

Development of Robot Platform for Autonomous Underwater Intervention

Taekyeong Yeu^{ID*}, Hyun Taek Choi^{ID*}, Yoongeon Lee^{ID*}, Junbo Chae^{ID*},
Yeongjun Lee^{ID*}, Seong Soon Kim^{ID**}, Sanghyun Park^{ID***} and Tae Hee Lee^{ID***}

^{*}Marine ICT Research Division, KRISO, Daejeon, Korea
^{**}Offshore Plant and Marine Energy Research Division, KRISO, Daejeon, Korea
^{***}Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

수중 자율작업용 로봇 플랫폼 개발

여태경^{ID*} · 최현택^{ID*} · 이윤건^{ID*} · 채준보^{ID*} · 이영준^{ID*} · 김성순^{ID**} · 박상현^{ID***} · 이태희^{ID***}

^{*}선박해양플랜트연구소 해양ICT연구본부
^{**}선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부
^{***}한양대학교 미래자동차공학과

KEY WORDS: Underwater robot 수중로봇, Autonomous intervention 자율작업, 7-function manipulator 7관절 로봇팔, Structural analysis 구조해석, ROS(Robot operating system) 로봇운영시스템

ABSTRACT: KRISO (Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering) started a project to develop the core algorithms for autonomous intervention using an underwater robot in 2017. This paper introduces the development of the robot platform for the core algorithms, which is an ROV (Remotely Operated Vehicle) type with one 7-function manipulator. Before the detailed design of the robot platform, the 7E-MINI arm of the ECA Group was selected as the manipulator. It is an electrical type, with a weight of 51 kg in air (30 kg in water) and a full reach of 1.4 m. To design a platform with a small size and light weight to fit in a water tank, the medium-size manipulator was placed on the center of platform, and the structural analysis of the body frame was conducted by ABAQUS. The robot had an IMU (Inertial Measurement Unit), a DVL (Doppler Velocity Log), and a depth sensor for measuring the underwater position and attitude. To control the robot motion, eight thrusters were installed, four for vertical and the rest for horizontal motion. The operation system was composed of an on-board control station and operation S/W. The former included devices such as a 300 VDC power supplier, Fiber-Optic (F/O) to Ethernet communication converter, and main control PC. The latter was developed using an ROS (Robot Operation System) based on Linux. The basic performance of the manufactured robot platform was verified through a water tank test, where the robot was manually operated using a joystick, and the robot motion and attitude variation that resulted from the manipulator movement were closely observed.

1. 서 론

오늘날 상당수의 수중작업(수중구난, 해양과학탐사, 해저유전 개발 등)에 무인수중로봇(UUV, Unmanned underwater vehicle)이 지속적으로 사용되어오고 있으며, 이들 작업은 수중에서의 조작(Manipulation) 기능까지 요구한다. 대부분의 수중작업은 한 개 이상의 로봇팔(Manipulator or robot arm)을 갖춘 유인잠수정(Manned submersible) 또는 원격운용잠수정(ROV, Remotely operated vehicle)에 의해 수행되어 오고 있다. 유인잠수정은 운용자가 직

접 잠수정에 탑승하여 로봇팔을 조작하기 때문에 정밀한 작업을 할 수 있다는 장점이 있지만, 항상 위험에 노출되어 있다는 것이 단점이다.

현재까지 수중작업에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 원격 운용잠수정(ROV)는 수상의 선박에 탑승한 2명 이상의 숙련된 운용자에 의해 조종된다. 이 중 한명은 로봇 자체를, 나머지 한명은 로봇팔을 각각 전담한다. 이러한 원격운용잠수정은 선상 갑판 위에 진·회수장치 및 전력공급장치, DPS(Dynamic positioning system) 등을 갖춘 전문지원선박과 숙련된 전문 인력이 요구되므로 상당

Received 20 February 2019, revised 5 April 2019, accepted 11 April 2019

Corresponding author Yeongjun Lee: +82-42-866-3864, leeyongjun@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3808-8349

© 2019, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

한 유지비용이 요구되며, 운전자의 숙련도, 작업시간에 따른 피로 누적, 그리고 운용자-잠수정 사이의 물리적 거리로 인한 시간 지연(Time delay) 등에 의해 작업 효율이 좌우되는 문제점이 있다(Haugalokken et al., 2018). 이러한 문제점들을 극복하기 위해, 자율수중잠수정(AUV, Autonomous underwater vehicle)에 로봇팔을 장착시켜 자율적으로 작업을 수행하는, I-AUV(Intervention AUV) 또는 UVMS(Underwater vehicle manipulator system)에 대한 연구가 1990년부터 진행되어 왔다(Mohan and Kim, 2015, Simetti et al., 2018). 자율수중잠수정(AUV)은 원격운용잠수정(ROV)에 비해 상대적으로 중량이 가볍고, 사람의 개입과 케이블로부터 자유로우며, 소형 선박으로 진·회수가 가능하므로 운용비용을 줄일 수 있어, 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

로봇팔을 갖춘 AUV에 관한 연구는 하와이 대학의 ODIN(Omni-Direction Intelligent Navigator), MBARI(Monterey Bay Aquarium Research Institute)의 OTTER(Ocean Technology Testbed for Engineering Research), Ifremer(French Research Institute for Exploitation of the Sea)의 VORTEX(Versatile and Open Subsea Robot for Technical eXperiment) 개발로부터 시작되었다. ODIN과 OTTER는 단일 관절(Single joint)의 로봇팔을 가진 6자유도(Degree-of-freedom)의 AUV인 반면, VORTEX는 7관절의 로봇팔을 지닌 5자유도의 ROV이다. 이들은 수중 로봇팔의 유체동역학 모델링 또는 로봇-로봇팔 연계 시뮬레이션 및 제어를 위한 연구 목적의 테스트 베드(Test-bed)로 사용되었다. 이후, 1990년 중반 AMADEUS(Advanced manipulation for deep underwater sampling) 프로젝트는 2개의 다관절 로봇팔의 협력 제어를 통해 정교한 수중작업을 실현하고자 하였다. 여기서는 3개의 손가락 및 7관절의 전기식 수중 로봇팔이 개발되었다. 2001년 SWIMMER 프로젝트에서는 하이브리드(AUV/ROV)라는 새로운 개념이 제안되었다. 여기서의 AUV는 ROV를 수중 목표지점까지 이송하는 자율 수송선(Shuttle)으로서, 지원 선박으로부터 수중에 진수되면 수중 구조물에 설치된 도킹스테이션(Docking station)까지 스스로 이동하여 접안(Docking)하는 임무를 수행한다. ROV는 도킹스테이션과 연결되고, 이를 통해 일반적인 ROV 운용 형태로 작업을 수행한다. SWIMMER 프로젝트 이후, ALIVE(Autonomous light intervention vehicle)와 SAUVIM(Semi-autonomous vehicle for intervention mission) 프로젝트가 추가로 진행되었다. ALIVE는 7관절 로봇팔을 가진 4자유도 작업용 AUV를 일컬으며, 수중 작업 패널(Pannel)까지 스스로 접근하여 로봇팔 외 고안된 2개의 유압 손잡이(Grab)를 이용하여 도킹하고 로봇팔을 이용하여 밸브를 조작하는 등의 간단한 작업을 자율적으로 수행하게 된다. 유압 손잡이에 의해 로봇이 고정됨에 따라 로봇팔 작업에 의해 발생하는 운동 영향력은 전혀 고려되지 않았다. 반면, SAUVIM 프로젝트는 로봇팔 작업에 따른 영향력까지 고려하였으며, AMADEUS 프로젝트에서 사용한 7관절 전기식 로봇팔을 AUV에 적용하여 해저면의 물체를 자율적으로 회수하는 성과를 달성한다. 이후 RAUVI(Reconfigurable AUV for intervention) 프로젝트는 수중 작업을 위한 재구성(Reconfigurable) AUV 개발에 초점을 두었으며, 그 결과물로 GIRONA500 I-AUV(작동수심 500m, 중량 140kg(로봇팔 제외))가 개발되었다. 여기에는 ECA 사 또는 CSIP 사의 전기식 로봇팔이 탑재되었고, 몸체는 알루미늄 프레임과 3개의 원통형 내압하우징(Pressure housing)으로 구성되어

있다(Ridao et al., 2014).

2012년 TRIDENT(Marine robots and dexterous manipulation for enabling autonomous underwater multipurpose intervention missions) 프로젝트는 다목적 수중 작업을 위한 새로운 방법론을 제안한다. 여기서는 2개의 다른 로봇, 즉 자율수상선(ASC, Autonomous surface craft)과 I-AUV가 서로 협업하여 임무를 수행한다는 것이 특징이며, I-AUV에는 7관절과 3 손가락을 가진 정교한 수중 로봇팔이 적용되었다. 수중작업은 2단계, 즉 조사(Survey)와 작업(Intervention)으로 구성된다. 조사 단계에서는 ASC와 I-AUV가 대상지역의 지형조사를 각각 수행하여 정밀 지형도를 생성한다. 정밀 지형도를 토대로 대상물체가 사람에게 의해 선정되면, 작업 단계에서는 I-AUV가 대상물체를 스스로 찾아서 회수한다. 특히, 상기 프로젝트에서는 부두 인근에서 직접 시연을 통해 성능을 입증하였다. TRIDENT 프로젝트에 이어서 TRITON(Multisensory basend underwater intervention through cooperative marine robots)과 PANDORA(Persistent autonomy through learning adaptation observation and replanning) 프로젝트가 착수되었다. TRITON 프로젝트에서는 수중 관측 장치(Submerged observatory)에 대한 자율적 작업 능력을 입증하는 것이 목표이며, 로봇은 수중 패널에 도킹하여 밸브를 조작하고, 커넥터를 연결하고, 수중의 카메라 등을 로봇팔을 이용하여 청소까지 수행한다. PANDORA 프로젝트는 수중자율작업에 있어서 사람의 도움을 최소화하는, 즉 로봇의 자율성을 극대화하는데 초점을 두었다. 로봇이 작업에서의 실패를 스스로 인지하는 것, 실패에 대응하여 새로운 계획을 수립하는 것, 불확실성에 개의치 않고 학습과 제어를 통하여 강인하게 대처하는 등의 알고리즘을 개발하고자 하였다(Ridolfi et al., 2015).

선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering, KRISO)에서는 2017년부터 수중에서의 로봇의 자율작업에 필요한 핵심 알고리즘 개발 연구에 착수했으며, 본 논문에서는 이를 위한 수중자율작업용 로봇 플랫폼 개발에 관한 내용을 소개하고자 한다. KRISO 자율작업용 로봇은 육상으로부터 케이블을 통해 전력과 통신을 공급받는 ROV 형태이며, 7관절의 전기식 로봇팔을 탑재하고 있다. ROV 형태로 제작된 이유는 지속적인 전력공급과 통신, 그리고 알고리즘 개발 과정에서 무한의 수정이 용이하여 AUV보다 유리한 장점을 가지고 있기 때문이다.

로봇 플랫폼 설계에 앞서, ECA Group 사의 7E-MINI 모델을 수중 로봇팔로 선정하였으며, 이것의 기중 중량은 51kg(수중 30kg), 최대 길이는 약 1.4m이다. 로봇 플랫폼은 중형 규모의 로봇팔을 수용하면서도 수조(Water tank)에서의 운용이 가능한 크기와 무게를 갖도록 설계하는 것이 중요하다. 이를 위해, 로봇팔을 로봇 몸체 중앙에 위치시키고, 중량 최소화 및 구조 안정성 확보를 위해 몸체 프레임의 구조 해석을 수행한다. 로봇은 로봇 몸체부와 로봇팔부로 구성되며, 유사시 로봇팔부를 분리시키면 로봇 몸체부는 일반 ROV와 동일한 형태로 운용될 수 있다.

수중 자율작업에서 로봇의 수중 위치, 자세 등을 계측하기 위해 IMU(Inertial measurement unit), DVL(Doppler velocity log), 수심(Depth) 센서 등이 탑재되며, 4개의 수평추진기와 4개의 수직추진기를 통해 제어된다. 수중작업 대상 물체를 로봇이 스스로

식별하고 인지하기 위해, 2대 고화질 카메라와 레이저스캐너가 사용되며, 이것은 현재 자체 제작이 진행되고 있다(Lee et al., 2018).

로봇 운용시스템은 원격제어스테이션과 운용 S/W로 구분되며, 원격제어스테이션은 440VAC 전원을 300VDC로 변환시키는 직류전원변환장치, 광(Fiber-optic, F/O) 통신을 이더넷 통신으로 변환하는 통신변환장치 그리고 주제어용 PC 등으로 구성된다. 로봇 운용 S/W는 리눅스 기반의 ROS(Robot operating system)를 사용하며, 운영자 편의를 위한 GUI(Graphic user interface)도 개발하고 있다.

끝으로, 본 논문에서는 개발된 로봇 플랫폼의 수중 시운전을 통해 기본 성능을 검증한다. 여기서는 조이스틱(Joystick)을 통해 수동으로 동작시키면서 로봇의 움직임을 파악하는 것과 함께, 로봇팔 움직임에 따른 로봇 자세 변동을 관찰한다.

2. 수중 자율작업용 로봇의 구성

수중에서의 자율작업에 필요한 핵심 기술 개발을 위해 선박 해양플랜트연구소에서는 수중 자율작업용 로봇을 개발하였다(Fig. 1). 자율작업용 로봇은 크게 로봇 몸체부와 로봇팔부로 구성되며, 로봇팔부를 분리시키면 조사 목적의 ROV 형태를 갖는다. 로봇 몸체부와 로봇팔부는 알루미늄 판(Plate)을 통해 서로 연결되며, 볼트·너트를 이용하여 최종 체결된다.

로봇 몸체부는 알루미늄 프레임, 4개의 수평추진기, 4개의 수직추진기, 4개의 부력재 블록, 로봇제어용 내압용기(Housing for robot control) 및 수중 이미지용 내압용기(Housing for underwater image), IMU, DVL, 수심(Depth) 센서, 4대의 수중 카메라, 2개의 LED(Light emitting diode) 라이트(Light), 수중레이저스캐너로 구성된다.

로봇팔부는 7관절의 전기식 수중 로봇팔과 함께, 압력보상기, 압력보상용 매니폴더 블록(Mainfold block), 로봇팔용 내압용기

(Housing for manipulator) 그리고 알루미늄 프레임으로 구성된다.

최종 제작된 KRISO 자율작업용 로봇의 크기는 너비 920mm, 길이 1,100mm, 높이 1,200mm이며, 기중 중량은 약 206kg이다. 로봇팔은 기중 중량이 51kg이며, 최대 길이는 약 1,400mm이다. 본 로봇의 경우, 전체 규모에 비해 로봇팔의 규모가 다른 로봇들과 비교했을 때 상대적으로 큰 것이 특징이다. 이것은 수조 또는 실험실에서의 원활한 핸들링(Handling) 및 실험을 위해 로봇의 크기와 무게를 제한해야 하는 것이 주된 원인이다. 이로 인해 로봇 설계에 있어서는 프레임 경량화 및 핵심장치 배치, 그리고 로봇 운동제어에 있어서는 로봇팔 움직임에 의해 발생하는 영향력을 최소화 하거나 보상하는 것이 매우 중요하다.

2.1 로봇팔

상용의 수중 로봇팔(Manipulator or robot arm)은 구동 방식에 따라 유압식(Hydraulic type)과 전기식(Electric type)으로 구분된다. 대부분의 상용 수중 로봇팔은 유압식이 널리 개발·이용되고 있으며, 이유는 중량 대비 큰 힘을 발생시키므로 높은 작업 하중(Payload) 능력을 가지기 때문이다. 그러나 단점으로는 유압을 발생시키는 파워팩이 별도로 필요하므로, 로봇 내부의 설치공간이 요구되며 중량도 증가한다. 이에 반해, 전기식 수중 로봇팔은 작업 하중 능력은 상대적으로 작지만, 유압 파워팩(Power pack)과 같은 별도의 큰 장비를 요구하지 않는다(Sivcev et al., 2018). 상용으로 출시되는 전기식 수중 로봇팔 제품은 매우 제한적(ECA Group, Grall tech 정도)이며, 그 외의 대부분은 연구용으로 개발된 프로토타입(Prototype)이다.

본 연구에서는 수중 전기식 로봇팔로서, 비교적 수급이 쉬운 ECA Group 사의 7E-MINI 제품(Fig. 2)을 채택하였다. 이것은 그리퍼(Gripper) Jaw(집게)의 개폐(Opne/Close)를 포함하여 총 7개의 관절을 가지며, 수중 중량 30kg(육상 51kg), 작업 하중 25kg, 작업수심 300m이다. 이것의 세부 사양은 Table 1과 같다.



Fig. 1 KRISO Intervention ROV



Fig. 2 7E-MINI Manipulator of ECA Group

Table 1 Specifications of 7E-MINI Manipulator

Items	Value
Functions	7
Weight	30 kg (in water), 51 kg (in air)
Material	6082 T6 Aluminum Alloy, Hard anodized
Power	24 VDC, 100 W
Depth	300 m or 3,000 m (Oil filled)
Communication	RS232
Reach(full)	1,439 mm
Lift capacity	25 kg (full reach)
Angle ranges	Slew 120° Elevation 120° Elbow 130° Forearm 340° Wrist pitch 120° Jaw : 360°

7E-MINI 로봇팔은 몸체와 함께, 제어 내압용기, 압력보상기 (Pressure compensator), 각 관절의 압력보상용 매니폴더 블록 등으로 구성된다.

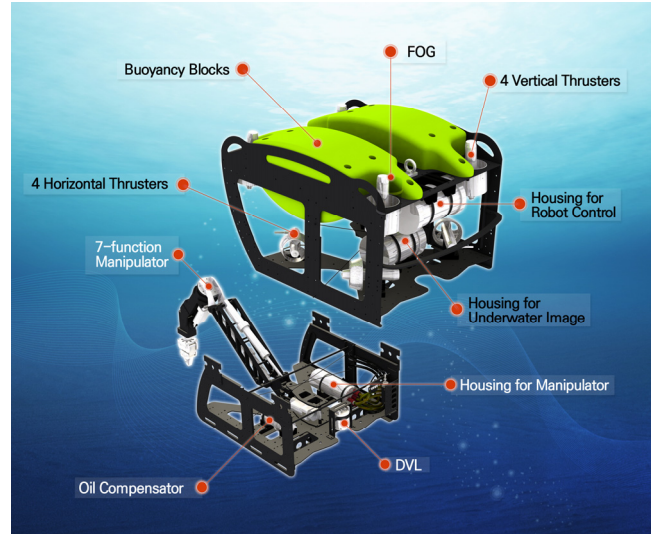
상기 로봇팔은 전용의 내압용기를 통해 원격으로 제어된다. 각 관절은 속도 지령을 통해 움직이며, 엔코더(Encoder) 등에 의해 위치와 속도 값이 계측된다. 이러한 모든 제어는 RS232 시리얼 통신을 통해 구현된다. 그리고 집게(Gripper Jaw) 조작용 제외하 6개 관절 중, 4개의 관절은 리니어 액츄에이터(Linear actuator), 나머지 2개는 회전식(Rotary) 액츄에이터에 의해 작동된다.

2.2 추진기 및 센서

앞서 설명한 것과 같이, 로봇 추진기는 4개의 수평추진기와 4개의 수직추진기, 그리고 센서는 IMU, DVL, Depth 센서, 4개의 카메라, 2개의 LED 라이트, 레이저스캐너로 이루어진다(Fig. 3).

수평추진기는 Tecnamdyne™ 사의 Model 561로서, 전격 전력은 300VDC, 1kW이다. 수직 추진기는 동일사 제품의 Model 541로서 300VDC, 500W이며, 정·역 출력이 동일하다. 두 추진기는 RS455 시리얼 통신에 의해 작동되며, PWM(Pulse width modulation) 값(0 ~ 255) 지령을 통해 속도(RPM) 제어가 구현된다.

센서에 있어서는 먼저, 수중 항법을 위해 Advanced Navigation 사의 IMU, Spatial FOG, Nortek 사의 1MHz DVL, 그리고 수심

**Fig. 3** Configuration of KRISO ROV

측정을 위한 MENSOR 사의 CPT9000(500kPa) 압력 센서가 채택되었다.

자율작업 로봇의 수중 전방 주시를 위하여, DeepSea Power & Light 사의 아날로그식 카메라, WSC-4060과 LED 라이트, LSL-2000이 사용된다.

수중 작업 대상 물체의 수중 3차원 복원을 위해서는 자체 개발된 수중 디지털 카메라 및 레이저스캐너가 적용되며, 현재 자체 제작 중에 있다(Lee et al., 2018). 각 센서별 세부 사양은 Table 2와 같다.

3. 로봇 설계

KRISO 수중 자율작업용 로봇 설계에 있어서의 기본적 요구 사양은 기 선정된 ECA 7E-MINI 로봇팔을 수용하면서도 수조에 서의 운용 및 실험이 용이하도록 그 크기와 중량을 최소화하는 것이다. 이를 위해 제한된 공간 내에서의 로봇팔을 비롯한 핵심 장치들의 배치 설계와 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 활용하여 로봇 몸체 프레임의 구조 안전성 해석을 수행하였다.

3.1 핵심장치 배치 설계

수조 또는 실험역에서의 원활한 핸들링(Handling) 및 실험을 위해 로봇의 크기와 무게를 제한하고 상대적으로 큰 규모의 로

Table 2 Specifications of Sensors

Items	Model	Communication	Accuracy
IMU	Spatial FOG	RS232	Accuracy: Heading 0.05°, R&P 0.01°
DVL	Nortek DVL 1 MHz	RS232	Altitude 50 m, Resolution 0.01 mm/s
Depth	CPT9000 (500 kPa)	RS232	Accuracy 0.008 % IS-33
Analog camera	WSC-4060	Composite	450TVL, 0.1 Lux at f/1.2
LED light	LSL-2000	RS485	9,000 Lumens, Dimming Control
Digital camera	Under developing	POE	-
Laser scanner	Under developing	RS232	-
Multi-beam	M900-90	RS232	FOW 90°, Resolution 25.4 mm

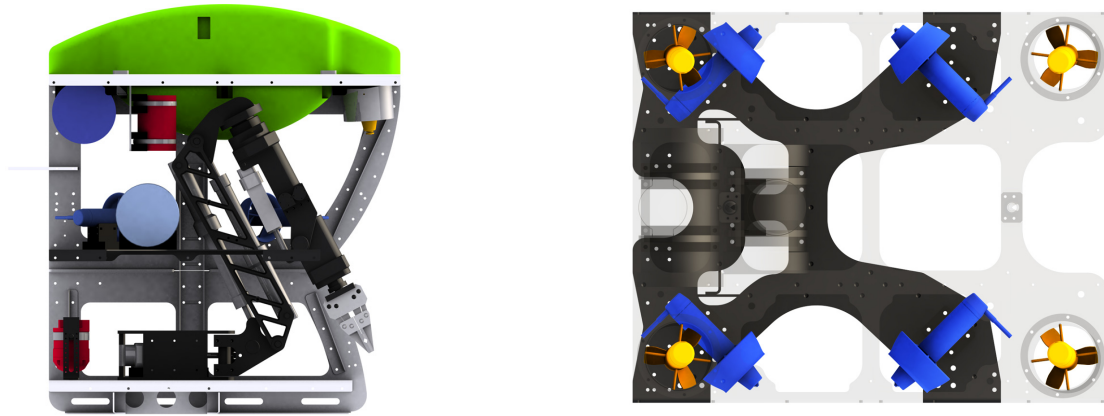


Fig. 4 Arrangement drawings of main devices on KRISO ROV: (Left) Manipulator, (Right) Thrusters

로봇팔을 탑재시키기 위해서는 프레임 경량화 및 핵심장치 배치 설계가 매우 중요하다.

일반적인 수중로봇의 경우, 로봇팔 중량은 로봇 중량의 약 1/10 수준이지만, 본 작업용 로봇은 약 1/4 정도이다. 또한 로봇팔 배치에 있어서도, 대부분 작업 공간(Workspace)을 최대한 확보하기 위해 로봇의 전면부에 위치시키는 것과 달리, KRISO 로봇은 로봇팔을 로봇 중심에 위치시킴으로써(Fig. 4), 별도의 중량 보상 없이 초기 상태에서의 균형을 유지하도록 하였다. 그러나 이로 인해 각종 센서 설치에 필요한 내부 공간 확보에 어려움이 있으며, 로봇 내부에서의 로봇팔 움직임을 보장하기 위하여 로봇팔 하단과 로봇 상부 프레임 사이의 전고를 높여야 하는 단점을 가진다. 로봇 전고 문제는 로봇 프레임 상부의 앞부분을 개방시킴과 동시에 부력재 블록((Buoyancy block)을 좌·우로 분리시킴으로써 해소된다.

다음으로, 추진기 배치에 있어서는 로봇의 수평 운동을 제어하기 위한 4개의 추진기, 수직 운동제어를 위한 4개의 추진기, 총 8개의 추진기가 적용되었다. 수평 추진기의 경우, 벡터 방식을 고려하여 로봇 전면 기준으로 45°회전시켜 배치하였다. 이것은 전·후진 움직임보다 좌·우 위치 및 방위각 변경 등의 자세 유지에 초점을 둔 것으로, 로봇의 자율 작업시의 위치 유지 및 경로 제어를 염두에 둔 것이다(Christ and Werinli, 2007). 수직추진기의 경우, 4개 모두 중심 방향으로 5° 기울여 설치되었다. 기울기 5° 제한은 로봇팔 움직임에 따른 로봇 몸체의 롤(Roll) 및 피치(Pitch) 운동보상을 위해 수직 방향의 추력을 최대한 확보하는 것과 수직추진기 작동에 따른 로봇 상·하 방향으로의 유동이 로봇 몸체에 직접 영향을 미치지 못하도록 하는 범위 내에서 설정되었다.

그 외, IMU, DVL, 로봇 제어용 내압하우징은 로봇 후면부에 배치하였으며, 이것은 수중 작업 시 로봇팔이 로봇 전면부로 움직임에 따라 질량중심이 앞쪽으로 이동하는 현상을 조금이나마 보상하기 위한 것이다.

3.2 몸체 프레임 설계

본 절에서는 앞서 배치 설계된 로봇 몸체 프레임의 구조적 안전성을 확보하고, 이를 설계에 반영하기 위하여 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 구조 해석을 수행하였다. 수중 자율 작업용 로봇은 여러 운용조건 중 크레인 또는 LARS(Launch and

recovery system)를 이용하여 선박에서 수중으로 진·회수될 때 최대 하중이 발생하기 때문에, 이러한 해석조건을 고려하여 구조 해석을 진행하였다. 해석을 위한 경계조건으로는 진·회수 시, 크레인 등과 체결되는 부분에 대해 자유도를 구속하였다. 하중 조건으로는 자율작업로봇의 무게, 진·회수 작업 과정에서 케이블을 감거나 멈출 때의 가·감속에 의한 힘, 수중에서 운동하는 물체에 작용하는 부가질량, 파도에 의한 파력, 바람에 의한 풍력, 그리고 부력 등이 있다. 이러한 하중 조건들 중에서 파력과 풍력은 자중에 비해 상대적으로 작으며, 만약 파력과 풍력이 클 때에는 실제 진·회수를 진행하지 않기 때문에 본 해석 조건에서는 고려하지 않았다. 아울러, 진·회수 작업 시 로봇이 해수면 밖으로 나온 상황으로 가정하여 부가질량에 의한 하중과 부력도 본 해석에서는 고려하지 않았다.

본 구조 해석에 고려된 하중 조건은 Table 3, 그리고 경계 조건은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 왼쪽 그림은 수중 자율작업용 로봇에 배치된 장비들의 무게에 대해 집중질량으로 나타낸 것이며, 오른쪽은 해석을 위한 경계 및 하중 조건을 나타낸 것이다. 자율작업용 로봇의 유한요소모델을 확보하고 구조 안전성을

Table 3 Mass acted on the robot body

Items	Mass [kg]	Total Mass [kg]
Frame	44.4	186.0
Robot arm	51.4	
Other equipments	67.2	
Buoyancy	23.0	

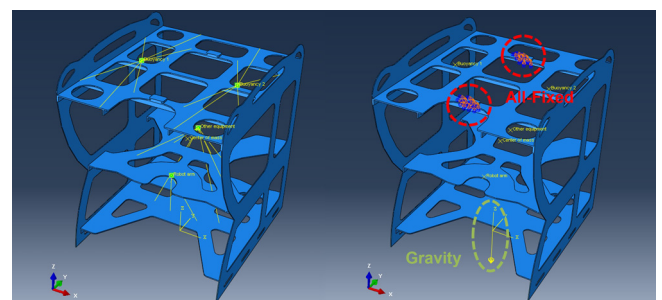


Fig. 5 Boundary condition for structural analysis : (Left) Distributed mass (Right) Boundary & loading condition

평가하기 위해 ABAQUS에서 정적해석(Static, General)을 수행하였으며, 진·회수 시 해석조건에서의 최대 응력을 확인하였다. 정적해석 결과는 Fig. 6(a)와 같고, 진·회수 시 크레인 등과 체결되는 뒷부분에서 76.55MPa인 1차 최대 응력이 발생하며, 다른 부분에 비해 상대적으로 구조적 취약함을 보인다. 이는 로봇 팔, 기타 장비들, 부력재 등의 자중에 의해 프레임이 z방향으로 처짐이 생겨서, 이를 지지하는 프레임과 체결되는 부분에서 최대 응력이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 2차 최대 응력으로는 로봇 프레임 옆의 하부 판 모서리 부분에서 20.58MPa로 발생한다. 본 연구에서 고려한 로봇 프레임의 재질인 AL 6061-T6의 항복 강도 276MPa를 고려할 때, 응력 관점에서 로봇 프레임은 충분한 안전성을 갖추었다고 판단할 수 있으며, 안전계수는 약 3.6을 확보하였다.

로봇 프레임의 전체 모드 형상을 평가하기 위해, 진·회수 시의 경계조건을 적용한 주파수 해석을 추가적으로 수행하였다. 로봇 프레임의 주파수 해석 결과는 Fig. 6(b)와 같다. 여기서 왼쪽의 첫 번째 모드 형상은 프레임의 좌·우 비틀림 형상이며, 그 때의 주파수는 약 2.2513Hz이다. 오른쪽의 두 번째 모드 형상은 진·회수 시 수직 방향으로의 굽힘 형상이며, 주파수는 약 9.1280Hz이다. 주파수 해석 결과 상대적으로 낮은 주파수 영역에서 발생하기 때문에 좌우 비틀림과 수직 방향의 굽힘 형상에 대해서 보강이 필요하다.

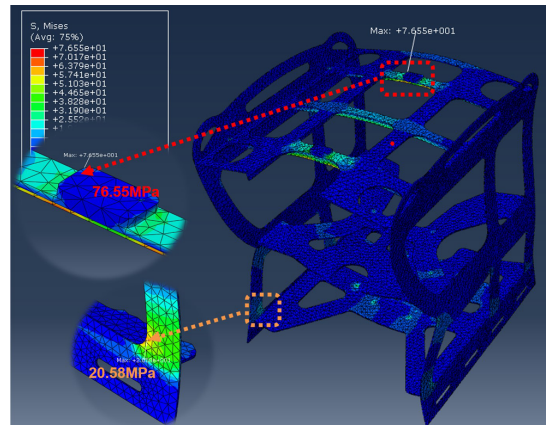
결국, 비틀림 현상을 보강하기 위해 로봇 프레임의 옆판에 3T의 ‘C’자 리브와 스테인리스강(Stainless steel) 봉을 추가하였고, 굽힘 형상에 대해서는 프레임의 상판 리브에 판을 추가적으로 보강하여 로봇 프레임 설계에 반영하였다.

3.3 로봇 전기·전자시스템 설계

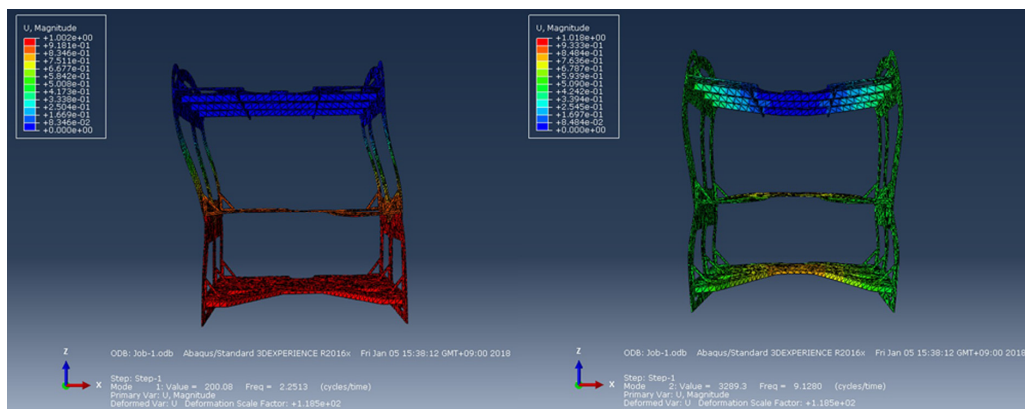
3.1절에 설명된 추진기 및 센서들과 로봇 운용시스템 사이의 인터페이스를 위해, 2개의 내압하우징, 로봇 제어용 하우징과 3차원 물체 복원을 위한 수중 이미지용 하우징이 설치된다. 수중 자율작업용 로봇은 엄비리컬 케이블을 통해, 선상으로부터 300VDC 전원을 공급받으며, F/O 통신을 통해 모든 정보를 송·수신한다.

로봇 몸체 운동 및 로봇팔 관련 정보는 로봇 운동 제어용 하우징을 통해 수상으로 전송되며, 3차원 물체 복원을 위한 모든 정보는 복원용 하우징을 통해 수집되고, 다시 로봇 제어용 하우징을 거쳐 수상으로 전송된다. 로봇 제어용 하우징과 복원용 하우징은 이더넷(Ethernet) 통신을 통해 서로 정보를 교환한다(Fig. 7).

로봇에 설치된 센서들은 선상으로부터 각 내압하우징에 보내진 고압 300VDC 전원을 내부에 설치된 DC-DC 변환기(Converter)를 통해 저압으로 강압한 24VDC의 전원을 공급받는다. 각 하우징 내부의 사용 전류 및 전압, 온도 및 습도 등의 정보도 별도로 제공된다.



(a) Static analysis result: maximum stress



(b) Frequency analysis results: (Left) 1st mode, (Right) 2nd mode

Fig. 6 Structural analysis of robot body frame using ABAQUS

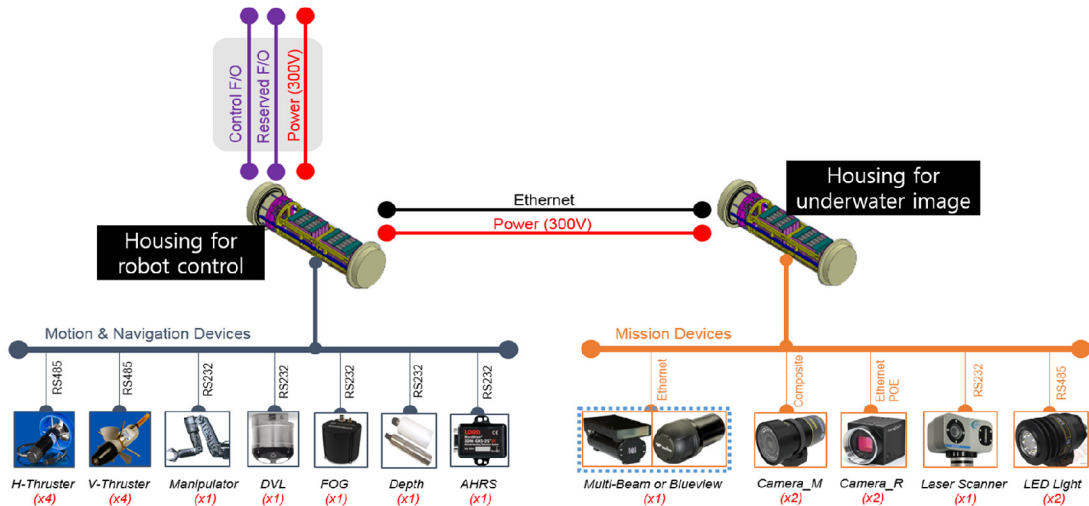
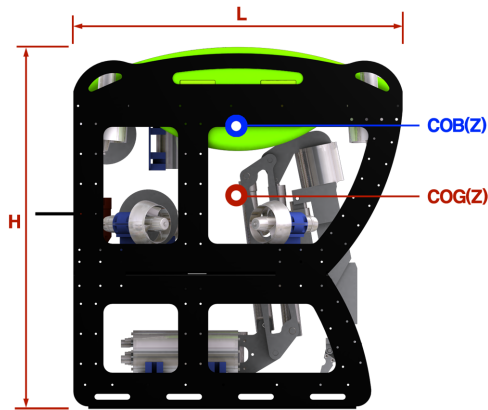


Fig. 7 Electric-Electronic system of KRISO Intervention ROV

Table 4 Specifications of KRISO Intervention ROV

Items	Value
Mass	206.1 kg
Length (L)	1,100 mm
Height (H)	1,266 mm
Width	924 mm
COG (Z)	721.7 mm
COB (Z)	933.3 mm
Projected area front	815,526
Projected area side	1,082,807 mm ²
Projected area top	980,343 mm ²



로봇 전체 중량 및 부력, 그리고 그 중심점의 위치 정보를 얻기 위해, 프레임, 각종 센서를 비롯한 모든 부품들의 기중 및 수중 중량을 직접 측정하여, 최종적으로 이들 정보를 CAD 도면에 반영하여 얻어진 로봇의 사양은 Table 4와 같다. 부력중심(COB, Center of buoyancy)과 무게중심(COG, Center of gravity)은 로봇의 수평면 중심점에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 로봇 운용

4.1 로봇 운용시스템

로봇 운용시스템은 선상의 원격제어스테이션(Remote control station), 키보드(Keyboard), 조이스틱(Joystick) 등의 제어 장치(Control device), 그리고 운용 S/W로 구성된다(Fig. 8).

원격제어스테이션은 교류 440V 전원을 직류 300V로 변환시키는 직류전압변환장치, F/O 통신을 이더넷 통신으로 변환하는 통신변환장치 그리고 주제어용 PC 등으로 구성되며, 키보드 및 조이스틱은 주제어용 PC에 접속되어 운전자의 지령을 전달하는 제어 장치에 속한다.

로봇 운용 S/W는 리눅스 기반의 ROS를 채택하였으며, 사용자 편의를 위한 GUI 개발에 있어서도 ROS가 제공하는 3D 가시

화 프로그램인 RViz를 활용한다.

Fig. 8에서 중앙의 사각형 부분은 로봇 운용 S/W 구조 및 세부 내용을 나타낸다. 이것은 Preliminary level, Fundamental level, Perception level, Navi. & Planning 및 Control level, 그리고 Task level의 5단계(Level)의 계층 구조를 갖는다. Task level에서 Task는 수중 물체 파지(Underwater object grasping)로 정의되며, Preliminary 단계에서의 프로그램은 주위 환경, 전력과 통신 상태, 로봇 상태 등의 정보들을 계측하거나 예측하는 것, 그리고 Fundamental 단계에서는 추진기 추력 관계식, 대상 물체 3차원 정보 추출, 로봇-로봇팔의 기구학 및 역기구학 등이 포함되며 이미 개발이 완료 되었다. 현재, Perception 단계와 Navi. & Planning 및 Control 단계의 프로그램들이 개발되고 있다.

4.2 수조 시운전

앞서 설계·제작된 자율작업 로봇은 앞으로 KRISO 내의 수조(Water tank)에서 기본 성능 및 핵심 알고리즘 검증 실험 등이 진행될 것이다. 실험 수조의 크기는 폭 5m × 길이 20m × 깊이 2.7m이며, 지원 장비로는 전차(Carriage)가 구비되어 있다(Fig. 9). 전차는 지원 선박의 역할을 담당하며, 수전반과 원격제어스테이션 등이 설치된다. 로봇의 진수에 앞서 육상 점검(수밀 상태, 통전 및

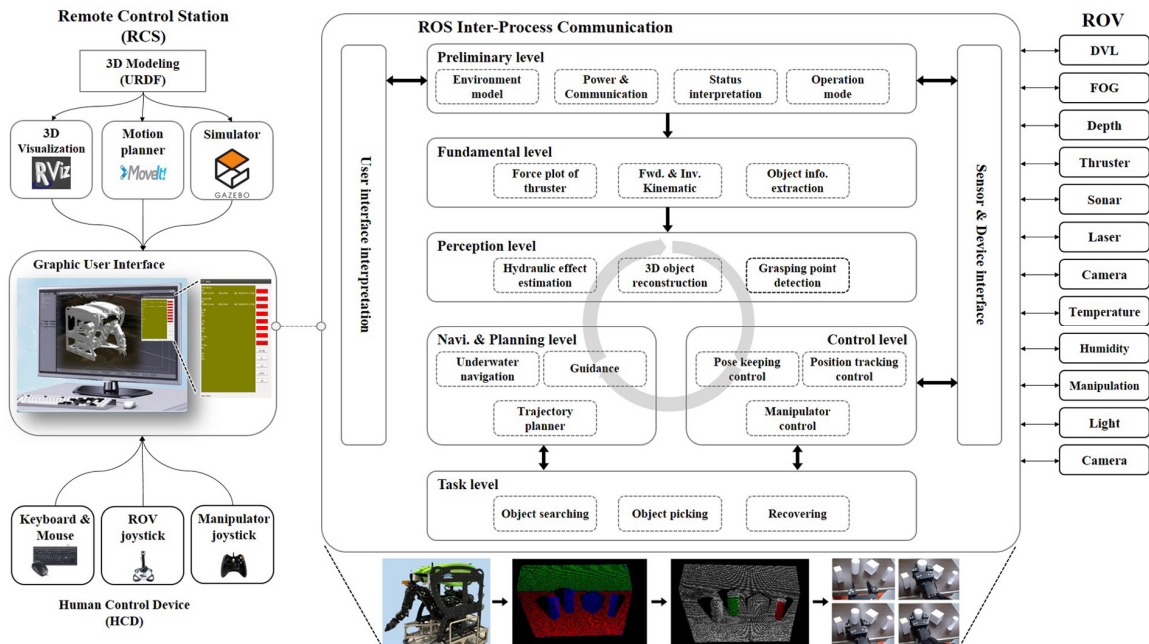


Fig. 8 Configuration of robot operation system



Fig. 9 Scene of water tank test with KRISO ROV

통신 상태, 기본 작동 상태)과 수중 균형(Balancing) 작업이 수행되며, 특히 본 과정에서는 로봇의 수중 중량 보다 부력이 약 4kg 정도 높게 제작되어 있어, 3.5kg의 중량물(Weight)을 추가시켜 전체 균형을 맞추었다.

수조에서의 로봇 기본성능은 조이스틱 수동 조작을 통한 전·후, 상·하, 회전 등의 운동 성능과 로봇팔의 움직임에 따른 로봇의 자세 변동을 확인하는 것에 초점을 두었다.

로봇의 운동 성능은 Fig. 10과 Fig. 11에서 확인할 수 있다. Fig. 10은 수동 조작에 따른 로봇의 x 및 y 방향의 속도, 그리고

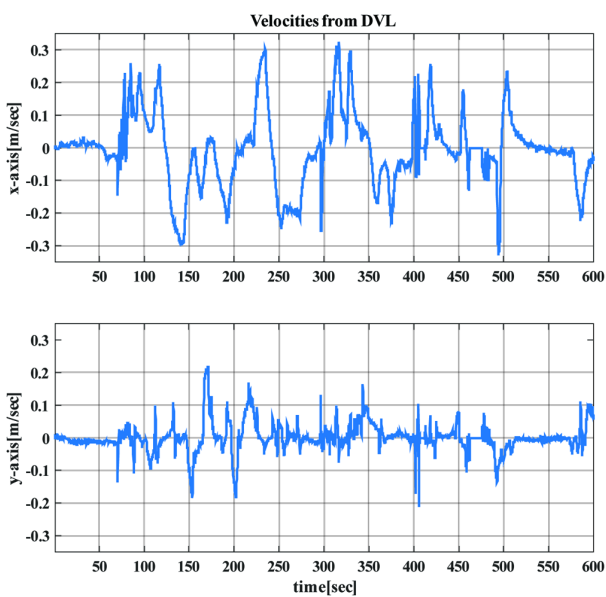


Fig. 10 Velocities from DVL in manual operation

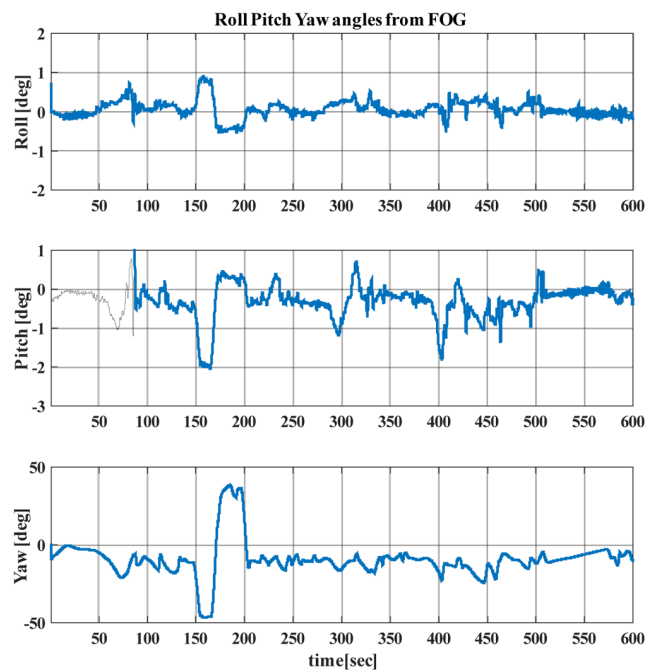


Fig. 11 Roll, Pitch and Yaw angles of robot platform in manual operation

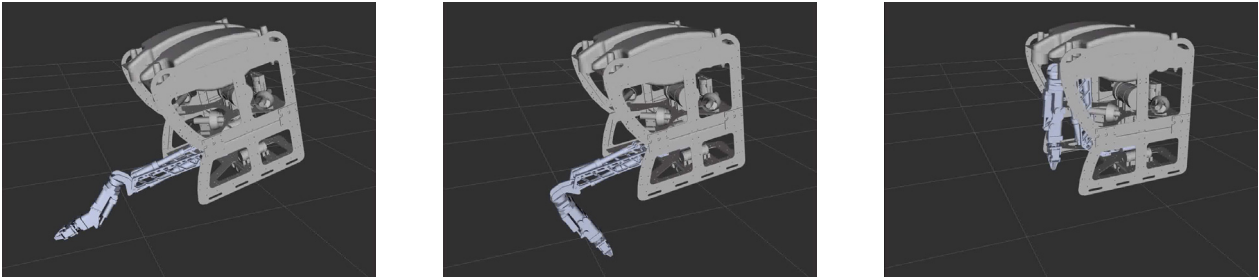


Fig. 12 Robot attitude variation by manipulator motion: (Left) Full-reach (Middle) Half-fold (Right) Fold

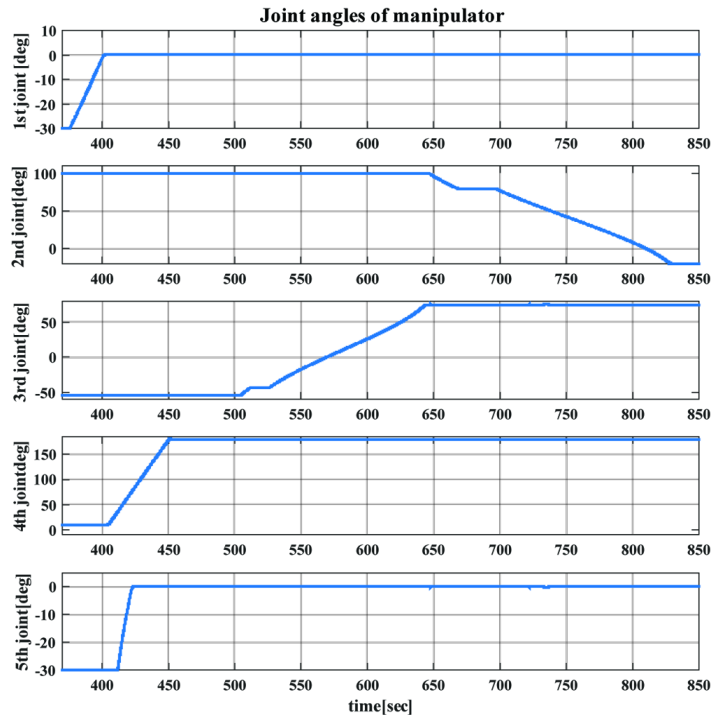


Fig. 13 Joint angles in manipulator operation

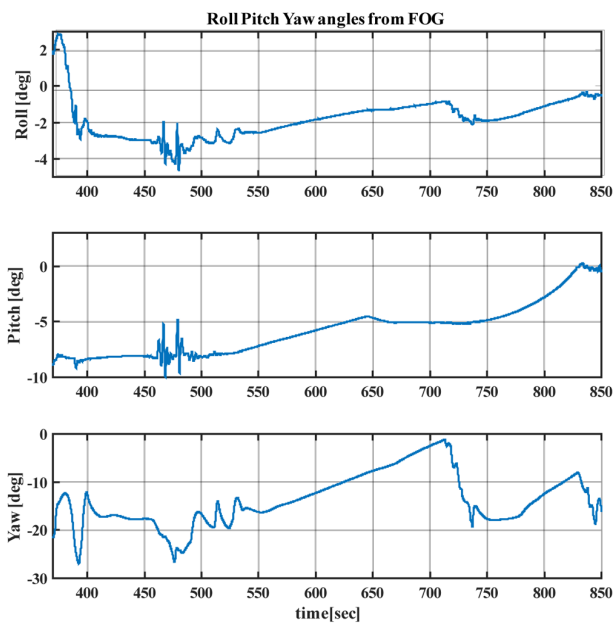


Fig. 14 Roll, Pitch and Yaw angle of robot platform in manipulator operation

Fig. 11은 x, y, z 방향(Roll, Pitch, Yaw)의 회전각을 각각 나타낸다. Fig. 11의 150초부터 200초까지 구간의 큰 회전 운동에서는 롤(Roll) 각은 1° 그리고 피치(Pitch) 각은 2° 정도의 운동을 보이지만, 그 외 전·후 또는 좌·우 움직임에서는 롤 각은 0.5° , 피치 각은 1° 범위 내에서 움직이는 것을 확인할 수 있다.

로봇팔의 움직임에 따른 로봇의 운동을 확인하기 위해, Fig. 12의 왼쪽부터 오른쪽까지와 같이 로봇팔을 로봇 앞으로 완전히 뻗은 다음 로봇 몸체 중앙으로 서서히 접으면서 변화를 측정하였다. Fig. 13은 로봇팔이 움직이는 동안 계측된 각 관절의 각도를 나타낸다. 6번과 7번 관절은 멈춰있어서 그래프에 나타나지 않았다.

Fig. 14는 로봇팔 움직임에 따른 로봇의 x, y, z 방향(Roll, Pitch, Yaw)의 각도를 나타내고 있다. Fig. 12의 왼쪽 그림과 같이 로봇팔이 앞으로 완전히 뻗었을 때, 로봇 피치(Pitch) 각도는 최대 8° 까지 앞으로 기우는 것을 알 수 있다. 로봇팔 움직임은 로봇 자세 뿐만 아니라 로봇 방위각(Yaw angle)에도 영향을 미치는 것이 확인되었다. 이러한 로봇팔 움직임에 따른 영향 특성은 추가 실험을 통해 면밀히 분석될 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 KRISO에서 수중 자율작업에 있어서의 핵심 알고리즘 확보에 필요한 로봇 플랫폼 개발에 관하여 소개하였다. KRISO 자율작업용 로봇은 ROV 형태를 갖추고 있으며, 7관절의 전기식 로봇팔을 탑재하고 있다. 여기에는 ECA Group사의 7E-MINI 로봇팔을 선정하였으며, 중형 규모의 로봇팔을 수용하면서도 수중에서의 운용이 용이하도록, 로봇팔을 로봇 중앙에 위치시키고, 무게를 최소화하기 위해 ABAQUS를 통한 구조 프레임 해석을 수행하였다. 이를 통해, 개발된 로봇 플랫폼은 너비 920mm, 길이 1,100mm, 높이 1,200mm, 중량(육상)은 약 206kg으로 제작되었다. 로봇은 수중 위치, 자세 등의 계측을 위해 IMU, DVL, 수심 센서가 설치되어 있으며, 4개의 수평추진기와 4개의 수직추진기를 통해 제어된다. 수중작업에서의 대상 물체를 로봇이 스스로 식별하고 인지하기 위해 2대의 고화질 카메라와 레이저스캐너가 사용되며, 현재 자체 제작이 진행되고 있다. 로봇 운용을 위하여 전력공급장치와 주제어(Main control) PC로 구성된 원격제어스테이션과 ROS 기반의 운용 S/W를 개발하고 있다. 끝으로, 수중에서의 조이스틱을 이용한 로봇 수동작동을 통해 로봇의 움직임과, 로봇팔 움직임에 따른 로봇 자세 변동까지 엄밀히 관찰하였다.

향후 계획으로는, 우선 로봇팔의 운동 특성 분석, 로봇 및 로봇팔의 유체저항력 측정 실험, 그리고 이를 통한 로봇 운동방정식 도출 및 제어기 설계, 다음으로는 수중레이저스캐너를 활용한 3차원 물체 자율인식 알고리즘 개발, 최종적으로는 개발된 로봇 플랫폼을 기반으로, 자율 운동보상제어 및 물체인식 알고리즘 등을 활용한 수중 대상체 자율과지(Autonomous grasping) 기술 개발 및 검증에 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 기관목적사업으로 수행되고 있는 ‘수중 자율작업을 위한 3차원 물체인식 및 로봇-로봇팔 운동보상제어 기반기술 개발’ 과제에 의해 수행되었습니다.

References

- Christ RD., Werinli RL., 2007. The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles. Published by Elsevier.
- Haugalokken, B.O.A., Jorgensen, E.K., Schjolberg, I., 2018. Experimental Validation of End-effector Stabilization for Underwater Vehicle-manipulator Systems in Subsea Operations. *Robotics and Autonomous Systems*, 109, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.08.007>
- Lee, YJ., Lee, YG., Chae, JB., Choi, HT., Yeu, TK., 2018. Development of Underwater Laser Scanner with Efficient and Flexible Installation for Unmanned Underwater Vehicle. *Journal of Ocean Engineering Technology*, 32(6), 511-517. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.32.6.511>
- Mohan, S., Kim, J.H., 2015. Coordinated Motion Control in Task Space of an Autonomous Underwater Vehicle-manipulator System. *Ocean Engineering*, 104, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.011>
- Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., Sanz, P.J., Oliver, G., 2014. Intervention AUVs: The Next Challenge. *Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Cape Town, South Africa. 12146-12159.
- Ridolfi, A., Conti, R., Costanzi, R., Fanelli, F., Meli, E., 2015. A Dynamic Manipulation Strategy for an Intervention: Autonomous Underwater Vehicle. *Advances in Robotics & Automation*, 4(2), 1-16. <https://doi.org/10.4172/2168-9695.1000132>
- Simetti, E., Casalino, G., Wanderlingh, F., Aicardi, M., 2018. Task Priority Control of Underwater Intervention Systems: Theory and Applications. *Ocean Engineering*, 164, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.026>
- Sivcev, S., Coleman, J., Omerdic, E., Dooly, G., Toal, D., 2018. Underwater Manipulator: A Review. *Ocean Engineering*, 163, 431-450. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.018>