

# 확장칼만필터 기반 무인잠수정 항법의 성능평가

임종환\* · 강철웅\*

## Performance Estimation of an AUV Navigation based on Extended Kalman Filter

Jong-Hwan Lim\* and Chul-Ung Kang\*

### ABSTRACT

This paper presents extended Kalman filter based navigation performances of an autonomous underwater vehicle(AUV). The system is composed of a mother ship (small unmanned marine prober) on the surface of the water and an unmanned underwater vehicle in the water. The mother ship is equipped with a digital compass and a GPS for position information, and extended Kalman filter is used for position estimation. For the localization of the AUV, we used only non-inertial sensors such as a digital compass, a pressure sensor, a clinometer and ultrasonic sensors. From the orientation and velocity information, a priori position of the AUV is estimated by applying the dead reckoning method. A posteriori position of the AUV is, then, updated by using the distance between the AUV and a mother ship on the surface of the water together with the depth information from the pressure sensor. The performances of the navigation system has been estimated in various situations through sets of simulations.

**Key Words** : Extended Kalman filter, navigation, AUV, mother ship

### 1. 서론

잠수정의 항법에 있어서 가장 큰 문제는 잠수정의 위치평가이다. 육상에서는 엔코더나 GPS 등을 이용하여 위치평가가 가능하지만 수중에서는 모두 불가능하다[1]. 현재 잠수정의 위치 추적 방법으로는 외부 용답기를 설치하여 그 용답신호로서 위치를 평가하는 Acoustic Long Base Line (LBL), Short Base Line (SBL), Ultra Short BaseLine (USBL)이 주종이다[2]. 이 방법들은 사전에 음파 beacon을 설치해야 하므로 설치비용이 고가이며 음파 beacon이 설치되지 않은 영역에서는 작업이 불가능하다[3].

또 다른 방법으로 육상 로봇과 같이 항법관성 센서를 이용하기도 하는데, 주로 스트랩다운형 소형 관성센서를 사용한다. 그러나 관성항법센서들은 단시간의 운항에는 매우 정밀한 위치정보를 제공할 수 있지만 기본적으로 적분과정을 포함하고 있으므로 바이어스 오차가 시간의 경과에 따라 기하급수적으로 늘어나는 문제점이 있다[4,5]. 따라서 관성센서와 함께 비 관성센서인 심도계, 도플러 속도센서, 마그네틱 컴퍼스 등의 보조항법센서를 이용하여 관성센서만의 항법에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 복합항법 시스템에 대한 연구가 수행되었다[6]. 수심이 얇은 천해에서는 잠수정이 주기적으로 수면으로 부상하여 GPS 위치정보를 수신하여 누적된 위치 오차를 보정하는 방법을 이용하기도 한다[7].

본 연구에서는 이와 같은 기존의 관성센서를 이용한 항법과는 달리 비 관성센서만을 사용한 항법을 제안한다. 즉, 디지털 컴퍼스 및 경사계 등을 이용하여 잠수정의 방향각 및 경사각을 측정하고 잠수정의 속도정보로부터 잠수정의 진행 방향 및 이동거리를 추정하여 잠수정의 위치를

\* 제주대학교 기계·에너지·시스템공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Mechanical, Energy & System eng.  
Research Institute of Advanced Technology, Cheju  
Nat'l Univ.

연속적으로 평가하는 방법이다. 그러나 이 방법 역시 각도 센서의 바이어스오차 및 드리프트, 그리고 잠수정의 속도정보에 관련된 오차, 즉 추진기의 응답지연, 잠수정의 동역학적 특성, 조류 등에 의한 오차가 시간에 따라 누적되는 문제점이 발생한다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 이용한다. 먼저 각도(방향각, 경사각) 센서들의 바이어스 및 드리프트 오차를 줄이기 위해 각 센서들의 절대 값 대신 각 샘플링 간격마다의 각도 증분을 이용한다. 이 경우 오차의 누적이 방지되므로 초기 각도만 정확하게 주어진다면 바이어스 오차의 영향이 최소화되며 드리프트 역시 단위 샘플링 간격동안의 드리프트 영향만 받게 되므로 현저하게 그 영향을 줄일 수 있다. 그러나 이와 같은 추측항법(Dead Reckoning : DR)은 잠수정의 속도에 관련된 오차로 인해 여전히 시간에 따라 오차가 누적될 수밖에 없다. 이 문제를 해결하기 위해 수면에 절대 위치정보 알고 있는 모선을 이용하여 모선과 잠수정 사이의 상대거리와 수심센서의 수심 정보를 확장칼만필터로 DR항법과 결합함으로써 잠수정의 절대 위치를 평가하는 방법을 제안하고 다양한 오차특성 및 샘플링 간격에 대한 항법의 성능을 평가한다.

## II. 무인 모선의 항법

### 2.1 모선의 시스템 모델

본 연구에서 제안하는 잠수정의 항법은 해수 표면에 위치하는 모선이 자율항해를 하면서 자신의 절대좌표를 평가한다. 잠수정은 모선을 기준으로 상대적인 위치를 평가하고 모선의 절대좌표를 이용하여 최종적으로 자신의 절대좌표를 추적하는 방법이다. 모선의 항법은 모선의 속도, 디지털 컴퍼스의 방향, 그리고 DGPS의 위치정보를 기본으로 단위 샘플링 간격 동안의 방향각 증분, 거리 증분을 이용함으로써 센서의 바이어스 및 드리프트 오차 영향을 줄이는 방법을 이용하며 확장칼만필터를 이용하여 DGPS 정보와 결합한다.

시간  $t$ 에서 모선의 경도, 위도 및 자세각을 각각  $\lambda$ ,  $\phi$ , 그리고  $\theta$ 로 정의하면 탐사선의 속도와 경, 위도 변화율 관계는 다음과 같다[8].

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= \frac{V \sin \theta}{(R_e + h) \cos \phi} \\ \dot{\phi} &= \frac{V \cos \theta}{R_e + h} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 탐사선의 속도,  $R_e$ 는 지구반경,  $h$ 는 고도로서 탐사선은 항상 바다 표면을 향해하므로  $h=0$ 으로 가정한다. 모선의 위치를  $X(k)$ 로 정의하고 이산시간으로 표현하면 시스템 모델은 다음과 같다 [9].

$$X(k+1) = F(X(k), u(k)) + v(k) \quad (2)$$

여기서,  $F(X(k), u(k))$ 는 상태 천이함수이며,  $u(k)$ 는 제어입력으로서 탐사선의 속력  $V(k)$ 와 자세각의 증분  $\Delta\theta(k)$ 로 구성되고,  $v(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이  $Q(k)$ 인 가우시안 잡음이다.

또한  $k$ 와  $k+1$ 사이의 시간 간격을  $\Delta t$ 라 하면 이 시간 동안의 경도와 위도 및 자세각의 변화량은  $[\dot{\lambda}\Delta t, \dot{\phi}\Delta t, \Delta\theta]^T$ 가 되며 이동거리는  $V(k)\Delta t$ 가 된다. 이동거리  $V(k)\Delta t$ 를  $d(k)$ 로 정의 하면 상태천이 함수는 다음과 같이 표현 된다.

$$F(X(k), u(k)) = \begin{bmatrix} \lambda(k) + \frac{d(k) \sin \theta(k)}{R_e \cos \phi(k)} \\ \phi(k) + \frac{d(k) \cos \theta(k)}{R_e} \\ \theta(k) + \Delta\theta(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

측정모델은 측정값과 탐사선의 위치를 연관시키는 것으로서 다음과 같이 정의 한다.

$$Z(k) = H(X(k)) + w(k) \quad (4)$$

여기서,  $w(k)$ 는 평균이 0, 공분산이  $R(k)$ 인 가우시안 잡음이다. 위치 측정 센서는 DGPS 및 디지털 컴퍼스로서 각각 고유한 측정 메커니즘을 갖고 있으며, 각 센서의 위치정보 발생과정은 탐사선의 위치를 제외한 다른 특별한 관계가 존재하지 않으므로 센서의 정보는 실제 위치정보에 단지 각 센서의 특성에 따른 오차만이 개입된다고 가정할 수 있다. 따라서  $H(X(k))$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$H(X(k)) = \begin{bmatrix} \lambda(k) \\ \phi(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 DGPS의 정보는 그 자체를 이용하며 디지털 컴퍼스는 각도의 증분을 이용한다.

### 2.2 모선의 위치평가

이상과 같이 정의된 시스템 모델과 측정모델을 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용하여 탐사선의 위치를 평가하는 방법은 다음과 같다[8,10]. 먼저 시스템 모델과 제어 입력  $u(k)$ 로부터 시간

$k+1$ 에서의 탐사선 위치를 다음으로 예측한다.

$$\hat{X}(k+1|k) = F(\hat{X}(k|k), u(k)) \quad (6)$$

이 예측에 대한 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$P(k+1|k) = \nabla F \cdot P(k|k) \cdot \nabla F^T + Q(k) \quad (7)$$

여기서  $\nabla F$ 는 상태천이함수 식 (3)의 자코비안이다.

측정된 값과 예측 값의 차로 구성되는 innovation 과 그에 따른 공분산행렬을 행렬은 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\nu(k+1) = [Z(k+1) - \hat{Z}(k+1)] \quad (8)$$

$$S(k+1) = \nabla H \cdot P(k+1|k) \cdot \nabla H^T + R(k+1) \quad (9)$$

여기서,  $Z(k+1)$ 은 센서의 측정값,  $\hat{Z}(k+1)$ 은 식 (3)으로 예측된 위치이며,  $\nabla H$ 는 식 (5)의 자코비안이다. 이 식들을 이용하여 칼만 이득 행렬  $W(k+1)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$W(k+1) = P(k+1|k) \nabla H^T S^{-1}(k+1) \quad (10)$$

이 칼만 이득을 이용하여 다음과 같이 위치를 평가한다.

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + W(k+1)\nu(k+1) \quad (11)$$

또한 이 평가에 수반된 공분산 행렬은 아래와 같이 갱신된다.

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - W(k+1)S(k+1)W^T(k+1) \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 이용하여 각 샘플링 시간마다 반복적으로 모선의 위치를 평가한다.

### III. 잠수정의 위치평가

모선의 위치는 경도, 위도로 나타내지는 반면에 잠수정의 위치는 작업영역에서의 초기 출발 위치에 설정된 직교좌표계에 대한 위치를 평가한다. 잠수정은 위치평가를 위해 초음파거리센서, 수심센서, 디지털 컴퍼스, 그리고 경사센서를 장착한 것으로 가정한다. 초음파 센서는 잠수정 상부에 위치하는 모선과의 상대거리를 측정하며, 수심센서는 수면에 대한 잠수정의 깊이, 경사센

서는 수평면에 대해 잠수정이 기울어진 각도, 그리고 디지털 컴퍼스는 경도선에 대한 잠수정의 방향각을 각각 측정한다.

### 3.1 시스템 모델

Fig. 1은 시간  $k$ 에서 모선과 잠수정 사이의 좌표관계를 나타낸다.  $x$ 축은 경도방향,  $y$ 축은 위도방향, 그리고  $z$ 축은 고도방향과 일치한다. 그림에서  $V(k)$ 는 잠수정의 속도,  $\beta$ 는  $x$ 축에 대한 잠수정의 방향각, 그리고  $\gamma$ 는 수평면에 대한 잠수정의 경사각을 나타낸다. 잠수정의 속도 성분은 다음과 같이 표현된다[11].

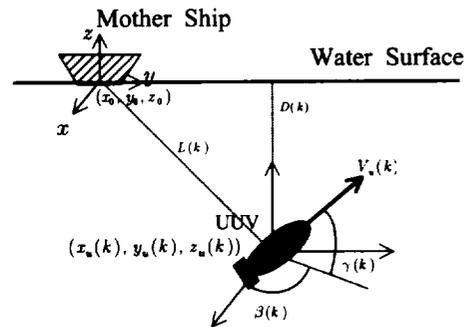


Fig. 1 Coordinates of the navigation system.

$$\begin{bmatrix} V_{u,x}(k) \\ V_{u,y}(k) \\ V_{u,z}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_u(k) \cos \gamma(k) \cos \beta(k) \\ V_u(k) \cos \gamma(k) \sin \beta(k) \\ V_u(k) \sin \gamma(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

시간  $k$ 에서  $k+1$ 동안의 이동거리를  $m(k)$ , 자세 각 변화를 각각  $\Delta\gamma(k)$ ,  $\Delta\beta(k)$ 라 하면 시간  $k+1$ 에서 잠수정의 위치 및 자세는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_u(k+1) \\ y_u(k+1) \\ z_u(k+1) \\ \gamma(k+1) \\ \beta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_u(k) + m(k) \cos \gamma(k) \cos \beta(k) \\ y_u(k) + m(k) \cos \gamma(k) \sin \beta(k) \\ z_u(k) + m(k) \sin \gamma(k) \\ \gamma(k) + \Delta\gamma(k) \\ \beta(k) + \Delta\beta(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서  $m(k)$ 는  $V_u \Delta t$  이다.

$X_u(k) = [x_u(k), y_u(k), z_u(k), \gamma(k), \beta(k)]^T$ 를 모선에 대한 잠수정의 상대 위치로 정의하고 발생하는 오차를 고려한 시스템 모델을 구성하면 다음과 같다.

$$X_u(k+1) = F_u(X_u(k), u_u(k)) + u_u(k),$$

$$u_u(k) \sim N[0, Q_u(k)] \quad (15)$$

여기서  $F_u(X_u(k), u_u(k))$ 는 식 (14)로 정의된 비선형 상태천이함수이며,  $u_u(k)$ 는 제어입력으로서  $[m(k), \Delta\gamma(k), \Delta\beta(k)]^T$ 이다. 또한  $u(k) \sim N[0, Q_u(k)]$ 는 기댓값이 0이며 공분산이  $Q_u(k)$ 인 가우시안 잡음을 나타낸다.

### 3.2 측정모델

그림 2에서와 같이 모선과 잠수정 사이의 거리를  $L(k)$ , 잠수정의 깊이를  $D(k)$ , 잠수정이 기울어진 각도를  $\gamma(k)$ , 그리고 경도선에 대한 잠수정의 x축에 대한 방향각을  $\beta(k)$ 로 각각 정의한다. 측정모델  $M_u(k)$ 는 다음과 같이 센서의 측정값과 잠수정의 위치 및 방향을 서로 연관시킨다.

$$M_u(k) = H_u(X_u(k), S_i) + r_u(k), r_u(k) \sim N(0, R_u(k)) \quad (16)$$

여기서  $r_u(k)$ 는 기댓값이 0이며 공분산이  $R_u(k)$ 인 가우시안 특성을 갖는 측정 잡음이며,  $S_i$ 는 초음파 센서 또는 수심센서 등과 같은 센서의 종류를 나타낸다. 식 (16)에서  $H_u(X(k), S_i)$ 는 각 센서에 따른 측정함수로서 Fig.1에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$H_u(X_u(k), S_i) = \begin{bmatrix} [(x_0 - x(k))^2 + (y_0 - y(k))^2 + (z_0 - z(k))^2]^{1/2} \\ z_0 - z(k) \\ \gamma(k) \\ \beta(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서  $(x_0, y_0, z_0)$ 는 직교좌표계로 환산된 모선의 위치이며,  $\gamma(k)$ 와  $\beta(k)$ 는 각 샘플 당 각도증분으로부터 구한다.

### 3.3 잠수정의 위치평가

설정된 잠수정의 시스템 모델과 측정모델에 대하여 확장칼만필터를 이용하여 위치를 평가하는 방법은 2.3절에 기술한 모선의 위치평가 과정과 동일하다. 이때 식 (7)을 이용하여 위치 예측에 대한 공분산 행렬을 구할 때 필요한  $\nabla F_u$ 는 식 (14)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla F_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -m(k)\sin\gamma(k)\cos\beta(k) & -m(k)\cos\gamma(k)\sin\beta(k) \\ 0 & 1 & 0 & -m(k)\sin\gamma(k)\sin\beta(k) & +m(k)\cos\gamma(k)\cos\beta(k) \\ 0 & 0 & 1 & m(k)\cos\gamma(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

또한 각 측정에 관련된 측정 자코비안  $\nabla H_u$ 는 식

(17)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla H_u = \begin{bmatrix} \frac{1}{L(k)}(x_0 - x(k) - x_0) & \frac{1}{L(k)}(y_0 - y(k) - y_0) & \frac{1}{L(k)}(z_0 - z(k) - z_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

이와 같은 과정을 반복적으로 수행함으로써 모선의 절대 위치로부터 잠수정의 절대 위치를 구할 수 있다. 잠수정의 절대 위치는 필요에 따라 경/위도 좌표계 또는 직교좌표계로 쉽게 환산할 수 있다.

평가된 잠수정의 위치 불확실성은 위치 평가 시에 모선의 위치가 정확하다고 가정하고 있기 때문에 모선에 대한 상대위치 불확실성이 된다. 따라서 실제 잠수정의 위치불확실성은 잠수정의 위치불확실성을 나타내는 공분산 행렬과 모선의 위치불확실성을 나타내는 공분산행렬인 식 (12)의 합으로 근사화할 수 있다.

## IV. 위치평가 결과 및 고찰

### 4.1 시뮬레이션 조건

잠수정의 위치 평가 시뮬레이션에서 모선은 일정한 위치에서 조류의 영향으로 약간씩 드리프트 하며 매 위치평가 시 마다 수중통신으로 모선의 위치를 잠수정에 전달하는 것으로 가정하였다. Table 1은 시뮬레이션에서 가정된 각 오차의 특성을 나타낸다. 모선은 단거리의 경우 초음파의 거리 측정시간이 짧으므로 이 시간 동안 모선의 드리프트 거리가 크지 않다고 가정하고 잠수정 이동거리의 2% 이내의 드리프트를 가정하였으며, 잠수정의 속력은 모선과 동일한 0.9m/s로 설정하였다.

수중에서 초음파센서는 장거리 측정 시에 감쇠 손실, 다중경로현상 등으로 인해 최대 4.8%의 거리오차가 발생하는 것으로 보고되고 있지만[12],

Table 1 Error characteristics

Parameter	random noise	systematics error
drift error (mother ship)		2.0% of m(k)
range error (sonar sensor)	0.3m	2.0%
depth error (depth meter)	0.5m	0.5m
tilting error (clinometer)	2.0°	4.0°
heading error(compass)	2.0°	4.0°
m(k) error	10.0%	2.0%

본 연구에서와 같이 발신과 수신에 분리된 경우는 최단거리를 감지하므로 다중경로현상의 영향은 받지 않는다. 또한 단거리일수록 감쇠 영향이 줄어들기 때문에 거리 값의 2% 계통오차를 가정하였다.

각도 센서들의 바이어스 오차는 각도 증분만을 이용하므로 초기 바이어스 오차를 측정하여 보정하는 것으로 가정하였으나 보정 오차 및 각 측정 시 발생하는 드리프트를 고려하여 4도 정도의 바이어스 오차를 가정하였다. 잠수정의 샘플 시간간격동안 거리증분 ( $m(k)$ )는 일정 속력을 가정하고 있으나 실제 해역에서는 조류 및 추진기의 특성 등에 의해 오차가 발생할 것으로 예상되므로  $m(k)$ 의 10% 무작위 오차 및 2%의 계통오차를 가정하였다. 또한 위치평가 샘플링 주파수는 3 Hz로 가정하였으며 각 샘플링 마다 모선의 위치, 각도센서의 방위각, 초음파센서의 거리, 그리고 수심센서의 수심정보를 수집하여 위치평가를 수행한다. 모선 및 잠수정의 초기위치 및 방향은 알고 있는 것으로 가정하였다.

#### 4.2 직선항해 결과

먼저 직선항해시의 성능을 평가하기 위해 잠수정이 수심 30m에서 x축 방향으로 수평하게 항해하도록 하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 모선은 초기위치  $[1m, 1m, 40m]^T$ 에서 x 방향으로 드리프트하며 총 항해 거리는 900m 이다. 각도의 바이어스 오차에 의해 DR (Dead Reckoning)에 의한 경로는 오차가 무한히 커지지만 EKF에 의한 경로는 실제 경로에서 크게 벗어나지 않으며 수렴하는 결과를 보이고 있다. Fig. 3은 실제 위치에 대한 EKF 항법의 3차원 위치오차를 나타낸다. 최대 오차는 3.04m, 평균 오차는 1.53m, 그리고 표준편차는 0.26m로 나타났다.

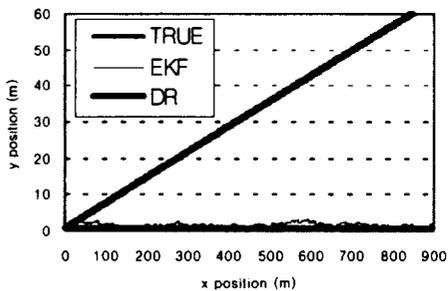


Fig. 2 Estimated position of the AUV

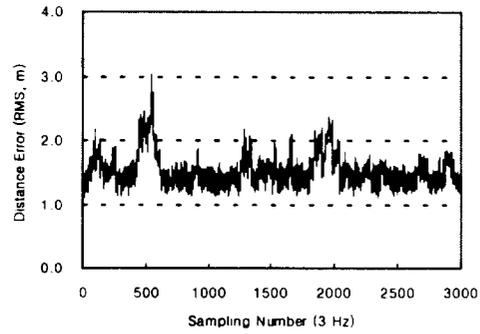
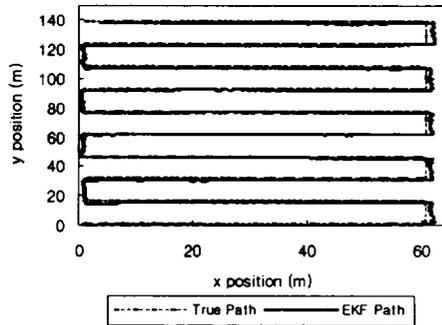


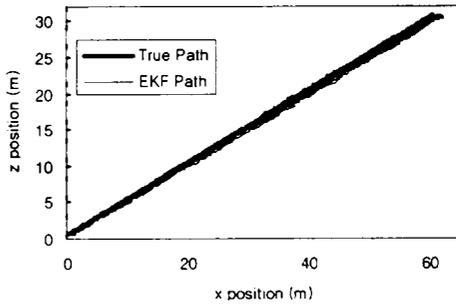
Fig. 3 Position Error of the AUV with proposed EKF navigation system (Max.:3.04m, Avg.:1.53m, Std. : 0.26m)

#### 4.3 ≡ 경로 항해 결과

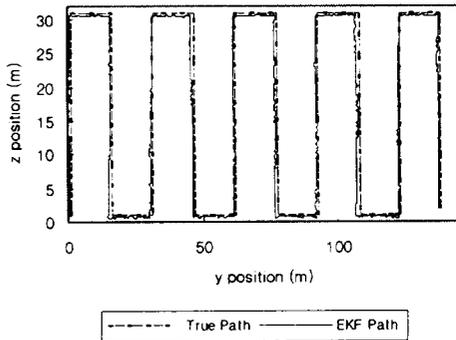
다음으로 잦은 방향전환이 발생하는 경우의 성능을 평가하기 위해 '≡' 자 모양의 항해경로 (Lawn-moving survey mode)를 설정하였으며 그림 7에 결과를 나타내었다. 모선은 초기위치에서 y 방향으로 잠수정 속도의 2% 속도로 서서히 드리프트 하며, 잠수정은 초기위치에서 x 방향으로 60m, z 방향으로 30m의 거리를 왕복하며 '≡' 자 경로를 항해하는 것으로 가정하였다. Fig. 4는 그 결과를 나타내는데, 이동거리의 증가에도 불구하고 오차는 수렴하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5는 이 경우의 3차원 위치평가 오차를 나타내며, 최대 2.0m, 평균 0.63m, 그리고 표준편차가 0.26m 정도로 나타났다.



(a) X-Y planes



(b) X-Z planes



(c) Y-Z planes

Fig. 4 Estimated positions the AUV for '≡' path navigation.

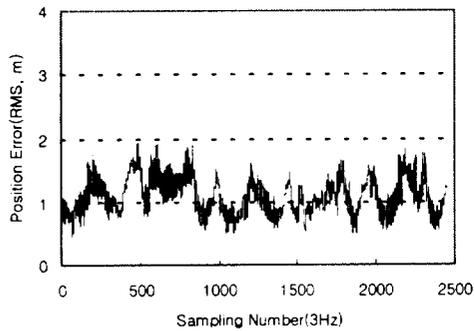
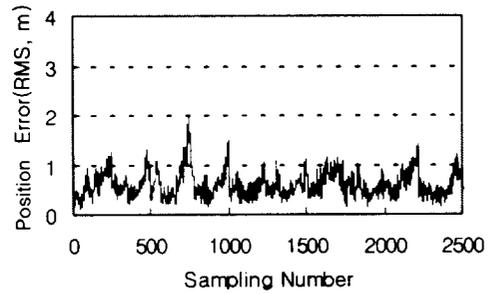
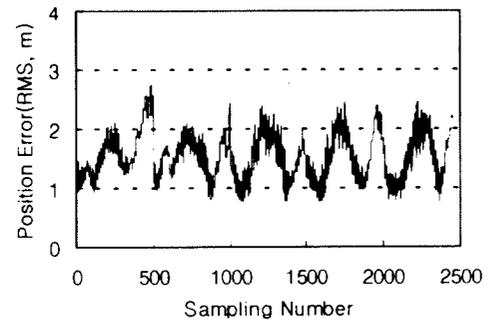


Fig. 5 Position Error of the UUV for '≡' path navigation (Max:1.94m, Avg. : 1.08m, Std. : 0.28m)

Fig. 6은 위치평가의 샘플링 간격에 따른 제안된 항법의 성능을 나타내고 있다. 시뮬레이션 환경은 Fig. 4와 동일하며 다만 샘플링 주파수를 4Hz 및 2Hz로 변화시킨 결과이다. 3Hz인 Fig. 5의 결과와 비교하면 샘플링 간격이 작을수록 더 양호한 특성을 나타내며 클수록 오차의 크기도 커지는 경향을 보이고 있다. Fig. 7은 바이어스 오차가 Fig. 5에 비해 커지는 경우의 결과이다. Fig. 7의 (a)는 각도센서의 바이어스 오차가 6도로서 Fig. 5의 4도에 비해 커진 경우이며 (b)는 잠수정의 거리증분에 대한 바이어스 오차가 Fig. 5의 거리증분의 2%에 비해 4%로 커진 경우의 결과를 나타낸다. 각 경우 모두 바이어스 오차가 커지면 오차 특성도 나빠지는 결과를 나타내었다.

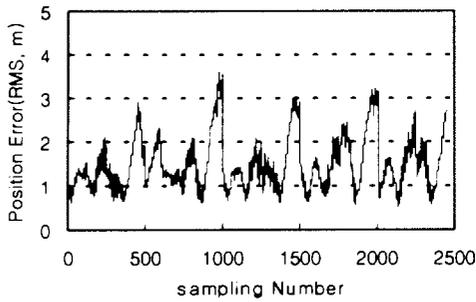


(a) Sampling frequency : 4 Hz (Max : 2.00m, Avg. : 0.59m, Std. : 0.24m)

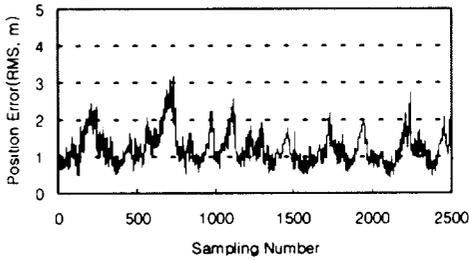


(b) Sampling Frequency : 2 Hz (Max : 2.74m, Avg. : 1.53m, Std. : 0.39m)

Fig. 6 Position error according to the sampling frequencies.



(a) Bias error for angle sensors : 6 degrees  
 (Max.:3.64m, Avg.:1.49m, Std.:0.61m)



(b) Bias error for distance increment : 4 % (Max : 3.18m, Avg. : 1.23m, Std. : 0.44m)

Fig. 7 Effects of bias errors on the position errors.

전술한 바와 같이 본 항법에서는 각도 증분을 이용하므로 경사 및 방위 각 센서의 초기 바이어스 오차 특성을 측정하여 보정 함으로써 이동 중에 발생하는 바이어스 오차를 최소화 시킬 수 있다. 또한 잠수정의 거리 증분에 대한 오차도 실험적으로 무작위 오차를 제외한 각 샘플 당 바이어스 오차를 4% 이내로 유지가 가능할 것으로 사료된다. 특히 기존의 도플러 속도계(DVL)는 0.4% 이내의 정확도를 보장하고 있으므로 이를 이용할 경우 잠수정의 동역학적 특성 및 각 센서에 대한 오차특성 모델링 없이도 본 항법을 실제에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 샘플링 간격을 가능하면 짧게 해야 하므로 본 항법을 적용하기 위한 잠수정과 모선과의 거리에는 제한이 발생할 수 있다. 즉, 수중 초음파 통신 속도가 기존 제품의 경우 최대 보오레이트가 1,200 정도이기 때문에 모선의 위치정보 수신에 0.1초, 기타 센서의 측정 및 위치평가에

최대 0.1초가 소요된다고 가정하면 3Hz 샘플링 주파수에서 초음파 거리측정에 배정되는 시간이 최대 0.13초 정도이므로 수중에서 초음파의 속도는 1,500m/s를 고려하면 100m 이내의 거리로 제한된다고 할 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 모선과의 상대 거리 및 잠수정에 장착된 비관성센서들의 정보만을 이용하여 위치를 평가하는 방법을 제안하고 그 성능을 검토하였다. 이다. 항법 센서는 비교적 저가이며 데이터 처리가 용이한 디지털 컴퍼스, 수압센서, 그리고 경사센서 등이며 모선과의 상대거리를 측정하기 위해 초음파센서를 이용하였다. 제안된 항법은 시간에 따른 오차의 누적이 없는 비관성센서만을 이용하여 필터의 입력이 각 샘플링 간격 당 각도 증분 및 거리증분이므로 각 정보의 바이어스오차 영향을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 잠수정의 동역학적 특성모델링이나 각 센서의 특성 모델링 없이 구현할 수 있다는 것이 특징이다. 시뮬레이션 결과 제안된 항법은 잡음이 심한 환경에서 잠수정의 이동거리 증가에도 불구하고 위치오차가 수렴함이 확인되었으며 따라서 이 방법은 천해에서 활동하는 AUV의 자율항법 구현에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 1) E.R. Bachmann and A.J. Healey, 1999, Testing and Evaluation of an Integrated GPS/INS System for Small AUV Navigation, IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 396-404.
- 2) M.R. Black and B. Butler, 1994, Arctic ocean trials of track point ultrashort baseline acoustic positioning system, Proc. on IEEE AUV systems, pp 297-302.
- 3) J. Vaganay, J.G. Bellingham and J.J. Leonard, 1996, Outlier rejection for autonomous acoustic navigation, Proc. on IEEE Robotics and Automation, pp. 2174-2182.
- 4) D.H. Titterton and J.L. Weston, 1997, Strapdown inertial navigation technology, Peter Peregrinus Ltd., London.
- 5) M.B. Larsen, 2000, High performance Doppler inertial navigation experimental results, Oceans 2000 Conf., Vol 2, pp. 1449-1456.

- 6) 이종무, 이관목, 성우제, 2003, 간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파속도센서 기반의 수중 복합항법 알고리즘, 한국해양공학회지, 제 17권, 제6호, pp. 83-90.
- 7) X. Yun, E. Bachmann and R. McGhee, 1999, Testing and evaluation of an integrated GPS/INS system for small AUV navigation, IEEE J. of Oceanic Eng., Vol 24, No 3, pp. 396-404.
- 8) 임종환, 강철웅, 2004, 소형 무인해양 탐사선 및 항법개발, 한국정밀공학회논문집, 제 21권 제3호, pp. 59-65.
- 9) Gelb, A. C. (1973). Applied Optimal Estimation, The MIT Press.
- 10) J.H. Lim. and C.U. Kang, 2002, Grid-based Localization of a Mobile Robot using Sonar Sensors, KSME Int. J., Vol 6, No 3, pp. 302-309.
- 11) 임종환, 강철웅, 2004, 확장칼만필터를 이용한 무인잠수정의 항법, 한국정밀공학회논문집, 제21권 제7호, pp. 130-135.
- 12) Y. Nagashima and N. Taguchi, 2002, Development of Compact Autonomous Underwater Vehicle Using Variable Vector Propeller, J. of Robotics and Mechatronics, Vol 14, No 1, pp. 112-117.