

병렬 배치된 두 선박에 작용하는 조류 하중 특성에 관한 수치해석 연구

송성진[†]

선박해양플랜트연구소 친환경해양개발연구본부 연수연구원

Numerical Study of Current Loads Acting on Two Vessels in Side-by-side Configurations

Seongjin Song[†]

Postdoctoral researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, 34103, Korea

요 약

병렬 배치된 두 선박에 작용하는 환경 하중을 예측하는 것은 안전한 LNG 병커링 작업을 수행하기 위한 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 CFD를 이용하여 LNG 병커링 선박에 대한 조류 하중을 연구하였다. LNG 병커링 선박이 대상선박과 병렬 배치되어 있을 때 조류 하중을 예측하였고, 단독 상태에서의 조류 하중 예측 결과와 비교하였다. 수치 모델과 격자 생성은 국제공동연구의 CFD 모델링 사례 및 가이드를 참고하였다. 수치 모델과 격자 시스템을 검증하기 위해 KVLCC의 조류 하중 계수를 계산하여 기존 실험 및 OCIMF 데이터와 비교하였다. 해석 결과는 실험 및 OCIMF 데이터와 대체로 일치하였다. 격자 이산화에 따른 민감도를 분석하기 위해, 유입 흐름 각도 90°와 180°에 대해 Y 방향과 X 방향 하중 계수를 각각 계산하여 가장 조밀한 격자에 대한 불확실성을 GCI(grid convergence index) 방법으로 확인하였다. 검증된 수치모델을 이용하여 병렬 배치된 조건의 두 선박에 대한 조류 하중을 예측하였다. 두 선박이 병렬 배치되었을 때 차폐효과가 발생하며, 두 선박의 흘수가 같은 조건에서 차폐효과가 상당히 감소하는 것을 확인하였다.

Abstract – Predicting the environmental loads acting on two vessels placed in side-by-side is an essential factor for conducting safe LNG bunkering operations. In this study, current loads on a LNG bunkering vessel were studied using Computational Fluid Dynamics (CFD). The current loads were predicted when the LNG bunkering vessel was arranged in parallel with the target vessel, and the results were compared with the current load prediction when they were placed alone. The numerical model and grid generation were based on CFD modeling practices and guides from the Reproducible Offshore CFD Joint Industry Project (JIP). To validate the numerical model and grid system, the current load coefficients of KVLCC were calculated and compared with the existing experimental and OCIMF data. The simulation results were in good agreement with the experimental and OCIMF data. To analyze the sensitivity of the grid discretization, the load coefficients in the Y and X directions were calculated for the inlet flow angles of 90° and 180°, respectively, and the uncertainty for the densest grid was determined by the grid convergence index (GCI) method. The validated numerical model was applied to predict the current loads on the two vessels in the side-by-side configuration. It was found that the shielding effect occurs when the two vessels are placed in side-by-side, and the shielding effect is significantly reduced when the two vessels have the same draft.

Keywords: Computational fluid dynamics(전산유체역학), Current loads(조류 하중), Side-by-side configuration(병렬 배치), Shield effect(차폐효과), LNG bunkering(LNG 병커링)

[†]Corresponding author: ssong@kriso.re.kr

1. 서 론

환경오염으로 인한 기후 변화로 IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)가 황산화물 및 질소산화물 배출에 대한 엄격한 규제를 강화하고 있다(Jung[2011]). 이에 따라 LNG(Liquefied natural gas, 액화천연가스)를 해상 연료로 사용하는 LNG 추진 선박의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 전 세계적으로 병커링 인프라 구축 및 확장이 필요하다(ABS[2015]). 특히, STS(Ship-to-Ship, 선박 대 선박) 병커링은 지역적 제한 없이 많은 병커링 물량과 우수한 접근성을 제공하고, 선적작업과 LNG 병커링의 동시작업(Simultaneous Operations, SIMOPS)이 가능한 장점이 있어 선호된다. 따라서 STS 방법을 이용한 LNG 병커링의 관심이 증가되고 있으며 이에 대한 안전하고 효율적인 운영에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(EMSA[2018]).

STS 병커링 작업 등과 같이 두 선박이 병렬 계류 형태를 유지할 때 상당한 차폐효과(Shield effect) 또는 유체 역학적 상호작용 현상이 나타난다(Yuck *et al.*[2007]). 차폐효과로 인해 다른 선박의 후류 영역에 있는 선박에 작용하는 하중은 단독 상태일 때와 비교하여 현저히 감소할 수 있다. 심지어 힘의 방향이 바뀌어 상류 방향으로 힘이 작용하여 두 선박이 충돌하는 상황이 발생하게 된다. 따라서, STS 병커링을 위한 계류 시스템 설계 시 두 선박에 작용하는 바람, 조류, 파랑과 같은 환경하중을 정확히 예측하는 것이 중요하다. 일반적으로, 바람과 조류 하중을 측정하기 위해 예인 탱크와 풍동을 이용한 모형실험을 수행하고 있다(Park *et al.*[2017]; Hong *et al.*[2002]; Hwang *et al.*[2016]). 설계 단계에서 간단하고 널리 사용되는 하중 추정 방법은 경험적 계수를 사용하는 것이다(OCIMF[1994]). OCIMF(Oil Companies International Marine Forum, 국제정유사해운포럼) 경험식은 일반적인 유조선 모양의 선체에 대한 실험 데이터를 기반으로 한다. 그러나 선체 모양이 최근 건조된 선박과는 다르며, 병렬 배치된 두 선박에 단독 상태의 조류 하중 계수를 적용하는 것은 제한이 있다(Yuck *et al.*[2005]; Yuck *et al.*[2007]).

최근 컴퓨팅 성능과 수치 기법의 발전으로 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)를 이용한 하중 추정 방법이 고려되고 있다(Park *et al.*[2011]; Song and Park[2017]; Yuck *et al.* [2005]). Yuck *et al.*[2005]은 FLUENT를 활용하여 KVLCC(KRISO Very Large Crude-oil Carrier), shuttle tanker, FPSO(Floating Production Storage and Offloading)의 세 가지 선형에 대한 조류 하중을 계산하고, 이를 예인 시험 및 OCIMF 데이터와 비교하였다. KVLCC의 해석 결과는 모형실험 및 OCIMF 데이터와 잘 일치하는 결과를 나타내지만, shuttle tanker와 FPSO의 해석 결과는 OCIMF 데이터와 분명한 차이를 보여주었다. Fathi *et al.*[2010]은 CFX와 MARINE의 in-house CFD 코드인 ReFresco를 이용하여 LNG carrier에 대한 조류 하중을 계산

하여 모형실험 데이터와 비교하였다. 다양한 격자 시스템과 수치 모델에 대한 해석 결과를 비교하면서 조류 하중을 추정하기 위한 점성 기반 CFD 해석 기법의 적용 가능성을 확인하였다. Koop[2015]은 Fathi *et al.*[2010]의 연구를 친해 영역으로 확장하여 다양한 수심 조건에서 LNG carrier에 작용하는 조류 하중을 해석하고 모형실험 데이터와 비교하였다. Hwang *et al.*[2016]은 STAR-CCM+을 이용하여 FPSO에 작용하는 조류 하중을 해석하고, 이를 풍동 실험과 해양공학수조 실험 데이터와 비교하였다. 최근 국제공동연구를 통해 조류 하중 해석을 위한 실용적인 CFD 모델링 사례를 통합하는 연구가 수행되었다(Koop *et al.*[2020]; Teng *et al.*[2019]; Xu *et al.*[2019]). 국제공동연구를 통해 계산 비용과 정확도 관점에서 효율적인 방식으로 선박 조류 하중을 추정하는 CFD 모델링 사례를 제시하였다.

병렬 배치된 두 선박에 작용하는 조류 하중을 평가하기 위한 CFD 연구도 수행되었다(Koop[2020]). Koop[2020]은 CFD를 이용하여 비슷한 크기의 두 선박이 병렬 배치되었을 때 조류 하중에 대한 차폐효과를 분석하였다. 해석 결과는 모형실험 데이터와 비교하여 수치 모델을 검증하였다. 선박 크기가 비슷할 때 흘수가 상대적으로 작은 선박이 다른 선박의 후류에 있을 때 차폐효과로 인한 흐름의 반대 방향 힘이 작용하였다. 반면에, 흘수가 상대적으로 큰 선박이 다른 선박의 후류에 있을 때 차폐효과가 상대적으로 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 이러한 조류 하중 특성은 선박의 길이와 흘수 그리고 선형에 따라 차폐효과와 유체역학적 상호작용은 다르게 작용할 것이다(Koop[2020]).

최근 개발되고 있는 친환경 연료 병커링 전용 선박은 그 크기가 친환경 연료 추진 선박에 비해 상대적으로 작은 실정이다. 따라서, 두 선박의 상대적인 길이와 흘수 그리고 상대 위치 등의 상대적인 배치 특성을 고려한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 LNG 병커링 선박이 대상 선박과 병렬 배치되어 있을 때, 선박 길이와 흘수 차이에 대한 조류 하중 특성을 CFD를 이용하여 해석하였다. 수치 해석을 위해 KVLCC, LNG 병커링 선박, 5k 급 LNG 추진 선박을 고려하였다. 수치 모델 설정 및 격자 생성을 위해 CFD 국제공동연구에서 제시한 CFD 모델링 사례를 적용하였다. 수치 모델 검증을 위해 KVLCC 단독 상태의 조류 하중 해석 결과를 모형실험 및 OCIMF 데이터와 비교하였다. 검증된 수치모델을 적용하여 LNG 병커링 선박과 5k LNG 추진선박에 대한 단독 상태에서의 조류 하중을 예측하고, 병렬 배치 상태의 두 선박에 대한 조류 하중 예측 결과와 비교하였다.

2. 계산 방법

2.1 기호 규칙 및 정의

Fig. 1에 표시된 것처럼 단독 상태의 경우 기호 규칙은

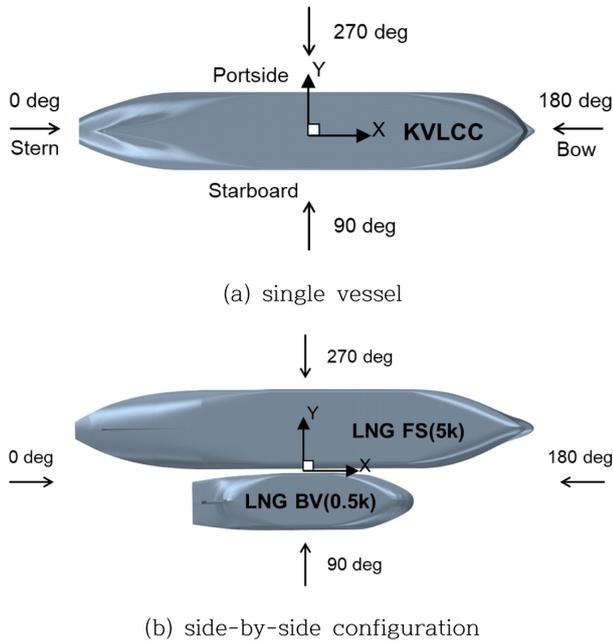


Fig. 1. Sign convention for current loads (Top view).

OCIMF 규칙에 따라 채택되었다. X축은 선수를 향하고, Y축은 좌현을 향하며, Z축은 중력 반대 방향으로 향한다. 180°는 선수파, 90°와 270°는 횡파, 0°는 선미파에 해당한다. 병렬 배치된 구성의 경우 LNG 병커링 선박(LNG BV)이 90° 횡파 조건에서 LNG 추진 선박(LNG FS)의 상류에 있고, 270° 횡파 조건에서 LNG 추진 선박의 후류에 있다. 각 방향에 대한 조류 하중 계수는 OCIMF의 정의를 따른다.

$$C_{X,Y} = \frac{F_{X,Y}}{0.5\rho U_{ref}^2 L_{pp} T}, C_M = \frac{M_Z}{0.5\rho U_{ref}^2 L_{pp}^2 T} \quad (1)$$

여기서 $F_{X,Y}$ = X, Y 방향 조류 하중

M_Z = Z축에 대한 모멘트

U_{ref} = 조류 속도

L_{pp} = 선박 길이

T = 선박 흘수

2.2 수치 모델

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+ ver 15.04를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 3차원 정상상태 비압축성 점성 유동에 대한 수치해석을 위해 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 지배 방정식으로 적용하였다. 대류항 이산화를 위해 2차 정도를 가지는 상류 차분법을 사용하였으며, 확산항은 2차 정도를 가지는 중심 차분 기법을 사용하였다. 경계층 영역에 대한 개선된 결과를 얻기 위해 SST k- ω 난류 모델을 사용하였다(Menter[1993]). 난류 모델의 벽면 처리는 all y+ 조건을 적용하였으며, 벽면 근처 유동을 직접 계산하여 경계층을 모사하기 위해 평균 y+는 1보다 작게 설정하였다.

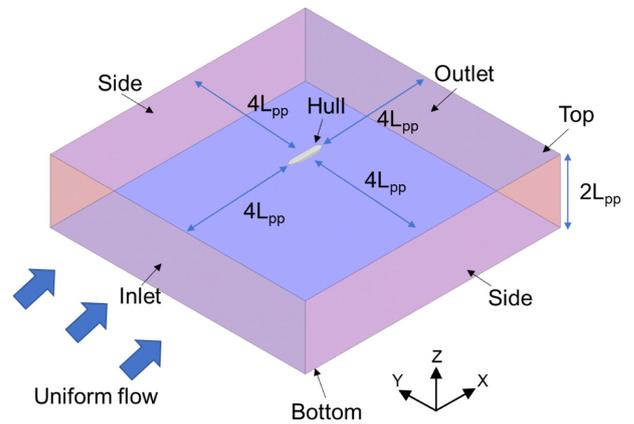


Fig. 2. Computational domain and boundary conditions.

Fig. 2는 직육면체 모양으로 구성된 계산 도메인을 보여준다. 계산 영역의 범위는 경계가 계산 결과에 미치는 영향을 피하고자 충분히 크게 선택하였다. 선박 중심에서 입구(Inlet), 출구(Outlet), 두 측면(Side) 경계면 사이의 거리는 모두 $4L_{pp}$ 로 설정하였다. 여기서 L_{pp} 는 선박 길이를 의미한다. 심해조건 시뮬레이션을 위해 바닥 경계면과 상단 경계면 사이의 거리는 $2L_{pp}$ 로 설정하였다. 병렬 배치된 두 선박에 대한 해석의 경우 계산 영역 길이는 L_{pp} 를 더 긴 선박을 기준으로 한다. 유입 흐름 방향을 고려하기 위해 원거리 경계(Inlet, Outlet, Side)면에는 velocity inlet 조건을 설정하였다. Velocity inlet 경계 조건의 경우 θ 는 유입 흐름 방향과 같고, 속도는 $U = U_{ref}[\cos\theta, \sin\theta, 0]$ 으로 균일한 흐름 속도를 지정하였다. 선체 표면에는 no-slip 벽 조건, 바닥 경계면과 상단 경계면에는 symmetry 조건을 설정하였다. 본 해석에서 고려되는 프루드수는 0.067(KVLCC)에서 0.179(0.5k LNG BV)의 범위에 해당하고, 0.2 보다 낮으므로 자유수면 효과는 크지 않은 것으로 고려하였다. 따라서, 상단 경계에 적용된 symmetry 조건은 자유 수면 효과 및 파고 상승이 무시되었음을 의미한다.

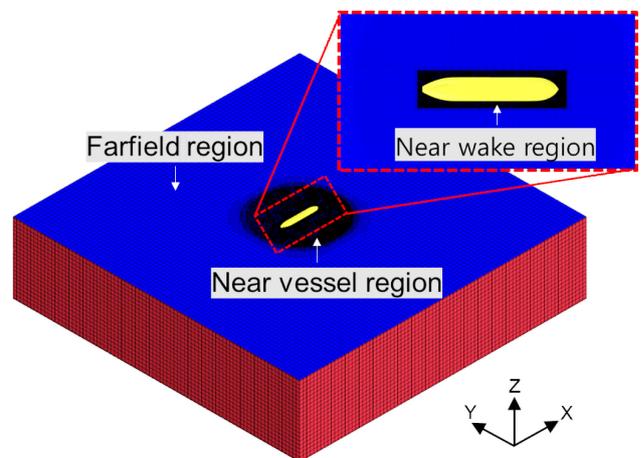


Fig. 3. Illustration of mesh distribution in the computational domain.

Table 1. Main parameters from the simulation for single and side-by-side configurations

Parameters	KVLCC		0.5k LNG BV		5k LNG FS	
	Full	Model	Full	Model	Full	Model
Scale ratio λ [-]	1	60	1	60	1	60
Length L_{pp} [m]	320	5.33	45.65	1.14	91.2	2.28
Breadth B [m]	58	0.97	12.4	0.31	17	0.43
Draft T [m]	20.8	0.35	2.4	0.06	4.3	0.11
$Re_{L,pp}$	1×10^9	3×10^6	2×10^8	8×10^5	4×10^8	2×10^6
Re_B	2×10^8	5×10^5	5×10^7	2×10^5	7×10^7	3×10^5

Fig. 3은 단일 선박의 조류 하중 수치 해석을 위한 격자 생성을 보여준다. 선체 표면 격자 크기는 선체 흘수의 1~2%이며, 경계층 흐름을 모사하기 위해 prism layer 격자를 사용하였다. 후류 구조를 적절히 포착하기 위해 선박 근처(near-vessel), 후류 근처(near-wake), 원거리(far-field)의 총 세 가지 격자 세분화 영역을 적용하였다(Koop *et al.*[2020]). 선박 근처 영역의 격자 크기는 선체 흘수의 3~4% 사이로 선체 표면의 작은 격자에서 원거리 영역의 큰 격자로 부드럽게 전환되도록 설정하였다.

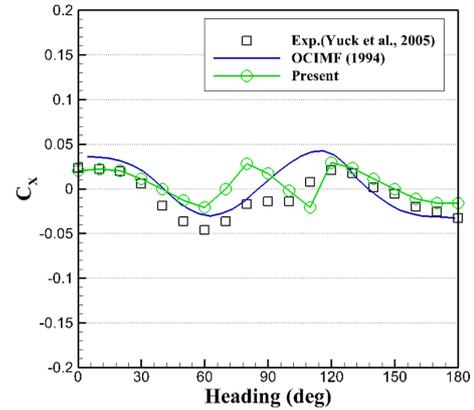
Table 1은 본 연구에서 사용된 선박 제원과 시뮬레이션 정보를 나타내었다. KVLCC 단독 상태에 대한 수치해석은 1/60 스케일로 수행하였다. 조류 속도는 0.49 m/s로 선박 길이 기준 레이놀즈수 $Re_{L,pp}=2.93 \times 10^6$, 선폭 기준 레이놀즈수 $Re_B=5.31 \times 10^5$ 에 해당한다. 시뮬레이션에는 총 780만 개의 격자가 사용되었다. 병렬 배치된 상태에 대한 수치 해석은 1/40 축척으로 수행되었다. 조류 속도는 0.6 m/s이며, $Re_{L,pp}$ 는 $8 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ 이고, Re_B 는 $2 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ 이다. 약 2천 7백만 개의 격자가 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

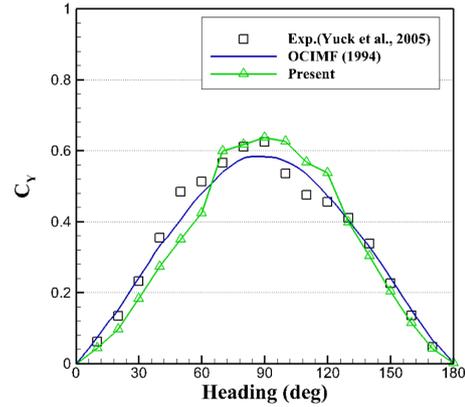
3.1 KVLCC 단독 상태

수치 모델 검증을 위해 KVLCC의 조류 하중 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 Yuck *et al.*[2005]의 실험 데이터 및 OCIMF[1994]의 데이터와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 0~180°까지 10° 간격으로 총 18개 방향각에서 조류 하중 계수를 보여준다. 해석 결과는 실험 및 OCIMF 데이터 모두와 합리적인 일치를 보이지만, 유입 흐름 각도가 90° 근처에서 X 방향 조류 하중 계수(C_x)의 차이가 관찰된다. 유입 흐름 각도가 90° 근처에서는 선수와 선측에서 강하게 발생하는 유동 박리로 인해 압력 차이가 발생하면서 Y 방향 힘이 지배적으로 작용하지만, X 방향 힘은 주로 선미에서 상대적으로 약한 흐름 분리에서 발생하기 때문에 정확하게 예측하기 어렵다(Teng *et al.*[2019]). 또한, X 방향 힘이 Y 방향 힘보다 훨씬 작고 선박에 작용하는 합력의 방향이 약간만 벗어나도 큰 차이를 만들 수 있다(Koop[2016]).

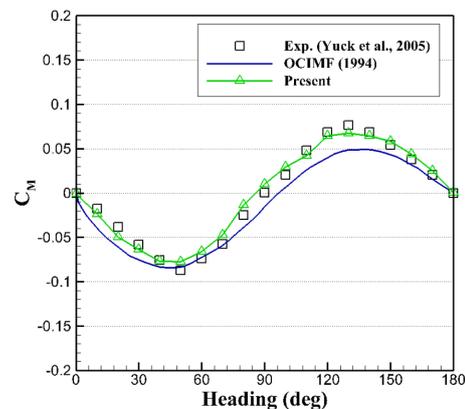
모형실험 결과와의 비교에 앞서 격자 수렴도 테스트를 진행하였다. 사용한 격자는 fine, medium, coarse 총 3가지를 사용하



(a) force coefficient in x-direction



(b) force coefficient in y-direction



(c) Yaw moment coefficient

Fig. 4. Comparison of current load coefficients between experiments and present calculations.

였다. 계산은 총 10,000번의 반복 계산을 거쳐 마지막 2,000번의 계산 결과를 평균하여 비교하였다. 격자 수렴도는 유입 흐름 각도 90, 180°에 대해 Y와 X 방향 힘에 대해 각각 확인하였다. 격자 수렴 정도를 정량적으로 파악하기 위하여 식 (2)-(5)과 같이 Celik *et al.*[2008]에 의해 제안된 방법을 적용하였다.

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25}{r_{21}^p - 1} \left| \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right| \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (3)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (4)$$

$$s = 1 \cdot \text{sgn} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) \quad (5)$$

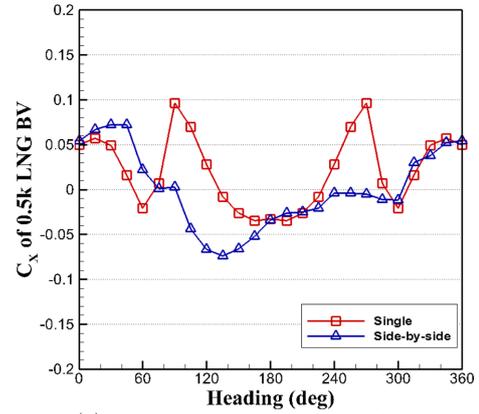
여기서 아래 첨자 1은 fine 격자, 2는 medium 격자 그리고 3은 coarse 격자를 의미한다. r_{21} 은 fine과 medium의 격자 크기 비를 뜻하며, Celik *et al.*[2008]의 비정렬 3차원 격자에서 사용되는 격자 크기 정의를 따른다. 따라서, 본 연구에서는 각 격자의 평균적인 전역 격자 크기 비가 약 1.2배가 되도록 하였다. $\varepsilon_{ij} = Q_i - Q_j$ 에서 Q_i 는 i 격자에서 얻어진 물리량을 뜻한다. GCI는 격자 수렴 인덱스(grid convergence index)의 약자로 fine 격자의 물리량이 갖는 격자에 대한 불확실성을 나타낸다. 격자 수렴도 테스트 결과는 Table 2에 나타내었다. Fine 격자에 대해 180°의 X 방향 하중 계수(C_x)는 0.29% 정도의 불확실성을 가지고, 90°의 Y 방향 하중 계수(C_y)는 0.14% 정도의 불확실성을 가진다. 수렴율(convergence ratio) $R = \varepsilon_{21}/\varepsilon_{32}$ 을 사용하여 격자의 수렴 특성을 함께 평가하였다. R은 0과 1 사이인 경우 단조 수렴(monotonic convergence)에 해당하며, 0과 -1 사이인 경우 진동 수렴(oscillatory convergence)에 해당한다. 90°의 Y 방향 하중 계수(C_y)는 단조 수렴성을 보이는 반면에, 180°의 X 방향 하중 계수(C_x)는 진동 수렴성을 나타내었으며, X 방향 하중 계수(C_x)에 대해서는 상대적으로 수렴하기가 더 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 격자 수렴도 테스트를 통해 본 연구의 수치해석은 Fine 격자 시스템을 사용하였다.

3.2 병렬 배치된 두 선박

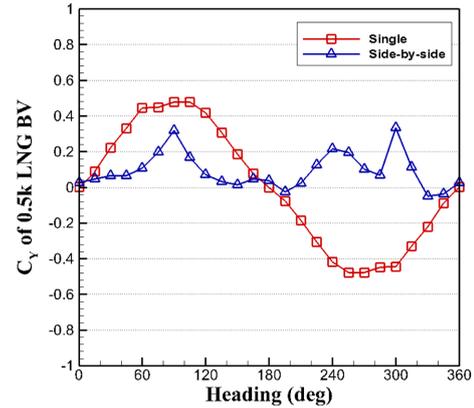
두 선박이 병렬 배치된 구성에 대한 조류 하중 수치 해석을 수행하였다. 병렬 배치된 구성은 0.5k LNG BV와 5k LNG FS를 고려하였다. 단일 선박에 대한 조류 하중을 병렬 배치되었을

Table 2. Grid convergence study for KVLCC simulations

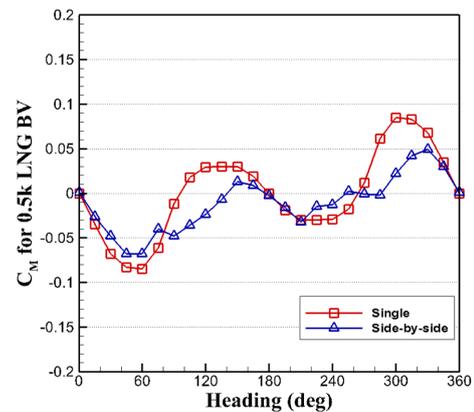
Mesh set	Cells [Million]	C_x		C_y	
		180°	90°	180°	90°
Fine	7.8	-0.0164	0.636		
Medium	4.8	-0.0165	0.643		
Coarse	3.1	-0.0159	0.721		
GCI [%]		0.29	0.14		
R		-0.22	0.09		



(a) force coefficient in x-direction



(b) force coefficient in y-direction



(c) yaw moment coefficient

Fig. 5. Comparison of current load coefficients between the vessel alone and the vessel in side-by-side configuration for the 0.5k LNG BV.

때의 선박에 대한 조류 하중 결과와 비교하여 차폐효과와 상호 작용 효과를 관찰하였다. 0.5k LNG BV의 조류 하중 계수 비교는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서, 0.5k LNG BV를 5k LNG FS 옆에 배치하면 C_x 의 추세가 120° 근처에서 많이 감소한다. X 방향의 힘이 작으므로 합력의 방향이 조금만 바뀌어도 C_x 계수가 크게 달라질 수 있다. Fig. 5(b)에서, 0.5k LNG BV가 상류에 위치하면 0.5k LNG BV의 C_y 계수가 많이 감소한다. 이는 상

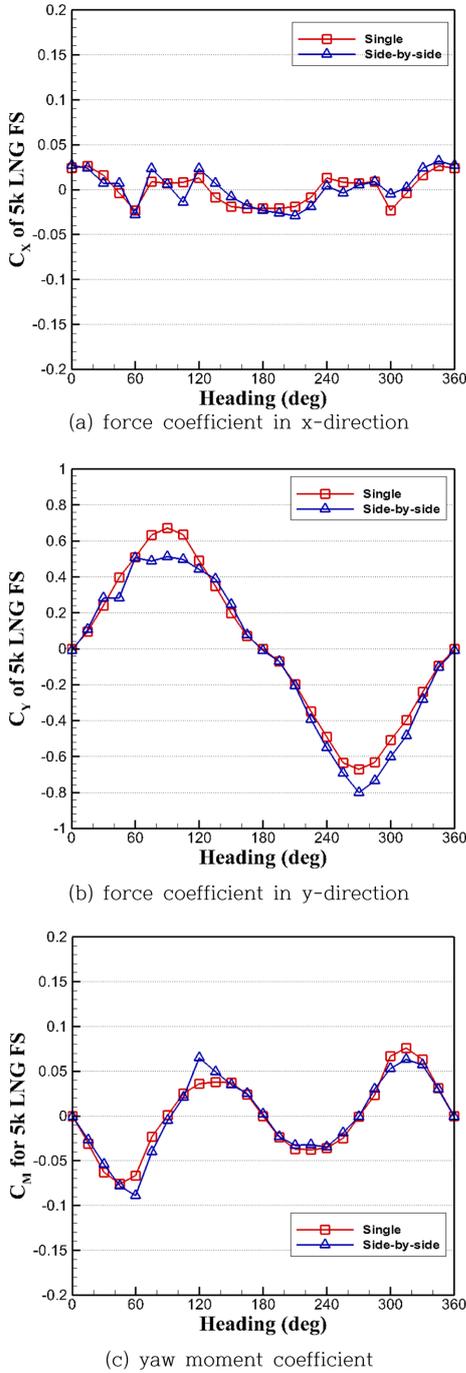


Fig. 6. Comparison of current load coefficients between the vessel alone and the vessel in side-by-side configuration for the 5k LNG FS.

대적인 길이와 흘수가 더 큰 5k LNG FS의 선측에서 압력 분포가 상승하게 되면서 0.5k LNG BV의 압력차가 단독 상태의 압력차보다 감소하게 된다. 반면에, 0.5k LNG BV가 5k LNG FS의 후류에 있으면 0.5k LNG BV의 C_y 계수는 부호가 바뀐다. 이는 0.5k LNG BV가 5k LNG FS 쪽으로 빨려 들어간다는 것을 의미한다. 차폐효과는 0.5k LNG BV가 5k LNG FS의 후류에 있을 때 명확하게 관찰할 수 있다. 차폐효과와 상호작용의 영향으로 C_m

계수가 감소하고, 120° 근처에서 모멘트의 방향이 반대가 된다.

5k LNG FS의 조류 하중 계수 비교는 Fig. 6에 나타내었다. 병렬 배치하였을 때 조류 하중 추세는 5k LNG FS만 단독 배치한 경우와 매우 유사하다. 그러나 5k LNG FS가 0.5k LNG BV의 후류에 있을 때 C_y 가 감소하였다(Fig. 6(b)). 하지만, 0.5k LNG BV에 대한 차폐효과보다 강하지 않다. 이는 0.5k LNG BV로 인한 후류가 상대적으로 길이와 흘수가 큰 5k LNG FS를 차폐하도록

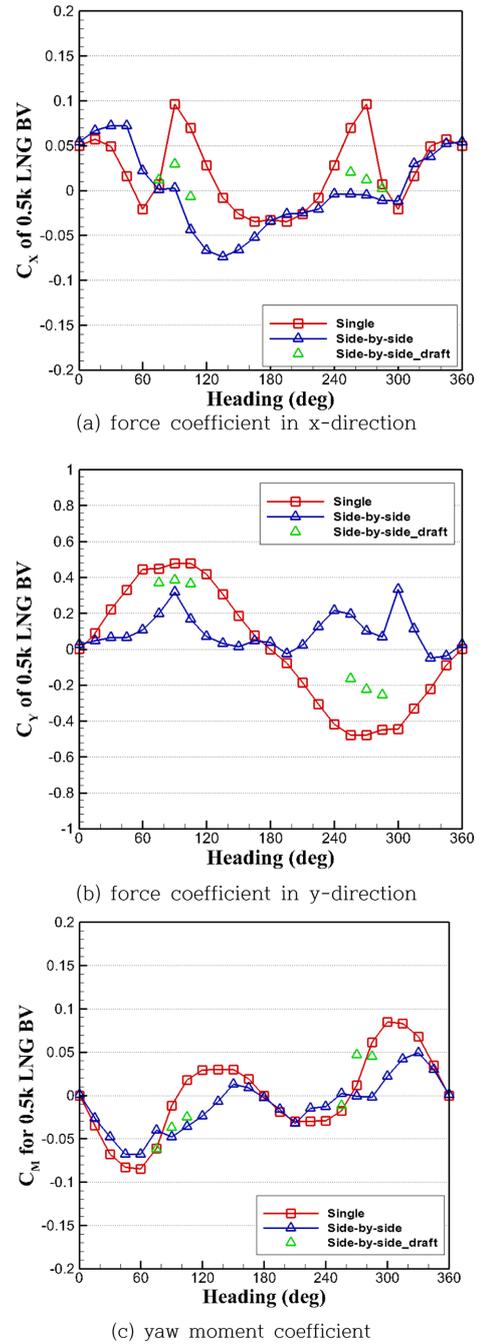
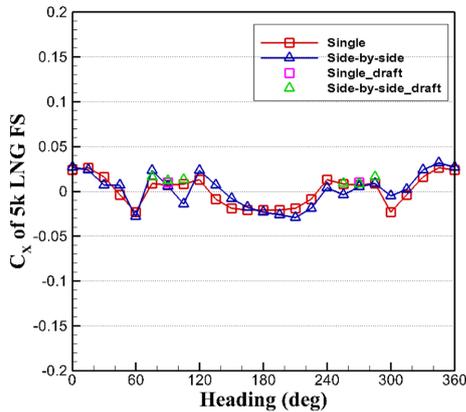


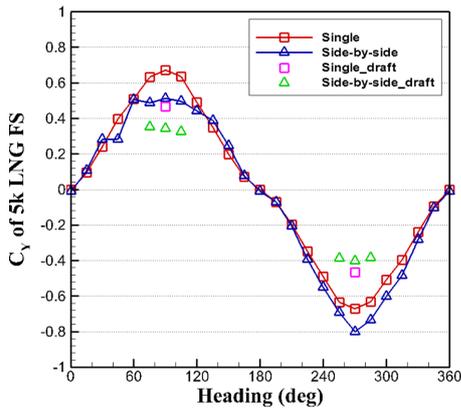
Fig. 7. Comparison of current load coefficients between the vessel alone and the vessel in side-by-side configuration for the 0.5k LNG BV when side-by-side vessels have the same draft.

충분히 발달하지 못한 영향으로 판단된다.

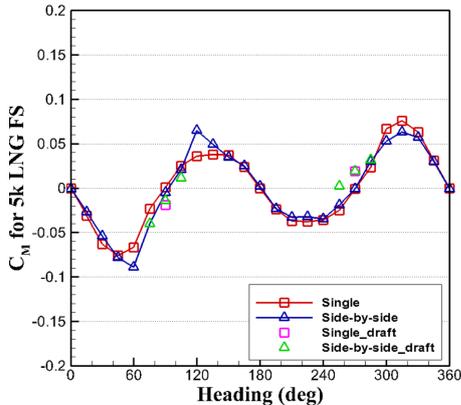
Fig. 7-8은 두 선박의 흘수 차이로 인한 효과를 보여준다. 직관적으로 흘수의 영향을 살펴보기 위해 5k LNG FS의 흘수를 0.5k LNG BV 흘수와 같도록 설정하였다. 삼각형 단독 심볼은 5k LNG FS의 흘수가 0.5k LNG BV의 흘수와 같은 조건에서 유입 흐름 방향이 75°, 90°, 105°, 255°, 270°, 285°일 때 조류 하중 계수를 나타낸다. Fig. 7은 0.5k LNG BV에 대한 조류 하중 변화



(a) force coefficient in x-direction



(b) force coefficient in y-direction



(c) yaw moment coefficient

Fig. 8. Comparison of current load coefficients between the vessel alone and the vessel in side-by-side configuration for the 5k LNG FS when side-by-side vessels have the same draft.

를 나타내었다. Fig. 7(b)에서, 0.5k LNG BV의 경우 차폐효과가 많이 감소하여 Y 방향에 대한 하중의 크기만 감소하였다. 0.5k LNG BV가 상류에 있을 때, 흘수가 동일한 5k LNG FS의 선측에서의 압력 변화의 영향이 크지 않았다. 0.5k LNG BV가 하류에 있을 때, 5k LNG FS에 의한 차폐효과가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 5k LNG FS에 대한 조류 하중 변화를 나타내었다. 사각형 단독 심볼은 5k LNG FS의 흘수가 변한 조건에서 단독 상태에서의 조류하중 결과를 나타낸다. 5k LNG FS가 후류에 있을 때, 차폐효과로 인해 C_y 계수가 많이 감소하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 8(b)). 하지만, 변화된 5k LNG FS 흘수에 대한 단독 상태에서 유입 흐름 방향 90°에서의 하중 결과인 사각형 단독 심볼과 비교하였을 때, 흘수가 변하면서 전체적인 하중 계수가 감소하는 영향을 포함하고 있다. 따라서, 두 선박이 병렬 배치되어 있을 때 차폐효과는 상류에 배치되어 있는 선박에 의한 후류의 발달이 중요하다는 것을 확인하였다. 이는 병렬 배치된 두 선박들에 대한 조류 하중 특성 변화를 파악하기 위해서는 후류의 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 병렬 배치된 두 선박에 작용하는 조류 하중을 CFD로 예측하였다. 수치 모델과 격자 생성은 선박의 조류 하중을 예측하기 위한 CFD 모델링 사례 및 가이드를 참고하였다. 수치 모델 검증은 위해 KVLCC의 조류 하중 계수를 기존 실험 및 OCIMF 데이터와 비교하였다. 유입 흐름 방향이 90° 근처에서 X 방향 하중 계수(C_x)의 차이를 제외하면, 흐름 방향에 대한 하중 분포는 대체로 일치 확인하였다. 동일한 수치 모델을 사용하여 LNG 병커링 선박과 5k LNG 추진 선박에 대한 단독 상태의 조류 하중과 병렬 배치되었을 때 조류 하중을 해석하였다. 두 선박의 크기 차이가 클 때, 상대적으로 크기가 큰 선박에 대한 조류력의 변화는 크지 않았다. 반면에, 상대적으로 크기가 작은 선박에 대한 조류력의 변화는 상당히 크게 나타나는 것을 확인하였다. 작은 선박이 상류에 있을 때 전체적으로 조류 하중의 크기가 감소하는 경향을 보이며, 120° 근처에서 X 방향 힘과 Z축 모멘트는 작용 방향이 반대된다. 작은 선박이 큰 선박의 후류에 있을 때 차폐효과로 인해 Y 방향 힘은 그 작용 방향이 흐름의 반대 방향으로 작용하게 되는 것을 확인하였다. 상대적으로 작은 선박이 큰 선박의 후류에 있을 때 작은 선박에 작용하는 차폐효과는 두 선박의 흘수가 같을 때 많이 감소하는 것을 확인하였다. 차폐효과는 두 선박 간의 상대적인 길이보다 상대적인 흘수 차이에 의해 더욱 의존하는 것을 확인하였다. 추후 모형 시험과의 비교를 통해 검증 작업을 진행할 필요성이 있으며, 두 선박의 다양한 위치관계를 고려하여 차폐효과에 대한 정량적 특성을 체계적으로 제시할 필요성이 있다.

후 기

본 연구는 2023년도 해양수산부 국가연구개발사업 ‘LNG병 커링 동시작업 기술개발(PMS5770)’으로 수행된 연구 결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] ABS, 2015, Bunkering of Liquefied Natural Gas-fueled Marine Vessels in North America, 2nd Edition, 75-90.
- [2] Celik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C. J., Coleman, H. and Raad, P.E., 2008, Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, *Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 130(7), 078001.
- [3] EMSA, 2018, EMSA Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities/Administrations, 339-348.
- [4] Fathi, F., Klaij, C. and Koop, A., 2010, Predicting Loads on a LNG Carrier with CFD. Proc. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, China, OMAE 49149, 427-440.
- [5] Hong, S.Y., Kim, J.H., Kim, H.J. and Choi, Y.R., 2002, Experimental study on behavior of tandem and side-by-side moored vessels. Proc 12th Int Ocean and Polar Eng Conf, Kitakyushu, Japan, ISOPE.
- [6] Hwang, S.C., Cho, S.K., Sung, H.G., Hong, J.P. and Vazquez-Hernandez, A.O., 2016, Experimental and Numerical Study of the Environmental Loads on a FPSO. Proc 26th Int Ocean and Polar Eng Conf, Rhodes, Greece, ISOPE, 1110–1114.
- [7] Jung, R.T., 2011, Recent International Development on the Technical and Operational Measures of IMO’s CO₂ Emission Control From Ships. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 14(1), 65-71.
- [8] Koop, A., 2015, Shallow water current loads on a LNG carrier using CFD. Proc. 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Newfoundland, Canada, OMAE V002T08A037.
- [9] Koop, A., 2016, Determining Side-by-Side Current Loads using CFD and Model Tests. Proc. 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Busan, OMAE 2016-54344.
- [10] Koop, A., Yeon, S., Yu, K., Loubeyre, S., Xu, W., Huang, J., Vinayan, V., Agrawal, M. and Kim, J., 2020, Development and Verification of Modeling Practice for CFD Calculations to Obtain Current Loads on FPSO. Proc. 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Virtual, Online, OMAE 2020-19173.
- [11] Koop, A., 2020, Using CFD to determine scale effects on current loads of offshore vessels in side-by-side configuration. *Ocean Engineering*, 195, 106707.
- [12] Menter, F.R., 1993, Zonal two equations k-turbulence models for aerodynamic flows. In Proceedings of the 24th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA, 93-2906.
- [13] Oil Companies International Marine Forum, OCIMF, 1994, Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs. 2nd edition.
- [14] Park, B., Jung, J.H., Hwang, S.C., Cho, S.K., Jung, D. and Sung, H.G., 2017, Wind tunnel test of wind loads and current loads acting on FLBT and LNG bunkering shuttles in side-by-side configuration and comparison with empirical formula. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(4), 266-273.
- [15] Park, Y.S., Chen, Z.S. and Kim, W.J., 2011, CFD application to evaluation of wave and current loads on fixed cylindrical substructure for ocean wind turbine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), 7-14.
- [16] Song, S. and Park, S., 2017, Analysis on Interaction of Regular Waves and a Circular Column Structure. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 20(2), 63-75.
- [17] Teng, Y.J., Tan, H.C.J., Jang, H.C., Kim, J.W., Kwon, C.S., Yeon, S.M., Hwang, S.C., Nam, B.W. and Huang, Z.J., 2019, CFD Simulation Modeling Practice Verification for FPSO Hull Current Load. Proc 29th Int Ocean and Polar Eng Conf, California, USA, ISOPE.
- [18] Xu, W., Huang, Z. and Kim, H., 2019, Thorough Verification and Validation of CFD Prediction of FPSO Current Load for Confident Applications. Proc. 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Scotland, UK, OMAE 2019-95017.
- [19] Yuck, R.H., Choi, H.S. and Hong, S.Y., 2005, Estimation of Current Loads on Offshore Vessels. Proc 15th Int Ocean and Polar Eng Conf, ISOPE.
- [20] Yuck, R.H., Park, M.K., Choi, H.S., 2007, Estimation of Current Loads on Side-by-Side Moored Two Vessels. Proc 17th Int Ocean and Polar Eng Conf, Lisbon, Portugal, ISOPE.

Received 8 January 2024

Revised 16 January 2024

Accepted 25 January 2024