비선형 선박운동을 고려한 대파고 파랑 중 조종성능에 대한 연구

서민국¹ · 김용환^{1,†} · 김경환¹
서울대학교 조선해양공학과¹

Effects on Nonlinear Ship Motions on Ship Maneuvering in Large Amplitude Waves

Min-Guk Seo¹ · Yonghwan Kim^{1,†} · Kyong-Hwan Kim¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹

Abstract

This paper considers a numerical analysis of ship maneuvering performance in the high amplitude incident waves by adopting linear and nonlinear ship motion analysis. A time-domain ship motion program is developed to solve the wave-body interaction problem with the ship slip speed and rotation, and it is coupled with a modular type 4-DOF maneuvering problem. Nonlinear Froude-Krylov and restoring forces are included to consider weakly nonlinear ship motion. The developed method is applied to observe the nonlinear ship motion and planar trajectories in maneuvering test in the presence of incident waves. The comparisons are made for S-175 containership with existing experimental data. The nonlinear computation results show a fair agreement of overall tendency in maneuvering performance. In addition, maneuvering performances with respect to wave slope is predicted and reasonable results are observed.

Keywords : Maneuvering (조종성능), Seakeeping (내향성능), Nonlinear ship motion (비선형 선박운동), Second-order mean drift force (2차 평균 표류력)

1. 서론

선박의 조종성능해석은 전통적으로 정수 중에서 이루어져 왔으며, 이는 초기설계단계에서 선박의 조종성능에 관한 유용한 정보를 제공한다. 정수 중에서의 조종성능 해석은 수조에서의 실험 혹은 수치적 계산 통해서 이루어지며, 좀 더 정확한 해석을 위하여 현재도 많은 연구가 (Kim et al., 2009; Kim et al., 2011; Stern et al., 2011) 수행되고 있다. 하지만 정수 중과는 달리 실제 해상에서는 파가 존재하며 이로 인해 선박은 동요운동을 하며 부가저항을 받게 된다. 그 결과 실제 해상에서 선박의 조종성능은 정수 중의 그것과 많은 차이를 보이게 된다. 또한 선박의 조종성능은 운항안전성과 밀접한 관련이 있으므로 실제 해상에서의 운항안전성을 평가하기 위해서는 파가 조종성능에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

파랑 중 조종운동은 선박의 속도와 선수각이 변하면서 선체가 동요하는 문제로, 이는 기존의 조종이론과 내향이론에서 다루는 운동의 특징을 모두 가지고 있다. 따라서 기존의 조종이론과 내향이론의 통합이 필요하며 효과적인 통합에 대한 고찰이 진행되

어야 한다.

파랑 중 자유항주실험을 하는 것은 파에 의한 영향을 평가하는 효과적인 방법이며 이에 대한 몇몇 결과가 발표된 바 있다. Ueno et al. (2003)는 규칙파 중에서 VLCC 모델을 사용하여 선회시험, 지그재그시험, 정지시험을 수행한 바 있으며, 최근에 Yasukawa & Nakayama (2009)는 S-175 컨테이너 선박에 대하여 규칙파 및 불규칙파에서 선회시험을 수행하였다.

한편 수치기법을 사용하여 파랑 중 선박의 조종성능을 추정한 다양한 연구가 진행되어 왔다. McCreight (1986)는 파에 의한 선체의 동요운동을 고려한 조종운동을 시도하였으며, 이를 바탕으로 6자유도 조종운동 방정식을 제시하였다. Ottosson & Bystrom (1991)은 고정된 부가 질량(added mass)과 감쇠계수(damping coefficient)를 사용하여 조종운동을 계산하였으며, Fang et al. (2005)은 오주파수에 의존하는 선형유체력미계수를 반영하여 한 단계 발전된 형태의 조종운동방정식을 제시하였다. 앞서 언급한 방법들은 실시간 시뮬레이션에 중점을 둔 방법으로, 파에 의한 기억효과 (memory effect)를 고려하지 않는다. 반면 Lee (1992)는 파랑력에 의한 조종운동에 있어서의 기억효과와 중요도를 조사한바 있으며, Bailey et al. (1997)는 컨볼루션 적분을 사

용하여 파에 의한 기억효과를 고려하였으며, Fossen (2005)은 이를 행렬형태로 유도하고 상태공간에서의 표현식을 제시하였다. 또한 Hwang (2010)은 파에 의한 기억 효과를 포함하여, S-175 선박의 규칙파 중에서의 선회성능을 계산하였으며 실험결과와 비교하였다. 컨볼루션 적분을 사용하면 수학적으로 간결한 형태로 조종운동과 내향운동을 통합할 수 있으나, 계산시간이 오래 걸리며 시간평균 표류력 (2^{nd} -order mean drift force)을 정확하게 계산하기 어렵다. Skejic & Faltinsen (2008)은 시간평균 표류력을 정확하게 계산하기 위해 기존의 여러 이론들을 비교, 검토하였으며 조종운동에 따른 저주파수 운동과 입사파에 의한 고주파수 운동을 분리하는 two-time scale 모델을 제시하였다.

앞서 언급한 방법들은 선박의 동요운동을 계산하기 위하여 2차원 해석에 기반을 둔 strip 방법을 사용한다. Ann & Rhee (1994)는 3차원 그린함수를 사용하여 파랑 중 조종운동성능을 해석하였으며, two-time scale expansion 방법을 적용하여 조종운동과 내향운동 문제를 정립하였다. Lin et al. (2006)은 3차원 랜킨 패널법을 기반으로 한 시간영역 비선형 운동해석 프로그램인 LAMP(Large Amplitude Motion Program)를 조종운동을 수행할 수 있도록 확장한 바 있으며, Yen et al. (2010)은 Lin et al. (2006)의 연구를 확장하여 비선형 선박운동을 고려한 파랑 중 조종운동 해석을 수행하였다. 랜킨 패널법의 경우 strip방법에 비하여 정도가 높으며 비선형 해석으로의 확장이 용이하지만, 아직 파랑 중 조종운동에 있어서는 Lin et al. (2006)과 Yen et al. (2010)의 연구를 제외하고는 연구가 많이 진행되지 않았다.

본 연구에서는 Seo & Kim (2010)의 연구를 확장하여 선박의 비선형 운동을 고려하여 대파고 중에서의 파랑 중 조종성능 해석을 수행하였다. 이를 위하여 서울대학교에서 개발한 B-spline 기반의 랜킨 패널법을 적용한 시간영역 비선형 운동 해석 프로그램인 WSH(Wave Induced load and Ship motion analysis)를 파랑 중 조종운동성능을 추정할 수 있도록 확장하였으며, 비선형 선박운동을 추가한 파랑 중 조종성능 해석을 수행하였다. 파랑 중 조종성능 추정에 중요한 요소인 시간평균 표류력은 선박 표면의 압력을 계산하여 적분하는 직접 압력 적분 방법(direct pressure integration)을 사용하여 구하였으며, 개발된 프로그램의 검증을 위해 Series 60($C_b=0.7$)선박과 S-175 선박에 대한 조종시험을 수행하였으며 실험결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 좌표계

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 공간에 고정된 O-XYZ 공간좌표계와 선박의 무게중심에 고정된 o-xyz 선박고정 좌표계를 사용한다. ψ_0 는 선박의 선수각(ship heading angle)이며, β 는 표류각(drift angle)을 나타낸다. δ 는 타각(rudder angle)을 의미하며, Fig. 1과 같이 음의 z축 방향으로의 회전(좌회전)을 양의 값으로 정의한다. 파는 X축에 대해서 χ 의 각으로 입사하며 파고와 파

장은 각각 A , λ 로 표현한다. o-xyz 좌표계는 선박의 조종운동에 의해 움직이는 좌표계이며, 이 좌표계에서 파랑기진운동이 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{\delta}(x, t) = \vec{\xi}_T(t) + \vec{\xi}_R(t) \times \vec{x} \quad (1)$$

여기서 $\xi_T = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 과 $\xi_R = (\xi_4, \xi_5, \xi_6)$ 은 선박의 파랑기진 병진운동과 회전운동을 나타낸다. O-XYZ 좌표계와 o-xyz 좌표계간의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= x \cos \psi_0(t) - y \sin \psi_0(t) + X_0(t) \\ Y &= x \sin \psi_0(t) + y \cos \psi_0(t) + Y_0(t) \\ Z &= z \end{aligned} \quad (2)$$

$X_0(t)$, $Y_0(t)$, $\psi_0(t)$ 는 시간 t 에서의 선박의 위치 및 선수각을 의미한다.

Fig. 1 Coordinate system

2.2 내향운동 방정식

2.2.1 선형 선박운동 문제

파랑 중 운항하는 선박의 운동은 조종운동(manuevering motion)과 파랑기진운동(wave-induced motion)의 합으로 나타낼 수 있다. 파랑기진운동은 다음과 같이 속도포텐셜을 도입한 경계 조건 문제(boundary value problem)를 풀어서 구한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in fluid domain} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \frac{\partial \delta}{\partial t} \cdot \vec{n} \quad \text{on body surface} \quad (4)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \phi) \cdot \nabla \right] [z - \zeta(x, y, t)] = 0 \quad \text{on } z = \zeta(x, y, t) \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \phi) \cdot \nabla \right] \phi = -g\zeta + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad \text{on } z = \zeta(x, y, t) \quad (6)$$

$\vec{\delta}, \vec{U} = (u_0 - yr_0)\vec{i} + (v_0 - xr_0)\vec{j}$ 는 임의의 지점에서의 선박의 변위와 속도이며, ζ 는 파의 높이 (wave elevation)를 나타낸다. 선박의 속도는 일반적인 운동해석 프로그램에서 전진속도만을 고려하는 것과는 달리 조종운동 해석을 수행하기 위하여 y 방향 속도와 z 방향 회전까지 고려한다. 편의상 전체 속도 포텐셜을 균일류 포텐셜 ($\vec{U} \cdot \vec{x} = 0(1)$), 입사파 포텐셜 ($\phi_I = 0(\epsilon)$) 및 교란파 포텐셜 ($\phi_d = 0(\epsilon)$)로 분리한다.

$$\phi(\vec{x}, t) = -\vec{U} \cdot \vec{x} + \phi_I(\vec{x}, t) + \phi_d(\vec{x}, t) \quad (7)$$

위의 속도포텐셜을 경계조건에 넣고 정리하면 선형화된 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right) - \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } \overline{S_B} \quad (8)$$

$$(m_1, m_2, m_3) = 0$$

$$(m_4, m_5, m_6) = \vec{n} \times \vec{U}$$

$$\frac{\partial \zeta_d}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \zeta_d = \frac{\partial \phi_d}{\partial z} \quad \text{on } z = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \phi_d = -g\zeta_d \quad \text{on } z = 0 \quad (10)$$

운동 방정식은 아래와 같이 적용될 수 있다.

$$[M_{jk}] \{\ddot{\xi}_k\} = \{F_{F.K.j}\} + \{F_{H.D.j}\} + \{F_{Res.j}\} \quad (11)$$

M_{jk} 질량을 의미하며 $F_{F.K.}$ 는 Froude-Krylov 힘, $F_{H.D.}$ 는 교란된 파와 선박 운동으로 발생하는 유체동역학적 힘, 그리고 $F_{Res.}$ 는 복원력을 의미한다.

2.2.2 비선형 선박운동 문제

선박 운동문제에서 비선형성에 대한 요인은 크게 자유표면의 비선형성과 물체 형상의 비선형성으로 나눌 수 있다. 위의 방법 중에서 최근에 많이 적용되는 방법은 선박 형상의 비선형성을 고려하는 것이며, 이는 컨테이너선과 같이 선박의 형상이 깊이 방향으로 많이 변화하는 선박들에 적용될 수 있다. 선박 형상의 비선형성을 고려하는 방법의 단계는 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

전체 문제를 비선형으로 문제를 푸는 Weak-scatterer 방법이 가장 바람직하지만, 이는 매시간마다 경계치 문제를 새로 만들어 계산해야 하기 때문에 많은 시간이 소요되며, 실용적인 목적에서는 많이 적용되지 않는다. 반면 약한 비선형 방법(weakly nonlinear method)은 계산 시간이 선형의 계산 시간과 많은 차이가 없고 비선형 운동의 상당부분을 포함하는 것으로 알려져 있어 실용적으로 많이 적용되고 있다.

Table 1 Consideration of body nonlinearity

	Froude-Krylov & Restoring Force	Hydrodynamic Force
Linear method	Calculated at mean body	Calculated at mean body
Weakly nonlinear method	Calculated at wetted body	Calculated at mean body
Weak-scatterer method	Calculated at wetted body	Calculated at wetted body

본 연구에서는 계산의 효율성을 위하여 약한 비선형 계산방법을 적용한다. 이 경우, 비선형 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_{jk}] \{\ddot{\xi}_k\} = \{F_{H.D.j}\}_{linear} + \{F_{Res.j}\}_{nonlinear} + \{F_{F.K.j}\}_{nonlinear} \quad (12)$$

선형 운동 방정식에서는 물체의 변위가 작다고 가정하기 때문에 복원력이 물체의 변위에 비례한다고 가정하고 복원력 계수를 상수로 두어 계산한다. 반면 비선형 운동 방정식에서는 실제 입수면적에 대한 복원력과 Froude-Krylov 힘을 계산하여 외력항에 이를 적용한다. 비선형 복원력은 실제 위치의 수두 압력을 적분한 값에서 정수 중 수두 압력을 적분한 값의 차이로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{F_{Res.j}\}_{nonlinear} &= \{F_{static.j}\}_{exact} - \{F_{static.j}\}_{mean} \\ &= \int_{S_B} \rho g(-z_e) \cdot n_j ds - \int_{\overline{S_B}} \rho g(-z_m) \cdot n_j ds \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, 6) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $S_B, \overline{S_B}$ 는 각각 선박의 실제 위치와 평균 위치에서의 입수면적을 의미한다. 비선형 Froude-Krylov 힘은 선형 입사파 포텐셜을 이용하여 계산한다. 수선면 아래쪽에서는 선형 입사파 포텐셜을 사용하여 Froude-Krylov 힘을 바로 계산할 수 있으며, 수선면 위쪽에서는 $z = 0$ 에서의 선형 입사파 포텐셜을 파 높이에 대해서 테일러 전개하여 계산한 후 Froude-Krylov 힘을 계산한다.

(i) $z \leq 0$:

$$\phi_I = \frac{gA}{\omega} e^{kz} \sin(kX \cos \chi + kY \sin \chi - \omega t) \quad (14)$$

(ii) $0 < z < \zeta$:

$$\phi_I(z) = \frac{gA}{\omega} \sin(kX \cos \chi + kY \sin \chi - \omega t) \quad (15)$$

위와 같이 주어진 포텐셜을 베르누이 방정식을 사용하여 적분하면 다음과 같은 비선형 Froude-Krylov 힘을 얻을 수 있다.

$$\{F_{Res,j}\}_{nonlinear} = -\rho \iint_{S_B} \left[\left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi_I \right\} \cdot \vec{n}_j + \left\{ \frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \right\} \cdot \vec{n}_j \right] dS \quad (16)$$

2.3 조종운동 방정식

선박의 조종운동은 다음의 4자유도 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u}_0 - v_0 r_0) &= X_H + X_P + X_R + X_W \\ m(\dot{v}_0 + u_0 r_0) &= Y_H + Y_R + Y_W \\ I_{xx} \dot{p}_0 &= K_H + K_R + K_W \\ I_{zz} \dot{r}_0 &= N_H + N_R + N_W \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

X, Y, K, N 의 아래첨자 H, P, R 은 각각 선체, 프로펠러, 타에 의한 유체동역학적 힘을 의미하며 W 는 시간평균 표류력을 나타낸다.

2.3.1 선체에 의한 유체동역학적 힘

선체에 의한 유체동역학적 힘은 다음과 같은 포괄적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_H = \vec{F}_{pot.} + \vec{F}_{lift} + \vec{F}_{visc} \quad (18)$$

여기서 $\vec{F}_{pot.}$ 은 포텐셜 유동에 의해서 야기되는 유체동역학적 힘이며, $\vec{F}_{lift}$ 는 선체의 양력, $\vec{F}_{visc.}$ 는, $\vec{F}_{pot.}$, $\vec{F}_{lift}$ 을 제외한 추가적인 점성 저항력을 일컫는다(Lin et al., 2006). 이 힘들은 종래의 MMG 모델에서 사용하는 방정식 항들과 관련이 있다.

$$\begin{aligned} X_H &= X_u \dot{u}_0 - Y_v v_0 r_0 + X_{vv} v_0^2 \\ &\quad + X_{vr} v_0 r_0 + X_{rr} r_0^2 - R(u_0) \\ Y_H &= Y_v \dot{v}_0 + X_u u_0 r_0 + Y_v v_0 + Y_r r_0 \\ &\quad + Y_{vv} v_0^3 + Y_{vr} v_0^2 r_0 + Y_{rr} v_0 r_0^2 + Y_{rrr} r_0^3 \\ K_H &= -W \overline{GZ} - N(\dot{\phi}) - z_H Y_H \\ N_H &= N_r \dot{r}_0 + N_v v_0 + N_r r_0 + N_{vv} v_0^3 \\ &\quad + N_{vr} v_0^2 r_0 + N_{rr} v_0 r_0^2 + N_{rrr} r_0^3 \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)의 방정식은 Yasukawa (2006a)가 사용한 선체에 의한 유체동역학적 힘을 나타내는 식이다. 위의 식에서 $X_u \dot{u}_0$, $X_u u_0 r_0$, $Y_v \dot{v}_0$ 및 $Y_v v_0 r_0$ 은 관성력과 관련이 있으며, $\vec{F}_{pot.}$

에 포함된다. 그리고 $Y_v v_0$, $Y_r r_0$, $N_v v_0$ 및 $N_r r_0$ 는 조파저항과 양력에 관련이 있으며 $\vec{F}_{pot.}$ 와 $\vec{F}_{lift}$ 양쪽에 포함된다. 나머지 $X_{vv} v_0^2$, $X_{vr} v_0 r_0$, $X_{rr} r_0^2$, $Y_{vv} v_0^3$, $Y_{vr} v_0^2 r_0$, $Y_{rr} v_0 r_0^2$, $Y_{rrr} r_0^3$, $N_{vv} v_0^3$, $N_{vr} v_0^2 r_0$, $N_{rr} v_0 r_0^2$ 및 $N_{rrr} r_0^3$ 는 비선형 항이며, $\vec{F}_{visc.}$ 에 포함된다. 위의 식을 변형하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_H &= X_u \dot{u}_0 - Y_v v_0 r_0 + X_{vr} v_0 r_0 \\ &\quad + X_{vv} v_0^2 + X_{rr} r_0^2 - (R_{pot.} + R_{visc.})(u_0) \\ Y_H &= Y_v \dot{v}_0 + X_u u_0 r_0 + \{ (Y_v)_{pot.} + (Y_v)_{lift} \} v_0 \\ &\quad + \{ (Y_r)_{pot.} + (Y_r)_{lift} \} r_0 + Y_{vv} v_0^3 \\ &\quad + Y_{vr} v_0^2 r_0 + Y_{rr} v_0 r_0^2 + Y_{rrr} r_0^3 \\ K_H &= -W \overline{GZ} - N(\dot{\phi}) - z_H Y_H \\ N_H &= N_r \dot{r}_0 + \{ (N_v)_{pot.} + (N_v)_{lift} \} v_0 \\ &\quad + \{ (N_r)_{pot.} + (N_r)_{lift} \} r_0 + N_{vv} v_0^3 \\ &\quad + N_{vr} v_0^2 r_0 + N_{rr} v_0 r_0^2 + N_{rrr} r_0^3 \end{aligned} \quad (20)$$

위의 식에서 한 줄 밑줄로 표현된 항은 포텐셜 유동에 의해서 야기되는 유체동역학적 힘, $\vec{F}_{pot.}$ 을 나타내며, WSH 프로그램을 통해서 계산 할 수 있다. 두 줄 밑줄로 표현된 항은 선체에 의한 양력, $\vec{F}_{lift}$ 을 나타내며, 선박을 종횡비(aspect ratio)가 작은 평판으로 가정하여 계산한다. 그리고 그 외의 항은 추가적인 점성 저항력이며, Yasukawa (2006a, 2006b)의 연구에서 사용된 실험값을 사용하여 계산한다.

2.3.2 프로펠러에 의한 유체동역학적 힘

프로펠러에 의한 추력은 다음과 같은 MMG 모델의 식을 사용한다.

$$X_p = (1 - t_p) \rho n^2 D_p^4 K_T \quad (21)$$

여기서 t_p , n , D_p , K_T 는 각각 추력감소계수, 프로펠러의 초당 회전수, 직경, 추력계수를 의미한다.

2.3.3 타에 의한 유체동역학적 힘

타에 의한 유체동역학적 힘 또한 MMG 모델의 식을 사용하였으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ K_R &= -z_R Y_R \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 δ , x_R , z_R 은 각각 타각, 타력의 x축 방향, z축 방향 작용중심을 의미하며, t_R , a_H , x_H 은 선체와 타의 상호작용에 의해 나타난 계수이다. F_N 은 타직압력을 의미한다.

2.3.4 파에 의한 시간평균 표류력

시간평균 표류력은 선박에 작용하는 힘들 중 2차항 힘의 평균값으로 계산된다. 2차 힘의 평균값은 선형해의 제곱 항들로 계산할 수 있으며, 선체에 작용하는 압력을 직접 적분하는 방식을 사용한다. 시간평균 표류력에 대한 식은 다음과 같으며, 자세한 설명은 Kim & Kim (2010)에 수록되어 있다.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F_W} = & \rho g \int \frac{1}{2} (\eta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x))^2 \cdot \overrightarrow{n} dl \\ & - \rho \iint_{S_B} g(\vec{z} + Z_0) \cdot \overrightarrow{n_2} dS \\ & - \rho \iint_{S_B} \frac{1}{2} \nabla(\phi_I + \phi_d) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \cdot \overrightarrow{n} dS \\ & - \rho \iint_{S_B} g(\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x) \cdot \overrightarrow{n_1} dS \\ & - \rho \iint_{S_B} \left(\frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} - \overrightarrow{U} \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \right) \cdot \overrightarrow{n_1} dS \\ & - \rho \iint_{S_B} \vec{\delta} \cdot \nabla \left[\frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} - \overrightarrow{U} \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \right] \cdot \overrightarrow{n} dS \end{aligned} \quad (23)$$

$\vec{n}$ 은 선박의 법선 벡터이며 $\vec{n_1}$ 과 $\vec{n_2}$ 는 1차, 2차 법선 벡터를 의미한다. 계산에 필요한 각종 계수들은 Yasukawa (2006a, 2006b)에 수록되어 있는 값을 사용하였다.

2.4 내항·조종 연성방법

내항운동은 파에 의해 진동하는 운동이며, 조종운동은 조종력에 의해 천천히 변화하는 운동이다. 본 연구에서는 이 두 가지 운동을 따로 계산하지만, 각 운동을 계산할 때 선박의 조종으로 인한 위치변화 및 파랑으로 인한 운동이 서로 고려가 될 수 있도록 연성하여 해석하였다.

조종운동방정식의 외력 항을 알고 있다면 시간 t 에서의 선박의 속도(u_b , v_b , p_b , r_b)와 위치 (X_0 , Y_0 , K_0 , N_0)를 계산할 수 있다. 계산된 선박의 속도 및 위치 사용하여 경계조건 문제를 재정의하며, 재 정의된 경계조건 문제를 풀어서 선박의 동요운동 및 시간평균 표류력을 계산한다. 조종운동방정식의 외력에 경계조건문제를 풀어서 구한 유체동역학적힘($F_{H,D}$)과 시간평균 표류력을 대입하고 그 외의 외력을 계산하여 선박의 조종운동을 풀어준다. 이러한 방식으로 시뮬레이션이 끝날 때까지 조종운동과 내항운동 간의 상호작용이 반복된다.

3. 수치계산 결과

파랑 중에서의 조종성능을 계산하기 위해서 사용된 모델은 S-175 컨테이너 선형이며 선박의 주요재원은 Table 2와 같다. Fig. 2는 계산에 사용된 패널모델의 예이며, 선박표면에는 1000~1200 개의 패널을 분포하였으며 자유표면에는 4000개 이상 충분히 분포하여 패널 개수에 따른 영향을 최소화 하였다.

Fig. 2 Panel model of S-175 Containership

Table 2 Principal particulars of S-175 containership

Model		S-175 containership
Hull particulars		
Length	Lpp	175.0 m
Breadth	B	25.4 m
Draught	d	9.5 m
Block coefficient	C _B	0.572
Displacement	Δ	24,739 ton
Roll period	T _φ	20.08 sec
Propeller particulars		
Diameter	D _p	6.507 m
Pitch/Diameter ratio	p	0.73
Rudder particulars		
Area	A _R	32.46 m ²
Aspect ratio	λ	1.83

3.1 선체에 의한 유체력 검증

본 연구에서 적합한 수학 모델의 타당성을 검증하기 위해서 선박의 선수각 속도와 선수각을 달리 하면서 현재의 모델로 계산된 선체에 의한 유체동역학적 힘을 실험값 (Yasukawa, 2006a)과 비교해 주었다. 선체에 의한 유체동역학적 힘은 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$Y' = \frac{Y_{hull}}{1/2\rho L d U^2} \quad (24)$$

$$N' = \frac{N_{hull}}{1/2\rho L^2 d U^2} \quad (25)$$

Fig. 3의 (a)는 좌우동요 힘, (b)는 선수동요 모멘트를 나타내며, 이는 식 (19)의 선형 항뿐만 아니라 비선형 항도 포함하는 값이다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 계산 결과가 실험값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

(a) Total hull sway force

(b) Total hull yaw moment

Fig. 3 Non-dimensional total hull sway force and yaw moment due to sway and yaw velocity: S-175 containership, $Fn = 0.15$

3.2 파에 의한 시간평균 표류력 검증

시간평균 표류력은 파랑 중에서 항해하는 선박의 선속을 변화시키며 선박의 운동 궤적을 표류시키는 등, 선박의 조종성능 해석에 중요한 영향을 끼친다. 따라서 파랑 중 조종성능의 정확한 예측을 위한 중요한 요소라고 할 수 있으며, 본 장에서는 시간평균 표류력에 대한 검증을 수행하였다. Fig. 4는 S-175 선박이 선수파와 횡파에서 $Fn = 0.15$ 의 속도로 운행하는 경우 시간평균 표류력을 나타내고 있다. 무차원화된 시간평균 표류력은 다음과 같이 정의된다.

$$C_{XW} = \frac{X_W}{\rho g A^2 B^2 / L} \quad (26)$$

$$C_{YW} = \frac{Y_W}{\rho g A^2 B^2 / L} \quad (27)$$

$$C_{NW} = \frac{N_W}{\rho g A^2 B^2} \quad (28)$$

선수파에서의 시간평균 표류력은 실험값과 계산 값이 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있지만, 횡파의 경우 선수동요 모멘트 값이 차이를 보인다. 이러한 차이는 점성의 영향을 고려하지 않은 현재의 포텐셜을 근간으로 한 방법 때문이라고 생각되며, 좀 더 견고한 결론을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

(a) Surge-directional mean drift force

(b) Sway-directional mean drift force

(c) Yaw-directional mean drift moment

Fig. 4 Comparison of mean drift forces: S-175 containership, $Fn = 0.15$

3.3 비선형 선박운동 검증

Fig. 5는 S-175 컨테이너선의 시간에 따른 상하동요 및 종동요 운동 결과를 나타내고 있다. 계산한 결과를 살펴보면 비선형의 결과가 좀 더 작게 계산되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서는 파의 기울기에 따른 상하동요와 종동요 운동의 계산 결과를 O' Dea et al. (1992)의 실험값과 비교하였다. 계산 결과와 실험값이 유사한 크기를 나타내고 있으며, 파의 기울기가 커질수록 선박의 운동응답이 작아지는 동일한 경향을 나타낸다.

(a) Heave motion

(b) Pitch motion

Fig. 5 Comparison of linear and nonlinear motion history: S-175 containership, $F_n = 0.275$, $\lambda / L = 1.4$, $kA = 0.08$, $\chi = 180^\circ$

(a) Heave motion

(b) Pitch motion

Fig. 6 Comparison of the motion magnitude with respect to wave slope: S-175 containership, $F_n = 0.275$, $\lambda / L = 1.4$, $\chi = 180^\circ$

3.4 파랑 중 선회시험 결과

규칙파 중에서의 선회시험은 S-175선박을 사용하여 수행하였다. 선박의 길이에 대한 파장의 비가 0.7, 1.0, 1.2인 파가 선박의 정면 ($\chi = 180^\circ$) 및 측면 ($\chi = 90^\circ$)으로 입사하는 경우를 고려하였으며, 계산에 사용된 파고는 3.5m 이다. 입사 파의 파저가 선박의 중심부를 통과할 때 선박의 타를 움직이기 시작하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 규칙파가 90° 와 180° 로 입사하는 경우 우현 선회 궤적을 나타낸 것으로, 선형 운동계산결과 및 비선형 운동계산결과를 Yasukawa & Nakayama (2009)의 실험결과와 비교한 것이다. 선박의 길이에 대한 파장의 비가 각각 0.7, 1.0, 1.2이며, 파장이 짧을수록 파의 기울기가 커지는 경우이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 실험결과와 계산결과에서 모두 파의 진행방향뿐만 아니라 파의 진행방향과 수직인 방향으로 선회궤적이 표류되는 것을 알 수 있다. 또한 파장이 짧을수록 선회궤적이 표류되는 정도가 커지는데, 이는 파장이 짧을수록 선박의 측면으로 작용하는 시간평균 표류력이 커지기 때문이다. 계산결과와 실험결과를 비교해 보면 두 결과 모두 동일한 경향을 보이고 있으나 계산된 선회궤적이 실험을 통해서 구한 선회궤적 보다 더 많이 표류된 것을 확인할 수 있다. 이러한 선회궤적의 차이는 파장이 짧은 경우에 더 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 4 (c)에서 원인을 찾을 수 있다. Fig. 4 (c)는 선수동요 표류모멘트의 값이며 실험값과 계산 값이 차이를 보인다. 이러한 차이로 인해서 선박의 선회성능 계산 시 선수각의 변화 정도가 작게 나타나게 되며, 선회궤적이 더 밀려나는 현상이 발생한다. 또한 파장이 짧을수록 계산 값과 실험값의 차이가 크기 때문에 좀 더 큰 차이를 보이게 된다. 선형 계산결과와 비선형 계산결과를 비교해 보면, 비선형 계산 결과가 선형 계산결과에 비해 실험 결과와 더 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 파장이 짧을수록, 즉 파의 기울기가 클수록 비선형 계산결과와 선형 계산 결과의 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

(a) $\lambda / L = 0.7$ ($kA = 0.090$)

(a) $\lambda / L = 0.7$ ($kA = 0.090$)

(b) $\lambda / L = 1.0$ ($kA = 0.063$)

(b) $\lambda / L = 1.0$ ($kA = 0.063$)

(c) $\lambda / L = 1.2$ ($kA = 0.052$)

(c) $\lambda / L = 1.2$ ($kA = 0.052$)

Fig. 7 Comparison of starboard turning trajectories in regular waves: S-175 containership, $F_n = 0.15$, $\chi = 90^\circ$, $\delta = -35^\circ$, $A / L = 0.01$

Fig. 8 Comparison of starboard turning trajectories in regular waves: S-175 containership, $F_n = 0.15$, $\chi = 180^\circ$, $\delta = -35^\circ$, $A / L = 0.01$

(a) Advance and tactical diameter in beam sea ($\chi = 90^\circ$)

(b) Advance and tactical diameter in head sea ($\chi = 180^\circ$)

Fig. 9 Comparison of advance (A_D / L) and tactical diameter (D_T / L): S-175 containership, $Fn = 0.15$, $\delta = -35^\circ$

Fig. 9는 파장변화에 따른 전진거리와 전술직경의 선형 계산결과와 비선형 계산결과를 실험값과 비교한 것이다. 계산된 결과가 실험값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 전진거리와 전술직경 역시 비선형 계산 결과가 선형 계산결과에 비해 좀 더 나은 결과를 보여 준다.

Fig. 10은 선장에 대한 파장의 비가 0.7인 규칙파가 선박의 측면에서 입사하는 경우에 우현선회 하는 선박의 전체 속도, 표류각, 선수각속도, 상하동요운동, 횡동요운동을 시간에 대하여 나타낸 것이다. 계산 결과가 실험결과와 전반적인 경향을 잘 따르고 있으며, 파랑기진 운동에 의한 영향을 잘 반영하고 있다. 다만 실험결과와 비교해 보았을 때 계산결과에서 시간지연이 발생하는데, 이는 계산된 선수각속도의 크기가 작기 때문이라고 생각된다. 이는 선수동요 모멘트에 대한 정확한 계산 방법을 도입한다면 개선될 것이라고 생각된다. 선형과 비선형 계산결과를 비교해 보면

비선형 결과가 시간지연 측면에서 좀 더 나은 결과를 보이는데, 이는 비선형 계산이 좀 더 정확한 선수동요 모멘트 결과 값을 준다는 것을 알 수 있다.

(a) Ship speed

(b) Drift angle

(c) Yaw rate

(d) Heave motion

(e) Roll motion

Fig. 10 Comparison of time histories in regular waves:
S-175 containership, $F_n = 0.15$, $\chi = 90^\circ$, $\lambda / L = 0.7$, $\delta = -35^\circ$, $A / L = 0.01$

3.5 파고에 따른 선회시험 결과

비선형 선박운동 계산방법을 사용하여 파고에 따른 선회 시험 결과를 비교하였다. Fig. 11은 선장에 대한 파장의 비가 0.7인, 파고가 각기 다른 규칙파가 S-175 컨테이너선의 정면에서 입사하는 경우에 좌현 선회하는 선박의 선회궤적을 나타내고 있다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 파고가 클수록 선회궤적은 많이 표류됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 파고에 대한 전진거리와 전술직경의 변화를 나타내고 있다. 파고가 증가함에 따라 전진거리와 전술직경은 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 대파고에서는 정수 중의 그것과 큰 차이를 보인다. 비선형 선박운동 계산방법을 사용한 대파고에서의 선박조종운동 계산이 비교적 합리적인 결과를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

(a) $kA = 0.02, 0.04$ (b) $kA = 0.06, 0.08$ (c) $kA = 0.10, 0.12$

Fig. 11 Nonlinear computation of port turning trajectories in regular waves: S-175 containership, $F_n = 0.15$, $\chi = 180^\circ$, $\lambda / L = 0.7$, $\delta = 35^\circ$

(a) Advance

(b) Tactical diameter

Fig. 12 Nonlinear computation of advance (A_D / L) and tactical diameter (D_T / L): S-175 containership, $F_n = 0.15$, $\chi = 180^\circ$, $\lambda / L = 0.7$, $\delta = 35^\circ$

4. 결론

본 연구에서는 비선형 선박운동 계산 방법을 사용한 대파고 중에서의 선박의 조종성능 해석에 대하여 다루었다. S-175 컨테이너선의 규칙파 중에서의 선회시험을 선형 및 비선형 선박운동 계산방법을 사용하여 수행하였으며, 이를 실험결과와 비교하였다. 그리고 파고에 따른 선회시험을 비선형 선박운동 계산방법을 사용하여 계산하였으며, 다음의 결론들을 얻었다.

■ 비선형 선박운동 계산방법을 사용한 파랑 중 조종성능 해석이 선형 선박운동 계산방법 사용한 경우에 비하여 좀 더 실험값에 근접한 결과를 나타내었다.

■ 파고가 커질수록 선회궤적이 파의 진행방향 및 수직한 방향으로 더 많이 밀려나며, 정수 중에서의 조종성능과 더 큰 차이를 보이는 것을 확인하였다. 또한 파고에 따라서 전술직경과 전진거리가 비교적 선형적으로 변하는 것을 확인하였다.

■ 계산결과의 정도를 증가시키기 위해서는 선박의 선수동요 모멘트의 정도 높은 계산방법에 대한 고찰이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

Ann, S.P. & Rhee, K.P., 1994. Analysis of Manoeuvrability of a Ship in Waves by 3-Dimensional Panel Method.

Transactions of the Society of Naval Architecture of Korea, 31(4), pp.82-98.

Bailey, P.A., Price, W.G. & Temarel, P., 1997. A Unified Mathematical Model Describing the Manoeuvring of a Ship Travelling in a Seaway. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 140, pp.131-149.

Fang, M.C., Luo, J.H. & Lee, M.L., 2005. A Nonlinear Mathematical Model for Ship Turning Circle Simulation in Waves. *Journal of Ship Research*, 49(2), pp.69-79.

Fossen, T.I., 2005. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 19(9), pp.2717-2746.

Hwang, S.H., 2010. *Ship's Manoeuvring Performance Analysis in Waves Using a Seakeeping and Manoeuvring Unified Model*. Master Thesis. Seoul National University.

Kim, K.H. & Kim, Y., 2010. Numerical Analysis of Added Resistance on Ships by a Time-domain Rankine Panel Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.398-409.

Kim, Y.G., Yeo, D.J., Kim, S.Y., Yun, K.H. & Oh, B.I., 2009. Prediction of Maneuverability of KCS by CPMC Captive Model Test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.553-561.

Kim, Y.G., Yeo, D.J., Son, N.S., Kim, S.Y., Yun, K.H. & Oh, B.I., 2011. Prediction of Maneuverability of KCS with 4 Degrees of Freedom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.267-274.

Lee, S.K., 1992. A Study on the Memory Effect of the Radiation Forces in the Maneuvering Motion of a Ship. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 29(3), pp.53-58.

Lin, W.M., Zhang, S., Weems, K. & Liut, D., 2006. Numerical Simulations of Ship Maneuvering in Waves. *Proceedings of the 26th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Rome, Italy 17-22 September 2006.

McCreight, W.R., 1986. Ship Maneuvering in Waves. *Proceedings of the 16th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Berkeley, USA, 13-18 July 1986.

O' Dea, J., Powers, E. & Zselecsy, J., 1992. Experimental Determination of Nonlinearities in Vertical Place Ship Motions. *Proceedings of the 19th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Republic of Korea, 23-28 August 1992.

Ottosson, P. & Bystrom, L., 1991. Simulation of the Dynamics of a Ship Maneuvering in Waves. *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 99, pp.281-298.

- Seo, M.G. & Kim, Y., 2010. Analysis on Ship Maneuvering Performance in Waves by using a Time-domain Rankine Panel Method. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting The Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, Republic of Korea, 21–22 October 2010
- Skejic, R. & Faltinsen, O.M., 2008. A Unified Seakeeping and Maneuvering Analysis of Ships in Regular Waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 13, pp.371–394.
- Stern, F., Agdrup, K., Kim, S.Y., Hochbaum, A.C., Rhee, K.P., Quadvlieg, F., Perdon, P., Hino, T., Broglia, R. & Gorski, J., 2011. Experience from SIMMAN 2008–The First Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods. *Journal of Ship Research*, 55, pp.135–147.
- Ueno, M., Nimura, T. & Miyazaki, H., 2003. Experimental Study on Manoeuvring Motion of a Ship in Waves. *International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*, Japan, 25–28 August 2003.
- Yasukawa, H., 2006a. Simulations of a Ship Maneuvering in Waves (1st report: turning motion). *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 4, pp.127–136.
- Yasukawa, H., 2006b. Simulations of Wave-Induced Motions of a Turning Ship. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 4, pp.117–126.
- Yasukawa, H. & Nakayama, Y., 2009. 6-DOF Motion Simulations of a Turning Ship in Regular Waves. *International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*, Panama city, Panama, 17–20 August 2009.
- Yen, T.G., Zhang, S., Weems, K. & Lin, W.M., 2010. Development and Validation of Numerical Simulations for Ship Maneuvering in Calm Water and in Waves. *Proceedings of the 28th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Pasadena, California, 12–17 September 2010.

서민국

김용환

김경환