

심해 잠수정 연결케이블의 안전성 평가에 관한 연구

노인식* · 최병기** · 이종무***

*충남대학교 선박해양공학과

**한국선급

***한국해양연구원

The Safety Assessment of the Connecting Cable in Deep Water Unmanned Underwater Vehicle

IN-SIK NHO*, BYOUNG-GY CHOI** AND JONG-MOO LEE***

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

**Korean Register of Shipping, Daejeon, Korea

***Korea Ocean Research & Development Institute, Daejeon, Korea

KEY WORDS: UUV(Advanced unmanned underwater vehicle) 무인잠수정, Umbilical cable 1차케이블, Snapping 스내핑, Impact load 충격하중, Nonlinear dynamic analysis 비선형 동적해석, Newmark- β method, Safety assessment 안전성 평가

ABSTRACT: In this study, the dynamic response of the umbilical cable in a deep-water unmanned underwater vehicle system was analyzed. In order to analyze the forces acting on the cable, the launcher and umbilical cable were modeled by the simple 1-D mass-spring system. Damping and dynamic analysis was carried out by a direct time integration scheme using the Newmark- β method with inverse iteration procedure, considering the nonlinear drag forces acting on the launcher. The obtained results of the present study can be used for the design of connecting the structure of the launcher and cable of the UUV system.

1. 서 론

심해용 무인잠수정(UUV, unmanned underwater vehicle) 시스템의 설계에 있어, 시스템을 구성하고 있는 전체 장비, 1차 및 2차 케이블 등에 대한 정적 및 동적 특성은 시스템의 구조 설계에 충분히 반영되어야 하며, 특히 무인잠수정의 안전성을 크게 좌우하는 연결 케이블에 의한 수중진수장치(Launcher, 해누비)의 동적 하중 특성은 정확히 파악되어야 한다(박한일, 2005). 최근 일본이 자랑하던 심해용 무인잠수정 KAIKO의 분실 사고는 우리에게도 하나의 교훈으로서 큰 의미가 있다.

따라서, 본 연구는 차세대 심해(6,000m) 무인 잠수정의 수중진수장치(Launcher, 해누비) 및 ROV(Remotely operated underwater vehicle, 해미래) 운용 상 발생할 수 있는 시스템의 여러 동적 특성 중에서 아직 정확히 검토되지 않은 1차 케이블의 급격한 하중전달(Snapping)에 의해 발생하는 충격하중에 대한 수중진수장치의 동적 거동특성을 이해하고, 1차 케이블에 걸리는 힘을 추정하는데 그 목적이 있다(정태환 등, 2004).

실제 Snapping 현상을 정확히 예측하기 위해서는 매우 복잡한 해석절차를 거쳐야 하나 본고에서는 케이블의 거동을 1차 유도 운동으로 간단하게 이상화함으로써 비교적 단순하고 명

쾌한 해석 모델을 제시하였다. 우선 1차 케이블 및 수중진수장치를 포함하는 전체 시스템을 단순한 1차원 질량-스프링-감쇠계로 이상화하고 이를 시간영역 직접적분 기법(Newmark- β 법)을 적용하여 해석하였다. 해석 결과를 분석하여 시스템의 구조적 안전성을 검토함으로써 케이블 연결부의 구조 안전성을 확인하는 한편, 나아가 임의 해상 상태에서 작업의 진행 여부를 판단하는 기준을 마련하는데 기여하고자 한다.

2. 수중진수장치 연결 케이블의 Snapping 해석

현재 개발 완료 단계에 있는 차세대 심해용 무인잠수정은 ROV의 과도한 표류방지와 심도 및 위치 유지력의 향상을 위하여 Fig. 1에 보이는 바와 같이 무게 중심추 역할을 하는 수중진수장치를 선체와 1차 케이블로 연결하고 이로부터 중성부력을 갖는 ROV를 2차케이블로 연결하여 각각 따로 진수하는 운용방식을 채택하고 있다 (이판목, 2003). 이러한 운용방식 하에서, 1차 케이블은 수중에서의 자신의 자중과 하단에 연결된 수중진수장치의 중량으로 인해 상대적으로 큰 장력이 작용하게 되며, 주로 지원 모선의 운동 및 해상의 파랑, 조류 등에 의해 영향을 받게 된다. 그러나 본 연구에서는 잠수정의 작업 영역이 심해임을 감안하여 조류나 모선의 표류에 의한 수중장치의 수평 방향 운동 효과를 무시하고 수직 방향으로 1차원적인 거동만 하는 것으로 간주하여 간단한 해석 모델을 제안하

교신저자 노인식 : 대전광역시 유성구 궁동 충남대학교

042-821-6622 isnho@cnu.ac.kr

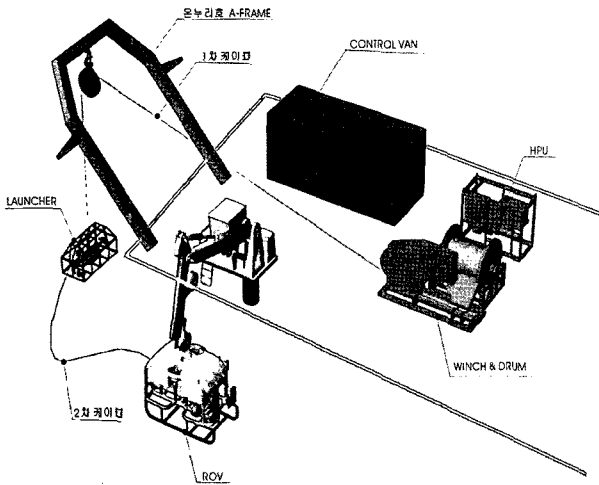


Fig. 1 Operation concept of UUV system

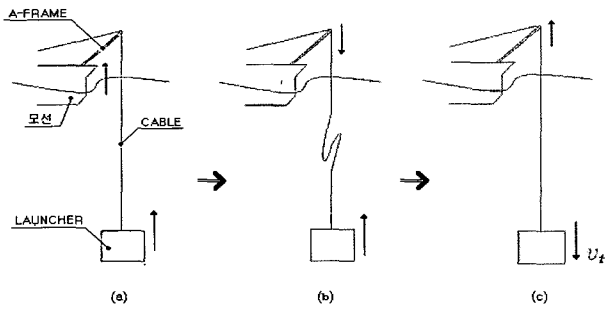


Fig. 2 Definition of the system

고 이 모델을 이용하여 여러 가지 시나리오에 대한 계산을 수행하였다.

2.1 케이블의 충격하중 작용 시나리오

수중진수장치 및 케이블의 구조적 안전성을 검토하기 위해서는 케이블에 걸리는 최대 인장력을 계산하여야 하며, 수중진수장치와 모선의 상대 운동에 대해서 최대 인장력이 작용하는 조건을 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가정하였다.

(1) 모선은 Heave와 Pitch가 연성된 단순 조화운동을 하며, 이때 winch 및 drum은 작동되지 않는 상태로 가정한다.

(2) 수중진수장치 및 케이블의 운동 역시 조류나 파랑의 영향으로 인한 수평방향 운동 성분을 무시하고 1자유도 수직 운동만 하는 것으로 간주하였다.

(3) 처음에 같이 위 방향으로 운동(Fig. 2 (a)) 하던 모선과 수중진수장치는 모선의 운동이 정점에 이르면 하강 운동을 시작함에 따라 서로 반대 방향의 운동을 하게 되고, 이때 연결 케이블은 압축상태가 되어 걸리는 힘은 영이 된다.(Fig. 2 (b))

(4) Fig. 2 (c)에서 보는 바와 같이 그 이후 수중진수장치는 다시 하강운동(자유 낙하)을 하게 되고, 모선 역시 상 방향 운

동으로 전환하게 된다. 따라서 두 지점이 서로 반대방향으로 운동함으로써 어느 순간 케이블이 팽팽해지면서 케이블의 인장력은 0에서 급격한 충격력으로 전환되는 Snapping 현상이 발생하게 되고, 이때 최대 인장력이 걸리게 될 것으로 판단된다.

2.2 시스템에 작용하는 하중 성분

전체 시스템이 놓인 작업 환경에 따라 시스템은 자체의 자중과 부력을 가지게 되고, 또한 해양 환경에 의해서 동유체력을 받게 된다. 시스템 자체의 운동과 유체입자의 상대속도를 고려하는 경우 작용 유체력 F 를 다음과 같이 Morison 식으로부터 추정할 수 있다 (Newmann, 1977); (Randall, 1997).

$$F = F_m + F_D \tag{1}$$

$$F_m = \rho Va + \rho C_m V_R a_r \tag{2}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v_r |v_r| A \tag{3}$$

여기서, F_m : Inertia force, F_D : Drag force

ρ : Mass density of sea water, A : Projected area

V : Volume per unit length

V_R : A reference volume (total or sectional)

v_r : Relative velocity

a : Particle acceleration, a_r : Relative acceleration

Morison 식의 사용 시에는 유체입자의 상대속도와 Added mass coefficient(C_m) 및 Drag coefficient(C_D)의 값을 정확히 추정 하는 것이 가장 중요한데, 본 문제에 있어서는 시스템의 작업 환경이 수심 2,000m에서 6,000m까지의 심해임을 감안하여 Wave 및 조류에 의한 영향의 거의 없을 것으로 간주함으로써 유체입자 자체의 속도는 무시하였고, 수중진수장치의 C_m 및 C_D 의 값은 DnV(2000)에서 제시한 추정공식을 적용하였다.

2.3 시스템 운동방정식 및 케이블에 걸리는 힘

전체 시스템은 2.1절의 가정 및 2.3절의 등가질량의 개념을 도입하여 Fig. 3과 같이, 모선의 운동을 조화운동으로 표현한 기초 가진 1자유도 스프링-질량-감쇠계로 나타낼 수 있으며, 케이블에 걸리는 힘을 계산하기 위하여 가상의 점 (c)와 수중진수장치와 케이블의 연결부, Point (a) 및 지원 모선과 케이블의 연결부, Point (b)를 설정하였다.

2.3.1 시스템 운동방정식

시스템의 운동방정식은 케이블의 구조적 특성 및 그 작업 환경 하에서 작용하는 유체점성항력에 의해 비선형적 성격을 갖게 되며, 이러한 특성에 따라 다음의 두 가지 상태를 고려할 수 있다.

(1) 케이블에 인장(Tension)이 작용하는 경우

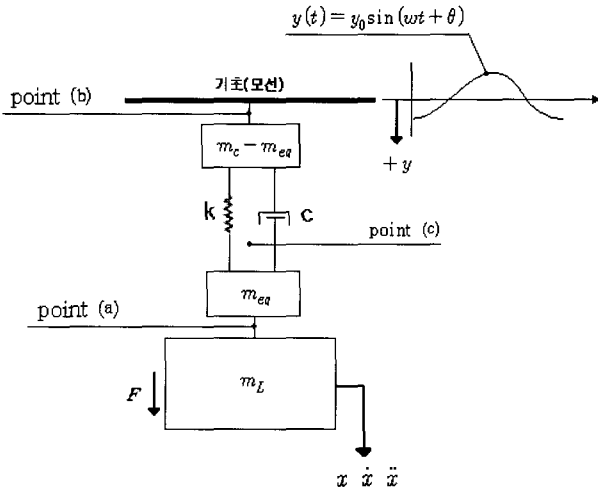


Fig. 3 Idealized 1 D.O.F. system

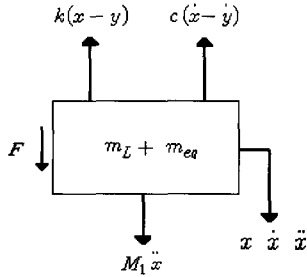


Fig. 4 Free body diagram under cable tension

케이블에 인장이 작용하는 경우, 수중진수장치에 대한 자유 물체도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 되고 시스템의 운동방정식은 2.2절의 정하중 및 동유체력을 고려하면 (4)식과 같이 얻을 수 있다 (김용철 등, 1986).

$$M_1 \ddot{x} + C(\dot{x} - \dot{y}) + K(x - y) = F \quad (4)$$

(가) 질량, M_1

계(시스템)의 질량 M_1 은 공기 중의 수중진수장치의 질량 및 케이블 등가질량의 합 \bar{M}_1 과 동유체력에 기인하는 부가질량 M_a 의 합으로 나타난다.

$$M_1 = \bar{M}_1 + M_a = m_L + m_{eq} + \rho C_m V_R \times a \quad (5)$$

(나) 강성, K

케이블의 강성 K는 케이블을 축 하중을 받는 균일 단면 봉으로 가정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \frac{EA_C}{L} \quad (6)$$

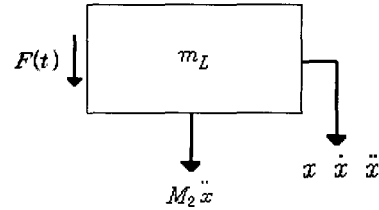


Fig. 5 Free body diagram without cable tension

(다) 감쇠, C

감쇠 C는 감쇠비 ζ 에 따라 다음과 같은 식으로 주어진다. 일반적인 구조물에서 감쇠비 ζ 는 0.01~0.05의 값을 보이거나, 본 문제에서는 유체감쇠가 크기 때문에 무시할 수 있는 정도이다.

$$C = 2\sqrt{M_1 K} \times \zeta \quad (7)$$

(라) 비선형 하중, F

하중은 정적 하중 F_{st} 와 시간 의존적인 동적 하중 $F_w(t)$ 로 분류되며 (3)식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_{st} - F_w(t) \quad (8)$$

$$F_w(t) = \frac{1}{2} \rho C_D \dot{x} | \dot{x} | A \quad (9)$$

(2) 케이블에 인장이 작용하지 않는 경우

Fig. 2 (b)에서와 같이 케이블에 인장이 작용하지 않는 경우, 시스템의 운동방정식은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 케이블로 인한 힘 2개 항을 제외하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M_2 \ddot{x} = F \quad (10)$$

케이블에 인장이 작용하지 않을 때의 질량 M_2 는 케이블의 등가질량을 제외하고 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 비선형 하중, F는 (8)식과 동일하다.

$$M_2 = m_L + \rho C_m V_R \times a \quad (11)$$

2.3.2 케이블에 작용하는 힘

2.1절의 가정 하에 케이블에 인장이 작용할 경우 Fig. 3의 가상의 점 (c)에 작용하는 힘 T는 케이블의 감쇠와 강성으로 인한 것임을 알 수 있으며, 운동방정식 (4)에서 힘 T는

$$T = C(\dot{x} - \dot{y}) + K(x - y) = F - M \ddot{x} \quad (12)$$

와 같이 결정된다. 수중진수장치와 케이블의 연결부 (a)점 및 지원 모선과 케이블의 연결부 (b)점에 작용하는 장력은 다음과

같이 구할 수 있다.

$$T_{(a)} = T - W_{eq} \quad (13)$$

$$T_{(b)} = T + (W_C - W_{eq}) - (m_C - m_{eq}) \times \ddot{y} \quad (14)$$

여기서, W_C : 케이블 전체의 물속에서의 자중

W_{eq} : 등가질량 성분의 물속에서의 자중

케이블에 인장이 작용하지 않을 경우에 힘은 다음과 같다.

$$T_{(a)} = 0 \quad (15)$$

$$T_{(b)} = T + (W_C - W_{eq}) - (m_C - m_{eq}) \times \ddot{y} \quad (16)$$

2.3.3 케이블의 등가질량

일반적인 1자유도 스프링-질량-감쇠계에서 스프링의 자체 질량은 그 계의 동적 거동에 영향을 미치게 된다. 본 연구의 1차 케이블 역시 자체 질량을 가진 연속체이므로 전체 계에서 케이블의 질량을 무시할 수 없고, Fig. 3에서 보는 바와 같이 케이블 질량의 기여분을 등가질량 개념으로 고려하여야 한다.

계의 동적거동에 있어서 케이블은 길이 방향으로 질량이 분포되어 있고 각 부분의 변형도 양 끝단의 값으로부터 선형적으로 표시되기 어려우므로 실제 1자유도 스프링-질량계로 가정하기에는 약간의 무리가 따른다. 케이블의 등가질량(m_{eq})은 케이블과 수중진수장치의 질량비율에 따라 개략적으로 케이블의 전체질량 m_c 의 1/3에서 0.4배 정도 사이의 값으로 나타나게 되는데, 본 연구에서는 수중진수장치의 각 해석 수심(200m, 2,000m 및 6,000m)에 대하여 유한요소법(ANSYS)를 이용한 정밀한 고유진동해석을 수행하고 그 결과를 1자유도 스프링-질량계의 고유진동수와 일치시킴으로써 케이블이 전체시스템의 질량에 기여하는 등가질량의 크기를 추정하였다.

2.4 시스템 운동방정식의 해석 기법

운동방정식을 풀어 시스템의 강제응답을 얻기 위하여 시간 영역 적분법 중에서 Unconditionally stable한 해를 주는 Newmark- β 법을 사용하였다. 시스템의 운동방정식은 케이블에 작용하는 힘의 방향에 따라 (4) 및 (10)식으로 달라지며, (8)식의 하중 역시 미지 속도의 함수로 표현되므로, 시스템의 운동방정식은 기본적으로 두 가지의 비선형성을 포함하고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 비선형 문제를 합리적으로 해석하기 위하여 각 시간 단계마다 해가 수렴될 때까지 반복적으로 해석을 수행하는 Inverse iteration 기법을 적용하였다.

3. 수치 해석

3.1 수중진수장치 및 1차 케이블의 제원

시스템 해석에 필요한 수중진수장치는 길이 $a = 7,600$ mm,

Table 1 Weight and evaluated ballast of the launcher

Classification	In air[kg]	In water[kg]
Structure	570	471
Propulsion	107	85
Electrical & control	328	216
Navigation & instrument	70	9
Total	1,075	781

Table 2 Specification of the umbilical cable

Classification	Metric
Diameter	0.01735 m
Weight in air	1,090 kg/km
Weight in water	874 kg/km
Modulus of elasticity	44.956 GPa
Breaking strength	191 kN
Length	6,000 m

폭 $b = 1,200$ mm, 높이 $h = 1,429$ mm의 제원으로, 수중진수장치의 추진기, 전자/제어 장비부, 항법장비 등 프레임에 장착되는 장비들을 고려하면 총 질량은 Table 1에서 보인 것과 같고, 해석에 사용된 모션 상의 제어 시스템으로부터 수중진수장치에 연결되는 1차 케이블의 물성치는 Table 2와 같다.

3.2 해석 조건

해석 기법의 타당성을 검토하고 케이블의 Snapping 거동을 고찰하기 위하여 아래와 같은 조건 하에 해석을 수행하였다.

- (1) 먼저, 잠수정의 성능 시험 계획과 최대 운용 수심을 고려하여 200m, 2,000m 및 6,000m를 해석 대상으로 하였으며,
- (2) 모션의 운동은 실제 작업이 어려울 것으로 판단되는 조금 높은 파도를 예상하여 상하 운동 진폭 3m, 운동주기(T_{ship}) 8초인 경우를 고려하여 해석을 수행하였다.
- (3) Fig. 2 (c)에 보인 수중진수장치의 초기 하강속도는 해석 결과에 큰 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는 다음과 같은 3가지 경우를 고려하였다.

- i) 최악의 경우로서 수중진수장치의 중력과 점성 저항이 평형을 이루게 되는 최대 하강 속도, Terminal velocity v_t .
- ii) 모션 운동주기의 반주기 동안(인장력이 작용하지 않아 자유낙하가 이루어지는 기간) 수중진수장치가 물속을 자유낙하했을 때의 속도 v_0 .
- iii) 초기속도가 0 인 경우.

3.3 각 수심(200m, 2,000m 및 6,000m)에서 계산된 수중진수장치의 동적 거동특성

Fig. 6, 7 및 8은 각 수심에서 케이블의 감쇠비 0.04, 모션 운동의 위상각 $\pi/2$, 수중진수장치의 초기 하강 속도를 Terminal velocity v_t 로 하였을 때, 1차 케이블의 동적 거동특성 및 케이블에 걸리는 힘을 보이고 있으며, 각 수심에서 지원 모션의 운동이 수중진수장치의 운동과 Snapping에 따른 충격하중에 미

치는 영향을 나타내고 있다.

Fig. 6에 따르면, 수중진수장치의 변위는 각 수심에서 케이블의 자중 및 길이 변화에 따른 강성의 차이에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 수심 200m에서는 케이블의 길이가 짧아 강성이 크고 자중이 가장 가벼우므로 지원 모선의 운동이 수중진수장치의 변위와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 반면에 수심 6,000m에서는 케이블의 강성이 작기 때문에 모선 운동의 영향이 완충되어 나타나므로 Snapping에 따른 충격하중의 영향이 적어진다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 및 8에서 보면, 각각의 수심에서 케이블 Snapping에 의해서 지원 모선 및 수중진수장치의 연결부에 발생하는 힘은 케이블이 짧을수록 더 크게 나타난다. 이는 케이블 강성이 상대적으로 크기 때문에 충격에 대한 완충효과가 적고, 고주파수 과도 진동 성분의 큰 충격력으로 반복적으로 작용하는 것을 볼 수 있다. 수심 6,000m에서는 케이블의 강성이 작아지므로 고유진동 주기가 상대적으로 길어질 뿐만 아니라 완충효과도 커지므로 충격력 보다는 오히려 케이블 및 수중진수장치의 자중에 의한 힘이 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

3.4 초기 자유낙하 속도 변화에 따른 수중진수장치의 동적 거동특성 (수심 200m 및 6,000m)

Fig. 9 및 10은 수심 200m 및 6,000m에서 케이블의 감쇠비 0.04, 모선 운동의 위상각 $\pi/2$ 일 때, 수중진수장치의 초기 자유낙하 속도를 0, v_0 , v_t 로 변화시켜 해석을 수행하였다. Fig.

9~12는 수심 200m 및 6,000m에서 수중진수장치와 케이블의 연결부 Point (a) 및 지원 모선과 케이블의 연결부 Point (b)에 작용하는 힘을 나타내고 있다. 각 수심에서 모든 조건이 동일할 경우, 초기 자유낙하 속도가 클수록 당연히 각 부분에 작용하는 인장력도 크게 나타남을 쉽게 관찰 할 수 있다. 또한 초기 낙하 속도 v_0 와 v_t 의 값이 큰 차이가 없기 때문에 해석 결과가 비슷한 점도 확인할 수 있다.

3.5 모선 운동의 위상각 변화에 따른 변위 및 케이블에 걸리는 힘 (수심 200m 및 6,000m)

모선의 초기변위 및 속도가 달라질 때 때 시스템의 거동 특성을 고찰하기 위하여 운동의 위상각이 $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 수심은 200m 및 6,000m를 대상으로 하였고, 케이블의 감쇠비는 0.04, 수중진수장치의 초기 자유낙하 속도를 v_t 로 두었다.

Fig. 13에서 16은 케이블에 걸리는 힘을 나타내고 있다. 모든 조건이 동일할 경우 200m 수심에서는 모선의 운동 위상각이 π 즉, 모선의 상승 속도가 최대가 되는 경우에 충격력이 최대가 되는데, 이것은 결국 모선과 수중진수장치 간의 상대 속도가 최대가 되는 경우에 충격력 역시 최대가 된다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 수심이 6,000m에 이르면 충격하중의 영향은 거의 없어지며 곧 정상상태로 진입함을 보이고 있다.

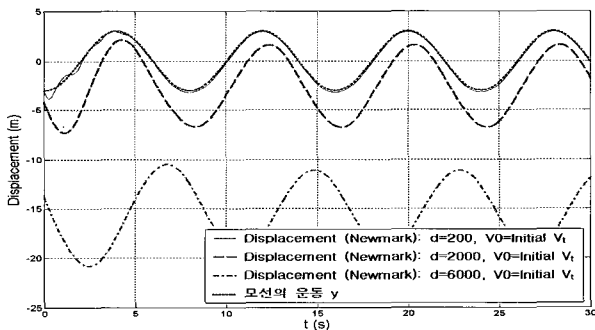


Fig. 6 Displacement of launcher (at $d = 200$ m, 2,000 m & 6,000 m)

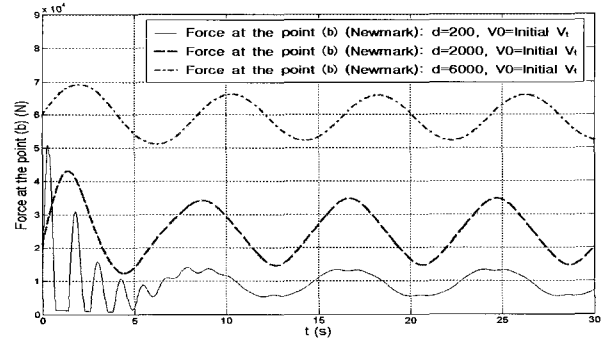


Fig. 8 Force at point (b) (at $d = 200$ m, 2,000 m & 6,000 m)

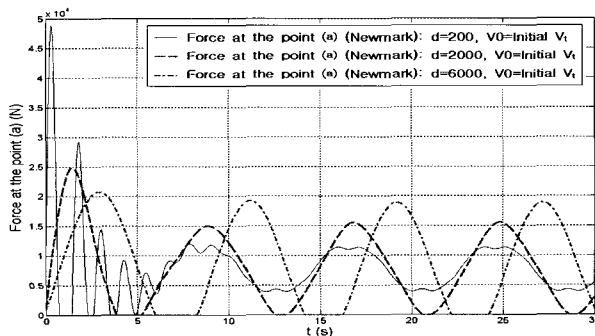


Fig. 7 Force at point (a) (at $d = 200$ m, 2,000 m & 6,000 m)

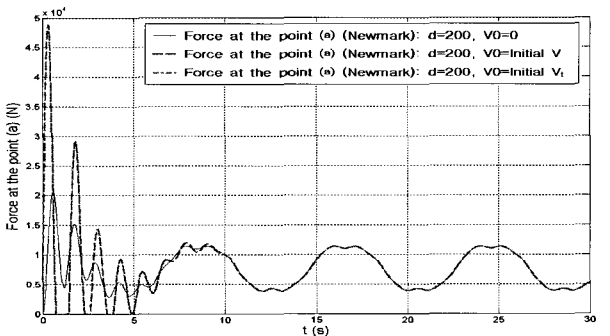


Fig. 9 Force at point (a) (initial velocity change at $d = 200$ m)

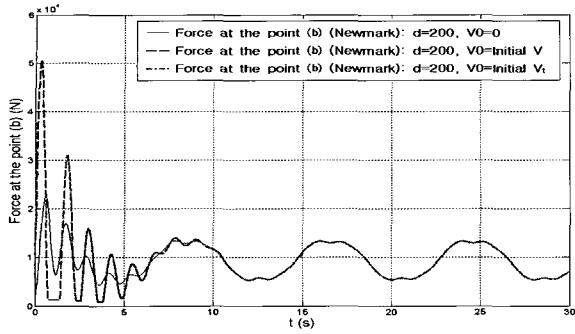


Fig. 10 Force at point (b) (initial velocity change, $d = 200$ m)

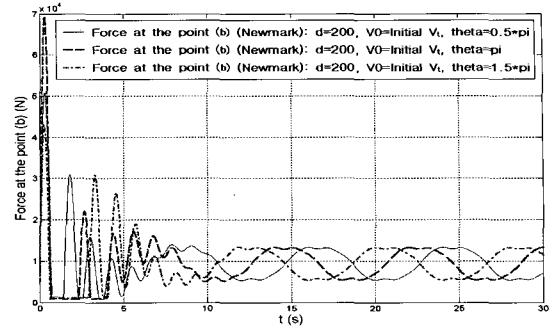


Fig. 14 Force at point (b) (phase angle change at $d = 200$ m)

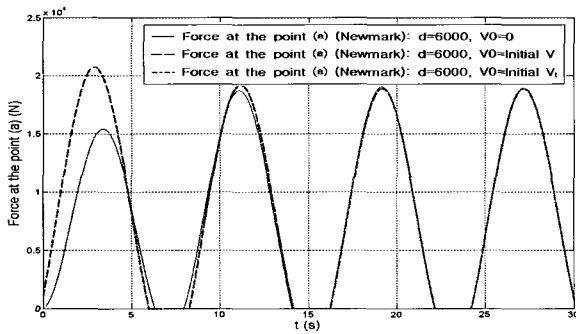


Fig. 11 Force at point (a) (initial velocity change at $d = 6,000$ m)

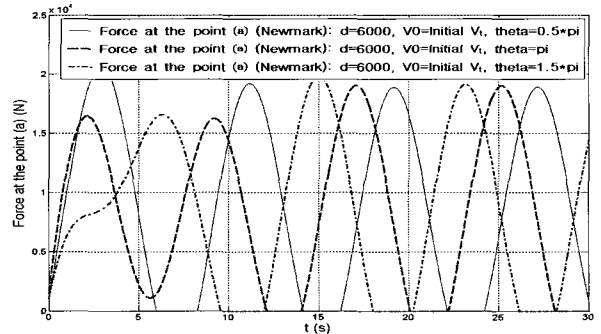


Fig. 15 Force at point (a) (phase angle change at $d = 6,000$ m)

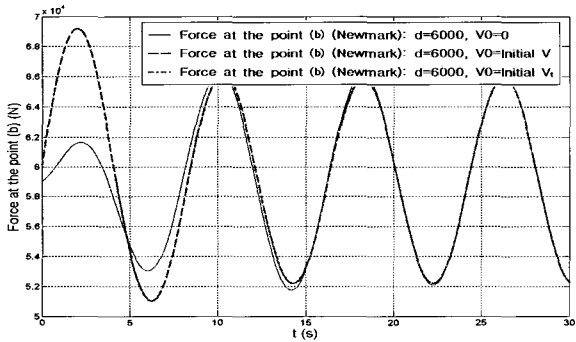


Fig. 12 Force at point (b) (initial velocity change at $d = 6,000$ m)

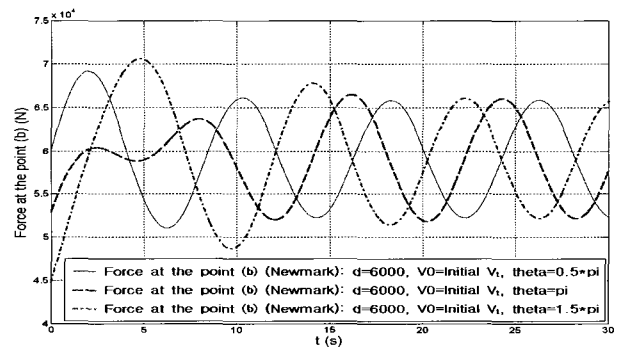


Fig. 16 Force at point (b) (phase angle change at $d = 6,000$ m)

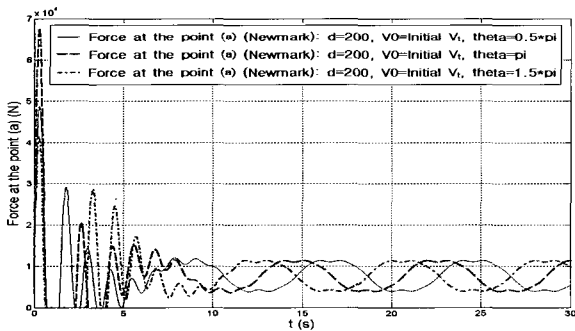


Fig. 13 Force at point (a) (phase angle change, $d = 200$ m)

4. 결 론

본 연구에서는 심해 무인 잠수정의 수중진수장치(해누비) 및 ROV(해미래)의 운용상 발생할 수 있는 시스템의 여러 동적 특성 중에서 1차 케이블의 급격한 하중전달(Snapping)에 의해 발생하는 충격하중과 수중진수장치의 동적 거동특성을 고찰함으로써 케이블 연결 부위의 구조적 안전성을 검토하였다.

먼저 최대 하중의 작용 시나리오를 검토하였으며, 이러한 시나리오를 해석하기 위하여 간단한 1자유도 스프링-질량계로 이상화된 해석 모델을 제안하였다.

잠수정의 작업 조건을 고려하여 1차 케이블에 걸리는 힘을 시간영역 직접적분법인 Newmark- β 법을 이용하여 해석한 결과, 수중진수장치와 케이블의 연결부 및 지원 모선과 케이블의 연결부에 작용하는 최대 인장력은 75kN보다 크지 않은 값으로 나타났으며, 이는 구조 안전성 판정 기준인 케이블의 Breaking strength, 191kN보다 작은 값이므로 시스템은 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다.

그러나, 연속체인 케이블을 1자유도 상하운동을 하는 스프링-질량-감쇠계로 가정함으로써 케이블의 종방향 고차진동형을 고려하지 못한데서 기인하는 해석의 오차에 대해서는 그 검토가 이루어 지지 않은 상태이며, 앞으로 이 부분에 대한 연구가 보완되어야 될 것으로 사료된다. 또한 동유체력의 추정에 있어, 수중진수장치의 Added mass coefficient C_m 및 Drag coefficient C_D 에 관한 추가적인 연구도 보완되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원의 "차세대 심해용 무인잠수정 개발" 과제 및 해양대학교 수중운동체특화센터로부터 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김용철, 노인식, 박성환 (1986). "Jacket 형 해양구조물의 비선형 동적응답해석", 대한조선학회지, 제23권, 제2호, pp 33-45.
- 박한일 (2005). "심해 무인잠수정의 케이블 거동 비선형 해석", 한국해양대학교 연구보고서.
- 이판목 (2003). "차세대 심해용 무인잠수정 개발 (2)", 한국해양연구원 연구보고서.
- 정태환, 이재환, 노인식, 이판목, Tarao Aoki (2004). "심해용 무인잠수정의 내압용기 구조해석", 대한조선학회 논문집, 41권, 제6호, pp 140-146.
- 정태환, 노인식, 천일용, 이종무 (2004). "심해 무인 잠수정 프레임의 설계 및 구조해석에 관한 연구", 2004 춘계 해양공학회 학술대회 논문집, pp 172-177.
- DNV Classification Notes (2000). "Environmental Conditions and Environmental Loads".
- Newman, J.N. (1977). "Marine Hydrodynamics", The MIT Press.
- Randall, Robert E. (1997). "Elements of Ocean Engineering", The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

2006년 6월 16일 원고 접수

2006년 10월 25일 최종 수정본 채택