

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.6.215>

IIBC 2014-6-31

## 가속도계를 이용한 파고 알고리즘 개선에 관한 연구

### A Study on Improvement of Wave Height Algorithm using Accelerometer

정동근\*, 임명재\*\*, 이준택\*\*\*

Dong-Keun Chung\*, Myung-Jae Lim\*\*, Joon-Taik Lee\*\*\*

**요약** 파고 부이에 설치된 가속도센서를 통해 가속도 값을 측정하고, 이를 통해 파고를 계산하는 알고리즘은 대부분 측정된 가속도값의 이중적분을 취하여 구하고 있다. 이와 같은 적분과정은 오차의 누적을 수반하게 되며, 오차의 누적은, 자칫 오측정 및 시스템의 불안정으로 이어질 수 있다. 한편, 해수면의 물입자 운동은 주기적이며 타원운동을 하고 있다는 사실이 잘 알려져 있다. 이러한 사실로부터, 선형적 관계를 이용하여 타원 운동식을 직접 계산할 수 있으며, 이에 대한 최소값을 구함으로써 파고를 얻을 수 있게 된다. 본 연구는, 이중 적분 과정을 통해 수반되는 오차누적의 영향을 최소화하는 방법으로서 선형적 관계의 이용가능성을 확보하고자 하는데 그 목적이 있다.

**Abstract** Most of studies on wave height algorithms that are using at buoys describe algorithms using double integral to determine the position data from the acceleration data measured from the accelerometer. but sometimes, it can involve some cumulative error in that process, and result in misjudgment or unstable system. On the other hand, It is widely known that the motion of fluid particles on or underneath a linear progressive wave is periodic and elliptic. This fact is considered in this article and leads a improved algorithms with no integral processing.

**Key Words** : Wave Height Algorithm, Accelerometer, Buoy, Small water wave

## 1. 서론

항만에서의 안정적이고 효율적인 관리, 해난사고등에 의한 유류오염, 적조 등에 대비한 해양환경의 실시간 자료획득 그리고 이상파고, 이상조위, 태풍 등에 의한 피해를 최대한 방지하여 인적/물적 손실등의 해난 재해를 줄이기 위해서는 해양환경 요인에 대한 실시간 모니터링이 필요하다. 또한 해양이라는 특수환경으로 인해 위험부담이 크고 막대한 시간과 비용을 초래하므로, 이를 극복하기 위한 무인 모니터링 시스템의 구축이 절실한 상황이

다. 국내적으로는 이러한 해양기상 관측을 위해 기상청에서 한반도 5개 지점에 해양에서의 기상 및 해상상황을 자동으로 관측하기 위한 장비로 부이에 각종 기상관측 센서 및 해양 관측 센서를 설치하여 무선통신으로 육상에 실시간으로 송신하는 해양자동기상관측장비를 구축하여 실시간으로 수집되는 해상 기상 관측 자료로 구지적인 해상예보, 기상예보 모델 및 특보 발표에 사용하고 있다.

그러나 현재 국내 해양에서 파고를 관측하는 센서는 대부분 국외에서 수입하고 있는 실정이며, 더불어 파고

\*정회원, 을지대학교 의료IT마케팅학과

\*\*정회원, 을지대학교 의료IT마케팅학과(교신저자)

\*\*\*정회원, 한국경영정보연구소

접수일자: 2014년 9월 30일, 수정일자: 2014년 10월 30일

게재확정일자: 2014년 12월 12일

Received: 30 September, 2014 / Revised: 30 October, 2014

Accepted: 12 December, 2014

\*\*Corresponding Author: lk04@eulji.ac.kr

Dept. of Medical IT Marketing, Eulji University, Korea

센서의 알고리즘 및 파고 센서의 연구 및 개발은 극히 미미한 실정이다. 이에 대한 중요성을 인식하여 국책과제를 통해 파고 센서 개발을 위한 파고 알고리즘 구현 및 센서 개발을 진행하고 부이의 표준이라 할 수 있는 해외의 D 파고 관측부이, M 파고 관측 시스템과 비교 테스트를 진행함으로써 그 효과성을 입증한 바가 있다.

파고 알고리즘의 구현에 있어서는 상기 연구를 비롯하여 다수의 논문이 측정된 가속도값의 이중 적분을 통해 위치를 추정하고 이를 통해, 파도의 주기 및 파고를 산정하고 있다. 이러한 과정에서 누적되는 오차의 문제는 자칫 시스템을 불안정하게 만들 수 있으며, 그로부터 발생하는 오측의 가능성을 항상 안고 있게되어 이에 대한 각종의 대책이 수반되게 된다. 본 연구에서는 해수면의 물 입자의 운동이 타원운동임에 착안하여 가속도 측정을 통해 적분과정없이 실시간으로 파고와 주기를 계산할 수 있음을 보이고 이로부터 알고리즘 개선의 가능성을 확인해보고자 한다.

## II. 파고의 특성과 측정

### 1. 가속도계에 의한 파고 측정

부이(buoy)는 해수면에 놓여져 내부 가속도계로부터 가속도 데이터를 취득한다. 취득된 가속도 데이터는 시간에 대한 2번의 적분과정을 거쳐 위치를 계산할 수 있다.



그림 1. 이중적분을 통한 가속도의 위치데이터 변환  
Fig. 1. Calculation of position data from acceleration data

그러나, 실제 측정된 값은 다양한 외부적 잡음에 영향을 받으므로 적절한 가공이 필요하다. 그림 2는 2009년에 개발해 실제 해수면에 적용시켜 해수면의 파고를 측정할 알고리즘이다.

가속도계로부터 취득된 데이터 중, 외부 환경에 의한 잡음을 비롯하여 각종 고주파성분의 잡음을 제거하고, 이상파랑 등에 영향을 주지않는 장주기와 성분을 제거하기 위해 대역통과필터를 사용하였다.

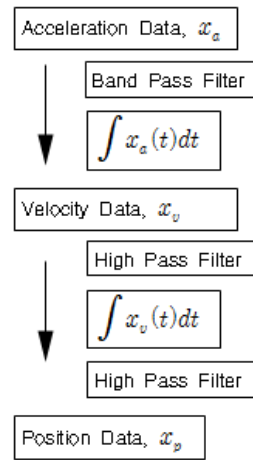


그림 2. 파고 계산 알고리즘 흐름도  
Fig. 2. flow of wave height algorithm



그림 3. 제작된 파고 발생기  
Fig. 3. wave height generation

아울러 속도 데이터의 적분과정에서는 적분연산 전후에 고주파필터를 사용함으로써, 연산과정에서 발생할지 모를 외란적 요소를 제거하고자 하였다. 그림 3은 파고측정을 위해 제작된 파고발생기이다. 파고발생기로 부터 발생된 ±1m의 파고에 대한 값을 0.1초단위로 샘플링한 가속도계 값이 입력데이터로 주어지며, 그림 2의 알고리즘 과정을 거친 결과값을 그림 4에 보였다.

이렇게 구하여진 위치 데이터 계산 알고리즘을 사용하여, 매 30분 간격의 최대파고, 상위 1/10 파고( $H[1/10]$ ), 상위 1/3파고( $H[1/3]$ ), 평균파고( $H_{avg}$ )를 구하여, 이를 모니터링하고 분석하게 된다. 이의 알고리즘이 장착된 파고부이는 현장테스트를 거쳐, 기상청에서 현재 활용 중에 있다.

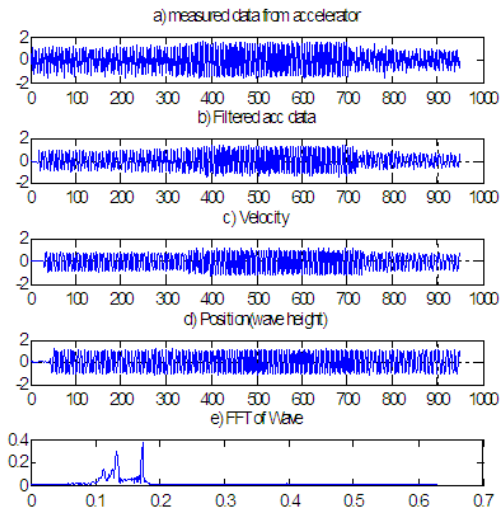


그림 4. 파고 알고리즘 수행 결과.1  
 Fig. 4. result using wave height algorithm..1

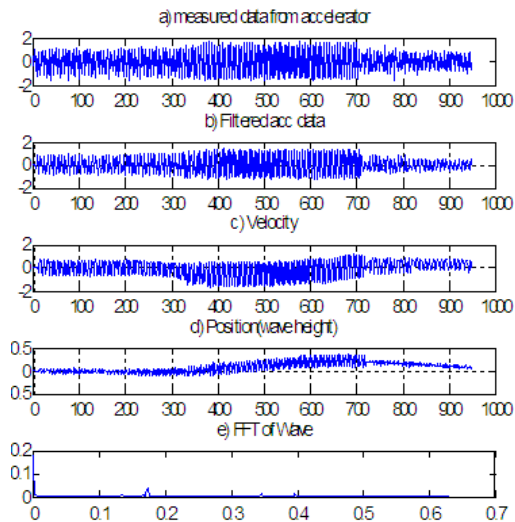


그림 5. 파고 알고리즘 수행 결과.2  
 Fig. 5. result using wave height algorithm..2

현재, 7분 단위로 측정하여, 3회에 걸친 데이터를 평균 하여 활용하고 있는데, 그림 5는 필터의 계수값을 임의 조정해본 경우로서, 적분오차등으로 인하여 발생가능한 상황을 보인 것이다. d)를 보면 알 수 있듯이, 위치에 대한 잘못된 정보가 결과로 나올 수 있다.

## 2. 해수면의 파고

속도포텐셜에 관한 라플라스 방정식(연속방정식, 질량보존의 법칙)과 베르누이 방정식을 근거로 선형화 작

업을 거치고 관련된 경계조건을 주게되면, 해수면에서의 파도에 관한 방정식은 다음의 라플라스 방정식으로 표현 되는 미분방정식이 된다.

$$\nabla^2 \phi(x, z, t) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

이와 관련된 각 기호적 의미는 그림 6과 같다.

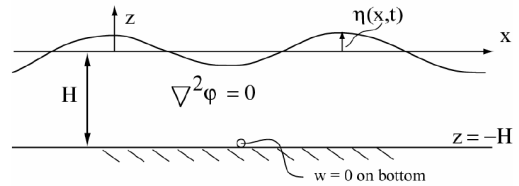


그림 6. Linearized Wave Problem  
 Fig. 6. Linearized Wave Problem

식(1)에 대한 해를 구하면, 선형 진행파 하에서 입자들의 운동을 알 수 있는데, 수평운동을  $\zeta_p$  라 하고, 수직운동을  $\eta_p$  로 하면, 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} \zeta_p(x, z, t) &= af(z)\sin(kx - \omega t) + \psi \\ \eta_p(x, z, t) &= af_1(z)\cos(\omega t - kx - \psi) \dots\dots(2) \end{aligned}$$

식(2)의 결과로 입자들이 가지는 궤적은 식(3)으로 표현되는 타원 방정식이 된다.

$$\left[ \frac{\zeta_p}{af(z)} \right]^2 + \left[ \frac{\eta_p}{af_1(z)} \right]^2 = 1 \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $f(z) = \frac{\cosh k(z+H)}{\sinh kH}$

$$f_1(z) = \frac{\sinh k(z+H)}{\sinh kH}$$

해저깊이  $H$  와 파장  $\lambda$  에 따른 물 입자의 궤적을 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 (a)는 천해면(shallow water)의 경우이며, (c)는 심해면(deep water)의 입자 운동을 보여준다. 얕은 바다에서는 타원운동을 하지만, 파장의 2배 이상의 깊이를 갖는 해양에서는 원운동을 하고 있음을 알 수 있다.

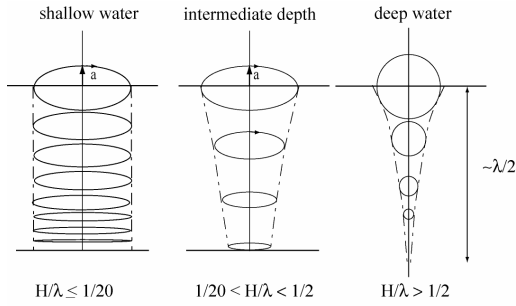


그림 7. 해수면에서 물입자의 운동 궤적  
Fig. 7. Schematic Representation of Water Particle Trajectories

그림 7로 보여지듯이 물 입자의 운동 궤적은 타원운동에 근거하고 있으며, 이러한 운동은 주기의 변화가 없다고 가정했을때, 각각의 위치,속도,가속도는 위상의 변화와 진폭의 크기로 결정될 수 있다.

### III. 알고리즘의 개선방향

2장에서 물 입자의 운동궤적을 시간에 대한 위치,  $\mathbf{r}(t)$  로 표현하면 그림 8과 같이 도식할 수 있다.

그림 8을 통해 시간  $t$  에 따른 타원 궤적의 위치는 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= x(t) \mathbf{i} + y(t) \mathbf{j} \\ &= a \cos(\omega t) \mathbf{i} + b \sin(\omega t) \mathbf{j} \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

단,  $\theta = \omega t$ ,  $\omega = 2\pi/T$

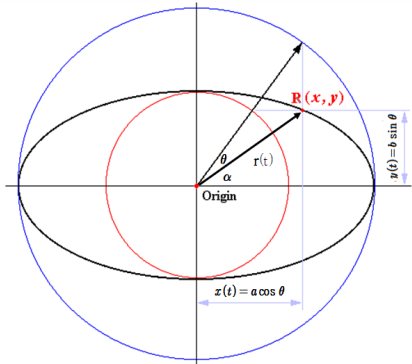


그림 8. 타원방정식의 기하학적 표현  
Fig. 8. geometrical representation of ellipse equation

가속도를  $\mathbf{a}(t) = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$  라 했을때 이는  $\mathbf{r}(t)$ 의 2차 미분이며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(t) &= \frac{d^2 \mathbf{r}(t)}{dt^2} \quad \dots\dots\dots(5) \\ &= -\omega^2 a \cos(\omega t) \mathbf{i} - \omega^2 b \sin(\omega t) \mathbf{j} \\ &= -\omega^2 \mathbf{r}(t) \end{aligned}$$

파고에 따라 가속도계로부터 측정값  $a_x$ ,  $a_y$ 가 주어지는데 식(5)로부터 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= -\frac{1}{\omega^2} \mathbf{a}(t) \quad \dots\dots\dots(6) \\ &= -\frac{1}{\omega^2} (a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}) \end{aligned}$$

이로부터 우리가 구하고자 하는 위치(파고)값을 알 수 있는데, 파고  $2b$ 는 다음식으로부터 구할 수 있다.

$$2b = -\frac{2a_y}{\omega^2 \sin(\omega t)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$a_y$ 의 값이 이상적으로 측정되어  $a_y = -\omega^2 b \sin(\omega t)$ 의 형태를 가진다면, 주기가 일정할 경우 시간과 무관한 상수  $b$ 의 값을 얻을 수 있다. 그러나, 실제에 있어서는  $a_y$ 에 측정 잡음등 외부적 잡음이 고려되어야 하며, 이 경우  $\sin(\omega t)$ 가 0 이거나 아주 작은 값을 가질 경우  $b$ 의 값을 무한대의 값을 가질 수 있다. 따라서, 특정 조건에서 결정되는  $b$ 의 값을 고려해야만 한다. 그중 하나는  $\omega t = (k+1/2)\pi$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$  일 때이다. 이 경우는 그림 8에서  $\mathbf{r}(t)$ 가  $x$ 축에 수직으로 놓인 경우이다. 이때  $\sin(\omega t) = 1$  이므로, 파고  $2b$ 는 다음의 식으로 얻을 수 있다.

$$b = -\frac{a_y}{\omega^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

식(8)로부터 파고의 높이를 계산하려면,  $\omega$ 의 값을 알아야만 한다. 이러한  $\omega$ 의 값을 알기위해서는  $\theta$ 를 추정할 수 있어야 하며,  $\tan \alpha = a_y/a_x$ 로부터,  $\theta$ 를 유도산정할 수 있으나, 하나의 주어진 방정식에 대해 미지변수

2개에 대한 유일해를 구할 수 없다.

따라서,  $\theta$  값은 별도로 추정해야만 하는데, 기존의 방식을 통하여, 주기를 별도로 구할 수 있다. 즉, 주기는 주어진 파에 대해 끝에서 끝까지 혹은 만에서 만까지를 측정함으로써 얻어질 수 있으며, 이에 따라 주기가 구해지면,  $\omega = 2\pi/T$  로 부터 각속도를 구하고 이를 식(8)에 대입함으로써 별도의 적분과정없이 파고를 구할 수 있게 된다.

이에 대한 전체적인 흐름도는 그림 9와 같다.

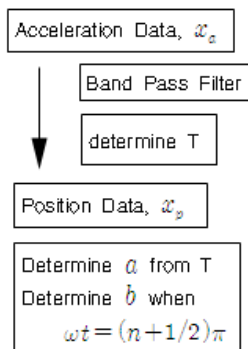


그림 9. 개선된 알고리즘의 흐름도  
 Fig. 9. flow of a improved algorithm

#### IV. 시뮬레이션 및 결과

그림 3의 실험에서 측정되었던,  $x, y, z$  축 방향의 가속도  $a_x, a_y, a_z$  를 이용하여 실험을 진행하였다. 500초에서 600초 간의 자료를 보면, 그림 4.에서 보여주듯이 정확한 파형의 모습을 보여주지는 않는다. 이는 식(7), (8)에서 설명하였듯이, 매 순간의 위치 파악 보다는,  $\mathbf{r}(t)$  가 수직선상에 놓여  $b$  와 같아질때를 중요한 포인트로 보기 때문이다. 결과적으로 그래프는 반경이 1m 즉, 파고가 2m임을 보여주고 있다.

실험적으로 파고의 파형이 일정치 않게 나온 요인 중 하나는,  $x$  축 가속계의 고정 여부이다. 가속도계를 부이에 장착함에 있어 몇가지 유형이 있는데, 그 중 하나는 짐벌(Gimbals)를 이용하는 것이고, 또 하나는 부이에 가속도계를 고정시킨 후, 기우는 정도를 계산하여 수직성분을 추출하는 것이다. 본 실험에서는 짐벌의 경우와 유사한 형태로 실험을 진행하였는데, 수직적 성분은 유효하여 그림 10-b)에서와 같이 어느 정도 정현파의 모습을

보여주나, 수평성분인  $x$  축(그림 10-a)은 흔들림으로 인해 파형이 정현파에서 일그러져 있음을 볼 수 있다.

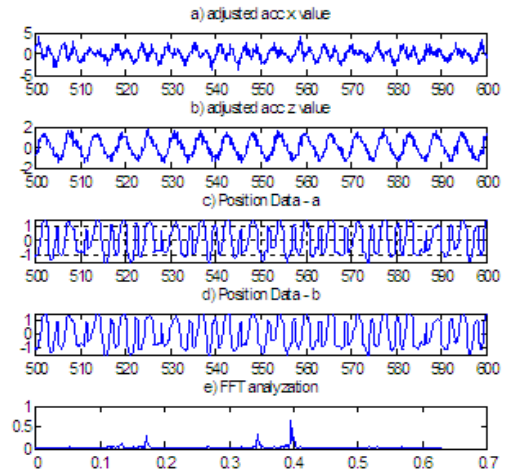


그림 10. 해수면에서 물입자의 운동 궤적  
 Fig. 10. Schematic Representation of Water Particle Trajectories

#### V. 결론

해수면에 놓여진 부이에 대하여 가속도계에 의한 파고(위치) 계산시 종래에는 대부분 이중적분 방식을 사용해왔다. 그러나 적분계산에 따르는 오차의 누적은 실시간 측정 불가능하게 하며, 때에 따라 오정보를 제공할 수 있다. 한편으로 해수면의 입자는 타원 운동을 진행하고 있으므로, 위치를 구하는데 있어, 적분을 배제한 벡터해석적 방법에 따라, 용이하게 구할 수 있음을 수식적으로 보였고, 이에 대한 실증적 시뮬레이션을 통해 밝혔다. 이러한 방식의 알고리즘은 적분을 배제하였다는 장점외에도 심해파뿐만 아니라, 천해파의 측정까지도 가능하게 해준다. 다만, 이러한 과정을 위해서는 주기에 대한 정확한 측정과 나아가서는 예측이 필요하다. 이에 대한 하나의 방안으로 이중적분으로 파고를 구하는 과정에서 오차의 누적을 제거하거나 최소화하는 방안으로 본 결과를 활용할 수 있으며, 이는 향후 연구과제가 될 것이다.

해양기상관측에 대한 중요도가 높아지면서 부이설계 및 운영에 대한 관심도 점차 증대되고 있는 시기에 부이의 국산화, 소형화, 첨단화는 향후 주요한 화두가 될 것이며, 이에 따르는 활발하고 심층적인 연구를 기대해 본다.

## References

- [1] J.S.Choi, H.R.Shin, J.W.Seo, J.S.Kim, S.W.Park, D.K.Chung, J.S.Park, L.H.Kim and T.Y.Park, "Wave Height Algorithm and Sensor Development using Accelerometer," Conference of The Korean Society of Marine Engineering, pp.291-296, 2009
- [2] Johan Kuperus, "Wave Monitoring using Wireless Sensor Nodes," Master's Thesis, The Univ. of Melbourne. Dept. of Electrical Engineering. 2009.
- [3] M.C.Marimon, N.J.Libatique, "Development and Evaluation of Wave Sensor Nodes for Ocean Wave Monitoring," IEEE, Systems Journal. Vol.PP, pp. 1-11, oct, 2013
- [4] Alexandra Techet, READINGS/L9 : Free Surface Water Waves, Hydrodynamics (13. 012), Course Number. 2.016, MIT Open - Course Ware.
- [5] Young, Sic, Na., Dong, Kun, Chung., Ki, Young, Lee., " Smartphone Controller using 3-D Acceleration Sensor", The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication., JIIBC,10,4(2010),23-28
- [6] Hyun,moon,Park., "A Study for Context - Awareness based on Multi-Sensor in the Smart-Clothing, JIIBC,13,3(2013)71-78

## 이 준 택(정회원)



- 2006년 ~ 현재 : 한국경영정보연구소 소장  
<주관심분야 : 무인항공기, 산업보안, SETA, HCISec GRC>

## 임 명 재(정회원)



- 1992년 ~ 현재 : 을지대학교 의료IT 마케팅학과 교수  
<주관심분야 : S/W공학, CBD방법론, HCI 등>
- E-Mail : lk04@eulji.ac.kr>

## 저자 소개

### 정 동 근(정회원)



- 1990년 ~ 현재 : 을지대학교 의료IT 마케팅학과 교수  
<주관심분야 : 임베디드시스템, 계측 제어, UAV 등>
- E-Mail : tchung@eulji.ac.kr>