

실험 및 수치해석을 통한 LNG 벙커링 선박들의 이접안 안정성 평가 연구

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

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

Experimental and Numerical Study of Berthing and Unberthing of LNG-Bunkering Vessels

† Sung-Jun Jung · Seung-Hoon Oh* · Dong-Woo Jung** · 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

요 약 : 세계적인 환경오염 규제 및 IMO(국제해사기구)의 선박 연료 황 함유량 제한으로 LNG를 선박의 연료로 사용하는 연구 및 사업이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존 연구를 통해 개발된 부유식 LNG 벙커링 터미널(FLBT, Floating LNG bunkering terminal)을 대상으로, STS LNG 벙커링 작업을 위해 이접안 하는 과정을 벙커링 서틀선의 환경하중을 모형시험과 수치해석으로 평가하였다. 고차경계요소법을 이용한 수치해석으로 가까운 위치에서 상호작용 하는 4척 선박들의 파랑표류력 변화를 검토하였다. 다양한 이접안 거리에 따라 파랑표류력이 크게 변함을 확인 했다. 모형시험은 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 이루어졌다. 모형시험에서는 예인선을 모사하여 대상 선박을 밀고 당길 수 있는 치구를 고안하였으며 접안시 마찰력 등의 영향 없이 선박을 밀 수 있도록 하였다. 모형시험 결과 LNG벙커링 선박은 대부분의 1년 환경조건에서 안전한 이접안이 가능하였다. 파랑 방향에 따라 안정성의 차이가 존재하므로, FLBT의 Heading control 기능을 적용하여 회파를 피한다면 더욱 안정적인 운용이 가능할 것이다.

핵심용어 : 부유식 LNG 벙커링 터미널(FLBT), LNG벙커링, 이접안, 모형시험, 예인선

Abstract : The IMO has adopted emission standards through Annex VI of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) that strictly prohibit the use of bunker C oil for vessels. In this study, we have adopted the turret-moored Floating LNG-Bunkering Terminal (FLBT) which is designed to receive the LNG from LNGCs and transfer it to LNG-bunkering shuttles in side-by-side moored condition. Numerical analyses were carried out using the high-order boundary-element method for four vessels at various relative distances. Mean wave drift forces were compared in an operational sea state. A model test was performed in the ocean engineering basin at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO) to verify the safety of the berthing/unberthing operation. In the model test, a jig was designed to simulate tug boats pushing or pulling the bunkering vessels, so that the friction force of the g operation was not affected. Safety depended on the environmental direction, with more stable operation possible if the heading-control function of FLBT is applied to avoid beam-sea conditions.

Key words : Floating LNG-Bunkering Terminal (FLBT), LNG bunkering, berthing and unberthing, model test, tug boat

1. 서 론

세계적인 환경오염 규제 및 IMO(국제해사기구)의 선박 연료 황 함유량 제한으로 LNG를 선박의 연료로 사용하는 연구 및 사업이 활발히 진행되고 있다. 앞으로도 세계 무역량 증가

와 선박 수의 증가에 따라 선박연료 수요가 증가할 것이나, 이러한 환경규제로 선박연료 구조는 크게 바뀔 것으로 예상된다. 청정 연료인 LNG를 사용하는 LNG 연료 추진선 및 벙커링(연료공급)을 위한 인프라 개발 사업이 더욱 확장되고 있는 추세이다.

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

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

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

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

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

(주) 이 논문은 "FLBT와 벙커링 선박들의 이접안 안전성 평가를 위한 실험적 연구"란 제목으로 2018년 한국해양과학기술협의회 학술대회(제주 국제컨벤션센터, 2018.5.24.-25, pp.5-8)에 발표되었음

선박에 LNG를 공급하기 위한 방법은 크게 TTS(Truck to ship), PTS(Port to ship 또는 Pipeline to ship), STS(Ship to ship)으로 나눌 수 있다. 현재 세계 주요 병커링 항구들은 전략적으로 LNG 병커링을 위해 이러한 설비들을 확충해 나가고 있다. 이 중 트럭을 이용한 방법은 소규모의 LNG 이송에만 적용할 수 있으며, PTS 방법은 LNG 저장 탱크 등의 항구 여건이 받쳐주지 않거나, 장기간의 안정된 공급 계약이 확정되지 않는다면 적용하기 힘든 단점이 있다. STS 방법은 보다 유연하게, 계류되어 있거나 정박중인 선박들에게 LNG 공급이 가능하다. 컨테이너 등의 선적물 처리나 승객들의 승하차 작업과 충돌이 없으므로, 선적작업과 LNG 공급의 동시작업이 가능한 장점이 있어 선호된다. 따라서 STS 병커링 기반 시설에 대한 다방면의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 관점에서 당 연구소에서는 해상 부유식 LNG 병커링 터미널 FLBT, Floating LNG bunkering terminal; 이하 FLBT) 개발 연구가 진행되었다.

국내의 경우, 각 항만마다 각자의 예인선 사용 기준 및 소요마력 산출 방법을 제시하고 있으며, 항만별로 예인 대상 선박에 대한 예인선 사용 척수와 총 사용마력이 다르다(Jung et al., 2010). 따라서 병커링 시 안전하고 운용 효율성이 높은 이접안 작업을 위한 해상환경 및 예인소요 마력에 대한 기준 연구가 필요하다. Park et al.(2017)은 FLBT의 이접안과 적하역 시나리오에 대한 풍하중과 조류하중에 대한 풍동시험을 수행하여 이접안 및 적하역 시 FLBT와 이접안 선박에 작용하는 풍조류 하중에 대한 특성을 분석하여 작업 조건 시 환경하중 적절성을 검증하였다. Jung et al.(2018)은 적하역 시나리오에 대한 모형시험을 수행하여 적하역 작업 향상을 위한 해양파차폐효과(Shielding effect)에 대한 필요성을 확인했다. Oh et al.(2020)는 Jung et al.(2018)의 연구를 통하여 이접안 및 적하역 작업 성능 향상을 위하여 환경하중에 대한 차폐효과가 필수적임을 착안하였으며 이러한 차폐효과 유지를 위한 DP 해석을 수행하여 적합성을 확인하였다.

부유체간의 접안 현상에 대한 연구는 두 선박의 거리의 변화에 대한 상호작용이 중요하기 때문에 이를 구현할 수 있는 수치적 방법이 제한적이다. 최근 Nam et al.(2016)은 FEM(Finite element method)과 가변 격자를 활용한 방법을 제시하여 두 선박의 거리 변화에 대한 상호작용을 성공적으로 반영하였다.

본 연구는 개발된 FLBT를 대상으로 이접안 연구를 수행하였다. FLBT는 220k CBM의 LNG 저장 능력을 가지며, 170k급 LNGC로부터 연료 공급을 받고, 30k, 5k급 LNG 병커링 셔틀 (이하 LNG BS)에 LNG 연료를 공급하며 부산항 연안에 터렛 계류되는 개념으로 설계되었다. 최대 3척이 동시 접안되어 갖은 이접안 작업이 예상된다. 이에 안전하고 효율적인 STS 병커링 작업 절차가 필요하며 STS 병커링 작업 가이드를 위한 이접안 연구를 다룬다.

LNGC 및 LNG BS이 FLBT에 안전하고 운항 효율적인

이접안 기준 설정 및 필요 예인선 운행 지침 등을 수립하기 위해 파랑 표류력에 대한 수치해석과 환경 하중 하의 이접안 모형시험을 수행하였다. 이접안 시 접안 거리에 대한 파랑 표류력의 변화는 이접안 기준을 정립하는데 중요한 정보를 제공한다. 따라서 고차패널법을 이용하여 FLBT와 이접안 선박의 상대거리에 대한 파랑 표류력 변화를 관찰하였다. 모형시험에서는 이접안 선박에 작용하는 예인선의 하중을 모델링하기 위한 특수한 모형치수가 제작되었으며, 이를 통하여 예인선의 하중을 계측하였다. 수행된 수치해석과 모형시험의 결과를 통해 이접안 운영 가이드 정립에 활용하고자 한다.

2. 이접안 거리별 파랑표류력 특성 수치해석

본 연구에서 고려된 FLBT는 LNG 연료의 저장 및 공급을 목적으로 해상에서 터렛 계류되어 있는 해양구조물이다. 170k급 LNGC와, 30k 및 5k 이하급 LNG BS가 동시에 접안하여 적하역이 가능하도록 개발되었으며, 총 4척 부유체의 기본 체원과 적하역 예상 모델은 Table 1과 Fig.1에서 확인 할 수 있다.

이접안 시 접안 거리에 대한 파랑 표류력의 변화는 이접안 절차를 마련하는데 중요한 정보를 제공한다. 파랑 표류력은 고전적인 포텐셜 이론으로도 정확히 계산할 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 각 부유체의 파랑표류력을 포함한 동유체력은 고차경계요소법 (Higher-order boundary element method)을 이용하여 계산하였다. 고차경계요소법은 동유체력 계산에 보다 널리 사용되고 있는 CPM (Constant panel method)에 비하여 모델링이 까다롭지만, 훨씬 적은 요소로도 정확한 형상을 반영할 수 있으며 파랑표류력 등의 결과 수렴성도 매우 뛰어나다 (Choi et al. 2000). 자세한 이론과 과정은 Kim et al.(2018)의 연구에서 찾을 수 있다. 고차경계요소법은 물체 형상을 9개 절점의 2차 사각요소로 나타내었으며, 본 연구에서는 약 10,000개의 절점 및 2500개 수준의 요소가 사용되었다. 동유체력 계산에 사용된 요소 형상은 Fig. 2에 나타내었다.



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

Table 1 Principal particulars 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

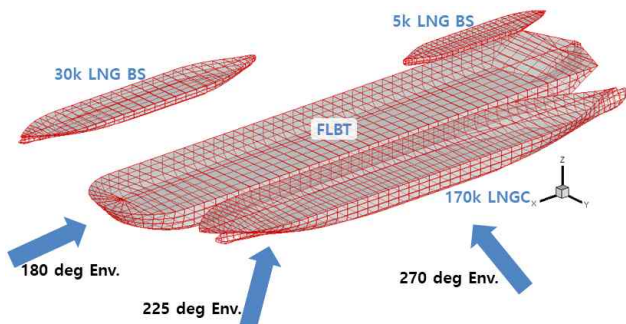


Fig. 2 Example of the numerical model and environmental directions

각 선박의 접안 거리에 따라 다양한 조건의 해석이 수행되었으며, Fig.2 에 나타난 형상은 예시로서 30k LNG BS가 접안 완료 되었을 때 보다 50m 더 떨어졌을 경우이다. 접안이 완료되었을 때 틈새 간격은, FLBT-LNGC 간 4.5m, FLBT-LNG BS 간 2.8m이며, 사이 공간에는 몇 개의 완충재(Fender)가 존재한다. 본 동유체력 계산에서 병렬계류 및 완충재로 인한 추가적인 계류강성은 고려되지 않았다. 파도의 주파수 성분별로 유체력 특성을 계산 하는 방식으로서, 계류 방법 또한 반영되지 않는다. 수심은 설치 예상 해역의 109m를 가정하였으며, 이로 인한 유체의 유한수심 영향은 해석에 반영하였다.

다물체의 동유체력 계산시, 선박 간 틈새 간격에서 공진이 발생 할 수 있으며 특정 주파수에서 파고 증폭되어 커지게 된다. 하지만 실제 현상을 크게 벗어나는 비정상적인 틈새 공진현상을 억제하기 위하여 선체의 침수표면 요소에 가상의 감쇄 파라미터 ϵ 을 도입하였다 (Hong et al. 2013). 이러한 국부적인 파고 증폭은 전반적인 운동 특성과 운동 RAO에 적은 영향만을 준다고 볼 수 있지만, 파랑표류력계수 (QTF) 에는 파고의 제곱에 비례하여 매우 큰 영향을 미친다. 아래 Fig. 3에는 공진 주기에서 감쇄 파라미터 ϵ 를 변화하였을 때, 파랑 표류력계수의 변화를 나타내었다. ϵ 은 0에서 0.05까지 변화한 모습을 나타내었으며, 그 중 비현실적 공진이 발생하지 않는다고 보여지는 0.02값을 적용하였다.

이처럼, 4척의 부유체가 고려되고 가상의 계수가 적용되는 등 일반적인 경계요소법으로 해석하기에는 비선형성이 큰 복잡한 문제임에는 틀림없다. 하지만 공진은 특정 주파수에 한정된 부분이고, 공진이 과하지 않도록 적절히 가정된 감쇄 계수가 적용되었으므로, 식 (1)을 통해 전체 주파수 영역에서 파랑표류력 계수를 적분 한 평균 힘을 상호 비교함에 있어서는 큰 문제가 없다고 판단된다.

$$F_{mean} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} QTF(w, w) S(w) dw \quad (1)$$

여기서 w 는 파도의 단일 성분의 주파수를, $QTF(w, w)$ 는 QTF의 대각행렬 곡선, $S(w)$ 는 파랑에너지스펙트럼을 뜻한다.

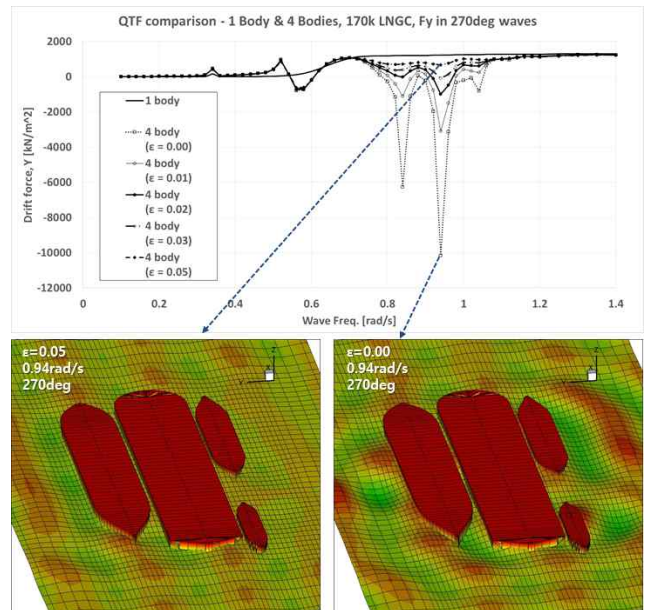


Fig. 3 Drift force discrepancies according to panel damping coefficient ϵ .

FLBT의 예상 설치 해역인 부산 근해의 계측된 파랑 자료로부터 도출 된 운용 상태 해상 조건 (1-year return period, operational sea state)으로서 유의파고(H_s) 2.1m, 파 주기(T_p) 6.02s, 형상계수 3.3의 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다. 예인선 운용에 크게 문제없는 잠잠한 해상 조건이며, 슬로싱 등 격렬한 유동현상 등을 추가로 고려할 필요가 없다. 파랑조건은 식 (1)에 반영되어, 운용 상태 해상 조건에서의 평균 파랑표류력을 계산하는 데 사용 되었다.

Fig. 4 에서는 FLBT와 3척이 동시 적하역이 이루어지는 조건에서의 평균 파랑표류력을 나타내었다. 270도 (FLBT의 좌현, 170k의 우현에서 접근하는 파향) 파랑색 실선을 확인 하면, 170k LNGC는 약 400kN의 평균 표류력을 받지만, FLBT는 약 250kN 수준의 파랑 표류력이 작용한다. 반대로, 90도 파향에서, 170k LNGC에는 거의 파랑표류력이 작용하지 않는다

것을 알 수 있다. 이와 같이 각 방향에 따라 차폐효과를 뚜렷하게 확인 할 수 있다. Fig. 5 에서는 Fig. 4 의 접안 완료 상태와 대비하여, 170k의 상대 거리가 먼 경우의 각 선박 파랑 표류력을 확인 할 수 있다. 접안이 진행되며 거리가 가까워질수록 두 선박 간 차폐효과등 상호 영향이 강해진다는 사실을 유추 할 수 있다. FLBT와 170k LNGC의 간격이 20m, 100m 추가로 멀어질수록 차폐효과가 약해지며, 상대 선박 방향에서 다가오는 파도에 표류력이 커진다. Fig. 6~8은 각 3척의 병커링 선박에 대해서 접안 거리별 파랑 표류력을 나타내었다. 170k LNGC의 경우에는 거리에 따른 파랑표류력이 어느 정도 합리적으로 이해 할 수 있는, 거리별로 일관된 경향성을 얻을 수 있었다. 하지만 30k나 5k LNG BS의 경우, FLBT의 우현으로 다가오는 파도에 대해서 3척의 부유체가 상호작용함으로 보다 복잡한 결과가 도출되었다. 예를 들어, 기본 배치 조건에서 30k LNG BS는 FLBT의 선수사과, 30deg 방향의 파도에서 약 200kN의 파랑 표류력을 받는 것을 Fig. 7에서 확인 할 수 있다.

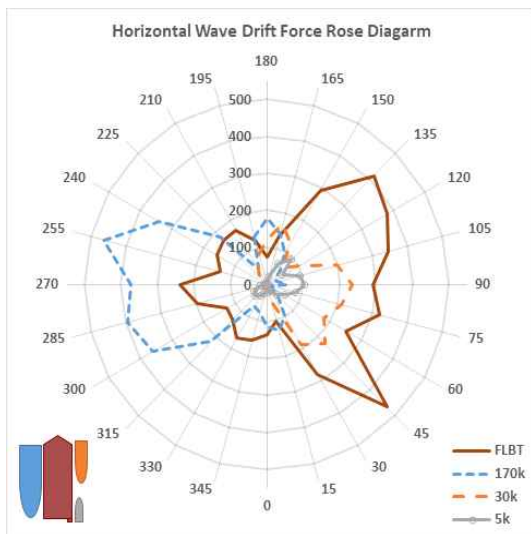


Fig. 4 Mean drift force diagram - base (4-body simultaneous operation) case

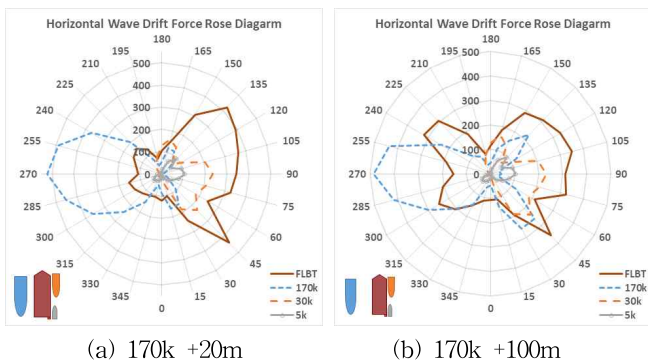


Fig. 5 4-body drift forces according to 170k LNGC distance

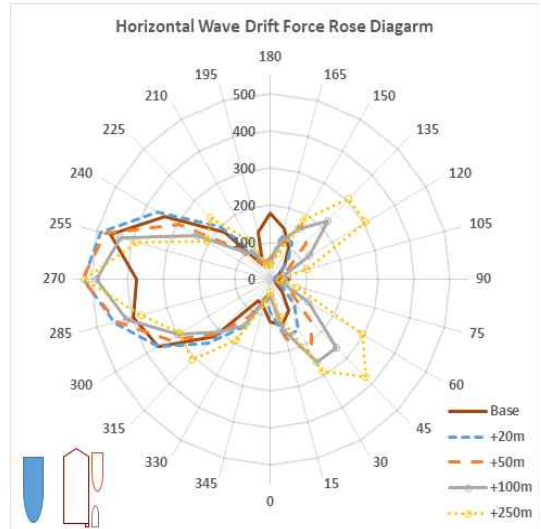


Fig. 6 170k LNGC drift forces at various berthing distance

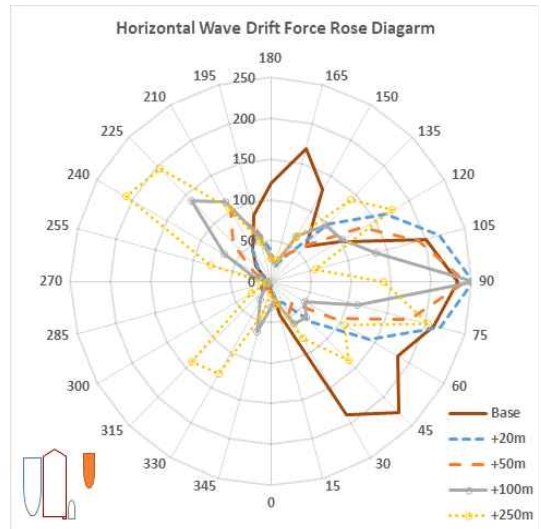


Fig. 7 30k LNG BS drift forces at various berthing distance

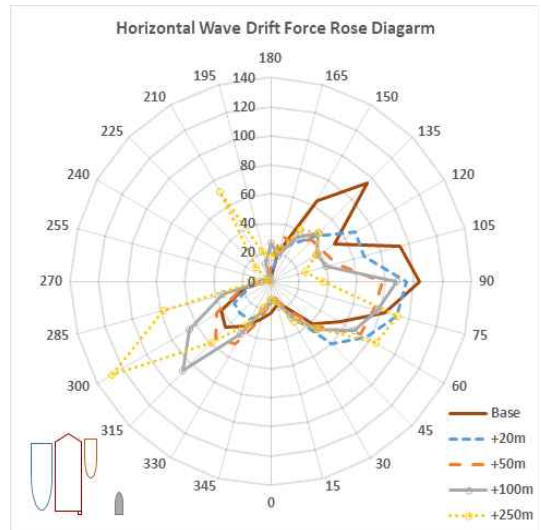


Fig. 8 5k LNG BS drift forces at various berthing distance

하지만, 불과 20m 간격이 더 떨어진 경우에는 파랑 표류력이 50kN 미만으로 급격히 감소한다. 이는 FLBT와 30k LNG BS 사이의 간격으로 인한 공진 파도가 표류력을 키우거나, FLBT에서 반사된 파도가 다시 30k LNG BS에 작용할 때 표류력을 상쇄하는 등의 이유가 존재한다고 생각된다.

이와 같이 선박들이 밀접해 있는 상황에서는 약간의 거리 변화만으로 파랑력 변화가 복잡하게 변할 수 있으므로, 예인선 운용에 주의가 필요하다.

실제 FLBT는 turret으로 계류되어 환경 하중에 따라 회전하기 때문에, FLBT의 선미파 (0 deg. 방향 파도)가 존재할 경우는 매우 적다. 벙커링 선박들의 이접안 운용에 문제가 있을 정도로 파도가 강하다면, 그리고 파도가 강할수록 바람과 파도의 방향이 일치할 확률이 더욱 커지기 때문에 이러한 180 deg 파도가 존재하기 어렵다. 이접안 되는 선박들이 선수파 ± 30 deg 범위 내에서 접안 된다면, 170k LNGC는 최대 300kN, 30k LNG BS는 200kN, 5k LNG BS는 50kN 수준의 평균 파랑 표류력을 받게 된다.

연해에 사용될 길이 20m 전후의 소형 예인선의 예인력이 약 20톤 수준이라고 볼 때, 바람, 조류를 제외한 순수 평균 파랑표류력은 예인선으로 충분히 작업할 수 있는 적은 값을 보이고 있다.

3. 이접안 모형시험

이접안 시 필요한 예인선 용량 산정과, 로프에 작용하는 하중을 평가하기 위해 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 모형시험을 수행하였다. Table 1에 나타난 제원 및 1/65 축척비의 모형을 사용하였다. 접안 중 조류속도 1.0m/s, 2.1m/s를 고려하였고, 계측된 값에서 조류에 의한 하중을 확인하기 위해 정수 중에서도 실험을 수행하였다. 정수 및 조류 중에서는 2회 반복실험을 수행하였고, 파랑 중 실험은 계측시간이 실선 기준으로 30분이 넘을 때까지 반복하였다. 파랑조건은 앞서 수치해석에 적용된 유의파고 2.1m의 조건이다.

일반적으로 이접안 속도는 실선 기준으로 0.3 노트 이하로 수행되며 이 속도는 모형선 기준으로 대략 0.019 m/s의 속도이다. 하지만 수조의 예인전차에서 제어 가능한 최저 속도가 X, Y 방향으로 각각 0.05 m/s임을 감안할 때 실선과 동일하게 평가할 수 없다. 고려된 이접안 속도는 모형선 기준으로 0.05m/s, 0.071m/s, 0.1m/s, 0.141m/s 그리고 0.191m/s이다. 이는 실선기준 0.4~1.5m/s이다. 모형시험에서 다룰 수 없는 저속의 영향은 추후 연구를 통해 검토 할 예정이다.

접안시는 예인선이 대상선박을 직접 밀고, 이안시에는 선측의 sunken bitt나 기타 bollard류에 로프를 연결하여 선박을 당기게 될 것이다. 본 모형시험에서는 선박의 길이방향 6번, 14번 station에서 선박을 밀거나 당길 수 있는 특별한 치구를 개발 및 제작하였다. 접안시에는 마찰력 등의 영향을 막기 위해 볼 조인트 끝단으로 밀게 되고, 이안시에는 wire를 걸 수

있도록 eye bolt를 연결하였다. 그리고 이접안시 과도한 충격 하중을 막기 위해 스프링을 연결하였다. 실제 예인선과 유사한 환경을 만드는 장점이 있으며, 예인선 자체의 운동은 고려하지 못하는 한계가 있다. 예인선 모사 치구의 형상은 Fig. 9에 나타나 있다. 치구는 중앙크레인 고정부, 굽힘계측식 로드셀 및 스프링으로 구성되어 있다.

예인선을 모사한 치구는 주어진 속도를 유지하며 약 320m (모형수조에서 약 5m 거리)를 이동하게 된다. 접안시에는 FLBT를 향해 320m를 접안속도를 유지하며 이동하고, 이안시에는 FLBT에 붙어 있는 초기상태에서 치구를 이동시킨다. 이에 따라 대상선박이 움직이게 되며, 예인선에 걸리는 힘과 대상선박의 움직임을 계측하였다.

대상 선박을 밀거나 당길 때 예인전차에서 제어 가능한 최소 가속도가 충분히 작지 못하므로 시험 시작과 종료에서 과도한 힘이 계측될 수 있다. 시험 및 종료시험의 가속 및 감속을 고려하면 반드시 복원력이 존재하여야 함으로 Fig. 10 같이 예인선 3, 4를 배치하였다. Fig. 10의 각 그림 및 예인선 3, 4가 중앙선과 이루는 각은 Table 2와 같다.

Fig. 11 및 12에서는 실제 모형시험 중인 모습을 나타내었다. 예인선 모사 치구는 접안시 Fig. 11와 같이 볼조인트 끝단으로 선박을 밀고, 이안시에는 치구를 돌려 반대편 끝단에 wire를 연결하여 Fig. 12와 같이 선박을 잡아당기게 된다. Fig. 13에서는 대표 1조건에서의 모형시험 결과 시계열(횡방향 움직임, 예인선 1, 2의 힘)을 나타내었다. 실선 스케일 30분 이상 통계가 쌓일 수 있도록 수차례 반복시험 한 것을 조합하였기에, 횡 움직임(Sway)에 부자연스러운 시계열 꺾임 현상을 찾을 수 있으나 시험결과나, 통계치에는 문제가 없다.

Fig. 14에는 파도 및 조류가 작용하지 않았을 경우, 계측된 평균 하중을 나타내었다. 횡방향으로 평행하게 접안되므로 F_y 가 지배적이며, 상대적으로 매우 적은 값인 F_x 는 나타내지 않았다. 170k LNGC의 경우, 1m/s의 이동 속도에서 약 1,000kN 가량의 이접안 하중이 발생하였다. 이는 0.3knot 정도의 일반적인 이접안 속도를 가정 했을 때, 2~3ton 수준의 평균 하중을 의미한다. 실제 이접안시에는 이접안 속도를 유지하기 위한 하중은 거의 없으며, 환경조건을 이겨내기 위한 예인선의 힘이 중요함을 나타낸다. 30k LNG BS의 경우 그 크기가 훨씬 적다.

Fig. 15에서는 환경조건 하에서의 접안 조건 중 환경하중을 나타내었다. 앞서 언급된 바와 같이 매우 낮은 실제의 이접안 속도와 모형시험에서 구현된 속도의 차이가 크므로, 선속에 의한 하중 성분을 제외 한 순수 외력에 의한 값만을 나타내었다. Fig. 15의 IRR01은 유의파고 2.1m의 불규칙파 조건을, U_c 는 조류 속도를 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 파도로 인한 필요 예인력은 1.0m/s의 조류속도로 인한 예인력보다 훨씬 적다.

Table 2 Tug line angle for arrangement of models

Scenario	Tug angle (deg)
170k LNGC berthing arrangement	21.45°
170k LNGC unberthing arrangement	33.98°
30k LNG BS berthing arrangement	23.24°
30k LNG BS unberthing arrangement	23.34°

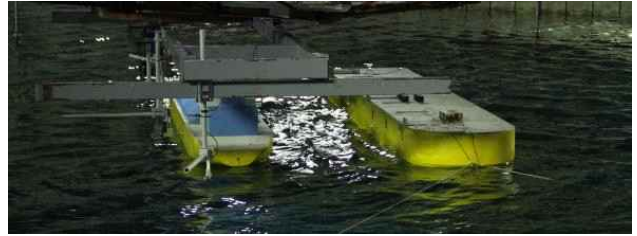


Fig. 11 Berthing test for 170k LNGC

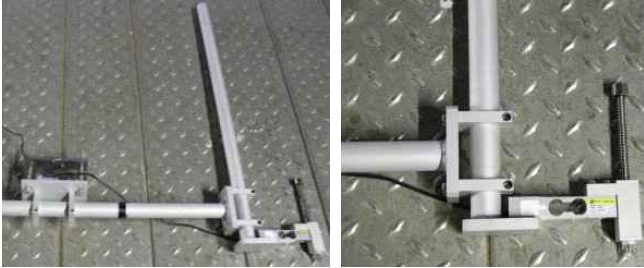


Fig. 9 Test devices for berthing and unberthing

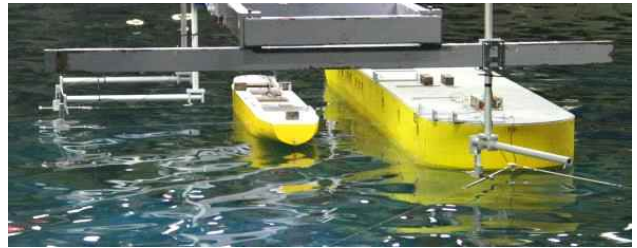
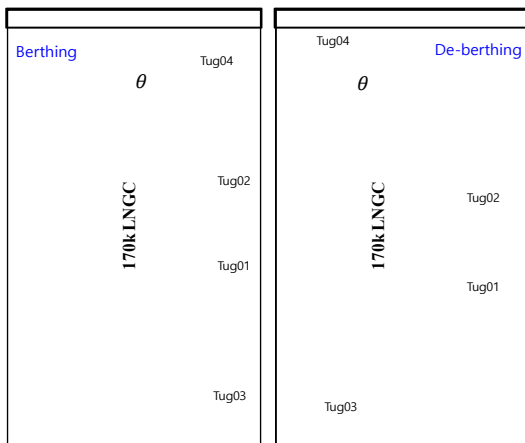
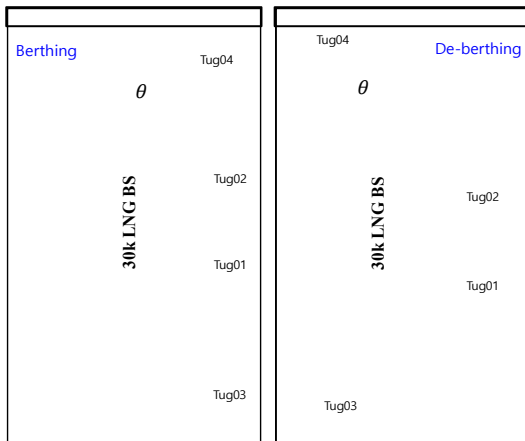


Fig. 12 Unberthing test for 170k LNGC



(a) (b)



(c) (d)

Fig. 10 Arrangement for test equipment for berthing and unberthing

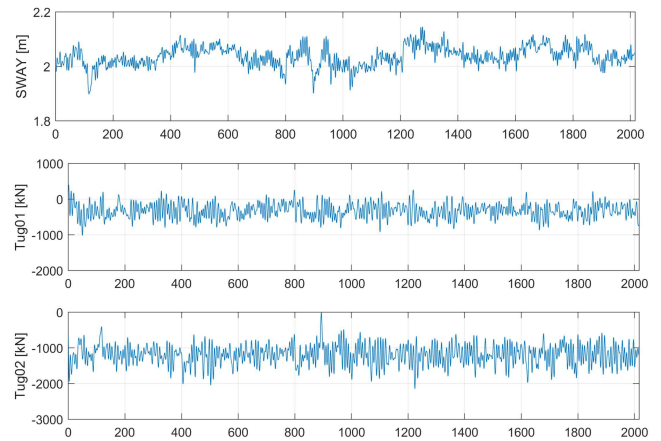


Fig. 13 Time series - 170k unberthing in 225deg waves

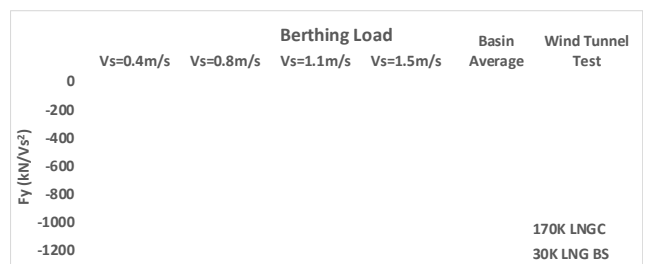


Fig. 14 Berthing load in without environment conditions

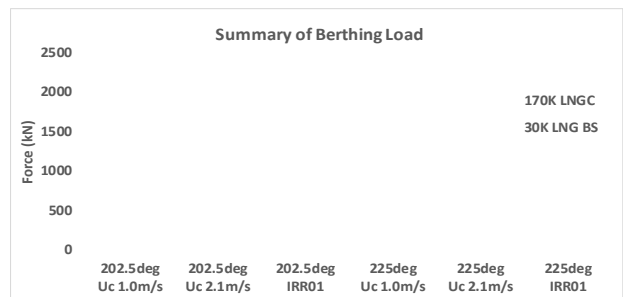


Fig. 15 Environmental load during berthing operation

대한해협의 강한 조류속도로 인하여, 파랑보다는 조류 속도가 접안력에 지배적임을 확인할 수 있다. 또한 30k의 조류하중은 170k LNGC 대비 1/3 이하 수준이었다. 모형시험 결과로부터 추정되는 최대 필요 예인선 저항력은, 모형시험에 사용된 18.6년 재현확률의 조류속도 2.1m/s 및 유의파고 2.1m 기준으로 300톤의 힘이 필요하다. 이는 조류 및 파랑 방향이 45도 틀어졌을 기준이며, 22.5도 틀어졌다면 180톤의 저항력이 필요하다. 조류속도 2.1m/s에서 실제 이접안 작업을 하기에는 너무 가혹한 조건임에 틀림없으며, 조류속도를 1m/s 으로 제한하였을 경우, 200톤의 저항력이 필요하다. 조류 및 파도의 방향을 선수에서 22.5도 방향으로 제한한다면, 90톤의 저항력이 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 고차경계요소법을 사용하여, FLBT에 접안하는 벙커링 선박들의 접안 과정 중 거리에 따라 변화하는 파랑 표류력 변화를 연구하였다. 또한 FLBT의 설치 해역에서의 이접안 운용 조건을 확인하기 위해 모형시험을 수행하였다. 모형시험 결과로부터 유추되는 주요 결론을 아래에 정리하였다.

(1) 입사파에 대하여 lee-side에 위치한 부유체는 입사파를 직접 받는 부유체의 차폐 효과에 따라 작은 파랑표류력을 받으며, 부유체 사이의 거리가 커질수록 영향이 감소하였다. 접안거리가 가까울수록 파랑표류력 경향이 급변함으로, 파도가 클 경우에는 예인선 운용에 주의가 필요하다.

(2) 모형시험 결과를 통해, 4,500마력급(저항력 60톤) 예인선 4척 사용을 기준으로, 조류가 1m/s 일 경우 170k LNGC의 이접안은 조류, 파도의 선수 상대각도 45deg 이내일 때 작업 가능하다.

(3) 조류가 2.1m/s 일 경우, 170k의 이접안은 조류, 파도의 선수 상대각도 25도 이내일 때, 작업 가능하다.

(4) 환경 상대각도가 커질수록 필요 저항력이 커짐으로, FLBT의 Heading control 기능이 운용 가능시간(Uptime)에 크게 기여 할 수 있다.

향후, 새롭게 조사된 환경조건을 적용 할 필요성이 있고, 본 모형시험에서 다루지 못한 바람의 영향 및 복합 환경 조건 등을 수치적으로 연구 할 계획이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 LNG벙커링 핵심기술개발 및 체계 구축사업 'LNG 벙커링 운영체계 및 위험도 평가기반 운영기술개발'에 의해 수행되었습니다.(PMS4310)

References

- [1] 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.
- [2] Hong, D. C., Hong, S. Y., Nam, B. W. and Hong, S. W. (2013), "Comparative numerical study of repulsive drift forces and gap resonances between two vessels floating side by side in proximity in head seas using a discontinuous HOBEM and a constant BEM with boundary matching formulation" *Ocean Engineering*, Vol. 72, pp. 331-343.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Jung, S. J., Jung, D. W., Oh, S. H., Jung, H. W., Won, Y. W., Cho, S. K., Jung, D. H. and Sung, H. G.(2018), "Experimental Study of Berthing and Deberthing Assessment for FLBT and Bunkering Vessels", *Proceedings of The Korea Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 5-8.
- [6] Kim, Y. H., Jung, D. W., Cho, S. K. and Sung, H. G. (2018), "Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics and Operational Feasibility of Floating LNG Bunkering Terminal Moored Side-by-side with LNG Carrier and Two LNG Bunkering Shuttles", *Ship and Offshore Structure*, Vol. 3, No. 5, pp. 504-518.
- [7] Nam, B. W., Kim, Y. and Hong, S. Y.(2016), "Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves", *Applied Ocean Research*, Vol. 58, pp. 49-61.
- [8] 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.
- [9] 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 10 August 2020

Revised 19 August 2020

Accepted 12 October 2020