

海洋構造物 Guyed Tower의 非線形 動的舉動 Nonlinear Dynamic Behaviors of Offshore Guyed Towers

朴佑善·片宗根·朴英錫

Woo Sun Park*, Chong Kun Pyun**, Young Suk Park**

要 旨: 本 論文에서는 波浪荷重을 받는 Guyed Tower의 非線形 動的舉動에 대하여 研究하였다. Guyed Tower를 效率的으로 解析하기 위하여 Tower는 等價의 기둥으로 模型化하였으며, 繫留裝置는 水平方向의 非線形 境界要素로 理想化하였다. 또한 파일 基礎部는 回轉方向의 線形境界要素로 代置하였다. Tower에 作用하는 波浪荷重은 Morison 方程式에 의해 算定하였다. 繫留裝置와 流體의 粘性에 기인된 抗力 等の 非線形性을 適切히 考慮하기 위하여 時間領域에서 解析을 修行하였으며, 非線形 運動方程式을 效率的으로 풀기 위해 Newmark 積分技法에 基礎한 모우드 重疊法을 사용하였다. Guyed Tower의 중요한 設計變數인 繫留線의 Clump weight 重量 條件과 파일 基礎部 條件의 變化에 대한 數值解析을 수행하였다.

Abstract □ This study is concerned with the nonlinear dynamic behaviors of guyed towers for wave loadings. In order to analyze the nonlinear responses of guyed towers efficiently, the main tower is modeled as an equivalent stick, the guyline system is idealized as a spring with nonlinear stiffness in the horizontal direction, and the pile foundation system is represented as a linear spring in the rotational direction. The wave forces on the main tower are evaluated by using Morison's equation. In order to consider adequately the nonlinearities of the guying system and drag forces due to fluid viscosity, the analyses are performed in the time domain. The mode superposition method is adopted for solving the nonlinear equation of motion efficiently, which is based on the Newmark integration scheme. Numerical analyses are carried out to investigate the sensitivity of two major design parameters for guyed towers, i.e., the clump weight conditions and the base conditions of the tower.

1. 緒 論

全世界産業의 高도한 發展으로 인한 에너지 需要의 急增은 海底石油開發을 점점 더 수심이 깊은 곳으로 擴大시키어, 深海에서의 石油開發 및 生産課程에 적합한 새로운 형태의 構造物開發을 필요로 하게 되었다. Guyed Tower는 이러한 에너지 需要의 增加를 充足시킬 目的으로 개발된 構造物로 Tension Leg Platform과 함께 심해에서의 工學의 特性 및 實用性이 매우 優秀하다고 인정된 構造物이다. Guyed Tower는 Fig. 1에 보인 바와 같이 각종 裝備, 施設 및 資材를 收容하는 甲板構造, 일정한 水平斷面을 갖는 鐵製主 構造物, 이의 上部에 水平支持를 提供하는 繫留裝置

및 地盤에 固定하는 파일 基礎部로 構成되어 있다.

Guyed Tower에 대한 研究는 1970년대 초부터 始 作되어 石油業界의 研究機關을 중심으로 修行되어 왔으며, 1975년에는 멕시코灣에 Spud Can 基礎의 小形 模型構造物이 설치되었고, 이를 통한 實驗의 研究도 수행되었다(Finn and Young, 1978). 이 후 파일 基礎의 Guyed Tower가 提案되어(Mangiavacchi *et al.*, 1980) 그 開發이 進行되어 오다가, 1983년 멕시코만 水深 1000 ft에 처음으로 설치되어 現在까지 運用되고 있다. 이 構造物은 從來의 固定式 鐵製 海洋構造物에 비하여 構造的으로 매우 柔軟하여, 設計波 條件에서는 構造物의 기본 固有振動週期가 波週期の 약 1.5~2.0배 가량 되므로 動力學的 增幅係數가 1.0

*韓國海洋研究所 海洋工學研究室(Ocean Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

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

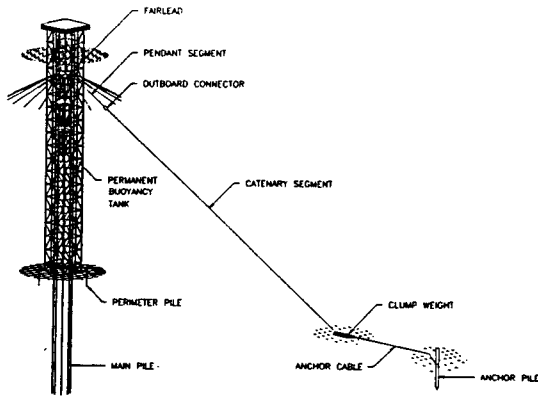


Fig. 1. A schematic diagram of a guyed tower.

보다 작아지게 되어 구조적으로 매우 유리한 특성을 지니고 있다. 이렇게 柔軟性이 큰 構造物의 解析 및 設計에 있어서는 既存의 固定式 鐵製 構造物과는 달리 반드시 動力學的 舉動을 면밀히 檢討해야 한다.

本 研究에서는 아직은 未洽하다고 할 수 있는 Guyed Tower의 非線形 動的 舉動解析에 대해서 연구하였다. 효율적인 舉動解析을 위하여 Tower는 等價의 기둥으로 模型化하였으며, 繫留裝置는 非線形剛性を 갖는 水平方向의 境界要素로 理想化하였다. 또한 파일 基礎部는 回轉方向의 線形境界要素로 대치하였다. 繫留裝置 및 流體의 粘性에 기인된 抗力 등의 非線形性を 적절히 고려하기 위하여 時間領域에서 解析을 수행하였으며, 非線形 運動方程式을 효율적으로 풀기 위하여 線形構造의 解析에 널리 이용되고 있는 모우드 重疊法을 이용하였다.

直接積分法의 結果와의 比較를 통하여 Guyed Tower와 같이 非線形성이 비교적 큰 境遇에도 모우드 重疊法이 適用可能함을 立證하였으며, Guyed Tower의 중요한 설계變數인 繫留線의 Clump weight의 重量條件과 파일 基礎部條件의 變化가 構造物에 미치는 影響을 分析하기 위한 解析도 수행하였다.

2. Guyed Tower의 模型化 및 運動方程式

2.1 構造物의 模型化

本 研究에서는 1983년 1000 ft 水深에 처음으로 設置되어 運用中에 있는 Lena Guyed Tower(Glasscock et al., 1984)를 標準 構造物로 선정하여 解析을

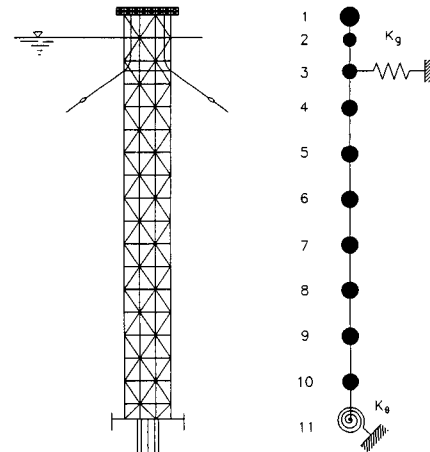


Fig. 2. Structural analysis model.

수행하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 Guyed Tower는 수많은 部材로 이루어진 Tower 部分과 이를 水平方向으로 支持하고 있는 여러개의 繫留線으로 구성되어 있다. 따라서 이를 그대로 模型化하여 動的解析을 수행하는 것은 非經濟的일 뿐만 아니라, 解析에도 많은 問題點이 있다. 그러므로 본 연구에서는 효율적으로 解析을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 Tower 部分은 鉛直 2次元 平面上的 等價 기둥 模型으로 單純化하였으며, 파일에 의해 지지되는 基礎部는 回轉 방향의 境界要素로 대치하였다. 繫留裝置에 의한 復原力은 非線形 剛性を 갖는 水平方向 境界要素로 模型化하였다. Fig. 3은 典型的인 Lena Guyed Tower 繫留線 및 繫留裝置의 復原力曲線으로 어느 한 繫留線의 Clump weight가 완전히 들리기 전까지는 復原力이 거의 線形的으로 증가하다가 들린 후에는 그 增加率이 顯著히 減少하는 非線形을 보이게 된다. 이는 Catenary 方程式을 이용하여 구한 것으로 그 課程은 附錄에 詳細히 記述되어 있다.

2.2 運動方程式

Fig. 2에 보인 바와 같이 Guyed Tower 構造模型의 運動方程式은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_S]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K_E + K_G]\{X\} = \{F_{WC}\} + \{F_{Wn}\} + \{F_{Xg}\} \quad (1)$$

여기서, $\{X\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{\ddot{X}\}$ = 構造物의 節點 變位, 速度 및 加速度 벡터; $[M_S]$ 는 構造物 自體의 重量에 관

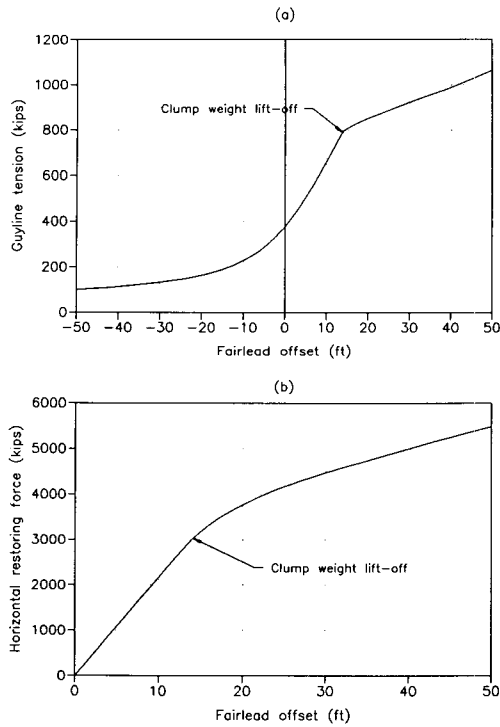


Fig. 3. Restoring forces for a guyline and guying system.

계된 質量行列; $[C]$ =構造物 自體의 減衰行列; $[K_E], [K_G]$ =構造物의 剛性 및 幾何學的 剛性; $\{F_{WC}\}$ =波動 및 潮流에 의한 荷重벡터; $\{F_{Wn}\}$ =構造物의 上版에 작용하는 風荷重; $\{F_{Xg}\}$ =繫留裝置에 의한 非線形 復原力 벡터로 繫留線이 附着된 點(Guy-node)의 水平方向 變位 X_g 의 函數로 나타내진다.

波動과 潮流에 의해 構造物에 작용하는 荷重 $\{F_{WC}\}$ 는 通常 入射波長에 비해 構造部材의 直徑이 작으므로 Morison 方程式에 의해 구할 수 있다. 즉 鉛直 水中部材의 微小部分에 작용하는 荷重 dF_{WC} 는 다음과 같이 표시된다(Morison *et al.*, 1950; Sarpkaya and Isaacson, 1981).

$$dF_{WC} = C_M \rho d \nabla a_x - (C_M - 1) \rho d \nabla \ddot{X} + \frac{1}{2} C_D \rho d A |v_x - \dot{X}| (v_x - \dot{X}) \quad (2)$$

여기서, \dot{X}, \ddot{X} =構造物의 水平方向 速度 및 加速度; v_x, a_x =微小部材 중심에서 水粒子의 水平方向 速度 및 加速度; $d \nabla$ =微小部材의 부피; dA =微小部材의 水平方向으로의 射影面積; C_M =慣性係數; C_D =粘性係

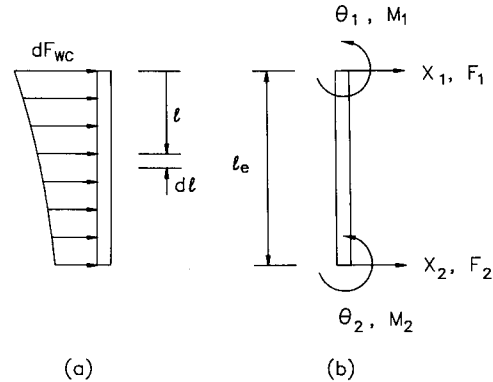


Fig. 4. Equivalent nodal forces.

數; ρ =流體의 密度를 나타낸다. 식 (2) 우변의 첫 번째 項은 水粒子의 加速度에 比例하는 波浪荷重을 나타내며, 두 번째 項은 構造物의 加速度에 比例하는 慣性力으로 \ddot{X} 를 除外한 나머지 部分($(C_M - 1) \rho d \nabla$)을 附加質量이라 부른다. 세 번째 項은 波動의 粘性 抵抗力을 나타내는 것으로 非線形으로 주어짐을 볼 수 있다.

2.3 等價節点荷重

식 (2)로 주어지는 波浪荷重은 Fig. 4a와 같이 部材에 分析하여 작용하므로, 이를 적절히 節点荷重으로 환산하여 주어야 한다. 일반적으로 이 荷重을 절반으로 나누어 양쪽에 分配하는 간단한 方法이 많이 사용되고 있으나 本 研究에서는 이를 보다 적절히 節点荷重으로 置換하기 위하여 보(Beam) 要素의 形狀函數를 사용하여 결정하였다(片等, 1987). Fig. 4b와 같이 節点變位 및 節点荷重을 정의하였을 때 部材內의 任意의 點에서 部材의 變位, 速度 및 加速度는 다음과 같이 표시할 수 있으며,

$$X = \{N\}^T \{X\} \quad (3a)$$

$$\dot{X} = \{N\}^T \{\dot{X}\} \quad (3b)$$

$$\ddot{X} = \{N\}^T \{\ddot{X}\} \quad (3c)$$

部材에 作用하는 分布荷重 dF_{WC} 는 다음의 積分式을 이용하여 等價節点荷重으로 환산할 수 있다(Gallagher, 1975).

$$\{F\} = \int_0^{l_e} dF_{WC} \{N\} dl \quad (4)$$

여기서 $\{N\}$ 은 形狀函數벡터이며, 다음의 函數를 각

要素로 지니는 列벡터이다.

$$N_1 = 1 + 2\xi^3 - 3\xi^2 \quad (5a)$$

$$N_2 = l(\xi - 1)^2 \quad (5b)$$

$$N_3 = 3\xi^2 - 2\xi^3 \quad (5c)$$

$$N_4 = l(\xi^2 - \xi) \quad (5b)$$

그리고 $\xi = l/l_c$ 이며 l_c = 部材의 길이이다.

3. 構造物的 動的 舉動解析

3.1 非減衰 自由振動解析

構造物的 動的 特性을 규명하고 運動方程式을 보다 효율적으로 풀기 위하여 非減衰 自由振動解析을 수행하였다. 식 (1)에 주어진 運動方程式을 재정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[M_S + M_a]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K_E + K_G + K_{XG}]\{X\} = \{F\} \quad (6)$$

여기서, $[M_a]$ = 식 (2) 右邊의 두번째 項에 相關된 附加質量行列; $[K_{XG}]$ = 繫留裝置의 初期剛性 行列; $\{F\}$ = 波浪荷重, 非線形 粘性力, 風荷重 및 繫留裝置 剛性的 線形化에 따른 不均衡 復原力을 포함하는 荷重벡터이다.

構造物的 非減衰 自由振動만을 고려하여 固有值解析을 수행하면 固有振動週期 T_n (또는 固有振動數 ω_n) 과 固有振動모우드 $\{\phi\}$ 를 구할 수 있다. 自由度的 數가 m -개이면 m -개의 固有振動數와 固有振動모우드가 얻어진다. Fig. 5에 標準構造物에 대한 固有值解析 結果로 얻어진 처음 5개의 모우드를 나타내었다. 첫번째 振動 모우드는 주로 파일 基礎部의 回轉에 關係된 모우드이며, 나머지는 構造物的 힘에 相關된 것임을 알 수 있다.

3.2 構造物的 動的 舉動解析

一般的으로 식 (6)과 같은 非線形 運動方程式을 푸는 技法中 많이 사용하는 것으로는 Runge Kutta 方法, Wilson θ 方法, Newmark 方法 등을 들 수 있으나 (Bathe, 1982), 本 研究에서는 Newmark 方法을 使用하였다. 그러나 식 (6)의 非線形 運動方程式을 직접 푸는 것은 計算시간이 많이 걸린다는 問題點이 있다. 따라서 本 研究에서는 이러한 問題點을 적절히 解消할 수 있는 모우드 重疊法을 使用하여 解析을

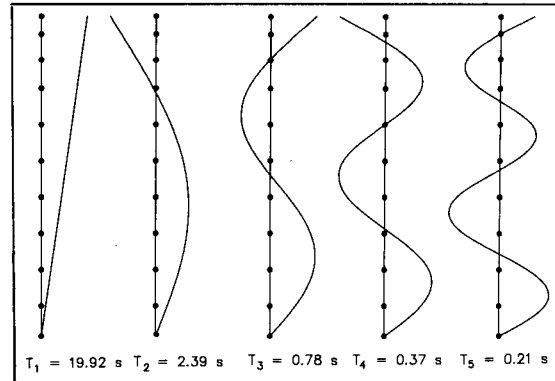


Fig. 5. Natural periods and mode shapes.

수행하였다. 즉 非線形 自由振動解析으로부터 구한 固有振動 모우드 行列 $[\Phi]$ 를 使用하여 다음과 같이 座標變換을 한후,

$$\{X\} = [\Phi]\{q\} \quad (7)$$

이를 식 (6)에 代入하고 양변에 $[\Psi]^T$ 를 곱하여 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$\{\ddot{q}\} + [2\xi_j \omega_{nj}]\{\dot{q}\} + [\omega_{nj}^2]\{q\} = \{f\} \quad (8)$$

여기서 $[\Phi]$ = 固有振動모우드 $\{\phi\}$ 를 列벡터로 갖는 모우드 行列; $\omega_{nj} = j$ -번째 振動모우드의 固有振動數; $\xi_j = j$ -번째 振動모우드의 減衰比; $\{f\} = [\Phi]^T \{F\}$ 로 構造物的 舉動的 函數이다.

식 (8)의 $\{q\}$ 는 Table 1에 나타난 Newmark 方法에 의한 反復計算課程에 의해서 구할 수 있으며, 構造物的 實際 舉動은 식 (7)로부터 구할 수 있다. 식 (8)에서 $\{F\}$ 가 構造物的 舉動的 函數가 아니라면, 즉 線形構造系이라면, 모우드 座標系 q_j 에 대해서 각각 풀어 線形組合을 통하여 解를 구할 수 있지만, 本 研究에서의 $\{F\}$ 는 構造物的 舉動的 函數이므로 함께 풀어야 한다. 따라서 反復計算課程이 必需的으로 所 要되게 된다. 이와 같이 固有值解析으로부터 얻어진 모우드 行列을 이용하여 座標變換을 하여 問題를 푸는 理由는 計算時間을 줄이고자 하는데에 있다. 즉 m -개의 自由도를 갖는 境遇 m -개의 固有振動모우드를 구할 수 있고 이를 모두 使用하여 식 (8)을 풀면 直接積分法으로 구한 結果와 같은 結果를 얻을 수 있지만, 通常 m -개의 모우드 중 주된 모우드(固有振動數가 낮은 모우드) 몇개만 使用하여도 直接積分法

Table 1. Step-by-step solution using Newmark integration method

A. Initial Calculations:

1. Initialize ${}^0\dot{q}_j, {}^0\ddot{q}_j, {}^0\ddot{\ddot{q}}_j$
2. Select time step size Δt , parameter α and δ , and calculate integration constants:
 $\delta \geq 0.50, \alpha \geq 0.25(0.5 + \delta)^2$
 $a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}; a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}; a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}; a_3 = \frac{1}{2\Delta t} - 1;$
 $a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1; a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right); a_6 = \Delta t(1 - \delta); a_7 = \delta \Delta t$
3. Form effective stiffness k_j : $k_j = \omega_{nj}^2 + a_0 + a_1 2\xi_j \omega_{nj}$

B. For Each Time Step:

1. Assume ${}^{t+\Delta t}q_j, {}^{t+\Delta t}\dot{q}_j$, and ${}^{t+\Delta t}\ddot{q}_j$ at time $t + \Delta t$
2. Calculate effective loads at time $t + \Delta t$:
 ${}^{t+\Delta t}f_j = {}^{t+\Delta t}f_j + (a_0 \dot{q}_j + a_2 \dot{\dot{q}}_j + a_3 \ddot{\dot{q}}_j) + 2\xi_j \omega_{nj} (a_1 \dot{q}_j + a_4 \dot{\dot{q}}_j + a_5 \ddot{\dot{q}}_j)$
3. Solve for displacements at time $t + \Delta t$:
 ${}^{t+\Delta t}q_j = {}^{t+\Delta t}f_j / k_j$
4. Calculate accelerations and velocities at time $t + \Delta t$:
 ${}^{t+\Delta t}\ddot{q}_j = a_0 ({}^{t+\Delta t}q_j - q_j) - a_2 \dot{q}_j - a_3 \ddot{\dot{q}}_j$
 ${}^{t+\Delta t}\dot{q}_j = \dot{q}_j + a_6 \ddot{q}_j + a_7 {}^{t+\Delta t}\ddot{q}_j$
5. Compare the calculated and the assumed values of ${}^{t+\Delta t}q_j, {}^{t+\Delta t}\dot{q}_j$, and ${}^{t+\Delta t}\ddot{q}_j$
 If the relative errors are not satisfactory, then go to the 2nd step.

에 거의 근접한 좋은 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 構造物의 變位, 速度 및 加速度가 얻어지면 部材力은 다음의 식으로부터 算定할 수 있다.

$$\{R\}^e = [K_E + K_G]\{X\}^e + [C]\{\dot{X}\}^e + [M_S + M_a]\{\ddot{X}\}^e - \{F\}_{FEF}^e \quad (9)$$

여기서 $\{R\}^e$ = 要素의 部材力벡터; $\{F\}_{FEF}^e$ = 分布荷重에 의한 固定端 荷重벡터이며, 上添字 e 는 각 要素에 대한 값을 의미한다.

4. 例題解析 및 結果分析

4.1 構造解析模型

本 研究에서 사용한 標準構造模型은 1983년 멕시코灣 1000 ft 水深에 世界 最初로 設置된 Lena Guyed Tower이다(Glasscock *et al.*, 1984). Fig. 1에 나타낸 바와 같이 Lena Guyed Tower의 수많은 部材로 이루어진 Tower 部分과 이를 橫方向으로 支持하고 있는 여러 개의 繫留線 및 Tower를 地盤에 固定하는 파일 基礎部分으로 構成되어 있다. 效率的으로 動的 構造解析을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 構造物을 單純化하였다. 즉 Tower 部分은 각 要素當 4개의 自由度(水平 2, 回轉 2)를 갖는 10개의 보(Beam) 要素로 模型化하였으며, 繫留裝置는 非線形剛性を 갖는 境界要素로, 파일 基礎部는, 回轉方向의 線形 境界要素로 代置하였다. 또한 Tower에 作用하는 波浪荷重을 보다 적절히 考慮하기 위하여, 實際 構造物처럼 40 ft

Table 2. Structural model data

Node	Mass (slug)	Element			Diameter of Equivalent Force Member (ft)								
		No.	l_e (ft)	I (ft ⁴)	for Drag Force				for Inertia Force				
					1	2	3	4	1	2	3	4	
1	275												
2	139	1	60	39000	58	100	100	58	11	16	16	11	
3	172	2	85	39000	58	100	100	58	11	16	16	11	
4	162	3	95	32500	47	135	135	47	11	33	33	11	
5	230	4	120	32500	47	135	135	47	11	33	33	11	
6	230	5	120	32500	47	135	135	47	11	33	33	11	
7	230	6	120	32800	42	80	80	42	10	15	15	10	
8	230	7	120	32800	42	80	80	42	10	15	15	10	
9	230	8	120	32800	42	80	80	42	10	15	15	10	
10	211	9	120	32800	42	80	80	42	10	15	15	10	
11	96	10	100	32800	42	80	80	42	10	15	15	10	

Table 3. Guyline properties

	Pendant and guyline	Clump weight	Anchor cable
Unit weight	46 lbs/ft	2900 lbs/ft	46 lbs/ft
Total length	2100 ft	120 ft	1300 ft
Size	5 in Dia.	8 ft Width	5 in Dia.

간격의 4개 等價 荷重部材를 사용하였다. Table 2에 構造解析模型의 物性值를 자세히 나타내었다. 파일 基礎部의 回轉剛性은 8.0×10^6 kips·ft/rad을 사용했는데, 이 값은 Lena Guyed Tower의 境遇와 같이 直徑 54 in의 파일 8개가 Tower의 中心部에 圓形으로 모아 설치된 境遇의 回轉剛性을 구한 것이다(Mangiavacchi *et al.*, 1980 ; Basu and Dutta, 1982).

4.2 構造特性

Guyed Tower를 水平方向으로 支持하고 있는 繫留線들은 平均海面 以下 85 ft 되는 곳에 18°의 間격으로 20개가 附着되어 있으며 그 제원은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 附錄에 技術한 方法에 의하여 구한 Tower의 水平移動에 대한 繫留線의 張力變化 및 繫留裝置에 의한 水平方向의 復原力의 關係를 Fig. 3에 나타내었다. 이를 살펴보면 Clump weight가 완전히 들리기 전까지는 繫留線의 張力이 急激히 增加하다가 들린 후에는 기울기가 緩慢해짐을 알 수 있으며, 전체 繫留線에 의한 水平方向의 復原力은 어느 한쪽의 Clump weight가 완전히 들리기 전까지는 復原力이 거의 一定하게 增加하다가 들린 후에는 急激히 減少하는 傾向을 보임을 알 수 있다.

繫留裝置의 初期剛性을 사용하여 非減衰 自由振動解析을 수행하여 구한 21개의 固有振動週期和 固有振動모우드 中에서 주된 5개를 Fig. 5에 나타내었다. 첫번째 振動모우드는 파일 基礎部의 回轉 및 繫留裝置에 관련된 모우드이며, 두번째 以上은 Tower의 휨剛性에 주로 影響을 받는 모우드임을 알 수 있다. 또 이들의 固有振動週期를 살펴보면 設計波의 振動週期(13초, Table 4 참조)를 피하고 있어, 共振의 危險性이 적음을 알 수 있다. 특히 設計波의 條件에서는 Tower의 水平移動量이 많아져 繫留裝置에 의한 剛性이 顯著히 減少하므로(Fig. 3b 참조) 더욱 그 危險이 적어지게 됨을 豫想할 수 있다. 이것이 固定式 海洋構造物보다 Guyed Tower가 수심이 깊고 海上상태가

Table 4. Design environmental condition

Wave	Current profile
Height=72 ft Period=13 sec	

劣惡한 境遇에 適合하다는 가장 큰 理由이다.

4.3 解析方法에 대한 比較檢討

本 研究에서는 두 가지 方法을 사용하여 解析을 수행하였다. 첫번째 方法은 Newmark 方法에 依據하여 直接積分하여 解를 구하는 方法이고, 두번째 方法은 먼저 固有值解析을 수행하여 구한 振動모우드로 座標變換을 한 후 Newmark 方法으로 接近하는 方法이다. 振動모우드를 이용하는 모우드 重疊法은 線形系에 많이 사용되는 技法이다. 즉 이를 利用하면 聯立 微分方程式을 모우드 수 만큼의 一介 微分方程式으로 變換할 수 있으므로(線形系인 境遇) 쉽게 풀 수 있으며, 또한 주된 모우드 몇개만 사용하여도 充分한 結果를 얻을 수 있다는 長點이 있기 때문이다. 이 모우드 重疊法은 線形系에서만 가능한 것이다. 그러나 本 研究에서 技術한 바와 같이, 非線形인 項을 전부 荷重項으로 넘겨서 接近하는 技法을 사용하면 非線形系에서도 이의 適用이 가능하다(Clough and Penzien, 1975). 따라서 本 研究에서는 이러한 接近技法이 Guyed Tower와 같이 非線形성이 비교적 큰 境遇에 適用이 가능한 가를 檢討하였다. 波浪 및 潮流條件으로는 Table 3에 보인 Lena Guyed Tower에 대한 設計 海上狀態를 사용하였으며 甲板에 작용하는 風荷重은 1000 kips로 假定하였다.

Fig. 6은 直接積分法에 의한 結果와 振動모우드를 1개에서 5개까지 使用하였을 때의 시계열을 比較한 것이다. 頂點變位 및 地盤에서의 回轉變位는 21개의 振動모우드 中 1개, 휨모멘트는 3개 정도 使用하면 거의 直接積分法에 의한 結果에 준하는 結果를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 結果는 Guyed Tower와 같이 非線形성이 비교적 큰 構造物에도 모우드 重疊法의 適用이 可能한 뿐만 아니라 주된 몇 개의 모우드만 사용하여도 充分히 妥當한 結果를 얻을 수 있다는 것을 意味하는 것이다.

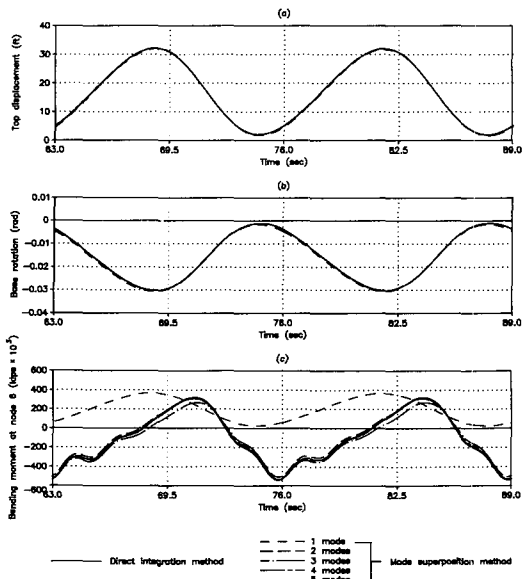


Fig. 6. Comparisons of dynamic responses obtained by two different methods.

4.4 設計變數의 變化에 따른 結果分析

Guyed Tower의 動的 舉動에 있어서의 主要 設計 變數로는 Tower에 水平支持力을 提供하는 系留裝置 및 이를 地盤에 고정하는 파일 基礎部를 들 수 있다. 즉 系留裝置의 Clump weight의 무게를 얼마 만큼 할 것인가, 또 파일 基礎部를 滑節로 할 것인가 아니면 固定으로 할 것인가에 따라 Guyed Tower의 動的 舉動 및 部材力은 대단히 큰 影響을 받게 된다. 따라서, 本 研究에서는 이들의 影響을 調査分析하기 위하여 條件을 變化시키며 解析을 수행하였다. 아울러 自由水面의 변동이 構造物의 舉動에 미치는 影響도 分析하였다.

4.4.1 Clump weight의 影響

繫留裝置 Clump weight의 影響을 調査하기 위하여

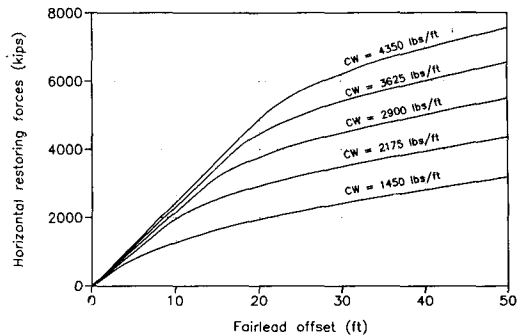


Fig. 7. Restoring forces due to guying systems for five different clump weight conditions.

Clump weight의 單位 길이당 무게를 標準모형 값 (2900 lbs/ft)의 0.5, 0.75, 1.25 및 1.5배인 경우에 대해 解析을 수행하였다. 각 境遇의 Tower의 水平移動에 대한 水平方向 復原力을 Fig. 7에 나타내었다. 이를 살펴 보면 Clump weight의 單位길이 당의 무게에 復原力이 상당한 影響을 받음을 알 수 있다. 즉 Clump weight의 單位길이당의 무게가 작을수록 繫留裝置의 初期剛性이 작아지며, Clump weight가 들리는 位置도 작아지게 됨을 알 수 있다. Table 5에 각 條件에 대한 解析結果를 比較하여 나타내었다. Clump weight의 무게가 增加할수록 最大 頂點變位와 휨모멘트는 減少하나 動的 成分의 振幅은 增加하는 것을 알 수 있다. 이는 Clump weight 무게의 增加에 따른 繫留裝置의 剛性 增加에 기인된 現狀이다. 즉 繫留剛性이 增加하여 靜的 舉動이 制限된 반면, Table 5에 보인 바와 같이 構造物의 基本 固有振動週期(T_1)가 入射波의 週期(13초)에 接近함에 따라 動的 增幅係數가 增加하여 動的 舉動成分이 增幅되었기 때문이다. 이 結果는 Clump weight의 무게를 增減시켜 經濟性을 고려하면서 構造物의 舉動을 適當히 許容範圍에 들도록 調節할 수 있음을 意味하는 것이다. 그러나 너무 過

Table 5. Dynamic responses for five different clump weight conditions

Clump weight (lbs/ft)	Top displacement (ft)		Bending moment at node 6 (kips-ft)		Natural period (sec)	
	Max.	Amp.	Max.	Amp.	T_1	T_2
1450	55.6	12.6	660	346.6	22.44	2.39
2175	35.6	13.4	544	369.0	20.84	2.39
2900	32.2	15.1	537	431.0	19.92	2.39
3625	31.0	16.4	535	472.5	19.37	2.39
4350	30.5	17.3	531	499.5	18.94	2.39

Table 6. Dynamic responses for three different base conditions

Base rotational stiffness (K_0) (kips·ft/rad)	Maximum top displacement (ft)	Maximum bending moment (kips·ft×10 ³)	Natural period (sec)	
			T ₁	T ₂
0 (hinged)	32.8	535 [6]	20.38	2.40
8×10 ⁶	32.2	537 [6]	19.92	2.39
∞ (fixed)	26.8	11100 [11]	10.04	2.39

Note: The values in parenthesis, [], denote the node numbers

度히 줄이게 되면 許容 最大 頂點變位 및 휨모멘트를 넘을 憂慮가 있고, 過度히 늘리면 構造物의 動的 舉動이 크게 되어 繫留線 및 Tower를 構成하고 있는 部材의 疲勞破壞의 問題가 發生할 憂慮가 있기 때문에 注意를 하여야 한다.

4.4.2 地盤條件의 影響

Guyed Tower의 基礎部는 設置의 容易性 때문에 通常 파일에 의한 基礎가 提案되고 있는데, 이 때 사용되는 파일의 갯수나 그 配置狀態에 따라 基礎部의 剛性이 變하게 된다. 따라서 本 研究에서는 이들의 影響을 調査하기 위하여 基礎部의 條件이 滑節인 境遇와 固定인 境遇를 解析하여 標準모델의 境遇와 比較하였다(Table 6). 標準모델의 境遇와 地盤條件이 滑節인 境遇의 結果는 거의 差異가 없으나, 地盤條件이 固定인 境遇는 頂點의 最大 變位는 약 17%정도 줄었지만, 最大 휨모멘트는 약 20배 정도로 增加하는

등 상당히 다른 舉動을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 地盤條件을 固定에 가깝게 設計하면, 構造物의 頂點變位는 줄일 수 있으나, 構造物의 基本 固有振動週期가 入射波의 週期(13초)와 近接하게 되어 動力學的으로 매우 不合理하게 된다. 따라서 許容 頂點變位내에서 地盤의 境界條件을 滑節에 가깝도록 設計하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

4.4.3 自由水面의 影響

自由水面의 影響을 調査하기 위하여, 이를 考慮하지 않은 境遇에 대한 解析을 수행하였으며, 그 結果를 고려한 境遇와 比較하여 Fig. 8에 나타내었다. 解析結果를 살펴보면, 自由水面의 影響은 주로 Tower의 靜的 成分에 寄與하고, 그 影響은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

5. 結 論

本 研究에서는 波力, 潮流力 및 風力을 받는 Guyed Tower의 動的學動 分析에 대해서 研究하였다. 繫留裝置의 非線形性, 非線形 抗力 및 自由水面影響을 考慮하여 時間領域에서 解析을 수행하였다. 例題解析을 통하여 얻어진 結果를 정리하면 다음과 같다.

1. 線形構造系에 주로 適用되는 모우드 重疊法은 Guyed Tower와 같이 非線形性이 比較적 큰 構造物에도 效果的으로 適用이 可能하다. 繫留裝置의 剛性을 初期剛性으로 간단히 線形化했음에도 불구하고, 3개의 모우드만 사용하여도 直接積分法에 의한 計算値에 비하여 만족할 만한 結果를 얻을 수 있었다.

2. 繫留裝置의 Clump weight는 構造物의 舉動을 支配하는 중요한 要素로, 이의 重量을 增加시키면 Tower의 最大 頂點變位는 줄게 되나, 이의 動的 成分의 振幅은 增加하게 된다. 따라서 Clump weight의 重量을 選定할 때는 이 점을 充分히 考慮하여야 한다.

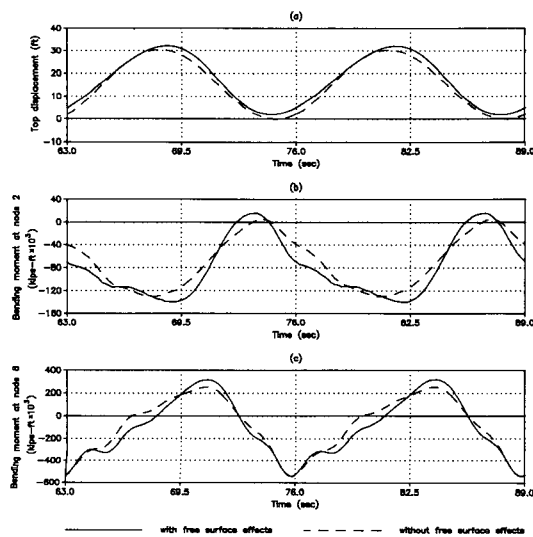


Fig. 8. Dynamic responses with or without free surface effects.

3. Tower를 地盤에 固定하는 基礎部는 變位 및 應力 成分이 許容되는 範圍內에서 滑節 境界條件에 가깝게 設計하는 것이 유리하다. Tower의 中心部에 網密히 배치한 圓形 Group 파일 基礎를 사용한 Lena Guyed Tower의 境遇는 滑節 條件에 거의 近接한 結果를 보였다.

4. 自由水面은 주로 構造物의 靜的 舉動에 影響을 미치며 그 影響의 程度는 微弱한 편이다.

辭 謝

本 研究는 1987년도 文敎部 支援 韓國學術振興財團의 大學附設研究所 支援 學術研究助成費에 의하여 研究되었음을 밝히며, 研究費 支援에 謝意를 表합니다.

參考文獻

柳井善, 1985. 波浪荷重에 對한 Guyed Tower의 動力學的

- 研究. 碩士學位論文. 韓國科學技術院.
 片宗根, 朴佑善, 金奎漢, 1987. Tension Leg Platform의 Tether의 動的解析, 大韓土木學會論文集, 第7卷, 第4號.
 Bathe, K.J., 1982. Finite element procedure in engineering analysis, Prentice Hall.
 Basu, A.K. and Dutta, A., 1982. Dynamic behavior of guyed towers, BOSS, Vol. 1.
 Clough, R.W. and Penzien, J., 1975. Dynamics of structures, McGraw-Hill.
 Finn, L.D. and Young, K.E., 1978. Field test of a guyed tower, OTC 3131.
 Gallagher, R.H., 1975. Finite element analysis, Prentice Hall.
 Glasscock, M.S., *et al.*, 1984. Design of the Lena Guyed Tower, OTC 4650.
 John, H.L. and Nelson, J.K., 1982. Optimum design of spread mooring systems, ASME, J. of Energy Resource Tech., Vol. 104, No. 1.
 Mangiavacchi, *et al.*, 1980. Design criteria of a pile founded guyed tower, OTC 3882.
 Morison, J.R., *et al.*, 1950. The forces exerted by surface wave piles, AIME, Vol. 189.
 Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981. Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand Reinhold Company.

부록 : 繫留裝置의 非線形 剛性曲線

A.1 基本方程式

Fig. A1에 보인 catenary 曲線의 方程式은 다음과 같이 나타내진다(John and Nelson, 1982 ; 柳, 1985).

$$y = \frac{H}{W} \left[\cosh\left(\frac{W}{H}x\right) - 1 \right] \quad (A.1)$$

여기서 H는 주어진 catenary 曲線上에서 一定한 張力의 水平成分을 나타내며, W는 單位길이당 水中 무게를 나타낸다.

Fig. A1과 식 (A.1)로부터 다음의 關係式을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= H \sec \alpha \\ &= H \left(1 - \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{1/2} = H \cosh\left(\frac{W}{H}x\right) \\ &= H + Wy \end{aligned} \quad (A.2)$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{H}{W} \cosh^{-1}\left(\frac{T}{H}\right) = \frac{H}{W} \cosh^{-1}\left(\frac{T}{H}\right) \\ &= \frac{H}{W} \ln\left(\frac{T+V}{H}\right) \end{aligned} \quad (A.3)$$

식 (A.3)에 의하면, Fig. A1의 두 점 1과 2사이의 水平距離는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta x = \frac{H}{W} \ln\left(\frac{T_1+V_1}{T_2+V_2}\right) \quad (A.4)$$

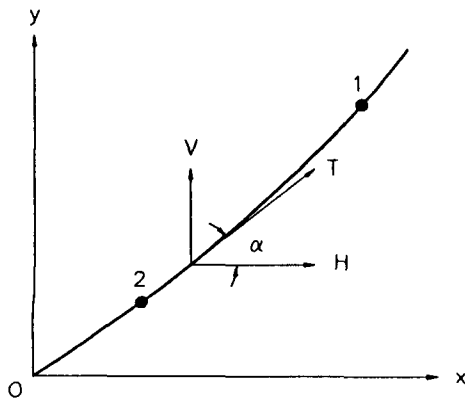


Fig. A1. Catenary segment.

張力의 水平成分(H)이 一定하므로, 두 점사이의 垂直成分의 差는 두 점사이의 自重과 같게 된다. 즉,

$$\Delta V = V_1 - V_2 = W \Delta S \quad (A.5)$$

식 (A.4)와 (A.5)는 單位길이당의 自重이 다른 여러 개의 catenary 曲線으로 構成된 境遇에도 그대로 適用된다.

A.2 Guyed tower 繫留線의 復原力 決定

一般的으로 Guyed tower의 繫留線은 單位길이당 自重이 세 部分으로 構成된다. 즉 Tower와 直接 連結되어 있는 Guyline, 대단히 重量이 큰 Clump weight 및 繫留線을 地盤에 固定하는 말뚝에 연결된 Anchor line 등 세 部分으로 構成되어 있다. 이 繫留線이 Tower의 水平方向 運動에 따라 움직이는 모습을 생각해 보면 두 境遇로 分離하여 생각할 수 있다. 즉 初期 繫留線의 狀態에서 Clump weight가 완전히 들리기 직전의 狀態(Fig. A2a)와 Clump weight가 완전히 들리고 Anchor line 部分이 어느 정도 들린 狀態(Fig. A2b)로 나누어 생각할 수 있다. 이 두 狀態에 대한 繫留線의 水平方向 變位와 張力의 關係를 앞절의 關係式을 利用하여 나타내면 다음과 같다.

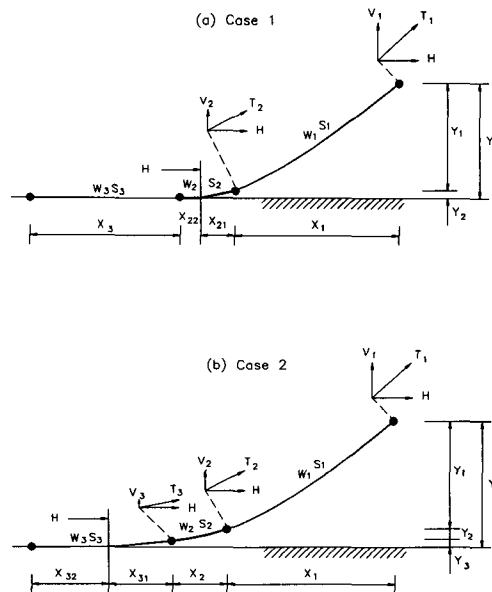


Fig. A2. Definition sketch for two cases of a guyline.

Case-1

Fig. A2a에 나타난 境遇에 대해 식 (A.2)와 (A.5)를 適用하면, 다음의 關係式을 얻을 수 있다.

$$T_1 - T_2 = W_1 Y_1 \quad (\text{A.6a})$$

$$T_2 - H = W_2 Y_2 \quad (\text{A.6b})$$

$$H = \sqrt{T_1^2 - V_1^2} \quad (\text{A.6c})$$

$$T = \sqrt{H^2 + V_2^2} \quad (\text{A.6d})$$

$$V_2 = V_1 - W_1 S_1 \quad (\text{A.6e})$$

$$Y = Y_1 + Y_2 \\ = \frac{(T_1 - T_2)}{W_1} + \frac{(T_2 - H)}{W_2} \quad (\text{A.6f})$$

이들 식에서 어떤 한 變數의 값을 조금씩 變化시켜 가면서 Newton-Raphson 等の 方法을 사용하면 각 變數들 간의 關係를 구할 수 있다. 특히 V_1 을 變化시켜 가며 解를 구하는 것이 가장 편리하다. 구한 각 變數의 값과 식 (A.4)를 이용하면 固定말뚝을 基準으로 한 全體 水平移動量은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = X_1 + X_{21} + X_{22} + X_3 \\ = \frac{H}{W_1} \ln\left(\frac{T_1 + V_1}{T_2 + V_2}\right) + \frac{H}{W_2} \ln\left(\frac{T_2 + V_2}{H}\right) \\ + S_2 - \frac{V_2}{W_2} + S_3 \quad (\text{A.7})$$

Case-2

Fig. A2b에 나타난 Case 2도 Case 1과 같이 식 (A.2)와 (A.5)를 適用하면, 다음의 關係式을 얻을 수 있다.

$$T_1 - T_2 = W_1 Y_1 \quad (\text{A.8a})$$

$$T_2 - T_3 = W_2 Y_2 \quad (\text{A.8b})$$

$$T_3 - H = W_3 Y_3 \quad (\text{A.8c})$$

$$H = \sqrt{T_1^2 - V_1^2} \quad (\text{A.8d})$$

$$T_2 = \sqrt{H^2 + V_2^2} \quad (\text{A.8e})$$

$$T_3 = \sqrt{H^2 + V_3^2} \quad (\text{A.8f})$$

$$V_2 = V_1 - W_1 S_1 \quad (\text{A.8g})$$

$$V_3 = V_2 - W_2 S_2 \quad (\text{A.8h})$$

$$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 \\ = \frac{(T_1 - T_2)}{W_1} + \frac{(T_2 - T_3)}{W_2} + \frac{(T_3 - H)}{W_3} \quad (\text{A.8i})$$

Case 1과 같은 방법으로 주어진 V_1 에 대해서 T_1 , T_2 , T_3 , V_2 , V_3 , H 를 決定하면, 繫留選의 固定말뚝에 대한 水平移動量은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = X_1 + X_2 + X_{31} + X_{32} \\ = \frac{H}{W_1} \ln\left(\frac{T_1 + V_1}{T_2 + V_2}\right) + \frac{H}{W_2} \ln\left(\frac{T_2 + V_2}{T_3 + V_3}\right) \\ + \frac{H}{W_3} \ln\left(\frac{T_2 + V_2}{H}\right) + S_3 - \frac{V_3}{W_3} \quad (\text{A.9})$$

앞에서 記述한 두 境遇에 대해서 假定할 수 있는 V_1 의 값은 다음과 같다.

$$W_1 S_1 < V_1 \leq W_1 S_1 + W_2 S_2 + W_3 S_3 \quad (\text{A.10})$$

이처럼 典型的인 繫留線에 대한 水平方向 變位와 張力의 關係를 구한 후, 주어진 繫留線들의 配列에 따라 全體를 組合하면 繫留裝置의 剛性曲線을 구할 수 있다.