



여객선 부두 계류안전성 평가를 통한 계류 환경 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Mooring Configuration through Mooring Safety Assessment for Passenger Ship Berth

김대근* · 강은지** · 조익순***

*한국해양수산연수원

**한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

***한국해양대학교 해사인공지능 · 보안학부

Daegun Kim* · Eun-Ji Kang** · Ik-Soon Cho***

*Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, Korea

**Ocean Science and Technology School, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

***Division of Maritime AI & Cyber Security, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

Abstract

Most of the domestic car ferries departing from Jeju Port in Korea were replaced through the construction of new ships or the introduction of new used ships starting in 2018 after the Sewol Ferry accident. Amid this trend of ship replacement, the size of passenger ship has also become larger than in the past to increase passenger sales and cargo transportation profits, but the passenger ship berth configuration at Jeju Port have not improved significantly. In this study, the current status of passenger ships at Jeju Port was investigated, and a mooring safety assessment was conducted on car ferries exceeding the design berth capacity of the pier. Risk factors of the target ship were identified through mooring safety assessment. Through the sensitivity analysis of each improvement plan, a plan to improve mooring configuration was proposed and its effect was confirmed. As a result, the in case of Arion Jeju which is berthed at No. 2 pier, improvement plan scenario case 1 to 4 from the operator's perspective did not secure the mooring safety due to the problem of exceeding maximum traction force with the size of the mooring post. However in case of scenario case 5 of the improvement plan through the additional installation of High Height Bitt, it was analyzed that a load of about 23% or less of the breaking strength of all lines acts on the mooring line and the load of 44% or less of the maximum traction force of the mooring post acts that the mooring safety was evaluated to be secured. The results of this study are expected to be used as reference materials for the establishment of safe passenger ship berth mooring configuration and the development of guidelines for mooring a car ferry.

Keywords : Passenger ship berth, Car ferry, Mooring configuration, Mooring safety assessment

1. 서론

국내 내항 여객선들은 현재 도시민들의 육지 왕래를 위해 이용하는 대중 교통수단으로뿐만 아니라 관광을 위해 여행객들을 섬으로 수송하여 주는 생활 교통수단이 되었다(Hwang *et al.*, 2015). 국내 제주항을 기항하는 카페리여객선은 세월호 사고 이후 2018년을 기점으로 새로운 중고선 및 신조선 도입을 통해 교체되었다. 이러한 카페리여객선 교체 흐름 속에 여객 영업 확대와 화물 운송 이익을 증가시키기 위해 일부 여객선들은 Table 1과 같이 크기를 대형화하였다.

제주항을 기항하는 내항 카페리여객선이 대형화됨에 따라 이러한 여객선들이 이용하는 부두시설도 충분한 계류안

전성을 확보할 수 있도록 선제적으로 개선되어야 한다. 항만의 계류시설에 작용하는 외력으로는 파랑, 바람, 조류 및 선박의 접안력 등이 있다. 이 중에서도 선박 접안력은 선박의 대형화, 전용선화 및 화물량 증가에 따라 변화하고 있다(Cho *et al.*, 2018). 부두마다 정해진 설계 접안에너지가 있으며 부두에 접안하는 선박의 규모가 각각 다르므로 허용되는 접안 속도 또한 규모에 따라 달라져야 한다(Kang *et al.*, 2021). 그리고 항내 선박의 재해 예방을 위해서는 선종, 선형의 차이에 따른 영향, 계류삭 및 방충재 변경에 의한 계류력의 영향, 파랑의 높이, 파향 등에 따른 영향을 상세히 검토하여 계류 선박의 운동을 제어할 필요가 있다(Cho *et al.*, 2006). 여객선이 부두에서 이탈하는 사고가 발생할 경우, 선박 파손 사고

Table 1. Replacement status of car ferry

Name of Pier	Before replacement			After replacement		
	Ship's name	LOA(m)	Size(GT)	Ship's name	LOA(m)	Size(GT)
No.2 Pier (24 Berth)	Namhae Express car ferry No.7	110	3,780	Arion Jeju (Used)	145	6,266
No.4 Pier (44 Berth)	Goldsteller	189	15,188	Goldsteller (New)	160	21,989 (Int.)
No.6 Pier (62 Berth)	Seastar cruise	185	15,089	Queen Mary (Used)	192	13,665
No.7 Pier (71 Berth)	Blue star	125	6,626	New star (Used)	163	9,997

뿐만 아니라 여객의 안전을 위협할 수 있는 대형 해양사고로 이어질 수 있으므로 이에 대한 적절한 대응과 조치가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 선박 계류해석 시뮬레이션 프로그램 OPTI-MOOR 프로그램을 활용하여 제주항에 기항하는 내항 카페리여객선 중 제주항 부두설계 한계를 초과하는 크기의 카페리여객선을 대상으로 계류안전성 평가를 수행하였다. 이를 통해 대상선박의 현 계류 환경에 대한 적정성을 검토하고 계류안전성이 취약한 부분은 어떤 요소인지를 파악하고자 하였다. 또한, 이를 개선하기 위해 운항자 관점에서 개선 가능한 방법과 국외 여객선 부두 계류 환경 개선사례 적용 등 다양한 개선 시나리오별 계류안전성 민감도 변화를 비교·분석하였다. Fig. 1은 연구 과정을 도식화한 것이며 이러한 연구 과정을 통해 효과적인 개선안을 제안함으로써 여객선의 안전을 확보하는 것을 연구목표로 한다.

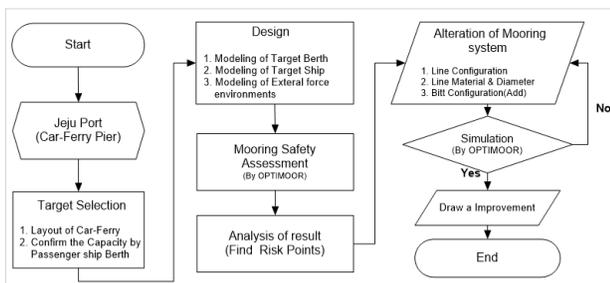


Fig. 1. Flow chart of the study

2. 대상 선정 및 모델링

2.1 여객선 운용현황 조사

본 연구에서 대상으로 하는 제주항을 기항하는 내항 카페리여객선들은 2021년 1월 기준으로 총 7척의 대형 카페리여객선들이 운항하고 있다. 카페리여객선들이 주로 이용하고 있는 제주항 여객선 부두는 총 4개의 부두로 2부두(24번석), 4부두(44번석), 6부두(62번석), 7부두(71번석)가 있으며 각 부두시설에 대한 선석별 길이, 계획 수심 그리고 접안능력

과 같은 주요제원 정보는 제주특별자치도 무역항 항만시설 운영세칙에 따라 Table 2와 같이 자세히 설명되어 있다.

Table 2. Facility status of passenger ship berth in Jeju Port

Name of Pier	Berth No.	Length (m)	Design Depth (m)	Capacity (DWT · Ship)	Main ship for use
No.2 Pier (410m)	21	100	-	50(4)	Government ship
	22	85	-	250(1)	Passenger ship
	23	105	6.0	3,000(1)	Passenger ship
	24	120	6.5	3,000(1)	Passenger ship
No.4 Pier (605m)	41-42	165	7.5	5,000(1)	Tanker ship
	43	100	7.5	5,000(1)	M.P. Patrol ship
	44-45	180	8.0	8,000(1)	Passenger ship
	46-47	160	6.0	3,000(1)	Cargo ship
No.6 Pier (305m)	61	100	5.0	1,000(1)	Passenger ship
	62	205	8.0	10,000(1)	Cargo ship
No.7 Pier (195m)	71-72	195	11.0	20,000(1)	Passenger ship

현재 제주항의 경우 각각의 부두를 이용하고 있는 대표적인 내항 카페리여객선들은 Table 1과 같이 2018년을 기점으로 대부분 새로운 중고선 또는 신조선으로 대체 되었으며 이 전보다 대형화되었다. 선박 크기가 증가함에 따라 외력의 영향이 커지며, 선박의 크기에 따라 선수미 여유 거리를 고려하여 부두 길이를 계산하는 것이 선박의 접·이안 작업의 안전을 확보하는데 가장 합리적인 방법이다. PIANC 기준에 따른 부두 길이 산정 방법은 선박의 LOA에 안전한 접·이안 작업을 위한 여유 거리(LOA의 10%)를 합한 값으로 부두 길이를 산정하고 있다(Cho and Cho, 2017). 하지만, 제주항

2부두 24번석의 경우 상기 제주특별자치도 무역항 항만시설 운영세칙 기준을 확인해 보았을 때 부두 길이는 120m이나 해당 선석을 이용하고 있는 여객선 아리온 제주호의 경우 길이가 145m인 것으로 조사되었다. 따라서 아리온 제주호의 경우 길이 측면에서 현재 부두설계 한도를 초과한 상태로 대상부두를 이용하고 있다고 볼 수 있다.

2.2 대상선박

제주항 2부두 24번석을 이용하고 있는 아리온 제주호는 2002년 일본에서 건조된 카페리여객선으로 남해고속에서 운영 중이던 남해고속 7호를 대신하여 2018년 6월부터 녹동-제주 항로를 운항 중이다. 아리온 제주호는 총톤수 6,266ton, 기관출력 6,615kW×2, 전장 145m 규모의 선박으로 주요제원은 Table 3과 같다.

Table 3. Specifications of P.S. Arion Jeju

Category	Description
Gross Tonnage	6,266 ton
L.O.A.	145 m
L.B.P.	132 m
Breadth	22 m
Depth	14.25 m
Draft	5.4 m

아리온 제주호의 경우 직경 65mm의 polyester rope를 전체적으로 사용하며 일반적인 계류상황에서는 Table 4와 같이 선수 head line 2개와 spring line 1개 그리고 선미는 stern line 2개와 spring line 1개로 계류되어 있으며 기상 악화 시 선미 spring line을 2개까지 사용하는 것으로 확인되었다.

Table 4. Mooring arrangement of P.S. Arion Jeju

Category	Position	Quantity	Number
Mooring Line	FWD	Breast	0
		Head	L1, L2
		Spring	L3
	AFT	Spring	L4, L5
		Stern	L6, L7
		Breast	0
Bollard	FWD	2	A, B
	AFT	2	E, G
Fender	ALL	7	aa~gg

2.3 대상부두 및 모델링

아리온 제주호가 사용 중인 2부두 24번석의 경우, 주요제

원은 Table 5와 같으며 1977년 준공되어 상부구조 형식은 중력식, 하부구조 형식은 블록 형식으로 접안톤수는 1,000 ~ 3,000DWT급 제원을 가지고 있다. 선수에서 선미 측까지 20m 간격으로 높이 50cm의 25톤 곡주가 선박계류를 위한 계선주로써 설치되어 있다. 그리고 해당 구간 안벽 측에는 Fig. 2와 같이 CV-type 방충재 4개와 pneumatic-type 방충재 3개 등 총 7개의 방충재가 설치되어 있다.

Table 5. Facility status of No. 24 berth

Category	Description
Year of completion	1977
Berthing Capacity	1,000~3,000 DWT
Structure format	Gravity type(Upper), Block type(Lower)
Length of berth	120m (No. 24 Berth)
Depth of berth	6.5m
Direction of berth	300°



Fig. 2. Status of fender for No.24 berth

계류안전성 평가를 위해 대상선박과 대상부두의 상세제원과 Table 6과 같은 계류삭, 계선주, 방충재 등 계류 환경의 배치 상황 및 용량에 관한 정보를 토대로 Fig. 3과 같이 계류상황을 모델링 하였다.

Table 6. Specifications of mooring condition for P.S. Arion Jeju

Category	Description	
Line	Type / Dia.(mm)	Polyester(pe) / 65
	S.W.L(ton)	26.5 (MBL x 50%, OCIMFT 2018)
Bollard	Interval(m)	20
	Max. Load(ton)	25
Fender	Type	CV Type, 200H
	Max. Load(ton)	40
	Type	Pneumatic Type, ∅2000×3500L
	Max. Load(ton)	95

2.4 환경 외력 조건설정

제주항 전면해역 조류의 경우 창조류는 남서류이고, 낙조류는 북동류이며 유속은 0.5~1.2kts의 유속으로 조사되었다.

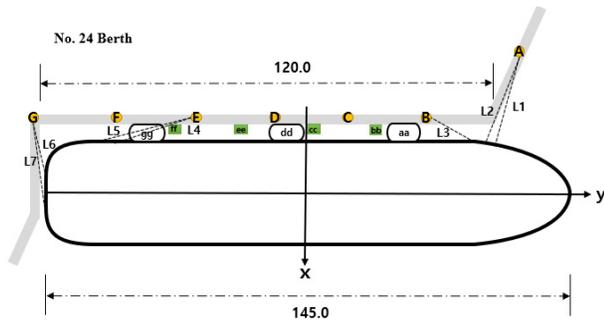


Fig. 3. Modeling of current mooring status for P.S. Arion Jeju

Fig. 4와 같이 대상부두인 제주항 2부두의 경우 방파제 등으로 차단된 제주항의 특성상 항 내에서의 조류 영향은 미미한 것으로 확인되어, 본 연구에서 평가에 적용한 조류조건은 조류의 영향이 거의 없는 것으로 보고 조류방향 및 속도는 210도, 0.1kts를 적용하였다. 파랑의 파고는 중·대형선의 하역 한계파고인 파고 0.5m 값과 대상부두에 불리한 조건을 가정한 파고 1.0m 값을, 파향은 방파제 입구를 통해 입사하는 030도 방향으로 적용하였다.



Fig. 4. Arrangement of passenger ship berths in Jeju port

풍속은 대상 해역 3년간('17~'19년)의 풍속 데이터를 추가로 분석하여 최대풍속 평균값 풍속인 22kts(11.3m/s)와 접안선박의 계류 안전에 큰 영향을 줄 수 있는 강풍·풍랑주의보의 최대풍속 기준 수준인 30kts(15.4m/s) 풍속 값을 적용하였다. 그리고 풍향은 5° 간격 전 방위로 하여 Table 7과 같이 8개의 외력 조건을 각각 설정하였다.

2.5 계류선박에 작용하는 외력 산정

OPTI-MOOR 프로그램은 계류 라인의 힘 및 모멘트 방정식을 만족시키기 위해 일련의 계산을 수행한다. 이 방정식은 해당 프로그램의 가이드를 참고하였으며, Eqs. (1~3)과 같이 나타낼 수 있다 (Ractliffe and Flory, 2012).

$$\sum F_x + \sum P_x = 0 \tag{1}$$

$$\sum F_y + \sum P_y = 0 \tag{2}$$

$$\sum M_{xy} + \sum N_{xy} = 0 \tag{3}$$

- 여기서, F_x : 외력의 x 벡터 성분 (예 : 바람, 조류)
- P_x : 계류 라인 힘의 x 벡터 성분 (펜더는 x 방향으로 힘을 가하지 않음).
- F_y : 외력의 y 벡터 성분 (예: 바람, 조류)
- P_y : 계류 라인 힘의 y 벡터 성분 (펜더는 y 방향으로 힘을 가하지 않음).
- M_{xy} : 외력에 의해 생성되는 xy 평면의 모멘트 (예: 바람, 조류)
- N_{xy} : 계류 라인 힘 또는 펜더 힘에 의해 생성되는 xy 평면의 모멘트

계류 라인의 힘 및 모멘트 방정식에 필요한 바람(Wind force)은 선박의 중심선에서의 수직적인 힘의 성분으로 정의되며 이 계산식은 OPTI-MOOR 가이드라인을 참고로 하였으며, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다(Ractliffe and Flory, 2012).

Table 7. Scenario of mooring safety for No. 24 berth

Scenario No.	Current		Wave			Wind	
	Speed	Direction	Height	Period	Direction	Speed	Direction
J2-1	0.1kts	210°	0.5m	6.0sec	30°	22	All
J2-2						30	All
J2-3				8.0sec		22	All
J2-4						30	All
J2-5			1.0m	6.0sec		22	All
J2-6						30	All
J2-7				8.0sec		22	All
J2-8						30	All

$$\begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ M_Z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_{WIND}^2 A \begin{pmatrix} C_X \\ C_Y \\ L_{PP} C_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 F_X : 바람에 의한 종방향 힘 (Surge)
 F_Y : 바람에 의한 횡방향 힘 (Sway)
 M_Z : 바람에 의한 요잉 모멘트
 L_{PP} : 선수미 수선 간의 길이
 C_X, C_Y, C_N : 풍력 계수 (Surge, sway, yaw)

계류 라인의 힘 및 모멘트 방정식 Eq. (1)에 필요한 조류력(Current force)은 선박의 중심선에서의 수직적인 힘의 성분으로 정의되며 이 계산식은 Eqs. (5~7)과 같이 나타낼 수 있다(Ractliffe and Flory, 2012).

$$F_{Xc} = \frac{1}{2} C_{Xc} \rho_w V_C^2 L_{PP} T \quad (5)$$

$$F_{Yc} = \frac{1}{2} C_{Yc} \rho_w V_C^2 L_{PP} T \quad (6)$$

$$M_{Zc} = \frac{1}{2} C_{Zc} \rho_w V_C^2 L_{PP}^2 T \quad (7)$$

여기서 F_{Xc} : 조류로 인한 종방향 힘 (Surge)
 F_{Yc} : 조류로 인한 횡방향 힘 (Sway)
 M_{Zc} : 조류로 인한 요잉 모멘트
 C_{Xc}, C_{Yc}, C_{Zc} : 조류력 계수
 ρ_w : 해수비중
 V_C : 조류의 속도
 L_{PP}, T : 선수미 수선간의 길이, 선박 흘수

2.6 계류안전성 평가기준 설정

계류안전성 평가는 Fig. 5와 같이 계류사에 작용하는 최대장력, 방충재에 작용하는 최대반력, 계선주에 작용하는 견인력의 계류안전성 평가요소와 외력에 의한 선체 동요에 의해 선박의 통상적인 하역작업이 가능한 범위 내에 있는지 평가하는 하역안전성 평가로 크게 구분된다. 또한, 일반적으로는 계류시스템의 안전성 margin을 고려해 선박의 계류한계를 고려하게 된다(Cho, 2017).

계류안전성 평가요소는 OCIMF의 표준환경 기준과 권고 사항을 참고하여 평가하였다. 앞서 설계한 계류안전성 평가 모델 및 환경 외력 조건설정을 바탕으로 계류사의 경우 계류사 파단하중의 50%, 계선주의 경우 계선주 설계하중의 100%를 허용기준으로 평가에 적용하였다. 방충재는 최대반력 값 이내를 허용기준으로 평가하고, 하역안전성의 평가는 ‘항만 및 어항설계기준’(이하 항설기준) 및 PIANC(1995)의 안전한 하역작업을 위한 선체동요 권고 기준을 참고하여 ferries, Ro-Ro선의 기준을 토대로 외력에 의한 선박의 6 자

유도 운동 통계량과 선박 특정 부의 상대운동에 대한 운동진폭치(amplitude)를 기초로 하여 평가하였다.

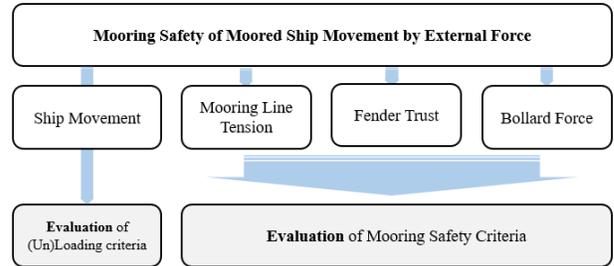


Fig. 5. Evaluation concept of mooring safety

3. 계류안전성 평가 결과

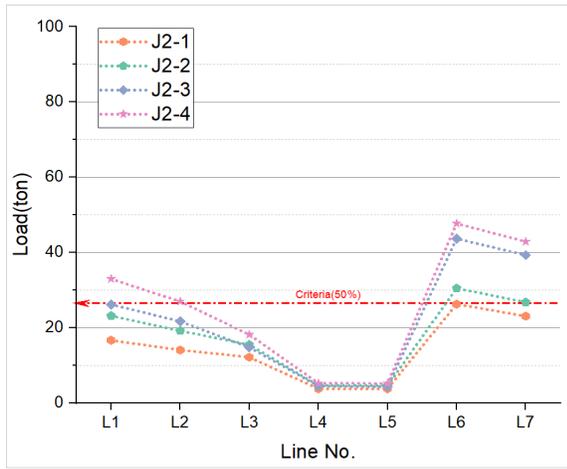
아리온 제주호에 대한 계류사 장력, 계선주 견인력, 방충재 반력, 하역안전성 측면에 대해 분석한 결과, 설정한 시나리오 기준으로 모든 환경 외력 조건에서 선수 head line과 선미 stern line이 설치된 계선주 A, G에 최대견인력을 초과하는 힘이 걸리는 것으로 분석되어 계선주의 개선이 시급한 것으로 평가되었으며 평가요소별 자세한 평가 결과는 다음과 같다.

3.1 계류사 최대장력

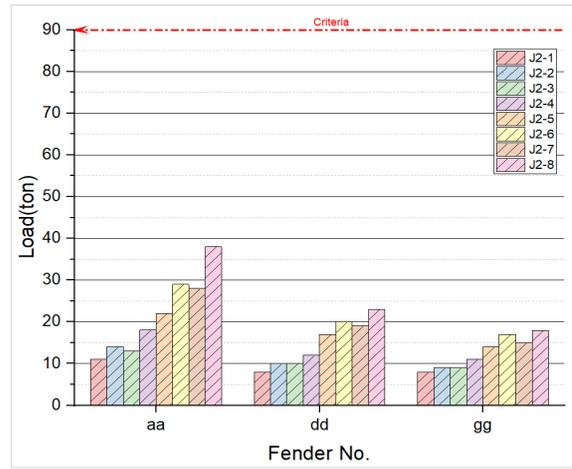
외력 조건에 따른 각 계류사의 최대 장력값을 비교하기 위해 5도 간격의 전 방위에 대하여 평가하지만, 풍향과 관계없이 최대장력 값을 표시한다. 계류사 최대장력 분석 결과는 Fig. 6과 같다. 대상부두 계류 시 풍력 22kts의 바람이 전방위로 불 때, 길이가 가장 짧은 선미 stern line (L6, L7)에 160도 풍향에서 가장 큰 하중이 작용하였으나, 모든 라인이 허용범위인 파단강도의 약 50% 이하 수준으로 계류사 하중에 여유가 있는 것으로 평가되었다. 하지만 외력 조건 J2-2 이상의 외력 조건에서는 선미 stern line이 허용범위를 초과하는 것으로 평가되었으며, 선수 head line 또한 자연 외력 조건 J2-4 이상의 외력 조건에서 파단강도 허용범위를 초과하는 것으로 평가되었다.

3.2 방충재 최대반력

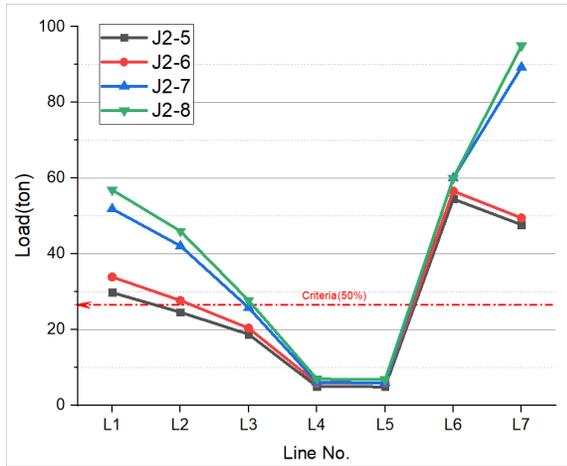
설정된 외력 조건 시나리오에 따른 방충재 최대반력 분석 결과, 외력 시나리오에 따라 방충재에 작용하는 최대반력은 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 pneumatic type보다 CV-type의 방충재에 전체적으로 많은 반력이 작용하는 것을 확인할 수 있었으며 선수 부근에 배치된 CV-type의 bb 방충재에 최대 53ton(132%)의 반력이 작용하는 것으로 분석되었다. 2부두의 경우 J2-4 외력 조건까지는 CV-type 방충재가 최대 반력 범위 40ton 이내의 반력이 작용하는 것으로 평가되었



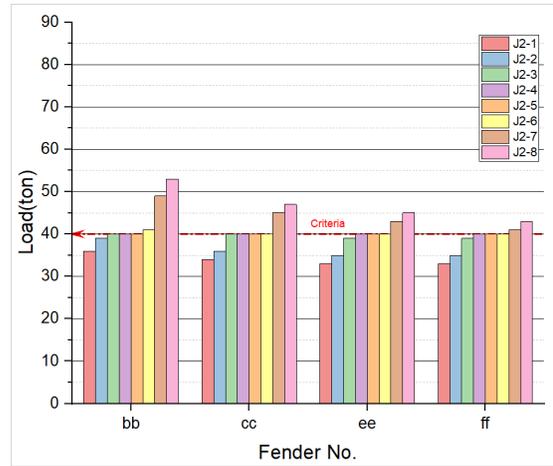
(a) Wave 0.5m



(a) Pneumatic Type fender



(b) Wave 1.0m



(b) CV Type fender

Fig. 6. Max. load of mooring line

Fig. 7. Max. load of fender

으나, 파고 1.0m 조건 이상의 외력 조건 J2-7, J2-8 외력 조건에서는 허용 반력 100% 이상의 반력이 모든 CV-type(bb, cc, ee, ff) 방충재에 작용하는 것으로 평가되었다.

3.3 계선주 최대전인력

설정된 외력 조건 시나리오에 따라 계선주에 작용하는 최대전인력을 분석한 결과, Fig. 8(a)에서와같이 시나리오상 가장 세기가 낮은 외력 조건인 J2-1 조건에서부터 선수 head line이 설치되는 계선주 A와 선미 stem line이 설치되는 계선주 G에 최대전인력의 허용 한도를 초과하는 30.7ton (123%), 49.2ton(197%)의 힘이 걸리는 것으로 평가되어 현재의 계선주 용량이 선박에 적합하지 않은 것으로 분석되었다. spring line이 설치되는 계선주는 Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이 J2-8 외력 조건에서 선수 spring line이 설치되는 계선주 B에만 최대전인력 허용 한도를 초과하는 27.7 ton의 최대전인력이 작용하는 것으로 분석되었다.

3.4 하역안전성

외력에 의해 발생하는 선박의 동요로 인해 대상선박의 일반적인 하역작업이 가능한 범위에 있는지를 알기 위하여 선박의 6 자유도 운동 통계량과 선박 특정 부의 상대운동에 대한 운동진폭치를 바탕으로 다음 표의 값을 기준으로 검토하였다. 대상선박은 카페리어객선으로 페리, 로로선의 선체 동요 권고 기준에 따라 분석하였다. 대상부두에 설정 시나리오에 따른 선체 동요량을 확인한 결과, Table 8에서 볼 수 있듯이 파고 0.5m, 파주기 6.0 sec의 조건인 J2-1, J2-2 경우를 제외한 다른 모든 외력 조건에서 Sway 값이 허용 동요량 0.6m를 초과하여 하역안전성이 확보되지 못하는 것으로 분석되었다. 파고 0.5m의 경우에도 파주기가 8.0sec 이상일 때 sway 값뿐만 아니라 heave 값과 roll 값이 허용 동요량을 초과하여 하역안전성이 확보되지 못하는 것으로 평가되었다. 2부두 24번 선석의 경우 대상선박 크기에 비해 충분한 계류 환경이 확보되어 있지 않은 것으로 판단됨으로 본선에서는 기상 상황 악화 시 하역작업에 많은 주의를 기울여야 할 것이다.

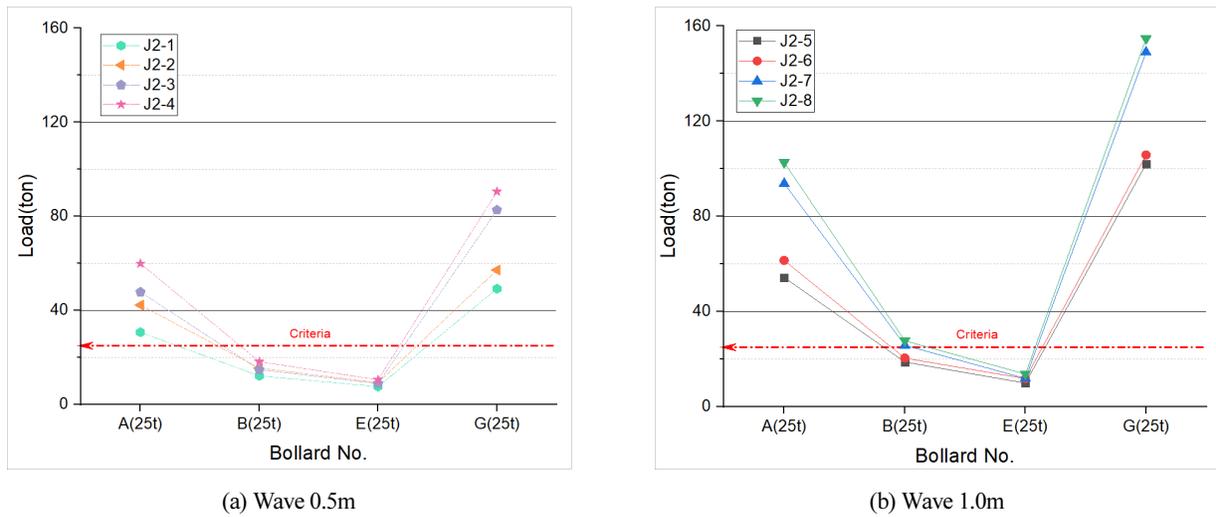


Fig. 8. Max. load of bollard

Table 8. Result of max. movement of P.S. Arion Jeju

Ship Type	Cargo Equip.	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Ro-R0 Ferries	Side Ramp	0.6	0.6	0.6	1	1	2
Case J2-1	Motion	0.03	0.36	0.16	0.1	0.1	1.0
	Safety	○	○	○	○	○	○
Case J2-2	Motion	0.03	0.36	0.16	0.1	0.1	1.0
	Safety	○	○	○	○	○	○
Case J2-3	Motion	0.04	0.62	0.76	0.1	0.1	2.6
	Safety	○	×	×	○	○	×
Case J2-4	Motion	0.04	0.62	0.76	0.1	0.1	2.6
	Safety	○	×	×	○	○	×
Case J2-5	Motion	0.05	0.72	0.30	0.1	0.1	2.0
	Safety	○	×	○	○	○	×
Case J2-6	Motion	0.05	0.72	0.30	0.1	0.1	2.0
	Safety	○	×	○	○	○	×
Case J2-7	Motion	0.08	1.24	1.52	0.2	0.1	5.3
	Safety	○	×	×	○	○	×
Case J2-8	Motion	0.08	1.24	1.52	0.2	0.1	5.3
	Safety	○	×	×	○	○	×

3.5 종합 분석 결과

2부두 아리온 제주호에 대한 계류안전성 평가 결과를 종합하여 볼 때, 계류삭은 J2-1 외력 조건에서만 허용한계 범위 이내인 것으로 분석되었으며 계선주는 모든 시나리오 외력 조건에서 허용한계를 초과하는 것으로 확인되었다. 또한, 방충재는 파고 1.0m 이상일 때 최대반력을 초과하는 것으로 분석되었으며 하역안전성은 J2-1, J2-2 외력 조건에서만 선박 동요량이 허용한계 범위 이내인 것으로 분석되었다. 따라서 2부두 아리온 제주호의 경우 부두설계 한도를 초과한 크

기의 선박이 현재 계류되어 최대풍속 평균값(22kts) 이상의 바람이 지속해서 발생하고 있는 상황에서는 선박의 계류가 위험하다고 볼 수 있다.

제주항 여객선 부두 중 2부두 24번 선석의 경우, 현재 대상부두의 수심과 길이의 경우 항설기준에서 제안하고 있는 페리선 선석 제원 기준과 비교하였을 때 계류 중인 대상선박의 크기에 비해 작은 것으로 확인되었다. 이에 앞서 대상선박에 대한 다양한 외력 조건에서의 계류안전성을 평가 결과 또한 평가요소별 안전성이 충분히 확보되지 못하는 것

으로 평가되어 시급히 계류 환경이 개선되어야 할 것으로 판단된다.

4. 계류 환경 개선안 효과 분석

4.1 개선방안 검토

최근까지 선박의 계류안전성 확보를 위한 계류 환경 개선 연구는 다양한 측면에서 진행되고 있다. Molen *et al.*(2015)은 호주 geraldton 항구의 장주기 파고로 인한 선박의 과도한 움직임을 개선하기 위하여 육상 기반 계류삭과 더 부드러운 방충재를 결합하는 방법을 제시하였다. Kudale *et al.*(2016)은 인도항에 VLCC(Very Large Crude Carrier) 선박에 대한 계류 시설 디자인 연구를 진행하였으며 OPTI-MOOR 프로그램을 활용하여 시간 경과에 따른 계류 분석 및 영향 예측 분석을 통해 선박에 적합한 계류 환경 구성을 도출하였다. Navamuel *et al.*(2018)은 항내 선박의 대기 오염 가스 배출량을 줄이기 위해서는 선박의 계류 작업 소요시간의 단축이 필요하며 이를 위해 AMS(Automatic Mooring System)의 설치를 제시하였으며, Ro/Ro Pax 선박의 오염 가스 배출량을 확인한 결과, 기존의 계류방법을 사용하였을 경우보다 AMS를 사용하였을 때 CO₂ 배출량이 약 97% 감소함을 확인하였다. Kim(2020)은 선박의 계류안전성 확보를 위해 돌풍 대비용 직후에 선수와 선미 브레스트 라인을 추가하였을 경우 일반적인 형태의 계류라인 배치와 비교하여 계류요소 값이 감소하는 것으로 분석하였다. Kim *et al.*(2020)은 접안작업의 안전성과 신속성을 개선할 수 있는 새로운 개념의 접안지원기술을 제안하고 새로운 접안기술의 여러 기능을 통합한 시스템을 이동식으로 구성하면 항만 운용의 효율성도 개선할 수 있는 것으로 판단하였다.

우리나라 대부분의 카페리여객선이 기항하고 있는 제주항의 경우 부두 완공 30년 이상 노후화된 부두로서 대형화된 여객선의 변화 흐름에 맞추어 부두의 계류 환경은 크게 개선되지 못한 상태이다. 여객의 안전을 위해 카페리여객선 계류 환경에 대해 제주항의 지리적 특성과 카페리여객선의 운항 및 하역작업 특성 등을 고려하여 현장 중심의 혁신적인 계류 환경 개선이 필요할 것이다. Fig. 9는 핀란드 헬싱키 웨스트하버 터미널에서 총톤수 5만 톤급 Ro/Ro Pax 여객선 계류 시 사용하고 있는 high height bitt 계선주의 활용 사례이다.



Fig. 9. High height bitt of west harbor terminal in Helsinki

위 사례와 같이 high height bitt와 같은 계선주를 국내 카페리여객선 부두에 설치할 경우, 계류삭(특히, breast line)의 수직각 감소를 통한 계류삭 효율성 향상과 직주 활용을 통한 계류안전성 향상뿐만 아니라 차량이 이동해야 하는 카페리여객선의 하역작업 특성을 고려하였을 시 매우 효율적인 계류 환경 개선방안이 되리라 생각한다.

4.2 개선 시나리오 도출

본 연구에서는 대상선박의 계류안전성을 확보하기 위해 운항자 관점에서 개선 가능한 계류삭 개선방안과 높이 4.5m, 최대하중 100ton의 high height bitt 추가 설치 개선방안 등을 도출하였다. 그리고 개선방안별 계류안전성 민감도 변화를 비교·분석하여 개선 효과를 정량적으로 확인하고 최적의 계류 환경 개선안을 제안하고자 한다. 제주항 2부두의 지리적 특성과 3년간 기상정보 통계자료를 고려하여 확률적으로 발생 가능한 외력 한계로 볼 수 있는 최고 파주기 평균값 6sec, 풍랑주의보 풍속 30kts 조건 그리고 중·대형선 하역한계 파고 기준인 0.5m를 적용한 J2-2 외력 조건에서 계류안전성이 확보될 수 있도록 Fig. 10과 같은 개선 흐름을 통해 최적의 개선안을 도출해보고자 한다. 이에 Table 9와 같이 개선안 시나리오를 도출하고 case 별 계류안전성 민감도 분석을 진행하였다.

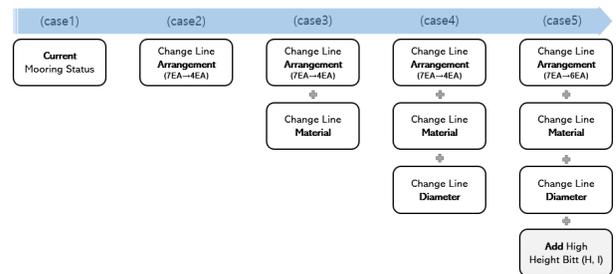


Fig. 10. Flow about improvement of mooring safety for P.S Arion Jeju

4.3 개선결과 민감도 분석

2부두의 개선안 case 별 계류안전성 민감도 분석은 앞서 부두별 계류안전성 평가 시 위험한 요소로 분석되었던 계류삭과 계선주에 작용하는 하중의 변화를 중점적으로 비교·분석하였다.

외력 조건 J2-2 기준에서 개선 시나리오 case 별 계류안전성 민감도 변화를 분석한 결과, Fig. 11과 같이 현재 2부두 아리온 제주호 계류상태(case 1)에서는 길이가 가장 짧은 선미 stern line(L6)에 170도 풍향에서 가장 큰 하중 30.5ton(57%)이 작용하였으며, 다른 라인에는 허용범위 내의 하중이 걸리는 것으로 분석되었다. 하지만 선수 head line 2개와 선미 stern line 2개가 설치되는 계선주 A, G에는 계선주의 최대견인력

Table 9. Detail of improvement plan for P.S. Arion Jeju

Case	Quality of rope material	Dia. of rope	Quantity of Mooring Line					
			FWD			AFT		
			Head	Breast	Spring	Stern	Breast	Spring
1	Polyester	65mm	2	0	1	2	0	2
2	Polyester	65mm	1	0	1	1	0	1
3	Nylon	65mm	1	0	1	1	0	1
4	Nylon	80mm	1	0	1	1	0	1
5	Nylon	80mm	0	2	1	0	2	1

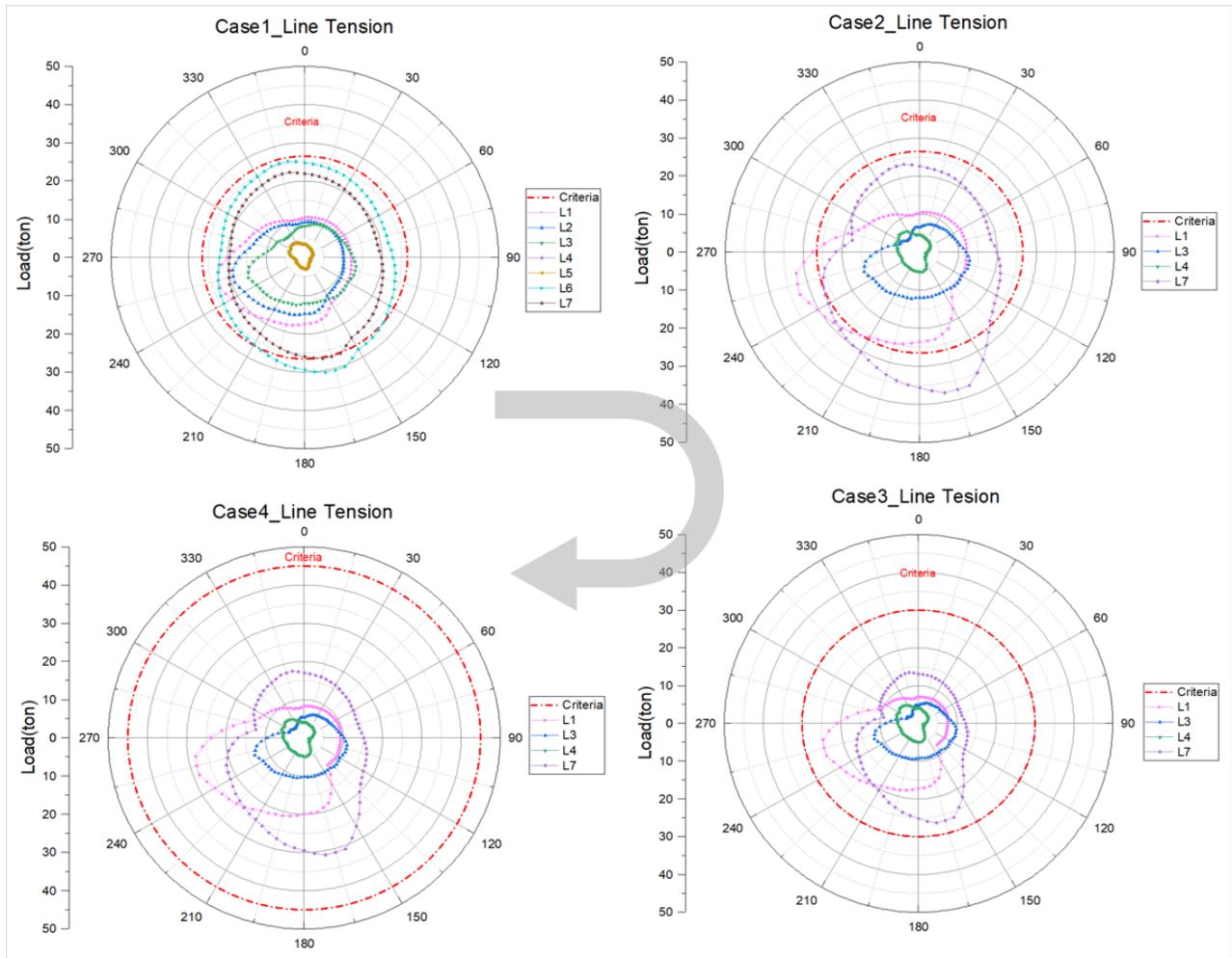


Fig. 11. Result of all bearing load of mooring lines (case 1~4)

허용 한도를 초과하는 42.3ton(169%), 57.2(229%)ton의 하중이 걸리는 것으로 평가되어 계류안전성이 위험한 것으로 평가되었다.

이에 먼저 계선주 A, G에 걸리는 견인력을 줄이기 위해 head line과 stern line 개수를 1개씩 줄였을 경우(case 2), 계선주 A에 걸리는 최대견인력은 42.3ton → 32.7ton(23%↓), 계선주 G에 걸리는 최대견인력은 57.2ton → 37.5ton(34%↓)으로 감소하는 것으로 분석되었다. 방충재의 반력은 최대

39ton(98%)으로 범위 내에 작용하였으며, 선박의 동요량 또한 Table 10과 같이 허용범위 내인 것으로 분석되었다. 하지만 계류삭의 경우에는 선수 head line L1의 경우 32.7ton(61%), 선미 stern line L7의 경우 37.5ton(70%)의 하중이 작용하여 계류삭의 최대장력 허용범위를 초과하여 여전히 계류안전성이 위험한 것으로 평가되었다. 이와 같은 분석 결과를 통해 선박 운항자로서 개선 가능한 계류삭의 강도 상향 방법 중 계류삭의 재질만 개선하였을 경우(case 3)와 계류삭의 재

질과 사양을 모두 개선(case 4)하였을 경우의 계류안전성 민감도를 분석한 결과, 모든 라인이 허용범위인 파단강도의 약 50% 이하 수준으로 계류사 하중에는 여유가 생기는 것으로 분석되었다. 하지만, 여전히 계선주의 경우 선수 head line과 선미 stern line이 걸리는 계선주 A, G에 최대전인력 25ton (100%) 이상의 하중이 작용하여 여전히 계류안전성이 위험한 것으로 평가되었다.

이처럼 2부두 아리온 제주호의 경우 선박 운항자로서 개선할 수 있는 범위인 계류사의 성능을 개선하는 것만으로는 대상부두에서 계류안전성을 확보하지 못하는 것으로 분석되어 선박의 크기에 적합한 계선주의 추가가 필요한 것으로 판단되었다. 이에 앞서 카페리여객선 부두에 적용 가능할 것으로 판단되었던 수직높이 4.5m, 최대하중 100ton의 high height bitt를 선수미에 1개씩 총 2개를 추가하고 Fig. 12와 같이 모델링을 하여 계류안전성 민감도 분석을 수행한 결과 (Case 5), Fig. 13에서 볼 수 있듯이 계류사의 경우 앞서 계류사 재질 및 사양을 개선한 사례를 적용하여 모든 라인이 파단강도의 약 23% 이하 수준으로 계류사 하중에 여유가 있는 것으로 분석되었다. 계선주 또한 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 선수미에 추가한 high height bitt H, I에 모든 선수미 라인을 배치한 결과, 모든 계선주가 최대전인력 44% 이하 수준으로 안정성이 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 방충재의 경우 모든 case에서 최대반력 39ton(98%) 이하로 허용범위 내의 반력이 작용하는 것을 확인하였으며, 선박 동요량 또한 J2-2 외력 조건에서는 Table 10과 같이 큰 변화 없이 허용범위 내에 있는 것으로 확인되었다. 이러한 직주의 개선방법은 카페리여객선 하역작업의 특성을 고려하였을 시 차량 이동에 간섭문제가 없을 뿐만 아니라, Fig. 15와 같이 직주의 높이가 4.5m로 높아지면서 breast line의 설치 수직각이 12.1°에서 0.5°로 약 11.6° 정도 줄어들어 계류사의 효율성 또한 약 2.2% 향상되는 효과도 확인할 수 있었다.

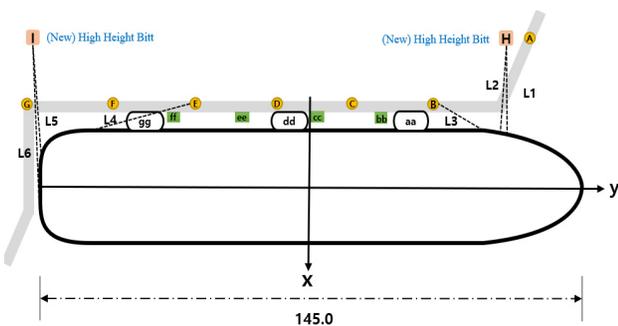


Fig. 12. Modeling of case 5 improvement plan for P.S. Arion Jeju

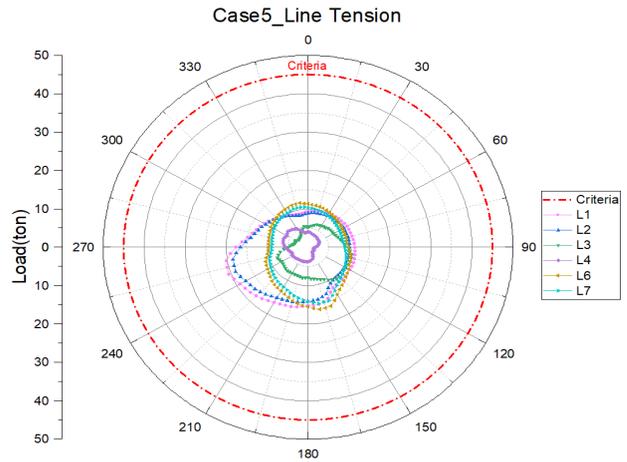


Fig. 13. Result of all bearing load of mooring lines

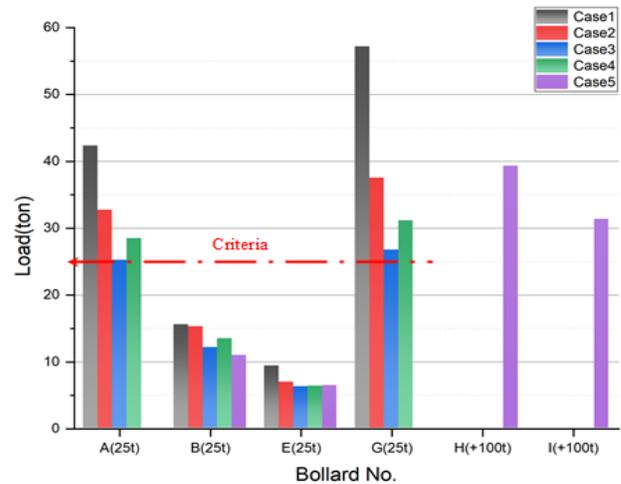


Fig. 14. Result of max. load of bollards & bitts



Fig. 15. Effect of raising the height of bitt (case 5)

Table 10. Result of max. movement each improvement plan for P.S. Arion Jeju

Ship Type	Cargo Equip.	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Ro-R0 Ferries	Side Ramp	0.6	0.6	0.6	1	1	2
Case 1	Motion	0.03	0.36	0.16	0.1	0.1	1.0
Case 2	Motion	0.03	0.36	0.16	0.0	0.1	1.0
Case 3	Motion	0.03	0.36	0.16	0.0	0.1	1.0
Case 4	Motion	0.03	0.36	0.16	0.0	0.1	1.0
Case 5	Motion	0.03	0.36	0.16	0.1	0.1	1.0
Work Safety		○	○	○	○	○	○

5. 결론

본 연구에서는 제주항을 기항하는 카페리어객선 중 부두의 접안능력을 초과하는 2부두 24번석 아리온 제주호에 대한 계류안전성 평가를 통하여 계류 환경의 위험 요소를 확인하였다. 여러 외력 환경조건 변화에 따른 대상선박의 계류삭, 계선주 및 방충재의 안전성 그리고 하역안전성 등을 평가하여 현재 대상선박의 계류안전성을 검토하고 다음과 같은 평가 결과를 도출하였다.

- (1) 2부두 24번석에 접안 중인 아리온 제주호의 경우, 계류삭은 J2-1 외력 조건에서만 최대장력이 허용한계 범위 이내인 것으로 분석되었으며, 계선주는 설정한 모든 외력 조건에서 허용한계 100%를 초과하는 하중이 걸리는 것으로 분석되었다.
- (2) 방충재의 경우 파고 1.0m 환경(J2-7, J2-8)을 제외한 모든 외력 조건에서 허용한계 이내의 반력이 작용하는 것으로 분석되었다. 하역안전성은 J2-1, J2-2 외력 조건에서만 허용한계 범위 이내인 것으로 분석되어 전반적으로 계류안전성이 위험한 것으로 평가되었다.

이와 같은 평가 결과를 통해 대상선박의 계류안전성 확보를 위한 계류 환경 개선방안을 도출하고 개선 시나리오별 계류안전성 민감도 변화를 비교·분석하였다. 그 결과, 대상선박의 계류삭 개선만으로는 계선주의 최대하중 초과 문제로 인하여 계류안전성이 확보되지 못하였으며, high height bitt 추가 설치를 통하여 계류안전성을 확보할 수 있음을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

- (1) 아리온 제주호의 경우, 선박 운항자로서 개선 가능한 개선방안 case 1~4에서는 계류삭의 사양 향상을 통해 계류삭 하중에는 여유가 생겼으나, 계선주의 최대하중 초과 문제로 인해 계류안전성이 확보되지 못하였다.
- (2) 하지만 최대하중 100ton의 high height bitt 추가를 통한 개선방안 case 5의 경우에는 모든 라인이 허용범위인 파단강도의 약 50% 이하 수준으로 계류삭 하중에 여유가 생기고 방충재의 반력과 선박의 동요량은 큰 변화가 없이 계선주 또한 최대견인력 44% 이하 수준으로 하중에 여유가 생겨 전체적으로 계류안전성이 확보되는 것으로 평가되었다. 이러한 직주 개선안은 카페리어객선 하역작업 특성을 고려하였을 때도 차량과 계류삭이 간섭되는 문제를 해결할 수 있으며 계류삭 수직각 개선을 통한 계류삭 효율성 향상 효과도 확인할 수 있었다.

본 연구 결과는 제주항 설계 접안능력을 초과하는 카페리어객선을 연구대상으로 한정하여 계류안전성을 평가하고

계류 환경 개선을 위한 계류삭 및 계선주에 대한 개선방안만 비교·분석하여 개선안을 제시하였다. 향후 연구에서는 다양한 여객선 부두시설의 계류 환경에 대한 종합적인 평가를 통해 여객선 크기별 표준 계류 환경 기준을 도출해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다(스마트항만-자율운항선박 연계기술 개발, No. 20210631).

References

- Kudale, A., Sohoni, V. and Kulkarni, S. (2016). "Mooring system for very large ships at berth, Intl." *Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 1363-1371.
- Cho, I. S. (2017). "Behavior analysis and control of a moored training ship in an exclusive wharf." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, No. 2, pp. 139-145 (in Korean).
- Cho, I. S. and Cho, J. W. (2017). "A study on supplement of harbour and fishery design criteria through the statistical characteristics analysis of cruise ship's specification." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, No. 6, pp. 652-660 (in Korean).
- 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., Lee, Y. S. and Lee, C. R. (2006). "A time domain analysis of moored ship motions with resonant period of a tsunami." *The Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 30, No.6, pp. 433-438 (in Korean).
- Diaz-Ruiz-Navamuel, E., Piris, A. O. and Perez-Labajos, C. A. (2018). "Reduction in Co² emissions in roro/pax ports equipped with automatic mooring system." *Environmental Pollution*, Vol. 241, pp. 879-886.
- Hwang, J. H., Park, S. H. and Jeon, W. H. (2015). "A study on the career development and capacity building for seafarers of coastal passenger ships." Basic Research 2015-07, Korea Maritime Institute, Busan, p. 20.
- Kang, E. J., Lee, H. T. and Cho, I. S. (2021). "Analysis of allowable berthing velocity by ship size considering designed energy." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 4, pp. 297-306 (in Korean).
- Kim, S. Y. (2020). "A study on analysis of mooring safety sensitivity according to the arrangement of bitt against gust." *Journal*

- of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 26, No. 7, pp. 767-776 (in Korean).
- Kim, C. H., Lee, D. H., Park, J. S. and Kim, Y. B. (2020). "Development and experimental evaluation of a ship berthing system using active fenders." *The Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 44, No. 6, pp. 494-500 (in Korean).
- MIKE 21 Maritime. (2020). *MIKE 21 Mooring analysis user guide, Recommended Motion Criteria for Safe Working Conditions (PIANC/2)*, p. 20.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2017). *Korea harbor design standard (KDS 64 55 10)*, pp. 8-12 (in Korean).
- Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). (2018). *Mooring equipment guidelines 4th edition*, pp. 10-12, pp. 96-99.
- Ractliffe, A. and Flory, F. J. (2012), OPTI-Mooring analysis computer program user guide, p. 133.
- Wim van der Molen, Scott, D., Taylor, D. and Elliott, T. (2016). "Improvement of mooring configurations in Geraldton harbour." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 4, No. 1, p. 3.