

계류시스템 설계를 위한 3차원 정적해석

범용 수치프로그램 개발

유 창 혁* · 박 한 일**

Development of a Multi-Purpose Numerical Program for Three Dimensional Static Analysis of Mooring Systems

Abstract

This study is aimed to predict the configurations and tensions of mooring lines for several different mooring systems which play an important role in developing ocean resources. The governing equations of 3-D static equilibrium equations for a flexible mooring line are derived and solved using a finite difference method. The forces considered in this study are effective weights, drag forces due to currents and ship moving, and the tension at both ends of the mooring line. The non-linear governing equations are solved by the bisection iterative procedure. Comparison between the results by theoretical and numerical methods seems quite reasonable.

The numerical program is then adapted to a menu-driven and dialog-box type by using the languages of Fortran 90 and Visual C++ under the MS-PowerStation Visual 5.0 Tool. It is possible to see the results on a monitor screen graphically, and this program can be used for the design of mooring systems.

1. 서 론

본 연구에서는 Fig.1-1에서 나타내고 있는 수면부체용, 수중부이용, 수중 다중부이용 및 사이드스캐너용과 해수면에서 두 대의 선박으로 예인되는 계류삭에 대한 해

* 한국해양대학교 해양공학과 대학원

** 한국해양대학교 조선해양공학부

석을 수행하고자 한다. 계류삭에 대한 정확한 해석은 소요되는 계류삭의 정확한 길이 산정, 계류삭에 걸리는 장력 계산 및 그에 따른 계류삭의 크기 결정, 계류삭의 수중 배치형상 등을 정확하게 예측함으로써 가장 적절한 계류시스템을 설계할 수 있다[1].

일반적으로 계류시스템 설계시 각각의 환경이나 재료에 따라 별도의 계산을 수행하여 인력과 시간의 소요가 뒤따른다. 이로 인해 계류시스템 전용 해석 프로그램 개발이 필요하였다. 요즈음과 같이 전자산업의 발전 속에서 컴퓨터는 인간에게 많은 도움을 제공한다. 특히 컴퓨터와 인간이 대화(dialog)하는 형식의 프로그램 개발이 가능하다. 이로 인해 특정분야에 대한 전문지식이 부족한 사람도 컴퓨터 화면을 통해 손쉽게 전문분야에 대한 이해가 가능하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 프로그램 개발에 있어서 메뉴선택(menu-driven) 방식과 대화상자(dialog-box) 방식을 이용한 윈도우 프로그램으로써 키보드와 마우스에 의한 간단한 작동으로 쉽게 해석이 가능하도록 구성하고자 한다.

본 논문에서는 총6장으로 구성하고자 한다. 먼저 제1장에서 계류시스템에 대한 간략한 소개 및 설계에 대해 논하고 제2장에서는 3차원 지배방정식을 모리슨 방정식으로 유도하여 제3장에서 유한차분법을 이용한 수치해석 제4장에서는 참고문헌과의 검증을 통해 수치프로그램을 완성하며 제5장에서는 개발되어진 수치프로그램을 간략히 소개하고 예제해석을 수행하고자 한다. 끝으로 제6장에서 결론을 맺도록 구성하고자 한다. 또한 여기서 제시되는 수치해석 프로그램은 유한차분법을 이용한 계류시스템 전용 프로그램으로 여러 가지 계류방식에 따른 계류해석을 통합 패키지화하여 짧은 시간에 다양한 해석을 수행하고자 한다.

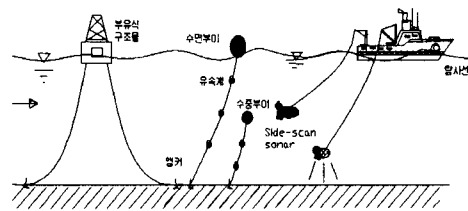


Fig.1-1 Mooring systems

2. 3차원 이론식

2.1 좌표계

본 논문에서는 Fig.2-1과 같은 3차원 좌표계를 사용하였다.[2]

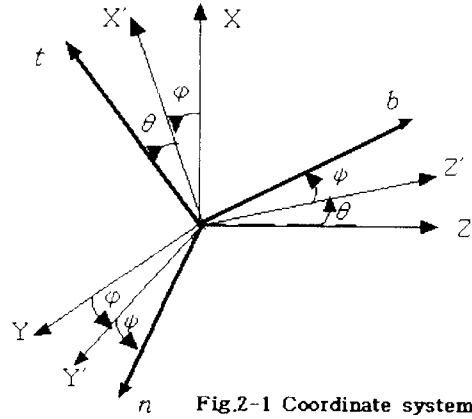


Fig.2-1 Coordinate systems

- φ : Z 축을 중심으로 회전한 각도
- θ : Y' 축을 중심으로 회전한 각도
- ψ : t 축을 중심으로 회전한 각도

$$\begin{bmatrix} t \\ n \\ b \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{1}$$

만약, 계류선의 접선방향 좌표축을 t축으로 잡고 계류선의 비틀을 무시한다면, $\psi=0$ 이 되므로 좌표변환 행렬식은 다음과 같이된다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ \cos \psi \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.2 유효자중 (R_u)

탄성거동 하에서 선형 응력-변형의 관계를 적용하면,

$$e = \frac{T}{EA} \tag{3}$$

여기서, T : 응력(Stress)

E : 탄성계수(Modulus of Elasticity)

A : 계류삭의 단면적

e : 변형도

만약, 계류삭이 원형단면(circular cross-section)이라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= A_s(1+e) \\ d &= d_s\sqrt{1+e} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, d, A 는 변형 전 계류삭의 직경과 단면적
 d_s, A_s 는 변형 후 계류삭의 직경과 단면적

만약, 물 속에서 계류삭의 변형을 고려한 단위 길이당 부력을 F_B 라 하면,

$$F_B = g\rho_w A_s \quad (5)$$

따라서 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_B(1+e) = g\rho_w A \quad (6)$$

또한, 계류삭의 단위 길이당 공기중 무게는 다음과 같다.

$$w = mg \quad (7)$$

한편, 수중에서의 계류삭의 유효자중은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$w_0 = (m - \rho_w A)g \quad (8)$$

유효자중을 성분별로 나타내면 아래 식과 같다.

$$\vec{R}_w = -w_0 \vec{i} = w_0(n_1 \vec{u} + n_2 \vec{v} + n_3 \vec{w}) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} n_1 = -\cos \phi \cos \theta \\ n_2 = \sin \phi \\ n_3 = -\cos \phi \sin \theta \end{cases}$$

2.3 항력 (R_d)

해류에 의해 수중 케이블이 받는 항력은 아래 식과 같이 된다.

$$\vec{R}_d = R_{d1} \vec{u} + R_{d2} \vec{v} + R_{d3} \vec{w} \tag{10}$$

여기서, R_{d1}, R_{d2}, R_{d3} : 각 성분별 항력의 크기

$$\begin{aligned} R_{d1} &= \frac{1}{2} \rho_u d_s \pi C_t v_t^2 \sqrt{(1+e)} \\ R_{d2} &= \frac{1}{2} \rho_u d_s \pi C_n v_n \sqrt{v_n^2 + v_b^2} \sqrt{(1+e)} \\ R_{d3} &= \frac{1}{2} \rho_u d_s \pi C_b v_b \sqrt{v_n^2 + v_b^2} \sqrt{(1+e)} \end{aligned} \tag{11}$$

여기서, v_t, v_n, v_b : 각 방향별 해류 속도

C_t, C_n, C_b : 각 방향의 항력계수

2.4 장력(T)

계류삭 각 요소 양 끝단에 작용하는 장력(T)은 아래 Fig.2-2와 같이 나타낼 수 있다.

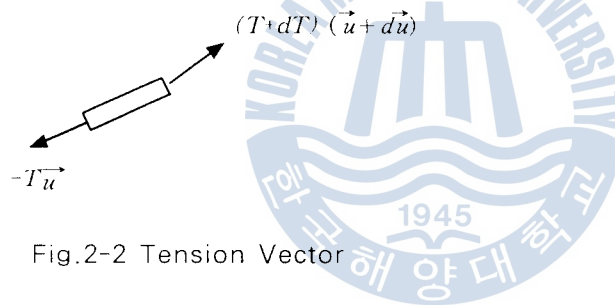


Fig.2-2 Tension Vector

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \cos \phi \cos \theta \vec{i} + \sin \phi \cos \theta \vec{j} - \sin \theta \vec{k} \\ \vec{v} &= -\sin \phi \vec{i} + \cos \phi \vec{j} \end{aligned} \tag{12}$$

$\vec{w} = \cos \phi \sin \theta \vec{i} + \sin \phi \cos \theta \vec{j} + \cos \theta \vec{k}$
 여기서, $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$: 좌표 (t, n, b) 의 단위벡터 $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$: 좌표 (X, Y, Z) 의 단위벡터

$$d\vec{u} = \cos \theta d\phi \vec{v} - d\theta \vec{w} \tag{13}$$

그래서, 각 요소 양단에 작용하는 장력은

$$-T\vec{u}$$

and

$$(T+dT)(\vec{u} + \cos \theta d\phi \vec{v} - d\theta \vec{w}) \tag{14}$$

2.5 평형방정식

예인케이블에 관한 평형방정식과 관련 문제들이 참고문헌 [3]에 잘 설명되어 있다. 본 연구에서는 예인케이블의 요소를 케이블과 같이 유연한 구조로 가정하여 굽힘강성을 무시하였다. 따라서 한 요소에 대한 자유물체도를 Fig.2-3과 같이 표현할 수 있으며 요소에 작용하는 힘에 대한 평형방정식을 구하면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & -T\vec{u} + (T+dT)(\vec{u} + \cos\theta\,d\phi\,\vec{v} - d\theta\,\vec{w}), \\
 & + R_t d\vec{s}u + R_n d\vec{s}v + R_b d\vec{s}w - w_0 ds\vec{i} = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

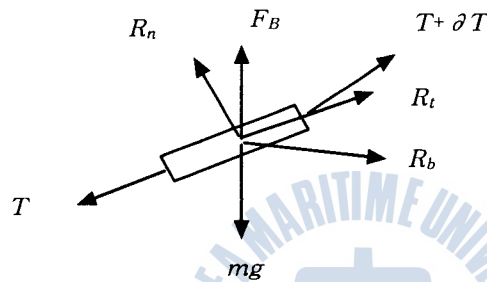


Fig.2-3 Free body diagram

식(15)을 성분 (t, n, b)별로 표시하면,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial s} &= -w_0 n_1 - R_t \\
 T \frac{\partial \phi}{\partial s} \cos\theta &= -w_0 n_2 - R_n \\
 T \frac{\partial \theta}{\partial s} &= w_0 n_3 + R_b
 \end{aligned} \tag{16}$$

3. 유한차분법

일반적으로 자연현상은 미분방정식을 가지고 나타내는 것이 통례이다. 그러나 자연현상의 복잡성으로 인해 미분방정식도 매우 복잡한 성질을 나타내게 되어 간단히 푸는 것이 곤란한 경우가 많이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 유한차분법을 이용한 해석을 수행하였다.

다음의 평형방정식에 대한 전진차분법으로 나타낸 식이다.[4]

$$\begin{aligned}
 T_{i+1} &= T_i + (w_{0i} \cos \phi_i \cos \theta_i - R_i) ds \\
 \phi_{i+1} &= \phi_i - \frac{w_{0i} \sin \phi_i + R_n}{T_i \cos \theta_i} ds \\
 \theta_{i+1} &= \theta_i - \frac{w_{0i} \cos \phi_i \sin \theta_i - R_b}{T_i} ds
 \end{aligned} \tag{17}$$

경계값은 계류삭 한쪽 끝단에 달려 있는 물체가 받는 힘의 수직장력 (T_y) 및 수평장력 (T_x, T_z)에 의해 결정한다.

$$\left. \begin{aligned}
 \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{T_y}{T_x} \right) \\
 \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{T_z}{T_x} \right) \\
 T &= \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}
 \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

수심에 따른 유속을 Fig.3 1과 같이 열 개까지 입력할 수 있도록 하였으며 그 방향도 임의의 방향으로 변화가 가능하도록 하였다. 수심에 따른 값들 사이에는 선형보간 공식(linear interpolation formula, [4])을 이용하여 얻었다. Fig.3 1에서는 편의상 수심에 따른 방향은 모두 동일한 경우에 대한 값으로 나타내었다.

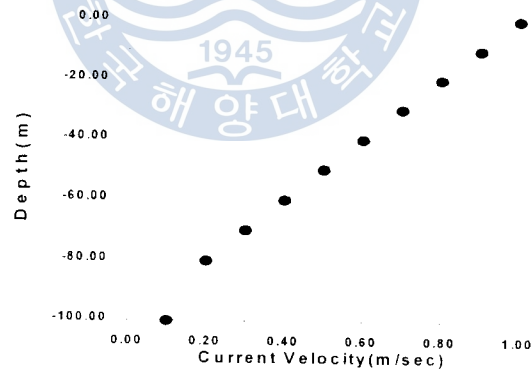


Fig.3-1 Current Profile

4. 알고리즘 검증

두가지 이론식과 개발된 프로그램의 결과값을 비교하였다. Table 4-1에서의 차이비율을 통해 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 4-1 Comparison between theoretical and numerical results

		이론계산	수치계산	차이비율(%)
현수 계류삭	부이에서 장력	2754.7237	2754.754	0.001
	앵커에서 장력	1155.5904	1144.525	0.958
	수평 최대거리	30.9463	30.9279	0.060
중립부력 계류삭	장력	4448	4401.083	1.055

해류의 방향을 변화시킴으로 Table 4-2와 같이 3차원 알고리즘이 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 4-2 Comparison between the results by a change of current angle

해류 각도 (도)	이탈거리	차이비율 (%)
0	64.1660	0.000
15	64.0513	0.179
30	63.8156	0.546
45	63.7145	0.704
60	63.8160	0.545
75	64.0517	0.178
90	64.1660	0.000

5. 프로그램 소개 및 예제해석

본 연구에 사용된 프로그램 언어로는 Fortran PowerStation 4.0[5]과 Visual C++ 5.0[6] 이다.

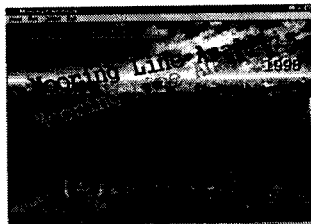


Fig.5-1 Main Display

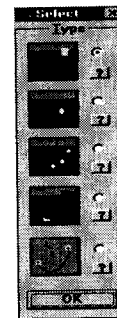
Fig.5-2
Selection
type

Fig.5-1은 주화면, Fig.5-2는 해석을 위한 선택메뉴와 Fig.5-3은 프로그램 흐름도를 보여주고 있다.

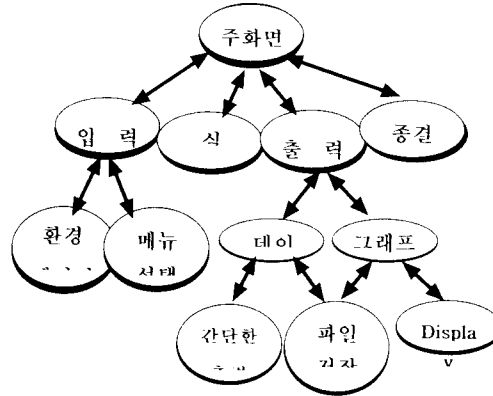


Fig.5-3 Flow Chart

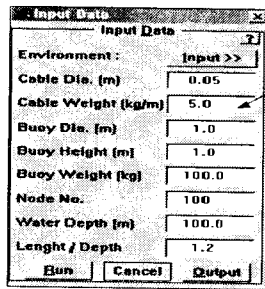


Fig.5-4 Input data for the mooring line of a surface buoy

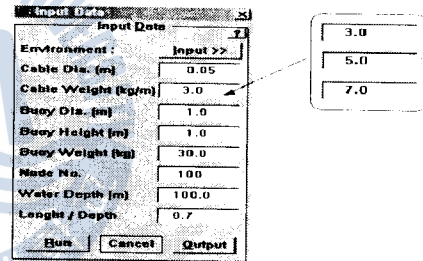


Fig.5-5 Input data for the mooring line of a subsurface buoy

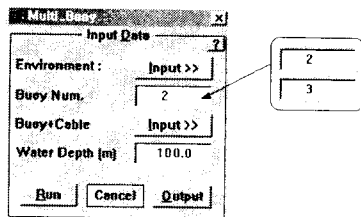


Fig.5-6 Main input data for the mooring line of a multi-buoy system

>> BUOY <<			>> CABLE <<			
	Diameter (m)	Height (m)	Weight (kg)	Diameter (m)	Length (m)	Weight (kg/m)
1	1.	1.	20.0	0.05	30.	5.0
2	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
3	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
4	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
5	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
6	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
7	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
8	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
9	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0
10	0.8	0.8	20.0	0.05	30.	5.0

Fig.5-7 Input data of buoy and mooring line for multi-buoy system

Fig.5-4~Fig.5-10은 각각의 계류형태에 따른 입력 대화상자를 보여주고 있다. 여기서 Fig.5-10은 수심에 따른 해류의 특성, 영계수와 계류삭 신장의 유무에 대해 결정하는 대화상자이다.

Depth (m)	50
Anchor Dia. (m)	0.5
Anchor Weight (kg)	0.3
Mooring Weight (kg)	100
Mooring Dia. (mm)	1.0
Cable Dia. (mm)	0.05
Cable Weight (kg/m)	5.0
Depth (m)	100
Mooring Dia. (mm)	100
Length / Depth	0.9
Ship Velocity (knot)	1.5
Ship Angle (deg)	45.0

Fig.5-8 Input data for the mooring line of a side-scan sonar

Current Velocity (m/sec)	1.0	100.0	
Target Point (X, Y, Z) (m)	0.0	10.0	20.0
Cable Length (m)	1.5		
Drag Coefficient (Tangential)	0.1		
Drag Coefficient (Normal)	1.5		
Young's Modulus (N/m²)	4.0e+8		

Fig.5-9 Input data for the mooring line of towing ships

Depth (m)	0.0	1.0	45.0
10.0	0.9	45.0	
20.0	0.8	45.0	
30.0	0.7	45.0	
40.0	0.6	45.0	
50.0	0.5	45.0	
60.0	0.4	45.0	
70.0	0.3	45.0	
80.0	0.2	45.0	
100.0	0.1	45.0	

Drag Coefficient (Tangential)	0.02
Drag Coefficient (Normal)	1.5
Young's Modulus (N/m²)	4.0e+7

Fig.5-10 Environment input data

Fig.5-11~Fig.5-15는 각각의 계류형태에 따른 출력 그래프를 보여준다. 왼쪽은 수심에 따른 Y-평면의 계류삭의 위치를 보여주며 오른쪽은 수심에 따른 계류삭의 장력분포를 보여주고 있다.

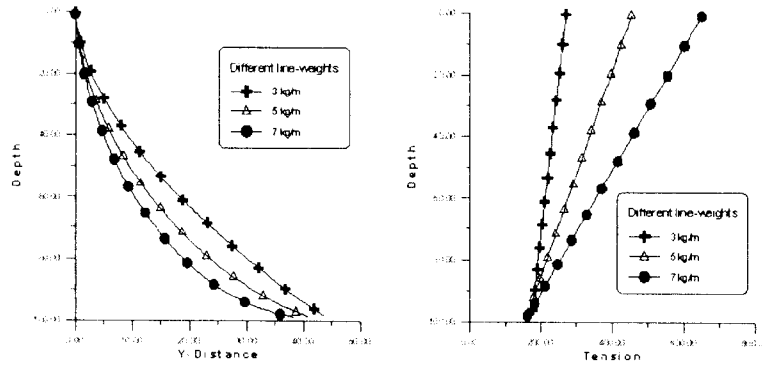


Fig.5-11 Configurations in X-Y plane(left) and tensions(right) for the mooring line of a surface buoy

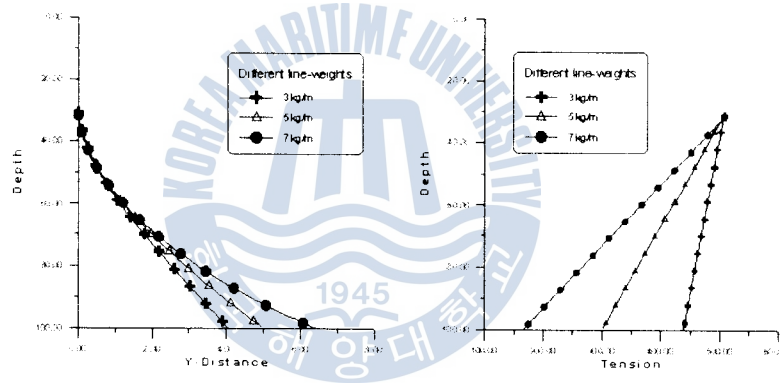


Fig.5-12 Configurations in X-Y plane(left) and tensions(right) for the mooring line of a subsurface buoy

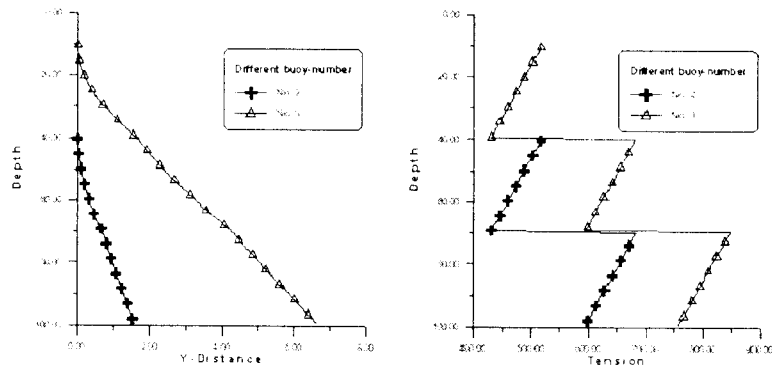


Fig.5-13 Configurations in X-Y plane(left) and tensions(right) for the mooring line of multi-buoy systems

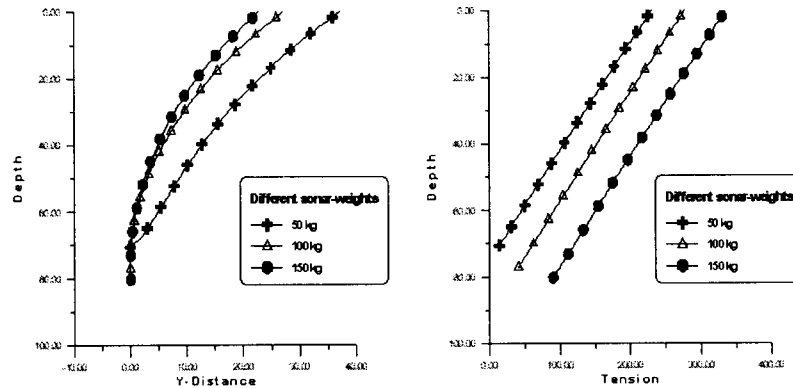


Fig.5-14 Configurations in X-Y plane(left) and tensions(right) for the mooring line of a side-scan sonar

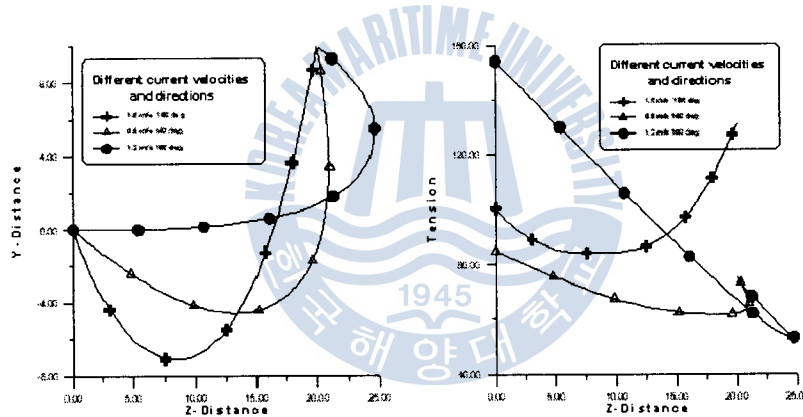


Fig.5-15 Configurations in X-Y plane(left) and tensions(right) for the mooring line of towing ships

6. 결론

본 논문에서는 계류시스템에서 중요한 부분을 차지하는 계류삭에 대한 3차원 정적 해석 프로그램을 개발하였다. 특히 해양에 적용되는 여러 가지 형태의 계류시스템에 대한 해석을 한 프로그램 내에서 해석할 수 있는 통합 프로그램으로 개발하였다. 이 프로그램은 간단한 계산에만 국한되는 것이 아니라 사용자위주의 프로그램으로써 메뉴선택(menu-driven) 방식과 함께 대화상자(dialog-box) 방식으로 구성되어 빠르고 쉽게 사용될 수 있도록 하였다. 해석방법으로는 유한차분법을 사용하여 계류시스템에

서 나타나는 유체력에 의한 비선형 효과를 근사적인 방법으로 해를 구하였다. 또한 반복법 및 보간법등의 여러 가지 수치해석적 방법이 도입되었다. 얻어지는 결과는 계류삭 각 요소에 작용하는 장력 및 계류삭의 수중형상과 함께 계류삭이 늘어난 길이와 수중부이의 위치 등을 구할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 개발되어진 프로그램을 검증하기 위해 참고문헌[5]에서 제시하는 현수 및 중립부력 계류삭에 대한 이론해석을 도입하여 이론해석과 수치해석을 비교함으로써 프로그램의 정당성이 입증되었다. 또한 여러 가지 경우에 대한 예제해석을 수행하여 다양한 결과들을 구하였다.

근래에는 계측기의 발달로 인해 이론해석에 의한 검증과 함께 실험을 통한 검증이 중요시되고 있다. 또한 동적해석의 요구가 점차 증가하고 있으며 이와같은 요구에 맞는 지속적인 연구가 필요하리라 생각한다. 마지막으로 본 연구에서 제시하고 있는 5가지의 계류시스템 외에 더 다양한 형태에 대한 연구도 꾸준히 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Berteaux H. O., "Buoy engineering", John Wiley & Sons, Inc., 1976
- [2] Spiegel M. R., "Theory and problems of vector analysis SI(metric) edition and an introduction to TENSOR ANALYSIS", McGraw-Hill Book Company, 1959
- [3] Howell C. T., "Introduction of the Dynamics of Low-Tension Cables", Dissertation of the Degree of Doctor, MIT, 1992
- [4] 유혜영, 이강섭 공역, "공학도를 위한 수치해석", 희중당, 1994

