

부두 설계기준을 고려한 접안가능 최대선형의 결정에 관한 연구 - 울산항을 중심으로 -

전상엽* · 김영모** · 우병구*** · 정 현****

*, **, *** 한국해양수산연수원 · **** (주)오션스페이스 대표

A Systematic Approach to Decide Maximum Berthing Ship Size Coupled with Berth Design Criteria

-A Case of Port of Ulsan-

Sang-Yup Jun* · Young-Mo Kim** · Byung-Goo Woo*** · Hyun Chung****

*, **, *** Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan, 608-080, Korea

**** Ocean Space Inc., Seoul, 121-763, Korea

요 약 : 현행 「항만 및 어항 설계기준」 상 부두의 접안능력은 하기재화중량톤수를 사용하여 나타나고 있으나 접안가능 최대 선박의 결정에 영향을 미치는 요인은 재화중량톤수보다는 선박의 질량이나 길이 및 폭 등이다. 따라서 안전하고 효율적인 항만 운영을 위해 현재의 기준을 개선할 필요가 있으며, 이 연구는 합리적인 접안능력 기준을 제시하기 위하여 수행되었다. 부두의 적정 접안능력을 검토하기 위하여 울산항의 3개 부두를 선정하고, 통항 및 접안 안전성과 선체동요 및 구조 안정성을 종합적으로 평가하였다. 배수톤수가 일정한 경우 선박의 크기가 다소 증가하더라도 선박조종이나 계류 및 구조 안전성에 미치는 영향은 미미하였으며, 검토 대상 선박에서는 선박의 크기에 따른 유의적인 차이를 보이지 않았다. 평가 결과 배수톤수에 차이가 없다면 20,000 DWT급 선박은 부두접안가능능력의 50%, 40,000 DWT급 선박은 25%, 그리고 150,000 DWT급 선박은 13% 정도 선박의 크기를 증가시키더라도 부두 축조시의 설계기준에 적합한 것으로 검토되었다. 따라서 항로폭, 선회장, 선석 길이 및 계류라인의 배치 등에 문제가 없다면 재화중량톤수 대신에 배수톤수를 적용하여 부두 접안가능 최대 선박을 조정할 수 있다.

핵심용어 : 부두 접안능력, 접안 안전성, 계류 안정성, 구조 안전성, 재화중량톤수, 배수톤수

Abstract : "Summer Deadweight Tonnage(SDWT)" is used as the criteria of the berthing capacity when establishing port entry limits under current guideline. The important factors affecting to the maximum ship size of possible berthing are mass, length and breadth of the ship rather than deadweight. Therefore this guideline should be modified to ensure safety and efficient operation of berth. This study aimed to propose a rational guideline to adjust the berthing capacity. In order to decide proper berthing capacity, three berths of Port of Ulsan were selected and systematic evaluations for the safety of passage transit, berthing maneuvers, ship motions at berth and stabilities of structures were conducted. Small changes of ship size had little effect on those characteristics and little significant differences were found according to the increase of ship size at the same displacement. The evaluation results of the increasement of 50% of berthing capacity at 20,000 DWT, 25% at 40,000 DWT and 13% at 150,000 DWT were within the design criteria in which the berths were built. Therefore, if the channel width, diameter of turning circle, berth length and mooring arrangements are satisfied with the criteria, the current berth limitations should be adjusted by the displacement as substitute for the deadweight.

Key Words : Berth capacity, Safety of berthing maneuvers, Stability of mooring, Stability of structures, Deadweight, Displacement

1. 서 론

우리나라는 부두 및 항만시설을 축조할 때 하기재화중량톤수(Summer Deadweight Tonnage : SDWT)에 해당하는 대상

선박의 제원을 기준으로, 자연조건, 수심, 수역, 접안하중, 계류하중, 구조물의 안전성과 계류설비 배치 등을 고려하여 설계 및 시공을 하고 있다. 그리고 각 지방해양수산청은 준공허가 당시의 부두 접안능력을 기준으로 입항하는 선박의 만재할수선 증서에 표기된 하기재화중량톤수를 검토하여 당해 선박의 접안 여부를 결정하고 있다.

* 대표저자 : syjun@seaman.or.kr, 051-620-5860

** 정회원, ymkim@seaman.or.kr, 051-620-5763

따라서 만재하지 않고 홀수를 조정하여 입항할 때에도 상기 기준에 맞지 않으면 입항이 허가되지 않는다. 이러한 경우에는 증서상의 하기재화중량톤수가 부두 집안능력보다 하회하도록 증서를 추가로 발급받아 입항하고 있으며, 증서발급에 따른 비용과 체선이 발생하여 민원이 종종 발생하고 있다. 관할 관청에서는 항만시설 사용자의 민원을 해결하고, 선박과 항만시설 운영의 효율성을 향상시키기 위하여 항만시설의 집안기준을 완화시키고자 하나, 무원칙적인 완화로 선박의 접·이안시 사고가 발생할 경우 허가 관청의 책임문제가 따를 수 있어 항만 운영에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

이 연구는 현행 하기재화중량톤수 기준으로 설정된 부두시설 집안능력을 선박의 조종성과 항만시설의 구조강도 측면에서 재검토하여 합리적인 집안능력기준을 제시함으로써 항만물류의 효율성을 향상시키기 위하여 수행되었다. 부두시설의 집안능력 조정 가능성을 판단하기 위해서는 먼저, 조정 범위내의 선박을 대상으로 자연 환경적 요인을 고려하여 집안하중, 집안용도 및 계류 시스템의 안정성과 선박의 최대 동요량 등을 검토하고, 계류된 선박의 외력을 산정하여 부두의 구조 안전성에 대한 평가가 필요하다. 그리고 여기에 부가하여 선박 통행 및 집안 조종의 안전성에도 문제가 없는지를 종합적으로 검토하여 평가하여야 한다.

2. 집안가능 최대선박의 결정에 영향을 주는 요소

2.1 부두 집안능력 구분 기준

부두의 집안능력 산정에는 선석의 길이나 전면 수심, 하역 장비, 계류시설 규모 등이 영향을 미치며, 총톤수(GT), 재화중량톤수(DWT), 배수톤수(DT) 및 TEU 등으로 부두의 규모를 나타내고 있다.

일반적으로 부두시설 집안능력을 표시할 때에는 Table 1과 같이 선박의 재화중량톤수를 사용하고 있으며, 어항이나 여객선 부두는 총톤수, 군함 전용 부두는 배수톤수, 컨테이너 부두의 경우는 재화중량톤수나 TEU 등을 사용하고 있다. 그리고 LNG 전용 부두는 입방미터(m³)를 사용하기도 한다.

Table 1. Berthing criteria by the ship type

부두의 종류	적용 선박	적용 기준
어선 부두	어선	GT, DWT
여객선 부두	여객선	GT, DWT
군용 부두	군함	DT, DWT
유조선 부두	원유운반선, 정유운반선, 화학제품운반선	DWT
LNG 부두	LNG 운반선	DWT, m ³
화물선 부두	산적화물선, 일반화물선	DWT
자동차운반선 부두	자동차운반선	DWT
컨테이너선 부두	컨테이너선	DWT, TEU

세계적으로도 대부분의 항만은 재화중량톤수를 집안능력의

기준으로 설정하고 있으나, 미국은 대체로 최대 접안 선체길이와 최대 수심을 부두의 집안능력 기준으로 제시하고 있다. 일부 국가의 경우 일반부두는 재화중량톤수로 접안 기준을 제시하고, 탱커의 경우 부분적재(Partial load) 운항관행이 많으므로 탱커터미널은 배수톤수를 기준으로 제시하고 있다. 배수톤수 기준으로 집안능력을 결정하고 있는 국가로는 싱가포르, 호주, 캐나다, 인도 등이 있다(한국해양수산연수원, 2006).

2.2 선박조종 안전성에 영향을 주는 선박 제원

항만 및 어항 설계기준상 수역시설과 관련된 기준을 검토해보면 Table 2와 같이 수역시설을 결정하는데 적용되는 선박의 주요 치수는 선체길이(L), 선평(B) 및 만재홀수(D) 등이며, 간접적인 요소로 파고(H_{1/2})나 선속(V) 등이 고려되고 있다(해양수산부, 2005).

그리고 선박조종이나 계류 및 구조 안전성 해석에 이용되는 선체운동 방정식과 집안에너지 산출식에서 선박과 관련된 변수는 선박질량, 계류로프 취부점까지의 거리 등이며, 운항요소로 선체속도가 포함되어 있다. 따라서 선박조종이나 계류·구조 안전성을 판단할 때에는 재화중량톤수나 총톤수보다는 배수톤수를 적용하는 것이 보다 합리적임을 알 수 있다(GPC, 1989).

한편, 선체에 작용하는 외력을 추정하는 방정식에서도 외력의 크기를 결정하는 선박의 치수는 재화중량톤수나 총톤수가 아니라 정면과 측면의 풍압면적, 선체길이 및 홀수임을 알 수 있다(OCIMF, 1992).

Table 2. Dependent variables used in equations' of ship maneuvers and safety

구분	구분	관련 변수
수역시설	항로폭	선체길이(L), 선평(B)
	계획수심	선체길이(L), 홀수(D), 파고(H _{1/2}), 선속(V)
	묘박지	선체길이(L), 홀수(D)
	선회장	선체길이(L)
선체운동	계류/해탈수역	선체길이(L)
	선체 운동	선박질량(M), 선체속도(V)
	접안에너지	계류로프 취부점까지의 거리
선체작용 외력	선박질량(M), 접안속도(V)	
	바람에 의한 외력	황풍압면적(A _T), 종풍압면적(A _L), 수선간장(L _{BP})
	조류에 의한 외력	수선간장(L _{BP}), 홀수(T)
	파랑에 의한 외력	정면 및 측면 유압면적(A)

3. 부두 집안능력 평가 절차 및 방법

부두의 집안능력을 평가하기 위해서는 부두 접안시 또는 계류중 계류시설과 부두 구조물에 미치는 영향뿐만 아니라 수역시설의 적정성에 대한 고려도 필요하다. 이번 연구는 기존 부두

에 대해 흘수를 조정하여 입항할 경우 어느 정도 규모의 선박까지 접안이 가능한지를 검토하기 위한 목적으로 수행되었다. 따라서 현재 접안가능 최대선박의 재화중량톤수에 상응하는 배수톤수를 제한조건으로 두고 선박의 크기와 적재상태를 변화시키면서 선박조종, 계류 및 구조 특성의 차이를 비교·분석하여 부두 접안능력 조정 가능성을 평가하였다.

실험 대상 부두로는 울산항의 OTK-North 부두, UTT 부두 및 SK-8 부두를 선정하였으며, 실험 대상 기본선박은 각 부두별로 접안가능 최대 선박인 20,000 DWT급(배수톤수 31,300톤), 40,000 DWT급(배수톤수 56,990톤) 및 150,000 DWT급(배수톤수 171,500톤) 선박을 선정하였다. 그리고 기본선박 외에 크기가 증대된 선박 2척을 각각 추가로 선정하여 기본선박과 안전성을 비교하였다. 추가로 선정된 선박은 기본선박에 비해 재화중량톤수는 증가하였으나 적재상태를 조정하여 배수톤수는 기본선박과 동일하도록 하였다. 따라서 부두별로 만재상태 선박 1척 및 부분적재상태 선박 2척 등 3척의 선박을 모델링 하여 실시간 또는 수치 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교하였다.

항만시스템의 적절성을 판단하기 위한 안전성 평가는 통항 및 접안 안전성과 계류 및 구조 안전성으로 구분하여 검토하였으며, 각 단계별 평가 방법과 절차는 다음과 같다.

3.1 통항 및 접안 안전성 평가

통항 및 접안 안전성 평가는 Table 3과 같은 설계조건에 따라 3개의 샘플 부두(UTT 부두, OTK-North 부두, SK-8 부두)에 대해 각각 3척의 모델선박을 이용하여 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 분석하여 수행하였다. 항로와 부두배치 등 항만시스템은 현재 상태로 설정하였다. 환경조건의 경우 바람은 통상 접안조종 허용 한계치인 풍속 26Kts를 입력하였으며, 풍향은 울산항 탁월풍을 고려하여 설정하였다. 그리고 조류는 구역별로 최강창조류를 입력하였다.

Table 3. Simulation design

내 용	대상 부두		
	UTT	OTK-North	SK-8
대상 선박	40,000 DWT 45,000 DWT 50,000 DWT	20,000 DWT 25,000 DWT 30,000 DWT	150,000 DWT 160,000 DWT 170,000 DWT
수 심	13.0m	11.0m	18m
바 람	풍향	N	N
	풍속	26kts	26kts
조 류	유향	창조류 332도	창조류 320도
	유속	0.2Kts	0.2Kts
항로폭	210~280m	120~160m	450m
예 선	3,000마력 2척	2,000마력 2척	3,000마력 4척
시뮬레이션 횟수	18회	18회	18회

통항 안전성 평가는 대상 수역 통항시 근접도와 여유제어력, 작업부하, 타작동 및 선체운동 등의 제어도를 분석하여 수행하

였으며, 접안 안전성은 Fig. 1과 같은 절차에 따라 접안조종시의 근접도, 접안시 종·횡방향 이동속도 및 접안에너지 분석하여 평가하였다.

평가요소별 세부 평가항목은 Table 4와 같다. 매 시나리오별로 각각의 세부 평가항목에 대한 기술통계량을 구한 다음, 부두별로 선박의 크기에 따른 유의성 검증은 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 $\alpha \leq 0.05$ 수준에서 판정하였다.

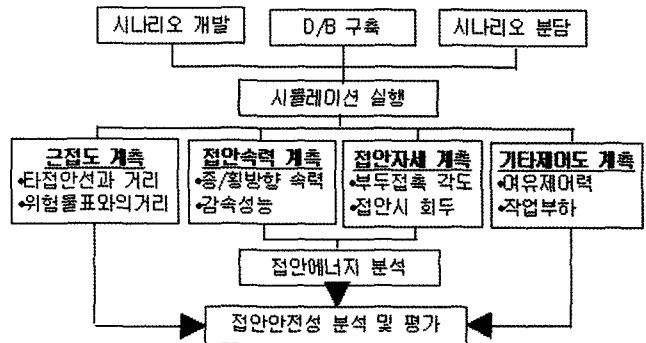


Fig. 1. Safety analysis and evaluation process of the berthing maneuvers.

Table 4. Dependent variables

구 분		평 가 항 목
통 항	선체 운동	Yaw Rate, Swept Path
	타작동	평균 사용타각, 타각 변동량
	작업 부하	반전타 및 기관 사용횟수
	여유제어력	여유 조타 및 기관 제어력
접 안	선체 운동	Yaw Rate, Swept Path
	타작동	평균 사용타각, 타각 변동량
	작업 부하	반전타 및 기관 사용횟수
	여유제어력	여유 조타, 기관, 예선, 쓰러스터 제어력
	부두접근 속도	부두접근 중·횡방향 속도, 감속성능
	부두접촉 자세	접안각도, 부두접촉시 Yaw Rate
접안에너지	부두 접촉시의 Impact Energy (Kinetic Energy Method 이용)	

3.2 계류 안정성 평가

계류 안정성은 선체와 안벽 그리고 계류 로프로 이루어진 하나의 계류 시스템에 파랑, 바람, 조류, 부력 및 초기 장력 등 외력 조건을 가하여 해석하였다. 계류력 해석시에는 가해진 외력에 따라 계류 시스템에서 선체 평형을 찾는 정적 해석과 파랑에 의한 선체의 동적 거동을 통계적으로 고려하는 주파수 영역에서의 동적 해석 및 외력 조건의 시간에 대한 비선형성을 고려한 시간영역 해석을 모두 수행하였다.

계류 안정성 해석은 BV에서 개발한 전용 프로그램인 Ariane-3Dynamic & Hydro-Star Offshore Software를 이용하여 Fig. 2와 같은 절차로 수행하였다.

계류선박의 수치해석법으로는 다음의 특이점분포법을 적용하였다.

$$C\Phi(\vec{x}) = \int \int_S \left\{ \frac{\partial \Phi(\vec{\xi})}{\partial n} G(\vec{x}, \vec{\xi}) - \Phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{\xi})}{\partial n} \right\} dS$$

여기서, C: solid angle

$G(\vec{x}, \vec{\xi})$: Green 함수

Φ : 속도포텐셜

x : 관측점(Field point)

ξ : 용출점(Source point)

S : 표면과와 물체의 운동에 의한 접수면

n : 물체 표면상의 단위 법선벡터

선박은 조종 안전성 검토시와 동일한 선박을 대상으로 하였으며, 부두, 계류시설 및 계류라인의 배치는 현재의 방식을 그대로 적용하여 모델링하였다. 계류 안정성 해석시 외력조건으로 조류는 부두 전면의 최강창·낙조인 유속 0.2Kts, 유향 상대방위 0도 및 180도를 입력하였다. 그리고 바람과 파랑은 각각 Table 5 및 Table 6과 같이 설정하였다.



Fig. 2. Analysis and evaluation process of the mooring stabilities.

Table 5. Wind conditions

구 분	풍속(m/s)	작용 방향
최대풍속	20.7	0, 90, 180, 270도
접안최대풍속	12.85	

Table 6. Wave conditions

구 분	유의파고 (m)	파주기 (sec)	적용 Spectrum	작용방향
단주기 파랑	0.5	2.73	ISSC	90도
	1.0	3.86		
	1.5	4.73		
장주기 파랑	0.5	15.0		
	1.0	15.0		
	1.5	15.0		

3.3 구조 안전성 평가

구조 안전성은 Fig. 3과 같은 절차에 따라 환경하중과 각 대 상 부두에 계류된 선박에서 발생하는 외력을 구조물에 가하여 해석하고, 허용기준과 비교하여 평가하였다. 돌핀 구조물의 형식에 따라 케이스 돌핀구조물은 활동·전도에 대한 안정성과 허용 지지력을 검토하고, 말뚝식 돌핀구조물은 파일의 허용응 력, 허용지지력 및 허용인발력과 Deck 단면을 검토하였다.

구조안전성 해석은 토목·건축분야의 범용 구조해석 및 설 계용 프로그램인 GT-STRUDL을 이용하여 수행하였다. 구조 안전성 해석시 외력조건으로 조류는 부두 전면의 최강창조인 유속 0.2Kts, 유향 상대방위 0도를 입력하였다. 그리고 바람과 파랑은 각각 Table 7 및 Table 8과 같이 설정하였다.

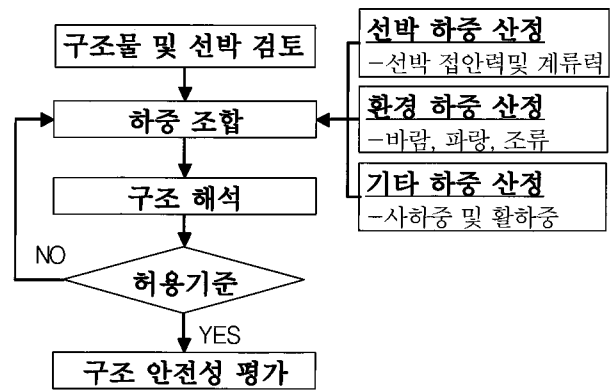


Fig. 3. Safety analysis and evaluation process of the berth structures.

Table 7. Wind conditions

구 분	풍속(m/s)	작용 방향	적용
설계 풍속	40	0도, 45도, 90도	구조 안전성 해석시 설계풍속

Table 8. Wave conditions

구 분	유의파고(m)	파주기(sec)	작용방향
단주기파랑	0.5	2.73	0도, 45도, 90도
	1.0	3.86	
	1.5	4.73	

4. 시뮬레이션 분석 결과

4.1 선박조종 시뮬레이션 분석 결과

1) 20,000 DWT급 선박

일반적으로 배수톤수(DWT)라 하면 그 선박의 만재할수에 해당하는 배수량으로 정의된다. 배수량 31,300톤인 20,000 DWT급 유조선을 기본 선박으로 하고, 배수톤수는 동일하나 부분적재 상태인 25,000 DWT 및 30,000 DWT급 선박을 추가로 모델링하여 각 Case별로 6회씩의 선박조종 시뮬레이션을 실시하고 그 결과를 비교하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 20,000 DWT 및 30,000 DWT급 선박의 접안 시물레이션 항적 합성도와 제어도 분석값이다. 주요 평가 항목에 대한 분석 결과 Table 9와 같이 선박 크기의 증가에 따른 선체길이나 폭의 증가로 인해 Swept path와 선회권 등은 선박간 통계적인 유의성을 보였다. 횡방향 접안속도와 접안에너지 등도 선박간 통계적인 유의성을 보였으나 앞의 항목과는 달리 선박의 크기가 증가할수록 오히려 감소하였다. 결과적으로 실질적인 배수톤수가 동일한 경우 선박의 크기가 50% 정도 증가하더라도 접안 조종에 미치는 영향은 미미하였다.

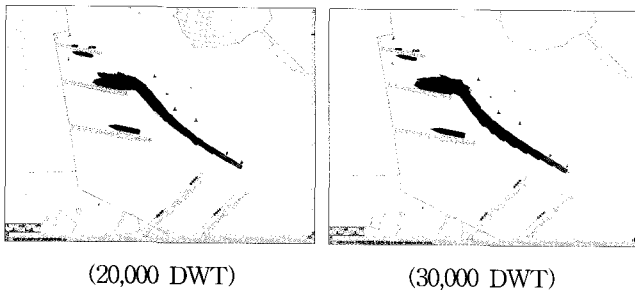


Fig. 4. Composite track of berthing at OTK-North berth.

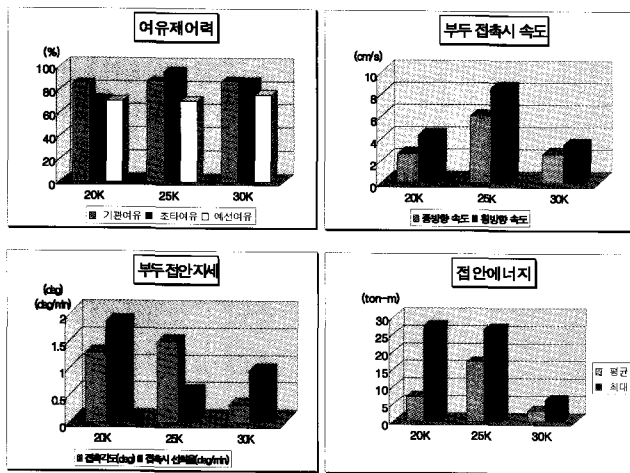


Fig. 5. Controllability on berthing at OTK-North berth.

Table 9. F-Probability between groups for transit and berthing maneuvers at OTK-North berth

구분	분석 내용	선형간 F-유의도
통항	항로 우측경계와 최근접거리	0.357
	항로 좌측경계와 최근접거리	0.072
	통항에 사용된 수역폭	0.057
	평균 Swept-path	0.007*
접안	여유예선제어력	0.439
	평균 Swept-path	0.004*
	선회권	0.000*
	부두 접촉시 종방향 속도	0.450
	부두 접촉시 횡방향 속도	0.026*
	부두 접촉시 부두와 교각	0.220
	접안에너지	0.029*

주 1) 선박간 비교 : 20,000 DWT, 25,000 DWT, 30,000 DWT

주 2) * : $\alpha \leq 0.05$

2) 40,000 DWT급 선박

Fig. 6와 Fig. 7은 40,000 DWT 및 50,000 DWT급 선박의 접안 시물레이션 항적 합성도와 제어도 분석값이다. 배수톤수 56,990톤인 40,000 DWT급 실험 유조선(만재상태)을 기본선박으로 하고 배수톤수는 동일하나 부분적재 상태인 45,000 DWT급 및 50,000 DWT급 선박을 추가로 모델링하여 시물레이션을 실시하고 그 결과를 비교하였다. 주요 항목에 대한 분석 결과 Table 10과 같이 전체적으로 배수톤수가 동일한 경우 조종성에 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다.

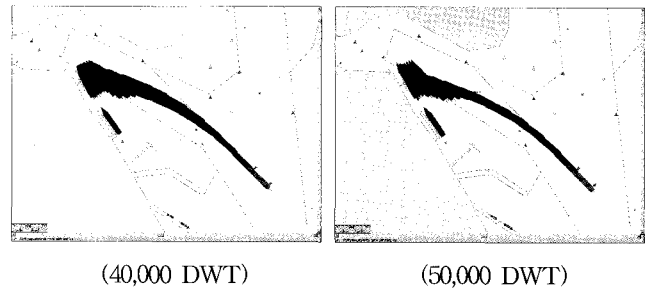


Fig. 6. Composite track of berthing at UTT berth.

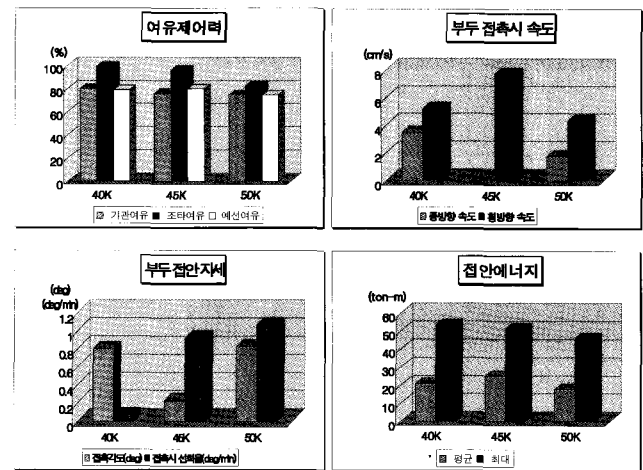


Fig. 7. Controllability on berthing at UTT berth.

Table 10. F-Probability between groups for transit and berthing maneuvers at UTT berth

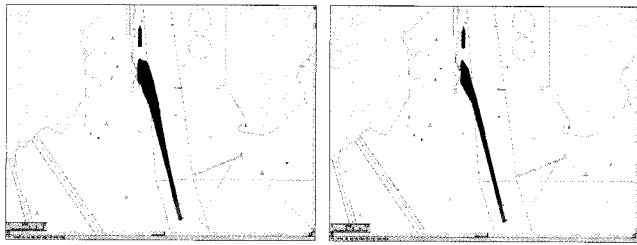
구분	분석 내용	선형간 F-유의도
통항	항로 우측경계와 최근접거리	0.240
	항로 좌측경계와 최근접거리	0.288
	통항에 사용된 수역폭	0.354
	분선의 Swept path	0.774
접안	여유예선제어력	0.270
	평균 Swept-path	0.591
	선회권	0.000*
	부두 접촉시 종방향 속도	0.414
	부두 접촉시 횡방향 속도	0.529
	부두 접촉시 부두와 교각	0.173
	접안에너지	0.779

주 1) 선박간 비교 : 40,000 DWT, 45,000 DWT, 50,000 DWT

주 2) * : $\alpha \leq 0.05$

3) 150,000 DWT급 선박

Fig. 8과 Fig. 9는 150,000 DWT 및 170,000 DWT급 선박의 접안 시물레이션 항적 합성도와 제어도 분석값이다. 배수톤수 171,500톤인 150,000 DWT급 실험 유조선(만재상태)을 기본선박으로 하고 배수톤수는 동일하나 부분적재 상태인 160,000 DWT급 및 170,000 DWT급 선박을 추가로 모델링하여 시물레이션을 실시하고 그 결과를 비교하였다.



(150,000 DWT) (170,000 DWT)

Fig. 8. Composite track of berthing at SK-8 berth.

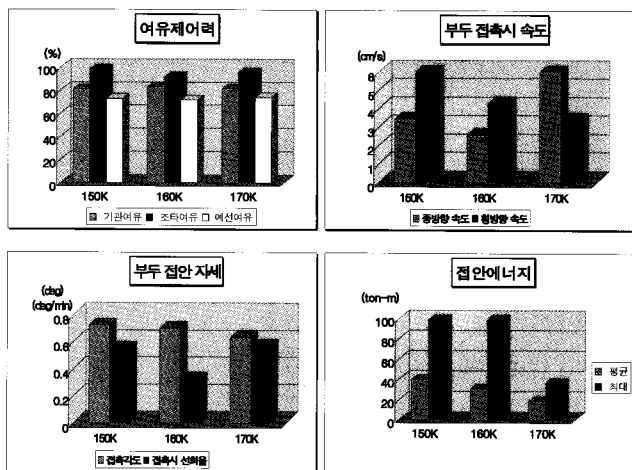


Fig. 9. Controllability on berthing at SK-8 berth.

주요 항목에 대한 분석 결과 Table 11과 같이 40,000 DWT급 선박의 경우와 같이 배수톤수가 동일한 경우 조종성에 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 11. F-Probability between groups for transit and berthing maneuvers at Sk-8 berth

구분	분석 내용	선형간 F-유의도
통항	항로 우측경계와 최근접거리	0.159
	항로 좌측경계와 최근접거리	0.452
	통항에 사용된 수역폭	0.697
	평균 Swept-path	0.522
접안	여유제어력	0.773
	평균 Swept-path	0.643
	선회권	0.000*
	부두 접촉시 종방향 속도	0.700
	부두 접촉시 횡방향 속도	0.338
	부두 접촉시 부두와 교각	0.994
	접안에너지	0.444

주 1) 선박간 비교 : 150,000 DWT, 160,000 DWT, 170,000 DWT
 주 2) * : $\alpha \leq 0.05$

4.2 계류 안정성 해석 결과

1) 20,000 DWT급 선박

Table 12는 20,000 DWT급 선박의 계류안정성에 대한 해석 결과이다. 실질적인 배수톤수가 동일하도록 적재상태를 조정하며 재화중량톤수 기준으로 선박의 크기를 50% 정도 증가시킬 경우, 최대계류장력은 파고 1.0m에서는 46.2%, 파고 1.5m에서는 13.3% 각각 증가하였다. 그리고 방충재의 동적압축력은 파고 1.0m에서는 13.1% 증가하였으나 파고 1.5m에서는 오히려 20.3% 감소하였으며, 볼라드의 동적작용하중은 선박이 증대될수록 오히려 감소하는 경향을 보였다. 한편, 선체동요량은 선박의 크기에 따라 증가하는 요소와 감소하는 요소가 있었으나 허용기준을 고려할 때 그 차이는 의미가 없는 수준이었다.

Table 12. Analysis on mooring stabilities at OTK-North berth

구분	허용치	증가율(%)	
최대 계류장력	33.3톤	13.3	
최대 방충재 압축력	165톤	▽-20.3	
최대 볼라드 하중	100톤	▽-3.2	
선체동요량	Surge(m)	1.5m	100
	Sway(m)	0.75m	▽-16.7
	Heave(m)	0.5m	10.7
	Roll(도)	4도	37.0
	Pitch(도)	2도	▽-41.7
	Yaw(도)	2도	35.3

주 1) 외력조건 : 파고(1.5m), 풍속(20.7m/sec), 단주기 파랑
 주 2) ▽ : 선박 증대에 따라 감소

파고 1.0m 이내의 해상조건인 경우 최대계류장력 기준으로 접안가능 최대선박을 추정하면 34,000 DWT의 실질적인 적재능력을 가지는 배수톤수까지는 접안이 가능할 것으로 판단된다.

2) 40,000 DWT급 선박

40,000 DWT급 선박의 계류안정성에 대한 해석결과, Table 13과 같이 실질적인 배수톤수는 동일하나 적재상태를 달리하여 재화중량톤수 기준으로 선박의 크기를 25% 정도 증가시킬 경우, 최대계류장력은 파고 1.0m에서는 127.3%, 파고 1.5m에서는 15% 각각 증가하였다. 그리고 방충재의 동적압축력은 파고 1.0m에서는 26.2%, 파고 1.5m에서는 5.6% 각각 증가하였다. 한편, 선체동요량은 선박 크기에 따라 증가하는 요소와 감소하는 요소가 있었으나 허용기준을 고려할 때 그 차이는 의미가 없는 수준이었다.

파고 1.0m 이내의 해상조건인 경우 최대계류장력과 방충재의 동적압축력을 고려하여 접안가능 최대선박을 추정하면 58,000 DWT의 실질적인 적재능력을 가지는 배수톤수까지는 접안이 가능할 것으로 판단된다.

Table 13. Analysis on mooring stabilities at UTT berth

구 분	허용치	증가율(%)	
최대 계류장력	32.2톤	15.0	
최대 방충재 압축력	70.0톤	5.6	
최대 블라드 하중	150.0톤	20.4	
선체동요량	Surge(m)	1.5m	100
	Sway(m)	0.75m	40
	Heave(m)	0.5m	3.2
	Roll(도)	4.0도	3.2
	Pitch(도)	2.0도	50
	Yaw(도)	2.0도	100

주 1) 외력조건 : 파고(1.5m), 풍속(20.7m/sec), 단주기 파랑
 주 2) ▽ : 선박 증대에 따라 감소

3) 150,000 DWT급 선박

같은 방법으로 Table 14는 150,000 DWT급 선박의 계류안정성에 대한 해석결과이다. 실질적인 배수톤수가 동일하더라도 선박 크기가 증가할수록 계류장력 역시 증가하여 재화중량톤수 기준으로 선박의 크기를 13% 정도 증가시킬 경우 최대계류장력은 파고 1.0m에서는 88.7%, 파고 1.5m에서는 33.3% 각각 증가하였다. 그리고 파고 1.0m에서 방충재의 동적 압축력은 14.7%, 블라드의 동적하중은 44.1% 각각 증가하였다. 한편, 선박 크기에 따른 선체동요량의 차이는 허용기준을 고려할 때 의미가 없는 수준이었다.

Table 14. Analysis on mooring stabilities at SK-8 berth

구 분	허용치	증가율(%)	
최대 계류장력	33.3톤	33.3	
최대 방충재 압축력	165톤	0.2	
최대 블라드 하중	100톤	35.2	
선체동요량	Surge(m)	1.5m	0
	Sway(m)	0.75m	33.3
	Heave(m)	0.5m	25.0
	Roll(도)	4도	▽-46.7
	Pitch(도)	2도	0
	Yaw(도)	2도	▽-69.2

주 1) 외력조건 : 파고(1.5m), 풍속(20.7m/sec), 단주기 파랑
 주 2) ▽ : 선박 증대에 따라 감소

4) 계류 안정성 해석 요소별 분석 결과

다음 그래프들은 각각의 부두 계류 선박들에 대한 단주기 파랑 입사시 선박의 크기와 파고에 따른 하중과 선체동요량의 변화를 비교한 그래프이다. Fig. 10은 최대 계류장력을 비교한 그래프이고, Fig. 11 및 Fig. 12는 각각 최대 방충재압축력과 최대 블라드 하중을 나타낸 것이다. 그리고 계류중 외력에 의한 선체의 6자유도 동요량은 각각 Fig. 13에서 Fig. 18까지 나타나 있다.

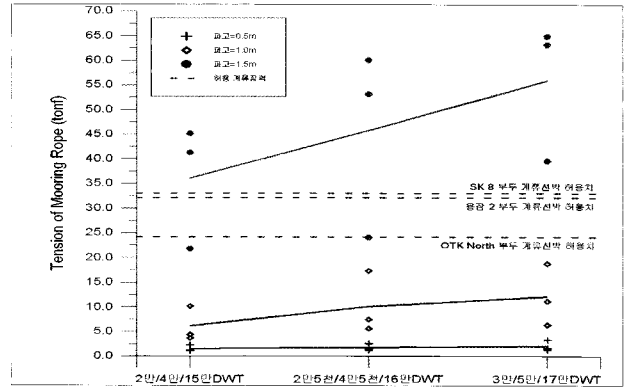


Fig. 10. Maximum mooring forces.

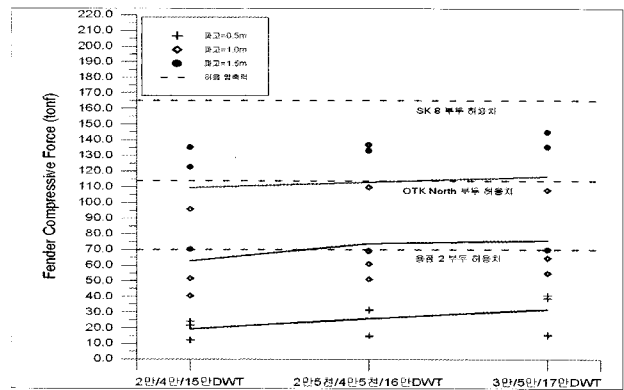


Fig. 11. Maximum fendering forces.

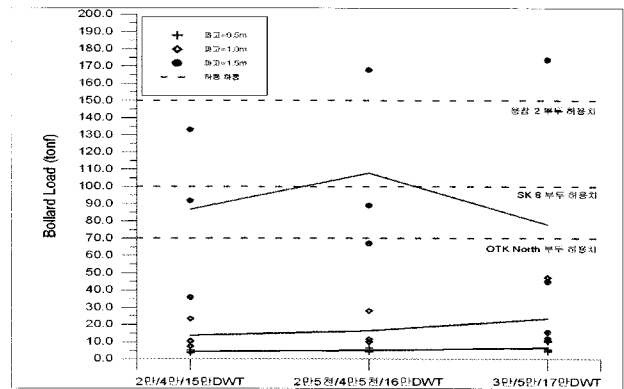


Fig. 12. Maximum loads affecting to bollard.

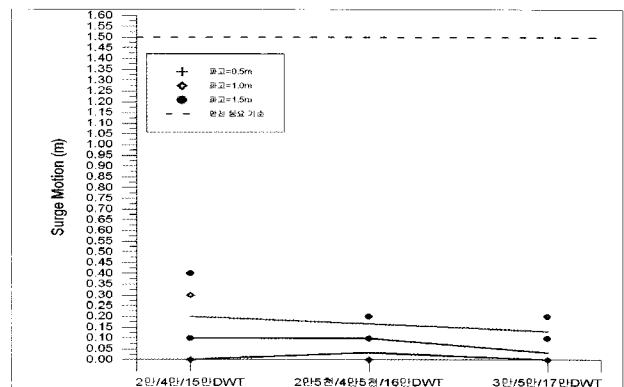


Fig. 13. Ship motion(Surge).

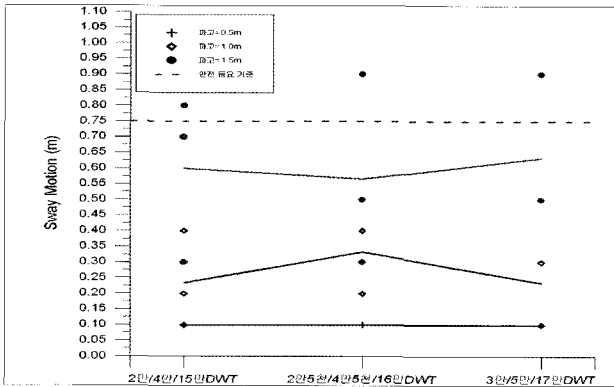


Fig. 14. Ship motion(Sway).

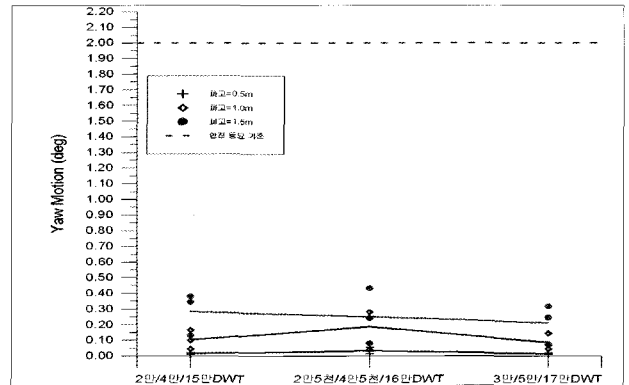


Fig. 18. Ship motion(Yaw).

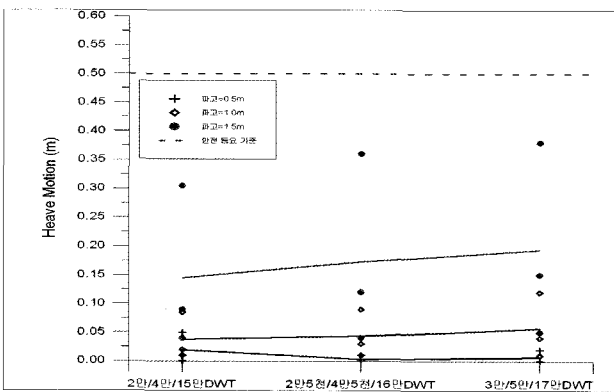


Fig. 15. Ship motion(Heave).

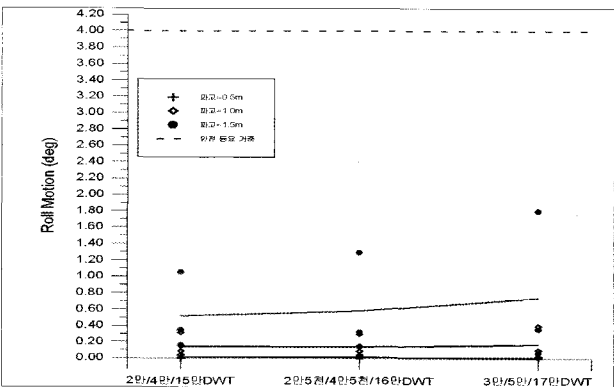


Fig. 16. Ship motion(Roll).

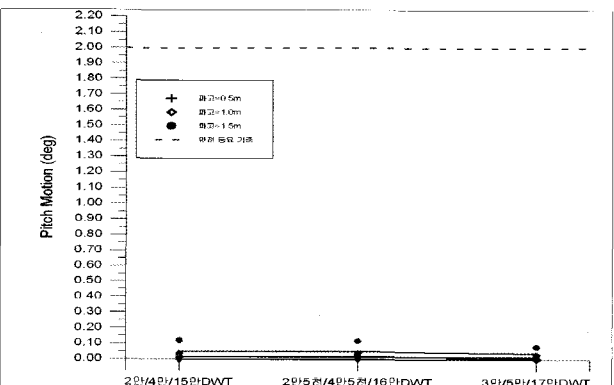


Fig. 17. Ship motion(Pitch).

4.3 구조 안전성 해석 결과

구조 안전성 검토는 선박종류 시뮬레이션이나 계류 안정성 검토시와 동일한 선박을 대상으로 외력조건을 변화시켜가며 블라드 및 계류용 돌핀에 대한 구조해석을 하고, 허용기준과 비교하여 안전성을 평가하였다. 각 케이스별로 표에 나타나 있는 값은 파고 1.5m, 풍속 20.7m/sec 및 단주기 파랑의 경우에 대한 해석 결과이다.

표상에서 “-” 부호는 선박의 크기가 증가함에 따라 응력이 감소함을 의미한다.

1) 20,000 DWT급 선박

말뚝식 돌핀 구조물인 OTK North 부두에 대하여 구조 안전성을 검토한 결과, Table 15에서 보여주는 바와 같이 배수톤수가 동일하다면 유의파고 1.0m 이하의 조건에서는 재화중량톤수 기준으로 선박의 크기가 50% 정도 증가하여도 안전성에 문제가 없었으며, 오히려 선박의 크기가 증가할수록 응력은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.

Table 15. Stability of structures at OTK-North berth

구 분		허용안전율	증가율(%)
B/D	강관 말뚝의 허용응력	1.0	-2.2
	강관 말뚝의 지반 지지력	369.92 tonf	-1.5
	강관 말뚝의 허용 인발력	101.21 tonf	-
	DECK 휨모멘트	68.50 tonf · m	-1.3
	DECK 전단	99.33 tonf	0.8
	DECK 뚫림전단	433.92 tonf	-1.5
M/D-1	강관 말뚝의 허용응력	1.0	-3.0
	강관 말뚝의 지반 지지력	226.25 tonf	-1.9
	강관 말뚝의 허용 인발력	93.30 tonf	-5.7
	DECK 휨모멘트	117.78 tonf · m	-1.3
	DECK 전단	157.65 tonf	-3.0
	DECK 뚫림전단	638.77 tonf	-1.9
M/D-3	강관 말뚝의 허용응력	1.0	-2.9
	강관 말뚝의 지반 지지력	226.25 tonf	-1.8
	강관 말뚝의 허용 인발력	119.20 tonf	-10.4
	DECK 휨모멘트	117.78 tonf · m	-1.9
	DECK 전단	157.65 tonf	-2.2
	DECK 뚫림전단	638.77 tonf	-1.8

주 B/D: Breasting Dolphin M/D: Mooring Dolphin

2) 40,000 DWT급 선박

케이슨식 돌핀 구조물인 UTT 부두에 대한 구조 안전성 검토 결과에서도 Table 16에서 보여주는 바와 같이 배수톤수가 일정할 경우 선박 크기의 증가에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다.

Table 16. Stability of structures at UTT berth

구분	구분	허용안전율	증가율(%)
B/D-1	활동에 대한 안정성	1.2	-4.5
	전도에 대한 안정성	1.2	1.0
	허용 지지력(kN/m ²)	838.708(SF 3.0)	10.2
B/D-3	활동에 대한 안정성	1.2	-0.2
	전도에 대한 안정성	1.2	-0.1
	허용 지지력(kN/m ²)	838.708(SF 3.0)	42.2
M/D	활동에 대한 안정성	1.2	-10.4
	전도에 대한 안정성	1.2	0.3
	허용 지지력(kN/m ²)	680.212(SF 3.0)	20.0

3) 150,000 DWT급 선박

말뚝식 돌핀 구조물인 SK-8 부두를 대상으로 한 구조 안전성 검토 결과, Table 17과 같이 배수톤수가 일정할 경우에는 선박 크기의 증가에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다.

Table 17. Stability of structures at SK-8 berth

구분	구분	허용치	증가율(%)
B/D-1	강관 말뚝의 허용응력	1.0	-0.3
	강관 말뚝의 지반 지지력	641.15 tonf	-6.0
	강관 말뚝의 허용 인발력	121.31 tonf	-61.9
	DECK 휨모멘트	283.80 tonf · m	-4.1
	DECK 전단	205.75 tonf	0.6
	DECK 뚫림전단	901.48 tonf	-6.0
B/D-3	강관 말뚝의 허용응력	1.0	-4.1
	강관 말뚝의 지반 지지력	641.15 tonf	-14.0
	강관 말뚝의 허용 인발력	105.29 tonf	-90.3
	DECK 휨모멘트	332.94 tonf · m	-29.7
	DECK 전단	241.23 tonf	-28.4
	DECK 뚫림전단	1313.59 tonf	-14.0
M/D	강관 말뚝의 허용응력	1.0	34.2
	강관 말뚝의 지반 지지력	641.15 tonf	10.7
	강관 말뚝의 허용 인발력	148.02 tonf	-
	DECK 휨모멘트	236.53 tonf · m	14.7
	DECK 전단	205.75 tonf	14.0
	DECK 뚫림전단	901.48 tonf	-1.9

주 B/D: Breasting Dolphin M/D: Mooring Dolphin

4.4 종합 안전성 해석 결과

선박조종 시뮬레이션과 계류 및 구조 안정성 해석 결과 배수톤수가 일정하도록 적재상태를 조정한다면 현재의 항만시스템

과 부두조건하에서 20,000 DWT급 선박은 50%, 40,000 DWT급 선박은 25%, 그리고 150,000 DWT급 선박은 13% 정도 선박의 크기를 증가시키더라도 안전성에는 문제가 없는 것으로 검토되었다.

Fig. 19는 선박조종 시뮬레이션, 계류 및 구조 안정성 해석 결과를 선형 근사하여 부두접안능력별로 계류가능 최대선박을 추정한 것이며, X축은 현재 부두접안능력(DWT 기준), Y축은 접안가능 최대선박(DWT)을 나타내고 있다.

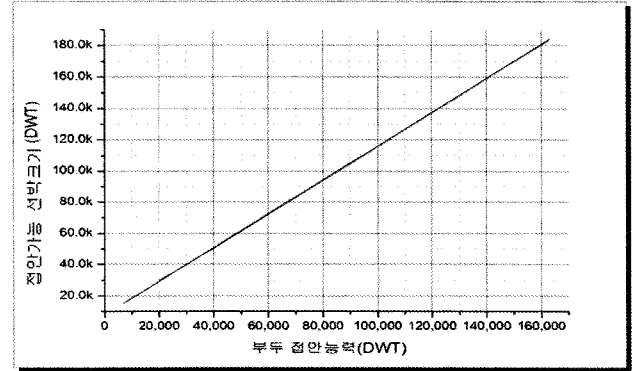


Fig. 19. Maximum ship size for berthing as per current berth limitations.

그러나 상기 그래프는 울산항 특정 부두인 OTK-North, UTT 및 SK-8 부두에 대해 각 부두별로 최대 접안선박을 대상으로 시뮬레이션한 결과를 일반화 한 것이므로, 부두의 구조 또는 계류시설의 성능이나 배치가 특이한 경우에는 이러한 특성들을 충분히 고려하여야 한다.

5. 결론

현행 하기재화중량톤수 기준으로 설정된 기존 부두시설에 대해 접안능력 조정가능성을 판단하기 위하여 부두 및 항만시설 설계조건과 자연 환경 요인 등을 고려하여 선박조종 시뮬레이션과 계류 및 구조 안전성 해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선박조종이나 계류·구조 안전성에 영향을 미치는 선박 요소는 선박의 질량과 길이 및 폭 등이므로 적재량의 변동이 많은 탱커 터미널의 경우에는 접안가능 최대선박을 나타낼 때 일반적으로 적용하는 재화중량톤수나 총톤수 보다는 배수톤수가 오히려 합리적이다.
- 2) 울산항을 대상으로 3개 부두 및 선박을 선정하여 배수톤수는 일정하게 두고 적재상태를 조정하여 재화중량톤수를 단계별로 증가시켜가며 안전성을 비교한 결과, 일정 범위(선박크기별 13~50%)내에서는 선박의 크기와 상관관계가 없는 것으로 나타났다.
- 3) 따라서 항로폭, 선회장, 선석 길이 및 계류라인의 배치 등에 문제가 없다면 탱커 터미널의 경우는 재화중량톤수 대

신에 배수톤수를 적용하여 접안가능 최대선박을 조정할 수 있을 것으로 본다.

- 4) 배수톤수가 동일하도록 적재상태를 조정하여 재화중량톤수 기준으로 선박의 크기를 증가시킬 경우 선박조종이나 부두시설 구조 안전성에는 거의 영향이 없었으며, 계류장력과 방충재의 압축력은 선박이 증대될수록 다소 증가하는 경향을 보였다.
- 5) 계류 안정성만 고려하여 파고 1.0m의 단주기 파랑 조건으로 접안가능 최대선박을 추정하면 20,000 DWT급 부두는 34,000 DWT의 실질적인 적재능력을 가지는 배수톤수까지, 40,000 DWT급 부두는 58,000 DWT의 실질적인 적재능력을 가지는 배수톤수까지, 그리고 150,000 DWT급 부두는 190,000 DWT의 실질적인 적재능력을 가지는 배수톤수까지 접안이 가능할 것으로 판단된다.
- 6) 선박조종 시뮬레이션과 계류 및 구조 안정성 해석 결과를 종합하여 판단하면, 현재의 항만시스템과 부두조건하에서 적재상태를 조정하여 실질적인 배수톤수를 일정하게 유지한다면 20,000 DWT급 부두는 50%, 40,000 DWT급 부두는 25%, 그리고 150,000 DWT급 부두는 13% 정도 선박의 크기를 증가시키더라도 안전성에는 문제가 없는 것으로 검토되었다.

이상의 결과는 울산항의 특정 부두를 대상으로 실험하여 추정된 것이므로 부두 구조 또는 계류시설의 성능이나 배치가 특이한 경우에는 이러한 특성들을 충분히 고려하여 조정하여야 한다. 특히 계류라인의 수평각과 수직각을 고려한 접안가능 최대 선체길이, Loading Arm의 전후 및 상하 이동 한계 등을 고려하여야 한다.

그러나 선박조종 시뮬레이션 및 계류·구조 안정성 해석시 외력조건은 예상 가능한 최대조건을 입력하였으며, 그 작용 방향도 외력의 영향이 가장 크게 반영되도록 설정하였기 때문에 실험 결과에는 어느 정도의 여유를 가지고 있다고 볼 수 있다.

계류 안정성 해석 결과 장주기 파랑이 입사될 때에는 작용 하중과 동요량이 대폭 증가하는 경향을 보이므로 수 분에서 수 시간의 주기를 가지는 부진동이나 장주기의 지진해일 등이 발생할 경우에는 계류로프 수의 증가 등 계류 안정성을 확보하기 위한 추가의 조치가 필요하다.

이 연구에서 모델 선박은 현재 해당 부두를 이용하는 선박 중 접안능력과 동일하거나 가장 근사한 재화중량톤수를 가지는 선박을 대상으로 하여 개발하였다. 따라서 모델 선박과 선체구조의 차이가 많은 특이한 선박에 이 연구의 결과를 그대로 적용하는 것은 무리가 따른다. 또한 울산항의 특정 부두를 대상으로 실험한 결과이므로 이 결과를 울산항 전체에 적용시키는 것에도 한계가 있다.

한편, 이 연구에서 채택한 외력조건은 과거 울산항의 기상과 해상 자료 기록을 검토하여 추출한 것이므로 이 연구 결과를 타 항만에 준용하는 것에도 한계를 가진다.

감사의 글

이 연구는 울산지방해양수산청과 (주)태영인더스트리의 지원으로 수행된 “울산항 항만시설 접안기준 연구” 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국해양수산연수원(2006), 울산항 항만시설 접안기준 연구 용역 보고서, pp. 223-225.
- [2] 해양수산부(2005), 항만 및 어항 설계기준(상권), pp. 681-703.
- [3] Gulf Publishing Company, Port Engineering Vol.(1989), pp. 1176-1189, pp. 1297-1303.
- [4] OCIMF(1992), Mooring Equipment Guidelines, pp. 14-16.

원고접수일 : 2007년 10월 02일

원고채택일 : 2008년 03월 21일