

深海用 Guyed Tower 繫留線의 海底面과의 接觸條件을  
考慮한 動的 解析  
Dynamic Analysis of Guyline in the Offshore Guyed Towers  
Considering Sea Bed Contact Conditions

李明雨\* · 朴佑善\*\* · 朴英錫\*

Myong Woo Lee\*, Woo Sun Park\*\* and Young Suk Park\*

**要 旨** : 本 研究에서는 深海用 Guyed Tower 繫留線의 海底面과의 境界條件을 考慮한 動的解析方法을 提示하였다. 가상일의 原理와 有限要素法을 使用하여 基本式을 誘導하였으며 케이블의 幾何學的 非線形性을 考慮하였다. 支點運動에 대한 靜的 및 動的의 效果를 考慮하기 爲하여 모든 시스템매트릭스를 自由度에 관계되는 成分 및 支點運動과 關係되는 成分으로 分割하여 運動方程式을 誘導하였다. 流體의 抗力과 慣性力은 Morrison式을 使用하였으며 非線形運動方程式의 解는 Newton-Raphson 方法과 Newmark- $\beta$ 方法을 使用하여 求하였다. 그 結果 Tower 運動에 의한 繫留線의 舉動을 容易하게 解析할 수 있었다. 數值解析例를 통하여 本 研究에서의 解析方法의 妥當性을 立證하였으며, 本 解析方法은 케이블構造의 動的解析에 여러모로 適用할 수 있다.

**Abstract** □ The numerical analysis on the behaviour of mooring system in the offshore guyed tower is presented. The governing equilibrium equations are derived by the principle of virtual work. The drag and inertia effects of fluid are included in a Morrison type equation. The finite element method is used in the computation. Geometric nonlinearities for the analysis of the mooring line are considered, in which both modified Newton-Raphson method and Newmark- $\beta$  method are employed. Numerical experiments show the validity and the capability of the developed mathematical formulation.

### 1. 緒 論

에너지에 대한 需要가 世界的으로 增加함에 따라 潛在되어 있는 에너지資源 즉, 海洋의 石油가 이제는 매우 重要하게 되었다. 石油의 探查, 生産, 運送 등은 繫留된 海洋船舶을 종종 利用하게 되었다. 一般的으로 油槽船, 파이프敷設用 臺船(Laybarge), GTP(Guyed Tower Platform) 등과 같은 特別한 目的의 海洋構造物 뿐만 아니라 모든 船舶들은 繫留되어져야 한다. 새로운 船舶들은 더욱 複雜하여 이러한 船舶들을 固定시키기 爲해 繫留시스템이 要求되어지고 있다. 앵커, Clump Weight, 체인, 케이블 등의 適切한 選擇은 Guyed Tower를 固定시키거나 惡條件인 海上狀態에서 維持하기 爲해서는 繫留시스템이 絶對적으로 必

要하다. 繫留시스템은 이들의 舉動에 影響을 미치는 모든 要因들이 완벽하게 研究되고 解析되어야 만족스럽게 設計할 수 있다. 그리고, 構造物의 運動과 繫留線의 引張으로 인한 實際의 限界에 對해 繫留시스템의 舉動을 實際와 같이 豫測할 수 있는 數學的인 모델과 解析方法은 適切하게 檢討되어야 한다.

深海用 Guyed Tower의 動的解析에 있어서 繫留線의 動的解析은 考慮할 重要한 事項이다. 繫留線의 舉動은 引張-變位 特性이 길이, 重量, 水深 등에 依存하는 非線形 스프링의 舉動과 類似하다. Wilson과 Garbaccio(1969)는 또한 繫留線에서 動的 引張力을 決定하기 爲하여 均一한 케이블을 考慮하였다. 이 數式은 均一한 케이블로 假定하였기 때문에, Clump Weight를 갖는 繫留線에는 適用시킬 수 없다. Nath와

\*明知大學校 土木工學科(Department of Civil Engineering, Myong Ji University, Seoul 120-728, Korea)

\*\*韓國海洋研究所 海洋工學研究室(Korea Ocean Research and Development Institute, Ocean Engineering Laboratory, Ansan P.O. Box 29, Korea)

Felix(1970)는 均一한 케이블인 單一 繫留시스템으로 보고 振動을 일으키는 波力에서 생기는 繫留線의 運動과 引張을 豫測하였다. 그렇지만 이들의 數值的인 모델은 모든 水深과 波浪條件에 附合되지는 않는다. Dominguez와 Smith(1972)는 線形스프링인 離散된 파라메타모델을 使用하여 擴張시킨 方法을 提示하였다. 그러나, 이 方法은 케이블의 變位가 작은 境遇에만 適用시킬 수 있고, 케이블 上部 끝단의 運動에 對해서는 計算할 수 없다. Childers(1973, 1974, 1975)는 一連의 論文에 實際的 觀點에서 繫留시스템의 設計에 對해 考慮할 事項을 論하였다. Niedzwecki와 Casarella(1975)는 체인, 로프 혹은 이 두 가지로 만들어진 繫留시스템에 對한 懸垂線 方程式을 無次元化하여 解析하는 알고리즘을 開發하였다. 그러나, 그들은 單純히 케이블의 平衡形狀에 關係되고 Clump Weight, 附加된 앵커, 繫留線 引張 등의 影響을 包含시키지는 않았다. Ansari(1980)는 앵커, Clump Weight, 체인, 케이블로 構成된 느슨한 繫留線의 引張-變位 特性을 決定하기 위한 解析方法을 提示하였으며, 繫留된 海洋船舶의 動的解析에서 케이블 舉動의 影響을 考慮하였다. 그렇지만, 그의 解析은 繫留線의 慣性에 對한 影響을 無視하였다. Schellin 등(1982)은 Ansari와 類似的한 準靜的 接近方法을 使用하여 繫留線의 引張과 船舶運動의 크기에 對한 確率函數를 求하였다.

現在까지도 Guyed Tower 繫留線에 對하여 많은 研究가 進行 中이다. 특히 Lena Guyed Tower의 繫留線에 對한 設計 以後의 여러 研究結果에 의하면 Tower의 最大變位와 繫留線의 最大引張力을 正確히 計算하려면 動的解析을 반드시 隨行하여야 하고, 繫留線의 靜的舉動에 對한 正確한 考察만으로도 Tower의 設計計劃에 有用하게 使用됨을 알 수 있다. 지금까지 解析方法인 解析的인 解法으로는 繫留線과 Guyed Tower 全體시스템에 對한 動的舉動을 把握하기가 困難하고 複雜한 周邊 環境條件들이 繫留線에 미치는 影響을 考慮할 수 없었다. 本 研究에서는 深海用 Guyed Tower 繫留線의 海底面과의 境界條件을 考慮한 動的解析을 遂行하기 위하여 引張力만 받을 수 있는 一次元 트러스要素를 幾何學的 非線形性을 考慮하여 繫留線에 適用하였다. 가상일의 原理와 有限要素法을 使用하여 基本式을 誘導하였으며 케이블의 幾何學的 非線形性을 考慮하였다. 支點運動에 對한 靜的 및 動的 效果를 考慮하기 위하여 모든 시스템

매트릭스를 自由度에 關係되는 成分 및 支點運動과 關係되는 成分으로 分割하여 運動方程式을 誘導하였다. Clump Weight와 海底와의 境界條件을 解決하기 위하여 材料의 非線形性만을 考慮한 트러스要素를 使用하였다. 流體의 抗力과 慣性力은 Morrison式을 使用하였으며 非線形 運動方程式의 解는 Newton-Raphson方法과 Newmark-β方法을 使用하여 求하였다. 이러한 解析方法을 통하여 Tower의 運動에 따른 繫留線의 動的舉動을 考察하고, 波力과 潮力 등에 의한 Tower 運動에 따른 繫留線의 動的應答을 求하였다.

## 2. 解析理論

Fig. 1과 같은 構造模型의 運動方程式은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]{}^{t+\Delta t}\{\ddot{q}\} + [C]{}^{t+\Delta t}\{\dot{q}\} + [K]_T\{\Delta q\} = {}^{t+\Delta t}\{R\} - \{F\} \quad (1)$$

여기서  $[M]$ 은 質量매트릭스,  $[C]$ 는 케이블의 減衰 매트릭스,  $[K]_T$ 는 時間  $t$ 에서의 全體剛度매트릭스 ( $[K]_L + [K]_{NL}$ )로서  $[K]_L$ 은 線形剛度매트릭스이고,  $[K]_{NL}$ 은 節點變位값에 따라 변하는 幾何學的 接線剛度매트릭스이다. 그리고  ${}^{t+\Delta t}\{R\}$ 은 時間  $t + \Delta t$ 에서의 荷重벡터,  $\{F\}$ 는 時間  $t$ 에서의 要素應力에 對應되는 節點力벡터,  ${}^{t+\Delta t}\{\ddot{q}\}$ 는 時間  $t + \Delta t$ 에서 節點加速度벡터,  ${}^{t+\Delta t}\{\dot{q}\}$ 는 時間  $t + \Delta t$ 에서 節點速度벡터,  $\{\Delta q\}$ 는 增分節點變位벡터, 즉,  $\{\Delta q\} = {}^{t+\Delta t}\{q\} - \{q\}$ 이다(박영석, 이명우, 1989).

### 2.1 支點運動을 考慮한 非線形 運動方程式

Guyed Tower 繫留線은 支點의 하나인 Tower와의 附着點이 움직이는 關係로 支點의 運動을 考慮해야 한다. 이러한 움직이는 境界值 問題를 갖는 構造시스템의 경우에는 우선 運動方程式을 境界值 問題를 考慮하여 修正한 후에 그 解를 求하여야 한다. 式 (1)에서 支點의 運動을 考慮하려면 이 式에서 使用된 增分節點變位벡터  $\{\Delta q\}$  대신에 다음과 같이 未知의 增分節點變位 벡터  $\{\Delta q_n\}$ 와 既知的의 支點移動變位벡터  $\{\Delta q_c\}$ 의 疊으로 나타내야 한다.

$$\{\Delta q\} = \begin{Bmatrix} \Delta q_n \\ \Delta q_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} \{\Delta q_n\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \Delta q_c \end{Bmatrix} \quad (2)$$

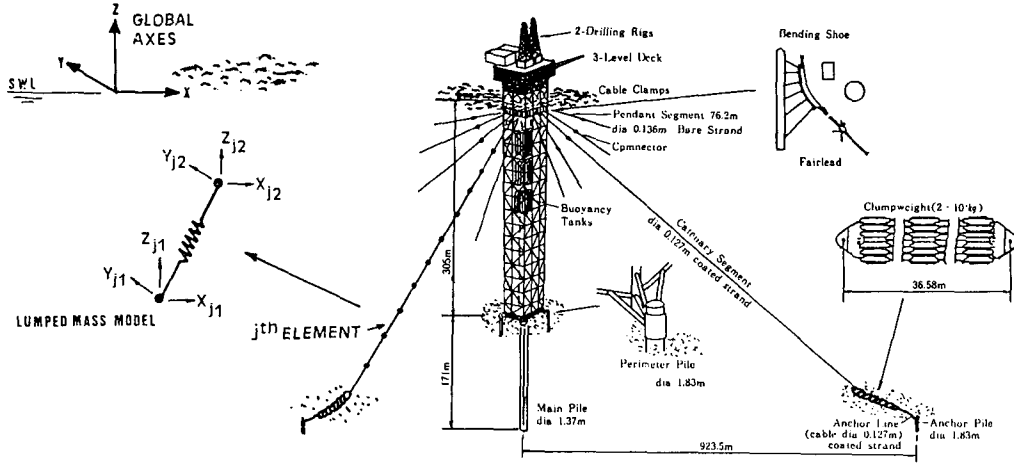


Fig. 1. Lena Guyed Tower configuration

여기서  $[I_u]$ 는  $\{\Delta q_u\}$ 와 對應하는 單位 매트릭스이다. 運動方程式 (1)에 식 (2)의 關係를 代入하여  $\{\Delta q_u\}$ ,  $\{\Delta q_c\}$ 에 對應되는 항들로 分割하고 모든 매트릭스를 整理하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M_{UU} & M_{UC} \\ M_{CU} & M_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_U \\ 0 \end{bmatrix} {}^{t+\Delta t} \{\ddot{q}_u\} + \begin{bmatrix} C_{UU} & C_{UC} \\ C_{CU} & C_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_U \\ 0 \end{bmatrix} {}^{t+\Delta t} \{\dot{q}_u\} \\
 & + {}^t K_{UU} \begin{bmatrix} I_U \\ 0 \end{bmatrix} \{\Delta q_u\} = {}^{t+\Delta t} \left\{ \begin{matrix} R_{eu} \\ 0 \end{matrix} \right\} \\
 & - \begin{bmatrix} M_{UU} & M_{UC} \\ M_{CU} & M_C \end{bmatrix} {}^{t+\Delta t} \left\{ \begin{matrix} 0 \\ \ddot{q}_c \end{matrix} \right\} - \begin{bmatrix} C_{UU} & C_{UC} \\ C_{CU} & C_C \end{bmatrix} {}^{t+\Delta t} \left\{ \begin{matrix} 0 \\ \dot{q}_c \end{matrix} \right\} \\
 & - {}^t K_{UU} \begin{bmatrix} I_U \\ 0 \end{bmatrix} \{\Delta q_u\} + \begin{bmatrix} M_{UU} & M_{UC} \\ M_{CU} & M_C \end{bmatrix} {}^{t+\Delta t} \left\{ \begin{matrix} \ddot{V}_u \\ 0 \end{matrix} \right\} \\
 & - \begin{bmatrix} C_{UU} & C_{UC} \\ C_{CU} & C_C \end{bmatrix} {}^{t+\Delta t} \left\{ \begin{matrix} \dot{V}_u \\ 0 \end{matrix} \right\} - {}^t \left\{ \begin{matrix} F_U \\ 0 \end{matrix} \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서  $[M_u] = [M] + [(C_t - 1)\rho_f \tilde{V}]$ ,  $[M_u] = [C_t \rho_f \tilde{V}]$ ,  $[C_u] = [C] + [1/2 C_D \rho_f A |\dot{r}|]$ ,  $[C_u] = [1/2 C_D \rho_f A |\dot{r}|]$ , 그리고  $\{r\} = \{v\} - \{q\}$ ,  $\tilde{V}$ 는 케이블의 부피이다. 이 식에 潮流  $\dot{V}_r$ 를 考慮하고 兩邊에  $[I_u | 0]$ 를 전승하여 整理하면 다음과 같은 運動方程式을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & [M_u] {}^{t+\Delta t} \{\ddot{q}_u\} + [C_u] {}^{t+\Delta t} \{\dot{q}_u\} + [K_t] \{\Delta q_u\} \\
 & = {}^{t+\Delta t} \{R_{eu}\} - [M_{uc}] {}^{t+\Delta t} \{\ddot{q}_c\} - [C_{uc}] {}^{t+\Delta t} \{\dot{q}_c\} \\
 & - [K_{uc}] \{\Delta q_c\} + [M_u] {}^{t+\Delta t} \{\ddot{V}_u\} + [C_u] {}^{t+\Delta t} \{\dot{V}_u + \dot{V}_c\}
 \end{aligned}$$

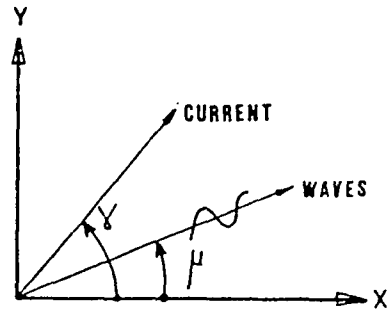


Fig. 2. Wave and current directions.

$$- \{F_U\} \quad (4)$$

集中質量(lumped mass)을 使用하는 境遇에  $[M_{UC}]$ 와  $[C_{UC}]$ 를 無視할 수 있으므로 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & [M_u] {}^{t+\Delta t} \{\ddot{q}_u\} + [C_u] {}^{t+\Delta t} \{\dot{q}_u\} + [K_t] \{\Delta q_u\} \\
 & = {}^{t+\Delta t} \{R_{eu}\} - [K_{uc}] \{\Delta q_c\} + [M_u] {}^{t+\Delta t} \{\ddot{V}_u\} \\
 & + [C_u] {}^{t+\Delta t} \{\dot{V}_u + \dot{V}_c\} - \{F_U\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

이 運動方程式은 既知의 拘束된 變位 벡터 成分을 考慮한 것을 除外하고는 식 (1)과 같은 形態이다.

### 2.2 波浪荷重

Fig. 2에 나타내 보인 바와 같이 全體座標 X軸에 關係된 각  $\mu$ 와  $\gamma$ 에서 任意의 方向으로 規則波와 潮流를 考慮한다. 波浪荷重은 3次元 벡터로 Morison式

으로부터 繫留線의 位置에서 瞬間的으로 計算된다. 節點 j1에서 流體의 慣性力은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 1 參照).

$$F_{j1} = \frac{C_m \rho \pi D^2 L_j}{8} [a_{j1} - (a_{j1} \cdot \tilde{q}_j) \tilde{q}_j] \quad (6)$$

여기서  $C_m$ 은 慣性力係數이고,  $\tilde{q}_j$ 는 單位接線벡터이다. 流體粒子 加速度는 다음과 같이 線形波理論으로부터 얻어진다.

$$a_{j1} = [a_x, a_y, a_z]^T \quad (7)$$

그리고,

$$(a_x)_{j1} = w h_c g \cos \mu \quad (8)$$

$$(a_y)_{j1} = w h_c g \sin \mu \quad (9)$$

$$(a_z)_{j1} = -w h_c g \quad (10)$$

여기서,

$$h_c = \frac{1}{2} w H \frac{\cosh k(d + Z_{j1})}{\sinh(k d)} \quad (11)$$

$$h_s = \frac{1}{2} w H \frac{\sinh k(d + Z_{j1})}{\sinh(k d)} \quad (12)$$

$$g_x = \cos[k(Y_{j1} \sin \mu + X_{j1} \cos \mu) - w t] \quad (13)$$

$$g_z = \sin[k(Y_{j1} \sin \mu + X_{j1} \cos \mu) - w t] \quad (14)$$

$w$  = 波의 角振動數,  $H$  = 波高,  $k$  = 波數(=  $2\pi/L$ ),  $d$  = 水深,  $L$  = 波長,  $t$  = 時間

그리고, 節點 j1에서 流體의 抗力은 다음과 같다.

$$F_{j1} = \frac{\rho C_D D L_j}{4} \dot{V}_r |\dot{V}_r| \quad (15)$$

여기서,  $C_D$ 는 繫留線의 抗力係數,  $\dot{V}_r$ 은 다음과 같이 주어지는 繫留線要素에 垂直인 相對速度벡터이다.

$$\dot{V}_r = \{(\dot{v}_{j1} + \dot{v}_{\sigma j1} - \dot{q}_{j1}) - [(\dot{v}_{j1} + \dot{v}_{\sigma j1} - \dot{q}_{j1}) \tilde{q}_j] \tilde{q}_j\} \quad (16)$$

여기서,  $\dot{v}_{j1}$ 은 j1에서 潮流의 速度벡터,  $\dot{q}_{j1}$ 은 構造物의 速度이고,  $\dot{v}_{\sigma j1}$ 은 다음과 같이 주어지는 波速이다.

$$\dot{v}_{j1} = [\dot{v}_x, \dot{v}_y, \dot{v}_z]^T \quad (17)$$

$$(\dot{v}_x)_{j1} = h_c g \cos \mu \quad (18)$$

$$(\dot{v}_y)_{j1} = h_c g \sin \mu \quad (19)$$

$$(\dot{v}_z)_{j1} = h_s g \quad (20)$$

이와 같이 하여 節點 j2에 대해서도 類似하게 나타낼 수 있다. 또한  $Z_{j1} > 0$ 이면 節點 j1은 流體밖에 놓이게 되고 j번째 要素에서 波浪荷重은 調整되어야 한다. 自由面 近處에서 部分의 水中要素에 대해 길이  $L_j$ 는 SWL에 관해 實在 물속길이로 交替된다.

j번째 要素에 대한 慣性力과 流體의 抗力은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{F_j\} = \{F_{j1}^i, F_{j2}^i\}^T \quad (21)$$

$$\{F_j^r\} = \{F_{j1}^r, F_{j2}^r\}^T \quad (22)$$

### 2.3 海底面에 Clump Weight가 닿는 境界條件

Clump Weight와 海底面의 接觸 길이의 變化를 Fig. 3에 나타내었다. 摩擦力을 無視한 地盤과의 接觸은

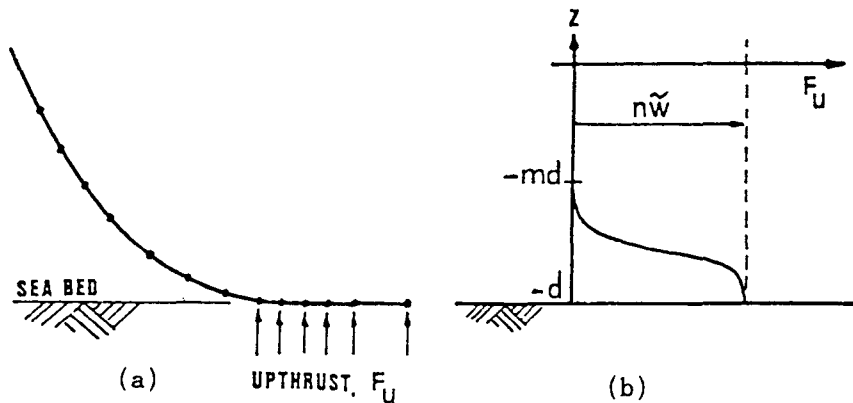


Fig. 3. Sea bed contact of guyline

海底 바다 近處의 節點에서 위로 밀어 올리는 것으로 模型化할 수 있다. 上向力은 일단 Clump Weight의 한 節點이 海底 바다에 到達하는 瞬間 Clump weight의 重量과 다른 動的荷重에 抵抗해야만 한다. 그러나 갑작스러운 힘의 作用은 時間領域에서 시뮬레이션하는 동안 數值的인 不安定을 防止하기 위하여 피하여야 한다. 그러므로 上向力이 바다에서부터 멀리있는 節點에 갈수록 영에 가까운 Fig. 3(b)에 나타난 方法으로 힘을 作用시킬 수 있다. 節點이  $Z = -md$ 에서 海底面에 到達함으로써 힘은 上向力이 下向荷重 크기와 같게 하여 바다에서 必要한 것으로 平坦하게 增加하게 될 것이다. 여기서  $n$ 은 常數이고,  $\bar{w}$ 는 節點荷重이다. 上向力의 變化는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_u = \frac{n\bar{w}}{2} [1 - \tanh(\beta Z + \eta)] \quad (23)$$

여기서,  $\beta$ 와  $\eta$ 는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이  $Z = -d$ 에서  $F_u = n\bar{w}$ ,  $Z = -md$ 에서  $F_u = 0.05n\bar{w}$ 와 같은 條件으로 얻을 수 있다.

이러한 上向力은 Clump Weight와 海底面과의 사이에 Fig. 7에 나타난 바와 같이 應力-變形度 關係를 갖는 가장 트러스要素를 使用하여 模型化할 수 있다. Clump Weight가 海底面에 닿을 때 까지는 應力이 없으므로 繫留線의 舉動에 아무런 影響을 미치지 않게 하고, Clump Weight가 海底面에 닿는 瞬間(變形度  $-0.02$ )부터는 壓縮應力이 上向力으로 作用할 수 있게 하여 Clump Weight를 地盤以下로 내려가지 않게 하는 境界要素를 使用하였다. 이러한 方法으로 模型化하면 海底面의 環境條件과 同一한 不規則하게 변하는 境界值 問題를 解決할 수 있다.

### 2.4 非減衰 自由振動解析

自由振動을 하는 非減衰에 대한 運動方程式은 式 (1)로부터 減衰行列과 作用荷重벡터를 除外시킴으로써 求할 수 있다.

$$[M]^{i+1} \{\ddot{q}\} + [K]_T \{\Delta q\} = \{0\} \quad (24)$$

여기서  $\{0\}$ 는 영벡터이다. 振動解析問題는 式 (24)가 運動을 일으키는 條件을 決定하는 것으로 構成된다. 單自由度系의 舉動을 類推하여 自由振動運動은 單純 調和運動이라고 假定할 수 있으므로, 式 (24)는 다

Table 1. Guyline properties

	Pendent and Guyline	Clump Weight	Anchor Cable
Unit Weight	46 lbs/ft	2,900 lbs/ft	46 lbs/ft
Total Length	2,100 ft	120 ft	1,300 ft
Size	5 in Dia	8 ft Width	5 in Dia

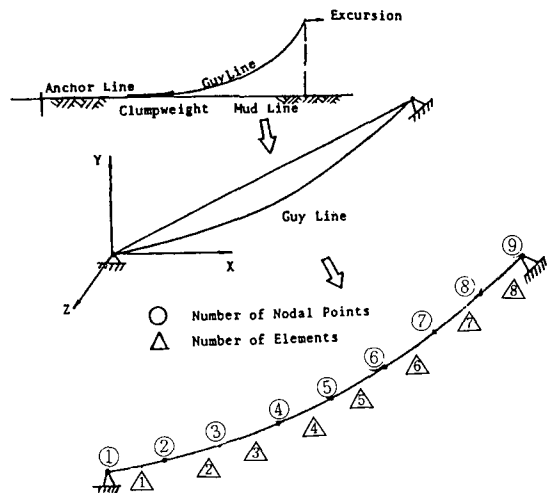


Fig. 4. Finite element model of guyline

음과 같이 標準固有置問題로 쓸 수 있다.

$$([K]_T - \omega^2 [M]) \{\Delta q\} = \{0\} \quad (25)$$

構造物의 非減衰 自由振動만을 考慮한 式 (25)를 使用하여 固有置解析을 遂行하면 固有振動數  $\omega_n$ 와 固有振動모우드  $\{\Phi\}$ 를 求할 수 있다. 自由度의 數가  $m$ 개이면  $m$ 개의 固有振動數와 固有振動모우드가 얻어진다.

### 2.5 直接積分法에 의한 動的 解析

波浪과 潮流에 의한 Guyed Tower의 運動 및 이들과의 相對速度를 考慮한 Guyline의 非線形運動方程式 (5)의 解는 增分法과 反復法을 混合한 Newmark法으로 求하였으며  $\gamma = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ 를 取하였다.

## 3. 解析例題 및 結果分析

### 3.1 非減衰 自由振動解析

本 適用例에서 使用한 標準構造模型은 앞에서 Fig. 1에 나타난 1983년 멕시코만 水深 1,000 ft되는 곳에

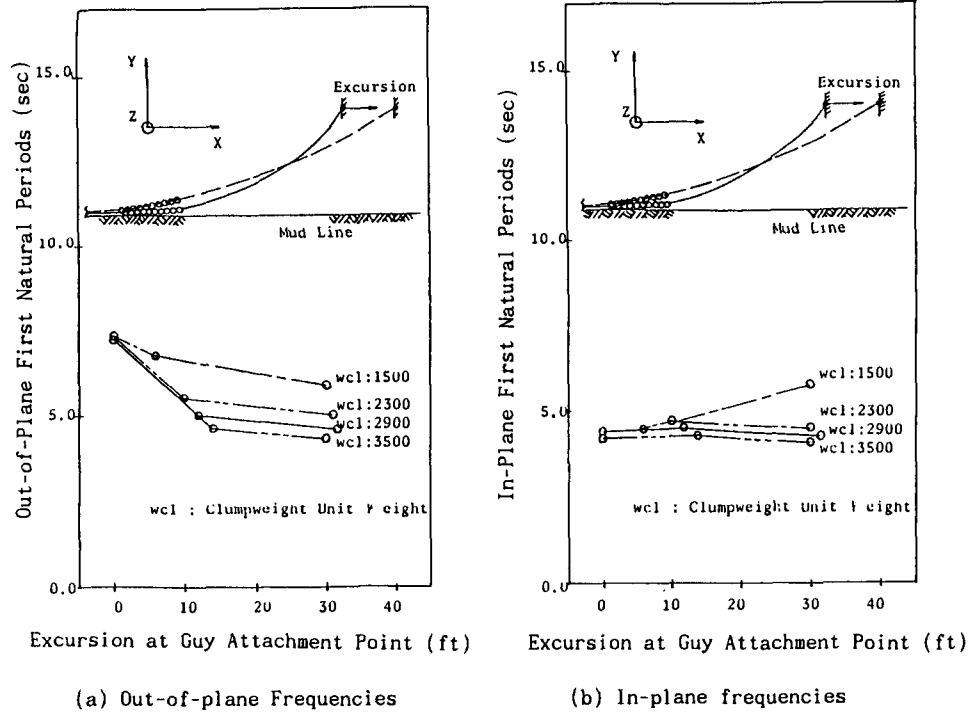


Fig. 5. Variation of frequencies for clump weight intensity

最初로 設置되어 運營 中에 있는 Lena GTP의 繫留線이다(Power, 1984). Guyed Tower를 水平方向으로 支持하고 있는 繫留線들은 平均海面 以下 85 ft되는 곳에 18°의 間隔으로 20개가 附着되어 있으며, 그 載重은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

본 適用例는 각 海上狀態에서 Guyed Tower 繫留線의 固有振動解析을 取扱한다. 構造解析模型은 각 海上狀態에 대하여 Clump Weight에서 Tower 附着點까지 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 考慮하였다.

Fig. 5는 최근 研究(박영석, 이명우, 1989)에서 다루었던 Clump Weight의 水中單位重量이 1,500 lbs/ft, 2,300 lbs/ft, 2,900 lbs/ft, 3,500 lbs/ft인 境遇에 대하여 初期狀態, Clump Weight가 들릴 때, 그리고 Clump Weight가 들린 후 Guyline 附着點의 水平變位가 30 ft 程度 發生했을 때 Guyline의 最少固有振動週期の 變化를 나타낸 것이며, 이 그림에서 (a)는 繫留線의 面外振動을 나타내고, (b)는 面內振動을 나타낸 것이다. 初期狀態의 面外固有振動週期는 7.3秒 程度로 각 境遇에 대하여 거의 같음을 알 수 있고, 繫留線 附着點에서 水平變位가 增加함에 따라서 繫留線의

固有振動週期는 짧아짐을 알 수 있다. 한편, 繫留線의 面內固有振動週期는 4.3秒 程度를 나타내었고, 繫留線 附着點의 水平變位가 增加하여도 繫留線의 固有振動週期는 거의 變化하지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6도 최근 研究에서 다루었던 繫留線 附着點에서 初期傾斜角의 變化에 대하여 初期狀態, Clump Weight가 들릴 때, 그리고 Clump Weight가 들린 후 繫留線 附着點의 水平變位가 30 ft 程度 發生했을 때 繫留線의 最少固有振動週期를 나타낸 것이다. 初期狀態의 面外 固有振動週期는 繫留線 附着點에서 初期 傾斜角이 작을수록 길어지고, 初期傾斜角이 크게 되면 固有振動週期는 짧아져 水平變位가 30 ft 程度에 이르게 되면 각 境遇에 대해 5.0秒 內외가 됨을 알 수 있다.

이러한 繫留線의 全體의인 舉動에는 큰 影響을 미치지 않을 수도 있으나 波浪荷重의 週期가 6~18秒인 것에 비추어 볼때 共振現象이 일어날 可能性이 있다. 共振이 發生하게 되면, 共振이 커짐에 따라서 Fairlead 近處에서 反復되는 振動으로 인하여 疲勞破壞의 危險性이 있게된다. 또한, 流速에 의해 繫留線에 渦流

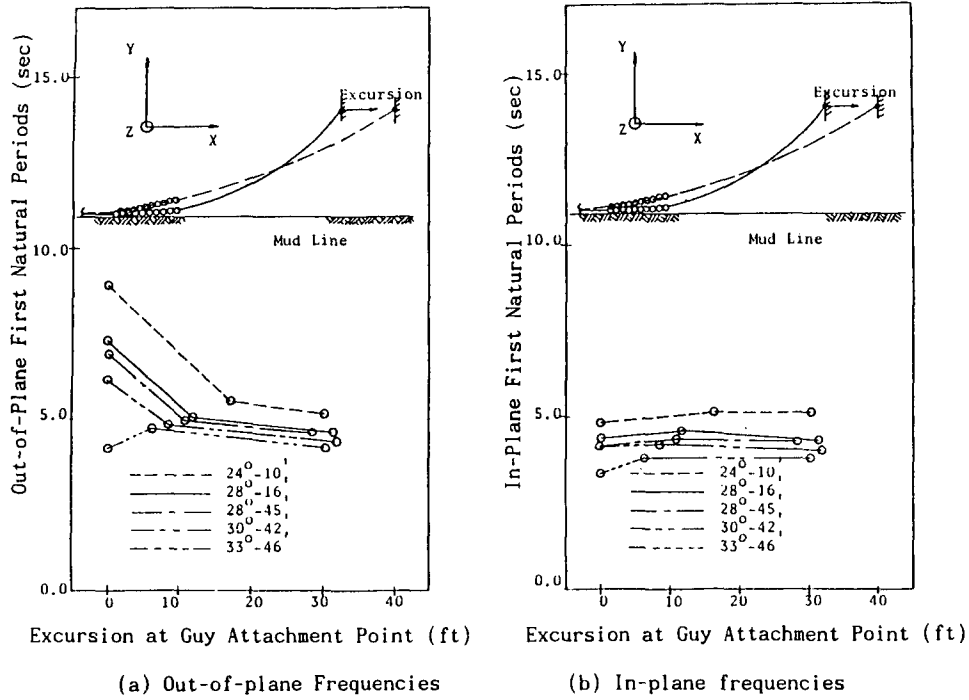


Fig. 6. Variation of frequencies for initial inclination

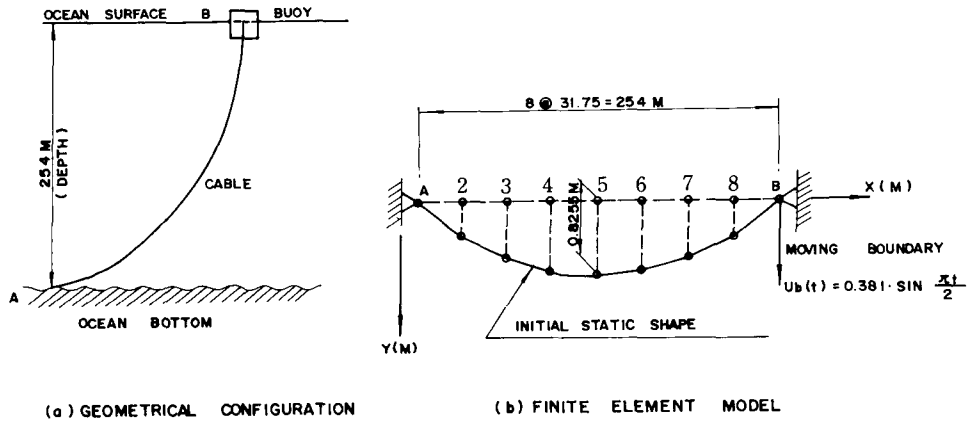


Fig. 7. Finite element model of single point moored cable system

(Vortex Shedding)가 발생하게 되고,渦流의 振動週期가 繫留線의 固有振動週期和 重疊하게 되면 共振이 發生하게 되어 예기치 못한 疲勞破壞의 危險性이 있게 된다. 週期的인 渦流의 振動數는 다음 式으로부터 求할 수 있다.

$$f = \frac{V_c S_r}{D} \tag{26}$$

여기서  $V_c$ 는 流體의 速度,  $D$ 는 케이블의 直徑,  $S_r$ 는 Strouhal數로 케이블인 境遇에 0.2를 取한다. 渦流에 의한 케이블의 振動은 流速方向에 垂直한 方向으로 생긴다. 本 適用例에서 使用된 繫留線의 直徑은 5 inch이므로, 潮流의 速度가 1 Knot, 1.5 Knot, 2 Knot일 때, 渦流의 振動數는 0.81 rad/sec, 1.21 rad/sec, 1.62 rad/sec이고, 振動週期는 7.75秒, 5.19秒, 3.87秒이다.

Table 2. Properties of moored cable system

Length	254.0 m
Area	$4.193 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Weight	$3.570 \times 10^{-1} \text{ kg/m}$
E	$1.405 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
$\rho$	$867.0 \text{ kg sec}^2/\text{m}^4$

渦流에 의한 繫留線の 振動은 流速의 方向에 垂直한 方向으로 생긴다. 流速을 알고 있고 繫留線の 直徑이 決定되면 위에 주어진 式을 利用하여 渦流의 振動週期를 推定할 수 있다. 만약 이렇게 推定된 渦流에 의한 振動週期가 繫留線の 固有振動週期和 같으면 繫留線の 直徑을 交替하거나 리본과 같은 流線型物體를 附着하여 共振을 피해야 한다. 그러나, 流線型物體를 附着하는 境遇에 있어서 繫留線解析時에 이들에 의한 附加質量과 附加抗力의 影響을 充分히 考慮하여야 한다.

3.2 直接積分法에 의한 動的 解析

Fig. 7(a)와 같은 케이블-Buoy시스템의 動的學動을 把握하기 위하여 Fig. 7(b)와 같은 模型을 使用하였다 (Leonard, 1972). 模型에 대한 값은 Table 2에 나타

내었다. Fig. 7(b)의 模型에서 初期引張力은 3,538 kg으로 한 다음에 自重을 모두 作用시키면 中央點에서의 ㄱ그가 0.8255m가 된다. 이 境遇에 支點 B가 週期 4秒, 振幅 0.381m인 週期運動을 할 때 1/4點, 3/4點 및 中央點에서의 橫方向 變位應答을 支點運動과 함께 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 波浪에 의해 Buoy가 運動을 시작할 때, Buoy 運動의 影響은 一定時間 (Buoy에서 떨어진 거리에 따라 다름) 이후에 케이블에 傳達되는 것을 알 수 있다. 또한 주어진 支點 運動과는 달리 중간중간에 屈曲이 存在하고 應答의 time lag가 생기는 現象은 波動效果에 의한 特性으로 볼 수 있다. 實際 케이블의 動的應答을 求하려면 波動에 의한 Buoy 運動 뿐만 아니라 直接 케이블에 作用하는 波力에 의한 影響도 考慮해야 한다.

繫留線の 動的學動을 把握하기 위하여 Fig. 9에 나타낸 A.H. Peyrot(1980)의 適用例 模型을 使用하였다. 繫留線 模型에 대한 정수들은 Table 3에 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 繫留線은 20개의 節點으로 나누어 19개의 要素로 模型化하였다. 模型의 5번째 要素에서 9번째 要素는 Clump Weight로 使用되어진 체인이다. 海底面은 Clump Weight를 받칠 수 있을 程度로 단단하다고 假定하였다. 海底面과의 境界條件

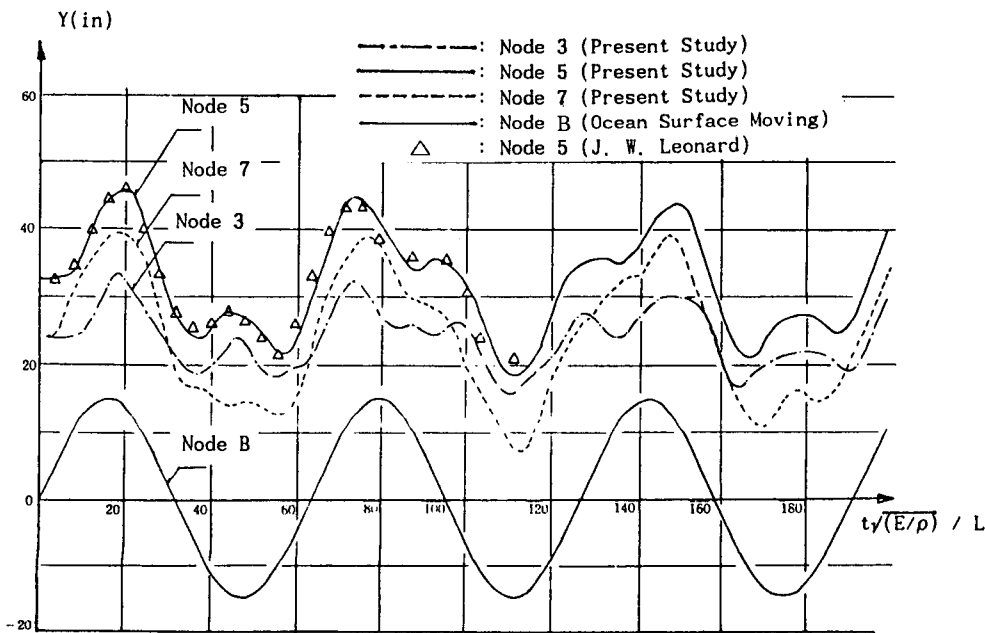


Fig. 8. Response of catenary to moving boundary



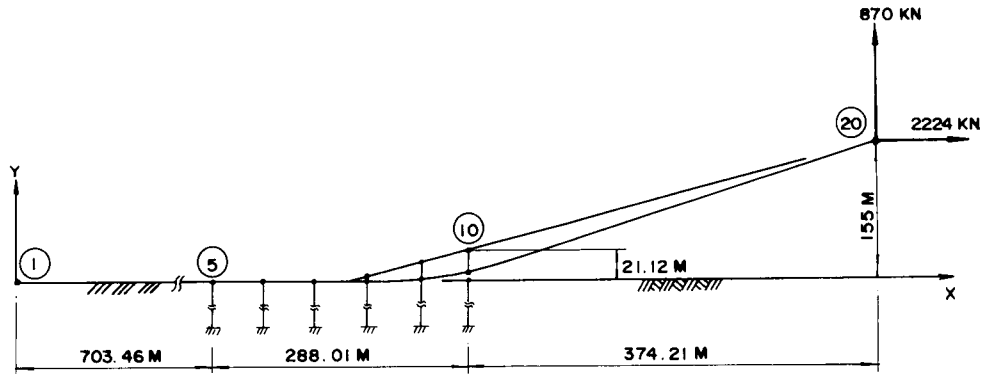


Fig. 9. Composite mooring line

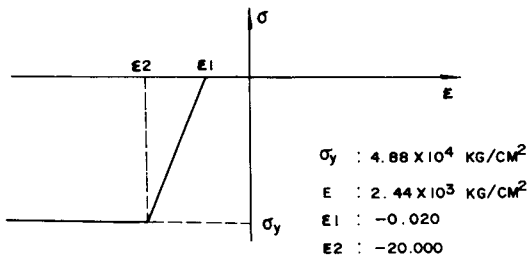


Fig. 10. Nonlinear stress-strain curve

Table 3. Propertis of mooring line

Line Type	Cable	Chain	Cable
From node number	1	5	10
To node number	5	10	20
Number of elements	4	5	10
L(unstretched), m	700	290	395
W(in air), kg/m	0.432	6.219	0.432
EA, KN	450,400	2,532,000	374,500
D, m	0.084	0.325	0.084
C <sub>D</sub> (drag coeff.)	1.45	1.51	1.45
C <sub>M</sub> (inertia coeff.)	2.00	2.00	2.00

을 解決하기 위하여 Fig. 10에 나타낸 바와 같은 應力-變形度 關係를 갖는 材料의 非線形性을 考慮한 트러스要素를 使用하였다. 이것은 Clump Weight가 海底面에 닿을 때까지는 應力이 없으므로 繫留線 舉動에 아무런 影響을 미치지 않는다는 것을 나타내며 Clump Weight가 海底面에 닿는 순간(變形度 -0.002)부터는 壓縮應力을 받아 Clump Weight는 地盤以下로 내려가지 않는다는 것을 나타낸 境界條件이며 EA는 1.87

$\times 10^8$  kg으로 하였고 斷面積은  $9.30 \times 10^6$  cm<sup>2</sup>으로 하였다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 節點 20을 155m의 높이에서 固定시켜 靜的으로 自重을 모두 作用시킨 후 固定된 節點 20을 X方向의 左側으로 移動시켜 節點 10이 X軸上에서 Y方向으로 떨어진 位置를 찾은 뒤 (A.H. Peyrot의 繫留線 形狀-Fig. 9) 그림에서 보는 바와 같이 節點 20이 X方向으로 10.8m, y方向

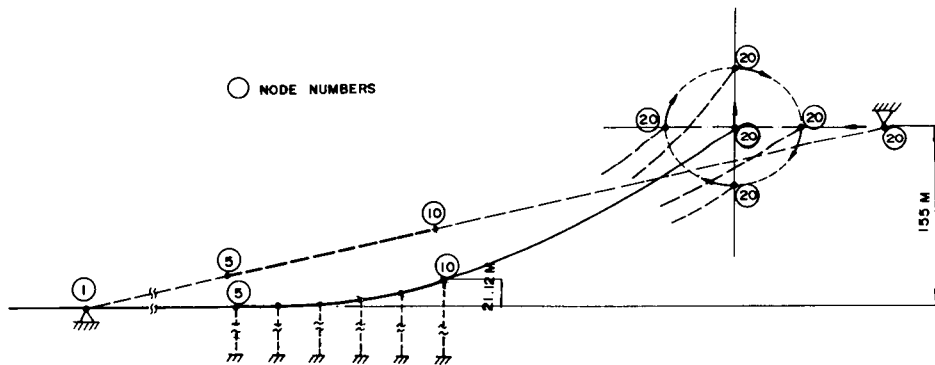


Fig. 11. Finite element model of mooring line

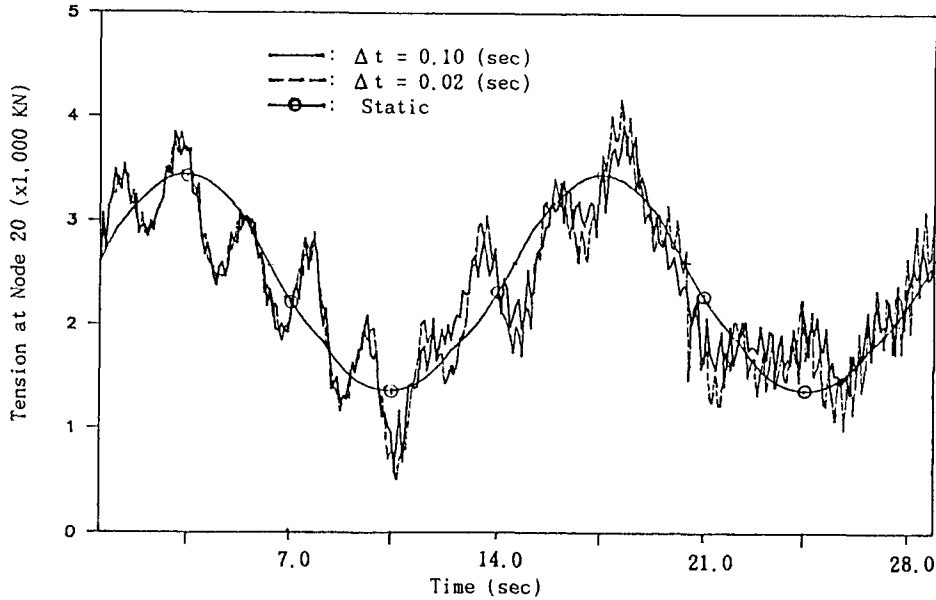


Fig. 12. Dynamic response of mooring line

으로 9m의 振幅으로 14秒 週期인 橢圓運動을 動的으로 作用시켜 繫留線의 舉動을 解析하여 Fig. 12에 fairlead의 引張力을 나타내었다. 最大值에서 A.H. Peyrot의 結果는 3767 KN이었으나 본 結果는 3840 KN이었다. 본 結果는 A.H. Peyrot의 값보다 약 2% 크게 나타났다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 時間間隔을 0.1秒와 0.02秒로 遂行하여 結果를 比較해 보면 時間間隔을 0.1秒로 한 것보다 0.02秒로 取한 것이 最大值에서 初期에는 작게 나타나다가 時間의 經過에 따라 약간 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 여기에서 주어진 支點運動과는 달리 증가중간에 屈曲이 存在하고 應答의 time lag가 생기는 現象은 波動效果에 의한 特性으로 볼 수 있다. A.H. Peyrot의 論文에서는 應答에 관한 그림이 주어져 있지 않으므로 Fig. 12에서 본 研究의 解析結果와 比較할 수 없었다.

### 6. 結 論

本 研究에서는 波力과 潮力 등에 의한 Guyed Tower 運動에 따른 繫留線의 舉動을 動的非線形解析으로 遂行하였다. 가상일의 原理를 利用하여 幾何學의 非線形性을 考慮한 運動方程式을 誘導하였고, 이 式은 增分理論을 使用하여 線形化하였다. 靜的 非線形解析

으로 繫留線의 舉動을 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

첫째로 繫留시스템과 海底面과의 境界條件은 材料의 非線形性만을 考慮한 트러스要素를 使用하여 解決할 수 있으며 不規則한 海底面에도 適用시킬 수 있다.

둘째로 支點運動에 대한 靜的 및 動的效果를 考慮하기 위하여 모든 시스템매트릭스를 自由度에 관계되는 成分 및 支點運動과 관계되는 成分으로 分割하여 運動方程式을 誘導하였다. 그 結果 繫留線과 Tower의 附着點運動에 의한 繫留線의 舉動을 解析할 수 있다. 이러한 解析方法은 케이블構造의 解析에 여러모로 適用할 수 있을 것으로 思料된다.

셋째로 繫留線 自體의 舉動과 繫留線이 Guyed Tower에 미치는 影響을 正確히 把握하려면 지금까지의 一般的인 懸垂線을 利用한 方法은 適切하지 못하므로 本 研究에서와 같은 數值解析方法이 必要하다.

네째로 渦流에 의한 振動週期가 繫留線의 固有振動週期和 같으면 繫留線의 直徑을 交替하거나 리본과 같은 流線型物體를 附着하여 共振을 피해야 한다. 이때, 流線型物體를 附着하는 境遇에는 解析時에 이들에 의한 附加質量과 附加抗力의 影響을 充分히 考慮하여야 한다.

## 辭 謝

本 研究는 1987年度 文教部 支援 韓國學術振興財團의 大學附設研究所 支援 學術研究造成費에 의하여 研究되었음을 밝히고 上記 財團에 謝意를 表한다.

## 參考文獻

- 박영석, 이명우, 1989. Guyed Tower의 繫留시스템에 관한 研究. 大韓土木學會論文集, 제 9권 제 1호, 11-23.
- Ansari, K.A., 1980. Mooring with multi-component cable systems. *Jour. of Energy Resources Technology*, ASME 102.
- Basu, A.K. & Dutta, A., 1982. Dynamic behaviour of guyed towers. *Proc. of 3rd. Int. Conf. on the Behaviour of Offshore Structures (BOSS, 82)*, Vol.I, 529-545, Hemisphere, N.Y.
- Bathe, K.J., 1982. Finite element procedures in engineering analysis, Prentice-Hall.
- Berteaux, H.O., 1976. Buoy engineering. A Wiley-Interscience Publication.
- Brinkmann, C.R., 1983. Dynamic interaction of guyed tower with its guyed system. *Proc. 2rd Offshore Mechanics & Arctic Eng. Symp.*, 46-53, ASME, Houston.
- Childers, M.A., 1973. Mooring system for hostile waters. *Petrol. Engr.* 58-70.
- Childers, M.A., 1974. Deep water mooring-Part I. Environmental factors control station keeping methods. *Petrol. Engr.* 10, 36-58.
- Childers, M.A., 1974. Deep water mooring-Part II. The ultradeep water spread mooring system. *Petrol. Engr.* 2, 108-118.
- Childers, M.A., 1975. Deep water mooring-Part III. Equipment for handling the ultradeep water spread mooring system. *Petrol. Engr.* 5, 114-132.
- Dominguez, R.F. & Smith, C.E., 1972. Dynamic analysis of cable systems. *J. Struct. Div., Proc. ASCE* 1817-1834.
- Dutta, A., 1986. Behaviour of guyed tower mooring lines. *Proc 1st. East Asian Conf. on Structural Eng. & Construction*, Bangkok.
- Finn, L.D., 1976. A new deep water offshore platform-the guyed tower. *Proc. 8th Offshore Technology Conf.*, Vol.III, OTC 2688, 819-830, Houston.
- Leonard, J.W., 1972. Curved finite element approximation to nonlinear cable. *ASCE, 4th Offshore Technology Conference*, Paper OTC 1533, Houston, Tex.
- Malhotra, A.K. & Penzien, 1970. Response of offshore structure to random wave forces. *ASCE*, Vol.96, No. ST10.
- Nath, J.H. & Felix, M.P., 1970. Dynamics of single point mooring in deep water. *J. Waterways, Harbours Coastal Engrg Div. Proc. ASCE* 815-833.
- Niedzwecki, J.M. & Casarella, M.J., 1975. On the design of mooring lines for deep water applications. *ASME Paper No.75-WA/OCE-1*.
- Peyrot, A.H., 1980. Marine cable structures. *ASCE*, Vol.106, No. ST12.
- Power, L.D. et al, 1984. Design of guylines for the Lena Guyed Tower. *Proc. 3rd offshore Mechanics & Arctic Eng. Symp.*, Vol.I, 51-59, ASME, New Orleans.
- Schellin, T.E., Scharrer & Mathies, H.G., 1982. Analysis of vessel moored in shallow, unprotected waters. *Offshore Technol. Conf.*, OTC-4243, 3-6.
- Smith, E., 1978. On nonlinear random vibrations. Report No.78-3, Div. Struc. Mech., Norwegian Institute of Technology, Univ. of Trondheim, 112-142, Norway.
- Triantafyllou, M.S. et al, 1982. The static and dynamics of the mooring lines of a guyed tower for design applications. *Proc. 3rd. Int. Conf. on the Behavior of Offshore Structures(BOSS'82)* Vol.I, 546-561, Hemisphere, N.Y.
- Wicker, L.F., 1957. The oscillatory motion of cable-tower bodies. Ph.D. Dissertation Submitted to the Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Wilson, B.W. & Garbaccio, D.H., 1969. Dynamics of ship anchorlines in waters and currents. *J. Waterways Harbours Div., Proc. ASCE* 449-465.
- Wilson, J.F., 1984. Dynamics of offshore structures, John Wiley & Sons.