부진동의 제어를 위한 공진장치의 현장적용 Application of Wave Resonator to the Field for Controlling Secondary Undulation

이광호* · 범성심** · 김도삼** · 최낙훈** · 박종배*** · 안성욱***

Kwang Ho Lee*, Seong Sim Beom**, Do Sam Kim**, Nack Hoon Choi, Do Sam Kim**,
Jong Bae Park*** and Seong Wook An***

요 지 : 본 연구에서는 장주기파에 의한 부진동 및 공진에 의한 선박의 이상동요를 저감시키기 위하여 공진장치를 실험역의 기설 항에 부착하여 그의 제어능을 수치적으로 검토하였다. 수치해석에 2차원타원형완경사방정식에 기초한 유한요소모델인 상용소프트웨어 SMS (Surface water Modeling System)의 CGWAVE MODULE을 적용하였고, 직사각형모델항만에 대한 기존의 실험 및 해석결과와의 비교·검토로부터 부진동해석에 대한 SMS의 타당성과 유효성 및 적용한 마찰계수값의 타당성을 검증하였다. 이로부터 직사각형항만에 공진장치의 부착유무에 따른 부진동의 비교검토로부터 그의 제어능을 확인하였다. 그리고, 포항신항에서 발생될 수 있는 부진동 및 계류선박의 장주기동요를 감쇠시키기 위하여 여러 크기의 공진장치를 적용하여 선박의 이상동요를 발생시키는 공진주기를 보다 장주기측으로 이동시키는 방안을 검토하였고, 이로부터 그의 유용성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 공진장치, 부진동, 장주기파랑, 포항신항

Abstract : In this study, to reduce the motion of the vessels resulting from resonance and secondary undulation by long-period waves, numerical review on the control performance of resonator was carried out by attaching the resonator to the established harbor of real waters. In the numerical analysis, CGWAVE MODULE of commercial software SMS(Surface water Modeling System), a finite element model based on 2-dimensional elliptical mild slope equation was applied, and through comparative analysis of the existing experiments and analysis results on the rectangular model ports, the validity of the friction coefficients in which validity and effectiveness of SMS on the secondary undulation analysis is applied was verified. Based on this, the control performance of resonator was confirmed through comparative review of the secondary undulation according to whether or not to attach the resonator to rectangular harbor. In addition, to reduce long-period motion of the moored vessels and the secondary undulation which may occur in Pohang new port, the method to move the resonant period which causes abnormal motion of the vessels to long-term one was discussed through application of the resonators with various sizes, thereby identifying the availability.

Keywords : resonator, secondary undulation, long-period waves, Pohang new port

1. 서 론

항만에서 계류선박의 장주기운동은 주로 장주기파에 의한 부진동이나 방현재와 계류라인 사이의 불균형으로 발생하게 된다(Nagai et al, 1994). 장주기파의 주기가 계류선박과 계류선의 진동계에서 나타나는 고유진동주기에 근접할 때에 항만으로 유입하는 입사파랑이 하역한계파고보다 작은 경우에도 공진현상에 의해 큰 장주기동요를 발생시켜 항만가동물에 크게 영향을 주기도 하고, 하역 및 선적작업의 중단이나 선박끼리의 충돌 및 최악의 경우에는 계류선의 파단으로 많은 피해가 발생되기도 한다. 따라서, 항만의 계획시에는 부진동의 영향

을 되도록 적게 받는 배치가 필요하고, 부진동현상이 현저하게 나타나는 기설의 항만에는 부진동 및 선박의 장주기동요를 저감시키기 위한 적절한 대책이 필요한 것으로 판단된다. 이러한 방안으로 Poon et al.(1998)은 미국 Long Beach 항만에 1992년에 건설된 J부두에서 1분 오더의 선박의 장주기운동을 제어하기 위하여 단주기파랑의 파랑제어를 목적으로 Nakamura et al.(1996, 1998)이 제안한 Fig. 1의 공진장치와 동일한 메커니즘의 공진장치에 대해 그의 유효성을 평면수리실험으로부터 검토하고, 실제로 Photo 1에 나타내는 공진장치를 항구에 설치한 예가 있다. 공진장치를 단주기 및 장주기파랑의 저감공으로 적용한 Nakamura et al.(1996, 1998) 및 Poon et al.

*(일)나고야대학교 공학연구과 사회기반공학전공 (Department of Civil Engineering, School of Engineering, Nagoya University)

**한국해양대학교 토목공학과 (Corresponding author : Do Sam Kim, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Busan 606-791, kimds@hhu.ac.kr)

***(주) 포스코건설 토목환경사업본부 토목기술그룹 (POSCO E&C, Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-732, Korea)

Fig. 1. Shape of wave resonator developed by Nakamura et al.(1995).

Photo 1. Wave resonator constructed at Pier J of Long Beach port to attenuate excessive ship motions (<http://earth.google.com>)

(1998)의 연구결과에 따르면 공진장치의 내부에 많은 파랑에너지가 포획되고, 더욱이 공진장치의 길이가 항의 전체길이에 부가되어 부진동이 발생하는 주기를 더욱 장주기측으로 이동시킴으로써 항내로 유입되는 파랑에너지 현저히 감소시키고, 또한 특정주기대에서 발생하는 부진동을 피할 수 있다는 것을 나타내고 있다. 또한, 정 등(2010)은 항내부진동에 의한 피해가 큰 것으로 잘 알려져 있는 부산 감천항과 포항신항에 Nakamura et al.(1996, 1998)이 제안한 공진장치를 부착하여 공진장치의 크기의 변화 등에 따른 항내수위변동을 면밀히 검토하여 실해역에서 부진동 및 공진에 의한 선박의 이상동요를 제어하는 공법을 강구하였다. 그러나, 정 등(2010)은 본 연구와 동일한 SMS를 적용하여 수치해석을 수행하고 있지만, 수치해석결과는 해저마찰의 영향이 고려되어 있지 않다. 일반적으로 항내에서 주기가 수 분에 달하는 장주기파를 고려하면 해역은 극천해역에 가깝기 때문에 파랑변형에 해저마찰의 영향이 매우 크게 나타나고, 정밀한 해석결과를 얻기 위해서는 해저마찰의 영향이 반드시 고려될 필요가 있는 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 선박의 이상동요로 높은 하역불능일수를 나타내고 있는 포항신항의 주변해역에 마찰의 영향을 고려하여 부진동 및 선박공진주기에 대한 공진장치의 제어능을 검토한

다. 해석에는 복잡한 형상과 수심의 변화가 심한 해역에서도 고정도의 해를 나타내는 타원형완경사방정식과 유한요소법에 기초한 SMS의 CGWAVE MODULE(Demirbilek and Panchang, 1998)을 적용한다. 먼저, 해저마찰을 고려한 경우에 SMS에 의한 결과의 타당성을 확인하기 위하여 직사각형만에 대해 Ippen and Goda(1963)가 수행한 선형파이론에 의한 해석해와 Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)에 의한 실험치를 해저마찰을 고려하고 완전반사조건을 적용한 SMS에 의한 수치해석결과와 비교·분석한다. 이로부터 마찰을 고려한 경우 포항신항에서 공진장치 크기의 변화 등에 따른 항내수위변동을 면밀히 검토하여 공진장치에 의한 부진동 및 선박의 이상동요를 효과적으로 제어하는 방안을 모색한다.

2. 수치해석이론의 개요

본 연구에서 사용한 SMS의 CGWAVE MODULE은 복잡한 형상과 수심의 변화가 심한 실해역에서도 파랑변형을 합리적으로 예측할 수 있는 타원형완경사파동방정식 (1)을 기초방정식으로 사용한다(Mei, 1989).

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

여기서, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, C 는 위상속도, C_g 는 군속도, $\hat{\eta}$ 는 복소평면변화함수로 수위변동, σ 는 각주파수를 각각 나타낸다.

다음의 식 (2)는 식 (1)에 마찰과 쇄파의 영향을 도입하여 임의형상의 연안역에서 파랑의 굴절, 회절 및 반사를 고려한 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 수정된 타원형완경사파동방정식을 나타낸다(Demirbilek and Panchang, 1998).

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

여기서, $i = \sqrt{-1}$, ω 는 마찰항, γ 는 쇄파파라메타를 각각 나타내며, 마찰항 ω 은 다음의 식 (3)으로 표현된다.

$$\omega = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi(2kd + \sinh(2kd))\sinh kd} \right] A_i k^2 \quad (3)$$

여기서, f_r 는 마찰계수, A_i 는 파랑의 진폭, n 는 Manning의 조도계수를 각각 나타내며, 마찰계수 f_r 는 항구근방의 요소에 입구손실을 시뮬레이션하기 위해 사용자가 할당할 수 있는 값이다.

3. 직사각형모델항만에서 공진장치에 의한 부진동의 제어

3.1 모델항만에 대한 SMS의 검증과 마찰계수

본 연구에서는 SMS로부터 얻어지는 공진장치의 제어능에

대한 타당성을 확립하기 위하여 Fig. 2에 나타내는 직사각형의 모델항만에 대해 Ippen and Goda(1963)가 수행한 선형파 이론의 해석해와 Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)의 실험치를 해저마찰을 고려함과 동시에 완전반사조건을 적용한 SMS에 의한 수치해석결과와 비교하였다. 여기서, Fig. 2의 모델항만에서 항의 길이 $l=0.3111$ m, 항의 폭 $b=0.0604$ m, 항 외의 폭 $b'=0.4308$ m, 수심 $h=0.2572$ m의 수치를 가지며, 수위변동은 항의 최내측 중앙지점에서 측정되었다. Fig. 3은 수치해석을 위한 모델항만의 유한요소격자망을 나타내며, 절점수는 401개, 요소수는 714개로 구성된다. 또한, 모델항만의 절점간격은 항내에서 0.015555 m, 항외 $0.0151\sim0.0380$ m이며, 이는 Chen and Mei(1974)가 제시한 한 파장에 10개 이상의 절점이 요구되는 조건을 만족한다.

Fig. 4는 Lee(1969) 및 Chen(1986)이 제안한 파수 k 와 모델항만길이 l 의 무차원값 kl 을 적용하여 SMS를 이용한 본 연

Fig. 2. Definition sketch of model harbor and measuring point.

Fig. 3. Finite element meshes for model harbor.

Fig. 4. Comparison of wave height between present study and another ones.

구의 수치해석결과와 Ippen and Goda(1963)의 해석해 및 Ippen and Goda(1963)와 Lee(1969)의 실험치를 비교한 결과이다. 여기서, 입사파향은 $270^\circ(S)$, 반사계수는 완전반사로 1.0, 마찰계수 f_r 은 다양한 값들을 적용하여 최적으로 판단된 0.15를 각각 적용하였다.

먼저 마찰을 고려하지 않았을 경우의 결과를 살펴보면 $kl=1.3$ 을 기준으로 하여 $0 < kl < 1.3$ 에서는 무차원파고증폭비가 지수함수적으로 증가하는 양상을 나타내다가 $kl=1.3$ 에서 최대치에 도달한다. 그리고, $kl > 1.3$ 에서는 지수함수적으로 감소하는 양상을 보이다가 $kl \approx 3$ 이후로 다시 증가하지만, $kl \approx 4.2$ 에서 대략 2.5에 근접하였다가 다시 감소한다. 따라서, 모델항만은 무차원항길이 kl 이 1.3에 대응하는 입사파랑조건 하에서 최대의 파고증폭을 발생시키는 것을 알 수 있고, 또한 무차원항길이 kl 이 1.3일 때 Ippen and Goda(1963)의 해석해와 SMS의 수치해석결과는 파고증폭비 $H/2A_0$ (H 는 측정 지점에서 파고)가 대략 8과 9의 값을 나타내어 대략 1 정도의 차이를 보이지만, 대체적으로 본 연구에 적용한 SMS의 수치해석결과와 Ippen and Goda(1963)의 해석해가 합리적으로 일치한다는 것을 확인할 수 있다.

마찰계수 $f_r=0.15$ 를 고려하였을 경우 무차원값 $kl=1.4$ 를 기준으로 $0 < kl < 1.4$ 에서는 마찰을 고려하지 않았을 경우에서 기술한 바와 같이 지수함수적으로 증가하는 양상을 나타내다가 $kl=1.4$ 에서 최대치에 도달하며, $kl > 1.4$ 에서는 마찰을 고려하지 않았을 경우와 거의 동일한 변화양상을 나타낸다. 이로 부터 마찰의 영향은 부진동이 발생하는 $kl \approx 1.4$ 에서 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그리고, Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)의 수리실험결과와 SMS의 수치해석결과를 비교하면 약간의 위상차를 보이거나 최대치와 전체적인 형상으로 보아 수치해석이 수리실험을 잘 재현하는 것으로 판단된다.

3.2 모델항만에서 부진동의 제어

직사각형모델항만으로 입사하는 장주파의 제어에 대한 공진장치의 유효성을 검토한다. Fig. 5는 Fig. 3에 나타내는 모

Fig. 5. Setup of present resonator in model harbor and measuring point.

Fig. 6. Non-dimensional wave height amplification ratio according to the change of the length of resonator.

델항만의 입구부에 공진장치를 부착한 경우를 나타낸다. 그림에서 L 은 공진장치의 길이를, B 는 공진장치의 중앙부폭을 각각 나타내며 공진장치의 길이 L 과 공진장치의 중앙부폭 B 의 크기변화는 정 등(2010)에서 수행된 제원과 동일하게 적용되었다. 또한, 장주기파의 입사조건과 입사파향, 반사계수, 마찰계수는 전절에 적용한 조건과 동일하게 적용되었다.

Fig. 6은 공진장치의 길이 L 의 변화가 무차원파고증폭비 $H/2A_i$ 에 미치는 영향을 검토하기 위하여 공진장치의 중앙부폭 B 을 0.2204 m로 고정하고 공진장치의 길이 L 을 0.02~0.2 m로 변화시킨 경우에 무차원항길 kl 에 따른 무차원파고증폭비를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 공진장치가 없을 경우에 kl 이 1.3에서 마찰을 고려하지 않았을 경우 $H/2A_i \approx 9$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 6.3$ 의 최대파고증폭비에 도달하고, $L = 0.02$ m의 경우에는 공진장치가 없을 경우와 동일한 $kl = 1.3$ 에서 마찰을 고려하지 않은 경우 $H/2A_i \approx 6.5$, 마찰

계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 4.3$ 의 최대파고증폭비를 나타내었으며, $L = 0.04$ m의 경우에는 $kl = 1.2$ 에서 마찰을 고려하지 않은 경우 $H/2A_i \approx 6.5$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 4.9$ 의 최대파고증폭비를 나타낸다. 또한, $L = 0.08$ m의 경우에는 $kl = 1.1$ 에서 마찰이 없는 경우 $H/2A_i \approx 4.7$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 4.2$ 의 최대파고증폭비를 나타내었고, $L = 0.12$ m의 경우에는 $kl = 1.1$ 에서 마찰을 고려하지 않았을 경우 $H/2A_i \approx 30$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 2.6$ 을, $L = 0.16$ m의 경우에는 $kl = 1.0$ 에서 마찰을 고려하지 않은 경우 $H/2A_i \approx 3.6$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 3.1$ 을, $L = 0.2$ m의 경우에는 $kl = 1.0$ 에서 마찰을 고려하지 않았을 경우 $H/2A_i \approx 3.6$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 2.7$ 의 최대파고증폭비를 각각 나타내는 것을 알 수 있다. 이상으로부터 공진장치의 길이 L 이 길어질수록 공진장치가 없을 경우의 최대파고증폭비를 현저하게 감소시키며, 최대파고증폭비를 나타내는 무차원항길 $kl = 1.3$ 보다 작은 값으로 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 무차원항길 kl 이 작은 값을 나타낸다는 것은 파수 $k = 2\pi/L_w$ (파장)에서 파장은 주기와 관련이 되므로 공진장치의 길이 L 이 길어질수록 파장이 긴 주기를 더 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 공진장치의 중앙부폭 B 의 변화가 무차원파고증폭비에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 공진장치의 길이 L 을 0.12 m로 고정하고 공진장치의 중앙부폭 B 을 0.0602~0.3004 m로 변화시켜 무차원항길 kl 에 따른 무차원파고증폭비를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 $B = 0.0602$ m의 경우에는 공진장치가 없을 경우와 동일한 $kl = 1.3$ 에서 마찰을 고려하지 않았을 경우 $H/2A_i \approx 3$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $kl = 1.2$ 에서 2.7의 최대파고증폭비를 나타내며, $B = 0.1404$ m의 경우에는 $kl = 1.1$ 에서 마찰을 고려하지 않았을 경우 $H/2A_i \approx 4.0$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 3.5$ 의 최대파고증폭비를 나타낸다. 또한, $B = 0.2204$ m의 경우에 $kl = 1.1$ 에서 마찰을 고려하지 않았을 경우 $H/2A_i \approx 2.99$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로

Fig. 7. Non-dimensional wave height amplification ratio according to the change of the width of resonator.

고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 2.6$ 의 최대과고증폭비를 나타내었고, $B = 0.3004$ m의 경우에는 $kl = 1.0$ 에서 $H/2A_i \approx 3.3$, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 로 고려하였을 경우 $H/2A_i \approx 2.9$ 의 최대과고증폭비를 나타내는 것을 알 수 있다. 이상으로부터 공진장치의 부착으로부터 전체적으로 피크치가 크게 줄어들고, 또한 피크치가 장주기측으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그리고, 중앙부폭 B 가 넓어짐에 따라 전술한 공진장치의 길이의 변화에 따른 경우와 같은 통일된 경향을 나타내지는 않으므로 현지조건에 최적의 폭이 존재한다는 것을 알 수 있다.

4. 포항신항에 부진동 제어를 위한 공진장치의 적용

이상의 모델항만에 대해 장주기파의 제어능이 충분히 검증되었고, 합리적인 마찰계수가 선정된 것으로 판단된다. 따라서, 본 장에서는 선박의 이상동으로 많은 하역불능일수를 나타내고 있는 포항신항을 대상으로 실험역에서 장주기파랑에 대한 공진장치의 유용성을 검토한다. 포항신항에 대한 공진장치의 유용성은 정 등(2010)에 의해 충분히 검토된 바 있지만, 그들의 연구에서는 해저마찰의 영향을 고려하고 있지 않기 때문에 부진동이 발생하는 주기대에서 과고증폭계수를 과도하게 예측하고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 모델항만에서 추정된 마찰계수 $f_r = 0.15$ 와 이보다 작은 $f_r = 0.07$ 를 추가하여 수치계산을 수행한다.

포항신항이 위치하는 영일만은 만입구가 북동쪽으로 개방되어 있고, 만입구의 폭은 대략 9.5 km, 만의 길이는 대략 13.5 km, 수심은 0에서 28 m로 완만하게 깊어지는 형태를 하고 있으며, 포항신항내에서는 10~20 m의 수심분포를 나타낸다. 본 연구에서는 포항신항의 계산영역을 Fig. 8과 같이 영일만의 전역을 대상으로 유한요소격자망을 구성하고, 입사파향은 만입구가 열린 방향을 고려하여 영일만에 수직방향인 NE(225°)로 설정하였다. 공진장치를 포함하는 포항신항내측의 절점간격은 5~25 m, 항외의 영역에 대해서는 50 m로 각각 구성되었으며, 입사파주기는 30~2000 sec, 입사파진폭은 0.5 m, 항내반사율은 완전반사에 가까운 0.99, 항외반사율은 0, 해저마찰계수는 전술한 바와 같이 0.07과 0.15로 각각 설정되었다. 수위변동의 측정지점 P 는 Fig. 9에서와 같이 포항신항내의 7부두와 8부두 사이에 있는 최내측의 중앙지점에 설정되었다. 본 연구에서는 Fig. 9와 같은 포항신항의 현상태와 Fig. 10과 같이 포항신항내의 제 2파제제를 제거한 Fig. 10(a)의 경우, 그리고 정 등(2010)에 의해 제안된 5종류의 공진장치(Fig. 10(b)~(f))에 대해서 공진장치의 유효성을 검토한다.

Fig. 11은 측정지점 P 에서 현상태 Fig. 9와 Fig. 10(a)의 배치안에 대한 무차원과고증폭비 $H/2A_i$ 를 비교한 결과이다. 결과를 살펴보면 현상태에서는 제 2파제제를 제거한 상태에서는 마찰을 고려하지 않았을 경우와 마찰을 고려한 경우 모두 주기 140, 170 sec에서 입사파고 이상의 증폭현상을 나타내고, 주기

Fig. 8. Finite element meshes for Pohang New Port in Young-il Bay and direction of incident waves.

Fig. 9. Measuring point within Pier 7 and 8 at present state of Pohang new port.

270 sec에서는 증폭비가 6 이상, 마찰계수 $f_r = 0.07$ 를 적용하였을 경우 증폭비가 약 4정도를, 마찰계수 $f_r = 0.15$ 를 적용하였을 경우 증폭비가 약 3정도의 값을 나타내었다. 또한, 본 연구의 수치해석으로부터 산정되는 포항신항내의 공진주기는 270, 170, 140 sec를 나타내었고, 현 상태의 포항신항내에서 발생하는 부진동을 일으키는 주기가 Sawaragi(1991) 및 Sakakibara et al.(2008)이 제시한 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기 30~300 sec 내에 존재한다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 10(a)의 배치안은 포항신항내의 8부두 전방에 위치하고 있는 제 2파제제를 제거한 경우로, 주기 140, 170 sec에서는 현상태와 거의 유사한 결과를 나타내었으며, 주기 270 sec에서는 최대과고증폭비의 위상이 오히려 주기 260 sec의 단주기측으로 이동되어 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주

Fig. 10. Schematics of the resonator configuration applied to the Pohang new port.

Fig. 11. Comparison of amplification ratio between present state and Fig. 10(a) at point P.

Fig. 12. Comparison of amplification ratio between present state and Fig. 10(b) at point P.

기내에 여전히 존재하는 것을 알 수 있을 뿐만 아니라, 파고 증폭비가 마찰을 고려하지 않았을 경우 약 5 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 을 적용하였을 경우 약 3 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 2 이상으로 감소하는 경향을 나타내어, 현 상태와의 비교로부터 제2파제체에 의해서 항내의 파고증폭비가 오히려 증가되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 현상태와 Fig. 10(b)의 배치안에 대한 파고증폭

비 $H/2A_0$ 를 비교한 결과이다. 여기서, Fig. 10(b)의 배치안은 7과 8부두의 안벽에 공진장치내에 넓은 유수역을 확보하기 위하여 안벽과 공진장치가 이루는 각을 보다 크게 한 경우이다. 결과를 살펴보면 주기 140 sec에서는 마찰을 고려하지 않았을 경우 파고증폭비가 약 2.5 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 을 적용하였을 경우 파고증폭비가 약 2 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 1 이상의 값을 나타내었고, 주기 170 sec에서는

입사파고에 근접한 결과를 나타낸다. 더불어, 마찰의 고려 유·무에 상관없이 주기 270 sec에서는 파고증폭비가 현저하게 감소되어 입사파고보다 작은 값을 나타내며, 최대파고증폭비의 위상은 주기가 350 sec로 이동되었다는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 파고증폭비는 마찰을 고려하지 않았을 경우 약 4 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 를 적용하였을 경우 파고증폭비가 약 3 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 약 2 정도로 감소된 결과를 나타낸다. 이로부터 최대파고증폭비의 주기는 Sawaragi(1991) 및 Sakakibara et al.(2008)이 제시한 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기 30~300 sec의 범위를 벗어나서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 현상태와 Fig. 10(c)의 배치안에 대한 파고증폭비 $H/2A_i$ 를 비교한 결과이다. 여기서, Fig. 10(c)의 배치안은 Fig. 10(b)의 배치안과는 달리 7과 8부두의 안벽과 공진장치가 이루는 각이 90° 보다 작게 한 경우이다. 그림을 살펴보면 주기 140 sec에서는 마찰을 고려하지 않았을 경우와 마찰을 고려한 경우 모두 증폭비가 2에 근접한 값을 나타내고, 주기 170 sec에서는 Fig. 10(b)의 배치안과 동일하게 입사파고에 근접한 결과를 나타낸다. 더불어, 주기 270 sec에서는 파고증폭비가 현저하게 감소되어 입사파고보다 작은 값을 나타내고, 최대파고증폭비의 위상은 주기가 345 sec로 이동되어 마찰을 고려하지 않았을 경우 4.5 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 를 적용하였을 경우 증폭비가 약 2.8 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 약 2.2 정도로 감소된 값을 나타내었으며, 최대파고증폭비의 주기는 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기 30~300 sec의 범위를 벗어나서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 현상태와 Fig. 10(d)의 배치안에 대한 파고증폭

Fig. 13. Comparison of amplification ratio between present state and Fig. 10(c) at point P.

Fig. 14. Comparison of amplification ratio between present state and Fig. 10(d) at point P.

비 $H/2A_i$ 를 비교한 결과이다. 여기서, Fig. 10(d)의 배치안은 7과 8부두의 안벽과 공진장치가 이루는 각이 90° 를 이루는 경우로, 주기 140 sec에서는 현상태보다 파고증폭비가 약간 증가하고, 주기 170 sec에서는 입사파고에 근접한 값을 나타내며, 주기 270 sec에서는 현저하게 감소되어 입사파고보다 작은 값을 나타낸다. 또한, 최대파고증폭비의 위상은 주기가 340 sec로 이동되어 마찰을 고려하지 않았을 경우 4 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 를 적용하였을 경우 파고증폭비가 약 3 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 2.1 정도로 감소된 결과를 나타내며, 이 경우에도 최대파고증폭비의 발생주기는 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기 30~300 sec의 범위를 벗어나서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 현상태와 Fig. 10(e)의 배치안에 대한 증폭비 $H/2A_i$ 를 비교한 결과이다. 여기서, Fig. 10(e)의 배치안은 Fig. 10(d)의 배치안에서 공진장치의 중앙부폭을 200 m 더 연장시킨 경우이다. 이의 경우에 주기 140, 170 sec에서는 현상태와 거의 유사한 결과를 나타내며, 주기 270 sec에서는 현저하게 감소되어 입사파고보다 작은 값을 나타내었고, 최대파고증폭비의 위상은 주기가 370 sec로 이동되어 마찰을 고려하지 않았을 경우 3.2 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 를 적용하였을 경우 증폭비가 약 2.8 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 2 이상 감소된 값을 나타내었으며, 이 경우에도 최대파고증폭비의 주기는 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기 30~300 sec의 범위를 벗어나서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 현상태와 Fig. 10(f)의 배치안에 대한 증폭비 $H/2A_i$ 를 비교한 결과이다. 여기서, Fig. 10(f)의 배치안은 Fig. 10(d)의 배치안에서 공진장치의 길이를 100 m, 중앙부폭을 200 m로

Fig. 15. Comparison of amplification ratio between present state and Fig. 10(e) at point P.

Fig. 16. Comparison of amplification ratio between present state and Fig. 10(f) at point P.

연장시킨 경우이다. 이 경우에 주기 140, 170 sec에서는 입사 파고에 근접한 결과를 나타내고, 주기 270 sec에서는 현저하게 감소되어 입사파고보다 작은 값을 나타내며, 최대파고증폭비의 위상은 주기가 380 sec로 이동되어 마찰을 고려하지 않았을 경우 약 3.9 정도, 마찰계수 $f_r=0.07$ 을 적용하였을 경우 증폭비가 약 3 정도를, 마찰계수 $f_r=0.15$ 를 적용하였을 경우 2.2 정도로 감소된 결과를 나타낸다. 이 경우에도 전술한 결과와 동일하게 최대파고증폭비의 주기는 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기 30~300 sec의 범위를 벗어나서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 10(a)~(f)의 모든 경우에 대하여 주기가 800 sec 이상으로 커지면 주기가 1630 sec에서 최대파고증폭비가 3~3.2의 값을 나타내었고, 주기위상의 변화는 발생하지 않은 것을 확인할 수 있으며, 주기 1630 sec는 영일만의 전역에 대한 공진주기에 해당하므로 항내에 설치된 공진장치는 이 주기대에 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

이상으로부터 마찰을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 모두 현상태의 경우는 제 2파제제를 제거한 경우보다 큰 증폭현상을 나타내어 제 2파제제의 제거에 대한 필요성을 확인할 수 있었으며, 7과 8부두에 공진장치를 부착함으로써 계류선박의 장주기동요를 일으키는 주기대가 이동되는 것을 확인할 수 있었고, 따라서 선박의 선·적하작업의 중단에 대한 문제점을 어느 정도로 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

타원형완경사방정식과 유한요소법에 기초하는 상용소프트웨어 SMS (Surface water Modeling System)의 CGWAVE MODULE을 적용하여 모델항만에 대해 Ippen and Goda(1963)가 수행한 선형파이론의 해석해와 Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)의 수리실험치와 비교하여 SMS에 의한 결과의 타당성과 마찰계수 값의 타당성을 검증하였다. 이로부터 직사각형모델항만과 포항항에서 공진장치에 의한 부진동의 저감효과를 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) Ippen and Goda(1963)가 수행한 선형파이론 해석해와 Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)에 의해 수행된 실험치를 본 수치해석의 결과와 비교·분석하여 본 연구의 타당성을 검증하였으며, 마찰계수에 대한 값의 타당성 또한 검증하였다.

(2) 마찰을 고려하지 않았을 경우와 마찰을 고려한 경우 모두 모델항만에 적용된 공진장치의 길이 L 과 중앙부폭 B 을 적절히 조절함으로써 장주기파에 의한 부진동을 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

(3) 포항항내의 현 상태에서는 마찰을 고려하지 않았을 경우와 마찰계수 $f_r=0.07, 0.15$ 를 고려하였을 경우 모두 주기 140, 170, 270 sec에서 뚜렷한 증폭현상이 나타났다.

(4) Fig. 10(b)~(f)의 배치안은 마찰을 고려하지 않았을 경우와 마찰계수 $f_r=0.07, 0.15$ 를 고려하였을 경우 모두 300 sec 이내에 발생하는 현상태의 부진동을 상당히 차단하고, 300 sec 이후로 최대파고증폭비의 위상주기를 이동시킴으로써 300 sec 이내에서 계류선박의 이상동요를 발생시키는 장주기파를 효율적으로 억제할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 정진우, 김도삼, 박종배, 안성욱 (2010). 실해역에서 공진장치를 이용한 부진동의 제어, 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 24(6), 51-60.
- Chen, H.S. (1986). Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering. *Applied Ocean Research*, 8, 99-104.
- Chen, H.S. and Mei, C.C. (1974). Oscillations and wave forces on an offshore harbor. Report 190, R.M. Parsons Lab., for Water Resources and Hydrodynamics, MIT, Cambridge, MA.
- Demirbilek, Z. and Panchang, V. (1998). CGWAVE: A coastal surface water wave model of the mild slope equation. U.S. Army Corps of Engineer.
- Ippen, A.T. and Goda, Y. (1963). Wave induced oscillations in harbors: The solution for a rectangular harbor connected to the open-sea. Hydrodynamic Laboratory Report No. 59, Massachusetts Institute of Technology.
- Lee, J.J. (1969). Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape. Report No. KH-20, W.M. Keck Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 266.
- Mei, C.C. (1989). The applied dynamics of ocean surface waves, World Scientific Publishing Co..
- Nagai, T. et al. (1994). Relationship of a moored vessel in a harbor and a long wave caused by wave groups. *Proceedings of 24th ICCE, Kobe*, 847-860.
- Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita, S. (1996). Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a harbor. *Proc. 25th Conf. on Coastal Eng.*, 1280-1292.
- Nakamura, T., Morita, S. and Kato, K. (1998). Wave protection performance of a resonator founded at harbor entrance. *Proc. Coastal Eng., JSCE*, 45, 721-725.
- Poon, Y.K., Raichlen, F. and Walker, J. (1998). Application of physical model in long wave studies for the port of Long Beach. *Proc. 26th ICCE, ASCE*, 1222-1235.
- Sakakibara, S. and Kubo, M. (2008). Characteristics of low-frequency motions of ships moored inside ports and harbors on the basis of field observations. *Marine Structures* 21, 196-223.
- Sawaragi, T. (1991). Waves, sediment transport and structure. Gihodo Press, 390.

원고접수일: 2012년 2월 6일

수정본채택: 2012년 2월 14일

게재확정일: 2012년 2월 15일