

규칙파 중 TLP의 유탄성응답 해석 Hydroelastic Response Analysis of TLPs in Regular Waves

하영록 · 이승철 · 구자삼
Y. R. Ha, S. C. Lee and J. S. Goo

(접수일 : 2010년 1월 15일, 수정일 : 2010년 1월 26일, 채택확정 : 2010년 2월 22일)

Key Words : TLP(Tension Leg Platform; 인장계류식 해양구조물), Three Dimensional Source Distribution Method(3차원 특이점 분포법), Finite Element Method(유한요소법), Hydrodynamic Interaction(유체역학적 상호간섭), Hydroelastic Response(유탄성응답), Drag Forces(항력)

Abstract : An improved numerical scheme, to which the hydroelastic method is adapted, is introduced for predicting the motion and structural responses of tension leg platforms(TLPs) in regular waves. The numerical approach in this work 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 included in order to estimate the responses of members with better accuracy. Comparisons with other results verify the works in this paper.

1. 서 론

인장계류식 해양구조물(TLP)은 최근의 심해유전 개발을 위한 대표적인 구조물중 하나이며, 이와 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러한 연구들 중에서 3차원 특이점 분포법¹⁾과 탄성응답해석법²⁾을 결합하여 유체력 및 구성부재간의 유체역학적 상호간섭을 고려할 수 있는 TLP의 탄성응답해석법³⁾이 개발된 바 있다. 이 해석법에서는 구조물을 다수의 외각요소로 분할하고 개개의 외각요소는 강체로 가정하여 각 외각요소간의 유체역학적 상호간섭을 고려하고 있으며, 외각요소 각각의 중앙점을 보요소로 연결하고 유한요소법으로 정식화를 한 뒤 구조물의 동적응답을 구하는 방법이다. 이 방법들에서는 radiation 계산을 수행할 때 외각요소 전체를 강체로 가정하지만^{3,5)}, Kim et al.⁶⁾은 각 외각요소를 탄성체로 가정하여 국소좌표계에서의 6자유도 운동을 고려한 계산을 수행하였다.

본 연구에서는, TLP 수중부재의 점성에 의한 항

력을 함께 고려하여 유체력을 구하는 해석법⁵⁾에 유탄성응답해석법⁶⁾을 적용하였고, 그 타당성 검증을 위해 기존의 연구결과들과 비교 및 검토하였다.

2. 이론 해석

2.1 기본가정 및 좌표계

TLP의 구조응답을 탄성응답해석법으로 해석하기 위한 기본가정은 다음과 같다.

(1) 입사파는 미소진폭의 규칙파로 하고, 유체는 비압축성 비점성으로 하며, 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다.

(2) 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한한 경우에는 수심 일정으로 한다.

(3) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.

(4) 각 평형위치에 대해 응답은 미소진폭 조화진동으로 한다.

(5) 계류부재에 작용하는 중력, 관성력, 유체력은 무시할 수 있고, 오직 축방향의 힘만이 계류력으로 상부구조에 작용한다.

(6) 모든 계류부재는 이완상태가 되지 않도록 충분한 초기 장력을 갖는다. 위의 가정에도 불구하고,

구자삼(교신저자) : 부경대학교 조선해양시스템공학과
E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615
하영록 : 거제대학 조선평과
이승철 : 한국해양대학교 국가지정연구소

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 7 종류의 오른손 직교 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 상방향이 양이다.

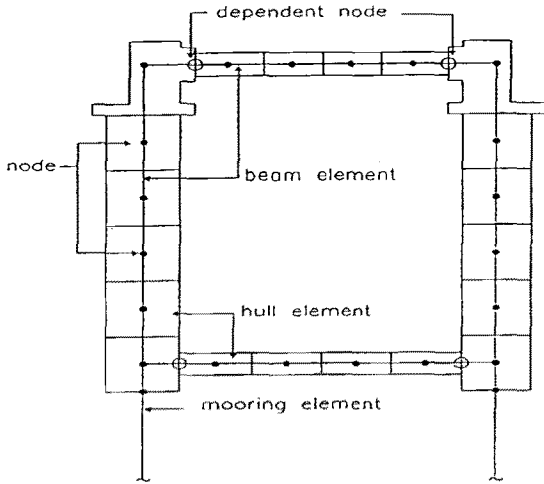


Fig. 1 Element subdivision of the TLP

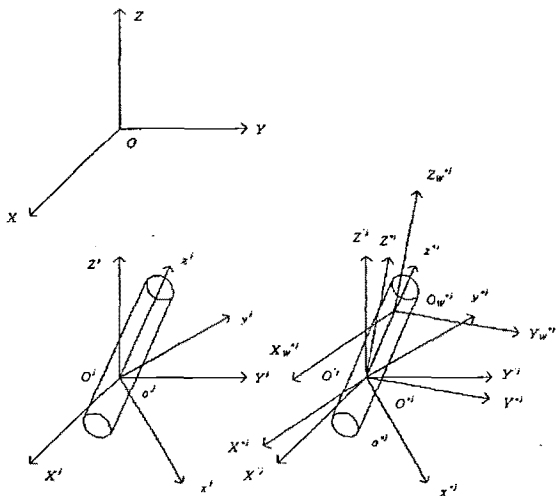


Fig. 2 Coordinate systems

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.

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

$$\phi_0 = \frac{g\xi_a}{\omega} \frac{\cosh\{k(Z-d+h)\}}{\cosh kh} \sin\{ik(X\cos\alpha + Y\sin\alpha) - \omega t\} \quad (2)$$

여기서, ξ_a 는 파진폭, k 는 파수, α 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.

6개의 나머지 좌표계는, 정적 평형상태에서 j 번째 부재 절점에 원점을 두고 $O^j-X^j-Y^j-Z^j$ 좌표계에 평행한 공간고정 전체 좌표계 $O^j-X^j-Y^j-Z^j$, 부재의 축방향으로 Z^j 를 두고 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.

2.2 외각요소에 작용하는 힘과 모멘트

외각요소에 작용하는 외력은 중력, 관성력, 정적 유체압력에 의한 부력, Froude-Krylov force, radiation force⁶⁾, diffraction force, drag force⁵⁾와 같이 7가지 종류로 분류된다. 이 힘들은 각각 그것에 편리한 좌표계에서 계산된 후, 각 좌표계간의 변환행렬을 이용하여 최종적으로 $O^j-X^j-Y^j-Z^j$ 좌표계로 표현된다. 그리고 이러한 외력들에 대한 사항은 기존의 연구³⁾에 잘 나타나 있다.

2.3 계류력

계류력은 초기 장력 T_p 와 계류부재 축방향 Z_T^j

로의 변위(신축에 의하여 축강성에 기인하는 장력 변동)에 의한 장력성분을 더함으로써 얻을 수 있다. 따라서 계류부재 고정 좌표계에서 계류력 벡터 $\{f_T^{*j}\}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\{f_T^{*j}\} = \left\{ 0 \quad 0 \quad -T_p^j - \frac{EA_t^j}{L^j} w^j \right\}^T \quad (3)$$

여기서, EA_t^j 와 L^j 는 각각 계류부재의 축강성과 초기길이를 나타내고, w^j 는 좌표계 $o^j-x^j y^j z^j$ 에서의 z^j 방향으로의 병진변위 성분이다.

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

$$\{F_T^{*j}\} = [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_p^j \end{Bmatrix} - [C_s^j]^T \begin{bmatrix} T_p^j/L^j & 0 & 0 \\ 0 & T_p^j/L^j & 0 \\ 0 & 0 & EA_t^j/L^j \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_t^j\} \quad (4)$$

계류점은 핀 결합으로 가정하여 모멘트는 발생하지 않는 것으로 둔다.

$$\{M_T^{*j}\} = \{0\} \quad (5)$$

2.4 보요소의 강성에 기인하는 절점력

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

$$\begin{Bmatrix} \{F_B^{*j}\} \\ \{M_B^{*j}\} \\ \{F_B^{*k}\} \\ \{M_B^{*k}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C^l]^T [K_{jj}^l] [C^l] & [C^l]^T [K_{jk}^l] [C^l] \\ [C^l]^T [K_{kj}^l] [C^l] & [C^l]^T [K_{kk}^l] [C^l] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_t^j\} \\ \{U_r^j\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_r^k\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 좌표변환행렬 $[C^l] = \begin{bmatrix} [C_s^l] & [0] \\ [0] & [C_r^l] \end{bmatrix}$ 이고,

$[C_s^l]$ 은 $O^j-X^j Y^j Z^j$ 좌표계와 $o^j-x^j y^j z^j$ 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.

$$[M]\{U_w\} + ([N_w] + [N])\{\dot{U}_w\} + ([K_w] + [K])\{U_w\} = \{F_w\} \quad (7)$$

여기서,

$[M]$: 부가질량을 포함하는 질량행렬,

$[N_w]$: 조파감쇠 및 항력에 의한 감쇠행렬,

$[N]$: 구조감쇠행렬,

$[K_w]$: 중력, 정수압, 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 벡터

구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh 감쇠를 이용하기로 한다.

$$[M] = a[M] + b([K_w] + [K]) \quad (8)$$

여기서, a, b 는 비례상수이다.

한편, $\{F_w\}$ 는 정적인 힘과 동적인 힘으로 나눌 수 있고, 동적인 힘을 여현 항과 정현 항으로 나누면 다음과 같다.

$$\{F_w^i\} = \{F_0^i\} + \{\overline{F_{wc}^i}\} \cos \omega t + \{\overline{F_{ws}^i}\} \sin \omega t \quad (9)$$

정적 응답은 정적인 힘 $\{F_0^i\}$ 을 이용하여 구할 수 있고, 동적 응답은 다음과 같은 운동 방정식에 의해 구해진다.

$$[M]\{\ddot{U}_w\} + ([N_w] + [N])\{\dot{U}_w\} + ([K_w] + [K])\{U_w\} = \{\overline{F_{wc}^i}\} \cos \omega t + \{\overline{F_{ws}^i}\} \sin \omega t \quad (10)$$

운동 방정식의 해법은 일반적으로 행해지고 있는 것처럼 변위 응답의 정상상태의 해를 다음과 같이 가정한다.

$$\{U_w\} = \{\overline{U}_c\} \cos \omega t + \{\overline{U}_s\} \sin \omega t \quad (11)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하여 정리하면, 다음의 연립 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} ([K_w] + [K]) - \omega^2[M] & \omega([N_w] + [N]) \\ -\omega([N_w] + [N]) & ([K_w] + [K]) - \omega^2[M] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} | \{U_r\} | \\ | \{U_s\} | \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} | \{F_{wr}\} | \\ | \{F_{ws}\} | \end{Bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)에 의해 각 절점 및 계류점의 여현향 및 정현향 진폭을 구함으로써 임의의 절점변위응답은 쉽게 구할 수 있다. 예를 들면, 절점의 X방향 변위 응답은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} U^j &= |U_c^j| \cos \omega t + |U_s^j| \sin \omega t \\ &= \sqrt{(|U_c^j|)^2 + (|U_s^j|)^2} \cos(\omega t - \gamma_u) \end{aligned} \quad (13)$$

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

3. 수치계산 및 고찰

본 해석법에 의한 수치계산 결과의 타당성 검증을 위해서 하영록⁵⁾과 Yoshida et al.²⁾ 각각의 수치계산 결과, 그리고 Fig. 3과 같은 TLP모형을 사용한 Fukuoka⁷⁾에 의한 실험결과와 비교 및 검토하였다.

Table 1은 비교대상 TLP의 주요항목을 나타내고 있으며, 수치계산 모형과 실험 모형간의 차이는 실험 모형의 중량분포에 대한 정확한 데이터가 없는 것에 기인한다. Fig. 4는 보요소로 이루어진 골조구조의 요소분할을 나타내고, 표기된 번호는 절점번호를 나타낸다.

Table 1 Particulars of the TLP

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

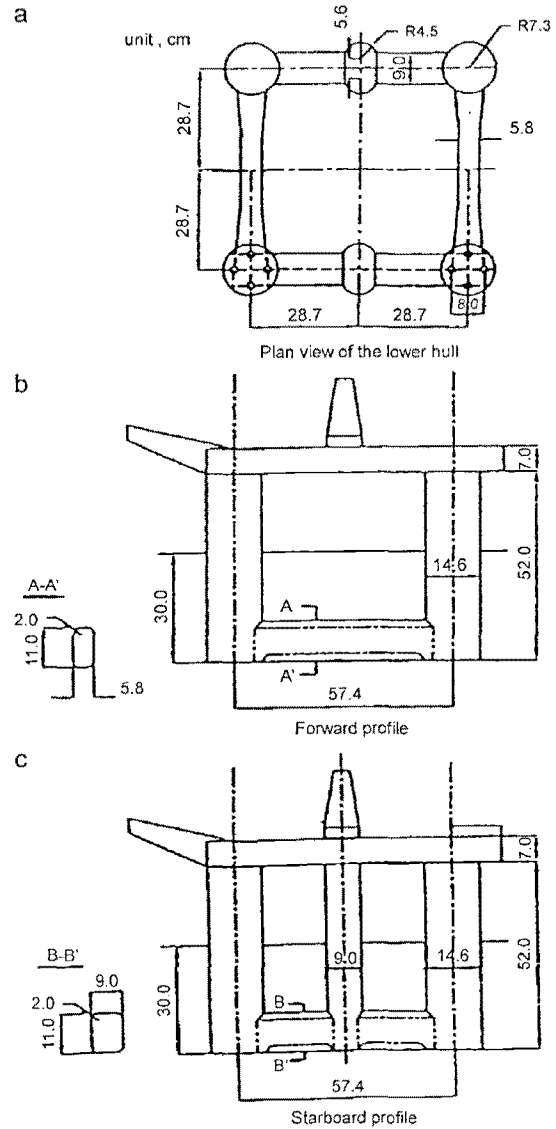


Fig. 3 Configuration of the TLP

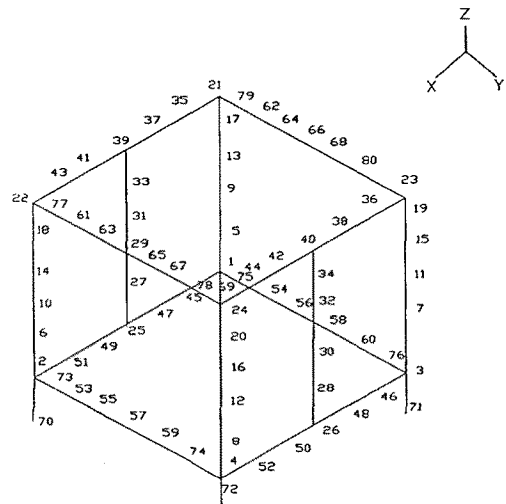


Fig. 4 Node number of 3-dimensional frame structure for the TLP

파강제력 및 유체력 계산을 위한 침수표면은 Fig. 5에서와 같이 544개의 평면패널로 분할하였다.

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

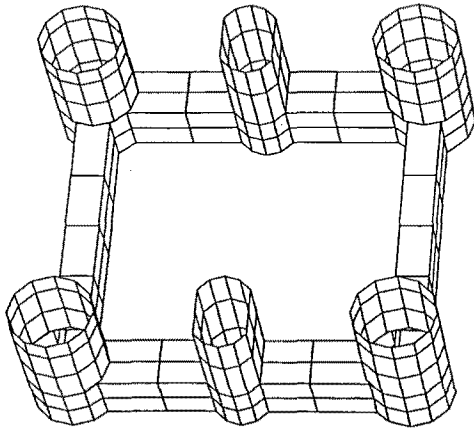


Fig. 5 Submerged surface of the TLP represented by 544 panels

Fig. 6 ~ Fig. 13은 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 $\rho g \zeta_a \Delta = 0.394 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ 로 각각 무차원화 시킨 것이다. 원표(○)는 각 외각요소를 탄성체로 가정하여 국소좌표계에서의 6자유도 운동을 고려한 본 계산방법에 의한 결과이고, 삼각표(△)는 강체로 가정한 하영록⁵⁾에 의한 결과이다. 별표(*)와 흑점(●)은 각각 Yoshida et al.²⁾에 의한 계산결과 및 Fukuoka⁷⁾에 의한 실험결과이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 Sway(cm/cm) 및 Roll(rad/cm)의 응답을 나타내고, Fig. 8과 Fig. 9는 각각 파상측(weather side)과 파하측(lee side)에서의 tendon의 변동장력을 나타내며, Fig. 10과 Fig. 11은 각각 deck girder(절점번호 63과 65 사이의 보 요소)의 축력과 전단력 응답을 나타내고 있다. 또, Fig. 12와 Fig. 13은 각각 전체구조에 작용하는 수직 전단력 및 수직 굽힘 모멘트의 응답을 나타내고 있다.

각 외각요소에서 6자유도 운동을 고려하여 radiation force를 계산한 본 결과와 그렇지 않은 계산결과⁵⁾ 모두 Yoshida et al.²⁾의 계산결과 보다도 Fukuoka⁷⁾

의 실험결과와 잘 일치하고 그래프의 경향도 보다 유사함을 알 수 있다. 다만, 본 해석법에 의한 계산 결과는 하영록⁵⁾의 계산결과와 상대적으로 공진영역을 포함한 단파장(고주파수) 파영역에서 차이를 보이고 있으며(Fig. 7~Fig. 9, Fig. 11과 Fig. 12), 대체적으로 계산결과가 조금 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 각 부체가 탄성 회전운동을 함으로써 장파장(저주파수) 파영역에서는 강체운동에 가깝게 거동하며, 단파장(고주파수) 파영역에서는 각 부체의 크기에 대하여 탄성응답 고유진동수에 가까움에 따른 현상으로 생각된다. 이는 단파장 파영역의 radiation 계산 수행 시 탄성체로 다룰 때가 강체로 다룰 때보다도 응답이 크게 나타남을 의미하므로, tendon의 설계하중 계산에 있어서 고려되어야 할 사항이라고 생각된다. 따라서 TLP의 탄성거동을 보다 엄밀하게 계산하기 위해서는 본 방법에 의한 해석법이 유효할 것으로 판단된다.

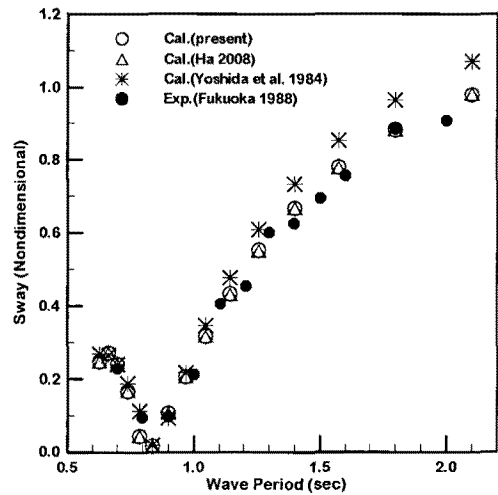


Fig. 6 Sway responses of the TLP

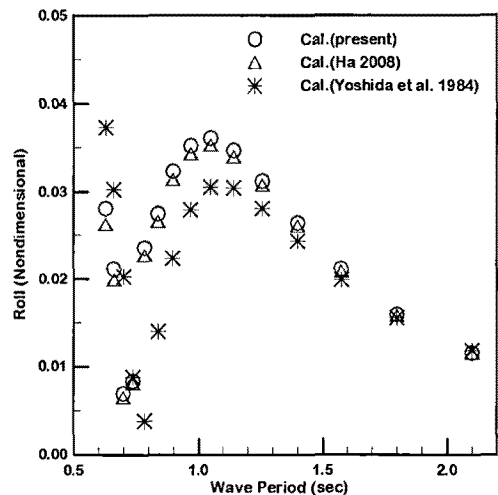


Fig. 7 Roll responses of the TLP

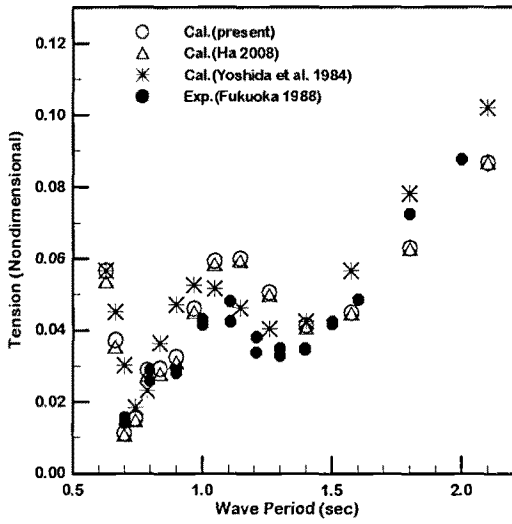


Fig. 8 Tension responses of the tendon on weather side

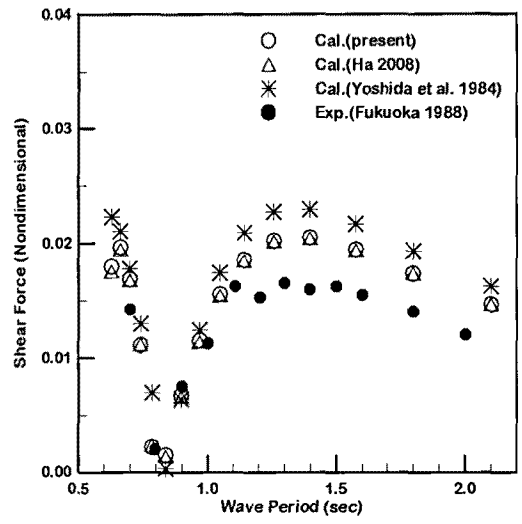


Fig. 11 Shear force responses of the transverse deck girder

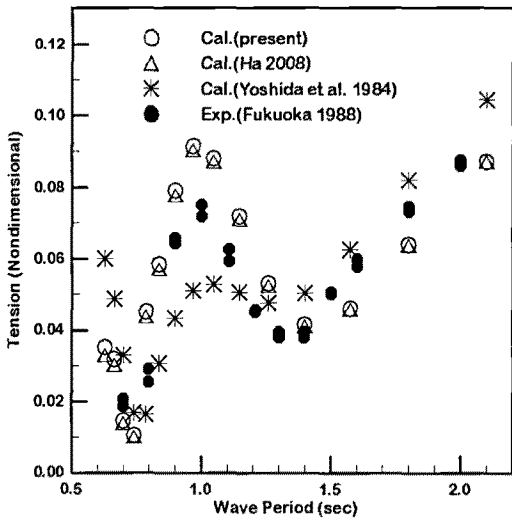


Fig. 9 Tension responses of the tendon on lee side

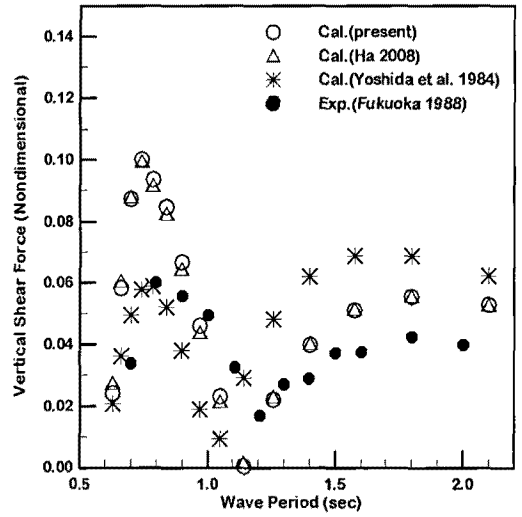


Fig. 12 Vertical shear force on the TLP

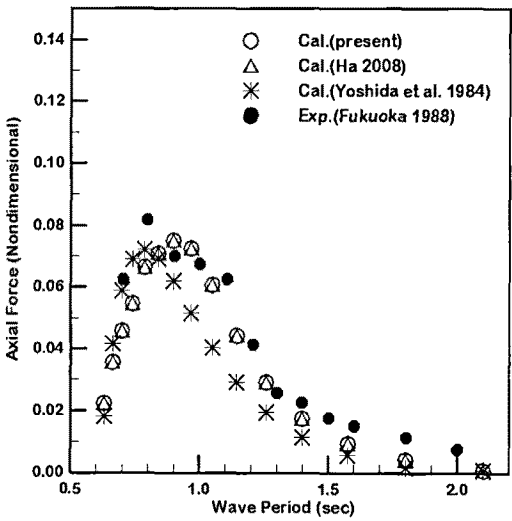


Fig. 10 Axial force responses of the transverse deck girder

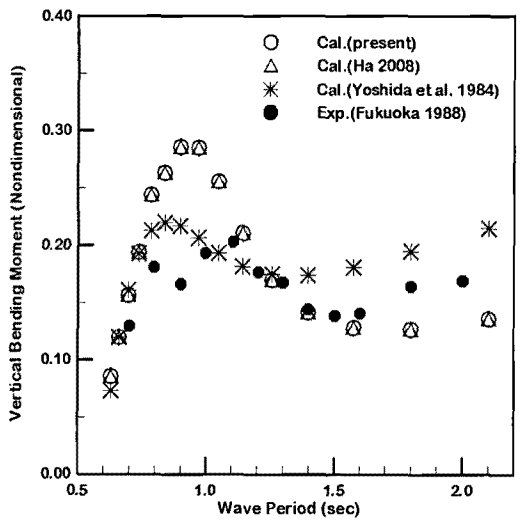


Fig. 13 Vertical bending moment on the TLP

4. 결 론

TLP의 탄성거동해석에 있어서, 본 해석법의 수치 계산 결과는 Fukuoka⁷⁾의 실험결과와 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

탄성 회전운동에 의한 radiation force를 고려한 본 해석법에 의한 계산결과는 이를 고려하지 않은 계산결과⁵⁾와 상대적으로 공진영역을 포함한 단파장(고주파수) 파영역에서 차이를 보이고 있으며, 계산 결과 값이 조금 높게 나타남을 알 수 있다.

이러한 결과는 단파장 파영역의 radiation 계산 수행 시 탄성체로 다를 때가 강체로 다를 때보다도 응답이 크게 나타남을 의미하므로, tendon의 설계하중 계산에 있어서 고려되어야 할 사항이라고 생각된다. 따라서 TLP의 탄성거동을 보다 엄밀하게 계산하는 본 방법에 의한 해석법은 관련분야에 좋은 비교자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업(ROA-2008-000-20069-0)의 지원으로 수행된 연구 결과임.

참고 문헌

1. 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.
2. 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.
3. 구자삼, 김진하, 이창호, 1995, "인장계류식 해양 구조물의 동적응답해석(I)", 한국해양공학회지, 제9권, 제1호, pp. 161~172.
4. 구자삼, 박찬후, 이창호, 1996, "인장계류식 해양 구조물의 동적응답해석(II)", 한국해양공학회지, 제10권, 제1호, pp. 25~35.
5. 하영록, 2008, "규칙파중 항력을 고려한 TLP의 동적응답해석", 대한조선학회논문집, 제45권, 제3

호, pp. 25~35.

6. 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.
7. Fukuoka, T., 1988, "Elastic Response Analysis of JOIA-TLP", Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.