

부유식 가두리 양식장의 파랑중 유탄성 응답 해석

최윤락* · 여환태**

*울산대학교 조선해양공학부

**현대중공업 조선사업본부

A Hydroelastic Analysis of a Floating Fish Cage in Waves

Yoon-Rak Choi* and Hwan-Tae Yeo**

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**Shipbuilding Division, Hyundai Heavy Industries Co., LTD., Ulsan, Korea

KEY WORDS: Floating fish cage 가두리 양식장, Hydroelastic response 유탄성 응답, Method of generalized mode 일반화 모드법, Higher-order boundary element method 고차경계요소법, Drift force 표류력

ABSTRACT: The dynamic responses and drift forces in waves of a floating circular fish cage are analyzed considering hydroelastic effects. The method of generalized mode is used to calculate the hydroelastic responses of the floater of cage. The elastic mode shapes, generalized mass, and stiffness in dry mode are evaluated by using a structural analysis code. The higher-order boundary element method is adopted to analyze the interaction between fluid and deformable structure. Some results of vertical motions and drift forces are shown and compared with those for a rigid body.

1. 서 론

부유식 가두리 양식시설은 부유식 프레임에 우리형 그물을 부착한 구조물로 파랑, 조류 등에 의해 유체력을 많이 받는다. 특히 심한 파랑 중에서는 시설물이 연직 방향으로 크게 운동하여 어류에 나쁜 영향을 미칠 뿐만 아니라 해상 작업을 하는 작업자에게도 매우 위험한 상황이 발생할 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 시설물의 파랑중 동역학적 특성을 정확하게 산정하여 파랑에 의한 운동이 최소화 되도록 설계하여야 한다.

일반적으로 가두리 시설의 부체는 가늘고 긴 부재로 구성되어 있어 파랑중 유탄성 거동을 보인다. 따라서 부체를 강체로 가정하여 해석한 기존의 연구결과는 실물 가두리 양식장의 운동응답과 파랑하중을 적절하게 예측한다고 보기 어렵다(김태호 등, 2001; Yang et al., 2002). 한편, 김태호 등(2002)은 가두리 양식장의 탄성응답을 비연성, 준정적 해석법으로 구한 바 있다.

본 연구에서는 일반화 모드법을 사용하여 원형 가두리양식시설의 유탄성 응답과 표류력을 해석하였다. 공기중 일반화 모드는 상용 구조해석 소프트웨어를 사용하여 구하였으며 산출된 모드 형상을 파랑의 산란 및 방사문제의 경계조건으로 부과하여 유체동역학적 기진력, 부가질량 그리고 파랑감쇠를 구하였다. 유체동역학 문제는 고차경계요소법을 사용하여 해석하였다. 구조해석을 통해 구한 일반화 질량 및 구조 강성과 변형을 고

려한 유체복원력계수 그리고 유체동역학적 힘들로 운동 방정식을 구성하여 모드별 운동응답을 구하였고 모드 중첩법을 사용하여 유탄성 운동응답을 산출하였다. 표류력은 부체의 유탄성 변형을 고려하여 해석하였다.

2. 일반화 모드법

x-y평면을 정수면으로 하는 Fig. 1과 같은 좌표계를 도입하여 문제를 정식화 한다. 비점성, 비압축성 유체와 비회전성 유체유동을 가정하고 자유표면의 파고와 부유체의 운동 및 변형이 작다는 가정 하에 속도포텐셜과 섭동법을 사용하여 유체유동과 부유체의 운동을 정식화 한다.

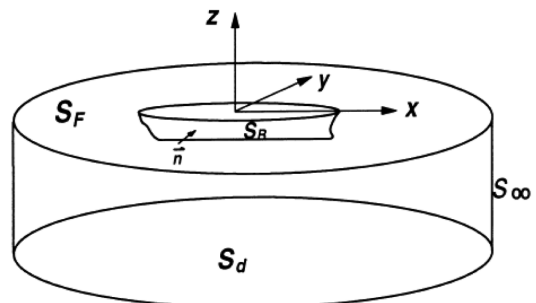


Fig. 1 Coordinate system

교신저자 최윤락: 울산광역시 남구 무거동 산29, 052-259-2158, yrchoi@ulsan.ac.kr

본 논문은 2009년 5월 창원에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

원진동수 ω 로 조화 진동하는 복소 파진폭 A 인 선형 입사파, 산란파 그리고 방사파 포텐셜을 각각 $\phi_0, \phi_s, \phi_R, \phi_0, \phi_s, \phi_R$ 이라 하면 속도 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = Re \left[\{A(\phi_0 + \phi_s) + \phi_R\} e^{-i\omega t} \right] \quad (1)$$

정수중 복소진폭 ξ_j 로 운동하는 N 개의 일반화 모드(Generalized mode)를 가정하면 방사파 포텐셜은 이들 운동으로 야기된 포텐셜들의 선형 중첩이다(Newman, 1994).

$$\phi_R = \sum_{j=1}^N \xi_j \phi_j \quad (2)$$

속도 포텐셜들은 유체장에서 라플라스방정식을 만족하며 바깥 경계조건, 선형 자유표면 경계조건, 방사조건을 만족하여야 한다. 그리고 물체표면 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{on } S_B \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega n_j \quad \text{on } S_B \quad \text{for } j=1 \sim N \quad (4)$$

여기서 n_j 는 일반화 방향여현(Generalized directional cosine)으로 모드 형상벡터 $\vec{S}_j = S_j^1 \vec{i} + S_j^2 \vec{j} + S_j^3 \vec{k}$ 와 표면 단위법선벡터의 내적이다.

$$n_j = \vec{S}_j \cdot \vec{n} \quad (5)$$

산란파 및 방사파 포텐셜은 경계적분방정식의 해로써 구해지는데 특이함수로는 파랑 Green함수를 사용하였다. 또한 파랑 Green함수를 사용함으로써 발생할 수 있는 특이파수(Irregular frequency)를 제거하기 위해 Hong(1987)과 Eatock Taylor and Chau(1992)의 방법을 결합하여 경계적분방정식을 구성하였다.

$$\begin{aligned} \phi(\vec{r}_0) \left(\frac{1}{1.5r_0 \in S_j} - \frac{\omega^2}{g} \iint_{S_j} \phi(\vec{r}) G(\vec{r}, \vec{r}_0)_{r_0 \in S_B} dS \right) \\ + \iint_{S_B} \left[\phi(\vec{r}) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n} - \phi(\vec{r}_0) \frac{\partial G_0(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n} \right] dS \\ = \iint_{S_B} \frac{\partial \phi(\vec{r})}{\partial n} G(\vec{r}, \vec{r}_0) dS \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 G 는 파랑 Green함수, G_0 는 랜킨소오스 그리고 S_j 는 부유체 내부의 가상 자유표면이다. 식 (6)을 사용하게 되면 계산시 어려움을 주는 다이폴 특이점을 제거 할 수 있고 입체각(Solid angle)을 별도로 계산하지 않아도 된다.

일반화 모드에 대한 부가질량(a_{ij}), 파랑감쇠계수(b_{ij}) 그리고 단위 진폭 입사파에 대한 선형 파강제력(X_j)은 포텐셜들을 일반화 방향여현에 대해 적분하면 구해진다(Newman, 1994).

$$\omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij} = i\omega \rho_w \iint_{S_B} \phi_j n_i dS \quad (7)$$

$$X_j = i\omega \rho_w \iint_{S_B} (\phi_0 + \phi_s) n_j dS \quad (8)$$

여기서 ρ_w 는 유체의 밀도이다.

이상의 유체 동역학적 힘과 구조 관성질량 및 강성 그리고 유체 정력학적 힘을 고려하면 N 자유도 일반화 모드에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^N [-\omega^2(m_{ij} + a_{ij}) - i\omega b_{ij} + c_{ij} + K_{ij}] \xi_j = AX_i \quad (9)$$

여기서 m_{ij} 는 구조 관성질량, K_{ij} 는 구조 강성계수 그리고 c_{ij} 는 중력에 의한 복원력계수이다. 특히 c_{ij} 는 구조물의 변형을 고려하면 다음과 같다(최윤락, 2004).

$$\begin{aligned} c_{ij} = \rho_w g \iint_{S_B} z (\nabla \cdot \vec{S}_j) n_i dS + \rho_w g \iint_{S_B} S_j^3 n_i dS \\ - \rho_w g \iint_{S_B} z \{ (\vec{S}_i \cdot \nabla) \vec{S}_j - (\vec{S}_j \cdot \nabla) \vec{S}_i \} \cdot \vec{n} dS \\ + g \iiint_V \rho_s (\vec{S}_j \cdot \nabla) S_i^3 dV \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 ρ_s 와 V 는 각각 구조물의 밀도와 체적이다.

운동방정식으로 부터 구한 모드별 복소진폭을 사용하여 모드 중첩원리에 따라 유탄성 응답을 구한다.

$$\vec{\tau} = \sum_{j=1}^N Re [\xi_j \vec{S}_j e^{-i\omega t}] \quad (11)$$

구조물 변형을 고려한 시간평균 표류력은 섭동법에 따라 유체력을 2차항까지 전개하여 구할 수 있으며 선형 물리량들의 곱으로 표현된다. 자세한 식은 최윤락(2004)에 나와 있다.

3. 수치해석

Fig. 2와 같이 두 겹의 원형 프레임으로 구성된 가두리 양식 시설에 대해 해석하였다. 프레임에 부착된 그물까지 포함하여 해석하여야 하나 Yang et al.(2002)에 의하면 그물에 의한 영향이 작으므로 본 연구에서는 프레임에 대해서만 해석하였다. 프레임은 Fig. 2에서 보듯이 단면 중앙부(P)의 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프가 구조재의 역할을 하며 그 바깥에 강성에 영향을 미치지 않은 부력재(F)가 둘러 싸고 있다. 그리고 프레임이 물 속에 절반 정도 잠기게 하기 위해 내부에 중량물을 추가하였다. 두 겹의 원형 프레임은 서로간의 상호운동이 없도록 구속하였다. Table 1에 프레임 구조물의 자세한 제원을 수록하였다.

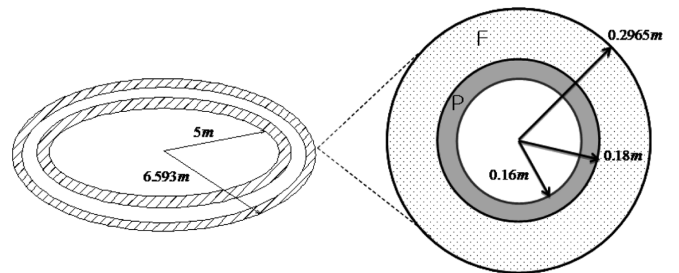


Fig. 2 Dimensions of floating fish cage

Table 1 Main particulars of floating fish cage

| | |
|--|----------------------|
| Length and breadth L [m], B [m] | 13.186 |
| Displacement ∇ [m ³] | 10.06 |
| Water plane area A_w [m ²] | 43.1947 |
| Vertical center of gravity z_G [m] | 0 |
| Vertical center of buoyancy z_B [m] | -0.1258 |
| Moments of inertia S_{xx} , S_{yy} [m ⁴] | 7.4375×10^2 |
| Mass moments of inertia I_{xx} , I_{yy} [kg·m ²] | 1.7707×10^5 |
| Mass moment of inertia I_{zz} [kg·m ²] | 3.5415×10^5 |
| Elastic modulus of HDPE E [GPa] | 0.9 |
| Poisson's ratio of HDPE ν [-] | 0.38 |

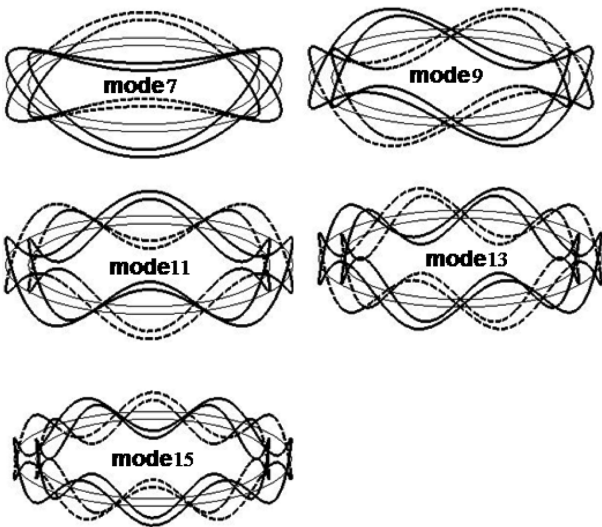


Fig. 3 Mode shapes of fish cage

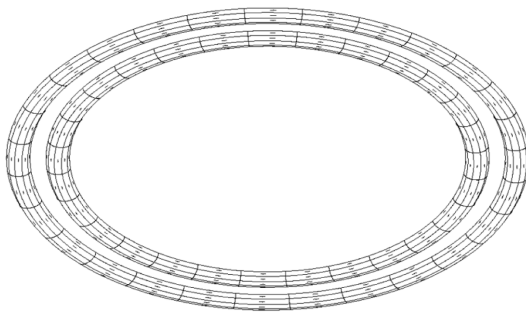


Fig. 4 Higher-order boundary elements of fish cage

프레임의 탄성변형은 연직방향만을 고려하였다. 탄성변형에 대한 공기 중 일반화 모드를 구하기 위해 구조해석 FEM코드인 MSC/NASTRAN을 사용하였다. 두 겹의 원형 프레임을 선부재들로 가정하여 일반화 모드 형상과 일반화 질량 및 구조 강성계수를 구하였다. Fig. 3에 해석에 사용된 5개의 탄성변형 모드를 도시하였다. 모드 번호 1~6까지는 6자유도 강체운동에 할당하였고 7~16까지는 탄성변형 모드이다. 이들 중 짝수번호 모드는 입사파 방향 축에 대해 반대칭 모드(Antisymmetric mode)

이므로 운동응답에 기여하지 않는다.

경계적분방정식을 풀기 위해 비교적 적은 요소 수로도 정확한 해를 주는 고차경계요소법(Higher-order boundary element method)을 사용하였다(Choi, et al, 2001). 사용된 경계요소는 9점 2차 경계요소이다. Fig. 4에 접수면 분할형상을 도시하였다.

4. 해석결과

먼저 유체 동력학적 해석결과와 유용성을 검증하기 위해 Yang et al.(2002)의 모형실험결과와 비교하였다. 실험은 강체 구조물에 대해서만 수행되었기 때문에 본 연구의 강체 모드와 비교하였다. 상하동요(Mode 3) 운동응답비의 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 횡축은 구조물 길이와 입사파 파장의 비 (L/λ)이다. 프레임의 형상이 간혀진 내부 자유표면을 형성하므로 진동수에 따라 복잡한 유동이 발생하여 운동응답도 복잡한 양상을 보인다. 이러한 현상에도 불구하고 계산치와 실험치가 잘 일치하여 고차경계요소법이 실제현상을 잘 구현함을 알 수 있다. 한편 유탄성 해석을 위해 본 연구에서 사용된 일반화모드법의 유용성은 홍사영 등(2000)의 초대형구조물에 대한 적용 예에서 찾아 볼 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에 유탄성 모드에 대한 부가질량과 동유체 감쇠계수의 계산결과를 도시하였으며 이 값들은 각 모드별 구조관성질량을 사용하여 무차원화 되어있다. 프레임 내부의 간혀진 유체영역으로 인하여 진동수에 따른 유동의 변화가 매우 심하고 규칙적인 극값을 보이고 있다. 특히 음의 부가질량과 0의 감쇠계수 현상은 제한 유동장에서의 동유체력 특성을 잘 나타내 준다.

Fig. 8에 입사파를 받는 지점에서의 연직운동 응답을 도시하였고 모드별 크기도 함께 보였다. 그림에서 Mode 3과 5는 강체

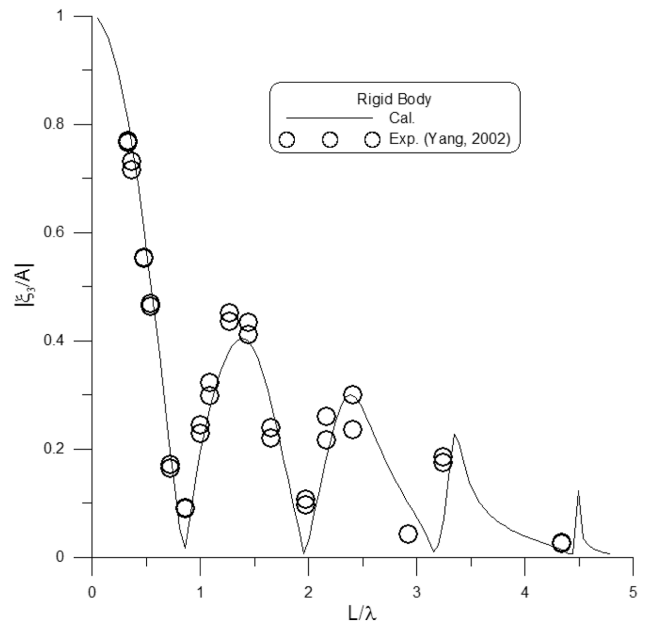


Fig. 5 Heaving responses of rigid fish cage

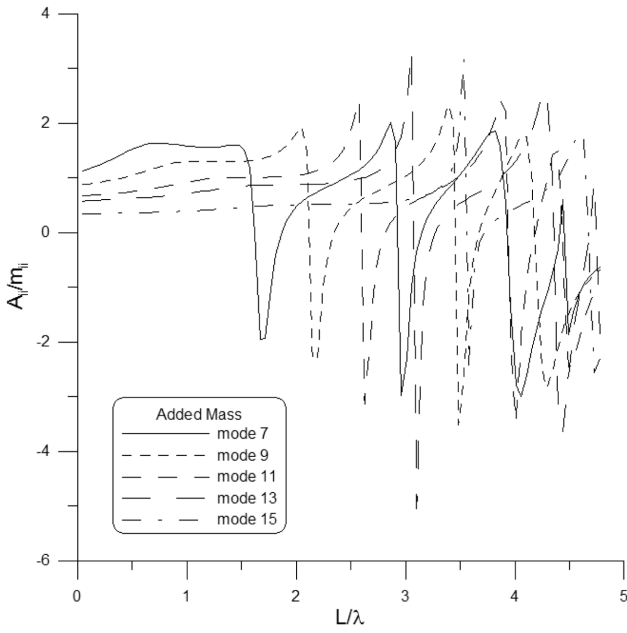


Fig. 6 Added masses of hydroelastic modes

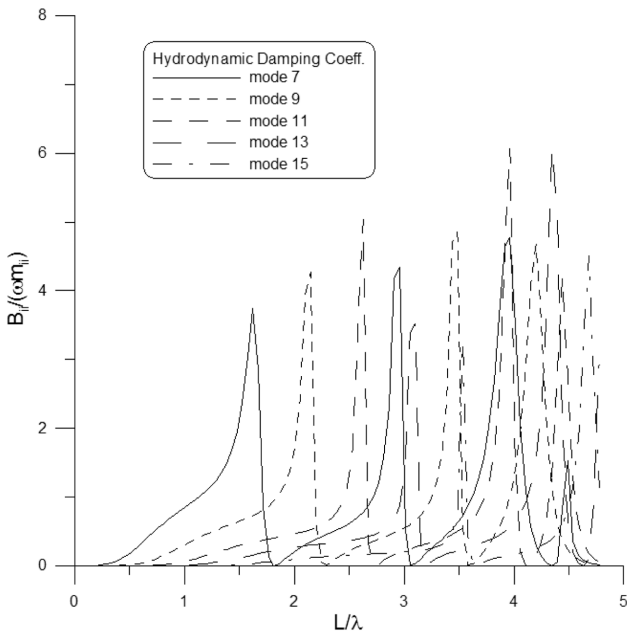


Fig. 7 Hydrodynamic damping coefficients of hydroelastic modes

운동모드의 상하동요 및 종동요이다. 프레임의 탄성 변형으로 인해 전반적으로 강제운동 결과보다 큰 운동응답을 보인다. 따라서 가두리 양식시설의 설계에 유탄성 해석이 필요함을 알 수 있다. 고차 모드로 갈수록 응답의 크기가 급격하게 줄어들며 주로 Mode 7과 9의 유탄성 응답이 운동응답에 영향을 미친다. 그리고 짧은 파장의 입사파에 대해서 유탄성 응답의 기여도가 증가하는 경향이다.

유탄성 응답 영향이 큰 $L/\lambda=1.38$ 에서의 운동응답 측면 스펙트럼을 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 실선은 유탄성을 고려한 응

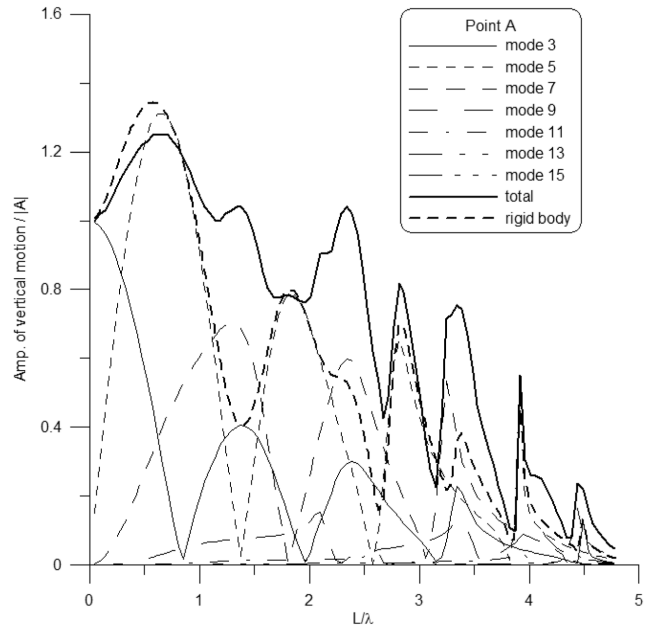


Fig. 8 Hydroelastic responses at the most weathered point

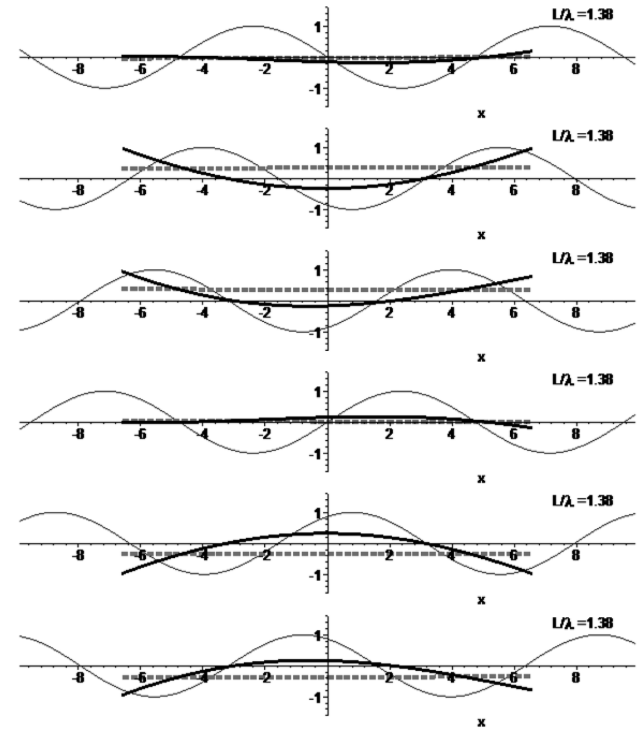


Fig. 9 Snapshots of vertical motion of fish cage ($L/\lambda=1.38$)

답이며 점선은 강제운동 응답이다. 입사파의 위상과 크기에 대한 응답을 비교하기 위해 입사파도 함께 도시하였는데 그림의 우측에서 좌측방향으로 파랑이 입사한다. Mode 7의 유탄성 응답이 뚜렷함을 알 수 있다. Fig. 10에 파랑에 대한 수직상대운동 응답을 도시하였다. 유탄성의 영향으로 수직상대운동의 크기 분포가 강제운동의 경우보다 균일하며 파랑을 받는 쪽의 크기가 상당히 감소하였다.

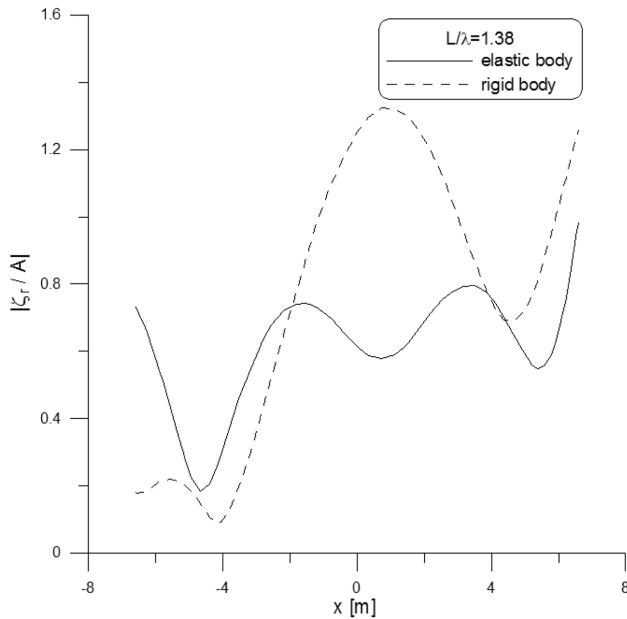


Fig. 10 Responses of relative vertical motion with respect to wave ($L/\lambda=1.38$)

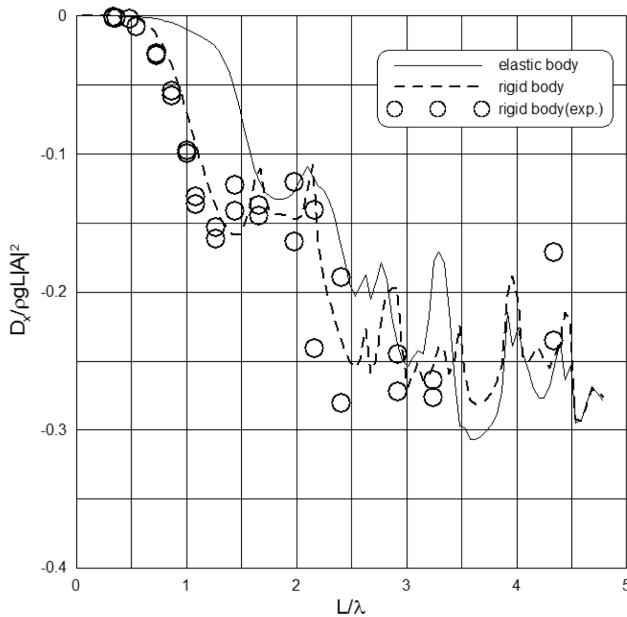


Fig. 11 Time mean drift forces of fish cage

Fig. 11에 무차원화된 시간평균 표류력을 도시하였다. 강체운동의 경우와 비교해서 $L/\lambda=1\sim 1.5$ 영역에서의 표류력 감소가 뚜렷하다. 이는 유탄성의 영향으로 운동응답은 증가하나 시간평균 표류력의 가장 큰 기여성분인 상대운동 제곱에 의한 힘이 감소한 결과라 사료된다.

가두리 양식장과 같이 가늘고 긴 구조재로 구성된 부체의 유탄성 응답해석법을 검증하기 위해서는 이에 대한 모형실험이 필요하다.

5. 결 론

일반화 모드법을 사용하여 원형 가두리 양식시설의 유탄성 응답과 표류력을 해석하였다.

기존의 강체운동 해석 결과와 비교해서 운동응답이 상당히 다르며 짧은 파장의 입사파일수록 유탄성의 영향이 증가함을 확인하였다. 강체운동 해석과 비교할 때 전반적으로 운동응답은 증가하였으나 파랑과의 상대운동의 감소에 따라 표류력은 감소하였다.

따라서 가두리 양식시설의 파랑중 거동 및 하중 해석에 유탄성 응답해석이 필요함을 알 수 있다. 본 연구에서 수행한 해석법의 유용성을 검증하기 위해서는 모형실험을 통한 검증이 수행될 필요가 있다.

참 고 문 헌

김태호, 김재오, 류청로 (2001). "파랑 및 흐름중 모형 가두리 시설의 운동 특성", 한국수산학회지, 제34권, 제1호, pp 43-50.

김태호, 류청로, 김대안 (2002). "유한 요소법을 이용한 어업용 프레임 구조물의 변형 및 강도 해석", 한국어업기술학회지, 제38권, 제4호, pp 307-316.

최윤락 (2004). "유탄성 구조물에 작용하는 파랑표류력 해석", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp 162-167.

홍시영, 홍석원, 최윤락, 정태영, 박성환, 최항순, 조규남, 이한석, 송화철 (2000). 초대형 부유식 해상구조물 기술개발, 한국해양연구소 보고서, UCM00902-2277.

Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S. (2001). "An Analysis of Second-Order Wave Forces on Floating Bodies by Using a Higher-Order Boundary Element Method", Ocean Eng., Vol 28, No 1, pp 117-138.

Eatock Taylor, R. and Chau, F.P. (1992) "Wave Diffraction - Some Development in Linear and Non-Linear Theory", J. Offshore Mech. and Artic Eng., Vol 114, No 4, pp 449-490.

Hong, D.C. (1987). "On the Improved Green Integral Equation Applied to the Water Wave Radiation-Diffraction Problem", J. Soc. of Naval Architects of Korea, Vol 24, No 1, pp 1-8.

Newman, J.N. (1994). "Wave Effects on Deformable Bodies", Applied Ocean Research, Vol 16, No 1, pp 47-59.

Yang, C.K., Choi, Y.R., Kim, H.J. and Hong, K.Y. (2002). "A Study on the Hydrodynamic Behavior of Fisheries Cages in Waves", Proc. of the 12th Int'l Offshore & Polar Eng. Conf., Vol 1, pp 762-732.

2009년 7월 20일 원고 접수
 2009년 11월 19일 심사 완료
 2009년 12월 21일 게재 확정