

무인모선기반 무인잠수정의 3차원 위치계측 기법에 관한 연구

임종환* · 강철웅* · 김성근**

*제주대학교 메카트로닉스공학과

** (주)이도텍

A Study on a 3-D Localization of a AUV Based on a Mother Ship

JONG-HWAN LIM*, CHUL-UNG KANG*, AND SUNG-KYUN KIM**

*Dept of Mechatronics, Cheju National University, Jeju, Korea

**leodo-Tech., Jeju, Korea

KEY WORDS: AUV 자율무인잠수정, 3-D Localization 3차원 위치평가, Unmanned Marine Prober 무인탐사선, Extended Kalman Filter 확장 칼만필터

ABSTRACT: A 3-D localization method of an autonomous underwater vehicle (AUV) has been developed, which can solve the limitations of the conventional localization, such as LBL or SBL that reduces the flexibility and availability of the 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 an 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. Based on the extended Kalman filter algorithm, 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.

1. 서 론

잠수정의 항법에 있어서 가장 큰 문제는 잠수정의 위치평가가이다. 육상에서는 엔코더나 GPS 등을 이용하여 위치평가가 가능하지만 수중에서는 모두 불가능하다(Bachmann and Healey, 1999). 현재 잠수정의 위치추적 방법으로는 외부 응답기를 설치하여 그 응답신호로써 위치를 평가하는 Acoustic Long Base Line (LBL), Short Base Line (SBL), Ultra Short BaseLine (USBL)이 주종이다(Black and Butler, 1994). 이 방법들은 사전에 음파 beacon을 설치해야 하므로 설치비용이 고가이며 음파 beacon이 설치되지 않은 영역에서는 작업이 불가능하다(Vaganay et al., 1996). 또한 초음파 센서를 이용하여 육상 로봇 분야에서와 같이 주위 환경정보로부터 상대적으로 위치를 추정하는 방법들도 연구되었다(Cristi and Caccia, 1995). 이와 같은 방법은 육상 환경에서 조차 초음파 센서의 넓은 지향각, 다중반사경로현상 등으로 인해 그 신뢰성 및 정밀도 면에서 한계가 있는 만큼 해상 환경에의 적용은 무리가 있다(Lim and Leonard,

2000). 또 다른 방법으로 육상 로봇과 같이 항법관성센서를 이용하기도 하는데, 주로 스트랩다운형 소형 관성센서를 사용한다.

그러나 관성항법센서들은 단시간의 운항에는 매우 정밀한 위치 정보를 제공할 수 있지만 기본적으로 적분과정을 포함하고 있으므로 바이어스 오차가 시간의 경과에 따라 기하급수적으로 늘어나는 문제점이 있다(Titterton and Weston, 1997; Larsen, 2000). 따라서 관성센서와 함께 비관성센서인 심도계, 도플러 속도센서, 마그네틱 컴퍼스 등의 보조항법센서를 이용하여 관성센서만의 항법에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 복합항법시스템에 대한 연구가 수행되었다(이종무 등, 2003a, 2003b). 이와 같은 방법의 성능을 더욱 개선시키기 위해 추가적으로 해저의 하나의 기준점으로부터 잠수정 사이의 거리를 측정하는 초음파 거리계를 이용함으로써 항법오차의 누적을 방지하는 연구도 수행되었다(이관복 등, 2004). 수심이 얕은 천해에서는 잠수정이 주기적으로 수면으로 부상하여 GPS 위치정보를 수신하여 누적된 위치오차를 보정하는 방법을 이용하기도 한다(Yun et al., 1999).

본 연구에서는 이와 같은 기존의 관성센서를 이용한 항법과는 달리 비관성센서만을 사용한 항법을 제안한다. 즉, 디지털 컴퍼스 및 경사계 등을 이용하여 잠수정의 방향각 및 경사각을 측정

제1저자 임종환 연락처 : 제주시 아라동 1
064-754-3712 jhlim@cheju.ac.kr

하고 잠수정의 속도정보로부터 잠수정의 진행방향 및 이동거리를 추정하여 잠수정의 위치를 연속적으로 평가하는 방법이다. 그러나 이 방법 역시 각도 센서의 바이어스오차 및 드리프트, 그리고 잠수정의 속도정보에 관련된 오차, 즉 추진기의 응답 지연, 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 절대값 대신 각 샘플링 간격마다의 각도 증분을 이용한다. 이 경우 오차의 누적이 방지되므로 초기 각도만 정확하게 주어진다면 바이어스 오차의 영향이 최소화 되며 드리프트 역시 단위 샘플링 간격 동안의 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 없으며, 이 문제를 해결하기 위해 수면에 절대 위치정보를 알고 있는 모선을 이용하여 모선과 잠수정 사이의 상대거리와 수심센서의 수심 정보를 확장칼만필터로 DR항법과 결합함으로써 잠수정의 절대 위치를 평가하는 방법을 제안한다.

본 항법 시스템은 수면에서 항해하는 모선과 수중의 잠수정이 한 조로 구성되는데, 모선은 소형 무인탐사선으로서 단독으로 각종 해양 정보를 수집하면서 GPS 및 디지털 컴퍼스 정보로부터 자신의 위치를 평가하여 자율항해를 하는 동시에 수중 잠수정의 자율 항해를 도와준다. 무인잠수정은 항해도중 각도 센서의 정보, 수심정보 및 자신과 모선과의 상대 거리 정보로부터 확장 칼만필터를 이용하여 자신의 3차원 위치를 평가한다.

이와 같은 모선 기반 잠수정의 항법에는 먼저 모선의 항법 시스템이 필요하며, 아울러 모선과 잠수정 사이의 거리정보 및 각도 센서의 정보, 그리고 수심정보를 복합적으로 이용한 잠수정의 위치평가 방법의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 이와 같이 비관성 센서만을 이용한 모선 및 잠수정의 항법 시스템을 제안하고 모선을 제작하여 실제 실험으로 그 성능을 분석하였으며, 아울러 시뮬레이션으로 모선 기반 잠수정의 항법의 가능성을 검토하였다.

2. 무인 모선(탐사선)의 항법

2.1 모선의 구조

본 연구에서 개발한 잠수정의 3차원 위치평가 방법은 먼저 해수 표면에 위치하는 모선이 자율항해를 하면서 자신의 절대좌표를 평가한다. 잠수정은 모선을 기준으로 상대적인 위치를 평가하고 모선의 절대좌표를 이용하여 최종적으로 자신의 절대좌표를 추적하는 방법이므로 먼저 모선의 위치평가가 필요하다. 또한 모선은 자체적으로 수집된 각종 해양 정보뿐만 아니라 잠수정이 수집한 정보를 지상 서버에 제공하며 잠수정을 유도하는 기능을 가져야 하며 원격으로 제어될 수 있어야 한다.

모선은 Fig 1과 같이 쌍둥선 형태로 설계하였으며 본체에는 제어, 통신, 탐사 등을 위한 각종 회로 및 전원공급을 위한 배터리 등이 내장되어 있다. 본체 좌우에는 일정한 각도를 갖고 부

력을 조절하기 위한 부력체가 좌우 대칭으로 연결되어 있으며 각 부력체에 구동부가 연결되어 있다. 구동부 내부에 DC 모터가 장착되어 있고 이 모터 축이 외부로 돌출되어 스크루가 연결되어 있다. 따라서 양측 두 개의 스크루가 동시에 작동하여 탐사선을 추진시키거나 방향을 전환하는 구조이다. Table 1은 설계된 탐사선의 제원을 나타낸다.

탐사선과 지상서버와의 통신은 무선 인터넷을 통하여 데이터를 송수신하는 간접통신방식과 무선 통신망을 이용하여 무인 해양탐사선과 지상서버의 1:1 통신, 즉 직접통신방식 등 두 가지 통신방식이 모두 가능하도록 설계되어있다.

모선의 항법에는 모선의 속도정보, 디지털 컴퍼스의 방향정보, 그리고 DGPS의 위치정보를 이용하는데, 기본적으로 잠수정의 항법과 마찬가지로 단위 샘플링 간격 동안의 방향각 증분, 거리 증분을 이용함으로써 센서의 바이어스 및 드리프트 오차 영향을 줄이는 방법을 이용하며 확장칼만필터를 이용하여 DGPS 정보와 결합한다. 항법센서인 디지털 컴퍼스와 DGPS의 사양을 Table 2에 나타내었으며, 모선의 속도는 실험실 실험결과 약 0.9m/s 정도로 측정되었다.

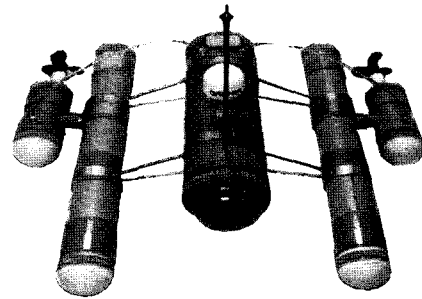


Fig 1 Photo of the unmanned marine prober

Table 1 Specifications of the marine prober (unit : mm)

Spec.	Main Body	Buoyance Body	Total System
Materials	PVC	PVC	PVC, Stainless Steel
Dimension (L × W × H)	900×200×200	1250×150×150	1250×950×315

Table 2 Specifications of the digital compass and DGPS

Digital Compass		DGPS-53	
Heading Accuracy	± 3°	Frequency Range	283.5 - 325.0 kHz @0.5 kHz
Resolution	1°	Data Rates	200/100/50/25 bps
Response Speed	4 Hz	Input/Output	RS-232, 4800 baud rate
		Accuracy	1~ 5 m

2.2 모선의 시스템 및 측정 모델

시간 t 에서 모선의 경도, 위도 및 자세각을 각각 λ , ϕ , 그리고 θ 로 정의하면 탐사선의 속도와 경위도 변화를 관계는 다음과 같

다 (Siouris, 1993).

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

여기서 V 는 탐사선의 속도, R_e 는 지구반경, h 는 고도로서 탐사선은 항상 바다 표면을 향해하므로 $h = 0$ 으로 가정한다. 모선의 위치를 $X(k) = [\lambda(k), \phi(k), \theta(k)]^T$ 로 정의하고 이산시간으로 표현하면 시스템 모델은 다음과 같다 (Gelb, 1973).

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

여기서, $F(X(k), u(k))$ 는 상태전이함수이며, $u(k)$ 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 Δt 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 정의하면 상태전이함수는 다음과 같이 표현 된다.

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

측정모델은 측정값과 탐사선의 위치를 연관시키는 것으로서 다음과 같이 정의한다.

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

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.

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

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

2.3 모선의 위치평가

이상과 같이 정의된 시스템 모델과 측정모델을 확장칼만필터 알고리즘에 적용하여 탐사선의 위치를 평가하는 방법은 다음과 같다 (Lim and Kang, 2002). 먼저 시스템 모델과 제어 입력

$u(k)$ 로부터 시간 $k+1$ 에서의 탐사선 위치를 다음과 같이 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 ∇F 는 상태전이함수 식(3)의 자코비안이다.

측정된 값과 예측 값의 차로 구성되는 innovation과 그에 따른 공분산 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, ∇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.

3. 잠수정의 위치평가

모선의 위치는 경도, 위도로 나타내지는 반면에 잠수정의 위치는 작업영역에서의 초기 출발위치에 설정된 직교좌표계에 대한 위치를 평가한다. 잠수정은 위치평가를 위해 초음파 거리센서, 수심센서, 디지털 컴퍼스, 그리고 경사센서를 장착한 것으로 가정한다. 초음파 센서는 잠수정 상부에 위치하는 모선과의 상대거리를 측정하며, 수심센서는 수면에 대한 잠수정의 깊이, 경사센서는 수평면에 대해 잠수정이 기울어진 각도, 그리고 디지털 컴퍼스는 경도선에 대한 잠수정의 방향각을 각각 측정한다.

초음파 센서의 거리측정 방법은 먼저 잠수정에서 음파를 발신하고 모선에서 이 음파가 감지될 때 모선에서 다시음파를 발신하여 잠수정이 그 음파를 수신할 때까지의 시간 경과로부터 거리를 산출한다. 또한 상대거리 측정을 위한 잠수정의 음파가 모선에 감지된 순간의 모선의 위치를 거리측정 이후에 수중통신으로 잠수정에 송신하는 것으로 가정한다.

3.1 시스템 모델

Fig. 2는 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, β 는 x 축에 대한 잠수정의 방향각, 그리고 γ 는 수평면에 대한 잠수정의 경사각을 나타낸다. 잠수정의 속도 성분은 다음과 같이 표현된다.

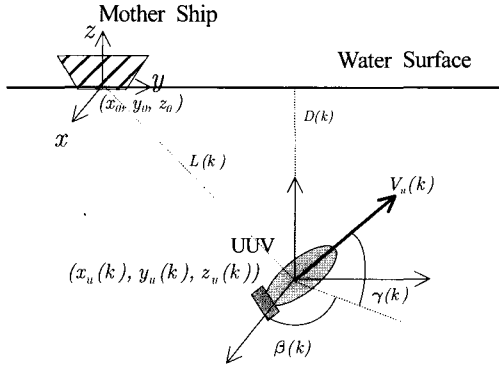


Fig. 2 Coordinates of the navigation system

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

시간 k 에서 $k+1$ 동안의 이동거리를 $m(k)$, 자세각 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 상대위치로 정의하고 발생하는 오차를 고려한 시스템 모델을 구성하면 다음과 같다.

$$X_u(k+1) = F_u(X_u(k), u_u(k)) + w_u(k), w_u(k) \sim N[0, Q_u(k)] \quad (15)$$

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

3.2 측정모델

Fig. 2에서와 같이 모선과 잠수정 사이의 거리를 $L(k)$, 잠수

정의 깊이를 $D(k)$, 잠수정이 기울어진 각도를 $\gamma(k)$, 그리고 경도선에 대한 잠수정의 x 축에 대한 방향각을 $\beta(k)$ 로 각각 정의한다. 측정모델 $M_u(k)$ 는 센서의 측정값과 잠수정의 위치 및 방향을 서로 연관시키는 식으로서 다음과 같다.

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

여기서 $v_u(k)$ 는 기댓값이 0이며 공분산이 $R_u(k)$ 인 가우시안 특성을 갖는 측정 잡음이며, S_t 는 초음파 센서 또는 수심센서 등과 같은 센서의 종류를 나타낸다. 식(16)에서 $H_u(X(k), S_t)$ 는 각 센서에 따른 측정함수로서 그림 3에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$H_u(X_u(k), S_t) = \begin{bmatrix} [(x_0 - x_u(k))^2 + (y_0 - y_u(k))^2 + (z_0 - z_u(k))^2]^{1/2} \\ \gamma(k) \\ \beta(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

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 확장칼만 필터를 이용하여 위치를 평가하는 방법은 2.3절에 기술한 모선의 위치평가 과정과 동일하다. 이때 식(7)을 이용하여 위치 예측에 대한 공분산 행렬을 구할 때 필요한 ∇F_u 는 식(14)로부터 다음과 같이 구해진다.

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

또한 각 측정에 관련된 측정 자코비안 ∇H_u 는 식(17)로부터 다음과 같이 구해진다.

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

이와 같은 과정을 반복적으로 수행함으로써 모선의 절대위치로부터 잠수정의 절대 위치를 구할 수 있다. 잠수정의 절대위치는 필요에 따라 경위도 좌표계 또는 직교좌표계로 쉽게 환산할 수 있다.

평가된 잠수정의 위치 불확실성은 위치평가 시에 모선의 위치가 정확하다고 가정하고 있기 때문에 모선에 대한 상대위치 불확실성이 된다. 따라서 실제 잠수정의 위치불확실성은 잠수정의 위치불확실성을 나타내는 공분산 행렬과 모선의 위치불확실성을 나타내는 공분산 행렬인 식(12)의 합으로 근사화 할 수 있다 (Smith et al., 1990).

4. 위치평가 결과 및 고찰

4.1 모선의 위치평가 결과

확장칼만필터를 이용한 항법, 그리고 DGPS만 이용한 항법의 성능을 비교하기 위해 한 번이 10 m인 정사각형 경로를 설정하고 이 경로를 항해하는 실험을 수행하였다. 실험에서 모선은 일정 rpm으로 추진되었으며 이때 속력은 0.9 m/s 정도로 측정되었다. 제어입력은 샘플링 간격동안의 이동거리 증분과 디지털 컴퍼스의 각도증분이다. 0.5 sec에서 2 sec사이의 다양한 샘플링시간에 대해 위치평가를 해본 결과 거의 유사하였으며, 샘플링 시간 0.5 sec에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

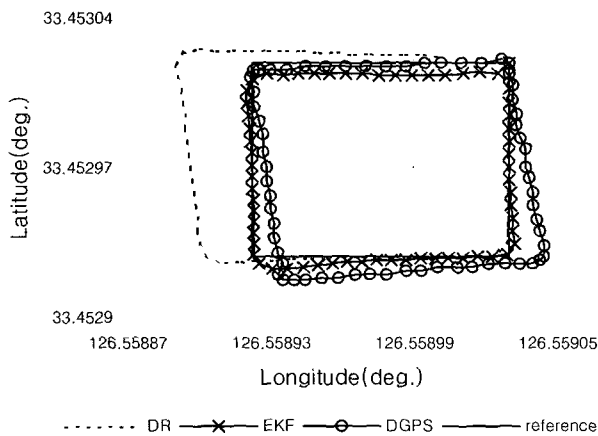


Fig. 3 Localization accuracy (Mother ship)

디지털 컴퍼스의 방위각과 증분과 모선의 이동거리 증분만을 사용한 추측항법(DR)은 기준경로를 크게 벗어나고 있다. 이는 주로 일정속도 가정에서 비롯된 거리증분오차에 기인한다. 또한 DGPS에 의한 항법은 정사각형 형태를 이루지 못하고 전체적으로 찌그러져 나타나고 있는데, 그 원인은 DGPS의 드리프트 영향으로 추정되며 최대오차는 1.74 m 정도였다. 그러나 확장칼만필터에 의한 결과는 DGPS에 비해 실제 경로에 대해서 상당히 근접한 형태를 나타내며 위치평가의 최대 오차는 0.77 m 이었다. 이는 모선의 거리 증분 및 디지털 컴퍼스의 각도 증분 정보에 의해 DGPS의 드리프트 영향이 많이 보정된 결과로 판단된다. 따라서 DGPS만을 이용할 경우 센서 자체의 최대 오차인 5 m 이내의 위치 정확도를 유지할 수 있지만 국부적인 장애물 회피 등 위치 정확도가 더 요구되는 경우에는 확장칼만필터 방법이 더욱 효과적인 것으로 사료된다.

장거리 항해시의 위치평가 성능을 시험하기위해 네 곳의 위치에 부표를 미리 설치한 다음, 모선이 설정된 위치를 차례대로 통과하는 방법으로 실험역 항해실험을 수행하였다. 초기 위치는 Fig. 4와 동일한 방법으로 설정하였으며, 모선의 경로제어나 위치제어는 수행되지 않았고 조작자의 관측에 의해 지상에서 원격으로 제어하였다. 샘플링 간격은 2 sec이고 모선은 설정된 경로를 3회 반복하여 항해 하였으며 총 이동거리는 1.3 km, 항해 시간은 30분 정도이다. Fig. 4는 총 3회 반복 중 마지막 항해에 대한 결

과이다. 그림에서 가로 한 눈금은 27.89 m, 세로 한 눈금은 22.18 m 이다. 그림에서 모선의 이동거리 증분과 디지털 컴퍼스의 각도 증분만을 이용한 DR 항법의 결과는 일정속도 가정에 의한 거리 증분오차 및 각도오차 등에 의해 실제 경로와 큰 오차를 보이고 있다. 또한 항해 경로가 확장칼만필터나 DGPS의 경로에 비해 크게 나타난 것은 실제 실험에서 모선의 속력이 조류 및 기타 요인으로 0.9 m/s 보다 느렸기 때문으로 사료된다.

장거리 실험역 운항실험의 경우는 정확한 실제 경로를 측정하기 어렵기 때문에 각 방법의 정량적인 오차분석을 할 수는 없지만 단거리 운항실험의 결과로 유추할 때 장거리 운항 시에도 확장칼만필터 방법이 더 효과적인 것으로 사료된다.

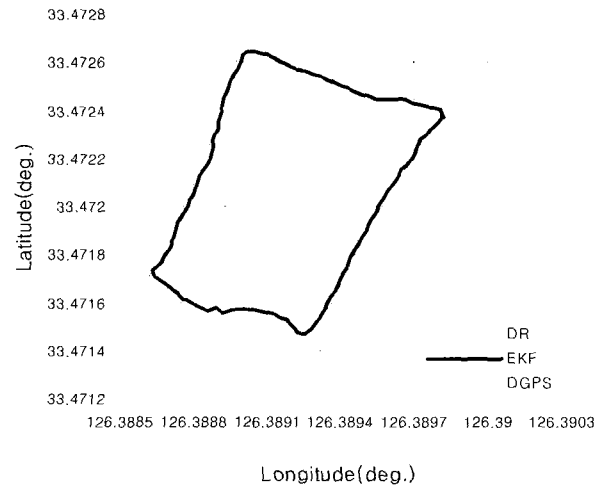


Fig. 4 Experimental result of localization (Mother Ship)

4.2 잠수정 위치평가 시뮬레이션 결과

잠수정의 위치 평가 시뮬레이션에서 모선은 일정한 위치에서 조류의 영향으로 약간씩 드리프트 하며 때 위치평가 시 마다 수중통신으로 모선의 위치를 잠수정에 전달하는 것으로 가정하였다. Table 2은 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 0.9 m/s로 설정하였다. 수중에서 초음파센서는 장거리 측정 시에 감쇠손실, 다중경로현상 등으로 인해 최대 4.8%의 거리오차가 발생하는 것으로 보고되고 있지만 (Nagashima et. al., 2002) 본 연구에서와 같이 발신과 수신 분리된 경우는 최단거리를 감지하므로 다중경로현상의 영향은 받지 않는다. 또한 단거리일수록 감쇠영향이 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 샘플링 시간 간격 동안 거리증분 $m(k)$ 는 일정 속력을 가정하고 있으나 실제 해역에서는 조류 및 추진기의 특성 등에 의해 오차가 발생할 것으로 예

Table 3 Error characteristics (AUV)

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

상되므로 $m(k)$ 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.

먼저 직선항해 시의 성능을 평가하기 위해 잠수정이 수심 30 m에서 x축 방향으로 수평하게 항해하도록 하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모선은 초기위치 $[1m, 1m, 40m]^T$ 에서 x 방향으로 드리프트하며 총 항해거리는 900 m 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. 6은 실제

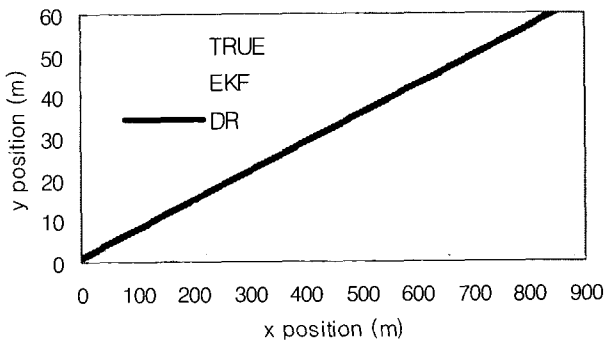


Fig. 5 Estimated position of the AUV

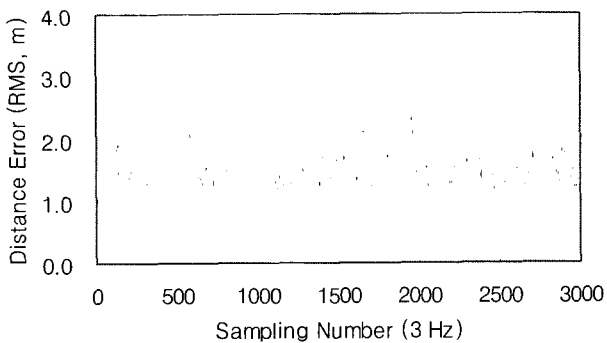
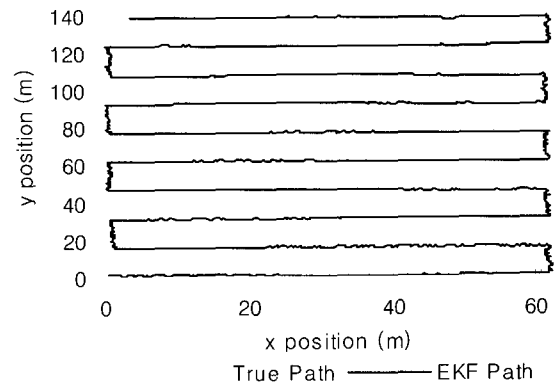
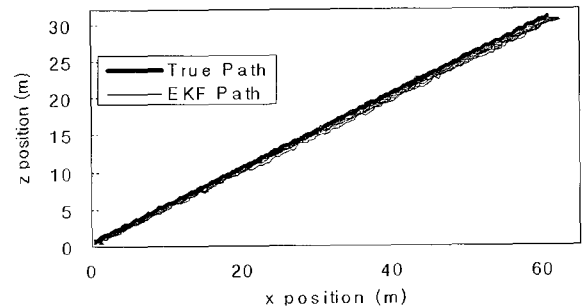


Fig. 6 Position Error of the AUV with proposed EKF navigation system (Max:3.04 m, Avg.:1.53 m, Std. : 0.26 m)

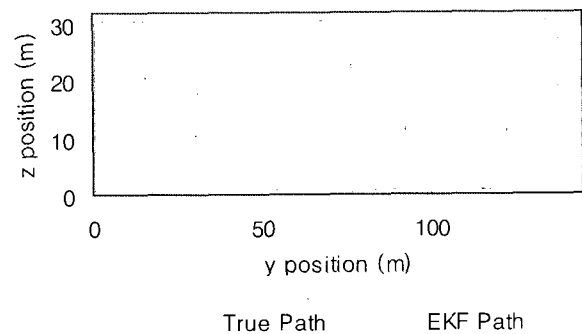
위치에 대한 EKF 항법의 3차원 위치오차를 나타낸다. 최대 오차는 3.04 m, 평균 오차는 1.53 m, 그리고 표준편차는 0.26 m 정도로 나타났다. 다음으로 잦은 방향전환이 발생하는 경우의 성능을 평가하기 위해 ‘ㄷ’자 모양의 항해경로를 설정하였으며 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 모선은 초기위치 $[30 m, 30 m, 40 m]^T$ 에서 y 방향으로 잠수정 속도의 2% 속도로 서서히 드리프트 하며, 잠수정은 초기위치 $[1m, 1m, 1m]^T$ 에서 x 방향으로 60 m, z 방향으로 30 m의 거리를 왕복하며 ‘ㄷ’자 경로를 항해하는 것으로 가정하였다. 결과를 보면 이동거리의 증가에도 불구하고 오차는 수렴하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8은 이 경우의



(a) X-Y planes



(b) X-Z planes



True Path EKF Path

(c) Y-Z planes

Fig. 7 Estimated positions the AUV for ‘ㄷ’ path navigation

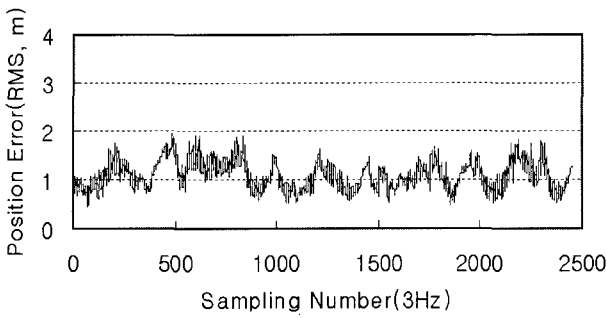


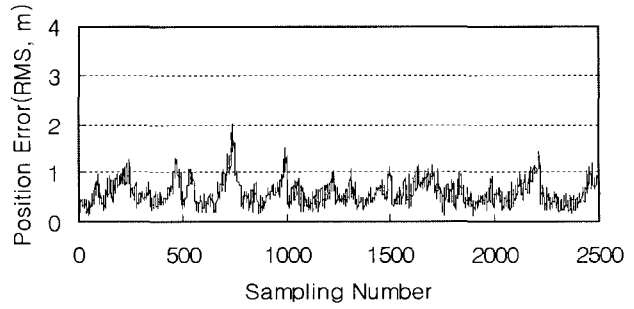
Fig. 8 Position Error of the UUV for 'ㄷ' path navigation
(Max:1.94 m, Avg. : 1.08 m, Std. : 0.28 m)

3차원 위치평가 오차를 나타내며, 최대 2.0 m, 평균 0.63 m, 그리고 표준편차가 0.26 m 정도로 나타났다.

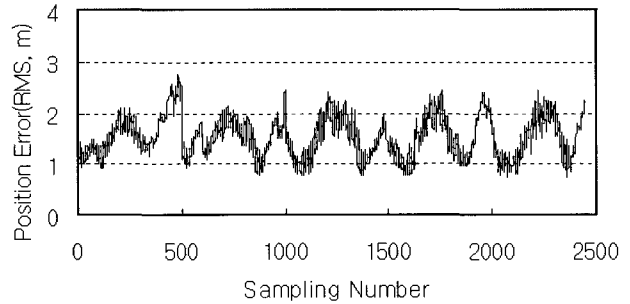
Fig. 9는 위치평가의 샘플링 간격에 따른 제안된 항법의 성능을 나타내고 있다. 시뮬레이션 환경은 Fig. 7과 동일하며 다만 샘플링 주파수를 4 Hz 및 2 Hz로 변화시킨 결과이다. 3 Hz인 Fig. 8의 결과와 비교하면 샘플링 간격이 작을수록 더 양호한 특성을 나타내며 클수록 오차의 크기도 커지는 경향을 보이고 있다. Fig. 10은 바이어스 오차가 Fig. 8에 비해 커지는 경우의 결과이다. Fig. 10의 (a)는 각도센서의 바이어스 오차가 6도로서 Fig. 8의 4도에 비해 커진 경우이며 (b)는 잠수정의 거리증분에 대한 바이어스 오차가 Fig. 8의 거리증분의 2%에 비해 4%로 커진 경우의 결과를 나타낸다. 각 경우 모두 바이어스 오차가 커지면 오차 특성도 나빠지는 결과를 나타내었다.

전술한 바와 같이 본 항법에서는 각도 증분을 이용하므로 경사 및 방위 각 센서의 초기 바이어스오차 특성을 측정하여 보정함으로써 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 0.1sec, 기타 센서의 측정 및 위치평가에 최대 0.1 sec가 소요된다고 가정하면 3 Hz 샘플링 주파수에서 초음파 거리측정에 배정되는 시간이 최대 0.13 sec 정도이므로 수중에서 초음파의 속도는 1,500 m/s를 고려하면 100 m 이내의 거리로 제한된다고 할 수 있다. 결과적으로 제안된 항법은 비관성센서들만을 이용한 추측항법의 오차를 수심 및 모선과의 상대거리 등의 오차 누적이 없는 정보를 결합하여 최소화 하는 방법이다. 장시간 항해시에 추측항법의 오차가 계속해서 누적된다하여도 잠수정의 위치는 모선과의 거리 및 수심이 이루는 원주상에 존재하게 된다. 따라서 이 원주의 반경을 최소화하는 제어를 수행한다면 위치오차의 누적을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

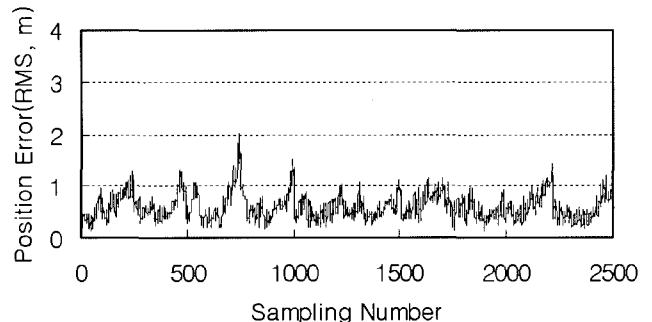


(a) Sampling frequency : 4 Hz
(Max : 2.00 m, Avg. : 0.59 m, Std. : 0.24 m)

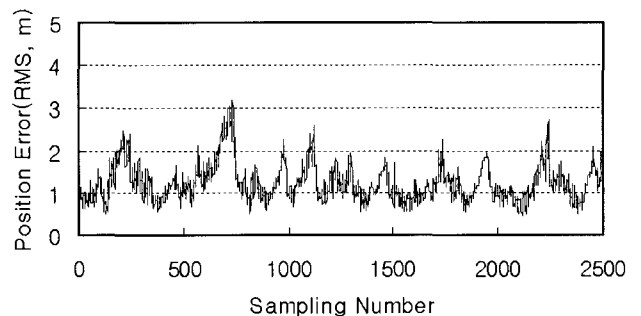


(b) Sampling Frequency : 2 Hz
(Max : 2.74 m, Avg. : 1.53 m, Std. : 0.39 m)

Fig. 9 Position error according to the sampling frequencies



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



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

Fig. 10 Effects of bias errors on the position errors

5. 결 론

본 연구에서는 해양의 각종정보를 측정할 수 있는 무인 해양 탐사선 및 탐사선을 모선으로 한 모선기반 잠수정의 항법 시스템을 제안하였다. 무인탐사선의 항법은 디지털 컴퍼스의 각도 증분과 속도정보를 이용한 이동거리 증분으로부터 위치를 예측하고 확장칼만필터를 이용하여 DGPS 위치정보와 결합하는 방법으로서 실험 결과 각 센서의 특별한 특성 모델링 없이도 DGPS만을 이용한 경우보다 위치 정확도를 높일 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 개발된 무인 탐사선은 대형 탐사선이 접근하기 어려운 해역이나 위험한 지역의 탐사가 가능하고, 해양탐사에 필요한 부대경비가 최소화 될 수 있어 실용성이 있을 것으로 사료된다.

잠수정의 항법은 무인탐사선을 모선으로 하고 모선과의 상대 거리 및 잠수정에 장착된 비관성센서들의 정보만을 이용하여 위치를 평가하는 방법이다. 항법 센서는 비교적 저가이며 데이터 처리가 용이한 디지털 컴퍼스, 수압센서, 그리고 경사센서 등이며 모선과의 상대거리를 측정하기 위해 초음파센서를 이용하였다. 잠수정의 항법은 각 각도센서의 증분과 잠수정의 거리증분으로부터 위치를 예측하고 확장칼만필터를 이용하여 시간의 경과에 따른 오차의 누적이 없는 수심정보와 모선과의 상대거리 정보를 결합하여 최적의 위치를 평가하는 방법이다. 시뮬레이션 결과 제안된 항법은 잡음이 심한 환경에서 잠수정의 이동거리 증가에도 불구하고 위치 오차가 수렴함이 확인되었으며 따라서 이 방법은 천해에서 활동하는 AUV의 자율항법 구현에 효과적으로 적용 될 수 있을 것으로 기대된다.

제안된 항법은 시간에 따른 오차의 누적이 없는 비관성센서만을 이용하며 필터의 입력이 각 샘플링 간격 당 각도 증분 및 거리증분이므로 각 정보의 바이어스 오차 영향을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 잠수정의 동역학적 특성 모델링이나 각 센서의 특성 모델링 없이 구현할 수 있다는 것이 특징이다. 향후 실제 실험역 적용을 위한 연구로는 모선이 이동하는 경우의 항법, 모선 및 잠수정의 경로제어 및 잠수정의 모선 추적제어, 장애물 감지 및 회피, 그리고 잠수정과 모선 사이의 수중통신방법 등이다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원 (R05-2004-000-10712-0)에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

이종무, 이판목, 김시문, 홍석원, 서재원, 성우제 (2003a). "반자율 무인잠수정의 수중 복합항법 시스템의 성능평가를 위한 회 전팔 시험", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 73-80.

이종무, 이판목, 성우제 (2003b). "간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파속도센서 기반의 수중 복합항법 알고리즘", 한국해양공학회지, 제17권, 제6호, pp 83-90.

이판목, 전봉환, 김시문, 이종무, 임용곤, 양승일 (2004). "초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템", 한국 해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 33-39.

Bachmann, E.R. and Healey, A.J. (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.

Black, M.R. and Butler, B. (1994). "Arctic Ocean Trials of Track Point Ultrashort Baseline Acoustic Positioning System", Proc. on IEEE AUV Systems, pp 297-302.

Cristi, R. and Caccia, M.(1995). "A Sonar Approach to AUV Localization", CAMS'95, pp 291-298.

Gelb, A.C. (1973). Applied Optimal Estimation, The MIT Press.

Larsen, M.B. (2000). "High Performance Doppler Inertial Navigation Experimental Results", Oceans 2000 Conf., Vol 2, pp 1449-1456.

Lim, J.H. and Kang, C.U. (2002). "Grid-based Localization of a Mobile Robot using Sonar Sensors", KSME Int. J., Vol 6, No 3, pp 302-309.

Lim, J.H. and Leonard, J.J. (2000). "Mobile Robot Relocation from Echolocation Constraints", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 22, No 9, pp 1035-1041.

Nagashima, Y., Taguchi, N. and Ishimatsu, T. (2002). "Development of Compact Autonomous Underwater Vehicle Using Variable Vector Propeller", J. of Robotics and Mechatronics, Vol 14, No 1, pp 112-117.

Siouris, G. (1993). Aerospace Avionics Systems, A Modern Synthesis, Academic Press Inc., San Diego, California.

Smith, R. and Cheeseman, P. (1990). Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics, Autonomous Robot Vehicles, Springer-Verlag.

Titterton, D.H. and Weston, J.L. (1997). Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd., London.

Vaganay, J., Bellingham, J.G, and Leonard, J.J. (1996). "Outlier Rejection for Autonomous Acoustic Navigation", Proc. on IEEE Robotics and Automation, pp 2174-2182.

Yun, X., Bachmann, E., McGhee, R., Whalen, R., Roberts, R., Knapp, R., Healey, A. and Zyda, M. (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.

2004년 8월 26일 원고 접수

2005년 3월 7일 최종 수정본 채택