

수평가진에 의한 계류라인의 장력응답 해석

정동호^{1,*} · 김현주¹ · 문덕수¹ · 박한일² · 최학선¹

¹한국해양연구원 해양시스템안전연구소

²한국해양대학교 해양개발공학부

Analysis on Tension Response of Mooring Line by Lateral Excitation

Dong Ho Jung¹, Hyeon Ju Kim¹, Deok Su Moon¹, Han Il Park² and Hak Sun Choi¹

¹Ocean Development System Lab., KRISO/KORDI, Yuseong P.O.Box 23, Daejeon 305-600, Korea

²Ocean Engineering Development, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Youngdo-ku, Busan, Korea

요 약

계류라인은 부체를 일정 위치에 유지시키기 위한 구조요소로 이용된다. 본 연구에서는 부소파제의 계류라인으로 사용되는 체인에 대한 동적거동 특성을 파악하기 위해서 체인에 대한 구조해석을 수행하였다. 먼저 체인에 대한 3차원 동적방정식을 유도하는데, 장력이 0 부근인 영역에서 복원력을 표현하기 위하여 굽힘강성 성분을 포함시켰다. 수치적인 방법을 통하여 3차원 동적 방정식을 해석하였다. 유한차분법을 적용하였는데, 조건에 상관없이 안정적인 음해법과 함께 비선형 해법인 뉴턴-랩슨 반복법을 사용하였다. 본 연구를 통하여 가진 주기에 따른 계류라인의 위치에 따른 장력응답 경향을 파악할 수 있었으며, 본 연구의 해석결과는 참고문헌의 실험결과와 그 경향이 잘 일치하였다. 본 연구결과는 향후 부소파제를 위한 계류라인 설계에 잘 이용될 수 있을 것이다.

Abstract – A mooring system can be applied to keep the position of a floating structures. In this study, the structural analysis is carried out to analyze the dynamic characteristics of a mooring line for a floating breakwater. A three-dimensional equations of motion for a submerged chain are derived. Bending stiffness is considered for the necessary restoring force in the regions of zero tension. A fortran program is to be developed by employing finite difference method. In the algorithm, an implicit time integration and Newton-Raphson iteration are adopted. The results of simulation show good agreement in tension response pattern with the experimental results of a reference. The results of this study can contribute for the design of mooring system for a floating breakwater.

Keywords: Floating Breakwater(부소파제), Mooring Line(계류라인), Numerical Analysis(수치해석), Tension Response(장력응답)

1. 서 론

소파제는 해역 보호를 위하여 파랑을 소멸시키는 구조물을 의미하는 것으로서, 일반적으로 방파제로 알려져 있다. 소파제는 크게 고정식 소파제(중력식 소파제)와 부유식 소파제(이하 부소파제)로 나누어진다. 고정식 소파제는 소파용 구조물이 해저면에 직접적으로 고정되어 있는 경우이며, 부소파제는 방파제 기능을 수행하는 구조물이 해수면 위에 떠 있는 경우를 의미한다. 소파제는

설치 해역의 특성을 고려하여 그 종류를 결정하게 되는데, 일반적으로 수심 10 m 이상의 해역에서는 부소파제가 경제적으로 유리한 것으로 알려져 있다(포스코건설, 2003).

부소파제는 수심이 10 m 이상되는 해역에서 경제적으로 유리한 점 외에 다양한 장점이 있다. 그 첫째는 대수심 및 연약지반에 적용가능하다는 것이다. 둘째는 소파제 아래로 해수유동이 자유롭게 이뤄지기 때문에 항내 수질이 보존될 수 있다. 셋째는 지진에 대한 피해가 적으며, 넷째는 고정식 소파제에 비하여 시공이 간단하다는 장점이 있다. 다섯째로 설명될 수 있는 부소파제의 장점은 이동이 가능하다는 것이다. 특정 목적을 위하여 부소파제의 위치

*Corresponding author: dhjung@kriso.re.kr

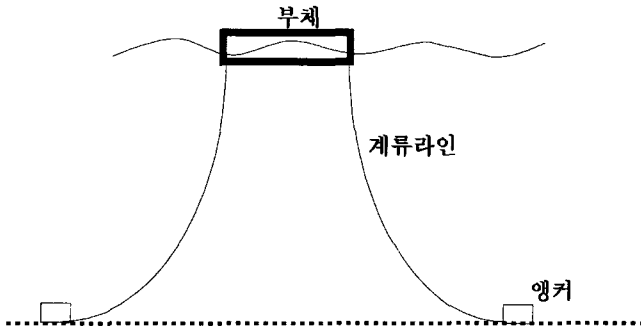


Fig. 1. Configuration of floating breakwater.

를 이동해야 할 경우에는 계류라인만 분리시킨다면 이동이 가능하기 때문에 매우 효율적이다. 이 외에도 부소파제를 다양한 용도로 활용할 수 있다. 즉, 부소파제 자체를 양식장으로 활용하거나 혹은 관광목적의 낚시터로 이용될 수도 있다.

이상과 같은 부소파제의 장점을 최대한 이용하기 위해서는 부소파제를 구성하는 각각의 구조요소들이 해양환경에 대하여 안정할 수 있어야 한다. Fig. 1에서는 부소파제의 전체적인 모양 및 구성을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 부소파제는 소파기능을 수행하는 부체와 부체를 일정위치에 유지시키는 계류시스템으로 구성된다. 특히 계류라인은 열악한 해양환경에 의해 쉽게 파단될 수 있으며, 이로 인하여 부소파제가 이동하여 부소파제 배후의 양식시설을 손상시키는 경제적 피해를 입을 수 있다. 따라서 계류라인에서 발생하는 정적장력 뿐만 아니라, 동적성분까지 잘 고려하여 안정적인 계류라인 설계가 이루어져야 한다.

윤상준 등(2002)은 중층계류된 인공해저시스템의 파랑 중 운동특성을 파악하기 위하여 실험적 연구를 수행하였으며, 박재현 등(2000)은 상자형 부소파제의 소파성능 개선을 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 그러나, 계류라인에 대한 구조해석은 무시하였으며, 부체의 거동에 국한하여 연구를 수행하였다. 신현경과 김덕수(1993)는 연승가두리시설물의 계류라인에 대한 구조해석을 수행하였는데, 3차원 비선형 정적방정식을 유도하여 가두리 시설물의 정적형상에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 천해역에서 부소파제를 일정한 위치에 유지시키기 위하여 사용되는 계류라인에 대한 동적해석을 수행하였다. 먼저 계류라인에 대한 지배방정식을 유도한 후, 이를 수치해석적 방법을 이용하여 해를 구하였다. 수치해석방법은 유한차분법이 적용되며, 뉴턴-랩슨 방법으로 비선형 해를 구하였다. 다양한 가진 주기에 따른 계류라인의 응답특성을 살펴보았으며, 특히 부체 연결지점에서의 가진에 의한 앵커 연결지점의 장력 응답 특성에 대하여 살펴보았다.

2. 계류라인의 지배방정식

본 절에서는 계류라인에 대한 동적 지배방정식과 그 방정식을 풀이하기 위한 수치해석적 방법에 대하여 설명한다.

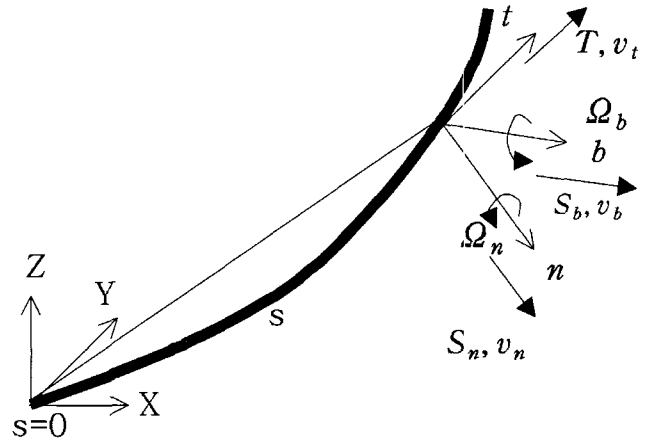


Fig. 2. Coordinate systems.

2.1 좌표계의 정의

체인 해석에서는 체인 요소에 성립되는 국부좌표계와 공간상에 고정된 전체좌표계로 나누고 오일러 각(Eulerian angles)의 정의를 이용하여 두 좌표계의 상관관계를 설정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 국부좌표계(t, n, b)와 전체좌표계를 (X, Y, Z)를 Fig. 2과 같이 정의하였다. 두 좌표계 사이의 변환은 오일러 각을 이용하여 실행하였다. 체인의 경우 점선방향(t 방향)의 비틀림 효과를 일반적으로 무시하므로 t 축 중심으로의 회전은 고려하지 않았다. 따라서 두 개의 회전 각 ϕ 와 θ 를 사용하여 좌표계 변환을 하였다.

두 좌표계에 대한 변환식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t \\ n \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ \cos\phi\cos\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 지배방정식

체인의 요소에 대해 지배방정식은 뉴턴의 제2법칙, 모멘트 평형식, 적합조건, 그리고 국부적 곡률관계를 이용한다(박한일과 정동호, 2002). 아래의 식은 미소요소의 국부좌표계 t, n, b 상에서 결정되어진다.

$$\begin{aligned} & m(\dot{v}_t + v_b\dot{\theta} - v_n\dot{\phi}\cos\theta) \\ & = T' + S_b\Omega_n - S_n\Omega_b - w_c\cos\phi\cos\theta + R, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & m(\dot{v}_n + \dot{\phi}(v_t\cos\theta + v_b\sin\theta)) + m_a\dot{v}_n \\ & = S'_n + \Omega_b(T + S_b\tan\theta) + w_o\sin\phi\dot{\theta} \\ & + 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_n + R_n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & m(\dot{v}_b - v_n\dot{\phi}\sin\theta - v_t\dot{\theta}) + m_a\dot{v}_b \\ & = (S'_b - S_n\Omega_b\tan\theta - w_c\cos\phi\sin\theta) \\ & + 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_b + R_b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 EI\Omega_n' &= EI\Omega_b^2 \tan\theta + S_b(1+T/EA)^3 \\
 EI\Omega_b' &= EI\Omega_n \Omega_b \tan\theta - S_n(1+T/EA)^3 \\
 v_t' + \Omega_n v_b - \Omega_b v_n &= T/EA \\
 v_n' + \Omega_b(v_t + v_b \tan\theta) &= (1+T/EA)\dot{\phi} \cos\theta \\
 v_b' - \Omega_b v_n \tan\theta - \Omega_n v_t &= -(1+T/EA)\dot{\theta} \\
 \Omega_n &= \theta' \\
 \Omega_b &= \dot{\phi} \cos\theta
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\vec{L} = \begin{pmatrix} S_n S_b - S_b S_n + w_0 \cos\phi \cos\theta - R_t \\ -\Omega_b(T + S_b \tan\theta) - w_0 \sin\phi - R_n - 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_n \\ S_b \Omega_b \tan\theta + T\Omega_n + w_0 \cos\phi \sin\theta - R_b - 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_b \\ \Omega_b v_n - \Omega_n v_b \\ -\Omega_b(v_t + v_b \tan\theta) \\ \Omega_b v_n \tan\theta + \Omega_n v_t \\ \Omega_b \\ \Omega_n \\ -EI\Omega_b^2 \tan\theta + S_b(1+T/EA)^3 \\ EI\Omega_b \Omega_n \tan\theta - S_n(1+T/EA)^3 \end{pmatrix}$$

여기서, 각 변수위의 점(·)은 시간 t 의 미분을 프라임(')은 공간 s 의 미분을 뜻하다.

- T : 체인의 임의의 시간과 공간에서 장력
- d : 체인의 직경
- ρ_w : 물의 밀도
- θ, ϕ : 회전각도
- m : 체인의 단위길이 당 질량
- w_0 : 체인의 단위길이 당 수중 무게
- m_a : 체인의 단위 길이당 부가질량
- C_M : 부가관성계수
- E : 체인의 탄성계수
- A : 체인의 단면적
- S_n, S_b : n, b 방향의 전단력
- u_n, u_b : n, b 방향의 유체속도 성분
- Ω_n, Ω_b : n, b 방향의 곡률
- v_t, v_n, v_b : 각각 t, n, b 방향의 체인 속도 성분
- R_t, R_n, R_b : 각각 체인에 가해지는 t, n, b 방향의 외부 유체항력

따라서 총 10개의 지배방정식을 얻을 수 있으며 한 요소에 대해 미지변수는 총 10개가 된다. 위의 지배방정식에서 고려된 굽힘 강성(EI)은 수치해석의 안정을 위해 중요한 역할을 한다.

3. 수치해석

위에서 보여진 체인에 대한 지배방정식은 이론적으로 해석하기가 어렵다. 따라서 수치해석적인 방법이 필요하며 적당한 경계조건을 적용시켜서 지배방정식의 해를 구해야 한다. 본 연구에서는 체인에 적합한 유한차분법을 사용하였으며, 시간적분에 있어서 보다 안정적인 해를 얻을 수 있는 음해법을 사용하였다.

식 (2)는 다음과 같이 하나의 행렬식으로 표현할 수 있다(박한일과 정동호 2002).

$$[J]\vec{H}' = [K]\vec{H} + \vec{L} \tag{3}$$

여기서

$$\vec{H} = (T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b)^T$$

한편 $[J], [K]$ 는 모두 10×10 크기의 정방행렬이 된다. $[J]$ 의 경우에 대각선 성분은 다음과 같으며, 그 외 성분은 모두 영이다.

$$\begin{aligned}
 J(1, 1) &= J(2, 2) = J(3, 3) = J(4, 4) = J(5, 5) = J(6, 6) = J(8, 8) = 1 \\
 J(3, 6) &= \cos\theta, J(9, 9) = J(10, 10) = EI
 \end{aligned} \tag{4}$$

$[K]$ 행렬의 경우는 영이 되는 성분과 영이 되지 않는 성분이 혼재하고 있는데, 영이 아닌 성분은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 K(1, 4) &= m, K(1, 7) = -mv_n \cos\theta, \\
 K(1, 8) &= mw, K(2, 7) = mv_t \cos\theta + mv_b \sin\theta, \\
 K(2, 5) &= K(3, 6) = m + m_a, \\
 K(3, 7) &= -mv_n \sin\theta, K(3, 8) = -mu, \\
 K(4, 1) &= 1/EA, K(5, 7) = (1+T/EA)\cos\theta, \\
 K(6, 8) &= -(1+T/EA)
 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (3)을 Δs 간격으로 n 개로 나눈 절점에 대해 이산화 시키고, 그 후에 Δt 만큼의 시간 간격으로 나눈 식으로 만든다. 식 (3)을 절점 j 와 $j+1$ 사이, 그리고 시간 i 와 $i+1$ 사이의 중앙점에서 풀이한다. 따라서 식 (3)을 중앙차분화 시키면 지배방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 & [J_{j+1}^{i+1} + J_j^{i+1}] \frac{H_{j+1}^{i+1} - H_j^{i+1}}{\Delta s} + [J_{j+1}^i + J_j^i] \frac{H_{j+1}^i - H_j^i}{\Delta s} \\
 &= [K_{j+1}^{i+1} + K_j^{i+1}] \frac{H_{j+1}^{i+1} - H_{j+1}^i}{\Delta t} + [K_j^{i+1} + K_j^i] \frac{H_j^{i+1} - H_j^i}{\Delta t} \\
 &+ L_{j+1}^{i+1} + L_j^{i+1} + L_{j+1}^i + L_j^i
 \end{aligned} \tag{6}$$

위의 방정식은 $10(n-1)$ 개의 방정식이 된다(n 은 절점 수). 하지만 미지수는 총 $10n$ 개이므로 10개의 또 다른 방정식이 필요하게 되는데, 이것은 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

체인의 하부 끝단($s=0$)은 힌지 조건이므로 각 방향 속도와 모멘트가 영이다. 따라서 다음의 5개 경계조건을 얻을 수 있다.

$$v_t(t, 0) = v_n(t, 0) = v_b(t, 0) = EI\Omega_n(t, 0) = EI\Omega_b(t, 0) = 0 \tag{7}$$

반면에 상부끝단($s=L$)은 체인과 부체가 연결되는 점이므로 체인의 속도는 부체의 속도와 같다. 또한 모멘트가 영이다.

$$v_t(t, L) = U(t), v_n(t, L) = V(t)$$

$$v_b(t, L) = W(t), \quad EI\Omega_n(t, L) = 0$$

$$EI\Omega_b(t, L) = 0 \quad (8)$$

여기서 v_i, v_n, v_b 는 국부좌표계 상에서 체인 끝단의 속도성분이며, $U(t), V(t), W(t)$ 는 부체의 전체좌표계 상의 속도성분을 나타낸다.

따라서, 지배방정식에 있는 $10(n-1)$ 개의 방정식과 10개의 경계조건을 이용해서 총 10n개의 미지수를 구할 수 있다. 식 (6)은 비선형 방정식인데, 본 연구에서는 뉴턴-랩슨 방법을 적용한다. 뉴턴-랩슨 방법에서 전체 방정식의 자코비안을 구성하면, 블록삼중대각행렬(block tri-diagonal matrix)의 형태를 나타낸다. 블록삼중대각행렬은 여러 가지 행렬풀이법에 의해서 풀이가 가능한데, 본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해서 비대각 성분인 영 값은 사용하지 않고 대각선 부근의 성분만 사용하는 행렬 풀이법을 적용하였다(Press, 1996).

4. 결과 및 고찰

본 절에서는 앞 절에서 설명한 수치해석적 방법을 통하여 얻은 해석결과에 대하여 논의한다. 부소파제는 해류 및 조류에 의해 수평으로 이동하여 정적평행상태에 이르게 되는데, 이 상태에서 하나의 계류라인에 대한 해석을 수행하였다. 계류라인은 전체 부분이 해저면으로부터 떨어져 있는 상태가 되며, 이 조건에서 계류라인의 맨 윗점에서 일정 주기와 진폭으로 가진될 때 계류라인의 응답특성을 살펴보았다. Table 1에서는 해석에서 사용된 입력 자료를 보여주고 있다. 가진은 수평방향으로 일정 주기와 진폭으로 작용된다고 가정하였다.

Fig. 3은 가진 주기를 각각 9초, 5초, 그리고 1초로 하고, 일정 진폭으로 가진되는 경우에 체인의 맨 윗점인 부이 연결점에서의 장력변화를 시간이력으로 보여준다. 장력 변동값은 가진진폭에 비례하며, 가진주파수에 비례하여 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 체인이 해저면 위에 붙어 있지 않고 거의 팽팽한 상태로 유지되고 있기 때문에 동적효과가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 장력은 시간에 따라서 비선형적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 조건에서 가진될 때 체인의 맨 아래지점인 앵커연결점에서 장력을 구한 결과를 시간이력으로 보여주고 있다. 응답 형태는 부이 연결점에서 얻은 장력 결과와 비슷한 유형을 보여주며 비선형성이 보다 강하게 나타나는 것을 볼 수 있

Table 1. Input data

Water depth (m)	80
Chain weight in water (N/m)	300
Chain length (m)	120
Chain diameter (m)	0.05
Number of nodes	25
Time increase (s)	0.05
Tolerance	0.0001

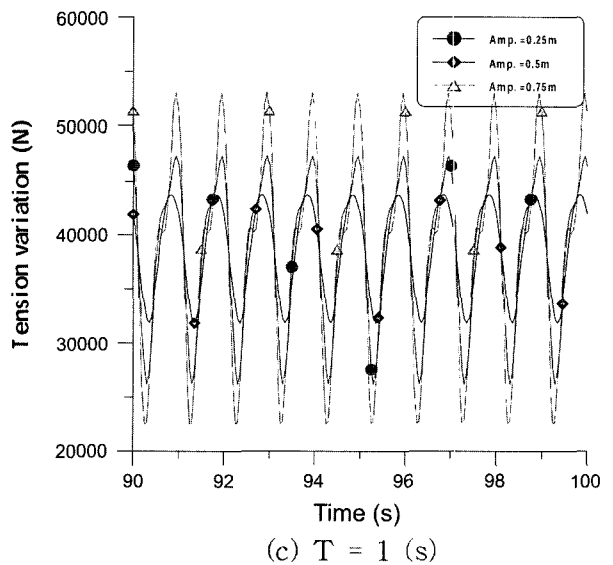
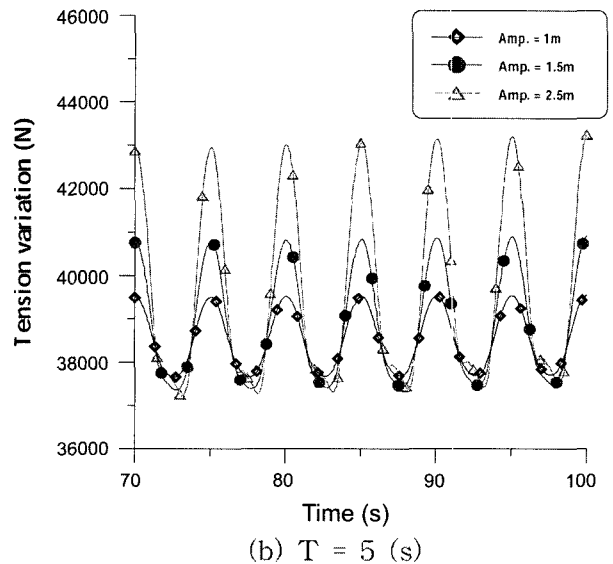
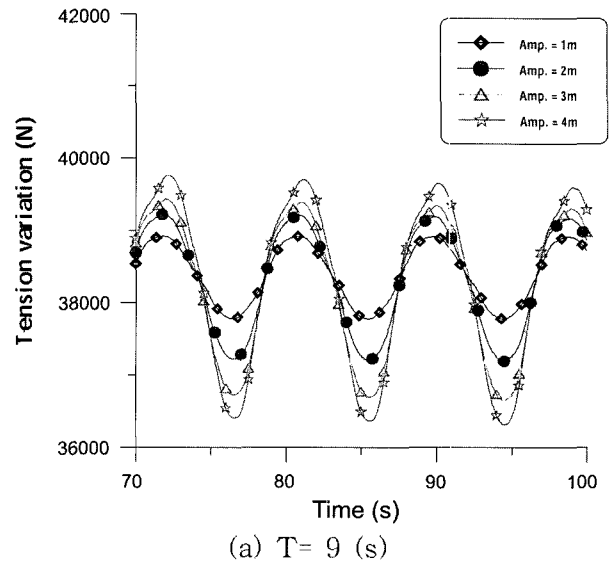
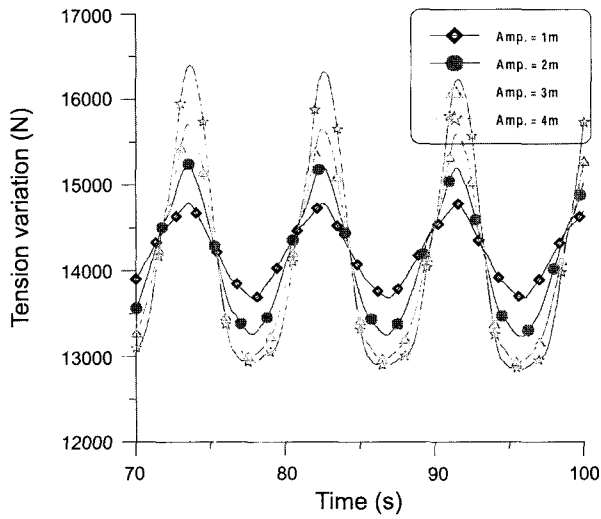
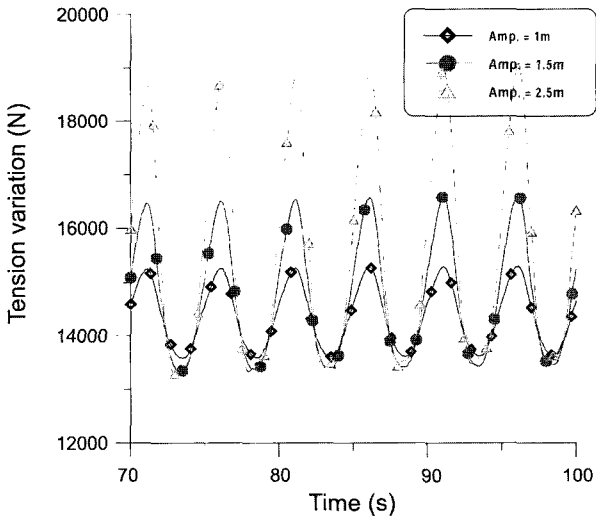


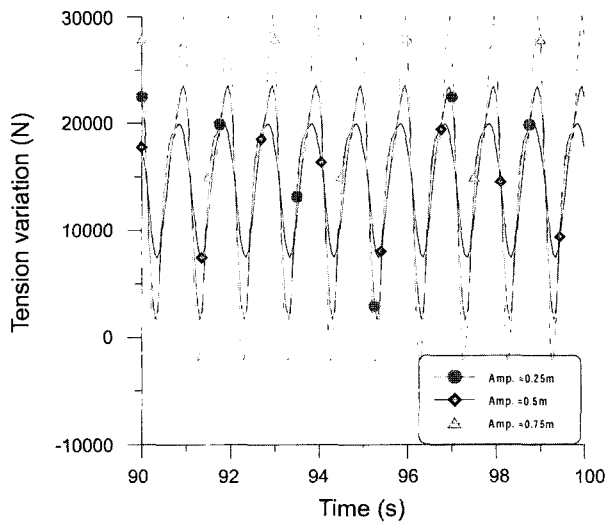
Fig. 3. Tension variation at top point in time history.



(a) $T = 9$ (s)



(b) $T = 5$ (s)



(5) $T = 1$ (s)

Fig. 4. Tension variation at bottom point in time history.

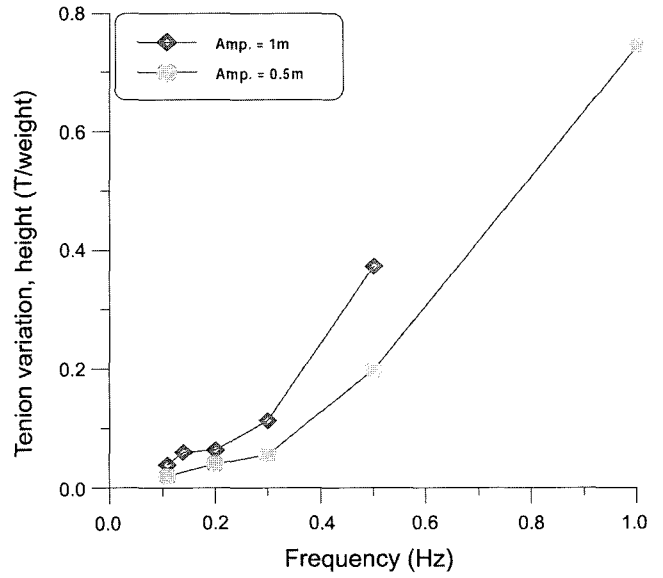


Fig. 5. Nondimensional tension variation (height) with excitation frequency.

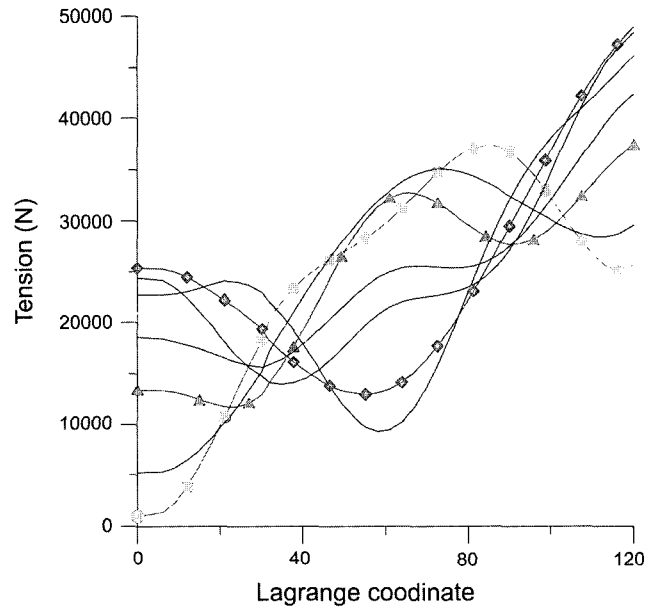


Fig. 6. Snapshot of tension in Lagrange coordinate ($T=1$ (s), Amp.=0.5(m)).

다. 특히 1초로 가진되는 경우에는 장력이 (-) 값이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 (-) 장력값은 압축력을 의미하므로 향후 이에 대한 깊은 연구가 요구된다.

Fig. 5에서는 부이 연결점에서 가진주파수에 따른 장력의 변동 값을 무차원화 하여 보여주고 있다. 장력의 변동치는 가진 주파수의 제곱함수로 비례하여 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 결과는 김현조 등 [2002]에 의한 실험 결과와 잘 일치하고 있는 것으로, 본 연구의 수치해석 결과의 간접적인 검증이 될 수 있을 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 살펴보면 부이 연결지점 외에 앵커 연결지점에서도 장력의 변동이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 따

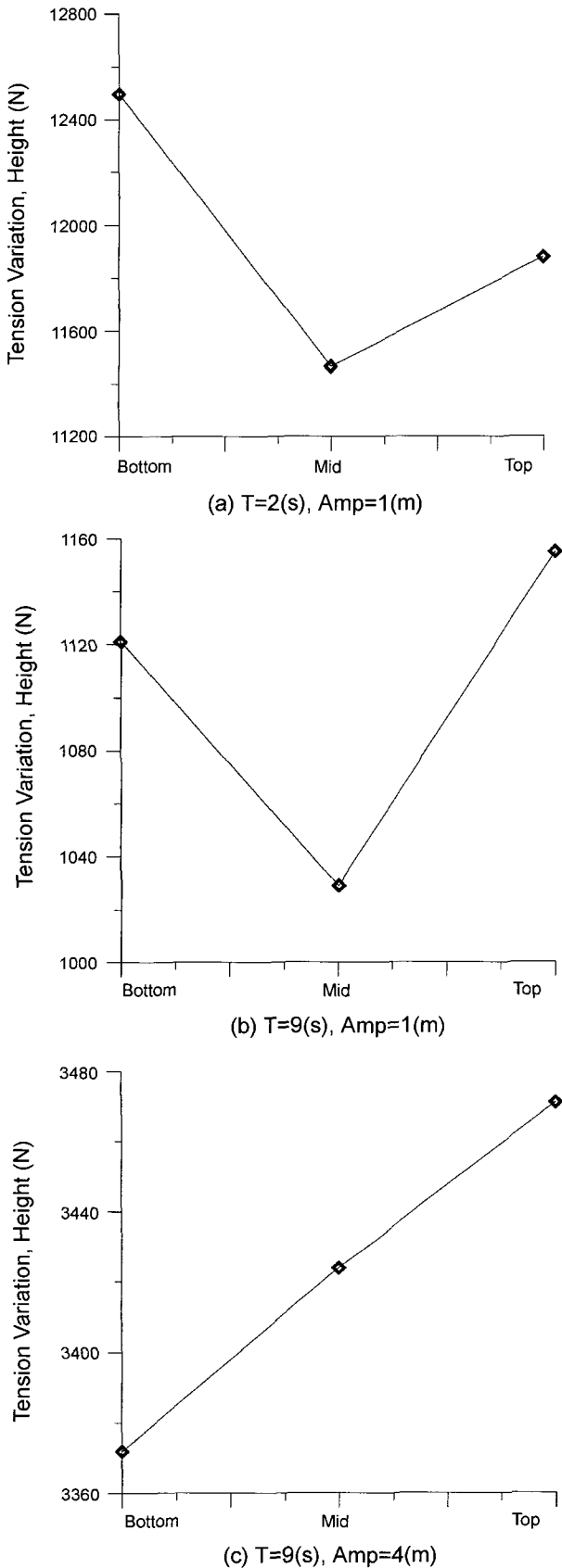


Fig. 7. Tension variations height at top, mid, and bottom point.

라서, 체인의 전체 길이에 따른 장력값을 Fig. 6과 같이 살펴보았다. 가진주기 1초, 진폭 0.5 m인 경우에 응답을 살펴보았는데, 한 주기 동안에 8개의 시점에서 전체 길이에 따른 장력을 구하였다. 결과를 보면 부이 연결점보다도 앵커 연결점에서 장력 변동치가 크게 나타났으며, 체인의 가운데 부분에서도 장력 변동치가 크게 나타났다. 이 결과는 피로파괴에 의해서 앵커 연결지점이 파단 될 수 있다는 것을 보여주며, 체인과 앵커 설계에 있어서 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

다른 가진주기에 대한 결과를 알아보기 위하여 단주기인 가진주기 2초와 장주기인 가진주기 9초인 경우에 체인의 부이 연결점, 중간점, 앵커연결점에서 장력의 변동치를 살펴보았다. Fig. 7은 그 결과를 보여주고 있는데, 단주기인 2초로 가진되는 경우에는 앵커 연결점에서 장력이 부이 연결점에서 장력보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 이 때 장력의 변동값은 거의 정적 장력만큼 나타났다. 그러나, 9초로 가진되는 경우에는 부이연결점, 중간지점, 그리고 앵커 연결지점에서 장력 변동값이 거의 비슷하게 나타났다. 이상의 결과에서 볼 때, 계류라인에 어떤 가진력이 작용한다면 부이 연결점 뿐만 아니라 앵커 연결점에서도 큰 장력이 발생할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 다목적용 부소파제의 계류라인 설계를 위한 장력 추정을 수행하였으며, 이를 바탕으로 앵커 설계 시에도 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 부소파제의 계류라인 설계를 위한 계류라인의 구조해석을 수행하였다. 계류라인의 동적방정식을 얻었으며, 유한 차분법을 적용하여 지배방정식을 풀이하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 체인이 일정주기와 진폭으로 가진될 때 장력의 변동값은 가진진폭과 주파수에 비례하여 나타났으며, 특히 주파수의 제곱함수로 비례하였다.

(2) 체인의 길이에 따른 장력 변동치를 살펴보았는데, 가진주기에 따라서 앵커 연결점에서 최대의 장력 변동치가 나타나기도 하였다. 이것은 체인에 대한 피로해석과 앵커 설치 시에 고려되어야 할 중요한 사항이다.

(3) 가진주기가 짧은 경우에 앵커 연결점에서의 장력값이 (-) 값이 나왔는데, 이에 대해서는 향후 보다 심도 있는 연구가 요구되어진다.

향후 계류라인의 고유치 해석을 통한 공진현상 해석에 관한 연구도 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부 “전남 다도해형 바다복합 기반조성사업” 및 “해양심층수의 다목적 개발”의 일부 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 김현조, 홍사영, 홍섭, 조석규, 2002, “강제동요 시험을 이용한 모형 계류사의 동적 응답 연구”, 한국해양공학회 추계학술대회, pp. 134-141.
- [2] 박재현, 안용호, 김도영, 2000, “상자형 부유식 소파제의 소파성능 개선을 위한 실험적 연구”, 한국해양환경공학회 논문집, 제3권 2호, pp. 41-49.
- [3] 박한일, 정동호, 2002, “유한차분법을 이용한 저장력 예인케이블의 비선형 동적해석”, 대한조선학회논문집, 제39권, 1호, pp. 28-37.
- [4] 신현경, 김덕수, 1993, “내파성 가리비 연승식 양식시설에 관한 연구(I)”, 한국해양공학회 논문집, 제10권, 1호, pp. 92-99.
- [5] 윤상준, 양찬규, 김현주, 김헌태, 2002, “중층계류식 인공해저시스템의 파랑중 운동특성에 관한 실험적 연구”, 한국해양환경공학회 논문집, 제5권, 2호, pp. 19-27.
- [6] 포스코 건설, 2003, “부소파제의 파랑제어 해석법과 기술개발 사례 및 설치현장조사”, 포스코 기술보고서.
- [7] 홍석원, 조일형 외, 1997, “해양환경 보전용 유연막 백(bag) 구조 방파제 개발”, 산업자원부 2차년도 중간보고서.
- [8] Press, W. H. and Teakolsky, S. A., 1986, “Numerical Recipes in Fortran 77”, Cambridge University Press, New York.

2004년 4월 30일 원고접수

2004년 9월 15일 수정본 채택