

항만공진현상을 고려한 계류선박의 동요 해석에 관한 연구

곽문수* · 문용호** · 편종근***

Kwak, Moon Su*, Moon, Yong Ho**, Pyun, Chong Kun***

A Study on Analysis of Moored Ship Motion Considering Harbor Resonance

ABSTRACT

This paper is proposed the computation method of moored ship motion considering harbor resonance, and estimated that the harbor resonance have an effect on moored ship motion. The computation of harbor resonance was used CGWAVE model and the computation of moored ship motion was used the Green function method expressed by three dimensions. This method was verified with the field observation data of moored ship motion, and the application of actual harbor was investigated with wave field data and down time record data in Pohang New Harbor. The resonance periods in Pohang New Harbor that obtained from wave field data were 80, 33, 23, 8 minute, which are the long waves, and 42, 54, 60 second, which are the infra-gravity waves inside harbor slip. The simulated results of harbor resonance were corresponded with the wave field data. This study was investigated on 5,000 ton, 10,000 ton and 30,000 ton ship sized in Pier 8 of Pohang New Harbor that the harbor resonance has effect on moored ship motion from simulated results of ship motion in case of included resonance and excluded resonance. In case of included resonance, the ship motion have increased by 12~400 percent when compared with results of excluded resonance. We could find that the harbor resonance have still more an effect on the surge and heave motions of a large size ship and the roll and yaw motions of a small size ship.

Keywords : Moored ship motion, Harbor resonance, Pohang New Harbor, Infra-gravity waves, CGWAVE model, Green function method

초 록

본 연구는 항만 공진 현상을 고려한 계류선박의 동요량 산정방법을 제시하고 공진현상이 선박의 동요에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 것이다. 공진 현상의 해석은 타원형완 경사방정식을 채용한 CGWAVE 모형을 사용하였고, 계류선박의 동요 해석은 3차원 Green 함수 모형을 사용하였다. 본 방법은 현지 계류선박의 동요량 계측 결과를 이용하여 타당성을 검증하였고, 포항신항의 최근 파랑 관측 자료와 비교하여 현지 항만의 적용성을 검토하였다. 파랑 관측 기록에서 얻어진 포항신항의 공진주기는 80분, 33분, 23분, 8분 등의 장주기 성분과 항내 슬립에서 발생한 주기 42초, 54초, 60초 등의 외중력과 성분이었으며 공진 해석 모형은 이들 공진주기를 잘 재현하였다. 본 연구에서는 포항신항의 제 8부두에 5,000톤, 10,000톤, 30,000톤의 선박이 계류되었을 때 공진 성분을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 동요량을 각각 산정하여 공진 현상이 선박 동요에 미치는 영향을 검토하였다. 공진 성분을 포함한 경우는 그렇지 않은 경우에 비하여 12~400 %의 동요량 증가를 보였다. 공진 현상이 동요량에 미치는 영향은 Surge, Heave 동요는 선박이 클 수록, Roll과 Yaw 동요는 반대로 선박이 작을 수록 커짐을 알 수 있었다.

검색어 : 계류선박동요, 항만공진, 포항신항, 외중력과, CGWAVE 모형, Green 함수 모형

* 정회원 · 교신저자 · 명지전문대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Professor, Myongji College · moonsu@mjc.ac.kr)

** 대영엔지니어링 부설연구소 사원 (jau84@dyengco.com)

*** 정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (ckpyun@mju.ac.kr)

Received September 13 2012, Revised November 8 2012, Accepted January 19 2013

1. 서론

우리나라 동남부에 위치한 항만들의 경우 외해와 접해있어 장주기 파랑의 내습으로 인한 항만 공진 현상이 빈번히 발생한다. 대표 항만으로는 포항신항, 영일만, 동해항, 감천항 등이 있다. 통상적으로 항내정온도는 평상시 원활한 하역작업을 수행하기 위한 정온구역 확보의 측면에서 검토된다. 하역중단의 주된 원인은 1분 이상의 장주기파와 10초 전후의 단주기파, 바람 및 계류 시스템에 의한 복합적인 선체운동으로 기인한다. 따라서, 항만의 정온도를 유지하기 위해서는 단주기 파랑의 효과적인 차단과 아울러 장주기 파랑에 의한 공진현상 및 그에 따른 선박동요 현상의 제어가 필요하다. 항만 공진현상을 고려하여 단주기 파랑과 장주기 파랑이 복합적으로 선체에 작용할 때의 외력을 산정하고 이들 외력에 의한 계류선박의 동요량을 산정할 수 있다면 선박의 동요로 인한 하역중단, 선박 및 계류장치의 파손 등의 피해를 줄이고 정온한 항만을 유지하여 하역가동률을 높일 수 있는 대책을 수립하는데 유용할 것이다.

최근 계류선박의 동요량을 해석하고 평가한 연구로는 Ueda and Shiraishi (1988)가 계류선박의 동요를 고려한 하역가동률 계산법을 제시하였다. 이 계산법은 선박의 하역허용 동요량에 의해 선석 전면에서의 하역한계파고를 파랑 및 주기 별로 도출하고, 항내 파고를 계산하여 하역가능 심해파고의 비 초과 확률을 구한 후 각 선석에서 하역가동률을 산정 한 것이다. Kubo et al. (1993)은 Ueda and Shiraishi (1988)가 제시한 계산법은 유효하지만 막대한 계산이 요구되고, 하역가동률이 파랑, 바람 등의 외력 뿐만 아니라 계류시스템의 특성에 의해서도 크게 좌우되는 것을 인지하고 선박 동요 모형을 사용하여 하역가동률을 간이적으로 산정 할 수 있는 개략 식을 제안하였다. 특히 동요에 영향을 주는 인자 중 계류시스템의 주 특성 인자인 방충공에 대해서 평가하였다. Ueda et al. (1994)은 선박의 동요 및 이미 제안한 하역한계파고를 이용하여 하역가동률을 산정 하였으며 대상 해역에서 선박 동요에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 파악하였다. Kubo and Sakakibara (1995)는 파군과 부진동에 의한 장주기 파랑이 하역가동률에 미치는 영향을 선박 동요 관점에서 평가하였다. 여기서는 대상 선박의 Surge 동요 고유주기와 장주기파의 주기가 비슷한 경우에 상호작용을 일으켜 동요가 크게 증가하고 하역가동률을 저하시키는 요인임을 지적하였다. 최근 Sakakibara et al. (2001)은 카메라를 사용하여 선박 동요량을 측정하고 수치모형으로 동요량의 시계열 해석을 하였다. 그리고 Mollen et al. (2003)은 선박동요 수치계산 결과와 실제 관측된 복원력을 비교하고 동요량과 일치함을 보였다. 한편, Cho et al. (2006)은 쓰나미를 대상으로 하여 항내 계류 중인 선박의 거동에 대한 수치시뮬레이션을 수행하여 쓰나미에 의한 선박 운동의 영향 및 계류사과 펜더에 작용하는 계류 하중을 계산하

였으며, Kwak et al. (2006)은 항만 설계 기준을 만족하는 항만에서 하역 중단 사례가 빈번히 발생하는 것을 감안하여 단주기 파랑이 작용할 때 계류선박의 동요량을 산정하여 하역가동률을 평가하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 선박의 고유주파수와 항만의 공진주파수가 일치하는 경우 선박의 동요량이 증가하여 하역 중단 및 선박의 피해를 일으키는 문제를 개선하기 위하여 항만 공진 현상이 계류선박의 동요에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 공진성분을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 동요량 산정 방법을 각각 제시하였다. 공진현상의 해석은 타원형 환경사방정식을 채용한 CGWAVE 모형을 사용하였고, 계류선박의 동요 해석은 3차원 Green 함수 모형을 사용하였다. 본 방법은 현지 계류선박의 동요량 측정결과를 이용하여 타당성이 검증되었고, 포항신항의 최근 파랑 관측 자료와 비교하여 현지 항만의 적용성을 검토하였다.

2. 항만 공진모형

2.1 지배 방정식

본 연구에서는 CGWAVE 모형을 이용하여 포항신항의 공진 현상을 해석하였다. CGWAVE 모형은 SMS (Surface water Modeling System) 패키지의 상용화된 유한요소 모형으로써 미국 군공병단의 해안 수리 실험실(Coastal & Hydraulics Laboratory)에서 사용하고 있으며 파랑의 천수, 굴절, 회절, 쇄파, 반사 및 바닥마찰 등을 고려할 수 있다. 2차원 타원형 환경사방정식은 연안역에서 표면중력파(surface gravity wave)를 모델링하는데 잘 알려진 해법으로 식 (1)과 같이 정의된다 (Demirbilek and Panchang, 1998).

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

여기서,

$\hat{\eta}$ = 복소 수면변위 함수

σ = 주파수

$C(x, y)$ = 위상속도

$C_g(x, y)$ = 군속도

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

$k(x, y)$ = 파수

d = 수심

식 (1)을 이용하여 연안역에서 파의 굴절과 회절 그리고 반사를 모의할 수 있지만, 실제 연안역에서 파의 거동은 다른 여러 물리현상

의 영향을 받으므로 환경사방정식에 파의 마찰과 쇄파에 의한 감쇄효과를 적용하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left(\frac{C_g}{c} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \quad (2)$$

여기서 w 는 마찰계수, γ 는 쇄파계수(wave breaking parameter)이며, CGWAVE 모형에서는 w 값을 Dalrymple et al. (1984)이 제안한 다음 식 (3)을 사용한다.

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left(\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right) \quad (3)$$

여기서 a 는 파의 진폭(=H/2, H는 파고), f_r 은 마찰계수(friction coefficient)로써 Madsen (1976)과 Dalrymple et al. (1984)에 의하면 마찰계수는 레이놀즈수와 바닥조도의 함수이며 f_r 값은 Manning의 마찰계수(n)와 유사한 범위를 갖는다. 쇄파계수 γ 는 다음과 같이 정의된다(Dally et al., 1985; Demirbilek, 1994; Demirbilek et al., 1996).

$$\gamma = \frac{\chi}{a} \left(1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right) \quad (4)$$

여기서 χ 는 상수로 Dally et al. (1985)이 제시한 0.15을 사용하며, Γ 는 경험상수로서 0.4이다.

한편, CGWAVE 모형에서는 식 (5)와 같은 비선형 분산식을 도입하여 비선형파의 거동을 모의한다(Kirby and Dalrymple, 1986).

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= gk[1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd] \tanh(kd + ka F_2) \\ F_1 &= \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd)}{8 \sinh^4(kd)} \\ F_2 &= \left(\frac{kd}{\sinh(kd)} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 공진모형의 검증

2.2.1 검증 조건

본 연구에서 항만 공진 해석 모형을 검증하기 위하여 포항신항 및 영일만 전역에 CGWAVE 모형을 적용하고 현장 관측 자료와 비교하였다. 검증을 위한 계산영역은 만의 길이 방향으로 약 13.5 km, 폭 방향으로 9.5 km이고, 입사 파향은 만의 개구부와 직각을 이루는 NE 방향으로 설정하였다. 계산 격자의 크기는 수심에 따른 파장의 크기와 계산시간을 고려하여 외해에서는 50~200 m 크기로 가변격자를 구성하였으며, 항내에서는 5~20 m 크기로 격자를 구성하였다. 공진현상에 가장 큰 영향을 미치는 장주기 파랑의

반사계수에 대해서는 Ministry of Science and Technology (1993), Jeong et al. (1993)이 유한요소 모형을 사용하는 과정에서 고체 경계면에서의 반사계수를 1.0~0.95 범위로 적용하여 증명한 바 있다. 또한 Jeong (1991)은 특정 수리모형 실험결과와 비교하여 직립 고체경계의 경우 반사계수가 0.99가 적합하다고 한 바 있으며, Ministry of Science and Technology (1993)에 의하면 동해안의 경우에는 반사계수 0.99가 현장 관측의 증폭 비를 가장 잘 재현한다고 설명하고 있다. 본 연구에서는 항내·외 경계의 반사계수를 1.0으로 하였으며, 계산에 사용된 총 요소의 수는 67,052개, 절점의 수는 35,622개이다. 그리고 입사 파랑의 주기조건은 외중력파와 장주기파의 주기를 포함하도록 30 s ~ 100 min으로 설정하였다. Figure 1은 계산에 사용된 유한요소 격자망을 나타낸 것이다.

Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office (2010)에서 실시한 포항신항의 파랑 관측 위치는 항의 1곳, 항내 8곳으로 총 9 곳이며, 항내 관측점은 관측위치에 따라 8분, 23분, 33분, 80분의 공진주기를 나타낸다. 파랑 관측점 중에서 동방파제와 8번

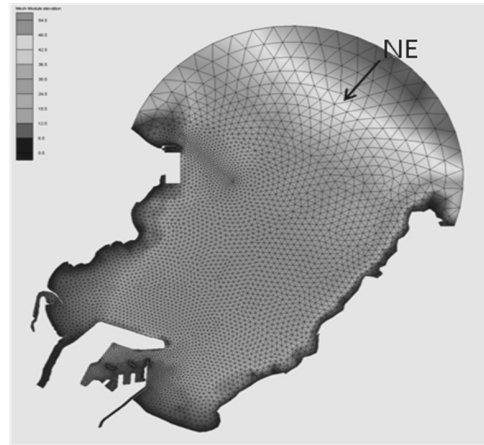


Fig. 1. Layout of simulation domain with FEM mesh and wave direction.

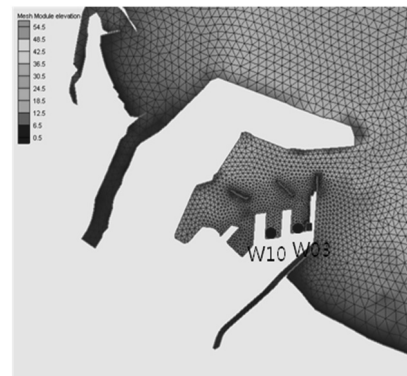


Fig. 2. Close up domain of the Pohang New Harbor with wave measurement stations

부두 사이의 W03 지점, 7번 부두와 8번 부두 사이의 W10 지점은 항내 슬립 안쪽에 위치하고 있어서 8분~80분대의 공진주기와 선박의 고유주기에 가까운 주기 1분대의 공진주기가 나타나고 있다(Jeong et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 주기 1분 내외의 공진주기를 주목하고, 수치모형이 W03, W10 지점에서 관측된 공진주기를 잘 재현하는지 확인하여 공진모형을 검증하였다. 각 관측점 W03, W10의 위치는 Figure 2에 나타내었다.

2.2.2 검증 결과

Figure 3은 W03 지점의 관측결과로써 가로축은 파 주기, 세로축은 스펙트럼 밀도함수를 나타낸다. 그림에서 No. 72, 82, 89는 파랑 연속 관측 자료를 46시간 자료로 분할한 자료들의 순차적 번호를 의미한다(Jeong et al., 2011). 그림에서 공진모드는 스펙트럼 밀도함수의 피크가 나타나는 곳으로서 주기 80분, 33분, 23분, 8분의 장주기 주기대와 주기 60초, 54초, 42초의 외중력과 주기대에서 나타남을 알 수 있다. Figure 4는 CGWAVE 모형으로 계산한 결과로써 가로축은 파 주기, 세로축은 진폭계수로 나타낸 진폭응답 곡선이다. 진폭응답곡선(amplitude response curve)은 입사파의 주기에 따라 항내 특정 점에서의 진폭반응을 나타내는 곡선으로

공진모드를 찾아내는데 유용하다. 이때 진폭계수(R)는 항내 점의 진폭을 입사파의 진폭으로 나누어 무차원화 한 값을 사용한다. 계산결과는 관측치에서 나타난 주기 80분, 33분, 23분, 8분의 침두 값을 잘 재현하고 있으며, 특히 선박의 고유 주기대와 비슷하여 선박 동요에 큰 영향을 미치는 주기 60초, 54초, 46초, 42초의 공진주기가 뚜렷이 나타나고 있다. 수치모형은 장주기대 뿐 아니라 외중력과 주기대에서도 관측값을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 한편 관측치는 주기 80분에서 최대 피크 값을 나타내는 반면 계산결과는 주기 46초에서 최대 피크 값을 나타내고 있다. 이는 수치모형에서는 항내 슬립내부의 경계조건을 완전반사 조건으로 계산함으로써 진폭의 증폭이 크게 일어난 결과로써 Lee (1971)의 직사각형 항만에 대한 계산결과와 비슷한 양상이다. 반면에 실제 항만에서는 에너지감쇠로 인하여 진폭이 일정 수치 이상 증폭되지 못한다.

Figure 5는 W10 지점의 관측결과로써 장주기의 공진모드는 W03의 관측치와 같이 80분, 33분, 23분, 8분에서 피크가 나타나지만, 주기 1분 전후의 외중력과 주기대에서는 W03 지점의 스펙트럼 밀도함수보다 작은 값을 나타내고 있다. Figure 6은 W10 지점에 대한 수치계산결과로써 관측치의 공진모드를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

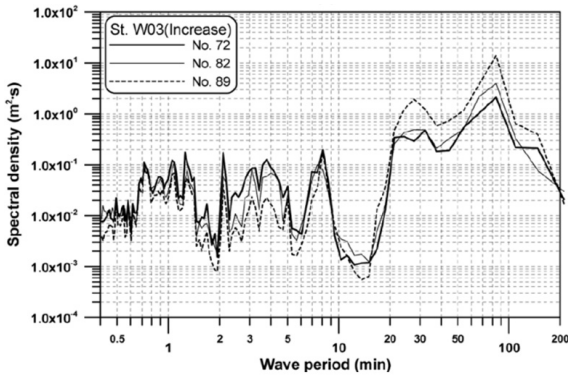


Fig. 3. Result of field measurement at W03.

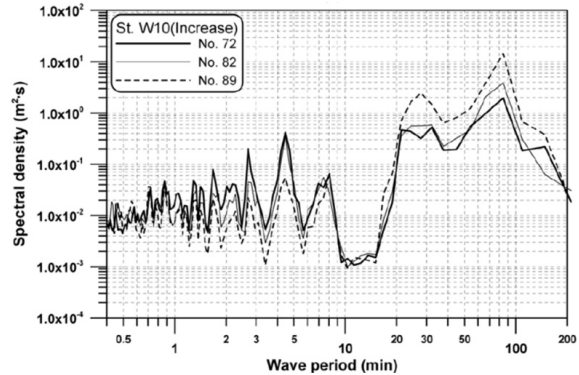


Fig. 5. Result of field measurement at W10.

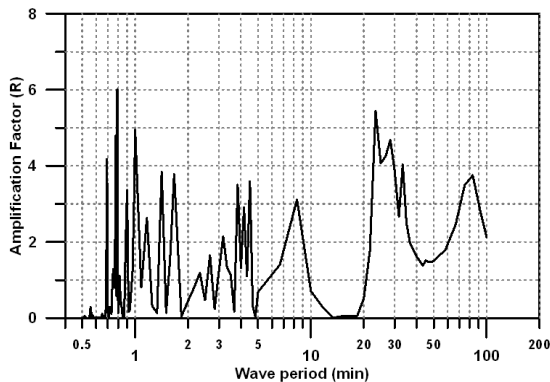


Fig. 4. Result of computer simulation at W03.

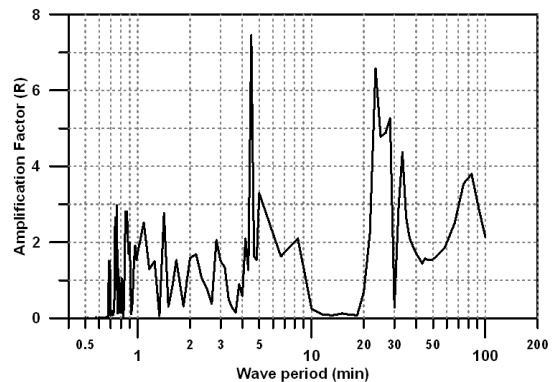


Fig. 6. Result of computer simulation at W10.

3. 계류선박 동요 해석 모형

3.1 기본 방정식

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 향해 다가오는 파들에 의해 배가 받는 힘을 이야기 한다. 이러한 힘들을 이론적으로 정확하게 구하기는 불가능하다. 그러므로 여러 가지 가정을 함으로써 물리적 모델을 계산이 가능한 수학적 모델로 바꾸어야 한다.

본 연구에 사용된 모형에서는 속도포텐셜을 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 스펙트럼 해석을 통하여 불규칙파 중에서의 운동을 예측한다. 본 연구에 있어서는 유의파고와 특성주기의 변수로서 표현이 가능한 Bretschneider의 스펙트럼을 이용하여 불규칙 해상상태를 가정하였다.

선박의 계류장치로는 계류삭과 펜더가 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. 규칙파중에서 선체의 선형운동 방정식은 식(6)과 같다.

$$[-\omega^2(M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + R_{jk}]a_k = F_j \quad (6)$$

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. 이러한 여러 종류의 힘들을 구하는 방법은 다음과 같다 (Ann, 1986; Ann and Rhee, 1987).

3.1.1 동유체력과 파 강제력

식(6)에서 A_{jk} 와 B_{jk} 는 선박의 k 방향 운동에 의하여 선체에 작용하는 j 방향의 동유체력이고, F_j 는 입사파에 의해 선박에 작용하는 파 강제력이다. 이 힘들을 물리적으로 구하기 위해서는 여러 가지 가정들을 도입하여 계산이 가능한 수학적 모델로 만들어야 한다. 먼저 유체는 비점성, 비압축성으로 가정하고 유체의 비회전성으로 가정하여 속도포텐셜을 도입한다. 파고는 작다고 가정하여 선형파 이론을 적용하고 동시에 선체의 운동이 작다는 가정을 도입함으로써 다음과 같이 속도포텐셜을 분리한다.

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_7 + \sum_{i=1}^6 \Phi_i \quad (7)$$

여기서,

Φ_0 = 입사파의 속도포텐셜

Φ_7 = 입사파의 선체에 의한 산란 속도포텐셜

Φ_i = i 모드의 선체운동에 의한 방사 속도포텐셜

이러한 속도포텐셜들은 이상 점 분포(singularity distribution)를 이용한 다음과 같은 적분방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Phi_i(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \sigma_i(Q)G(P,Q)ds(Q) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_i(P)}{\partial n_P} = -\frac{\sigma_i(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \iint_{S_1+S_2} \sigma(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_P} ds(Q) \quad (9)$$

여기서,

S_1 = 선체의 침수표면,

S_2 = 안벽(jetty)의 침수표면,

σ = 용출 점의 세기

n_P = P 점에서 유체장 밖으로 향한 단위법선

$G(P,Q)$ = Green 함수 (Q 에 위치한 단위 용출 점에 의한 P 에서의 속도포텐셜)

방사문제에서는 정수 중에서 선박과 안벽 간의 상호 작용하는 유체력으로 이루어져 있다. 이 유체력을 구하기 위해서는 다음과 같은 경계조건이 주어져야 한다. 식 (9)의 물체 표면에서의 경계조건은 방사문제에서는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \Phi_i(P)}{\partial n_P} = \begin{cases} i\omega a_i n_i(P) & P \in S_1 \\ 0 & P \in S_2 \end{cases} \quad (10a)$$

산란문제에서는 파랑중에서 선박이 움직이지 않도록 구속시키고 본다. 지배방정식, 자유표면조건, 방사조건, 해저경계조건은 산란문제와 동일하고, 선체경계조건만 다르다. 선체경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_7(P)}{\partial n_P} = -\frac{\partial \Phi_0(P)}{\partial n_P} \quad P \in S_1 + S_2 \quad (10b)$$

또한, Green함수는 다음과 같은 형태의 유한수심에서의 단위 용출 점에 대한 함수를 사용한다.

$$G(P, Q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 2 \int_0^\infty \frac{(k+v)e^{-kh} \cosh k(\zeta+h) \cosh k(z+h)}{k \sinh kh - v \cosh kh} \times J_0(kR) dk + 2\pi i \frac{(k+v)e^{-kh} \cosh k(\zeta+h) \cosh k(z+h)}{vh + \sinh^2 kh} \times J_0(kR) \quad (11)$$

$$= \frac{2\pi(v^2-k^2)}{(k^2-v^2)h+v} \cosh k(\zeta+h) \cosh k(z+h) \times [Y_0(kR) + iJ_0(kR)] + 4 \sum_{i=1}^\infty \frac{k_i^2+v^2}{(k_i^2+v^2)h-v} \times \cos k_i(\zeta+h) \cos k_i(z+h) k_0(k_i R) \quad (12)$$

여기서,

$$P = (x, y, z), \quad Q = (\xi, \eta, \zeta) \\ r^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2 \\ r_1^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+2h+\zeta)^2 \\ R^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 \\ v = \omega^2/g, \quad h = \text{수심} \\ k = \text{파수}, \quad v = k \tanh kh \text{ 를 만족하는 실근} \\ k_i = \text{파수}, \quad v = k_i \tanh k_i h \text{ 를 만족하는 실근}$$

위의 식 (11)은 수평거리가 가까울 경우에 사용하고, 식 (12)는 수평거리가 비교적 먼 경우에 사용하는 것이 편리하다. Green 함수의 해로 주어지는 Bessel 함수는 용출 점에 가까울 수록 무한대로 발산하는 성질이 있다. 따라서 Green 함수 모형에서는 두 점의 수평거리가 가까울 때와 먼 때를 분리하여 계산하고 있으며, 그 경계 값은 무차원 수 kR 로 구분하고 있다. 수치계산에서는 두 점의 거리가 가까울 때 발산하는 해를 수렴하도록 근사적으로 풀어야 하며, 본 연구에서는 식(11)을 사용하여 Green 함수 해를 구하도록 하고 있다. 해가 발산하는 경계는 여러 번의 시험계산을 통하여 정하게 되고, 본 연구에서는 이 경계로써 $kR = 0.05$ 로 주었다.

이와 같이 속도포텐셜이 구해지면 이 속도포텐셜을 선형화된 Beruoulli 방정식에 대입하여 다음과 같이 유체 동압력을 구할 수 있다.

$$p = -i\omega\rho\Phi \quad (13)$$

식 (13)을 정수압으로 무차원화 하면

$$\frac{p}{\rho g a} = \frac{\omega^2}{g} \frac{1}{i\omega a} \Phi$$

이 되고, 다음과 같이 무차원화된 동압력 \hat{p} 를 얻을 수 있다.

$$\hat{p} = \frac{p}{\rho g a} = v\phi \quad (14)$$

여기서, ϕ 는 무차원화된 속도포텐셜로써

$$\phi = \frac{1}{i\omega a} \Phi$$

로 표시된다.

식 (14)를 선체표면에 대하여 적분하면 방사문제에서는 부가질량과 감쇠계수를 구할 수 있고, 산란문제에서는 파 강제력을 구할 수 있다.

3.1.2 복원력

계류된 선박이 운동을 하면 선체는 선박의 운동에 따른 부력의 변화에 의해 발생하는 정유체력과 계류장치에 의한 강성력이 복원력으로 작용한다. 계류장치에는 계류삭과 팬더가 있는데 이들을 모두 선형 스프링장치로 가정하여 복원력을 구한다. 정유체력에 의한 복원력 계수는 원점을 무게중심에 취하였을 경우 다음과 같다.

$$C_{33} = \rho g S \\ C_{44} = \rho g \tilde{V} [(S_{22}/\tilde{V}) - BG] \\ C_{55} = \rho g \tilde{V} [(S_{11}/\tilde{V}) - BG] \quad (15)$$

이 식에서 S 는 수선면적, S_{11} 과 S_{22} 는 각각 종 방향 2차 모멘트와 횡 방향 2차 모멘트를 나타낸다. 또한 \tilde{V} 는 선박의 배수용적을 나타내고, BG 는 부심에서 무게 중심까지의 연직 높이이다. 위 식의 3항을 제외한 나머지 계수는 모두 0을 취하면 된다.

3.1.3 관성력

물체가 관성운동을 하면 물체는 가속도에 비례하는 관성력을 갖게 된다. 본 모형의 경우에도 선박이 정현 운동을 하게 되므로

관성력이 존재한다. 선박의 운동방정식에서 보면 이 힘에 관계하는 계수는 M_{jk} 이다. 이 계수의 각 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= M_{22} = M_{33} = \rho \tilde{V} \\
 M_{44} &= I_{11} \\
 M_{55} &= I_{55} \\
 M_{66} &= I_{66} \\
 M_{46} &= M_{64} = I_{46}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

여기서,

$$I_{jk} = \iiint_{\tilde{V}_S} \rho_B [\vec{X} \cdot \vec{X} \delta_{ij} - X_i X_j] d\tilde{V}$$

\vec{X} = 거리 벡터

δ_{ij} = Kronecker Delta 함수

($i=j$ 이면 1, $i \neq j$ 이면 0)

ρ_B = 선체의 질량 밀도

이 식은 원점을 선박의 무게 중심에 취하였을 경우의 식이고, 다른 위치에 원점을 취할 경우는 나타낸 항들 이외에도 다른 항들이 다수 포함되어야 한다.

3.2 동요량 산정 방법

3.2.1 단주기 파랑에 의한 선박 동요량 산정 방법

단주기 파랑에 의한 선박 동요량은 Figure 7과 같은 과정으로 산정된다. 먼저 대상선박의 선형조건에 따라 선박의 길이와 폭, 흘수 및 무게 중심 좌표 값을 이용하여 선박과 선박 또는 선박과 안벽의 격자망을 구성한다. 그 다음은 파랑의 주파수, 파향, 수심 및 계류조건을 입력하여 각각의 단위파고를 갖는 규칙파를 이용하여 파 강제력을 구한다. 다음은 유의파고, 유의파 주기의 자료를 가지고 Bretschneider의 스펙트럼을 이용하여 불규칙 해상 상태에서의 선박의 운동량 모멘트를 합으로써 단주기 파랑에 의한 동요량을 산정할 수 있다.

3.2.2 공진주기 성분을 고려한 선박 동요량 산정 방법

공진주기 성분, 즉 장주기 성분을 고려한 선박 동요량 산정 방법은 Figure 8의 흐름도와 같은 방식으로 진행된다. 선형조건 입력은 단주기 성분에 의한 선박 동요량 산정방법과 같으나, 단위파의 파 강제력은 입사파의 주파수, 파향, 수심, 계류조건 등의 입력자료를 가지고 주기를 30초 이하의 단주기 성분과 공진을 유발하는 30초 이상의 장주기 성분으로 구분하여 단주기와 장주기의 단위파에 대한 파 강제력을 각각 구한다. 그 다음은 유의파고, 유의파 주기의 입력자료를 이용하여 Bretschneider의 스펙트럼을 구한 후 불규칙 해상 상태에서의 단주기와 장주기 성분의 운동량

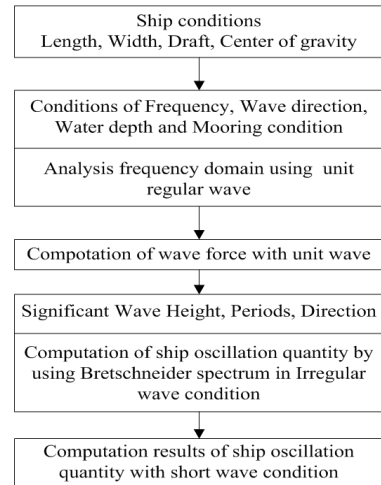


Fig. 7. Flow charts of the computational procedure for ship oscillation quantity by short waves

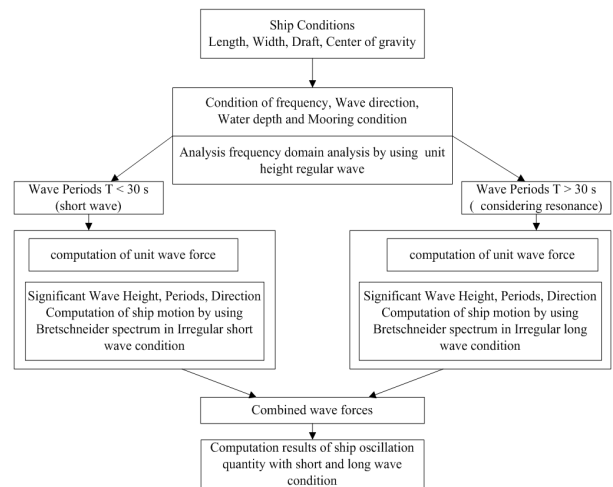


Fig. 8. Flow charts of the computational procedure for ship oscillation quantity considering harbor resonance

모멘트를 각각 구한다. 그리고 장·단주기 파랑의 합성된 힘을 구하기 위하여 각 선체 운동 모드별로 운동량모멘트를 합성하고 합성된 모멘트를 이용하여 선박의 동요량을 계산하면 단주기 성분과 공진주기 성분을 모두 고려한 선박의 동요량을 구할 수 있게 된다.

3.3 계류선박 동요 해석 모형의 검증

3.3.1 검증조건

선박모형의 검증은 Sakakibara et al. (2001)이 실시한 계류선박의 현장 동요량 측정자료와 비교하여 이루어졌다. 모형검증에 사용된 선박조건은 Table 1과 같이 선박의 중량은 45,500톤이고, 계류 사은 8개, 펜더는 12개, 박지 수심은 14 m이다. 파랑조건은 Table 2, 3과 같이 단주기 파랑 3 case와 공진주기를 갖는 파랑

Table 1. Ship and mooring condition for ship model verification

Weight	45,500 tons
Length	180 m
Width	31 m
Draft	8.915 m
Wetted area	5876.04 m ²
Mooring lines	8 ea
Fender	12 ea
Water depth	14 m

Table 2. Short waves conditions for ship model verification.

Short waves conditions	Case 1	Case 2	Case 3
H_s (m)	0.73	0.77	0.83
T_s (s)	10.28	11.66	11.57
Wave direction (°)	75	75	75

Table 3. Long waves condition for ship model verification.

H_s (m)	0.15
T_s (s)	146
Wave direction (°)	75

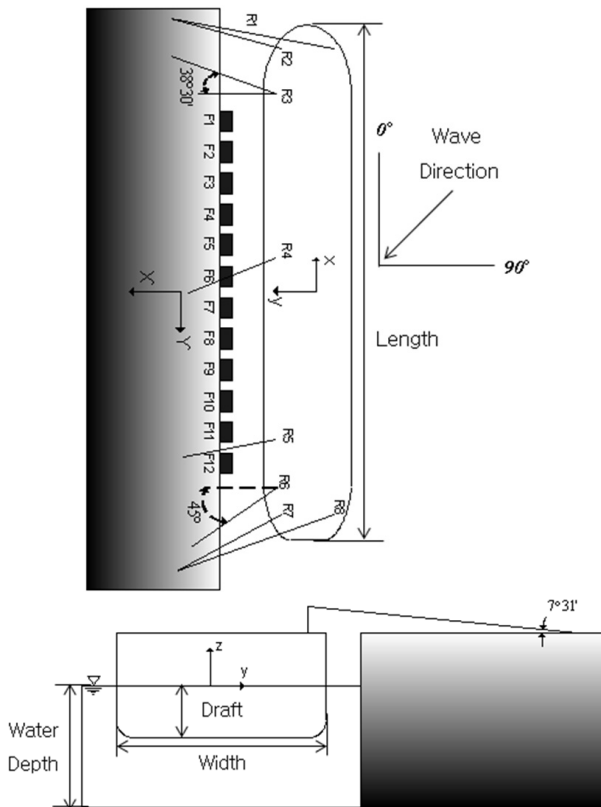


Fig. 9. Definition sketches of the ship and mooring conditions.

1 case로 하였다. 단주기 파랑의 파고는 0.73 m, 0.77 m, 0.83 m, 주기는 10.28 s, 11.66 s, 11.57 s이며, 파향은 75°이다. 공진주기 성분은 파고 0.15 m, 주기 146 s이고, 파향은 75°이다. 선박의 치수 및 계류조건은 Figure 9와 같다.

3.3.2 검증 결과

Figure 10은 Table 2와 3의 검증계산 실험 안에 대한 본 모형의 선박 동요량 계산결과와 Sakakibara et al. (2001)의 현장 관측치 및 수치계산 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Sakakibara et al. (2001) 이 사용한 선박 동요 해석 모형은 Kubo et al. (1988) 이 개발한 수치모형으로써 기존 선박 동요 해석에 있어서 간편성과 실용성 때문에 많이 사용되어진 Strip 법을 완벽이 있는 경우에 적용 가능하도록 확장한 것이다. 이 모형은 방사문제는 Green 함수법을 산란문제는 Strip법을 사용하고 있으나, Strip 법은 Surge 방향의 힘을 구할 수 없기 때문에 선체 단면에 작용하는 수압의 전후 방향 성분을 파 강제력으로 표시하였다.

한편, 본 연구에서 사용한 선박 동요 해석 모형은 Ann (1986), Ann and Rhee (1987)가 개발한 Green 함수 모형을 기초로 하여 단주기 및 장주기 파랑에 의한 동요 해석이 가능하도록 파 강제력 합성부분을 추가하여 개량한 것이다. 본 모형은 기본방정식을 적분 방정식으로 변환하여 해를 구하는 Green 함수법을 사용하여 방사 문제와 산란문제를 풀게 된다. 특히, Green 함수법은 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.

Figure 10에서 Case 1은 본 모형의 계산 결과를 현지 관측치 및 Kubo 등의 모형과 비교한 것이고, Case 2, 3은 현지 관측치와 본 모형을 비교한 것이다. Table 4는 현지 관측치 및 Kubo 등의 모형과 본 모형의 동요량 산정 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 표로 정리한 것이다.

검증계산 실험 안은 단주기 파랑의 파고와 주기 조건이 매우 작은 값으로 변화하므로 Table 4에서 현지 관측치 결과 또한 각 실험 안에 따라 동요량의 크고 작음이 일관된 경향을 나타내고 있지 않다.

한편, 단주기 및 공진주기 파랑은 입사 방향이 선박의 길이 방향 법선과 75°를 이루며 선체 측면에서 입사하므로 Sway와 Roll의 동요 성분에 크게 영향을 미칠 것으로 생각되며, 이는 Case 3의 관측 결과에서도 이들 동요 성분이 뚜렷이 증가함으로부터 알 수 있다.

본 모형은 현지 관측치와 비교하여 동요 성분별로 ±10~15%의 오차를 나타내고 있으며, 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

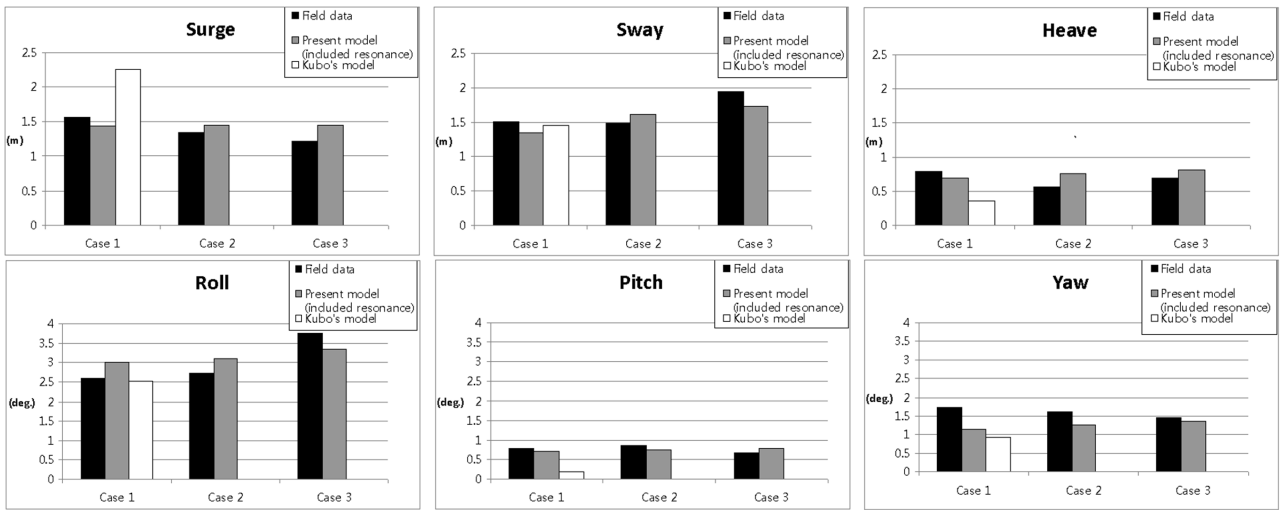


Fig. 10. Comparison of results between computer simulation and field data with ship oscillation quantity.

Table 4. Comparison of results between field data and computer simulation

	Field data			Present model (included resonance)			Kubo's model
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1
Surge (m)	1.56	1.35	1.22	1.44	1.44	1.45	2.26
Sway (m)	1.51	1.48	1.95	1.34	1.61	1.73	1.46
Heave (m)	0.78	0.56	0.70	0.69	0.75	0.81	0.35
Roll (deg.)	2.60	2.73	3.75	3.01	3.10	3.35	2.52
Pitch (deg.)	0.80	0.87	0.67	0.70	0.74	0.80	0.19
Yaw (deg.)	1.73	1.60	1.44	1.13	1.25	1.35	0.93

특히, 본 모형은 Case 3의 Sway와 Roll 성분 결과에서 관측치보다 과소평가 함을 알 수 있다. 이러한 오차의 원인으로는 현지 관측치의 경우 항내 흐름이나 바람의 요소 등이 선박 동요에 영향을 주지만 본 모형의 경우는 바람의 요소를 고려하지 않았기 때문이고, 실제 계류식 및 펜더의 거동은 비선형이지만 본 모형은 선형 거동을 가정하였기 때문으로 판단된다.

본 모형의 결과는 Kubo 등의 모형에 비하여 Sway, Roll을 제외하면 관측치와 더 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 현지 항만의 적용

4.1 대상항만

본 연구에서는 포항신항을 대상으로 항만 공진을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 각각 계류선박의 동요량을 산정한 후 이를 기초로 하여 항만 공진현상이 계류선박의 동요에 미치는 영향을 평가해 보았다. 포항신항이 위치한 영일만은 만의 입구가 NE 방향으로 열려있고 외해에 접해있어서 장주기 파랑의 내습이 빈번하다. 여기서는 장주기파로 인한 항만 공진현상이 뚜렷이 발생하는 동방

파제와 제 8번 부두 사이의 선석 (파랑 관측점 W03 지점)을 대상으로 하였다.

4.2 계산 조건

대상 선박의 선종은 일반화물선이고 선형은 5,000톤, 10,000톤, 30,000톤의 3종류로 하였다. 펜더는 국내에서 제조된 고무펜더로 하였고, 계류 삭 및 계류방법은 각 선형마다 동일하게 하였다. 단 계류삭의 초기장력은 절단하중의 7%로 하였다. 선형별 계류상태는 Figure 9와 같으며, 그밖에 선박의 동요 해석에 사용된 선박의 체일 및 계류삭, 펜더의 수를 정리하면 Table 5와 같다. 계류선박에 대한 입사파의 방향은 파랑 해석으로부터 얻어진 파랑벡터도를 기초로 하여 선박에 영향을 줄 수 있는 15°, 45°, 75° 로 선정하였다. 단주기 파랑의 조건은 주기는 8, 9, 10, 11, 12 s 로 하였고, 파고는 0.2~1.0 m의 범위로 하였다(Table 6). 이는 항내 파랑 관측 자료(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010)를 이용하여 출현율이 높은 파랑을 대상으로 주기와 파고를 선택한 것이다.

한편, 공진주기 파랑 조건은 대상선박의 고유주기인 동시에 대상 지점에서 공진현상이 뚜렷이 발생하는 주기 60 s 의 파랑을 대상으로 하였는데 이는 공진 해석 결과와 하역 중단시의 파랑 관측 자료로부터 선정된 것이다. 그리고 파고 0.12 m 는 역시 파랑 관측 자료로부터 선정하였으며, 입사 파향 15°는 제 8부두 입구의 파랑벡터도로부터 산정한 것이다(Table 7).

Table 5. Ship and mooring conditions for application of Pohang New harbor

Ship type	General cargo ship		
	5,000 tons	10,000 tons	30,000 tons
Weight	5,000 tons	10,000 tons	30,000 tons
Length	98 m	120 m	171.6 m
Width	14.0 m	17.42 m	26.0 m
Draft	4.5 m	6.0 m	7.0 m
Wetted area	2534.39 m ²	3876.04 m ²	4461.60 m ²
Mooring lines	8 ea	8 ea	8 ea
Fender	12 ea	12 ea	12 ea
Water depth	10.0 m	10.0 m	10.0 m

Table 6. Short waves conditions of Pohang New harbor

H_s (m)	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 7. Long waves condition of Pohang New harbor

H_s (m)	0.12
T_s (s)	60
Wave direction (°)	15

4.3 계산 결과

4.3.1 공진성분을 포함하지 않는 경우

공진성분을 포함하지 않는 경우는 주기 8-12 s 의 단주기 파랑조건에 의한 선박의 동요량을 계산한 것이다. 계산 예로서 10,000 톤 선박에 파랑이 75°로 입사한 경우에 대하여 각 동요 성분 별로 유의파고와 주기에 따른 동요량의 관계를 그래프로 도시하여 Figure 11에 나타내었다. 그림에서 점선은 Ueda and Shiraishi (1988)가 제안한 하역 허용 동요량을 나타낸다. 하역 허용 동요량의 의미는 선박 동요량이 하역 허용 동요량을 초과하지 않을 때는 하역이 가능하고, 허용 동요량을 초과하면 하역이 불가능함을 정량적인 수치로 제한한 것이다.

동요량의 변화를 보면 동일 유의파고에서는 파 주기가 길어질 수록 동요량이 커지는 경향을 보인다. Sway와 Roll의 경우는 8-9 초대의 주기에서 보다 11~12초로 주기가 길어질 수록 주기별 동요량의 차이가 줄어든다. 이것은 선박동요 성분 중 Sway, Roll 성분은 짧은 주기의 파랑이 작용하였을 때 동요량의 영향을 크게 받는 것을 나타낸다. 또, 동일 파 주기에 대하여 비교하면, 파랑이 선박의 측면 방향으로부터 입사할 수록 동요량이 커지며 이때 주요 동요 성분은 Sway, Roll인 것을 알 수 있다.

한편, 입사 각도에 따른 동요량 변화를 정량적으로 검토하기 위하여 선형별, 입사 각도별 동요량의 계산 결과를 Table 8로 정리하였다. Table 8은 공진 성분을 포함하지 않은 단주기 파랑에 의한 동요량 결과로써 계산조건은 파고 1.0 m, 주기 12.0 s 이다. 입사 각도가 동요량에 미치는 영향을 분석하면, 동일 선형에서는 입사 파향과 선박의 길이 방향 법선과 이루는 각도가 클 수록 Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw의 동요량은 커지며, 반대로 Surge 동요량은 작아짐을 알 수 있다. 특히 Roll의 동요량은 입사

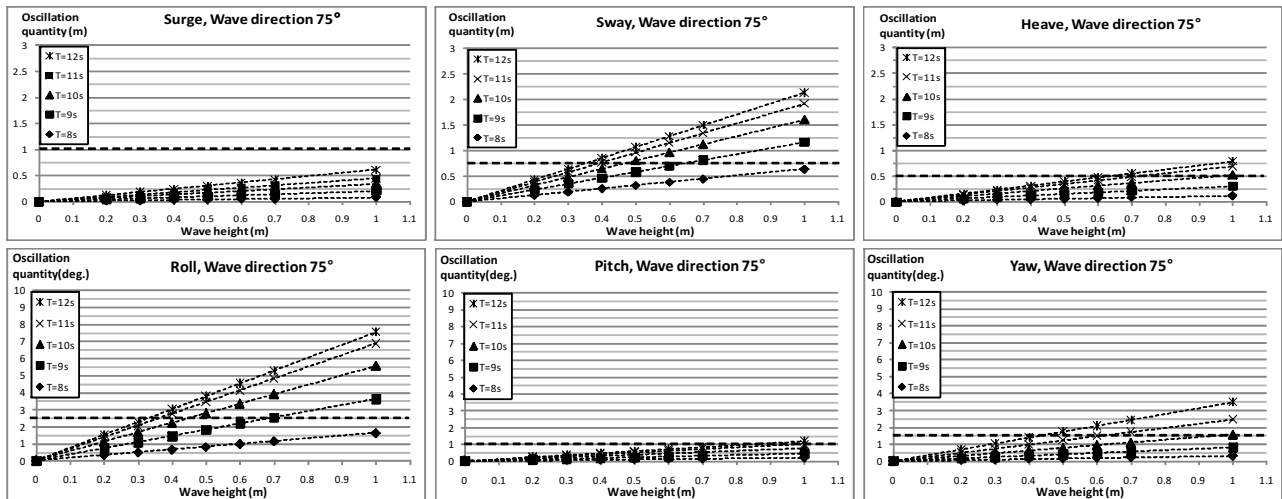


Fig. 11. Computer simulation results of the ship oscillation quantity with short waves conditions (short wave only, 10,000 tons, wave direction 75°)

Table 8. Comparison of oscillation quantity with changing wave direction in case of short waves condition

Mode	5,000 DWT			10,000 DWT			30,000 DWT		
	15°	45°	75°	15°	45°	75°	15°	45°	75°
Surge (m)	0.96	1.05	0.81	0.72	0.79	0.61	0.25	0.19	0.18
Sway (m)	0.90	1.50	2.74	0.67	1.12	2.13	0.39	0.59	1.34
Heave (m)	0.66	0.73	0.99	0.51	0.56	0.79	0.12	0.20	0.35
Roll (deg.)	7.88	8.47	9.51	6.04	6.46	7.55	2.06	2.45	2.93
Pitch (deg.)	1.23	1.30	1.51	0.93	0.98	1.18	0.32	0.37	0.44
Yaw (deg.)	3.03	3.39	4.45	2.26	2.51	3.47	2.08	2.15	2.28

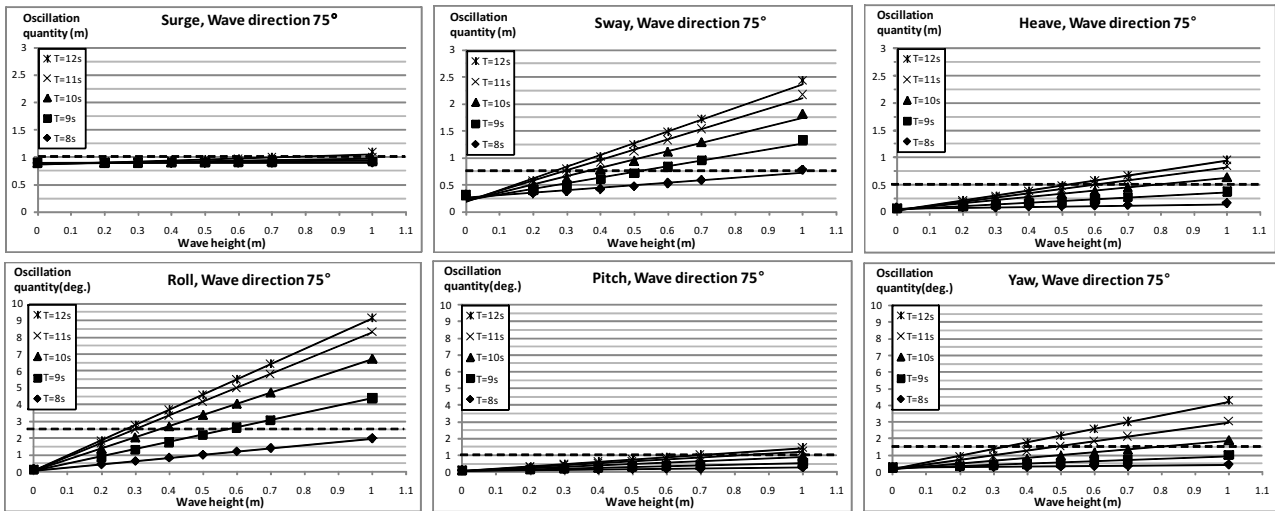


Fig. 12. Computer simulation results of the ship oscillation quantity with short and long wave conditions (considering harbor resonance, 10,000 tons, wave direction 75°)

각도가 커질 수록 가장 큰 폭으로 증가함을 알 수 있는데, 이것은 Roll 성분이 좌우 회전 운동임을 감안할 때 물리적으로 타당한 결과로 생각된다. 그러나 Surge 동요는 입사 각도가 작을 수록 동요량이 커지고, 입사 각도가 클 수록 동요량이 작음을 알 수 있으며, Surge 동요가 선박의 길이 방향 범선으로 전후 병진 운동임을 감안하면 동일한 파력이 작용할 때 타당한 결과로 생각된다.

4.3.2 공진 성분을 포함한 경우

공진주기 성분을 포함한 경우는 단주기 파랑과 장주기 파랑의 영향을 모두 고려한 경우로써 선박의 선형과 계류조건은 공진 성분을 포함하지 않은 경우와 동일하게 하였다. 동요량 계산결과는 10,000톤 선박에 단주기 파랑이 75°로 입사하는 경우에 대하여 각 동요 성분별로 유의파고와 주기에 따른 동요량의 관계를 그래프로 도시하여 Figure 12에 나타내었다.

계산한 결과는 파 주기가 길고 유의파고가 클 수록 동요량이 증가하였으며, 입사각이 선박의 길이 방향 범선에 수직 방향으로 입사할 수록 동요량이 증가하였다. 특히, Surge 성분은 공진주기

성분을 포함하지 않은 경우는 단주기 파랑의 주기와 파고가 커짐에 따라 동요량이 완만하게 증가하였으나, 공진주기 성분을 포함한 경우는 단주기 파랑의 주기와 파고가 변화해도 동요량은 일정한 값을 나타내었다. 이것은 대상 선박의 Surge 동요 고유주기가 장주기 파랑과 상호작용을 일으키어 Surge 동요를 더욱 크게 증가시킨 결과로 생각된다. 이때 단주기 파랑은 선박의 측면에 75°로 입사하므로 선박의 전후 운동인 Surge 동요에는 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

4.3.3 공진성분을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 동요량 비교

본 연구에서는 항만 공진현상이 계류선박의 동요에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공진성분을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 동요량 산정결과를 Figure 13에 나타내었다. 그리고 Table 9는 공진성분의 포함여부에 따른 동요량의 변화를 정량적으로 비교하기 위하여 5,000톤, 10,000톤, 30,000톤 선박의 동요량 산정결과를 각각 나타내고 동요 증가량을 산정한 것이다. 이 때

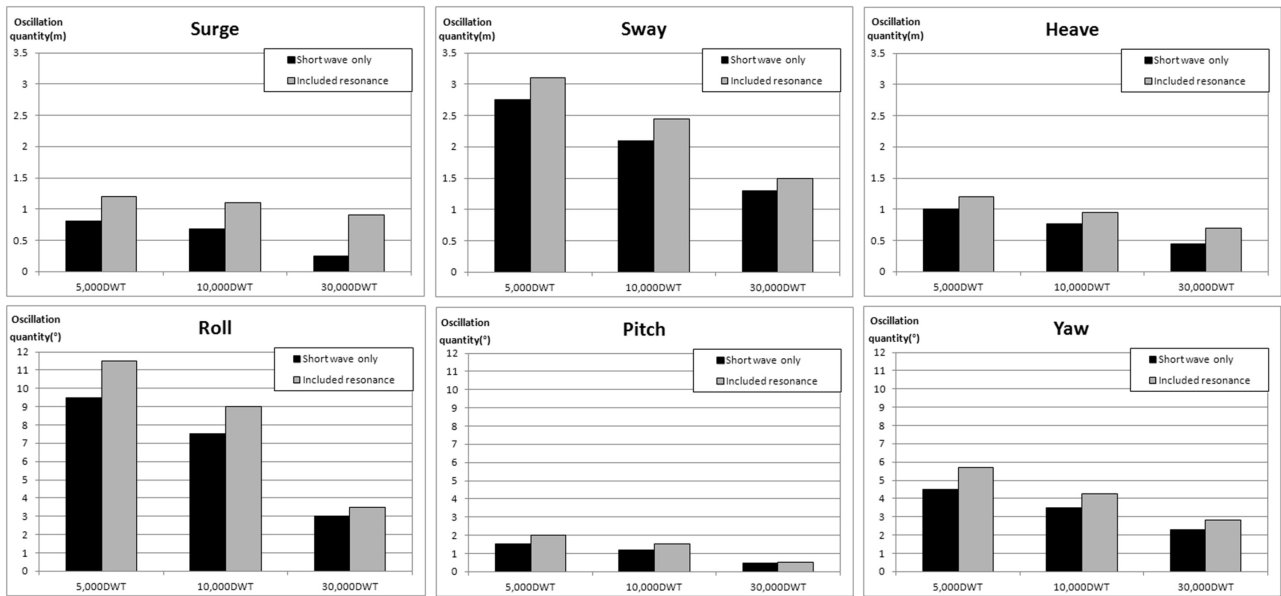


Fig. 13. Comparison of results between short waves and considering harbor resonance.

Table 9. Comparison of results between short waves only and considering harbor resonance

Mode	5,000 DWT			10,000 DWT			30,000 DWT		
	Short wave	Included resonance	Increasing amount (percent)	Short wave	Included resonance	Increasing amount (percent)	Short wave	Included resonance	Increasing amount (percent)
Surge (m)	0.81	1.20	50	0.61	1.10	80	0.18	0.90	400
Sway (m)	2.74	3.10	13	2.13	2.45	15	1.34	1.50	12
Heave (m)	0.99	1.20	21	0.79	0.95	20	0.35	0.70	100
Roll (deg.)	9.51	11.50	21	7.55	9.00	19	2.93	3.50	19
Pitch (deg.)	1.51	2.00	32	1.18	1.50	27	0.44	0.50	14
Yaw (deg.)	4.45	5.70	28	3.47	4.25	22	2.28	2.80	23

단주기 파랑의 조건은 파고 1 m, 주기 12 s, 파향 75° 인 경우이다.

공진성분을 포함하지 않은 경우, 즉 단주기 파랑만에 의한 동요량을 기준으로 하여 공진성분을 포함했을 경우의 증가된 동요량을 비율(%)로 나타내면, 5,000톤은 13%(Sway)~50%(Surge), 10,000톤은 15%(Sway)~80%(Surge), 30,000톤은 12%(Sway)~400%(Surge)임을 알 수 있다. 구체적으로 동요 성분별 증가율을 살펴보면, Surge는 50%~400%, Sway는 12%~15%, Heave는 20%~100%, Roll은 19%~21%, Pitch는 14%~32%, Yaw는 22%~28%이다. 따라서 공진성분을 포함하였을 경우의 동요량 증가 비율은 Surge와 Heave를 제외하면 12%~32%임을 알 수 있다.

한편, 동요성분 중에서 가장 큰 증가율을 나타낸 것은 각 선형 모두 Surge 동요이고, 특히 30,000톤의 Surge 동요는 공진성분을 포함했을 때 400%의 증가율을 나타내고 있다. 이것은 공진성분의

주기 60 s가 30,000톤 선박의 Surge 동요 고유주기와 유사하여 서로 상호작용을 일으키어 동요가 크게 증가한 것으로 생각된다.

Surge, Heave 동요는 선박의 크기가 증가함에 따라 공진성분의 영향이 커짐을 알 수 있고, 반대로 Roll, Pitch, Yaw 동요는 소형선일수록 동요량에 미치는 공진성분의 영향이 커짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 항만 공진 해석 모형과 계류선박의 동요 해석 모형을 사용하여 공진현상을 고려한 계류선박의 동요 해석 방법을 제시하고, 포항신항에 적용하여 항만 공진현상이 계류선박의 동요에 미치는 영향을 정량적으로 파악한 것이다. 본 방법을 포항신항 제 8부두에 적용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 5,000톤, 10,000톤, 30,000톤의 동요량은 단주기 파랑 조건이 파고 1 m, 주기 12 s, 입사각 75° 이고, 공진주기 파랑 조건이 파고 0.12 m, 주기 60 s, 입사각 15° 일 때, 공진성분을 포함했을 경우가 포함하지 않은 경우 보다 12~400% 증가하는 것으로 계산되었다. 이때 30,000톤의 Surge 동요는 가장 큰 증가량을 보였으며, 이는 선박의 Surge 동요 고유주기와 공진주기가 일치하여 서로 상호작용을 일으킨 결과로 판단되며, 선형이 클 수록 관성력이 커져서 30,000톤의 Surge 동요량이 크게 증가한 것으로 생각된다.
- (2) Surge, Heave 동요는 선박의 크기가 증가함에 따라 공진성분의 영향이 커짐을 알 수 있었고, 반대로 Roll, Yaw 동요는 선형이 작을 수록 동요량에 미치는 공진성분의 영향이 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 동일 파 주기에서의 동요량은 파랑의 입사각이 75°에 가까울 수록 즉, 선체의 측면에 입사할수록 Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw는 커지며, Surge 동요는 작아졌다.
- (4) 본 연구에서 제시된 공진현상을 고려한 계류선박의 동요량 계산 방법은 단주기 파랑과 장주기 파랑이 복합적으로 선체에 작용하여 동요를 일으키는 실제 해상 조건을 그대로 반영하여 해석할 수 있으므로 선박의 하역 가능 여부를 예측할 수 있는 하역한계파고를 산정하고 하역가동율을 평가하는데 있어서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

이상과 같은 결론으로부터 주기 1분 전후의 장주기파가 내습할 때 공진현상을 일으키는 항만에서는 5,000톤~30,000톤 선박의 고유주기와 상호작용을 일으켜서 동요량을 크게 증가시킨다는 사실을 확인하였다. 이러한 장주기파에 의한 동요 증가량은 파고가 작은 단주기 파랑이 내습할 경우라도 하역 중단을 일으키는 주요 요인으로 작용함을 알 수 있다. 본 연구 결과는 슬립 내부의 고유주기를 계류선박의 고유주기와 다르게 설계하여 하역 중단 저감 대책을 수립하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2012-0007754)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).

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).

Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1985) Wave Height Variation Across Beaches of Arbitrary Profile. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C6, pp. 11917-11927.

Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A. (1984) Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 110, pp. 67-79.

Demirbilek, Z. (1994) *Comparison Between REFDIFS and CERC Shoal Laboratory Study*. Unpublished Report, Waterways Exp. Station, Vicksburg, MS, 53.

Demirbilek, Z., Xu, B. and Panchang, V. (1996) Uncertainties in the Validation of Harbor Wave Models. *Proceedings of 25th ICCE*, pp. 1256-1267.

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. (1991) *Numerical Analysis of Wave Agitations in Arbitrary Shaped Harbors by Hybrid Element Method*, Master's Thesis, Myongji University, Kyonggi Korea (in Korean).

Jeong, W. M. and Park, W. S. (1993) Analysis of Wave Responses in Harbor Using Boundary Damper Techniques, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 1, pp. 39-44 (in Korean).

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).

Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A. (1986) Modeling Waves in Surfzones and Around Islands. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 1, pp. 78-93.

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).
- Lee, J. J. (1971) Wave-Induced Oscillations in Harbor of Arbitrary Geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, Part 2, pp. 375-394.
- Madsen, O.S. (1976) Wave Climate of the Continental Margin: Elements of its Mathematical Description. *Marine Sediment Transport and Environmental Management* (eds. D. Stanley and D.J.P. Swift), John Wiley, New York, pp. 65-87.
- Ministry of Science and Technology (1993) *A study on the harbour tranquility and ship motions(III)*, BSPG 00192-621-2, Korea Ocean Research & Development Institute (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*, Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office (in Korean).
- 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*. Vol. 27, No. 4, Technical report of port and harbour research Institute, Japan, 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).