

고속 자율 무인잠수정 적용을 위한 MEMS 기술기반 자세 측정 장치 개발

황아롬*[†] · 안남현** · 윤선일***

*, ** 거제대학교, *** LIG 넥스원(주)

Development of Attitude Heading Reference System based on MEMS for High Speed Autonomous Underwater Vehicle

A-Rom Hwang*[†] · Nam-Hyun Ahn** · Seon-Il Yoon***

*, ** Koje College, Geoje, 656-701, Korea

*** LIG Nex1 Co. Ltd., Seongnam, 463-400, Korea

요 약 : 본 연구는 빠른 운항 속도와 짧은 운용 시간을 요구하는 임무에 활용될 저가 소형 자율 무인잠수정에 고가 대형 관성 측정 장치를 대신하여 사용할 수 있는 저가 소형 자세 측정 장치 개발 및 성능 검증을 수행하였다. 저가 소형 자세 측정 장치 개발을 위해서 MEMS 기술을 적용한 gyro, accelerometer 및 magnetometer 채택하여 MEMS 기반 하드웨어를 제작하였으며, 좌표 변환 공식과 칼만 필터를 적용하여 자세 계산 알고리즘을 구현하였다. 또한 개발된 MEMS 기반 자세 측정 장치에 대한 기본 성능 검증을 위한 지자기 센서 검증 시험, 정적 자세 시험, 차량 시험, 운동 모사 장치 시험을 수행하였으며, 각각 시험 결과를 제시하였다. 지자기센서 검증 시험 결과 외부 자기장 보정을 통하면 개발된 MEMS 기반 자세 측정 장치의 측정 결과가 외부 자기장에 강인함을 확인하였으며, 정적 자세 시험 및 차량 시험을 통하여 자세 변화가 크지 않는 환경에서 자세 측정 오차가 0.5°/hr 임을 확인하였다. 운동 모사 장치 시험을 통하여 5분 내외 자세 변화가 큰 운동 중에도 자세 측정 오차가 발산하지 않고 1°/hr 이내임을 확인하였다. 상기 시험 결과로부터 개발된 MEMS 기반 자세 측정 장치가 목표 성능인 1°/hr 이내 roll, pitch, yaw 오차를 보여주고 있음 확인하였으며, 이로부터 20분 내외 운용 시간 동안 정확한 자세 정보 제공 가능성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 자세 측정 장치, 자율 무인잠수정, 마이크로 전자 기계 시스템, 성능 검증 시험, 운동 모사 장치, 칼만 필터

Abstract : This paper proposes the performance evaluation test of attitude heading reference system (AHRS) suitable for small high speed autonomous underwater vehicle(AUV). Although IMU can provide the detail attitude information, it is sometime not suitable for small AUV with short operation time in view of price and the electrical power consumption. One of alternative for tactical grade IMU is the AHRS based micro-machined electro mechanical system(MEMS) which can overcome many problems that have inhibited the adoption of inertial system for small AUV such as cost and power consumption. A cost effective and small size AHRS which incorporates measurements from 3-axis MEMS gyroscopes, accelerometers, and 3-axis magnetometers has been developed to provide a complete attitude solution for AUV and the attitude calculation algorithm is derived based the coordinate transform equation and Kalman filter. The developed AHRS was validated through various performance tests as like the magnetometer calibration, operating experiments using land mobile vehicle and flight motion simulator (FMS). The test of magnetometer calibration shows the developed MEMS AHRS is robust to the external magnetic field change and the test with land vehicle proves the leveling error of developed MEMS AHRS is below 0.5 °/hr. The results of FMS test shows the fact that AHRS provides the measurement with 0.5 °/hr error during 5 minutes operation time. These results of performance evaluation tests showed that the developed AHRS provides attitude information which error of roll and pitch are below 1° and the error of yaw is below 5° and satisfies the required specification.. It is expected that developed AHRS can provide the precise attitude measurement under sea trial with real AUV.

Key Words : Attitude heading reference system, Autonomous underwater vehicle, Micro electro mechanical system, Performance evaluation test, Flight motion simulator, Kalman filter

[†] Corresponding Author : aromhwang@koje.ac.kr, 055-680-1579

1. 서론

해양 플랜트 산업이 지속적으로 발전함에 따라 석유 탐사 및 시추 작업 환경에서 요구되는 수중 작업에 잠수부를 대신하여 위험한 환경에서도 장시간 사용이 가능한 수중 운동체에 대한 다양한 수요가 발생하고 있으며, 이러한 요구를 만족하는 새로운 수중 운동체 개발을 위한 많은 연구 활동이 활발하게 이루어지고 있다 (Yuh, 2000; Showalter, 2004). 수중 운동체 중 운용자의 개입이 최소화되어 스스로 자율 운항 로직에 의해서 운용 가능한 자율 무인잠수정(Autonomous underwater vehicle: AUV)에 대한 수요는 해양 플랜트 산업과 같은 민간 부분과 기뢰탐색작전과 같은 국방 분야에서 증대하고 있다. 자율 운항해야 하는 무인잠수정에서 가장 중요한 기술은 외부 도움 없이 스스로 운동 및 위치를 제어하는 자율 제어 기술이라고 할 수 있기 때문에 무인잠수정의 항법과 자율제어 기술에 많은 연구들이 국내외적으로 진행되어 왔다 (Kim et al., 2009; Hwang and Seong, 2012; Hwang et al., 2012; Negahdaripour et al., 2011; Hwang et al., 2009; Lee et al., 2005). 자율 무인 잠수정에 가장 많이 채택되고 있는 관성항법시스템(Inertial Navigation System: INS)은 관성 측정 장치 (Inertial Measurement Unit: IMU)을 이용하여 관성의 변화를 측정하여 위치, 속도 및 자세를 계산할 수 있는데, 외부의 도움 없이 독립적인 항법을 수행하며 높은 해상도와 짧은 출력 주기로 데이터 제공이 가능하다는 장점을 가지고 있는 반면, IMU의 바이어스 등과 같은 오차와 적분 방식의 항법 알고리즘으로 인해 시간이 지남에 따라 항법오차가 제한 없이 발산할 수 있다는 단점을 가지고 있다. INS을 대신하여 사용할 수 있는 장비 중 하나가 자세 측정 장치(Attitude heading reference system: AHRS) 이다(Titterton and Weston, 1997; Park and Lee, 2008). INS는 위치, 속도, 자세 등을 제공할 수 있지만, 자체 bias 오차가 1° 이하인 전술급 자이로와 같은 고가이며 정밀도 높은 IMU가 필요하기 때문에 가격이 비싸며 계산 과정이 매우 복잡한 반면, AHRS는 자세만 제공 가능하지만, 상대적으로 정밀도가 낮은 장비를 사용하여도 INS와 비교하였을 때 오차가 크지 않은 값을 제공 가능하고 계산 과정이 단순하여 시스템 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유에서 수중 로봇뿐만 아니라 다양한 자동화 무인화된 시스템에 MEMS(Machined electro mechanical system) 기술을 적용한 관성 센서를 이용한 AHRS를 적용하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다 (Kim, 2011; Heo, 2010).

군사적 임무에 사용되는 일부 소형 자율 무인 잠수정은 긴 운용 시간 대신 고속 기동이 필요하기 때문에 30분 이내 운용 시간을 목표 성능으로 가지고 있으며, 임무에 요구되

는 장비로 탑재로 탑재 공간(payload)이 제한적이기에 MEMS 관성 센서를 이용한 AHRS에 대한 개발 필요성이 높으나, 대부분의 MEMS 기반 AHRS 관련 국내 연구는 대부분 실제 제품 없이 가상 신호를 이용하여 추정 결과를 얻기 위한 필터 설계 등에 주력하고 있어, 실제 국내 개발한 MEMS 기반 자세 측정 장치 개발 및 성능 검증관련 연구는 미흡한 현실이다. 이에 본 논문에서는 실제 개발 완료되어 제작된 길이 1미터 내외 10노트 이상의 운항 속도와 30분 이내 운용 시간을 가지는 소형 자율 무인 잠수정에 적용하기 위한 MEMS 기반 자세 측정 장치를 소개하고 이에 대한 성능 검증결과를 제시한다. 본 논문의 구성은 아래와 같다. 2장에서는 개발 완료되어 제작된 MEMS기반 자세 측정 장치 제원 및 자세 계산 알고리즘을 소개하고, 3장에서는 2장에서 소개한 MEMS 기반 자세 측정 장치에 대하여 자율 무인 잠수정 운동 모사 장비 등을 이용하여 수행한 성능 검증 시험과 그 결과를 제시하였다. 4장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

2. MEMS 기반 자세 측정 장치

2.1 자세 측정 장치 개요 및 제원

5시간 이상 운용 시간을 요구하는 민간용 자율 무인잠수정과 달리 일부 군사적 임무에 적용하기 위한 국방용 자율 무인잠수정은 30분 이내 운용 시간과 10노트 이상의 고속 기동을 목표로 성능으로 하고 있다. 고가의 관성 항법 장비는 이러한 목표 성능에 부합되지 않기에 본 연구에서는 전술한 임무에 적합한 20 cm 이내 지름을 가지고 있는 소형 자율 무인잠수정에 탑재 가능하며 roll, pitch 방향은 1° 이하 오차를, yaw 방향은 5° 이하 오차를 가진 자세 측정 장치를 MEMS기술을 적용하여 개발하였다. 개발된 MEMS 기술 기반 자세 측정 장치는 roll, pitch, heading의 3축 자세를 측정하기 위한 장치로서 각각 3축의 MEMS 타입 자이로, MEMS 타입 가속도계, 지자기센서로 구성되어 있다. Fig. 1은 개발 완료되어 제작된 MEMS 기반 자세 측정 장치의 외형을 제시하고 있으며, Fig. 2는 MEMS 기반 자세 측정장치 구성을 보여주고 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 MEMS 기반 자세 측정



Fig. 1. Developed AHRS based MEMS.

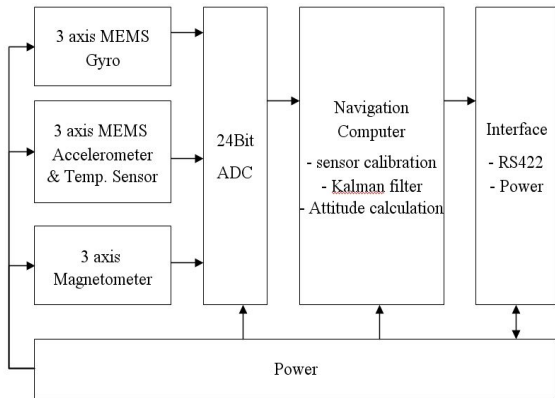


Fig. 2. Configuration of AHRS based MEMS.

Table 1. Specification of AHRS based on MEMS

Item	specification
Size	80 mm × 49 mm × 70 mm
Weight	200 g (including case)
Power	2.2 W below (nominal)

기반 자세 측정 장치는 3축 자이로와 3축 가속도계로 구성된 6자유도 MEMS 관성측정장치와 3축 지자기센서 이외에도 센서에 생성된 신호 데이터를 획득하기 위한 시그마델타 타입의 24bit ADC, 센서 calibration 및 자세계산 알고리즘을 통해 3축의 각속도와 roll, pitch, heading을 계산하기 위한 항법컴퓨터로 구성되어 있다. MEMS 기반 자세측정 장치의 제원은 Table 1과 같다. 일부 제원은 보안 문제로 정확한 값을 공개할 수 없음을 알린다.

2.2 자세 계산 알고리즘

자율 무인잠수정을 포함한 수중 운동체의 자세를 계산하는 방법은 운동체의 관성 변화를 측정하는 관성센서가 장착되는 하드웨어 구성 측면에서 볼 때 크게 김블(Gimbale) 방식과 스트랩다운 (Strap-down) 방식으로 나눌 수 있다. 김블 방식은 3~4개의 김블 구조를 갖는 기계적 안정대(platform)를 설치하고 그 위에 관성센서가 장착하는 방식이다. 이러한 김블 방식은 김블 구조물이 외부의 회전 운동을 차단하는 역할을 하기 때문에 운동체의 자세 변화와 관계없이 관성센서 측이 물리적으로 항상 일정한 항법 좌표계(navigation frame)를 유지하는 것이 가능하지만, 많은 설치 공간을 요구하고 있어 적재 공간이 부족한 자율 무인잠수정보다는 잠수함 항법 체계에 적합하다고 할 수 있다. 스트랩 다운 방식은 김블 방식과 달리 기계적인 안정대 구조를 사용하지 않고 관성 센서를 직접 운동체 본체에 장착하여 운동체의 관성

정보를 획득하고 이러한 관성 정보를 이용하여 기존 항법 좌표계에 대한 운동체의 자세를 실시간으로 계산하는 방식으로 적재 공간이 작은 소형 자율 무인잠수정에 적합한 방식이라고 할 수 있다.

관성 센서를 이용하여 자세를 계산하는 방법은 자이로 출력인 각속도를 적분하여 자세를 계산하는 방식과 가속도계에서 측정된 가속도를 행렬식으로 변환하여 자세를 계산하는 방식이 있다. 스트랩 방식 관성 센서를 적용하여 자이로 센서의 출력인 각속도를 적분하여 자세를 계산할 경우 자이로 센서의 바이어스, 환산 계수, 오차, 비정렬 오차가 자이로 센서 출력에 모두 포함되어 있어 적분 시간이 길어짐에 따라 오차가 누적되어 계산된 자세 오차가 누적되어 자세 측정 성능이 저하되게 된다. 또한 기본적으로 오차가 큰 MEMS형 자이로를 이용하는 경우 오차가 매우 크기 때문에 적분을 통한 자세계산을 수행할 경우 짧은 시간 안에 계산 결과가 발산하기 때문에 실제 상황 적용에는 많은 무리가 있다고 할 수 있다. 이에 반해 가속도계로 측정된 선가속도(linear acceleration)을 이용하여 자세를 계산하는 방식은 가속도계 출력을 적분하지 않고 행렬을 이용하여 가속도에 따른 힘을 계산하고 이에 대한 자세를 계산하기 때문에 가속도계 센서 오차에 의한 자세오차는 증가하지 않고 바이어스(bias)에 비해 정밀을 가지게 되기 때문에 시간이 지남에 따라 상대적으로 정확한 자세 계산이 가능하다고 할 수 있다. 이러한 이유에서 MEMS 형 AHRS를 이용하여 자세를 계산할 때는 적분을 통한 상대값 측정방식보다 운동체의 중력 성분을 이용하여 자세를 계산하는 정렬방식이 효과적이라고 판단하여 본 연구에서는 정렬 방식을 이용하여 자세 계산 알고리즘을 구현하였다. 본 논문에서 가속도계를 이용하여 자세를 구하는 알고리즘은 다음과 같다.

운동체가 정지한 경우 중력 가속도를 g 라 가정하면 각각의 비힘은 다음과 같다.

$$f^b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, f^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, f^b 는 동체좌표계에서 측정된 비힘, f^n 는 항법 좌표계에서의 비힘이다. 항법좌표계와 동체 좌표계 사이의 좌표 변환 행렬 C_n^b 은 다음과 같다.

$$C_n^b = \begin{bmatrix} c(\theta)c(\psi) & c(\theta)s(\psi) & -s(\theta) \\ s(\phi)s(\theta)c(\psi) - c(\phi)s(\psi) & s(\phi)s(\theta)s(\psi) - c(\phi)c(\psi) & s(\phi)c(\theta) \\ c(\phi)s(\theta)c(\psi) + s(\phi)s(\psi) & c(\phi)s(\theta)s(\psi) - s(\phi)c(\psi) & c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $s(\cdot) = \sin(\cdot), c(\cdot) = \cos(\cdot)$ 이다.

각 비힘의 관계는 다음과 같으며 운동체가 정지한 경우 다음과 같다.

$$f^b = C_n^b f^n = \begin{bmatrix} -g \sin(\theta) \\ -g \sin(\phi) \cos(\theta) \\ -g \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식을 정리하면 roll, pitch는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} \right) \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{f_y}{f_x} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

개략정렬 시간을 T라고 할 때 roll과 pitch는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} \right) \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{f_y}{f_x} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이와 같이 가속도계를 이용하면 roll과 pitch 값을 구할 수 있지만, yaw 값을 구할 수 없다. 따라서 yaw값은 각속도 정보를 이용하여 계산하여야 한다. 시간에 따른 오일러각 변화량과 자이로 출력인 각 축 각속도 사이 관계식은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos(\phi) \sin(\phi) \\ 0 \sin(\phi) \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos(\phi) \sin(\phi) \\ 0 \sin(\phi) \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)을 정리하면 아래와 같은 미분 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \sin(\phi) \tan(\theta) \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 \sin(\phi) \sec(\theta) \cos(\phi) \sec(\theta) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)에서 식(5)에서 구한 roll, pitch값을 대입하여 계산하면 yaw값에 대한 미분 방정식을 구할 수 있으며 이에 대한 계산을 수행하여 yaw 값을 구할 수 있다. 식 (5)와 (7)을 이용하면 정해진 정렬 시간 간격에서 roll, pitch 및 yaw를 계산할 수 있으나, 시간에 따른 미분 방정식 및 적분식을 계산하여

야하기 때문에 누적 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차를 보상하기 위해서 본 연구에서는 확장형 칼만 필터(extended Kalman filter)를 적용하였다. 칼만 필터를 적용하기 위한 시스템 상태(system state)와 측정치 (measurement)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [\phi \ \theta \ \psi]^T \\ \mathbf{z} &= [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \end{aligned} \quad (8)$$

3. 성능 검증 시험

개발이 완료되어 제작된 소형 자율 무인 잠수정용 MEMS 기반 자세 측정 장치의 성능을 검증하기 위하여 4가지 시험을 수행하였다. 성능 검증 시험은 개발된 자세 측정 장치 내부에 설치된 자자기 센서 검증 시험, 미리 정해진 자세에서 자세 측정 장치의 자체 측정 성능을 검증하는 정적 자세 시험, 자동차를 이용하여 2자유도 운동 중 자체 측정 장치 성능을 검증하는 차량 시험 및 자율 무인 잠수정의 3자유도 운동을 모사하는 flight motion simulator(FMS)을 이용하여 3자유도 운동 중 자세 측정 장치 성능을 검증하는 FMS 시험으로 구성하였다.

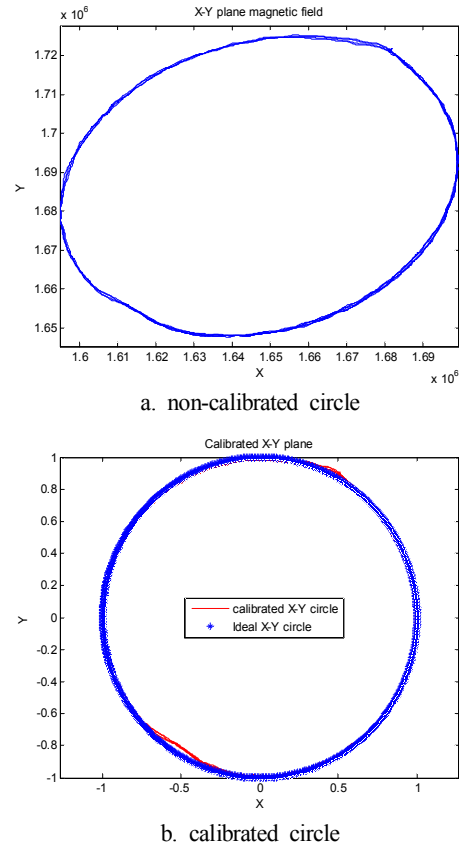


Fig. 3. Calibration circle of X-Y plane magnetic filed.

3.1 지자기 센서 검증 시험

지자기센서는 상대적으로 항법 센서 중 저가이지만, 정확한 절대 방위각을 측정할 수 있기 때문에, 오차 누적으로 인해 heading이 발산하는 관성센서보다 효과적이다. 그러나, 지자기센서는 Soft iron effect 또는 Hard iron effect 형태로 외부의 영향으로 인해 지구자기장의 왜곡이 발생하면 계산된 방향에 오차가 발생하게 되고, 소형 자율 무인잠수정은 자기 밀도가 높은 고출력 음향송신, 전지, 전동기 등의 장비가 협소한 공간에 장치하게 되어 있어 지구 자기장 왜곡이 발생할 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 이러한 이유에서 본 연구에서 개발한 자세 측정 장치 내부에 설치되어 있는 지자기 센서가 자율 무인잠수정 내부에서도 적절한 성능을 낼 수 있는지에 대한 검증과 검증 결과를 이용한 보정(calibration)을 수행해야 할 필요가 있다. 검증 및 보정을 위해서 정해진 방위각에 대한 회전 운동이 가능한 Rate table에 자세 측정 장치를 장착하고 회전 운동 중 자세 측정 장치의 지자기센서의 출력을 측정하였다. Fig. 3은 회전 운동 중에 측정된 Rate table 출력 값을 이용하여 지자기센서를 보정하기 이전과 이후의 자세 측정 장치에 기록된 자기장을 표시하고 있다. Fig. 3을 살펴보면, 보정하기 이전에 획득한 자기장은 회전 운동 중임에도 정확한 원이 되지 못하고 타원에 가까운 방향으로 왜곡이 발생하고 있지만, 보정 이후에는 자기장이 원에 매우 가까운 것을 확인할 수 있다.

3.2 정적 자세 시험

개발된 자세 측정 장치를 일정한 방향으로 회전이 가능한 rate table에 장착하고 rate table을 yaw 방향으로 45° 단위로 회전한 후 정지시켜 roll, pitch, heading 방향으로 모두 정적 자세를 유지하고 있는 상태에서 자세 측정 장치 출력값을 측정하였다. Rate table은 roll과 pitch가 0°으로 고정되어 있고 진북에 대한 각도를 제공하기 때문에 이를 이용하여 자세 측정 장치 측정값의 오차를 구하였으며, 이에 대한 결과가 Table 2에 정리되어 있다. Yaw 값을 변화시켜 가며 정적인 자세에 대한 성능 시험을 수행하였고, 자세 계산에서 가장 많은 오차를 발생할 수 있기 때문에, yaw에 대한 측정 결과만을 Fig. 4에 제시되어 있다.

Table 2. Error of AHRS based on MEMS under static motion test

Attitude	Mean error
Roll	0.2242 °
Pitch	0.2217 °
Yaw	1.9 °

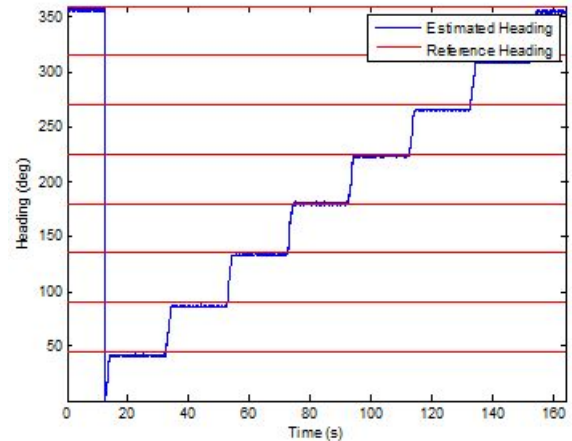


Fig. 4. Measured heading under station motion test.

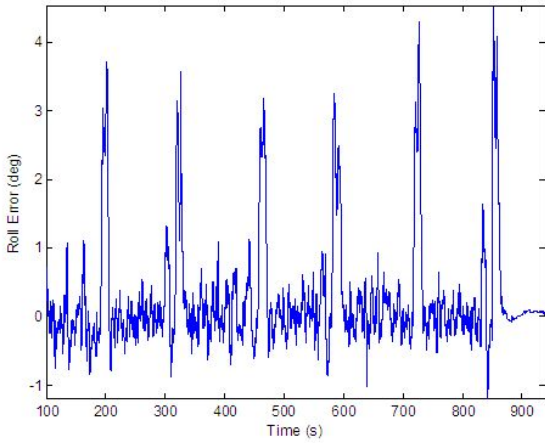
3.3 차량 시험

개발된 자세 측정 장치의 roll과 pitch 측정 특성을 파악하기 위하여 자동차에 자세 측정 장치를 장치하고 직선주로를 4회 왕복 주행하였다. 차량시험을 통해 자세 측정 장치의 roll, pitch의 동적 특성을 파악하기 위하여 전술급 IMU인 Honeywell사의 HG1700를 기준센서로 비교하였으며, Fig. 5은 HG1700 측정값과 개발된 자세 측정 장치의 roll, pitch 측정값의 오차를 보여주고 있다. Roll과 pitch는 가속도계를 이용하여 중력성분을 측정하여 운동체의 자세를 계산하기 때문에 회전에 의한 가속도 성분이 roll과 pitch 측정에 영향을 줄 수 있는데, 이러한 사실은 Fig. 5에서 주기적으로 회전할 때 상대적으로 큰 오차가 발생하는 점에서 확인할 수 있다. Fig. 5에 제시되어 있는 roll, pitch의 leveling 오차는 각각 평균 0.439°, 0.726°로서 목표로 한 1%/hr 이내 오차를 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

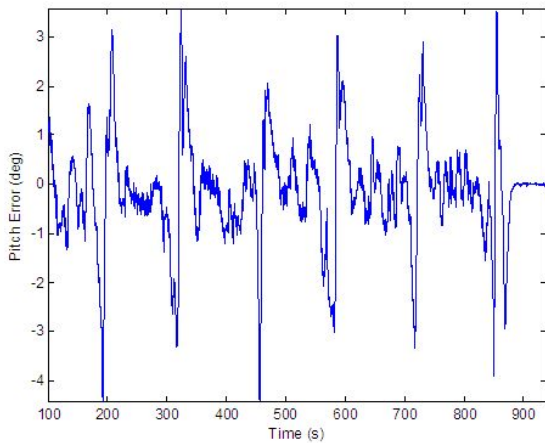
3.4 FMS 시험

개발된 MEMS 기반 자세 측정 장치를 실제 자율 무인 잠수정 운동과 유사한 환경에서 성능을 검증하기 위해서 본 연구에서는 자율 무인 잠수정의 3자유도 복합 운동 모사가 가능한 FMS를 이용하여 개발된 자세 측정 장치의 3자유도 운동 중 성능에 대한 검증을 수행하였다. FMS를 이용한 검증 시험을 수행하기 위하여 실제 자율 무인 잠수정에 적용되는 자율 조정 제어기, 제어컴퓨터, 통신 보드와 연결하여 실제 자율 무인 잠수정에 탑재된 것과 유사한 환경을 구성하여 시험을 수행하였다. FMS를 이용한 검증 시험 시나리오는 roll 변화가 없는 상태(roll free)에서 정해진 yaw각과 심도, 속도까지 자율 무인 잠수정이 가속 및 회전 운동하고 정해진 목표에 도달한 이후에 정해진 yaw각과 속도를 유지하면서 운항하는 상황을 가정하여 수행하였으며, yaw각은 자북 방향으로 0°로 설정하였을 때 시계 방향을 양(+)으로 설정하

고속 자율 무인잠수정 적용을 위한 MEMS 기술기반 자세 측정 장치 개발



a. Roll error



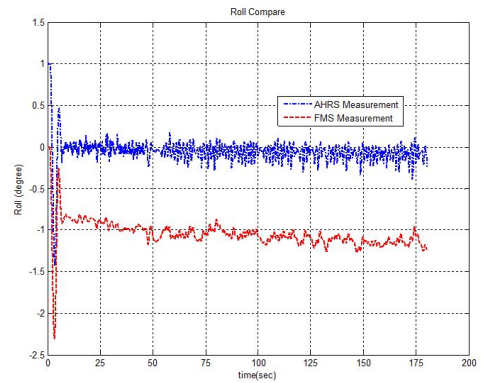
b. Pitch error

Fig. 5. Field test result of roll and pitch.

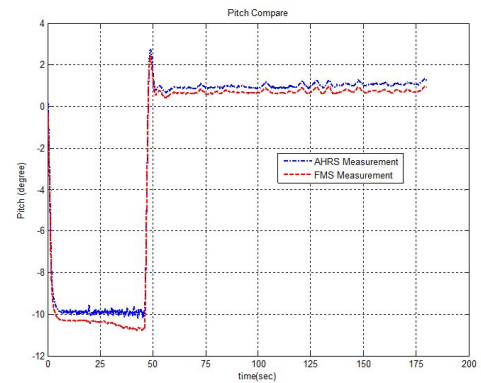
있을 때 양의 방향과 음의 방향으로 각각 목표 각도를 설정하여 시험을 수행하였다. 시험 시나리오는 Table 3에 정리되어 있다. Table 3에 정리되어 있는 시나리오는 yaw 계산을 확인하기 위하여 양의 방향과 음의 방향으로 모두 동일한 크기의 목표 yaw 값을 설정하였다. Fig. 6은 시나리오의 첫 번째 경우인 목표 yaw 값이 30°에 대한 시험 결과를 보여주고 있으며, Fig. 7은 목표 yaw 값이 -30°일 때 시험 결과를 보여주고 있다. Fig. 6, 7 모두 roll, pitch, yaw 순서로 시험 결과를 보여주고 있으며, MEMS AHRS 성능 검증을 위해서 AHRS 출력값과 FMS 자체 측정 센서에서 측정한 자세 출력값을 동시에 보여주고 있다. Fig. 6과 7을 살펴 보면, 두 가지 경우 모두 roll의 변화가 매우 작은 운동을 하였기 때문에 roll은 1° 이내 오차를 보이고 있으며, pitch는 수심 변화를 위한 driving 운동을 할 경우 1° 이내 오차를 보이고 있고 수심 변화 없이 일정한 pitch 각도를 유지할 경우에는 0.5°이내 작은 오차를 보여주고 있다. Fig. 7와 Fig. 8에 제시되어 있는 2

Table 3. Conditions of FMS test.

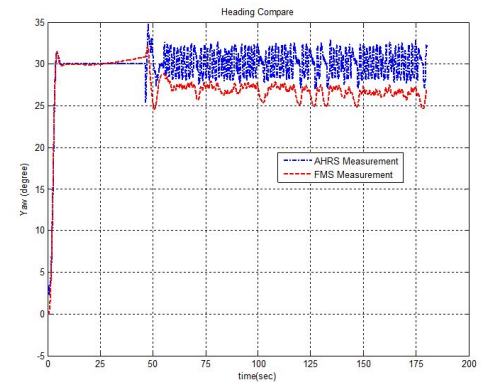
Item	Value	
	Case I	Case II
Operating Time	180 sec	180 sec
Velocity	16 knots	16 knots
Biased heading Error	3°	4°
Target Heading	30°	-30°



a. Roll



b. Pitch

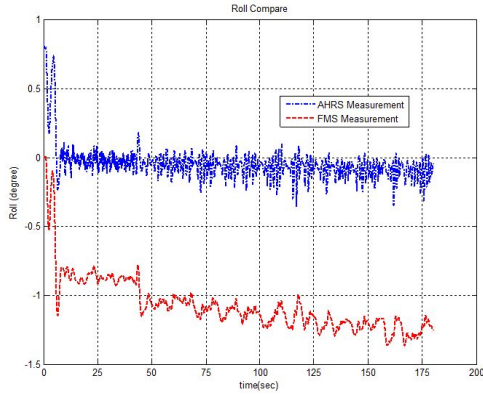


c. Yaw

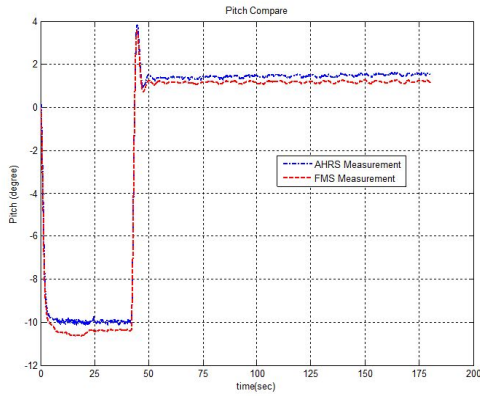
Fig. 6. FMS test results under 1st scenario in Table 3.

가지 경우 모두 yaw 값에서 가장 큰 오차를 보여주고 있고, 특히 목표 yaw 각도인 30°와 -30°에 도달한 이후 두 경우 모두 FMS에서 측정된 yaw 값보다 자세 측정 장치에서 측정된 yaw 값이 작은 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 2 가지 경우에 대한 FMS 측정값에 대한 자세 측정 장치의 yaw 측정값 오차를 보여 주고 있다. Fig. 8을 제시된 결과를 살펴보면 50초

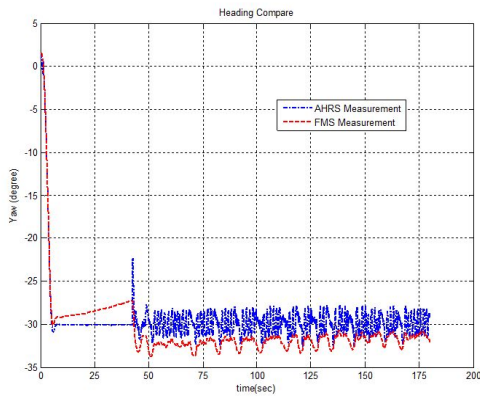
이후 목표 침로와 목표 수심에 도달한 이후 대략 1° 크기를 가진 파동 형태 변화를 보여 주고 있지만, 평균 2° 내외 오차를 보여 주고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 오차는 자율 무인 잠수정의 운동을 모사하기 위해 FMS가 구동될 때 마다 FMS의 고풍력 모터에 의한 지구자기장이 왜곡되어 자세 측정 장치 내부 지자기센서가 영향을 받아 실제 침로인 FMS의 yaw과 비교하여 자세 측정 장치의 yaw 측정값에 오차가 발생한 것으로 볼 수 있으며, 이러한 오차는 자율 조종 제어기에 의한 제어 입력 값으로 사용되기 때문에, 자세 측정 장치 성능과는 무관한 결과로 판단된다. 또한 3분 시험 시간동안 자기장 변화가 큰 환경인 yaw 값이 변화할 때와 비교적 자기장 변화가 작은 일정한 방향으로 고정된 경우 모두 자세 측정 장치 오차가 발산하지 않고 일정한 범위 내에서 파동 형태 변화를 보여주고 있는 사실에서 개발된 자세 측정 장치가 이십여 분 이내 운영 시간 동안 정확한 자세 정보를 제공할 수 있을 것으로 예측할 수 있다.



a. Roll

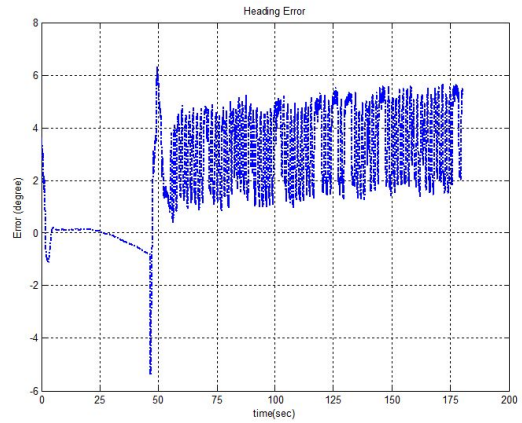


b. Pitch

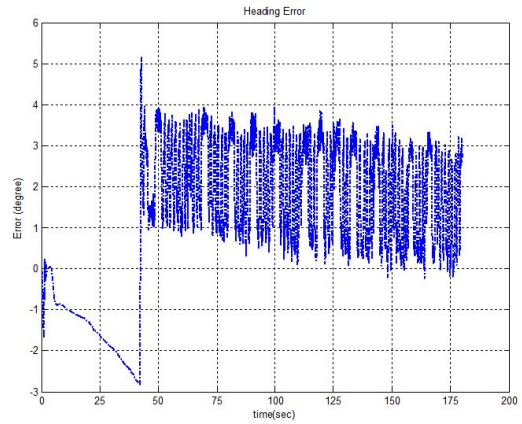


c. Yaw

Fig. 7. FMS test under 2nd scenario in Table 3.



a. Error of yaw when target yaw is 30°



b. Error of yaw when target yaw is - 30°

Fig. 8. Error of yaw in both FMS test.

4. 결 론

소형 자율 무인잠수정은 적재 공간에 제약이 많기 때문에 항법 장비를 포함한 모든 적재 장비는 소형화 및 경량화 필요성이 있다. 본 연구를 통하여 개발된 자세 측정 장치는 MEMS 기술을 적용하여 내부 적재 공간이 협소한 소형 자율 무인잠수정에 적용 가능하다고 판단할 수 있다. 개발된 자세 측정 장치는 지자기 센서 검증 시험, 차량시험, FMS 시험을 통해 주어진 임무에 적합한 자세 측정 성능을 보여주어 짧은 시간 동안 고속으로 기동하는 소형 자율 무인잠수정에 적용하기에 충분한 성능을 보였다.

향후 지구자기장의 왜곡이 없는 조건에서 실제 탑재 자율 무인잠수정의 추진전지, 추진전동기, 소나 등 각 부품을 이용한 하드웨어 활용 폐회로 시뮬레이션 (Hardware in the loop simulation: HILS)을 수행하여 실제 부품이 작동 하는 환경에서 서의 자세 측정 장치의 성능을 확인하고 실험실 실험을 통해 실제 환경에 지구 자기장 변화에 따른 성능을 살펴볼 필요가 있다.

References

- [1] Heo, O. C.(2010), Attitude estimation of the moving bodies using the MEMS sensor, Master Dissertation, Sungkyunkwan University.
- [2] Hwang, A. and W. Seong(2012), "Simultaneous mapping and localization for small military unmanned underwater vehicle", DEFENCE SCIENCE JOURNAL, Vol. 22, No. 4, pp. 223-227.
- [3] Hwang, A., W. Seong, and P. Lee(2012), Experiment on Simultaneous Localization and Mapping Based on Unscented Kalman Filter for Unmanned Underwater Vehicles, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 63-68.
- [4] Hwang, A., W. Seong and P. M. Lee(2009). "Experiments of Unmanned Underwater Vehicle's 3 Degrees of Freedom Motion Applied the SLAM based on the Unscented Kalman Filter," Journal of the Korea society of Ocean Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 58-68.
- [5] Kim, H. S.(2011), Study on GPS and Sonar - INS for unmanned underwater vehicle, Master Dissertation, Korea Maritime University.
- [6] Kim, Y. S., J. Lee, J. H. Kim, B. H. Jun and P. M. Lee(2009), "Path Tracking Control Based on RMAC in Horizontal Plane for a Torpedo-Shape AUV ISiMi, Journal of the Korea society of Ocean Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 146-155.
- [7] Lee, P. M., B. H. Jun, Y. K. Lim, S. W. Hong and S. I. Yang(2005), Pseudo Long Base Line (LBL) Hybrid Navigation Algorithm Based on Inertial Measurement Unit with Two Range Sonar, Journal of the Korea society of Ocean Engineering, Vol. 19, No. 5, pp. 71-77.
- [8] Negahdaripour, S., S. Cho and J. Y. Kim(2011), Controller design for an autonomous underwater vehicle using nonlinear observers, International Journal of Ocean System Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 16-27.
- [9] Park, C. J. and S. J. Lee(2008), The Improvement Method of ARS Attitude depending on Dynamic Conditions, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 30-37.
- [10] Showalter, S.(2004), The Legal Status Of Autonomous Under Vehicles, The Marine Technology Society Journal, Spring, Vol. 38, No. 1, pp. 80-83.
- [11] Titterton, D. H. and J. L. Weston(1997), Strapdown inertial navigation technology, Peter Peregrinus Ltd.
- [12] Yuh, J.(2000), Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey, in Autonomous Robots, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, pp. 7-24.

원고접수일 : 2013년 09월 11일

원고수정일 : 2013년 10월 24일

게재확정일 : 2013년 12월 26일