

규칙파중 항력을 고려한 TLP의 동적응답해석

하영록^{†*}

부경대학교 조선해양시스템공학과*

A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms Including Drag Forces in Regular Waves

Young-Rok Ha^{†*}

Dept. of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University*

Abstract

For predicting the motion and structural responses of tension leg platforms(TLPs) in regular waves, a numerical scheme is introduced. The numerical approach in this paper is based on a combination of the three dimensional source distribution method and the finite element method. The hydrodynamic interactions among TLP members, such as columns and pontoons, are included in the motion and structural response analysis. The drag forces on the submerged slender members, which are proportional to the square of relative velocity, are newly included in order to estimate the responses of members with better accuracy. Comparisons with other's results verifies the works in this paper.

※Keywords: TLP(Tension Leg Platform; 인장계류식 해양구조물), Hydrodynamic interaction(유체역학적 상호간섭), Motion response(운동응답), Structural response(구조응답), Drag forces(항력)

1. 서론

최근 심해유전개발의 가속화는 부유식 해양구조물(Offshore floaters)에 대한 관심과 발주증가에 많이 기여하고 있다. 인장계류식 해양구조물(TLP)은 이러한 심해개발을 위한 대표적인 구조물중 하나이고, 실용화를 위한 많은 연구가 진행되어 왔

다. 그러한 연구들 중에서 Goo et al.(1996b)은 3차원 특이점 분포법(Faltinsen and Michelsen 1974)과 탄성응답해석법(Yoshida et al. 1984)을 결합하여 유체력 및 구성부재간의 유체역학적 상호간섭을 고려할 수 있는 TLP의 탄성응답해석법을 개발한 바 있다.

이 해석법에서는 구조물을 다수의 외각요소(hull element)로 분할하고 개개의 외각요소는 강체로 가정하여 각 외각요소간의 유체역학적 상호간섭을 고려하고 있으며, 외각요소 각각의 중앙점을 보요

접수일: 2008년 2월 20일, 승인일: 2008년 4월 29일

† 교신저자: yrha@pknu.ac.kr, 051-629-6618

소로 연결하고 유한요소법으로 정식화를 한 뒤 구조물의 동적응답을 구하는 방법이다(Kim et al. 2007, Goo et al. 1996a, Jo et al. 1995).

본 연구에서는, 이 방법을 개선하여 TLP 수중 부재의 점성에 의한 항력을 함께 고려하며, 항력이 TLP의 동적응답에 미치는 영향을 해석하였다.

항력은 유체입자와 구조요소들 사이의 상대속도의 제곱에 비례하는 힘으로서 미소량의 2차 항이기 때문에 선형 응답의 경우에는 통상 생략하는 편이 간단하다. 하지만, 수중의 가느다란 부재들을 가진 반잠수식 해양구조물의 경우 그 부재 내력을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 항력의 영향이 고려되어야 하며, 계류부재의 연직방향 운동으로 인한 조와저항의 영향을 예측하기 위하여 요소 단부에서 부재 축방향의 상대속도 제곱에 비례하는 힘도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구의 타당성 검증을 위해 도출된 수치계산 결과를 기존의 연구결과와 비교 및 검토하였다.

2. 문제의 정식화 및 해석방법

2.1 기본가정 및 좌표계

TLP의 구조응답을 탄성응답해석법으로 해석하기 위한 기본가정은 다음과 같다.

입사파는 미소진폭 규칙파로 두고, 대상 유체에는 포텐셜 이론을 적용한다. 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한한 경우 수심일정으로 한다.

한편, 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 하며, 각각의 평형위치에 대한 응답은 미소진폭 조화진동으로 한다.

계류부재에 작용하는 중력, 관성력, 유체력은 무시하고, 오직 축방향 힘만이 계류력으로서 상부구조에 작용하며, 모든 계류부재는 이완상태가 되지 않도록 충분한 초기 장력을 갖도록 둔다. 이러한 가정에도 불구하고, 상대속도의 제곱에 비례하는 항력도 외력으로 고려한다.

해석대상 구조물은 그 전체구조를 Fig. 1과 같이 요소로 분할하고, 각각의 요소를 그 역할에 따라 다음과 같이 분류한다. 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소

(hull element), 상부구조의 계류점에 계류력을 작용시키는 계류요소(mooring element), 그리고 탄성체로서 외각요소의 절점이나 계류점을 연결하는 보요소(beam element)의 3종류로 나눈다.

운동방정식의 정식화에 있어서는 Fig. 2와 같은 7종류의 좌표계를 사용하는데, 공간고정 기준 좌표계 $O-XYZ$ 는 원점 O 가 정수면 아래 거리 d 만큼 떨어진 곳에 위치하며, XY 평면은 정수면에 평행하고, Z 축은 상방향을 양으로 선택한다.

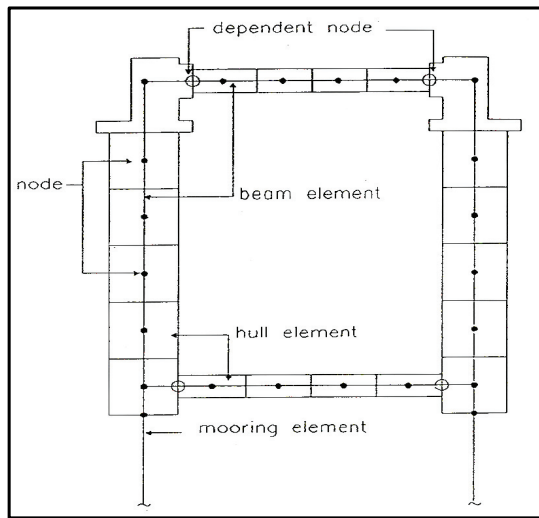


Fig. 1 Element subdivision of the TLP

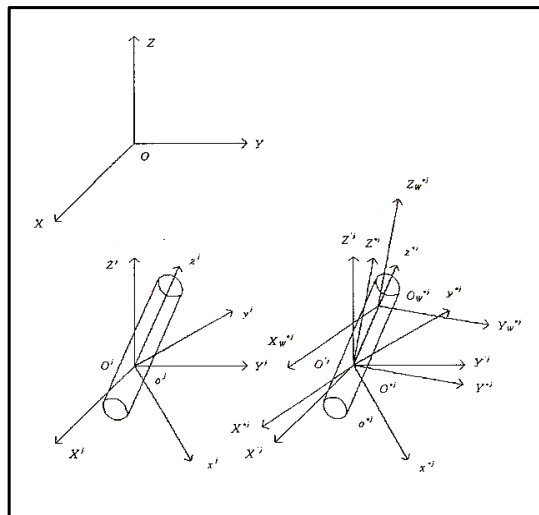


Fig. 2 Coordinate systems

유체력 계산을 위하여 선형 포텐셜 유동이론에 의한 유한수심에서의 진행파(Progressive waves)를 이용하면, 수면상승 ξ_w 와 입사파의 속도 포텐셜 Φ_0 는 다음과 같이 표현된다.

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

$$\Phi_0 = \frac{g \xi_a}{\omega} \frac{\cosh \{k(Z-d+h)\}}{\cosh kh} \sin \{ik(X \cos \chi + Y \sin \chi) - \omega t\} \quad (2)$$

여기서, ξ_a 는 파진폭, k 는 파수, 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 기준 좌표계 $O-XYZ$ 의 원점 O 에서부터 정수면까지의 거리를 나타낸다. 식 (2)로부터 유체입자의 속도와 가속도가 구해지며, 선형화된 Bernoulli의 정리로부터 유체압력을 구한다.

나머지 6개의 좌표계는, 정적 평형상태에서 j 번째 부재 절점에 원점을 가지고 $O-X^j Y^j Z^j$ 좌표계에 평행한 공간고정 전체 좌표계 $O^j-X^j Y^j Z^j$, 부재의 축방향으로 z^j 를 가지고, $x^j z^j$ -평면이 연직으로 되는 공간고정 국소 좌표계 $o^j-x^j y^j z^j$, 정적 평형상태에서는 $O^j-X^j Y^j Z^j$ 와 국소 좌표계 $o^j-x^j y^j z^j$ 에 일치하면서, 부재의 병진변위 및 회전변위에 따라 이동하는 물체고정 전체 좌표계 $O^{*j}-X^{*j} Y^{*j} Z^{*j}$ 와 물체고정 국소 좌표계 $o^{*j}-x^{*j} y^{*j} z^{*j}$, 공간고정 전체 좌표계 $O^j-X^j Y^j Z^j$ 가 부재의 병진변위에 따라 이동하는 좌표계 $O^j-X^j Y^j Z^j$, 정적 평형상태에서는 부재 j 의 수선면상에 원점을 두고 물체고정 전체 좌표계와 평행하게 이동하는 $O_W^{*j}-X_W^{*j} Y_W^{*j} Z_W^{*j}$ 이다. 모든 좌표계는 오른손 좌표계이며, 각각의 좌표축 변환관계는 Goo et al.(1996b)과 같다.

2.2 외각요소에 작용하는 힘과 모멘트

외각요소에 작용하는 외력은 중력, 관성력, 정적 유체압력에 의한 부력, Froude-Krylov force, radiation force, diffraction force, drag force와 같이 7가지 종류로 분류된다. 그리고 이 힘들은 각각 그것에 편리한 좌표계에서 계산된 후, 각 좌표계간의 변환행렬을 이용하여 최종적으로 O^j-

$X^j Y^j Z^j$ 좌표계로 표현된다.

본 연구에서는 외각요소에 작용하는 외력으로서 항력을 추가로 고려하므로 이에 대한 사항만을 다룬다. 그 외의 외력들에 대한 사항은 기존의 연구(Goo et al. 1996b)에 잘 나타나 있다.

본 논문에서는 정상 주파수 응답을 가정하고 있으므로 상대속도의 진폭을 이용하여 에너지 등가 선형화를 행한다(Clauss et al.1992). 이 때 임의점의 상대속도를 절점의 병진변위 속도와 회전변위 속도의 항으로 표현해도 요소의 중심축에 따른 적분이 곤란하기 때문에 항력에 대해서는 요소를 더욱 세분하여 수치적분을 한다. 또, 항력은 미소량의 2차 항이므로 공간고정 좌표계와 물체고정 좌표계를 서로 동일한 것으로 취급하고, 물체고정 국소 좌표계에서 $\{x^{*j}\}$ 에 존재하는 점에 대한 상대속도 $\{v^j\}$ 는 다음과 같다.

$$\{v^j\} = \nabla^{*j} \Phi - (\{\dot{u}_t^j\} + \{\dot{u}_r^j\} \times \{x^{*j}\}) \quad (3)$$

요소절점의 변위를 정현항과 여현항으로 나누면 다음과 같다.

$$\{u_t^j\} = |\{u_{tc}^j\}| \cos \omega t + |\{u_{ts}^j\}| \sin \omega t \quad (4)$$

$$\{u_r^j\} = |\{u_{rc}^j\}| \cos \omega t + |\{u_{rs}^j\}| \sin \omega t \quad (5)$$

식 (3)으로부터 상대속도는 다음으로 표현된다.

$$\{v^j\} = |\{v_c^j\}| \cos \omega t + |\{v_s^j\}| \sin \omega t \quad (6)$$

항력을 계산할 경우 상대속도 진폭은 요소 중심축의 법선방향 최대 성분을 취해야 하며, 이것을 $|\{v_n^j\}|$ 로 나타내고, 반경이 R^j 인 j 부재의 항력을 물체고정 국소 좌표계로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{f_d^{*j}\} = \sum_{R=1}^{N_j} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \begin{bmatrix} c_{D_x}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{D_y}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{v^j\} \Delta z \quad (7)$$

$O-X^j Y^j Z^j$ 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{F_d^j\} &= \sum_{K=1}^{N_d} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \Delta z \frac{kg_s^2 a}{\omega \cosh kh} \\ &\quad \left[[C_s^j]^T \begin{pmatrix} c_{D_x^j} c_x \\ c_{D_y^j} c_y \\ 0 \end{pmatrix} \sinh \varepsilon'_{zK} \sin(\Omega'_K - \omega t) \right. \\ &\quad \left. + [C_s^j]^T \begin{pmatrix} c_{D_x^j} \mu_x \\ c_{D_y^j} \mu_y \\ 0 \end{pmatrix} \cosh \varepsilon'_{zK} \cos(\Omega'_K - \omega t) \right] \\ &- \sum_{K=1}^{N_d} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \Delta z [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{D_x^j} & 0 & 0 \\ 0 & c_{D_y^j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} \\ &- \sum_{K=1}^{N_d} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \Delta z z_K^{*j} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & c_{D_x^j} & 0 \\ -c_{D_x^j} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_r^j\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \{M_d^j\} &= \sum_{K=1}^{N_d} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \Delta z z_K^{*j} \frac{kg_s^2 a}{\omega \cosh kh} \\ &\quad \left[[C_s^j]^T \begin{pmatrix} -c_{D_x^j} c_y \\ c_{D_x^j} c_x \end{pmatrix} \sinh \varepsilon'_{zK} \sin(\Omega'_K - \omega t) \right. \\ &\quad \left. + [C_s^j]^T \begin{pmatrix} -c_{D_x^j} \mu_y \\ c_{D_x^j} \mu_x \end{pmatrix} \cosh \varepsilon'_{zK} \cos(\Omega'_K - \omega t) \right] \\ &- \sum_{K=1}^{N_d} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \Delta z z_K^{*j} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & -c_{D_x^j} & 0 \\ c_{D_x^j} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} \\ &- \sum_{K=1}^{N_d} \frac{8\rho R^j}{3\pi} |\{v_n^j\}| \Delta z (z_K^{*j})^2 [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{D_x^j} & 0 & 0 \\ 0 & c_{D_x^j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_r^j\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\mu_x = a_x \cos X + b_x \sin X$, $\mu_y = a_y \cos X + b_y \sin X$,
 $\varepsilon'_{zK} = k(c_z z_K^{*j} + Z_0^j - d + h)$, $\Omega'_K = k(\mu_z z_K^{*j} + \mu_0)$,
 $\mu_z = a_z \cos X + b_z \sin X$, $\mu_0 = X_0^j \cos X + Y_0^j \sin X$,
 $z_K^{*j} = (K - \frac{1}{2})\Delta z - l_1^j$, $\Delta z = (l_2^j + l_1^j)/N_d$,
 그리고 첨자가 붙은 a , b , c 등은 각 방향으로의
 방향여현을 나타내고, l_1^j 와 l_2^j 는 각각 o^{*j} 에서
 외각요소 j 의 하단부까지 및 상단부 수선면까지의
 중심축상 길이를 나타내며, $K = 1, 2, \dots, N_d$ 이고,
 N_d 는 외각요소 j 의 분할개수이다.

① 하단부가 있는 경우

하단부 중심에서 z^{*j} 방향의 상대속도 진폭을
 $|v_{zl}^j|$ 라 하면, 항력은 동일한 방법으로 다음과 같
 이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \{F_{dl}^j\} &= \frac{8}{3\pi} |v_{zl}^j| \frac{kg_s^2 a}{\omega \cosh kh} \\ &\quad \left[[C_s^j]^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{D_{zl}^j} c_z \end{pmatrix} \sinh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1 \right. \\ &\quad \left. + [C_s^j]^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{D_{zl}^j} \mu_z \end{pmatrix} \cosh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1 \right] \\ &- \frac{8}{3\pi} |v_{zl}^j| [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{D_{zl}^j} \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\{M_{dl}^j\} = \{0\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } \varepsilon_{z1} &= k(-c_z l_1^j + Z_0^j - d + h), \\ \Omega_1 &= k(-\mu_z l_1^j + \mu_0) - \omega t \end{aligned}$$

② 상단부가 있는 경우

상단부 중심에서 z^{*j} 방향의 상대속도 진폭을
 $|v_{zu}^j|$ 라 하면, 항력은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \{F_{du}^j\} &= \frac{8}{3\pi} |v_{zu}^j| \frac{kg_s^2 a}{\omega \cosh kh} \\ &\quad \left[[C_s^j]^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{D_{zu}^j} c_z \end{pmatrix} \sinh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 \right. \\ &\quad \left. + [C_s^j]^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c_{D_{zu}^j} \mu_z \end{pmatrix} \cosh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 \right] \\ &- \frac{8}{3\pi} |v_{zu}^j| [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{D_{zu}^j} \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\{M_{du}^j\} = \{0\} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{이 때, } \varepsilon_{z2} &= k(c_z l_2^j + Z_0^j - d + h), \\ \Omega_2 &= k(\mu_z l_2^j + \mu_0) - \omega t \text{ 이다.} \end{aligned}$$

상대속도 진폭 $|\{v_n^j\}|$, $|v_{zl}^j|$, $|v_{zu}^j|$ 는 반복
 계산에 의하여 수렴시키는 방법을 취한다.

2.3 계류력

계류력은 초기 장력 T_p^j 와 계류부재 축방향 z_T^{*j} 으로의 변위(신축에 의하여 축강성에 기인하는 장력변동)에 의한 장력성분을 더함으로써 얻을 수 있다. 따라서 계류부재 고정 좌표계에서 계류력 벡터 $\{f_T^{*j}\}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\{f_T^{*j}\} = \left\{ 0 \quad 0 \quad -T_p^j - \frac{EA_t^j}{L^j} w^j \right\}^T \quad (14)$$

여기서, EA_t^j 와 L^j 는 각각 계류부재의 축강성과 초기길이를 나타낸다.

계류점의 물체고정 국소 좌표계 $o^{*j}-x^{*j}y^{*j}z^{*j}$ 는 변환행렬 $[C_t^j]^T$ 에 의해 공간고정 국소 좌표계로 변환되고, $[C_s^j]^T$ 에 의해 공간고정 전체 좌표계와 평행이 되도록 변환된다. 따라서 계류력은 미소변위의 고차항을 무시하면 다음과 같다.

$$\{F_T^j\} = [C_s^j]^T \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -T_p^j \end{array} \right\} - [C_s^j]^T \begin{bmatrix} T_p^j/L^j & 0 & 0 \\ 0 & T_p^j/L^j & 0 \\ 0 & 0 & EA_t^j/L^j \end{bmatrix} [C_s^j][U_t^j] \quad (15)$$

계류점은 핀 결합으로 가정하여 모멘트는 발생하지 않는 것으로 둔다.

$$\{M_T^j\} = \{0\} \quad (16)$$

2.4 보요소의 강성에 기인하는 절점력

j 와 k 2개의 절점을 연결하는 l 번째 탄성 보요소에 대하여, 국소 좌표계에서의 절점력과 절점 변위를 결합하는 요소강성행렬을 종래의 3차원 골조 해석법에 의해 정식화시키면 좌표변환행렬 $[C^l]$ 에 의해 다음과 같이 $O^j-X^jY^jZ^j$ 좌표계에서의 전체 강성 방정식으로 변환된다.

$$\begin{Bmatrix} \{F_B^j\} \\ \{M_B^j\} \\ \{F_B^k\} \\ \{M_B^k\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C^l]^T[K_{ll}^l][C^l] & [C^l]^T[K_{lk}^l][C^k] \\ [C^l]^T[K_{lk}^l][C^l] & [C^l]^T[K_{kk}^l][C^k] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_t^j\} \\ \{U_r^j\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_r^k\} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

여기서, 좌표변환행렬 $[C^l]$ 은 다음과 같고,

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

$[C_s^l]$ 은 $O^j-X^jY^jZ^j$ 좌표계와 $o^j-x^jy^jz^j$ 좌표계 사이의 변환행렬식으로서, 전체 좌표계를 국소 좌표계로 변환시킨다.

2.5 운동 방정식

각 절점에서 계산된 힘과 모멘트는 변위, 속도, 가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조 전체의 변위 벡터를 $\{U_w\}$ 라 하고 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합하여 구조 전체에 대한 운동 방정식을 얻으면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{U}_w\} + ([N_w] + [M])\{\dot{U}_w\} + ([K_w] + [K])\{U_w\} = \{F_w\} \quad (19)$$

여기서,

- $[M]$: 부가질량을 포함하는 질량행렬,
- $[N_w]$: 조파감쇠 및 항력에 의한 감쇠행렬,
- $[M]$: 구조감쇠행렬,
- $[K_w]$: 중력, 정수압 및 계류력에 의한 복원력행렬,
- $[K]$: 구조강성행렬,
- $\{F_w\}$: 정적중력, 정적부력, 초기장력, 파강제력 벡터,

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

: 구조 전체의 변위 벡터이다.

구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh 감쇠를 이용하기로 한다.

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

여기서, a, b 는 비례상수이다.

$\{F_w\}$ 는 정적인 힘과 동적인 힘으로 나눌 수 있고, 변위응답을 정상상태의 해로 가정하면 식 (19)는 다음의 연립방정식으로 된다.

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

식 (21)에 의해 각 절점 및 계류점의 여현항 및 정현항 진폭을 구함으로써 임의의 절점변위응답은 쉽게 구할 수 있다. 예를 들면 j 절점의 X 방향 변위응답은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} U^j &= |U_c^j| \cos \omega t + |U_s^j| \sin \omega t \\ &= \sqrt{(|U_c^j|)^2 + (|U_s^j|)^2} \cos(\omega t - \varphi_u) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, $\varphi_u = \tan^{-1} \frac{|U_s^j|}{|U_c^j|}$ 이다.

이와 같이 변위응답이 구해지면 다른 응답들은 통상적인 방법에 의해 구할 수 있다.

3. 수치계산 및 고찰

본 연구의 타당성 검증을 위해 도출된 수치계산 결과를 Goo et al.(1996b)과 Yoshida et al.(1984) 각각의 수치계산 결과, 그리고 Fukuoka(1988)에 의한 실험결과와 비교 및 검토 하였다. Table 1은 그 비교대상 TLP의 주요항목을 나타내고 있으며, 수치계산 모형과 실험 모형 간의 차이는 실험 모형의 중량분포에 대한 정확한 데이터가 없는 것에 기인한다. Fig. 3은 보조소로 이루어진 골조구조의 요소분할을 나타내고, 표기된 번호는 절점번호를 나타낸다. 파강제력 및 유체력을 계산하기 위한 침수표면은 Fig. 4에서와 같이 544개의 평면패널로 분할하였다.

횡방향의 lower hull과 deck girder의 등가 굽힘강성은 각각 1.63×10^5 , $7.61 \times 10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ 이고, 1 column당 tendon의 스프링 상수는 5.9 kgf/cm이다. 또, Rayleigh 감쇠의 비례상수 a와 b는 각각 0.0과 0.02로 하였다.

Fig. 5 ~ Fig. 12는 각종 응답의 계산결과를 나타내고 있다. 계산결과는 수심 5m, 파 입사각 90°인 횡파에 대한 것이며, 힘은 $\rho g \zeta_a \Delta^{2/3} = 1.16 \text{ kgf}$, 모멘트는 $\rho g \zeta_a \Delta = 0.394 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ 로서 각각

Table 1 Particulars of the TLP

	Numerical model	Experimental model
Length	72 cm	72 cm
Width	72 cm	72 cm
Height	59 cm	59 cm
Draft	30 cm	30 cm
Center of gravity above base	34.5 cm	35.0 cm
Longitudinal radius of gyration	29.1 cm	35.1 cm
Weight	27.7 kgf	28.9 kgf
Pre-tension	11.7 kgf	10.5 kgf
Displacement	39.4 kgf	39.4 kgf

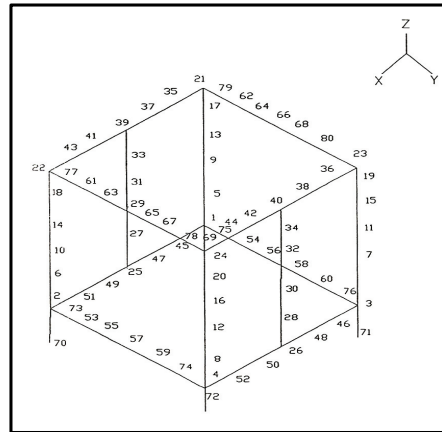


Fig. 3 Node number of 3-dimensional frame structure for the TLP

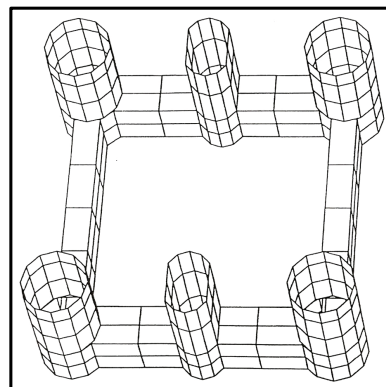


Fig. 4 Submerged surface of the TLP represented by 544 panels

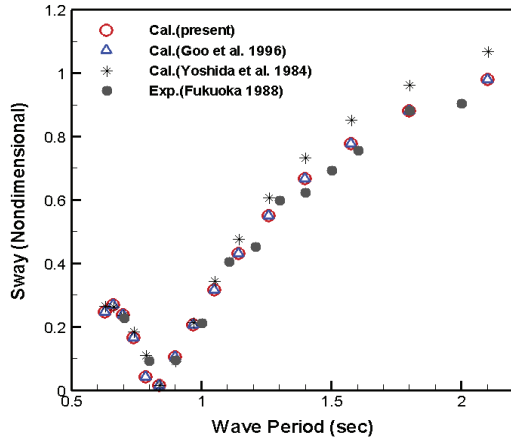


Fig. 5 Sway responses of the TLP

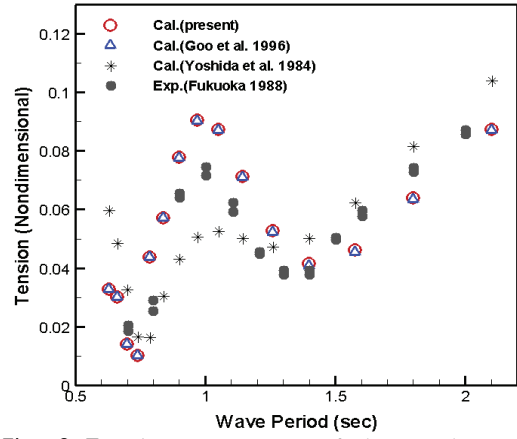


Fig. 8 Tension responses of the tendon on lee side

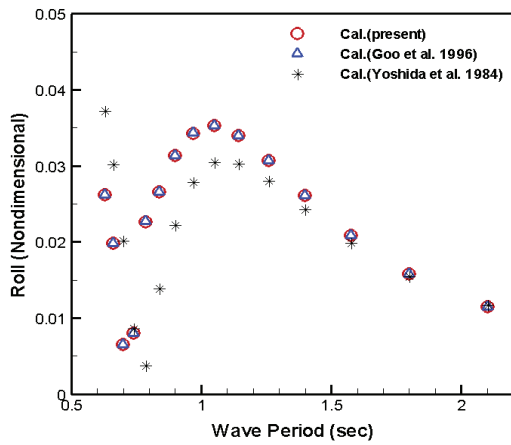


Fig. 6 Roll responses of the TLP

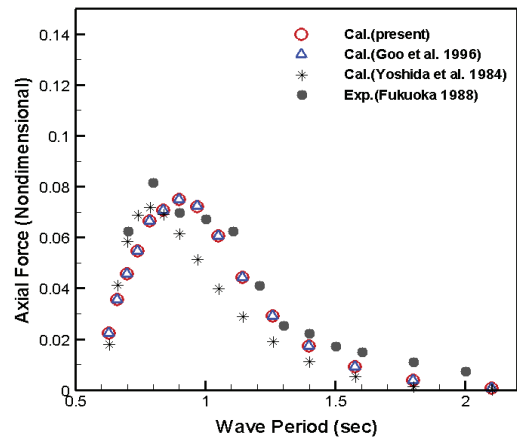


Fig. 9 Axial force responses of the transverse deck girder

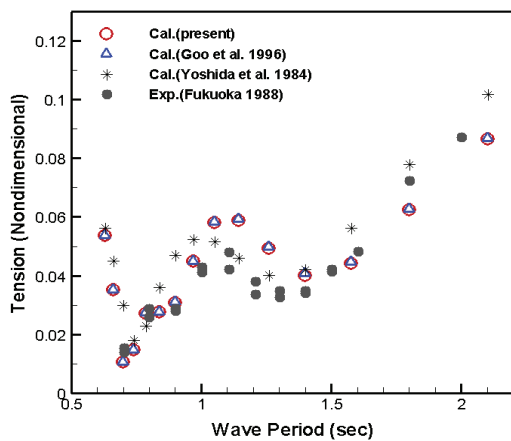


Fig. 7 Tension responses of the tendon on weather side

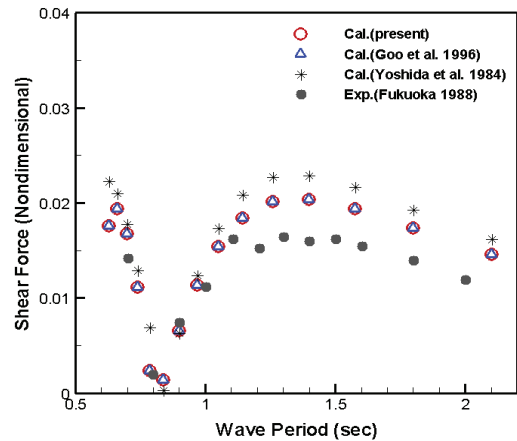


Fig. 10 Shear force responses of the transverse deck girder

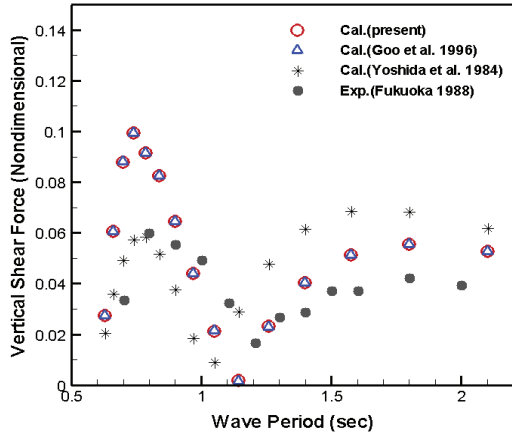


Fig. 11 Vertical shear force on the TLP

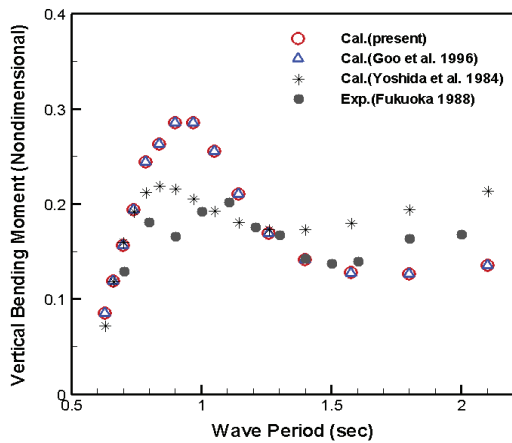


Fig. 12 Vertical bending moment on the TLP

무차원화 시킨 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 Sway(cm/cm) 및 Roll (rad/cm)의 응답을 나타내고, Fig. 7과 Fig. 8은 각각 파상측(weather side)과 파하측(lee side)에서의 tendon의 변동장력을 나타내며, Fig. 9와 Fig. 10은 각각 deck girder(절점번호 63과 65 사이의 보요소)의 축력과 전단력 응답을 나타내고 있다. 또, Fig. 11과 Fig. 12는 각각 전체구조에 작용하는 수직 전단력 및 수직 굽힘 모멘트의 응답을 나타내고 있다.

항력을 고려한 본 해석법에 의한 계산결과는 항력을 고려하지 않은 Goo et al.(1996b)의 계산결과와 거의 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다.

본 논문에서 취급한 TLP의 경우에 있어서 상부 구조물은 직경이 큰 column과 pontoon으로 구성되어 있기 때문에, 항력에 비해 관성력이 지배적이고, 그리고 파주파수 영역내에서 공진이 일어나지 않게 TLP가 설계되어 있으므로 항력의 영향이 아주 미소하게 나타난 것으로 판단된다. 그런데 본 연구에서는 계류부재에 작용하는 중력, 관성력, 유체력은 무시할 수 있는 것으로 가정하고 있으나 계류부재에 작용하는 유체력은 항력이 지배적이므로 이들의 영향도 평가될 필요가 있다. 또한 TLP의 2차 비선형응답의 공진영역에서도 항력의 영향이 나타날 것으로 생각된다. 그리고 수중에서 다수 세장부재들을 가지는 반잠수식 해양구조물의 경우에도 항력의 영향이 나타날 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서 다룬 계산모델 및 계산조건하에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1) 본 인장계류식 해양구조물(TLP)은 직경이 큰 부재로 구성되어 있어 항력에 비해 관성력이 지배적이고 더욱이 파주파수 영역내에서는 공진이 일어나지 않기 때문에 항력의 영향이 아주 미소하게 나타나고 있으나, 2차 비선형응답의 공진영역에서는 항력의 영향이 다소 나타날 것으로 생각된다.

2) 수중의 세장부재들을 갖는 반잠수식 해양구조물의 경우 그 부재의 내력을 보다 정확하게 평가할 수 있는 본 방법이 유효할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 전체 구조물을 강체로 가정한 자유도에 해당하는 상호간섭만을 고려하여 각 외각요소의 유체력을 계산하였다. 따라서 향후, 각 외각요소의 국소좌표계에서 6자유도 운동을 고려한 Radiation 계산을 수행하여, TLP의 탄성거동을 보다 정확하게 해석할 수 있는 수치해법의 개발이 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- Clauss, G., Lehmann, E. and Østergaard, C., 1992, Offshore Structures, Vol. 1, pp. 231-255.
- Faltinsen, O.M. and Michelsen, F.C., 1974,

"Motion of Large Structures in Waves at Zero Froude Number," International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp. 91-106.

- Fukuoka, T., 1988, Elastic Response Analysis of JOIA-TLP, Misui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.
- Goo, J.S., Jo, H.J., Hong, S.Y., Lee, C.H. and Kim, K.T., 1996a, "Steady Drift Forces on Very Large Offshore Structures Supported by Multiple Floating Bodies in Waves (II)," Journal of SNAK, Vol. 33, No. 4, pp. 150-161.
- Goo, J.S., Park, C.H. and Lee, C.H., 1996b, "A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms in Waves (II)," Journal of KSOE, Vol. 10, No. 1, pp. 25-35.
- Jo, H.J., Goo, J.S., Hong, S.Y. and Lee, C.H., 1995, "Steady Drift Forces on Very Large Offshore Structures Supported by Multiple Floating Bodies in Waves (I)," Journal of SNAK, Vol. 32, No. 4, pp. 123-135.
- Kim, C.H., Lee, C.H. and Goo, J.S., 2007, "A Dynamic Response Analysis of Tension Leg Platforms including Hydrodynamic Interaction in Regular Waves," Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 1680-1689.
- Yoshida, K., Ozaki, M. and Oka, N., 1984, "Structural Response Analysis of Tension Leg Platforms," Proceedings of the Third International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, ASME.



< 하 영 록 >