

저가 수중 무인 이동체 개발 및 운동성능 검증

Development of a Low-cost Unmanned Underwater Vehicle and Performance Verification

황 동 욱¹ · 장 민 규² · 김 진 현[†]

Dongwook Hwang¹, Mingyu Jang², Jinhyun Kim[†]

Abstract: In this paper, a high performance underwater vehicle which can be manufactured at low cost is designed and fabricated, and its performance is verified through experiments. To improve efficiency, the Myring equation is used to design the appearance and the duct structure including the thruster is planned to increase the propulsion efficiency while reducing the drag force. Through various methods, it is secured stable waterproof performance, and also is devised to have high speed movement and turning performance. The developed underwater vehicle is equipped with a high output BLDC motor to achieve a linear speed of up to 2 m/s and can change direction rapidly with stability through four rudders. The rudders are driven by coupling a timing belt and a pulley by extending the axis of a servo motor, and are equipped at the end of the body to turn heading. In addition, for stable posture control, the roll keeps its internal center of gravity low and maintains its stability due to restoring force. By controlling the four rudders, pitch and yaw are handled by the PID controller and show stable performance. To investigate the horizontal turning performance, it is confirmed that the yaw rate controller is designed and stable yaw rate control is performed.

Keywords: Underwater vehicle, Ducted type vehicle, Waterproof, Direction changing mechanism, Myring equation

1. 서 론

본 논문에서는 수중에서 원하는 임무를 수행 할 수 있는 수중 이동체의 설계 및 제작과 이에 따른 자세 제어 알고리즘에

대하여 기술하였다. 최근 평창올림픽 등으로 드론에 대한 관심이 높아진 가운데 드론이 각광받는 이유는 누구나 쉽게 공중에서의 새로운 시야를 제공 받을 수 있기 때문으로 판단된다. 이러한 수중에서의 시야는 이미 여러 가지 방식으로 음영 지역에서의 경로추정^[1] 혹은 사이드스캔 소나^[2] 등을 이용하여 확보되어 있는 반면 그것을 탑재 할 ROV나 AUV가 너무 고가이거나 부피나 무게 면에서 대중적인 면이 부족하다. 본 논문은 그 시야를 조금 달리하여 아직 익숙지 않은 수중에서의 새로운 시야를 제공하기 위한 좀 더 작고 가벼운 수중 이동 플랫폼 개발에 초점을 맞추어 하드웨어 제작과 그에 따른 제어 알고리즘에 대하여 서술하였다.

기존의 수중 이동체는 크게 원격무인잠수정(ROV)과 자율무인잠수정(AUV)으로 분류되며^[3-6], [Fig.1]의 (a)와 같이 ROV는 원격 정밀 자세제어를 통해, 수중 관찰 및 매니플레이터 따위를 장착하여 수중에서 특정 임무를 수행하는 로봇이다. 매니플레이터 등을 이용한 특정 임무수행을 목적으로 하는 ROV는 정밀작업이 요구되는 수중작업에 적합한데, 조류

Received : Apr. 9. 2018; Revised : May. 11. 2018; Accepted : May. 15. 2018

※ This research was supported by the MOTIE(Ministry of Trade, Industry & Energy) and the KIAT(Korea Institute for Advancement of Technology) through the Industry Convergence/Connected for Creative Robot Human Resource Development(N0001126). And development of core technologies for observation class underwater robots based on current measurement and overcoming up to 2.0m/s reverse current supported by grant No. 10060065 from the Industrial Source Technology Development Programs of the MOTIE(Ministry Of Trade, Industry and Energy), Korea. And also this research was a part of the project titled "Development of small drag bio-mimetic underwater robots" funded by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea.

1. Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (dwhwang1101@gmail.com)

2. Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (12jmg1234@gmail.com)

† Corresponding author: Corresponding author: Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea (jinhyun@seoultech.ac.kr)



[Fig. 1] General ROV and AUV

에 의한 ROV의 위치제어 및 자세제어를 위해 수직방향 추진기, 수평방향 추진기, 그리고 후면에 장착된 2개의 주 추진기를 장착하고 있는 경우가 많다. ROV는 제자리에서 회전하거나 제자리에서 심도조절이 가능해야하며 그 자체로 수평방향 위치이동이 가능해야하므로 위와 같은 조합의 추진기를 장착해야만 한다. 따라서 높은 전력소모량을 가진 ROV는 내부에 비상용 배터리가 장착이 되어있지만, 주된 전력은 테더(Tether)를 통해 외부로부터 공급받는다.

AUV는 보통 무삭식 자율 무인 잠수정으로 전원공급의 한계로 인해 ROV와 같이 정밀 자세제어 보다는 항주에 목적을 두는 경우가 많다. 따라서 [Fig.1]의 (b)와 같이 보통 어뢰(Torpedo) 형상을 가진다. AUV의 이러한 형체는 수중에서의 항주 시 유체저항을 최소화하여 장거리, 장시간 운용이 주된 목적이며, 유체저항을 대폭 낮추는 형상으로 직진 운항 속도도 매우 빠르다. AUV는 ROV와는 다르게 제자리에서 위치와 자세제어를 통하여 작업하는 방식이 아닌 항주형 로봇으로, 로봇 그 자체의 이동이 목적이다. 따라서 추진기는 주 추진기 하나 내지는 둘 뿐이며 일반적으로 방향타(Rudder)를 이용하여 방향전환을 수행한다. 또한 이러한 항주형 로봇의 특성 때문에 외부에서 전력을 받아 운용되는 것이 아닌, 주로 탑재된 배터리로 운용된다. AUV는 어뢰형 형상을 가지는 경우가 대부분인데, 긴 동체를 가짐으로 인하여 유체저항을 최소화하여 빠른 직진 이동속도를 가지는 것이 특징이지만 반대로 방향 전환 시 긴 회전반경을 가지게 되어 기동성이 떨어진다.

이러한 수중 이동체는 대부분 추진기가 외부로 노출되어있어 해당분야의 전문가가 아니라면 사용에 있어 취급에 주의

요한다. 또한 ROV와 AUV는 각각의 특징과 장점을 갖고 있지만 ROV는 탐사용 관찰급으로 사용하기에는 느리며 AUV는 빠르지만 회전반경이 길어 기동이 힘들다. 따라서 이러한 단점을 상쇄하고 소형의 관찰급이나 일반적인 레저용으로 사용 가능한 무인잠수정(UUV, Unmanned Underwater Vehicle)을 구상하였다. 덱트형의 동체를 채택함으로써 추진기가 동체의 가운데에 장착되므로 구동 중에 추진체에 손이 닿지 않아 안전을 확보할 수 있으며 동체 길이를 짧게 하여 일반적인 AUV보다 회전반경을 줄여 기동성을 확보할 수 있다. 또한 일상생활과 밀접한 주변의 강과 연안에서의 운용을 목표로 하기 때문에 깊은 심도에서 구동되는 것이 아닌 비교적 얕은 깊이에서 운용될 경우 조류의 영향을 많이 받을 수 있으므로 출력이 높은 추진기를 사용하여 조류를 극복하고 목표 지점까지 이동이 가능해야 한다. 따라서 이러한 조건을 충족시킬 수 있는 추진기가 동체 내부에 장착되어 사용자의 위험을 최소화 할 수 있으며 작은 크기, 낮은 유체저항 계수와 높은 기동성을 확보하고자 하였다. 또한 고출력의 BLDC 모터를 사용하여 빠른 속도 성능과 선회 성능을 통해 조류를 극복할 수 있는 덱트형 무인잠수정을 제안 및 개발하게 되었다.

수중 이동체는 수중에서 구동되는 특성상 부식에 취약할 수 있으므로 유지 보수가 쉬워야 하며 방수성능을 필수적으로 확보해야 한다. 이를 위하여 오링과 오일 쥔, 케이블 그랜드 등을 조합하여 방수성능을 확보하였으며, 서보모터와 타이밍벨트, 폴리의 조합으로 방향전환이 가능하도록 제작하였다. 또한 이러한 방향전환 메커니즘에 맞추어 동체 내부에 장착되는 제어용 MCU에 자세제어 알고리즘을 탑재하여 이동체의 운동성능을 확보하였다.

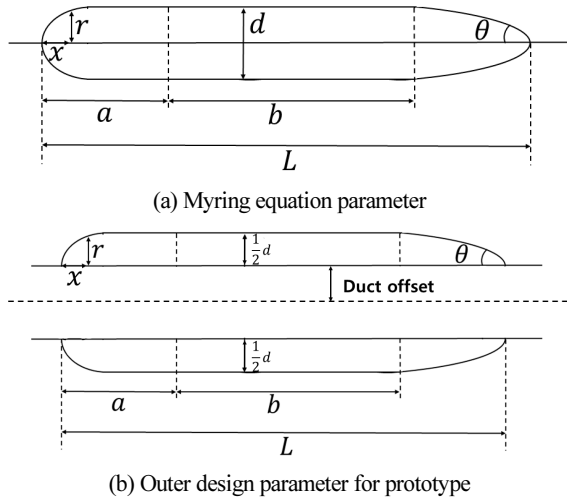
2. 수중 이동 플랫폼 설계 및 제작

2.1 플랫폼 설계

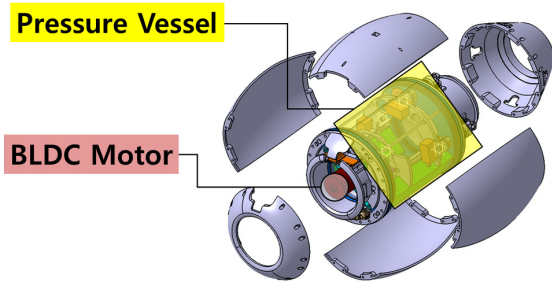
2.1.1 플랫폼 외형 설계

플랫폼 설계의 전반적인 컨셉은 효과적인 방수 성능 확보와 안정적인 운동 성능 확보를 목표로 하며 유지 보수가 용이한 조립구조를 취하도록 설계되었다. 또한 사용자의 안전을 확보하기 위하여 추진체가 외부에 노출되어있는 디자인이 아닌 동체가 덱트형의 형상을 취하여 추진체가 최대한 외부로 노출되는 것을 막아 사용자의 안전을 고려하였다^[9].

설계된 플랫폼은 크게 두 파트로 구분되며 첫 번째 압력용기 파트는 플랫폼 구동과 제어에 필수적인 전원공급용 배터리와 전장이 내장되어 수중 환경에서의 안정적인 구동이 가능하게 하였다. 두 번째 하우징 파트는 유지 보수가 간편하도록 6



[Fig. 2] Parameters of Myring equation and prototype design



[Fig. 3] Prototype : inner pressure vessel and outer housing part

조각으로 나누어 3D프린팅 하여 제작할 수 있도록 설계하였으며 각각의 조각은 임무에 따라 교체 가능한 컨셉을 취하였다. 또한 하우징의 형상은 Myring 방정식^[10]을 이용하여 어뢰 형상을 응용 설계하여 수중 구동 시 유체저항을 최소화 하는 방향으로 설계가 진행되었다.

Myring 방정식은 [Fig. 2]의 (a)와 같이 수중 이동체에서 길이와 최대 직경의 비에 대하여 최소 저항계수를 가지는 선형 방정식으로 Nose, Body, Tail의 세 가지 섹션으로 구분된다.

Myring 방정식은 식(1)과 정리된 식(2)와 같으며 선체 길이 x 에 대한 반경 r 을 나타내는 식으로 유체저항 최소화에 최적화된 외형 형상을 결정해준다^[11].

$$r = \frac{1}{2}d \left\{ 1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$r = \frac{1}{2}d \left\{ \frac{3d}{2(100-a-b)^3} - \frac{\tan\theta}{(100-a-b)} \right\} + \left\{ \frac{d}{(100-a-b)^3} - \frac{\tan\theta}{(100-a-b)^2} \right\} (x-a-b)^3 \quad (2)$$

그러나 설계된 이동체의 형상은 관통형이므로 Myring 방정식을 적용하기 위해 단면의 형상을 Myring 방정식을 이용하여 초기 설계를 수행하였다. 그러나 [12]에서 고찰한 바와 같이 내부의 경우 덕트 형상에 의한 와류 감소 및 추진 효율을 고려하여 약 1°가량의 기울기를 가진 벤추리 형상으로 결정하였다. 따라서 Fig. 2의 (b)와 같이 기존 Myring 방정식을 이용하여 r 을 x 에 따른 덕트 내부 면에서 외부 면까지의 거리로 정의하여 형상의 단면을 최종 결정하였다.

2.1.2 플랫폼 구성 및 부품 선정

관통형 구조 및 외형 디자인을 바탕으로 [Fig.3]와 같이 소형 수중 로봇을 설계하였다. 플랫폼의 전방부에 장착되어 있는 추진기는 BLDC모터를 이용하여 물속에서도 가동에 지장이 없도록 분해하여 방청 작업 후 재조립하여 사용하였다.

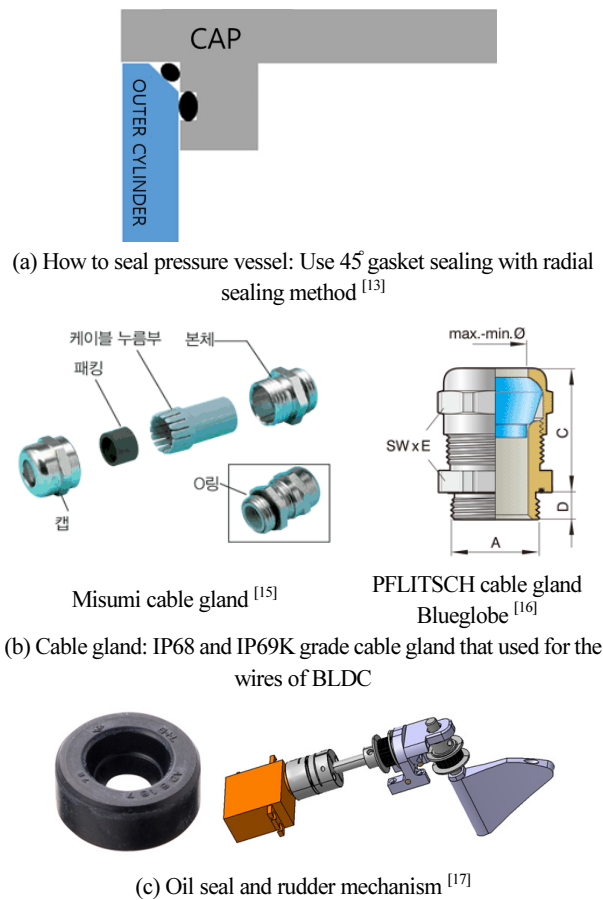
플랫폼의 전장 및 배터리가 장착된 압력용기에서 외부의 추진체에 전력 및 신호를 전달해주어야 하는 와이어와 후면부에 방향전환을 위한 방향타의 구동을 담당하는 서보모터의 축이 외부로 연결되기 때문에 방수에 대한 고려가 필수적이다. 압력용기의 경우 오링을 이용하여 압착 방수 방식으로 비교적 쉽게 방수 확보가 가능하지만, 외부와 연결되는 부분을 통해 누수가 발생할 가능성이 높기 때문에 특별히 주의를 기울여 방수 성능을 확보해야 한다.

제작한 잠수정에서는 각각 외부와 연결되는 와이어는 케이블 그랜드를 이용, 서보모터 축은 오일 씰을 이용하여 방수 처리 하는 방식을 채택하여 설계를 진행하였다. 방수 소켓을 통해 와이어 연결도 가능하지만, 소형 잠수정의 특성상 크기 문제 때문에 사용이 어려운 측면이 있었고, 목표 운용 수심이 30 m 이내이기 때문에 케이블 그랜드를 이용하는 것에 문제는 없다. 압력용기는 네 개의 피스로 구성되며 앞 뒤 캡 파트와 내측 관, 외측 관으로 이루어져 오링을 이용하여 방수 처리를 하는 방식을 채택하였는데, 이는 고정용 씰링 방식으로 수중 방수에서 보편적으로 활용하는 방식이다. 케이블 그랜드[Fig. 4](b)와 오일 씰[Fig. 4](c)은 시중에 판매 중인 규격 제품을 구매하여 사용하였으며, 오링은 지름 3 mm 두께의 오링을 사용하여 외벽과 캡 파트 조립 시 약 0.5 mm가량 (약 16%) 압축되도록 설계하여 잦은 분해조립에도 오링의 파손을 최소화 하며 방수 성능을 이끌어 낼 수 있도록 설계되었다.

2.2 플랫폼 제작

2.2.1 압력용기 제작

플랫폼의 압력용기 파트는 각각 외측 관은 무선통신이 가능하도록 아크릴 관을 가공하여 사용하였으며, 내측 관과 앞 뒤의 캡 파트는 알루미늄을 절삭가공 하여 제작하였고 아크릴

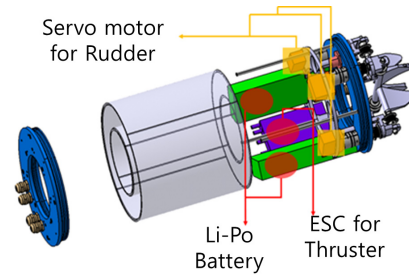


[Fig. 4] Sealing methods of inner pressure vessel of prototype

로 제작된 외측 관을 제외한 나머지 세 피스는 각각 오링 삽입이 가능하도록 그루브 가공을 하여 안정적으로 오링이 삽입되도록 제작하였다. 이때 아크릴로 제작된 외측 관은 내측 모서리에 45° 만큼의 면취 가공을 통해 오링을 압착하여 방수하는 방식을 추가하여 개스킷 방식과 유사한 형태를 취하였다. 또 진행된 설계와 같이 캡 파트 외측 면에 장착되는 오링은 3 mm 두께의 오링을 사용하여 약 0.5 mm, 약 16% 가량의 압축률을 적용하여 방수성능 확보하였다[Fig. 4(a)]^[13]. 이때 오링의 압축만큼 좌우로 인장되는 크기를 고려하여 오링이 장착될 그루브의 폭은 3.5 mm로 가공되었다. 외곽의 하우징 파트는 3D 프린팅의 특성상 발생할 수 있는 수축을 고려하여 열 수축이 덜한 PLA 재질을 이용하여 프린팅 하였으며 각각의 프린팅 된 하우징 피스들은 압력용기 앞뒤의 캡 파트와 조립되는 구조를 취하였다. 최종적인 압력용기의 형태는 [Fig. 9]와 같다.

2.2.2 압력용기 부품 구성

BLDC 모터의 와이어를 압력용기 내부로 삽입하면서 방수성능을 확보 할 케이블 그랜드[Fig. 4(b)]는 테스트를 위하여 각각 IP68 등급과 IP69K 등급의 제품을 구매하여 사용하였다. 또 방향전환을 위한 방향타는 서보모터의 축을 커플링을 이용



[Fig. 5] Inner pressure vessel assembly

하여 연장하고 타이밍 벨트와 풀리를 이용하여 회전방향을 수직으로 전환하는 방식을 이용하여 서보모터가 큰 토크 부하에 의해 파손되는 현상이 적도록 제작하였다[Fig. 4(c)]^[14].

사용한 서보모터는 총 세 개로, 후면의 방향타 중 심도를 조절하는 방향타는 각각 개별 제어하여 추진기로 인한 역토크(counter torque)를 해소할 수 있게 하였으며 동체의 수평 이동 방향 전환 역할을 하는 방향타는 빠른 방향전환을 위해 개별 개별 제어 하지 않고 하나의 서보를 이용하여 한 축으로 묶어 같은 방향으로 동시에 움직이도록 구성하였다.

압력용기 내부에는 앞뒤의 캡 파트의 조립과 함께 내부 부품을 고정할 수 있도록 리니어 샤프트가 체결되며 이는 구동 시 외부 충격이 가해졌을 때 내구성을 확보하여 압력용기가 분해되거나 내부 부품이 분해되는 등의 문제에 대처하였다[Fig. 5].

조립 시 부품의 위치는 가장 무거운 Li-Po 배터리와 BLDC의 구동을 위한 ESC를 가장 하단부에 위치시켜 무게중심을 낮추고 측면부와 상부에 제어를 위한 MCU를 배치하여 부력중심을 높여 운동 안정성을 확보하였으며, 각 부품이 이탈하지 않도록 부품 가이드를 3D프린팅하여 사용하였다.

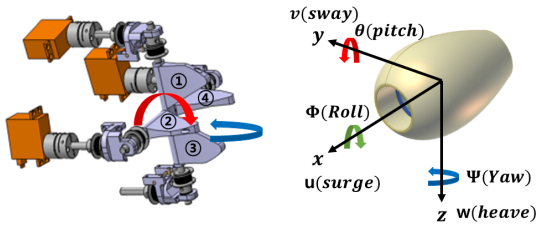
2.2.3 압력용기 방수 성능

제작된 수중 이동체는 가압탱크에서 약 3bar, 즉 약 30 m급의 방수성능을 확인하였으며, 동체는 3D프린터 등의 장비를 제외하고 약 150만 원가량의 가격으로 제작되었으며, 향후 가격이 가장 많이 소요된 압력용기 가공 방식 변경을 통해 양산을 목표로 할 경우, 100만 원 이하의 가격으로 제작이 가능할 것으로 판단된다.

3. 제어 시스템 설계

3.1 제어시스템의 구성

구성된 전체 제어시스템은 다음과 같다. 사용자의 조작 입력 신호는 무선통신모듈(Zigbee, 900 Mhz)을 통해 수신기로 보내지며 수신기는 받은 입력신호를 통해 로봇의 운동을 제어한다. 이때 로봇이 운동 중에 발생하는 상태 변화를 실시간으로



[Fig. 6] Rudder and degree of freedom of underwater vehicle

[Table 1] Control Parameter

	Target value	Currently value	Parameters
Roll control	0	Roll data of IMU	Center of gravity, Buoyancy center
Pitch control	Y-axis data of the transmitter	Pitch data of IMU	Rudder of 2,4
Yaw control	Yaw data of IMU + X-axis data of the transmitter	Yaw data of IMU	Rudder of 1,3

관측하기 위하여 수신기는 현재의 상태 신호를 송신기로 보내고 신호를 받은 송신기는 UART통신을 통해 다시 PC로 보낸다. 마지막으로 데이터 분석을 위하여 내장된 SD카드 모듈을 통해 모든 데이터를 저장한다.

3.2 수중 이동체 자세제어

수중 이동체는 수중에서 3차원 이동 시 추진기의 역토크, 부력 및 중력 중심의 불일치, 환경적인 외란 등으로 인해 자세가 불

안정해진다. 불안정한 자세는 운동성능을 떨어트리는 요인으로 작용하며 사용자가 원하는 방향으로 이동하기 위해서는 자세 제어 알고리즘이 필수적이다. 앞서 설계된 수중 이동체는 [Fig.6]과 같이 자세 제어를 위해 총 4개의 방향타를 사용하며 수직 방향타의 각도를 통해 Pitch를 수평 방향타의 각도를 통해 Yaw를 제어한다.

[Fig.7]은 전체 제어시스템의 모습을 나타내며 [Fig.8]은 본 논문에서 제안하는 자세제어 알고리즘은 보여준다. 자세제어 알고리즘의 따른 파라미터는 [Table 1]과 같다.

자세제어 알고리즘은 다음과 같이 적용된다. IMU 센서로부터 측정된 Pitch, Yaw의 현재 값은 목표 값의 차이로 인해 오차가 발생하게 되며, 발생한 오차는 PID제어기를 거치면서 적절한 입력 값으로 도출된다. 도출된 입력 값은 방향타의 각도를 변화시키며, 변화된 방향타의 각도는 아래의 수식에 따라 수중이동체가 오차의 반대방향으로 선회력^[12]을 가지게 한다.

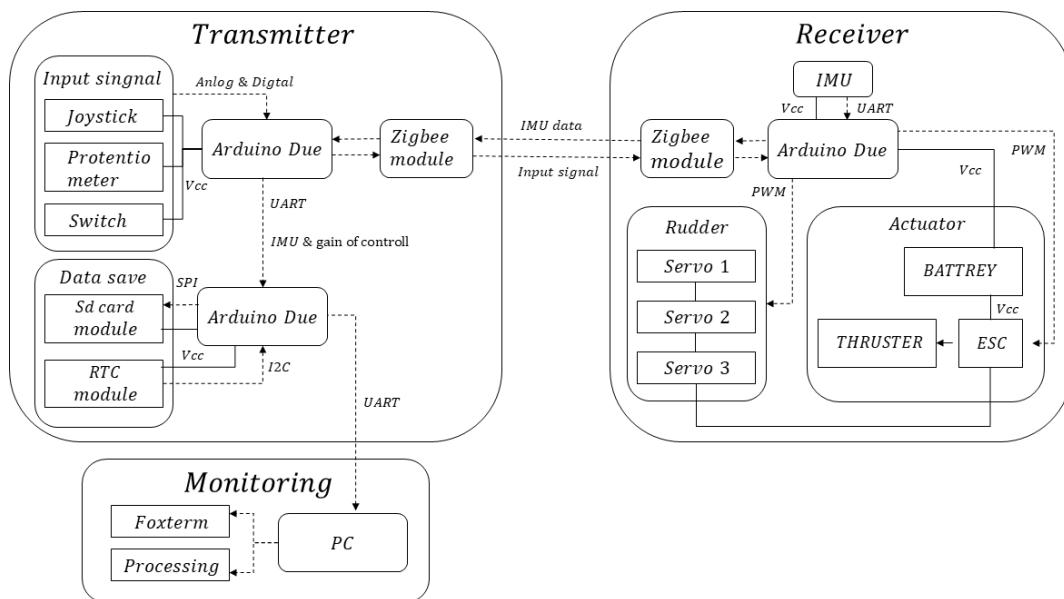
$$F = \sin\theta_1 [p_b A_b - p_2 A_2 + \rho Q(v_p - v_2)] + \frac{9c^2 \rho}{16t^2 A_2} (\cos\theta_2^2 - \cos\theta_1^2) \quad (3)$$

또한, Roll의 경우 사전에 무게 및 부력중심을 조절하여 복원력에 의해 목표 값을 유지하도록 설계하였다.

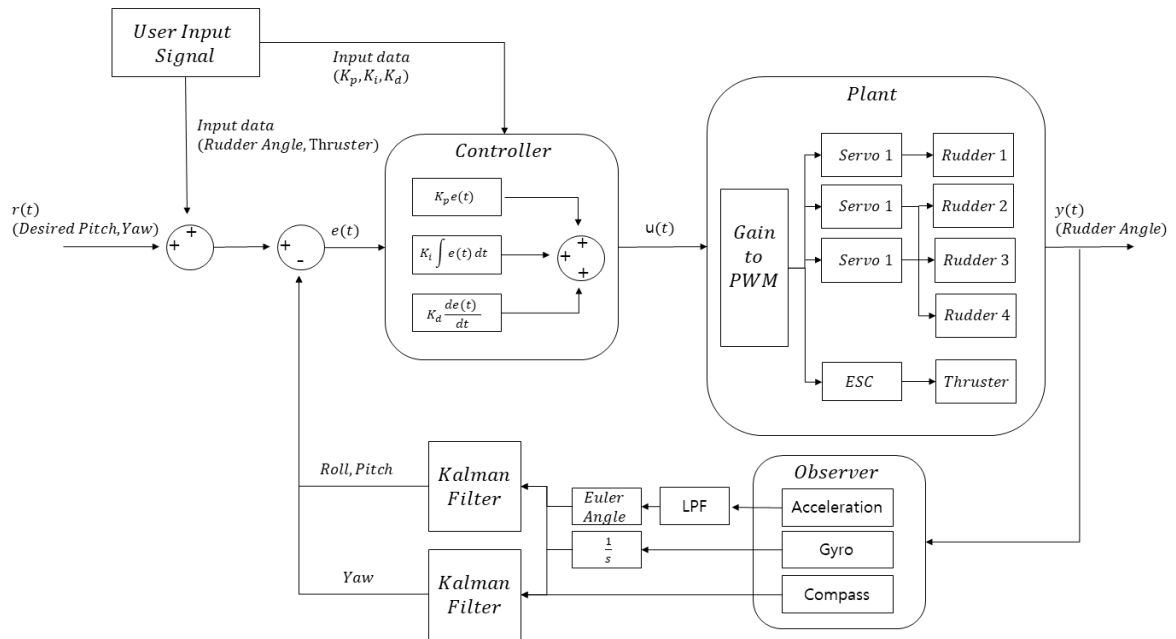
4. 운동성능 검증

4.1 운동성능 검증을 위한 실험 방법 및 환경

수중 이동체는 3.2절에서 언급한 안정적인 자세유지 와 동



[Fig. 7] Overall control system

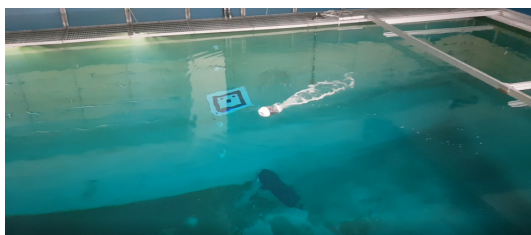


[Fig. 8] Block diagram of attitude control

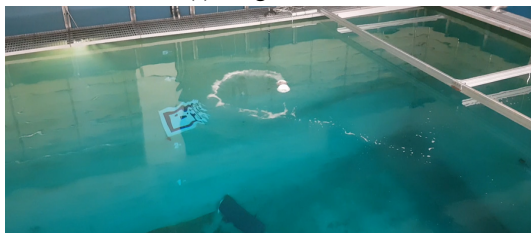
시에 조류를 극복하여 추진할 수 있는 조류 극복성능, 장애물 회피 및 목표지점 도달을 위한 작은 선회 성능이 필요하다. 현재 개발 단계중인 수중 이동체는 앞서 언급한 안정적인 자세 유지, 선회성능, 조류 극복성능을 수중환경에서 검증할 필요가 있으며 본 논문에서는 3가지의 실험을 통해 각각의 운동성능들을 검증하였다.

4.1.1 자세유지 및 선회성능 실험 방법 및 환경

실험은 포항에 위치해 있는 한국로봇융합연구원(KIRO) 수조에서 진행 하였다. [Fig.9]는 안정적인 자세유지 성능을 검증



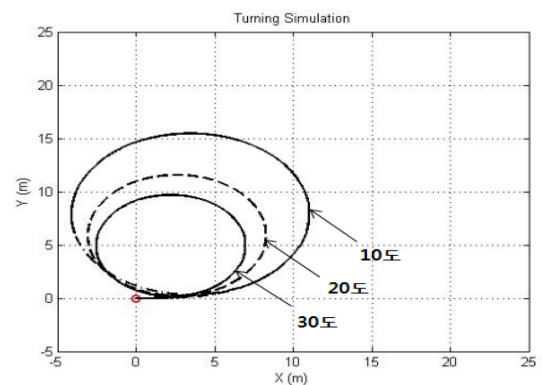
(a) straight motion

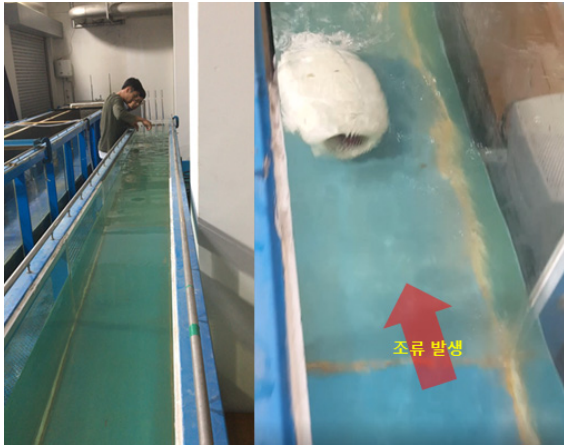


(b) rotational motion

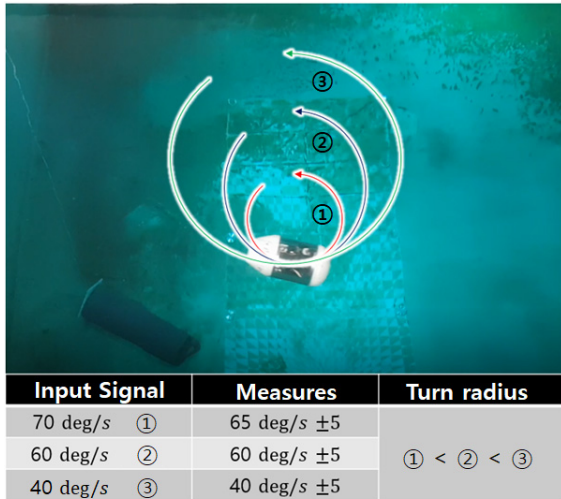
[Fig. 9] Experimental environments of attitude control

하기 위한 실험 환경을 나타내고 있으며 실험 방법은 다음과 같다. 3.2절에서 소개한 자세제어 알고리즘을 적용한 수중 이동체를 일정 시간동안 직진 및 회전운동을 진행하고, 그때의 자세데이터를 확인함으로써 자세유지 성능을 확인하였다. [Fig.10]^[18]은 부경대학교에서 개발 중인 AUV의 선회성능을 시험한 결과 데이터이며, 본 논문에서는 동일한 방법으로 선회 성능을 보여주기 위한 실험을 수행하였다. AUV의 방향타 각도를 10도에서 30도까지 점차 증가시키고 선회반경을 측정함으로써 선회성능을 확인하였다. 본 논문에서는 선회성능 검증을 위해 앞의 실험방법을 참고한 Yaw rate 제어 알고리즘을 설계하였으며, 설계된 Yaw rate 제어 알고리즘^[19]에 따른 실험 방법은 다음과 같다. 초기 정지상태의 수중 이동체는 일정한 추진 값과 Yaw rate (40 deg/s)의 입력 값을 받으며, 일정 시간

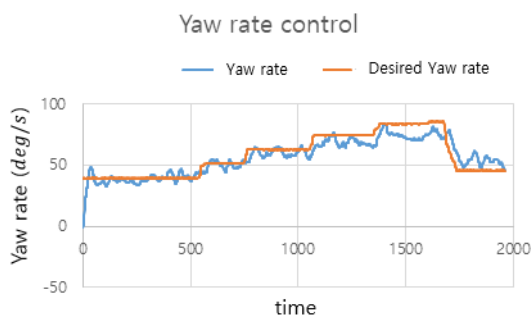
[Fig. 10] Experimental environments of turning radius^[18]



[Fig. 11] Experiment environment of overcoming tidal current



[Fig. 12] Experimental environments of yaw rate control

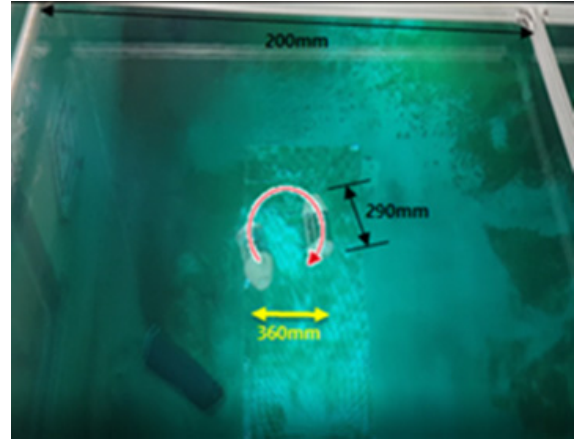


[Fig. 13] Yaw rate experimental result

간격으로 입력 값을 점차 증가시킨다. 일정한 추진 값을 받는 수중 이동체는 증가되는 입력 값에 도달하기 위하여 방향타의 각도를 조정하게 되며, 조정된 방향타에 의해 선회반경의 크기는 줄어들게 된다. 이후 검증은 다음과 같이 진행하였다. 연속적으로 변하는 입력 값과 측정되는 각속도를 비교함으로써 수중이동체가 주어진 입력 값에 따라 원활하게 추종하는지를



(a) Continuous appearance of turning movement



(b) Turn radius of body length

[Fig. 14] Results of turning radius

확인하였으며, 입력 값을 계속적으로 증가시켜 수중이동체가 가지는 최대 선회능력을 카메라 촬영을 통해 확인하였다.

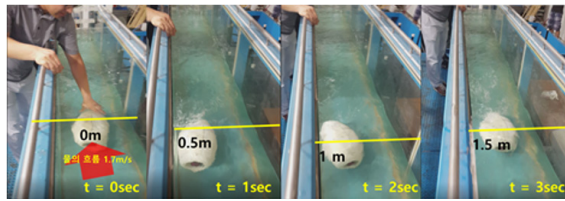
4.1.2 조류 극복성능 실험 방법 및 환경

실험은 서울과학기술대학교에 위치해 있는 회류수조에서 진행 하였으며, [Fig.11]은 조류 극복 성능을 검증하기 위한 실험 환경을 보여주고 있다. 조류의 속도는 유속계로 측정하였으며, 조류 극복 성능을 위한 실험 방법은 다음과 같다. 회류수조 내의 유속의 속도를 유지 시킨 후 로봇을 최대 추력으로 가동하였다. 이 때 동영상으로 촬영된 로봇의 단위시간당 거슬러 올라간 거리를 측정하여 해당 조류를 극복한 상태에서 추진 가능한지를 확인하였다.

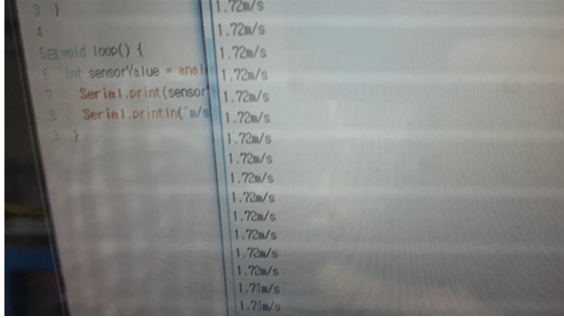
4.2 실험 결과

4.2.1 선회성능 실험 결과

[Fig.12]의 ①, ②, ③은 입력 값이 40 deg/s, 60 deg/s, 70 deg/s 일 때의 선회반경과 측정된 각속도를 나타낸다. [Fig.13]의 그래프를 보았을 때 연속적으로 변하는 입력 값을 따라 측정 값이 원활하게 추종하는 것을 확인하였으며, 현재의 추진력에서 방향타에 의해 발휘할 수 있는 최대 운동성능(70 deg/s)를 확인하였다. [Fig.14] (a)는 70 deg/s의 입력 값에서 선회운동의 경로를 나타내며, [Fig.14] (b)는 로봇의 동체길이(290 mm) 및 선회반경(180 mm)을 보여준다. 영상을 분석한 결과 로봇의 동체길이 대비 최대 선회반경이 0.62임을 확인하였다. 앞서 실험



(a) Progress over time



(b) Water flow rate

[Fig. 15] Experimental result of overcoming tidal current

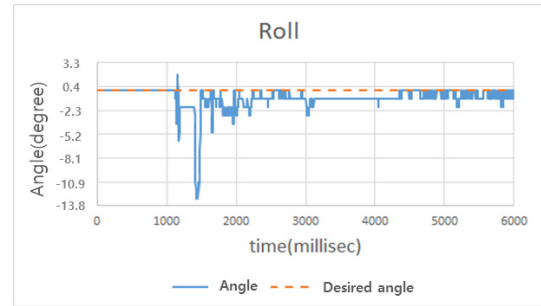
을 위해 참고한 AUV^[18]의 경우 동체길이 대비 최대 선회반경이 2.875이므로 본 논문에서 설계된 수중 이동체의 선회능력은 비교적 높다고 판단된다.

4.2.2 조류 극복 성능 실험 결과

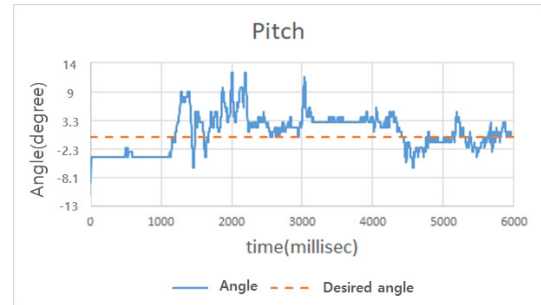
[Fig.15]는 조류 극복성능의 결과를 보여주고 있다. [Fig.15] (a)는 시간에 따른 추진 거리를 보여주며, [Fig.15] (b)는 현재 물의 유속을 보여준다. [Fig.15] (a), (b)에서 보듯이 수로 내 유속이 약 1.7 m/s일 때 로봇의 직진 속도는 약 0.5 m/s로 해당 조류를 극복 가능한 것으로 판단되며 이는 최대속도 약 2.2 m/s의 값을 보여주고 있으며, 조류 환경에서 자세를 유지하며 직진 성능을 가지는 것을 확인하였다.

4.2.3 자세 유지 성능 실험 결과

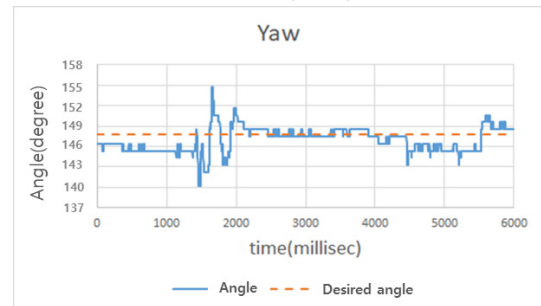
[Fig.16]과 [Fig.17]은 실제 자세제어 알고리즘을 적용한 수중 이동체가 직진 및 회전 운동을 하였을 때의 자세데이터를 나타낸다. [Fig.16], [Fig.17]의 (a)는 수중이동체의 Roll을 나타내고 있으며 Roll은 앞서 언급한 것과 같이 무게 및 부력 중심의 조절을 통해 제어된다. [Fig.16]의 (a)와 달리 [Fig.17]의 (b)는 0을 기준으로 많은 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 무게 및 부력중심의 오차가 회전운동 시 발생하는 원심력에 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 또한, [Fig.16] (b), (c)의 1~2 sec 와 [Fig.17] (b)의 6~8 sec 구간에서 외부적인 외란으로 인해 오차가 크게 발생하였지만 그 이후 빠르게 오차를 줄여 나가는 모습을 확인 할 수 있었다. 또한, 수중 이동체는 고정된 방향타 각도 및 추진력에 의해 동일한 선회반경을 갖는 회전운동을 해야 한다.



(a) Roll data during straight motion



(b) Pitch data during straight motion



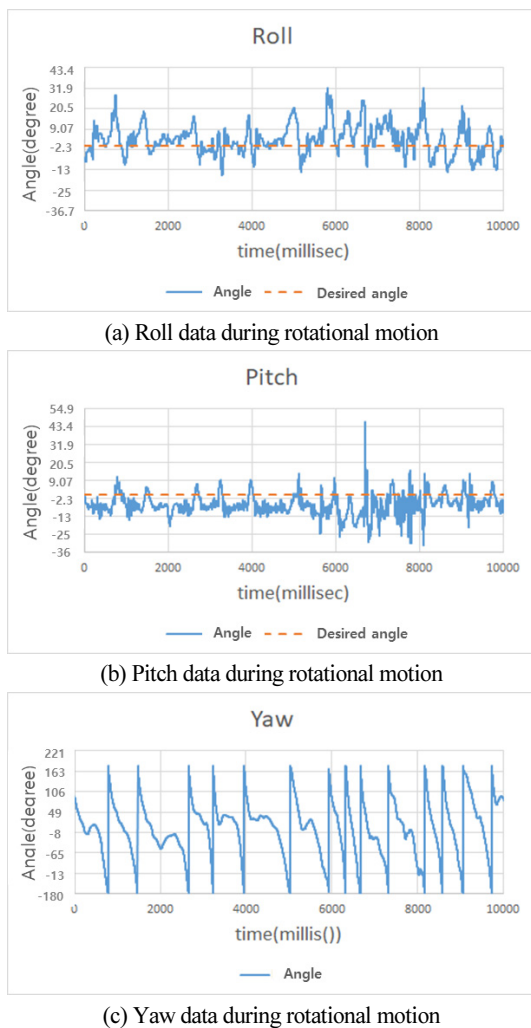
(c) Yaw data during straight motion

[Fig. 16] Attitude experimental results during straight motion

하지만 [Fig.17] (c)를 보았을 때 회전(-180 ~ 180)의 변화량이 동일한 주기에서 일어나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 무게 및 부력중심의 불일치가 원심력에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

5. 결 론

저가형 수중 이동체의 설계 및 제작, 제어 시스템을 구성하였으며, Myring 방정식을 이용하여 외형 형상을 최적화하였으며 안정적인 방수성능을 확보하였다. 또한, 설계된 수중 이동체의 운동성능 검증을 위해 자세유지, 조류극복, 선회성능의 3가지의 실험을 진행하였다. 실험결과 수중 이동체는 직진 운동 시 발생하는 불안정한 자세를 보정 후 유지하는 것이 가능한 것을 확인 하였다. 하지만 잘못된 무게 및 부력 중심으로 인해 회전운동 시 Roll 과 Yaw의 대해 불안정한 자세를 보여주었다. 또한, Yaw rate 제어 실험을 통해 동체길이 대비 선회



[Fig. 17] Attitude experimental results during rotational motion

반경(0.62)의 비교적 높은 선회성능을 확인하였다. 그 밖의 최대 1.7 m/s의 조류를 극복하고 추진 할 수 조류 극복 성능을 확인하였다. 향후 좀 더 효율적인 방향전환 메커니즘 연구를 통해 내부 부품의 간소화를 진행하여 플랫폼을 더욱 소형화하게 되면 좀 더 높은 효율의 수중 이동체를 제작할 수 있을 것으로 예상되어지며, 무게 및 부력중심을 다시 조절하고, 직진 성능 및 다른 운동성능을 실험을 통해 검증할 계획이다.

References

[1] Y. S. Park, J. W. Song, D. H. Lee, and J. Lee, "Path Estimation Method in Shadow Area Using Underwater Positioning System and SVR," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 12, no. 2, pp.173-183, Jun., 2017.

[2] D.-H. Gwon, J. Kim, M. H. Kim, H. G. Park, T. Y. Kim, and A. Kim, "Side Scan Sonar based Pose-graph SLAM," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 12, no. 4, pp.385-394, Dec., 2017.

[3] G. Mailfert and J. Lemaire, "REDERMOR: an experimental

platform for ROV/AUV field sea trials," *OCEANS'98 Conference Proceedings*, Nice, France, pp.357-362, 1998.

[4] H.-S. Choi, J.-K. Jeon, S.-K. Jeong, H.-I. Park, and S.-S. You, "Study of Design for Convertible ROV," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 451-458, May, 2012.

[5] F.A. Azis, M.S.M. Aras, M.Z.A. Rashid, M.N. Othman, and S.S. Abdullah, "Problem identification for underwater remotely operated vehicle (ROV): A case study," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 554-560, 2012.

[6] P.-M. Lee and S.-C. Yu, "Introduction to UUV and Key Technology," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol.26, no. 5, pp. 7-13, May, 2009.

[7] Saab, *Seaeye - Panther Plus*, [Online], <http://www.seaeye.com/pantherplus.html>, Accessed: February 16, 2018.

[8] Kongsberg Maritime, *Autonomous Underwater Vehicle, REMUS 600 - REMUS 600 AUV - Kongsberg Maritime*, [Online], <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/F0437252E45256BDC12574AD004BDD4A?OpenDocument>, Accessed: February 16, 2018.

[9] D. Hwang, "Design and manufacture of underwater vehicle with effective waterproof performance," *13th Korea Robotics Society Annual Conference*, Hoengseong, Gangwon-do, Korea, pp.7-8, 2018.

[10] D. F. Myring, "A theoretical study of body drags in subcritical axisymmetric flow," *The Aeronautical Quarterly*, vol. 27, no. 3, pp. 186-194, Aug., 1976.

[11] B.-H. Jun, J.-Y. Park, P.-M. Lee, F.-Y. Lee, and J.-H. Oh, "Development and Tank Test of an Autonomous Underwater Vehicle 'ISiMT'," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 21, no. 2, pp.67-74, 2007.

[12] D.-J. Won, J. Kim, and J. Kim, "Design Optimization of Ducted Type AUV using CFD Analysis," *Intelligent Service Robotics*, vol. 8, no. 4, pp. 233-245, Oct., 2012.

[13] Steven L. Apple, *Seal Design Guide*, [Online], <http://www.applerrubber.com/src/pdf/seal-design-guide.pdf>, Accessed: February 21, 2018.

[14] Y. Kim, D. Hwang, and J. Kim, "Design of Rudder Mechanism to Maximize the Turning Force of a Ducted-Type Underwater Robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and System*, vol. 23, no. 9, pp. 771-779, Sept., 2017.

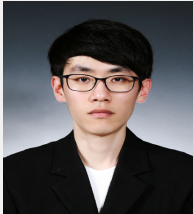
[15] MISUMI, *Misumi Korea cable gland*, [Online], <https://kr.misumi-ec.com/vona2/detail/110500127270/>, Accessed: February 21, 2018.

[16] PFLITSCH, *Blueglobe katalog_2014_web.pdf*, [Online], https://www.pflitsch.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Kataloge/Blueglobe_Katalog_2014_web.pdf, Accessed: February 21, 2018.

[17] MISUMI, *Misumi Korea oil seal*, [Online], <https://kr.misumi-ec.com/vona2/detail/221000616503/>, Accessed: February 21, 2018.

[18] C. M. Kim and W. K. Baek, "Motion Performance Prediction and Experiments of an Autonomous Underwater Vehicle through Fluid Drag Force Calculations," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 614-619, Jul., 2015.

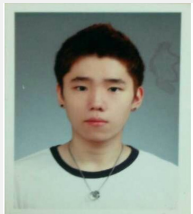
- [19] M. Jang, "Experimental verification of rotating motion performance of duct type submersible mobile robot," *13th Korea Robotics Society Annual Conference*, Hoengseong, Gangwon-do, Korea, pp. 422-423, 2018.



황 동 옥

2017 서울과학기술대학교 기계공학과(학사)
2017~현재 서울과학기술대학교 기계공학과
(석사과정)

관심분야: Underwater robots, Mechanism



장 민 규

2017 안동대학교 기계설계공학과(학사)
2017~현재 서울과학기술대학교 기계공학과
(석사과정)

관심분야: Underwater robots, Control



김 진 현

1998 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
2000 포항공과대학교 기계공학과(공학석사)
2005 포항공과대학교 기계공학과(공학박사)
2005~2007 한국생산기술연구원 선임연구원
2007~현재 서울과학기술대학교 기계공학과
교수

관심분야: Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.