

논문 2017-12-35

# 축소 차원 관측기를 사용한 수중 글라이더의 깊이 제어 (Depth Control of Underwater Glider Using Reduced Order Observer)

주 문 갑\*, 우 힘 찬, 손 형 곤

(Moon G. Joo, Him-Chan Woo, Hyeong-Gon Son)

Abstract : A reduced order observer is developed for depth control of a hybrid underwater glider which combines the good aspects of a conventional autonomous underwater vehicle and a underwater glider. State variables include the center of gravity of the robot and the weight of the buoyancy bag, which can not be directly measured. By using the mathematical model and available information such as directional velocities, accelerations, and attitudes, we developed a Luenberger's reduced order observer to estimate the center of gravity and the buoyancy weight. By simulations using Matlab/Simulink, the efficiency of the proposed observer is shown, where a LQR controller using full state variables is adopted as a depth controller.

Keywords: Autonomous underwater vehicle, Underwater glider, Depth control, Luenberger observer, LQR control

## 1. 서 론

무인 잠수정은 크게 자율 무인 잠수정 (AUV, autonomous underwater vehicle)과 원격 조정 잠수정 (ROV, remotely operated vehicle)으로 나뉜다. 자율 무인 잠수정은 배터리와 항법 장치와 자율 제어 모듈을 내장하여 높은 자율성을 가진다. 주로 어뢰 모양이며 1개 이상의 추진기와 꼬리 날개를 이용하여 직진 및 방향 전환을 한다. 원격 조정 잠수정은 모선과 연결된 선을 통하여 필요한 전력과 명령을 수신하며 주로 각 방향별로 장착된 추진기를 이용하여 모선의 명령에 따라 상하전후좌우로 움직인다.

자율 무인 잠수정의 범주 중에서도 내부 배터리의 효율을 극대화하여 장시간의 작전을 수행하기

위하여 수중 글라이더가 개발되었다. 수중 글라이더는 주로 어뢰 모양의 몸체에 양력 발생을 위한 긴 날개를 가지고, 내부의 부력 조절 장치와 무게 중심 이동 장치를 이용하여, 깊이 방향의 지그재그 운동을 통하여 앞으로 나아간다. 이때 수중 글라이더는 많은 전력을 소모하는 추진체를 사용하지 않고, 작은 전력으로 내부의 부력과 무게 중심만을 변화시키는 방법으로 전력 소비를 최소화하여 한 달 이상의 작동 시간과 1000km 이상의 작전 거리를 가진다. 대신에 수중 글라이더는 추진기를 사용하지 않기 때문에 이동 속도가 느리며 회전 반경도 크다.

최근에는 기존의 자율 무인 잠수정과 수중 글라이더의 장점을 혼합하여, 주 날개가 없는 수중 글라이더 [1-3], 추진기와 꼬리 날개를 가진 수중 글라이더 [4] 등으로 기존의 수중 글라이더를 변화시키는 연구들이 진행되고 있다. 또한 기존의 자율 무인 잠수정에 글라이딩 기능을 구현하기 위한 연구도 진행 중이다 [5-8].

수중 글라이더의 깊이 제어를 위하여 반드시 필요한 변수 중에는, 로봇의 무게 중심과 부력 주머니의 부력량이 포함되는데, 이러한 모든 변수들을 측정 가능하다는 가정하에 제어기를 구성한 연구가 있었다 [9, 10]. 그러나 내부의 배터리의 움직임에 의하여 변화하는 로봇의 무게 중심과 부력 엔진의

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

Received: July 18 2017, Revised: Aug. 30 2017,

Accepted: Aug. 31 2017.

Moon G. Joo, H. C. Woo, H. G. Son : Pukyong National University

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

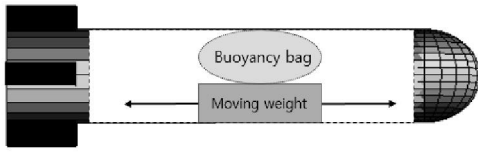


그림 1. 중심 이동 장치와 부력 주머니를 가진 수중 글라이더

Fig. 1 Underwater glider with a moving mass and a buoyancy bag

펌핑에 의해 변화하는 부력 주머니의 부력량은 직접적으로 측정하기가 불가능하거나 쉽지 않다. 그러므로 수중 글라이더의 수학적 모델과 측정 가능한 변수들로부터 그 값을 추정하는 것이 필요하다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 다루고자 하는 수중 글라이더의 구조와 관련 동역학을 간략히 소개한다. III장에서는 기존의 수중 글라이더 연구에서 도출된 안정적인 글라이딩 조건을 소개한다. IV장은 수중 글라이더의 깊이 제어를 위하여 필요한 변수들을 추정하기 위한 관측기와 이를 이용한 제어 기법을 다루고, V장에서 Matlab을 이용한 시뮬레이션 결과를 보이며, VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 제안된 수중 글라이더의 구조

일반적으로 수중 글라이더는 충분한 양력 발생을 위한 긴 날개를 가지고 있으며, 별도의 추진체가 없이 로봇 내부의 부력과 로봇의 자세를 제어하여 상하로 지그재그로 이동한다. 본 논문에서는 자율 무인 잠수정의 하나인 REMUS 내부에 부력 조절 장치와 무게 중심 이동 장치를 가진 그림 1과 같은 날개 없는 수중 글라이더를 고려한다. 이에 대한 자세한 내용은 [9]를 참고하면 된다.

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

이때 로봇의 운동을 나타내기 위한 동체 고정 좌표계의 원점은 로봇의 부력 중심으로 두고, 중력에 의한 무게 중심은  $(x_g, y_g, z_g)$ 로 둔다. 로봇의 전체 질량은  $m_v = m_h + \bar{m} + m_b$ 로서,  $m_h$ 는 동체의 질량,  $\bar{m}$ 는 배터리와 같은 이동 질량,  $m_b$ 는 부력주머니에 의한 질량을 나타낸다. 사용된 변수의 설명과 수학적 모델은 [9]와 [11, 12]을 참고하면 된다. 수중 글라이더는  $m_b$ 를 조절하여 하강 및 상승 속도

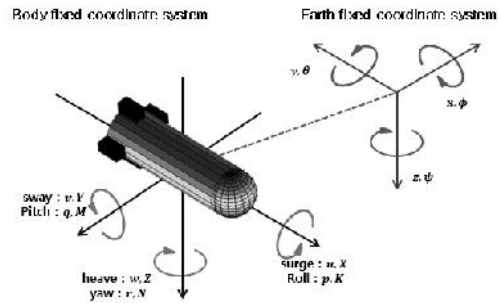


그림 2. 동체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계에서 표시된 상태 변수들

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

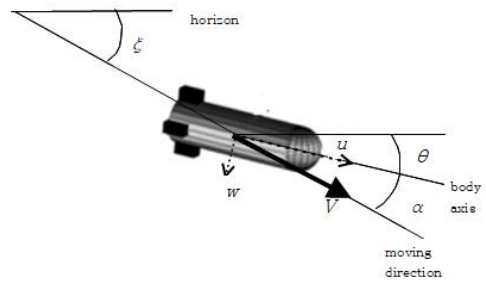


그림 3. 수중 글라이더의 하강 운동

Fig. 3 Downward moving of underwater glider

를 제어하고, 로봇의 무게 중심  $x_g$ 를 조절하여 필요한 자세를 제어하게 된다.

## III. 안정된 글라이딩 조건

[9]의 결과에 의하면, 수중 글라이더가 안정된 글라이딩을 하기 위하여는 여러 가지 조건들이 만족되어야 한다. 즉, 그림 3에서와 같이 진행 방향으로의 활공각  $(\xi_d)$ 이 선정되면, 수중 글라이더의 형태에 따른 저항 등에 의한 공격각  $(\alpha_d)$ 이 정해지고, 이에 따라 목표 피치각  $(\theta_d)$ 이 계산된다. 실현 불가능한 활공각의 경우에는 해당되는 피치각을 계산할 수 없다.

또한 수중 글라이더의 진행 방향으로의 이동 속도  $(V_d)$ 가 선정되면, 이에 따라 동체 방향을 기준으로 하는 전진 속도  $(u_d)$ 와 하강속도  $(w_d)$ 가 계산된다.

표 1. 안정된 글라이딩을 위한 파라미터 값.

Table 1. Desired parameters for stable gliding.

	downward		
$\xi_d$ (deg)	$-30^\circ$	$-45^\circ$	$-60^\circ$
$\alpha_d$ (deg)	$12^\circ$	$7^\circ$	$4^\circ$
$\theta_d$ (deg)	$-18^\circ$	$-38^\circ$	$-56^\circ$
$V_d$ (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)	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
$\alpha_d$ (deg)	$-12^\circ$	$-7^\circ$	$-4^\circ$
$\theta_d$ (deg)	$18^\circ$	$38^\circ$	$56^\circ$
$V_d$ (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

수중 글라이더의 제어기는 수중 글라이더 내부의 배터리를 앞뒤로 움직여 로봇의 피치각을 조절하고, 부력 주머니에 유입되는 물의 펌핑에 의해 부력량을 조정하여 로봇의 전진 속도와 하강 속도를 조절하며, 최종적으로 수중 글라이더의 하강 및 상승 운동이 정해진 활공각과 궤적을 유지하도록 하는 역할을 한다.

표 1은 [9]에 제시된 것으로서, 제시된 수중 글라이더가 안정된 글라이딩이 가능하도록 하는 목표 변수값들을 정리한 것이다. 여기에서  $Z_G$ 는 수중 글라이더의  $z$ 축 방향의 무게 중심을 나타낸 상수값이고,  $m_{bd}$ 는 부력 질량을 나타내는 변수값으로, 아래 첨자  $d$ 는 목표값을 의미한다.

#### IV. 수중 글라이더의 깊이 제어와 관측기

수중 글라이더의 수직면 운동 방정식은 식 (1)과 같이 간략화된다.

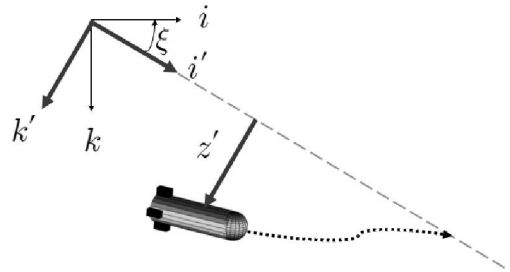


그림 4. 좌표축 변환.

Fig. 4 Coordinate transform.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{z} &= -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \quad (1)$$

글라이더 운동의 경우, 제어하고자 하는 로봇의 위치는 로봇의 잠수 깊이가 아니라, 글라이딩 평면과의 법선 거리가 적당할때, 이것은 식 (2)의 좌표축 회전으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \xi_d & -\sin \xi_d \\ \sin \xi_d & \cos \xi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

깊이 제어의 목적은 그림 4에서 보여지는 것과 같이, 글라이더 평면과의 법선 거리인  $z'$ 을 0으로 유지하는 것이다.

[9]에 의하면 해당 수중 글라이더의 깊이 제어를 위한 연속 시간 상태 방정식은 동작점을 기준으로 식 (3)과 같이 선형화된다.

$$\Delta \dot{X}(t) = \tilde{A} \Delta X(t) + \tilde{B} U(t) \quad (3)$$

여기에서, 상태 변수 및 상수들은 아래와 같다. 제어기의 출력  $u_x, u_b$ 는 각각 배터리를 움직이기 위해 가해지는 힘과 부력 주머니를 부풀리기 위한 힘을 의미한다.

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= M^{-1} A \\ \tilde{B} &= M^{-1} B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta X &= X - X_d \\ X &= [u \ w \ q \ z' \ \theta \ x_g \ m_b]^T \\ X_d &= [u_d \ w_d \ q_d \ z'_d \ \theta_d \ x_{gd} \ m_{bd}]^T \\ U &= [u_x \ u_b]^T \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (Z_w - m_{vd})w_d & 0 & -(W_d - B)\cos\theta_d & 0 & -g\sin\theta_d \\ Z_{uw}w_d & Z_{uw}u_d & (m_{vd} + Z_{uq})u_d & 0 & -(W_d - B)\sin\theta_d & 0 & g\cos\theta_d \\ M_{uw}w_d & M_{uw}u_d & (M_{uq} - m_{vd}x_{gd})u_d - m_{vd}Z_Gw_d & (-Z_G\cos\theta_d + x_{gd}\sin\theta_d)W_d & -W_d\cos\theta_d & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_d & \cos\alpha_d & 0 & 0 & -u_d\cos\alpha_d - w_d\sin\alpha_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_x & 0 \\ 0 & b_m \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{v0} - X_u & 0 & m_{v0}Z_G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{v0} - Z_w & -(m_{v0}x_g + Z_q) & 0 & 0 & 0 \\ m_{v0}Z_G & -(m_{v0}x_g + M_w) & I_{yy} - M_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위와 같은 연속 시간 상태 방정식을 ZOH (zero order holder)를 이용하여  $T$ 초의 샘플링 시간을 가진 이산 시간 상태 방정식으로 변환한 것을 식 (4)와 같이 표기하였다.

$$\Delta X(k+1) = A_d \Delta X(k) + B_d U(k) \quad (4)$$

여기에서 사용된 이산 시간 상태 변수 및 상수 값들은 다음과 같이 표시되었다.

$$A_d = \begin{bmatrix} A_{11}(5 \times 5) & A_{12}(5 \times 2) \\ A_{21}(2 \times 5) & A_{22}(2 \times 2) \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} B_{11}(5 \times 2) \\ B_{21}(2 \times 2) \end{bmatrix}$$

$$X(k) = [u(k) \ w(k) \ q(k) \ z'(k) \ \theta(k) \ x_g(k) \ m_b(k)]^T$$

$$X_d(k) = [u_d(k) \ w_d(k) \ q_d(k) \ z'_d(k) \ \theta_d(k) \ x_{gd}(k) \ m_{bd}(k)]^T$$

$$\Delta X(k) = X(k) - X_d(k) \\ = [y(1 \times 5) \ w(1 \times 2)]^T \quad (5)$$

식 (5)에 사용된 7개의 상태 변수  $X(k)$ 의 변수 중에서, 처음 5개는 로봇에 장착된 IMU나 DVL에 의하여 측정되거나 쉽게 계산되는 반면에, 배터리의 이동에 의해 달라지는 수중 글라이더의 무게 중심  $x_g(k)$ 와 부력 엔진의 펌핑에 의해 달라지는 부력 질량  $m_b(k)$ 는 측량이 용이하지 않다. 그러므로 뒤의 2개 변수를 추정하기 위한 관측기를 구성하되, 계산 속도에서 유리한 축소 차원의 Luenberger 관측기를 구성한다.

식 (5)와 같이 상태 변수  $X(k)$ 의 측정 가능한 변수들을  $y(k)$ , 측정 불가능한 부분을  $w(k)$ 라 하면 식 (4)는 다음과 같이 풀어쓸 수 있다.

$$y(k+1) = A_{11}y(k) + A_{12}w(k) + B_{11}U(k) \\ w(k+1) = A_{21}y(k) + A_{22}w(k) + B_{21}U(k)$$

여기에서  $v(k) = w(k) - Ly(k)$ 로 정의하고 식(6)과 같이 정리한다.

$$v(k) = w(k) - Ly(k)$$

$$v(k+1) = (A_{22} - LA_{12})v(k) \\ + (A_{21} - LA_{11} + A_{21}L - LA_{11}L)y(k) \\ + (B_{21} - LB_{11})u(k) \quad (6)$$

$w(k)$ 가 측정 불가능한 값이므로,  $v(k)$ 는 측정될 수 없으므로, 추정값  $\hat{v}(k)$ 를 식 (7)과 같이 구성한다.

$$\hat{v}(k+1) = (A_{22} - LA_{12})\hat{v}(k) \\ + (A_{21} - LA_{11} + A_{21}L - LA_{11}L)y(k) \\ + (B_{21} - LB_{11})u(k) \quad (7)$$

두 신호의 차이는 식 (8)과 같다.

$$e(k) = v(k) - \hat{v}(k) \\ e(k+1) = (A_{22} - LA_{12})e(k) \quad (8)$$

여기서 두 신호의 오차는  $A_{22} - LA_{12}$ 의 고유값이 단위원내에 위치하도록  $L$ 을 선정함으로써 신속하게 없앨 수 있다. 그러면  $\hat{v}(k) = v(k) = w(k) - Ly(k)$ 로부터  $w(k)$ 를 식 (9)와 같이 추정값  $\hat{v}(k)$ 와 측정값  $y(k)$ 로부터 계산할 수 있다.

$$w(k) = \hat{v}(k) + Ly(k) \quad (9)$$

이제 측정 가능한  $y(k)$ 와 관측기로부터 추정된

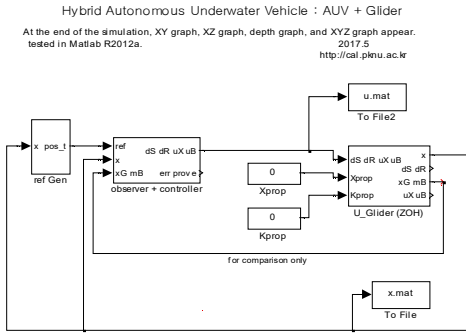


그림 5. Matlab/simulink을 이용한 시뮬레이션  
Fig. 5 Simulation using Matlab/Simulink

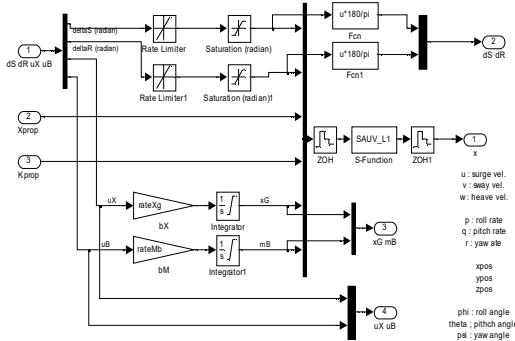


그림 6. U\_Glider 블록 내부의 구현도  
Fig. 6 Implementation of U\_Glider block

$w(k)$ 로 식 (5)의  $\Delta X(k)$ 의 모든 상태 변수들을 구성하였으므로, 제어기의 출력은 극점 배치 또는 LQR 기법을 사용하여 구해진 궤환 이득  $K$ 를 사용하여 식 (10)과 같이 정할 수 있다.

$$U(k) = -K \Delta X(k) \quad (10)$$

### V. 시뮬레이션

제안된 방식의 관측기의 성능을 확인하기 위하여 그림 5, 6과 같이 Matlab/Simulink를 사용한 시뮬레이터를 구현하였다. 제어 시스템은  $T=1$ 초의 ZOH (Zero order holder)를 가진 이산시간 시스템으로 표현되고 1초에 한번 깊이 제어를 수행한다.

시뮬레이션에는 식 (11)과 같이 신호들에 임의의 잡음을 추가하였다.

$$\begin{aligned} u_n, v_n, w_n &: rand(-0.0051, 0.0051) \quad (DVL) \\ p_n, q_n, r_n &: rand(-0.2618, 0.2618) \quad (DVL) \\ x_n, y_n, z_n &: rand(-0.5000, 0.5000) \quad (GPS) \\ \phi_n, \theta_n, \psi_n &: rand(-0.0175, 0.0175) \quad (IMU) \end{aligned} \quad (11)$$

사용된 값들에 있어, DVL (Doppler velocity logger)은 LinkQuest의 NavQuest 600 Micro, GPS (Global positioning system)는 Septentrio의 AsteRx1, IMU (Inertial measurement unit)는 Xsens의 MTi의 매뉴얼에 제시된 각각의 오차값이다.

표 2는 시뮬레이션에 사용된 변수값을 나타내며 배터리의 무게값  $\bar{m}=1(Kg)$ 은 임의로 정한 값이고, 나머지 값은 REMUS의 알려진 값 [8]을 그대로 사용하였다.

표 1에 나타난 몇가지 활공각 중,  $\xi_d = \pm 30^\circ$ 에 대하여 시뮬레이션을 실행하였다. 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

표 2. 시뮬레이션에 사용된 변수값.

Table 2. Parameters used for simulation.

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

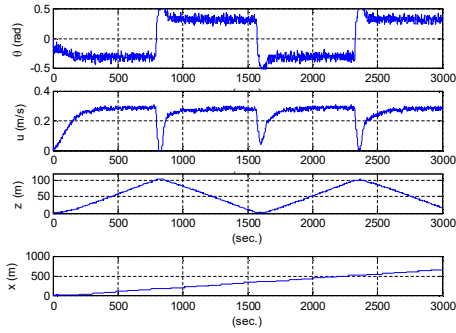


그림 7.  $\xi_d = \pm 30^\circ$  인 경우 로봇의 자세와 위치  
Fig. 7 Attitude and position of the robot  
when  $\xi_d = \pm 30^\circ$

오차가 1 m 내외가 되면 다음 목표 깊이로 설정치를 변경한다.

상승 운동과 하강 운동시 로봇의 목표 변수들이 서로 다르므로, 각각의 경우에 대한 관측기와 제어기를 구현하여야 한다. 제어기는 [9]에서 사용한 LQR 제어기를 그대로 사용하였다. 관측기의 이득값  $L$ 은 연속 시간 복소 평면의  $p = -2 \pm j2$ 에 대응되는 이산 시간 복소 평면상의 극점을 사용하여 극점 배치 기법을 이용하여 구하였다.

이를 통하여 얻어진 하강 운동과 상승 운동시의 관측기 이득값은 각각  $L_d, L_u$ 이며 그 값은 다음과 같다.

$$L_d = \begin{bmatrix} -0.3989 & -0.5489 & -0.0675 & -0.2374 & 0.0134 \\ 3.4676 & 4.7314 & 0.3494 & 2.0594 & -0.2427 \end{bmatrix}$$

$$L_u = \begin{bmatrix} 0.4003 & -0.5458 & -0.0608 & -0.2369 & 0.0174 \\ -3.4773 & 4.7159 & 0.2907 & 2.0621 & -0.2792 \end{bmatrix}$$

그림 7은 시뮬레이션 결과로서, 수중 글라이더가  $\pm 30^\circ$ 의 활공각 ( $\xi_d$ )을 형성하기 위하여 표 1에 나타난 것처럼 피치각( $\theta$ )을  $\pm 18^\circ$  ( $\pm 0.31rad$ )로 제어하고 있음을 보여준다. 이때의 전진 속도 ( $u$ )는 약  $0.3m/sec$ 로 표 1과 잘 부합한다. 깊이가 0과 100m로 변화하는 3000초 동안 전진 거리 ( $x$ )는 약 700여 m임을 알 수 있다.

그림 8은 무게 중심을 변화시키기 위한 제어기의 출력  $u_x$ 와 부력 주머니에 물을 채우기 위한 제어기의 출력  $u_b$ 를 나타낸다. 축소 차원 관측기를 통하여 추정된  $x^*, m^*$ 는 표 1과 같이 하강 시 각각

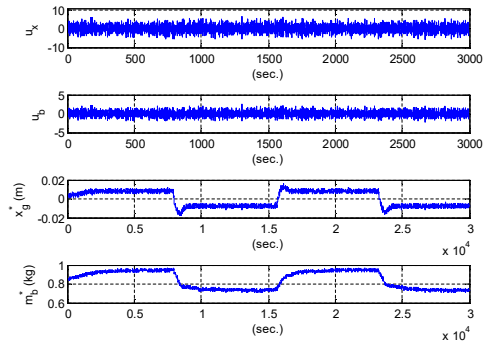


그림 8.  $\xi_d = \pm 30^\circ$  인 경우 제어기의 출력값에 의한 무게 중심 및 부력 변화  
Fig. 8 The changes in center of gravity and buoyancy mass by control efforts when  $\xi_d = \pm 30^\circ$

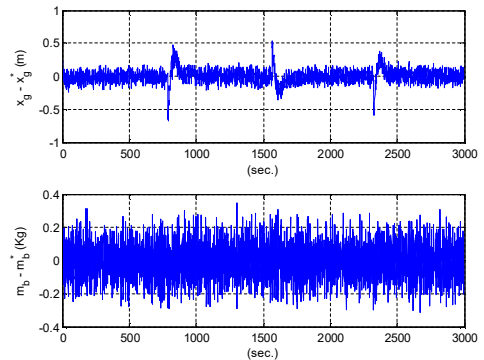


그림 9. 축소 차원 관측기를 통한 추정값의 오차  
Fig. 9 Estimator error by reduced order observer

$0.0080$  m과  $0.9436$  Kg, 상승시 각각  $-0.0080$  m,  $0.7262$  Kg으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 9는 변수값과 추정값과의 오차를 나타낸 것으로,  $x_g - x_g^*, m_b - m_b^*$ 로 나타나는 오차가 빠르게 0으로 수렴하거나 거의 0으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

## VI. 결론

기존의 자율 무인 잠수정은 하나 이상의 추진기의 추진력으로 전진하는데, 이는 많은 에너지를 소비시켜 로봇의 운용 범위가 제한된다. 한편, 수중

글라이더는 에너지 소비가 적은 무게 중심 이동 장치와 부력 주머니를 사용하여 추진력을 얻으므로 장시간과 장거리의 운용 범위를 가진다. 본 논문에서는 자율 무인 잠수정과 수중 글라이더의 장점을 결합하여 기존의 자율 무인 잠수정에 배터리 이동 장치와 부력 주머니를 장착한 형태의 수중 글라이더의 깊이 제어에 대하여 다루었다.

이때, 측정이 불가능한 변수를 추정하기 위하여 축소 차원의 Luenberger 관측기를 구성하였다. 이를 통하여 추정된 수중 글라이더의 무게 중심과 부력량을 이용하여 기존의 LQR 제어를 수행하는 시뮬레이션을 통하여 제안된 관측기의 효용을 검증하였다.

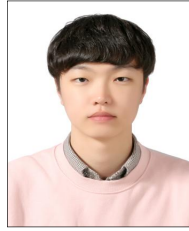
## References

- [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," *Ocean engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 24-38, 2009.
- [2] ASCA-ALCEN, SeaExplorer - autonomous underwater vehicle gliders, <http://www.underwater-gps.com/images/dynproduits/g48.pdf>.
- [3] J. Imlach, R. Mahr, "Modification of a Military Grade Glider for Coastal Scientific applications," *Oceans*, pp. 1-6, 2012.
- [4] S.X. Wang, X.J. Sun, Y.H. Wang, J.G. Wu, X.M. Wang, "Dynamic Modeling and Motion Simulation for a Winged Hybrid-driven Underwater Glider," *China ocean engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 97-112, 2011.
- [5] 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," *Autonomous Underwater Vehicles*, 2010 IEEE/OES, pp. 1-7, 2010.
- [6] J.S. Wang, C. S. G. Lee, "Self-adaptive Recurrent Neuro-fuzzy Control of an Autonomous Underwater Vehicle," *IEEE transactions on Robotics and automation*, Vol. 19, No. 2, pp. 283-295, 2003.
- [7] J. G. Graver, "Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design," Ph. D. thesis, Department of mechanical and aerospace Engineering, Princeton University, 2005.
- [8] T. 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.
- [9] M.G. Joo, Zihua Qu, "An Autonomous Underwater Vehicle as an Underwater Glider and its Depth Control," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 13, No. 5, pp. 1212-1220, 2015.
- [10] M.G. Joo, "Depth Control of Underwater Glider by Lyapunov's Direct Method," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 12, No. 2, pp. 105-112, 2017 (in Korean).
- [11] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons, Ltd., 1994.
- [12] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

**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

**Him-Chan Woo (우 힘 찬)**

He is currently working toward B.S. degree at Pukyong National University, Korea. His research interests include factory automation and embedded system.

Email: glacks623@gmail.com

**Hyeong-Gon Son (손 형 곤)**

He is currently working toward B.S. degree at Pukyong National University, Korea. His research interests include factory automation and embedded system.

Email: hyeong902@gmail.com