

논문 2017-12-38

가오리형 수중글라이더의 형상설계 및 운동성능 해석

(Hull Design and Dynamic Performance Analysis for ray-type Underwater Glider)

이 성 욱, 정 재 훈, 정 상 기, 최 형 식, 김 준 영*

(Sung-Wook Lee, Jae-Hun Jeong, Sang-Ki Jeong, Hyeung-Sik Choi, Joon-Young Kim)

Abstract : Underwater glider with a single buoyancy engine could generally obtain propulsive forces by moving the center of buoyancy and gravity. Furthermore, The hull and internal structure of underwater glider are designed according to the purpose of long-time operation, high speed and a wide variety of payloads (sensors, communications and etc.). In this paper, Ray-type underwater glider featuring flatfish is considered in view of hydrodynamics. The hull design is especially performed by the analysis of fluid resistance and dynamic performance. The resistance performance is analyzed using the Computational Fluid Dynamics (CFD). In addition, a simulation program is implemented in order to verify the validity of dynamics modeling and dynamic performances.

Keywords : Ray-type underwater glider, Dual buoyancy engine, Motion controller, Dynamics modeling, Dynamic simulation

1. 서 론

최근 선진국에서는 수중환경을 장기적으로 관측할 수 있는 무인동체인 수중글라이더 (Underwater Glider)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 수중글라이더의 전통적인 모델인 어뢰형 (Torpedo-type) 수중글라이더는 구조상 부력엔진의 용량한계가 있어 속도가 극히 제한적이며, 음향 센서 및 통신기기 등 부가적 센서 및 장비의 탑재가 어려운 구조로 설계되어 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 국외에서는 X-Ray, Z-Ray와 같은 가오리형 (Ray-type)의 수중글라이더에 대한 연구

를 이미 추진되고 있는 상황이다.

현재 국외의 연구현황을 살펴보면, Slocum glider, Spray glider, Sea glider, X-Ray와 같은 다양한 형태의 수중글라이더가 개발되었다. 또한 이러한 플랫폼에 여러 가지 음향장비 및 센서를 장착하여 광범위한 해저 지형을 탐사하거나 해양환경 자료수집 및 대서양 횡단 실험을 수행하는 등 실제적으로 운용 가능하도록 하는 실험역 실험들을 수행하고 있다 [1, 2]. 반면 국내의 경우는 초기 단계로서 일반적인 Torpedo 형태에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나 [3, 4], 가오리형의 수중글라이더에 대한 연구개발 사례는 아직 전무한 상황이고 국외의 경우라도 구체적인 정보를 얻기가 매우 어려운 실정이다. 일반적으로 가오리형은 어뢰형에 비해 체적이 크므로 이에 비례하여 유체저항이 커지는 단점이 있으나, 적재공간이 커지므로 수중탐사용 장비를 추가적으로 탑재할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 운용시간, Payload, 속도 등을 개선할 수 있는 대안으로 이중부력엔진을 탑재한 가오리형의 수중글라이더를 제안하고자 하며, 이에 대한 초기단계로서 개념설계 및 최적형상설계를 실시하였다. 또한 범용 CFD 코드인 OpenFOAM을 사용하여 저항성능해석을 수행하였고 그 결과를

*Corresponding Author (jykim@kmou.ac.kr)

Received: Aug. 3 2017, Revised: Aug. 30 2017, Accepted: Sep. 4 2017.

J.Y. Kim : Korea Maritime and Ocean University

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE 2017 in Busan.

※ 이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 무인이동체 미래선도 핵심기술개발 사업단 (No.2016M1B3A1A02937626)과 한국연구재단의 기초연구사업 (NRF-2016R1A2B4011875)의 지원을 받아 수행되었음.

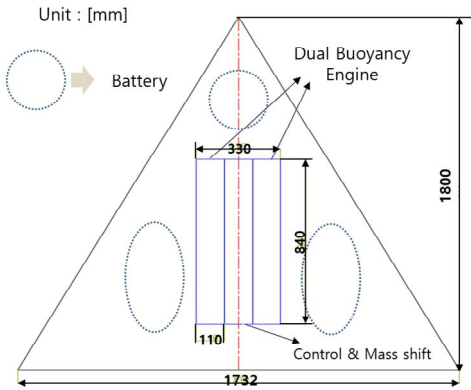


그림 1. 가오리형 수중글라이더의 구성도
Fig. 1 Configuration of ray-type underwater glider

반영한 가오리형 수중글라이더의 형상 및 내부 구성품을 설계하였다. 더욱이 이중부력엔진을 사용한 기구학적 특성과 운동특성을 반영한 동역학 모델링을 구성하였으며, 시뮬레이션 프로그램을 이용한 운동성능 해석을 수행함으로써 동역학 모델링과 운동성능에 대한 유효성을 검증하고자 하였다.

II. 수중글라이더 형상설계

1. 추진 매커니즘 및 시스템 구성

본 연구의 대상모델인 가오리형 수중글라이더의 추진 매커니즘은 수심 상환과 하한 사이를 상승과 하강을 반복하여 추진력을 얻는 방식이다. 하강 시, 이중부력엔진의 실린더 내에 해수를 유입시켜 부력을 감소시킴으로써 추진력을 얻는다. 동시에 자세제어기의 질량체 이동에 의하여 무게중심이 전방으로 이동하면서 하방향 중동요각 (Pitch)을 발생시켜 주행하게 된다. 상승 시에는 역으로 작용하는 추진방식이다.

수중글라이더의 시스템 구성은 기존 어뢰형 수중글라이더와 달리 이중부력엔진과 자세제어기로 구성하였으며, 동체 외형은 가오리형으로서 고속이동 및 장기운동 가능하며 다양한 센서들의 적재가 가능하도록 설계하였다. 수중글라이더의 외형 및 내부구성품 배치도는 그림 1에 나타난 바와 같다.

2. 수중 유체저항성능 해석

수중글라이더의 초기설계를 위해 CFD를 이용하

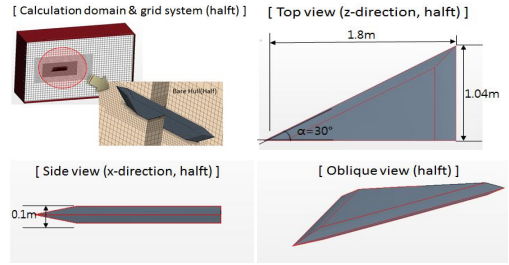


그림 2. 가오리형 수중글라이더의 격자 및 제원
Fig. 2 Geometry of ray-type underwater glider

표 1. CFD 해석 조건 (1 단계)

Table 1. CFD analysis condition (Step 1)

Case	Type	Angle (α)	Thickness [m]
1	Torpedo	0°	0.1
2	Ray	30°	0.1
3	Ray (New type)	30°	0.1~0.25 (Smoothing)

표 2. 해석 케이스 조건 (2 단계)

Table 2. Case study (Step 2)

Case	Angle (α)	Width [m]	Length [m]
1	tan35°	1.23	1.8
2	tan27°	0.945	1.8
3	tan25°	0.866	1.8
4	tan27°	1.04	1.98
5	tan25°	1.04	2.16
6	tan25°	0.866	1.8

였고 Case별 형상과 속도에 따른 저항력을 계산하여 저항성능을 해석함으로써 형상을 도출하였다. 저항성능해석을 위한 지배방정식으로는 연속방정식과 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS) 방정식이며, 3차원 비정상상태 비압축성 점성유동을 고려하는 유한체적법 (Finite Volume Method, FVM)에 근거한 오픈소스 툴킷 코드인 OpenFOAM (Open-source Field Operation And Manipulation)을 사용하였다. 난류모델로는 레이놀즈 응력항으로 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였고, 압력과 속도 연성은 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-consistent) 계열인 PIMPLE (PISO + SIMPLE)법을 이용하였다. 형상설계를 위해 모델의 기본 Geometry는 그림 2에 나타난 바와 같으며, 2단계에 걸쳐 설계변수를 변화시켜

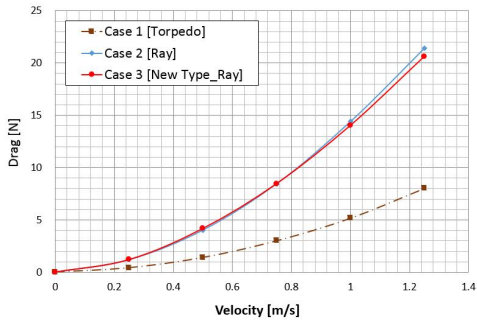


그림 3. 저항성능 결과
Fig. 3 Results of drag force

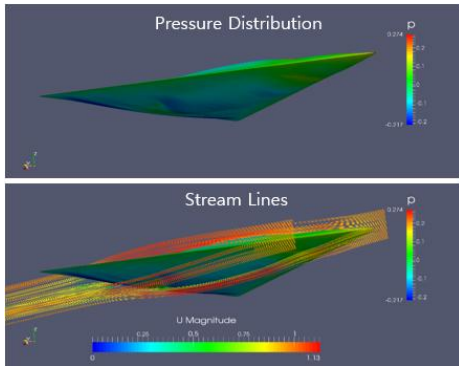


그림 4. 전산유체해석 결과
Fig. 4 Computational flow analysis results

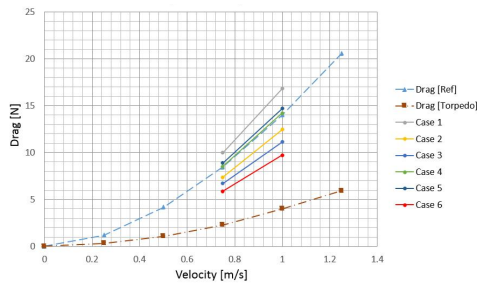


그림 5. 저항성능 결과
Fig. 5 Results of drag force

가면서 CFD 계산 및 해석을 수행하였다. 첫번째 단계는 형태와 두께 변화에 따른 세 개의 형상에 대하여 계산한 후 최적 두께를 선정하였다. 두번째 단계는 도출된 최적 두께를 고정하고 α 각에 대한 동체길이와 날개폭에 따른 형상을 여섯 개의 Case로 나누어 저항성능해석을 하였다. 각 단계별 Case 조

건은 표 1~2와 같고 해석결과는 그림 3~5에 나타내었다.

그림 3에서는 단계 1의 각 Case의 형상을 이용하여, 속도에 따른 저항성능을 나타내었다. 단계 1을 통해 Case 3의 형상을 선정하였고, 이 Case에 대한 전산유체해석 수행 모습은 그림 4에 나타낸다. 그림 5는 단계 2의 각 Case의 형상을 이용하여, 속도에 따른 저항성능을 나타낸다. 0.75~1m/s의 속도 구간에서 최소의 저항을 가지는 Case 6의 형상 제원을 도출하였다.

III. 운동성능해석

1. 좌표계 설정 및 동역학 모델링

설계된 무인 수중글라이더에 대하여 동체 내부의 자세제어장치와 부력조절장치의 운동에 따른 동적 거동을 파악하고, 부력엔진 제어기의 성능을 확인하기 위하여 수중글라이더에 대한 수학적 동역학 모델을 구성하였다. 수중글라이더에 대한 비선형 6자유도 운동방정식을 유도하기 위해 좌표계를 그림 6과 같이 설정하였다. 일반적으로 수중에서 거동하는 운동체의 운동을 묘사하기 위해서는 지구고정좌표계 $EXYZ$ 와 선체고정좌표계 $Oxyz$ 를 설정하여 사용한다.

설정된 좌표계에서 수중글라이더의 운동을 나타내기 위한 운동방정식은 식 (1)과 같다 [3]. 식 (1)은 뉴턴-오일러에 의해 유도된 병진운동과 회전운동을 나타내는 좌향과 외력 및 외력모멘트를 나타내는 우향으로 구성되어 있다. 우변의 유체력에 포함되는 유체력 계수들은 CFD 해석, 구속모형시험 또는 경험식을 통하여 구한 값들을 사용한다.

$$\begin{aligned}
 m_i[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= F_x \\
 m_i[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] &= F_y \\
 m_i[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= F_z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= M_x \quad (1) \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (pq - \dot{r})I_{yz} \\
 + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M_y \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + pr)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (qr - \dot{p})I_{xz} \\
 + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= M_z
 \end{aligned}$$

여기서 u, v, w 와 p, q, r 은 각각 x, y, z 축에 대한 수중글라이더의 병진운동 속도와 회전운동 각속도

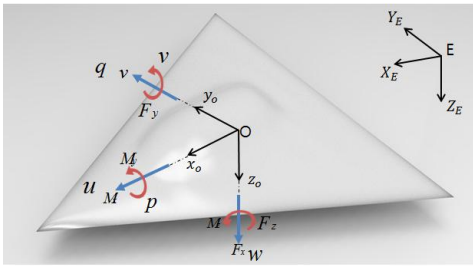


그림 6. 수중글라이더 좌표계
Fig. 6 Coordinate system of ray-type underwater glider

를 나타낸다. I_{ij} 는 각 첨자의 축에 대한 수중글라이더의 질량관성모멘트를 나타내고, x_G, y_G, z_G 는 수중글라이더의 질량중심 위치를 나타낸다. 식 (1)의 우변에 있는 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 는 각각의 운동방향에 대해 추력, 부력, 중력 그리고 유체력 등과 같이 수중글라이더에 작용하는 외력과 모멘트이다. 수중글라이더의 전체 질량 m_t 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

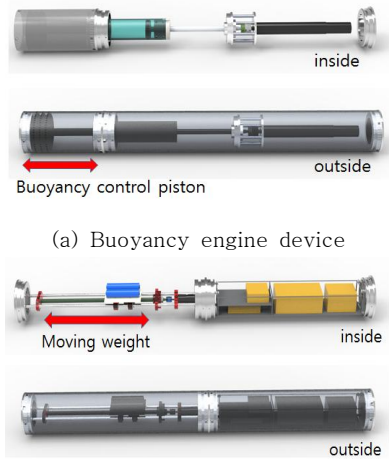
$$m_t = m_s + m_n + m_m \quad (2)$$

여기서 m_n 는 수중글라이더의 외형 선체 질량, m_s 는 수중글라이더의 외형 선체 질량과 내부의 변화 가능한 질량을 제외한 내부 제어보드 및 센서모듈과 같은 고정된 구성품의 질량, 그리고 m_m 는 내부의 가변질량을 각각 나타낸다.

추진기와 방향타, 승강타를 이용하여 거동하는 일반적인 형태가 아닌, 이동질량체와 부력엔진을 이용하여 거동하는 형태이다. 이에 따라 위의 식 (1)의 좌변에서 질량중심 x_G, y_G, z_G , 질량관성모멘트 I_{ij} 는 일정하지 않고, 수중글라이더의 거동에 영향을 미치는 외력으로 작용하게 된다.

2. 이중부력엔진 및 자세제어기 모델링

본 연구에서 사용된 수중글라이더는 선체의 내부에 그림 7 (a)와 같은 형태의 부력조절장치를 설계하여 수중글라이더에 작용하는 부력을 조절할 수 있도록 하였다. 이는 유압을 이용하여 부력조절장치의 피스톤을 전진시키도록 하였고, 피스톤을 후진시킬 경우에는 소비전력을 줄이기 위하여 해수의 압력을 이용하도록 설계하였다. 피스톤의 운동에 따라 수중에서 수중글라이더의 부피를 변화시킴으로써,



(a) Buoyancy engine device

(b) Attitude control system

그림 7. 부력엔진 및 자세제어기의 구성도
Fig. 7 Configuration of buoyancy engine and motion controller

시스템에 작용하는 부력을 조절할 수 있게 되며 결과적으로 수직방향의 운동이 가능하도록 하였다.

한편, 추진기를 가지고 있지 않은 수중글라이더는 내부에 있는 이동질량체의 직선운동을 이용하여 수중에서 피치방향의 운동을 갖도록 한다. 이동질량체의 제어기는 PID 제어기를 사용하였다 [5]. 특히 선체의 피치방향 운동이 발생함에 따라 수중글라이더 선체뿐만 아니라 선체에 부착된 날개에는 상대 유속에 의한 양력이 발생하게 되며, 이 힘을 통하여 수중글라이더가 추진력을 가지고 운동하게 된다. 본 연구에서는 그림 7 (b)에 보여준 바와 같이 내부에 있는 이동질량체를 구동하기 위해 사용한 DC (Direct current) 모터의 전기시스템에 대한 모델링과 기어 및 볼스크류를 통한 이동질량체의 기계시스템을 모델링하였다.

IV. 운동시뮬레이션 및 고찰

앞서 설계된 수중글라이더 모델의 운동성능을 해석하기 위하여 그림 8과 같이 Matlab Simulink를 이용한 동역학 시뮬레이션 프로그램을 가오리형 모델 형상에 적합하게 구성하였고, 내부 이동질량과 부력조절장치 피스톤의 운동에 따른 운동특성을 파악하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서는 초기설계단계로서 가오리형태와 유사한 형상을

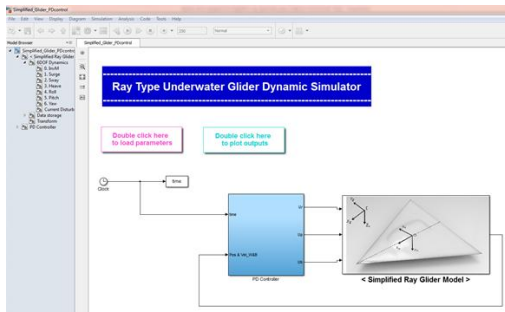


그림 8. 운동시물레이션 프로그램
Fig. 8 Simulation program of the underwater glider

갖는 모형에 대한 구속모형시험 및 경험식에서 얻어진 유체력 계수를 시물레이션에 사용하였다 [6].

천해에서의 수중글라이더 운동성능을 확인하기 위하여 부력제어량을 전진과 후진 시 각각 20mm씩 이동하게 하였다. 목표 수심 하한인 10m에 도달 하였을 시 피스톤이 전진하여 부상시키고, 목표 수심 상한인 2m에 도달하였을 시 피스톤을 후진시켜 잠항되도록 부력엔진을 조절하였다. 자세제어기의 이동질량체를 전후로 이동시켜 pitch각도를 조절하도록 하였으며 목표 pitch각도를 하강시 -20° , 상승시 20° 가 되도록 제어를 수행하였다. 운동시물레이션 결과는 그림 9에 나타낸 바와 같으며, 승하강 운동 양상은 기 연구결과인 어뢰형 수중글라이더의 운동과 전반적으로 유사한 경향을 보이고 있으며, 속도 측면에서는 가오리형 수중글라이더가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 어뢰형에 비해 가오리형이 유체로부터 받는 저항면적이 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. 가오리형 수중글라이더의 경우 저항 성능은 나빠지나, 장비탑재를 위한 공간이 증가하므로 필수불가결한 상황이 된다. 가오리형 수중글라이더의 성능개선을 위한 형상설계를 계속해서 진행하고자 한다.

V. 결론

본 연구에서는 가오리형 수중글라이더에 대하여 저항성능 해석을 통한 최적 형상설계를 수행하였으며, 동역학 모델링과 운동시물레이션을 통해 운동성능을 해석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 저항성능 해석을 통하여 최소 저항을 가지는

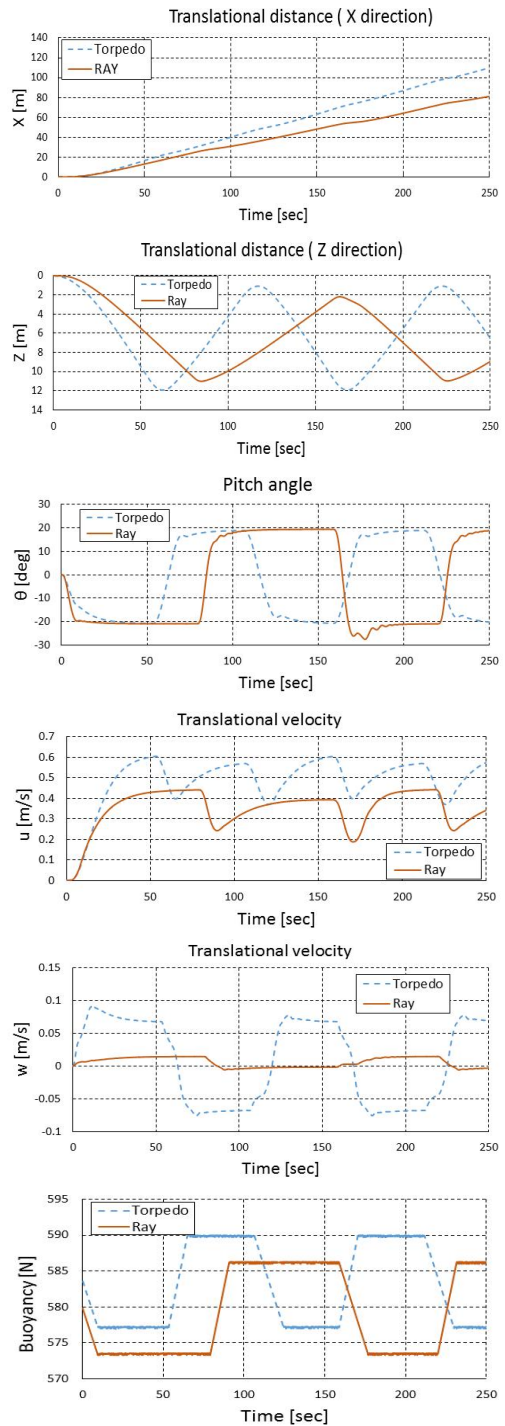


그림 9. 가오리형과 어뢰형의 운동성능 비교결과
Fig. 9 Comparison results for Ray-type and Torpedo-type

외형 및 내부구성품의 최적 배치를 반영한 최적 형상안을 도출하였다.

- (2) 이중부력엔진과 자세제어기를 적용한 동역학 모델링을 구성하였고, 운동성능해석을 위한 프로그램을 작성하였다.
- (3) 기존 모델인 어뢰형과의 운동성능을 비교한 결과, 승하강 운동시물레이션이 유사한 형태로 잘 구현됨으로써 모델링의 유효성이 검증되었다.
- (4) 추후, 성능개선을 위해 추가적인 형상설계를 진행하고 이에 따른 운동성능 해석을 수행할 계획이다. 또한, 하드웨어를 구성하여 실험역 실험을 수행함으로써 성능검증을 진행할 것이다.

References

- [1] N. E. Leonard, D. A. Paley, R. E. Davis, D. M. Fratantoni, F. Lekien, F. Zhang, "Coordinated Control of an Underwater Glider Fleet in an Adaptive Ocean Sampling Field Experiment in Monterey Bay," *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 6, pp. 718-740, 2010.
- [2] R. N. Smith, M. Schwager, S. L. Smith, B. H. Jones, D. Rus, G. S. Sukhatme, "Persistent Ocean Monitoring with Underwater Gliders: Adapting Sampling Resolution", *Journal of Field Robotics*, Vol. 28, No. 5, pp. 714-741, 2011.
- [3] K.S. Nam, J.H. Bae, S.K. Jeong, S.J. Lee, J.Y. Kim, "Dynamics Modeling and Performance Analysis for the Underwater Glider," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 7, pp. 709-715, 2015 (in Korean).
- [4] J.W. Park, J.W. Lee, Y.H. Choi, K.H. Seo, J.H. Suh, J.J. Park, "Computational Flow Analysis and Drag Coefficient Research for Angle of Attack in Slocum Underwater Glider," *Journal of Ocean Engineering and Technology* Vol. 30, No 5, pp. 381-388, 2016 (in Korean).
- [5] M.J. Kim, S.B. Bae, W.K. Baek, M.G. Joo, K.N. Ha, "A Way-Point Tracking of Hovering AUV by PID Control," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 10, No. 4, pp. 257-264, 2015.
- [6] T.J. Presterio, "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle," M.S Thesis, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution, USA, 2001.

Sung-Wook Lee (이 성 욱)

He received B.S. and M.S. degree in Naval Architecture from Korea Maritime and Ocean University in 1996 and 1998 respectively, PhD degree in marine system engineering from Kyushu University in 2007.

He is an Assistant Professor at the department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan. From 2016-2017, he was a Research Engineer at Samsung heavy industries. His main research interest is in the ship's manoeuvring, CFD simulation, ship handling simulator and reinforcement learning. His current research includes a development of collision avoidance system using deep learning.

Email: swlee@kmou.ac.kr

Jae-Hun Jeong (정 재 훈)

He received B.S., M.S degree in ocean engineering from Pukyong National University in 2002 and 2006 respectively, and PhD degree in naval architecture and ocean engineering from Pusan National University in 2015.

He is a Post Doctor at the department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan. In 2016, he worked as a visiting researcher at the Ship Equipment Design and Control Laboratory, Korea Maritime and Ocean University. His main research interest is in the ship motion & maneuverability and design & control of UUV.

Email: jhjeong0120@kmou.ac.kr

Sang-Ki Jeong (정 상 기)

He received B.S., M.S. and PhD degree in mechanical engineering from Korea Maritime and Ocean University in 2011, 2013 and 2017 respectively.

His main research interest is in the AUV, underwater navigation, noise filtering. His current research includes Underwater Construction Robotics; and Ray-type Underwater Glider.

Email: koyoumy@hanmail.net

Hyeung-Sik Choi (최 형 식)

He received B.S. and M.S degree in mechanical engineering from Korea University and University of South Carolina in 1983 and 1989 respectively, and

PhD degree in mechanical engineering from University of North Carolina in 1993.

He is a Professor at the department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan. In 1993, he worked as a mechanical engineer at Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon. His main research interest is in design & control of underwater robots; Underwater Navigation & Control; underwater light communication system; and design & control of industrial robots. His current research includes Underwater Construction Robotics; Ray-type Underwater Glider; cooperative control of USV and UUV.

Email: hchoi@kmou.ac.kr

Joon-Young Kim (김 준 영)

He received B.S. and M.S. degree in Naval Architecture from Inha University, Incheon, Korea in 1989 and 1993, respectively, and PhD degree in Precision Mechanical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 1999. From 2003 to 2005, he was a Post-doctoral Research Fellow at Univ. of Hawaii and Univ. of Miami, and from 2005 to 2011, he was an Assistant Professor in Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea. In 2011, he joined the Division of Mechanical Engineering at Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea, where he is currently an Associate Professor. His research interests include Underwater Vehicles and Robots, such as AUV, ROV, UUV, Underwater Gliders, and Underwater Construction Robots.

Email: jkim@kmou.ac.kr