

Guyed Tower의 계류시스템에 관한 연구

-A Study on the Behaviour of Mooring System for Guyed Tower-

박	영	석*
Park,	Young	Suk
이	명	우**
Lee,	Myong	Woo

Abstract

This paper presents the results of the numerical analysis on the behaviour of mooring system of offshore guyed tower. Finite element method is used and geometric nonlinearities are considered in the analysis of mooring line. The governing equilibrium equations are derived by the principle of virtual work, and modified Newton-Raphson method and Newmark- β method are employed in response calculations. The drag and inertia effects of fluid are included using a Morrison type equation. The influences of changing typical parameters like initial inclination and tension of line at the guy attachment point, the length of clump weight, its unit weight and the anchor line length are examined. The effects of idealising the clump weight as a point load(lumped clump weight) on the behaviour of mooring lines are also discussed. Numerical examples demonstrate the validity and capability of the mathematical formulation.

要 旨

본 논문에서는 guyed tower의 mooring system에 관한 수치해석결과를 제시하였다. 가상일의 원리와 유한요소법을 사용하여 기본식을 유도하였으며 케이블의 기하학적 비선형성을 고려하였다. 유체의 항력과 관성력은 Morrison식을 사용하여 고려하였으며 비선형 운동방정식의 해는 Newton-Raphson방법과 Newmark- β 방법을 사용하여 구하였다.

Tower와 mooring line의 부착점에서의 초기경사각, 인장력, clump weight의 분포길이가 단위중량 및 정착선 길이의 변화에 따르는 영향등을 분석하였다. clump weight를 집중하중으로 이상화 시키는 종래의 해석방법의 문제점도 아울러 고찰하였다. 수치해석 예를 통하여 본 논문에서의 해석방법의 정당성을 입증하였다.

1. 서 론

Guyed Tower는 근래에 개발된 심해용 해양구조

물의 하나로서 그 공학적 특성 및 경제성이 우수한 것으로 확인되고 있다. 이러한 guyed tower 구조는 tower와 계류시스템(mooring system)으로 구성되어 있다. 계류시스템은 guyed tower의 공학

*정회원 · 명지대학교 공과대학 부교수

**정회원 · 명지대학교 대학원 박사과정

적 특성과 경제적인 이점을 제공하는 중요한 구조로서 tower의 주위에 동간격으로 배치되는 여러개의 계류선들로 구성된다. 일반적으로 계류선(mooring line)이란 배, 부유식 플랫폼 또는 guyed tower와 같은 해양구조물을 바람, 파랑 등에 의한 수평력에 저항하게 하는 케이블 또는 체인등을 말한다.

현재까지도 guyed tower의 계류선에 대하여 많은 연구가 진행중이다^(1~12). 특히 Lena guyed tower의 계류선에 대한 설계 이후의 여러 연구결과에 의하면 tower의 최대변위와 계류선의 최대인장력을 정확히 계산하려면 동적해석을 반드시 수행하여야 하고, 계류선의 정적거동에 대한 정확한 고찰만으로도 tower의 설계계획에 유용하게 사용됨을 알 수 있다^(1, 3, 4).

지금까지의 해석방법인 해석적인 해법으로는 계류시스템과 guyed tower 전체시스템에 대한 동적거동을 파악하기가 곤란하고 복잡한 주위 조건들이 계류선에 미치는 영향을 고려할 수 없었다^(12~16).

본 연구에서는 계류선의 해석을 위하여 인장력만 받을 수 있는 일차원 트러스요소를 기하학적 비선형성을 고려하여 사용하였다. 또한 clump weight와 해저와의 경계조건을 해결하기 위하여 재료의 비선형성만을 고려한 트러스요소를 사용하였다. 이러한 해석방법을 통하여 tower의 변위에 따른 계류선의 동적거동을 고찰하고, 파력과 조력 등에 의한 tower의 계류선 부착점 운동에 따른 계류선의 동적응답을 구하였다.

2. 케이블 구조의 해석이론

운동중인 물체의 시간 $t+dt$ 에서의 동적평형을 관성력을 고려하여 가상일의 원리로 나타내면 다음과 같은 식이 된다⁽¹¹⁾.

$$\int_{V_0} \rho^{t+dt} \ddot{u}_k \delta u_k dV + \int_{V_0} {}^{t+dt} S_{ij} \delta {}^{t+dt} \epsilon_{ij} dV = {}^{t+dt} R \quad (1)$$

여기서 δu_k 는 임의의 가상변위이고, ${}^{t+dt} S_{ij}$ 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력텐서, ${}^{t+dt} \epsilon_{ij}$ 는 Green-Lagrange 변형도텐서를 나타내고, ${}^{t+dt} u_k$ 는 $\frac{\partial^2}{\partial t^2} {}^{t+dt} u_k$ 를 의미하며, ρ 는 단위체적당 질량이다.

이 식의 좌변의 첫째항은 관성력에 의한 외부

가상일이고, 둘째항은 내부응력에 의한 내부가상일, 우변은 외력에 의한 가상일을 나타낸다.

식 (1)의 해를 구하기 위해서는 이 식을 선형화할 필요가 있다. 질량보존의 법칙이 성립되고, 외력성분의 시간에 따른 변화가 없다고 가정한다면, 다음과 같이 선형화된 운동방정식을 얻을 수 있다⁽¹¹⁾.

$$\int_{V_0} \rho^{t+dt} \ddot{u}_k \delta u_k dV + \int_{V_0} {}^t C_{ijkl} \epsilon_{rs} \delta \epsilon_{ij} dV + \int_{V_0} {}^t \tau_{ij} \delta \eta_{ij} dV = {}^{t+dt} R - \int_{V_0} {}^t \tau_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV \quad (2)$$

여기서 ${}^t \tau_{ij}$ 는 시간 t 에서의 Cauchy 응력텐서이고, ϵ_{rs} , η_{ij} 는 시간 $t+dt$ 에서 Green-Lagrange 변형도텐서 ${}^{t+dt} \epsilon_{ij}$ 를 시간 t 에서 Green-Lagrange 변형도 증분텐서 ϵ_{ij} 로 나타냈을 때 선형부분과 비선형부분을 나타낸다.

운동중인 물체는 유한한 크기의 개별요소의 집합체로 근사화시킬 수 있으며, 개개의 케이블 유한요소매트릭스를 구하여 전체적으로 조합시키면 필요한 식을 얻을 수 있다.

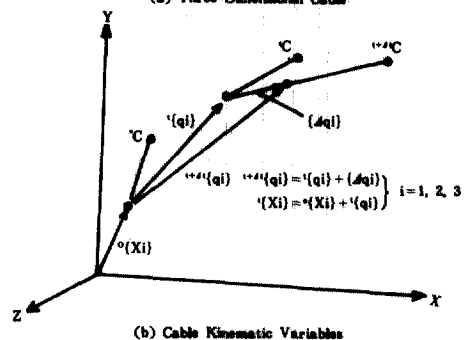
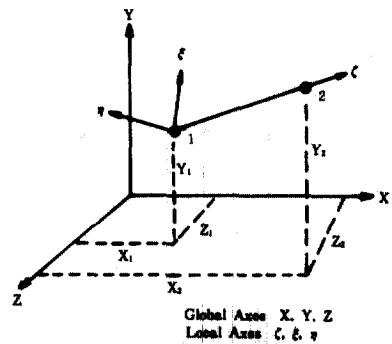


그림 1. Three dimensional cable and cable kinematic variables.

케이블요소는 그림1-(a)와 같이 직교좌표계에서 인장력만 받을 수 있는 트러스요소를 사용하였으며, 단면적의 변화는 고려하지 않았다. 케이블요소의 절점을 그림1에서와 같이 둘을 취하고 요소내의 변위는 다음과 같이 선형형상함수를 사용하여 나타낸다.

$$\{u\}_{(s)} = [N]_{(s)} \{q\}_{(s)} \quad (3 \text{ a})$$

여기서 $\{u\}_{(s)}$ 과 $\{q\}_{(s)}$ 은 각각 요소변위벡터 및 요소 절점변위벡터이고 $[N]_{(s)}$ 은 선형형상함수로서 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$[N]_{(s)} = \left[\left(1 - \frac{\xi}{L}\right) \cdot I_3 \quad \frac{\xi}{L} \cdot I_3 \right] \quad (3 \text{ b})$$

여기서 I_3 은 (3×3) 인 단위매트릭스이고, ξ 는 절점 1에서 절점2 방향으로의 거리를 나타낸다.

식 (2)에서 변형도를 변위로 나타내어 식 (3, a)과 같은 관계를 고려하면 계류선에 대한 다음과 같은 증분형 운동방정식을 얻을 수 있다(그림 1-(b)).

$$[M]^{t+\Delta t} \{\ddot{q}\} + i[K]_r \{dq\} = {}^{t+\Delta t}\{R\} - i\{F\} \quad (4)$$

여기서 $[M]$ 은 질량매트릭스이고, $i[K]_r$ 는 시간 t 에서의 전체강도매트릭스($i[K]_L + i[K]_{M_s}$)로서 $i[K]_L$ 은 선형강도매트릭스이고, $i[K]_{M_s}$ 은 절점변위값에 따라 변하는 기하학적 점선강도매트릭스이다. 그리고 ${}^{t+\Delta t}\{R\}$ 은 시간 $t + \Delta t$ 에서의 하중벡터, $i\{F\}$ 는 시간 t 에서의 요소응력에 대응되는 절점력벡터, ${}^{t+\Delta t}\{\ddot{q}\}$ 는 시간 $t + \Delta t$ 에서 절점가속도벡터, $\{dq\}$ 는 증분 절점변위벡터(즉, $\{dq\} = {}^{t+\Delta t}\{q\} - i\{q\}$)이다.

감쇠력을 고려한 경우에 식 (4)는 다음과 같이 된다.

$$[M]^{t+\Delta t} \{\ddot{q}\} + [C]^{t+\Delta t} \{\dot{q}\} + i[K]_r \{dq\} = {}^{t+\Delta t}\{R\} - i\{F\} \quad (5)$$

여기서 들쭉임은 감쇠력을 나타내며, $[C]$ 는 케이블의 감쇠매트릭스이고, ${}^{t+\Delta t}\{\dot{q}\}$ 는 시간 $t + \Delta t$ 에서 절점속도벡터이다.

파랑과 케이블의 상호작용력 ${}^{t+\Delta t}\{R_w\}$ 은 Morison의 식을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다(2, 9, 21, 28).

$${}^{t+\Delta t}\{R_w\} = [(C_l - 1)\rho_f \bar{V}]^{t+\Delta t} \{(\dot{v} - \dot{q})\} + [\rho_f \bar{V}]^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} + \left[\frac{1}{2} \rho_f C_D A \right]$$

$${}^{t+\Delta t} \{(\dot{v} - \dot{q}) | (\dot{v} - \dot{q})\} \quad (6)$$

여기서 C_l 과 C_D 는 유동의 관성계수와 항력계수, ρ_f 는 해수의 밀도, \dot{v} 와 \dot{v} 는 유동의 속도와 가속도, 그리고 \bar{V} 와 A 는 케이블요소의 절점에 대한 부피 및 유동방향 투영면적을 의미한다.

유동과 케이블의 변위차를 $\{r\} = \{v\} - \{q\}$ 라 하고, 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & ([M] + [(C_l - 1)\rho_f \bar{V}]^{t+\Delta t}) \{\ddot{r}\} + [C]^{t+\Delta t} \{\dot{r}\} \\ & + \left[\frac{1}{2} C_D \rho_f A \right]^{t+\Delta t} \{r | r\} + i[K]_r \{dr\} \\ & = ([M] - [\rho_f \bar{V}]^{t+\Delta t}) \{\ddot{v}\} + [C]^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} \\ & + i[K]_r \{dv\} + i\{F\} \end{aligned} \quad (7)$$

비선형 항력매트릭스는 일반적으로 선형화된 항력매트릭스 $[\bar{C}]$ 를 사용하여 나타낸다. 케이블의 감쇠매트릭스 $[C]$ 와 선형화된 항력매트릭스 $[\bar{C}]$ 를 합하여 $[\hat{C}]$ 로 표시하면 식 (7)은 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} & ([M] + [M]_{add})^{t+\Delta t} \{\ddot{r}\} + [\hat{C}]^{t+\Delta t} \{\dot{r}\} + i[K]_r \{dr\} \\ & = ([M] - [\rho_f \bar{V}]^{t+\Delta t}) \{\ddot{v}\} + [C]^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} \\ & + i[K]_r \{dv\} + i\{F\} \end{aligned} \quad (8 \text{ a})$$

$$[M]_{add} = [(C_l - 1)\rho_f \bar{V}] \quad (8 \text{ b})$$

$$[\hat{C}] = [C] + [\bar{C}] \quad (8 \text{ c})$$

$$[\bar{C}] = \left[\frac{1}{2} C_D \rho_f A \right] \{ | r | \} \quad (8 \text{ d})$$

식 (8 a)에서 케이블의 운동과 유체의 유동을 분리함으로써 다음과 같은 형태의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & ([M] + [M]_{add})^{t+\Delta t} \{\ddot{q}\} + [\hat{C}]^{t+\Delta t} \{\dot{q}\} + i[K]_r \{dq\} \\ & = [(C_l \rho_f \bar{V})^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} + [\bar{C}]^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} - i\{F\}] \end{aligned} \quad (9)$$

이 운동방정식은 파랑-케이블구조 시스템의 선형화된 증분형 운동방정식을 나타낸다. 만일 파랑 이외의 작용하중 ${}^{t+\Delta t}\{R_e\}$ 가 있다면, 식 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & ([M] + [M]_{add})^{t+\Delta t} \{\ddot{q}\} + [\hat{C}]^{t+\Delta t} \{\dot{q}\} + i[K]_r \{dq\} \\ & = [C_l \rho_f \bar{V}]^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} + [\bar{C}]^{t+\Delta t} \{\dot{v}\} - i\{F\} \\ & + {}^{t+\Delta t}\{R_e\} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 운동방정식에서 접선강도매트릭스 $[K]_T$ 는 동적평형을 이루고 있는 시간 t 상태에서 모든 기지의 값을 사용하여 구할 수 있으며, 시간 $t+\Delta t$ 인 형상에서 변위벡터 ${}^{t+\Delta t}\{q\}$ 는 다음과 같이 변위증분을 사용하여 구할 수 있다.

$${}^{t+\Delta t}\{q\} = {}^t\{q\} + \{\Delta q\} \quad (11)$$

3. 지점운동을 고려한 비선형 운동방정식

guyed tower의 계류선은 지점의 하나인 tower와의 부착점이 움직이는 관계로 지점의 운동을 고려해야한다. 이러한 움직이는 경계치 문제를 갖는 구조시스템의 경우에는 우선 운동방정식을 경계치 문제를 고려하여 수정한 후에 그 해를 구하여야 한다. 식 (10)에서 지점의 운동을 고려하려면 이 식에서 사용된 증분절점변위벡터 $\{\Delta q\}$ 대신에 다음과 같이 기지의 증분절점변위벡터 $\{\Delta q_U\}$ 와 기지의 지점이동변위벡터 $\{\Delta q_C\}$ 의 합으로 나타내야 한다.

$$\{\Delta q\} = \left\{ \begin{array}{c} \Delta q_U \\ \Delta q_C \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{c} I_u \\ O \end{array} \right] \{\Delta q_U\} + \left\{ \begin{array}{c} O \\ \Delta q_C \end{array} \right\} \quad (12)$$

여기서 $[I_u]$ 는 $\{\Delta q_U\}$ 와 대응되는 단위매트릭스이다. 운동방정식 (10)에 식(12)의 관계를 대입하여 $\{\Delta q_U\}$, $\{\Delta q_C\}$ 에 대응되는 항들로 분할하고 모든 매트릭스를 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c|c} M_U & M_{UC} \\ \hline M_{CU} & M_C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_u \\ O \end{array} \right] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_U\} + \left[\begin{array}{c|c} C_U & C_{UC} \\ \hline C_{CU} & C_C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_u \\ O \end{array} \right] \\ & {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_U\} + \left[\begin{array}{c|c} K_U & K_{UC} \\ \hline K_{CU} & K_C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_u \\ O \end{array} \right] \{\Delta q_U\} \\ & = {}^{t+\Delta t}\left\{ \begin{array}{c} R_{uw} \\ O \end{array} \right\} - \left[\begin{array}{c|c} M_U & M_{UC} \\ \hline M_{CU} & M_C \end{array} \right] {}^{t+\Delta t}\left\{ \begin{array}{c} O \\ \dot{q}_C \end{array} \right\} \\ & - \left[\begin{array}{c|c} C_U & C_{UC} \\ \hline C_{CU} & C_C \end{array} \right] {}^{t+\Delta t}\left\{ \begin{array}{c} O \\ \dot{q}_C \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{c|c} K_U & K_{UC} \\ \hline K_{CU} & K_C \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} O \\ \Delta q_C \end{array} \right\} \\ & + \left[\begin{array}{c|c} M_U & M_{UC} \\ \hline M_{CU} & M_C \end{array} \right] {}^{t+\Delta t}\left\{ \begin{array}{c} \dot{v}_U \\ O \end{array} \right\} - \left[\begin{array}{c|c} \bar{C}_U & \bar{C}_{UC} \\ \hline \bar{C}_{CU} & \bar{C}_C \end{array} \right] \\ & {}^{t+\Delta t}\left\{ \begin{array}{c} \dot{v}_U \\ O \end{array} \right\} + \left[\begin{array}{c} F_U \\ O \end{array} \right] \quad (13) \end{aligned}$$

여기서 $[M_U] = [M] + [M]_{add}$, $[\bar{M}_U] = [C_p \bar{V}]$, $[C_U] = [\bar{C}]$, 그리고, $[\bar{C}_U] = [\bar{C}]$ 이다. 식 양변에 $[I_u | O]$ 를 전승하여 정리하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[M_U] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_U\} + [C_U] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_U\} + [K_U] \{\Delta q_U\}$$

$$\begin{aligned} & = {}^{t+\Delta t}\{R_{uw}\} - [M_{uc}] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_C\} - [C_{uc}] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_C\} \\ & - \left[\begin{array}{c|c} K_{UC} & \\ \hline \bar{M}_U \end{array} \right] {}^{t+\Delta t}\{\dot{v}_U\} + [\bar{C}] {}^{t+\Delta t}\{v_U\} \\ & - \left[\begin{array}{c} F_U \\ \end{array} \right] \quad (14) \end{aligned}$$

집중질량(lumped mass)을 사용하는 경우에 $[M_{uc}]$ 와 $[C_{uc}]$ 를 무시할 수 있으므로 식 (14)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & [M_U] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_U\} + [C_U] {}^{t+\Delta t}\{\dot{q}_U\} + [K_U] \{\Delta q_U\} \\ & = {}^{t+\Delta t}\{R_{uw}\} - \left[\begin{array}{c|c} K_{UC} & \\ \hline \bar{M}_U \end{array} \right] {}^{t+\Delta t}\{\dot{v}_U\} \\ & + [\bar{C}] {}^{t+\Delta t}\{v_U\} - \left[\begin{array}{c} F_U \\ \end{array} \right] \quad (15) \end{aligned}$$

이 운동방정식은 기지의 구속된 변위벡터성분을 고려한 것을 제외하고는 식 (10)과 같은 형태이다.

Guyed tower의 운동을 고려한 계류선의 거동은 식 (15)를 사용하여 해석할 수 있으며, 해를 구하는 방법으로는 Newmark방법을 사용하였고, r 와 β 는 각각 $\frac{1}{2}$ 과 $\frac{1}{4}$ 을 사용하였다⁽¹⁾.

4. 적용예

본 논문에서 제시한 이론을 기초로 해서 케이블 구조물의 정적 및 동적 비선형해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 논문의 적용예로 사용된 표준구조모델은 1983년 멕시코만 상에 수심 305m되는 곳에 설치된 Lena guyed tower platform의 계류시스템(그림 2)이다⁽²⁾. 계류선은 평균해수면 이하 15.24m되는 곳(attachment point)에서 tower와 부착되어 있는 것으로 가정하였으며, 해저면은 clump weight를 받칠 수 있을 정도로 단단하다고 가정하였다. 해저면과의 경계조건을 해결하기 위하여 그림3에 나타난 바와 같이 응력-변형도 관계를 갖는 트러스요소를 사용하였다. 이를 사용하면 해저면의 토질상태(흙의 유효탄성계수)에 따라 불규칙하게 변하는 경계치 문제를 해결할 수 있다. 본 적용예에서 사용한 계류선의 정수는 표1에 나타내었고 EA 는 $1.87 \times 10^9 \text{kg}$ 로 하였으며, 해저면과의 경계조건을 해결하기 위하여 사용된 트러스요소의 단면적 A 는 $9.29 \times 10^6 \text{m}^2$ 로 취하였다. 그림4에 나타난 바와같이 guy line, clump weight, 그리고 anchor line으로 구성된 계류시스템을 여러개의 절점으로 나누어 요한요소 모델화하였고, 하중은 먼저 자중을 정적으로 작용시킨 후, tower의 계

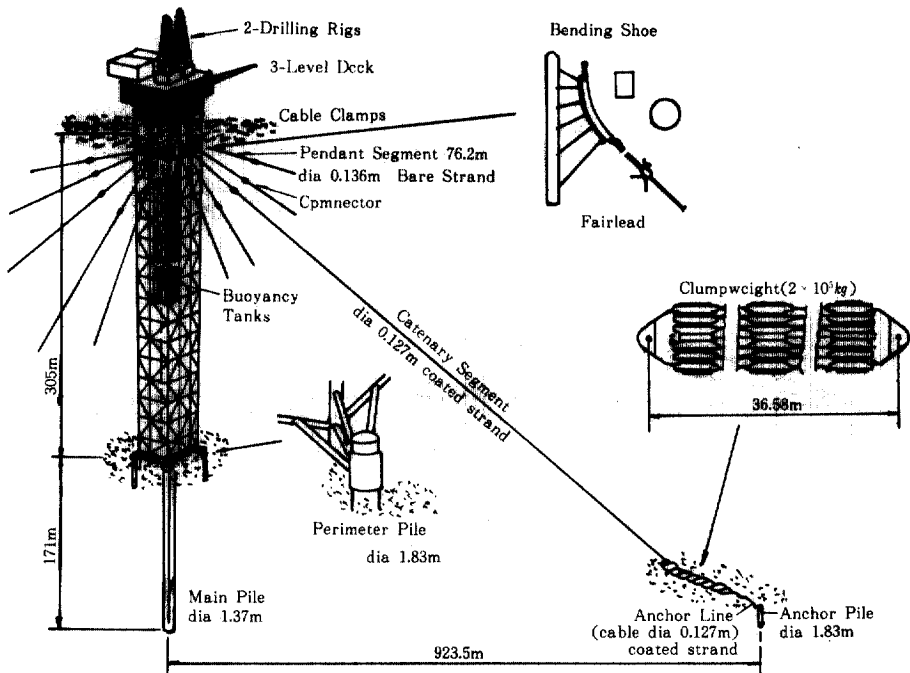


그림 2 Lena guyed tower configuration

류선 부착점의 운동을 고려하여 계류선의 거동을 해석하였다.

그림5에서 보느바와 같이 clump weight를 한

표 1. Mooring line properties

	Pendant and guy line	Clumpweight	Anchor line
Unit length weight	68.45kg/m	4315kg/m	68.45kg/m
Total length	640m	36.58m	396.2m
Size	dia 0.127m	width 2.438m	dia 0.127m

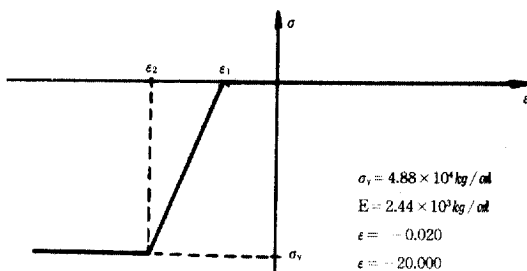


그림 3. Nonlinear stress-strain curve for truss element

개의 집중하중으로 처리한 경우에는 초기(clump weight가 들리기 전까지)의 계류선 강도를 약 39% 정도 과대평가하게 되고, clump weight가 들릴 때의 tower 부착점의 수평변위는 분포된 절점하중으로 처리한 경우의 값보다 작은 값이 된다.

그림6에서 clump weight의 총중량을 $1579 \times 10^3 \text{kg}$ 으로 일정하게 유지시키고 clump weight의 분포된 길이 S_{cl} 이 24.38m에서 36.58m, 48.77m로 증가하는 경우에 계류선의 거동을 고찰한 것으로서 clump weight의 분포길이가 증가함에 따라 계류선의 강도는 감소하고, clump weight가 모두 들릴 때의 tower 부착점의 수평변위는 증가함을 알 수 있다.

그림7에서 계류선의 clump weight의 단위중량을 2,232kg/m에서 3,423kg/m, 4,316kg/m, 5,209kg/m로 변화시켰을 때 계류선의 초기강도의 변화를 알 수 있으며, 각각 42%, 86%, 120%로 초기강도와 변화함을 알 수 있다. 그러므로 clump weight의 중량이 계류선의 강도에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며, 따라서 계류선의 최적현상은 clump weight가 들릴 때 tower 부착점에서의 인장력과 수평변위가 허용한계에 들도록 clump weight의 중량을 적절히 변화시켜서 구해야 한다.

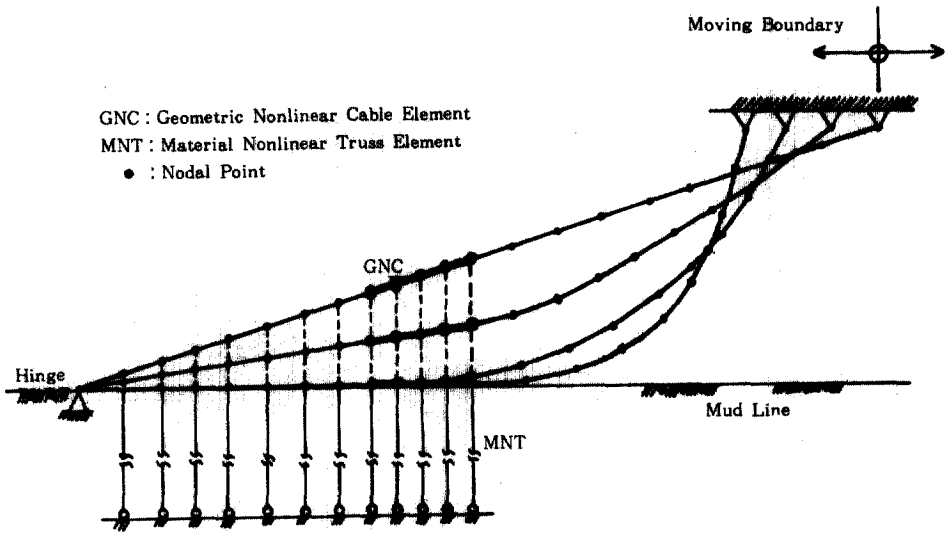


그림 4. General finite element model

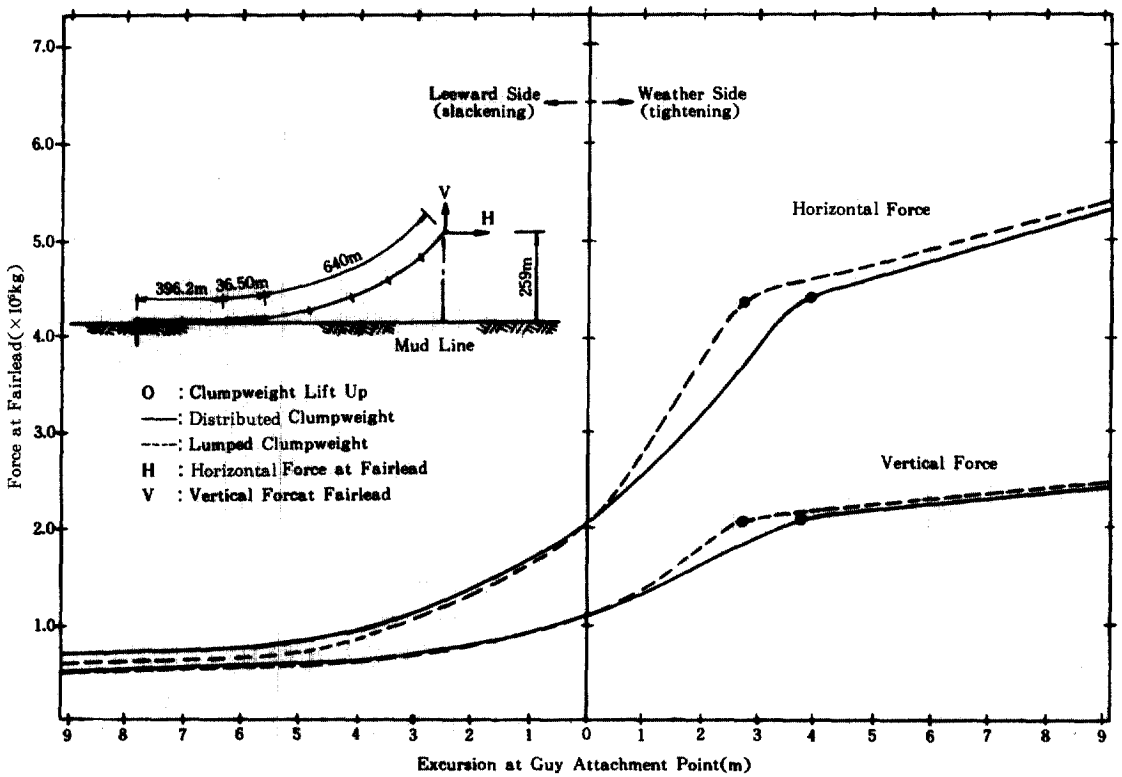


그림 5. Force-excision relationships of a single mooring line

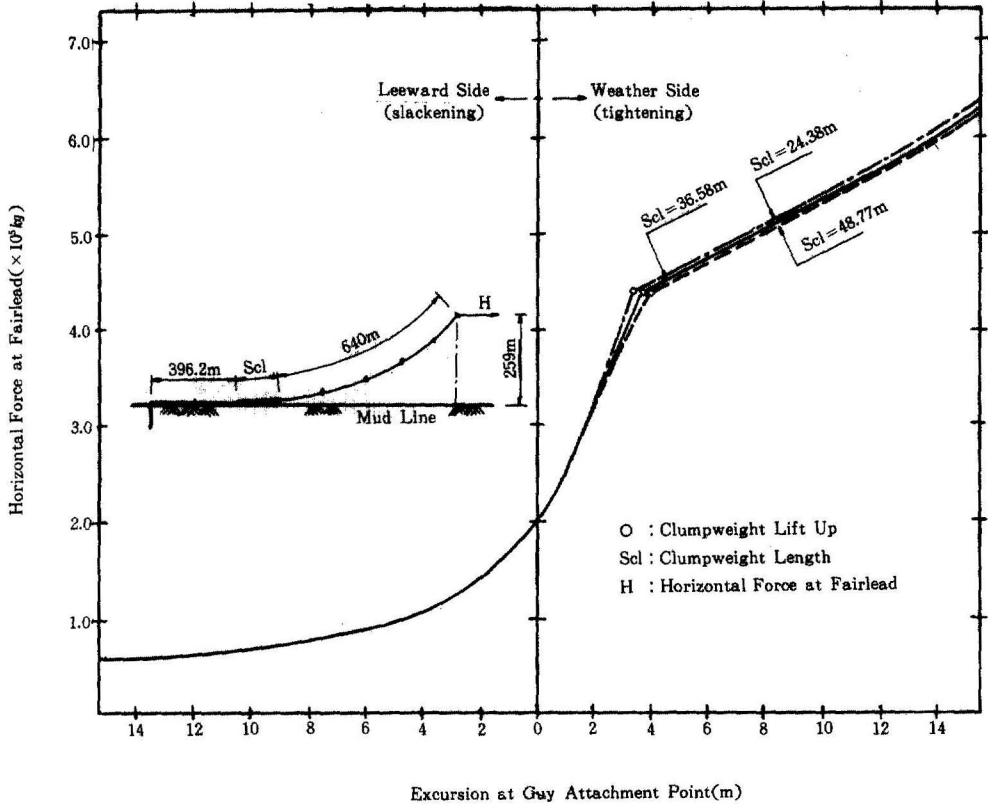


그림 6. Effect of clumpweight length

그림8에서 anchor line의 길이를 305m에서 396m, 488m, 1524m로 변화시켰을 때 clump weight가 들리는 순간 tower 부착점에서 수평범위가 약 7%, 14%, 167%로 변화함을 알 수 있으므로 anchor line 길이의 증가는 계류선의 강도를 감소시킴을 알 수 있다. 한편, anchor line이 없는 경우에는 tower 부착점에서 수평범위는 clump weight가 들린 후에도 거의 같은 강도로 증가함을 알 수 있으며, 이 경우에 guyed tower는 수평범위에 대해 유연성을 갖지 못하게 됨을 알 수 있다.

그림 9. (a)와 같은 케이블-Buoy시스템의 동적 거동을 파악하기 위하여 그림 9.(b)와 같은 모델을 사용하였다⁽²⁶⁾. 모델에 대한 값은 표2에 나타내었다. 그림 9.(b)의 모델에서 초기인장력을 3,538kg으로 한 다음에 자중을 모두 작용시키면 중앙점에서의 sag가 0.8255m가 된다. 이 경우에 지점B가 주기 4초, 진폭 0.381m인 주기운동을 할 때 $\frac{1}{4}$ 점, $\frac{3}{4}$ 점 및 중앙

점에서의 횡방향 변위응답을 지점운동과 함께 그림10에 나타내었다. 그림10에서 파랑에 의해 buoy가 운동을 할 때 buoy운동의 영향이 일정시간(buoy에서 떨어진 거리에 따라 다름) 이후에 케이블에 전달되는 것을 알 수 있다. 또한 주어진 지점운동과는 달리 중간중간에 굴곡이 존재하고 응답의 time lag가 생기는 현상은 파동효과에 의한 것으로 볼 수 있다. 실제 cable의 동적응답을 구하려면 파동에 의한 buoy운동 뿐만 아니라 직접 케이블에 작용하는 파력에 의한 영향도 고려해야 한다.

표 2. Properties of moored cable system

Length	254m
Area	$4.193 \times 10^{-5} \text{m}^2$
Weight	$3.57 \times 10^{-3} \text{kg/m}$
E	$1.405 \times 10^8 \text{kg/cm}^2$
ρ	$867 \text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$

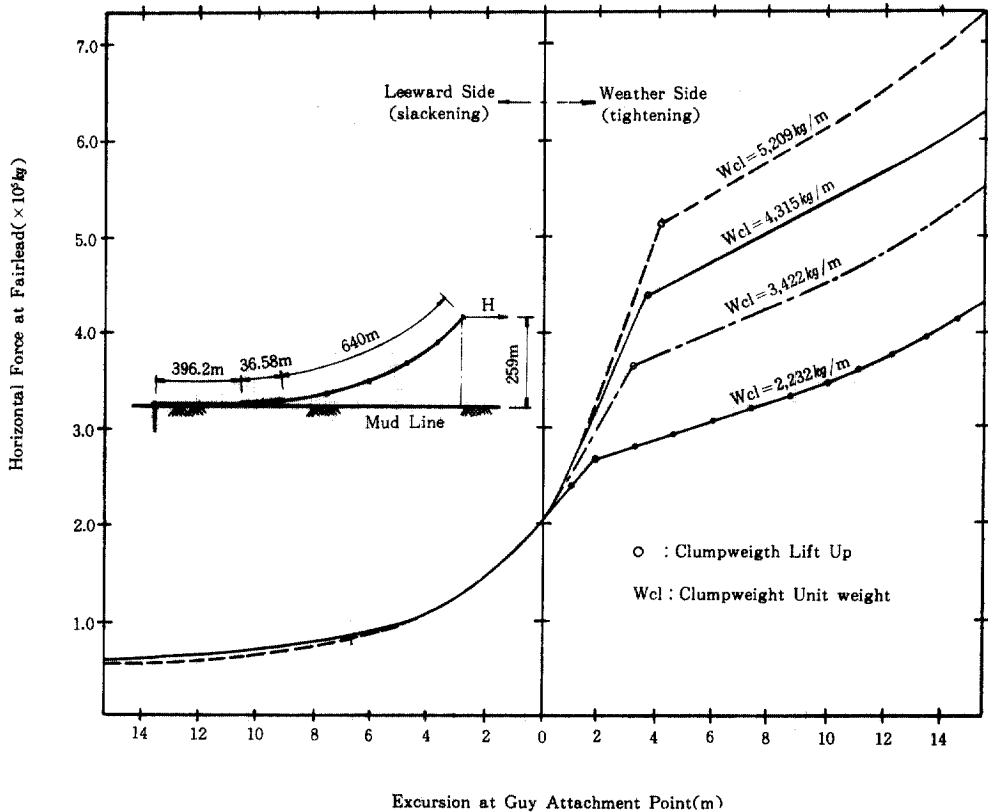


그림 7. Effect of changing clumpweight intensity

그림11과 표3에 나타낸 바와 같은 단일계류선을 갖는 Buoy의 이완(Relaxation)에 대한 동적해석을 하여 그 결과를 그림12, 13에 나타내었다. 계류선은 4개의 요소로 모델화하였으며, 초기형상은 현수선 식에서 구하였다. 본 예는 Leonard등의 해석에 및 Meggitt등이 실험한 것과 동일한 조건으로 동적해석을 하였다^(17~20). 이때 시간간격을 0.1sec로 취하여 수치적분을 수행하고 매 시간단계 마다 평행반복을 수행하였다. 그림12에서 알 수 있듯이 초기의 변위응답(0.7sec까지)은 Meggitt의 실험결과보다 약간 작으나 시간이 흐름에 따라 증가하여 4.0sec 이후에는 일치하였다. 그리고, 그림13은 시간 변화에 따른 anachor에서의 케이블 인장력의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초기의 인장력은 실험결과와 거의 일치하였으며, 전반적으로 Leonard, Huston, Webster등이 구한 응답에 비하여 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

표 3. Cable and buoy properties

Cable	Unstretched cable length	1.818m
	Cable diameter	$4.14 \times 10^{-3}m$
	Cable weight in air	$1.70 \times 10^{-2}kg/m$
	Cable weight in water	$3.54 \times 10^{-3}kg/m$
	Cable EA	2.18kg
Buoy	Buoy diameter	$5.08 \times 10^{-2}m$
	Buoy weight in air	$1.12 \times 10^{-2}kg$
	Buoy weight in water	$-5.49 \times 10^{-3}kg$

5. 결 론

본 연구에서는 파력과 조력등에 의한 guyed tower의 계류선 부착점의 운동에 따른 계류선의 거동을 정적 및 동적인 비선형해석을 수행하여 해석하였다. 가상일의 원리를 이용하여 기하학적 비선형성

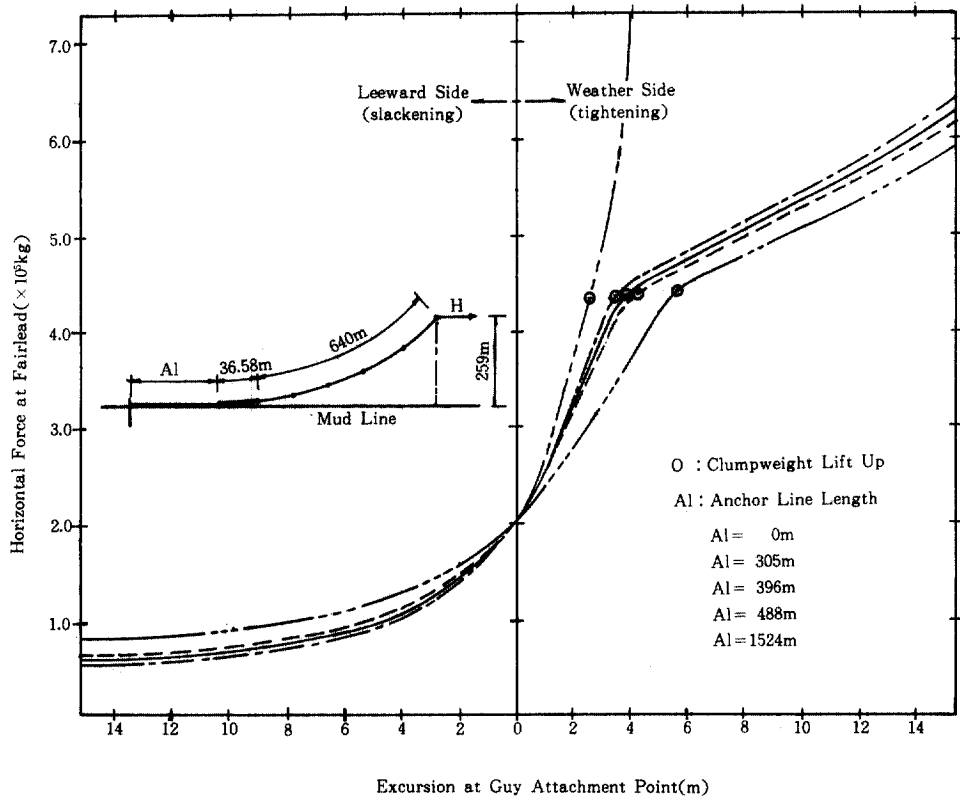


그림 8 Effect of changing anchor line length

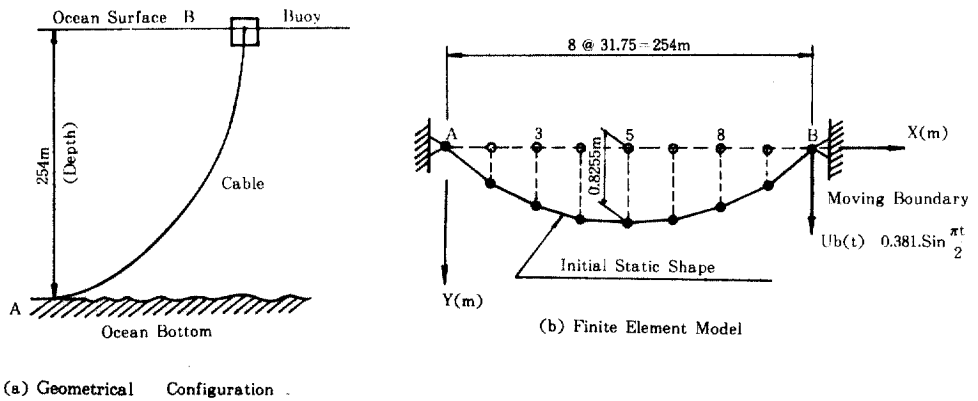


그림 9. Finite element model of single point moored cable system

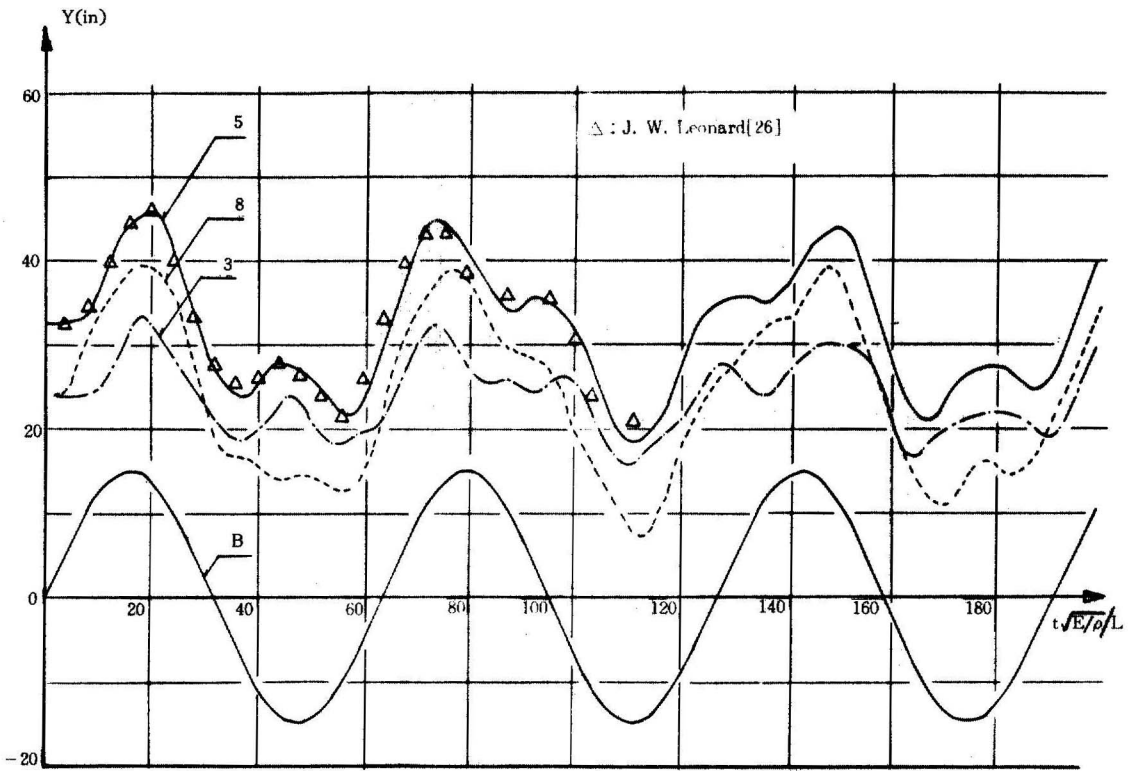


그림 10. Response of catenary to moving boundary

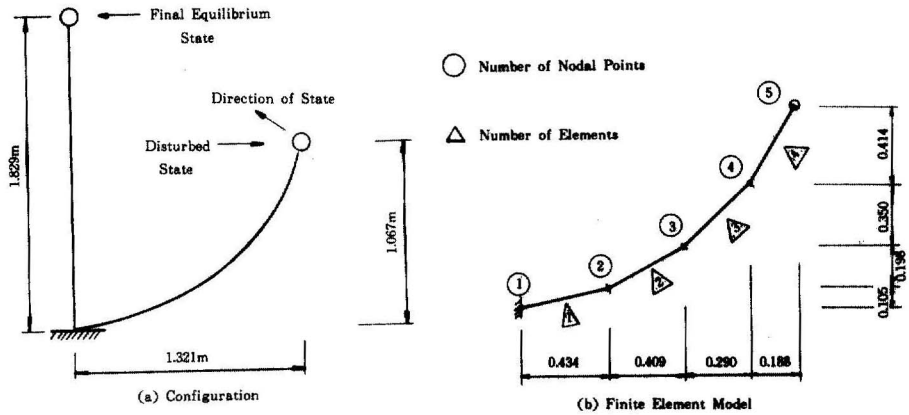


그림 11. Relaxation of single point moor

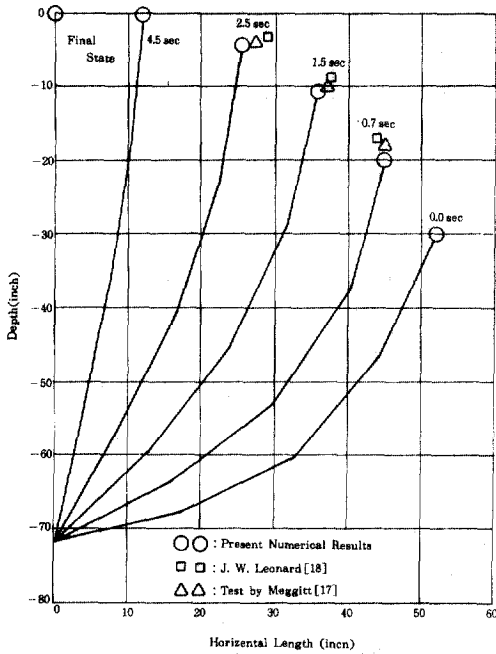


그림 12. Configuration for buoy relaxations of single point moored buoy.

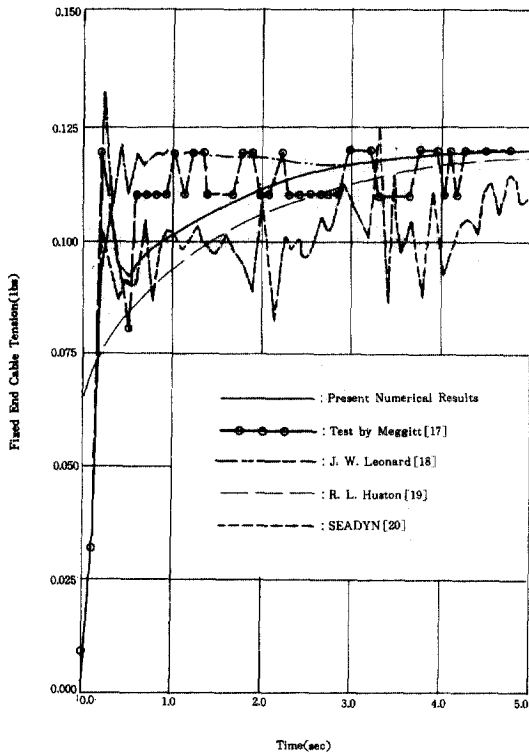


그림 13. Fixed end tension for buoy relaxation of single point moored buoy

을 고려한 운동방정식을 유도하였고, 이 식은 증분 이론을 사용하여 선형화하였다. 정적 및 동적 비선형 해석을 하여 계류선의 거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째로 계류선과 해저면과의 경계조건은 재료의 비선형성만을 고려한 트러스요소를 사용하여 해결할 수 있으며 불규칙한 토질상태를 갖는 해저면에 도 적용시킬 수 있다.

또한 계류선 자체의 거동과 계류선이 guyed tower에 미치는 영향을 정확히 파악하려면 지금까지의 일반적인 해석방법인 현수선식을 이용한 방법은 적절하지 못하므로 본 논문에서와 같은 수치해석 방법을 사용하는 것이 요망된다. clump weight의 중량 및 분포길기와 anchor line의 길이 및 계류선과 tower와의 부착점에서의 경사각등이 계류선의 강도에 미치는 영향등을 해석예에서 다룬바와 같으며, 또한 지점운동을 고려한 계류선의 동적 비선형해석을 통하여 계류선의 수중에서의 거동을 파악하였다.

감사의 말

본 연구는 1987년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행된 것이며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. L. D. Power et al, "Design of Guylines for the Lena Guyed Tower", *Proc. 3rd Offshore Mechanics & Arctic Eng. Symp.*, Vol. I, 51-59, ASME, New Orleans, 1984.
2. M. S. Triantafyllou et al, "The Static & 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., 1982.
3. C. R. Brinkmann, "Dynamic Interaction of Guyed Tower with Its Guyed System", *Proc. 2nd Offshore Mechanics & Arctic Eng. Symp.*, 46-53, ASME, Houston, 1983.
4. M. J. Mes, "Guyed Tower Design & Analysis of Preliminary Guy Design", *Petroleum Engineer International*, Nov. 15, 1981.

5. L. D. Finn, "A New Deep Water Offshore Platform -The Guyed Tower", *Proc. 8th Offshore Technology Conf.*, Vol. III, OTC 2688, 819-830, Houston, 1976.
6. L. D. Finn & K. E. Young, "Field Test Guyed Tower", *Proc. 10th Offshore Technology Conf.*, Vol. II, OTC 3131, 681-688, Houston, 1978.
7. E. Smith, "On Nonlinear Random Vibrations", Report No. 78-3, Div. Struc. Mech., Norwegian Institute of Technology, Univ. of Trondheim, 112-142, Norway, 1978.
8. K. A. Ansari, "Mooring with Multi-Component Cable System", *Jour. of Energy Resources Tehnology*, ASME 102, 62, June 1980.
9. A. K. Basu & A. Dutta, "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., 1982.
10. A. Dutta, "Behaviour of Guyed Tower Mooring Lines", *Proc 1st, East Asian Conf. on Structures Eng. & Construction*, Bangkok, Jan. 15-17, 1986.
11. K. J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.
12. D. L. Dean, "Static and Dynamic Analysis of Guyed Cables" *Jour. ASCE*, Vol. 87, No. Stl, Jan., 1961.
13. L. F. Wicker, "The Oscillatory Motion of Cable-Tower Bodies", Phd. Dissertation Submitted to the Univ. of California, Berkley, Calif. May 1957.
14. J. H. Nath, "Dynamic of Single Position Ocean Mooring of a Buoy-a Numerical Model for Solution by Computer", Oregon State Univ. School of Science, Corvallis, Oregon. Ref. 69-10, July 1969.
15. J. P. Breslin, "Dynamic Force Exerted by Oscillating Cables", *Journal of Hydronautics*, AIAA, Vol. No. 1, Jan 1974.
16. S. Shore et al, "Dynamic Response of Cable Systems : Nonlinear Vibrations of a Single Cable", Univ. of Pennsylvania, Towne School of Civil & Mechanical Engineering, Philadelphia, Penna.
17. D. J. Meggitt, P. A. Palo, & E. F. Buck, "Shell-Size Laboratory Experiments of the Large-Displacement Dynamics of Cable System, Vol I", M-44-78-11, U. S. Navy Civil Eng. Lab. Technical Memorandum, Port Hueueme, Calif., June 1978.
18. J. W. Leonard & A. Lo. "Dynamics Analysis of Underwater Cable", *Jour. ASCE*, Vol. 108, No. EM4, Aug. 1982.
19. R. L. Huston & J. W. Kamman, "Modeling of Submerged Cable Dynamics", *Comp. & Struct.* Vol. 20, No 1-3, 1985
20. P. A. Palo, "Comparisons between Small-Scale Cable Dynamics, Experimental Results and Simulations using SEADYN and SNAPLPG Computer Models", Tech. Memo TM No. M-44-79-5, Civil Eng. Lab, Port Hueueme, California, 1979.
21. J. F. Wilson, "Dynamics of Offshore Structures", Jone Wiley & Sons, 1984
22. M. S. Triantafyllou & L. Grinfolgel, "Natural Frequencies & Modes of Inclined Cable", *Jour. ASCE*, Vol. 112, No. 1, Jan 1986
23. A. S. Veletsos & G. R. Darbre, "Free Vibration of Parabolic Cable", *Jour. ASCE*, Vol. 109, No. 2, Feb 1983.
24. Banjwu Shin et al. "Small-Amplitude Vibrations of Extensible Cable", *Jour ASCE*, Vol. 110, No. 4, Apr 1984.
25. H. O. Berteaux, "Buoy Engineering", A Wiley-Interscience Publication, 1976.
26. J. W. Leonard, "Curved Finite Element Approximation to Nonlinear Cable", *Proceedings, ASCE, 4th Offshore Technology Conference*, paper OTC 1533, Houston, Tex., May, 1972.
27. R. L. Webster, "Nonlinear Static and Dynamic Response of Underwater Cable Structures Using the Finite Element Method," *Proceeding, ASCE, 7th Offshore Technology Conference*, Paper, OTC 2322, Houston, Tex, 1975.
28. A. K. Malhotra & Penzien, "Response of Offshore Structure to Random Wave Forces", *Jour ASCE*, Vol. 96, No. ST10, Oct., 1970

부 록

케이블과 유체가 조합된 해저케이블의 질량매트릭스는 다음과 같다.

$$[M_U]^e = [M]^e + [M]^e_{odd} \quad (A1)$$

여기서 대각행렬을 「」를 사용하여 대각요소만 표시하면

$$[M]^e = \frac{\rho_c A^o L}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & \end{bmatrix} \quad (A2)$$

$$[M]^e_{odd} = \frac{C_m \rho_f A^o L}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ & & & & & \end{bmatrix} \quad (A3)$$

$$C_m = C_I - 1 \quad (A4)$$

결국 식 (A1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[M_U]^e = \frac{\rho_c A^o L}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} + \frac{C_m \rho_f A^o L}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \quad (A5)$$

여기서 ρ 는 $(\rho_c + C_m \rho_f)$ 이다.

시간 t 에서의 케이블요소의 강도매트릭스 $[K]^e$ 는 다음과 같이 선형강도매트릭스 $[K]^e_L$ 와 절점변위값에 따라 변

하는 기하학적 접선강도매트릭스 $[K]^e_{NL}$ 의 합이다⁽²⁾.

$$[K]^e = [K]^e_L + [K]^e_{NL} \quad (A6)$$

$$[K]^e_L = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \quad (A7)$$

$$[K]^e_{NL} = \frac{P}{L} \begin{bmatrix} I_3 & -I_3 \\ -I_3 & I_3 \end{bmatrix} \quad (A8)$$

$$[k_1] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 3\theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \\ \theta_2 & \theta_1 & 0 \\ \theta_3 & 0 & \theta_1 \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$\theta_1 = \frac{X_2 - X_1}{L}, \quad \theta_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{L}, \quad \theta_3 = \frac{Z_2 - Z_1}{L} \quad (A10)$$

여기서 A 와 E 는 케이블요소의 단면적과 탄성계수이고, L 와 P 는 시간 t 에서의 케이블요소의 길이와 축방향 인장력을 나타낸다.

(接受: 1988. 11. 17)