한국정밀공학회지 제 26 권 5 호 pp. 23-32 May 2009 / 23
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 5, pp. 23-32

◆ 특집 ◆ UUV(수중로봇) 기술

호버링형 AUV(자율 수중로봇)의 설계과정 및 제어실험

Design and Control of a Hovering Type AUV

김준영 [1,✉]
Joon-Young Kim [1,✉]

1 제주대학교 해양시스템공학과 (Department of Ocean System Engineering, Jeju National Univ.)
✉ Corresponding author: jkim@jejunu.ac.kr, Tel: 064-754-3485

Key Words: Hovering AUV (호버링형 자율 수중로봇), AUV (자율 수중로봇), Mathematical Model (수학모델), Depth Control (수심제어), Heading Control (방향제어), Navigation Control (운항제어)

1. 서론

해양탐사 및 해양개발을 위한 도구로써 1960 년대 중반까지는 유인잠수정(Manned Submersible)이 주류를 이루었고, 1990 년대까지는 ROV(원격조종 수중로봇)가 개발되어 사용되었다. 이는 사람이 들어갈 수 없는 극한 환경에서 역할을 담당할 수 있기 때문이다. 특히, 심해저나 군사작전 지역 및 원자력 발전소에서 수요가 많아지고 해양 자료수집, 해저조사, 해저공사 및 해양구조물의 유지와 보수를 위해 필수 불가결한 도구로 사용되었다.[1]

ROV 에서 한단계 진보된, AUV(자율 수중로봇)에 관한 연구는 1990 년대 초부터 활발하게 진행되어 왔다. AUV 는 장거리를 주행하며 비교적 넓은 영역을 탐사하는 항주형 AUV 와 특정지역의 정밀조사 및 작업용으로 사용하는 호버링형 AUV 의 두가지 형태로 발전되었다. 일정공간에서 작업용으로 사용되는 AUV 는 제자리에서 자세 및 위치를 제어하는 기능과 정밀한 위치이동 기능이 매우 중요하며, 이러한 기능을 갖는 AUV 를 호버링형 AUV 라고 한다. ROV 의 조종성과 AUV 의 자율성을 갖춘 호버링형 AUV 는 선박의 선저검사 및 수중 구조물의 정밀조사 등에 사용되고 있다.

본 논문은 호버링형 AUV 의 국내외 현황을 살펴보고, 그 실례로써 제주대학교에서 개발한 호버링형 AUV 'NOAH'의 설계과정에 대해 기술하였다. 또한, NOAH 의 설계를 위한 수학 모델링과 제어기 설계과정을 설명하였고 제작된 NOAH 의 수조실험 결과에 대해서도 언급하였다.

2. 호버링형 AUV 의 현황

2.1 국외현황

호버링형 AUV 의 국외 연구현황을 보면, University of Hawaii 의 'ODIN'이 가장 초기에 발표되었다(Fig. 1). ODIN 은 지름 0.6m 의 구형 내압선체로 구성되었고 8 개의 추진기를 장착하여 6 자유도의 운동을 제어할 수 있다. 항법을 위해 IMU(Inertial Measurement Unit)를 탑재하였고 위치제어용 센서로 소나와 압력계를 사용한다.[2]

동경대학교 Ura Lab 에서도 활발한 호버링형 AUV 의 연구를 수행하고 있다. 대표적인 정밀관측용 AUV 인 'Tri-Dog1'을 1999 년 건조하여, 다양한 실해역 실험에서 성공하였다(Fig. 2). Tri-Dog1 은 전후, 좌우, 상하의 6 개의 추진기를 장착하고 있으며, 전면에 팬틸트가 가능한 돔형 광학카메라가 탑재되어 있다.[3] 최근에는 광학과 초음파의 정보융합을 통해 선구적인 연구를 수행하고 있다.

Carnegie Mellon University 에서는 지형 탐사용 AUV 로 'DEPTHX'를 발표하였다(Fig. 3). 'DEPTHX'

은 우주탐사가 목적인 것이 특징이다. NASA 의 연구의 일환으로 물이 있는 행성을 탐사하기 위해 3 차원 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)에 특화되어 설계된 것이 특징이다. DEPTH 는 타원형의 선체를 갖고 있으며, 장축은 2.13m 이고 단축은 1.52m 의 크기이다. 4 개의 수평추진기와 2 개의 수직추진기를 장착하고 있으며 항법센서로 IMU, DVL, INS 등을 탑재하였고, Core Sampler 를 이용하여 광물샘플을 채집이 가능하다.[4]

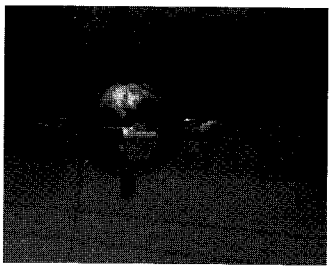


Fig. 1 Hovering Type AUV ODIN(University of Hawaii)

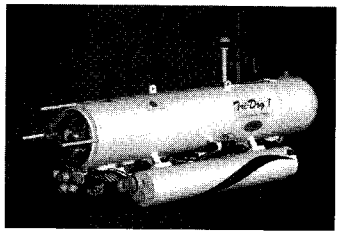


Fig. 2 Hovering Type AUV Tri-Dog1(Univ. of Tokyo)

Fig. 3 Hovering AUV 'DEPTHX'(Carnegie Mellon University)

2.2 국내현황

국내에서도 호버링형 AUV 에 관한 연구가 활발히 전개되고 있으나 아직은 초기단계라고 할 수 있다. 대표적으로, 포항공대의 'PETASUS'(Fig. 4), 한국해양대학교의 'SAUV'(Fig. 5) 그리고 제주대학교의 'NOAH'(Fig. 6) 등이 개발되었고, KAIST 의 'Mini-KUVE'는 현재 실험을 수행 중에 있다.

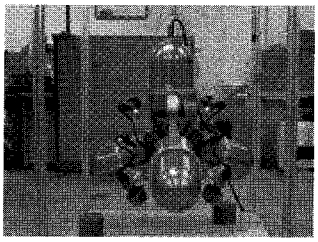


Fig. 4 Hovering Type AUV PETASUS(POSTEC)

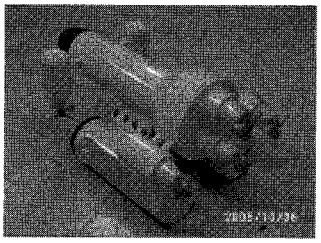


Fig. 5 Hovering Type AUV SAUV(Korea Maritime Univ.)

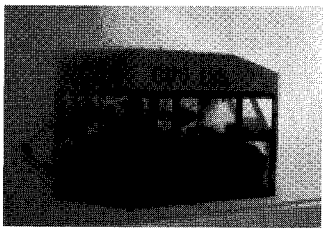


Fig. 6 Hovering Type AUV NOAH(Jeju National Univ.)

포항공대의 PETASUS 는 천해작업용 호버링형 AUV 로써 0.7m(L)×0.7m(B)×0.7m(D)의 크기를 갖고 있고, 6 개의 추진기를 벡터적으로 배열하여 6 자유도 운동을 제어할 수 있다. 센서는 가속도계, 각속도계, 컴파스 압력계 등을 장착하였고, 로봇팔을 장착하여 수중작업이 가능하다.[5] 한국해양대학교의 SAUV 는 해저 및 수중구조물 탐사용 AUV 로써 6 개의 추진기를 장착하고 있다. 센서는 기울기센서, 압력센서, 컴파스를 장착하였고, CAN module 을 이용한 통신방식을 사용하고 있다.[6] 제주대학교의 NOAH 는 수중탐사용 호버링형 AUV 의 개발용 Test-bed 로써 0.75m(L)×0.5m(B)×0.5m(D)의 크기를 갖고 있고, 4 개의 추진기를 장착하여 4 자유도 운동을 제어한다. 사용센서는 압력계와 컴파스이고 위치제어와 항법을 위해 수조벽면에 SBL(Short BaseLine) 위치측정시스템을 설치하였다.[7]

본 논문의 3 장에서부터는 호버링형 AUV

NOAH 의 설계과정에 대해 자세하게 언급하였다.

3. 호버링형 AUV 'NOAH' 설계

3.1 설계목표

AUV 의 설계과정에서 사용목적을 설정하는 일은 무엇보다도 중요하며, 사용목적이 정해지면 선형구조, 부력장치, 내압용기, 추진장치 등의 기계시스템 설계가 이루어지고, 이에 따라 전원장치, 계측장비, 통신장비, 컴퓨터 등의 전기시스템 설계와 자율항법 알고리즘, 지능항법 알고리즘 등의 제어시스템 설계가 이루어진다.

Table 1 NOAH design specifications

Parameters	Specifications
Hull shape	Frame type
Dimension	0.75m(L) x 0.5m(B) x 0.5m(D)
Weight	70kgf (in air)
Max. Depth	20m
Max. Speed	2m/s
Thruster	300watt(at 24V) x 4EA
Control mode	4DOF (surge, sway, heave, yaw)
Computer	On-board PC (Pentium III 700MHz)
Sensor	Pressure, Magnetic compass
Power	12-12AH Lead-acid x 4EA 18.5-3.2AH Lithium polymer x 1EA
Operating hour	1 hour
Communication	RS-232, Ethernet

NOAH 의 사용목적은 실험실 수조 내에서 호버링형 AUV 의 자율주행 성능과 센서 및 제어기의 성능을 실험하기 위한 테스트베드의 역할을 담당하고 있다. 실험을 통해서 제어 알고리즘을 개선할 수 있고, 추진 장치의 배치 및 계측장치의 성능을 개선할 수 있는 유용한 도구로 사용될 것이다. 이러한 호버링형 AUV 의 사용목적을 이루기 위해 Table 1 과 같은 설계사양을 결정하였다.

NOAH 의 사용목적에 따라 장비의 탑재가 용이하고 공간활용도가 높으며, 작업용도로 위치 및 자세제어가 편리하도록 하기 위해 ROV 와 같은 선형구조를 갖도록 하였다. Fig. 7 에 선형구조의 개념도를 나타내었고, Fig. 8 은 개념도를 바탕으로 제작된 원형을 나타낸다. 이러한 원형을 토대로 기계시스템, 전기시스템, 제어시스템의 상세 설계가 이루어진다.

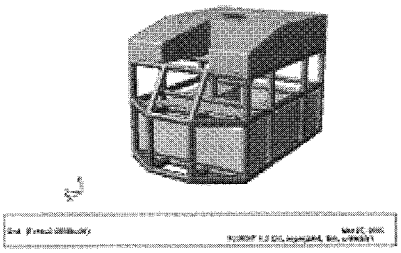


Fig. 7 Design concept

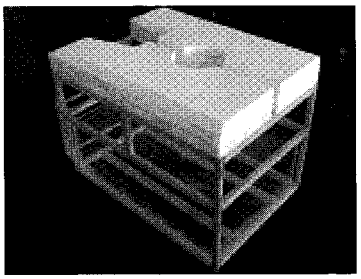


Fig. 8 Prototype

3.2 하드웨어 구성

제작된 NOAH 의 전체구조는 Fig. 9 와 같고 전체적인 구성 및 탑재장비는 Fig. 10 과 같다. 호버링형 AUV 의 성능개발을 위한 테스트베드로 사용하기 위해 Fig. 11 과 같이 ROV 형상과 유사한 프레임 구조의 선체를 채택하였는데, 이는 각종 센서와 장비를 장착하기 손쉽게 하고 공간 활용도를 높이기 위함이다. 프레임의 재질은 부식을 방지하기 위해 스테인리스 스틸을 사용하였고 부력재는 발포 폴리스티렌을 사용하여 충분한 부력을 얻도록 하였다.

Fig. 9 Appearance of NOAH

추진방식은 2 개의 직진방향 추진기와 1 개의 수직추진기 및 1 개의 횡 방향 추진기를 장착하여

4 자유도 운동을 제어할 수 있게 하였다. 또한, 3 개의 내압용기를 설치하였으며, 선수부분의 내압 용기에는 잠수정의 제어를 위한 컴퓨터와 센서들이 들어있고 선체 양쪽에 위치한 내압용기에는 전원공급을 위한 납 축전지가 들어있다. 내압용기는 Fig. 12 와 같이 폴리에틸렌 재질로 제작되었으며, 내압용기의 앞뒤 캡은 알루미늄으로 제작되었으며, 오링(O-ring)을 이용해 수밀을 하고 있다.

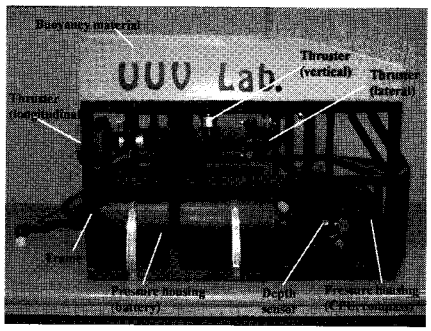


Fig. 10 General arrangement

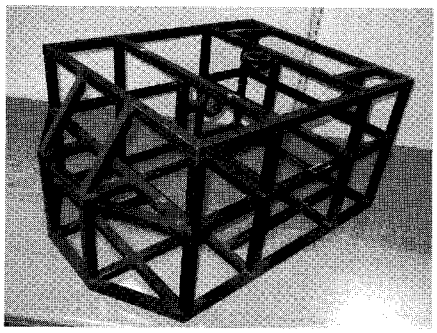


Fig. 11 Frame structure

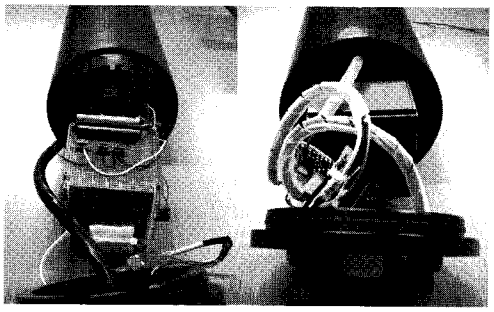


Fig. 12 Pressure can

3.2.1 추진기

추진기는 Tecnadyne 사의 BLDC(Brushless DC) 모터를 사용하고 있으며 Fig. 13 과 같이 Mode 280 과 Model 300 두 종류의 모델을 사용한다. 각각의 추진기의 입력전압은 24V 이며 소비전력은 76watt 이다. Model 280 은 덕트가 없는 추진기로 전후진 시 5.4kgf 로 동일한 추력을 갖고 있으며, Model 300 은 덕트가 있는 추진기로 전진 시 5.4kgf 의 추력을 갖고 후진 시 3.6kgf 의 추력을 갖는 추진기이다. 전진방향으로 덕트가 있는 2 개의 추진기를 사용하고, 수직과 횡방향으로 각각 1 개의 덕트가 없는 추진기를 사용하고 있다.

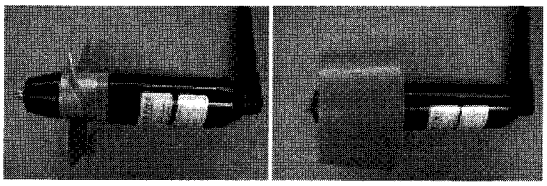


Fig. 13 Model 280 and Model 300 Thruster

3.2.2 센서

AUV 의 수심과 방향각 측정을 위해 압력계와 컴퍼스를 사용하며 Fig. 14 에 나타내었다. 압력계는 그린센서사의 ECO-1 모델을 사용하였으며, 수심 20m 까지 측정이 가능하고 4~20mA 의 아날로그 신호를 출력한다. 컴퍼스는 PNI 의 TCM2-50 모델을 사용하였으며, 이 컴퍼스는 3 축을 가지고 있어 경사각이 발행했을 때 경사각을 보정한 방향각을 측정할 수 있다. ±0.4° 의 정확도와 0.3° 의 분해능을 갖고 있으며 RS-232 통신을 사용하여 롤/피치/요우각을 출력으로 제공한다.

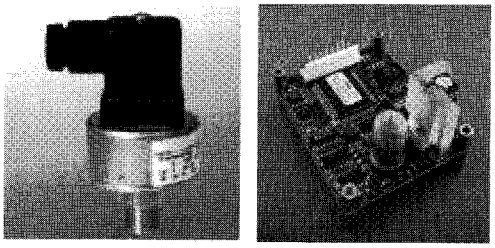


Fig. 14 Pressure sensor and magnetic compass

3.2.3 컴퓨터

NOAH 의 모든 센서와 추진기를 실시간으로 제어하기 위해 Fig. 15 와 같이 소형의 On-board PC 를 사용하고 있다. 크기는 10cm×9cm×9cm 이며 CPU 는 Kontron 사의 MOPSlcd7 모델이며, 사양은 Pentium III 700MHz 이다. 펜티엄 싱글보드 프로세스를 기반으로 PC104 버스를 통하여 Jupiter 사의

Jupiter-MM DC/DC 컨버터, Diamond 사의 DIMOND-MM-16AT AD/DA 보드 모듈이 인터페이스 되어있으며, RS-232 및 Ethernet 통신을 지원한다. 운용체제는 Windows XP 를 사용하며, 제어용 프로그램은 C/C++을 사용하고 있다.

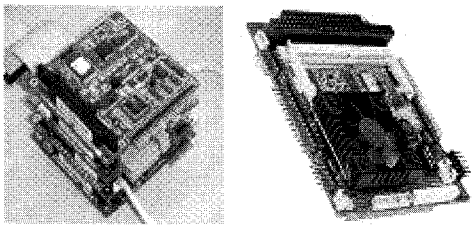


Fig. 15 On-board PC and CPU board

3.2.4 전원

AUV 는 모선과 독립적으로 자율운항하기 때문에 전원을 자체적으로 보유해야 한다. 따라서 AUV 의 운용에서 매우 중요한 문제로 배터리 설계가 부각된다. 사용되는 배터리의 용량에 따라서 AUV 의 운항범위 및 작업시간이 결정되기 때문이다. NOAH 의 전원은 Fig. 16 과 같이 납축전지와 리튬폴리머의 두 종류의 배터리가 사용되었다. 추진기의 입력전압이 24V 이므로 12V-12AH 납축전지를 직렬로 연결하여 전원을 공급해 주었으며, 이는 추진기 4 대를 최대 속도로 동시에 작동시켰을 때 약 1 시간 정도 운용이 가능하다. On-board PC 와 추진기의 모터 드라이버 및 센서에 전원을 공급해주기 위해서 18.5V-3.2AH 의 리튬폴리머 배터리를 사용하였다.

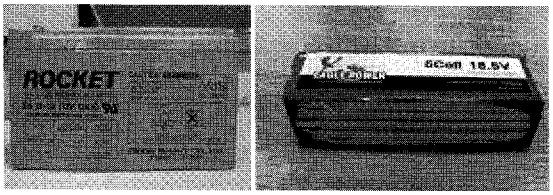


Fig. 16 Lead-acid and Lithium polymer battery

3.3 시스템 구성도

위에서 언급한 전원장치, 추진장치, 계측장치 및 제어장치를 이용하여 NOAH 의 자세 및 위치 제어를 하게 되며, 전체 시스템의 구성도는 Fig. 17 과 같다. 육상의 컴퓨터와는 TCP/IP 로 연결되며, 소프트웨어의 수정 시에는 원격데스크톱 프로그램을 이용하여 On-board PC 의 프로그램을 수정한다.

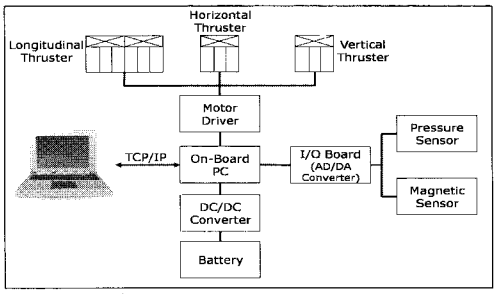


Fig. 17 Block diagram of overall system

4. NOAH 의 모델링

대다수 AUV 의 수학 모델은 6 자유도의 운동방정식으로 표현되며, 상당수의 유체동역학 계수에 의한 힘과 모멘트로 전개되어 있다. 이에 관련된 많은 연구가 진행되어 왔는데, Gertler and Hagen[8] 은 잠수함의 운동 해석에 있어서 표준이 되는 운동방정식을 정리하였고, Feldman[9] 은 실제와 더욱 근사한 수정된 운동방정식을 제시하였으며, 실제 AUV 의 6 자유도 비선형 운동방정식과 유체동역학 계수를 이용한 연구도 이루어졌다.[10-12]

본 논문은 NOAH 의 운동 상태를 해석할 수 있도록 6 자유도의 비선형 운동방정식을 유도하고, 이러한 운동방정식을 해석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 다양한 입력과 환경 하에서 NOAH 의 운동성능을 해석하고자 한다. 시뮬레이션을 위해서는 유체동역학 계수의 값이 필요하며 NOAH 에 관한 계수 값을 측정하기 어려운 상황이므로 직육면체 선형의 NPS AUV II 의 유체동역학 계수를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.[12] 이러한 시뮬레이션 결과는 정량적으로 많은 오차가 포함되었을 것이며, 본 논문에서는 정성적인 결과를 보는데 중점을 두고자 한다.

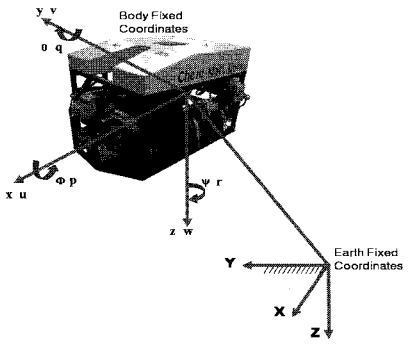


Fig. 18 Coordinate system

4.1 운동방정식

수학 모델을 위한 좌표계는 Fig. 18 과 같고 선수방향을 x 축, 우현방향을 y 축 그리고 연직하방을 z 축으로 나타낸다. 6 자유도의 운동은 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)의 병진운동과 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)의 회전운동으로 분류되며 운동방정식은 다음과 같다.

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

식 (1)을 상태공간 모델(State-Space Form)로 표현하면 다음의 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix}\dot{u}\\ \dot{v}\\ \dot{w}\\ \dot{p}\\ \dot{q}\\ \dot{r}\\ \dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} = [M]^{-1}\begin{bmatrix} X'+X_m\\ Y'+Y_m\\ Z'+Z_m\\ K'+K_m\\ M'+M_m\\ N'+N_m\\ p+q\sin\phi\tan\theta+r\cos\phi\tan\theta\\ q\cos\phi-r\sin\phi\\ (q\sin\phi+r\cos\phi)\sec\theta\end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 M 은 부가질량이 포함된 관성행렬을 나타내며 X'~N'은 외력과 외력 모멘트 성분을 그리고 X_m~N_m 은 관성력과 관성 모멘트 성분을 나타낸다. 본 논문에서는 Healey and Lienard[12]가 전개한 수식을 사용하였으며, 수식에 대한 자세한 내용은 Kim[13]에 설명되어 있다.

4.2 시뮬레이션 프로그램 개발

전개된 운동방정식을 이용하여 Matlab 의 Simulink 를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. 구성된 시뮬레이션 프로그램은 Input, Dynamics, Integration 의 세 개의 블록으로 이루어져 있으며, Input 블록은 추진기의 전압과 승강타, 방향타의 각도를 입력으로 준다. Dynamics 블록은 6 방향의 힘과 모멘트를 계산하는 블록이며, Integration 블록은 출력부로써 NOAH 의 자세와 위치 등의 상태 변수들을 결과 값으로 계산한다. 이러한 모듈화된 구성방법은 사용자가 전체구조를 쉽게 파악할 수 있고, 그래픽 환경을 제공함으로써 모델의 확장 및 수정작업이 편리하다.

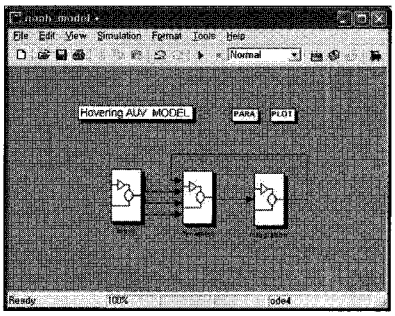


Fig. 19 Simulation program using Simulink

5. NOAH 의 제어기 설계

NOAH 의 자세 및 위치를 제어하기 위하여 설계가 비교적 용이하며, 구현이 간단한 PID 제어기를 설계하고자 하며, 설계된 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해 해석한 후 실험으로 구현하고자 한다.

5.1 수심제어

NOAH 는 1 개의 수직추진기로 수직운동을 제어하며, 수심제어에 사용한 PID 제어기는 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}
u(t) &= k_p e(t)+k_i\int e(t)dt+k_d\dot{e}(t)\\
e(t) &= Z_d(t)-Z(t)
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서 k_p는 비례이득, k_i는 적분이득, k_d는 미분이득을 나타내고 e(t)는 수심오차로써 목표수심 $Z_d(t)$와 현재수심 Z(t)의 차이를 나타내며 u(t)는 제어입력으로써 수직추진기의 입력전압을 나타낸다. 본 논문에서 NOAH 의 성능에 맞게 조종된 값으로 k_p=68, k_i=0.1, k_d=300 을 사용하였다.

Fig. 20 은 PID 제어기를 사용하여 수심제어에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 목표수심

은 60 초 동안 1m 깊이를 유지하다가 다시 초기수면으로 돌아오는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 약 10 초 정도의 시간이 흐른 뒤 최대 오버슈트가 발생되고 20 초가 지난 뒤 목표수심으로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 또한 초기수면으로 돌아올 때는 오버슈트 없이 수렴하는 것을 볼 수 있다.

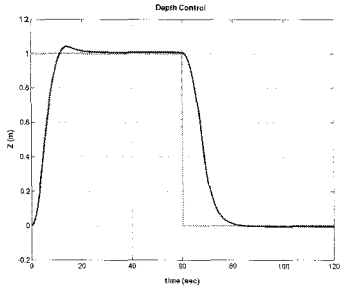


Fig. 20 Simulation result of the depth control

5.2 방향제어

NOAH 는 2 개의 직진방향 추진기를 사용하여 추진과 방향각을 제어하며, 방향제어에 사용된 PID 제어기 수식은 다음과 같다.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \dot{e}(t)$$
$$e(t) = \psi_d(t) - \psi(t) \tag{4}$$

$$u_l(t) = u_0(t) + u(t)$$
$$u_r(t) = u_0(t) - u(t) \tag{5}$$

여기서 k_p, k_i, k_d 는 비례, 적분, 미분이득을 나타내고 e(t)는 방향각 오차로써 목표방향각 $\psi_d(t)$와 현재방향각 $\psi(t)$의 차이를 나타낸다. u(t)는 제어입력으로 좌우추진기에 인가되는 전압이고 $u_0(t)$는 초기속도를 유지하는 추진기 전압이다. $u_l(t)$은 좌측추진기의 입력전압이고 $u_r(t)$은 우측추진기의 입력전압을 나타낸다. 본 논문에서는 k_p=15, k_i=0.1, k_d=55 를 사용했을 때 가장 최적의 추종성능을 나타내었다.

Fig. 21 은 방향제어에 대한 PID 제어기의 시뮬레이션 결과이다. NOAH 가 진행방향에서 우현으로 90° 방향각을 변화시켰다가 초기방향으로 돌아오는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 10 초에서 최대 오버슈트가 발생하며 20 초 이전에 목표 방향각에 수렴하고 있다.

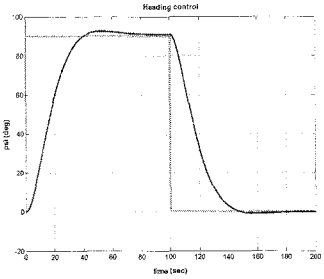


Fig. 21 Simulation result of the heading control

5.3 운항제어

설계된 PID 제어기의 성능을 테스트하기 위하여 자세 및 위치제어가 결합된 운항제어의 시뮬레이션을 수행하였고, 원하는 운항경로는 Fig. 22 와 같다. 초기위치에서 수심 3m 로 잠항하여 Target 1 으로 이동 후 자세와 위치를 유지한 후 Target 2 와 Target 3 을 지나 다시 Target 1 으로 돌아오고 그 후 부상하여 초기위치로 돌아오는 경로로 정하였다. 운항속도는 0.2m/s 로 저속이며, 시뮬레이션 결과는 모델링 오차가 없는 경우(Fig. 23), 조류의 영향을 받는 경우(Fig. 24) 그리고 센서잡음이 있는 경우(Fig. 25)에 대해 비교하였다. 외란이나 센서 잡음이 없는 경우 호버링형 AUV 의 자세 및 위치제어가 잘 이루어 졌으나 조류에 의한 외란이 있는 경우와 약 10%정도의 센서 잡음 포함시 원하는 주행궤적에서 벗어남을 볼 수 있다.

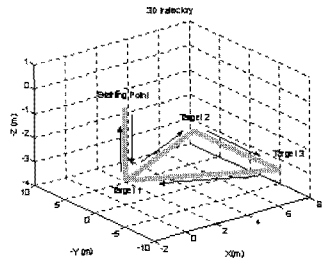
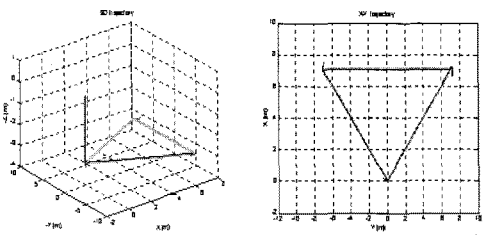
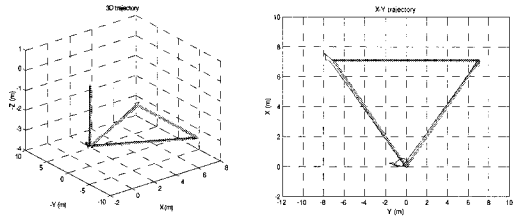


Fig. 22 Simulation condition



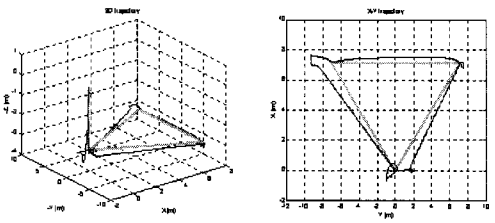
(a) 3-D trajectory (b) X-Y trajectory

Fig. 23 Simulation results with nominal model



(a) 3-D trajectory (b) X-Y trajectory

Fig. 24 Simulation results under current



(a) 3-D trajectory (b) X-Y trajectory

Fig. 25 Simulation results with sensor noise

6. NOAH 의 제어실험

설계된 PID 제어기의 성능을 검증하기 위한 수심제어와 방향제어 실험을 실시하였으며 Fig. 26 에 보인 것과 같이 2m(L)×1.2m(B)×1.5m(D)의 실험실 수조에서 수행하였다.

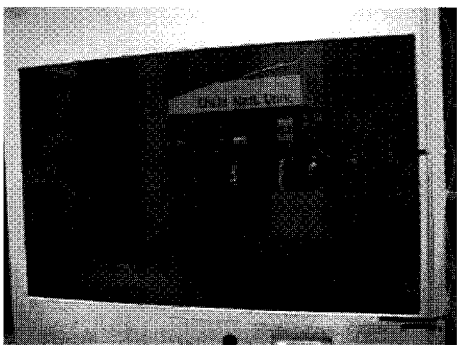


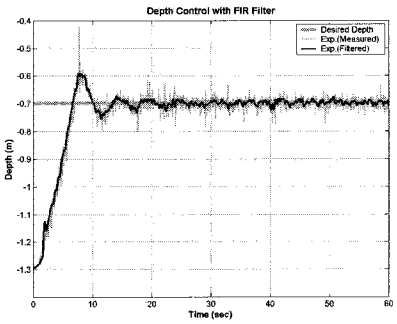
Fig. 26 Experimental basin for the control test

6.1 수심제어 실험

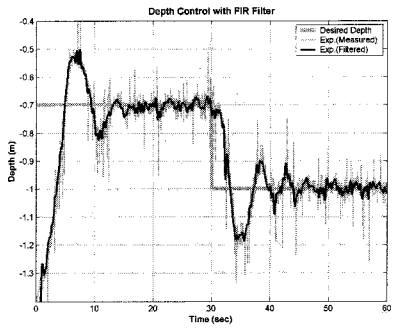
수심제어 실험은 PID 제어기를 사용하여 목표수심이 일정한 경우와 변하는 경우에 대해 실시하였으며, 60 초 동안 목표수심을 잘 추종하는지를 비교하였다. 압력센서에서 얻는 수심신호는 아날로그 전류신호이기 때문에 전기적인 잡음을 많이 포함하고 있어 FIR(Finite Impulse Response) 필터 알고리즘을 적용하여 필터링한 후 사용하였다.

Fig. 27(a)는 목표수심이 0.7m 인 경우이며, 측정된 신호와 필터링한 신호를 나타내었다. 8 초에서 최대오버슈트가 발생하며 10 초 이후 진동이 줄어들며 목표수심을 잘 추종함을 볼 수 있다. Fig. 27(b)는 목표수심을 0.7m 에서 30 초경과 후 1m 로 변화시킨 경우이며 이 경우 또한 오버슈트가 발생하며 목표수심에 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

PID 제어기에서 동일한 이득 값을 사용하여 실험을 반복 수행하였는데, 결과를 측정할 때마다 최대 오버슈트나 정상상태 오차 등이 어느 정도 변하는 것을 볼 수 있었다. 이는 실제 실험의 경우 다양한 환경적 외란이나 센서잡음 등이 시스템에 많은 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.



(a) Depth control(desired depth: 0.7m)



(b) Depth control(desired depth: 0.7m~1.0m)

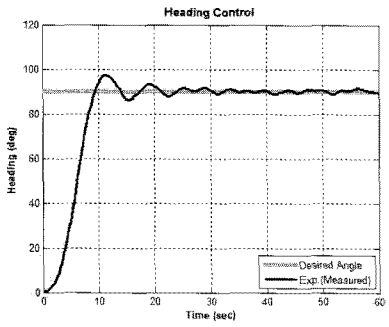
Fig. 27 Experimental results of the depth control

6.2 방향제어 실험

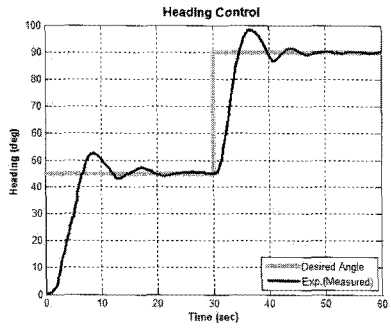
방향제어 실험은 목표 방향각이 일정한 경우와 변하는 경우에 대해 PID 제어기를 사용하여 수행하였다. NOAH 에는 위치를 고정해 주는 시스템이 없기 때문에 요우운동이 발생하면서 좁은 수조 벽에 충돌하는 경우가 발생하여 정확한 데이터를 받

기가 어려운 조건이었다. 따라서 NOAH 가 수면에 떠있는 상태에서 표류하지 못하고 회전중심으로 회전만 하도록 구속을 한 후 요우운동만 발생시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 28(a)는 목표방향각이 90° 인 경우 제어결과를 나타내었다. 컴퍼스에서 출력하는 방향각 신호는 필터링된 디지털 신호이므로 잡음이 제거된 깨끗한 신호를 받을 수 있다. 결과를 보면, 12 초에서 최대 오버슈트가 발생하며 그 이후 감쇠하며 목표 방향각을 잘 수렴해 가고 있다. Fig. 28(b)는 목표방향각을 45° 에서 90° 로 변화시킨 경우이며, 이 경우에도 오버슈트와 진동이 발생하며 목표 방향각을 수렴하고 있다. 방향제어 실험의 경우 요우운동만을 발생시키기 위해 임의의 구속력이 포함되어 있어 진동의 감쇠가 빨리 이루어졌고, 실제로 넓은 수조에서 실험을 수행하면 최대 오버슈트 이후 더 많은 진동이 발생할 것으로 예측이 된다.



(a) Heading control (desired heading: 90°)



(b) Heading control (desired heading: 45°~90°)

Fig. 28 Experimental results of the heading control

7. 결론

본 논문은 제주대학교에서 설계하고 제작한 호버링형 AUV 'NOAH'의 설계과정에 대해 언급하였다. 호버링형 AUV 는 수중에서 작업하는 용도로 사용하는 AUV 로써 자신의 자세와 위치를 유지하고 원하는 자세와 위치로 정확히 이동할 수 있는 능력이 중요한 설계목표가 된다. 제작된 NOAH 는 이러한 기능을 실현하고 성능을 더욱 향상시키기 위해 구동장치, 제어장치 및 계측장치를 테스트하기 위한 테스트베드로써의 역할을 수행하고 있다. 추진기는 4 자유도의 운동을 제어할 수 있도록 직진방향 추진기 2 대, 수직추진기 1 대 및 횡방향 추진기 1 대를 장착하였다. 자세와 위치를 제어하고 운항을 제어할 센서로는 압력계와 자력 컴퍼스를 사용하고 있으며, 추후 AUV 의 항해를 위해 위치 측정용 SBL 시스템을 장착할 계획이다. NOAH 의 모든 센서와 추진기를 실시간으로 제어하고 전체시스템을 운용하기 위하여 소형 On-board PC 를 사용하고 있으며, 모든 운용 프로그램은 외부의 Master PC 로부터 Ethernet 으로 다운받는 방식을 사용한다. 이와 같이 설계된 NOAH 는 실험실 수조 내에서 테스트를 거쳐 더욱 개선된 기능의 호버링형 AUV 로 발전될 것이다.

설계된 NOAH 의 운동성능을 해석하기 위하여 6 자유도 운동방정식을 전개하였고, 이를 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다. 또한, NOAH 의 자세 및 위치 제어를 위해 PID 제어기를 설계하였고 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 제어기 성능을 해석하고 수조에서 수심제어와 방향제어 실험을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 수심제어에 대한 수조실험 결과 목표수심을 진동하면서 잘 추종함을 볼 수 있었으며 방향제어 실험도 유사한 결과를 얻었다. 시뮬레이션 결과와 수조실험을 정량적으로 비교하기는 어려운 조건이지만 정성적인 측면으로 볼 때 유사한 결과를 볼 수 있고, 모델링 오차나 파라미터 오차가 줄어들면 상당히 유사한 결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

향후 연구로는 수심제어와 방향제어에 대한 정밀하고 다양한 실험을 수행하여 NOAH 의 호버링형 기능을 발전시키고, 실험을 통해 구동장치나 계측장치의 성능 및 제어 알고리즘을 개선하는 것이다. 또한, SBL 을 이용해 자신의 위치를 정확히 인식하고 그러한 정보를 모선이나 공동 작업 중인 다른 AUV 에도 통신할 수 있는 통신시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 수중운동체특화연구센터(URVC, SM-23)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yuh, J., "Development in Underwater Robotics," Robotics and Automation 1995 IEEE International Conference, Vol. 2, pp. 1862-1867, 1995.
2. Choi, S. K., Yuh, J. and Takashige, G. Y., "Development of the Omni Directional Intelligent Navigator," Robotics & Automation Magazine, IEEE, Vol. 2, Issue 1, pp. 44-53, 1995.
3. Kondo, H., Ura, T., Yu, S. C. and Nose, Y., "Design of Autonomous Underwater Vehicle Tri-Dog1 and Tank Tests," Proc. of International Symposium Techno-Ocean, pp. 339-344, 2000.
4. Kantor, G. A., Fairfield, N., Jonak, D. and Wettergreen, D., "Experiments in Navigation and Mapping with a Hovering AUV," Intl. Conf. on Field and Service Robotics, Vol. 42, pp. 115-124, 2008.
5. Han, J., Jang, J. and Chung, W. K., "Dynamic Simulation of Underwater Vehicle-Manipulator System Using Principle of Dynamic Balance," Journal of Korea Robotics Society, Vol. 2, No. 2, pp. 152-160, 2007.
6. Kim, K. K., Choi, H. S., You, S. S. and Seo, J. N., "Development of a Semi Autonomous Underwater Vehicle," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 784-790, 2007.
7. Byun, S. W. and Kim, J. Y., "Development of a Hovering AUV for Underwater Explorations," Journal of Ship and Ocean Technology, SOTECH, Vol. 11, No. 2, pp. 1-9, 2007.
8. Gertler, M. and Hagen, G. R., "Standard Equation of Motion for Submarine Simulations," NSRDC Report No. 2510, 1967.
9. Feldman, J., "DTNSRDC Revised Standard Sub marine Equations of Motion," DTNSRDC/SPD-0393-09, 1979.
10. Jun, B. H., Lee, P. M., Lee, J. H., Hong, S. W. and Lee, J. H., "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.
11. Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, P. M., Lee, P. Y. and Oh, J. H., "Development and Tank Test of an Autonomous Underwater Vehicle 'ISiMI'," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 21, No. 2, pp. 67-74, 2007.
12. Healey, A. J. and Lienard, D., "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.
13. Kim, J. Y., Kim, K., Choi, H. S., Seong, W. and Lee, K. Y., "Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 830-840, 2002.