

## 확장칼만필터를 이용한 호버링타입 무인잠수정의 위치추정알고리즘 개발

# Development of the Localization Algorithm for a Hovering-type Autonomous Underwater Vehicle using Extended Kalman Filter

강현석<sup>1</sup> · 홍승민<sup>1</sup> · 서주노<sup>2</sup> · 김동희<sup>3</sup> · 정재훈<sup>4</sup> · 정성훈<sup>2</sup> · 최형식<sup>4</sup> · 김준영<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양대학교-한국해양과학기술원 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

<sup>2</sup>한국해양대학교 산업기술연구소

<sup>3</sup>한화시스템 해양연구소

<sup>4</sup>한국해양대학교 기계공학부

Hyeon-seok Kang<sup>1</sup> · Sung-min Hong<sup>1</sup> · Joo-no Sur<sup>2</sup> · Dong-hee Kim<sup>3</sup> · Jae-hun Jeong<sup>4</sup> · Seong-hoon Jeong<sup>2</sup> · Hyeung-sik Choi<sup>4</sup> · Joon-young Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University-Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, 49112, Korea

<sup>2</sup>Research Institute of Industrial Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

<sup>3</sup>Naval R&D Center, Hanwha Systems, Gyeongsangbuk-do, 39376, Korea

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 위성항법장치 (GPS; global positioning system)를 보조센서로 사용하는 위치추정알고리즘의 성능을 검증하기 위해 호버링타입 무인잠수정에 알고리즘을 적용하여 실제 해역에서 실험을 수행하였다. 적용된 알고리즘은 무인잠수정에 탑재된 도플러 속도계 (DVL; doppler velocity logger), TCM (tilt-compensated compass module)을 이용한 추측항법의 시간에 따라 누적되는 위치오차를 개선하기 위한 알고리즘이다. 수면에서 GPS 위치정보를 수신하여 무인잠수정의 위치와 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차를 추정하고, 이를 통해 진북 (geodetic north) 기준의 좌표계에 대한 추측항법을 수행한다. 실제 해역에서 방향각 제어 실험을 수행한 결과, 위치추정알고리즘을 통해 기존 추측항법의 위치오차가 개선되고 TCM의 방향각 바이어스 오차를 추정함을 확인하였다.

### [Abstract]

In this paper, in order to verify the performance of a localization algorithm using GPS as an auxiliary sensor, the algorithm was applied to a hovering-type autonomous underwater vehicle (AUV) to perform a field test. The applied algorithm is an algorithm to improve the accumulated positional error of dead reckoning using doppler velocity logger(DVL) and tilt-compensated compass module (TCM) mounted on the AUV. GPS when surfaced helps the algorithm to estimate the position and the heading bias error of TCM for geodetic north, which makes it possible to perform dead reckoning on north-east-down (NED) coordinates. As a result of field test performing heading control, it was judged that the algorithm could improve the positional error, enhance the operational capability of AUV and contribute to the research of underwater navigation depending on a magnetic compass.

**Key word :** Autonomous underwater vehicle, Dead reckoning, Declination, Field test, Extended Kalman filter.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.2.171>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 27 March 2017; Revised 30 March 2017

Accepted (Publication) 24 April 2017 (30 April 2017)

\*Corresponding Author; Joon-young Kim

Tel: +82-51-410-4965

E-mail: jykim@kmou.ac.kr

## I. 서론

최근 급격한 환경, 기후 변화와 더불어 해저자원 획득 요구가 증대됨에 따라 해양 지질 및 생태 탐사, 해저플랜트 건설 및 유지보수를 위한 무인 수중 로봇(UUV; unmanned underwater vehicle)에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 이 뿐만 아니라, 70여년의 군사적 긴장감 속에 있는 한반도는 지속적인 육상 지뢰, 수중 기뢰의 위협에 이어 잠수함발사탄도미사일(SLBM; submarine launched ballistic missile)이라는 예측 불가능의 위협에 당면함에 따라, 이에 대응하기 위한 무인수중로봇에 대한 필요성이 증대되고 있다.

일찍이 무인수중로봇에 대한 기술을 확보한 여러 선진국에서는 해양탐사와 대기뢰전(MCM; mine countermeasures), 대잠전(ASW; anti-submarine warfare) 등 수상과 수중에서 복합적으로 임무를 수행하기 위한 무인수중로봇을 개발하고 실전 배치하여 운용중이다. 미국 MBARI(Monterey bay aquarium research institute)는 최근 최고 수심 3685m의 코르테스 해에서 해저 지형 탐사 작업을 수행하였으며, 미 해군 대학원(NPS; naval postgraduate school)은 기뢰 탐지와 식별, 무력화를 위한 과거 잠수부와 표유류 투입의 한계를 극복하기 위해 개발된 대기뢰전용 무인수중로봇의 운용사례를 소개하고, 나아가 자율적이고 효율적인 미래 대기뢰전을 위해 실무자 및 관련 전문가의 의견을 참조 및 인용하여 수색, 탐지, 분류, 식별, 작전수행, 통신 등의 상황에 따른 기술적 요구사항들을 제시하고 있다[1]-[3].

위치추정(localization)은 무인로봇의 임무 완수를 위해 필수적인 기술 중 하나이다. 이는 수집한 탐사자료나 채취물질의 취득 시간과 지역, 그리고 기뢰나 잠수함 등 목표대상이 탐지된 시간과 위치의 정확도가 그 정보의 유효성과 신뢰성을 결정하기 때문이다. 이때, 위치정보는 진북을 기준으로 하고 경위도로 나타나는 일반적인 지도상의 위치로 표현되어야 하며, 통용되지 않는 기준좌표계상의 위치로 나타내어선 안 된다. 이에 따라, 자기컴퍼스를 이용하여 위치를 추정할 경우 그림 1에서 나타낸 진북에 대한 자편각(declination)을 고려해야 한다[4].

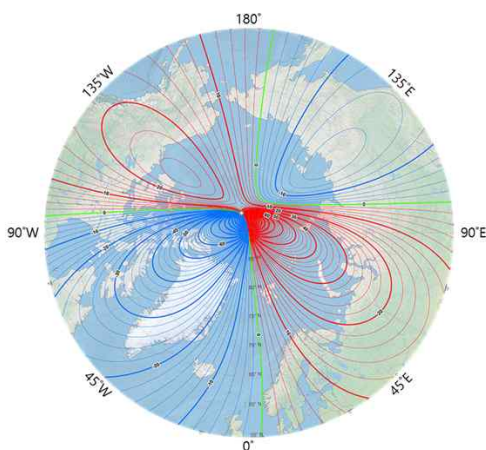


그림 1. 자편각 지도 - 북극 지방  
Fig. 1. Declination map - north polar region.

육상과 해상에서 GPS와 추측항법 또는 관성항법을 융합한 항법시스템에 관해 다수의 연구가 수행되었지만, 무인수중로봇의 경우 임무 수행 시 GPS를 활용하기 어렵다는 이유로 GPS를 융합한 항법시스템은 실용성에 한계를 가지고 있다[5]-[7].

본 논문에서는 GPS를 보조센서로 사용하는 위치추정 알고리즘을 호버링타입 무인잠수정에 적용하고, 실제 해역에서 실험을 수행하여 알고리즘의 성능을 확인한다. 적용된 알고리즘은 GPS 위치정보를 이용하여 DVL과 TCM을 이용한 추측항법에서 발생하는 위치오차를 개선할 뿐만 아니라 TCM 측정값의 진북에 대한 방향각 바이어스 오차를 추정하여 GPS 수신에 어려운 수중에서도 누적되는 위치오차를 개선할 수 있도록 함으로써 알고리즘의 실용성을 높이고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 위치추정 시 고려되는 기준좌표계와 자편각에 대해 언급한다. 3장에서 확장 칼만필터(EKF; extended Kalman filter)를 이용하여 설계한 위치추정 알고리즘을 개괄한 뒤, 실험을 수행하여 알고리즘의 성능을 확인하기 위한 플랫폼, 호버링타입 무인잠수정의 제원과 시스템 구성에 대해 4장에서 설명한다. 5장에서는 실제 해역에서 수행한 실험과 그 결과에 대해 기술하여 알고리즘의 성능을 검증한다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 기술한다.

## II. 좌표계

무인수중로봇의 운동은 그림 2의 지구고정좌표계 {E}와 선체고정좌표계 {B}에 대한 운동으로 나타낼 수 있으며, 선체고정좌표계의 각 축에 작용하는 힘과 모멘트, 또 그에 따른 선속도와 각속도는 표 1의 표기법에 기초하여 나타낸다[8].

본 연구에서 사용되는 호버링타입 무인잠수정의 거동 특성과 TCM의 센서 특성에 따라 무인수중로봇 내부에 탑재된 TCM의 기준좌표계와 선체고정좌표계의 변환 관계는 그림 2의  $Z_0$ 축에 대한  $b_{\psi}^{mount}$ 의 회전으로 표현될 수 있다.  $\vec{D}_{Mag}$ 과  $\vec{D}_{Geo}$ 는 각각 선체고정좌표계에서 자북(magnetic north)과 진북으로의 방향벡터이며, 여기서 두 벡터의 끼인 각은 자편각  $b_{\psi}^{dec}$ 로 나

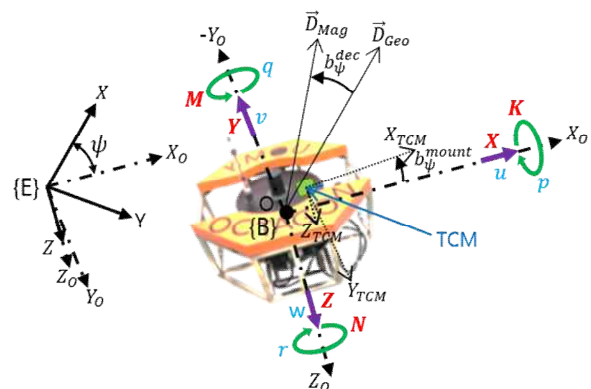


그림 2. 무인수중로봇 좌표계  
Fig. 2. Coordinates of UUV.

표 1. SNAME 표기법

Table 1. The notation of SNAME.

Translation	Forces	Linear velocity	Position
Rotation	Moments	Angular velocity	Attitude
X axis	$X$	$u$	$x$
	$K$	$p$	$\phi$
Y axis	$Y$	$v$	$y$
	$M$	$q$	$\theta$
Z axis	$Z$	$w$	$z$
	$N$	$r$	$\psi$

타내었다. 이에 따라, 진북에 대한 무인잠수정의 방향각  $\psi$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = \psi_{TCM} + b_{\psi} \quad (1)$$

여기서,  $\psi_{TCM}$ 는 TCM의 방향각 측정값으로, 자북 기준의 방향을 나타낸다. 또한  $b_{\psi}$ 는 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차로 아래의 식 (2)와 같이 자편각  $b_{\psi}^{dec}$ , 선체고정좌표계와의 뒤틀림 각  $b_{\psi}^{mount}$ , 주변 자기장과 센서 성능에 따른 측정 잡음  $b_{\psi}^{noise}$ 의 합으로 고려될 수 있다.

$$b_{\psi} = b_{\psi}^{dec} + b_{\psi}^{mount} + b_{\psi}^{noise} \quad (2)$$

### III. 위치추정알고리즘

본 저자의 연구팀은 이전의 연구에서 확장칼만필터를 사용하여 위치추정 알고리즘을 설계하고 시뮬레이션을 통해 기본적인 알고리즘의 성능을 확인하였다[9]. 본 장에서는 설계된 위치추정알고리즘에 대해 개괄한다.

#### 3-1 알고리즘 설계

센서의 데이터를 융합하고 TCM의 방향각 바이어스 오차를 추정하기 위해, 위치추정알고리즘은 표 2와 같이 확장칼만필터를 이용하여 설계되었다.

알고리즘이 함수의 형태로 호출될 때 입력되는 값은 이전 루프에서 추정된 상태벡터  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 와 오차 공분산 행렬  $\mathbf{P}_{k-1}$ , 그리고 센서 측정값으로 구성된 출력벡터  $\mathbf{y}_k$ 이다. 먼저, 상태벡터  $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^{7 \times 1}$ 와 출력벡터  $\mathbf{y} \in \mathcal{R}^{6 \times 1}$ 는 식 (3)과 같이 구성된다.

$$\mathbf{x} = [X \ Y \ \psi \ u \ v \ r \ b_{\psi}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [u_{DVL} \ v_{DVL} \ \psi_{TCM} \ r_{AHRS} \ X_{GPS} \ Y_{GPS}]^T$$

여기서, 상태벡터  $\mathbf{x}$ 는 확장칼만필터에 의해 추정되는 벡터이며, 진북을 기준으로 하는 지구고정좌표계, 즉, NED 좌표계 상의 위치  $X$ 와  $Y$ , 방향각  $\psi$ , 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차  $b_{\psi}$ , 그리고 선체고정좌표계에서 선속도  $u$ 와  $v$ , 각속도  $r$ 로 구성된다. 또한 출력벡터  $\mathbf{y}$ 는 DVL 측정 선속도  $u_{DVL}$ 와  $v_{DVL}$ , TCM 측정 방향각  $\psi_{TCM}$ , AHRS (attitude and heading reference system) 측정 각속도  $r_{AHRS}$ , GPS 측정 위치  $X_{GPS}$ 와  $Y_{GPS}$ 로 구성된다. ①의 시스템 모델  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 는 아래 식 (4)와 같이 기구학적 관계로 표현된다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} u \cos\psi - v \sin\psi \\ u \sin\psi + v \cos\psi \\ r \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

②에서 ①의 시스템 모델을 통해 상태벡터의 예측값을 구한다. ③에서 시스템 모델과 출력 모델을 상태벡터로 편미분하여 특정 구간에 대해 선형화하고 이를 이용하여 ④에서 상태천이 행렬  $\Phi$ 를 도출한다. ⑤에서 오차 공분산 행렬에 대한 예측값을 구하고, 이를 적용하여 ⑥에서 칼만필터의 이득행렬을 구한다. 끝으로 ⑦과 ⑧을 통해 상태벡터와 오차 공분산 행렬의 추정값을 얻으며, 여기서 ⑦의 출력 모델  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 는 아래 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} u \\ v \\ \psi - b_{\psi} \\ r \\ X \\ Y \end{bmatrix} \quad (5)$$

표 2. 확장칼만필터를 이용한 위치추정알고리즘  
Table 2. Localization algorithm using EKF.

<p>Function) Localization (<math>\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{P}_{k-1}, \mathbf{y}_k</math>)</p> <p>① <math>\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})</math></p> <p>② <math>\tilde{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \dot{\mathbf{x}}_k \cdot \Delta t</math></p> <p>③ <math>\mathbf{A}_{jacob} \equiv \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big _{\tilde{\mathbf{x}}_k}, \mathbf{H} \equiv \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \Big _{\tilde{\mathbf{x}}_k}</math></p> <p>④ <math>\Phi = \mathbf{I} + \mathbf{A}_{jacob} \Delta t</math></p> <p>⑤ <math>\mathbf{P}_k = \Phi \mathbf{P}_{k-1} \Phi^T + \mathbf{Q}</math></p> <p>⑥ <math>\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}</math></p> <p>⑦ <math>\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}}_k))</math></p> <p>⑧ <math>\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{H} \mathbf{P}_k</math></p> <p>return <math>\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k</math></p>
---

IV. 호버링타입 무인잠수정

한국해양대학교에서는 이론과 실제 해역에서의 실험을 병행하며 무인수중로봇에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 장에서는 위치추정알고리즘의 성능을 검증하기 위한 플랫폼으로 동특성 해석, 제어 알고리즘 성능 검증 등 여러 실험에 활용되고 있는 호버링타입 무인잠수정을 소개한다[10],[11].

4-1 제원

본 논문에서 사용된 호버링타입 무인잠수정의 제원은 표 3과 같으며, 실험의 용이성을 위해 오픈프레임으로 개발되었다.

표 3. 호버링타입 무인잠수정의 제원

Table 3. The specification of the hovering-type AUV.

Parameter	Specification
Dimension (L×W×H)	736 × 736 × 600 [mm]
Weight	50 kgf (in air)
Operating depth	10 m
Battery	25.9 V – 6600 mA LiPo × 6 EA
Sensor	GPS / DVL / TCM / AHRS / Pressure sensor
Thruster	Tecnadyne Model 300 × 2 EA Tecnadyne Model 280 × 2 EA
Control mode	4-DOF
Control board	On board PC / Intel Edison board / NI USB-6009 / NI cDAQ-9171
Operating program	Windows NI LabVIEW / Linux C/C++

4-2 시스템

1) 시스템 구성

위치추정알고리즘의 성능을 검증하기 위해 호버링타입 무인잠수정에 그림 3에 나타난 구성도와 같이 알고리즘을 무인잠수정 운용시스템에 적용하였다. 운용시스템은 크게 Edison 보드와 On board PC 두 부분으로 나뉜다.

먼저 Linux 환경의 Edison 보드는 GPS, DVL, TCM, AHRS로부터 위치와 자세, 속도에 대한 정보를 취득하고 이를 이용하여 위치추정알고리즘을 수행하는 시스템을 탑재한다. 본 연구에서는 Edison 보드와 AHRS를 그림 4와 같이 상부 내압용기 내부에 추가적으로 설치하고 GPS, DVL, TCM, AHRS, On board PC와 USB 연결로 데이터를 통신하도록 시스템을 구성하였다. 위치추정알고리즘은 GPS 수신여부와 수신한 위치정보의 정확도, 무인잠수정의 이동속도 등 위치추정알고리즘의 성능에 영향을 미치는 요소들을 고려하여 그 성능이 우수할 때

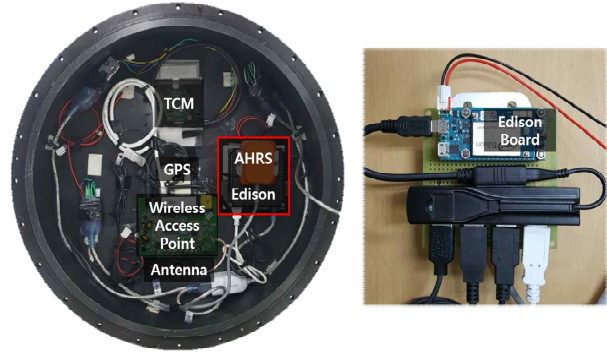


그림 4. 상부 내압용기에 탑재된 Edison 보드와 AHRS  
Fig. 4. Edison board and AHRS mounted on the upper pressure container.

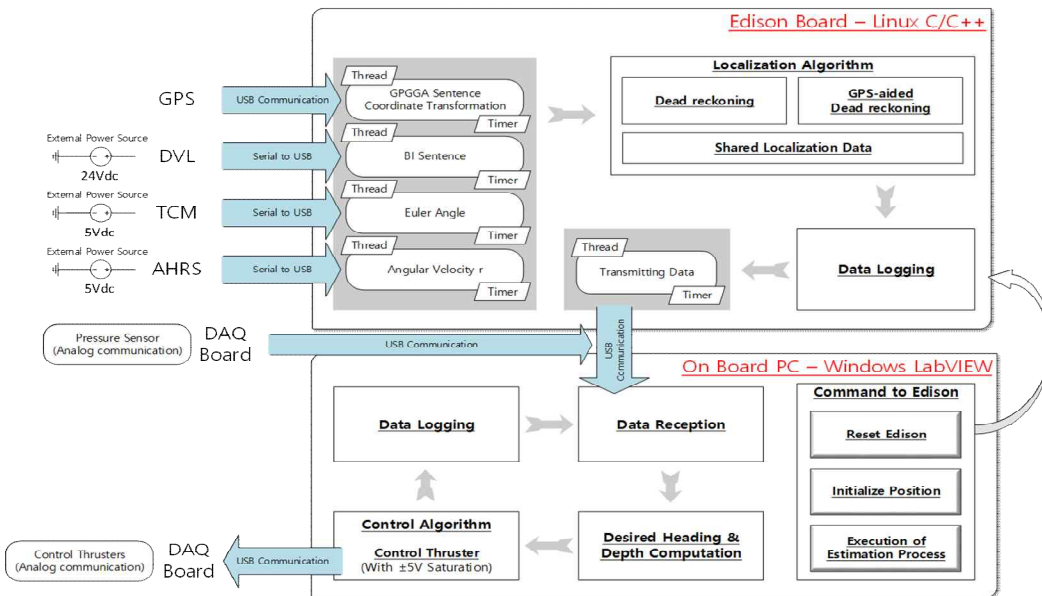


그림 3. 시스템 구성도  
Fig. 3. System block diagram.



알고리즘을 수행하도록 하고, 그 외의 경우에는 기존의 추측항법을 수행하도록 함으로써 보다 실용적으로 알고리즘을 활용하도록 하였다.

다음으로 Windows 환경의 on board PC는 LabVIEW 기반의 운용프로그램을 통해 Edison 보드로부터 위치추정알고리즘의 추정값과 센서 측정값을 수신하고, 추진기를 구동하여 호버링타입 무인잠수정의 자세와 위치를 제어하며 관련 데이터들을 저장하도록 하였다. 추가적으로 Edison 초기화, 위치 초기화, 알고리즘 활용 여부 설정 등 간단한 명령을 두어, 필요에 따라 운용자가 임의로 Edison의 시스템에 접근할 수 있도록 하였다.

2) 센서

확장칼만필터를 이용한 위치추정알고리즘의 측정값에 대한 공분산 행렬을 선정하기 위해, 표 4에서는 호버링타입 무인잠수정에 탑재된 센서에 대해 개별적인 센서테스트를 수행하거나 별도 표기된 사양을 참조하여 센서별 측정값의 정확도 및 잡음 특성, 데이터 생성 주기 등을 파악하였다.

V. 실제 해역에서의 실험

5-1 실험 개요

위치추정알고리즘의 성능을 확인하기 위해 호버링타입 무인잠수정에 알고리즘을 적용하여 실제 해역에서 실험을 수행하였다. 먼저, GPS를 보조센서로 사용하는 알고리즘의 특성상 수면에서 일정한 방향으로 주행할 때 알고리즘은 우수한 성능을 보인다. 이에 따라 본 논문에서는 방향각 제어를 통해 일정한 각도로 주행할 때 위치추정 성능과 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차추정 성능을 확인하고, 도착점에 대한 위치 오차를 비교함으로써 적용한 알고리즘의 성능을 검증한다.

실제 해역에서 수행한 방향각 제어 실험은 평균 수심 약 5m의 한국해양대학교 내항에서 진행되었으며, 60 초간 0°의 목표 방향각을 추종하도록 하였다. 실험 당시 GPS의 수평위치 정밀도 저하율 (HDOP; horizontal dilution of precision)은 1.2, 접속한 위성 수는 8-9 개로 GPS의 위치정보 수신 상태는 아주 양호했다.

표 4. 탑재된 센서의 사양

Table 4. The specification of mounted sensor

Sensor		Accuracy	Frequency	Related parameters
GPS	AsteRx-m OEM Active L1 Antenna	± 0.3 m	10 Hz	$X_{GPS}, Y_{GPS}$
DVL	NavQuest 600 Micro	1% ± 1 mm/s	3 Hz	$u_{DVL}, v_{DVL}$
TCM	TCM3	± 0.5 °	10 Hz	$\psi_{TCM}$
AHRS	MTi AHRS	± 0.05 %s/√Hz	10 Hz	$r_{AHRS}$

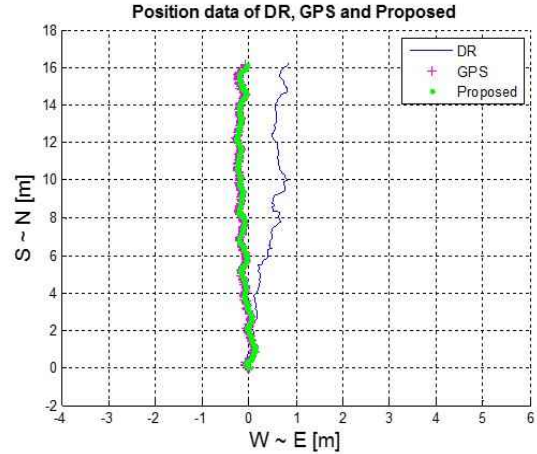


그림 5. 무인잠수정의 이동 궤적  
Fig. 5. The trajectory of AUV

5-2 방향각 제어 실험

그림 5에서는 수사에서 수행한 방향각 제어 실험에서 무인잠수정이 이동한 궤적을 나타내었다. 자색의 ‘+’로 표시된 GPS 위치정보를 수신하여 위치추정알고리즘을 통해 추정된 위치를 녹색으로 나타내었다. 이때, TCM의 방향각 바이어스 오차를 고려하지 않은 기존의 추측항법은 특정 방향으로 편향된 궤적을 그리는 것을 청색그래프를 통해 확인하였다.

위치추정알고리즘의 효율성을 고려하여 무인잠수정이 특정 이동속도 이상으로 거동할 때 알고리즘은 위치와 TCM의 방향각 바이어스 오차를 추정하도록 하였다. 이는 아래 그림 6의 0으로 표기된 시점을 통해 알 수 있다. 그 중 두 구간에 대해 그림 7을 살펴보면 무인잠수정의 선속도 측정값 중 전진 방향의 속도  $u$ 가 작아져 알고리즘을 수행하지 않았음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차 추정값을 나타낸 그림 8에서도 해당 구간에서는 이전에 추정된 값

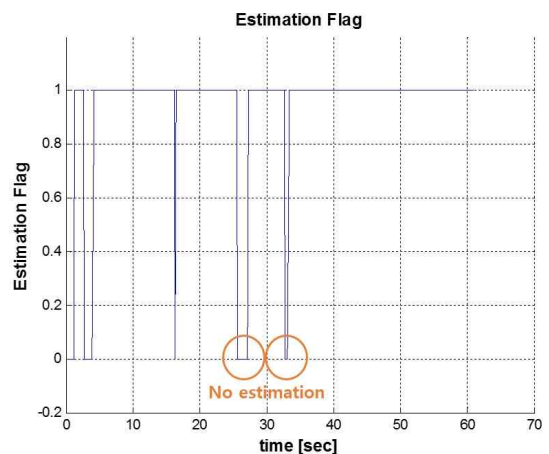


그림 6. 위치추정알고리즘 수행 여부  
Fig. 6. The flag whether the algorithm is performed.

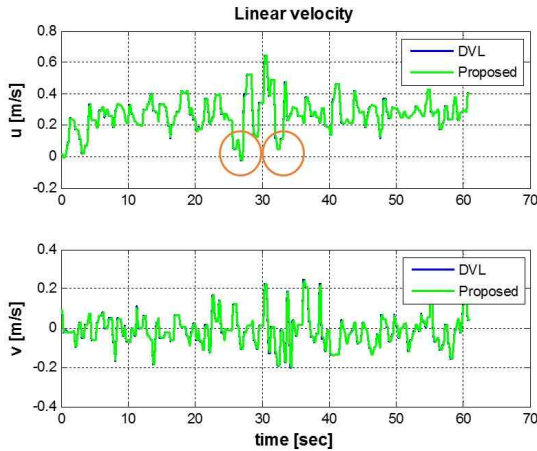


그림 7. 무인잠수정의 선속도  
Fig. 7. The linear velocity of AUV.

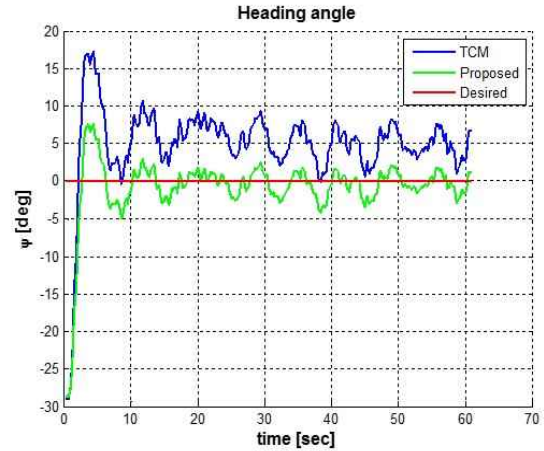


그림 9. 무인잠수정의 방향각  
Fig. 9. The heading of AUV.

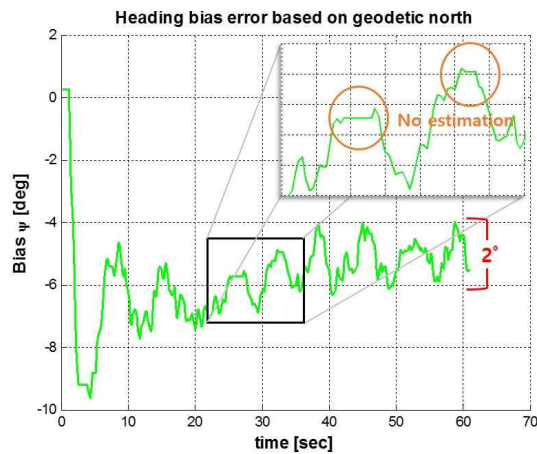


그림 8. 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차 추정값  
Fig. 8. The estimated heading bias error of TCM based on geodetic north.

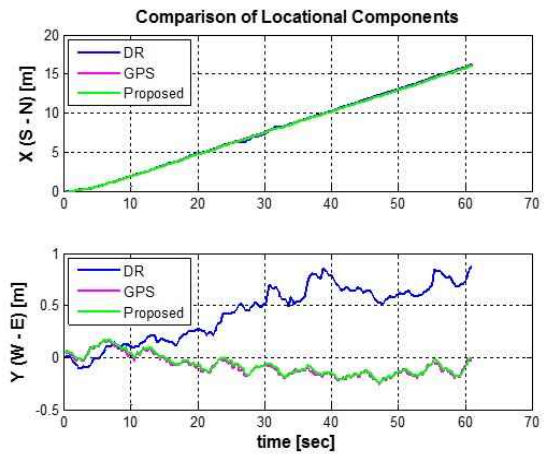


그림 10. X, Y축에 대해 이동한 거리  
Fig. 10. The distance traveled on the X and Y axis.

으로 추측항법을 수행함을 볼 수 있다. 또한 추정값은  $-4^{\circ} \sim -6^{\circ}$ 의 약  $2^{\circ}$  이내로 수렴하였는데, 이는 선체고정좌표계에 대한 TCM의 뒤틀림 각을 고려할 때 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NCEI (National Centers for Environmental Information)에서 실험 일시와 장소로 계산한 자편각  $-7.79^{\circ}$ 을 유사하게 추정된 것으로 볼 수 있다[12].

그림 9에서 알고리즘은 청색의 그래프로 나타낸 TCM 측정값에서 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스 오차 추정값을 고려하여 녹색의 진북에 대한 방향각을 추정하였고, 이를 통해 무인잠수정의 방향각 제어 실험을 수행하였다.

X 축 (south to north)과 Y 축 (west to east)에 대해 무인잠수정의 이동한 거리는 그림 10에 나타내었다. GPS 위치정보를 참조값으로 하여 도착점에 대한 위치를 각 축으로 나누어 비교하면 표 5와 같다.

기존 추측항법의 경우 60 초간 약 16 m의 거리를 이동하여

표 5. 도착점에서의 위치 비교

Table 5. Position comparison at the end point.

Axis	GPS	DR		Localization algorithm	
	Position	Position	Distance	Position	Distance
X	16.17 m	16.26 m	0.09 m	16.14 m	0.03 m
Y	-0.03 m	0.865 m	0.895 m	-0.01 m	0.02 m

도착점에서 약 0.900 m의 위치오차가 발생했고 이동시간과 이동거리에 비례하여 위치오차가 누적되었다. 이에 비해 본 논문의 위치추정알고리즘을 적용한 경우 이동시간과 이동거리가 길어질 때에도 기존 추측항법에 비해 위치추정 성능이 개선되었고, 이동 중 알고리즘을 수행하지 않을 때에도 TCM의 방향각 바이어스 오차 추정값에 의해 위치오차가 크게 누적되지 않았다. 또한 도착점에서는 0.036 m의 개선된 위치오차를 확인함으로써 알고리즘의 성능을 검증하였다.

## VI. 결 론

본 논문은 GPS를 보조센서로 사용하는 위치추정알고리즘을 호버링타입 무인잠수정에 적용하고 실제 해역에서 방향각 제어 실험을 수행하였다. 기존의 DVL, TCM을 이용한 추측항법과의 성능비교를 통해 알고리즘의 개선된 위치추정 성능을 검증하였고, 진북에 대한 TCM의 방향각 바이어스를 추정하여 NED 좌표계에 대한 추측항법을 수행함으로써 누적되는 위치 오차가 개선될 수 있음을 알 수 있었다.

향후 실제 해역에서 다양한 시나리오의 실험을 수행하여 호버링타입 무인잠수정에 대한 위치추정알고리즘의 실용화 방안 에 대해 연구를 진행할 계획이다.

## Acknowledgments

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단, 무인 이동체 미래선도 핵심기술개발 사업단 (No.2016M1B3A1A02 937626)과 한국연구재단의 기초연구사업 (NRF-2016R1A2B40 11875)의 지원을 받아 수행되었음.

## References

[1] D. Thompson, D. Caress, C. Paull, D. Clague, H. Thomas and D. Conlin, "MBARI mapping AUV operations: In the Gulf of California", in *OCEANS'12 MTS/IEEE*, Virginia: VA, pp. 1-5, Oct. 2012.

[2] D. Thompson, D. Caress, H. Thomas and D. Conlin, "MBARI mapping AUV operations in the gulf of California 2015", in *OCEANS'15 MTS/IEEE*, Washington: WA, pp. 1-7, Oct. 2015.

[3] T. Brown, J. Damiano, S. Jhala, R. Moore, B. Morgan, V. Nguyen, T. Opheim, T. Ringwald, W. Roman, and J. Turk, "Next generation mine countermeasures for the very shallow water zone in support of amphibious operations", Naval Postgraduate School, Monterey, California: CA, No. NPS-SE-12-001, pp. 1-401, Mar. 2012.

[4] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydro-dynamics and Motion Control*, Chichester, United Kingdom: A John Wiley & Sons, 2011.

[5] C. W. Nam and S. S. Lim, "Position-fix improvement of integrated GPS and DR system using two-level noise model", *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 75-83, Dec. 1998.

[6] S. C. Park, S. B. Chun, J. W. Kim and M. B. Heo, "Development of monitoring program based an automotive GPS/DR integrated navigation system for lane departure warning", *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 791-799, Dec. 2010.

[7] Y. S. Park, D. H. Lee, W. S. Choi and J. M. Lee, "Sea-surface localization of AUV using extended Kalman filter for INS/GPS", in *Conference of Institute of Control, Robotics and Systems*, Daejeon: Korea, pp. 97-98, May. 2015.

[8] The society of naval architects and marine engineers (SNAME), *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid*, New York, Technical and Research Bulletin, No. 1-5, 1950.

[9] H. S. Kang, S. M. Hong, J. N. Sur and J. Y. Kim, "Design of GPS-aided dead reckoning algorithm of AUV using extended kalman filter", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 28-35, Feb. 2017.

[10] S. M. Hong, Y. J. Lee, D. H. Choi, H. S. Choi and J. Y. Kim, "Development of hovering type AUV 'Octagon' and test of dynamic motion", in *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Annual Meeting*, Busan: Korea, pp. 176-178, May. 2014.

[11] D. H. Choi, Y. J. Lee, S. M. Hong and J. Y. Kim, "Development of hovering-type AUV test-bed 'OCTAGON' ", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 40, No. 6, pp. 516-526, Jul. 2016.

[12] National Centers for Environmental Information (NCEI) of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Magnetic field calculators [internet]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>



**강 현 석** (Hyeon-Seok Kang)

2013년 8월 : 한국해양대학교 제어자동화공학전공 (공학사)

2015년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교-한국해양과학기술원 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과 해양선박-플랜트전공 석사과정

※관심분야 : 수중로봇, 제어, 수중항법, 센서 융합



**홍 승 민 (Sung-Min Hong)**

2013년 2월 : 한국해양대학교 조선기자재공학 (공학사)  
2015년 2월 : 한국해양대학교 재료공학 (공학석사)  
2015년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교-한국해양과학기술원 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과 해양선박-플랜트전공 박사과정  
※ 관심분야 : 무인잠수정 설계 및 제어, 항법



**서 주 노 (Joo-No Sur)**

1989년 9월 : 미국 해군대학원 (NPS) 기계공학 (공학석사)  
1997년 6월 : 미국 캘리포니아 대학원 (UCSB) 기계공학 (공학박사)  
1997년 6월 ~ 2011년 7월 : 해군사관학교 기계조선공학과 교수  
2014년 11월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양무인체계센터 센터장  
※ 관심분야 : 해양무기체계, 수중항법, 제어, 경로계획



**김 동 희 (Dong-Hee Kim)**

1999년 2월 : 한양대학교 기계공학 (공학사)  
2001년 2월 : 한양대학교 기계공학 (공학석사)  
2016년 2월 : 한국해양대학교 기계공학 (공학박사)  
2016년 2월 ~ 현재 : 한화시스템 해양연구소 전문연구원  
※ 관심분야 : 수중로봇, 동역학 해석, 제어



**정 재 훈 (Jae-Hun Jeong)**

2002년 2월 : 부경대학교 해양공학 (공학사)  
2006년 2월 : 부경대학교 해양공학 (공학석사)  
2015년 2월 : 부산대학교 조선해양공학 (공학박사)  
2016년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 기계공학부 연구원  
※ 관심분야 : 무인수중운동체, DPS 시스템 설계, 선박운동조종



**정 성 훈 (Seong-Hoon Jeong)**

2004년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학석사)  
2007년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학박사)  
2003년 ~ 2010년 : 부산경상대학교 멀티미디어컴퓨터과 겸임교수  
2010년 ~ 현재 : 한국해양대학교 산업기술연구소 산학연구교수  
※ 관심분야 : 해양 무인화 시스템, 해양 IoT, 해상통신, ICT 융·복합 기술



**최 형 식 (Hyeung-Sik Choi)**

1989년 2월 : 미국 University of South Carolina 기계공학 (공학석사)  
1993년 2월 : 미국 University of North Carolina 기계 및 항공공학 (공학박사)  
1993년 ~ 1997년 : 한국기계연구원 (박사 후 연구원)  
1997년 5월 ~ 현재 : 한국해양대학교 기계공학부 교수  
※ 관심분야 : 휴머노이드 로봇, 무인수중로봇, 제어, 수중 가시광 통신



**김 준 영 (Joon-Young Kim)**

1993년 2월 : 인하대학교 조선해양공학 (공학석사)  
1999년 8월 : 한양대학교 정밀기계공학 (공학박사)  
2005년 4월 ~ 2011년 3월 : 제주대학교 해양시스템공학과 조교수  
2011년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 기계공학부 부교수  
※ 관심분야 : 선체운동모델링 및 동역학 해석, 해양플랜트 설계 및 해석, 무인잠수정 설계 및 제어