

불규칙파중 1점계류 선박의 거동해석에 관한 연구

이 승 건* · 조 효 제** · 강 동 훈***

* 부산대학교 조선해양공학과 교수, ** 한국해양대학교 해양시스템공학부 부교수, *** 부산대학교 대학원 조선해양공학과

A Study on the Motion of a Single Point Moored Ship in Irregular Waves

Seung-Keon Lee* · Hyo-Jae Jo** · Dong-Hoon Kang***

* Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

** Associate professor, Division of Ocean System Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

*** Graduate school, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

요 약 : 계류된 선박의 시뮬레이션을 위해 조종방정식을 사용하였고, 파 중의 선박에 가해지는 파강제력은 3차원 특이점 분포법에서 얻어진 주파수 전달함수로부터 시간영역해석법을 적용하였다. 운동을 유발하는 입사파의 주기와 동일한 선형 파강제력과 성분파 주파수의 차이에 기인하는 장주기 표류력을 외력항에 고려하였다. 규칙파와 불규칙파 중에서의 선박의 거동을 비교분석하여 계류 중 선박에 발생할 수 있는 SLEW MOTION에 불규칙파 및 비선형 파강제력이 미치는 영향을 고찰하였다.

핵심용어 : SLEW MOTION, 일점계류, 불규칙파, 3차원 특이점 분포법, 장주기 표류력

Abstract : The maneuvering equations of motion are derived to express the motion of a ship. The wave forces in the time domain analysis are generated from the frequency transfer function calculated by 3-D source distribution method. The linear wave forces whose periods are equal to those of incident waves and the nonlinear wave forces that make long period drift forces are computed for the simulation. The consideration of irregular waves and nonlinear wave force effects on the slew motion are carried on the analyzing the motion of ship in the regular and irregular waves.

Key words : slew motion, single point moored, irregular wave, 3-D source distribution method, long period drift force

1. 서 론

일점계류된 선박에 외력(바람, 조류, 파)이 가해지면, 선박은 이에 반응하여 표류하고, 표류하는 선박은 계류삭에 힘을 가한다. 이 때, 외력과 계류삭의 장력은 함께 작용하여 선박이 Swing하는 장주기의 Slew Motion을 일으킨다. 이 Slew Motion이 과다해지면, 계류삭의 파단이나 주묘(走錨)를 발생시키는 원인이 되며 계류 중의 선박에 해난사고를 유발하기도 한다. Slew Motion의 예측과 경감(輕減)이 가능하다면 이로 인한 해난사고를 막을 수 있다.

Slew Motion을 예측하기 위한 바람과 조류 및 규칙파 등에 의한 Simulation은 이미 계산된 바가 있으나(김,2001)(小保方, 1982) 실제 해상상태에서의 계산은 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 Slew Motion의 예측에 좀 더 현실적으로 접근하고자 불규칙파 중에서 일점계류된 선박의 거동을 Simulation하고 분석을 하였다.

Slew Motion을 Simulation하기 위하여 조종방정식을 사용하였고, 불규칙파 중의 선박에 가해지는 파강제력의 계산은 3차원 특이점 분포법에서 얻어진 주파수 전달함수로부터 시

간영역 해석법을 적용하였다. 규칙파와 불규칙파 중에서의 선박의 거동을 비교 분석하여 Slew Motion에 불규칙파 및 비선형 파강제력이 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 운동방정식

Simulation에서는 선박의 수평면상의 운동(Surge, Sway, Yaw)만이 고려되었고, 선박의 운동을 표현하기 위해 조종운동방정식을 이용하였으며 외력으로는 계류력과 파강제력을 고려하였다. 파랑 중 선박의 Slew motion은 표현하기 위해 식 (1)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X_H + X_{WV} + X_T \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y_H + Y_{WV} + Y_T \\ I_{ZZ} \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) &= N_H + N_{WV} + N_T \end{aligned} \quad (1)$$

u, v, r 은 각각 surge 속도, sway 속도, yaw 각속도이고 m, I_{ZZ}, x_G 는 각각 배의 질량, z축에 대한 질량관성모멘트,

* 정회원, leesk@pusan.ac.kr 051)510-2441

** hjjo@hanara.kmaritime.ac.kr 051)410-4302

*** 정회원, aknalee@dreamwiz.com 051)510-2755

배의 무게 중심의 좌표를 나타낸다. 식(1)의 우변에 표기된 X, Y 와 N 은 각각 surge, sway, yaw방향의 힘과 모멘트이고 아래첨자 H, WV, T 는 각각 선체에 작용하는 유체력과 파장제력, 계류삭에 작용하는 장력을 의미한다. 공간고정좌표에 대한 선박의 중심과 heading angle은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{Y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, X, Y 는 선박중심의 좌표이고, ψ 는 heading angle이며 Simulation에 사용된 선체고정좌표계와 공간고정좌표계를 Fig.1과 같이 나타내었다.

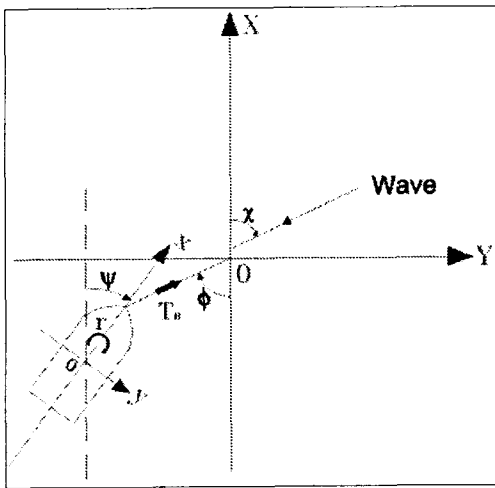


Fig. 1 Coordinate system

3. 선체에 작용하는 힘과 모멘트

3.1 선박의 모델링

본 논문에서 사용된 선박모형은 KRISO TANKER (KVLCC2)을 1:136.75으로 축소한 모형을 사용하였다. 계산에 사용된 선박의 기본제원을 Table 1에 나타냈다. 수면하의 선체표면에 620개의 패널을 분포시켰으며 분포된 모습과 법선벡터 n 은 Fig.2에서 나타내었다.

Table. 1 Main particulars of model ship

KRISO 300K VLCC	
Lpp(m)	2.340
B(m)	0.424
D(m)	0.219
d(m)	0.148
C_b	0.81

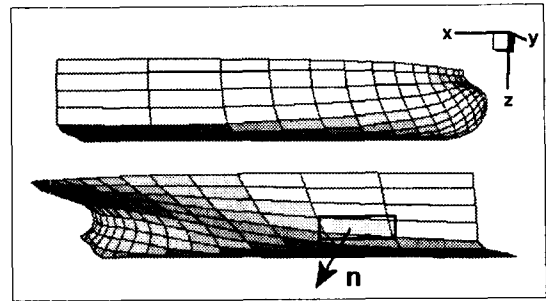


Fig. 2 Plans and meshes for model ship

3.2 Hull 유체력의 추정

선체(bare hull)에 작용하는 유체력 X_H 는 식(3)과 같이 모델화하였다.

$$X_H = X(U) + X_u \dot{u} + (X_w - Y_v)vr \quad (3)$$

$X(U)$ 는 직진시의 저항으로 식(4)로 나타낸다.

$$X(U) = \frac{1}{2} \rho S_{IV} C_T u^2 \quad (4)$$

여기서 ρ 와 S_{IV} 는 물의 밀도와 배의 침수표면적이며, 전저항계수 C_T 는 아래와 같다.

$$C_T = (1+k)C_F + C_W \quad (5)$$

여기서 k 는 형상계수이고, 평판의 마찰저항계수 C_F 와 조파저항계수 C_W 는 다음식을 이용하여 구하였다.

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(R_n \times C_F) : \text{Schoenherr's formula} \quad (6)$$

$$C_F = 1.328 \cdot R_n^{-\frac{1}{2}} : \text{Blasius's formula} \quad (7)$$

$$C_W = C_{W4} \cdot F_N^4 + C_{W5} \cdot F_N^5 + C_{W6} \cdot F_N^6 \quad (8)$$

where, F_N : Froude number

R_n : Reynolds number

X_w, Y_v 는 Motora(Motora, 1960) Chart로부터 추정하고 ($X_w - Y_v$)항은 Hasegawa(Hasegawa, 1980) Chart를 직선으로 Fitting하여 식(9)같이 계산하였고, Y_B, N_H 의 선형항과 비선형항은 Inoue(井上正裕, 1978)(井上正裕, 1979)의 추정식을 사용하여 추정하였다.

$$\begin{aligned} \frac{X'_w - Y'_v}{-Y'_v} &= 1.613C_b - 0.471 \end{aligned} \quad (9)$$

3.3 파강제력의 계산

입의 위치 X 에서의 파강제력의 계산을 위해 먼저 식(10)을 이용하여 불규칙파를 분포시켰다. 여기에서 사용된 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼을 사용하였다.

$$\zeta(X, z) = \sum_{i=1}^M [2S(\omega_i) \Delta\omega]^{1/2} \times \cos[k_i X - \omega_i t + \varepsilon_i] \quad (10)$$

여기서, $S(\omega_i), \omega_i, k_i, \varepsilon_i$ 는 각각 i 파의 성분의 파스펙트럼, 주파수, 파수, 무작위 위상각을 나타낸다. $\Delta\omega$ 는 이웃하는 주파수 사이의 차이값이며 상수이다.

파강제력은 입의 위치 X 에서 한 방향의 입사파에서 선수각을 0° 부터 180° 까지 15° 간격으로 계산을 수행하였다. 계류된 선박에 작용하는 파강제력은 섭동전계를 통해 나타내어지는 힘들 중 1차력과 2차력만을 취하였으며, 주파수 영역에서의 1차 파강제력은 3차원특이점분포법을 이용하여 구하였다. 1차 파강제력을 주파수별로 나누어 주파수 전달함수를 구한 예를 Fig.3으로 나타내었다.

2차 파강제력은 2차 속도포텐셜의 영향을 무시한 1차 성분을 이용하여 구해지는 4개의 항으로 나누어 계산하였다. 이를 식(11)에서 식(14)으로 나타내었다.

1차상대수위에 의한 항

$$-\frac{1}{2} \rho g \int_{w_L} \zeta_R^{(1)2} \cdot n' dl \quad (11)$$

1차속도의 제곱항에 비례한 항

$$\frac{1}{2} \rho \iint_{S_0} |\nabla \Phi^{(1)}|^2 \cdot n' ds \quad (12)$$

1차응답과 1차압력의 적분에 의한 항

$$\rho \iint_{S_0} (X^{(1)} \cdot \nabla \Phi_i^{(1)}) \cdot n' ds \quad (13)$$

1차 관성력과 1차회전운동의 곱에 의한 항

$$\alpha^{(1)} \times M \cdot \ddot{X}_k^{(1)} \quad (14)$$

주파수 영역에서의 2차 파강제력의 주파수 전달함수를 구한 예를 Fig.4 로 나타내었다.

파강제력과 모멘트의 시간이력(time history)은 주파수영역에서 구해지는 파강제력과 모멘트의 주파수전달함수를 Fourier 역변환함으로써 얻어지는 임펄스 응답함수를 콘볼루션 적분하여 구하였다. 파강제력 $\{F_w(t)\}$ 와 모멘트 $\{M_w(t)\}$ 를 Volterra 급수로 표현한 후 2차항까지 취하여, 1차 및 2차 파강제력과 모멘트로 분리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{F_{ex}^{(1)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_F^{(1)}(\tau)\} \zeta(t-\tau) d\tau \quad (15)$$

$$\{F_{ex}^{(2)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{h_F^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} \zeta(t-\tau_1) \zeta(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (16)$$

$$\{M_{ex}^{(1)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{h_M^{(1)}(\tau)\} \zeta(t-\tau) d\tau \quad (17)$$

$$\{M_{ex}^{(2)}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{h_M^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} \zeta(t-\tau_1) \zeta(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (18)$$

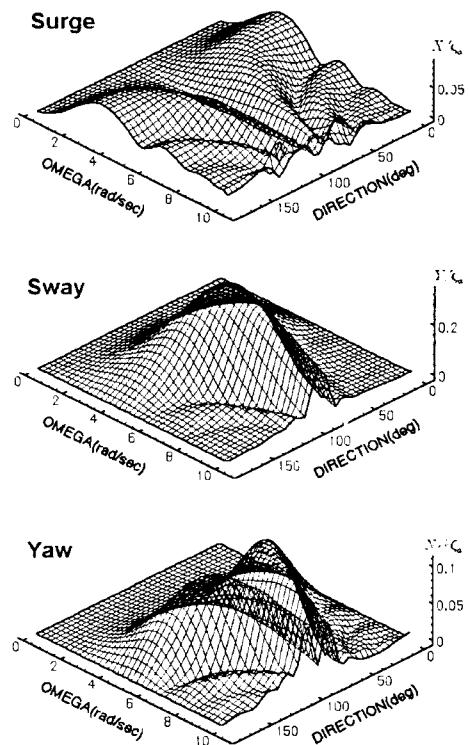


Fig. 3 Directional frequency transfer function(1st order)

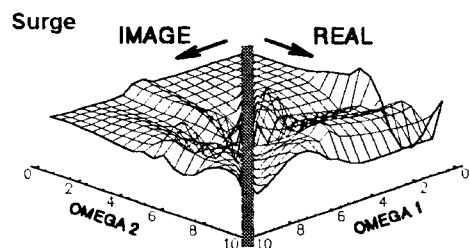


Fig. 4 Quadratic frequency transfer function at $\theta=45^\circ$ (2nd order)

여기서, $\{h_F^{(1)}(t)\}, \{h_F^{(2)}(t)\}$ 및 $\{h_M^{(1)}(t)\}, \{h_M^{(2)}(t)\}$ 는 각각 1차 및 2차 파강제력과 모멘트의 임펄스 응답함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\{h_F^{(1)}(\tau)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{H_F^{(1)}(\omega)\} e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (19)$$

$$\{h_F^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\{H_F^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\} e^{-i(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)}] d\omega_1 d\omega_2 \quad (20)$$

$$\{h_M^{(1)}(\tau)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{H_M^{(1)}(\omega)\} e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (21)$$

$$\{h_M^{(2)}(\tau_1, \tau_2)\} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\{H_M^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\} e^{-i(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)}] d\omega_1 d\omega_2 \quad (22)$$

여기서, $\{H_F^{(1)}(\omega)\}, \{H_M^{(1)}(\omega)\}$ 는 1차 파강제력과 모멘트의 주파수전달함수이고, $\{H_F^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\}, \{H_M^{(2)}(\omega_1, \omega_2)\}$ 는 각각 2차 파강제력과 모멘트의 주파수전달함수이다. Fig.5는 구하여진 2차 파강제력의 Impulse Response Functions의 예를 보여준다.

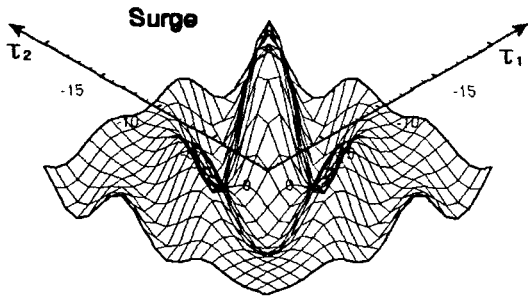


Fig. 5 Quadratic impulse response function at $\theta=45^\circ$ (2nd Order)

3.4 계류력의 계산

Simulation에서 계류삭에 걸리는 장력은 정적해석법을 사용하여 구하였다. 즉, 계류삭의 동적 거동을 무시하고 매 순간선박의 위치에 따른 계류력을 식(23)과 같이 계산하여 운동방정식에 포함시켰다. 여기에서 계류삭은 Catenary를 이룬다고 가정하며 계류삭의 관성과 탄성은 무시하였다. 장력수평성분 T_H 를 다음과 같이 나타낼 수 있다(O.M, 1990).

$$T_H = \frac{w \left\{ x_a - l + h \sqrt{1 + \frac{2T_H}{wh}} \right\}}{\cosh^{-1} \left\{ 1 + \frac{wh}{T_H} \right\}} \quad (23)$$

여기서, w 는 수면아래의 계류삭의 단위 길이당 하중이고, x_a 는 Anchoring point와 선박의 취부점의 수평거리, l 는 계류삭의 총길이, h 는 수심을 나타낸다. Simulation에 사용된 계류삭은 길이 4m, 재질은 Steel chain, 단위길이당 수중무게는 0.01074 kgf 라고 두었다.

4. 계산결과 및 고찰

규칙파와 불규칙파의 1차 파강제력은 0.1초간격으로 선박의 위치와 입사각에 따라 계산하여 Simulation에 사용하였다. 2차 파강제력은 1차 파강제력과 같이 0.1초간격으로 계산한 값과 각 위치와 입사각에서 1000초 동안의 계산의 평균값을 사용한 경우로 나누어 Simulation하였다. 계산에 사용된 규칙파와 불규칙파를 한 지점에서 1000초 동안 계산한 평균 2차파력(Surge)을 도식화하여 Fig.6, Fig.7에 나타내었다.

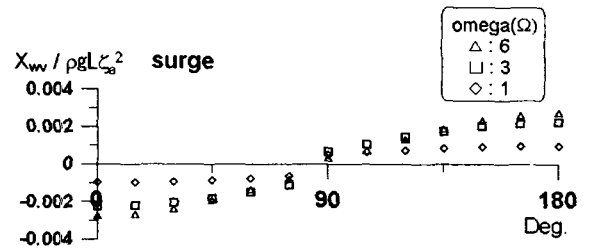


Fig. 6 Mean 2nd order forces in regular waves

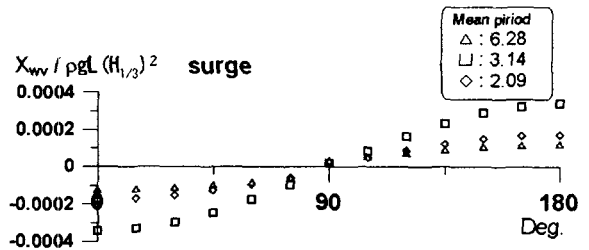


Fig. 7 Mean 2 order forces in irregular waves

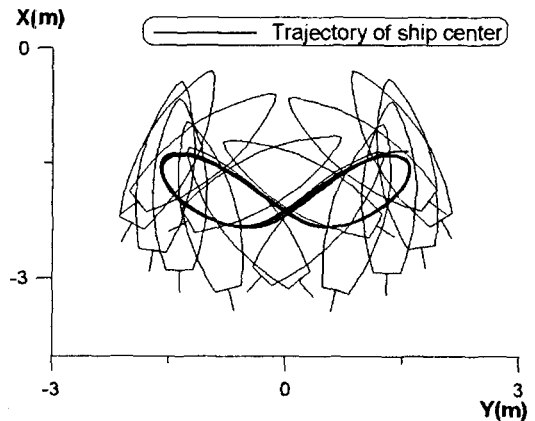


Fig. 8 Slew motion at regular wave(amp:0.03m, $\omega(\Omega)$: 6, only 2nd order force)

Fig.8에서 파고 0.03m, Omega 6인 규칙파중에서 일점계류된 선박에 비선형 파강제력만 고려한 Simulation의 예를 보여 준다. 선박의 중심의 궤적이 ∞ 를 이루는 Slew motion이 구현되어진 모습이다.

Fig.9와 Fig.10에서 규칙파중에서 X,Y방향의 변위를 장주

기파와 단주기파로 나누어 나타내었다. 2차 파강제력만을 사용하였을 때에 비하여 1차 파강제력을 같이 사용했을 때에는 운동주기는 길어지고, 단주기 규칙파중에서는 1차 파강제력으로 인한 선박의 운동에 의해 X,Y방향의 운동변위가 감소한다.

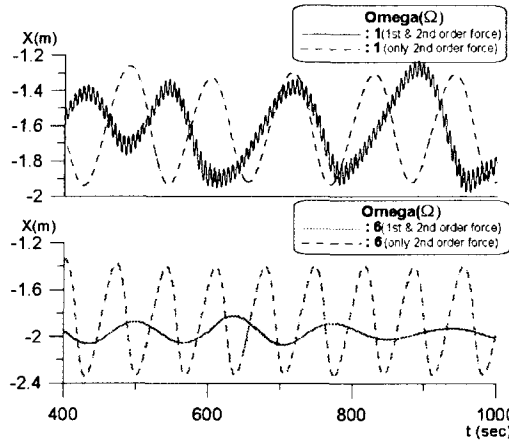


Fig. 9 Time history of longitudinal deviations in regular wave (amp:0.03m)

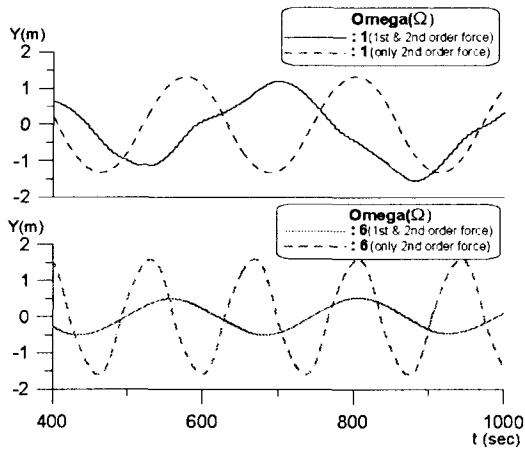


Fig. 10 Time history of lateral deviations in regular wave (amp: 0.03m)

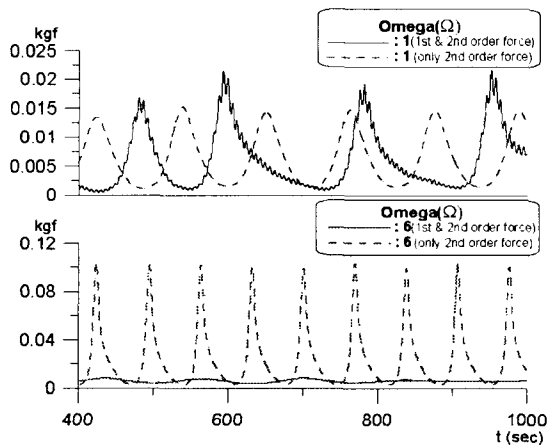


Fig. 11 Time history of horizontal tension in regular wave (amp: 0.03m)

Fig.11에서 규칙파중에서 계류삭에 걸리는 장력을 나타내었다. 장주기 규칙파중에서는 1차 파강제력으로 인한 선박의 운동으로 인해 계류삭에 걸리는 수평장력이 약간 증가하고, 단주기 규칙파중에서는 선박의 운동감소로 인해 계류삭에 걸리는 수평장력도 감소하였다.

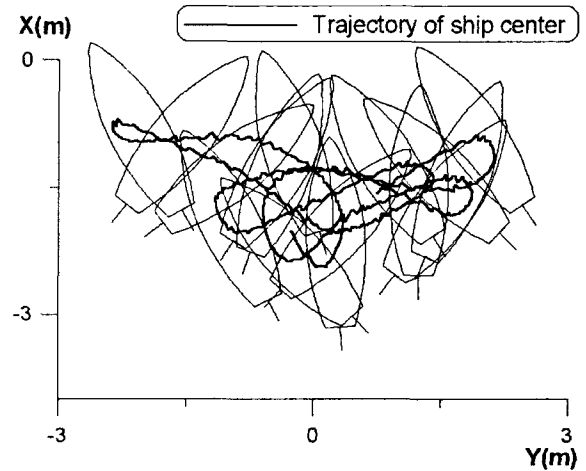


Fig. 12 Slew motion in irregular wave ($H_{1/3}$:0.05m, T_{mean} :3.14 sec)

Fig.12는 유의파고 0.05m, 평균주기 3.14sec인 불규칙파중에서 Simulation되어진 일점계류된 선박의 예를 보여 준다. 1차 파강제력과 2차 파강제력을 모두 고려하였을 때의 Simulation이며, 선박중심의 궤적은 정확하지는 않지만 ∞ 를 이루며 운동하였다.

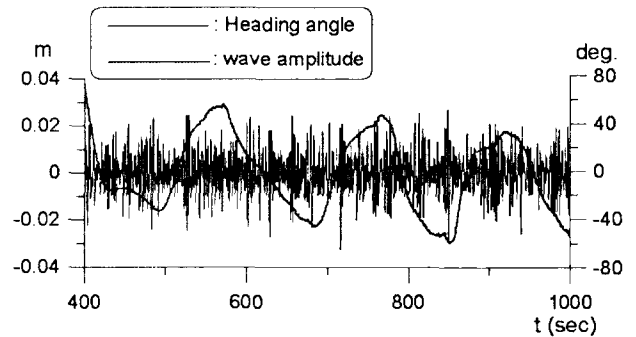


Fig. 13 Time history of wave and heading angle ($H_{1/3}$:0.05m, T_{mean} :3.14 sec)

Fig.13는 Fig.12의 Simulation에 사용된 선박의 선수각과 움직임은 선박위치에서 작용하는 파의 시간이력을 나타내고, Fig.14와 Fig.15는 불규칙파의 1차 파강제력과 2차 파강제력을 나타낸다. 1차 파강제력은 파면의 상승량에 따라 +값과 -값을 가지고, 파의 진폭과 선수각에 의해 파력의 크기가 변하는 것을 볼 수 있다. 그에 반하여, 2차 파강제력은 선수각에 의해 파력의 위상이 지배되고, 파의 진폭과 위상에 따라 파력이 변화함을 볼 수 있다.

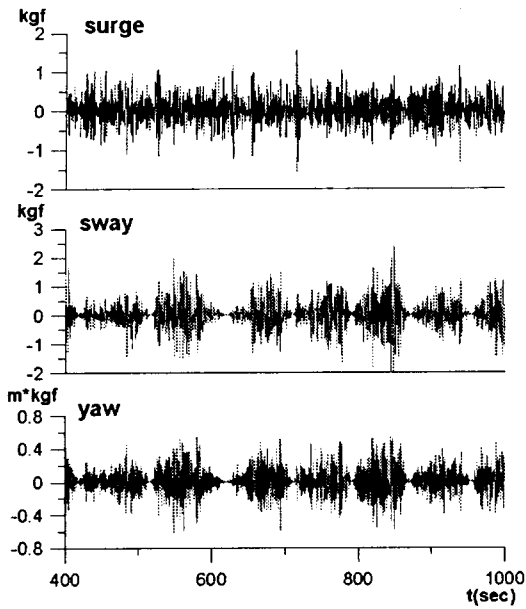


Fig. 14 Time history of 1st order wave force and moment ($H_{1/3}:0.05m, T_{mean}:3.14 sec$)

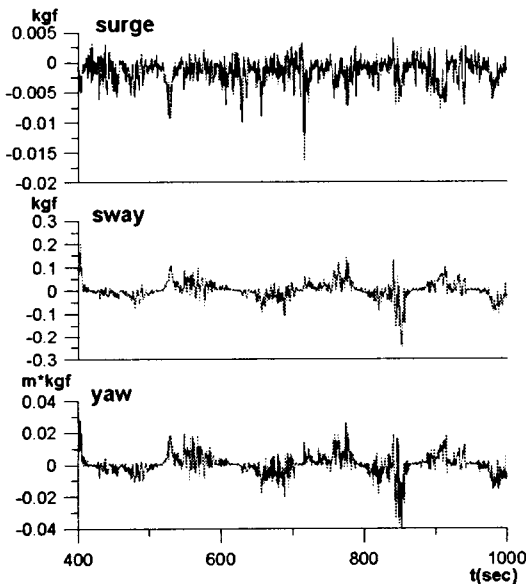


Fig. 15 Time history of 2nd order wave force and moment ($H_{1/3}:0.05m, T_{mean}:3.14 sec$)

유의파고 0.05m인 불규칙파중의 일점계류된 선박의 X,Y의 변위를 Fig.16으로 나타내었다. 계산에 사용된 불규칙파에서는 파의 평균주기보다는 Fig.7에 나타난 평균파력에 의해 운동의 주기가 지배되고 있는 경향을 보여준다. 유의파고 0.03m, 동일한 평균주기에서의 계산에서도 같은 경향을 보였다.

Fig.17과 Fig.18에서 불규칙파중에서 2차 파강제력만을 사용했을 때와 1차, 2차 파강제력을 같이 사용하였을 때의 X,Y의 변위의 시간이력을 나타내었다. 1차 파강제력에 의해 운동변위가 영향을 받고 있음을 알 수 있고, 이로 인하여 Fig.19

에서 나타난 계류삭의 수평장력도 1차 파강제력의 영향으로 변화하였다.

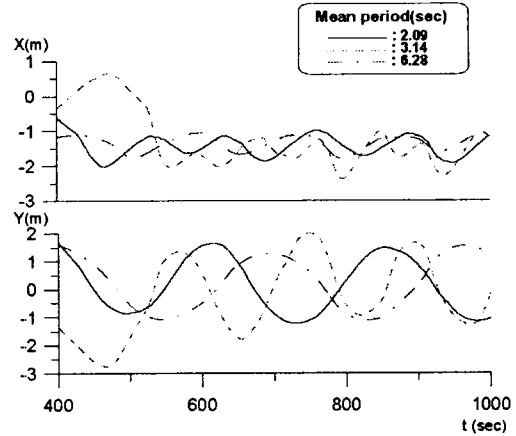


Fig. 16 Time history of longitudinal and lateral deviations in irregular wave ($H_{1/3}:0.05m$, only 2nd order force)

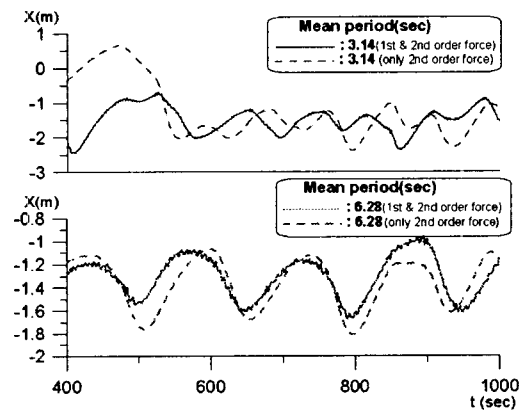


Fig. 17 Time history of longitudinal deviations in irregular wave ($H_{1/3}:0.05m$)

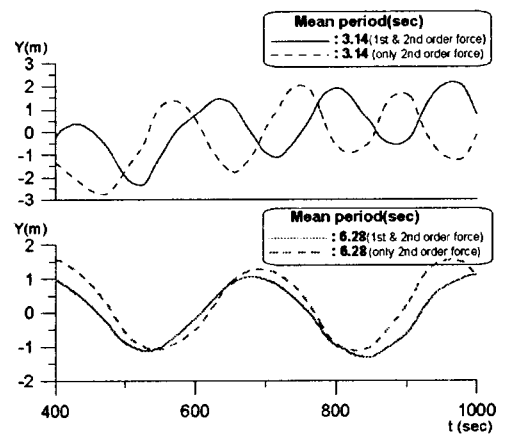


Fig. 18 Time history of lateral deviations in irregular wave ($H_{1/3}:0.05m$)

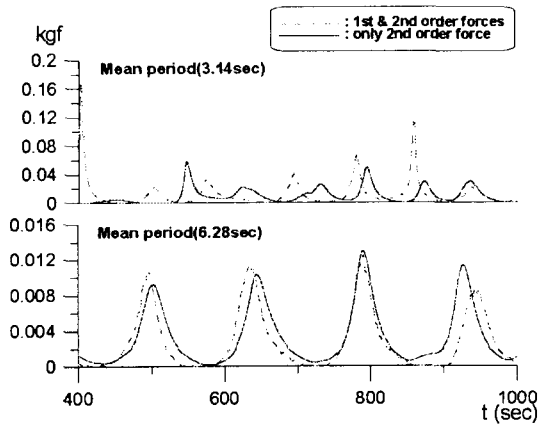


Fig. 19 Time history of horizontal tension in irregular waves ($H_{1/3}: 0.05m$)

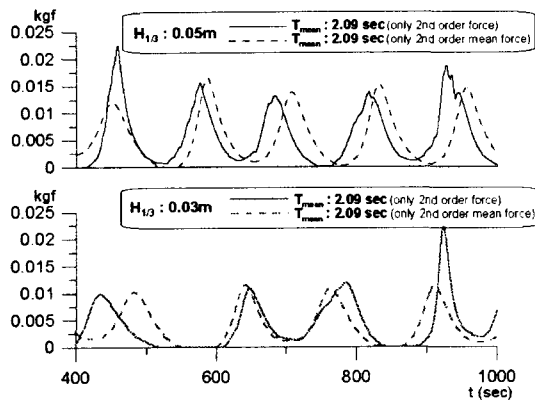


Fig. 20 Time history of horizontal tension in irregular waves

Fig.20에서 불규칙파 중에서 2차 파강제력을 시간평균값과 시간이력을 사용할 때의 계류삭에 걸리는 수평장력을 비교하였다. 2차파강제력을 시간이력으로 사용하였을 때에서 파강제력의 불규칙적인 작용에 의한 선박의 운동으로 인해 수평장력이 크게 작용하는 경우가 발생하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 일점계류된 선박에 작용하는 선형, 비선형 파강제력을 적용하여 선박의 Slew motion 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 불규칙파중의 일점계류된 선박의 거동을 Simulation 할 수 있는 기법을 개발하였다.

(2) 규칙파의 1차파강제력에 기인한 선박의 단주기운동의 영향으로 인하여 2차파강제력만을 사용했을 때보다 선박의

운동주기를 증가시키는 경향이 있다.

(3) 단주기 규칙파중에서는 장주기 규칙파에 비하여 1차 파강제력의 영향으로 선박의 운동변위가 감소하였다.

(4) 불규칙파의 파강제력의 시간이력을 사용한 해석에서는 근사적으로 평균값을 적용할 때에 비하여 일점계류된 선박의 계류삭에 장력이 크게 되는 경우를 발생하였다.

(5) 계류삭의 최대장력은 입력되는 불규칙파 파라메타에 따라 크기가 달라지므로 최대장력의 예측을 위해서는 1차, 2차 파강제력을 모두 사용한 Simulation 결과를 조사할 필요가 있는 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00320) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 김동훈, 이승건 (2001) "바람과 파랑을 고려한 계류시 선박의 거동 해석," 2001년 대한조선학회 춘계학술대회는 문집, pp.128-pp.131
- [2] 이창호, 구자삼, 조효제, 홍봉기 (1999) "불규칙중의 인장 계류식 해양구조물의 비선형 응답해석," 한국해양공학회지, 제12권 제2호, pp.33-42
- [3] 宮島省吾, 趙孝濟, 前田久明 (1994) "浮遊海洋構造物の方向波中での長周期動揺特性について," 關西造船協會誌, 第222号 pp.133-140
- [4] 小保方準, 佐木紀雄 (1982) "一点係留時の船体振れまわり運動とその安定性について," 關西造船學會論文集, 第186号
- [5] Hasegawa, K. (1980) "On a Performance Criterion of Autopilot Navigation," JKSN AJ, No.178, pp. 93-104
- [6] 井上正裕, 貴島勝郎 (1978) "トリム時の船体操縦微係数の推定," 西部造船會々報, 第55号
- [7] 井上正裕, 平野雅祥 (1979) "操縦時船体に働く横力・モーメントの非線型項について," 西部造船會々報, 第58号
- [8] Motora, S. (1960) "On the Measurement of Added Mass and Added Moment of Inertia for Ship Motions," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.106, pp.59-62
- [9] O.M. Faltinsen (1990) "Sea loads on ships and offshore structures," cambridge university press, pp.257-270

원고접수일: 2002년 10월 20일

원고채택일: 2003년 1월 21일