

심해무인잠수정 1차 케이블의 비선형 동적 해석

권도영* 박한일** 정동호***

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 해양개발공학부

***한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Non-Linear Dynamic Analysis of First Cable of Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle

DO-YOUNG KWON* HAN-IL PARK** DONG-HO JUNG***

*Graduate School of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering / KORDI, Yusong P.O. BOX 23, Taejeon, 305-600, Korea

KEY WORDS: Deep-sea unmanned underwater vehicle 심해무인잠수정, Non-linear dynamic analysis 비선형 동적 해석, Finite Difference Method 유한차분법, Cable tension 케이블장력, Cable axial vibration 케이블 축방향 진동

ABSTRACT: Ocean developments gradually move to deep-sea in the 21 century. A deep-sea unmanned underwater vehicle is one of important tools for ocean resource survey. A marine cable plays an important role for the safe operation of a deep-sea unmanned underwater vehicle. The first cable of a deep-sea unmanned underwater vehicle is excited by surface vessel motion and shows non-linear dynamic behaviors. A numerical method is necessary for analysing the dynamic behaviour of the first marine cable. In this study, a numerical program is established based on a finite difference method. The program is applied to a 6000m long cable for a deep-sea unmanned underwater vehicle and shows good reasonable results.

1. 서 론

세계 각국은 21세기에 와서 심해개발에 더욱 많은 노력을 기울이고 있다. 우리나라도 심해 망간 단괴나 열수 광산 주변 자원 등을 탐사하고 생산하는 기술을 개발하려는 노력이 활발하다.

심해 자원 탐사를 위한 중요한 도구중의 하나가 무인 잠수정이다. 무인잠수정은 대단히 고가이므로 사고로 인한 피해는 막심하다. 최근 일본에서는 무인잠수정의 사고가 발생하였으며 이로 인해 무인잠수정의 안전에 대한 국제적인 관심을 환기시켰다. 무인잠수정에는 유식식과 무식식이 있는데 유무식식인 경우에는 해양케이블이 무인잠수정의 안전에 중요한 역할을 한다. (Fig. 1 참조) 특히, 1차 케이블은 수심이 깊어짐에 따라 길이가 수천미터에 달하며 선박의 운동 등과 외란에 의해 복잡한 거동을 한다.

해양 케이블은 해양환경에서 운용될 때 파랑과 조류와 같은 해양환경 하중과 다양한 기능하중을 받게 된다. 해양 케이블을 설계할 때는 복잡한 하중 인자들을 모두 고려하여 정확한 해석을 필요로 한다. 해양 케이블에 대한 구조해석은 정적해석 외에도 동적해석이 중요한 설계인자가 되므로 정확한 동적해석을 통하여 케이블의 안정성을 확보함과 동시에 그 기능을 충분히 수행할 수 있도록 해야하며 이에 관한 논문이 많이 발표되었다. 한다. (Ablow and Schechter, 1987; Choo and Caseralla, 1973; Hong and Hong, 1994)

해양 케이블은 일반적으로 장력의 크기가 굽힘강성의 크기에 비하여 지배적이므로, 굽힘강성 성분을 무시하고 구조해석을 수행한다. 그러나 장력성분이 작아지는 경우에는 비선형성이 강하게 나타난다. 저장력 케이블의 문제를 해결하기 위해서는 굽힘강성(bending stiffness) 성분을 고려하여 수치적 안정성을 확보해야 한다. 저장력 케이블에 대한 논문 또한 다수 발표되어 왔다. (박, 정, 2002; Dermer et al., 1988; Park et al., 2004)

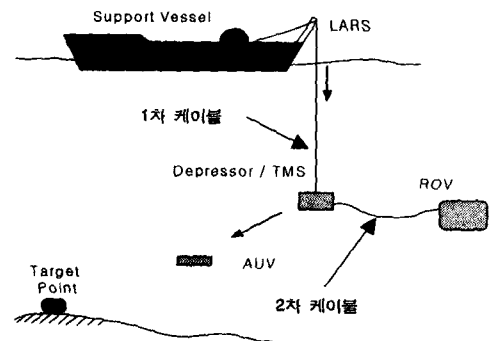


Fig. 1 Deep-sea unmanned underwater vehicle

심해무인잠수정의 1차 케이블은 이 시스템의 안정성을 상당부분 좌우한다. 따라서 연구선박의 운동이나 환경외력에 대한 심해무인잠수정의 1차 케이블의 동적 거동특성을 정확히 파악할 필요가 있다. 또한 선박이 항진하는 동안 케이블에 매달린

물체의 거동을 파악하는 것도 중요하다. (정 외, 2002)

본 연구에서는 유한 차분법에 의한 수치해석에 의해 심해무인잠수정 1차케이블의 비선형 동적 거동을 해석하고자 한다.

2. 케이블의 3차원 지배방정식

먼저 지배방정식을 유도하기 위해 좌표계에 대해 살펴보기로 한다. (박 정, 2002)

2.1 좌표계의 정의

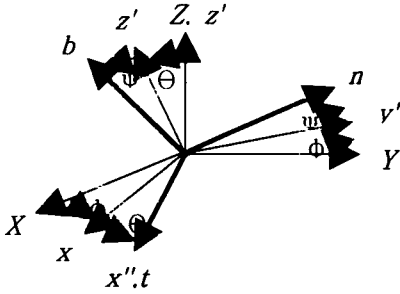


Fig. 2 Coordinate systems and Euler rotation sequence

본 연구에서는 Fig. 2과 같은 Euler 3차원 좌표계를 사용하였다.

ϕ : Z축을 중심으로 회전한 각도

θ : Y' 축을 중심으로 회전한 각도

ψ : t 축을 중심으로 회전한 각도

접선방향(t 방향)의 비틀을 무시한 경우에 국부 및 전체 좌표계의 변환은 다음 공식을 통하여 수행된다.

$$\begin{pmatrix} t \\ n \\ b \end{pmatrix} = L_{\psi} L_{\theta} L_{\phi} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

(1)

여기서

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

(2)

그리고, 국부적 곡률 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_t = -\frac{\partial \phi}{\partial s} \sin \theta$$

$$\Omega_n = \frac{\partial \theta}{\partial s}$$

(3)

$$\Omega_b = \frac{\partial \phi}{\partial s} \cos \theta$$

여기서 Ω_t 은 Ω_b 과 θ 의 함수로 표현되므로, 다음과 같이

표현될 수 있다.

$$\Omega_t = -\Omega_b \tan \theta$$

(4)

위와 유사하게 국부좌표계에서 각속도 벡터성분도 표현될 수 있다.

$$\omega_t = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \sin \theta \quad \omega_n = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

$$\omega_b = \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos \theta$$

(5)

2.2 케이블에 작용하는 하중성분

케이블이 물 속에 있을 때는 케이블 자체의 자중과 부력, 그리고 해양환경에 의한 동수력학적 하중을 받게 된다. 동수력학적 하중은 다시 항력(drag force)과 부가질량력(added mass force)으로 나눌 수 있다.

1) 자중과 부력

물 속에 있는 모든 물체는 물체표면에 중력 반대방향(연직방향)의 수압, 즉 부력을 받게 되는데, 부력을 단위길이당 힘으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

(6)

여기서, F_B = 단위길이당 작용하는 부력

ρ_w = 물의 밀도

g = 중력 가속도

e : 케이블의 변형도

A = 케이블의 단면적

위와 같은 부력의 영향으로 케이블의 수중중량은 자체중량에서 부력을 뺀 값이 된다. 공기 중에서 케이블의 중량을 $w = mg$ 라고 하면, 케이블의 수중에서의 중량 w_0 는 다음과 같다.

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

(7)

케이블에 작용하는 유효중량의 성분을 오일러각을 이용하여 국부좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{R}_x(1+e) = -w_0 \vec{k} = w_0(n_1 \vec{t} + n_2 \vec{n} + n_3 \vec{b})$$

(8)

여기서, $n_1 = -\cos \phi \cos \theta$

$$n_2 = \sin \phi$$

$$n_3 = -\cos\phi \sin\theta$$

2) 항력성분

국부좌표계에서의 케이블의 각 방향 속도성분을 각각 v_t, v_n, v_b 라 하고, 유체입자의 각 방향 속도성분을 각각 u_t, u_n, u_b 라고 표시하면 각 방향으로 작용하는 항력을 벡터로 나타내면 아래와 같이 나타낸다.

$$\vec{R}_d(1+e) = R_{d1}\hat{t} + R_{d2}\hat{n} + R_{d3}\hat{b} \quad (9)$$

여기서,

$$R_{d1} = -\frac{1}{2}\rho_u d\pi C_{d1} v_{1r} |v_{1r}| (1+e)^{\frac{1}{2}}$$

$$R_{d2} = -\frac{1}{2}\rho_u d\pi C_{d2} v_{2r} \sqrt{v_{2r}^2 + v_{3r}^2} (1+e)^{\frac{1}{2}}$$

(10)

$$R_{d3} = -\frac{1}{2}\rho_u d\pi C_{d3} v_{3r} \sqrt{v_{2r}^2 + v_{3r}^2} (1+e)^{\frac{1}{2}}$$

$$v_{1r} = v_t - u_t, \quad v_{2r} = v_n - u_n$$

$$v_{3r} = v_b - u_b$$

(11)

2.3 케이블의 지배방정식

케이블 미소요소에 대한 자유물체도는 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 우리가 알고자 하는 미지수는 총 10개가 된다. Fig. 3에 나타나 있는 $T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \Omega_n, \Omega_b$ 와 Fig. 2에 나타나 있는 ϕ, θ 이다. 본 연구에선 비틀림의 영향을 무시하였기 때문에 ϕ, Ω 성분은 고려하지 않았다.

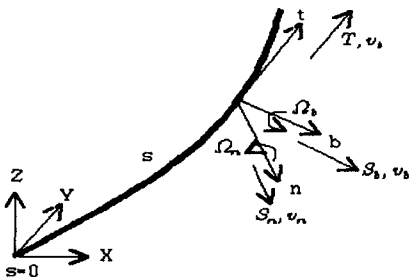


Fig. 3 Free body diagram

10개의 미지수 $T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b$ 에 대한 지배방정식을 얻기 위해서는 10개의 방정식이 필요하다. 본 절에서는 운동방정식, 모멘트 평형방정식, 적합조건식, 곡률관계를 이용하여 지배방정식을 유도한다. 운동방정식을 통해 T, S_n, S_b 에 대한 식을 얻을 수 있고, 모멘트 평형방정식을 통해 Ω_n, Ω_b 를 얻을 수 있다. 또, 적합조건식을 통해서

v_t, v_n, v_b 를 얻을 수 있고, 마지막으로 곡률 관계를 통해서 ϕ, θ 를 얻을 수 있다.

1) 운동방정식

케이블의 미소길이에 대하여 뉴턴의 제2법칙을 적용하고 전미분으로 전개한 다음 비틀림을 무시하고 3방향 성분으로 운동방정식을 나타내면 각각 다음과 같다.

$$m\left(\frac{\partial v_t}{\partial t} + v_b \frac{\partial \theta}{\partial t} - v_n \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos\theta\right) = \frac{\partial T}{\partial s} + S_b \Omega_n - S_n \Omega_b + w_0 n_1 + R_{d1}$$

$$m\left(\frac{\partial v_n}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} (v_t \cos\theta + v_b \sin\theta)\right) + m_a \frac{\partial v_{2r}}{\partial t}$$

$$= \frac{\partial S_n}{\partial s} - \Omega_b (T + S_b \tan\theta) + w_0 n_2 + R_{d2}$$

$$m\left(\frac{\partial v_b}{\partial t} - v_n \frac{\partial \phi}{\partial t} \sin\theta - v_t \frac{\partial \theta}{\partial t}\right) + m_a \frac{\partial v_{3r}}{\partial t}$$

$$= \frac{\partial S_b}{\partial s} - S_n \Omega_b \tan\theta - T \Omega_n + w_0 n_3 + R_{d3}$$

(12)

2) 모멘트 평형방정식

내력 모멘트와 외부 분포 모멘트 벡터 사이의 평형을 고려한다. 비틀림을 무시하기 때문에 접선방향 모멘트식은 무시하고 정리하면 모멘트 평형방정식은 다음과 같이 된다.

$$EI \frac{\partial \Omega_n}{\partial s} = \Omega_b^2 EI \tan\theta - S_b (1+e)^3$$

$$EI \frac{\partial \Omega_b}{\partial s} = -\Omega_n \Omega_b EI \tan\theta - S_n (1+e)^3$$

(13)

3) 적합조건식

마지막으로 적합조건을 적용시킨다. 케이블의 속도, 방향, 변형에 관계하는 적합관계는 인접하는 케이블 요소 사이에서 적합성을 만족해야 한다. 방향별로 구분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial v_n}{\partial s} - \Omega_b (v_t + v_b \tan\theta) = -\left(1 + \frac{1}{EA}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos\theta$$

$$\frac{\partial v_b}{\partial s} - \Omega_b v_n \tan\theta - \Omega_n v_t = -\left(1 + \frac{1}{EA}\right) \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

(14)

곡률의 정의에 의하여 다음의 두 식을 얻을 수 있다.

$$\Omega_n = \frac{\partial \theta}{\partial s} \quad \Omega_b = \frac{\partial \phi}{\partial s} \cos \theta \quad (15)$$

이상과 같이 운동방정식(뉴턴의 제 2법칙), 모멘트 평형방정식, 적합조건식, 곡률 관계를 이용하여 10개의 지배방정식을 구하였다. 이 10개의 지배방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & m\left(\frac{\partial v_t}{\partial t} + v_b \frac{\partial \theta}{\partial t} - v_n \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos \theta\right) \\ &= \frac{\partial T}{\partial s} + S_b \Omega_n - S_n \Omega_b + w_0 n_1 + R_{d1} \\ & m\left(\frac{\partial v_n}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} (v_t \cos \theta + v_b \sin \theta)\right) + m_a \frac{\partial v_{2r}}{\partial t} \\ &= \frac{\partial S_n}{\partial s} - \Omega_b (T + S_b \tan \theta) + w_0 n_2 + R_{d2} \\ & m\left(\frac{\partial v_b}{\partial t} - v_n \frac{\partial \phi}{\partial t} \sin \theta - v_t \frac{\partial \theta}{\partial t}\right) + m_a \frac{\partial v_{3r}}{\partial t} \\ &= \frac{\partial S_b}{\partial s} - S_n \Omega_b \tan \theta - T \Omega_n + w_0 n_3 + R_{d3} \\ & \frac{\partial v_t}{\partial s} + \Omega_n v_b - \Omega_b v_n = \frac{1}{EA} \frac{\partial T}{\partial t} \\ & \frac{\partial v_n}{\partial s} - \Omega_b (v_t + v_b \tan \theta) = -\left(1 + \frac{1}{EA}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos \theta \\ & \frac{\partial v_b}{\partial s} - \Omega_b v_n \tan \theta - \Omega_n v_t = -\left(1 + \frac{1}{EA}\right) \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ & \Omega_b = \frac{\partial \phi}{\partial s} \cos \theta \\ & \Omega_n = \frac{\partial \theta}{\partial s} \\ & EI \frac{\partial \Omega_n}{\partial s} = \Omega_b^2 EI \tan \theta - S_b (1+e)^3 \\ & EI \frac{\partial \Omega_b}{\partial s} = -\Omega_n \Omega_b EI \tan \theta - S_n (1+e)^3 \end{aligned} \quad (16)$$

3. 수치해석을 이용한 지배방정식의 풀이

앞에서 얻은 지배방정식을 풀어보도록 한다. 이러한 식들은 비선형 일련 아니라 서로 연성되어 있으므로 이론적으로 풀 수가 없다. 따라서 수치해석적인 방법이 필요하다. 본 연구에서는 공간상의 이산화에 위해 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하기로 한다.

앞에서 말한바와 같이 본 연구에서는 시간적분법은 음해법

(Implicit Method)과 중앙차분법을 사용하였다.

3.1 음해법을 이용한 지배방정식의 차분화

2절에서 구한 지배방정식을 행렬로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$M \frac{\partial \bar{Y}}{\partial s} = N \frac{\partial \bar{Y}}{\partial t} + \bar{Q} \quad (17)$$

여기서, \bar{Y} 가 계산에서 구해야 할 미지벡터 행렬이며 다음 식과 같다.

$$\bar{Y} = (T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b)^T \quad (18)$$

$$\bar{Q} = \begin{pmatrix} S_n \Omega_b - S_b \Omega_n + w_0 \cos \phi \cos \theta - R_{d1} \\ \Omega_b (T + S_b \tan \theta) - w_0 \sin \phi - R_{d2} + m_a \partial v_{2r} / \partial t \\ S_n \Omega_b \tan \theta + T \Omega_n + w_0 \cos \phi \sin \theta - R_{d3} + m_a \partial v_{3r} / \partial t \\ \Omega_b v_n - \Omega_n v_b \\ \Omega_b (v_t + v_b \tan \theta) \\ \Omega_b v_n \tan \theta + \Omega_n v_t \\ \Omega_b \\ \Omega_n \\ EI \Omega_b^2 \tan \theta - S_b (1 + T/EA)^3 \\ -EI \Omega_b \Omega_n \tan \theta - S_n (1 + T/EA)^3 \end{pmatrix} \quad (19)$$

한편 M, N 는 모두 10x10 크기의 사각행렬이 된다. M 의 경우에 대각선 성분은 다음과 같으며 그 외 성분은 모두 영이다.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & \cos \theta & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & EI & \\ & & & & & & & & & EI \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & -mv_n \cos \theta & mv_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m+m & 0 & mv_n \cos \theta + mv_b \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m+m & -mv_n \sin \theta & -mv_b & 0 & 0 \\ 1/l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1+T/EA) \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1+T/EA) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

위 식은 Δs 만큼 나누어져서 n 개의 노드(node)로 이산화 되고, 그 후에 Δt 만큼의 시간간격으로 나누어진다. $j+1/2$ 와 $i+1/2$ 에서 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{Y_j^{i+1} - Y_j^i}{\Delta t} \quad \frac{\partial Y}{\partial s} = \frac{Y_{j+1}^i - Y_j^i}{\Delta s} \quad (22)$$

위와 같은 방법으로 위의 식을 전개하여 $j+1/2$ 와 $i+1/2$ 에서 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [M_{j+1/2}^{i+1} + M_{j+1/2}^i] \frac{Y_{j+1/2}^{i+1} - Y_{j+1/2}^i}{\Delta s} + [M_{j+1/2}^i + M_j^i] \frac{Y_{j+1/2}^i - Y_j^i}{\Delta s} = \\ [N_{j+1/2}^{i+1} + N_{j+1/2}^i] \frac{Y_{j+1/2}^{i+1} - Y_{j+1/2}^i}{\Delta t} + [N_{j+1/2}^i + N_j^i] \frac{Y_{j+1/2}^i - Y_j^i}{\Delta t} + \\ Q_{j+1/2}^{i+1} + Q_{j+1/2}^i + Q_j^i \end{aligned} \quad (23)$$

(23)식은 $10(N-1)$ 개의 방정식으로 구성되어 있다. 반면에 미지변수는 총 $10N$ 개로 구성되어 있으므로, 10개의 또 다른 방정식이 구성되어야 한다. 나머지 10개의 방정식은 경계조건에서 얻어진다. 경계조건도 마찬가지로 근사화시킬 수 있으며, 경계조건을 포함하여 (23)식을 정리하면 다음과 같다.

$$\Phi^{i+1/2}(Y^{i+1}, Y^i) = 0 \quad (24)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi^{i+1/2} = (\Phi_0^{i+1/2}, \Phi_{1/2}^{i+1/2}, \Phi_{3/2}^{i+1/2}, \\ \dots, \Phi_{N-3/2}^{i+1/2}, \Phi_{N-1/2}^{i+1/2}, \Phi_N^{i+1/2}) \end{aligned}$$

(24)식은 편미분 방정식 (17)식을 음해법을 사용하고, 중앙차분화 시킨 2차 근사 방정식이다. 이 식을 통하여 시간 t_i 에서

\vec{Y}^i 이 주어지면 t_{i+1} 시간에서의 \vec{Y}^{i+1} 을 얻을 수 있다. 여기서, 초기상태 \vec{Y}^0 은 이미 아는 값이다. 하지만, (24)식은 각 시간에서 비선형으로 구성되어 있기 때문에 비선형 방정식을 풀이할 수 있는 적당한 수치해석 방법을 선택해야 한다. 본 연구에서는 뉴턴-랩슨 방법을 사용하여 비선형 방정식의 해를 구한다.

따라서, 지배방정식에서 구한 $10(n-1)$ 개의 방정식과 10개의 경계조건을 이용해서 총 $10n$ 개의 미지수를 구하게 된다.

3.2 비선형 방정식을 풀기 위한 Newton-Raphson 방법

본 수치해석에서는 미지수를 10개로 잡고 지배방정식도 10개로 유도하였기 때문에 다변수-다방정식 Newton-Raphson 방법을 채택해야 한다. 이 때 한 절점에 대한 자코비안 방정식은 아래와 같이 10×10 행렬로 이루어 진다.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{10}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_{10}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{10}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{10}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{10}}{\partial x_{10}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서, f_i ($i=1 \sim 10$)는 지배방정식 10개를 의미하며, x_i ($i=1 \sim 10$)는 각 변수 $T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b$ 를 의미한다.

한 절점에 대한 자코비안을 구한 뒤 전체 절점에 대한 자코비안으로 조합을 통해 해를 구할 수 있다.

4. 1차 케이블의 거동특성 예제해석

4.1 상하동요에 따른 1차 케이블의 동적거동 해석

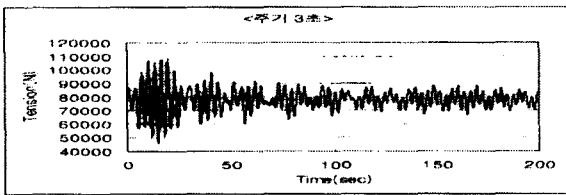
수립된 수치해석 방법을 이용하여 예제해석을 수행한다. 계산에 사용된 케이블 및 런처의 물성치는 아래의 Table 1과 같다. 여기서 케이블에 매달린 런처(Launcher)는 계산의 편의를 위해 집중 질량화(mass) 시켰다.

Table 1 Specification of ROV Cable and Luncher

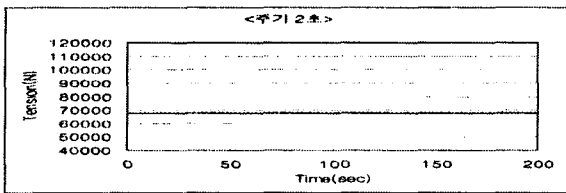
종류	케이블 물성치
케이블 외경	0.0173(m)
케이블 해수 중 단위중량	10.66(N/m)
케이블 탄성계수	1.246e7(N/m ²)
케이블 길이	6,000(m)
해수 중 런처중량	14,175(N)

4.1.1 케이블에 작용하는 장력

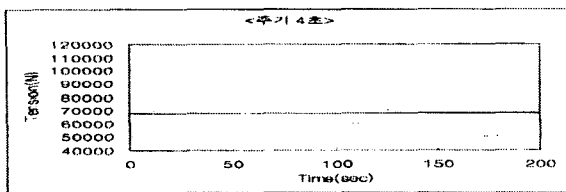
위의 물성치를 이용하여 케이블에 작용하는 장력을 구하였다. 가진 주기는 2초에서6초까지 1초간격으로 증가시켰으며 가진 진폭은 1m로 두었다. 아래 그림들은 각 주기에 대한 장력의 시간이력을 보여주고 있다.



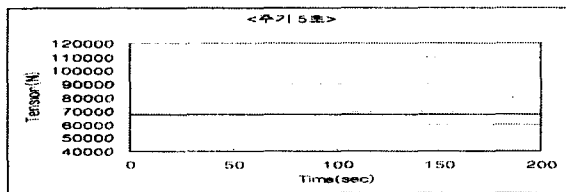
(a) Excitation period is 2sec



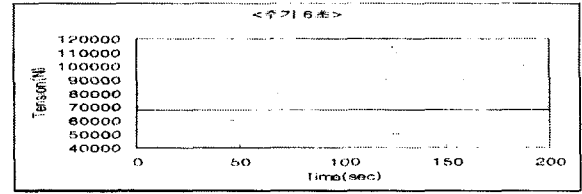
(b) Excitation period is 3sec



(c) Excitation period is 4sec



(d) Excitation period is 5sec



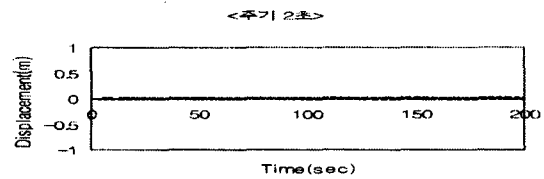
(e) Excitation period is 6sec

Fig. 4 Cable tension variation at top point for several excitation periods with excitation amplitude being 1m

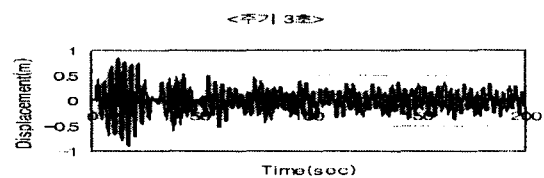
위의 결과값들을 보면 가진 주기가 3초일 때 가장 큰 장력 응답을 보여준다. 따라서 런처 거동 해석 및 케이블 제원을 결정할 때 가진 주기가 3초인 조건이 중요한 고려 사항임을 알 수 있다.

4.1.2 Cable 끝단에서의 변위

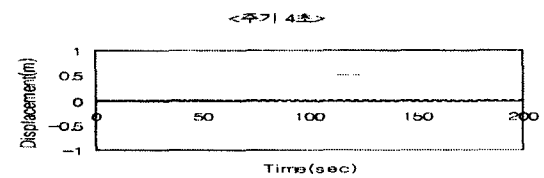
케이블 아래 끝단에서의 변위를 살펴보기로 한다. 마찬가지로 가진 주기는 2초에서부터 6초까지 1초씩 증가시켰으며 가진 진폭은 1m로 잡았다.



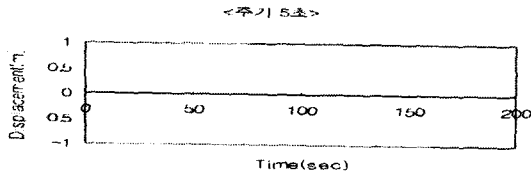
(a) Excitation period is 2sec



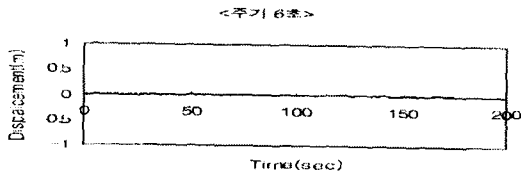
(b) Excitation period is 3sec



(c) Excitation period is 4sec



(d) Excitation period is 5sec



(e) Excitation period is 6sec

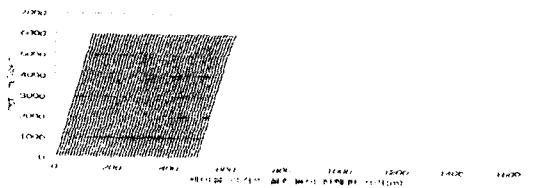
Fig. 5 Cable displacement variation at middle point for several excitation periods with excitation amplitude being 1m

위의 결과값을 보면 장력과 마찬가지로 끝단에서의 변위도 가진 주기가 3초일 때 다른 주기의 변위들에 비해 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

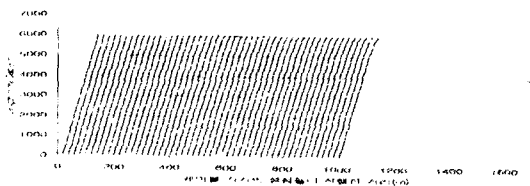
4.2 선박의 항진에 따른 케이블의 거동해석

선박이 1, 2, 3knot(0.51, 1.02, 1.53m/s)로 항진할 때 전체 케이블이 어떤 형상을 보여주며 그 케이블에 걸리는 장력이 얼마 인지를 해석하였다. 해석조건은 배가 상하운동을 하는 동시에 위에서 언급된 속도로 직진한다. 상하동요의 가진진폭을 1m, 주기를 3초로 적용하였다. 가동시간 1000초 동안 20초단위로 케이블의 형태를 나타내었다. 비정상상태의 케이블 형상은 의미가 없으므로 정상상태 이후의 결과만 나타내었다. 수평방향속도는 1knot, 2knot, 3knot의 3가지로 나누었다.

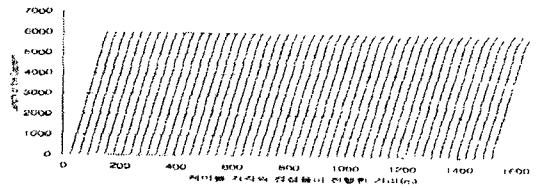
4.2.1 속도 변화에 따른 케이블 형상변화



(a) Ship speed is 1knot



(b) Ship speed is 2knots



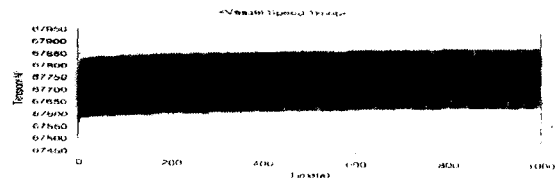
(c) Ship speed is 3knots

Fig. 6 Cable configurations for for several ship speeds with heaving amplitude being 1m and period being 3sec

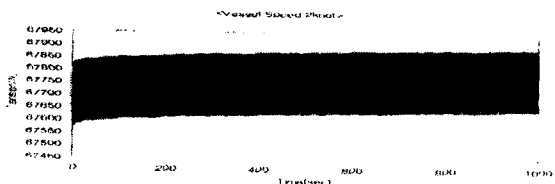
위의 그래프에서 X축은 각각의 절점들이 진행한 거리이고 Y축은 케이블의 길이를 의미하며 6000m의 지점이 수면이고 0인 지점이 바닥을 나타낸다. 결과치를 비교해 보면 같은 시간 1000(sec)를 진행하였지만 속도가 1, 2, 3knot로 다르기 때문이 X방향으로의 진행거리가 다름을 알 수 있다. 기울기의 차이는 미소하지만 속도가 증가 할수록 케이블이 기울어지는 각이 커짐을 알 수 있다.

4.2.2 속도 변화에 따른 케이블 장력변화

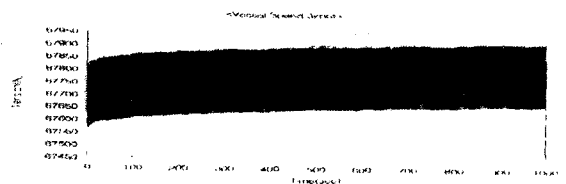
아래에서는 선박의 항진 속도변화에 따른 케이블의 장력값을 계산하였다. 진폭이 1m, 주기는 3초로 상하동요하면서 세가지 다른 속도, 즉 1, 2, 3knot로 선박이 항진하는 경우에 대해 비교해 보았다.



(a) Ship speed is 1knot



(b) Ship speed is 2knots



(c) Ship speed is 3knots

Fig. 7 Cable tension variation for several ship speeds with with heaving amplitude being 1m and period being 3sec

3가지 경우를 비교해 보면 응답 진폭의 크기는 거의 같으나 속도가 증가 할수록 최대 장력 값은 커짐을 알 수 있다. 이것은 속도의 제곱에 비례하는 항력의 증가에 따른 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 연구선박과 Launcher를 연결하는 1차 케이블의 동적거동을 파악하기 위해서 수치해석 기법을 수립하였다. 먼저 해양 케이블에 대한 3차원 동적 지배방정식을 유도하였다. 이 지배방정식은 비선형, 연성방정식인데 이 방정식에 대한 해를 구하기 위하여 유한차분법을 이용한 수치해석적 방법을 적용하였으며 유한차분법 중에서도 조건에 비교적 관계없이 안정적인 음해법을 적용하였다. 비선형 방정식을 풀기 위해서 뉴턴-랩슨 방법을 적용하였다.

개발된 수치알고리즘을 이용하여 1차 케이블이 여러 가진 주기에 의해서 어떻게 거동하는지 그 특성을 파악하였다. 먼저 선박의 상하동요에 대해 케이블에 작용하는 장력 및 변위를 계산하였다. 선정된 케이블에 대해서 가진 주기가 3초일때 가장 큰 응답을 보여주었다. 또한 선박이 상하동요하면서 일정한 속도로 항해할 때의 케이블에 걸리는 장력과 거동을 파악하였다.

참 고 문 헌

- 박한일, 정동호, 2002, "유한차분법을 이용한 저장력 예인 케이블의 비선형 동적해석", 대한조선학회지, 제39권 제1호, pp28-37.
- 정동호, 김종규, 박한일, 2002 "해양탐사장비 예인케이블의 3차원 동적해석에 관한 연구", 한국해양학회지, 제8권 2호, pp203-209.
- Ablow, C.M. and Schechter, S., 1987, "Numerical Simulation of Undersea Cable Dynaics", Ocean Engineering, Vol. 14, No. 6.
- Choo, Y. and Caseralla, M.J., 1973, "A Survey of Analytical Methods for Dynamic Simulation of Cable-Body Systems", J. of Hydronautics, Vol. 7, No. 4, pp. 137-144.
- Delmer, T.N., Stephens, T.C. and Tremills, J.A., 1988, "Numerical Simulation of Cable-Towed Acoustic Arrays", Ocean engineering, Vol.15, No.6.
- Hong, S. and Hong, S.W., 1994, "A Three-Dimensional Dynamic Analysis of Towed Systems, Part 1. A Mathematical Formulation", 한국해양공학회지, 제8권, 제 1호, pp. 16-22.

Park, H.I., Jung, D.H. and Koterayama, W., 2004, "Numerical and experimental study on the dynamics of a towed low tension cable", Applied Ocean Research (in press).