

論 文

# 사이드스캔 소나 예인케이블에 걸리는 장력 및 형상 해석

박한일\* · 류창혁\*\*

Analysis into the configuration and tension of  
the towing cable of a side-scan sonar

*Han-il Park\* · Chang-Heouk Ryu\*\**

〈 목 차 〉	
Abstract	4. 예제 해석 및 검증
1. 서론	5. 결론
2. 3차원 이론식	참고문헌
3. 수치해석	

## Abstract

This study is aimed to predict the configuration and tension of a towing cable of a side-scan sonar which plays an important role in developing ocean resources. The governing equations of 3-D static equilibrium equations for a flexible cable are derived and solved using a finite difference method. The forces considered in this paper are effective weights, drag forces due to currents and ship moving, and the tension at both ends of the towing cable. The governing equations are non-linear, so an iteration method is applied to solve the equation. A case study is carried out for several different conditions. The result will be useful for predicting the location of a side-scan sonar and to design the towing system.

\* 한국해양대학교 조선·해양공학부

\*\* 한국해양대학교 대학원

## 1. 서론

육상자원의 고갈로 인하여 해저자원을 개발하기 위한 노력은 1970년대부터 본격적으로 시작되었다. 해저자원을 개발하기 위해서는 해양 탐사가 우선적으로 필요하며, 이것은 크게 해저지형 탐사, 해저지층 탐사, 해저퇴적물 탐사로 구분된다. 해양탐사를 통해서 얻어진 귀중한 자료는 여러 측면에서 활용이 가능하다. 학술적 측면으로는 해양자원의 생성환경 및 지질학적·지형학적 분석에 활용할 수 있다. 또한 해양개발 측면에서는 기술개발에 없어서는 안 될 귀중한 연구자료를 얻는 수단으로도 이용된다. 예로 해저퇴적물의 특성을 연구함으로써 짧은 시간에 많은 양의 노듈(nodule)을 생산할 수 있는 채광기구의 개발에도 활용되고 있으며, 해양구조물 설치 위치의 선정과 안전설계에 대한 기초자료를 제공하기도 한다. 경제적 측면으로는 개발대상지역 및 목표지역의 선정, 매장위치 및 매장량 추정, 생산성 평가 등에 활용되고 있다.

해양탐사에서 중요한 장비중의 하나가 사이드 스캔 소나이다. 해양탐사에 사이드 스캔 소나는 관측선에 의해 예인되면서 작동하게 되는데, 이때 중요한 사항 중의 하나는 예인시스템에 대한 정확한 해석이 필요하다. 예인시스템에 대한 정확한 해석은 경제성, 안정성, 운용성 등의 측면에서 매우 중요하다. 즉, 소요되는 예인케이블의 정확한 길이산정, 예인케이블에 걸리는 장력 계산 및 그에 따른 예인케이블의 크기 결정, 예인케이블의 수중에서의 배치형상 등을 정확하게 예측할 필요가 있다. Fig.1에서는 사이드 스캔 소나 시스템의 한 예를 보여 주고 있다.

사이드 스캔 소나의 위치추정방법은 크게 음향학적 방법과 케이블 동역학적 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 변환기(transducer)와 수신기(hydrophone)를 이용하여 상호간의 거리를 측정하는 단기저선(short base line, SBL) 시스템과 장기저선(long base line, LBL) 시스템 등의 방법이고 후자는 예인케이블에 대한 지배방정식을 세워 예인케이블 및 사이드 스캔 소나의 위치 및 장력을 구하는 방법이다. 전자는 실험에서 초음파를 이용하여 원하는

곳의 위치를 정확히 추정할 수 있으나 예인케이블의 각 요소 및 장력에 대한 값은 다수의 수신기 및 다른 많은 부수 장비를 요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 사이드 스캔 소나 및 예인케이블 각 요소의 위치 및 장력을 수치계산으로 간단히 해석할 수 있는 케이블 동역학적 방법을 이용하였다.

사이드 스캔 소나의 예인시스템을 해석하기 위한 예인케이블에 대한 지배방정식은 비선형적이고 다소 복잡하다. 따라서 수치적 방법이 필요하다. 본 논문에서는 예인시스템에 대한 3차원 정적 지배방정식을 제시하고 이를 풀기 위해 유한 차분법을 이용하였으며 여러 가지 경우에 대해 예제 해석을 수행하고자 하였다. 즉, 수심, 해류의 수심에 따른 분포, 예인케이블의 재료특성, 관측선박의 속도 및 방향 등에 대한 기본적인 자료를 입력하여 예인케이블의 형상 및 장력을 해석하고자 한다.

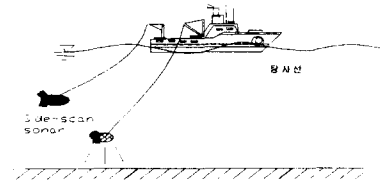


Fig. 1 Side-scan sonar system

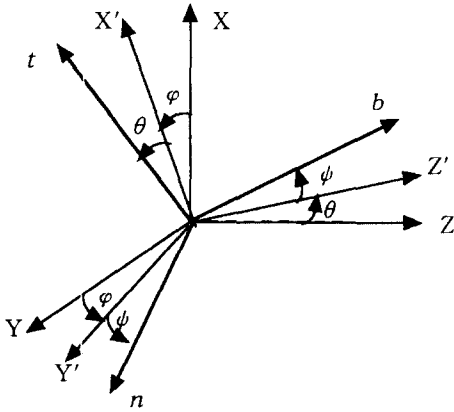
## 2. 3차원 이론식

### 2.1 좌표계

본 논문에서는 Fig. 2과 같은 3차원 좌표계를 사용하였다[2].

좌표계의 Euler 회전에 대하여 설명하면, Z축에 대해  $\varphi$ 만큼 회전하여 X'와 Y'가 만들어지며, Y'축에 대해  $\theta$ 만큼의 회전하여 t 와 Z'축이 만들어지고, t축에 대해  $\psi$ 만큼의 회전하여 n, b 축이 만들어진다. 따라서 국부 좌표계 t, n, b 와 고정 좌표계 X, Y, Z 간의 관계는 좌표변환 행렬식  $\Gamma$ 를 이용해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t \\ n \\ b \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$



$\phi$  : Z 축을 중심으로 회전한 각도  
 $\theta$  : Y' 축을 중심으로 회전한 각도  
 $\psi$  : t 축을 중심으로 회전한 각도

Fig. 2 Coordinate systems and Euler rotation sequence

예인케이블의 접선방향 좌표축을 t축으로 잡고 예인케이블의 비틀을 무시한다면,  $\phi=0$ 이 되므로 좌표변환 행렬식은 다음과 같이 된다.

$$F = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ \cos \psi \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \dots (2)$$

2.2 작용하중

2.2.1 예인케이블의 자중 및 부력

예인케이블의 자중 ( $w$ ) 및 부력 ( $F_B$ ) 은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} w &= mg \\ F_B &= g\rho_w A \end{aligned} \dots (3)$$

여기서,

$\rho_w$ : 물의 밀도,  $A$ : 예인케이블 단면적,  
 $m$ : 예인케이블의 단위 길이당 질량  
 한편, 케이블이 받는 유효자중은 다음과 같다.

$$w_0 = (m - \rho_w A)g \dots (4)$$

유효자중을 각 성분별로 표시하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} w_{0t} &= w_0 n_1, \quad n_1 = -\cos \phi \cos \theta \\ w_{0n} &= w_0 n_2, \quad n_2 = \sin \phi \dots (5) \\ w_{0b} &= w_0 n_3, \quad n_3 = -\cos \phi \sin \theta \end{aligned}$$

2.2.2 항력

해류에 의해 수중 케이블이 받는 항력 ( $R_t, R_n, R_b$ ) 은 아래 (6)식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} R_t &= \frac{1}{2} \rho_w d \pi C_t v_t^2 \\ R_n &= \frac{1}{2} \rho_w d \pi C_n v_n \sqrt{v_n^2 + v_b^2} \dots (6) \\ R_b &= \frac{1}{2} \rho_w d \pi C_b v_b \sqrt{v_n^2 + v_b^2} \end{aligned}$$

여기서,  $v_t, v_n, v_b$ : 각 방향별 해류 속도,  $d$ : 예인케이블 직경,  $C_t, C_n, C_b$ : 각 방향의 항력계수.

2.3 평형방정식

예인케이블에 관한 평형방정식과 관련 문제들이 참고문헌 [3]에 잘 설명되어 있다. 본 연구에서는 예인케이블의 요소를 케이블과 같이 유연한 구조로 가정하여 굽힘강성을 무시하였다. 따라서 한 요소에 대한 자유물체도를 Fig. 3과 같이 표현할 수 있으며 요소에 작용하는 힘에 대한 평형방정식을 구하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

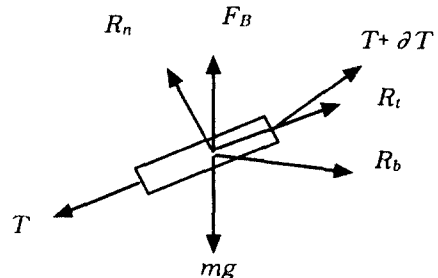


Fig. 3 Free body diagram

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial s} &= -w_0 n_1 - R_t \\ T \frac{\partial \phi}{\partial s} \cos \theta &= -w_0 n_2 - R_n \dots\dots\dots (7) \\ T \frac{\partial \theta}{\partial s} &= w_0 n_3 + R_b \end{aligned}$$

### 3. 수치해석

유한 차분식은 전진, 후진, 중앙 차분식 등으로 표현할 수 있다[4]. 여기서는 전진과 후진 차분법을 사용하여, 초기값의 적절성에 따라 전진, 후진을 선택적으로 사용하였다. 절점번호는 제일 하단에서 시작하여 해수면에서 n번째 요소가 존재한다. 위의 지배방정식 (7)식을 전진차분식으로 표현하면 (8)식과 같다.

$$\begin{aligned} T_{i+1} &= T_i + (w_{0i} \cos \phi_i \cos \theta_i - R_t) ds \\ \phi_{i+1} &= \phi_i - \frac{w_{0i} \sin \phi_i + R_n}{T_i \cos \theta_i} ds \dots\dots\dots (8) \\ \theta_{i+1} &= \theta_i - \frac{w_{0i} \cos \phi_i \sin \theta_i - R_b}{T_i} ds \end{aligned}$$

#### 3.1 경계조건 및 계산방법

예인케이블은 항상 수중에 있는 것으로 두었다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \tan^{-1} \left( \frac{T_y}{T_x} \right) \\ \phi_1 &= \tan^{-1} \left( \frac{T_z}{T_x} \right) \dots\dots\dots (9) \\ T_1 &= \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2} \end{aligned}$$

여기서,  $T_x, T_y, T_z$ 는 X, Y, Z 좌표계상의 각각의 장력성분이다.

(9)식에서 장력성분들은 미지의 값이므로 정확한 초기값을 가정하기 위해서는 반복법을 사용한다.

#### 3.2 해류

Fig.4에서는 수심에 따른 유속 분포를 나타내고

있다. 일반적으로 유속은 수심에 따라 속도 및 유속 방향이 달라진다. 따라서 수심에 따른 유속을 Fig. 4와 같이 10개 입력하고 그 사이의 값들은 선형보간공식(linear interpolation formula, [4])을 이용하여 얻었다. 다만, 본 논문에서는 수심에 따른 방향은 모두 동일한 것으로 가정하였다.

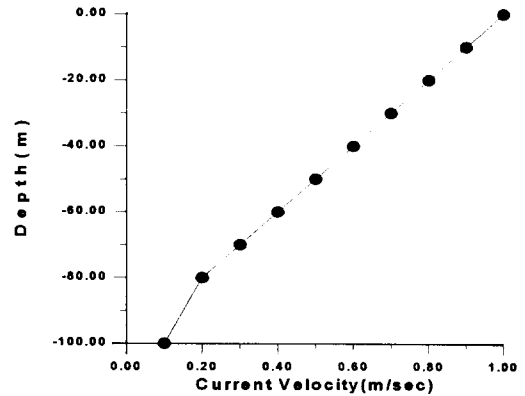


Fig. 4 Current Profile

### 4. 예제 해석 및 검증

본 논문에서는 사이드 스캔 소나용 예인시스템에 관하여 예제해석을 수행하였다. 예인케이블 재료 특성값, 소나장비의 무게, 해류의 속도 및 방향, 관측선의 속도 및 방향 등의 입력 값이 Table 1에 주어져 있다. 해류 및 선박이동 방향은 고정 좌표계 Y축에서 Z축의 양의 방향으로 45도 회전한 것으로 놓았다. 예제 해석에서는 Side-scan 소나의 형태를 편의상 원통형으로 취하였는데, 크기나 형태가 정해지면 그에 해당하는 항력과 양력을 계산하면 된다.

Table 1에 주어진 입력값을 이용하여 예인케이블의 수중 배치형상 및 접선 방향의 장력분포를 계산하였으며 출력결과를 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 탐사선 항진속도 변화에 따른 배치형상 및 장력변화를 보여주고 있으며 Fig. 6은 소나장비의 무게 변화에 따른 배치형상 및 장력변화

를 보여주고 있다. 이러한 변화들은 쉽게 예상될 수 있는 결과이다.

본 연구에서 접근한 3차원 해석에 대한 자체 검증의 한 방법으로 해류 및 선박의 방향을 45도로 두었을 때 두 평면(XY평면과 XZ평면)상의 수평 거리가 동일한지 비교하였다. 그 결과가 Table 2에 주어져 있으며 매우 만족스러움을 알 수 있다. 단, 두 평면상 최대거리의 기준점은 사이드스캔 소나로 하였다. 한편 본 논문의 알고리즘의 검증은 참고문헌[5]에서 이미 검증되었다.

Table 1. Input data for case study

예인케이블 직경(m)	0.1
예인케이블 무게(kg/m)	10
수심(m)	100
예인케이블 길이/수심	0.95
해류 방향(도)	45
해류 속도(m/s)	Fig. 4 참조
부이 직경(m)	0.5
부이 무게(kg)	50, 100, 150
부이 높이(m)	0.2
요소 개수	100
배의 방향(도)	45
배의 속도(m/s)	1.0, 1.5, 2.0

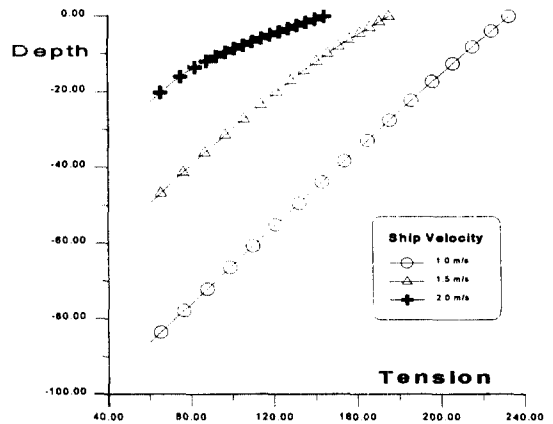
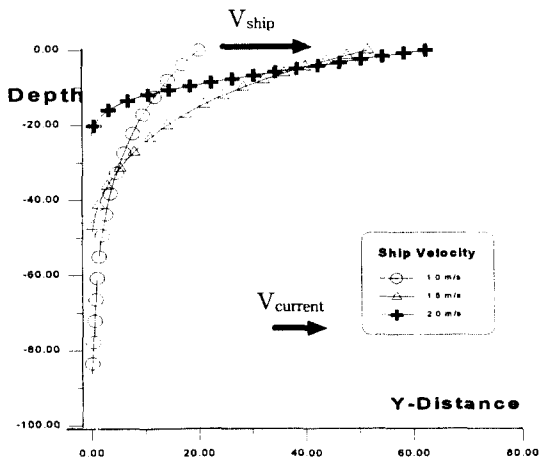


Fig. 5 Configuration in X-Y plane (left) and tensions (right) of a towing cable for different ship velocity

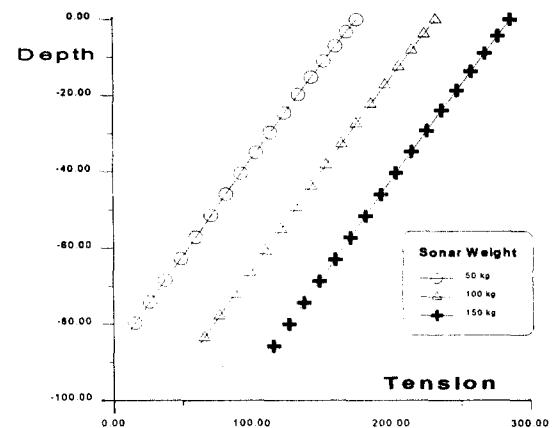
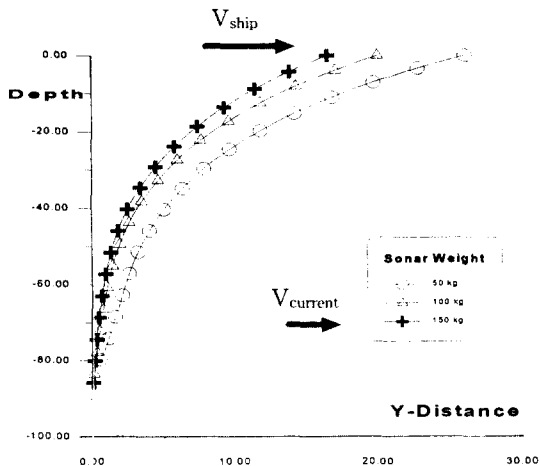


Fig. 6 Configurations in X-Y plane (left) and tensions (right) of a towing cable for different sonar-weights

Table 2. Comparison between distances in XY and XZ planes for 45 degree of a current direction and ship velocity

	변화값	XY평면상 최대거리(m)	XZ평면상 최대거리(m)	차이비율(%)
소나장비 자중변화	50kg	26.085	25.998	0.33
	100kg	20.001	20.036	0.17
	150kg	16.503	16.526	0.14
탐사선의 속도변화	0.1m/s	20.001	20.036	0.17
	0.5m/s	51.592	51.770	0.34
	1.0m/s	62.278	62.525	0.40

## 5. 결 론

본 논문에서는 사이드스캔 소나의 자중이나 탐사선의 항진속도에 따른 소나의 위치, 수중 예인케이블의 배치형상, 예인케이블에 걸리는 접선방향 장력 및 탐사선에 걸리는 장력 등을 정확하게 예측할 수 있었다. 이 자료를 통해 해저 및 해중 탐사시 중요시되는 안정성, 경제성 및 운용성을 고려한 설계를 할 수 있으리라 생각한다. 앞으로 동적해석을 첨가하고 해석결과도 3차원 동영상을 포함한 그래픽을 포함시키고자 한다.

[2] Spiegel M. R., "Theory and problems of vector analysis SI(metric) edition and an introduction to TENSOR ANALYSIS", McGraw-Hill Book Company, 1959.

[3] Berteaux H. O., "Buoy engineering", John Wiley & Sons, Inc., 1976.

[4] 유해영, 이강섭 공역, "공학도를 위한 수치해석", 희중당, 1994.

[5] 류창혁, 박한일, "계류시스템 해석용 소프트웨어 개발에 관한 기초연구", 해양공학연구회 제 41차 WORKSHOP 논문집, 1998.

## 참고문헌

[1] Howell C. T., "Introduction of the Dynamics of Low-Tension Cables", Dissertation of the Degree of Doctor, MIT, 1992.