

다점지지 계류시스템의 정적해석에 대한 연구

신 현 경* · 김 덕 수**

(95년 6월 15일 접수)

A Study on the Static Analysis of Multi-Leg Spread Mooring Systems

H. Shin* · D. S. Kim**

Key Words : Floating Offshore Structure(부유식 해양 구조물), Multi-leg Spread Mooring System(다점지지 계류계), Static Analysis(정적해석), Runge-Kutta 4th Method (룽에-쿠타 4차법), Spring Constant(스프링 상수), Taylor's Series Expansion (테일러 급수 전개)

Abstract

A multi-leg spread mooring system for floating offshore structures is important, but the multi-leg static analysis is complicated due to the nonlinear behavior of each line and the effect of current which affects each line differently. The pretensioned position of the multi-leg mooring system obtained from the static equilibrium condition changes into a different position due to external loads and current. In this paper, the new position and the static tension at each line are calculated. The relation between the initial static equilibrium position and the new position due to the external loads is expressed in terms of a Taylor's series expansion. The Runge-Kutta 4th method is employed in analyzing the 3-dimensional static cable nonlinear equations.

1. 서 언

부유식 해양구조물에는 다점지지 계류시스템(a multi-leg spread mooring system)이 많이 사용되는데, 각 계류선의 비선형적인 거동과 각 계류선에 작용하는 서로 상이한 해류는 다점지지 계류시스템의 거동해석을 어렵게 한다[1][2].

본 논문에서는 정적평형 상태에 있는 다점지지 계류시스템의 선인장력(pretension)된 위치가 케이블에 작용하는 해류와 주어진 외력에 의해 새로운 위치로 변함을 보인다. 정적평형 상태로 계류된 구조물에 외력이 가해지면 구조물은 새로운 위치로 이동하게 되고, 이때 각 계류선의 정적장력을 구할 수 있다[2].

* 정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

** 비회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

정적평형 상태의 처음의 위치와 외력이 가해졌을 때 새로운 위치 사이의 관계는 각 계류선에서 구한 스프링 상수(spring constants)를 이용해서 Taylor's Series로 구한다[3]. 또한 정적 계류선의 3차원 비선형 방정식 해석에는 4차의 Runge-Kutta 방법이 사용된다[4].

2. 좌 표 계

본 논문에서 사용한 좌표계는 Fig. 1과 같다.

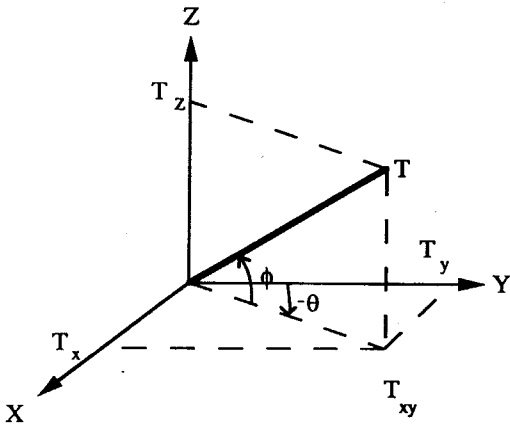


Fig. 1 Coordinate System

Fig. 1에서 T는 케이블요소에 작용하는 장력이다. T_x 는 X방향의 수평력이고, T_y 는 Y방향의 수평력이다. 그리고 T_z 는 Z방향의 수직력이다. ϕ 는 케이블요소에서 장력이 작용하는 접선방향과 XY 수평면간의 각도이고, θ 는 Y축과 T_{xy} 와 이루는 각도이다.

3. 계류선의 정역학

Fig. 2에서 l_x 는 Excursion의 X방향 길이를 나타내고, D는 수심을 나타낸다. Excursion은 l이고, 계류선의 길이는 L이다.

Fig. 3에서 l_x 는 Excursion의 X방향 길이를 나타내고, l_y 는 Excursion의 Y방향 길이를 나타낸다.

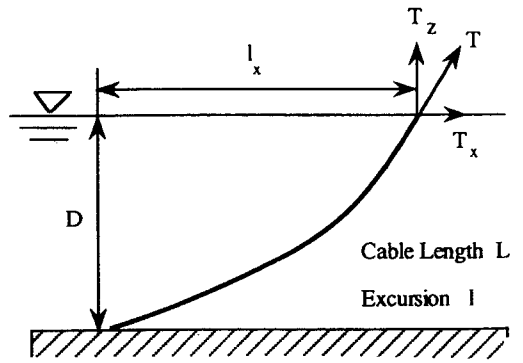


Fig. 2 Vertical plane view of a mooring line

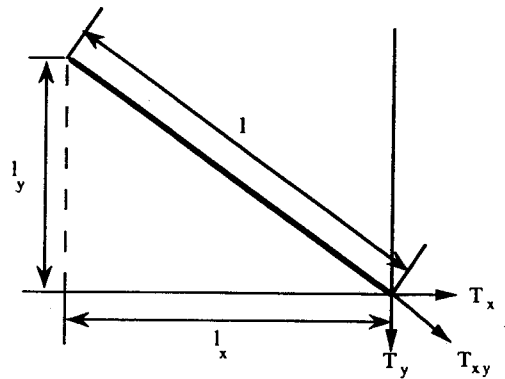


Fig. 3 Horizontal plane view of a mooring line

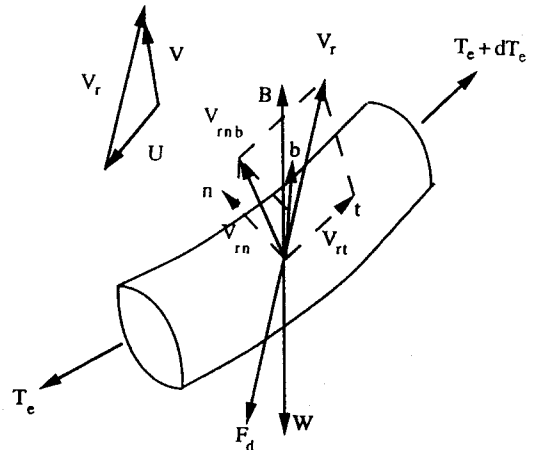


Fig. 4 Forces acting on a unit element of cable

Fig. 4에서 U 는 해류의 속도다. 계류선 단위요소가 V 의 속도를 가질 때, 상대속도는 V_r 이 된다. $V_{r,t}$ 는 접선방향의 속도이고, $V_{r,n}$ 은 $V_{r,n}$ 과 $V_{r,b}$ 의 합한 속도다. V_r 은 $V_{r,t}$ 와 $V_{r,n}$ 의 합이다. 이 때 항력은 V_r 과 반대방향으로 작용하는 F_d 가 된다. T_e 는 유효장력을 나타내는데 이는 계류선에 작용하는 장력 T 와 계류선의 단면에 작용하는 압력에 의한 힘과의 합이다. 이외에도 계류선 단위요소에는 수직인 방향으로 부력 B 와 단위요소의 수중에서의 무게 W 가 작용한다.

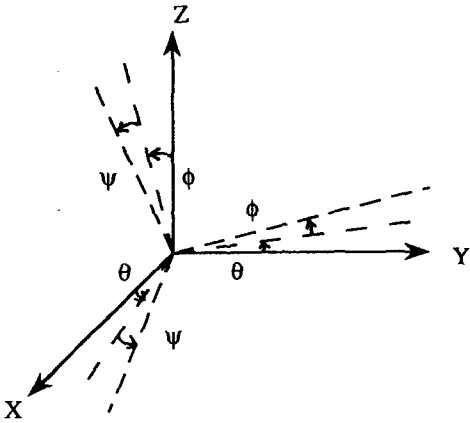


Fig. 5 Euler angle

Fig. 5에서 θ 는 Z축에 대한 회전각, ϕ 는 X축에 대한 회전각, ψ 는 Y축에 대한 회전각이며 오일러각(Euler angle)은 Z축, X축, Y축의 회전 순서를 따른다.

다점지지 계류계의 해석을 위해 사용하는 다음의 식 (1)은 계류선을 따라서 만족되어야 한다. 여기서 w 는 계류선의 단위요소가 물속에서 갖는 무게이고, e_o 는 $\frac{T_e}{EA}$ 이다.

$$\begin{aligned} \frac{dT_e}{ds} &= w \sin \phi - F_t(1+e_o) \\ \frac{d\phi}{ds} &= \frac{[w \cos \phi \cos \psi - F_n(1+e_o)] \cos \psi}{T_e} \\ 0 &= w \cos \phi \sin \psi - F_b(1+e_o) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{ds} &= - \frac{[w \cos \phi \cos \psi - F_n(1+e_o)] \sin \phi}{T_e \cos \phi} \\ \frac{dx}{ds} &= - \cos \phi \sin \theta (1+e_o) \\ \frac{dy}{ds} &= \cos \phi \cos \theta (1+e_o) \\ \frac{dz}{ds} &= \sin \phi (1+e_o) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 해류에 의한 F_t , F_n 및 F_b 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} F_t &= -0.5 \rho_w C_t \pi D V_{r,t} |V_{r,t}| \\ F_n &= -0.5 \rho_w C_n D V_{r,n} \sqrt{V_{r,n}^2 + V_{r,b}^2} \\ F_b &= -0.5 \rho_w C_b D V_{r,b} \sqrt{V_{r,n}^2 + V_{r,b}^2} \end{aligned}$$

ρ_w 는 물의 밀도, C_t , C_n 및 C_b 는 각각 접선방향, 법선방향 및 종법선방향의 항력계수이다. $V_{r,t}$ 는 계류선 단위요소의 접선방향 속도, $V_{r,n}$ 은 법선방향, $V_{r,b}$ 는 종법선방향의 속도다.

4. 다점지지 계류시스템의 정적해석

4.1 Tension-Excursion 곡선

Fig. 6은 2차원 평면상에 놓인 계류선의 상단에 선인장력(pretension)이 주어졌을 때 Excursion의 경향을 나타내며 이 그래프는 Excursion을 알고 있을 때 그에 해당하는 장력을 구할 때 사용한다. 또한 식(6)에서 스프링 상수를 구할 때도 사용된다.

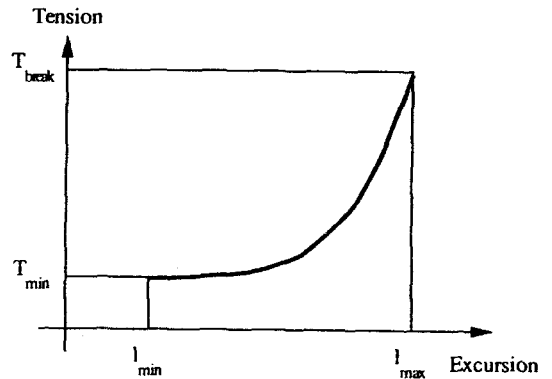


Fig. 6 Tension-Excursion curve of a mooring line

4.2 스프링 상수의 유도

정적 장력의 변화는 닻의 위치(anchor position)와 계류선의 상단위치(top position, fairleader) 사이의 수평거리의 함수로 생각한다. 즉, $h = h(l)$ 이다. 여기서, h 는 계류선의 상단위치에서 작용하는 정적장력으로 Fig. 1의 T_{xy} 와 크기는 같고 방향은 반대이다. 구조물의 변위는 고정된 닻의 위치 A에 대한 점 $P_1(x_{p0}, y_{p0})$ 에서 점 $P_2(x_p, y_p)$ 로의 이동으로 표현할 수 있다. 결국, 계류선의 기하학적 모양으로부터 $h = h(l)$ 와 스프링 상수 사이의 관계를 찾을 수 있다. Fig. 7의 각 θ 는 Fig. 5의 오일러 각 θ 와는 다르다.

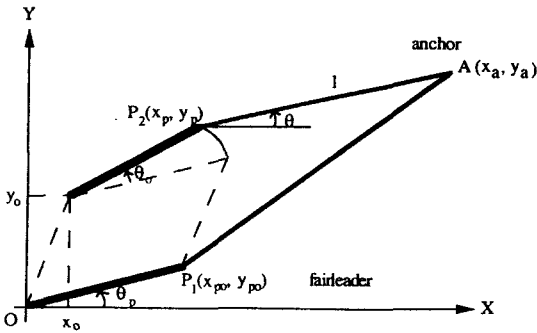


Fig. 7 Holding loads

Fig. 7로부터 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h &= h(l) = h[l(x_o, y_o, \theta_o)] \\
 f_x &= h \cos(\theta) \\
 f_y &= h \sin(\theta) \\
 rm &= (x_p - x_o)f_y - (y_p - y_o)f_x
 \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)의 (x_o, y_o) 는 외력이 가해진 구조물이 새로운 위치를 찾기 위한 전 단계의 위치를 나타내고, Fig. 7에서의 θ_o 는 OP_1 의 회전각을 나타낸다. θ_p 는 OP_1 의 각도이고, l 은 닻의 위치(anchor position)와 계류선의 상단위치(top position) 사이의 Excursion을 나타낸다. (f_x, f_y) 는 X와 Y 방향으로 파지력을 나타내고, rm 은 파지력에 의한 모우먼트를 나타낸다.

Fig. 7의 기하학적인 모양으로부터 다음의 식들

이 유도된다.

$$l \cos \theta = x_a - x_p = x_a - x_o - OP_1 \cos(\theta_p + \theta_o) \tag{3}$$

$$l \sin \theta = y_a - y_p = y_a - y_o - OP_1 \sin(\theta_p + \theta_o)$$

또한 식 (3)으로부터 다음과 같은 미분 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(l \cos \theta)}{\partial x_o} &= \frac{\partial l}{\partial x_o} \cos \theta + l(-\sin \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x_o} = -1 \\
 \frac{\partial(l \sin \theta)}{\partial x_o} &= \frac{\partial l}{\partial x_o} \sin \theta + l(\cos \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x_o} = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

그러므로, 다음의 식들이 만족된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial x_o} &= \frac{dh}{dl} \frac{\partial l}{\partial x_o} = -\cos \theta \frac{dh}{dl} \\
 \frac{\partial h}{\partial y_o} &= \frac{dh}{dl} \frac{\partial l}{\partial y_o} = -\sin \theta \frac{dh}{dl} \\
 \frac{\partial h}{\partial \theta_o} &= \frac{dh}{dl} \frac{\partial l}{\partial \theta_o} = OP_1 \sin(\theta_p + \theta_o - \theta) \frac{dh}{dl}
 \end{aligned} \tag{5}$$

결국, 스프링 상수 S_{11} 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{\partial f_x}{\partial x_o} = \frac{\partial h}{\partial x_o} \cos \theta + \frac{\partial \theta}{\partial x_o} h(-\sin \theta) \\
 &= -\left[\frac{dh}{dl} \cos^2 \theta + \frac{h}{l} \sin^2 \theta \right]
 \end{aligned}$$

마찬가지로, i^{th} 계류선에 대한 스프링 상수(spring constants)를 식 (6)과같이 유도할 수 있다.

$$[S]^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x_o} & \frac{\partial f_x}{\partial y_o} & \frac{\partial f_x}{\partial \theta_o} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x_o} & \frac{\partial f_y}{\partial y_o} & \frac{\partial f_y}{\partial \theta_o} \\ \frac{\partial rm}{\partial x_o} & \frac{\partial rm}{\partial y_o} & \frac{\partial rm}{\partial \theta_o} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= -\left(\frac{dh}{dl} \cos^2 \theta + \frac{h}{l} \sin^2 \theta \right) \\
 S_{12} &= \left(\frac{h}{l} - \frac{dh}{dl} \right) \sin \theta \cos \theta \\
 S_{13} &= -OP_1 \sin(\theta_p + \theta_o) \frac{\partial f_x}{\partial x_o} + OP_1 \cos(\theta_p + \theta_o) \frac{\partial f_x}{\partial y_o} \\
 S_{21} &= \frac{\partial f_x}{\partial y_o} = S_{12} \\
 S_{22} &= -\left(\frac{dh}{dl} \sin^2 \theta + \frac{h}{l} \cos^2 \theta \right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 S_{23} &= -OP_1 \sin(\theta_p + \theta_o) \frac{\partial f_y}{\partial x_o} + OP_1 \cos(\theta_p + \theta_o) \frac{\partial f_y}{\partial y_o} \\
 S_{31} &= \frac{\partial f_x}{\partial \theta_o} = S_{13} \\
 S_{32} &= \frac{\partial f_y}{\partial \theta_o} = S_{23} \\
 S_{33} &= -[OP_1 \sin(\theta_p + \theta_o) f_y + OP_1 \cos(\theta_p + \theta_o) f_x] \\
 &\quad + [OP_1 \cos(\theta_p + \theta_o) \frac{\partial f_y}{\partial \theta_o} \\
 &\quad - OP_1 \sin(\theta_p + \theta_o) \frac{\partial f_x}{\partial \theta_o}]
 \end{aligned}$$

4.3 새로운 위치 계산

전체 계류시스템의 스프링 상수는 식 (7)과 같이 표현된다. 이는 각각의 계류선에 대한 스프링 상수를 각 방향끼리 전부 합함으로써 표현된 것이다.

$$\sum_{i=1}^N [S]^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x_o} & \frac{\partial F_x}{\partial y_o} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta_o} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x_o} & \frac{\partial F_y}{\partial y_o} & \frac{\partial F_y}{\partial \theta_o} \\ \frac{\partial RM}{\partial x_o} & \frac{\partial RM}{\partial y_o} & \frac{\partial RM}{\partial \theta_o} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, N은 계류선의 수다. 각각의 계류선이 갖는 각 방향으로 파지력들의 합을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_x &= \sum_{i=1}^N (f_x)_i \\
 F_y &= \sum_{i=1}^N (f_y)_i \\
 RM &= \sum_{i=1}^N (rm)_i
 \end{aligned} \quad (8)$$

스프링 상수와 외력(external loads) 사이의 관계는 Taylor's Series로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_x &= f_1(x, y, \theta) \\
 &= f_1(x_o, y_o, \theta_o) + \alpha \left(\frac{\partial f_1}{\partial x} \right)_o + \beta \left(\frac{\partial f_1}{\partial y} \right)_o \\
 &\quad + \gamma \left(\frac{\partial f_1}{\partial \theta} \right)_o \\
 F_y &= f_2(x, y, \theta) \\
 &= f_2(x_o, y_o, \theta_o) + \alpha \left(\frac{\partial f_2}{\partial x} \right)_o + \beta \left(\frac{\partial f_2}{\partial y} \right)_o \\
 &\quad + \gamma \left(\frac{\partial f_2}{\partial \theta} \right)_o
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 RM &= f_3(x, y, \theta) \\
 &= f_3(x_o, y_o, \theta_o) + \alpha \left(\frac{\partial f_3}{\partial x} \right)_o + \beta \left(\frac{\partial f_3}{\partial y} \right)_o \\
 &\quad + \gamma \left(\frac{\partial f_3}{\partial \theta} \right)_o
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x &= x_o + \alpha \\
 y &= y_o + \beta \\
 \theta &= \theta_o + \gamma
 \end{aligned}$$

여기서, f_1 , f_2 및 f_3 는 각 계류선의 각 방향의 힘 및 모멘트다. (x_o, y_o, θ_o) 는 구조물이 새로운 위치를 찾기 전 단계의 위치를 나타내며 (x, y, θ) 는 외력이 가해진 구조물의 새 위치를 나타낸다. 식 (9)에서, 외력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= -F_x \\
 E_y &= -F_y \\
 EM &= -RM
 \end{aligned} \quad (10)$$

다점지지 계류시스템의 최초의 위치를 구하기 위하여 외력과 해류가 없는 정적상태에서 선인장력을 결정해야 한다. 이 단계에서 각 계류선의 스프링 상수를 구할 수 있다. 정적 평형 상태의 계류시스템에 해류가 흐르고 외력이 가해질 때, 부유식 해양 구조물의 새로운 위치와 각 계류선에 생기는 정적 장력을 구할 수 있다. 구하고자 하는 해는 i^{th} 단계의 위치와 $i-1^{\text{th}}$ 단계의 위치를 수렴기준 (convergence criterion)과 비교하여 이를 만족할 때까지 반복법으로 구한다.

5. 응용

본 프로그램으로 직육면체 구조물(L×B×D = 150×100×10)이 4개의 계류선으로 계류되었을 때, 4개의 계류선이 똑같은 경우(identical lines)와 다를 경우(different lines)에 대해서 해석해 보았다. 구조물에 대한 해류의 방향과 가해진 외력의 방향은 Fig. 8과 같다.

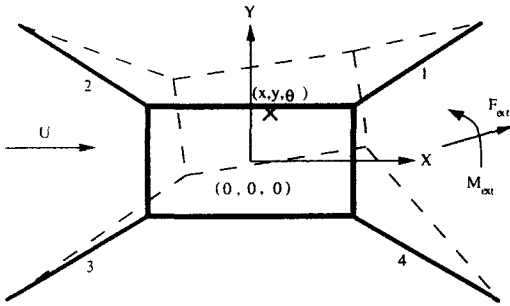


Fig. 8 New configuration of the structure and its mooring system due to external loads

5.1 같은 계류선(identical lines)

같은 계류선의 특성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Characteristics of the identical line

	CABLE 1, 2, 3, 4
CABLE LENGTH	1036.0 m
MASS	48.7 kg/m
ADDED MASS	6.3 kg/m
WEIGHT	417.98 N/m
DIAMETER	0.8890E-01 m
EA	0.1300E+10 N
BREAKING TENSION	0.1500E+08 N
WATERDEPTH	426.7 m
CURRENT VELOCITY	1.0 m/s
TANGENTIAL DRAG COEFFICIENT	0.05
NORMAL DRAG COEFFICIENT	1.2
BINORMAL DRAG COEFFICIENT	1.2

각 계류선의 상단위치와 닻의 위치는 Table 2와 같다.

Table 2 Top and anchor position of each cable line

	CABLE LINE 1	CABLE LINE 2	CABLE LINE 3	CABLE LINE 4
X COORD. TOP	75.0 m	-75.0 m	-75.0 m	75.0 m
Y COORD. TOP	50.0 m	50.0 m	-50.0 m	-50.0 m
ANGLE(θ)	30.0 °	150.0 °	210.0 °	330.0 °
X COORD. ANCHOR	872. m	-872. m	-872. m	872. m
Y COORD. ANCHOR	510. m	510. m	-510. m	-510. m
EXCURSION	920.5 m	920.5 m	920.5 m	920.5 m

주어진 외력, 구조물의 새로운 위치 및 각 계류선의 장력은 Table 3과 4에 나타내었다.

Table 3 Initial total force, given external total force and total motion(new position)

	INITIAL FORCE	GIVEN FORCE	TOTAL MOTION
X DIRECTION	0.1 N	1.0E+06 N	6.107 m
Y DIRECTION	0.1 N	1.0E+06 N	36.52 m
ANGLE DIRECTION	-30.0 NM	1.0E+06NM	-0.38 °

Table 4 Excursion and total forces of each line at the new position

	CABLE LINE 1	CABLE LINE 2	CABLE LINE 3	CABLE LINE 4
TOTAL FORCE AT THE TOP	5.8E+5N	5.1E+5N	9.0E+5N	2.1E+6N
ANGLE(θ)	27.8 °	151.8 °	212.1 °	328.2 °
EXCURSION	914. m	899. m	934. m	944. m

5.2 다른 계류선(different lines)

계류선 2와3은 같은 계류선(identical lines)과 특성이 같고, 1과 4는 다르다. 계류선의 특성치는 아래와 같다.

Table 5 Characteristics of the identical line

	CABLE 2,3	CABLE 1,4
CABLE LENGTH	1036.00 m	1136.00 m
MASS	48.7 kg/m	48.7 kg/m
ADDED MASS	6.3 kg/m	6.3 kg/m
WEIGHT	417.980 N/m	417.980 N/m
DIAMETER	0.8890E-01m	0.8890E-01m
EA	0.1300E+10N	0.1300E+10N
BREAKING TENSION	0.1500E+08N	0.1500E+08N
WATERDEPTH	426.7 m	436.7 m
CURRENT VELOCITY	1.0 m/s	1.0 m/s
TANGENTIAL DRAG COEFFICIENT	0.05	0.05
NORMAL DRAG COEFFICIENT	1.2	1.2
BINORMAL DRAG COEFFICIENT	1.2	1.2

각 계류선의 상단위치와 닻의 위치는 Table 6과 같다.

Table 6 Top and anchor position of each cable line

	CABLE LINE 1	CABLE LINE 2	CABLE LINE 3	CABLE LINE 4
X COORD. TOP	75.0 m	-75.0 m	-75.0 m	75.0 m
Y COORD. TOP	50.0 m	50.0 m	-50.0 m	-50.0 m
ANGLE(θ)	30.0 °	150.0 °	210.0 °	330.0 °
X COORD. ANCHOR	964. m	-872. m	-872. m	964. m
Y COORD. ANCHOR	563. m	510. m	-510. m	-563. m
EXCURSION	1025.9m	920.5 m	920.5 m	1025.9m

주어진 외력, 구조물의 새로운 위치 및 각 계류선의 장력은 Table 7과 8에 나타내었다.

Table 7 Initial total force, given external total force and total motion(new position)

	INITIAL FORCE	GIVEN FORCE	TOTAL MOTION
X DIRECTION	1.8E+05N	1.0E+06 N	3.665 m
Y DIRECTION	-0.01 N	1.0E+06 N	36.23 m
ANGLE DIRECTION	-12.8 NM	1.0E+06NM	-0.33 °

Table 8 Excursion and total forces of each line at the new position

	CABLE LINE 1	CABLE LINE 2	CABLE LINE 3	CABLE LINE 4
TOTAL FORCE AT THE TOP	6.5E+5N	5.2E+5N	9.7E+5N	2.1E+6N
ANGLE(θ)	28.1 °	151.8 °	212.0 °	328.4 °
EXCURSION	1020 m	903. m	936. m	1050 m

5.3 해석 결과 토의

5.3.1 같은 계류선의 시스템에 외력이 작용할 경우 직육면체 구조물(L×B×D = 150×100×10)이 동일한 특성을 갖는 계류선에 계류되어 있고, 여기에 큰 외력이 가해졌을 때 구조물의 새로운 위치와 각 계류선의 정적 장력을 해석했다.

각 계류선의 길이는 1036 m, 직경 0.0889 m이고, 수심은 426.7 m이다. 정적 장력이 200,000 N부터 1.5E+07 N까지 변하면서 각 계류선의 상단위치에 가해졌을 때 계류선이 갖는 Excursion은 36.2 m이고, 수심에 대한 Excursion의 비는 약 8.5 %였다.

각 계류선에 가해진 선인장력에 의해 닻위치와 상단위치를 결정했고, 선인장된 계류계의 X 와 Y 방향으로 외력이 각각 1.0E+06 N 가해지고, 모멘트가 1.0E+06 NM 가해졌을 때 새로운 위치(6.11 m, 36.52 m)와 구조물의 회전각(-0.38 degrees)을 구할 수 있었다. 이 때 새로운 위치에서 각 계류선

의 장력의 합은 X 와 Y 방향으로 각각 1,002,768 N, 998,559.8 N 이었고, 모멘트는 986,812.5 NM 이었다. 또한 각 계류선의 상단위치 및 닻위치에서 장력을 구할 수 있었다.

5.3.2 다른 계류선의 시스템에 외력이 작용할 경우 계류선 2와 3은 같은 계류선(identical line)과 특성이 같고, 1과 4는 다른 경우이다. 계류선 1과 4는 길이가 1136 m, 직경 0.0889 m이고, 수심은 436.7 m이다. 정적 장력이 200,000 N부터 1.5E+07 N까지 변화하면서 각 계류선의 상단위치에 가해졌을 때 계류선이 갖는 Excursion은 최대가 35.95 m이고, 수심에 대한 Excursion의 비는 약 8.2 %였다.

계류선 2와 3은 선인장력이 666,000 N, 1과 4는 777,000 N이 가해졌을 때, 계류계의 고정좌표계 원점에서 X 방향으로 파지력이 zero가 아니었다. 계류계의 X 방향으로 총 파지력은 약 -184,800 N 이었다. 이는 이미 최초 선인장된 계류계의 원점에서 X 방향으로 외력이 작용하고 있음을 의미한다.

선인장된 계류계의 X 와 Y 방향으로 외력이 각각 1.0E+06 N 가해지고, 모멘트가 1.0E+06 NM 가해졌을 때 새로운 위치(3.67 m, 36.23 m)와 구조물의 회전각(-0.33 degrees)을 구할 수 있었다. 새로운 위치에서 각 계류선의 장력의 합력은 X 방향으로 1,002,678.0 N, Y 방향으로 998,611.8 N 이었고, 모멘트는 988,203.8 NM 이었다. 그리고 새로운 위치에서 각 계류선의 정적 장력을 구할 수 있었다.

6. 결 언

3차원 비선형 상미분 방정식으로 표현되는 케이플의 다점지지 계류시스템(a multi-leg mooring system)의 정적 해석을 수행했다.

다점지지 계류시스템의 정적해석을 위하여 스프링 상수(spring constants)와 Taylor's series 를 적용하는 새 알고리즘을 개발했다.

부유식 해양구조물의 다점지지 계류시스템에 해류(current)와 외력(external force)이 작용했을 때, 계류된 구조물의 새로운 위치와 각 계류선의 정적 장력을 구했다.

7. 후 기

본 연구는 과학기술처 특정 연구개발사업(한일 국제 공동 연구사업)의 일부분으로, 주관기관인 울산대학교 해양공간이용 프로그램(OSURP)의 연구비 지원으로 수행했다.

8. 참 고 문 헌

- [1] H. Shin and K. N. Cho, "Study on Nonlinear Cable Dynamics", Report, University of Ulsan, 1992.
- [2] K. Sekita, "Analysis of the Multi-line Mooring Systems", Nippon Steel Corp.
- [3] Francis B. Hildebrand, "Advanced Calculus for Applications", pp. 102 - 105, pp 94, pp. 122, Second Edition Prentice-Hall International, Inc., 1976.
- [4] William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky and William T. Vetterling, "Numerical Recipes in C", Chapter 15, Cambridge University Press, 1987.
- [5] H. Shin, "Static Analysis of Multi Point Mooring System for Buoy", OSURP, No 94-026, University of Ulsan, 1994.
- [6] H. Shin, "Cable Dynamics for the Application to Floating Breakwaters", RCOID, National Fisheries of Pusan, 1990.
- [7] H. Shin, "Static Analysis of Multi-leg Mooring Systems", OSURP, No 94-041, University of Ulsan, 1994.