

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.4.473

JCCT 2024-7-55

예인케이블 조출 거동 해석을 위한 모델링 기법

Modeling Method for Simulating The Winding Motion of a Towing Cable

이은택*

Euntaek Lee*

요약 본 논문은 윈치드럼과 함께 구성되어 있는 수중 케이블의 거동을 해석하기 위해 개발된 조출 모델링을 소개한다. 케이블의 수중 거동은 장력만 영향을 준다고 가정한다. 이러한 가정은 직진 거동을 하는 함정에 의해 예인되는 수중 케이블 거동을 해석하는데 적합하다. 수중 케이블은 절점 위치유한 요소법으로 차분한다. 이 수치기법은 기하학적 비선형성을 표현할 수 있기 때문에 대변형을 동반하는 수중 케이블의 거동 예측에 적합하다고 알려져 있다. 본 논문은 실제 역 실험에서 계측된 수중 예인케이블의 심도 정보를 활용하여 수치 기법의 타당성을 확보한다.

주요어 : 케이블 동역학, 케이블 조출, 예인 안정성, 선배열 예인 소나, 수상함

Abstract In this paper, we introduce a newly developed winding model to simulate the motion of underwater cable consisting of winch drums. It is assumed that only tension affects the underwater cable motion. This assumption is suitable for simulating the underwater cable motion towed by a naval vessel in a straight ahead maneuver. The underwater cable is discretized using Nodal Position Finite Element Method. This numerical method is known to be suitable for predicting the underwater cable motion with large deformation because it can express geometric nonlinearity. In this paper, the validity of the numerical method was secured by comparing it with the depth information of towing cable measured through sea experiments.

Key words : Cable Dynamics, Cable Winding, Towing Stability, Towed Array Sonar, Surface Vessel

1. 서론

함정이 수행하는 대잠작전 중 투양된 예인케이블의 길이는 심도 유지를 위해 지속적으로 제어되어야 한다. 이때 윈치 드럼에 권선저장되어 있는 케이블이 풀려지는 모습이 마치 삶은 고치에서 실을 뽑아내는 모습과 닮아서 조출이라고 부른다. 그리고 윈치로부터 조출된 케이블이 주위 유체장과의 상호작용으로 움직이는 현상을 조출 거동이라고 한다.

본 논문은 함정에 의하여 예인 되는 케이블의 조출 거동을 수치적으로 예측하기 위한 모델링을 고안하고자 한다. 조출은 수중 케이블의 거동이 축하중에만 영향을 받는다고 가정하여 설계한다. 예인 케이블은 대변형을 동반하는 수중 케이블 거동 예측에 적합한 절점 위치유한요소법(Nodal Position Finite Element Method)으로 이산화한다.[1-5] 절점위치 유한요소법에 사용되는 유한요소는 1차원 케이블 요소이며 축 방향 힘(Axial Force)에 의한 변형만이 고려되어 있다. 이는

*정회원, 국방과학연구소 연구원 (단독저자)
접수일: 2024년 5월 16일, 수정완료일: 2024년 6월 5일
게재확정일: 2024년 6월 17일

Received: May 16, 2024 / Revised: June 5, 2024
Accepted: June 17, 2024
***Corresponding Author: etlee@add.re.kr
Researcher, Agency for Defense Development

굽힘, 비틀림, 전단 변형에 대한 효과가 고려되어 있지 않다는 의미이다. 이러한 유한요소 모델링이 예인 케이블의 거동을 예측하는데 부족함이 있다고 판단될 수 있다.

하지만 힘이 직진 거동을 하거나 선회 반경을 크게 거동을 하면 예인 되는 케이블에는 장력이 지배적으로 작용한다. 이러한 경우에는 굽힘 모멘트나 비틀림 모멘트의 크기가 상대적으로 작게 작용한다고 볼 수 있다. 따라서 케이블에 장력이 지배적으로 작용하는 경우에는 케이블의 축 방향 힘만을 고려하는 것이 타당하다고 할 수 있다. 케이블에 작용하는 외력은 부가질량력, 항력, 유효 하중이 고려되어 있으며 이는 각각 케이블의 가속도, 속도, 위치에 대응하는 힘이다.

절점위치 유한요소법은 대변형을 동반하는 케이블의 거동을 표현가능한 것으로 알려져 있다.[1-5] 이러한 복잡한 거동 예측은 강성행렬, 부가질량력 등이 비선형 모델링이 되어 있기 때문에 가능하다. 비선형 모델링 항은 케이블 자세의 변화에 민감하게 변화하기 때문에 시간의 흐름에 따른 해의 변화가 정확하게 예측 되어야 한다. 즉, 시간 적분법의 선택이 수렴된 해를 얻는데 중요하다는 의미이다. 통합 예인 소나 동시 예인 거동 해석 소프트웨어는 음해법(Implicit)으로 알려져 있는 Predictor Multi-Corrector Newmark법을 시간적분법으로 사용한다.[6] 음해법을 적용함으로써 비선형항에 의한 시간 차분 간격의 크기 제한이 양해법에 비해 상대적으로 자유롭다.[7-8] 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장을 통하여 조출 거동 해석을 위하여 새롭게 개발한 모델링에 대하여 설명한다. 조출이 일어나는 과정을 설명하고, 이러한 현상을 절점위치 유한요소법과 융합되도록 어떻게 모델링할 것인지를 설명한다. 그리고 3장에는 새롭게 개발된 조출 모델링을 검증하기 위한 수치해석 방법과 그 결과를 설명한다.

II. 조출 모델링

1. 조출 모델링 기법

본 절은 새롭게 개발된 조출 모델링에 대하여 설명을 한다. 먼저 조출이 일어나는 과정을 설명하고, 이 현상을 어떻게 모델링할 것인지를 설명한다.

1) 힘에 의하여 예인 되는 케이블 조출의 정의

예인케이블은 윈치드럼에 권선 저장되어 있다. 만약 윈치드럼이 Fig. 1과 같이 각속도 ω 로 회전한다면 예인케이블은 초당 $r\omega$ 만큼 조출하게 된다. 이 때 예인케이블이 조출 되는 방향은 윈치드럼과 그림퍼쉬브가 배치되는 양상에 따라 결정된다. 본 연구에서는 예인케이블의 조출 되는 방향이 힘의 진행방향과 평행 하다고 가정한다.

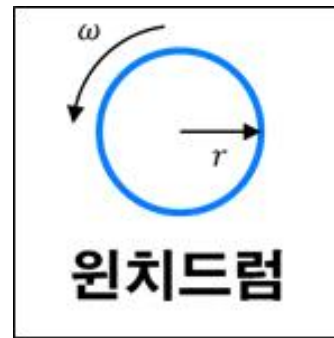


그림 1. 윈치 드럼의 개략도
Figure 1. Schematic diagram of winch drum

여기에 윈치드럼은 힘에 고정되어 함께 움직인다. 이는 윈치드럼이 지구고정좌표계를 기준에서 힘의 속도로 움직이고 있다는 의미이다. 그렇기 때문에 윈치드럼에서 예인케이블이 조출 되는 속도는 지구고정좌표계에서 함속과 윈치드럼속도의 상대속도로 정의하여야 한다.

위에 정의된 사항들로부터 윈치드럼에 권선 저장되어 있던 예인케이블이 조출 되는 현상을 Fig. 2와 같다. Fig. 2를 설명하자면 다음과 같다. 먼저 윈치드럼이 s_{old} 위치에 있다고 가정한다. 이 때 함속과 윈치드럼속도의 상대속도인 v_{winch} 로 케이블이 예인 된다면 Δt 초가 흐른 뒤에는 윈치드럼의 위치가 $s_{\neq w}$ 로 변하게 된다. 그렇게 되면 윈치드럼으로부터 가장 가깝게 위치한 유한요소 Ω_0 의 길이가 $r\omega\Delta t$ 만큼 길어지게 된다. 조출을 모델링하는 것의 의미는 유한요소의 길이가 시간에 따라 변화하는 현상을 효과적으로 표현하기 위한 방법을 찾는 것이라고 할 수 있다.

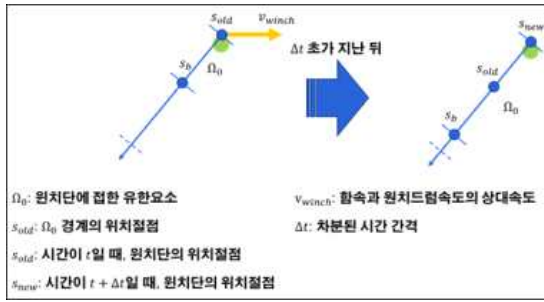


그림 2. 케이블 감기 운동의 개략도
 Figure 2. Schematic Diagram of Winch Drum

2) 절점위치유한요소법을 이용한 케이블 모델링

본 절은 절점위치유한요소법을 이용하여 어떻게 케이블이 모델링 되었는지 확인하고자 한다. 앞서 서론에서 서술한 바와 같이 절점위치유한요소법은 오직 외력에 의한 인장변형만을 고려하여 케이블의 거동을 표현한다. 이는 굽힘, 비틀림, 전단 변형은 무시되었다는 의미이다. 이러한 가정은 직진 예인을 하거나 선회 반경을 크게 예인 하는 경우에는 유효하다고 할 수 있다.

외력이 작용하였을 때 절점위치유한요소법으로 모델링 된 케이블의 어떻게 거동하는지를 Fig. 3을 통하여 나타내었다. Fig. 3을 설명하자면 다음과 같다. 수직 방향으로 정렬되어 있는 케이블에 외력이 작용한다. 케이블 거동이 정상상태에 도달하게 되면 외력이 작용하는 방향과 평행하게 케이블이 정렬하게 된다. 그리고 외력은 케이블을 축 방향으로 변형시키는데 쓰이게 된다.

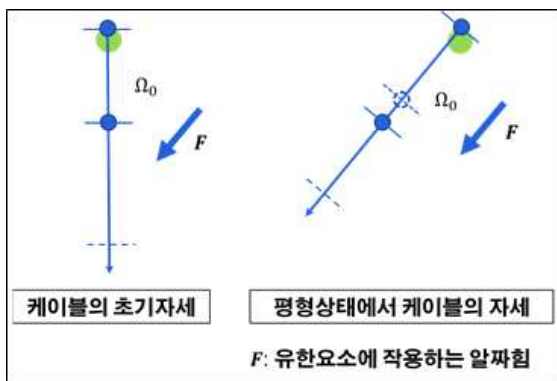


그림 3. 수중 케이블의 평형 상태
 Figure 3. Equilibrium state of underwater cable

정상상태에 이른 케이블을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M_{CB}\ddot{X}_e + K_{CB}X_e = F_{CB}$$

where $M_{CB} = M + M_a$, $K_{CB} = K$, $F_{CB} = F_k + F_a - F_d + F_{bg}$

위 방정식에서 M_{CB} 는 케이블의 질량과 부가질량을 더하여 나타낸 질량행렬이며, K_{CB} 는 외력에 의한 변형을 결정하는 강성행렬이며, F_{CB} 는 케이블에 작용하는 외력이다. 그리고 \ddot{X}_e 은 케이블 요소의 가속도, X_e 는 케이블 요소의 위치이다. X_e 는 지구고정좌표계에서 다음과 같이 정의한다.

$$X_e = [X_p^i, X_p^{i+1}]^T = [X_1 Y_1 Z_1 X_2 Y_2 Z_2]^T$$

여기에서 X_p^i 와 X_p^{i+1} 는 Fig. 4에서 보이는 것과 같이 1차원 케이블 요소를 정의하는 절점의 위치이다.

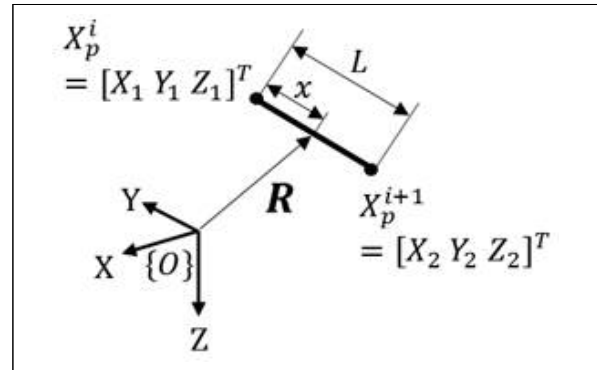


그림 4. 차원 케이블 요소
 Figure 4. dimensional cable element

X_p^i 와 X_p^{i+1} 로 정의된 유한요소 내의 위치는 R 이며 정의는 다음과 같다.

$$R = NX_e$$

where $N = \begin{bmatrix} 1-\xi & 0 & 0 & \xi & 0 & 0 \\ 0 & 1-\xi & 0 & 0 & \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1-\xi & 0 & 0 & \xi \end{bmatrix}$; shape function

R 을 시간에 대하여 미분한 유한요소 내의 속도 v 는 다음과 같이 정의된다.

$$v = \dot{R} = N\dot{X}_e$$

v 를 다시 한번 시간에 대하여 미분한 유한요소 내의 가속도 a 는 다음과 같이 정의된다.

$$a = \ddot{R} = N\ddot{X}_e$$

형상함수 N 은 ξ 에 의하여 매개변수화 되어 있다. ξ 는 유한요소의 길이 L 로 무차원화된 변수로 케이블의 물체고정좌표계에서 다음과 같이 정의된다.

$$\xi = x/L$$

ξ 는 X_p^i 에서 값이 0이 되고 X_p^{i+1} 에서 값이 1이 되도록 정의되어 있다. L 은 $X_p^{i+1} - X_p^i$ 의 L2 norm으로 정의하며 다음과 같다.

$$L = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}$$

축 방향 변형률 ϵ_x 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{L}{L_0} - 1$$

여기에서 L_0 는 변형이 일어나지 않은 유한요소의 길이이다. ϵ_x 는 케이블의 물체고정좌표계에서 정의된다. ϵ_x 를 지구고정좌표계에서 물체고정좌표계로의 변환을 수행하는 좌표 변환 행렬 Q 를 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\epsilon_x = B_0 Q X_e - 1 = B X_e - 1$$

$$\text{where } B = B_0 Q;$$

$$B_0 = \left[-\frac{1}{L_0}, 0, 0, \frac{1}{L_0}, 0, 0 \right];$$

$$Q = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ & & & \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

ϵ_x 을 이용하여 유한요소에 작용하는 변형에너지는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EA \epsilon_x^2 dx$$

여기에서 E 는 영률이고, A 는 유한요소의 단면적이다. 위의 식을 적분하여 X_e 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2} X_e^T K X_e - X_e^T F_k + \frac{1}{2} EAL$$

위의 식을 통하여 강성행렬 K 와 외력 F_k 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K = EALB^T B = Q^T K_0 Q$$

$$F_k = EALB^T = EALQ^T B_0$$

$$\text{where } K_0 = EALB_0^T B_0$$

K 와 F_k 는 변환행렬 Q 에 의하여 결정되는데는 유한요소의 위치와 시간에 대하여 함수 관계를 가진다. 그렇기 때문에 K 와 F_k 는 유한요소의 위치에 대하여 비선형성을 가지고 시간의 흐름에 의존한다. 이는 유한요소의 대변형 운동을 절점위치유한요소법에서 표현가능하게 한다. 참고로 기존의 유한요소법의 경우, 변형률이 0에 가깝다고 가정하여 강성행렬을 정의하며 그 값을 K_0 와 같다.

유한요소에 작용하는 운동에너지는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \dot{R} \cdot \dot{R} dx$$

여기에서 ρ 는 케이블의 밀도이다. 위의 식을 적분하여 \dot{X}_e 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{X}_e^T M \dot{X}_e$$

위의 식을 통하여 질량행렬 M 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} & 2I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

유한요소 주위 유체에 의한 부가질량은 유한요소로부터 수직인 방향으로만 작용한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_a = -C_m \rho_f A \dot{V}_n$$

$$\text{where } V_n = V - V_t, V_t = k_0 \cdot V$$

여기에서 f_a 는 부가질량에 의한 관성력, C_m 은 부가질량 계수, ρ_f 는 유체의 밀도이다. f_a 를 유한요소에 대하여 적분하여 부가질량 행렬 M_a 와 부가질량에 의한 관성력 F_a 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M_a = \frac{C_m \rho_f AL}{6} \left(\begin{bmatrix} 2I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} & 2I_{3 \times 3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2m_0 & m_0 \\ m_0 & 2m_0 \end{bmatrix} \right)$$

$$F_a = -\frac{C_m \rho_f AL}{6} \begin{bmatrix} 2m_0 & m_0 \\ m_0 & 2m_0 \end{bmatrix} \dot{V}$$

유한요소에 작용하는 항력은 유한요소의 속도 V 의하여 결정된다. 항력은 V 의 크기가 작을 때 Fig. 5와 같이 수직분력과 수평분력으로 나눌 수 있다.

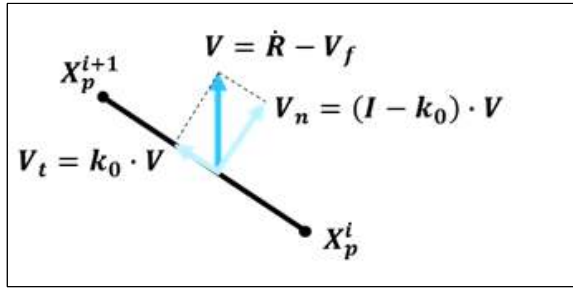


그림 5. 케이블 요소에 작용하는 상대 속도
 Figure 5. Relative velocity acting on cable element

유한요소에 작용하는 항력을 물체고정좌표계에서 아래의 식과 같이 모델링 한다.

$$f_d = \frac{\rho_f D}{2} V^2 \left[-C_{dt}(\alpha) \frac{V_t}{|V_t|} - C_{dn}(\alpha) \frac{V_n}{|V_n|} \ 0 \right]^T$$

여기에서 $C_{dt}(\alpha)$ 는 수평방향으로 작용하는 항력의 계수, $C_{dn}(\alpha)$ 는 수직방향으로 작용하는 항력의 계수, D 는 케이블 단면의 지름이다. 좌표변환행렬 T 를 이용하여 항력을 지구고정좌표계에서 정의하면 다음과 같다.

$$F_d = T f_d^e$$

where $T = \begin{bmatrix} T_0 & 0 \\ 0 & T_0 \end{bmatrix}$, $T_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos \alpha_x & \cos \beta_x \\ \cos \theta_y & \cos \alpha_y & \cos \beta_y \\ \cos \theta_z & \cos \alpha_z & \cos \beta_z \end{bmatrix}$

유한요소에 작용하는 유효하중은 다음과 같이 정의한다.

$$F_{bg} = \frac{LA(\rho - \rho_f)g}{2} [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

위 정식화 과정에서 조출에 의한 영향을 받는 인수는 외력이 작용하지 않았을 때의 케이블 길이 L_0 이다. 따라서 절점위치유한요소법을 기반으로 조출 거동을 모델링 하려면 L_0 를 시간의 함수로 표현하여야 한다.

2) 조출모델링

앞서 조출 모델링은 L_0 의 크기가 시간의 흐름에 따라 변화하는 현상의 모델링이라는 사실을 확인하였다. L_0 의 크기가 시간의 흐름에 따라 변화하는 현상은 Fig. 4와 같이 1차원 공간 상에서 정의할 수 있다. Fig. 6를 설명하자면 다음과 같다. 먼저 윈치드럼이 s_{old} 위치에 있다고 가정하였다. 이 때 윈치드럼이 $r\omega$ 의 속력으로 조출한다면 Δt 초가 흐른 뒤에는 윈치드럼의 위

치가 s_{new} 로 변하게 된다. 이 때 조출된 케이블의 길이는 $r\omega\Delta t$ 이다.

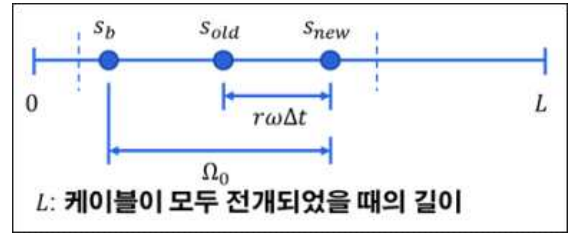


그림 6. 케이블 감기 모델링
 Figure 6. Cable winding modeling

조출이 진행되어 갈수록 유한요소 Ω_0 의 길이는 점차 늘어나게 된다. 그런데 보다 정확한 수치해를 얻으려면 유한요소의 길이를 제한할 필요가 있다. 이는 격자 수렴성 수치해석을 통하여 확인가능하다. Fig. 7는 같은 예인 조건을 적용하고 단지 케이블을 공간 상에서 차분한 유한요소의 길이를 변화하였을 때 예측된 케이블의 심도를 보여주고 있다. 조건 별 유한요소의 길이는 Table 1을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 7를 보면 심도 예측 결과가 Case 4와 Case 5에서는 수렴되었음을 확인할 수 있다. 이는 조출 모델링을 적용하여 늘어난 유한요소의 길이가 Case 4에서의 유한요소의 길이 이상 길어진다면 신뢰하기 어려운 수치해석 결과를 도출할 수 있음을 의미한다.

그래서 유한요소의 길이가 일정 길이를 넘어서게 되면 새로운 유한요소를 추가하는 절차가 추가된다. Fig. 8은 새로운 유한요소를 추가하는 절차에 대한 개념도이다. Fig. 8을 설명하자면 다음과 같다. 먼저 Δt 초동안 조출이 되었을 때의 유한요소의 길이를 계산한다. 그리고 그 길이가 유한요소 길이의 최댓값인 L_{max} 을 넘는다면 새로운 유한요소를 추가한다.

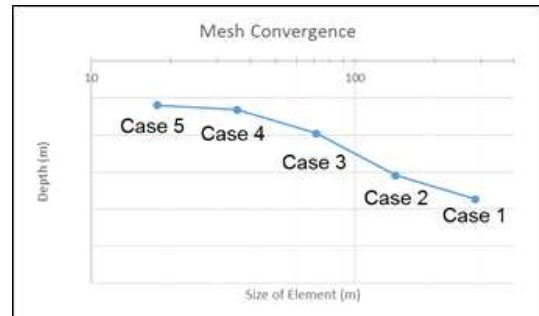


그림 7. 요소 크기 수렴 테스트
 Figure 7. Element size convergence test

표 1. 수렴 테스트를 위한 요소 크기
Table 1. Element size for convergence test

구분	유한요소의 길이 [m]
Case 1	285
Case 2	143
Case 3	71
Case 4	36
Case 5	18

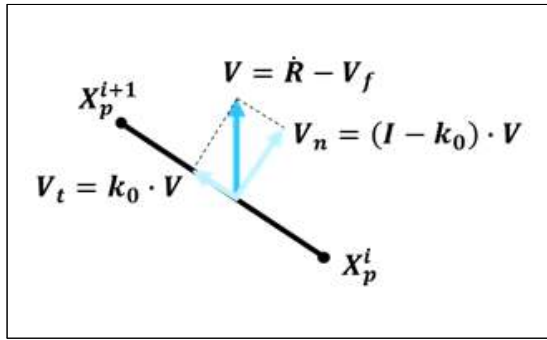


그림 8. 유한 요소 h-세분화
Figure 8. Finite element h-refinement

최종적으로 완성된 조출 모델링은 다음과 같다. 먼저 조출 모델링을 수행하기 위하여 윈치드럼이 초당 예인케이블을 조출하는 양 v_{winch} , 수치해석의 시간차분 간격 Δt , 현재의 윈치드럼의 1차원 공간 상의 위치 s_{old} , 유한요소 길이의 최대값 L_{max} , 현재 유한요소의 개수 i , 유한요소의 경계절점 위 1차원 공간 상의 위치 s_b 의 정의가 필요하다.

정의된 수치를 이용하여 Δt 초가 지난 뒤의 윈치드럼의 1차원 공간 상의 위치를 계산한다. 그리고 갱신된 윈치드럼의 위치를 이용하여 유한요소의 길이를 계산한다. 만약 유한요소의 길이가 정의된 최대값을 초과할 경우, 새로운 유한요소를 추가한다.

위의 조출 모델링 과정을 아래와 같이 의사코드(pseudo code)로 정리한다.

III. 수치해석 결과

검증을 위하여 수행한 수치해석 결과에 대하여 설명한다. 먼저 조출 모델링이 포함되지 않았을 때 직진 예인 해석을 수행한 결과를 설명한다.[9-15] 수치해석 결과는 해상 시험 결과와 비교하여 수치해석의 정확성을 확인한다. 다음으로 조출 모델링이 포함되었을 때 직진 예인 해석을 수행한 결과에 대하여 설명한다. 수치 해

```

algorithm winch_modeling is
input: winch speed  $v_{winch}$ ,
      time step size  $\Delta t$ ,
      position of winch  $s_{old}$ ,
      maximum length of element  $L_{max}$ ,
      element index  $i$ ,
      position of element boundary node  $s_b$ 
output: length of element  $L$ 

 $s := s_{old} + v_{winch} \Delta t$             $s_{new}$ 의 위치 갱신
 $L(i) := s - s_b$                         $L(i)$ 의 크기 계산
if  $L(i) > L_{max}$ 
     $s_b = s_b + L_{max}$ 
     $L(i+1) := L(i) - L_{max}$ 
     $L(i) := L_{max}$ 
     $i = i + 1$ 
return  $L$ 
    
```

석 결과 비교를 통해 조출 모델링으로 인하여 오차가 발생되는지 확인한다.

동시 직진 예인 해석에 사용된 LFPA와 MFTA의 구성은 Fig. 9-10과 같다. LFPA의 경우, Faired 케이블과 Bare 케이블로 구성되어 있다. MFTA의 경우, 배열 센서, 중량 케이블, 경량 케이블, 그리고 테일 로프로 구성되어 있다.

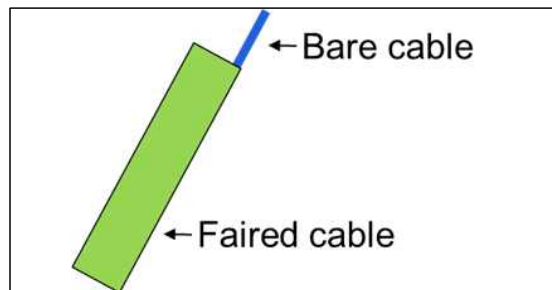


그림 9. LFPA 시스템의 개략도
Figure 9. Schematic diagram of LFPA system

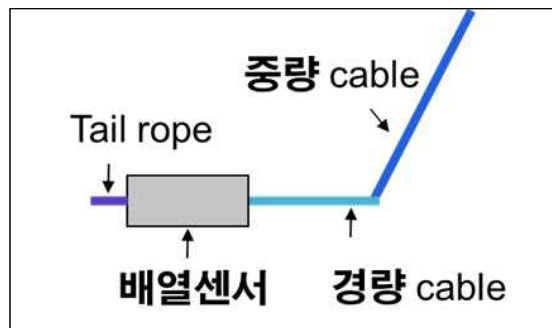


그림 10. MFTA 시스템의 개략도
Figure 10. Schematic diagram of MFTA system

1. 절점위치유한요소법의 검증

조출 모델링을 포함하지 않았을 때 예인케이블 자세의 정확성을 수치해석을 통하여 확인한다. 정확성은 다음의 절차를 통하여 확인한다. 먼저 LFPA와 MFTA의 직진 예인 해석을 통하여 체계의 심도 예측 값을 획득한다. 그런 다음 해상시험을 통하여 계측된 체계의 심도와 비교한다.

수치해석에 사용된 계산 조건은 다음과 같다. 예인 시나리오는 직진 예인이다. 그리고 케이블 길이는 해상 시험에서 실시되었던 조건을 이용한다. LFPA의 예인 속력은 해상시험에서 실시되었던 조건을 이용하고, MFTA의 예인 속력은 해상시험에서 실시되었던 조건과 유사한 조건을 이용한다.

Fig. 11은 수치해석에서 예측된 LFPA 심도와 해상 시험에서 계측된 LFPA 심도의 비교이다. 여기에서 L_1이 가장 짧은 길이 조건이고 L_3가 가장 긴 길이 조건이다. Fig. 11를 보면 예인케이블의 길이가 길고 예인 속력이 빠를수록 심도 차이가 줄어들어 가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 직진 예인이 종료된 시점에서 측면에서 바라본 LFPA 예인케이블의 자세이다. Fig. 12를 보면 예인케이블에 부착되어 있는 체계의 하중으로 인하여 끝 단 근처에 굽힘이 발생되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 13은 수치해석에서 예측된 MFTA 심도와 해상시험에서 계측된 MFTA 심도의 비교이다. Fig. 13을 보면 L_1 길이 조건에서 예인 속력 변화에 따른 MFTA 심도 변화 추세를 수치해석이 잘 포착하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 14는 직진 예인이 종료된 시점에서 측면에서 바라본 MFTA 예인케이블의 자세이다. Fig. 14를 보면 케이블의 끝단이 수평을 이루는

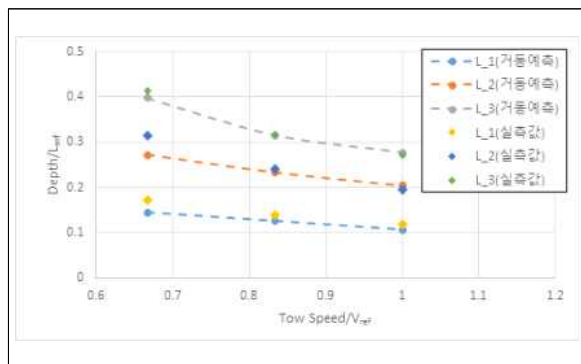


그림 11. 수치 결과와 해상 실험 데이터(LFPA)의 깊이 비교
 Figure 11. Depth comparison between Numerical result and Sea experiment data(LFPA)

것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 경량케이블, 배열 센서, Tail Rope의 밀도가 해수의 밀도와 같기 때문에 일어난다.

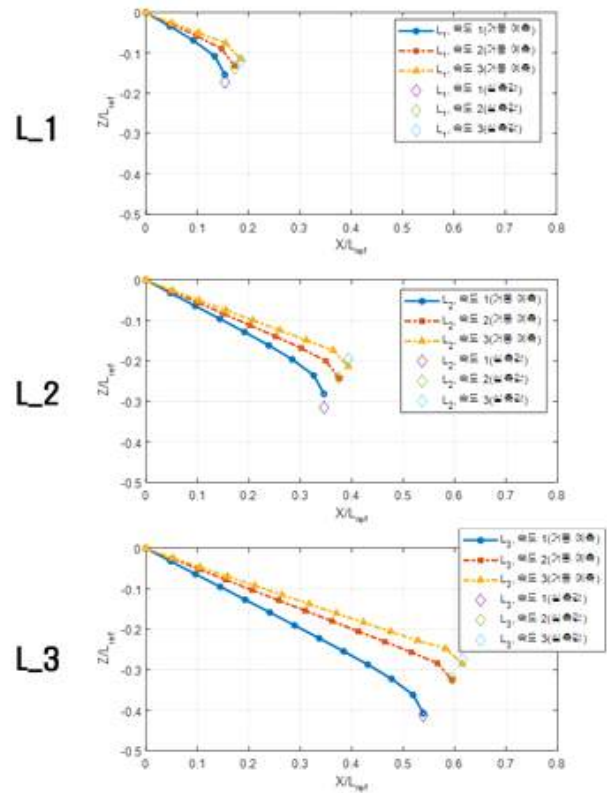


그림 12. 수치 결과와 해상 실험 데이터(LFPA, 측면도)의 깊이 비교
 Figure 12. Depth comparison between Numerical result and Sea experiment data(LFPA, Side view)

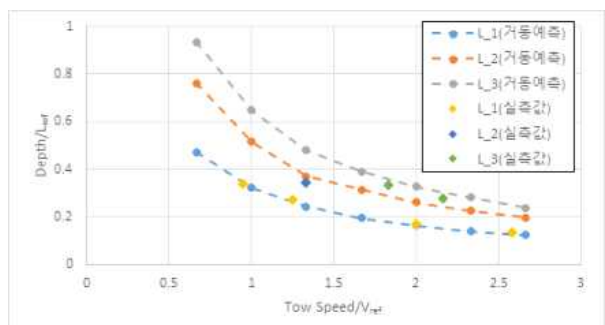


그림 13. 수치 결과와 해상 실험 데이터(MFTA)의 깊이 비교
 Figure 13. Depth comparison between Numerical result and Sea experiment data(MFTA)

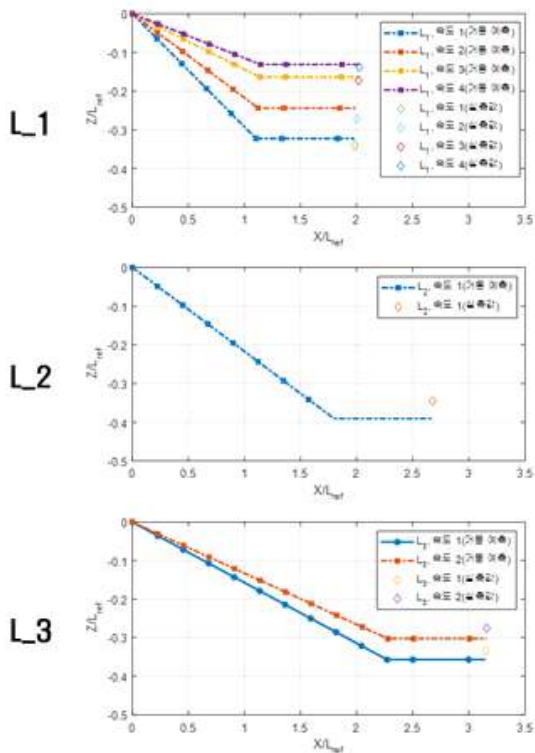


그림 14. 수치 결과와 해상 실험 데이터(MFTA, 측면도)의 깊이 비교

Figure 14. Depth comparison between Numerical result and Sea experiment data(MFTA, Side view)

2. 조출 모델링의 검증

조출 모델링을 추가하여 수행한 수치해석을 통하여 모델링을 검증한다. 수치해석은 다음과 같은 절차를 따라 수행한다. 먼저 조출 모델링이 없는 상태에서 LFPA와 MFTA 동시 직진 예인 해석을 수행한다. 그런 다음 조출 모델링을 포함한 상태에서 LFPA와 MFTA 동시 직진 예인 해석을 수행한다. 그리고 두 가지 해석을 통하여 예측된 심도 예측 치가 동일한지를 비교하여 조출 모델링을 추가함으로써 인하여 수치적 오차가 발생하는지를 확인한다.

수치해석에 사용된 조건은 Table 2와 같다. 먼저 예인 속력은 15 kts, 예인 시간은 2,000 초, 윈치드럼의 속력은 1 m/s 이다. 그리고 해상상태는 파가 존재하지 않는 정수이다.

표 2. 수치 테스트를 위한 입력 매개변수
Table 2. Input parameters for numerical test

항목	함속 [kts]
입력 값	15

수치해석의 결과는 Fig. 15와 Table 3과 같다. 수치 해석 결과를 보면 조출 모델링이 있었을 때의 심도 예측 결과와 없었을 때의 심도 예측 결과가 동일한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그리고 조출 모델링을 추가할 경우, 계산에 쓰인 시간이 조출 거동 모델링이 없을 때에 비하여 절반가량 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 조출 거동 모델링을 추가하여 수치해석을 수행할 경우, 초기에는 수치해석의 자유도가 작게 시작하였다가 케이블이 조출 되면서 수치해석의 자유도가 증가하도록 설계되었기 때문이다.

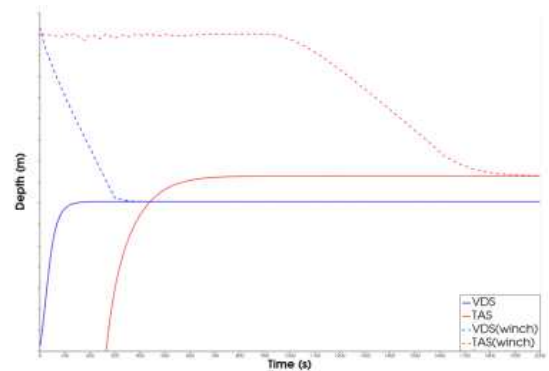


그림 15. 케이블 감기 모델링 유무에 따른 깊이 비교

Figure 15. Comparison of depth w/wo cable winding modeling

표 3. 수치 테스트를 위한 입력 매개변수

Table 3. Input parameters for numerical test

항목	조출 거동 모델링 X
계산시간 [초]	571

IV. 결 론

본 논문은 함정에 의하여 예인 되는 케이블의 조출 거동을 수치적으로 예측하기 위한 모델링을 고안했다. 조출은 수중 케이블의 거동이 축하중에만 영향을 받는다고 가정했다. 예인 케이블은 대변형을 동반하는 수중 케이블 거동 예측에 적합한 절점위치유한요소법(Nodal Position Finite Element Method)으로 이산화했다. 2장을 통하여 조출 거동 해석을 위하여 새롭게 개발한 모델링에 대하여 설명했으며, 조출이 일어나는 과정을 설명하고, 이러한 현상을 절점위치 유한요소법과 융합되도록 어떻게 모델링할 것인지를 설명했다. 그리고 3장에는 새롭게 개발된 조출 모델링을 검증하기 위한 수치해석 방법과 그 결과를 설명했다. 먼저 조출 모델링

이 포함되지 않은 수치기법에 대한 검증을 수행했다. 그 결과 절점위치 유한요소법을 이용하여 예측한 LFPA와 MFTA의 심도가 해상시험을 통하여 계측된 심도와 유사하다는 사실을 확인했다. 그런 다음 조출 모델링을 포함한 상태에서 LFPA와 MFTA 동시 직진 예인 해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 보면 조출 모델링이 있었을 때의 심도예측 결과와 없었을 때의 심도예측 결과가 동일한 값을 나타내는 것을 확인했다. 이를 통하여 조출 모델링을 추가함으로 인하여 수치적 오차가 발생하지 않는다는 사실을 확인했다.

조출 모델링을 추가함으로 인하여 실제 함에 설치되어 있는 체계와 보다 유사한 환경에서 수치해석을 수행가능하게 되었다. 그리고 기존의 수치기법에 비하여 해석하는데 필요한 시간이 저감 되었음을 확인했다. 새롭게 개발된 수치기법은 함정이 예인하는 수중 케이블의 거동을 예측하는데 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] Lee, E., et al. "Nonlinear Analysis of Underwater Towed Cable Using Robust Nodal Position Finite Element Method." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 53, no. 5, 2016, pp. 388-399.
- [2] Sun, F. J., Z. H. Zhu, and M. LaRosa. "Dynamic Modeling of Cable Towed Body Using Nodal Position Finite Element Method." *Ocean Engineering*, vol. 28, no. 4, 2011, pp. 519-718.
- [3] Sun, F. J. *Elastodynamic Analysis of Towed Cable Systems by a Novel Nodal Position Finite Element Method*. M.S. Thesis, York University, 2009.
- [4] Zhu, Z. H. "Dynamic Modeling of Cable System Using a New Nodal Position Finite Element Method." *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, vol. 26, 2010, pp. 692-704.
- [5] Sun, F. J. *Elastodynamic Analysis of Towed Cable Systems by a Novel Nodal Position Finite Element Method*. Master Thesis, York University, 2010.
- [6] Cottrell, J. A., T. J. R. Hughes, and Y. Bazileves. *Isogeometric Analysis*. John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [7] Go, G., E. Lee, and H. Ahn. "3D Nonlinear Fully Coupled Simulation of Cable and Tow-Fish System." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 30, no. 6, 2016, pp. 458-467.
- [8] Go, G., et al. "6DOF Simulation and Determination of Hydrodynamic Derivatives of Underwater Tow-Fish Using CFD." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 4, 2016, pp. 315-328.
- [9] Park, J. M., and N. W. Kim. "Dynamic Modeling of a Semi-Submersible Autonomous Underwater Vehicle with a Towfish Towed by Cable." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 7, no. 2, 2015, pp. 409-425.
- [10] Newman, J. N. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, 1977.
- [11] Bhattacharyya, S. K., C. P. Vendhan, and K. Sudarsan. "The Finite Element Method for Hydroelastic Instability of Underwater Towed Cylindrical Structures." *International Journal of Solids and Structures*, vol. 237, no. 1, 2000, pp. 119-143.
- [12] Gobat, J. I., and M. A. Grosenbaugh. "Time-Domain Numerical Simulation of Ocean Cable Structures." *Ocean Engineering*, vol. 33, 2006, pp. 1373-1400.
- [13] Hover, F. S., M. A. Grosenbaugh, and M. S. Triantafyllou. "Calculation of Dynamic Motions and Tensions in Towed Underwater Cables." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 19, no. 3, 1994, pp. 449-457.
- [14] Howell, C. T. *Investigation of the Dynamics of Low-Tension Cables*. Ph.D. Thesis, Woods Hole Oceanographic Institution.
- [15] Fossen, T. I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons Ltd., 1994.