

◆ 특집 ◆ UUV(수중로봇) 기술

## 항주형 AUV(자율 수중로봇)의 기술동향

### Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies

전봉환<sup>1,✉</sup>, 이판목<sup>1</sup>, 임용곤<sup>1</sup>  
Bong-Huan Jun<sup>1,✉</sup>, Pan-Mook Lee<sup>1</sup> and Yong-Kon Lim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국해양연구원 해양시스템연구부 (Ocean Engineering Department, KORDI)

✉ Corresponding author: bhjeon@moeri.re.kr, Tel: 042-868-7531

Key Words: AUV (자율 수중로봇), Cruising-type (항주형), ISIMI AUV (이섬이 AUV), Mapping (맵핑), Docking (도킹)

#### 1. 서론

자율 수중로봇(autonomous underwater vehicle, AUV)은 자율성<sup>1</sup>을 가지는 수중로봇으로 정의할 수 있고, 임무를 위한 항주 거리에 따라 항주형 자율 AUV와 호버링 AUV로 나누어 질 수 있다. 일반적으로 항주형 AUV라고 하면, 수백 미터에서 수백 킬로미터까지의 비교적 넓은 영역의 해저를 항주하며 해양학 자료를 수집하는 수중로봇을 일컫는다. 이러한 형태는 선체의 유체저항을 최소화하기 위해 유선형의 선체로 제작되며 중축 방향의 주 추진기와 제어판을 이용하여 운동을 제어한다. 1990년대까지 심해 탐사는 심해 예인장비와 유인 잠수정 그리고 ROV에 의한 탐사가 주류를 이루었으나 2,000년대에 들어서면서 AUV 기술의 발전으로 AUV를 이용한 심해 탐사 결과들이 가시적인 성과를 보이기 시작하였다. 대표적인 심해 탐사용 CAUV인 미국 WHOI의 ABE(Autonomous Benthic Explorer)는 1996년부터 2005년까지 200회 이상의 잠수를 기록하였고 평균잠수 수심은 2,000미터, 평균 조사거리는 잠수당 16km였다.<sup>2,3</sup> ABE AUV의 주된 임무는 미터 스케일의 해저지형 맵핑, 해저 마그네틱 맵핑, 열수의 유동 조사, 열수분출구 주변의 조사와 예측을 위한 계측 등이었다. 이처럼 항주형 AUV는 통신이나 전원공급을 위한 케이블로부터 자유로울 수 있으므로 ROV에

비해 넓은 영역을 탐사할 수 있고, 빙하 아래와 같이 극히 위험한 환경까지 접근할 수 있으며 비교적 적은 비용으로 다수를 운용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 항주형 AUV의 주된 역할은 첫째, 선박에 의한 광대역 맵핑과 ROV나 호버링 AUV에 의한 국부영역 정밀 작업의 중간 단계에서 필요한 맵핑작업의 수행, 둘째 인간이 도달하기 힘든 극한 환경이나 케이블이 얽히기 쉬운 복잡한 환경의 탐사, 셋째 한 대의 모선에서 적은 인력과 비용으로 다수를 동시에 운용하여 넓은 지역을 효과적으로 조사하는 것 등이다. 현재까지의 항주형 AUV는 측면 주사 소나(side scan sonar), CCD 카메라, 스틸 카메라 등을 이용한 해저면이나 특정 목표물을 맵핑할 수 있고, 마그네토미터, CTD 등 각종 해양학 데이터 계측 센서를 이용한 맵핑을 수행할 수 있으며, 해양의 3차원공간 상에 존재하는 현상의 변화를 적은 시간차를 두고 동시다발적으로 계측할 수 있다. 이러한 기능을 가진 항주형 AUV는 최근 다양하게 상용화되어 시판되고 있다. 향후, 항주형 AUV는 더 넓은 영역을 보다 정밀하게, 보다 빨리 그리고, 더 지능적으로 탐사할 수 있도록 진화해 갈 것으로 예측된다. 이를 위해 동역학과 유체역학에 기반하는 모델링과 제어기술, 높은 위치정밀도로 넓은 영역을 항해하기 위한 수중항법기술, 장애물의 인식 및 회피기술, 수중통신 기술 등 다양한 기술들이 연구되고 있다.

본 논문에서는 항주형 AUV 에 대한 세계의 기술개발 동향과 국내의 기술개발 사례를 소개하고 향후, 항주형 AUV 기술의 발전전망을 제시한다.

## 2. 항주형 AUV 기술 동향

### 2.1 항주형 AUV 기술 개요

1990 년대에 전세계적으로 AUV 는 약 50 대 정도가 해양조사를 목적으로 또는 테스트베드로 개발되었고, 그 개발 주체는 대부분이 연구소와 대학이었다.<sup>4</sup> 이는 AUV 기술이 그만큼 도전적인 기술이었다는 점을 시사한다. 2007 년까지 약 400 여대의 AUV 가 제작된 것으로 알려졌으나,<sup>5</sup> 학교나 연구소에서 개발되고 있는 테스트베드까지 포함한다면 실제 AUV 의 수는 훨씬 많을 것으로 추정된다. 2000 년대에 들어서 눈에 띄는 AUV 기술의 변화 중 하나는 항주형 AUV 의 상용화 추세이다. 노르웨이에서 1993 년 개발된 Hugin AUV 는 꾸준히 기술개발을 한 결과 6,000 미터 사양까지 상용화하였다.<sup>6</sup> 미국 MIT Sea Grant 에서 개발된 Odyssey<sup>7</sup> 시리즈도 6,000m 급까지 상용화되었고, WHOI 에서 1996 년에 처음 개발되었던 REMUS AUV<sup>8</sup> 역시 꾸준한 보완을 거친 후 상용화되어 2008 년까지 170 대가 판매되었으나 이중 90% 이상은 군용목적이다. 이외에도 Hafmynd 의 GAVIA AUV 는 상용화된 항주형의 소형 AUV 이고, 캐나다 ISE 의 Explore 는 3,000m 급과 5,000m 급 상용화된 항주형 AUV 이다.

또 다른 기술 동향은 항주형 AUV 의 한계를 확장하려는 다양한 시도들이다. 육상기술의 적용에 제약을 받는 수중환경에서 보다 더 진보된 임

무를 수행하기 위하여 기술적으로 해결하여야 할 문제들에 주목한 연구이며, 수중항법,<sup>9-11</sup> 초음파 통신/네트워킹,<sup>12</sup> 수중작업,<sup>13</sup> 장애물의 감지/회피, 자율적 임무계획/수행,<sup>14</sup> 협업제어,<sup>12,15</sup> 장거리 항주,<sup>16</sup> 수중도킹,<sup>17,18</sup> 전원축전<sup>16</sup> 문제 등이 이 분야에 속한다. 일본 JAMSTEC 은 연료전지를 사용하여 300km 의 거리를 항주할 수 있는 3,500m 급 장거리 항주형 Urashima AUV 를 개발하였다.<sup>16</sup> 미국의 MBARI 에서는 여러 대의 항주형 AUV 와 수중 글라이더를 활용한 협업탐사의 개념을 수중탐사에 적용하여 시험하였다.<sup>15</sup> 최근 WHOI 에서는 전세계의 모든 해양의 해저에 다다를 수 있는 11,000m 급 하이브리드 잠수정을 개발하고 있다.<sup>19</sup> 이는 자체 배터리를 내장하며 자율모드와 리모트 제어 모드 두 가지 중 하나를 선택하여 운용할 수 있다. 로봇팔을 이용한 샘플링이나 작업을 할 경우 원격 조종모드로 사용되고 해저 맵핑 등의 임무를 위해서는 자율모드로 동작한다.

한편, 국내에서는 1997 년 한국해양연구원에서 항주형 AUV 보람을 테스트베드로 개발하였고, 2003 년부터는 이십이 AUV 시리즈를 개발해 오고 있다. 대우조선해양에서는 1996 년 옥포 6000 을 개발한 이래 최근에는 옥포 300 을 개발 중에 있다. 이외에도, 서울대의 SNUUV, 제주대의 MUUTV 등의 항주형 AUV 가 테스트베드로 개발되었거나 개발 중에 있다.

### 2.2 모델링과 시뮬레이션

AUV 의 운동제어기 설계와 수치 시뮬레이션을 위해서는 수치모델이 요구된다. 정확한 수치모델은 AUV 기술개발을 위해 필연적으로 수반되어야 하는 많은 실험을 대체하기 위한 도구이다. 실제로 수치시뮬레이션은 실험의 보조적 수단으로 이용되어 왔으며, 연산 프로세서의 발달에 힘입어 응용 범위가 점점 확대되어 가고 있다.

항주형 AUV 와 같은 유선형의 형상을 가진 물체의 6 자유도 운동방정식의 표준형태는 DTNSRDC 보고서<sup>20</sup> 와 Healey 의 논문<sup>21</sup> 에 잘 나타나 있다. 1967 년 Gertler 의 NSRDC<sup>22</sup> 보고서에서 잠수함 시뮬레이션에 있어서 표준이 되는 운동방정식을 정리하였으며, 이후 Feldman 은 실제와 더욱 근사하도록 방정식을 수정 제시하였다.<sup>20</sup> 한편, Fossen 은 잠수정의 비선형제어를 위해 비선형 모델링을 적용하였고,<sup>23</sup> Healey 는 NPS AUV 의 운동방정식을 제시하였다.<sup>21</sup> 이들 모델은 뉴턴의 제 2 법

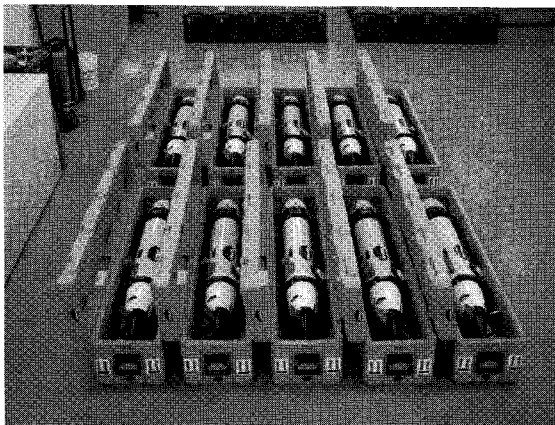


Fig. 1 Commercial AUV Remus

칙을 이용한 강체의 운동방정식에 유체력을 고려함으로써, 다음과 같은 형태로 나타낸다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F}_{CC}(\mathbf{v}) + \mathbf{F}_{DL}(\mathbf{v}) + \mathbf{F}_{rest}(\eta) + \mathbf{F}_{fin}(\mathbf{v}) + \mathbf{F}_{thrust}(\mathbf{v}) + \mathbf{F}_{ext} \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{M}$  은 부가질량을 포함한 질량행렬이고,  $\mathbf{v} = [v_1, v_2] = [u, v, w, p, q, r]^T$  는 동체좌표계에서 표현된 선형 및 각속도 벡터이다. 우변의  $\mathbf{F}=[\mathbf{X} \ \mathbf{Y} \ \mathbf{Z} \ \mathbf{K} \ \mathbf{M} \ \mathbf{N}]$ 는 6 자유도에서 표현되는 외력이며, 좌측부터 차례로, 코리올리 및 원심력, 감쇠 및 양력, 복원력, 제어판의 영향력, 추진기에 의한 추력, 그리고 그 밖의 외력을 나타낸다. 운동방정식을 구성하는 유체동역학 계수는 PMM(Planner Motion Mechanism)과 같은 구속시험이나 자항시험을 바탕으로 한 시스템 식별법에 의해 구하거나 경험식에 의해 추정하기도 한다.

식 (1)의 동체좌표계에서 표현된  $\mathbf{v}$  는 식 (2)와 (3)에 의해 지구고정 좌표계로 상호 변환된다.<sup>23</sup>

$$\dot{\eta}_1 = \mathbf{J}_1(\eta_2)\mathbf{v}_1 \Leftrightarrow \mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_1 \quad (2)$$

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2(\eta_2)\mathbf{v}_2 \Leftrightarrow \mathbf{v}_2 = \mathbf{J}_2^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_2 \quad (3)$$

여기서,  $\eta_1 = [\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}]^T$ ,  $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$  는 각각 지구고정좌표계에서의 위치 및 자세벡터이다.  $\dot{\eta}_1$  과  $\dot{\eta}_2$  는 각각 잠수정의 위치와 자세벡터의 시간 미분이고  $\mathbf{J}_1(\eta_2)$  과  $\mathbf{J}_2(\eta_2)$  는 각각 선속도와 각속도 변환행렬이다.

대표적인 환경외력으로 작용하는 해류는 해류 모델식이나 실측된 데이터를 이용하여 표현되고, 잠수정의 운동에 대한 해류의 영향을 시뮬레이션 하기 위해서 동체좌표계에서 본 해류의 속도를  $v_c$  라 하고, 잠수정과 해류의 상대속도를  $v_r = v - v_c$  라 하면, 잠수정의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F}_{CC}(\mathbf{v}) + \mathbf{F}_{DL}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{F}_{rest}(\eta) + \mathbf{F}_{fin}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{F}_{thrust}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{F}_{ext} \quad (4)$$

식 (4)는 유체력과 관련된 항에서만 유체와의 상대속도의 함수로 대체됨을 주의하여야 한다.

### 2.3 경로계획 및 제어

현재까지 항주형 AUV 에 주어지는 가장 일반적인 임무는 해저 맵핑임을 감안할 때 자율경로계획과 운동제어는 AUV 를 특정하는 가장 중요한 기능 중 하나이다. AI 에 기반한 전통적인 경로계획 알고리즘을 확장하여 장애물과 해류와 같은 환경조건과 AUV 의 회전반경과 같은 제약조건들을 경로계획에 고려하는 한편, 실시간 적용을 위해 연산속도를 개선하는 연구가 진행되고 있다.<sup>14</sup> 항주형 AUV 의 운동제어기는 수직면과 수평면 운동으로 나누어 구성되며 전통적인 PD 제어기에서부터 모델의 불확실성과 외란을 극복하기 위해 퍼지 이론, 신경망이론, 적응제어이론 등의 접목이 연구되어 왔고, 슬라이딩모드 제어기 설계법이 비교적 많이 이용되고 있다.<sup>24,25</sup>

최근에는 여러 대의 항주형 AUV 로 구성되는 AUV 선단의 경로계획과 제어에 대한 연구가 진행되고 있다. 미국 MBARI 에서는 AOSN(Autonomous Oceanographic Sampling Network) 프로젝트의 일부로 수중의 계류 네트워크를 통하여 다수의 글라이더와 자항식 AUV 를 이용하여 Monterey Bay 해역의 해양학 데이터를 얻었다.<sup>15</sup> 이 분야에서 제어와 관련된 연구는 크게 세 가지 부류로 나누어질 수 있다. 첫째, 주로 수중선단의 대형, 즉 선단의 기하학적 배열의 형성, 유지, 및 전이 등에 초점을 맞춘 연구이다.<sup>15,26</sup> 둘째는 주로 시스템공학적인 입장에서 선단의 구축, 유지, 및 해체에 이르기까지 전체시스템의 자율화에 초점을 맞춘 연구이다.<sup>27</sup> 셋째는 최적화 기법으로 분류할 수 있다. 주어진 미션에 적합한 성능함수를 선정하고 이 함수를 최소화 또는 최대화하는 방법으로 제어기법을 유출한다.<sup>27</sup>

### 2.4 수중항법

전파 사용에 큰 제약이 따르는 AUV 의 수중항법에는 관성센서(inertial measurement unit, IMU)를 이용하는 방법, 초음파센서를 이용하여 거리 또는 각도를 계산하여 위치를 추적하는 LBL(Long Base Line) 또는 USBL(Ultra Short base Line) 등의 초음파항법, 초음파 센서와 관성센서를 융합하는 복합항법 등이 있으며, 이 밖에도 AUV 가 수면에 부상하는 경우에는 GPS 를 이용하여 위치를 보정하거나 관성항법시스템의 바이어스 오차 누적을 줄이기 위하여 초음파 속도계(Doppler velocity log, DVL)를 이용한 IMU-DVL 기반의 수중 보조항법시스템도

연구되었다.<sup>29</sup> 수중 초음파 항법장비인 LBL 의 위치추적 정밀도를 높이기 위하여 DVL 신호를 융합하는 항법에 관한 연구를 수행하기도 하였고<sup>30</sup>, 기준점과 AUV 사이의 거리정보와 AUV 에 내장된 방위센서 및 심도계를 이용하여 위치를 추정하는 방법이 제안되기도 하였다.<sup>9,10</sup>

무인잠수정 운용 해역의 지형지물 정보를 이용하여 지형지물에 대한 위치를 기록하고 이로부터 무인잠수정의 위치를 파악하려는 Simultaneous Localization and Mapping(SLAM) 기법도 연구되고 있다<sup>11</sup>. SLAM 기법을 구현하기 위해서는 무인잠수정과 물체의 위치를 동시에 추정하여 하는데, 이를 위하여 칼만 필터(Kalman Filter) 와 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter: EKF)가 주로 사용되어 왔다. 또한, 확장 칼만 필터의 비선형성에 대한 약점을 극복하기 위한 연구<sup>31</sup> 와 SLAM 기법의 실시간 적용을 위한 계산량 감소기법<sup>32</sup> 등도 연구되었다. SLAM 에서는 외부 환경에 대한 공간 정보 획득 장비로서 전방주시소나(Foward looking sonar), 측면주시소나(Side-scan sonar), 합성개구면소나(Synthetic aperture sonar)와 거리 측정 소나(Range sonar) 등이 사용된다.

**2.5 수중도킹**

수중에서 AUV 의 전원 충전과 정보의 전송을 가능하도록 하기 위한 수중도킹기술<sup>17,18,33-35</sup> 또한 AUV 의 주요 연구기술 분야 중 하나 이다. 수중도킹 기술에 대한 연구는 도크와 AUV 간의 상대 위치와 자세를 얻는 방법에 대한 연구와 도크와 AUV 간의 전기적 및 기계적 결합 기술에 대한 연구로 나누어질 수 있다. AUV 가 도크로 유도되는 최종단계에서 위치와 자세를 제어하기 위한 종단 유도 방식으로는 초음파 유도방식에 보조기구를 사용하는 방법<sup>17,18</sup> 과 초음파 위치추적의 낮은 위치정밀도와 업데이트율을 보완하기 위한 광학식 유도방법,<sup>33,34</sup> 전자기 유도방법,<sup>35</sup> 등이 연구되었다. 도크와 AUV 간의 결합방식으로 몇 가지 기계적인 고정장치가 제안되었고 전기적 점접촉 방식으로는 점촉식과 비점촉식 점접 연결방법들이 각각 사용되고 있다.<sup>17,18</sup>

미국에서는 AOSN(Autonomous Ocean Sampling Network)연구의 일환으로 수중에 고정된 스테이션과 AUV 간의 도킹에 관한 연구를 1993 년부터 수행하고 있다. Singh 등은 AUV 에 장착된 가위모양의 기구를 이용하여 수직의 도킹막대를 걸어 도킹

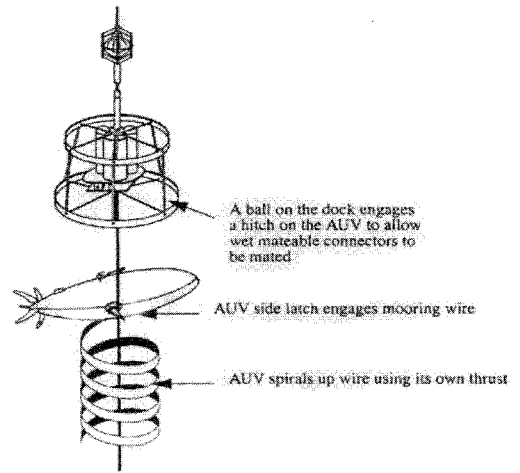


Fig. 2 An underwater docking mechanism of WHOI

하는 방법으로 호밍 방향에 대한 제약이 적은 도킹스테이션을 제안하였다.<sup>17</sup> 이들은 MIT 의 AUV Odyssey IIb 를 이용하여 7 번의 시도중 6 번의 성공을 거두었다고 보고되었다. Fig. 2 는 폴대를 이용한 도킹장치의 개념을 보이고 있다. Stokey 등은 AUV REMUS (Remote Environmental Monitoring UnitS)와 도킹장치를 개발하였다.<sup>18</sup> 원뿔형의 유도부와 원통형 격납부가 연결된 형태의 도크를 채택하였고, 초기 도킹실험에서 21%이던 도킹 성공율을 시스템 H/W 와 S/W 의 개선으로 91%(30/33)로 향상시켰다고 한다. Feezor 등은 호밍의 마지막 단계에서 잠수정의 위치와 각도를 얻어 낼 수 있는 전자기 유도 장치(Electromagnetic Guidance System; EM system)를 제안하여 8 번의 도킹 시험중 5 번의 도킹이 이루어졌다.<sup>35</sup> Cowen 등은 종단광학유도(Optical Terminal Guidance) 시스템을 제안하였다.<sup>33</sup> 도킹장치에 장착된 광원을 추적하는 이 장치의 계측 범위는 수중의 탁도와 밀접한 관계가 있으며, 실험에서 10~28m 정도였다.

**3. 항주형 AUV ‘이심이’ 기술개발 사례**

**3.1 설계개념**

한국해양연구원에서는 지난 10 년간의 경험과 기술을 토대로 소형 AUV ‘이심이(ISIMI; Integrated Submersible for Intelligent Mission Implementation)와 ‘이심이 100’을 개발하였다.<sup>34,36,37</sup> ‘이심이’란 이름은 우리나라에 전해 내려오는 옛날 이야기 속의 작지만 강하고 정의로운 물고기 이름에서 유래되

었다. 소형 AUV 이십이의 목적은 향후 다양한 수요에 의해 개발될 일련의 유사 AUV 들에 대한 표준 전형으로서의 역할을 수행하는 것이다. 즉, AUV 의 기계적 구조와 수밀 및 구동 메카니즘에서부터 전기·전자·계측 제어시스템, 소프트웨어 그리고 동역학모델에 이르기까지 AUV 개발에 필요한 일련의 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. 이십이 100 AUV 는 이십이 AUV 를 통하여 얻어진 경험을 바탕으로 제작된 실험역 임무용 AUV 이다.<sup>37</sup>

**3.2 시스템구성**

이십이 AUV 시스템은 기계부, 제어부, 계측부, 통신부로 크게 나누어질 수 있다. 기계부는 외형 선체와 추진 및 조종제어 장치를 포함하고, 제어부는 컴퓨터 및 전기 인터페이스 장치와 소프트웨어를 포함한다. 계측부는 이십이의 제어 또는 임무수행을 위해 설치되는 다양한 센서들이며, 통신부는 수면 위의 외부 시스템 또는 수중의 다른 잠수정과의 정보 교환을 위한 장치이다. 조립된 이십이 AUV 의 외관은 Fig. 3 과 같으며, 기본제원은 Table 1 에 나타내었다. 내부에 탑재된 장비는 Fig. 4 와 같이 배치되었다.

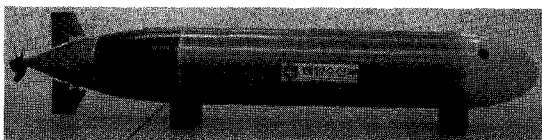


Fig. 3 Appearance of ISiMI AUV

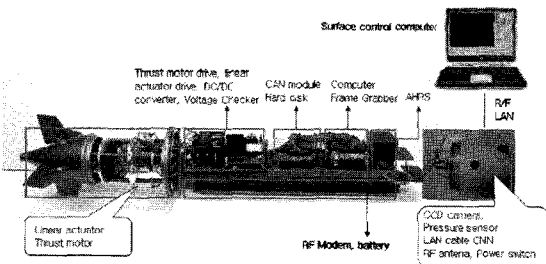


Fig. 4 System configuration of ISiMI AUV

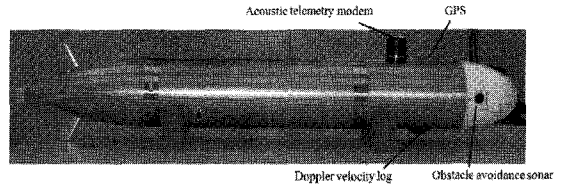


Fig. 5 Appearance of ISiMI100 AUV

Table 1 Dimension of ISiMI AUV

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

이십이의 선형은 선체 지름과 길이의 비가 주어져 있을 경우, 최소의 유체저항계수를 갖는다고 알려진 Myring 선형식을 이용하여 설계하였다. 외형선체의 중앙부는 내압선체이며 알루미늄으로 제작하였고, 선수부는 폴리아우레탄으로 제작하였으며, 선미부에는 추진모터와 제어판 구동장치들을 탑재하기 위한 공간과 장치가 설치되었다. 제어판의 단면은 NACA 0012 를 선정하였고 추진기는 MOERI 모형시험에 사용되는 소형 프로펠러 중에서 KP452 S175 모델을 사용하였다. 이십이의 최대 속도는 약 2m/sec 이고, 2 시간 이상 운용가능 하도록 설계하였다.

이십이 100 은 실험역 임무를 위해 개발된 이십이 AUV 의 후속 모델이다. 수심 100m 까지의 해저 환경을 탐사할 수 있도록 설계·제작되었다. 이십이에 장착된 기본 모듈에 더하여 실험역 임무를 위한 DVL, ATM(Acoustic Transmit Modem, 수중 통신 모뎀), LBL, OAS(Obstacle Avoidance Sonar, 장애물 회피 소나)를 추가로 장착 하였고, 측면주사소나, CTD, 자계센서 등의 임무센서를 위한 여유부력을 확보하였다. 이십이의 선체길이는 약 1.6m, 지름은 0.2m, 공기중 중량은 약 40kg 이고, 그 외형은 Fig. 5 와 같다.

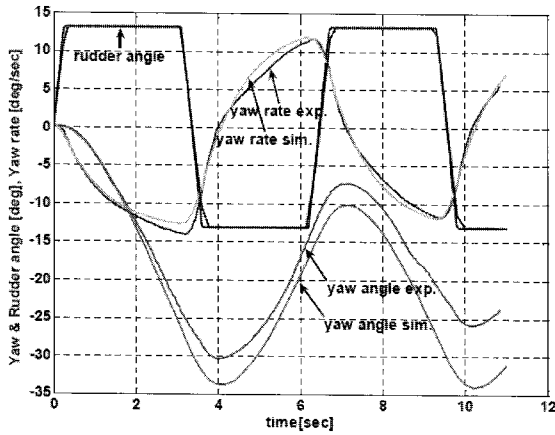


Fig. 6 Zig-zag test results of ISiMI AUV

### 3.3 실험결과

#### 3.3.1 조종시험

개발된 이십이 AUV의 운동특성을 확인하기 위하여 일련의 자항시험을 한국해양연구원 해양공학 수조에서 수행하였다. 전진속도 시험에서는 1,000rpm의 프로펠러 속도에서 1m/s의 설계 속도에 도달하였다. 선회시험에서는 전진속도 0.7m/s, 15°의 선미타각에서 정상상태 선회 반경은 6m이었고, 이때 선회속도는 -6°/sec이었다. 평면 조종특성을 확인하기 위해서 0.8m/s의 전진속도에서 ±12.6° 타각으로 지그재그 시험한 결과와 수치모형을 이용한 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이러한 조종제어 결과들은 수치모델의 검증 및 보정과 제어기설계 등에 활용된다.

#### 3.3.2 자율제어시험

무인잠수정으로서 임무수행에 필요한 자율제어 기능시험으로 자동심도제어와 웨이포인트 추적 실험을 수행하였다. 심도제어기는 PD 제어와 슬라이딩모드 제어기로 각각 구성하였다. 해양공학 수조에서 슬라이딩모드 제어 실험결과와 시뮬레이션결과를 Fig. 7에 비교 도시하였다. 초기심도 0.4m에서 1m로 수심을 변경할 때 심도변화 결과와 제어판의 각도, 그리고 자세의 변화결과를 나타낸다. 시뮬레이션은 6자유도 비선형 모델과 수직평면 운동으로 한정된 선형 모델 두 가지에 대하여 수행하였다. 웨이포인트 추적 실험을 위하여 해양공학 수조 내에 추종되어야 할 5개의 포인트를 설정하고 이들을 순차적으로 추종하도록 하여 '8'자 모양을 그리도록 하였다. Fig. 8은 LOS(line of sight)

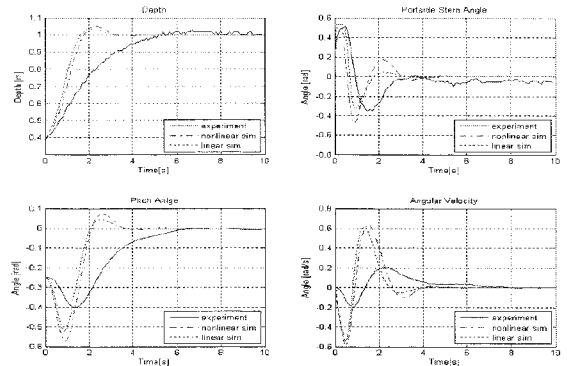


Fig. 7 Depth control using sliding mode controller

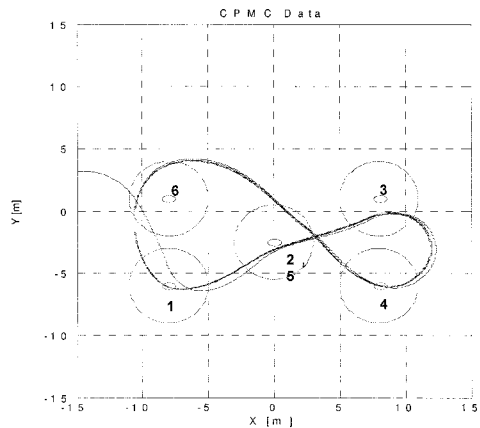


Fig. 8 Way point tracking control results

알고리즘을 이용하여 웨이포인트를 반복하여 추적한 궤적을 나타낸다. 실험결과에서 '8'자 모양이 대칭되지 않는 것은 마그네틱 컴퍼스를 방위센서로 사용하는 이십이 AUV가 수조의 철구조물들의 자장에 영향을 받아 왜곡된 방위 정보를 제어에 이용하였기 때문인 것으로 추정된다.

#### 3.3.3 수중도킹시험

개발된 이십이 AUV는 수중도킹기술 개발에도 활용되었다. 갈대기 모양의 입구를 가지는 도크를 상정하고 도킹을 위한 최종 접근시점에서 제어 정밀도를 확보하기 위하여 AUV의 선수 카메라를 이용하였다. 이십이는 도크 주변의 조명을 광학영상으로 인식하고 CCD 평면 상의 조명들의 중심점을 향하도록 자세를 제어한다. 이 기술은 도킹이 이루어지는 최종유도단계에서 초음파 위치추적장

치의 업데이트율과 정밀도 문제를 보완하기 위해 고안되었다. 광학영상을 이용한 도킹 개념은 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 10 은 하나의 카메라를 장착한 이십이 AUV 로 토키시험을 수행한 결과의 일부를 보인다. 도크와 약 20m 의 거리에 있던 이십이 AUV 가 약 9 초 후에 도킹을 완료할 때까지 CCD 상에서의 위치 오차가 0 으로 수렴해 이십이가 도크 중심으로 향해 가는 과정을 보인다. 8 초 이후에 오차가 급격히 크진 것은 AUV 와 도크사이의 거리가 가까워짐에 따라 도크 주변의 조명이 CCD 평면 상에서 사라졌기 때문이다.

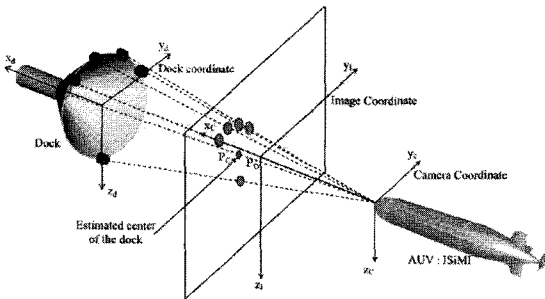


Fig. 9 A concept of final approach for underwater docking by visual servo

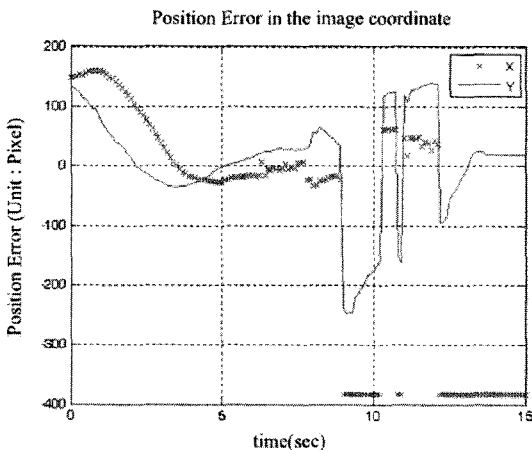


Fig. 10 Position error in CCD plan in final approach control using visual servo algorithm

**4. 결론**

본 논문에서는 호버링 AUV 와 상반되는 개념으로서 비교적 넓은 수중영역을 조사할 수 있는 항주형 AUV 에 대한 세계적 기술동향과 국내 기

술개발 사례에 대하여 서술하였다. 지금까지 AUV 는 기술은 성숙도가 낮고 그 수요가 극히 제한되어 있어 육상 로봇처럼 활발하게 연구되지는 못하였으나, 국가적으로 필요한 기술로 인정되어 꾸준히 개발되어 왔다. 인명을 증시하고 행복한 삶을 영위하려는 현대사회의 풍조는 각국의 군대를 무인전투체계로 전환시키고, 포화상태에 있던 육상의 산업로봇분야를 서비스로봇분야로 전환시키면서 새로운 지능형 로봇 시대를 열어나가고 있다. 이러한 주위 여건들은 AUV 기술 개발을 가속화시킬 것이며 AUV 의 상용화는 더욱 확대되어 갈 것으로 예상된다. 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어 및 정보기술의 발달로 AUV 의 지능화가 더욱 가속될 것이며, 해양탐사에 있어서 AUV 의 역할도 현재보다 더욱 확대되어갈 전망이다. 군용으로는 항만 감시, 기뢰 탐색 및 제거, 공격형 어뢰, 기만기 등에 광범위하게 AUV 가 활용될 것이다. 해양 산업 및 과학기술 분야에서, 기존의 선박과 예인장비를 이용하던 탐사방법은 대부분 AUV 를 이용하는 방법으로 대체될 것이고, 탐사작업도 단순 조사에서 벗어나 수중작업(manipulation)까지를 자율적으로 수행하는 AUV 로 발전해 나갈 것이다. 특히, AUV 는 해양과학 조사에서 절실히 요구되고 있는 해양과학 데이터의 질적 향상과 데이터 취득에 소모되는 비용의 절감이라는 두 가지를 만족시키기 위한 해법으로 대두될 것이다. 즉, 시간과 공간적으로 변화하는 해양을 효과적으로 관찰하기 위해서는 시간차와 공간차를 극복하여야 하는데 이를 위해서는 다수의 계측장비가 동시에 계측을 수행하여야 하므로 막대한 비용이 소모된다. AUV 선단은 이를 해결해 주기 위한 해법이 될 것이다. 즉, 한대의 모선에서 다수의 AUV 를 진수시킴으로써 전체 탐사비용을 현저히 줄이면서도 취득데이터의 질이 높이는 동시 맵핑을 달성하기 위한 해법으로 등장할 것이다.

**후 기**

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행된 “차세대심해무인잠수정 개발” 과제와 한국해양연구원 기본사업 “해저지형 자율맵핑 핵심기술개발” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

**참고문헌**

1. Jun, B. H., "Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle AUVs in the World," *The Science & Technology*, pp. 80-83, 2007.
2. WHOI, "Vessels & Vehicles of the Woods Hole Oceanographic Institution," WHOI, pp. 16-17, 2006.
3. Yoerger, D. R., Bradley, A. M., Jakuba, M., German, C. R., Shank, T. M. and Tivey, M., "Autonomous and Remotely Operated Vehicle Technology for Hydrothermal Vent Discovery Exploration, and Sampling," *Oceanography*, Vol. 20, No. 1, pp. 86-95, 2007.
4. Yuh, J., "Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey," *Autonomous Robots*, Vol. 8, No. 1, pp. 7-24, 2000.
5. Douglas Westwood, "The AUV Gamechanger Report 2008-2017," Douglas Westwood Limited, pp. 12-14, 2007.
6. Marthiniussen, R., Vestgard, K., Klepaker, R. A. and Storkersen, N., "Hugin-AUV Concept and Operational Experiences to Date," *Proc. of the Oceans'04. MTS/IEEE Techno-Ocean'04*, Vol. 2, pp. 846-850, 2004.
7. Bellingham, J. G., Bales, J. W., Goudey, C. A. and Consi, T. R., "Performance Characteristics of the Odyssey AUV," *Proc. of the Eighth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology(AUV '93)*, pp. 37-59, 1993.
8. Allen, B., Stokey, R., Austin, T., Forrester, N., Goldsborough, R., Purcell, M. and von Alt, C., "REMUS: a Small, Low Cost AUV; System Description, Field Trials and Performance Results," *Proc. of the Oceans'97 MTS/IEEE*, Vol. 2, pp. 994-1000, 1997.
9. Lee, P. M. and Jun, B. H., "Pseudo Long Base Line Navigation Algorithm for Underwater Vehicles with Inertial Sensors and Two Acoustic Range Measurements," *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 3-4, pp. 416-425, 2007.
10. Lee, P. M., Jun, B. H., Kim, K. H., Lee, J. H., Aoki, T. and Hyakudome, T., "Simulation of an Inertial Acoustic Navigation System with Range Aiding for an Autonomous Underwater Vehicle," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 329-345, 2007.
11. Hwang, A., Seong, W., Jun, B. H. and Lee, P. M., "Semi-autonomous Experiments of ISiMI's 3 Degrees of Freedom Motion Applied the SLAM Based on the Unscented Kalman Filter," *Proc. of Underwater Robot Research Workshop*, pp. 52-60, 2007.
12. Jun, B. H., Park, J. W., Lee, P. M. and Lim, Y. K., "A Study on the Constraints and Requirements for the Implementation of the Underwater Fleet with Multiple AUVs," *Proc. of KAOST Joint Conference*, pp. 2304-2307, 2008.
13. Jun, B. H., Lee, P. M. and Kim, S., "Manipulability Analysis of Underwater Robotic Arms on ROV and Application to Task-Oriented Joint Configuration," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 5, pp. 887-894, 2008.
14. Petres, C., Pailhas, Y., Patron, P., Petillot, Y., Evans, J. and Lane, D., "Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 2, pp. 331-341, 2007.
15. Fiorelli, E., Leonard, N. E., Bhatta, P., Paley, D., Bachmayer, R. and Fratantoni, D. M., "Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Moterey Bay," *Workshop on Multiple AUV Operations(AUV04)*, pp. 134-147, 2004.
16. Hyakudome, T., Aoki, T., Murashima, T., Tsukioka, S., Yoshida, H., Nakajoh, H., Ida, T., Ishibashi, S. and Sasamoto, R., "Key Technologies for AUV URASHIMA," *Proc. of Oceans'02 MTS/IEEE*, Vol. 1, pp. 162-166, 2002.
17. Singh, H., Bellingham, J. G., Hover, F., Lerner, S., Moran, B. A., Heydt, K. and Yoerger, D., "Docking for an Autonomous Ocean Sampling Network," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 498-514, 2001.
18. Stokey, R., Allen, B., Austin, T., Goldsborough, R., Forrester, N., Purcell, M. and von Alt, C., "Enabling Technologies for REMUS Docking: an Integral Component of an Autonomous Ocean-Sampling Network," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 487-497, 2001.
19. Bowen, A. D., Yoerger, D. R., Taylor, C., McCabe, R., Howland, J., Gomez-Ibanez, D., Kinsey, J. C., Heintz, M., McDonald, G., Peters, D. B., Fletcher, B., Young, C., Buescher, J., Whitcomb, L. L., Martin, S. C., Webster, S. E. and Jakuba, M. V., "The Nereus



- Hybrid Underwater Robotic Vehicle for Global Ocean Science Operations to 11,000m Depth," Proc. of Oceans'08 IEEE/MTS, 2008.
20. Feldman, J., "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion," DTNSRDC/SPD-0393-09, 1979.
  21. Healey, A. J., "Model-based Maneuvering Controls for Autonomous Underwater Vehicles," Trans. of the ASME, Vol. 114, No. 44, pp. 614-622, 1992.
  22. Gertler, M. and Hagen, G. R., "Standard equations of motion for submarine simulations," NSRDC Report No. 2510, 1967.
  23. Fossen, T. I., "Marine Control Systems," Marine Cybernetics, pp. 15-113, 2002.
  24. 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. 152-160, 1993.
  25. Lee, P. M., Hong, S. W., Lim, Y. K., Lee, C. M., Jeon, B. H. and Park, J. W., "Discrete-time Quasi-Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 388-395, 1999.
  26. Saber, R. O., "Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory," IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 51, No. 3, pp. 401-420, 2006.
  27. Turner, R. M. and Turner, E. H., "Self-Organization and Reorganization of Multi-AUV Systems: CoDA Project Overview," Proc. of IEEE AUVs: Workshop on Multiple AUV Operations, pp. 1-12, 2004.
  28. Sousa, J. B., Matos, A. and Pereira, F. L., "Dynamic Optimization in the Coordination and Control of Autonomous Underwater Vehicles," Proc. of the 41th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2087-2092, 2002.
  29. Larsen, M. B., "High performance Doppler Inertial Navigation-Experimental Results," Proc. of Oceans, Vol. 2, pp. 1449-1456, 2000.
  30. Kinsey, J. C. and Whitcomb, L. L., "Preliminary Field Experience with the DVLNAV Integrated Navigation System for Oceanographic Submersibles," Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 12, pp. 1541-1549, 2004.
  31. Simon, D. and Chia, T. L., "Kalman Filtering with State Equality Constraints," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, No. 1, pp. 128-136, 2002.
  32. Leonard, J. and Feder, H., "Decoupled Stochastic Mapping," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 561-571, 2001.
  33. Cowen, S., Briest, S. and Dombrowski, J., "Underwater Docking of Autonomous Undersea Vehicles Using Optical Terminal Guidance," Proc. of Oceans '97, pp. 1143-1147, 1997.
  34. Park, J. Y., Jun, B. H., Lee, P. M. and Oh, J. H., "Experiments on Vision Guided Docking of an Autonomous Underwater Vehicle Using One Camera," Vol. 36, No. 1, pp. 48-61, 2009.
  35. Feezor, M., Blankinship, P., Bellingham, J. and Sorrel, Y., "Autonomous Underwater Vehicle Homing/Docking via Electromagnetic Guidance," Proc. of Oceans'97, pp. 1137-1142, 1997.
  36. Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, F. Y., Lee, P. M., Lee, C. M., Kim, K., Lim, Y. K. and Oh, J. H., "Development of the AUV ISiMI and a Free Running Test in an Ocean Engineering Basin," Ocean Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 2-14, 2009.
  37. Lee, F. Y., Jun, B. H., Lee, P. M. and Kim, K., "Implementation and Test of ISiMI100 AUV for a Member of AUVs Fleet," Proc. of Oceans'08-MTS/IEEE, 2009.