

## 3,000톤급 및 9,000톤급 실습선의 파랑 표류력 특성에 관한 연구

이 상 민<sup>†</sup>  
군산대학교(교수)

### Study on the Characteristics of Wave Drift Forces for 3,000 ton and 9,000 ton Class Training Ships

Sang-Min LEE<sup>†</sup>  
Kunsan National University(professor)

#### Abstract

In this study, numerical calculations were performed to analyze the characteristics of wave drift forces on the 3,000 and 9,000 ton class training ships that have been recently built and operated. The longitudinal wave drift force shows a large value in the areas  $\lambda/L=1.0$  and  $\lambda/L=1.5$  in the case of the head and bow seas, and shows a relatively small value in the short wavelength. In the case of a short wavelength at an encounter angle of 30 degrees, which is a stern sea, a fairly large lateral wave drift force is acting. The difference in wave drift force between the two ships does not appear to be large. It can be seen that a larger wave drift moment value is acting on the passenger type vessel T/S B in the case of a short wavelength.

**Key words :** Wave drift force, Wave drift moment, Training ship, Numerical calculation

#### I. 서론

파랑 중을 항행하는 선박에는 파도에 의한 선체 운동 발생, 파랑 표류력의 작용 및 선속 감소 현상이 나타난다(Tello Ruiz et al., 2015). 선속 감소는 중방향의 파랑 표류력인 부가저항의 영향으로 나타나는 현상이다. 파랑 표류력은 선박 및 해양구조물을 표류시키는 역할을 할 뿐만 아니라 파랑 중 선박의 조종성능 평가시 중요한 영향을 미치는 요소로서 알려져 있다. 최근 IMO에서는 황천시 선박의 조종성능 기준안을 만들기 위해 많은 논의를 해오고 있다. 이에 따라 파랑 중에

서의 선체조종운동 평가에 대한 관련된 연구들이 진행 중인데, 파랑 중 조종성능 시뮬레이션을 수행하기 위해 파랑 표류력 영향을 고려하여 선회 성능을 비교·분석한 연구가 발표되었다.(Seo et al., 2018; Lee and Kim, 2020).

파랑 표류력을 해석하기 위한 수치계산법으로는 포텐셜 이론을 토대로 한 strip method(Takagi, 1991; Faizul and Yasukawa, 2007)와 panel method(Zhang et al., 2020)가 있으며, CFD를 활용한 연구(Cura-Hochbaum and Uharek, 2016; Liu et al., 2018) 또한 수행되고 있다.

최근 수산계 대학에서는 3,242 G/T 실습선 3척

<sup>†</sup> Corresponding author : 063-469-1814, smlee@kunsan.ac.kr

\* 이 논문은 2020년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

을, 해양계 대학에서는 9,196 G/T 실습선 2척을 건조하여 실제 운항 중에 있다. 모형실험을 통한 내항성능 자료(슬래밍, 상하 및 좌우가속도, 불규칙파 중 마력증가)는 제공되고 있지만, 실해역에서 선박 조종시 중요한 자료가 될 각 선박의 파랑 표류력에 대한 데이터는 미비한 상태이다. 이에 본 연구에서는 보다 빠른 시간에 수치계산이 가능한 strip method를 기반으로 각 선박의 파랑 표류력 및 표류모멘트에 대하여 만남각별 및 파장별 그 특성에 대하여 분석하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 방법

본 연구에서는 2019년도에 건조되어 운항되고 있는 서로 다른 크기의 두 척 실습선 선박을 대상으로 수치계산을 실시하여 선체에 작용하는 파

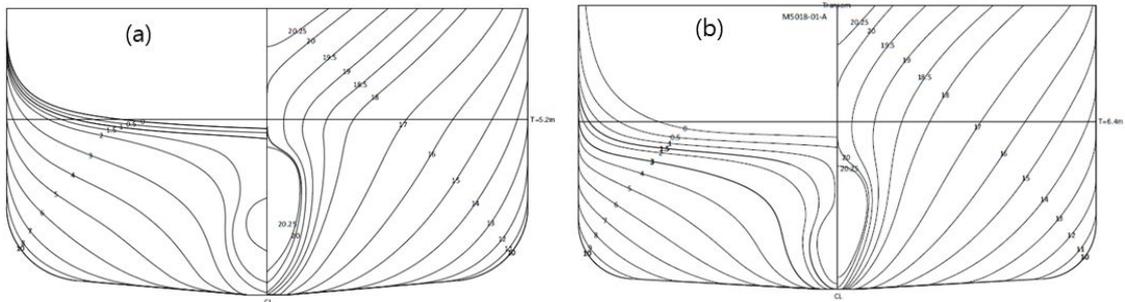
랑 표류력에 대한 특성에 대하여 조사 및 분석하였다. 두 척의 실습선 제원은 <Table 1>에 나타내고 있으며, [Fig. 1]은 각 선박의 정면도를 보여주고 있다. A호는 stern trawler 형상의 어선선형 선박이고, B호는 여객선 형태의 상선선형 모습을 지닌 선박에 해당된다.

2차 파랑 하중인 파랑 표류력은 선체운동과 깊은 관련이 있기 때문에 먼저 파랑에 의한 운동 응답 함수를 strip 이론에 의한 NSM (New Strip Method)법을 이용하여 구하고, Maruo에 의해 개발된 far field method를 이용하여 파랑 표류력을 계산하게 된다. 이와 같은 일련의 과정을 Takagi (1991)가 제안한 근사계산법을 토대로 하여 본 연구에서 수치계산을 실행하였다.

[Fig. 2]는 수치계산을 위해 설정한 좌표축 및 입사파와의 만남각을 나타내고 있다.

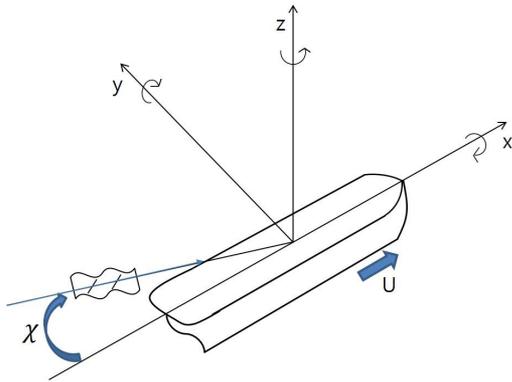
<Table 1> Principal particulars of ships

Description	Symbol	T/S A	T/S B
Length between perpendicular [m]	$L$	85.0	120.0
Breadth [m]	$B$	15.0	19.4
Draft [m]	$d$	5.365	6.366
Displacement [ton]	$\Delta$	4177.1	9026.5
Block coefficient	$C_b$	0.5957	0.5942
Metacentric height [m]	$GM$	1.788	2.338
Speed [knot]	$U$	14.0	17.0
Length to breadth ratio	$L/B$	5.667	6.186
Breadth to draft ratio	$B/d$	2.796	3.047



[Fig. 1] Body plan of (a) T/S A and (b) T/S B.

선수파(head sea)는 입사파 파향이 180도를, 선미파(following sea)는 0도를 의미한다. 수치해석에 적용된 운항 상태는 ‘full loaded departure condition’의 조건에서 계산을 실행하였다.



[Fig. 2] Coordinate system and wave direction.

## 2. 수치계산

파랑 중 저항증가 근사계산식은 아래와 같이 표현된다(Maruo and Iwase, 1980).

$$\Delta R = 4\pi\rho \left[ -\int_{-\infty}^{-K_1} + \int_{-K_2}^{K_1} + \int_{K_3}^{\infty} \right] \frac{(m + K_0\tau)^2 (m - K\cos\chi)}{\sqrt{(m + K_0\tau)^4 - K_0^2 m^2}} |H(m)|^2 dm \quad \dots\dots (1)$$

$$|H(m)|^2 = |H_1(m)|^2 + \frac{(m + K_0\tau)^4 - K_0^2 m^2}{K_0^2} |H_2(m)|^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_1 \\ K_2 \end{cases} = \frac{1}{2} K_0 (1 + 2\tau \pm \sqrt{1 + 4\tau}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{cases} K_3 \\ K_4 \end{cases} = \frac{1}{2} K_0 (1 - 2\tau \pm \sqrt{1 - 4\tau}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

세장체를 가정하면 특이점 분포는 x축상에 분포하고 있기 때문에 Kochin 함수  $H_n(m)$ 은 다음 식으로 계산된다.

$$H_1(m) = \int_{-L/2}^{L/2} \sigma(x) \exp[imx] dx \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$H_2(m) = \int_{-L/2}^{L/2} \mu(x) \exp[imx] dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{단, } K = \frac{\omega^2}{g}, \quad K_0 = \frac{g}{U^2}, \quad \tau = \frac{U\omega_e}{g},$$

$$\omega_e = \omega - KU\cos\chi$$

Takagi(1991)는 파도와 의 만남파수가 큰 경우와 작은 경우를 구분하여 각각 적용할 수 있는 근사계산식을 제안하였다. 즉, 만남파수가 큰 경우의 종방향 파랑 표류력( $R_x$ ), 횡방향 파랑 표류력( $R_y$ ), 표류 모멘트( $R_{mz}$ )는 아래의 식에 의해서 계산된다.

$$R_x' = 4\pi\rho \left[ -\int_{-\infty}^{-K_1} + \int_{K_3}^{\infty} \right] \frac{(m - K\cos\chi)}{\sqrt{1 - K_0^2/m^2}} |H(m)|^2 dm$$

$$+ 4\pi\rho \int_{-K_2}^{K_1} \frac{(m - K\cos\chi)}{\sqrt{1 - m^2/K_0^2}} |H(m)|^2 dm \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$R_y' = -16\pi^2 \rho K_e \text{Im} \left[ \int_{-L/2}^{L/2} \sigma(x) \mu^*(x) dx \right]$$

$$+ 8\pi^2 \rho K \sin\chi \int_{-L/2}^{L/2} \{ |\sigma(x)|^2 + K_e^2 |\mu(x)|^2 \} dx \quad \dots\dots (8)$$

$$R_{mz}' = 8\pi^2 \rho K_e^2 \text{Re} \left[ \int_{-L/2}^{L/2} ix \{ \sigma^*(x) \mu(x) - \sigma(x) \mu^*(x) \} dx \right]$$

$$+ \frac{2\pi}{K} \rho \zeta \omega \sin\chi \text{Re} \left[ \sqrt{K/K_0} [H_1(K\cos\chi) + iK\sin\chi H_2(K\cos\chi)] \right]$$

$$+ \frac{1}{\rho^2} \left[ \sqrt{K/K_0} K_e \frac{d}{dm} H_1(K\cos\chi) \right.$$

$$\left. + i \frac{(2\sqrt{K/K_0} - \cos\chi)}{\sin\chi} H_2(K\cos\chi) \right.$$

$$\left. + iK\sin\chi \frac{d}{dm} H_2(K\cos\chi) \right] \quad \dots\dots\dots (9)$$

또한 만남파수가 작은 경우의 계산식은 아래와 같다.

$$R_x'' = 4\pi\rho K_0 \sqrt{K_0} [J_2 + (K_3 - K\cos\chi)J_1]$$

$$+ 4\pi\rho K_0 \sqrt{K_0} [J_3 + (K_3 - K\cos\chi)J_4] \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$R_y'' = -4\pi\rho [4K_0 \sqrt{K_0} I_1 - K\sin\chi (\sqrt{K_0} I_2 + K_0 \sqrt{K_0} I_3)]$$

$$\dots\dots\dots (11)$$

$$R_{mz}'' = -4\pi\rho K_0 \sqrt{K_0} \text{Re} [2(L_1 - L_2) + L_3] \quad \dots\dots\dots (12)$$

자세한 근사식의 유도과정은 Takagi(1991)의 논문을 통하여 확인할 수 있다.

### Ⅲ. 연구 결과

파랑 표류력을 분석하기에 앞서 파랑에 의한 선박의 운동 응답 특성을 살펴본다. 선체 운동 응답은 파진폭( $\zeta$ ) 및 파수( $K$ )에 의해 무차원된 값을 보여주고 있으며, 파랑 표류력 및 표류모멘트는 아래와 같이 무차원화된 값으로 나타내었다.

$$\overline{F_x} = R_x / (4\rho g \zeta^2 B^2 / L) \dots\dots\dots (13)$$

$$\overline{F_y} = R_y / (4\rho g \zeta^2 B^2 / L) \dots\dots\dots (14)$$

$$\overline{M_z} = R_{mz} / (4\rho g \zeta^2 B^2) \dots\dots\dots (15)$$

[Fig. 3]의 선수사파( $\chi = 120^\circ$ )인 경우 선체 운동 응답 결과를 분석해 보면, 상하동요와 종동요 모두  $\lambda/L = 0.8$  보다 작은 단파장 영역에서는 B호가 더 크지만  $\lambda/L = 0.9$  이상부터는 A호가 더 크게 나타난다. 횡동요는 장파장이 될수록 점차 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 좌우동요 및 전후동요는 장파장이 되면서 일정한 값을 보여주고 있는 것에 비해 선수동요는 파장이 길어질수록 운동 응답 값이 함께 커지고 있는 것을 확인 할 수 있다.  $\lambda/L = 1.5$  보다 작은 영역에서 좌우동요, 선수동요, 전후동요 및 횡동요의 운동 응답 값은 선박별로 큰 차이가 없는 것으로 보여 진다.

[Fig. 4]의 선미사파( $\chi = 60^\circ$ )인 경우를 살펴보면, 상하동요 및 종동요는 선박별 큰 차이가 없는 것으로 보여진다. 횡동요의 경우 단파장 영역에서 B호가 조금 작게 나타나지만  $\lambda/L = 0.8$  이후부터 A호보다 큰 폭으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히  $\lambda/L = 1.1$  에서 가장 큰 피크 값을 나타내며 장파장이 될수록 점차 감소되고 있지만 단파장 영역보다는 조금 더 큰 운동 응답 값에 수렴되고 있는 모습을 보여 주고 있다. 횡동요 운동 응답 값은 선수사파의 장파장 영역에서 각 선박의 최대값을 보여주고 있으며, 선미사파인 경우에는 중간파장 영역에서 각 선박의 응답 값의 최대값을 나타내고 있기 때문에 두

선박 모두 선수사파의 경우에는 장파장을, 선미사파의 경우에는 중간파장의 파도에 특히 주의해야 될 것으로 판단된다. 좌우동요 및 선수동요의 경우  $\lambda/L = 1.0$  보다 작은 영역에서는 A호가 조금 더 크고,  $\lambda/L = 1.0 \sim 1.5$  영역에서는 B호가 더 크게 나타나고 있다. 전후동요는 전체적으로 B호가 조금 더 크게 분포되어 있다.  $\lambda/L = 1.0 \sim 1.5$  에서 좌우동요 및 선수동요 응답이 B호가 더 크게 나타나고 있는데, 횡동요 또한 B호가 더 큰 경향을 보여주고 있다. 이러한 횡운동군의 연성운동 영향으로 인하여 [Fig. 5]에서와 같이 파랑 표류모멘트( $\overline{M_z}$ ) 값이 B호에서 더 크게 발생하고 있는 것이라고 추정된다.

다음으로 [Fig. 5]의 선수사파( $\chi = 120^\circ$ )인 경우 파랑 표류력에 대한 특성을 분석해 보면, 종방향 파랑 표류력( $\overline{F_x}$ )은  $\lambda/L = 0.9$  보다 큰 영역에서는 A호가 더 크고  $\lambda/L = 0.8$  보다 작은 영역에서는 B호가 더 크게 분포되어 있음을 알 수 있다. 종방향의 파랑 표류력은 파랑에 의한 부가저항의 증가를 의미하므로, 단파장 영역에서는 B호가 A호보다 부가저항이 더 크게 작용하여 자연적 감속량이 증가할 것으로 예측되어 진다.

선수사파에서 횡방향의 파랑 표류력( $\overline{F_y}$ ) 및 표류모멘트( $\overline{M_z}$ )는  $\lambda/L = 0.6$  보다 작은 단파장 영역에서는 B호가 더 커지며,  $\lambda/L = 0.8 \sim 1.1$  에서는 A호 값이 더 크게 분포되어 있다.

$\lambda/L = 1.5$  보다 큰 장파장 영역에서 종방향 및 횡방향 파랑 표류력과 표류모멘트 값은 두 척 사이에 차이가 거의 없이 '0'에 가까워지고 있는 모습을 확인 할 수 있다. 이러한 장파장 영역에서는 입사파가 선체를 통과해 지나가는 투과파로서 작용하기 때문인 것으로 보여 진다.

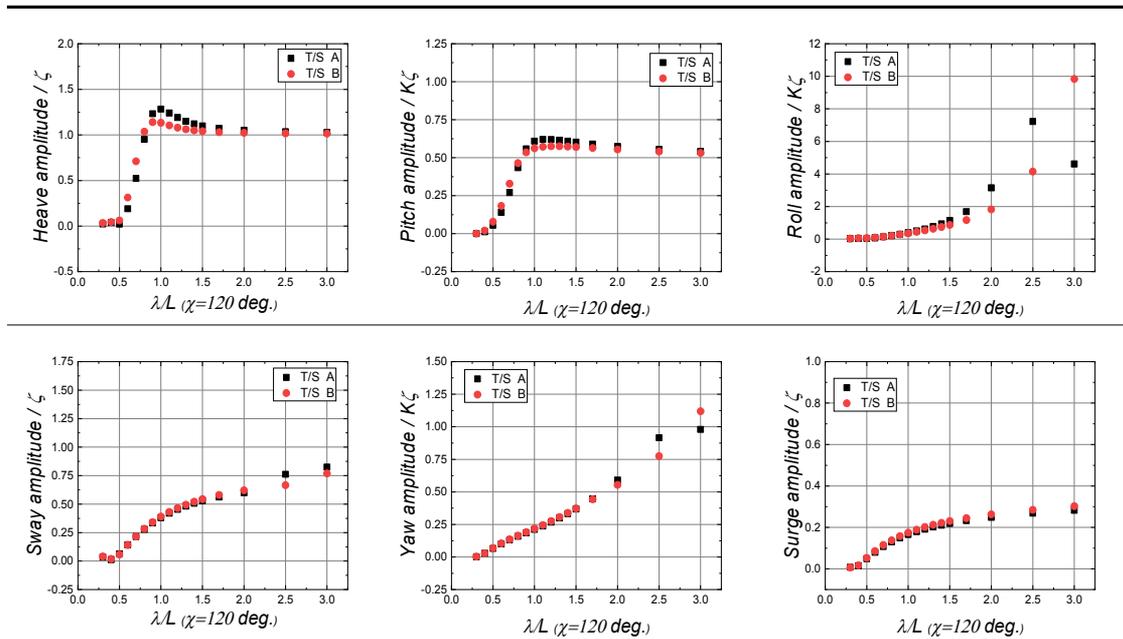
선미사파( $\chi = 60^\circ$ )의 경우 종방향 및 횡방향의 파랑 표류력을 비교해 보면, 각 선박사이의 차이는 거의 없으며,  $\overline{F_x}$ 는  $\lambda/L = 0.5$  에서 최대 값을 나타내고  $\overline{F_y}$ 는 파장이 매우 짧아질수록 점차 커지고 있는 모습을 알 수 있다. 그러나 파랑

표류모멘트 값은 파랑 표류력과는 전혀 다른 경향을 나타내고 있다. 즉,  $\lambda/L=1.5$  보다 작은 파장의 영역에서 B호에 더 크게 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 횡운동군의 연성운동 영향인 것으로 보여지며,  $\lambda/L=0.8$  보다 작아지는 단파장 영역에서의 차이는 각 선박에 작용하는 반사파 영향 때문인 것으로 추정된다.

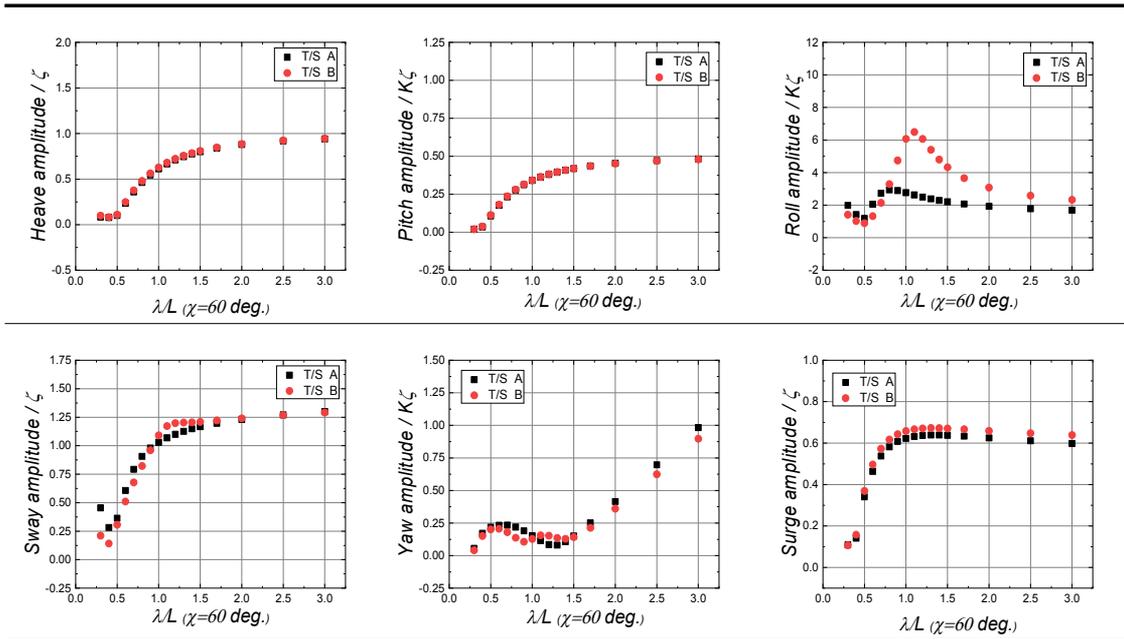
[Fig. 6]은 파도와 의 만남각에 따르는 파랑 표류력 및 표류모멘트 결과를 보여주고 있다. 종방향 파랑 표류력( $\overline{Fx}$ )은 선수파 및 선수사파인 경우  $\lambda/L=1.0$  과  $\lambda/L=1.5$  의 영역에서 큰 값을 나타내고 있으며 단파장인  $\lambda/L=0.5$  에서는 비교적 작은 값을 보여주고 있다. 그러나 선미파에서는 단파장에서 큰 파랑 표류력이 나타나고 있다. 이러한 원인은 입사파가 선체에 부딪혀 반사되는 반사파 영향이 정선수 방향보다 정선미 방향에서 더 크게 작용하고 있기 때문인 것으로 추정된다. 이와 같은 단파장 파랑에 의한 반사파 영향이 횡방향 파랑 표류력( $\overline{Fy}$ )에서도 나타나고 있다. 즉,

선미사파인 만남각 30도에서 단파장인 경우 상당히 큰 파랑 표류력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 선수사파보다는 선미사파에서 횡방향 표류력이 단파장에서 크게 작용하고 있기 때문에 두 유형의 선박 모두 항행시 주의가 필요하다고 할 수 있다. 파랑 표류모멘트( $\overline{Mz}$ )는 선수사파 및 선미사파 방향의 단파장에서 B호에 작용하는 값이 A호에 미치는 영향보다 더 큰 것을 알 수 있다. 파랑 표류모멘트가 작아지면 침로안정성이 향상될 것으로 추정되기 때문에 A호가 직진성능이 더 양호하리라 예측된다.

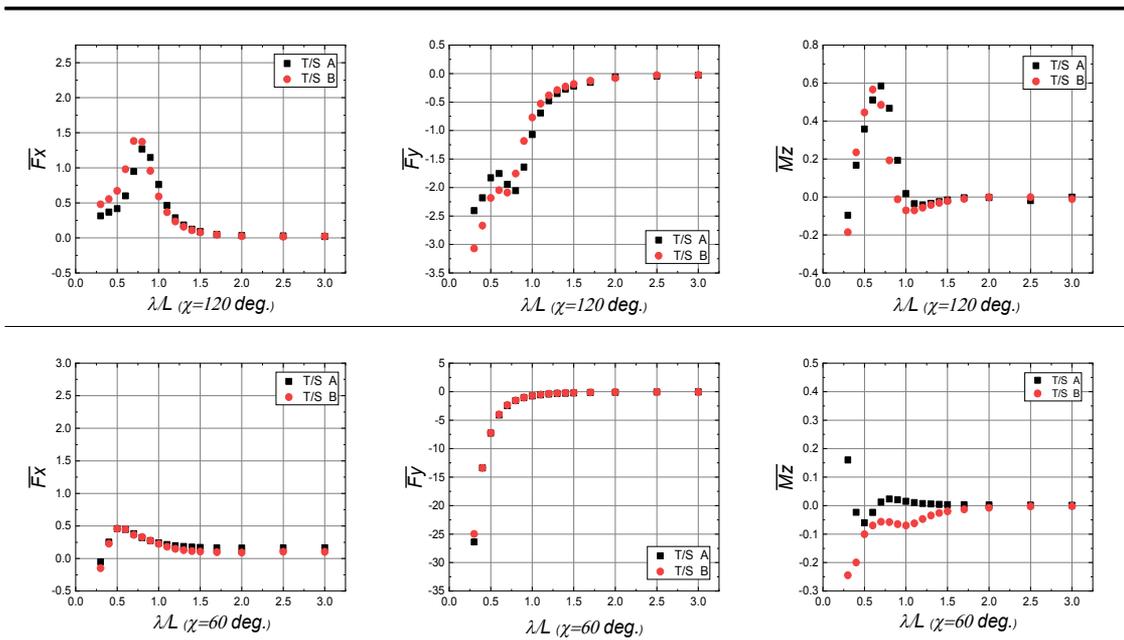
일반적으로 길이-폭의 비가 증가할수록, 폭-흘수 비가 작아질수록 직진안정성이 향상된다고 알려져 있다(Yum, 2012). 그러나 본 연구에서 채택한 대상 선박의 제원은 서로 다른 특성을 보여주고 있다. 즉 L/B 및 B/d 모두 B호가 A호보다 큰 것으로 나타나고 있는데, 위의 직진안정성 향상과 관련된 제원 특성과는 상반된 형상이다. 선체 형상과 조종 유체력 미계수와의 상관관계에 대한



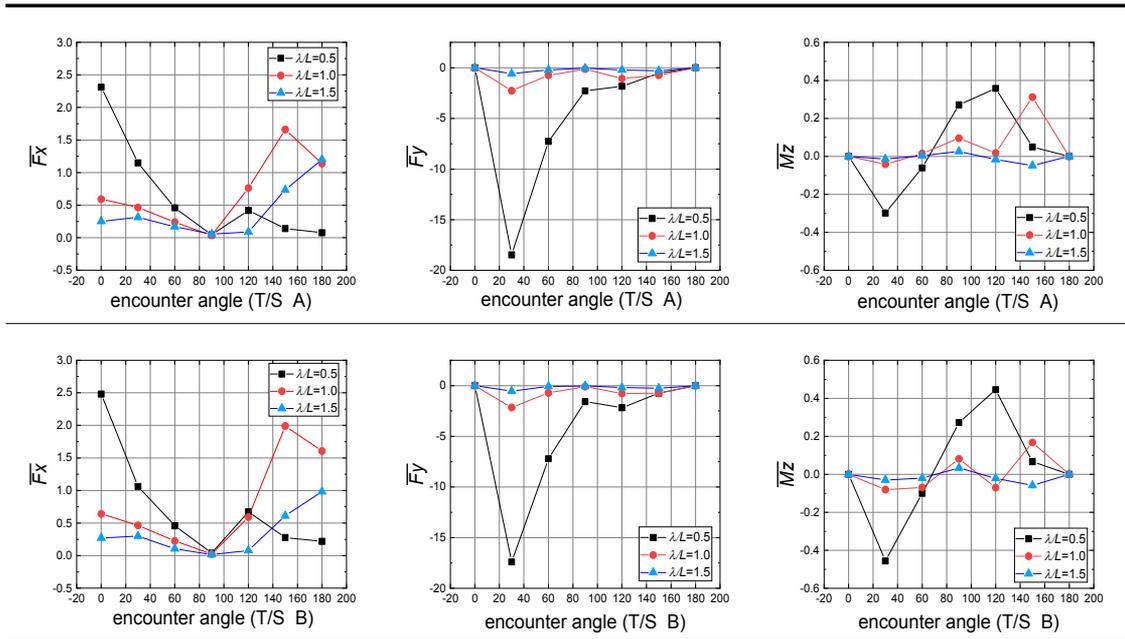
[Fig. 3] Ship motions in bow sea ( $\chi = 120^\circ$ ).



[Fig. 4] Ship motions in stern sea ( $\chi = 60^\circ$ ).



[Fig. 5] Wave drift force and moment in bow and stern sea.



[Fig. 6] Wave drift force and moment according to encounter angle.

기존 연구에서 선박제원 항목이 선미형상 파라미터보다 상관도가 월등히 높으며, 또한  $L/B$ 보다  $B/d$ 의 상관도가 더 높은 특성이 있다는 결과를 보여주고 있다(Im, 2005). 따라서  $B/d$ 를 기준으로 했을 경우, 이 값이 더 작은 A호가 직진성능이 더 좋을 것이라고 추정된다. 그러나 향후 CFD를 이용하여 단파장 파랑에 의한 쇄파 현상과 점성 영향을 고려한 침로안정성 지수를 정량적으로 비교함으로써 양 선박의 파랑 중 조종성능을 비교 분석할 필요가 있다고 보여 진다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 최근 건조되어 운항되고 있는 3,000톤급 및 9,000톤급의 실습선 선박을 대상으로 파랑 표류력 특성을 분석하기 위하여 수치계산을 실시하였다.

선수사파에서 파랑 표류력 및 표류모멘트는  $\lambda/L=0.6$  보다 작은 단파장 영역에서 B호가 더

커지고 있으며,  $\lambda/L=0.8 \sim 1.2$  에서는 A호 값이 더 크게 분포되어 있다. 이러한 원인으로서는 단파장 영역에서는 입사파가 선체에 부딪혀 반사되어 발생하는 영향으로 인해 나타나고, 중간 파장 영역에서는 상하동요 및 종동요 운동 응답의 차이로 인한 영향 때문이라고 추정된다. 선미사파의 경우 파랑 표류력은 각 선박에 차이가 거의 없으며 단파장에서 커지고 있는 모습을 알 수 있다. 파랑 표류모멘트 값은  $\lambda/L=1.5$  보다 작은 파장의 영역에서 A호 선박에 더 작게 작용하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 원인은 횡운동군의 연성운동 응답 값이 더 크게 나타나고 있기 때문인 것으로 보여 진다.

파도와의 만남각에 따르는 결과를 분석해 보면, 종방향 파랑 표류력은 선수와 및 선수사파인 경우  $\lambda/L=1.0$  과  $\lambda/L=1.5$  의 영역에서 큰 값을 나타내고 있으며 단파장에서는 비교적 작은 값을 보여주고 있다. 그러나 선미사파에서는 단파장에서 큰 파랑 표류력이 나타나고 있다. 선미사파인 만

남각 30도에서 단과장인 경우 상당히 큰 횡방향 파랑 표류력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 파랑 표류모멘트는 단과장 영역에서 A선박보다 B선박에서 더 크게 나타나고 있다.

본 연구를 통하여 확인된 결과인 종방향 파랑 표류력은 파도에 의한 저항 증가를 의미하기 때문에 실효역에서 선박운항시 발생하는 마력변화와 선속감소의 예측 등에 이용 될 수 있으며, 횡방향 표류력 및 표류모멘트는 선박조종시 선박의 표류운동 추정과 선회 및 침로안정성 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- Cura-Hochbaum A and Uharek S(2016). Prediction of ship manoeuvrability in waves based on RANS simulations. 31st Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Faizul AA and Yasukawa H(2007). Strip method for a laterally drifting ship in waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 12, 139~149.  
<http://doi.org/10.1007/s00773-007-0224-2>
- Im NK(2005). The study on ship's manoeuvrability through the analysis of the relationship between hydrodynamic coefficient and ship hull parameter. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 29(8), 667~671.
- Lee J and Kim Y(2020). Study on steady flow approximation in turning simulation of ship in waves. *Ocean Engineering*, 195, 106645.  
<http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106645>
- Liu C, Wang J and Wan D(2018). CFD computation of wave forces and motions of DTC ship in oblique waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 28(2), 154~163.  
<http://doi.org/10.17736/ijope.2018.sh21>
- Maruo H and Iwase K(1980). Calculation of added resistance in oblique waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 147, 79~84.
- Sea MG, Nam BW and Kim YG(2018). Numerical analysis of turning performance in waves by considering wave drift force. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(2), 103~115.
- Takagi K(1991). Simplified formulas for the calculation of a added resistance, steady lateral force and turning moment in waves. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects of Japan*, 216, 121~128.
- Tello Ruiz M, De Caluwe S, Van Zwijnsvoorde T, Delefortrie G, Vantorre M(2015). Wave effects in 6DOF on a ship in shallow water. *International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation(MARSIM 2015)*.
- Yum DJ(2012). Ship motion and manoeuvrability. UUP.
- Zhang W, el Moctar O, Schellin TE(2020). Numerical study on wave-induced motions and steady wave drift forces for ships in oblique waves. *Ocean Engineering*, 196, 106806.  
<http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106806>

- 
- Received : 09 September, 2020
  - Revised : 19 September, 2020
  - Accepted : 29 September, 2020