

논문 2019-14-04

# 수평 꼬리 날개의 제어를 병행하는 하이브리드 수중 글라이더의 깊이 제어

## (Depth Control of a Hybrid Underwater Glider in Parallel with Control of Horizontal Tail Wing)

주 문 갑\*  
(Moon Gab Joo)

Abstract : An underwater glider is a type of autonomous unmanned vehicle and it advances using a vertical zig-zag glide. For this purpose, the position of an internal battery is regulated to control its attitude, and the amount of water in a buoyancy bag is regulated to control the depth. Underwater glider is suitable for a long-distance mission for a long time, because the required energy is much smaller than the conventional autonomous unmanned vehicle using propeller propulsion system. In this paper, control of horizontal tail wing is newly added to the conventional battery position and buoyancy control. The performance of the proposed controller is shown through Matlab simulation.

Keywords : Underwater glider, unmanned underwater vehicle, Matlab

### 1. 서 론

수중 자원을 탐사 개발하고 자국의 안보를 지키기 위하여 무인 수중 로봇이 개발되어 왔으며 [1-3] 최근에는 무인 수중 로봇과 함께 작업하는 무인 수상선의 개발 또한 병행 가속화되고 있다. 이중 수중 글라이더는 배터리, 항법 장치, 제어 장치가 로봇 내에 존재하고, 외부 모선과의 연결선이 없이 독자적으로 동작하는 자율 무인 잠수정에 속한다.

기존의 자율 무인 잠수정은 주로 어뢰 형태를 가지며 프로펠러 추진기를 이용하고, 수평 및 수직 꼬리 날개를 이용하여 원하는 위치로 이동한다. 모선과의 연결선이 없어 자유롭기 때문에, 미리 정해진 경유점을 추적해가며 어뢰를 탐색하거나, 소나 장치를 이용하여 깊은 해저 지형을 정밀하게 스캔

\*Corresponding Author (gabi@pknu.ac.kr)

Received: Sep. 20, 2018, Revised: Oct. 25, 2018,

Accepted: Oct. 30, 2018.

M. G. Joo : Pukyong National University

※ 본 논문은 2016년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학계인기초연구지원사업에 의하여 지원되었음 (NRF-2016R1D1A3A03917039).

하는 등의 작업에 활용된다. 그러나 프로펠러 추진기는 물의 저항을 이기고 추력을 얻기 위하여 큰 에너지를 소모하기 때문에 배터리를 사용하는 자율 무인 잠수정은 운용 시간이 수시간 내로 제한된다.

이에 반하여 수중 글라이더 [4]는 긴 날개를 가진 형태로 내부의 부력과 무게 중심을 조절하여 수직 방향의 지그재그 운동으로 추진한다. 프로펠러 추진기를 사용하지 않고, 내부 장치만을 동작시키기 때문에 에너지 소비를 최소화되어 수중 글라이더의 운용 시간은 한 달 이상으로 늘어난다. 그러나 수중 글라이더는 이동 속도가 느리고 회전 반경이 커서 프로펠러 추진형 무인 잠수정에 비하여 세밀한 작업이 어렵기 때문에 넓은 범위의 해양의 염도, 온도 분포 조사 등에 활용된다.

본 논문에서는 프로펠러 추진형 자율 무인 잠수정 내부에 배터리 이동 장치와 부력 조절 장치를 갖춘 하이브리드 수중 글라이더를 다룬다. 하이브리드 수중 글라이더는 먼 목표점 부근까지 지그재그 활강 방식을 사용하여 장시간, 장거리를 이동하고, 도달 이후에는 추진기와 꼬리 날개를 사용하는 자율 무인 잠수정으로서 세밀한 작업을 할 수 있다.

이러한 하이브리드 수중 글라이더의 수직 방향 지그재그 활강 깊이를 제어하기 위하여, LQR 제어

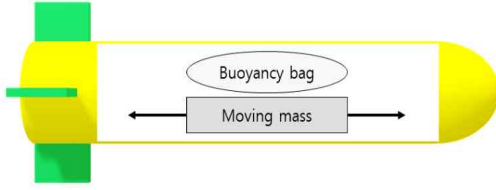


그림 1. 이동 질량과 부력백을 장착한 수중 글라이더  
Fig. 1 Underwater glider with a moving mass and a buoyancy bag

기 [5], PID 제어기 [6], Lyapunov 제어기 [7] 등이 제안되었다. 이러한 제어기는 무인 잠수정 내부의 배터리 위치를 조정하고, 부력 주머니로 출입하는 물의 양을 조절하되, 잠수정 외부의 프로펠러 추진기와 꼬리 날개 제어는 사용하지 않는다.

본 논문에서는 글라이드 모드의 효과적인 깊이 제어를 위하여 그간 사용되지 않았던 수평 꼬리 날개를 함께 활용하는 방법을 다룬다. 꼬리 날개 동작은 프로펠러 추진기에 비하여 상당히 적은 에너지를 소모하기 때문에 무인 잠수정의 글라이딩 동작에 활용하는데 있어서 에너지 소모의 측면에서 무리가 없다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 하이브리드 수중 글라이더의 수학적 모델링을 소개한다. 3장에서 3개의 PD 제어기로 구성된 제어기를 제안한다. 4장에서는 매트랩을 이용한 시뮬레이션 결과를 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 하이브리드 수중 글라이더의 모델링

본 논문에서는 자율 무인 잠수정의 하나로서 그 동역학이 잘 알려져 있는 REMUS [8] 내부에 부력백과 이동 질량을 가진 그림 1과 같은 날개 없는 하이브리드 수중 글라이더를 고려한다. 모델링에 대한 자세한 내용은 [5]를 참고하면 된다.

하이브리드 수중 글라이더의 운동 방정식은 12개의 상태 변수를 사용하여 6 자유도 방정식으로 나타낼 수 있다. 각 변수( $x, y, z, u, v, w, \phi, \theta, \psi, p, q, r$ )의 정의는 그림 2와 같다.

동체 고정 좌표계의 원점을 부력 중심으로 두면  $x_b = y_b = z_b = 0$  이고, 중력에 의한 무게 중심은  $(x_g, y_g, z_g)$ 로 표기한다. 하이브리드 수중 글라이더의 전체 질량은 다음과 같이 구성된다.

$$m_v = m_h + \bar{m} + m_b \quad (1)$$

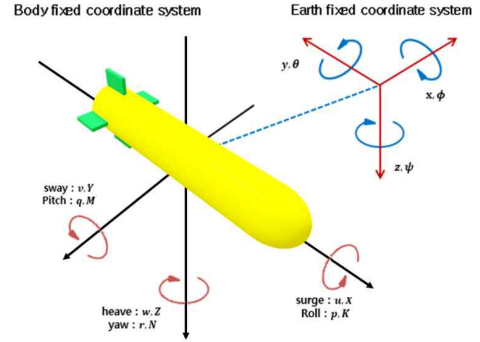


그림 2. 동체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계에서 표시된 상태 변수들

Fig. 2 State variables represented in the body fixed coordinate and the earth fixed coordinate

여기에서,  $m_h$ 는 동체의 질량,  $\bar{m}$ 는 배터리와 같은 이동 질량,  $m_b$ 는 부력 주머니에 들어있는 물의 질량을 나타낸다.

하이브리드 수중 글라이더는 식 (2)와 같은 동역학 방정식으로 묘사된다.

$$\begin{aligned} m_v [\dot{u} - vr + wq - x_y (q^2 + r^2) \\ + y_y (pq - \dot{r}) + z_y (pr + \dot{q})] &= \sum X_{ext} \\ m_v [\dot{v} - wp + ur - y_y (r^2 + p^2) \\ + z_y (qr - \dot{p}) + x_y (qp + \dot{r})] &= \sum Y_{ext} \\ m_v [\dot{w} - uq + vp - z_y (p^2 + q^2) \\ + x_y (rp - \dot{q}) + y_y (rq + \dot{p})] &= \sum Z_{ext} \\ I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m_v [y_g (\dot{w} - uq + vp) \\ - z_g (\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K_{ext} \\ I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m_v [z_g (\dot{u} - vr + wq) \\ - x_g (\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M_{ext} \\ I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m_v [x_g (\dot{v} - wp + ur) \\ - y_g (\dot{u} - vr + wq)] &= \sum N_{ext} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ 는 방향별 관성 질량을 나타내고,  $\sum X_{ext}, \sum Y_{ext}, \sum Z_{ext}$ 과  $\sum K_{ext}, \sum M_{ext}, \sum N_{ext}$ 은 각 축 방향으로 가해진 힘과 토크를 나타내며, 지면 부족으로 인하여 자세히 기술하지는 않는다 [5].

수중 글라이더의 부력 질량 ( $m_b$ )과 진행 방향의 무게 중심 ( $x_g$ )의 변화식은 각각 식 (3)에 의하여 표현된다.  $u_x$ 와  $u_b$ 는 각각 배터리를 움직이는 DC 모터의 토크와 부력 펌프를 동작시키는 DC 모터의 토크를 의미한다.

표 1. 안정된 글라이딩을 위한 파라미터 값  
Table 1. Desired parameters for stable gliding

	downward		
$\xi_d$ (deg)	-30°	-45°	-60°
$\alpha_d$ (deg)	12°	7°	4°
$\theta_d$ (deg)	-18°	-38°	-56°
$V_d$ (m/s)	0.30	0.30	0.30
$u_d$ (m/s)	0.2936	0.2978	0.2993
$w_d$ (m/s)	0.0615	0.0364	0.0209
$x_{gd}$ (m)	0.0080	0.0167	0.0305
$Z_G$ (m)	0.02	0.02	0.02
$m_{bd}$ (kg)	0.9436	0.8954	0.8778

	upward		
$\xi_d$ (deg)	30°	45°	60°
$\alpha_d$ (deg)	-12°	-7°	-4°
$\theta_d$ (deg)	18°	38°	56°
$V_d$ (m/s)	0.30	0.30	0.30
$u_d$ (m/s)	0.2936	0.2978	0.2993
$w_d$ (m/s)	-0.0615	-0.0364	-0.0209
$x_{gd}$ (m)	-0.0080	-0.0167	-0.030
$Z_G$ (m)	0.02	0.02	0.02
$m_{bd}$ (kg)	0.7262	0.7743	0.7919

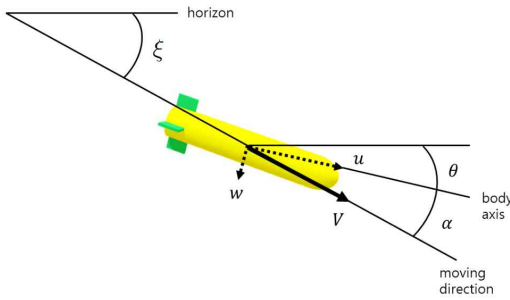


그림 3. 활공각 ( $\xi$ ), 공격각 ( $\alpha$ ), 피치각 ( $\theta$ )  
Fig. 3 Flight angle ( $\xi$ ), attack angle ( $\alpha$ ), pitch angle ( $\theta$ )

$$\begin{aligned} \dot{x}_g &= b_x u_x \\ \dot{m}_b &= b_m u_b \end{aligned} \quad (3)$$

그림 3은 수중 글라이더의 활강 상황을 나타낸다. [5]에 따르면, 수중 글라이더의 진행 속도를  $V_d=0.3\text{m/s}$ 로 설정할 때, 몇 가지 목표 활공각( $\xi_d$ )에 대하여 수중 글라이더가 안정적인 활강을 하기 위한 중요 변수값은 표 1과 같다.  $\alpha$ 는 공격각을 나타내고,  $\theta$ 는 피치각을 나타낸다.  $u, w$ 는 각각 로봇의 전방 전진 속도와 하강 속도를 나타낸다. 아래 첨자  $d$ 는 목표값을 의미한다.

수중 글라이더의 깊이를 제어할 경우, 제어하고자 하는 것은 수중 글라이더의 잠수 깊이 ( $z$ )가 아니라 활강 경사면과의 법선거리( $z'$ )이며 식 (4)의 좌표축 회전으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\xi_d & -\sin\xi_d \\ \sin\xi_d & \cos\xi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

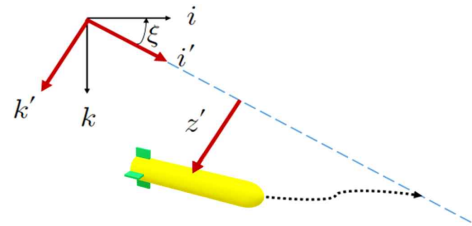


그림 4. 깊이 제어를 위한 좌표축 변환  
Fig. 4 Coordinate transform for depth control

즉, 그림 4와 같이 글라이딩 평면과 수중 글라이더의 법선 거리인  $z'$ 을 0으로 유지하는 것이 깊이 제어의 목표이다.

### III. 수중 글라이더 제어기

먼저, 수중 글라이더가 상승 및 하강 시에 안정된 글라이딩 동작을 수행할 수 있도록, 무게 중심 제어기와 부력량 제어기를 다음과 같은 PD 제어기로 구성하였다. 이때 각각의 목표값은 표 1과 같다.

$$\begin{aligned} u_x(k) &= P_x e_x(k) + D_x \dot{e}_x(k) \\ e_x(k) &= x_g(k) - x_{gd} \\ u_b(k) &= P_b e_b(k) + D_b \dot{e}_b(k) \\ e_b(k) &= m_b(k) - m_{bd} \end{aligned}$$

제어기의 출력은 식 (3)에 의하여  $x_g, m_b$ 를 변화시키며, 변화된 값들은 식 (1)을 통하여 6자유도 동역학 방정식 (2)에 반영된다.

기존의 하이브리드 수중 글라이더의 PID 제어기 [6]는  $u_x(k)$ 를 피치각 ( $\theta$ )의 함수로,  $u_b(k)$ 를 법선

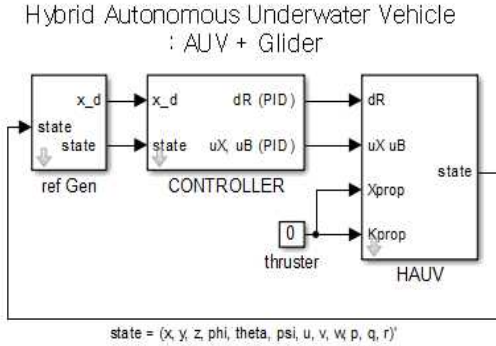


그림 5. Matlab/simulink을 이용한 시뮬레이션  
Fig. 5 Simulation using Matlab/Simulink

깊이 ( $z'$ )의 함수로 구성하고, 수평 꼬리 날개는 사용하지 않았다. 이 경우 목표 깊이 오차를 제거하기 위하여 적분 이득이 필요했고, 제어기의 발산을 방지하기 위하여 anti wind-up 기능이 필요하였다.

한편, REMUS와 같은 어뢰 형태의 자율 무인 잠수정은 필연적으로 수직 및 수평 꼬리 날개를 가지고 있다. 본 논문에서는 무게 중심과 부력량의 제어 뿐만 아니라, 수평 꼬리 날개를 글라이딩시의 제어 수단으로 함께 사용하는 것을 제안한다. 글라이더 모드에서 깊이 제어를 수행하기 위한 수평 꼬리 날개 제어기는 다음과 같이 PD 제어기로 구성된다.

$$\delta s(k) = P_z e_z(k) + D_z \dot{e}_z(k)$$

$$e_z(k) = z'(k)$$

여기에서  $\delta s$ 는 수평 꼬리 날개의 각도를 의미한다. 지면 부족으로 식 (2)에 작용하는 외력항들을 모두 기술하지는 않았으나,  $\delta s$ 가 영향을 미치는  $\sum Z_{ext}$  항을 표시하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \sum Z_{ext} &= Z_{HS} && ; \text{Hydro Static} \\ &+ Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} - X_u u \dot{q} + Y_v v \dot{p} + Y_r r \dot{p} && ; \text{Added Mass,} \\ &&& \text{Coriolis Centripetal} \\ &+ Z_{u|w}|w| + Z_{q|q}|q| && ; \text{Crossflow Drag} \\ &+ Z_{un} u w && ; \text{Body Lift} \\ &+ Z_{uus} u^2 \delta s + Z_{uw} u w + Z_{uq} u q && ; \text{Fin Lift} \end{aligned}$$

본 논문에서 제안하는 깊이 제어기는  $u_x(k)$ 와  $u_b(k)$ 는 안정적인 글라이딩 조건만 유지하도록 제어하고, 목표 깊이는 수평 꼬리 날개가 제어한다. 이 방식은 이전의 방식에 비하여 직관적으로 제어기의 역할이 분명하게 나뉘어져, 각각의 제어기가 적분항이 없는 PD 제어기로 간단히 구성되는 장점이 있다.

표 2. 시뮬레이션에 사용된 파라미터값  
Table 2. Parameters used for simulation

$m_h = 30.4791$	$x_b = 0$	$I_{x.x} = 0.1770$
$\bar{m} = 1$	$y_b = 0$	$I_{y.y} = 3.4500$
$m = 32.3140$	$z_b = 0$	$I_{z.z} = 3.4500$
$g = 9.8100$	$x_g = 0$	$y_g = 0$
	$y_g = 0$	$z_g = 0.0200$
$X_u = -0.9300$	$Y_{v v} = -1310$	$Z_{w w} = -131$
$Z_w = -35.5000$	$Y_{r r} = 0.6320$	$Z_{q q} = -0.6320$
$Z_q = -1.9300$	$Y_{uwl} = -18.9600$	$Z_{uwl} = -18.9600$
$Y_v = -35.5000$	$Y_{u\delta r} = 9.6400$	$Z_{u\delta s} = -9.6400$
$Y_r = 1.9300$	$Y_{uvf} = -9.6400$	$Z_{uvf} = -9.6400$
$X_{u u} = -3.9000$	$Y_{urf} = 6.1500$	$Z_{uqa} = 0.9300$
		$Z_{uqf} = -6.1500$
$K_p = -0.0704$	$M_w = -1.9300$	$N_v = 1.9300$
$K_{p p} = -0.1300$	$M_q = -4.8800$	$N_r = -4.8800$
	$M_{w w} = 3.1800$	$N_{v v} = -3.1800$
	$M_{q q} = -188$	$N_{r r} = -94$
	$M_{uwl} = -4.4200$	$N_{uwl} = 4.4500$
	$M_{u\delta s} = -6.1500$	$N_{u\delta r} = -6.1500$
	$M_{uvf} = -6.1500$	$N_{uvf} = 6.1500$
	$M_{uqf} = -3.9300$	$N_{urf} = -3.9300$

#### IV. 시뮬레이션

제안된 방식의 성능을 확인하기 위하여 그림 5와 같이 Matlab/Simulink를 사용한 시뮬레이터를 구현하였다. 제어 시스템은 1초의 ZOH (Zero order holder)를 가진 이산 시간 시스템으로 표현되고 1초에 한 번의 깊이 제어를 수행한다.

시뮬레이션에는 아래와 같은 크기의 잡음을 추가하였다.

$$\begin{aligned} u_n, v_n, w_n &: \text{rand}(-0.0051, 0.0051) \text{ (DVL)} \\ p_n, q_n, r_n &: \text{rand}(-0.2618, 0.2618) \text{ (DVL)} \\ x_n, y_n, z_n &: \text{rand}(-0.5000, 0.5000) \text{ (GPS)} \\ \phi_n, \theta_n, \psi_n &: \text{rand}(-0.0175, 0.0175) \text{ (IMU)} \end{aligned}$$

사용된 값들의 신뢰성을 극대화하기 위하여 DVL (Dopper velocity logger)의 경우는 LinkQuest의 NavQuest 600 Micro 센서의 오차를, GPS (Global positioning system)의 경우는 Septentrio의 AsteRx1 센서의 오차를, IMU (Inertial measurement unit)의 경우는 Xsens의 MTi 센서의 오차값을 사용하였다.

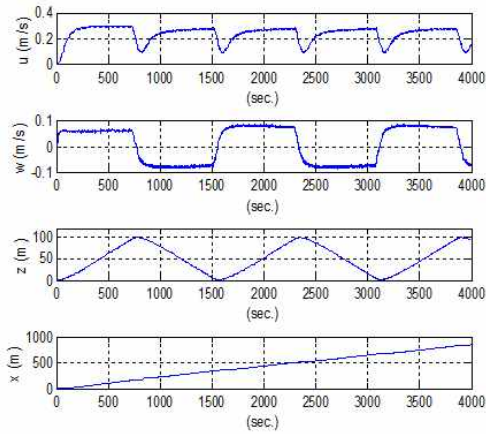


그림 6.  $\xi_d = \pm 30^\circ$  인 경우 로봇의 자세와 위치.  
Fig. 6 Attitude and position of the robot when  $\xi_d = \pm 30^\circ$

표 3. PID 제어기의 이득값 ( $T=1$ )  
Table 3. PID controller's gain values ( $T=1$ )

	$P$	$D$
$u_x$	-10	-1
$u_b$	-1	-0.01
$\delta s$	-0.1	-0.1

표 2는 시뮬레이션에 사용된 변수값을 나타낸다. 배터리의 무게  $\bar{m}=1kg$ 은 임의로 정한 값이고, 나머지 값들은 REMUS의 알려진 값 [8]을 사용하였다.

수중 글라이더의 활공각을  $\xi_d = \pm 30^\circ$  으로 정하고 시뮬레이션을 실행하였다. 하이브리드 수중 글라이더는 표면에서 잠수를 시작하여 100m 깊이가 되면 0m로 부상하고, 다시 100m로 잠수한 후 0m로 부상하는 일을 반복하기 위하여 (100, 0, 100, 0, ...)의 목표 깊이를 차례로 설정하는데, 목표 깊이와의 오차가 5 m 내외가 되면 다음 목표 깊이로 설정치를 변경한다.

배터리 이동을 위한 PD 제어기 ( $u_x$ )와 부력량을 조절하기 위한 PD 제어기 ( $u_b$ )와 수평 꼬리 날개의 각도를 조절하기 위한 PD 제어기 ( $\delta s$ )의 각각의 이득값은 시행 오차를 통하여 표3과 같이 결정하였다.

그림 6은 수중 글라이더의 이동 속도와 깊이 및 수평 이동 거리를 나타낸다. 전진 속도 ( $u$ )와 하강 속도 ( $w$ )는 약  $\pm 0.3 m/sec$ 과  $\pm 0.06 m/sec$ 로서, 표

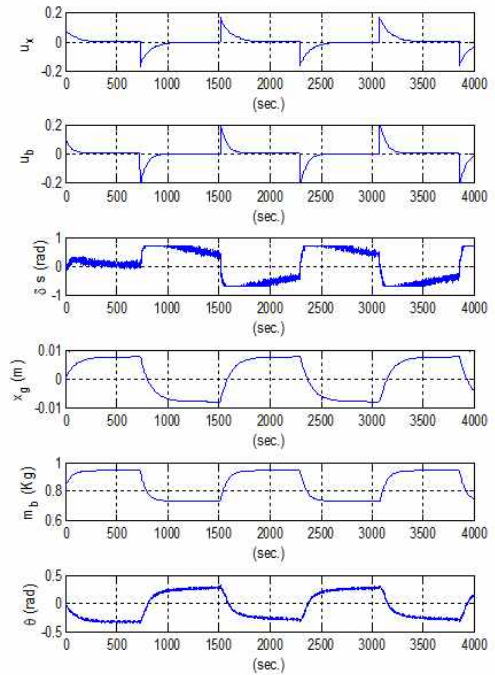


그림 7.  $\xi_d = \pm 30^\circ$  인 경우 제안된 제어기의 출력과 무게 중심, 부력, 피치각의 변화

Fig. 7 The control efforts from proposed controller and the changes in center of gravity, buoyancy mass, and pitch angle when  $\xi_d = \pm 30^\circ$

1과 잘 부합한다. 그림 6에서  $z$ 는 깊이,  $x$ 는 수평 이동 거리를 나타내는데, 수중 글라이더가 0에서 100m의 깊이로 수직 지그재그 운동을 하는 4000초 동안 수평으로는 700m 정도를 전진했음을 보여준다.

그림 7은 제안된 3개의 PD 제어기의 출력을 보여준다.  $u_x$ 는 배터리의 위치를 변화시키기 위한 모터의 출력이고,  $u_b$ 는 부력 주머니에 물을 채우기 위한 펌프의 출력이며,  $\delta s$ 는 수평 꼬리 날개의 각도를 나타낸다. 제어기의 출력은 수중 글라이더가 방향을 바꾸어 떠오르거나 가라앉는 동작의 초기에 나타나고, 그 결과 무게 중심 ( $x_g$ )은 약  $\pm 0.008m$ , 부력 질량 ( $m_b$ )은 약 0.9Kg 또는 0.7Kg, 피치각 ( $\theta$ )은  $\pm 0.3rad(\pm 18^\circ)$ 으로 표 1과 같이 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 본 논문에서 제안된 제어기와 기존의 PID 제어기 [6]를 사용한 경우의 글라이딩 평면과 수중 글라이더의 범선 거리 ( $z'$ )의 변화를 나타낸다.

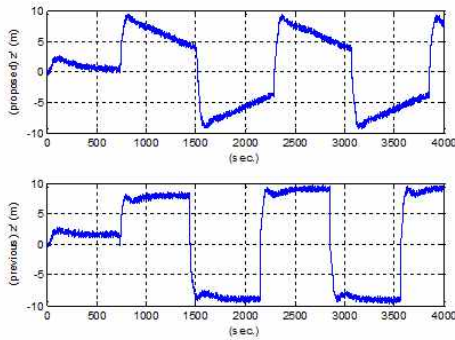


그림 8. 제안된 PD 제어기와 기존 PID 제어기의  $z'$   
Fig. 8  $z'$  of the proposed and the previous controller

제안된 제어기의 경우 수평 꼬리 날개의 작용으로 수중 글라이더가 방향을 바꾸는 초기에 발생하는 최대 10m의 초기 오차가 점차 줄어드는 반면, 기존 제어기는 초기 오차를 개선하지 못하고 그대로 유지하며 활강함을 알 수 있어, 제안된 제어기가 구성이 간단하면서도 깊이 제어에 효과적임을 알 수 있다.

## V. 결론

기존의 자율 무인 잠수정 내부에 배터리 위치 이동 장치와 부력 조절 장치를 갖춘 하이브리드 수중 글라이더의 깊이 제어에 대하여 다루었다. 하이브리드 수중 글라이더의 안정된 활강을 위하여 배터리 위치를 조정하여 진행 방향으로의 무게 중심을 변화시키는 PD 제어기와, 부력백 내부의 물의 양을 변화시키는 PD 제어기와, 수평 꼬리 날개를 이용하여 글라이딩 평면을 따라 잠수 또는 부상하기 위한 PD 제어기로 구성된 제어 시스템을 제안하였다.

제안된 제어 시스템은 수평 꼬리 날개를 사용하지 않는 기존의 PID 제어 시스템에 비하여 적분 이득을 사용하지 않아 보다 간단하게 구성되면, 글라이딩 평면과의 법선 거리 오차를 해소할 수 있음을 보였다.

현재, 조류 등 변화하는 수중 환경을 고려하고, 수직 꼬리 날개를 이용한 방향 제어를 포함하는 하이브리드 수중 글라이더의 제어기 개발을 진행 중이다.

## References

- [1] A. Alvarez, A. Caffaz, A. Caiti, G. Casalino, L. Gualdesi, A. Turetta, R. Viviani, "Fòlaga: A Low-cost Autonomous Underwater Vehicle Combining Glider and AUV Capabilities," *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 24-38, 2009.
- [2] J. Imlach, R. Mahr, "Modification of a Military Grade Glider for Coastal Scientific Applications," *Proceedings of IEEE Oceans*, pp. 1-6, 2012.
- [3] J. G. Bellingham, Y. Zhang, J. E. Kerwin, J. Erikson, B. Hobson, B. Kieft, M. Godin, R. McEwen, T. Hoover, J. Paul, A. Hamilton, J. Franklin, A. Banka, "Efficient Propulsion for the Tethys Long-range Autonomous Underwater Vehicle," *Proceedings of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, pp. 1-7, 2010.
- [4] J. G. Graver, "Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design," Ph. D. thesis, Dept. mechanical and aerospace Eng., Princeton University, 2005.
- [5] Moon G. Joo, Zhihua Qu, "An Autonomous Underwater Vehicle as an Underwater Glider and its Depth Control," *Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 13, No. 5, pp. 1212-1220, 2015.
- [6] Min J. Kim, Moon G. Joo, "Depth Control of an Underwater Glider by Using PID Controller," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-7, 2015 (in Korean).
- [7] Moon G. Joo, "Depth Control of Underwater Glider by Lyapunov's Direct Method," *Journal of IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 12, No. 2, pp. 105-112, 2017.
- [8] Timothy Presto, "Verification of a Six-degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle," M. S. thesis, Applied Ocean Science and Engineering, MIT & WHOI, pp. 102-113, 2001.

**Moon-Gab Joo (주 문 갑)**



He received his B.S. in Electricity and Electronic Engineering from POSTECH, Korea, in 1992. He received his M.S. in Information Communication Engineering from

POSTECH in 1994. He received his Ph.D. in Electronic Computer Engineering from POSTECH in 2001. Since 2003, he has been a professor at Pukyong National University, Korea. His research interests include intelligent control and factory automation.

Email : [gabi@pknu.ac.kr](mailto:gabi@pknu.ac.kr)