

비동기식 센서 융합을 이용한 수중 구조물 부착형 수중 위치 인식 시스템 개발

오지윤¹, 신창주^{1*}, 백승재¹, 장인성¹, 정상기¹, 서정민¹, 이화준¹, 최재호¹, 원성규²
¹한국해양과학기술원, ²Vibroacoustics Total Solution

Development of Underwater Positioning System using Asynchronous Sensors Fusion for Underwater Construction Structures

Ji-Youn Oh¹, Changjoo Shin^{1*}, Seungjae Baek¹, In Sung Jang¹,
Sang Ki Jeong¹, Jungmin Seo¹, Hwajun Lee¹, Jae Ho Choi¹, Sung Gyu Won²
¹Korea Institute of Ocean Science & Technology
²Vibroacoustics Total Solution

요약 한국해양과학기술원에서는 수중 공사용 구조물에 적용할 수 있는 수중 위치 인식 기술을 개발하고 있다. 정밀한 위치 인식을 위해 관성 항법을 기반으로 한 확장 칼만 필터를 사용하였으며, 비동기화 된 센서들의 데이터를 알고리즘 보정 단계에 적용하기 위하여 내부의 관측 행렬을 데이터에 따라 구분하여 업데이트 하였다. 수중 공사 환경, 설치 위치, 시스템 운용 편의성 등을 종합적으로 고려하여 수중 공사 구조물 하부에 붙여야 신호를 획득할 수 있는 Doppler velocity logger(DVL)는 설치 및 회수가 어렵기 때문에 이를 배제한 수중 공사 구조물 부착용 수중 위치 인식 복합 시험체를 제작하였으며 수중 환경에서 수중 위치 인식 성능 시험을 수행하였다. Ultra short-base line(USBL)로 측정된 수중 위치, 위치 벡터만 보정된 추정 위치, 그리고 위치와 속도 벡터를 보정한 추정 위치 결과를 원형 공산 오차(CEP)를 이용하여 비교 및 평가하였다. 그 결과 USBL 단독 위치 추정 CEP 0.02 m, 위치 벡터만 보정한 추정 위치 CEP 3.76 m., 위치 및 속도 벡터를 보정한 추정 위치 CEP 0.06 m로 평가되었다. 본 연구를 통해 DVL이 미적용된 비동기식 센서 들을 이용하여 안정적인 수중 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다.

Abstract An underwater positioning method that can be applied to structures for underwater construction is being developed at the Korea Institute of Ocean Science and Technology. The method uses an extended Kalman filter (EKF) based on an inertial navigation system for precise and continuous position estimation. The observation matrix was configured to be variable in order to apply asynchronous measured sensor data in the correction step of the EKF. A Doppler velocity logger (DVL) can acquire signals only when attached to the bottom of an underwater structure, and it is difficult to install and recover. Therefore, a complex sensor device for underwater structure attachment was developed without a DVL in consideration of an underwater construction environment, installation location, system operation convenience, etc.. Its performance was verified through a water tank test. The results are the measured underwater position using an ultra-short baseline, the estimated position using only a position vector, and the estimated position using position/velocity vectors. The results were compared and evaluated using the circular error probability (CEP). As a result, the CEP of the USBL alone was 0.02 m, the CEP of the position estimation with only the position vector corrected was 3.76 m, and the CEP of the position estimation with the position and velocity vectors corrected was 0.06 m. Through this research, it was confirmed that stable underwater positioning can be carried out using asynchronous sensors without a DVL.

Keywords : Asynchronous Sensors, Doppler Velocity Logger, Extended Kalman Filter, Sensor Fusion, Underwater Positioning

본 논문은 한국해양과학기술원 주요연구사업의 연구지원(PE99932)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Changjoo Shin(Korea Institute of Ocean Science & Technology)

email: cjshin@kiost.ac.kr

Received December 8, 2020

Revised February 17, 2021

Accepted March 5, 2021

Published March 31, 2021

1. 서론

한국해양과학기술원은 수중 공사용 구조물을 수중에서 정밀하고 안전하게 시공 및 관리하기 위한 다양한 기반 기술 중 천해 수중 위치 인식 기술 연구를 수행하고 있다.

육상의 경우 대상물 위치 인식을 수행하기 위하여 위성항법시스템(GNSS: Global Navigation Satellite System, 이하 GNSS)을 구조물 이동, 빌딩 정보 관리 등에 적극적으로 활용하고 있다[1]. 반면 수중에서는 대상물의 위치 인식을 위해 육상의 GNSS를 대체하는 장비로 Long-Base Line(LBL), Ultra Short-Base Line(USBL) 등이 사용된다[2]. GNSS용 센서의 경우 항공, 육상, 해상 등 다양한 분야에서 대중화되어 있는 반면, 수중 위치 인식용 음향 센서는 수중에 국한되어 사용되기 때문에 군사적 목적[3], 또는 Offshore Oil & Gas 산업 등의 특수 목적으로 주로 사용되고 있다.

GNSS는 전파를 이용하여 위치 인식을 수행하는 반면 수중 위치 인식용 센서는 음향을 이용하기 때문에 상대적으로 위치 인식 업데이트가 느리며 비주기적이다[4]. 또한 수중 위치 인식용 음향 센서의 정확도는 수중 대상물의 수심 및 수중 환경(시간과 공간에 따른 음속변화, 조류, 매질의 불균일 등)에 따라 가변 된다[5]. 따라서 지속적으로 정밀한 수중 위치 인식을 수행하기 위해서는 음향 센서 외에도 다른 센서들을 추가로 활용하는 것이 유리하다.

수중에서 견인되는 장비의 위치 인식을 수행하기 위하여 자체 측정용 Inertial Measurement Unit(IMU), 수중 위치 인식용 USBL, 수중 속도 측정을 위한 Doppler Velocity Logger(DVL), 수심 측정용 압력 센서를 활용한 연구가 수행되었다[6]. 각 센서로 획득된 신호를 상호 작용 다중 모델 알고리즘에 적용하여 수중 위치 인식을 수행하였다. 해당 연구에 활용된 시스템은 USBL의 특성에 의해 수심의 변화에 따라 위치 정확도가 달라지며 위치 업데이트 주기가 비주기적이게 된다. 또한 DVL의 경우 해저면에서 일정고도 이상이거나, 침전물이 부유하여 수중 탁도가 높아질 경우 신호획득이 불가능할 수 있다[7]. 따라서 해양 구조물 시공 및 관리에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다.

또한 심해 무인잠수정을 이용하여 수중 위치 인식 연구가 수행되었다[8,9]. 해당 연구에 적용된 센서는 IMU, USBL, DVL, 압력 센서 이다. Kim의 경우 고가의 센서들을 적용함으로써 동기화된 데이터를 획득하여 수중위

치인식을 수행하였다[8]. 반면 Lee는 각 센서별 신호 업데이트 경우의 수를 분류하고 이에 따른 수중 위치 인식을 수행하였다[9]. 해당 방안은 비동기 다중 센서 융합 시 유용하게 활용될 수 있다.

자율 무인잠수정 편대 운영을 위한 수중 위치 인식 연구도 수행된 바 있다[10]. 이때 적용된 각 센서들은 IMU, DVL, 압력센서, USBL이었다. 해당 연구에서는 편대 운영을 위하여 자율 무인잠수정 간의 거리유지가 필수적이기 때문에 정밀한 DVL 사용이 요구되었다.

선행 연구를 통해 센서 융합을 통한 수중 위치 인식을 위해서는 IMU, USBL, DVL 및 수심 측정을 위한 압력 센서가 요구되는 것을 확인할 수 있다. 이들 센서를 이용하여 수중 구조물 시공/관리에 수중 위치 인식 기술을 적용하기 위해서는 다음의 두 가지 조건을 만족시킬 필요가 있다.

- (1) 저가의 센서를 이용한 위치 인식 시스템
- (2) 수중 구조물의 시공 환경 분석 및 반영

정밀도가 높은 고가의 센서를 사용할 경우 좋은 성능의 결과를 얻을 수 있으나 실제 수중 공사 현장에서는 고비용 문제로 적용이 어렵다. 따라서 저가의 센서로 시스템을 구성하여 정도 높은 결과를 확보하여야 한다. 대다수 저가 센서들은 자체적으로 클럭 카운터를 내장하여 각 제조사가 설정한 주기로 데이터를 출력하기 때문에 센서로부터 동기화된 신호를 획득하는 것이 어렵다. 대부분의 수중 구조물 시공 및 관리 현장에는 다수의 부유물이 발생하여 현장 주변의 탁도가 높아진다. 이러한 환경에서는 DVL을 통한 대상물의 수중 속도를 획득하는 것이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 수중 구조물 시공 및 관리 현장에 적용할 것을 감안하여 DVL을 사용하지 않고 비동기 다중 센서를 융합한 수중 위치 인식 연구를 수행하였다. 또한 정밀한 신호의 획득이 어려운 수중 환경의 특성을 고려하여 수중 위치 오차 0.5 m 이하가 되도록 개발하고자 하였다.

2. 수중 위치 인식 알고리즘

안정적인 수중 위치 인식을 위한 알고리즘 구현을 위해 IMU 센서를 이용한 관성 항법(INS: Inertial Navigation System, 이하 INS)을 기본적으로 수행하고, 대상물의 수

중 위치를 USBL로 측정하고 압력 센서로 수심 데이터를 획득하여 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter, 이하 EKF)의 업데이트 인자로 사용하였다.

2.1 관성 항법 모델링

INS는 IMU로부터 선체 고정 좌표계 기반 각속도, 가속도를 획득하고, 가속도 적분을 수행하여 항법좌표계 상의 대상물 위치를 추정하는 체계이다. INS의 지배 방정식은 Eq. (1)과 같다[11].

$$\begin{bmatrix} \dot{r}^l \\ \dot{v}^l \\ \dot{R}_b^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1}v^l \\ R_b^l f^b - (2\Omega_{ie}^l + \Omega_{el}^l)v^l + g^l \\ R_b^l(\Omega_{ib}^b - \Omega_{il}^b) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 r^l , v^l 는 각각 항법 좌표계 상의 위치벡터 및 속도벡터이며 R_b^l 는 선체 고정 좌표계에서 정의된 값을 항법 좌표계에 관한 값으로 변환하는 회전행렬, D^{-1} 은 항법 좌표상의 속도 벡터를 위치벡터 변화율로 변환하는 행렬, f^b 는 선체 고정 좌표계에서 정의되는 힘 벡터, Ω_{ie}^l 은 자이로에서 측정된 지구 자전 각속도를 항법 좌표계 상으로 변환하는 행렬, Ω_{el}^l 은 지구 고정 좌표계에 관한 각속도를 항법 좌표계 상으로 변환하는 행렬, g^l 은 중력 가속도 벡터이다. Ω_{ib}^b 는 자이로에서 출력되는 각속도 행렬, 그리고 Ω_{il}^b 는 관성 좌표계에 관한 지구 자전 각속도를 선체 고정 좌표계로 변환한 행렬과 지구 고정 좌표계에 관한 항법 좌표계의 원점 변화를 선체 고정 좌표계로 표현한 행렬의 합이다.

Eq. (1)의 좌변을 적분함으로써 대상물의 위치, 속도를 추정할 수 있다.

2.2 비동기 센서 융합 기반 EKF 모델링

EKF는 비선형 시스템을 자코비안 행렬과 테일러 급수를 통해 선형화시켜 필터링하는 방법이다[12]. 비선형 시스템으로 구성되는 INS의 시스템 오차를 상태 변수로 설정하고 EKF를 적용하였다. EKF는 재귀적으로 동작하며 예측 단계와 보정 단계를 통해 필터링 과정이 수행된다.

예측단계에서는 Eq. (2), (3)을 통해 상태변수 x_k , 시스템 공분산 P_k 을 추정한다.

$$x_k(-) = \Phi_{kk-1} \hat{x}_{k-1}(+) \quad (2)$$

$$P_k(-) = \Phi_{kk-1} P_{k-1}(+) \Phi_{kk-1}^T + Q_{k-1} \quad (3)$$

여기서 $x = [\delta\phi \ \delta\lambda \ \delta h \ \delta v_e \ \delta v_n \ \delta v_u \ \delta p \ \delta r \ \delta y]^T$ 로, 시스템 에러로 구성되어 있으며 ϕ 는 위도, λ 는 경도, h 는 고도이고 v_e, v_n, v_u 는 항법 좌표계 상 동, 북, 상 방향 속도, p, r, y 는 피치, 롤, 요이다. Φ 는 시스템 행렬로서 Eq. (4)와 같다[11].

$$\Phi = \begin{bmatrix} 000 & 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 000 & \frac{1}{(R_N+h)\cos\phi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 000 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 000 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_u & -f_n \\ 000 & 0 & 0 & 0 & -f_u & 0 & f_e \\ 000 & 0 & 0 & 0 & f_n & -f_e & 0 \\ 000 & 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 000 & \frac{-1}{R_N+h} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 000 & \frac{-\tan\phi}{R_N+h} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

R_M 은 지구 자오선 곡률 반경, R_N 은 지구 횡 곡률 반경, Q 는 시스템 노이즈 행렬이다. $\hat{x}(-)$ 는 추정된 상태 변수의 예측 값, $\hat{x}(+)$ 는 추정된 상태 변수의 수정된 값이다.

보정단계에서는 먼저 칼만 게인 K 를 확보한다.

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (5)$$

여기서 H 는 관측 행렬, R 은 측정 노이즈 공분산 행렬이다. Eq. (5)의 K 를 Eq. (6), (7)에 적용하여 k 스텝의 상태 변수와 시스템 공분산을 추정한다.

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k(-)] \quad (6)$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k] P_k(-) \quad (7)$$

여기서 z 는 측정값 벡터이다.

본 연구에 적용된 센서는 IMU, 압력센서, USBL이다. IMU를 통해 자세값을 획득하며 이는 알고리즘 연산의 기준이 되는 정보로 100 Hz 주기로 업데이트된다. 압력

센서로부터 획득하는 수심 데이터는 IMU와 비동기화 되어 있으며 10 Hz로 출력된다. 수중에서의 위치 데이터는 USBL을 통해 비주기적으로 측정된다. 속도 정보를 보정할 수 있을 경우 이를 가능하도록 하였다. 이와 같이 비동기화 된 센서들로부터 획득된 측정값을 보정단계에 적용하기 위하여 4가지 경우를 고려할 수 있다.

- (1) 자세 보정
- (2) 수심, 자세 보정
- (3) 위치, 자세 보정
- (4) 위치, 속도, 자세 보정

위의 경우를 만족할 수 있도록 상태변수 x 에 대응되는 각 센서들의 측정값에 따라 Eq. (8)과 같이 대응할 수 있도록 관측 행렬을 정의하였다.

$$H_k = [0_{3 \times 6} \quad I_{3 \times 3}] \tag{8a}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 2} & 1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \tag{8b}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \tag{8c}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \tag{8d}$$

3. 수중 위치 인식 시스템

관성 항법 기반의 다중 센서 융합 수중 위치 인식 알고리즘 구현 및 성능 검증을 위한 복합 시험체의 하드웨어 및 소프트웨어를 제작하였다.

3.1 Hardware System

수중 위치 인식을 위한 복합 시험체는 Fig. 1과 같이 수중 위치 측정을 위한 USBL, 가속도 및 각속도를 측정을 위한 IMU 센서, 수심을 측정하기 위한 압력 센서를 사용하였으며, 적용된 각 센서의 제조사 및 모델은 Table. 1과 같다.

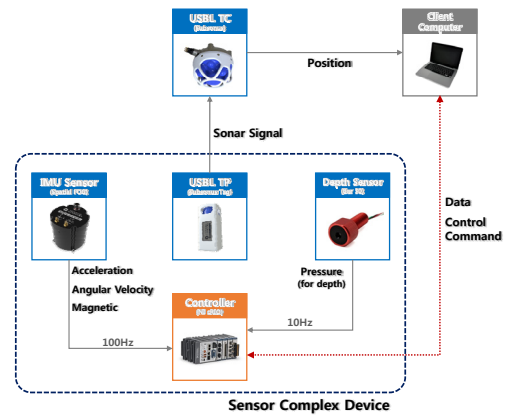


Fig. 1. System Configuration for Underwater experiment

Table 1. Applied sensors and equipment

Sensors					
Item	Model	Range	Error	Operating temperature	Measured Data
IMU	Spatial FOG	Acc: ± 10 g Gyro: ± 490 °/s Mag: ± 8 G	Acc: <0.03 % Gyro: <0.01 % Mag: <0.07 %	-40 °C to 75 °C	Angular velocity, Acceleration
Pressure Sensor	Bar30	Pressure: 0-30 bar Depth: 300 m	Pressure: ± 75 mbar	-20 °C to +85 °C	Depth
USBL	Subsonus /Tag	Depth: 1000 m Coverage: 300 °	5 m: 0.1 m 100 m: 0.5 m 1000 m: 5.0 m	-20 °C to 40 °C	Underwater position
Equipment					
Item	Model	Processor	Comm. Channel	Operating temperature	Measured Data
DAQ	cRIO-9034	CPU: Atom E3845 FPGA: Xilinx Kintex7	Ethernet, USB 2.0, RS-232, RS-485, RS-422	to 85 °C	Data acquisition

각 센서의 데이터를 획득하고, 수중 위치 인식 알고리즘 연산을 수행하기 위한 Data Acquisition (DAQ) 보드를 탑재하였다. 센서에서 측정된 데이터 및 알고리즘 연산을 통해 계산된 결과는 수상에 연결된 Client Computer로 전송된다. 방수 설계가 적용된 내압 용기에 사용되는 장비를 탑재하여 Fig. 2와 같이 일체화된 복합 시험체를 제작하였다.

외란에 의한 거동 영향을 최소화하기 위해 IMU 센서는 복합 시험체의 내부 하단 중심에 설치하였다. 복합 시험체 내부 상단에는 데이터 취득을 위한 DAQ 보드를 탑재하였으며 상단 외부 하우징에 수심을 측정하는 압력 센서와 USBL의 트랜스폰더를 장착하였다. 시험체의 외벽은 아크릴을 사용하여 제작함으로써 시스템의 전원 인가 여부 및 동작 상태, 누수 여부 등 내부의 상태를 가지적으로도 확인할 수 있도록 제작하였다.

USBL 트랜시버 및 트랜스폰더의 음향 정보 송수신에 방해가 되는 요소들을 최대한 제거하기 위해 트랜스폰더를 외부 상단의 중심에 장착하였으며, 시험체의 이동 및 운용의 편의성을 확보하기 위하여 상단에 아이볼트를 결합하였다.

복합 시험체의 하부에는 약 4 kg의 무게 추를 추가로 설치할 수 있도록 구성하여 외부에서 부력을 편리하게 조절할 수 있도록 제작하였으며 수중 장비 및 구조물에 결합이 가능하도록 제작하였다.

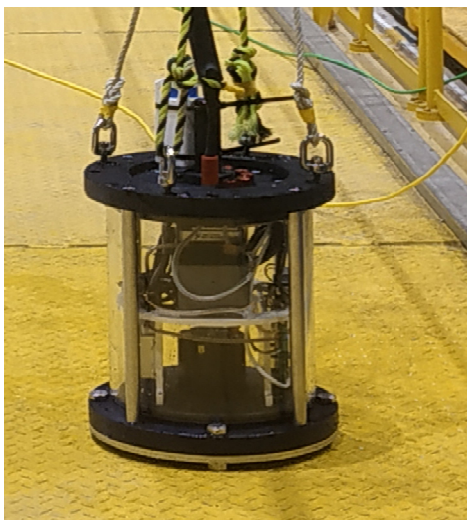


Fig. 2. Sensor complex device for Underwater positioning

3.2 Software

Fig. 3과 같이 USBL, IMU, 압력 센서의 데이터 취득과 수중 위치 인식 알고리즘을 구현하고, 복합 시험체의 상태와 데이터를 모니터링하기 위한 소프트웨어를 제작하였다.

복합 시험체의 각 센서들로부터 장시간, 고속으로 수신되는 데이터를 원활하고 안정적으로 획득할 수 있도록 DAQ 보드에 내장된 Field Programmable Gate

Array(FPGA) 기능 및 Real Time Controller 기능을 동시에 활용하여 소프트웨어를 구성하였다.

IMU 센서로부터 가속도, 각속도, 지자기 데이터를 100 Hz로, 압력 센서로부터 수심 측정을 위한 압력 데이터를 10 Hz로 수신하지만, USBL의 수중 위치 데이터는 업데이트 주기가 불규칙하기 때문에 각각의 센서별로 데이터가 수신되는 즉시 업데이트 하도록 하였다. 또한 각각의 센서에서 출력되는 다양한 데이터와 알고리즘 연산으로 도출된 추정 위치 데이터를 실시간으로 모니터링 가능하도록 구성하였다. 사용 중 예상하지 못한 긴급 상황이 발생하거나 Client Computer와의 통신이 단절되는 상황에 대비하여 복합 시험체의 내부에 설치된 DAQ에 모든 데이터가 별도로 저장될 수 있도록 하였다.

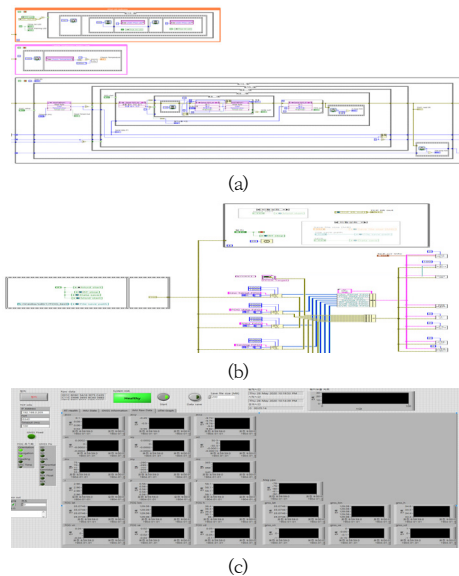


Fig. 3. Software Program
(a) FPGA code, (b) Real-Time code,
(c) Monitoring interface

4. 수중 위치 인식 시스템 성능 시험

대형 3차원 수조를 이용하여 수중 위치 인식 시험을 수행하였으며, 알고리즘 연산 결과를 평가하기 위하여 원형 공산 오차(CEP: Circular Error Probable, 이하 CEP)를 이용하였다.

4.1 실험

Fig. 4와 같이 한국해양과학기술원 수중로봇복합실증

센터의 대형 3차원 수조에서 수중 위치 인식 시스템의 성능 시험을 수행하였다. 해당 시험의 목적은 수중 위치 인식 시스템에 장착한 각 센서, 장비의 정상작동 확인 및 USBL과 알고리즘 결과에 의한 수중위치 추정 결과를 비교하기 위함이다. 시험 당시 환경적 외란요소를 최소화하고자 국내에서 가장 큰 수조 (길이 30 m, 폭 20 m, 깊이 9.6 m)를 이용하였으며, 소음, 진동이 최소화되는 시간대에 시험이 수행되었으며, 수면 상태는 준 정적상태를 유지하도록 하였다. 수조 상단에서 이동하는 대차를 이용하여 수심 1 m 깊이의 위치에 USBL 트랜시버를 설치하고, 수조 내 임의의 위치에 수중 위치 인식 시스템을 위치시킨 후 정적인 상태에서 데이터를 획득하였다.



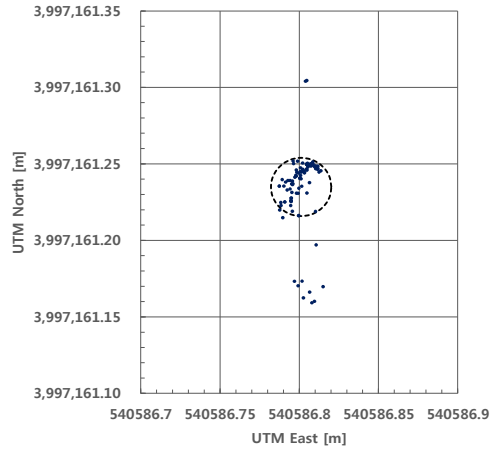
Fig. 4. Experiment environment in water tank

4.2 데이터 확인 및 분석

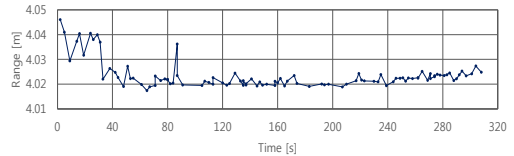
수조 시험을 통하여 확인한 모든 위치 데이터를 UTM 좌표계로 변환하고, CEP 평가를 수행하였다.

Fig. 5(a)에서 점으로 표기된 데이터는 USBL로부터 측정된 수중 위치 데이터이며, 점선은 CEP 평가선이다.

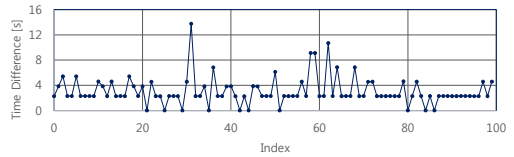
USBL 측정 데이터의 최대/최소 편차는 동서 방향으로 0.03 m, 남북 방향으로 0.15 m를 보였다. 또한 CEP는 0.02 m로 평가되었다. Fig. 5(b)는 USBL의 트랜시버와 트랜스폰더 사이의 거리 측정치를 나타내며 평균 약 4 m로 전체 시험시간 동안 일정하게 유지되고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 USBL 트랜스폰더의 수중 위치가 측정되는 시간 간격으로 평균 약 2초의 주기로 데이터가 업데이트되는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Measured underwater position using USBL (a) UTM Data-USBL only, (b) USBL range, (c) Time difference

해당 수조 시험은 조용한 수중 음향 환경과 더불어 복합 시험체가 정지되어 있는 상태로 수행되었음에도 불구하고 일부 구간에서는 약 14초까지 업데이트가 되지 않는 등 USBL 신호 획득 주기가 불규칙적인 것을 알 수 있다.

해저 파이프 매설, 수중 구조물 설치/유지 보수와 같은 수중 공사 현장에서 USBL 단독으로 수중 위치인식을 수행하기에는 주변을 지나가는 선박, 현장에서 발생하는 수중 방사 소음 등으로 인한 음향 위치 추적 장비인 USBL의 위치 인식 정밀도 저하가 발생할 수 있고 불규칙한 신호 획득 주기로 인해 해당 구간에서 발생하는 장비의 거동 추정 불가 등의 이유로 무리가 있는 것이 현실이다. 따라서 USBL의 위치 데이터가 불규칙적으로 업데이트 되더라도 이를 보상하여 수중의 위치를 추정하는 방안이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)은 USBL로부터 측정된 위치 데이터와 해당 위치 데이터만을 EKF에 적용 후 추정한 수중 위치 (Pupd INS: Position updated INS, 이하 Pupd INS)를 비교한 결과이다. 실선은 Pupd INS 위치 추정 데이터, 점으로 표기된 데이터는 USBL 측정 위치 데이터, 점선은 Pupd INS의 CEP 평가선이다. Pupd INS의 CEP는 3.76 m로 평가 되었으며 추정 위치의 최대/최소 편차는 동서 방향으로 30.17 m, 남북 방향으로 10.64 m를 보였다. USBL로부터 측정된 위치와 비교하였을 시 편차가 약 1000배까지 차이가 나는 것을 확인하였다. Fig. 6(b)는 Pupd INS에 의해 추정된 속도로 실선은 북쪽 방향, 1점 쇄선은 동쪽 방향, 점선은 수심 방향을 나타낸다. 복합 시험체가 정적인 상태에서 속도의 변화 없이 실험을 수행하였기 때문에 시험체의 각 방향별 속도는 0 m/s에 가깝도록 추정되어야 하지만 각 방향의 속도 성분은 시간이 지남에 따라 진폭이 증가하면서 발산하는 경향을 보이고 있다. Pupd INS의 경우 EKF 연산 시 Correction step에서 상태 변수 중 위치 벡터는 USBL로 측정된 위치 데이터로 보정이 되지만, 속도 벡터는 측정치가 없기 때문에 보정이 불가능한 상태이다. 따라서 해당 알고리즘을 지속적으로 수행할 경우 속도 벡터에 대한 적분 오차가 누적되고, 이를 보상하지 못하여 최종적인 위치는 발

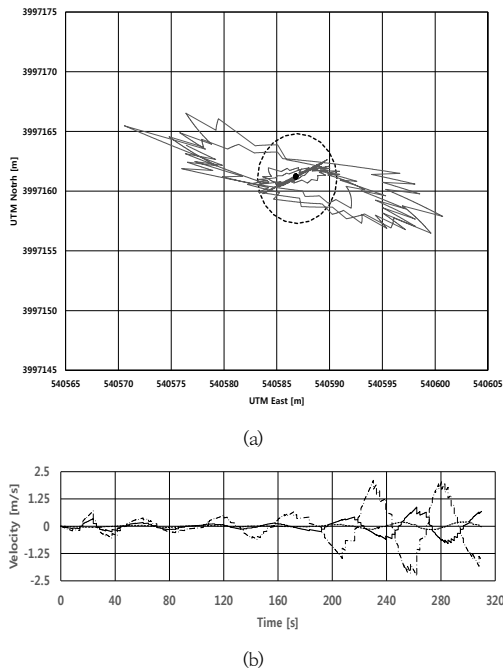


Fig. 6. Comparison of Pupd INS and USBL
(a) UTM Data - Pupd INS, (b) Estimated velocity

산할 것으로 판단할 수 있다. 따라서 수중 위치 인식을 수행하기 위해서는 Correction step에서 속도 벡터의 보정이 반드시 필요하다.

본 연구에서 개발한 복합 시험체는 수중 시공 현장 환경, 시스템 적용의 편의를 감안하여 수중에서 속도를 측정하는 DVL이 장착되지 않은 시스템이다. 해당 시험체로 속도 벡터를 USBL로 측정된 현재 위치와 이전 스텝의 위치를 시간 미분하여 구성하고 EKF에 적용하였다.

Fig. 7(a)은 USBL로부터 측정된 위치와 USBL로 위치, 속도 벡터를 보정하여 추정된 수중 위치(PVupd INS: Position & Velocity updated INS, 이하 PVupd INS)를 비교한 결과이다. 실선은 PVupd INS 위치 추정 데이터, 점은 USBL 측정 위치 데이터, 점선은 PVupd INS의 CEP 평가선이다. 그리고 Fig. 7(b)는 PVupd INS에 의해 추정된 속도로 실선은 북쪽 방향, 1점 쇄선은 동쪽 방향, 점선은 수심 방향을 나타낸다.

PVupd INS의 CEP는 0.06 m로 평가되었으며 추정 위치의 최대/최소 편차는 동서 방향으로 0.19 m, 남북 방향으로 0.35 m임을 확인하였다. USBL로부터 측정된 위치 데이터와 비교할 시 편차가 약 6배까지의 차이를 보였지만, 설정한 수중 위치 오차 0.5 m 이하의 성능을 만족함으로써 제안한 위치 인식 알고리즘을 이용한 위치

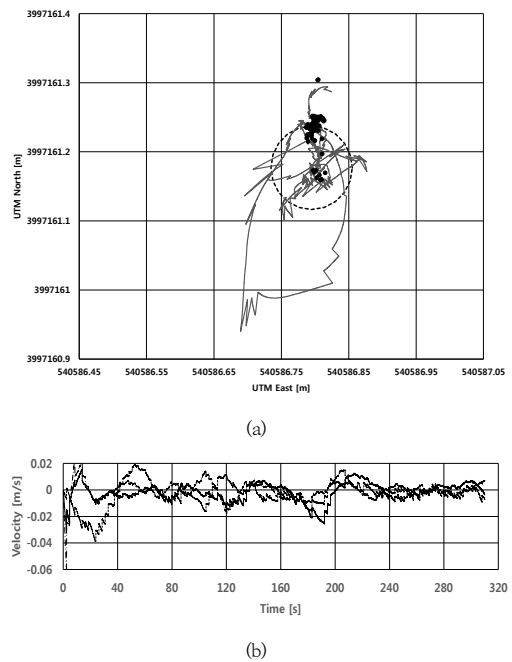


Fig. 7. Comparison of PVupd INS and USBL
(a) UTM Data - PVupd INS, (b) Estimated velocity

추정이 충분히 가능하다는 것을 확인하였다. Fig. 7(a)의 PVupd INS 결과 중 약 170~210초 구간에서 북쪽 방향으로 3,997,161.0 m 이상으로 위치 데이터가 감소하였다가 3,997,161.2 m 위치로 다시 복귀하는 구간을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 7(b)의 북쪽 방향 추정 속도 구간을 통해 확인할 수 있다. 해당 구간은 Fig. 5(c)의 index 57~64 부분으로 위치, 속도 벡터의 보정 시간 간격이 지연되고 있는 부분이다.

PVupd INS의 경우 Pupd INS와 달리 EKF의 Correction step에서 속도벡터로 USBL의 위치 데이터를 시간미분 값을 적용하였다. 이에, 적분오차가 발생하더라도 속도가 지속적으로 보정되어 약 ± 0.02 m/s 내에서 유지되었다. 그 결과 안정적인 수중위치 추정이 가능하였다.

Fig. 6, 7을 통하여 수중 위치 인식을 수행하기 위해서는 위치 벡터와 속도 벡터의 보정이 반드시 필요함을 알 수 있다. 수중위치 추정 결과를 CEP로 평가할 경우 그 크기가 작을수록 데이터의 분포가 집중되어 정밀한 추정결과를 도출한 것으로 판정할 수 있다. 본 실험에서 PVupd INS가 Pupd INS에 비해 CEP가 작게 평가되었기 때문에 상대적으로 정밀한 수중 위치 추정 성능을 보인다고 판단할 수 있다. 준 정적 상태를 유지하는 대상물의 수중 위치 추정을 위하여 속도 벡터로 위치 벡터의 시간미분 값을 적용하더라도 무방한 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 해당 실험 조건에서는 DVL과 같은 독립적인 수중 속도 측정 센서를 사용하지 않더라도 충분히 수중 위치 인식을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 비동기식 센서 융합을 이용한 수중 구조물 부착형 수중 위치 인식 알고리즘 및 시스템을 개발하였다.

USBL의 위치 데이터 업데이트 주기가 불규칙한 문제를 해결하기 위해 INS와 EKF를 적용한 위치 인식 알고리즘을 구성하고, 위치 인식을 위한 복합 시험체를 제작하였다.

수조 실험을 통해 USBL 측정에 의한 수중 위치, 위치 벡터만 보정한 추정 위치, 위치와 속도 벡터를 보정한 추정 위치를 비교하였다. 시험의 결과는 Table. 2와 같이 정리하였다.

Table 2. Results of the Test

Case	East Difference [m] (max-min)	North Difference [m] (max-min)	CEP [m]	Max. period of signal acquisition [sec]
USBL only	0.03	0.15	0.02	14
Pupd INS	30.17	10.64	3.76	0.01
PVupd INS	0.19	0.35	0.06	0.01

- (1) USBL로 측정된 수중 위치 데이터는 획득한 데이터 중 측정 정밀도가 가장 높았으나 데이터 획득 주기가 불규칙적이다.
- (2) 위치 벡터만 보정할 경우 추정 속도 벡터는 보정이 불가능하여 적분 오차가 누적되며 지속적으로 연산 수행 시 추정 위치 데이터는 발산하게 된다.
- (3) USBL 측정 데이터를 활용하여 위치 벡터와 속도 벡터를 보정하는 경우에는 안정적인 추정 위치 데이터를 확보할 수 있다.

향후 실험역 시험을 통해 제한한 수중 위치 인식 알고리즘 성능을 검증 및 보완할 예정이다.

References

- [1] Z. Ma, Y. Ren, "Integrated Application of BIM and GIS: An Overview", *Procedia Engineering*, Vol. 196, pp.1072-1079, Jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.064>
- [2] Wikipedia, the free encyclopedia "Underwater acoustic positioning system", [cited 2020 September 17], Available From: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustic_positioning_system (accessed Oct. 2020)
- [3] A. Tomczak, "Modern Methods of Underwater Positioning Applied in Subsea Mining", *Górnictwo i Geoinżynieria*, Vol. 35, No. 4/1, pp.381-394, 2011.
- [4] M. Morgado, P. Oliveira, C. Silvestre, J. F. Vasconcelos, "USBL/INS Integration Technique for Underwater Vehicles", *Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, International Federation of Automatic Control(IFAC), Lisbon, Portugal, Sep. 2006.
- [5] L. Zhou, *A Precise Underwater Acoustic Positioning Method Based on Phase Measurement*, Master's thesis, University of Victoria, pp.2-3, 2010
- [6] H. Liu, Z. Wang, R. Shan, K. He and S. Zhao,

"Research into the integrated navigation of a deep sea towed vehicle with USBL/DVL and pressure gauge", *Applied Acoustics*, Vol. 159, No. 2, 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107052>

- [7] H. M. Manik, D. A. Gultom, Firdaus, L. Elson, "Evaluation of ADCP backscatter computation for quantifying suspended sediment concentration", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 429, Feb. 2020
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012035>
- [8] K. H. Kim, H. T. Choi, S. M. Kim, P. M. Lee, C. M. Lee, S. K. Cho, "Implementation of Deep-sea UUV precise Underwater Navigation based on Multiple Sensor Fusion", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 24, No.3, pp.46-51, 2010.
- [9] P. M. Lee, H. W. Shim, H. Baek, B. H. Kim, J. Y. Park, B. H. Jun, S. Y. Yoo, "Navigation System for a Deep-sea ROV Fusing USBL, DVL, and Heading Measurements", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp.315-323, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.26748/KSOE.2017.08.31.4.315>
- [10] B. Allotta, R. Costanzi, E. Meli, L. Pusi, A. Ridolfi, G. Vettori, "Cooperative localization of a team of AUVs by a tetrahedral configuration", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 62, No. 8, pp.1228-1237, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.03.004>
- [11] A. Noureldin, T. B. Karamat and J. Georgy, *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*, p.313, Springer, 2013, pp.167-200
- [12] M. Zhang, K. Li, B. Hu and C. Meng, "Comparison of Kalman Filters for Inertial Integrated Navigation", *Sensors*, Vol. 19, No. 6, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s19061426>

오 지 윤(Ji-Youn Oh)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한국해양대학교 공과대학 기계시스템공학부 (공학사)
- 2015년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기계공학과 (공학 석·박사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연수연구원

<관심분야>

수중 운동제 제어 시스템, 자율 제어, 소프트웨어

신 창 주(Changjoo Shin)

[정회원]



- 2006년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학 석·박사)
- 2012년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직 (현: 선임연구원)

<관심분야>

수중 로봇, 센서 융합, 소음 진동

백 승 재(Seungjae Baek)

[정회원]



- 2007년 2월 : 단국대학교 컴퓨터 과학 (이학석사)
- 2010년 2월 : 단국대학교 컴퓨터 공학 (공학박사)
- 2011년 6월 : ㈜프롬나이 (벤처 창업)

• 2013년 9월 : Univ' of Pitt Post-doc.

• 2016년 2월 : 단국대학교 조교수

• 2016년 7월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직 (현: 책임연구원)

<관심분야>

운영체제, 스토리지 시스템, 시스템소프트웨어

장 인 성(In Sung Jang)

[중신회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2002년 12월 : 한국해양과학기술원 연수연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직 (현: 책임연구원)

<관심분야>

지반공학, 지반조사, 해양구조물, 수중시공장비

정 상 기(Sang Ki Jeong)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한국해양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 8월 : 한국해양대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 9월 ~ 2018년 2월 : 한국해양대학교 기계공학과 (박사 후 연구원)

- 2018년 3월 ~ 2019년 2월 : 미국 Naval Postgraduate School(Post Doctor)
- 2019년 3월 ~ 2020년 2월 : 한국해양대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직(현: 선임 연구원)

<관심분야>

수중로봇, 센서융합, 기계학습

서 정 민(Jung-min Seo)

[정회원]



- 2011년 8월 : 한국해양대학교 공과대학 기계시스템공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직 (현: 무기계약직기술원)

<관심분야>

2D/3D CAD, 수중운동체 설계/제작(AUV,ROV)

이 화 준(Hwajun Lee)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한국폴리텍대학 전기과(전문학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직 (현: 무기계약직기술원)

<관심분야>

수중 로봇, 전기/전자

최 재 호(Jae Ho Choi)

[정회원]



- 2005년 2월 : 제주한라대학 생활체육과
- 2013년 10월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 재직 (현: 무기계약직기술원)

<관심분야>

해양관측장비 수중설치, 수중공사

원 성 규(Sung Gyu Won)

[정회원]



- 2005년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학석사)
- 2017년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 2016년 5월 : Midas IT 해석개발팀
- 2017년 3월 ~ 2018년 2월 : 한국해양과학기술원 연수연구원

- 2019년 5월 ~ 현재 : Vibroacoustics Total Solution 대표

<관심분야>

수중로봇, 센서융합, 소음진동