

계류삭 파단 방지를 위한 선박의 한계치 접안 속력 추정에 관한 연구

김대정* · 이춘기** · † 임정빈

*한국해양대학교 대학원 항해학과, **,† 한국해양대학교 항해학부

On the Estimation of Ship's Approach Speed Limit to the Pier to Prevent Breaking of Mooring Rope

Dae-Jeong Kim · Chun-Ki Lee** · † Jeong-Bin Yim*

**Graduate School of National Korea Maritime and Ocean University, Korea*

*** , † Division of Navigation Science, Korea Maritime and Ocean University, Korea*

요 약 : 선박이 계류삭을 이용하여 부두에 접안하는 경우, 과도한 선박 속력은 계류삭이 절단되는 사고를 야기할 수 있다. 이러한 계류삭의 파단 사고를 방지하기 위해서는 계류삭 파단 방지에 선박의 한계치 접안 속력을 알아야 한다. 본 연구의 목적은 계류삭 파단을 방지하기 위한 선박의 한계치 접안 속력 추정에 있다. 본 연구의 핵심은 선박의 속력을 모르는 경우 선박제원과 계류삭 제원을 이용하여 접안 시 한계치 접근 속력을 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 선체저항과 계류삭의 탄성력 등에 관한 이론을 바탕으로 한계치 접근 속력의 추정 방법과 절차를 제안하였다. 135K LNG 선박과 IWRC, 6×36의 강선 계류삭을 대상으로 한계치 접근 속력을 추정한 결과, 추정한 접근 속력으로 접안하는 경우 계류삭이 파단이 되지 않는 것으로 분석되어 제안한 방법이 유효함을 알았다. 본 연구에서 제안한 방법은 실제 선박에서 계류삭 파단을 방지하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 선박, 접안, 계류삭, 파단, 선박 속력

Abstract : When a ship is berthing on the pier using a mooring rope, excessive ship speeds may cause accidents where mooring rope is cut off. In order to prevent the mooring rope from breaking, there is need to know the approach speed limit of the ship. The purpose of this study is to estimate the berthing speed limit of a ship to prevent mooring fracture. Focus will be made to when the speed of the ship is unknown. In this study, we propose a method and procedure for estimating the berthing-speed limit based on the theory of ship resistance and the elasticity of the mooring rope. This method was found to be effective as it was observed that the mooring rope cannot be broken when it is estimated that the berthing-speed of a 135K LNG vessel, IWRC, and 6 × 36 steel wire mooring rope. The method proposed in this study will significantly contribute to preventing actual accidents related to mooring lines.

Key words : Vessel, Berthing, Mooring Rope, Breaking, Ship's Speed

1. 서 론

선박 접안 속력에 관한 선행 연구는 방충재(Fender)와 같은 항만시설물 설계에 대한 허용기준을 결정하는 접안에너지 산출을 위해 선박의 제원에 따라 연구되었다.(Kong, 2004). 이러한 선박의 접안에너지는 부두와 선박의 안전과 직결된다. 이와 같이 선박 접안 속력과 관련한 연구는 항만시설물 설계 기준의 관점에서 행해졌다. 선행 연구와는 다른 관점으로, 본 연구는 선박의 접안 속력을 계류삭(Mooring Rope)의 파단 여부 관점에서 연구하였다.

선박이 계류삭(Mooring Rope)을 이용하여 부두에 접안하는 경우 선박의 과도한 접안속력은 계류삭의 파단(Breaking)을 야기할 수 있다. 이러한 계류삭의 파단을 방지하기 위해서

는 한계치 접근 속력을 알아야 한다.

본 연구의 목적은 계류삭의 파단을 방지하기 위한 선박의 한계치 접근속력을 추정하기 위한 기법을 제안하고 그 유효성을 평가하는데 있다. 특히, 본 연구의 핵심은, 선박의 속력을 모르는 경우, 선박의 제원과 계류삭의 제원에 관계식을 적용하여 선박의 가속도를 계산하고, 계산한 가속도를 이용하여 한계치 접근 속력을 추정하는 기법의 개발이다.

현재 선박에서는 선장 또는 항해사의 주관적인 판단 또는 감지센서가 부착된 윈치(Winch) 등을 이용하여 계류삭의 파단을 방지하고 있다. 그럼에도 불구하고, 선장 또는 항해사의 인적오류 또는 윈치의 고장 등으로 계류삭의 파단이 발생하는 것으로 보고되어 있다.(UK P&I CLUB, 2009). 이러한 계류삭의 파단 사고는 귀중한 인명의 희생, 물적 피해 등의 결과를

† Corresponding author : 종신회원, jbyim@kmou.ac.kr 051)410-4246

* 정회원, kdj4907@kmou.ac.kr 051)410-4474

** 종신회원, leeck@kmou.ac.kr 051)410-4270

야기하기 때문에 계류삭 파단 방지를 위한 대책 수립이 필요한 실정이다.

한편, 계류삭에는 다양한 종류가 있는데, 거대 선박에서는 강선을 심은 계류삭(Wire Rope)을 주로 이용하는데, 강선 로프의 경우에도 선박의 속력에 의한 힘에 의해서 팽창된다. 과도한 선박의 속력으로 계류삭에 걸리는 장력이 최소파단하중 이상이 되면 계류삭은 파단이 된다. 또한 선박의 제원과 기상 환경 등에 따라서 계류삭에 걸리는 하중은 변하게 된다.

이러한 다양한 조건을 고려한 계류삭 파단 방지 기법을 개발하기 위하여, 우선, 선속과 기상 등의 영향에 의한 선체의 저항과 계류삭에 걸리는 탄성력 등에 관한 기존 이론식을 정리하였다. 그리고 기존 이론식을 기반으로 접안 시 안전한 접안을 위한 안전 속력 및 한계치 속력을 추정하기 위한 이론식과 방법 및 절차를 제안하였다.

그리고 135K LNG 선박에 사용하고 있는 IWRC (Independent Wire Rope Core) 형식의 6×36(스트랜드(Strand) 수가 6이고, 소선의 수가 36개) 로프를 대상으로 제안한 방법의 유용성 평가 실험을 하였다. 실험결과, 제안한 방법으로 추정한 한계치 접안속력은 실험대상 계류삭의 파단을 야기하지 않는 것으로 나타나서 제안한 방법의 유용성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 본 연구의 접근절차와 연구에 적용하기 위한 접안 시나리오를 설명하였다. 제3절에서는 부두 접근 시 한계 접안 속력 추정을 위한 이론식을 전개하였는데, 특히, 선박의 속력을 모르는 경우 관계식을 이용하여 접안속력한계를 추정하는 이론과 절차를 소개하였다. 그리고 제4절에서는 실험결과를 나타내고, 제5절에서는 실험결과에 대해서 검토하였다. 그리고 제6절에 결론을 맺었다.

2. 연구 접근 방법

2.1 연구절차

Fig. 1은 연구절차를 나타내고, 각 단계별 연구방법은 다음과 같다.

- Step 1: 선박이 계류삭(Mooring Rope)을 부두에 건 상태에서 주기관을 정지하고 전진 타력으로 접안하는 경우, 선체의 운동 에너지가 계류삭에 미치는 영향에 대한 시나리오를 구축한다. 이를 통해서 계류삭에 걸리는 장력 평가방법을 도출한다.
- Step 2: 선체의 저항과 계류삭의 장력을 계산하기 위한 기존 이론식을 정리한다.
- Step 3: 부두 접근 시 한계치 접안 속력을 추정하기 위한 이론과 방법 및 절차를 개발한다.
- Step 4: 주어진 선박 제원과 계류삭 제원에 대해서 계류삭 파단 방지를 위한 선박의 한계치 접안 속력을 추정한다.
- Step 5: 추정한 한계치 접안속력을 분석하여 제안한 방법

의 타당성을 평가하고 실무 관점에서 검토하여 본 연구에서 제안한 방법의 적용 가능성을 논의한다.

- Step 6: 이상의 결과를 정리하고 추후 연구내용을 제시한다.

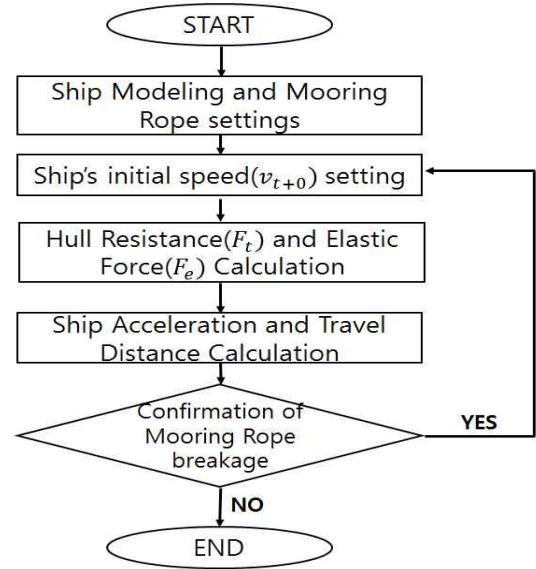


Fig. 1 Flow-chart for the study approaching

2.2 접안 시나리오

Fig. 2는 선박의 선수에서 첫 번째 계류삭(First Line) 한 개만을 육상 부두의 비트(Bitt)에 걸고 선박의 좌현 측으로 접안하는 경우, 계류삭에 미치는 영향을 특정 시간별로 구분한 시나리오를 나타낸다. 이 때 선박은 주기관을 정지하고 전진 타력으로 부두에 접근한다고 가정한다.

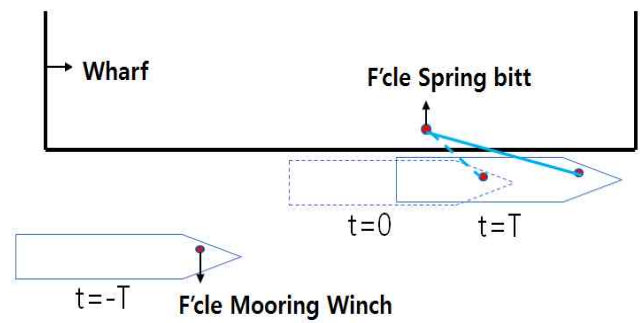


Fig. 2 Ship-berthing scenario divided into three viewpoints

Fig. 2에서, 특정 시점 $t=-T$ 부터 $t=T$ 까지의 사이에서 나타나는 현상은 다음과 같이 고려할 수 있다. 여기서 t 는 이산시간을 의미하는 것으로 $t=0,1,2,\dots,T-1,T$ 이고, $-T$ 는 $t=0$ 이전 시간의 경계 값, T 는 $t=0$ 이후 시간의 경계 값을 나타낸다.

- $t=-T$: 시점 $t=-T$ 는 선박이 계류 윈치(Mooring

Winch)를 사용하여 계류삭을 부두에 내어주는 단계로 계류삭에 장력이 발생하지 않는 시점으로 정의한다. 이 때, 선박의 속도 v_{-T} 는 $v_{-T} > 0$ 이고, 계류삭에 미치는 힘 F_{-T} 은 영(0)이 된다.

- $t=0$: 시점 $t=0$ 은 계류삭에 장력이 발생하기 시작하는 시점으로 정의한다. 이 때, $v_{-T} \geq v_0 > 0$ 이고, $F_0 > 0$ 이 되는데, 여기서 v_0 는 선박의 한계치 접안속력으로 정의한다. 이러한 v_0 가 본 연구에서 추정하려는 목표이다.
- $t=T$: 시점 $t=T$ 는 계류삭이 파단되기 직전으로, 계류삭의 장력이 최대가 됨과 동시에 선박의 이동이 멈추는 시점으로 정의한다. 이 때, $v_T=0$ 이고, $F_T=MBL_{Rope}$ 이 되는 것으로 정의한다. 여기서 MBL_{Rope} 는 해당 계류삭의 최소 파단하중(Minimum Breaking Load, MBL)을 나타낸 것으로, 만약 $t=T$ 에서 $F_T > MBL_{Rope}$ 라면 계류삭은 파단이 되고, $F_T=MBL_{Rope}$ 라면 계류삭은 터지기 직전이며, $F_T < MBL_{Rope}$ 라면 계류삭은 안전할 것이다.

본 연구의 목적은 $F_T < MBL_{Rope}$ 가 될 수 있는 $t=0$ 시점에서의 v_0 를 추정하는 것이다.

3. 이론전개

3.1 선박의 접안속력 계산 이론

계류삭 파단을 방지하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 시점 $t=0$ 에서 요구되는 선박의 한계치 접안속력 v_0 과 관련된 이론을 정리하면 다음과 같다.

먼저, 선박의 전진속력과 계류삭에 의하여 선박에 작용하는 총 힘 F_{Total} 는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.(Yun, 2018).

$$F_{Total} = (m + m')a = F_t + F_c \quad (1)$$

여기서, m , m' , a , F_t , F_c 등은 선박 질량(kg), 부가질량(kg), 선박 가속도(m/s^2), 선체저항에 의한 힘(N, Newton), 계류삭의 탄성력(N)을 각각 나타낸다. 이 식에서 부가질량을 고려한 이유는 선박이 유체 중에서 가속운동을 한다고 가정하고 이를 고려하기 위함이다.

한편, 본 연구의 목적은 식(1)에 나타낸 선박 가속도 a 을 관계식을 이용하여 계산한 후, 계산한 a 을 이용하여 시점 $t=0$ 에서의 한계치 접안속력 v_0 를 추정하는 것이다. 우선, 선박 가속도 a 을 구하기 위한 관계식을 유도하면 다음과 같다.

위의 식(1)로부터 a 는 다음 식(2)로 나타낼 수 있고, 식(2)의 부가질량 m' 은 식(3)으로 계산할 수 있다. 식(3)은 가상질

량계수 $C_m = (m + m')/m$ 에서 유도한 것으로, 선체의 가속도 운동에 의한 관성력을 나타낸다. 이러한 C_m 는 식(4)의 근사식을 이용하여 추정할 수 있다.(Kong, 2004).

$$a = \frac{F_t + F_c}{m + m'} \quad (2)$$

$$m' = m(C_m - 1) \quad (3)$$

$$C_m \approx 1 + \frac{\pi}{2C_b} \times \frac{d}{B} \quad (4)$$

여기서 C_b , d , B 는 방형비척계수, 흘수(m), 선폭(m)을 각각 나타낸다.

그리고 식(2)의 선체저항으로 인한 힘 F_t 은 다음 식(5)로 나타낼 수 있고, 계류삭의 탄성력 F_c 은 다음 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$F_t = R_f + R_a + R_w \quad (N) \quad (5)$$

여기서, R_f , R_a , R_w 등은 식(6)으로 정의된 마찰저항, 식(7)으로 정의된 바람에 의한 저항, 식(8)으로 정의된 조파저항을 각각 나타낸다.(Nam, 2012; Kim, 2014).

$$R_f = \gamma\lambda[1 + 0.0043(15 - t)]Sv^{1.83} \quad (N) \quad (6)$$

여기서, γ 는 해수비중, λ 는 마찰계수, S 는 선박침수면적(m^2), v 는 선박속력(m/s)를 나타낸다. 또한 t 는 수온($^{\circ}C$)을 의미하며 본 논문에서는 실용상 $t=15(^{\circ}C)$ 로 가정하였다. 여기서 λ 는 Le Besnerais가 제안한 평판의 마찰저항에 대한 마찰계수 $\lambda = 0.1392 + 0.258/(2.68 + L)$ 을 이용하여 결정하였는데, L 은 선박의 길이를 나타낸다.(Nam, 2012; Kim, 2014).

$$R_a = \frac{1}{2}\rho_a C_a v_a^2 (H \cos^2 \theta + W \sin^2 \theta) \quad (N) \quad (7)$$

여기서, ρ_a 는 공기밀도($1.225kg/m^3$)를 나타내고, C_a , v_a , H , W , θ 등은 풍압계수, 상대풍속(m/s), 수선 위 정면투영면적(m^2), 수선 위 측면 투영면적(m^2), 바람의 입사각을 각각 나타낸다. 그리고 풍압계수 C_a ($-0.8 \leq C_a \leq 1.0$)는 바람의 입사각에 의해 결정된다.(Nam, 2012; Kim, 2014).

$$R_w = \frac{1}{2}\rho_w C_w B d v^2 \quad (N) \quad (8)$$

여기서, ρ_w 는 해수밀도($1,024kg/m^3$)를 나타내고, C_w , B , d , v 등은 유압계수, 선폭(m), 흘수(m), 선박의 속도(m/s)를 각각 나타낸다.(Nam, 2012; Kim, 2014).

$$F_c = AE \left(\frac{X_{rope}}{L_{rope}} \right) \quad (9)$$

여기서, A 는 계류삭의 단면적(mm^2)을 나타내고, E, X_{rope}, L_{rope} 등은 계류삭의 영률(Young's Modulus), 계류삭의 늘어난 길이, 계류삭의 초기 길이 등을 각각 나타낸다. 단, 계류삭은 탄성변형 내에 있다고 가정한다.

그리고 계류삭의 파단을 방지하기 위한 구속조건을 다음과 같이 정의한다.

$$F_c < MBL_{rope} \quad (10)$$

여기서, MBL_{rope} 는 계류삭이 하중을 이겨낼 수 있는 최소 파단하중(Minimum Breaking Load, MBL)을 나타낸다.

그리고 계류삭의 파단을 방지하기 위해서 선박은 계류삭의 늘어난 길이 X_{rope} 에 대해서 다음 식(11)과 같은 한계 이동거리 S_{lim} 이내에서만 이동해야 된다.

$$S_{lim} = X_{rope} \cos(\theta) \quad (11)$$

여기서 θ 는 계류삭과 부두가 이루는 각이다.

한편, 위에서 설명한 다양한 식들의 특징을 고찰하면 다음과 같다. 우선, 위의 식들은 대부분 선박의 속력 v 에 대한 함수로 구성되어 있기 때문에 v 가 주어져야 계산이 가능하다. 그렇다면 계류삭의 파단을 방지하기 위한 선박의 한계치 접안 속력은 어떻게 추정할 것인가?

본 연구에서는 위에서 설명한 다양한 식들을 이용하여 해당시점의 가속도 a 를 계산한 후, a 를 다음과 같은 방법과 절차에 적용한 한계치 접안속력의 추정방법을 적용하였다.

단, 이러한 절차에는 다양한 초기 조건이 주어져야 하며, 이 때의 초기값은 시점 T (계류삭이 파단되기 직전)의 상황에서 결정되는 것으로 하였다. 그리하여 주어진 계류삭의 제원과 계산에 필요한 구속조건 및 시점에 따른 선박에 작용하는 힘 등을 적용하여 선박의 한계치 접안속력을 추정하였다. 이러한 방법을 3.2절에서 설명하였다.

3.2 선박의 초기 접안속력 추정 절차

선박의 제원, 계류삭의 제원, 환경 조건 등이 주어진 경우 식(5)~식(9)들을 통해서 특정 시점 t 에서의 선박 가속도 a_t 를 구할 수 있다. 계산한 a_t 을 이용하면 선박의 초기 접안속력 v_0 을 추정할 수 있는데 방법은 다음과 같다.

· Step 1: 시점 T (계류삭이 파단되기 직전)을 시작으로 $T, T-1, T-2, \dots, 0$ 순으로 역 추정하여 해당 시점에서의 선

박에 작용하는 총 힘($F_t + F_c$)을 식(5)~(9)를 이용해 구한 뒤 식(2)을 이용해 가속도 $a_T, a_{T-1}, a_{T-2}, \dots, a_{T-n}$ 를 구한다. 여기서 a_t 는 시점 t 에서의 가속도로 정의한다. 상기 식(5)~(9)의 계산을 위해서는 시점에 따른 속력과 계류삭의 길이 값을 알아야 하며, 이는 아래 Step 2 및 3에서 기술한 바와 같이 구한다.

· Step 2: 가속도 a_T 를 $[T, T-1]$ 구간에 시간 t 에 대하여 적분한 값에 v_T 를 더하여 v_{T-1} 를 구한다. 여기서 v_t 는 각 시점 t 에서의 속도를 의미한다.(2.2절 접안시나리오에 따라 $v_T=0$ 으로 정한다) 연속하여 가속도 a_{T-1} 를 $[T-1, T-2]$ 구간에 대해 적분한 값에 v_{T-1} 를 더하여 v_{T-2} 를 구한다. 상기의 규칙을 적용한 $v_T, v_{T-1}, v_{T-2}, \dots, v_{T-n}$ 즉, 역으로 추정한 각 시점에서의 속도를 구한다. 이를 일반화 하면 식(12)과 같다. t 의 범위는 $T-1, T-2, T-3, \dots, T-n$ 으로 정의한다.

$$v_t = \int_{t+1}^t a_{t+1} dt + v_{t+1} \quad (12)$$

· Step 3: 선박이 1초 간격으로 등가속도 운동을 한다고 가정하였을 때, 각 구간별 선박의 이동거리 $S_{t,t-1}$ 는 다음과 같다. 여기서 $S_{t,t-1}$ 는 $[t, t-1]$ 구간 동안 선박이 이동한 거리로 정의한다. $S_{T,T-1}$ 은 $v_T + a_T t$ 를 $[T, T-1]$ 구간에 시간 t 에 대하여 적분하여 구한다. $S_{T-1,T-2}$ 은 $v_{T-1} + a_{T-1} t$ 를 $[T-1, T-2]$ 구간에 대하여 적분하여 구한다. 상기의 규칙을 적용하여 $S_{T,T-1}, S_{T-1,T-2}, S_{T-2,T-3}, \dots, S_{T-n,T-n-1}$ 를 각 구한다. 이를 일반화 하면 식(13)과 같다.

$$S_{t,t-1} = \int_t^{t-1} (v_t + a_t t) dt \quad (13)$$

시점 T 부터 시점 $T-n$ 까지 이동한 거리는 각 구간별 이동거리의 합과 같으므로, 구간 $[T, T-n]$ 에서의 선박의 총 이동거리를 $S_{TTL[T,T-n]}$ 라 하면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{TTL[T,T-n]} = S_{T,T-1} + S_{T-1,T-2} + \dots + S_{T-n,T-n-1} \quad (14)$$

여기서, 계류삭의 파단을 방지하기 위해서는 선박의 한계 이동거리는 선박이 이동한 거리보다 크거나 같아야 한다. 즉, $S_{TTL[T,T-n]} \leq S_{lim}$. 따라서 $S_{TTL[T,T-n]} \leq S_{lim}$ 이 될 때 구한 v_{T-n} 가 본 연구에서 구하려는 한계치 접안 속력 v_0 가 된다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험조건

실험대상 선박의 제원을 Table 1에 나타냈다. 이 선박은 모

스(Moss)형태의 탱크(tank)를 갖는 135 K(kilogram)급 LNG (Liquified Natural Gas) 운송 선박이다.

Table 1 Specification of vessel

Items	Specifications
LOA(m)	288.77
LBP(m)	274.00
B(m)	48.20
D(m)	26.50
d(full loaded)	10.76
d(ballast)	-
G/T(ton)	113998
DWT(ton)	63547.8
Displacement(full loaded)(ton)	97666.0
Ballast water(ton)	920.0
Bunker(ton)	1376.1
Main engine(MCR)	39,000BHP×86RPM
Main engine(NCR)	39,000BHP×86RPM

그리고 실험대상 계류삭의 제원을 Table 2에 나타냈는데, 이 계류삭은 Table 1에 나타난 선박에 현재 사용되고 있다. 재질은 강선 로프(Steel Wire Rope)이고, 제작 방법은 강선을 심으로 하여 제작한 "IWRC, 6×36"인데, IWRC는 독립적인 강선 로프 코어(Independent Wire Rope Core)형식을 의미하고, 6×36은 스트랜드(Strand) 수가 6이고, 소선의 수가 36개임을 의미한다. 그리고 직경 44 mm, 단면적 950 mm², 무게는 100 m 당 792 kg, MBL은 1,350 kN, 영률은 105 kN/mm² 등이며, 계류삭의 길이는 200 m이다.(OCIMF, 2008).

Table 2 Specification of rope

Items	Specifications
Type	IWRC, 6 x 36
Diameter (mm)	44
Length (m)	200
Cross section area (mm ²)	950
Weight (kg/100m)	792
MBL(kN)	1,350
E Modulus (kN/mm ²)	105

4.2 계류삭의 늘어난 길이와 선박의 한계 이동거리 계산

계류삭에 MBL 이상의 하중이 걸리면 계류삭은 파단이 된다. 계류삭의 파단을 방지하기 위해서는 계류삭의 파단이 발생하기 전에 선박의 속력은 영(0)이 되어야 한다. 또한, 최소 파단하중이 걸릴 때 선박의 한계 이동거리 S_{lim} 는 계류삭의 늘어난 길이 $X_{rope} \times \cos\theta$ 와 비교하여 같거나 짧아야 한다. 즉, $S_{lim} \leq X_{rope} \times \cos\theta$.

위의 식(9)에서 계류삭의 늘어난 길이는 $X_{rope} = \frac{F_e L_{rope}}{AE}$ 로 구할 수 있고, 선박의 한계 이동거리 S_{lim} 는 식(11)로 구할 수

있다. Table 2의 제원을 적용한 계산결과는 다음과 같다.

$$X_{rope} = 2.71 \text{ m}$$

$$S_{lim} = 2.34 \text{ m (단, 시점 T에서 } \theta \text{을 } 30^\circ \text{라 가정할 경우)}$$

따라서 Table 2의 제원을 갖는 200 m 길이의 계류삭은 2.71 m 이상 늘어나면 장력이 최소파단하중 값 이상이 되어 파단이 됨을 알 수 있고, 계류삭의 늘어난 길이 2.71 m에 해당하는 선박의 이동거리는 2.34 m임을 알았다.

4.3 계류삭 파단 방지를 위한 한계치 선박 속력 계산

Table 3은 위에서 설명한 관계식을 이용한 계류삭의 파단 방지를 위한 선박의 속력 계산결과를 나타낸다. Table 3는 선박의 주기관을 정지하고 전진타력으로 부두에 접근함에 따라 받는 선체저항(F_t), 계류삭의 탄성력(F_e), 선박의 가속도(a_t), 적분 속력(v_t), 이동거리 ($S_{TTL[T, T-n]}$) 등을 나타낸다. 그리고 Fig. 3에 시간에 따른 적분 속력 v_t 계산 결과를 나타냈다.

Table 3의 계산에 적용한 변수와 계수는 실제 선박의 제원을 이용하여 다음과 같이 정한 것으로, 괄호안의 "*" 표시는 모델 선박의 소책자(booklet)에서 참조한 값들이다.

- 해수비중 : $\gamma = 1.025$
- 마찰계수 : $\lambda = 0.1401 (\lambda = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L}, L = 274)$
- 선박침수면적(*): $S = 14209 \text{ m}^2$
- 공기밀도 : $\rho_a = 1.225 \text{ kg/m}^3$
- 풍압계수 : $C_a = 0.85 (\theta = 0, \text{바람을 정면으로 받을 때})$
- 상대풍속 : $v_a = 4 \text{ m/s}$ (풍속은 4m/s로 가정)
- 수선 위 정면투영면적(*): $A = 1740 \text{ m}^2$
- 수선 위 측면투영면적(*): $B = 7772 \text{ m}^2$
- 해수밀도 : $\rho_w = 1,025 \text{ kg/m}^3$
- 유압계수 : $C_w = 0.1$
- 선폭 : $B = 48.2 \text{ m}$
- 흘수 : $d = 10.76 \text{ m}$
- 방형비척계수(*): $C_b = 0.6699$
- 가상질량계수: $C_m = 1.5232 (C_m = 1 + \frac{\pi}{2 \times 0.6699} \times \frac{10.76}{48.2})$
- 부가질량을 고려한 선박 질량 : $m + m' = 15180 \text{ ton}$
($C_m \times \frac{w}{g} = 1.5232 \times \frac{97666}{9.8}$)
- 배수량 $w = 97666 \text{ ton}$
- 시점 T에서 계류삭과 부두면 각 $\theta = 30^\circ$ 로 가정

Table 3 The force corresponding to each point, the moving distance of the ship, the acceleration and the velocity value

Time	T	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8
R_f (N)	0	19.15	67.22	136.93	220.56	309.66	395.26	469.04	523.90
R_a (N)	14494.2	15065.0	15638.5	16197.5	16722.6	17196.1	17600.2	17921.1	18146.6
R_w (N)	0	161.55	637.14	1386.44	2334.42	3382.38	4415.95	5324.73	6008.91
$F_t(R_f+R_a+R_w)$ (kN)	14.49	15.10	15.77	16.48	17.18	17.85	18.45	18.93	19.28
F_e (kN)	1350.00	1330.55	1274.06	1178.45	1047.52	884.58	693.91	480.55	250.24
$F_{F_t+F_e}$ (kN)	1183.63	1166.23	1116.68	1031.80	916.12	772.97	606.92	423.32	227.98
$S_{TTL[T,T-n]} \times 10^{-4}$ (m)	0	390	1555	3472	6097	9364	13187	17465	22082
$a_t \times 10^{-4}$ (m/s ²)	780	769	736	680	604	509	400	279	150
$v_t \times 10^{-4}$ (m/s)	0	780	1549	2285	2965	3569	4078	4478	4757
θ (°)	30.00	30.06	30.22	30.50	30.89	31.39	32.00	32.70	33.49

Fig. 3를 설명하면 다음과 같다. x-축은 초(second) 단위의 시간을 나타내고, y-축은 3.2 선박의 한계치 접안속력 추정 절차에 따라서 계산한 적분 선속 v_t 을 나타낸다. 이 그림은 1초의 등간격으로 구분한 총 9개의 시간간격에서 선박이 등가속도 운동을 한다고 가정하여 그래프로 도시한 것이다.

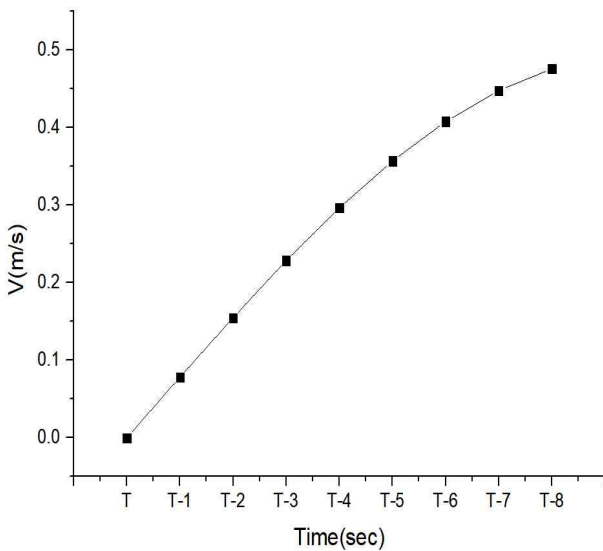


Fig. 3 Integral speed v_t over time

Fig. 3에서 그래프 하부의 면적이 선박의 이동거리 $S_{TTL[T,T-8]}$ 가 된다. $t = T$ (계류삭의 장력이 최대가 되는 시점)부터 $t = T-8$ (계류삭에 장력이 걸리는 시점)까지 계산한 결과 $S_{TTL[T,T-8]} = 2.2082$ m로 나타났다. 그리고 $t = T-8$ 에서 계류삭 파단 방지를 위한 선박의 한계치 접안속력 v_0 는 0.4757 m/s로 추정되었다.

즉, 이러한 수치의 의미는, 선박이 시점 T-8에서 속력 v_0 를 0.4757 m/s로 하여 주기관을 정지하고 전진타력으로 진행하면서 계류삭에 장력이 걸리게 되면, 시점 T에서 선박의 속

력이 0 m/s가 되며, $S_{TTL[T,T-n]} \leq S_{lim}$ 를 만족하여 계류삭이 파단 되지 않음을 뜻한다.

한편, 계류삭이 파단이 되는 조건은 $F_e \geq MBL_{Rope}$ 이다. 즉 계류삭에 걸리는 장력이 Table 2에 기술한 바와 같이 계류삭의 최소파단하중 1350 KN을 초과하면 파단이 된다. 계류삭의 최소파단하중에 의하여 늘어난 길이 $X=2.706$ m이기 때문에 선박이 2.343 m 이상 이동하면 계류삭은 파단이 됨을 알 수 있다.

이러한 상황에서, 선박의 이동거리 $S_h=2.2082$ m인데 계류삭의 파단조건인 선박이동거리가 2.343 m 미만이므로 해당 선박의 계류삭은 파단하지 않는다.

그리고 Fig. 3에서 시점 T-9까지 나타내지 않은 이유는 시간의 범위를 시점 T-9까지 확장할 경우 선박의 이동거리가 2.338 m을 초과하여 파단이 되기 때문이다.

5. 결 토

실험대상 선박과 실험대상 계류삭에 대해서 본 연구에서 정리한 관계식과, 본 연구에서 제안한 선박의 한계치 접안속력 v_0 의 추정 방법과 절차를 이용한 계산결과의 내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 계류삭 파단 방지를 위한 선박의 한계치 접안속력 v_0 는 0.4757 m/s로 추정되었다.

둘째, 선박 가속도 a_t 로 추정된 적분 선속 v_t 을 이용하여 계산한 선박의 이동거리 $S_{TTL[T,T-8]}$ 는 2.2082 m로 나타났고, 계류삭의 최소파단하중에 의하여 늘어난 길이 X 는 2.706 m로 나타나서 계류삭은 파단하지 않음을 알았다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 방법이 계류삭 파단 방지를 위한 부두 접근 시 접안속력 한계치 추정에 적용 가능함을 알았다.

한편, v_0 는 선박의 제원과 계류사의 제원 및 부두 접안시의 환경 등에 따라서 다르게 나타나게 된다.

선박에서 실제 계류작업을 하는 경우, 선속 제어에 실패하여 계류사의 탄성력이 MBL이상이 될 수 있는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황이 발생하면 항해사는 윈치(Winch)를 조작하여 계류사에 걸리는 장력을 제거하는데, 해기사의 인적오류 또는 윈치 고장으로 인하여 계류사가 파단 되면 인명사고 또는 선박 구조물의 손상을 초래할 수 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 방법은 실제 현장에서 계류사 파단을 방지하기 위한 한계치 접안 속력 추정의 기법으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

6. 결 론

본 연구에서는 선박의 속력을 모르는 경우 계류사의 파단을 방지하기 위한 선박의 한계치 접안속력 추정에 관하여 제안하였다.

선체운동과 계류사의 장력에 관한 관계식을 정리하고, 한계치 접안속력 추정 방법과 절차를 제안하여 135K LNG 선박을 대상으로 한계치 접안속력을 추정한 결과는 다음과 같다.

첫째, 추정한 초기 접안속력에 대해서 평가한 결과 계류사에 파단이 발생하지 않을 것으로 분석되었다.

둘째, 선박의 속력을 모르는 경우, 관계식을 이용하여 시점 T 에 대한 선박 가속도 a_t 을 계산한 후, 시점에 따른 a_t 에 대한 적분 속력 v_t 을 추정하는 방법이 유효함을 알았다.

셋째, 본 연구에서 적용한 방법은 선박의 제원과 계류사의 제원을 이용하여 계류사의 파단 방지를 위한 한계치 접안속력의 추정이 가능하기 때문에 기존 선장의 판단과 감지기를 이용한 자동 윈치 장치 등에서 발생 가능한 사고예방에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 접안 시 선박 정지를 위해서는 엔진이나 터그보트를 이용하여 선박이 정지하는 것이 일반적이며, 통상 접안 한계치 속력 추정의 경우 부두시설물(펜더를 포함한)과의 선박 접촉에 따른 충격력 예측이 주로 연구 대상이 되고 있다. 본 연구는 계류사의 장력에 의한 선박 정지를 위한 최소 접근 속력 계산에 초점을 맞추어 수행되었다. 따라서 실무적 적용에는 이러한 한계점이 존재한다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 “해양안전사고 예방시스템 기반연구(2단계)”과제의 연구결과임을 밝힌다.

References

- [1] Kim, J. M., Nam, T. K., Jung, C. H. and Choi, H. J.(2014) “A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments”, Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 38, No. 5, pp. 463-470.
- [2] Kong, G. Y., Kim, C. S., Lee, S. M. and Lee, Y. S.(2004) “A Study on the Berthing Energy considering the shallow effect of Added mass Actiong on a Large Ship”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Academic conference(2004), pp. 107-112.
- [3] Nam, T. K., Jung, C. H. and Jung, J. S.(2012), “A Study on the Calculation of Resistance of the ship to be Towed and Towline Tension”, Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 8, pp. 607-612.
- [4] OCIMF(2008), Mooring Equipment Guidelines, 3rd Edition, pp. 109-123.
- [5] “UK P&I CLUB(2009), Understanding mooring incidents, <https://www.ukpandi.com>”
- [6] Yun, J. D.(2018), Theory and Practice of Ship Control, Sejong press, pp. 80-126.

Received 4 October 2018

Revised 3 December 2018

Accepted 3 December 2018