Coastal and Harbour Engineering

ISSN 1015-6348 (Print) ISSN 2287-934X (Online) www.kscejournal.or.kr

해안 및 항만공학

계류선박의 동요량을 고려한 하역한계파고 산정 방법에 관한 연구

곽문수* · 문용호**

Kwak, Moon Su*, Moon, Yong Ho**

A Study on Estimation of Allowable Wave Height for Loading and Unloading of the Ship Considering Ship Motion

ABSTRACT

This study proposed an estimation method of allowable wave height for loading and unloading of the ship considering ship motion that is affected by ship sizes, mooring conditions, wave periods and directions. The method was examined validity by comparison with wave field data at pier 8^{th} in Pohang new harbor. The wave field data obtained with wave height of $0.10 \sim 0.75 m$ and wave period of $7 \sim 13 s$ in ship sizes of $800 \sim 35,000 t$ on when a downtimes have occurred. On the other hand, the results of allowable wave height for loading and unloading of the ship in this method have obtained with wave heights of $0.19 \sim 0.50 m$ and wave periods of $8 \sim 12 s$ for ship sizes of 5,000,10,000 and 30,000 ton. Thus this method well reproduced the field data respond to various a ship sizes and wave periods. And the results of this method tended to decrease in $16 \sim 62\%$ when have considered long wave, and it is decreased in $0 \sim 46\%$ when didn't consider long wave than design standards in case of the ship sizes of $5,000 \sim 30,000 t$ on, wave period of 12 s and wave angle of 75° . The allowable wave heights for loading and unloading of the ship proposed by design standards are didn't respond to various the ship sizes and wave periods, and we have found that the design standards has overestimated on smaller than 10,000 ton.

Key words : Allowable wave height for loading and unloading of ship, Oscillation quantity of moored ship, Long period wave, Pohang New Harbor, Computer simulation

초 록

본 연구는 선박의 크기, 계류상태, 파랑의 주기, 파항 등의 영향을 반영하여 계류선박의 동요량을 계산하고, 그 결과를 이용하여 선석 전면에서 하역한계파고를 산정하는 방법을 제시한 것이다. 여기서는 포항신항의 제 8부두에 본 방법을 적용하고 하역중단시 현지 파랑 관측자료와 비교 하여 그 타당성을 검증하였다. 하역중단시 현지 선박의 크기는 800~35,000ton이었으며, 이 때 관측된 파랑은 파고 0.10~0.75m, 주기 7~13s 이었다. 본 방법에 의한 하역한계파고는 5,000ton, 10,000ton, 30,000ton 선박에 대하여 파고 0.19~0.50m, 주기 8~12s로 계산되었으며, 본 방법은 파랑의 주기 변화 및 선박의 크기에 대응하여 하역중단시 현지 파랑 관측 결과를 잘 재현하였다. 한편 본 방법에 의한 하역한계파고는 선형 5,000~30,000ton, 주기 12s, 선박에 입사하는 파랑의 각도가 75°일 때, 설계기준의 하역한계파고에 비해서 장・단주기 파를 고려하면 16~62%, 단주기 파랑만 고려하면 0~46% 감소하였다. 또한 설계기준에 제시된 하역한계파고는 주기 변화 및 선형에 따라 대응하지 못하며, 10,000ton 이하의 선박에 대해서는 과대 평가되어 있음을 확인하였다.

검색어: 하역한계파고, 선박 동요량, 장주기파, 포항신항, 수치모의

Received January 27, 2014/ revised February 21, 2014/ accepted March 15, 2014

^{*} 정회원·교신저자·명지전문대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author·Myongji College·moonsu@mjc.ac.kr)

^{**} 대영엔지니어링 부설연구소 사원 (jau84@dyengco.com)

1. 서론

현재, 항만 및 어항 설계기준의 박지 정온도는 연간 97.5% 이상의 가동율을 확보하도록 규정하고 있으며, 계류시설 전면의 하역한계파고는 소형선 0.3m, 중·대형선 0.5m, 초대형선 0.7~1.5m 로 되어 있다. 하역한계파고는 하역허용파고라는 의미로도 사용되 며, 계류시설 전면의 파고가 하역한계파고를 초과하면 하역작업이 불가능함을 의미하는 파고로서 항내정온도 및 하역가동율 산정의 기준이 되는 값이다. 설계기준에 제시된 하역한계파고는 선박의 크기를 3등급으로 구분하고 각 등급은 일률적인 파고 값을 적용하고 있으나, 현지에서 하역중단을 발생시키는 파고는 선박의 크기, 계류시스템의 상태, 파랑의 주기 및 파향, 기상 등 많은 요소에 의해서 달라진다. 특히, 항 입구의 폭이 항내 수면적에 비해 매우 좁은 경우나, 장방형의 항내 슬립에서는 장주기 파랑의 다중반사로 인하여 공진현상이 발생하고 수면진동이 계류선박의 동요량을 더 욱 증가시킴으로써 하역중단을 일으키는 사례도 발생한다. 이러한 장주기 파랑의 영향은 선형이 커질 수록 하역중단에 결정적인 요인으로 작용하기도 한다. 따라서, 하역한계파고를 현지 파랑과 부합되도록 산정하기 위해서는 선박의 크기, 계류상태, 단주기파 및 장주기파의 영향 등을 반영하여 산정할 필요가 하다.

선박 동요 해석에 관한 연구성과들을 살펴보면, Kubo et al. (1988)은 선박 동요 해석에 있어서 간편성과 실용성 때문에 그 동안 많이 사용된 strip 법을 안벽이 있는 경우에 적용 가능하도록 확장한 해석 모형을 제안하였다. 이 모형은 방사문제는 Green 함수법을 산란문제는 strip법을 사용하고 있으나, strip법은 surge 방향의 힘을 구할 수 없기 때문에 선체 단면에 작용하는 수압의 전후 방향 성분을 파 강제력으로 표시하였다. 그리고 Ueda and Shiraisi (1988)는 계류선박의 동요량을 계산하고 하역 가능여부를 정량적인 동요량 값으로 표시한 선종별 하역허용동요량을 제시하 였으며, Kubo et al. (1993)은 계류시스템의 특성을 반영하여 선박 동요 해석을 수행하고 하역가동율을 간이적으로 산정할 수 있는 개략식을 제안하였다. 또한 Ueda and Shiraisi (1994)는 계류선박 의 동요량을 수치모의하고 하역허용동요량을 이용하여 하역가동율 을 평가하였다. 이 방법은 실무적으로 유용하지만 많은 계산 량이 소요되었다. 그리고 Kubo et al. (1995)은 계류선박의 동요를 고려 하여 하역가동율을 계산할 때 파군과 부진동에 의한 장주기파의 영향이 중요함을 관측 결과로부터 입증하였다. 또한 Yuen et al. (1986)이 미국 San Pedro 항만의 중장기 발전 개발 계획안에 대해서 수치모형으로 동요량을 해석하고 계류시스템의 최적안을 제시하였다. Rafael et al. (1998)은 우루과이 엘도라도 항만의 개발 계획안에 대해서 3차원 수리모형실험을 실시하여 동요량을 측정하였고, Sakakibara et al. (2001)은 여러대의 카메라를 설치하 여 동요량을 관측하고, Kubo 등의 모형을 사용하여 관측치와 비교 하였다. 그리고 Mollen et al. (2003)은 수치모형을 이용하여 동요 해석을 실시하고 관측된 복원력과 비교하여 수치모형을 검증하였다.

한편, Cho and Choi (1992; 1993)는 항만내의 파랑응답과 항내 에 계류된 선박의 운동응답을 선형포텐셜 이론으로 해석하고 모형 실험 결과와 비교하였으며, 선박의 운동응답에 대한 계산 결과는 실험결과와 정성적으로는 일치하였으나 정량적으로는 차이를 보였 다. 그리고 Cho et al. (2006)은 지진해일이 항내로 내습하였을 때 계류중인 선박의 동요량을 수치계산하고 지진해일이 선박운동 에 미치는 영향 및 계류삭과 방현재에 작용하는 하중을 계신하였다. 또한 Kwak et al. (2006)은 단주기 파랑이 작용할 때 선박 동요량을 계산하고 하역한계파고를 산정하여 하역가동율을 산정하는 방법을 제시하였으나, 장주기 파랑의 영향을 고려하지는 못하였다. 그리고 Kwak et al. (2013)은 장주기 파랑에 의한 항만공진현상을 해석하 고 선박의 고유주기와 일치하는 공진주기를 파악하여 단주기 파랑 및 장주기 파랑이 선박에 작용하였을 때 선박 동요량을 해석할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구는 단주기 파랑과 장주기 파랑이 선체에 동시에 작용할 때, 선박의 동요량을 계산하고 선석 전면에서 선형별, 주기별, 입사 각도별 하역한계파고를 산정하는 방법을 제시한 것이다. 여기서는 포항신항의 제 8부두에 대하여 본 방법을 적용하고 하역중단시 관측된 현지 파랑 관측자료 및 설계기준에 제시된 하역한계파고와 비교하여 본 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 본 연구에서는 장주기 파랑의 고려 유무에 따라 각각 하역한계파고를 산정하고 장주기 파랑이 하역한계파고에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 선박 동요량을 고려한 하역한계파고 산정 방법

선박 동요량을 고려한 하역한계파고 산정 방법은 단주기 및 장주기 파랑에 의한 계류 선박의 동요량을 계산하고, 하역 가능 여부를 판단할 수 있는 하역허용동요량을 이용하여 선종, 선형, 파향, 주기별로 하역이 가능한 한계파고를 산정하는 것이다. 이 방법을 구체적으로 설명하면, 먼저 선형마다 파랑조건 및 계류조건 등을 달리하여 계류 선박의 동요 시뮬레이션을 수행한다. 다음은 선체 입사 파고와 동요량이 대체적으로 선형 관계에 있으므로 각 주기 별로 양자의 관계에 대한 회귀식을 구한다. 이 회귀식과 하역허용동요량과의 교점에 해당하는 파고가 하역한계파고이며 이것을 주기별로 구한다. 이러한 과정은 각 동요 성분별로 반복하여 적용된다. 또한 방현재에 대해서는 방현재의 최대변위가 허용변위 를 넘지 않는 파고를 구하고 이를 하역한계파고로 한다(Fig. 1). 여기서 하역허용동요량은 Table 1과 같으며, 표에서 일반화물선, 유조선(내항 및 외항), 곡물운반선, 광석운반선은 Ueda and Shiraisi (1988)가 제안한 값이고, 그 이외의 선종은 Bruun (1981)이 제안한 값이다.

최종 하역한계파고는 각 동요 성분별 및 방현재의 최대 변위로부

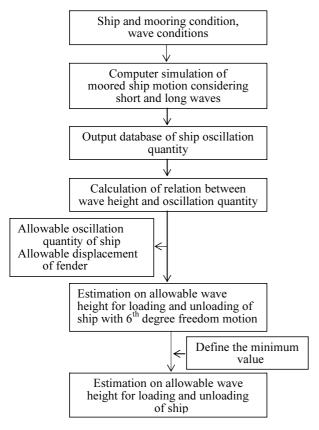


Fig. 1. Estimation Process on Allowable Wave Height for Loading and Unloading of the Ship Considering Ship Motion

Table 1. Allowable Oscillation Quantity of Ship Motion for Loading and Unloading

Type of ship	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)
General cargo ship*	±1.0	+0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
Grain carrier*	±1.0	+0.5	±0.5	±1.0	±1.0	±1.0
Ore carrier*	±1.0	+1.0	±0.5	±3.0	±1.0	±1.0
Oil tanker* (outer harbor)	±1.0	+0.75	±0.5	±4.0	±2.0	±2.0
Oil tanker* (inner harbor)	±1.5	+0.75	±0.5	±3.0	±1.5	±1.5
Container ship** (L0/L0)	±0.5	+0.3	±0.3	-	-	-
Container ship** (R0/R0-Side)	±0.3	+0.2	±0.1	-	-	-
Car carrier**	±0.3	+0.2	±0.1	-	-	-

^{*}proposed by Ueda and Shiraishi(1988), **proposed by Bruun(1981)

터 구해진 하역하용파고를 비교하여 그 최소값을 해당 조건의 하역 한계파고로 한다. 단, 이 파고 값이 현행 설계기준에 제시된 하역한 계파고를 초과할 때는 설계기준의 값을 하역한계파고로 한다.

3. 선박 동요 해석

3.1 수치모형

유체 중에서 계류된 선체에 작용하는 힘으로는 선체의 운동에 의해 발생하는 유체 동력학적 힘과 유체 정력학적 힘, 입사파에 의해 선체에 작용하는 파 강제력, 계류장치에 의해 작용하는 계류력 등이 있다. 여기서 파 강제력이란 동유체력들 중 하나이고 선박을 항해 다가오는 파들에 의해 배가 받는 힘을 이야기 한다. 이러한 힘들을 이론적으로 정확하게 구하기는 불가능하다. 그러므로 여러가지 가정을 함으로써 물리적 모델을 계산이 가능한 수학적 모델로 바꾸어야 한다.

본 연구에 사용된 모형에서는 속도포텐설을 도입한 후 선체의 운동이 미소하다고 가정하여 선체의 운동을 변수로 하여 유체의 동력학적 힘과 파 강제력을 선형화하여 구하였다. 실제의 해상상태는 매우 불규칙적이어서 선박의 운동을 직접 관측 하는 것은 매우 복잡하다. 그러므로 파고가 작다고 가정하여 불규칙적인 해상상태를 규칙적인 선형파들의 중첩으로 생각하여, 규칙파 중에서의 선체 운동을 계산한 후 스펙트럼해석을 통하여 불규칙과 중에서의 운동을 예측한다. 본 연구에 있어서는 유의파고와 특성주기의 변수로서 표현이 가능한 Bretschmeider 스펙트럼을 이용하여 불규칙 해상상태를 가정하였다.

선박의 계류장치로는 계류삭과 방현재가 있는데 두 가지 모두 선체의 운동에 대해 비선형성을 갖는다. 그러나 본 연구에서는 주파수 영역에서의 선체의 운동을 해석하기 위해서 이들이 운동에 대해 선형성을 갖는다고 가정하여 계류력을 구하였다. 규칙파 중에 서 선체의 선형운동 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\left[-\omega^{2}(M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + R_{jk} \right] a_{k} = F_{j}$$
 (1)

여기서.

 M_{jk} = 선체의 질량, A_{jk} = 선체부가질량, B_{jk} = 감쇠계수, R_{jk} = 복원력, ω = 파 진동수, $i=\sqrt{-1}$, a_k = 선체운동의 진폭, F_j = 파 강제력

위 식에서 선체에 작용하는 유체력으로는 부가질량과 감쇠력으로 나타내어지는 동유체력, 파랑에 의해 작용하는 파 강제력, 선체 운동에 의해 발생하는 부력의 변화에 의해 선체에 작용하는 유체 정력학적 힘이 있다. 또한 계류장치에 작용하는 계류력이 선박의

운동에 대해 복원력으로 작용한다(Ann, 1986; Ann and Rhee, 1987). 이러한 여러 종류의 힘들을 구하는 방법은 Kwak et al. (2013)에 자세히 설명되어 있다.

본 연구에서 사용한 선박 동요 해석 모델은 Ann (1986), Ann and Rhee (1987)가 개발한 Green 함수 모형을 기초로 하여 단주기 및 장주기 파랑에 의한 동요 해석이 가능하도록 장·단주기 파랑의 파 강제력을 각각 구하여 합성하는 부분을 추가한 것이다. 본 모형은 기본방정식을 적분방정식으로 변환하여 해를 구하는 Green 함수법 을 사용하여 방사문제와 산란문제를 풀게 된다. 특히, Green 함수법 은 적분방정식을 경계치 문제로 풀게 되므로 주어진 경계조건으로 경계치를 미리 산정해 놓으면 계산시간이 매우 짧아지며, Green 함수를 이용하여 두 물체의 상호 영향력을 해석하므로 안벽과 부유체의 상호 거동 해석에 매우 편리하다.

3.2 계류선박의 동요량 계산

3.2.1 동요량 계산 조건

본 연구에서는 포항신항 제 8부두의 항내 슬립에 위치한 선석을 대상으로 일반화물선 5,000ton, 10,000ton, 30,000ton에 대하여 동요량을 계산하였다(Fig. 2). 계류선박은 계류 장치에 의한 복원력 이 동요량에 큰 영향을 미치므로 동요 해석에 있어서 계류시스템의 특성을 수치모형에서 잘 재현할 필요가 있다. 본 논문에서는 계류삭 과 방현재의 계류장치에 대한 입력정보를 반영하여 계류장치에 의한 복원력을 해석하였다. 계류삭과 방현재의 입력정보는 선인장

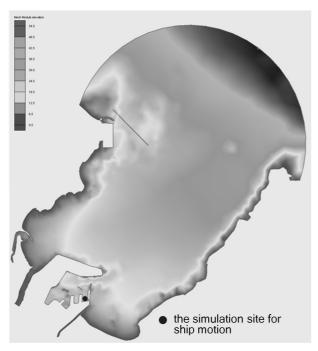


Fig. 2. Bathymetry of Youngil-Man Area Using Wave Field Analysis and the Simulation Site for Ship Motion

력, 탄성계수, 계류력이 작용하는 위치좌표, 계류삭의 경사각 및 회전각 등이 주어졌다. 그밖에 선박의 동요해석에 사용된 선박의 제원 및 계류삭, 방현재의 수를 정리하면 Table 2와 같다.

본 연구 대상 지역인 포항신항 제 8부두의 항내 슬립 안쪽은

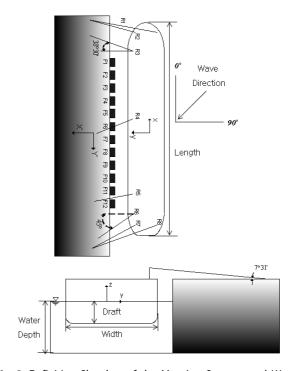


Fig. 3. Definition Sketches of the Mooring Systems and Wave Direction

Table 2. Ship and Mooring Conditions for Simulation of Pohang **New Harbor**

Type of ship	General cargo ship					
Weight (ton)	5,000	10,000	30,000			
Length (m)	98	120	171.6			
Width (m)	14.0	17.42	26.0			
Draft (m)	4.5	6.0	7.0			
Wetted area (m ²)	2534.39	3876.04	4461.60			
Mooring lines (ea)	8	8	8			
Initial tension of the mooring rope (ton)	1.50	2.20	3.50			
Modulus elasticity of the mooring rope (ton/m)	7.0	7.0	7.0			
Fenders (ea)	12	12	12			
Initial tension of the fenders (ton)	-1.05~-2.71	-1.05~-2.71	-1.05~-2.71			
Modulus elasticity of the fender (ton/m)	130.0	130.0	130.0			
Basin depth (m)	10.0	10.0	10.0			

Table 3. Short Waves Conditions for Simulation of Pohang New Harbor

$H_{s}\left(m\right)$	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1.0
$T_{s}(s)$	8, 9, 10, 11, 12
Wave direction (°)	15, 45, 75

Table 4. Long Waves Condition for Simulation of Pohang New Harbor

H _s (m)	0.12
$T_{s}(s)$	60
Wave direction (°)	15

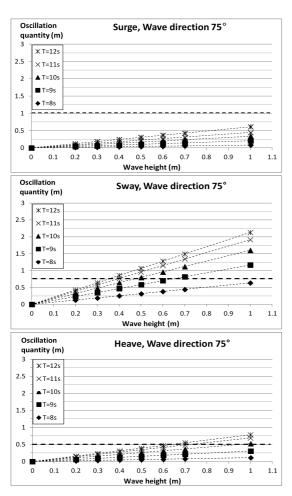
안벽에 의한 다중반사로 장주기 뿐만 아니라 단주기 파랑이 중복파를 형성한다. 또한 항내 슬립에 계류된 선체는 입사파랑의 직접적인 영향을 받기도 하고 안벽에 의한 반사파 및 중복파의 영향을 받게된다. 따라서 동요 계산은 여러 개의 파고 및 주기 성분이 다양한 입사각도로 선체에 작용하는 현상을 시뮬레이션하게 된다. 본 계산

에서 계류선박에 대한 입사파의 방향은 입사파 및 반사파의 선체 입사각도를 반영하여 15°, 45°, 75°로 선정하였다. 단주기 파랑조건 의 주기는 8, 9, 10, 11, 12s로 하였고, 파고는 0.2~1.0m의 범위로 하였다(Table 3). 이는 항내 파고관측자료(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010)로부터 얻어진 하역중단시 관측파랑 의 분석 결과를 이용한 것이다. 또한 장주기 파랑 조건은 CGWAVE 모형(Demirbilek and Panchang, 1998)을 이용하여 포항신항에 대한 항만 공진해석을 실시하고 그 결과로부터 공진주기인 동시에 대상선박의 고유주기인 주기 60s의 파랑을 선정하였으며, 이때 파고 0.12m는 하역중단시 파랑 관측자료의 장주기 파 분석 결과를 이용한 것이다(Table 4).

3.2.2 동요량 계산 결과

(가) 단주기 파랑만 고려한 경우

단주기 파랑만 고려한 경우는 주기 8~12s의 단주기 파랑이 선체에 입사할 때 동요랑을 계산한 것이다. 계산 예로써, 파랑이 10,000ton 선박에 75°의 각도로 입사한 경우에 대하여 각 동요



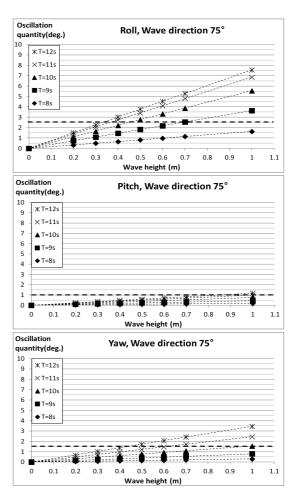


Fig. 4. Computer Simulation Results of Oscillation Quantity Excited by Short Waves (10,000ton, Wave Direction of 75°)

성분별로 유의파고와 동요량의 관계를 나타내면 Fig. 4와 같다. 그림에서 점선은 Ueda and Shiraisi (1988)가 제안한 하역허용동요 량을 나타낸다. 하역허용동요량의 의미는 선박의 동요량이 하역허 용동요량을 초과하지 않을 때는 하역이 가능하고, 허용동요량을 초과하면 하역이 불가능함을 정량적인 수치로 제안한 것이다.

동요량의 변화를 보면 동일 유의파고에서는 파 주기가 길어질 수록 동요량이 커지는 경향을 보인다. roll의 경우는 주기 8~9s에서 는 주기가 길어질 수록 동요량이 큰 폭으로 증가하며, 11~12s에서 는 주기변화에 따른 동요량의 증가 폭이 작아졌다. 또한, 동일 주기에서는 파랑이 선박의 측면으로부터 입사 할 수록 동요량이 커지며 이때 주요 동요성분은 sway, roll인 것을 알 수 있다.

(나) 장·단주기 파랑을 고려한 경우

장·단주기 파랑을 고려한 경우는 단주기 파랑과 장주기 파랑이 선체에 동시에 작용할 때의 동요량을 계산한 것이다. 선박의 선형과 계류조건은 단주기 파랑만 계산한 경우와 동일하다. 계산 결과는 10,000ton 선박에 단주기 파랑이 75°로 입사하는 경우에 대하여

Oscillation Surge, Wave direction 75° quantity (m) ж T=12s × T=11 ▲ T=10: ■ T=9s ◆ T=8s 0.1 0.2 0.3 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.1 Wave height (m) Oscillation Sway, Wave direction 75 quantity (m) ¥ T=12¢ 2.5 ×T=11 ▲T=10 ■ T=9s 1.5 ◆ T=8s 0.5 0 0.6 0.7 0.8 1.1 Wave height (m) Oscillation Heave, Wave direction 75 quantity (m) **≭T=12** ×T=119 ▲ T=10s ■ T=9s 1.5 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.1 0.3 0.4 1.1 Wave height (m)

각 동요성분별로 유의파고와 동요량의 관계를 그래프로 도시하여 Fig. 5에 나타내었다.

계산 결과는 파 주기가 길고 유의파고가 클 수록 동요량이 증기하 게 되며, 입사각이 커질 수록 동요량이 증가하였다. 특히, Surge 성분은 단주기 파랑만 고려한 경우는 주기와 파고가 커짐에 따라 동요량이 완만하게 증가하였으나, 장주기 파랑이 동시에 작용하면 단주기 파랑의 주기와 파고에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 이것은 대상선박의 surge 동요 고유주기가 장주기 파랑과 상호작용 을 일으키어 surge 동요를 더욱 크게 증가시킨 결과로 생각된다.

4. 연지 항만의 하역한계파고 산정

4.1 장주기 파랑을 고려한 하역한계파고 산정 방법

장주기 파랑이 항내로 내습할 경우 항만공진현상이 발생하고 특정 공진주기가 선박의 고유주기와 일치하면 동요량이 크게 증가 하므로 하역한계파고는 감소한다. 선박의 하역한계파고는 단주기 파뿐만 아니라 장주기 파랑을 고려하여 산정하여야만 실제 현상에

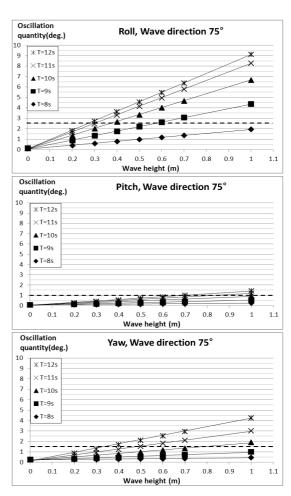


Fig. 5. Computer Simulation Results of Oscillation Quantity Excited by Short and Long Waves (10,000ton, Wave Direction of 75°)

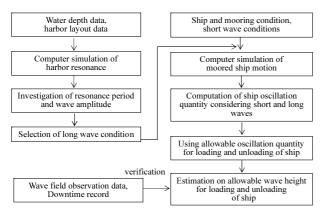


Fig. 6. Estimation Process on Allowable Wave Height for Loading and Unloading of the Ship Considering Ship Motion Excited by Long Waves

근접한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 장주기 파랑에 의한 선박 동요량 및 하역한계파고를 Fig. 6과 같이 산정하였다. 먼저 CGWAVE모형을 사용하여 항만 공진해석을 실시하고 공진주기와 그 때의 진폭을 찾아내었다. 다음은 공진해석에서 찾아낸 주기와 진폭을 선박 동요 해석모형의 장주기 파랑조건으로 사용하였다. 그리고 여기서는 각 선형마다 장·단주기 파랑조건 및 계류조건을 다르게 하여 장주기 파 및 단주기 파가 선체에 작용하는 힘, 즉 동유체력을 각각 계산하고 다시 이들을 합성하여 선체에 작용하는 외력으로 부여하였다. 동요 시뮬레이션으로부터 얻어진 계류선박의 동요량은 입사파고에 대응하는 동요량의 변화를 그래프로 표시하고, 각 주기별로 파고와 동요량과의 회귀식을 구하였다. 그 다음 단계는 앞에서 설명한 하역한계파고 산정 방법과 동일한 과정으로 진행된다.

4.2 포항신항의 하역한계파고 산정 결과

본 연구에서는 포항신항 제 8부두의 항내 슬립에 5,000ton, 10,000ton, 30,000ton의 선박이 계류되었을 경우를 상정하고, 단주기 파랑만 고려한 경우와 장·단주기 파랑을 고려한 경우의 하역한 계파고를 산정하였다.

Tables 5 and 6은 파랑이 10,000ton 선박에 75°의 각도로 입사했을 때, 입사파의 주기별로 하역한계파고를 산정한 예이다. 표에는 선박 조건과 하역허용동요량 및 방현재의 허용범위와 바람조건, 파향, 동요 성분별 유의파고, 하역한계파고 결과를 나타내었다. Table 5는 단주기 파랑에 의한 선박 동요랑을 계산하여 하역한계파고를 산정한 결과로써 입사파 주기가 8~12s일 때 하역한계파고는 0.33~0.50m로 산정되었고, 이 때 roll 성분의 결과가 하역한계파고로 산정되었다. Table 6은 장·단주기 파랑에 의한 선박 동요랑을 계산한 후 하역한계파고를 산정한 결과로써 입사파의 주기가 8~12s일 때 하역한계파고를 산정한 결과로써 입사파의 주기가 8~12s일 때 하역한계파고는 0.22~0.50m로 산정되었다.

Table 5. Results of Allowable Wave Height for Loading and Unloading with Change of Wave Period at Pier 8 in Pohang New Harbor (10,000ton, Wave Direction of 75°, Short Waves only)

Type of Ship	General	cargo	Allowable	llowable oscillation			
Ship size	10,000 DWT		SURGE		1.0m		
Wind dir.	no w	rind	SWAY	SWAY		0.75m	
Wind speed	0m	/s	HEAVE	HEAVE		0.5m	
Wave dir.	75	0	ROLL			2.5°	
			PITCH			1.0°	
			YAW		1.5°		
			Fender		0.575m		
Allowa	ble wave h	eight for l	oading and u	ınloa	ding (m)	
Wave period	8	9	10 11			12(s)	
SURGE	12.2	4.84	2.97	2	.23	1.64	
SWAY	1.17	0.64	0.47	0	.39	0.35	
HEAVE	4.36	1.62	0.95	0	.72	0.64	
ROLL	1.53	0.69	0.45 0.36		.36	0.33	
PITCH	5.07	2.20	1.33	1.00		0.84	
YAW	4.98	1.88	0.97	0	.61	0.43	
Results	0.50	0.50	0.45	0	.36	0.33	

Table 6. Results of Allowable Wave Height for Loading and Unloading with Change of Wave Period at Pier 8 in Pohang New Harbor (10,000ton, Wave Direction of 75°, Short and Long Waves)

Type of ship	General	cargo	Allowable	Allowable oscillation		quantity		
Ship size	10,000 DWT		SURGE		1.0m			
Wind dir.	no w	ind	SWAY		0.75m			
Wind speed	0m	/s	HEAVE	2		0.5m		
Wave dir.	75	•	ROLL			2.5°		
			PITCH			1.0°		
			YAW			1.5°		
-			Fender		0.575m			
Allowa	ble wave h	eight for l	oading and u	ınloa	ding (m)		
Wave period	8	9	10 11		12(s)			
SURGE	30.59	5.06	2.03	1	.21	0.70		
SWAY	1.04	0.50	0.35	0	.29	0.26		
HEAVE	4.91	1.42	0.79	0	.59	0.52		
ROLL	1.27	0.52	0.32	0	.25	0.22		
PITCH	5.69	2.00	1.13	0	.82	0.68		
YAW	7.71	1.76	0.72	0	.38	0.23		
Results	0.50	0.50	0.32	0	.25	0.22		

이와 같은 과정으로 산정된 포항신항 제 8부두에서의 하역한계 파고는 선형별로 입사파 주기와 각도에 따라 정리하면 Tables 7~9와 같다.

Table 7은 5,000ton에 대한 결과로써 단주기 파랑은 0.27~0.50m, 장·단주기 파랑은 0.19~0.50m로 산정되었다. 그리고 Table 8은 10,000ton에 대한 결과로써 단주기 파랑은 0.33~0.50m, 장·단주 기 파랑은 0.22~0.50m로 산정되었다. 또한 Table 9는 30,000ton에

Table 7. Results of Allowable Wave Height for Loading and Unloading with Change of Wave Period and Direction at Pier 8 in Pohang New Harbor (5,000ton, Unit in Meter)

Wave period (s)	8	9	10	11	12
Short and long wave (75°)	0.50	0.39	0.25	0.22	0.19
Short and long wave (45°)	0.50	0.50	0.42	0.30	0.25
Short and long wave (15°)	0.50	0.50	0.42	0.32	0.28
Short wave only (75°)	0.50	0.50	0.35	0.30	0.27
Short wave only (45°)	0.50	0.50	0.48	0.35	0.30
Short wave only (15°)	0.50	0.50	0.48	0.37	0.32
Design standard	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

Table 8. Results of Allowable Wave Height for Loading and Unloading with Change of Wave Period and Direction at Pier 8 in Pohang New Harbor (10,000ton, Unit in Meter)

8	9	10	11	12
0.50	0.50	0.32	0.25	0.22
0.50	0.50	0.50	0.38	0.33
0.50	0.50	0.50	0.40	0.35
0.50	0.50	0.45	0.36	0.33
0.50	0.50	0.50	0.45	0.39
0.50	0.50	0.50	0.48	0.42
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50	0.50 0.50 0.32 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.45 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50	0.50 0.50 0.32 0.25 0.50 0.50 0.50 0.38 0.50 0.50 0.50 0.40 0.50 0.50 0.45 0.36 0.50 0.50 0.50 0.45 0.50 0.50 0.50 0.48

Table 9. Results of Allowable Wave Height for Loading and Unloading with Change of Wave Period and Direction at Pier 8 in Pohang New Harbor (30,000ton, Unit in Meter)

8	9	10	11	12
0.50	0.50	0.50	0.50	0.42
0.50	0.50	0.50	0.50	0.45
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50	0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50

대한 결과로써 단주기 파랑은 0.50m, 장·단주기 파랑은 0.42~0.50m 로 산정되었다. 여기서, 본 방법에 의한 결과는 입사파의 주기가 12s일 때 0.19~0.50m를 나타내어 설계기준 대비 16~62% 감소하 였다. 이러한 결과는 항만 설계시 항내정온도가 설계기준에는 만족 할 지라도 선박 동요량의 증가로 인하여 하역중단 사례가 발생할 수 있음을 보여주는 것이다.

또한, 본 모형의 결과는 입사파의 주기가 12s인 경우, 입사

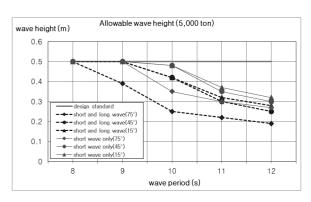


Fig. 7. Comparison Results Between Design Standard and Computer Simulation (5,000ton)

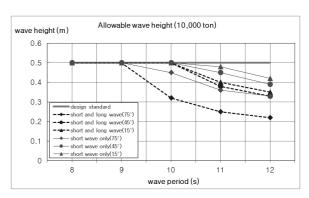


Fig. 8. Comparison Results Between Design Standard and Computer Simulation (10,000ton)

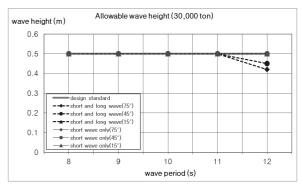


Fig. 9. Comparison Results Between Design Standard and Computer Simulation (30,000ton)

각이 15°일 때는 설계기준 대비 0~44% 감소하였고, 입사각이 45°일 때는 10~50%, 75°일 때는 16~62%감소하였다. 따라서, 본 방법에 의한 하역한계파고는 선형이 작을 수록, 입사파 주기와 입사 각도가 클 수록 설계기준 보다 더욱 감소하였다. 이것은 현행 설계기준은 선형, 입사파의 주기, 입사각도와 무관하게 산정되었지만, 본 방법은 선형, 입사파의 주기 및 입사각도 등을 반영하여 하역한계파고를 산정하였기 때문이다.

한편, 단주기 파랑만 고려한 경우와 장·단주기 파랑을 모두 고려했을 때의 하역한계파고를 설계기준과 비교하면 Figs. 7~9와 같다. 그림에서 회색 실선은 설계기준을 나타내고, 마크된 실선은 단주기 파랑만 고려한 경우, 마크된 점선은 장·단주기 파랑을 고려한 경우의 하역한계파고를 나타낸다. Fig. 7은 5,000ton에 대한 결과로써 장・단주기 파랑을 고려한 경우는 입사파 주기가 8s이후부터 설계기준보다 작아지기 시작하여 주기 12s일 때는 파향별로 0.19~0.28m를 나타내며, 단주기 파랑만 고려한 경우는 입사파 주기가 9s이후부터 설계기준보다 작아지기 시작하여 주기 12s일 때는 파향별로 0.27~0.32m를 나타내었다. 그리고 Fig. 8은 10,000ton에 대한 결과로써 장·단주기 파랑을 고려한 경우는 입사 파 주기 9s이후부터 설계기준보다 작아지기 시작하여 주기 12s일 때는 0.22~0.35m를 나타내며, 단주기 파랑만 고려한 경우는 주기 12s일 때 0.33~0.42m를 나타내었다. 또한 Fig. 9는 30,000ton에 대한 결과로써 장·단주기 파랑을 고려한 경우는 입시파 주기 11s이 후부터 설계기준보다 작아지기 시작하여 주기 12s일 때는 0.42~0.50m 를 나타내며, 단주기 파랑만 고려한 경우는 모든 주기 설계기준보다 큰 값을 나타내었다.

여기서 장주기 파랑이 하역한계파고에 미치는 영향을 파악하기 위하여 입사파 주기가 12s일 때, 장주기 파랑의 고려 유무에 따른 하역한계파고 결과를 비교하였다. 장주기 파랑을 고려한 경우는 고려하지 않은 경우보다 5,000ton은 8~16%, 10,000ton은 14~22%, 30,000ton은 10~16% 더 감소하였다. 특히, 30,000ton의 결과는

주기 12s일 때 단주기 파랑만 계산하면 설계기준보다 크게 산정되지만, 장주기 파랑을 고려하면 설계기준보다 작게 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 선박이 중·대형선인 경우는 장주기 파랑에 의한 동요량 증가가 하역한계파고 산정에 매우 중요하게 작용함을 알 수 있다.

4.3 하역중단시 파랑 관측자료와의 비교

본 연구에서는 포항지방해양항만청에서 실시한 대규모 항내 ·외 파랑관측으로부터 얻어진 자료(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010; Jeong et al., 2011) 중, 제 8부두의 항내 슬립에서 하역중단시 관측된 파랑자료를 분석하고 본 방법에 의한 하역한계파고 산정결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

Table 10은 입사각이 75°인 경우에 대해서 본 방법에 의한 하역한계파고 산정 결과와 현지 파랑관측 자료를 비교한 것이다. 표에는 하역중단시기, 선형, 하역중단시 관측된 파고 및 주기를 표시하였다. 또한 본 방법에 의한 하역한계파고는 단주기 파랑만을 고려한 경우와 장·단주기 파랑을 고려한 경우의 결과를 선박의 크기별로 정리하였고, 설계기준도 표시하였다.

포항신항 제 8부두의 항내 슬립에서 2008년 11월부터 2009년 1월까지 발생한 하역중단 사례는 대상선박이 1,200~35,000ton이었으며, 하역중단시 관측된 파랑은 단주기 성분의 경우 파고 0.10~0.75m, 주기 8~16s이었고, 장주기 성분은 파고 0.10~0.20m, 주기 48~60s이었다. 그리고 본 방법에 의한 하역한계파고는 5,000ton, 10,000ton, 30,000ton에 대한 결과로써 단주기 파랑만 고려한 경우는 파고 0.27~0.50m, 주기 8~12s이며, 장·단주기 파랑을 고려한 경우는 파고 0.19~0.50m, 주기 8~12s이다. 여기서 본 방법에 사용된 장주기 성분은 주기 60s, 파고 0.12m이다. 따라서 본 방법에 의한 하역한계파고는 장주기 성분을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우 보다 관측치에 더욱 근접하였다. 그리고 하역중단이 발생한실제 선박의 크기가 본 연구대상의 선박 크기와 정확히 일치하지는

Table 10. Comparison Results between Field Data and Computer Simulation in Case of Wave Direction of 75°

Dovertime duration	Downtime duration Field ship sizes Field data		Simu	lation results	Simulated ship	Design
Downtime duration	(ton)	(H_s, T_p)	Short waves (H _s , T _s)	Short and long waves (H _s , T _s)	sizes (ton)	standard
2008/11/09~11/11	3,500	0.35~0.45m, 8~16s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000	0.50m
2008/11/28~11/29	3,500~22,000	0.15~0.38m, 8~10s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000~30,000	0.50m
2008/12/14~12/15	3,700	0.10~0.38m, 7~10s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000	0.50m
2008/12/18~12/20	800~2,500	0.10~0.50m, 8~12s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000	0.50m
2008/12/21~12/23	4,500~17,000	0.15~0.65m, 8~11s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000~30,000	0.50m
2008/12/28~12/29	8,500	0.15~0.25m, 9~11s	0.33~0.50m, 8~12s	0.22~0.50m, 8~12s	10,000	0.50m
2008/12/31~2009/1/4	2,500~26,000	0.15~0.40m, 9~12s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000~30,000	0.50m
2009/01/09~01/15	1,500~35,000	0.10~0.50m, 9~13s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000~30,000	0.50m
2009/01/30~02/02	1,200~30,000	0.15~0.75m, 7~12s	0.27~0.50m, 8~12s	0.19~0.50m, 8~12s	5,000~30,000	0.50m

않으며, 현지 기상악화로 인한 강우 및 강한 바람이 하역중단에 영향을 미친 경우도 있어서 두 결과 사이에 오차는 발생하였지만 본 방법에 의한 하역한계파고는 선형 및 주기에 따라 관측치를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

한편 설계기준의 하역한계파고는 관측기간 동안 하역중단이 발생한 모든 선박의 크기가 중·대형선에 속하여 일률적으로 0.5m 로 적용되며, 이는 선형 및 주기에 따라 크게 변하는 실제 하약중단시 파고와는 많은 차이가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 선박의 크기, 계류상태, 단주기 및 장주기 파의 영향을 반영하여 선박 동요량을 계산하고 하역한계파고를 산정하 는 방법을 제시하였으며, 포항신항의 제 8부두에 본 방법을 적용한 결과 하역중단시 현지 파랑관측 자료를 잘 재현 하였다. 그리고 본 연구를 통하여 다음과 같은 사실을 확인하였다.

- (1) 본 방법에 의한 하역한계파고는 선형 및 선체 입사파의 주기 변화에 대응하여 실제 하역한계파고를 잘 재현하였다. 한편 설계기준에 제시된 하역한계파고는 선형 및 주기 변화에 따라 대응하지 못하며, 특히 10,000ton 이하의 선박에 대해서는 과대평가 되어 있음을 확인하였다
- (2) 본 방법에 의한 결과는 5,000ton, 10,000ton, 30,000ton 선박 에 대해서 장주기 파를 고려하면 설계기준의 하역한계파고에 비해서 16~62%감소하였고, 장주기 파를 고려하지 않으면 0~46% 감소하였다. 특히 30,000ton의 결과는 단주기 파랑만 작용할 때는 설계기준을 만족하였지만, 장주기 파랑이 작용할 때는 설계기준보다 감소하였다. 이러한 결과는 항만 설계시 현행 설계기준을 적용하면 항내 정온도가 만족되더라도 장주기 파랑이 선박의 동요량을 증가시켜서 하역불능 사례를 발생시킬 수도 있음을 나타낸 것이다.
- (3) 본 방법은 선형, 계류상태, 선체 입사파의 주기 및 입사 각도에 대응하여 하역한계파고를 산정할 수 있으므로 항내정온도 평가 및 하역가동률 산정시 보다 현실적인 결과를 도출하는데 매우 유용한 방법이 될 수 있을 것이다. 또한 본 방법의 정확도를 더욱 높이기 위해서는 향후 선박동요의 현지 계측 및 하역중단 시 현지 파랑관측자료의 축적이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0023136)의 연구결과 중 일부임.

References

- Ann, S. P. (1986). Analysis of moored ship motion using three dimensional source distribution method, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul Korea (in Korean).
- Ann, S. P. and Rhee, K. P. (1987). "The hydrodynamic interaction effects between two barges on the motion responses." Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 24, No. 1, pp. 29-34 (in Korean).
- Bruun, P. (1981). Port engineering, 3rd Edition, Gulf Pub.
- Cho, I. H. and Choi, H. S. (1992). "Wave responses and ship motions in a harbor excited by long waves (I)." Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 29, No. 2, pp. 38-47.
- Cho, I. H. and Choi, H. S. (1993). "Wave responses and ship motions in a harbor excited by long waves (II)." Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 87-93.
- Cho, I. S., Kong, K. Y. and Lee, Y. S. (2006). "A time domain analysis of moored ship motions considering tsunami resonant effects." Proceedings of the Spring Conference on Korean Institute of Navigation and Port Research, Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 30, No. 1, pp. 191-197 (in Korean).
- Demirbilek, Z. and Panchang, V. (1998). CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation, Technical Report CHL-98-xx, U.S. Army Corps of Engineers, pp. 6-11.
- Jeong, W. M., Ryu, K. H., Beak, W. D. and Choi, H. J. (2011). "Downtime analysis for pohang new harbor through long-term investigation of waves and winds." Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 23, No. 3, pp. 226-235 (in Korean).
- Kubo, M., Saitou, K. and Sakakibara, S. (1988). "Application of a strip method to the hull motion of a quay-front moored vessels." Proceedings of the 35th Japanese Conference on Coastal Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 35, pp. 682-686 (in Japanese).
- Kubo, M., Saito, K. and Oki, T. (1993). "Approximate calculation of ship motions under the prevention system of ship separation from quay wall." Journal of Japan Institute of Navigation, Vol. 89, pp. 15-21 (in Japanese).
- Kubo, M. and Sakakibara, S. (1995). "Effects of long period waves caused by wave groups and harbor oscillation in computation of wharf operation efficiency." Proceedings of Coastal Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 42, pp. 931-935 (in Japanese).
- Kwak, M., Chung, J., Ann, S. and Pyun, C. (2006). "Estimation of harbor operating ratio based on moored ship motion." Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 6B, pp. 651-660 (in Korean).
- Kwak, M. S., Moon, Y. H. and Pyun, C. K. (2013). "A study on analysis of moored ship motion considering harbor resonance."

- Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 2, pp. 595-608 (in Korean).
- Mollen, W., Ligteringen, H., Lem, J. C. vander, Waal, J. C. M. de (2003). "Behavior of a moored LNG ship in swell waves." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 1, pp. 15-21.
- Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office (2010). Field investigation report for swell analysis and improvement measure making of downtime in Pohang new harbor, Report of Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office (in Korean).
- Rafael, G., Eduardo, G., Fernando, P. (1998). "Utilization of moored vessels in hydraulic models of harbors." Coastal Engineering, ASCE, pp. 2979-2990.
- Sakakibara, S., Saitou, K. and Kubo, M. (2001). "A study on long-period ship motions in a harbor induced by a resonant large

- roll motion under long-period waves." Proceedings of ISOPE, The International Society of Offshore and Polar Engineers, Stavanger Norway, pp. 326-333.
- Ueda, S. and Shiraisi, S. (1988). The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Technical Report of Port and Harbour Research Institute, Japan, Vol. 27, No. 4, pp. 3-61 (in Japanese).
- Ueda, S., Shiraisi, S., Oshima, H. and Asano, K. (1994). "Proposal of allowable wave height and wharf operation efficiency based on the oscillations of ships moored to quay walls." Proceedings of Coastal Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 41, pp. 916-920 (in Japanese).
- Yeun, A. F., Burke, M. G. and Leung, T. C. (1986). "Ship motion study for the 2010 and 2020 plan in the san pedro bay california." Coastal Engineering, ASCE, pp. 2742-2755.