

무인 수중글라이더의 에너지 효율 개선을 위한 제어방법 개발

Development of Control Method for Improving Energy Efficiency of Unmanned Underwater Gliders

나승규¹ · 고성협² · 지대형² · 천승재³ · 정성훈⁴ · 최형식⁵ · 김준영^{6*}

¹(주)대우조선해양 중앙연구소

²한국해양과학기술원 해양·방위안전연구센터

³한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

⁴한국해양대학교 산업기술연구소

⁵한국해양대학교 기계공학부

⁶한국해양대학교 해양신소재융합공학과

Seung-kyu La¹ · Sung-hyup Ko² · Dae-hyeong Ji² · Seung-jae Chon³ · Seong-hoon Jeong⁴ · Hyeung-sik Choi⁵ · Joon-young Kim^{6*}

¹Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Siheung 15011, Korea

²Marine Security and Safety Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

³Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Graduate School, KMOU, Busan 49112, Korea

⁴Research Institute of Industrial Technology, KMOU, Busan 49112, Korea

⁵Dept. of Mechanical Engineering, KMOU, Busan 49112, Korea

⁶Dept. of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, KMOU, Busan 49112, Korea

[요 약]

본 논문의 무인 수중글라이더는 깊은 수심에서 작동하기 위해 설계되었고, 배터리 효율을 개선하기 위해 블래더 타입의 부력제 어기를 채택하였고 내부 이동배터리의 움직임을 이용하여 피치각도를 제어하는 방식을 사용하고 있다. 무인 수중글라이더의 에너지 효율을 증대하기 위해 구간별로 제어를 수행하는 Layered PID 제어를 설계하였으며, 유체동역학 계수를 포함한 6자유도 운동방정식을 전개하여 Matlab/Simulink 해석 프로그램을 설계하였다. 제어성과 에너지 효율을 비교하기 위해 PID 제어기, 슬라이딩 모드 제어기 그리고 Layered PID 제어를 해석 프로그램을 이용하여 비교 분석하였고 Layered PID 제어기가 PID 제어기에 비해 7.2%의 에너지 절감의 성능을 나타내었다.

[Abstract]

In this paper, unmanned underwater glider was designed for high-depth operation and adopted a bladder-type buoyancy controller for improving battery efficiency, and the motion controller controls the pitch angle by moving the internal mass battery. To improve the energy efficiency of the unmanned underwater glider, a layered PID controller that performs control by section was designed. Simulation program including 6-DOF motion equations and hydrodynamics coefficients of an unmanned underwater glider is constructed using Matlab/Simulink program. Control methods such as PID controller, sliding mode controller and layered PID controller were applied to the simulator to compare the dynamics performance and energy efficiency. As a result, the layered PID controller showed improved control performance compared to other controllers and improved energy efficiency of approximately 7.2% compared to PID controller.

Key word : Unmanned underwater glider, Motion controller, Layered PID controller, Energy efficiency.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.2.105>



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.

Received 22 February 2022; Revised 6 April 2022

Accepted (Publication) 25 April 2022 (30 April 2022)

*Corresponding Author; Joon-young Kim

Tel: +82-051-410-4351

E-mail: jykim@kmou.ac.kr

I. 서론

최근 육지 자원의 부족 및 다양한 연구 활동을 위해 해양탐사의 수요 증가가 이루어지며, 효율적이고 장기적으로 활용 가능한 탐사 장비 수요가 증가하고 있다. 제한적인 활동 범위와 운용 시간을 극복하며 넓은 범위 및 장기간 운용 가능한 해양탐사를 자율적으로 수행하기 위해 수중에서의 무인잠수정의 전력 소비 최소화하는 시스템 개발이 요구되어진다.

수중글라이더는 선체 내부 이동배터리와 부력 엔진을 통해 선체의 자세와 부력을 조절하여 추진력을 얻는다. 잠항과 부상을 위한 부력 변경과 배터리 이동에 대한 에너지 소모를 통해 추진력을 얻어 에너지 효율을 극대화 시킬 수 있다. 이와 같은 장점을 바탕으로 탐사 장비 탑재를 통해 해양 환경 조사 및 정보 수집이 장기간 가능하다는 특징을 가진다.

본 논문에서 수중글라이더는 하강 시에는 목표 수심을 기준으로 글라이더의 수직방향의 자세각도인 목표 종동요각(Pitch angle)을 유지하면서 운동하도록 설계하였다. 수학 모델링을 위한 6자유도 운동방정식을 전개하였고, 하드웨어 시스템의 구성에 대해 설명하였다. 또한 Matlab/Simulink로 구성된 시뮬레이터와 시뮬레이션에 적용된 파라미터를 통해 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어기, 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC)와 새롭게 설계된 Layered PID (Layered Proportional-Integral-Derivative) 제어기를 설명하고, 각각의 운동성능 해석을 시행하였다. 또한 기존의 PID 제어기를 기준으로 슬라이딩 모드 제어기와 Layered PID 제어기의 에너지 효율을 비교하였으며, 그 제어 성과와 에너지 효율의 결과를 결론에서 언급하고자 한다.

II. 시스템 구성 및 운동방정식

2-1 시스템 구성

일반적으로 무인 수중글라이더의 형상은 수중에서 효율적인 거동을 위해 그림 1과 같이 어뢰형으로 되어있다. 선체 중앙에 두 개의 수평 날개가 설치되어있고, 선미에는 안테나를 포함하는 수직 조향타가 부착되어 있다. 선수와 선미는 마이어링 선형(Myring profile)을 적용하여 설계되었으며, 선수 노즈콘 속에 부력제어를 담당하는 오일 블레더(Oil bladder)가 위치하도록 설계하였다(그림 2(a))[1], [2]. 선미의 카울링에는 수직 조향타와 진회수 장치가 위치하도록 설계되었다. 선체의 내부는 선수 부분, 선체중앙, 선미 부분으로 나뉜다. 선수 부분에는 부력을 제어하기 위해 사용되는 오일을 담기 위한 오일탱크와 수중글라이더 장기 운용을 위한 고정배터리가 위치하도록 설계되었으며, 선체 중앙은 페이로드를 적용하도록 설계되었다. 페이로드에는 해양 탐사 및 운용 목적에 맞게 센서 및 장비를 탑재하거나 장기 운용을 위한 배터리 설치 공간으로 이용된다.

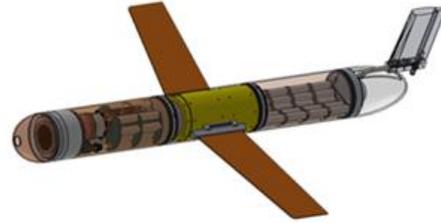


그림 1. 수중글라이더의 3차원 도해와 내부 구조
Fig. 1. 3D illustration and internal structure of the underwater glider

선미 부분의 내부 이동배터리는 모터를 이용해 전, 후진만을 하며 이를 통해 종동요각에 대한 자세 제어가 가능하도록 설계되었다(그림 2(b)).

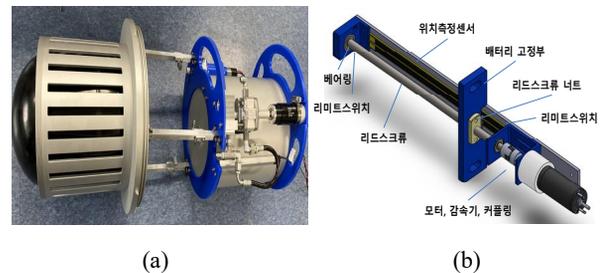


그림 2. 부력 및 자세 제어기 (a) 블레더 (b) 이동질량 배터리
Fig. 2. Controller of buoyancy and posture (a) Oil bladder (b) Mass shifter unit

2-2 좌표계 및 운동 모델링

설계된 무인 수중글라이더의 부력 엔진과 내부 이동배터리 에 따른 동적 거동 파악과 제어 성능 확인을 위해 수중글라이더의 수학적 동역학 모델이 필요하다. 수중글라이더에 대한 6자유도 운동방정식을 유도하기 위해 좌표계를 그림 3과 같이 지구고정좌표계($X_E Y_E Z_E$)와 선체고정좌표계($X_O Y_O Z_O$)를 설정하였다. 그림 3에서 정의된 좌표계에 따라 병진운동과 회전운동에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다[3], [4], [5].

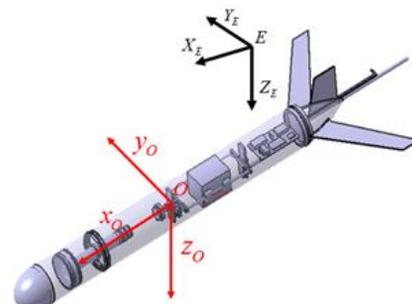


그림 3. 지구고정좌표계 및 선체고정좌표계
Fig. 3. The internal earth-fixed frame and body-fixed frame

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u}-vr+wq-x_G(q^2+r^2)+y_G(pq-\dot{r})+z_G(pr+\dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v}-wp+vr-y_G(r^2+p^2)+z_G(qr-\dot{p})+x_G(pq+\dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w}-up+vp-z_G(p^2+q^2)+x_G(pr-\dot{q})+y_G(qr+\dot{p})] &= Z \\
 I_{xx}\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr-(\dot{r}+pq)I_{xz}+(r^2-q^2)I_{yz}+(pr-\dot{q})I_{xy} \\
 +m[y_G(\dot{w}-uq+vp)-z_G(\dot{v}-wp+ur)] &= K \\
 I_{yy}\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})rp-(\dot{p}+qr)I_{xy}+(p^2-r^2)I_{zx}+(qp-\dot{r})I_{yz} \\
 +m[z_G(\dot{u}-vr+wq)-x_G(\dot{w}-uq+vp)] &= M \\
 I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq-(\dot{q}-rp)I_{yz}+(q^2-p^2)I_{xy}+(rq-\dot{p})I_{zx} \\
 +m[x_G(\dot{v}-wp+ur)-y_G(\dot{u}-vr+wq)] &= N
 \end{aligned}$$

(1)

여기서 u, v, w 와 p, q, r 은 각각 x, y, z 축에 대한 수중글라이더의 병진운동 속도와 회전운동 각속도를 나타낸다. $x_G y_G z_G$ 는 무게중심의 위치이며, m 은 질량을 I 는 각 첨자 축의 질량관성모멘트를 나타낸다. 식 우변에 있는 X, Y, Z, K, M, N 은 수중글라이더에 작용하는 외력과 모멘트이다.

무인 수중글라이더의 질량은 식 (2)와 같이 선체의 질량, 선체의 고정 질량, 부력제어기 속 블레더와 탱크 오일의 질량, 자세제어기의 내부 이동 질량의 합으로 정의되며, 부력제어기의 유체의 이동과 내부 이동배터리의 이동으로 실시간으로 변화한다. 부력 제어기와 자세 제어기의 변동으로 인해 질량 중심(식 (3))과 부력 중심(식 (4)), 질량관성모멘트(식 (5))의 변화를 나타낼 수 있다. 유체의 특성상 고정된 형태가 아니므로 노즈콘에 위치한 블레더의 형태는 구의 형태로 가정하여 산출되며, 이 변화에 의해 발생한 선체의 질량 관성 모멘트를 고려하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_t = m_{hull} + m_{stat} + m_{tank} + m_{oil} + m_{mov} \quad (2)$$

$$\vec{r}_{cg} = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \frac{m_{hull}\vec{r}_h + m_{stat}\vec{r}_s + m_{tank}\vec{r}_t + m_{oil}\vec{r}_o + m_{mov}\vec{r}_m}{m_t} \quad (3)$$

$$\vec{r}_{cb} = \begin{bmatrix} x_{cb} \\ y_{cb} \\ z_{cb} \end{bmatrix} = \frac{V_{fix} \cdot \vec{r}_{fix} + \Delta V \cdot \vec{r}_{be}}{V_{fix} + \Delta V} \quad (4)$$

$$I = (I_{hull} - m_{hull}\hat{r}_h\hat{r}_h) + (I_{stat} - \hat{r}_s\hat{r}_s) + (I_{oil} - \hat{r}_o\hat{r}_o) + (I_{tank} - \hat{r}_{tk}\hat{r}_{tk}) + (I_{mov} - \hat{r}_m\hat{r}_m) \quad (5)$$

위의 식에서 전체 질량 m_t 는 m 의 각 첨자에 해당하는 부분의 질량의 합이 된다. \vec{r}_{cg} 와 \vec{r}_{cb} 는 각각 무게중심과 부력중심의 위치벡터를 나타내며, \vec{r} 의 각 첨자에 해당하는 위치벡터를 나타낸다. 또한 V_{fix} 는 고정부피 ΔV 는 부피의 변화량이며, \vec{r}_{fix} 는 고정부피의 위치벡터 \vec{r}_{be} 는 변화된 부피의 위치벡터를 나타낸다. I_{hull} 은 선체고정좌표계의 원점에서 선체의 질량관성모멘트

트, I_{stat} 은 내부고정질량의 질량관성모멘트, I_{mov} 은 위치에 따라 변화하는 내부 이동배터리의 질량관성모멘트, I_{oil} 은 구의 형태로 가정한 오일 블레더의 유체 유출입으로 인해 변화하는 질량관성모멘트, I_{tank} 은 선수 내부에 위치하는 오일 탱크의 유체에 따른 질량관성모멘트를 나타낸다. 왜대칭행렬(Skew symmetric matrix)을 의미하는 기호 \wedge 를 이용해 실시간으로 변화하는 수중글라이더의 관성모멘트 I 를 구할 수 있다.

III. 제어 알고리즘 및 운동성능 해석

수중글라이더는 수면과 목표 수심 사이를 정현파(Sine wave) 형태로 운동하며, 최대한 적은 양의 배터리 소모로 장기간, 장거리 운행이 가능하여야 한다. 또한, 수평거리의 손실을 최소화하며, 목표 수평속도를 위해 중동요각을 유지하면서 운행하여야 하므로, 에너지 소모를 최소화하는 자세제어기의 제어알고리즘 설계가 필요하다. 기존에 적용된 PID 제어알고리즘은 목표 중동요각을 유지하기 위해서 지속적인 자세제어기의 가동을 하고 있다. 이와 같은 방법은 중동요각의 유지에는 좋은 성능을 보이나, 배터리 방전에 영향을 주므로 제어기가 작동하지 않는 구간을 설정하는 제어 방식을 필요로 한다. 본 논문에서는 상승 하강 운동 시 중동요각(Pitch angle)이 $\pm 35^\circ$ 를 유지하도록 내부 이동배터리의 위치를 PID 제어기, 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC) 및 본 논문에서 새롭게 제안하는 Layered PID 제어기를 적용하여 운동성능과 제어 성능을 확인한다.

3-1 PID 제어기의 운동성능 해석

수중글라이더는 부력제어기를 통해 목표 수심(Z)을 추종하기 위해 자세제어기로 수중글라이더의 중동요각(θ)을 제어한다. 따라서 목표 중동요각 제어를 위한 자세제어기의 PID 제어기 적용 시 식 (6)에서 오차함수 $e(t) = \theta_d - \theta$ (Pitch angle error)을 통해 입력함수 $u(t)$ 는 내부 이동배터리의 위치를 제어한다[1].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

여기서 K_p, K_i, K_d 는 비례이득, 적분이득 및 미분이득을 나타낸다. PID 제어기를 적용하여 정상상태의 운동성능을 해석 시 목표 수심인 400m를 기준으로 글라이딩 운동하며 목표 속도를 만족하는 결과를 보인다(그림 4-5).

3-2 슬라이딩 모드 제어기의 운동성능 해석

슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC)를 적

용하기 위하여 종동요각의 각속도, 종동요각, 수심을 제어한다. 목표 수심에 따라 목표 종동요각을 설정하며, 종동요각 각속도는 0으로 설정한다. 따라서, 목표 제어값을 적용하여 제어입력을 식 (7)과 같이 전개할 수 있다[4]. 외란 및 모델링 오차는 제어알고리즘 적용 시 포함하지 않고 시뮬레이션을 시행하여 그림 6과 같은 운동 특성을 확인하였다. 슬라이딩 평면 유지를 위하여 하강 및 상승 시에 목표 종동요각을 유지하기 위하여 그림 7과 같이 종동요각이 변동하는 것을 확인할 수 있다.

$$u = -kx - (s^T b)^{-1} \eta \tanh(\sigma/\Phi) \tag{7}$$

여기서 k 는 이득값, x 는 상태변수, s 는 슬라이딩 평면계수, b 는 입력벡터, η 는 스위칭 이득, σ 는 슬라이딩 평면, Φ 는 경계층 영역을 나타낸다.

3-3 Layered PID 제어기의 운동성능 해석

본 논문에서는 에너지 효율을 높이며 목표 종동요각을 유지하기 위하여 PID 제어기를 개선하여 제어 경계를 설정한 제어 방법을 설계하였고 Layered PID 제어기로 명명하였다.

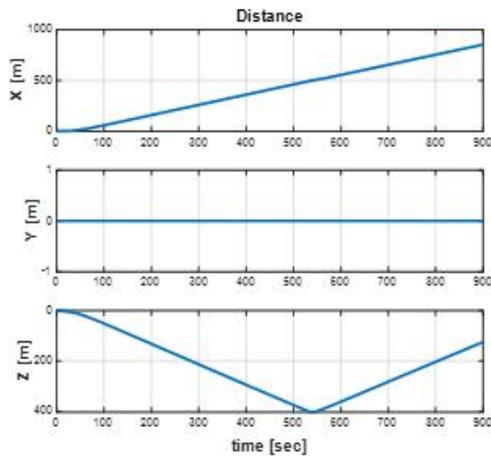


그림 4. PID 제어의 결과(위치)
Fig. 4. Simulation results of PID(Position)

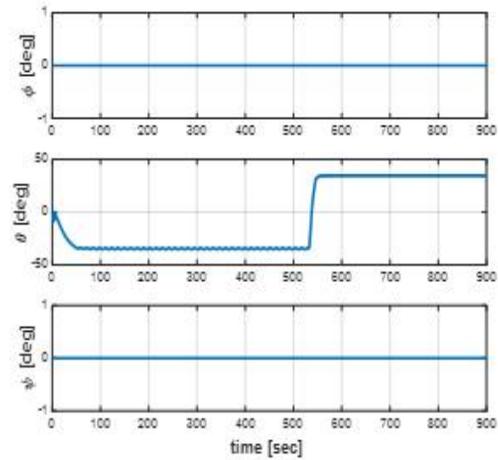


그림 5. PID 제어의 결과(자세)
Fig. 5. Simulation results of PID(Attitude)

PID 제어기 및 슬라이딩 모드 제어기에서 목표 종동요각 유지를 위해 지속적으로 기동하는 자세제어기의 제어 동작을 최소화하고자 그림 8과 같이 목표 종동요각의 임의의 각도 내에서 자세제어기의 제어입력을 작동하고 비작동하는 레이어(Layer)의 최대값(Φ_{max})과 최소값(Φ_{min})을 추가한 방식을 적용하였으며, 이러한 최대 및 최소값은 글라이더 모델로부터 복원 안정성을 계산하여 유도한다[6].

$$\text{제어입력 비작동 구간: } \Phi_{min} < u < \Phi_{max} \tag{8}$$

$$\text{제어입력 작동 구간: } u > \Phi_{max}, u < \Phi_{min} \tag{9}$$

Layered PID 제어기의 제어방식은 우선 글라이더의 모델식에서 상승 및 하강에 따라 내부 이동배터리의 위치가 산출되며 이에 따라서 종동요각(Φ)이 결정된다.

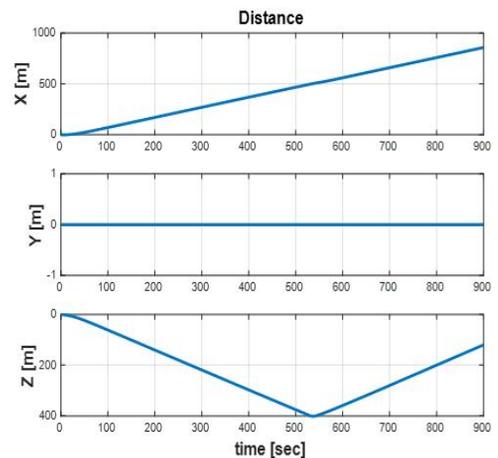


그림 6. 슬라이딩 모드 제어의 결과(위치)
Fig. 6. Simulation results of SMC(Position)

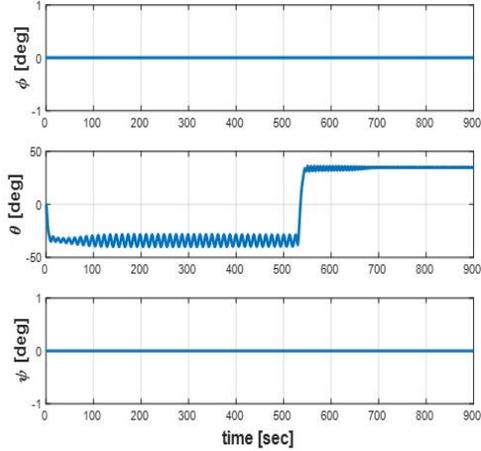


그림 7. 슬라이딩 모드 제어의 결과(자세)
Fig. 7. Simulation results of SMC(Attitude)

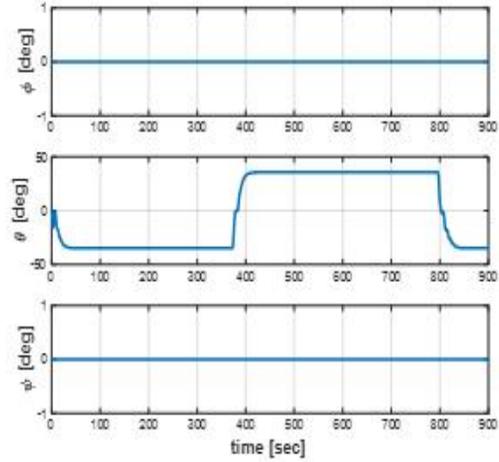


그림 10. Layered PID 제어의 시뮬레이션 결과(자세)
Fig. 10. Simulation results of Layered PID(Attitude)

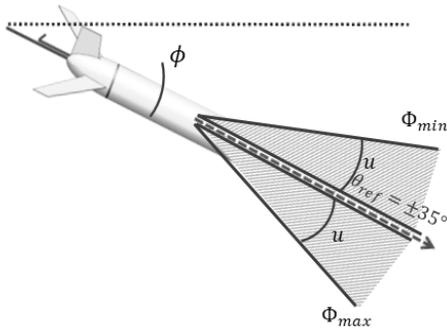


그림 8. 목표 종동요각의 제어 경계
Fig. 8. Control layer of target pitch angle

산출된 내부 이동배터리의 위치는 정상상태 시 목표 종동요각을 유지하므로, 제어가 작동하지 않는 식 (8) 구간에서는 내부 이동배터리를 이동시킨 후에 제어기 비작동 상태를 유지한다. 또한, 종동요각이 임의의 구간에서 벗어난 상태인 식 (9)에서는 제어입력이 작동하여 목표 종동요각이 되도록 하는 제어방식을 따르고 있다. 이에 대한 제어 성능은 그림 9와 그림 10에 나타내었고, 채터링(Chattering) 현상을 줄이고 만족할 만한 성능을 나타내었다.

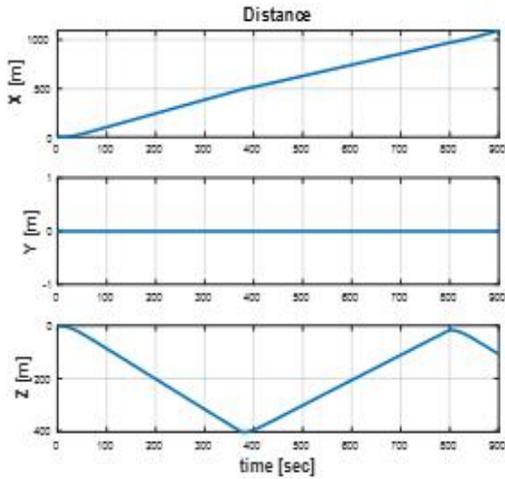


그림 9. Layered PID 제어의 시뮬레이션 결과(위치)
Fig. 9. Simulation results of Layered PID(Position)

IV. 에너지 효율 비교

에너지 효율 비교를 위해 PID 제어기와 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC)의 내부 이동 배터리 이동거리 및 전력량 산출식을 이용한 에너지 소모량 비교 시뮬레이션을 시행하였다. 내부 이동배터리의 이동 거리는 그림 11과 같이 슬라이딩 모드 제어기가 PID 제어기에 비해 움직임이 많음을 확인할 수 있으며, 에너지 효율 측면에서는 그림 12와 같이 PID 제어기가 슬라이딩 모드 제어기에 비해 에너지 소모량이 1.8% 감소하므로 약간 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

다음은 PID 제어기와 Layered PID 제어기의 에너지 효율을 비교하였다. 그림 13과 같이 한 사이클의 주기가 Layered PID 제어가 PID 제어보다 빠르므로 동일 시간 기준으로 수평 거리가 약 9.5% 상승하였으며, 한 사이클 기준으로 8.9% 상승한 것을 확인하였다. 즉, 동일 전력 조건에서 Layered PID 제어가 더 많은 전진 거리를 얻을 수 있었다. 그림 14와 같이 PID 자세제어기 움직임이 Layered PID에 비해 많은 움직임이 있음을 확인할 수 있으며, 이로 인해 발생하는 에너지의 소모량을 나타내는 결과값은 그림 15와 같으며, 한 사이클이 완료되는 시점에서 Layered PID 제어기가 PID 제어기에 비해 약 7.2%의 에너지 감

소 효과를 확인할 수 있다.

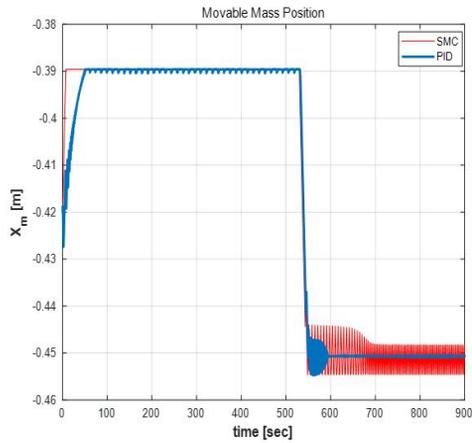


그림 11. 슬라이딩 모드 제어기(SMC) 및 PID 제어기의 내부 이동배터리 이동량 비교

Fig. 11. Battery position of SMC & PID

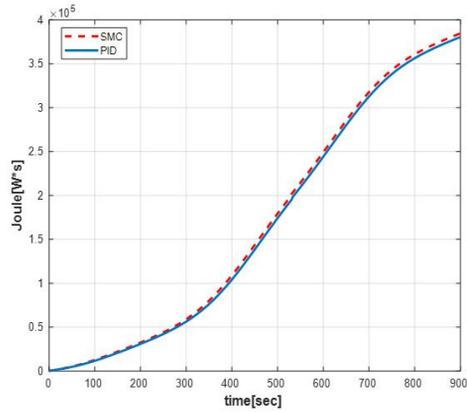


그림 12. 슬라이딩 모드 제어기(SMC) 및 PID 제어기의 에너지 소모 비교

Fig. 12. Energy consumption of SMC & PID

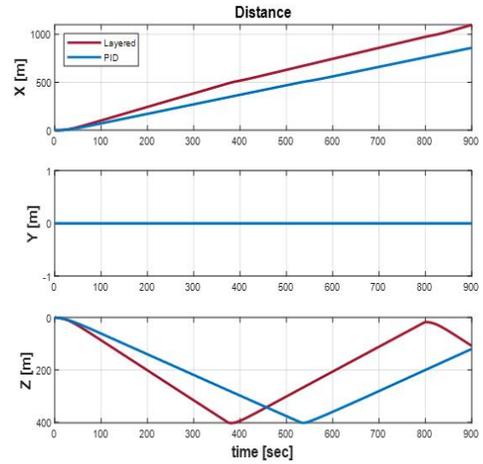


그림 13. PID 제어기 및 Layered PID 제어기의 운동성능 비교

Fig. 13. Comparison with PID & Layered PID

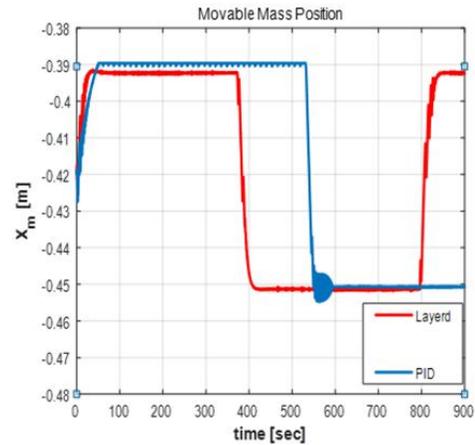


그림 14. PID 제어기 및 Layered PID 제어기의 이동배터리 이동량 비교

Fig. 14. Battery position of PID & Layered PID

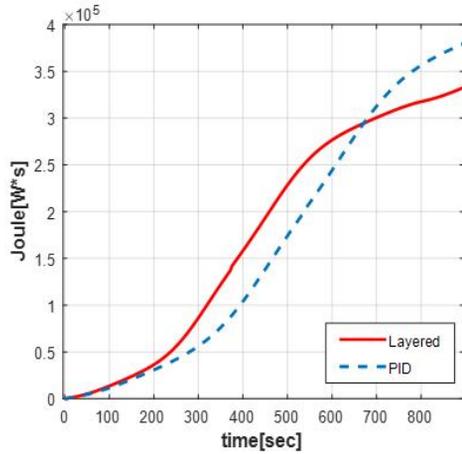


그림 15. PID 제어기 및 Layered PID 제어기의 에너지 소모 비교

Fig. 15. Energy consumption of PID & Layered PID

V. 결 론

본 논문에서는 수중글라이더의 운동특성을 반영하여 동역학 모델링을 수행하였고, 전개된 6자유도 운동방정식을 이용하여 Matlab/Simulink 프로그램을 통해 운동성능 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. 운동성능 시뮬레이션은 기존의 PID 제어기와 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC) 그리고 새로 제안한 Layered PID 제어기를 적용하여 수중글라이더의 종동요각(Pitch angle) 및 수심제어 성능을 해석하였다, 제가지 제어방식이 비슷한 제어 성능을 나타내었으나 슬라이딩 모드 제어기는 채터링(Chattering) 현상이 발생하는 단점이 있었으며 Layered PID 제어기가 우수한 제어 성능을 나타내어 동일시간에 더 많은 직선거리 주행이 가능함을 보였다. 또한 수중글라이더의 운용 목적인 장기 운용을 위한 에너지 효율을 비교하였고 제안한 Layered PID 제어방식이 다른 제어방식에 비해 1.8% ~ 7.2% 에너지 소모량이 작아 에너지 효율이 높음을 확인하였다. 또한, 차세대 수중글라이더의 자율적인 조정을 위한 부력제어기와 자세제어기의 에너지 관점에서 효율적인 제어 가능성도 확인하였다.

추후 연구로는 개발된 Layered PID 제어 알고리즘의 타당성

검증을 위해 수식적으로 산정한 경계층 제어 방식의 가동 범위를 실험적 검증을 통해 정립하고, 외란을 고려한 방향각 제어를 추가한 시뮬레이션 프로그램의 구성을 추진할 계획이다. 또한 실제 운용 가능성 확인을 위한 소형 글라이더 하드웨어를 구성하여 실험을 추진할 계획이다.

Acknowledgments

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 차세대무인이동체원천기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구(2020M3C1C1A0208632612)이며 또한, 해양경찰청 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(군집수색 자율무인잠수정(AUVs) 및 운용시스템 개발).

References

- [1] A. V. Medvedev, V. V. Kostenko, and A. Y. Tolstonogov, "Depth control methods of variable buoyancy AUV," *2017 IEEE Underwater Technology*, Busan, pp. 1-5, 2017.
- [2] J. C. Yu, A. Q. Zhang, W. M. Jin, Q. Chen, Y. Tian, and C. J. Liu, "Development and experiment of the sea-wing underwater glider," *China Ocean Engineering*, Vol 25, No. 4, pp. 721-736, Dec. 2011.
- [3] D. H. Kim et al., "Dynamic modeling and motion analysis of unmanned underwater gliders with mass shifter unit and buoyancy engine," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 466-473, Oct. 2014.
- [4] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & sons, New York, 1994.
- [5] N. E. Leonard, and J. G. Graver, "Model-based feedback control of autonomous underwater gliders," *IEEE Journal of oceanic engineering*, Vol 26, No 4, pp. 633-645. Oct. 2001.
- [6] P. Bhatta, and N. E. Leonard. "Nonlinear gliding stability and control for vehicles with hydrodynamic forcing," *Automatica*, Vol. 44, No. 5, pp. 1240-1250. May 2008.



나 승 규 (Seung-Kyu La)

2021년 8월 : 한국해양대학교 조선기재공학과 (공학석사)
 2021년 11월 ~ 현재 : 대우조선해양 중앙연구소 연구원
 ※관심분야 : 무인잠수정, 자율운항선박, 제어시스템



고 성 협 (Sung-Hyub Ko)

2012년 2월 : 제주대학교 해양시스템공학 (공학석사)
2012년 10월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 해양방위·안전연구센터 기술원
※관심분야 : 수중글라이더, 웨이브글라이더



지 대 형 (Dae-Hyeong Ji)

2016년 2월 : 한국해양대학교 기계공학 (공학석사)
2020년 2월 : 한국해양대학교 기계공학 (공학박사)
2020년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 해양방위·안전연구센터 연구원
※관심분야 : 무인잠수정, 수중글라이더, 수중항법



천 승 재 (Seung-Jae Chon)

2018년 2월 : 한국해양대학교 제어계측공학 (공학석사)
2018년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 제어계측공학과 박사과정
※관심분야 : 지능로봇시스템, 수중도킹시스템, 무인잠수정



정 성 훈 (Seong-Hoon Jeong)

2004년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학석사)
2007년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학박사)
2003년 ~ 2010년 : 부산경상대학교 멀티미디어컴퓨터과 겸임교수
2010년 ~ 현재 : 한국해양대학교 산업기술연구소 산학연구교수
※관심분야 : 해양 무인화 시스템, 해양 IoT, 해상통신, ICT 융·복합 기술



최 형 식 (Hyeung-Sik Choi)

1989년 2월 : University of South Carolina 기계공학 (공학석사)
1993년 2월 : University of North Carolina 기계항공공학 (공학박사)
1993년 ~ 1997년 : 한국기계연구원 (박사후연구원)
1997년 5월 ~ 현재 : 한국해양대학교 기계공학부 교수
※관심분야 : 휴머노이드 로봇, 무인수중로봇, 제어, 수중 가시광 통신



김 준 영 (Joon-Young Kim)

1993년 2월 : 인하대학교 조선해양공학 (공학석사)
1999년 8월 : 한양대학교 정밀기계공학 (공학박사)
2003년 6월 ~ 2005년 3월 : Univ. of Hawaii & Univ. of Miami (박사후연구원)
2005년 4월 ~ 2011년 2월 : 제주대학교 해양시스템공학과 교수
2011년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양신소재융합공학과 교수
※관심분야 : 선체운동모델링, 동역학 및 제어, 수중로봇 설계 및 제어