

계류선박의 동요에 기초한 항만가동률 산정

Estimation of Harbor Operating Ratio Based on Moored Ship Motion

곽문수* · 정재완** · 안성필*** · 편종근****

Kwak, Moon-su · Chung, Jaewan · Ann, Sungphil · Pyun, Chongkun

Abstract

Although a harbor may be constructed with calmness in harbor in mind, which satisfies the design standard, it is frequently reported that the motion of moored ships disrupt the cargo handling. This is because of current design standard, which only deals with the wave height in the decision making process of cargo handling, and, now, a new kind of estimation method of operating ratio for calmness based on the motion of moored ship is in need. In this research, a computational method that analyses the harbor operation rate in harbor was put forward by considering the relation of allowable quantity of motion for cargo handling and the computation of the motion of moored ship at wharf by using moored ship motion analysis model. Here, a new estimation method was applied at Onsan harbor, and it was compared with the current estimation method, and, then, the difference between the two methods was showed. The harbor operating ratio gained by a new method was dropped by 2~11% at ENE and NE directions when it was compared with the operating ratio based on the current design standard. However, when a harbor structure layout is to be designed, a harbor operating ratio test according to the wave height and a harbor operation rate test, which considers the motion of moored ship, are to be run side by side at a harbor designing process.

Keywords : harbor tranquility, allowable wave height for cargo handling, motion of moored ship, allowable quantity of moored ship motion for cargo handling, harbor operating ratio

요 지

외해에 접해 있는 항만은 항내정온도가 항만설계기준에 만족 되도록 설계되었을 지라도 계류선박의 동요 때문에 하역에 지장을 초래하고 가동률이 저하되는 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 이것은 항만설계기준이 항내 파고만으로 설정되었기 때문이다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 계류선박의 동요를 고려한 새로운 가동률 평가방법이 필요하다. 본 연구는 선박동요해석모형을 이용하여 항내에 계류된 선박의 동요량을 산정하고 하역허용동요량과의 관계로부터 하역허용파고를 산정한 후 항만의 가동률을 평가하는 방법을 제시한 것이다. 여기서는 새로운 가동률 평가 방법을 현지 항만인 온산항에 적용하고 현행 평가 방법과 비교하여 두 방법의 차이를 제시하였다. 새로운 방법에 의한 항만가동률은 ENE와 NE방향에서 현행 항만설계기준에 의한 가동률 결과 보다 1~11% 정도 낮아 지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 외해에 접해 있는 항만은 설계 단계에서 파고 기준에 의한 항만가동률 평가뿐만 아니라 계류선박의 동요를 고려한 가동률 평가를 병행하여 평면배치 계획을 수립하여야 할 것이다.

핵심용어 : 항내정온도, 하역허용파고, 계류선박의 동요, 하역허용동요량, 항만가동률

1. 서 론

최근 우리나라는 동북아 허브항만의 역할을 차지하기 위하여 일본, 중국, 홍콩등 주변국 항만들과 치열한 경쟁관계에 놓여있으며, 새롭게 건설되는 대형 항만들은 매우 높은 항만 가동률을 필요로 하고 있다. 현재 설계기준에 규정된 박지의 정온도는 파고에 기초하여 소형선 0.3m, 중·대형선 0.5m, 초대형선 0.7~1.5m로 규정되어 있고, 하역일수가 연간 97.5% 이상이 되도록 요구하고 있다. 그러나 항내정온도가

설계기준에 만족 되도록 설계된 항만일지라도 계류선박의 동요로 인하여 하역에 지장을 초래하고 하역일수를 감소시켜 항만의 가동률을 저하시키는 사례가 빈번하게 발생하고 있다.

계류선박의 동요현상에 대한 연구는 주로 현장관측과 수리 모형실험을 통하여 이루어졌다. 永井 등(1994)은 일본 센다이 신항만에 대한 파랑 관측을 통하여 선박의 동요를 일으키는 항 외 장주기파가 하역불능의 원인임을 밝혔다. 그리고 久保 등(1995)은 계류선박의 동요를 고려한 항만가동률 계산 시 파군과 부진동에 의한 장주기파의 영향을 고려해야 할

*정희원 · 명지전문대학 토목과 부교수(E-mail : moonsu@mjc.ac.kr)

** (주)건설엔지니어링 항만부(E-mail : cjwany@empal.com)

*** (주)어드밴스드 마린테크 이사

****정희원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수(E-mail : ckpyun@mju.ac.kr)

필요성을 현장 관측 결과를 통하여 입증하였으며, Hiraishi (1995)는 하역작업에 피해를 입은 일본의 주요항만에 대하여 장주기파를 관측하고 분석하였다. 또한 Rafael 등(1988)은 우루과이의 엘도라도 항만 개발계획안에 대해서 3차원 수치 모형실험을 실시하고 선박의 동요량을 측정하였으며, Yuen 등(1986)은 미국 La San Pedro 항만의 중장기 개발 계획안 중 계류시스템의 비용절감안에 대해서 수치모형실험을 통하여 계류선박의 동요량을 해석하고 계류시스템의 최적안을 제안하였다.

한편, 계류선박의 동요량을 해석하고 항만가동률을 계산한 연구로는 Ueda and Shiraisi(1988)의 연구가 있다. 이 계산법은 선박의 하역허용동요량에 의해 선석 전면에서의 하역한계파고를 파향·주기별로 도출하고, 항내파고 계산결과로부터 하역가능 심해파고의 비초과 확률을 구하여 각 선석에서의 항만가동률을 산정 한 것이다. 久保 등(1993)은 파랑, 바람 등의 외력뿐만 아니라 계류시스템의 특성에 의해서도 가동률이 달라진다는 것을 인지하고 항만가동률을 간이적으로 산정 할 수 있는 개략식을 제안 하였으며, 특히 선박동요에 영향을 주는 인자 중 계류시스템의 주특성 인자인 방현재에 대하여 평가하였다. 上田 등(1994)은 선박의 선종·선형별로 동요량을 산정하고 이미 제안 된 하역허용파고를 사용하여 항만가동률을 산정 하였다.

항만가동률은 항내 계류선박의 동요량에 따라 크게 달라진다는 점을 주목한다면, 대상 항만의 계류선박에 내습하는 파랑의 조건과, 선박의 조건 등을 함께 고려하여 선박의 동요량을 산정하고, 그 동요량으로부터 대상항만의 항만 가동률을 평가하는 것이 합리적일 것이다. 그러나 국내에서는 항만설계기준에 제시된 파고에 근거하여 항내 파고분포 해석만으로 항만 가동률을 산정하는 방법이 널리 사용되고 있는 상황이다.

본 논문은 선석의 선형운동방정식을 기본방정식으로 갖는 선박동요해석모형을 사용하여 항만에 내습하는 파랑조건과 선박의 선체조건별로 동요량을 산정하고, 그것으로부터 대상 선석의 하역한계파고를 결정하여 항만가동률을 평가하는 방법을 제시한 것이다. 이 방법은 선박동요해석 모형으로 구한 동요량과 하역허용동요량의 관계를 이용하여 계류선박의 선종·선형과 항내 입사파의 파향·주기별로 대상 선석에 대한 하역허용파고를 정확히 산정하는 것이 무엇보다 중요하다. 여기서는 현지 항만인 온산항에 대하여 각각 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT 선박의 동요량을 계산하고, Ueda and Shiraisi(1988) 가 제시한 하역허용동요량 기준치와 비교하여 온산항의 각 대상선석에 대한 하역한계파고를 구한 후, 현지 파랑 관측 자료로부터 온산항의 항만가동률을 산정하였다. 아울러, 현행 설계기준에 기초한 기존 방법으로 가동률을 산정하고, 그 결과와 계류선박의 동요를 고려하여 산정한 가동률 결과를 비교하여 새로운 가동률 평가방법의 필요성을 언급하였다.

2. 하역허용파고 및 가동률 산정 방법

2.1 하역허용파고 산정

하역의 가능여부를 판단하는 하역허용파고는 항만가동률 산정의 기준파고가 된다. 현행 항만설계기준의 하역허용파고

는 파 주기나 파향에 관계없이 일률적으로 선박의 중량톤수에 따른 파고값으로 규정하고 있다.

본 방법에서 사용하는 하역허용파고는 선박의 동요량으로부터 결정된 값으로서 선형조건이나 내습파랑의 조건에 따라 달라지고, 선박의 선종, 선형 및 파의 주기, 파향, 파고 등을 모두 고려하여 결정하여야 한다.

하역허용파고를 결정하기 위한 첫 단계는 선형별로 파향, 파고, 파 주기의 파랑조건과 계류식, 방현재 등의 계류조건을 달리하여 계류선박의 동요현상을 수치적으로 해석한다. 다음은 수치해석을 통해서 얻어진 선박의 동요량을 가지고 각 동요성분별로 파고와 동요량인폭의 관계식을 구한다. 즉 파고와 각 동요성분의 최대값과의 회귀식을 구한다. 그리고 대상선박의 동요량이 하역허용동요량 이하가 되는 파고를 회귀식으로부터 결정한다.

동요성분별로 부터 구해진 하역허용파고의 최소치는 해당 조건에서 대상선석의 하역허용파고로 선정된다. 단, 이 수치가 현행 설계기준에 제시된 하역한계파고를 넘는 파고에 대해서는 설계기준의 하역한계파고를 하역허용파고로 한다(上田 등 1994).

하역허용동요량은 Ueda and Shiraisi(1988) 및 Brunn (1981)의 제안값을 사용하였다..

2.2 가동률 산정방법

본 논문에서는 上田 등(1994)이 사용한 항만가동률 산정방법을 참고하여 각 선석에 대한 가동률을 산정하였다(Fig. 1).

가동률 산정 방법은 먼저, 선박 동요해석 수치모형을 사용하여 각 선석에서 계류선박의 동요량을 파향별, 주기별, 선형별로 산정한다. 그리고 수치해석으로 구한 동요량과 선형별 하역허용동요량의 관계로부터 선석의 하역허용파고를 파향별, 주기별, 선형별로 구한다.

다음은 파랑해석 수치모형을 사용하여 항내 파고분포를 해석하고, 각 선석의 하역허용파고와 선석 전면의 파고비 관계를 이용하여 심해에서의 하역허용심해파고를 산정한다.

그리고 대상해역의 현지 파랑관측 자료를 정리하여 파고-주기 결합 빈도분포표를 구하고, 이 파고-주기 결합 빈도분포표를 이용하여 하역허용심해파고의 비초과 확률을 각 선석에 대하여 파향별, 주기별로 구한다. 이와 같이 구해진 비

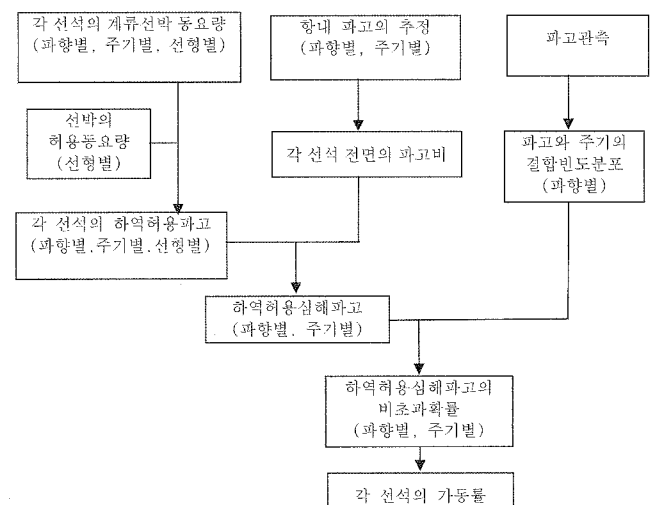


Fig. 1 Flow chart for the estimation of operation rate based on moored ship motion

초과 확률이 각 선석의 항만기동률이 된다.

3. 선박 동요 해석 모형

3.1 기본방정식

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 이야기한다. 이러한 힘들을 이론적으로 정확하게 구하기는 불가능하다. 그러므로 여러 가지 가정을 함으로써 물리적 모델을 계산이 가능한 수학적 모델로 바꾸어야 한다(안 1986).

본 연구에 사용한 선박 동요 해석 모형은 속도포텐셜을 도입한 후 선체의 운동이 미소하다고 가정하고 선체의 운동을 변수로 하여 유체의 동력학적 힘과 파 강제력을 선형화하여 구한 것이다.

실제의 해상상태는 매우 불규칙적이어서 선박의 운동을 직접 관측하는 것은 매우 복잡하다. 그러므로 파고가 작다고 가정하여 불규칙적인 해상상태를 규칙적인 선형파들의 중첩으로 생각하여, 규칙파 중에서의 선체운동을 계산한 후 스펙트럼해석을 통하여 불규칙파 중에서의 운동을 예측한다. 본 연구에 있어서는 유의파고와 특성주기의 변수로서 표현이 가능한 Bretschneider 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.

규칙파중에서 선체의 선형운동 방정식은 다음 식과 같다.

$$[-\omega^2(M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + R_{jk}]a_k = F_j \quad (1)$$

여기서, M_{jk} 는 선체질량, A_{jk} 는 선체부가질량, B_{jk} 는 감쇠계수, R_{jk} 는 복원력이며 ω 는 파진동수, a_k 는 선체운동의 진폭, F_j 는 파강제력이다.

식 (1)에서 선체에 작용하는 유체력으로는 부가질량과 감쇠력으로 나타내어지는 동유체력, 파랑에 의해 작용하는 파 강제력, 선체 운동에 의해 발생하는 부력의 변화에 의해 선체에 작용하는 유체 정역학적 힘이 있다. 또한 계류장치에 작용하는 계류력이 선박의 운동에 대해 복원력으로 작용한다. 이러한 여러 종류의 힘들을 구하는 방법은 다음과 같다.

3.2 동유체력과 파 강제력

식 (1)에서 A_{jk} 와 B_{jk} 는 선박의 k방향운동에 의하여 선체에 작용하는 j방향의 동유체력이고, F_{jk} 는 입사파에 의해 선박에 작용하는 파 강제력이다. 이 힘들을 물리적으로 구하기 위해서는 여러 가정들을 도입하여 계산이 가능한 수학적 모델로 만들어야 한다. 먼저 유체는 비점성, 비압축성으로 가정하고 유체의 비회전성으로 가정하여 속도포텐셜을 도입한다. 파고는 작다고 가정하여 선형파이론을 적용하고 동시에 선체의 운동이 작다는 가정을 도입함으로써 다음과 같이 속도 포텐셜을 분리한다.

$$\phi = \phi_0 + \phi_7 + \sum_{i=1}^6 \phi_i \quad (2)$$

여기서 ϕ_0 은 입사파의 속도포텐셜, ϕ_7 는 입사파의 선체에 의한 산란 속도포텐셜이며 ϕ_i 는 j방향의 선체운동에 의한 방사 속도포텐셜이다.

파랑장에서 선박의 운동을 예측하기 위해서는 선형화된 여러 가지 경계치 문제를 풀어야한다. 전 유체장에서 속도 포텐셜은 다음과 같은 3차원 Laplace 방정식을 만족해야 한다.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \phi_i(x, y, z) = 0 \quad (i=0, 1, 2, \dots, 7) \quad (3)$$

이때, 각 경계면에서의 경계조건은 선형화된 자유표면 경계조건, 바닥경계조건, 무한원방 경계조건, 배의 평균위치에서의 선체 경계조건이 필요하다.

방정식과 경계조건에서 속도포텐셜들은 이상점 분포(singularity distribution)를 사용하면 다음과 같은 적분방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\phi_i(P) = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S1+S2} \sigma_i(Q) G(P, Q) ds(Q) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_i(P)}{\partial n_P} = -\frac{\sigma_i(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \iint_{S1+S2} \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_P} ds(Q) \quad (5)$$

여기서 $S1+S2$ 는 선체와 안벽 각각의 침수표면, σ 는 용출점에 세기이다.

방사문제에서는 정수 중에서 선박과 안벽간의 상호 작용하는 유체력으로 이루어져 있다. 이 유체력을 구하기 위해서는 방사문제 경계조건이 주어져야 하고, 산란문제에서는 파랑 중에서 선박이 움직이지 않도록 구속시키고 본다. 이때, 지배방정식, 자유표면조건, 방사조건, 해저경계조건은 방사문제와 동일하고 선체경계조건만 다르다(안, 1986).

식 (5)에 쓰인 적분방정식의 해를 구하는 방법은 선박을 N개의 평판으로 자르고 각 평판에서의 점원강도가 일정하다고 가정하면 식 (5)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$-\frac{\sigma_i(P)}{2} - \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \sigma_i(Q) \iint_{S1+S2} \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_P} ds = f_i(P) \quad (6)$$

식 (6)으로부터 N개의 선형연립방정식을 얻어서 해를 구하면 각 평판에서의 점원강도를 얻을 수 있고, 이 강도를 식 (4)에 대입하면 속도 포텐셜을 얻을 수 있다. 여기서, $f_i(P)$ 는 선체경계조건이다.

본 연구에 사용된 Green함수는 다음과 같은 형태의 유한수심에서의 단위 용출점에 대한 함수를 사용하였다.

$$Q(P, Q) = \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{r_1^2} + 2 \int_0^\infty \frac{k + ve^{-kh} \cosh k(\zeta+h) \cosh(z+h)}{k \sinh kh - v \cos kh} J_0(kR) dk \quad (7.a)$$

$$+ 2\pi i \frac{(K-v)e^{-kh} \cosh k(\zeta+h) \cosh k(z+h)}{vh + \sinh^2 Kh} J_0(kR) \\ = \frac{2\pi(v^2 - k^2)}{(k^2 - v^2)h + v} \cosh k(\zeta+h) \cosh k(z+h) [Y_0(kR) + iJ_0(kR)] \\ + 4 \sum_{i=1}^\infty \frac{k_i^2 + v^2}{k_i^2 + v^2 h - v} \cos k_i(\zeta+h) \cos k_i(z+h) J_0(k_i R) \quad (7.b)$$

여기서,

$$P = (x, y, z)$$

$$Q = (\xi, \eta, \zeta)$$

$$r^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2$$

$$r_1^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+2h+\zeta)^2$$

$$R^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2$$

$$v = \omega^2/g$$

$$h = \text{수심}$$

$$K = \text{파수}, \quad v = k \tanh Kh \text{를 만족하는 실근}$$

식 (7.a)는 용출점과 대상점의 거리 R 이 작은 경우에 사용하고, 식(7.b)는 거리 R 이 클 때에 사용한다. 본 연구에서는 이 경계로써 $KR=0.05$ 를 택하였다.

KR 은 Green 함수 $G(P, Q)$ 의 계산에서 용출점과 대상점의 거리 R 에 따라 식(7.a)를 사용할지 식(7.b)를 사용할지를 결정해 주는 값으로서, 파의 주기와 무관하도록 무차원수로 표시한다. KR 값의 선정은 다양한 파랑조건에 대하여 거리 R 을 변화시켜 가면서 Green 함수 $G(P, Q)$ 를 계산한 결과, 0.05의 값이 식 (7.a), (7.b)를 구분하는 가장 적절한 값을 알 수 있다.

속도포텐셜은 선형화된 베르누이방정식에 대입하면 유체 동수압 p 가 구해지고, 각 모드의 강제운동에 의해 야기된 동수압을 선박의 평균침수표면에 대해 적분하면 다음과 같이 동유체력이 얻어 진다.

$$F_i = \iint_{s_1+s_2} p n_i ds = \rho g a v \tilde{F}_i \quad (8)$$

여기서,

$$\tilde{F}_i = \iint_{s_1+s_2} \phi n_i ds \quad (9)$$

한편, 무차원화된 산란속도포텐셜은 아래와 같이 주어지고,

$$\phi_7(P) = -\frac{1}{4}\pi \iint_{s_1+s_2} (\sigma_7(Q)G(P, Q)) ds \quad (10)$$

선형화된 베르누이방정식으로부터 압력을 구한 후, 선체의 평균침수표면에 따라 적분하면 다음과 같이 파 강제력을 구할 수 있다.

$$F_i^W = -j\rho\omega \iint_{s_1+s_2} (\phi_0 + \phi_7) n_i ds \quad (11)$$

3.3 복원력

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

$$\begin{aligned} C_{33} &= \rho g S \\ C_{44} &= \rho g V[(S_{22}/V) - BG] \\ C_{55} &= \rho g V[(S_{11}/V) - BG] \end{aligned} \quad (12)$$

이 식에서 S 는 수선면적을, S_{11} 과 S_{22} 는 각각 종방향 2차 모멘트와 횡방향 2차 모멘트를 나타낸다. 또한 V 는 선박의 배수용적을 나타내고 BG 는 부심에서 무게중심까지의 연직높

이이다. 위 식의 3항을 제외한 나머지 계수는 모두 0을 취하면 된다

3.4 관성력

물체가 관성운동을 하면 물체는 가속도에 비례하는 관성력을 갖게된다. 본 모형의 경우에도 선박이 정현운동을 하게 되므로 관성력이 존재한다. 선박의 운동방정식에서 보던 이 힘에 관계하는 계수는 M_{jk} 이다. 이 계수의 각 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_{22} = M_{33} = \rho V \\ M_{44} &= I_{11} \\ M_{55} &= I_{55} \\ M_{66} &= I_{66} \\ M_{46} &= M_{64} = I_{46} \end{aligned} \quad (13)$$

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

4. 수치모형의 검증

본 선박 동요 해석 모형의 검증은 일반화물선 10,000DWT에 대해서 선박 동요량과 하역허용파고를 계산하고 上田 등(1994)의 산정 값과 비교하여 실시하였다.

Table 1에 나타낸 계산조건은 선박의 선종 및 선형과 선박의 치수, 계류장치, 입사파 조건 등으로 이루어져있다. 계산 조건 중에서 선박의 길이(Lpp), 넓이(Breadth), 흘수심(Draft)등은 국내에서 일반적으로 건조되는 일반화물선 10,000DWT의 제원을 이용하였다. 그밖에 박지수심은 10m, 계류삭 수는 8개, 방형재 수는 12개로 하였고, 입사파의 조건으로 파향은 15°~60° 까지 15° 간격으로 4파향이며, 파고는 0.1m~0.8m, 주기는 6s~15s까지 5가지로 설정하였다.

Fig. 2는 선박에 입사하는 파향이 45°인 경우에 대해서 유의파고와 동요량의 관계를 주기별로 표시하고, 본 모형의 결과를 上田 등(1994)의 결과와 비교한 것이다.

Table 1. Computational conditions for verification of the present model

	본 모형의 조건	上田 등 (1994)
선종	일반화물선	일반화물선
선형	10,000DWT	10,000DWT
Lpp	120m	127.5m
Breadth	17.42m	19.9m
Draft	6.0m	4.32m
박지수심	10m	10m
계류삭수	8	8
방형재수	12	12
파향	15°, 30°, 45°, 60°	15°, 30°, 45°, 60°
파고	0.1m ~ 0.8m	0.1m ~ 0.8m
주기	6s, 8s, 10s, 12s, 15s	6s, 8s, 10s, 12s, 15s

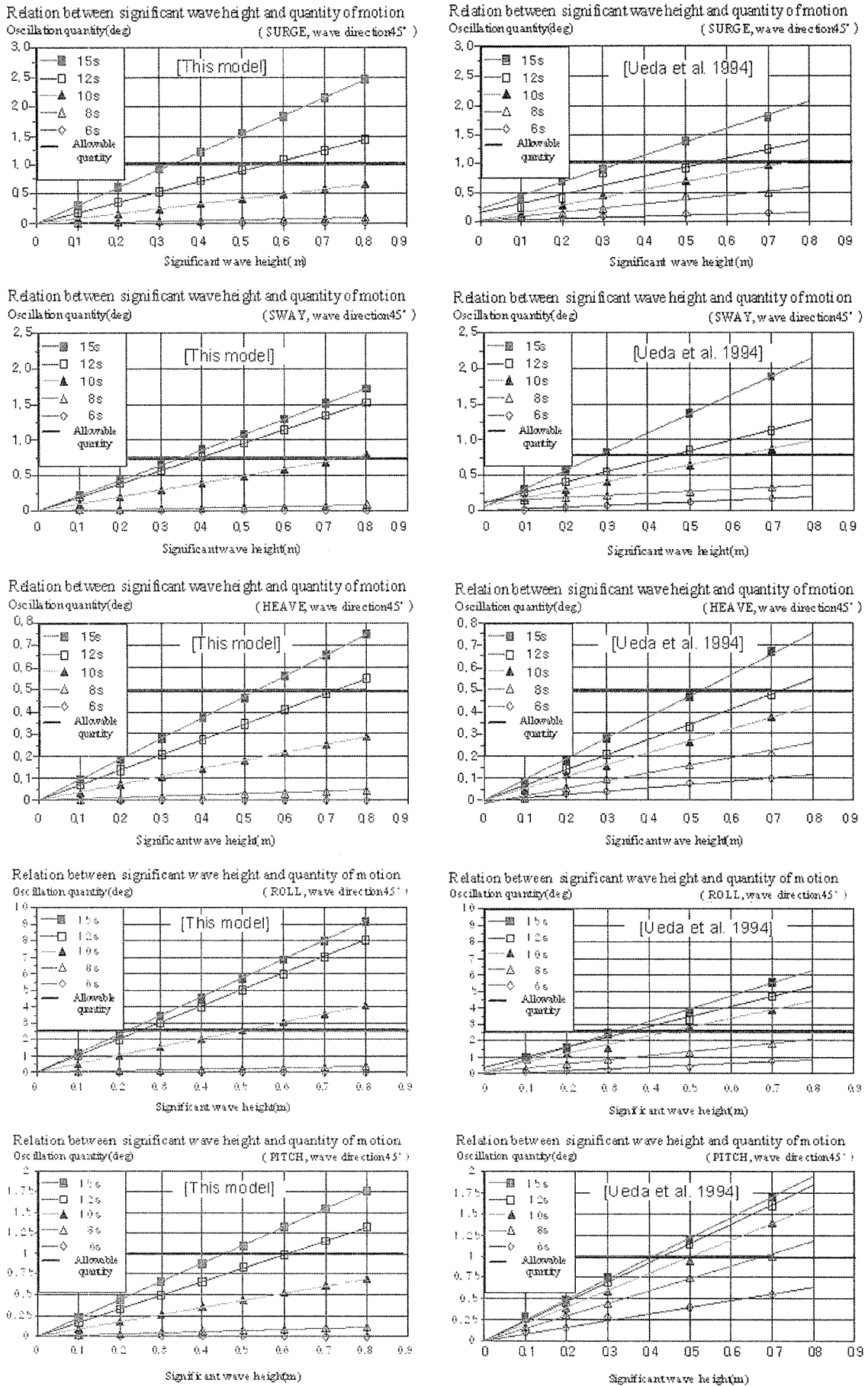


Fig. 2 Comparison between significant wave height and quantity of motion

본 모형에 의한 동요성분들은 上田 등(1994)의 결과와 허용동요량을 초과할 때의 유의파고의 유사하게 나타나며, 장주기에 가까울수록 두 결과가 일치하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 roll의 모드에서는 본 모형에 의한 동요량은 上田 등

(1994)의 결과보다 크게 산정되었고 이에 따라 유의파고는 작게 산정되는 결과를 보였다. 그리고 pitch의 결과에서는 본모형에 의한 동요량이 주기 6s와 8s에서 上田 등(1994)의 결과보다 작게 산정됨을 알 수 있다.

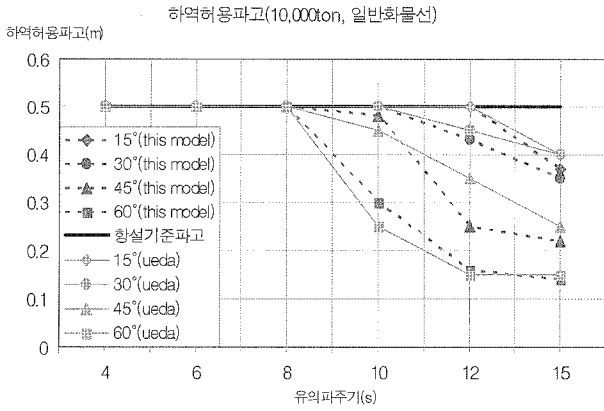


Fig. 3 Comparison between this model and Ueda's model with loading and unloading allowable wave height

Fig. 3은 파향별·주기별 하역허용파고를 본 모형의 결과와 上田 등(1994)의 결과를 비교한 것이다. 하역허용파고는 파 주기가 일정할 경우 선박에 입사하는 파향이 90°에 가까울수록 작아지고, 입사파향이 일정할 경우 파 주기가 클수록 작아짐을 알 수 있다. 일반화물선 10,000DWT의 하역허용파고는 선박에 입사하는 파향이 60° 일 때는 파 주기가 8s 이상이면 항만설계기준파고 0.5m 이하가 된다. 본 모형에 의한 하역허용파고는 파향 45°, 주기 12s 인 경우를 제외하면 上田 등(1994)의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

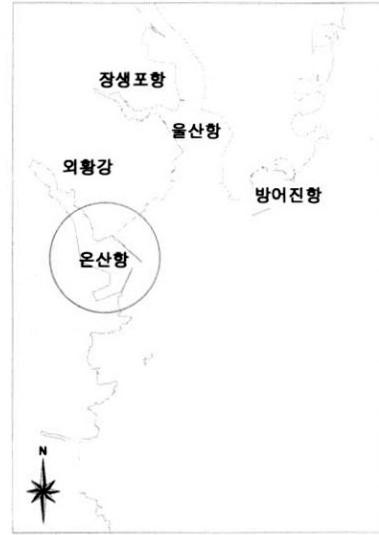


Fig. 4 The Location map of the Onsan harbor

5. 현지항만의 적용

5.1 대상지역

본 연구에서는 울산광역시 울주군의 온산항(Fig. 4)을 대상으로 계류선박의 동요량을 고려한 새로운 항만가동을 평가 방법을 적용하고 현행 방법에 의한 가동을 평가 방법과 비교해 보았다. 현재 온산항은 2단계 신항 개발이 진행되고 있으나, 여기서는 현행 방법과의 뚜렷한 차이를 확인하기 위

Table 2. Computational conditions for ship motion analysis

선종	동요해석 조건		
	일반화물선	일반화물선	일반화물선
선형	5,000DWT	10,000DWT	50,000DWT
Lpp	98m	120m	207m
Breadth	14.0m	17.42m	32.20m
Draft	4.5m	6.0m	10.7m
박지수심	8m	10m	15m
계류삭수	8	8	10
계류삭 선인장력	1.54tf	2.21tf	3.57tf
방현재수	10	12	12
방현재 탄성계수	4.83tfm	9.50tfm	33.0tfm
파향	15, 30, 45, 60	15, 30, 45, 60	15, 30, 45, 60
파고	0.1m~0.8m	0.1m~0.8m	0.1m~2.0m
주기	7s, 9s, 12s, 15s	7s, 9s, 12s, 15s	7s, 9s, 12s, 15s

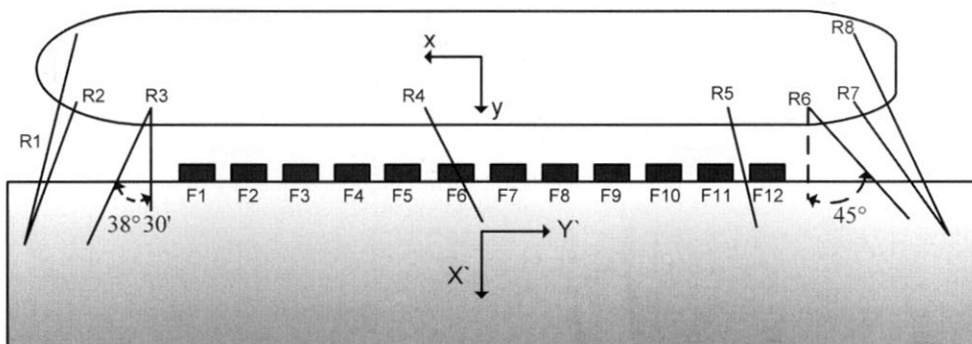


Fig. 5 Sketch of fender and mooring line

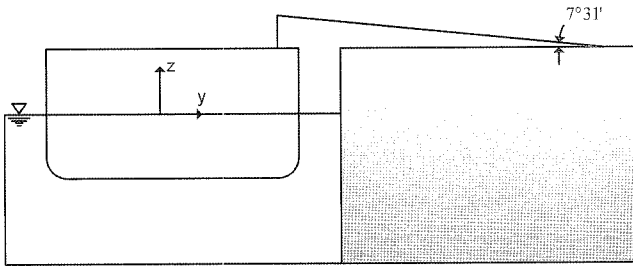


Fig. 6 Sketch of moored ship at jetty

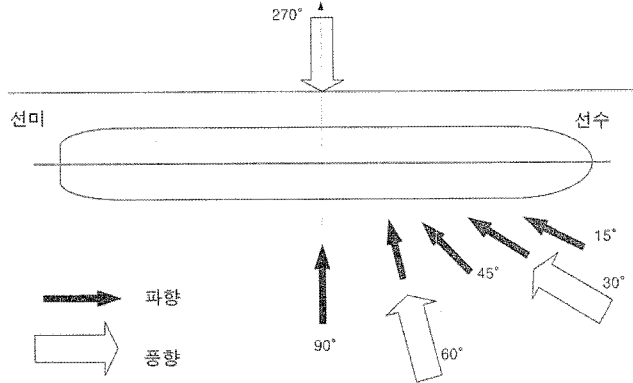


Fig. 7 Definition of the wind direction and the wave direction

역은 동계에는 NE계열 파랑이 우세하고, 하계에는 S 계열의 파랑이 우세한 지역으로서 조석에 의한 영향은 매우 작다.

5.2 계산조건

현지 항만의 가동률 평가에 사용된 대상 선박의 선종은 일반화물선이고, 선형은 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT의 3종류로서 계산 조건을 정리하면 Table 2와 같다. 하역 허용파고는 일반적으로 만재시보다 공재시의 쪽이 작아지기 때문에 본 연구에서는 선박의 재하상태를 공재상태로 하였다. Table 2에서 선박의 길이, 폭은 일반화물선의 평균적인 제원을 사용하였고, 흘수심은 항내 박지의 수심이 선형별로 8m, 10m, 15m일 때 각각 4.5m, 6.0m, 10.7m로 설정하였다. 계류삭수와 방현재의 수는 두 종류이고, 계류삭의 초기 장력과 방현재의 탄성계수는 선형이 클수록 큰 값을 사용하였다.

선박의 계류상태와 방현재의 배치는 Fig. 5와 같다. 여기서는 계산에 사용된 50,000DWT선박의 계류상태를 나타낸 것으로서 계류삭이 10개, 방현재가 12개 배치되어 있고 계류삭의 넓이 각도가 표시되어 있다. Fig. 6은 안벽과 계류선박의 단면도를 나타낸 것으로서 안벽과 이루는 계류삭의 높이 각도가 나타내어져 있다.

선박에 입사하는 파랑의 방향은 Fig. 7과 같이 15°, 30°, 45°, 60°로 설정하였고, 유의파주기는 6s, 8s, 10s, 12s, 15s로 하였다. 파고는 0.1m~0.8m의 범위로 설정 하였는데 초대형선인 50,000DWT에 대해서는 현행 기술기준의 하역한계파고가 0.7m~1.5m인 점을 감안하여 1.0m, 1.5m, 2.0m에 대해서도 계산했다.

上田 등(1994)은 일반화물선10,000DWT, 공재상태에 대하여 파향이 30° 및 60°의 조건에 대하여 바람 조건에 따른 하역허용의 파고를 산정하였다. 파향 30°의 경우에는 평균풍속 10 m/s, 풍향 30°와 무풍상태에 대하여 비교하였는데 양

자의 차이는 작게 나타났다. 또한, 파향 60°에서는 평균풍속 10 m/s, 풍향 60°보다도 무풍상태의 하역허용파고가 작다. 이에 비하여 평균풍속 10 m/s, 풍향270°의 하역허용파고는 무풍상태 및 평균풍속10 m/s, 풍향 60° 조건의 경우보다도 작은 것으로 나타났다. 따라서 바람의 영향은 그다지 크지 않기 때문에, 본 연구에서 바람의 조건은 무풍상태로 하여 동요해석을 수행하였다.

감쇠력조건은 순수 동유체력만으로 계산하게 되면 횡동요의 경우 감쇠력이 작기 때문에 공진 주파수 근처에서 실제보다 상당히 큰 값을 주게 된다. 그러므로 횡동요의 경우에는 점성감쇠력을 포함시켜 계산해야만 실제에 가까운 값을 얻을 수 있게 된다. 횡동요의 점성감쇠력은 운동변위에 대한 비선형 함수이다. 따라서 주파수 영역의 계산에 이 힘을 포함시키려면 선형화된 값을 써야 한다. 본 계산에서는 횡동요 5°까지의 에너지를 적분하여 대응하는 선형계수의 값을 구하여 계산에 포함시켰다.

방현재의 조건은 국내에서 제조된 고무방현재를 대상으로 검토하였다. 정반력형과 반력점증형의 방현재중 정반력형이 장주기에 가까울수록 하역허용파고가 작기 때문에 정반력형 방현재로 선택하였다.

계류삭 및 계류방법은 각 선형마다 동일하게 하였다. 단 계류삭의 초기장력은 절단허중의 7%로 하였다.

5.3 동요량 계산

계류선박의 동요량은 일반화물선 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT의 3가지 선형에 대해서 Table 2의 조건으로 입사파향 4개, 파주기 4개의 계산 case에 대해서 선박의 6가지 동요모드를 선박동요해석 수치모형으로 구하였다.

동요량 결과는 Fig. 2에서 알 수 있듯이, 동일한 파향, 파주기에서는 선형이 작을수록 동요량은 증가하였고, 동일한

Table 3. Allowable wave height for cargo handling (5,000DWT)

조건	일반화물선	선박동요량 · 방현재 허용변위				
선종	5,000DWT	SURGE	1.0m			
풍향	무풍	SWAY	0.75m			
풍속	0m/s	HEAVE	0.5m			
파향	60°	ROLL	2.5°			
		PITCH	1.0°			
		YAW	1.5°			
		방현재 허용변위	0.575m			
		허용파고(m)				
동요성분	파주기	7s	9s	12s	15s	
		SURGE	33.00	3.10	0.90	0.50
		SWAY	9.30	4.30	0.80	0.30
		HEAVE	0.45	0.40	0.13	0.12
		ROLL	37.30	0.40	0.36	0.12
		PITCH	90.00	3.40	0.39	0.13
		YAW	20.80	15.20	0.76	0.26
하역허용파고(m)			0.45	0.40	0.13	0.12

선형과 파랑에서는 파주기가 커질수록 동요량은 커졌다. 이것은 장주기파가 될수록 하역허용파고가 작아진다는 것을 의미한다. 또한 동일 파주기에 대해서 비교하면 입사파향이 90°에 가까울수록 즉, 파가 선박의 측면방향으로 입사할수록 sway, roll의 동요량이 크게 증가함을 알 수 있었다.

5.4 하역허용파고 산정

하역허용파고는 계류선박의 하역작업이 가능한 한계 파고를 결정하는 것으로서 결정 방법은 다음과 같다. 먼저, 유의

Table 4. Allowable wave height for cargo handling (10,000DWT)

조건	일반 화물선	선박동요량 · 방현재 허용변위			
		선종	10,000DWT	SURGE	1.0m
풍향	무풍	SWAY	0.75m		
풍속	0m/s	HEAVE	0.5m		
파향	60°	ROLL	2.5°		
		PITCH	1.0°		
		YAW	1.5°		
		방현재 허용변위	0.575m		
허용파고(m)					
파주기 동요성분		7s	9s	12s	15s
SURGE		8.40	1.20	0.55	0.31
SWAY		5.04	0.50	0.26	0.23
HEAVE		8.65	1.38	0.72	0.52
ROLL		3.21	0.31	0.16	0.14
PITCH		7.08	1.14	0.60	0.44
YAW		7.97	0.70	0.35	0.30
하역허용 파고(m)		0.50	0.31	0.16	0.14

Table 5. Allowable wave height for cargo handling (50,000DWT)

조건	일반화물선	선박동요량 · 방현재 허용변위			
		선종	50,000DWT	SURGE	1.0m
풍향	무풍	SWAY	0.75m		
풍속	0m/s	HEAVE	0.5m		
파향	60°	ROLL	2.5°		
		PITCH	1.0°		
		YAW	1.5°		
		방현재 허용변위	0.575m		
허용파고(m)					
파주기 동요성분		7s	9s	12s	15s
SURGE		8.20	3.20	1.50	1.40
SWAY		2.10	0.90	0.50	0.40
HEAVE		2.20	1.20	0.70	0.60
ROLL		1.40	0.60	0.40	0.40
PITCH		1.80	1.30	1.20	1.10
YAW		2.20	1.30	1.30	1.20
하역허용 파고(m)		0.70	0.60	0.40	0.40

파고와 동요량이 대체적으로 선형의 관계에 있으므로 양자의 관계에 대한 회귀식을 각 주기별로 구한다. 다음으로 이 회귀식과 전술한 하역허용 동요량과의 교점, 즉 하역허용파고를 주기별로 구한다. 이것을 각 동요성분별로 반복하여 구한다. 또한, 방현재에 대해서는 최대변위와 그 허용변위로부터 동일한 방법으로 하역허용파고를 구한다.

본 연구에서는 동요량 계산 결과중에서 입사파향 60° 일 때의 하역허용파고가 다른 파향에 비해 가장 작으므로 입사파향 60°에 대해서 하역허용파고를 산정하였다. 각 선형별로 입사파향 60°에 대한 하역허용파고의 산정 예를 나타내면 Table 3~5와 같다. 각 표는 주기별로 각 동요성분에 대하여 회귀식과 허용동요량의 교점으로부터 구한 유의파고를 나타내고 있으며, 이들 값 중에서 최소치를 하역허용파고로 선정한다. 단, 이 수치가 현행 기술기준의 하역허용파고를 초과하는 경우에는 설계기준에 제시된 파고를 하역허용파고로 채택한다.

Table 3은 5,000DWT선박에 대한 하역허용파고 산정 결과로서, 파 주기가 7s, 9s, 12s일 때는 heave 모드에서 0.45m, 0.40m, 0.13m로 산정되었고, 파 주기가 15s일 때는 heave와 roll모드에서 0.12로 산정되었다. Table 4는 10,000 DWT의 하역허용파고 산정 결과로서 주기 7s에서는 3.21m로 계산되었지만 항만설계기준의 하역허용파고를 초과하므로

Table 6. Allowable wave height for cargo handling by wave direction and period (5,000DWT)

5,000DWT				
파향	파 주기			
	7s	9s	12s	15s
15°	0.5m	0.5m	0.4m	0.3m
30°	0.5m	0.4m	0.3m	0.3m
45°	0.5m	0.4m	0.3m	0.2m
60°	0.45m	0.4m	0.1m	0.1m

Table 7. Allowable wave height for cargo handling by wave direction and period (10,000DWT)

10,000DWT				
파향	파 주기			
	7s	9s	12s	15s
15°	0.5m	0.5m	0.5m	0.4m
30°	0.5m	0.5m	0.4m	0.3m
45°	0.5m	0.5m	0.3m	0.2m
60°	0.5m	0.3m	0.2m	0.1m

Table 8. Allowable wave height for cargo handling by wave direction and period (50,000DWT)

50,000DWT				
파향	파 주기			
	7s	9s	12s	15s
15°	0.7m	0.7m	0.7m	0.7m
30°	0.7m	0.7m	0.7m	0.7m
45°	0.7m	0.7m	0.7m	0.6m
60°	0.7m	0.6m	0.4m	0.4m

로 가동률계산에 사용할 하역허용파고는 설계기준 파고인 0.50m로 산정하였다. 그리고 파 주기가 9s, 12s, 15s일 때는 모두 roll의 모드에서 각각 0.31m, 0.16m, 0.14m로 산정되었다. Table 5는 50,000DWT의 하역허용파고 산정 결과로서 주기 7s에서는 1.40m로 계산되었지만 항만설계기준 파고를 초과하므로 가동률계산에 사용할 하역허용파고는 0.70m로 산정하였다. 그리고 파 주기가 9s, 12s, 15s일 때는 모두 roll의 모드에서 각각 0.60m, 0.40m, 0.40m로 산정되었다.

온산항의 하역허용파고는 각 선형별로 파향과 주기에 따라 정리하면 Table 6~8과 같다.

Table 6은 5,000DWT에 대한 하역허용파고를 정리한 것으로서, 파향이 60°일 때는 주기가 커짐에 따라 하역허용파고는 0.45m에서 0.1m로 줄어들음을 알 수 있다. Table 7은 10,000DWT에 대한 하역허용파고를 정리한 것으로서, 파향이 60°일 때는 주기가 커짐에 따라 하역허용파고는 0.5m에서 0.1m로 줄어들음을 알 수 있다. Table 8은 50,000DWT에 대한 하역허용파고를 정리한 것으로서, 파향이 60°일 때는 주기가 커짐에 따라 하역허용파고는 0.7m에서 0.4m로 줄어들음을 알 수 있다.

이들 결과들을 종합하면 동일한 파향에 있어서 주기에 대한 하역허용파고의 변화는 주기가 길 수록 하역허용파고는 작아짐을 알 수 있다. 이것은 장주기 일 수록 계류선박의 동요량이 커지기 때문이다. 또한 동일한 주기에 있어서 비교하면 파가 선박에 대하여 측면방향으로부터 입사 할 수록 하역허용파고는 작아진다. 이는 파향이 90°에 가까울수록 sway, roll의 동요량이 커지기 때문이다.

Table 9. Incident wave conditions

파향	파고(m)	주기(s)
NNE	3.5	7.2
NE	3.5	7.2
ENE	2.5	6.2
E	2.5	6.2
SSW	4.0	8.0
SW	4.0	8.0

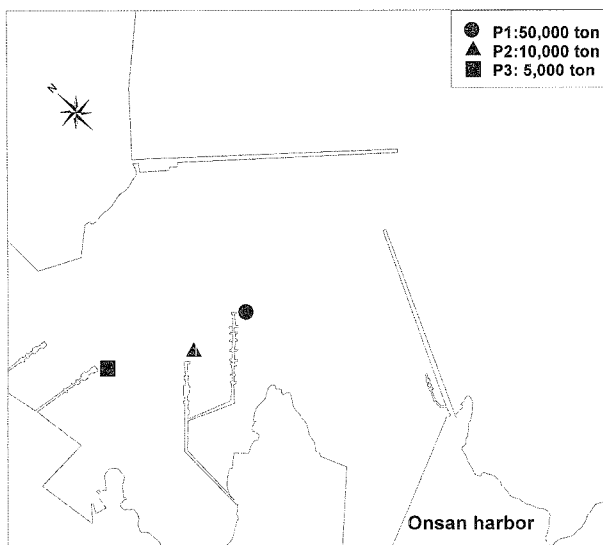


Fig. 8 Location map of the berth for computation

Table 10. Relative wave height of each berth by wave direction

	NNE	NE	ENE	E	SSW	SW
P1	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3
P2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.2	0.2
P3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2

5.5 파랑장 해석 및 파고비 산정

대상해역의 파랑장해석은 에너지 평형방정식 모형을 이용한 광역계산과 시간의존완경사 방정식모형을 이용한 상세역계산으로 이루어 졌다. 광역계산의 입사파 조건은 Table 9와 같이 겨울철의 NNE, NE, ENE, E방향과 여름철의 SSW, SW방향에 대해서 평상파 제원을 사용하였다.

계산결과는 겨울철 주 파향인 NNE, NE, ENE, E 파향의 파고비가 여름철 주 파향보다 높게 나타났다. Fig. 8은 각 선석의 가동률 산정 위치를 나타낸 것이다. 대상선석은 항입구로부터 항내측으로 각각 P1(50,000DWT), P2(10,000DWT), P3(5,000DWT)이며, 그림에는 각각 ●, ▲, ■로 표시하였다.

Table 10은 항내파랑장 해석에 의한 P1, P2, P3선석의 파고비를 파향별로 나타낸 것이다. 파향별 파고비 산정 결과를 살펴보면, E방향의 입사파가 전 선석에서 가장 큰 파고비를 나타내었다. 특히, P1의 경우는 항 입구에 근접해 있으므로 다른 선석에 비하여 다소 큰 파고비를 나타내었고 0.3~0.5의 파고비 분포를 보였다. 그 밖의 선석별 파고비 결과는 P2선석은 파향별로 0.2~0.5의 분포를 보였고, P3선석은 0.2~0.4의 분포를 나타내었다.

5.6 항만가동률 산정

일반적으로 중·대형선은 항내에서 횡계류 상태로 정박하고 있으며, 선박에 입사하는 파랑의 방향은 항입구와 일직선상의 파향을 제외하고는 방파제 선단에서 회절된 파랑의 방향과 선박의 계류위치에 따라 결정된다.

본 연구의 온산항은 겨울철 NE계열파랑과 여름철 S계열 파랑이 우세한 지역으로서 항입구와 일직선상의 방향인 E를 제외하고, 그 이외의 심해파랑은 항입구에서 회절된 파랑이 항내로 전달된다. 온산항의 대상 선박의 계류상태는 심해파의 방향에 따라 회절파의 방향이 약간씩 변화하겠지만 방파제 선단의 회절파와 대략 60° 정도의 각도를 이루는 위치에 놓여 있다. 따라서 가동률 산정에는 온산항에 내습 가능한 전 심해파에 대해서 고려하였고, 이 파랑들이 항입구에서 회절되어 계류선박에 60° 정도의 각도 입사하는 것을 상정하였다. 여기서 가동률 산정에 필요한 심해파의 파향-주기 결합빈도분포는 온산항 전면해역의 장기파랑 관측자료를 사용하였다.

온산항에 대한 항만가동률 산정조건은 Table 11과 같다.

Table 11. Estimation conditions of operating ratio for the Onsan harbor

선석명	선종	선형	파향
P1	일반화물선	50,000DWT	60°
P2	일반화물선	10,000DWT	60°
P3	일반화물선	5,000DWT	60°

Table 12. Operating ratio of the Onsan harbor

선석명	P1 (50,000DWT)		P2 (10,000DWT)		P3 (5,000DWT)	
	현행 방법 (%)	본 방법 (%)	현행 방법 (%)	본 방법 (%)	현행 방법 (%)	본 방법 (%)
NNE	99.8	95.2	99.8	97.3	99.9	98.1
NE	90.6	84.7	86.4	82.1	99.8	97.9
ENE	83.4	82.3	81.1	78.9	96.3	85.1
E	93.9	93.5	89.1	87.5	92.0	90.5
SSW	99.5	97.1	99.5	98.2	99.7	98.9
SW	99.9	99.5	99.9	98.1	99.9	99.9

가동률 산정의 대상 선종은 일반화물선이고, 선형은 5,000DWT, 10,000DWT, 50,000DWT의 3종류이다.

항만가동률 산정은 대상 선석 전면의 파고비와 하역허용파고의 관계로부터 하역허용심해파고를 산출한 후, 현장 관측 결과에서 얻은 파고주기 결합빈도분포표로부터 하역허용심해파고의 비초과 확률을 산정하였다. 항만가동률 결과는 백분율로 표시하여 현행 방법에 의한 결과와 함께 Table 12에 나타내었다.

본 방법에 의한 가동률 산정 결과는 현행 방법에 의한 결과보다 전반적으로 1%~11%정도 낮은 값을 나타내었다. 대상선석별로 비교해 보면, P1(50,000DWT)은 본 방법에 의한 가동률이 현행 방법보다 2%~6%정도 낮게 산출되었다. 특히 NNE와 SSW방향은 현행 가동률 산정 방법으로는 설계기준을 만족시키지만 본 방법에 의하면 92.2%와 97.1%로서 설계기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

P2(10,000DWT)는 본 방법에 의한 가동률이 1%~4%정도 현행 방법보다 낮게 산출되었으며, NNE방향은 본 방법에 의하면 97.3%로서 설계기준을 만족시키지 못하였다.

P3(5,000DWT)는 본 방법에 의한 가동률이 현행 방법보다 1%~11%정도 낮게 산출되었다. 특히, ENE방향에 대해서는 본 방법에 의한 가동률이 현행 방법보다 11%정도 낮게 산출되었는데, 이는 선형이 작기 때문에 선박의 측면으로 입사하는 파향에 대해서 동요량이 커지기 때문이다.

6. 결 론

본 연구에서는 계류선박의 동요량을 정량적으로 산정하고 하역한계파고로부터 항만의 가동률을 산정하는 방법을 제시하였다.

온산항에 대한 계산결과로부터 얻은 일반적인 결론은 다음과 같다. 온산항의 하역허용파고는 5,000DWT의 경우는 주기에 따라 0.1m~0.45m이고, 10,000DWT는 0.1m~0.5m, 50,000DWT는 0.4m~0.7m의 분포를 나타내었다. 이들 하역허용파고는 입사파의 주기가 장주기에 가까울수록 작아졌으며, 동일파 주기에 있어서는 선체에 입사하는 파향이 60°에 가까울수록 작아졌다. 즉, 파향이 60°에 가까울수록 sway,

roll의 동요량이 커져서 하역허용파고가 작아지게 된다. 동일파향, 동일파주기에 대해서는 선형이 대형일 수록 하역허용파고가 커졌다.

온산항의 항만가동률은 본 방법에 의한 결과가 현행 방법보다 1~11% 정도 낮게 산출 되었다. 특히, NNE와 ENE방향은 P1, P2, P3 선석 모두 현행 방법으로는 설계기준에 제시된 가동률을 만족시키지만, 본 방법에 의하면 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과로부터, 외해에 노출되어 있는 항만은 현행 방법에 의한 가동률 평가뿐만 아니라 계류선박의 동요를 고려한 항만가동률 평가를 함께 검토하여 평면배치 계획을 수립하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

참고문헌

- 안성필(1986) 3차원 특이점 분포방법에 의한 계류시 부유체의 운동응답해석, 석사학위논문, 서울대학교.
- Bruun, P. (1981) Port Engineering, 3rd Edition, Gulf Pub.
- Hiraish (1995) Field observation of harbor oscillation by long period waves, *J. of Coastal Eng., In Japan*, in Japanese, Vol. 42, pp. 301-305.
- Rafael, G., Eduardo, G., and Fernando, P. (1998) Utilization of moored vessels in hydraulic models of harbors, *Coastal engineering*, ASCE, pp.2979-2990.
- Ueda, S. and Shiraisi, S. (1988) The allowable ship motions for cargo handling at wharves. 27(4), Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 27, pp.3-61.
- Yuen, 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.
- 上田茂 白石悟, 大島弘之, 淺野恒平 (1994) 繫岸船舶の動搖に基づく荷役許容波高の提案及び稼働率. 港灣技研資料, No. 779.
- 永井紀彦, 橋本典明, 淺井正, 戸引動, 伊藤一教, 東江隆夫, 小林昭男, 柴田孝雄 (1994) 現地夕に基づく港内係留船舶の動搖に及ぼす港外長周波, *海岸工學論文集*, 第41卷, pp.931-935.
- 久保雅義, 原繁樹 (1993) 年間 荷役稼働率からみた繫留システムの比較について, *海岸工學論文集*, 第40卷, pp. 941-945.
- 久保雅義, 原繁樹 (1995) 荷役稼働率計算における波群副振動による長週期波の影響について, *海岸工學論文集*, 第42卷, pp. 931-935.

(접수일: 2006.7.3/심사일: 2006.8.24/심사완료일: 2006.8.24)