

인장계류식 해양구조물의 구조응답에 미치는 굽힘강성의 영향

이창호* · 이수룡*
*동명대학교 조선공학과

Effects of the Flexibility on the Structural Responses of a Tension Leg Platform

CHANG-HO LEE* AND SOO-LYONG LEE*
*Dept. of Naval Architecture, Tongmyong University, Busan, Korea

KEY WORDS: Tension leg platform 인장계류식 해양구조물, Three dimensional source distribution method 3차원 특이점 분포법, Hydrodynamic interaction 유체역학적 상호간섭, Structural damping 구조감쇠, Structural analysis 구조해석

ABSTRACT: The structural response characteristics of Tension leg platforms(TLPs) in waves are examined for presenting the basic data for structural design of TLPs. The numerical approach is based on a combination of the three dimensional source distribution method and the structural response analysis method, in which the superstructure of TLP is assumed to be flexible instead of rigid. Hydrodynamic and hydrostatic forces on the submerged surface of a TLP have been accurately calculated by excluding the assumption of the slender body theory. The hydrodynamic interactions among TLP members, such as columns and pontoons, and the structural damping are included in structural analysis. The mooring forces are estimated as the sum of pretension of tendons and variational tension due to longitudinal displacements. Stiffness matrices of elastic beam elements connecting nodes are formulated by ordinary method of three dimensional frame analysis. The equation of motion about the whole structure is obtained by the sum of forces and moments acting on each nodes.

1. 서 론

최근의 해양개발은 심해로 관심을 돌리고 있으며, 21세기의 새로운 해저자원 개발은 대부분 500m 이상의 심해에서 이루어 질 것으로 예상되며, 인장계류식 해양구조물(TLP)은 이러한 심해 해저자원의 시추 및 생산을 위한 대표적인 구조물이다 (Mercier et al., 1991). 미국, 유럽, 일본 등 해양 선진국에서는 경제적인 TLP의 실용화 기술 개발을 위한 많은 연구와 해양실험이 진행되었으며(Teigen and Haver, 1998; Kanetsuna et al., 1994 ; Zou, 2003), 국내에서도 한국해양연구원에서 해양공학수조를 활용하여 TLP의 운동 모형시험과 수치계산 결과의 해석을 수행하였다(김진하 등, 2000).

구자삼 등(1995;1996)은 3차원 특이점 분포법과 탄성응답 해석법을 결합하는 것에 의해 구조물을 다수의 외각요소로 분할하고 외각요소간의 유체역학적 상호간섭을 고려하여 유체력을 평가하였으며, 외각요소의 중앙점을 절점으로 하고, 이 절점들을 탄성 보요소로 연결하여 유한요소법에 의해 운동방정식을 정식화함으로써 해양구조물에 작용하는 정밀한 유체력 평가와 구성부재간의 유체역학적 상호간섭을 고려할 수 있는 인장계류식 해양구조물의 탄성응답 해석법을 개발하였다.

김진하 등(2000)은 ISSC-TLP의 1/65 모델에 대하여 고차 경계요소법에 의한 동유체력 계수, 운동응답, 파랑 기진력 등을 계산하여 모형실험에 의한 실험치와 비교, 평가하였으며, 이창호(2006)는 ISSC-TLP 실선 구조물에 대한 다방향 불규칙파중의 운동응답 특성과 시간영역에서의 비선형 운동 응답 특성을 평가하였다.

인장계류식 해양구조물의 경제적인 설계를 위해서는 동일 탑재능력에 대하여 중량의 감소화가 요구되며, 이에 대한 구조물의 강성이 감소하게 된다. 이러한 점을 감안하여 이창호 등(1996)은 기존의 탄성응답 해석법을 이용하여 굽힘강성 변화에 따른 인장계류식 해양구조물의 동적응답 특성을 평가하였으나, 이 해석법은 세장체 가정에 근거하기 때문에 유체력을 근사적으로 평가하고, 구성부재간의 유체역학적 상호간섭이 무시되고 있다. 본 논문에서는 구자삼 등(1996)에 의해 개발된 탄성응답 해석법을 이용하여 JOIA-TLP의 1/100모델에 대하여 탄성체인 경우의 굽힘 강성의 변화가 구조응답에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 이론해석

2.1 기본 가정

탄성 응답 해석법에 의해 TLP의 구조응답을 해석하기 위한 기본가정은 다음과 같다.

교신저자 이수룡: 부산광역시 남구 용당동 535번지

051-620-3404 lsyong@tu.ac.kr

- (1) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.
- (2) 입사파는 미소진폭의 규칙파로 하고, 유체는 비압축성, 비점성으로 하고, 유체입자의 운동은 비회전인 것으로 한다.
- (3) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다.
- (4) 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.
- (5) 계류부재에 작용하는 중력, 관성력, 유체력은 무시할 수 있고, 오직 축방향의 힘만이 계류력으로서 상부구조에 작용한다.
- (6) 모든 계류부재는 이완상태가 되지 않도록 충분한 초기 장력을 갖는다.

또한 전체 구조물을 요소로 분할하고, 각 요소는 그 역할에 따라 다음의 3종류로 분류한다.

- (1) 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소 (Hull element)
- (2) 상부구조의 계류점에 계류력을 작용시키는 계류요소 (Mooring element)
- (3) 탄성체로서 외각요소의 절점이나 계류점을 연결하는 보 요소 (Beam element)

2.2 파강제력과 동유체력

유체력을 산정하기 위하여 유한수심의 Airy파를 이용하면, 수면상승 ξ_w 와 입사파의 속도 포텐셜 Φ_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$\xi_w = a \cos k(X \cos \chi + Y \sin \chi) - \omega t \quad (1)$$

$$\Phi_0 = \text{Re} \{ \phi_0 e^{-i\omega t} \}, Z \leq d \quad (2)$$

$$\phi_0 = \frac{ga}{i\omega} \frac{\cosh k(Z-d+h)}{\cosh kh} e^{ik(X \cos \chi + Y \sin \chi)} \quad (3)$$

여기서, a 는 파의 진폭, k 는 파수(Wave number), χ 는 입사파의 각으로 파의 진행방향과 X 축 사이의 각을 나타내며, ω 는 각주파수, t 는 시간, g 는 중력가속도, h 는 수심을 나타내고, d 는 공간고정 기준좌표계 $O-XYZ$ 의 원점 O 에서부터 정수면까지의 거리를 나타낸다. 식 (2)로부터 유체입자의 속도와 가속도가 구해지며, 선형화된 Bernoulli의 이론으로부터 유체압력은 다음과 같이 표현된다.

$$p = p_s + p_v \quad (4)$$

$$p_s = \rho g(d - Z), Z \leq d \quad (5)$$

$$p_v = -\rho \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} \quad (6)$$

여기서, p 는 유체압력, p_s 는 정적 유체압력, p_v 는 동적 유체압력이고, ρ 는 유체의 밀도이다.

2.2.1 입사 파강제력(Froude-Krylov force)

j 번째 외각요소에 작용하는 공간고정 전체좌표계에 대한 입사 파강제력은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_{Fk}^j \\ M_{Fk}^j \end{Bmatrix} = \text{Re} \{ \{ F_{Fk}^j \} e^{-i\omega t} \} \quad (7)$$

여기서, $\{ F_{Fk}^j \}$ 는 평면 입사파에 의한 파강제력의 복소진폭 벡터이며, 다음과 같다.

$$\{ F_{Fk}^j \} = -i\rho\omega \int \int_{S_H^j} \Phi_0^j n_k^j dS^j, (k = 1 \sim 6) \quad (8)$$

여기서, S_H^j 는 j 번째 외각요소의 침수표면이고, n_k^j 는 일반화 방향여현이다.

2.2.2 산란 파강제력(Diffraction wave force)

j 번째 외각요소에 작용하는 공간고정 전체좌표계에 대한 산란 파강제력은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_{Dk}^j \\ M_{Dk}^j \end{Bmatrix} = \text{Re} \{ \{ F_{Dk}^j \} e^{-i\omega t} \} \quad (9)$$

여기서, $\{ F_{Dk}^j \}$ 는 산란파에 의한 산란 파강제력의 복소진폭 벡터이며, 다음과 같다.

$$\{ F_{Dk}^j \} = -i\rho\omega \int \int_{S_H^j} \phi_1^j n_k^j dS^j, (k = 1 \sim 6) \quad (10)$$

여기서, n_k^j 는 일반화 방향여현이다.

2.2.3 방사파 동유체력(Radiation wave force)

j 번째 외각요소에 작용하는 방사파 동유체력은 속도(각속도)에 비례하는 힘(모멘트)과 가속도(각가속도)에 비례하는 힘(모멘트)으로 분리할 수 있고, 속도 및 각속도에 비례하는 힘과 모멘트를 각각 $\{ F_{Nk}^j \}, \{ M_{Nk}^j \}$ 라 하고, 가속도 및 각가속도에 비례하는 힘과 모멘트를 각각 $\{ F_{Ak}^j \}, \{ M_{Ak}^j \}$ 라 하면, 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{Bmatrix} F_{Nk}^j \\ M_{Nk}^j \end{Bmatrix} = -[v_{ki}^j] \begin{Bmatrix} U_{ij}^j \\ U_{rj}^j \end{Bmatrix}, (k, i = 1 \sim 6) \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{Ak}^j \\ M_{Ak}^j \end{Bmatrix} = -[\mu_{ki}^j] \begin{Bmatrix} U_{ij}^{\prime\prime j} \\ U_{rj}^{\prime\prime j} \end{Bmatrix}, (k, i = 1 \sim 6) \quad (12)$$

여기서, $[\mu_{ki}^j], [v_{ki}^j]$ 는 공간고정 전체좌표계에 대한 j 번째

외각요소의 부가질량 행렬, 조파감쇠 행렬이며,

$$\Phi_i^j = \Phi_{ic}^j + i\Phi_{is}^j \quad (13)$$

로 두면, u_{ki}^j 와 v_{ki}^j 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_{ki}^j &= -\rho \int \int_{S_H} \Phi_{ic}^j n_k^j dS^j \\ v_{ki}^j &= -\rho \omega \int \int_{S_H} \Phi_{is}^j n_k^j dS^j \end{aligned} \quad (14)$$

2.3 계류력

계류력은 초기장력 T_p^j 와 계류부재의 축방향 (z_T^{*j})의 변위, 즉 신축에 의한 축강성에 기인하는 장력 변동을 더함으로서 평가할 수 있다. 그러므로 계류부재 고정 좌표계에서의 계류력 벡터 $\{f_T^{*j}\}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\{f_T^{*j}\} = \left\{ 0 \quad 0 \quad -T_p^j - \frac{EA_i^j}{L^j} w^j \right\}^T \quad (15)$$

여기서, EA_i^j 와 L^j 는 계류부재의 축강성과 초기길이를 나타낸다. 계류부재 고정좌표계에 대한 계류력을 공간고정 전체좌표계와 평행이 되도록 변환하고, 미소변위의 고차항을 무시하여 계류력은 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} \{F_T^j\} &= [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_p^j \end{Bmatrix} \\ &- [C_s^j]^T \begin{bmatrix} T_p^j/L^j & 0 & 0 \\ 0 & T_p^j/L^j & 0 \\ 0 & 0 & EA_i^j/L^j \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_t^j\} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $[C_s^j]$ 는 좌표변환 행렬이며, 계류점은 핀 결합을 가정하여 모멘트는 발생하지 않는 것으로 한다.

2.4 보요소의 강성에 기인하는 절점력

j, k 번째 2개의 절점을 연결하는 l 번째의 탄성 보요소에 있어서, 국소 좌표계에서의 절점력과 절점변위를 결합하는 요소 강성 행렬은 종래의 3차원 골조 해석법에 의해 정식화시키면 다음과 같이 $O^j - X^j Y^j Z^j$ 좌표계에서의 전체 강성방정식으로 변환된다.

$$\begin{Bmatrix} \{F_B^j\} \\ \{M_B^j\} \\ \{F_B^k\} \\ \{M_B^k\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C^j]^T [K_{jj}^j] [C^j] & [C^j]^T [K_{jk}^j] [C^j] \\ [C^j]^T [K_{kj}^j] [C^j] & [C^j]^T [K_{kk}^j] [C^j] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_t^j\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_t^j\} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

여기서, 좌표변환 행렬 $[C^j]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$[C^j] = \begin{bmatrix} [C_s^j] & [0] \\ [0] & [C_s^j] \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서, $[C_s^j]$ 는 $[C_s^j]$ 와 같이 전체좌표계를 국소좌표계로 변환시키는 변환행렬이다.

2.5 운동방정식

각 절점에서 평가한 힘과 모멘트는 변위, 속도, 가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조 전체의 변위 벡터를 $\{U_w\}$ 라 하고 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 더해줌으로서 구조 전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [M] \{U_w''\} + ([N_w] + [M]) \{U_w'\} + ([K_w] + [K]) \{U_w\} \\ = \{F_w\} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,

$[M]$: 부가질량을 포함하는 질량 행렬

$[N_w]$: 조파감쇠 행렬

$[N]$: 구조감쇠 행렬

$[K_w]$: 중력, 정수압 및 계류력에 의한 복원력 행렬

$[K]$: 구조강성 행렬

$\{F_w\}$: 정적중력, 정적부력, 초기 장력, 과 강제력 벡터

$\{U_w\} = \{ \{U_t^1\} \{U_t^1\} \{U_t^2\} \{U_t^2\} \dots \}^T$

: 구조전체의 변위 벡터

구조감쇠 행렬은 다음과 같이 Rayleigh의 감쇠를 이용하기로 한다.

$$[N] = a[M] + b([K_w] + [K]) \quad (20)$$

여기서, a, b 는 비례상수이다.

$\{F_w\}$ 는 정적인 힘과 동적인 힘으로 나눌 수 있고, 변위 응답은 정상상태의 해로 가정하면 다음의 연립방정식으로 된다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} ([K_w] + [K]) - \omega^2[M] & \omega([N_w] + [N]) \\ -\omega([N_w] + [N]) & ([K_w] + [K]) - \omega^2[M] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{U_c} \\ \overline{U_s} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} \overline{F}_{wc} \\ \overline{F}_{ws} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에 의해 각 절점 및 계류점의 cos항과 sin항의 진폭을 구함으로써 임의의 절점의 변위응답은 쉽게 구할 수 있다. 예를 들면 j 절점의 x 방향 변위응답은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} U^j &= \overline{U}_c^j \cos \omega t + \overline{U}_s^j \sin \omega t \\ &= \sqrt{(\overline{U}_c^j)^2 + (\overline{U}_s^j)^2} \cos(\omega t - \gamma_u) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, $\gamma_u = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{U}_s^j}{\overline{U}_c^j} \right)$ 이다.

2.6 구조내력 응답

j, k 번째 2개의 절점을 연결하는 l 번째의 탄성 보요소에 대하여, 양단의 변위를 각각 cos항과 sin항으로 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{Bmatrix} U_{tl}^j \\ U_{rl}^j \\ U_{tl}^k \\ U_{rl}^k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_{tc}^j \\ U_{rc}^j \\ U_{tc}^k \\ U_{rc}^k \end{Bmatrix} \cos \omega t + \begin{Bmatrix} U_{ts}^j \\ U_{rs}^j \\ U_{ts}^k \\ U_{rs}^k \end{Bmatrix} \sin \omega t \quad (23)$$

보요소의 국소 좌표계로 평가한 내력과 모멘트는 식 (17)에 의해 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{Bmatrix} f_B^{*j} \\ m_B^{*j} \\ f_B^{*k} \\ m_B^{*k} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [K_{jj}^l][C^l] & [K_{jk}^l][C^l] \\ [K_{kj}^l][C^l] & [K_{kk}^l][C^l] \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{Bmatrix} U_{tc}^j \\ U_{rc}^j \\ U_{tc}^k \\ U_{rc}^k \end{Bmatrix} \cos \omega t + \begin{Bmatrix} U_{ts}^j \\ U_{rs}^j \\ U_{ts}^k \\ U_{rs}^k \end{Bmatrix} \sin \omega t \right) \quad (24)$$

3. 수치계산 및 고찰

본 논문에서는 탄성응답 해석법에 의해 인장계류식 해양구조물의 구조응답에 미치는 굽힘강성 변화의 영향을 평가하기로 한다. 먼저, Table 1은 계산을 하기 위한 실기 구조물의 1/100 모델의 주요목을 나타내고 있으며, 구조물에 작용하는

Table 1 Particulars of the tension leg platform as actual model for calculation

Length	72 cm
Breadth	72 cm
Height	59 cm
Draft	30 cm
Center of gravity above base	36.28 cm
Transverse radius of gyration	36.23 cm
Weight	28.4 kgf
Pretension	11.0 kgf
Displacement	39.4 kgf

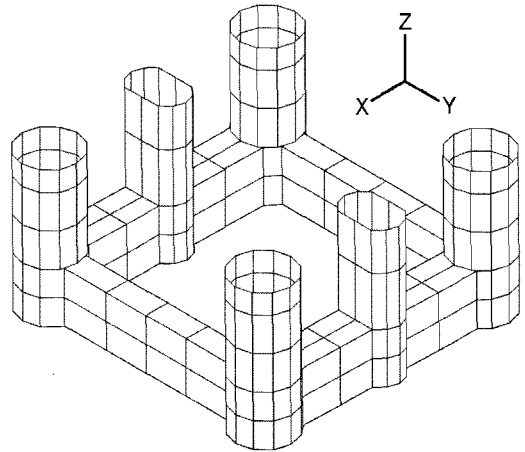


Fig. 1 Submerged surface of the tension leg platform represented by 544 panels

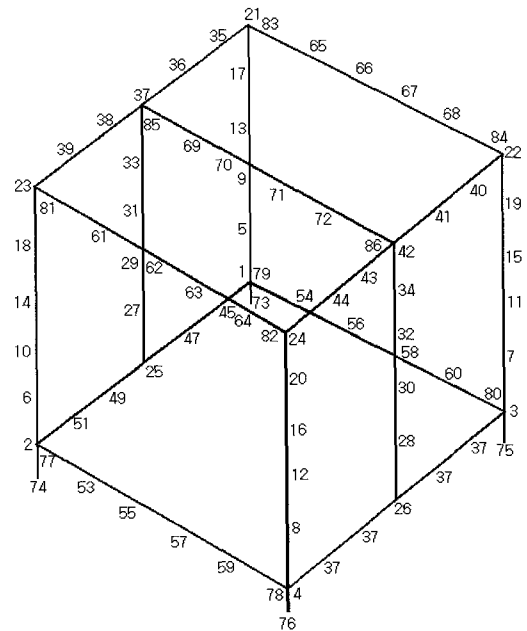


Fig. 2 Node number of 3-dimensional frame structure for the tension leg platform

파강제력 및 유체력을 계산하기 위해 Fig. 1과 같이 TLP 구조물의 침수표면을 544개의 평면 Panel로 분할하였다. Fig. 2는 보요소(Beam elements)로 이루어진 골조 구조의 요소 분할도이고, 표기된 번호는 절점번호를 나타낸다.

전체 구조물을 탄성체로서 실제 구조물 상당의 강성을 가지는 경우(S=1.0)와 횡방향 부재의 굽힘 강성을 S=0.5, S=0.1 및 S=2.0인 경우로 변화시킨 경우의 4종류에 대해 계산을 수행하였으며, One column당 계류부재의 스프링 상수는 5.9kg/cm 이고, 여기서,

$$S = \frac{\text{계산모델의 횡방향 부재의 굽힘강성}}{\text{실기의 1/100 모델의 횡방향 부재의 굽힘강성}}$$

이며, 횡방향 부재는 하부구조(Poonton) 요소(절점번호 55와 57 사이의 보요소) 및 횡방향 전방 상부구조 요소(절점번호 62와 63 사이의 보요소)와 중앙 상부구조 요소(절점번호 70과 71사이의 보요소)를 나타낸다.

Fig. 3~Fig. 5는 각각 굽힘강성 변화에 따른 전체 구조물에 작용하는 축력, 전단력, 굽힘 모멘트 응답 특성을 나타내고 있다. 계산결과는 수심 5m, 파 입사각이 90°에 대한 것이며, 힘은 $\rho g \zeta_a \Delta^{2/3} = 1.16 \text{ kg}$, 모멘트는 $\rho g \zeta_a \Delta = 0.394 \text{ kg} \cdot \text{m}$ 로서 무차원화 시킨 것이다.

수직 전단력 응답은 S=0.1인 경우, 파주기 T=0.8sec 이하의 영역에서 약간의 차이를 보이고 있으며, 축력과 수직 굽힘 모멘트의 응답은 변화가 거의 나타나지 않았다.

Fig. 6은 구조물 하부구조(Pontoon)의 횡방향 부재 요소들(절점번호 55와 57 사이의 보요소, 절점번호 62와 63 사이의 보요소, 절점번호 70과 71사이의 보요소)의 축력응답에 대한 굽힘강성 변화의 영향을 나타내고 있으며, 하부 구조요소에서는 굽힘강성 변화의 영향이 거의 나타나지 않지만, 중앙 상부구조 요소 부재의 경우에는 파주기 T=0.8~1.6sec에서 굽힘강성 변화의 영향이 다소 나타났으며, Peak치 부근에서 가장 크게 나타나고 있다.

Fig. 7은 구조물의 횡방향 부재 요소들(절점번호 55와 57 사이의 보요소, 절점번호 62와 63 사이의 보요소, 절점번호 70과 71사이의 보요소)의 전단력 응답 특성을 나타내고 있다. 굽힘강성 S의 변화에 따른 영향이 전체 파주기 영역에서 현저하게 나타나고 있으며, 특히 전방 상부구조 요소의 경우에는 응답의 크기는 작게 나타났지만, 상대적으로 큰 굽힘강성 변화의 영향이 가장 크게 나타났다.

Fig. 8은 구조물의 횡방향 부재 요소들(절점번호 55와 57 사이의 보요소, 절점번호 62와 63 사이의 보요소, 절점번호 70과 71사이의 보요소)의 수직 굽힘 모멘트 응답 특성을 나타내고 있다. 전방 상부구조 요소의 경우에는 굽힘강성 S의 변화에 따른 영향이 전체 파주기 영역에서 현저하게 나타나고 있으며, 하부구조 요소와 중앙 상부구조 요소의 경우에는 주기가 짧은 영역에서 현저한 차이를 보이고 있다. 특히 중앙 상부구조 요소의 경우에는 가장 큰 응답이 나왔으며, 파주기 T=1.0sec 부근에서 굽힘강성의 변화에 따른 영향이 가장 크게 나타나고 있다.

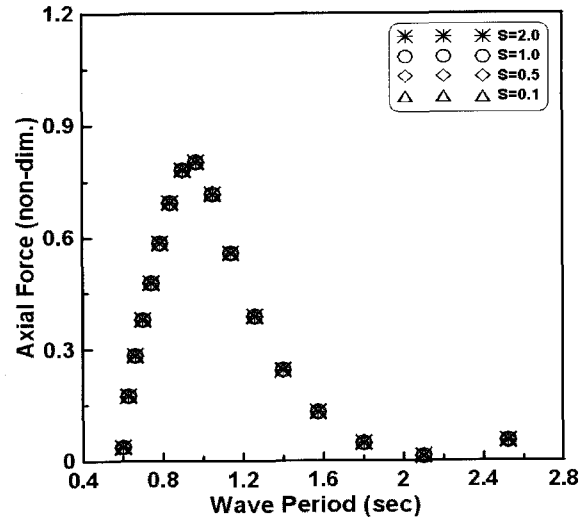


Fig. 3 Axial forces on whole structure

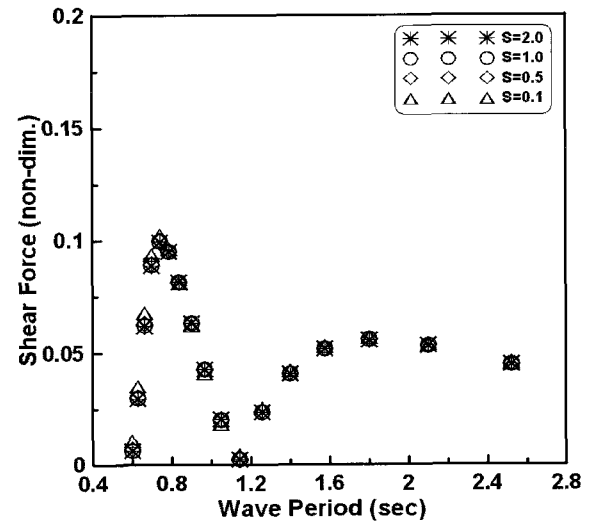


Fig. 4 Shear forces on whole structure

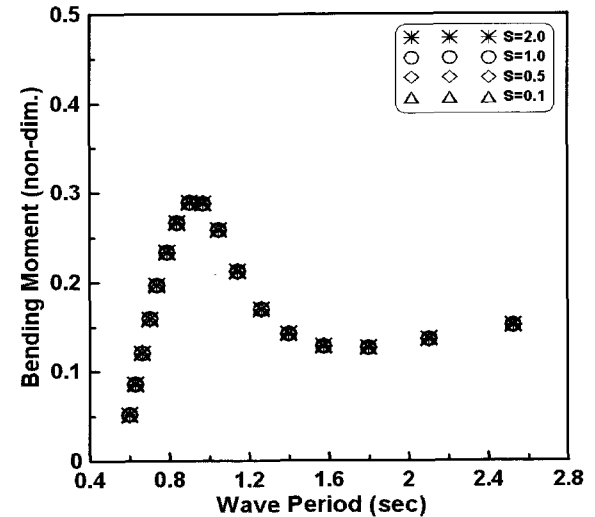


Fig. 5 Vertical bending moments on whole structure

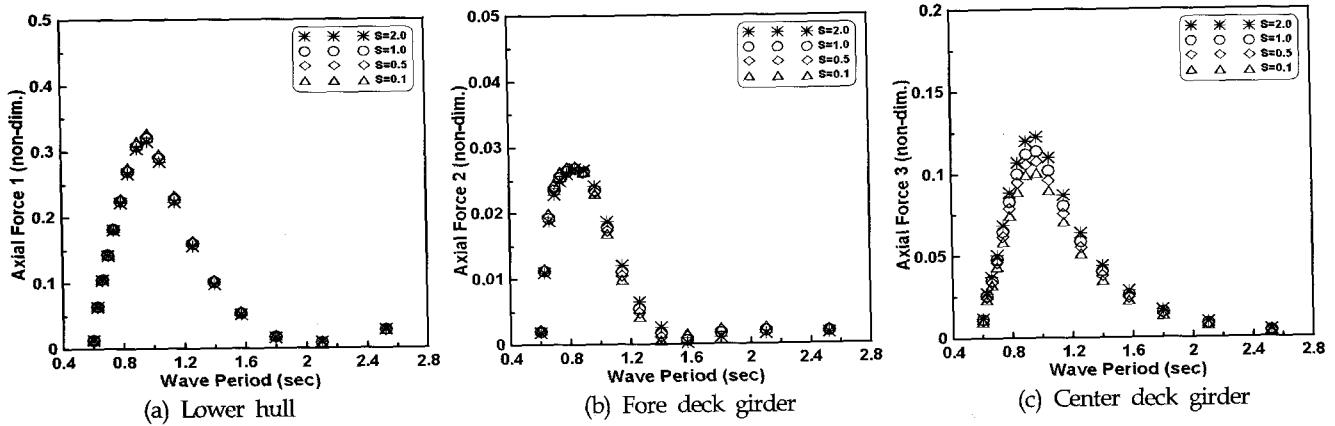


Fig. 6 Axial forces on lower hull and deck girders

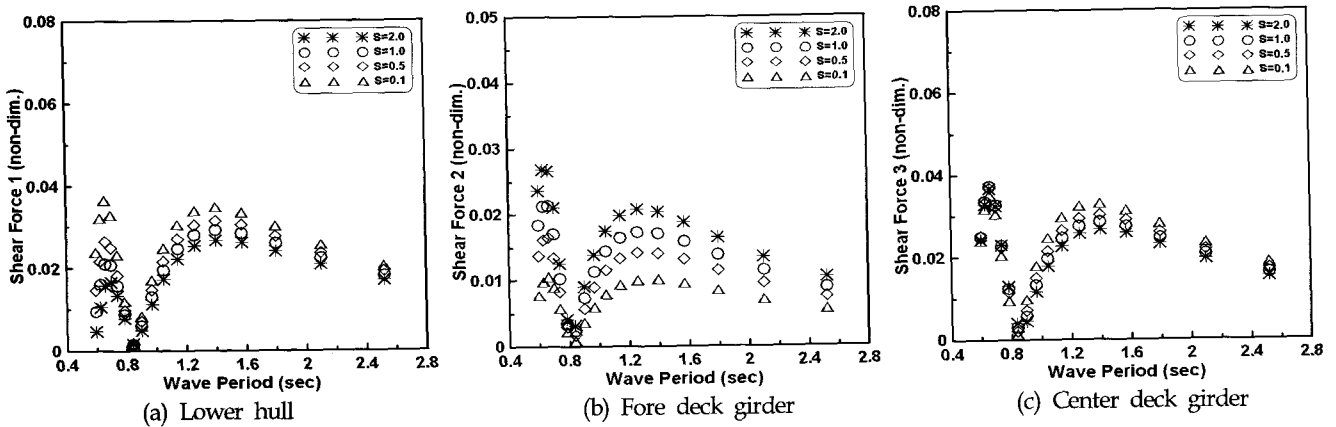


Fig. 7 Shear forces on lower hull and deck girders

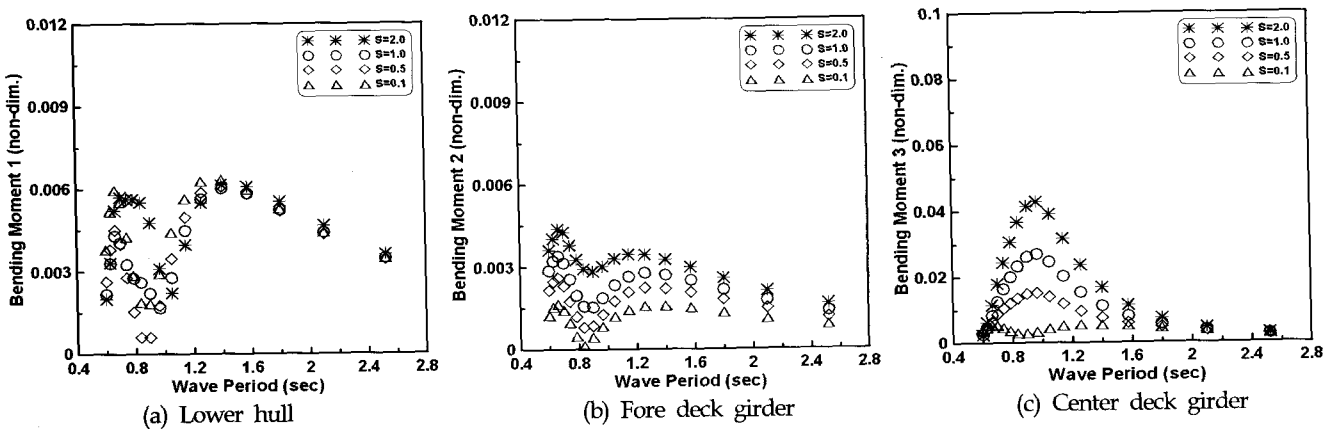


Fig. 8 Vertical bending moments on lower hull and deck girders

4. 결 론

해양구조물의 경제적인 설계를 위해서는 동일 탑재능력에 대하여 중량의 감소화가 요구되며, 이에 대한 구조물의 강성이 감소하게 된다. 본 논문에서 구조물의 구조응답에 미치는 굽힘강성 변화의 영향을 평가하였으며, 취급한 계산모델 및 계산조건하에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 전체 구조물에 작용하는 전단력 응답은 파주기가 짧은 영역($T=0.8\text{sec}$ 이하)에서 굽힘강성 변화 $S=0.1$ 인 경우에 약간의 영향을 받으며, 축력과 수직 굽힘 모멘트 응답은 굽힘강성 변화의 영향이 거의 나타나지 않는다.
- (2) 구조물 구성 부재의 축력 응답에서는 하부 구조요소의 경우에는 굽힘강성 변화의 영향이 거의 나타나지 않지만, 중앙상부구조 요소 부재의 경우에는 파주기 $T=0.8\sim 1.6\text{sec}$ 에서 굽힘강성 변화의 영향이 다소 나타났으며, Peak치 부근에서 가장

크게 나타나고 있다.

(3) 구조물 구성 부재의 전단력 응답에서는 하부와 상부 모든 구조 요소에서 굽힘강성 변화에 따른 영향이 전체 파주기 영역에서 나타났으며, 특히 전방 상부구조 요소의 경우에 상대적으로 굽힘강성 변화의 영향이 크게 나타났다.

(4) 구조물 구성 부재의 수직 굽힘 모멘트 응답에서는 하부 구조요소와 중앙 상부구조 요소의 경우에는 주기가 짧은 영역에서 굽힘강성 변화에 따른 영향이 크게 나타났으며, 중앙 상부구조 요소의 경우에는 파주기 $T=1.0\text{sec}$ 부근에서 굽힘강성의 변화에 따른 영향이 가장 크게 나타났다.

참 고 문 헌

- 구자삼, 김진하, 이창호 (1995). "인장계류식 해양구조물의 동적 응답해석(I)", 한국해양학회지, 제9권, 제1호, pp 161-172.
- 구자삼, 박찬후, 이창호 (1996). "인장계류식 해양구조물의 동적 응답해석(II)", 한국해양학회지, 제10권, 제1호, pp 25-35.
- 김진하, 홍사영, 최윤락, 홍섭, 김현조 (2000). "심해 인장각 플랫폼의 모형시험 연구(II) -모형시험 및 해석-", 한국해양공학회 춘계학술대회논문집, pp 69-74.
- 이창호 (2006). "ISSC-TLP의 운동응답 및 변동장력에 미치는 다방향 불규칙파의 영향", 한국해양학회지, 제20권, 제4호, pp 70-75.
- 이창호 (2006). "시간영역에서 ISSC-TLP의 비선형 운동응답 특성", 한국해양학회지, 제20권, 제5호, pp 30-35.
- 이창호, 최찬문, 홍봉기 (1996). "굽힘강성 변화에 따른 인장계류식 해양구조물의 동적응답 특성", 한국어업기술학회지, 제32권, 제2호, pp 191-204.
- Kanetsuna, M., Sekita, K., Sekimoto, T. and Shimada, K. "Field Measurement Results of TLP Dynamic Responses and Strength Assessment of Parallel Wire Strand Tendon", SNAJ, Vol 175, pp 227-239.
- Mercier, J.A., Birell, N.D., Chivvis, J.C. and Hunter, A.F. (1991). "Tension Leg Platforms - Progress and Prospects", SNAME Transactions 99, pp 249-279.
- Teigen, P. and Haver, S.(1998). "The Heidrun TLP : measured versus predicted response", Applied Ocean Research 20, pp 27-35.
- Zou, J. (2003). "TLP Hull/Tendon/Riser Coupled Dynamic Analysis in Deepwater", Proc. of 13th IOPEC, pp 160-166.

2007년 4월 16일 원고 접수

2007년 8월 6일 최종 수정본 채택