

수중 추진 시스템의 개발 및 성능 검증: 워터젯 다이버 추진체의 사례 연구

Development and Performance Validation of Underwater Propulsion Systems: A Case Study of Waterjet Diver Propulsion Device

이상희¹, 김도한², 김성보^{3*}

Sang-Hee Lee¹, Do-Han Kim², Sung-Bo Kim^{3*}

〈Abstract〉

The development of high-performance underwater propulsion devices has gained importance with the expansion of recreational and industrial diving applications. This study aims to develop and validate a waterjet-type diver propulsion system capable of achieving a top speed of 3.8 knots and an operational time of over 120 minutes. Utilizing advanced modeling and simulation techniques, the design focuses on minimizing hydrodynamic resistance and optimizing buoyancy. Structural and fluid dynamic analyses were conducted to ensure the device's stability and performance under 20 atm pressure at a depth of 200 meters. The propulsion system employs a sensorless BLDC motor and a 36V lithium-ion battery pack to enhance efficiency and reliability. Field tests confirmed an average speed of 3.88 knots and a continuous operation time of 150 minutes, exceeding the initial targets. This research demonstrates significant advancements in diver propulsion technology, providing valuable insights for future underwater equipment development. The outcomes are poised to enhance the safety, efficiency, and usability of diver propulsion devices, with broader applications in marine research, environmental monitoring, and resource exploration.

Keywords : *Diver Propulsion System, Waterjet Propulsion, Hydrodynamic Resistance, Structural Analysis, Fluid Dynamics, Sensorless BLDC Motor, Lithium-Ion Battery*

1 정회원, 동아대학교 미래에너지공학전공

2 정회원, (주)디에이치오션

3* 정회원, 교신저자, 영산대 드론공간정보공학과

E-mail: tamsabo@ysu.ac.kr

1 Department of Future Energy Engineering, Dong-A University, Korea

2 DH OCEAN Inc., Korea

3* Corresponding Author, Department of Drone and Spatial

Information Engineering, Young-san University, Korea

1. 서론

수중 활동 범위가 레저, 산업 다이빙 분야에 이르기까지 다양해지면서, 효율적이고 안정적인 수중 추진 시스템 개발의 그 중요성이 날로 증가하고 있다. 기존 수중 추진 시스템은 속도와 운용 시간, 그리고 안전성 면에서 한계가 있어 이를 극복하기 위한 고도화된 기술 개발이 요구되고 있다. 이러한 배경 아래 최근 수중 추진 기술은 눈에 띄게 발전해 왔으며 그 연구의 방향도 다양하게 진행되고 있다. 현재 진행 중인 수중 추진 기술 연구로는 자율 무인 잠수정(Autonomous Underwater Vehicle, AUV), 해파리 모양의 로봇 플랫폼, 고속 유체 역학 문제에 대한 연구, 듀얼 로터 초음파 모터, 수중 글라이더 로봇, 수중 차량의 운동 안정성, 펌프-제트 추진, 자율 로봇 물고기, 수중 기포의 운동특성 및 공동 현상, 해양 열에너지 적용 기술 등 다양한 분야에서 활발히 연구가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

수중 활동 범위가 레저 및 산업 다이빙 분야에서 점차 확대됨에 따라, 효율적이고 안정적인 수중 추진 시스템 개발의 중요성은 날로 증가하고 있다. 기존의 수중 추진 시스템은 속도, 운용 시간, 안전성 측면에서 한계를 보였으며, 이를 극복하기 위한 고도화된 기술 개발이 필수적이다. 이러한 요구를 반영하여 최근 수중 추진 기술은 급속하게 발전해왔고, 다양한 연구 방향이 동시에 진행되고 있다. 특히 해양 레저용 다이버 추진체의 경우, 사용자 편의성과 안전성을 동시에 만족시켜야 하기 때문에 기술적 도전 과제가 많다. 기존의 추진 시스템이 가지는 한계를 넘어서기 위해서는 지속적인 기술 혁신이 요구되며, 이는 레저용 다이버 추진체의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 중요한 요소로 작용하고 있다[1].

생체 모방형 추진 시스템은 자연의 생물체에서

영감을 받아 효율적이고 자연 친화적인 수중 추진 방법을 개발하는 데 초점을 맞추고 있다[2]. 예를 들어, 해파리의 움직임을 모방한 로봇 플랫폼은 추진 속도와 에너지 소비 효율을 크게 개선한 사례로, 이는 레저용 다이버 추진체에 적용될 수 있는 가능성을 보여준다[3]. 이러한 생체 모방형 로봇 기술은 자연의 움직임을 정교하게 모방함으로써 보다 효율적이고 환경 친화적인 수중 추진 시스템을 구현할 수 있으며, 레저 활동에서의 사용성을 크게 향상시킬 수 있다.

자율 무인 잠수정(AUV)은 군사, 과학, 상업적 목적 외에도 해양 레저 분야에서 점점 더 중요한 역할을 하고 있다. AUV 기술은 해양 생태계 모니터링과 같은 복잡한 임무 수행 외에도, 레저용 다이버 추진체의 개발에 필요한 핵심 기술을 제공하고 있다[4][5]. AUV의 추진 시스템 개선은 다양한 해양 환경에서의 안정성과 효율성을 높이는 데 기여하며, 이러한 기술은 레저용 다이버 추진체의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

고효율 추진 기술은 수중 추진 시스템의 성능을 극대화하는 데 중점을 두고 있으며, 이는 레저용 다이버 추진체의 성능 향상에도 직접적인 영향을 미친다. 예를 들어, 듀얼 로터 초음파 모터는 고속 회전과 정밀한 제어를 통해 수중 로봇의 추진력을 크게 향상 시킨 사례이다[6]. 이러한 기술은 다양한 수중 환경에서 안정적인 성능을 제공하며, 특히 레저용 다이버 추진체의 경우, 빠른 속도와 긴 운용 시간을 제공할 수 있는 가능성을 보여준다. 펌프-제트 추진 시스템 역시 고속과 높은 효율성을 바탕으로 다양한 수중 응용 분야에서 널리 사용되고 있으며[7], 이는 해양 레저용 다이버 추진체에도 적합한 기술로 평가된다.

수중 추진체의 유체역학 연구도 활발히 진행되고 있다[8]. Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)

기법을 활용한 연구는 고속 유체역학 문제를 해결하는 데 중요한 도구로 사용되고 있으며, 이는 레저용 다이버 추진체의 성능을 최적화하는 데 기여할 수 있다[9]. 이러한 유체역학적 연구는 레저용 다이버 추진체가 다양한 수중 환경에서 안정적이고 효율적으로 작동할 수 있도록 하는 데 중요한 역할을 한다.

에너지 효율성과 높은 내구성을 특징으로 하는 수중 글라이더 로봇의 개발은 레저용 다이버 추진체에도 중요한 시사점을 제공한다[10][11]. 이러한 로봇은 긴 시간 동안 자율적으로 작동할 수 있는 능력을 갖추고 있으며, 이는 레저 활동에서도 장시간 안전하게 사용할 수 있는 다이버 추진체 개발로 이어질 수 있다. 또한, 무인잠수정에 해양 열 에너지를 적용하는 기술은 에너지 효율성을 높이고, 수중 장비의 운용 시간을 연장하는 데 중요한 역할을 한다[12]. 이러한 기술은 레저용 다이버 추진체의 운용 시간을 극대화하고, 에너지 소비를 줄이는 데 기여할 수 있다.

다양한 추진 방식의 비교 연구도 레저용 다이버 추진체 개발에 중요한 정보를 제공한다. 각 추진 방식의 장단점을 비교 분석함으로써, 최적의 추진 시스템을 개발할 수 있으며, 이는 레저 활동에서의 안전성과 편의성을 크게 개선할 수 있다. 수중 추진 장치의 성능 평가는 추진 장치의 성능을 정밀하게 측정하고 분석할 수 있는 기준을 제공하며, 이러한 평가 프로세스는 개발된 장치의 신뢰성을 높이는 데 중요한 역할을 한다[7][13]. 예를 들어, 리튬 이온 배터리를 적용한 해외 주요 다이버 추진체 제조사들은 빠른 속도, 긴 운용 시간, 높은 안정성을 목표로 지속적인 혁신을 이루고 있다. 이러한 기술 개발은 해양 레저 활동에서의 사용성을 크게 개선하고, 사용자의 안전을 보장할 수 있는 방향으로 나아가고 있다[14].

이와 같이, 해양 레저용 다이버 추진체 개발을

위한 연구는 다양한 기술적 접근을 통해 효율성과 안정성을 극대화하고 있으며, 이러한 연구 동향은 미래의 해양 레저 활동에서 필수적인 기술 발전을 이끌어낼 것으로 기대된다. 레저용 다이버 추진체는 점점 더 고도화된 기술을 바탕으로 사용자 편의성과 안전성을 동시에 만족시키며, 다양한 해양 환경에서의 요구 사항을 충족시키기 위해 지속적인 혁신이 이루어지고 있다.

수중 추진 시스템의 발전은 다양한 산업 및 연구 분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 다이버용 추진체의 성능 향상과 상용화는 수중 활동의 효율성을 크게 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 본 연구는 국내 시장을 주요 목표로 하여, 다이버 추진체의 상용화 및 성능 향상을 위한 종합적인 접근 방식을 제시하고자 한다. 연구의 주요 목표는 다이버 추진체가 국내 시장에서 경쟁력을 갖추도록 하여, 최종적으로 3.8노트의 최고 속도를 달성할 수 있는 워터젯 추진 시스템을 개발하는 것이다. 다이버 추진체는 레저, 산업, 군사, 수색 및 구조, 탐사 등 수중 활동의 전 분야에서 활용될 수 있으며, 이를 통해 추진체 기술을 확보함으로써 다양한 기술적 요구를 충족할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 추진방식 고도화를 통한 다이버 추진체 개발의 필요성

해외 주요 다이버 추진체 기술의 현황을 살펴보면, 여러 가지 기술적 특징과 장점을 가진 제품들이 있다(Fig. 1). 그러나 이러한 제품들도 몇 가지 문제점을 가지고 있으며, 이는 사용자 편의성과 안전성에 영향을 미친다.

Future 1000 모델(Poland, SEACRAFT)은 리튬 이온 배터리를 사용하여 긴 운용 시간을 제공하



Fig. 1 Technical Specifications of Major Underwater Diver Propulsion Systems (a) SEACRAFT Future 1000 (Poland) (b) SUEX VR (Italy) (c) DIVERTUG DT24 (Spain) (d) Submerge Scooters MINNUS (USA)

며, 높은 효율성과 안정성을 특징으로 한다. 이 모델은 깊은 수심에서도 안정적인 성능을 유지하며, 다양한 해양 환경에서 활용될 수 있다. Future 1000은 최신 기술을 반영한 디자인과 성능을 자랑하며, 기술 사양이 높은 제품군으로 평가받고 있다.

VR 모델(Italy, SUEX)은 고성능 모터와 혁신적인 설계를 통해 높은 추진력을 제공한다. 이 모델은 주로 전문 다이버와 해양 연구자들에게 인기가 있으며, 깊은 수심에서의 작업에도 적합하다. SUEX VR은 사용자의 편의성을 고려한 설계와 함께, 최신 배터리 기술을 적용하여 긴 운용 시간을 자랑한다.

DT24 모델(Spain, DIVERTUG)은 리튬 이온 배터리를 채택하여 사용자의 편의를 극대화하고, 높은 효율성을 제공한다. 이 모델은 수중에서의 기동성과 조작성을 중점적으로 개선하였으며, 다양한 해양 환경에서의 활용성을 높였다. DT24는 뛰어난 내구성과 성능을 통해 많은 다이버들에게 신

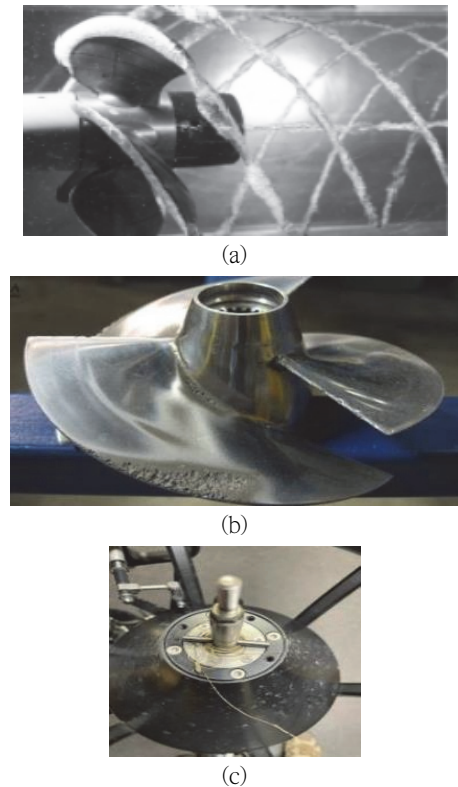


Fig. 2 Blade Corrosion and Propeller Fouling due to Cavitation. (a) Corrosion due to cavitation, (b) Cavitation damage evident on the propeller of a personal watercraft, (c) Propeller fouling causing operational stoppage[15]

뢰받는 제품이다.

MINNUS 모델(USA, Submerge Scooters)은 소형화된 설계와 높은 효율성을 제공하는 리튬 이온 배터리를 사용한다. 이 모델은 강력한 추진력과 함께 가벼운 무게로, 이동성과 기동성을 강조한다. MINNUS는 사용 편의성을 높이기 위해 직관적인 인터페이스와 다양한 안전 기능을 갖추고 있다.

해외 주요 다이버 추진체의 경우 Fig. 2와 같이 Torque 방식의 DC Motor를 이용해 대형 프로펠러로 추진력을 얻는 방식을 사용하고 있다. 이러한 대형 프로펠러의 노출로 인해 다이버의 부상,

이물질이 프로펠러에 걸려 동작이 멈추거나 날개가 부러지는 현상, 회전 시 발생하는 캐비테이션 현상에 의한 부식 등으로 유지·보수의 부담이 문제가 되고 있다. 또한, 사용자 편의 기술이 부족하여, 제품 운용 시 많은 문제점을 가지고 있다. 기존 해외 제품의 경우 제품에 부착된 단일 LED의 색상만으로 제품의 상태를 표현하여 현재 배터리 잔량, 내부 온도 등과 같은 추진체 상태에 대한 정보를 정확히 알 수 없으며, 다이버의 감각에 의지하여 운용 가능 시간을 추정하여 제품을 사용하고 있다.

현재 수중 추진 장치 시장에서 주요한 역할을 하는 제품들은 위와 같이 각기 다른 기술적 장점과 함께 몇 가지 공통적인 문제점을 가지고 있으며 장점과 함께 공통적인 문제점을 해결하기 위한 기술 개발이 필요하다.

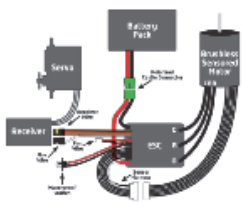
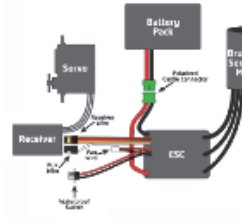
3. 다이버 추진체 부품별 특성

다이버 추진체 본개발에 앞서 3D 프린터를 활용하여 Small-scale Mock-up 제작을 진행하였으며, 아두이노를 활용하여 기능 구현 및 형상에 따른 추력 측정을 위한 사전 모의 테스트를 진행하였다. 사전 모의 테스트를 통해 모터의 종류, 수입구의 위치 및 면적, 수입구 대비 수출구의 크기, 길이, 형상에 따른 출력 변화를 확인하고, 테스트 결과를 반영하여 항목별 부품 선정 및 형상 설계에 필요한 특성을 정의하였다.

3.1 모터 선정

일반적인 BLDC 모터의 설계, 제어 방식으로는 내부에 고정식 엔코더가 부착되어 U, V, W 극의

Table 1. Characteristics According to BLDC Motor Design Methods

Classification	Sensored BLDC	Sensorless BLDC
Internal Connection Method		
Control Principle	Control using internal Hall sensors	Control using current changes by motor polarity
Maximum Achievable RPM	7,000 rpm	100,000 rpm
RPM Measurement Accuracy	High (± 50 rpm)	Low (± 150 rpm)
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> - High control and measurement accuracy - Low control and measurement design complexity due to the use of separate Hall sensors 	<ul style="list-style-type: none"> - High RPM achievable - Fewer connection terminals between motor and driver, advantageous for durability
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> - Separate Hall sensor terminal connection needed during motor driver design - Difficulty in achieving high RPM due to physical control limitations using external sensors 	<ul style="list-style-type: none"> - High development and control complexity due to the need for control through back EMF analysis by polarity

회전각을 측정하고 추진과형을 제어하는 물리적 sensed BLDC 방식과, 모터의 U, V, W 극에서 발생하는 역기전력(Back EMF)을 분석하여 그 파형을 통해 회전각을 측정하여 제어하는 전기적 sensorless BLDC 방식으로 나눌 수 있다(Table 1).

Sensored BLDC 방식은 물리적으로 측정, 제어하는 만큼 낮은 회전수에서도 정확한 측정과 회전각 제어가 가능하나, 물리적인 홀센서의 측정 한계로 인해 최대 7,000rpm 내외로 구현 가능하며, 더 높은 회전수를 낼 수 없는 단점이 있다. Sensorless BLDC 방식은 전기적으로 측정되는 만큼 최대 100,000rpm의 높은 회전수까지 측정 및 제어가 가능하다는 장점이 있으나, 물리적인 측정 방식에 비해 오차가 있으며 낮은 RPM에서 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.

위터젯 방식의 추진 효율 극대화를 위해 Sensorless


BLDC 방식 설계를 통한 기존 BLDC보다 더욱 높은 회전수를 구현하였다. 모터 캔 외부에 자석을 심어 더 많은 자석으로 동일 회전수에서 더욱 높은 토크를 구현할 수 있는 아웃러너 방식의 모터 설계를 진행하였다.

3.2 배터리

다이버 추진체의 배터리는 다이버 추진체를 구성하는 가장 중요한 요소 중 하나이며, 수중에서 운용하는 제품의 특성을 반영하여 제품의 크기, 무게, 효율, 안정성을 모두 고려해야 한다.

사전 확보한 다이버 추진체 관련 기초 데이터에 따르면, 다이버 추진체에 사용되는 배터리는 Table 2와 같이 크게 납축(Lead-acid) 전지, 리튬이온(Li-ion) 배터리, 리튬폴리머(Li-poly) 배터리

Table 2. Characteristics According to Battery Types

Classification	Lead-Acid (Pb) Battery	Lithium-Ion (Li-ion)	Lithium-Polymer (Li-poly)
Photo			
Energy Density	Low (2.0V per cell)	High (3.7V per cell)	High (3.7V per cell)
Instant Power	Low	High	Highest
Discharge Rate	High (20% decrease per month)	Low (3% decrease per month)	Low (3% decrease per month)
Durability	Highest	Low	Lowest
Price	Cheapest	High	Highest
Size and Weight	Largest and heaviest	Small and light	Smallest and lightest
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> - Cheapest price - High stability 	<ul style="list-style-type: none"> - Low discharge rate - High instant power - Cheaper and more stable than Li-poly 	<ul style="list-style-type: none"> - Low discharge rate - Highest instant power - Smallest size and weight for the same capacity
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> - Increased size and weight due to low energy density - Discharge issues due to high discharge rate and memory effect 	<ul style="list-style-type: none"> - Higher price than lead-acid - Stability issues 	<ul style="list-style-type: none"> - Highest price - Highest stability issues

로 나눌 수 있다. 납축전지는 순간 출력이 타 배터리에 비해 낮고 에너지 밀도가 낮아 동일한 용량의 리튬이온, 리튬폴리머 배터리에 비해 9배 이상 무겁지만, 가격이 저렴하고 안정성이 높아 성능이 낮은 레저용 다이버 추진체에 주로 쓰인다. 리튬폴리머 배터리는 순간적으로 가장 높은 출력을 낼 수 있으며 동일 용량의 타 배터리 대비 제품의 크기와 무게를 절반 이상 줄일 수 있으나, 사고 발생 위험이 높고 제작 비용이 높아 제트보드 등 짧은 시간 동안 고출력으로 운용하는 수중 장비에 주로 사용된다. 리튬이온 배터리는 리튬폴리머 배터리와 동일한 에너지 밀도와 매커니즘을 가지고 있어 높은 출력과 동시에 작고 가벼우며, 원통형 케이스로 감싸져 있어 리튬폴리머 배터리에 비해 높은 안정성을 보여주고 있어 고급형 다이버 추진체에 주로 쓰인다.

제품의 경량화와 120분 이상의 성능 지표 달성을 위해 가벼우면서도 고출력의 배터리가 필요하며, 운용 중 사고 위험 등 안정성 문제를 고려하여 리튬이온 배터리를 이용하여 제품을 개발하였다. 모터의 전압과 출력을 고려하여 3.7V 리튬이온 셀을 10개 단위로 직렬 연결한 36V의 리튬이온 배터리팩을 제작하여 제품을 개발용으로 활용하였다.

3.3 주행 스위치

다이버 추진체 주행 스위치는 다이버가 직접 제어하기 위해 물 밖으로 노출되는 부품이다. 주행 스위치의 직접적인 침수를 막기 위해 근접 센서를 밀폐된 하우징 내부에 위치시킨 후 자기장, 전자기 유도 법칙을 이용하여 원거리에서 금속을 인식시켜 근접 센서를 동작하게 하여 주행하는 방식을 사용하였다. 수심 200m에서의 내압 성능을 위해 각 가공 항목별 충분한 두께가 보장되어야

하는 다이버 추진체 특성상 가장 긴 인식 거리의 제품을 사용하여 개발하였다.

3.4 수심 측정 센서

소나 스캔 방식은 해저면에 고주파 음원을 발사하여 반사되어 되돌아오는 시간을 측정해 수심으로 변환하는 방식으로, 매우 정밀하나 고가이며 크기가 크다. 초음파 측정 방식은 해저면에 초음파를 발사하여 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여 수심으로 변환하는 방식이며, 제품 내부 초음파 발사 센서와 반사되어 들어오는 초음파 측정 격벽이 분리되어 있어 센서의 내구성이 높으나, 초음파 발사 센서가 항상 해저면을 향해야 하는 단점이 있다. 압력 측정 방식은 방수용 젤에 둘러싸인 압력 및 온도 측정용 센서가 제품 외부로 노출되어 직접 수압을 측정하여 현재 수심으로 변환하는 방식으로, 크기가 작고 가격이 저렴하며 부착 위치에 제한이 없으나, 해수에 직접 노출되는 센서의 내구성 문제가 있다. 자유자재로 이동이 가능하고 소형화되어야 하는 개발 제품의 특성상 압력 측정 센서를 이용하여 수압을 측정하는 방식을 사용하였다. 개발품의 동작 환경인 수심 200m에서 측정이 가능하며, 개발 편리성을 고려하여 범용성이 높은 제품을 선정하였다. 센서 회로의 침수를 방지하기 위해 센서 측정부에 별도의 방수 하우징을 장착하였다.

3.5 디스플레이

다이버에게 RPM, ADT, 수심, 수온 등 편의 정보를 제공하고 배터리 잔량 부족 등의 위험 정보를 제공하여 이용 편의성과 다이버의 사고 위험을 예방할 수 있다. 수중이라는 극한 환경에서도 손쉽게 정보를 확인할 수 있도록 2.4인치 이상의 디

스플레이 크기와 90도 이상의 시야각을 가진 제품을 선정하였다. 사용자 편의성 제공 및 배터리 잔량 부족 등의 긴급 상황 발생 시 디스플레이를 통해 쉽게 식별할 수 있도록 컬러 폰트를 지원하는 완제품을 선정하였다.

다이버 추진체는 깊은 수심에서 사용하는 제품의 특성상 압력, 부식, 침수에 강한 소재로 제작되어야 하며, 육상에서의 이동을 위한 무게 또한



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Analysis of diver propulsion product failure cases (a) Damage caused by external impact on the housing Stainless Steel(SUS) usage area, (b) Damage due to impact on the area where the nose cone lock Stainless Steel(SUS) is used, (c) Handle damage caused by external impact to the acrylic use area

중요한 고려사항이다. 일반적인 산업 잠수용 다이버 추진체는 크게 알루미늄과 엔지니어링 플라스틱을 이용하여 제작되고 있으며, 알루미늄 소재는 가볍고 단단하나 주행 혹은 운반 시 충격으로 인해 찌그러짐이 발생할 수 있다. 엔지니어링 플라스틱은 단단하고 찌그러짐의 위험이 없으나 알루미늄 대비 무게가 무겁다.

기초 자료 수집 단계에서 수집한 다이버 추진체 제품 파손 사례인 Fig. 3을 통해 파손 빈도가 높은 부위를 분석하여 부위별 맞춤 소재를 선정하였으며, 이를 통해 다이버 추진체를 경량화함과 동시에 파손 위험성을 낮췄다. 알루미늄은 세부 재질과 후처리 방식에 따라 다양한 특징을 지니며, 염분이 높은 해수에서 사용하는 제품의 특성상 부식 방지에 강점이 있는 6061 알루미늄 소재를 선정하여 해수에서 부식 등의 변형이 생기지 않도록 하였다. 엔지니어링 플라스틱은 기계적 강도가 우수하며 표면 강도 및 충격 강도가 높은 ABS 소재를 선정하였다.

4. 다이버 추진체 해석 및 내, 외부 설계

4.1 다이버 추진체 개념 설계

본 연구에서는 기존에 확보한 기초 데이터를 바탕으로 다양한 형상의 워터젯 타입 다이버 추진체를 설계하였다. 초기 설계 조건은 다이버의 피로를 최소화하고 사용자 편의성을 극대화하는 것을 목표로 하였다. 첫째, 다이버의 피로를 최소화하기 위해 추진체가 물로부터 받는 저항을 줄이고, 센서의 정확도를 높이기 위해 센서 측정부 부근의 물의 와류를 감소시켜야 했다. 둘째, 다이버가 주행 중 손쉽게 상태를 확인하고 조작할 수 있도록 핸들, 디스플레이, 스위치를 한 곳에 배치하

는 것이 중요했다. 셋째, 거치 및 충전의 용이성을 위해 추진체를 세워서 보관할 수 있도록 설계해야 했다.

이러한 조건을 바탕으로 모델링을 진행하였으며, 물속에서 무게 중심을 맞추고 이동 시 저항을 최소화하기 위해 추진체의 부피가 하단으로 갈수록 좁아지는 유선형 디자인을 채택하였다. 또한, 추진체를 세워서 거치할 수 있도록 수출구에 원통형 거치대를 배치하고, 조작 편의성을 위해 주행 스위치 및 디스플레이 또한 수출구에 배치하였다.

4.2 다이버 추진체 구조해석

설계 조건을 반영한 모델링을 바탕으로 구조해석 시뮬레이션을 진행하였으며, 수중 환경에서 추진체 하우징에 가해지는 압력을 계산하여 구조적 안전성을 검증하고, 부위별 재질 선정을 수행하였다. Mesh 설정은 영역별로 조밀도를 다르게 하여 효율적으로 처리할 수 있도록 최적화하였다. 파손 우려가 높은 접합부 등 복잡한 부위는 조밀도를 높여 해석의 정확도를 향상시켰다. 추진체의 자세는 0°로 설정하였으며, 하중은 수심 200m인 20atm을 변환한 2,026,500N으로 설정하였다(Table 3). 사용된 물성치는 6061 알루미늄과 ABS를 기준으로 하였다(Fig. 4).

구조해석 결과, 외부 볼트 체결 부위, 몸체의 연결부 및 거치대를 지지하는 지지대에 직접적인 압력 하중이 발생하였으며, 제품의 최외곽 부위에

도 하중이 발생하는 것을 확인하였다(Fig. 5). 이를 바탕으로 하중이 많이 발생하는 하우징 연결부와 지지대는 6061 알루미늄 소재를 사용하여 제작하고, 찌그러짐 위험이 낮은 하우징 부위에도 6061 알루미늄을 활용하여 제품의 무게를 줄였다.

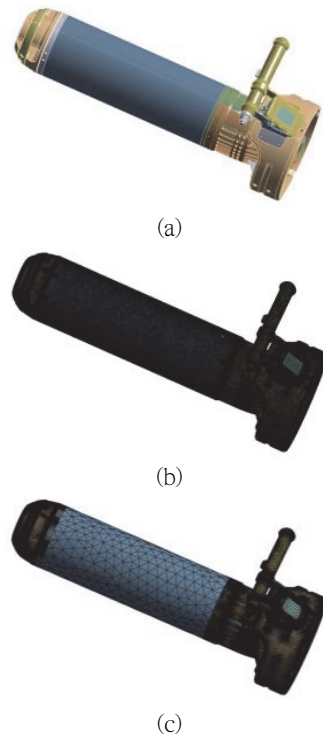


Fig. 4 Model Setup for Structural Analysis of Diver Propulsion Device. (a) Setting Boundary Conditions, (b) FEM Model Setup, (c) FEM Model Optimization

Table 3. Material Properties for Structural Analysis of Diver Propulsion Device

Item	Value	
Material	AL6061	ABS
Density	2,700 kg/m ³	1,030 kg/m ³
Poisson's Ratio	0.33	0.4089
Yield Strength	280 MPa	27.44 MPa



Fig. 5 Structural Analysis Results

외부로부터의 충격 빈도가 높아 찌그러짐이 발생하기 쉬운 부위는 엔지니어링 플라스틱(ABS) 소재를 활용하여 제작하였다. 또한, 외부 체결용 볼트 중 큰 하중이 발생하는 부위는 피치와 외경 등 제품 규격을 키워 결합부의 내구성을 강화하였다.

4.3 다이버 추진체 유동해석

모델링을 바탕으로 유동해석 시뮬레이션을 진행하여 추진체의 부피와 부력 공간 설계를 수행하였다. 물속 운용 시 수출구 유체의 흐름 및 속도를 확인하여 다이버의 피로감을 최소화하고 출력 효율을 극대화하기 위한 유체역학적 테스트를 실시하였다. 유동해석의 경계조건으로는 밀도 1,030kg/m³, 유속 0m/s, 수심 200m, 점도계수 1.08×10⁻³Pa·s, 수온 15℃를 설정하였다(Table 4).

유동 해석의 계산 효율성을 높이기 위해 격자 밀도를 영역별로 다르게 설정하였다. 이는 유체 흐름이 크게 변화하는 전면부와 입구/출구 부근에서 더 조밀한 격자(높은 밀도)를 사용하여 이러한 중요한 영역에서 해석의 정확성을 높이면서 전체 계산 효율을 유지하는 데 목적이 있다. 이러한 격자 최적화 방법은 계산 자원을 효율적으로 활용하여 세밀한 흐름 거동을 정확하게 포착할 수 있다.

물의 압축률이 매우 낮기 때문에 본 연구에서는 물을 비압축성 유체로 가정하였다. 이 가정은 유체 흐름의 수학적 모델링을 단순화시키며, 표준

k-ε 모델을 바탕으로 나비에-스토크스 방정식과 연속 방정식을 사용하여 유동을 해석할 수 있게 한다.

표준 k-ε 모델은 난류 운동 에너지(k) 및 이 에너지의 소산율(ε)에 대한 모델 수송 방정식을 기반으로 하는 모델로, k-ε을 사용하는 수송방정식은 식 (1), (2), (3)과 같다:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

연속 방정식은 유체 흐름에서 질량 보존을 보장하는 방정식이다. 비압축성 유체의 경우, 연속 방정식은 식 (4)와 같이 표현된다:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

여기서, *u*, *v*, *w*는 각각 *x*, *y*, *z* 방향의 속도 성분이다.

나비에-스토크스 방정식은 유체 흐름에서 운동량 보존을 설명하는 방정식이다. 비압축성 유체의 경우, *x*, *y*, *z* 방향의 각 성분별 방정식은 식 (5), (6), (7)과 같다:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x \quad (5)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g_y \quad (6)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z \quad (7)$$

Table 4. Boundary Conditions for Flow Analysis of Diver Propulsion Device

Item	Boundary Value
Density	1,030 kg/m ³
Flow Velocity	0 m/s
Depth	200 m
Viscosity Coefficient	1.08×10 ⁻³ Pa·S
Water Temperature	15 °C

여기서, $\frac{D}{Dt}$ 는 물질 미분으로, 시간에 따른 속도의 변화를 나타낸다. ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν 는 동점도, 그리고 g_x, g_y, g_z 는 각각의 방향에 대한 단위 질량당 힘의 성분이다.

이러한 이론적 근거를 활용하여 CFD 시뮬레이션을 수행하여 특정 도메인 내의 유체 흐름 동역학을 분석할 수 있었다. 격자 최적화는 계산 자원을 효율적으로 활용하여, 높은 유동 변동이 있는

영역에 집중하여 세밀한 흐름 거동을 정확하게 확인할 수 있다. 다양한 공학적 응용에서 유동 문제를 설정하고 해결하는 데 필요한 기초를 제공하여 정확하고 효율적인 해석에 활용될 수 있다.

유동해석 결과, 추진체의 부피와 부력 공간 설계를 통해 물속 운용 시 유체의 흐름 및 속도를 최적화하였다(Fig. 6). 다양한 조건에서 유동해석을 진행하여 RPM의 변화에 따른 내부 유동장의 동압 및 효율 데이터를 확보하였다.

4.4 임펠러 및 수출구 노즐 상세 설계

기초 개념 설계와 1차 유동해석 결과를 반영하여, 동일 회전수 대비 최고 출력을 위한 세부 설계를 진행하였다. 캐비테이션 현상을 최소화하고

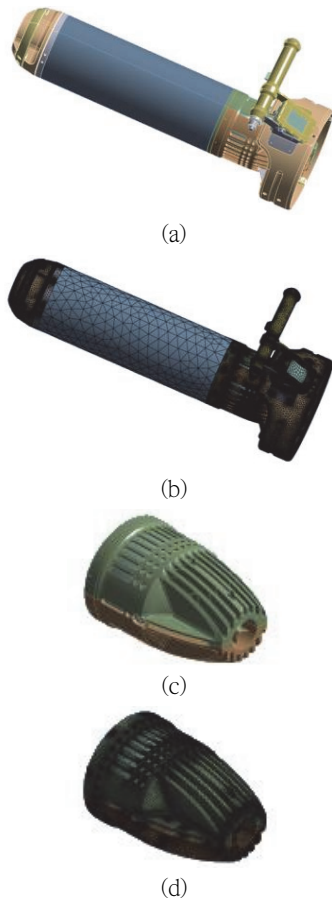


Fig. 6 Mesh Model Setup for Flow Analysis of Diver Propulsion Device. (a) Geometry of Diver Propulsion Device, (b) Mesh of Diver Propulsion Device, (c) Geometry of Exhaust Port, (d) Mesh of Exhaust Port

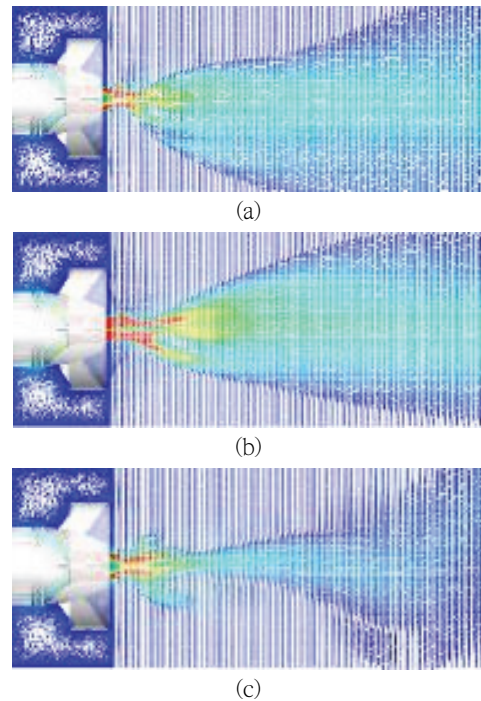


Fig. 7 Flow Analysis of Diver Propulsion Unit by Impeller Diameter. (a) 52mm Impeller, (b) 67mm Impeller, (c) 78mm Impeller

Table 5. Average Exit Velocity by Impeller Size

Impeller Diameter	Avg. Velocity (m/s)	Avg. Velocity (kn)
52mm	1.9451	3.781
67mm	2.0454	3.976
78mm	1.6997	3.304

최대 출력을 위해 43mm 피치를 가진 4개의 날개로 임펠러를 구성하였다(Fig. 7). 수입구에서 수출구로 나오는 순간의 동압을 활용하여 워터젯 외부 유체의 평균 속도 에너지를 측정하였다(Table 5). 동일한 주행부 조건에서 최적의 임펠러 지름을 67mm로 설정하였고, 유동해석 결과를 통해 수출구 공동 부피에 최적화된 임펠러 사이즈를 도출하여 설계에 반영하였다.

해석 결과를 바탕으로 최적의 임펠러를 배치하여 최종 설계를 완료하였으며, 다양한 조건에서 유동해석을 진행하여 전체적인 유동 분포 및 RPM별 효율 데이터를 확보하였다. 이와 같은 과정을 통해 다이버 추진체의 설계, 구조해석 및 유동해석을 최적화하여 안정적이고 효율적인 수중 추진 시스템을 구현할 수 있었다. 향후 지속적인 연구와 테스트를 통해 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

5. 성능 평가 결과

5.1 다이버 추진체 속도 시험결과

다이버 추진체의 속도를 측정하기 위해 별도의 측정 장비가 없어, 외부 수영장에서 사람이 직접 운용하는 방식을 통해 테스트를 진행하였다. 속도 측정 기준으로 설정한 3.8 노트를 초속으로 변환하면 약 1.955m/s가 된다. 이를 바탕으로 속도(V),



Fig. 8 Velocity Measurement Field Test

Table 6. Minimum Travel Time to Achieve 3.8 Knots by Travel Distance for Diver Propulsion Device

No.	Travel Distance	Minimum Travel Time (seconds)
1	5m	2.55
2	10m	5.11
3	15m	7.67

이동 거리(S), 시간(T)에 대한 계산식 $V = \frac{S}{T}$ 를 이용하여, 다이버 추진체가 3.8 노트 이상의 속도를 충족하기 위해 주파해야 하는 주행 거리당 최소 시간을 계산하였다. 예를 들어, 5m 주행 거리의 최소 주파 시간은 2.55초, 10m는 5.11초, 15m는 7.67초이다. 이러한 계산을 통해 다이버 추진체의 성능을 평가할 수 있는 기준을 마련하였다.

속도 필드 테스트는 Fig. 8과 같이 각 거리별 최소 주파 시간을 기준으로 10회 반복하여 실시되었다. 테스트 결과, 10회 주행 기준 평균 속도는 3.88 노트로 측정되었으며, 이는 다이버 추진체의 목표 속도인 3.8 노트를 초과하는 수치이다(Table 6). 이로써 다이버 추진체가 속도 지표 수준을 충분히 만족함을 확인할 수 있었다. 이 시험을 통해 다이버 추진체가 실제 사용 환경에서 안정적이고 효율적으로 작동할 수 있는 능력을 입증하였다.

5.2 다이버 추진체 운용시간 시험

다이버 추진체의 운용시간을 측정하기 위해 무게추를 이용하여 추진체를 고정시킨 후, 크루즈 모드로 설정한 5,000rpm에서 테스트용 수조에서 동작시켰다(Fig. 9). 이 실험은 다이버 추진체가 연속으로 얼마나 오래 작동할 수 있는지를 확인하기 위한 것이다. 실험 결과, 다이버 추진체는 연속으로 150분 이상 동작할 수 있음을 확인하였다. 이는 초기 목표였던 120분 이상의 운용시간을 충분히 충족하는 수치이다. 이러한 결과는 다이버 추진체가 긴 시간 동안 안정적으로 작동할 수 있으며, 실제 운용 환경에서도 사용자의 요구를 만족시킬 수 있음을 시사한다.

다이버 추진체의 현장 실험 결과, 본 연구에서 개발된 다이버 추진체는 속도 및 운용시간 모두 목표 기준을 초과 달성하였다. 속도 시험에서는 평균 3.88 노트의 속도를 기록하여 목표치인 3.8 노트를 초과하였고, 운용시간 시험에서는 연속 150분 이상 동작하여 목표치인 120분을 초과하였다. 현장 실험 환경과 바다 등 실제 사용 환경과의 차이는 밀도에 의한 부력 차이를 제외하고 동일하다는 특성을 반영하였을 때 이러한 결과는 다이버 추진체 내부 무게추 배치 등 부력 차이를 해

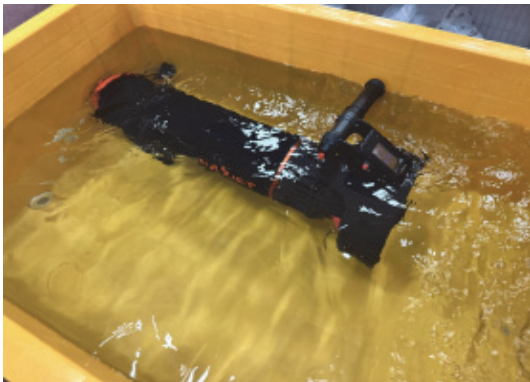


Fig. 9 Operating Time Measurement Field Test

소하기 위한 방안만 추가한다면 다이버 추진체가 실제 환경에서도 높은 성능을 발휘할 수 있음을 입증하며, 향후 더욱 발전된 연구와 테스트를 통해 성능을 지속적으로 향상시킬 수 있는 중요한 기초 데이터를 제공한다.

6. 결론

본 연구는 고성능 다이버 추진체의 개발을 목표로 다양한 실험과 분석을 통해 다이버 추진체의 성능을 검증하고자 하였다. 실험 결과, 다이버 추진체는 설정된 속도 및 운용시간 목표를 초과 달성했으며, 개발 과정에서 얻어진 데이터와 경험은 향후 다양한 수중 장비 개발에도 적용될 수 있다. 본 연구는 다양한 추진 방식과 구성 요소들의 최적화를 통해 다이버 추진체의 성능 극대화에 중점을 두었으며 이를 통해, 안전성, 효율성, 사용자 편의성을 모두 고려한 종합적인 설계를 구현하였다.

결론적으로 이를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 속도 시험 결과 다이버 추진체는 3.8노트 이상의 속도를 목표로 하였고, 평균 3.88노트를 기록하여 목표치를 초과하여 달성하였다.

둘째, 운용시간 시험 결과 다이버 추진체는 연속 150분 이상 동작하여 초기 목표였던 120분을 초과 달성하였다.

본 연구는 다이버 추진체가 수중 레저와 산업 분야에서 고성능을 발휘할 수 있음을 입증하였으며, 이를 통해 자율 로봇 시스템 및 수중 탐사 기술의 발전에 기초 데이터를 제공할 수 있었다. 특히 속도와 운용 시간 시험 결과, 다이버 추진체는 목표치를 초과 달성하여 향후 성능을 지속적으로 개선할 수 있는 기반을 마련하였다. 이 연구에서 축적된 데이터와 경험은 향후 더욱 진보된 다이버 추진체와 수중 장비 개발에 기여할 수 있으며, 수

중 레저 활동뿐 아니라 해양 연구, 해양 환경 모니터링, 해양 자원 조사 등 다양한 산업 분야에서 중요한 도구로 활용될 가능성을 지니고 있다. 또한 리튬 이온 배터리 기술의 도입으로 운용 시간과 성능이 크게 향상되어 자율 무인 잠수정 및 수중 로봇 기술의 발전에도 큰 도움이 될 것이다.

결론적으로, 다이버 추진체는 수중 활동의 효율성과 안전성 높이는 기술로 이는 다양한 수중 응용 분야에서 활용될 가능성이 높은 기술이다. 향후 지속적인 연구와 개발을 통해 다이버 추진체의 성능을 더욱 발전시키고, 다양한 수중 환경에서 안정적이고 효율적인 작동을 보장할 방안을 모색하여 수중 기술의 혁신을 선도할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 부산광역시의 재원으로 (재)부산테크노파크의 지원을 받아 수행된 2024년 지산학 협력 기업R&BD 지원사업임

참고문헌

- [1] A. Manthiram, "A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry", *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, p. 1550, (2020).
- [2] Li, J., Li, W., Liu, Q., Luo, B. and Cui, W, "Current Status and Technical Challenges in the Development of Biomimetic Robotic Fish-Type Submersible", *Ocean-Land-Atmosphere Research*, vol. 3, No. 36, (2024).
- [3] A. Villanueva, C. Smith, and S. Priya, "A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators", *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 6, no. 3, 036004, (2011).
- [4] Yoerger, D. R., Jakuba, M. V., Bradley, A. M., and Bingham, B., "Techniques for deep sea near-bottom survey using an autonomous underwater vehicle", *Robotics Research: Results of the 12th International Symposium ISRR*, p.416-429, (2007).
- [5] Ryu, J. D., Nam, K. S., and Ha, K. N., "A Basic Study of ROV System Design for Underwater Structure Inspection", *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, Vol. 23, No. 3, p. 463-471, (2020)
- [6] Lu, X., Wang, Z., Shen, H., Zhao, K., Pan, T., Kong, D., and Twiefel, J., "A novel dual-rotor ultrasonic motor for underwater propulsion". *Applied Sciences*, vol. 10, no. 1, p. 31, (2019).
- [7] Li, Q., Abdullah, S., and Rasani, M. R. M. "A review of progress and hydrodynamic design of integrated motor pump-jet propulsion", *Applied Sciences*, vol. 12, no. 8, 3824, (2022).
- [8] Brennen, C. E., "Cavitation and bubble dynamics", Cambridge University Press, (2014).
- [9] Monaghan, J. J., "Smoothed particle hydrodynamics and its diverse applications", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, No. 1, pp. 323-346, (2012).
- [10] Inprasetyobudi, H., Darma, Y. Y. E., Rinanto, N., Wibowo, G. H., and Utomo, R. E. P.. "Design and analysis of low-cost underwater glider for shallow water", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 925, No. 1, p. 012055., (2021).
- [11] Page, B. R., Ziaeeafard, S., Pinar, A. J., and Mahmoudian, N. "Highly maneuverable low-cost underwater glider: Design and development", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 344-349, (2016).
- [12] Vega, A., "Ocean thermal energy conversion primer", *Marine Technology Society Journal*, Vol 36, No. 4, pp. 25-35, (2002).
- [13] Li, C., Guo, S., and Guo, J., "Performance

- evaluation of a hybrid thruster for spherical underwater robots”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 1-10, (2022).
- [14] Lucà Trombetta, G., Leonardi, S. G., Aloisio, D., Andaloro, L., and Sergi, F., “Lithium-ion batteries on board: A review on their integration for enabling the energy transition in shipping industry”. Energies, vol. 17, no. 5, p. 1019, (2024).
- [15] Wikipedia contributors. (2024, July 15). Cavitation. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>
-
- (접수: 2024.08.17. 수정: 2024.10.04. 게재확정: 2024.10.14.)