로봇기술연구센터 전임연구원
2017년~현재 ㈜씨랩 대표이사
※관심분야: 수중로봇, 수중항법센서, 자율항법