

덕트형 수중 이동 로봇의 선회력 극대화를 위한 방향타 메커니즘 설계

Design of Rudder Mechanism to Maximize the Turning Force of a Ducted-Type Underwater Robot

김 영 현, 황 동 옥, 김 진 현*
 (Yunghyun Kim¹, Dongwook Hwang¹, and Jinhyun Kim^{1,*})

¹Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Abstract: The ducted-type underwater vehicle has a streamline outer shape and an inner duct. Fluid resistance is small due to streamline appearance, and because of the short length of the body, it has a small turning radius and good maneuverability. In this paper, the design of the rudder mechanism in which the rudder driving part is placed outside the duct is carried out and it is easy to increase the fluid acting area of the rudder compared to the rudder placed inside the duct. The degree of freedom of movement is also increased because it is free from interference and drive angle between rudders. The hydrodynamic analysis of the relationship between the state of the internal flow only and the optimum angle relationship between the driving angles of each rudder for maximizing the turning force was carried out.

Keywords: underwater robot, rudder, thruster

1. 서론

현재 전 세계적으로 무인 비행 로봇 드론의 대한 연구와 활용이 활발히 진행되고 있다. 과거에는 주로 군사용으로 이용되었으나 최근에는 물류분야, 정보통신분야, 방송·영화 등의 특수 촬영, 교통상황 관측 등 상업·민간용으로 많은 분야에서 이용되고 있다. 항공 분야와 달리 수중 로봇은 대부분 크기가 크고 고가이며 일반인이 활용하기에는 한계가 있다. 따라서 수중에서 드론의 역할을 할 수 있는 작고 저가인 수중 로봇 개발이 완료된다면 군사적 목적뿐만 아니라 민간용으로도 활용될 수 있을 것으로 예상된다[1-4].

이러한 목적으로 개발된 Fig. 1과 같은 덕트형 수중 이동 로봇은 유선형 외형과 내부 덕트로 구성되어 있으며, 어뢰형 수중로봇처럼 유선형 외형에 의해 유체저항이 작을 뿐만 아니라 동체의 길이가 짧아 작은 선회반경을 가져 운동 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 또한 동체 크기 대비 큰 추진기를 덕트 내부에 설치할 수 있으며 설치된 추진기는 벤츨리 효과를 이용하여 추력을 극대화할 수 있다[5-7].

덕트형 수중 이동 로봇의 장점 중 선회력 및 운동성능을 높이기 위해서는 효율적인 방향전환에 대한 연구가 필수적

이다. 수중에서의 방향전환 방식으로는 일반적으로 방향타 반력을 이용한 방법(Fig. 2(a)), 다수의 추진기의 추진력 조절을 통한 방향전환 방법(Fig. 2(b))을 사용하고 있다[8-10]. 이 두 가지 방향 전환 방식 중 덕트형이고 유선형인 형상에 더 적합하다고 판단되는 방향타 반력을 이용한 전환방법을 활용한 덕트형 수중 이동 로봇은 로봇의 외형 변화를 줄이며



그림 1. 덕트형 수중 이동 로봇.

Fig. 1. The ducted-type underwater robot.

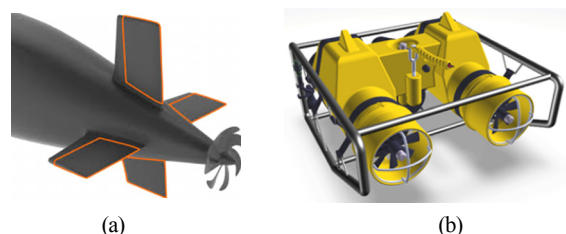


그림 2. 수중 방향 전환 방법 (a) 방향타를 이용한 방향 전환, (b) 복수의 추진기를 이용한 방향 전환.

Fig. 2. The Steering method of underwater robot (a) a rudder mechanism, (b) a multiple thruster mechanism.

* Corresponding Author

Manuscript received June 25, 2017 / revised July 17, 2017 / accepted July 21, 2017

김영현, 황동옥, 김진현: 서울과학기술대학교 기계공학과
 (younghyeonkim89@gmail.com/dwhwang1101@gmail.com/jinhyun@seoultech.ac.kr)

※ 본 논문은 산업통상자원부 기술혁신사업 (로봇산업원천기술개발사업, No. 10060065)와 한국해양과학기술진흥원(해양부수산업, 유체저항이 작은 생체모사 수중 이동로봇, No. 20150022)의 지원을 받아 수행되었습니다.

덕트 내부의 유량을 활용하기 위해 덕트 내부에 방향타가 설치되었다. 하지만 방향타가 선회력이 커지기 위해서는 면적이 증가되어야 하는데 덕트의 지름이 커지지 않는 이상 방향타 면적을 증가시키는데 한계가 있다. 또한 덕트 내부에 십자형태로 방향타 간 거리가 가깝게 설치되어 있으므로 여러 방향타가 동시에 구동될 경우 방향타 간의 간섭이 생기는 등의 문제가 있었다.

이를 개선하기 위해 본 논문에서는 덕트 외부에 방향타 구동부가 설치되는 방향타 메커니즘 설계를 제안하였다. 외부 방향타 구동 메커니즘은 직접적으로 정확하게 동력 전달이 가능한 베벨 기어 방식을 채택하여 불필요한 동력 전달 구조를 줄이고 공간 활용을 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 방향타가 덕트 외부에 상하좌우 사방향으로 부착되어 덕트 내부에 비해 같은 크기의 방향타를 부착하더라도 한 방향으로 2개의 방향타가 작용하기 때문에 유체가 닿는 면적이 비교적 커지는 장점이 있다. 또한 각 방향타 간 구동되는 공간이 겹치는 부분이 내부 십자형태에 비해 매우 적기 때문에 방향타 간의 간섭에서 자유롭다.

또한 방향타가 설치된 위치에서 방향타 구동 각도에 따라 추진기에 의해 유속이 발생하는 덕트 내부 또는 항행에 따른 외부 유속에 영향을 받으며 각각 속도가 다르므로 방향타 간의 위치 조합에 따라 선회력은 달라질 것이다. 이러한 관계를 해석하기 위해서는 내부 유속만 존재하는 상태에서의 관계를 해석하고 내외부 유속 모두 존재하는 상태에서의 관계까지 해석할 필요가 있다. 본 논문에서는 먼저 내부 유속만 존재하는 상태의 관계를 유체역학적으로 해석하여 선회력 극대화를 위한 각 방향타 간의 구동각도별 최적의 각도 관계 도출을 목표로 한다. 이를 위해 유체역학적으로 해석을 하고, 실험을 통해 해석한 내용을 검증하였다. 추후 내외부 유속 모두 존재하는 상태의 관계에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이다.

II. 방향타 메커니즘 설계

1. 선회력 극대화를 위한 방향타 메커니즘 개선안

Fig. 1에서 제작된 수중 이동 로봇은 Fig. 3(a)와 같이 내부에 방향타가 십자 형태로 설치되었다. 하지만 이러한 설치 형태는 방향타 간의 간섭, 선회력 향상에 제약이 있었

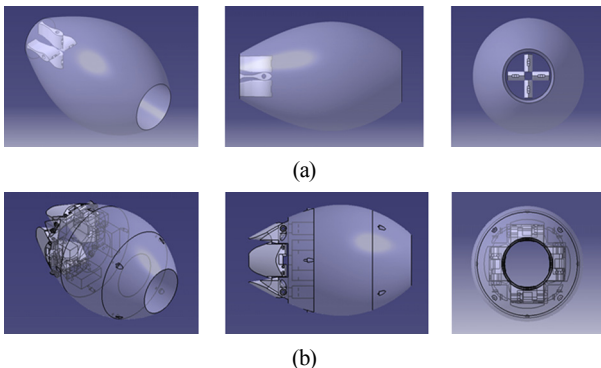


그림 3. 방향타 설치 형태 (a) 내부 방향타, (b) 외부 방향타.

Fig. 3. The rudder installation mechanism (a) a inside rudder, (b) a outside rudder.

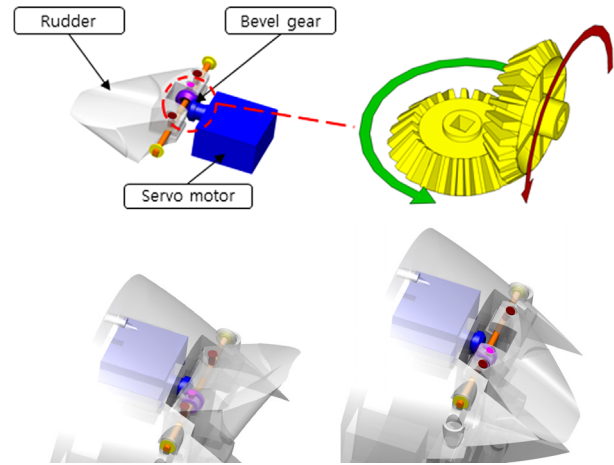


그림 4. 개선된 방향타 구동 메커니즘.

Fig. 4. The proposed rudder mechanism.

표 1. 방향타 설치 위치에 따른 특징.

Table 1. The features of rudder installation mechanism.

형태	특징
덕트 내부	- 덕트 내부에 십자 형태로 설치 - 방향타의 구동 각도에 따라 방향타간의 간섭해결이 쉽지 않음 - 선회력 향상에 제약 있음 (방향타의 면적을 키우기 위해서는 방향타의 길이가 길어져야 하지만 덕트 내부 지름에 의해 최대 구동각도가 결정)
덕트 외부	- 동체의 상하좌우 사방향에 설치 - 덕트 내부에 비해 방향타에 작용하는 유체가 닿는 면적을 변경시키기가 쉬움 - 방향타 간의 간섭과 구동각도에서 자유로움 - 운동자유도가 높아짐 - 방향타 구동각도에 따라 덕트 내, 외부 모든 유량이 방향타에 작용 (덕트 내외부 유속이 다르므로 방향타 각도에 따른 선회력 차이가 있음)

고, 이를 개선하기 위해 전체적인 형상은 유지하면서 덕트 외부에 방향타를 설치하는 Fig. 3(b)의 형태에 대한 형상 설계를 수행하였다.

그리고 제안한 방향타를 구동하기 위해서 Fig. 4와 같이 직접적으로 정확하게 동력 전달이 가능한 베벨 기어를 채택하였으며, 구동 모터 작동 시 베벨 기어에 의하여 방향타가 위 아래로 구동되게 된다.

방향타 설치 위치에 따른 특징은 Table 1과 같이 요약할 수 있다.

2. 유체역학적 해석

제안된 방향타는 구동 각도에 따라 덕트 내부 또는 외부 유량이 방향타에 작용하며 이에 따라 방향타 각도에 따른 선회력 차이가 발생한다. 이는 각 방향타 간의 위치 조합의 영향을 받게 되며 유체역학적으로 두 가지 경우로 나누어서 해석을 진행할 필요가 있는데, Fig. 5(a)의 외부 유체의 흐름이 없고 프로펠러에 의한 내부 유체의 흐름만 고려하는 경우와 Fig. 5(b)의 외부 유체의 흐름 및 프로펠러에 의한

내부 유체의 흐름을 함께 고려하는 경우이다. 현실적으로 수중로봇이 추진기에 의해서 구동되면 상대적인 외부 유체의 흐름이 발생되기 때문에 외부 유체의 흐름이 없는 경우는 존재하지 않는다. 그러나 일반적인 수조에서의 실험적인

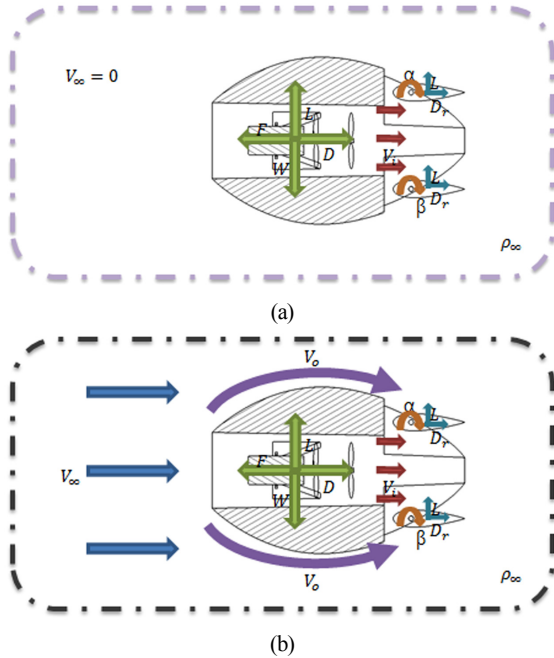


그림 5. 유체역학적 해석 (a) 내부 유체만 고려한 상태, (b) 내부 유체를 모두 고려한 경우.

Fig. 5. The analysis of fluid dynamics, (a) an inside duct fluid effect only, (b) both inside and outside duct fluid effect.

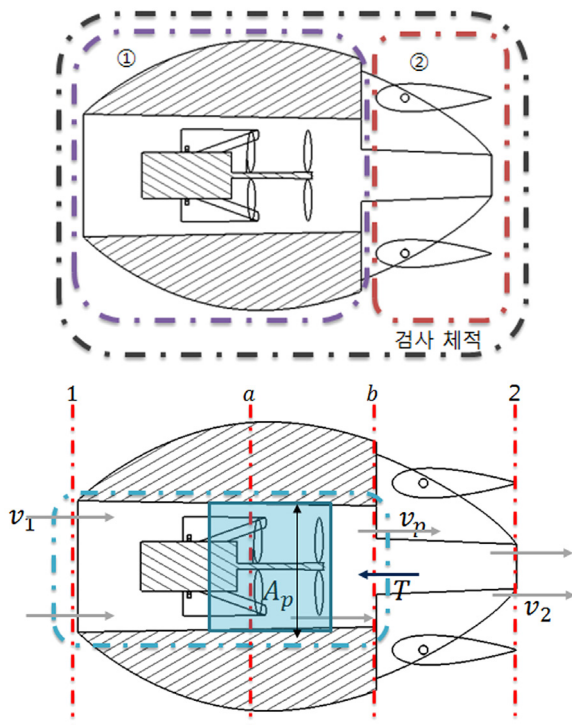


그림 6. 유체역학 해석을 위한 검사 체적.

Fig. 6. Control volume for fluid dynamic analysis.

검증을 위해서는 추진기를 고정시켜 센서를 이용해 추진력과 추진력의 방향 등을 정밀하게 측정하여 추진기 자체의 특징을 정량적으로 비교하기 위해서 많은 논문들에서 이 방법을 사용하고 있다. 외부 유체까지 고려한 성능 실험은 회류수조에서 수중로봇을 고정시킨 상태로 외부 유체의 흐름을 변화시키면서 측정을 수행할 수 있지만, 실험 비용 증가와 실험 환경의 제약이 크다는 단점이 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 먼저 외부 유체의 흐름이 없고 프로펠러에 의한 내부 유체의 흐름만 존재하는 경우에 대한 해석을 진행하였다.

전체적인 해석 시스템은 Fig. 6과 같이 구성하여 ① 동체부, ② 방향타부로 나누어 동체부에서는 프로펠러에 의해 발생하는 유동, 방향타부에서는 유동에 의해 방향타에 생기는 선회력에 대하여 각각 해석을 진행한다.

2.1 동체부 해석

외부유체의 흐름이 없고 동체가 고정된 상태이므로 덕트 내부의 추진기의 추력에 의해서만 덕트 내부의 유속이 발생된다. Fig. 6처럼 덕트 입구, 덕트 끝 부분을 1, 2 구간으로 정하고 프로펠러에 의해 유속이 형성되는 단면을 a, b라 한다. 해석적 단순화를 위해 덕트는 평행한 관이며, 프로펠러에 의해 유속이 형성되는 끝 단면 b는 동체부의 끝 단면과 큰 차이가 없으므로 동체부의 끝 단면을 b로 가정하고 해석을 한다. 해석을 위해 단순화시킨 동체부는 Fig. 7과 같다.

동체부 해석은 [11,12]을 참고하여 진행하였으며, 프로펠러는 액추에이터 디스크(actuator disk)로 표시되어 있는데, 이것은 면적이 A_p 인 프로펠러 면을 가로질러 압력의 불연속과 속도 v_p 를 발생한다. 유속은 접근속도 v_1 과 저속의 후류 속도 v_2 에 의해 나타내어진다. 프로펠러를 통과하는 유체의 압력은 디스크 직전에서 p_a 로 떨어지고 바로 뒤쪽에서 p_b 로 상승하며, 후류에서 자유유동압력으로 회복한다. 프로펠러가 강체이며 유체의 흐름으로부터 에너지를 추출하고 있

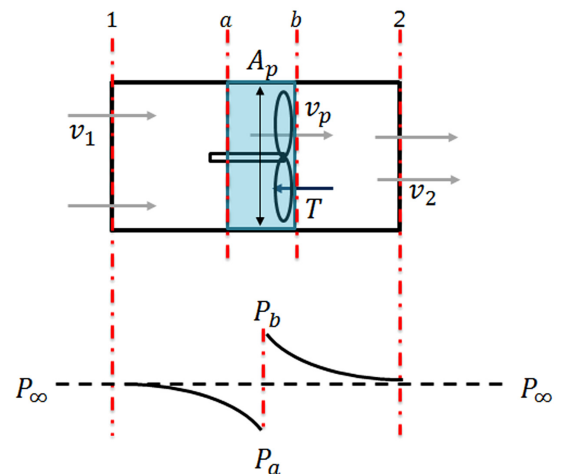


그림 7. 해석을 위해 단순화 시킨 동체부와 프로펠러 주위의 압력 변화.

Fig. 7. The simplification of inside duct area and pressure difference induced by thruster.

을 때 추진력 T 가 유체의 속도 방향과 반대되는 방향으로 발생하게 된다. 단면 1, 2 사이의 검사체적에 수평 방향의 운동량 식을 적용하면 다음 식이 성립한다.

$$\sum F_x = -T = \dot{m}(v_2 - v_1) \quad (1)$$

디스크 바로 앞뒤 사이의 검사체적으로부터 다음과 유사한 관계식이 성립한다.

$$\sum F_x = -T + (p_a - p_b)A_p = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (2)$$

이 두 식을 연립하면 추진력은 다음과 같이 표시된다.

$$T = (p_a - p_b)A_p = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (3)$$

이상유동을 가정하면 비압축성 Bernoulli 방정식을 디스크까지의 영역에 적용함으로써 압력 관계식을 유도할 수 있다.

$$1\text{구간} \sim a\text{구간} : \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_a}{\rho} + \frac{v_a^2}{2} \quad (4)$$

$$b\text{구간} \sim 2\text{구간} : \frac{p_b}{\rho} + \frac{v_b^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)를 서로 빼고 프로펠러 단면을 통과하는 단위 시간당 질량이 $\dot{m} = \rho A_p v_p$ 라는 것을 이용하여 식 (3)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$p_b - p_a = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = \rho v_p(v_2 - v_1) \quad (6)$$

따라서, 식 (6)에서 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$v_p = \frac{1}{2}(v_2 - v_1), \quad v_2 = 2v_p - v_1 \quad (7)$$

디스크로부터 생성되는 추진력은 식 (3)과 식 (6)에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$T = 2\rho A_p v_p(v_p - v_1) \quad (8)$$

2.2 방향타부 해석

방향타부에서는 동체부에서 해석된 속도와 압력을 이용하여 덕트 내부 유체가 방향타에 맞닿으면서 지나갈 때의 표면력과 방향타가 덕트 외부 방향의 각도를 가질 때는 두 방향타 간의 압력차에 의한 힘이 발생한다. 이 두 가지 상황에 대해 해석하고 힘을 합하면 선회력을 구할 수 있다. 방향타부의 방향타는 방향타 고정부 기준으로 각도가 변하므로 해석의 단순화를 위해 각 방향타 고정부로부터 각 방향타 끝 부분까지를 원형 관으로 가정하였다(Fig. 8). 동체 끝단과 방향타 고정부까지 거리 차이에 의한 속도 및 압력 차이가 크지 않기 때문에 방향타 고정부에서의 속도와 압력은 동체 끝단의 속도와 압력으로 가정하여 단순화하였고, 방향타의 구동 각도는 θ_1, θ_2 로 정하였다.

① 방향타의 각도가 덕트 내부일 경우(검사 체적이 줄어드는 경우)

Fig. 9와 같이 2번 방향타 고정부에 수평으로 검사체적을

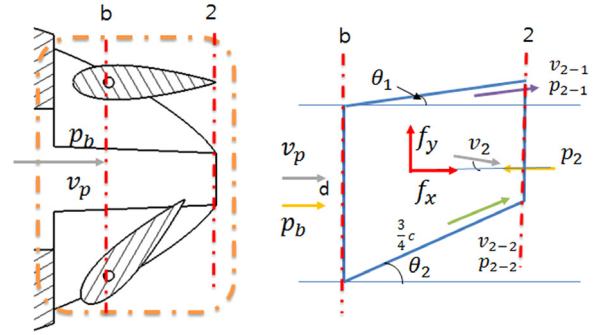


그림 8. 해석을 위해 단순화 시킨 방향타부.

Fig. 8. The simplification of rudder area.

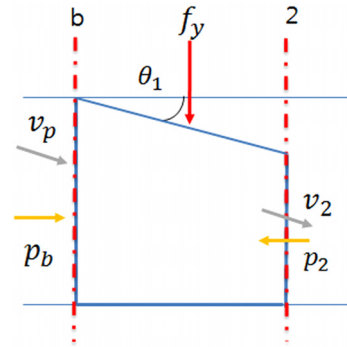


그림 9. 검사 체적이 줄어드는 경우.

Fig. 9. The case of reduced control volume.

설정하고, 내부 유속이 흐를 때 1번 방향타가 내부방향의 각도를 갖고 있을 경우 1번 방향타는 내부 유속에 의한 직접적인 힘을 받고 방향타에 닿는 유선이 각도가 생기기 때문에 수직방향의 힘이 생긴다. 여기서 해석하고자 하는 원형관에서 수직분력은 식 (9)로 구할 수 있다.

$$f_y = p_b A_b \sin \theta_b - p_2 A_2 \sin \theta_2 + \rho Q(v_p \sin \theta_p - v_2 \sin \theta_2) \quad (9)$$

b단면에서의 유선과 2단면에서의 유선이 1번 방향타와 평행하다고 가정하면 $\theta_b = \theta_2 = \theta_1$ 이 되며 식이 더 간단해진다.

$$f_y = \sin \theta_1 [p_b A_b - p_2 A_2 + \rho Q(v_p - v_2)] \quad (10)$$

② 방향타의 각도가 덕트 외부일 경우(검사체적이 증가하는 경우)

한 방향타의 각도가 덕트 외부일 경우에도 두 방향타의 압력 차이에 의해 힘이 작용한다. 방향타가 각도가 생기면 그 각도에 평행한 유선이 생기며 관 내의 모든 유선은 같은 시간에 2단면에 도착할 것이다. 이 경우 상대적으로 수평방향 길이가 짧은 방향타 쪽의 유속은 반대 방향보다 느리며 이 경우 압력이 커진다. 이에 따라 방향타 간의 압력차가 생기고 수직방향에 힘이 생긴다.

각 방향타와 평행한 유선을 따라갈 때 각 방향타 끝부분의 속도를 v_{2-1}, v_{2-2} , 압력을 p_{2-1}, p_{2-2} 라 한다. 그리고 유체가 b단면에서 2단면까지 도달하는 시간이 같다고 하면 시간을 t 라 하면 v_{2-1} 과 v_{2-2} 의 x 방향 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

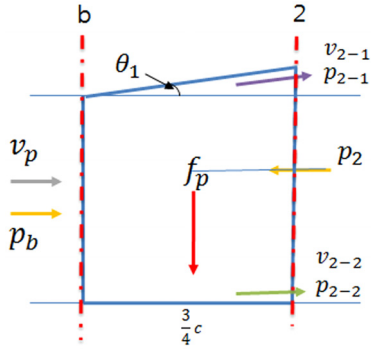


그림 10. 검사 체적이 증가하는 경우.

Fig. 10. The case of increased control volume.

$$v_{2-1,x} = \frac{3\cos\theta_1}{4t}, \quad v_{2-2,x} = \frac{3\cos\theta_2}{4t} \quad (11)$$

여기서 각각 유선에 대해 이상 유동을 가정하고 각 유선을 따라 비압축성 Bernoulli 식을 적용하면 1, 2번 방향타 끝 부분의 압력을 구할 수 있다.

$$\text{b구간} \sim \text{2-1구간} : \frac{p_b}{\rho} + \frac{v_p^2}{2} = \frac{p_{2-1}}{\rho} + \frac{v_{2-1}^2}{2} \quad (12)$$

$$\text{b구간} \sim \text{2-2구간} : \frac{p_b}{\rho} + \frac{v_p^2}{2} = \frac{p_{2-2}}{\rho} + \frac{v_{2-2}^2}{2} \quad (13)$$

식 (13)에서 식 (12)을 빼서 정리하면 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$p_{2-1} - p_{2-2} = \frac{1}{2}\rho(v_{2-2}^2 - v_{2-1}^2) = \frac{9c^2\rho}{16t^2}(\cos^2\theta_2 - \cos^2\theta_1) \quad (14)$$

압력은 단위 면적당 힘이므로 압력차에 의한 힘 f_p 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_p = \frac{p_{2-1} - p_{2-2}}{A_2} = \frac{9c^2\rho}{16t^2 A_2}(\cos^2\theta_2 - \cos^2\theta_1) \quad (15)$$

큰 쪽에서 압력이 작은 쪽으로 힘이 작용하므로 $p_{2-1} - p_{2-2}$ 가 양수일 경우에는 Fig. 3.10기준으로 아랫방향으로, 음수일 경우에는 윗방향으로 힘이 발생한다.

③ 선회력

최종적으로 선회력은 앞서 구해진 덕트 내부 유속에 의한 수직분력과 두 방향타의 압력차에 의한 힘의 합으로 구할 수 있다.

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

식 (14)에 앞서 설계된 로봇의 외형 치수와 제작된 로봇에 사용된 BLDC모터인 AEO-RC CR28M Contra-Rotating Motor w/ 2-Blades @1050kv의 스펙상 추진력인 13.734N 가 정하여 계산해보면 아래와 같은 Figs. 11~13의 그래프를 얻을 수 있다.

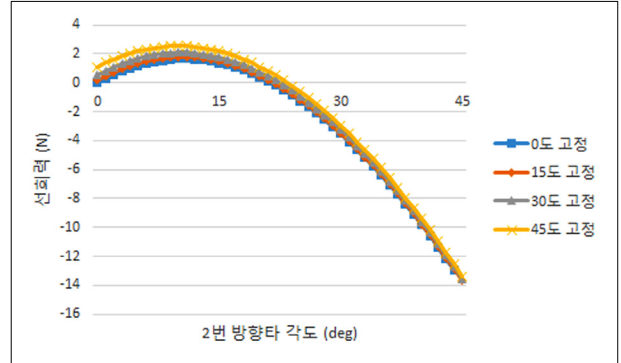
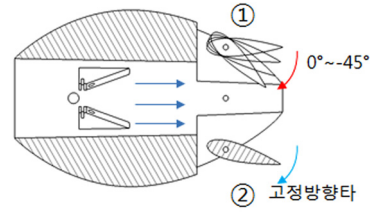


그림 11. 검사 체적이 줄어드는 경우의 모의실험결과.

Fig. 11. The simulation results of reduced control volume.

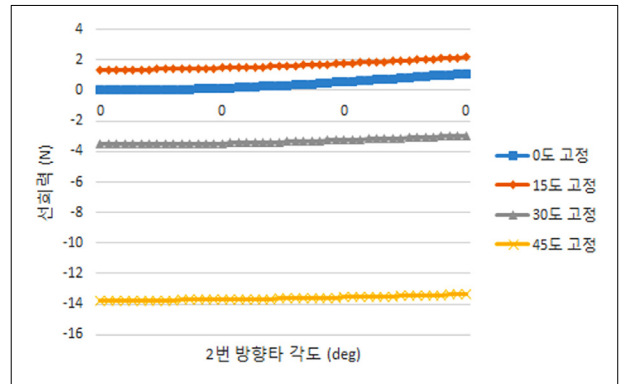
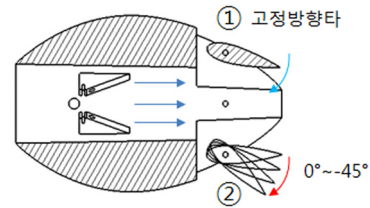


그림 12. 검사 체적이 증가하는 경우의 모의실험결과.

Fig. 12. The simulation results of increased control volume.

III. 메커니즘 검증을 위한 실험

1. 실험 환경

방향타의 각도별 선회력을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험장치 구성은 Fig. 14와 같다.

실험용 동체에서 방향타부는 상하 제외 좌우 두 방향타 간의 관계만 알아보기 위해 좌우 방향타만 구동되도록 모델링하였고, 이를 3차원 프린터를 이용해서 Fig. 15과 같이 제작하였다.

실험은 2.7m(W)×1.6m(L)×1.2m(H) 크기의 소형 수조에서 진행하였다. 보정이 완료된 각재봉에 실험용 동체를 고정하

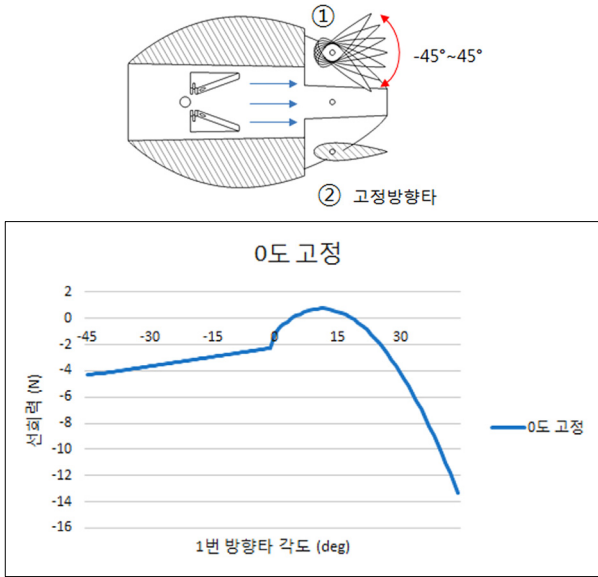


그림 13. 검사 체적의 변화에 따른 선회력 모의실험결과.

Fig. 13. The simulation results according to the variation of control volume.

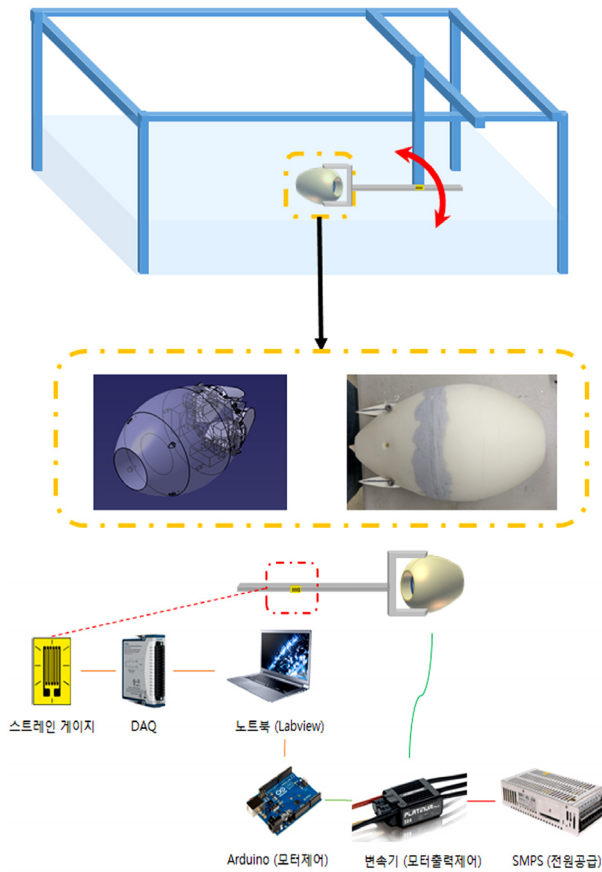


그림 14. 실험 장치 구성 모사도.

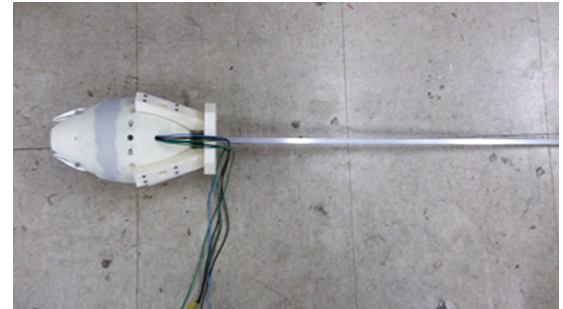
Fig. 14. The schematic diagram of experimental setup.

고 수조 내에 설치하였다(Fig. 16). 프로펠러에 의해 발생되는 유동이 벽에 반사되어 영향을 미치는 것을 최소화하기 위해 최대한 수조의 가로 방향 앞쪽에 위치시켰다.

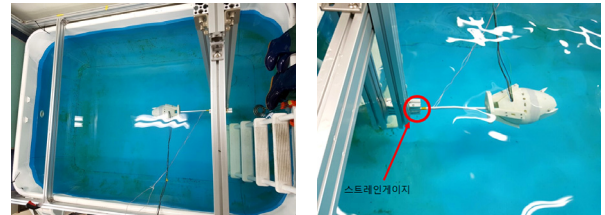


그림 15. 검증용 수중로봇.

Fig. 15. The prototype of underwater robot for experimental verification.



(a)



(b)

그림 16. 실험 환경.

Fig. 16. The experimental environment.

2. 실험 결과 및 고찰

본 실험은 덕트형 수중 이동 로봇이 프로펠러에 의한 내부 유동만 발생하고 있을 때 제한한 방향타 형태에 대한 각 각도별 선회력 확인을 위한 실험이다. 모터의 추력을 발생시켜 각재의 처짐에 대한 데이터를 스트레인 게이지를 통해 획득하며 이 데이터를 통해 선회력을 도출하였다.

실험 방법으로는 위쪽 방향타(1번 방향타)를 $0^\circ \sim 45^\circ$ 까지 7.5° 간격으로 고정시켜두고 아래쪽 방향타(2번 방향타)의 각도를 각각 $0^\circ \sim 45^\circ$ 까지 변경해가며 각도를 맞춰 주고 방향타 각도 별로 실험을 진행하였다. 또한 프로펠러의 추력은 방향타의 각도를 모두 0로 고정하였을 때 x축 방향 힘이 7N, 15N이 되는 두 가지 경우에 대해서 각각의 데이터를 취득하였다.

또한 과도 상태일 때 후류의 영향이 스트레인 게이지 측정값에 노이즈로 작용하는 점을 최소화하기 유동이 정상상태에 도달한 시점부터 데이터 저장을 시작하여 30초간 데이터를 취득하였다. 취득한 데이터는 저대역필터(Low pass filter)로 보정하여 사용하였다.

실험을 통해 얻어진 데이터로 두 가지 상황에 대해 분석이 가능하다.

2.1 한 방향타를 기준으로 반대 방향타가 가까워질 때

우선 추력이 15N일 때와 7N일 때를 비교해 보면 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 17에서 2번 방향타가 덕트 내부 방향으로 가지는 각도가 커질 때, 즉 검사체적이 줄어들 때 선회력이 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 2번 방향타 각도가 점점 커질 때, 고정된 1번 방향타가 각도가 작을수록 약간 더 큰 선회력을 발생하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 방향타가 직접적인 내부 유속에 영향을 받을 때 방향타 간의 간격이 가까워질수록 선회력은 증가한다고 판단할 수 있다. 또한 1번 방향타가 외부 방향으로 각도가 클수록 2번 방향타의 각도가 작을 때 선회력이 반대 방향으로 작용하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 한 방향타를 기준으로 반대 방향타가 멀어질 때

Fig. 18에서 1번 방향타가 외부 방향으로 향하는 각도가 커질수록, 즉 검사체적이 커질수록 전체적인 선회력은 작지만 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 또한 덕트 내부 방향으로 회전하는 2번 방향타의 각도가 클수록 내부 유속에 의한 영향이 더 크기 때문에 더 큰 선회력이 발생한다.

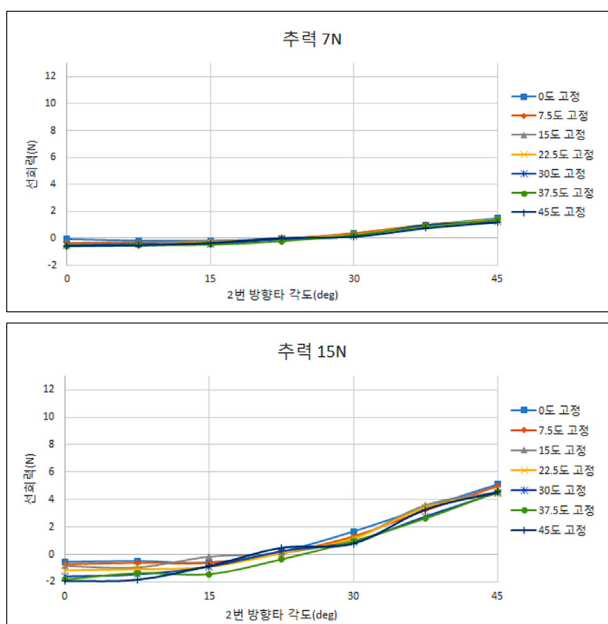
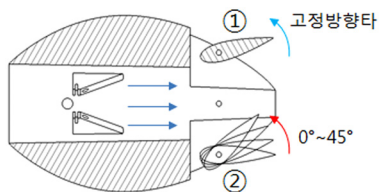


그림 17. 검사 체적이 줄어드는 경우의 실험결과.

Fig. 17. The experimental results of reduced control volume.

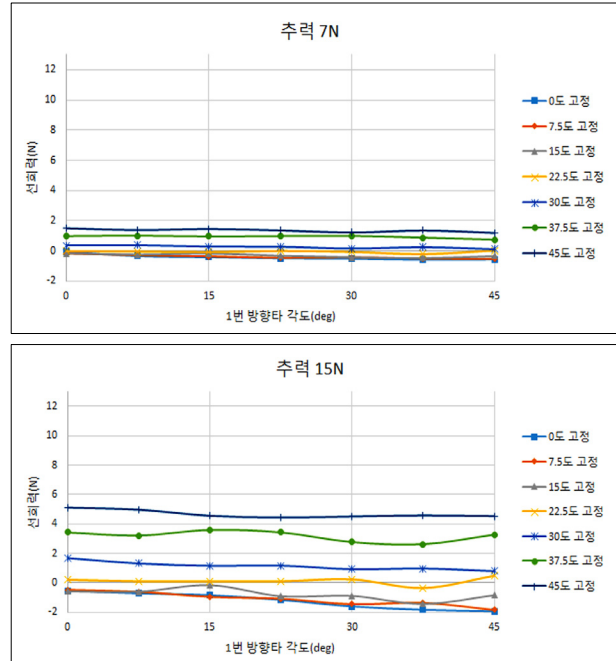
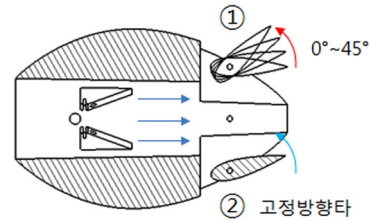


그림 18. 검사 체적이 증가하는 경우의 실험결과.

Fig. 18. The experimental results of increased control volume.

2.3 한 방향타가 0°로 고정되어 있을 때 반대 방향타 각도에 대한 관계

Fig. 19와 같이 한 방향타를 0°로 고정해두고 반대 방향타를 덕트 내외로 모두 회전 시킬 경우를 확인해보면 전반적인 특징을 확인할 수 있다. 2번 방향타가 덕트 내부 방향의 각도를 가질 때 당연히 각도가 커질수록 2차 함수 그래프 모양으로 선회력이 커지는 것을 알 수 있고, 또한 반대 방향인 외부 방향의 각도를 가질 경우도 방향타 각도가 커질수록 1차 함수 형상으로 작지만 선회력이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 내부 유속이 방향타에 직접적으로 주는 힘이 압력 차에 의해 발생하는 힘보다 큰 영향을 미치고 외부 방향 각도로 방향타를 꺾더라도 크진 않지만 같은 방향으로 선회력이 생기는 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

그리고 선회력이 제일 작은 지점은 방향타각도가 0°가 아닌 오른쪽에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 프로펠러 추력이 5N일 경우는 거의 0°에서 나타났지만 15N일 때는 15°인 근에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 각도가 작을 경우 두 방향타 간의 압력 차이에 의한 힘의 영향 때문으로 판단되며 특정 임계각보다 각도가 커질 시 내부 유속에 의한 수직분력 영향이 더 커지는 것으로 볼 수 있다. 또한 프로펠러 추력에 따라 이 임계각은 커질 것으로 추정되며 이는 더 많은 추력 조건 실험으로 해석이 필요하다.

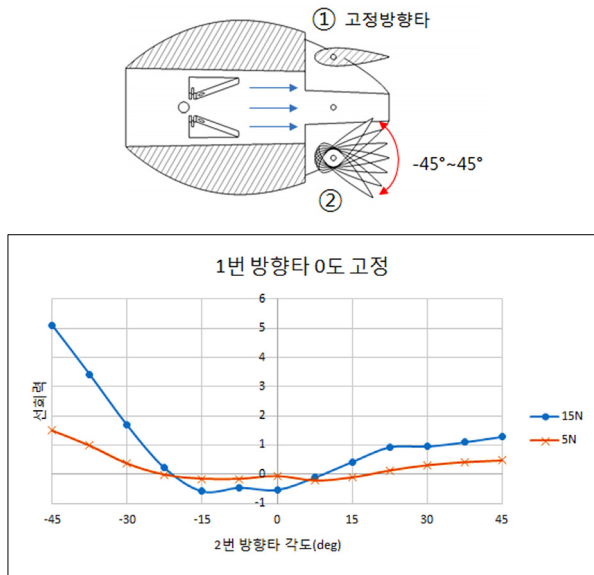


그림 19. 검사 체적의 변화에 따른 선회력 실험결과.

Fig. 19. The experimental results according to the variation of control volume.

또한 15N의 추력에서 0°에서 0이 아닌 값이 측정된 이유는 방향타 각도 제어의 미세한 오차와 추진기의 특성 때문에 발생했을 것이라고 생각된다. 0°도에서의 값을 기준으로 정규화시키는 것도 고려하였지만 실제 제어에서도 동일한 현상이 발생할 것으로 예측되어, 측정값을 그대로 사용하였다. 특히 수중 로봇에서 추진기의 추력은 모터와 달리 다양한 오차 요인을 포함하고 있기 때문에 피할 수 없는 결과이고, 이는 제어를 통해 극복해야하는 문제라고 판단된다.

Fig. 17~19의 실험 결과는 모의실험 결과인 Fig. 11~13과 전체적인 경향성이 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 해석에서 사용한 가정과 분석 방법이 타당하다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 덕트형 수중 이동 로봇의 선회력 극대화를 위한 방향타 메커니즘을 제안하였고, 방향타 간의 관계에 대해 연구하였다. 유체역학적 해석과 실험을 수행한 결과 방향타는 덕트 내부 방향으로 회전할 시, 즉 검사체적이 줄어들 경우 선회력이 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 방향타가 외부 방향으로 회전할 때, 즉 검사체적이 늘어날 때 전체적인 선회력은 미세하지만 점점 줄어든다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 선회력이 최소가 되는 지점이 0°가 아닌 각도인 것을 볼 수 있다. 이는 저각에서는 두 방향타 간의 압력 차이에 의한 힘의 영향 때문으로 판단되며 특정 임계각보다 각도가 커질 시 내부 유속에 의한 수직분력 영향이 더 커지는 것으로 볼 수 있다. 또한 프로펠러 추력에 따라 이 임계각은 커질 것으로 추정되며 이는 더 많은 추력 조건 실험을 통한 검증이 필요하다. 또한 실험 결과는 해석을 통해 수행한 모의실험 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해 해석에서 사용한 가

정과 분석 방법이 타당하다고 판단된다.

이 같은 결과들을 통해 내부 유속만 존재하더라도 방향타가 내외부 방향의 각도를 가질 때 선회력에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 방향타가 서로 가까워질수록 선회력이 더 커지며 멀어질 경우 반대 방향으로 작용되는 힘에 의해 선회력이 저하된다고 판단할 수 있다. 또한 한 방향타를 0°로 고정해두고 반대 방향타를 덕트 내외 모두 회전시킬 경우에서 보았을 때 저각에서는 두 방향타 간의 압력 차이에 의한 힘의 영향이 더 크며 특정 임계각보다 커질 시 내부 유속에 의한 수직분력 영향이 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 프로펠러 추력이 커질 시 점점 더 큰 각도에서 선회력 최소 지점이 생기는 것을 확인할 수 있으며 이 임계각도에 대한 조건은 추가적인 실험을 통해 해석이 필요할 것으로 보인다. 또한 더 나아가 추후 내부유속 뿐만 아니라 외부 유속까지 포함된 방향타 해석까지 진행할 필요성이 있다.

REFERENCES

- [1] B.-H. Jun, P.-M. Lee, and Y.-K. Lim, "Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering(in Korean)*, vol. 26, no. 5, pp. 14-22, 2009.
- [2] J.-M. Lee and G.-W. Kim, "Vision-based Sensor Fusion of a Remotely Operated Vehicle for Underwater Structure Diagnostication," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 4, pp. 349-355, 2015.
- [3] T. H. Fang, J. Han, N.-S. Son, and S. Y. Kim, "Track Initiation and Target Tracking Filter Using LiDAR for Ship Tracking in Marine Environment," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 2, pp. 133-138, 2016.
- [4] K. Kwak, D. Park, Y. Kim, W. K. Chung, and J. Kim, "Underwater E-plane Attenuation Model of Omnidirectional Antenna Using Half Power Beam Width (HPBW)," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 11, pp. 1050-1056, 2015.
- [5] B.-G. Kang, "Estimation of the Hydrodynamic Coefficients and Predict Dynamic Performance test for Ducted a single thruster Unmanned Underwater Vehicle," Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul Korea, 2013.
- [6] G. Lee, B.-G. Kang, and J. Kim, "A Study of Shape and Structural for the Improvement of Dynamic Performance of the Underwater Vehicle," *The Korean Society of Mechanical Engineers(in Korean)*, pp. 3082-3087, 2011.
- [7] D. Won, J. Kim, and J. Kim, "Design optimization of duct-type AUVs using CFD Analysis," *Intelligent Service Robotics*, vol. 8, no. 4, pp. 233-245, 2015.
- [8] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Vehicles*, John Wiley & Sons, 2011.
- [9] L. V. Mott, *The Development of the Rudder: A Technolo-*

gical Tale (Studies in Nautical Archaeology), Texas A&M University Press, 1st Ed., 1997.

- [10] J. H. Jung, D. G. Baek, H. S. Yoon, K.-S. Kim, and B.-G. Paik, "Study on the Angle-of-Attack Characteristics of the Rudder in Rotating Propeller Flow," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea (in Korean)*, vol. 50, no. 6, pp. 421-428, 2013.
- [11] W. F. Robert, J. P. Philip, and T. M. Alan, *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, 2009.
- [12] J. Kim, W. K. Chung, "Thruster Modeling for Underwater Vehicle with Ambient Flow Velocity and its Incoming Angle," *Korea Robotics Society(in Korean)*, vol. 2 no. 9, pp. 109-118, 2007.



김영현

2015년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2017년 서울과학기술대학교 기계공학과 석사. 2017년~현재 현대로템 연구원. 관심분야는 Underwater robots, Mechanism design.



황동욱

2017년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2017년~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 Underwater robots, Mechanism design.



김진현

1998년 포항공과대학교 기계공학과 학사. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사. 2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사. 2005년~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 부교수. 관심분야는 Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.