

# 소형무인잠수정(AUV) 이심이의 개발 및 시험

전봉환\* · 박진영\*\* · 이관목\* · 이필엽\* · 이종무\* · 오준호\*\*

\*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부  
\*\*한국과학기술원 휴머노이드 로봇 연구센터

## Development and Trials of an Small Autonomous Underwater Vehicle 'ISiMI'

BONG-HUAN JUN\*, JIN-YEONG PARK\*\*, PAN-MOOK LEE\*, FILL-YOUB LEE\*, JONG-MOO LEE\*, AND JUN-HO OH\*\*

\*\*Ocean Engineering Research Department, MOERI, KORDI, Daejeon, Korea  
\*\*Humanoid Robot Research Center, KAIST, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Autonomous Underwater Vehicle 자율무인잠수정, Auto depth control 심도자동제어, Auto heading control 선수각자동제어, ISiMI 이심이, System design 시스템설계, Tank test 수조시험

**ABSTRACT:** Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI), a branch of KORDI, has designed and manufactured a model of an autonomous underwater vehicle (AUV) named ISiMI(Integrated Submergible for Intelligent Mission Implementation). ISiMI is an AUV platform to satisfy the various needs of experimental test required for development of challenging technologies newly investigated in the field of underwater robot; control and navigational algorithms and software architectures. The main design goal of ISiMI AUV is downsizing which will reduce substantially the operating cost compared to other vehicles previously developed in KORDI such as VORAM or DUSAUV. As a result of design and manufacturing process, ISiMI is implemented to be 1.2m in length, 0.17m in diameter and weigh 20 kg in air. A series of tank test is conducted to verify the basic functions of ISiMI in the Ocean Engineering Basin of MOERI, which includes manual control with R/F link, auto depth, auto heading control and a final approach control for underwater docking. This paper describes the implementation of ISiMI system and the experimental results to verify the function of ISiMI as a test-bed AUV platform.

### 1. 서 론

한국해양연구원 해양탐사장비연구사업단에서는 지난 10년간 축적된 경험과 기술을 토대로 새로운 소형 AUV '이심이 (ISiMI; Integrated Submergible for Intelligent Mission Implementation)'를 개발하였다. '이심이'란 이름은 우리나라에 전해 내려오는 이야기 속의 작지만 강하고 정의로운 물고기 이름에서 유래되었다. 그동안 해양연구원에서 개발되었던 보람 AUV(전봉환 등, 1997)와 DUSAUV(Hong et al., 2002)의 경험으로부터 얻은 새로운 테스트베드 AUV에 대한 강력한 요구사항은 소형화에 대한 필요성이었다. AUV의 크기와 사양은 AUV의 목적과 임무에 따라 결정되지만 개발과 운용에 필요한 비용 또한 설계의 제약조건이 된다.

새로이 개발된 소형 AUV 이심이의 목적은 향후 다양한 수요에 의해 개발될 일련의 유사 AUV들에 대한 표준 전형으로서의 역할을 수행하는 것이다. 즉, AUV의 기계적 구조와 수밀 및 구동메카니즘에서부터 전기·전자·계측 제어시스템, 소프트웨어

의 기술들을 참조할 수 있도록 시험 검증하는 것이다. 특히, 중점을 두는 것은 이론적 연구와 실제 현상 사이의 차이에 의해 나타나는 문제점들을 실험적으로 표면화시키고 이를 위한 대책을 사전에 수립하는 것이다.

본 논문에서는 새로이 개발된 AUV 이심이의 설계목적과 개념을 비롯하여 하드웨어 및 소프트웨어의 구현, 그리고 테스트 베드로서의 기능 확인을 위해 해양공학수조에서 수행된 수조시험 결과를 제시한다.

### 2. 설계개념

#### 2.1 기본 설계 개념

이심이 AUV 설계 개념의 핵심은 2인 이하의 운용자가 크레인 같은 보조 장비 없이 진수/인양, 운용, 그리고 유지보수 할 수 있는 AUV를 구현하는 것이다. 이심이의 설계과정은 소형화와 상반되는 설계항목들과의 트레이드 오프 과정으로 진행되었다. 예를 들면, 이심이의 운용시간은 배터리의 탑재공간과 밀접히 연관되어 있으며, 탑재되는 프로세서 및 센서들의 종류와 수량, 그리고 향후 확장성을 고려한 여유공간과 여유부력 등이 이심이의 총 중량과 크기에 연동되어 있는 설계의 항목들이었다.

전봉환 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7531 bhjeon@moeri.re.kr

어 그리고 동역학모델에 이르기까지 AUV 개발에 필요한 일련

## 2.2 설계목표

이십이의 설계개념을 고려하여 설정된 설계의 목표는 다음과 같이 요약된다.

1) 소형경량설계 : 추가적인 센서나 장비의 탑재를 위한 여유 부력을 포함한 후에도 크레인 없이 1~2인에 의해 쉽게 진수/인양 가능하도록 약 20~30kg 범위 내에서 제작되어야 한다.

2) 운용 속도와 거리 : 약 2노트의 속도로 2시간 이상의 운항이 가능하여야 한다.

3) 외형선형 : 수학적모델의 추정이 용이하고 추진 효율을 높일 수 있도록 현재 실험적으로 알려진 선형을 이용하여 유체저항계수가 적고 충분한 탑재공간을 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 최대심도는 최소 20m 이상이어야 한다.

4) 연산 및 데이터 처리 능력 : 탑재되는 주처리 컴퓨터는 임무수행을 위한 충분한 계산능력을 갖도록 Pentium III급 이상의 능력을 갖추어야 하며 취득 데이터를 자체 저장할 수 있는 저장능력을 확보하여야 한다.

5) 신뢰성 호환성 : 탑재장비나 부시스템의 고장과 오동작의 빈도를 최소화하고 신뢰성을 높이기 위해 성능이 검증된 장비가 선정되어야 하고, 지속적이고 안정적으로 공급되는 장비들을 선정 하여 고장발생시 즉각적인 대처가 가능하여야 한다.

6) 확장성 : 기본 기능에 포함되어 있지 않은 기능을 추가로 확장할 경우, 기계적으로나 전기적인 기본 설계의 변경을 최소화 하면서 가능하여야 한다.

## 3. 이십이 AUV 시스템

### 3.1 시스템 개요

이십이 AUV 시스템은 기계부, 제어부, 계측부, 통신부로 크게 나누어질 수 있다. 기계부는 외형선체와 추진 및 조종제어 장치를 포함하고, 제어부는 컴퓨터 및 전기 인터페이스 장치와 소프트웨어를 포함한다. 계측부는 이십이의 제어 또는 임무수행을 위해 설치되는 다양한 센서들이며, 통신부는 수면위의 외부 시스템 또는 수중의 다른 잠수정과의 정보 교환을 위한 장치이다. 조립된 이십이 AUV의 외관은 Fig. 1과 같으며, 외형치수와 무게정보는 Table 1에 나타내었다. 내부에 탑재된 장비는 Fig. 2와 같이 배치되었다. 각 부 시스템의 설계과정과 결과는 계속되는 소절에서 언급한다.

### 3.2 외형선체 및 구동장치

이십이의 선형은 선체 지름과 길이의 비가 주어져 있을 경우, 최소의 유체저항계수를 갖는다고 알려진 Myring 선형식을 이용하여 설계하였다. 선형은 선수부, 중앙부 그리고 선미부로 나뉘어진다. 총 길이는 1.2m, 최대지름이 170mm이다. Fig. 2에 외형선체의 분해도를 나타내었다. 중앙부는 내압선체로 알루미늄으로 제작하였고, 선수부는 폴리우레탄으로 제작하였으며, 선미부의 일부는 부력재로 제작하여 여유부력을 고려하였다.

제어판의 단면은 NACA 0012를 선정하였고 제어판 구동모터로는 HYBRID 43000 리니어 스테핑 모터 시리즈로 선정하였다. 한 쌍의 수직타는 하나의 스테핑 모터에 의해 일괄 구동되고,

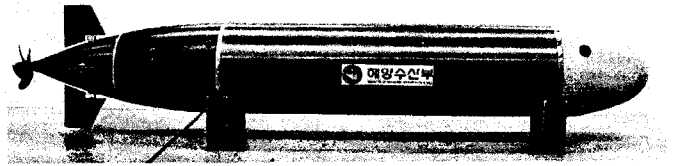


Fig. 1 Appearance of ISiMI

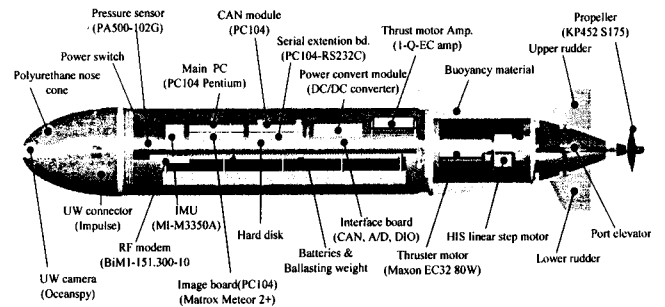


Fig. 2 General arrangement of the AUV ISiMI system

수평타는 각각의 스테핑모터에 의해 각각 제어될 수 있다. 제어판에 요구되는 최대의 모멘트를  $10 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 으로 추정하고 방향타의 축과 방향타 구동기 축간의 거리가  $5 \text{ cm}$ 라 하면 구동기에 필요한 최대 힘은 약 20 N이다. 수평타의 구동기는 최대 25 N, 수직타의 구동기는 최대 50 N의 사양으로 선정하였다.

이십이에 사용될 추진기의 용량을 추정하기 위하여 Fig. 3과 Table 1에 나타난 이십이의 외형을 이용하여 다음과 같은 항력식으로 저항을 계산하고 추진마력을 추정하였다.

$$F_d = -\frac{1}{2} C_d \rho A_f u |u| \quad (1)$$

선체의 저항계수는 0.2로 물의 밀도는  $4^\circ\text{C}$  청수를 가정하여  $1,000 \text{ kg/m}^3$ 로 하였으며 프로펠러와 추진축계 및 모터의 효율을 0.4로 하여 추정하였다. 그 결과 속도에 따라 필요한 마력은 Table 2와 같이 나타났다. 추진기는 모형시험에 사용되는 소형 프로펠러 중에서 KP452 S175 모델을 선정하였다. 이에 따라 추

Table 1. Dimensions of ISiMI

parameter	value	unit	description	remarks
<i>L</i>	1,996	mm	overall length	
<i>D</i>	170	mm	diameter	
<i>V</i>	21783799.6	mm <sup>3</sup>	volume	include fin
<i>W</i>	about 19	kg	weight	
<i>B</i>	215.82	N	buoyancy	$\rho=1000$
<i>CB</i>	(627.9, 0, 0)	mm	center of buoyancy from nose	

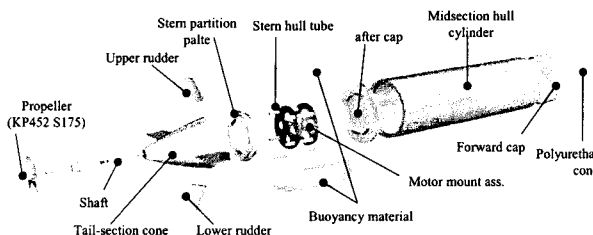


Fig. 3 Conceptual view of hull structure of ISiMI

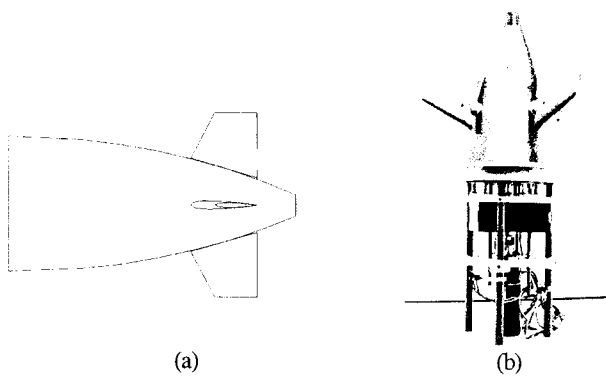


Fig. 4 Dimension and implementation of stern plane

진모터는 모터와 앰프의 크기, 용량, 그리고 rpm을 고려하여 5.8:1 기어를 장착한 Maxon사의 EC32모터를 선정하였다. Table 2의 추정결과와 이십이의 제어시스템에서 사용되는 기본 전력을 고려하여 이십이의 최대 속도는 약 2m/sec 이상으로 추정되며 이는 4장에서 보인 실험결과와 일치하고 있다.

### 3.3 제어시스템

이십이의 제어시스템은 펜타움 싱글보드 프로세서를 중심으로 PC104 버스를 통하여 프레임 그래픽과 시리얼 확장용 보드 그리고 CAN(Controller Area Network)모듈이 인터페이스 되어 있다. 아날로그 및 디지털 신호의 인터페이스를 위하여 자체 설계된 I/O 보드가 내장되어 있으며 메인 컴퓨터와는 CAN방식으로 통신하며 데이터를 주고받는다.

초기설계에서는, 에너지밀도가 낮은 단점이 있으나 저가이며 구하기 쉬운 장점이 있는 연축전기가 이십이의 전원으로 선정되었다. 그러나 최근 리튬이온, 리튬폴리머, 니켈 수소 축전지 등의 가격이 낮아짐에 따라 축전지를 리튬 폴리머 형으로 교체하게 되었다. 이로써 전체 4.3kg의 여유부력을 추가로 얻으면서, 2시간 방전율에서 0.4A 이상의 이득을 얻게 되었다.

제어시스템의 장비배치는 장비간의 전자기 및 기계적 간섭과 중량분포 그리고 유지보수의 편의성을 고려하여 진행되었으며, Fig. 2에 그 결과를 보인다. 전원 및 제어시스템은 슬라이딩택에 장착된 후 내압 중앙선체 내에 탑재되며 랙이 선체 내에 밀려 들어가면 선미부의 구동부와는 접속커넥터에 의해 자동접속되는 구조로 설계되었다.

이십이의 주제어 컴퓨터의 OS는 일반적으로 친숙한 윈도우즈 XP에 RTX 실시간 커널을 탑재하여 실시간성을 확보하였다. 운용소프트웨어는 비주얼 C++로 작성되었고, 선상컴퓨터와는 유선 또는 무선 네트워크 통신과 R/F 무선통신을 한다. 소프트웨어의 디버깅이나 개발 또는 업그레이드 단계에서는 유/무선 네트워크에 연결되며 원격데스크탑 기능을 이용하여 온보드 상의 프로

Table 2 Thruster power estimation of ISiMI

speed [m/sec]	1	1.5	2	2.5	remark
drag [N]	2.2698	5.1071	9.0792	14.1867	
thrust power [W]	2.2698	7.6608	18.1584	35.4656	
required power [W]	5.6745	19.1514	45.3960	88.6641	eta=0.4

그램을 직접 액세스한다. 개발이 끝난 후에는 무선 R/F 통신으로 연결되어 데이터를 주고받는다. 이십이에 탑재된 주제어 컴퓨터의 소프트웨어 구조는 RTX 프로젝트 내의 인터럽트 루틴을 이용하여 시리얼 통신포트와 CAN 통신을 비롯한 각종 인터페이스 장비들과 제어루틴과의 동기를 맞추고 제어를 수행한다.

### 3.4 센서 및 통신 시스템

기본적인 센서로 압력센서, AHRS(Attitude Heading Reference System), CCD 카메라, 그리고 축전지의 잔량을 확인하기 위한 전압센서가 이십이에 장착되었고, 통신장치로 R/F 모뎀과 유선 및 무선랜이 장착되어 있다. 압력센서는 이십이 제어시스템에 수심정보를 제공하고, IMU는 3축 가속도, 3축 각속도 및 자세와 방위각 정보를 제공하며, 압력센서와 함께 잠수정의 운동제어와 항법을 위해 사용된다. CCD 카메라는 선수부에 장착되어 수중도킹을 위한 최종유도 알고리즘 개발을 위해 사용된다. 수조 내에서 이십이 위치계측을 위하여 해양연구원의 해양공학수조에 설치된 CPMC (Computerized Planner Motion Carriage)의 이미지 추적 기능을 확장하여 수중에서의 위치측이 가능하도록 하였다. CPMC에서 계측된 이십이의 위치는 R/F 모뎀을 통하여 실시간으로 이십이에 무선 전송하여 이십이가 자신의 위치를 알 수 있도록 하였다. 일반적으로 R/F는 수중에서의 심한 감쇄로 사용에 제약을 받고 있으나 수조환경에서 3.5m 수심까지 양방향 전송이 가능함을 실험으로 확인하였다. 향후 실험 시 시험에서는 LBL 또는 USBL과 같은 초음파 장비가 사용될 예정이며, 도플러 속도계를 추가로 장착하여 속도를 계측할 예정이다.

R/F 모뎀은 151.3MHz 대역, 100mW 출력, 10kbps의 전송속도, 최대 10km까지 양방향 통신할 수 있는 사양으로 선정하였고, 소형화를 위해 별도의 I/F 보드를 SMD(Surface-Mount Device)형 소자를 이용하여 설계 제작하였다.

## 4. 수조시험 결과

### 4.1 자항전진 시험

프로펠러 회전수와 이십이의 속도 사이의 선형관계를 Fig. 5에 나타내었다. 실험 결과로부터 추진모터가 최대회전수로 회전할 경우 추정되는 속도는 약 2.2m/sec 이며 최대 설계속도(2m/sec)는 약 1650rpm에서 얻어짐을 알 수 있었다.

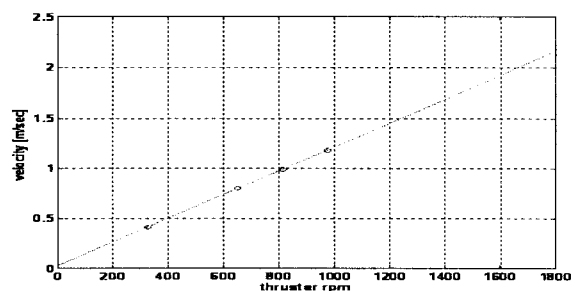


Fig. 5 Thruster rpm vs. advance speed of ISiMI

$$U = 0.0012N + 0.0126$$

#### 4.2 개루프 지그재그 운동 시험 결과

이심이의 수평면 지그재그 시험 결과를 수치모델 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 유체계수는 3장에서 언급된 이심이의 외형과 설계 파라미터들을 이용하여 추정하한 결과를 사용하였다. 계수는 Nernstein & Smith의 방법에 의해 추정된 결과를 사용하였으며 Nernstein & Smith의 방법에서 구할 수 없는 비선형 조종운동계수와 운동속도에 대한 복잡성분 계수는 Prestero의 방법에 의하여 구한 것을 사용하였다. 0.8m/sec의 속도로 전진하는 이심이의 수직타를  $\pm 12.6$ 도의 사각파로 제어하였을 때, 선수각과 선수각속도를 계측하였다. Fig. 6에 이심이의 수평면 지그재그 운동 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내었다.

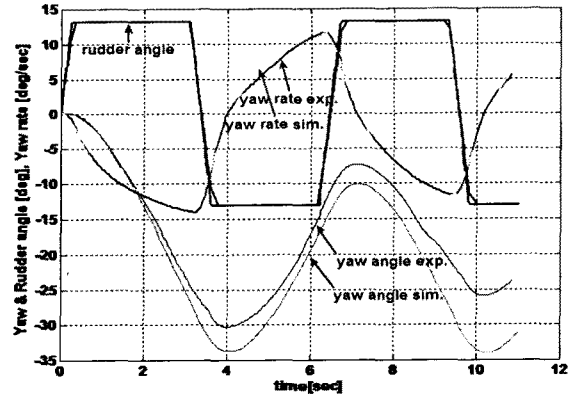


Fig. 6 Open loop zig-zag test results compared with simulation

#### 4.3 자동제어 시험 결과

이심이의 페루프 자동제어 실험으로 선수각과 심도를 동시에 제어하는 실험을 수행하였다. Fig. 7은 추진기를 800 rpm으로 회전한 상태에서 PD 제어를 사용하여 선수각과 심도제어를 동시에 수행한 실험결과이다. 출발 후 약 27초 시점에 설계속도인 1m/sec에 도달하였다. 방위각과 심도 모두 주어진 명령값 70도와 0.5m에 각각 잘 추종함을 확인하였다. 실험결과에서 나타난 것처럼 출발 초기, 제어 응답이 낮은 것은 낮은 전진 속도도 인해 제어판에 의한 조종력이 작기 때문이다. 실험에서 설계된 이심이가 AUV 테스트베드로 사용되기 위한 기본기능의 검증이 이루어졌고 실험결과로부터 전진속도, 수평면 및 수직면 운동에 대한 특성을 파악하였다.

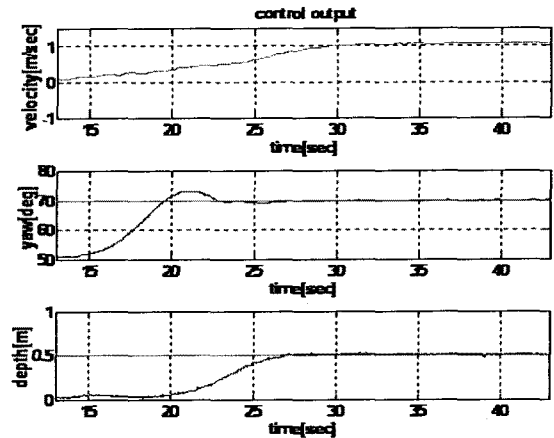


Fig. 7 PD control results - velocity, yaw and depth

### 5. 결 론

본 논문에서는 한국해양연구원에서 새로이 개발된 항주형 소형 AUV 이심이의 설계개념과 제작 및 시험에 대하여 서술하였다. 이심이 설계의 가장 큰 주안점은 자율무인잠수정의 개발과 성능향상을 위해 수행되어야 하는 일련의 실험을 적은 비용으로 쉽게 수행할 수 있도록 하는 것이었으며 이를 위하여 2인이 크레인의 도움 없이 진수 인양할 수 있도록 설계하였다. 제작된 이심을 이용하여 수조에서 시험을 수행하였으며 그 결과를 수치모델의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 또한, 수평면과 수직면 운동에 대한 PD 제어시험을 수행하여 향후, 다양한 제어알고리즘의 개발에 활용될 수 있음을 보였다. 향후 이심이는 모델인식 방법을 통해 수치모델을 보정하고 AUV를 위한 각종 기술들의 개발을 위해 수치 시뮬레이션에서 시험까지를 지원할 수 있는 테스트베드로 활용될 예정이다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 “차세대 심해무인잠수정 개발” 과제와 해양연구원 중점연구사업 “U-기반 탐사선단의 스마트 운용기술개발”과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 박진영, 이필엽, 이판목, 전봉환, 김기훈, 오준호 (2006). “무인잠수정의 자세 제어와 수중 도킹을 위한 비주얼 서보 제어에 관한 연구”, 2006년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 1813-1818.
- 전봉환, 박진영, 이판목, 오준호 (2005). “소형 자율항주 수중로봇의 시스템 설계와 초기성능시험”, 국방수중로봇 워크샵 논문집, pp 1-6.
- 전봉환, 이판목, 홍석원 (1997). “자율무인잠수정(VORAM)의 제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 설계”, 해양공학연구회 제40차 Workshop 논문집.
- Hong S.W., Lee P.M., Lim Y.K., Lee C.M., Jeon B.H., Park J.W., Choi Y.C., Kim S.M. and Suh S.J. (2002). “Design and Implementation of a Dual Use Purpose Semi-Autonomous Underwater Vehicle”, Underwater Defence Technology 2002, Korea.