

만타형 무인잠수정의 제어기 설계 및 운동성능 해석을 위한 시뮬레이션 프로그램 개발

변승우*, 김준영*, 손경호**, 이승건***
*제주대학교 해양시스템공학과
**한국해양대학교 해양시스템공학과
***부산대학교 조선해양공학과
e-mail:gombau@jejunu.ac.kr

Simulation Program Development for Controller design and Performance analysis of Manta-type UUV

Seung-Woo Byun*, Joon-Young Kim*, Kyoung-Ho Sohn**,
Seung-Keon Lee**

*Dept of Ocean System Engineering, Jeju National University

**Pusan National University

***Korea Maritime University

요약

본 논문에서는 만타형상의 무인잠수정의 운동성능과 제어기설계에 대한 성능을 확인하기 위한 수학적 모델을 정립하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 본 논문에 사용된 수학적 모델은 6자유도 운동방정식을 이용하여 Matlab / Simulink를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 만타형상무인잠수정(Manta-type unmanned underwater test vehicle)의 동역학적 운동성능을 해석하였으며, 무인잠수정의 제어성능을 해석하기 위하여 PID(비례-미분-적분)제어기와 슬라이딩모드(Sliding mode)제어기를 설계하여 만타형상무인잠수정의 제어 성능을 해석하였다. 설계된 제어기는 무인잠수정의 수심제어와 방향각제어에 사용되었다. 설계된 제어기의 성능을 확인하기 위하여 미국 해군대학원(Naval Postgraduate School)의 AUV II와 비교하였다. 설계된 수심제어와 방향각 제어기를 이용하여 만타형무인잠수정의 설계 목표에 부합하는 항해제어시뮬레이션을 실시하였다.

1. 서론

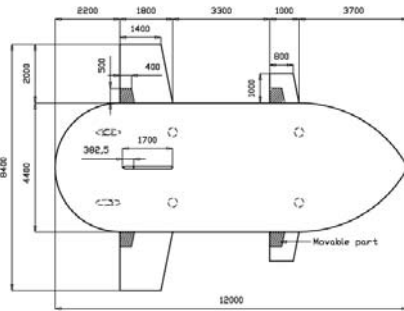
무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle; UUV)은 심해저 지형 조사나 광물자원의 탐사, 해양구조물의 조사 등의 민간작업을 위한 장비로서 뿐만 아니라 기뢰제거정(Mine Disposal Vehicle; MDV)이나 수중 유도무기와 같은 군사적 목적으로도 중요한 비중을 차지하고 있다. 무인잠수정은 크게 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)와 ROV(Remotely Operated Vehicle)로 분류된다. 무인잠수정은 유인잠수정에 비해 개발과 유지보수의 측면에서 많은 경비를 절감할 수 있지만, 운동 및 위치 제어성능을 보장

하는 고성능의 제어시스템이 필요하게 된다. 무인잠수정의 제어시스템 개발에는 많은 시험이 필요하게 되므로 이를 단축하기 위해서 수치모델에 의한 시뮬레이션이 보조적인 수단으로 이용된다[3]. 국내에서도 수중운동체의 운동특성과 운용시스템에 관련된 연구가 활발하게 수행되고 있다. 본 연구에서는 모함인 잠수함 동체 상부의 일부로써 장착되어 있다가 필요시에만 모함으로부터 분리되어 자료 획득 등 작전 수행에 이용되는 Manta형상 무인잠수정에 대한 유체동역학적 계수를 이용하여 운동성능 및 제어성능 검증을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 2장에서는 PMM 실험에 의한 유체동역학적 계수를 이용하여 시

물레이션을 위한 6자유도 수학모델을 구성하였고, 3장에서는 모델링을 기초로 시물레이션 프로그램을 설계하였고, 4장에서는 Manta형상 무인잠수정의 제어기 성능과 경로추적 성능을 확인하였다. 그리고 5장에서 시물레이션과 제어기 성능에 대한 결론을 제시하였다.

2. Manta형 무인잠수정의 수학모델

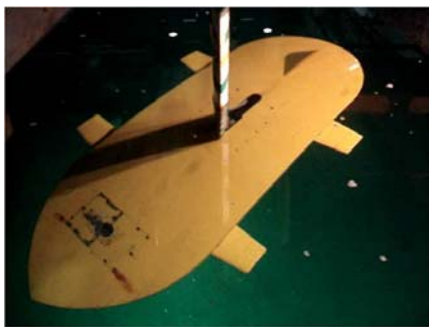
잠수정 모델은 무인잠수정의 동역학 운동 모델과 추진기, 제어판과 같은 구동모델로 구성된다. 잠수정의 3차원 운동을 시물레이션 하기 위하여 6자유도 비선형 운동방정식으로 표현되며 복잡한 유체동역학 계수들을 포함한다. 방정식에 포함되는 유체동역학적 계수들은 손경호 등[3]에 의해서 얻어진 값을 사용하였으며, 무인잠수정의 제원은 표 1에 나타내었고, 형상은 그림 1과 같다. 또한, 유체동역학 계수를 얻기 위한 PMM test에 사용된 구속모형은 그림 2와 같다.



[그림 1] Configuration of MUUTV

[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

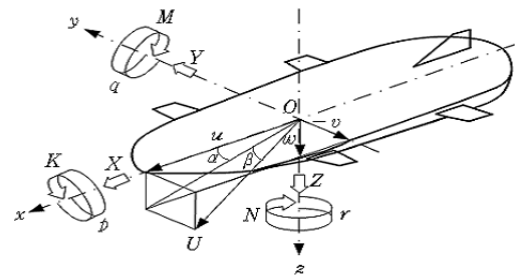


[그림 2] MUUTV model for PMM test

본 연구에서 채택한 무인잠수정은 그림 1과 같이 동체 측면에 승강 또는 자세 제어를 위한 수평타가 4개 설치되어 있으며, 동체 선미 상부와 하부에 각각 수직관을 설치하고 있으며, 하부 수직관 후단부에는 방향 제어를 위해 수직타가 설치되어 있다. 또한 바닥 4곳에 호버링 (hovering)을 위한 추진기와 선미에 추진을 위한 2개의 추진기가 설치되어 있다.

무인잠수정의 6자유도 운동방정식은 Gertler/Hagen의 NSRDC보고서에서 잠수함 시물레이션의 표준이 되는 식을 정리하였으며[7], 이를 기반으로 Abkowitz[5]와 Feldman[6]이 실제와 더욱 근사한 운동방정식을 수정하여 제시하였다.

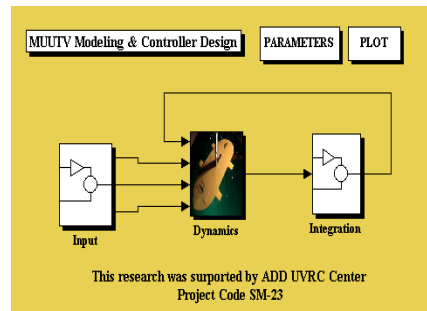
Fossen[8]은 잠수정의 비선형제어를 위한 비선형 모델을 제시하였으며, Healey / Lienard [9]는 NPS AUV II의 운동방정식을 제시하였다. 6자유도 수학 모델은 그림 3과 같이 지구고정좌표계와 동체고정좌표계를 사용하고 있으며, 선수방향을 x, 우현방향을 y, 선체의 연직하방을 z축으로 잡고 있다.



[그림 3] Coordinate system and notations

3. 시물레이션 프로그램

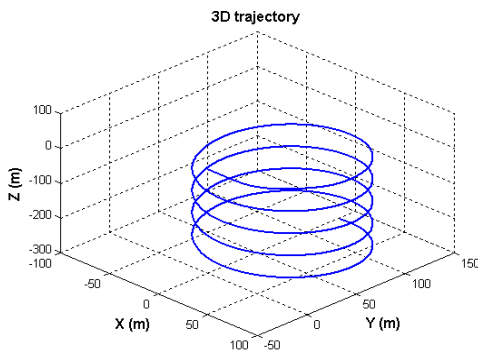
제안된 Manta형상 UUV의 수학모델을 Matlab의 Simulink를 이용하여 시물레이션 프로그램을 개발하였다. Matlab은 제어시스템의 해석과 설계에 강력한 툴을 많이 포함하고 있으며, Simulink는 비선형 시물레이션에 편리하다. 따라서 그림 4와 같이 Matlab/Simulink를 이용하여 시물레이션 프로그램을 개발하였다.



[그림 4] Simulation program for MUUTV

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. 그림 4에서 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 MUUTV의 운동성능을 해석하였다. 시뮬레이션 조건은 초기속도 2.5m/s에서 승강타를 30°, 방향타를 30°준 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

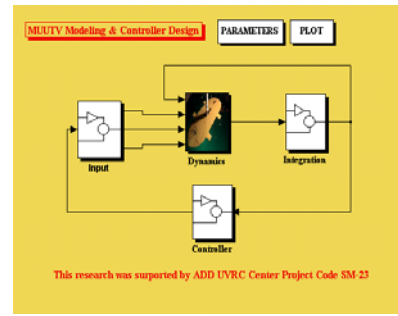
그림 5는 위 조건에 대한 MUUTV의 시뮬레이션 결과를 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 방향타와 승강타를 동시에 입력으로 주고 초기속도를 2.5m/s로 주었을 때 나선형 운동을 하면서 수심방향으로 들어가는 양상을 보여주고 있다.



[그림 5] Dynamic performance of MUUTV

4. 제어기 설계

MUUTV는 해양의 열악한 환경 하에서 자율 항주하면서 임무를 완수하고 모션으로 회귀해야하기 때문에 불확실성에 대하여 강인한 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. 본 논문에서는 얻어진 파라미터를 이용하여 모델링을 하였고, 고전제어 방법인 PID제어기를 설계하고자 하며, 설계된 제어기는 그림 6과 같다.



[그림 6] Simulink model for the depth and heading control

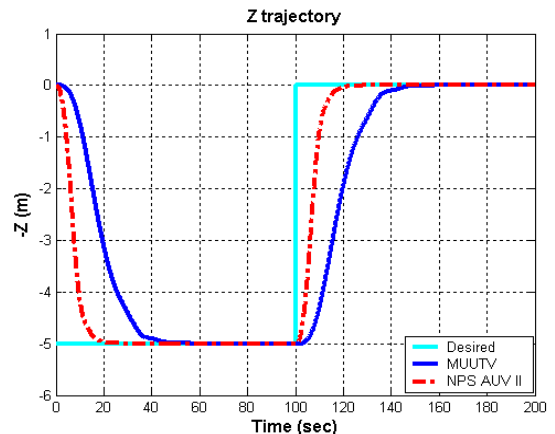
4.1. 수심제어

4.1.1 PID 제어기

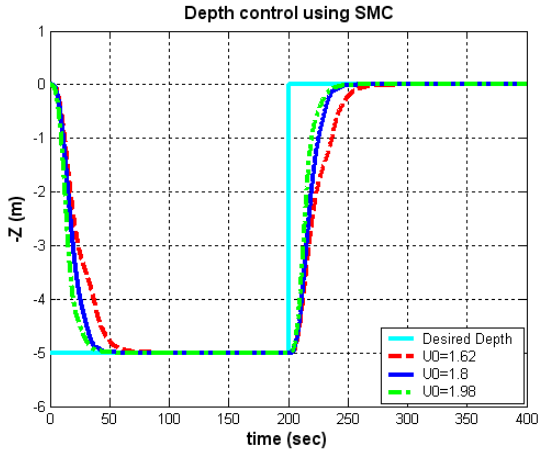
PID 제어기를 이용한 수심제어는 식 (1)을 이용하여 승강타의 각 δ_s 를 연산하도록 하였으며, 그림 7은 PID 제어기를 사용한 수심제어 시뮬레이션에 대한 결과이며, 설계된 제어기의 성능을 비교하기 위해 Healey/Lienard의 NPS AUV II와 비교하여 시뮬레이션을 수행하였으며[9], 시뮬레이션 조건은 100초 동안은 수심 5미터를 유지 하고, 그 후 다시 초기 수심으로 돌아오는 경우에 대해 시뮬레이션을 실시하였으며, 초기속도는 1.8m/s이다.

$$\delta_s(t) = K_p(Z(t) - Z_d) + K_\theta \theta(t) + K_q q(t) \quad (1)$$

그림 7의 결과에서 보면 AUV II가 MUUTV보다 크기가 상대적으로 작아서 Manta형상 보다 목표수심을 조금 더 빨리 찾아 수렴해 나가는 모습을 보이고 있다. 그러나 MUUTV도 약 40초 정도의 시간이 지난 후에 목표수심인 5m로 수렴해 가는 것 볼 수 있다.



[그림 7] Depth control result using PID controller



[그림 8] Depth control result using sliding mode controller

4.1.2 슬라이딩모드 제어기

슬라이딩모드 제어기를 이용한 수심제어는 식 (2)의 선형화된 운동방정식을 이용하여 식(3)의 제어기 모델을 설정하였다. 그림 8은 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 수심제어 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 조건은 PID 제어기의 경우와 마찬가지로 수심 5m하강 후 다시 수면으로 돌아오는 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였고, 초기속도 1.8m/s를 기준으로 하여 초기속도를 각각 10%씩 증가/감소한 경우에 대해 비교를 실시하였다. 이 결과 속도가 증가 및 감소하는 경우에도 슬라이딩모드 제어기가 강인성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} (I_y - M_q)\dot{q} &= M_q q - z_C W \theta + M_{\delta_s} \delta_s \\ \dot{\theta} &= q \\ \dot{Z} &= -u \theta \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2648 & -0.0902 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0158 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (3)$$

4.2. 방향각 제어

4.2.1 PID 제어기

방향각 제어는 식(4)를 이용하여 방향타의 각 \$\delta_r\$ 을 연산하도록 하였으며, 그림 9는 PID 제어기를 사용한 방향각제어 시뮬레이션에 대한 결과이며, 방향각 제어기도 NPS AUV II와 비교하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 조건은 100초 동안은 진행방향에서 우현방향으로 30°만큼 방향을 변화 시키고 그 후 다시 초기 각도로 돌아오는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 초기 속도는 1.8m/s이다.

$$\delta_r(t) = K_p(\psi(t) - \psi_d) + K_d \dot{\psi}(t) \quad (4)$$

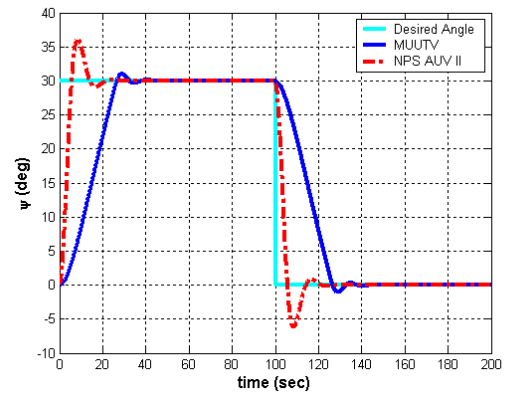
방향각 제어의 경우에도 AUV II 가 MUUTV보다 횡 방향으로의 이동 성능이 우수함을 볼 수 있다. Flatfish타입인 NPS의 AUV II가 Manta형인 MUUTV보다 선체가 작고 관성모멘트가 작기 때문에 운동응답이 빠르게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

4.2.2 슬라이딩모드 제어기

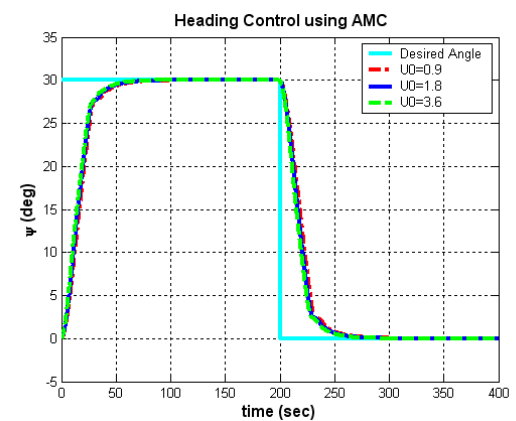
제어기 설계를 위한 수평평면의 선형화된 운동방정식은 식(5)와 같으며, 방향각 제어를 위한 슬라이딩모드 제어기의 모델은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} (m - Y_v)\dot{v} - Y_r \dot{r} &= Y_v v + (Y_r - m\mu)r + Y_{\delta_r} \delta_r \\ -N_v \dot{v} + (I_z - N_r)\dot{r} &= N_v v + N_r r + N_{\delta_r} \delta_r \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1074 & -1.221 & 0 \\ -0.0066 & -0.1706 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0069 \\ 0.0123 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (6)$$



[그림 9] Heading control result using PID controller

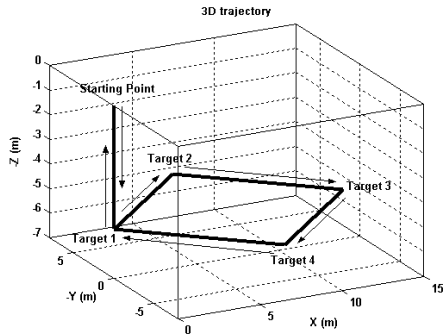


[그림 10] Heading control result using sliding mode controller

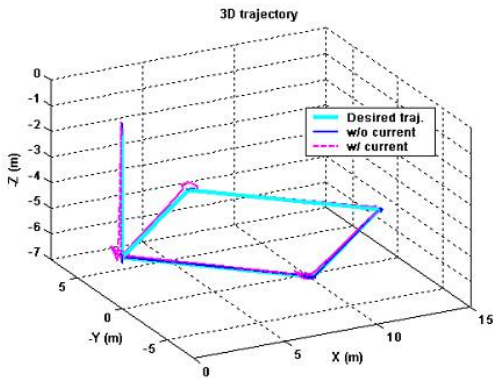
4.3. 운항 제어

MUUTV는 목표지점에서의 임무를 수행하고 다시 모션으로 회귀해야 하기 때문에 이를 위해 경로추적에 대한 운항제어 시뮬레이션을 수행하였다. 그림

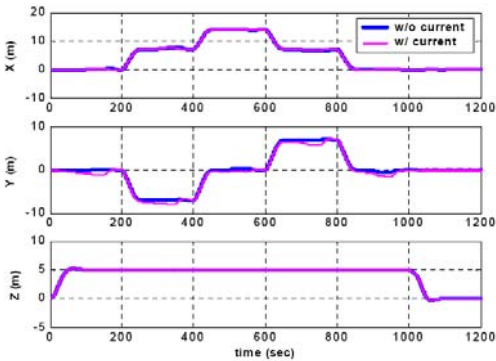
11과 같은 경로를 미리 설정해 놓고, 출발점에서 부터 Target 1부터 Target 4를 거쳐 다시 출발점으로 돌아오는 경로에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.



[그림 11] Path planning for navigation control



[그림 12] Simulation result(3D trajectory)



[그림 13] Simulation result(Vehicle position)

5. 결론

본 논문에서는 Manta형상 무인잠수정의 3차원에서의 운동제어를 위한 수학적모델을 기반으로 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 운동성능을 해석하였다. 또한 수심과 방향에 대한 제어기를 설계하여 제어 성능에 대한 결과도 제시 하였다. 설계된 제어기는 제어 성능을 비교하기 위해 NPS의 AUV II와 성능을 비교하였다. 설계된 제어기는 MUUTV의 임무수행을 위한 경로 추적 시뮬레이션을 수행하는데 사

용되었다.

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 제어기를 설계하여 각각의 제어기의 특성을 파악하고, 개발된 시뮬레이션 프로그램의 성능을 향상시키고자 한다.

후기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 설치된 수중운동체특화연구센터(UVRC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김준영, “Controller Design for an Autonomous Underwater Vehicle Using Estimated Hydrodynamic Coefficients,” 해양공학회지 제 20권 제 6호, pp. 7-17, 2006. 12
- [2] 손경호, 이승건, 하승필, “Manta형 무인잠수정의 6자유도 운동 수학적모델 및 조종응답 특성,” 대한조선학회 논문집, 제 43권 4호, pp. 339-413, 2006. 8.
- [3] 전봉환, 이관목, 임용곤, 홍석원, “무인잠수정의 통합시뮬레이션 환경의 개발,” 제3회 해상무기체계 발전 세미나, pp. 81-87, 2000. 6
- [4] 전봉환, 이관목, 이계홍, 홍석원, 이지홍, “네 대의 주 추진기를 이용함 무인잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어 - 시뮬레이션 및 실험,” 해양공학회지 제 19권 제 2호, pp. 67-73, 2005. 4.
- [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] Gertler, M., and Hagen, G. R., “Standard equations of motion for submarine simulations,” NSRDC Report No. 2510, 1967.
- [8] T.I. Fossen, “Guidance and Control of Ocean Vehicles,” John Wiley & Son, New York, 1994.
- [9] A. J. Healey and D. Lienard, “Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles,” IEEE J. of Oceanic Engineering. Vol. 18, No. 3, 1993.