

수치 파동 수조를 이용한 부유체의 문풀 (Moon Pool) 유동해석

구원철^{1,†} · 이경록¹
울산대학교 조선해양공학부¹

Flow Analysis of Two-Dimensional Floating Body with Moon Pool Using a Numerical Wave Tank

Weon-Cheol Koo^{1,†} · Kyoung-Rok Lee¹
School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan¹

Abstract

The aim of this study is to analyze the hydrodynamic properties of a 2D floating body with moon pool using a 2D fully nonlinear Numerical Wave Tank(NWT). This NWT was developed based on the Boundary Element Method(BEM) with potential theory and fully nonlinear free surface boundary conditions. Free surface elevations in the moon pool were calculated in the time domain for various frequencies of forced body motions. The added-mass and damping coefficients of the heaving body were also obtained. The present numerical results were compared with the analytic and experimental results and their accuracy was verified.

Keywords : Moon pool(문풀), Forced heave motion(강제상하동요), Numerical wave tank(수치 파동 수조), Boundary element method(경계 요소법)

1. 서론

문풀(Moon pool)은 해저면 시추나 해저 광물 탐사를 위해 건조되는 특수선의 갑판에서 바닥까지 사각형이나 원형 모양으로 뚫린 개구부를 말한다. 문풀은 유체와 공기가 만나는 자유수면이 존재하며 이로 인하여 선체의 저항이 증가되며, 자유수면 변위로 인한 선체 운동 및 안정성에 영향을 준다. Kim et al.(2006)은 문풀을 가진 선박은 내부 유동이 발생하며, 이로 인한 부가저항이 유발 된다고 보고하였다. 또한, Yoo and Choi(2004)도 문풀 내부의 자유수면은 일정한 주기를 가지고 상하운동을 함으로써 부가저항을 발생시키고 선체의 전체저항을 증가 시킨다는 연구 결과를 발표하였다. 또한 Ha et al. (2002)은 문풀의 영향을 고려한 LNG-FPSO(Liquefied Natural Gas-Floating Production Storage and Off-loading)의 운동 해석을 위해 단순화된 경계조건을 만족하는 선형화된 3차원 산란문제(diffraction problem)를 계산하였다.

LNG-FPSO 및 LNG-FSRU(Liquefied Natural Gas-Floating Storage & Regasification Unit)는 병렬 계류되어 양 하역이 이뤄지는 동안에 두 선체간에 긴 2차원 문풀 형상을 가지게 된다. Koo and Kim(2005)과 Hong et al.(2005)은 이같이 병렬 계류된 선체를 고정 부유체로 가정하고 물체에 미치는 파력과 문풀 주변의 자유 수면의 변화를 경계 요소법을 사용하여 계산하였다.

Faltinsen et al.(2007)은 두 선체간의 병렬계류, 항만에 접한 선체, 쌍동선 등에서 발생하는 피스톤 모드의 슬로싱 현상을 실험 및 선형이론에 기초한 속도 포텐셜 방법으로 연구하였다. 또한 Kristiansen and Faltinsen (2008)은 보텍스(Vortex) 추적법을 통하여 문풀 주변에서 발생하는 물입자의 와류의 형태 및 진행을 조사하였다. 최근에 Heo and Park(2009)은 CFD 방법을 이용하여 2차원 문풀 주위의 유동장을 해석하고, 모형시험과도 비교하였다.

본 연구에서는 완전 비선형 2차원 수치 파동 수조(Numerical Wave Tank)를 이용하여 2차원 부유체의 강제상하동요 운동에 대한 문풀 내부의 파고, 문풀 내벽에 작용하는 수평력을 시간 영역에서 계산하였다. 이를 통해 문풀 내부의 자유수면 유동이 선체운동에 미치는 영향을 예측 할 수 있으며, 계산을 통하여 구하여진 선형 및 비선형 힘을 문풀의 설계에 이용할 수 있다. 수치 파동 수조 기법을 이용한 본 연구는 해저면 바닥 및 방사파의 인공 감쇠 영역을 재현할 수 있기 때문에, 수조 실험 조건과 동일한 계산 조건을 구현할 수 있다. 따라서 기존 연구에서 잘 고려하지 않은 부유체 상하운동으로 인한 해저면 영향과, 수조 실험에서 완벽하게 제거하기 어려운 수조벽에서의 반사파 영향 등을 조사할 수 있다. 본 논문에서는 Faltinsen et al.(2007)의 선형식 결과 및 실험결과와의 비교를 통해 본 계산 결과의 유효성을 확인하고, 반사파 영향으로 인한 실험결과와의 상이성을 설명하였다.

2. 수학적 모델과 공식화

2.1 지배방정식 (Governing Equation)

문풀의 내부유동을 해석하기 위하여 계산 영역내의 유체는 비점성, 비압축성 유체이고 비회전 운동을 한다고 가정하고 속도 포텐셜 이론을 바탕으로 하였다. 직교 좌표계를 사용하였으며 원점은 계산 영역 왼쪽 경계면의 평균 수면이고 x 는 수평 방향의 좌표이며 오른쪽 방향으로 증가하고 y 는 수직방향 좌표로서 평균 수면에서 위쪽으로 증가한다. 유체 입자의 속도는 속도 포텐셜의 미분으로 표현 될 수 있으며, 계산 영역 내에서 연속 방정식을 만족하므로 지배방정식은 라플라스 방정식(Laplace Equation)이 된다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

라플라스 방정식을 풀기 위해 그린 함수(Green function)를 사용하여 지배방정식을 경계적분 방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\alpha \phi_i = \iint_{\Omega} (G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} - \phi_j \frac{\partial G_{ij}}{\partial n}) ds \tag{2}$$

여기서, 2차원 영역계산의 그린함수는 $G(x_i, z_i, x_j, z_j) = -(1/2\pi) \ln R$, α 는 solid angle로 경계면에서는 0.5가 되며, R 은 각 소스(Source)점과 필드(Field)점 사이의 거리이다. n 은 단위법선 벡터를 나타낸다.

2.2 경계조건(Boundary condition)

경계적분 방정식을 풀기 위해서는 계산 영역을 구성하고 있는 각 경계면의 경계조건들을 활용해야 한다. 자유표면에는 완전 비선형 자유표면 경계조건을 사용하였는데 동역학적(Dynamic)조건과 운동학적(Kinematic) 경계조건이 존재하며, 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - \frac{P_a}{\rho} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \phi \cdot \nabla \eta + \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{4}$$

여기서, η 는 자유표면의 변위, g 는 중력가속도, ρ 는 유체밀도, P_a 는 자유표면의 대기 압력으로서 0으로 가정한다. 선형 경계 조건은 식 (3)의 오른쪽 두 번째 항과 식 (4)의 오른쪽 첫 번째 항을 제외한 조건을 의미한다.

해저면(Sea Bottom)과 계산 영역의 좌우측 수직 경계면에는 불 투과성 경계조건을 적용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{5}$$

또한, 선체의 강제 운동을 위해서 선체운동을 식 (6)과 식 (7)과 같이 가정하고 선체 경계조건은 식 (8)과 같다.

$$y = \eta_{3a} \sin(\omega t) \tag{6}$$

$$\vec{v} \cdot \hat{j} = \eta_{3a} \omega \cos(\omega t) \tag{7}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = v \hat{j} \cdot n \tag{8}$$

여기서 η_{3a} 는 강제 상하동요 진폭, $v \hat{j}$ 는 강제 상하동요 속도 벡터를 나타내며 ω 는 원주파수이다.

2.3 수치 계산 방법

계산 결과의 수치적 안정성을 위해 선체의 강제 운동을 일정 시간 동안 점진적으로 증가시켜 입력 값까지 이르게 하기 위해 램프(Ramp) 함수를 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t > 5T \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\pi \frac{t}{5T}\right) \right\} & t \leq 5T \end{cases} \tag{9}$$

여기서, 선체 운동의 점진적 증가를 위한 램프의 길이는 선체 운동주기의 5배로 하였다. 정상상태의 계산을 지속적으로 수행하기 위해 계산 영역의 양끝 자유표면 경계면에 인위적 파 감쇠영역(Artificial damping zone)을 두었다. 이는 선체의 강제 운동으로 생기는 방사파를 계산영역 끝의 자유표면에서 강제로 흡수하여 선체로 유입되는 것을 방지하기 위함이다. 인위적 파 감쇠영역의 자유표면에는 다음과 같은 동역학적조건과 운동학적 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + \mu_1 \frac{\partial \phi}{\partial n} \tag{10}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \phi \cdot \nabla \eta + \frac{\partial \phi}{\partial z} + \mu_2 \eta \tag{11}$$

여기서, μ 는 감쇠계수이며 $\mu_1 = k \mu_2$ 이고 k 는 파수(wave number)이다. 이러한 인위적 파 감쇠영역은 점진적 감쇠강도의 증가로 선체의 강제운동으로 생기는 파를 흡수하게 된다. 이와 같은 파 감쇠기법은 실제 해양 수조실험과 동일한 조건을 구현한 것이다. 또한, 선체의 급격한 운동으로 발생하는 방사파의 비선형성 증가와 경계면 이산화(Discretization) 등으로 인한 자유표면의 수치적 불안정성을 해결하기 위해 Chebyshev 5-point 평탄화(Smoothing)법을 매 5번째 시간스텝마다 자유표면에 적용하여 계산의 수치적 안정성을 도모하였다.

2.4 선체의 외력 계산

선체의 강제 상하동요 운동으로 좌우의 선체를 밀어내는 힘이 발생하게 되며, 이러한 힘은 선체의 구조적 안정성과 운동에 영

향을 줄 뿐 아니라 선체의 병렬 계류 시 적절한 계류사의 적용을 통한 선체 운동 안전성을 확보하기 위해 정확하게 예측되어야 한다. 선체의 작용하는 압력을 계산하기 위해 Bernoulli's equation을 사용하였다. 선형식 계산은 식 (12)의 오른쪽 세 번째 항인 비선형 항을 제외한 식을 사용한다.

$$P = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 \quad (12)$$

이를 통해 구한 선체 압력을 식 (13)에 대입하고 선체 표면 (Sb)에 대한 적분을 통해 매시간 변화하는 파력을 구할 수 있다.

$$\vec{F} = \iint_{Sb} P \vec{n} ds \quad (13)$$

여기서, $\vec{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j}$ 로 선체표면의 단위 법선벡터를 의미한다.

2.5 부가질량과 감쇠계수의 계산

선체의 상하동요 강제 운동으로 인한 부가질량과 감쇠계수는 선체에 가해지는 수직방향의 힘을 이용하여 구하였다. 시간영역 계산을 통해 얻어진 결과 중 정상상태 구간의 시계열 데이터(파력)를 사용하여, 부가질량과 감쇠계수를 식 (14)을 이용하여 계산하였다.

$$A_{33} = -\frac{\int_0^T F_3 \ddot{\eta} dt}{\int_0^T (\ddot{\eta})^2 dt}, B_{33} = -\frac{\int_0^T F_3 \dot{\eta} dt}{\int_0^T (\dot{\eta})^2 dt} \quad (14)$$

여기서, F_3 는 선체에 가해지는 수직방향의 힘이고, $\dot{\eta}(=v)$ 와 $\ddot{\eta}$ 는 각각 선체를 강제로 움직이는 속도와 가속도를 나타낸다.

2.6 수치모델

본 계산에 사용된 수치 파동 구조를 Fig. 1에 도식화 하였고, 계산 조건은 Faltinsen et al.(2007)의 모형시험과 동일한 조건으로 계산을 수행하였으며 Table 1에 표기하였다.

Table 1 Principal particulars of computational setup

	CASE1	CASE2
L_1 (m)	0.18	0.36
B(m)	0.36	0.36
D(m)	0.18	0.18
η_{3a} (m)	0.0025	0.0025

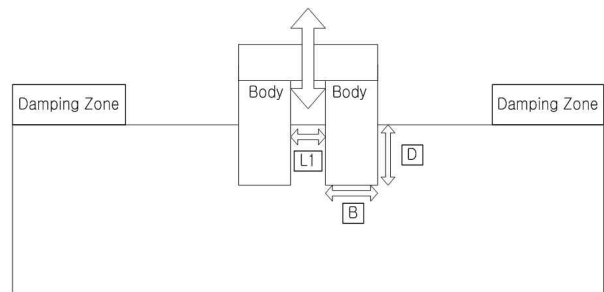


Fig. 1 Sketch of computational domain, one side of free surface is 14m including an artificial beach of 7m and a water depth of 1.03m. L_1 is width of moon pool

3. 결과 및 분석

3.1 수렴성 확인 (Convergence test)

매시간 움직이는 자유표면의 변위를 정확히 재현할 수 있는 적절한 노드(node)수를 결정하기 위해 노드수에 대한 해의 수렴성을 조사하였다. 선체 운동으로 발생하는 방사파의 단위 파장당 자유표면의 노드수를 10개, 20개, 30개로 변화시켜 계산한 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 문풀 내부와 외부 자유표면의 변위를 각각 표시하고 이를 선형 이론값 (Faltinsen et al. 2007)과 비교하였다. 이를 통해 자유표면의 노드수는 생성 방사파에 대해 한 파장당 20개 이상이면 충분히 수렴함을 알 수 있다. 모든 수치 계산은 강제운동의 시간 간격을 $dt = T/128$ 로 계산 하였다.

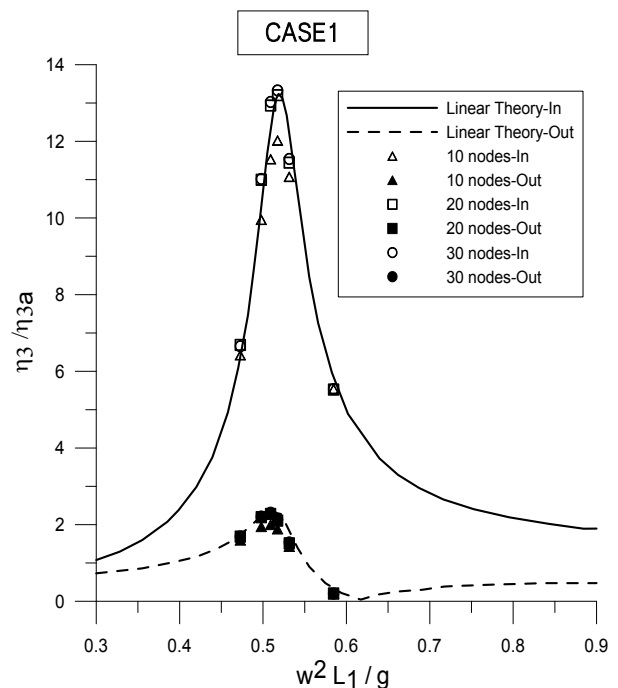


Fig. 2 Convergence test of node number per wavelength on the free surface in CASE1

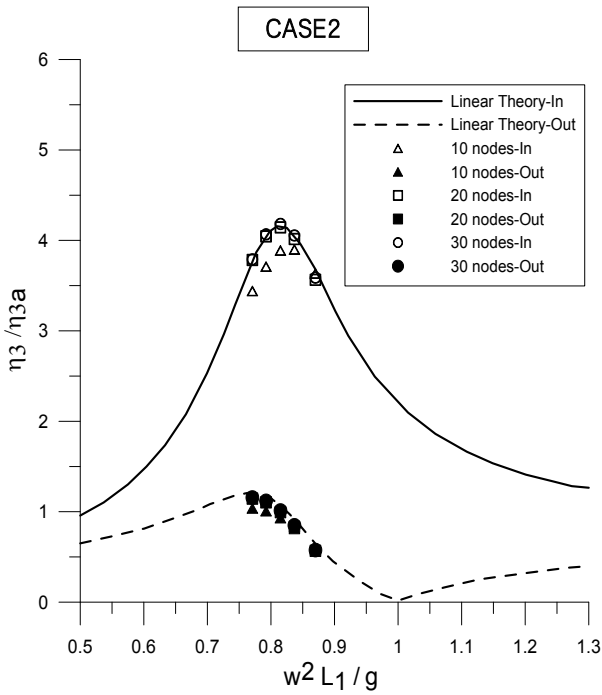


Fig. 3 Convergence test of node number per wavelength on the free surface in CASE2

3.2 Moon pool 내부의 자유표면

선체의 강제 상하운동으로 발생하는 자유표면의 변위를 문풀 내부(In)와 외부(Out)로 나누어서 측정하였다. 각 조건에 따라 계측한 무차원화된 자유표면의 변위를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

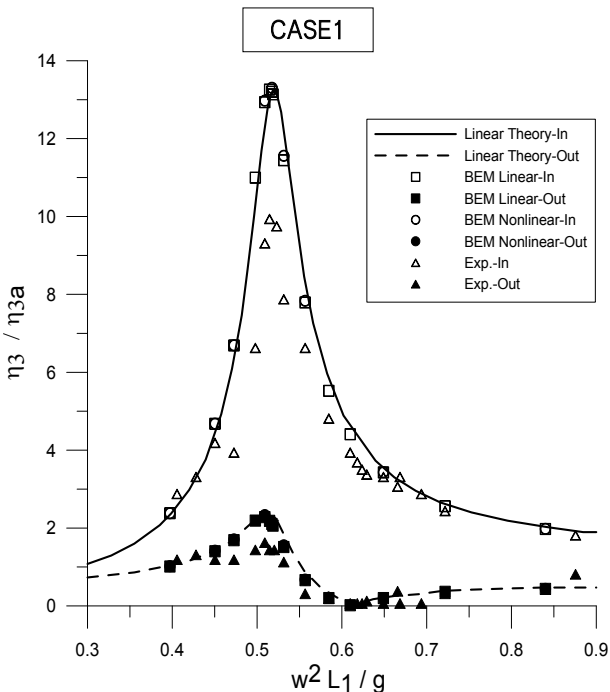


Fig. 4 Comparison of surface elevations in CASE1

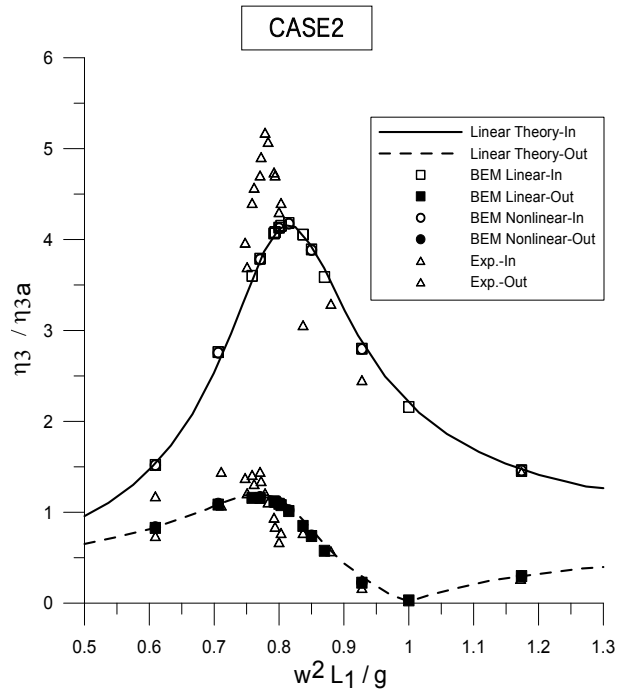


Fig. 5 Comparison of surface elevations in CASE2

문풀 내부에 생성된 자유표면의 변위는 공진주파수에서 급격히 증가하였고 문풀 간격이 좁은 CASE1이 CASE2에 비해 더 큰 값을 나타내었다. 본 계산 결과는 선형이론과 Faltinsen et al. (2007)의 모형시험 결과와 비교하였다. 경계요소법을 이용한 본 연구의 선형, 비선형 시계열 계산 결과는 전 주파수 영역에서 선형식 결과와 잘 일치하지만, 공진 주파수 근처에서는 실험결과와 상당한 차이를 나타낸다. 이는 공진 주파수 근처에서 유체 점성의 영향이 상대적으로 크기 때문에 비점성 유체를 가정한 본 계산 결과와 차이를 보이기 때문이다.

또한 Case2에서 나타나는 실험결과와 본 계산의 공진영역이 상이하게 나타나는 이유는 수조실험의 양끝 수직벽에서 발생하는 반사파로 인한 수조 실험의 불완전성에 기인한다. 이는 실험을 수행한 Faltinsen et al.(2007)에서도 언급되어 있다. 이 같은 사실을 통해, 인공 감쇠영역의 적용을 통한 반사파의 완벽한 제거가 가능한 수치 파동 수조 계산 기법의 유용성을 확인할 수 있다.

본 연구의 선형계산은 계산 영역 경계면에 놓인 노드들의 움직임을 조화운동(Harmonic motion)이라고 가정하여 각 노드가 평균 지점(mean position)에 놓여 있다고 가정하여 계산한 결과이다. 다시 말하면, 실제 노드의 움직임이 없는 상태에서 선형 경계 조건을 사용하여 경계 적분 방정식을 푼 것이다. 이에 반해 비선형 계산은 비선형 경계 조건을 사용하고 각 경계면의 노드 움직임을 실시간 대입하여 각 시간 계산 스텝마다 계산을 수행한 것이다.

3.3 부가질량과 감쇠계수

본 연구에서 계산한 수직 운동 방향의 부가질량과 감쇠계수를 식 (14)을 이용하여 계산하고 Faltinsen et al.(2007) 이론값과 비교하여 Fig. 6 과 Fig. 7에 나타내었다. 감쇠계수는 공진주기에서 가장 큰 값을 가지고 있는 것을 알 수 있고 부가질량은 공진 주파수보다 약간 큰 주파수영역에서 가장 큰 변위를

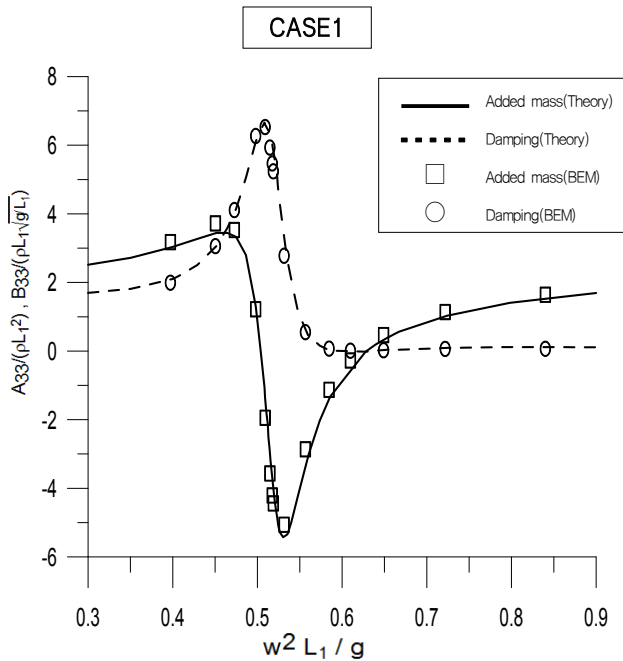


Fig. 6 Comparison of added mass and damping coefficient on one barge section in CASE1

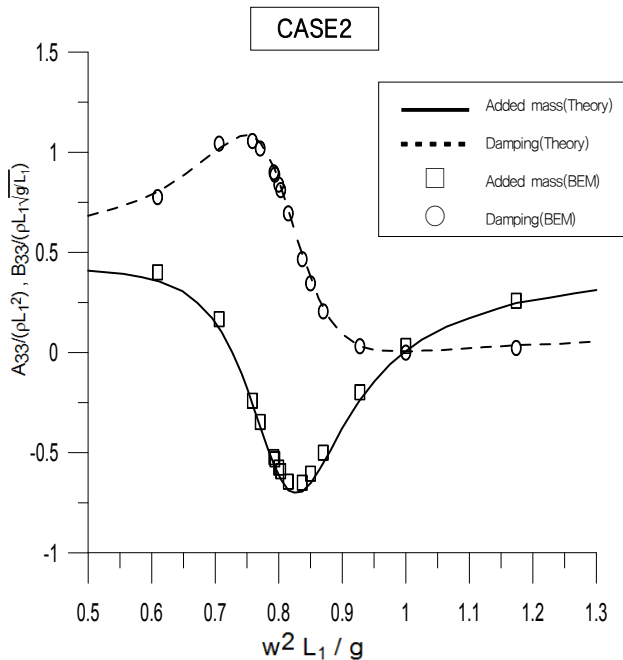


Fig. 7 Comparison of added mass and damping coefficient on one barge section in CASE2

나타내며, 이때 부가질량은 최대 음의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 주어진 모든 주파수 영역에서 이론 값과 계산 값이 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 본 연구의 계산 방법의 유효성과 해의 정확성이 입증되었다. 여기서, 부가질량과 감쇠계수의 무차원화는 각각 $A_{33}/(\rho L_1^2)$ 과 $B_{33}/(\rho L_1^2 \sqrt{g/L_1})$ 로 하였다.

3.4 좌우방향의 힘

Fig. 8은 선체의 강제 운동으로 인해 한쪽 선체(one barge)에 작용하는 수평력의 진폭을 비교한 결과이다. 문풀에 작용하는 유체력은 선형과 비선형방법으로 계산하여 비교하였다. 비선형 계산이 선형계산에 비해 다소 큰 것을 알 수 있는데, 이는 식 (10)의 압력 계산식 오른쪽 세번째의 비선형 항의 영향이라고 판단된다. Fig. 4 와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 자유표면의 변위차는 선형과 비선형 계산의 경우 거의 차이가 없음이 확인되었기 때문이다. 또한 내부유동의 공진주기와 동일한 주파수에서 수평력이 최대값을 가짐을 확인하였고, 문풀 폭이 좁은 CASE1이 CASE2에 비해 큰 수평력을 가짐을 알 수 있다. 이는 CASE1의 내부 유동 변위가 CASE2에 비해 훨씬 크기 때문이다.

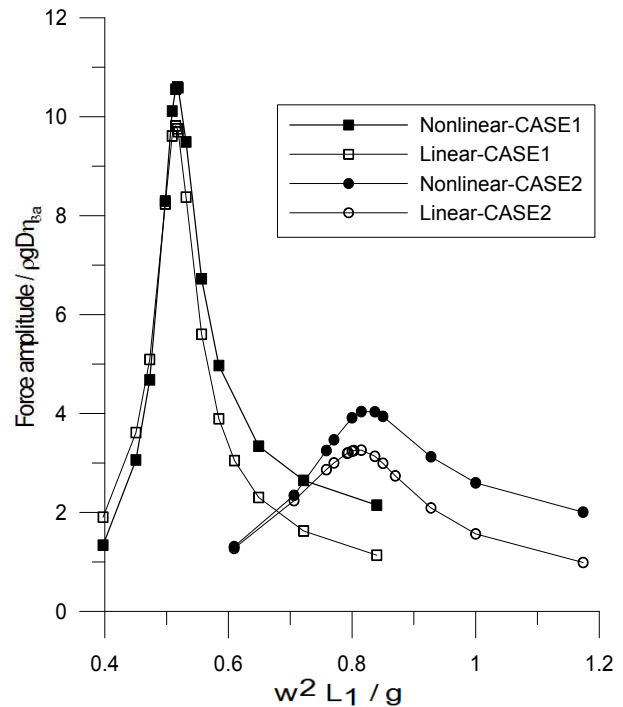


Fig. 8 Comparison of horizontal force on one barge section in CASE 1 and CASE2

4. 결론

완전 비선형 수치 파동 수조 기법을 이용하여 2차원 부유체의 강제 상하동요시 문풀에서의 유체 운동을 해석하고 부유체에 미

치는 수평력을 계산하였다. 문풀내 자유표면 변화는 문풀 간격이 좁을수록 크게 측정되었다. 본 계산 결과는 선형 이론값과 전 주파수 영역에서 잘 일치함을 확인하였고, 유체 점성의 상대적 영향이 큰 공진주파수 영역을 제외한 대부분의 영역에서 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 선체 강제 운동으로 인한 부가질량과 감쇠계수를 시계열 외력 데이터를 이용하여 계산하고 선형식 결과와 비교하여 본 계산 방법의 정확성과 유효성을 확인하였다. 본 연구에서 계산한 부가질량과 감쇠계수 및 문풀에 작용하는 수평력은 문풀 간격이 작을수록 큰 값을 나타냄을 알 수 있었고 공진 주파수 영역에서 최대값을 가짐을 실험값과 비교하여 확인하였다. 또한 수조 실험시 양끝 경계면에서 완벽히 제거되지 못한 반사파는 결과의 정확성에 중요한 영향을 끼치는 것을 본 수치결과를 통해 확인하였다. 따라서 수조 실험시 반사파의 효과적인 제거가 필수적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

Faltinsen, O.M. Rognebakke, O.F. & Timokham, A.N., 2007. Two-dimensional resonant piston-like sloshing in a Moon pool. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.575, pp.359-397.

Ha, M.K. Kim, M.S. Paik, B.K. & Park, C.H., 2002. Motion and sloshing analysis for new concept of offshore storage unit. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 16(1), pp. 1-7.

Heo, J.K. & Park, J.C., 2009. A CFD Analysis on a 2-D Floating Body with a Moonpool under Forced Heave Motion. *Proceedings of the Korea Committee for Ocean Resources and Engineering Conference*.

Hong, S.Y. et al., 2005. Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels. *Ocean Engineering*, 32, pp.783-801.

Koo, B.J. & Kim, M.H., 2005. Hydrodynamic interactions and relative motions of two floating platforms with mooring lines in side-by-side offloading operation. *Ocean Engineering*, 27, pp.292-310.

Kim, D.J. Park, J.W. Kim, J.N. & Jeong, U.C., 2006. An Experimental Study on the Moonpool Characteristics of a Cleaning Ship for Ocean Environment Purification. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(2), pp. 46-51.

Kristiansen, T. & Faltinsen, O.M., 2008. Application of a vortex tracking method to the piston-like behavior in a semi-entrained vertical gap. *Applied Ocean Research*, 30, pp.1-16.

Yoo, J.H. & Choi, S.H., 2004. Performance of Drill ship with Moonpool and Azimuth Thrusters. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 41(6), pp.33-39.

