

수중탐사용 호버링 무인잠수정 NOAH의 테스트베드 개발

변승우¹, 김준영^{2*}

¹제주대학교 해양시스템공학과

²제주대학교 해양시스템공학과 / 제주대학교 해양과환경연구소

Development of Hovering AUV 'NOAH' Test-bed for Underwater Explorations

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 논문은 호버링 무인잠수정 'NOAH'의 설계과정을 언급하였고 그 성능을 확인하기 위한 수학모델을 정립하고 실험을 실시하였다. 시뮬레이션과 수조실험을 통해 성능을 검증하였으며, 무인잠수정 NOAH의 설계목표인 자세 및 위치제어를 위한 기본실험을 실시하였다. 설계된 무인잠수정은 일반적인 ROV형태의 외형을 갖고 있으며, 이러한 외형은 NOAH의 제작목적에 따라 다양한 장비를 설치하여 실험하기가 용이하며 크기는 0.75m×0.5m×0.5m이다. 추진을 위한 450watt의 용량을 갖는 4개의 추진기가 주행방향, 횡방향, 수직방향으로 설치되어져 있고 수심을 측정하기 위한 압력센서와 방향각을 측정하기 위한 자력컴파스가 설치되었다. 잠수정의 주행을 제어하기 위해 펜티엄 III의 소형 온보드 컴퓨터에 운영체제는 윈도우 XP를 탑재하였다. 제작된 호버링 무인잠수정 NOAH는 다양한 환경에서 여러 가지 제어알고리즘을 적용하여 성능을 개선하고 실험을 하기 위한 테스트베드로 운영된다.

Abstract This paper describes the design and performance of a hovering AUV 'NOAH' constructed at Jeju National University. We analyse the dynamic performance of NOAH using simulation program and carry out depth control test at small basin. The main purpose of NOAH is to carry out fundamental tests on its attitude control and position control. Its configuration is similar to general ROV appearance for underwater works and dimension is 0.75m×0.5m×0.5m. It has 4 thrusters of 450watt for longitudinal/lateral/vertical propulsion and is equipped with a pressure sensor for measuring water depth and a magnetic compass for measuring heading angle. The navigation of the vehicle is controlled by an on-board Pentium III-class computer, which runs with the help of the Windows XP operating system. These give us an ideal environment for developing various algorithm which are needed for developing and advanced hovering AUV.

Key Words : AUV(Autonomous Underwater Vehicle), Hovering AUV, Mathematical model, Attitude control, Position control

1. 서론

수중로봇(Underwater Robotic Vehicles)에 대한 연구는 1990년대 초부터 활발하게 진행되어 왔으며, 사람이 들어갈 수 없는 극한 환경에서 많은 역할을 담당해 오고 있

다. 예를 들면, 심해저나 군사 작전지역 및 원자력 발전을 하는 곳에서 많이 이용되고 있다[1]. 특히, 해양에서 자료 수집, 해저조사, 해저공사 및 해양구조물의 보수와 유지를 위해 필수불가결한 도구로 사용되고 있다. 이러한 수중로봇은 과거의 과학적인 연구용이나 군사적인 목적의

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

*교신저자: 김준영(jkim@jeju.ac.kr)

접수일 09년 10월 30일

수정일 10년 02월 04일

게재확정일 10년 02월 24일

범위를 벗어나 일반 산업용으로도 필요성이 점차 증대되어 고성능의 수중로봇 개발이 절실히 요구되고 있다. 최근 심해저 자원 및 생물 탐사에 대한 연구가 활발하게 이루어지면서 그 역할에 대한 기대가 점차 증가하고 있다.

수중로봇에는 대표적으로 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 ROV(Remotely Operated Vehicle)가 있으며, AUV는 장거리 주행용으로 주로 사용되며 ROV는 특정지역의 작업용으로 사용되고 있다. 최근에는 AUV와 ROV의 성능이 결합된 형태의 수중로봇이 개발되고 있는데, 자율주행 성능을 갖는 ROV 및 일정공간에서 작업용으로 사용되는 AUV등이 대표적인 예이다. 일정공간에서 작업용으로 사용되는 AUV는 자세제어(Attitude Control) 및 위치제어(Position Control) 기능이 매우 중요하며 이러한 AUV를 호버링(Hovering) AUV라고 한다.

본 논문에서는 호버링 AUV 'NOAH'의 설계과정에 대해 언급하였으며, 제작된 NOAH는 실험실 수조 내에서 AUV의 자세 및 위치 제어기의 성능과 센서장비의 성능 그리고 호버링 AUV의 성능개발을 위한 실험용 테스트베드(Test-bed)로 사용될 것이다.

2. 설계목표

무인잠수정의 설계과정에서 사용 목적을 설정하는 일은 무엇보다도 중요하며, 이에 따라서 적절한 선체형상, 적재하중, 항해수심 및 주행속도 등이 결정되어 진다. 선체형상은 AUV의 사용목적에 따라 결정되고, 적재하중은 AUV의 자세나 위치를 측정하기 위한 센서와 AUV의 구동장치 그리고 임무수행을 위한 센서들에 의해 결정된다. 항해수심은 압력용기의 내구성에 따라 결정되며, 주행속도는 저항력이나 추진력 그리고 유체동역학 계수에 의해 결정된다.

제주대학교에서 제작한 NOAH의 사용목적은 실험실 수조 내에서 AUV의 자율주행 성능과 센서 및 제어기의 성능을 실험하기 위한 테스트베드의 역할을 담당하고 있다. 테스트베드의 실험을 통해서 제어 알고리즘을 개선할 수 있고, 추진 장치의 배치 및 계측장치의 성능을 개선할 수 있는 유용한 도구로 사용될 것이다. 이러한 호버링 AUV의 사용 목적을 이루기 위해 다음과 같은 설계목표를 설정하였으며 Table 1에 상세하게 나타내었다.

[표 1] NOAH의 설계 사양

Parameters	Specification
선형	프레임타입
제원	0.75m × 0.5m × 0.5m
질량	70kg
작업수심	20m
최고속도	2m/s
추진기	450watt × 4개
제어모드	4자유도 운동제어 (Surge, Sway, Heave, Yaw)
컴퓨터	On-board PC (Pentium III 700MHz)
항해센서	압력계, 컴퍼스
배터리	12V-12AH 납축전지 × 4개 18.5V-3.2AH 리튬폴리머 × 1개
통신	RS-232, Ethernet 통신

3. NOAH의 구성

3.1 전체구조

제작된 NOAH의 전체 구조는 그림 1과 같다. 설계된 AUV의 사용목적은 성능개선을 위한 실험용 테스트베드로써 사용하고자 한다. 이를 위해 프레임 구조의 선체를 채택하였고, 이는 각종 센서를 장착하기 쉽고 공간 활용도를 높이는 장점이 있다. 또한 2개의 직진방향 추진기와 1개의 수직추진기 및 1개의 횡방향 추진기를 각각 장착하여 4자유도 운동을 제어할 수 있도록 하였다.



[그림 1] NOAH의 전체구조

3.2 추진기

추진기는 Tecnydyne사의 BLDC 모터를 사용하고 있으며 그림 2와 그림 3과 같다. 입력전압은 24V이며 450watt가 최대소비 전력이며 Model 280은 전후진시 5.4kgf로 동일한 추력을 갖고 있으며, Model 300은 전진

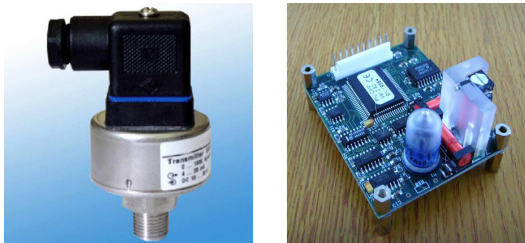
시 5.4kgf의 추력을 갖고 후진시 3.6kgf의 추력을 갖는 추진기이다. 전진방향으로 2개의 추진기를 사용하고, 수직과 수평방향으로 각각 1개의 추진기를 사용하며 4자유도 운동을 제어할 수 있다.



[그림 2] Model 280 Thruster [그림 3] Model 300 Thruster

3.3 센서

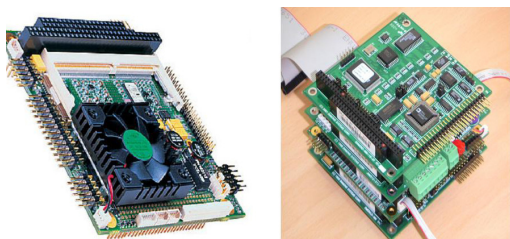
수심과 방향각 측정을 위해 압력계와 컴파스를 사용하며 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 압력계는 수심 20m까지 측정이 가능하고 4~20mA의 아날로그 신호를 출력하며, 컴파스는 50°의 기울기에서도 값을 보정해준다. RS-232 통신을 사용하며 6.3cm×5cm×3.1cm의 소형 컴파스이며 롤/피치/요우각을 출력으로 제공한다.



[그림 4] Pressure sensor [그림 5] Magnetic compass

3.4 On-board PC

NOAH의 모든 센서와 추진기를 실시간으로 제어하고 모니터하기 위해 그림 6과 같은 소형의 On-board PC를 사용하고 있다. 크기는 10cm×9cm이며 CPU는 Pentium III 700MHz 이다. I/O 보드를 포함하며 RS-232/485 및 Ethernet 통신을 지원한다. OS는 Windows XP를 사용하며 제어용 프로그램은 C/C++을 사용한다.



[그림 6] On-board PC (PC104)

3.5 전원

AUV는 자율운항하기 때문에 전원을 독립적으로 보유해야 한다. 따라서 AUV의 운용에서 가장 중요한 문제로 배터리 설계가 부각된다. 사용되는 배터리의 용량에 따라서 AUV의 운항 범위 및 작업 시간이 결정되기 때문이다. NOAH의 전원은 그림 7의 12V 12AH 납축전지와 그림 8의 18.5V 3.2AH의 리튬폴리머 배터리 등 두 종류의 배터리가 사용되었다.

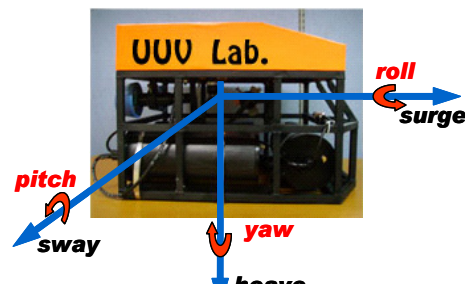


[그림 7] Lead-acid [그림 8] Lithium polymer

4. NOAH의 수학모델 및 제어기 설계

대다수 AUV의 수학적 모델은 6자유도의 운동방정식으로 표현되며, 상당수의 유체동역학 계수에 의한 힘과 모멘트로 모델링되어 있다. AUV 모델링에 관련된 많은 연구가 진행되어 왔는데[2], Gertler와 Hagen[3]은 잠수함의 운동 해석에 있어서 표준이 되는 운동방정식을 정리하였고, Feldman[4]은 실제와 더욱 근사한 수정된 운동방정식을 제시하였다. Fossen[5]은 잠수정의 비선형 제어시스템 설계를 위한 모델식을 전개하였고, Healey와 Lienard[6]는 6자유도의 비선형 운동방정식과 유체동역학 계수를 제시하였다.

NOAH의 운동성능을 해석하기 위하여 본 논문에서는 6자유도의 운동방정식을 사용하였으며 수학적 모델을 위한 좌표계는 그림 9와 같다.



[그림 9] Coordinate system of NOAH

6자유도의 운동은 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway),

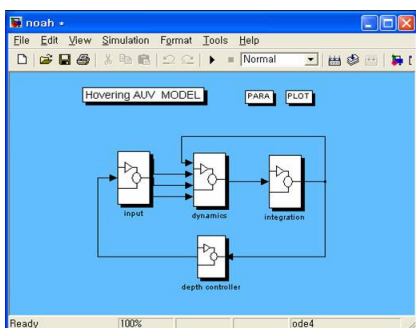
상하동요(Heave)의 병진운동과 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 회전운동으로 분류되며 운동방정식은 식(1)과 같다. 전개된 6자유도 운동방정식을 Matlab의 Simulink를 이용하여 NOAH의 운동성능을 해석하는 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다[7].

$$\begin{aligned}
 m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\ddot{v} + ur - wp + x_G(pq - \dot{r}) - y_G(\dot{p}^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p})] &= Y \\
 m[\ddot{w} - uq + vp + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p}) - z_G(\dot{p}^2 + q^2)] &= Z \\
 I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{yz}(\dot{q}^2 - r^2) - I_{xz}(pq + \dot{r}) \\
 + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} + ur - wp)] &= K \\
 I_y\dot{q} + (I_x - I_z)pr - I_{xy}(qr + \dot{p}) + I_{yz}(pq - \dot{r}) + I_{xz}(\dot{p}^2 - r^2) \\
 - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - vr + wq)] &= M \\
 I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{xy}(\dot{p}^2 - q^2) - I_{yz}(pr + \dot{q}) + I_{xz}(qr - \dot{p}) \\
 + m[x_G(\dot{v} + ur - wp) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned} \tag{1}$$

또한, NOAH의 자세 및 위치를 제어하기 위하여 구성이 간단하고 제어이득을 조절하기 용이한 PID 제어를 설계하였으며 Matlab/Simulink로 구성된 제어기는 그림 10과 같다. NOAH는 1개의 수직추진기로 수직운동을 제어하며, 수심제어에 사용한 PID 제어기는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 u_c(t) &= k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \dot{e}(t) \\
 e(t) &= Z_d(t) - Z(t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

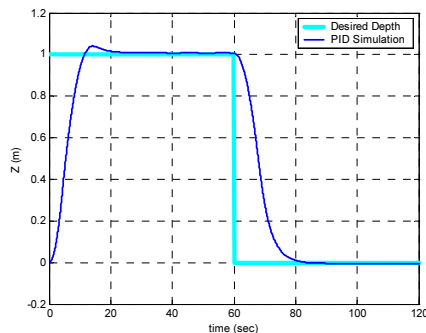
여기서 k_p 는 비례이득, k_i 는 적분이득, k_d 는 미분이득을 나타내고 $e(t)$ 는 수심오차로써 목표수심 $Z_d(t)$ 와 현재수심 $Z(t)$ 의 차이를 나타내며 $u_c(t)$ 는 제어입력으로써 수직추진기의 입력전압을 나타낸다.



[그림 10] Simulink model for the depth control

그림 11은 PID 제어기를 사용하여 수심제어에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 목표수심은 60초 동안 1m 깊이를 유지하다가 다시 초기수면으로 돌아오는

것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 약 10초 정도의 시간이 흐른 뒤 최대 오버슈트가 발생되고 20초가 지난 뒤 목표수심으로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.



[그림 11] Simulation result of depth control

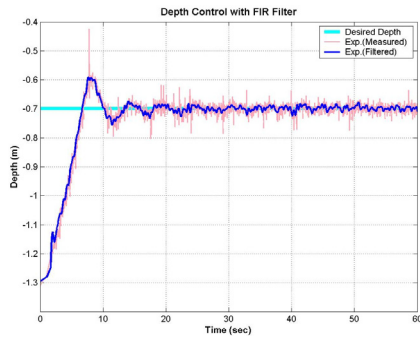
5. 수조실험 결과

설계된 PID 제어기의 성능을 검증하기 위한 수심제어 실험을 실시하였으며 그림 12에 보인 2m×1.2m×1.5m의 수조에서 수행하였다. 실험은 목표수심이 하나인 경우와 두개인 경우에 대해 실행하였으며, 시간은 0~60초까지 측정을 하였고 각각의 경우 시뮬레이션과 실제 실험 모두 목표수심을 잘 따라가는지를 비교하였다.

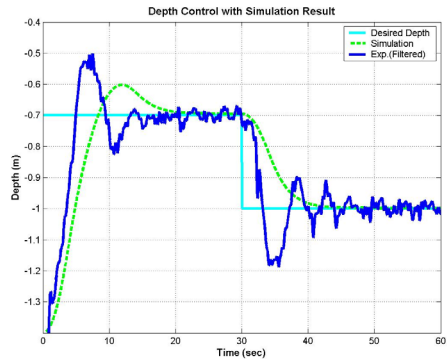


[그림 12] Experimental basin for control test

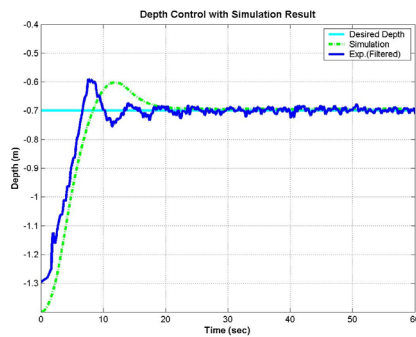
그림 13과 그림 14는 원하는 수심이 0.7m인 경우이며, 그림 13에서 보는바와 같이 압력센서에 의해 얻어진 수심이 진동을 하고 있지만 원하는 수심을 잘 따라가는 모습을 볼 수 있었고, 이 신호에는 전기적인 노이즈가 있어 FIR(Finite Impulse Response) 필터를 적용하여 노이즈 성분을 일정부분 제거한 후 적용하였다. 그림 14는 필터를 통과한 신호의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.



[그림 13] Depth control with FIR filter(1)

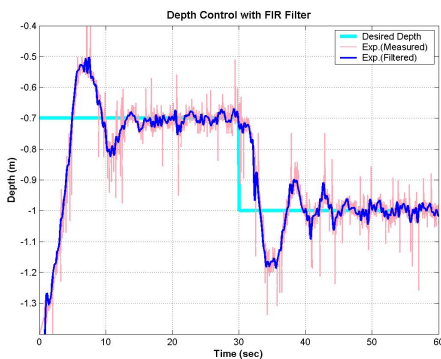


[그림 16] Depth control with sim. result(2)



[그림 14] Depth control with sim. result(1)

그림 15와 그림 16은 목표수심이 0.7m에서 30초경과 후 1m로 변하는 경우에 대해 실험을 수행하였다. 이 경우 역시 NOAH가 목표수심을 진동하면서 따라가는 것을 보여주고 있으며, 그림 15의 경우에도 압력센서에서 측정되는 값에 노이즈가 발생하여 FIR 필터를 적용하였으며, 그림 16에서는 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였고 유사한 성향을 보이며 목표수심을 잘 따라가고 있음을 보여주고 있다.



[그림 15] Depth control with FIR filter(2)

6. 결론

본 논문에서는 제주대학교에서 제작한 호버링 AUV NOAH의 설계과정에 대해 설명하였다. 호버링 AUV는 수중에서 작업하는 용도로 사용하는 AUV로써 자신의 자세와 위치를 유지하고 원하는 자세와 위치로 정확히 이동할 수 있는 능력이 중요한 설계목표가 된다. 제작된 NOAH는 이러한 기능을 실현하고 성능을 더욱 향상시키기 위해 구동장치 및 계측장치를 테스트하기 위한 테스트베드로써의 기능을 하게 될 것이다. 추진기는 4자유도의 운동을 제어할 수 있도록 평행추진기 2개, 수평추진기 1개와 수직추진기 1개를 장착하였다. 자세와 위치를 제어하고 운항을 제어할 센서로는 압력계와 자력 컴파스를 사용하고 있으며, AUV의 위치를 측정하기 위한 LBL(Long BaseLine) 시스템과 장애물 회피를 위한 소나(Sonar) 시스템은 추후 장착할 계획이다.

NOAH의 모든 센서와 추진기를 실시간으로 제어하고 모니터링 할 뿐만 아니라 전체시스템을 운용하기 위하여 소형 On-board PC를 사용하고 있으며, OS는 Windows XP를 사용한다. 또한, 모든 운용 프로그램은 외부의 Master PC로부터 Ethernet으로 다운받는 방식을 사용한다. 이와 같이 설계된 하드웨어는 실험실 수조내에서 테스트를 거쳐 더욱 개선된 기능의 호버링 AUV로 개발될 것이다.

향후 연구로는 자력 컴파스를 이용한 방향제어와 실험을 수행하여 NOAH의 호버링 기능을 완성하고, 실험을 통해 구동장치나 계측장치의 성능 및 제어알고리즘을 개선하는 것이다. 또한, LBL과 소나를 이용해 자신의 위치와 장애물의 위치를 정확히 인식하고 그러한 정보를 모션이나 공동 작업중인 다른 AUV에도 통신할 수 있는 통신시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

참고문헌

- [1] J. Yuh, "Development in Underwaer Robotics," Robotics and automation 1995 IEEE International Conference, Vol. 2, pp. 1862-1867, 1995.
- [2] B. H. Jun, P. M. Lee, J. H. Lee, S. W. Hong, J. H. Lee, "Speed, Depth and Steering Control of Underwater Vehicles with Four Stern Thrusters Simulation and Experimental results," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 67-73, 2005.
- [3] M. Gertler, G. R. Hagen, "Standard Equation of Motion for Submarine Simulations," NSRDC Report No. 2510, 1967.
- [4] J. Feldman, "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion," DTNSRDC/SPD-0393-09, 1979.
- [5] T. I. Fossen, "Underwater Robotic Vehicle Dynamics," Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994.
- [6] A. J. Healey, D. Lienard, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol. 18, No. 3, 1993.
- [7] S. W. Byun, J. Y. Kim, "Development of a Hovering AUV for Underwater Explorations," Journal of Ship and Ocean Technology, SOTECH, Vol. 11, No. 2, pp. 1-9, 2007.

김 준 영(Joon-Young Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 인하대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 인하대학교 선박해양공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 제주대학교 해양시스템공학과 교수

<관심분야>
수중로봇 설계 및 제어

변 승 우(Seung-Woo Byun)

[정회원]



- 2003년 2월 : 제주대학교 해양계측공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 해양정보시스템공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 해양시스템공학과 박사과정

<관심분야>
수중로봇 설계 및 제어