

영일만 항만에서의 부진동 변화에 관한 연구

전민수* · 이종우** · 이승철* · 정재현* · 황호동*

*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과, ** 한국해양대학교 건설환경시스템공학부 교수

Variation of Harbor Oscillations in Youngil Bay

Min-Su Jeon* · Joong-Woo Lee** · Seung-Chul Lee* · Jae-Hyun Jung* · Ho-Dong Hwang*

* Dept of Civil and Environmental Engineering, Graduate Division, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

** Prof., Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 오늘날에 항만부진동의 문제는 대형선박이 입출항하는 항만의 설계에서 가장 현저한 인자로 작용한다. 연안항만에서 탄성체의 삭으로 계류하고 있는 대형선박은 장주기파랑과 계류시스템간의 공진으로 인해 종종 이탈되기도 한다. 특히, 장주기 파랑의 증폭비가 현저해지면 화물의 하역에 장애를 가져오며 계류삭이 절단되는 경우도 발생한다. 이중 국내에서 부진동의 문제가 가장 현저하게 나타난 항만은 포항신항이다. 여러 가지 경우의 문제가 도선사 협회나 지역해양수산청으로부터 보고되고 있다. 그러나 이 항만에서 부진동을 야기하는 장주기 파랑의 내습을 막는 것은 어렵다. 더구나 정부는 이미 포항신항에서 발생하고 있는 이러한 문제점을 해결하지 않고 영일만의 입구에서 신항만 건설을 이미 착수해놓고 있다. 본 연구는 영일만 입구의 4.1km에 달하는 방파제 건설과 신항만 계획을 반영하여 이들이 항만부진동에 어떠한 변화를 가져오는 것인가에 대해 다룬다. 사용한 수치기법은 확장완경사방정식을 사용한 표준형식을 갖춘 것으로 수치실험결과를 이전 연구를 통해 이루어진 관측치와 비교하였으며, 이것이 어느 수준까지의 토론으로 이끌어 낼 것이며 장래 항만개발에 변화를 가져올 것으로 본다.

핵심용어 : 연안항, 부진동, 계류시스템, 수치기법, 확장완경사방정식, 현장관측

Abstract : Today the harbor oscillation problems are the most significant factor to design harbors serving the very large ships. Large vessels moored in the elastic hawsers at the coastal harbors are often displaced due to the resonance between the long period waves and mooring system. The cargo handling may be interrupted and the hawsers may be broken, especially when the amplification becomes remarkable. The most significant harbor which is confronted with harbor oscillation problem in Korea is the Pohang New Port. Many cases of problems are being notified by the pilot association and local office of MOMAF. However, it is difficult to prevent the arrival of long waves causing oscillation within this harbor. Moreover, Government already started new port plan at the mouth of Youngil Bay without treating problems occurred in the Pohang New Port. This study deals with the variation of harbor oscillation due to the construction of 4.1km breakwater at the bay mouth and new port plan. Numerical method used are fairly standard form from the extended mild slope equation. The obtained numerical results were compared with the field measurement from the previous study and this will bring a certain level of discussion and consideration of variation in the future port development.

Key words : Coastal harbor, Harbor oscillation, Mooring system, Numerical method, Extended mild-slope equation, Field measurement

1. 서 론

선박이 대형화됨에 따라 항만내의 정온도 유지 문제는 안정된 접이안과 하역작업에서 필연적이라 할 수 있다. 특히, 선박이 고속화 되어 항만내의 체류시간을 최소화하는 것이 관건으로 되어있고 대규모의 항만인프라 시설을 건설하기 위해 많은 예산을 투입하고 있는 만큼 항만가동율의 높이는 것도 항만계획자나 자사의 부두를 보유하고자 하는 기업에게는 주 관심사가 된다. 항만에서의 부진동의 문제는 기상변동이나 해황의 변

동으로 외해에서 발생한 파랑이 만내 또는 항만으로 입사되어 만이나 항만의 고유주기와 연계되어 공진현상이 나타나는 것으로 정박하고 있는 선박이나 항만구조물에 상당한 피해를 가져오는 것이다 (Lee and Raichlen, 1972). 80년대에 이르기까지도 설계과정에서 발견하지 못하고 항만을 건설 한 후 실제 부두의 운영과정에서 부진동의 현상을 발견하고 이에 대한 대책을 강구하고자 하지만 이미 상당한 토목공사가 이루어진 상태이거나 완료된 상태라 수정을 기하기가 더욱 어려운 실정이다. 국내 항만에서의 부진동 현상은 가장 현저하게 나타나는 곳으로 영일만의 포항신항으로 이미 포항종합제철단지를 조성하는 초기부터 거론이 되어 이를 해소하기 위한 노력이 반복되고 있으며, 현재까지도 이렇다 할 성과를 내놓지 못하고 있는 실정이다.

포항종합제철주식회사의 내부자료를 통하여 1987년부터 2001

*	minsusids@hanmail.net	051)410-4981
**	jwlee@hanara.hhu.ac.kr	051)410-4461
*	kmartime99@nate.com	051)410-4981
*	kkull@nate.com	051)410-4981
*	hodongvov@hanmail.net	051)410-4981

년까지의 포항신항의 장주기파랑 및 기상으로 인한 하역작업 불능일수를 분석한결과 Fig.1과 같이 나타났다. 포항항의 1,2,3,4번 부두를 제외한 나머지 부두의 최근 3년간 평균 가동율은 화천 시 하역중단 99일(27%)과 선체동요로 인한 하역중단 58일(17%)을 제외하면 실제로 정상하역가능일수는 208일(56%)밖에 되지 않는 것으로 된다. 최근 3년간의 평균치에 의하면 하역중단일수 58일 중 봄 12.1일(21%), 여름 3.7일(6%), 가을 17.4일(30%), 겨울 24.8일(43%)로 분류되었다.

포항항에서의 부진동에 관한 연구는 초기 현장관측기록을 통해 인지되기 시작하였고(추, 1974, 1976), 포항신항을 포함한 영일만에서의 부진동 현상을 2차원 차분모델로 분석한 이후(박, 1986), 건설부(1987), 강 등(1989), 해운항만청 (1994), 정 등(1995)이 현장관측 및 수치모형실험 결과를 통하여 그 존재를 확인하기에 이르렀다. 부진동의 저감은 일단 발생하는 항만에서 그 진동주기를 변경시키거나 증폭비를 감쇄시키는 2가지 방법으로 접근하여야 한다. 즉, 항만이 가지고 있는 1개 이상의 고유진동주기에 대해 항만이 가지고 있는 고유 진동주기가 공명이 되지 않도록 하는 것이지만 이것은 쉽지 않고, 다만 항만으로의 이용도가 크지 않거나 일시적인 박지로 활용할 수 있는 공간으로 공진을 유도하여 반응주파수를 걸러내는 적극적인 방법과 기존의 안벽의 구조를 변경하여 어느 정도 감쇄 효과를 가져오도록 하는 평범한 방법이 있을 수 있다(이 등, 2001).

특히, 영일만의 경우에는 포항신항에서의 부진동을 경감시키는 노력을 구체화하지 않은 상태에서 대규모 물류를 유치하거나 서비스하기 위하여 영일만 입구 북단측에 대규모 방파제를 건설하여 마무리 단계에 와 있고 컨테이너 부두의 대대적인 개발을 후속으로 계획되고 있어서 이러한 구조물과 평면계획이 기존의 포항신항에 어떠한 형태로 부진동의 변화를 가져올 것인가가 관심이 될 수밖에 없다.

따라서, 본 연구에서는 영일만 신항의 건설로 만의 형상이 바뀔 때 따라 격자 간격을 보다 세분하게 하고 영일만 신항 방파제를 포함한 영일만 전체에 대해 광역유한요소망을 구성하여 포항구항, 포항신항, 영일만신항에서의 부진동 주기와 증폭 현상을 분석해보기로 한다.

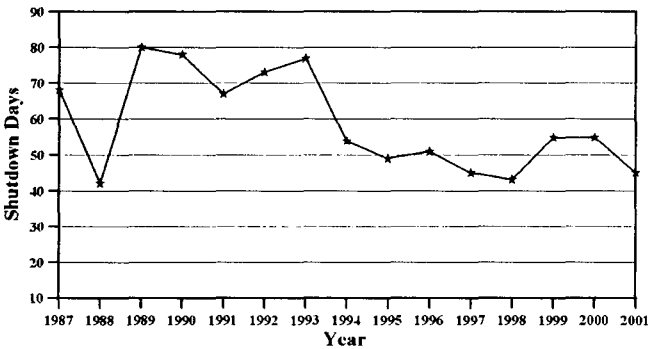


Fig.1 Shutdown Period of Cargo handling work due to dynamic motion of the moored vessel at Pohang New Port(1987-2001)

2. 이론적 배경 및 수치모델의 구성

2.1 지배방정식

해저면의 급한 경사 (steep slope)와 곡률 (curvature) 등을 고려하여 임의의 지형에 대해 급격한 변화성분을 정의하여 확장 환경사방정식(extended mild-slope equation, Booij,1983; Massel, 1993 등)을 지배방정식으로 사용하였다. 그 기본 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{n}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma y \right) \hat{n} = 0 \quad (1)$$

여기서 $\hat{n}(x, y)$ = 복소해면변동함수, σ = 각주파수 (radians/sec), $C(x, y)$ = 위상속도(phase velocity) = σ/k , $C_g(x, y)$ = 군속도 (group velocity) = $\frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC$, $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$, $k(x, y)$ = 수심 $d(x, y)$ 에서 선형분산관계식 $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ 를 만족하는 파수($= 2\pi/L$), 쇄파파라메타 $\gamma = \frac{\chi}{d} \left(1 - \frac{\Gamma^2 d^2}{4a^2} \right)$ 와 마찰항을 나타내는 진폭 감쇠계수 $w = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right]$ 이다.

이 때 χ 는 일정한 값(0.15)이고, Γ 는 경험상수(0.4)를 사용하고, $a(= H/2)$ 는 파랑의 진폭이며 f_r 은 마찰계수를 나타낸다. 위의 관계식 외에도, 진폭의존 파랑분산을 고려하여 식 (1)에 있는 선형분산관계식을 비선형 산란관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma^2 = gk \left[1 + (ka)^2 \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd) \tanh^3 kd}{8 \sinh^4(kd)} \right] \cdot \tanh \left\{ kd + ka \left(\frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

한편, 해안선이나 투과성 구조물에 대해서는 다음과 같은 부분반사경계조건이 적용된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \hat{\eta} \quad (3)$$

이때 K_r 은 반사계수를 나타낸다.

개방경계에 대해서는 Sommerfeld의 방사조건(Radiation condition)을 아래와 같이 적용한다.

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \hat{\eta}_s \rightarrow 0 \quad (4)$$

여기서 $\hat{\eta}_s$ 는 산란파의 포텐셜로 Mei(1983)가 제시한 것과 같이 제1종 Hankel함수 $H_n^{(1)}(kr)$ 를 사용하여 식 (5)로 나타낸다.

$$\hat{n}_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) (a_n \cos n\theta + \beta_n \sin n\theta) \quad (5)$$

2.2 수치모델의 구성

영일만 항만의 부진동 변화에 대한 분석은 대상 영역을 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 포항구항, 포항신항, 그리고 영일만신항을 모두 포함하고 있다. 영일만 신항의 경우 현재 방파제 4.1km만이 거의 완공단계에 있고 부두의 경우는 아직 진척이 이루어지지 않고 있다. 영일만 항만에 대한 수치실험은 대상 해역을 영일만 신항의 개발 전후로 제한하여 만내의 3 항만에 대한 주요 개소에 대한 반응 특성을 분석하는 것으로 하고 현재의 항만조건과 대비시켜 분석하였다.

완경사 방정식 파랑모델의 모델은 의해 개방경계영역을 영일만신항방파제의 시작점 상단을 좌측한계, 장기곶 해안선을 우측한계로 한 반원영역으로 설정하여 그 이내의 만 해역이다. 유한요소망으로 삼각형 가변요소를 적용하였으며, 각 요소의 간격은 10~100m이다. 최대 수심은 1.0m에서 51.3m이다. 대상 영역에 적용된 요소수는 신항개발 전 115,718개, 신항개발 후 102,294개이다. 좌표축은 x축의 양의 방향을 진북에서 120도 방향으로 선택하였다. Fig. 2은 영일만 신항을 제외한 현상태의 영역을 유한요소망으로 구성한 것이고, Fig. 3은 영일만 신항을 포함시킨 대상해역을 유한요소망으로 구성한 것이며, 이때 소요된 요소의 특징은 Table 1과 같다. Fig. 4의 A0~D2는 수치실험 결과를 비교 분석하기 위해 선정한 지점을 나타낸다.

Table 1 Finite element model characteristics

Plan	Node	Open boundary	Element	calculation Time
Before	59,692	239	115,718	2h 36min
After	52,792	238	102,294	2h 29min

3. 수치모델에 의한 평가

3.1 영일만 부진동의 특성

영일만은 장방형의 형상을 하고 있고 영일만의 제1공진주기를 Merian공식(SPM, 1984)으로 간략하게 계산해보면 개방형 항만에서

$$T_n = \frac{4l_B}{(2n-1)\sqrt{gh}} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

를 사용하여 공진모드를 계산해 가면 62.7분, 20.9분, 12.5분으로 나타난다. T_n 은 n 번째 고유주기, l_B 는 만의 길이 (13.5km 적용), g 는 중력가속도 (9.8m/sec 적용), h 는 수심(약 21m)이다. 만구 보정계수

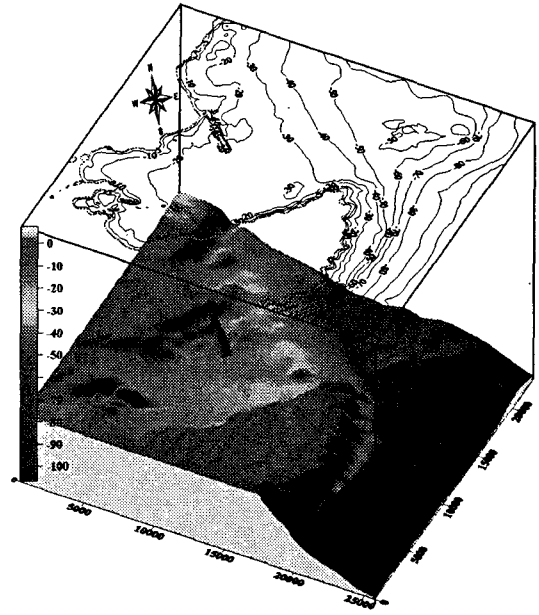


Fig. 2 Study area and depth for model simulation.



Fig. 3 Finite element mesh for the present Youngil bay

$$\alpha = \left[1 + \frac{2b}{\pi l_B} \left(0.9228 - \ln \frac{\pi b}{4l_B} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

를 곱해서 공진모드를 계산해 가면 81.3분, 27.1분, 16.3분으로 나타난다. b 는 만의 폭으로 9.5km이다.

한편, 포항신항의 형상이 폐쇄형 만이므로

$$T_n = \frac{2l_B}{n\sqrt{gh}} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

를 적용하여 계산해 가면 공진모드는 9.9분, 5.0분, 3.3분으로

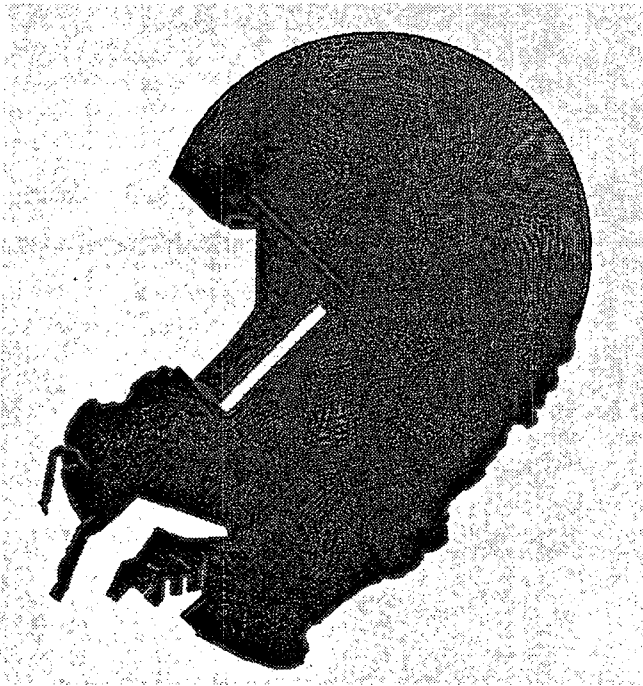


Fig. 4 Finite element mesh after Youngil bay New Port

나타난다. 이 또한 개략적인 값으로 계산된 것이며, 만의 수심, 좌우 형상 만내의 에너지 손실 및 만 입구의 상태에 따라 달라진다.

일반적으로 알려져 있는 수식에서 알 수 있는 바와 같이 고유주기는 항만의 면적, 길이, 폭, 수심의 인자에 좌우되므로 이를 변경하는 방안을 찾아야만 저감할 수 있는 길이 나올 수 있는 것이다.

한국해양연구소(1995)에서는 영일만의 Helmholtz natural period로 75.5분, 제2공진주기로 31.8분, 포항신항의 제1공진주기로 22.5분, 제2공진주기로 7분을 제시하였다.

정 등(1995)이 1994년 10월에서 1995년 3월까지 10개월 동안 포항신항 15만톤 부두와 제1부두 사이의 수심 8M 지점에서 부진동 관측을 통해 분석한 결과에서는 일부 누락된 경우도 있지만 영일만의 제1공진주기에 해당하는 80분이 80set의 자료에 공통으로 나타났고, 영일만의 제2공진주기 또는 포항신항의 제1공진주기 부근에 해당하는 32분, 29.1분, 26.7분 및 22.9분 등이 기록되었고 포항신항의 제2공진주기 이하로 8분, 5분, 2.8분의 순으로 나타났다.

3.2 수치실험 및 분석

Fig.6에서 Fig.17은 영역내에서 시뮬레이션의 시작주기를 12sec로 하여 입사파의 두 가지 파향 NE, N80E와 주파수에 대한 시뮬레이션을 수행한 그래프이며, 수시 시뮬레이션은 각 케이스 별로 164차례 반복되었다. 각 실험 주파수 범위는 12sec ~ 80min로 계산하였다.

포항신항의 경우 영일만 신항의 건설 전과 건설 후를 비교했

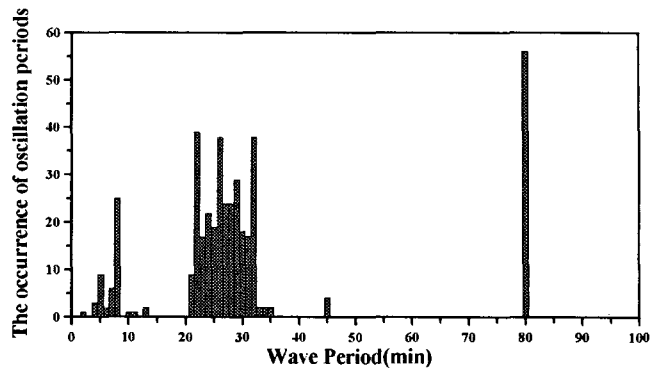


Fig. 5 Mean occurrence of oscillation period at Pohang New Harbor(1994.10.5-1995.3.10, KORDI)

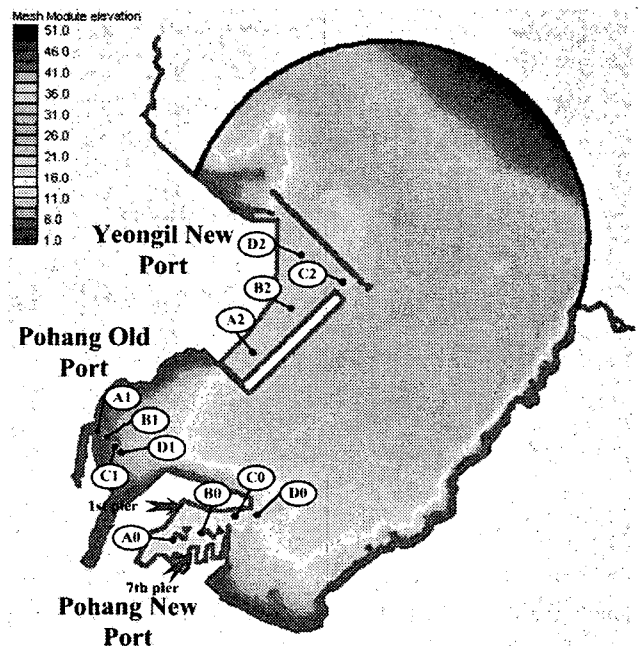


Fig. 6 Selected stations for model simulation

을 때 건설 전에는 영일만 제1공진 주기에 해당하는 80분과 30분이 계산되었고, 항 입구부와 외항에서 3분, 5분, 10분에 공진 주기가 존재하였다. 건설 후에는 0.6분, 16분, 35분, 42분의 공진주기가 존재하였다. 영일만신항 건설 이전에 비해 건설 후에 30분의 공진주기가 사라지고 35~42분에서 더 큰 증폭비를 가진 공진이 제시되었다. 수치실험의 결과는 Fig.11~Fig.14의 그래프로 정리되었다.

포항 구항의 경우 영일만 신항의 건설전의 공진주기로 1분, 3분, 8분, 17분 30분, 80분이 존재하였고, 건설 후에는 0.5분, 1분, 17분, 80분으로 건설 전에 비해 3분, 8분, 30분의 공진이 약해지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 그 차이가 매우 작아서 포항 구항은 건설 전·후의 공진의 변화가 거의 없다는 것을 Fig.15~Fig.18의 그래프에서 확인 할 수 있다.

영일만 신항의 경우 건설후에 2분, 4분, 5분, 12분, 14분, 80분이 나타났다.

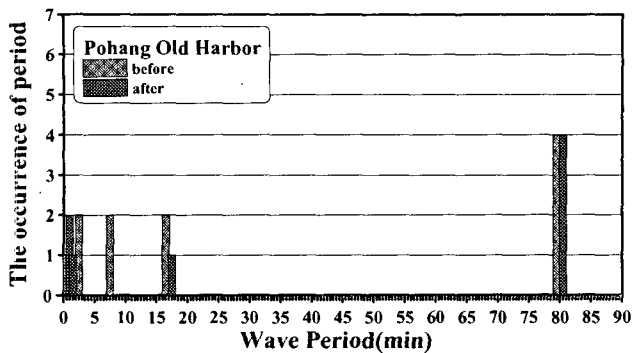


Fig. 7 Mean occurrence of oscillation period at Pohang New Harbor before and after construction yeongil new port

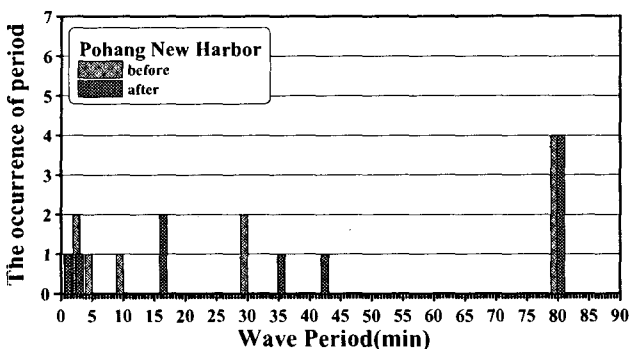


Fig. 8 Mean occurrence of oscillation period at Pohang Old Harbor after construction yeongil new port

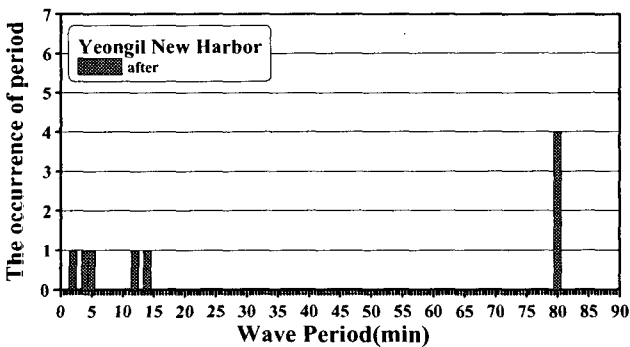


Fig. 9 Mean occurrence of oscillation period at yeongil new port

식(6)에서 계산되어진 영일만의 공진주기인 80분, 27.1분, 16.3분에서 크게 벗어나지 않는 공진주기가 포항 신항 및 포항구항에서 존재하였다.

Fig 7~Fig 9는 수치실험 결과 각 항의 공진주기 출현빈도를 나타내었다.

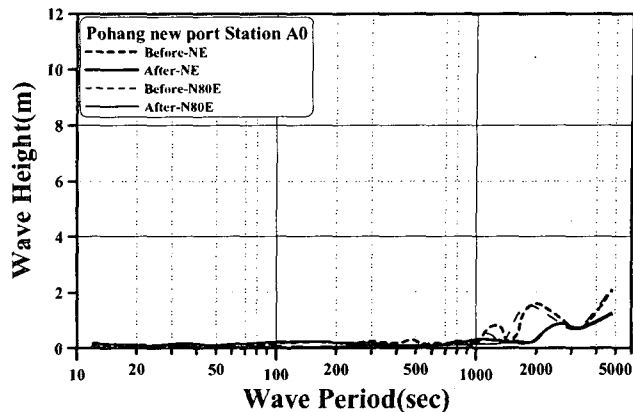


Fig.10 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.A0)

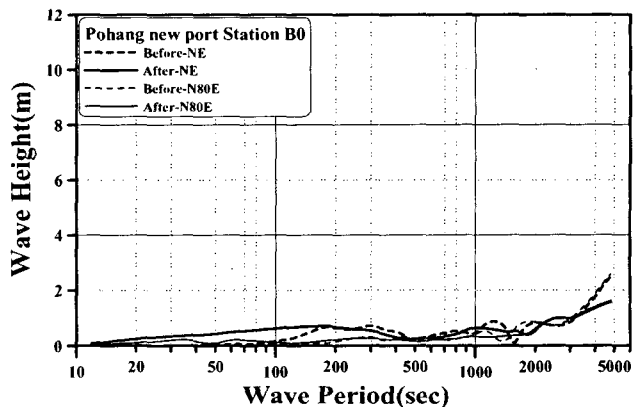


Fig.11 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.B0)

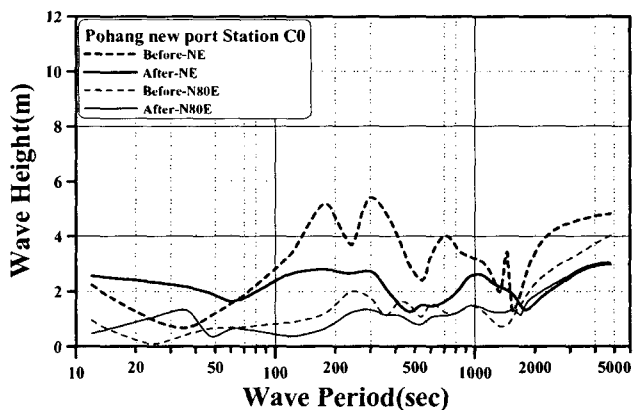


Fig.12 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.C0)

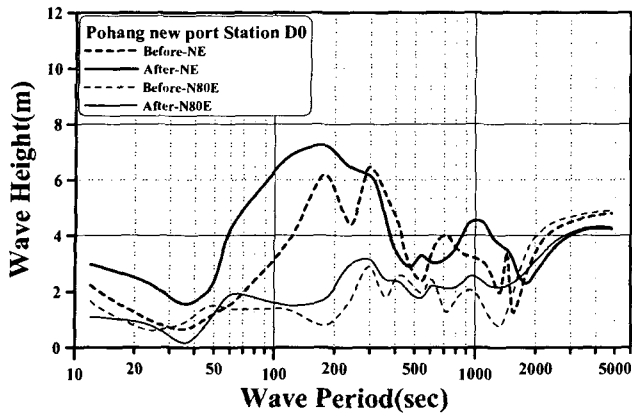


Fig.13 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.D0)

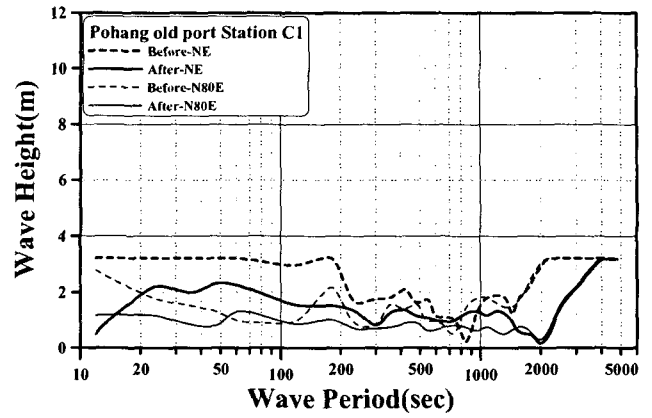


Fig.16 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.C1)

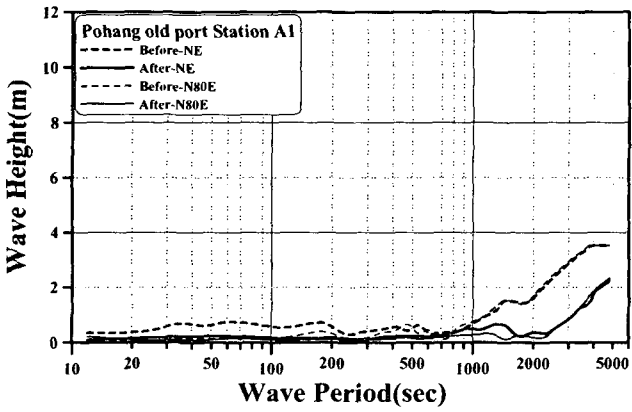


Fig.14 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.A1)

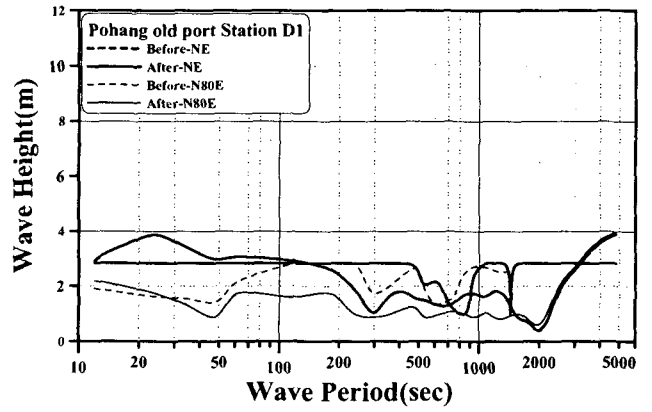


Fig.17 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.D1)

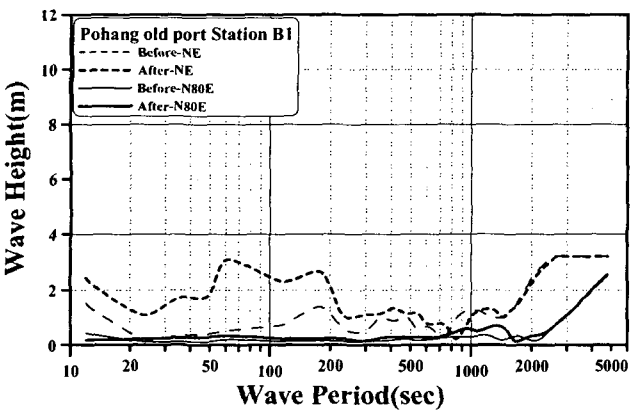


Fig.15 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.B1)

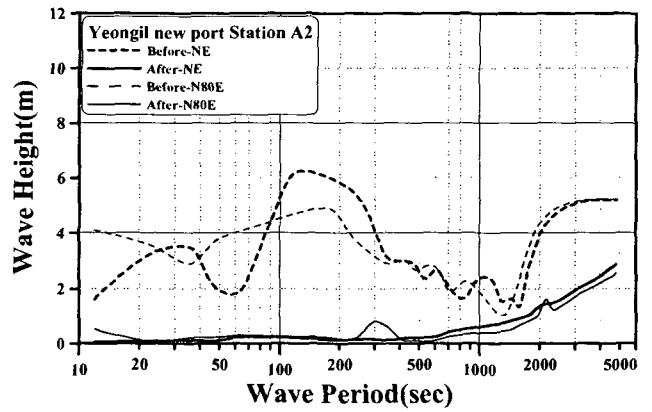


Fig.18 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.A2)

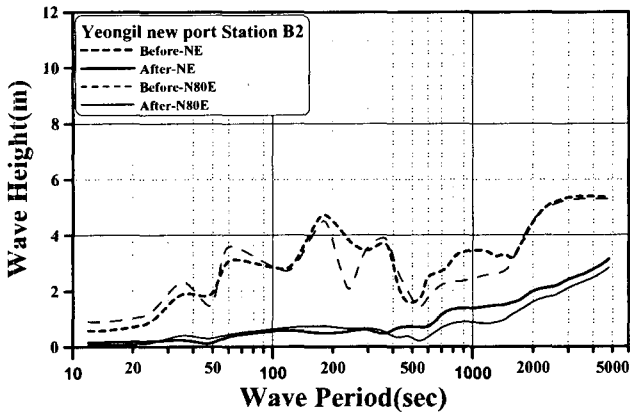


Fig.19 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.B2)

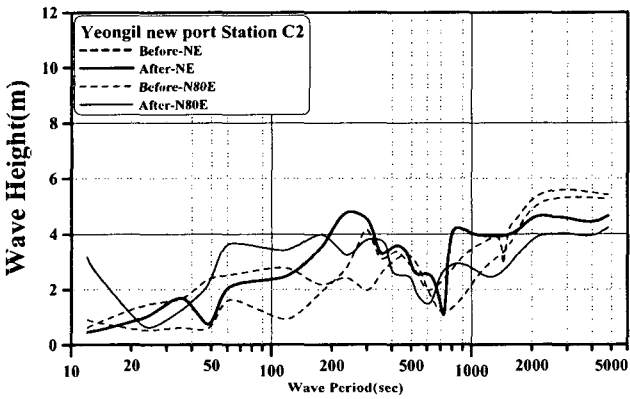


Fig.20 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.C2)

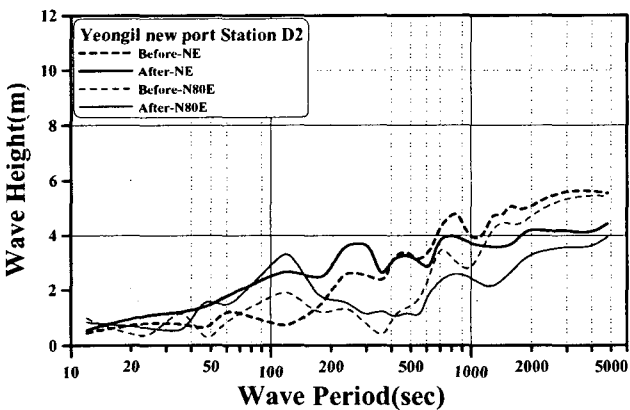


Fig.21 Comparison of harbor response with respect to wave direction (St.D2)

1994년 해양연구소에서 관측한 정(1997)의 제1부두와 제 7부두에서의 공진주기 관측결과와 수치실험의 결과를 비교분석

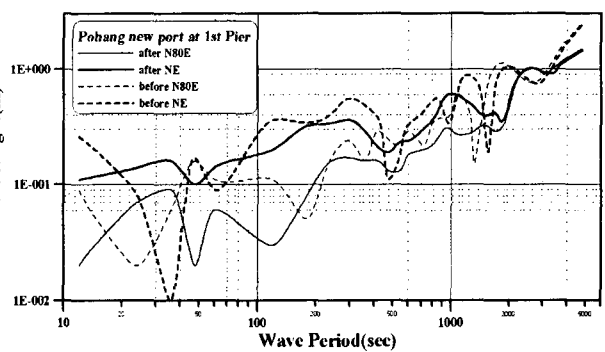
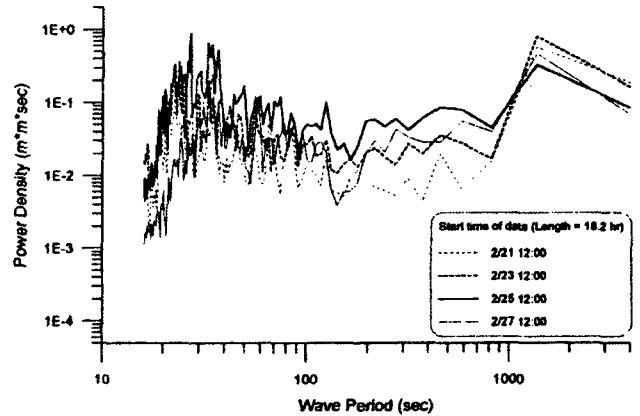


Fig.22 Comparison of harbor response with respect to wave direction at Pohang New Harbor 1st pier

하였다. Fig.22와 Fig.23은 각각 제1부두와 제 7부두의 주기별 파고 값을 나타낸 그래프이며 실제 관측 그래프와 수치실험 그래프를 보여준다.

제 1부두지점의 파고의 실관측치는 주기 10~20sec사이에서 0.1m의 파고가 관측되었고 설계파랑을 적용한 시뮬레이션에서는 주기 20sec에서 파고 0.15m, 주기 200~400sec 사이에 0.6m, 주기2000sec에서 1.2m의 파고를 나타내었다. 또한 제7부두 지점의 실관측치는 주기 10~20sec 사이에 가장 높은 파고를 나타내었고 시뮬레이션 결과 10~20sec 사이에 0.3m, 100~200sec 사이에 0.45m, 2000sec에서 0.9m의 파고를 나타내었다.

영일 신항의 건설 전에 비해 전체적인 증폭비는 감소하였으나 주기 30분 및 80분에서 파고가 대폭 상승하는 것을 볼 수 있으며 이것은 영일신항의 건설이 포항신항에 문제를 야기시킬 수 있는 여지가 있는 것으로 사료된다.

4. 결론 및 토론

항만 부진동 문제는 대형선박의 입출항 및 계류시스템에 중요한 요소이다. 특히 국내에서는 포항신항에서의 부진동 문제가 심각하게 거론되고 있다. 본 연구에서는 현재 영일만 신항이 건설되고 있는 시점에서 영일만 입구의 방파제의 건설과 영일만 신항의 건설로 인해 포항신항과 포항구항의 공진주기

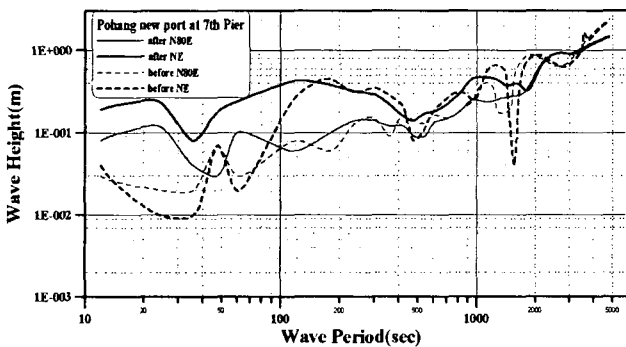
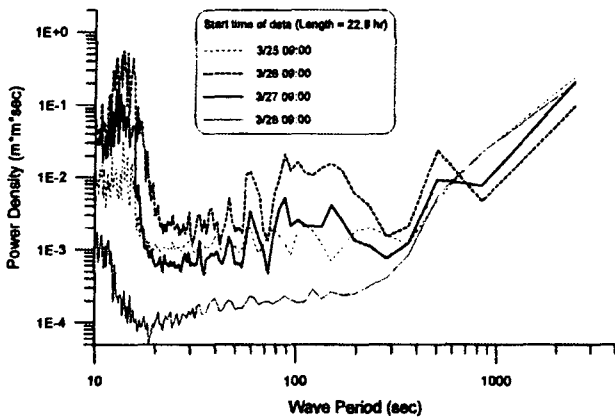


Fig.23 Comparison of harbor response with respect to wave direction at Pohang New Harbor 7th pier

가 어떻게 바뀌어졌는지 분석 평가하였다. 대체로 영일만의 제1공진주기와 제2공진주기 범위 안에서 대표적인 주기가 수치실험을 통해 발견되었으나 영일신항 건설 후에 포항신항과 포항 구항의 공진주기가 변화된 것을 볼 수 있었고, 몇몇의 구간에서는 건설 전에 비해서 높은 증폭을 보이는 구간도 있었다. 이러한 점에서 신항만의 건설이 기존에 있던 2개의 항만과 건설되고 있는 신항만에 부진동 문제가 더욱 심각해질 수 있는 가능성을 고려하여 지금부터라도 부진동의 저감을 위해 진동주기를 변경시키거나 증폭비를 감소시킬 수 있는 방안을 마련해야 할 것이며 불가피할 경우 설계변경을 통해 저감시설의 도입, 안벽의 구조나 평면배치를 변경하는 등 대규모 건설사업에 걸맞는 대책을 마련해야 할 것이다.

본 연구에서는 164가지의 경우로서 수치실험을 했으나 추후 더욱 주기의 간격을 줄여서 정도가 높은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Booij, N.(1983), A note on the accuracy of the mild-slope equation, Coastal Eng., Vol.7, pp.191-203.
- 2) 추교승(1974), 포항항의 해면 부진동 현상, 수로기술연보, pp.3-10.
- 3) 추교승(1976), 포항항의 해면부진동 현상, 한국해양학회지

제11권, 제2호, pp.51-56.

- 4) 이종우, 허명규 (2001), “공진방파제를 이용한 항만부진동의 저감”, 한국항만학회지, 제15권 제2호, pp.152-159.
- 5) Massel, S.R.(1983), Extended Refraction- Diffraction Equation for Surface Waves, Coastal Engng. Vol.19, pp.97-126.
- 6) US Army Engineers Waterways Experiment Station(1984), Shore Protection Manual(4th ed.), CERC, US Government Printing Office, Washington, DC.
- 7) Mei, C. C. (1983), “The applied dynamics of ocean surface waves”, John Wiley, New York.
- 8) 강석구, 이상룡, 소재귀, 1989. 영일만과 포항신항의 부진동 현상. 해양 연구, 11(2), 31~41.
- 9) 건설부, 1987. 포항신항 파랑조사 및 모델실험 용역 보고서. 제2권 파랑조사 및 모델 실험편, 440 pp.
- 10) 한국해양연구소, 1995. 포항신항 항만부진동 현장관측 및 수치실험, BSPE 00469-784-2, 180 pp.
- 11) 해운항만청, 1994. 영일만 신항개발 외곽시설 실시설계 용역 보고서, 제2권 수치모형실험편, 551 pp.