

## 선체 운동을 고려한 ROV 케이블의 연성 동력학 해석

조규남\*, 송하철\*\*

\* 홍익대학교 조선해양공학과 (E-mail: kncho@hongik.ac.kr)

\*\* 서울대학교 해양시스템공학연구소

### Dynamic Analysis of ROV Cable with the Coupling of Ship Motion

Kyu-Nam Cho\*, Ha-Cheol Song\*\*

\* Hong Ik University, \*\*Seoul National University

#### 요 약

최근 해양 자원 확보의 중요성이 증대됨에 따라, 이들 자원의 탐사 및 해양 연구에 필요한 심해 잠수정의 개발이 국내에서 진행되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 ROV 진수 시 파랑 하중에 의해 발생하는 ROV 케이블의 장력 변화에 대한 정량적 평가를 수행하였다. ROV carrier 는 국내에서 운용 중인 온누리호를 모델로 하였으며, 파도에 의해 발생하는 선체 운동 해석 결과를 토대로, 이들 운동에 의해 발생하는 케이블의 장력을 선체, A-frame 및 ROV 의 물리적, 기하학적 특성을 고려한 연성 동력학 해석을 통해 구하였다. 해석은 유한 요소 해석을 기반으로 하는 조화 가진 해석을 수행하였고, 선체 운동은 선수파와 횡파에 대해 각각의 해석 결과를 도출하였다.

※Keywords: ROV, Couples dynamic analysis(연성 동력학해석), FE analysis(유한요소해석)  
ship motion(선체운동), Harmonic response analysis (조화가진해석)

#### Abstract

Remotely Operated Vehicle, ROV is a new concept equipment being made to replace the manned systems for investigating the deep sea environment. This paper presents the dynamic cable response during ROV launching considering the coupling effects of ship motion. By the harmonic response analysis, the variations of cable tensions were obtained. Harmonic forces in head/beam sea states were calculated by the concept of relative acceleration which obtained by ship motion analysis

## 1. 서론

21세기에 들어와 해양자원 확보의 중요성이 증대되고 있는 시점에 있어서, 해양이 가지고 있는 다양한 자원을 개발하기 위한 노력이 활발해지면서 해양에 대한 상세한 정보가 필요하게 되었으며, 관련 연구개발이 해양 선진국을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 이를 위한 연구개발의 일환으로, 해저에 대한 다양한 조사작업을 수행하기 위한 원격조종기술을 이용한 무인잠수정의 개발은 향후 심해저 광물개발 및 경제적 활동에 필수적인 기술 개발의 하나로 간주되고 있다(해양수산부, 2000).

ROV를 원활하게 작동시키고 안전성을 유지하기 위해서는 수상 지원선에서의 관련 작업이 우선적으로 중요하다. 그 작업 중 A-Frame의 운용과 원치로부터 연결된 케이블과 무인 잠수정의 거동 분석을 위한 동적 거동해석 등은 매우 중요한 요소 기술이다.

이에 따라 본 연구에서는, 심해 무인잠수정의 안전하고 지속적인 작동을 위한 수상 지원시스템인 A-Frame, 수상지원선, 원치-케이블 연성 구조 해석을 수행하여, 각 시스템의 거동과 안전성을 파악하고 운용에 따르는 지침과 설계 가이드를 제시하기 위하여, ROV 진수 시 파랑 하중에 의해 발생하는 ROV 케이블의 장력 변화에 대한 정량적 평가를 수행하였다. ROV carrier는 국내에서 운용 중인 온누리호를 모델로 하였으며, 파도에 의해 발생하는 선체 운동 해석 결과를 토대로, 이들 운동에 의해 발생하는 케이블의 장력을 선체, A-frame 및 ROV의 물리적, 기하학적 특성을 고려한 수치해석을 통해 구하였다. 해석은 유한 요소 해석을 기반으로 하는 조화 가진 해석을 수행하였고, 선체 운동은 선수파와 횡파에 대해 각각의 해석 결과를 도출하였다.

이에 대한 해외 연구 현황을 살펴보면, 최근 점증하는 심해저 탐사의 중요성에 발맞춰 심해 케이블의 역학적 거동 평가에 대한 연구가 최근까지 활발히 진행되고 있다(Osamu Nagatomi et al., 2002). 국내의 경우도 한국해양연구원 주관하에,

심해 무인 잠수정의 원치, 장력조절장치 설계 (홍익대 해양시스템 연구센터, 2002)에 대한 연구가 계속 진행되고 있으며, ROV 운용 중의 케이블 장력 변화에 대한 연구가 수행된 바 있다(Cho and Yi, 2002).

## 2. 모델링 및 해석 결과

일반적으로 수상지원시스템들의 거동 특성을 모델링하여 다자유도계의 수학적 운동방정식으로 나타내면 식(1)과 같다. 여기서  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ ,  $\{F(t)\}$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬 및 선체에 작용하는 하중벡터이고,  $\{x\}$ ,  $\{\dot{x}\}$ ,  $\{\ddot{x}\}$ 는 각 시스템의 변위, 속도 및 가속도 벡터를 나타내며, 첨자 s, a, 및 c는 각각 선체, A-Frame 및 ROV 케이블에 해당한다. 위의 시스템들이 모두 연성되어 있을 때 해를 구하는 과정은 각각 다른 시스템의 영향을 각 시스템에 추가하여 그 영향으로 인한 거동을 구하는 것이다. 만약 수상선의 거동이 구해지면, 그 거동에 따르는 가속도항을 A-Frame에 해당하는 구조물의 질량과 곱하여 inertia force로 치환하여 부가한 후 A-Frame 및 ROV 케이블의 거동을 풀어 구하는 방법이다 (Morooka and Nishimoto).

$$\begin{aligned} [M]_s \{\ddot{x}_s(t)\} + [C]_s \{\dot{x}_s(t)\} + [K]_s \{x_s(t)\} &= \{F_s(t)\} \\ [M]_a \{\ddot{x}_a(t)\} + [C]_a \{\dot{x}_a(t)\} + [K]_a \{x_a(t)\} &= \{F_a(t)\} \quad (1) \\ [M]_c \{\ddot{x}_c(t)\} + [C]_c \{\dot{x}_c(t)\} + [K]_c \{x_c(t)\} &= \{F_c(t)\} \end{aligned}$$

이에 따라 본 연구에서는 선수파와 횡파에 의해 선체에 발생하는 운동 해석을 수행하고, 이 선체 운동에 의해 유발되는 ROV 케이블의 가진력을 산정한 후, 이를 가진력으로 하여 식(2)에 대한 조화 가진 해석을 수행하였다.

$$MX + KX = F_0 \sin \omega t \quad (2)$$

해석 대상인 ROV carrier는 우리나라의 온누리호로 하였으며, 온누리호의 기본 제원과 해석 대

상인 ROV 케이블 시스템은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Dimensions of ROV carrier

Lpp	55.5 m
Breath	12.0 m
Draft	5.1 m
Displacement	1805 m <sup>3</sup>

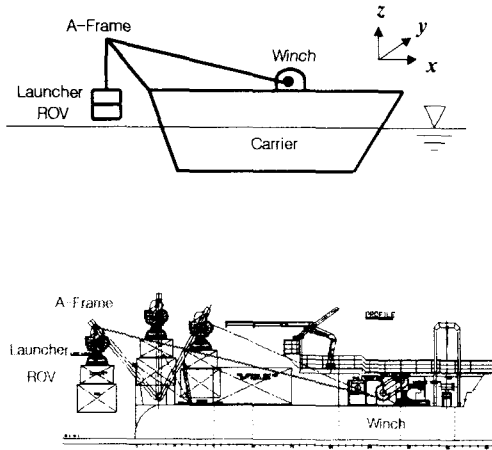


Fig. 1 Analysis model of ROV cable system

케이블에 작용하는 가진력은, 선체 운동 해석을 통해 구하여진 원치와 A-프레임 상단에서의 가속도 값을 Fig. 2, 식(3) 및 식(4)와 같이, A-프레임 상단에 대한 상대 가속도 값으로 치환하여, 론처(Launcher)와 ROV의 질량을 곱함으로써 산정하였다. 이에 따른 각 파장의 주파수별 unit wave height (1m)에 대한 가진력은 Table 3와 Table 4에 각각 정리하였다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a} &= \text{Re} + i \text{Im} \\
 &= \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \sin(\omega t + \phi) \quad (3) \\
 \text{where, } \phi &= \tan^{-1} \frac{\text{Im}}{\text{Re}}
 \end{aligned}$$

$$\text{Relative accel.} = \mathbf{a}_w \sin(\omega t + \phi_w) - \mathbf{a}_F \sin(\omega t + \phi_F) \quad (4)$$

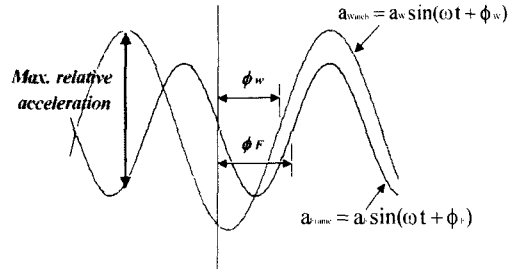


Fig. 2 Description of Max. relative acceleration

상기한 과정을 통해 구하여진 조화 가진력에 의해 발생하는 ROV 케이블의 장력 변화는 조화 가진 해석을 통해 구하였다. 이 때 pre-stress 해석을 선행하여 론처와 ROV의 자중에 의해 발생하는 장력을 조화 가진 해석에 고려하였다.

해석에 사용된 유한요소는 기존의 논문 (Chung and Cheng, 1999)에서 연구된 바와 같이 케이블의 경우 링크(link) 요소를 사용하였고, 론처와 ROV는 집중 질량(mass) 요소이며, solver는 범용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 이용하였다. 해석에 이용된 케이블의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of ROV cable

items		value
Weight (ton/km)	in air	1.041
	in water	0.8302
Diameter (mm)		17.3
Strength (ton)	breaking	14.5
	Max.	17.2
Stiffness (kN)		9.79 X 10 <sup>3</sup>

Table 5와 Table 6은 해석을 통해 구하여진, unit wave load 에 의한 ROV 케이블의 진수시의 장력 변화를 나타내고 있으며, 유의 파도가 결정될 경우, 상기한 바와 같은 동일한 해석 과정을 통해 규칙파 상에서의 케이블 장력 변화를 구할 수 있을 것이다. 횡파의 0.2 Hz 주파수의 경우는 가진력이 매우 작아 해석에서 제외하였다.

Table 3 Results of wave load (in case of head sea, unit wave height)

Freq. (Hz)	Acceleration / gravity accel.	Position	Re	Im	Phase (rad.)	Amplitude	Wave load (N)
0.2	X direction	Winch	3.970E-3	-4.157E-4	-1.043E-1	3.992E-3	-2.5
		A-frame	3.913E-3	-4.105E-4	-1.045E-1	3.934E-3	
	Y direction	Winch	3.493E-10	-1.817E-14	-5.202E-5	3.493E-10	0.0
		A-frame	3.718E-10	-1.716E-14	-4.616E-5	3.718E-10	
	Z direction	Winch	2.458E-4	4.065E-3	1.510E+0	4.073E-3	360.0
		A-frame	-8.250E-5	4.095E-3	-1.551E+0	4.096E-3	

Freq. (Hz)	Acceleration / gravity accel.	Position	Re	Im	Phase (rad.)	Amplitude	Wave load (N)
0.5	X direction	Winch	1.689E-2	-1.292E-2	-6.530E-1	2.126E-2	-96.2
		A-frame	1.509E-2	-1.168E-2	-6.587E-1	1.908E-2	
	Y direction	Winch	1.557E-9	-6.979E-10	-4.215E-1	1.706E-9	0.0
		A-frame	1.582E-9	-3.611E-11	-2.282E-2	1.582E-9	
	Z direction	Winch	8.928E-3	2.285E-2	1.198E+0	2.453E-2	2353.4
		A-frame	-1.419E-3	2.997E-2	-1.523E+0	3.001E-2	

Table 4 Results of wave load (in case of beam sea, unit wave height)

Freq. (Hz)	Acceleration / gravity accel.	Position	Re	Im	Phase (rad.)	Amplitude	Wave load (N)
0.2	X direction	Winch	-2.123E-7	-9.749E-7	1.356E+0	9.977E-7	0.0
		A-frame	-8.171E-8	-6.266E-7	1.441E+0	6.319E-7	
	Y direction	Winch	-3.902E-3	4.761E-10	-1.220E-7	3.902E-3	2.9
		A-frame	-3.968E-3	8.426E-10	-2.124E-7	3.968E-3	
	Z direction	Winch	3.105E-5	4.075E-3	1.563E+0	4.075E-3	-0.8
		A-frame	1.194E-5	4.077E-3	1.568E+0	4.077E-3	

Freq. (Hz)	Acceleration / gravity accel.	Position	Re	Im	Phase (rad.)	Amplitude	Wave load (N)
0.5	X direction	Winch	1.446E-5	-3.927E-5	-1.218E+0	4.185E-5	-0.7
		A-frame	5.385E-6	-2.624E-5	-1.368E+0	2.678E-5	
	Y direction	Winch	-1.146E-2	-6.653E-6	5.808E-4	1.146E-2	279.6
		A-frame	-1.779E-2	-1.655E-6	9.303E-5	1.779E-2	
	Z direction	Winch	3.211E-3	2.547E-2	1.445E+0	2.567E-2	-87.3
		A-frame	1.232E-3	2.555E-2	1.523E+0	2.558E-2	

Table 5 Results of amplitude of ROC cable tension in case of head sea, unit wave height

Freq. (Hz)	Position	Tension (kgf)
0.2	A-frame top	29.7
	ROV	29.8
0.5	A-frame top	13.8
	ROV	13.9

Table 6 Results of amplitude of ROC cable tension in case of beam sea, unit wave height

Freq. (Hz)	Position	Tension (kgf)
0.5	A-frame top	70.6
	ROV	72.8

#### 4. 결론

- ROV carrier 시스템을 이상화한 유한요소해석 모델을 개발하고, ROV 진수시 wave load에 의해 발생하는 ROV 케이블의 장력변화를 pre-stressed harmonic response analysis를 통해 산정하였다.
- 선체 운동에 따른 케이블 가진력을 상대 가속도 개념을 이용해 산정하여 선체 운동과 케이블 가진력 간의 연성 효과를 고려하였다.
- 제시된 해석 과정은 유의파가 결정될 경우, 이에 의한 케이블 장력 변화 산정에 적용되어 선상 지원 시스템의 안전 설계에 응용될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- 해양수산부 “차세대 심해저 무인잠수정 개발을 위한 기획, 조사 연구,” 한국해양연구소 보고서, 2000.11
- 홍익대 해양시스템 연구센터, “심해 무인 잠수

정의 원치, 장력조절장치 설계,” 한국해양연구원 보고서, 2002

- C.K. Morooka, K. Nishimoto, R.S. Rodrigues and A.L. Cordeiro, "Coupled Motion of a Drill Vessel-Riser-Template System in Waves."
- Jin S. Chung and B. Cheng, "3-D Responses of Vertical Pipe Bottom Pin-Jointed to a Horizontal Pipe to Ship Motion and Thrust on Pipe - Part I: MSE and FEM Modeling," Proceed. of Ninth Int. Offshore and Polar Eng. Conference, Brest, France, 1999
- Kyu Nam Cho and Woo Sup Yi, "Development of a Dynamic Analysis Scheme of Cable for ROV Operation," Proceed. of Twelfth Int. Offshore and Polar Eng. Conference, Kitakushu, Japan, 2002
- Osamu Nagatomi, Masahiko Nakamura and Wataru Koterayama, "Dynamic Simulation and Field Experience of Submarine Cable during Laying and Recovery," Proceed. of Twelfth Int. Offshore and Polar Eng. Conference, Kitakushu, Japan, 2002