

손상선박의 예인 특성 연구

서민국¹ · 황성철² · 권용주³ · 박동민⁴ · 남현승⁵ · 홍사영^{6,†} · 최혁진⁷

¹선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 심해공학연구센터 선임연구원

²선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 심해공학연구센터 선임기술원

³선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 기술원

⁴선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 선임연구원

⁵선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 전문연구요원

⁶선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 책임연구원

⁷선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터 책임연구원

Study of Towing Characteristics of Damaged Ship

Min-Guk Seo¹, Sungchul Hwang², Yong Ju Kwon³, Dong-Min Park⁴, Hyunseung Nam⁵,
Sa Young Hong^{6,†}, and Hyuek-Jin Choi⁷

¹Senior Researcher, Deep Ocean Engineering Research Center, Offshore Platform Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Busan 46729, Korea

²Senior Engineer, Deep Ocean Engineering Research Center, Offshore Platform Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Busan 46729, Korea

³Junior Engineer, Offshore Platform Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

⁴Senior Researcher, Offshore Platform Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

⁵Professional Researching Agent, Offshore Platform Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

⁶Principal Researcher, Offshore Platform Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

⁷Principal Researcher, Offshore Industries R&BD Center, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

본 연구에서는 해양사고로 인해서 손상된 선박의 예인 특성에 대해서 살펴보고자 하며, 이를 위해서 선박의 동적 해석을 수행할 수 있는 KIMAPS (KRISO Integrated Multi-body And Positioning Simulation system) 프로그램을 사용하여 예인 시뮬레이션을 수행하였다. 선박의 예인 특성을 살펴보기 위해서 예선, 부선 및 예인삭을 수치 모델링하였다. 부선의 운동은 MMG 모델 및 횡유동 모델(cross-flow model)을 적용하여 모사하였으며, 두 모델의 결과를 비교하였다. 두 모델은 예인 불안정상태에서 운동 진폭 및 진동주기에서 다소 차이는 있었지만 전반적인 경향은 동일하였으며, 예인 안정상태에서의 예인 특성 값 및 예인가능성에 대한 판단은 거의 동일하였다. 따라서 빠른 판단이 필요한 긴급구난 상황에서는 비교적 단순한 횡유동 모델을 실용적인 관점에서 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 손상선박의 상태를 모사하기 위해서 상용 CFD 해석 프로그램인 StarCCM+를 사용하여 횡경사가 있는 상태에서의 조류하중계수를 추정하였으며, 이를 횡유동 모델에 적용하여 손상선박의 자세(횡경사 유무)에 따른 예인 특성을 확인하였다. 횡경사가 존재함으로써 인해서 비대칭 유체력이 발생하였으며, 부선의 불안정한 운동 진폭 및 최대 장력이 증가함을 확인하였다.

Abstract – In this study, towing characteristics of damaged ships due to marine accidents are examined. To this end, a towing simulation was performed using the KIMAPS (KRISO Integrated Multi-body And Positioning Simulation system) program that can perform a dynamic analysis of the ship. To check the towing characteristics of the ship, the towed ship, tugboat, and a tow line was numerically modeled. The motion of the towed ship was simu-

†Corresponding author: sayhong@kriso.re.kr

lated by applying the MMG model and the cross-flow model, and the results of the two models were compared. Although the two models had slightly different motion amplitude and slewing periods in an unstable state, the overall tendency was the same. The towing performance in a stable state and judgment of towing possibilities were, also, almost the same. Therefore, it is considered that a relatively simple cross-flow model can be used for emergency salvage situations from a practical point of view. To replicate the condition of the damaged ship, heel condition was assumed, and the current load coefficient in that condition was estimated using the commercial CFD program, StarCCM+. And towing characteristics according to the damaged condition were confirmed. Due to the heel angle, an asymmetric force occurred, and the unstable motion amplitude and maximum towing line tension increased.

Keywords: Towing Characteristics(예인 특성), Damaged Ship(손상선박), MMG model(MMG 모델), Cross-flow model(횡유동 모델), KVLCC2(KVLCC2)

1. 서 론

우리나라에서의 해양사고 발생 건수는 꾸준히 증가하고 있으며, 심각한 해양 오염을 유발할 수 있는 유조선 사고도 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라에서 발생한 해양사고의 종류를 살펴보면, 기관손상, 부유물 감김 및 안전사고가 가장 많으며, 해양오염을 유발할 수 있는 충돌, 좌초 및 화재폭발 사고도 유의미한 건수로 발생하고 있다(e-Korea Indicator[2020]). 사고 초기 긴급 상황에서 해양오염방지를 위한 의사결정에 활용할 수 있는 과학적 기반의 기술 및 지원시스템이 필요하며, 해난 사고 선박의 긴급 구난의 일환인 비상 예인 시뮬레이션 기술은 반드시 필요한 기술 중 하나라고 할 수 있다.

선박의 예인 안정성을 평가하기 위해서 모형시험 혹은 수치 시뮬레이션을 수행하는 방법이 주로 활용된다. 모형시험은 추가적인 수치해석 없이 예인 안정성을 직접적으로 판별할 수 있다는 장점이 있지만, Latorre[1998]가 언급한 바와 같이 축적비에 대한 효과로 인해서 모형선 저항이 실제 선박보다 과도하게 발생하며, 모형선의 예인 안정성을 실제보다 좋다고 평가하게 된다. 모형시험을 통한 예인 안정성을 수행한 사례는 다음과 같다. Yasukawa *et al.*[2006]은 바지선에 대한 예인 모형시험을 수행하였으며, 바지선의 폭, 스케그의 유무, 예인선의 길이에 따른 예인 안정성 변화를 살펴보았다. Nam *et al.*[2014]은 운송 바지선의 예인안정성 평가를 위한 모형시험을 수행하였으며, 스케그의 유무, 예인선의 길이, 예인속도에 따른 변화를 확인하였다.

수치 시뮬레이션을 활용해서 선박의 예인 안정성을 평가하는 방법의 경우 부선에 대한 운동 방정식이 확립이 되면 다양한 예인조건 및 환경조건에 대해서 예인 안정성을 평가할 수 있다. 다만 시뮬레이션 결과가 부선의 운동 방정식에 활용되는 유체력 미계수에 영향을 받으며, 이를 정확하게 도출하는 과정이 선행되어야 한다. 이를 위해서 모형시험 혹은 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석이 필요하다. 수치해석을 통해서 예인 안정성을 평가한 기존 연구는 다음과 같다. Yasukawa *et al.*[2006]은 바지선에 대한 예인 시뮬레이션을 수행하였으며, 모형시험 결과와 비교하였다. 부선의 운동방정식은 MMG (Manoeuvring Mathematical Modeling Group) 모델을 적용하였으며, 예인선은 집중 질량 모델(lumped mass method)을 사용하였다. Nam *et al.*[2013]은 수치 시뮬레이션을 수행하기 위해

서 부선의 운동방정식을 MMG 모델과 Wichers[1988]가 제안한 횡유동 모델(cross-flow model)을 적용하였으며, 예인선의 길이, 유체력 계수의 변화가 부선의 거동에 어떻게 영향을 미치는지 확인하였다.

손상선박의 비상 예인에 대한 연구는 매우 제한적이며, 대부분 손상선박의 유체력 미계수 도출이 주를 이룬다. Ha[2018]는 ONR Tumblehome 선형에 대해서 비손상상태 및 손상상태에서의 구속 모형시험을 수행하여 유체력 미계수를 도출하였으며, 손상상태에서 비대칭 유체력이 발생함을 보여주었다. 손상상태에 대한 정의는 선수 우현부분이 손상되었다고 가정하였으며, 이로 인해서 횡경사가 2.93도가 존재하는 경우이다. Kim *et al.*[2011]은 횡경사가 있는 상태에서의 구속모형시험을 수행하였으며, 횡경사각도와 연관된 유체력 미계수를 도출한 바 있다.

본 연구는 Nam *et al.*[2013, 2014]의 연구를 바탕으로 하고 있다. Nam *et al.*[2013; 2014]는 KIMAPS (KRISO Integrated Multi-body And Positioning Simulation system)를 사용하여 barge 선의 예인 시뮬레이션을 수행하였으며, 모형시험 결과와 비교하여 수치해석 프로그램을 검증하였다. 본 연구에서는 검증된 해석 프로그램을 사용하여 해양사고로 인해서 손상된 선박의 예인 특성을 살펴보고자 하였으며, 선박의 손상으로 인해서 횡경사 각도가 5도 발생하였다고 가정하였다. 부선의 운동방정식은 MMG 모델과 횡유동 모델을 적용하였으며, 운동 모델에 따른 결과를 비교하였다. MMG모델에 사용되는 유체력 미계수는 Yasukawa & Yoshimura [2015]의 연구결과를 참고하였으며, 횡유동 모델에 사용되는 조류하중 계수는 상용 CFD 프로그램인 StarCCM+를 활용하여 직접 계산하였다. 손상상태(횡경사 5도)에서의 조류하중 값 또한 CFD로 계산하였으며, 이를 활용하여 손상상태의 예인 안정성을 평가하였다. 다양한 파라미터(예인속도, 예인선의 종류 및 길이, 예선 및 푸셔의 척수, 배치)를 정의하여 파라미터에 대한 예인 안정성의 변화를 살펴보았으며, 손상상태에서 예인안정성이 어떻게 변화하는지 확인하였다.

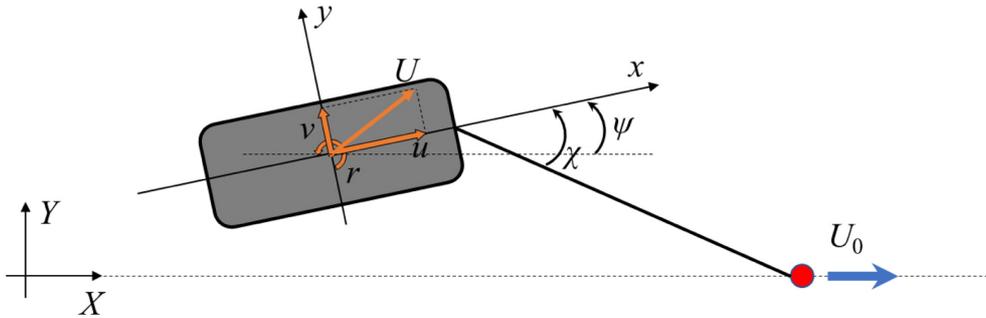
2. 배경 이론

2.1 대상 선형 및 좌표계

본 연구의 주요 목적은 사고 선박의 비상 예인과 관련된 내용이며, 선박사고가 발생했을 경우 환경에 큰 피해를 줄 수 있는 탱커선을 대상선으로 선정하였다. 사고 선박의 예인을 위해서는 어느 정도

Table 1. Principle dimensions of KVLCC2

	Abbreviation	Unit	KVLCC2
Length between perpendicular	L	[m]	320.0
Breadth	B	[m]	58.0
Draft	d	[m]	20.8
Displacement volume	∇	[m ³]	312,622
Center of gravity			
X from midship	x_g	[m]	11.1
Y from center	y_g	[m]	0.0
Z from baseline	z_g	[m]	18.66
Center of buoyancy			
X from midship	x_b	[m]	11.1
Y from center	y_b	[m]	0.0
Z from baseline	z_b	[m]	11.05
Gyration, transverse	k_{xx}	[m]	23.2
Gyration, longitudinal	k_{yy}, k_{zz}	[m]	80.0

**Fig. 1.** Coordinate systems for towing simulation.

크기가 있어야 하며, 이러한 조건에 맞으면서 잘 알려진 선형인 KVLCC2를 대상선으로 선정하였다. 대상선의 주요채원은 다음과 같다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 공간에 고정된 O-XYZ 좌표계와 선박에 고정된 o-xyz 좌표계를 사용한다. 대상선은 U_0 의 속도로 전진하는 예인선에 의해서 예인되며, 선박은 x축 방향의 속도 u , y방향 속도 v 및 선속각 속도 r 를 가지고 있다. U , ψ 는 각각 선박의 전체 속도($U = \sqrt{u^2 + v^2}$) 및 선속각을 의미하며, χ 는 예인선과 선박의 x축이 이루는 각도를 나타낸다.

2.2 부선 운동 방정식

예인 시뮬레이션은 수평방향의 3자유도 운동으로 구성되며, 부선의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (m + a_{11})\dot{u} - (m + a_{22})vr &= F_x + F_{Tx} + F_{Fx} \\
 (m + a_{22})\dot{v} - (m + a_{11})vr &= F_y + F_{Ty} + F_{Fy} \\
 (I_z + a_{66})\dot{r} &= M_z + M_{Tz} + M_{Fz}
 \end{aligned} \quad (1)$$

위의 식에서 m , I_z 는 선박의 질량 및 관성 모멘트이며, a_{11} , a_{22} , a_{66} 은 각 방향 부가질량을 의미한다. F_x , F_y , M_z 는 부선 선체에 작용하는 유체력을 의미하며, 각각 x방향, y방향 힘 및 z축 방향 모멘

트를 나타낸다. 선체에 작용하는 유체력은 MMG 모델 및 횡유동 모델(cross-flow model, Wichers, 1988)을 사용하여 표현하였다. F_{Tx} , F_{Ty} , M_{Tz} 는 예인선이 부선에 작용하는 힘을 의미하며, 예인선은 인장력만을 가지는 tether 모델을 적용하였다. F_{Fx} , F_{Fy} , M_{Fz} 는 푸셔(pusher)가 부선에 작용하는 힘을 의미하며, 압축력만을 가지는 fender 모델을 적용하였다. Tether 모델과 fender 모델에 대한 구체적인 내용은 아래의 2.2.3에서 자세히 설명하고 있으며, Hong *et al.*[2018]에서 확인할 수 있다.

2.2.1 MMG 모델

MMG 모델은 선체에 작용하는 유체력을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{1}{2}\rho L d U^2 (-R_0 + X'_{vv} v'^2 + X'_{vr} v' r' + X'_{rr} r'^2) \\
 F_y &= \frac{1}{2}\rho L d U^2 (Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vvv} v'^3 + Y'_{vvr} v'^2 r' + Y'_{vrr} v' r'^2 + Y'_{rrr} r'^3) \\
 M_z &= \frac{1}{2}\rho L^2 d U^2 (N'_v v' + N'_r r' + N'_{vvv} v'^3 + N'_{vvr} v'^2 r' + N'_{vrr} v' r'^2 + N'_{rrr} r'^3)
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도이며, L , d 는 각각 선박의 길이 및 흘수를 나타낸다. v' , r' 는 무차원화 된 y방향 속도 및 선속 각속도 ($v' = v/U$, $r' = r/U$)를 의미하며, R_0 , Y_v , Y_r , N_v , N_r 등은 유체력 미계수값

이다. MMG 모델에 대한 구체적인 내용 및 유체력 미계수 값은 Yasukawa & Yoshimura[2015]에서 확인할 수 있다.

2.2.2 횡유동 모델

횡유동 모델은 저속 운동에 적합하며, 선체의 길이 방향으로 유동의 간섭이 없다고 가정한다. 선박의 전진속도는 선박으로 입사하는 조류로 대체하여 고려하며, 선체에 작용하는 유체력은 조류력 계수로 추정할 수 있는 준정상 조류력(quasi-steady current force)과 횡유동에 의한 동적 조류력(dynamic current force)의 합으로 표현된다(Wichers, 1988).

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{1}{2}\rho L d V_{cr}^2 C_{1c}(\psi_{cr}) - (a_{22} - a_{11}) V_c \sin(\psi_c - x_6) r \\
 F_y &= \frac{1}{2}\rho L d V_{cr}^2 C_{2c}(\psi_{cr}) + X_{2D} \\
 M_z &= \frac{1}{2}\rho L^2 d V_{cr}^2 C_{6c}(\psi_{cr}) + X_{6D} \\
 X_{2D} &= \frac{1}{2}\rho d C_{2c}(90^\circ) \int_{AP}^{FP} [-(v_r + r l)((v_r + r l)^2 + u_r^2)^{0.5} + v_r V_{cr}] dl \\
 X_{6D} &= \frac{1}{2}\rho d C_{6c}(90^\circ) \int_{AP}^{FP} [-(v_r + r l)((v_r + r l)^2 + u_r^2)^{0.5} + v_r V_{cr}] dl
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 V_c , ψ_c 는 입사하는 조류의 속도 및 방향을 의미하며, 예인선의 속도 및 방향과 동일하다($V_c = U_0$). 예인선이 x 축으로 이동하는 경우라면, $\psi_c = 0^\circ$ 이 된다. C_{1c} , C_{2c} , C_{6c} 는 무차원화 된 조류력 계수이며, X_{2D} , X_{6D} 는 횡유동에 의한 동적 조류력 성분을 의미한다. V_{cr} , ψ_{cr} 은 선체의 운동을 고려한 상대 조류 속도 및 방향이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{cr} &= \sqrt{u_r^2 + v_r^2} \\
 \psi_{cr} &= \tan^{-1}\left(\frac{v_r}{u_r}\right) \\
 u_r &= u - V_c \cos(\psi_c - \psi) \\
 v_r &= v - V_c \sin(\psi_c - \psi)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

위의 식을 살펴보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 먼저 조류력 계수로 추정할 수 있는 준정상 조류력은 MMG 모델의 v 항과 관련이 있으며, 횡유동에 의한 동적 조류력은 MMG 모델의 r 항 및 v , r 의 연성항을 포함하고 있다. 준정상 조류력, 즉 MMG 모델의 v 항과 관련된 유체력 미계수의 경우 모형시험 혹은 CFD를 통해서 도출하게 되면 상당히 정확한 값이지만 횡유동에 의한 동적 조류력, 즉 r 항 및 v , r 의 연성항은 횡유동 가정(선박의 길이 방향 유동의 간섭 없음, 길이 방향 cd값 동일 등)에 의해서 추정한 값으로 비교적 정확도가 떨어질 수밖에 없다. 이어지는 장에서 이에 대한 분석을 다루었다.

횡유동 모델을 사용하기 위해서는 조류력 계수 값이 필요하며, 이를 위해서 CFD 해석을 수행하였다. 상용 CFD 해석 프로그램인 StarCCM+ 11.06ver를 사용하였으며, 해석 영역은 $10L \times 10L \times 10T$ 를 적용하였다. K- ϵ 난류 모델을 사용하였으며, 최종 격자는 대략 2000~3500만개 정도이다(Fig. 2 참조). CFD해석은 Koop[2019]에서 제안된 해석 절차서에 근거하여 수행하였으며, 해석 절차서는 CFD-JIP (TechnipFMC 주관)의 주요 결과물이다. CFD를 활용한 조류하중 해석법에 대해서 다루고 있으며, 그 과정에서 모형시험과의 결과 비교를 수행하였다(Xu *et al.*, 2019). 조류력은 비손상상태와 손상상태를 가정한 횡경사 각도가 5도 조건에서 계산하였으며, 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$\begin{aligned}
 C_{Fx} &= \frac{Fx}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot T} \\
 C_{Fy} &= \frac{Fy}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot T} \\
 C_{Mz} &= \frac{Mz}{0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L^2 \cdot T}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

위의 그림은 조류의 입사 방향에 따른 x , y 방향 힘 및 z 방향 모멘트의 무차원화 값을 보여주고 있다. 각각의 그림은 3개의 결과를 포함하고 있으며 비손상조건('Evenkeel'), 손상조건('Heel 5deg') 조건 및 참고를 위한 OCIMF 유조선 결과이다. 참고로 OCIMF [1994]은 tanker에 대한 선수 형상별, 흘수별 조류하중 계수를 제공하고 있다. 제공된 조류하중은 1986년부터 1975년까지 네덜란드

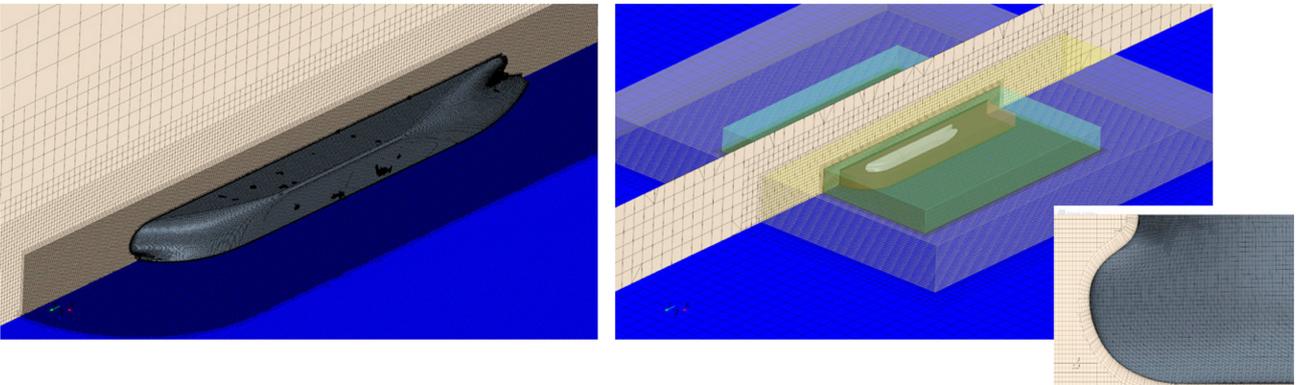


Fig. 2. Grid system for CFD calculation of current load.

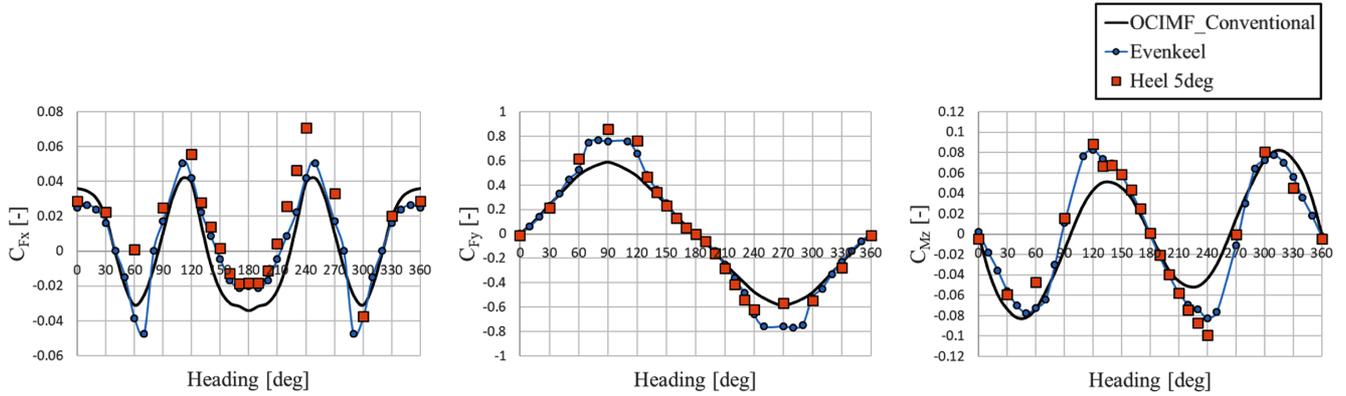


Fig. 3. Current load coefficient of KVLCC2.

MARIN에서 수행된 모형시험 결과를 기반으로 한 일종의 회귀식이며, 초기에 정확한 데이터가 없는 경우 많이 사용되는 자료이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 손상조건에서는 좌우 대칭이 깨지는 것을 볼 수 있으며, 우현에서 조류가 입사하는 경우 y방향 유체력이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

대상선인 KVLCC2 선형에 대해서 정상상태에서의 유체력 미계수 및 조류력 계수에 대한 해석 결과는 공개된 자료가 다수 존재한다. 하지만 손상상태, 즉 횡경사가 있는 상태에서의 유체력 미계수나 조류력 계수에 대한 내용은 공개된 자료가 매우 드물며, 본 연구에서 CFD를 활용해서 정상상태 및 손상상태에서의 조류력 계수를 추정하였다.

2.2.3 예인삭 & 푸셔 모델링

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 예인삭을 구현하기 위해서 인장력 만을 가지는 tether 모델을 적용하였으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{Tx} = T \cdot \cos\chi$$

$$F_{Ty} = T \cdot \sin\chi$$

$$M_{Tz} = x_T \cdot F_{Ty}$$

$$T = \begin{cases} \frac{EA}{L_0}(L_{TE} - L_{T0}) + C \frac{dL_{TE}}{dt} & \text{if } L_{TE} > L_{T0} \\ 0 & \text{if } L_{TE} \leq L_{T0} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 T , χ 는 각각 예인삭의 인장력, 예인삭과 선박의 x축이 이루는 각도를 의미하며, x_T 는 예인삭이 연결된 위치이다. EA , C 는 각각 예인삭의 축강성(axial stiffness) 및 감쇠계수를 의미하며, L_{T0} , L_{TE} 는 예인삭의 초기 길이 및 변형된 길이를 나타낸다. 본 연구에서는 다양한 종류의 로프를 적용하여 축강성을 달리하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 사용된 예인삭의 종류 및 그에 따른 축강성의 값은 다음과 같다.

푸셔는 예인선과 동일한 속도로 전진한다고 가정하였으며, 압축력 만을 가지는 fender 모델을 적용하였다.

Table 2. Properties of towing lines (ref: OrcaFlex manual [2020])

	Type	EA [kN]
합성 섬유 로프	Nylon, D=100 mm	1,180
	Polyester, D=100 mm	10,900
	Polypropylene, D=100 mm	10,600
강철 로프	Fibre core wire rope, D=30 mm	33,030
	Wire core wire rope, D=30 mm	36,360

$$F_{Fx} = F \cdot \cos\chi$$

$$F_{Fy} = F \cdot \sin\chi$$

$$M_{Fz} = x_T \cdot F_{Fy}$$

$$F = \begin{cases} 0 & \text{if } L_{FE} > L_{F0} \\ k(L_{FE} - L_{F0}) + C \frac{dL_{FE}}{dt} & \text{if } L_{FE} \leq L_{F0} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 F 는 펜더의 압축력을 의미하며, k , C 는 각각 스프링 강성 및 감쇠계수를 의미한다. L_{F0} , L_{FE} 는 펜더의 초기 길이 및 변형된 길이를 나타낸다.

현재의 시뮬레이션에서는 예인삭 및 펜더의 변형된 길이 L_{TE} 를, L_{FE} 는 다음과 같이 계산한다. 먼저 예선은 특정 속도로 일정하게 전진한다고 가정하였으며, 부선은 운동방정식을 풀어 매 시간단계에서 위치를 계산한다. 이를 활용하여 예선과 부선의 상대거리를 계산하고, 매 시간단계에서 예인삭 및 펜더의 변형된 길이를 추정한다. 이러한 방법을 사용하여 다수의 예선, 예선의 위치, 예인삭 및 펜더의 길이와 재질, 예인삭 및 푸셔가 연결된 위치를 정확하게 모사하며, 시간영역 시뮬레이션을 수행하여 예인특성을 파악한다.

2.3 유체력 미계수 비교

본 연구에서는 선체에 의한 유체력을 모사하기 위해서 MMG모델과 횡유동 모델을 사용하였다. 본 장에서는 두 모델에서 도출된 유체력 미계수 값을 비교하였으며, 유체력 미계수는 MMG모델의 표현식을 따랐다. 먼저 Fig. 4와 같이 표류각($\beta = \tan^{-1}(v/U)$)에 따른

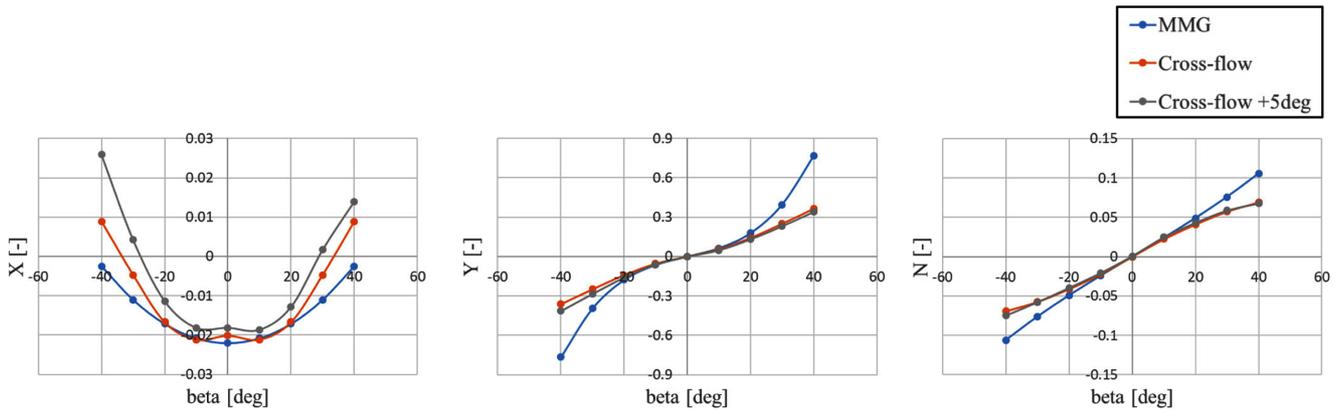


Fig. 4. Hull force and moment according to drift angle.

Table 3. Hydrodynamic coefficient for sway velocity

	R_0	X_v	X_{vv}	Y_v	Y_{vv}	Y_{vzv}	N_v	N_{vv}	N_{vzv}
MMG	0.0220	-	0.040	0.315	-	1.607	0.137	-	0.0300
Cross flow (Heel 0deg)	0.0228	-	0.065	0.371	-	0.318	0.125	-	-0.0531
Cross flow (Heel 5deg)	0.0206	-0.006	0.083	0.378	-0.0720	0.345	0.125	-0.0109	-0.0486

x축, y축 방향 힘 및 z축 방향 모멘트를 계산하였으며, v와 관련된 유체력 값을 도출하면 Table 3과 같이 정리된다. 아래의 그림 및 식에는 MMG 모델, 등흘수 조건의 횡유동 모델 및 횡경사 5도 조건의 횡유동 모델 결과가 포함되어 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 저항 계수, R_0 와 선형 유체력 미계수, Y_v , N_v 값은 두 모델이 거의 동일한 값을 보여주고 있지만 비선형 유체력 미계수 Y_{vv} , N_{vv} 값은 다소 차이를 보인다. 이러한 차이를 보이는 주된 이유는 MMG 모델에서 유체력 미계수를 도출할 때 표류각을 20도 전후로 사용하였기 때문인 것으로 생각되며(Yasukawa & Yashimura[2015]), 표류각을 40도까지 확장해서 사용하게 되면 비선형 유체력 미계수 값에 의한 힘 및 모멘트가 과도하게 크게 나타나는 것으로 생각된다. 예인 시뮬레이션에서 선박이 안정적으로 예인되지 못하는 경우는 표류각이 40도가 넘어가는 경우가 발생하며, MMG 모델에서 유체력 미계수를 도출할 때 이러한 점을 반영해야 될 것으로 생각된다.

횡경사 각도의 유무에 따른 결과를 살펴보면, 가장 주된 변화는

횡경사 각도로 인한 좌우 비대칭 성분, X_v , Y_{vv} , N_{vv} 이 나타난다는 점이다. 이러한 비대칭 성분은 선박의 예인 안정성을 좋지 않게 하는 방향으로 작용하며, 한쪽으로 치우쳐서 예인이 된다.

다음으로 Fig. 5와 같이 선수 각속도, r에 따른 x축, y축 힘 및 z축 방향 모멘트를 계산하였으며, r과 관련된 유체력 값을 도출하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있다. 아래에서 확인할 수 있듯이, r과 관련된 항은 다소 차이를 보인다. 먼저 MMG 모델에서는 Y_r 값이 존재하지만 횡유동 모델에서 Y_r 값은 0이다. 본 연구에 적용한 횡유동 모델은 각 섹션 별 저항계수, C_{2c} 가 동일하다고 가정하였으며, 길이방향으로 적분하면 0이 된다. 반면 실제 선박은 선수 선미에서의 형상 변화가 존재하며, 이로 인해서 선수 각속도에 의한 y방향 힘이 실제로는 존재하며, MMG 모델에서는 이를 반영한다. N_r 값 또한 두 모델이 대략 30% 정도 차이를 보인다. 이러한 차이의 주된 원인은 횡유동 모델이 r 값을 도출할 때 사용한 가정(선체의 길이 방향으로 유동 간섭이 없음, 각 섹션별 저항계수 값은 동일) 때문

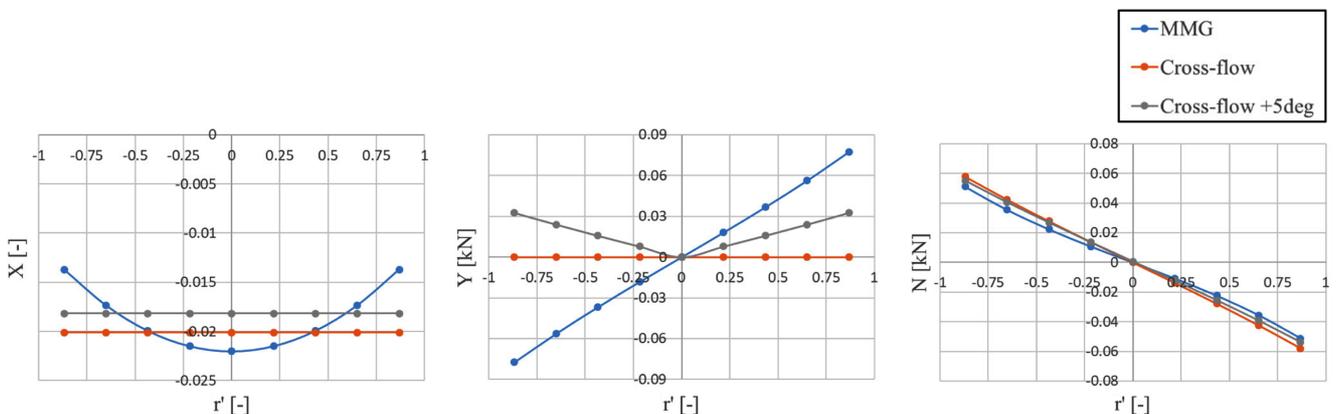


Fig. 5. Hull force and moment according to yaw velocity.

Table 4. Hydrodynamic coefficient for yaw velocity

	R_0	X_{rr}	Y_r	$Y r $	Y_{rr}	N_r	N_{rr}	N_{rrr}
MMG	0.0220	0.011	0.083	-	0.008	-0.0490	-	-0.01300
Cross flow (Heel 0deg)	0.0228	-	0	-	-	-0.0633	-	-0.00455
Cross flow (Heel 5deg)	0.0206	-	0	-0.0373	-	-0.0595	0	-0.00428

인 것으로 생각된다.

한가지 언급하고자 하는 점은 MMG 모델은 선체에 작용하는 유체력을 비교적 정확하게 모사가 가능하지만, 필요한 유체력 미계수의 수가 많다. 반면 횡유동 모델은 특정 가정을 사용해서 선체에 작용하는 유체력의 정확도는 떨어지지만, 필요한 유체력 미계수의 수가 적다. 이러한 점을 미리 인지하고 어떠한 모델을 적용할 지 고민할 필요가 있다.

3. 예인 시뮬레이션

3.1 다양한 조건에서의 예인 시뮬레이션

본 장에서는 다양한 조건에서의 예인 시뮬레이션을 수행하였으며, 가정한 예인 시나리오는 아래의 그림과 같이 네 가지이다. 첫 번째는 하나의 예인선이 앞쪽에서 예인 하는 경우이며, 두 번째는 두대의 예인선이 앞쪽에서 예인하는 경우이다. 세 번째는 두대의 예인선은 앞쪽에서, 한대의 예인선은 뒤쪽에서 예인하는 경우(높은 예인 안정성이 필요한 경우의 예인 방법)이며, 네 번째는 한대의 예인선이 앞쪽에서 예인 하며, 두대의 푸셔가 양 옆쪽에 붙어서 예인 하는 경우이다. 각각의 시나리오에 대해서 여러 파라미터(예인선의 종류, 예인속도, 예인선 길이, 예인선 거리, 푸셔 위치 등)를 변경해 가면서 예인 시뮬레이션을 수행하였으며, 파라미터에 따른 예인 안정성의 변화 양상을 살펴보았다.

3.1.1 예인 속도 및 예인선의 종류에 따른 예인 결과 비교
먼저 예인 속도 및 예인선의 종류에 따른 예인 시뮬레이션을 수

행하였다. 예인속도는 3노트, 4노트, 5노트를 적용하였으며, 예인선의 종류는 Table 2에 정리된 것을 사용하였다. 예인선을 변경한다는 것은 축강성을 변경한다는 것을 의미한다. 예인 시나리오 1에 대해서 시뮬레이션을 수행하였으며, 예인선의 길이는 700 m, 예인선이 연결된 위치, x_T 는 160 m 이다.

그림에서 확인할 수 있듯이, 현재 예인 조건(시나리오 1, $x_T=160m$, $L_T=700m$)에서는 부선이 안정적으로 예인되지 못하며, 상당히 크고 주기적으로 진동하는 현상(fish-tailing)을 보인다. 부선은 좌우로 배 폭의 5배까지 움직이며, 선수동요는 60도까지 발생하는 것을 알 수 있다. 선속 및 예인선의 종류에 따른 결과를 살펴보면, 선속이 감소할수록, 예인선의 축강성이 증가할수록 부선의 진동폭은 감소하며, 예인선의 최대장력은 증가한다. 이어지는 장에서 수행된 시뮬레이션에서는 예인속도를 5 knots, 예인선의 종류는 폴리에스테르(EA=10,900 kN)를 사용하였다.

3.1.2. MMG 모델 vs 횡유동 모델 결과 비교

다음으로 MMG 모델과 횡유동 모델의 시뮬레이션 결과를 비교 하였다. 예인 시나리오 1을 가정하였으며, 아래의 그림은 $x_T=160m$, $L_T=700m$, 예인속도 5 knots, 예인선 종류는 폴리에스테르(EA=10,900 kN)인 경우의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 예인선은 불안정한 운동을 보여주고 있으며, 상당히 크고 주기적인 좌우동요, 선수동요 운동을 하고 있는 것을 볼 수 있다. MMG 모델과 횡유동 모델의 결과를 비교하면, 두 모델 모두 불안정한 경향을 보여주고 있으며, 운동 및 예인선 장력의 최대 크기, 진동하는 주기가 조금씩 다른 것을 알 수 있다. 이러한 차

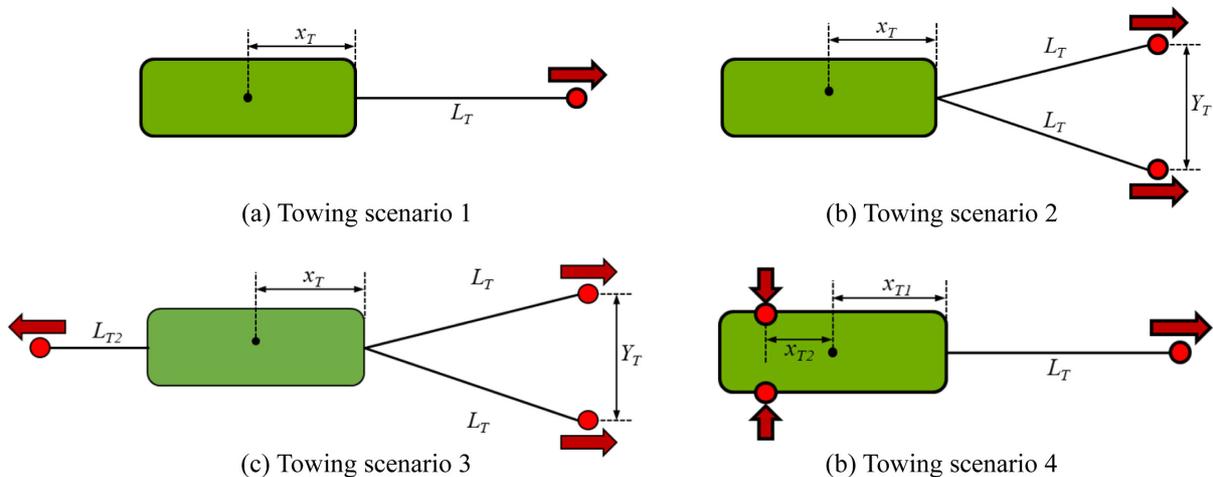


Fig. 6. Various towing scenarios.

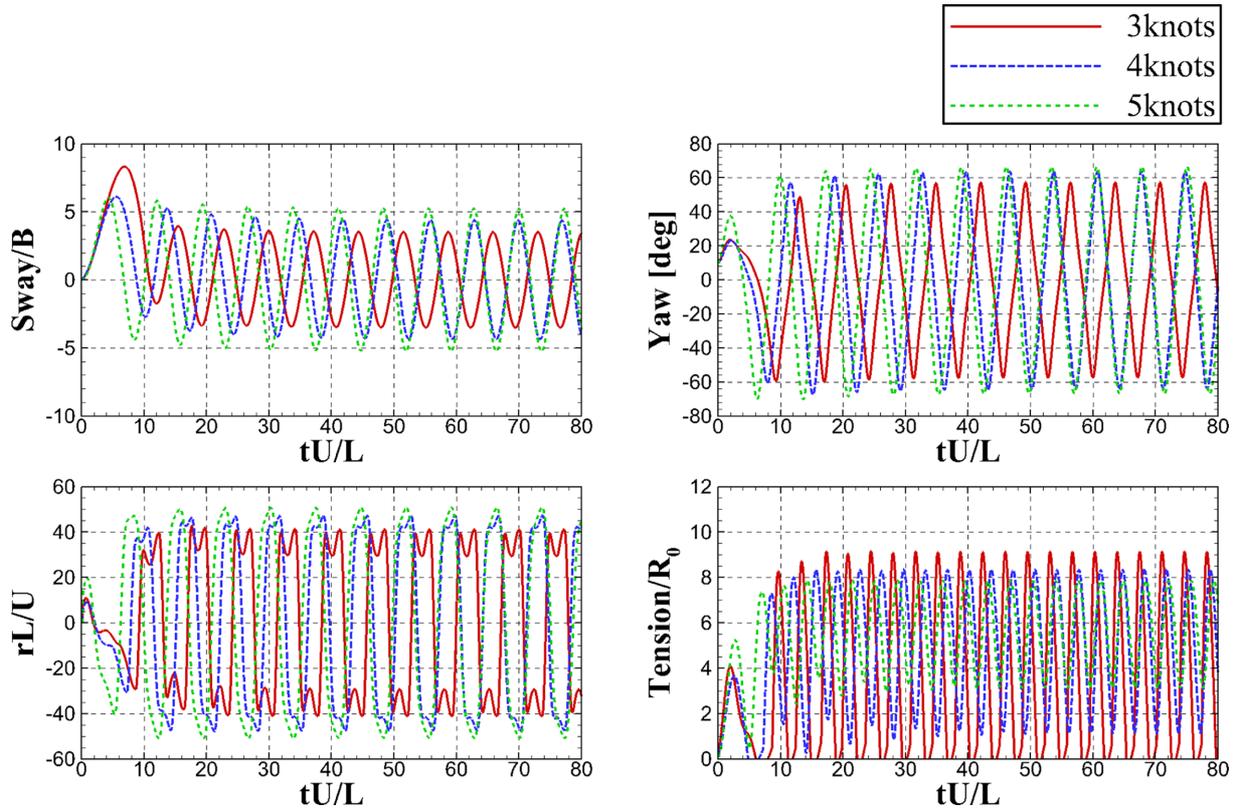


Fig. 7. Towing simulation results for towing speed: scenario1, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m.

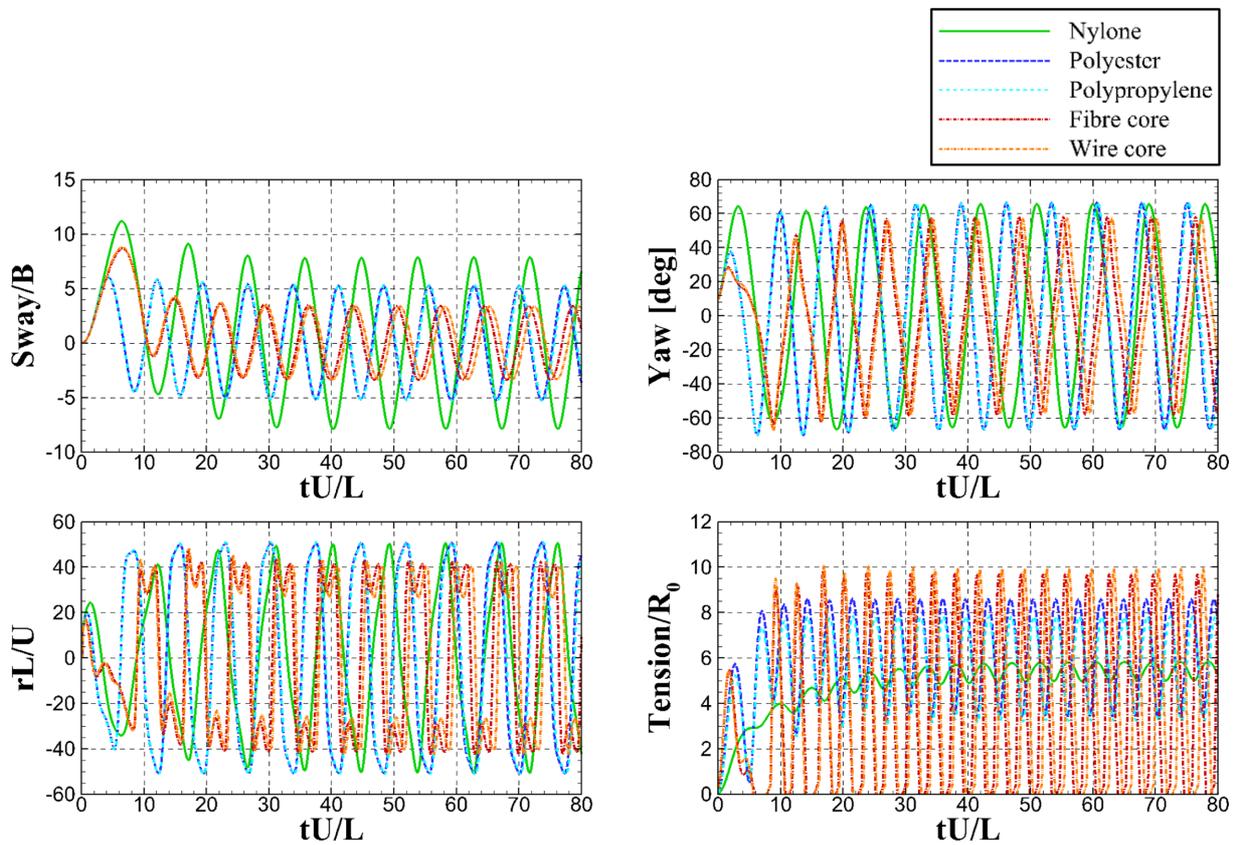


Fig. 8. Towing simulation results for towing line: scenario1, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m.

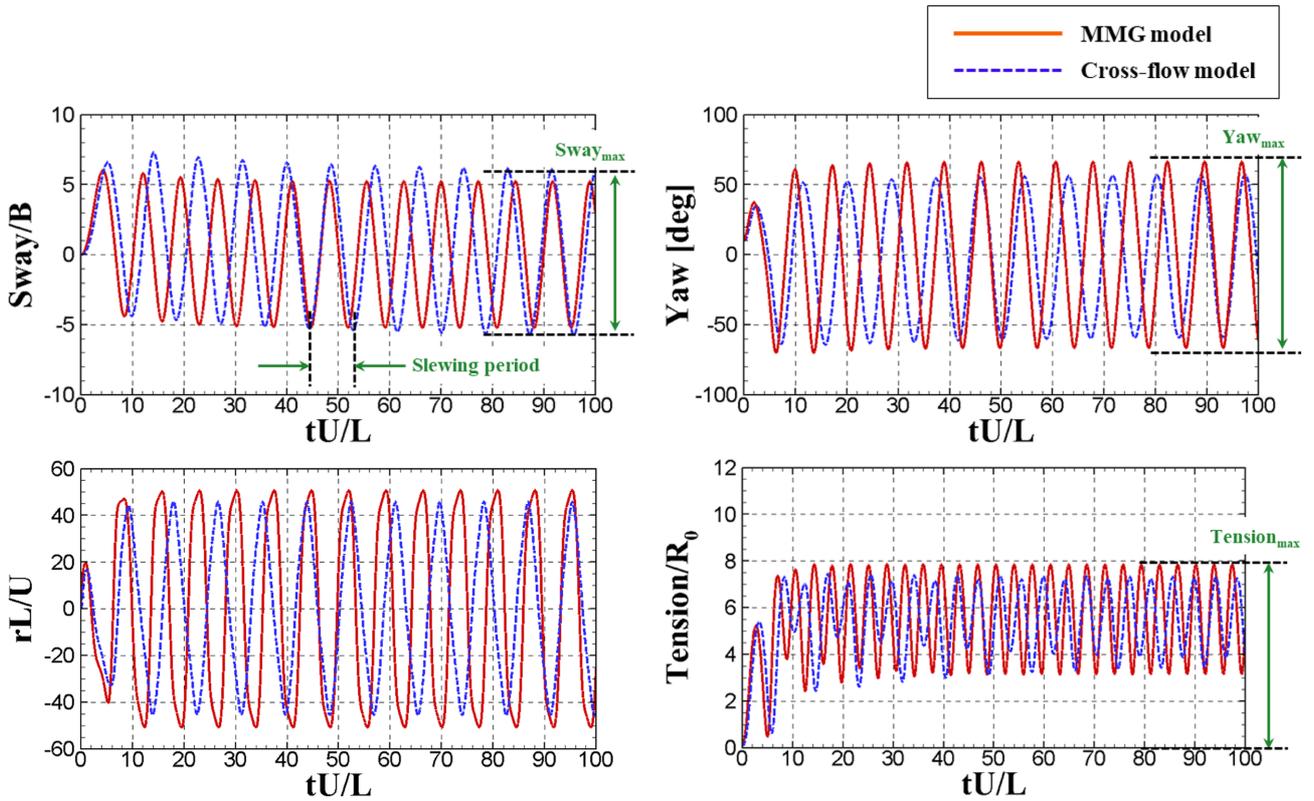


Fig. 9. Comparison of towing simulation results for hull model: scenario1, $x_r=160$ m, $L_r=700$ m.

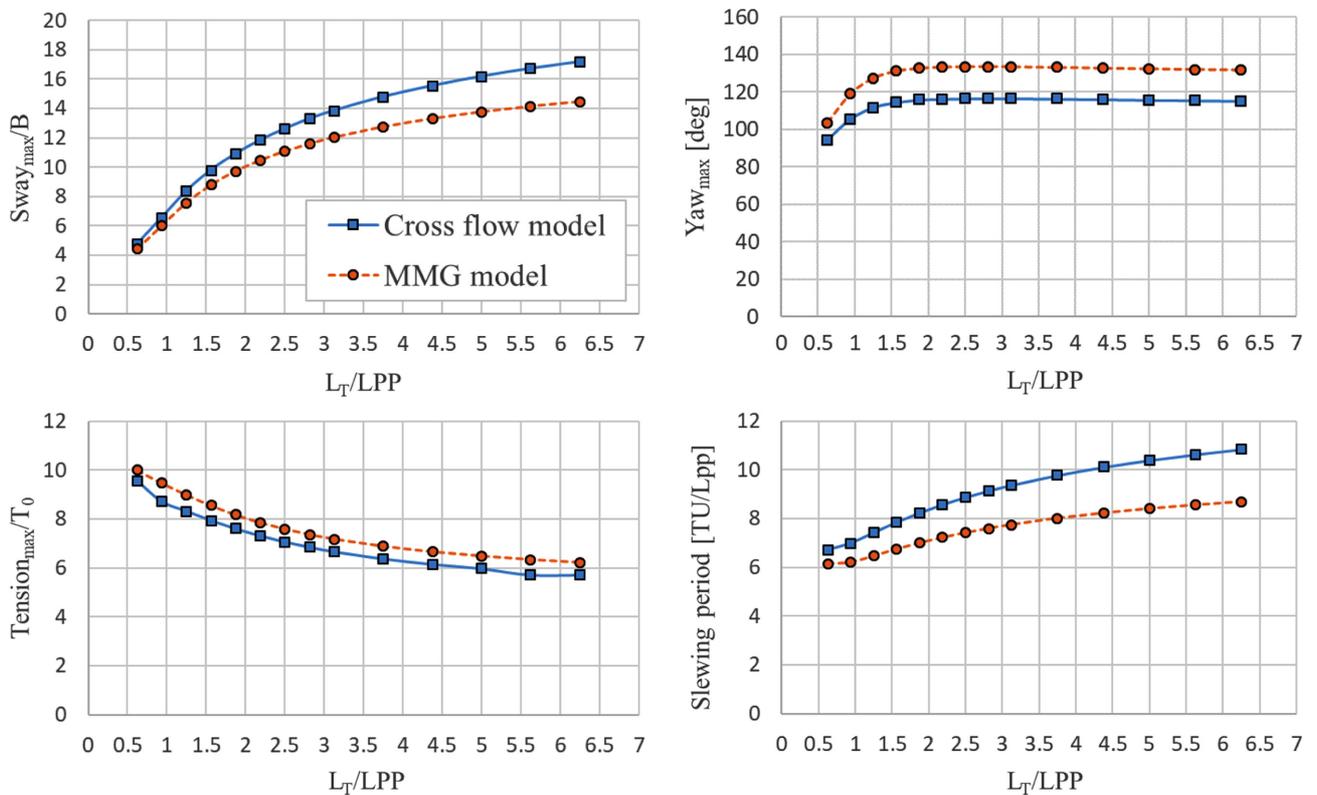


Fig. 10. Towing parameter according to L_T and hull model: scenario1, $x_r=160$ m.

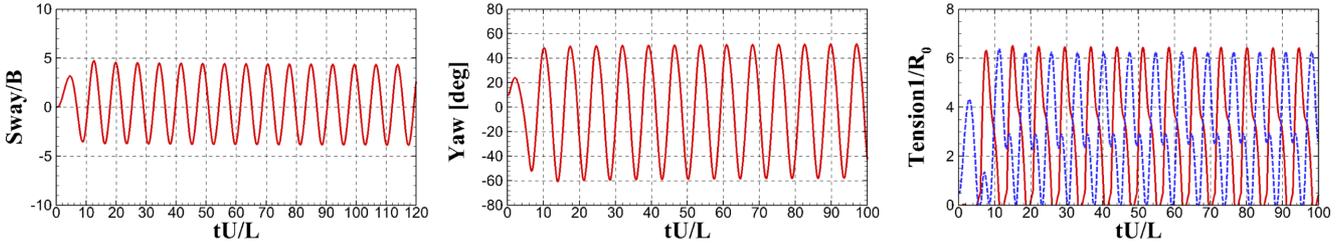


Fig. 11. Towing simulation results: scenario2, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $Y_T=600$ m.

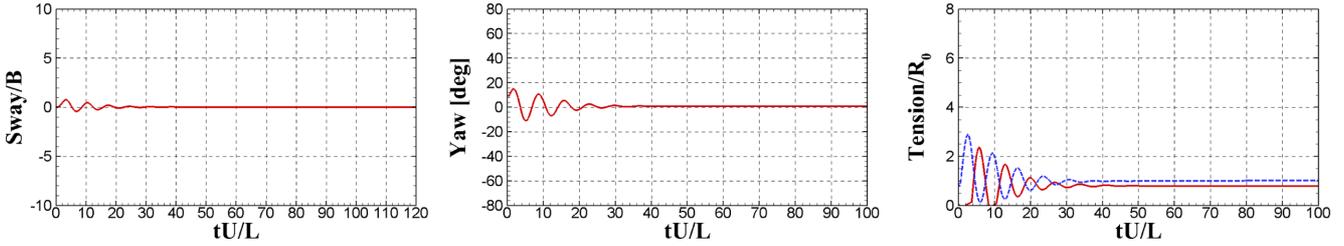


Fig. 12. Towing simulation results: scenario2, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $Y_T=1200$ m.

이는 앞서 언급한 바와 같이 MMG 모델의 대변위 운동에서의 오차, 횡유동 모델의 각속도 관련 계수의 부정확성에서 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 $x_T=160$ m로 고정하고 L_T 를 바꿔가면서 좌우동요, 선수동요, 예인삭 장력의 최대값의 및 진동주기의 변화 양상을 살펴보았다. 예인삭의 길이가 길어 짐에 따라서 좌우동요 및 진동주기는 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 예인삭의 장력은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 두 수치모델은 크기는 다르지만 변화양상은 동일한 경향을 보여주는 것을 알 수 있다.

3.1.3. 다른 시나리오에서의 예인 결과 비교

다음으로 예인 시나리오 2(Fig. 6참고)에 대해서 시뮬레이션을

수행하였다. 예인 시나리오 2는 두대의 예인선이 앞쪽에서 예인하는 경우이며, 두 예인선 간의 거리 Y_T 가 추가적인 변수로 사용된다. Fig. 11, 12는 각각 Y_T 가 600 m인 경우와 1200 m인 경우에 대한 예인 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, Y_T 의 거리가 큰 경우 안정적으로 예인이 가능함을 알 수 있다.

다음으로 예인 시나리오 3(Fig. 6참고)에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 예인 시나리오 3는 두대의 예인선이 앞쪽에서 끌어주며, 한 대의 예인선은 뒤쪽에서 당기는 형태로 부선을 예인한다. 시나리오 2에서 뒤쪽에 추가적인 예인선을 배치하면서 예인 안정성을 높이고자 하는 경우이다. Fig. 13은 시나리오 2의 결과이며, $Y_T=1000$ m인 경우이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 큰 폭으로 진동하면서 불안정하게 예인되는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 14는 부선 뒤쪽에

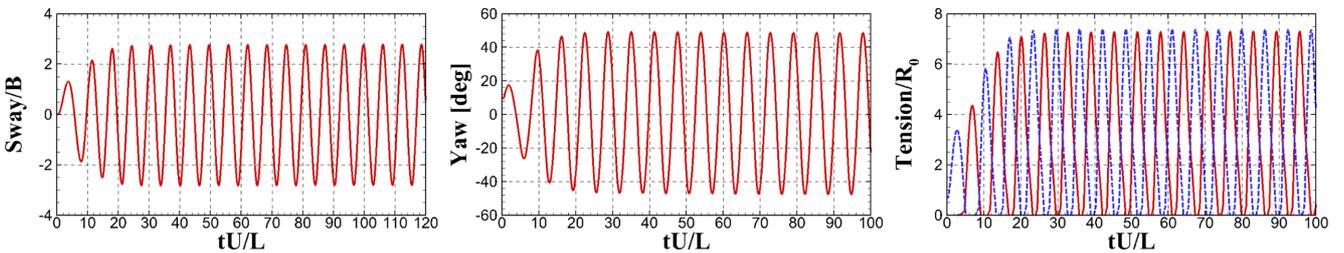


Fig. 13. Towing simulation results: scenario2, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $Y_T=1000$ m.

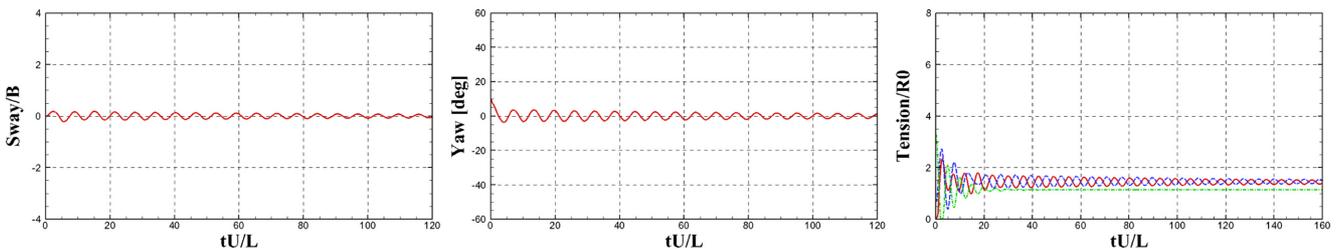


Fig. 14. Towing simulation results: scenario3, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $L_{T2}=350$ m, $Y_T=1000$ m.

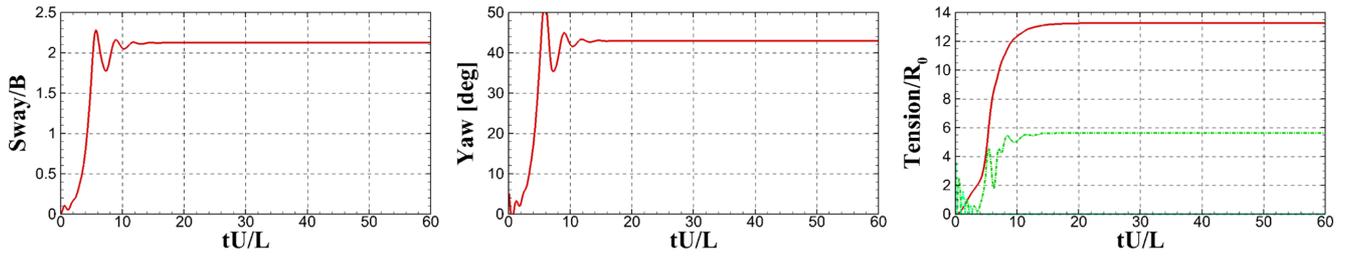


Fig. 15. Towing simulation results: scenario4, 2 pusher, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $x_{T2}=-150$ m.

예인선을 추가 배치하여 예인하는 경우이며, 불안정한 하던 예인이 안정적으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 예인선을 어떠한 위치에 어떻게 배치 하나에 따라서 예인 안정성은 얼마든지 바뀔 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로 예인 시나리오 4(Fig. 6참고)에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 예인 시나리오 4는 앞쪽에 한 대의 예인선이 끌여주며, 양 옆에서 두대의 푸셔가 밀어주는 형태이다. 두대의 푸셔는 선미 부근($x_{T2}=-150$ m)에서 밀어준다고 가정하였으며, 초기 압축력은 57 kN이다. Fig. 15는 두대의 푸셔를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이며, 안정적인 예인이 되지 못하고 다른 위치에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 수렴된 범위는 푸셔 바깥쪽으로 수치적으로만 계산된 결과이며, 실제로는 수렴할 수 없는 곳이다. 푸셔의 초기 압축력을 변경하여도 결과는 마찬가지이며, 푸셔 두대를 선미 쪽에 배치해서는 안정적인 예인이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 Fig. 16과 같이 두가지 방법을

적용하였으며, 첫 번째는 푸셔의 위치를 선수 쪽으로 이동하는 것이며, 두 번째는 푸셔의 대수를 증가시키는 것이다. Fig. 17, 18은 각각 첫 번째 방법(푸셔 2대, 선수쪽으로 이동)과 두 번째 방법(푸셔 4대 사용)을 적용한 결과이다. 두 가지 방법 모두 푸셔의 초기 압축력은 57kN으로 설정하였으며, 안정적인 예인이 가능한 것을 알 수 있다. 다만 2대의 푸셔를 사용하였을 때는 수렴된 좌우동요, 선수동요 값이 0이 아니며, 우현의 푸셔에 다소 큰 압축력이 지속적으로 가해지는 것을 알 수 있다. 반면, 4대의 푸셔를 사용하면 좌우동요, 선수동요가 0에서 수렴하며, 안정적인 예인이 가능함을 알 수 있다. 이와 같이 푸셔의 대수 및 위치를 신중히 결정하는 것이 필요하다.

Fig. 18에서는 MMG 모델과 횡유동 모델의 결과가 모두 포함되어 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 부선이 안정적으로 예인되는 지에 대한 판단은 두 모델 모두 동일하게 나타나며, 부선이 안정적으로 예인되는 경우 MMG모델과 횡유동 모델의 결과 차이가 거의

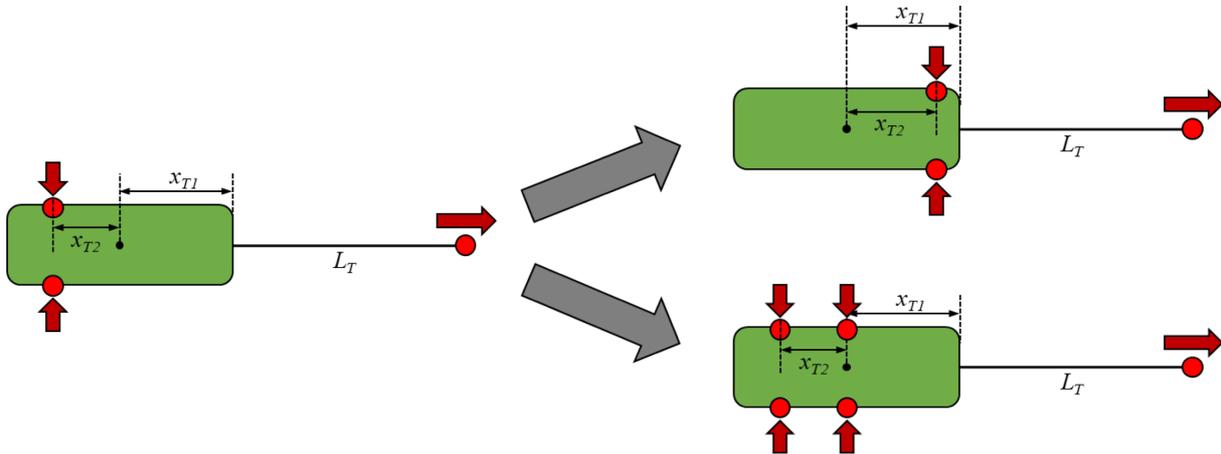


Fig. 16. Change of pusher configuration.

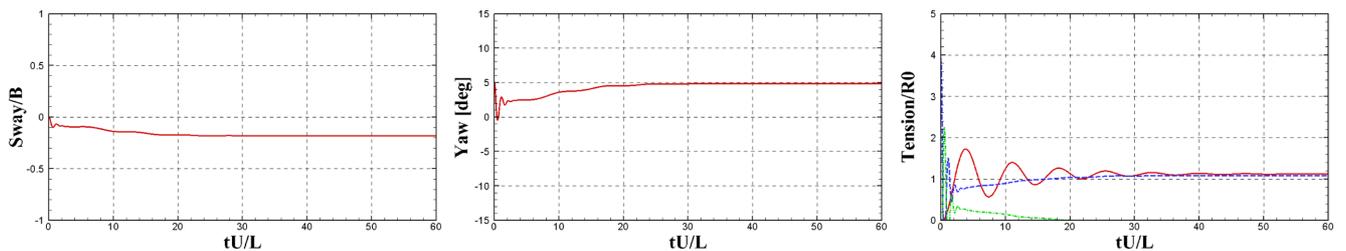


Fig. 17. Towing simulation results: scenario4, 2 pusher, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $x_{T2}=150$ m.

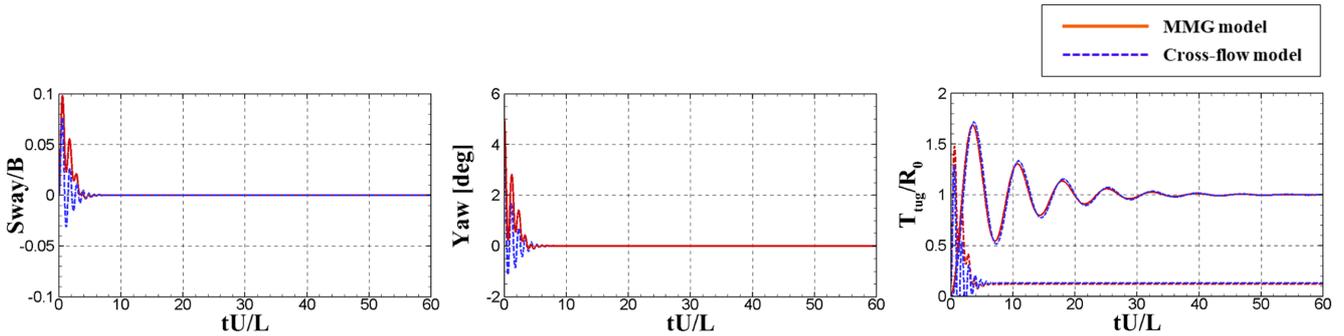


Fig. 18. Towing simulation results: scenario4, 4 pusher, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $x_{T2}=-150$ m, 0 m.

없는 것을 알 수 있다. 따라서 빠른 판단이 필요한 긴급 구난 상황에서는 MMG 모델에 비해서 적용이 간단한 횡유동 모델을 실용적인 관점에서 사용할 수 있을 것으로 생각되며, 비상 예인 조건 및 방법을 결정하는 모델로 활용 가능할 것으로 생각된다.

3.2 손상상태에서의 예인 시뮬레이션

손상상태에서의 예인 시뮬레이션을 수행하기 위해서 손상상태를 가정해야 한다. 선박의 손상상태는 다양한 형태로 나타나지만 본 연구에서는 선박 손상으로 인해서 횡경사 각도가 5도 정도 발생하였다고 가정하였으며, 이로 인한 예인 안정성이 어떻게 달라지는지를 확인하였다. 선박의 사고로 인해서 횡경사가 더 크게 발생하는 경우도 있지만, 횡경사가 아주 크게 발생한 경우에는 그대로 예인을 하는 것이 아니라 발라스팅 작업을 통해서 횡경사를 줄이는 작업을 수행하게 된다. 따라서 예인을 할 수 있으며, 횡경사에 의한

영향을 확인할 수 있는 각도가 5도 정도라고 가정하였으며, 이 값을 적용하였다. 횡경사 각도로 인한 조류하중 계수 및 유체력 미계수의 변화는 앞의 2.3장에서 살펴보았으며, 이를 활용하여 예인 시뮬레이션을 수행하였다. 즉 횡유동 모델을 적용하여 손상상태의 선체 유체력 변화를 추정하는 방식을 적용하였다. MMG 모델에서 횡경사 각도에 따른 유체력 미계수 값을 도출하기 위해서는 상당히 많은 양의 모형 시험 혹은 CFD 해석(static drift test, PMM test or CMT test)이 필요하다. 반면 횡유동 모델에서는 횡경사 상태에서의 조류력(static drift test)만을 모형시험 혹은 CFD 해석을 통해서 도출하면 시뮬레이션이 가능하다.

먼저 시나리오 1에 대해서 비손상상태(w/o heel)와 손상상태(heel 5deg)에서의 예인 시뮬레이션을 수행하였으며, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m 인 조건이다. 아래의 그림에서 확인할 수 있듯이, 두 상태 모두 부선이 불안정하게 예인 된다. 다만, 손상상태에서는 좌우동요 및 선

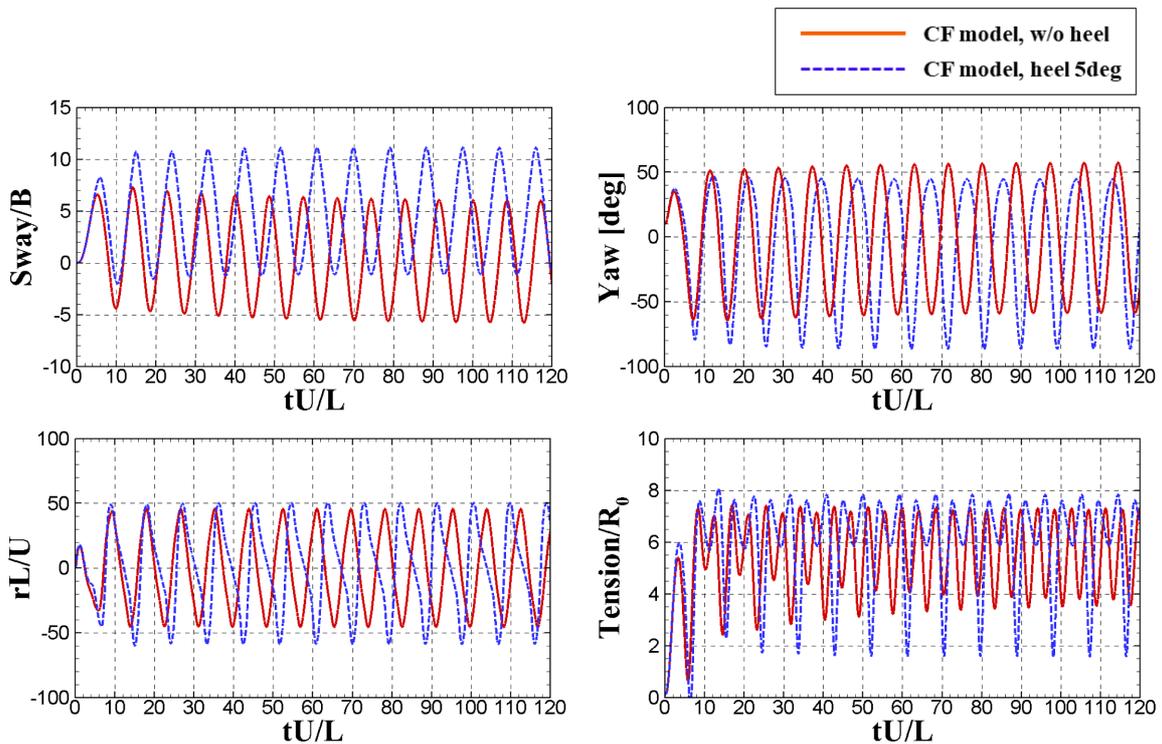


Fig. 19. Comparison of towing simulation results for heel angle: scenario1, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m.

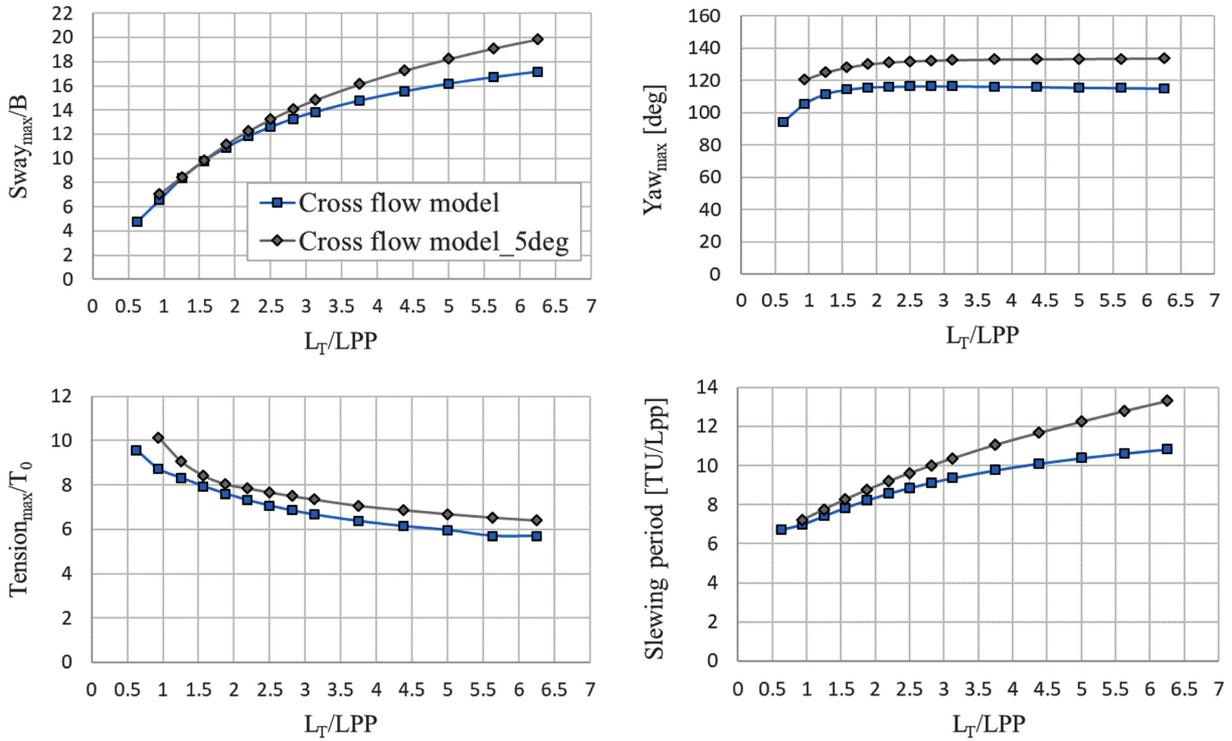


Fig. 20. Towing parameter according to L_T , hull model and heel angle: scenario1, $x_T=160$ m.

수동요가 0인 지점을 중심으로 발생하는 것이 아니라 한쪽으로 밀린 상태에서 동요가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 손상상태에서는 양의 횡경사 각도로 인해서 좌현쪽으로 밀리는 비대칭 힘이 발생하기 때문인 것으로 생각되며, 이로 인해서 예인삭 장력의 최대값 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 20은 $x_T=160$ m로 고정하고 L_T 를 바꿔가면서 좌우동요, 선수 동요의 진동 폭, 예인삭 장력의 최대값의 및 진동주기의 변화 양상을 살펴보았다. 각각의 그림은 비손상상태의 횡유동 모델, 손상상태의 횡유동 모델 결과가 포함되어 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 예인삭의 길이가 길어짐에 따라서 좌우동요 및 진동주기는 증

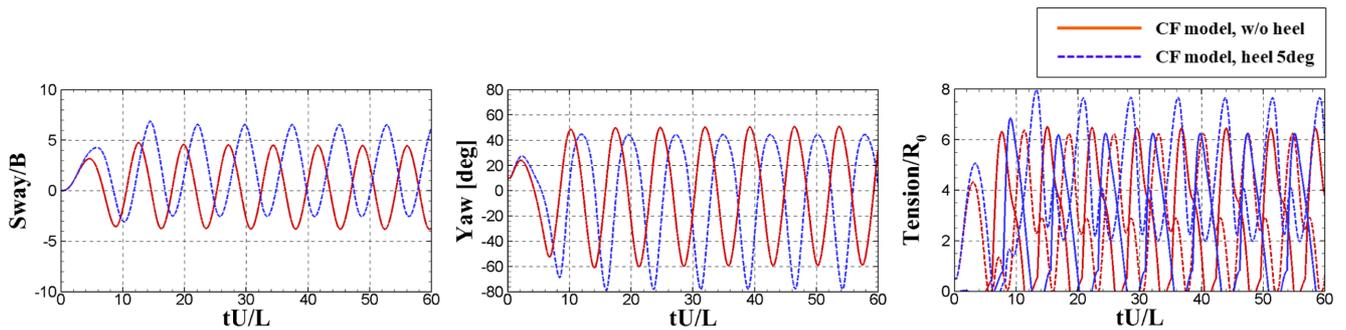


Fig. 21. Towing simulation results: scenario2, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $Y_T=600$ m.

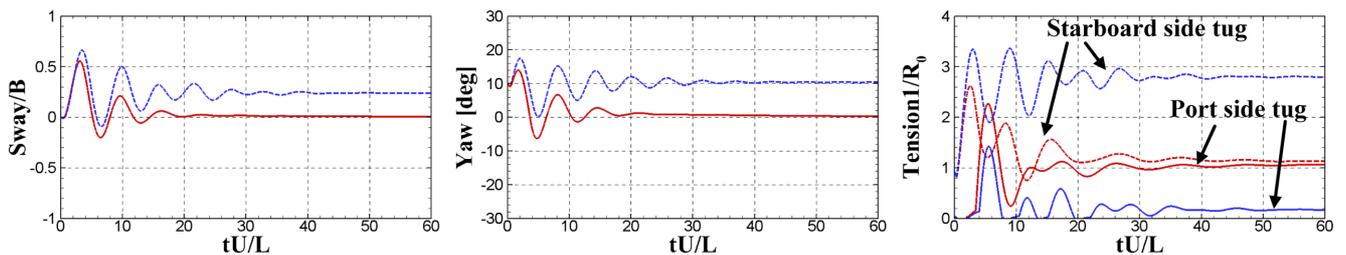


Fig. 22. Towing simulation results: scenario2, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $Y_T=1200$ m.

가하는 경향을 보여주고 있으며, 예인선의 최대 장력은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 비손상상태와 손상상태를 비교해 보면, 손상상태에서의 운동의 크기, 장력 및 진동주기 모두 증가하였으며, 이는 선박의 손상으로 인해서 횡경사 각도가 생기면 예인 안정성이 나빠진다는 것을 의미한다.

다음으로 예인 시나리오 2(Fig. 6참고)에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 예인 시나리오 2는 두대의 예인선이 앞쪽에서 예인하는 경우이며, 두 예인선 간의 거리 Y_T 가 추가적인 변수로 사용된다. Fig. 21, 22는 각각 Y_T 가 600 m인 경우와 1200 m인 경우에 대한 예인 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, Y_T 의 거리가 큰 경우 수렴된 영역에서 안정적으로 예인이 가능함을 알 수 있다. 다만 손상상태에서는 Y_T 의 거리가 큰 경우에서도 수렴된 위치가 원점(sway=0, yaw=0)이 아닌 다른 점(sway=0.25B, yaw=10deg)이며, 표류각을 가진 상태로 예인 되는 것을 알 수 있다. 선박이 비스듬하게 예인됨으로 인해서 예인선의 전체 장력은 증가하며, 특히 우현에 위치한 예인선의 장력이 다소 크게 발생한다. 즉 손상선박은 안정적인 예인(운동이 진동하지 않고 수렴한 상태)이 가능한 조건은 동일하다고 하더라도, 수렴된 상태가 다르게 나타날 수 있다. 대개는 횡경사 각도로 인한 비대칭력이 발생함으로 인해서 비스듬한 상태로

예인이 되며, 비손상상태에 비해서 예인력이 증가하는 경향을 보인다.

두 예인선의 거리에 대한 예인 안정성의 변화를 확인하기 위해서 Y_T 를 변화시켜 가면서 sway_{max}, yaw_{max} 및 Tension_{max}의 변화를 살펴보았다. Fig. 23에서 보는 바와 같이 Y_T 가 커짐에 따라서 좌우동요 및 선수동요의 진동폭이 줄어들며, 일정거리(1200 m)이상 떨어진 경우 진동하지 않고 안정적으로 예인이 됨을 확인하였다. 비손상상태와 손상상태에 따라서 안정적으로 예인 되는 구간이 다소 달라짐을 알 수 있으며, 손상상태에서는 안정적으로 예인이 된 후에도 Tension_{max}값이 다소 크게 나타난다. 시나리오 2와 같이 예인하는 경우 두 예인선의 거리 또한 중요한 변수로 고려해야 한다.

마지막으로 예인 시나리오 4(Fig. 6참고)에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 안정적인 예인을 위해서는 4대의 푸셔가 필요하며, 4대의 푸셔를 동일한 조건으로 사용해서 비손상상태와 손상상태의 결과를 비교하였다. Fig. 24에서 확인할 수 있듯이, 비손상상태 뿐만 아니라 손상상태에서도 수렴되며, 안정적인 예인이 가능함을 알 수 있다. 다만 손상상태에서는 수렴된 위치가 원점에서 약간 벗어난 위치이며, 이로 인해서 예인선의 장력이 미소하게 줄어들었으며, 4대의 푸셔의 압축력이 위치에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있다.

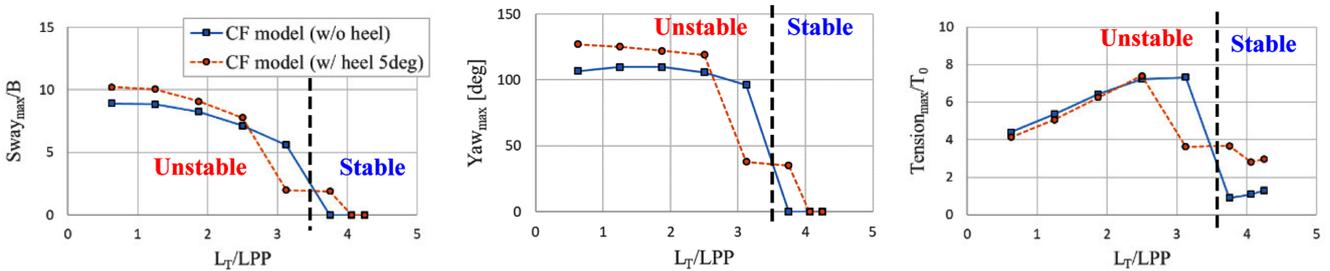


Fig. 23. Towing parameter according to Y_T and heel angle: scenario2, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m.

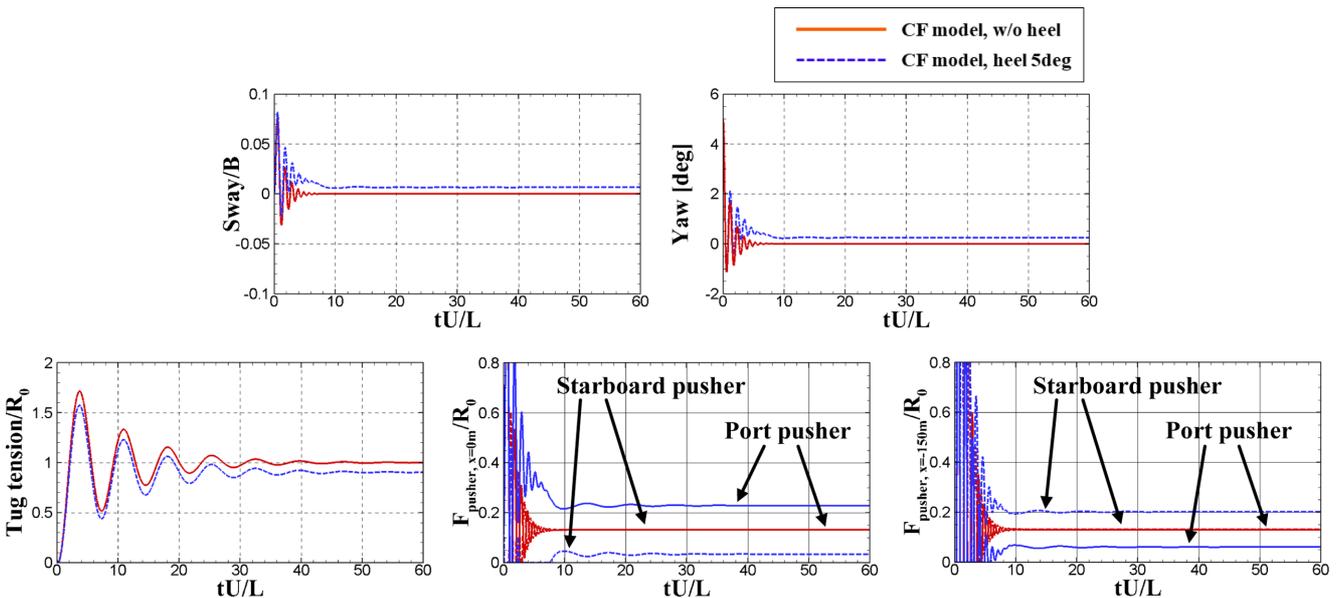


Fig. 24. Towing simulation results for heel angle: scenario4, 4 pusher, $x_T=160$ m, $L_T=700$ m, $x_{T2}=-150$ m, 0 m.

4. 결 론

본 연구에서는 손상선박의 예인 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 위해서 선박의 동적운동을 해석할 수 있는 KIMAPS 프로그램을 활용하였다. 수평면의 3자유도 운동을 적용하였으며, 부선 선체에 가해지는 유체력을 모사하기 위해서 MMG 모델과 횡유동 모델을 도입하였다. 선박의 손상상태는 다양한 형태로 나타나지만 본 연구에서는 선박 손상으로 인해서 횡경사 각도가 발생하였다고 가정하였으며, 이로 인한 예인 안정성이 어떻게 달라지는지를 확인하였다. 비손상상태(w/o heel) 및 손상상태(heel 5deg)에서의 조류하중을 상용 CFD 프로그램을 사용하여 해석하였으며, 계산된 조류하중 값을 예인 시뮬레이션에 적용하였다. 본 연구를 통해서 확인한 바는 다음과 같다.

- KVLCC2 선형은 하나의 예인선으로 예인하는 경우, 예인선의 길이가 배의 길이보다 긴 영역에서는 안정적으로 예인이 불가능하며, 안정적인 예인을 위해서는 예인선 혹은 푸셔가 추가적으로 필요함을 확인함.
- 예인선의 축강성이 커질수록, 예인 속도가 작아질수록 불안정하게 예인 되는 부선의 좌우동요, 선수동요의 크기는 작아지며, 예인선의 최대장력은 증가함. 즉 예인 안정성이 증가함을 확인함.
- 단일 예인선에 의한 예인(one line towing)에서는 예인선의 길이가 짧아질수록, 두개의 예인선에 의한 예인(two line towing)에서는 두 예인선의 거리가 멀어질수록 안정성이 증가함. 또한 푸셔의 위치는 선수쪽에 위치하는 것이 좋으며, 푸셔의 대수가 증가할수록 안정적인 예인이 가능함. 따라서 안정적인 예인 조건을 찾기 위해서는 다양한 조건(예인선 및 푸셔의 대수, 배치, 초기 인장력 및 압축력 등)을 고려하는 것이 필요함.
- 선박의 손상으로 인해서 횡경사 각도가 발생하였다고 가정하였으며, 횡경사 각도로 인해서 좌우동요(sway), 선수동요(yaw) 방향 비대칭 유체력이 발생함. 이로 인해서 좌우동요 및 선수동요가 0이 아닌 지점에서 진동하며, 부선의 불안정한 운동 진폭 및 최대 장력이 증가하는 경향을 보임.
- 부선의 운동 모델은 MMG 모델과 횡유동 모델을 적용하였으며, 두 모델이 불안정한상황에서의 운동 진폭 및 진동주기에서 다소 차이는 있었지만 경향은 거의 동일하였음. 또한 안전한 예인이 가능할지에 대한 판단 및 안전한 예인시의 예인 특성은 유사한 값을 보임. 따라서 빠른 판단이 필요한 긴급구난 상황에서는 MMG 모델에 비해서 적용이 간단한 횡유동 모델을 실용적인 관점에서 사용할 수 있으며, 비상 예인 조건 및 방법을 결정하는 톨로 활용 가능할 것으로 생각됨.

후 기

본 연구는 해양경찰청의 국가연구개발사업인 “해양오염방지 긴급구난 의사결정 지원기술 개발(PMS4600)” 및 산업통상자원부의 국가연구개발사업인 “해저 및 해상생산플랜트 설치설계 핵심기술

개발(PNS2490)”에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] e-Korea Indicator (e-나라지표), Current status of maritime accidents by year, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1770, 2020 (accessed 2020.12.03).
- [2] Ha, J.S., 2018, Development of 3DOF Dynamic Model for Maneuverability Assessment of Damaged Surface Combatant, M.S. thesis, Dept. Naval Architecture Ocean Eng., Seoul National University, Seoul, Korea.
- [3] Hong, S.Y., Nam, B.W., Ha, Y.J. and Hong, S.W., 2018, Fully Coupled Analysis of an Offshore Deck Mating Operation of a Large Topside Module, *Int. J. Offshore Polar Eng.*, 28(1), 40-45.
- [4] Koop, A., 2019, CFD Modeling Practice: FPSO Current Load and Low-frequency Damping, JIP on Reproducible CFD Modeling Practices for Offshore Applications.
- [5] Kim, Y.G., Yeo, D.J., Son, N.S., Kim, S.Y., Yun, K.H. and Oh, B.I., 2011, Prediction of Maneuverability of KCS with 4 Degrees of Freedom, *J. Soc. Naval Architects Korea*, 48(3), 267-274.
- [6] Latorre R., 1998, Scale Effect in Towed Barge Course Stability Tests, *Ocean Eng.*, 15(4), 305-317.
- [7] Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, J.H., Choi, S.K. and Kim, J.W., 2014, Experimental and Numerical Study on Towing Stability of Transportation Barge, *J. Ocean Eng. Technol.*, 28(2), 102-110.
- [8] Nam, B.W., Park, J.Y., Hong, S.Y., Sung, H.G. and Kim, J.W., 2013, Numerical Simulation of Towing Stability of Barges in Calm Water, *J. Ocean Eng. Technol.*, 27(1), 67-73.
- [9] OCIMF, 1994, Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs, Witherby & Co., Ltd., London.
- [10] OrcaFLEX Manual, Rop/Wire: Axial and bending stiffness, <https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Default.htm>, 2020, (accessed 2020.12.03).
- [11] Wichers, J.E.W., 1988, A Simulation Model for a Single Point Moored Tanker. MARIN Publication, 797.
- [12] Yasukawa, H., Hiritaka, H., Nakamura, N. and Matsumoto, Y., 2006, Simulation of Slewing Motion of a Towed Ship, *J. Japan Soc. Naval Architects Ocean Eng.*, 4, 137-146.
- [13] Yasukawa, H. and Yoshimura Y., 2015, Introduction of MMG Standard Method for Ship Maneuvering Predictions, *J. Mar. Sci. Technol.*, 20, 37-52.
- [14] Xu, W., Huang, Z. and Kim, H., 2019, Thorough Verification and Validation of CFD Prediction of FPSO Current Load for Confident Applications, in proc. of OMAE2019, Glasgow, Scotland, UK.

Received 15 December 2020

1st Revised 2 February 2021, 2nd Revised 17 February 2021

Accepted 18 February 2021