

LNG 병커링 바지의 정수 중 예인안정성에 관한 수치연구

† 오승훈 · 정동호* · 정재환** · 황성철*** · 조석규**** · 성홍근*****

,*,*****,† 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Numerical Study on Towing Stability of LNG Bunkering Barge in Calm Water

† Seung-Hoon Oh · Dong-Ho Jung* · Jae-Hwan Jung** · Sung-Chul Hwang*** · Seok-Kyu Cho****
· Hong-Gun Sung*****

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

요 약 : 본 논문에서는 LNG 병커링 바지에 대한 예인안정성을 평가하였다. 친환경 에너지원인 LNG(액화천연가스)의 전환을 위한 인프라로 LNG 병커링 바지가 개발되고 있다. LNG 병커링 바지는 예인줄에 연결되어 이동하는 부선의 형태이기 때문에 LNG 공급용 부선의 예인안정성의 확보는 LNG 병커링 바지 뿐 만아니라 주변 항해 선박의 안전을 위해 매우 중요하다. LNG 병커링 바지의 예인안정성을 초기설계 단계에서 추정하기 위해 예인시뮬레이션을 위한 수치코드를 개발하였다. 초기설계 단계에서 활용 가능하도록 운동방정식에는 조종수학그룹 모델이 적용되었고 조종미계수에는 경험식이 적용되었다. 개발된 수치코드의 유효성을 확인하기 위해 발표된 계산 및 모형시험 결과와 비교하였다. 개발된 수치코드를 이용하여 LNG 병커링 바지의 선미 스킵그 면적과 예인 위치의 변화에 따른 예인시뮬레이션을 수행하였다. 수행된 시뮬레이션을 통해 설계된 선미 스킵그 면적의 적정성을 확인하였다.

핵심용어 : LNG 공급용 부선의 예인안정성, 예인시뮬레이션, 조종수학모델그룹, 조종 미계수, 선미 스킵그

Abstract : In this paper, the towing stability of the LNG bunker barge was estimated. Currently, LNG bunkering barge is being developed for the bunkering of LNG (Liquefied Natural Gas), an eco-friendly energy source. Since the LNG bunkering barge assumes the form of a towed ship connected to the tow line, the towing stability of the LNG bunker barge is crucial not only for the safety of the LNG bunker barge but also the neighboring sailing vessels. In the initial stages, a numerical code for towing simulation was developed to estimate the towing stability of the LNG bunkering barge. The MMG (Maneuvering Mathematical modeling Group) model was applied to the equations of motion while the empirical formula was applied to the maneuvering coefficients for use in the initial design stage. To validate the developed numerical code, it was compared with published calculation and model test results. Towing simulations were done based on the changing skeg area and the towing position of the LNG bunkering barge using the developed numerical codes. As a result, the suitability of the designed stern skeg area was confirmed.

Key words : Towing Stability of LNG Bunkering Barge, Towing simulation, MMG Model, Maneuvering Coefficients, Stern Skeg

1. 서 론

지속적인 인구 증가와 화석연료의 사용으로 인한 대기오염 및 이산화탄소의 증가에 대한 우려가 커지고 있다. 전 세계적으로 이산화탄소의 억제를 위한 대책이 마련되고 있는 실정이다. 특히 항만도시의 경우, 선박배출가스로 인한 대기오염이 심각한 수준이며 이를 방지를 선박배출규제가 발효됨은 물론 친환경 연료에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 특히 SOx, NOx 뿐만 아니라 미세먼지를 거의 배출하지 않고 이산화탄

소의 배출도 약 20~30% 줄일 수 있는 장점이 있는 LNG는 전환 가능성이 가장 높은 친환경 연료로 고려되고 있다. 이러한 LNG의 지속적인 관심증가에도 LNG 추진선박을 위한 병커링 설비의 부재로 선박연료의 LNG 전환이 지연되고 있다. 이러한 상황을 돌파하기 위해 해양수산부의 지원으로 LNG 병커링 바지의 건조 및 실증을 위한 연구인 “연안선박용 맞춤형 LNG 병커링 시스템의 개발”이 진행되고 있다(Jung et al., 2018). 현재 LNG 병커링 바지는 추후 추진기 탑재 및 개조(Retrofit)를 고려하기 위해 LNG Propulsion Ready(LNG 추

† Corresponding author : 정희원, carot541@kriso.re.kr 051)604-7825

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

** 정희원, jaehwan@kriso.re.kr 051)604-7828

*** 정희원, schwang@kriso.re.kr 051)604-7835

**** 정희원, skcho33@kriso.re.kr 042)866-3933

***** 정희원, hgsung@kriso.re.kr 051)604-7823

(주) 이 논문은 “LNG 병커링 바지의 정수 중 예인안정성에 관한 수치연구”란 제목으로 “2019년 한국해양과학기술협회 춘계공동 학술대회(제주 국제컨벤션센터, 2019.5.15-17, pp.185-188)”에 발표되었음.

진 준비 설계)로 설계가 진행되고 있기 때문에 선미 예인되는 부선의 형태로 개발되고 있다. 예인삭에 의해 정수 중 선미 예인되는 LNG 병커링 바지의 경우, 예인되는 LNG 병커링 바지의 유체역학적 힘과 예인삭의 장력의 상호작용을 통해 LNG 병커링 바지가 평면운동하게 된다. 특히 예인 중 외란의 작용으로 인해 예인되는 부유체의 수평면운동이 시간이 지남에 따라 원래 방향으로 돌아오는 정수 중 예인안정성이 확보되어야 안전한 운항이 가능하기 때문에 LNG 병커링 바지 뿐만 아니라 주변 항해 선박의 안전을 위해 정수 중 예인안정성의 특성을 초기설계 시 파악하는 것은 매우 중요하다.

Bernitsas and Kekerdis(1985)은 예인선박의 안정성에 대한 조건식을 선형운동방정식을 기반한 특성방정식을 이용하여 제시한 바 있다. Yasukawa et al.(2006)은 폭이 다른 두개의 바지선에 대한 예인 모형시험과 구속모형시험에 기반한 유체력을 이용한 수치해석을 수행하여 비교 분석하였다. Nam et al.(2013)은 Yasukawa et al.(2006)에서 제시한 유체력 계수를 기반으로 MMG(Manoeuvring Mathematical modeling Group) 모델과 Cross-flow 모델에 대한 비교해석을 수행하였고 MMG 모델이 더욱 모형시험에 근접함을 확인하였다. Kwon(2015)은 전산유체역학을 이용하여 예인시스템의 안정성 판별식, 평형점, 시간영역해석을 통해 초기 단계의 예인안정성을 예측하는 방법을 제안하였다.

상기 연구들과 같이 정수 중 예인안정성 해석은 일반적으로 예인안정성 판별식 또는 예인시뮬레이션을 통해 진행되기 때문에 예인되는 부선의 유체력을 추정하는 것이 필요하다. 부선의 형태는 선박의 형상과 유사하기 때문에 초기설계 단계에서는 추정식을 활용하는 것 또한 좋은 방안이다. 조종 유체력 추정식에 관한 연구는 다양하지만 Inoue et al.(1979a, 1979b)의 연구가 대표적인 사례이다. 예인안정성 향상을 위한 선미 스케그의 효과 또한 고정편을 모델링하여 추정식으로 반영하는 것이 가능하며 Jacobs(1964)의 연구를 통해 관련된 방법론을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 Ship to Ship LNG 병커링에 활용될 LNG 병커링 바지에 대한 정수 중 예인안정성을 상기 연구들을 바탕으로한 수치해석을 통하여 평가하였다. LNG 병커링 바지의 정수 중 예인안정성을 추정하기 위해 예인시뮬레이션을 위한 수치코드를 개발하였다. 개발된 수치코드는 Nam et al.(2013)의 연구에서도 모형시험에 더욱 근접한 결과를 주는 것으로 확인된 MMG 모델을 채택하였다. 조종 미계수는 Inoue et al.(1979a, 1979b)의 경험식과 Jacobs(1964)의 선미 스케그 효과를 반영하였다. 개발된 수치모델의 유효성을 확인하기 위해 Yasukawa et al.(2006)의 바지모델에 대하여 정수 중 예인해석을 수행하여 Yasukawa et al.(2006)의 계산 및 모형시험의 결과 비교 검증하였다. 개발 검증된 수치코드를 이용하여 LNG 병커링 바지의 나선(bare hull)상태의 정수 중 예인안정성을 확인하고 선미 스케그 면적과 브라이들(bridle)에 의한 예인 지점의 변화에 따른 정수 중 예인해석을 수행하였다. 수행된 해석결과를 통해 설계된 선미 스케그의 적정성을 확인하고 안전한 예인을 위한 예인지점을 파악하였다.

2. 수학모델 및 예인안정성 기준

2.1 수학모델

본 연구에서는 LNG 병커링 바지의 예인안정성에 관한 수치해석을 수행하기 위하여 MMG모델 기반의 조종운동방정식을 고려하였다. 예인되는 바지의 모델을 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

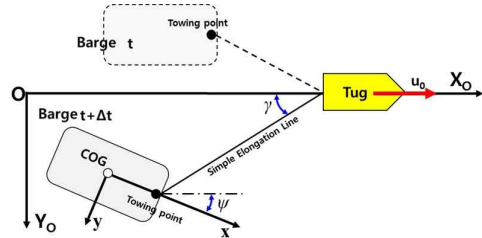


Fig. 1 Mathematical model for towing barge

예인되는 LNG 병커링 바지의 운동은 전후, 좌우 그리고 선수동요 방향의 운동으로 구성된 평면운동으로 묘사할 수 있으며 MMG 모델을 기초로 운동방정식을 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$m(\dot{u} - vr) = X_{low} + X_{hyd} \quad (1)$$

$$m(\dot{v} - ur) = Y_{low} + Y_{hyd} \quad (2)$$

$$I_{zz}\dot{r} = N_{low} + N_{hyd} \quad (3)$$

여기서 m 은 질량, I_{zz} 는 선수동요 질량관성모멘트를 의미한다. u , v 및 r 각각은 바지의 전후속도, 좌우속도 그리고 선수각 속도를 의미한다. X_{hyd} , Y_{hyd} 그리고 N_{hyd} 는 LNG 병커링 바지의 작용하는 유체력으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$X_{hyd} = -X_{res} + (X_{vr} - Y_v')vr + X_u'\dot{u} \quad (4)$$

$$Y_{hyd} = Y_v'\dot{v} + Y_r'\dot{r} + \frac{1}{2}\rho L d U^2 (Y_v'v' + Y_r'r' + Y_{v|v|}'v'|v'| + Y_{v|r|}'v'|r'| + Y_{r|r|}'r'|r'|) \quad (5)$$

$$N_{hyd} = N_v'\dot{v} + N_r'\dot{r} + \frac{1}{2}\rho L^2 d U^2 (N_v'v' + N_r'r' + N_{r|r|}'r'|r'| + N_{vvr}'v'v'r' + N_{vrr}'v'r'r') \quad (6)$$

여기서 L 은 바지의 길이, d 는 바지의 흘수 그리고 $U (U = \sqrt{u^2 + v^2})$ 는 바지의 속도를 의미한다. u' ($u' = u/L$), v' ($v' = v/L$) 및 r' ($r' = rU/L$)의 무차원화된 속도에 종속적으로 변하는 횡방향 및 선수각 방향의 유체력은 Inoue (1979a, 1979b)에 의해 개발된 조종 미계수를 정리한 Lee and Kim(1995)의 논문을 참조하였으며 식(7)-(16)과 같다.

$$Y'_v = -\frac{\pi}{2} \frac{2d}{L} - 1.4C_B B/L \quad (7)$$

$$Y'_r = \frac{\pi}{4} \frac{2d}{L} \quad (8)$$

$$N'_v = -\frac{2d}{L} \quad (9)$$

$$N'_r = -0.54 \frac{2d}{L} + \left(\frac{2d}{L}\right)^2 \quad (10)$$

$$Y_{v|v}|' = -6.49(1 - C_B) \frac{d}{B} + 0.0795 \quad (11)$$

$$Y_{v|r}|' = 1.82(1 - C_B) \frac{d}{B} + 0.447 \quad (12)$$

$$Y_{r|r}|' = -0.4664(1 - C_B) \frac{d}{B} \quad (13)$$

$$N_{r|r}|' = -1.7 |C_B B/L - 0.157|^{1.5} - 0.01 \quad (14)$$

$$N_{vvr}' = -3.25 C_B B/L + 0.35 - 10^{-7} \left(\frac{L}{C_B B}\right)^6 \quad (15)$$

$$N_{vrr}' = 0.444 C_B \frac{d}{B} - 0.064 \quad (16)$$

여기서 B 와 C_B 는 바지의 폭과 방형계수를 의미한다. 식 (5)-(6)의 Y'_v , Y'_r , N'_v 과 N'_r 은 slender body 이론을 통해 계산하였다. slender body 이론에 적용할 단면의 부가질량은 2차원 경계적분방정식방법을 이용하여 계산하였다. 그리고 X 방향 유체력 X_u 은 Motora(1960)의 추정식을 X_{vr} 은 Wagner and Chislett(1972)의 추정식을 이용하였고 식(17), (18)과 같다.

$$X_u = -0.01m (2.246 + 17.242d/B + 5.873C_B - 1.472L/B - 7.406(d/B)^2 + 4.687C_B^2 + 0.175(L/B)^2 + 22.979C_B d/L - 1.701C_B L/B - 2.198(L/B)(d/B)) \quad (17)$$

$$X_{vr} - Y_v = -Y_v (1.11C_B - 0.07) \quad (18)$$

식 (4)의 X_{res} 는 정수 중 저항을 나타낸다. 본 연구에서는 식 (19)로 저항을 모델링 하였으며 모형시험 자료 또는 CFD 결과를 최소자승법을 이용하여 a , b 를 산정할 수 있다.

$$X_{res} = au^b \quad (19)$$

식 (1)-(3)의 X_{tow} , Y_{tow} 그리고 N_{tow} 는 예인삭에 의한 예인력을 의미하며 본 연구에서는 단순 인장줄을 고려하여 식 (20)과 같이 모델링하였다.

$$Tension = \begin{cases} \frac{EA}{L_{T0}}(L_E - L_{T0}) + C \frac{dL_E}{dt} & (L_E \geq L_{T0}) \\ 0 & (L_E < L_{T0}) \end{cases} \quad (20)$$

여기서 $E(N/m^2)$ 는 예인삭의 탄성계수, $A(m^2)$ 는 예인삭의

직경, $L_E(m)$ 는 예인삭의 인장 길이, $L_{T0}(m)$ 는 예인삭의 비인장 길이, $C(N \cdot s/m)$ 는 예인삭의 감쇠계수를 의미한다. 계산된 인장력에서 예인력은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$X_{tow} = Tension \cdot \cos(\gamma - \psi) \quad (21)$$

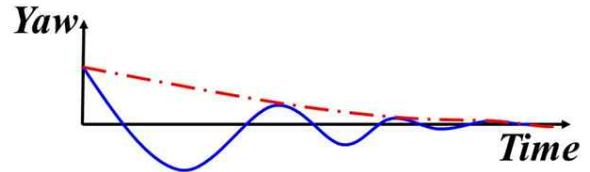
$$Y_{tow} = Tension \cdot \sin(\gamma - \psi) \quad (22)$$

$$N_{tow} = Y_{tow} \cdot x_T \quad (23)$$

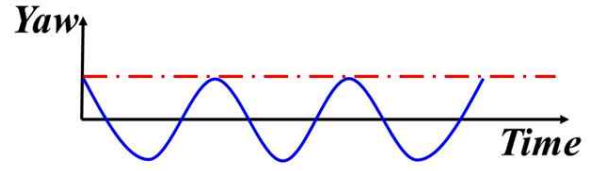
여기서 γ 와 ψ 는 Fig. 1에서 정의된 각도이다. 그리고 x_T 는 무게중심으로 부터 예인삭이 고정된 위치까지의 거리를 의미한다.

2.2 예인안정성 기준

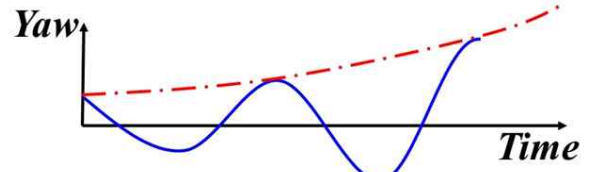
예인삭에 의해 선미 예인되는 부유체의 경우, 예인되는 부유체의 유체역학적 힘과 예인삭의 장력에 의해 저주파수의 수평면 운동을 하게되며 항해하는 선박과 예인되는 부유체의 안전을 위한 최소한의 예인안정성을 확보해야한다.



(a)Stable



(b)Marginal stable



(c)Unstable

Fig. 2 Towing stability criteria

예인 안정성이란 예인 중 외란의 작용으로 인해 예인되는 부유체의 수평면운동이 시간이 지남에 따라 원래 방향으로 돌아오려는 성질로 정의되며 Fig. 2와 같이 세분화 할 수 있다. 일정 속도로 예인되는 부유체의 경우, 운동방정식의 선형화를 통하여 아래 예인안정성 판별식이 유도될 수 있다(Bernitsas and Kekkerdis,1985; Kown, 2015).

$$x_T > \frac{N_v}{Y_v} \quad (24)$$

$$Tension > \frac{L_{T0}[-N_v\{(m - X_u)U - Y_r\} - Y_v N_r]}{\{x_T(x_T + L_{T0})(m - Y_v) + (I_{zz} - N_r)\}} \quad (25)$$

식 (24)는 예인점의 위치가 횡방향 운동 시 유체감쇠력의 작용점이 전방에 있어야 안정함을 의미한다. 식(25)는 안정적인 예인을 위한 최소장력을 의미하며 부유체의 저항이 클수록 예인 장력이 증가하여 안정성이 증가함을 유추할 수 있다.

3. 수치코드 검증

본 연구에서는 상기 서술한 수학모델을 기반으로 MATLAB 기반의 바지 평면의 예인 시뮬레이션 수치코드를 개발하였다. 수치코드의 유효성을 검증하기 위하여 Yasukawa et al.(2006)의 계산 및 모형시험의 결과와 비교하였다. 검증계산에 사용된 바지의 제원은 Table 1과 같다.

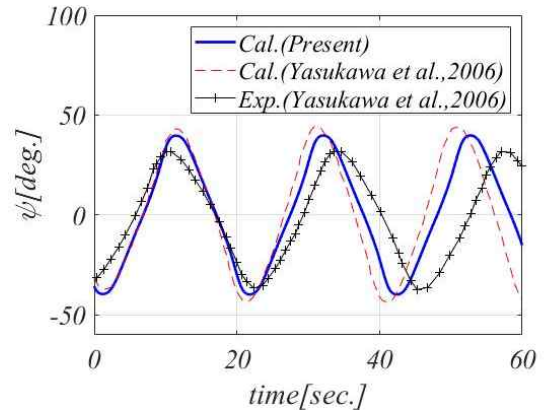
Table 1 Principal dimensions for Yasukawa's barge (Yasukawa et al., 2006)

	1B w/o skeg	2B w/o skeg
Length L(m)	1.219	1.219
Bredth B(m)	0.213	0.426
Bredth d(m)	0.0548	0.0548

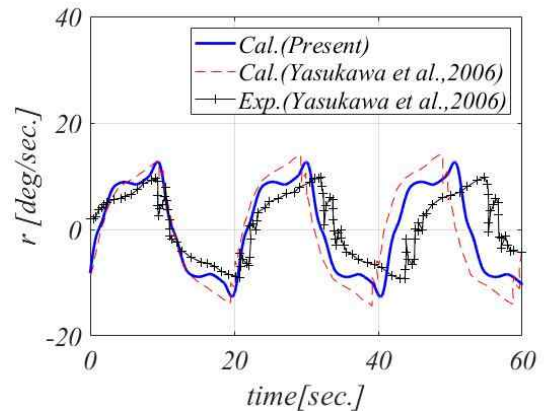
검증계산에 사용된 예인속도는 0.509m/s만을 고려하였다. 조종 미계수는 Yasukawa et al.(2006)에 제시된 값을 이용하였으며 제시된 조종미계수에 대응되도록 유체력 수식은 수정하여 계산하였다. 예인선의 길이 역시 Yasukawa et al.(2006)와 같이 바지의 길이($L_{T0}/L=1$)로 하였다. 예인선의 물성치는 Nam et al.(2013)에 제시된 스프링상수(50N/m)와 감쇠계수(10N·s/m)를 참조하여 산정하였다.

3.1 바지 1B의 예인해석

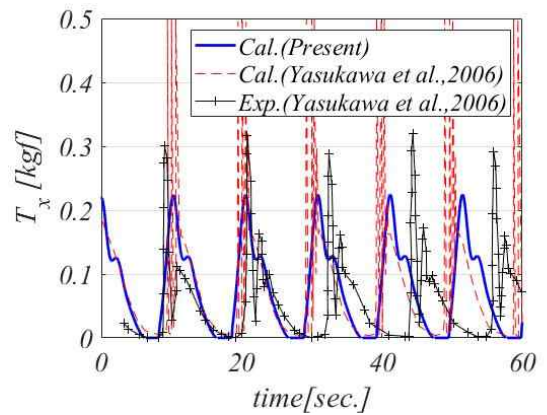
바지 1B의 예인해석을 수행하였다. 선수각 -30도의 offest으로 초기 조건을 설정하였으며 모형시험과 동일하게 60초로 수행하였다. 수행된 결과를 정리하여 Yasukawa et al.(2006)의 계산 및 모형시험 결과를 함께 Fig. 3에 비교하였다. 본 연구에서 개발된 코드로 수행된 계산의 결과와 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과 모두 Yasukawa et al.(2006)의 모형시험과 비교하여 전반적으로 유사하나 다소 큰 진폭과 짧은 동요 주기를 예측하였다. 예인선에 발생하는 장력 또한 개발된 코드와 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과 모두 모형시험과 비교하여 최대값에서는 다소 차이가 있으나 비슷한 경향성을 보여주고 있음을 확인하였다. 특히 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과의 경우, 모형시험에는 발생하지 않는 장력의 고주파 성분이 예측되는데 예인선의 모델링의 차이로 판단된다.



(a) Heading angle



(b) Yaw rate



(c) Towline tension

Fig. 3 Comparison of time histories for 1B

3.2 바지 2B의 예인해석

바지 2B의 예인해석 역시 수행하였다. 선수각 -20도의 offest으로 초기 조건을 설정하였으며 모형시험과 동일하게 60초로 수행하였다. 수행된 결과를 정리하여 Yasukawa et al.(2006)의 계산 및 모형시험 결과를 함께 Fig. 4에 비교하였다. 바지 B1과 동일하게 본 연구에서 개발된 코드로 수행된 계산의 결과와 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과 모두 Yasukawa et al.(2006)의 모형시험과 비교하여 전반적으로 유사하나 다소 큰 진폭을 예측하였다.

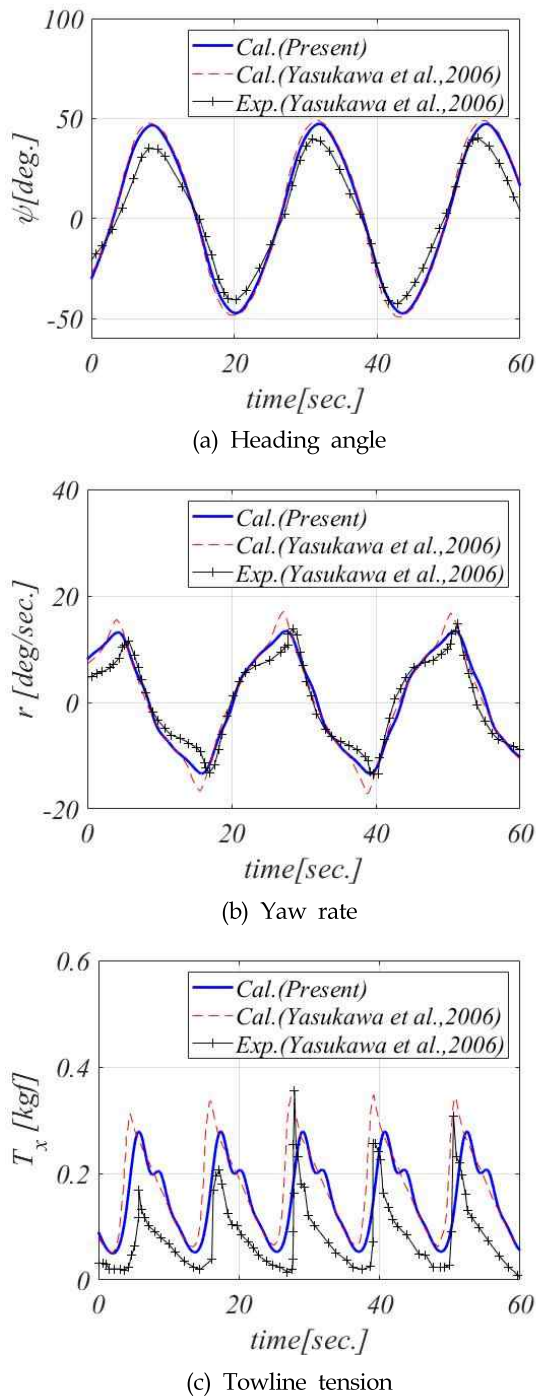


Fig. 4 Comparison of time histories for 2B without skeg

예인삭에 발생하는 장력 또한 개발된 코드와 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과 모두 모형시험과 비교하여 최대값에서는 다소 차이가 있으나 유사한 경향성을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 수치모델이 Yasukawa et al.(2006)에 의해 수행된 계산과 모형시험과 비교하여 유사한 결과를 제공함을 확인하였으며 개발된 수치모델을 통하여 LNG 병커링 바지의 예인안정성을 확인하였다.

4. LNG 병커링 바지의 예인안정성 해석

4.1 대상선 및 해석조건

본 연구에서는 설계가 진행 중인 LNG 병커링 바지의 정수 중 예인시뮬레이션을 수행하였다. LNG 병커링 바지의 3차원 형상은 Fig. 5와 같으며 주요제원은 Table 2에 나타내었다. 예인선속은 설계선속인 8 knot로 적용하였다.

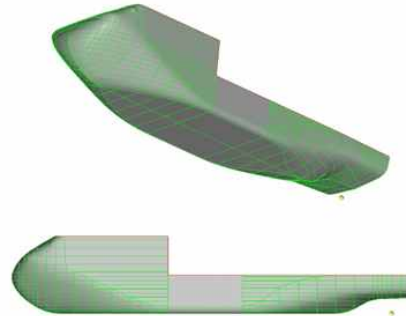


Fig. 5 Three dimensional geometry of hull

LNG 병커링 바지의 경우, 주요제원을 통해 알 수 있듯 선 폭이 넓고 흘수가 낮은 선형으로 침로안정성이 낮을것을 예상할 수 있다. 따라서 침로안정성을 향상시킬 방안이 필요하며 선미 스키프는 부족한 침로안정성을 향상시키는 방안 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 선미 스키프가 없는 LNG 병커링 바지의 정수 중 예인 안정성의 특성을 확인하고 선미 스키프의 면적 변화에 따른 예인안정성 변화를 통해 설계된 면적의 적정성을 확인하는 것이 목표이다. 추가로 브라이들(bridle)에 의한 예인 지점의 변화를 통해 안전한 예인을 위한 예인 지점을 파악하였다.

Table 2 Particulars of LNG bunkering barge

Item	Unit	Design condition
LBP	[m]	45.65
B	[m]	12.4
TF	[m]	2.5
TA	[m]	2.5
Displacement	[m ³]	1052.1
Wetted surface area	[m ²]	656.8
k _{yy}	[L]	0.25

예인해석을 위한 예인삭의 길이는 식(26)과 같이 선박안전법 제 23조 시행규칙 제 81조의 규정을 참조하여 선정하였다.

$$S \geq \gamma(L1 + L2) \quad (26)$$

S : 예인삭의 길이 (m)

$L1$: 예인선의 길이 (m)

$L2$: 부선의 길이 (m)

γ : 상수 (연해구역 이하 = 2, 근해구역 이상 = 3)

LNG 벙커링 바지는 연해구역을 운항하기 때문에 예인선은 부선과 동일한 길이로 가정하면 182.6 m ((45.65+45.65)×2) 이상의 예인삭을 확보해야 하며 계산에 편의를 위해 200m로 예인삭의 길이를 설정하였다. 예인삭의 재질은 64mm의 폴리프로필렌 합성수지 로프를 사용하였다. 본 예인삭은 20% 신장시 파단되며 파단력은 49톤이다. 이를 이용하여 EA를 산출하면 약 2,403 kN이며 감쇠계수 C는 0으로 가정하였다.

LNG 벙커링 바지의 정수 중 저항은 CFD 계산 결과를 활용하였다. CFD 계산은 상용코드인 STAR-CCM+을 이용하였고 계산은 실선 scale에서 수행되었다. 선속 별 저항을 통해 최소자승법을 통하여 식(19)의 a와 b를 산정하였고 모델된 정수 중 저항은 Fig. 6과 같다.

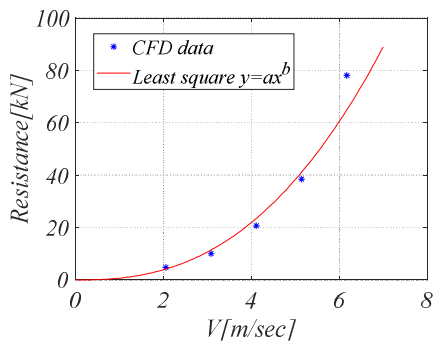


Fig. 6 Calm water resistance model of LNG bunkering barge

Y_v , Y_r , N_v 과 N_r 은 Fig. 7과 같은 LNG 벙커링 단면모델을 통해 계산되는 2 차원 단면 부가질량을 이용한 slender body 이론으로 추정하였다.

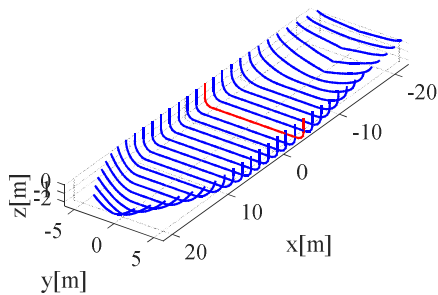


Fig. 7 Section model for 2D added mass calculation

나머지 조종미계수는 식 (7)-(18)의 추정식을 이용하여 산정하였다.

4.2 스케그가 미부착된 LNG 벙커링 바지의 예인안정성 해석

본 연구에서 예인안정성 해석은 초기 횡방향 offset(0m, 30m)에 대한 거동해석을 수행하였다. 해석 시간은 1000초를 수행하였다. 초기 offset으로 인하여 LNG 벙커링 바지의 평면운동을 Fig. 8에 도시하였다.

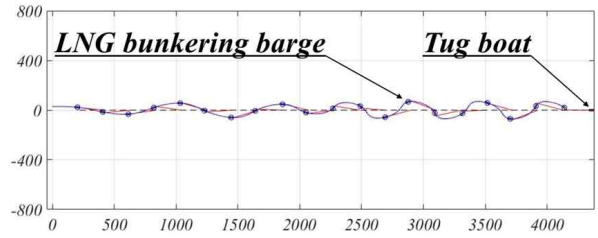
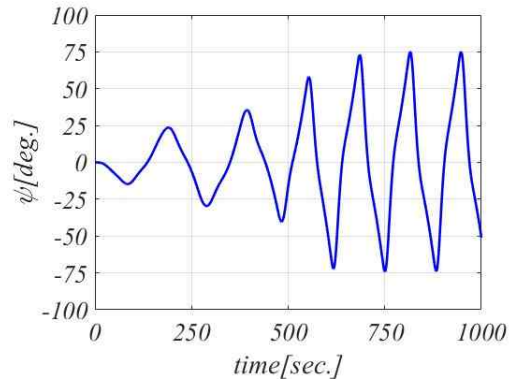
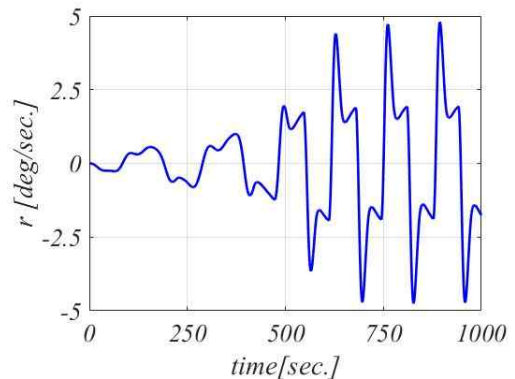


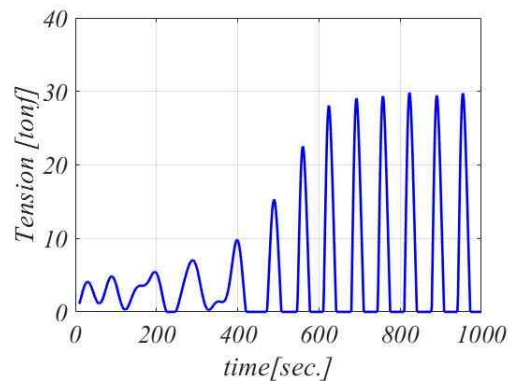
Fig. 8 Trajectory of LNG bunkering barge(W/O skeg)



(a) Heading angle



(b) Yaw rate



(c) Towline tension

Fig. 9 Time histories for LNG bunkering barge(W/O skeg)

시간이 지남에 따라 LNG 벙커링 바지의 횡방향 운동이 증가함을 알 수 있다. 선수동요, 각속도 그리고 예인장력의 시계

열을 또한 Fig. 9에 도시하였다. LNG 병커링 바지의 횡방향 운동과 마찬가지로 선수동요 역시 시간이 지남에 따라 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 예인안정성이 불안정함을 나타내며 이러한 불안정성은 예인 바지의 선수동요와 좌우동요를 증가시켜 예인되는 LNG 병커링 바지의 운항 안정성에 악영향을 준다. 뿐만 아니라 예인장력을 증가 시켜서 예인작의 파손 위험과 예인선의 저항증가로 인한 운영비 증가를 예상할 수 있다. 정수 중 저항의 결과를 통해 설계 선속 8 knots에서 저항은 약 2.0 tonf임을 감안하면 약 15배의 저항증가를 의미한다. 따라서 LNG 병커링 바지의 예인안정성 향상을 위해 선미 스키프 부착 또는 브라이들(bridle)에 의한 예인 지점의 변화를 주는 방안들이 필요한 것으로 판단된다.

4.3 선미 스키프 변화에 따른 예인 안정성 변화

선미 스키프의 효과는 핀(fin) 모델을 이용하여 조종 미계수에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 아래와 같이 Jacobs(1964)의 추정식을 반영하였다.

$$(Y'_v)_f = -\frac{A_f}{Ld} \left(\frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_f = -\frac{A_f}{Ld} \left(\frac{2\pi}{1 + 1/(h_f^2/A_f)} \right) \quad (27)$$

$$(Y'_r)_f = -(Y'_v)_f \frac{x_f}{L} \quad (28)$$

$$(N'_v)_f = -(Y'_v)_f \frac{x_f}{L} \quad (29)$$

$$(N'_r)_f = (Y'_v)_f \left(\frac{x_f}{L} \right)^2 \quad (30)$$

여기서 A_f 는 선미 스키프의 면적, h_f 는 선미 스키프의 높이, x_f 는 무게중심으로 부터 선미 스키프까지의 거리를 의미한다. 상기 핀 모델은 선형(linear) 조종계수에만 더하여 반영된다. Fig. 10과 같이 LNG 병커링 바지의 선미형상을 근거하여 선미 스키프가 설치 가능한 최대 면적은 약 10.84m²로 추정된다. 선미 스키프 면적을 1m²간격으로 6m²까지 증가시키며 예인안정성 해석을 수행하였다. 선미 스키프는 구조적 안정성을 위하여 선수방향에 선미 방향으로 면적을 증가시켰다.

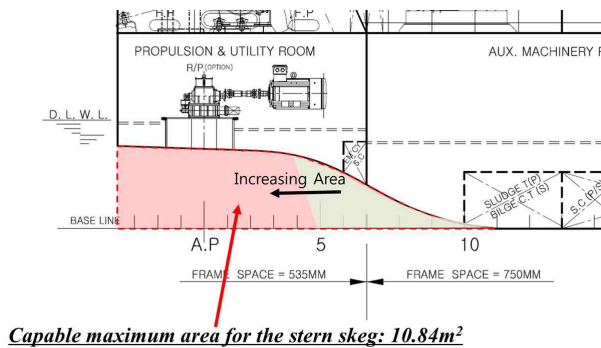


Fig. 10 Capable space for the stern skag

선미 스키프를 삼각형으로 이상화하여 h_f 와 x_f 를 계산하였다. 모든 해석의 초기 횡방향 offset은 (0m, 30m) 그리고 해석 시간은 1000초로 하였다. 선미 스키프 면적의 변화에 따른 선수각 변화 시계열을 Fig. 11에 도시하였다. 스키프의 면적이 증가할수록 초기 외란에 의한 선수각이 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식(24), (27) 그리고 (29)을 통해 예인 지점 x_T 가 고정되어 있다면 선미 스키프의 효과로 N_v 는 감소하고 Y_v 는 증가되기 때문에 정성적으로 예인안정성이 향상됨을 유추할 수 있다. 해석을 통해 정성적인 해석과 수치해석의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 특히 선미 스키프 면적이 4 m² 이후 안정성 향상의 정도가 미미한 것으로 판단되며 선미 스키프 면적은 약 4 m² 정도가 적정할 것으로 판단된다.

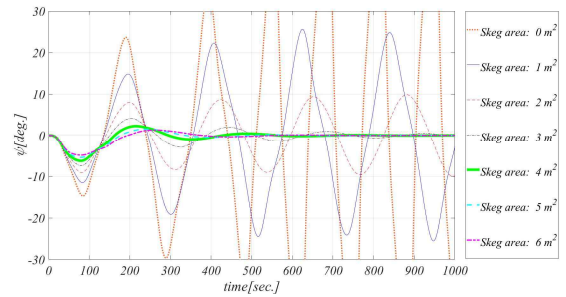


Fig. 11 Time histories of heading angle according to variation of stern skag area

4.4 브라이들(bridle) 길이 변화에 따른 예인 안정성 변화

선미 예인 시 브라이들(bridle)에 의한 예인 지점의 변화를 줄 수 있다. 브라이들은 Fig. 12와 같이 연결되는 것이 일반적이다. Fig. 12에서 L_{Bri} 은 브라이들의 길이를 의미한다.

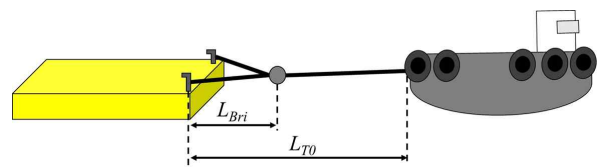


Fig. 12 Schematic diagram for towline and bridle

본 연구에서는 브라이들을 모사하기 위하여 브라이들이 강체처럼 움직이지 않는다는 가정을 하고 예인작의 길이와 예인 지점을 식(31)과 (32)로 수정하였다. 본 가정은 브라이들의 거동이 무시되지만 브라이들의 특성 상 블라이들을 제외한 예인작의 거동보다 작아서 제한적이지만 유용할 것으로 판단된다.

$$x_T' = x_T + L_{Bri} \quad (31)$$

$$L_{T0}' = L_{T0} - L_{Bri} \quad (32)$$

브라이들을 예인작의 길이의 0.1간격으로 0.5까지 증가시키면서 예인해석을 수행하였다. 모든 해석의 초기 횡방향

offset은 (0m, 30m) 그리고 해석 시간은 1000초로 하였다. 브라이들의 길이 변화에 따른 선수각 변화 시계열을 Fig. 13에 도시하였다.

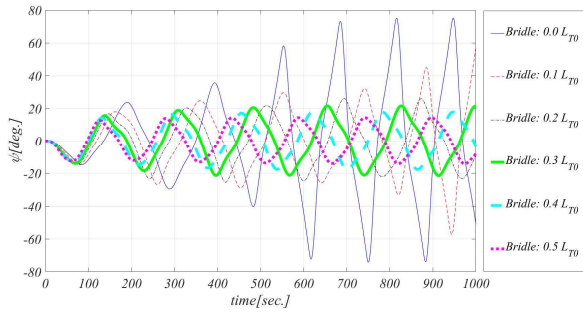


Fig. 13 Time histories of heading angle according to variation of Bridle length

브라이들의 길이가 증가할수록 초기 외란에 의한 선수각이 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 브라이들의 길이가 증가하는 것은 x_T 가 증가함을 의미한다. 이는 식 (24)를 통해 예인 지점 N_v/Y_v 가 고정되어 있다면 x_T 가 증가되기 때문에 정성적으로 예인안정성이 향상됨을 유추할 수 있다. 해석을 통해 정성적인 해석과 수치해석의 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 특히 브라이들의 길이가 $0.2L_{70}$ 이후 안정성 향상의 정도가 미미한 것으로 판단되며 브라이들은 $0.2L_{70}$ 정도가 적절할 것으로 판단된다.

4.5 Skeg가 부착된 LNG 병커링 바지의 예인안정성 해석

설계된 LNG 병커링 바지의 선미 스케그는 Fig. 14에 도시하였다. 상기 스케그 면적 변화에 대한 예인안정성 해석결과를 미루어 면적은 적절한 것으로 사료된다.

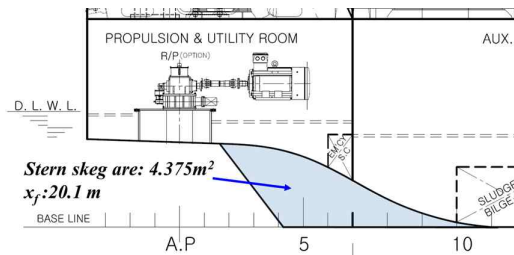


Fig. 14 Stern skog for LNG bunkering barge

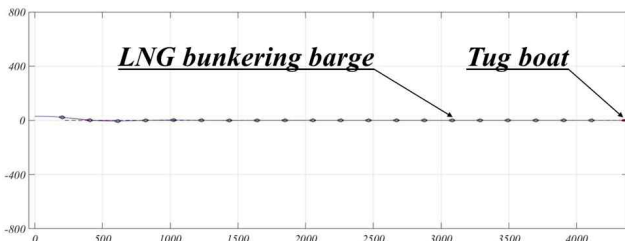
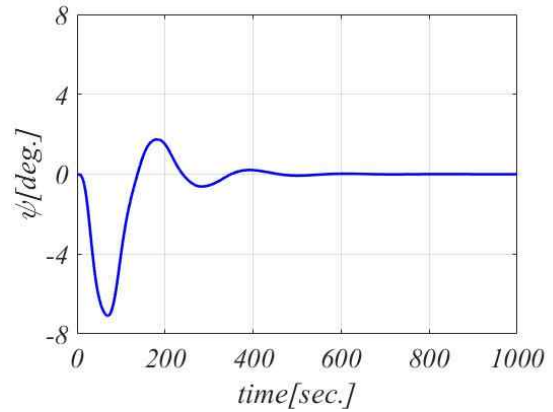
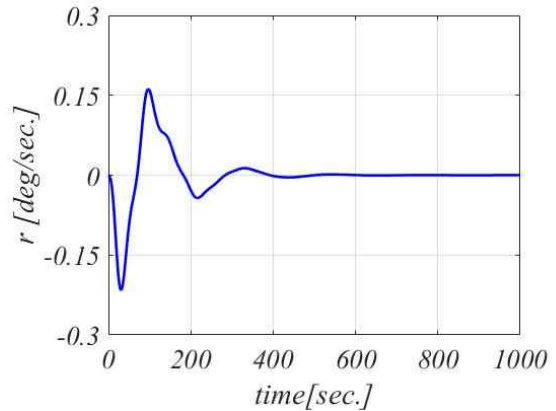


Fig. 15 Trajectory of LNG bunkering barge(W/ skog)

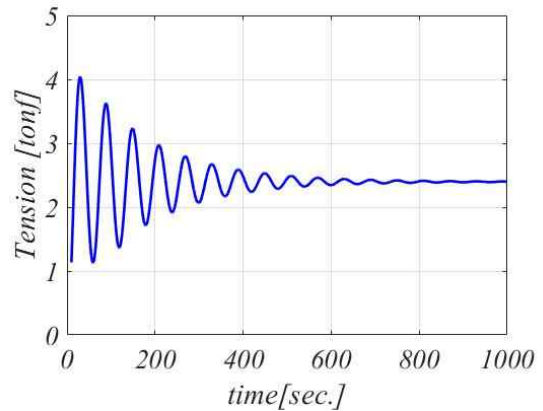
설계된 선미 스케그가 부착된 LNG 병커링 바지의 예인안정성 해석을 최종적으로 수행하였다. 브라이들 길이 변화에 대한 해석결과를 토대로 브라이들 길이는 $0.2L_{70}$ 로 설정하였다. 또한 초기 offset은 (0m, 30m)으로 하였으며 해석 시간은 1000초로 하였다. 초기 offset으로 인하여 LNG 병커링 바지의 평면운동을 Fig. 15에 도시하였다. 시간이 지남에 따라 LNG 병커링 바지의 횡방향 운동이 감소함을 알 수 있다. 선수동요, 각속도 그리고 예인장력의 시계열을 또한 Fig. 16에 도시하였다.



(a) Heading angle



(b) Yaw rate



(c) Towline tension

Fig. 16 Time histories for LNG bunkering barge(W/ skog)

설계된 선미 스케그가 부착된 LNG 병커링 바지의 선수동요는 횡방향과 마찬가지로 초기 외란에 의한 증가 이후 시간이 지남에 따라 급격히 감소함을 확인하였다. 예인 장력 또한 초기 offset으로 인하여 발생한 선수동요로 인한 예인 장력이 초기에 증가하였다가 예인 바지의 수평면 운동이 안정됨에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는 예인사의 안전성 향상뿐만 아니라 예인저항 감소로 인한 운영비 감소도 기대할 수 있다. 상기 해석을 통해 설계된 선미 스케그 면적의 적정성을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 Ship to Ship LNG 병커링에 활용될 LNG 병커링 바지에 대한 정수 중 예인안정성을 추정하기 위하여 정수 중 예인해석을 수행하였다. 예인해석을 위한 수치코드를 MATLAB 환경에서 개발하였으며 기 발표된 계산과 모형시험의 결과를 통해 유효성을 확인하였다. 개발된 수치코드를 통해 LNG 병커링 바지의 예인안정성 해석을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 선미 스케그 면적 변화에 대한 예인해석을 통해 선미 스케그의 면적이 증가할수록 초기 외란에 의한 선수각이 시간에 지남에 따라 더욱 빨리 감소하여 원래방향으로 돌아오는 것을 확인하였다. 이는 식 (24)의 예인안정성 조건의 정성적인 해석과 일치한다. 다양한 선미 스케그 면적에 대한 예인해석 결과를 통하여 선미 스케그 면적이 4 m^2 이상이 적정할 것이라 판단된다.

(2) 브라이들의 길이 변화에 대한 예인해석을 통해 브라이들의 길이가 증가함에 따라 초기 외란에 의한 선수각이 시간이 지남에 따라 더욱 안정화 되는 것을 확인하였다. 브라이들의 길이가 증가하는 것은 x_T 가 증가함을 의미하며 식(24)의 예인안정성 조건에서 x_T 의 증가로 인한 예인안정성 향상이라는 정성적인 해석과 일치한다. 다양한 브라이들의 길이에 대한 예인해석 결과를 통해 브라이들의 길이는 $0.2L_{T0}$ 정도가 적정할 것으로 판단된다.

(3) 최종적으로 설계된 선미 스케그가 부착된 LNG 병커링 바지의 예인해석을 수행을 통해 설계된 스케그 면적의 적정성을 확인하였다.

본 연구는 기본제원을 통한 추정식을 이용하여 초기설계 단계에서 LNG 병커링 예인안정성 해석을 수행하였다. 조종미계수의 정확성이 신뢰도 있는 예인해석 결과를 주는 것은 자명하다. 추후 모형시험 또는 전산해석을 통해 설계된 LNG 병커링 바지의 예인안정성을 최종 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 ‘연안선박 맞춤형 LNG병커링 시스템 개발’ (PMS4150)의 결과물임을 밝히는 바입니다.

References

- [1] Bernitsas, M. M. and Kekridis, N. S.(1985), "Simulation and stability of ship towing", International Shipbuilding Progress, Vol 32, No. 369, pp. 112-123.
- [2] Inoue, S., Hirano, M., Hirakawa, Y. and Mukai, K.(1979a), "The hydrodynamic derivatives on ship manoeuvrability in even keel condition", Transactions of the WestJapan Society of Naval Architects, No. 57, pp. 13-19.
- [3] Inoue, S., Hirano, M. and Mukai, K.(1979b), "The non-Linear terms of lateral force and moment acting on ship hull in the case of manoeuvring", Transactions of the WestJapan Society of Naval Architects, No. 58, pp. 153-160.
- [4] Jacobs, W. R.(1963), "Method of Predicting Course Stability and Turning Qualities of Ships", Davidson Laboratory Report 945. Davidson Laboratory: New Jersey.
- [5] Jung, D. H., Oh, S. H., Jung, J. H., Hwang, S. C., Sung, H. G., Lee, J. I. and Kim E. S.(2018), "Development of the First LNG Bunkering Barge System in Korea", Proceedings of the Annual Autumn Meeting the Korean Institute of Navigation and Port Research, pp. 162-163.
- [6] Kwon, C. S.(2015), "A study on Directional Stability of Towed Floating Bodies by Computational Fluid Dynamics", Korea Advanced Institute of Science and Technology, Ph.D. Dissertation.
- [7] Lee, S. K. and Kim, S. J.(1995), "Prediction of Maneuverability of a Ship in the Initial Design Stage", Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 32, No. 4, pp. 19-26.
- [8] Motora, S.(1960), "On the measurement of added mass and added moment of inertia of ships in steering motion", Proceedings of the First Symposium on Ship Maneuverability, David Taylor Model Basin Report 1461, Washington D.C., pp. 241-274.
- [9] 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", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 1, pp. 67-73.
- [10] Wagner, S. L. and Chislett, M. S.(1972), "Xvr' for Models of a Fast Container Vessel and Two Large Tankers, Measured with a Planar Motion Mechanism-Materials for Manoeuvrability Committee Reports to 13 th ITTC".
- [11] Yasukawa, H., Hiritaka, H., Nakamura, N. and

Matsumoto, Y.(2006), "Simulation of Slewing Motion of a Towed Ship", Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 4, pp. 137-146.

Received 5 April 2019
Revised 10 May 2019
Accepted 23 May 2019