

# P-SURO II 하이브리드 자율무인잠수정 기술 개발 및 현장 검증

## Development of P-SURO II Hybrid Autonomous Underwater Vehicle and its Experimental Studies

이 계 홍\*, 이 문 직, 박 상 현, 김 정 태, 김 종 결, 서 진 호

(Ji-Hong Li<sup>1</sup>, Mun-Jik Lee<sup>1</sup>, Sang-Heon Park<sup>1</sup>, Jung-Tae Kim<sup>1</sup>, Jong-Geol Kim<sup>1</sup>, and Jin-Ho Suh<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Applied Technology Division, Korea Institute of Robot and Convergence

**Abstract:** In this paper, we present the development of P-SURO II hybrid AUV (Autonomous Underwater Vehicle) which can be operated in both of AUV and ROV (Remotely Operated Vehicle) modes. In its AUV mode, the vehicle is supposed to carry out some of underwater missions which are difficult to be achieved in ROV mode due to the tether cable. To accomplish its missions such as inspection and maintenance of complex underwater structures in AUV mode, the vehicle is required to have high level of autonomy including environmental recognition, obstacle avoidance, autonomous navigation, and so on. In addition to its systematic development issues, some of algorithmic issues are also discussed in this paper. Various experimental studies are also presented to demonstrate these developed autonomy algorithms.

**Keywords:** AUV, ROV, hybrid system, autonomous navigation, obstacle avoidance, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

### I. 서론

최근 들어 조력, 파력, 온도차, 해류, 염분차, 해상풍력 등을 활용한 해양에너지, 그리고 해저 원유 및 가스 등 대체에너지에 대한 수요 급증으로 다양한 해양 플랜트에 대한 관심도가 지속적으로 높아지고 있다. 아울러 본격적인 해양 플랜트 산업의 붐에 앞서 해양이라는 열악한 환경에서 다양한 수중 인공 구조물에 대한 유지보수를 포함한 효율적인 관리기술 확보가 시급하다. 기존에 대부분의 수중 구조물 유지보수 작업은 ROV 기술에 의존하고 있다. 그러나 Jacket 구조물(그림 1을 참조)과 같이 복잡한 수중 구조물의 경우 테더케이블의 영향으로 ROV 운용에 제약을 받을 수밖에 없으며 이 경우 AUV 기술이 필요한 대응책으로 떠오르게 된다. 또한 복잡한 구조물 환경의 영향으로 기존에 어뢰외형의 대부분의 상용화 AUV [1,2]가 아닌 호버링 타입의 AUV 기술이 필요하다[3].

P-SURO II AUV는 AUV와 ROV 두 가지 모드로 모두 운용이 가능한 호버링 타입의 하이브리드 무인잠수정으로 그림 2와 같이 전형적인 ROV 외형을 갖는다. 총 여섯 대의 추진기(수평면 4대, 수직면 2대)가 부착되어 잠수정의 5

자유도 운동(피치운동 제외)을 제어하도록 설계되어 있으며, 또한 추후 다양한 탐사장비 및 간편한 작업 툴의 탈부착이 가능하도록 약 18kg의 유로하중을 갖도록 제작되었다.



그림 1. Jacket 수중 구조물 일례.

Fig. 1. Example of an underwater jacket structure.



그림 2. P-SURO II 하이브리드 AUV.

Fig. 2. Perspective view of P-SURO II hybrid AUV.

\* 책임저자(Corresponding Author)

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

이계홍, 이문직, 박상현, 김정태, 김종결, 서진호: 한국로봇융합연구원 실용기술연구본부

(jhli5@kiro.re.kr/mcklee@kiro.re.kr/windscar@kiro.re.kr/postman@kiro.re.kr/ps100@kiro.re.kr/suhgang@kiro.re.kr)

\* 본 논문은 산업통상자원부 기술혁신사업(로봇 산업원천기술 개발 사업, No. 10043928)과 한국과학기술원 국방무인화기술 특화 연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었음.

기존에 수중 무선통신 기술 발전의 제약으로 AUV의 경우 대부분의 수중 임무는 독자적으로 또는 최소한의 인간의 개입으로 수행되어야 한다. 아울러 정밀한 수중 위치인식, 주변 환경 실시간 인지 및 이에 기초한 장애물회피를 동반한 자율주행 기술은 AUV 핵심기술로 최근 들어 수중 로봇 분야에서 많은 각광을 받고 있다. P-SURO II의 경우, IMU (Inertial Measurement Unit), AHRS (Attitude and Heading Reference System), DVL (Doppler Velocity Log), 및 심도계의 조합으로 스트랩다운(strap-down) 관성항법 시스템을 구축하였으며, 위치발산을 방지하기 위하여 GPS 외에도 카메라, 소나 및 센서융합 기반의 수중 위치인식 기술을 결합시킨 복합 항법 시스템을 구성하였다[4,5]. 또한 잠수정의 전방에는 2D 멀티빔 이미지 소나가 부착되어 고도소나와 더불어 주변 환경 및 장애물 탐지 목적으로 활용되고 있다.

개발한 수중 복합항법 및 자율주행 기술의 성능검증을 위하여 수조 및 하천 환경에서 다양한 현장실험을 수행하였으며 획득한 데이터정보를 이용하여 알고리즘 수정보완 작업을 수행하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 P-SURO II AUV 시스템을 간략하게 소개하고, III 장에서는 구축한 수중 복합항법 알고리즘을, 그리고 IV 장에서는 수조환경에서 자율주행을 위한 SLAM 알고리즘을 설명하고, 관련된 알고리즘 성능검증을 위한 현장실험 결과를 V 장에서 기술하고 끝으로 VI 장에서 간단한 결론 및 추후 연구내용을 언급한다.

II. 시스템 개요

1. 일반사양

앞에서 언급한 바와 같이 P-SURO II는 AUV와 ROV 두 가지 모드로 모두 운용이 가능한 무인잠수정으로 전형적인 ROV형태의 오픈 프레임 구조를 갖는다. 또한 추후 다양한 탐사장비 및 간단한 작업 장비의 탈부착이 가능하도록 하기 위하여 가능한 많은 유로하중을 갖도록 부력재를 설계하였다. 그 외에도 4대의 추진기가 수평면에서 벡터 형식으로 배치되어 해/조류 환경에서 잠수정의 DP (Dynamic Positioning), 수평 이동, 고정점을 둘러싼 회전 등 다양한 운동 제어에 편리한 구조로 설계되었다[7]. 잠수정의 전체적인 사양은 표 1과 같다.

표 1. P-SURO II AUV의 일반사양.

Table 1. General specifications of P-SURO II AUV.

| 항 목   | 사 양                        |                     |
|-------|----------------------------|---------------------|
| 최대수심  | 100 m                      |                     |
| 외형치수  | 1.2(L) x 0.9(W) x 0.6(H) m |                     |
| 전체무게  | 134 kg                     |                     |
| 전원시스템 | 2.4 kW 리튬폴리머               |                     |
| 운항시간  | ≥1.5시간                     |                     |
| 유로하중  | 18 kg                      |                     |
| 추진시스템 | 추진기 6대(수평x4 + 수직x2)        |                     |
| 센서시스템 | 시작&조명                      | 카메라x2, 라이트x2        |
|       | 항법                         | IMU, AHRS, DVL, 심도계 |
|       | 장애물탐지                      | 2D 전방 이미지소나, 고도소나   |
|       | 통신                         | 광통신/ATM/RF/WiFi     |



그림 3. P-SURO II 하이브리드 AUV의 분해 조립도.  
Fig. 3. Exploded view of P-SURO II hybrid AUV.

2. 기계시스템

전체 시스템은 100m 작업수심에 맞춰 설계되었다. 메인 프레임과 내압용기는 AL-6061 재질로, 리프트 후크는 스테인리스로, 그리고 센서장비 고정부는 POM (Polyoxymethylene)재질로 제작되었다. 또한 시스템 안정성과 유지보수의 편리를 위하여 전원시스템을 센서장비 및 임베디드시스템과 분리하여 별도의 내압용기에 설치하였다. 전체 시스템의 기계 구조는 그림 3과 같다.

3. 임베디드시스템

임베디드시스템은 크게 제어, 항법, 및 I/O 세 가지 모듈로 구성된다. 두 대의 3.5인치 PCM-9362 SBC (Single Board Computer)가 각각 제어 및 항법 모듈로, 그리고 USB-4704가 I/O 모듈로 사용되고 있다. PCM-9362의 경우, 총 세개의 RS232 채널, 선택이 가능한 1채널의 RS232/422/485, 그리고 6개의 USB 포트를 내장하고 있다. 또한 이 보드는 SSD (Solid State Drive)를 지원하므로 잠수정이 수중작업 중에 대용량의 원시데이터들을 저장하여 추후 분석에 활용 가능하게 된다. 더욱이 SSD의 경우 일반 하드디스크에 비해 물리 충격에 강하므로 전체 시스템의 안정성을 대대적으로 향상할 수 있다. USB-4704 I/O 보드는 총 8채널의 아날로그 입력, 16채널의 DI/O 및 2채널의 아날로그 출력이 가능하다.

운영시스템으로 WES (Windows Embedded Standard) 7을 적용하였다. WES 7의 경우, RT Linux, VxWorks, 및 QNX 등 일반 상용화 RTOS (rEal-Time Operating System)에 비하여 실시간성이 다소 떨어지지만 익숙한 UI (User Interface)로 인하여 시스템 개발이 편리한 장점이 있다. 설계된 WES7 기반의 소프트웨어 아키텍처는 그림 4와 같다.

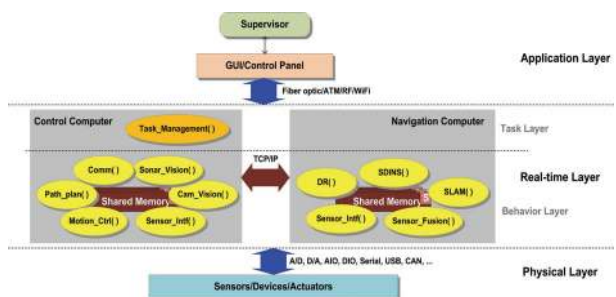


그림 4. P-SURO II AUV의 하이브리드 제어아키텍처 구성.  
Fig. 4. Hybrid control architecture for P-SURO II AUV.



그림 5. P-SURO II AUV의 선상 원격제어 시스템.

Fig. 5. Surface control unit for P-SURO II AUV.

#### 4. 선상 제어시스템

P-SURO II의 경우 선상 제어시스템은 주로 ROV 모드 운용을 목표로 설계되었다. ROV의 경우, 광대역의 광통신이 가능하여 로보공학의 관점에서 봤을 때 전형적인 텔레오퍼레이션 시스템이 된다[8]. 이러한 텔레오퍼레이션 시스템에서 원격제어시스템의 주목적은 실시간으로 로봇의 행위 및 상태를 모니터링하고 이에 기초한 상응한 제어를 수행하는 것이 되겠다. 이러한 관점에서 봤을 때 선상 제어시스템의 가장 중요한 요구사항은 효율성, 신뢰성, 및 안정성이 되겠다.

전체 하드웨어 시스템은 그림 5와 같이 휴대가 가능한 박스 내부에 설치되었으며 제어패널과 컴퓨터의 인터페이스를 위하여 PLC (Programmable Logic Controller) 시스템을 활용하였다. 또한 전체 시스템의 안정성을 위하여 모든 부품은 기성품을 사용하였다. 앞에서 언급한바와 같이 ROV 모드의 경우 광대역 광통신이 가능하여 전형적인 계층구조의 제어 아키텍처를 구성하여 잠수정의 실시간 조종이 가능하다. 그러나 AUV 모드의 경우 제한된 대역폭의 수중 음향통신으로 인하여 위에서 언급한 계층구조가 아닌 행위 기반의 제어아키텍처[9]가 필요하게 된다. 결과적으로 P-SURO II AUV를 위하여 그림 4와 같은 하이브리드 제어 아키텍처[10,11]를 설계하였다.

### III. 수중 복합 관성항법

LBL (Long Baseline), SBL (Short Baseline), 및 USBL (Ultra-Short Baseline) 등 기존에 대부분의 음향통신 기반의 수중 위치인식 시스템의 경우, 사전에 특정 지역에 음향 비콘을 설치하거나 또는 음향신호 전수신기를 장착한 지원선박이 항상 필요하게 된다. 따라서 수중로봇 운용이 복잡하고 또한 비용이 높은 단점이 있다. 이에 비해 관성항법시스템, 특히 스트랩다운 관성항법시스템은 수중로봇 내부에 간단하게 장착할 수 있고 또한 비용이 저렴한 장점이 있다.

관성항법은 IMU 센서가 측정한 동체좌표계에서 가속도와 각속도를 적분하여 속도와 자세, 나아가서 위치를 계산한다. 이때 IMU 측정값에 포함된 바이어스 성분이 관성항법의 주 오차요인이 된다. 이러한 바이어스 성분으로 인하여 순수 관성항법의 경우, 계산된 항법결과가 시간에 따라

빠르게 발산하게 된다. 이러한 발산을 막고자 다양한 보정 기법들이 사용되고 있다[4-6,12]. P-SURO II의 경우, IMU, AHRS, DVL, 심도계, 및 GPS 수신기를 활용하여 복합 관성항법을 구축하였다.

#### 1. 항법 방정식

스트랩다운 관성항법시스템의 경우, IMU는 동체좌표계에서의 가속도 및 각속도를 출력하며 이러한 이유로 항법 매커니즘은 지리좌표계(geographic frame) [5,6,13]에서 표현하는 것이 편리하다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\lambda}} \\ \dot{\hat{\phi}} \\ \dot{\hat{h}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{[(\hat{R}_\phi + \hat{h})\cos(\hat{\lambda})]} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_N \\ \hat{v}_E \\ \hat{v}_D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{v}}_N \\ \dot{\hat{v}}_E \\ \dot{\hat{v}}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{f}_N \\ \hat{f}_E \\ \hat{f}_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{g} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} -\left[ \frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})\cos(\hat{\lambda})} + 2\Omega \right] \hat{v}_E \sin(\hat{\lambda}) + \frac{\hat{v}_N \hat{v}_D}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} \\ \left[ \frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})\cos(\hat{\lambda})} + 2\Omega \right] \hat{v}_N \sin(\hat{\lambda}) + \frac{\hat{v}_E \hat{v}_D}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} + 2\Omega \hat{v}_D \cos(\hat{\lambda}) \\ -\frac{\hat{v}_E^2}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} - \frac{\hat{v}_N^2}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} - \hat{v}_E 2\Omega \cos(\hat{\lambda}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\phi}} \\ \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\hat{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \sin(\hat{\phi}) \tan(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\phi}) \tan(\hat{\theta}) \\ 0 & \cos(\hat{\phi}) & -\sin(\hat{\phi}) \\ 0 \sin(\hat{\phi}) / \cos(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\phi}) / \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \\ \hat{r} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 와  $\phi$ 는 잠수정의 위도와 경도를 뜻하고  $h$ 는 높이를 ( $v_N, v_E, v_D$ )와  $(\phi, \theta, \psi)$ 는 각각 속도와 자세를 뜻하며  $R_\lambda = R(1 - e^2)/(1 - e^2 \sin^2 \lambda)^{1.5}$ ,  $R_\phi = R/(1 - e^2 \sin^2 \lambda)^{0.5}$ , 그리고  $R, e$  및  $\Omega$ 는 각각 지구관련 파라미터다[6]. 또한

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_N \\ \hat{f}_E \\ \hat{f}_D \end{bmatrix} = \hat{C}_b^p \left( \begin{bmatrix} f_{u,m} \\ f_{v,m} \\ f_{w,m} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{b}_u \\ \hat{b}_v \\ \hat{b}_w \end{bmatrix} \right), \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \\ \hat{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_m \\ q_m \\ r_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{b}_p \\ \hat{b}_q \\ \hat{b}_r \end{bmatrix} - \hat{C}_b^y \left( \Omega \begin{bmatrix} \cos(\hat{\lambda}) \\ 0 \\ -\sin(\hat{\lambda}) \end{bmatrix} + \frac{1}{(R + \hat{h})} \begin{bmatrix} \hat{v}_N \\ -\hat{v}_N \\ -\hat{v}_E \tan(\hat{\lambda}) \end{bmatrix} \right), \quad (5)$$

여기서  $(f_u, f_v, f_w)$ 와  $(p, q, r)$ 은 동체좌표계에서 가속도 및 각속도를 뜻하고,  $(b_u, b_v, b_w)$  및  $(b_p, b_q, b_r)$ 는 가속도와 각속도 출력값에 내포된 바이어스 성분을 뜻하고  $C_b^m$ 은 동체좌표계에서 항법좌표계(지리좌표계)로 변환행렬이고 아래첨자  $m$ 은 상응한 변수의 측정값을, 그리고  $\hat{x}$ 은  $x$ 의 추정값을 뜻한다.

#### 2. 항법 오차 방정식

본 연구에서 항법 오차는  $\delta x = x - \hat{x}$ 로, 즉 실제값과 추정값의 차이로 정의한다. 또한 오차 방정식은 섭동 기법(perturbation method)을 이용하여 구한다[6,7].

##### 2.1 위치오차 동특성

(1)식에 섭동 기법을 적용하면

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta\Phi \\ \delta h \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{-\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} & 0 & \frac{-\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \\ \frac{\hat{v}_E(\hat{R}_\phi + \hat{h})\sin\hat{\lambda} - \hat{v}_E \frac{\partial \hat{R}_\phi}{\partial \lambda} \cos\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2 \cos^2\hat{\lambda}} & 0 & \frac{-\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2 \cos\hat{\lambda}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta\Phi \\ \delta h \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{[(\hat{R}_\phi + \hat{h})\cos\hat{\lambda}]} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix}, \\ &= A_{pp} \begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta\Phi \\ \delta h \end{bmatrix} + B_{pv} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 회전 행렬 오차 동특성

일반적으로 오정렬(misalignment), 측정, 계산, 및 초기 오차로 인하여 동체좌표계에서 항법좌표계로 변환 행렬은 항상 오차를 내포하게 된다[6]. 이러한 변환 오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{C}_b^m = (I - P)C_b^m, \quad C_b^m = (I + P)\hat{C}_b^m, \quad (7)$$

여기서

$$P = \begin{bmatrix} 0 & -\epsilon_D & \epsilon_E \\ \epsilon_D & 0 & -\epsilon_N \\ -\epsilon_E & \epsilon_N & 0 \end{bmatrix},$$

그리고  $\rho = [\epsilon_N \epsilon_E \epsilon_D]^T$ 은 실제 항법좌표계를 계산된 항법좌표계에 맞추기 위한 작은 회전각 벡터를 뜻한다[6]. 회전 행렬은 다음과 같이 선형화가 가능하다.

$$\dot{C}_b^p = C_b^m \times \omega_{nb}^b = C_b^m \times (\omega_{ib}^b - \omega_{in}^b), \quad (8)$$

여기서  $\omega_{ib}^b$ 는 플랫폼에 부착된 자이로를 이용하여 측정이 가능하며, 또한  $\omega_{in}^b = C_n^b \omega_{in}^n = C_n^b [(\dot{\Phi} + \Omega)\cos\lambda, -\dot{\lambda}, -(\dot{\Phi} + \Omega)\sin\lambda]^T$ . (7)식을 (8)식에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{C}_b^p &= \dot{P}\hat{C}_b^p + (I + P)\dot{C}_b^p \\ &= (I + P)\dot{C}_b^p \times [(\hat{\omega}_{ib}^b - \hat{\omega}_{in}^b) + (\delta\omega_{ib}^b - \delta\omega_{in}^b)]. \end{aligned} \quad (9)$$

(9)식으로부터  $\dot{\rho} = \hat{C}_b^p (\delta\omega_{ib}^b - \delta\omega_{in}^b)$ 을 얻을 수 있다. 또한

$$\begin{aligned} \omega_{in}^b &= C_n^b \omega_{in}^n \\ &= \hat{C}_n^b (I - P)(\hat{\omega}_{in}^n + \delta\omega_{in}^n) \\ &= \hat{C}_n^b \hat{\omega}_{in}^n - \hat{C}_n^b P \hat{\omega}_{in}^n + \hat{C}_n^b \delta\omega_{in}^n, \end{aligned}$$

나아가서 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\delta\omega_{in}^b = -\hat{C}_n^b P \hat{\omega}_{in}^n + \hat{C}_n^b \delta\omega_{in}^n. \quad (10)$$

결과적으로 다음과 같은 형태의 회전행렬의 오차 동특성을

얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= \hat{C}_b^m \delta\omega_{ib}^b \\ &- \begin{bmatrix} \frac{-\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\phi}{\partial \lambda} - \Omega \sin\hat{\lambda} & 0 & \frac{-\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \\ \frac{\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} & 0 & \frac{\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \\ \frac{\hat{v}_E \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\phi}{\partial \lambda} - \frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h}) \cos^2\hat{\lambda}} - \Omega \cos\hat{\lambda} & 0 & \frac{\hat{v}_E \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta\Phi \\ \delta h \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} & 0 \\ \frac{1}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} 0 & \frac{\hat{v}_E \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} + \Omega \sin\hat{\lambda} & \frac{-\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} \\ \frac{\hat{v}_E \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} - \Omega \sin\hat{\lambda} & 0 & \frac{-\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} - \Omega \cos\hat{\lambda} \\ \frac{\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} & \frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} + \Omega \cos\hat{\lambda} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_N \\ \epsilon_E \\ \epsilon_D \end{bmatrix} \\ &= \hat{C}_b^p \delta\omega_{ib}^b + A_{vp} \begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta\Phi \\ \delta h \end{bmatrix} + B_{vv} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} + C_{va} \begin{bmatrix} \epsilon_N \\ \epsilon_E \\ \epsilon_D \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.3 속도 오차 동특성

잘 아시다시피 항법좌표계에서 속도 방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{V}^n = C_b^m f^b + g^n - (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n) \times V^m, \quad (12)$$

여기서  $f^b = [f_u, f_v, f_w]^T$ 은 동체좌표계에서 가속도 벡터이고,  $g^n$ 은 항법좌표계에서 중력벡터이다. 또한

$$\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} (\dot{\Phi} + 2\Omega)\cos\lambda \\ -\dot{\lambda} \\ -(\dot{\Phi} + 2\Omega)\sin\lambda \end{bmatrix}.$$

(12)식을 더 전개하면

$$\begin{aligned} \dot{V}^n &= (I + P)\hat{C}_b^p (f^b) + (\hat{g}^n + \delta g^n) - [(\hat{\omega}_{en}^n + 2\hat{\omega}_{ie}^n) \\ &+ (\delta\omega_{en}^n + 2\delta\omega_{ie}^n)] \times (\hat{V}^n + \delta V^m) \\ &= \hat{C}_b^p \hat{f}^b + \hat{g}^n - (\hat{\omega}_{en}^n + 2\hat{\omega}_{ie}^n) \times \hat{V}^n + \hat{C}_b^p \delta f^b + \delta g^n + P \hat{C}_b^p \hat{f}^b \\ &- (\hat{\omega}_{en}^n + 2\hat{\omega}_{ie}^n) \times \delta \hat{V}^n - (\delta\omega_{en}^n + 2\delta\omega_{ie}^n) \times \hat{V}^n \\ &= \hat{C}_b^p \delta f^b - \\ &\begin{bmatrix} \frac{\hat{v}_g^2}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h}) \cos^2\hat{\lambda}} + 2\Omega \hat{v}_g \cos\hat{\lambda} - \frac{\hat{v}_g^2 \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{\hat{v}_N \hat{v}_D}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} \\ \frac{-\hat{v}_N \hat{v}_g}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h}) \cos^2\hat{\lambda}} - 2\Omega \hat{v}_N \cos\hat{\lambda} + \frac{\hat{v}_N \hat{v}_g \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{\hat{v}_g \hat{v}_D}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} + 2\Omega \hat{v}_D \sin\hat{\lambda} \\ \frac{\hat{v}_N^2 \tan\hat{\lambda}}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} - \frac{\hat{v}_g^2}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} \frac{\partial \hat{R}_\lambda}{\partial \lambda} + 2\Omega \hat{v}_g \sin\hat{\lambda} \end{bmatrix} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} 0 & \frac{\hat{v}_N \hat{v}_D}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} - \frac{\hat{v}_E^2 \tan \hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \\ 0 & \frac{\hat{v}_E \hat{v}_D}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} + \frac{\hat{v}_N \hat{v}_E \tan \hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \\ 0 & -\frac{\hat{v}_N^2}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})^2} - \frac{\hat{v}_E^2}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \hat{\lambda} \\ \delta \hat{\Phi} \\ \delta \hat{h} \end{bmatrix} \\
& - \begin{bmatrix} \frac{-\hat{v}_D}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} & 2 \left( \frac{\hat{v}_E \tan \hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} + \Omega \sin \hat{\lambda} \right) & \frac{-\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} \\ \frac{\hat{v}_E \tan \hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} - 2\Omega \sin \hat{\lambda} & \frac{\hat{v}_N \tan \hat{\lambda}}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} - \frac{\hat{v}_D}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} & \frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}_\phi + \hat{h})} - \Omega \cos \hat{\lambda} \\ \frac{2\hat{v}_N}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} & \frac{2\hat{v}_E}{(\hat{R}_\lambda + \hat{h})} + 2\Omega \cos \hat{\lambda} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} \\
& = \hat{C}_b^T \delta f^b + A_{ap} \begin{bmatrix} \delta \lambda \\ \delta \hat{\Phi} \\ \delta \hat{h} \end{bmatrix} + B_{av} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} + C_{aa} \begin{bmatrix} \epsilon_N \\ \epsilon_E \\ \epsilon_D \end{bmatrix}, \quad (13)
\end{aligned}$$

여기서  $D = \hat{C}_b^T f^b$ .

### 3. 항법 필터 설계

P-SURO II 무인잠수정의 경우 IMU의 가속도 및 각속도 출력값을 (1)-(3)식에 대입하여 항법(위치, 속도, 및 자세)결과를 계산하며, 시변 칼만 필터를 적용하여 상용한 항법(위치, 속도, 및 자세) 오차를 추정하여 보정하는 방법을 적용하였다.

#### 3.1 항법 오차 상태방정식

구성한 항법 필터의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)w(t), \quad (14)$$

여기서  $X = [\delta \lambda, \delta \hat{\Phi}, \delta \hat{h}, \delta v_N, \delta v_E, \delta v_D, \epsilon_N, \epsilon_E, \epsilon_D, b_w, b_v, b_w, b_p, b_q, b_r]^T$ 는 상태 벡터다. 또한,

$$F = \begin{bmatrix} A_{pp} & B_{pw} & C_{pa} \\ A_{vp} & B_{vw} & C_{va} \\ A_{ap} & B_{aw} & C_{aa} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 6} \\ -\hat{C}_b^p & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -\hat{C}_b^p \\ 0_{6 \times 6} \end{bmatrix},$$

그리고 본 연구에서 IMU 가속도 및 각속도 오차는 랜덤워크의 바이어스 성분과 백색 잡음의 합으로, 즉 다음과 같이 모델링 된다.

$$\delta f^b = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \end{bmatrix} + w_a(t), \quad w_a(t) \sim N(0, Q_a), \quad (15)$$

$$\delta \omega_{ib}^b = \begin{bmatrix} b_p \\ b_q \\ b_r \end{bmatrix}, \quad w_g(t) \sim N(0, Q_g), \quad (16)$$

(14)식에서  $w = [w_a^T, w_g^T]^T$ 이다.

#### 3.2 항법 오차 측정방정식

앞에서 언급하다시피 P-SURO II의 경우, AHRS, DVL, 및 심도계를 이용하여 추가적인 항법정보를 획득한다. 이 센서 측정 오차방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{h} - h_m = (h - \delta h) - (h - b_h - v_h) = -\delta h + b_h + v_h, \quad (17)$$

$$\hat{V}^n - V_m^n = (V^m - \delta V^m) - \hat{C}_b^T (V^b - b_V - v_V) \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& = (V^m - \delta V^m) - (I - P) C_b^T (V^b - b_V - v_V) \\
& = -\delta V^m + \hat{C}_b^T (b_V + v_V) + P \hat{C}_b^T V_m^b,
\end{aligned}$$

$$\hat{\phi} - \phi_m = (\phi - \rho) - (\phi - b_\phi - v_\phi) = -\rho + b_\phi + v_\phi, \quad (19)$$

여기서  $V_m^b$ 는 DVL 측정값을,  $\phi_m$ 은 AHRS 측정값을 뜻하며,  $b_h, b_v$ , 및  $b_\phi$ 는 각각 심도계, DVL, 및 AHRS 측정값에 내포된 상수 바이어스 성분을 뜻하고  $v_h, v_v$ , 및  $v_\phi$ 는 상용한 백색잡음이다.

(17)-(19)식에 근거하여 항법 오차 측정방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Y(t) = C(t)X(t) + H(t)v(t), \quad (20)$$

여기서

$$C = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 2} & -1 & 0_{1 \times 9} & 0_{1 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} & C V_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0_{1 \times 6} \\ 0 & \hat{C}_b^p & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} & 1_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

그리고  $v = [v_h^T, v_v^T, v_\phi^T]^T \sim N(0, R)$ 이다.

#### 3.3 이산형 필터 설계

(14)식과 (20)식의 상태 및 측정 방정식을 이용하여 다음과 같은 이산형 필터 설계가 가능하다[14].

$$X_{k+1} = F_k^s X_k + w_k, \quad (21)$$

$$Y_k = C_k^s X_k + H_k^s v_k, \quad (22)$$

여기서

$$F_k^s = e^{F \cdot \delta t} = I + F \delta t + \frac{F^2}{2!} \delta t^2 + \frac{F^3}{3!} \delta t^3 + \dots,$$

또한  $C_k^s = C(t)$ ,  $H_k^s = H(t)$ , 그리고  $w_k \sim N(0, Q^s)$  및

$$\begin{aligned}
Q^s &= G Q G^T \delta t + \frac{F G Q G^T + G Q G^T F^T}{2!} \delta t^2 \\
&+ \frac{F^2 G Q G^T + 2 F G Q G^T F^T + G Q G^T (F^T)^2}{3!} \delta t^3 + \dots,
\end{aligned}$$

그리고  $v_k \sim N(0, R^s)$ ,  $R^s = R/\delta t$ 이다.

## IV. 수조환경에서 SLAM 기술

앞에서 언급하다시피 P-SURO II 무인잠수정의 경우 전방에 2D 이미저소나가 부착되어 장애물탐지 목적으로 사용된다. 만약 잠수정의 속도 및 방위각 정보를 알고 있다면 일반적인 확장 칼만필터기법[15,16]을 그대로 적용하여 수평면에서 SLAM을 구현할 수 있다. 그러나 한국로봇융합연구원에서 보유하고 있는 지하수조의 경우 사면이 철제 구조물로 둘러싸여 있어 심각한 자기장 왜곡을 유발하며 결과적으로 AHRS가 정상적인 방위각 정보를 제공할 수 없게 된다. 이러한 문제점으로 인하여 위 SLAM 기법을 그대로 적용하기 어렵다. 그럼에도, 만약 잠수정의 초기 위치 및 자세와 더불어 수조 공간구조특징을 사전에 알고 있다고 가정한다면 일정한 가시 각도(view angle)를 갖는 소나 데이

터를 활용하여 수조환경에서 비교적 정밀한 SLAM을 구현할 수 있다.

### 1. 이미지소나 측정값 모델링

잠수정에 부착된 2D 이미지소나는 130도의 가시 각도를 가지며 총 768개의 빔이 0.18도의 간격으로 배치되어 있다. 매 빔에서 거리 측정값은 특정 Gaussian 분포를 갖도록 모델링 되었으며, 여기서 표준편차는 소나 빔의 수조 벽면으로 입사각(attack angle)에 의존한다. 자세한 내용은 [16]을 참조한다.

### 2. 잠수정의 위치인식

본 연구에서 항법좌표계는 그림 6과 같이 수조벽면 좌표계를 사용하여 상응한 위치 및 방위각을 정의한다.

앞에서 언급하다시피 만약 전 시점에서 잠수정의 위치 및 방위각을 알고 있다면 현 시점에서 소나의 핑(ping) 정보 즉 거리 정보를 이용하여 현 시점에서 잠수정의 위치 및 방위각을 추정할 수 있다. 예를 들어, 현 시점에서 획득한 소나 핑 정보가 그림 7에서 표시되는 푸른 점들과 같다면 그림에서와 같이 소나좌표계(즉 Y'축이 소나 중심축과 일치)에서 수조벽면에 상응한 1차 다항식  $l_1: y = a_1x + b_1$ 과  $l_2: y = a_2x + b_2$ 을 유출할 수 있으며, 나아가서 소나 헤더(그림에서 원점)에서 두 직선까지 거리를 계산할 수 있다.

$$l_{OP_1} = b_1 \sec \alpha = b_1 \sec(\text{atan}(a_1)), \quad (23)$$

$$l_{OP_2} = -\frac{b_2}{a_2} \sec \beta = -\frac{b_2}{a_2} \sec\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}(a_2)\right). \quad (24)$$

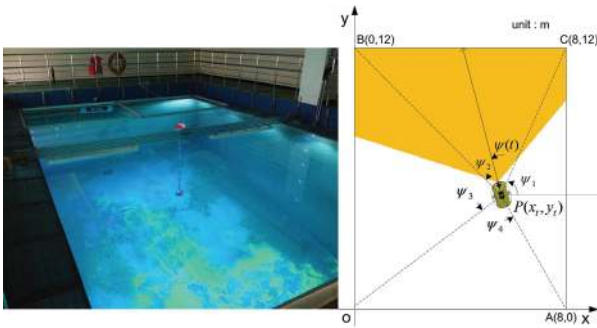


그림 6. 수조좌표계에서 위치 및 방위각 정의.

Fig. 6. Definition of position and heading in water tank frame.

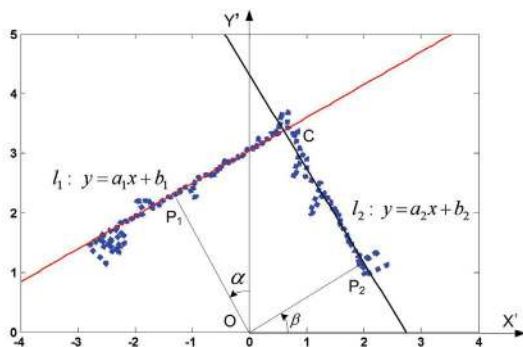


그림 7. 소나 핑 정보를 이용한 잠수정의 위치 및 방위각 추정.

Fig. 7. Estimation of vehicle position and heading from sonar ping measurement.

만약 두 1차 다항식의 교차점 C점이 그림 6에서 표시되는 수조 네 귀퉁이 O, A, C, B에서 어느 점과 일치하다는 정보가 추가적으로 있다면, 예를 들어 그림 6에서 C점과 일치한다면, 잠수정의 위치 및 방위각은 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$x_t = 8 - l_{OP_1}, \quad y_t = 12 - l_{OP_1}, \quad \psi(t) = \frac{\pi}{2} - \alpha = \frac{\pi}{2} - \beta, \quad (25)$$

실제로 전 시점에서 잠수정의 위치 및 방위각 정보에 근거하여 두 1차 다항식의 교점 C가 수조의 어느 귀퉁이와 일치한지 추정이 가능하다.

## V. 현장 성능 검증

### 1. 수중 복합항법 알고리즘

#### 1.1 항법 원시데이터 획득

P-SURO II AUV의 경우 탑재한 항법센서들의 성능특성은 표 1과 같다. 개발한 AUV의 성능검증을 위하여 2012년 2월 포스코 열처리 수조에서 현장실험을 수행하였다(그림 8을 참조). 실험에서 GPS 데이터를 포함한 모든 항법관련 원시데이터들을 실시간으로 저장하였으며 후처리 방식으로 개발한 수중 복합 관성항법의 성능을 분석하였다.

#### 1.2 항법결과 비교 및 분석

항법알고리즘의 성능분석을 위하여 획득한 항법 원시데이터를 이용하여 DR (Dead Reckoning, DVL+AHRS), DVL-aiding INS, GPS+DVL-aiding INS 결과를 GPS 데이터와 비교하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 또한 GPS+DVL-aiding INS의 경우, GPS 위치정보 보정간격을 임의로 조절

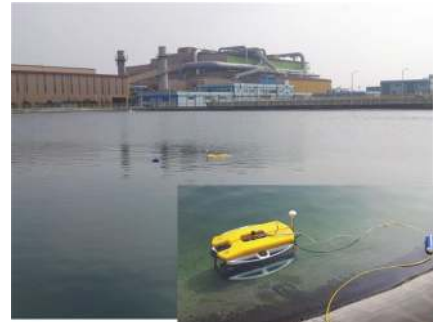


그림 8. 포스코 수조 현장테스트.

Fig. 8. Field test in the Posco outdoor water tank.

표 2. P-SURO II AUV의 항법센서 성능특성.

Table 2. Navigation sensor specifications for P-SURO II AUV.

| 센서   | 항목  | 바이어스 오차 ( $1\sigma$ )              | 랜덤 노이즈 ( $1\sigma$ )    | 갱신 주기 (Hz) |
|------|-----|------------------------------------|-------------------------|------------|
| IMU  | 가속도 | 1 mg                               | 35 mg                   | 100        |
|      | 자이로 | $1^\circ/hr$                       | 0.0045 rad/s            | 100        |
| DVL  |     | 0.01 m/s                           | 0.1 m/s <sup>a)</sup>   | 1          |
| AHRS |     | $2^\circ$ (롤, 피치)<br>$1^\circ$ (요) | $2^\circ$ <sup>a)</sup> | 100        |
| 심도계  |     | 0.05m                              | 0.02 m <sup>a)</sup>    | 10         |

a) 이 값들은 반복적인 실험에서 획득한 센서 원시데이터를 분석하여 획득한 실험수치임.

하면서 항법결과에 주는 영향을 고찰하였다. 구축한 항법 알고리즘의 경우 위치 보정간격이 25초를 초과하면 위치오차가 5m(RMS)를 초과하는 것을 관찰할 수 있었다.

관성항법의 실제 응용에 있어서 쉽게 접할 수 있는 문제점이 곧 AHRS 비정상 작동이 되겠다. 기존에 대부분의 AHRS 센서는 내부에 3축 자기장센서를 장착하여 지구 자

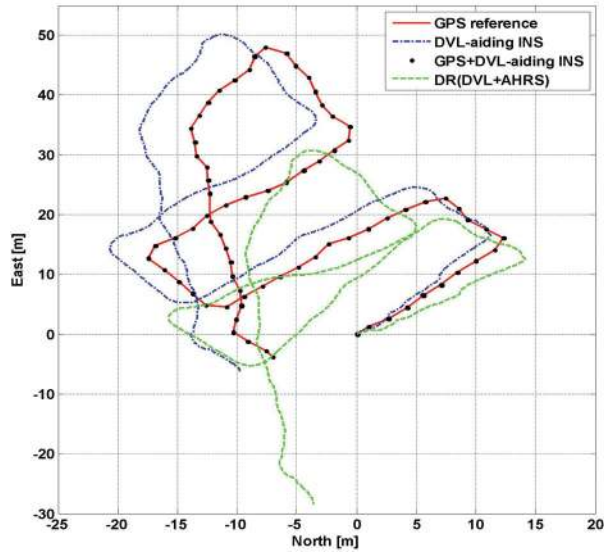


그림 9. 항법 알고리즘 결과 비교.

Fig. 9. Comparison of navigation algorithm results.

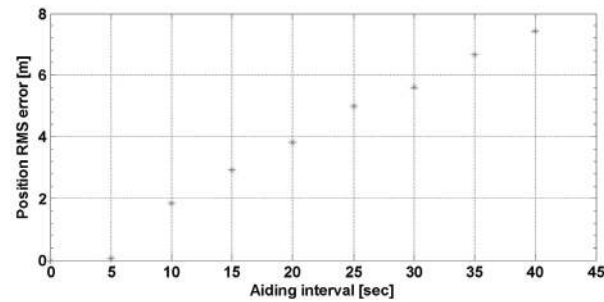


그림 10. GPS 보정간격에 따른 항법 오차 비교.

Fig. 10. Comparison of navigation results according to different GPS aiding interval.

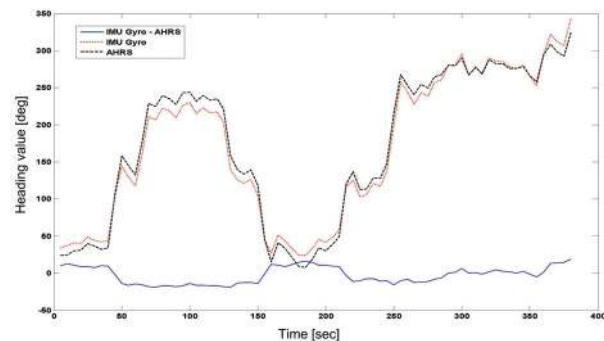


그림 11. AHRS 방위각 출력과 IMU 자이로 적분값 비교.

Fig. 11. Comparison between AHRS heading output and IMU gyro output integration.

장을 측정하므로 표준 방위각(진북)을 보정한다. 만약 AHRS 센서 외부에 지구 자기장 왜곡이 발생하면 센서는 정상적인 자세정보를 제공할 수 없게 된다. P-SURO II의 경우 AHRS 센서는 기타 항법센서 및 임베디드시스템과 동일한 내압용기 공간을 공유하며 이러한 장비배치가 AHRS 출력에 주는 영향을 관찰하고자 IMU 자이로 적분값(지구 자기장의 영향을 받지 않음)과 AHRS 방위각 출력값을 비교 분석하였다. 그림 11에서 보듯이 이 두 값 사이 차이는 잠수정의 방위각에 따라 변하는 것을 볼 수가 있으며 이는 AHRS 출력값이 지구 자기장 왜곡의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 아울러 이러한 문제점을 극복 또는 최소화하기 위해서는 실제 응용에서 AHRS 센서를 가급적으로 철재 구조물 및 전기/전자 회로 시스템과 멀리 분리시켜야 한다.

## 2. 수조환경에서 SLAM 알고리즘

### 2.1 소나 원시데이터 획득

P-SURO II의 경우 아직 AUV 모드가 완벽하게 구현되어 있지 않다. 아울러 ROV 모드로 장애물이 설치되어 있는 수조환경에서 일정한 패턴으로 주행하면서 획득한 소나 원시데이터를 이용하여 후처리 방식으로 SLAM 알고리즘 성능을 분석하였다. 구축한 실험환경은 그림 12와 같다. 그림에서 보듯이 외경이 약 40 cm의 빨간색 풍선을 수조내부에 설치하여 소나로 검색이 가능한지 실험하였다.

### 2.2 SLAM 알고리즘 성능분석

획득한 소나 원시데이터를 이용하여 MATLAB으로 후처리한 SLAM 결과는 그림 13과 같다. 그림에서 파란색으로 표시된 부분이 장애물로 인지된 영역이다. 본 연구에서 소나의 매개 빔에서 측정된 거리가 설계변수  $OR_{threshold}$  보다 작을 경우 목표점을 장애물 후보로 선정한다. 여기서 변수  $OR_{threshold}$ 의 크기는 소나 빔 입사각에 따라 변한다. 만약 연속으로 장애물 후보에 선정된 인접한 빔 개수가 일정한 수치  $ON_{threshold}$ 을 초과하면 상응한 목표물을 장애물로 선정한다. 여기서 소나 및 수조환경 특징에 따라  $ON_{threshold}$ 을 적절하게 선정할 필요가 있다.

그림 13에서 보듯이 빨간색 장애물이 위치한 근처에 두 개의 장애물 블록이 검출되었다. 이러한 문제점의 이유는 그림 14에서 찾을 수 있다. 그림에서 보듯이 장애물 근처에서 SLAM 알고리즘이 추정된 잠수정의 y축 위치값이 점프하는 것을 볼 수 있다. 이러한 위치오차로 인하여 동일한 장애물 블록이 두 개로 검출되는 결과를 가져오게 된다.



그림 12. 소나 원시데이터 획득을 위한 수조테스트.

Fig. 12. Tank test for acquisition of sonar raw measurement.



실제로 본 SLAM 알고리즘의 경우 그림 7에서 볼 수 있듯이 만약 특정 수조벽면에 상응한 소나 측정값이 너무 적을 경우엔 상응한 위치 추정이 어렵게 된다. 예를 들어 그림 7에서  $l_1$ 에 해당되는 소나 측정값이 너무 적을 경우 (25)식으로 계산되는 잠수정의 y축 위치값이 정확하지 못하게 된다. 그림 14의 경우가 바로 이와 같은 경우가 되겠다. 이러한 문제점은 실제 응용에 있어서 소프트웨어적으로, 즉 한 쪽 벽면에 상응한 소나 측정 빔 개수가 일정한 수치보다 적을 경우엔 그 벽면에 상응한 위치 추정을 포기하고 전 단계 위치값을 유지하는 방식으로 일정하게 보상이 가능하다. 그림 13에서 장애물 블록 C는 수조벽면에 설치된 유리창문으로 인한 소나 측정오차로 인하여 검출된 가상의 장애물이다.

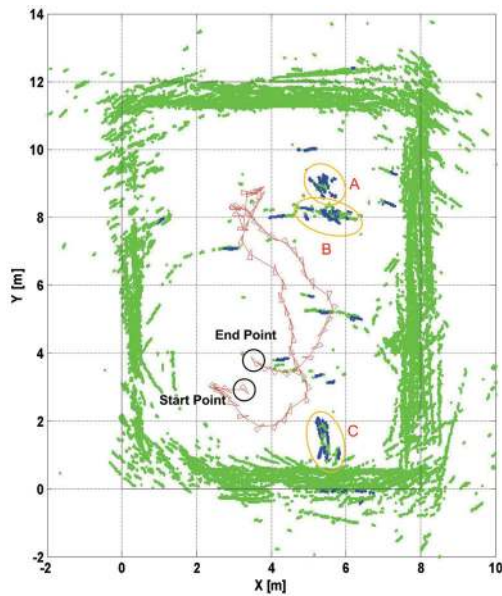


그림 13. SLAM 시뮬레이션 결과 1.

Fig. 13. Simulation result 1 of SLAM algorithm.

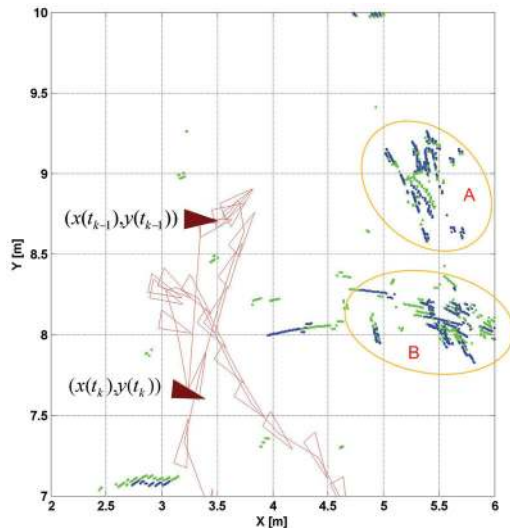


그림 14. SLAM 시뮬레이션 결과 2.

Fig. 14. Simulation result 2 of SLAM algorithm.

## VI. 결론

본 논문에서는 현재 한국로봇융합연구원에서 개발하고 있는 P-SURO II 하이브리드 자율무인잠수정에 대하여 소개하였다. 전체 시스템에 대한 간략한 소개에 이어 수중 복합 관성항법과 자율주행을 위한 SLAM 기법에 관하여 중점적으로 기술하였다. 또한 개발한 알고리즘의 성능분석을 위하여 다양한 현장실험에서 획득한 원시데이터를 이용하여 후처리 방식으로 성능검증을 수행하였다.

추후 보완사항으로 크게 두 가지를 들 수 있다. 하나는 수중 복합 관성항법으로, 우선 지구 자기장 왜곡으로 인한 AHRS 센서 이상(malfunction) 문제해결이 시급하며, 그 외에도 오정렬, 레버 암(lever arm) 등의 영향을 최소화하는 것도 복합 관성항법 정밀도 향상에 반드시 필요한 수단으로 예상된다. 또 다른 추후과제로 기존에 SLAM 기법에 대한 수정보완이 되겠다. P-SURO II의 경우 탑재된 IMU 및 DVL, 심도계를 활용하여 비교적 정밀한 방위각 추정이 가능하다. 또한 수조벽면에 설치된 수중패턴에 대한 비전 기반의 위치인식 기법을 병합하므로 밀폐된 수조환경에서 정밀한 SLAM, 나아가서 장애물회피를 동반한 자율유영 기술 구현이 가능할 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] T. Presterro, *Verification of a Six-degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicles*, Masters Thesis, Department of Ocean Engineering and Mechanical Engineering, MIT, 2001.
- [2] R. Marthiniussen, K. Vestgard, R. A. Klepaker, and N. Storkersen, "HUGIN-AUV concept and operational experience to date," *Proc. of MTS/IEEE Techno-Oceans'04*, Kobe, Japan, pp. 846-850, 2004.
- [3] J. H. Li, S. K. Park, M. J. Lee, J. G. Kim, S. H. Park, and J. H. Suh, "Development of P-SURO II hybrid AUV," *Proc. of the 2011 KUUV Fall Conference (in Korean)*, pp. 6-8, Nov. 2011.
- [4] L. L. Witcomb, D. Yoerger, and H. Singh, "Advances in Doppler-based navigation of underwater robotic vehicles," *Proc. of IEEE ICRA*, pp. 399-406, 1999.
- [5] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1997.
- [6] J. Farrell and M. Barth, *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. McGraw-Hill, New York, NY, 1999.
- [7] J. H. Li, M. J. Lee, J. G. Kim, S. K. Park, S. H. Park, and J. H. Suh, "Guidance and control of P-SURO II hybrid AUV," *Proc. of MTS/IEEE Oceans'12 Yeosu*, Korea, 2012.
- [8] T. B. Sheridan, "Teleoperation, telerobots and telepresence: a progress report," *Control Engineering Practice*, vol. 3, pp. 205-214, 1995.



- [9] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 14-23, 1986.
- [10] D. Simon, B. Espiau, E. Castillo, and K. Kapellos, "Computer-aided design of a generic robot controller handling reactivity and real-time issues," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 1, pp. 213-229, 1993.
- [11] J. H. Li, B. H. Jun, P. M. Lee, and S. W. Hong, "A hierarchical real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle," *Ocean Engineering*, vol. 32, pp. 1631-1641, 2004.
- [12] N. Fairfield, G. Kantor, D. Jonak, and D. Wettergreen, *DEPTHX Autonomy Software: Design and Field Results*, Technical Report CMU-RI-TR-08-09, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, July 2008.
- [13] K. R. Britting, *Inertial Navigation Systems Analysis*, Artech House, Norwood, MA, 2010.
- [14] F. L. Lewis, *Optimal Estimation*, John Wiley & Sons, 1986.
- [15] S. Thurn, W. Birgard, and D. Fox, *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, 2005.
- [16] J. H. Li, M. J. Lee, S. H. Park, and J. G. Kim, "Range sonar array based SLAM for P-SURO AUV in a partially known environment," *Proc. of 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, Daejeon, Korea, pp. 353-354, 2012.



### 김 정 태

2002년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 졸업. 2012년 동 대학원 석·박사 졸업. 2012년~현재 한국로봇융합연구원 수중로봇연구센터 선임연구원. 관심분야는 로봇 경로 계획.



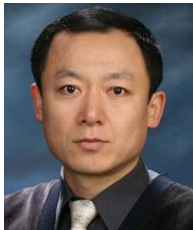
### 김 종 굴

1996년 경일대학교 기계설계학과 졸업. 2010년 경북대학교 대학원 석사. 1996년~2006년 (주)풍산 연구원. 2007년~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원. 관심분야는 로봇 기구 설계 및 메커니즘, 공장 자동화.



### 서 진 호

1993년 한양대학교 응용수학과 졸업. 1998년 부경대학교 대학원 석사. 2002년 동경공대 박사. 2002년~2006년 부경대학교 기계공학부 및 대학원 강사. 2006년~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원. 관심분야는 수중로봇, 시스템 통합 제어.



### 이 계 홍

1991년 중국 길림대학교 물리학과 졸업. 1999년 충남대학교 대학원 석사. 2003년 동 대학 박사. 2003년~2009년 한국해양과학기술원(옛 한국해양연구원). 2009년~현재 한국로봇융합연구원(옛 포항지능로봇연구소) 책임연구원.

관심분야는 비선형제어, 수중로봇의 위치인식 및 자율주행.



### 이 문 직

2005년 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년~2007년 (주)마이키 연구원. 2007년~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원. 관심분야는 수중로봇 전장설계 및 제어, 산업용 로봇 응용기술 개발.



### 박 상 현

2007년 홍익대학교 컴퓨터학과 졸업. 2011년 고려대학교 대학원 석사. 2011년~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원. 관심분야는 수중/지상 SLAM 및 시뮬레이션.