6자유도 호버링 AUV의 설계 및 제어

Design and Control of 6 D.O.F(Degrees of Freedom) Hovering AUV

정 상 기, 최 형 식*, 서 정 민, Tran Ngoc Huy, 김 준 영

(Sang-ki Jeong¹, Hyeung-Sik Choi², Jung-Min Seo², Tran Ngoc Huy², and Joon-Young Kim³)

¹Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST)

²Division of Mechanical and Energy System Eng., Korea Maritime University

³Division of Marine Equipment Department., Korea Maritime University

Abstract: In this paper, a study of a new hovering six dof underwater robot with redundant horizontal thrusters, titled HAUV (hovering AUV), is presented. The results of study on the structure design, deployment of thrusters, and development of the developed control system of the AUV was presented. For the HAUV structure, a structure design and an analysis of the thrusting system was performed. For navigation, a sensor fusion board which can proceed various sensor signals to identify correct positions and speeds was developed and a total control system including EKF (Extended Kalman Filter) was designed. Rolling, pitching and depth control tests of the HAUV have been performed, and relatively small angle error and depth tracking error results were shown.

Keywords: CROV (Convertible Remotely Operated Vehicle), HAUV (Hovering Type Autonomous Unmanned Vehicle)

I. 서론

수중로봇은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 유선 원격제어 무인 잠수정 ROV (Remotely Operated vehicle)와 자율 무인 잠수정 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)로 나눌 수 있다. ROV는 모선에 연결된 케이블을 통한 원격제어로 구동되고 수중에서 원하는 위치 및 방향으로 이동시키기 위한 5~6 자유도를 갖는 구조로 구성되어 있다. AUV는 자율적으로 동작하기 위한 제어장치 및 센서를 갖추고 주로 광역의 수중탐사 작업이나 일정 지역의 정밀 조사 작업을 수행하도록 구성된다. 광역을 빠르게 탐사하기 위해서는 추진작동기를 최소 단위인 3개로 구성하고 있으나 특정지역을 정밀탐사하기 위해서는 호버링 기능을 갖도록 5~6 개의 작동기를 갖도록 구성된다[1,3]

호버링 AUV에 대한 연구로는 1999년 동경대학교에서 정밀관측용 AUV인 Tri-Dog1을 건조하여 다양한 실험역 실험에서 성공하였다. Tri-Dog1은 전후, 좌우, 상하의 6개의 추진기를 장착하고 있으며, 전면에 팬틸트가 가능한 돔형 광학카메라가 탑재되어 있다. Carnegie Mellon University에서는 지형 탐사용 AUV로 'DEPTHX'를 발표하였다.

* 책임저자(Corresponding Author)

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

정상기: 한국해양과학기술원(koyoumy@kiost.ac)

최형식, 서정민, Tran Ngoc Huy: 한국해양대학교 기계시스템 공학(hchoi@hhu.ac.kr/koel0147@naver.com/Tran_huy1984@yahoo.com)

김준영: 한국해양대학교 조선기체공학(jykim@hhu.ac.kr)

※ 본 연구는 국토해양부에서 지원하는 “다관절복합이동해저로봇 개발” 과제로 수행된 연구결과 중 일부와 국토해양부 지역MT 특성화사업의 연구비 지원(해양산업고도화를 위한 핵심 해양장비 개발에 의해 수행되었음).

'DEPTHX'는 타원형의 선체를 갖고 있으며, 장축은 2.13m 이고 단축은 1.52m로 4개의 수평추진기와 2개의 수직추진기를 장착하고 있으며 항법센서로 IMU, DVL, INS 등을 탑재하였다[2]. 포항공대의 PETASUS는 천해작업용 호버링형 AUV로써 0.7m(L)×0.7m(B)×0.7m(D)의 크기를 갖고 있고, 6개의 추진기를 벡터적으로 배열하여 6자유도 운동을 제어할 수 있다. 센서는 가속도계, 각속도계, 지자계센서, 압력계 등을 장착하였고, 로봇팔을 장착하여 수중작업이 가능하다. 한국해양대학교의 SAUV는 해저 및 수중구조물 탐사용 AUV로써 6개의 추진기를 장착하고 있다. 센서는 기울기센서, 압력센서, 지자계센서, 를 장착하였고, CAN module을 이용한 통신방식을 사용하고 있다[4]. 제주대학교의 NOAH는 수중탐사용 호버링형 AUV의 개발용 Test-bed로써 0.75m(L)×0.5m(B)×0.5m(D)의 크기를 갖고 있고, 4개의 추진기를 장착하여 4자유도 운동을 제어한다. 사용센서는 압력계와 지자계센서이고 위치제어와 항법을 위해 수조벽면에 SBL(Short BaseLine) 위치측정시스템을 설치하였다[5]. 또한, 4개의 회전하는 추진기를 가지는 6 자유도 수중로봇 플랫폼에 대한연구와 이의 제어에 대한 연구가 있었다[6].

본 연구에는 광역의 조사를 위한 신속한 이동성능을 가지며 동시에 특정 지역의 정밀탐사가 가능한 hovering AUV(HAUV)의 설계와 제어에 대해 연구하였다. 개발한 HAUV의 모듈설계에 대해 기술하였고, 제작한 HAUV의 호버링 제어시스템을 구성하였으며, 사용한 복합센서의 필터링과 상태추정을 위해 확장칼만필터를 설계하고 이를 통한 센서 정보를 활용하여 제어하는 구조로 구성하였다, 복합 센서를 퓨전하는 시스템을 구성하여 수중에서 AUV의 위치/방향 및 속도를 보다 정확히 추정할 수 있는 시스템에 대한 연구를 하였다.

II. HAUV 기구부 구조 설계

1. HAUV의 기구부 구성

본 연구에서는 해류나 선체의 유체저항을 최소화하기 위해 유선형의 선체로 설계하였고 수평방향의 이동속도를 높이거나 자기위치를 강인하게 유지하기 위하여 4대의 추진기를 대칭적으로 설계한 호버링 AUV로 그림 1과 같이 제작하였다.

제작한 HAUV는 호버링 AUV 타입으로 그림 2와 같이 유선형 선체 내부에는 제어하우징, 전원하우징, 배터리 하우징, 추진기, DVL, USBL과 이들을 고정하는 프레임으로 구성하였다.

HAUV 형태에서의 자기 위치 유지 및 자세제어에 용이하도록 7개의 추진기를 6자유도 운동제어에 적합하도록 전방 30° 각도로 배치하였다. 4개의 수평 추진기는 자율 운항 시 필요한 추력을 내기 위해 사용하며 3개의 수직 추진기는 선체의 상하 운동 때 사용되도록 설계하였다. 또한 각 추진기는 최대 추력을 낼 수 있게 최대한 유로를 확보 하였으며, Roll 동작이 용이하도록 선체의 좌/우 측면 끝에 배치하였다.

2. HAUV의 모듈 형 구조

HAUV는 조립과 해체가 용이하도록 그림 3과 같이 크게 7개의 모듈로 설계하였으며 이의 조립 과정을 그림 4에 나타내었다. 각 모듈은 방수 케이블을 이용하여 통신 및 전원을 배터리 및 제어 하우징에 결합되는 구조로 구성하였다.

3. HAUV의 추진체 용량설계

무인 잠수정은 수중에서 받는 항력보다 큰 추력을 낼 수 있어야 한다. 외란을 무시하였을 때 수중에서 수평 추진기

그림 1. 개발된 HAUV의 사진.

Fig. 1. Picture of developed HAUV.

그림 2. HAUV의 내부 부품 구성.

Fig. 2. Composition of interior parts of HAUV.

그림 3. HAUV의 모듈 부품.

Fig. 3. Modular parts of HAUV.

그림 4. HAUV의 조립과정.

Fig. 4. Assembly process of HAUV.

의 사용이 가능한지를 판단하기 위해 선체 형상을 입방체 형태로 가정하여 수평 추진기가 최대 부하 추력을 추정하였다.

그림 5와 같이 최대 추력 $5Kg_f$ 의 모터 4개를 30도의 각도로 달았을 경우 추력은 식 (1)과 같이 계산 할 수 있다.

$$V = \sqrt{\frac{F \times g}{0.5 \times \rho \times C_d \times A}} \quad (1)$$

여기서 $F = 5kg_f \times \cos 30^\circ \times 4 = 17.3kg_f$ 이며 C_d 는 항력계수로 HAUV의 전면을 반구 형태로 설계하여 그림 6과 같이 모델링하여 0.8로 가정하고, ρ 는 평균 바다 밀도인 $1025kg/m^3$, A 는 HAUV 전면 투영 면적으로 $0.161m^2$ 이다. 식 (1)에 실제 값을 넣어 계산하면 HAUV의 최대 속도는 $1.6m/s$ 이고 대략 $3knot$ 의 수평 추진속도를 가진다. 여기서 C_d 를 충분히 크게 설정하였는데, 유선형으로 제작

그림 5. HAUV의 3D 모델링.

Fig. 5. 3D modeling of HAUV.

그림 6. HAUV의 투영면적.

Fig. 6. Projected area of HAUV.

한 HAUV의 선형을 고려하면 최대 $4knot$ 이상의 속도가 예상된다.

III. HAUV 모델링

1. HAUV의 운동방정식

HAUV의 6자유도 운동방정식을 물체좌표계(body-fixed coordinates)에 의해 표현하였다[7].

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= \sum X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(pr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= \sum Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] &= \sum Z \\
 I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K \\
 I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M \\
 I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xz} + (rq - \dot{p})I_{xy} \\
 + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= \sum N
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 식 (2)는 다음의 행렬식으로 간략히 표현된다.

$$M\dot{v} + C(v) + D(v) + g(\eta) = \tau \quad (3)$$

여기서

$$M = M_{RB} + M_A, \quad C = C_{RB} + C_A$$

M_{RB} : The rigid-body inertia matrix

M_A : Added inertia matrix

C_{RB} : The rigid-body Coriolis and centripetal matrix

C_A : The added coriolis matrix

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$: 물체 중심의 속도/각속도 벡터

$\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$: 외력과 모멘트 벡터

$$D = D_p(v) + D_s(v) + D_w(v) + D_M(v)$$

$D_{P(v)}$: The hydrodynamic damping matrix is mainly caused by radiation-induced potential damping,

$D_{S(v)}$: linear skin friction,

$D_{W(v)}$: wave drift damping

$D_{M(v)}$: damping due to vortex shedding

$g(\eta)$: Gravity and buoyancy vector(forces and moments)

그림 7. HAUV의 기하학적 구성.

Fig. 7. Geometrical configuration of HAUV.

2. HAUV의 추진시스템

HAUV의 7개의 추진체의 위치는 그림 7을 통해 알 수 있으며, 추진체 A1에서 A4는 수평방향으로 직진 및 회전운동, A5~A7는 수직방향으로 추진하는 추진체들로 이들의 배치는 그림 7에 나타내었다. 그림에서 O1은 HAUV의 무게 중심 O에서 A1-A2-A3-A4면에 투영한 점이며 O2는 A5-A6-A7면에 투영한 점이다. 수평방향의 추진에 3개의 추진체면 충분하나 A1~A4까지의 여분의 추진체를 설계한 것은 수평방향으로 보다 고속의 추진성능을 내고 호버링시에 조류 등의 외란에 대응하기 위한 것이다. 여분의 추진체를 이용하여 최적의 추진력 분배를 할 수 있다.

HAUV의 운동 모델식은 식 (3)으로 이의 제어를 위해 이차 미분방정식의 형태로 표현하면 제어를 위한 입력 벡터 τ 와 여분의 추진체 간의 관계식은 다음과 같다.

$$U = B\tau \quad (4)$$

여기서 입력벡터 $U = [F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7]^T$, F1~F7은 HAUV에 설치된 7개 추진체의 추력을 나타낸다. 추진체는 7개로 제어 자유도보다 많아서 여분을 HAUV의 6자유도 운동 시 최적화나 내고장성(fault tolerance)에 적용할 수 있다. B 행렬은 HAUV에 설치된 추진체의 위치 및 추력방향과 HAUV의 물체좌표계의 외력과 모멘트 벡터와 연관 짓는 제어 입력행렬이다. 추진체의 최적 분배를 위한 행렬식은 다음과 같이 설계된다.

$$\tau = B_w^+ U \quad (5)$$

여기서 $B_w^+ = W^{-1}B^T(BW^{-1}B^T)^{-1}$ 이고 최적분배를 위해서는 가중함수 W 를 단위벡터로 구성하면 된다.

3. HAUV의 추진기의 실험에 의한 추진성능 검증

추진기 성능은 일반적으로 실험에 의존하기 보다는 기존의 자료를 이용하여 성능을 추정하는 것이 일반적이었다. 그러나 추진기의 성능은 무인잠수정의 잠항 시간이나 추진 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 보다 정확한 제어를 위해 HAUV의 추진기의 추력 성능을 CFD 해석과 실제 수조에서의 정지 추력 테스트를 통해 좀 더 신뢰성 있는 제어입력과 출력 간의 데이터를 확보하였다.

그림 8의 사진은 추진체의 정지 추력을 테스트 하기위한

그림 8. 추력시험장치.

Fig. 8. Propulsion test device.

그림 9. 로드셀.

Fig. 9. Load cell.

표 1. 로드셀의 사양.

Table 1. Specification of Load cell.

Model	Rated Capacity	Zero balance	Rated output
UMM -200 K	0~1.961 kN (200 kgf)	±0.06 mV/V	2 mV/V± 0.01 mV/V

그림 10. 300W급 추진체의 추력시험.

Fig. 10. Propulsion test of 300W thruster.

표 2. 추진체 시험결과.

Table 2. Test results of the thruster.

Forward Direction			Backward Direction		
Current(A)	rpm	Thrust [N]	Current(A)	rpm	Thrust [N]
1	626	4.12	1	549	0.98
2	845	5.00	2	655	2.55
3	975	10.79	3	749	4.12
4	1084	13.93	4	864	8.04
5	1152	15.70	5	968	11.18
6	1200	19.62	6	1056	13.24
7	1251	21.97	7	1132	14.22
8	1289	24.03	8	1185	14.91
9	1291	25.51	9	1215	15.70
10	1324	26.98	10	1242	16.87

장치로 추진체를 고정하고 그 추력을 로드 셀을 이용해 측정할 수 있는 장치이다. 추력 테스트를 위해 그림 9와 같은 로드 셀을 사용하여 추진체의 정지추력을 측정 하였으며, 사용 로드 셀의 사양은 표 1과 같다.

추력 시험장치의 마찰로 인한 부가적인 부하를 구하기 위한 실험을 먼저 하였다. 시험장치의 레일 위에 위치한 추진기의 고정 지그를 수직방향에 위치한 도르래를 스틸 와이어로 통과 시킨 후 아래 방향으로 5 kg과 10 kg의 무게를 고정하여 마찰계수를 계산할 수 있는 실험장치의 총 마찰력을 측정하였다. 마찰 계수를 구하는 식 $F = \mu mg$ 를 이용하였다.

실험결과에서의 운동마찰계수는 약 0.72~0.73이라고 계산되었다. 이 운동마찰계수는 현재 상용 제품으로 사용 추진기는 'Tecnadyne사'의 'Model 1020 thruster'이다. 그림 10은 실제 회조류 수조에서 300W 추진체의 성능 시험하는 장면이며 표 2는 성능시험 결과를 RPM과 소모 전류의 순으로 정리하였다[7].

4. HAUV의 추진기의 CFD해석

CFD 해석은 비압축성 난류유동의 해석에 3차원 RANS (Reynolds Averaged Naveir-Stocks) 방정식과 연속 방정식을 지배방정식으로 하며 이는 유한체적법에 의하여 이산화 된다. 난류모델은 CFX에서 제공하는 SST 난류모델을 사용하였으며, 벽 근처에서의 격자수를 줄이기 위해 수정된 벽 법칙을 사용하였다[8].

CFD를 통한 해석에 있어서 적절한 가정을 통하여 수치 계산에 소요되는 시간과 비용을 현저히 줄일 수 있다. 본 연구에서는 계산 영역에 회전부와 정지부를 갖고 있으므로, 그림 7에 보인 바와 같은 전처리 과정에서 MRF (Multiple Frame Reference)를 사용하였다. 여기서 회전부의 정지부 사이의 경계면에서 정보 전달 방법은 "frozen rotor" 방식을 사용하였다.

해석을 위하여 설계된 추진기를 3D로 모델링 한 것을 그림 11에 나타내었다. 수치해석에 사용된 덕트 프로펠러의 격자모형은 그림 12에 나타내었다. 계산에 사용된 격자수는 총 5,281,598개 이며, 격자는 CFX 전용 격자 생성기인 CFX-Mesh를 이용하여 생성하였으며, 벽 근처에서의 격자수를 줄이기 위한 경계층을 고려하기 위하여 Hexa 격자로 생성하였다.

CFD 해석으로 전진방향으로 정지상태에서 정회전과 역회전에 대하여 600 rpm~1300 rpm까지의 각 rpm별 추력 및 토크를 구하였다.

그림 11. 덕트 프로펠러의 기구형상.

Fig. 11. The Geometry of the duct propeller.

그림 12. 계산영역의 그리드.

Fig. 12. Grid of the computational domain.

그림 13. 시험과 CFD 해석 결과.

Fig. 13. Results of test and CFD analysis.

실험과 해석의 결과를 그림 13에 같이 나타내었다. 그림 13에 보이는 바와 같이 정 방향에 대한 결과는 10% 내외로 비교적 잘 일치하고 있으나 역방향은 회전수가 증가할수록 미세한 차이가 발생하였다. 이 실험을 통해 제어에 필요한 추진체의 입출력 특성을 파악하였다.

IV. 제어 시스템

1. HAUV모드의 제어시스템 구성

HAUV의 제어시스템은 선상으로 전송되는 센서의 데이터가 직접 제어 회로에 전송되어 센서 데이터의 연산을 통해 현재 위치를 추정하고 선체의 상태와 경로를 제어하게 된다. DSP 프로세서인 TMS320c28335를 사용하여 데이터 수신회로를 결합하였다. HAUV는 주행 중 수집된 영상을 메모리에 저장하여 회수 후 영상 데이터를 육상에서 분석할 수 있도록 영상 저장장치를 따로 제어하우징에 장착하였다.

HAUV의 제어기는 ATxmega128A1을 사용하였다. sensor board와의 통신 레벨을 맞추기 위해 control board로 전송되는 Navigation data를 TTL 레벨의 통신으로 변환 후 다시 3.3V 레벨의 통신으로 변환하였다. 제어시스템은 그림 14와 같다.

그림 14. HAUV의 제어시스템.

Fig. 14. Control system of HAUV.

그림 15. HAUV의 융합센서 시스템.

Fig. 15. Complex sensor system of HAUV.

다양한 센서로 구성된 Sensor fusion system은 3축 각속도, 3축 가속도, 3축 지자기 출력을 하는 IMU 센서와 DSP28335, GPS, DVL, USBL로 구성하였다. IMU 센서의 자이로, 가속도, 지자기 센서 자체 오차, 스케일 오차, 비정렬 오차 등에 의하여 발생하는 추정 오차를 GPS와 DVL, USBL을 이용하여 시간에 따라 누적되는 시스템의 항법 오차를 보정 하였다. HAUV는 일정 거리를 주행 후 수상으로 부상하여 GPS 정보를 이용하여 자기 위치를 보정한다. 센서들을 제어하는 전체 제어시스템은 그림 15와 같이 구성하였다.

2. HAUV모드의 항법시스템

센서 데이터의 노이즈를 필터링하고 실제 상태를 추정하기 위해 확장칼만필터를 사용하였다. 수중에서의 항법 시스템은 DVL에서 나오는 HAUV의 속도 정보를 이용하여 위치를 추정한다. DVL경우 maximum ping rate가 5/second 이다. 또 측정 노이즈가 더해져 적분과정을 통하여 위치를 추정하기 때문에 시간이 지남에 따라 위치 값이 발산한다. 이를 보정하기 위하여 칼만필터를 사용하여 측정 신호의 잡음을 제거하며 이전의 속도 정보의 추정을 통해 위치정보를 추정한다.

기본적인 동체 고정형 센서인 IMU, DVL 센서에 좌표변환 알고리즘을 구성하여 지구고정 좌표 및 회전각 정보를 나타내었다. 이를 위해 확장칼만필터를 사용하였다. 확장칼만필터는 외부 입력인 Measurement matrix와 최종 출력인 Estimate matrix, 시스템 모델 F matrix, H matrix로 구성되며 예측 과정과 추정 과정으로 나누어진다.

예측 과정에서는 이전 Estimate matrix와 오차 공분산을 입력으로 받아서 현재 상태의 Estimate matrix와 오차 공분산을 구하게 된다. 예측 과정에서 사용하는 Estimate matrix와 시스템 모델 F matrix의 구성은 식 (6) 및 식 (7)과 같다. 식 (6)의 Estimate matrix는 4개의 쿼터니언 원소와 3축 속도 값으로 구성된다. 기존 오일러 좌표계에서 야기되는 짐벌락 현상을 해결하기 위해 IMU 센서를 사용하여 연산을 통해 쿼터니언 값을 구하였다.

$$x = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ W_x \ W_y \ W_z]^T \quad (6)$$

식 (7)의 F matrix는 이전 상태의 Estimate matrix를 현재 상태의 Estimate matrix로 연결 시켜주는 matrix로 구성된다.

$$F = \begin{bmatrix} R_{4 \times 4} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 4} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $R_{4 \times 4}$ 는 자세변환행렬이다. 추정 과정에서는 예측 과정에서의 Estimate matrix와 오차 공분산, Measurement matrix를 입력으로 받아 시스템 모델 H matrix를 이용하여 최종 Estimate matrix와 오차공분산을 구하게 된다. 추정과정에서 사용하는 Measurement matrix와 H matrix 구성은 식 (8) 및 식 (9)와 같다. 식 (11)의 measurement matrix는 IMU 센서의 3축 각속도, 가속도, 지자기 출력 값으로 구성된다.

$$z = [W_x \ W_y \ W_z \ a_x \ a_y \ a_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T \quad (8)$$

식 (9)의 H matrix는 Estimate matrix를 Measurement matrix로 연결 시켜주는 matrix로 구성된다.

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\partial h_1}{\partial q_0} & \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & \frac{\partial h_1}{\partial q_2} & \frac{\partial h_1}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_2}{\partial q_0} & \frac{\partial h_2}{\partial q_1} & \frac{\partial h_2}{\partial q_2} & \frac{\partial h_2}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_3}{\partial q_0} & \frac{\partial h_3}{\partial q_1} & \frac{\partial h_3}{\partial q_2} & \frac{\partial h_3}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_4}{\partial q_0} & \frac{\partial h_4}{\partial q_1} & \frac{\partial h_4}{\partial q_2} & \frac{\partial h_4}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_5}{\partial q_0} & \frac{\partial h_5}{\partial q_1} & \frac{\partial h_5}{\partial q_2} & \frac{\partial h_5}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_6}{\partial q_0} & \frac{\partial h_6}{\partial q_1} & \frac{\partial h_6}{\partial q_2} & \frac{\partial h_6}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

그림 16. 적용된 확장칼만필터의 블록 선도.

Fig. 16. Block diagram of applied extended Kalman filter.

IMU 센서에서 나오는 신호잡음을 제거하여 보다 정확한 신호를 받고 다른 센서 신호의 샘플링 시간동안 상태정보를 추정하는 확장 칼만필터 알고리즘을 적용하였다. 구체적인 내용은 참고문헌 [9]에 기술하였다.

V. 실험 및 고찰

개발된 제어시스템을 이용하여 무인잠수정의 경로제어 [10] 등의 실험이 필요하나, 본 논문에서는 우선적으로 HAUV의 동작제어를 하였다. 심도제어와 전방이동 실험을 위하여 depth 센서와 IMU를 사용하여 그림 17과 같이 최적 분배를 위한 행렬 관계식과 함께 PID 제어시스템을 구성하였다.

HAUV의 심도 제어 성능시험을 위해 PID 제어기의 이득을 여러 번의 튜닝을 통해 $K_p = 4.0$, $K_i = 0.2$, $K_d = 0.4$ 로 적용하여 1m의 수심제어를 하였다. 실험은 수조에서 하였고 이때 루프타임은 10 ms로 하였고 실험 중에 약 600개의

그림 17. HAUV를 위한 최적분배입력의 PID 제어.

Fig. 17. PID control with optimal input distribution for HAUV.

그림 18. HAUV의 심도제어결과.

Fig. 18. Depth control result of HAUV.

그림 19. HAUV의 30° 피치각 제어결과.

Fig. 19. 30° Pitch control result of HAUV.

그림 20. HAUV의 30° 롤각 제어결과.

Fig. 20. 30° Roll control of HAUV.

그림 21. HAUV의 30° 롤과 피치 각제어결과.

Fig. 21. Roll and Pitch control for HAUV.

그림 22. 수조에서 30° 롤과 피치 제어 시험하는 사진.

Fig. 22. Picture of 30° Roll and Pitch control test in water tank.

데이터를 샘플링 타임 0.3초 간격으로 저장하여 그림 18에 나타내었다. 1M 심도 제어의 평균 오차 범위는 5.3cm 이내로 확인하였다.

HAUV의 심도 자세제어 성능시험을 위해 PID 제어기의 이득을 $K_p = 3.4$, $K_i = 0.3$, $K_d = 0.4$ 로 적용하여 Roll과 Pitch의 각을 30도로 제어하여 자세를 제어하였으며, 두각을 동시에 제어하였다. 그림 19의 데이터는 IMU를 사용하여 Pitch 축을 제어하여 0.1초의 샘플링 타임으로 약 1200개의 제어결과 데이터를 그래프로 나타내었고 Roll축 제어 결과는 약 1400개의 데이터를 그림 20에 나타내었다.

Roll축과 Pitch축의 제어를 동시에 하였고 0.1초의 샘플링 시간으로 약 1400의 데이터를 받아 그림 21에 정리하였다. 그림 22는 수조에서 HAUV의 깊이 및 자세제어를 하는 실험 모습이다.

그림 23. HAUV의 속도시험결과.

Fig. 23. Velocity test results of HAUV.

각각의 Roll축과 Pitch축의 제어에서 각도 제어결과를 보면 약간의 진동이 있지만 30° 목표의 제어결과 3°도 이내의 각도 오차로 제어성이 우수함을 알 수 있다.

또한, 속도성능 시험을 위해 HAUV를 바다에 투입하여 시험하였는데 심도제어 실험과 같이 동일한 PID 이득을 적용하였다. 실험 중에 DVL 센서를 통해 약 1700개의 데이터를 샘플링타임 0.015초로 저장하여 40m 거리를 통과 하는 속력을 계산하여 그림 23에 나타내었다. 추진체의 속도를 70% 정도로 한 성능 시험결과는 1.577 m/s로 3knot를 초과 하였다. 실험결과를 통해 최대속도로 구동하면 4knot 이상의 속도가 예상된다.

VI. 결론

HAUV라 호칭하는 호버링 가능한 6자유도 AUV의 모듈형 구조설계를 하였고 이를 바탕으로 HAUV를 제작하였다. HAUV의 추진체의 성능시험을 하였고 여분 추진체의 최적 분배에 대한 해석을 하였다. 또한, HAUV의 제어시스템을 설계하고 HAUV에 사용되는 심도센서, IMU, DVL를 이용한 HAUV의 자세제어와 정확한 위치 및 속도 추정을 위한 센서퓨전에 대한 연구를 하였다. 또한, 센서퓨전보드를 직접 제작하고 확장 칼만필터 알고리즘을 포함하는 전체 제어시스템을 설계하였다.

개발한 HAUV의 호버링 성능과 개발한 제어기의 성능 시험을 위해 수중 자세제어 성능시험을 하였고 이를 통해 HAUV의 Roll, Pitch 및 심도가 실시간으로 제어됨을 확인하였다. 실험결과 30°도 피칭의 제어 및 30° 롤링 제어는 각각 평균 3° 오차 내의 제어성능을 나타내었으며, 1m 심도 제어는 평균 5.3cm의 작은 위치오차 내로 제어됨을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] H. Kondo, T. Ura, S. C. Yu, and Y. Nose, "Design of autonomous underwater vehicle tri-dog1 and tank tests," *Proc. of International Symposium Techno-Ocean*, pp. 339-344, 2000.
- [2] G. A. Kantor, N. Fairfield, D. Jonak, and D. Wettergreen, "Experiments in navigation and mapping with a hovering AUV," *Intl. Conf. on Field and Service Robotics*, pp. 115-124, 2007.
- [3] J. Han, J. Jang, W. K. Chung, Y. Choi, and J. Kim,

"Development of a small underwater vehicle/manipulator system for underwater manipulation," *Proc. of 2006 Spring KUUV Workshop*, pp. 42-48, 2006.

- [4] H. S. Choi, K. K. Kim, and B. W. Woo, "Development of a semi autonomous underwater vehicle," *Proc. of 2006 Spring KUUV Workshop*, pp. 31-37, 2006.
- [5] S. W. Byun and J. Y. Kim, "Development of a Hovering AUV for Underwater Explorations," *Journal of Ship and Ocean Technology, SOTEC*, vol. 11, no. 2, pp. 1-9, 2007.
- [6] S. Jin, S. Lee, J. Kim, and T. Seo, "Starfish capture robotic platform: conceptual design and analysis," *Journal of the Korean Society for precision Engineering*, vol. 29, no. 9, pp. 101-108, 2012.
- [7] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Son, New York, 1994.
- [8] ANSYS Inc., *ANSYS CFX-Solver Theory Guide: Release 14.0*, ANSYS Ltd., pp. 139-144, 2011.
- [9] H.-S. Kim, H.-S. Choi, J.-S. Yoon, and R. Paul, "Study on AHRS sensor for unmanned underwater vehicle," *International Journal of Ocean System Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 165-170, 2011.
- [10] 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, June. 2011.

Tran Ngoc Huy

2011년 한국해양대학교 기계시스템 공학과 졸업. 2013년 동 대학원 석사. 2013년~현재 한국해양과학기술원 연구원. 관심분야: 수중운동제어 시스템 설계 및 제어.

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.

정 상 기

2011년 한국해양대학교 기계시스템 공학과 졸업. 2013년 동 대학원 석사 졸업. 2013년~현재 한국해양과학기술원 연구원. 관심분야는 수중운동제어 시스템 설계 및 제어.

최 형 식

1989년 North Carolina 로봇공학(공학박사). 1993년 한국기계연구원 Post Doctor. 2000년~현재 한국해양대학교 기계에너지시스템 공학부(교수). 관심분야는 무인수중로봇, 수중 로봇팔, 외력증강장치, 제어시스템, 수중 항법, 적응제어, 강인제어.

서 정 민

2011년 한국해양대학교 기계시스템 공학과 졸업. 2012년~현재 동 대학원 석사 재학중. 관심분야는 수중 운동체 설계.