

예인되는 케이블의 고유치 해석에 관한 연구 - 하부 끝단 자유 경계조건

정동호* · 김현주* · 문덕수* · 이승원*

*한국해양연구원 해양시스템연구부

Study on Eigenvalue Analysis for a Towed Cable - Free Boundary at the Bottom End

Dongho Jung*, Hyeonju Kim*, Deoksoo Moon* and Seungwon Lee*

*Ocean System Research Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Towed cable 예인케이블, Vortex-induced vibration 와류유기진동, Natural frequency 고유진동수, Lock-in 록-인, Numerical study 수치해석

ABSTRACT: In this study, the static and modal analyses to find the characteristic of eigenvalues for a towed cable were with a free boundary condition at the bottom end carried out with numerical study. The resulting numerical code with finite element method was used to study sample problems for a cable with towing speeds. After tracing the equilibrium state with a towing speed through the static analysis, modal analysis on the basis of static results was performed. The static top tension for a critical towing speed is nearly 50 percent of what it was for a free hanging pipe. From static analyses, it is found that towing speed has a noticeable effect on top tension of a towed pipe. At a high towing speed, differences between the first and second periods become larger. Compared to the fundamental period for a free hanging pipe, that for a towed pipe with a critical towing speed is approximately 1.4 times larger. This result is very important point in that the lock-in condition and tension of the towed cable system with top excitation can be predicted. The corrected close-form solution to solve natural periods for a towed cable was presented in this study. The code is validated by comparison of the results of theoretical and numerical studies. Two results were in very good agreement. This study can contribute to predicting the lock-in condition and tension for a towed cable or pipe with top excitation.

1. 서 론

케이블은 많은 분야에서 해양산업에 적용되고 있으며, 그 예로서는 해양계류시설, 선배열 음향탐지시스템(Towed array sonar system), ROV(Remotely operated vehicle) 예인 케이블 등이 있다. 특히, 예인되는 해양케이블은 군사적 목적 또는 해양조사 등을 위하여 매우 유용하게 사용되는 구조체이다. 케이블 시스템에서 장력과 위치를 예측하는 일은 그 기능 및 안전성 관점에서 볼 때 매우 중요한 일이다.

케이블 장력에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나는 와류유기진동(VIV, Vortex-induced vibration)이다. 와류유기진동이란 케이블 혹은 파이프 주변으로 유체가 흘러갈 때 구조물 후면에서 와류가 발생하게 되는데, 비대칭적인 와류의 발생으로 흐름의 직각 방향으로 구조물이 거동하게 되는 현상을 의미한다. 한편, 구조물의 고유진동수와 와류가 발생하는 진동수가 거의 일치하는 영역에서는 와류유기진동의 진폭이 매우 크게 발생하는 현상이 발생하게 되며, 이것을 록인(Lock-in)이라고 한다. 록인이 발생하면 케이블에 작용하는 항력을 증가시킬 뿐

아니라, 피로파괴까지 발생할 수 있기 때문에 설계 시 이에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다. 예인되는 케이블에 있어서 와류유기진동에 관한 영향을 살펴보기 위해서는 시스템의 고유치 해석이 반드시 필요하다. 케이블의 고유치 해석을 위해서는 발생하는 장력을 추정해야 하는데, 특히 예인되는 케이블에서는 예인속도에 의해서 장력이 크게 지배받기 때문에 예인속도에 따른 장력 추정을 통한 정확한 고유치 해석이 이루어져야 한다.

예인되는 케이블의 고유치 해석에 관한 연구는 몇몇 연구자에 의해서 수행되어졌다. Park et al.(2003)은 수치해석 및 실험적 연구를 통하여 예인되는 케이블의 동적 거동 특성에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 실험 및 수치해석 결과를 서로 검증하여 개발된 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 예인되는 케이블의 고유치를 얻는 이론식을 수정하여 제시하였다.

와류유기진동에 관한 연구는 오랫동안 많이 이루어져 오고 있다. Welch and Tulim(1993)은 자유롭게 매달린 케이블에 대한 예인 실험을 통하여 와류유기진동에 관한 연구를 수행하였다. Hover et al.(1997)은 기울어진 케이블에서 발생하는 록-인 상태

교신저자 정동호: 강원도 고성군 죽왕면 오호리 245-7, 033-630-5010, dhjung@moeri.re.kr

본 논문은 2007년 대구에서 개최된 대한토목학회 정기학술대회에 발표된 논문의 주된 내용을 발췌하였음을 밝힙니다.

에 대해서 해석하였으며, Hong et al.(2002)은 예인되는 파이프의 와류유기진동에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 이 외에도 와류유기진동에 관한 다양한 연구가 이루어지고 있다(Sarpkaya, 1979). Triantafyllou and Grinfogel(1986)와 Triantafyllou(1984)은 기울어진 케이블에 대한 고유치 해석을 위하여 이론적인 방법을 제시하였으나, 이것은 육상에서 고정된 케이블에 한정되었다.

본 연구에서는 끝단이 자유 경계조건인 예인되는 케이블의 고유치 특성 해석을 위하여 수치해석적 연구를 수행한다. 유한요소법을 이용하여 수치해석 코드를 개발하며, 예인속도에 따른 케이블의 정적 및 고유치 해석을 수행한다. 정적해석에서는 예인속도에 따른 케이블의 기울어진 각도 및 장력을 추정하며, 이를 바탕으로 고유치 해석을 수행한다. 개발된 프로그램의 타당성을 보이기 위하여 참고문헌에서 제시하는 이론 해석식에 대하여 수정된 이론식을 제안하며 그 결과를 수치해석 결과와 검증한다.

2. 지배방정식

본 장에서는 케이블이 지배방정식에 관하여 다룬다. 일반적으로 케이블 요소는 전단력과 굽힘모멘트 성분이 장력 성분에 비하여 미비하기 때문에 해석에서 무시된다. 그러나, 본 연구에서 다루고자 하는 케이블의 끝단이 자유 조건인 경우에는 전단력과 굽힘모멘트의 성분도 중요하기 때문에 해석에서 고려된다. 케이블 부재는 외력과 모멘트를 받는 빔 부재로 표현될 수 있으며, 지배방정식에 대해서는 참고문헌을 참조하며 본 연구에서는 간단하게 언급하기로 한다(Frampion, 1982). Fig. 1에서는 굽힘을 받는 빔 요소에 대한 자유물체도를 보여주고 있다. 외력을 고려하여 수평, 수직, 그리고 모멘트 평형 방정식을 유도하면 각각 다음과 같다.

· 연직 방향 평형방정식

$$A_1 \cos \theta - B_1 \sin \theta - F_w + F_{ys} = 0 \quad (1)$$

· 수평 방향 평형방정식

$$A_1 \sin \theta + B_1 \cos \theta + F_{xs} - m \ddot{x} = 0 \quad (2)$$

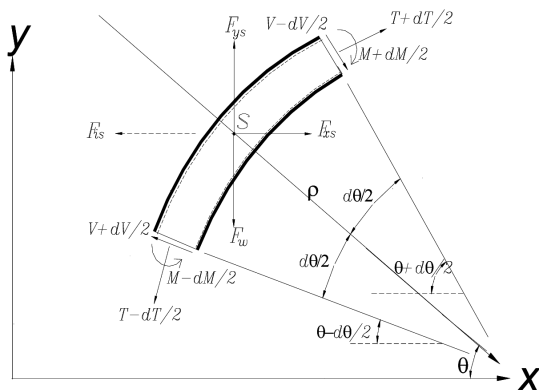


Fig. 1 Free body diagram in a curved beam

· 모멘트 평형방정식

$$\frac{\partial M}{\partial s} + V = 0 \quad (3)$$

$$\text{여기서, } A_1 = \frac{\partial T}{\partial s} - V \frac{\partial \theta}{\partial s} \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{\partial V}{\partial s} + T \frac{\partial \theta}{\partial s} \quad (5)$$

F_w : 단위 길이 당 자중

F_{xs}, F_{ys} : x, y 방향의 단위 길이 당 표면에 작용하는 힘

F_{is} : 관성력, V : 전단력, M : 굽힘모멘트 (2)식에서 A_1 에 대해서 정리한 후 (1)식에 대입하면, B_1 에 대하여 다음과 같이 정리된다.

$$B_1 \sec \theta + (F_w - F_{ys}) \tan \theta + F_{xs} - m \ddot{x} = 0 \quad (6)$$

(3) 식에서 전단력 성분을 (5) 식에 대입한 후 B_1 을 (6) 식에 대입하여 미소변위와 미소각 가정을 도입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} (EI \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}) - (T + A_o \bar{P}_o - A_i \bar{P}_i) \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} - \\ & [\gamma_s (A_o - A_i) - F_{ys} - A_o \gamma_o + A_i \gamma_i] \frac{\partial x}{\partial y} + \\ & m_x \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = F_{xs} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, EI : 굽힘강성,

A_o, A_i : 외부 및 내부 단면적

$\gamma_s, \gamma_o, \gamma_i$: 요소의 중량, 외부유체 중량, 내부유체 중량

F_{xs}, F_{ys} : x, y 방향으로 작용하는 유체력

T : 장력, \bar{P}_o, \bar{P}_i : 부재의 내, 외부 압력

m : 부재 길이당 질량

3. 수치해석

본 절에서는 케이블 요소에 대하여 구조해석을 수행하기 위하여 유한요소법을 적용한 수치해석에 대해서 다룬다. 케이블에 작용하는 하중으로는 크게 해양환경하중과 기능하중으로 나누어진다. 해양환경하중은 조류 및 파랑 등의 해양환경에서 발생하는 하중을 의미하며, 기능하중은 케이블의 예인 혹은 예인 장비 등 기능 수행으로 인해 발생하는 하중을 의미한다. 본 해석에서는 해양환경하중 및 기능하중을 고려한 정적 결과 및 고유치 값들을 다루게 된다. 유체 비선형 및 구조강성에 기인하는 비선형 요소를 고려한다. 개발된 수치해석 코드는 정적, 모드, 그리고 동적 해석을 수행할 수 있지만, 본 연구에서는 정적 및 모드 해석으로 국한한다.

3.1 정적해석

정적해석에서는 2차원 실린더 요소에 대한 해석을 위하여 요소 당 6자유도가 사용된다. 축방향으로 작용하는 장력의 크기는

부재 자중의 효과로 상부 끝점부터 점차적으로 감소하게 되며, 정적 변형 및 수평 하중 등은 예인 속도에 직접적으로 관계한다. 유체 속도 및 예인속도에 의해서 발생하는 항력은 다음 식으로 표현된다.

$$f_d = \frac{1}{2} \rho_w C_D d_o |U_c - v| (U_c - v) \tag{8}$$

여기서, U_c : 유체 속도, v : 예인속도

요소의 전체 강성행렬 S_m 은 기본적인 탄성강성행렬 S_E 와 형상 및 장력의 함수로 표현되는 기하학적 강성행렬 S_G 의 합으로 구성된다.

따라서,

$$S_m = S_E + S_G \tag{9}$$

$S_E =$

$\frac{EA}{L}$			$\frac{-EA}{L}$		
	$\frac{12EI}{L^3}$	$\frac{6EI}{L^2}$		$\frac{-12EI}{L^3}$	$\frac{6EI}{L^2}$
	$\frac{6EI}{L^2}$	$\frac{4EI}{L}$		$\frac{-6EI}{L^2}$	$\frac{2EI}{L}$
$\frac{-EA}{L}$			$\frac{EA}{L}$		
	$\frac{-12EI}{L^3}$	$\frac{-6EI}{L^2}$		$\frac{12EI}{L^3}$	$\frac{-6EI}{L^2}$
	$\frac{6EI}{L^2}$	$\frac{2EI}{L}$		$\frac{-6EI}{L^2}$	$\frac{4EI}{L}$

$S_G =$

	$\frac{6T}{5L}$	$\frac{T}{10}$		$\frac{-6T}{5L}$	$\frac{T}{10}$
	$\frac{T}{10}$	$\frac{2TL}{15}$		$\frac{-T}{10}$	$\frac{-TL}{30}$
	$\frac{-6T}{5L}$	$\frac{-T}{10}$		$\frac{6T}{5L}$	$\frac{-T}{10}$
	$\frac{T}{10}$	$\frac{-TL}{30}$		$\frac{-T}{10}$	$\frac{2TL}{15}$

부재의 자중과 부재에 작용하는 유체력에 의해서 발생하는 전체 외력 $w(y)$ 은 가정된 형상함수 $N(y)$ 에 의해서 부재의 끝단에 다음과 같이 적용된다.

$$A_{mL} = - \int_0^l w(y)N(y)dy \tag{10}$$

최종 부재 끝단에 작용하는 힘 A_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$A_m = A_{mL} + S_m D_m \tag{11}$$

여기서, D_m : 변위행렬

3.2 모드해석 및 경계조건

질량 행렬 M 을 가지는 다자유도 시스템의 고유치 방정식은

다음과 같다.

$$M\ddot{D} + SD = 0 \tag{12}$$

케이블 요소를 구성하는 행렬에 있어서 질량 행렬은 집중질량법(Lumped mass)과 정합질량법(Consistent mass)이 있는데, 본 연구에서는 회전 자유도에 대한 생략을 위하여 집중질량법을 사용한다. 고유치 해석 알고리즘은 자코비안법(Jacobian method)에 기초한다.

본 연구에서는 예인되는 케이블의 정적 및 고유치 해석을 수행하게 된다. 따라서 케이블의 상단부는 힌지 조건으로 하며, 하단부는 자유단으로 처리된다.

3.3 수치해석 코드

본 연구에서는 유한요소 해석이론을 바탕으로 전산 프로그램을 개발하여 예인되는 케이블의 고유치 해석을 수행하였다. 사용된 언어는 FORTRAN 90이며, 정적해석과 고유치 해석 두 부분으로 이루어져 있다. Fig 2에서는 수치해석 코드의 플로우차트를 보여주고 있다. 해석 자료가 입력되면 예인속도에 따라서 자중과 항력이 평형을 이루는 조건을 간단한 식을 통해서 구하며, 이를 통하여 기하학적 값들을 얻게 된다. 서브루틴 STATF에서는 자중에 의해 형성되는 등가의 절점하중을 구한 후 전체 좌표계로 변환하여 전체 하중 벡터를 형성하게 된다. 그 후에 서브루틴 ELEMENT에서는 각 부재에 대해서 강성행렬을 형성하고 변환 행렬식을 이용하여 국부 좌표계 값을 전체 좌표계 값으로 변환한 후, 각 요소의 강성행렬을 전체 강성행렬식으로 조합한다. 전체 좌표계에 대한 하중벡터와 강성행렬을 정의하고 나면 서브루틴 GAUSS를 이용하여 기본 강성행렬식을 풀이하는데 여기서는 가우스(Gauss) 소거법을 사용하여 행렬식의 해를 구하게 된다. 각 절점의 변위를 구하고 나면 전체 좌표계의 값을 다시 변환 행렬식을 이용하여 국부 좌표계로 변환하여

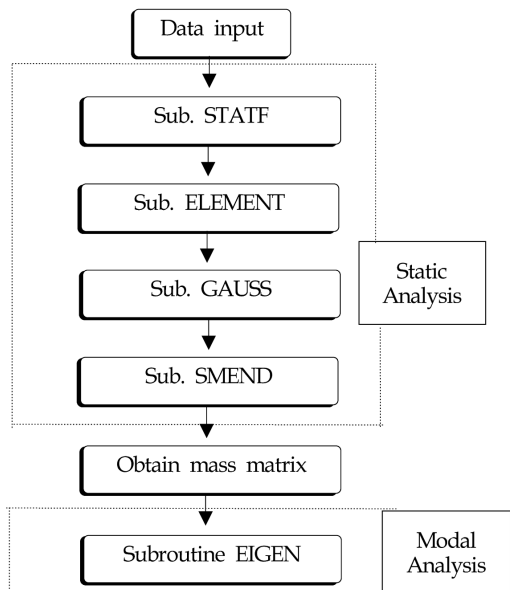


Fig. 2 Flow chart in numerical analysis code

각 요소에 대한 응력을 산출하게 되는데, 이때는 서브루틴 SMEND가 사용되어진다. 정적 해석이 끝난 후에는 전체 질량 행렬식을 형성한다. 질량행렬식을 구하고 나면 Jacobi법에 기초하여 모드 해석을 하는데, 서브루틴 EIGEN에서 고유치와 고유 벡터를 구하고 구조물의 고유 진동 주기와 고유 모드형상을 구한다.

4. 수치해석 결과

본 절에서는 개발된 수치해석 코드에 대한 예제해석을 수행하며 그 결과에 대해서 토의한다. 예제해석에서 사용되는 케이블은 길이 6m, 직경 0.02m의 고무케이블로 구성된다(Table 1). 케이블은 상부 끝단에서 일정 속도로 예인된다고 가정했으며, 이로 인하여 케이블은 각도를 가지고 늪는 형상을 가지게 된다(Fig. 3). 예제해석에서 유한요소 모델은 20개의 균일하게 나누어져서 수행되어지며, 케이블 길이는 하나의 조건으로 한정되어졌다.

4.1 정적해석 결과

케이블이 자유롭게 매달린 상태에서부터 예인되면, 케이블은 법

Table 1 Model properties

Material	Rubber
Length	6 m
Thickness	2 cm
Weight in air	0.485 kgf/m
Weight in water	0.163 kgf/m
Elastic modulus	2.33 MPa

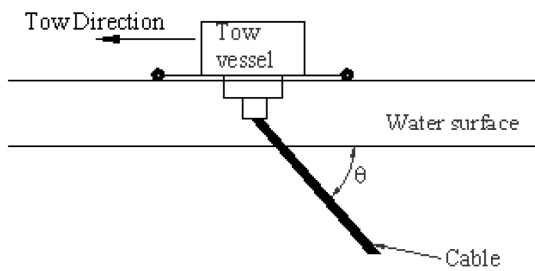


Fig. 3 General configuration of a towed cable

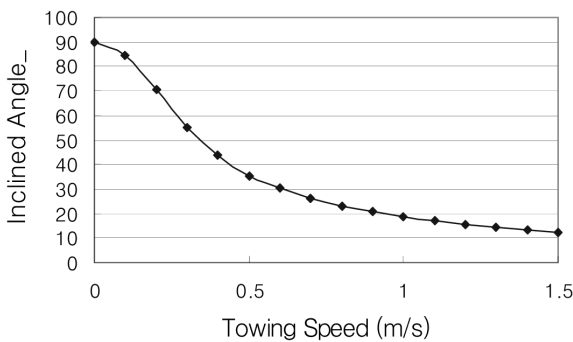


Fig. 4 Inclined angles with towing speeds

선항력 효과에 의해서 일정한 각도를 가지고 기울어지게 된다. 케이블이 예인될 때 그 형상은 거의 직선에 가깝게 된다.

Fig. 4에서는 예인속도에 따른 기울어진 각도값을 보여주고 있다. 예인속도가 증가함에 따른 각도는 비선형적으로 감소하고 있으며, 이것은 장력의 감소로 이어진다(정지상태: 90°). 예인속도가 점점 증가하는 경우 케이블에 작용하는 항력 성분이 바뀌게 되는데, 즉 일정 속도까지는 법선항력이 지배적이다가 일정 순간을 넘어서면 접선항력 성분이 지배적이게 된다. Fig. 5에서는 예인속도에 따른 장력의 변동을 보여주고 있다. 결과를 살펴보면, 예인속도가 0.9m/s 보다 작은 경우에는 예인속도가 증가할수록 장력이 감소하다가 0.9m/s 를 넘으면서 다시 장력이 증가하고 있다. 이것은 0.9m/s 의 예인속도를 기점으로 해서 속도가 작을 경우에는 법선항력이 지배적으로 작용하고, 클 경우에는 접선항력이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 예인속도가 증가함에 따라 임계속도까지 장력이 감소하는 현상을 설명하자면, 예인속도에 의해서 케이블에는 항력이 발생하게 되고 법선항력 성분 중 일부는 자중을 감소시키는 효과를 나타내기 때문에 장력의 감소로 이어지는 것이다.

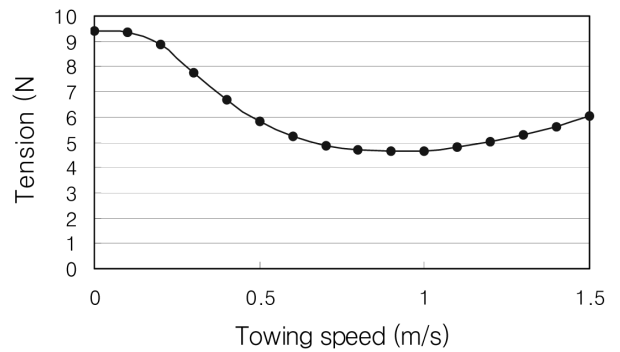


Fig. 5 Top tensions with towing speeds

Table 2 Natural frequencies in hanging cable

Mode No.	Natural periods (s)
1	9.0558
2	3.8781
3	2.3182
4	1.564
5	1.1399
6	0.8751
7	0.6965
8	0.569
9	0.4744
10	0.4021
11	0.3455
12	0.3006
13	0.2646
14	0.2356
15	0.2123

정량적인 장력 값을 비교해보면, 0.9m/s의 예인속도에서 장력값은 자유롭게 매달려 있는 장력값의 약 50%에 불과하다는 것을 알 수 있다. 정적해석 결과를 통하여 예인속도에 따라서 장력값이 현저하게 변화한다는 사실을 알 수 있었으며, 이 값은 고유치 해석에서도 크게 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

4.2 모드해석 결과

다음은 고유치 해석 결과에 대해서 토의한다. Table 2에서는 자유롭게 매달린 케이블에 관하여 해석된 고유치 결과값을 보여주고 있다. 약 6차 이상의 모드에서는 주기가 1초 미만으로, 비록 그 영향은 작을지라도 대부분의 단주기와류유기진동이 발생하면 시스템의 고유주기와 일치할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 6에서는 1차부터 4차까지 고유주기 모드형상을 보여주고

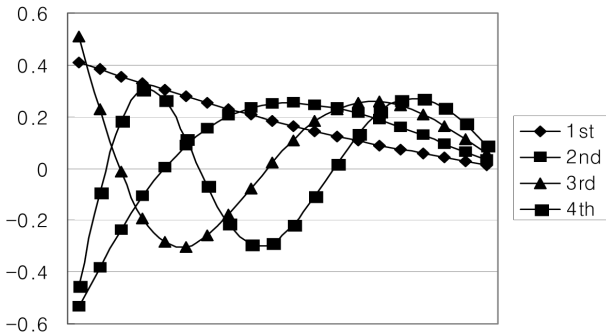


Fig. 6 Mode shapes in free hanging cable

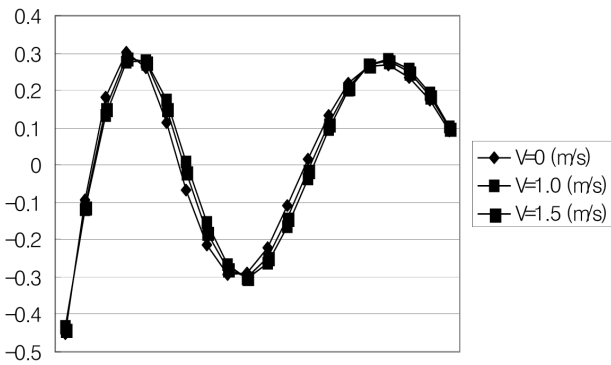


Fig. 7 Comparison of 4th mode with towing speeds

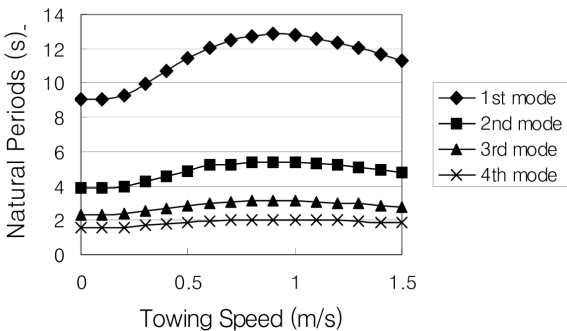


Fig. 8 Natural periods with towing speeds

있으며, Fig. 7에서는 4차 모드에 대한 모드 형상을 비교하고 있다. 예인속도에 따른 장력값의 차이 때문에 모드 형상이 약간씩 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에서는 예인속도에 따른 고유 주기값을 1차부터 4차까지 나타내고 있다. 질량과 강성과 고유진동수의 관계식인 $\omega = \sqrt{k/m}$ 에 의해서 예인속도가 증가하여 장력이 작아지면 강성이 감소되어 고유주기값은 일정 범위까지 커지고 있다. 예인속도에 따라서 고유주기가 변하는 패턴은 장력이 변하는 패턴과 부호만 반대일 뿐 유사하게 나타나고 있다. 자유롭게 매달려 있는 케이블에 대한 고유주기와 비교해 볼 때, 0.9m/s로 예인되는 경우의 고유주기는 약 1.4배가 됨을 알 수 있다. 이 결과는 예인되는 시스템 혹은 가진과 동시에 예인되는 시스템의 장력과 록-인 추정에 매우 중요한 자료가 된다.

고차모드에서는 예인속도에 의해서 고유주기 값의 변화 패턴은 유사할 지라도, 고유주기 값의 크기에는 많은 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 임계속도까지는, 예인속도가 증가할수록 1차 및 2차 주기 사이의 크기 차이가 더 크게 나타나는 것도 알 수 있다. 이것은 예인되는 케이블에 있어서의 하나의 특징이 될 수 있다.

5. 개발된 알고리즘의 검증

본 절에서는 개발된 알고리즘을 검증하기 위하여 이론적 방법을 통하여 얻은 예인되는 케이블의 고유값을 수치해석 결과와 비교한다. 자유롭게 매달려 있는 케이블에 대한 고유주기와 진동수는 변수분리법에 의해서 얻어질 수 있으며, 그 표현식은 다음과 같다(McLachlan, 1995).

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = \frac{1}{2\sqrt{L}} j_{0,n} \sqrt{\frac{gw_0}{w_1 + w_2}} \tag{13}$$

Table 3 Comparison of 1st natural periods with towing speeds (numerical and analytic)

Towing speed (m/s)	$\rho = 1,511 \text{ (kg/m}^3\text{)}$			$\rho = 2,267 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	
	Analytic solutions (s)	Numerical solutions (s)	Errors (%)	Analytic solutions (s)	Numerical solutions (s)
0	8.848	9.0558	2.3	6.565	6.563
0.1	8.866	9.0752	2.3	6.5675	6.565
0.3	9.725	9.9453	2.2	6.7274	6.725
0.5	11.361	11.4704	0.1	7.3106	7.306
0.7	12.303	12.502	1.6	8.0363	8.019
0.9	12.700	12.8469	1.1	8.6547	8.682
1.1	12.524	12.6141	0.7	9.0813	9.015
1.3	11.979	12.023	0.4	9.2995	9.318
1.5	11.250	11.2676	0.2	9.3264	9.343
1.7				9.1987	9.206

여기서, w_0 : 물속에서 케이블의 단위중량

w_1 : 공기중 단위중량

w_2 : 부가질량에 의해 추가적으로 발생하는 중량

L : 케이블 길이

j_0, n : 베셀함수 $J_n(z)$ 을 만족하는 n 번째 해

Park et al.(2003) 등은 케이블이 일정 속도로 예인되는 경우 케이블의 고유주기 산정에 있어서 수정된 이론적인 공식을 이용하였다. Park et al.(2003) 등에 의해서 제안된 이 공식에서는 항력에 의한 케이블 중량의 감소를 고려하였지만 물속에서 케이블의 단위중량 w_0 를 다음과 같이 재정의 하였다.

$$w_0' = w_0 - F_{DN}\cos(\theta) + F_{DT}\sin(\theta) \quad (14)$$

여기서, F_{DN} : 단위길이 당 법선방향 항력 성분, F_{DT} : 단위길이 당 접선방향 항력 성분이다.

그러나, 항력의 의한 수중 중량의 변화된 효과를 (14) 식과 같이 나타내는 것은 수중 중량의 감소만을 나타내는 것이며, w_0 는 자중에 의하여 장력에 미치는 영향으로 표시되어야 한다. 따라서 예인되는 케이블에 대한 수중 중량 효과 및 고유값은 다음 식이 보다 합리적이다.

$$w_0' = w_0\sin(\theta) + F_{DT} \quad (15)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = \frac{1}{2\sqrt{L}} j_{0,n} \sqrt{\frac{g(w_0\sin(\theta) + F_{DT})}{w_1 + w_2}} \quad (16)$$

(16) 식은 항력 및 케이블의 수중 중량에 의해서 장력에 미치는 영향을 나타내게 된다. Table 3에서는 (16)식을 이용하여 예인속도에 따른 1차 고유주기 값을 수치해석 결과와 서로 비교하고 있다. 케이블이 정지해 있을 경우에는 두 해석 방법에 따른 결과가 2.3% 오차가 발생하지만 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 케이블 밀도를 달리할지라도 두 해석결과는 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. (16)식을 이용하여 얻은 예인속도에 따른 1차~4차 고유주기 값을 Fig. 9에 나타내었다. 속도에 따른 고유주기 값의 변동 패턴은 수치해석 결과와 유사하게 나타나고 있다. 예인속도가 증가함에 따라서 중량 w_0 의 감소 때문에 고유주기가 증가하다가, 접선항력 성분의 증가로 다시 감소하고 있음을 볼 수 있다.

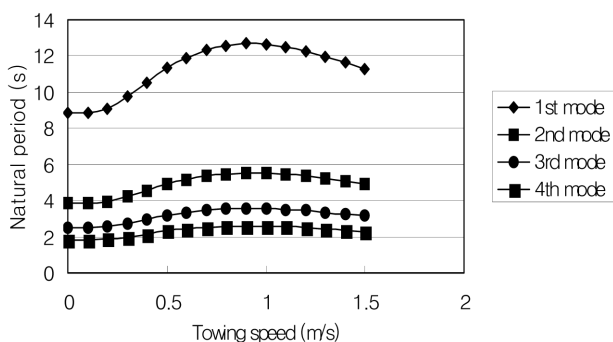


Fig. 9 Natural periods with towing speeds (corrected analytic solution)

6. 결 론

본 연구에서는 끝단이 자유 경계조건인 예인되는 케이블에 대한 고유치 특성을 파악하기 위해서 수치해석적 방법을 통하여 정적 및 고유치 해석을 수행하였다. 유한요소법을 이용하여 개발된 수치해석 코드는 예인되는 시스템에 적용하여 예인속도에 따른 예제해석을 수행하였다. 예인속도에 따라서 정적해석을 수행한 후에 이 값을 바탕으로 모드해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 임계속도보다 낮은 예인속도에서는 법선항력이 지배적이며, 높은 예인속도에서는 접선항력이 지배적으로 나타났다.

(2) 임계속도에서의 케이블 상부단에서의 장력값은 자유롭게 매달려 있는 장력값의 약 50%에 불과했으며, 예인속도가 증가할수록 1차와 2차 고유주기 값의 차이는 크게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

(3) 자유롭게 매달려 있는 케이블의 고유주기와 비교해볼 때, 임계속도에서 예인되는 케이블의 고유주기는 약 1.4배로 크게 나타났다. 이것은 예인속도의 증가에 의한 강성 감소에 기인한다.

(4) 예인되는 케이블의 고유치를 추정하는 이론식에 대하여 수정된 이론식을 제안하였으며, 제안된 이론식을 이용하여 예인속도에 따른 고유치 해석을 수행하였다. 계산 결과는 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하여 두 해석 결과의 타당성을 검증할 수 있었다.

본 연구 결과는 예인되는 케이블에서 발생하는 와류유기 진동 현상의 특인 영역을 추정하거나 예인되면서 가진되는 시스템의 장력 추정 등에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 ‘해양심층수의 다목적 이용 개발’, ‘해양구조물의 극한응답 해석기술 개발’ 및 ‘해양 기초생산력 증대를 위한 부유식 인공용승 시스템 핵심기술 연구’의 결과임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

Frampton, S.K. (1982). "Review of Riser Analysis", Applied Ocean Research, Vol 4, No 2.

Hong, S., Choi, Y.R., Park, J.B., Park, Y.K. and Kim, Y.H. (2002). "Experimental Study on the Vortex-induced Vibration of Towed Pipes, Journal of Sound and Vibration", Vol 249, No 4, pp 649-661.

Hover, F.S., Miller, S.N. and Triantafyllou, M.S. (1997). "Vortex-induced Oscillations in Inclined Cables", Journal of Wind Engineering, Vol 69, pp 203-211.

McLachlan, N.W. (1955). Bessel Functions for Engineers, Oxford: Clarendon Press.

Park, H.I., Jung, D.H. and Koterayama, W. (2003). "A Numerical and Experimental Study on the Dynamics of a

- Towed Low-tension Cable", Applied Ocean Research, Vol 25, pp 289-299.
- Sarpkaya, T. (1979). "Vortex-Induced Oscillations", Journal of Applied Mechanics, Vol 46, pp 241-257.
- Triantafyllou, M.S. and Grinfogel, L. (1986). "Natural Frequencies and Modes of Inclined Cables", Journal of structure Eng., Vol 112, pp 139-148.
- Triantafyllou, M.S. (1984). "The Dynamics of Taut Inclined Cable", Quart. Journal of Mechanics Applied Mathematics, Vol 37, pp 421-440.
- Welch, S.M. and Tulim, M.P. (1993). "An Experimental Investigation of the Mean and Dynamic Tensions in Towed Strumming Cables", Journal of Offshore and Polar Eng. Vol 3, No 3, pp 205-212.

2008년 8월 6일 원고 접수

2008년 11월 17일 최종 수정본 채택