만타형 자율무인잠수정의 운동성능 및 운동제어에 대한 실험실실험

Field Experiments for Dynamic Characteristics and Motion Control of a Manta-type Autonomous Underwater Vehicle

김 동 회, 박 종 현, 김 준 영*, 최 형 식, 안 진 형

(Dong Hee Kim¹, Jong Hyeon Park², Joon Young Kim³, Hyeung Sik Choi⁴, and Jin Hyeong Ahn⁵)

¹Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

²School of Mechanical Engineering, Hanyang University

³Division of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime University

⁴Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime University

⁵Agency for Defense Development

Abstract: In this paper, we developed a Manta-type AUV (Autonomous Underwater Vehicle) and analyzed its control performance as well as its dynamic characteristics underwater. The nonlinear motion of equations, which are expressed in terms of hydrodynamic coefficients obtained by various experiments, are used to simulate the motion of a Manta AUV underwater. We applied the sliding-mode theory to control the heading angle and depth of the vehicle, and confirmed the effectiveness of the control algorithm through simulations and sea-trials.

Keywords: Manta AUV, motion control, heading angle control, depth control

I. 서론

과학기술의 발전을 바탕으로 해저지역 탐사 또는 수중의 극한 환경에서의 다양한 작업을 수행하기 위한 무인잠수정의 개발 및 운용이 점점 증가하고 있을 뿐만 아니라, 군사 분야에서도 수중에서 활용되는 잠수정들의 자동화 및 무인화 기술이 중요시 되고 있다. 이러한 군사 분야에서 무인무기체계의 일환으로 UUV (Unmanned Underwater Vehicles) 또는 AUV의 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 현재 수중에서 운용되고 있는 무인잠수정들의 외형은 다양한 형태들이 존재하고 있으며[1-5], 그 중에서도 미해군에서는 1990년대 중반부터 MTV (Manta Test Vehicle)의 연구를 진행하였다. MTV의 설계 개념은 평상시에는 잠수함의 모선에 부착되어 있는 UUV가 필요할 경우 모선에서 분리되어 작전해역에서 주어진 임무를 수행하는 것이다.

국내에서도 독자적인 형태의 만타형 무인잠수정을 설계 및 제작하여 사항시험 및 PMM (Planar Motion Mechanism)

시험등 구축모형시험을 통한 유체력미계수를 측정하였고, 이를 이용하여 만타형 무인잠수정에 대한 비선형 6자유도 운동방정식 모델을 제안한 연구가 수행되었다[6]. 또한 만타형 무인잠수정에 대하여 방향각제어 및 수심제어기를 설계하고 제안된 제어알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하는 연구도 수행되어졌다[7,8]. 이외에도 다양한 형태의 무인잠수정에 대해서 운동제어에 대한 연구들이 활발히 수행되었지만 많은 연구들이 이론적인 영역에만 머물러 있다[9-16].

본 논문에서는 앞선 연구들에서 진행된 만타형 무인잠수정에 대한 비선형 6자유도 운동방정식 모델 및 운동제어에 대한 이론을 실제 실험해역에서의 실험을 통하여 검증하도록 하였다. 즉, 유도된 6자유도 운동방정식의 시뮬레이션 결과와 수평면에서의 선회실험 및 지그재그 실험을 통하여 매우 유사한 선회반경과 오버슈트를 갖고 있음을 확인하였다. 이를 통하여 제안된 비선형 6자유도 운동방정식 모델에 대한 타당성을 검증하였다. 또한 수중에서 무인잠수정의 운동제어를 수행하기 위하여 다양한 항법센서를 장착한 만타형 무인잠수정을 설계 및 제작하였다. 또한 본 논문에서 개발된 만타형 무인잠수정에 대한 파라미터 및 실험을 통해 얻어진 유체력미계수들을 이용하여, 슬라이딩모드 이론을 적용한 잠수정의 수심을 제어할 수 있도록 하는 수심제어기와 잠수정의 방향각을 제어할 수 있도록 하는 방향각제어기를 각각의 서브시스템에 대하여 설계하였다. 설계된 제어기의 성능을 확인하기 위하여 만타형 무인잠수정에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

김동회: 한양대학교 기계공학과(risingsun4@hanyang.ac.kr)

박종현: 한양대학교 기계공학부(jongpark@hanyang.ac.kr)

김준영: 한국해양대학교 조선기자재공학부(jykim@hhu.ac.kr)

최형식: 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부(hchoi@hhu.ac.kr)

안진형: 국방과학연구소(posthvn@add.re.kr)

※ 본 논문은 방위사업청/국방과학연구소에 의해 한국해양대학교에 설치된 수중운동체특화연구센터(UVRC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

II. 시스템 구성 및 수학적 모델

1. 시스템 구성

수중에서는 잠수정의 이동 경로에 대한 정보를 측정할 수 있는 GPS 신호를 사용할 수 없기 때문에, 잠수정의 수중에서의 위치정보를 획득하고 또한 이를 제어하기 위해서는 DVL (Doppler Velocity Log), Magnetic-compass, Gyrocompass, IMU (Inertial Measurement Unit), 압력센서와 같은 여러 가지 센서가 필수적이다. 이와 같은 여러 가지 센서들의 출력값에 대한 정보들을 적절히 혼합하여 잠수정의 제어에 이용하게 된다. 본 논문에서는 잠수정의 잠항 깊이를 측정하기 위하여 압력센서가 사용되었으며, 잠수정의 수평면상에서의 위치정보를 측정하기 위해서 잠수정의 회전정보(롤/피치/요각도)를 계속할 수 있는 Gyrocompass로써 PNI사의 TCM5 센서를 사용하였다. 잠수정의 속도정보를 측정하기 위해 LinkQuest사의 NavQuest 600 Micro DVL 센서모듈을 사용하였다. 또한 무인잠수정은 자율항주를 위해서 독립적인 배터리를 보유해야 하며, 배터리 용량은 잠수정의 사용 목적과 작업시간에 따라 결정된다. 본 논문에서는 25.7V 6.6AH 리튬폴리머 배터리가 사용되었으며, 최대 운용시간은 4시간이다. 그리고 잠수정과 호스트 PC간의 통신은 무선 네트워크통신을 이용하여 데이터를 송수신하게 된다. 이와 같은 만타형 무인잠수정의 상세 제원은 표 1과 같다.

실제 제작된 만타형 무인잠수정의 외형을 그림 1에 나타내었으며, 잠수정의 내부에는 다양한 항법센서들과 제어보드가 포함된 내부 압력용기가 위치해 있다. 무인잠수정의

표 1. 만타형 무인잠수정의 상세 제원.

Table 1. Specification of Manta AUV.

	Specification
Hull shape	Manta-type (Flat-fish type)
Dimension	1.5×0.55×0.28 (L×W×H) [m]
Weight	40 [kgf]
Thruster	Tecnadyne model-300
Servo motor	EX-106+ [5EA]
Control board	Onboard PC
Sensors	DVL, TCM5, Pressure sensor, GPS
Battery	25.7V-6.6AH Lithium polymer
Communication	RS-232, RS-485, WiFi

그림 1. 만타형 무인잠수정의 외형.

Fig. 1. Manta-type autonomous underwater vehicle.

상태값들을 측정하는 DVL, PNI-TCM5, GPS 등의 센서 데이터들은 Onboard PC와 RS-232 통신방법을 이용하여 수신하게 되며, 잠수정의 수중에서의 운동제어를 수행할 수 있도록 RS-485 통신을 이용해서 서보 모터를 구동시켜 수직타와 수평타를 움직이게 한다. 또한 NI-DAQ 보드를 통해서 압력센서로부터 측정된 전압값을 입력으로 받아 잠수정의 수심을 측정하게 되며, 추진기를 구동하기 위한 전압값을 보드로부터 출력하여 무인잠수정에 추진력을 인가하게 된다.

2. 수학적 모델

실제 제작된 무인잠수정의 동특성을 미리 파악하고, 다음 장에서 설계할 무인잠수정의 운동제어기의 성능을 확인하기 위하여 만타형 무인잠수정에 대한 수학적 모델이 필요하다. 무인잠수정에 대한 비선형 6자유도 운동방정식을 유도하기 위하여 좌표계를 그림 2와 같이 설정하였다. 좌표계 EXYZ는 지구고정좌표계를 나타내고, 좌표계 Oxyz는 선체고정좌표계를 나타낸다. 선체고정좌표계에서 각 좌표계의 양의 방향은 잠수정의 진행방향을 x , 잠수정의 우현방향을 y 그리고 수심방향을 양의 z 방향으로 설정하여 사용하였다. 설정된 좌표계에 따른 만타형 무인잠수정의 비선형 6자유도 운동방정식은 식 (1)과 같으며[17], 유체력에 포함되는 모든 유체력미계수들은 본 논문에서 제작된 만타형 무인잠수정에 대한 VPMM (Vertical Planar Motion Mechanism) 시험, 사향시험, 강제선회 시험 등과 같은 구축모형시험을 통하여 구한 값들을 사용하였다[6].

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

위에서 정립된 만타형 무인잠수정의 비선형 수학모델에 대한 운동성능을 확인하기 위하여 수평선회와 수평 지그재그 운동에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그

그림 2. 잠수정의 좌표계.

Fig. 2. Coordinate systems.

(a) Horizontal turning motion ($\delta_r = 30^\circ$). (b) Horizontal zigzag motion ($30^\circ/30^\circ$).

그림 3. 무인잠수정의 동적특성 시뮬레이션.

Fig. 3. Simulation results for dynamic characteristic of AUV.

림 3에 나타내었다. 그림 (a)는 초기에 잠수정이 0° 의 방향 각에서 출발하여 수직타의 각도가 30° 를 유지하고 있을 경우에 대한 수평선회 시뮬레이션 결과이다. 결과에서 보는바와 같이 약 7m의 선회반경을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 (b)는 수평 지그재그 운동에 대한 시뮬레이션 결과이며, 방향각에서 약 7° 정도의 오버슈트가 발생하는 것을 알 수 있다.

III. 운동제어기 설계 및 시뮬레이션

만타형 무인잠수정이 수중에서 정해진 임무를 수행하기 위해서는 잠수정의 이동경로를 제어해야 할 필요성이 있다. 잠수정의 이동경로를 제어하기 위해서는 일반적으로 잠수정의 수평면의 운동과 수직면의 운동을 분리하여 각각의 시스템을 독립적으로 제어하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다[1,17]. 따라서 본 논문에서는 슬라이딩모드 제어알고리즘을 이용하여 잠수정의 진행 방향각을 제어하기 위한 제어기와 잠수정의 수심을 제어하기 위한 제어기를 각각 독립적으로 설계하여 잠수정의 수중에서의 전체 운동을 제어하도록 하였다.

수평평면 또는 수직평면에 대하여 선형화된 운동방정식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(x, t) \quad (2)$$

여기서 $x(t) \in R^{3 \times 1}$ 는 상태 변수를 나타내며, $u(t)$ 는 제어입력을 나타낸다. 또한 $f(x, t)$ 는 외란 또는 모델 불확실성을 나타내는 함수이다. 슬라이딩 평면과 슬라이딩 평면의 시간에 대한 미분은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = h^T(x(t) - x_d(t)) \quad ; \quad h \in R^{3 \times 1} \quad (3)$$

$$\dot{s}(t) = h^T(\dot{x}(t) - \dot{x}_d(t))$$

여기서 $x_d(t)$ 는 목표 상태값이다. 만약 제어입력을 식 (4)와 같이 설정한다면 페루프방정식은 식 (5)와 같다.

$$u(t) = -Kx(t) + u_{r_obst}(t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A - BK)x(t) + Bu_{r_obst}(t) + f(x, t) \\ &= A_c x(t) + Bu_{r_obst}(t) + f(x, t) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 양변에 h^T 를 곱하고 양변에 $-h^T \dot{x}_d(t)$ 를 더하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{s}(t) = h^T A_c x(t) + h^T B u_{r_obst}(t) + h^T f(x, t) - h^T \dot{x}_d(t) \quad (6)$$

만약 $(h^T B) \neq 0$ 이면, 불확실성에 대한 강인제어를 위한 제어입력을 식 (7)과 같이 정의할 수 있고, 슬라이딩 평면의 동역학식은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$u_{r_obst}(t) = (h^T B)^{-1} [-h^T \hat{f}(x, t) + h^T \dot{x}_d(t) - \eta \operatorname{sgn}(s(t))] \quad (7)$$

$$\dot{s}(t) = h^T A_c x(t) - \eta \operatorname{sgn}(s(t)) + h^T \Delta f \quad (8)$$

여기서 $\hat{f}(x, t)$ 는 불확실성에 대한 추정치를 나타내고, $\Delta f = f(x, t) - \hat{f}(x, t)$ 이다. 식 (8)에서 극점 배치법에 의하여 K 값을 결정할 수 있으며, 목표극점 중 하나의 극점을 $\lambda = 0$ 으로 설정하고, 이에 대한 행렬 A_c 의 좌측고유벡터를 h 로 설정한다면 식 (9)를 만족하게 된다. 따라서 슬라이딩 평면의 동역학식은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$h^T A_c = \lambda h^T = 0 \quad (9)$$

$$\dot{s}(t) = -\eta \operatorname{sgn}(s(t)) + h^T \Delta f \quad (10)$$

식 (11)과 같이 Lyapunov 함수를 정의하고, 식 (12)와 같은 조건을 만족하도록 제어입력을 설정한다면 시스템의 안정성을 보장하게 된다.

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s(t) \dot{s}(t) \\ &= -\eta |s(t)| + s(t) h^T \Delta f \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 시스템의 안정성 보장을 위한 식 (12)의 조건을 만족하도록 식 (13)과 같이 파라미터를 설정하고, 식 (14)를 이용하여 채터링과 같은 문제점을 완화시킬 수 있다.

$$\eta > \|h\| \|\Delta f\| \quad (13)$$

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & \text{if } |s/\Phi| > 1 \\ s/\Phi & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

위와 같은 슬라이딩모드 제어이론을 수중에서의 만타형

무인잠수정의 운동제어를 수행하기 위한 방향각제어기 및 수심제어기에 적용하도록 한다.

1. 방향각 제어

만타형 무인잠수정의 방향각제어는 잠수정 후미동체의 상·하부에 부착된 2개의 수직타를 통하여 수행되며, 2개의 수직타는 하나의 각도로써 동시에 동일한 형태로 작동된다. 잠수정이 진행해야 할 목표방향각을 추종하도록 하는 슬라이딩모드 제어기를 설계하기 위해, 잠수정의 수평평면에 대한 선형화된 운동방정식은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (m - \frac{\rho L^3}{2} Y'_v) \dot{v} + (m x_G - \frac{\rho L^4}{2} Y'_r) \dot{r} = \\ (\frac{\rho L^2}{2} Y'_v U) v - (m u - \frac{\rho L^3}{2} Y'_r u) r + \frac{\rho L^2}{2} Y'_{\delta r} u^2 \delta_r \\ (m x_G - \frac{\rho L^4}{2} N'_v) \dot{v} + (I_{zz} - \frac{\rho L^5}{2} N'_r) \dot{r} = \\ \frac{\rho L^3}{2} (N'_v U + N'_{uv} u) v - (m x_G u - \frac{\rho L^4}{2} N'_r u) r \\ + \frac{\rho L^3}{2} N'_{\delta r} u^2 \delta_r \\ \dot{\psi} = r \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에 PMM 등 여러 시험을 통하여 구한 각각의 해당 파라미터 값을 대입하면 식 (16)과 같은 형태의 상태공간 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{r}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.7677 & -0.3427 & 0 \\ -0.6452 & -1.1619 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ r(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.1001 \\ 0.4591 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r(t) \quad (16)$$

파라미터 불확실성과 외란이 존재하는 시스템에 대하여 안정적인 슬라이딩모드 제어기 설계를 위하여 원하는 극점을 $[0, -0.5, -0.6]$ 에 위치시켰을 경우, 방향각제어 법칙은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_r(t) &= 2.0946v(t) + 2.2638r(t) - 5.3109sat(s_r(t)) \\ s_r(t) &= \tilde{v}(t) + 3.0890\tilde{r}(t) + 0.9481\tilde{\psi}(t) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $\delta_r(t)$ 은 방향각제어기의 제어입력인 수직타의 각도를 나타내고, $s_r(t)$ 은 방향각제어기의 슬라이딩 평면을 나

그림 4. 방향각 제어 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation results of heading angle control.

타낸다.

설계된 슬라이딩모드 이론을 이용한 방향각제어기의 성능을 확인하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 초기에 잠수정은 1.0m/s의 속도로 출발하여 일정한 수심을 유지하면서 진행하게 되며, 수중에서 운항 중일 때 잠수정의 평균속도는 약 0.65m/s이다. 시뮬레이션 결과를 그림 4에서 살펴보면 그림의 상단은 잠수정의 목표방향각과 실제 방향각의 변화를 나타내고, 하단의 그림은 목표방향각을 추종하기 위해 방향각제어기에 의해 생성된 수직타의 구동각도를 나타낸다. 수직타의 구동각도는 $\pm 30^\circ$ 범위 내에서 작동하도록 한계를 설정하였다. 결과에서 보는 바와 같이 수직타의 제어를 통하여 큰 오차 없이 목표방향각을 잘 추종함을 알 수 있다.

2. 수심 제어

만타형 무인잠수정의 수심제어는 잠수정의 선수부 및 선미부 좌우 양쪽에 부착된 4개의 수평타에 의해 수행된다. 잠수정의 수심제어를 위한 슬라이딩모드 제어기 설계를 위하여 수직평면에 대해 선형화된 운동방정식은 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} (I_{yy} - \frac{\rho L^5}{2} M'_q) \dot{q} = - (m x_G U - \frac{\rho L^4}{2} M'_q u) q \\ - (z_G W - z_B B) \theta + \frac{\rho L^3}{2} M'_{\delta s} u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (18)$$

$$\dot{\theta} = q$$

$$\dot{z} = -u_0 \theta$$

방향각제어기와 마찬가지로 PMM 시험등을 통한 유체력 계수 값을 식 (18)에 각각 대입하면 식 (19)와 같은 선형화된 상태공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5092 & -1.6704 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(t) \\ \theta(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.0091 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s(t) \quad (19)$$

안정적인 슬라이딩모드 제어기 설계를 위하여 원하는 극점을 $[0, -1.1, -2.2]$ 에 위치시켰을 경우, 수심제어법칙은 식 (20)과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_s(t) &= -1.3891q(t) - 0.3731\theta(t) - 9.9548sat(s_s(t)) \\ s_s(t) &= \tilde{q}(t) + 3.3\tilde{\theta}(t) - 2.42\tilde{z}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 $\delta_s(t)$ 는 수심제어기의 제어입력인 수평타의 각도를 나타내고, $s_s(t)$ 는 수심제어기의 슬라이딩 평면을 나타낸다.

설계된 슬라이딩모드 이론을 이용한 수심제어기의 성능을 확인하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 초기에 잠수정은 1.0m/s의 속도로 수면에서 출발하여 0° 의 일정한 방향각을 유지하면서, 1m 깊이로 잠항한 후 다시 0.5m 깊이로 부상하고, 일정 시간 후에 다시 초기위치로 귀환하는 수심제어 시나리오이다. 이에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 5에서 살펴보면 그림의 상단은 잠수정의 목표수심과 실제 수심의 변화를 나타내고, 하단의 그림은 목표수심을 추종하기 위해 수심제어

그림 5. 수심 제어 시뮬레이션 결과.

Fig. 5. Simulation results of depth control.

기에 의해 생성된 수평타의 구동각도를 나타낸다. 수직타와 마찬가지로 수평타의 구동각도는 $\pm 30^\circ$ 범위 내에서 작동하도록 한계를 설정하였다. 결과에서 보는 바와 같이 수평타의 제어를 통하여 큰 오차 없이 목표수심을 잘 추종함을 알 수 있다.

이상과 같이 방향각제어와 수심제어에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안된 슬라이딩모드 이론을 적용한 만타형 무인잠수정의 운동제어의 유효성을 확인할 수 있었으며, 이를 실제 실험역에서 잠수정의 운동제어에 대한 실험에 이용하고자 한다.

IV. 실험역 실험

앞 장에서 제안된 만타형 무인잠수정의 방향각제어기와 수심제어기를 실제 설계 및 제작된 자유항주모형에 대하여 실험역에서의 운동제어 실험에 적용하였다. 실험역 실험은 한국해양대학교에 위치한 요트계류장에서 잠수정의 운동제어에 대한 여러 가지 실험을 수행하였다.

슬라이딩 모드 제어이론에서 사용되는 무인잠수정의 유체력계수는 다양한 실험을 통하여 구해진다. 하지만 이를 구하기 위한 실험을 수행할 때 발생할 수 있는 오차 또는 실험역에서는 조류 및 바람과 같은 외란이 존재하게 되며, 이를 수학적으로 정확하게 모델링하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 제어기에 사용된 외란 또는 모델의 불확실성을 나타내는 항으로써 오차범위의 한계값과 제어성능 및 안정성을 위한 제어기의 게인과 파라미터들도 마찬가지로 시행착오법을 통하여 설정하였다. 본 연구에서는 잠수정의 동적특성과 운동제어기의 성능을 확인하기 위하여 총 3가지의 실험역 실험을 수행하였다. 첫 번째로 만타형 무인잠수정에 대하여 제안된 방향각제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 수심제어는 수행하지 않고 수면에서 방향각제어만을 적용한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 초기에 잠수정은 수면에서 정지 상태에서 출발하여 운항 중에는 약 0.5m/s의 평균속도를 갖는다. 그림 (a)에서는 잠수정의 목표방향각 및 실제방향각 그리고 수직타의 구동각도를 나타내고 있다. 그림 (a)의 상단의 그래프에서 보는 바와 같이 잠수정은 초기에 약 -20° 의 방향

(a) Heading angle and rudder angle.

(b) Depth, roll angle and pitch angle.

그림 6. 방향각 제어 실험역실험 결과.

Fig. 6. Experiment results of heading angle control.

각을 갖고 출발하였으며, 초기에는 0° 의 방향각을, 그리고 22초 후 -20° 의 방향각을 추종할 수 있도록 실험을 수행하였다. 목표방향각이 변경되면 초기에는 잠수정이 정지 상태에서 출발하기 때문에 수직타의 구동에 따른 항력을 받기 위해서는 일정시간이 필요하므로, 약 10초 후에 목표방향각에 도달하지만 일정 속도를 유지하면서 진행하는 경우에는 약 5초 후에 목표방향각에 도달함을 볼 수 있다. 또한 목표방향각에 도달한 후에는 큰 오차 없이 목표방향각을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 (a)의 하단 그래프는 목표방향각을 추종하기 위해 생성된 제어입력, 즉 수직타의 구동각도를 나타내고 있다. 시뮬레이션과 마찬가지로 수직타의 구동각도는 $\pm 30^\circ$ 범위 내에서 작동하도록 한계를 설정하였다. 그림 (b)는 잠수정의 실제 수심, 실제 롤각도 그리고 실제 피치각도를 각각 나타낸다. 수심제어를 수행하지 않았기 때문에 그 값들은 잠수정이 운항하는 중에 변화되는 상태값이며, 이를 살펴보면 먼저 잠수정의 수심은 약 0.25m를 유지함을 볼 수 있다. 이는 잠수정의 수심을 측정하는 압력센서가 잠수정의 내부에 있는 압력용기 가장 하단부에 설치되어 있기 때문에, 잠수정이 수면에 떠 있는 경우에도 약 25cm 가량 수면아래로 잠겨있게 된다. 또한 잠수정의 롤각도는 약 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 사이에 있고, 피치각도는 약 5° 의 각도를 유지하면서 진행하게 된다.

(a) Depth and elevator angle.

(b) Pitch, roll and heading angle.

그림 7. 수심 제어 실험결과.

Fig. 7. Experiment results of depth control.

두 번째로는 잠수정의 수심제어 성능을 확인하기 위해 방향각제어는 수행하지 않은 상태에서 잠수정이 주어진 목표수심을 잘 추종하는가에 대한 실험을 수행하였다. 초기에 정지 상태에서 수면에서 출발하였으며, 잠수정이 1m의 수심을 유지하도록 하는 수심제어 실험을 수행하였다. 수중에서 잠수정이 운항중일 때 평균속도는 약 0.5m/s이며, 이에 대한 실험 결과는 그림 7에 나타내었다. 그림 (a)는 잠수정의 목표수심, 실제수심 그리고 목표수심을 추종하기 위해 제어기에 의해 생성된 수평타의 구동각도를 나타낸다. 수직타와 마찬가지로 수평타의 구동각도는 $\pm 30^\circ$ 범위 내에서 작동하도록 한계를 설정하였다. 그림 (b)는 잠수정의 롤각도, 피치각도 및 방향각의 변화를 나타낸 결과이다. 잠수정의 수심은 약 20초 후에 목표수심 1m에 도달하여 약간의 오실레이션이 존재하지만, 조류의 영향에도 불구하고 목표수심을 잘 추종함을 볼 수 있다. 초기에 잠수정이 정지 상태에서 출발하였기 때문에 수평타가 충분한 항력 및 양력을 받을 수 있는 속도를 얻기까지는 시간이 필요하므로 목표수심에 도달하는데 시간이 많이 소요된다. 또한 잠수정은 약 -60° 의 방향으로 진행하면서, 롤각도는 $-3^\circ \sim 5^\circ$ 사이를 유지하고 있다. 반면 잠수정의 피치각도는 잠항하기 위해서 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한 목표수심에 도달한 이후에

(a) Horizontal turning motion ($\delta_r = 30^\circ$). (b) Horizontal zigzag motion ($30^\circ/30^\circ$).

그림 8. 무인잠수정의 운동성능 확인을 위한 실험결과.

Fig. 8. Experiment results for dynamic characteristics of AUV (with depth control).

는 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 사이에서 오실레이션함을 볼 수 있다. 이는 수중에서 잠수정의 운동은 수심방향 운동과 피치방향 운동이 서로 강하게 연관되어 있어서, 두 운동모드를 하나의 수평타를 이용하여 동시에 만족시키기 힘들기 때문에 발생하는 현상이다. 하지만 롤각도와 피치각도가 크게 발산하지 않고 일정한 각도 사이를 유지하면서 잠수정이 수중에서 일정한 수심을 유지하기 때문에 잠수정이 수중에서 동적으로 안정성을 확보하고 있다는 것을 알 수 있다.

세 번째 실험은 잠수정의 수중에서의 운동성능을 확인하기 위하여 잠수정이 일정한 수심을 유지하면서 수평선회와 수평 지그재그 운동을 수행하도록 하였으며, 그 실험결과를 그림 8에 나타내었다. 초기에 수면에서 정지상태에서 출발하여 수직타의 각도를 30° 로 하여 수평선회를 수행한 실험 결과를 그림 (a)에 나타내었다. 잠수정이 수중에서 운항할 때 평균속도는 약 0.5m/s이며, 목표수심 1m를 유지하면서 선회반경이 약 7.5m의 선회성능을 갖고 있음을 실험을 통하여 확인할 수 있다. 이는 같은 조건 하에서 만타형 무인잠수정의 수학모델을 통한 운동성능 시뮬레이션 결과와 거의 유사한 선회반경을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 만타형 무인잠수정의 수학모델에 대한 정확성의 정도를 확인하는

결과라 할 수 있다. 또한 수중에서 1m의 수심을 유지하면서 수평 지그재그 운동에 대한 실험결과를 그림 (b)에 보이고 있으며, 그 결과 목표수심을 유지하면서 방향각에서 약 5°의 오버슈트가 발생하면서 수평 지그재그 운동을 수행함을 알 수 있다. 잠수정의 수평면상에서의 이동경로를 보면 잠수정의 좌현방향으로 밀리면서 진행함을 알 수 있는데, 이는 실험해역에서 약 150°의 방향각으로 흐르는 조류가 존재함에 따른 현상으로 보인다.

이상과 같은 만타형 무인잠수정에 대한 방향각제어와 수심제어의 실험역 실험을 통하여 제안된 비선형 수학모델의 정확성과 슬라이딩모드 이론을 바탕으로 제안된 운동제어기의 유효성을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 실험역의 수중에서 자율운항을 수행할 수 있도록 만타형 무인잠수정을 설계 및 제작하였다. 수중에서 무인잠수정의 운동을 제어하기 위해서, 슬라이딩모드 이론을 이용하여 수직타를 이용한 방향각제어와 수평타를 이용한 수심제어 알고리즘을 설계하였다. 또한 실험을 통해 얻어진 다수의 유체력계수들을 포함한 비선형 수학모델을 이용하여 설계된 제어알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하고, 이를 실제 제작된 만타형 무인잠수정에 대하여 실험역에서의 다양한 실험을 수행하였다. 이와 같은 만타형 무인잠수정에 대한 시뮬레이션과 실험역 실험을 통하여 제안된 운동제어 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

REFERENCES

- [1] A. Healey and D. Lienard, "Multivariable sliding-mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 327-339, 1993.
- [2] S. Mohan and A. Thondiyath, "A nonlinear tracking control scheme for an underactuated autonomous underwater robotic vehicle," *International Journal of Ocean System Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 120-135, 2011.
- [3] J. Petrich and D. Stilwell, "Robust control for an autonomous underwater vehicle that suppresses pitch and yaw coupling," *Ocean Engineering*, vol. 38, pp. 197-204, 2011.
- [4] C. Silvestre and A. Pascoal, "Depth control of the INFANTE AUV using gain-scheduled reduced order output feedback," *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 7, pp. 1-13, 2006.
- [5] J. Guo, F. C. Chiu, and C. C. Huang, "Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle," *Ocean Engineering*, vol. 30, pp. 2137-2155, 2003.
- [6] K. H. Sohn, S. K. Lee, and S. P. Ha, "Mathematical model for dynamics of manta-type unmanned undersea vehicle with six degrees of freedom and characteristics of maneuverability response," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 43, no. 4, pp. 399-413, 2006.
- [7] H. D. Kim, J. Y. Kim, S. H. Kim, and S. K. Lee, "A study of the control system on the manta-type UUV," *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 35, no. 5, pp. 359-363, 2011.
- [8] J. H. Kim, S. K. Lee, S. E. Lee, and C. H. Bae, "A study of the depth control system and the collision avoidance system for the manta-type UUV," *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 32, no. 6, pp. 447-452, 2008.
- [9] Z. Feng and R. Allen, "H ∞ autopilot design for an autonomous underwater vehicle," *IEEE International Conf. on Control Applications*, Glasgow, Scotland, U.K., pp. 18-20, 2002.
- [10] L. Lapiere, "Robust diving control of an AUV," *Ocean Engineering*, vol. 36, pp. 92-104, 2009.
- [11] J. H. Li and P. M. Lee, "Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle," *Ocean Engineering*, vol. 32, pp. 2165-2181, 2005.
- [12] A. Bateman, J. Hull, and Z. Lin, "A backstepping-based low-and-high gain design for marine vehicles," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 19, no. 4, pp. 480-493, 2009.
- [13] P. Ven, C. Flanagan, and D. Toal, "Neural network control of underwater vehicles," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 18, no. 5, pp. 533-547, 2005.
- [14] S. T. Kwon, W. K. Baek, I. Kang, H. S. Choi, and M. G. Joo, "A study on way-point tracking of AUV using state feedback," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1183-1277, 2011.
- [15] D. W. Kim, H. J. Lee, and J. Sur, "T-S fuzzy model-based waypoints tracking control of underwater vehicles," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 6, pp. 526-530, 2011.
- [16] V. P. Bui and Y. B. Kim, "Design of sliding mode controller for ship position control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 9, pp. 526-530, 2011.
- [17] T. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Wiley, New York, 1994.

김 동 희

1999년 한양대학교 기계공학부 졸업.
2001년 한양대학교 정밀기계공학과 석사.
현재 한양대학교 기계공학과 박사과정.
관심분야는 보행로봇제어, 수중 관절로봇제어, 무인잠수정 항법 및 제어.

박 종 현

1981년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1983년 미국 MIT 석사. 1991년 미국 MIT 박사. 1992년~현재 한양대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 보행로봇 동역학 및 제어, 생체모방로봇.

최 형 식

1983년 고려대학교 기계공학과 졸업. 1989년 Univ. of South Carolina 기계공학과 석사. 1993년 North Carolina State Univ. 기계 및 항공공학과 박사. 2006년~현재 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 교수. 관심분야는 수중로봇, 수중 항법 및 센서시스템, 다관절로봇.

김 준 영

1989년 인하대학교 조선해양공학과 졸업. 1993년 동 대학원 석사. 1999년 한양대학교 정밀기계공학과 박사. 2011년~현재 한국해양대학교 조선기자재공학부 교수. 관심분야는 수중로봇 설계 및 제어, 수중로봇 모델링 및 관측기 설계.

안 진 형

1990년 서울대학교 조선공학과 졸업. 1992년 동 대학원 석사. 2005년 동 대학원 박사. 2006년~현재 국방과학연구소 근무. 관심분야는 수중운동체 운동 시뮬레이션 및 신경회로망을 이용한 제어.