

해상 태양광 부유체의 거동측정을 위한 MEMS 연구

임정빈*

*한국해양대학교 항해학부 교수

Research on MEMS for Motion Measurement of Solar Energy Platform at Sea

*Jeong-Bin Yim**

**Division of Maritime Sciences, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea*

요 약 : 태양 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 장치가 설치된 해상 부유체는 파도에 의해서 운동한다. 해상 부유체의 안전성을 평가하기 위해서는 부유체 운동의 측정과 해석이 필요한데, 일반적으로 6자유도 운동을 이용한다. 6자유도 운동은 저전력, 소형, 저가의 특징을 갖고 있는 MEMS(Micro-Electro Mechanical System)를 이용하여 측정할 수 있다. 문제는 MEMS의 낮은 정밀도이다. 본 연구에서는 이러한 MEMS를 이용한 해상 태양광 부유체의 거동을 측정하고, 측정된 거동을 이용한 안전성 평가 기법에 관하여 검토하였다. 연구결과 3축의 가속도계와 3축의 자이로스코프를 이용한 관성 측정 플랫폼을 통해서 해상 부유체의 모델링과 안전성 평가가 가능함을 알았다.

핵심용어 : 태양광, 해상 부유체, 안전성, 거동, MEMS, 가속도, 자이로스코프

Abstract : A floating body with a device that converts solar energy into electrical energy is moved by waves. To evaluate the safety of a floating body, measurement and interpretation of the float motion is required, which is generally based on 6 degrees of freedom motion. The 6 degree of freedom motion can be measured using MEMS (Micro-Electro Mechanical System), which features low power, small size and low cost. The key issue is, meanwhile, the low precision of the MEMS. In this study, the safety evaluation technique by analyzing the behavior of floating body using MEMS was examined. As a result of the study, it was found that the marine floating body can be modeled through the inertial measurement platform using the 3-axis accelerometer and the 3-axis gyroscope, and the safety of the float can be evaluated through this model.

Key words : Solar Energy, Marine Floating Body, Safety, Motion, MEMS, Accelerometer, Gyroscope

1. 서 론

해상 태양광은 해상에서 태양 에너지를 이용하여 전기 에너지를 생산하기 위한 시설로서, 부유체(floating body)에 설치되기 때문에 파도의 영향을 받는다. 높은 파고의 파도가 부유체의 특정 방향으로 입사되는 경우, 부유체가 파손되거나 전복될 수 있다. 이러한 사고는 태양광 시설과 장비가 손실되는 결과를 초래할 수 있고, 이에 따른 부유체 안전성에 관한 연구가 필요하다.

부유체의 안전성은 6자유도 운동으로 평가할 수 있다. 6자유도 운동 분석을 위해서는 관성 센서를 이용한 플랫폼 구성이 필요하다. 관성 센서는 크게 기계식과 반도체식으로 구분할 수 있다. 기계식은 고속으로 회전하는 로터(rotor)를 이용하기 때문에 고전력, 중량, 큰 부피, 고가 등의 문제가 있으나, 정밀도는 반도체식과 비교하여 대단히 우수하다. 반면 반도체식은 저전력, 소형, 저가인 장점이 있으나 정밀도가 대단히 열악한 것이 문제이다. 그럼에도 불구하고, 최근 반도체 기술의 진전으로 MEMS(Micro-Electro Mechanical System)를 이용한 정밀도 높은 관성측정 장치가 개발되고 있다. 현재, MEMS는 드론(drone), 잠수함, 소형 자율무인 항공기, 로봇,

자율 이동체 등에 널리 적용되고 있다. 그리고 첨단 개념의 칼만필터(Kalman filter)를 이용한 고정밀 위치 획득의 가능성이 높아지고 있다.

해상 부유체에 MEMS를 적용하기 위해서는 우선, 해상 부유체의 거동 측정 모델이 필요하다. 이러한 모델은 3축의 가속도계와 3축의 자이로스코프(gyroscope)를 이용한 관성항법계(inertial navigation system)를 이용할 수 있다. 관성항법계는 3차원 공간에서 3축의 가속도와 3축의 각속도를 이용한 것으로, 관성 플랫폼으로 부른다. 본 연구에서는 관성 플랫폼을 이용한 태양광 부유체의 거동 해석 방법과 MEMS를 이용한 데이터 획득방법 등을 검토하였다.

2. 관성 플랫폼

2.1 부유체 운동 모델

관성 플랫폼은 3차원 공간에서 6자유도의 관성 특성을 측정하기 위한 것이다. 관성 플랫폼은 Fig. 1과 같은 부유체(floating body)에 설치되는 것으로 가정한다. 이 부유체의 거동은 해상 파의 파고와 입사 방위에 의한 6자유도 운동으로

해석할 수 있다.

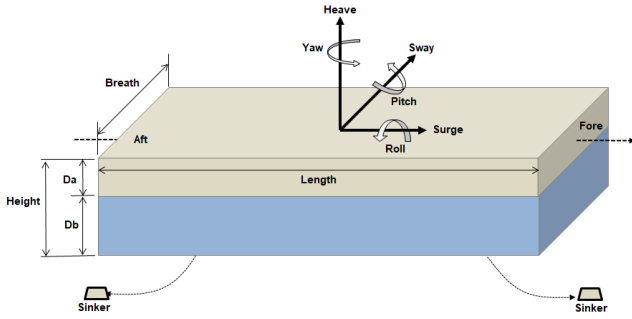


Fig. 1 Conceptual design of an inertial platform launched at the marine floating body

Fig. 1과 같은 사각형의 부유체에는 6자유도 운동 중에서, 히브(Heave)와 피치(Pitch) 및 롤(Roll) 등의 3가지 운동이 현저하게 나타난다. 이러한 운동은 응답함수 Ψ 을 이용하여 분석할 수 있다(Jørgen etc., 2004; José, 2009; 임, 2011; 임, 2012; 임, 2013).

$\Psi_H = \eta F$ (m), $\Psi_P = \eta G$ (rad), and

$$\Psi_R = \frac{|M|}{\left[-\bar{\omega} \left(\frac{T_N}{2\pi} \right)^2 + 1 \right]^2 C_{44}^2 + \bar{\omega}^2 B_{44}^2}^{1/2} \text{ (rad)}$$

여기서 Ψ_H 는 Heave 응답함수, Ψ_P 는 Pitch 응답함수, Ψ_R 는 Roll 응답함수, $\bar{\omega}$ 는 해양파 주파수(rad/sec.), T_N 은 Roll 운동 자연주기(sec.), C_{44} 는 복원 모멘트 계수, B_{44} 는 유체력 댐핑, F 와 G 는 기진력 함수, M 은 기진 모멘트 등이다.

2.2 부유체의 응답함수

위에서 설명한 3가지 운동의 응답함수를 통칭하여 $\Psi(\omega_i, \beta_j)$ 로 나타내면(여기서, ω_i 는 해양파의 주파수, β_j 는 입사각), $\Psi(\omega_i, \beta_j)$ 을 통해서 부유체 거동 분석에 필요한 데이터를 확보할 수 있다. 그리고 $\Psi(n) \leftarrow \Psi(\omega_i, \beta_j)$ 의 과정을 통해서 확률변수를 추정할 수 있고, 이러한 확률변수를 이용하면 부유체의 안전성을 평가할 수 있다(임, 2012; 임, 2013).

2.3 관성 측정

3축 가속도계에서 측정된 가속도를 f^a 로 두고, 플랫폼 좌표계에서의 가속도를 f^p 로 두면, 이들 사이의 관계는 $f^p = T_a^p f^a$ 으로 정의할 수 있다. 여기서, T_a^p 는 가속도계 좌표계에서 플랫폼 좌표계로의 변환을 나타낸다. 그리고 플랫폼 내부에서 측정된 각속도 ω_{ing}^g 는 다음 식을 적용하여 지구 기준 플랫폼 좌표계의 각속도 ω_{inp}^p 로 변환된다. 즉, $\omega_{inp}^p = T_g^p \omega_{ing}^g$ 이 되는데, 여기서, T_g^p 는 다음 식으로 정의된 것으로, 자이로 좌표계에서 플랫폼 좌표계로의 변환을 나타내고, γ_{ij} 는 j 의 플랫폼 축에 대한 i 의 자이로 축 사이의 회전

각도를 의미한다.

$$T_a^p = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & -\alpha_{zy} \\ \alpha_{xz} & 1 & -\alpha_{zx} \\ -\alpha_{xy} & \alpha_{yx} & 1 \end{pmatrix}, T_g^p = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_{yz} & -\gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & 1 & -\gamma_{zx} \\ -\gamma_{xy} & \gamma_{yx} & 1 \end{pmatrix}$$

2.4 MEMS를 이용한 6자유도 측정

Pitch와 Roll 운동의 각속도를 $\dot{\varphi}_P$ 와 $\dot{\varphi}_R$ 로 두면 이산시간 k 에 대한 각도 $\varphi_P[k]$, $\varphi_R[k]$ 는 다음 식으로 계산되고,

$$\begin{cases} \varphi_P[k+1] = \varphi_P[k] + T \dot{\varphi}_P[k] \\ \varphi_R[k+1] = \varphi_R[k] + T \dot{\varphi}_R[k] \end{cases}$$

센서의 가속도계에서 측정된 Heave 운동의 가속도 $\ddot{\varphi}_H$ 와 속도 $\dot{\varphi}_H$ 에 대한 변위 $\varphi_H[k]$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다(임, 2011; 임, 2012; 임, 2013).

$$\begin{bmatrix} \varphi_H[k+1] \\ \dot{\varphi}_H[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_H[k] \\ \dot{\varphi}_H[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} \ddot{\varphi}_H[k]$$

3. 결 토

현재 본 연구는 기획 단계이기 때문에 구체적인 결과는 연구를 통해서 도출되어야 한다. 단, 본 연구를 통해서 해상 태양광의 부유체는 관성 플랫폼으로 모델링할 수 있고, 관성 플랫폼은 MEMS 기반의 3축 가속도계와 3축 자이로를 이용하여 구성할 수 있음을 알았다. 본 연구를 통해서 해상 태양광 부유체의 안전성을 과학적으로 평가할 수 있는 기반을 확보할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 임정민(2011), "소형 선박용 관성 측정 장치 개발을 위한 MEMS 기반 관성 센서의 평가와 선정," 한국항해항만학회지, 35권, 10호, pp. 785-791.
- [2] 임정민(2012), "소형 해상 부유체의 확률 기반 위기평가기법," 한국항해항만학회지, 제36권, 제10호, pp. 795-801.
- [3] 임정민, 양원재(2013), "해상 부유체 모델의 표본 데이터에 대해서 최대우도도를 갖는 누적분포함수 추정," 한국항해항만학회지, 제37권, 제5호, pp. 453-461.
- [4] Analog Device(2009), ADIS16405 data sheet (URL: <http://www.analog.com>)
- [5] Analog Device(2004), ADXL103/ADXL203 data sheet (URL: <http://www.analog.com>)
- [6] Charles R. Farrar, Scott W. Doebling and David A. Nix(2001), "Vibration-based structural damage identification," Philosophical Transactions of the Royal Society A, Londo, Vol. 359, pp. 131-149.
- [7] Claudia C. Meruane Naranjo(2008), Analysis and Modeling of MEMS based Inertial Sensors, Thesis Paper of Signal Processing School of Electrical

- Engineering, ungliga Tekniska Hgskolan, Stockholm, XR-EE-SB 2008:011
- [8] Chris Goodall, Naser El-Sheimy and Kai-Wei Chiang(2005), "The Development of a GPS/MEMS INS Integrated System Utilizing a Hybrid Processing Architecture," Proc. of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, pp. 1444-1455
- [9] D. H. Titterton and J. L. Weston(2009), Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd Edition, Volume 207 Progress in Astronautics and Aeronautics, p. 57
- [10] Eduardo A. Tannuri, Joao V. Sparano, Alexandre N. Simos and Jose J. Da Cruz (2003), "Estimating directional wave spectrum based on stationary ship motion measurements," Applied Ocean Research 25, pp. 243-261.
- [11] Eric C. Anderson(1999), Monte Carlo Methods and Importance Sampling, Lecture Notes for Stat 578C, Statistical Genetics (URL: <http://ib.berkeley.edu>)
- [12] Giorgio De Pasquale and Aurelio Soma(2010), "Reliability Testing Procedure for MEMS IMUs Applied to Vibrating Environments," Sensors2010, Vol.10, pp. 456-474
- [13] Iseki Toshio and Ohtsu Kohei(2000), "Bayesian estimation of directional wave spectra based on ship motions," Control Engineering Practice 8, pp. 215-219.
- [14] I. Skog and P. Handel(2006), "Calibration of a MEMS Inertial Measurement Unit," XVII IMEKO WORLD CONGRESS, Brazil, pp. 1-6
- [15] Jonathan Pengelly(2002), Monte Carlo Methods, Tutorial Materials, pp. 118 (URL: <http://www.cs.otago.ac.nz>)
- [16] Jonathan Goodman(2011), Lecture Note on the Principles of Scientific Computing, Chapter 9: Monte Carlo methods, pp.183~201 (URL: <http://www.cs.nyu.edu>)
- [17] Jørgen Juncher Jensen, Alaa E. Mansour and Anders Smørup Olsen(2004), "Estimation of ship motions using closed-form expressions," Ocean Engineering Vol. 31, pp. 61-85.
- [18] José Miguel Simón Donaire(2009), Sea Transport Analysis of Upright Wind Turbines, Master Thesis(MEK-FM-EP-2009-14), Technical University of Denmark.
- [19] Kim Mathiassen(2010), A low cost navigation unit for position estimation of personnel after loss of GPS position, Masters of Science degree in Engineering Cybernetics from the Norwegian University of Science and Technology
- [20] Lu Kung-Chun, Loh Chin-Hsiung, Yang Y. S., Jerome P. Lynch and Kincho H. Law(2008), "Real-Time Structural Damage Detection using Wireless Sensing and Monitoring System," Smart Structures and Systems, TechnoPress, Vol. 4(6), pp. 759-778.
- [21] Martin Vagner(2011), MEMS Gyroscope Performance Comparing Using Allan Variance Method, Doctoral Degree Programme(1), FEEC BUT, (URL: <http://www.feec.vutbr.cz>)
- [22] Mohamed Gad-el-Hak(2006), MEMS Applications, 2nd Edition, Taylor & Francis, pp. 1-1~11-1
- [23] Naserel-Sheimy, Eun-Hwan Shin and Xiaojinlu(2006), Kalman Filter Face-Off - Extended vs. Unscented Kalman Filters for Integrated GPS and MEMS Inertial, InsideGNSS March 2006, pp. 48-54 (URL: www.insidegnss.com)
- [24] Peter Sherman and Steven Holmes(2005), Personal navigation system, Technical report NATRICK/TR-06/004, Draper Laboratory, Cambridge, MA 02130
- [25] S. M. Bennett, R. Dyott, D. Allen, J. Brunner, R. Kidwell and R. Miller(1998), Fiber Optic Rate Gyros As Replacement for Mechanical Gyros, American Institute of Aeronautics and Astronautics, KVH Industries Inc. Report AIAA-98-4401, pp. 1-7 (URL: <ftp://ftp.uni-duisburg.de>)
- [26] Sensoror(2009), SAR10Z Gyro Sensor Series data sheet (URL: <http://www.Sensoror.com>)
- [27] Sensoror(2010), SAR100Grade100 Single-Axis Gyro data sheet (URL: <http://www.Sensoror.com>)
- [28] Songlai Han, Jinling Wang and Nathan Knight(2009), "Using Allan Variance to Determine the Calibration Model of Inertial Sensors for GPS/INS Integration," 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Presidente Prudente, São Paulo, Brazil, pp. 1-8
- [29] ST Microelectronics(2008), LIS344ALH data sheet (URL: <http://www.st.com>)
- [30] Ulrik Dam Nielsen(2006), "Estimations of on-site directional wave spectra from measured ship responses," Marine Structures, Vol. 19, pp. 33-69.
- [31] Ulrik Dam Nielsen and Iseki Toshio(2011), 'A Study on Parametric Wave Estimation Based on Measured Ship Motions,' Wite Paper. (URL: <http://orbit.dtu.dk>)
- [32] Volker Kempe(2011), Inertial MEMS Principles and Practice, Cambridge University Press, pp. 1-452
- [33] Walid Abdel-Hamid(2005), Accuracy Enhancement of Integrated MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications, UCGE Reports Number 20207, Thesis for PhD. Department of Geomatics Eng., Calgary, Alberta, Canada