「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 8, No. 2, pp. 203 — 209, May 2003

<Note>

해양탐사장비 예인케이블의 3차원 동적해석에 관한 연구

정동호[1] · 김종규[2,*] · 박한일[3]
[1]한국해양대학교 해양과학기술연구소
[2]여수대학교 해양시스템학부
[3]한국해양대학교 해양개발공학부

A Study on Three-dimensional Dynamic Analysis of a Towing Cable for Marine Survey Instruments

DONG-HO JUNG[1], JONG-KYU KIM[2,*] AND HAN-IL PARK[3]
[1]*Research Institute of Marine and Science Technology, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*
[2]*Ocean System Division, Yosu National University, Jeonnam 550-749, Korea*
[3]*Ocean Development Division, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

본 연구에서는 해양탐사장비를 예인하는 예인케이블에 관한 3차원 동적해석을 수행하였다. 해양케이블에 관한 지배방정식 중에서 굽힘강성 성분도 포함되는 보다 일반적인 지배방정식을 사용하였으며, 지배방정식은 3차원 비선형, 연성방정식이다. 예인선박의 예인속도와 측면주사음탐기의 중량에 따라서 예인단에서 발생하는 장력을 추정하였으며, 임의의 시간에 대한 케이블의 전체형상을 추정하였다. 정적해석결과를 통하여 특정한 수심에서 해양탐사장비를 예인할 때 예인속도를 잘못 조절한다면 관측장비가 해저면 바닥에 닿아서 탐사장비를 손실할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 다양한 예인속도에 따른 예인단에서 장력의 변화를 살펴보았는데, 이를 통하여 예인단 장력은 예인속도가 임계속도보다 클 때는 접선항중성분이 지배적이고 작을 때는 자중효과가 지배적으로 나타난다는 것을 알 수 있었다. 또한 속도가 변하는 천이영역에서는 장력의 피크가 나타났으며 이것은 케이블에 충격력 효과로 작용할 수 있으므로 예인선박 운용에 이를 잘 고려해야 할 것이다. 본 연구결과는 다양한 해양탐사장비의 예인문제에 적용할 수 있을 것이다.

In this study, the configuration and tension of a towing cable for side-scan sonar are predicted in an ambient flow and at an unsteady towing condition. The governing equation of three-dimensional dynamic analysis for a flexible cable is solved using a finite difference method. We successfully predict the configuration and tension of a side-scan sonar and designed the towing system. It is found in static analyses that the side-scan sonar must be towed to keep a its stable depth at a reasonable speed. The study also reveals in the transient analyses that the dominant component affecting the top tension is the tangential drag force for the larger towing speed than the critical speed, and the seft weight of a towed instrument for the smaller towing speed than. It should be maneuvered for a towing vessel with good consideration for the impact effect in a cable due to tension peak when a towing speed is suddenly increase. The developed program can be applicable for three-dimensional dynamic analysis of a towing system for various marine survey instruments.

Key words: Towing Cable, Side-scan Sonar, Marine Survey Instruments, Three-dimensional Dynamic Analysis, Finite Difference Method, Tension peak

서 론

해저지형, 퇴적물 분포, 침몰선박 등의 정확한 정보 취득을 위한 해양탐사기술은 해양환경, 해양생물, 해양지질 및 해양공학 연구뿐만 아니라 수산 및 양식이나 군사적인 측면에서도 그 활용가치가 높으며, 해양 탐사기술과 정보의 정밀분석을 위한 시스템 개발에 관한 관심은 날로 증가하고 있는 실정이다. 이러한 해양탐사에서 많이 사용되고 있는 중요한 장비 중의 하나가 측면주사음탐기(side-scan sonar)로서 해저면에 대한 광역 음향사진(sono-graph)을 제공하며, 최근에는 비교적 보편화되어서 해저지형조사 및 수중탐사용으로 널리 사용되고 있다. 한편, 이러한 예인시스템에 대한 정확한 거동해석은 해양탐사장비 개발시에 시스템의 안정성, 운용성 및 경제성 등의 측면에서 매우 중요하다(박과 류, 1998). 즉, 예인선박의 예인속도, 예인케이블의 장력, 예인케이블의 전체형상 및 탐사장비의 심도 등을 정확하게 추정할 필요가 있다. 예인시스템 외에 계류시스템과 ROV시스템에서도 해양케이블은 중

*Corresponding author: oceaninfo@yosu.ac.kr

요한 구조요소로 작용하는데, 이러한 구조물에서도 케이블에 대한 정확한 구조해석을 통하여 그 안전성을 확보하여야 한다(신과 김, 1993; 홍과 홍, 1994).

해양케이블은 여러 가지로 분류될 수 있으나 장력의 크기에 따라 고장력 케이블과 저장력 케이블로 나눌 수 있다. 고장력 케이블은 저장력 케이블에 비해 보다 많이 사용되고 있으며, 여러 가지 상황에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다(Irvine, 1981; Hong and Hong, 1997).

저장력 해양케이블에 대해서는 상대적으로 근래에 연구되기 시작하였는데 심해자원 개발 및 가벼운 케이블의 등장으로 인해 그 연구가 더욱 활발해지고 있다. 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, TASS(Towed Array Sonar System)의 중립부력부분, 그리고 자유롭게 매달린 케이블 등으로 그 예가 많다. 특히, 예인중인 해양케이블의 경우에는 운용중인 예인선박이 일시적으로 정지하거나, 추진방향을 바꿀 때에는 전 부분에서 저장력 현상이 발생한다.

한편, 고장력 케이블 해석에서 일반적으로 무시되어온 굽힘강성이 저장력 케이블 해석에서는 중요한 고려대상이 된다. 저장력 케이블에서는 복원력이 작아 대변형이 발생할 수 있으며, 이 대변형은 기하학적 비선형을 유발할 뿐만 아니라 유체점성에 의한 비선형 성분도 뚜렷해지므로 이것들을 반드시 고려해야 한다. 이러한 특성으로 인하여 저장력 케이블에 대한 연구는 고장력 케이블에 비해 상대적으로 소수이다. Leonard(1972)는 슬랙 케이블에 대한 문제를 해결하면서 처음으로 저장력 케이블의 동역학적인 문제를 고려했다. 그 후에 Sanders(1982), Ablow and Schechter (1983) 등이 저장력 케이블의 문제를 보다 본격적으로 취급하기 시작했다. 특히, Gobt *et al.*(1997)은 저장력 해양케이블에 관한 해를 구하여 해양탐사장비용 케이블, 계류용 케이블, 다중부이용 케이블 등 다양한 문제를 해결할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 해양탐사장비를 예인하는 예인케이블에 대한 3차원 동적해석을 수행하기 위해서 유한차분법을 적용하며, 비선형해를 구하기 위해서 뉴톤-랍슨 방법을 적용한다. 개발된 프로그램은 다양한 예인선박의 예인속도 및 예인케이블의 중량 등에 따른 예인케이블의 장력 및 전체형상을 파악하고자 한다. 또한 천이영역 해석을 통하여 예인단에서 장력에 영향을 미치는 중요 요소들을 살펴본다.

지배방정식

Fig. 1은 좌표계 관계를 나타내는데, 국부좌표계는 로 표현되며, 전체좌표계는 로서 표현된다. 본 연구에서 비틀림 효과는 무시하였다.

케이블의 요소에 대해 지배방정식은 박한일과 정동호(2002)를 참고하였다. 아래의 식은 미소요소의 국부좌표계 상에서 결정되어졌다.

$$m(\dot{v}_t+v_t\dot{\theta}-v_n\dot{\phi}\cos\theta)=T'+S_b\Omega_n-S_n\Omega_b-w_o\cos\phi\cos\theta+R_t$$

$$m\dot{v}_n+\dot{\phi}(v_t\cos\theta+v_b\sin\theta)+m_a\dot{v}_n$$

$$=S_n'+\Omega_b(T+S_b\tan\theta)+w_o\sin\phi 2+0.25\pi d^2\rho_w C_M\dot{u}_n+R_n$$

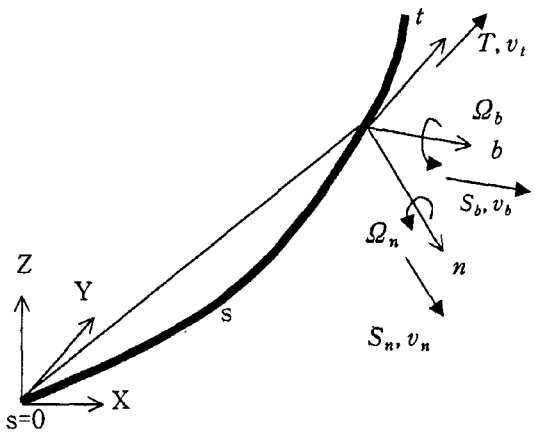

Fig. 1. Coordinate systems.

$$m(\dot{v}_b-v_n\dot{\phi}\sin\theta-v_t\dot{\theta})+m_a\dot{v}_b$$

$$=S_b'-S_n\Omega_b\tan\theta-T\Omega_n-w_o\cos\phi\sin\theta+0.25\pi d^2\rho_w C_M\dot{u}_b+R_b$$

$$EI\Omega_n'=-EI\Omega_b^2\tan\theta+S_b(1+T/EA)^3$$

$$EI\Omega_b'=EI\Omega_n\Omega_b\tan\theta-S_n(1+T/EA)^3$$

$$v_t'+\Omega_n v_b-\Omega_b v_n=T/EA$$

$$v_t'+\Omega_b(v_t+v_b\tan\theta)=(1+T/EA)\dot{\phi}\cos\theta$$

$$v_b'-\Omega_b v_n\tan\theta-\Omega_n v_t=-(1+T/EA)\dot{\theta}$$

$$\Omega_n=\theta'$$

$$\Omega_b=\dot{\phi}\cos\theta \qquad (1)$$

여기서, 각 변수위의 점(˙)은 시간 t의 미분
각 변수의 프라임(′)은 공간 s의 미분

T	: 케이블의 장력
S_n, S_b	: n, b방향의 전단력
v_t, v_n, v_b	: 각각 t, n, b방향 케이블속도 성분
u_t, u_n, v_b	: n, b 방향의 유체속도 성분
Ω_n, Ω_b	: n, b 방향의 곡률
θ, ϕ	: 회전각도
w_0	: 케이블의 단위길이 당 수중 무게
R_t, R_n, R_b	: 각각 케이블에 가해지는 t, n, b방향의 외부 유체항력 등을 나타낸다.

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.

수치해석

본 연구에서는 저장력 예인케이블에 적합한 유한차분법을 사용하며, 시간적분에 있어서 보다 안정적인 해를 얻을 수 있는 음해법(implicit method)을 사용하였다.

식 (1)을 다음과 같이 하나의 행렬식으로 표현할 수 있다(Ablow

and Schechter, 1983).

$$\vec{JH'} = K\vec{H} + \vec{L} \tag{2}$$

여기서,

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

$\vec{L}$ 는 다음 식 (3)과 같다.

한편 J, K는 모두 10×10 크기의 사각행렬이 된다. J의 경우에 대각선 성분은 다음과 같으며 그 외 성분은 모두 영이다.

$$\begin{vmatrix} S_n\Omega_b - S_b\Omega_n + w_0\cos\phi\cos\theta - R_t \\ -\Omega_b(T + S_b\tan\theta) - w_0\sin\phi - R_n - 0.25\pi d^2\rho_w C_M \dot{u}_n \\ S_n\Omega_b\tan\theta + T\Omega_n + w_0\cos\phi\sin\theta - R_b - 0.25\pi d^2\rho_w C_M \dot{u}_b \\ \Omega_b v_n - \Omega_n v_b \\ -\Omega_b(v_t + v_b\tan\theta) \\ \Omega_b v_n\tan\theta + \Omega_n v_t \\ \Omega_b \\ \Omega_n \\ -EI\Omega_b^2\tan\theta + S_b(1 + T/EA)^3 \\ EI\Omega_b\Omega_n\tan\theta - S_n(1 + T/EA)^3 \end{vmatrix} \tag{3}$$

$$J(1,1)=J(2,2)=J(3,3)=J(4,4)=J(5,5)=J(6,6)=J(8,8)=1$$
$$J(7,7)=\cos\theta, J(9,9)=J(10,10)=EI \tag{4}$$

K행렬의 경우는 영이 되는 성분과 영이 되지 않는 성분이 혼재하고 있는데 영이 아닌 성분은 아래와 같다.

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

식 (2)를 Δs 간격으로 m개로 나눈 절점(node)에 대해 이산화 시키고, 그 후에 Δt 만큼의 시간 간격으로 나눈 식으로 만든다. 식 (2)를 절점 j와 $j+1$사이, 그리고 시간 i와 $i+1$사이의 중앙점에서 풀이한다. 따라서 식 (2)를 중앙차분화 시키면 지배방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$[J_{j+1}^{j+1} + J_j^{j+1}]\frac{H_{j+1}^{j+1} - H_j^{j+1}}{\Delta s} + [J_{j+1}^{j} + J_j^{j}]\frac{H_{j+1}^{j} - H_j^{j}}{\Delta s} =$$
$$[K_{j+1}^{i+1} + K_{j+1}^{i}]\frac{H_{j+1}^{i+1} - H_{j+1}^{i}}{\Delta t} + [K_j^{i+1} + K_j^{i}]\frac{H_j^{i+1} - H_j^{i}}{\Delta t}$$
$$+ L_{j+1}^{i+1} + L_j^{i+1} + L_{j+1}^{i} + L_j^{i} \tag{6}$$

위의 방정식은 10(m−1)개의 방정식이 된다(m은 절점수). 하지만 미지수는 총개이므로 10 m개의 또 다른 방정식이 필요하게 되는데, 이것은 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

예인용 케이블의 하부 끝단(s=0)은 예인되는 탐사장비가 매달려 있다. 따라서 끝단에서의 장력과 전단력(S_n, S_b)은 탐사장비에 작용하는 외력과 관계한다. 탐사장비에 작용하는 동수역학적 하중과 자중을 구하여 케이블 끝점에 국부적인 힘으로 작용시켜서 경계조건으로 적용시킨다. 반면에 끝점에서 모멘트는 영으로 가정하였다. 그리고, 예인단에서 각방향 속도를 알고 모멘트가 영이므로 총 10개의 경계조건을 얻는다.

비선형 방정식을 풀기 위해서 뉴톤-랍슨방법을 사용했으며, 전체 Jacobian 행렬은 블록삼중대각행렬(block tri-diagonal matrix)의 형태를 나타낸다. 본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해서 비대각 성분인 영 값은 사용하지 않고 대각선 성분만 사용하는 행렬 풀이법을 적용하였다(Press and Teakolsky, 1986).

수치해석 결과 및 분석

본 장에서는 앞 장에서 설명한 수치해석 방법을 이용하여 해양탐사장비 예인케이블에 대한 예제해석을 수행하였다. 해양탐사장비는 해수면의 예인선박이 일정속도로 예인할 때, 예인케이블의 끝단에 매달려서 예인된다. 본 연구에서는 예제해석을 위하여 해양탐사장비는 측면주사음탐기(side- scan sonar)로 가정하였다. Fig. 2는 예인선박이 케이블의 끝단에 연결된 측면주사음탐기를 예인하는 모습을 나타내고 있다. Table 1에서는 예제해석에서 사용된 각종 입력자료를 보여주고 있다. 측면주사음탐기는 실린더형으로, 길이는 2 m이며 직경은 0.1 m로 가정하였다. 따라서 측면주사음

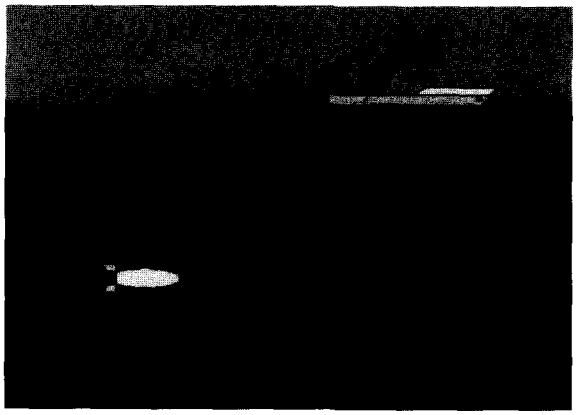

Fig. 2. General configuration for towing cable.

Table 1. Input data

Water Depth (m)	100
Water Density (kg/m^3)	1025
Cable Diameter (m)	0.01
Cable Effective Weight (N/m)	10
Cable Length (m)	150
Cable Elastic Modulus (N/m^2)	6.5E7
Current velocity (m/s)	0
Turning rate (°/s)	0.514
Tow Fish Effective Weight (N)	300
	600
	900
Tow Speed (m/s)	1.5
	2.5
	3.5

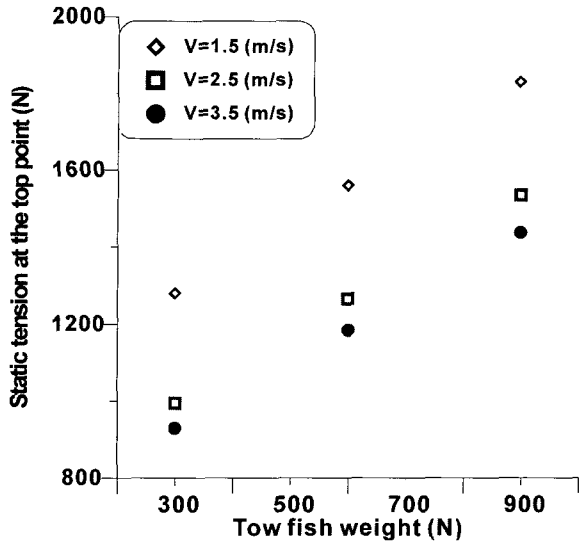

Fig. 3. Static tension for different towing speeds at the top point.

탐기에 작용하는 외력은 세장형 구조물에 적합한 모리슨 방정식을 적용시켰다. 예인케이블은 유연한 케이블로 가정하였으며, 예인탐사장비의 중량을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 또한 예인선박의 속도변화에 따라서 케이블의 형상과 장력을 추정하였다. 이때 예인선박은 60초 동안은 0.514(°/s)의 변침율로 이동한 후 500초까지 직진하여 이동하는 것으로 가정하였다. 한편, 본 연구에서 적용된 수치해석 알고리즘은 박한일과 정동호(2002)의 연구에서 검증되어졌다.

Fig. 3은 예인선박이 직전예인을 할 때, 예인선박의 속도와 측면주사음탐기의 중량에 따른 예인단에서의 장력을 예측하고 있다. 예인단에서의 장력은 예인속도에 반비례하고 측면주사음탐기의 중량에 비례하는 것을 알 수 있는데, 측면주사음탐기의 중량에 대하여 선형적인 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 예인선박이 직진예인을 할 때 케이블의 전체형상을 보여주고 있다. 측면주사음탐기의 중량이 300N인 경우와 900N인 경우에 대하여 해석을 수행하였는데, 300N인 경우에는 케이블이 거의 일직선 형상을 보여주는데 반하여 900N인 경우에는 중량의 효과로 케이블의 형상은 더 이상 직선이 아니며, 곡선으로 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 예인속도가 1.5 m/s인 경우에는 측면주사음탐기는 거의 바닥에 닿는 것을 알 수 있는데, 이 경우에 측면주사음탐기가 바닥과 부딪힌다면 측면주사음탐기에는 큰 충격이 가해져 장비손실의 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 예인조건에 대한 충분한 사전 연구를 통한 예측을 수행하여 고가의 장비손실을 막아야 한다.

다음은 예인선박의 변침율을 0.5°/s로 설정하여, 360초 동안 변침 후 직진하여 이동하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 360초 동안 변침하기 때문에 예인선박은 180° 만큼 회전을 한 후 반대 방향으로 이동하는 경우이다. 예인속도는 3.5 m/s이며, 측면주사음탐기의 중량은 900N으로 설정하였다. 이 경우에 예인선박과 측면주사음탐기의 시간궤적을 XZ평면 상에서 추정해 보았다(Fig. 5). 예인선박이 완전히 변침하고 직진을 한 후에도 측면주사음탐기는 여전히 약간의 각도를 가지고 이동하다가 약 700초가 경과

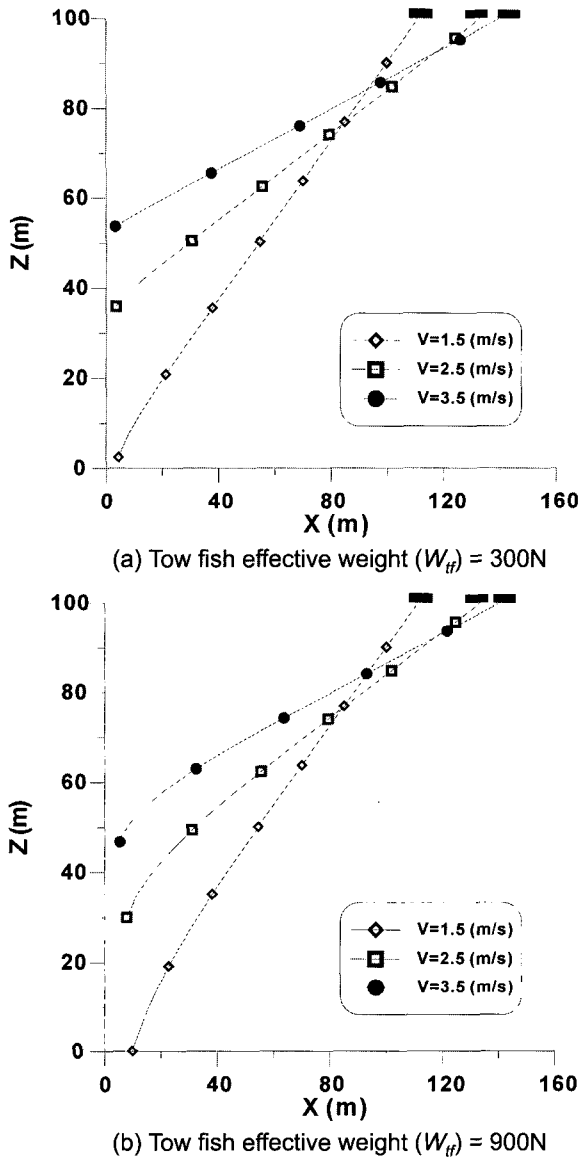

Fig. 4. Static configuration of towed cable for different towing speeds and fish weights.

되면서 직진이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 위의 해석조건에 대하여 선박 예인단에서 시간에 따른 장력변화를 보여주고 있다. 변침하는 동안에는 장력이 계속 증가하고 있는데, 변침이 끝나고 직진이동하는 동안에도 어느 정도까지는 장력이 계속 증가하고 있다. 약 500초가 지나면서 장력은 다시 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 예인선박의 이동과 측면주사음탐기의 이동이 위상차를 가지기 때문이다. 즉, 예인선박은 360초가 지나면 직진이동을 시작하지만, 여전히 측면주사음탐기는 변침각도를 가지고 이동하고 있기 때문이다. 이 결과는 Fig. 8을 보면 보다 자세히 확인할 수 있다. Fig. 7은 예인될 때 케이블의 전체형상을 XY 평면에서 100초마다 나타내었다. 예인선박이 직진이동을 하는 400초에도 케이블의 전체형상은 곡률을 가지고 휘어져 있으며, 약 600초가 지나면서 케이블은 거의 일직선을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 측면주사음탐기를 예인하여 해양탐

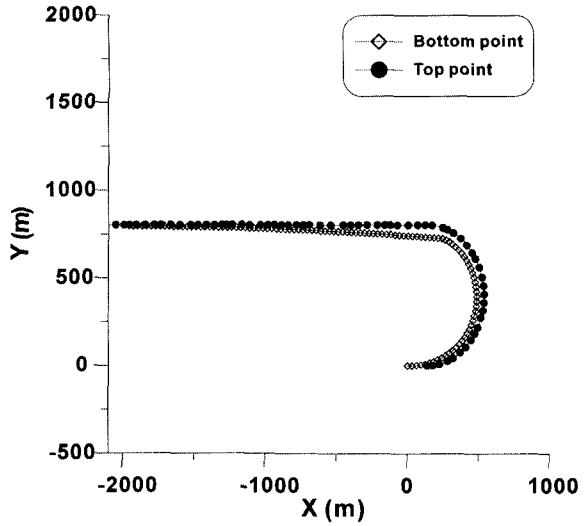

Fig. 5. Trajectory of bottom and top points (V_t=3.5 m/s, W_{tf} = 900 N).

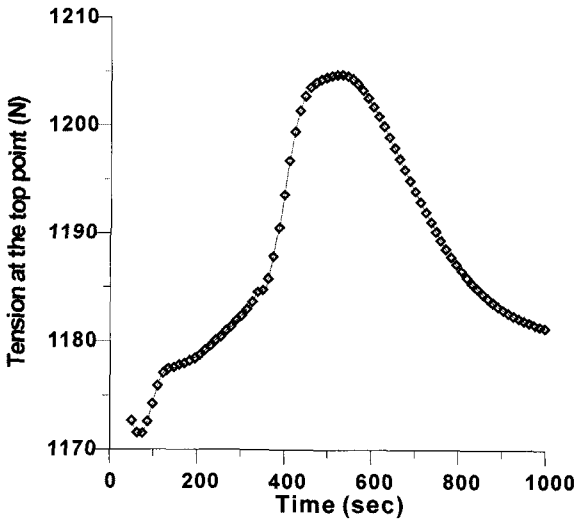

Fig. 6. Tension variation at the top point (V_t=3.5 m/s, W_{tf} = 900N).

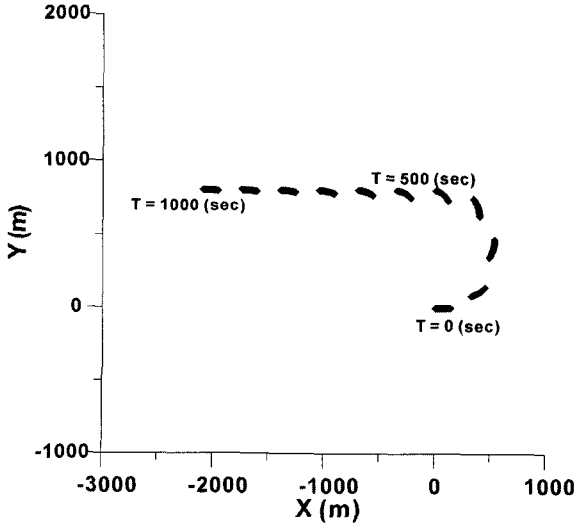

Fig. 7. Snapshot in XY plain.

Table 2. Towing speed for transient analysys

Time	Towing speed (m/s)
0~1000	7
~2000	6
~3000	5
~4000	4
~6000	3
~8000	2
~10000	3
~12000	4
~14000	5
~16000	6

사를 할 때에는 이와 같은 점을 잘 염두해서 운용해야 할 것이다.

예인선박의 변침에 의한 효과를 살펴본 후에는 예인속도의 변화에 따른 예인단의 장력 효과를 살펴보았다. Table 2에서는 시간에 따른 예인속도를 나타내고 있으며, 예인선박은 변침하지 않고 일직선으로 이동하는 것으로 가정하였다. 초기에는 7 m/s로 예인하는데, 이후에 2 m/s까지 속도를 감소시킨 후에 다시 속도를 증가시키면서 해석하였다. 예인속도가 변화하는 동안에는 약 60초 동안 천이영역을 설정하여 예인속도가 선형적으로 변화하도록 설정하였다. 예인장비의 무게는 1000 N으로 가정하였다.

Fig. 8은 예인속도의 변화에 따른 예인단의 장력 변화를 보여주고 있다. 7 m/s 속도로 예인될 때에는 장력이 약 1900N으로 유지되다가, 속도가 감소함에 따라서 예인단에서의 장력도 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 이 현상은 예인속도가 4 m/s로 감소될 때까지 계속되지만, 3 m/s로 예인속도가 감소되면서 예인단에서 장력이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 다시 2 m/s로 예인될 때에는 장력이 더욱 증가하고 있다. 이후에 예인속도를 증가시는 경우에는 예인속도가 감소되는 경우와 반대 현상이 나타났다. 예인속도가 4 m/s가 될 때 까지는 장력이 감소하다가 예인속도가 더 커지면 장력도 증가하고 있다.

정적해석 결과인 Fig. 3에서는 예인속도가 증가함에 따라서 장

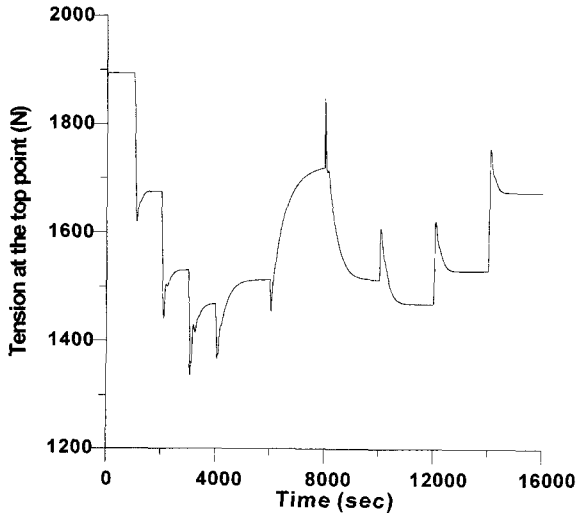

Fig. 8. Time history of tension at top point.

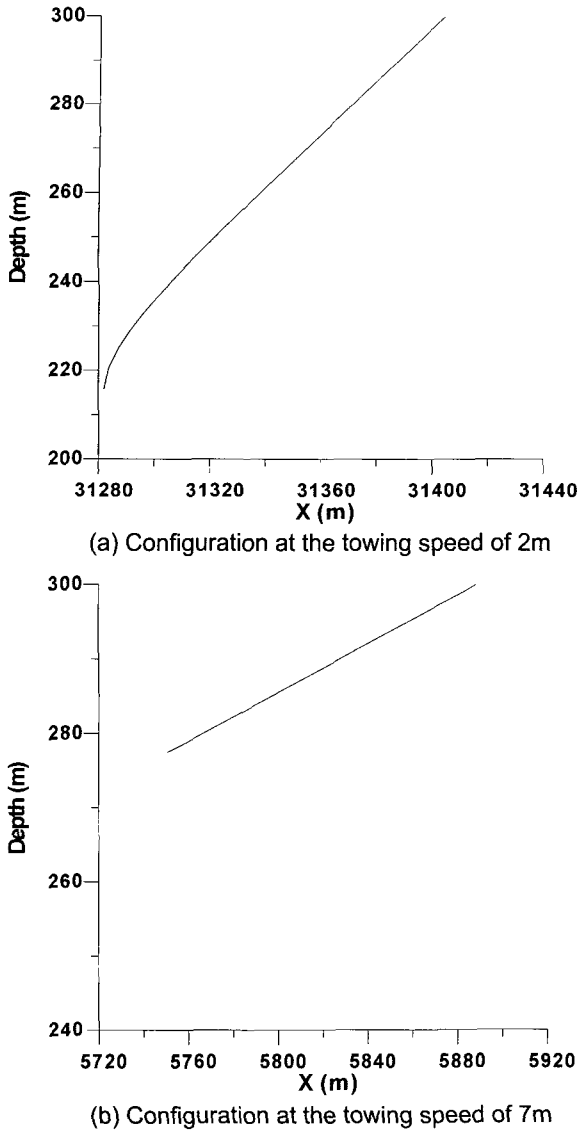

Fig. 9. Cable configuration for two different towing speeds.

력이 감소한다는 것을 보였는데, 이 결과는 모든 속도에서 적용되지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 예인속도가 4 m/s보다 작은 경우에는 예인장비의 자중 효과가 예인속도에 의해서 발생하는 접선방향 하중성분보다 더 지배적으로 나타난다는 것을 알 수 있다. 반면에 예인속도가 5 m/s 이상인 경우에는 케이블에 작용하는 접선방향 하중성분의 효과가 증가하면서 예인단에서 장력도 증가하는 것으로 판단된다.

이 결과는 일정 예인속도에서 전체 형상을 보여주는 Fig. 9의 결과를 통하여 확인할 수 있다. Fig. 9 (a)는 2 m/s로 예인하는 경우인데 예인장비의 자중 효과로 인하여 케이블 끝단이 곡률을 가지고 휘어져 있다. 반면에 Fig. 9 (b)는 7 m/s로 예인하는 경우인데 이 경우에는 케이블 형상이 거의 일직선을 가지며 곡률은 거의 0에 가깝다. 따라서 이 경우에는 케이블 접선방향으로 작용하는 항력의 효과가 지배적일 것이다. 즉, 7 m/s로 예인하는 경우에 케이블의 형상은 거의 일직선이고 접선방향 항력성분이 지배적으로 나타나지만, 예인속도가 점차 감소하면서 접선방향 하중성분이 감소하여 장력이 감소하다가, 예인속도가 더 작아지면 예인장비의 자중효과가 점점 지배적으로 되면서 케이블은 곡률을 가지게 되고 장력은 다시 증가하게 된다.

다시 Fig. 8의 결과를 살펴보면 속도가 바뀌는 구간에서는 장력이 정상상태에 도달하기 까지 약간의 시간이 소요되며, 천이 구간에서 장력은 크게 피크가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 예인장비의 관성력 효과에 의한 것으로 판단된다. 특히 속도가 갑작스럽게 증가할 때에는 이와 같은 장력의 피크가 충격력 효과로 작용하여 케이블의 파단을 가져올 수 있으므로 이를 잘 고려하여 예인선박을 운용하여야 할 것이다.

요약 및 결론

본 연구에서는 해양탐사장비를 예인하는 예인케이블에 관한 3차원 동적해석을 수행하였다. 해양케이블에 관한 지배방정식은 3차원 비선형, 연성방정식을 사용하였다. 지배방정식을 풀이하기 위하여 유한차분법을 적용하였으며, 비선형 방정식은 뉴톤-랍슨 방법을 적용하여 풀이하였다.

예인케이블에 관한 예제해석에서는 측면주사음탐기를 예인하는 해양케이블에 관한 거동해석을 수행하였다. 예인선박의 예인속도와 측면주사음탐기의 중량에 따라서 예인단에서 발생하는 장력을 추정하였으며, 임의의 시간에 대한 케이블의 전체형상을 추정하였다. 해석결과를 통하여 특정한 수심에서 해양탐사장비를 예인할 때 예인속도를 잘못 조절한다면 관측장비가 해저면 바닥에 닿아서 탐사장비를 손실할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 다양한 예인속도에 따른 예인단에서 장력의 변화를 살펴보았는데, 약 4 m/s의 한계예인속도를 기준으로 4 m/s보다 속도가 작을 때에는 예인장비의 자중효과로 인하여 장력이 증가하고 이보다 큰 예인속도에서는 접선하중성분이 지배적임을 알 수 있었다. 예인속도가 변하는 천이구간에서는 장력의 피크가 나타났으며, 이것은 갑작스럽게 속도가 증가할 경우에 케이블에 충격력 효과로 작용할 수 있기 때문에 예인선 운용에 있어서 고려해야 할 것이다. 따라서, 해양탐사장비 예인작업을 하기 이전에 충분한 사전 해석을 통하여 해양탐사장비의 안전성을 보장할 수 있어야 할 것이다. 본 연구결과는 다양한 해양탐사장비의 예인문제에 적용할 수 있을 것이다.

향후 연구방향을 살펴보면, 케이블을 예인할 때 발생하는 와동유기진동(vortex induced vibration) 효과가 케이블의 거동 및 장력에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 고려하여 해석하는 것이 필요하다.

참고문헌

박한일, 정동호, 2002. 유한차분법을 이용한 저장력 예인케 이블의 비선형 동적해석. 대한조선학회논문집, **39**(1): 28–37.

박한일, 류창혁, 1998. 사이드스캔 소나 예인케이블에 걸리 는 장력 및 형상 해석. 해양안전학회지, **4**(2): 63–68.

신현경, 김덕수, 1993. 내파성 가리비 연승식 양식시설에 관 한 연구(I). 한국해양공학회논문집, **10**(1): 237–245.

홍 섭, 홍도천, 1994. 6000 m ROV시스템의 케이블 거동해 석. 한국해양공학회학술대회논문집, **2**(1): 301–310.

Ablow C.M. and S. Schechter, 1983. Numerical simulation of under-

sea cable dynamics. Ocean Engineering, **10**(6): 443–457.

Gobt, J. I., Grosenbaugh M. A., and M.S. Triantafyllou, 1997. WHOI Cable: Time domain numerical simulation of moored and towed oceano-graphic systems. Woods Hole Oceanographic Insti- tution.

Hong, S. and S. Y. Hong, 1997. Effects of mooring line dynamics on position keeping of a floating production system. Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 2.

Irvine H.M., 1981. Cable structures. MIT Press.

Leonard, J. W., 1972. Nonlinear dynamics of cables with low initial tension. J. of Engineering Mechanics (ASCE), **98**(2): 293–309.

Sanders, J.V., 1982. A three-dimensional dynamic analysis of a towed system. Ocean Engineering, **9**(5): 483–499.

Press, W.H. and S.A. Teakolsky, 1986. Numerical Recipes in Fortran 77. Cambridge University Press, New York.

2002년 12월 17일 원고접수
2003년 5월 13일 수정본채택
담당편집위원: 강석구