

논문 2017-12-12

리아푸노프 직접법에 의한 수중 글라이더의 깊이 제어

(Depth Control of Underwater Glider by Lyapunov's Direct Method)

주 문 갑*

(Moon G. Joo)

Abstract : To control the depth of an underwater glider, a control method by using Lyapunov's direct method is proposed. The underwater glider has a torpedo-shape hull, a movable mass in the hull, and an inflatable buoyancy bag in the hull, but doesn't have large wings that increase the lift force for the conventional underwater glider. The control laws to adjust the position of the movable mass and the mass of the inflatable buoyancy bag are derived. For a selected speed and an angle of attack, we simulated the operation of the underwater glider using Matlab/Simulink. The efficiency of the proposed controller is shown in the fact that the control effort is active during only a short period of time when the zigzag trajectory is changed from downward to upward or vice versa.

Keywords: Autonomous underwater vehicle, Underwater glider, Depth control, Lyapunov's direct method

1. 서 론

세계 각국에서 개발되고 있는 무인 잠수정은 크게 자율 무인 잠수정 (AUV, autonomous underwater vehicle)과 원격 조정 잠수정 (ROV, remotely operated vehicle)로 나눌 수 있다. 자율 무인 잠수정은 배터리와 항법 장치를 내장하여 높은 자율성을 가진 반면 원격 조정 잠수정은 모선과 연결된 선을 통하여 필요한 전력과 명령을 수신하는 형태이다. 기존의 자율 무인 잠수정은 보통 어뢰 모양이며 1개 이상의 추진기와 꼬리 날개를 통하여 직진 및 방향 전환을 하는데 비하여, 원격 조정 잠수정은 각 방향별로 추진기를 장착하여 상하전후좌우로 움직인다.

모선과의 연결선이 없는 자율 무인 잠수정이면 서도 내부 배터리의 효율을 극대화하여 장시간의

작전을 수행하기 위한 방법으로 개발된 수중 글라이더는 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. 수중 글라이더는 많은 전력을 소모하는 추진체를 사용하지 않고, 적은 전력으로 내부의 부력과 무게 중심을 이동하므로 한 달 이상의 작동 시간과 1000km 이상의 작전 거리를 가진다. 수중 글라이더의 단점은 정확한 위치 제어가 어렵고 속도가 느리며 회전 반경이 크다.

최근에는 날개가 없는 수중 글라이더 [1-3], 추진기와 꼬리 날개를 가진 수중 글라이더 [4] 등으로 기존의 수중 글라이더를 변화시키는 연구들이 진행되고 있다. 기존의 자율 무인 잠수정에 글라이더 기능을 구현하기 위한 연구도 진행 중인데, 이 수중 로봇은 비교적 먼 작전 지역까지는 글라이딩을 통하여 소리없이 저전력 기동을 한 다음, 작전 지역에서는 기존의 자율 무인 잠수정으로 동작할 수 있다 [5].

수중 글라이더의 동역학적 모델은 몸체와 가변 부력 질량체, 가변 무게추로 이루어진 강체 다물체 동역학 모델을 사용해 왔는데, 수중 로봇에 작용하는 외력들은 로봇의 공격각에 따른 양력과 항력의

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

Received: Mar. 4 2017, Revised: Mar. 15 2017,

Accepted: Mar. 21 2017.

Moon G. Joo : Pukyong National University

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

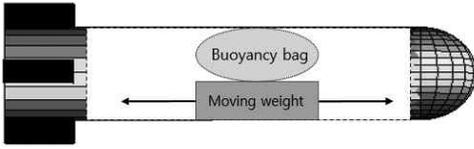


그림 1. 중심 이동 장치와 부력 주머니를 가진 수중 글라이더

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

함수로 표현된다. 이것은 수많은 실험, 또는 시뮬레이션 프로그램을 통하여 실험적으로 결정된다 [6-8].

본 논문은 대표적인 자율 무인 잠수정인 REMUS에 이동 무게 중심과 가변 부력 질량을 장착한 가상의 수중 글라이더를 다룬다. 수중 글라이더의 지그재그 깊이 제어를 위하여 리아푸노프 직접법을 사용한 비선형 제어 기법을 사용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 다루고자 하는 수중 글라이더의 구조와 동역학이 소개된다. III장에서는 수중 글라이더의 안정적인 글라이딩 조건을 소개한다. IV장은 깊이 제어를 위하여 제안하는 리아푸노프 직접법에 의한 제어 방법을 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, 추진체를 가지고 있지 않다. 본 논문에서는 자율 무인 잠수정의 하나인 REMUS 내부에 부력 조절 장치와 무게 중심 이동 장치를 가진 그림 1과 같은 날개 없는 수중 글라이더를 고려한다. 자세한 내용은 [9]을 참고하면 된다.

수중로봇의 운동 방정식은 12개의 상태 변수를 사용하여 6 자유도로 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 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

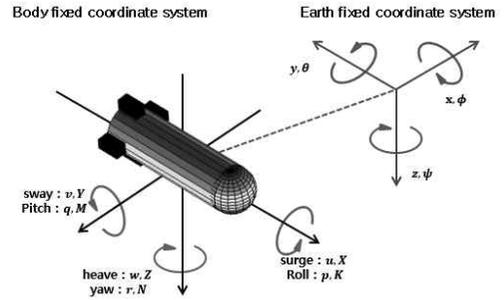


그림 2. 동체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계에서 표시된 상태 변수들

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

질량을 나타낸다. 수중 로봇에 의하여 밀려나는 물의 질량을 m 이라고 하면 순수 부력 질량은 $m_O = m_V - m$ 이다. 다음 식 (1)과 같이 12개의 동역학 방정식이 성립된다. 사용된 변수의 설명은 [10, 11]을 참고하면 된다.

$$\begin{aligned}
 m_v [\dot{u} - vr + uq - x_g (q^2 + r^2) \\
 + y_g (pq - \dot{r}) + z_g (pr + \dot{q})] &= \sum X_{ext} \\
 m_v [\dot{v} - wp + ur - y_g (r^2 + p^2) \\
 + z_g (qr - \dot{p}) + x_g (qp + \dot{r})] &= \sum Y_{ext} \\
 m_v [\dot{w} - uq + vp - z_g (p^2 + q^2) \\
 + x_g (rp - \dot{q}) + y_g (rq + \dot{p})] &= \sum Z_{ext} \\
 I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m_v [y_g (\dot{w} - uq + vp) \\
 - z_g (v - wp + ur)] &= \sum K_{ext} \\
 I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m_v [z_g (\dot{u} - vr + uq) \\
 - x_g (\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M_{ext} \\
 I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m_v [x_g (\dot{v} - wp + ur) \\
 - y_g (\dot{u} - vr + uq)] &= \sum N_{ext}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= u \cos \psi \cos \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) \\
 &\quad + w (\cos \psi \sin \theta \sin \phi + \sin \psi \sin \phi) \\
 \dot{y} &= u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) \\
 &\quad + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\
 \dot{z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \sin \phi \\
 \dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\
 \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\
 \dot{\psi} &= (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \theta
 \end{aligned}$$

수중 로봇에 작용하는 외력들은 다음 식 (2)와 같다 [8].

$$\begin{aligned}
 \sum X_{ext} &= X_{HS} && ; HydroStatic \\
 &+ X_u u + Z_w w q + Z_q q q - Y_v v r - Y_r r r && ; Added Mass, \\
 &&& Coriolis Centripetal \\
 &+ X_{u|u}|u| && ; Axial Drag \\
 &+ X_{prop} && ; Propella Thrust \\
 \\
 \sum Y_{ext} &= Y_{HS} && ; HydroStatic \\
 &+ Y_v v + Y_r r + X_u u r + Z_w w p - Z_q p q && ; Added Mass, \\
 &&& Coriolis Centripetal \\
 &+ Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| && ; Crossflow Drag \\
 &+ Y_{uv} u v && ; Body Lift \\
 &+ Y_{u\delta r} u^2 \delta r + Y_{uv} u v + Y_{ur} u r && ; Fin Lift \\
 \\
 \sum Z_{ext} &= Z_{HS} && ; HydroStatic \\
 &+ Z_w w + Z_q q - X_u u q + Y_v v p + Y_r r p && ; Added Mass, \\
 &&& Coriolis Centripetal \\
 &+ Z_{u|u}|u| + Z_{q|q}|q| && ; Crossflow Drag \\
 &+ Z_{uv} u w && ; Body Lift \\
 &+ Z_{u\delta s} u^2 \delta s + Z_{uv} u w + Z_{ur} u q && ; Fin Lift
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \sum K_{ext} &= K_{HS} && ; HydroStatic \\
 &+ K_p p && ; Added Mass, Coriolis Centripetal \\
 &+ K_{p|p}|p| && ; Rolling Drag Moment \\
 &+ K_{prop} && ; Propella Torque
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum M_{ext} &= M_{HS} && ; HydroStatic \\
 &+ M_w w + M_q q - (Z_w - X_u) u w - Y_r v p + (K_p - N_r) r p - Z_q u q && ; Added Mass, Coriolis Centripetal \\
 &+ M_{u|u}|u| + M_{q|q}|q| && ; Crossflow Drag \\
 &+ M_{uv} u w && ; Body Lift Moment \\
 &+ M_{u\delta s} u^2 \delta s + M_{uv} u w + M_{ur} u q && ; Fin Lift
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum N_{ext} &= N_{HS} && ; HydroStatic \\
 &+ N_v v + N_r r - (X_u - Y_v) u v + Z_w w p - (K_p - M_q) p q + Y_r u r && ; Added Mass, Coriolis Centripetal \\
 &+ N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| && ; Crossflow Drag \\
 &+ N_{uv} u v && ; Body Lift Moment \\
 &+ N_{u\delta r} u^2 \delta r + N_{uv} u v + N_{ur} u r && ; Fin Lift
 \end{aligned}$$

여기에서 X_{prop} , K_{prop} , δs , δr 은 각각 프로펠러 추력, 프로펠러 토크, 수평타 각도, 수직타 각도를 나타낸다.

그림 1의 수중 로봇에 작용하는 각 방향별 유체 정역학적 힘은 식 (3)과 같고, g 는 중력가속도이다.

$$\begin{aligned}
 X_{HS} &= -(W-B) \sin\theta \\
 Y_{HS} &= (W-B) \cos\theta \sin\phi \\
 Z_{HS} &= (W-B) \cos\theta \cos\phi \\
 K_{HS} &= Z_C W \cos\theta \sin\phi \\
 M_{HS} &= -Z_G W \sin\theta - x_g W \cos\theta \cos\phi \\
 N_{HS} &= x_g W \cos\theta \sin\phi \\
 W &= (m_h + \bar{m} + m_b)g \\
 B &= mg
 \end{aligned} \tag{3}$$

III. 안정된 글라이딩 조건

[9]의 결과에 의하면, 선정된 활공각(ξ_d)로 안정된 글라이딩을 하기 위한 공격각(α_d)는 식 (4)를 만족한다. 만약 $\alpha_d \ll 1$ 인 값이 없다면, 해당 활공각은 사용할 수 없다.

$$\tan(\xi_d + \alpha_d) \approx \frac{X_{u|u}|u|}{-Z_{uw}\alpha_d} \tag{4}$$

수중 로봇의 속도(V_d)가 선정되면, 이에 따라 전진 속도(u_d)와 하강속도(w_d)가 식 (5)로 계산된다.

$$u_d = V_d \cos(\alpha_d), w_d = V_d \sin(\alpha_d) \tag{5}$$

수중 로봇의 목표 피치각은 식 (6)와 같다.

$$\theta_d = \xi_d + \alpha_d \tag{6}$$

전진 속도와 공격각에 의하여 필요한 부력 조절량과 무게 중심의 위치는 식 (7)으로 각각 계산된다.

$$\begin{aligned}
 m_{bd} &\approx m - m_h - \bar{m} \pm \frac{X_{u|u}|u|}{g} u_d^2 \\
 x_{gd} &= \frac{-Z_G(m_h + \bar{m} + m_{bd})g \sin\theta_d + M_{uw}\alpha_d u_d^2}{(m_h + \bar{m} + m_{bd})g \cos\theta_d}
 \end{aligned} \tag{7}$$

표 1은 $X_{u|u}|u|/Z_{uw} = 0.1364$, $m_h = 30.4791$, $m = 32.314$, $Z_G = 0.02$ 인 경우, 몇가지 활공각에 대한 변수값들을 정리한 것이다. 활공각(ξ_d)과 로봇의 속도(V_d)는 설계 변수로서, 이에 의하여 나머지 변수들의 설정값들이 계산된다.

IV. 수중 글라이더의 깊이 제어

수중 로봇의 수직면 운동 방정식은 식 (8)와 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= u \cos\theta + w \sin\theta \\
 \dot{z} &= -u \sin\theta + w \cos\theta \\
 \dot{\theta} &= q
 \end{aligned} \tag{8}$$

글라이더 운동의 경우, 제어하고자 하는 로봇의 위치는 로봇의 잠수 깊이가 아니라, 그림 3에서와

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

		downward		
ξ_d (deg)		-30°	-45°	-60°
α_d (deg)		12°	7°	4°
θ_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		
ξ_d (deg)		30°	45°	60°
α_d (deg)		-12°	-7°	-4°
θ_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

같은 글라이딩 평면과의 법선 거리가 적당한데, 이것은 식 (9)의 좌표축 회전으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\xi_d & -\sin\xi_d \\ \sin\xi_d & \cos\xi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

제어의 목적은 글라이더 평면과의 법선 거리인 z' 을 0으로 유지하는 것이며, 대부분 수중 글라이더와 마찬가지로 x' 는 직접 제어하지 않는다.

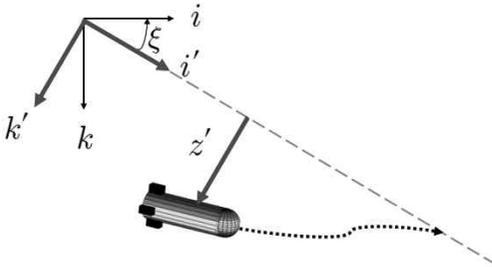


그림 3. 좌표축 변환.

Fig. 3 Coordinate transform.

z' 의 변화식은 식 (10)와 같다.

$$\dot{z}' = -u \sin(\theta - \xi_d) + w \cos(\theta - \xi_d) \quad (10)$$

리아푸노프 함수를 아래식과 같이 정의하고, $\dot{u} = \dot{w} = \dot{q} = 0$ 이라 가정하여 도함수를 구하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2}(z' - z'_d)^2 + \frac{1}{2}(\theta - \theta_d)^2 \\ & + \frac{1}{2}(u - u_d)^2 + \frac{1}{2}(w - w_d)^2 + \frac{1}{2}(q - q_d)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & (z' - z'_d)\dot{z}' + (\theta - \theta_d)\dot{\theta} \\ = & (z' - z'_d)(-u \sin(\theta - \xi_d) \\ & + w \cos(\theta - \xi_d)) + (\theta - \theta_d)q \end{aligned}$$

위 식 (11)을 음수로 만들기 위하여 식 (12)와 같이 대입한다.

$$\begin{aligned} q = & -\kappa_q (\theta - \theta_d) \equiv q^* \\ w = & -\kappa_w (z' - z'_d) \cos(\theta - \xi_d) + U \tan(\theta - \xi_d) \\ \equiv & w^* (\kappa_q > 0, \kappa_w > 0) \end{aligned} \quad (12)$$

그러면 리아푸노프 함수의 시간에 따른 도함수는 식 (13)을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\kappa_w (z' - z'_d)^2 \cos^2(\theta - \xi_d) \\ & - \kappa_q (\theta - \theta_d)^2 < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

이것은 $\theta - \xi_d \neq \pm \frac{\pi}{2}$ 조건하에서는, 시간이 지남에 따라 점근적으로 $z' \rightarrow z'_d, \theta \rightarrow \theta_d$ 이 된다는 것을 의미한다. $\theta - \xi_d = \pm \frac{\pi}{2}$ 은 로봇이 활공각에 수직으로서는 경우를 의미하는데, 이런 경우는 나타나지 않는다.

V. 시뮬레이션

제안된 방식의 성능을 확인하기 위하여 그림 4, 그림 5와 같이 Matlab/Simulink를 사용한 시뮬레이터를 구현하였다. 제어 시스템은 1초의 ZOH (Zero order holder)를 가진 이산시간 시스템으로 표현되고 1초에 한번 깊이 제어를 수행한다.

Hybrid Autonomous Underwater Vehicle : AUV + Glider

At the end of the simulation, XY graph, XZ graph, depth graph, and XYZ graph appear.
 tested in Matlab R2012a.

2014.1

<http://cal.pknu.ac.kr>

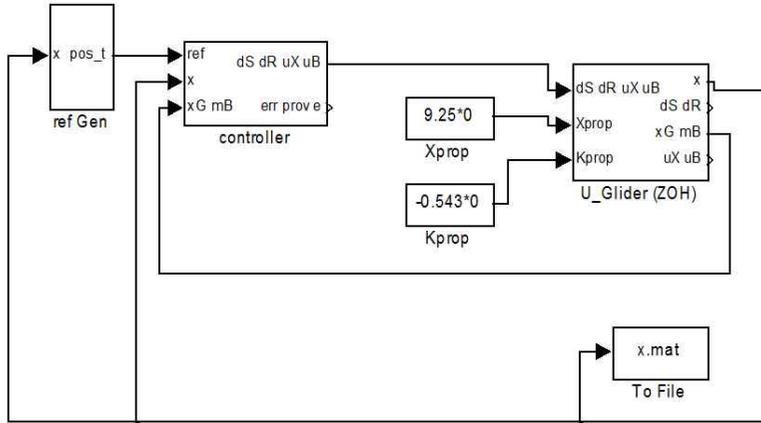


그림 4. Matlab/simulink을 이용한 시뮬레이션

Fig. 4 Simulation using Matlab/Simulink

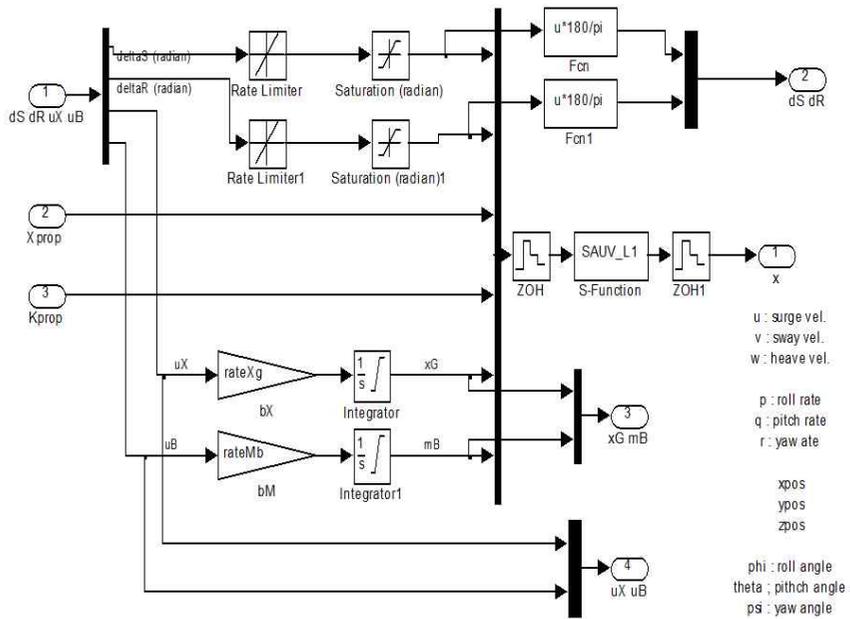


그림 5. U_Glider 블록 내부의 구현도

Fig. 5 Implementation of U_Glider block

표 2. 시뮬레이션에 사용된 파라미터값.

Table 2. Parameters used for simulation.

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

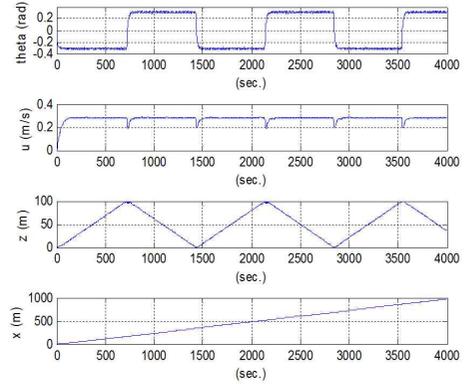
시뮬레이션에는 식 (14)와 같은 크기의 임의의 값을 추가하였다.

$$\begin{aligned}
 u_n, v_n, w_n &: \text{rand}(-0.0051, 0.0051) \quad (DVL) \\
 p_n, q_n, r_n &: \text{rand}(-0.2618, 0.2618) \quad (DVL) \\
 x_n, y_n, z_n &: \text{rand}(-0.5000, 0.5000) \quad (GPS) \\
 \phi_n, \theta_n, \psi_n &: \text{rand}(-0.0175, 0.0175) \quad (IMU)
 \end{aligned} \quad (14)$$

사용된 값들의 신뢰성을 위하여 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 오차값을 사용하였다.

표 2는 시뮬레이션에 사용된 변수값을 나타내며 무게추의 값 $\bar{m} = 1kg$ 은 임의로 정한 값이고, 나머지 값은 REMUS의 알려진 값 [8]을 그대로 사용한다.

표 1의 활공각을 $\xi_d = \pm 30^\circ$ 으로 정하고, 시뮬레이션을 실행하였다. 무인잠수정은 표면에서 잠수를 시작하여 100m 깊이가 되면 0m로 부상하고, 다시 100m로 잠수한 후 0m로 부상하는 일을 반복하기

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

위하여 (100, 0, 100, 0, ...)의 목표 깊이를 차례로 설정하는데, 목표 깊이와의 오차가 1 m 내외가 되면 다음 목표 깊이로 설정치를 변경한다.

식 (15)에 의하여, q, w 를 q^*, w^* 로 제어하면 z', θ 는 z'_d, θ'_d 로 제어된다. 이를 위하여 다음과 같이 간단한 제어 규칙을 정의한다.

$$\begin{aligned}
 u_x &= \gamma_q (q - q^*) + \beta_q (\dot{q} - \dot{q}^*) \\
 u_b &= \gamma_w (w - w^*) + \beta_w (\dot{w} - \dot{w}^*)
 \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)와 같은 제어기를 사용하여, 시행착오를 통하여 얻어낸 적절한 설정치 및 이득값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \kappa_q &= 20 \\
 \kappa_w &= 0.1 \\
 \gamma_q &= 0.1, \beta_q = 0 \\
 \gamma_w &= -10, \beta_w = 0
 \end{aligned} \quad (16)$$

w^* 는 수중 로봇에서 실현 불가능한 값이 되지 않도록 표 1의 값으로 최소값 및 최대값을 제한하였다. 그림 6은 $\pm 30^\circ$ 의 활공각을 형성하기 위하여 표 1에 보여지는 대로 $\pm 18^\circ (\pm 0.31rad)$ 의 피치각 (θ)을 제어하고 있음을 보여준다. 이때의 전진 속도는 약 0.3으로 표 1과 잘 부합한다. 깊이가 0과 100m로 변화하는 4000초 동안 약 1000m를 전진하였음을 알 수 있다.

그림 7은 무게 중심을 변화시키기 위한 제어기

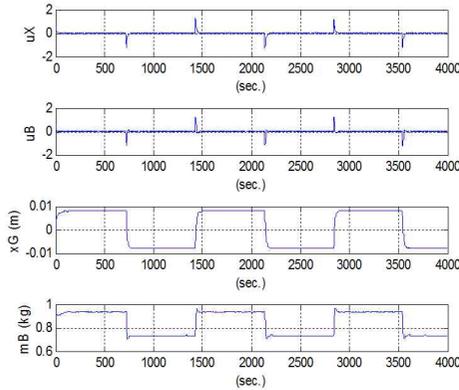


그림 7. $\xi_d = \pm 30^\circ$ 인 경우 제어기의 출력값에 의한 무게 중심 및 부력 변화
 Fig. 7 The changes in center of gravity and buoyancy mass by control efforts when $\xi_d = \pm 30^\circ$

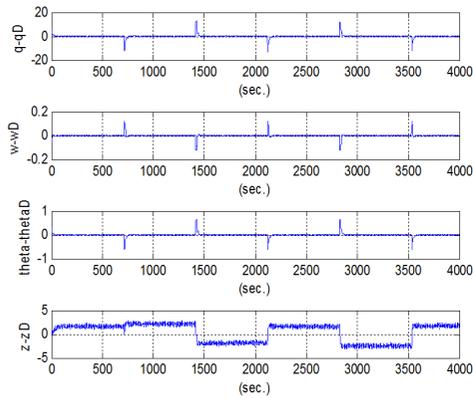


그림 8. $\xi_d = \pm 30^\circ$ 인 경우 오차 그래프
 Fig. 8 Error plots when $\xi_d = \pm 30^\circ$

의 출력 u_x 와 부력 주머니에 물을 채우기 위한 제어기의 출력 u_b 가 목표 깊이가 변화하는 초기에만 크게 작용하였음을 보여준다. 결과적으로 x_g, m_b 는 표 1의 값으로 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

그림 8의 $q - q_d, w - w_d, \theta - \theta_d$ 를 나타낸 것으로 전체적으로 오차가 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다. z' 는 약 2m 범위 내에서 제어되고 있다.

VI. 결론

기존의 자율 무인 잠수정은 하나 이상의 추진기의 추진력으로 전진하는데, 이는 많은 에너지를 소모시켜 로봇의 운용 범위를 제한한다. 한편, 수중 글라이더는 무게 중심 이동 장치와 부력 주머니를 사용하여 추진력을 얻으며, 기존의 자율 무인 잠수정보다 에너지 소비가 크게 줄어든다. 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.

수중 글라이더의 안정된 활강의 조건은 수중 글라이더가 아닌 기존의 자율 무인 잠수정을 모델링하여 구하였다. 경유점을 추적하는 시뮬레이션을 통해 리야푸노프 직접법을 통하여 제안된 제어기의 성능을 검증하였다.

본 논문에서는 제어기의 구현을 간단하게 하기 위하여, 제어기의 출력이 로봇의 위치와 자세에 의해서만 결정되도록 구현되었다. 그러나 조류 등의 변화하는 수중 환경을 고려한다면 수중 로봇의 동역학을 포함시키는 것이 필수적이며, 이를 고려한 제어기를 개발 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," 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. Wang, X. Sun, Y. Wang, J. Wu, X. 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 IEEE/OES*, pp. 1-7, 2010.
- [6] J. 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, Deptment 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, Z. Qu, "An Autonomous Underwater Vehicle as an Underwater Glider and its Depth Control," *Int. Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 13, No. 5, 2015.
- [10] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons, Ltd., 1994.
- [11] T. I. Fossen, *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

Moon-Gab Joo (주 문 감)



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