

# 다방향 불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 구조응답 해석

이수룡\* · 서규열\*\* · † 이창호\*\*\*

\*, \*\*, \*\*\* 동명대학교 조선공학과

## Structural Response Analysis of a Tension Leg Platform in Multi-directional Irregular Waves

Soo-Lyong Lee\* · Kyu-Youl Suh\*\* · † Chang-Ho Lee\*\*\*

\*, \*\*, \*\*\* Dept. of Naval Architecture Tongmyong University, Pusan, Korea

**요약** : 다방향 불규칙파 중에서의 인장계류식 해양구조물(TLP)의 구조응답 해석을 수행함으로써 다방향 불규칙파가 구조응답에 미치는 영향을 평가하고 있다. 인장계류식 해양구조물에 작용하는 파강제력과 동유체력은 3차원 특이점분포법을 사용하여 각각의 외각요소에 대해 평가하였다. 3차원 골조요소로 모델링하여 유한요소법에 의해 구조응답을 평가하였으며, 인장계류식 해양구조물의 각 외각요소간의 유체역학적 상호간섭을 고려하여 구조응답을 해석하였다. 구조응답의 주파수 응답함수와 다방향파의 스펙트럼을 이용하여 다방향 불규칙파에 대한 해양구조물의 구조응답 스펙트럼을 구하여 다방향 불규칙파가 인장계류식 해양구조물의 구조응답에 미치는 영향을 평가하였다.

**핵심용어** : 인장계류식 해양구조물, 3차원 특이점분포법, 유체역학적 상호간섭, 구조감쇠, 구조응답 해석, 다방향 불규칙파

**Abstract** : A numerical procedure is described for estimating the effects of the multi-directional irregular waves on the structural responses of the Tension Leg Platform (TLP). The numerical approach is based on a three dimensional source distribution method for hydrodynamic forces, a three dimensional frame analysis method for structural responses, 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 spectral description used in spectral analysis of directional waves for the linear system of a TLP in the frequency domain is sufficient to completely define the structural responses. This is due to both the wave inputs and responses are stationary Gaussian random process of which the statistical properties in the amplitude domain are well known. The numerical results for the linear motion responses and tension variations in regular waves are compared with the experimental and numerical ones, which are obtained in Yoshida et al.(1983). The results of comparison confirmed the validity of the proposed approach.

**Key words** : Tension leg platform, Three dimensional source distribution method, Hydrodynamic interaction, Structural damping, Structural response analysis, Multi-directional irregular waves

### 1. 서론

해양에 관련된 공학 기술은 해양 심해저의 석유와 천연가스의 개발과 더불어 급속히 발전하였으며, 21세기의 해양개발은 수심 500m이상의 대수심역에서의 해양공간이용 및 해저 자원과 에너지의 개발을 중심으로 이루어질 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 ; Zou 2003), 국내에서도 한국해양연구원에서 해양공학수조를 활용하여 TLP의 운동에 대한 모형 시험과 수치계산 결과의 해석을 수행하였다(김 등 2000).

Yoshida et al.(1983)은 반잠수식 해양구조물, TLP의 탄성응답 해석법에 의한 전체 구조응답 해석법을 개발하였다. 그러나 이들의 탄성응답 해석법은 세장체 가정에 근거를 두는 유체력의 근사평가 및 구성부재간의 유체역학적인 상호간섭을 무시 하는 것에 의해 성립되고 있다. 그래서 구자삼 등(1996)은 3차원 특이점분포법과 기존의 탄성응답 해석법을 결합하는 것에 의해 TLP 전체구조를 다수의 외각요소로 분할하여 외각요소의 중앙점을 절점으로 하고, 이 절점들을 탄성 보요소로 연결하여 유한요소법에 의해 운동방정식을 정식화함으로써 유체력의 정밀 평가 및 구성 부재간의 유체역학적 상호간섭을 고려할 수 있는 규칙파중에서의 TLP의 탄성응답 해석법을 개발하였다. 또한, Jo et al.(1992), Sand et al.(1987)은 이론 및 실험을 통하여 선형 중첩에 의해 다방향파(단파정파)중의 해

\* 정회원, lsyoung@tu.ac.kr 051)620-3404  
\*\* 정회원, kyuyou@tu.ac.kr, 051)620-3401  
† 교신저자 : 종신회원, chlee829@tu.ac.kr 010)7590-0825

양구조물에 대한 선형응답을 정도 좋게 추정할 수 있다는 것을 실증하였다. 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 운동응답과 변동장력 특성을 평가하였다. 그러나 연구의 대부분이 해양구조물의 운동응답에 국한되고 있는 실정으로 해양구조물의 구조설계적인 관점에서 보면 구조응답에 대한 다방향파의 영향도 충분히 검토되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 TLP의 유체역학적 상호간섭을 고려한 구조응답을 해석하고, TLP의 구조응답에 미치는 다방향파의 영향을 평가하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 기본 가정

본 논문에서 3차원 특이점분포법에 의해 파강제력과 동유체력을 계산하고, 탄성 응답 해석법에 의해 TLP의 구조응답을 해석하기 위한 기본가정은 다음과 같다.

- (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 계류력으로 상부구조에 작용한다.
- (6) 모든 계류부재는 이완상태가 되지 않도록 충분한 초기장력을 갖는다.

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  $\xi_w$ 와 입사파의 속도 포텐셜  $\Phi_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

여기서,  $\zeta$ 는 파의 진폭,  $k$ 는 파수(wave number),  $\chi$ 는 입사파의 각으로 파의 진행방향과  $X$ 축 사이의 각을 나타내며,  $\omega$ 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,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다.

#### 1) 파강제력(Wave exciting forces)

$j$  번째 외각요소에 작용하는 공간고정 전체좌표계에 대한 입사파에 의한 파강제력과 산란파에 의한 파강제력은 각각 다음과 같다.

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

$$\begin{Bmatrix} F_D^j \\ M_D^j \end{Bmatrix} = \text{Re} \{ \{ F_{Dk}^j \} e^{-i\omega t} \} \quad (8)$$

여기서,  $\{ F_{Fk}^j \}$ 는 평면 입사파에 의한 파강제력의 복소진폭 벡터이며,  $\{ F_{Dk}^j \}$ 는 산란파에 의한 산란 파강제력의 복소진폭 벡터이다.

#### 2) 방사파 동유체력(Radiation wave forces)

$j$  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  $\{ F_N^j \}, \{ M_N^j \}$ 라 하고, 가속도 및 각가속도에 비례하는 힘과 모멘트를 각각  $\{ F_A^j \}, \{ M_A^j \}$ 라 하면, 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{Bmatrix} \{F_N^j\} \\ \{M_N^j\} \end{Bmatrix} = -[v_{ki}^j] \begin{Bmatrix} \{U_i^j\} \\ \{U_r^j\} \end{Bmatrix}, (k, i=1 \sim 6) \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} \{F_A^j\} \\ \{M_A^j\} \end{Bmatrix} = -[\mu_{ki}^j] \begin{Bmatrix} \{U_t^j\} \\ \{U_r^j\} \end{Bmatrix}, (k, i=1 \sim 6) \quad (10)$$

여기서,  $[\mu_{ki}^j], [v_{ki}^j]$ 는 공간고정 전체좌표계에 대한  $j$ 번째 외각요소의 부가질량 행렬, 조과감쇠 행렬이다.

### 2.3 계류력

계류력은 초기 장력  $T_p^j$ 와 계류 부재의 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.

$$\{f_T^j\} = \left\{ 0 \quad 0 \quad -T_p^j - \frac{EA_t^j}{L^j} w^j \right\}^T \quad (11)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \{F_T^j\} \\ -[C_s^j]^T \end{Bmatrix} = [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_p^j \end{Bmatrix} - [C_s^j]^T \begin{bmatrix} T_p^j/L^j & 0 & 0 \\ 0 & T_p^j/L^j & 0 \\ 0 & 0 & EA_t^j/L^j \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_i^j\} \quad (12)$$

여기서,  $[C_s^j]$ 는 좌표변환 행렬이며, 계류점은 핀 결함을 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 강성 방정식으로 변환된다.

$$\begin{Bmatrix} \{F_B^j\} \\ \{M_B^j\} \\ \{F_B^k\} \\ \{M_B^k\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C^l]^T [K_{jj}^l] [C^l] & [C^l]^T [K_{jk}^l] [C^l] \\ [C^l]^T [K_{kj}^l] [C^l] & [C^l]^T [K_{kk}^l] [C^l] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_j^j\} \\ \{U_r^j\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_r^k\} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

여기서, 좌표 변환 행렬  $[C^l]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$[C^l] = \begin{bmatrix} [C_s^l] & [0] \\ [0] & [C_s^l] \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,  $[C_s^l]$ 는  $[C_s^j]$ 와 같이 전체 좌표계를 국소 좌표계로 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.

$$[M] \{U_w''\} + ([N_w] + [N]) \{U_w'\} + ([K_w] + [K]) \{U_w\} = \{F_w'\} \quad (15)$$

여기서,

$[M]$  : 부가질량을 포함하는 질량 행렬

$[N_w]$  : 조과감쇠 행렬

$[N]$  : 구조감쇠 행렬

$[K_w]$  : 중력, 정수압 및 계류력에 의한 복원력 행렬

$[K]$  : 구조강성 행렬

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

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

: 구조전체의 변위 벡터

본 논문에서 구조감쇠 행렬은 다음과 같이 Rayleigh의 감쇠를 이용하기로 한다.

$$[N] = a[M] + b([K_w] + [K]) \quad (16)$$

여기서,  $a, b$ 는 비례상수이다.

### 2.6 구조내력 응답

$j, k$ 번째 2개의 절점을 연결하는  $l$ 번째의 탄성 보요소에 대하여, 양단의 변위를 각각  $\cos$ 항과  $\sin$ 항으로 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\begin{Bmatrix} \{U_t^j\} \\ \{U_r^j\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_r^k\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{U_{tc}^j\} \\ \{U_{rc}^j\} \\ \{U_{tc}^k\} \\ \{U_{rc}^k\} \end{Bmatrix} \cos \omega t + \begin{Bmatrix} \{U_{ts}^j\} \\ \{U_{rs}^j\} \\ \{U_{ts}^k\} \\ \{U_{rs}^k\} \end{Bmatrix} \sin \omega t \quad (17)$$

보요소의 국소 좌표계로 평가한 내력과 모멘트는 식(17)에

의해 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{Bmatrix} \{f_B^*{}^j\} \\ \{m_B^*{}^j\} \\ \{f_B^*{}^k\} \\ \{m_B^*{}^k\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [K'_{jj}][C'] & [K'_{jk}][C'] \\ [K'_{kj}][C'] & [K'_{kk}][C'] \end{bmatrix} \cdot \left( \begin{Bmatrix} \{U'_{jc}\} \\ \{U'_{rc}\} \\ \{U^k_{jc}\} \\ \{U^k_{rc}\} \end{Bmatrix} \cos \omega t + \begin{Bmatrix} \{U^j_{js}\} \\ \{U^j_{rs}\} \\ \{U^k_{js}\} \\ \{U^k_{rs}\} \end{Bmatrix} \sin \omega t \right) \quad (18)$$

### 2.7 다방향 스펙트럼

다방향파의 스펙트럼  $S_{\zeta}(\omega, \chi)$  는 다음과 같이 방향분포함수(Directional distribution function)  $D(\omega, \chi)$  와 일차원 파 스펙트럼  $S_{\zeta}(\omega)$  를 이용하여 표현할 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega, \chi) = D(\omega, \chi) S_{\zeta}(\omega) \quad (19)$$

방향분포함수의 일반적인 모델은 주파수에 대해 독립인 코사인함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$D(\chi) = \frac{\Gamma(S+1)}{\sqrt{\pi} \Gamma(S+\frac{1}{2})} \cos^{2S}(\chi - \theta_0) \quad (20)$$

여기서,  $\chi = \theta + \theta_0$  이며,  $\theta_0$  는 입사파의 주방향,  $\theta$  는 주방향과 성분파의 진행방향이 이루는 각을 표시하고,  $S$  는 에너지의 방향에 따른 분포를 나타내는 파라메타이고,  $S \rightarrow \infty$  일때, 한방향파(One-directional waves) 즉, 장파정파가 된다. 그리고 방향분포 파라메타  $S$  를 변화시켜도 에너지가 일정하게 되도록 다음과 같이 정규화 시킬 필요가 있다.

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta) d\theta = 1 \quad (21)$$

본 연구에서 사용된 일차원 파 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼으로 다음과 같이 표현된다.

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3}^2 T_1 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega\right)^{-5} \exp[-0.44 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega\right)^{-4}] \quad (22)$$

여기서,  $\omega$  는 파의 원주파수,  $H_{1/3}$  는 유의파고,  $T_1$  은 평균주기이다.

선형 입출력계에 있어서, 입력에 대한 출력은 단위 충격 응답함수(Unit impulse response function)와 입력의 시간 이력과의 컨볼루션 적분으로 표현되어진다. 여기서는 입력으로서 방향파의 수면 상승량  $\zeta(t, x)$  를 취했을 때 출력을 TLP의

구조 응답  $x(t, x)$  로 표시한다. 단  $t$  는 시간,  $x$  는 위치벡터를 나타낸다. 수면 상승량 및 응답의 자기상관함수는 다음과 같이 표기된다.

$$R_{\zeta\zeta}(\tau, \delta) = E[\zeta(t, x) \cdot \zeta(t+\tau, x+\delta)] \quad (23)$$

$$R_{xx}(\tau, \delta) = E[x(t, x) \cdot x(t+\tau, x+\delta)] \quad (24)$$

이 때,  $\tau$  는 시간 간격이고,  $\delta$  는 위치벡터의 차를 나타낸다. 응답의 자기 상관함수는 단위 충격함수를 이용하여 표현하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_{xx}(\tau, \delta) &= \int \int \int \int \int \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &\cdot E[\zeta(t-\tau_1, x-\delta_1) \zeta(t+\tau-\tau_2, x+\delta-\delta_2)] d\tau_1 d\delta_1 d\tau_2 d\delta_2 \\ &= \int \int \int \int \int \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &\cdot R_{\zeta\zeta}(\tau+\tau_1-\tau_2, \delta+\delta_1-\delta_2) d\tau_2 d\delta_2 d\tau_1 d\delta_1 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, Wiener-Khintchine 공식

$$R_{xx}(\tau, \delta) = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega, K) e^{i(K\delta - \omega\tau)} dK d\omega \quad (26)$$

을 식(25)에 대입하면 다음의 응답 스펙트럼이 구해진다.

$$S_{xx}(\omega, K) = |H_{x\zeta}(\omega, K)|^2 S_{\zeta\zeta}(\omega, K) \quad (27)$$

주방향  $\theta_0$  인 다방향파에 대한 주파수 응답 스펙트럼  $S_{xx}(\omega, \theta_0)$  는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{xx}(\omega, \theta_0) = \int_{-\pi}^{\pi} |H_{x\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)|^2 S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta) d\theta \quad (28)$$

단,  $H_{x\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)$  는 2.6절의 구조 내력응답에서 구해지는 단위진폭의 규칙파에 대한 TLP의 주파수영역 구조응답 함수이고,  $S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)$  는 다방향파 스펙트럼을 나타내고 있다.

이와 같은 방법으로 구조응답 스펙트럼이 구해지면 다방향 불규칙파중에서의 구조응답 진폭의 유의치(Significant value)는 다음과 같이 구해진다.

$$X_{1/3}(\theta_0) = 2.0 \sqrt{m_0(\theta_0)} \quad (29)$$

$$m_0(\theta_0) = \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \theta_0) d\omega \quad (30)$$

여기서  $m_0(\theta_0)$  는 스펙트럼의 0차 모멘트로서 분산을 나타낸다.

### 3. 수치계산 및 고찰

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

Fig. 3, Fig. 4는 각각 TLP 구조물의 횡방향 하부 구조요소(절점번호 55와 57사이의 보요소)와 횡방향 상부 구조요소(절점번호 63과 65사이의 보요소)에 작용하는 축력 응답을 나타내고 있다. 계산결과는 수심 5 m, 파 입사각이 90에 대한 것이며,  $\rho g \zeta_a \Delta^{2/3}$ 로서 무차원화 시킨 것이다. 횡방향 하부 구조요소에 작용하는 축력은 파주기 1sec 부근에서 실험치보다 다소 크게 평가하고 있지만, 그 이외의 영역에서는 실험치와 잘 일치하고 있다.

Fig. 5, Fig. 6은 각각 TLP 구조물의 횡방향 하부 구조요소와 상부 구조요소에 작용하는 전단력 응답을 나타내고 있다.

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	34.5 cm
Transverse radius of gyration	29.1 cm
Weight	27.7 kgf
Pretension	11.7 kgf
Displacement	39.4 kgf

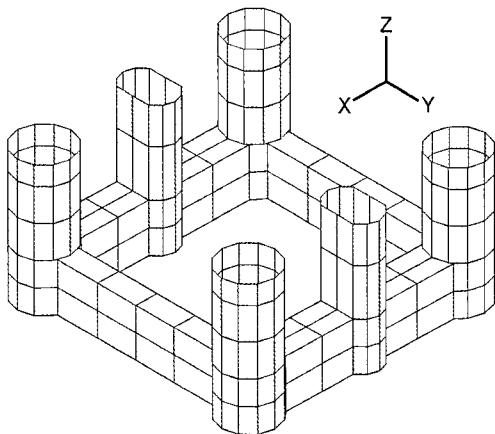


Fig. 1 Submerged surface of the Tension Leg Platform represented by 544 panels

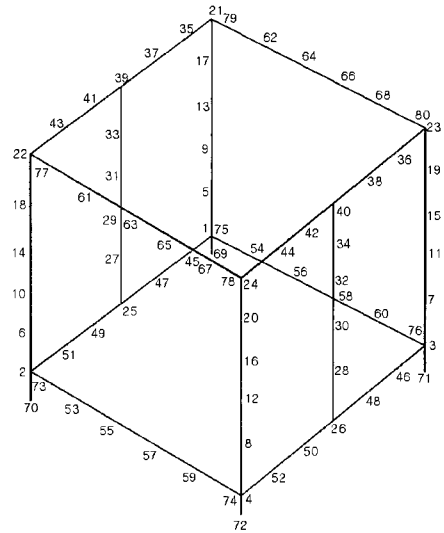


Fig. 2 Node Number of 3-Dimensional Frame Structure for the Tension Leg Platform

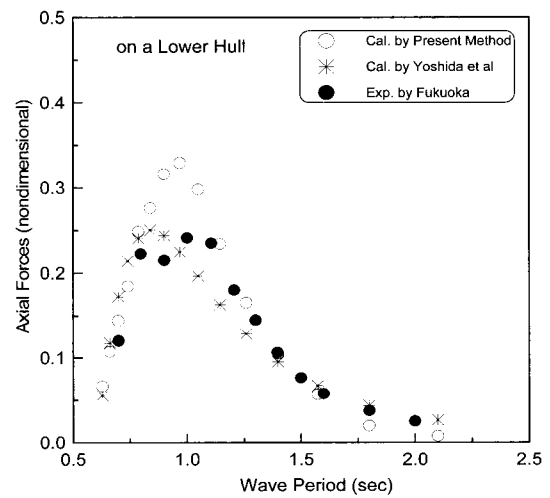


Fig. 3 Axial Forces on transverse lower hull

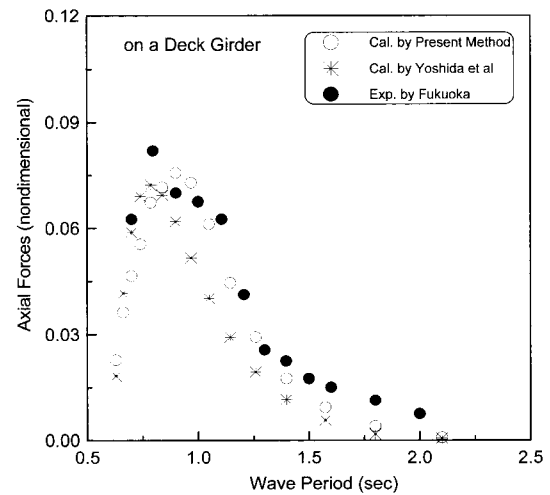


Fig. 4 Axial Forces on transverse deck girder

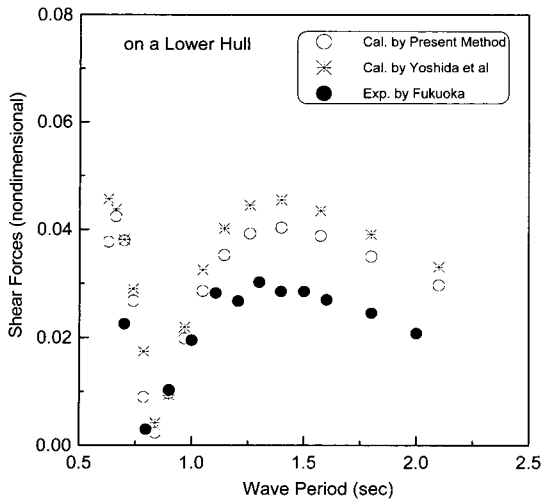


Fig. 5 Shear forces on transverse lower hull

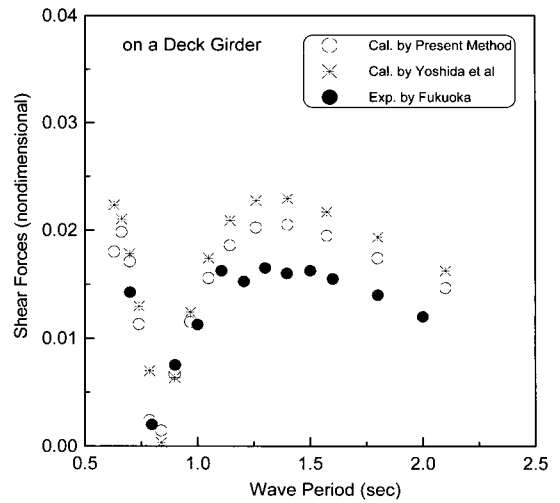


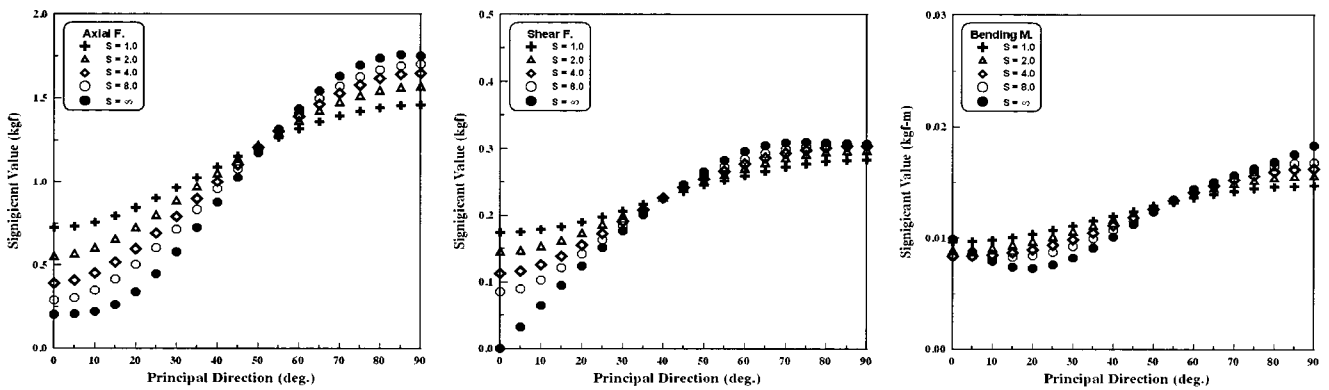
Fig. 6 Shear forces on transverse deck girder

파주기 1 sec보다 큰 장주기 영역에서 실험치와 정량적인 차이를 보이고 있지만, 그 외 주기에서는 Yoshida 등의 계산치보다 실험치에 더욱 근접해 있음을 알 수 있으며, 본 탄성응답 해석법이 타당함을 보여준다.

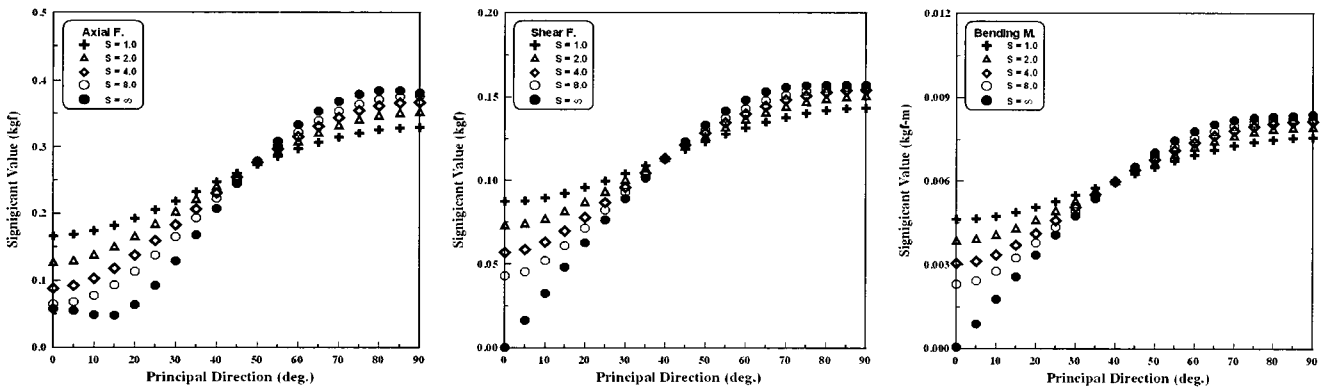
다방향 불규칙파에 대하여 본 계산에 사용된 일차원 스펙트럼은 유의파고 16cm, 평균주기 1.1sec인 ISSC 스펙트럼이고, 수심은 5m, 방향분포 파라메타 S는 1에서 무한대까지 변화시

키면서 계산을 수행하였으며, 방향분포 파라메타 S가 무한대라고 하는 것은 한방향파를 나타내고 있고 S가 작아짐에 따라 다방향으로 에너지가 분산하고 있는 것을 나타낸다. 그리고 방향분포 파라메타가 변하더라도 모든 파의 에너지는 일치하도록 하였다.

Fig. 7은 횡방향 하부 구조요소와 상부 구조요소에 대한 다방향 불규칙파중의 축력, 수직 전단력, 수직 굽힘모멘트의



(a) Axial forces, shear forces and bending moments on transverse deck girder(element between node no. 63 and 65)



(b) Axial forces, shear forces and bending moments on transverse lower hull(element between node no. 55 and 57)

Fig. 7 Significant values of structural responses for various principal directions and parameters of directional function

내력응답의 유의치를 나타내고 있다. 주방향 180도의 한방향파에 대한 내력응답을 보면 구성부재간의 상호간섭을 무시하면 0으로 될 것이나 본 구조응답 해석법은 구성부재간의 상호간섭효과를 고려하고 있으므로 응답이 다소 나타나고 있음을 알 수 있다. 단, 전단력 응답에 대해서는 구조물의 대칭성에 의해 동 위상의 힘이 작용하므로 0이 된다.

파의 주방향 및 주방향을 중심으로 양쪽으로 5척 취한 각각 18개의 성분파의 방향을 합쳐 37개의 다방향파로 계산한 결과이다. 횡축은 파의 주방향을 0에서 5척 변화시키면서 90까지 나타내고 있고 종축은 유의치를 취하여 통계치의 변화를 나타내고 있다. 방향분포 파라메타의 변화에 따라 각 구조 응답에서 다방향파의 영향이 나타나고 있고, 한방향파와 비교해 보면 한방향파의 응답이 크게 나타나는 주방향에 대해서는 작게 나타나고, 한방향파의 응답이 없거나 작게 나타나는 주방향에 대해서는 크게 나타남을 알 수 있으며, 주방향이 45부근에서는 그다지 응답의 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 즉, 다방향파의 영향을 요약하면 한방향파  $S \rightarrow \infty$  의 응답과  $S=1$  의 응답이 일치하는 주방향을 기점으로 응답의 역전현상이 나타나고 한방향파의 응답이 큰 영역은 작게 나타나고 작은 영역은 크게 나타남을 알 수 있다. 본 연구의 선형응답의 범위내에서 다방향파의 영향은 응답의 범위를 평균화시키는 방향으로 작용하므로 한방향파의 큰 응답을 감소시키고 있음을 알 수 있다.

다방향파의 영향으로 인한 구조응답의 감소효과 영향을 구체적으로 평가하기 위해 한방향파와  $S=2$ 인 경우의 최대응답을 비교하면 축력, 전단력, 굽힘 모멘트는 다방향파의 영향으로 하부 구조요소는 각각 8.0%, 4.7%, 5.5% 정도 감소하고, 상부구조요소는 각각 10.8%, 3.7%, 15% 감소하고 있다. 구조설계에 영향을 미치는 주 요소는 축력 및 굽힘모멘트에 의한 응력이고 횡방향 구성 부재에서는 응력이 10% 정도 감소되는 효과를 가져오므로 구조부재의 설계에 있어서도 다방향파는 좋은 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 인장계류식 해양구조물의 모형에 대한 구조응답에 미치는 다방향파 불규칙파의 영향을 평가하였으며, 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- (1) 한방향파에 대한 구조응답이 큰 경우(주방향이 90°인 경우)에 대해서는 다방향파의 영향으로 응답이 감소하고 있으며, 한방향파에 대한 구조응답이 작은 경우(주방향이 0°인 경우)에 대해서는 다방향파의 영향으로 구조응답이 크게 나타남을 알 수 있으며, 다방향 불규칙파의 영향으로 구조응답의 범위가 작아지면서 한방향파에 대한 큰 응답을 감소시킨다.

- (2) 인장계류식 해양구조물의 구조응답에 대해서는 다방향파의 영향으로 최대 응답이 10%정도 감소하므로 구조응답의 크기가 감소한다는 결과에 따라 구조 부재의 설계에 있어서 다방향파의 영향을 고려하면 보다 합리적인 결과에 대한 설계를 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 구자삼, 박찬후, 이창호 (1996), "인장계류식 해양구조물의 동적응답해석(II)", 한국해양공학회지, 제10권 1호, pp.25-35.
- [2] 김진하, 홍사영, 최윤락, 홍섭, 김현조 (2000), "심해 인장각 플랫폼의 모형시험 연구(II) -모형시험 및 해석-", 한국해양공학회 춘계학술대회논문집, pp.69-74.
- [3] 이창호(2006), "ISSC-TLP의 운동응답 및 변동장력에 미치는 다방향 불규칙파의 영향", 한국해양공학회지, 제20권 4호, pp.70-75.
- [4] Jo, H. J., Maeda, H., and Miyajima, S. (1992), "Effects of Directional Waves on the Behaviour of Semisubmersible Rigs", PRADS, pp.116-129.
- [5] Mercier, J. A., Birell, N. D., Chivvis, J. C., and Hunter, A. F. (1991), "Tension Leg Platforms - Progress and Prospects, SNAME Transaction", Vol. 99 pp.249-279.
- [6] Sand, S. E., Romaring, J., and Kirkegaard, J. (1987), "Influence of Wave Directionality on Response of Semisubmersible", OMAE, pp.239-245.
- [7] Teigen, P. and Haver, S.(1998), "The Heidrun TLP : measured versus predicted response", Applied Ocean Research 20, pp.27-35.
- [8] Yoshida, K., Ozaki, M., and Oka, N. (1983), "Structural Response Characteristics of Taut Moored Platforms", J. of SNAJ, Vol.152, pp.329-335.
- [9] Zou, J. (2003), "TLP Hull/Tendon/Riser Coupled Dynamic Analysis in Deepwater", Proc. of 13th IOPEC, pp.160-166.

원고접수일 : 2007년 8월 6일

원고채택일 : 2007년 10월 26일