韓國海洋工學會誌 第11卷 第1號, pp.96~105, 1997. 2

◉ 論 文

# AUV의 운동계측을 위한 스트랩-다운형 관성계측장치(IMU)의 개발

이 판 묵* · 전 봉 환* · 이 종 식** · 오 준 호*** · 김 도 현***

(96년 11월 25일 접수)

# A Strap-Down Inertial Measuring Unit for Motion Measurement of an AUV

P.M. Lee* · B.H. Jeon* · J.S. Lee** · J.H. Oh*** · D.H. Kim***

**Key Words** : Strap-down Inertial Measuring Unit(IMU), AUV, Digital Signal Processor, Direction Cosine Matrix

## Abstract

This paper presents a Inertial Measuring Unit(IMU) for motion measurement of an AUV. The IMU is composed of three parts: inertial sensors with three servo accelerometers and three rate gyros, an analog/digital interface board, and a digital signal processing board with TMS320C31 DSP processor. The IMU is a class of strap-down inertial navigation system, but this system does not applicable directly to the navigation system in consequence of the low qualities of the inertial sensors. This system will be available for motion references of the AUV and itegrated sensors for an integrated navigation system of the AUV. Fast calculation of direction cosine matrix for the coordinate transformation body to reference is obtained through the DSP processor. A switching algorithm is used to lessen the low frequency drift effect of the gyros in the vertical plane with use of low pass filtering of the signal of the accelerometers.

## 1. 서 언

태평양 공해상의 심해저 광구 개발과 같은 대형사업에 우리 나라도 참여하고 있고, 이러한 해양개발을 위해서는 해저와 같은 열악한 환경에서 인간의 작업을 대치할 수 있는 장비의 개발이 필수적이다. 특히, 삼면이 바다인 우리 나라는 국토개발의 효율성을 증진시키기 위한 해양장비의 개발이 필연적이다. 최근, 연구개발되고 있는 자율무인잠수정(autonomous underwater vehicle, AUV)은 해양자원개발을 위한 탐사 및 해양구조물의 유지보수를 위한 신속한 검사 등의 요구로 인해 이에

* 한국기계연구원 선박해양공학연구센터
** 삼성중공업 중앙연구소
*** 한국과학기술원 기계공학과

대한 필요성이 날로 높아지고 있다.

AUV는 자체의 동력원을 내장하고 있으며, 주어진 임무를 스스로 처리할 수 있는 능력이 있어야 한다. AUV가 임무를 완수하고 회귀하기 위해서는 수상지원선과의 통신, 현 작업위치의 정밀계측 및 자동항해 제어기능이 필요하다. 이들 중에서 자동항해 제어기술은 AUV개발에 기본이 된다. 자동항해를 위해서는 수중에서 AUV의 3차원 운동과 위치를 정확히 측정할 수 있어야 하는데, 이를 위해서 고정밀도의 관성항법장치(inertial navigation system, INS)를 이용하거나 소나추적장치를 이용하는 방법이 요구된다.

LBL(long baseline) 시스템은 해저의 트랜스폰더가 설치된 특정한 위치에서 일정범위 내의 해저물체의 위치추적이 정확히 이루어지나 넓은 영역에 걸쳐 작업을 수행하는 경우에는 제약이 따르므로 본 논문에서는 이 시스템을 고려하지 않는다. SBL(short baseline) 혹은 USBL (ultra short baseline) 시스템과 같은 소나추적장치를 이용한 위치 추적은 수중물체의 이동에 제약이 없이 넓은 영역에 걸친 작업을 용이하게 수행할 수 있으나, 노이즈 성분이 포함되어 있어 이를 직접 제어에 이용하기에는 무리가 있다. 또한, 고정밀도의 INS는 고가일 뿐만 아니라 크기 및 중량이 크므로 소형 AUV에는 탑재하기가 용이하지 않다. 따라서 중급의 정밀도를 갖는 INS와 소나 신호를 적절히 조합하여 AUV의 운동을 측정할 수 있는 복합형 위치추적장치의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 중급의 관성계측장치를 이용하여 수중에서 AUV의 3차원 운동을 측정할 수 있는 IMU(inertial measuring unit)을 설계, 제작하며 항법알고리듬을 구현하여 AUV에 탑재가능한 운동계측장치를 개발하는데 그 목적이 있으며, 최종적으로는 소나위치추적장치와 연계된 위치추적/운동계측시스템을 구축하는데 있다.

본 논문에서 개발한 IMU는 신호처리를 위하여 TMS320C31 DSP 프로세서를 사용하고, 아날로그 신호의 입력을 위하여 I/O 보드를 제작하였다. 연산된 출력은 롤각, 피치각, 선수각 운동의 값과 각각의 각속도 및 전후, 좌우, 상하운동의 상대적인 위치, 속도, 가속도 등이 있으며, 얻어진 데이터를 시리얼 통신으로 전송하여 다른 컴퓨터에서 사용할 수 있도록 설계되었다.

## 2. IMU의 설계 및 제작

AUV의 항법센서는 크게 방사센서(radiative sensor), 추측항법센서(dead-reckoning sensor), 수동센서(passive sensor), 종합항법(integrated navigation)으로 구분할 수 있다. 방사센서는 일반적으로 소나센서를 의미하며 AUV에서 소나를 발생하면 이 신호를 트렌스폰더에서 수신하여 AUV의 위치를 측정하는 방법이다. 추측항법센서는 글자 그대로 외부의 도움 없이 자체적으로 내장된 센서에 의해서 운동을 측정하는 방법이다. 수동센서는 직접 AUV의 운동을 계측하지 않고 AUV의 운동과 관련된 변수를 구하는 방법이다. 종합항법은 위의 센서들을 복합적으로 구성하여 서로 보완을 하면서 운동을 측정하는 방법으로 최근 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다.

본 논문은 추측항법 센서로서 가속도계와 레이트자이로를 이용한 IMU의 설계/제작에 관한 것이다. IMU는 짐발(gimbals)장치 없이 관성센서들로 이루어진 집합체이며, 제작된 IMU는 3축방향의 직선운동을 측정하기 위한 3개의 서보 가속도계와 3축방향의 회전운동을 측정하기 위한 3개의 레이트자이로를 장착하고 있다.

다음의 Table 1 및 Table 2는 본 연구에서 사용된 가속도센서와 레이트 자이로 센서의 기본사양을 나타낸다.

Table 1 Specifications of Servo Accelerometer

| | |
|---|---|
| Manufacturer | Lucas Schaevitz |
| Type | Linear servo |
| Input voltage | 15 V ( 10%) |
| Operating range | 2 g |
| Output | 5 V DC 1% |
| Scale factor | + 2.5 V/g |
| Natural frequency | 140 Hz nominal |
| Damping ratio | 0.6 nominal |
| Linearity | 0.05% of full range |
| Resolution | 0.001% of full range |
| Cross-axis sensitivity | 0.002 g per g |
| Bias | 0.1% of full range |
| Sensitive axis to case alignment | 1 degree maximum |

Table 2 Specifications of Rate Gyro

| | |
|---|---|
| Manufacturer | Murata |
| Type | ENV - 05A |
| Input voltage | +8 ~ +13.5 V |
| Operating range | 90 °/sec |
| Output | 2.5 ±0.3V (at 0 °/s) |
| Scale factor | 22.2 ±1.8mV/deg/sec |
| Resolution | 0.1 /sec |
| Linearity | 0.5 % full scale |
| Drift | 0.2 Vp-p max. |
| Sensitive axis to case alignment | 1 deg. maximum |
| Bandwidth | 7 Hz max. |

IMU의 지그(Jig)는 최소의 공간에서 관성센서들을 모두 장착할 수 있어야 하며, 제작시 가공이 용이해야 하고, 온도변화에 따른 변형이 거의 없어야 한다. 또한 가속도계가 마그네틱코일에 의한 자기력으로 펜들럼을 중립위치에 고정되게 널링(nulling)하는 서어보형이므로 자기장의 영향을 받지 않는 재질이어야 한다. 본 논문에서는 지그의 재질은 가볍고 가공성이 좋으며 비자성체인 알루미늄 60계열로 선정하였고, 2층으로 구분되어 있으며, 가공의 용이성을 위하여 2개의 부분으로 나뉘어져서 조립을 하도록 되어있다. 지그의 1층부는 x, y축 방향의 레이트자이로를 장착하며 z축 방향 자이로를 수직면에 설치하고, 2층부는 가속도계를 장착하도록 되어있다.

## 3 신호처리 보드의 설계

IMU는 크게 3가지 파트로 구분 지을 수 있다. 3개의 자이로와 3개의 가속도계가 부착되어 있는 센서모듈, DSP 프로세서, 메모리 및 시리얼통신 모듈로 구성된 디지탈 신호처리 보드, 멀티플렉서와 A/D 변환기가 부착되어 있는 아날로그 보드 등 3개의 부분으로 나눌 수 있다. 회로 기판은 디지틀부와 아날로그부를 분리함으로써 노이즈의 제거와 사이즈의 축소를 도모하였으며, DSP의 인터페이스부를 EPLD를 이용하여 프로그램화하므로써 설계된 보드의 확장성을 증가시켰다. 다음에서 신호처리부의 디지탈 보드, 아날로그 보드를 설명하였다.

### 3.1 IMU용 마이크로 프로세서

IMU는 3개의 가속도계, 3개의 자이로 센서에서의 정보를 실시간으로 읽어들여서 신호처리를 수행해야 하므로 빠른 부동소숫점 연산과 실시간처리를 필요로 한다. 마이크로 프로세서의 처리능력 및 요구조건은 다음과 같다.

- 복잡한 필터 알고리듬의 실시간 처리능력
- 타이머 인터럽트 이용 가능
- 좌표변환에 필요한 비선형함수 처리능력 (부동소숫점 연산 가능)
- 데이터 공유를 위한 기본 버스
- 외부 기기들과의 시리얼 통신 가능

이상의 요구조건을 충족시키기 위하여 TI사에서 개발한 TMS320C31을 사용하였다. TMS320C31은 여러 응용분야에서 사용되고 있고, 많은 사용자와 문헌이 참고 가능할 뿐 아니라, 그 신뢰도 역시 입증되어 있는 상태이다. 본 연구에서는 빠른 부동소숫점 연산이 가능하고, C 언어의 지원이 가능한 TMS320C31을 이용하여 신호처리보드의 디지탈부를 설계하였다. TMS320C31은 16 M × 32 bit 크기의 방대한 메모리영역을 지원하기 때문에 많은 직접회로 및 모듈의 부착이 용이하다.

### 3.2 메모리 맵

DSP 프로세서의 총 메모리 영역은 16M×32 워드이다. 이 16M 워드의 영역에 프로그램, 데이터 및 I/O 영역이 위치한다. 따라서 ROM 이나 RAM 에 저장할 프로그램 코드, 데이터, 상수, 테이블 등을 이 영역에 위치시킨다. 다음의 Table 3 은 IMU용의 DSP 프로세서의 메모리 맵을 나타낸다.

Table 3 Memory map of IMU DSP Board

| Address | Length | Interfaced Devices |
|---|---|---|
| 0x00 | 0x3f | Interrupt Vector Table |
| 0x40 | 0x3f00 | External ROM |
| 0x10000 | 0x3fff | External RAM |
| 0x400000 | 0x02 | 8251 (Serial Comm. to PC) |
| 0x400050 | 0x01 | BAUD |
| 0x400010 | 0x01 | A/D Converter |
| 0x400020 | 0x01 | Status |
| 0x400030 | 0x01 | 8251 (Serial Comm. to Inclinometer) |
| 0x400040 | 0x01 | LED Port |
| 0x400050 | 0x01 | BAUD |
| 0x400060 | 0x01 | Multiplexor |
| 0x400070 | 0x01 | A/D Start Bit Address |
| 0x809800 | 0x400 | Internal RAM0 |
| 0x809c00 | 0x400 | Internal RAM1 |

### 3.3 RS232C 시리얼통신 포트

C31은 내부에 직렬포트를 내장하고 있으나, RS232C 통신하기에는 적합하지 않다. 따라서 Intel의 UART(Universal Sync./Async. Receiver /Transmitter) IC인 8251을 사용하였다. 8251은 동기모드와 비동기모드 양쪽 다 사용할 수 있으며, IMU에서는 비동기 모드를 사용하여서 일반 컴퓨터와의 시리얼 통신을 구현하였다. 신호선을 RS232의 규격으로 증폭하기 위하여 Max232 드라이버를 사용하였다. 8251 IC는 비동기 모드에서는 19.2Kbps의 전송속도까지 사용할 수 있으나, IMU에서는 9600bps를 기준으로 설계하였다.

### 3.4 아날로그 보드의 설계

본 연구에서는 설계한 아날로그 보드는 프로세서, 메모리, 시리얼 통신부를 제외한 나머지 센서 인터페이스부와 멀티플렉서 등을 포함하고 있고, 이는 디지탈 보드 바로 밑에 부착된다. 2 개의 Board 사이의 연결은 25 핀 커넥터를 이용하여 별도의 케이블 없이 바로 꽂아서 사용할 수 있게 설계하였다. 아날로그 보드는 우선 센서의 접속을 위한 6개의 커넥터와 Analog Device 사의 A/D 변환기 AD1671, 16 채널 멀티플렉서 ADG506 등을 포함하고 있으며, 방위각센서와의 인터페이싱을 위한 또다른 8251를 내장하고 있다.

설계된 IMU는 센서의 샘플링 주기가 100 Hz 이며, 멀티플렉서를 이용하여서 6개의 센서를 차례로 읽어들이는 구조로 되어있다. Fig. 1은 센서가 장착된 IMU의 지그에 DSP 보드 및 아나로그 보드가 설치된 모습을 나타내는 사진이다.

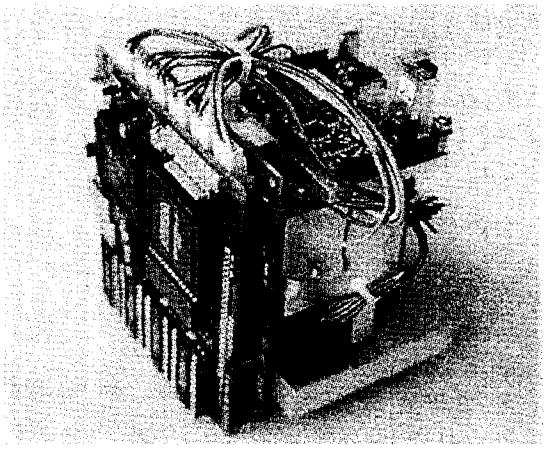

Fig. 1 IMU with Digital/Analog Board

## 4 관성항법 알고리듬

스트랩-다운형(strap-down, S-D) IMU는 관성센서를 동체에 직접 장착하므로써 소형이며 저가로 관성을 계측할 수 있으나, 시간이 지남에 따라 오차가 누적되는 단점이 있다. 또한 항법 프로세서는 기준좌표에 대한 동체의 움직임(자세)을 계속해서 추적해야 한다. 따라서 항법 프로세서는 동체에 설치된 가속도계의 신호를 실시간으로 기준좌표계로 변환시켜야 한다. 즉, 짐발형의 INS에서 안정한 플랫폼의 역할을 프로세서의 좌표변환이 대신하게 되는 것이다. 따라서, SD-INS는 동체의 운동변화정보를 직접적으로 제공하고, 짐발형 INS에 필요한 기계적 장치들과 전자부분들이 불필요해 진다. Fig. 2에 일반적인 SD-INS의 구조를 나타내었다[2].

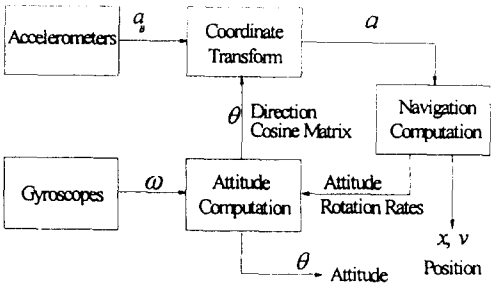


Fig. 2 Schematic Diagram of SD-IMU

### 4.1 자세 알고리듬

관성항법 좌표계에는 크게 다음과 같은 6가지의 좌표계가 있다[1].

1) 진 관성좌표계
2) 지구-중심 관성좌표계
3) 지구-중심 지구-고정 관성좌표계
4) 항법 좌표계
5) 항체 좌표계
6) Wander-azimuth 좌표계

본 IMU에서는 위의 좌표계중 항법좌표계(navigation frame)와 동체좌표계(body frame)를 이용한다. 그 이유는 AUV의 IMU에서는 항공기의 항법에서 처럼 크지 않고, 물위의 모선으로부터의 상대적인 위치를 구하는 것이므로 항법좌표계와 동체좌표계만을 이용하는 것이 타당하다.

항법좌표계는 항체의 중심을 원점으로 하고 세 축이 지구 표면에서 북쪽, 동쪽, 수직 아래쪽으로 일치되는 local-level 좌표계이다. 이들은 Euler 각도의 롤, 피치, 요 축으로 정의된다. 동체좌표계는 선체의 질량중심을 원점으로 하고 x축은 선수방향, y축은 우현방향, z축은 수직아래 방향이다. 이들은 각각 선체의 롤, 피치, 요 축으로 정의된다.

실제 모선에서 AUV의 위치와 자세를 구하려면 AUV에 장착된 관성센서에서 측정된 신호(동체좌표계)를 모선에 대한 값(항법좌표계)으로 변환이 필요하다. 이러한 좌표변환을 수행하는 것을 자세 알고리듬이라고 하며, 자세 알고리듬에는 크게 오일러 각(Euler angles), 방향여현행렬(direction cosine matrix), 쿼터니언(quaternions)의 3가지 방법이 있다[7].

오일러각은 기준(항법)좌표계에 대한 동체좌표의 롤, 피치, 요의 3개의 각도를 이용하여 동체의 자세를 구하는 방법이며 변환행렬이 직접구해지지 않으며 90도 근처에서 특이점이 있다는 단점이 있다. 방향여현행렬은 좌표계의 변환을 9개의 파라미터를 이용하여 행렬의 형태로서 구하는 방법으로 특이점이 없고 변환행렬이 직접 구해지는 반면 계산이 복잡하다. 쿼터니언은 좌표변환을 4개의 파라미터를 이용하며 미분방정식 형태로 표현이 가능하여 계산이 간단해지나 변환행렬이 직접 구해지지 않는 단점이 있다.

변환행렬을 직접적으로 구할 수 있는 방법은 방향여현행렬(DCM)가 가능하다. DCM은 파라미터가 9개이기 때문에 계산시간이 문제가 되나 고속 DSP칩인 TMS320C31을 사용하므로 계산시간은 문제가 되지 않는다고 본다. 쿼터니언은 계산시간은 짧으나 파라미터의 물리적 의미를 쉽게 알 수가 없다. 그러나 DCM은 물리적 의미가 바로 전달되기 때문에 본 논문에서는 자세알고리듬으로 DCM을 이용하여 좌표변환을 하였다. 좌표변환은 동체좌표계에서 항법좌표계(기준좌표계)로의 변환이며 선체고정좌표계의 롤각, 피치각, 선수각을 이용하면 다음과 같다.

$$C_r^b = C_\phi \; C_\Psi \; C_\theta \tag{1}$$

$$C_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_\Psi = \begin{bmatrix} \cos\Psi & 0 & \sin\Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Psi & 0 & \cos\Psi \end{bmatrix}$$

$$C_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$C_b^r = (C_r^b)^T$$

where $\theta$ : 롤 각도
$\Psi$ : 피치 각도
$\phi$ : 선수각 각도
$C_\theta$ : 롤축 좌표변환행렬
$C_\Psi$ : 피치축 좌표변환행렬

$C_\phi$ : 선수각축 좌표변환행렬

$C_b^r$ : 동체좌표계에서 기준좌표계로의 변환행렬

$C_r^b$ : 기준좌표계에서 동체좌표계로의 변환행렬

따라서 Euler 각도인 $\theta$, $\Psi$, $\phi$ 을 구하면 좌표변환 행렬인 $C_b^r$ 이 결정되므로 AUV 동체에서 측정된 가속도 신호를 곱하여 기준좌표계에서의 AUV의 운동을 구할 수 있다.

기준좌표계에서의 AUV의 운동을 구하는 식은 다음과 같으며 중력에 의한 가속도항을 보상해줘야 한다.

$$\dot{R} = V$$

$$\left[\frac{dV}{dt}\right]_r = C_b^r Z_A - G(R) \quad (3)$$

R : 기준좌표계에 대한 동체의 위치 벡터

V : 기준좌표계에 대한 동체의 속도 벡터

$Z_A$ : 동체좌표계의 관성센서에서 측정한 가속도

G(R) : 위치변화에 따른 중력항

따라서 식(3)에서 우측항을 계산하여 두번 적분하면 기준좌표계에 대한 동체의 위치가 구해진다. 이를 위해서는 Euler각도인 $\theta$, $\Psi$, $\phi$ 을 먼저 구해야 하는데 자이로에서 측정한 신호를 이용하여 Euler각도인 $\theta$, $\Psi$, $\phi$ 을 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\dot{\theta} = \omega_x + \tan\Psi\,(\omega_y \sin\theta + \omega_z \cos\theta)$$

$$\dot{\Psi} = \omega_y \cos\theta - \omega_z \sin\theta$$

$$\dot{\phi} = (\omega_y \sin\theta + \omega_z \cos\theta)/\cos\Psi \quad (4)$$

여기서, $\omega_x$, $\omega_y$, $\omega_z$는 레이트 자이로에서 측정한 각 축의 각속도이다.

## 4.2 신호처리 및 항법알고리듬의 구현

### 4.2.1 관성센서의 Drift실험

드리프트(drift)는 관성센서가 자체적으로 가지고 있는 특성중의 하나이면서 항법오차를 야기시키는 주요 원인중의 하나이다. 드리프트는 적분을 했을 경우 계속 누적됨에 따라서 적분된 값이 크게 변하는 양상을 보인다. 가속도계를 이용하여 변위를 구하고자 할 때 가속도계에 일정한 양의 드리프트가 존재하면, 속도는 일차함수의 형태로 증가하고 변위는 이차함수의 형태로 증가하게 되어, 측정값에 드리프트로 인한 큰 오차를 야기시킨다.

Fig. 2에 IMU에 사용한 관성센서의 드리프트를 약 3시간 동안 측정한 값을 나타내었다. 이 드리프트는 온도에 따라 변하기 때문에 항상 같은 값을 가지지는 않는다. 그림에서 볼 수 있듯이 드리프트는 일정한 값을 중심으로 심하게 변하는 양상을 보였다. AUV가 수중에 있을 때의 온도에 따라 드리프트의 값이 다르고, 또한 AUV 내에 장착되어 있는 장치들에 의해 내부 온도가 변할 수 있으므로, 다양한 상황에 대해서 항상 일정한 값으로 보상하는 것은 어려운 실정이다.

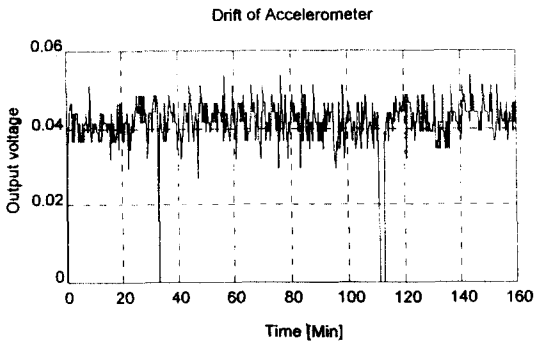


Fig. 2 Drift of the Inertial Sensors

자이로 드리프트를 제거하기 위한 기존의 방법으로는 드리프트를 실험적으로 오랜 시간동안 측정한 후 1차 모델로 모델링하여 항법방정식에 포함시켜서 드리프트를 제거하는 방법[3]과 ARMA모델로 모델링하여 Data Dependent Systems (DDS)

법[5]을 이용하는 방법 등이 있다.

본 IMU에서는 처음 4-5초간 각 관성센서들의 값을 측정하여 평균 구한 후, 이 값을 drift라고 간주하여 매 샘플링 시마다 빼주었다. 또한 4.2.2절에서 언급하겠지만 가속도계의 값으로 리셋을 하였다. 여기서 주의할 점은 가속도계의 값은 드리프트를 빼주면 안된다는 것이다. 왜냐하면 가속도계는 정적인 상태에서는 경사계의 역할을 하므로, 초기에 조금이라도 기울어진 상태에서 평균값을 구하여 그 값을 빼면 그 자세가 수평이라고 인식을 하게되는 일이 발생하기 때문이다.

따라서 가속도계에서 측정한 신호는 드리프트값을 제하지 않고 그대로 사용하며 레이트자이로의 값만 드리프트 제거를 하였다. 가속도계의 드리프트 제거에 관해서는 후에 스위칭 알고리듬에 대해서 설명할 때 다시 언급하겠다.

4.2.2 Euler 각도의 계산

Euler 각도는 레이트자이로와 가속도계를 이용하여 두 가지로 구할 수 있기 때문에 본 연구에서는 두 관성센서의 신호를 필터처리하여 혼합한 알고리듬을 사용하여 Euler 각도를 구했다.

계측한 선체 좌표계에서의 각속도를 이용하여 (4)식에 대입하면 실시간으로 연속적인 Euler각도를 구할 수 있다. 또한 가속도계의 신호는 저역통과필터(LPF)를 통과하여 경사신호로도 사용이 가능하므로 가속도계의 신호를 이용해도 AUV의 Euler각도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Aa[0] = -\sin^{-1}( Acci[1] / G )$$
$$Aa[1] = \sin^{-1}( Acci[0] / G ) \quad (5)$$

여기서, Acci[i] : 각속도계의 신호를 가속도 값으로 변화시킨 값.
Aa[i] : 가속도 값을 이용하여 계산한 각도(roll, pitch)
G : 중력가속도
i = 0, 1 : x축, y축 (롤, 피치)

위의 (5)식에서 가속도계의 측정값이 1g를 초과하는 경우 $\sin^{-1}$의 값이 존재하지 않으므로 Acci의 값을 1g에서 제한시켰다.

이와같이 Euler 각도를 자이로 및 가속도계로부터 구할 수 있으며, 이들 두 값을 비교할 필요가 있다.

자이로를 통하여 Euler 각도를 구하려면 식(4)의 우변을 적분해야 하는데, 이 값은 동적인 상황에서는 드리프트의 영향이 적으므로 Euler각도를 잘 표현할 수 있는 반면 정적인 상황에서는 드리프트로 인하여 값이 증가하게 되는 단점이 있다. 가속도계로부터 Euler 각도를 구하려면 가속도계의 신호를 저역통과 필터를 거치면 바로 AUV의 경사가 계산된다. 즉, 자이로는 고주파일 때 유효하고 가속도계는 저주파일 때 유효하다는 의미이다. 따라서 본 연구에서는 고역통과 필터를 거친 자이로신호와 저역통과 필터를 거친 가속도계의 신호를 합하여 Euler 각도를 다음의 식으로 계산하였다.

$$Agf[k] = TT(Ag[k]-Ag[k-1])+TT(Agf[k-1])$$
$$Aaf[k] = (1-TT)\ Aa[k] + TT\ Aaf[k-1]$$
$$Ang[k] = Agf[k] + Aaf[k] \quad (6)$$

여기서, Ag : 자이로에 의한 Euler 각도
Aa : 가속도계를 통하여 구한 Euler 각도
Agf : Ag를 고역통과 필터링한 값
Aaf : Aa를 저역통과 필터링한 값
Ang : 최종적인 구한 Euler 각도
TT : 필터 파라미터 ( $0 < TT < 1$ )

위 식(6)에서 두 필터의 게인의 합은 1이다. TT의 값이 커지면 저역통과 필터의 cut-off 주파수가 낮아지므로 각도응답이 늦어지며, TT가 작아지면 자이로의 진동성분이 많이 포함되어 과도응답이 생기게 된다. 따라서 IMU 시스템에 적절한 TT값을 선정해야 하는데 본 논문에서 시행착오법에 의해 TT=0.94로 정하였다.

위의 방법은 AUV가 회전 운동을 하는 경우에는 잘 적용이 되나, 만일 AUV가 직선방향으로 천천히 왕복운동을 하는 경우에는 그 운동이 가속도계에 감지되기 때문에 회전을 하지 않아도 저주파의 직선운동이 회전을 한 것처럼 나타나게 된다. 따라

서 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 AUV의 운동상태를 4가지로 분류하여 각 운동상태에 따른 스위칭 알고리듬을 적용하여 자세를 결정하였다.

4.2.3 스위칭 알고리듬

AUV의 운동상태를 4가지로 분류하여, 자세를 결정하는 방법으로 운동상태에 따라서 스위칭하는 방법을 이용하였다. AUV의 운동을 분류하는 기준은 가속도계와 레이트자이로의 응답신호의 경향을 이용하여 Table 4와 같이 4가지로 분류하였다.

Table 4 AUV Motion and Applied Algorithm

| 가속도계의 신호 | 자이로의 신호 | AUV의 운동 | 적용 알고리듬 (Euler 각도결정) |
|---|---|---|---|
| 정적상태 | 정적상태 | 정지,등속 직선운동 | Ang =Ag=Aaf |
| 정적상태 | 동적상태 | - | - |
| 동적상태 | 정적상태 | 가감속 직선운동 | Ang = Ag |
| 동적상태 | 동적상태 | 회전운동, 직선운동 | Ang = Ag = Agf+Aaf |

가속도계나 자이로 신호의 정적상태 및 동적상태를 인지하는 기준은 센서 값의 시간에 대한 미분치를 계산해서 일정시간(1.5초) 동안 정해진 작은 범위 안에서 유지되면 정적상태, 그렇지 않은 경우는 동적상태라고 간주하였다. 또한 자이로의 드리프트 특성상 가속도계의 신호로 자이로의 값을 상황에 맞춰서 리셋하였다. 자이로를 리셋하는데 있어서 x, y축 방향으로는 가속도계로 리셋이 가능하나 z축 방향으로는 리셋이 불가능하여 x, y축만 리셋하고 z축은 순전히 자이로의 출력에 의존하였다.

선수각 센서인 마그네틱 컴파스(magetic compass)를 이용하여 선수각에 대한 리셋이 가능하나, 본 장비에서는 가속도계에서 발생하는 자기장의 영향으로 바로 위에 장착된 마그네틱 컴파스가 제대로 동작을 하지 못하였다. 가속도계로부터 적어도 20-30cm이상 떨어져야 하기 때문에 IMU로부터 격리하여 장착한다. 뿐만 아니라 마그네틱 컴파스의 출력이 시리얼 통신으로 나오기 때문에 ASCII값으로 출력되므로, 이 값을 계산하기 위한 실수값으로 변환하는데 100ms 가까운 시간이 소요되어 10ms로 샘플링하는 IMU에 멀티레이트 샘플링 개념이 도입되어야 한다. 이에 관한 연구는 센서 퓨젼기법을 도입하여 멀티레이트 신호처리를 수행해야 하므로 본 논문의 내용에는 포함시키지 않았다.

## 5. 실험 및 결과

5.2.1 회전운동 테스트

개발한 AUV용 IMU의 성능을 테스트하기 위해서는 3축의 회전운동과 3축의 직선운동을 발생할 수 있는 장치가 필요하나, 실험실 레벨에서는 어려운 실정인 관계로 6축 로보트의 End-effect에 MRU를 고정시켜서 운동을 발생시켰다. 사용한 로보트는 삼성전자에서 개발한 모델명 FARA A1-U, 6축 산업용 로봇이다. 실험은 3축 회전운동에 대해서만 수행하였다.

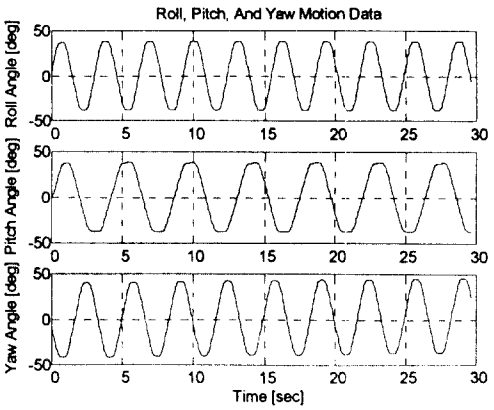


Fig. 3 Angular Response of the IMU(±40°)

3축회전은 x, y, z축으로 40°를 움직이도록 하였다. 이 실험의 응답특성을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 ±40°를 0.3Hz 정도의 주파수를 가지고 정속으로 움직이게 하였는데 비교적 좋은 응답을 나타내었다. 그러나 선수각 운동은 다른 외부센서의 도움이 없기 때문에 드리프트하는 양상을 나타내었다. 자이로는 정속으로 움직일 때는 드리프트 양이 작으나 각가속도를 받으면 드리

프트가 현저하게 나타나게 된다.

5.2.2 회전축의 드리프트 테스트

다음은 각 축의 회전운동에 대한 드리프트의 실험을 하였다. Fig. 4에 각 축의 회전운동을 손으로 돌려서 발생시켰을 때의 각 축의 응답을 나타내었다. 실험은 0°에서 임의의 각도로 빠르게 움직인 후 다시 빠른 속도로 원위치한 경우와 천천히 원위치하는 두 가지의 운동을 발생시켜 보았다.

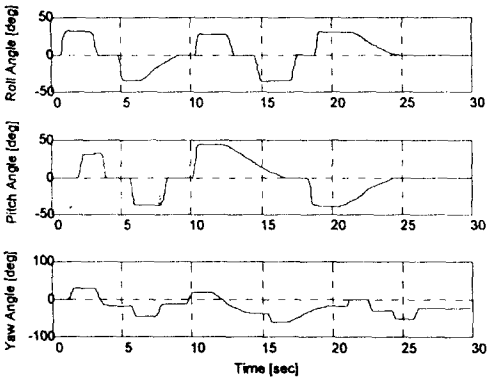


Fig. 4 Angular Drift of the IMU

그래프에서 기울기가 급격한 부분이 빠르게 움직인 경우고 완만한 부분이 천천히 움직인 경우이다. 이 실험에서 롤운동과 피치운동은 두 가지의 경우에 모두 과도응답이나 시간지연이 없이 0°로 원위치함을 볼 수 있었다. 이는 식 (6)에서의 TT 값을 0.94로 하여 고역통과 필터를 거친 자이로로 인한 과도응답과 저역통과 필터를 거친 가속도계의 시간지연을 적절히 보상했기 때문이다. TT값을 0.98 혹은 0.99 정도로 크게 하면 각도의 응답이 늦어짐을 볼 수 있었고, 0.9 정도로 작게 하면 과도응답이 생김을 볼 수 있었다. 그러나 선수각운동 빠른 움직임에 대해서 드리프트가 생겨 원위치로 다시 온 경우 선수각도의 값에 옵셋이 발생함을 볼 수 있다. 이는 마그네틱 컴파스를 이용한 각도 보정이 필요함을 의미한다.

Fig. 5는 센서가 장착된 IMU를 28초 동안 임의 방향으로 움직이다가 제자리에 놓은 결과의 각도 변환값이다. 손으로 움직인 관계로 기준입력의 값을 알 수가 없으므로 MRU의 응답만 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 롤운동과 피치운동은 다시 0°로 원위치 하였으나 선수각운동은 드리프트로 인한 옵셋이 발생했음을 알 수 있다.

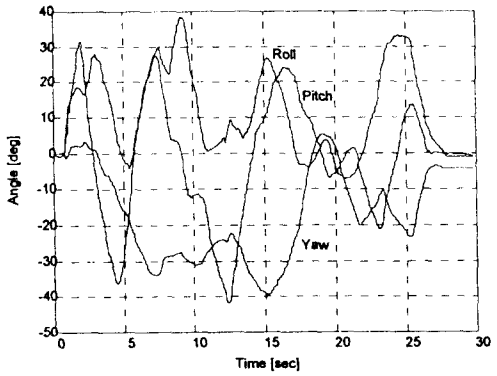


Fig. 5 Angular Response for Irregular Motion

## 6. 결 론

본 논문에서는 AUV용 IMU (inertial measuring unit)를 개발하였다. 개발한 IMU의 관성센서로는 가속도계 3개와 레이트자이로 3개를 장착하였고, 실시간으로 신호처리 및 항법알고리듬 구현을 하기 위하여 TMS320C31 DSP칩을 주 제어기로 사용하였으며, 고속의 A/D 컨버터를 이용하여 센서신호를 취득하였다. 계산한 AUV의 운동값들을 시리얼 통신하도록 설계하였다.

항법알고리듬은 Euler 각도를 계산함에 있어서 가속도계와 자이로의 출력을 혼합하여 이용하였고, 만족할 만한 수준으로 드리프트를 제거하였으며, 방향여현행렬(DCM)방법을 이용하여 좌표변환을 하였다. 개발된 IMU는 롤각, 피치각, 선수각의 정적인 값과 동적인 값의 절대량과 전후, 좌우, 상하운동의 상대량을 출력할 수 있으나 선수각도에 대해서는 보조센서의 보완이 요구된다. 직선방향의 운동은 상대량을 출력하므로 AUV의 위치추적을 위해서는 소나 위치추적 장치와의 공조가 필요하다.

## 후 기

본 논문은 과기처 출연연 연구사업의 일환으로 수행된 "200m급 탐사용 AUV 개발(II)" 연구과제 결과의 일부임을 밝혀둔다.

## 참고문헌

1) George M. Siouris, "Aerospace Avionics systems", Academic Press, Inc. 1993
2) Ching-Fang Lin, "Modern Navigation, Guidance, and Control Processing", Prentice Hall, 1991
3) Billur Barashan, Hugh F. Durrant-Whyte, "Inertial Navigation Systems for Mobile Robots", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol 11, No 3, pp. 328-342, 1995
4) V. Anantha Subramanian, C. P. Vendhan, "An Efficient Algorithm for Strapdown Accelerometer-Based Motion Measurement", Ocean Eng., Vol 20, No 4, pp. 421 - 432, 1993
5) Sudhakar M. Pandit, Weibang Zhang, "Modeling Random Gyro Drift Rate by Data Dependent Systems", IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, Vol AES-22, No 4, pp. 455 - 460, 1986
6) 박홍원, "스트랩다운 관성항법장치의 영속도 보정 칼만필터 구성 및 성능분석", 서울대학교 대학원, 제어계측공학과, 석사학위 논문, 1988
7) Bernard Friedland, "Analysis Strapdown Navigation using Quaternions", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol AES-14, No 5, pp. 764 - 768, 1978
8) "TMS320C3x User's Guide", Texas Instruments, 1993
9) 박귀태, 이상락, "C언어로 쉽게 쓰는 TMS320C31", 대영사, 1995
10) Seatex, "MRU : User's Maual", 1995