

풍랑 모델링을 기반으로 한 실시간 파고 측정 시스템 Wave Height Measurement System Based on Wind Wave Modeling

이 중 현*, 이 동 옥*, 허 문 범**

Jung-Hyun Lee*, Dong-Wook Lee**, Moon-Beom Heo***

요약

일반적인 파고 측정 시스템은 스펙트럼 분석을 통하여 파고를 측정한다. 하지만 스펙트럼 분석은 fast fourier transform(FFT)을 이용하기 때문에 구조가 복잡하며, 또한 FFT를 사용하기 위해서는 먼저 데이터를 저장해야 하기 때문에 실시간 처리가 어렵다. 본 논문에서는 칼만필터와 관성센서를 사용하여 실시간으로 데이터를 처리하는 알고리즘을 개발하고 성능을 평가하였다. 칼만필터 이론은 비교적 복잡한 알고리즘이지만 FFT를 사용하는 것에 비하여 간단하며, 가속도 데이터를 적분하여 위치를 효율적으로 추정할 수 있다. 하지만 가속도 데이터를 적분할 때 오차의 누적이 발생되는데, 파고의 특징을 이용한 알고리즘을 개발하여 누적오차 문제를 해결하였다. 본 논문에서는 다양한 조건의 해파를 모델링하여 성능평가를 수행하였으며, 실험을 통하여 풍랑측정에 한해서 평균 오차율 3.5%로 우수한 측정 성능을 확인할 수 있었다.

Abstract

The standard wave height measurement system is usually based on spectrum analysis for measuring wave height. The spectrum analysis is complicated because of the FFT, and the FFT is not for real time processing since it requires the saved data segments. In this paper, we carried out the performance evaluation of real-time and simpler wave height measurement system using the kalman filter and inertial sensors. The kalman filter theory is complicated, but its algorithm is simpler than the FFT and the kalman filter is used to estimate wave height by integrating acceleration data. But the accumulated error is occurred when the acceleration data is integrated. We developed the algorithm using the wind wave characteristic to decrease the accumulated error. In this paper, the performance evaluation of the wave height measurement system is carried out for various wind wave conditions. Through the experiments, we verified that it shows high measurement performance with the 3.5% margin of error in wind wave condition.

Keywords : Wave Height Measurement, Kalman Filter, Inertial Sensor, Wind Wave

1. 서론

현존하는 대부분의 파고측정시스템은 가속도 센서 데이터를 스펙트럼 분석하여 파고를 계산한다[1]. 스펙트럼 분석을 위해서는 가속도 센서 데이터를 일정시간동안 저장한 후에 FFT를 통하여 분석을 수행한다. 또한 FFT는 연산량이 많고 복잡하여 고가의 마이크로 컨트롤러 장치에서만 원활한 연산처리가 가능하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 스펙트럼 분석이 필요 없는 관성항법시스템을 접목시켜서 실시간 처리가 가능하고 연산량이 FFT에 비하여

상대적으로 적은 선형칼만필터를 이용하여 파고 측정에 적합한 시스템을 설계하였다. 관성항법시스템은 적분오차의 누적이 적을 때 매우 정확한 장점이 있지만, 시간이 흐를수록 적분 오차의 누적으로 인한 문제가 발생한다. 적분 오차의 누적을 해결하기 위해서 가장 많이 사용하는 방법은 위성항법시스템을 결합하는 방식이며, 지금도 관성항법시스템과 위성항법시스템을 결합하는 연구는 지속되고 있다[2][3]. 또한 항법시스템은 실시간 처리를 요구하기 때문에 실시간 시스템에 적합한 칼만필터를 이용한 연구도 지속되고 있다[4][5]. 하지만 위성항법시스템의 수직 오차율은 1m이상이기 때문에 1m 이하의 파고를 측정하기 위해서 위성항법시스템만을 사용하는 것은 부적절하다. 그러므로 위성항법시스템보다 수직오차율이 적은 기압고도계를 결합하여 고도의 정확도를 상승시키는 연구도 진행되고 있다[6]. 본 논문에서는 파고 측정에 관성항법시스템을 접목하여, 위성항법시스템이나 기압고도계에 의존하지 않고도 파고의 특징을 이용하여 오차누적의 문제를 해결할 수 있는 방법을 연구

* 동국대학교 ** 항공우주연구원

투고 일자 : 2012. 9. 18 수정완료일자 : 2012. 10. 18

계재확정일자 : 2012. 11. 3

* 본 연구는 기초기술연구회의 "재난예방 및 국민안전제고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구"과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

하였다. 또한 저가의 마이크로 컨트롤러 장치에서도 연산처리가 되도록 알고리즘을 간소화시켰다. 그리고 중력에 의해서 발생하는 조석파와 세이쉬, 지진에 의해서 발생하는 쓰나미는 중력, 지진과 같은 환경요소를 감지하여 파고를 예상할 수 있지만 바람에 의하여 생기는 파고는 가장 빈번하게 발생하면서도 바람이 빠른 주기로 변화할 수 있어서 예측이 매우 어렵다. 또한 파도는 현 위치의 바람뿐만 아니라, 주변의 풍랑의 영향도 받기 때문에 환경적인 요소를 통하여 측정하는 방법은 다른 파에 비하여 대단히 어렵다. 본 논문에서는 바람에 의해 생길 수 있는 다양한 해파를 측정할 수 있는 파고 측정 시스템을 개발하고, 성능을 검증하는 실험을 수행하였다.

II. 파고 측정 방법

2.1 파고 측정 방법

파고를 측정하기 위해서는 파랑의 특징을 알아야 한다. 파랑은 바람, 해류뿐만 아니라 수심에 의해서도 결정된다. 이러한 파랑에서 파고를 측정하기 위해서는 고도방향의 움직임만을 이용하여 계산하여야 하기 때문에 고도방향의 데이터만 수집할 수 있는 기술이 필요하다. 이동거리를 측정하기 위해서는 가속도 센서를 이용하여 적분을 통한 위치추정을 사용한다. 본 논문에서는 고도방향의 가속도 데이터를 계산한 후에 고도방향의 가속도 데이터를 이용하여 파고를 계산하는 방식으로 진행하였다.

단계 1: 고도방향 가속도 데이터 계산

선체나 부이에 설치되어 있는 관성센서는 파랑에 의하여 여러 방향으로 움직인다. 하지만 파고를 측정하기 위해서는 고도방향의 가속도만을 필요로 하기 때문에, 고도방향의 가속도만을 추출하는 과정이 필요하다. 고도방향의 가속도만을 얻기 위해서는 센서의 자세를 측정한 후에 센서의 가속도 데이터를 지구좌표축으로 변환하여 고도방향의 가속도를 얻는다. 센서의 자세를 측정하기 위해서는 자세측정시스템을 필요로 한다. 자세측정시스템은 센서가 지구좌표축을 기준으로 어느 정도 회전해 있는지를 측정하는 시스템이며 Attitude Reference System(ARS)과 Attitude Heading Reference System(AHRS) 두가지로 나뉜다. AHRS는 각 축마다 Pitch, Roll, Yaw 회전이 있으며, 회전 순서는 Pitch, Roll, Yaw 순서이고 회전방식은 그림 1과 같다. ARS는 AHRS에서 Yaw 회전이 제외된 시스템이다. 여기서 Yaw 회전은 지자계센서로 측정하며 센서의 Heading 방향을 의미한다. 파고를 측정할 때에는 고도방향의 데이터만 필요하므로 고도방향의 가속도에 영향을 주는 Roll, Pitch 회전만 필요하게 된다. 그러므로 Yaw 회전이 없는 ARS를 적용하여 Pitch 회전 $R_p(\theta)$ 과 Roll 회전 $R_r(\phi)$ 을 측정하였고 각각의 회전식은 식 (1), (2)와 같다.

$$R_p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_r(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

센서좌표계 $[X_A Y_A Z_A]$ 는 자세측정시스템에 의하여 지구좌표계 $[X_E Y_E Z_E]$ 가 Pitch 회전과 Roll 회전을 한 좌표계이다. 회전 순서에 따라 지구좌표계 $[X_E Y_E Z_E]$ 는 Pitch 회전을 한 후에 Roll 회전을 하기 때문에 식 (3)처럼 Pitch 회전 매트릭스 $R_p(\theta)$ 를 먼저 곱한다. 식 (3)에서 R_T 변환은 $R_r(\phi)$ 와 $R_p(\theta)$ 의 곱으로써 Pitch, Roll이 전부 회전했을 때의 변환이기 때문에, 지구좌표계 $[X_E Y_E Z_E]$ 를 기준으로 센서좌표계 $[X_A Y_A Z_A]$ 가 얼마만큼 회전했는가를 의미한다.

$$\begin{aligned} [X_A Y_A Z_A]^T &= R_r(\phi)R_p(\theta)[X_E Y_E Z_E]^T \\ [X_A Y_A Z_A]^T &= R_T[X_E Y_E Z_E]^T \end{aligned} \quad (3)$$

그림 2-(1)은 지구좌표계 $[X_E Y_E Z_E]$ 에서 가속도를 측정했을 때 출력되는 가속도 데이터 $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ 를 설명한 그림이며, 그림 2-(3)은 자세가 틀어진 센서의 센서좌표계 $[X_A Y_A Z_A]$ 와 그림 2-(1)과 동일한 가속도를 측정했을 때 출력되는 가속도 데이터 $[G_{XA} G_{YA} G_{ZA}]$ 를 설명한 그림이다. 파고를 계산하기 위해서는 지구좌표계의 가속도 데이터인 G_{ZE} 가 필요하지만 실제 회전된 센서에서 얻는 가속도 데이터는 G_{ZA} 가 된다. 그림 2-(2)에서처럼 센서좌표계가 회전이 되었다더라도 가속도 벡터는 변화하지 않기 때문에 동일한 가속도를 측정하더라도 지구좌표계에서 출력되는 가속도 데이터 $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ 와 센서좌표계에서 출력되는 가속도 데이터 $[G_{XA} G_{YA} G_{ZA}]$ 는 다르게 출력된다. 센서좌표계의 가속도 데이터 $[G_{XA} G_{YA} G_{ZA}]$ 에서 지구좌표계의 가속도 데이터 $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ 를 구하기 위해서는 가속도 벡터를 센서좌표계 회전변환 R_T 만큼 변환시켜주면 구하고자 하는 지구좌표계의 가속도 데이터 $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ 와 같게 된다. 그러므로 센서좌표계의 가속도 데이터를 식 (4)처럼 R_T 변환을 하여 지구좌표계의 가속도 $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ 를 구한다. 식 (4)에서 계산한 가속도 데이터 G_{ZE} 가 고도방향의 가속도임으로 파고 계산에 사용된다.

$$[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]^T = R_T[G_{XA} G_{YA} G_{ZA}]^T \quad (4)$$

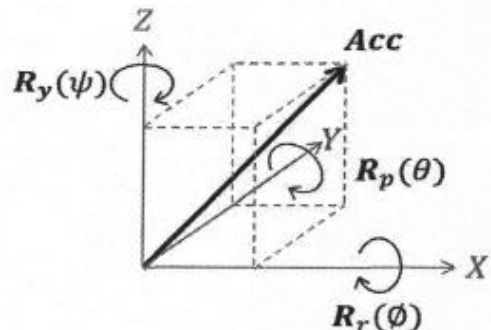


그림 1. Pitch 회전방향 $R_p(\theta)$, Roll 회전방향 $R_r(\phi)$, Yaw 회전방향 $R_y(\psi)$

Fig. 1. Pitch rotation $R_p(\theta)$, Roll rotation direction $R_r(\phi)$, Yaw rotation direction $R_y(\psi)$

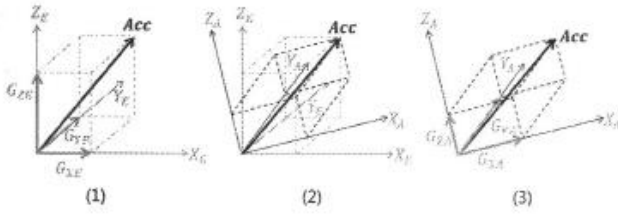


그림 2. (1) 지구좌표계 $[X_E Y_E Z_E]$ 에서의 가속도 출력 벡터 $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ (2) 센서좌표계가 R_T 변환된 그림 (3) R_T 변환된 센서좌표계 $[X_A Y_A Z_A]$ 에서의 가속도 출력 벡터 $[G_{XA} G_{YA} G_{ZA}]$

Fig. 2. (1) Acceleration output vector $[G_{XE} G_{YE} G_{ZE}]$ on the earth coordinate $[X_E Y_E Z_E]$ (2) R_T rotated sensor coordinate (3) Acceleration output vector $[G_{XA} G_{YA} G_{ZA}]$ on the R_T rotated sensor coordinate $[X_A Y_A Z_A]$

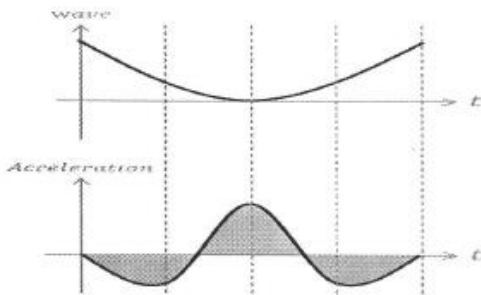


그림 3. crest-to-crest 방법의 파형 모양과 가속도 그래프

Fig. 3. Crest-to-crest method wave graph and its acceleration graph

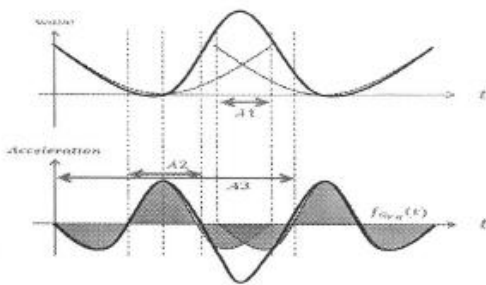


그림 4. crest-to-crest 방법의 파형 두개가 겹쳤을 경우의 파형과 가속도 그래프

Fig. 4. Crest-to-crest method wave graph and its acceleration graph when two waves are overlapped

단계 2: 가속도 데이터를 이용한 고도 계산

고도방향 가속도 데이터 G_{ZE} 는 중력가속도 g 와 동적가속도 d 를 포함하고 있다. 파랑에 의하여 생기는 가속도 데이터는 동적가

속도이기 때문에 고도방향 가속도 데이터 G_{ZE} 에서 중력가속도 g 를 제거하여 식 (5)처럼 동적가속도를 구한다.

$$d = G_{ZE} - g \tag{5}$$

식 (5)에 의해서 동적가속도가 계산되지만 지역마다 중력가속도가 일정하지 않기 때문에 중력가속도에 의한 오차가 발생되고 시간이 흐름에 따라서 오차 누적이 발생된다. 또한 선형칼만필터를 이용하여 가속도를 2회 적분하여 파고를 계산하기 때문에 적분으로 인한 오차 누적도 발생한다. 그리고 관성항법시스템에 비하여 센서의 방향이 매우 높은 주기로 변화하기 때문에 상대적으로 오차율이 높아진다. 이러한 오차들을 해결하는 방법은 일반적으로 다른 센서를 접목하여 제거하지만, 본 연구에서는 해파의 특징을 분석하여 해파의 한 주기 범위를 찾은 후에 각 주기마다 독립적으로 파고를 계산하여 오차누적을 해결하였다. 적분오차는 시간이 흐름에 따라 누적되어 문제가 발생하는데 각 주기마다 독립적으로 파고를 계산하기 때문에 적분오차는 누적되지 않는다. 또한 적분오차 뿐만 아니라 다른 오차들이 발생하여도 다음 파고 계산에 영향을 주지 않는다. 게다가 기존의 스펙트럼 분석을 통한 파고 측정은 보통 20분간 데이터를 저장하여 처리를 하는 후처리 방식이지만[7], 각 주기마다 파고를 측정하기 때문에 주기가 1초에서 30초 사이인 풍량이 한번 발생할 때마다 즉각적으로 파고를 계산하는 실시간 시스템이 된다. 해파의 한 주기 범위를 찾기 위해서 파랑을 Gerstner Waves 모델로 가정하고 파를 crest-to-crest 방법으로 정의하였다[8]. Gerstner Waves 모델은 파랑이 안정되었을 경우의 위치를 중심으로 해수면에 수직으로 원운동하는 입자들의 움직임에 의한 곡선인 트로코이드의 중첩으로 표현되며, crest-to-crest 방법은 파형의 마루에서 다음 마루까지를 하나의 파형으로 간주하는 방법이다. 마루에서 다음 마루까지 센서가 이동할 때 고도방향 움직임만 고려하면 제자리로 돌아온 것이 된다. 센서가 제자리로 돌아왔기 때문에 가속도의 합은 그림 3처럼 0이 되어야 한다. 하지만 그림 4에서 두개의 파가 A1 구간에서 겹치게 되면 가속도 데이터 또한 겹치게 된다. 파가 반복되면 A1구간은 지속적으로 발생한다. 반대로 A2구간은 두개 이상의 파가 겹칠 경우에도 영향을 받지 않는 가속도 데이터 구간이 되며 A2구간도 지속적으로 생긴다. 그러므로 A2구간을 기준으로 A3구간을 하나의 파로 가정하여 가속도의 합이 0이 되도록 보정한다. 보정 방법은 양의 가속도 합과 음의 가속도 합의 비율이 1이 되도록 하는 것이다. 보정을 하기 위하여 먼저 양의 가속도 합과 음의 가속도 합의 비율 err 을 식 (6)처럼 구한다. 양의 가속도 합은 $A2$ 구간임으로 $\sum_{A2} f_{G_x}(t)$ 이며, $A2$ 구간을 제외한 나머지 구간은 음의 가속도 구간이기 때문에 $\sum_{A3} f_{G_x}(t) - \sum_{A2} f_{G_x}(t)$ 가 된다. 여기서 $f_{G_x}(t)$ 는 시간에 대한 고도방향 가속도 데이터 G_{ZE} 의 함수를 의미한다.

$$err = \frac{\sum_{A2} f_{G_x}(t)}{\sum_{A3} f_{G_x}(t) - \sum_{A2} f_{G_x}(t)} \tag{6}$$

err은 양의 가속도 합에 대비하여 음의 가속도 합의 비율을 의미하고, A2구간은 다른 파도에 영향을 받지 않은 구간임으로, A2 구간을 제외한 나머지 구간은 다른 파도에 영향을 받아서 필요하지 않은 데이터가 포함되어 있음으로 err을 곱하여 식 (7)처럼 보정한다. 보정된 동적가속도 \hat{d} 에 의하여 중력가속도 오차는 함께 해결이 된다. 하나의 파에 중력가속도 오차가 포함이 되었을 경우에 가속도의 합은 0이 되지 않지만 보정된 동적가속도 \hat{d} 에 의해서 함께 제거되기 때문에 중력가속도 오차도 자연스럽게 해결된다.

$$\hat{d} = \begin{cases} (G_{ZE}-g) & f_{G_{\#}}(t) = A2 \\ (G_{ZE}-g) \times err & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

보정된 동적가속도 \hat{d} 를 2회 적분을 하면 파형이 나온다. 적분은 선형칼만필터를 이용하였다. 선형칼만필터는 상태방정식을 통하여 예측 값을 구하고, 입력 데이터의 오차정보를 이용하여 예측값과 실제 측정값에 가중치를 주어 계산하는 필터이다[9]. 선형칼만필터의 상태방정식을 구하기 위해서는 우선 상태방정식 매트릭스 A를 구해야 한다. 상태방정식 매트릭스 A는 가속도, 속도, 이동거리간의 방정식을 통하여 구할 수 있다. 속도의 변화율 ΔV 는 현재 가속도 A_t 와 시간 ΔT 를 이용하여 $\Delta V = A_t \times \Delta T$ 이 된다. 현재 속도는 과거 속도와 속도 변화율의 합임으로 식 (8)이 되며, 이동거리도 같은 방식으로 식 (9)가 된다.

$$V_t = V_{t-1} + \Delta V = V_{t-1} + A_t \times \Delta T \quad (8)$$

$$S_t = S_{t-1} + \Delta S = S_{t-1} + V_t \times \Delta T + 0.5 \times A_t \times (\Delta T)^2 \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에 의하여 상태방정식 매트릭스 A는 식(10)이 된다.

$$\begin{bmatrix} S_t \\ V_t \\ A_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0.5 \times \Delta T^2 \\ 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{t-1} \\ V_{t-1} \\ A_{t-1} \end{bmatrix} = AX_{t-1} \quad (10)$$

선형칼만필터는 오차공분산을 지속적으로 업데이트하여 가중치를 계산한다. 오차공분산을 지속적으로 업데이트하기 위한 계산식은 식 (11)이다. 여기서 P는 X의 오차공분산 매트릭스이며, Q는 A의 오차공분산 매트릭스이다.

$$P_t = AP_{t-1}A^T + Q \quad (11)$$

선형칼만필터에서 적분을 처리함으로써 시간이 흐를수록 적분에 의하여 오차가 누적된다. 하지만 각각의 파는 마루에서 시작되고 마루를 시작점으로 하여 파형을 분석하면 되기 때문에 마루지점마다 시작점을 초기화 시킨다. 시작점을 초기화시킴으로써 과거의 파형으로 생긴 적분 오차는 누적되지 않기 때문에 장시간 동작을 해도 오차누적에 의한 문제가 발생하지 않는다. 시작점을 초기화하기 때문에 파고 W는 선형칼만필터 출력 파형의 시작점

$f_s(t_{srt})$ 와 최소치 $\min(f_s(t))$ 차이와 끝점 $f_s(t_{end})$ 과 최소치 $\min(f_s(t))$ 의 평균으로 계산한다. 여기서 $f_s(t)$ 는 선형칼만필터를 이용해서 구한 파형의 함수이다.

$$W = \frac{1}{2}(f_s(t_{srt}) + f_s(t_{end}) - 2\min(f_s(t))) \quad (12)$$

III. 실험조건

파도는 중력에 의해서 발생하는 조석파와 조석파의 공명으로 일어나는 세이쉬, 지진으로 발생하는 쓰나미, 표면장력에 의해 발생하는 표면 장력파, 그리고 바람에 의해 발생하는 풍랑이 있다. 중력에 의해서 발생하는 파는 달의 위치를 파악해서 분석할 수 있으며, 지진으로 발생하는 쓰나미는 지진강도와 위치를 파악해서 분석할 수 있고, 표면장력에 의해서 발생하는 표면 장력파는 매우 미비하다. 그리고 바람에 의해서 발생하는 풍랑은 바람에 의하여 분석이 가능하다. 하지만 풍랑은 현 위치의 주변의 바람 세기에도 영향을 받기 때문에 환경적인 요소로 분석하기가 다른 파보다 어렵다. 그리고 파의 대부분의 에너지는 풍랑 범위에 집중되어 있어서 풍랑데이터는 해상정보에 매우 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 풍랑의 특성을 분석하고, 다양한 풍랑을 모델링하여 실험을 하였다. 풍랑은 Beaufort 풍력 계급표에 의하여 14미터 이상까지 발생하고 등급을 13단계로 나눈다(표 1).

표 1. Beaufort 풍력 계급표
Table 1. Beaufort wind scale

풍력계급	명칭	풍속 [m/s]	파고 [m]	최대파고 [m]
0	Calm	0	0.0	0.0
1	Light air	0.3~1.5	0.1	0.1
2	Light breeze	1.6~3.3	0.2	0.3
3	Gentle breeze	3.4~5.4	0.6	1.0
4	Moderate breeze	5.5~7.9	1.0	1.5
5	Fresh breeze	8.0~10.7	2.0	2.5
6	Strong breeze	10.8~13.8	3.0	4.0
7	Near gale	13.9~17.1	4.0	5.5
8	Gale	17.2~20.7	5.5	7.5
9	Strong gale	20.8~24.4	7.0	10.0
10	Storm	24.5~28.4	9.0	12.5
11	Violent storm	28.5~32.6	11.5	16.0
12	Hurricane	32.7 이상	14.0 이상	-

IV. 파고 측정 실험

단계 1: 파도 모델링

파랑을 모델링 하는 방법은 Perlin noise를 이용하여 모델링

하는 방법 [10], Gerstner Waves를 이용하여 모델링 하는 방법 등 여러 가지가 있다. 풍랑은 파도에 의하여 생성되기 때문에 대부분이 끝에 비하여 뾰족한 모양이다. 이러한 모양은 Gerstner Waves 모델과 유사하며, 실험조건에 만족하기 때문에 Gerstner Waves 모델을 사용하였다. Gerstner Waves 모델은 파랑이 안정되었을 경우의 위치가 $X_0 = [x_0 z_0]$ 인 입자는 임의의 시간 t 에 진폭이 A 인 물결들이 지나감에 따라 식 (13)처럼 움직인다. 식 (13)에서 K 는 파도의 진행방향 벡터이며 w 는 시간에 대한 위상차로, 물결의 이동속도를 결정한다[11]. 그림 5는 주기가 5초이고 파고가 15미터인 Gerstner Waves 모델 그래프와 그 모델의 가속도 그래프이다.

$$X = X_0 + \sum A \frac{K}{|K|} \cos(K \cdot X_0 - wt) \quad (13)$$

$$y = \sum A \sin(K \cdot X_0 - wt)$$

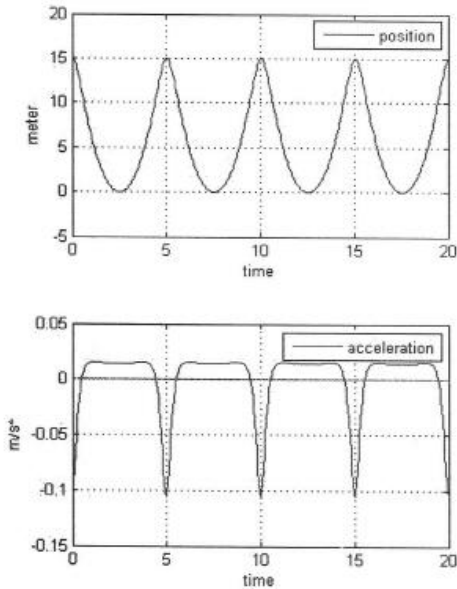


그림 5. 주기가 5초이고 파고가 15미터일 때 Gerstner waves 모델과 가속도 그래프

Fig. 5. Gerstner Waves Model graph and its acceleration graph when period is 5 sec., wave height is 15 m.

단계 2: 파도 1회 검출

파고를 측정하기 위해서 관성센서로부터 가속도 데이터를 얻기 때문에 이용할 수 있는 데이터는 가속도 데이터밖에 없다. 즉, 그림 5에서 가속도 그래프만을 이용하여 파도 1회 부분을 검출하여 $A2$ 구간과 $A3$ 구간을 나누어야 한다. $A3$ 구간은 그림 6에서처럼 down-zero-crossing을 시작으로 down-zero-crossing과 up-zero-crossing이 2회 반복되는 구간이 되며, $A2$ 구간은 $A3$ 구간중에서 첫번째 up-zero-crossing부터 두번째 down-zero-crossing 구간이 된다. 그림 6에서 $A3$ 구간은 2군데가 나오며 표 2와 같다.

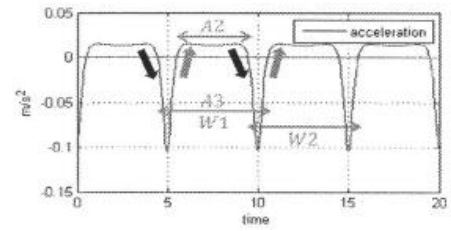


그림 6. 가속도 그래프에서의 down-zero-crossing과 up-zero-crossing
Fig. 6. Down-zero-crossing and up-zero-crossing in the acceleration graph

표 2. 그림 6에서의 $A2$ 구간과 $A3$ 구간
Table 2. $A2$ area and $A3$ area in Fig 6.

구간	$A2$ [sec]	$A3$ [sec]
W1	5.6~9.5	4.5~10.55
W2	10.6~14.5	9.5~15.55

단계 3: 파고 계산

단계 2를 통하여 $A2$ 구간과 $A3$ 구간을 나눈 다음에 err 을 계산하여 동적가속도 d 를 보정한 후에 선형칼만필터를 이용하여 파고를 계산한다. 그림 7은 표 2의 구간 1의 W1결과 그래프이다. 그림 7-(1)은 구간 W1의 Gerstner Waves 모델 그래프이다. 여기서 그래프 모양은 정확히 crest-to-crest구간이 아니라 다른 파도의 영향이 있음을 볼 수 있다. 그림 7-(2)는 보정된 동적가속도 d 의 그래프이다. zero crossing이 총 4회가 발생함을 볼 수 있다. 그림 7-(3)은 선형칼만필터를 이용하여 파형을 추정한 그래프이다. 논문의 가정대로 그림 7-(3)에서 추정된 파형은 제자리로 돌아온 그래프가 그려짐을 볼 수 있다. 같은 방식으로 W2구간도 파고를 측정하였으며 결과는 표 3과 같다. 다른 구간 이더라도 동일한 모델이기 때문에 같은 결과임을 알 수 있다.

표 3. 그림 6 가속도 그래프의 실험 결과
Table 3. Experimental results using acceleration graph in Fig 6.

구간	Gerstner Waves 모델 파고 [m]	실험 결과 파고 [m]
W1	15	15.5
W2	15	15.5

Beaufort 풍력 계급표에 의거하여 풍랑은 1미터에서 최고 15미터까지 발생할 수 있다. 그러므로 파고를 1미터에서 15미터까지 2미터 간격으로 변경하면서 실험을 진행하였으며 결과는 표 4와 같다. 실험 결과에 따르면 모델링의 파고가 증가할수록 오차도 비례하여 증가함을 알 수 있다. 하지만 파고가 변하더라도 실

험 결과의 오차율은 평균 3.51%로 큰 변화 없이 일정함을 볼 수 있다.

표 4. 각각의 파고에 대한 실험 결과

Table 4. Experimental results for various wave heights

Gerstner Waves 모델의 파고 [m]	실험 결과 파고 [m]	오차 [m]	오차율 [%]
1	1.04	0.04	4
3	3.11	0.11	3.67
5	5.16	0.16	3.2
7	7.24	0.24	3.43
9	9.35	0.35	3.89
11	11.36	0.36	3.28
13	13.43	0.43	3.33
15	15.5	0.5	3.33

각 주기마다 독립적으로 파고를 측정하지 않으면 적분오차가 지속적으로 누적되어 시간이 오래 지나면 파고 측정에 영향을 주게 된다. 오차 누적이 영향을 비교하기 위하여 그림 5 모델을 이용하지만 구간을 나누지 않고 동일한 적분 알고리즘을 통하여 파고를 측정하였으며 결과 파고그래프는 그림 8과 같으며 각 주기마다 바이어스는 표 5와 같다. 그림 8에서 시간이 흐를수록 파도가 상승함을 볼 수 있으며, 이는 시간이 지속됨에 따라 표 5처럼 오차율이 증가하게 된다. 적분을 할 때에는 적분오차가 발생하는데 이러한 적분오차가 다음 주기의 풍랑에 영향을 주기 때문에 오차율은 계속 증가하게 되는 것이다. 이 실험을 통하여 본 논문에서 개발한 각각의 주기마다 독립적으로 파고를 측정하는 알고리즘이 오차 누적 문제를 해결함을 보였다.

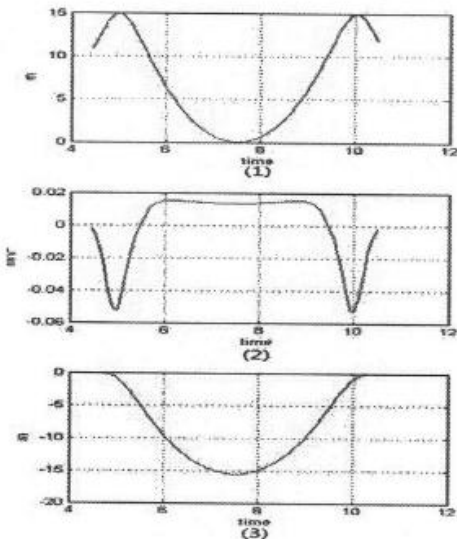


그림 7. (1) W1구간의 Gerstner Waves 모델 그래프
(2) W1구간의 가속도 그래프
(3) 실험 결과 파형

Fig. 7. (1) Gerstner Waves Model graph in area W1
(2) Acceleration graph in area W1
(3) Experimental results

표 5. 해파의 한 주기 구간을 정하지 않고 실험을 한 결과 발생한 바이어스

Table 5. The bias from experimental result without selecting one period of wave

주기	실험 결과 파고 [m]	오차율 [%]	bias [m/s]
1	14.9	0.07	-0.02
2	15.76	5.07	0.15
3	16.56	10.4	0.31
4	16.97	13.13	0.39

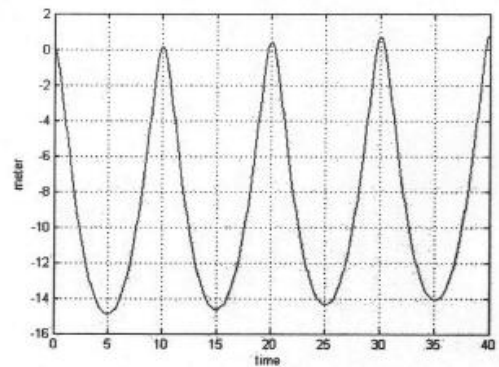


그림 8. 해파의 한 주기 구간을 정하지 않고 실험을 한 결과 파형

Fig. 8. Experimental result without selecting one period of wave

VI. 결론

관성센서를 이용하여 위치를 추적하는 관성항법시스템은 항상 적분 오차 누적이 문제가 발생하지만 다른 센서들과의 결합으로 적분 오차 누적이 문제를 해결한다. 본 논문에서는 다른 센서들과의 결합을 하지 않고도 파도의 특징을 이용하여 적분 오차의 누적을 알고리즘을 통하여 해결할 수 있었다. 또한 중력가속도를 완벽하게 제거할 수 없는 문제도 동시에 해결하였으며, 선형칼만 필터를 이용하여 파고 측정을 실시간으로 처리할 수 있게 하였다. Gerstner Waves 모델은 파형이 트로코이드 케적이라고 가정을 하였기 때문에 바람에 의해 발생하는 풍랑만 모델링을 할 수 있는 한계점이 있지만, 실험을 통하여 풍랑측정에 한해서 평균 오차를 3.5%로 우수한 측정 성능을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] National Data Buoy Center, Nondirectional and Directional Wave Data Analysis Procedures, NDBC Technical Document 96-01, Stennis Space Center
[2] B. W. Parinson and J. J. Spilker, Global Positioning

System: Theory and Applications, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.164, 1995.

[3] D. B. Cox, "Integration of GPS with Inertial Navigation Systems" NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, Vol.25, No.2, pp.236-245, Summer 1978.

[4] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, John Wiley and Sons, 1992.

[5] 이재훈, 김도윤, 성상학, 남동균, 박주영, "임베디드 시스템을 위한 GPS/INS 결합 알고리즘의 실시간 동작 구현", 한국지능시스템학회 학술발표 논문집, Vol.19 No.1, pp.245-249, 2009.

[6] 김성필, 유창선, 김응태, "GPS/INS/기압고도계를 결합한 고도 결정 알고리즘", 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, p.283-287, 2004.

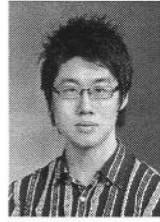
[7] 이원부, 박수홍, "해양자동관측용 해상 부이식 파고 시스템에 대한 연구", 한국전자통신학회 논문지, Vol.6 No.2, pp.268-273, 2011.

[8] Yoshimi Goda, 토목강좌 해안·항만, Shokokushi Publishing Co., Ltd., 2000.

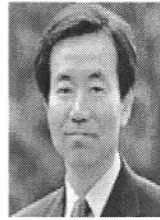
[9] M. S. Grewal and A. P. Andrews, Kalman Filtering: Theory and Practice using MATLAB, John Wiley and Sons, New York, 2001.

[10] K. Perlin, "An image synthesizer", Proceeding of SIGGRAPH '85 Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.287-296, July 1985.

[11] Jerry Tessendorf., Simulating Ocean Water, In Siggraph Course Notes, Addison-Wesley, 1999.



이 중 현 (Jung-Hyun Lee)
 2009년 8월 동국대 전기공학과(공학사)
 2012년 8월 동국대 전자전기공학과
 (석박통합 수료)
 ※주관심분야: 디지털신호처리, DSP 응용, 위성항법



이 동 옥 (Dong-Wook Lee)
 正會員
 1983년 2월 서울대 전기공학과(공학사)
 1985년 2월 서울대 전기공학과(공학석사)
 1992년 6월 Georgia Institute of Technology(공학박사)
 1992년 8월 ~ 1998년 8월 (주)삼성 SDS 선임연구원
 1998년 9월 ~ 현재 동국대학교 전자전기공학부 정교수
 ※주관심분야: 디지털신호처리, 디지털통신



허 문 범 (Moonbeom Heo)
 1992년 2월 경희대학교 기계공학과(공학사)
 1997년 12월 Illinois Institute of Technology 항공
 기계공학과(공학석사)
 2004년 12월 Illinois Institute of Technology 항
 공기계공학과(공학박사)
 2005년 10월 ~ 현재 항공우주연구원 선임연구원
 ※주관심분야: GNSS, 위성항법, 항행시스템 등