

## 무인선 USBL의 설치 및 운용을 위한 기계시스템의 다물체 동역학 시뮬레이션 기반 동적 안전성 검토에 관한 연구

A Study on the Multibody Dynamics Simulation-based  
Dynamic Safety Analysis of Machinery for Installation and  
Operation of USBL in Unmanned Vessel

오재원<sup>1</sup>, 김형우<sup>1\*</sup>, 최종수<sup>1</sup>, 전봉환<sup>1</sup>, 김성순<sup>1</sup>

Jaewon Oh<sup>1</sup>, Hyung-Woo Kim<sup>1\*</sup>, Jong-Su Choi<sup>1</sup>, Bong-Huan Jun<sup>1</sup>, Seong-Soon Kim<sup>1</sup>

### 〈Abstract〉

This paper considers the simulation-based installation and operation safety analysis of installation and operation machinery of USBL as underwater equipment in operation environments. The simulation model of this mechanical system was developed using flexible multibody dynamics simulation technology. Operation and environmental conditions were applied using dynamic forces model considering ocean environments. The developed simulation model was used to evaluate operation safety through eigenvalue analysis, dynamic forces analysis, and structural analysis. As the analysis results, the operation safety was very low in extreme operation condition due to increase of dynamic loads by VIV effect. It was not a problem because safety factor had more than 2.0 in this case. However, the operation safety should be further strengthened because the USBL and LARS was installed and utilized in unmanned vessel with automatic controls. In order to improve safety by avoiding VIV frequency, we redesigned the USBL pole.

*Keywords : USBL, Operation Machinery, Simulation-based Design Verification, Multibody Dynamics, Unmanned Vessel*

<sup>1</sup> 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

<sup>1</sup> Korea Research Institute Of Ships & Ocean Engineering (KRISO)

<sup>1\*</sup> 교신저자, 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 <sup>1\*</sup> Corresponding Author, Korea Research Institute Of Ships & Ocean Engineering (KRISO)  
E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr

## 1. 서론

사람이 직접 투입되기 어려운 심해의 탐사를 위해 수중드론의 활용은 점차 증가하고 있는 추세이다. 최근, 과학기술의 발전에 의해 고중량의 수중드론 시스템은 소형화 및 무인화, 케이블리스 형태로 변화하고 있으며, 이에 따라서 대형 선박을 통한 운용이 아닌, 소형 무인수상선 또는 육상 원격 운용이 가능하기에 이르렀다[1].

선박해양플랜트연구소에서는 무인수상선(USV)과 수중자율이동체(AUV)의 복합운용체계 구축을 위해 해양복합연구단을 운영 중에 있으며, AUV와 USV 단독으로는 수행하기 어려운 임무를 수행하기 위한 기술개발을 목표로 연구가 진행 중에 있다[1].

AUV와 USV의 복합 임무 시 USV는 AUV의 위치에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 이를 위해 USBL(Ultra short baseline)을 이용하여 AUV에 설치된 각종 센서 기반 위치 정보를 취득하여 추정하도록 한다[2]. USBL은 일반적으로 선박의 측면 또는 선체 아래에 케이블을 이용하여 배치된다. 하지만, USV는 다목적 소형 무인선박으로 고속 이동의 운용 목적도 갖게 되므로 USBL이 배치된 상태로 이동할 경우 분실 또는 손상, 유체저항력 발생으로 선박 이동의 방해 등 치명적인 영향을 주게 된다. 따라서, 케이블을 이용하여 사용 후 이동 시 회수하여 선박을 이송하는 방법을 사용 중에 있다.

하지만, 무인선은 모든 장비가 자동화 되어야 하며, 케이블을 통한 자동화 운용 시 유연체의 탄성 변화와 USBL의 운동으로 인해 정밀한 제어의 어려움을 갖게 된다.

이와 같은 이유로, 본 연구에서는 무인선에 적합한 USBL의 설치 및 운용을 위한 기계시스템을 Fig. 1과 같이 기구학적으로 설계하였다. 해당 시스템은 무인선의 측면에 설치되어, USBL 운용에

따른 상하 이동을 유압실린더의 동력기반으로 구현되었다.

무인선에 장착된 USBL 운용 시스템 및 USBL과 같이 수중에 잠기는 장비의 경우, 큰 밀도를 갖는 해수와 해류, 선속 등에 의해 발생하는 유체력으로 인하여 기중보다 더 큰 외력을 받게 된다 [3-5]. 이에 따라, 발생하는 외력을 고려한 동하중을 이용한 설계 및 검증이 필수적이며 이를 통해 수중에서도 안전한 운용이 가능한 장비를 확보하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 설계된 무인선의 USBL 운용 시스템의 검증을 위한 동역학 시뮬레이션 모델을 구축하고, 운용 환경 모사를 통해 동역학적 운동과 하중에 대해 검토하였다. 또한, 주 구동축

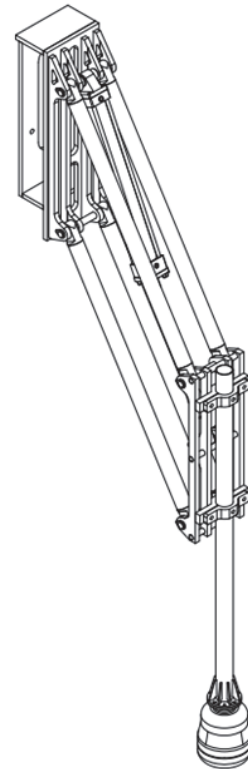


Fig. 1 Design concept of installation and operation system for USBL on USV

인 유압실린더의 좌굴 및 구조안전성에 대해 분석하고 운용 시스템의 프레임에 대해 운용 중 구조 안전성에 대해 분석, 유체저항에 의한 공진 회피를 위한 주파수 영역을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무인선 USBL의 운용 시스템에 대한 시뮬레이션 모델과 환경 모사 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 가상 운용 시뮬레이션을 통한 시스템의 고유치 분석 및 하중에 대한 분석을 다루고, 4장에서는 운용 중 구조안전성에 대해 고찰한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 계획을 설명한다.

## 2. USBL 운용 시스템의 시뮬레이션 모델

### 2.1 동역학 모델

USBL 운용 시스템의 시뮬레이션 모델은 기구학적 분석과 동역학적 분석, 구조역학적 분석을 동시에 수행할 수 있는 유연다물체 동역학 시뮬레이션 상용 소프트웨어인 ANSYS/Motion[6]을 이용하여 구축하였다.

시뮬레이션 모델은 선박에 고정되는 Hinge와 USBL이 거치되는 Pole을 고정하는 Hinge, 동력과 기구적 거동을 갖는 유압실린더와 링크들로 Fig. 2와 같이 구성되었다.

모델의 전체 중량은 약 170kg이고 Hinge와 링크부는 중량 감소 및 강도 유지를 위해 AL60계열의 소재로 채택되었으며, 나머지 부분은 강도 확보를 위해 SUS계열의 소재로 채택되었다.

또한, 본 시스템은 유압실린더의 병진 운동으로 운동되며, 나머지 연결부는 그 운동에 의한 기구학적 회전 운동만 갖기 때문에, 유압실린더의 로드부만 병진 운동이 가능한 자유도를 갖는 조인트를 인가하였고 나머지는 회전 운동이 가능한 자유

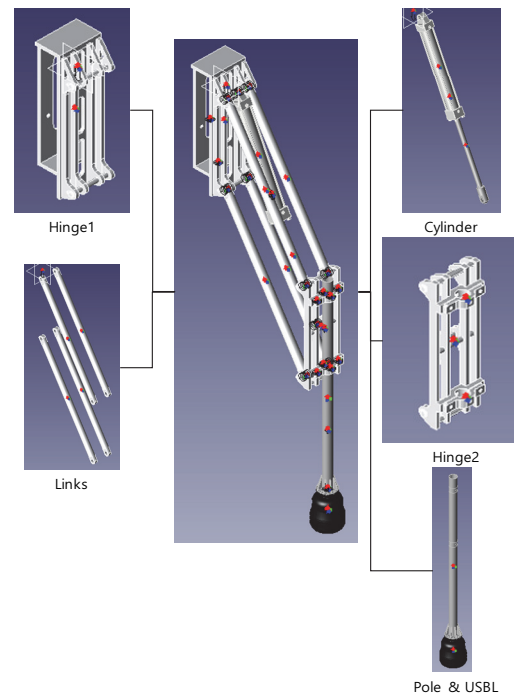


Fig. 2 Structure of simulation model

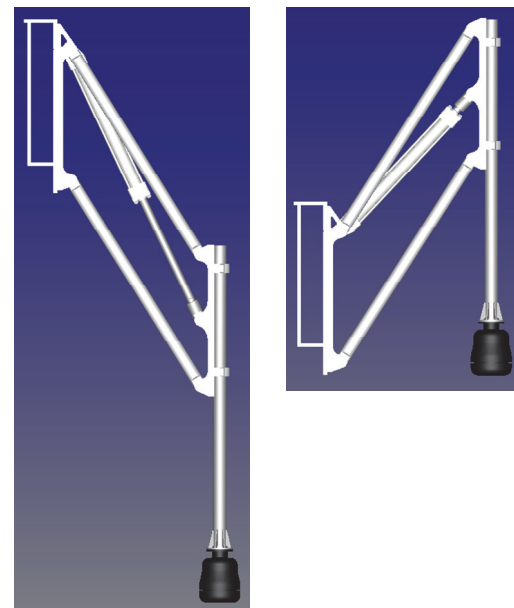


Fig. 3 Kinematic results by hydraulic cylinder motion of simulation model:(Left) Expansion of hydraulic cylinder, (Right) Contraction of hydraulic cylinder

도를 갖는 조인트를 인가하였다. Hinge1은 선박에 고정되는 부분이므로 모든 자유도를 고정하는 조인트를 인가하였다.

조인트의 구속조건과 유압실린더의 수축 및 팽창 운동의 결과 USBL 운용 시스템의 시뮬레이션 모델은 Fig. 3과 같이 기구학적 거동을 갖음을 확인하였다.

### 2.2 유체저항 모델

수중에서 운용되는 장비는 해수 유체에 의한 부가질량, 유체감쇠력, 유체저항력, 부력 등의 외력을 받게 된다. 그 중에서 본 시스템과 같이 부피와 질량이 작고 수중에 일부만 잠기면서 선속과 해류속도의 영향을 같이 받게 되는 조건에서는 다양한 외력 중에서 유체저항력을 가장 크게 받게 된다.

이에 따라, morison equation 기반 유체저항력 ( $F_{drag}$ )[7]을 식 (1)과 같이 모사하여 구축된 시뮬레

이션 모델에 Fig. 4와 같이 적용하였다.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_w C_D A V |V| \quad (1)$$

여기서,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도 (1,020~1,030 kg/m<sup>3</sup>),  $C_D$ 는 투영단면 형상에 따른 유체저항계수, A는 유체저항력이 작용하는 투영면적, V는 USV의 선속과 해류의 상대속도를 의미한다.

본 연구에서는 최대 하중 조건 상태에서의 검증을 위해 해수밀도는 1,030 kg/m<sup>3</sup>, 유체저항계수는 투영단면 형상 중 가장 큰 형상계수를 갖는 1.05[7], 투영면적은 단면이 막혀있다는 가정 하에 Fig. 5와 같이 투영 면적을 산출하여 적용한다.

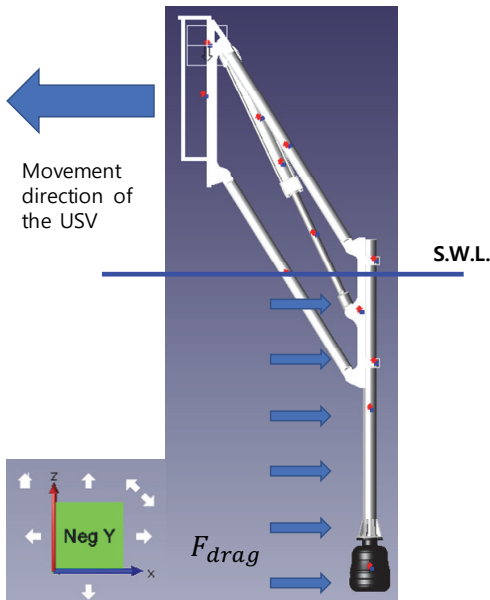


Fig. 4 Drag forces model of simulation model

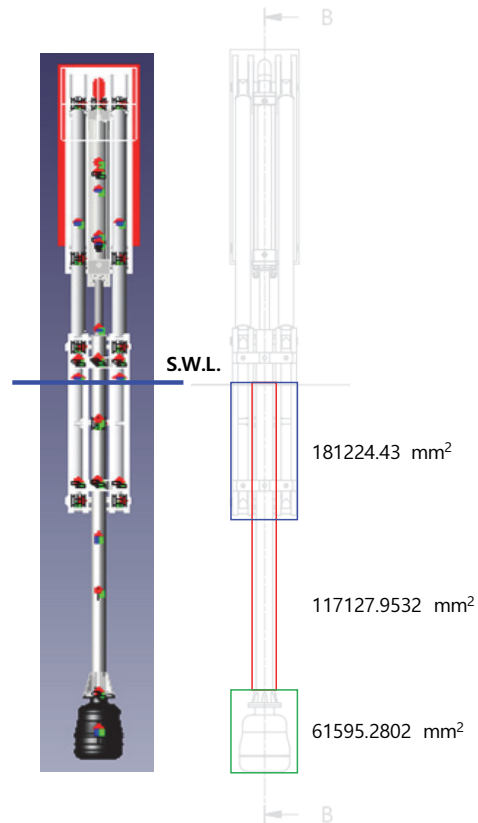


Fig. 5 Projected areas for drag forces

### 3. 시스템 안전성 평가

본 시스템은 선속과 해류속도의 상대속도 하에 유압실린더의 동력으로 운용된다. 이에 따라, 상대속도에 대한 유체저항과 더불어 와유기 진동에 대한 영향을 받기 때문에 와유기 진동에 대한 공진 회피가 필요하다.

이러한 이유로, 시스템 안전성 검증을 위해 시스템 고유치와 와유기 진동의 고유치의 분석을 통한 공진 회피 평가 및 유체저항이 작용한 상태에서의 유압실린더 구동 시 좌굴안전율 평가를 수행하였다.

#### 3.1 시스템 고유치 분석

와유기 진동은 세장체 구조물에 가장 큰 영향을 미치기 때문에, USBL-LARS의 시스템 고유치 분석은 수중에 잠기어 와유기 진동에 가장 큰 영향을 받는 pole 단독시스템과 전체 운용시스템으로 Fig. 6과 같이 구분하여 수행하였다.

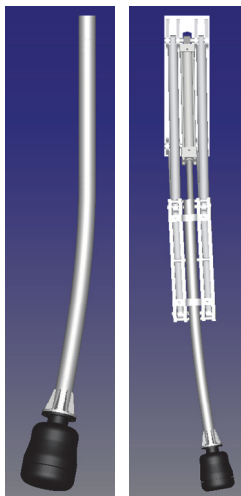


Fig. 6 Pole and System model for eigenvalue analysis

고유치 분석은 식 (2)와 같이 일반좌표계에서의 시스템 강성행렬과 질량행렬을 이용하여 고유치와 고유벡터를 도출을 통해 수행한다. ANSYS/Motion에는 유연다물체 시스템의 고유치 분석을 위한 Lanczos algorithm[8] 기반의 분석 도구를 보유하고 있으며, 본 연구에서는 이를 이용하여 고유치 분석을 수행하였다.

$$(\lambda_r I - M^{-1}K)X = 0 \tag{2}$$

$$\Psi^T M \Psi = I \tag{3}$$

$$\Psi^T K \Psi = \lambda_r I \tag{4}$$

여기서,  $\lambda_r$ 은 r차의 시스템 고유치, M은 시스템 질량행렬, K는 시스템 강성행렬을 의미한다.

고유치 분석 결과는 Table 1과 같다. Pole 단독시스템의 1차 고유진동수는 14.104 Hz 였으며, 전체 시스템에 대한 1차 고유진동수는 9.0966 Hz, 2차는 14.994 Hz 이지만, 구속조건에 의해 Pole 고유진동수가 2개의 축으로 분리되어 서로 다른 진동수를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서, Pole의 고유진동수가 전체 시스템의 1차와 2차 고유진동수에 지배적인 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Pole과 같은 원형봉 형태의 물체에 작용하는 유체 가진 주파수가 봉이 설치된 시스템의 고유진동수와 맞물리게 되면 강한 진동을 유발하는 와유기 현상이 발생된다. 수중에 잠긴 봉에 가해지는

Table 1. Results of eigenvalue analysis on the pole and system

	Eigenvalue Frequency [Hz]	
	Pole	System
1st	14.104	9.0966
2nd	175.29	14.994
3rd	545.48	20.084
4th	1150.3	25.241

유체 가진주파수는 원형봉의 지름과 유체의 속도에 따라 식 (5)[9]와 같이 도출할 수 있다.

$$f_n = S_t \frac{V}{D} \quad (5)$$

여기서  $S_t$ 는 스트로홀수,  $V$ 는 유체속도,  $D$ 는 원형봉의 직경을 의미한다. Pole과 같이 원형 실린더 형태의 스트로홀수는 평균적으로 0.21[8]의 값을 가지며, 유체 속도는 본 연구에서 사용하는 USV 선속와 해류속도의 상대속도인 3.0 knot와 7.0 knot,  $D$ 는 Pole의 직경인 0.0763 m이다.

분석 결과, 3.0 knot 조건에서는 4.04 Hz의 유체 가진 주파수를 갖으며, 7.0 knot 조건에서는 9.44 Hz의 유체 가진 주파수를 갖는다. 와유기 진동은 유체 가진 주파수의 2배가 수직 방향으로 작용하기 때문에, 3 knot 조건에서는 시스템의 고유진동수를 벗어나지만, 7 knot 조건에서는 시스템의 고유진동수 범위 안으로 들어오기 때문에 와유기 진동이 발생할 수 있어, 회피설계 또는 진동상쇄 방안 모색 및 운용 자제 등의 대안을 제시해야 한다.

### 3.2 시스템 동력전달 안전성 분석

USBL 운용시스템은 와유기 진동과 더불어 유일한 동력원인 유압실린더의 운용 안전성이 매우 중요한 요소이다. 유압실린더의 운용 안전성은 실린더의 좌굴 안전성[10] 평가로 수행할 수 있다.

실린더의 좌굴 안전성은 실린더에 작용하는 최대하중과 실린더의 작동 전체 길이로 평가할 수 있다. 본 연구에서 사용된 유압실린더는 실린더 내경 80 mm의 로드 B계열이며, 본 실린더의 한계 스트로크는 1,600 mm이다.

Table 2는 유압실린더 작동 시 최대하중과 그에 따른 좌굴 안전율을 보여주고 있다.

Table 2. Results of buckling load and safety

	Relative velocity between USV and current [knot]		
	0.0	3.0	7.0
Cylinder Load [N]	35,604	23,257	17,570
Cylinder Length [mm]	1732.7	1732.2	1733.0
Safety Factor [-]	3.84	5.88	7.78

분석 결과, 어떠한 운용 조건에서도 좌굴 안전율은 3.0 이상으로 충분한 안전성을 보유하고 있음을 확인하였다. 또한, 실린더 작동 방향과 유체 저항력의 방향이 동일한 방향으로 시스템이 동작하기 때문에 상대속도가 높을수록 시스템을 올려주는 효과가 발생하여 작용하중이 줄어드는 현상이 발생하였다.

## 4. 구조 안전성 평가

본 시스템은 유체저항과 와유기 진동에 의한 외력이 작용하기 때문에 기중보다 더 큰 외력에 대한 구조 안전성 평가가 필요하다. 따라서, 수중 상태에서의 운용 시 구조 안전성 평가와 와유기 진동에 의한 공진 시의 극한 상태 구조 안전성 평가를 수행한다.

### 4.1 운용 상태에서의 구조 안전성 분석

운용 상태에서의 분석 결과, Fig. 7과 같이 동력전달 주체인 유압실린더의 팽창과 압축 운동 시 유압실린더의 로드에서 가장 큰 하중이 작용하여 최대응력이 발생함을 확인하였다.

유압실린더의 재질은 AL60계열의 열처리(T5 이

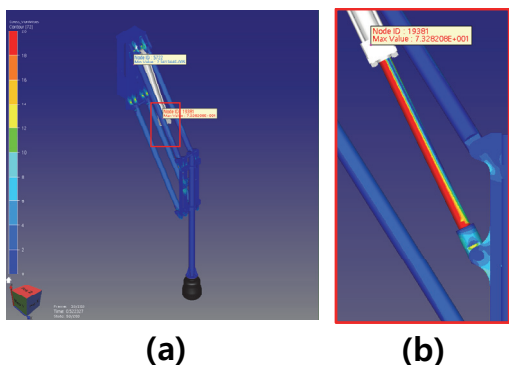


Fig. 7 Stress analysis results in USBL operation system: (a) Stress distribution result, (b) Maximum stress position and result

상)된 소재로써 항복강도는 240 MPa 이다.

Table 3은 운용 조건에서의 최대응력과 구조 안전율을 나타내고 있으며, 3 knot와 7 knot 운용 조건에서 모두 구조 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다. 또한, 유압실린더 좌굴 안전성 평가 결과와 마찬가지로 상대속도가 더 클수록 최대응력이 낮아지고 구조 안전성이 더 확보되었다.

#### 4.2 극한 상태에서의 구조 안전성 분석

세장체와 유사한 본 시스템은 와유기 진동에 의한 강제 가진의 영향이 발생할 수 있기 때문에, 강제 가진이 고려된 극한 상태에서의 구조 안전성 평가를 수행해야 한다.

Table 3. Results of structural safety

	Relative velocity between USV and current [knot]	
	3.0	7.0
Maximum Stress [MPa]	73.28	56.93
Safety Factor [-]	3.28	4.22

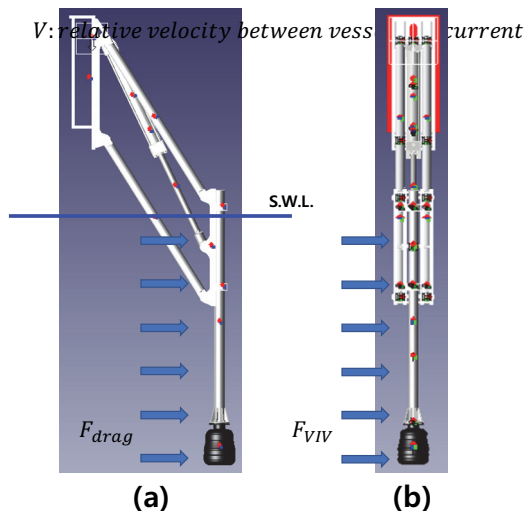


Fig. 8 External forces model for simulation: (a) Drag forces model, (b) VIV forces model

와유기 진동에 의한 강제 가진은 morison equation 기반 유체 저항력의 항력계수를 배수하여 최대 3.2까지 저항 방향의 90도 측면 방향으로 인가하여 모사할 수 있다[11]. 이에 따라, 본 연구에서는 항력계수의 3배인 3.15를 VIV의 최대 하중 모사계수로 정의하여 Fig. 8과 같이 유체 저항력과 유체 저항력의 90도 측면 방향으로 VIV 가진력을 적용하였다.

극한 상태에서의 분석 결과, Table 4와 같이 유압실린더 부에 최대응력이 발생하였다. 특히, 7 knot의 상대속도에서 발생하는 VIV 가진력은 안전

Table 4. Results of structural safety in applied VIV forces

	Relative velocity between USV and current [knot]	
	3.0	7.0
Maximum Stress [MPa]	74.13	118.13
Safety Factor [-]	3.24	2.03

율이 2.0까지 저하되었으며, 수중장비의 설계 안전 계수에는 만족하지 못하는 결과를 보여주었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 수중 장비의 설치 및 운용 안전성에 대한 분석을 운용 조건을 고려하여 수행하였다. 이를 위해 유연다물체 동역학 시뮬레이션 기술을 이용하여 디지털 모델을 구성하였으며, 운용 조건은 해양 환경을 고려하여 동하중 모델로 적용하였다. 그리고, 구성된 시뮬레이션 모델을 이용하여 운용 안전성 평가를 위해 주요 요소인 주파수 영역, 동적 거동 및 동하중, 구조 강도 등을 분석 및 고찰하였다.

시스템 안전성 분석 결과, 상시 운용 조건인 3 knot 이하의 상대속도 조건에서는 VIV 영향이나 동하중에 의한 영향이 안전성에 문제되지 않음을 확인하였다. 하지만, 7 knot 조건에서는 VIV 영향에 의해 문제가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 7 knot 운용 조건이 필수적인 경우, VIV 회피 설계 혹은 운용 중 수중 설치 깊이를 변화시켜서 VIV 주파수를 회피시켜야 시스템의 안전성이 유지됨을 알 수 있다.

구조 안전성 분석 결과, VIV 현상이 일어나는 극한 조건에서 2.0 이하의 안전계수가 도출됨을 확인하였으며, 이는 본 시스템은 구조 강도가 충분히 높게 설계되었음을 의미한다. 단, 운용 안전성을 보강하기 위해 VIV 현상에 의한 동하중의 영향을 많이 받는 상대속도 조건에서는 운용을 가급적 제한하는 것이 무인선의 자동제어 가용도 증가를 위해서는 더 좋을 것으로 판단된다.

해당 연구를 통해 VIV에 대한 문제점의 개선이 필요함을 확인하였으며, VIV 주파수 회피를 위해 USBL이 거치되는 pole의 직경(76.3 mm → 89.1

mm)과 두께(3.5 mm → 4.0 mm)를 개선 설계하여 시스템의 1차 고유주파수를 10.0 Hz 이상 되도록 변경하였다. 그리고 운용 안전성을 더 확보하기 위해 7 knot의 상대속도에서는 운용을 하지 않도록 제안하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 발견된 USBL 운용 시스템에 작용되는 동하중과 VIV 하중의 반비례 관계의 상세 분석을 통한 상대유속과 pole 길이와 두께, 유압실린더 최소하중의 상관관계를 밝히고 최소한의 하중으로 시스템을 운용할 수 있는 최적 제어 방법에 대해 제안 및 고찰하고자 한다. 특히, 무인선의 경우 자동제어로 운용되기 때문에 유지보수성 및 가용성이 우수해야 하며, 제안된 제어 방법을 이용한다면 이를 해결할 수 있을 것이라고 판단된다.

## 사 사

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업(No. 1711196759, PNS4940)을 통해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 전봉환, 김시문, 백혁, “멀티플 수중드론 개발 동향”, 대한조선학회지, vol. 57, no. 3, pp. 12-18, (2020).
- [2] P. Lee, H. Shim, H. Baek, and B. Kim, “Navigation System for a Deep-sea ROV Fusing USBL, DVL, and Heading Measurements”, Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 31, no. 4, pp. 315-323, (2017).
- [3] G. O. Tysse, and O. Egeland, “Dynamic



- Interaction of a Heavy Crane and a Ship in Wave Motion”, *Modeling, Identification and Control*, vol. 39, no. 2, pp. 45-60, (2018).
- [4] P. S. Fard, H. Tohidi, and H. Moayeri, “Boom Structural Design and Static Finite Element Analysis for a 1000tons Sheerleg Offshore Crane”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 485-495, (2016).
- [5] J. Oh, H. Kim, O. Kwon, and H. Kang, “A study on the multibody dynamics simulation-based dynamic safety estimation for installation and operation of A-Frame in Retrofit Vessel”, *Journal of the Korea Society of Industry Convergence*, vol. 23, no. 5, pp. 789-798, (2020).
- [6] ANSYS, “ANSYS/Motion 2023 Verification Manual”, ANSYS, Inc., (2023).
- [7] A. S. AARONAES and H. NILSSON, “Dynamic response of pipe rack steel structures to explosion loads”, *Chalmers University of Technology*, (2014).
- [8] S. K. Kim and A. T. Chronopoulos, “A class of Lanczos-like algorithms implemented on parallel computers”, *Parallel Computing*, vol. 17, no. 6, pp. 763-778, (1991).
- [9] R. D. Blevins, “Flow-Induced Vibration”, *Van Nostrand Reinhold*, (1990).
- [10] J. Oh, H. Kim, and O. Kwon, “A Study on the Development of Safety Operation Guideline for Onboard A-Frame System Using Dynamic Simulation”, *Journal of the Korea Society of Industry Convergence*, vol. 24, no. 5, pp. 625-633, (2021).
- [11] L. Song, S. Fu, S. Dai, M. Zhang, and Y. Chen, “Distribution of drag force coefficient along a flexible riser undergoing VIV in sheared flow”, *Ocean Engineering*, vol. 126, pp. 1-11, (2016).

---

(접수: 2024.07.12. 수정: 2024.07.31. 게재확정: 2024.08.06.)