

# 저가형 해파 모니터링 시스템을 위한 파형 모델링

## Wave Modeling for Low-cost Wave Monitoring System

이 중 현\* · 이 동 욱<sup>†</sup> · 허 문 범\*\*

(Jung-Hyun Lee · Dong-Wook Lee · Moon-Beom Heo)

**Abstract** - This paper describes a wave modeling method using low-cost sensors. Wave modeling is applied to the wave monitoring system for accurate measurement of ocean wave parameters. The observation of ocean wave parameters is necessary to improve the accuracy of forecast of ocean wave condition. However, the ocean wave parameters measured by a low-cost wave monitoring system suffer from several errors. Therefore we introduce a wave modeling method to compensate the ocean wave parameters corrupted by errors. The proposed method is analyzed using experiments within controlled environment. It is verified that the accuracy of low-cost wave monitoring system can be increased by the proposed method.

**Key Words** : Wave monitoring, Wave modeling, Laboratory experiments

### 1. 서 론

해양예보는 해양 관련 종사자들의 안전과 직결되기 때문에 매우 중요한 정보이다. 이러한 해양예보에 필요한 파고, 파향, 풍향 등의 정보들은 파랑관측을 통하여 얻게 된다. 특히 파고는 파랑관측으로부터 얻는 정보들 중에서 가장 안전과 직결되는 정보이다. 그러므로 파고측정은 파랑관측에서 필수 불가결하다.

현재까지 파고를 측정하기 위하여 널리 사용되고 있는 방법은 크게 부이를 이용한 방법과 x-밴드 레이더를 이용한 방법으로 나눌 수 있다[1][2]. 하지만 상용화된 부이와 x-밴드 레이더는 매우 고가의 장비이기 때문에 일반인이 사용하기나 실험하기는 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 저가형 센서를 이용한 부이개발 연구가 꾸준히 수행되고 있다[3]. 특히 MEMS 타입의 센서 제작기술 발달에 힘입어 센서의 크기는 점점 줄어들고 가격도 내려가고 있기 때문에, 부이뿐만 아니라 다양한 방면에서 MEMS 타입의 센서들을 적용하는 연구가 진행되고 있다. 저가형 관성 항법 시스템에 적용한 것이 대표적인 예이며, MEMS 타입의 가속도 센서를 기반으로 관성 항법 시스템을 설계한다[4][5]. MEMS 타입의 저가형 관성 센서를 이용하여 개발한 파고 측정 시스템은 저가형 관성 항법 시스템과 매우 유사한 방식으로 파고를 측정하게 된다. 하지만 저가형 관성 센서로 측정된 관성 데이터에는 센서의 하드웨어적인 오차, 측정 능력의 한계와 정밀도의 한계로 발생하는 오차들이 포함되어

있다. 이러한 오차들은 관성 항법 시스템의 정확도를 하락 시키기 때문에 반드시 해결해야한다. 센서의 하드웨어적인 오차는 바이어스(bias), 스케일 팩터(scale factor), 직교성(orthogonality), 잡음 등으로 나타나고, 센서의 측정 능력의 한계와 정밀도의 한계로 발생하는 오차들은 위치정보의 발산과 위치정보의 잡음으로 나타난다. 바이어스, 스케일 팩터, 직교성은 가속도 센서 칼리브레이션을 통해서 해결할 수 있다[6]. 또한 위치정보의 발산과 잡음은 GPS나 다른 센서와의 결합으로 해결할 수 있다[7]. 하지만 파고측정을 위한 GPS 결합은 저가형 GPS의 수직오차가 일반적인 파고보다 크기 때문에 적절하지 않다. 그러므로 본 논문에서는 파형을 정현파의 형태로 모델링하여 위치정보의 발산과 잡음을 해결하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법을 검증하기 위하여 해파 모사 장치를 제작하여 실험하였으며, 실험을 통해서 위치정보의 발산과 잡음이 해결됨을 확인하였다.

### 2. 파고 측정 시스템

부이에 장착된 파고 측정 시스템은 관성 센서를 이용하여 부이의 위치정보를 추정하는 방법으로 파고를 측정한다. 부이의 위치정보는 부이의 가속도와 운동 방향 정보를 이용하여 계산된다. 부이의 운동 방향 정보를 계산하기 위해서 자세 측정 시스템을 적용하였다. 자세 측정 시스템은 부이의 가속도와 각속도 정보를 이용하여 부이의 자세를 계산한다. 부이의 가속도는 자세 측정 시스템과 부이의 위치 추정 알고리즘에도 사용되기 때문에 정확도가 매우 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 가속도 센서 칼리브레이션을 선행하여 부이 가속도 정보의 정확도를 향상시킨 후에 파고 측정 시스템을 설계하였다.

#### 2.1 가속도 센서 칼리브레이션

가속도 센서 칼리브레이션은 센서가 가지고 있는 오차들

\* Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University, Korea

<sup>†</sup> Corresponding Author : Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University, Korea

E-mail : dlee@dongguk.edu

\*\* Korea Aerospace Research Institute

Received : December 26, 2013; Accepted : February 18, 2014

을 해결하기 위해서 사용된다. 칼리브레이션으로 해결할 수 있는 오차들은 바이어스, 스케일 팩터, 직교성 오차이다. 부이의 실제 가속도를  $f$ , 가속도 센서로 측정된 가속도를  $f_m$  이라고 하면, 가속도  $f_m$ 에는 식 (1)과 같이 오차들이 포함되어 있다[8][9]. 여기서  $b$ 는 바이어스,  $S$ 는 스케일 팩터,  $m$ 은 직교성 오차를 의미하고, 아래 첨자  $x, y, z$ 는 3축 방향을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} f_{m,x} \\ f_{m,y} \\ f_{m,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1+S_x) & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & (1+S_y) & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & (1+S_z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

가속도 센서 각각의 축이 중력가속도 방향과 평행하도록 센서를 설치할 했을 때, 부이의 실제 가속도  $f$ 는 표 1과 같이 된다. 그리고  $f_m$ 은 표 1과 같은 환경에서 가속도 센서가 측정된 가속도가 된다. 식 (1)에서  $f$ 와  $f_m$ 을 알면 최소제곱법을 적용하여 오차들의 성분을 계산할 수 있다. 오차들의 성분이 계산되면 가속도 센서로 측정된 가속도  $f_m$ 으로부터 부이의 실제 가속도  $f$ 를 추정할 수 있다.

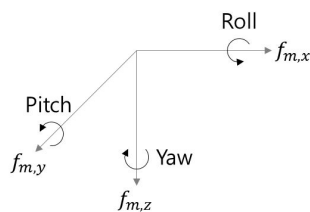
**표 1** 가속도 센서 칼리브레이션을 위한 6가지 실험 환경  
**Table 1** Six experimental conditions for accelerometer calibration

Case	1	2	3	4	5	6
$f_x$	1	-1	0	0	0	0
$f_y$	0	0	1	-1	0	0
$f_z$	0	0	0	0	1	-1

단위 :  $g$

## 2.2. 자세 측정 시스템

자세 측정 시스템은 부이의 가속도와 각속도 정보를 이용하여 부이의 롤(roll), 피치(pitch) 회전각을 계산하는 시스템이다. 롤, 피치의 회전방향은 그림 1과 같다. 가속도 정보만을 이용하여 롤, 피치 회전각을 계산할 수 있으나 센서가 움직일 경우에는 오차가 발생하기 때문에 각속도 정보와 결합하여 회전각을 계산한다. 가속도와 각속도 정보 결합에는 칼만 필터를 적용하였다.



**그림 1** 3축 가속도와 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 회전방향  
**Fig. 1** Three-axis directions of acceleration and directions of roll, pitch, yaw rotation

가속도 센서 칼리브레이션을 통하여 계산된 부이의 실제 가속도  $f$ 는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 여기서  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$

는 각각 센서  $x, y, z$ 축 방향의 이동가속도,  $u, v, w$ 는 각각 센서  $x, y, z$ 축 방향의 이동속도,  $p, q, r$ 은 각각 센서  $x, y, z$ 축을 중심축으로 회전하는 각속도,  $g$ 는 중력가속도,  $\theta$ 는 피치 회전각,  $\phi$ 는 롤 회전각이다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta\sin\phi \\ -\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

가속도 센서와 각속도 센서를 이용하여 부이의 이동가속도와 이동속도를 측정할 수 없기 때문에 이동가속도와 이동속도를 0이라고 가정하여 식 (3), (4)와 같이 가속도 정보만으로 롤, 피치 회전각을 계산할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{f_x}{g}\right) \quad (3)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{-f_y}{g\cos\theta}\right) \quad (4)$$

하지만 부이의 이동가속도와 이동속도를 0이라고 가정하였기 때문에 부이가 움직일 경우에는 오차가 발생한다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서 각속도 정보를 결합한다. 각속도를 이용하여 회전각을 계산하기 위해서는 먼저 각속도를 오일러 각속도로 변환한 후에 적분해야 한다. 회전 각속도와 오일러 각속도의 관계는 식 (5)과 같으며, 여기서  $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ 는 각각 롤, 피치, 요 회전방향의 오일러 각속도이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (5)$$

선형 칼만 필터는 그림 2처럼 측정값을 이용해서 추정값을 반복 수행하며 계산하는 알고리즘이다. 반복 수행되는 알고리즘은 상태변수가 동일해야 한다. 하지만 식 (5)의 상태변수는 회전 각속도  $p, q, r$ 과 오일러 각속도  $\phi, \theta, \psi$ 로 서로 상이하기 때문에 상태방정식으로 적용하기엔 부적합하다. 그러므로 본 논문에서는 사원수(quaternion)를 상태변수로 적용하였다. 선형 칼만 필터의 상태방정식은 사원수  $q_1, q_2, q_3, q_4$ 와 각속도  $p, q, r$ 의 관계를 이용하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 여기서 아래 첨자  $n$ 은 선형 칼만 필터 알고리즘이 반복 수행되는 순서를 의미하고,  $\Delta t$ 는 샘플링 간격을 의미하며,  $I$ 는 단위행렬을 의미한다. 식 (6)은 상태변수가 변경되지 않기 때문에 선형 칼만 필터에 적합하다.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}_{n+1} = \left\{ I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}_n \quad (6)$$

선형 칼만 필터의 측정값은 가속도 센서로 계산한 롤, 피치 회전각이며 식 (7)처럼 계산하여 사원수로 표현할 수 있다. 또한 선형 칼만 필터의 추정값은 사원수로 표현되고, 식 (7)을 이용해서 오일러각으로 표현해야 한다. 그러므로 선형 칼만 필터는 가속도와 각속도 정보, 사원수 변환 방법을 이

용하여 부이의 자세를 추정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

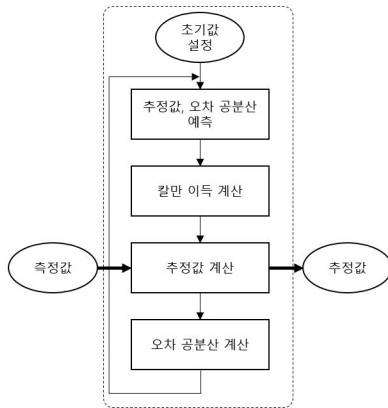


그림 2 선형 칼만 필터  
Fig. 2 Linear Kalman filter

### 2.3. 부이 궤적 추정 알고리즘

부이 궤적 추정 알고리즘은 부이의 자세 정보와 가속도 정보를 이용하여 부이의 위치를 계산하는 알고리즘이다. 부이 궤적은 부이의 이동방향과 이동거리로 추정할 수 있다. 부이의 이동방향은 부이의 자세 정보를 통해서 계산할 수 있으며, 부이의 이동거리는 부이의 가속도를 두 번 적분해서 계산할 수 있다. 부이의 이동방향은 부이의 운동방향과 동일하기 때문에 부이의 운동 가속도가 발생하는 방향과도 동일하다. 하지만 운동 가속도의 방향은 센서의  $x, y, z$ 축으로 표현되기 때문에 지리좌표계(geographic coordinate) 기준으로 변환되어야 한다. 부이의 운동 가속도는 식 (8)처럼 부이의 자세 정보를 이용하여 회전시키면 지리좌표계로 변환된다. 여기서  $f_{T,x}, f_{T,y}, f_{T,z}$ 는 지리좌표계로 변환된 부이의 가속도이다. 식 (8)에는 역행렬이 들어있기 때문에 행렬식(determinant)이 0이 되는 경우에는 성립하지 않는다. 이러한 문제를 회피하기 위해서 식 (8)을 식 (9)와 같이 바꾼다.

$$\begin{bmatrix} f_{T,x} \\ f_{T,y} \\ f_{T,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} f_{T,x} \\ f_{T,y} \\ f_{T,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

과고는 파도의 수직방향 운동거리이기 때문에  $f_{T,z}$  만 이

용하여 계산된다.  $f_{T,z}$ 에는 센서의 하드웨어적인 문제로 발생된 잡음이 포함되어 있다. 그러므로  $f_{T,z}$ 에 포함되어 있는 잡음을 제거하면서 부이의 위치를 계산하기 위해서 선형 칼만 필터를 사용하였다. 선형 칼만 필터에 적용할 상태방정식은 식 (10)이 된다. 여기서  $V_{T,z}$ 는 지리좌표계 수직 방향의 속도이고,  $P_{T,z}$ 는 지리좌표계 수직 방향의 위치이며, 아래 첨자  $n$ 은 선형 칼만 필터의 반복 순서이다. 지리좌표계 수직 방향의 위치  $P_{T,z}$ 의 궤적이 부이의 궤적이 된다.

$$\begin{bmatrix} f_{T,z} \\ V_{T,z} \\ P_{T,z} \end{bmatrix}_{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Delta t & 1 & 0 \\ \frac{1}{2}\Delta t^2 & \Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{T,z} \\ V_{T,z} \\ P_{T,z} \end{bmatrix}_n \quad (10)$$

### 3. 파형 모델링

파형 모델링은 부이의 궤적에 포함된 오차들을 제거하기 위해서 수행된다. 부이의 궤적에 포함되어 있는 오차들은 이산시간 데이터를 이용하여 발생하는 오차, 잡음 등이 포함되어 있다. 이러한 오차들은 부이의 궤적이 부이의 이동거리를 누적해서 그려지기 때문에 지속적으로 누적된다. 누적되고 있는 오차 문제를 해결하고 잡음을 제거하기 위해서 본 논문에서는 파형을 정현파고 가정하여 모델링하였다.

해수는 사람의 눈으로 보았을 때 파도의 방향으로 계속해서 이동하고 있는 것처럼 보인다. 하지만 해수는 에너지를 전달하는 매개체 역할을 하고 있기 때문에 제자리에서 맴돌고만 있다. 이러한 파도 위에 떠있는 부이는 회전운동을 하게 되고, 부이의 회전운동 궤적은 수심에 의해서 원형이나 타원형이 될 수 있다[10]. 그러므로 수직방향의 타원 지름이 파도가 된다. 이러한 궤적의 수직방향 운동은 시간 축에 대하여 그리면 정현파의 형태로 그려지게 된다. 누적되는 오차가 포함되어 있다고 가정하면 부이의 궤적  $P_{T,z}$ 를 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 파형 모델링의 미지수는  $\alpha, f_w, \delta, \beta, \gamma$ 가 된다.  $2\alpha$ 는 파고,  $f_w$ 는 파도의 주파수,  $\delta$ 는 파도의 위상차,  $\beta$ 는 누적되는 오차의 발산,  $\gamma$ 는 DC성분 오차이다.

$$P_{T,z} = \alpha \cos(2\pi f_w \Delta t + \delta) + \beta \Delta t + \gamma \quad (11)$$

파도의 마루가 파도 한 주기의 시작점이라고 가정하면 파도의 위상차  $\delta$ 는 0이 된다. 또한 파도의 주파수  $f_w$ 는 영속도 검출을 통하여 구할 수 있다[11]. 부이의 궤적  $P_{T,z}$ 와 파도의 주파수  $f_w$ 를 알기 때문에 최소제곱법을 사용하여 미지수  $\alpha, \beta, \gamma$ 를 구할 수 있다. 오차인  $\beta$ 와  $\gamma$ 를 제거한 부이의 궤적  $\hat{P}_{T,z}$ 는 식 (12)가 된다. 식 (12)의 시작점은  $\alpha$ 이기 때문에 파도 각각의 주기마다 시작점이 상이하다. 그러므로 식 (12)에서  $\alpha$ 를 빼줌으로 파도의 시작점을 0인 부이의 궤적  $\hat{P}_{oT,z}$ 를 식 (13)처럼 구할 수 있다.

$$\hat{P}_{T,z} = \alpha \cos(2\pi f_w \Delta t) \quad (12)$$

$$\hat{P}_{oT,z} = \alpha \cos(2\pi f_w \Delta t) - \alpha \quad (13)$$

### 4. 실험

본 연구에서는 파형 모델링과 가속도 센서 칼리브레이션의 효과를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 실험을 위해서 파고와 주기를 변경할 수 있는 해파 모사 장치를 제작하였다. 해파 모사 장치에는 저가형 MEMS타입의 관성센서가 설치되어 있다. 가속도 센서(MMA7331LC)의 가격은 약 \$1이며, 자이로 센서(FXAS21000)의 가격은 약 \$2이다[12].

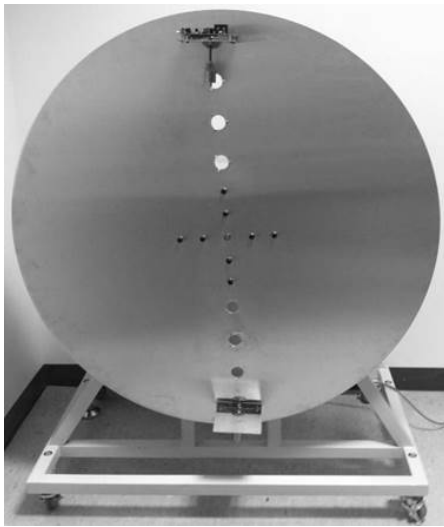


그림 3 해파 모사 장치  
Fig. 3 Ocean wave simulator

해파 모사 장치를 주기 12초, 파고 100cm로 설정하여 측정한 관성 데이터는 그림 4와 같다. 위에서부터 첫 번째와 두 번째 데이터는 자세 측정 시스템으로 측정된 부이의 롤, 피치 회전각이며, 세 번째부터 다섯 번째까지의 데이터는 가속도 센서 칼리브레이션이 적용되지 않은  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축의 가속도이다. 이와 같은 관성 데이터를 파형 모델링과 가속도 센서 칼리브레이션의 효과 검증 실험에 각각 적용하였다.

그림 4의 관성 데이터를 이용하여 부이의 궤적을 추정하면 그림 5와 같이 된다. 그림 5의 부이 궤적은 주기가 12초이고 크기가 100cm인 파형에 오차 데이터가 포함되어 있다. 오차 데이터에 의해서 정확한 파고 측정이 불가능하다. 이러한 오차 데이터를 제거하기 위하여 파형 모델링을 적용하였다.

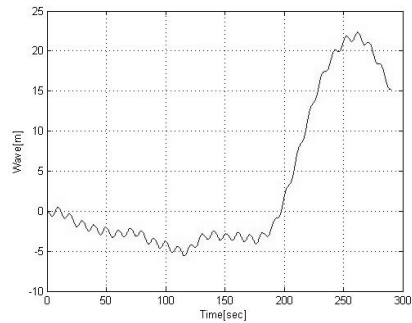


그림 5 오차들이 해결되지 않은 부이의 궤적  
Fig. 5 Trace of buoy when error is not corrected

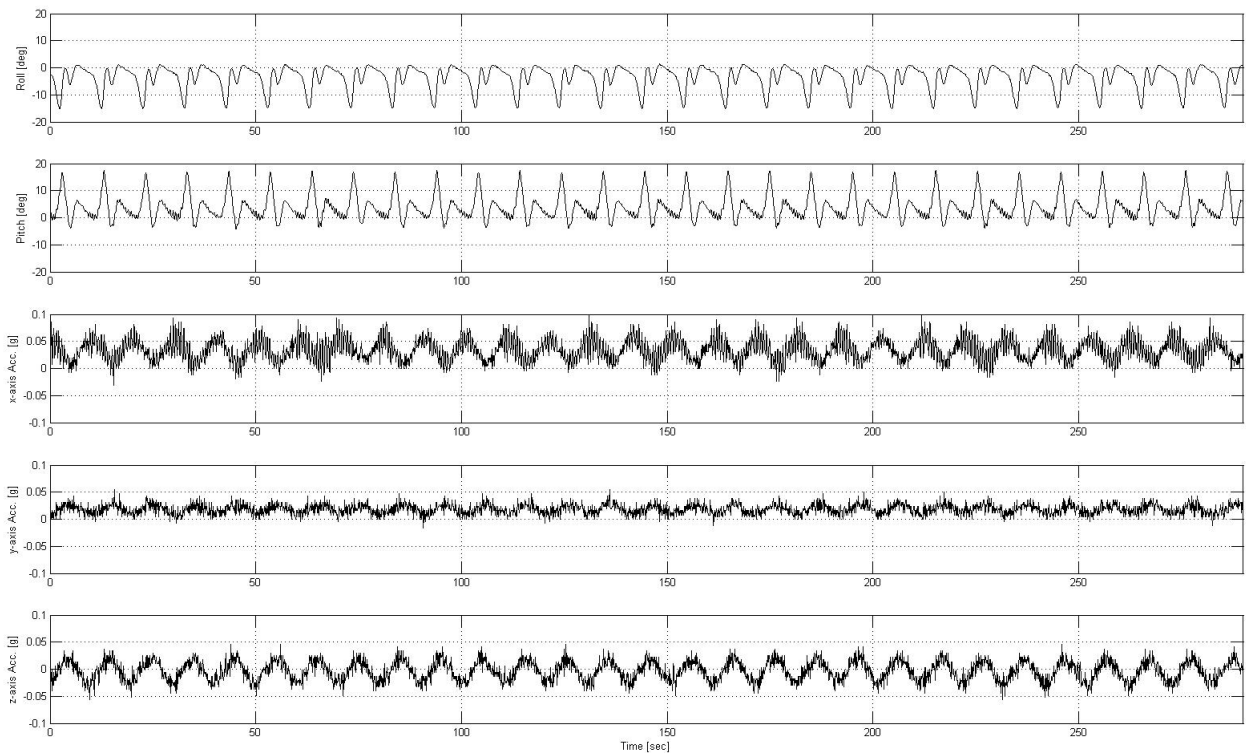


그림 4 해파 모사 장치에서 측정한 관성데이터 (주기 12초, 파고 100cm)  
Fig. 4 Inertial data measured using ocean wave simulator (wave period 12sec, wave height 100cm)

파형 모델링은 그림 5의 데이터에서 부이의 궤적과 오차 데이터를 모델링한다. 모델링된 데이터 중에서 오차 데이터를 제거하고 마루를 0으로 정렬하면 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 첫 번째 그래프는 오차 데이터가 제거된 부이의 궤적이고, 두 번째 그래프는 그에 상응하는 파고 데이터이다. 그림 6의 평균 파고는 101.4275cm, 오차율은 1.43%, 표준편차는 9.6752cm이다. 파형 모델링을 통해서 오차들이 제거됨을 확인할 수 있다.

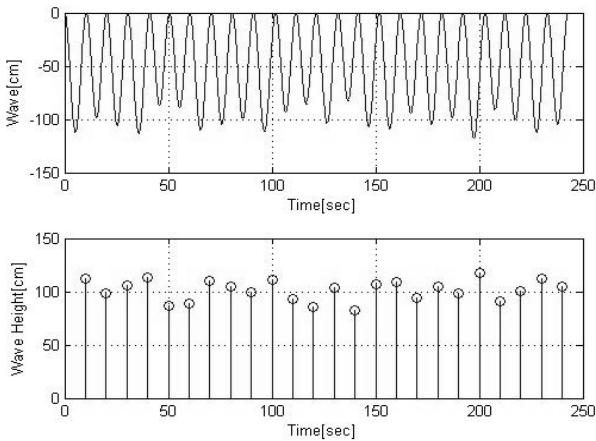


그림 6 파형 모델링이 적용된 부이의 궤적(상)과 파고(하)  
 Fig. 6 Trace of buoy(top) and wave height(bottom) when wave modeling is applied

가속도 센서 칼리브레이션은 가속도 센서의 하드웨어적인 오차들을 해결하기 위하여 사용된다. 그림 4의 가속도 데이터에 포함되어있는 바이어스, 스케일 팩터, 직교성 오차는 가속도 센서의 하드웨어적인 오차들이며 가속도 센서 칼리브레이션을 통해서 제거할 수 있다. 가속도 센서 칼리브레이션을 수행한 결과 바이어스 오차는 식 (14)와 같고, 스케일 팩터, 직교성 오차는 식 (15)와 같다.

$$\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0354 \\ 0.0081 \\ 0.0041 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} (1+S_x) & m_{xy} & m_{zx} \\ m_{yx} & (1+S_y) & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & (1+S_z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0074 & -0.0022 & 0.0039 \\ -0.0065 & 0.9856 & 0.0138 \\ -0.0027 & 0.0087 & 0.9963 \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (14)를  $B_{err}$ , 식 (15)를  $M_{err}$ , 측정된 가속도를  $F_m$  이라고 하면, 가속도 센서의 하드웨어적인 오차들이 제거된 가속도 벡터  $F$ 는 식 (16)이 된다.

$$F = M_{err}^{-1}(F_m - B_{err}) \quad (16)$$

가속도 센서 칼리브레이션을 통해서 오차들이 제거된 가속도  $F$ 를 이용하여 부이의 궤적을 추정하고 파형 모델링을 적용하면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 7의 평균 파고는 100.8163cm, 오차율은 0.82%, 표준편차는 9.2120cm이다. 가속도 센서 칼리브레이션을 적용하기 전보다 오차율은 1.43%에서 0.82%로 0.62% 감소되었고, 표준편차는 9.6752cm에서 9.2120cm로 0.4632cm 감소되었다. 가속

도 센서 칼리브레이션을 통해서 오차율과 표준편차가 감소됨을 확인하였다.

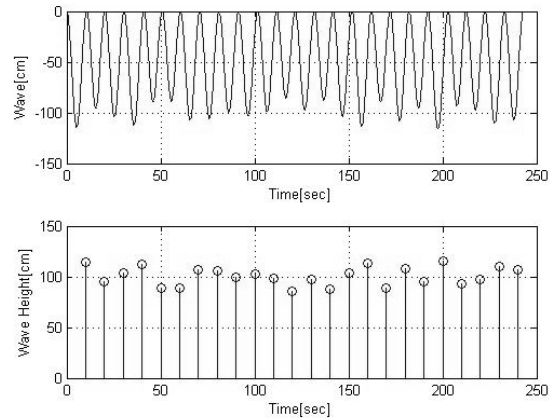


그림 7 모든 오차들이 제거된 부이의 궤적(상)과 파고(하)  
 Fig. 7 Trace of buoy(top) and wave height(bottom) when error is corrected

가속도 센서 칼리브레이션과 파형 모델링을 통해서 파고 측정에서 문제되는 오차들을 제거할 수 있음을 확인하였다. 가속도 센서 칼리브레이션과 파형 모델링 검증 실험은 주기 12초, 파고 100cm에서만 진행되었기 때문에, 다양한 상황에서도 실험을 진행하였다. 해파 모사 장치를 주기는 6초, 12초, 파고는 60cm, 80cm, 100cm로 변경하면서 실험하였다. 각 설정마다 5분씩 3회 반복하였으며 실험 결과는 표 2와 같다. 주기가 12초 일 경우보다 6초일 경우에 표준편차가 낮고, 주기가 12초이고 파고가 60cm일 경우에 오차율이 10%가 넘는다. 즉, 주기가 짧을수록 정확도가 높고, 주기가 12초보다 길고 파고가 60cm보다 낮으면 정확도가 급감하는 것을 확인하였다.

표 2 해파 모사 장치를 이용한 실험 결과  
 Table 2 Experiment result using ocean wave simulator

주기 [초]	파고 [cm]	평균파고 [cm]	오차율 [%]	표준편차 [cm]
6	60	60.86	1.43	4.74
	80	78.44	1.95	5.66
	100	97.30	2.70	5.36
12	60	67.19	11.98	11.69
	80	78.28	2.15	17.06
	100	100.80	0.80	11.89

5. 결 론

MEMS 타입의 관성 센서는 저렴하고 크기가 작다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 기존의 시스템에 MEMS 타입의 센서를 적용하는 연구가 계속되고 있다. 하지만 MEMS 타입의 센서는 기존의 센서보다 정확도가 떨어지기 때문에 이를 보완해야만 하는 문제점이 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 MEMS 타입의 저가형 관성 센서를 장착한 해양 모니터링 시스템의 정확도 향상을 위하여 파형 모

델링을 제안하였다. 또한 발생 가능한 오차 문제를 최소화하기 위해서 가속도 센서 칼리브레이션, 자세 측정 시스템을 적용하였다. 과형 모델링은 해파를 정현파의 형태로 모델링하여 오차 누적 문제와 잡음을 제거하고, 가속도 센서 칼리브레이션은 가속도 센서의 하드웨어적인 오차를 해결하며, 자세 측정 시스템은 부이의 흔들림으로 발생하는 오차를 최소화 시킨다. 제안하는 방법을 검증하기 위해서 해파의 특성을 이용한 해파 모사 장치를 제작하였다. 해파 모사 장치를 통해서 일정 주기 이내에서 정확도가 높다는 것과 주기가 일정 이상 길어지면 정확도가 급감하는 것을 확인하였다. 정확도가 급감하는 것은 주기가 일정 이상 길어지면 단위시간동안 가속도 변화율은 적어지고, 가속도 변화율이 적어지면 부이의 가속도가 MEMS 타입 저가형 센서의 측정 능력 한계에 다다르기 때문이다. 하지만 제안하는 방법은 해파가 밀집되어 있는 주기 1초에서 10초 구간에서는 정확도가 높기 때문에 해양 모니터링 시스템에 적합하다.

본 논문에서는 정확도 검증 실험을 해파 모사 장치로 수행하였기 때문에 실제 해양에서의 실험을 필요로 한다. 실제 해양에서의 실험에서도 정확도 향상이 검증된다면, 본 논문에서 제안하는 과형 모델링은 저가형 해양 모니터링 시스템의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 2013년도 기초기술연구회의 “재난예방 및 국민안전제고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

**References**

[1] Pedersen, Torstein, Eric Siegel and Jon Wood, “Directional wave measurements from a subsurface buoy with an acoustic wave and current profiler (AWAC)”, IEEE OCEANS, pp.1-10, September 2007.

[2] Wang, Fuyou, Gannan Yuan and Zhizhong Lu, “Investigation of real-time wave height measurement using X-band navigation radar”, IEEE WiCom Conf., pp.980-983, September 2007.

[3] Marimon, Maricris C., et al, “Low cost sensor system for wave monitoring”, IEEE ISSNIP Conf., pp.312-316, 2011.

[4] Peng, Ying Kun and M. F. Golnaraghi, “A vector-based gyro-free inertial navigation system by integrating existing accelerometer network in a passenger vehicle” IEEE PLANS Conf., pp.234-242, 2004.

[5] Koifman M. and I. Y. Bar-Itzhack, “Inertial navigation system aided by aircraft dynamics”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.7, no.4, pp.487-493, 1999.

[6] Won S. and Farid Golnaraghi “A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.59, no.8,

pp.2144-2153, 2010.

[7] Kim S., Yoo C. and Kim E., “Altitude Determination Algorithm by Using GPS/INS/Baroaltimeter”, The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, pp.283-287, 2004.

[8] Niu, Xiaoji, et al, “An efficient method for evaluating the performance of MEMS IMUs” IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, 2006.

[9] Park, Minha and Yang Gao, “Error analysis and stochastic modeling of low-cost MEMS accelerometer”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol.46, no.1, pp.27-41, 2006.

[10] Constantin A., “On the deep water wave motion”, Journal of Physics A: Mathematical and General, vol.34, no.7, 2001.

[11] Lee J. H., Lee D. W. and Heo M. B., “Wave Height Measurement System Based on Wind Wave Modeling”, The Korea Institute of Signal Processing and Systems, vol.13, no.4, pp.166-172, 2012.

[12] <http://www.freescale.com/> - Freescale Semiconductor, Inc.

**저 자 소 개**



**이 중 현 (李重賢)**

2009년 8월 동국대 전기공학과 (공학사), 2012년 8월 동국대 전자전기공학과 (박사 과정)



**이 동 옥 (李東旭)**

1983년 2월 서울대 전기공학과 (공학사), 1985년 2월 서울대 전기공학과 (공학석사), 1992년 6월 Georgia Institute of Technology (공학박사), 1992년 8월 ~ 1993년 8월 (주)삼성 SDS 선임연구원, 1993년 9월 ~ 현재 동국대학교 전자전기공학부 정교수



**허 문 범 (許文範)**

1992년 2월 경희대 기계공학과 (공학사), 1997년 12월 Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 (공학석사), 2004년 12월 Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 (공학박사), 2005년 10월 ~ 현재 항공우주연구원 선임연구원