

# 항만 부진동에 미치는 입구손실의 영향 Effects of Entrance Loss on Harbor Resonances

박우선\* · 정원무\* · 채장원\*

## 1. 서론

기존의 항만 부진동현상 해석은 대부분 완전유체라는 가정하에 선형이론에 기초하여 개발된 수치 모델에 의해 수행되고 있다. 실제의 경우에는 해저면의 마찰, 고체경계면을 따른 에너지 손실, 단면의 급 축소 및 확대에 따른 에너지 손실 등이 존재하므로, 이와 같은 에너지의 손실을 고려하지 않고 선형해석을 수행하게 되면 실제와는 다른 과장된 결과를 얻게 된다. 특히, 항 입구의 폭이 좁은 경우에는 실제와는 다르게 증폭비가 대단히 크게 예측된다(*harbor paradox* : Miles and Munk, 1961).

Chen(1986)은 해저면의 마찰효과가 고려된 환경사 방정식을 사용하고, 부분반사 경계조건을 도입함으로써, 수치모델을 사용하여 실제 현상에 근접한 결과를 예측할 수 있음을 보였다. Ūnlũata and Mei(1975)는 항 입구에서의 에너지 손실의 영향을 해석적으로 취급하였다. Lepelletier(1980)는 수리 실험과 비선형 수치모델을 이용하여 각 종 에너지 손실에 대해서 연구하였으며, 항 입구 손실계수에 관한 실험식도 제공하였다.

본 연구에서는 항 입구에서의 손실을 고려할 수 있도록 기존 Park et al(1994)의 수치 모델을 확장하였으며, Lepelletier(1980)의 수리실험결과와의 비교를 통하여 검증을 수행하였다. 또한 파고 변화 및 항 입구 폭의 변화에 따른 입구손실의 영향을 살펴보았다.

## 2. 지배방정식 및 경계조건

해저면의 경사가 완만히 변하는 경우에는 다음과 같은 환경사 방정식으로 파동장을 나타낼 수 있다(Chen, 1986).

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \tag{1}$$

여기서,  $C$ 는 파속,  $C_g$ 는 군속도를 나타내며,  $\lambda$ 는 해저면의 마찰로 인한 난류발생에 관련된 에너지 손실을 나타내는 계수이다.

방파제, 안벽 등의 고체 경계면은 일반적으로 에너지 흡수체로 볼 수 있다. 이 에너지 소산의 영향은 특히 제1 고유진동조건 부근에서 크게 나타나므로 이를 적절히 고려하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 에너지 손실효과를 고려하기 위하여 다음과 같은 부분반사 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik \cos \theta \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \phi \tag{2}$$

\* 한국해양연구소 연안공학연구부

여기서,  $K_r$ 은 고체 경계면에서의 반사율을 의미하며,  $\theta$ 는 고체 경계면으로 진행하는 국소파의 입사각을 나타내나 일반적으로 이 방향을 정하기는 거의 불가능하기 때문에 직각으로 입사하는 것으로 가정을 한다(즉,  $\theta = 0^\circ$ ).

### 3. 입구손실

단면이 급 축소 또는 확대하는 곳을 파랑 또는 흐름이 통과하는 경우의 에너지 손실수두,  $h_l$ 은 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$h_l = \frac{1}{2} f_e u_e |u_e| + \int_l \frac{\partial u_e}{\partial t} dl \quad (3)$$

여기서,  $u_e$ 는 축소단면에서의 유속을 나타내며,  $f_e$ 는 단면 축소확대에 따른 손실계수,  $l$ 은 흐름의 제트(jet) 길이를 나타낸다. 이  $f_e$ 와  $l$ 은 단면의 형상에 따라 실험적으로 결정되는 계수이다. 본 연구에서는 이 손실계수,  $f_e$ 를 다음과 같은 Lepelletier(1980)가 제안한 식을 사용하여 결정하였다. 즉, 항 폭과 입구 폭이 같은 경우( $a/b=1.0$ )는

$$f_e = \begin{cases} 0.8(u_e/aw) & \text{for } u_e/aw \leq 1 \\ 0.8 & \text{for } u_e/aw > 1 \end{cases} \quad (3)$$

입구 폭이 항 폭의 0.8보다 작은 경우( $a/b \leq 0.8$ )는

$$f_e = \begin{cases} 1.15(u_e/aw) & \text{for } u_e/aw \leq 1 \\ 1.15 & \text{for } u_e/aw > 1 \end{cases} \quad (4)$$

를 사용하였다. 단면이 급격히 변하는 지점에서 손실에너지를 고려한 두 영역간의 정합조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_1 = u_2 \quad (5)$$

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} f_e u_2 |u_2| + \int_l \frac{\partial u_2}{\partial t} dl \quad (6)$$

여기서,  $u$ 와  $p$ 는 유속과 압력을 나타내며 하첨자 1과 2는 항입구 경계면에서의 외부 및 내부의 의미한다.

주파수 영역에서 해를 보다 효율적으로 구하기 위하여 식(6) 우변의 두 번째에 나타난 비선형 항을 Lorentz 변화를 사용하여 다음과 같이 선형화하였다.

$$\frac{1}{2} f_e u_2 |u_2| = \frac{1}{2} \alpha u_2 \quad (7)$$

여기서,  $\alpha$ 는 선형화된 손실계수로 유속의 함수로 주어지며, 연직방향으로 다른 값을 갖게 된다. 본 연구에서 채택한 지배방정식이 수평 2차원에서 정의된 환경사 방정식이기 때문에 연직방향으로  $\alpha$ 가 변하는 것은 처리하기 어렵다. 따라서, 연직방향으로 변하지 않으면서 동일한 파워를 갖도록 다음과 같이  $\alpha$ 를 결정하였다.

$$\alpha = \frac{8}{9\pi} f_e \overline{u_2} \tanh kh \frac{5 + \cosh 2kh}{2kh + \sinh 2kh} \quad (8)$$

여기서,  $\overline{u_2}$ 는 유속의 진폭을 의미한다.

#### 4. 수치해석 및 결과분석

상기의 경계치 문제를 풀기 위하여 Park et al(1994)의 유한요소법에 기초한 수치모델을 확장하였으며, 확장된 수치모델의 타당성과 입구손실의 영향을 조사하기 Fig. 1에 보인 바와 같은 Lepelletier(1980)의 모형항만에 대해서 주기 2초의 파랑으로 파고변화에 따른 수치실험을 실시하였다. 모형항만은 입구 폭이 항 폭과 같은 경우( $a/b=1.0$ )와 항 폭의 0.2인 경우( $a/b=0.2$ )를 대상으로 하였다.

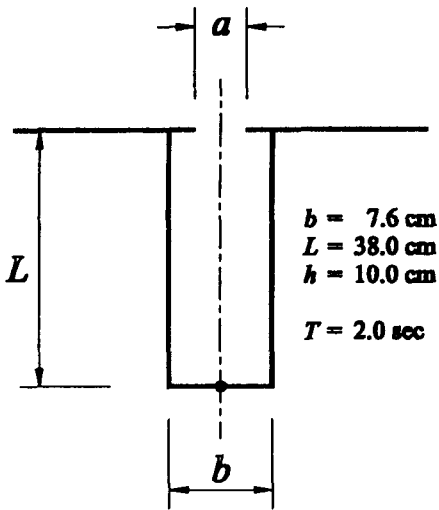


Fig. 1 Lepelletier's Model harbor

Lepelletier는 입구손실의 영향을 고려하지 않은 경우, 항 가장 안쪽 안벽 중앙점에서의 증폭비가 약 5.6 이 된다고 보고하였다( $a/b=1.0$ 의 항의 경우). 이는 이상적인 항의 경우와 비교하여 본다면 작은 값으로 주로 모형항만의 고체경계면사이의 누수에 기인된 것 현상으로 판단된다. 수치실험결과, 전체 벽면의 반사율이 0.94일 때 Lepelletier가 제시한 증폭비 5.6을 얻었다. 따라서, 모형항만의 벽면 반사율은 0.94로 고정하고 입구의 손실을 고려한 경우에 대한 해석을 실시하였다. 반사율 0.94를 적용하고 항 입구의 손실을 고려하지 않으면  $a/b=0.2$ 인 경우의 증폭비는 약 5.4정도로 예측되었다. 입구가 넓은 경우에 비하여 증폭비가 작은 것은 항 입구의 폭이 상대적으로 줄어 공진주기가 장주기쪽으로 이동했기 때문이다. 즉,  $a/b=1.0$ 의 항의 경우는 1.95초 부근에,  $a/b=0.2$ 인 경우는 2.15초 부근에 제1 공진주기가 존재하기 때문이다.

Fig. 2에 나타낸 것은  $a/b=1.0$ 인 항에 대한 것으로 본 연구에 의한 결과와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 두 결과의 차이의 주된 원인으로서는 비선형성으로 생각할 수 있다. 항 입구의 손실이 큰  $a/b=0.2$ 에 대한 결과인 Fig. 3에서도 같은 현상을 볼 수 있다. 두 결과는 파고가 증가할수록 입구에서의 손실도 증가함을 나타내고 있다. 또, 두 결과를 서로 비교하여 보면 항 입구의 폭이 좁은 경우의 손실이 더 크울 알 수 있다.

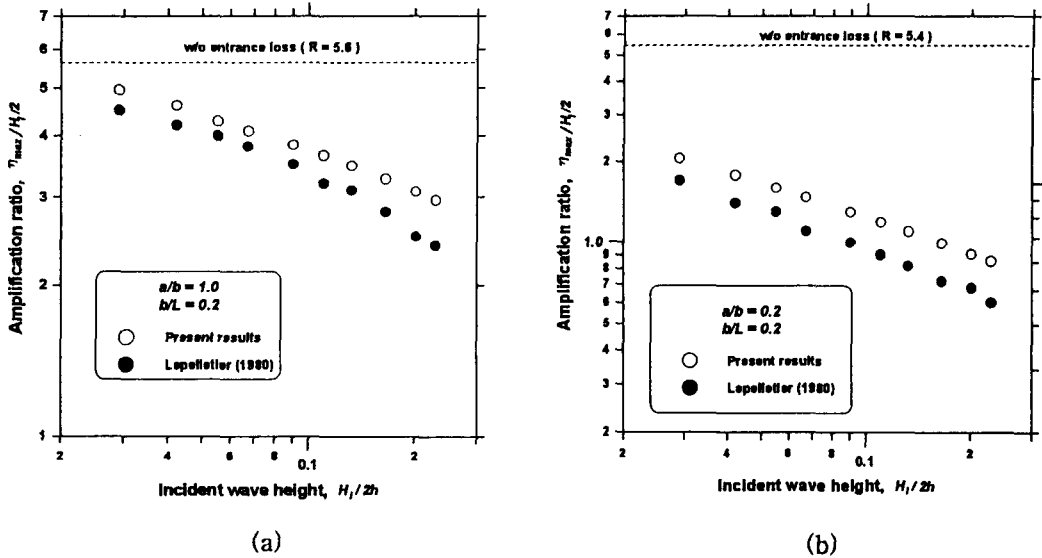


Fig. 2 Variation of amplification ratios w.r.t. incident wave heights: (a) fully open harbor ( $a/b=1.0$ ), (b) partially open harbor ( $a/b=0.8$ ).

## 5. 결론

항만 부진동 현상에 미치는 항 입구 손실의 영향에 대해서 연구하였다. 기존의 Park et al(1994)의 유한요소 모델을 입구손실을 고려할 수 있도록 확장하였으며, 수리실험치와의 비교를 통한 검증 결과, 상당히 양호한 결과를 보였다. 또한, 항 입구의 손실은 파고가 커질수록 증가하며, 입구가 좁아질수록 더욱 중요하게 작용됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- Miles, J.W. and Munk, W., 1961. Harbor paradox, Jour. of Wat. Har. and Coas. Engrg Div., ASCE, 87(WW3), pp.111-131.
- Chen, H.S., 1986. Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering, Applied Ocean Research, 8, pp. 99-104.
- Ūnlũata, Ū and Mei, C.C., 1975, Effects of entrance loss on harbor oscillations, Jour. of Wat. Har. and Coas. Engrg Div., ASCE, 101(WW2), pp.161-180.
- Lepelletier, T.G., 1980. Tsunamis-harbor oscillations induced by nonlinear transient long waves, Technical Report No. KH-R-41, W. M. Keck Lab. of Hydraulic and Water Resources, California Institute of Technology.
- Park, W-S., Chun, I.S., and Jeong, W.M., 1994. Infinite element for the analysis of harbor resonances, Jour. of Kor. Soc. of Coas. and Ocean Engineers, 6(2), pp.139-149.