
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 29 卷 第 3 號 1992 年 8 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No.3, August 1992

실선 운동계측 시스템 개발

홍사영*, 이종식*, 홍석원*

Development of a Digital Motion Measuring System in a Real Seaway

by

Sa-Young Hong*, Jong-Sik Lee* and Seok-Won Hong*

요 약

실제 해상에서 운항중인 선박의 6자유도 운동 및 해상의 파도를 계측할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 Miles의 방법에 따라 7개의 가속도계로 선체의 운동을 계측하고, 초음파 파고계를 이용하여 선수부에서의 상대운동을 계측하여 상대운동에서 선체운동을 소거함으로써 해상에서의 파랑에 관한 정보(파고 및 주기)를 해석할 수 있다.

모형시험을 수행하여 개발된 시스템의 우수성을 확인하였으며, 원격조종 모형시험시 운동계측기로의 적용가능성도 발견하였다.

Abstract

A digital 6-dof motion measuring system is developed using 7 accelerometers following Miles' [1] method. A sonic wave height gauge is also developed to measure the relative wave height at the foremost end of the ship. By combining the time series of both 6-dof motions and relative wave height, we can estimate the time series of real sea wave.

Results of model tests shows the validity of the developed system.

1. 서 언

해양을 항해하는 선박은 파고에 의해 운동을 하게 되며 이러한 운동은 선속의 저하, 작업능률의 저하

및 화물의 손상등 선박의 고유기능을 저해하는 효과를 가져온다. 특히 거친 해상상태는 선박의 안전성을 저하시켜 심한 경우 전복 및 선체손상을 야기시키기도 한다. 최근에 건조된 일부 여객선 및 특수선들은

발 표 : 1991년도 대한조선학회 추계연구발표회('91. 11. 16.)

접수일자 : 1991년 12월 23일, 재접수일자 : 1992년 4월 1일

* 정회원, 한국해사기술연구소

제어장치를 도입하여 거친 해상에서의 승선감 및 작업성과 안전성의 제고를 꾀하고 있다.

선박의 운항효율향상 및 안전성을 확보하기 위해서는 운항중 선박의 내항성을 평가할 수 있는 신뢰성있는 방법이 필요하다. 이러한 목적으로 정기항로 선박들(주로 컨테이너선) 및 특수선 등에 의해 실선계측 시스템이 채용된 예가 있으나 계측장비의 취급 및 보수의 어려움, 결과해석의 전문성요구, 실시간해석의 어려움 등의 제한적 요소들로 인해 내항성능의 실선계측이 널리 행하여 지지 못하였다. 또한, 실선계측시 해상상태를 대표하는 파고 및 주기 등에 대한 계측의 번거로움 및 부정확성도 실선계측을 방해해온 요소이다.

악천후중에서도 쾌적한 승선감과 우수한 기능의 선박을 요구하는 작금의 추세에 부응하기 위하여 선박의 내항성지표(6자유도 운동, 가속도, 슬래밍, 갑판침수)는 물론 해상상태(파고 및 주기)를 정확히 계측할 수 있는 실선계측 시스템이 요구된다. 실선계측시스템으로부터 주어지는 내항성능 지표의 실시간 해석 결과는 운항효율 향상은 물론 운동제어장치에 정확한 입력자료를 제공함으로써 안전한 항해에 기여할 것이다.

종래의 실선 계측 시스템은 지정된 위치에서 가속도를 계측하고 자이로(gyro-compass) 혹은 경사계(inclinometer)를 이용하여 회전운동을 계측하였다. 해상상태의 계측은 목측에 의존하거나 풍향 및 풍속을 계측한 결과로부터 간접적으로 추정하였으며, 라디오 통신장치가 부착된 1회용 파고계측부표를 이용하여 파고를 계측하는 경우에는 혼신에 의한 방해 및 계측시간의 제한 등으로 인해 해상상태를 지속적으로 관찰할 수 없었다. 계측된 결과는 테이프 레코더에 수록되어 실험실에서 별도로 해석되었다. 그러나 최근의 전자산업의 발달로, 간편하고 신뢰성 있는 장비가 개발되었으며 이로 인해 취급 및 유지·보수가 간편한 실선계측 시스템을 구성할 수 있게 되었고, 휴대용 컴퓨터의 급격한 성능향상은 계측결과의 실시간 해석을 가능하게 하였다.

본 연구에서는 Miles[1]의 방법에 따라 가속도계만을 이용하여 선체의 6자유도 운동을 계측할 수 있는 시스템을 구성하고 선수부에 초음파 센서를 부착하여 선수상태운동으로부터 해상상태를 지속적으로 관찰할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 모형실험을 수행한 결과, 구성된 시스템이 실선운동계측에 적용될 수 있음이 확인되었다.

2. 실선계측 시스템

2.1 6자유도 운동계측 시스템(strap-down-system)

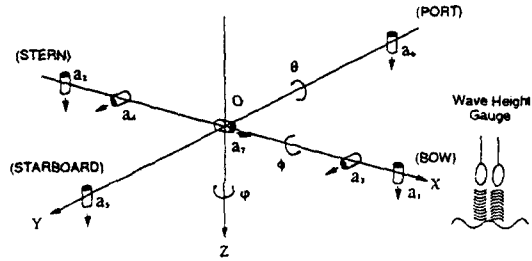


Fig. 1 Configuration of Strapdown Accelerometers

Fig.1과 같이 7개의 가속도계로 구성된 strap-down 시스템을 생각하자. 여기서 0(xo, yo, zo)는 선체의 평균속도로 움직이는 관성좌표계이며 C(x,y,z)는 선체에 고정된 좌표계이다. C는 선체에 고정된 기준점이며 단위벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{X}_0(Q) = \vec{OQ}$$

$$\vec{X}(Q) = \vec{CQ}, \quad Q: \text{an arbitray point on the vessel}$$

$\vec{X}(Q)$ 는 일정하므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\ddot{\vec{X}}_0(Q) = \ddot{\vec{X}}_0(C) + \ddot{A} \cdot \vec{X}(Q) \tag{1}$$

여기서 A는 회전 행렬로 다음과 같이 주어진다 [2].

$$\begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi\cos\phi & \sin\theta\cos\phi\cos\phi \\ -\cos\phi\sin\phi & +\sin\phi\sin\phi & +\sin\phi\sin\phi \\ \cos\theta\sin\phi & \sin\theta\sin\phi\sin\phi & \sin\theta\cos\phi\sin\phi \\ +\cos\phi\cos\phi & -\sin\phi\cos\phi & \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \tag{2}$$

계측치 a7은 물체고정 좌표계에서의 전후방향 가속도 성분이며, a1, a2, a5, a6은 상하방향성분, a3, a4는 좌우방향성분으로 이들은 직선운동은 물론 회전운동의 영향을 포함하므로 회전운동을 제거하면 물체고정좌표계에서 직선운동에 기인한 가속도 성분만을 얻는다.

- 전후운동 가속도: a7=Pc

- 상하운동 가속도: $\frac{a_3R_4+a_4R_3}{R_3+R_4} = P_2^c$ (3)

- 좌우운동 가속도: $\frac{a_5R_2+a_2R_1}{R_1+R_2} = \frac{a_5R_6+a_6R_5}{R_5+R_6} = P_3^c$

이때 R_j 는 가속도계가 위치한 j점에서 C점까지의 거리이다.

따라서 관성좌표계에서 기준점의 가속도는 다음과 같다.

$$\ddot{\vec{X}}_0(C) = A \cdot \ddot{\vec{P}}^c + g \vec{k}_0 \quad (4)$$

식(4)에서 $\ddot{\vec{P}}^c$ 는 직선운동성분에 의한 기준점 C에서의 가속도 벡터로 식(3)에 정의되어 있다.

회전운동 성분만에 의한 가속도성분은 계측된 가속도가 직선운동성분과 회전운동성분을 포함하므로 식(4)와 식(1)로 계측가속도를 식(5a)와 같이 표시하고 전후, 좌우방향 계측치의 짝(pair)을 서로 빼주면 얻을 수 있다. 5번과 6번 가속도계에 적용해 보면,

$$\ddot{\vec{X}}(Q) = [A^{-1}(\ddot{\vec{X}}_0(C) - g \vec{k}_0)] + [A^{-1} \ddot{\vec{A}} \vec{X}(CQ)] \quad (5a)$$

$$a_5 = \vec{k} \cdot [A^{-1}(\ddot{\vec{X}}_0(C) - g \vec{k}_0)] + R_5 = \vec{k} \cdot [A^{-1} \ddot{\vec{A}} \vec{j}] \quad (5b)$$

$$a_6 = \vec{k} \cdot [A^{-1}(\ddot{\vec{X}}_0(C) - g \vec{k}_0)] - R_6 = \vec{k} \cdot [A^{-1} \ddot{\vec{A}} \vec{j}] \quad (5c)$$

이때 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 는 x, y, z 방향의 단위벡터이다.

$F_1(t) = (a_5 - a_6) / (R_5 + R_6)$ 로 하면 다음과 같이 된다.

$$F_1 = \vec{k} \cdot [A^{-1} \ddot{\vec{A}} \vec{j}] \quad (6)$$

참고문헌[3]에 따르면 다음의 관계가 성립한다.

$$\dot{\vec{A}} = A\Omega$$

$$\text{단, } \Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 물체고정좌표의 회전각속도 성분이다. 짧은 시간간격 Δt 동안 작은 회전각의 움직임을 고려하면, 이 회전각들은 다음과 같이 SNAME Euler angle과 연관시킬 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin\theta \\ \omega_y &= \dot{\theta} \cos\phi + \dot{\psi} \cos\theta \sin\phi \\ \omega_z &= -\dot{\theta} \sin\phi + \dot{\psi} \cos\theta \cos\phi \end{aligned} \quad (8)$$

식(7)로부터 $\ddot{\vec{A}} = A\dot{\Omega}$ 이고, 이때 $B = \Omega^2 + \dot{\Omega}$ 이며, 따라서 $F_1 = B_{32}$ 이다. 다른 가속도계에 대해서도 비슷한 정의를 내리면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{\omega}_x = F_1(t) - \omega_y\omega_z \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_y = F_2(t) + \omega_z\omega_x \quad (10)$$

$$\dot{\omega}_z = F_3(t) - \omega_x\omega_y \quad (11)$$

단, $F_2(t) = (a_2 - a_1) / (R_1 + R_2)$ 이며, $F_3(t) = (a_3 - a_4) / (R_3 + R_4)$ 이다.

식(9-11)은 계측된 값 F_1, F_2 와 F_3 로 회전률(rotation rates)을 정의하는 기본적 관계식이다. 따라서 식(8)로부터 Euler angle은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\phi} = \omega_x + \tan\theta(\omega_y \sin\phi + \omega_z \cos\phi) \quad (12)$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cos\phi - \omega_z \sin\phi \quad (13)$$

$$\dot{\psi} = (\omega_y \sin\phi + \omega_z \cos\phi) / \cos\theta \quad (14)$$

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 를 구하기 위해, 식(9-11)을 먼저 수치적으로 풀어야 하며, ϕ 와 θ 에 대해 식(12)와 식(13)을 푼 후 식(14)를 적분하여 ψ 를 구한다. 이로써 회전행렬이 구해지면 식(4)를 적분하여 상하운동, 좌우운동 및 전후운동을 구한다.

2.2 초음파 파고계측 시스템

선상의 동일 위치에 초음파 송·수신기를 설치한다. 초음파를 파도를 향하여 수직으로 송신하고 파면에서 반사된 초음파를 수신하여, 초음파의 왕복 전달경과시간을 거리로 환산하여 상대파고를 측정한다. 사용된 초음파 주파수는 40kHz이며, 수신파는 160 Ksps(Kilo samples per second)로 sampling되어 디지털 신호처리된다.

현재 개발된 파고계측시스템의 성능은 다음과 같다.

- 파고측정 해상도: $340\text{m/s} \times (1/160,000) / 9 = 0.2\text{cm}$
- 파고측정 sampling rate: Max. 15 sps(samples per second)
- 파고: $\pm 6\text{m}$

2.3 실선계측 시스템의 구성

선체운동과 파고를 계측하기 위한 hardware 구성도를 Fig. 2에 나타내었으며 사용되는 장비는 아래와 같다.

- TMS320C25, 2ch./DA Digital Signal Processor Card(Wave and Motion Data Acquisition Control)
- 4ch./AD and 2ch./DA Card(Sonar Control)
- 32ch./AD Card(Motion Measurement)
- Accelerometers
- Software : Assembler PGM(for TMS320C25), Fortran and C PGM(for Data .Analysis)
- IBM PC(User Interface, Graphics, Parameter input etc)

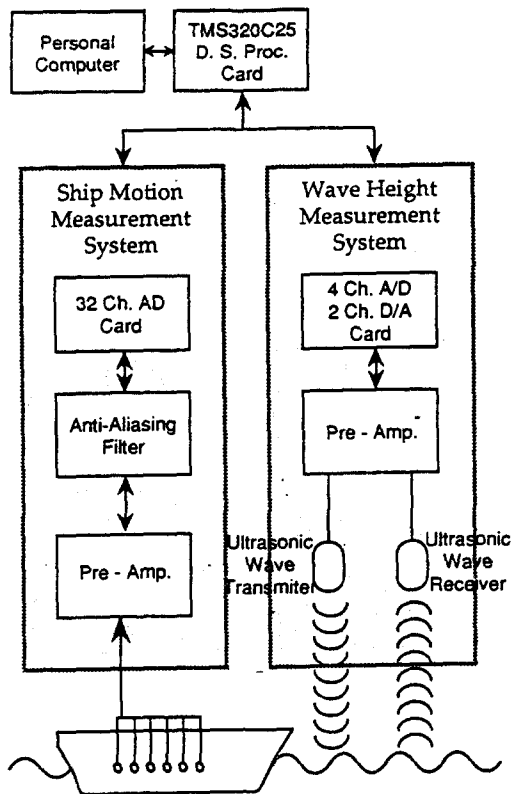


Fig. 2 System Diagram for Ship Motion and Wave Measurement

3. 결과해석

3.1 6자유도 운동 추정

Miles는 식(9-11)으로부터 ω 를 구하기 위해 다음과 같은 반복법을 사용하였다. 먼저 선형화된 식(4)로부터 전후 및 좌우운동 가속도의 시간평균이 0이라는 조건으로부터 횡운동과 종운동의 초기 추정치를 구한다.

$$\phi_0 = -\overline{P_x(t)/g}, \quad \theta_2 = \overline{P_y(t)/g}$$

회전각속도는 다음과 같은 반복식을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x(n+1,t) &= F_1(t) - \omega_y(n,t) \omega_z(n,t) \\ \dot{\omega}_y(n+1,t) &= F_2(t) + \omega_x(n,t) \omega_z(n,t) \\ \dot{\omega}_z(n+1,t) &= F_3(t) - \omega_x(n,t) \omega_y(n,t) \end{aligned}$$

각 반복계산 과정마다 high pass filter를 결합한 FFT를 이용한 적분을 수행하였다. Filter의 cut-off frequency는 저주파수 영역에서 과도한 증폭을 방지하도록 선택되었다. 적분상수는 회전운동속도의 시간평균이 0이라는 조건을 부과하여 구한다. ω 값들이 구해지면 다음의 반복식에 의해 횡운동과 종운동 변위를 구한다.

$$\begin{aligned} \phi(n+1,t) &= \omega_x + \tan(\theta(n,t))(\omega_y \sin(\phi(n,t)) + \omega_z \cos(\phi(n,t))) \\ \dot{\theta}(n+1,t) &= \omega_y \cos(\phi(n,t)) - \omega_z \sin(\phi(n,t)) \end{aligned}$$

선수운동은 (14)식을 직접 적분하여 구하며, 최종적인 횡운동과 종운동의 평균값은 식(4)로부터 전후 및 좌우운동의 가속도 평균이 0이라는 조건을 만족하도록 상수를 더하여 얻는다. 따라서 횡운동 및 종운동의 평균각도는 선체고정좌표계에 대한 중력가속도 벡터의 평균방향을 계측함으로써 결정된다. 최종적으로 임의의 위치 Q에서의 선수, 좌우 및 상하운동 변위는 식(1)과 식(4)로부터 다음식을 적분하여 얻는다.

$$\ddot{\vec{X}}_0(Q) = A(\vec{P} + B \vec{X}(CQ)) + g \vec{k}_0 \tag{15}$$

3.2 파고 및 주기의 추정

7개의 가속도로부터 6자유도 운동변위가 결정되고 초음파센서로부터 상대운동변위가 계측되면 다음의

관계로부터 공학적으로 유용한 파고를 산출할 수 있다.

$$z_1 = z + x_1 \cdot \sin\theta - y_1 \cdot \sin\phi \quad (16)$$

$$\zeta_w = \zeta_r - z_1 \quad (17)$$

이때 상대운동 계측위치에서의 수직방향 운동변위 z_1 은 (15)식으로부터 가속도를 직접 적분하여 구할 수도 있다. 입사파의 주기는 선속을 알고 있으므로 스펙트럼 해석을 통하여 구할 수 있다.

$S_w(\omega) = S_w(\omega_e) \cdot (d\omega_e/d\omega)$ 의 관계가 성립하므로 $m_1 = \int_0^\infty \omega^2 S_w(\omega) d\omega$ 로 정의하면 입사파의 평균주기, T_z (zero-upcrossing period)는 다음으로부터 구한다.

$$\text{평균주기 } T_z = 2\pi \sqrt{m_0/m_2} \quad (18)$$

3.3 모형실험에 의한 시스템검증

구성된 시스템의 검증을 위하여 축척비 1/43.75의 콘테이너선 S-175를 사용하여 불규칙파중 운동을 계측하고, 7개의 스트레인 게이지형 가속도계(Kyowa AS-5C)로부터 선체의 6자유도운동을 추정하여 비교하였다.

수행된 모형시험의 내용은 다음과 같다.

- 모형 : S-175 콘테이너선
- 파도조건 : 유의파고 5.8미터, 평균주기 9.5초
- 선속 및 선수각 : 선수파(Fn=0.15, 0.2), 사파(Fn=0.0)

Fig.3에는 사파중 정지상태에서 수직방향운동(상하운동, 횡운동, 종운동)의 변위를 나타내었다. 그림에

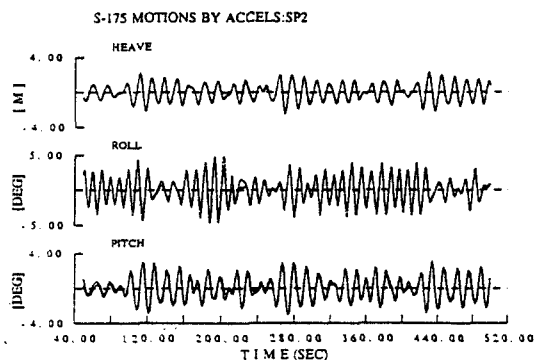


Fig. 3 Comparisons of Heave, Roll and Pitch (Fn=0.0, Heading=Bow Quartering)

서 실선은 포텐시오미터로 계측한 운동이며, 점선은 가속도로부터 추정한 운동을 나타낸다. 두 결과가 매우 좋은 일치율을 보이고 있으므로 가속도계만으로 선박의 운동을 정확하게 계측할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 4에는 초음파 파고계로 계측한 상대운동으로 추정된 파도의 스펙트럼과 모형선 5미터 전방에

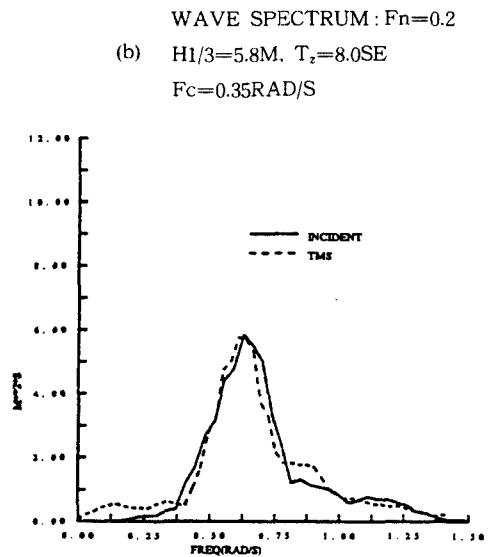
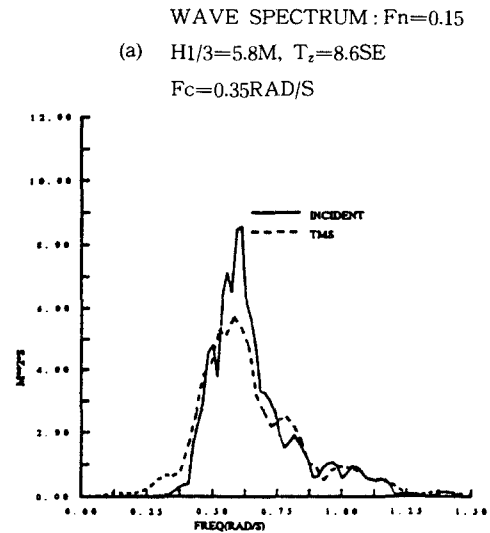


Fig. 4 (a) Comparison of Wave Spectra (Fn=0.15, Head Sea)
(b) Comparison of Wave Spectra (Fn=0.20, Head Sea)

서 계측한 파도스펙트럼을 나타내었다. 초음파파고계의 위치는 선수로부터 0.5미터(실선에서는 22미터)로 배로 인해 생성, 산란되는 파도의 효과를 줄이고자 하였다. 그림에서 실선은 입사파를, 점선은 초음파파고계로부터 환산된 파도를 의미한다. 스펙트럼 형태와 모달주기등이 대체로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 선속이 증가하면서 보다 나은 일치를 나타내고 있다. 그러나 상대파고로 부터 추정되는 입사파도는 배의 운동에 의한 반사파 및 산란파를 포함하므로 보다 신뢰성있는 파도추정을 위해서는 두 위치 이상에서 상대운동을 계측하여 입사파와 반사파의 성분을 분리하는 방법을 고안할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 언

가속도계 및 초음파 센서를 이용하여 선체의 6 자유도 운동 및 파고를 계측할 수 있는 실선운동 계측시스템에 대해 살펴보았으며 모형실험을 통하여 구성된 시스템의 유용성 및 신뢰성을 검토하였다. 가속도 신호를 수치적으로 적분하는데 있어서의 문제점은 저주파수에서의 민감도 및 신호의 표류 등에 의한 저주파수운동의 증폭이며, 이 문제점은 물리적으로 타당한 cut-off frequency를 선택하여 high-pass filter를 사용함으로써 완화시킬 수 있다. 또한 Miles[1]가 권장한 관성항법용 가속도계(inertial navigation grade accelerometer)의 사용도 저주파수

에서의 가속도의 신뢰성을 향상시킬 것으로 생각된다.

가속도계를 이용하여 직선운동변위를 구하는 Miles의 개념은 계측된 가속성분으로 부터 회전운동 성분을 제거하는데 있으므로 경사계 혹은 자이로 등을 이용하여 회전운동 성분을 계측한다면 회전행렬을 수치적분없이 바로 구할 수 있으므로 보다 해석이 용이할 것으로 생각된다. 모형실험을 통해 strap-down system의 유용성을 확인한 바 있으므로, 본 방법이 원격조종 모형실험의 운동계측에 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Miles, M.D., Measurement of Six Degree of Motions Using Strapdown Accelerometers, Hydraulic Laboratory, National Research Council, Ottawa, Canada.
- [2] Clayton, B.R. and Bishop, R.E.D., Mechanics of Marine Vehicles, E. & F.N.Spon Ltd., London.
- [3] Britting, K.R., Inertial Navigation System Analysis, Wiley-Interscience, pp.11~17, 1971.
- [4] 홍사영외, 컨테이너선의 불규칙파중 운동응답에 대한 실험적 고찰, 대한조선학회지 제24권 제2호, 1987.