

## 파랑중 실선의 동요각 및 동요 주기 추정 알고리즘 개발

최광식\*, 원문철\*\*, 류상현\*\*, 류재문†\*\*\*, 지용진\*\*\*\*

한국항공우주연구원\* / 충남대학교 메카트로닉스공학과\*\*  
충남대학교 선박해양공학과\*\*\* / (주)수퍼센츄리\*\*\*\*

### Development of Algorithm for Measuring Oscillating Angles and Periods of Ships in a Seaway

Kwang-Sik Choi\*, Moon-Cheol Won\*\*, Sang-Hyun Ryu\*\*,  
Jae-Moon Lew†\*\*\* and Yong-Jin Ji\*\*\*\*

Korea Aerospace Research institute.\*  
Dept. of Mechatronics, Chungnam National Univ.\*\*  
Dept. of NAOE, Chungnam National Univ.\*\*\*  
Super Century Co., Ltd.\*\*\*\*

#### Abstract

It is essential to find oscillating angles and periods in a seaway when designing and manufacturing stabilizers. It is difficult to find oscillating angles and periods in high speed turning and they vary with ship speed and wave heading angles, therefore, proper algorithm to measure oscillating periods in a seaway.

In the present study, three kinds of algorithms are developed to measure oscillating angles periods in a seaway. Dual axis tilt sensor of low price is used to measure oscillating angles, and the effect of lateral accelerations on tilt sensor have been reduced by the fusion algorithm using the gyro sensor signals. Analog and digital filters are applied to minimize the noise of the signals. Three kinds of algorithms, zero crossing, peak to peak and moving zero crossing algorithm, are developed to measure oscillating periods in a seaway. It is found that the moving zero algorithm showed the best results in the sea trials.

※Keywords: Tilt, Gyro sensor(틸트, 자이로센서), Digital filter(디지털 필터), Zero crossing(0점 관통), Peak to peak(극값 사이), Moving zero crossing(이동 0점 관통)

### 1. 서언

선박의 횡동요를 감소시키기 위한 수단으로 U형 Ant-Rolling Tank(이후 ART로 표기함)가 설치되고 있다. 이러한 ART는 선박의 고유주기에 대응하여 최적의 효율을 발휘하도록 설계된 수동형 ART가 개발되었으나, 수동형 ART는 선박의 고유주기가 변화 되면 효과가 감소하는 단점이 있다. 따라서 일본이나 독일의 ART 설계업체에서는 선박의 동요 주기에 따라 탱크 내 물의 동요주기를 조절하도록 하는 제어형 수동식 ART를 개발하여 우리나라등에 수출하여 왔으나, 우리나라에서도 해군 및 해양경찰청의 경비함 등에 독일 또는 일본의 제품이 사용되어 왔으나, 최근 제어형 ART의 국산화 개발이 성공하여 해양경찰청 및 국토해양부의 어업지도선에 설치되어 만족스러운 효과를 발휘하고 있다.

ART의 효율을 개선하기 위한 제어형 ART에서는 선박의 동요주기에 대해 ART 내 물의 동요 주기가 90도의 위상차를 가지도록 하기 위해서 파랑중 선박의 동요주기를 정확히 계측하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 저렴한 가격의 센서를 이용하여 실시간으로 동요각(pitch와 roll)과 동요주기를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 동요각 계측을 위해 2축 경사 센서를 사용하였으며, 이때 경사 센서에 미치는 횡가속도 영향 성분을 제거하기 위해 동요각속도를 측정하는 저가 자이로 센서 신호를 디지털 필터를 구현 융합하였으며, 계측 센서의 잡음 제거를 위한 아날로그 및 디지털 필터를 적용하였다. 신호처리된 동요각 및 동요각속도 정보를 사용하여 zero crossing period, peak to peak period 및 moving zero crossing period를 추정하는 알고리즘을 융합하는 알고리즘을 개발하였다. 육상에서 1 축 선박 동요 모사장치 및 실 해역에서의 실선 테스트를 통하여 얻어진 신호에 개발된 알고리즘을 적용하여 동요주기 추정 성능을 검증하였다.

### 2. 계측 센서

#### 2.1 Tilt 센서

파랑중 실선의 종동요 및 횡동요 각은 저렴한 가격으로 동요각을 계측할 수 있는 tilt 센서를 사

용 하여 계측하였다. VTI 테크놀로지사에서 만든 SCA-103T-D05(Datasheet SCA103T Series)제품을 사용하였다. 연구에서 사용된 tilt 센서는 물기둥타입으로 물기둥 타입의 문제점은 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 중력가속도에 의한 기울어진 정도( $\theta$ )와 횡 가속도(Lateral Acceleration)로 유발되는 경사각( $\theta'$ )을 구분하지 못한다는 것이다.

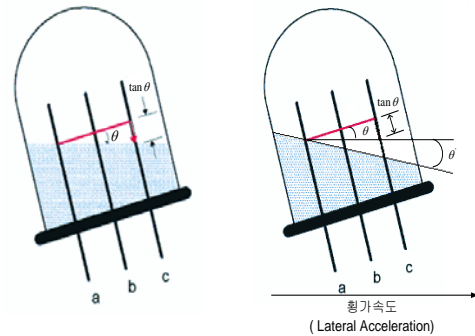


Fig. 1 Water column type tilt sensor

Fig. 2는 횡가속도의 영향을 받는 상태에서 포텐쇼미터와 동요각을 계측한 결과이다. 이 결과로부터 tilt센서는 횡가속도 영향을 받아 동요각을 과도하게 추정하는 문제가 있음을 알 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 횡가속도의 영향을 받지 않는 Gyro Sensor의 신호와 Tilt Sensor의 신호를 융합하는 신호처리 알고리즘을 사용하였다(Won and Kim 2006).

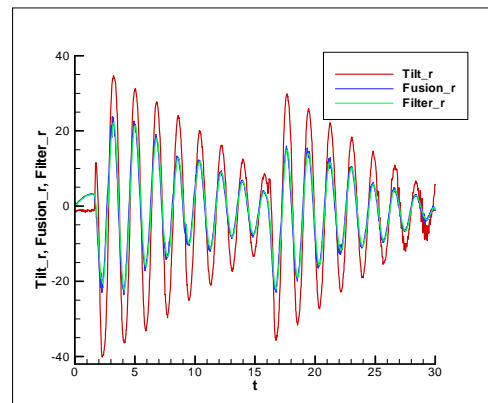


Fig. 2 Effect of lateral acceleration on tilt sensor

2.2 자이로 센서

선박의 pitch와 roll의 각속도를 측정하기 위해 Murata사의 ENV-05G Gyro Sensor(Datasheet ENV-05G) 를 사용하였다. 모든 자이로 센서는 통상적으로 drift 또는 offset이 있다. 이 drift값은 일반적으로 시간과 온도에 따라 천천히 변하며, 저가 자이로 일수록 이 drift의 폭 변화가 심하게 나타나므로, 이를 해결하기 위해 자이로 신호에 대해 1.5Hz의 cutoff frequency를 가지는 아날로그 RC 고주파 통과필터를 적용하여 드리프트 효과를 감소시켰다.

3. 센서 신호처리 알고리즘

본 연구에서 사용한 틸트 센서의 단점인 횡 방향 가속도의 효과가 그대로 센서 출력 값으로 나오는 것과, 자이로 센서의 단점인 온도 변화에 따른 drift가 발생한다는 것을 해결하기 위하여 센서 신호처리 알고리즘을 적용하였다.

이 신호처리의 기본 개념은 Tilt Sensor의 저주파 성분과 자이로 센서의 고주파 성분을 이용하는 것이다. 이렇게 두개의 서로 다른 성분을 계측하는 센서의 신호를 이용해 센서 융합을 할 수 있는 이유는 경사각을 미분하면 각속도가 되고, 각속도를 적분하면 경사각이 되기 때문이다. 횡 가속도 성분을 제거하여 경사각을 구하는 것이 이 센서 신호처리 알고리즘의 목적이므로 본 연구에서는 계측 신호에 1차 Butterworth filter(Seul Jung, 2005)를 사용하였다. Filter를 설계하기 위해서는 먼저 입·출력에 관한 Transfunction을 구해야 한다. Lowpass filter의 Transfunction은 식 (4.1)이고 Highpass filter의 Transfunction은 식 (4.2)로서 이 식을 이용하여 Digital filter를 설계하였다.

$$\frac{0.0155Z+0.0155}{Z-0.9691} \tag{4.1}$$

$$\frac{0.9845Z-0.9845}{Z-0.9691} \tag{4.2}$$

식 (4.1)은 lowpass filter의 Z transform이고, 식 (4.2)는 highpass filter의 Z transform을 나타낸

것이다. 여기서 Sampling Frequency 는 100Hz, Cut-off Frequency는 0.5Hz로 계산하였다.

Fig. 3에 보인 Block Diagram은 디지털 신호처리 알고리즘을 나타낸 것이다.

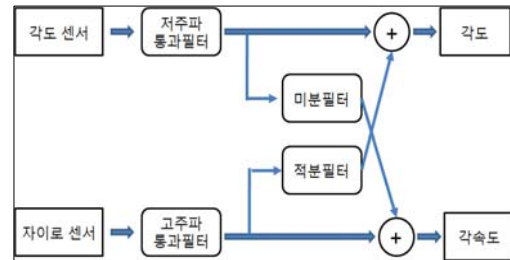


Fig. 3 Algorithm of data fusion

이 이외에도 틸트 및 자이로 센서의 응답성(Band width)이 제한되어 있으므로 이를 어느 정도 향상시키는 것이 필요하다. 틸트 센서의 경우 고주파 영역에서 응답성이 낮으므로 고주파 영역을 제거하고 자이로 센서의 적분 값으로 제거된부분을 보상하여 응답성을 높였고, 자이로 센서의 경우 저주파 영역에서의 응답성이 낮으므로 저주파 영역을 제거하고 제거된 부분을 틸트센서를 미분하여 보상하는 센서융합 알고리즘을 사용하여 센서의 응답성을 높였다. Fig. 3과 같은 과정을 거쳐 최종적으로 선박의 동요 각, 각속도를 계측할 수 있게 되며, 계측된 동요각의 신호를 이용하여 파랑중 동요주기를 추정할 수 있게 된다.

Fig. 4로부터 Encoder 의 실제 각도와 센서융합 알고리즘을 거친 각도가 거의 일치 함을 알 수 있으며, 고주파 부분에서의 횡가속도 영향이 사라진 것을 확인 할 수 있다.

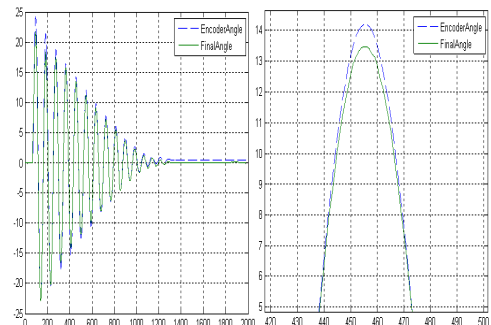


Fig. 4 Result of final signal using data fusion

#### 4. 주기추정 알고리즘

##### 4.1 선박의 파랑중 횡동요 분석

Fusion 신호처리 알고리즘을 적용하여 계측한 실선의 파랑중 횡동요각의 변화를 Fig. 5 에 도시하였다. 이 파형은 Tilt 센서의 측정값을 1차 Butterworth Lowpass Filter 를 통과시켜 노이즈를 제거한 파형이며, 이때 Cut-off Frequency는 0.5Hz를 선택하였다.

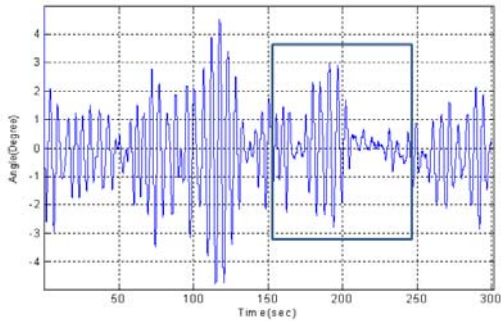


Fig. 5 Measured roll angles using data fusion

Fig. 6은 Fig. 5의 한 부분을 확대한 파형으로 노이즈가 제거된 파형을 잘 보여주고 있다.

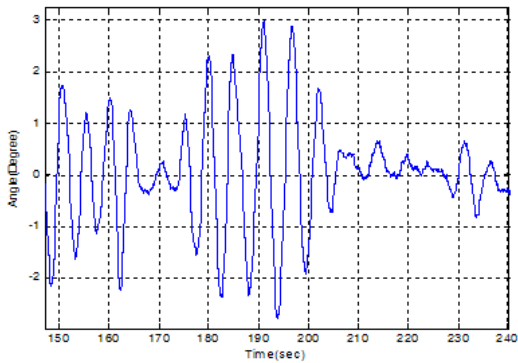


Fig. 6 Enlarged scale of measured data

ART를 작동 시킨 선박의 횡동요 주기 특성은 대체적으로 사인파의 형태를 나타내지만 그렇지 않은 이상주기 현상도 나타난다. 그 이유는 ART내

물의 동요가 선박의 횡동요와 위상차를 가지며 운동하기 때문이라 생각된다. Fig. 7은 실선 계측 파형의 Frequency Response 로 0.17Hz 와 0.2Hz 의 두 주기가 주요 를 응답임을 알 수 있다.

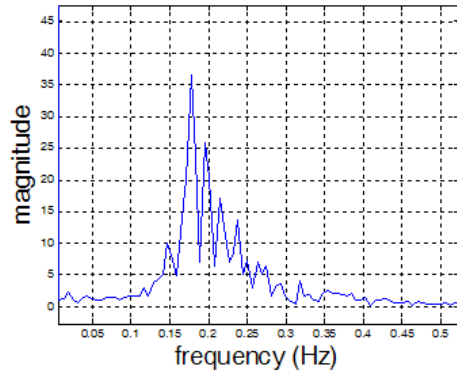


Fig. 7 Frequency response of measured roll data of a ship

이렇게 2개 이상의 비슷한 주기의 파형이 합쳐진 형태에서는 2가지 형태의 이상주기 현상을 나타낼 수 있다. 따라서 이 현상을 고려하여 동요주기를 정확히 찾을 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

##### 4.1.1 선박의 파랑중 횡동요 이상주기 특성

비슷한 주기의 두 파가 합쳐졌을 때의 특성은 두 파의 위상 차이에 의해 나타난다. 위상 차이가 0° 일 때의 합성파형은 진폭이 커지는 특성을 나타내지만 사인파 형태를 유지한다. 또한 위상 차이가 90° 일 때에는 진폭이 작아지는 특성이 있으나 이 역시 사인파 형태를 유지하므로 횡동요 주기를 측정하는데 있어 문제가 있는 것은 아니다. 이상주기 특성은 Phase 차이가 0°~90° 사이에 있을 때 나타나는데 그 첫번째 현상은 Fig. 8(a)에서 보는 것처럼 파형이 0점을 지나지 않으면서 나타나는 주기 현상이다. 이는 선박이 한쪽으로 기울어진 상태에서 동요하는 상태로 실선에서 자주 나타나는 현상이다. 이 현상은 위상차에 따라 다양한 모양으로 나타나며 Zero Crossing 알고리즘으로 주기를 추정하였을 때 이상주기를 계산하는 주된 원인이 되는 현상이 두 번째 현상은 위상 차이가 45° 정도일

때의 현상으로 선박이 일정시간 정지해 있는 현상이다. Fig. 8(b) 두 번째 현상의 일반적인 예를 보여준다. 이 현상은 동요시의 어떤 위치에서도 나타날 수 있으며 이 현상으로 인해 Peak to Peak 알고리즘으로 주기를 추정하였을 때 이상주기로 계산되어진다.

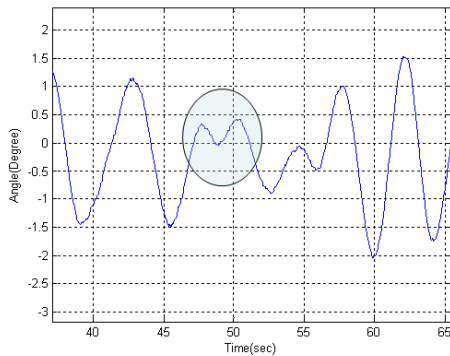


Fig. 8(a) Characteristics of irregular signature of roll

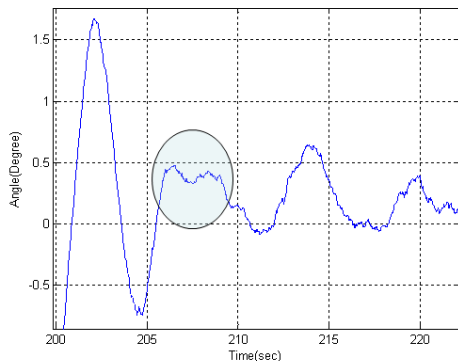


Fig. 8(b) Characteristics of irregular signature of roll

#### 4.2 주기 추정 알고리즘

##### 4.2.1 Tilt 센서만 사용한 Zero Crossing 알고리즘

Zero Crossing 알고리즘은 횡동요각이 Zero 점을 지나는 순간부터 다음 Zero점을 지나는 순간까지의 시간을 반주기로 나타내는 알고리즘으로 그 반주기 2개를 합쳐 한 주기를 나타낸다. Fig. 9는 Zero Crossing 알고리즘의 개념도이다.

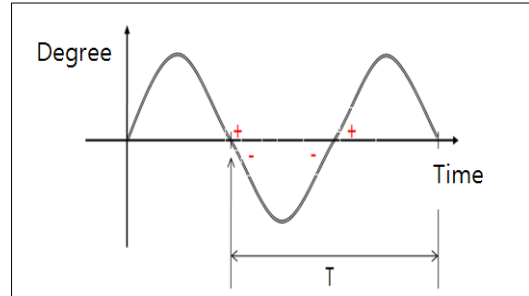


Fig. 9 Zero crossing algorithm

이 알고리즘의 장점은 Zero 점을 지나는 구간이 각속도가 빠른 구간으로 노이즈가 적은 장점이 있다. 이로 인해 주기의 정확도가 높은 특성을 나타낸다. 그러나 선박의 횡동요 이상주기 특성인 Zero 점을 지나지 않는 현상에서는 주기를 추정할 수 없다는 단점이 있다.

Fig. 10에는 주기 5.2초인 사인파를 입력으로 주었을 때의 신호와 주기 추정 결과를 도시하였으며, 추정된 주기는 0.1초의 실험적 오차가 있지만 대부분 정확하게 주기를 추정하는 것을 확인할 수 있다.

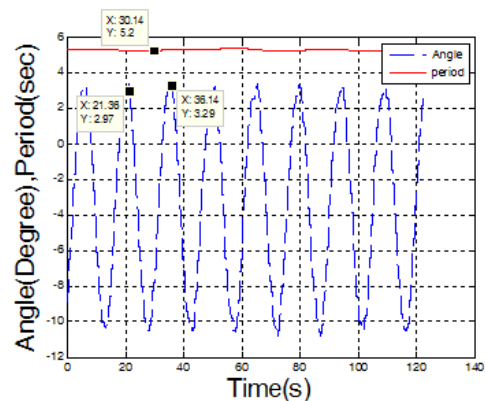


Fig. 10 Response of zero crossing algorithm for sine waves

Zero Crossing 알고리즘의 단점인 Zero 점을 지나지 않는 이상 현상에 대해서 실험을 한 결과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 Zero점을 지나지 않는 시점부터 긴 주기 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

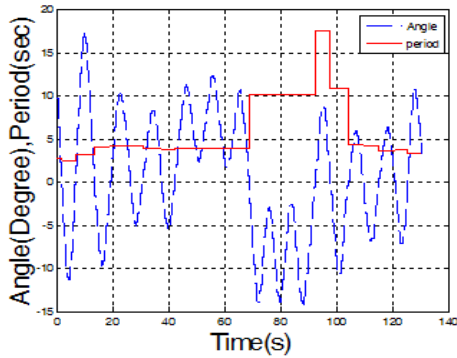


Fig. 11 Disadvantages of zero-crossing algorithm when the roll signals don't cross the zero

4.2.2 GYRO 신호만을 사용하는 Peak to Peak 알고리즘

Peak to Peak 알고리즘은 횡동요 각의 최대각과 그다음 최대각 사이 또는 최소각과 그다음의 최소각 사이의 시간을 한주기로 추정하는 알고리즘이다. Fig. 12는 Peak to Peak 알고리즘의 개념도이다.

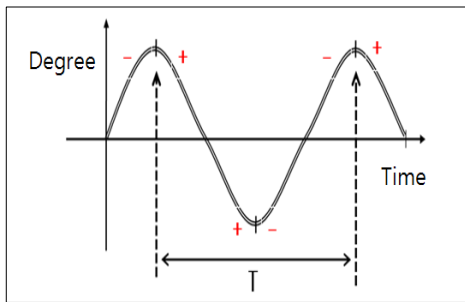


Fig. 12 Peak to Peak algorithm

이 알고리즘은 Zero Crossing 알고리즘의 단점인 Zero 점을 지나지 않는 횡동요 현상에서도 주기를 잘 추정하는 장점을 갖고 있다. 그러나 Peak 점에서는 횡동요 각속도가 매우 느리므로 노이즈 현상이 발생하며 이로 인해 정확한 Peak 점을 찾는 것이 어려운 단점이 있다. 특히나 선박의 횡동요 이상주기 현상 중 잠시 정지해 있는 특성에서는 주기 추정의 정확도가 현저히 떨어진다.

주기가 5.8초인 사인파를 입력으로 주었을 때의 Peak to Peak 알고리즘의 응답은 Fig. 13과 같다.

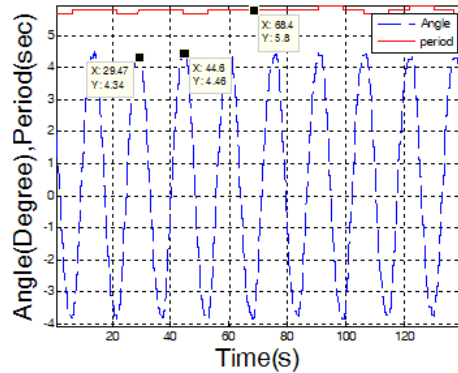


Fig. 13 Response of zero crossing algorithm for sine waves

Gyro 값이 0이 되는 지점이 Angle 값이 최대 또는 최소가 되는 값이므로 그 Peak 점 사이의 시간을 추정하는 Peak to Peak 알고리즘 역시 정현파에 대해서는 실험적 오차인 0.1초의 오차를 보이긴 하였지만 정확한 주기를 추정하는 것을 확인할 수 있다.

Peak to Peak 알고리즘의 단점인 선박의 정지 상태의 응답을 확인하기 위하여 실험을 한 결과를 Fig. 14에 보였다.

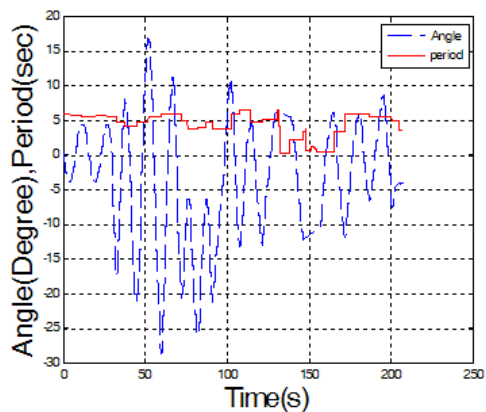


Fig. 14 Response of peak to peak algorithm when the irregular signal of roll occurs

150초 근처의 주기 파형을 보면 주기가 1초 미만으로 측정되는 것을 볼 수 있는데 이는 정지 상태에서의 Gyro 센서값이 센서 자체 Drift 값에 묻혀서 이상 주기를 추정하는 현상을 나타냄을 알 수 있다. 또한 70초 근처의 주기는 각도 값이 0 점을 지나지 않으면서 동요하여도 주기 값을 정상적으로 추정하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Peak to Peak 알고리즘의 장점이다.

#### 4.2.3 Moving Zero Crossing 알고리즘

Moving Zero Crossing 알고리즘은 Zero Crossing 알고리즘의 장점인 정확도 높은 주기 추정 특성과 Peak to Peak 알고리즘의 장점인 Zero 점을 지나지 않는 횡동요 이상주기 특성을 추정할 수 있는 장점을 융합한 알고리즘으로 Gyro 센서값의 Zero 점에서의 값을 Peak 점으로 추정하여 그 Peak 점을 통하여 최대각과 최소각을 구하고 최대각과 최소각의 차이의 1/2의 각을 Moving Zero Point로 설정하여 Moving Zero Point 사이의 시간으로 주기를 추정하는 알고리즘이다. 그림 Fig. 15는 Moving Zero Crossing 알고리즘의 개념도이다.

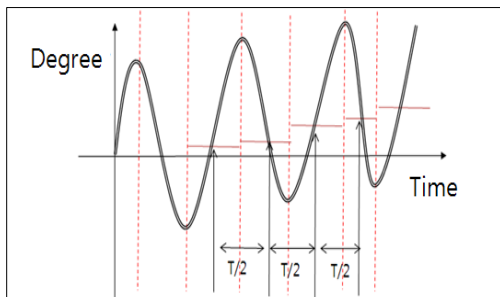


Fig. 15 Moving zero crossing algorithm

이 알고리즘은 이상주기 현상인 두가지 현상에서의 주기를 추정할 수 있는 장점이 있다.

주기가 5.6인 사인파를 입력으로 주었을 때의 Moving Zero Crossing 알고리즘의 결과는 Fig. 16과 같다.

실험적 오차에 의해 0.1초 내외의 오차가 발생하였지만 정현파에 대한 주기 추정은 정확하게 나타남을 확인 할 수 있다.

두 가지의 이상현상에 대한 Moving Zero

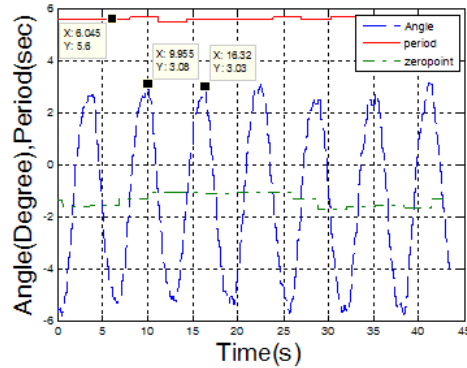


Fig. 16 Response of moving zero crossing algorithm for sine waves

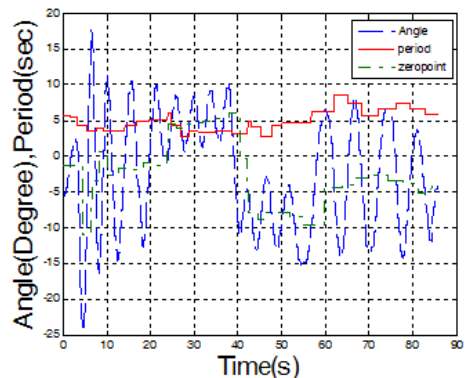


Fig. 17 Response of moving zero crossing algorithm for two irregular

Crossing 알고리즘의 응답을 확인하기 위하여 실험한 결과는 Fig. 17과 같다.

30~50초 근처의 파형을 보면 0점을 지나지 않는 이상현상이 발생하지만 주기 추정이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 55초 근처의 선박의 정지 현상에서도 주기 추정이 잘 되는 것을 실험결과를 통하여 확인 할 수 있다.

### 5. 실선 평가

개발된 시스템의 성능 확인을 위해 실선 시운전을 수행하였다. 시운전 대상 선박은 정원 10명의 소형 낚시 어선으로 파도가 다소 높아 동요각 계측에 적합하였다. 주기 추정시 선박의 동요각 범위가

1°미만일 경우와 각속도 범위가 0.3°/sec 이하의 느린 주기는 선박의 주기로 판단하기 어려우므로 이전 주기의 평균주기로 대체하였다. 따라서 선박 주기 추정의 정확도 산출 조건은 동요각 범위 1° 이상이고, 각속도 범위가 0.3°/sec 이상일 경우의 주기이다. 또한 주기 추정은 소수점 둘째 자리에서 반올림함으로 주기 오차 범위의 허용치는 0.1초로 각 알고리즘의 정확도를 산출 하였다. 실선에서의 계측 시간은 1건당 5분으로 큰 파랑에서의 10개의 Data와 작은파랑 상태에서의 10개 Data를 이용하여 각 알고리즘의 주기 추정 정확도를 산출하였다. Table 1에 정리한 바와 같이 작은 파랑보다는 큰 파랑에서 주기 추정의 정확도가 높음을 알수 있다.

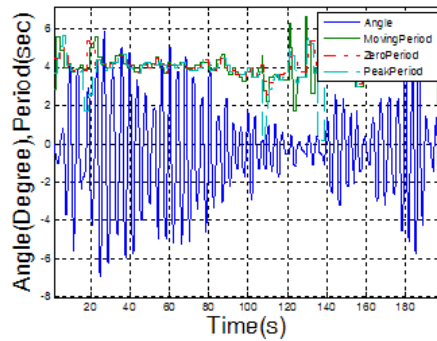
**Table 1** Comparisons among three kinds of algorithm for actual seaways

	Zero Crossing	Peak to Peak	Moving Zero Crossing
Big wave	90%	95%	98%
Small wave	88%	93%	98%

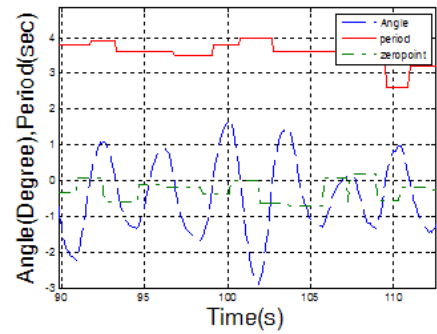
그 이유는 큰 파랑에서는 센서의 출력이 크기 때문에 노이즈에 의한 오차가 작으며, 이상주기 현상도 작은 파랑에서 보다 적게 나타나기 때문이다. 본 연구에서 개발된 Moving Zero Crossing 알고리즘의 주기추정 정확도가 Zero Crossing 알고리즘과 Peak to Peak 알고리즘에 비해서 높은 것으로 실험 결과가 나왔으며, 2%의 오차는 동요각이 갑자기 큰폭으로 줄어들거나 커질경우에 Moving Zero Point를 지나지 않는 현상에서 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 Moving Zero Point 는 그 다음 주기에서 바로 갱신되는 장점으로 인해 다음 주기 추정에 문제가 없는 회복률이 빠른 장점을 나타내는 것을 확인 하였다.

Fig. 18은 실측 데이터를 이용하여 3가지 알고리즘을 동시 계측한 결과파형이며, Figs. 19 ~ 21은 각각의 알고리즘의 결과파형을 확대하여 나타낸 것으로 선박 주기의 변화에 따라 주기 추정이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 22는 같은 시간대에서의 3가지 알고리즘의 주기를 비교한 그

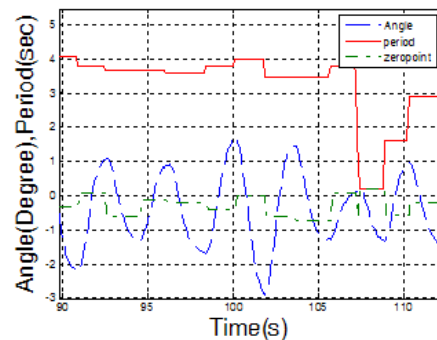
림이다. 3개의 주기가 계단 형태로 출력되는 것은 알고리즘 특성상 주기를 출력하는 시점이 모두 다르기 때문이다.



**Fig. 18** Roll periods obtained by three kinds of algorithms in a seaway



**Fig. 19** Roll periods obtained by zero crossing algorithm in a seaway



**Fig. 20** Roll periods obtained by peak to peak algorithm in a seaway



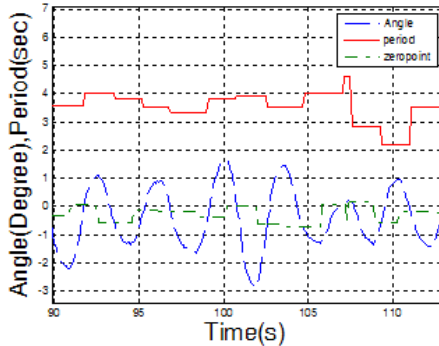


Fig. 21 Roll periods obtained by moving zero crossing algorithm in a seaway

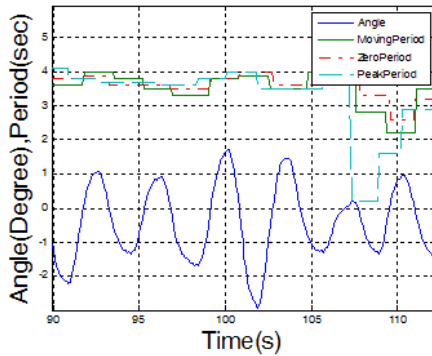


Fig. 22 Comparisons of roll periods obtained by three kinds of algorithms in a seaway

6. 결론

본 연구에서는 저렴한 가격의 센서를 이용하여 실시간으로 동요각(pitch와 roll)과 동요주기를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 동요각 계측을 위해 2축 경사 센서를 사용하였으며, 이때 경사 센서에 미치는 횡가속도 영향 성분을 제거하기 위해 동요각속도를 측정하는 저가 자이로 센서 신호에 디지털 필터를 구현 융합하였으며, 계측 센서의 잡음 제거를 위한 아날로그 및 디지털 필터를 적용하였다. 신호처리된 동요각 및 동요각속도 정보를 사용하여 zero crossing period, peak to peak period 및 moving zero crossing period를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 육상에서 1축 선박 동요 모사장치 및 실 해역에서의 실선테스

트를 통하여 동요주기 추정 성능을 검증하였으며, Moving zero crossing algorithm에 의한 주기추정의 정확도가 가장 높게 계측되었다. 따라서 동요주기 값을 선체 동요 제어에 사용하기 위해서는 moving zero crossing 알고리즘을 사용하는 것이 추천된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참 고 문 헌

- Datasheet SCA103T Series, VTI Technologies
- Won, M.C. and Kim, S.S., 2006, Development of Satellite Antenna System for Marine Use, Report of Program for Cultivating Graduate Students in Regional Strategic Industry.
- Datasheet ENV-05G, Murata Manufacturing Co., Ltd.
- Jung, S. 2005, "Digital Signal Processing and Filter Design Using Matlab", AJIN Publication.
- Moon, S.J., Lim, C.W., Lee, H.J., 2005, "Design of Control Algorithm for Mass Driving Anti-Rolling System Considering Control Input Constraint," J. of SNAK, Vol. 42, No. 6, pp. 566-574.
- Lew, J.M. and Kang, D.S., 2005, Development of Voyage Safety Evaluation System of Ships, Research Report of ITEP
- Koike, Y., 1994, "Study and At-sea Experiment on Activity Controlled Anti-rolling System," Journal of the SNAJ, Vol. 174, pp. 137-143.



< 최 광 식 > < 원 문 철 > < 류 상 현 >



< 류 재 문 > < 지 용 진 >