

# 급힘강성 변화에 따른 인장계류식 해양구조물의 동적응답 특성

이창호 · 최찬문 · 홍봉기

부산수산대학교

(1996년 3월 20일 접수)

## Dynamic Response Characteristics of Tension Leg Platforms with Flexibility Variations in Waves

Chang - Ho Lee, Chan - Moon Choi and Bong - Ki Hong

National Fisheries University of Pusan

(Received March 20, 1996)

### Abstract

The dynamic response characteristics with flexibility variations are examined for presenting the basic data for design of Tension Leg Platforms(TLPs) in waves.

A numerical approach is based on the dynamic response analysis theory, in which the super-structure of TLPs is assumed flexible instead of the rigid body assumption used in two-step analysis method. The hydrodynamic interactions among TLP members, such as columns and pontoons are not included in the motion and structural analyses. The equations of motion of a whole structure are formulated using element-fixed coordinate systems which have the origin at the node of the each hull element.

### 1. 서 론

최근 육상자원의 고갈과 공간부족으로 대수심역 해양공간이용 및 해저자원 개발의 필요성이 점점 증가되고 있는 추세이다. 최근의 해양개발은 심해로 그 관심을 돌리고 있으며 21세기의 새로운 해저자원 개발은 대부분 500m 이상의 심해에서 이루어질 것으로 예상되며, 인장계류식 해양구조물(TLP)은 이러한 심해의 석유자원의 시추 및 생산을 위한 대표적인 구조물이다<sup>1)</sup>.

파랑중의 TLP의 전체구조응답 평가법으로서 통상의 반잠수식 해양구조물의 구조응답 해석법

인 소위 2단계 해석법은 구조물의 탄성응답에 대한 영향을 무시하고 있다. 그래서 초기단계에서 전체 구조를 탄성체로서 동적으로 취급하는 소위 탄성응답 해석법이 필요하게 된다. 대표적으로 Yoshida 등<sup>2),3)</sup>은 반잠수식 해양구조물 및 TLP의 탄성응답 해석법에 의한 전체 구조응답 해석법을 개발하였다. 이 해석법은 구조물을 다수의 외각요소(hull element)로 분할하고 개개의 외각요소는 강체로 가정하여 각 외각요소의 중앙점을 절점으로 하고 이들 절점을 탄성 보요소로 연결하고 유한요소법에 의해 정식화를 행하여 동적응답을 구하는 방법이다. 또, 튕등은 최근 3차원 특이점 분포

법<sup>4-6)</sup>과 기존의 탄성응답 해석법<sup>9)</sup>을 결합하는 것에 의해 유체력의 정밀평가 및 구성부재간의 유체역학적인 상호간섭을 고려할 수 있는 규칙파중에서의 TLP의 탄성응답 해석법을 개발하였다<sup>7-9)</sup>.

경제적인 TLP의 설계를 위해서는 동일 탑재능력에 대하여 중량의 감소화가 요구되며, 구조물의 강성이 감소하게 된다. 본 논문에서는 이러한 점을 감안하여 구조물의 강성변화에 따른 TLP의 동적응답 특성을 평가하고자 한다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 기본 가정 및 좌표계

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

- (1) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.
- (2) 입사파는 미소진폭의 규칙파로 하고, 구성부재의 단면에 비해 파장은 충분히 긴 것으로 한다.
- (3) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다.
- (4) 구성부재간의 유체 역학적 상호간섭은 무시한다.
- (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.

전체구조를 Fig. 1과 같이 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 절점과 절점을 연결하는 보요소(beam element)

운동방정식의 정식화에 있어서는 Fig. 2와 같이 5종류의 좌표계를 사용하는데, 공간고정 기준좌표계  $O-XYZ$ 는 원점  $O$ 가 정수면 아래 거리  $d$ 만큼 떨어진 곳에 위치하며,  $XY$ -평면은 정수면에 평

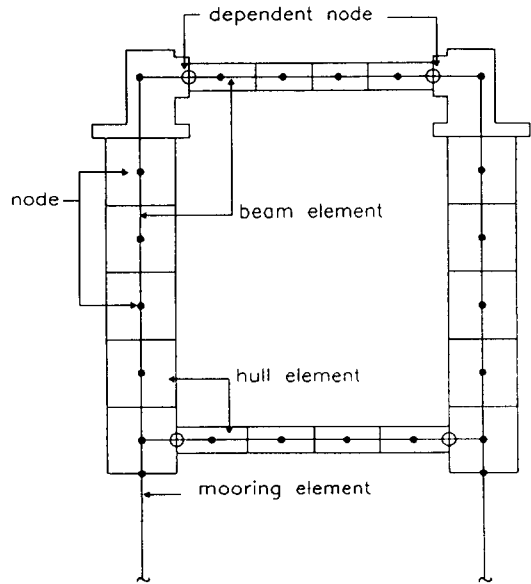


Fig. 1 Element subdivision of the tension leg platform

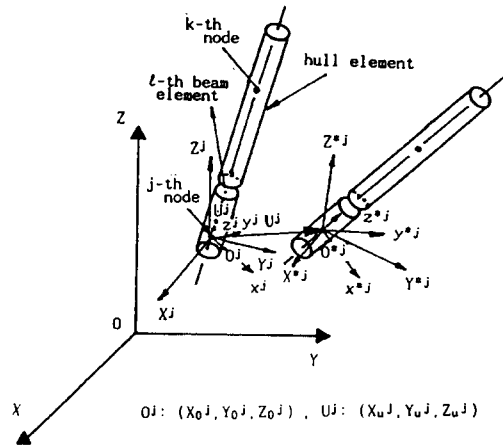


Fig. 2 Coordinate systems

행하고,  $Z$ 축은 상방향을 양으로 한다.

나머지 4개의 좌표계는, 정적 평형 상태에서  $j$ 번째 부재 절점에 원점을 가지고,  $O-XYZ$ 좌표계에 평행한 공간고정 전체좌표계  $O'-X'Y'Z'$ , 부재의 축방향으로  $z'$ 를 가지고,  $x'z'$ -평면이 연직으로 되는 공간고정 국소좌표계  $o'-x'y'z'$ , 정적 평형상태에서는  $O'-X'Y'Z'$ 와  $o'-x'y'z'$ 에 일치하고, 부재의

변위에 따라 이동하는 물체고정 전체좌표계  $O^{*j} - X^{*j}Y^{*j}Z^{*j}$ 와 물체고정 국소좌표계  $o^{*j} - x^{*j}y^{*j}z^{*j}$ 이다. 모든 좌표계는 右手系를 따르며, 변위를 다음과 같이 정의한다.

$O^j - XYZ$ 좌표계와  $o^j - x'y'z'$ 좌표계로 표현되는 부재절점의 병진 변위벡터는  $\{U_i^j\} = \{U^j \ V^j \ W^j\}^T$ ,  $\{u_i^j\} = \{u^j \ v^j \ w^j\}^T$ 이고, 회전 변위벡터는  $\{U_r^j\} = \{\Phi^j \ \Theta^j \ \Psi^j\}^T$ ,  $\{u_r^j\} = \{\phi^j \ \theta^j \ \psi^j\}^T$ 로 나타낸다.

$O - XYZ$ 좌표계,  $O^j - XYZ^j$ 좌표계,  $o^j - x'y'z'^j$ 좌표계로 표현되는 임의점의 위치벡터를 각각  $\{X\}$ ,  $\{X^j\}$ ,  $\{x^j\}$ 라 하면, 다음의 관계가 성립한다.

$$\{X^j\} = \{X\} - \{X_0^j\} \quad (1)$$

$$\{x^j\} = [C_s^j] \{X^j\} \quad (2)$$

여기서,  $\{X_0^j\}$ 는  $O - XYZ$ 좌표계로 표현되는  $O^j$ 의 위치벡터이고,  $[C_s^j]$ 는  $O^j - XYZ^j$ 좌표계와  $o^j - x'y'z'^j$ 좌표계 사이의 변환행렬로서 다음과 같이 표현된다.

$$[C_s^j] = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_y & b_y & c_y \\ a_z & b_z & c_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$x'z'$ 평면은  $X'Y'$ 평면에 대해 연직이 되도록  $x'$ 축을 취하되,  $x'$ 축이 아래로 향하거나 수평으로 향하는 것을 양의 방향으로 한다. 공간고정 전체좌표계와 물체고정 전체좌표계의 위치벡터는 변위를 이용한 변환행렬에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{X^{*j}\} = [A_s^j] (\{X^j\} - \{U_i^j\}) \quad (4)$$

여기서,

$$[A_s^j] = \begin{bmatrix} 1 & \psi^j - \theta^j \\ -\psi^j & 1 & \phi^j \\ \theta^j - \phi^j & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이다. 물체고정 좌표계에 있어서도 전체 좌표계와 국소좌표계로 표현되는 위치벡터의 관계는 동일하다. 이와같은 좌표변환으로 얻어지는 변환행렬을 이용하면 부재절점의 변위벡터, 부재절점에 작용하는 힘과 모멘트의 벡터는 변환식을 이용하여

여러 좌표계로 표현된 힘과 모멘트를 최종적으로  $O^{*j} - X^{*j}Y^{*j}Z^{*j}$ 좌표계로 나타낼 수 있고, 각 절점에 대한 평형방정식으로부터 운동방정식을 유도한다.

## 2.2 외각요소에 작용하는 힘과 모멘트

외각요소에 작용하는 외력은 (1) 중력 (2) 관성력 (3) 정적 유체압력에 의한 부력 (4) Froude - Krylov force (5) radiation force (6) diffraction force와 같이 6가지로 분류되며, 이 힘들은 각각 그것에 편리한 좌표계에서 산정된 후,  $O^{*j} - X^{*j}Y^{*j}Z^{*j}$ 좌표계로 표현하기 위하여 변환된다.

### 2.2.1 중력

$j$ 번째 외각요소의 중력 벡터는  $O^{*j} - X^{*j}Y^{*j}Z^{*j}$ 좌표계로 다음과 같이 표현된다.

$$\{F_G^{*j}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -M^j g \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -M^j g & 0 \\ M^j g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{U_r^j\} \quad (6)$$

여기서,  $\{F_G^{*j}\}$ 는  $O^{*j} - X^{*j}Y^{*j}Z^{*j}$ 좌표계에서의 중력 벡터이고,  $M^j$ 는 외각요소  $j$ 의 질량이다. 중력에 기인하는 절점에 대한 모멘트  $\{M_G^{*j}\}$ 는 외각요소의 절점과 重心사이의 거리  $l_z^j$ 를 사용함으로써 다음과 같이 표현된다.

$$\{M_G^{*j}\} = M^j g l_z^j \begin{Bmatrix} -b_z \\ a_z \\ 0 \end{Bmatrix} + M^j g l_z^j \begin{bmatrix} c_z & 0 & 0 \\ 0 & c_z & 0 \\ -a_z & -b_z & 0 \end{bmatrix} \{U_r^j\} \quad (7)$$

여기서,  $a_z, b_z, c_z$ 는  $[C_s^j]$ 의 성분으로, 요소의 중심축의 방향여현을 나타낸다.

### 2.2.2 관성력

$O^{*j} - X^{*j}Y^{*j}Z^{*j}$ 좌표계에서의 관성력과 모멘트는  $[C_s^j], [A_s^j]$ 를 이용함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\{F_t^{*j}\} = -[C_s^j]^T \begin{bmatrix} M^j & 0 & 0 \\ 0 & M^j & 0 \\ 0 & 0 & M^j \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_t^j\}$$

$$-[C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & M^j l_z^j & 0 \\ -M^j l_z^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_r^j\} \quad (8)$$

$$\{M_t^{*j}\} = -[C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & -M^j l_z^j & 0 \\ M^j l_z^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_t^j\}$$

$$-[C_s^j]^T \begin{bmatrix} I_\theta^j + M^j l_z^{j2} & 0 & 0 \\ 0 & I_\theta^j + M^j l_z^{j2} & 0 \\ 0 & 0 & I_v^j \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_r^j\} \quad (9)$$

여기서,  $I_\theta^j, I_d^j, I_v^j$  는 요소의 관성 모멘트이고, 침자  $I$ 는 관성에 기인하는 힘과 모멘트임을 나타내는 것이며,  $\{\ddot{U}_t^j\}$ 와  $\{\ddot{U}_r^j\}$ 는 절점에서의 가속도 및 각가속도 벡터이다.

유체력을 산정하기 위하여 유한수심의 Airy파를 이용하면, 수면상승  $\zeta$ 와 입사파의 속도포텐셜  $\phi_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\zeta = a \cos(k(X \cos \chi + Y \sin \chi) - \omega t) \quad (10)$$

$$\phi_0 = \text{Re}\{\phi_0 e^{-i\omega t}\}, Z \leq d \quad (11)$$

$$\phi_0 = \frac{ga}{i\omega} \frac{\cosh\{k(Z-d+h)\}}{\cosh kh} \cdot \exp\{ik(X \cos \chi + Y \sin \chi)\} \quad (12)$$

여기에서,  $a$ 는 파의 진폭,  $k$ 는 파수(wave number),  $\chi$ 는 입사파의 각으로 파의 진행방향과  $X$ -축 사이의 각을 나타내며,  $\omega$ 는 원주파수,  $t$ 는 시간,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심을 나타내고,  $d$ 는 공간고정 좌표계 ( $O-XYZ$ )의 원점  $O$ 에서부터 정수면까지의 거리를 나타낸다. 식(11)로부터 유체입자의 속도와 가속도가 구해지며, 선형화된 Bernoulli의 이론으로부터 유체압력은 다음과 같이 표현된다.

$$P = P_s + P_v \quad (13)$$

$$P_s = \rho g(d - Z), \quad Z \leq d + \zeta \quad (14)$$

$$P_v = -\rho \frac{\partial \phi_0}{\partial t} \quad (15)$$

여기서,  $P$ 는 유체압력,  $P_s$ 는 정적 유체압력,  $P_v$ 는 동적 유체압력이고,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다.

### 2.2.3 정수압에 따른 부력

정적 유체압력에 기인하는 부력은 식(14)의  $P_s$ 를 요소의 침수표면에 대하여 적분함으로써 산정되며, 만일 요소가 부분적으로 침수되었으면, 적분 구간은 요소와 유체의 수면상승 사이의 상대운동에 의해 시간에 따라 변하게 되나, 여기서는 적분 상한을 평균수면으로 한다.

침수표면에 대하여  $P_s$ 를 Green의 정리에 의해 체적 적분으로 하고, 압력구배를 요소의 중심축상의 값으로 대표시킬 수 있는 것으로 하면, 유체의 정적 압력에 기인하는 힘을  $O^* - X^*Y^*Z^*$ 좌표계에 대하여 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

• 전침수 상태

$$\{F_s^{*j}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho g A^j (l_2^j + l_1^j) \end{Bmatrix}$$

$$-\rho g A^j (l_2^j + l_1^j) [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & c_z & -c_y \\ -c_z & 0 & c_x \\ c_y & -c_x & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \quad (16)$$

• 반침수 상태

$$\{F_s^{*j}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho g A^j \left( \frac{d - Z_0^j}{c_z} + l_1^j \right) \end{Bmatrix}$$

$$-\rho g A^j \left( \frac{d - Z_0^j}{c_z} + l_1^j \right) [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & c_z & -c_y \\ -c_z & 0 & c_x \\ c_y & -c_x & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\}$$

$$-\frac{\rho g A^j}{c_z} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_x^2 & c_x c_y & c_x c_z \\ c_x c_y & c_y^2 & c_y c_z \\ c_x c_z & c_y c_z & c_z^2 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\rho g A^j (d - Z_0^j)}{c_z^2} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} -c_x c_y & c_x^2 & 0 \\ -c_y^2 & c_x c_y & 0 \\ -c_y c_z & c_x c_z & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \\
 & + \rho g A^j a [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_x/c_z \\ c_y/c_z \\ 1 \end{bmatrix} \cos \left\{ \frac{k \mu_z (d - Z_0^j)}{c_z} \right. \\
 & \left. + k \mu_0 - \omega t \right\} \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{여기서, } \mu_z &= a_z \cos \chi + b_z \sin \chi \\
 \mu_0 &= X_0^j \cos \chi + Y_0^j \sin \chi
 \end{aligned}$$

식(16), (17)의 첫째항은 정적평형시의 부력이  
고, 두번째 항은 공간적으로 항상 위쪽으로 향하는  
부력을 물체고정 좌표계로 표현할 때 생기는 회전  
변위에 비례하는 힘이고, 식(17)의 세번째 항과 네  
번째 항은 각각 병진변위와 회전변위에 의해 출수  
가 변화하는 것에 의해 생기는 복원력을 나타내고,  
마지막 항은 수면변동에 따른 변동부력을 나타낸  
다. 또, 이 부력에 기인하는 모멘트는 다음과 같이  
산정된다.

• 전침수 상태

$$\begin{aligned}
 \{M_S^{*j}\} &= \rho g A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} \begin{bmatrix} b_z \\ -a_z \\ 0 \end{bmatrix} \\
 & - \rho g A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_z & 0 & -c_x \\ 0 & c_z & -c_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

• 반침수 상태

$$\begin{aligned}
 \{M_S^{*j}\} &= \rho g A^j \frac{(d - Z_0^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} \begin{bmatrix} b_z \\ -a_z \\ 0 \end{bmatrix} \\
 & - \rho g A^j \frac{(d - Z_0^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \cdot
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} c_z & 0 & -c_x \\ 0 & c_z & -c_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} - \rho g A^j \frac{d - Z_0^j}{c_z^2} \cdot \\
 & [C_s^j]^T \begin{bmatrix} -c_x c_y & -c_y^2 & -c_y c_z \\ c_x^2 & c_x c_y & c_x c_z \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \\
 & - \rho g A^j \frac{(d - Z_0^j)^2}{c_z^3} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_y^2 & -c_x c_y & 0 \\ -c_x c_y & c_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \\
 & + \rho g A^j \frac{d - Z_0^j}{c_z} a [C_s^j]^T \begin{bmatrix} -c_y/c_z \\ c_x/c_z \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \\
 & \cos \left\{ k \left( \mu_0 + \mu_z \frac{d - Z_0^j}{c_z} \right) - \omega t \right\} \\
 & - \frac{\rho g \pi (R^j)^4}{4 c_z} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_z^2 & 0 & -c_x c_z \\ 0 & c_z^2 & -c_y c_z \\ -c_x c_z & -c_y c_z & c_x^2 + c_y^2 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서,  $R^j$ 는 외각요소  $j$ 의 단면의 반경이고, 마  
지막 항은 출수면의 단면 2차 모멘트에 의한 복원  
모멘트이고 나머지 항의 물리적 의미는 식(17)에  
대한 것과 같다.

#### 2. 2. 4 Froude - Krylov Force

Froude - Krylov force, diffraction force, radiation force는 각각 평면 입사파, 산란파 및 발산파  
에 기인하는 미소 1차항이므로 공간고정 좌표계와  
물체고정 좌표계 사이의 변환은 무시할 수 있다. 또,  
반침수 상태의 외각요소에 있어서의 압력적분 영역  
의 상한을 일정한 값  $(d - Z_0^j)/c_z$ 로 한다. Froude -  
Krylov force는  $P_i$ 를 요소의 침수표면에 대해 적분  
함으로써 다음과 같이 얻어진다.

•  $c_z^2 + \mu_z^2 \neq 0$ 인 경우

$$\{F_F^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \frac{1}{c_z^2 + \mu_z^2} \cdot$$

$$\left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} -c_x c_z - \mu_x \mu_z \\ -c_y c_z - \mu_y \mu_z \\ -c_z^2 - \mu_z^2 \end{Bmatrix} \left( \cosh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 - \right. \right. \\ \left. \left. \cosh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1 \right) + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_y \mu_z - c_z \mu_y \\ -c_x \mu_z + c_z \mu_x \\ 0 \end{Bmatrix} \left( l_2^j \sinh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 \right. \right. \\ \left. \left. + l_1^j \sinh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1 \right) \right] + \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \frac{1}{k(c_z^2 + \mu_z^2)^2} \cdot \\ \left. \left( \sinh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 - \sinh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1 \right) \right] \quad (20)$$

•  $c_z = \mu_z = 0$ 인 경우

$$\{F_F^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a k (l_2^j + l_1^j)}{\cosh kh} \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} -c_x \\ -c_y \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \right. \\ \left. \sinh \varepsilon_{z0} \cos \Omega_0 + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ 0 \end{Bmatrix} \cosh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 \right] \quad (21)$$

$$\left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} -c_y (c_z^2 - \mu_z^2) - 2c_z \mu_y \mu_z \\ c_x (c_z^2 - \mu_z^2) + 2c_z \mu_x \mu_z \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \right. \\ \left. (\sinh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 - \sinh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1) \right. \\ \left. + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} \mu_y (c_z^2 - \mu_z^2) - 2c_y c_z \mu_z \\ -\mu_x (c_z^2 - \mu_z^2) + 2c_x c_z \mu_z \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \right. \\ \left. (\cosh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 - \cosh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1) \right] \quad (22)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mu_x &= a_x \cos \chi + b_x \sin \chi, \\ \mu_y &= a_y \cos \chi + b_y \sin \chi, \\ \varepsilon_{z2} &= k(c_z l_2^j + Z_0^j - d + h), \\ \varepsilon_{z1} &= k(-c_z l_1^j + Z_0^j - d + h), \\ \varepsilon_{z0} &= k(Z_0^j - d + h), \\ \Omega_2 &= k(\mu_z l_2^j + \mu_0) - \omega t, \\ \Omega_1 &= k(-\mu_z l_1^j + \mu_0) - \omega t, \\ \Omega_0 &= k\mu_0 - \omega t \end{aligned}$$

Froude - Krylov force에 의한 모멘트는 다음과 같이 산정된다.

•  $c_z^2 + \mu_z^2 \neq 0$ 인 경우

$$\{M_F^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \frac{1}{c_z^2 + \mu_z^2} \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_y c_z + \mu_y \mu_z \\ -c_x c_z - \mu_x \mu_z \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \right. \\ \left. (l_2^j \cosh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 + l_1^j \cosh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1) \right]$$

•  $c_z = \mu_z = 0$ 인 경우

$$\{M_F^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a k}{\cosh kh} \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_y \\ -c_x \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \right. \\ \left. \sinh \varepsilon_{z0} \cos \Omega_0 + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} -\mu_y \\ \mu_x \\ 0 \end{Bmatrix} \cosh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 \right] \quad (23)$$

2. 2. 5 Diffraction Force와 Radiation Force  
diffraction force와 radiation force는 유체 입자와 요소의 상대운동에 기인하는 상대속도와 상대가속도에 비례하는 힘의 합을 구함으로써 근사적으로 구한다.

국소좌표계에서  $\{x^*\}$ 에 존재하는 점에 있어서의 상대속도  $\{v\}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{v\} = \nabla^* \Phi - (\dot{u}_t^j + \dot{u}_r^j \times \{x^*\}) \quad (24)$$

상대속도에 비례하는 힘은 단위길이당 상대속도에 비례하는 힘을 부재길이에 대해 적분하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

•  $c_z^2 + \mu_z^2 \neq 0$ 인 경우

$$\{F_N^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \cdot \frac{1}{c_z^2 + \mu_z^2} \left[ [C_s^j]^T \cdot \begin{Bmatrix} c_{nx}^j (c_x c_z + \mu_x \mu_z) \\ c_{ny}^j (c_y c_z + \mu_y \mu_z) \\ 0 \end{Bmatrix} (\cosh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 - \cosh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1) + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{nx}^j (-c_x \mu_z + c_z \mu_x) \\ c_{ny}^j (-c_y \mu_z + c_z \mu_y) \\ 0 \end{Bmatrix} (\sinh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 - \sinh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1) \right] - \rho \omega A^j (l_2^j + l_1^j) [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{nx}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{ny}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} - \rho \omega A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & c_{nx}^j & 0 \\ -c_{ny}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} \quad (25)$$

•  $c_z = \mu_z = 0$ 인 경우

$$\{F_N^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a k (l_2^j + l_1^j)}{\cosh kh} \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{nx}^j c_x \\ c_{ny}^j c_y \\ 0 \end{Bmatrix} \sinh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{nx}^j \mu_x \\ c_{ny}^j \mu_y \\ 0 \end{Bmatrix} \cosh \varepsilon_{z0} \cos \Omega_0 \right] - \rho \omega A^j (l_2^j + l_1^j) [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{nx}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{ny}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\}$$

$$- \rho \omega A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & c_{nx}^j & 0 \\ -c_{ny}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} \quad (26)$$

상대속도에 비례하는 힘에 의한 모멘트는 다음과 같이 된다.

•  $c_z^2 + \mu_z^2 \neq 0$ 인 경우

$$\{M_N^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \cdot \frac{1}{c_z^2 + \mu_z^2} \cdot \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{ny}^j (-c_y c_z - \mu_y \mu_z) \\ c_{nx}^j (c_x c_z + \mu_x \mu_z) \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot (l_2^j \cosh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 + l_1^j \cosh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1) + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{ny}^j (c_y \mu_z - c_z \mu_y) \\ c_{nx}^j (-c_x \mu_z + c_z \mu_x) \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot (l_2^j \sinh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 + l_1^j \sinh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1) \right] + \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \cdot \frac{1}{k(c_z^2 + \mu_z^2)^2} \cdot$$

$$[C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{ny}^j [c_y (c_z^2 - \mu_z^2) + 2c_z \mu_y \mu_z] \\ c_{nx}^j [-c_x (c_z^2 - \mu_z^2) - 2c_z \mu_x \mu_z] \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot (\sinh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 - \sinh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1) + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{ny}^j [-2c_y c_z \mu_z + \mu_y (c_z^2 - \mu_z^2)] \\ c_{nx}^j [2c_x c_z \mu_z - \mu_x (c_z^2 - \mu_z^2)] \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot (\cosh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 - \cosh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1)$$

$$- \rho \omega A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & -c_{ny}^j & 0 \\ c_{nx}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\}$$

$$-\rho\omega A^j \frac{(l_2^j)^3 + (l_1^j)^3}{3} \cdot [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{ny}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{nx}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_r^j\} \quad (27)$$

•  $c_z = \mu_z = 0$ 인 경우

$$\{M_N^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a k}{\cosh kh} \cdot \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} \cdot \left[ [C_s^j]^T \begin{bmatrix} -c_{ny}^j c_y \\ c_{nx}^j c_x \\ 0 \end{bmatrix} \sinh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 \right. \\ \left. + [C_s^j]^T \begin{bmatrix} -c_{ny}^j \mu_y \\ c_{nx}^j \mu_x \\ 0 \end{bmatrix} \cosh \varepsilon_{z0} \cos \Omega_0 \right] \\ - \rho\omega A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & -c_{ny}^j & 0 \\ c_{nx}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [C_s^j] \{\dot{U}_t^j\} - \rho\omega A^j \frac{(l_2^j)^3 + (l_1^j)^3}{3} \cdot [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{ny}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{nx}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\dot{U}_r^j\} \quad (28)$$

상대가속도에 비례하는 힘과 모멘트는 상대속도에 비례하는 힘에서와 같은 방법으로 산정된다.

국소좌표계에서  $\{x^*\}$ 에 존재하는 점에 있어서의 상대가속도  $\{\dot{v}\}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\dot{v}\} = \nabla^* \frac{\partial \Phi}{\partial t} - (\{\dot{u}_t^j\} + \{\dot{u}_r^j\} \times \{x^*\}) \quad (29)$$

상대가속도에 비례하는 힘은 단위길이당 상대가속도에 비례하는 힘을 부재길이에 대해 적분함으로써 산정된다.

•  $c_z^2 + \mu_z^2 \neq 0$ 인 경우

$$\{F_A^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \cdot \frac{1}{c_z^2 + \mu_z^2} \cdot \left[ [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{mx}^j (-c_x c_z - \mu_x \mu_z) \\ c_{my}^j (-c_y c_z - \mu_y \mu_z) \\ 0 \end{bmatrix} \right]$$

$$(\cosh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 - \cosh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1)$$

$$+ [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{mx}^j (-c_x \mu_z + c_z \mu_x) \\ c_{my}^j (-c_y \mu_z + c_z \mu_y) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$(\sinh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 - \sinh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1)$$

$$- \rho A^j (l_2^j + l_1^j) [C_s^j]^T \cdot$$

$$\begin{bmatrix} c_{mx}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{my}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_t^j\} - \rho A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} \cdot$$

$$[C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & c_{mx}^j & 0 \\ -c_{my}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_r^j\} \quad (30)$$

•  $c_z = \mu_z = 0$ 인 경우

$$\{F_A^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a k (l_2^j + l_1^j)}{\cosh kh} \cdot$$

$$\left[ [C_s^j]^T \begin{bmatrix} -c_{mx}^j c_x \\ -c_{my}^j c_y \\ 0 \end{bmatrix} (\sinh \varepsilon_{z0} \cos \Omega_0 \right.$$

$$\left. + [C_s^j]^T \begin{bmatrix} c_{mx}^j \mu_x \\ c_{my}^j \mu_y \\ 0 \end{bmatrix} \cosh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 \right]$$

$$- \rho A^j (l_2^j + l_1^j) [C_s^j]^T \cdot$$

$$\begin{bmatrix} c_{mx}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{my}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_t^j\} - \rho A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2}$$

$$[C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & c_{mx}^j & 0 \\ -c_{my}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_r^j\} \quad (31)$$

상대가속도에 비례하는 힘에 의한 모멘트는 다음과 같이 된다.

•  $c_z^2 + \mu_z^2 \neq 0$ 인 경우

$$\{M_A^{*j}\} = \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \cdot \frac{1}{c_z^2 + \mu_z^2} \cdot$$



$$\begin{aligned}
 & \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j(c_y c_z + \mu_y \mu_z) \\ c_{m_x}^j(-c_x c_z - \mu_x \mu_z) \\ 0 \end{Bmatrix} \right. \\
 & \left. (l_2^j \cosh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 + l_1^j \cosh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1) \right. \\
 & \left. + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j(c_y \mu_z - c_z \mu_y) \\ c_{m_x}^j(-c_x \mu_z + c_z \mu_x) \\ 0 \end{Bmatrix} \right. \\
 & \left. (l_2^j \sinh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 + l_1^j \sinh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1) \right] \\
 & + \frac{\rho g A^j a}{\cosh kh} \cdot \frac{1}{k(c_z^2 + \mu_z^2)^2} \cdot \\
 & \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j[-c_y(c_z^2 - \mu_z^2) - 2c_z \mu_y \mu_z] \\ c_{m_x}^j[c_x(c_z^2 - \mu_z^2) + 2c_z \mu_x \mu_z] \\ 0 \end{Bmatrix} \right. \\
 & \left. (\sinh \varepsilon_{z2} \cos \Omega_2 - \sinh \varepsilon_{z1} \cos \Omega_1) \right. \\
 & \left. + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j[\mu_y(c_z^2 - \mu_z^2) - 2c_y c_z \mu_z] \\ c_{m_x}^j[-\mu_x(c_z^2 - \mu_z^2) + 2c_x c_z \mu_z] \\ 0 \end{Bmatrix} \right. \\
 & \left. (\cosh \varepsilon_{z2} \sin \Omega_2 - \cosh \varepsilon_{z1} \sin \Omega_1) \right] \\
 & - \rho A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} 0 & -c_{m_y}^j & 0 \\ c_{m_x}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \\
 & [C_s^j] \{\ddot{U}_t^j\} - \rho A^j \frac{(l_2^j)^3 + (l_1^j)^3}{3} [C_s^j]^T \cdot \\
 & \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{m_x}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_r^j\} \quad (32)
 \end{aligned}$$

•  $c_z = \mu_z = 0$ 인 경우

$$\begin{aligned}
 \{M_A^{*j}\} &= \frac{\rho g A^j a k}{\cosh kh} \cdot \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} \\
 & \left[ [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j c_y \\ -c_{m_x}^j c_x \\ 0 \end{Bmatrix} \sinh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left. + [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} -c_{m_y}^j \mu_y \\ c_{m_x}^j \mu_x \\ 0 \end{Bmatrix} \cosh \varepsilon_{z0} \sin \Omega_0 \right] \\
 & - \rho A^j \frac{(l_2^j)^2 - (l_1^j)^2}{2} [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} 0 & -c_{m_y}^j & 0 \\ c_{m_x}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \\
 & [C_s^j] \{\ddot{U}_t^j\} - \rho A^j \frac{(l_2^j)^3 + (l_1^j)^3}{3} [C_s^j]^T \cdot \\
 & \begin{Bmatrix} c_{m_y}^j & 0 & 0 \\ 0 & c_{m_x}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} [C_s^j] \{\ddot{U}_r^j\} \quad (33)
 \end{aligned}$$

### 2.3 계류력

인장 계류제에 있어서의 계류 부재에는 커다란 초기 장력이 존재하기 때문에 계류력을 단순하게 평가할 수 없으며, 여기서는 정지 상태에서의 계류점에 원점을 갖고 계류부재(tendon)의 인장 방향을  $z'$ 축의 음의 방향으로 취하는 공간고정 국소 좌표계  $o' - x'y'z'$ , 계류점을 상부구조물의 요소로 간주하는 물체고정 좌표계  $o^* - x^*y^*z^*$  그리고 계류 부재에 고정인 물체 고정 좌표계  $o_T^* - x_T^*y_T^*z_T^*$ 를 설정하며, 이 좌표계들은 정지시에는 모두 일치하게 된다. 계류력은 초기 장력  $T_p^j$ 와 계류 부재의 축방향 ( $z_T^*$ )의 변위 즉 伸縮에 의한 축강성에 기인하는 장력 변동을 더함으로서 평가할 수 있다. 그러므로 계류부재 고정 좌표계에서의 계류력 벡터  $\{f_T^*\}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\{f_T^*\} = \{0 \quad 0 \quad -T_p^j - \frac{EA_t^j}{L} w\}^T \quad (34)$$

여기서,  $EA_t^j$ 와  $L$ 는 계류 부재의 축강성과 초기 길이를 나타낸다.

축방향 이외의 병진변위에 의해 계류 부재는 하단부를 중심으로 미소 회전을 하므로 계류 부재의 장력에 대한 벡터를 공간 고정 좌표계로 표현하기 위하여 변환행렬  $[C_t^j]^T$ 를 정의한다.

계류점의 물체고정 국소 좌표계  $o^* - x^*y^*z^*$ 는 변환행렬  $[C_t^j]^T$ 에 의해 공간고정 국소좌표계로 변환되고,  $[C_s^j]^T$ 에 의해 공간고정 전체 좌표계와 평

행이 되도록 변환한다. 따라서 계류력은 다음과 같이 산정된다.

$$\{F_r^{*j}\} = [C_s^j]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_p^j \end{Bmatrix} - [C_s^j]^T \begin{bmatrix} T_p^j/L^j & 0 & 0 \\ 0 & T_p^j/L^j & 0 \\ 0 & 0 & EA_s^j/L^j \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_t^j\} - [C_s^j]^T \begin{bmatrix} 0 & -T_p^j & 0 \\ T_p^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C_s^j] \{U_r^j\} \quad (35)$$

계류점은 핀 결함을 가정하여 모멘트는 발생하지 않는 것으로 한다.

$$\{M_r^{*j}\} = \{0\} \quad (36)$$

#### 2.4 보요소의 강성행렬에 기인하는 절점력

$j, k$ 의 2개의 절점을 연결하는  $l$ 번째의 탄성 보요소에 있어서, 국소 좌표계에서의 절점력과 절점변위를 결합하는 요소 강성 행렬은 종래의 3차원 골조 해석법에 의해 정식화시키면 좌표 변환 행렬  $[C]$ 에 의해 다음과 같이  $O^* - X^*Y^*Z^*$ 좌표계에서의 전체 강성 방정식으로 변환된다.

$$\begin{Bmatrix} \{F_B^{*j}\} \\ \{M_B^{*j}\} \\ \{F_B^{*k}\} \\ \{M_B^{*k}\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [C^l]^T [K_{jj}^l] [C^l] & [C^l]^T [K_{jk}^l] [C^l] \\ [C^l]^T [K_{kj}^l] [C^l] & [C^l]^T [K_{kk}^l] [C^l] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_t^j\} \\ \{U_r^j\} \\ \{U_t^k\} \\ \{U_r^k\} \end{Bmatrix} \quad (37)$$

여기서, 좌표 변환 행렬  $[C]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$[C^l] = \begin{bmatrix} [C_s^l] & [0] \\ [0] & [C_s^l] \end{bmatrix} \quad (38)$$

여기서,  $[C_s^l]$ 은 식(3)과 같이, 전체 좌표계를 국소 좌표계로 변환시키는 변환행렬이다.

#### 2.5 운동 방정식

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.

$$[M] \{\ddot{U}_w\} + [N_w] \{\dot{U}_w\} + ([K_w] + [K]) \{U_w\} = \{F_w^*\} \quad (39)$$

여기서,  $[M]$  : 부가질량을 포함하는 질량 행렬  
 $[N_w]$  : 조파감쇠 행렬  
 $[K_w]$  : 중력, 정수압 및 계류력에 의한 복원력 행렬  
 $[K]$  : 구조강성 행렬  
 $\{F_w^*\}$  : 정적중력, 정적부력, 초기 장력, 파 강제력 벡터  
 $\{U_w\} = \{\{U_t^1\} \{U_r^1\} \{U_t^2\} \{U_r^2\} \dots\}^T$  : 구조 전체의 변위 벡터

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

$$\begin{bmatrix} ([K_w] + [K]) - \omega^2 [M] & \omega [N_w] \\ -\omega [N_w] & ([K_w] + [K]) - \omega^2 [M] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{U}_t\} \\ \{\bar{U}_s\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\bar{F}_{wc}^*\} \\ \{\bar{F}_{ws}^*\} \end{Bmatrix} \quad (40)$$

식(40)에 의해 각 절점 및 계류점의 cosine항과 sine항의 진폭을 구함으로써 임의의 절점의 변위 응답은 쉽게 구할 수 있다. 예를들면  $j$ 절점의  $X$ 방향 변위응답은 다음과 같이 구해진다.

$$U^j = \bar{U}_c^j \cos \omega t + \bar{U}_s^j \sin \omega t = \sqrt{(\bar{U}_c^j)^2 + (\bar{U}_s^j)^2} \cos(\omega t - \gamma_u) \quad (41)$$

여기서,  $\gamma_u = \tan^{-1} \frac{\bar{U}_s^j}{\bar{U}_c^j}$  이다.

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

### 3. 수치계산 및 고찰

탄성응답 해석법에 의해 굽힘강성 변화에 따른 인장계류식 해양구조물의 동적응답 특성을 평가하기 위한 계산모델의 주요목은 Table.1에 나타나고 있다. Fig. 3는 보요소(beam elements)로 이루어진

Table 1. Particulars of the tension leg platform

		수치계산 모형
길	이	72 cm
	폭	72 cm
높	이	59 cm
홀	수	30 cm
무	게 중심 높이	34.5 cm
Roll	회전 반경	29.1 cm
중	량	27.7 kgf
초	기 장 력	11.7 kgf
배	수 량	39.4 kgf

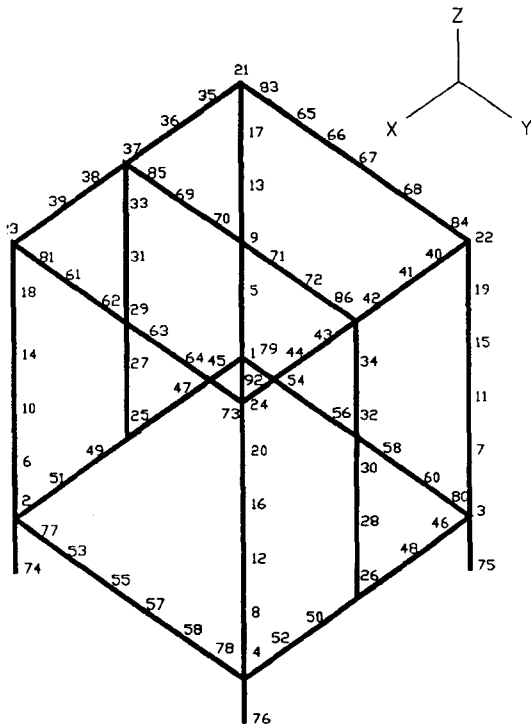


Fig. 3 Node number of 3 - dimensional frame structure for the tension leg platform

어진 골구조의 요소 분할도이고, 표기된 번호는 절점번호를 나타낸다.

응답계산은 구조물을 강체로 가정한 경우와 實機 상당의 강성을 가지는 구조물( $\alpha=1.0$ ) 및 횡방향 부재의 굽힘강성을  $\alpha=0.5$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $\alpha=0.1$ 로 변화시킨 경우의 5종류에 대해 계산을 수행하였으며, 1 column 당의 tendon 의 스프링 상수는 5.9Kg/cm이다.

여기서,

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

Fig. 4~Fig. 10은 굽힘강성 변화에 따른 동적응답 특성의 계산결과를 나타내고 있다. 계산결과는 수심 5m, 파입사각이 90°인 횡파에 대한 것이며, 힘은  $\rho g \zeta_a \Delta z^3 = 1.16 \text{ Kg}$ , 모멘트는  $\rho g \zeta_a \Delta = 0.394 \text{ Kg} \cdot \text{m}$ 로서 무차원화 시킨 것이다.

Fig. 4, Fig. 5는 각각 굽힘강성 변화에 따른 Sway(cm/cm) 및 Roll(rad/cm) 의 응답 특성을 나타내고 있다. 삼각표는  $\alpha=1.0$ , 사각표는  $\alpha=0.5$ , 별표는  $\alpha=0.2$ , 원표는  $\alpha=0.1$ 인 경우의 계산결과이며, 흑점은 구조물을 강체로 가정한 경우의 계산결과이다. Sway 응답에서는 굽힘강성의 변화에 따른 응답의 변화가 나타나지 않으나, Roll 응답에

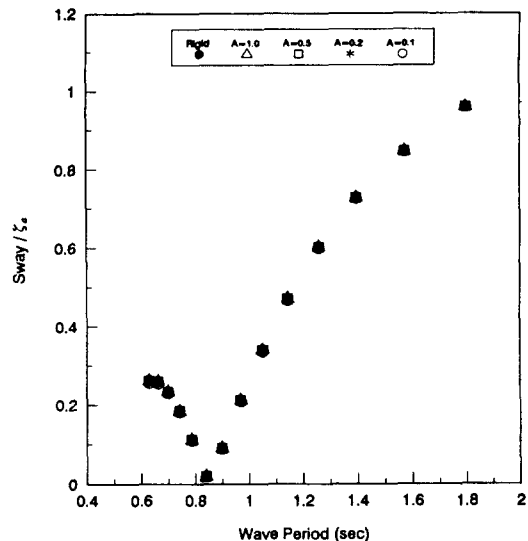


Fig. 4 Sway responses of the tension leg platform

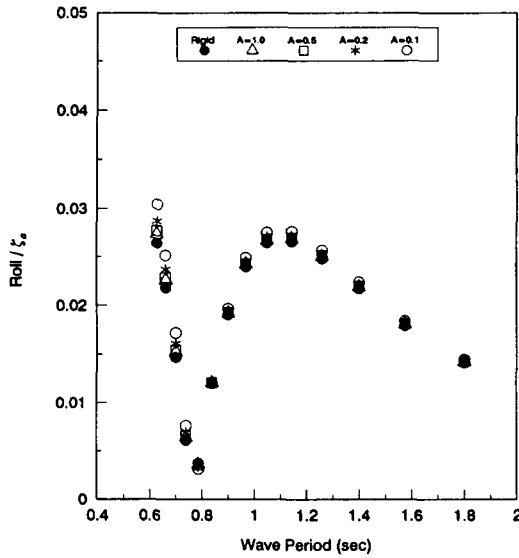


Fig. 5 Roll responses of the tension leg platform

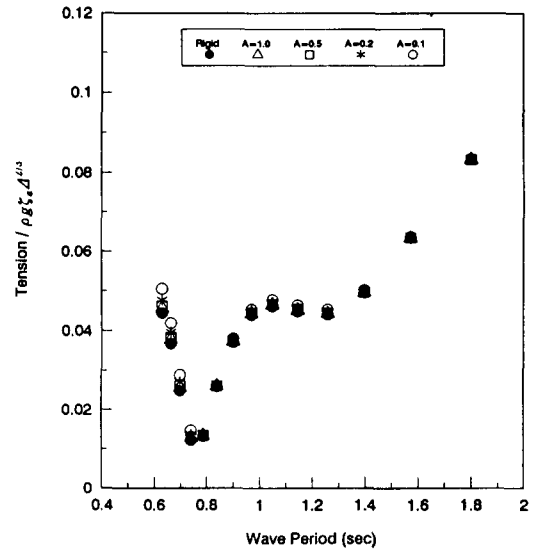


Fig. 6 Tension responses of the tendon on lee side

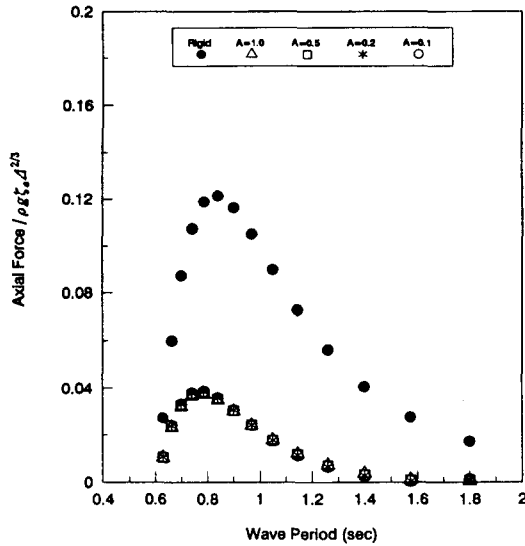


Fig. 7 Axial force responses of the transverse deck girder

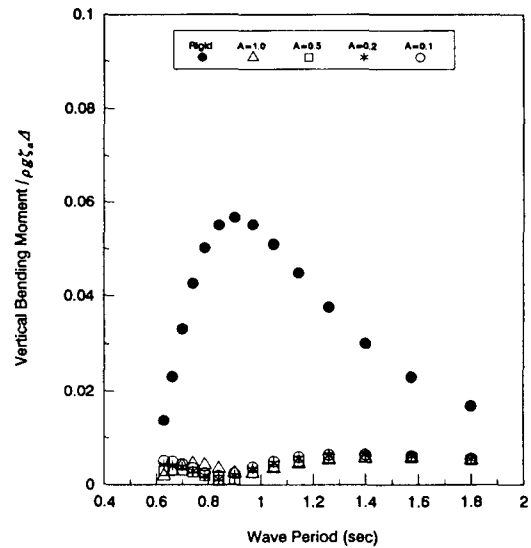


Fig. 8 Bending moment responses of the transverse deck girder

서는 굽힘강성 변화의 영향이 특히 파주기가 작은 영역에서 다소 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 파주측(lee side)의 tendon의 변동장력 특성을 나타내고 있다. 파주기가 작은 영역에서 굽힘강성 변화의 영향이 다소 나타나고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 횡방향 deck girder(절점

번호 62 과 63 사이의 보요소)의 축력과 굽힘 모멘트의 응답 특성을 나타내고 있다. 굽힘강성  $\alpha$ 의 변화에 따른 응답의 변화는 거의 나타나지 않으나, 강체로 가정한 경우에 비하여 응답이 현저하게 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 횡방향 deck girder의 전단력의 응답 특

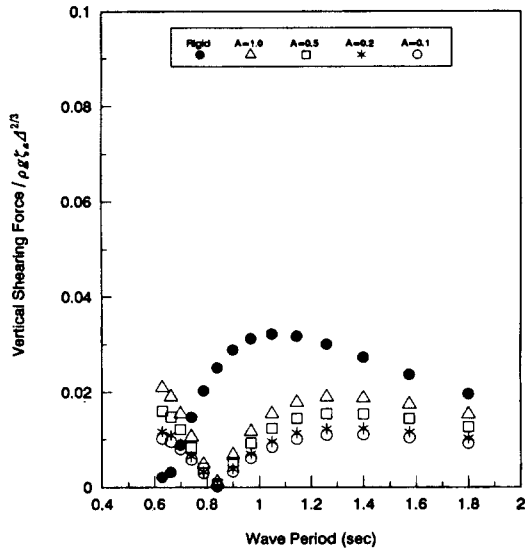


Fig. 9 Shear force responses of the transverse deck girder

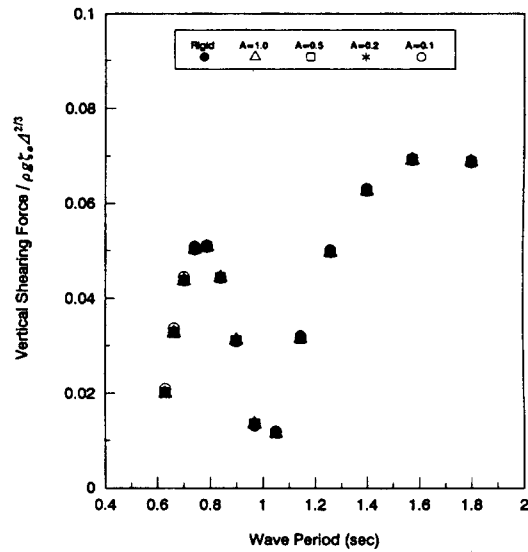


Fig. 10 Vertical shear forces on the tension leg platform

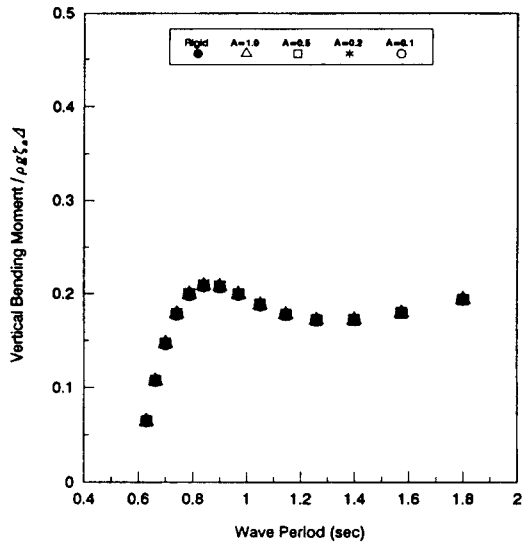


Fig. 11 Vertical bending moments on the tension leg platform

성을 나타내고 있다. 굽힘강성  $\alpha$ 의 변화에 따른 영향이 전체 영역에서 나타나고 있으며, 특히 강체로 가정한 경우의 응답과는 현저한 차이를 나타낸다.

Fig. 10과 Fig. 11은 전체구조에 작용하는 수직 전단력 및 수직 굽힘모멘트의 응답 특성을 나타내고 있으며, 전체적으로 굽힘강성의 변화에 따른 응

답의 변화가 나타나지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서 취급한 계산모델 및 계산조건하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 병진운동 및 전체구조에 작용하는 힘과 모멘트의 응답은 굽힘강성 변화에 따른 영향을 거의 받지 않는다.

2) 계류부재에 발생하는 장력변동은 파주기  $T=0.75\text{sec}$ . 이하의 영역에서 횡방향 부재의 굽힘강성이 작을수록 응답이 커지며,  $T=0.75\text{sec}$ . 보다 큰 영역에서는 굽힘강성의 변화에 따른 영향을 거의 받지 않는다.

3) 부재의 축력과 굽힘모멘트 응답은 굽힘강성의 변화에 따른 영향이 거의 나타나지 않으나, 강체인 경우와는 현저한 차이를 나타낸다.

4) 부재의 전단력 응답은 굽힘강성의 변화에 따른 영향이 전체 영역에서 나타나며, 강체인 경우와는 전체적인 경향도 달라지며, 현저한 차이를 나타낸다.

## 참고문헌

- 1) 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
- 2) 吉田宏一郎, 石川邦照 (1978) : 三次元浮遊骨組構造の周期應答. 日本造船學會論文集 143, pp. 286 - 300
- 3) 吉田宏一郎, 尾崎雅彦, 岡 德昭 (1983) : 緊張繫留プラットフォームの構造應答特性, 日本造船學會論文集 152, pp. 329 - 335
- 4) 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
- 5) Telst, J. G and Noblesse, F.(1986) : Numerical Evaluation of the Green Function of Water - Wave Radiation and Diffraction. Journal of Ship Research 31(1), pp. 34 - 40
- 6) Endo, H.(1987) : Shallow - Water Effect on the Motions of Three - Dimensional Bodies in Waves. Journal of Ship Research 31(1), pp. 34 - 40
- 7) 구자삼, 이창호, 홍봉기(1993) : 인장계류식 해양구조물의 동적응답해석법의 개발. 한국해양공학회지 7(1), pp. 133 - 146
- 8) 구자삼, 김진하, 이창호(1995) : 인장계류식 해양구조물의 동적응답 해석법( I ). 한국해양공학회지 9(1), pp. 161 - 172
- 9) 구자삼, 박찬후, 이창호(1996) : 인장계류식 해양구조물의 동적응답 해석법( II ). 한국해양공학회지 10(1), pp. 25 - 35