

## 항만 부진동에 관한 현장관측 및 수치실험

김규한\* · 김덕중\* · 배기성\*\*

\*관동대학교 건설환경시스템공학부

\*\*경상대학교 해양과학대학 해양토목공학과

# Field Observation and Numerical Modeling for Secondary Undulation

KYU-HAN KIM\*, DUK-JOONG KIM\* AND KI-SEONG BAE\*\*

\*Division of Civil & Environmental System Engineering, Kwandong University, Gangneung, Korea

\*\*Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang University, Mokpo, Korea

**KEY WORDS:** Secondary Undulation 항만 부진동, Field Observation 현장관측, Finite Element Method 유한요소법, Long Period Wave 장주기파

**ABSTRACT:** The purpose of this study is to investigate the variation of resonance that is possibly caused by construction of new port in a practical sea area between the existing port and the new one. The research of amplification that of the sea area was accomplished for the variation of resonance. In this study, long period wave that is observed continuously in the practical sea area was analyzed, and then secondary undulation was reproduced by numerical analysis. As a result of numerical analysis, the first mode of resonant periods in the existing port is 640sec, and in the new one is 500sec. On the other hand, we know there is long period wave of 500sec from analyzation of field datas. Because that period this period is the same with the resonant period in the new port. There is also the possibility of secondary undulation cause of resonant.

### 1. 서 론

종래의 항만은 선박의 입·출항시 항행의 안전성과 안벽에서의 계류, 하역의 안전성을 확보하기 위해 주기 10초 전후의 통상파랑(단주기파랑)에 대해 필요한 정온도가 확보될 수 있도록 외곽시설의 형상이나 안벽의 위치 등이 결정되었다. 그러나, 내습하는 파랑에는 단주기파랑 성분의 비선형 간섭에 의한 파군에 구속된 주기 1~2분의 장주기파나 주기 수십 분의 만수진동(bay oscillation)이 포함되어 있어서 항내에서 부진동이 야기되어 장주기 파고가 증대되는 경우가 있다. 또한, 이들 장주기파의 주기가 계류선박의 동요의 고유주기에 가깝기 때문에 통상파랑이 하역한계파고보다 작은 경우에도 하역작업의 중단이나 계류라인의 절단이라는 피해를 유발시키는 경우가 있다.

장주기파에 의한 선박의 계류불가능 사례를 Nagai et al. (1994)이 보고하였고, Hiraish et al.(1995)은 선박화물작업에 피해를 입는 일본의 주요 항에서 장주기파를 관측·분석하였다. 또한, 국내에서는 Jeong(1999)이 장주기파에 의한 항내부진동을 연구하였고, Kim et al.(1995)이 현장관측을 통한 장주기파의 특성에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 실제 항만건설 예정해역을 대상으로 장주기 파 관측을 실시하여 그 출현특성을 분명히 함과 동시에 수치 모형실험을 통해 항만 건설후의 부진동 현상을 재현함으로써 항내 증폭현상을 분석하여 대상해역에서의 신항 건설로 인한 기존 항과 신항 전체의 공진현상의 변화에 대해 검토하였다.

### 2. 현장관측 및 분석

#### 2.1 현장관측의 개요

연구대상 항만인 J항은 한국 남해상의 섬에 위치한 항만으로 서 지형적인 여건으로 인하여 태풍 내습이 빈번하며 N파랑의 고파랑이 발생한다. 현장관측은 J항 동측의 신항 건설 예정해역에 메모리형 수압식 파고계 WH(Wave Hunter)-102를 수심 19m에 설치하여 2001. 6. 30~2001. 10. 12(105일)동안 실시하였다. 관측자료는 0.5sec 간격으로 2시간마다 20분간 취득하였으며, 2시간 간격의 연속된 2,400개 자료를 1세트로 하여 모두 1,260세트의 자료를 얻어 조석성분을 제거한 후 FFT를 이용한 스펙트럼분석을 통해 주요 주파수 성분에 대한 스펙트럼 밀도를 분석하였다.

Table 1 Details of field measurement

M · P	Observation Addition	Observation period	Depth	Note
P1	N 33° 31' 50" E 126° 33' 35"	6/30 ~ 10/12, 2001	19m	저층 관측

제1저자 김규한 연락처: 강원도 양양군·읍 임천리 산7번지  
033-670-3317 kkhkim@mail.kwandong.ac.kr

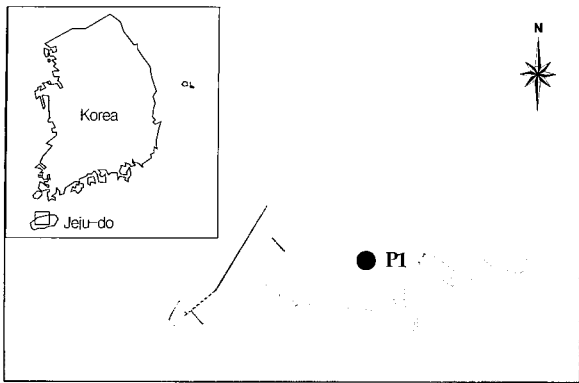


Fig. 1 The location map of field measurement

2.2 현장관측자료 분석

관측자료에 대해 스펙트럼 분석을 실시하고 얻어진 장주기 성분 중 유의파고와 유의주기를 구하여 이의 변화를 Fig. 2에 도시하였다. 그 결과 검출된 장주기파의 유의파고  $G_{1/3}$  은 0.2 ~ 5.7cm, 유의파 주기  $T_{G1/3}$  는 38.53 ~ 648.46sec 사이에 분포하였다. 또한, 관측정점에서 장주기 파고가 비교적 높았던 10월 11일 8시부터 20분 동안 관측된 자료의 스펙트럼 분석결과 Fig. 3에서와 같이 주기 6.4sec, 11.1sec, 53.8sec에서 첨두치를 나타내었다. 이 중 주기 53.8sec의 첨두치는 향후 항만 완성시 항만 고유의 진동주기와 일치할 때 공진현상을 일으켜 선박동요에 심각한 영향을 유발시킬 가능성이 있을 것으로 판단된다.

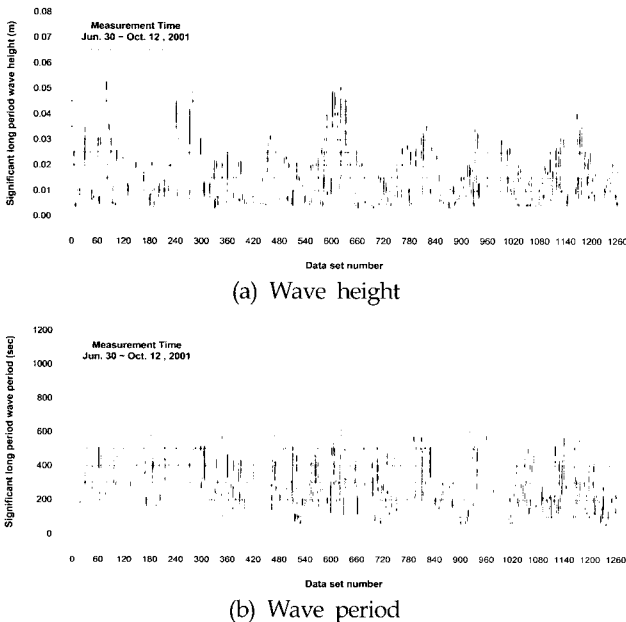


Fig. 2 Variation of long period waves

3. 수치실험

3.1 실험내용

항만 부진동은 일반적으로 외해로부터 항입구를 통하여 침입하는 장주기파가 항만의 형상에 따라서 에너지가 고립되어

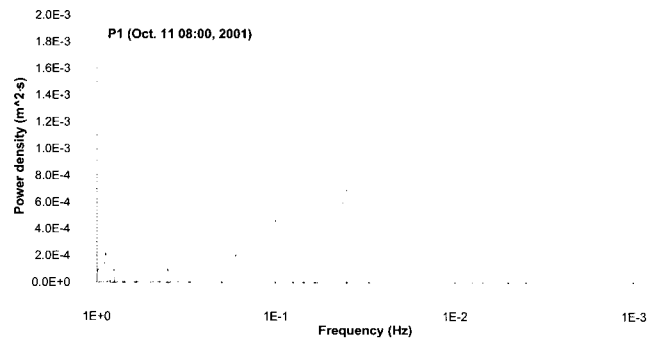


Fig. 3 Result of spectra analysis for long period wave at 08:00, 11, Oct. 2001

비정상적으로 공진하는 현상이다. 이러한 공진현상은 항의 형상으로 항내에서 형성되는 장주기 반사파의 절(node)이 항의 반사파의 복(antinode)과 만나는 경우에 가장 심하게 일어나며 항구의 폭이 좁을수록 크게 일어난다. 그 이유는 항내파의 마디가 항구에 위치할 경우 회절현상으로 더 큰 에너지를 갖고 있는 항외파의 에너지가 항내로 유입되는 것을 허용하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 항내의 공진특성을 파악하기 위하여 제 1 모드의 공진주기에 이르는 광범위한 주파수대(주기대)의 단일방향 규칙파를 사용한 항내 부진동 계산을 수행하고, 주파수 응답특성을 검토하였다.

3.2 기본방정식

본 연구에서의 수치모델은 파랑의 굴절, 구조물에 의한 파랑의 회절 및 부분반사, 해저마찰에 의한 에너지손실 등을 고려한 (1)식의 완경사방정식(mild slope equation)을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( CC_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( CC_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (1)$$

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \quad (2)$$

여기서,  $\Phi(x, y)$ 는 속도 potential,  $\phi(x, y, z, t)$ 의 복소수 위 함수,  $k, h$ 는 국소적인 파수, 수심,  $\omega$ 는 각주파수,  $C, C_g$ 는 각각 파속 및 군속도이다.

3.3 경계조건

Fig. 4에서 경계 B는 ①경계부(B0), ②반사형(B1), ③투과·반사경계(B2)로 나뉘고, 각각의 경계조건의 미분은 다음과 같다.

① 경계부(B0)

- 고유함수전개일 경우

산란파 성분을 다음 Hankel 함수의 급수대로 나타내어 해석적으로 표현한다.

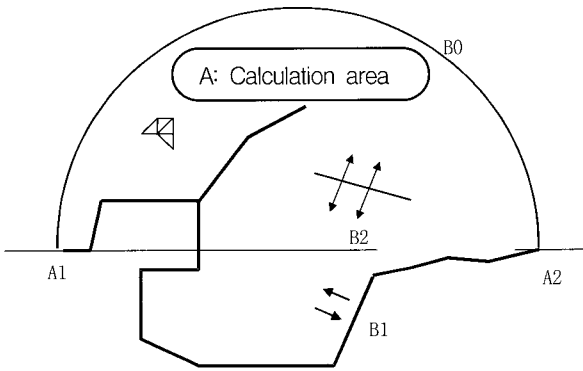


Fig. 4 Definition sketch for the boundary value problems

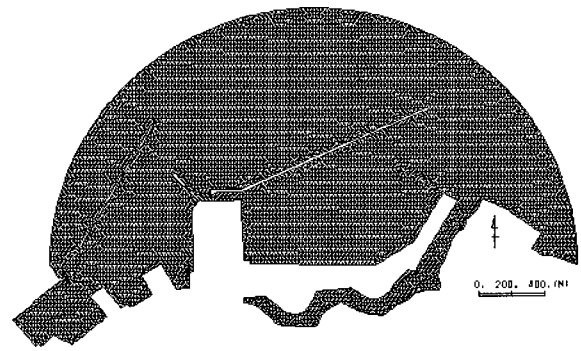


Fig. 5 Finite element meshes

$$\phi_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(K_r) \mu_n \cos(n\theta) \quad (3)$$

여기서,  $\mu_n$ 는 미지수,  $H_n^{(1)}$ 는  $n$ 차 제1종 Hankel 함수이다.

• 포물선 근사 개경계의 경우

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -p\phi - q \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + g \quad (4)$$

여기서,  $p, q, g$ 는 입사·반사파 성분과로부터 결정되는 계수이다.

② 반사형(B1)

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \alpha \phi, \quad \alpha = ik \frac{1-R}{1+R} \quad (5)$$

③ 투과·반사경계(B2)

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik(1-r)[(1+st)\phi - (s+t)\varphi] / (1-s^2) \quad (6)$$

여기서,  $\phi, \varphi$ 는 투과제에 의해 나뉘어진 양측의 속도 potential이다.  $r$ 은 반사계수,  $s, t$ 는 투과계수이다.

### 3.4 실험조건

유한요소법에 의한 부진동 해석시 유한요소망의 절점 수는 6,800개, 요소수 1,300개, 그리고 평균절점간격은 20m로 구성하였다. 또한, 입사파향은 N방향의 규칙파로 설정하였으며, 실험 주파수 범위는 관측기록범위인 30sec~1200sec로 설정하여 총 100case를 검토하였다. 아울러, 안벽의 반사율은 거의 완전반사에 가까운 0.99로 설정하고, 항외 배후수역은 0.0으로 설정하였다.

### 3.5 실험결과

Fig. 6은 입사파주기에 대해 안벽을 따라 파고의 최대값의 관계를 표시한 것이다. Fig. 6에서 주된 공진 주기는 640, 500, 150, 90, 68, 56, 52, 48, 38, 34sec 정도인 것을 알 수 있으며, 분석된 각 침두주기에 대해 수치모형실험을 실시하여 Fig. 7~Fig. 16에 파고비 분포로 도시하였다. 수치실험결과, 주기

640sec는 기존항의 제 1 모드의 공진주기이고, 신항도 이 영향으로 파고증폭 경향이 있으며, 주기 500sec는 신항의 제 1 모드의 공진주기(항내에서 腹, 항구에서 節)인 것으로 나타났다. 또한, 주기 150sec, 90sec, 68sec는 각각 신항의 동서방향 제 2, 3, 4 모드의 공진주기에 대응하는 것으로 판단되며, 주기 56sec 이하의 경우는 더욱이 고차 모드의 공진주기이고, 항내에서 동서·남북의 공진모드가 복합되어 있는 것으로 판단된다. 아울러, 계류선박의 장주기 동요를 일으키는 동요(고유)주기는 선박의 질량과 계선방법에 의해 다르지만, 대부분의 경우 60~300sec 정도로 알려져 있으며, 본 연구대상 항만에서는 그 주기대에 대해서 68sec, 90sec 등의 공진주기가 존재하는 것으로 나타났다.

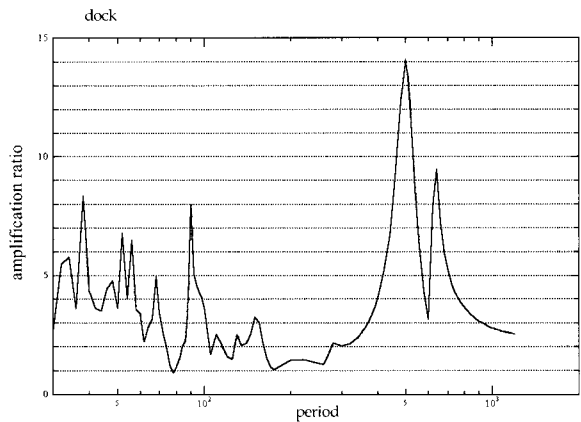


Fig. 6 Resonant specification of investigation harbor

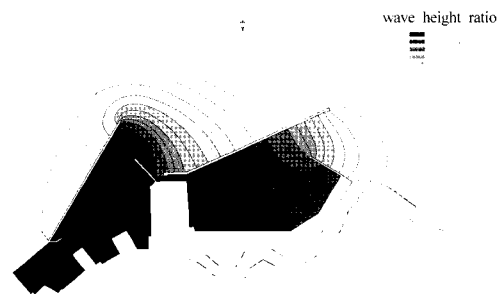


Fig. 7 Computed wave height ratio contours for wave period 640 seconds

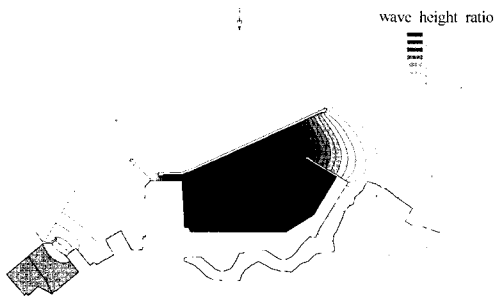


Fig. 8 Computed wave height ratio contours for wave period 500 seconds

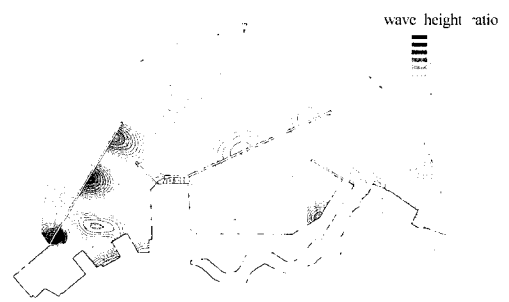


Fig. 12 Computed wave height ratio contours for wave period 56 seconds

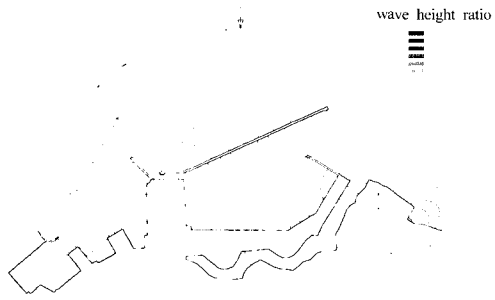


Fig. 9 Computed wave height ratio contours for wave period 150 seconds

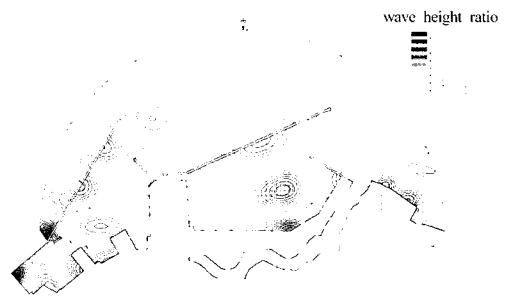


Fig. 13 Computed wave height ratio contours for wave period 52 seconds

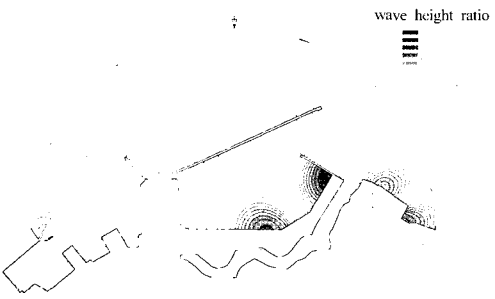


Fig. 10 Computed wave height ratio contours for wave period 90 seconds

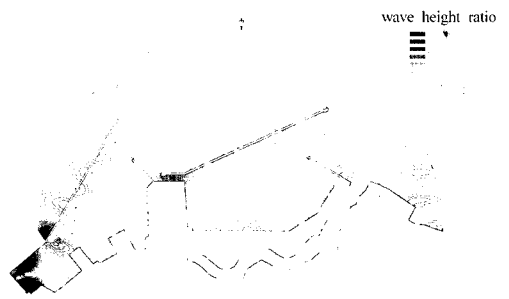


Fig. 14 Computed wave height ratio contours for wave period 48 seconds

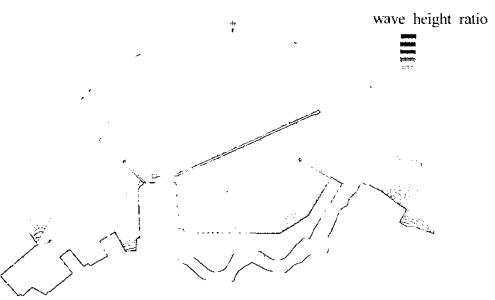


Fig. 11 Computed wave height ratio contours for wave period 68 seconds

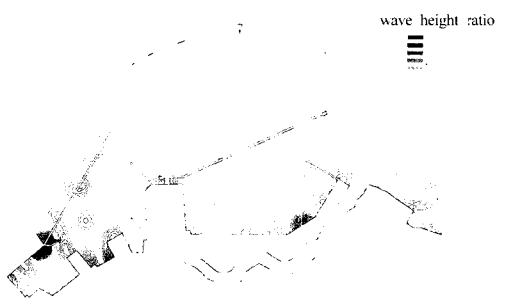


Fig. 15 Computed wave height ratio contours for wave period 38 seconds

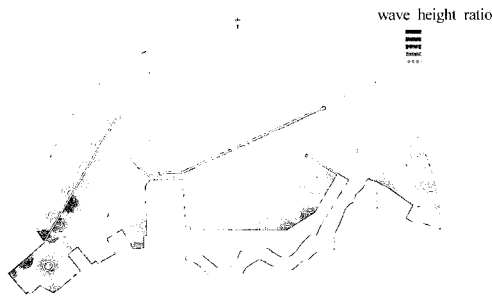


Fig. 16 Computed wave height ratio contours for wave period 34 seconds

#### 4. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장관측을 통해 검출된 대상해역의 장주기 유의파고  $G_{1/3}$  은 0.2~5.7cm, 유의파 주기  $T_{G1/3}$  는 38.53~648.46sec 사이에 분포하였다.
- (2) 수치실험결과 주기 640sec는 기존항의 제 1 모드의 공진주기이고, 신항도 이 영향으로 파고증폭 경향이 있으며, 주기 500sec는 신항의 제 1 모드의 공진주기이다.
- (3) 주기 150sec, 90sec, 68sec는 각각 신항의 동서방향 제 2, 3, 4 모드의 공진주기에 대응하는 것으로 판단된다.
- (4) 주기 56sec 이하의 경우는 더욱이 고차 모드의 공진주기이고, 항내에서 동서·남북의 공진모드가 복합되어 있는 것으로 판단된다.
- (5) 계류선박의 장주기 동요를 일으키는 동요(고유)주기는 대부분의 경우 60~300sec 정도로 알려져 있으며, 그 주기대에 대해서 68sec, 90sec 등의 공진주기가 존재한다.

- (6) 현장관측결과 대상해역에서는 주기 500sec 대의 장주기파가 존재하며, 이 주기대는 수치실험 결과 산출된 신항의 제 1 모드의 공진주기와 일치하는 것으로 나타났다.
- (7) 스펙트럼 해석시 나타난 주기 53.8sec의 첨두치는 장주기 동요를 일으키는 고유주기에 가까우므로 신항 완성시 항내 부진동을 야기시킬 가능성이 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

Huebner, K.H. (1995). The Finite Element Methods for Engineers, 3/e, John Wiley & Sons.

Hiraish et al. (1995). "Field Observation of Harbor Oscillation by Long Period Waves", J. of Coastal Engineering, in Japanese, Vol 42, pp 301-305.

Jeong, W.M. (1999). "Field Study and Finite Element Analysis Of Harbor Oscillations", Doctoral Dissertation, Seoul National Univ.

Kim et al. (1999). "A Study on Characteristics of Long Period Waves by Field Observations", Conf. of Civil Engineering, KSCE, in Korean, pp 427-430.

Nagai et al. (1994). "Relationship of a Moored Vessel in a Harbor and a Long Period Wave Caused by Wave Groups", Proc 24th Coastal Engineering Conf., ASCE, Vol 1, pp 847-860.

2002년 1월 18일 원고 접수

2002년 3월 20일 최종 수정본 채택