

## 반자율무인잠수정의 수중 복합항법 시스템 성능평가를 위한 회전팔 시험

이종무\* · 이판목\* · 김시문\* · 홍석원\* · 서재원\*\* · 성우제\*\*\*

\* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

\*\* 서울대학교 자동화시스템공동연구소

\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과

### Rotating Arm Test for Assessment of an Underwater Hybrid Navigation System for a Semi-Autonomous Underwater Vehicle

CHONG-MOO LEE\*, PAN-MOOK LEE\*, SEA-MOON KIM\*, SEOK-WON HONG\*, JAE-WON SEO\*\* AND WOO-JAE SEONG\*\*\*

\* Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI, Daejeon, Korea,

\*\* Automation and Research Institute, Seoul National University, Seoul, Korea

\*\*\* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

**KEY WORDS:** Hybrid Navigation System 복합항법시스템, Semi-Autonomous Underwater Vehicle 반자율무인잠수정, Inertial Navigation 관성항법, Doppler Velocity Log 초음파 속도계

**ABSTRACT:** This paper presents considerations on the results of the rotating arm test, which was carried out for assessment of an hybrid navigation system for a semi-autonomous underwater vehicle. The navigation system consists of an inertial measurement unit (IMU), an ultra-short baseline (USBL) acoustic navigation sensor and a doppler velocity log (DVL) accompanying a magnetic compass. A navigational system model is derived to include the scale effect and bias errors of the DVL, of which the state equation composed of the navigation states and sensor parameters are 25 in the order. The extended Kalman filter was used to propagate the error covariance. The rotating arm tests were carried out in the Ocean Engineering Basin of KRISO, to generate circular motion. The hybrid underwater navigation system shows good tracking performance against the circular planar motion. Additionally this paper checked the effects of the sampling ratio of the navigation system and the possibility of the dead reckoning with the DVL and the magnetic compass to estimate the position of the vehicle

### 1. 서 론

무인잠수정이 수중에서 운항하기 위해서는 무인잠수정이 어디에 있으며 어디를 가야하는지를 판단하는 것이 필수적이다. 수상의 선박이나 항공기와는 달리 수중의 무인잠수정은 전파의 전달이 어려운 수중을 항해하는 관계로 최근 항법시스템으로 보편화되어 있는 GPS(Global positioning system) 등과 같은 전파 항법 시스템을 제한적으로 밖에 이용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이에 따라 수중의 항법 시스템은 초음파 항법(Acoustic positioning systems, APS)으로써, LBL(Long baseline), SBL(Short baseline), USBL(Ultra-short baseline) 등을 주로 사용해왔으며(Milne, 1983), 관성센서를 초음파 항법 센서의 자세보정에 활용하는 보조항법센서로 사용하곤 한다(Woolven and Field, 1998).

이러한 초음파 항법시스템은 수중전달 초음파의 굴절, 다중 경로 특성 및 산란에 의하여 측정치에 오차가 포함되므로 측정거리에 비례하는 오차를 갖게되며, 또한 데이터 취득 간격이 수초에서 심해의 경우 십초 이상이 소요되기도 한다. 따라서, 초음파항법시스템을 운용하는 경우에도 선체의 운동을 계측하여 초음파 항법시스템의 신호 취득 사이에 무인잠수정의 위치를 추정하기도 한다. 수중에서도 육상에서와 같이 관성센서를 이용한 항법이 행해지지만 무인잠수정에 사용되는 항법센서는 주로 스트랩다운형의 소형 관성센서(Inertial measurement unit, IMU)를 통상 사용하고 있다. 이러한 IMU는 센서의 바이어스 오차특성으로 인하여 시간이 지남에 따라 위치추정 오차가 기하급수적으로 늘어나므로 수심센서, 방위각센서, 자세센서, 초음파속도계(Doppler velocity log, DVL) 또는 LBL/USBL 등으로부터 얻어지는 위치추정치에 이용한 보정이 반드시 요구된다. 최근의 연구동향으로 무인잠수정이 수면에 부상하였을 때 GPS를 이용하여 위치를 보정하며(Yun et al., 1999), 초음파 항법시스템과 함께 IMU를 융합하거나, DVL을 이용한 복합항법시스템이 연구되고 있다(Larsen, 2000; Marco and

제1저자 이종무 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171  
042-868-7533 jmlee@kriso.re.kr

Healey, 2001; Kinsey and Whitcomb, 2003).

한국해양연구원에서는 무인잠수정의 수중 정밀항법을 위한 알고리즘을 개발해 왔으며, 최근에 초음파속도계 DVL과 관성 센서 IMU를 근간으로 하며 간접되먹임 칼만 필터를 이용하는 수중 복합항법시스템(이종무 등, 2003)을 개발한 바 있다. 본 논문에서는 한국해양연구원의 해양수조에 설치된 회전팔을 이용하여 개발된 수중 복합항법시스템에 대하여 시스템을 검증하고자 한다. 회전팔 시험은 비록 평면상이지만 정확한 이동 경로를 알 수 있으므로 이를 항법시스템의 결과와 비교함으로써 항법 시스템의 성능을 평가 할 수 있다. 보조항법센서로써 DVL 이외에도 심도계와 방위각 센서를 이용하여 측정 데이터를 구성하였다. 무인잠수정에 탑재되는 프로세서는 영상정보를 비롯하여 초음파 이미지 정보를 처리하는 경우에는 계산량이 늘어나게 되므로, 본 논문에서는 수중 복합항법 시스템의 샘플링 레이트 변화에 따른 항법특성을 함께 고찰하고자 한다. 또한, 본 논문에서는 DVL과 방위각 센서만을 이용한 추측항법을 구성하여 이의 항법특성을 검토하고자 한다.

## 2. 간접되먹임 오차법을 이용한 칼만필터

항법시스템은 가속도 센서와 자이로의 바이어스 오차, 스케일 오차 비정렬 오차 등에 의하여 오차가 발생하게 된다. 시간에 따라 누적되는 스트랩다운 IMU 시스템의 항법 오차는 Fig. 1과 같은 구조의 간접되먹임 방식으로 보정된다.

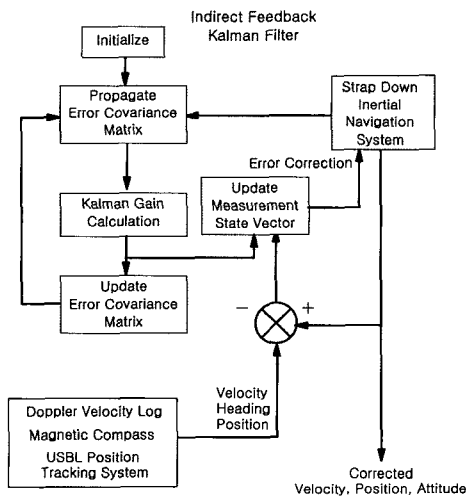


Fig. 1 Block diagram of the indirect feedback kalman filter of the hybrid navigation system for an unmanned underwater vehicle

간접되먹임 방식은 항법 정보의 추정치에 포함된 오차를 추정하여 이를 보정함으로써 최종 항법해를 얻는 방식이다. 항법 오차의 추정은 칼만필터를 통하여 이루어지며, 항법오차 모델은 USBL 오차모델을 포함하여 다음과 같이 얻어진다(이종무 등, 2003).

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t), w \sim N(0, Q(t)) \quad (1)$$

여기서,

$$x = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \quad \delta V_n^T \quad \phi^T \quad \nabla_a^T \quad \epsilon_g^T \quad s_b \quad h_b \quad a_v \quad \psi_b \quad s_\theta]^T$$

$$w = [0_{1 \times 3} \quad w_a^T \quad w_g^T \quad 0_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 2} \quad 0 \quad 0_{1 \times 3} \quad 0 \quad 0_{1 \times 3}]^T$$

상기식에서  $x(t)$ 는 무인잠수정의 위도오차, 경도오차, 심도 오차, 속도오차 및 자세오차로 구성된 항법오차와 USBL의 바이어스오차, 심도계의 바이어스오차, 도플러 센서의 변환계수 오차, 자기속도계의 바이어스오차, USBL 기저선의 비정렬오차로 구성된 센서오차로 이루어진 25차 상태변수이다.  $w(t)$ 는 평균이 0이고 공분산이  $Q(t)$ 인 시스템의 공정잡음이며 가속도계와 자이로의 측정오차를 나타낸다.

심도계와 방위각센서 및 DVL 계측신호로부터 측정오차식을 유도하고 USBL의 위치추정오차를 백색잡음으로 모델링한 측정잡음을 포함하면 칼만필터의 측정 모델식이 얻어진다.

$$y_k = \begin{bmatrix} \hat{n} - h_{meas} \\ \hat{\nabla}^n - V_{meas} \\ \hat{\phi} - \phi_{meas} \\ \hat{L} - L_{meas} \\ \hat{\gamma} - l_{meas} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} 0_{1 \times 2} & 1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 2} & 0 & 0_{1 \times 6} & 0_{1 \times 2} & -1 & 0_{1 \times 3} & 0 & 0_{1 \times 3} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 1} & I_{3 \times 3} & -V^{n \times} & 0_{1 \times 2} & 0_{3 \times 6} & 0_{3 \times 2} & 0 & C_b^n & 0 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{1 \times 2} & 0 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 2} & -1 & 0_{1 \times 6} & 0_{1 \times 2} & 0 & 0_{1 \times 3} & -1 & 0_{1 \times 3} \\ I_{2 \times 2} & & & 0_{2 \times 13} & & & -I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 1} & Pos^x \end{bmatrix} x(t_k)$$

$$+ \begin{bmatrix} v_h(t) \\ v_v(t) \\ v_{avg}(t) \\ v_{ssb}(t) \end{bmatrix}$$

$$\text{여기서, } Pos^x = \begin{bmatrix} 0 & h & -\int v_e dt \\ -h & 0 & \int v_n dt \end{bmatrix}$$

식(1)과 (2)로 구성된 칼만필터로부터 필터의 오차공분산을 계산하여 각 상태변수의 공분산을 얻을 수 있다. 항법시스템은 외부신호의 입력이 주어지지 않을 경우에는 칼만필터를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 외부의 측정 신호가 있는 경우에 오차를 update하고 상태변수를 보정하게 된다(이종무 등, 2003).

## 3. 수중 복합항법시스템 성능평가를 위한 회전팔 시험

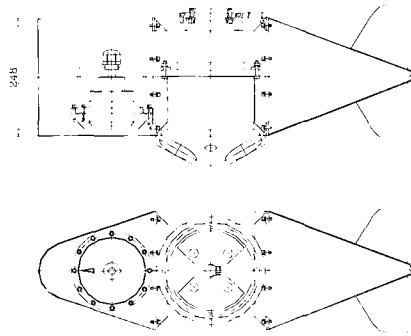
### 3.1 항법센서의 특성

#### (1) IMU

본 논문에서 사용된 관성센서는 미국의 하니웰사의 HG1700AG11이며, 3축의 Ring Laser Gyro와 3축의 Resonant Beam 방식의 가속도 센서를 내장하고 있다. 이 IMU의 상세한 사양은 Table 1에 표시된 바와 같다.

**Table 1** Specification of the IMU HG1700AG11

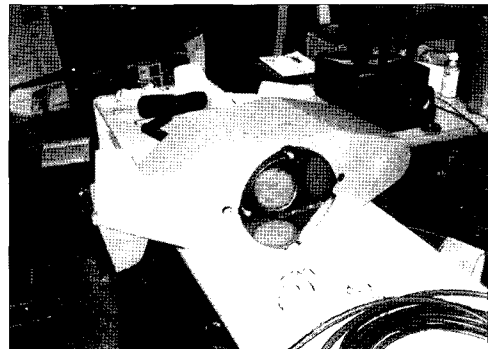
	Accelerometer	Gyro
Operating Range	±37g	±1074.° /s
Bias (1σ)	1mg	1.° /h
Random Noise(1σ)	50mg	0.3.° /h
Random Walk	0.065ft/s/√h	0.125.° /√h
Output Frequency	100Hz	
Interface	RS422, SDLC	



**Fig. 2** Drawing of the fish

**(2) DVL**

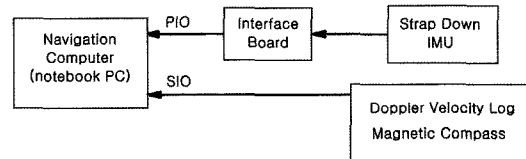
본 시험에서 사용된 초음파 속도계(DVL)는 미국의 RD Instruments사의 제품으로 300kHz의 초음파를 사용하며 서로 대칭인 4개의 센서가 경사각을 갖고 설치되어 수중에서 선체의 운동에 따른 초음파의 도플러 효과를 이용하여 3축의 속도를 측정한다. 이 DVL은 flux gate 형의 방위계와 경사센서를 이용하여 방위각, 횡요각(roll), 전후 경사각(pitch)을 측정하여 물체좌표계에서 측정된 속도를 항법좌표계의 속도로 자체적으로 변환이 가능하다. 또한, 이 DVL은 수온을 측정하여 온도변화에 따른 음속변화를 보정하는 기능을 내장하고 있다. RDI의 DVL 상세 사양은 다음의 Table 2와 같다.



**Fig. 3** Photo of a fish for the navigation system

**Table 2** Specification of the DVL RDI workhorse navigator 300

Available Frequency	307.200kHz	
Minimum / Maximum Altitude	1.0m / 200m	
Precision	v=1.0m/s	0.3cm/s
	v=3.0m/s	0.6cm/s
	v=5.0m/s	0.8cm/s
Accuracy	±0.4%±0.4 cm/s	
Maximum Ping Rate	0.5 to 7 Hz	
Interface	RS232	



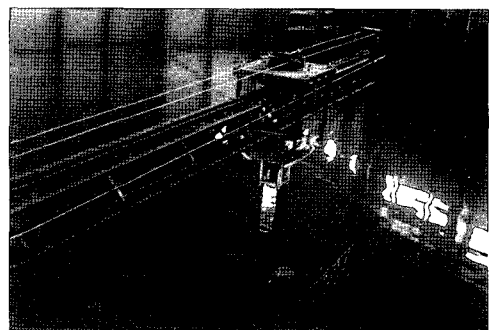
**Fig. 4** Block diagram of the rotating arm test for the hybrid navigation system

**3.2 회전팔 시험 장치의 구성 및 회전 시험**

회전팔 시험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 해양수조에서 수행되었다. 항법시험을 위하여 물고기형태의 소형 항체에 IMU와 DVL 센서를 탑재하였으며, 이 항체를 해양공학 수조의 회전 팔(Rotating Arm)에 스트럿을 이용하여 부착하였다. 항법성능 만의 시험이므로 항체에는 여타의 추진장치가 붙지 않으며 스트럿에 고정되어 있다. DVL은 자체 내압용기가 있으므로 이를 수중 항체 바닥에 부착하였고, IMU는 방수를 위해 별도의 내압 방수 용기를 제작하여 항체 내부에 설치하였다. Fig. 2와 3은 각각 항법 시스템 시험을 위한 항체의 도면과 사진을 나타낸다.

회전팔은 해양공학수조의 소형 전차 중앙부 하단에 설치되었고, 전차 상부에 설치된 구동모터의 회전수를 조정하여 시험이 이루어졌다. 회전팔은 중심으로부터의 최대길이가 10미터이며 별도의 모터를 이용하여 위치를 가변할 수 있다. 본 논문에서는 항체를 8미터 지점에 설치하였고, 수중항체의 기준속도를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0m/s로 정하여 실험이 수행되었다. Fig. 5는 회전팔에 장착된 수중항체의 전경을 나타낸다.

DVL과 IMU의 신호취득은 노트북을 이용하였으며, DVL 신호는 직렬포트를 통하여, IMU의 신호는 SDLC(Synchronous, Data Link Control) 신호를 병렬 데이터로 변환하는 자체제작된 보드를 통하여 취득되어졌다. IMU와 DVL 신호는 각각 100Hz와 2Hz의 샘플링 간격으로 저장되었으며, 항법 프로그램으로 후처리되었다. Fig. 4는 회전팔 시험을 위한 센서의 연결도를 나타내는 개략도이다.



**Fig. 5** Photograph of the rotating arm test setting in the ocean engineering basin of KRISO, KORDI

시험은 신호취득 초기 10초 동안에 수중항체가 정지 상태를 유지하여 항법 프로그램에서 초기정렬을 수행할 수 있게 하였으며, 10초 이후에 서서히 회전수를 높여 기준속도에 다다를 때까지 속도를 올리고 이후에는 정속으로 유지하며 약 10분간 연속 데이터를 취득하였다. 항법을 위한 좌표계 설정은 항체의 전진방향을 x, 항체의 우현방향을 y, 지구중력방향을 z로 정하였다.

#### 4. 항법성능 실험결과 및 고찰

시험은 5가지의 속도에 대하여 이루어졌으나 본 논문에서는 대표적인 선속도인 1.5m/s의 조건에 대하여 심도있게 고찰하고자 한다. Fig. 6는 1.5m/s 속도에 대한 수중 항체의 계측 데이터를 나타내는 것으로써, IMU로부터 취득된 가속도와 자이로 신호와, DVL로부터 얻어진 속도와 자세를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 IMU 신호는 100Hz, DVL 신호 및 방위각 신호는 2Hz로 취득한 결과이다. Fig. 6에서 20초 근방에서 항체가 초기 정지상태에서 전진하기 시작함에 따라, x 방향의 가속도에 변화를 일어났으며, y 방향으로 원심력이 작용하고, z 방향의 회전각속도가 발행한 것을 알 수 있다. 그림에서 IMU의 각 관성센서의 신호는 항체의 속도가 증가함에 따라 유체 항력이 증가하고 보오택스 발생에 기인하는 진동으로 인하여 노이즈 레벨이 2배 정도 커진 것을 보이고 있다.

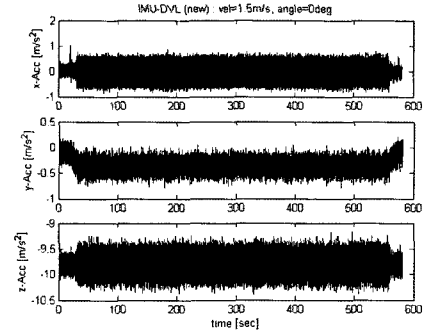
##### 4.1 IMU 단독항법 및 복합항법 성능 고찰

항법오차로 구성된 칼만필터의 시스템 모델 (1)과 항법오차의 측정모델 (2)를 이용하여 항법 알고리즘을 구동하였다. 본 논문의 항법 알고리즘은 초기 10초간의 개략정렬을 통하여 항체의 자세와 방위각을 추정할 수 있으나, 본 실험에서는 초기의 항체 선속도를 이미 알고 있기 때문에 기지의 방위값을 지정하였다.

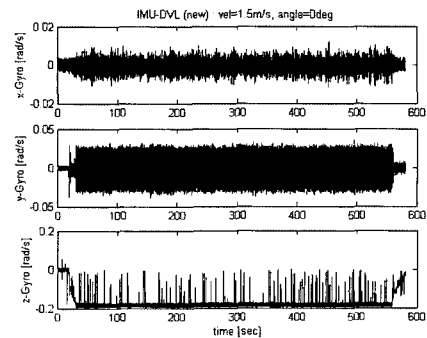
Fig. 7은 DVL의 측정치가 주어지지 않아 IMU 단독으로 오차의 상태변수를 추정한 결과를 나타낸다. 항법 알고리즘은 100Hz로 취득되는 관성신호만을 이용하여 위치를 추정하였다. 그림에서 위치추정 오차는 기하급수적으로 발산하고 있는 결과를 보이고 있다. 이러한 발산현상은 IMU의 가속도 및 자이로의 바이어스 오차와 스케일 오차에 따라 기인하는 것으로써, 보다 정밀한 관성센서를 사용하더라도 발산하는 현상이 늦춰질 뿐 현상 자체가 사라지는는 않게 되므로 오차를 보정하기 위한 외부 계측신호가 반드시 필요하다.

Fig. 8은 2Hz로 얻어지는 초음파 속도계와 지자기센서의 신호를 이용하여 오차공분산의 update와 상태변수의 보정이 이루어지는 경우의 항법 결과를 보이고 있다. Fig. 7에서 사용하였던 동일한 IMU를 이용한 관성항법 시스템에 대하여 보조항법 센서로 초음파 속도계를 이용하는 경우의 복합항법시스템은 약 10분 경과한 후의 위치 추정 오차가 1.0m 범위 이내에 존재하여 우수한 항법 성능을 보였다. 이 결과로부터 수중의 항법을 위해서는 속도신호가 반드시 필요하다는 결론을 얻을 수 있으며, 최근에 수중항법을 연구하는 분야에서 DVL을 이용하여 LBL의 항법 성능을 향상시키고 IMU와 LBL 및 GPS를

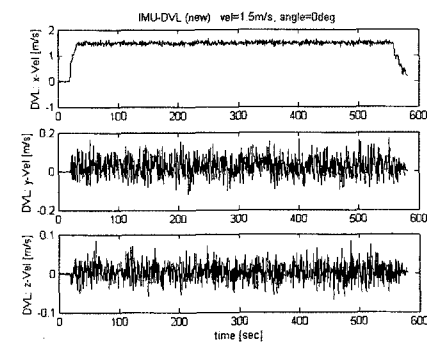
융합하여 보다 정밀도 높은 수중 항체의 위치추적에 적용하는 사례(Kinsey and Whitcomb, 2003; Larsen, 2000; Marco and Healey, 2001)들은 합리적인 방법으로 판단된다.



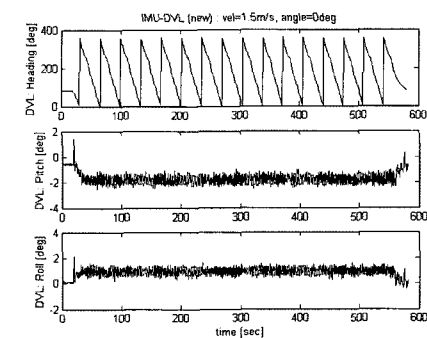
(a) Accelerations



(b) Gyros

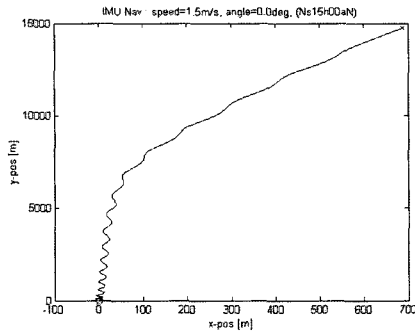


(c) Velocities

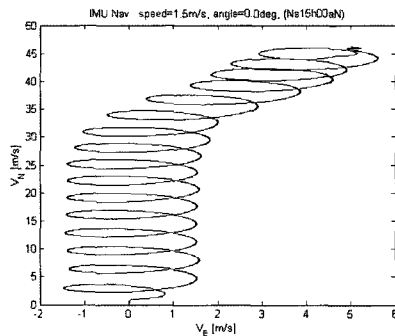


(d) Heading and Attitudes

Fig. 6 Rotating arm test results of a fish equipped with an IMU and a DVL



(a) Estimated position



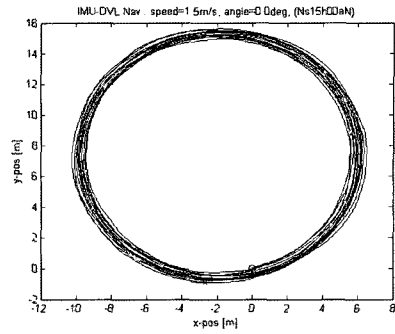
(b) Estimated velocities

Fig. 7 Estimated positions and velocities of the fish with the IMU-only navigation system

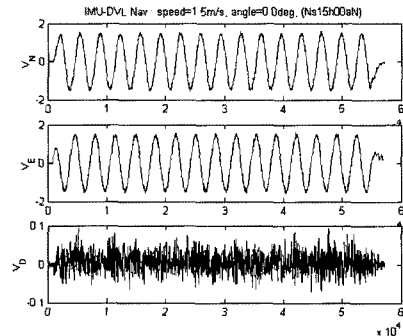
4.2 DVL 단독항법 성능고찰

방위각 측정 센서와 초음파 속도계를 이용한 추측항법(Dead Reckoning)에 관하여 검토하기 위하여 우선 방위각 센서의 특성을 검토하였다. Fig. 6의 (d)에서 보이는 방위각은 선속도가 일정한 상태에서 직선적인 변화를 보이지 않고 외란 성분이 포함되어 있다. 이는 해양수조의 외부 구조물과 해양수조의 전차가 철구조물로 만들어져서 자장의 변화를 유발하기 때문이다. 일반적으로 무인잠수정의 내부는 각종 전자장비가 작동하면서 발생하는 자기장의 변화로 인하여 자기 컴퍼스의 방위각을 그대로 사용할 수 없고 이를 보정하여 사용해야만 한다. Fig. 9의 (a)는 수중 항체가 초기정렬을 위하여 정지한 상태의 방위각 신호를 나타내며, (b)의 윗그림은 수중 항체가 회전팔에 의하여 회전하고 있는 상태의 방위각을 나타내는 그림이다. (b)의 아래그림은 방위각의 평균변화율을 제거한 상태의 오차를 나타내는 것으로써 당초 0.1° 오차 범위 이내의 방위각 신호가 ±10° 이상의 오차를 보이고 있다. 따라서 방위각 센서를 이용한 위치 추정을 할 경우에는 자장변화에 따른 방위각 오차를 보정하는 것이 반드시 요구된다.

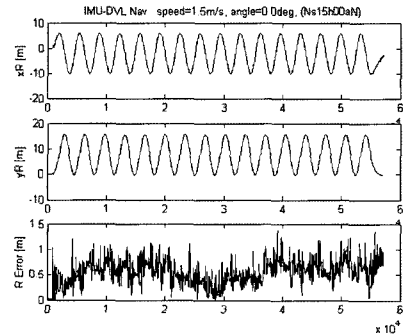
Fig. 10은 DVL과 DVL에 장착된 방위각 센서를 이용한 추측항법의 결과를 보이고 있다. 방위각에 오차 성분이 포함되어 있으므로 변형된 원의 형태를 그리면서 드리프트 하는 결과를 보이고 있다. 한편 수심방향으로도 드리프트하는 양이 크게 발생하고 있으며, 이는 DVL에서 계측되는 속도에도 바이어스 오차 및 스케일 오차가 존재하기 때문이다. 본 논문에서 사용한 DVL의 오차는 0.4%±0.4cm/s가 되므로, DVL과 방위각자이로만



(a) Estimated position



(b) Estimated velocities

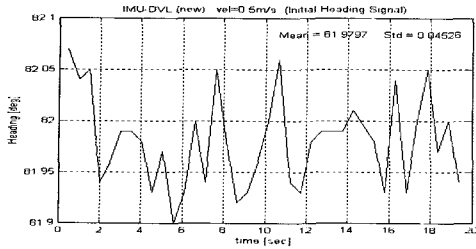


(c) Estimated velocities

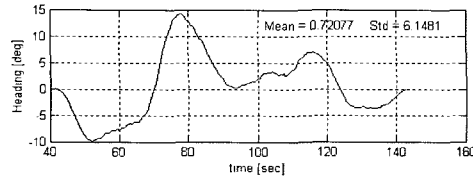
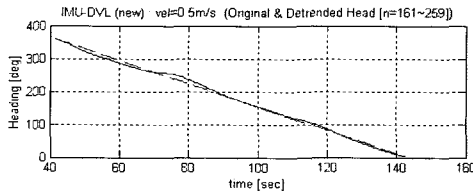
Fig. 8 Estimated positions and velocities of the fish with the hybrid underwater navigation system

을 이용하는 항법시스템의 경우에는 수심방향은 침도계로 쉽게 보정이 가능하나 수평면의 위치보정은 용이하지 않다. 따라서, 자이로를 이용하여 방위각 오차를 보정한다고 하여도 DVL과 방위각 자이로만을 이용하여 항법 시스템을 구성할 경우에는 위치추정에는 시간이 증가하면서 위치추정 오차가 크게 발생하게 되어 실용적이지 못하다.

한편, DVL과 방위각 자이로를 이용한 항법시스템에서의 DVL의 샘플링 레이트 변화에 따른 항법 성능의 변화를 검토하였다. Fig. 11은 DVL의 샘플링 레이트를 2Hz에서 0.4Hz로 낮추었을 경우의 위치추정 오차를 나타내는 그림으로써, 위치추정오차가 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다. 본 논문에서는 생략하였으나 0.2Hz로 낮추더라도 거의 동일한 결과를 보여 DVL과 방위각 센서를 이용하여 추측항법 시스템을 구현하는 경우에는 샘플링 레이트를 변화시키더라도 항법시스템의 성능에는 크게 영향이 없다.



(a) Static errors



(b) Dynamic errors

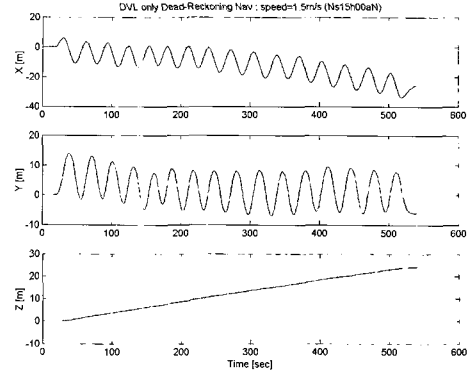
Fig. 9 Static and dynamic errors of the magnetic compass embedded in the DVL

4.3 DVL 샘플링 주파수의 영향

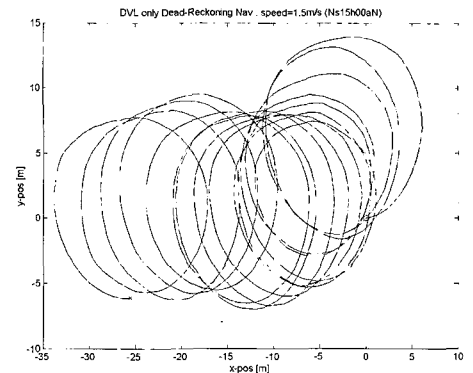
본 절에서는 DVL의 샘플링 레이트에 따른 항법 시스템의 성능 변화에 대하여 고찰하였다. Fig. 12는 IMU의 샘플링 레이트는 100Hz로 고정시키고 DVL의 샘플링 레이트를 1.0Hz, 0.5Hz 및 0.2Hz로 낮추는 경우의 항법성능을 나타낸 결과이다. 그림에서 DVL의 샘플링 레이트가 떨어짐에 따라 위치추정 오차가 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 DVL에서 얻어지는 속도 오차와 방위각 오차의 데이터 시간간격이 길어질수록 IMU의 위치추정 오차가 제곱에 비례하여 증가하기 때문으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 사용한 중저급의 IMU를 이용하는 경우에는 복합항법시스템의 성능을 높이기 위해서는 보조항법 센서에서 얻어지는 데이터의 레이트를 높일 필요가 있다.

4.4 IMU 샘플링 주파수의 영향

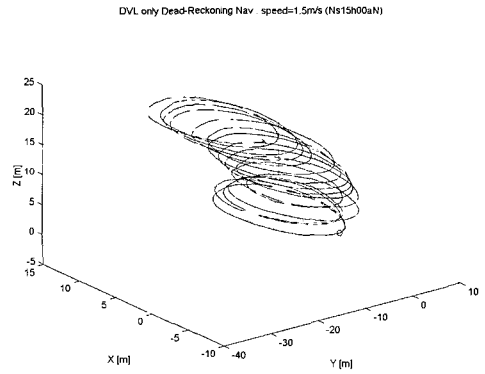
본 절에서는 IMU의 샘플링 레이트가 항법 시스템의 성능에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 13은 DVL의 계측 시간 간격을 0.5초 즉, 2.0Hz로 고정하고 IMU에서 얻어지는 데이터의 레이트를 20Hz, 10Hz 및 4Hz로 낮추는 경우의 복합항법시스템의 성능을 나타내는 그림이다. Fig. 8(a)와 Fig. 13(a)를 비교해 보면, IMU의 샘플링 레이트를 100Hz에서 20Hz로 낮추는 경우에는 위치추정 오차가 약간 증가하는 정도의 영향이 있음을 알 수 있다. 하지만 10Hz부터 그 이하의 샘플링 레이트에서는 위치추정 오차가 크게 증가하였다. 이는 수중 항체의 운동특성에 기인하는 것으로써 항체의 속도에 따른 위치 및 자세변화의 주파수 대역폭 보다 넓은 주파수 대역폭에서는 IMU의 샘플링 레이트를 낮추더라도 항법시스템의 성능에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.



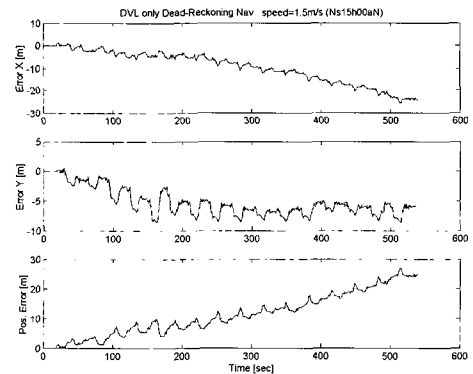
(a) Estimated position



(b) Estimated position in x-y plan

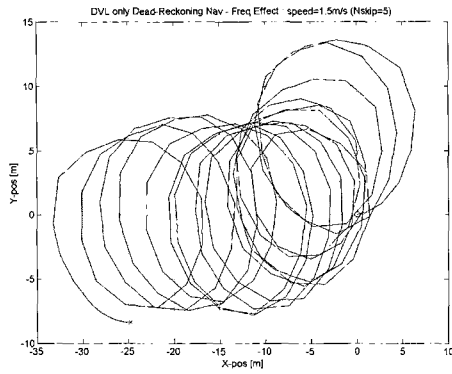


(c) 3-D trajectories

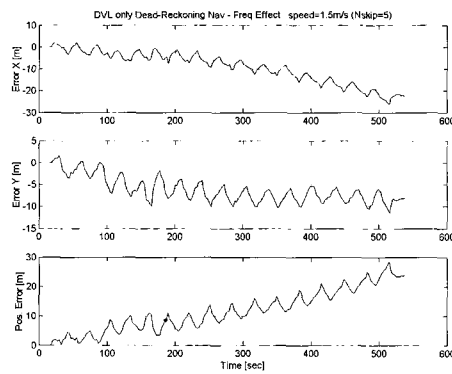


(d) Tracking errors

Fig. 10 Tracking performance with DVL-only navigation



(a) Estimated position in x-y plan

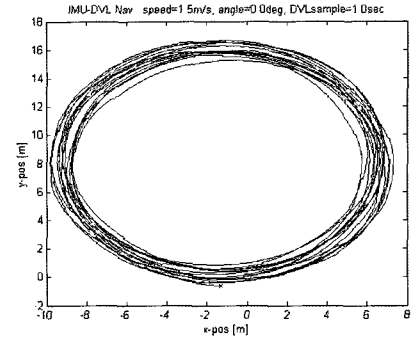


(b) Tracking Errors

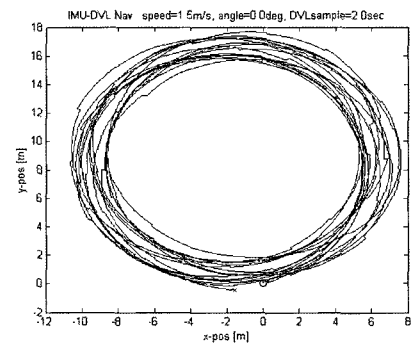
Fig. 11 Estimated position and errors according to the change of the sampling interval of DVL with DVL-only navigation (sampling interval : 2.5 sec)

#### 4. 결 론

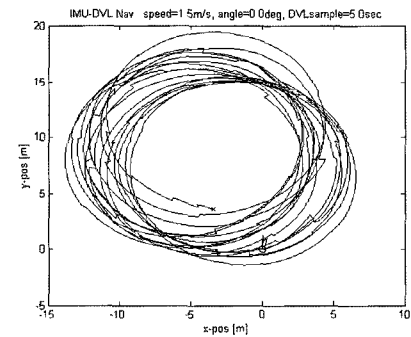
본 연구의 회전팔 시험을 통하여, 간접되먹임 칼만필터를 이용하는 관성항법시스템에 초음파 속도계 및 방위각 센서의 계측신호를 측정 오차로 하는 수중 복합항법시스템은 무인잠수정의 항법시스템으로 유용하게 사용될 수 있음을 밝혔다. 초음파속도계와 스트랩다운 관성센서를 융합한 수중 복합항법시스템은 소형이며 저소비전력 특성을 가짐으로써 장시간에 걸쳐 수중에서 활동해야하는 무인잠수정의 항법시스템으로 바람직하다. 또한, 본 논문은 초음파속도계와 방위각 센서만을 이용한 추측항법의 특성을 비교하여 수중항법으로의 활용성을 검토하였으며, 이 추측항법은 센서특성에 기인하는 오차가 누적됨을 알 수 있었다. 한편, 본 논문은 수중 복합항법 시스템의 샘플링 레이트 변화에 따른 항법특성을 고찰하였다. 관성항법 센서는 시스템의 주파수 대역보다 높은 영역에서는 샘플링 레이트가 항법 성능에 그다지 영향을 미치지 않으며, 속도계 신호는 높은 주파수의 보정 신호를 활용함으로써 보다 정확하게 위치를 추정함을 알 수 있었다.



(a) Sampling Interval : 1.0 sec



(b) Sampling Interval : 2.0 sec



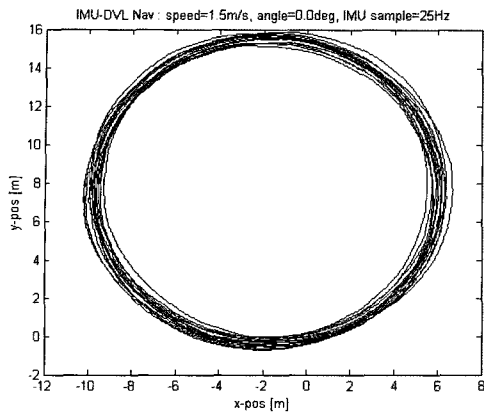
(c) Sampling Interval : 5.0 sec

Fig. 12 Tracking performance according to the change of the sampling interval of DVL with the hybrid underwater navigation system

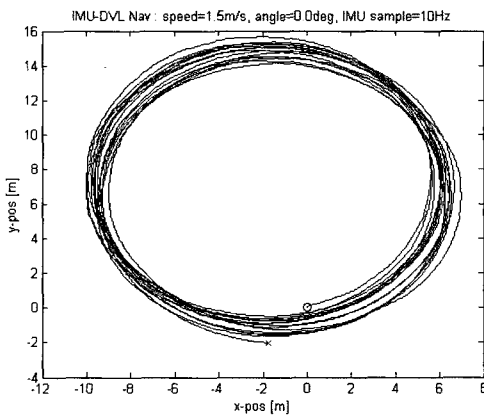
따라서, 관성센서와 초음파 속도센서를 융합한 복합항법시스템이 무인잠수정의 항법시스템으로 적합하다고 결론지을 수 있다.

#### 후 기

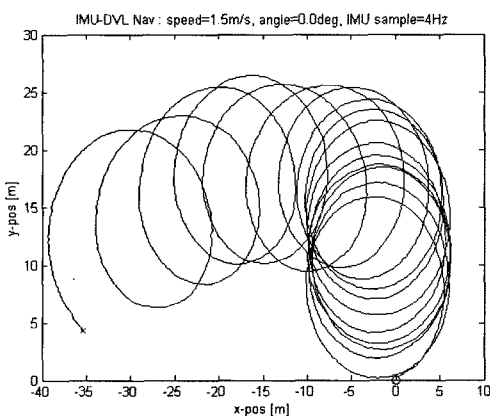
본 연구는 과학기술부의 민군겸용기술개발사업인 “무인잠수정의 운항제어 및 매니퓰레이터 기술 개발”과 해양수산부의 “차세대 심해용 무인잠수정 개발” 사업의 일환으로 수행된 연구결과임을 밝힌다.



(a) Sampling frequency : 20 Hz



(b) Sampling frequency : 10 Hz



(c) Sampling frequency : 4 Hz

**Fig. 13** Tracking performance according to the change of the sampling frequency of IMU with the hybrid underwater navigation system

## 참고 문헌

- 이종무, 이관목, 성우제 (2003). "간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파 속도센서 기반의 수중 복합항법 시스템", 한국해양공학회 2003 춘계학술대회논문집, 제주대학교, 5.23-24.
- An, E., Healey, A.J., Park, J. and Smith, S.M. (1997). "Asynchronous Data Fusion for AUV Navigation via Heuristic Fuzzy Filtering Techniques", Proc. of Ocean 97 Conference, Vol 1, pp. 397-402.
- Gelb, A. (1974). Applied Optimal Estimation, MIT, Cambridge.
- Honeywell (2001). User's Manual for HG1700 IMU, Aerospace Electronic Systems, Honeywell, Sensor and Guidance Products 2600 Ridgway Parkway, Minneapolis, MN 55413.
- Kinsey, J.C. and Whitcomb, L.L. (2003). "Preliminary Field Experience with the DVLNAV Integrated Navigation System for Manned and Unmanned Submersibles", 1st IFAC Workshop on Guidance and Control of Underwater Vehicle, April 9-11.
- Larsen, M.B. (2000). "Synthetic Long Baseline Navigation of Underwater Vehicles", Proc. of Oceans 2000 Conference, Vol 3, pp 2043-2050.
- Marco, D.B. and Healey, A.J. (2001). "Command, Control, and Navigation Experimental Results with the NPS ARIES AUV," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol 26 No 4, pp 466-476.
- Milne, P.H. (1983). Underwater Acoustic Positioning Systems, Gulf Publishing Company.
- RD Instruments Inc. (1997). Acoustic Doppler Current Profilers - Workhorse Navigator Doppler Velocity Log Technical Manual, P/N 957-6023-00, October.
- Titterton, D.H. and Weston, J.L. (1997). Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Pegerinus, London.
- Woolven, S. and Field, M. (1998). "POS/SV - An Aided Inertial Navigation System for Submersible Vehicles," Proc. of Oceans '98 Conference, Vol 1, pp 103-107.
- Yun, X., Bachmann, E.R., McGhee, R.B., Whalen, R.H., Roberts, R.L., Knapp, R.G., Healey, A.J. and Zyda, M.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.

2003년 6월 18일 원고 접수

2003년 7월 25일 최종 수정본 채택