한국연안방재학회지/ISSN 2288-7903(Print), ISSN 2288-8020(Online)
Journal of Coastal Disaster Prevention
Vol. 8, No. 4, pp. 297-306, October 2021
http://doi.org/10.20481/kscdp.2021.8.4.297

한국연안방재학회
Korean Society of Coastal Disaster Prevention

부두 설계 접안에너지를 고려한 선박 규모별 허용접안속도에 대한 분석

Analysis of Allowable Berthing Velocity by Ship Size considering Designed Energy

강은지* · 이형탁* · 조익순**
*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원
**한국해양대학교 항해융합학부

Eun-Ji Kang* · Hyeong-Tak Lee* · Ik-Soon Cho**
*Ocean Science and Technology School, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea
**Division of Navigation Convergence Studies, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

Abstract

The berthing velocity is the factor that has the greatest influence on the berthing energy. For the vessel to berth safely, it should not exceed the appropriate berthing velocity. In addition, when the vessel is berthing, it should be berthed with berthing energy smaller than the energy absorption of the fender. This study intends to derive the allowable berthing velocity by ship size considering the berthing capacity. When a small vessel berth, the allowable berthing velocity is greater than when a relatively large vessel berths. In this study, the extrapolated velocity is defined as the relative value of the ship's berthing velocity when considering the ship's size and the berthing capacity. A regression equation for the allowable berthing velocity by ship size was derived by calculating the designed berthing energy for each fender performance. It was also verified whether any ships were exceeding the allowable berthing velocity by comparing it with the measured data for each jetty. In addition, the extrapolated velocity was proposed using the regression equation, and as a result of applying the measured data, 11 ships exceeded the designed velocity in jetty 1, but it was confirmed that all ships were safely berthed in jetty 2,3. Therefore, the target pier of this study was evaluated as a pier where ships can be berthed safely. A safer berthing velocity operation guideline can be suggested if the allowable berthing velocity by ship size is analyzed and utilized at various piers. Extrapolated velocity can also be used for risk analysis of berthing.

Keywords : Allowable Berthing Velocity, Ship size, Berthing energy, Energy absorption, Fender

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

선박의 대형화 등 급격한 환경변화에 따라 우리나라 주요 항만은 항만시설 투자비를 증가시키는 등 항만시설을 확보하는데 주력하였다. 하지만 늘어난 항만 물동량을 따라가지 못해 부두의 설계접안능력보다 더 큰 선박이 접안하는 사례가 빈번하게 발생하고 있다(Kang and Park, 2016). 실제 울산항의 경우, A부두에서는 부두접안능력의 2배가 넘는 선박이 접안하고 있으며 일부 부두에서는 부두접안능력의 4배를 웃도는 선박이 접안한 사례도 있다(UPA, 2020). 울산항 B부두의 경우, 부두 형상으로 인한 편심접안으로 첫 번째 접촉하는 방충재(fender)가 지속적으로 파손되어 교체가 빈번하게 일어난다. 따라서 접안능력을 초과하는 선박이 안전하게 접안하기 위해서는 부두 방충재가 수용할 수 있는 에너지 내에서 안전한 접안속도로 접안해야 한다.

접안속도는 접안에너지에 가장 큰 영향을 미치는 동시에 선박에서 통제할 수 있는 요소이기 때문에 선박이 안전하게 접안하기 위해서는 적정 접안속도를 지키는 것이 중요하다. 2019년 인천에서 발생한 산적화물선 S호 부두접촉사건은 선박이 과도한 속력으로 부두에 접근하다가 전진 타력을 적절하게 제어하지 못해 발생한 사고이다(Korea maritime safety tribunal, 2019). 우이산호 사고 역시 두 배 이상 빠른 속도로 부두에 너무 근접한 채 항해하다 발생하였다(Korea maritime safety tribunal, 2015). 이처럼 선박이 적정 접안속도를 넘은 채로 접안하면 부두 계류시설이 파괴되거나 선박의 선체 손상과 같은 사고가 이어질 수 있다(Lee *et al*., 2019).

접안속도와 관련된 선행연구는 다음과 같이 다양하게 진행되었다. Fig. 1과 같이 5가지 항해 조건으로 구분하여 선박 규모별 적합한 접안속도를 나타낸 Brolsma's curve를 시작으로 선박규모가 클수록 접안속도가 감소한다는 분석이 이루어졌다(Brolsma, 1977). Inoue(1990)는 위험에 대한 항

Received 09 September 2021, revised 28 October 2021, accepted 28 October 2021
Corresponding author: Ik-Soon Cho, +82-51-410-5072, ischo@kmou.ac.kr

해자의 심리적 태도를 3가지 유형으로 표준화하여 접안속도 감속패턴을 제안하였고 Robous *et al.*(2017)은 로테르담항의 대형 선박들의 접안속도를 실측하여 외부 요인들과 접안속도의 관계를 통계 분석을 사용하여 비교하였다. Cho *et al.*(2018)는 부두 위치, 선박 크기에 따라 접안속도와 접안각도를 통계적 기법으로 분석하였으며, Iversen *et al.*(2019)는 탱커 터미널의 접안속도 데이터를 수집하여 PIANC Working Group 145의 데이터 분석결과와 비교하였다. Lee *et al.*(2019)의 경우 선박 재화상태와 규모에 따라 확률분포 분석을 실시하고 초과확률에서의 접안속도 예측값을 추정하였다. Lee *et al.*(2020a)의 연구에서는 접안속도에 영향을 미치는 요인들을 머신러닝 분류 알고리즘을 적용하여 중요도를 계산하였고 Lee *et al.*(2020b)에서는 접안속도를 부두 설계운영속도로 나누어 머신러닝 분류 모델을 적용하였다. Lee *et al.*(2020c)는 이전엔 고려되지 않았거나 낮은 중요도로 취급된 도선사를 정량적으로 평가하기 위해 접안속도에 따른 도선사의 조선에 대해 연구하였다.

하지만 선박규모별로 부두의 설계접안에너지를 고려한 접안속도를 분석하는 연구는 없었다. 부두 설계접안에너지는 방충재의 흡수에너지와 밀접한 관계가 있다. 방충재의 규격은 해당 부두에 접안하는 선박의 종류, 규모, 길이, 흘수 및 폭에 따라 결정된다. 설계 접안속도와 각도, 접안에너지에 영향을 미치는 요소들을 결정한 후 부두 설계접안에너지를 계산하고 에너지를 흡수할 수 있는 방충재를 선택한다. 후에 방충재의 흡수에너지와 반력, 편향 정도가 결정된다. 즉, 부두마다 정해진 설계 접안에너지가 있는데 부두에 접안하는 선박의 규모가 각각 다르므로 허용되는 접안속도 또한 규모에 따라 달라져야 한다. 선박규모가 작은 선박과 선박규모가 큰 선박이 같은 위험 접안속도로 부두에 접안한다고 가정할 때 선박규모가 작은 선박은 더 높은 허용접안속도를 가지므로 선박규모가 큰 선박에 비해 위험하다고 보기 어렵다.

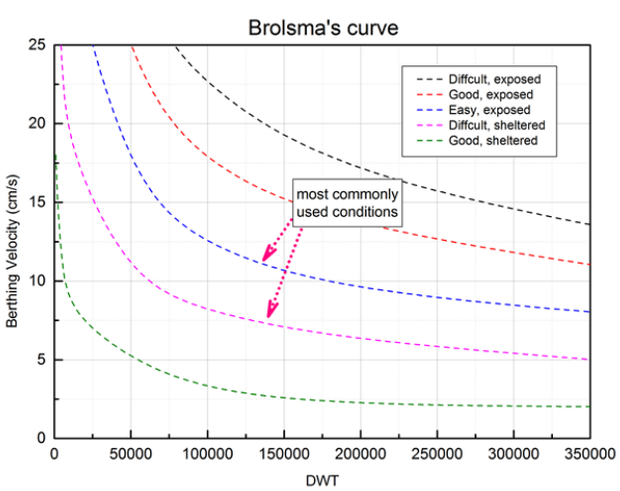


Fig. 1. Brolsma's curve

따라서 본 연구는 선박규모별 접안속도 분석을 통해 부두의 접안능력을 고려하여 안전하게 접안할 수 있는 허용접안속도를 제안하고자 한다. NILIM(2015)와 Lee(2019)의 연구에서는 접안속도와 선박규모 관계의 커버율을 제시하는데 대수회귀분석 방법을 사용하였다. 본 연구에서도 선박규모별 허용접안속도 관계식을 도출하는 방법으로 대수회귀분석을 사용하고자 한다. 또한 도출된 회귀식을 이용하여 절대적인 값의 접안속도가 상대적으로 어느 정도의 값을 갖는지에 대한 추정접안속도를 계산하여 부두 접안의 위험도를 분석하였다.

1.2 연구 방법

본 연구 방법은 Fig. 2와 같은 순서로 이루어진다.

먼저, 접안속도 실측데이터를 수집하여 기초데이터 분석을 실시한다. 펜더 성능별로 흡수에너지를 계산하고 선박크기별로 접안에너지를 계산하여 선박 접안에너지가 펜더 흡수에너지를 넘지 않는 허용접안속도를 도출한다. 이를 바탕으로 관계식을 산정하고 이 관계식을 이용하여 추정접안속도 식을 도출한다. 도출된 식에 실측데이터를 적용하여 대상 부두의 허용 및 추정접안속도에 대한 결과를 시각화 하였다.

2. 선박 접안속도 실측데이터 분석

2.1 데이터 수집

국제수상교통시설협회(PIANC, World Association for Waterborne Transport Infrastructure) Working Group 145(2020)

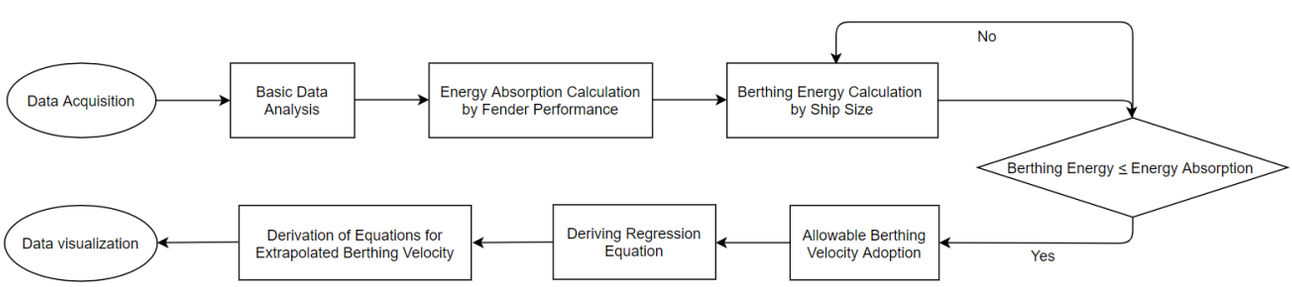


Fig. 2. Flow chart of the study

의 보고서에서는 Brolsma curve 이후로 7개국에 위치한 14개의 다른 선석에서 약 2,300개의 접안속도 데이터를 수집하여 분석하였다. PIANC는 각각의 선석에서 작게는 18개에서 많게는 744개까지의 데이터를 수집하여 분석결과를 제시하였으나 본 연구는 하나의 선석에서 오랜 시간 축적된 데이터를 대상으로 하여 분석 결과의 신뢰도를 높이고자 하였다. 수집 대상부두는 접안속도 측정을 위한 DAS(Docking Aid System)가 설치된 국내의 한 탱커 터미널로, 2017년 3월부터 2021년 3월까지 약 4년간 755개의 접안속도 데이터(Measured Velocity : mV)를 수집하였다. 탱커 터미널은 Fig. 3(a)과 같이 Jetty 1~3으로 구분되어 있다. Table 1은 부두의 상세를 표기한 것으로, 접안능력은 Jetty 1에서 80,000DWT, Jetty 2에서 120,000DWT, Jetty 3에서 320,000DWT 이다. 설계접안속도(Designed Velocity : dV) 또한 Jetty별로 12cm/s, 15cm/s, 15cm/s로 정해져 있다.

부두의 방충재 종류 및 규격, 흡수에너지 사양은 해당 부두의 설계보고서를 참고하였다(OKYC, 2012). 부두 방충재 종류는 Reel type으로 선박 접안면에 판넬이 부착되어 넓은 접촉면적을 가진다. 따라서 운동에너지는 많이 흡수하고 선체 압력은 최소화하여 대형 선박 접안에 많이 쓰인다(Hwaseung, 2020). Jetty별로 1200H, 1700H, 2250H 규격의 펜더가 두 개씩 설치되어 있다. Fig. 3(b)는 대상부두에 설치된 Reel Fender 모습이다.

2.2 기초 데이터 분석

수집한 데이터를 바탕으로 기초 데이터 분석을 실시하였으며 분석 결과를 시각화하여 나타내었다. Jung *et al.*(2018)에 따르면 데이터 시각화를 통해 데이터를 요약하여 한눈에 살펴보고 유의미한 결과를 도출할 수 있다.

2.2.1 Jetty별 접안속도 분석

Jetty별로 접안속도의 현황을 알아보기 위해 기초통계분석을 실시하였으며 접안속도 특성값을 분석한 결과는 Table 2와 같다. 755개의 모든 데이터 평균값은 7.48cm/s, 표준편차는 3.56이다. 평균적으로 높은 접안속도 값을 가지지는 않지만 모든 Jetty에서 설계접안속도를 초과하는 사례가 발생했음을 알 수 있다. 그러나 실제로 설계접안속도를 초과한 선박들 모두 안전하게 접안하였으므로 본 연구에서는 선박규모별로 부두의 접안에너지를 고려한 허용접안속도를 구하여 평가해보고자 한다.

전체 접안속도에 대해 접안속도별 빈도수 및 상대빈도를 알아보기 위해 분석한 표는 Table 3과 같다. 접안속도 6~8cm/s가 전체의 26.2%로 가장 높은 빈도수를 나타냈지만 4~6cm/s도 전체의 26.1%로 높은 빈도수를 보였다. 10cm/s 이내가 81.1%로 조사되었으며, 국내 항설기준의 한계치인 15cm/s를 넘는 비율도 약 5% 수준에 달하는 것으로 분석되었다. 빈도 분석에 따르면 대상 부두에 접안하는 선박의 접안속도가 전체적으로 높지 않은 것을 확인할 수 있다.

(a) Overview of tank terminal

(b) Reel fender

Fig. 3. Terminal view and fender of the target pier

Table 1. Terminal particulars

CASE	Jetty 1	Jetty 2	Jetty 3
Capacity (DWT)	80,000	120,000	320,000
Berthing Velocity (designed)	12cm/s	15cm/s	15cm/s
Berthing Velocity (operated)	safety : 5cm/s, warning : 6~10cm/s, dangerous : 11~15cm/s		
Fender Type	Reel Fender	Reel Fender	Reel Fender
Fender Standard	1,200H * 2Unit	1,700H * 2Unit	2,250H * 2Unit
Fender Energy Absorption	1,070kJ	2,900kJ	6,420kJ

Table 2. Characteristic of berthing velocity values by Jetty

Velocity(cm/s)	Jetty 1	Jetty 2	Jetty 3	Total
Average	6.95	8.39	6.94	7.48
Standard Deviation	3.32	4.00	2.85	3.56
Coefficient of Variance	0.48	0.48	0.41	0.48
Max observed Value	19.98	21.21	18.41	21.21
Data Number	307	278	170	755

Table 3. Frequency analysis of berthing velocity

Velocity(cm/s)	Count	Cumulative Count	Relative Frequency	Cumulative Frequency
0~2	16	16	2.1%	2.1%
2~4	74	90	9.8%	11.9%
4~6	197	287	26.1%	38.0%
6~8	198	485	26.2%	64.2%
8~10	127	612	16.8%	81.1%
10~12	65	677	8.6%	89.7%
12~14	35	712	4.6%	94.3%
14~16	18	730	2.4%	96.7%
16~18	10	740	1.3%	98.0%
18~20	13	753	1.7%	99.75%
20~	2	755	0.3%	100.0%

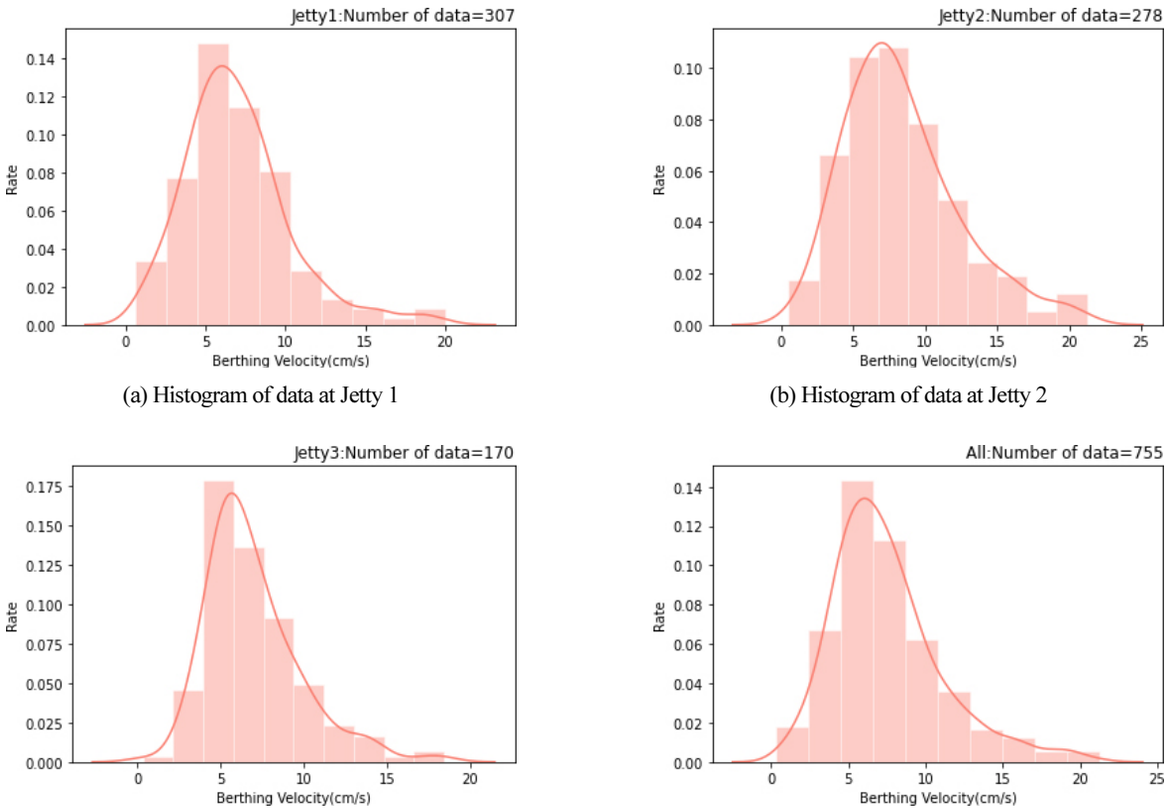
Jetty별 접안속도 분포형상을 알아보기 위해 접안속도 비율을 Fig. 4와 같이 히스토그램으로 시각화 하였다. 그 결과, Jetty 1과 3은 5cm/s의 접안속도가 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 분석되었다. 하지만 Jetty 2에서는 선박이 상대적으로 높은 접안속도로 접안하는 경향을 보인다. 분포형상을 확률분포함수에 적용시켜 KS(Kolmogorov-Smirnov) test를 시행한 결과, 대수정규분포에서 p-value 값이 각각 0.46, 0.95, 0.35, 0.30로 나와 모든 경우에서 대수정규분포를 따르는 것으로 나타났다.

2.2.2 Jetty별 선박크기의 무차원화

선박 크기에 해당하는 DWT와 접안속도 관계를 Fig. 5(a)와 같이 산점도로 나타내었다. 상관계수 γ 값은 -0.13으로 음의 상관관계를 보인다. 또한 절대값이 0에 가까운 값을 보이므로 선박규모와 접안속도의 관계는 거의 상관성이 없다. Jetty별로 접안능력 대비 어느 정도 규모의 선박이 접안하고 있는지 확인하기 위해 무차원화를 진행하였다. 무차원화란 차원을 없앤다는 의미로 단위가 사라지기 때문에 크기 비교에 용이하다(Jonathan, 2016). Jetty별로 접안한 선박 규모 M_d를 부두의 설계접안능력 M_i로 나누면 선박크기의 무차원화 결과값(P)이 Eq. (1)과 같이 도출된다.

$$P = \frac{M_d}{M_i} \tag{1}$$

Fig. 5(b~d)는 Jetty별로 무차원화 한 결과와 접안속도 관계 그래프를 나타내었다. Jetty 1의 경우, 접안능력 대비 약 0.5~0.7에 해당하는 크기의 선박이 대부분 접안하였으며 설계접안속도를 넘어서 접안한 선박이 다수 존재한다. 또한 접안능력을 초과하는 선박이 한 척 접안하였다. Jetty 2에서는 접안능력에 비해 현저히 작은 크기의 선박들이 많이 접안하였으며, 모든 선박이 접안능력 범주 내에 존재한다. Jetty 3의 경우, 접안능력과 유사한 크기의 선박들 외에는 0.5 이하에 해당하는 크기의 선박들이 접안하였으며 설계접안속도를 넘는 선박은 많지 않다. 전체적으로 접안능력 범주를 초과하는 선박이 거의 없으며, 접안능력에 비해 작은 크기의 선박들이 많이 접안하고 부두 운영위험속도를 초과하는 선박들이 다수 존재한다. 또한 Jetty별로 같은 접안속도를 가지지만 선박크기에서는 두 배 이상의 차이가 나는 선박들이 있다. 같은 위험속도로 들어온 선박들이지만 선박규모에서 차이가 나면 접안에너지 크기도 달라진다. 규모 차이가 클수록 선박 접안에너지 크기 차이도 커지며 규모가 작은 선박은 그 차이만큼 여유 에너지가 생긴다. 여유 에너지만큼 접안속도 한계가 늘어나므로 절대적인 접안속도 값만으로는 위험속도인지 판단하는데 한계가 있다.



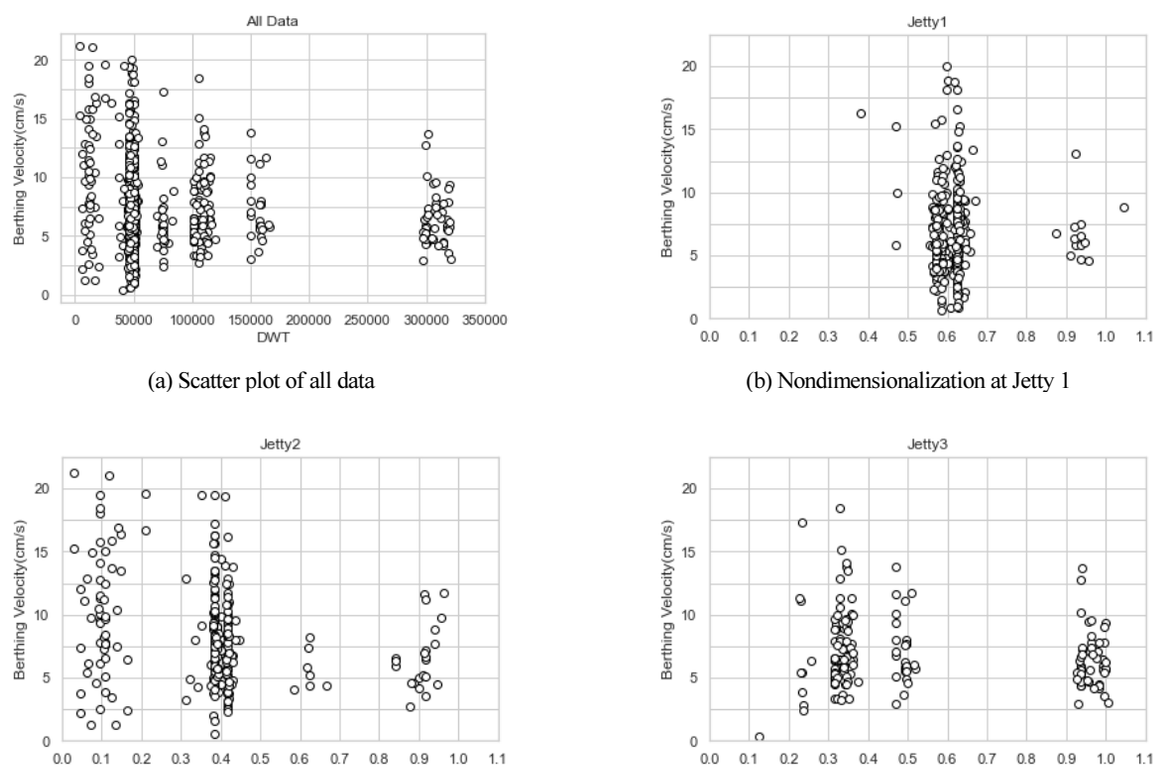
(a) Histogram of data at Jetty 1

(b) Histogram of data at Jetty 2

(c) Histogram of data at Jetty 3

(d) Histogram of all data

Fig. 4. Density estimation of berthing velocity



(a) Scatter plot of all data

(b) Nondimensionalization at Jetty 1

(c) Nondimensionalization at Jetty 2

(d) Nondimensionalization at Jetty 3

Fig. 5. Nondimensionalization-Berthing Velocity Scatter plot

3. 방충재 성능과 허용접안속도 관계식

3.1 선박 접안에너지와 방충재 흡수에너지 관계

우리나라 항만 및 어항 설계기준에 따르면 일반적으로 선박의 접안에너지를 구하는 방법은 운동역학적인 방법을 사용하며 Eq. (2)와 같이 규정하고 있다(Ministry of oceans and fisheries, 2020).

$$E_f = (\frac{M_s V^2}{2}) C_e C_m C_s C_c \quad (2)$$

여기서, E_f : 선박의 접안에너지(kN • m)
M_s : 선박의 질량(t)
V : 선박의 접안속도(m/s)
C_e : 편심계수
C_m : 가상질량계수
C_s : 유연성계수(표준은 1.0)
C_c : 선석의 형상계수(표준은 1.0)

접안에너지 산출 방식은 선박이 횡이동하여 접안했을 때 선박에 의한 운동에너지에 방충재에 의하여 흡수되는 에너지 즉, 편심계수, 가상질량계수, 유연성계수, 형상계수, 안전계수 등을 고려하여 구성되었다.

선박의 접안 및 계류 시 선체와 접안시설의 손상을 방지하기 위해 방충재가 설치된다(Cho *et al.*, 2019). 방충재의 규격 및 배치는 해당 부두에 접안하는 선박의 최대 규모 및 주로 접안하는 선박의 규모에 맞추어 결정된다. 따라서 선박의 접안에너지는 해당 부두에 적합하게 설계되어야 하며, 방충재는 접안하는 선박의 접안에너지를 버텨낼 수 있도록 만들어져야 한다. Galor(2012)는 선박이 접안할 시 발생하는 접안에너지를 항만 부두시설의 방충재가 충분히 흡수해야 한다고 명시하고 있다. 접안부두가 허용할 수 있는 흡수에너지가 실제로 발생하는 선박의 최대 접안에너지보다 커야만 항만 및 부두시설과 해당 선박이 파손 없이 안전하게 접안을 완료할 수 있다.

3.2 허용접안속도와 선박규모 관계

3.2.1 선박규모별 허용접안속도 산출

본 연구에서는 접안에너지 산출식을 역산하여 선박규모별 최대 접안속도를 도출하였다. 접안에너지 산출식을 접안속도를 구하기 위한 식으로 변형하면 Eq. (3)과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2E_f}{M_s C_e C_m C_s C_c}} \quad (3)$$

위 식에서, 최대 허용접안속도를 산출하기 위해서는 E_f에 허용되는 최댓값이 적용되어야 한다. 선박의 접안에너지는 항상 방충재의 흡수에너지보다 작거나 같아야 하므로 E_f에 방충재의 흡수에너지를 대입하여 계산한다. UEDA(2018)는 고정식 계류시설의 경우 방충재의 에너지 흡수량은 Eq. (4)에 의한 성능검증식에 의해 결정된다고 명시하고 있다. 식에 따르면 선박 접안에너지(kJ) E_f는 정상 방충재 흡수에너지(kJ) E_{cat}에 방충재 성능의 영향 요인 τ를 곱하여 계산된 방충재 흡수에너지(kJ) E를 넘지 않아야한다.

$$E = \tau E_{cat} \geq E_f \quad (4)$$

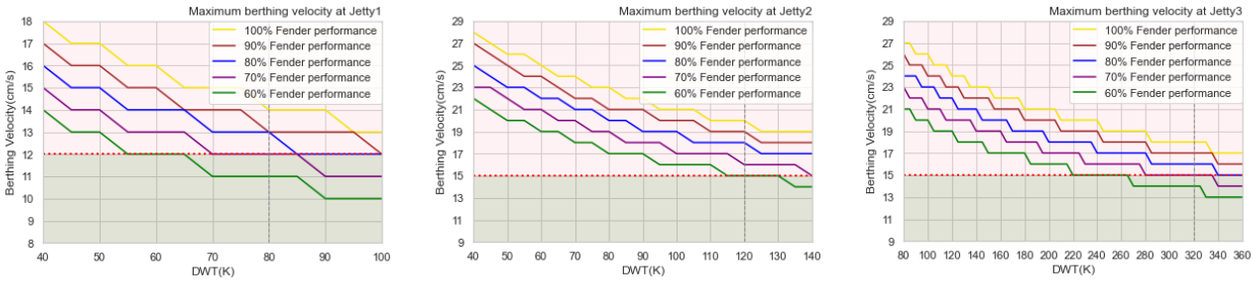
방충재 계수 τ는 E_{cat}에 대한 흡수에너지 계수로 τ=1.0은 방충재 흡수에너지가 카탈로그 값 E_{cat}와 같다는 것을 의미하며, τ=0.9는 E_{cat}가 10% 감소함을 의미한다. 방충재의 주성분은 고무(rubber)이기 때문에 그 성능 및 품질은 시간경과에 따라 저하되며, 최초 설계성능을 만족하지 못하는 불량 방충재가 설치된 사례도 존재하기 때문에 현재 설치·운영되고 있는 방충재를 평가를 위해서는 성능 저하에 대한 고려가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 방충재의 성능평가 Case를 100%의 흡수에너지를 기준으로 10%, 20%, 30% 및 40%의 성능이 각각 저하되는 다섯 개로 구분하여 분석하였다. 선박의 질량은 5,000DWT 간격으로 접안속도 값을 제시하였고, 최대 접안에너지에 부합하는 방충재 성능저하를 직관적으로 찾기 위해 허용 접안속도를 1cm/s 간격으로 표시하였다. Jetty별로 설계접안속도는 빨간 점선(횡선)으로 최대접안능력은 회색 점선(종선)으로 표시한 것이 Fig. 6이며, 두 점선이 만나는 점이 부두에서 설계한 최대 접안에너지 값이다. 그 점과 방충재 성능저하 직선이 만나는 교점을 그래프를 통해 도출해 Jetty별 방충재 성능저하 값을 도출하였다. 즉, Jetty 1에서는 펜더 성능의 70%, Jetty 2는 성능 60%, Jetty 3에서 성능 70%를 가지는 것으로 가정하였다. 이러한 분석방식으로 부두별로 충족하는 각각의 펜더 성능을 활용하여 선박규모와 접안속도의 관계식을 도출하고자 한다.

3.2.2 선박 규모와 허용접안속도 관계식

NILIM(2006)에 따르면 통계 분석에는 데이터 특성에 따라 최적이라고 판단되는 방법을 적용한다. Fig. 5(a)와 같이 접안속도 데이터는 선박규모와 상관관계가 거의 없으므로 본 연구에서는 대수 회귀 분석 방법을 이용하였다. 선박 접안속도와 선박 규모의 관계를 대수회귀분석 방법으로 나타내면 Eq. (5)와 같다.

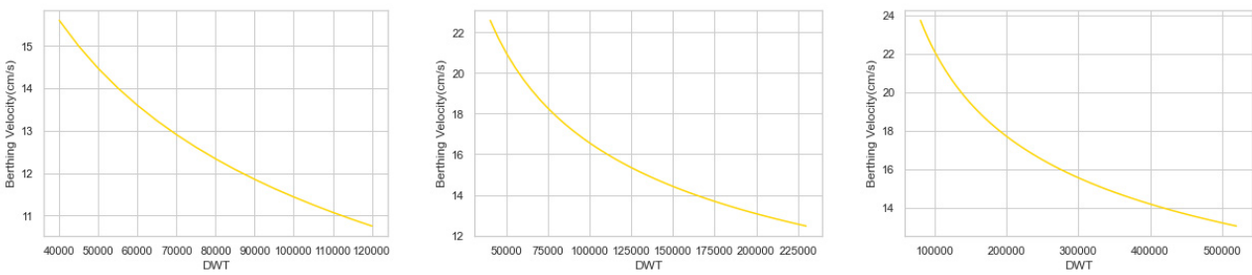
$$y = \alpha x^{\beta} \quad (5)$$

위 수식의 양변에 자연로그를 취하면 Eq. (6)로 치환되고 이를 통해 로그 회귀식이 아닌 단순 직선 회귀식의 산정 및 통계 분석을 용이하게 할 수 있다.



(a) Allowable berthing velocity at Jetty 1 (b) Allowable berthing velocity at Jetty 2 (c) Allowable berthing velocity at Jetty 3

Fig. 6. Graph of Allowable berthing velocity by ship size and jetty



(a) 70% fender performance at Jetty 1 (b) 60% fender performance at Jetty 2 (c) 70% fender performance at Jetty 3

Fig. 7. Relation curve between berthing velocity and DWT

Table 4. The results of linear regression analysis (80% performance at Jetty 1)

Equation	Intercept ($\ln\alpha$)	Coef (β)
$\ln y = \ln\alpha + \beta \ln x$	6.25771	-0.3374

$$\ln y = \ln\alpha + \beta \ln x \tag{6}$$

선박 규모별 접안속도를 계산한 값과 선박규모인 DWT를 자연로그화하여 표현한 산점도에 선형 회귀분석을 시행해 회귀직선식을 얻는다. 여기서 $\ln y$를 임의의 Y로 보고 $\ln x$를 임의의 X로 본다면 $\ln\alpha$와 β는 각각 회귀직선의 y절편, 그리고 기울기를 의미하게 된다. 따라서 본 연구에 사용한 선박의 DWT와 그에 해당하는 허용 접안속도 V에 자연로그를 취해 산점도로 표현하고 이에 대한 선형 회귀분석을 시행하여 $\ln\alpha$와 β를 구할 수 있다.

Table 4에서 $\ln\alpha$ 값은 y절편으로써 이 값에 지수함수를 취하면 α값을 구할 수 있으며 β값은 기울기로 구할 수 있다. 여기서 구해진 회귀계수 값을 Eq. (5)에 대입하면 접안속도와 DWT 간의 관계식이 도출된다.

위의 방법에 따라 계산된 관계식은 Eq. (7~9)와 같다. 본 연구는 Jetty별 펜더 성능에 의한 선박규모별 허용접안속도를 변환접안속도(Transformed Velocity : tV_{τ}^{n})로 정의하였다. n=1, 2, 3으로 정의하며, 이는 Jetty의 위치를 의미한다.

$$tV_{0.7}^{1} = 563.984 \cdot DWT^{-0.3386} \tag{7}$$

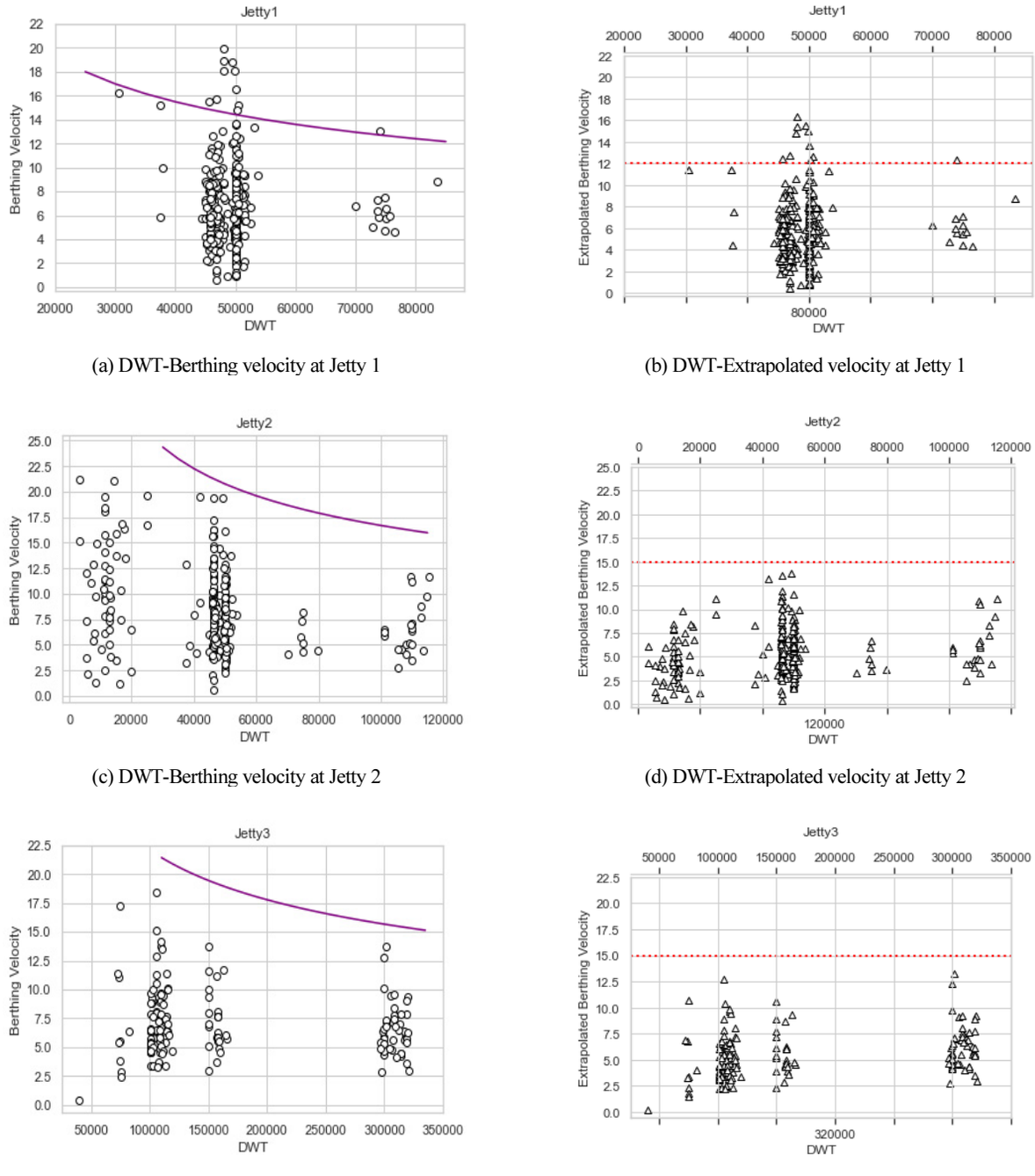
$$tV_{0.6}^{2} = 825.813 \cdot DWT^{-0.3396} \tag{8}$$

$$tV_{0.7}^{3} = 880.579 \cdot DWT^{-0.3200} \tag{9}$$

Fig. 7은 변환접안속도를 Jetty별로 도식화한 것이다. 곡선형태로 그려지며, 안전하게 접안할 수 있는 접안속도는 선박의 규모에 따라 다르게 분석되었다. 선박의 규모가 작을수록 허용접안속도는 높은 값을 가지며, 규모가 큰 선박은 상대적으로 낮은 허용접안속도를 가진다.

3.3 추정접안속도식 도출

본 연구에서는 추정접안속도(Extrapolated Velocity : eV)를 선박이 가지는 절대적인 값이 아닌 선박규모와 부두의 접안능력을 고려했을 때 계산되는 상대적인 값이라고 정의한다. 다시 말해, 추정접안속도(eV)는 실측접안속도 데이터(mV)를 k배 한 값이다. 계수 k값은 부두의 설계접안속도(dV)를 앞서 계산된 관계식에 따른 변환접안속도(tV_{τ}^{n})로



(a) DWT-Berthing velocity at Jetty 1

(b) DWT-Extrapolated velocity at Jetty 1

(c) DWT-Berthing velocity at Jetty 2

(d) DWT-Extrapolated velocity at Jetty 2

(e) DWT-Berthing velocity at Jetty 3

(f) DWT-Extrapolated velocity at Jetty 3

Fig. 8. Scatter graph before and after application of extrapolated velocity equation

나누어 도출하며, 관계식으로 나타내면 Eq. (10)과 같다.

$$eV = mV \cdot \frac{dV}{tV_{\tau}^{n}} \tag{10}$$

부두 운영 위험 속도를 초과한 선박들 모두 실제로는 안전하게 접안하였다. 이를 증명하기 위해 방충재 성능에 따른 선박규모별 허용접안속도를 실측데이터가 이를 넘어서는지 한 차례 검증하였고, 추정접안속도 식을 실측데이터에 적용하여 부두 설계접안속도를 초과하는지 다시 한 번 검증하였다. 그 결과를 바탕으로 부두의 접안 위험도를 비교하였다.

Fig. 8(a,c,e)는 Jetty별로 선박 규모와 실측접안속도 관계를 나타낸 산점도로, 변환접안속도를 보라색 실선으로 표시하여 그래프에 추가하였다. Fig. 8(b,d,f)는 Jetty별 선박 규모와 추정접안속도 관계를 산점도로 나타낸 것으로 설계접

Table 5. The results of berthing safety evaluation

	Berthing Safety Evaluation		
	Jetty 1	Jetty 2	Jetty 3
Berthed Ships (count)	307	278	170
$mV < tV_{\tau}^{n}$ (count)	11	0	0
$eV < dV$ (count)	11	0	0
Risk Probability (%)	3.6%	0%	0%

안속도를 빨간 점선으로 표시하였다. 추정접안속도는 각 규모의 선박이 부두의 최대접안능력이라고 가정했을 때의 접안속도를 나타낸 것이므로 x축을 이중축으로 두어 나타내었다. 아래의 x축은 부두의 최대접안능력을 나타낸 것이고 위의 x축은 각 선박의 본래 규모를 나타낸 것이다. 추정접안속도는 접안능력에 가까운 크기일수록 변화가 적고 접안능력에 비해 작은 크기일수록 변화가 크다. Jetty 1에서 50,000DWT 주변 11척의 선박들이 허용접안속도를 뛰어넘는 위험한 속도로 접안하고 있으며, 추정접안속도도 설계접안속도 12cm/s를 초과하며 접안한다. Jetty 2는 접안능력에 비해 작은 크기의 선박이 많이 접안하였으므로 접안속도에서 가장 눈에 띄는 변화를 보인다. 변환접안속도를 초과하는 속도로 접안하는 선박이 없으며, 크기가 작은 선박들의 실측접안속도는 부두 운영 위험 속도를 넘어서는 경우도 있지만 추정접안속도를 보면 접안속도가 현저히 줄면서 설계접안속도 15cm/s를 넘어서지 않는다. Jetty 3에서도 Jetty 2의 경우처럼 부두 운영 위험 속도를 초과하는 선박들이 몇몇 있지만 변환접안속도를 넘어서지는 않으며 선박의 추정접안속도도 15cm/s를 넘어서지 않는다. 따라서 부두의 접안 위험도 결과를 Table 5와 같이 나타내었다. Jetty 1에서는 307척의 선박 중 11척이 위험한 접안속도로 접안하였으며, Jetty 2에 접안한 278척의 선박과 Jetty 3에 접안한 170척의 선박은 모두 안전하게 접안하였다. 접안 안전성의 위험확률은 Jetty 1에서 3.6%, Jetty 2와 3에서 0%로, 대상부두는 선박 접안이 비교적 안전하게 이루어지고 있다고 판단하였다.

4. 결 론

본 연구는 분석 대상을 국내 한 Tanker 부두로 지정하여 실측접안속도 데이터를 수집하고 방충재 사양을 조사하였다. 각각의 흡수에너지와 접안에너지를 비교하여 선박규모별 허용접안속도를 계산해 관계식을 산정하는데 있어 Jetty별로 적합한 방충재 성능을 제시하였다. 추정접안속도 관계식을 실측데이터에 적용하여 산점도 그래프로 시각화하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 대상 부두에 접안하는 선박의 접안속도가 전체적으로 높지 않으며 Jetty별로 각각 설계접안속도를 초과한 사례는 있으나 모두 안전하게 접안하였다. 또한 데이터의 분포 형상이 모두 대수정규분포를 따르고 무차원화한 결과 전체적으로 접안능력 범주를 초과하는 선박이 거의 없으며, 접안능력에 비해 작은 크기의 선박들이 많이 접안하였다. 같은 접안속도를 가지지만 선박 규모에서 큰 차이가 나는 선박들도 다수 존재하였다.

(2) 방충재 성능을 10%씩 감하여 방충재 흡수에너지를 구하고 접안에너지가 흡수에너지를 넘지 않도록 허용접안속도를 산정하였다. 적절한 방충재 성능을 선택하기 위해 부두의 설계접안에너지를 이용하였으며 그 결과는, Jetty 1에서 방충재 성능 70%, Jetty 2에서 60%, Jetty 3에서 70%로 부합하였다. 각 방충재의 성능에서 대수회귀분석 방법을 활용하여 선박규모별 허용접안속도 관계식을 도출하였다.

(3) 선박규모별 허용접안속도 관계식을 새로운 추정접안속도 식을 도출하는데 활용하였으며 실측데이터에 적용한 결과 Jetty 1에서 허용접안속도를 넘어서고 추정접안속도가 설계접안속도를 초과하는 선박들이 11척 있었다. Jetty 2와 Jetty 3에서는 허용접안속도를 넘어서는 선박이 없었으며 추정접안속도 또한 설계접안속도를 넘어서지 않았다. Jetty별로 위험확률이 3.6%, 0%, 0%로 나타나 대상 부두는 선박 접안이 비교적 안전하게 이루어지고 있다고 판단하였다.

본 연구는 접안에너지 산정식을 역산하여 선박규모별 허용접안속도를 계산하였으며 이를 통해 도출된 추정접안속도 식을 실측데이터에 적용하여 위험도를 평가하였다. 선박 대형화에 따라 부두의 설계접안능력을 초과하는 선박들이 접안하는 경우가 늘어나고 있으므로, 부두 설계접안에너지를 고려한 선박규모별 허용접안속도에 관한 연구의 필요성은 높다. 울산항의 경우처럼 부두 접안능력을 현저히 초과하는 선박들이 많이 접안하면 더 상세한 접안속도 가이드라인을 제안할 수 있으며, 추정접안속도가 감소하는 것만이 아닌 증가하는 결과에 따른 위험도 분석도 할 수 있다.

하지만, 본 연구 결과는 국내의 한 Tanker 부두에 한정된 결과로, 부두에서 접안능력을 벗어난 선박이 두 척 뿐일만큼 선박에 대한 관리가 철저하게 이루어졌다. 향후 연구에서는 다양한 항만과 선종을 대상으로 데이터를 수집하여 접안속도 운용가이드라인을 제안할 필요가 있다. 이는 해

당 부두와 선종의 위험 접안에 대한 평가지표로도 활용할 수 있을 것이다. 또한 추정접안속도도 평가지표로 충분히 활용할 수 있으므로 다양한 부두의 데이터를 바탕으로 보편적인 허용접안속도를 도출할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다(스마트항만-자율운항선박 연계기술 개발, No. 20210631).

References

Brolsma, J. U. (1977). "On fender design and berthing velocities." *Proc. of Intl. Navigation Congress,* Section Ⅱ, Subject 4, pp. 87-100.

Cho, I. S., Cho, J. W. and Lee, S. W. (2018). "A basic study on the measured data analysis of berthing velocity of ships." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 5, No. 2, pp. 61-71 (in Korean).

Cho, I. S., Yun, S. H., Kim, D. G., Lee, H. T. and Cho, J. W. (2019). "Proposal of fender design through analysis damage cases in the viewpoint of ship operations." *Proc. of 7th Annual Conf. on Coastal Disaster,* pp. 87-88 (in Korean).

Galor, W. (2012). "The analysis of effective energy of ship's berthing to the quay." *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 19, No. 4) pp. 185-191.

Hwaseung Exwill (2020). "*Rubber fender marine fendering system*." Hwaseung Exwill, Korea (in Korean).

Inoue, K. (1990). "Guidelines for desirable berthing operation." *Journal of Japan Institute of Navigation,* Vol. 82, pp. 43-52 (in Japanese).

Iversen, R., Argo, M. L., Cortes, S. C. and Pyun, J. J. (2019). "Analysis of measured marine oil terminal berthing velocities." *Proc. of 15th Triennial Intl. Conf. on Port engineering.*

Jonathan Evans (2016). "*Mathematical modeling in industrial and applied mathematics*." CEPID-CeMEAI.

Jung, H. and Choi, S. M. (2018). "Analysis of the Selection Factors of Data Visualization System Using AHP." *Journal of Innovation Studies*, Vol. 13, No. 3, pp. 175-203 (in Korean).

Kang, W. S. and Park, Y. S. (2016). "A basic study on safe mooring guide for dangerous goods berths in ul-san port." *Journal of the Korean Society of Marine Environment&Safety*, Vol. 22, No. 1, pp. 67-73 (in Korean).

Korea Maritime Safety Tribunal (2015). *Special investigation report on oil carrier Uisanho pier contact accident* (in Korean).

Korea Maritime Safety Tribunal (2019). *Maritime safety paper.* Vol. 65 (in Korean).

Lee, H. T., Lee, J. S., Cho, J. W., Yang, H. and Cho, I. S. (2020). "A study on the pattern of pilot's maneuvering using k-means clustering of ship's berthing velocity." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 221-232 (in Korean).

Lee, H. T., Lee, J. S., Son, W. J. and Cho, I. S. (2020). "Development of machine learning strategy for predicting the risk range of ship's berthing velocity." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 5, 376.

Lee, H. T., Lee, S. W., Cho, J. W. and Cho, I. S. (2020). "Analysis of feature importance of ship's berthing velocity using classification algorithms of machine learning." *Journal of the Korean Society of Marine Environment&Safety,* Vol. 26, No. 2, pp. 139-148 (in Korean).

Lee, S. W. (2019). "*A study on the measured data analysis of berthing velocity for safe berthing*." Master's thesis, Korea Maritime & Ocean University The Korea (in Korean).

Lee, S. W., Cho, J. W. and Cho, I. S. (2019). "Estimation of berthing velocity using probability distribution characteristics in tank terminal." *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 43, No. 3, pp. 186-196 (in Korean).

Ministry of oceans and fisheries (2020). *Harbor and Fishery Design Criteria* (in Korean).

National Institute of Land and Infrastructure Management (NILIM) (2006). "*Study on ship dimensions by statistical analysis-standard of main dimensions of design ship (Draft).*" Research report of national institute for land and infrastructure management (in Japanese).

National Institute of Land and Infrastructure Management (NILIM) (2015). "*Fundamental analysis on the charateristics of berthing velocity of ships for the design of port facilities*." Research report of national institute for land and infrastructure management (in Japanese).

OilHub Korea Yeosu (2012). *Report of pier design* (in Korean).

PIANC (2020). "*Berthing velocity analysis of seagoing vessels over 30,000 DWT.*" Report of working group 145 of the MARITIME NAVIGATION COMMISSION, 67p.

Roubous, A., Groenewegen, L. and Peters, D. J. (2017). "Berthing velocity of large seagoing vessels in the port of Rotterdam." *Marine Structures*, Vol. 51, pp. 202-219.

Ueda, S., Yoneyama, H. and Ikebe, M. (2018). "*Dredging and reclamation considering impact on environment*." Techinal Articles, PIANC, pp. 131-146.

Ulsan Port Authority (2020). *Report of ulsan port port facility improvement basic plan establishment service* (in Korean).