

결합가진 하의 ROV 런처와 케이블의 동적거동 수치해석

권도영* 박한일**

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 해양개발공학부

A numerical analysis for the dynamic behavior of ROV launcher and 1st cable under combined excitations

DO-YOUNG KWON*, HAN-IL PARK**

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

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

KEY WORDS: Deep-sea unmanned underwater vehicle 심해 무인잠수정, Numerical analysis 수치해석, FDM(Finite Difference Method) 유한 차분법, Cable tension 케이블장력, Combined excitations 결합가진

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 and signal transmission 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 ROV launcher is also excited by the 1st cable motion. A numerical method is necessary for analysing the dynamic behaviour of the first marine cable and the ROV launcher. In this study, a numerical program is applied to a 6,000m long cable for a deep-sea unmanned underwater vehicle to show shows the dynamic behaviour of the cable and the ROV launcher under combined excitations.

1. 서 론

육상자원의 고갈로 인하여 전 세계 각 국은 심해 자원개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라 역시 최근 들어 심해자원을 탐사하고 채취하려는 기술개발이 활발해지고 있다.

심해 자원탐사를 위한 많은 기기들이 있지만 그중에서도 중요한 기기중의 한 가지가 무인 잠수정인데, 이는 매우 고가이며 탐사나 채취 중 유실될 경우 기술적 경제적 큰 피해를 야기시킨다. 실제로 가까운 일본에서는 무인잠수정의 유실사고가 실제 발생하였으며 이로 인하여 무인잠수정의 안전에 대한 국제적 관심이 환기되었다. 특히 유삭식의 경우에는 해양케이블은 무인잠수정의 안전에 큰 역할을 한다. (Fig. 1 참조)

특히 Fig.1에서 보는 바와 같이 1차 케이블은 수심이 깊어질수록 수 천 미터에 이르며 지원모선의 6자유도 운동과 외부 간섭력에 의해 비선형적인 거동을 일으킨다.

해양 케이블이 이러한 해양환경에서 운용될 때 다양한 하중들을 받는데 이를 견디 내기위한 해양케이블을 설계하기 위해서는 복잡한 하중인자들이 모두 고려되어야 정확한 해석이 필요하다. 해양 케이블에 대한 해석은 정역학적인 해석이 선행되고 이에 더하여 동적해석 또한 중요한 케이블 설계요소가 되므로 이 논문의 목적인 정확한 동적해석을 통하여 케이블의 안정성을 확보하여 그 기능을 충분히 수행할 수 있도록 해석해야한다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 논문이 최근들어 많이 발표

되고 있는 추세이다.(Ablow and Schechter, 1987; Choo and Caseralla, 1973; Hong and Hong, 1994)

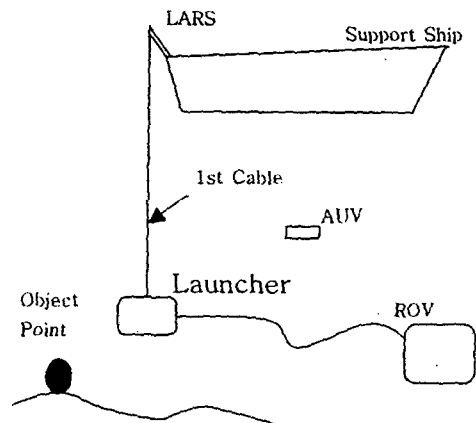


Fig. 1 Deep-sea unmanned underwater vehicle

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 발표

되어 왔다. (박, 정, 2002; Dermer et al., 1988; Park et al., 2004; 정 외, 2004)

심해 무인잠수정의 케이블은 무인 잠수정의 작동을 컨트롤 하는 신호를 보냄과 동시에 ROV를 지지하여 전체시스템의 안정성을 유지하는 역할을 한다.

따라서 연구선박의 운동이나 환경외력에 대한 심해 무인잠수정의 1차 케이블의 안전을 확보하기 위하여 동적 거동특성을 알아보는 것이 중요하고 이에 더하여 케이블에 런처가 부착된 상태에서 지원모선이 항진하는 경우의 거동을 파악하는 것도 중요하다. (정 외, 2002)

본 연구에서는 유한 차분법에 의한 수치해석에 의해 심해 무인잠수정 1차 케이블의 비선형 동적 거동을 해석하고자 한다. 1차 케이블에 걸리는 장력은 선박의 연직운동에 가장 크게 영향을 받으므로 먼저 연직운동(heave oscillation)을 할 때의 케이블에 작용하는 장력을 알아보고 또한 이에 더하여 수평가진(surge oscillation)과 동시에 작용되었을 때의 장력을 구하고자한다. 또한 지원모선의 운동을 최대한 고려한 연직운동을 하면서 동시에 항진하는 형태의 가진에 대한 케이블의 거동을 파악하고자 한다.

2. 케이블의 3차원 지배방정식

먼저 지배방정식을 유도하기에 앞서 좌표계에 대해 살펴보기로 한다. (박, 정, 2002)

2.1 좌표계의 정의

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

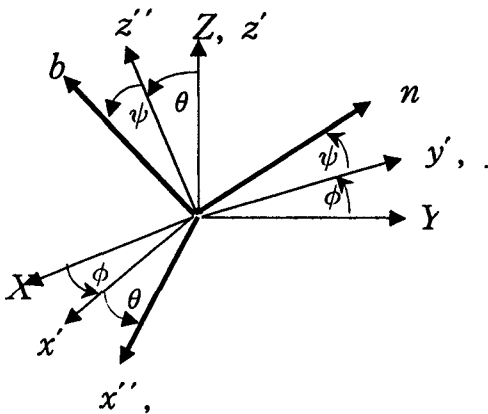


Fig. 2 Coordinate systems and Euler rotation sequence

2.2 케이블에 작용하는 하중성분

케이블이 물속에 있을 때는 케이블 자체의 자중과 부력, 그리고 해양환경에 의한 동수역학적 하중을 받게 된다. 동수역학

적 하중은 다시 항력(drag force)과 부가질량력(added mass force)으로 나눌 수 있다.

케이블에 작용하는 유효중량의 성분을 오일러각을 이용하여 국부좌표계로 표현하면 다음과 같다.

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

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 같다.

$$\vec{R}_d(1+e) = R_{d1} \vec{i} + R_{d2} \vec{n} + R_{d3} \vec{b} \quad (2)$$

2.3 케이블의 지배방정식

케이블 미소요소에 대한 자유물체도는 Fig. 3과 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 Ψ, Ω_t 와 관련된 성분은 고려하지 않았다.

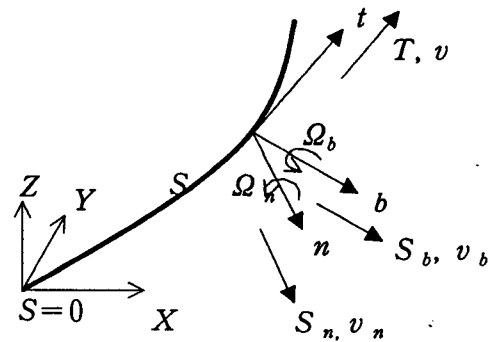


Fig. 3 Free body diagram

10개의 미지수 $T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b$ 에 대한 해를 얻기 위해서는 10개의 지배방정식이 필요하다.

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 곡률관계를 통해서 ϕ, θ 를 얻을 수 있다.

이상과 같이 각 관계들을 이용하여 10개의 지배방정식을 세우고 정리하면 다음과 같다.

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

3. 수치해석을 이용한 지배방정식의 풀이

앞에서 얻은 지배방정식을 풀어보도록 한다. 이러한 식들은 비선형 일련 아니라 서로 연성되어 있으므로 이론적으로 풀 수가 없다. 따라서 수치 해석적인 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.

$$M \frac{\partial \vec{Y}}{\partial s} = N \frac{\partial \vec{Y}}{\partial t} + \vec{Q} \tag{4}$$

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

$$\vec{Y} = (T, S_n, S_b, v_t, v_n, v_b, \phi, \theta, \Omega_n, \Omega_b)^T \tag{5}$$

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} S_n \Omega_b - S_b \Omega_n + w_0 \cos \phi \cos \theta - R_{d1} \\ \Omega_b (T + S_b \tan \theta) - w_0 \sin \phi - R_{d2} + m_a \partial v_{2r} / \partial t \\ S_n \Omega_b \tan \theta + T \Omega_n + w_0 \cos \phi \sin \theta - R_{d3} + m_a \partial v_{3r} / \partial t \\ \Omega_b v_n - \Omega_n v_b \\ \Omega_b (v_t + v_b \tan \theta) \\ \Omega_b v_n \tan \theta + \Omega_n v_t \\ \Omega_b \\ \Omega_n \\ EI \Omega_b^2 \tan \theta - S_b (1 + T/EA)^3 \\ -EI \Omega_b \Omega_n \tan \theta - S_n (1 + T/EA)^3 \end{pmatrix} \tag{6}$$

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

$$M = \begin{pmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & \cos & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & EI \\ & & & & & & & & & EI \end{pmatrix} \tag{7}$$

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & -mv_n \cos \theta & mv_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m+m_a & 0 & mv_t \cos \theta + mv_b \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m+m_n & -mv_n \sin \theta & -mv_t & 0 & 0 \\ 1/EA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1+T/EA) \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1+T/EA) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{8}$$

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.

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{Y_j^{i+1} - Y_j^i}{\Delta t} \quad \frac{\partial Y}{\partial s} = \frac{Y_{i+1}^j - Y_i^j}{\Delta s} \quad (9)$$

(9)식을 풀어보면 $10(n-1)$ 개의 방정식으로 구성되어 있다. 반면에 미지변수는 총 $10n$ 개로 구성되어 있으므로, 10개의 또 다른 방정식이 구성되어야 한다. 나머지 10개의 방정식은 경계조건에서 얻어진다. 경계조건도 마찬가지로 근사 화시킬 수 있으며, 경계조건을 포함시키도록 한다.

본 연구에서는 뉴턴-랩슨 방법을 사용하여 비선형 방정식의 해를 구한다.

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 방정식을 이용하는 10×10 행렬로 이루어진다.

4. ROV 1차 케이블의 거동특성 예제해석

4.1 상하동요에 따른 1차 케이블의 동적거동 해석

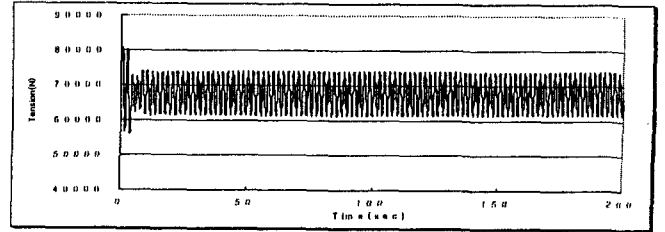
수립된 수치해석 방법을 이용하여 예제해석을 수행한다. 계산에 사용된 케이블 및 런처의 물성치는 아래의 Table 1과 같다. 여기서 케이블에 매달린 런처(Launcher)는 계산의 편의를 위해 집중 질량화 (Lumped Mass) 시켰다.

Table 1 Specification of ROV Cable and Luncher

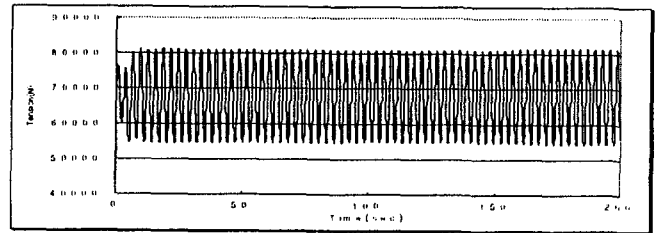
Description	Properties of Cable
Diameter of Cable	0.0173(m)
Weight of Cable in Seawater	8.878(N/m)
Young's Modulus	5.3E10(N/m ²)
Length of Cable	6,000(m)
Weight of Launcher in Seawater	14,175(N)

4.1.1 케이블에 작용하는 장력

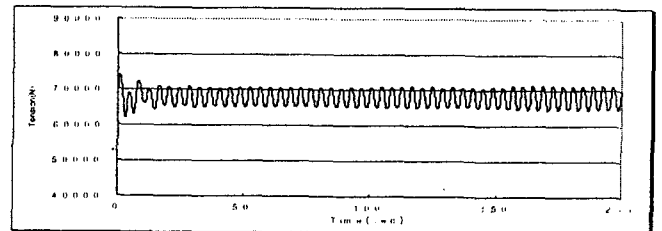
위의 물성치를 이용하여 케이블에 작용하는 장력을 구하였다. 가진 주기는 2초에서 5초까지 1초 간격으로 증가시켰으며 수직방향 가진 진폭은 1m로 두었다. 아래 그림들은 각 주기에 대한 장력의 시간이력을 보여주고 있다.



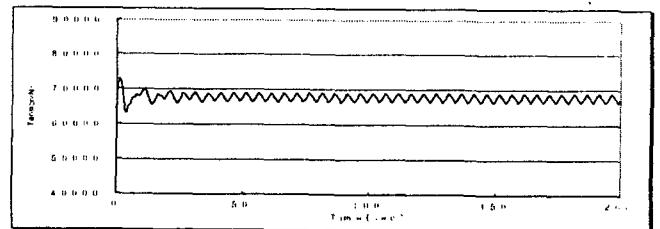
(a) Excitation period is 2sec



(b) Excitation period is 3sec



(c) Excitation period is 4sec



(d) Excitation period is 5sec

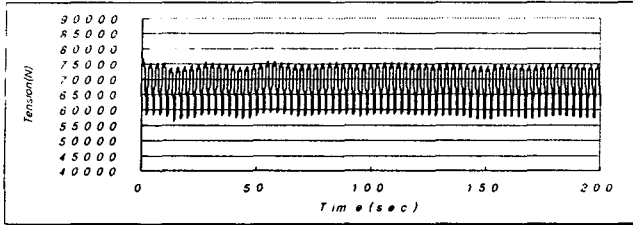
Fig. 4 Cable tension variation at top point for several excitation periods with excitation amplitude being 1m

위의 결과값들을 보면 가진 주기가 3초일 때 가장 큰 장력 응답을 보여준다. 즉, 6,000m 케이블에 런처가 붙어 있는 경우의 수직방향 고유주기가 약 3초 정도인 것을 알 수 있다. 따라서 런처 거동 해석 및 케이블 제원을 결정할 때 가진 주기가 3초인 조건이 중요한 고려 사항임을 알 수 있다.

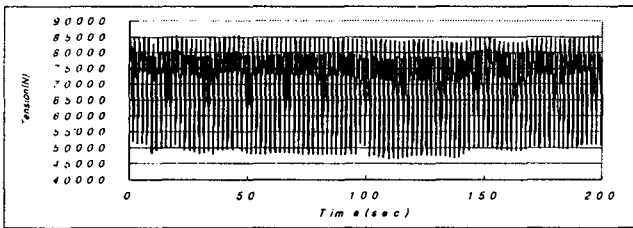
가진 주기가 3초 일 때의 장력 변화를 보면, 케이블 및 런처의 수중 무게가 67,443N이므로 동적장력은 정적인 장력값을 중심으로 변화하는 것을 알 수 있다. 초기 30초 정도의 값은 계산치가 안정되기 이전의 값이므로 그 이후의 값을 정상적인 값으로 보면 약 14,000N의 변화폭을 가지는 것을 알 수 있다.

4.1.2 결합가진 하에서의 케이블에 작용하는 장력

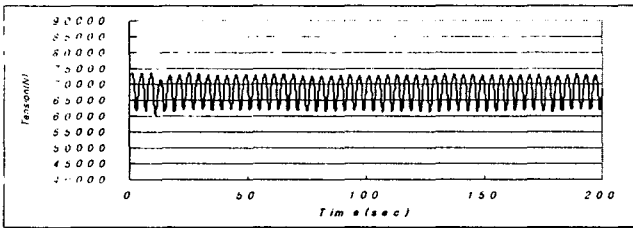
이번 절에서는 케이블이나 런처의 물성치는 앞절과 같고 복합가진을 적용했을 때의 장력값을 살펴보기로 한다. 가진진폭은 수직가진 1m, 수평가진 3m로 가정하고 동시에 적용시켰다.



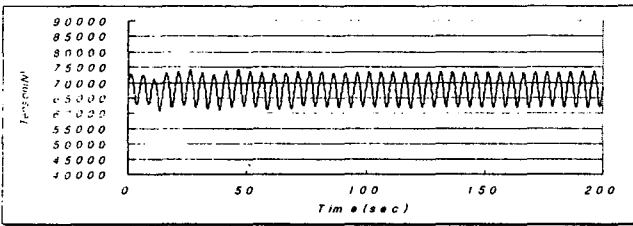
(a) Excitation period is 2sec



(b) Excitation period is 3sec



(c) Excitation period is 4sec



(d) Excitation period is 5sec

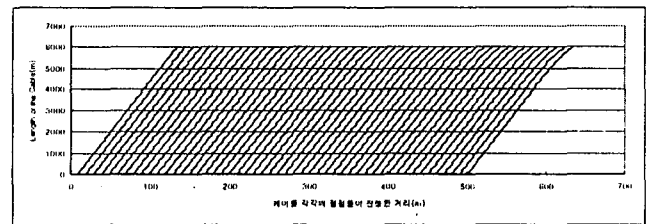
Fig. 5 Cable tension variation at top point for several excitation periods with excitation heave amplitude being 1m and surge amplitude being 3m

위의 결과값을 보면 연직가진만을 주었을 때와 마찬가지로 가진 주기가 3초일 때 다른 주기의 장력들에 비해 매우 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 수평가진 3m에 의한 장력값은 수직가진에 비하여 장력에 영향은 다소 덜 미치지만 주기가 3초 일때의 그래프에서 살펴보면 5000N 정도의 장력이 증가함을 알 수 있다.

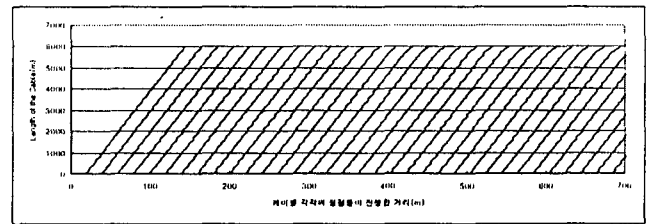
4.2 선박의 항진에 따른 케이블의 거동해석

선박이 1, 2, 3knot(0.51, 1.02, 1.53m/s)로 항진할 때 전체 케이블이 어떤 형상을 보여주며 그 케이블에 걸리는 장력이 얼마인지를 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. 수평방향 속도는 1knot, 2knot, 3knot의 3가지로 나누었다.

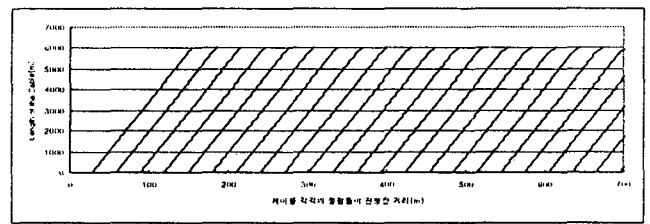
4.2.1 속도 변화에 따른 케이블 형상변화



(a) Ship speed is 1knot



(b) Ship speed is 2knots



(c) Ship speed is 3knots

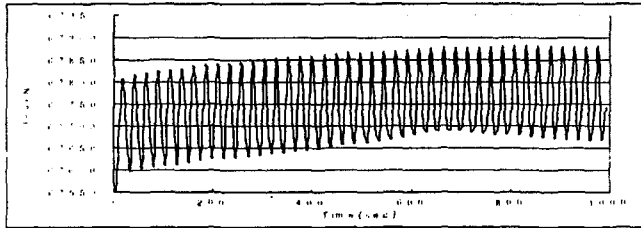
Fig. 6 Cable configurations for several ship speeds with heaving amplitude being 1m and period being 3sec

위의 그래프에서 X축은 각각의 절점들이 진행한 거리이고 Y축은 케이블의 길이를 의미하며, 6,000m의 지점이 수면이고 0인 지점이 바닥을 나타낸다. 결과치를 비교해 보면 같은 시간 1,000초를 진행하였지만 속도가 1, 2, 3knot로 다르기 때문에 X 방향으로의 진행거리가 다를 수 있다. 기울기의 차이는 미소하지만 속도가 증가 할수록 케이블이 기울어지는 각이 커짐

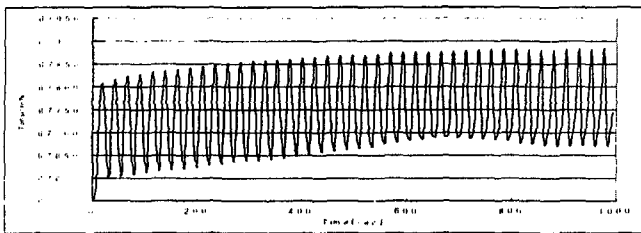
을 알 수 있다.

4.2.2 속도 변화에 따른 케이블 장력변화

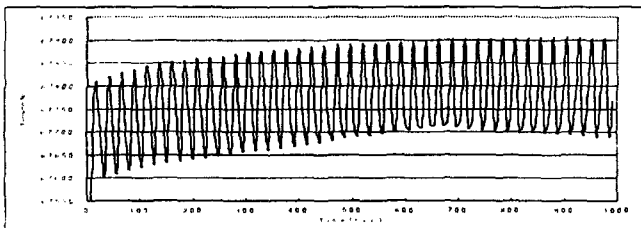
아래에서는 선박의 항진 속도변화에 따른 케이블의 장력값을 계산하였다. 진폭이 1m, 주기는 3초로 상하동요하면서 세 가지 다른 속도, 즉 1, 2, 3knot로 선박이 항진하는 경우에 대해 비교해 보았다.



(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 heaving amplitude being 1m and period being 3sec

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

5. 결론

본 연구에서는 연구선박과 무인잠수정 런처를 연결하는 1차 케이블의 동적거동을 파악하기 위해서 수치해석 기법을 수립하였다. 먼저 해양 케이블에 대한 3차원 동적 지배방정식을 유도

하였고 10개의 지배방정식을 정립하였으며 이 지배방정식은 비선형, 연성방정식인데 이 방정식에 대한 해를 구하기 위하여 유한차분법을 이용한 수치 해석적 방법을 적용하였다.

수치해석을 위하여 유한차분법을 적용하였으며 이 중에서도 조건에 비교적 관계없이 안정적인 음해법을 사용하였다. 또한 비선형 방정식 풀이를 위해 뉴턴-랩슨 방법을 적용하였다.

개발된 수치알고리즘을 이용하여 1차 케이블이 여러 가진 주기에 의해서 어떻게 거동하는지 그 특성을 파악하였다. 지원모선의 수평가진과 동시에 수평가진이 동시에 작용하는 케이블에 작용하는 장력을 계산하였다. 선정된 케이블에 대해서 두 경우 모두 가진 주기가 3초일 때 가장 큰 응답을 보여주었다. 따라서 이와 같은 시스템의 운용에 있어서는 3초의 가진주기에 대해 주기가 요망됨을 알 수 있다. 수평가진은 수직가진에 비하여 장력에 보다 미소하게 관여하지만 일부 장력값이 증가함을 알 수 있었다. 또한 선박이 상하동요 되면서 일정한 속도로 항해할 때의 케이블에 걸리는 장력과 거동을 파악하였으며 속도가 큰 경우에 미소하지만 보다 큰 장력이 걸리는 것을 알 수 있다.

차후 본 전산프로그램에서 가진 방향을 3차원으로 확장하고 또한 런처의 질량을 집중질량 대신에 실질적인 질량으로 적용하고자 한다. 이를 통하여 심해자원 개발 및 탐사용 무인잠수정의 거동을 파악하는데 본 프로그램을 활용하고자 한다.

참 고 문 헌

- 박한일, 정동호, 2002, "유한차분법을 이용한 저장력 예인케이블의 비선형 동적해석", 대한조선학회지, 제39권 제1호, pp28-37.
- 정동호, 김현주, 박한일, 2004 "수치 해석적 방법을 통한 해양심층수 취수용 유연 라이저의 거동해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제18권 4호, pp15-22.
- 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., 2003, "Numerical and experimental study on the dynamics of a towed low tension cable", Applied Ocean Research, Vol. 25, pp289-299