

## 동역학 시뮬레이션 기반 선박 A-Frame의 안전 운용 가이드 개발 연구

### A Study on the Development of Safety Operation Guideline for Onboard A-Frame System Using Dynamic Simulation

오재원<sup>1</sup>, 김형우<sup>1\*</sup>, 권오순<sup>2</sup>

Jae-Won Oh<sup>1</sup>, Hyung-Woo Kim<sup>1\*</sup>, O-Soon Kwon<sup>2</sup>

#### 〈Abstract〉

This paper considers the development of safety operation guideline for onboard A-Frame system used to operate heavy-work ROV using dynamic simulation. Onboard A-Frame is affected by ship's behavior and large inertia by the marine environment. For this reason, safety operation guidelines are required for the safety of workers who operate ship-mounted equipment. In order to develop a guideline, it is necessary to evaluate the safety loads through real sea experiment. However, simulation method is used instead since it is difficult to conduct experiments in sea. Therefore, a procedure for safety operation analysis based on dynamic simulation that can consider ship behavior and marine environment and a safety operation table were proposed in this study. And the construction of safety operation table and guide for safety operation using the applied load and safety factor analysis results were considered.

*Keywords : Dynamic Simulation, Guideline, Onboard A-Frame, Safety Operation, Test Support Vessel*

---

1\* 선박해양플랜트연구소  
E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr

2 한국해양과학기술원

1\* Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering

2 Korea Institute of Ocean Science & Technology

## 1. 서론

해양 작업의 다변화에 따라, 기존 선박을 목적에 맞게 변경하여 선급승인을 득한 후 활용할 수 있는 개조 선박에 대한 수요가 증가하고 있다. 한국해양과학기술원에서는 해양장비 및 수중로봇의 실효역 성능검증 및 시험평가를 위한 시험평가선을 선박의 영구 개조를 통해 제작하고 있다.

제작 중인 시험평가선(장영실호)은 Fig. 1과 같이 기존 선박을 구매하여 설계 변경을 통해 개조를 수행하였으며, 해양장비 및 수중로봇의 진/회수를 위해 SWL(Safety Working Load) 60.0 ton급의 A-Frame을 제작 및 설치하여 운용할 예정이다.

A-Frame은 전력을 공급하면서 하중을 지지하는 케이블과 함께 설치되어 수중장비를 체결부에 연결한 후 선상에서 수중으로의 안전하게 이동 및 진/회수 시키며, 진수 후 수중에서의 운용이 가능하도록 한다[1].

이러한 선상에서의 운용은 Oh[1]의 연구에서와 같이 파도, 해류, 바람 등의 환경 요소로 인해 외력을 받아 거대 관성력이 발생하게 되고 이로 인하여 A-Frame과 같은 선상 장비의 운용 안전성에 영향을 준다. 특히, 고중량의 장비를 설치하여 운용하는 heavy lifting crane 형태의 경우 선미에 설치되기 때문에 선박의 pitch 거동에 의해 더 큰 관성력의 영향을 받게 된다[2,3].



(a) 개조 전 선박

(b) 개조 후 선박 3D 모델

Fig. 1 Retrofit vessel: (a) before, (b) expected

이에 따라, 20년도에 A-Frame의 설계 안전성 검토를 위해 동역학 시뮬레이션 기반의 연구가 수행되었으며[1], 본 연구에서는 A-Frame의 안전한 운용과 작업자 안전을 위해 육상 크레인 안전사용하중 테이블[4]과 같이 A-Frame의 안전사용하중 테이블을 구축하여 안전작업 가이드로 활용할 계획이다. 안전 사용하중 테이블은 거대 관성력을 고려할 수 있는 동역학 시뮬레이션 기술을 이용하여 개조 선박과 A-Frame의 정보를 모델링하고 운용 각도와 장비 중량에 따른 실린더 하중을 계측 및 분석을 통해 안전계수 추정 및 작업 안전성 평가를 수행하였다.

## 2. A-Frame의 안전운용 가이드 구축 절차

### 2.1 안전운용 테이블

고중량의 물체를 이동하는 장비로 사용되는 크레인의 경우 크레인의 크기, 중량, 붐 길이 등 사양에 따라 운용이 가능한 중량물의 무게, 이송 가능 거리 등이 상이하다. 이에 따라, 고용노동부 안전보건공단에서는 육상용 크레인을 대상으로 작업 반경과 붐 길이에 따른 정적 하중 테이블을 구축하여 크레인의 안전운용을 권장하고 있지만[4], 해상용의 경우 아직 기준이 없는 상태이다.

해상 작업의 경우 크레인 또는 A-Frame에 설치된 하중 계측 결과를 확인해 가며 운용을 하고 있으며, 본 연구에서는 육상용 크레인의 안전하중 테이블과 해상 경험을 융합한 형태의 해상 크레인 및 A-Frame 안전하중 테이블을 Table 1과 같이 구축한 후 안전율을 산출하여 Table 2와 같이 안전운용 테이블로 제안하고자 한다.

Table 1. Conceptual table of developed safety operation load table for onboard A-Frame

	Weight of Object [ton]			
Operation Angle [deg]	0.1	...	10.0	...
0.0	Cylinder Loads [N or kN]			
10.0				
...				
90.0				
...				

Table 2. Conceptual table of developed safety operation table for onboard A-Frame

Max. Safety Working Load = aa.aa [tonf] Safety Operation Factor = xx.xx				
	Weight of Object [ton]			
Operation Angle [deg]	0.1	...	10.0	...
0.0	O or X			
10.0				
...				
90.0				
...				

제안된 안전운용하중 테이블은 설치된 선박 A-Frame의 안전율을 기준으로 A-Frame의 운용 각도와 중량물의 무게에 따른 작동 실린더 부하와 buckling 안전율을 계측하고 작업 가능 영역을 기재하도록 하였다. 실제 A-Frame 운용자는 Table 2에서 해상 조건에 따른 필요 안전율을 선택한 후 그에 따른 중량과 운용 각도를 확인한 후 운용 가능 여부를 판단할 수 있다.

## 2.2 동역학 시뮬레이션 기반 하중 산출

안전운용 테이블을 구축하기 위해서는 Table 1

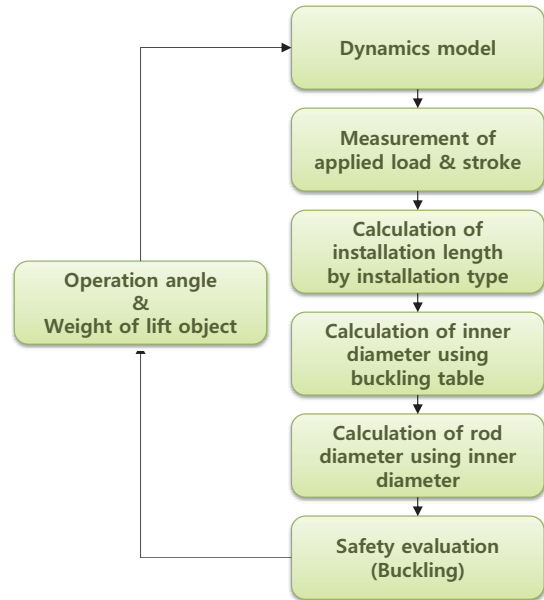


Fig. 2 Procedure for safety operation evaluation

의 안전하중 테이블을 구축해야하며, 안전하중은 거대 관성력을 고려할 수 있는 동역학 시뮬레이션을 통해 산출이 가능하다. 산출된 안전하중은 Fig. 2의 절차에 의해 안전을 평가가 가능하며, 이를 통해 안전운용 테이블 도출을 수행하였다.

안전운용을 위한 안전율은 A-Frame을 작동시키는 실린더 buckling 안전율을 대표값으로 활용하며, buckling 안전율은 Oh[5]의 연구에서 활용된 바와 같이 세장비가 큰 부재는 허용하중 이하에서도 길이와 폭 방향의 압축 하중으로 인해 좌굴(buckling) 현상이 발생하기 때문에 실린더류의 운용 안전을 위해 식 (1)을 통해 항상 평가되는 지표 중 하나이다.

$$S.F_{buckling} = \frac{F_{cr}}{F_{applied}} \quad (1)$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

여기서,  $F_{applied}$ 는 실린더 최대작용하중,  $F_{cr}$ 은 부재의 좌굴 임계하중,  $E$ 는 실린더 로드 의 young's module,  $I$ 는 실린더 로드 의 2차 모멘트,  $L$ 은 실린더 운용 시 전체 길이를 의미한다.

### 3. 동역학 시뮬레이션 기반 안전운용 분석

#### 3.1 동역학 시뮬레이션 모델

A-Frame의 동역학 시뮬레이션 모델은 20년도 연구에서 검증을 통해 사용되었던 상용 소프트웨어인 DAFUL(ANSYS/Motion)을 이용하여 메인 프레임과 롤러, 베이스프레임 2기, 190.0 mm 로드경을 갖는 유압실린더 4기로 구성하여 전체 중량 79.0 ton의 A-Frame system을 설계 도면을 기반으로 Fig. 3과 같이 개발하였다.

A-Frame의 기구학적 운동을 모사하기 위해 Fig. 4와 같이 선박에 고정되는 부분은 6자유도를 구속하는 고정 조인트(fixed joint)를 사용하였으며, A-Frame의 구조물과 유압실린더, pulley는 실

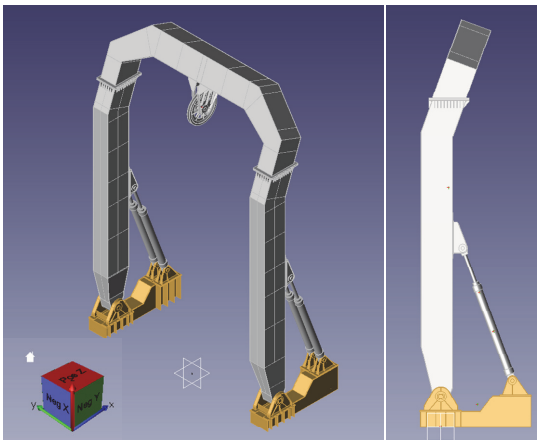


Fig. 3 Developed dynamic simulation model

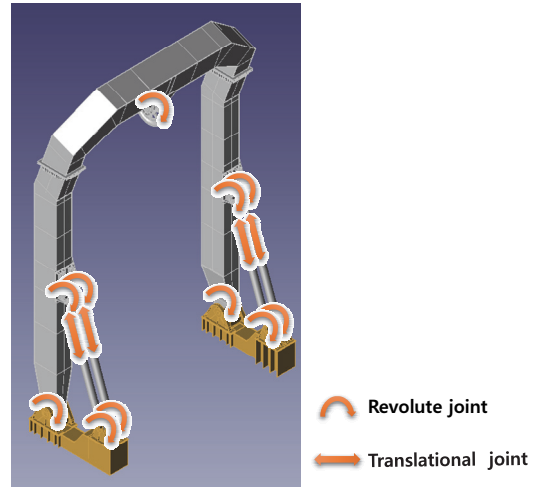


Fig. 4 Joint constraints schematic

제 메커니즘과 동일하게 움직일 수 있도록 한 방향 회전 및 병진 운동이 가능한 revolution joints와 translational joints를 이용하여 모델링 하였다[7].

선박은 하중에 가장 큰 영향을 주고 수중 장비를 진/회수 할 때 heading control로 제어하기 어려운 heave 와 pitch 거동을 인가하기 위해 한 축 방향의 병진과 회전 자유도를 허용하는 구속조건들을 적용하였다. 선박 거동은 Fig. 5와 같이 현재 연구 진행 중인 개조선박의 주행속도와 선박 방향에 따른 주파수 성분 분석기반 거동 특성 결과를 전달받아 heave와 pitch의 최대값인 0.32 m와 1.48° 를 각각 heave와 pitch 거동을 식 (3) 과 같이 시간영역에서의 사인파 함수로 변위(A)와 주기(T), 위상차( $\Phi$ )를 고려할 수 있도록 하였다.

$$h = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot time / T + \Phi \cdot \pi / 180) \quad (3)$$

여기서 주기는 Oh[1]의 연구에서 사용된 선박의 안전 운용 주기인 7초를 위상은 0.0° 로 정의하였다.

A-Frame의 운용 각도는 Fig. 6와 같이 초기

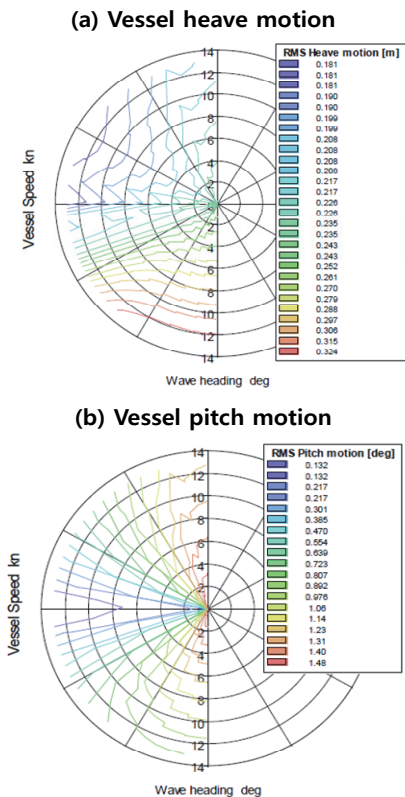
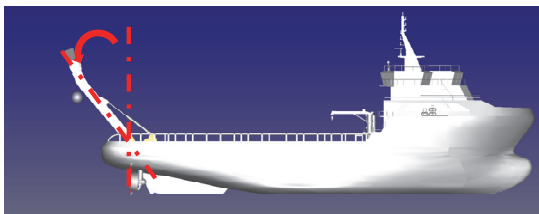


Fig. 5 Vessel Motion for operation : (a) heave motion, (b) pitch motion

<A-Frame Operation Angle Coordinate>



<A-Frame Operation Angle = 0.0 deg>



Fig. 6 Operation angle coordinates of onboard A-Frame

0° 부터 최대 운용 각도인 65.0° 까지 회전하도록 하였으며, 회전은 실린더 스트로크를 계산하여 실제와 동일한 메커니즘으로 구동되게 하였다. 각 운용 각도에 따른 실린더 스트로크 정보는 Table 3와 같다.

Table 3. Cylinder strokes by operation angles of A-Frame

	Operation Angle [deg]	Cylinder Stroke [mm]
1	0.0	0.00
2	10.0	627.85
3	20.0	1227.82
4	30.0	1789.06
5	40.0	2302.85
6	50.0	2762.09
7	60.0	3160.96
8	65.0	3336.24

A-Frame를 통해 진/회수될 중량물은 중량별 검토를 위해 반경이 1.5 m인 구형의 중량물로 고려하였으며, 중량물의 밀도 변화를 통해 무게를 10.0 ton ~ 50.0 ton 까지 가변되도록 하였다.

### 3.2 작용 하중 분석

안전하중 분석을 위해 A-Frame의 유압실린더 4기에 작용하는 부하의 평균치를 계측하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4의 하중 데이터에 따르면, 동일 중량에서 운용 각도에 따라 최대 11배, 동일 운용 각도에서 중량에 따라 2배 정도의 하중 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 중량물의 무게보다 A-Frame의 운용 각도가 안전운용에 더 지배적인 요인임을 의미한다.

도출된 하중 데이터를 기반으로 안전율을 환산하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 4. Cylinder loads by operation angles and weight of object

	Operation Angle [deg]	Weight of Object [ton]								
		10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
		[N]								
1	0.0	78572	88282	97961	108007	118051	128098	138144	148190	158236
2	10.0	128121	146593	164328	183536	200892	220479	238951	257423	274021
3	20.0	228501	258231	287961	317691	347421	377152	405472	436613	466344
4	30.0	340609	382335	424355	467158	508396	551525	592436	632889	678075
5	40.0	469404	525641	581877	638113	694349	751505	807878	864251	920624
6	50.0	623698	696763	766361	843334	911513	989659	1062088	1135984	1209146
7	60.0	818104	912125	1002678	1100350	1194431	1288514	1382596	1476678	1566252
8	65.0	938758	1045630	1152631	1259658	1366437	1473441	1580307	1687243	1794278

Table 5. Safety factors by operation angles and weight of object

	Operation Angle [deg]	Weight of Object [ton]								
		10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
		[-]								
1	0.0	31.39	27.94	25.18	22.83	20.89	19.25	17.85	16.64	15.59
2	10.0	16.27	14.22	12.68	11.36	10.37	9.45	8.72	8.10	7.61
3	20.0	7.86	6.96	6.24	5.65	5.17	4.76	4.43	4.11	3.85
4	30.0	4.63	4.13	3.72	3.38	3.10	2.86	2.66	2.49	2.33
5	40.0	3.01	2.68	2.42	2.21	2.03	1.88	1.75	1.63	1.53
6	50.0	2.06	1.84	1.67	1.52	1.41	1.30	1.21	1.13	1.06
7	60.0	1.45	1.30	1.18	1.08	0.99	0.92	0.86	0.80	0.76
8	65.0	1.22	1.10	0.99	0.91	0.84	0.78	0.73	0.68	0.64

Table 5의 안전계수 데이터에 따르면, 운용 각도 및 중량물의 무게에 따라 일부 영역에서는 안전율이 1.0 이하로 발생하기도 하며, 이는 운용 시 무게를 고려하여 운용 각도 조정이 운용 시에 필요함을 의미한다. 또한, 최대 운용 각도인 65.0°에서는 전반적으로 20.0 ton 이상의 중량에 대해서는 안전율이 1.0 이하임을 확인할 수 있으며, 따라서, A-Frame의 최대 운용 각도에서의 활용은 자제하는 것이 안전 운용에 적절하다고 할 수 있다.

### 3.3 안전 운용 가이드

작용하중 및 안전율 분석 결과 A-Frame의 안전한 운용을 위해서는 안전율에 따른 중량별/각도별 운용 가능영역을 구분하고 이를 해상 상황에 따라 즉각적으로 확인할 수 있는 테이블 형태의 가이드가 필요하다. 따라서, 분석된 결과를 Table 2와 같이 제안된 안전운용 테이블 형태로 구축하였고 그 결과는 대표적으로 Table 6~8 과 같다.





안전율이 1.0인 경우의 안전운용 테이블은 Table 6과 같으며, 그 결과를 보면, A-Frame의 최대 운용 각도인  $60.0^\circ \sim 65.0^\circ$  영역만 아니면 안전운용에는 문제가 발생하지 않는다. 하지만, 안전율 1.0은 해상 상황이 매우 좋은 경우라 하더라도 해양 장비 설계 및 운용 시에는 보수적으로 1.0을 초과하여 사용하지 1.0을 사용하지는 않는다.

A-Frame의 설계 시 고려하였던 안전율 1.5인 Table 7의 결과를 보면 안전율 1.0 보다 더 보수적으로 운용 각도가  $50.0^\circ$  에서도 30.0 ton급 이상의 중량물에 대한 안전운용이 어렵다라는 결론이 도출되며, 안전율이 2.5인 경우에는 상대적으로 안전운용 영역이 작아진다. 따라서, 안전율이 2.5 이상의 영역에 대해서는 안전운용 측면에서는 운용하지 않아야 하는 상황으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에는 2020년도에 연구되었던 개조선박 장영실호의 A-Frame 동역학 시뮬레이션 기반 설계 및 검증을 통해 제작 중인 A-Frame의 작업자 안전을 위한 안전운용 분석 및 가이드라인 개발을 수행하였다.

일반적으로 육상용 크레인의 경우 고정된 지면에서 작업이 수행되기 때문에 육상 실험 또는 정적인 시뮬레이션을 통해서 분석이 가능하지만, 해상 크레인 또는 A-Frame의 경우에는 해상 조건에 의해 선박 거동이 발생하고 이에 따라, 거대 관성력이 작용하기 때문에 육상용과는 다르게 실험이 어렵고 정적인 시뮬레이션을 통해서 여러 조건을 충족시키기 어렵다. 이에 따라, 본 연구진은 동역학 시뮬레이션 기반의 선상 A-Frame 안전운용 가이드 구축을 위한 시뮬레이션 기반 분석 절차와 안전운용 테이블을 제안하고 이를 고찰하였다.

분석 결과, A-Frame의 운용 안전성에 지배적인 요인은 A-Frame의 운용 각도였으며, 운용 각도 및 중량물의 무게에 따라 안전율이 상이함을 확인하였다. 또한, 운용 시 필요한 안전율에 따라 안전 운용 영역이 변화함을 확인하였고, 선상에서 A-Frame 운용 시 작업자의 안전을 위해서는 안전운용 테이블 및 이를 통한 가이드라인이 필요함을 다시금 확인하였다.

따라서, 본 연구를 통해 구축되고 분석된 안전운용 테이블과 더 확장된 안전율에 따른 테이블을 작성하여 최종적으로 장영실호의 A-Frame 안전운용 가이드라인을 작성할 계획이다. 하지만, 안전율은 해상의 환경과 선박의 현재 상태 등을 고려하여 사용자가 결정을 해야 하며, 이를 위해 각각의 연관성을 분석하여 현재 상태가 어떤 안전율을 갖는지를 판단할 수 있어야 한다. 따라서, 향후 안전율과 해상의 환경, 선박의 현재 상태를 연관분석할 수 있는 연구를 수행할 계획이다.

#### 사 사

본 논문은 해양수산부 국가연구개발사업 “해양 장비 실험역 시험평가 기술 개발”(PMS4760)으로 수행된 연구결과입니다.

#### 참고문헌

- [1] 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).
- [2] J. Krukowski, and A. Maczynski, “Application of the rigid finite element method for modelling



- an offshore pedestal crane”, The archive of mechanical engineering, vol. LX, no. 3, pp. 451-471, (2013).
- [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] 안전보건공단, “건설기계·장비 사망사고 예방을 위한 안전작업가이드(이동식크레인-치량탑재형)”, 안전보건공단 (2018).
- [5] J. Oh, C. Min, S. Cho, S. Park, K. Sung, H. Kim, D. Bae, and J. Lim, “CAE-based proper design method for the efficient production of hydraulic cylinder”, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 32, no. 3, pp. 1243-1252, (2018).
- [6] Virtual Motion, “DAFUL 2020 R1 Verification Manual”, Virtual Motion, Inc., (2020).
- [7] E. J. Haug, “Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System”, ALLYN AND BACCON (1989).

---

(접수: 2021.09.15. 수정: 2021.10.02. 게재확장: 2021.10.06.)