

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 33 卷 第 4 號 1996年 11月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 33, No. 4, November 1996

## 내파성 가리비 연승식 양식시설에 관한 연구 - 케이블-부이-중량물 계류시스템의 주파수 영역 해석 -

신현경\* , 김덕수\*\*

### A Study on Longline Type Aquaculture Facilities in the Open Sea : Frequency Domain Analysis of Cable-Buoy-Weight Mooring System

by

H. Shin\* and D. S. Kim\*\*

#### 요 약

내파성 연승식 양식시설은 케이블-부이-중량물 계류시스템으로 이루어졌다. 양식시설의 최적 설계를 위해서는 계류선과 부이나 중량물 연결점에서 장력등의 추정이 필요하다. 그러나 계류선의 비선형적인 거동과 파·해류 등의 영향은 해석을 어렵게 한다. 본 논문에서는 여러 가지 부이-중량물을 갖는 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 파라메트릭 연구를 통하여 동장력 변화 및 거동 변화 등을 알아보았다. 고유진동수 해석을 위하여 유한차분법을 도입하였으며, 비선형 유체항력은 선형화 되었다.

#### Abstract

Longline type aquaculture facilities in the open sea are based on the cable-buoy-weight mooring system. For their optimal design it is necessary to estimate tensions along the mooring lines including the attachment points of buoys and weights. However, the dynamic analysis is very complicated due to the nonlinear behaviors of the mooring lines and the effects of wave and current. In this paper, parametric studies for various buoy-weight cases are shown. Finite difference scheme is employed in obtaining eigenfrequencies in the frequency domain. Nonlinear hydrodynamic drag forces are equivalently linearized.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 춘계연구발표회('96. 4. 19)

접수일자 : 1996년 5월 27일 , 재접수일자 : 1996년 9월 21일

\*정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

\*\* 정회원, 대우중공업(주) 옥포조선소 선박해양기술연구소

### 1. 서 론

최근 동해 연안에서 양식을 위한 시설로서 연승식 시설(longline type aquaculture facilities)을 사용하고 있는데, 동해는 다른 해역과 달리 강한 해류와 폭풍성 저기압에 의한 고파랑의 내습이 빈번하다. 이러한 환경하에서 견딜 수 있는 계류시스템 개발 및 안전성 평가가 절실하게 되었다<sup>1), 2)</sup>.

케이블-부이-중량물 계류시스템으로 이루어진 내파성 연승식 양식시설에 대한 닻위치에서의 장력과 파·해류 등의 영향에 의한 부이나 중량물 연결점에서의 장력 및 거동의 변화 등을 해석하는 것은 계류시스템의 최적설계를 위해서 중요하다. 그러나 계류선의 비선형적인 거동, 해류 등은 정적 및 동적해석을 복잡하고 어렵게 하고 있다<sup>3)</sup>.

본 논문에서는 해류가 작용하는 연승식 양식시설의 파라메트릭 연구(parametric study)를 통하여 가리비의 성장과정에 따른 닻위치에서의 정장력과 부이나 중량물 연결점에서의 정장력 및 변위를 비교한다. 또한 유한차분법을 이용한 주파수 영역 해석을 통하여 계류시스템의 고유주파수, 부이나 중량물 연결점에서의 동장력 및 거동의 변화 등을 알아봄으로써 계류시스템에 대한 안전성 평가의 기초를 마련하고자 한다.

### 2. 케이블-부이 동역학

Fig. 1과 같이 수중 부이가 파와 해류의 영향을 받으며 케이블에 연결되어 있다면 다음과 같은 케이블-부이 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (m_b + a_b) \ddot{x} &= a_b \dot{u} - T_e^+ \cos \phi^+ \sin \theta^+ \\
 &\quad + T_e^- \cos \phi^- \sin \theta^- + D_{xb} \\
 (m_b + a_b) \ddot{y} &= a_b \dot{v} + T_e^+ \cos \phi^+ \cos \theta^+ \\
 &\quad - T_e^- \cos \phi^- \cos \theta^- + D_{yb} \\
 (m_b + a_b) \ddot{z} &= a_b \dot{w} + T_e^+ \sin \phi^+ \\
 &\quad - T_e^- \sin \phi^- + B_b - W_b + D_{zb}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x^+ &= x^- \\
 y^+ &= y^- \\
 z^+ &= z^-
 \end{aligned}$$

식 (1)에서  $m_b$ 는 부이의 질량이다.  $a_b$ 는  $(1 + a_b)$ 를 의미하고,  $a_b$ 는 부이의 부가질량이다.  $u$ ,  $v$  및  $w$ 는 각 방향(X, Y, Z)에 대한 유체입자의 가속도이다.  $T_e$ 는 케이블에 작용하는 유효 정장력(effective static tensile force)과 유효 동장력의 합력이고,  $\phi$ 와  $\theta$ 는 각각 케이블이 놓여 있는 정적 각도( $\phi_o$ ,  $\theta_o$ )와 동적 각도( $\phi_1$ ,  $\theta_1$ )의 합한 각도를 의미한다.  $D_{xb}$ ,  $D_{yb}$  및  $D_{zb}$ 는 각각 부이에 작용하는 각 방향(X, Y, Z)으로의 유체 항력이다.

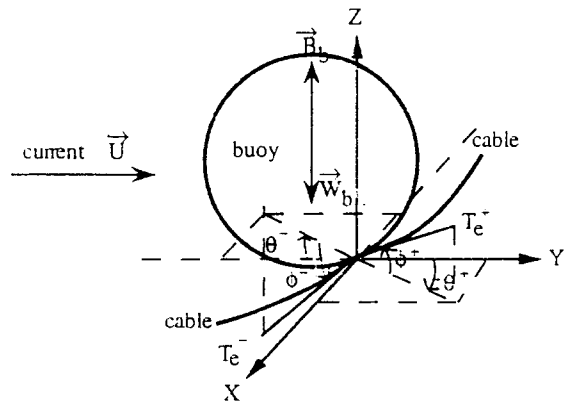


Fig. 1 Forces at the attachment point of cable and buoy

Fig. 1과 식 (1)로부터 모든 동적인 요소들을 제거하면, 다음과 같은 케이블과 부이의 연결점에서의 3차원 정적 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 -T_{eo}^- \cos \phi_o^- \sin \theta_o^- \\
 = -T_{eo}^+ \cos \phi_o^+ \sin \theta_o^+ + D_{xb} \\
 T_{eo}^- \cos \phi_o^- \cos \theta_o^- \\
 = T_{eo}^+ \cos \phi_o^+ \cos \theta_o^+ + D_{yb}
 \end{aligned}$$

$$T_{eo}^- \sin \phi_o^- = T_{eo}^+ \sin \phi_o^+ + B_b - W_b + D_{zbs} \quad (2)$$

$$x^+ = x^-$$

$$y^+ = y^-$$

$$z^+ = z^-$$

여기서,  $B_b$  와  $W_b$  는 각각 부이의 부력과 중량이다.  $D_{xbs}$ ,  $D_{ybs}$  및  $D_{zbs}$ 는 각 방향(X, Y, Z)으로 작용하는 부이의 정상 유체 항력(steady fluid drag)을 의미한다.

식 (1)에서 케이블과 부이나 중량물의 연결점에 파에 의한 강제 진동이 야기되고 정적 상태를 고려하면, 2차원 XZ평면에서 거동하는 경우에 대하여 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다. 운동은 작고, 동장력이 정장력에 비해 작다고 하면, 고차항을 무시함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_b \ddot{x} = T_{el}^+ \cos \phi_o^+ - T_{eo}^+ \phi_1^+ \sin \phi_o^+ - T_{el}^- \cos \phi_o^- + T_{eo}^- \phi_1^- \sin \phi_o^- + D_{xbd} + a_b \dot{u}$$

$$M_b \ddot{z} = T_{el}^+ \sin \phi_o^+ + T_{eo}^+ \phi_1^+ \cos \phi_o^+ - T_{el}^- \sin \phi_o^- - T_{eo}^- \phi_1^- \cos \phi_o^- + D_{zbd} + a_b \dot{w} \quad (3)$$

$$x^+ = x^-$$

$$z^+ = z^-$$

$$x = p \cos \phi_0 - q \sin \phi_0$$

$$z = p \sin \phi_0 + q \cos \phi_0$$

식 (3)에서  $M_b = m_b + a_b$ 이고,  $\dot{u}$  와  $\dot{w}$  는 각 방향(X, Z)에 대한 유체입자의 가속도이다.  $p$  와  $q$ 는 각각 케이블의 접선 방향과 법선 방향의 동적 거동의 크기이다. 해류의 속도와 파에 의한 유체입자의 속도를 고려하면, 유체입자의 속도  $u$  와  $w$  는 다음과 같다.

$$u = U_x + u_w$$

$$w = U_z + w_w \quad (4)$$

식 (4)에서  $U_x$  및  $U_z$ 는 각 방향(X, Z)으로의 해류의 속도이고,  $u_w$  및  $w_w$ 는 각 방향(X, Z)으로의 파에 의한 유체입자의 속도이다. 부이에 작용하는 항력  $D_{xbd}$ 와  $D_{zbd}$ 가 상대 속도  $(u - \dot{x})$  와  $(w - \dot{z})$ 에 비례한다면, 각각의 항력은 다음과 같이 선형화될 수 있다.

$$D_{xbd} = b_x (u_w - \dot{x})$$

$$D_{zbd} = b_z (w_w - \dot{z})$$

$$b_x = \frac{1}{3} \rho_w C_{sp} D_b^2 \omega x_a$$

$$b_z = \frac{1}{3} \rho_w C_{sp} D_b^2 \omega z_a \quad (5)$$

$$u_w = \frac{g \zeta_a k}{\omega} \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} \cos(kx - \omega t)$$

$$w_w = \frac{g \zeta_a k}{\omega} \frac{\sinh k(z+D)}{\cosh kD} \sin(kx - \omega t)$$

식 (5)에서  $b_x$  및  $b_z$ 는 각각 부이의 X축 방향과 Z축 방향의 등가 감쇠 계수(equivalent damping coefficient)를 의미한다.  $D_b$ 는 부이의 직경,  $k$ 는 파수(wave number),  $\zeta_a$ 는 파의 진폭(wave amplitude)이고,  $D$ 는 수심이다.

### 3. 주파수 영역 해석

각 파주파수(wave frequency)에 있어서 수중 부이거동의 영향으로 인한 케이블과 부이나 중량물 연결점에서의 동장력 및 거동변화 등을 알아 보기 위하여 등가 감쇠계수를 이용하여 표현한 케이블에 관한 식과 케이블과 부이나 중량물 연결점에 관한 식 (3)을 행렬식으로 표현하면 식 (6) 및 식 (7)과 같다<sup>4), 5)</sup>

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{T_{eo}d\phi_o}{ds} & -m\omega^2 + \omega b_{pi} & 0 \\ \frac{-d\phi_o}{T_{eo} ds} & \frac{-dT_{eo}}{T_{eo} ds} & 0 & \frac{-M\omega^2 + \omega b_{qi}}{T_{eo}} \\ \frac{1}{EA} & 0 & 0 & \frac{d\phi_o}{ds} \\ 0 & (1+e_o) & -\frac{d\phi_o}{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{T}_{el} \\ \widetilde{\phi}_1 \\ \widetilde{p} \\ \widetilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\widetilde{T}_{el}}{ds} \\ \frac{d\widetilde{\phi}_1}{ds} \\ \frac{d\widetilde{p}}{ds} \\ \frac{d\widetilde{q}}{ds} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} T_{el}^+ \\ \phi_1^+ \\ \widetilde{p}^+ \\ \widetilde{q}^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (a_b \dot{u} + b_x u_w - b_x \dot{x}) \cos \phi_o^+ + (a_b \dot{w} + b_z w_w - b_z \dot{z}) \sin \phi_o^+ \\ (a_b \dot{w} + b_z w_w - b_z \dot{z}) \cos \phi_o^+ - (a_b \dot{u} + b_x u_w - b_x \dot{x}) \sin \phi_o^+ \\ T_{eo}^+ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \tau & -T_{eo}^- \sin \tau & M_b \cos \tau & -M_b \sin \tau \\ \frac{\sin \tau}{T_{eo}^+} & \frac{T_{eo}^- \cos \tau}{T_{eo}^+} & \frac{M_b \sin \tau}{T_{eo}^+} & \frac{M_b \cos \tau}{T_{eo}^+} \\ 0 & 0 & \cos \tau & -\sin \tau \\ 0 & 0 & \sin \tau & \cos \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{el}^- \\ \phi_1^- \\ \widetilde{p}^- \\ \widetilde{q}^- \end{bmatrix}$$

식(6)에서  $\widetilde{T}_{el}$ ,  $\widetilde{\phi}_1$ ,  $\widetilde{p}$  및  $\widetilde{q}$ 는 각각 동적 변수들의 진폭을 의미한다. 예를들면,  $T_{el} = \widetilde{T}_{el} \cos at$ 이다.  $M$ 은 케이블의 질량과 부가 질량의 합이다.  $b_p$  및  $b_q$ 는 각각 케이블의 접선방향과 법선방향의 등가 감쇠계수 (equivalent damping coefficient)를 의미한다. 식 (7)에서  $\tau = (\phi_o^- - \phi_o^+)$ 이다. 이때 케이블-부이-중량물 계류시스템의 주파수 영역 해석은 유한차분법(finite difference scheme)을 사용하여 수행될 수 있다.

### 3.1 고유주파수

식 (6)과 식 (7)에서 등가 항력을 제외하고 다음과 같이 표현함으로써 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 고유주파수를 구할 수 있다.

식 (6)의 행렬식을 간략히  $A$ 와  $y$  행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$A(s) y(s) = \frac{dy}{ds} \quad (8)$$

식 (8)에서  $y(s)^T = [ \widetilde{T}_{el} \quad \widetilde{\phi}_1 \quad \widetilde{p} \quad \widetilde{q} ]$ 이다. 케이블 미소요소의 이웃하는 두 점  $i$ 와  $i+1$  사이의 관계는 중앙차분법을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>.

$$y_{i-1} - \frac{\Delta s}{2} \frac{d}{ds} y_{i-1} = y_i + \frac{\Delta s}{2} \frac{d}{ds} y_i$$

$$\rightarrow y_{i-1} = [ I - \frac{\Delta s}{2} A_{i-1} ] [ I + \frac{\Delta s}{2} A_i ] y_i = B_i y_i \quad (9)$$

등가 항력항을 제외한 케이블과 부이나 중량물 연결점의 관계를 포함한 케이블의 양끝단 사이의 관계를 식 (8)과 식 (9)에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} y_2 &= B_1 y_1 \\ y_3 &= B_2 y_2 = B_2 B_1 y_1 \\ &\vdots \\ y_n &= (\prod_{i=1}^{n-1} B_i) y_1 \end{aligned} \tag{10}$$

$$y_n = \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \\ p \\ q \end{bmatrix}_{\text{left bottom}}, \quad y_1 = \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \\ p \\ q \end{bmatrix}_{\text{right bottom}}$$

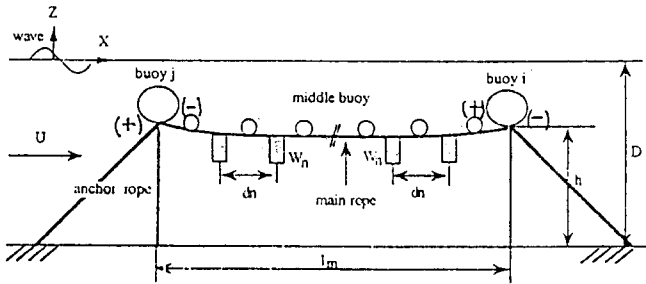


Fig. 2 Cable-Buoy-Weight mooring system

Left bottom과 right bottom은 이하 LB 및 RB로 표기한다. 양끝단이 고정된 케이블-부이-중량물 계류시스템일 경우 양 끝단의 닻위치에서 p와 q가 영(zero)이 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{L.B} &= \left[ \prod_{i=1}^{n-1} B_i \right] \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{R.B} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{R.B} \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)에서  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$  및  $\alpha_{22}$ 는 소행렬을 나타내며, 다음과 같은 간단한 2개의 행렬식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix}_{L.B} = [\alpha_{11}] \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix}_{R.B} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [\alpha_{21}] \begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix}_{R.B}$$

식 (12)에서  $\begin{bmatrix} \hat{T} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix}_{R.B}$  이 영(zero)이 아닌 유의해를 찾기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\det[\alpha_{21}(\omega)] = 0 \tag{13}$$

그러므로써 케이블-부이-중량물 계류시스템의 고유주파수  $\omega$ 를 얻을 수 있다.

### 3.2 강제 진동

Fig. 2의 케이블-부이-중량물 계류시스템이 2차원 XZ평면에서 거동하는 경우, 중량물의 무게를 달리 하면서 계류시스템에 작용하는 동장력 및 거동 변화를 알아보기 위한 간단한 지배방정식은 다음과 같다.

- ①  $y_i = [U] y_{RB}$
- ②  $y_i = [G]^{-1} [[A]+[B]]_i y_i + [G]^{-1}[W]$
- ③  $y_j = [M] y_i$
- ④  $y_j = [G]^{-1} [[A]+[B]]_j y_j + [G]^{-1}[W]$
- ⑤  $y_{L.B} = [L] y_j$

식 (14)에서 [U], [M], [L]은 고유주파수를 구할 때의 식 (10)과 같은 방법의 케이블 각 요소의 행렬 곱을 나타낸다. [G]는 식 (7)에서 우변항의 첫 번째 행렬을 나타내고, [A]는 좌변항의 첫 번째에 대한 행렬을 나타낸다. [B] 및 [W]는 각각 좌변항의 두 번째를 전개했을 때 동적 거동( $\hat{p}$ ,  $\hat{q}$ )를 나타내는 행렬과 파에 의한 유체입자의 속도 및

위상차 등을 표현하는 행렬이다. 식 (14)를 이용하여 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대하여 주파수 영역 해석을 행할 수 있다. 케이블과 부이나 중량물 연결점에서의 동장력 및 거동변화 등을 알아보기 위해서는 등가항력 등을 이용하고 있는 본 논문의 수치해법을 고려할 때 부이나 중량물 연결점에서의 진폭의 각 방향(X, Z)성분이 필요하며, 진폭  $x_a$  및  $z_a$ 는 초기값으로 다음과 같이 가정된다.

$$x_a = -\frac{g \zeta_a k}{\omega^2} \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} e^{-ikx} \quad (15)$$

$$z_a = \frac{g \zeta_a k}{\omega^2} \frac{\sinh k(z+D)}{\cosh kD} e^{-ikx}$$

부이나 중량물 연결점에서 초기에 가정된 진폭은 반복법에 의해 각 단계에서 새로운 진폭으로 바뀌며, 케이블의 각 요소 및 부이나 중량물 연결점에서의  $i^{th}$  단계와  $i-1^{th}$  단계의 진폭사이에 수렴조건을 만족할 때, 동장력 및 거동변화 등이 결정될 수 있다.

#### 4. 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 응용

정적 및 동적 해석을 수행하는데 사용한 케이블(polypropylene)의 특성치는 다음과 같다.

CABLE CHARACTERISTICS	
MASS PER UNIT LENGTH	= 1.167000 kg/m
ADDED MASS PER UNIT LENGTH	= 0.725 kg/m
WEIGHT PER UNIT LENGTH	= 4.336500 N/m
DIAMETER	= .30000E-01 m
EA	= .48490E+07 N
BREAKING TENSION	= .11270E+06 N

Fig. 2의 main rope와 anchor rope를 연결하는

부이  $i/j$ 와 main rope에 놓여서 중량물을 지지하는 부이 A에 대한 특성치를 Table 1에 나타내었다. 단, 부이는 부력만 가지고 있고, 무게는 매우 작다고 생각했다.

Table 1 Characteristics of buoys

Type of buoy	buoy i (buoy j)	buoy A
viscous drag coeff.	0.5	0.5
mass	0.1E-05 kg	0.1E-05 kg
added mass	57.962 kg	4.0816 kg
diameter	0.60 m	0.2446 m
buoyancy	1136.0 N	77.0 N

부이  $i/j$ 의 부력은 Fig. 2의 계류시스템 전체를 충분히 지탱할 수 있게 했으며 부이 A의 부력은 중량물을 충분히 지탱할 수 있도록 유지했다. 즉 케이블-부이-중량물 계류시스템이 일정한 수심을 유지하기 위해서는 중량물의 무게 증가에 따라서 부이의 부력을 충분히 마련해주어야 한다. 실제 양식시설에서는 가리비의 성장에 따른 부이의 부력 유지를 위해서 부이 A와 같은 부이를 계속 더 매달아주고 있다.

#### 4.1 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 정적 해석

Fig. 2의 케이블-부이-중량물 계류시스템을 따라 매달린 부이나 중량물들로 구성된 계류시스템의 정적 해석에 있어서 해류의 속도를 0.0 m/s, 0.3 m/s, 0.6 m/s 및 0.9 m/s로 변화시키며 계류시스템의 변위 및 각 주요 지점의 장력 변화를 살펴 보았다. main rope의 길이( $l_m$ )을 100 m, 중량물의 간격( $d_n$ )을 5 m로 하고 해류의 방향이 계류시스템과 평행할 때 장력 및 변위를 살펴보았다. 중량물( $W_n$ )의 무게가 10.0 kgf, 23.5 kgf 및 70.0 kgf로 변함에 따른 정적 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다<sup>5)</sup>.

예상했던 바와같이, Fig. 2의 부이와 케이블의

접촉점  $j$ 는 해류 속도가 점점 증가함에 따라 해저면에 가깝게 됨을 볼 수가 있었고, 이에따른 장력도 해류가 0.9 m/s이고 중량물 10.0 kgf일 경우는 4817 N이었는데 비해서 중량물이 70.0 kgf로 증가하면 6044 N으로 증가함을 알 수 있었다. 그러나 부이와 케이블의 접촉점  $i$ 는 해류가 점점 증가함에 따라 접촉점  $j$ 와는 반대로 수면에 가깝게 됨을 볼 수가 있었다. 또한 장력의 변화도 해류가 0.9 m/s일 경우에 중량물 10.0 kgf에서는 1426 N이었는데 비해서 중량물 70.0 kgf에서는 1231 N으로 작아짐을 알 수 있었다.

### 4.2 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 주파수 영역 해석

Fig. 2의 케이블-부이-중량물 계류시스템이 2차원 XZ평면에서 거동하는 경우에 대하여 중량물의 무게를 달리하면서 계류시스템에 작용하는 동장력 및 거동 변화를 알아보았다. 이때 케이블-부이-중량물 계류시스템의 각 경우에 대한 고유주파수는 Table 2와 같다.

Table 2 Eigenfrequencies of cable-buoy-weight mooring system(no current,  $l_m=100m$ ,  $d_n=5m$ )

Natural Frequency	Weight 10.0 kgf	Weight 23.5 kgf	Weight 70.0 kgf
$\omega_1$ (rad/sec)	0.5397270	0.3757892	0.2174297
$\omega_2$ (rad/sec)	0.5471250	0.4604229	0.3191718
$\omega_3$ (rad/sec)	1.0849297	1.0762895	0.7310234
$\omega_4$ (rad/sec)	1.2748750	1.1291884	0.8145469

Table 2로부터 해류가 없고, 케이블-부이-중량물 계류시스템의 중량물의 무게가 점점 커질 때 계류시스템에 대한 고유 주파수는 점점 작아짐을 알 수 있었다. 이는 중량물의 증가에 따른 중량물의 질량 및 부이의 부가질량 등이 크게 증가하는 반면, 중량물 증가에 따른 계류시스템의 장력의 변화는 크지 않기 때문이다.

케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 정적 해석 결과를 이용하여 파의 진폭을 1 m로 하고 파 주파수에 따른 2차원 주파수 영역 해석을 행한 결과를 Fig. 4부터 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 4부터 Fig. 6에서 감쇠가 없을 때의 케이블-부이-중량물 계류시스템에 작용하는 동장력을 살펴보면, 시스템의 고유주파수에서 감쇠를 고려하지 않을 때 부이나 중량물 연결점의 동장력은 무한히 큰 값으로 계산되었으나 감쇠를 고려해서 동장력을 살펴보면 고유주파수에서도 유한한 크기의 동장력을 계산할 수 있었다. 예를들면, 중량물이 10.0 kgf, 70.0 kgf일 때 첫번째 고유주파수에서 계류시스템의 중간 부이점(middle point)에서의 동장력은 200 N보다 작은 값이었다. 중량물 증가에 따른 최대 동장력은 중량물이 10.0 kgf일 때 파 주파수 0.75 rad/sec 부근에서 200 N이었고, 중량물이 70.0 kgf일 때에도 파 주파수 0.75 rad/sec 부근에서 550 N이었다.

거동의 변화는 Fig. 7로부터 알 수 있다. 각 파 주파수에 대한 케이블-부이-중량물 계류시스템의 부이나 중량물 연결점에서 접선 및 법선 방향의 거동의 크기를 알 수 있었다. 그리고 중량물이 10.0kgf → 23.5kgf → 70.0kgf로 점점 커짐에 따른 거동의 크기도 비교할 수 있었다. 계류시스템의 중간 부이점(middle point)에서 중량물 증가에 따른 거동을 비교해 보면, 중량물이 10.0 kgf일 때 거동의 최대 진폭은 파 주파수 0.30 rad/sec 부근에서 0.61 m로 케이블 직경의 약 20배였고, 중량물이 70.0 kgf일 때는 0.80 m로 케이블 직경의 약 26배였다. 또한 파 주파수가 점점 증가함에 따라 거동의 크기는 점점 작아짐을 알 수 있었다.

케이블-부이-중량물 계류시스템의 main rope에 부이나 중량물이 없거나 부착된 수가 적은 경우(3개의 buoy-weights)에는 Fig. 8과 9와 같은 결과를 얻었다. 예측한 대로 해류가 없는 상태에서 파에 의한 계류시스템의 조화운동은 buoy  $i$ 의 + point 와 buoy  $j$ 의 - point에서 거의 같은 경향의

동장력을 나타내었다. 그런데 부이와 중량물이 많은 경우 해류가 없는 상태에서 감쇠가 있을 때, Fig. 4부터 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 buoy i의 + point 와 buoy j의 - point에서 동장력의 경향이 중량물의 무게 증가에 따라 점점 큰 차이가 있었다.

중량물 10.0 kgf에 대해서 해류의 속도를 점점 증가시키며 살펴 본 동장력의 변화는 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10으로부터 알 수 있듯이 해류가 점점 클수록 감쇠의 영향이 커져서 동장력의 크기가 점점 작아짐을 알 수 있다.

### 5. 결 론

수산 양식에서의 연승식 양식시설은 케이블과 부이나 중량물로 이루어진 유연체(flexible body)로서 다점지지 계류시스템을 이루고 있기 때문에 파·해류 등의 영향으로 인한 계류시스템의 거동 예측은 매우 복잡한 문제가 된다.

파·해류 등의 영향을 받는 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 비선형 운동방정식을 유도하여 등가 감쇠계수 등을 적용해 선형화함으로써 주파수 영역 해석(frequency domain analysis) 기법의 적용이 가능하고, 케이블-부이-중량물 계류시스템에 대한 고유주파수 및 부이나 중량물 연결점에서의 파주파수에 따른 동장력과 거동변화 등을 미리 예측할 수 있다.

### 후 기

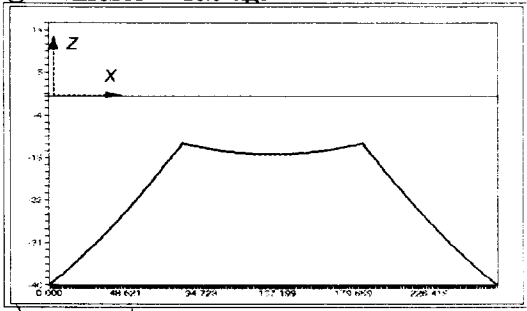
본 연구는 국립 수산진흥원 특정과제 연구사업 수행 중에 나온 연구 결과의 일부이며, 국립 부산수산대학교 해양산업 개발 연구소(RCOID)와 국립 수산진흥원 주문진 종묘배양장 및 아낌없는 지원을 해주신 관계 제위께 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

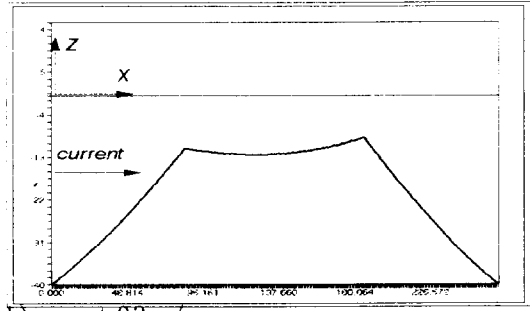
- [1] Ryu, C. et. al. , " Studies on the Development of Offshore Aquaculture Facilities (I) ", National Fisheries Research and Development Agency, 1994
- [2] Matsubara M. , Hirao A. and Noda H. , " Dynamic Response of Submerged Buoy-Cable Structure to the Wave." The 30th Coastal Engineering (in Japanese), 1983
- [3] Shin, H. and Cho, K. N. , " Study on Nonlinear Cable Dynamics ", Report, University of Ulsan, 1992.
- [4] Shin, H. , " Dynamic Analysis of Cable with Intermediate Submerged Buoys for Offshore Applications ", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 3, No. 2, KCORE, 1989
- [5] Kim, D. S. , " A Study on the Nonlinear Analysis of Mooring System " , M. S. Thesis Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, 1995
- [6] Shin, H. and Kim, D. S. " A Study on Offshore Longline Type Aquaculture Facilities, Part 1 : 3-D Nonlinear Static Analysis of Cable-Buoy-Weight Mooring System " , Proceeding of KCORE, pp. 237 ~ 245, Pusan University May 26-27, 1995
- [7] Craig R. R. Jr. , " Structural Dynamics - An Introduction to Computer Methods " , John Wiley & Sons. , 1981
- [8] Hoffmann A. K. and Steve T. Chiang , " Computational Fluid Dynamics for Engineers - Volume I " , Engineering Education System, Wichita, 1993



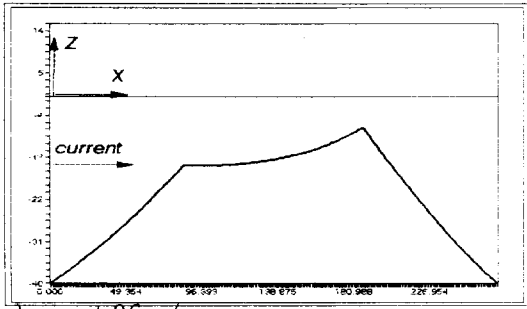
① WEIGHT = 10.0 kgf



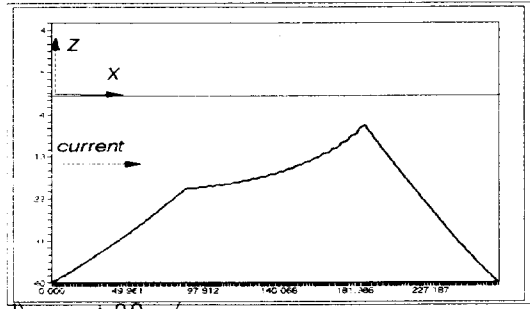
a) no current



b) current 0.3 m/s

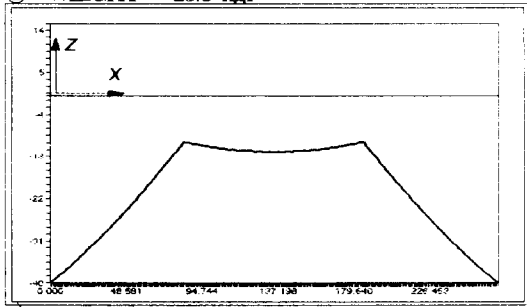


c) current 0.6 m/s

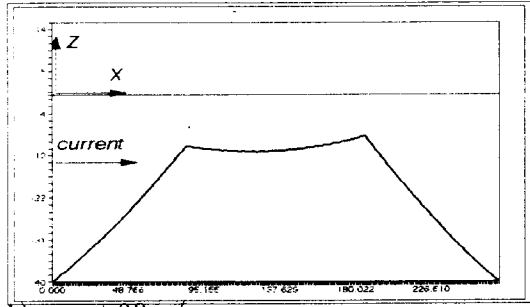


d) current 0.9 m/s

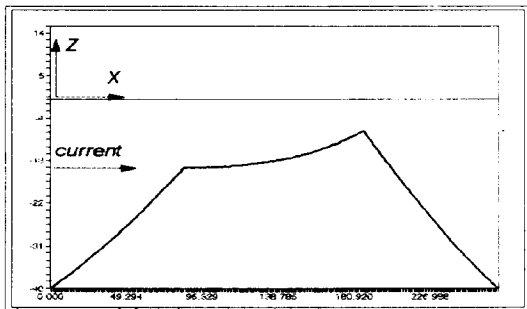
② WEIGHT = 23.5 kgf



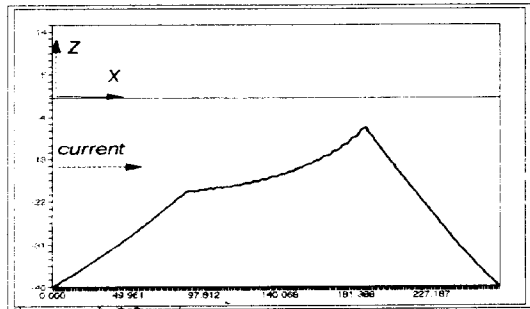
a) no current



b) current 0.3 m/s

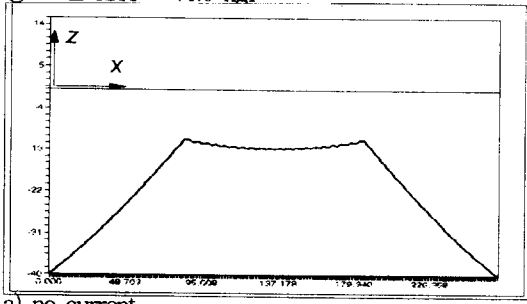


c) current 0.6 m/s

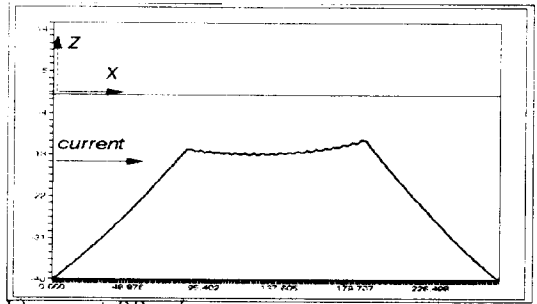


d) current 0.9 m/s

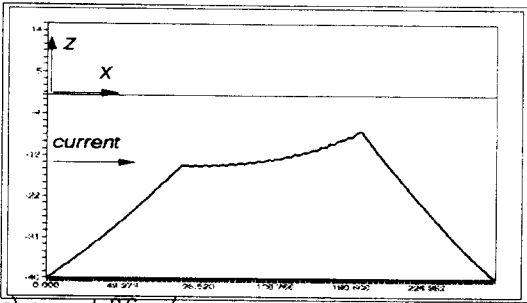
③ WEIGHT = 70.0 kgf



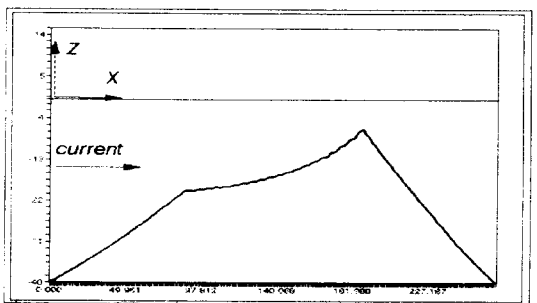
a) no current



b) current 0.3 m/s



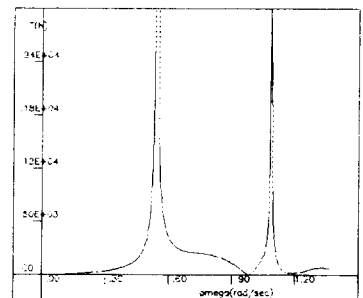
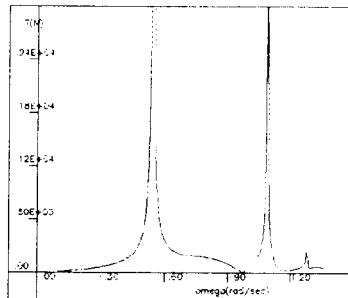
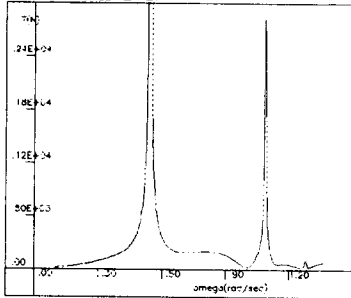
c) current 0.6 m/s



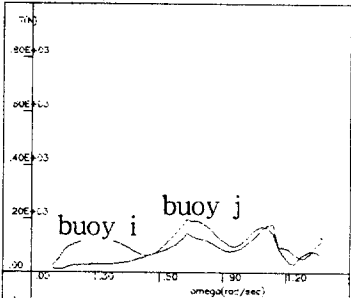
d) current 0.9 m/s

Fig 3. Configuration change of Cable-Buoy-Weight mooring system

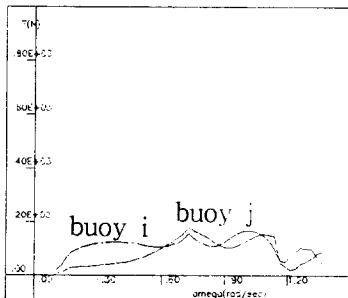
NO DAMPING



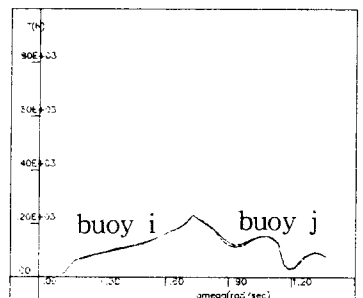
DAMPING



a) - point of buoy i and + point of buoy j



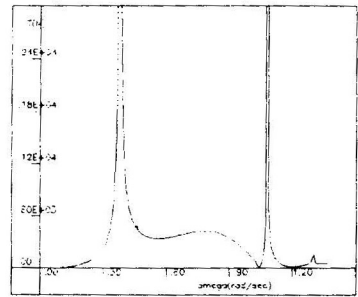
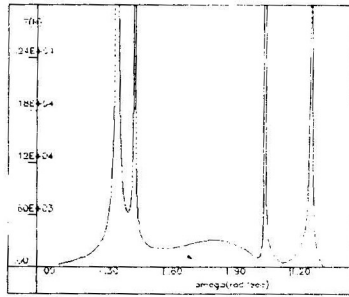
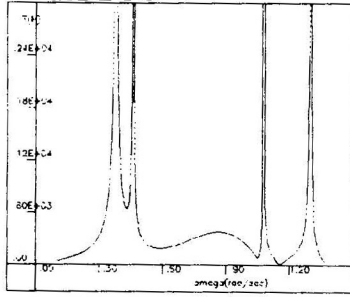
b) + point of buoy i and - point of buoy j



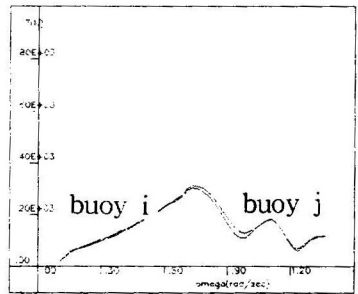
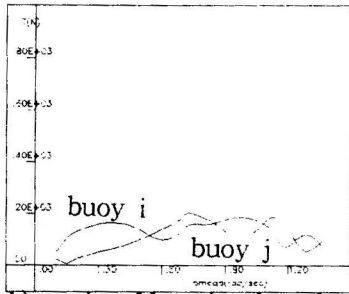
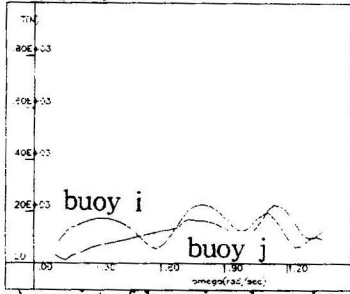
c) + point and - point of middle buoy of main rope

Fig. 4 Comparison of amplitudes of dynamic tensions at each attachment point of cable in Fig. 2(no current, weight 10.0 kgf)

NO DAMPING



DAMPING



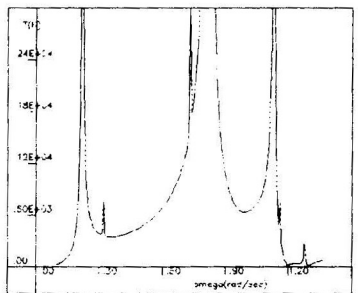
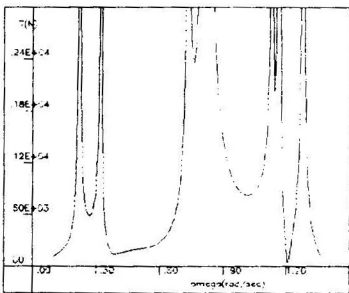
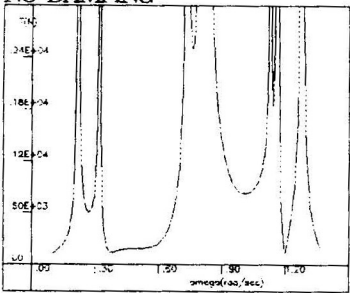
a) - point of buoy i and + point of buoy j

b) + point of buoy i and - point of buoy j

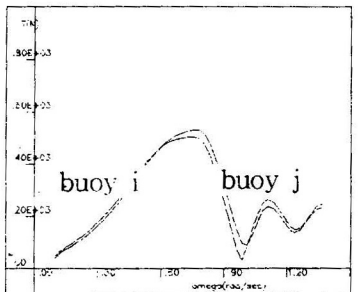
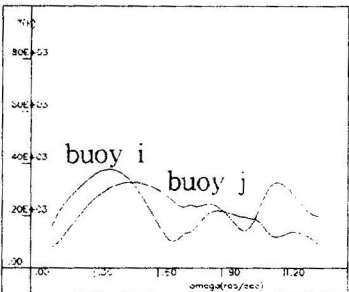
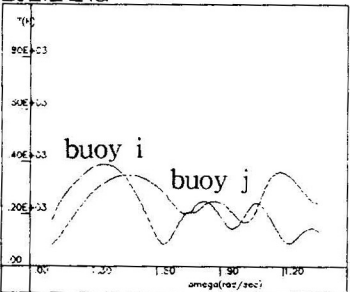
c) + point and - point of middle buoy of main rope

Fig. 5 Comparison of amplitudes of dynamic tensions at each attachment point of cable in Fig. 2(no current, weight 23.5 kgf)

NO DAMPING



DAMPING



a) - point of buoy i and + point of buoy j

b) + point of buoy i and - point of buoy j

c) + point and - point of middle buoy of main rope

Fig. 6 Comparison of amplitudes of dynamic tensions at each attachment point of cable in Fig. 2(no current, weight 70.0kgf)

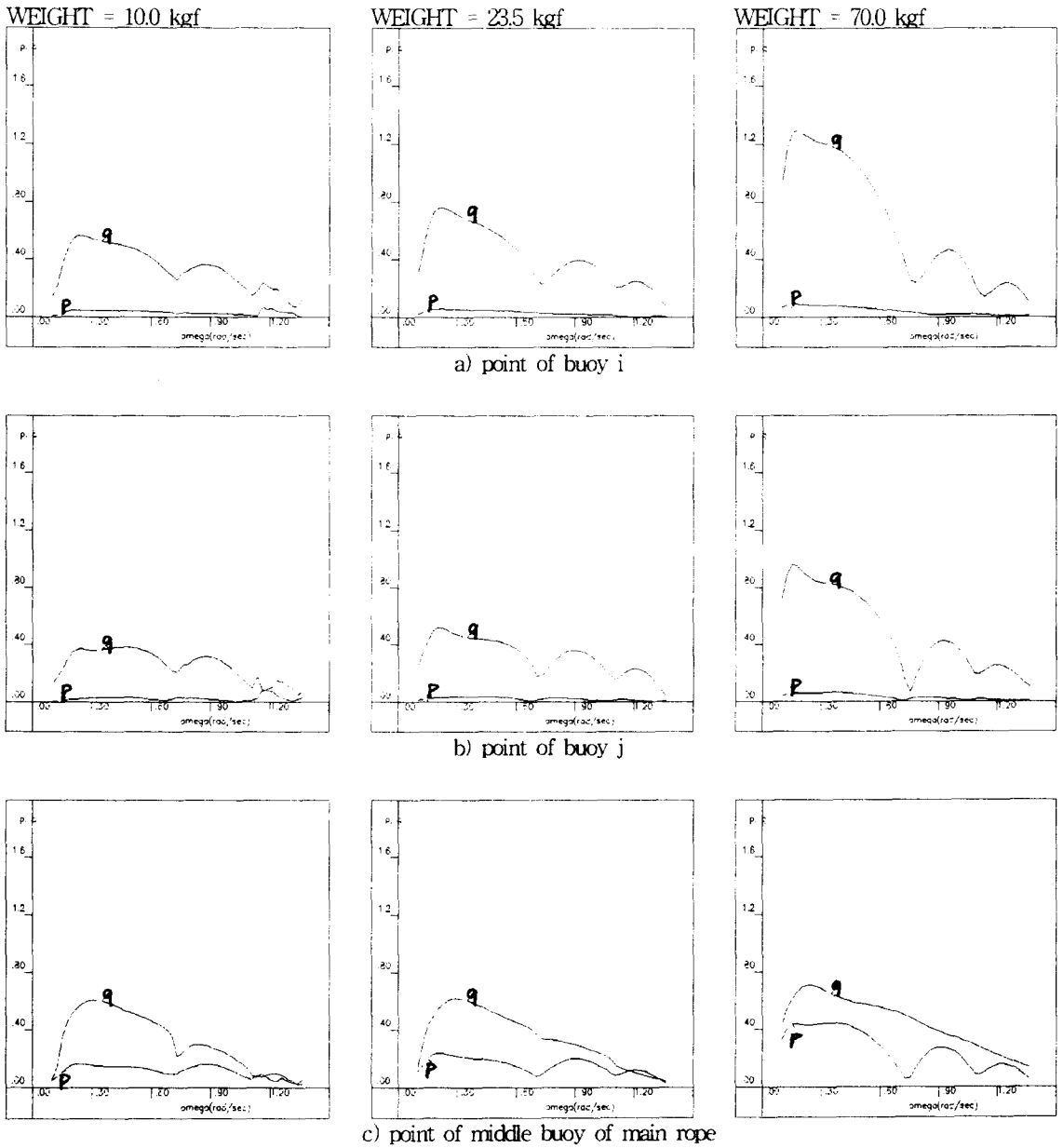
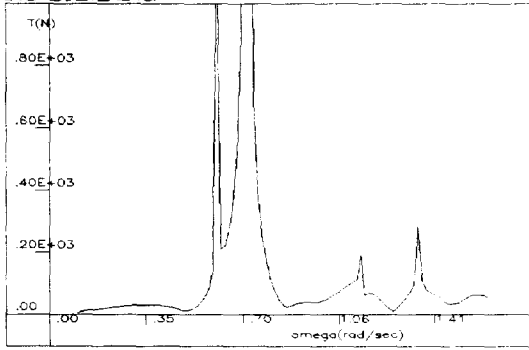
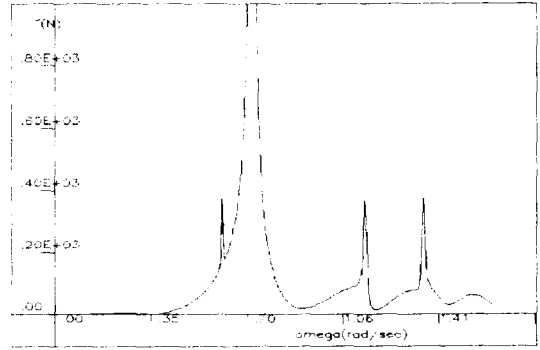


Fig. 7 Amplitudes of tangential displacement  $p$  and normal displacement  $q$  at each attachment point of cable in Fig. 2( no current , damping )

NO DAMPING

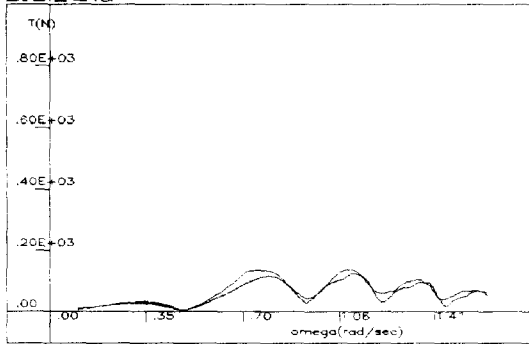


a) - point of buoy i and + point of buoy j

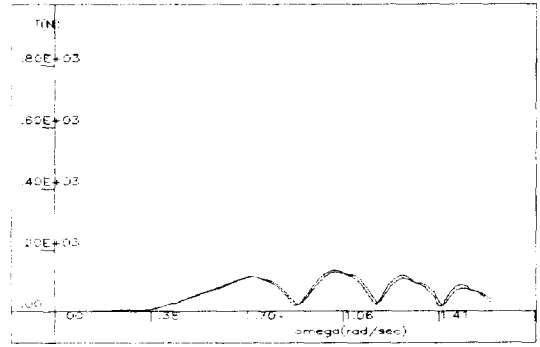


b) + point of buoy i and - point of buoy j

DAMPING



a) - point of buoy i and + point of buoy j



b) + point of buoy i and - point of buoy j

Fig. 8 Comparison of amplitudes of dynamic tensions at each attachment point of cable in Fig. 2(no current , 3 buoy-weights(10.0kgf) along the main rope)

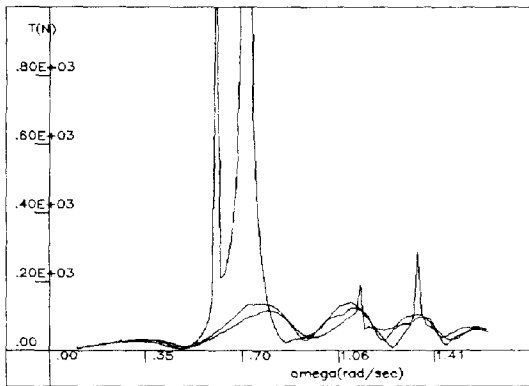


Fig. 9 Comparison of Fig 8 a)(no current, 3 buoy-weights(10.0kgf) along the main rope)

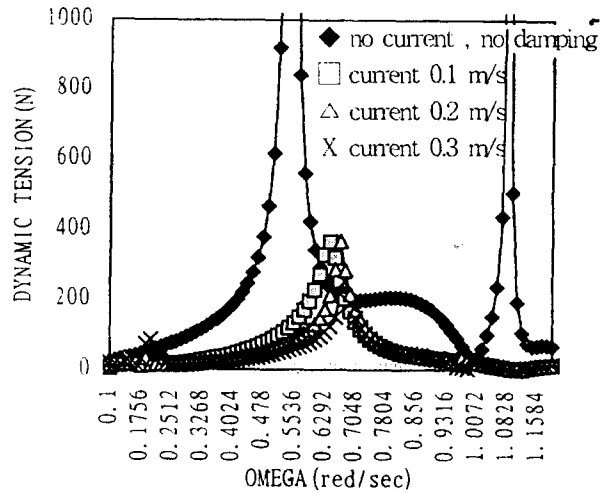


Fig. 10 Comparison of amplitudes of dynamic tensions at - point of buoy i in Fig. 2(current, weight 10.0 kgf)