

만타형상 무인잠수정의 운동성능 해석 및 제어기 설계를 위한 비선형 수학적모델 개발

변승우¹, 김준영^{2*}

¹제주대학교 해양시스템공학과

²제주대학교 해양시스템공학과 / 제주대학교 해양과환경연구소

Mathematical Modeling for Dynamic Performance Analysis and Controller Design of Manta-type UUV

Seung-Woo Byun¹ and Joon-Young Kim^{2*}

¹Department of Ocean System Engineering, Jeju National University

²Department of Ocean System Engineering, Jeju National University / Marine and Environmental
Research Institute, Jeju National University

요약 본 논문에서는 만타형상 무인잠수정(Manta-type unmanned underwater test vehicle)의 운동성능과 제어기설계에 대한 성능을 해석하기 위한 수학적모델을 정립하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 6자유도 운동방정식을 이용하여 Matlab/Simulink로 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 만타형상 무인잠수정의 동역학적 운동성능을 해석하였으며, 무인잠수정의 제어성능을 해석하기 위하여 PID(비례-미분-적분)제어기와 슬라이딩모드(Sliding mode)제어기를 설계하여 만타형상 무인잠수정의 제어성능을 해석하였다. 설계된 제어기는 무인잠수정의 수심제어(Depth control)와 방향제어(Heading control)에 사용되었다. 설계된 제어기의 성능을 확인하기 위하여 미해군 대학원의 AUV II와 비교하였다. 설계된 수심제어기와 방향제어기를 이용하여 만타형 무인잠수정의 설계 목표에 부합하는 항해제어 시뮬레이션을 실시하였다.

Abstract This paper describes the mathematical model and controller design for Manta-type Unmanned Underwater Test Vehicle (MUUTV) with 6 DOF nonlinear dynamic equations. The mathematical model contains hydrodynamic forces and moments expressed in terms of a set of hydrodynamic coefficients which were obtained through the PMM (Planar Motion Mechanism) test. Based on the 6 DOF dynamic equations, numerical simulations have been performed to analyze the dynamic performances of the MUUTV. In addition, using the mathematical model PID and sliding mode controller are constructed for the diving and steering maneuver. Simulation results show that the control performances of the MUUTV and compared with these of NPS (Naval Postgraduate School) AUV II.

Key Words : Manta-type Unmanned Underwater Test Vehicle, Mathematical Model, Controller Design, Depth Control, Heading Control, PID Controller, Sliding Mode Controller

1. 서론

무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle; UUV)은 심해저 지형 조사나 광물자원의 탐사, 해양구조물의 조사

등의 민간작업을 위한 장비로서 뿐만 아니라 기뢰제거정 (Mine Disposal Vehicle; MDV)이나 수중 유도무기와 같은 군사적 목적으로도 중요한 비중을 차지하고 있다. 무인잠수정을 크게 분류하면 AUV(Autonomous Underwater

본 논문은 수중운동체특화연구센터(UVRC, SM-23)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*교신저자 : 김준영(jkim@jejunu.ac.kr)

접수일 09년 10월 15일

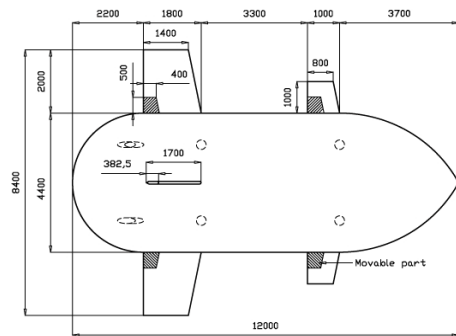
수정일 09년 12월 21일

게재확정일 10년 01월 20일

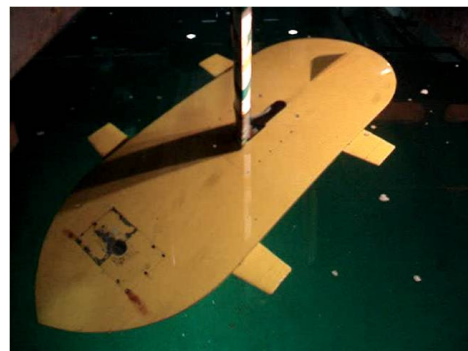
Vehicle)와 ROV(Remotely Operated Vehicle)로 분류된다. 무인잠수정은 유인잠수정에 비해 개발과 유지보수의 측면에서 많은 경비를 절감할 수 있지만, 운동 및 위치 제어성능을 보장하는 고성능의 제어시스템이 필요하게 된다. 무인잠수정의 제어시스템 개발에는 많은 시험이 필요하게 되므로 이를 단축하기 위해서 수치모델에 의한 시뮬레이션이 보조적인 수단으로 이용된다[1]. 국내에서도 수중운동체의 운동특성과 운용시스템에 관련된 연구가 활발하게 수행되고 있다[2].

본 연구에서는 모함인 잠수함 동체 상부의 일부로써 장착되어 있다가 필요시에만 모함으로부터 분리되어 자료 획득 등 작전 수행에 이용되는 만타형상 무인잠수정(Manta-type UUV; MUUTV)에 대한 유체동역학 계수를 이용하여 운동성능 및 제어성능 검증을 위한 비선형 수학적 모델을 정립하고 이를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 6자유도 수학적 모델을 전개하였고, 3장에서는 시뮬레이션 프로그램을 설계하였다. 4장에서는 무인잠수정의 제어성능과 자율항해 성능을 확인하였으며, 마지막 5장에서 결론을 제시하였다.



[그림 1] Configuration of MUUTV



[그림 2] MUUTV model for PMM test

2. 만타형상 무인잠수정의 수학적 모델

무인잠수정의 수학적 모델은 잠수정의 순수한 동체만의 운동모델과 추진기, 제어판과 같은 구동기(Actuator)의 구동모델로 구성된다. 운동모델은 잠수정의 3차원 운동을 시뮬레이션 하기 위하여 6자유도 비선형 운동방정식으로 표현되며 복잡한 유체동역학 계수들을 포함한다. 방정식에 포함되는 유체동역학 계수들은 손경호 등[3]에 의해서 얻어진 값을 사용하였으며, 무인잠수정의 제원은 표 1에 나타내었고, 형상은 그림 1과 같다. 또한, 유체동역학 계수를 얻기 위한 PMM 실험에 사용된 구속모형은 그림 2와 같다.

[표 1] Principal dimensions of MUUTV

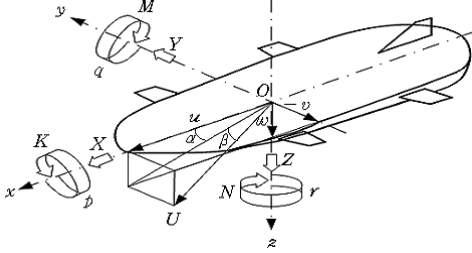
Parameter	Dimensions
Length	12.0 m
Breadth	4.4 m
Height	1.2 m
Disp. Vol.	33.18 m ³

본 연구에서 채택한 무인잠수정은 그림 1과 같이 동체 측면에 승강 또는 자세 제어를 위한 수평타가 4개 설치되어 있으며, 동체 선미 상부와 하부에 각각 수직판을 설치하고 있으며, 하부 수직판 후단부에는 방향제어를 위해 수직타가 설치되어 있다. 또한, 동체 4곳에 수직운동을 위한 4개의 추진기와 선미에 추진을 위한 2개의 추진기가 설치되어 있다. 전체적인 외형은 모선인 잠수함의 표면에 장착할 수 있도록 얇고 넓은 형상을 가지고 있으며, 선수와 선미의 아래 부분은 활주형 선형으로 설계되어 있다.

무인잠수정의 6자유도 운동방정식은 Gertler와 Hagen의 NSRDC보고서에서 잠수함 시뮬레이션의 표준이 되는 식을 정리하였으며[4], 이를 기반으로 Abkowitz와 Feldman이 실제와 더욱 근사한 운동방정식을 수정하여 제시하였다[5][6]. Fossen은 잠수정의 비선형제어를 위한 비선형 모델을 제시하였으며[7], Healey와 Lienard는 NPS AUV II의 운동방정식을 제시하였다[8].

본 연구의 6자유도 수학적 모델은 그림 3과 같이 지구고정좌표계와 동체고정좌표계를 사용하고 있으며, 선수방

향을 x , 우현방향을 y , 선체의 연직하방을 z 축으로 잡고 있다.



[그림 3] Coordinate system and notations

MUUTV의 6자유도 운동방정식은 다음의 식(1) ~ (6)과 같으며, 손경호 등[3]에 의해 정리된 식에 추진기 모델이 포함된 형태를 취하고 있다.

식(1)에서 X_{uu} 은 정상직진 시 MUUTV에 작용하는 저항계수를 나타낸다. 또한 δ_s 과 δ_b 에서 r 과 s 는 각각 선미 수직타와 선미 수평타를 의미하며, X_{T1} 과 X_{T2} 는 선미의 우현과 좌현에 부착되어있는 추진기의 추력을 의미한다. 식(3)과 식(5)에서 Z_{uu} 와 M_{uu} 는 정상직진 시 MUUTV 동체의 상하 비대칭 형상에 기인하는 양력성분의 유체력을 나타내며, Z_{T1} , Z_{T2} , Z_{T3} , Z_{T4} 는 수직운동을 위한 수직 추진기에 의한 추력을 나타낸다.

식(4)에서 l_z 는 추진기 중심에서 선체의 좌표중심까지 떨어진 z 방향의 거리를 의미한다. 식(6)에서 l_x 는 추진기의 중심에서 선체의 좌표중심까지 떨어진 x 방향의 거리를 의미한다. 언급에서 제외된 선체에 작용하는 외력 및 표기법은 Feldman의 보고서와 동일한 방법으로 나타내었다[6]. 수치모델에 포함되는 유체동역학 계수는 PMM(Planar Motion Mechanism) 실험을 통하여 구하였고[9], 이들은 부록 A에 나타내었다.

Surge Force Equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + z_G(\dot{p}r + \dot{q})] = & \quad (1) \\
 & + \frac{\rho}{2}L^4[X_{qq}' \dot{q}^2 + X_{rr}' r^2 + X_{pr}' pr] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[X_u' \dot{u} + X_{vr}' vr + X_{wq}' wq] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[X_{vv}' v^2 + X_{ww}' w^2 + X_{uu}' u^2] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[X_{\delta_r \delta_r}' u^2 \delta_r^2 + X_{\delta_s \delta_s}' u^2 \delta_s^2 + X_{\delta_b \delta_b}' u^2 \delta_b^2] \\
 & - (W - B)\sin\theta + X_{T1} + X_{T2}
 \end{aligned}$$

Sway Force Equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{v} - wp + ur + z_G(\dot{q}r - \dot{p}) + x_G(\dot{p}q + \dot{r})] = & \\
 & + \frac{\rho}{2}L^4[Y_r' r^2 + Y_p' \dot{p} + Y_{pq}' pq] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[Y_v' \dot{v} + Y_{wp}' wp + Y_r' ur + Y_{v|r}' v|r] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Y_v' Uv + Y_{v|v}' v|v + Y_{\delta_r}' u^2 \delta_r] \\
 & + (W - B)\cos\theta\sin\phi
 \end{aligned} \quad (2)$$

Heave Force Equation

$$\begin{aligned}
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(\dot{p}^2 + \dot{q}^2) + x_G(\dot{p}r - \dot{q})] = & \\
 & + \frac{\rho}{2}L^4[Z_q' \dot{q} + Z_{pp}' p^2 + Z_{pr}' pr] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[Z_w' \dot{w} + Z_{vp}' vp + Z_q' uq + Y_{w|q}' w|q] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Z_{uu}' u^2 + Z_w' Uw + Z_{w|w}' w|w] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^2[Z_{\delta_s}' u^2 \delta_s + Z_{\delta_b}' u^2 \delta_b] \\
 & + (W - B)\cos\theta\cos\phi \\
 & + Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3} + Z_{T4}
 \end{aligned} \quad (3)$$

Roll Moment Equation

$$\begin{aligned}
 I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m[z_G(\dot{v} - \phi + ur) & \\
 + x_G z_G(\dot{r} + pq)] = & \\
 & + \frac{\rho}{2}L^5[K_p' \dot{p} + K_r' \dot{r} + K_{qr}' qr] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^4[K_p' up + K_r' ur + K_{wp}' wp + K_{vq}' vq + K_{wr}' wr] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[K_v' Uv + K_{vw}' vw + K_{v|v}' v|v + K_{\delta_r}' u^2 \delta_r] \\
 & - (z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \\
 & + l_z(Z_{T2} + Z_{T4}) - l_x(Z_{T1} + Z_{T3})
 \end{aligned} \quad (4)$$

Pitch Moment Equation

$$\begin{aligned}
 I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) & \quad (5) \\
 - x_G(\dot{w} - uq + vp) + x_G z_G(\dot{p}^2 - r^2)] = & \\
 & + \frac{\rho}{2}L^5[M_q' \dot{q} + M_{pr}' pr + M_{rr}' r^2 + M_{pp}' p^2] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^4[M_w' \dot{w} + M_q' Uq + M_{vr}' vr + M_{vp}' vp \\
 & \quad + M_{w|q}' w|q] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[M_{uu}' u^2 + M_w' uw + M_{w|w}' w|w] \\
 & + \frac{\rho}{2}L^3[M_{\delta_s}' u^2 \delta_s + M_{\delta_b}' \delta_b] \\
 & - (x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi - (z_G W - z_B B)\sin\theta
 \end{aligned}$$

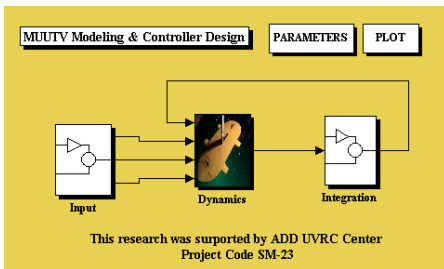
Yaw Moment Equation

$$\begin{aligned}
 & I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) \\
 & + z_G x_G(\dot{q} - \dot{r})] = \\
 & + \frac{\rho}{2} L^5 [N_r' \dot{r} + N_p' \dot{p} + N_{pq}' pq + N_{qr}' qr] \\
 & + \frac{\rho}{2} L^4 [N_v' \dot{v} + N_r' Ur + N_p' up + N_{wp}' wp + N_{vq}' vq \\
 & \quad + N_{|v|r}' |v|r] \\
 & + \frac{\rho}{2} L^3 [N_v' uv + N_{vlv}' v|v| + N_{\delta_r}' u^2 \delta_r] \\
 & + (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi \\
 & + l_x (X_{T_1} - X_{T_2})
 \end{aligned}$$

(6)

3. 시뮬레이션 프로그램

2장에서 전개한 MUUTV의 수학적모델을 이용하여 Matlab의 Simulink로 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. Matlab은 제어시스템의 해석과 설계에 있어서 강력한 도구를 많이 포함하고 있으며, Simulink는 비선형 시뮬레이션에 있어서 그래픽환경으로 사용하기 편리하다. 따라서 그림 4와 같이 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다.

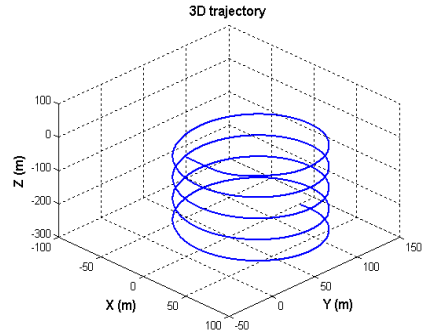


[그림 4] Simulation program for MUUTV

그림 4에서 각각의 블록들은 계층구조로 되어있다. 이러한 모듈화된 구성방법은 사용자가 전체구조를 쉽게 파악할 수 있고, 그래픽 환경을 제공함으로써 모델의 확장 및 수정작업이 편리하다. Input블록은 추진기의 전압과 승강타, 방향타의 각도를 입력으로 준다. Dynamics 블록은 6방향의 힘과 모멘트를 계산하는 블록이며, Integration 블록은 출력부로서 MUUTV의 자세와 위치 등의 상태 변수들을 결과값으로 계산한다.

위에서 언급한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 MUUTV의 다양한 운동성능을 해석하였다. 그중 한 예로써, 시뮬레이션 조건은 초기속도 2.5m/s에서 승강타를 30°, 방향타를 30° 입력한 경우에 대한 시뮬레이션을 수행

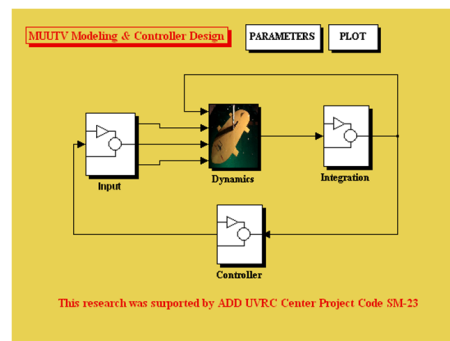
하였다. 그림 5는 위 조건에 대한 MUUTV의 시뮬레이션 결과를 3차원 그래프로 나타낸 것이며 나선형 운동을 하면서 수심 아래방향으로 운항하는 양상을 보여주고 있다.



[그림 5] Dynamic performance of MUUTV

4. 제어기 설계

MUUTV는 해양의 열악한 환경 하에서 자율 항주 하면서 임무를 완수하고 모션으로 회귀해야하기 때문에 불확실성에 대하여 강한 제어 시스템이 요구된다. 이러한 무인잠수정의 제어를 위하여 고전적인 제어방법을 이용하는 경우에는, 잠수정의 운동특성을 정확히 파악하고 시스템의 모든 파라미터를 실험과 이론 계산으로 추정하여 모델링하는 것이 요구된다[10].



[그림 6] Simulation model for depth and heading control

본 논문에서는 계산과 실험에 의해 얻어진 파라미터를 이용하여 모델링을 하였고, 고전제어 방법인 PID 제어기와 현대제어 방법인 슬라이딩모드(Sliding Mode) 제어를 적용하고자 한다. 제어기를 적용한 프로그램은 그림 6과 같다.

4.1 수심제어

4.1.1 PID 제어기

PID 제어기를 이용한 수심제어는 식(7)을 이용하여 승강타의 각 δ_s 를 연산하도록 하였으며, 그림 7은 PID 제어기를 사용한 수심제어 시뮬레이션에 대한 결과이며, 설계된 제어기의 성능을 비교하기 위해 Healey와 Lienard의 NPS AUV II와 비교하였다[8]. NPS AUV II는 기존의 항주형 무인잠수정과는 달리 MUUTV와 유사한 Flatfish형상으로 제작되었으며, 이에 대한 운동방정식과 유체력 계수등이 [9]에 자세히 언급되어있다. 또한, NPS AUV II는 Flatfish형상의 AUV중에서 유일하게 실험결과 및 파라미터 자료를 공개하였으므로 이와 비교하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 조건은 100초 동안은 수심 5미터를 유지하고, 그 후 다시 초기 수심으로 돌아오는 경우에 대해 시뮬레이션을 실시하였으며, 초기속도는 1.8m/s이다.

$$\delta_s(t) = K_p(Z(t) - Z_d) + K_\theta \theta(t) + K_q q(t) \quad (7)$$

그림 7의 결과에서 보면 AUV II가 MUUTV보다 크기가 작아서 관성모멘트도 작으므로 목표수심을 더 빨리 찾아 수렴해 나가는 모습을 보이고 있으며, MUUTV도 약 40초 정도의 시간이 지난 후에 목표수심인 5m로 수렴해 가는 것 볼 수 있다. 현재 수행한 시뮬레이션은 수직 추진기는 사용하지 않고 선미의 승강타만 이용하여 수심 제어를 수행하였기 때문에 상당히 늦게 목표수심에 이르는 것을 볼 수 있다.

4.1.2 슬라이딩모드 제어기

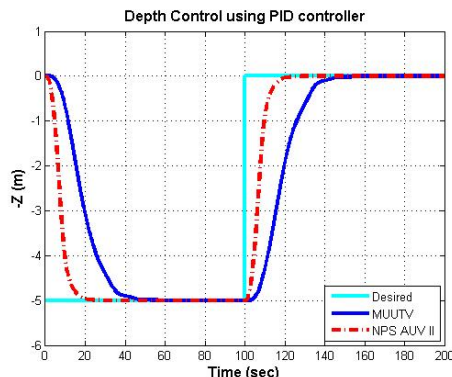
슬라이딩모드 제어기를 이용한 수심제어는 식(8)과 (9)의 선형화된 운동방정식을 이용하여 식(10)과 같은 제어기 입력을 설정하였다.

$$\begin{aligned} (I_y - M_q)\dot{q} &= M_q q - z_G W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \quad (8) \\ \dot{\theta} &= q \\ \dot{Z} &= -u \theta \end{aligned}$$

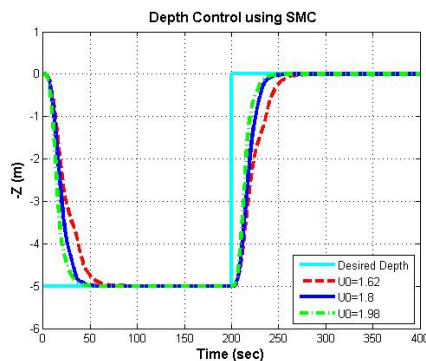
$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2648 & -0.0902 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0158 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (9)$$

$$\delta_s = 21.85q + 0.17\theta - 2.28\dot{Z}_d + 5 \tanh(\sigma_s/1.5) \quad (10)$$

여기서 σ_s 는 수심제어시의 슬라이딩평면이며, $\sigma_s = -27.6923\tilde{q} - 14.1231\tilde{\theta} + \tilde{z}$ 이다.



[그림 7] Depth control result using PID controller



[그림 8] Depth control result using sliding mode controller

그림 8은 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 수심제어 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 조건은 PID 제어기의 경우와 마찬가지로 수심 5m 하강 후 다시 수면으로 돌아오는 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였고, 초기속도 1.8m/s를 기준으로 하여 초기속도를 각각 10%씩 증가/감소한 경우에 대해 비교를 실시하였다. 이는 외란에 의해 속도가 증가 또는 감소한 상태다. 이 결과 속도가 증가 및 감소하는 경우에도 슬라이딩모드 제어기가 원하는 목표 값을 발산하지 않고 허용범위내로 추종하고 있음을 보여주고 있다.

4.2 방향제어

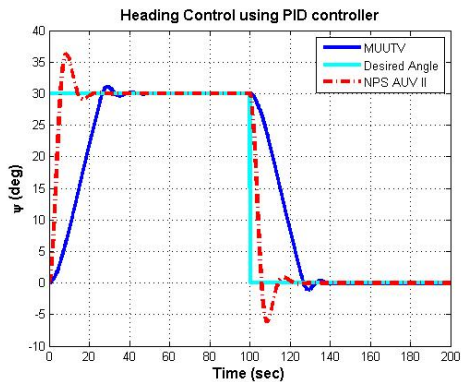
4.2.1 PID 제어기

방향제어는 식(11)을 이용하여 방향타의 각 δ_r 을 연산하도록 하였으며, 그림 9는 PID 제어기를 사용한 방향제

어 시뮬레이션에 대한 결과이다. 방향제어도 NPS AUV II와 비교하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 조건은 100초 동안은 진행방향에서 우현방향으로 30°만큼 방향을 변화시키고 그 후 다시 초기 각도로 돌아오는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 초기 속도는 1.8m/s이다.

$$\delta_r(t) = K_p(\psi(t) - \psi_d) + K_d r(t) \quad (11)$$

방향제어의 경우에도 AUV II가 MUUTV보다 운동성능이 우수함을 볼 수 있다. 직사각형(Flatfish) 형태인 NPS의 AUV II가 MUUTV보다 선체가 작고 관성모멘트가 작기 때문에 운동응답이 빠르게 나타나고 있음을 볼 수 있다.



[그림 9] Heading control result using PID controller

4.2.2 슬라이딩모드 제어기

제어기 설계를 위한 수평평면의 선형화된 운동방정식은 식(12)와 (13)과 같으며, 방향각 제어를 위한 슬라이딩 모드 제어기의 제어입력은 식(14)와 같다.

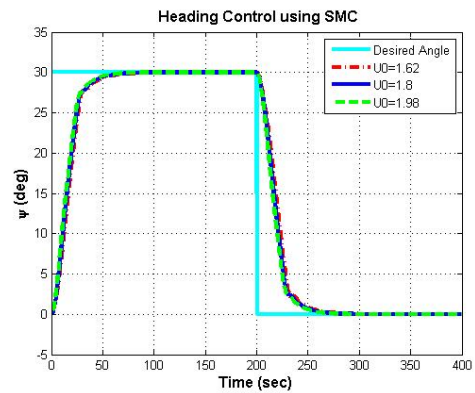
$$\begin{aligned} (m - Y_v)\dot{v} - Y_r\dot{r} &= Y_v v + (Y_r - m\mu)r + Y_{\delta_r}\delta_r \\ -N_v\dot{v} + (I_z - N_r)\dot{r} &= N_v v + N_r r + N_{\delta_r}\delta_r \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1074 & -1.221 & 0 \\ -0.0066 & -0.1706 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0069 \\ 0.0123 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (13)$$

$$\delta_r = 4.37v - 32.5r - 61.6\dot{\psi}_d + 1.8 \tanh(\sigma_r/0.08) \quad (14)$$

여기서 σ_r 는 방향제어시의 슬라이딩평면이며, $\sigma_r = 0.3762\dot{v} + 1.0959\dot{r} + \dot{\psi}$ 이다.

그림 10은 슬라이딩모드 제어기를 방향제어에 적용한 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 수심제어의 경우와 마찬가지로 초기속도 1.8m/s를 기준으로 외란에 의하여 속도가 10%씩 증가/감소한 경우에 대한 비교를 하였다. 이 결과 슬라이딩모드 제어기의 강인성을 확인할 수 있었다.

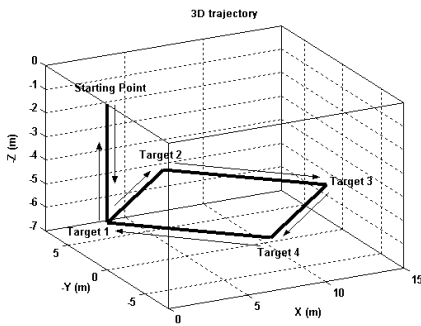


[그림 10] Heading control result using sliding mode controller

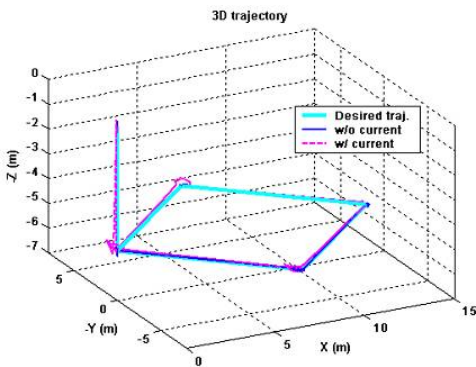
4.3 운항 제어

MUUTV는 목표지점에서의 임무를 수행하고 다시 모션으로 회귀해야 하기 때문에 이를 위해 경로추적에 대한 운항제어 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11과 같은 경로를 미리 설정해 놓고, 출발점에서부터 Target 1부터 Target 4를 거쳐 다시 출발점으로 돌아오는 경로에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

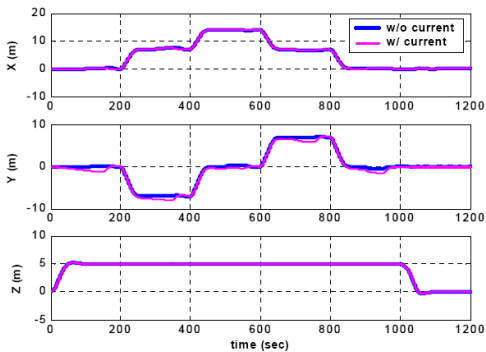
그림 12는 이 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 조류가 있는 경우와 없는 경우에 대해서 시뮬레이션을 실시하였다. 조류는 0.1m/s로 동쪽에서 서쪽으로 흐른다고 가정하였다. 이때 조류가 있는 경우에는 약간의 경로이탈이 생기는 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 MUUTV가 설계된 경로를 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. 그림 13은 운항제어 시뮬레이션의 시간 경과에 따른 잠수정의 위치를 X, Y, Z 방향에 대해서 나타낸 결과이며, 조류가 있는 경우와 없는 경우에 대해서 나타내었다.



[그림 11] Path planning for navigation control



[그림 12] Simulation result(3D trajectory)



[그림 13] Simulation result(Vehicle position)

5. 결론

본 논문에서는 만타형상 무인잠수정의 6자유도 운동 해석을 위한 수학적모델을 전개하였으며, 이를 기반으로 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 운동성능을 해석하였으며, 수심과 방향에 대한 제

어를 설계하여 제어성능에 대한 결과도 제시하였다. 설계된 제어기의 제어성능을 비교하기 위해 NPS의 AUV II와 성능을 비교하였다. 또한, 설계된 제어기는 MUUTV의 임무수행을 위한 자율운항 시뮬레이션을 수행하는데 사용되었다.

본 논문을 통해 제시된 시뮬레이션 결과들은 MUUTV의 운동성능 해석에 유용하게 사용될 것으로 판단되며, 향후 MUUTV의 목적에 더욱 부합한 제어기 설계에 기초가 될 것으로 사료된다. 향후 연구로는 다양한 제어방법을 적용하여 각각의 제어기의 특성을 파악하고, 개발된 시뮬레이션 프로그램의 성능을 향상시키고자 한다.

참고문헌

- [1] 전봉환, 이판목, 임용근, 홍석원, “무인잠수정의 통합 시뮬레이션 환경의 개발,” 제3회 해상무기체계 발전 세미나, pp. 81-87, 2000. 6.
- [2] 전봉환, 이판목, 이계홍, 홍석원, 이지홍, “네 대의 주추진기를 이용한 무인잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어 - 시뮬레이션 및 실험,” 해양공학회지 제 19권 제 2호, pp. 67-73, 2005. 4.
- [3] 손경호, 이승건, 하승필, “Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학적모델 및 조종응답 특성,” 대한조선학회 논문집, 제 43권 4호, pp. 339-413, 2006. 8.
- [4] Gertler, M., and Hagen, G. R., “Standard equations of motion for submarine simulations,” NSRDC Report No. 2510, 1967.
- [5] Abkowitz, Martin A., “Stability and Motion Control of Ocean Vehicles,” The MIT Press, Cambridge, 1969.
- [6] Feldman, J., “DTNSRDC Revised Standard Submarine Equation of Motion,” Report No. DTNSRDC/SPD-0393-09, Washington, D.C., 1979.
- [7] Fossen, T.I., “Guidance and Control of Ocean Vehicles,” John Wiley & Son, New York, 1994.
- [8] Healey, A. J. and Lienard, D., “Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles,” IEEE J. of Oceanic Engineering. Vol. 18, No. 3, 1993.
- [9] 이승건, 손경호, 이상의, 황성준, 서정호, “만타형 수중운동체의 사항시험에 관한 연구,” 한국항해항만학회지, 제 29권, 제 8호, pp. 679-684, 2005. 10.
- [10] 김준영, “Controller Design for an Autonomous Underwater Vehicle Using Estimated Hydrodynamic Coefficients,” 해양공학회지 제 20권 제 6호, pp. 7-17, 2006. 12.

부록 A MUUTV의 파라미터 및 유체동역학 계수

$$\begin{aligned}
 m' &= 0.036900 \\
 I_{xx}' &= 0.000316, & I_{yy}' &= 0.001749, & I_{zz}' &= 0.001749 \\
 x_G' &= -0.027760, & z_G' &= 0.019200 \\
 x_B' &= -0.027760, & z_B' &= 0.002900 \\
 X_u' &= -0.005535 \\
 Y_p' &= -0.000252, & Y_v' &= -0.018861, & Y_r' &= 0.001803 \\
 Z_q' &= -0.009942, & Z_w' &= -0.108529 \\
 K_p' &= -0.002755, & K_r' &= 0.000000, & K_v' &= -0.000252 \\
 M_q' &= -0.004672, & M_w' &= -0.009942 \\
 N_p' &= 0.000000, & N_r' &= -0.000894, & N_v' &= -0.000894 \\
 Y_v' &= -0.037998, & Y_r' &= 0.003183, & Y_{\delta r}' &= -0.003421 \\
 Z_w' &= -0.580529, & Z_q' &= 0.024560, & Z_{\delta s}' &= 0.016149 \\
 K_p' &= -0.010422, & K_v' &= 0.000110, & K_r' &= -0.000009 \\
 K_{\delta r}' &= 0.000036 \\
 M_w' &= 0.082078, & M_q' &= -0.011336, & M_{\delta s}' &= 0.004506 \\
 N_v' &= -0.000124, & N_r' &= -0.001784, & N_p' &= -0.000252 \\
 N_{\delta r}' &= 0.001497 \\
 X_{uu}' &= -0.005016, & X_{vv}' &= 0.007713, & X_{ww}' &= 0.414507 \\
 X_{wq}' &= -0.108529, & X_{vr}' &= 0.018861, & X_{qq}' &= -0.009942 \\
 X_{rr}' &= -0.001803, & X_{pr}' &= 0.000252, & X_{\delta r \delta r}' &= -0.001656 \\
 X_{\delta s \delta s}' &= -0.008116 \\
 Y_{wp}' &= 0.108529, & Y_{pq}' &= 0.009942, & Y_{v|v|}' &= -0.031930 \\
 Y_{v|r|}' &= 0.000000 \\
 Z_{uu}' &= 0.000000, & Z_{vp}' &= -0.018861, & Z_{pp}' &= -0.000252 \\
 Z_{pr}' &= 0.001803, & Z_{w|w|}' &= -0.477640, & Z_{w|q|}' &= 0.000000 \\
 K_{wp}' &= 0.000252, & K_{qr}' &= 0.003778, & K_{vq}' &= -0.008139 \\
 K_{wr}' &= 0.008139, & K_{vw}' &= -0.089668, & K_{v|v|}' &= 0.000000 \\
 M_{uu}' &= 0.000000 & M_{vr}' &= -0.000252, & M_{vp}' &= -0.001803 \\
 M_{rr}' &= 0.000000, & M_{pp}' &= 0.000000, & M_{pr}' &= -0.001861 \\
 M_{w|w|}' &= 0.016490, & M_{w|q|}' &= 0.000000 \\
 N_{vp}' &= -0.009942, & N_{qr}' &= 0.000000, & N_{pq}' &= -0.001916 \\
 N_{vp}' &= 0.000252, & N_{v|v|}' &= 0.009500, & N_{v|r|}' &= 0.000000
 \end{aligned}$$

변 승 우(Seung-Woo Byun)

[정회원]



- 2003년 2월 : 제주대학교 해양 계측공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 해양 정보시스템공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 해양시스템공학과 박사과정

<관심분야>

수중로봇 설계 및 제어

김 준 영(Joon-Young Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 인하대학교 선박 해양공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 인하대학교 선박 해양공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 정밀 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 제주대학교 해양시스템공학과 교수

<관심분야>

수중로봇 설계 및 제어, 수중로봇 모델링 및 관측기설계