

# 해양 환경 및 선박 특성을 반영한 마루높이 평가지표에 관한 연구

김승연\*†

\* 한국해양대학교 대학원

## A Study on the Evaluation Index of Crown Height given Marine Environmental Factors and Ship Characteristics

Seungyeon Kim\*†

\* Graduate school of Korea Maritime and Ocean University, Busan, Republic of Korea

**요 약 :** 최근 국내에서는 지구온난화로 인한 해수면 상승과 이에 따른 태풍 및 해일의 증가로 인해 22개항을 선정하여 방파제 보강 및 방호 시설 설치 등의 공사를 시행중에 있다. 또한, 지속적인 선박대형화로 인해 대형선 접안을 위한 수심 준설, 접안부두 확장 등의 항만 공사를 수행하고 있으나, 접안선박의 안전한 계류와 밀접한 영향이 있는 마루높이의 상향 및 보강 등의 뚜렷한 공사 계획은 없는 실정이다. 본 연구는 국내·외 마루높이 설계기준을 분석하고, 환경 및 선박 요소로 나누어 마루높이 평가지표 및 평가방법을 개발하였다. 특히, 선박 평가지표의 경우 각 요소별로 국내·외 규정에 의거하여 4단계로 설정하고, 각 단계별로 평가값을 부여하여 평가값의 곱으로 마루높이 안전도를 평가하였다. 10만톤급 크루즈선의 계류안전성 시뮬레이션 결과, 적정 최저 마루높이 기준은 약최고고조위에서 3m 상향된 값인  $H_3$ 으로 도출되었다. 본 연구 결과는 선박 특성을 반영한 부두 마루높이 기준을 제안하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어 :** 부두, 마루높이, 환경평가지표, 선박평가지표, 계류안전성평가

**Abstract :** Korea has recently selected twenty-two ports for reinforcement breakwater installation of protection facilities, due to rise sea level caused by global warming and increase in the number of typhoon and tsunami. In addition, due to consistent enlargement of ship size, dredging for depth of water for large vessel's berthing and enlargement of berth is under construction. However, no definite construction plan for the reinforcement and lengthening of crown height, which has close relationship with the safe mooring of ships. In this study, domestic and foreign design criteria of crown height were analyzed, and the crown height evaluation index and evaluation method were developed by dividing it into environment and ship elements. In particular, in the case of ship evaluation index, each step was set up in 4 steps according to domestic and foreign regulations, weighted by each step, and the safety level of crown height was evaluated. As a result of the mooring safety simulation of the 100,000 ton cruise ship, the appropriate minimum crown height standard was derived to be 3m above A.H.H.W. The results of this study are expected to be used as basic data to propose the crown height standard reflecting ship characteristics.

**Key Words :** Pier, Crown height, Evaluation index of Environment, Evaluation Index of Ship, Mooring safety assessment

### 1. 서 론

국내 항만은 우리나라 수출입 화물의 99.7%를 처리하고 있으며, 세계 9위의 무역국으로의 도약을 견인한 국가 기간 산업의 요지이다. 또한 국가산업단지 41개 중 20개가 항만을 포함하거나 항만과 인접하여 고부가가치를 창출하는 주요 국가산업이며, 항만 물동량의 지속적인 증가로 항만 물류산업 자체로도 매년 27조원 이상의 부가가치를 창출하고 있다.

그러나 세계 경제가 저성장 시대에 진입하여 교역 성장세가 둔화되고 세계 항만물류산업의 경쟁이 치열해지고 있음에 따라, 해외 주요 항만들은 선박 초대형화 및 경쟁 심화에 선제적으로 대응하기 위해 항만시설 투자를 확대하고 있다. 이에 따라 국내 항만시설 또한 ‘물류와 레저, 문화가 함께하는 고부가가치 항만’이라는 비전을 목표로 하여 전국 항만에 대해 2020년까지 189선석의 접안시설을 확충하고, 140선석의 화물부두를 추가로 확보하기 위해 총 14.7조원을 투자 계획을 진행 중이다(Ministry of Ocean and Fisheries, 2016).

† sykim7@kmou.ac.kr, 051-410-4765

이에 따라 현재 항만 및 부두 개발은 2017년에 개정된 ‘항만 및 어항 설계기준’에 의거하여 이루어지고 있으며, 이는 ‘항만법’에 의거하여 수역시설, 외곽시설, 계류시설, 입항교통시설, 항행보조시설, 하역시설, 마arina 등의 항만시설을 포함하고 있다. 특히, 계류시설은 선박이 대상부두에 계류시 선박 및 부두의 안전성에 영향을 미치는 시설로 항만 및 어항 설계기준에서 그 세부 설계기준을 규정하고 있다.

그러므로 부두 설계시 접안선박의 선종 및 크기가 결정되고 항만 및 어항 설계기준에 의거하여 접안선박에 따라 선박의 치수, 마루높이, 계선주, 방충설비 등이 선정된다. 대표적인 부두시설 설계기준의 고려사항으로 선석길이는 선종 및 크기, 계선주는 총톤수, 방충재는 선종 및 재화중량톤수에 의해 결정된다.

그러나 접안선박의 계류안전성, 풍압면적, 선체 동요량에 밀접한 영향을 주는 부두 마루높이의 설계기준은 해상 환경 특성인 수심과 조차만 고려될 뿐 선종 및 크기 등의 접안선박의 특성은 포함되지 않고 있다. 이로 인하여 대형선박이 환경 특성만 고려된 마루높이의 부두에 접안하게 되고, 이에 따라 선박의 계류안전성을 충분히 확보하지 못하여 돌풍 등으로 인한 계류사고의 발생 가능성이 높아질 수 있다.

부두 시설에 관한 연구 성과로는 Port Designer’s Hand Book (Thoresen, 2003)과 같은 항만 및 부두 설계 관련 기초 연구를 토대로 국내·외 정부기관에서 설정한 각국의 설계기준에서 자연환경 및 계류선박의 변화에 따른 개선안을 제안하는 방향으로 수행되고 있다. Kang(2013)은 국내·외 돌핀부두의 설계기준과 전 세계에서 운항 중인 탱커선의 선형특성을 분석하여, 선박계류의 관점에서 국내 돌핀부두의 설계기준에 대한 평가와 기존 시설물에 대한 합리적인 운영방안 및 설계의 개선안을 제안하였다.

Won et al.(2015)은 선박 대형화가 항만에 미치는 영향을 분석하고 부산항의 대형 선박 입항 현황 및 미래의 상황을 추정하여, 부산항의 현재 부두시설을 토대로 선박 대형화가 가속화되었을 때 수용 가능 여부를 분석하였다. Park(2016)은 해수면 상승 시나리오를 국내 항만에 대입하여 해수면 상승시 기존 시설물의 마루높이 적정성을 검토한 결과 전국 무역항 외곽시설의 약 53%, 연안항 접안시설의 약 65%가 설계 기준에 미달하여 보강이 필요한 것으로 분석되었다.

그러나 부두 시설 중 마루높이를 선정하여 국내·외 기준을 분석하고, 해상 환경 및 접안선박의 특성을 반영한 마루높이를 평가지표를 제안한 연구는 아직 수행되지 않고 있다.

이에 따라 본 연구는 국내·외 마루높이 설계기준과 선박 대형화 및 지구 온난화에 따른 해수면 상승 등의 현재 추세를 분석하여, 해상 환경 특성과 접안선박의 특성을 반영한 마루높이 평가지표를 제안하였으며, 이 평가지표를 10만톤급 크루즈선에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

## 2. 국내·외 마루높이 설계기준 분석

계류시설의 마루높이는 Fig. 1과 같이 기본수준면인 약최저저조면에서 부두끝단까지의 수직높이로 정의되며, 이는 접안선박의 안전한 계류에 밀접한 연관성이 있는 설계요소이다. 항만 및 어항 설계기준에서 마루높이는 대상선박의 주요치수, 이상조위, 파랑 등의 자연 상황과 지반 침하, 인근 지역의 적용사례 등을 고려하여 적절하게 결정하여야 한다고 명시되어 있다.

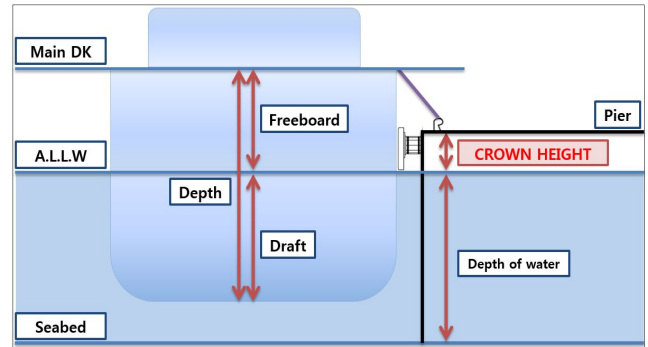


Fig. 1. Definition of crown height.

### 2.1 국내 마루높이 기준 분석

국내 마루높이 기준은 Table 1과 같이 접안시설의 수심이 4.5 m 이상이면 대형접안시설, 4.5 m 미만이면 소형접안시설로 분류하고, 조차 3.0 m 이상인 지역과 3.0 m 미만인 지역으로 구분하여 대상 해역의 약최고고조위(A.H.H.W)에 일정 높이를 더하여 설정한다.

Table 1. Standard crown heights of wharves

Category	Tidal range 3.0 m or more	Tidal range less than 3.0 m
Wharf for large vessels (water depth of 4.5 or more)	A.H.H.W + (0.5~1.5 m)	A.H.H.W + (1.0~2.0 m)
Wharf for small vessels (water depth of less than 4.5)	A.H.H.W + (0.3~1.0 m)	A.H.H.W + (0.5~1.5 m)

이 때, 조차가 큰 지역이 조차가 작은 지역보다 약최고고조위에 더해지는 값이 더 작는데, 이는 조차가 큰 지역에서 마루높이가 너무 높으면 저조시 선박의 계류시작점이 마루높이보다 낮아 계류가 불가능할 수 있기 때문에 설정한 값으로 추측해 볼 수 있다. 이러한 설계기준은 선종 및 선박의 크기에 상관없이 일괄적으로 적용하고 있으며, 2005년 개정된 항만 및 어항 설계기준상의 기준과 2017년에 개정된 기준이 동일하여 선박대형화 및 해수면 상승속도 등의 추세를 반영하지 못하고 있는 것으로 사료된다.

### 2.2 국외 마루높이 기준 분석

미국 항만시설의 설계기준은 UFC 4-152-01에서 규정하고 있으며, 부두 마루높이 기준은 접안선박의 안전성을 위해서 가능한 범위에서 높이 설계하도록 규정하고 있다. 적절한 마루높이를 위해서는 접안선박의 특성을 파악하여 설계하도록 하며, 특히 접안선박의 견련과 승하선 장비 및 하역 장비의 설치와 작동을 고려해야 한다. 부두에 설치된 컨베이어, 크레인, 로딩암 등의 하역장비가 파도에 의해 짓지 않아야 하며, 계류라인의 수직각이 적절히 유지되도록 부두높이를 설정하여야 한다(Unified Facilities Criteria, 2017).

영국 설계기준에서 부두의 마루높이는 기존 인접지역의 작업 구역 높이와 비슷해야 한다고 규정하고 있으며, 최적의 마루높이를 결정하기 위해서는 부두 침수의 위험, 지구 온난화로 인한 해수면 변화의 영향, 크레인 등 하역장비의 높이를 고려하여야 한다고 명시되어 있다. 그러므로 정온한 해역의 화물선 부두의 마루높이는 작업 수위보다 1.5 m 이상 높아야 한다고 명시되어 있다(British Standard Institute, 2010).

홍콩 설계기준에서 부두 마루높이는 인접 지역의 높이, 조석 변동, 약최고고조위, 접안선박의 종류, 부두 작업의 유형을 유의하여 설정하여야 한다. 또한, 관련 정부 부처, 선박 또는 부두 운영자 및 유지·보수 당국과 협의하여 설정하여야 한다고 명시되어 있다(The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2004).

PIANC 권고기준의 지침서인 Port Designer's Handbook에 따르면 부두높이는 인근 자연환경과 접안 선박의 종류, 항만 시설 및 화물작업을 고려하여 결정되어야 하며, 마루높이는 최대 작업 수위인 약최고고조위보다 최소 1.5 m 이상 높아야 한다고 권고하고 있다(Port Designer's Handbook, 2003).

## 3. 마루높이 평가지표

해상 환경 및 선박 특성을 반영한 마루높이 평가지표를 설정하기 위해 환경 및 선박 요소로 분류하여 마루높이 평가지표를 설정하였다. 먼저, 마루높이  $H_i$ 일 때 안전성 평가지표를 Crown Height의 약자인  $CH(H_i)$ 로 설정하고,  $CH(H_i)$ 는 각각 독립변수인 환경 평가지표  $CE$ (Evaluation Index of Environment)와 선박 평가지표  $CS$ (Evaluation Index of Ship)의 곱으로 표현하였다. 이는 적절한 마루높이를 설정하기 위해서는 그 해역의 환경 특성과 접안선박의 특성을 동시에 만족해야 하기 때문이다.

$$CH(H_i) = CE_{ij} \times CS_{ik} \quad (1)$$

$CE_{ij}$ 는 마루높이  $H_i$ 일 때 환경 평가지표  $j$ 요소의 값을 의미하며 4개 지표로 설정되고, 각 지표가 모두 충족될 때 모

든 환경 평가지표를 고려한 것으로 평가되어  $CE_j$ 는  $CE_1$ ,  $CE_2$ ,  $CE_3$ ,  $CE_4$ 의 곱으로 표현된다. 여기서,  $CE_1$ 은 조위 및 조차,  $CE_2$ 는 해수면 상승,  $CE_3$ 은 승하선 및 하역 설비  $CE_4$ 는 수심을 나타낸다.

$$CE_{ij} = CE_{i1} \times CE_{i2} \times CE_{i3} \times CE_{i4} \quad (2)$$

$CS_{ik}$ 는 마루높이  $H_i$ 일 때 선박 평가지표  $k$ 요소의 값을 의미하며 4개 지표로 설정되고, 환경 평가지표와 마찬가지로 각 지표가 모두 충족될 때 모든 선박 평가지표를 고려한 것으로 평가되어  $CS_k$ 는  $CS_1$ ,  $CS_2$ ,  $CS_3$ ,  $CS_4$ 의 곱으로 표현된다. 여기서,  $CS_1$ 은 계류삭 장력,  $CS_2$ 는 계선주 견인력,  $CS_3$ 는 선체동요량,  $CS_4$ 는 계류라인 수직각을 나타낸다.

$$CS_{ik} = CS_{i1} \times CS_{i2} \times CS_{i3} \times CS_{i4} \quad (3)$$

### 3.1 환경 평가지표

#### 1) 조위 및 조차

$CE_1$ 은 조위 및 조차를 의미하고, 항만 및 어항 설계기준의 마루높이 설계기준은 조차 3 m에 따라 약최고고조위에 일정 높이를 더하여 설정하므로 매년 조차 및 조위를 분석하여 마루높이 설정에 반영하여야 한다.

약최고고조위와 약최저저조위는 매년 측정하며, 연중 최고조위에 근접하는 고조위를 약최고고조위라 하고 연중 최저저조위에 근접하는 저조위를 약최저저조위라고 한다. 대조평균고조위와 대조평균저조위의 차이를 대조차라고 정의한다. Table 2는 2017년 기준 국내 대표무역항의 약최고고조위와 Table 1에 의거하여 산출된 표준 마루높이이다.

Table 2. Standard crown height and A.H.H.W on domestic major port

Coast	Port	A.H.H.W (m)	Crown Height (m)	
			Small	Large
East	Donghae	0.38	0.9~1.9	1.4~2.4
	Pohang	0.25	0.8~1.8	1.3~2.3
	Ulsan	0.61	1.1~2.1	1.6~2.6
South	Busan	1.84	2.3~3.3	2.8~3.8
	Masan	1.96	2.5~3.5	3.0~4.0
	Jeju	2.74	3.2~4.2	3.7~4.7
	Yeosu	3.40	3.7~4.4	3.9~4.9
	Gwangyang	3.54	3.8~4.5	4.0~5.0
West	Mokpo	4.86	5.2~5.9	5.4~6.4
	Gunsan	7.23	7.5~8.2	7.7~8.7
	Daesan	8.28	8.6~9.3	8.8~9.8
	Pyeongtaek	9.36	9.7~10.4	9.9~10.9
	Incheon	9.27	9.6~10.3	9.8~10.8

2) 해수면 상승

환경 평가지표  $CE_2$ 는 해수면 상승을 의미하며, 매년 증가하는 해수면 상승정도를 조사하고 이를 마루높이 설정에 반영하여야 한다. 항만 및 어항 설계기준의 항만시설 설계공용기간은 3등급으로 50년이며, 이 기간 동안 구조 견고성을 확보하여야 하고 항만 및 부두의 사용이 가능하여야 하므로 장기적인 해수면 상승정도를 적정 마루높이 설정에 반영할 필요가 있다.

국내·외 해수면 상승정도는 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 설계된 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오를 사용하여 산출하고 있으며, 이에 따라 21세기 말 지구 전체와 우리나라 연안의 평균 해수면은 Table 3과 같다. 특히 우리나라 연안의 해수면은 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5에 대해 각각 0.378 m, 0.481 m, 0.477 m, 0.65 m 상승하는 것으로 전망되었다. 모든 시나리오에서 우리나라 주변 해역의 불확실성의 범위가 다소 크게 나타났으며, RCP 8.5 기준 해수면 상승 예측 범위는 우리나라 전 해역에서 지구 전체 평균보다 높은 것으로 분석되었다(Heo et al., 2018).

Table 3. Prediction of sea level rise on domestic seas (2100year)

Category	RCP			
	2.6(m)	4.5(m)	6.0(m)	8.5(m)
Global	0.407 [0.21-0.62]	0.475 [0.27-0.71]	0.495 [0.27-0.73]	0.633 [0.37-0.94]
Korea	0.378 [0.17-0.59]	0.481 [0.23-0.70]	0.477 [0.23-0.74]	0.650 [0.33-0.96]
East Coast	0.378 [0.16-0.61]	0.485 [0.21-0.71]	0.476 [0.21-0.76]	0.654 [0.31-0.97]
South Coast	0.394 [0.18-0.62]	0.498 [0.23-0.72]	0.495 [0.24-0.77]	0.671 [0.33-0.99]
West Coast	0.363 [0.18-0.56]	0.472 [0.23-0.67]	0.457 [0.24-0.69]	0.637 [0.33-0.99]

3) 승하선 및 하역 설비

환경 평가지표  $CE_3$ 는 부두에 설치된 승하선 및 하역 설비를 의미하며, 마루높이가 승객의 승하선 및 접안선박의 하역 작업에 제한이 되어서는 안 되며, 특히 부두의 하역 설비를 원활히 사용가능하도록 적정 마루높이 설정에 반영하여야 한다.

항만 및 어항 설계기준상 하역장 또는 계류시설에 설치되는 하역기계는 당해 시설의 이용형태에 가장 적합한 구조, 능력 및 위치와 구조상의 안전성을 갖추어야 하고, 하역작업을 원활하고 안전하게 수행할 수 있도록 설치되어야 한다고 명시되어 있다. 그러므로 부두에 설치된 하역기계와 여객선 및 크루즈선의 갠웨이 등 여객의 승하선 설비, PCTC 또는 로로선의 차량승강시설 등 선박에 장치되어 있는 장비를 원활히 설치할 수 있도록 대상선박의 선종 및 크기를 고려하여 마루높이를 설정하여야 한다.

4) 수심

환경 평가지표  $CE_4$ 는 선박의 수심을 의미하며, 이를 마루높이 설정에 고려하여야 한다. 현재 항만 및 어항 설계기준에서 마루높이 기준은 접안시설의 수심이 4.5 m 이상이면 대형 접안시설, 4.5 m 미만이면 소형접안시설로 분류하고 있으며, 항만 및 어항 설계기준에서 선박의 설계수심은 선종 및 크기에 따라 대상선박의 최대흘수의 약 1.1배 정도로 제시된다.

PIANC 기준에서 설계 수심은 접안선박의 흘수, 선체침하 현상 등의 선박특성과 조위, 해수밀도, 파랑, 저질 등의 환경특성을 고려하여 설정하도록 권고하고 있다. 이에 따라 정온한 부두의 선박은 대상선박의 최대흘수의 1.1배로 설정하도록 규정하였다.

3.2 선박 평가지표

1) 계류삭 장력

선박 평가지표의 각 요소에 대해 분석하면,  $CS_1$ 은 계류삭의 장력을 의미한다. 마루높이에 따라 계류삭의 길이 및 장력이 변화하며, 마루높이가 상향되면 부두에서 선박으로 바람이 불 때 풍압면적이 감소하고 이 때 선박의 계류삭에 미치는 장력 또한 감소하게 된다.

계류삭의 안전사용하중(Safety Working Load, SWL)은 계류삭의 재질에 따라 보통 설계하중(Design Load, DL)의 0.45~0.55 배로 권고되며, 설계하중은 계류삭의 최소 과단력(Minimum Breaking Load, MBL)과 같다. Table 4는 계류삭 재질에 따른 안전사용하중이다(OCIMF, 2008).

Table 4. Safety Working Load of mooring rope

Material	SWL	SF(MBL/SWL)	× MBL
Steel	Highest load calculated for adopted standard environmental criteria	1.82	0.55
Polyamide		2.22	0.45
Other Synth.		2	0.50

2) 계선주 견인력

선박 평가지표의  $CS_2$ 는 계선주의 견인력을 의미하며, 마루높이에 따라 계선주에 미치는 견인력이 변화한다. 마루높이가 상향되면 부두에서 선박으로 바람이 불 때 풍압면적이 감소하고 이 때 선박의 계류삭에 미치는 장력이 감소하여 계선주의 견인력 또한 감소하게 된다.

계선주의 안전사용하중은 IMO MSC/Circular 1175의 선박 견인 및 계류설비 지침에서 규정하고 있으며, 계선주 안전사용하중은 설계하중의 80%를 초과하지 않도록 권고하고 있다(IMO, 2005).

3) 선체동요량

선박 평가지표의  $CS_3$ 은 선체동요량을 의미하며, 마루높이에 따라 접안선박의 선체동요량이 변화한다. 마루높이가 상향되면 부두에서 선박으로 바람이 불 때 풍압면적이 감소하고 이 때 선박에 미치는 풍력이 감소하므로 선체동요량 또한 감소하게 된다.

Table 5는 항만 및 어항 설계기준 및 PIANC 기준에서 규정하는 선체동요량 한계기준 중 페리선 및 로로선의 하역장비에 따른 선체 6자유도운동 허용한계값이다.

Table 5. Recommended motion criteria for safe working conditions

Ship's type	Loading Device	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Ferry Ro-Ro Ship	side ramp	0.6	0.6	0.6	1	1	2
	link span	0.4	0.6	0.8	3	2	4

4) 계류라인 수직각

선박 평가지표의  $CS_4$ 는 계류라인 수직각을 의미하며, 마루높이에 따라 접안선박의 계류라인 수직각이 변화한다. 마루높이가 상향되면 부두 계선주의 높이도 올라가므로 계선주와 접안선박 간의 계류라인 수직각 또한 감소하게 된다.

계류라인 수직각이 클수록 계류삭 수평장력에 대한 효율성이 감소하게 되므로 적정 수직각을 유지하는 것이 중요하다. 예를 들어 수직각이 25°일 때 풍력에 대한 장력 효율성은 91%이며, 수직각이 45°일 때 풍력에 대한 장력 효율성은 71%로 측정된다(OCIMF, 2008).

항만 및 어항 설계기준에서 권고하는 계류라인 수직각은 돌핀 계류시설에 대해 25° 이내로 계획하는 것이 바람직하며 어떠한 경우에도 30°를 초과해서는 안 된다.

4. 마루높이 평가방법 및 적용

4.1 마루높이 평가방법

3장에서 정의한 마루높이 환경 및 선박 평가지표를 설정하고, 이를 사용하여 선박 특성에 따른 적정 마루높이를 도출하기 위한 평가방법을 개발하였다.

마루높이  $H_i$ 일 때 안전성 평가지표  $CH(H_i)$ 는 환경 평가지표  $CE_{ij}$ 와 선박 평가지표  $CS_{ik}$ 의 곱으로 표현되고, 각각 환경 평가지표와 선박 평가지표도 4개 요소의 곱으로 표현된다.

$CE_{ij}$ 는 마루높이  $H_i$  설정할 때 각  $CE_{i1}$ ,  $CE_{i2}$ ,  $CE_{i3}$ ,  $CE_{i4}$  요소를 고려하면 1의 값을 갖고, 각 요소가 고려되지 않으면 0의 값을 갖는다. 이에 따라 환경 평가지표 4개 중 1개의 지표라도 고려되지 않아 0의 값을 갖게 되면  $CE_{ij}$ 는 0이 된다. 예를 들어 마루높이  $H_i$  설정할 때 해수면 상승치를 반영하

는  $CE_{i2}$ 를 고려하지 않으면  $CE_{i2}=0$ 이 되어  $CE_{ij}=0$ 이 되고,  $CH(H_i)$ 값 또한 0이 된다.

$CS_{ik}$ 는 마루높이  $H_i$  설정할 때 각  $CS_{i1}$ ,  $CS_{i2}$ ,  $CS_{i3}$ ,  $CS_{i4}$  요소의 위험도를 Table 6의 위험도 평가기준을 바탕으로 평가하고, 위험도 단계별로 정해진 평가값을 모두 곱하여 구한다.

Table 6. Risk level evaluation standards of ship factor

Risk Level	Value	$CS_1$ (%)	$CS_2$ (%)	$CS_3$ (%)	$CS_4$ (°)
1	1	$\leq 25$	$\leq 40$	$\leq 50$	$\leq 25$
2	0.8	$25 < CS_1 < 45$	$40 < CS_2 < 70$	$50 < CS_3 < 90$	$25 < CS_4 < 30$
3	0.3	$45 \leq CS_1 < 50$	$70 \leq CS_2 < 80$	$90 \leq CS_3 < 100$	$30 \leq CS_4 < 40$
4	0	$50 \leq$	$80 \leq$	$100 \leq$	$40 \leq$

선박 평가요소의 위험도는 Table 6과 같이 1단계부터 4단계까지 4개로 구성되어 있고, 1단계는 항만 및 어항 설계기준, IMO, OCIMF, PIANC 등의 국내·외 기준에 의해 규정된 각 선박 평가요소 한계값의 50% 정도로 가장 안전한 수준이며, 1의 평가값을 부여하였다. 2단계는 한계값의 10~50% 정도로 비교적 안전한 수준으로 평가되어 0.8의 평가값을 부여하였고, 3단계는 한계값의 1~10% 정도로 비교적 위험한 수준으로 평가되어 0.3의 평가값을 부여하였다. 마지막으로 4단계는 국내·외 기준에서 권고하는 한계수준으로 평가되어 0의 평가값을 부여하였다. 여기서, 계류라인 수직각 기준인  $CS_4$ 는 항만 및 어항 설계기준에서 유조선에 한하여 그 기준을 30°를 초과하지 않도록 설정하고 있으므로, 40° 이상의 수직각일 때 0의 평가값을 부여하고, 30°에서 40°사이의 0.3의 평가값을 부여하였다.

여기서, 4개의  $CE_1$ ,  $CE_2$ ,  $CE_3$ ,  $CE_4$ 의 모든 환경 평가요소가 고려되면  $CE_{ij} = 1$ 이고,  $CH(H_i) = CE_{ij} \times CS_{ik}$ 이므로 마루높이  $H_i$ 일 때 안전성 평가지표  $CH(H_i) = CS_{ik}$ 가 된다.

그리고 Table 7의 마루높이 안전도 평가기준에 따라  $CH(H_i)$ 값의 안전도는 0.2 씩의 차이로 5단계로 구분되며,  $CH(H_i)$ 값이 0에 가까울 때 위험도가 높으며, 1에 가까울 때 위험도가 낮은 것으로 평가된다.

Table 7. Safety level evaluation standards of crown height

$CH(H_i)$	Safety Level
$0.0 \leq CH < 0.2$	Very High Risk
$0.2 \leq CH < 0.4$	High Risk
$0.4 \leq CH < 0.6$	Moderate Risk
$0.6 \leq CH < 0.8$	Low Risk
$0.8 \leq CH \leq 1.0$	Very Low Risk

### 4.2 대상선박 선정

본 논문의 마루높이 평가방법을 적용하기 위하여, 선박 대형화로 인해 풍압면적이 커지므로 마루높이 상향이 필요할 것으로 판단되는 10만톤급 크루즈선을 대상선박으로 선정하였다. 대상선박의 제원은 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 선박제원을 기준으로 Table 8과 같이 설정하였다.

Table 8. Specifications of vessel

Category		Dimension
LOA / LBP (m)		324.0 / 281.0
Breadth (m)		32.3
Depth (m)		30.0
Mean draft (m)		8.0
Above Water Projected Areas (m <sup>2</sup> )	Transverse	11,039
	Lateral	1,257

### 4.3 계류상황 및 환경외력 모델링

대상부두의 치수와 계선주, 방충재 등 계류시스템의 배치는 항만 및 어항 설계기준 계류시설의 배치 규정에 따라 Table 9 및 Fig. 2와 같이 모델링하였고, 계류삭의 종류, 직경 및 배치는 대상선박에서 일반적으로 사용하는 종류 및 방식으로 설정하였다.

환경외력으로 풍속은 20 kts, 풍랑주의보 수준인 30 kts, 풍랑경보 수준인 40 kts로 설정하였고, 풍향은 Fig. 2와 같이 마루높이에 따른 풍압면적의 변화량이 가장 큰 방향인 접안현정횡방향으로 모델링하였다. 또한 마루높이와 풍압면적 변화에 따른 민감도가 적은 파랑과 조류 조건은 제외하였다.

시뮬레이션을 위한 마루높이는 총 4가지로 분류하였고, 약최고고조위에서 1m를 더한 높이를  $H_1$ , 2m를 더한 높이를  $H_2$ , 3m를 더한 높이를  $H_3$ , 4m를 더한 높이를  $H_4$ 로 설정하였다. 여기서  $H_1$ 은 항만 및 어항 설계기준 기준 수심 4.5m 이상의 대형접안시설의 최저기준이고,  $H_2$ 는 대형접안시설의 최고기준이다.

Table 9. Specifications of mooring condition

Category		A	
Length of Pier(m)		370	
Line	Fore	Head	L1, L2, L3, L4
		Breast / Spring	L5, L6 / L7, L8
	Aft	Spring / Breast	L9, L10 / L11, L12
		Stern	L13, L14, L15, L16
Type / Dia.(mm) / M.B.L(t)		Polyester / 80 / 80	
Bollard	Fore	B1, B2, B3	
	Aft	B4, B5, B6	
	Max. Load(t) / Interval(m)	150 / 20	
Fender	Type	Cell1400H×1600φ	
	Interval(m)	20	

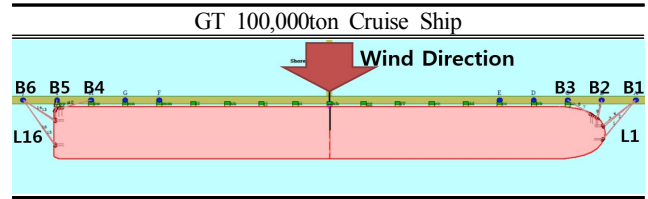


Fig. 2. Mooring Arrangement of cruise ship.

### 4.4 적정 마루높이 평가결과

10만톤급 크루즈선의 계류안전성 시뮬레이션의 결과값을 Table 6의 선박 평가요소 위험도 평가기준에 대입하여 마루높이  $H_i$ 일 때  $CS_{ik}$ 를 Table 10과 같이 도출하였다.

평가요소는 계류삭에 작용하는 장력( $CS_1$ ), 계선주에 작용하는 견인력( $CS_2$ ), 선체동요량( $CS_3$ ), 부두와 계류라인의 수직각( $CS_4$ )이며, 각 선박 평가요소의 최대값(Max.)과 평가값(Value : VL)을 구하고, 각 평가값의 곱인  $CS_{ik}$ 를 나타내었다.

평가 결과, 풍속 30 kts, 40 kts 조건에서는 모든 마루높이에서 각  $CS$ 값이 0으로 나타났으며, 풍속 20 kts에서 각  $CS$ 값은  $H_1$ 일 때 0.15,  $H_2$ 일 때 0.19,  $H_3$ 일 때 0.80,  $H_4$ 일 때 0.80으로 도출되었다.

모든 환경평가요소가 고려되었을 때  $CE_{ij} = 1$ 이 되고, 이때  $CH(H_i) = CS(H_i)$ 이므로 마루높이 및 풍속에 따라 구해진  $CS(H_i)$ 값은  $CH(H_i)$ 와 일치한다. 이를 Table 7의 마루높이 안전도 평가기준에 따라 평가하고, 적정 최소 마루높이를 Moderate Risk 범위인 0.4 이상이 되는 최소 높이로 설정하였다. 이에 따라 10만톤급 크루즈선의 적정 최소 마루높이는  $H_3$ 으로 도출되었으며, 이는 약최고고조위에서 3m 상향된 마루높이이다.

Table 10. Results of risk level analysis on ship index

$H_i$	Wind Sp'd (kts)	$CS_{i1}$		$CS_{i2}$		$CS_{i3}$		$CS_{i4}$		$CS_{ik}$
		Max (%)	VL	Max (%)	VL	Max (%)	VL	Max (°)	VL	
$H_1$	20	26	0.8	43	0.8	73	0.8	32	0.3	0.15
	30	65	0	85	0	257	0	31	0.3	0
	40	117	0	138	0	447	0	30	0.3	0
$H_2$	20	25	1	41	0.8	58	0.8	30	0.3	0.19
	30	65	0	80	0	232	0	29	0.8	0
	40	118	0	129	0	412	0	29	0.8	0
$H_3$	20	24	1	39	1	48	1	28	0.8	0.80
	30	64	0	75	0.3	207	0	28	0.8	0
	40	118	0	120	0	373	0	27	0.8	0
$H_4$	20	23	1	37	1	40	1	26	0.8	0.80
	30	63	0	70	0.3	185	0	26	0.8	0
	40	117	0	112	0	340	0	25	1	0

## 5. 결론

최근 국내에서는 지구온난화로 인한 해수면 상승과 이에 따른 태풍 및 해일의 증가로 인해 방파제 보강 및 방호시설 설치 등의 공사를 시행중에 있다. 또한, 지속적인 선박대형화로 인해 대형선 접안을 위한 수심 준설, 접안부두 확장 등의 항만 공사를 수행하고 있으나, 접안선박의 안전한 계류와 밀접한 영향이 있는 마루높이의 상향 및 보강 등의 뚜렷한 공사 계획은 없는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 국내·외 마루높이 설계기준을 분석하고, 해상 환경 특성과 선종별 특징을 반영한 마루높이 환경 평가지표와 선박 평가지표를 제안하였다. 또한 이를 10만톤급 크루즈선의 계류안전성 평가 결과에 적용하여 적정 최소 마루높이를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 국내·외 마루높이 설계기준 분석 결과, 국내 기준은 조차 3.0 m, 수심 4.5 m에 따라 구분하고 해당지역의 약최고고조위에서 0.3~2.0 m를 더하여 설정하고 있다. 그러나 미국, 영국, 홍콩 및 Port Designer's Handbook의 마루높이 설계기준은 조차, 조위 등의 환경기준 외에 접안선박의 특성, 승하선 및 하역 설비 및 해수면 상승 요소를 반영하고 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 환경요소와 선박요소로 나누어 마루높이 평가지표 및 평가방법을 개발하였다. 환경 평가지표는 4개로 설정하였으며, 각각의 요소는 조위 및 조차, 해수면 상승, 승하선 및 하역 설비, 수심이다. 선박 평가지표 또한 4개로 설정하였고, 각각은 계류삭 장력, 계선주 견인력, 선체 동요량, 계류라인 수직각을 나타낸다. 특히, 선박 평가지표는 각 요소의 국내·외 허용기준을 적용하여 위험도 평가기준을 개발하였다. 이를 종합하여 환경 및 선박 요소가 고려된 마루높이 안전도 평가기준을 제안하였다.
- (3) 본 연구에서 개발한 마루높이 평가지표 및 평가방법을 검증하기 위해 항만 및 어항 설계기준에 의거하여 설계된 가상의 부두에 접안한 10만톤급 크루즈선의 계류안전성 시뮬레이션 결과에 적용하였다. 그 결과, 마루높이 안전도 평가기준에 따라 Moderate Risk인 0.4 이상이 되는 최소 마루높이를 대상선박의 적정 최저 마루높이로 설정하고 10만톤급 크루즈선의 적정 마루높이는 약최고고조위에서 3 m 상향된 값인  $H_3$ 으로 도출되었다.

본 연구 결과로 도출된 마루높이 평가지표와 평가방법은 추후 해상 환경 및 접안선박 특성을 고려한 마루높이 건설에 활용될 수 있다. 또한, 향후 국내 여러 항만의 부두에 본 연구 결과를 적용하여 타당성을 검증해 볼 예정이며, 특히

선박 평가지표의 위험도 평가기준 및 마루높이 안전도 평가기준을 세부적으로 정비하여 대상선박의 특성을 정확히 반영할 수 있도록 보완할 계획이다.

## References

- [1] British Standard Institute(2010), Maritime Works Part 2 Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins, BS 6349-2:2010, pp. 9-10.
- [2] Heo, T. K., Y. M. Kim, K. O. Boo, Y. H. Byun and C. H. Cho(2018), Future Sea Level Projections over the Seas Around Korea from CMIP5 Simulations, Atmosphere. Korean Meteorological Society, Vol. 28, No. 1, pp. 25-35.
- [3] IMO(2005), Guidance on Shipboard Towing and Mooring Equipment, IMO MSC/Circ.1175. pp. 1-9.
- [4] Kang, S. J.(2013), A study on Design Condition for Dolphin Berth by Tanker Fleet Analysis, Doctor's thesis, Korea Maritime and Ocean University, pp. 1-7.
- [5] Ministry of Ocean and Fisheries(2016), The third Port Harbour Basic Project Plan (Modified Plan), Official Notification No. 2016-122, p. 11, pp. 45-62, p. 70, pp. 345-386.
- [6] OCIMF(2008), Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, p. 7, pp. 109-111.
- [7] Park, D. C.(2016), Analysis of safety of port facilities due to rising sea level, potential degradation of port function, Journal of Coastal Disaster Prevention, Vol. 3, No. 3, pp. 149-154.
- [8] The Government of the Hong Kong Special Administrative Region(2004), Port Works Design Manual Part 2 Guide to Design of Piers and Dolphins, Civil Engineering Department of Hong Kong, pp. 18-19.
- [9] Thoresen, C. A.(2003), Port Designer's Handbook : Recommendations and Guidelines, Thomas Telford, p. 191, pp. 16-17.
- [10] Unified Facilities Criteria(2017), Design : Piers and Wharves, Department of defense, U.S.A., pp. 28-29.
- [11] Won, S. H., S. W. Cho and J. H. Lee(2015), Counter-strategies of Busan Port against Expansion of Container Vessel Size, The Journal of shipping and logistics, Vol. 31, No. 2, pp. 249-274.

---

Received : 2018. 06. 15.

Revised : 2018. 06. 26.

Accepted : 2018. 06. 27.