

# 불균일 단면을 갖는 저장력 예인케이블의 동적해석을 위한 수치해석적 연구

## A Study on Numerical Simulation for Dynamic Analysis of Towed Low-Tension Cable with Nonuniform Characteristics

정 동 호†

Jung, Dong-ho

(논문접수일 : 2002년 7월 26일 : 심사종료일 : 2002년 2월 24일)

### 요 지

최근 들어 심해역에 대한 개발과 합성섬유 재질 케이블의 발달로 인하여 저장력 케이블의 사용이 증가되었다. 저장력 케이블은 장력에 의한 복원력이 작기 때문에 대변위가 발생하게 되며, 따라서 기하학적 비선형이 강하게 나타나게 된다. 또한 해양환경에서는 유체 비선형도 작용하게 된다. 본 연구에서는 수치해석적 방법을 통하여 불균일하게 구성된 예인되는 저장력 케이블의 3차원 동적거동 해석을 수행한다. 수치해석에서는 유체 및 기하학적 비선형과 굽힘강성이 고려되며, 유한차분법(음해법)을 적용하여 풀이된다. 비선형 해를 구하기 위해서 뉴턴 랩슨 방법을 사용한다. 대형 행렬을 풀이하기 위하여 블록삼중대각행렬 풀이법이 적용되는데, 이 방법은 일반적인 행렬 풀이법인 가우스 조르단 방법에 비하여 계산시간을 상당히 줄일 수 있었다. 선배열 음탐 케이블에 대한 다양한 예제해석을 수행하였으며, 해석결과를 미국 우즈홀 해양연구소에서 개발된 프로그램 결과와 잘 일치하였다.

**핵심용어** : 저장력 케이블, 유한차분법, 케이블 동적해석, 예인형 선배열 소나, 뉴턴 랩슨법

### Abstract

Low-tension cables have been increasingly used in recent years due to deep sea developments and the advent of synthetic cables. In the case of low tension cables, large displacements may happen due to relatively small restoring forces of tension and thus the effects of fluid and geometric non linearities become predominant. In this study, three dimensional (3-D) dynamic behavior of a towed low-tension cable with non-uniform characteristics is numerically analyzed by considering fluid and geometric non-linearities and bending stiffness. A Fortran program is developed by employing a finite difference method. In the algorithm, an implicit time integration and Newton Raphson iteration are adopted. For the calculation of huge size of matrices, block tri diagonal matrix method is applied, which is much faster than the well known Gauss Jordan method in two point boundary value problems. Some case studies are carried out and the results of numerical simulations are compared with a in-house program of WHOI Cable with good agreements.

**Keywords** : low tension cable, finite difference method, dynamic behaviour analysis, towed array sonar system, newton raphson method

### 1. 서 론

해양케이블은 해양산업의 다양한 분야에서 중요한 구조요소로서 적용되고 있다. 해양케이블의 구체적인 적용 사례를 살펴보면, 국제간의 정보통신 전송수단인 해저케이블

을 비롯하여 해양구조물이나 해양관측시스템의 계류삭, ROV의 전원 및 제어신호 공급선, 해저탐사장비 예인선, 그리고 군사용 예인음탐케이블(TASS, Towed Array Sonar System) 등과 같이 그 적용 예가 넓고 다양하다.

해양케이블은 흔히 장력의 크기에 따라 고장력 케이블과

† 책임저자, 학생회원 · 한국해양대학교 해양과학기술연구소  
전화: 051-410-4937; Fax: 051-404-3538  
E-mail: nocturn3@hanmail.net

• 이 논문에 대한 토론회를 2003년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 2003년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

저장력 케이블로 나눌 수 있는데, 고장력 케이블에 관한 연구는 거의 완성된 단계이다.<sup>1)~5)</sup>

저장력 해양케이블에 대해서는 상대적으로 근래에 연구되기 시작하였는데 심해자원 개발 및 합성섬유 재질로 된 가벼운 케이블의 등장으로 인해 그 연구가 더욱 활발해졌다. 저장력 문제는 동적 장력이 정적 장력보다 큰 경우 또는 분포하중과 끝단장력의 크기와 유사한 경우에 발생하게 된다. 저장력 해양케이블이 발생하는 경우로서는 부설중인 해저케이블의 해저면 인접 부분, 한쪽 끝단이 자유롭게 매달린 케이블의 하단 부분, TASS의 중성부력부분 등으로 그 예가 많다. 특히 예인중인 해양케이블의 경우에는 운용 중인 예인선박이 일시적으로 정지하거나, 추진방향을 바꿀 때에는 전 부분에서 저장력 현상이 발생한다.

저장력 케이블의 가장 큰 특징은 비선형성이다. 케이블의 주된 복원력 성분은 장력인데, 저장력 케이블에서는 복원력이 작아서 대변형이 발생할 수 있으며 이 대변형은 기하학적 비선형을 유발한다. 또한, 유체점성에 의한 비선형 성분도 뚜렷하게 나타나므로 저장력 케이블의 해석에서는 비선형 성분을 반드시 고려해야 한다. 저장력 케이블의 또 다른 특징은 저장력 구간에서 에너지 전달속도가 느리다는 것이다. 케이블에서 횡방향 에너지 전달속도는  $\sqrt{T}$ 에 비례하는데 장력이 거의 영(zero)인 부근에서는 장력에 의한 에너지 전달이 불가능하며, 이것은 수치 해석적으로 특이점(singularity) 문제를 발생시킨다. 따라서 저장력 케이블에서 특이점 문제를 해결하기 위해서는 굽힘강성(bending stiffness) 성분을 고려하여 해석해야 한다. 일반적으로 고장력 케이블 해석에서는 굽힘강성을 무시하지만, 저장력 케이블에서는 굽힘강성 성분이 수치적 안정성의 중요한 성분이 되므로 이 성분을 고려하게 된다.

저장력 케이블에 대한 연구는 고장력 케이블에 비해 상대적으로 소수이다. Leonard<sup>6)</sup>는 슬랙 케이블에 대한 문제를 해결하면서 처음으로 저장력 케이블의 동역학적인 문제를 고려했다. 그 후에 Ablow and Schechter,<sup>7)</sup> Sanders,<sup>8)</sup> Dowing,<sup>9)</sup> Triantafyllou and Howell<sup>10)</sup> 등이 저장력 케이블의 문제를 보다 본격적으로 취급하기 시작했다.

박한일과 정동호<sup>11)</sup>는 자유롭게 매달린 중량케이블의 3차원 동적해석을 수행하였으며, 또한 Jung et al.<sup>12)</sup>는 중량케이블에 대한 예인수조 실험을 통하여 저장력 예인케이블에 관한 수치해석 알고리즘을 검증하였다. 본 연구는 개발된 알고리즘에 더하여 중량케이블 끝단에 중성부력케이블이 연결되어 있는 시스템에 대한 거동해석을 다룬다. 본 연구의 연구대상인 예인케이블은 해저탐사용으로 많이 적용되는데, 탐사장비를 예인하는 경우에는 케이블이 고장력 상태가 되나 음향모듈을 탑재한 대 잠수함용인 경우에는

저장력 상태가 되어 복잡한 동적거동을 보이게 된다.

본 연구에서는 저장력 예인케이블의 비정상 거동해석을 통하여 운용중인 예인 케이블의 정확한 형상과 케이블에 작용하는 장력을 추정하고자 한다. 거동해석에서는 먼저 지배방정식을 소개한 후에 수치해석 방법을 사용하여 지배방정식의 해를 구한다. 일반적으로 구조해석 방법에는 유한요소법과 유한차분법이 있는데, 유한요소법은 저장력 해양케이블의 강한 비선형을 해석하기에 부적합하다.<sup>13)</sup> 따라서 본 연구에서는 저장력 해양케이블에 가장 적합한 유한차분법을 적용한다. 유한차분법에서 시간 적분은 계산의 조건에 상관없이 안정한 음해법(implicit method)을 적용한다. 유한차분법에서 시간 적분은 계산의 조건에 상관없이 안정한 음해법(implicit method)을 적용한다. 비선형 방정식을 풀기 위해서 뉴턴-랩슨 방법을 적용하며, 행렬 계산을 위해서는 신속한 계산이 가능한 블록삼중대각 특수 풀이법을 사용하고자 한다.

예제해석에서는 특성치가 다른 케이블로 연결된 TASS에 대한 거동해석을 수행한다. 케이블 특성치가 변하는 절점에서 발생하는 수치적인 불안정을 제거하기 위하여, 두 케이블 특성치의 평균값을 사용한다. 개발된 프로그램은 미국 WHOI(Woods Hole Oceanography Institute) 연구소에서 자체 개발하여 실험결과에 의해 검증된 WHOI Cable 프로그램<sup>13)</sup>의 계산결과와 비교 및 검토한다.

## 2. 지배방정식

예인중인 케이블은 예인선박의 방향선회로 인해 3차원 공간상에서 동적 거동을 하므로 3차원 동적 지배방정식을 수립하는 것이 필요하다. 아래에서는 지배방정식을 수립하는데 필요한 좌표계 및 이를 바탕으로 한 케이블 요소에 대한 3차원 동적 지배방정식을 소개한다.

### 2.1 좌표계의 정의

케이블의 해석에서는 케이블 요소에 성립되는 국부좌표계와 공간상에 고정된 전체좌표계로 나누고 오일러 각(Eulerian angles)의 정의를 이용하여 두 좌표계의 상관 관계를 설정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 국부좌표계  $(t, n, b)$ 와 전체좌표계를  $(X, Y, Z)$ 를 Fig. 1과 같이 정의하였다. 두 좌표계 사이의 변환은 오일러 각을 이용하여 실행하였다. 케이블의 경우 접선방향( $t$  방향)의 비틀림 효과를 일반적으로 무시하므로  $t$ 축 중심으로의 회전은 고려하지 않았다. 따라서 두 개의 회전 각  $\phi$ 와  $\theta$ 를 사용하여 좌표계 변환을 하였다.

두 좌표계에 대한 변환식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

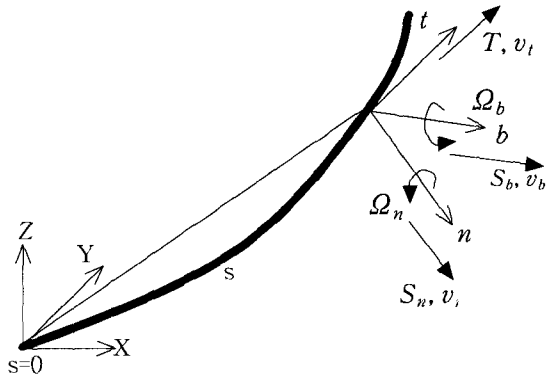


Fig. 1 Coordinate systems

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

### 2.2 지배방정식

케이블의 요소에 대해 지배방정식은 박한일과 정동호<sup>11)</sup>을 참고하는데, 뉴턴의 제2법칙, 모멘트 평행, 적합조건, 그리고 국부적 곡률관계를 이용한다. 아래의 식은 미소요소의 국부좌표계  $t, n, b$  상에서 결정되어진다.

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_t + v_b \dot{\theta} - v_n \dot{\phi} \cos \theta) &= T' + S_b \Omega_n - S_n \Omega_b - w_o \cos \phi \cos \theta + R_t \\ m(\dot{v}_n + \dot{\phi}(v_t \cos \theta + v_b \sin \theta)) + m_a \dot{v}_n &= S_n' + \Omega_b(T + S_b \tan \theta) + w_o \sin \phi \\ &+ 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_n + R_n \\ m(\dot{v}_b - v_n \dot{\phi} \sin \theta - v_t \dot{\theta}) + m_a \dot{v}_b &= S_b' - S_n \Omega_b \tan \theta - T \Omega_n - w_o \cos \phi \sin \theta \\ &+ 0.25\pi d^2 \rho_w C_M \dot{u}_b + R_b \\ EI \Omega_n' &= -EI \Omega_b^2 \tan \theta + S_b(1 + T/EA)^3 \\ EI \Omega_b' &= EI \Omega_n \Omega_b \tan \theta - S_n(1 + T/EA)^3 \\ v_t' + \Omega_n v_b - \Omega_b v_n &= \dot{T}/EA \\ v_n' + \Omega_b(v_t + v_b \tan \theta) &= (1 + T/EA) \dot{\phi} \cos \theta \\ v_b' - \Omega_b v_n \tan \theta - \Omega_n v_t &= -(1 + T/EA) \dot{\theta} \\ \Omega_n &= \theta' Z \\ \Omega_b &= \phi' \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 각 변수위의 점( $\dot{\phantom{x}}$ )은 시간  $t$ 의 미분  
 각 변수의 프라임( $\phantom{x}'$ )은 공간  $s$ 의 미분  
 $T$  : 케이블의 유효장력  
 $d$  : 케이블의 직경  
 $\rho_w$  : 물의 밀도

- $\theta, \phi$  : 회전각도
- $m$  : 케이블의 단위길이 당 질량
- $w_o$  : 케이블의 단위길이 당 수중 무게
- $m_a$  : 케이블의 단위 길이당 부가질량
- $C_M$  : 부가관성계수
- $E$  : 케이블의 탄성계수
- $A$  : 케이블의 단면적
- $S_n, S_b$  :  $n, b$  방향의 전단력
- $u_n, u_b$  :  $n, b$  방향의 유체속도 성분
- $\Omega_n, \Omega_b$  :  $n, b$  방향의 곡률
- $v_t, v_n, v_b$  : 각각  $t, n, b$  방향의 케이블 속도 성분
- $R_t, R_n, R_b$  : 각각 케이블에 가해지는  $t, n, b$  방향의 외부 유체항력

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

### 3. 수치해석

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

식(2)는 다음과 같이 하나의 행렬식으로 표현할 수 있다.<sup>15)</sup>

$$[J] \vec{H}' = [K] \vec{H} + \vec{L} \quad (3)$$

여기서

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

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

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

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

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

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

식(3)을  $\Delta s$  간격으로  $n$  개로 나눈 절점에 대해 이산화시키고, 그 후에  $\Delta t$ 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 중앙차분화시키면 지배방정식은 다음과 같이 정리된다.

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

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.

예인음탐케이블의 하부 끝단( $s=0$ )은 자유로운 상태이므로 장력과 모멘트, 그리고 전단력이 영이다. 따라서 다음의 5개 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T(t, 0) &= EI\Omega_n(t, 0) = EI\Omega_b(t, 0) \\ &= EI\Omega_n'(t, 0) = EI\Omega_b'(t, 0) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

반면에 상부끝단( $s=L$ )은 케이블과 예인선박이 연결되는 점이므로 케이블의 속도는 예인선박의 속도와 같다. 또한 모멘트가 영이다.

$$\begin{aligned} v_t(t, L) &= U(t), \quad v_n(t, L) = V(t), \quad v_b(t, L) = W(t), \\ EI\Omega_n(t, L) &= 0, \quad EI\Omega_b(t, L) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $v_t(t, L), v_n(t, L), v_b(t, L)$ 는 국부좌표계 상에서 케이블 끝단의 속도성분이며,  $U(t), V(t), W(t)$ 는 예인선의 속도성분을 나타낸다.

따라서, 지배방정식에 있는  $10(n-1)$ 개의 방정식과 10개의 경계조건을 이용해서 총  $10n$ 개의 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.<sup>16)</sup>

#### 4. 예제해석 및 검증

아래에서는 본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용하여 특정한 예인케이블의 거동특성을 살펴보고자 한다. Fig. 2에서는 예제해석 대상인 예인형 선배열 소나의 상태를 보여주고 있다. 예인형 선배열 소나는 총 4개의 특성치가 다른 케이블로 연결되는데, 예인선박과 연결된 부분은 중량케이블(heavy weight cable)로서 수중에서 일정한 무게를 가지게 된다. 중량케이블 끝단에는 경량케이블(light weight cable)이 연결되는데, 이것은 중성부력을 나타낸다. 경량케이블 끝단에는 음향센서가 탑재된 음향모듈(acoustic module)이 연결되며, 마지막 부분에는 꼬리(tail)이 연결된다.

예인음탐케이블은 총 4 종류의 단면으로 구성되어 단면 특성치가 변화함에 따라서 행렬계산에 큰 어려움이 발생하는 사실을 알 수 있었다. 그 이유는 단면이 급변하는 지점에서 행렬의 계수값이 큰 차이가 발생하게 된다. 이로 인하여 행렬식은 불안정해지고 따라서 수렴이 어려워지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서 단면이 급변하는 지점에서 단면 특성치가 완만하게 변화하도록 조정하였다. 두 다른 물성치가 만나는 절점을 기

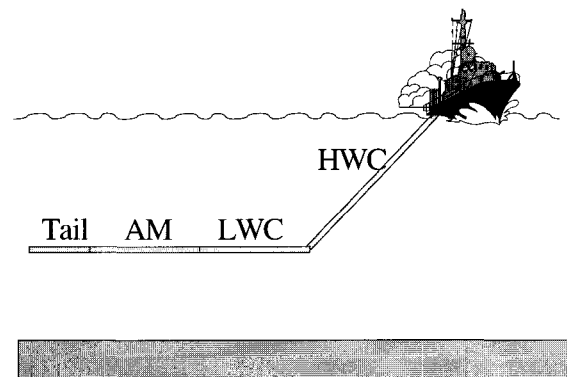


Fig. 2 General configuration of TASS

준으로 양쪽 2개의 절점씩 총 5개의 절점을 사용하여 물성치가 선형적으로 증가하도록 설정하였다. 선형적으로 변하는 물성치를 적용하여 수렴도를 증가시키고 계산시간은 감소시킬 수 있었다.

다음은 예제해석 결과를 살펴보겠는데, 먼저 중량케이블의 길이와 선박의 다양한 예인속도에 따른 예인단에서의 장력과 음향모듈의 심도를 조사하였다. 중량케이블의 길이는 각각 530m, 1050m, 1530m이고 특성치는 Table 1과 같으며, 예인선박은 일정한 속도로 정상적인 운행을 하고 있는 조건이다. 그리고 조류는 선박의 기동방향과 반대방향으로 1m/s로 흐르고 있다고 가정하였다. 법선항력계수는 1.5, 접선항력계수는 0.01을 사용하였다. 해석결과는 미국 WHOI 해양연구소에서 개발된 해저케이블 해석프로그램인 WHOI 결과와 서로 비교하였다.

선박의 예인속도는 각각 1m/s, 2m/s, 3m/s로 기동하

Table 1 Properties of TASS

	Length (m)	Diameter (m)	Net weight (N)	Elastic Modulus (N/m <sup>2</sup> )	strain	No. of node
Tail	70	0.012	0.0	6.6E8	0.01	5
Acoustic Module	340	0.086	0.0	1.3E8	0.01	15
Light weight cable	317	0.043	0.0	4.4E9	0.01	15
Heavy weight cable	530	0.028	14.1	4.4E9	0.01	70
	1050					
	1530					

였는데, 각 예인속도에 따른 예인단에서의 장력값과 음향모듈의 심도가 각각 Fig. 3~Fig. 5에 나타나 있다.

Fig. 3~Fig. 5에서는 본 연구의 해석결과를 WHOI

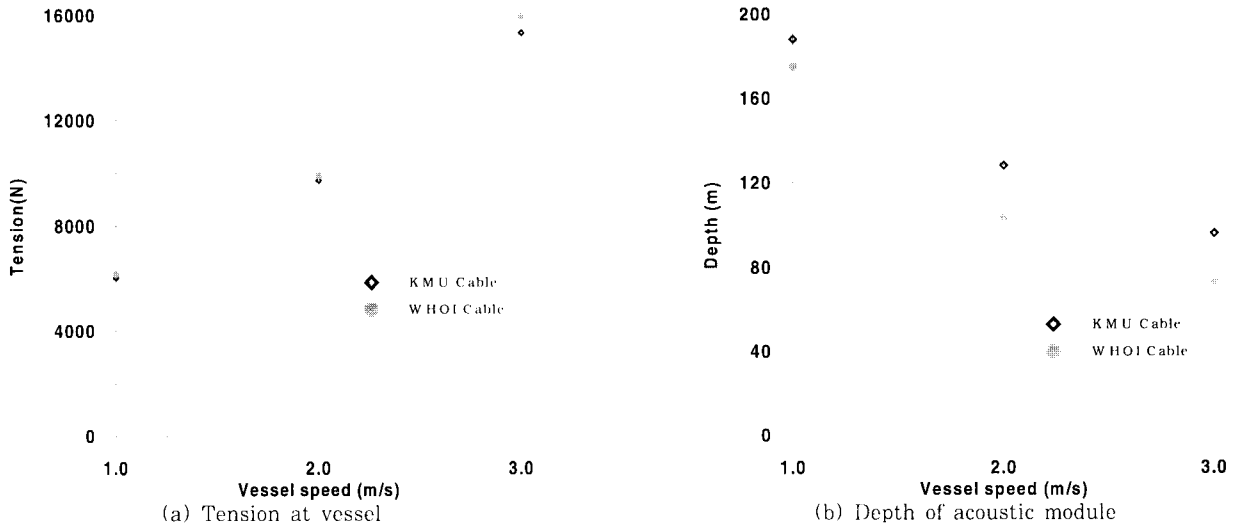


Fig. 3 Output comparison according to vessel speed for 530m of a heavy weight cable

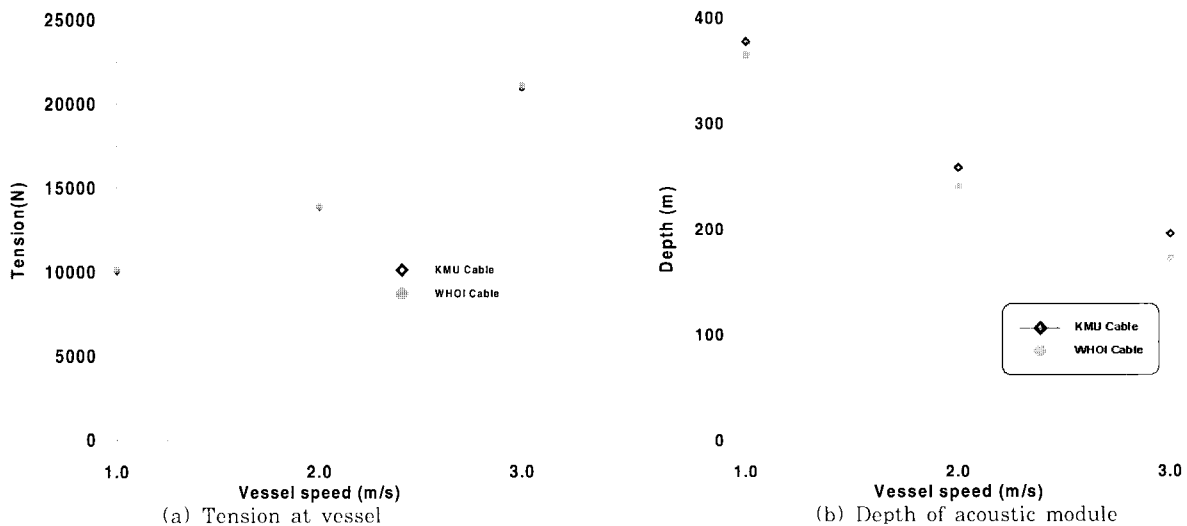
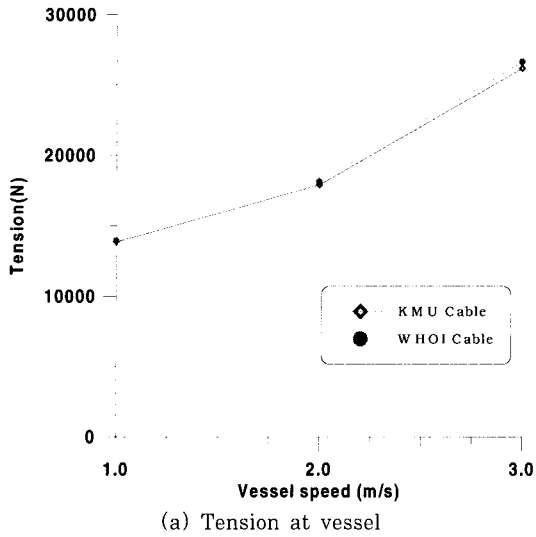
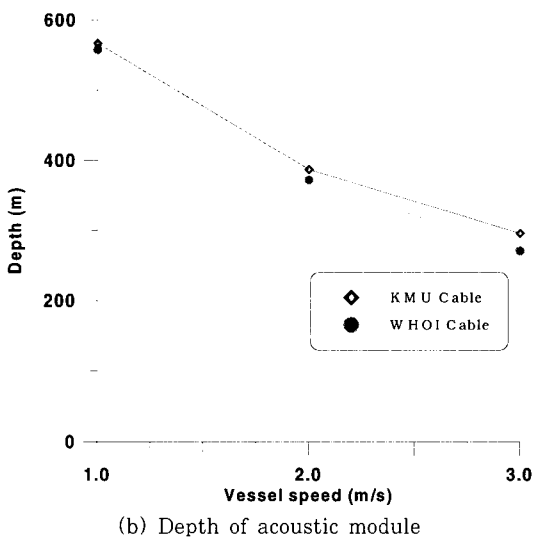


Fig. 4 Output comparison according to vessel speed for 1050m of a heavy weight cable



(a) Tension at vessel



(b) Depth of acoustic module

Fig. 5 Output comparison according to vessel speed for 1530m of a heavy weight cable

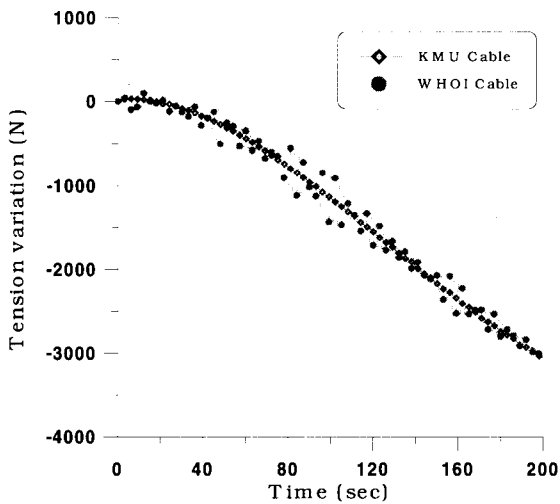


Fig. 6 Tension variation at vessel(time history)

Cable 해석결과와 서로 비교하고 있다. 중량케이블의 길이를 다르게 할지라도 해석결과는 모두 유사한 형태로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 즉, 장력은 두 해석결과가 잘 일치하지만, 심도는 두 해석결과가 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 기동선박이 1m/s로 직진할 경우 예인단에서 장력은 약 14kN의 장력이 발생하며, 이 때 음향모듈은 약 560m 수심에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이상과 같이 본 연구를 통하여 다양한 선박의 속도에 따른 예인단의 장력과 음향모듈을 심도를 파악할 수 있었다.

다음은 기동선박이 한 방향으로 직진하는 경우가 아니라 일정한 변침율을 가지고 변침하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 수행된 예인케이블의 특성치는 Table 1과 같으며, 기동선박의 속도는 1m/s이며, 변침율은 0.5°/sec이다. 조류는 역시 초기 선박이 직진하는 방향의 반대방향으로 1m/s로 흐르고 있다. 이 결과 역시 WHOI 결과와 서로 비교한다.

Fig. 6에서는 변침을 시작한 후 시간에 따른 예인단에서의 장력값 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 선박이 변침함에 따라서 케이블의 상대속도가 떨어지기 때문에 장력값이 작아지고 있음을 알 수 있다. 두 결과의 차이를 보면 본 연구인 KMU Cable은 장력변화값이 일정하게 작아지고 있지만, WHOI Cable의 결과는 전체적인 변화의 패턴은 KMU Cable과 비슷하지만 값이 많이 요동하고 있는 것을 알 수 있다. 해석결과를 통하여 선박이 100초동안 기동한 후에는 예인단의 장력이 약 14kN에서 11kN으로 줄어든다는 사실을 알 수 있었다.

Fig. 7에서는 기동선박이 변침할 때 예인케이블의 전체적인 형상을 알아보기 위해서 snapshot(XZ평면) 결과를 살펴보았다. 선박이 변침함에 따라서 케이블에서 상대속도가 감소하게 되고, 따라서 중량케이블과 경량케이블이 연결되는 지점의 심도가 현저히 깊어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 KMU Cable과 WHOI Cable 결과는 현저한 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. KMU Cable에서는 100초 동안 기동 후 중량케이블과 경량케이블 연결지점의 심도가 깊어지지만, 음향모듈 부분은 깊이의 변화가 많이 발생하지 않는다. 즉 연결부분과 음향모듈 부분은 약 10m 정도의 깊이차가 발생한다. 반면에 WHOI Cable에서는 20초가 지나면서 중성부력 부분이 심도가 얕아지고 중량케이블과 경량케이블 연결지점은 깊어져서 100초가 지나면 연결부분과 음향모듈은 약 50m 정도의 깊이 차이가 발생한다. 이 결과 차이에 대해서도 차후에 더 많은 연구를 하고, 실험을 통하여 검증이 필요하다고 판단된다.

Fig. 8에서는 KMU Cable의 또 다른 snapshot(XY평면) 결과를 볼 수 있다. 이것은 예인선박이 변침함에 따

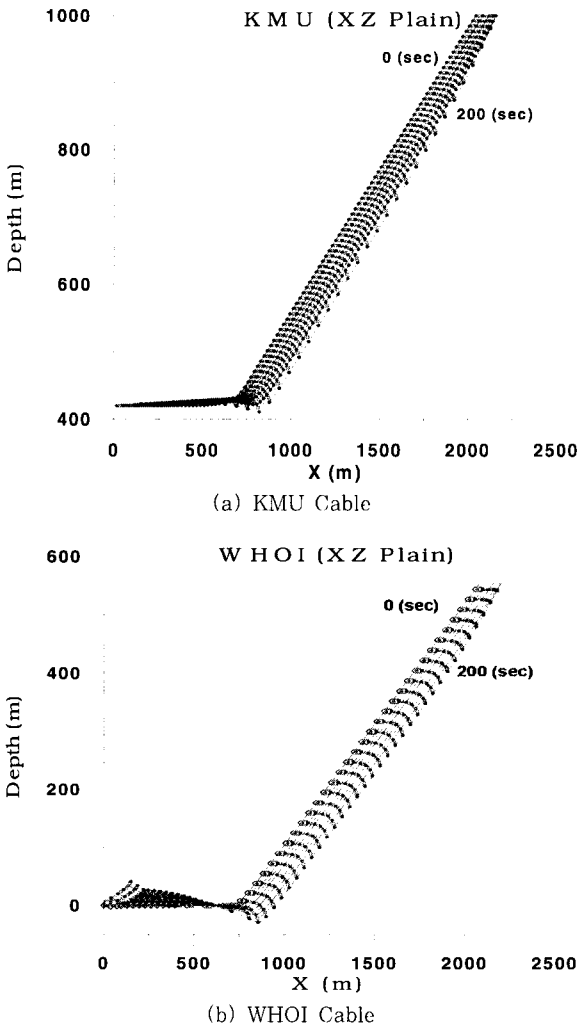


Fig. 7 Comparison of Snapshot(XZ Plain)

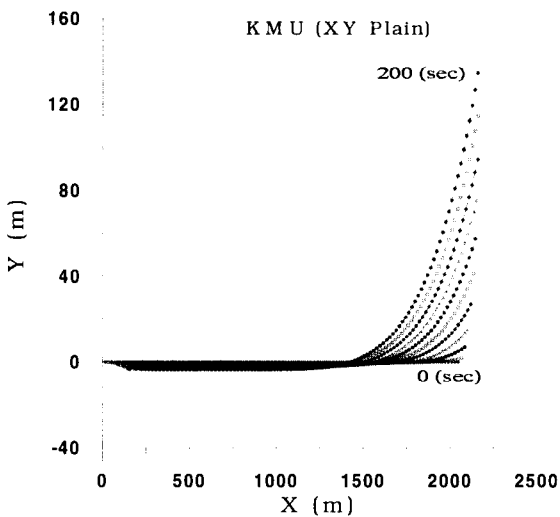


Fig. 8 Snapshot of KMU Cable(XY Plain)

라서 케이블의 전체적인 형상을 보여준다.

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 예인음탐케이

블의 기동에 있어서 나타나는 케이블 전체의 형상과 중요 부분의 장력을 추정할 수 있을 것이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 예인중인 저장력 예인케이블의 동적 거동을 수치적으로 해석하였다. 저장력 예인케이블에 대한 3차원 비선형 운동방정식을 풀기 위하여 유한차분법을 적용하였다. 비선형 해를 구하기 위하여 뉴턴-랩슨 반복법을 적용하였으며 만족스런 결과를 얻을 수 있었다. 행렬방정식 풀이는 대각선 부근의 성분만 이용하여 풀이함으로써 대형 행렬을 보다 효율적으로 풀이할 수 있었다. 또한 케이블 특성치가 급변하는 영역에서는 두 케이블 특성치의 평균값을 취함으로써 수치적인 안정성을 얻을 수 있었다.

개발된 프로그램을 이용하여 몇몇 예제해석을 수행함과 동시에 본 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 미국의 WHOI의 프로그램 결과와 비교하였다. 비교 결과 장력은 두 결과가 잘 일치하였는데, 음향모듈의 심도는 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이에 대해서는 차후 연구가 더 필요하다고 판단된다. 본 프로그램은 예인중인 저장력 케이블의 거동을 보다 정확히 예측할 수 있으므로 대 잠수함용의 군사적 목적이나 해저탐사용의 케이블 거동 해석에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 프로그램은 예인케이블 뿐만 아니라 다른 용도의 저장력 케이블에 대해서도 적용이 가능하다.

향후 연구방향을 살펴보면, 첫째는 본 연구에서 개발된 프로그램을 보다 자세히 검증하기 위해서 중량케이블과 중성부력케이블이 연결된 모델에 대한 실험실 실험 혹은 실험해역 실험이 요구된다.

둘째, 와동유기 진동이나 충격하중을 받는 케이블의 거동을 해석할 수 있는 연구가 앞으로 필요할 것으로 사료된다

### 참 고 문 헌

1. S. Hong and S. Y. Hong, "Effects of mooring line dynamics on position keeping of a floating production system", *Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol 2, 1997.
2. H.M. Irvine, "Cable structures", MIT Press, 1981.
3. 김문영, 김남일, 안상섭, "3차원 케이블 망의 초기 평행 상태 결정 및 정적 비선형 유한요소 해석", 한국전산구조공학회 논문집, 제11권, 제1호, 1998, pp. 179~190.

4. 김문영, 김남일, "등매개 케이블 요소를 이용한 케이블 망의 정적 및 동적 비선형 해석", 한국전산구조공학회 논문집, 제11권, 제2호, 1998, pp. 305~317.
5. 최창근, 김선훈, 송명관, "케이블 지지구조물의 구조해석을 위한 개선된 유한요소", 한국전산구조공학회 논문집, 제14권, 제6호, 2001, pp.117~126
6. J. W. Leonard, "Nonlinear dynamics of cables with low initial tension", *Journal of Engineering Mechanics(ASCE)*, Vol.98, No.2, 1972, pp.293~309
7. C. M. Ablow and S. Schechter, "Numerical simulation of undersea cable dynamics", *Ocean Engineering*, Vol. 10, No. 6, 1983, pp.443~457
8. J. V. Sanders, "A three-dimensional dynamic analysis of a towed system", *Ocean Engineering*, Vol. 9, No. 5, 1982, pp.483~499
9. A. P. Dowling, "The dynamics of towed flexible cylinders: Part 1. Neutrally buoyant elements", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 187, 1988, pp. 507~532
10. M. S. Triantafyllou and C. T. Howell, "Dynamic response of cables under negative tension : An ill posed problem", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173, No. 4, 1994
11. 박한일, 정동호, "유한차분법을 이용한 저장력 예인케이블의 비선형 동적해석", 대한조선학회논문집, 제39권, 제1호, 2002, pp.28~37
12. D. H. Jung, H. I. Park, W. Koterayama, "A Numerical and Experimental Study on Dynamics of A Towed Low-Tension Cable", *Proceedings of the twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol 2, 2002, pp. 213~220.
13. Delmer, T. N., Stephens, T. C. and Tremills, J. A., "Numerical Simulation of Cable-Towed Acoustic Arrays", *Ocean engineering*, Vol. 15, No. 6, 1988, pp.511~548
14. J. I. Gobt, M. A. Grosenbaugh, and M. S. Triantafyllou, "*WHOI Cable: Time domain numerical simulation of moored and towed oceanographic systems*", Woods Hole Oceanographic Institution, 1997, p.100
15. C. T. Howell, "Numerical analysis of 2-D non-linear cable equations with applications to low tension problems", *J. of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 2, No. 2, 1992
16. W. H. Press and S. A. Teakolsky, "*Numerical Recipes in Fortran 77*", Cambridge University Press, New York, 1986, p.963