한국동력기계공학회지 제16권 제1호 pp.65~71 2012년 2월

조류와 파랑 중에서의 TLP의 동적구조응답해석
A Dynamic structural response analysis of tension leg platforms in current and waves

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

(접수일 : 2011년 06월 21일, 수정일 : 2011년 09월 09일, 채택확정 : 2011년 10월 06일)

Key Words : Tension Leg Platform(인장계류식 해양구조물), Fluid-structure interaction(유체구조상호간섭), Finite element method(유한요소법), Three-dimensional source distribution method(3차원 특이점분포법), Dynamic structural response(동적구조응답)

Abstract : A numerical procedure is described for predicting the dynamic structural responses of tension leg platforms(TLPs) in current and waves. The developed numerical approach is based on a combination of the three dimensional source distribution method and the dynamic structural analysis method, in which the superstructure of the TLPs is assumed to be flexible instead of rigid. The hydrodynamic interactions among TLP members, such as columns and pontoons, and the structural damping are included in the dynamic structural analysis. The equations of motion of a whole structure are formulated using element-fixed coordinate systems which have the origin at the nodes of the each hull element and move parallel to a space-fixed coordinate system. The dynamic structural responses of a TLP were analyzed in the case of including the current or not including the one in waves and the effects of current on the TLP were investigated.

1. 서 론

21세기의 석유와 가스 생산의 주력 지역이 500m 이상의 심해에서 이루어지고 있는데, 심해의 석유자원의 시추 및 생산을 위한 구조물로는 거친 해상 환경에서도 우수한 작업 성능을 가지는 TLP가 대표적이다. TLP는 부유식과 고정식의 특성을 결합한 유연식 구조물로서 1500m 이상의 깊이, 즉 ultra-deepwater 지역에도 투입이 가능하다. 이 지역에 들어가는 TLP가 무려 전체의 42%에 달하며 500m에서 1000m 사이의 지역에 들어가는 TLP가 약 40%에 달한다[1].

미국, 유럽, 일본 등 해양 선진국에서는 경제적인 TLP의 실용화 기술 개발을 위한 많은 연구와 해양실험이 진행되었으며[2),3)], 국내에서도 한국해양연구원에서 해양공학수조를 활용하여 TLP의 운동 모형시험과 수치계산 결과의 해석을 수행하였다[4]. 구 등[5),6)] 과 Kim 등[7]은 3차원 특이점 분포법과 기존의 탄성응답 해석법을 결합하는 것에 의해 유체력의 정밀평가 및 구성부재간의 유체역학적인 상호간섭을 고려할 수 있는 규칙파중에서의 TLP의 탄성응답 해석법을 개발하였다. 이[8]는 ISSC-TLP 실선 구조물에 대한 다방향 불규칙파중의 운동응답과 변동장력 특성을 평가하였다. 이 등[9]은 조류와 파랑 중에 있는 TLP를 강체로 취급한 운동해석법을 개발하였다.

본 논문에서는 조류와 파랑 중에 있는 TLP를 탄성체로 취급한 동적구조응답 해석법을 개발하였다. 따라서, 공간고정전체좌표계와 평행한 새로운 물체고정 좌표계를 선정하여 이 좌표계를 기준으로 운동방정식을 정식화하고 구조감쇠를 고려한 TLP의 구조내력을 파랑만 작용하였을 때와 파랑과 조류가 동시에 작용할 때로 나누어 파의 입사각의 변화에 따라 평가하였다.

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

2. 수치 해석

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.

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.

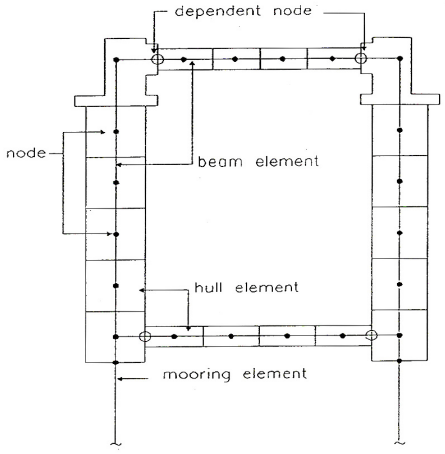

Fig. 1 Element subdivision of the TLP

운동방정식의 정식화에 있어서는 Fig. 2와 같은 7종류의 좌표계를 사용하는데, 공간고정 기준 좌표계 $O-XYZ$는 원점 O가 정수면 아래 거리 d만큼 떨어진 곳에 위치하며, XY평면은 정수면에 평행하고, Z축은 상방향을 양으로 선택한다. 조류는 X축의 음의 방향으로 U의 속도로 흐르는 것으로 한다.

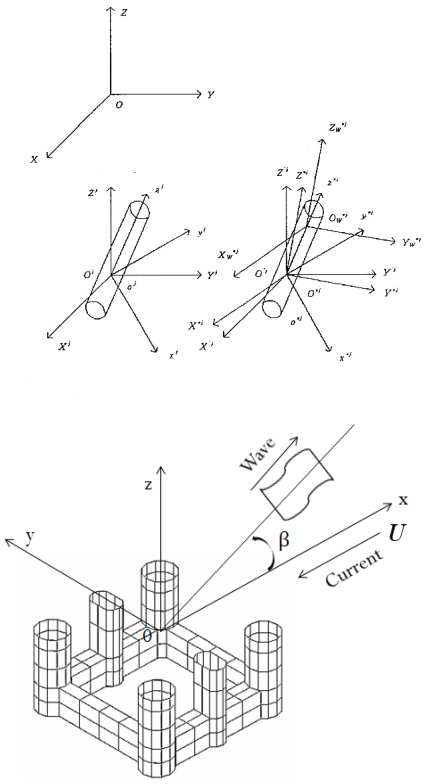

Fig. 2 Coordinate systems

2.2 기초방정식과 경계조건

비회전 완전유체의 유체운동은 다음 식으로 정의되는 속도포텐셜Φ에 의해 기술할 수 있다.

$$\vec{V} = grad\ \Phi(x,y,z,t) \tag{1}$$

단, $\vec{V}$는 유체의 속도 벡터이다.

그런데 이 속도포텐셜은 정상포텐셜과 비정상 포텐셜로 나눌 수 있고, 비정상 포텐셜은 입사파의 속도포텐셜과 구속된 TLP에 의한 입사파의 산란을 나타내는 산란 포텐셜 및 정수 중에서 TLP의 운동에 의해 발생되는 방사파를 나타내는 방사 포텐셜의 합으로서 생각할 수 있다.

또한, 방사 포텐셜은 운동자유도에 따라 6성분으로 나눌 수 있다. 따라서 유장 전체의 속도포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x,y,z,t) = -Ux + \phi_s(x,y,z) + \tilde{\Phi}(x,y,z,t) \tag{2}$$

$$\tilde{\Phi} = [\phi_I + \phi_D + \sum_{k=1}^{6} -i\omega\eta_k\phi_k]e^{-i\omega t} \tag{3}$$

여기서, ϕ_s는 조류에 의한 정상 교란 속도포텐셜로서 본 연구에서는 정상 교란 포텐셜을 무시한다. 또, $\tilde{\Phi}$는 파에 의한 비정상 속도포텐셜, ϕ_I는 입사파의 포텐셜, ϕ_D는 산란 포텐셜, ϕ_k는 운동기준점에서

TLP가 단위 속도 진폭으로 k 방향의 운동에 의해 발생하는 방사 포텐셜이다. 또, i 는 허수단위, ω 는 TLP와 파의 조우 각주파수, η_k 는 k 방향의 복소 변위 진폭이다.

산란 포텐셜 ϕ_D 및 방사 포텐셜 ϕ_k $(k=1\sim6)$ 은 각각 다음과 같은 경계치 문제의 해로서 구할 수 있다.

$$\nabla^2\phi_{D,k}=0 \text{ in } \Omega \tag{4}$$

$$[(i\omega+U\frac{\partial}{\partial x})^2+g\frac{\partial}{\partial z}]\phi_{D,k}=0 \quad \text{on} \quad S_F \tag{5}$$

$$\frac{\partial\phi_{D,k}}{\partial z}=0 \qquad \text{on} \qquad S_B \tag{6a}$$

$$\lim_{z\to-\infty} grad\,\phi_{D,k}=0 \quad \text{on} \quad S_B \tag{6b}$$

$$\frac{\partial\phi_D}{\partial n}=-\frac{\partial\phi_I}{\partial n} \quad \text{on} \quad S_H \tag{7}$$

$$\lim_{R\to\infty}\sqrt{R}\,(\frac{\partial\phi_{D,k}}{\partial R}-ik\phi_{D,k})=0 \quad \text{on} \quad S_R \tag{8}$$

여기서, 식(6a)는 유한 수심의 경우이고, 식(6b)는 무한수심의 경우이다. 또, 식(8)은 무한 원방에 있어서의 방사조건이며, 무한 원방에 있어서는 산란파, 방사파 둘 다 방사상으로 펼쳐져 가는 진행파 성분만으로 된다고 하는 물리적인 조건을 나타내고 있다. 단, R 은 source 점과 field 점의 수평거리이며, k 는 조우 파수이다.

TLP의 조우주파수 ω 가 미분 연산자 $U\partial/\partial x$ 보다 훨씬 큰 고주파수로 가정하면($\omega\gg U\frac{\partial}{\partial x}$), 자유표면 경계조건은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial\phi_D}{\partial z}-\frac{\omega^2}{g}\phi_D=0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial\phi_k}{\partial z}-\frac{\omega^2}{g}\phi_k=0 \ (k=1\sim6) \tag{10}$$

그러므로, ϕ_D, $\phi_k(k=1\sim6)$ 는 통상적인 3차원 특이점 분포법에 의해 구할 수 있다.

2.3 유체력 및 파강제력

일정 유속 U 로 진행하는 조류 중에 계류된 TLP에 작용하는 유체력과 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$F_j=-\int\int_{S_H} p\cdot n_j ds=F_j^W+F_j^R+F_j^\delta \tag{11}$$

여기서, F_j^W는 파강제력과 모멘트, F_j^R 은 동유체력과 모멘트, F_j^δ 는 복원력과 모멘트이다.

2.4 계류력

계류력은 초기 장력 $T_p{}^j$와 계류부재 축방향$z_T{}^{*j}$으로의 변위를 더함으로서 얻을 수 있다. 따라서 계류부재 고정 좌표계에서 계류력 벡터 $\{f_T{}^{*j}\}$는 다음과 같이 표현된다.

$$\{f_T{}^{*j}\}=\left\{0 \quad 0 \quad -T_p{}^j-\frac{EA_t{}^j}{L^j}w^j\right\}^T \tag{12}$$

여기서, $EA_t{}^j$와 L^j는 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.

$$\{F_T{}'^j\}=[C_s^j]^T\begin{Bmatrix}0\\0\\-T_p^j\end{Bmatrix}-[C_s^j]^T\begin{bmatrix}T_p^j/L^j & 0 & 0\\ 0 & T_p^j/L^j & 0\\ 0 & 0 & EA_t{}^j/L^j\end{bmatrix}[C_s^j][U_t^j] \tag{13}$$

계류점은 핀 결합으로 가정하여 모멘트는 발생하지 않는 것으로 둔다.

$$\{M_T{}'^j\}=\{0\} \tag{14}$$

2.5 운동 방정식

TLP의 운동이 입사파의 주파수와 조화인 것으로 가정하고 있으므로 선형운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$[-\omega^2([M_S]+[\mu])-i\omega([C_S]+[\nu])+([K_S]+[K_P]+[K_w])]\{\eta\}=\{F^W\} \tag{15}$$

여기서,

$[M_S]$: 전체 질량 행렬

$[\mu]$: 유체에 의한 전체 부가질량 행렬

$[C_S]$: 전체 구조감쇠 행렬

$[\nu]$: 전체 조파감쇠 행렬

$[K_S]$: 전체 강성행렬

$[K_P]$: 정수압에 의한 전체 복원력 행렬

$[K_w]$: 계류계에 의한 복원력 행렬

$\{F^W\}$: 파강제력 벡터

식 (15)의 연립방정식을 푸는 것에 의해, 절점 변위 벡터 $\{\eta\}$가 구해진다.

j번과 k번의 절점을 연결하는 탄성 보요소의 국소좌표계로 평가한 내력과 모멘트는 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

$$= \begin{Bmatrix} \{\overline{f}_{Bc}^j\} \\ \{\overline{m}_{Bc}^j\} \\ \{\overline{f}_{Bc}^k\} \\ \{\overline{m}_{Bc}^k\} \end{Bmatrix} \cos\omega t + \begin{Bmatrix} \{\overline{f}_{Bs}^j\} \\ \{\overline{m}_{Bs}^j\} \\ \{\overline{f}_{Bs}^k\} \\ \{\overline{m}_{Bs}^k\} \end{Bmatrix} \sin\omega t \qquad (16)$$

3. 수치계산 결과 및 고찰

본 운동응답 해석법의 타당성을 검증하기 위해 실험치 및 Yoshida 등[10]의 탄성응답 해석법에 의한 계산치를 본 응답 해석법의 계산치와 비교·검토하기로 한다.

Table 1 Particulars of the TLP model

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	27.7	kgf
pretension	11.7	kgf
Displacement	39.4	kgf

Table 1은 계산을 하기 위한 실기 구조물의 1/100 모델의 주요목을 나타내고 있다. 구조물에 작용하는 유체력 및 파강제력을 계산하기 위해 Fig. 3와 같이 TLP모델의 침수표면을 544개의 패널로 분할하였다. Fig. 4는 보요소로 이루어진 골조구조의 요소분할도이고, 표기된 번호는 절점번호를 나타낸다.

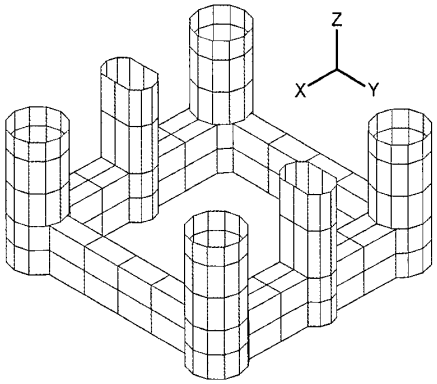

Fig. 3 Submerged surface of TLP represented by 544 panels

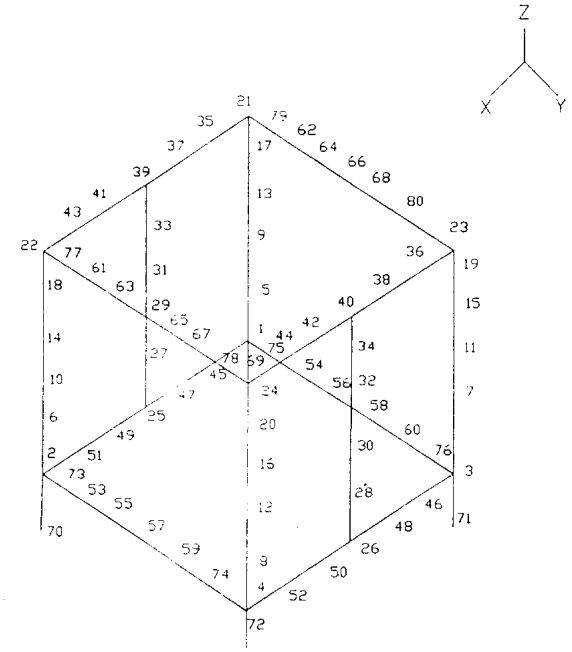

Fig. 4 Node number of 3-dimensional frame structure for the TLP

Fig. 5-8은 조류를 고려하지 않았을 때, 파입사각이 90°인 횡파에 대한 구조내력 응답을 나타내고 있다.

Fig.5는 deck girder의 축력 응답을 나타내고 있다. 실험치의 피크 부분을 제외하면 전반적으로 실험치와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 deck girder의 전단력 응답을 나타내고 있다. 장주기 부분을 제외하면 실험치와 잘 일치하고 있다.

Fig.7은 구조 전체에 작용하는 수직전단력 응답을 나타내고 있다. 파주기 0.75 sec 부근에서 실험치보

다 높게 평가하고 있지만, 그 이외의 부근에서는 실험치에 접근해 있음을 알 수 있다.

Fig.8은 구조 전체에 작용하는 수직굽힘모멘트 응답을 나타내고 있다. 파주기 1 sec 부근에서 실험치보다 크게 평가하고 있는 것을 알 수 있다.

본 계산 방법에 의한 결과가 Yoshida등의 방법에 의한 결과보다 더욱 더 실험치와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

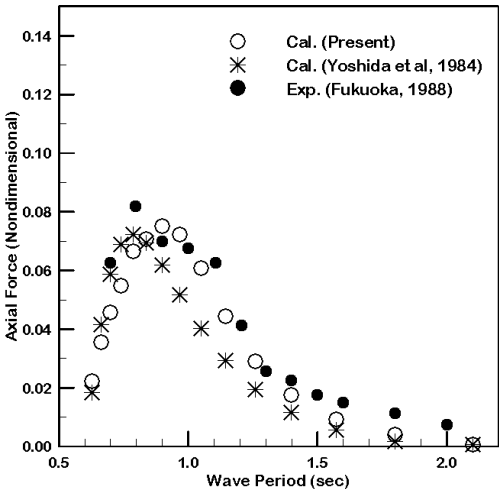

Fig. 5 Axial force responses of the transverse deck girder at $F_n = 0.0,\ \beta = 90^o$

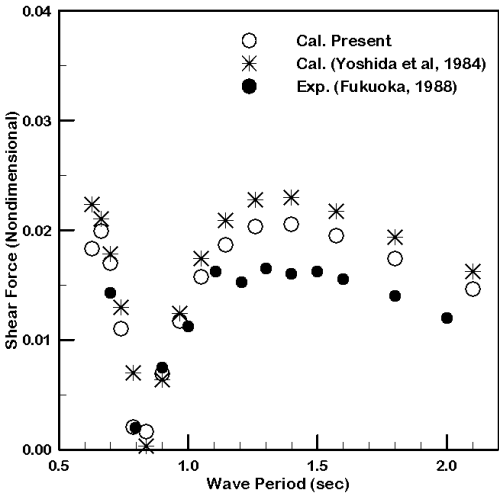

Fig. 6 Shear force responses of the transverse deck girder at $F_n = 0.0,\ \beta = 90^o$

TLP가 주로 설치되는 지역인 북해의 경우, 조류의 속도가 최대 1.5 m/s 정도이므로 본 논문에서는 조류의 속도를 1.59 m/s (F_n = 0.06)로 고려하였다.

Fig. 9-12는 파의 입사각과 조류의 유무에 따른 구조내력 응답값을 보이고 있다.

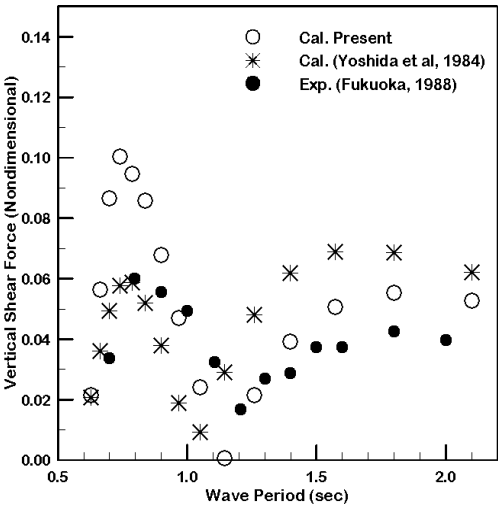

Fig. 7 Vertical shear force on the TLP at $F_n = 0.0,\ \beta = 90^o$

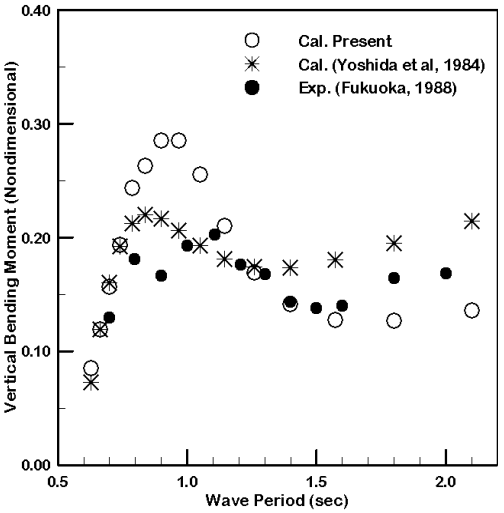

Fig. 8 Vertical bending moment on the TLP at $F_n = 0.0,\ \beta = 90^o$

Fig.9는 deck girder의 축력에 대한 응답을 보이고 있다. 입사각이 90°인 경우 조류의 영향이 없음을 알 수 있고, 선수미파의 응답은 아주 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

Fig.10은 deck girder의 전단력에 대한 응답을 보이고 있다. $\beta = 60^o$ 일 때 파주기 0.7sec 부근에서 조류를 고려한 경우 24% 감소하지만, $\beta = 120^o$ 의 경우에는 16% 증가함을 알 수 있다. 파주기 1.0sec이후에는 조류의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 구조 전체에 작용하는 수직전단력에 대한 응답을 보이고 있다. $\beta = 30^o$ 와 $\beta = 150^o$ 의 조류를 고려한 경우가 40% 증가하지만, 파주기 0.8sec 이후부터는 최대 25% 감소됨을 알 수 있다.

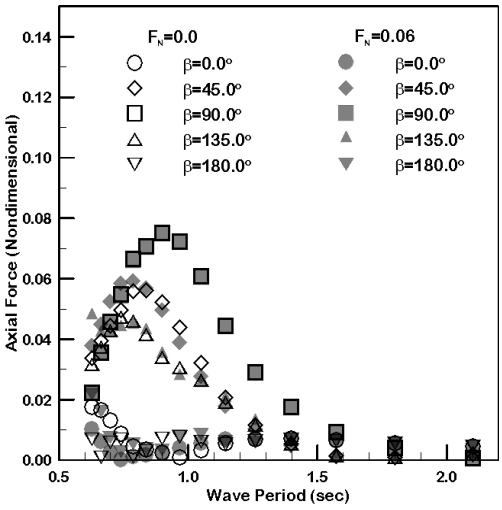

Fig. 9 Axial force responses of the transverse deck girder

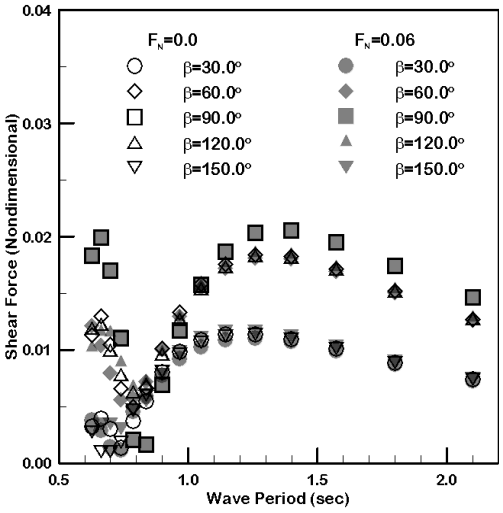

Fig. 10 Shear force responses of the transverse deck girder

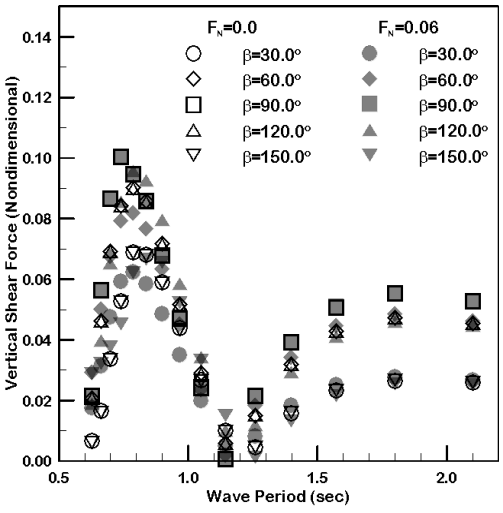

Fig. 11 Vertical shear force on the TLP

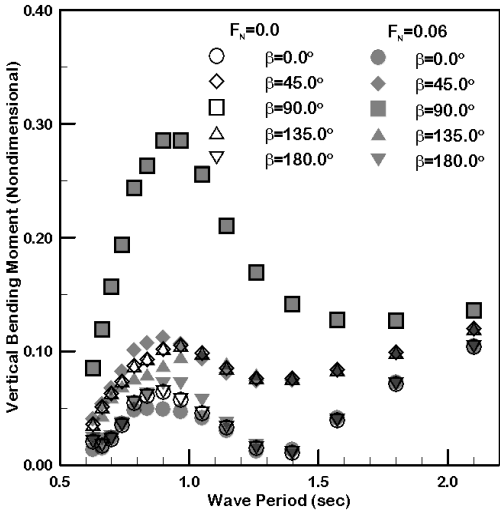

Fig. 12 Vertical bending moment on the TLP

Fig.12는 구조 전체에 작용하는 수직굽힘모멘트를 나타내고 있다. 전체적으로 조류의 유무에 따른 응답값의 차이가 거의 없지만, 파주기 0.85sec 부근에서 약간의 차이를 보임을 알 수 있다. 선수사파($\beta=135^{\circ}$)의 경우에는 조류를 고려한 경우의 응답이 14% 감소되지만, 선미사파($\beta=45^{\circ}$)의 경우 16% 증가됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 취급한 계산모델 및 계산조건 하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 조류와 파랑 중에 있는 TLP를 탄성체로 취급한 동적구조응답해석법을 개발하였다.

(2) 구조내력은 조류의 유무와 입사각의 변화에 따라 많은 영향을 받지만, 파의 입사각이 90°인 경우에는 조류의 영향이 거의 없었다.

(3) 파주기가 장주기로 갈수록 조류의 영향이 거의 없었다.

(4) deck girder의 전단력은 조류 영향으로 $\beta=120^{\circ}$에서 16% 증가했다.

(5) 조류 영향으로 수직전단력은 $\beta=30^{\circ}$와 $\beta=150^{\circ}$에서 40%, 수직굽힘모멘트는 선미사파($\beta=45^{\circ}$)에서 16% 증가했다.

사 사

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-118).

참고 문헌

1. 정하찬, 임성우, 김용환, 2007, “석유생산 해양구조물의 수요 전망 Ⅱ: 종류별 분석 및 국내 조선업계의 장단점 분석”, 대한조선학회지, 제 43권, 제 2호, pp 62-68.
2. Teigen, P. and Haver, S, 1998, "The Heidrun TLP : measured versus predicted response", Applied Ocean Research 20, pp. 27-35.
3. Zou, J, 2003, "TLP Hull/Tendon/Riser Coupled Dynamic Analysis in Deepwater", Proc. of 13th IOPEC, pp. 160-166.
4. 강대훈, 노준범, 최항순, 신현수, 2004, “Mini TLP의 규칙파 중 운동해석” SNAK, 22-23, April, pp. 119-123.
5 구자삼, 김진하, 이창호, 1995, “인장계류식 해양구조물(TLP)의 동적응답해석(Ⅰ)”, 한국해양공학회지, 제 9권, 제 1호, pp. 161-172.
6 구자삼, 박찬후, 이창호, 1996, “인장계류식 해양구조물(TLP)의 동적응답해석(Ⅱ)”, 한국해양공학회지, 제 10권, 제 1호, pp. 25-35.
7 Kim, C. H. and 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.
8 이창호, 2006, “ISSC-TLP의 운동응답 및 변동장력에 미치는 다방향 불규칙파의 영향”, 한국해양공학회지, 제 20권 4호, pp. 70-75.
9 이승철, 박찬홍, 배성용, 구자삼, 2011, “조류와 파랑 중의 인장계류식 해양구조물의 거동해석”, 한국동력기계공회지, 제 15권 1호, pp. 64-71.
10 Yoshida, K. and 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.