

# 개방형 제어 플랫폼 기반 호버링형 무인잠수정 테스트베드 설계 및 성능평가

## Design of a Test bed and Performance Evaluation for a Hovering Type Autonomous Underwater Vehicle under Open Control Platform

최재원\*, 하태규, Eko Henfri Binugroho, 유창호, 서영봉  
(Jae Weon Choi, Tae Kyu Ha, Eko Henfri Binugroho, Chang Ho Yu, and Young Bong Seo)

**Abstract:** This paper presents the design of hardware platform, which is a test bed for the navigation system and hovering type AUV (Autonomous Underwater Vehicle) under the OCP (Open Control Platform). The developed AUV test bed consists of two hulls, four thrusters, and the navigation system which uses a SBC2440II with IMU (Inertial Measurement Unit). And the SMC (Sliding Mode Control) is chosen for the diving and steering control of the AUV. This paper uses ACE/TAO RTEC (Real-Time Event Channel) as a middleware platform in order to control and communicate in the developed AUV test bed. In this paper, two computers are used and each of them is dedicated for the specific purpose, the first computer is used as the SMC module and the middleware platform for the ACE/TAO RTEC and the second computer is used for the sensor controller. We analyze the performance of the AUV test bed under the OCP.

**Keywords:** hovering type AUV, OCP, RTEC, ACE/TAO.

### I. 서론

지난 수년간의 정보통신 분야에서의 발전은 가히 급격한 진보를 이루었다 할만하다. CPU 속도뿐만 아니라 메모리 용량, 통신 대역폭, 통신 속도 역시 상당한 발전을 이루었으며 이와 함께 소프트웨어의 발전 역시 기존에 보여주지 못했던 기능들을 실현시키고 있다. 이러한 정보통신 분야의 발전은 결과적으로 제어공학을 한 단계 발전시키는 원동력이 되었으며, 종래의 실현하기 어려웠던 많은 분야에서 새로운 방법들을 제시하고 있다. 복잡한 시스템에서 요구되는 능력은 빠른 적응력 및 재구성, 시스템 확장, 상호 운용, 그리고 개방성 등으로 요약할 수 있다.

개방형 제어 플랫폼(OCP: Open Control Platform)은 새로운 소프트웨어 기술을 활용하여 이질적인 컴포넌트 간의 분산된 상호작용을 통합하고 실시간으로 컴포넌트의 재구성을 가능하게 하며, 빠르게 변하는 시스템의 요구 조건을 수용하여 새로운 하드웨어 플랫폼 및 센서 기술과 같은 기술들을 기존의 시스템에 쉽게 통합시킬 수 있도록 한다. 또한 이질적인 환경에서 컴포넌트가 상호 운용될 수 있도록 하고, 예기치 못한 환경에서의 시스템 운용 능력을 보장해 준다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 4. 30., 수정: 2009. 7. 7., 채택확정: 2010. 3. 19.

최재원: 부산대학교 기계공학부(choijw@pusan.ac.kr)

하태규: LG전자(taekyume@naver.com)

Eko Henfri Binugroho: 인도네시아 수라바야 공업대학 전자공학과(dev\_art@yahoo.com)

유창호: 부산대학교 지능기계공학과(changhoyu@pusan.ac.kr)

서영봉: 부산대학교 공학교육혁신센터(ybseo@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

Boeing Phantom사는 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 개발을 위해 실시간 CORBA 프로그램을 이용한 OCP를 개발하였고[1], Georgia Institute of Technology에서도 UAV의 임무수행에 있어서 역동적인 재구성 능력과 분산된 컴퓨터 언어 환경에서의 다양한 소프트웨어 컴포넌트의 통합에 초점을 맞춘 연구를 수행한 바 있다[2].

본 논문에서는 무인잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehicle) 테스트베드 개발을 위한 소프트웨어 플랫폼을 구축하기 위하여 미들웨어로써 OCP를 사용하였다. 일반적으로 AUV에 탑재된 센서, 항법장치 등을 이용하여 여러 가지 임무와 작업을 수행할 수 있게 하는 제어시스템과 항법 시스템의 설계과정은 아주 복잡하고 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 AUV 구성요소들 간의 분산된 통신을 지원하고 컴포넌트들 간의 설계절차를 간소화하기 위해 OCP를 적용하였다. OCP를 통해 각 컴포넌트들 간의 통신을 분리할 수 있을 뿐만 아니라, 전체시스템의 재구성 없이 새로운 장비를 추가 또는 분리할 수 있다. 결과적으로 OCP를 적용하여 보다 쉽고 유연한 AUV 개발을 가능하게 해 준다.

수중환경에서는 RF (Radio Frequency) 신호를 사용하기 어려우며, 임무전환 과정에 있어 AUV 운동역학의 부력과 중력에 의한 차이, 부가질량(added mass) 및 저항(drag)에 의한 힘과 모멘트 등의 비선형성이 크게 나타난다. 본 논문에서는 외란이나 부정확한 모델링에 대해 강인한 특성을 가지는 슬라이딩 모드 제어(SMC: Sliding Mode Control)[3]를 AUV에 적용하였다. 그리고 2개의 원통형 선체(hull), 4개의 추진기(thruster) 그리고 3대의 컴퓨터로 구성된 호버링형(hovering type) AUV 테스트베드를 개발하였고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다.

II. OCP 미들웨어

미들웨어는 소프트웨어 컴포넌트나 어플리케이션을 연결 시켜주는 컴퓨터 소프트웨어로, 네트워크상의 모든 컴포넌트 및 어플리케이션의 상호작용을 위한 복합적인 연산을 가능하게 하는 서비스들의 집합이다. 미들웨어라는 용어에서 알 수 있듯이 상호 동일한 운영체제 혹은 이종의 운영체제 사이에 위치하여 중개자적인 역할을 하며, 네트워크 간의 데이터 전송을 위해 요구되는 사항들을 관리한다. 미들웨어 기술은 최근 네트워크를 기반으로 하는 어플리케이션의 급속한 성장으로 그 중요성이 더욱 커지고 있다. 본 논문에서는 AUV 테스트베드 개발을 위해 미들웨어로써 OCP를 사용하였다.

ACE/TAO는 OCP를 지원하는 공개된 소프트웨어로서 공학, 의학, 금융 분야 등 다양한 영역에서 활용되고 있으며, MS Windows, UNIX 뿐만 아니라 많은 실시간 운영체제 및 하드웨어 플랫폼을 지원한다.

OCP 구조는 그림 1에 도시된 것과 같이 몇 개의 계층으로 구성되어 있다. 하드웨어 계층은 PC 또는 임베디드 컴퓨터로 구성되어 있으며, 입력 및 출력 장치와 네트워크 인터페이스를 포함한다. 실시간 이벤트 채널(RTEC: Real-Time Event Channel)은 각 호스트들의 운영체제(OS: Operating System)에 상관없이 운영될 수 있도록 지원하지만, 본 논문에서 사용한 2대의 컴퓨터의 운영체제는 .NET framework를 지원하는 Windows 기반의 운영체제를 사용하였다. ACE/TAO는 기본적으로 운영체제에 독립적인 플랫폼이기 때문에 단일 .NET Framework를 지원하지 않는 운영체제라도 큰 문제가 되지 않는다[4].

표준 CORBA 이벤트 서비스는 실시간 어플리케이션이 요구하는 실시간 이벤트 전달(dispatching) 및 계획 능력, 이벤트 필터링 및 상호 연관(correlation), 주기적 처리(periodic processing) 능력과 같은 중요한 기능이 부족하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Boeing Pantom사 와 워싱턴 대학교는 표준 이벤트 서비스를 바탕으로 실시간 이벤트 서비스(RTES: Real-Time Event Service)를 개발하였다. 즉, RTES는 실시간 어플리케이션의 QoS (Quality of Service) 요구조건인 전송주기, 우선순위, 중요도 등의 조건을 충족시키기 위하여 표준 이벤트 서비스를 확장시킨 것이다[5-7].

RTES는 컴포넌트 사이에서 중개자 역할을 하기 때문에 이를 통해 컴포넌트의 상호연결은 유연한 특성을 가지게 된다. 이러한 특성으로 RTES는 어플리케이션 소프트웨어가

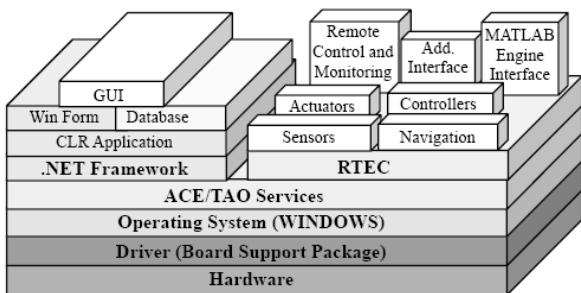


그림 1. OCP 시스템 계층 구조.  
Fig. 1. Hierarchical structure of OCP system.

동일한 프로세서 상에 있는지, 네트워크를 통한 이종의 프로세서들로 이루어진 분산 처리 시스템 상에 있는지 관계 없이 사용할 수 있다. 결과적으로 컴포넌트 기반 구조의 장점을 최대한 활용할 수 있고, 프로그램 코드를 재사용할 수 있다. 또한 컴포넌트들을 시스템에 추가하고 제거하는 재구성 과정에 있어 전체시스템의 재구성이 필요 없는 장점을 가진다[8].

III. AUV 테스트베드

AUV는 수중환경에서 항법시스템 및 각종 계측센서를 탑재하고 자체의 전력을 바탕으로 임무를 수행하는 시스템이다. AUV의 형태는 기본적으로 그림 2와 같이 어뢰형(torpedo type)과 호버링형(hovering type)으로 분류할 수 있으며, 개발목적 및 기능에 따라 그 형태를 설계한다.

어뢰형 AUV는 그림 2(a)에 도시된 바와 같이 매끄러운 재질로 된 하나의 원통형 선체로 이루어져 있어 선체에 대한 저항이 작은 특징을 가진다. 그리고 선체 끝단에 위치한 개의 추진기를 사용하기 때문에 전력 소모가 적은 장점을 가진다. 또한 방향 및 심도 제어를 위해 선체에 방향타(rudder)와 승강타(elevator)가 있으며, 이를 조정하기 위한 서보모터도 필요하다. 하지만 어뢰형 AUV는 선체가 하나 뿐이어서 추가적인 장비를 위한 공간상 제약이 많을 뿐만 아니라, 즉각적인 방향 및 심도 제어가 어려운 단점이 있고 정확한 위치에 정지하여 수행해야 하는 임무를 하기에는 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 그림 2(b)에 도시된 바와 같이 2개의 원통형 선체와 4개의 추진기로 구성되어 있는 호버링형 AUV 테스트베드를 설계한다. 호버링형 AUV는 어뢰형 AUV보다 선체저항은 큰 편이지만 방향 및 심도 제어 시 좁은 범위에서 제어가 가능하며 정확한 위치제어가 가능하다는 장점이 있다. 그리고 하단의 작은 선체에 무거운 배터리를 배치함으로써 선체의 중심과 부력 중심을 일치시켜 선체의 움직임을 안정하게 만들기 용이하다. 결과적으로 안정성 면에 있어 어뢰형 AUV보다 많은 장점을 가지고 있으므로 매니퓰레이터(manipulator) 등을 부착하여 작업하기에 용이한 장점이 있다.

1. 시스템 구성

본 논문에서는 호버링형 AUV 테스트베드를 그림 3에 도시된 바와 같이 설계하였다. 전/후방에 각각 한 개씩의 추진기를 배치하여 심도제어를 할 수 있도록 하였고, 좌/우 측면에 각각 한 개씩의 추진기를 배치하여 방향 및 속도 제어를 할 수 있도록 설계하였다. 하단부의 선체에는 AUV 운용을 위한 배터리를 탑재할 수 있도록 설계하였다. 그림

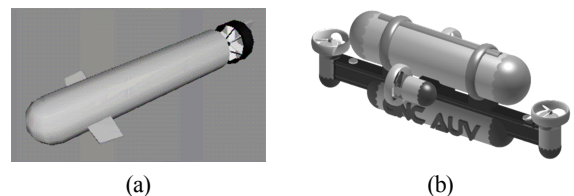


그림 2. (a) 어뢰형 AUV, (b) 호버링형 AUV.  
Fig. 2. (a) Torpedo type AUV, (b) Hovering type AUV.

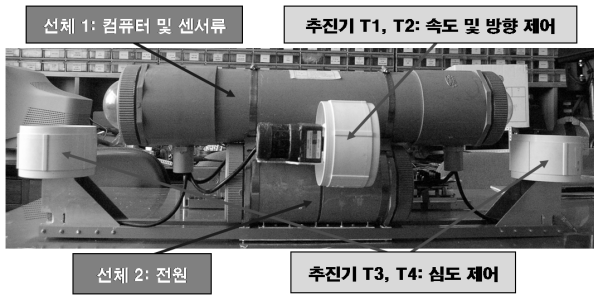


그림 3. 호버링형 AUV 테스트베드.  
Fig. 3. test bed of hovering type AUV.

4는 상단부 선체부분의 하드웨어 구성도를 도시한 것이다. 상단부 선체에는 SBC2440II 컴퓨터 1대, PC104 컴퓨터 1대, IMU 센서 및 모터 드라이브 등의 장비들이 탑재되어 있다. 본 시스템의 메인 컴퓨터 역할을 수행하는 PC104 컴퓨터는 AUV 원격제어 인터페이스를 제공하며 추진기 제어를 위한 인터페이스를 연결하여 구성하였다. SBC2440II 컴퓨터는 관성항법장치, 초음파센서 등의 각종 센서들의 정보를 관리, 감독하는 역할을 한다. 이 두 대의 컴퓨터는 RTEC로 연결하였다.

일반적으로 수중 환경에서 RF 신호는 전파의 감쇠진동에 의한 영향으로 그 도달 범위가 아주 제한적이기 때문에 수중 통신방식으로 사용하기에 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 수중 환경에서는 주로 음향 통신방식

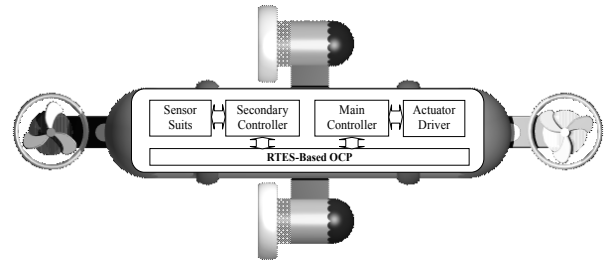


그림 4. 선체 구성도.  
Fig. 4. Compositions of the main hull.

을 사용한다. 음향 통신은 수중에서 넓은 도달 범위를 가지는 장점이 있는 반면에, 전달할 수 있는 데이터의 양이 제한적이고 장비의 가격이 고가인 단점이 있다. 본 논문에서는 간단한 수중 환경에서의 AUV 테스트베드 설계를 목표로 하기 때문에 RF 통신방식을 적용하기에 별 무리가 없다고 판단하여 Wi-Fi 무선인터넷을 사용한 통신시스템을 설계하였다.

그리고 외부 기지국으로 사용되는 컴퓨터 1대는 AUV 명령을 설정하고 조절하며, AUV를 원격으로 제어하는 역할을 하며, AUV에 설치된 센서를 통해 AUV의 속도, 가속도, 장애물 감지 유무 등의 모든 정보를 관리 감독하는 역할을 한다. AUV와 외부 기지국도 RTEC로 연결하였다.

이와 같이 구성한 탑재장비의 상호 인터페이스는 그림 5에 도시된 바와 같이 구성하였다.

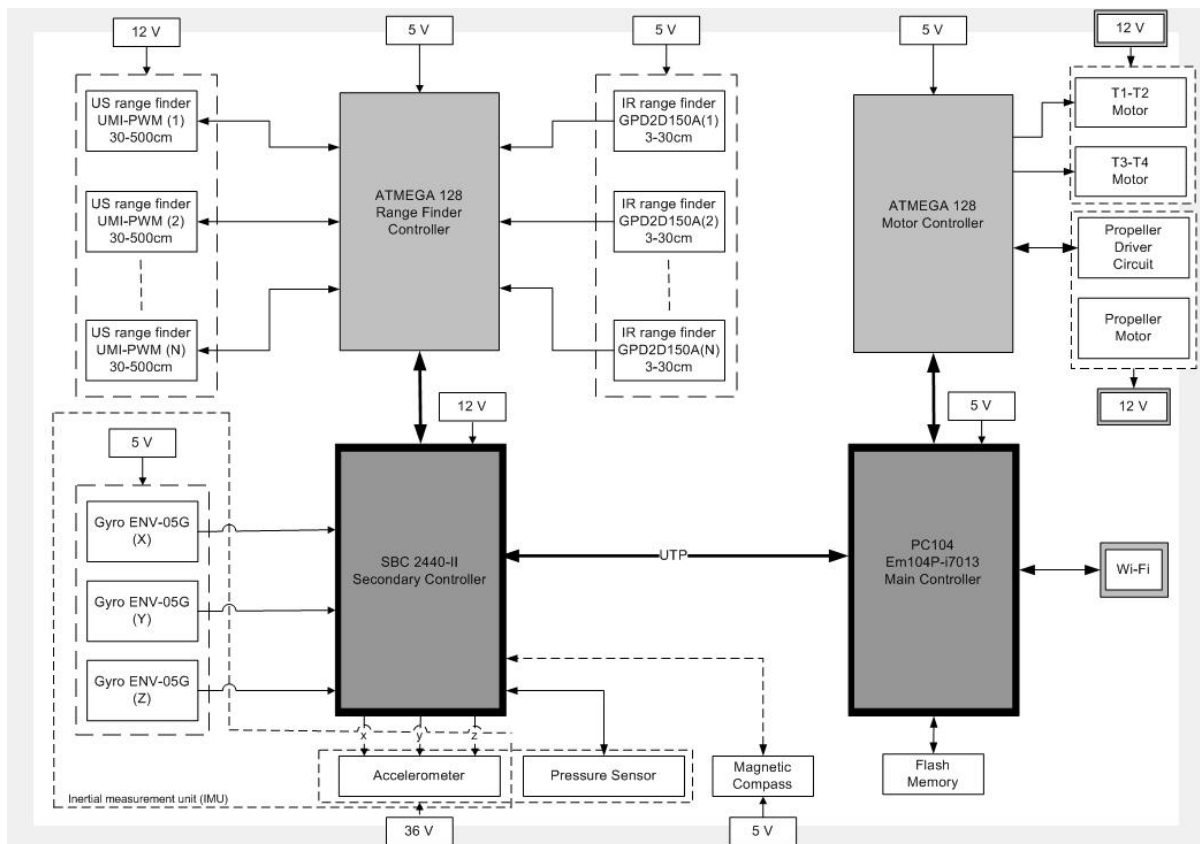


그림 5. 탑재 장비의 인터페이스.  
Fig. 5. Interface of the loaded equipments.

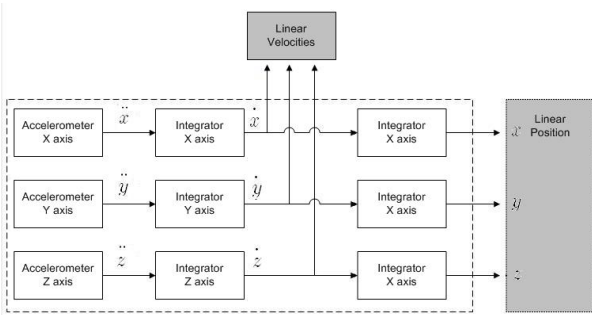


그림 6. 가속도 센서를 통한 AUV 위치 계산.  
Fig. 6. Linear position calculation from the accelerometer sensors.

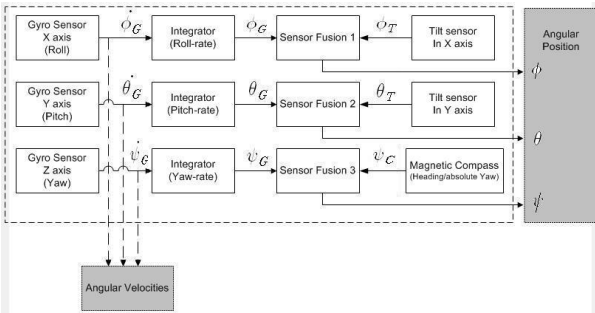


그림 7. 자이로 센서를 통한 AUV 자세 계산.  
Fig. 7. Angular position calculation from the gyro sensors.

1.1 항법시스템

본 논문에서는 AUV의 자세를 측정하기 위하여 3축의 관성 센서로 구성된 항법시스템을 설계하였고, 이를 통해 AUV 중심좌표에 대한 각 변위와 가속도 변위를 측정한다. AUV의 위치 ( $x, y, z$ ) 정보는 그림 6과 같이 관성 센서를 구성하는 가속도계에서 측정된 가속도를 적분하여 속도를 계산하고, 속도를 적분하여 최종적으로 얻어낼 수 있다. 그리고 그림 7과 같이 자이로 센서를 통해 얻어진 각속도 ( $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ )의 적분을 통해 AUV의 자세 ( $\phi, \theta, \psi$ )를 계산할 수 있다. 그림 8은 3개의 자이로 센서와 가속도 센서를 ATMEGA128로 연결하여 구성한 항법시스템을 보여준다. 그림 9와 같이  $aX, aY, aZ$ 는 가속도 센서의 좌표축 방향,

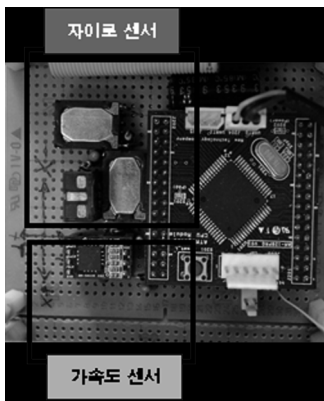


그림 8. 항법시스템의 자이로 센서와 가속도 센서 회로.  
Fig. 8. Circuit for the gyro and accelerometer sensors of the navigation system.

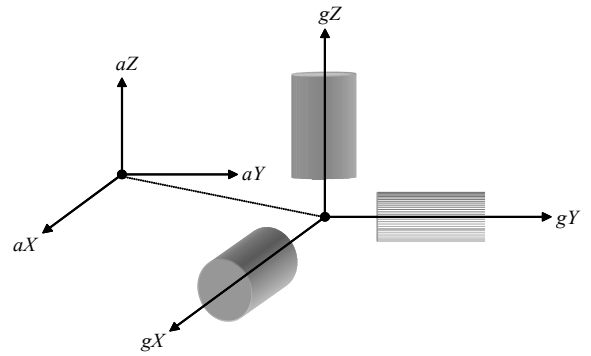


그림 9. 자이로 센서와 가속도 센서의 좌표축.  
Fig. 9. The axis of coordinates for the gyro and accelerometer sensors.

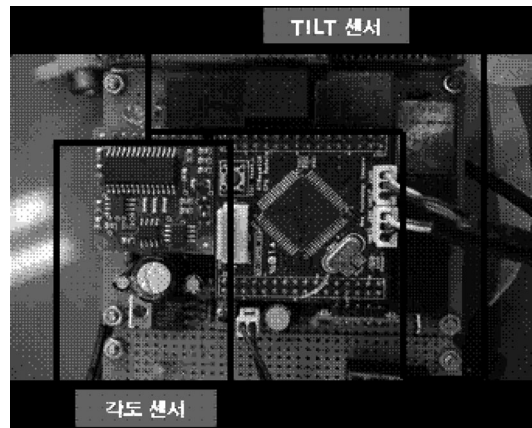


그림 10. 항법시스템의 TILT 센서와 각도 센서 회로.  
Fig. 10. Circuit for the TILT and compass sensors of the navigation system.

$gX, gY, gZ$ 는 자이로 센서의 좌표축 방향을 나타내며, 두 센서 좌표축의 영점을 일치시켰다.

그리고 그림 10에 도시된 바와 같이 TILT 센서와 각도 (compass) 센서를 구성하여 AUV 항법시스템의 방향 및 자세 오차를 보정할 수 있도록 하였다. 일반적으로 자이로 센서는 각 변위에 대한 정보를 제공하여 시간이 지날수록 오차가 누적되는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 TILT 센서와 각도 센서를 통해 AUV의 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)에 대한 각도 정보를 얻고, 이를 통해 자이로 센서 정보를 보정하여 더욱 정확한 롤, 피치, 요에 대한 각도 정보를 구할 수 있다.

그림 7에 도시된 바와 같이 TILT 센서는 X축과 Y축 자이로 센서와 정보 융합을 하고, 각도 센서는 Z축 자이로 센서와 정보 융합을 수행한다. 일반적으로 TILT 센서는 급격한 각도 변화에 대해 큰 오차를 유발하는 특성이 있기 때문에 X축과 Y축 방향의 각속도가 빠를 경우, 자이로 센서 정보를 선택하도록 융합 알고리즘 1, 2를 설계하였다. 그리고 융합 알고리즘 3에서는 AUV의 롤과 피치값이 0에 가까울 때, Z축에 대한 각도 센서의 정보를 사용하고, 롤과 피치값이 클 경우 자이로 센서의 정보를 사용하도록 설계하였다.

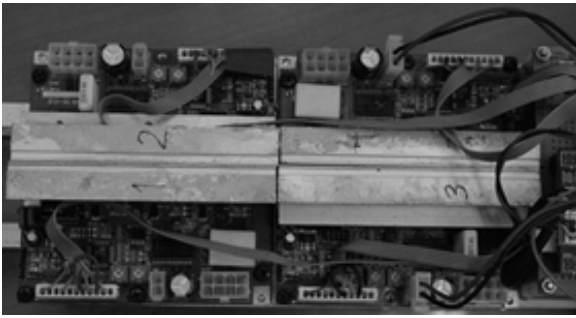


그림 11. 모터 드라이버 회로.

Fig. 11. Circuit for the motor driver.

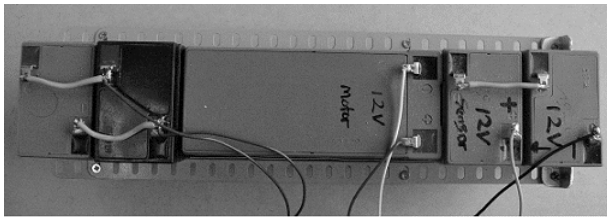


그림 12. AUV 전원부.

Fig. 12. Battery package for the AUV test bed.

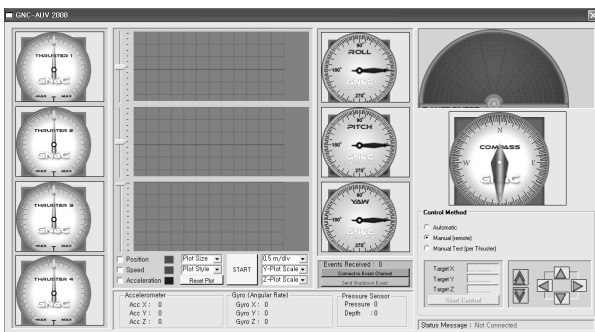


그림 13. AUV 모니터링 시스템.

Fig. 13. Monitoring system for the AUV.

1.2 추진기 구동부

수중에서 호버링형 AUV의 원활한 움직임을 위해 상하 좌우 4개의 추진기를 선체에 부착하였으며, PC104 컴퓨터가 4개의 추진기 모터들과 연결되어 구동시킨다. 추진기 모터 드라이버는 그림 11과 같이 회로를 구성하였다.

1.3 전원부

AUV의 전원부는 그림 12에 도시된 바와 같이 12V-7A와 6V-8A의 배터리로 구성되어 있다. 전원부의 6V 전원은 DC-to-DC 컨버터를 통하여 SBC 컴퓨터, ATMEGA128 및 각종 센서를 위해 5V로 변환하고, Wi-Fi를 위해 3.6V로 변환하도록 전원부의 회로를 구성하였다.

1.4 AUV 모니터링 시스템

AUV 상태 모니터링 및 명령 전달을 위해 그림 13과 같은 GUI 환경의 AUV 모니터링 시스템을 구성하였다. AUV 모니터링 시스템은 각 축 방향의 각도, 방향, 추진기 RPM 및 추진기 입력을 표시해 준다. 또한 각도 센서를 통해 AUV의 방위 정보를 표시할 수 있게 하였다.

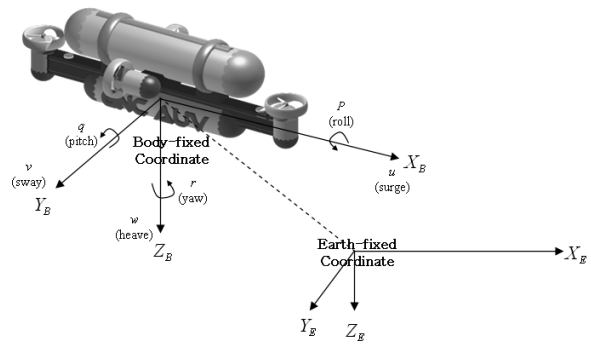


그림 14. 선체고정 좌표계 및 지구고정 좌표계.

Fig. 14. Body-fixed and Earth-fixed coordinate system.

표 1. 좌표계에 따른 AUV 상태변수.

Table 1. States of the AUV according to each coordinate.

	선체고정 좌표계		지구고정 좌표계
	힘 및 모멘트	속도 및 각속도	위치 및 자세
X축 운동	$X$	$u$	$x$
Y축 운동	$Y$	$v$	$y$
Z축 운동	$Z$	$w$	$z$
X축 회전	$K$	$p$	$\phi$
Y축 회전	$M$	$q$	$\theta$
Z축 회전	$N$	$r$	$\psi$

2. AUV 운동방정식

2.1 좌표계 설정

수중을 항해하는 AUV의 위치, 속도 및 자세를 나타내기 위해서는 절대 기준좌표계, 즉 지구고정 좌표계를 정의해야 한다. 또한 AUV에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하기 위해서는 선체고정 좌표계의 설정이 필요하다.

지구고정 좌표계는 AUV가 출발하는 지점에 대한 해수면 상의 한 점을 원점으로 하여 운동체가 출발하는 방향이 해수면에 투영된 방향을  $X_E$  축, 해수면에 수직인 아래쪽 방향을  $Z_E$  축, 그리고 오른손 법칙에 따라 이미 구해진 두 축으로부터 결정되는 방향을  $Y_E$  축으로 정한다.

선체고정 좌표계는 AUV의 무게중심을 원점으로 하고 원점에서 선수로 향하는 주 대칭면상의 축을  $X_B$  축, 이 축에 수직으로 주 평면상에서 아래쪽으로 향하는 방향을  $Z_B$  축, 그리고 오른손 법칙에 의하여 결정되는 우현으로 향하는 방향을  $Y_B$  축으로 정한다. 이들 지구고정 좌표계와 선체고정 좌표계의 관계를 도시하면 그림 14와 같고, 좌표계에 따른 AUV의 상태변수들은 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 AUV 운동방정식 유도

본 논문에서는 Fossen[9]과 Yuh[10]가 제안한 AUV 모델을 기초로 하여 운동방정식을 유도하였다. 운동방정식의 간략화를 위해 스웨이(sway) 및 롤 방향의 운동을 무시하고, AUV 부력중심은 선체 중앙에 위치하고, AUV 선체를 상하 좌우 대칭이라고 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 선체고정 좌표계에서의 호버링형 AUV의 상태공간 및 측정 방정식을 나타내면 식 (1)과 같다.

표 2. 호버링형 AUV 테스트베드 변수 및 수치.

Table 2. Parameters and numerical values of the hovering type AUV test bed.

변수	정의	수치	단위	변수	정의	수치	단위
$m$	mass	30	$Kg$	$Z_w$	linear damping in heave movement	10	$Kg/sec$
$X_u$	added mass in surge movement	5	$Kg$	$Z_{w w }$	quadratic damping in heave movement	5	$Kg/m$
$Z_w$	added mass in heave movement	5	$Kg$	$K_p$	linear damping coefficient for roll movement	4.5	$Nmsec/rad$
$K_p$	added mass in roll movement	2	$Kgm^2$	$K_{p p }$	quadratic damping coefficient for roll movement	1.3	$Nmsec^2/rad^2$
$M_q$	added mass in pitch movement	2	$Kgm^2$	$M_q$	linear damping coefficient for pitch movement	4	$Nmsec/rad$
$N_r$	added mass in yaw movement	4	$Kgm^2$	$M_{q q }$	quadratic damping coefficient for pitch movement	1.6	$Nmsec^2/rad^2$
$B$	buoyancy force	295	$N$	$N_r$	linear damping coefficient for yaw movement	5	$Nmsec/rad$
$W$	weight force	294	$N$	$N_{r r }$	quadratic damping coefficient for yaw movement	2.1	$Nmsec^2/rad^2$
$I_x$	moment of inertia in roll movement	3	$Kgm^2$	$z_B$	distance of the center of buoyancy from the center of gravity at z axis	0.026	$m$
$I_y$	moment of inertia in pitch movement	4	$Kgm^2$	$z_T$	distance of the thruster $T_1, T_2$ from the center of gravity at z axis	0.01	$m$
$I_z$	moment of inertia in yaw movement	4	$Kgm^2$	$y_T$	distance of the thruster $T_1, T_2$ from the center of gravity at y axis	0.25	$m$
$X_u$	linear damping in surge movement	11	$Kg/sec$	$x_T$	distance of the thruster $T_3, T_4$ from the center of gravity at x axis	0.057	$m$
$X_{u u }$	quadratic damping in surge movement	5.5	$Kg/m$				

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$y_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ r \end{bmatrix},$$

여기서,

$$a_{11} = \frac{-(X_u + X_{u|u|}|u|)}{m + X_u}, \quad a_{22} = \frac{-(Z_w + Z_{w|w|}|w|)}{m + Z_w},$$

$$a_{33} = \frac{-(M_q + M_{q|q|}|q|) + z_B B \sin\theta}{I_y + M_q}, \quad a_{44} = \frac{-(N_r + N_{r|r|}|r|)}{I_z + N_r},$$

$$b_{11} = b_{12} = \frac{1}{m + X_u}, \quad b_{23} = b_{24} = \frac{-1}{m + Z_w},$$

$$b_{31} = \frac{-z_{T1}}{I_y + M_q}, \quad b_{32} = \frac{-z_{T2}}{I_y + M_q},$$

$$b_{33} = \frac{-x_{T3}}{I_y + M_q}, \quad b_{34} = \frac{-x_{T4}}{I_y + M_q},$$

$$b_{41} = \frac{-z_{T1}}{I_z + N_r}, \quad b_{42} = \frac{-z_{T2}}{I_z + N_r},$$

그리고  $[T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]$ 는 추진기에 의한 추력벡터를 나타낸다.

식 (1)로 표현된 AUV 상태공간 방정식을 지구고정 좌표계로 변환하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 통해 AUV의 위치 및 자세 정보를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\theta\cos\psi & 0 & 0 \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\theta\sin\psi & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tan\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (2)$$

식 (1)에서 유도된 상태공간 방정식을 구성하는 변수들의 정의와 본 논문에서 설계한 호버링형 AUV 테스트베드의 수치 및 단위를 정리하면 표 2와 같다.

#### IV. 슬라이딩 모드 제어기 설계

AUV의 심도 및 방향을 제어하기 위해 본 논문에서는 모델 불확실성에 대해 강인한 특성을 가지는 슬라이딩 모드 제어(SMC: Sliding Mode Control) 기법을 적용하였다. SMC를 통해 OCP 환경에서의 시간 지연에 대해 대처 가능하며, 앞 장에서 정리한 호버링형 AUV의 수학적 모델의 비선형성에 대해 강인하게 대처할 수 있다.

##### 1. 심도 제어기

호버링형 AUV의 심도 제어에  $T_3$ 와  $T_4$ 의 추력만 영향을 준다고 가정하면, 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 심도 제어를



위한 상태공간 및 측정 방정식을 구할 수 있으며, 각각의 변수에 표 2의 수치들을 대입하면 식 (3)과 같이 간략하게 나타낼 수 있다[11].

극점을  $(-0.29, -0.3)$ 으로 선정하면 슬라이딩 평면 (sliding surface)은 식 (4), 식 (5)와 같이 설계할 수 있으며, SMC는 식 (6), 식 (7)과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.28571 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.66667 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.02857 & -0.02857 \\ -0.00950 & -0.00950 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$y_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\sigma_1 = w + 0.3(z - z_c), \quad (5)$$

$$T_3 = 0.25w - 19.8246q + 17.5\{q_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + r_1 \sigma_1\} + 52.6316\{q_2 \operatorname{sgn}(\sigma_2) + r_2 \sigma_2\}, \quad (6)$$

$$T_4 = 0.25w - 19.8246q + 17.5\{q_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + r_1 \sigma_1\} - 52.6316\{q_2 \operatorname{sgn}(\sigma_2) + r_2 \sigma_2\}, \quad (7)$$

여기서,  $z_c$ 는 명령 심도를 나타내고,  $q_1 = q_2 = 0.0001$ ,  $r_1 = r_2 = 1$ 이다.

## 2. 방향 제어기

호버링형 AUV의 방향 제어에  $T_1$ 와  $T_2$ 의 추력만 영향을 준다고 가정하면, 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 방향 제어를 위한 상태공간 및 측정 방정식을 구할 수 있으며 표 2의 수치들을 대입하면 식 (8)과 같이 간략하게 나타낼 수 있다[11].

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.14286 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.62500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \\ \psi \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.02857 & 0.02857 \\ 0.00125 & -0.00125 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$y_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \\ \psi \\ x \end{bmatrix}.$$

극점을  $(-0.15, 0)$ 으로 선정하면 슬라이딩 평면은 식 (9), 식 (10)과 같이 설계할 수 있으며, SMC는 식 (11), 식 (12)와 같이 설계할 수 있다.

$$\sigma_1 = (u - u_c) + 0.15x, \quad (9)$$

$$\sigma_2 = r - r_c, \quad (10)$$

$$T_1 = -0.125u + 250r - 17.5q_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + r_1 \sigma_1 - 400q_2 \operatorname{sgn}(\sigma_2) + r_2 \sigma_2, \quad (11)$$

$$T_2 = -0.125u - 250r - 17.5q_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + r_1 \sigma_1 + 400q_2 \operatorname{sgn}(\sigma_2) + r_2 \sigma_2, \quad (12)$$

여기서,  $u_c$ 는 서지(surge) 명령,  $r_c$ 는 요(yaw) 명령을 나타내고,  $q_1 = q_2 = 0.01$ ,  $r_1 = r_2 = 1$ 이다.

## V. 모의 실험

본 논문에서 설계한 항법시스템 및 추진기 모터 드라이버로 구성된 호버링형 AUV 테스트베드를 위한 소프트웨어 플랫폼의 성능을 평가해 본다. 이를 위해 OCP 환경에서의 실험 결과와 Matlab SIMULINK 결과를 통해 AUV의 심도 및 방향 제어를 위해 적용한 SMC 성능 및 시간지연에 대한 성능을 비교 평가해 본다.

### 1. 모의 실험 환경

본 논문에서는 호버링형 AUV 최종 설계 이전 단계의 AUV 테스트베드를 설계하였다. 모의 실험 환경은 그림 15와 같이 구성하였고, 이를 위해 100Hz(10ms)의 데이터 전송주기를 가지는 RTEC로 AUV와 2대의 PC를 연결하였다. PC 1은 AUV 심도 및 방향 제어를 위한 제어 입력을 계산하고 PC 2는 항법시스템을 위한 센서들과 추진기 모터 드라이버를 탑재하여 데이터 수집 및 추진기 제어의 역할을 한다.

기본적으로 RTEC를 통해 PC 1에서 계산된 제어 입력을 PC 2로 보내고, 이는 PC 2의 추진기 드라이버 입력으로 사용한다. 그리고 PC 2의 항법시스템이 AUV의 위치, 자세 및 속도 등을 계산하여 RTEC를 통해 다시 PC 1로 전송한다. RTEC는 C 프로그램으로 작성되었기 때문에 Matlab 프로그램과의 연결을 위해 C++ 프로그램에서 제공하는 "engine.h"를 사용하였다[12].

하지만 본 논문은 AUV 테스트베드에 관한 연구이므로 실제 수조실험은 수행하지 않았고, OCP 환경에서의 SMC 기법의 성능과 통신 시간지연에 대한 성능을 평가해 보았다. 이를 위해 OCP 환경의 실험에서는 AUV에 탑재된 두 대의 PC 사이에 발생하는 실질적인 시간지연을 고려하였고, 시간지연을 고려하지 않은 Matlab SIMULINK 결과와 비교 평가하였다.

### 2. 모의 실험 결과

그림 16은 OCP 환경에서의 AUV 테스트베드 심도 제어

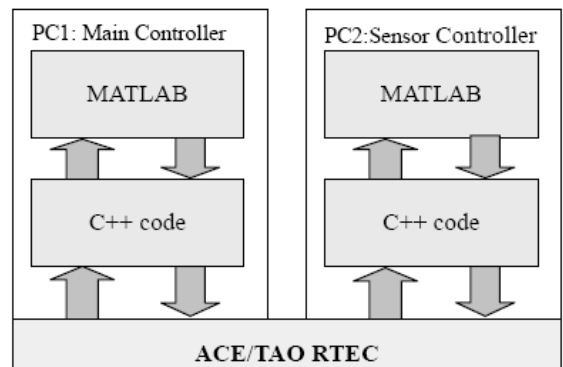


그림 15. AUV 테스트베드 모의 실험 환경.

Fig. 15. Simulation environment for the AUV test bed.

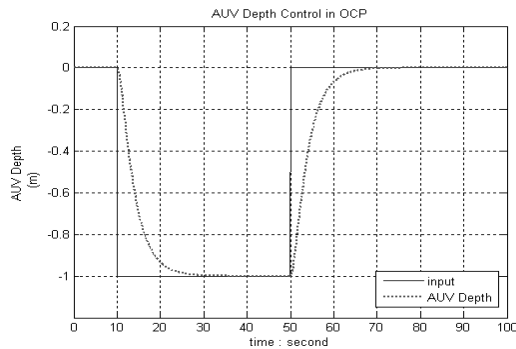


그림 16. OCP 환경에서의 AUV 테스트베드 심도 제어.

Fig. 16. Depth control for AUV test bed under OCP.

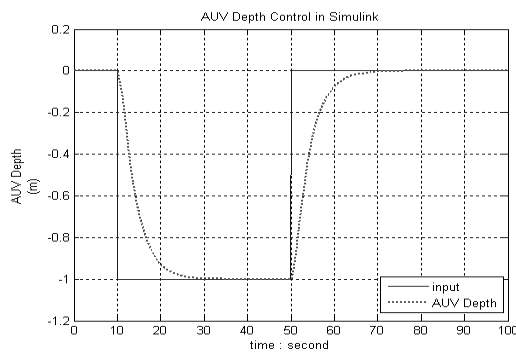


그림 17. SIMULINK를 통한 AUV 심도 제어.

Fig. 17. Depth control for AUV by SIMULINK.

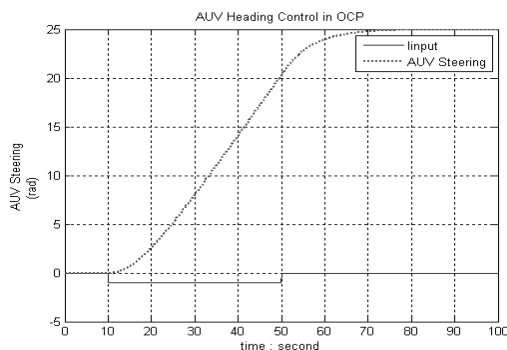


그림 18. OCP 환경에서의 AUV 테스트베드 방향 제어.

Fig. 18. Steering control for AUV test bed under OCP.

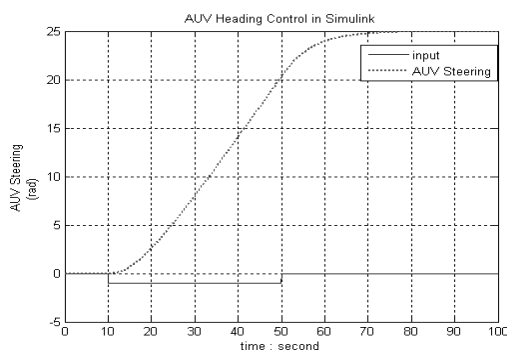


그림 19. SIMULINK를 통한 AUV 방향 제어.

Fig. 19. Steering control for AUV by SIMULINK.

의 결과를 보여주고, 그림 17은 Matlab SIMULINK를 통한 AUV 심도 제어의 결과를 보여준다. 그림에 도시된 바와 같이 명령 심도는  $-1m$ 로 설정하였고, 40초 동안  $-1m$ 의 심도를 유지하도록 하였다. 그림 16과 그림 17의 비교를 통해, 실제 OCP 환경의 테스트베드 실험 결과와 SIMULINK 결과는 거의 유사한 성능을 보임을 알 수 있었다.

그리고 그림 18은 OCP 환경에서의 AUV 테스트베드 방향 제어의 결과를 보여주고, 그림 19는 Matlab SIMULINK를 통한 AUV 방향 제어의 결과를 보여준다. 그림에 도시된 바와 같이 서지 및 요 명령은 각각  $4Kts$ 와  $0.2rad$ 으로 40초 동안 일정하게 회전하도록 하였다. 그림 18과 그림 19의 비교를 통해, 심도 제어의 결과와 마찬가지로 실제 OCP 환경의 테스트베드 실험 결과와 SIMULINK 결과는 거의 유사한 성능을 보임을 알 수 있었다. 결과적으로 OCP 환경에서의 시간지연은 제어기 성능에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

## VI. 결론

본 논문에서는 OCP 환경에서의 호버링형 AUV의 하드웨어 구현을 위한 테스트베드를 설계하였다. 이를 위해 SBC2440II, PC104 기반의 항법시스템과 추진기 모터 드라이버를 설계하였고, AUV의 심도 및 방향을 제어하기 위해 모델 불확실성에 대해 강인한 특성을 가지는 SMC 기법을 적용하였다. 특히 SMC 기법은 OCP 환경에서 센서와 제어기 간의 통신에서 발생하는 시간지연에 대해 강인한 특성을 가짐을 알 수 있었다. OCP는 실시간 높은 확장성을 보장하며, 이러한 확장성을 바탕으로 임무 전환 시 빠르게 AUV를 적합한 시스템으로 재구성할 수 있어 상대적으로 AUV의 임무에 대한 제약에 유연하게 대처할 수 있는 장점을 가진다. 향후 본 논문에서 설계한 호버링형 AUV 테스트베드의 하드웨어 보강을 통하여 실제 수중환경에서의 다양한 AUV 제어 기법들의 성능 평가를 수행할 계획이다.

## 참고문헌

- [1] T. Samad, and G. Balas, *Software-Enabled Control: Information Technology for Dynamic Systems*, NJ, Wiley IEEE Press, Piscataway, 2003.
- [2] L. Wills, S. Kannan, S. Sander, M. Guler, B. Heck, J. V. R. Prasad, D. Schrage, and G. Vachtsevanos, "An open platform for reconfigurable control," *IEEE Control Systems Magazine*, June 2001.
- [3] K. D. Young, and Umit Ozgiiner, "Sliding mode: control engineering in practice," *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, California June 1999.
- [4] E. H. Binugroho, T. K. Ha, J. W. Choi, and N. G. Ko, "Modeling of hovering AUV test bed and design of ACE/TAO RTES-based open control platform," *Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference (ISOPE'09)*, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, pp. 644-650, June 2009.



[5] C. D. Gill, David L. Levine, and D. C. Schmidt, "The design and performance of a real-time CORBA scheduling service," *Journal of Real-Time System*, Springer Netherlands, vol. 20, no. 2, March 2001.

[6] D. C. Schmidt, and S. Vinoski, "Object interconnections," *The OMG Events Service*, Column 9, February 1997.

[7] D. C. Schmidt and C. O'Ryan, "Patterns and performance of distributed real-time and embedded publisher/subscriber architectures," *Journal of Systems and Software*, Elsevier Science Inc., vol. 66, no. 3, pp. 213-223, June 2003.

[8] H. M. Huang, and C. D. Gill, "Design and performance of a fault-tolerant real-time CORBA event service," *Proceedings of the 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems*, 2006.

[9] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicle*, John Wiley & Sons, 1994.

[10] J. Yuh, "Modeling and control of underwater robot vehicles," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, pp. 1475-1483, 1990.

[11] 양승윤, 이만형, "수중운동체의 조종제어기 설계 연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권 제3호, pp. 850-860, 1996.

[12] <http://www.mathworks.co.kr/support/compiler/interface.html>.



**최재원**

1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 제어계측공학과 공학석사. 1995년 서울대학교 대학원 제어계측공학과 공학박사. 1999년 8월~현재 IFAC Technical Committee on Aerospace 및 Technical Committee on Linear Systems 운영위원. 2000년 1월~현재 IEEE Control Systems Society Conference Editorial Board, Associate Editor. 2003년 3월~현재 IJCAS Editorial Board, Editor. 2007년 11월~현재 부산대학교 공학교육혁신센터, 공학교육혁신거점센터 센터장. 2009년 1월~현재 교육인증지원센터 센터장. 2008년 9월~현재 한국산업기술진흥원 해양메카트로닉스 R&D인력양성 실험실컨소시엄 사업단장. 2008년 9월~현재 교육과학기술부 공학교육혁신위원회 위원. 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 2000년 5월 한국과학기술단체총연합회 수여 제10회 과학기술우수논문상 수상. 2002년 4월 제 35회 과학의 날 과학기술진흥유공포상 국무총리 표창수상. 2008년 10월 제어로봇시스템학회 고명삼 학술상수상. 2009년 11월 공학교육혁신유공 교육과학기술부장관 표창. 관심분야는 수중센서망기반 표적추적기법, 수중로봇의 항법 및 유도제어, OCP (Open Control Platform) 설계기술, 추적필터 설계, 자동차-항공기 공용 제어기 설계기술, 선형시변시스템 제어 이론.



**하태규**

2005년 홍익대학교 기계공학부 졸업. 2009년 부산대학교 대학원 기계공학부 공학석사. 2009년~현재 (주)LG전자 연구원. 관심분야는 무인잠수정, 개방형 제어 플랫폼, 슬라이딩 모드 제어기법.



**Eko Henfri Binugroho**

2001년 인도네시아 수라바야 공업대학 전자공학과 졸업. 2009년 부산대학교 대학원 지능기계공학과 공학석사. 2009년~현재 인도네시아 수라바야 공업대학 전자공학과 강사. 관심분야는 무인잠수정, 개방형 제어 플랫폼, 슬라이딩

모드 제어기법.



**유창호**

2002년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2002년~현재 부산대학교 대학원 지능기계공학과 석·박사 통합과정. 2009년 8월 ICROS-SICE International Joint Conference 2009 수여 Student Travel Grant Award 수상. 관심분야는 수중무선센서망 표적추적필터 이론, 센서 로컬라이제이션 이론, 항법 및 유도제어 시스템.



**서영봉**

1997년 부산대학교 기계설계공학과 졸업. 1999년 부산대학교 대학원 기계공학부 공학석사. 2003년 부산대학교 대학원 기계공학부 공학박사. 2005년 중국 하얼빈공대 박사후과정. 2006년 부산대학교 박사후과정. 2008년 2월~11

월 부산대학교 공학교육혁신센터 전임연구원. 2008년 11월~현재 부산대학교 공학교육혁신센터 연구교수. 관심분야는 복합시스템 고장 검출 이론, 수중운동체용 항법 및 유도제어 시스템을 위한 소프트웨어 기능강화제어, 자동차-항공기 공용 제어기 설계기술.