

# 파랑 표류력을 고려한 선박의 파랑 중 선회성능 해석

서민국·남보우<sup>†</sup>·김연규  
선박해양플랜트연구소

## Numerical Analysis of Turning Performance in Waves by Considering Wave Drift Forces

Min-Guk Seo·Bo Woo Nam<sup>†</sup>·Yeongyu Kim  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper performs a numerical computation of ship maneuvering performance in waves. For this purpose, modular-type model (MMG (Mathematical Modeling Group) model) is adopted for maneuvering simulation and wave drift force is included in the equation of maneuvering motion. In order to compute wave drift force, two different seakeeping programs are used: AdFLOW based on Wave Green function method and SWAN based on Rankine panel method. When wave drift force is calculated using SWAN program, not only ship forward speed but also ship lateral speed are considered. By doing this, effects of lateral speed on wave drift force and maneuvering performance in waves are confirmed. The developed method is validated by comparing turning test results in regular waves with existing experimental data. Sensitivities of wave drift force on maneuvering performance are, also, checked.

**Keywords** : Maneuvering performance in waves(파랑 중 조종성능), Wave drift force(파랑 표류력), Turning performance(선회성능), Numerical simulation(수치 시뮬레이션)

## 1. 서론

최근 국제적으로 친환경에 대한 관심이 증가하고, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO) 산하의 해양환경보전위원회(Marine Environmental Protection Committee, MEPC)에서 선박의 온실가스 방출을 규제하기 위해서 EEDI(Energy Efficiency Design Index)를 도입하면서 선박의 효율에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 하지만 선박의 효율을 추구하다 보니 반대급부로 해상환경조건이 좋지 않은 상황에서의 선박의 안정성 및 조종성이 문제가 되었으며, 이러한 문제를 예방하기 위해서 2013년에 MEPC에서는 황천시 선박의 조종성능을 유지하기 위한 최소 마력에 대한 가이드라인을 제안하였다(MEPC, 2013). 이러한 국제적인 이슈로 인해서 파랑 중 조종성능에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 유럽연합의 공동 프로젝트인 SHOPERA(Energy Efficient Safe SHip OPERAtion), 일본의 JASNAOE 주도의 연구가 대표적으로 진행되고 있다. SHOPERA 프로젝트에서는 benchmark study를 통해서 탱커와 컨테이너선

에 대한 파랑 표류력 및 파랑 중 조종 시험을 수행하였으며, 파랑 중 조종성능을 계산할 수 있는 프로그램을 평가하기도 하였다(SHOPERA, 2016).

파에 의한 영향을 평가하는 효과적인 방법은 파랑 중 자유항 주시험을 하는 것이며, 이에 대한 몇몇 결과가 발표된 바 있다. Ueno et al. (2003)는 파랑 중에서 탱커 모형을 사용하여 선회시험, 지그재그시험 및 정지시험을 수행하였다. Yasukawa (2006a, 2006b)는 컨테이너 선박에 대하여 규칙파 및 불규칙파에서 선회시험을 수행하였으며, 파랑 중 조종 수치해석 또한 수행하여 결과를 비교하였다. 또한 언급한 바와 같이 SHOPERA benchmark study에서 KVLCC2, DTC 선형의 규칙파 및 불규칙파에서의 선회 시험을 수행한 바 있다.

파에 의한 영향을 평가하기 위한 또 다른 방법은 수치기법을 사용하는 것이며, 이를 사용하여 파랑 중 선박의 조종성능을 추정하는 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. Ottosson and Bystrom (1991)은 고정된 부가 질량(added mass)과 감쇠계수(damping coefficient)를 사용하여 파랑 중 조종운동을 계산하였으며, Fang et al. (2005)은 조우주파수에 따른 선형 유체력 미

계수를 반영하였으며, 발전된 형태의 해석 모델을 제시하였다. 앞서 언급한 방법들은 실시간 시뮬레이션에 중점을 둔 방법이며, 파에 의한 기억효과(memory effect)를 고려하지 않는다. 반면 Lee (1992)는 파랑 중 조종성능 해석에 있어서의 기억효과의 중요도를 조사하였으며, Bailey et al. (1997)는 컨볼루션 적분(convolution integral)을 사용하여 파에 의한 기억효과를 파랑 중 조종성능 해석 시 고려할 수 있는 방법을 제시하였다. Fossen (2005)은 이를 행렬형태로 유도하였다. 또한 Hwang (2010)은 파에 의한 기억 효과를 포함하여 컨테이너 선박의 파랑 중에서의 선회성능을 계산하였다. Skejic and Faltinsen (2008)은 파랑 표류력을 계산하기 위한 기존의 이론들을 비교하였으며, 조종에 의한 수평면 운동과 파도에 의한 6자유도 운동을 분리하는 two-time scale 모델을 제시하였다. Ann and Rhee (1994)는 3차원 그린함수를 사용하여 파랑 중 조종을 해석하였다. Lin et al. (2006)은 3차원 랜킨 패널법을 기반으로 한 운동해석 프로그램을 사용하여 파랑 중 조종운동을 수행한 바 있으며, Yenet et al. (2010)은 Linet et al. (2006)의 연구를 확장하여 비선형 선박운동을 고려한 파랑 중 조종운동 해석을 수행하였다. Seo et al. (2011), Seo and Kim (2011), Seo (2016)은 시간영역 랜킨패널법을 사용하여 파랑 중 조종시뮬레이션을 수행하였으며, S175 선형의 규칙파 중 선회시험을 수행하여 실험과 비교하였다.

본 논문은 대한조선학회 공동학술대회에서 발표한 논문을 기반으로 하고 있으며 (Seo et al., 2017), 조종운동방정식에 파랑 표류력을 외력 항으로 대입하는 비교적 단순한 방법을 통해서 선박의 선회성능에 미치는 파도의 영향을 평가하였다. 파랑 표류력을 계산하기 위해서 파랑그린함수법 기반의 AdFLOW와 랜킨패널법 기반의 SWAN 프로그램을 사용하였으며, 전진속도, 파향 및 파장에 따른 파랑 표류력을 미리 계산하여 시뮬레이션 상황에 맞는 값을 추출하여 적용하였다. SWAN 프로그램의 경우, 선박의 전진속도 뿐만 아니라, y방향 속도도 고려하여 파랑 표류력을 계산하였으며, 이를 통해서 y방향 속도가 파랑 표류력 및 선박의 선회성능에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 파랑 표류력 민감도 해석을 통해서 파랑 표류력이 선회 궤적 및 선회 파라미터에 미치는 영향에 대해서 확인하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 좌표계 및 조종운동 방정식

본 연구에서는 파랑 중 조종성능을 평가하기 위해서 Fig. 1과 같이 공간에 고정된 O-XYZ 좌표계와 선박에 고정된 o-xyz 좌표계를 사용하였다. 선박은 x축, y축 방향의 속도,  $u_0$ ,  $v_0$ 와 선수각 속도(yaw velocity),  $r_0$ 를 포함하고 있다.  $\psi_0$ ,  $\beta$ 는 각각 선박의 선수각(heading angle), 표류각(drift angle)을 의미하며,  $\delta$ 는 타각(rudder angle)을 의미한다. 파도는 X축에 대해서  $\chi$ 의 각으로 입사하며, 파도의 진폭과 파장은 각각 A,  $\lambda$ 로 나타낸다.

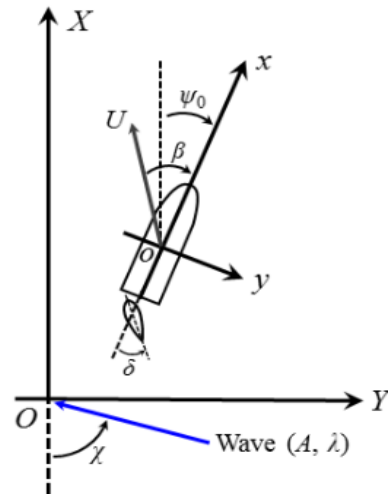


Fig. 1 Coordinate system

선박의 조종운동을 해석하기 위해서 3자유도 조종운동방정식을 도입하였으며, 선체, 프로펠러, 타 및 파도에 의한 힘으로 구분된 모듈 형 타입의 운동방정식을 적용하였다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u}_0 - v_0 r_0) &= X_H + X_R + X_P + X_W & (1) \\ m(\dot{v}_0 + u_0 r_0) &= Y_H + Y_R + Y_W \\ I_{zz} \dot{r}_0 &= N_H + N_R + N_W \end{aligned}$$

여기서 m,  $I_{zz}$ 는 선박의 질량 및 z축 회전관성 모멘트를 의미하며, X, Y, N은 각각 surge, sway 방향 및 yaw 방향의 모멘트를 나타낸다. 그리고 아래첨자 H, R, P는 각각 선체, 타 및 프로펠러에 의한 힘을 의미하며, 아래첨자 W는 파랑 표류력을 나타낸다.

선체에 의한 힘( $X_H$ ,  $Y_H$ ,  $N_H$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_H &= X_u \dot{u}_0 - Y_v v_0 r_0 + X_{\beta\beta} \beta^2 + X_{\beta r} \beta r_0 & (2) \\ &+ X_{rr} r_0^2 - R(u_0) \\ Y_H &= Y_v \dot{v}_0 + X_u u_0 r_0 + Y_{\beta\beta} \beta + Y_r r_0 \\ &+ Y_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y_{\beta\beta r} \beta^2 r_0 + Y_{\beta r r} \beta r_0^2 + Y_{r r r} r_0^3 \\ N_H &= N_r \dot{r}_0 + N_{\beta\beta} \beta + N_r r_0 + N_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\ &+ N_{\beta\beta r} \beta^2 r_0 + N_{\beta r r} \beta r_0^2 + N_{r r r} r_0^3 \end{aligned}$$

선체에 의한 힘은 3차 다항식 형태로 표현하였으며, 다항식의 계수에 해당하는 유체력 미계수는 일반적으로 실험 및 회귀식을 통해서 도출할 수 있다. 본 연구에서는 유체력 미계수 값을 Yasukawa (2006a, 2006b)에 나타난 값을 적용하였다.

타에 의한 힘( $X_R$ ,  $Y_R$ ,  $N_R$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta & (3) \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned}$$

여기서  $\delta$ ,  $x_R$ 은 타각, 타의  $x$ 축 방향 위치를 의미하며,  $t_R$ ,  $a_H$ ,  $x_H$ 는 선체와 타의 상호작용에 의한 계수이다. FN은 타직입력을 의미한다.

프로펠러에 의한 힘( $X_P$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_P = (1 - t_P)\rho n^2 D_P^4 K_T \quad (4)$$

여기서  $t_P$ ,  $n$ ,  $D_P$ ,  $K_T$ 는 각각 추력감소계수, 프로펠러의 초당 회전수, 프로펠러 직경, 추력계수를 의미한다.

본 연구에서는 조종운동방정식의 우변에 해당하는 선체, 프로펠러 및 타에 의한 힘을 계산하기 위해서 필요한 각종 계수는 Yasukawa (2006a, 2006b)에 나타난 값을 사용하였다.

## 2.2 파랑 표류력 해석

본 연구에서 파랑 표류력을 계산하기 위해서 두 가지 다른 수치해석 프로그램을 적용하였다. 첫 번째는 선박해양플랜트연구소에서 개발된 AdFLOW(Advanced analysis system for FLOating body in Waves using higher-order element method)이며, 두 번째는 MIT에서 개발된 SWAN1 이다. 두 해석 프로그램간의 비교는 다음과 같다.

Table 1 Comparison of analysis programs

Item	AdFLOW	SWAN1
Analysis scheme	Wave Green function method	Rankine panel method
Analysis domain	Frequency domain	Frequency domain
Forward speed	Approximate method (encounter wave frequency + m-term)	Double body approximation
Lateral speed	None	Double body approximation
Radiation condition	Automatically satisfied	Numerical damping zone
Development	KRISO	MIT, modified by KRISO

두 해석 방법의 가장 큰 차이점이라고 할 수 있는 부분은 전진 속도의 반영에 대한 부분이다. AdFLOW의 경우 zero-speed Wave Green function 기반의 프로그램으로 전진속도를 반영하기 위해서 근사적인 방법인 조우주파수 및 m-term을 적용하는 방법을 사용한다. 반면 SWAN의 경우 랜킨패널법 기반의 프로그램으로 double body 가정을 통해서 더 정확하게 전진속도를 반영할 수 있다. 또한 SWAN 프로그램을 사용하는 경우 선박의 y

방향 속도를 고려하여 파랑 표류력을 계산할 수 있도록 확장하였으며, 이를 통해서 선박의 y방향 속도가 파랑 표류력 및 선박의 선회성능에 미치는 영향을 확인하였다.

파랑 표류력은 선박의 속도, 파의 방향 및 파장의 함수이며, 3개의 변수에 대해서 파랑 표류력을 미리 계산하였으며, 조종 운동 시뮬레이션을 하는 경우, 조건에 해당하는 파랑 표류력을 추출하여 적용하였다.

## 3. 수치 해석 결과

### 3.1 계산 모델 및 수치 격자

Table 2 Main dimensions of target ship

Item	Unit	S175 containership
Length	[m]	175.0
Breadth	[m]	25.4
Draft	[m]	9.5
Displacement volume	[m <sup>3</sup> ]	24,154
Transverse gyration (kxx/B)	-	0.338
Longitudinal gyration (kyy/L, kzz/L)	-	0.269
Propeller diameter	[m]	6.507
Rudder area	[m <sup>2</sup> ]	32.46
Rudder aspect ratio	-	1.83

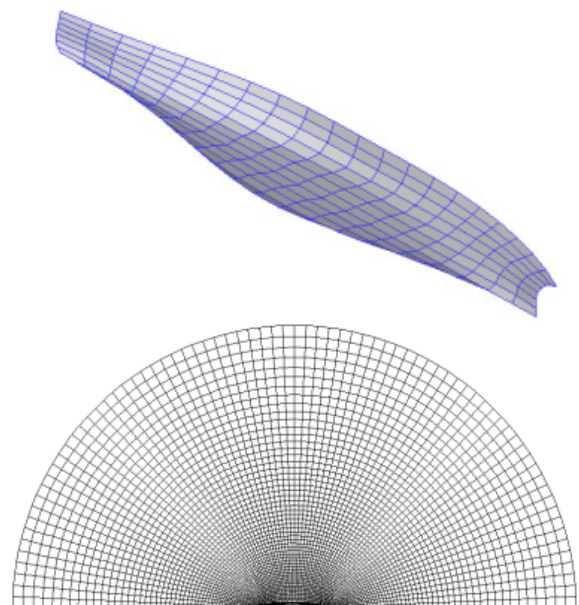


Fig. 2 Examples of panel model

본 연구에서 수치해석에 사용하는 모델은 S175 컨테이너선이며, 주요 제원은 아래의 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2는 계산에 사용된 패널 예제를 나타낸다. AdFLOW의 경우 파랑 그린함수법을 사용하기 때문에 물체표면에만 패널을 분포시킨 반면, SWAN은 랜킨패널법을 사용하기 때문에 물체표면 뿐만 아니라 자유표면에도 패널을 분포 시켰다. 자유표면의 크기는 입사파 파장의 5배 정도로 분포 시켰으며, 방사조건을 만족시키기 위한 수치소파구간은 자유표면 바깥쪽에 입사파 파장의 2배 구간에 존재하도록 구성하였다.

### 3.2 파랑 표류력 비교

앞서 언급한 바와 같이 파랑 중 조종성능 평가를 위해서는 선박의 속도, 입사파의 방향 및 파장에 따른 파랑 표류력을 미리 계산하여 데이터베이스화 해 놓는 것이 필요하다. 선박이 선회하는 경우 선박의 전진속도 뿐만 아니라 y방향 속도와 선회 각속도가 존재하며, 파랑 표류력 또한 이러한 속도에 영향을 받을 것으로 생각된다. SWAN 프로그램을 사용하여 파랑 표류력을 계산하는 경우 전진속도 뿐만 아니라 y방향 속도를 고려하였으며, Table 3와 같이 계산 케이스를 설정하였다.

Table 3 Computation matrix for wave drift force

Item	Calculation case
Forward speed (knots)	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12
Lateral speed (m/s)	AdFLOW: 0 SWAN: 0, 0.4, 0.8
Wave angle (deg)	AdFLOW: 0~180deg, interval 15deg SWAN: 0~180deg, interval 30deg
Wave frequency (rad)	AdFLOW: 0.3~1.42, interval 0.02 SWAN: 0.35~1.0, interval 0.05

Fig. 3은 SWAN 프로그램으로 계산한 선박주위의 전체 파랑장 및 산란된 파랑장을 나타내고 있으며, y방향 속도를 0, -0.4 m/s, -0.8 m/s로 변화시켜 가면서 계산한 결과를 보여주고 있다. y방향 속도가 증가함으로 인해서 좌우 대칭이던 파랑장이 비대칭적으로 바뀌고 있으며, 좌현방향의 파도가 우현방향에 비해서 더 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

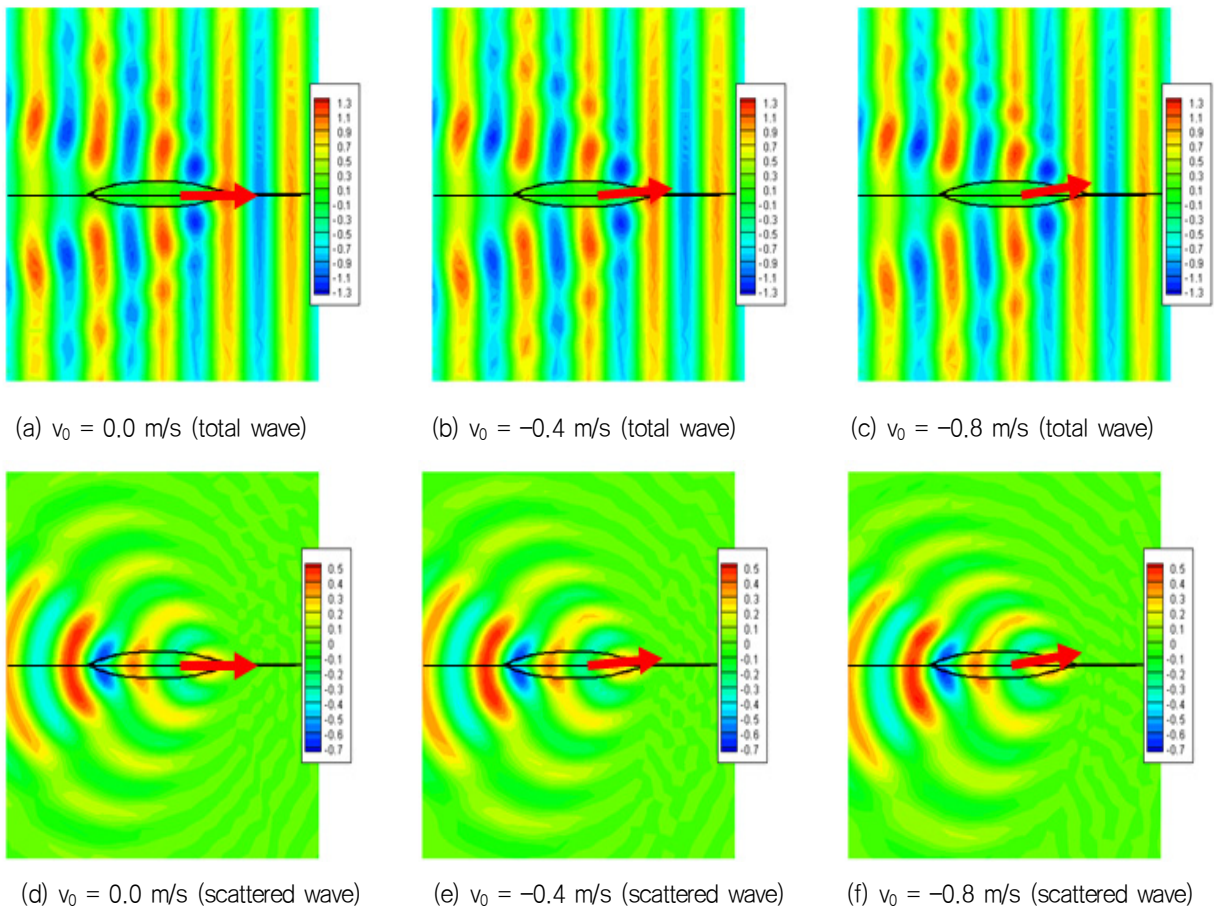


Fig. 3 Wave contours near the S175: SWAN,  $u_0=6$  knots,  $\lambda/L=0.45$  (upper: total wave field, lower: scattered wave field)

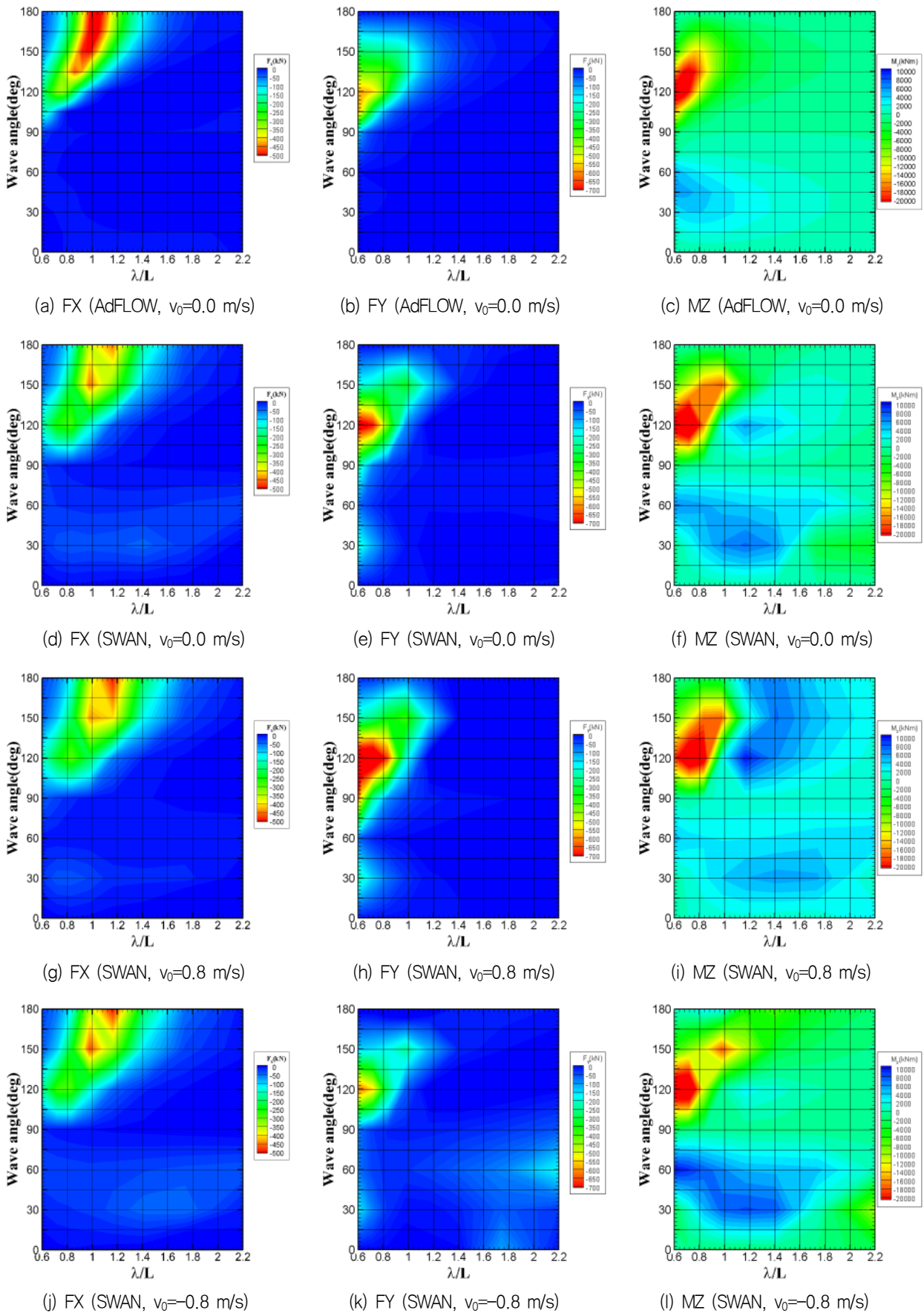


Fig. 4 Wave drift force and moment:  $u_0=12$ knots

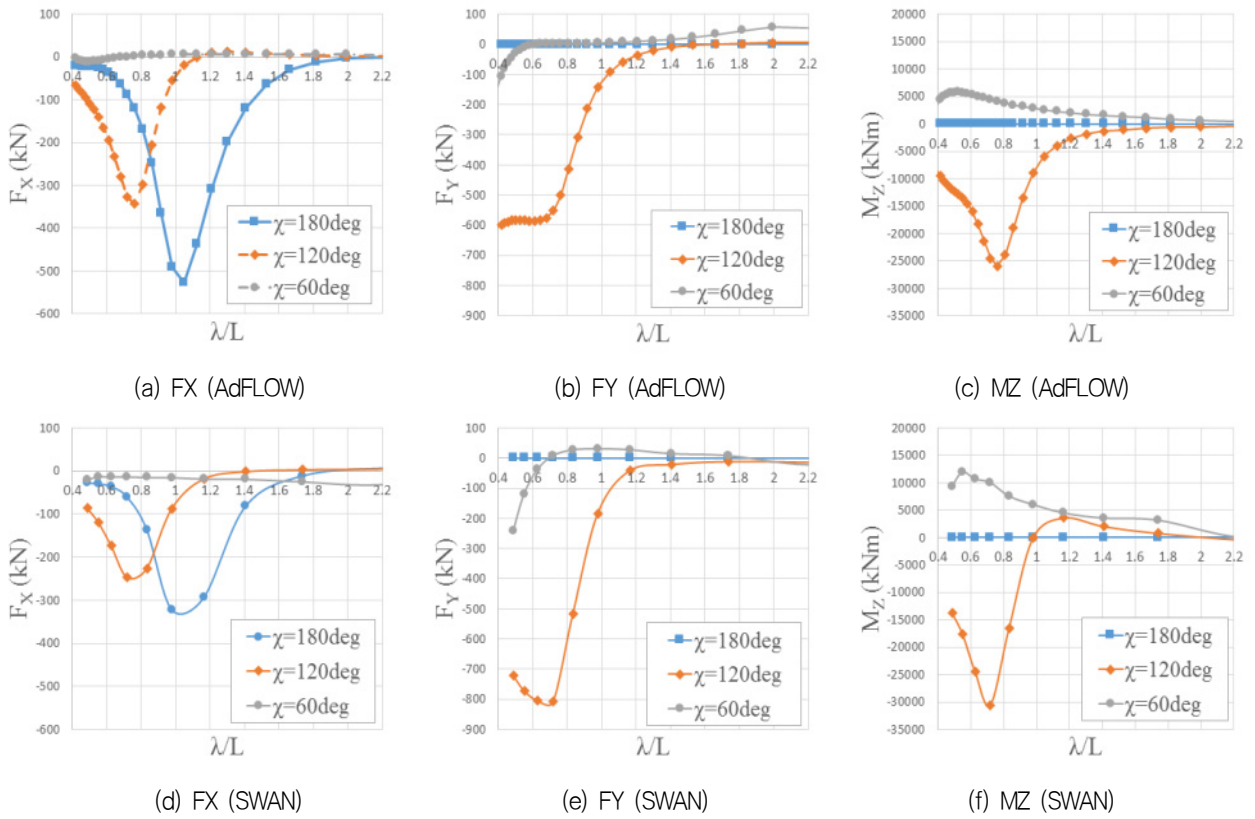


Fig. 5 Wave drift force and moment according to wave length at 12knots (upper: AdFLOW, lower: SWAN)

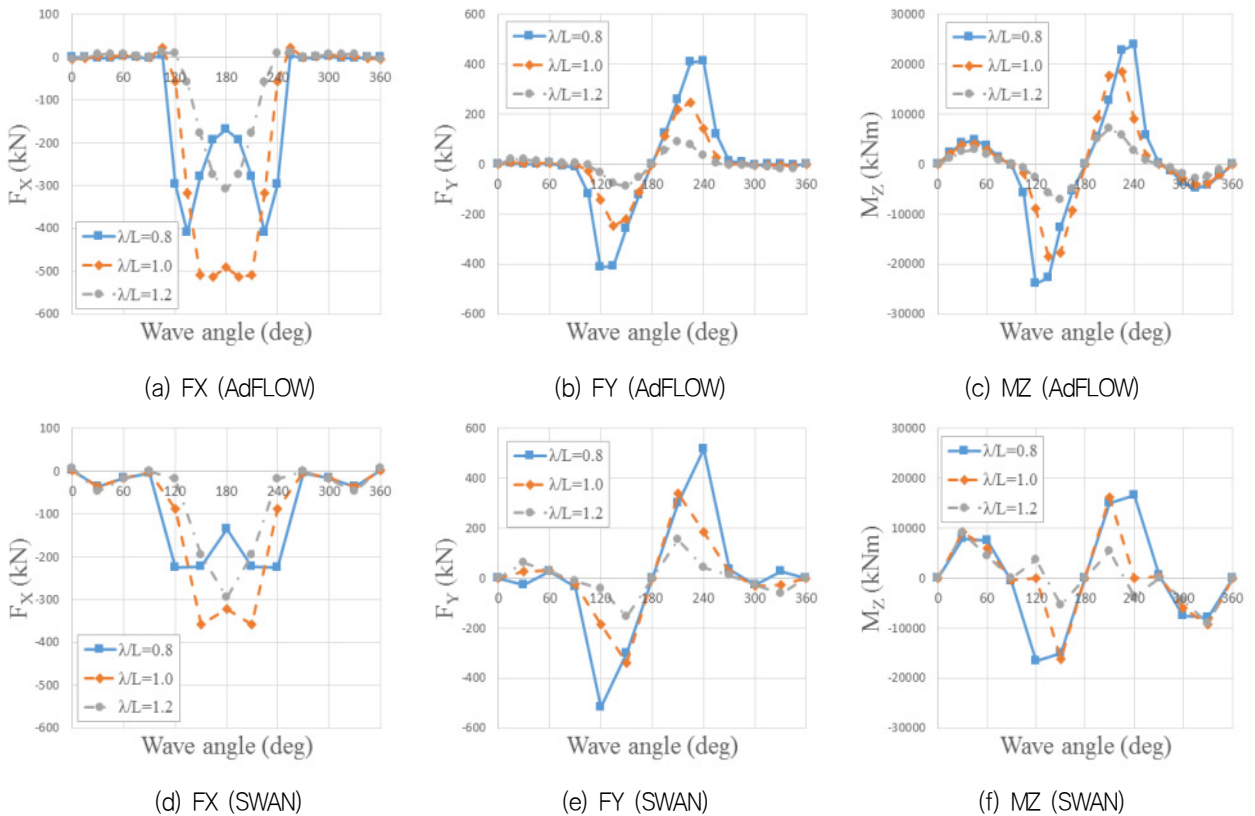


Fig. 6 Wave drift force and moment according to wave angle at 12 knots (upper: AdFLOW, lower: SWAN)

Fig. 4는 surge 방향, sway 방향 파랑 표류력 및 yaw 방향 표류 모멘트 결과를 2차원 contour plot으로 표현한 그림이며, 전진 속도가 12노트인 경우이다. (a)~(c)는 AdFLOW 계산 결과이며, y방향 속도가 0인 경우이며, (d)~(l)은 SWAN 계산 결과이다. SWAN 계산 결과는 y방향 속도가 0 m/s, 0.8 m/s, -0.8 m/s 인 경우에 대해서 결과를 나타내었으며, y방향 속도에 의한 변화를 살펴보았다. 먼저 전반적인 경향을 살펴보면, surge 방향 파랑 표류력의 경우 선수파 및 선수사파에서 입사파의 파장이 선박의 길이와 비슷한 영역에서 큰 값을 보여주고 있으며, sway 방향 파랑 표류력은 선수사파의 단파장 영역에서 큰 값을 보여주고 있다. 두 프로그램간의 계산 결과를 비교하면, surge 방향의 파랑 표류력은 AdFLOW가 큰 값을 보여주고 있으며, sway 방향 파랑 표류력 및 yaw 방향 파랑 표류 모멘트는 SWAN이 큰 값을 보여주고 있다. 두 프로그램의 계산 결과에서 절대적인 크기의 차이는 있지만 최고점이 나타나는 위치나 전반적인 경향은 유사하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 y방향 속도에 의한 결과를 비교해보면, y방향 속도에 의해서 surge 방향 파랑 표류력은 크게 변화가 없지만, sway 방향 파랑 표류력과 yaw 방향 파랑 표류 모멘트는 크기가 다소 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다. y방향 속도가 양인 경우(우현방향으로 속도 존재) 선수 사파에서의 sway 방향 파랑 표류력의 크기 및 yaw 방향 파랑 표류 모멘트가 증가함을 알 수 있으며, y방향의 속도가 음인 경우(좌현방향으로 속도 존재) 선수 사파에서 반대의 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 선박이 파도를 맞는 상대속도의 변화로 인한 것이며, 상대속도의 증가 및 감소로 인해서 파랑 표류력 및 표류 모멘트의 증가 및 감소로 이어지는 것으로 생각된다.

Fig. 5, 6은 각각 입사파의 파장과 파향에 따른 파랑 표류력 값을 x-y plot으로 표현한 그림이며, 두 프로그램이 유사한 경향을 보여주고 있는 것을 확인할 수 있다. 선박이 선회하는 경우 선박으로 입사하는 파의 방향이 계속 바뀌게 되며, Fig. 6을 통해서 시간에 따라서 선박에 가해지는 파랑 표류력 및 표류 모멘트의 크기가 어떻게 변하게 될지를 가늠할 수 있다. Surge 방향 파랑 표류력의 경우 파향이 90 deg~270 deg 구간(선수사파 구간)에서 지속적인 음의 값으로 크게 작용하며, 그 외의 구간에서는 영향이 거의 없다. Sway 방향 파랑 표류력의 경우 역시 파향이 90 deg~270 deg 구간(선수사파 부근)에서 지속적으로 작용하지만 180 deg를 경계로 작용 방향이 바뀌는 것을 알 수 있다. Yaw 방향 파랑 표류 모멘트의 경우 90 deg~270 deg 구간(선수사파 부근)에서는 비교적 큰 값을 보여주고 있으며, 270 deg~90 deg 구간(선미사파 부근)에서는 비교적 작은 값을 보여주고 있다. 이러한 파랑 표류력 및 표류 모멘트의 변화를 선회하는 구간에서 나타내면 Fig. 7과 같이 도식화 할 수 있다. Surge, sway 방향 파랑 표류력의 경우 앞서 언급한 바와 같이 90 deg~270 deg 구간에서 지속적으로 큰 힘으로 작용하며, 선회궤적을 밀려나게 하는 주된 요인이 된다. 특히 surge 방향의 파랑 표류력의 작용으로 인해서 선박의 전진속도가 지속적으로 감소하며, 파랑 표류력 또한 감소하게 된다. 따라서 선박의 표류되는 방향 자체가 입사파의 방향과 동일한 방향이 아닌 비스듬한 방향으로 표류하게 된다. Yaw 방향 파랑 표류 모멘트의 경우 선회 궤적을 밀어

내는 역할보다는 선회 궤적의 모양변화(타원형으로의 변화) 및 표류 각도에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

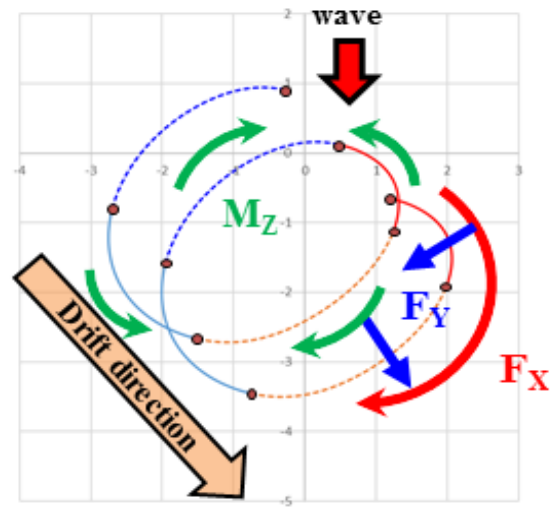


Fig. 7 Wave drift force and moment during turning test

### 3.3 파랑 중 선회 성능 비교

본 장에서는 대상선박에 대해서 규칙파 중에서의 선회 시뮬레이션을 수행하였으며, 계산 결과를 모형시험 결과와 비교하였다 (Yasukawa, 2006a, 2006b). 규칙파 중에서의 선회시험은 선박이 좌현선회를 하며, 선박의 길이에 대한 파장의 비( $\lambda/L$ )가 0.7, 1.0, 1.2인 파도가 선박의 정면 및 측면으로 입사하는 경우를 고려하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파고는 3.5 m이다. 규칙파 중에서의 선박의 선회 성능을 수치적으로 확인하기 위해서, Fig. 8과 같이 Ueno et al. (2003)에 의해 정의된 표류거리(drift distance,  $H_D$ )와 표류각도(drift angle,  $\mu_D$ )를 도입하였다. 선박이 선회를 하는 경우 초기 과도 구간이 지나고 정상선회를 할 때 선회궤적이 밀려난 거리를 표류거리라고 정의하며, 표류각도는 선회궤적이 파도의 방향 대비 밀려나는 각도를 의미한다.

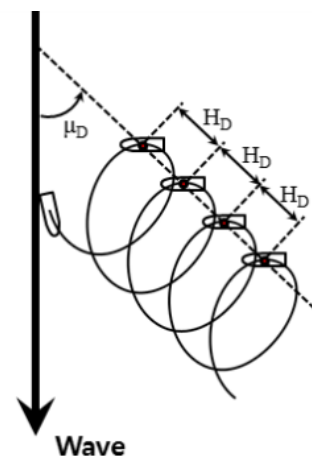
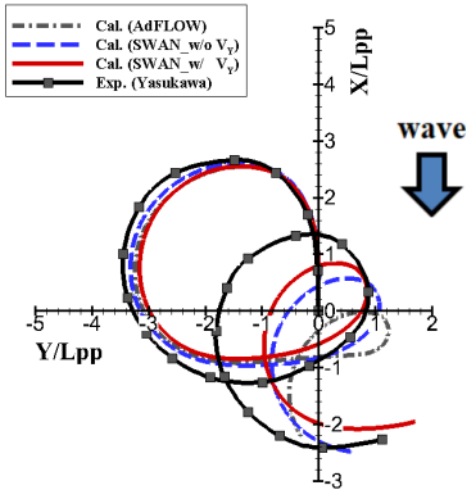
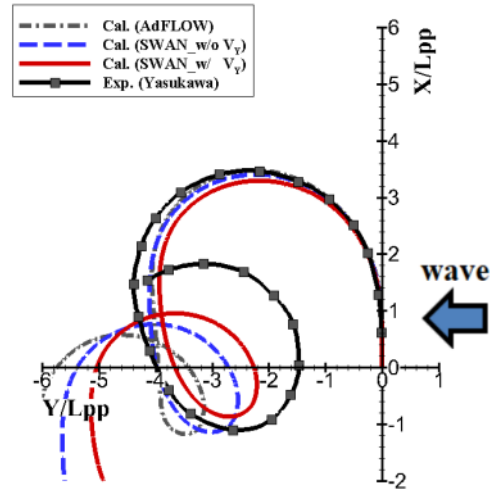


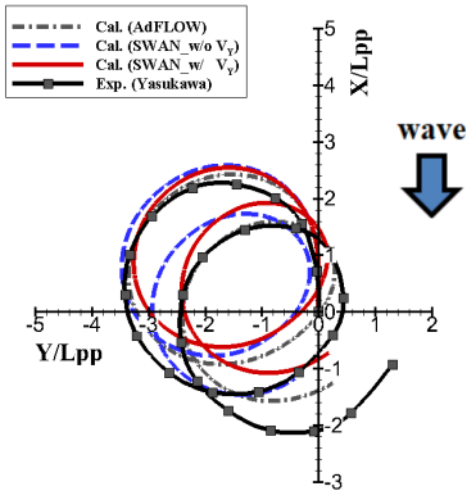
Fig. 8 Definition of drift distance ( $H_D$ ) and angle ( $\mu_D$ )



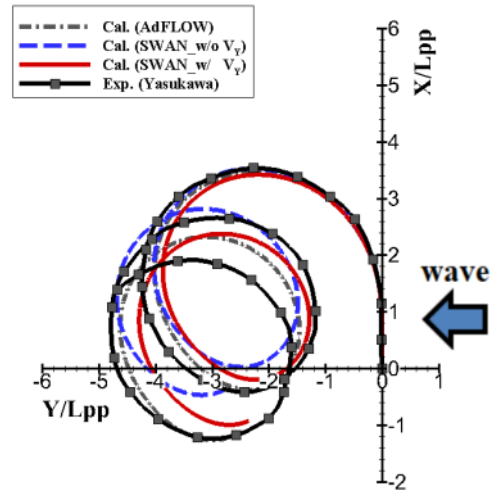
(a)  $\lambda/L = 0.7$



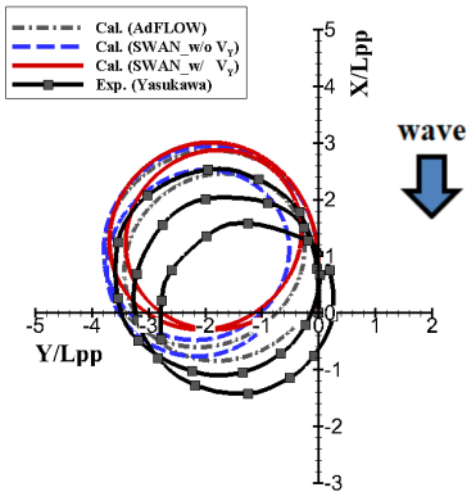
(a)  $\lambda/L = 0.7$



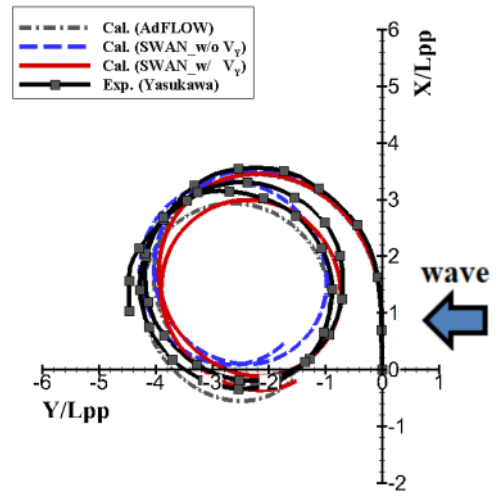
(b)  $\lambda/L = 1.0$



(b)  $\lambda/L = 1.0$



(c)  $\lambda/L = 1.2$



(c)  $\lambda/L = 1.2$

Fig. 9 Port turning trajectories in regular waves:  $\chi = 180$  deg

Fig. 10 Port turning trajectories in regular waves:  $\chi = 90$  deg



Fig. 9, 10은 각각 선박이 좌현선회를 할 때 파도가 선수쪽, 측면쪽에서 입사하는 경우의 선회궤적을 비교한 것이며, 각각의 그래프에는 실험결과와 SWAN 및 AdFLOW를 사용하여 계산한 파랑 표류력을 적용한 경우가 나타나 있다. SWAN 계산결과는 파랑 표류력 계산 시 y방향 속도를 고려하지 않은 경우(SWAN w/o  $V_y$ )와 y방향 속도를 고려한 경우(SWAN w/  $V_y$ ) 두 가지 결과를 포함하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 실험결과와 계산결과 모두 파도의 진행방향 뿐만 아니라 파도의 진행방향과 수직인 방향으로 선회궤적이 표류하는 것을 알 수 있다. 또한 파장이 짧을수록 선회궤적이 표류하는 정도가 커지는데, 이는 파장이 짧을수록 선박의 측면으로 작용하는 파랑 표류력이 커지기 때문인 것으로 생각된다. 계산결과와 실험결과를 비교해 보면,  $\lambda/L=0.7$ 의 수치 계산의 경우 선회궤적이 실험에 비해서 더 많이 밀려나는 것을 알 수 있다. 특히 측면( $\chi=270$  deg)에서 파가 입사되는 경우 파랑 표류력 및 모멘트가 선회를 방해하는 방향으로 작용을 하게 되는데, 수치계산에서는 두 번째 선회 시 선회 반경의 크기 자체가 작게 나타난다. 즉, 수치 계산에서 사용된 파랑 표류력이 실제보다 다소 과도하게 작용하고 있다는 것을 의미한다. 다른 파장 영역에서의 결과를 살펴보면, 선회궤적이 밀려나는 방향과 같은 전반적인 경향은 유사하게 나타나지만 계산 결과가 실험과 다소 차이를 보이고 있다. 현재의 계산 방법이 단지 파랑 표류력만을 조종 운동방정식에 도입한 단순한 방법이기 때문인 것으로 생각되며, 고차원 적인 방법이 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 조종 운동방정식의 선형 항의 경우 파도에 의한 영향을 받으며, 이를 반영하기 위해서 선형 항을 조우주파수 의존하는 값을 적용하는 방법 및 컨볼루션 적분을 사용한 메모리 효과까지 적용하는 방법 등이 제시되어 있으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

다음으로 수치계산 간의 결과를 비교해 보면, AdFLOW의 계산 결과에 비해서 SWAN 계산 결과가 미소하게나마 실험값과 더 유사한 경향을 보인다. 이는 SWAN 프로그램이 선박의 전진속도를 더 정밀하게 반영할 수 있는 방법이기 때문인 것으로 생각된다. 마지막으로 y방향 속도에 대한 영향을 살펴보면, SWAN 프로그램에서 y방향 속도를 추가하여 파랑 표류력을 계산한 경우 선회궤적이 실험과 더 유사한 경향을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 y방향 속도를 고려함으로써 sway 방향 파랑 표류력과 yaw 방향 파랑 표류 모멘트가 변화하게 되며, 이로 인해서 전체적으로 선박의 선회가 잘 일어나며 선회궤적이 선회반경 안쪽으로 모이게 된다. 이러한 변화로 인해서 선회궤적이 실험값과 더 유사한 경향을 보여주게 되는 것이며, y방향 속도 고려로 인해서 파랑 표류력 계산 시 물리적인 현상의 정밀한 반영 및 선회궤적의 계산 정도 향상을 이루어 낸 것으로 생각된다.

다음으로 입사파의 파장에 따른 선회 파라미터의 변화를 살펴 보았다. 선회 파라미터는 일반적인 선회시험에서 사용되는 전진거리(Advance, AD)와 전술직경(Tactical Diameter, TD), 그리고 Fig. 8과 같이 Ueno et al. (2003)에 의해 정의된 표류 거리

(drift distance,  $H_D$ )와 표류 각도(drift angle,  $\mu_D$ )를 사용하였다. Fig. 11, 12는 각각 선수파와 측면파 조건에서의 선회 파라미터를 비교한 것을 나타내고 있다. 선수쪽에서 파도가 입사하는 경우 전진거리와 전술직경이 파장에 따라서 차이를 보이는 반면, 측면에서 파도가 입사하는 경우 전진거리와 전술직경이 파장에 관계없이 유사한 값을 보이고 있다. 이는 측면에서 파도가 입사하는 경우 초기에 측면파-선미파를 받게 되며, 파랑 표류력이 크지 않은 영역이기 때문에 파장에 관계없이 유사한 값을 보여주고 있는 것으로 생각된다. 또 한 가지 주목할 만한 점은 표류거리와 표류각도는 초기 입사되는 파의 방향과는 무관하며, 오직 입사파의 파장과 관련이 있다는 점이다. 표류거리는 파장이 짧아질수록 커지는 경향을 보이고 있다.

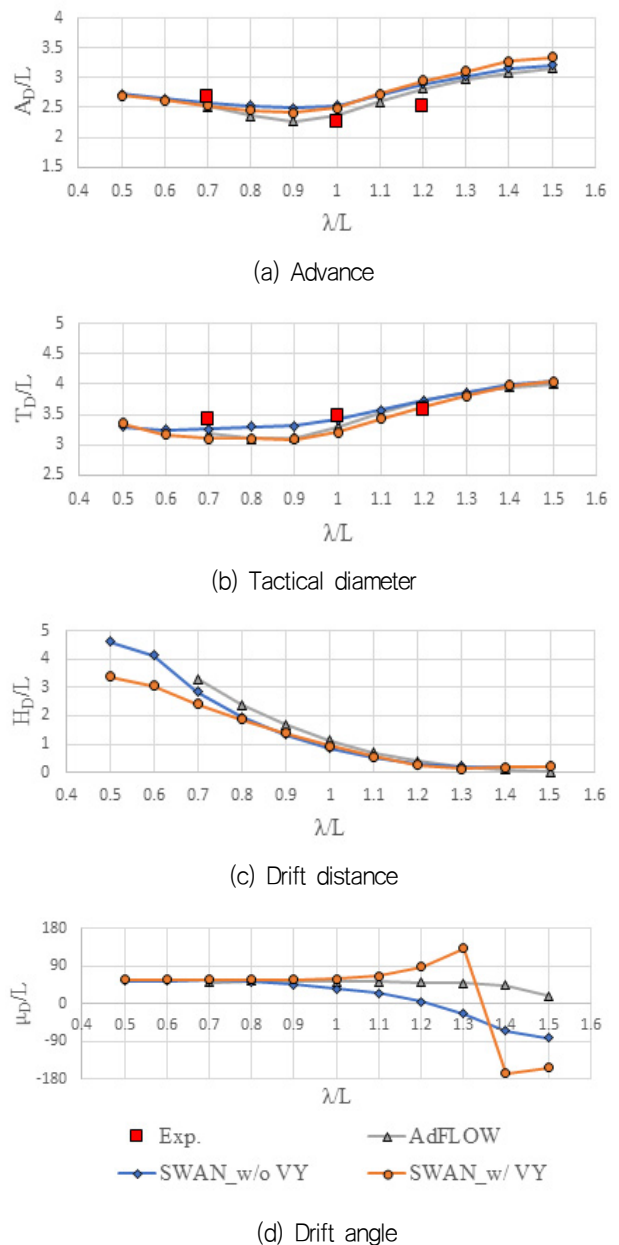


Fig. 11 Turning parameters in waves:  $\chi=180$  deg

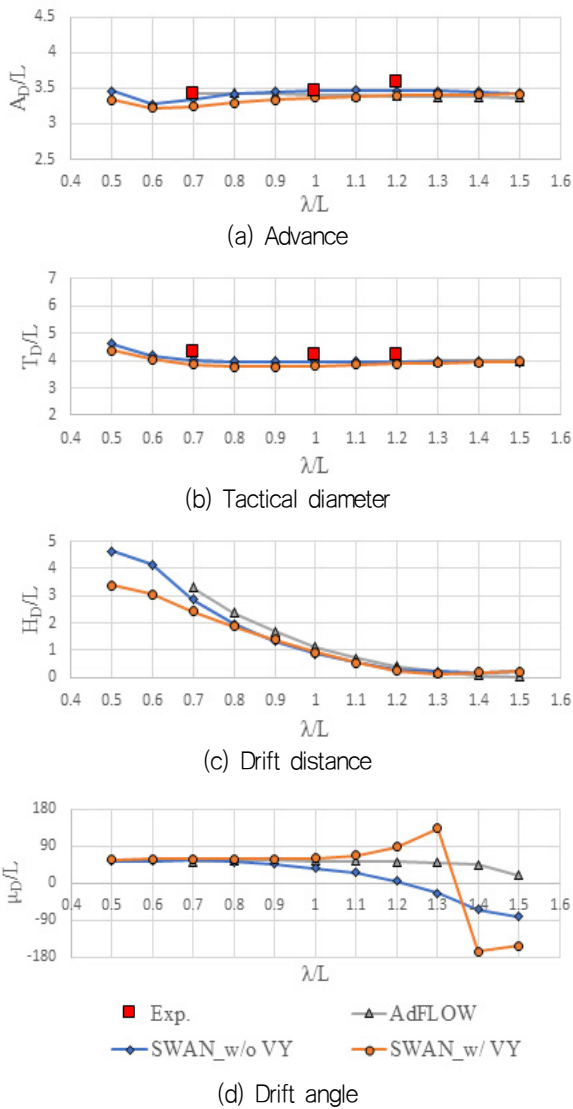


Fig. 12 Turning parameters in waves:  $\chi=90$  deg

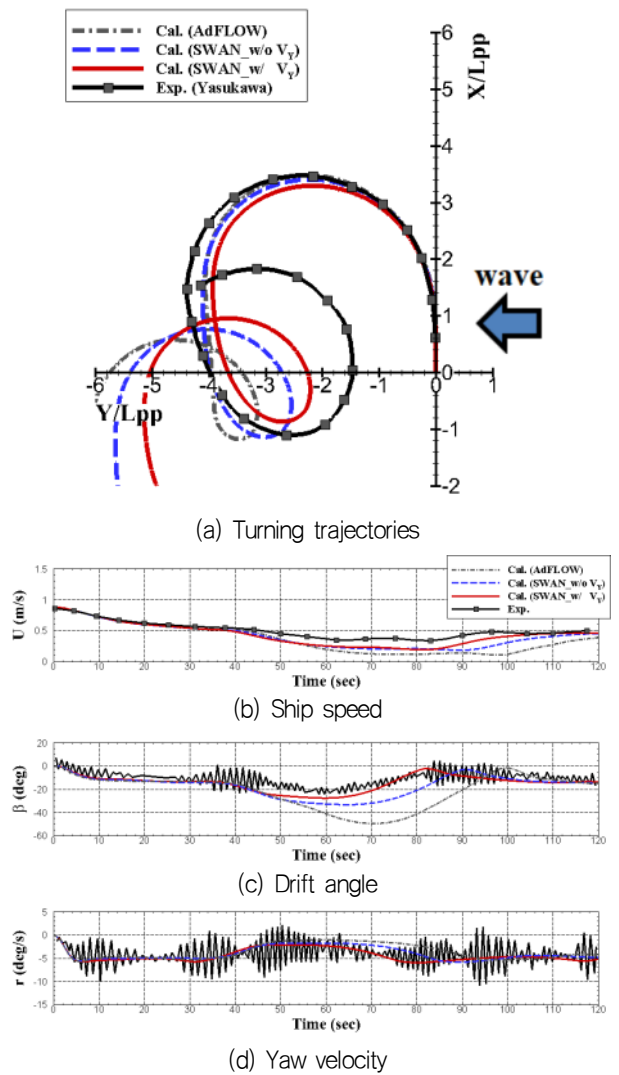


Fig. 13 Port turning trajectories and time histories:  $\lambda/L=0.7$ ,  $\chi=90$  deg

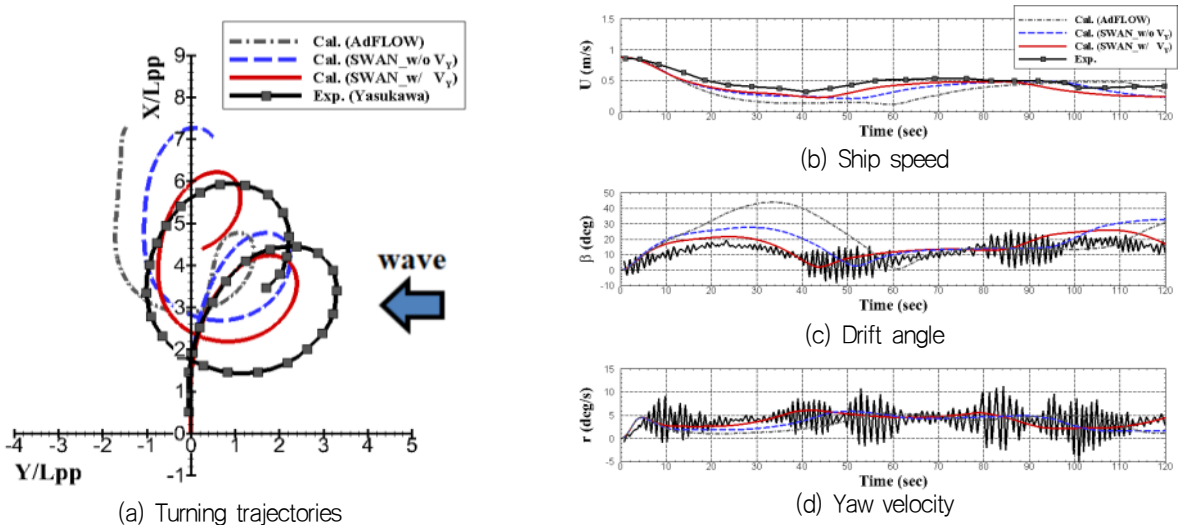


Fig. 14 Starboard turning trajectories and time histories:  $\lambda/L=0.7$ ,  $\chi=90$  deg

Fig. 13, 14는 선박의 좌현 및 우현 선회 시 선박의 전체 속도, 표류 각도 및 선수각속도의 시간변화를 나타낸 것이며, 프로그램간의 차이를 살펴보았다. 그림에는 각각 실험결과, AdFLOW 결과, SWAN y방향 속도를 고려하지 않은 경우(SWAN w/o  $V_y$ ) 및 y방향 속도를 고려한 경우(SWAN w/  $V_y$ )의 네 가지 결과를 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이, AdFLOW, SWAN y방향 속도 고려하지 않은 경우, SWAN y방향 속도 고려한 경우 순으로 계산 결과의 정확도가 높아지는 것을 알 수 있으며, 파랑 표류력 계산 방법의 정도가 높아짐에 따라서 최종적인 선회궤적의 계산 정확도도 높아지는 것을 확인할 수 있다.

한 가지 언급하고자 하는 점은 실험에 대한 시간 변화 그래프는 파도의 주기로 인해서 진동하는 경향이 나타나지만, 본 연구에서 계산한 결과에서는 파도에 의한 영향은 평균 표류력만 고려하였기 때문에 파도의 주기로 진동하는 경향이 나타나지 않고 있다. 이러한 부분은 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

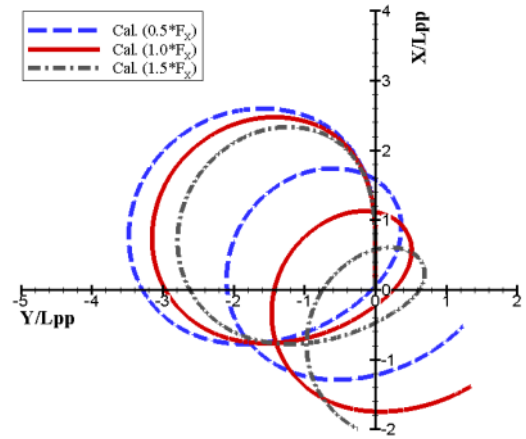
### 3.4 민감도 해석

본 장에서는 파랑 표류력 변화에 따른 선회궤적 변화 정도를 확인하는 민감도 해석을 수행하였으며, surge, sway방향 파랑 표류력 및 yaw 방향 파랑 표류 모멘트의 값의 변화에 따른 선회 파라미터의 변화를 살펴보았다. 각각의 파랑 표류력 및 파랑 표류 모멘트를 0.25~2.0배로 변화시켜가면서, 선회 궤적 및 선회 파라미터가 어떻게 변하는지를 살펴보았다. Fig. 15에서 확인할 수 있듯이, surge 방향 파랑 표류력이 선회궤적을 많이 변화시키고 있으며, 상대적으로 sway방향 파랑 표류력과 yaw 방향 파랑 표류 모멘트는 선회궤적에 많은 영향을 주지 않고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 16은 선회 파라미터의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, surge 방향 파랑 표류력이 전진거리, 전술 직경 및 표류거리를 가장 많이 변화시키고 있는 것을 알 수 있다.

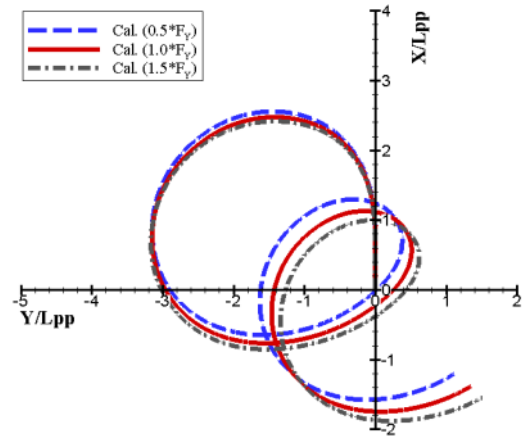
Yaw 방향 파랑 표류 모멘트는 선회궤적의 형상, 즉 선회궤적을 원형이 아닌 타원형으로 바꾸도록 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 따라서 표류각도에 다소 큰 영향을 끼치고 있다. Sway 방향 파랑 표류력은 표류거리에만 어느 정도 영향을 끼치고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 민감도 테스트를 통해서 각 파랑 표류력 성분이 선회 파라미터에 어떤 영향을 끼치는지를 파악할 수 있으며, 수치계산을 더 정확하게 수행하기 위해서 어떤 성분의 계산 정도가 향상되어야 하는지에 대해서 파악이 가능할 것으로 생각된다.

## 4. 결론

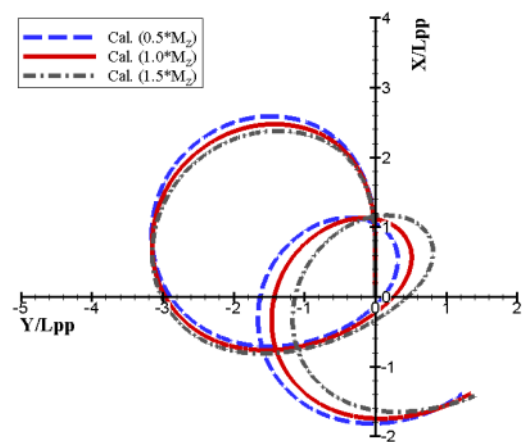
본 연구에서는 파랑 표류력이 선박의 조종성능 평가에 미치는 영향에 대해서 살펴보았으며, 이를 위해서 조종운동방정식에 파랑 표류력을 외력항으로 대입하는 비교적 단순한 방법을 사용하



(a) Variation of surge-directional wave drift force

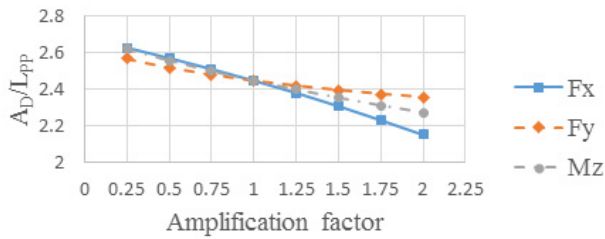


(b) Variation of sway-directional wave drift force

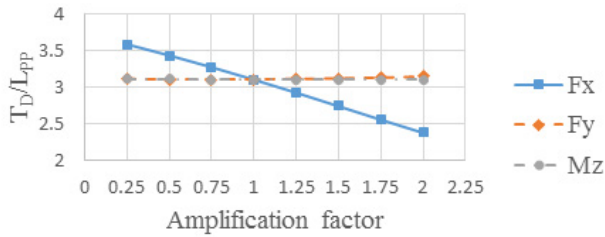


(c) Variation of yaw-directional wave drift moment

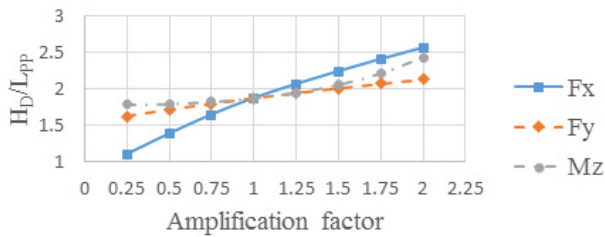
Fig. 15 Turning trajectories of wave drift sensitivity test:  $\chi=180$  deg,  $\lambda/L=0.8$



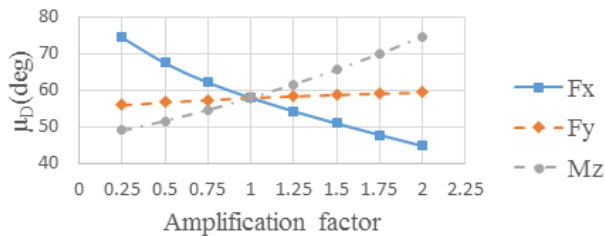
(a) Advance, AD



(b) Tactical diameter, TD



(c) Drift distance, HD



(d) Drift angle,  $\mu D$

Fig. 16 Variation of turning parameters according to wave drift force sensitivity test

였다. 파랑 표류력을 계산하기 위해서 AdFLOW와 SWAN의 두 가지 기법을 사용하였으며, SWAN 프로그램의 경우 전진방향의 속도뿐만 아니라 y방향의 속도를 포함하여 파랑 표류력을 계산하였으며, y방향 속도가 파랑 표류력 및 선회성능에 미치는 영향을 비교하였다. 또한 민감도 해석을 통해서 파랑 표류력이 선회 궤적 및 선회 파라미터에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 이러한 연구를 통해서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 조종운동방정식에 파랑 표류력을 외력항으로 추가하는 방법을 통해서 파랑 중 선회시험에 관한 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 선회 궤적 및 선회 파라미터에 대하여 본 수치해석 결과가 실험과 유사한 경향을 보여 줄 수 있음을 확인하였음.

- 파랑 중 선회하는 선박은 파랑 표류력으로 인하여 파도의 입사 방향과 일정한 각도를 가지고 표류하는 경향을 확인하였으며, 파랑 표류력이 선박의 속도 변화 및 선회궤적 표류와 관련 있는 중요한 요소임을 확인함.

- 파랑 표류력 계산 시 y방향 속도를 고려함에 따라 선박의 선회가 잘 일어나며 선회궤적이 안쪽으로 모이는 경향을 보였으며, 이러한 선회 운동 결과는 y방향의 속도를 고려하지 않은 경우보다 실험결과에 더 근접함을 확인하였음. 즉, 파랑 표류력 계산 시 물리적인 현상을 더 정확하게 반영함으로써 계산의 정확도를 높일 수 있음을 확인함.

- Surge 방향 파랑 표류력의 경우 표류거리에 큰 영향을 미치며, yaw 방향 파랑 표류 모멘트의 경우 선회궤적의 모양 및 표류 각도에 큰 영향을 미치는 것을 수치적으로 확인하였음. 수치계산의 정도 향상을 위해서 각 요소들의 민감도 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단됨.

## 후기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서 주요사업으로 수행중인 “선박의 조종-운동 통합 성능 해석 기술 개발(PES8900)” 과제에 대한 연구결과의 일부이다.

## References

Ann, S.P. & Rhee, K.P., 1994. Analysis of manoeuvrability of a ship in waves by 3-Dimensional panel method. *Transaction 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's Thesis. Seoul National University.

- 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, pp.1–11.
- MEPC, 2013. *Interim guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse condition*. RESOLUTION MEPC. 232(65).
- Ottosson, P. & Bystrom, L., 1991. Simulation of the dynamics of a ship maneuvering in waves. *Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 99, pp.281–298.
- Seo, M.G., Kim, Y. & Kim, K.H., 2011. Effects on nonlinear ship motions on ship maneuvering in large amplitude waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.516–527.
- Seo, M.G. & Kim, Y., 2011. Numerical analysis on ship maneuvering coupled with ship motion in waves. *Ocean Engineering*, 38, pp.1934–1945.
- Seo, M.G., 2016. *Study on prediction method for ship operation performance in waves*. Ph.D. Thesis. Seoul National University.
- Seo, M.G., Nam, B.W. & Kim, Y.G., 2017. Study of effects of wave drift force on maneuvering performance in waves. *Proceedings of the Annual Meeting the Society of Naval Architects of Korea, Busan, Republic of Korea*, 19–20 April 2017, pp.79–89.
- SHOPERA, 2016. *Presentation of benchmark results*. SHOPERA Benchmark Workshop, London, 15 April 2016.
- 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.
- 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, pp.1–7.
- 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.
- 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, pp.1–16.

