

# FLBT를 향해 접안하는 LNGC의 수치해석 및 안정성 평가

† 정성준 · 정동우\* · 오승훈\*\* · 김윤호\*\*\* · 정동호\*\*\*\*

\*\*,\*\*,† 선박해양플랜트연구소 선임연구원, \*선박해양플랜트연구소 선임기술원, \*\*\*\*선박해양플랜트연구소 책임연구원

## Numerical Assessment of LNGC Berthing Operation to FLBT

† Sung-Jun Jung · Dong-Woo Jung\* · Seung-Hoon Oh\*\* · Yun-Ho Kim\*\*\* · Dong-Ho Jung\*\*\*\*

\*\*,\*\*,† Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

\*Senior Engineer, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

\*\*\*\*Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

**요약** : 국제해사기구의 연료유 황 함유량 제한 등, 세계적으로 강화되고 있는 환경규제로 LNG를 선박 연료로 사용하는 연구 및 사업이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 기본설계 되어 있는 부유식 병커링 터미널(FLBT, Floating LNG bunkering terminal)을 대상으로, STS LNG 하역 작업을 위해 접안 하는 과정을 수치 시뮬레이션으로 평가하였다. 수치해석에서는 예인선이 대상선박을 밀 경우 이를 가상의 펜더로 가정하였으며, 당길 때는 HMPE 로프 특성을 적용하였다. 해석에는 파랑, 조류, 바람 1년 재현 확률의 해상조건을 적용하였다. 수치모델은 선행 모형시험 결과로부터 조정되어 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 해석 결과 LNG선은 대부분의 1년 환경조건에서 안전한 접안이 가능하였다. 파랑 방향에 따라 안정성의 차이가 큼으로 FLBT의 Heading control 기능을 적용하여 횡파를 피한다면 더욱 안정적인 운용이 가능할 것이다.

**핵심용어** : 부유식 LNG 병커링 터미널(FLBT), 접안 작업, 수치해석, 모형시험, 예인선, LNG 하역

**Abstract** : The IMO has adopted emission standards that strictly restrict the use of bunker C oil for vessels. Accordingly, research and bunkering pilot projects for LNG fueled ships are being actively carried out, which is expected to substantially reduce environmental pollution. In this study, we have adopted the turret moored Floating LNG Bunkering Terminal (FLBT) designed to receive the LNG from LNGCs and to transfer LNG to LNG bunkering shuttles in ship to ship moored condition. Numerical simulations have been performed with a 1-year return period of wind, wave, and current. Damping values of numerical model were adjusted from the results of model tests to obtain accurate simulation results. The results confirm safe berthing operation during the 1-year return period of environmental condition. Safety depends on the direction of environment, with increasingly stable operation facilitated by the application of heading-control function of FLBT to avoid beam-sea conditions.

**Key words** : Floating LNG Bunkering Terminal(FLBT), berthing operation, numerical analysis, model test, tug boat, LNG offloading

## 1. 서 론

IMO(국제해사기구)는 선박 연료유 내 황 함유량 기준을 3.5%에서 0.5%로 낮추도록 강제하였으며, ECA(Emission Control Area)와 같이 각 지역에서는 자발적으로 더 강화된 규제를 도입하고 있다. 이에 이산화탄소, 황, 질소화합물 배출량을 획기적으로 줄일 수 있는 LNG 연료 추진선의 연구 및 병커링 시범 사업이 활발히 진행되고 있다. 세계적으로 경제 성장과 선박 수의 증가로 선박연료의 수요는 증가하나 환경규제 또한 엄격해 지고 있어, 선박연료의 구조가 크게 바뀔 것으

로 예상된다.

선박에 LNG를 공급하기 위한 방법은 크게 3 가지로 Truck to ship(TTS), PTS(Port to ship 또는 Pipeline to ship), STS(Ship to ship)으로 분류된다. 현재 세계 주요 병커링 항구들은 전략적으로 LNG 병커링을 위한 설비들을 확충하고 있다(ABS, 2015). 이 중 TTS 방법은 소규모의 LNG 이송에만 적용 할 수 있고, PTS 방법은 LNG 저장 탱크, 하역 설비, 파이프라인 등 항만 인프라 건설이 요구되어 장기간의 안정된 공급 계약이 없이 항만에 설치하기 어려운 것으로 보고된다.(GMI, 2017) 이와 비교하여 STS 방법은 항만 여건에 자유

† Corresponding author : 정희원, jungsj@kriso.re.kr 051)604-7827

\* 정희원, dwjung@kriso.re.kr 051)604-7834

\*\* 정희원, carot541@kriso.re.kr 051)604-7825

\*\*\* 정희원, yunhokim@kriso.re.kr 042)866-3959

\*\*\*\* 정희원, dhjung@kriso.re.kr 042)866-3962

(주) 이 논문은 "실험 및 수치해석을 통한 FLBT와 병커링 선박들의 이접안 안정성 평가"란 제목으로 2019년 한국해양과학기술협의회 학술대회(제주 국제컨벤션센터, 2019.5.15-17, p.98)에 발표되었음

로우며, 항의 임시계류 중이거나, 항내 정박 중인 선박들에 구분 없이 LNG 공급이 가능하다. 컨테이너 등의 선적물 처리나 승객들의 승하차 작업과 충돌이 없으므로, 선적작업과 LNG 병커링의 동시작업(SIMOPS; Simultaneous Operations) 이 가능한 장점이 있어 선호된다. 따라서 STS 방법을 이용한 LNG 병커링의 관심이 증가되고 있으며 이에 대한 안전하고 효율적인 운영에 대한 연구가 증가하고 있다(EMSA, 2018).

KRISO(Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering)에서는 해양 부유식 병커링 터미널(Floating LNG bunkering terminal, 이하 FLBT)의 개념 설계, 관련 기자재 개발 및 운용기술 연구를 수행하였다. FLBT는 220k CBM의 LNG 저장 능력을 가지며, 170,000(170k)CBM급 LNGC로부터 연료 공급을 받고, 30k, 5k급 LNG 병커링 셔틀(이하 LNG BS)에 LNG 연료를 공급한다. FLBT는 부산항 연안에 터렛 계류되는 개념으로 설계되었으며, 최대 3척이 동시 접안 될 수 있다. FLBT는 육상공간의 제약으로부터 자유로우며, LNG 병커선과 LNG 추진선 간의 이동 및 적하역이 매우 빈번한 경우, 동선을 최소화 하여 큰 효율을 꾀할 수 있다.

본 플랫폼의 개념 설계를 위해, 4척의 부유체가 서로 LNG를 적하역 하는 순간의 운동특성 실험 연구(Jung et al., 2018), 다물체 중에서의 바람, 조류력의 상호작용 연구 (Park et al., 2017), Heading control 제어 성능 관련 연구(Oh et al., 2020) 등 다양한 분야에서 연구가 진행된 바가 있다.

국내의 경우, 각 항만마다 접안시 필요한 예인선 사용 척수와 총 사용마력 등의 기준이 모두 다르다(Jung et. al., 2010). 그리고 LNG 병커링이나 하역을 위한 접안 기준이 전무하다. 따라서 FLBT와 LNGC, LNG BS 상호간 잦은 접이안을 고려해 안전한 접안 절차 수립이 필요하다.

본 연구는 FLBT가 대상 해역에서 LNG 적하역을 위한 빈번한 접안 과정에서, 예인선이 얼마나 투입되어야 하는지의 지침을 수립하기 위해 진행되었다. 사전 연구(Jung. et al., 2020)를 통해 모형시험으로 접안 과정 안정성이 평가되었으나, 이후 Metocean 정보가 수정되었으며, 모형시험에서 다루지 못한 실제 접안 속도, 바람의 영향, 예선 로프의 강성 등을 반영 한 수치 시뮬레이션을 수행했다.

접안 시뮬레이션의 경우, 부유체 운동방정식을 기반으로 모델링을 수행하였고 이를 모형시험을 통하여 교정 및 검증하였다. 검증된 모델을 통하여 STS LNG 적하역을 위해 접안 하는 과정을 시뮬레이션 하였다. 초기 해석을 통해 비교적 크기가 작은 LNG BS의 경우 접안을 위한 예선 용량이 크지 않음

을 확인하고, 가장 예선이 많이 투입되는 170k LNGC 위주로 해석을 하였다. 실제 시뮬레이션 결과를 통하여 1년 환경조건에서 안전한 접안이 가능함을 확인하였고, 어느 수준의 예인선이 투입되어야 하는지 검토되었다. 본 결과는 추후 접안 운영 지침을 위한 근거로 활용될 것이다.



Fig. 1 3D view of the FLBT and associated bunkering vessels

Table 1 Main characteristics of FLBT, LNGC and LNG BS

	220k FLBT	170k LNGC	30k BS	5k BS
LOA(m)	355.0	294.0	172.0	99.0
LBP(m)	326.0	282.0	162.0	91.2
Breadth(m)	60.0	45.5	26.5	17.0
Depth(m)	32.7	26.0	15.0	10.0
Draft(m)	13.5	11.95	5.08	4.3
Disp.(ton)	239278	111304	16862	4747
LCG(m, midship)	-0.695	1.27	-4.62	3.12
VCG(m, freesurface)	3.295	4.75	2.74	0.25
Gyration, Kxx(m)	16.288	18.78	9.81	6.51
Gyration, Kyy,zz(m)	86.715	65.29	43.25	24.95

## 2. 수치모델의 구성 및 시험결과 반영

### 2.1 대상 모델 및 해역 환경 조건

본 연구에서 고려된 FLBT는 LNG의 저장 및 공급을 목적으로 해상에서 터렛 계류되어 있는 해양 플랫폼이다. 설계에 검토된 설치 위치는 109m 수심의 부산항 근처, 북위 35.18도, 동경 129.4도의 위치이다. 170k급 LNGC와 30k 및 5k 급의 LNG BS가 동시에 접안하여 적하역이 가능하도록 개발되었다. 총 4척 부유체의 기본 제원과 적하역 예상 모델은 Table 1

Table 2 Metocean data with 1-year of return period at operation site for the simulation

Direction (come from)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Wave Hs(m)	1.50	1.87	1.98	1.52	1.07	0.92	0.84	0.92	1.20	1.54	1.54	1.15	1.21	1.38	1.32	1.36
Wave Tp(m)	5.64	6.29	6.48	5.67	4.76	4.41	4.22	4.41	5.04	5.71	5.71	4.94	5.06	5.41	5.29	5.37
Wind Speed(m/s)	5.94	7.15	9.58	7.04	5.07	5.30	4.50	6.56	7.40	8.68	8.78	8.71	8.19	7.81	7.62	7.30
Current Spd(knots)													2.39			

과 Fig. 1에서 확인 할 수 있다. Table 1에서 LOA(Length Over All)는 선박의 전장길이, LBP(Length Between Perpendiculars)는 선박의 수선간장 길이, Kxx, Kyy, Kzz는 선박의 질량관성반경 값이다.

공개된 부이 관측 자료나 기존 심해설계과 보고서 등의 자료는 FLBT의 실제 위치와 거리적 차이가 있으며, 1년 확률의 통계값 등을 제공하지 못한다. 이에 정확한 Metocean(환경조건) 확보를 위한 연구가 별도로 수행되었으며, 이를 통해 예상 설치 위치에서의 1년 최대 환경 조건을 Table 2에 나타내었다.

방향별로 해당하는 최대 1년 파도 및 풍속이 나타나 있다. 조류의 경우 주로 남서방향에서 북동방향으로 흘러가는 대한해협 특성에 맞추어 방향을 고정하였다. 일반적으로 풍파는 흘러오는 방향, 조류는 흘러 나가는 방향으로 정의되나, 본 연구에서는 쉬운 이해를 위해, 방향 정의를 흘러오는 방향으로 일치시켰다.

파랑 스펙트럼은 JONSWAP을 사용하였고 형상 계수 Gamma 값으로 3.3을 가정하였다. 일반적으로 일기예보 등에 널리 사용되는 풍속은 10분 평균풍속이며, 해석에는 산업계 관례 및 선급 규정에 맞도록 1분 평균풍속으로 치환하여 적용하였다. 황천 시에는 접안 작업을 할 수 없지만, 설계 목표점으로 1년 재현 확률의 최대 환경조건을 목표로 했으며, 어느 수준까지 접안 운용이 가능할 것인지 해석을 통해 검토하였다.

일반적으로 STS 적하역을 위한 계류 구성은 유의파고 2m 정도가 한계라고 알려져 있다. 최대 1년 유의파고가 1.98m 임으로, 그 이상의 파고에 접안 작업이 가능하다 하여도 적하역 작업은 불가능하다. 1년 확률의 환경조건이 적절한 수준의 운용 한계 기준이라 판단한다.

### 2.2 수치 모델의 구성 및 입력계수

각 부유체의 파랑표류력을 포함한 동유체력 계수는 고차경계요소법 (Higher-order boundary element method)을 기반으로 한 KRISO 내 자체 개발 프로그램인 AdFLOW를 이용하여 계산하였다. 동유체력 계산에 보다 널리 사용되고 있는 CPM (Constant panel method)에 비하여 모델링이 까다롭지만, 훨씬 적은 요소로도 정확한 형상을 반영할 수 있으며 파랑표류력 등의 유체동역학계수들의 수렴성도 매우 뛰어나다 (Choi et al. 2000).

AdFLOW 해석 결과로서 나온 운동응답특성곡선(RAO; Response Amplitude Operator)의 제공에 파랑스펙트럼을 곱하면 식 (1)과 같이 응답스펙트럼을 구할 수 있다. 그리고 식 (2)와 같이 응답스펙트럼의 면적  $m_0$ 와 3시간동안의 응답 개수  $n$ 을 조합하면, 3시간 최대 기대 응답(MPM; Most Probable Maximum response)을 계산 할 수 있다.

$$S_{response}(w) = |RAO(w)|^2 S_{wave}(w) \tag{1}$$

$$R_{1/n} = \sqrt{2 \ln n} \sqrt{m_0} \tag{2}$$

식 (3)과 같이 2차 파랑표류력특성곡선(QTF; Quadratic Transfer Function)에 파랑스펙트럼을 곱하면 평균파랑표류력을 계산 할 수 있다. 이렇게 구해진 최대기대응답(MPM)과 파랑표류력을 방향별로 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다.

$$F_{mean} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} QTF(w,w) S_{wave}(w) dw \tag{3}$$

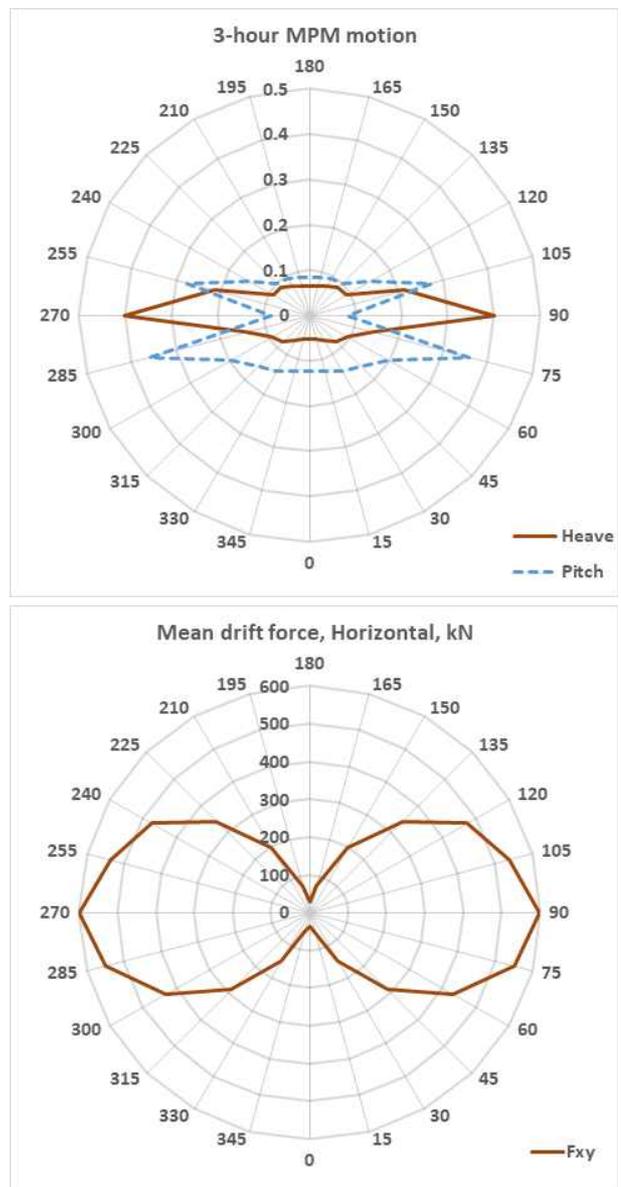


Fig. 2 3-hr MPM motion and wave drift force in 1-yr wave condition - 170k LNGC

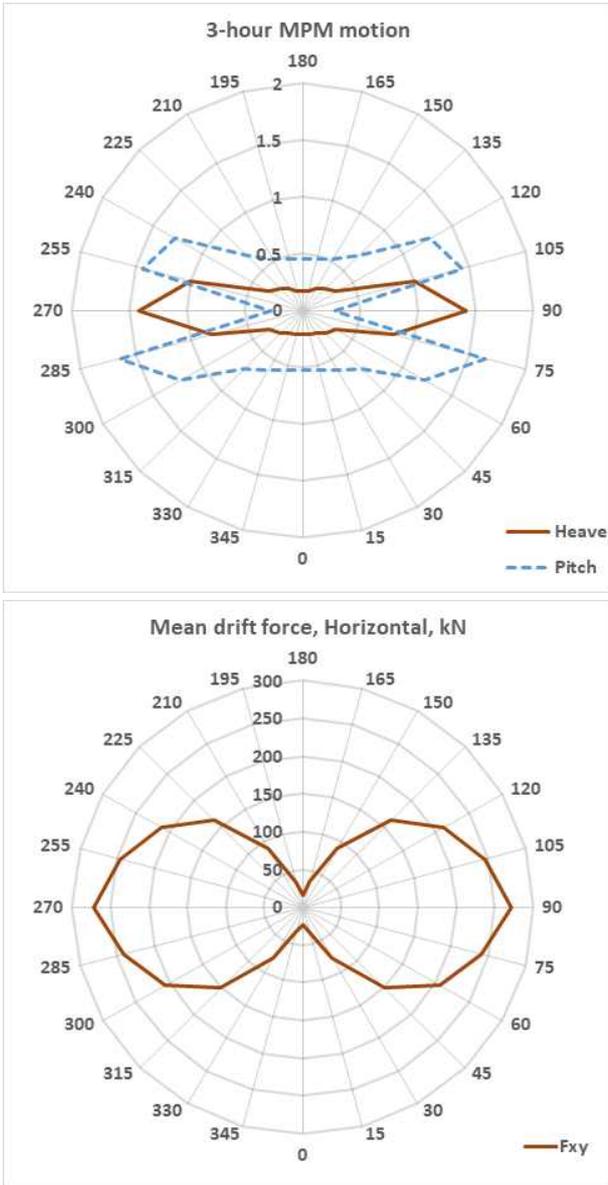


Fig. 3 3-hr MPM motion and wave drift force in 1-yr wave condition - 30k LNG BS

Fig. 2와 Fig. 3의 결과는 전 방향 1년 최대파인 유의파고 1.98m의 파랑조건에서 나타나는 Heave, Pitch와 평균 파랑표류력을 나타내었다. 본 해석에서 Heave, Pitch 외 다른 모드의 운동 값이 비교적 적어 그림에 나타내지 않았다. Fig. 2의 170k LNGC의 경우 1년 최대 파도에서도 전 방향 선박의 최대 Heave가 0.4m에 불과하며, Pitch 또한 0.4deg에 불과하다. 따라서 170k의 경우, 접안 중 운동에 의한 위험 요소가 특별히 없을 것으로 판단된다. 30k LNG BS의 경우, 선박의 크기가 작아 운동이 다소 커진다. 1년 최대 유의 파고에서 1.6deg 수준의 Pitch, 1.4m 수준의 최대 Heave가 관측된다.

최대 Pitch는 75deg 파랑 조건에서 나타났으며, 이를 예시로 Fig. 4에 Pitch 특성 RAO를 도시하였다. 실선으로 도시한 파랑 에너지 스펙트럼을 보면 파랑 주기(Tp) 6.48초 주변에

파랑 에너지가 집중된 것을 볼 수 있다. 170k LNGC의 경우 네모 표식으로 표시된 170k 선박의 운동 특성(RAO)과 같이 Pitch 공진주기가 약 10초로서, 파랑주기와 차이가 나 Pitch가 매우 적게 나타난 것으로 확인된다. 이와 같이 170k LNGC나 동급 이상의 대형 선박의 경우 부산항 근처 1년 파랑 조건에서는 운동이 거의 관측되지 않을 것이다. 그러나 비교적 운동이 큰 30k LNG BS의 경우에도 접안 운용이 가능한 수준의 운동 값으로 판단된다.

두 선박 모두 횡파부근에서 큰 운동이 발생하였다. Pitch의 경우 선수 선미파에서 클 것이라 생각하는 것이 일반적이나, 정확한 90deg 횡파가 아닌 이상, Pitch마저 횡파주변에서 훨씬 크게 발생하였다. 이로서 접안시 횡파를 피하는 것이 안정성 측면에서 중요함을 확인 할 수 있다.

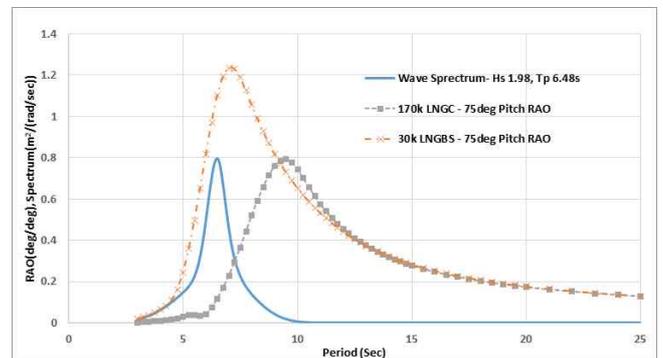


Fig. 4 Pitch motion comparison for 170k and 30k ships

파랑표류력의 경우, 170k LNGC는 파랑 방향이 선수각 $\pm 30$ 도 이내로 유지된다면 20톤 이내로 유지된다. 30k LNG BS의 경우 170k 선박 대비 파랑표류력이 절반 이하로 크게 줄어든다. 본 연구에서는, 예인선을 활용한 접안 관점에서 예인력이 크게 적은 30k LNG BS는 추후 연구에서 제외하였다. 또한 5k LNG BS의 경우 추진체를 이용한 자력 접안을 고려하고 있으므로, 접안 시뮬레이션에서 제외하였다.

본 AdFLOW 해석 결과로 도출된 동유체력 계수들은 시간영역 해석을 위한 기본 입력 자료로 사용되며, 시간영역 해석 소프트웨어로서 KRISO 자체 개발 프로그램인 KIMAPS를 이용하였다. KIMAPS는 AdFLOW 해석 결과로 도출된 동유체력 계수와 해상작업을 위한 로프 모델을 고려한 시간영역 수치모사를 위해 Cummins' 방법(Cummins, 1962)이 적용된다.

선박에 작용하는 환경 외력 중 170k LNGC의 바람과 조류력 부분은 OCIMF에서 제공하는 가스 운반선의 풍하중 및 탱커의 조류력 계수를 사용하였다(OCIMF, 2018). 계수를 Fig. 5에 나타내었으며, 일반적인 상선의 경우 풍동모형시험을 따로 수행하지 않기 때문에, 본 문헌의 계수 사용이 가장 적합하다고 판단하였다. 본 계수는 다양한 모형시험과 CFD 추정을 기반으로 하여, 널리 활용되고 있는 계수이다.

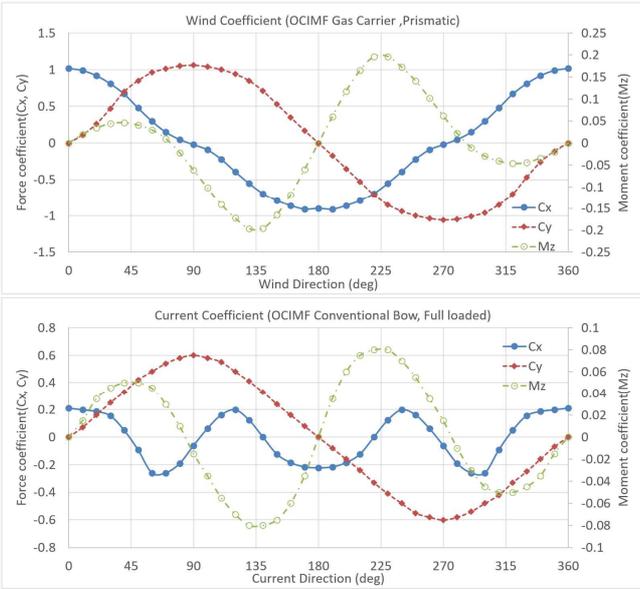


Fig. 5 Wind and current coefficients for 170k LNGC

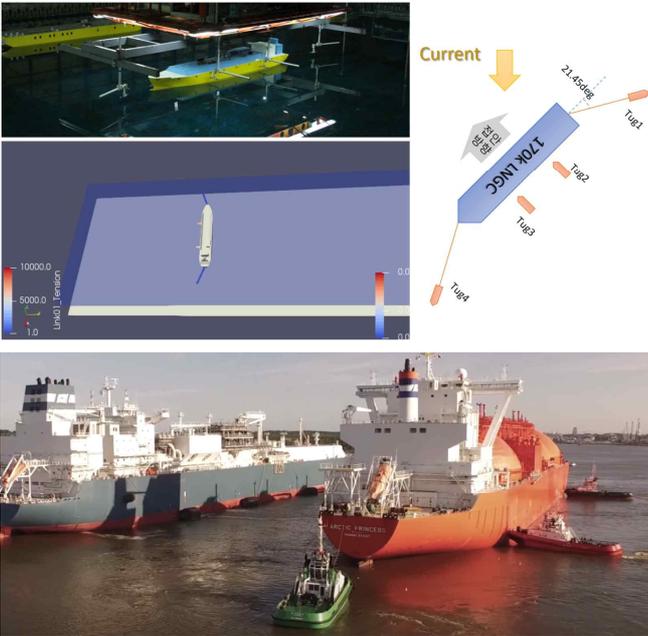


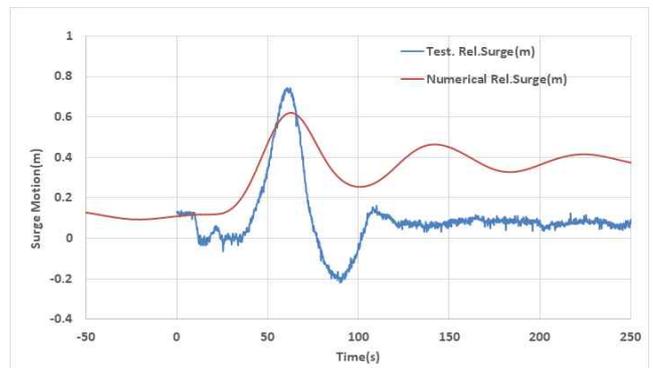
Fig. 6 Model test and simulation configurations, and similar example of actual tug operation

수치모델에서 예인선은 KIMAPS 프로그램 내 펜더와 같이 압축에 따라 선박을 밀어낼 수 있는 수치적 스프링으로 구성했다. 250kN/m의 강성을 가정하였으며 이는 대상 선박을 밀되, 약 25ton의 힘에 1m가량 예인선이 움직인다는 뜻이다. 배를 당길 경우 일반적인 수치 로프로서 배를 잡아당기도록 했다. 해석에 사용된 예인선의 로프는 40mm HMPE 로프를 가정하였다. 상용 40mm HMPE 로프는 약 127ton의 MBL (Minimum Breaking Load)을 가지며, 이는 60ton Bollard pull(4500마력 급) 예인선의 예인력을 고려할 때 안전율 2 이상을 확보하는 적절한 수준의 로프로 판단하여 설정하였다.

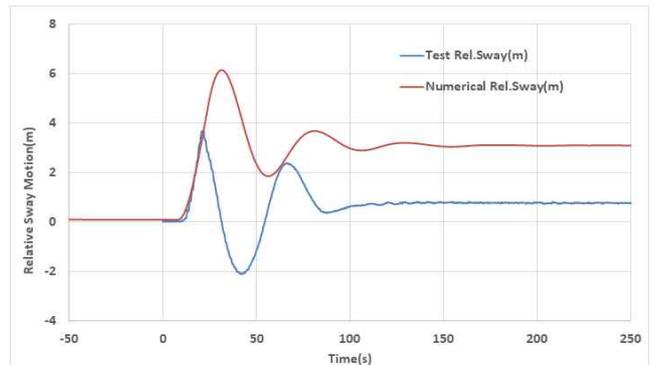
HMPE 로프는 일반적으로 MBL에서 4.5% 정도의 신장률을 가지며 이를 수치해석 프로그램에 반영하였다. 예인선은 4척을 가정했으며, 지정된 예인 속도에 따라 일정하게 움직인다.

### 2.3 모형시험 결과를 반영한 수치모델 감쇄 계수 조정

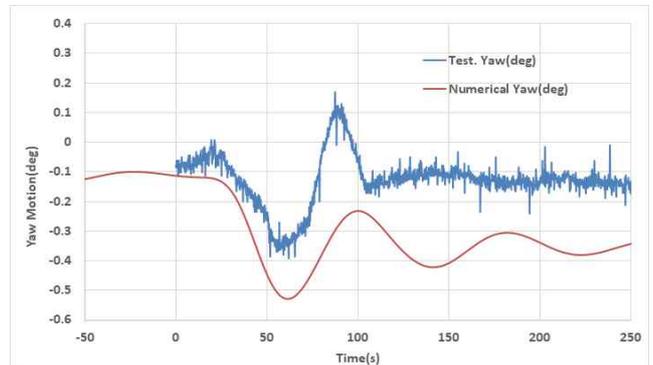
앞선 수조 모형시험 연구, Jung et al.(2020)를 통하여 본 접안 과정의 안정성이 평가되었다. 하지만, 당시 고려된 파도와 조류속도는 Table 2에 나타낸 Site의 최신 Metocean 정보와 차이가 있다. 그리고 모형시험의 경우 바람의 영향이 고려되지 못하였다. 본 연구에서는 모형시험에 반영되지 못한 최신 환경조건을 시뮬레이션을 통하여 반영하여 안정성에 반영하였다.



(a) Surge damping : 8,000kN/(m/s)



(b) Sway damping : 14,000kN/(m/s)



(c) Yaw damping: 300,000 kNm/(rad/s)

Fig. 7 Damping tuned at model test result

선형 모형시험에서 현실과 모형시험과의 가장 큰 괴리점은 0.4~1.5m/s의 속도로 접안이 모사된 것이다. 이는 수조 전차의 최저 속도를 포함하여 속도 변화를 준 것이지만 실제 현실에서 예인선을 통해 기대되는 접안 속도는 0.1m/s 수준이다. 모형시험은 최저 전차 속도 및 최저 가속도로 접안을 시도한 것이나, 이는 실제 현상보다 수 배 이상 빠른 속도로서, 시험 시작과 동시에 충격 및 진동, 감쇄 현상이 발생하였다. 본 연구에서는 오히려 이러한 진동 현상을 활용하여 수치 모델의 감쇄계수를 조정하고자 하였다.

Fig. 6은 모형시험의 모습과, 수치모델의 형상을 보여 주고 있다. 설명한 바와 같이 대상 선박을 밀거나 당길 때 예인 전차에서 제어 가능한 최소 가속도가 충분히 작지 못하므로 시험 시작과 종료에서 과도한 힘이 계측된다. 시험 시작과 종료 시의 가속 및 감속을 고려하면 반드시 복원력이 존재하여야 하므로 그림의 Tug1, Tug4로 표시된 예인선은 대상선의 진행 반대 방향으로 잡아당기는 비효율적인 배치가 되고 있다. 하지만 이는 실제 접안 시에도 적용되는 예인선 배치이다.

조류가 1.94knots 존재하는 조건에서, 접안 시작 시 나타나는 진동 및 감쇄 현상을 Fig. 7에 나타내었다. 수치모델은 최대한 모형시험과 동일하도록 구성하였으며, 진동의 감쇄경향을 비슷한 수준에서 약간 보수적으로 맞추도록 감쇄계수를 조절하였다. 조류가 없는 조건의 경우에도 비교해 보았으나, 큰 차이는 없었다. 모형시험에서 1.94knots의 조류가 존재할 때, 진동의 주기가 조금 더 짧아지고(강성의 증가), 감쇄가 증가하는 경향이 있었다. 본 시뮬레이션을 위한 환경조건은 Table 2와 같이 2.39knots의 조류에 노출된 조건임으로 1.94knots의 조류가 있는 모형시험 결과와 일치시킨 감쇄계수를 적용하였다.

### 3. 접안 시뮬레이션 결과

모형시험 이후 도출된 새로운 환경조건과, 모형시험에서 고려할 수 없는 접안 속도를 반영한 수치해석 접안 시뮬레이션을 수행하였다. 접안속도는 실제 항만에서 선박을 안벽 등에 접안할 때 주로 적용되는 0.1m/s의 속도를 가정했다.

조류는 Table 2에서 나타난 것과 같이 남서 방향에서 오는 것으로 고정하고, 1년 환경조건에서의 바람, 파랑을 같은 방향으로 동시에 적용하였다. 22.5deg 간격으로 16개 조건(Table 2의 환경 조건과 동일)이며, 각각 3시간 시뮬레이션을 수행하였다.

170k LNGC의 선미방향을 남서(SW)으로 가정하였다. 이는 Fig. 1에서 보이는 중앙의 부유식 터미널(FLBT)은 터렛 계류되어 환경방향에 따라 수동적으로 회전한다. FLBT는 설치 해역의 강한 조류로 인해 선수가 남서방향을 향할 확률이 크므로, 이에 맞추어 LNGC의 선미를 남서방향으로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 8 에 이러한 시뮬레이션 배치를 나타내고 있으며, 4척의 예인선의 방향도 나타내었다. 두 척은 직접 LNGC 선체에

닿아 배를 밀게 되며, 두 척은 45도 각도로 HMPE 로프를 통해 배를 당기게 된다. 360도 전 방향, 22.5도 간격으로 16개 시뮬레이션 조건에 동일한 배치를 가져가기 위한 가정이다. 16개 시뮬레이션 조건은 Table 2의 환경조건과 동일하다. 현실에서는 환경 조건 방향에 따라 더욱 효율적인 예인선 배치를 가져 갈 수 있다.

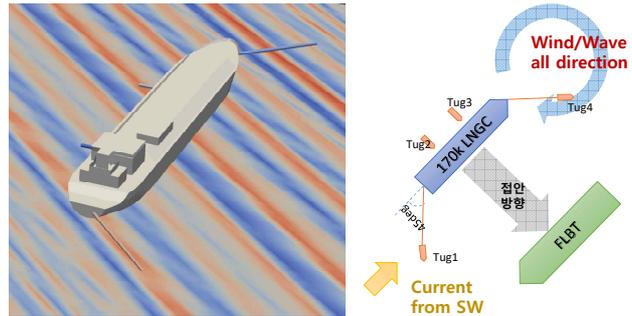


Fig. 8 Arrangement of 170k LNGC and 4-tugs

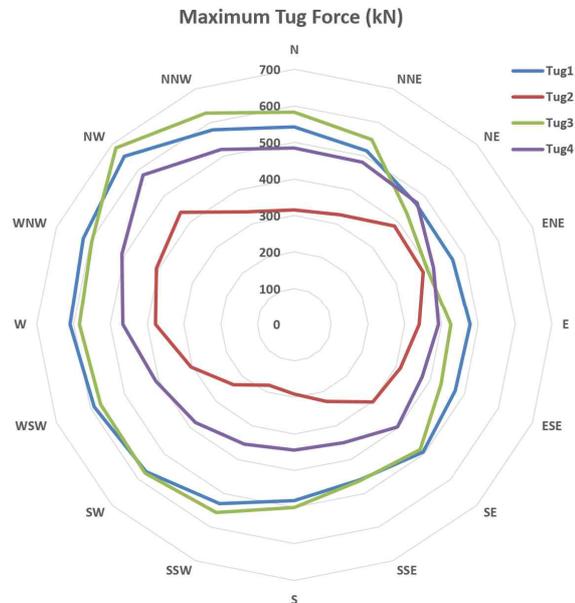


Fig. 9 Maximum tug force diagram

해석 결과 60ton Bollard pull (4500마력 급) 예인선 4척이면, 전 방향 1년 환경조건에서 접안 가능 할 것으로 추정되었다. 대부분 조건에서 예인선에 걸리는 하중 600kN(약 60톤) 이내 수준이었다.

일부 600kN이 벗어난 조건 있으나, 이는 풍파가 북서(NW)에서 불어오는 경우로서 선박이 횡파를 받는 조건이 된다. Fig. 10에 본 조건에서의 결과를 나타내었다. 타 조건에 비하여 선박이 횡파로 인해 움직임이 크고 이에 따라 예인선의 하중 시계열도 크게 흔들리게 된다.

하지만, 앞서 언급한 대로 FLBT는 터렛 계류됨으로서, 환경조건에 따라 선수 각이 수동적으로 변하게 된다. 조류가 남서에서 온다 할지라도, 북서에서 강한 풍파가 불어오면 FLBT

가 회전하게 되며 횡과 조건을 벗어날 확률이 크다. 또한 FLBT는 자체로 선미에 터널 추진기가 있어 Heading control 능력을 갖추고 있다. 추진기를 사용 해 횡과를 피하게 된다면 더욱 안정적인 운용이 가능하다.

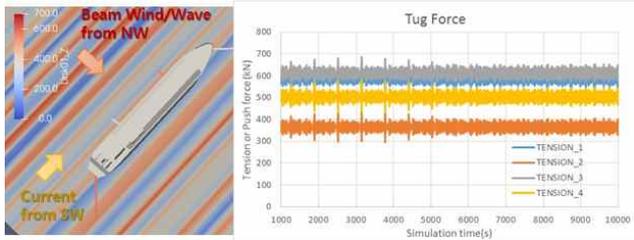


Fig. 10 Tug force time series - most critical case (Wind/wave from NW)

또한 주목해야 할 점으로, 거의 모든 환경조건에서 예인선 1, 3번의 하중이 집중된다. 조류가 남서에서 선미방향으로 접근함으로 선미 측 로프(예인선 1)에 하중이 집중됨이 당연하다. 그리고 예인선 1의 하중이 커지게 되면 모멘트 평형을 맞추기 위해 예인선 3의 하중도 같이 커져야 한다.

이는 환경방향을 고려하지 않은 일률적이고 대칭적인 예인선 배치로 인한 문제이다. 현실에서는 보다 효율적인 예인선 운용이 가능할 것이다. 그리고 실제 FLBT는 터렛 계류 되어, 강한 환경 방향에 선수방향을 틀게 됨으로 횡과에 노출될 확률이 적다. 본 해석조건은 1년에 한번 발생할 확률의 바람, 파도가 동시에 횡 방향으로 발생하는 조건까지 포함한 결과로서 충분히 보수적인 접근이 되었다. 실제로는 더욱 안전한 작업이 가능할 것이다. 1년 환경조건 최대 1.98m 조건에서 시뮬레이션 된 결과임을 밝히며, 일기예보 등을 통해 유의파고 2m 이상의 황천에서는 작업을 피해야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고차경계요소법을 사용하여, FLBT에 접안하는 선박의 기본 운동 특성을 해석하였으며, 이를 입력 자료로 한 접안 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 선행 연구의 모형 시험 이후로 변화된 환경조건 및 실제 로프 특성 등 최신 정보, 모형시험에서는 구현할 수 없었던 저속의 접안 속도 등을 수치시뮬레이션으로 반영하였다. 수치 모델은 모형시험에서 나타난 진동 현상에 맞추어 조정과정을 거쳤다. 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 결론을 아래에 정리하였다.

(1) 운동특성 분석 결과, 선수 및 선미파에서 클 것이라 생각되는 Pitch 마저 횡과 부근에서 가장 큰 값을 보인다. 횡과를 피할 수 있다면 운동이 줄어들지만, 1년 파랑 환경조건에 한해 대상선 들의 운동은 충분히 적어 접안 작업에 무리가 없다.

(2) 30k LNG BS의 경우 환경 표류력 측면에서 170k LNGC 대비 하중이 절반 이하에 불과하므로, 필요 예선 추정을 위한 대상 해석에서 제외하였다.

(3) 170k LNGC 기준으로 4500 마력 급 예인선 4척이면 주어진 환경 조건에서 연중 대부분의 접안 작업이 가능한 것으로 나타났다. 예인선 척수 및 마력이 달라지는 경우, Bollard pull 총합이 약 240ton 이상을 확보해야 한다.

(3) 선박이 횡과에 노출될 경우 안정성이 떨어지나, FLBT는 Heading control 기능을 갖추고 있다. 또한 터렛 계류 특성상 이러한 제어 없이도, 바람, 파도, 조류의 방향에 따라 선수 방향이 맞추어 진다. 이로 인해 실제 해석결과보다 더욱 안전한 접안 운용이 가능할 것이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 LNG병커링 핵심기술개발 및 체계 구축사업 ‘LNG 병커링 운영체계 및 위험도 평가기반 운영기술개발’에 의해 수행되었습니다.(PMS4680)

## References

- [1] ABS(2015), Bunkering of Liquefied Natural Gas-fueled Marine Vessels in North America 2<sup>nd</sup> Edition, pp. 75-90.
- [2] Choi, Y. R., Hong, S. Y. and Choi, H. S.(2000), “An analysis of second-order wave forces on floating bodies by using a higher-order boundary element method”, Ocean Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 117-138.
- [3] Cummins, W. E.(1962). “The Impulse Response Function and Ship Motions,” Symp. on Ship Theory, Hamburg.
- [4] EMSA(2018), EMSA Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities/Administrations, pp. 339-348.
- [5] Global Market Insights(2017), LNG Bunkering Market Size by Product, pp. 61-62.
- [6] Jung, C. H., Kong, G. Y. and Lee, Y. S.(2010), “A Study on the Criteria of Tugboat Requirement in Domestic Trading Ports”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 16, No. 1, pp. 107-113.
- [7] Jung, D. W., Kim, Y. H., Cho, S. K., Jung, D. H., Sung, H. G. and Kwon, S. H.(2018), “Experimental Study on Floating LNG Bunkering Terminal for Assessment of Loading and Offloading Performance”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 32, No. 1, pp. 51-61.
- [8] Jung, S. J., Oh, S. H., Jung, D. W., Kim, Y. H. and Jung, D. H.(2020), “Experimental and Numerical Study of Berthing and Unberthing of LNG Bunkering Vessels”, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 44, No. 6, pp. 439-446.
- [9] OCIMF(2018), Mooring Equipment Guidelines (MEG4), pp. 234-251.
- [10] Oh, S. H., Jung, D. W., Kim, Y. H., Kwak, H. U., Jung, J.

H., Jung, S. J., Park, B. W., Cho, S. K., Jung, D. H. and Sung, H. G.(2020), "Numerical Study on Characteristics and Control of Heading Angle of Floating LNG Bunkering Terminal for Improvement of Loading and Off-loading Performance", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 34, No. 2, pp. 77-88.

- [11] Park, B. W., Jung, J. H., Hwang, S. C., Cho, S. K., Jung, D. H. 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, Vol. 31, No. 4, pp. 266-273.

---

Received 06 August 2020

Revised 24 August 2020

Accepted 22 March 2021