

## 개조 선박의 A-Frame 설치 및 운용을 위한 다물체 동역학 시뮬레이션 기반 동적 안전성 검토에 관한 연구

A study on the Multibody Dynamics Simulation-based  
Dynamic Safety Estimation for Installation and  
Operation of A-Frame in Retrofit Vessel

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

Jaewon Oh<sup>1</sup>, Hyungwoo Kim<sup>1\*</sup>, Osoon Kwon<sup>2</sup>, Hyoun Kang<sup>2</sup>

### 〈Abstract〉

This paper considers the development of the dynamic analysis model and simulation-based operation safety estimation of A-Frame to be applied to the test evaluation support vessel for real sea test. The support vessel will be manufactured by modifying the existing offshore support vessel. Also, development and installation of various sensors and supporting facilities for test evaluation are under preparation. Among these facilities, A-Frame is an equipment that transfers marine equipment from ship deck to the sea floor, and is being designed to transfer up to 50 ton class equipment. However, the A-Frame is a moving equipment using hydraulic cylinders. When the 50 ton equipment is attached and transferred to A-Frame, the buckling of cylinders may occur or A-Frame becomes inoperable due to the influence of huge inertia. For this reason, safety verification should be performed using dynamic analysis techniques that can take into account huge inertia forces in the design of A-Frame. Therefore, in this study, A-Frame and ship behavior were modeled using dynamic analysis method, and the applied loads of various equipment including hydraulic cylinder of A-Frame was measured and the operation safety review was performed.

*Keywords : Support vessel, A-Frame, Multibody dynamics, Dynamic analysis, Simulation-based design verification*

---

1\* 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터

E-mail: hyungwoo4601@kriso.re.kr

2 한국해양과학기술원

1\* Offshore Industries R&BD Center, KRISO

2 KIOST

### 1. 서론

해양 탐사 및 작업 등을 위해 개발되는 수중장비 및 로봇들은 성능평가 및 운용을 위해 전력 공급 및 하중 지지가 가능한 umbilical cable이 구축된 지원선(Support Vessel)을 활용한다. 이러한 지원선을 이용한 수중장비들의 시험 및 운용 시에는 고중량물의 장비들을 선박 deck에서 정비 후 탑재하여 수중으로의 원활한 진/회수를 할 수 있는 A-Frame을 사용하게 된다.

A-Frame은 그림 1과 같은 형태로 umbilical cable과 함께 설치되어 수중장비를 체결부에 연결한 후 선상에서 수중으로의 안전하게 이동 및 진/회수 시키며, 진수 후 수중에서의 운용이 가능하도록 한다.



Fig. 1 Support vessel with A-Frame

해양 장비 및 선박은 파도, 해류, 바람 등의 해양환경 요소로 인해 발생하는 외력의 영향을 크게 받는다[1-3]. 발생한 외력은 계절, 날씨, 해상 상황 등에 따라 가변하는 불확실성으로 인해 예측이 어렵다. 이에 따라, 선박에 탑재되는 장비 중 하나인 A-Frame은 고중량의 장비하중 및 다양한 불확실성을 갖는 해양환경 하중에 의해 큰 영향을

받는다. 또한, 해양환경 하중은 고중량의 장비하중을 큰 관성력을 포함한 동하중으로 변화시키고, 이에 따라, A-Frame의 정하중 설계 조건보다 더 큰 하중을 받게 되는 경우가 발생하게 된다. 허용 하중보다 큰 하중을 받거나 고하중의 반복 작용으로 A-Frame에 피로하중이 발생할 경우, 케이블 절단, 프레임 파괴, 제어 불능 등의 다양한 사고를 발생 시킬 수 있고, 선박의 roll과 pitch 방향의 큰 거동을 야기하여 선박 전복의 위험성도 존재한다. 이러한 이유로, 선박 개조 시 A-Frame 설치를 위한 동하중 기반의 구조 안전성 검토[4,5]가 필수적이다.

본 연구에서는 동역학 해석 기술을 이용하여 A-Frame의 운용 시나리오에 따른 하중 검토를 통해 A-Frame의 설치 및 해양 장비 운용을 위한 구조안전성 검토를 수행하였다. 동역학 해석을 이용한 선박 탑재 장비 동적 영향도 검토는 그림 2와 같이 수행된다.

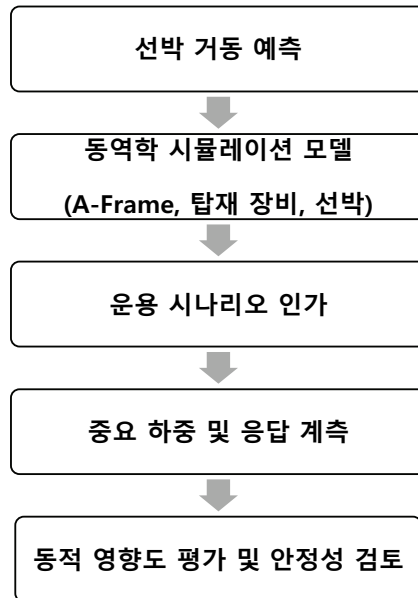


Fig. 2 Procedure for dynamic simulation-based safety evaluation

우선, 선박의 거동은 선박 거동 주기와 변위의 parameter iteration을 통한 주요 영향도 검토 방법과 주파수 영역에서의 해양파 정보와 선박 RAO를 이용하여 시간 영역의 선박 거동을 예측하는 방법이 있으며, 이번 연구에서는 동역학 해석 모델 개발 후 선박 거동 주기와 변위의 parameter iteration을 통한 주요 응답 영향도 평가 방법을 사용하여 평가를 수행하였다.

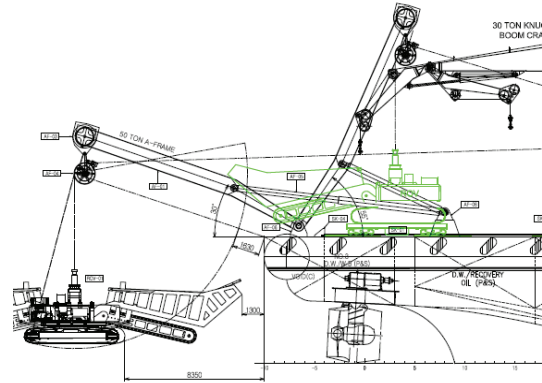


Fig. 4 A-Frame operation with offshore equipment

## 2. 선박 A-Frame의 동역학 모델

### 2.1 선박 A-Frame의 구성

개조 선박은 A-Frame의 설치가 가능한 support vessel로 해양장비를 운용하기 위해 그림 3과 같은 형태로 A-Frame이 탑재 된다. 설치될 A-Frame의 총 중량은 30.0ton 이며, 구조 프레임, 유압실린더, winch-pulley 등으로 구성되어 있다.

A-Frame에서 운용될 해양 장비는 그림 4의 예와 같이 고중량의 장비들로 A-Frame의 유압실린더 거동을 통해 선박 deck로부터 수중으로 진회수 된다.

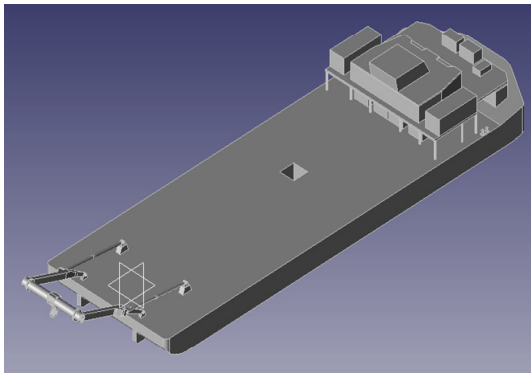


Fig. 3 Retrofit vessel and A-Frame

### 2.2 동역학 시뮬레이션 모델

A-Frame의 동역학 시뮬레이션 모델은 유연다물체동역학 시뮬레이션 상용 소프트웨어인 DAFUL (ANSYS/Motion)[6]을 이용하여 개발하였으며, DAFUL은 해양 분야에서 수중로봇 주행성능 해석[7], 라이저 구조동역학 해석[8], 해양장비 설계 검증을 위한 해석[9] 등 구조 및 동역학 기반의 설계 검증을 위한 시뮬레이션 도구로 활용되고 있다.

선박은 하중에 가장 큰 영향을 주는 heave 방향의 거동을 인가하기 위해 한 축 방향의 병진 자유도만을 허용하는 구속조건(translational constraint)을 적용하였다. Heave 거동은 시간영역에서의 변위로 모사하여 parameter iterations 기법을 사용할 시에는 식 (1)과 같이 사인파 함수로 변위(A)와 주기(T), 위상차(Φ)를 고려할 수 있도록 하였고, 일반적으로 파랑의 주기는 4~15초(너울성 파도 8~15초)[10]의 범위에 있으며, 변위는 A-Frame 운용이 가능한 높이인 0~2m로 고려하였다.

$$h = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \text{time} / T + \Phi \cdot \pi / 180) \quad (1)$$

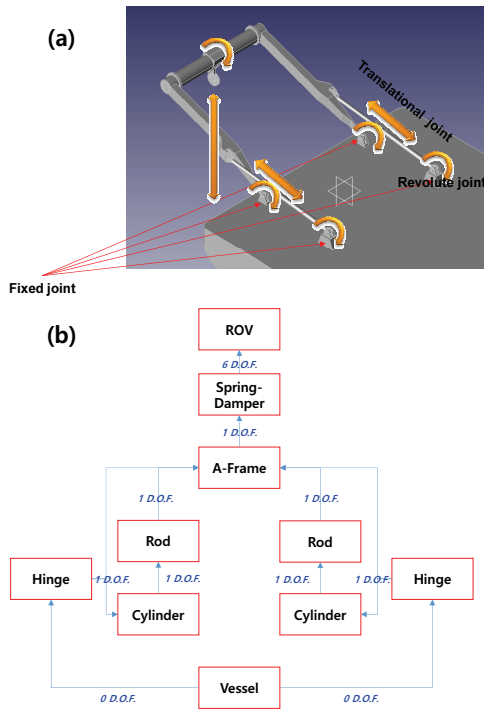


Fig. 5 Dynamic simulation model of A-Frame:  
(a) Model schematic (b) D.O.F diagram

A-Frame의 운동을 모사하기 위해 그림 5와 같이 선박에 고정되는 부분은 6자유도를 구속하는 고정 조인트(fixed joint)를 사용하였으며, A-Frame의 구조물과 유압실린더, pulley는 실제 메커니즘과 동일하게 움직일 수 있도록 한 방향 회전 및 병진 운동이 가능한 revolution joints와 translational joints를 이용하여 모델링 하였다. 유압실린더 모델은 Oh[11]의 연구에서 개발된 stroke displacement 기반 기구동역학 모델을 사용하였다.

A-Frame 설치 및 운용 검증을 위해 사용된 해양장비는 심해저 광물자원 채광로봇인 MineRo(그림 6[12])를 사용하였다. 기중 무게는 약 27.3ton, 수중 무게는 약 9.3ton이다. 해석 효율화를 위해 MineRo는 강체 모델로 적용하였으며, A-Frame과는 spring-damper 모델로 umbilical cable을 모사하여 그림 7과 같이 적용하였다.

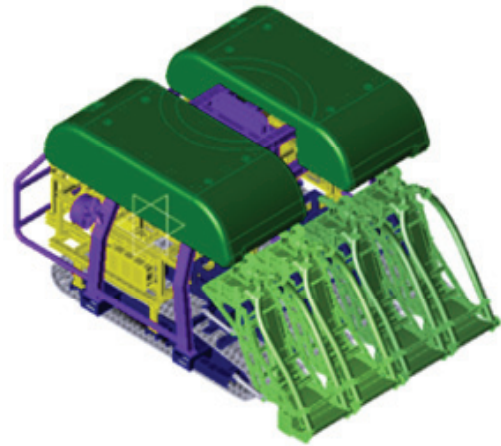


Fig. 6 Deep-seabed mining robot, MineRo[8]

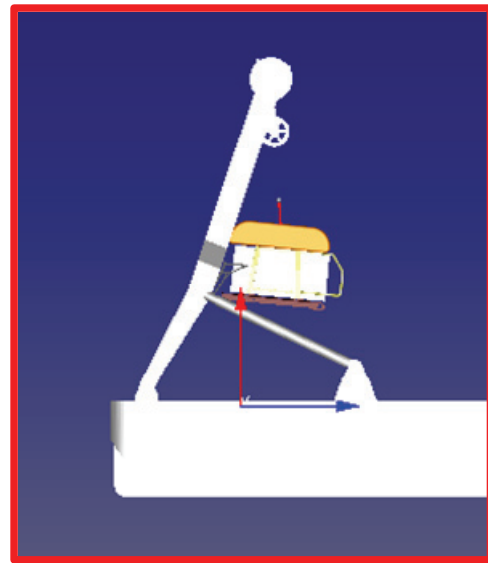


Fig. 7 Integration model of A-Frame and MineRo

### 2.3 시뮬레이션 시나리오

선박 A-Frame의 구조 안전성 검토를 위해 개발된 동역학 모델에 운용 시나리오와 운용 각도를 다음과 같이 정의하여 시뮬레이션에 반영하였다(그림 8).

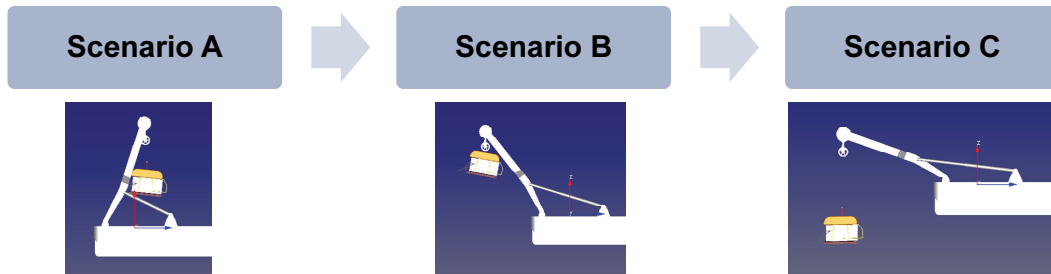


Fig. 8 Operation scenario of A-Frame

운용 시나리오는 크게 3가지로 구분할 수 있으며, 그림 8과 같이 선박 deck에 안착되어 있는 해양 장비를 A-Frame과 체결 후 들어올리는 시나리오 A, A-Frame에 체결된 장비를 진수시키기 위해 선체 밖으로 내보내는 시나리오 B, 선체 밖에 매달린 장비를 수중으로 진수하는 시나리오 C로 정의하였다.

운용 시나리오에 따른 안전성을 검토하기 위해 하중 주요 검토 부위를 유압실린더와 선박 deck의 고정부(support), 유압실린더(cylinder), pulley와 A-Frame 구조물의 고정부(pulley)로 정의하였으며, 각 부분의 하중을 계측하여 분석에 활용하였다.

고중량을 갖는 대형 구조물인 A-Frame과 해양 장비는 운용 시 거대 관성력이 작용하기 때문에 회전 각도에 따라 작용하는 하중의 크기가 급격하게 변화하게 된다. 이에 따라, A-Frame 운용을 위한 운용 각도에 대한 분석이 필요하다.

시뮬레이션에 적용된 운용 각도는 A-Frame의 기본 운용 각도인 90°와 진수 시 선체와의 간섭을 피할 수 있는 최소 운용 각도인 60°에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 운용 각도에 따른 하중검토를 위해 선박 거동 주기는 하중변화에 가장 작은 영향을 주는 장주기인 15초, 변위는 0.5m, 위상은 0°로 고정하였다. 하중 계측은 운용 시나리오에 따른 안전성 검토를 위한 하중 계측 부위와 동일하게 적용하였다.

### 3. 동역학 시뮬레이션 기반 안전성 검토

#### 3.1 운용 시나리오에 따른 결과

운용 시나리오 A에서 주기와 위상, 변위에 따른 support 하중 시뮬레이션 분석 결과, 최대 부하는 약 450kN 이었으며, 그림 9와 같이 주기가 높을수록 저주파수의 응답을 갖기 때문에 부하하중은 감소한다. 또한 변위가 증가할수록 하중의 변화가 급격하게 변화함을 확인할 수 있다. 그림 10에 따르면, 변위가 증가할수록 부하하중은 증가하는 경향을 보이며, 주기가 커질수록 부하하중은 낮아지는 경향을 동일하게 보인다. 또한 위상이 바뀔 경우, 그림 11과 같이 부하하중은 주기에 따라 크기가 서로 다를 수 있다.

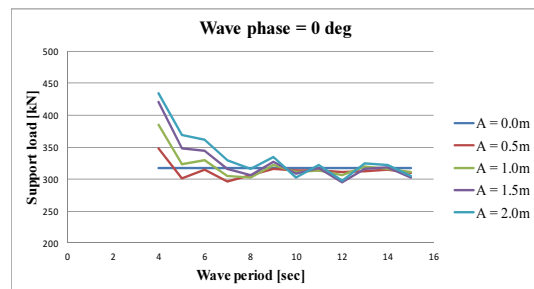


Fig. 9 Support loads by periods and amplitudes in scenario A

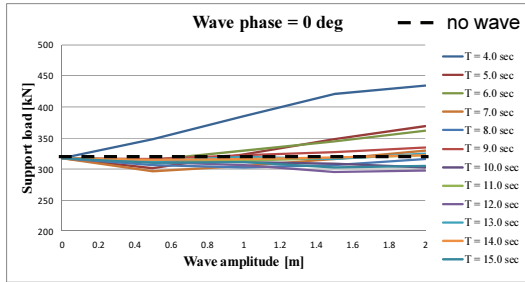


Fig. 10 Support loads by amplitudes and periods in scenario A

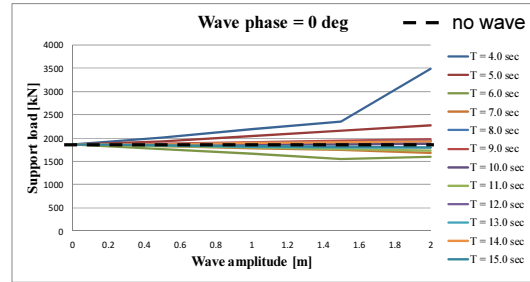


Fig. 13 Support loads by amplitudes and periods in scenario B

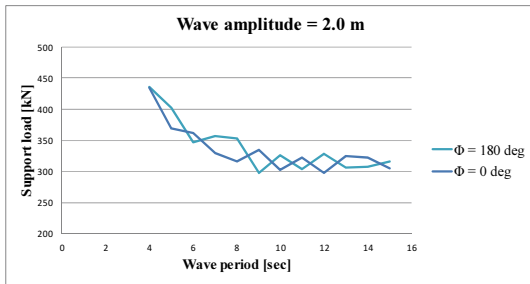


Fig. 11 Support loads by phases in scenario A

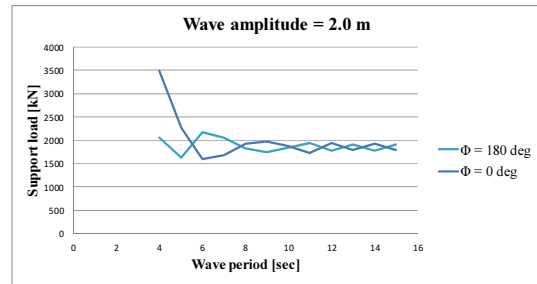


Fig. 14 Support loads by phases in scenario B

운용 시나리오 B에서 주기와 위상, 변위에 따른 support 하중 시뮬레이션 분석 결과, 최대 부하는 약 3,500kN 이였으며, 시나리오 A와 유사하게 그림 12~14와 같이 주기가 높을수록 부하하중은 감소하고, 변위가 증가할수록 하중의 변화가 급격하게 변화하며 위상에 따라 부하하중 크기가 서로 다름을 확인할 수 있다.

운용 시나리오 C에서 주기와 위상, 변위에 따른 support 하중 시뮬레이션 분석 결과, 최대 부하는 약 2,500kN 이였으며, 시나리오 A와 유사하게 그림 15~17과 같이 주기가 높을수록 부하하중은 감소하고, 변위가 증가할수록 하중의 변화가 급격하게 변화하며 위상에 따라 부하하중 크기가 서로 다름을 확인할 수 있다.

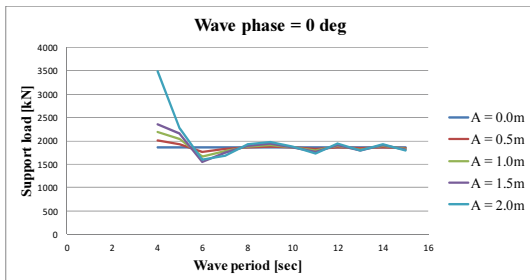


Fig. 12 Support loads by periods and amplitudes in scenario B

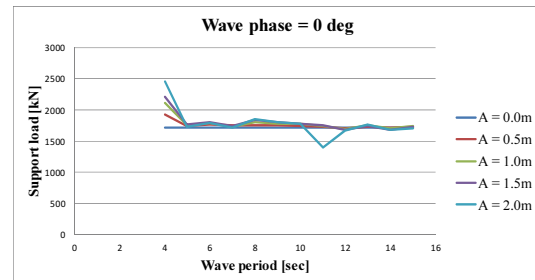


Fig. 15 Support loads by periods and amplitudes in scenario C

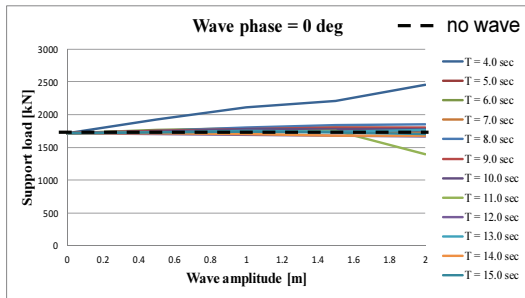


Fig. 16 Support loads by amplitudes and periods in scenario C

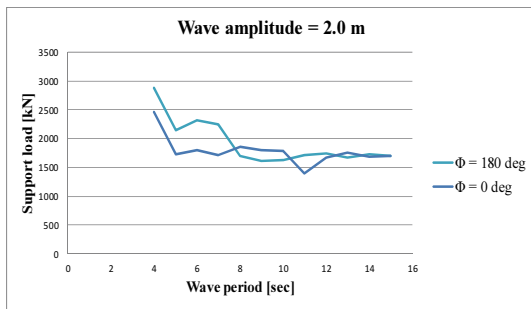


Fig. 17 Support loads by phases in scenario C

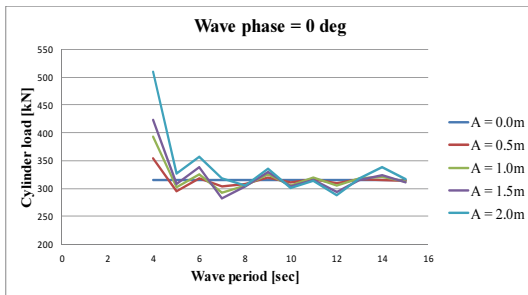
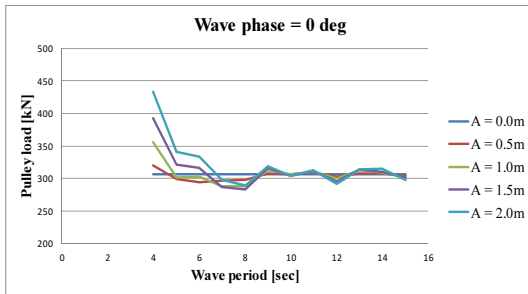


Fig. 18 Pulley and Cylinder loads in scenario A

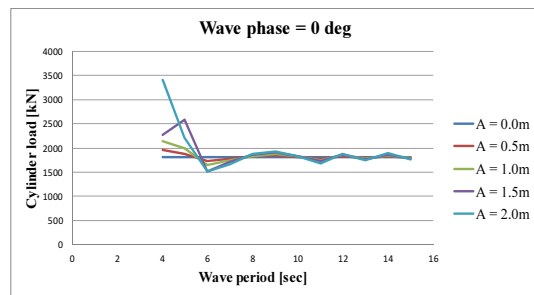
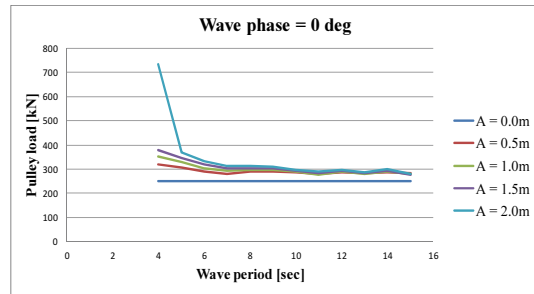


Fig. 19 Pulley and Cylinder loads in scenario B

결국, A-Frame 운용 시나리오의 주기와 선박 거동 주기, 위상들이 상호영향을 주기 때문에 이러한 하중 변화들이 발생하게 된다.

운용 시나리오 A, B, C에서 pulley와 cylinder에 작용하는 부하는 그림 18~20과 같으며, 시나리오 A에서의 최대부하가 cylinder에서 약 500kN, 시나리오 B에서의 최대부하가 support와 cylinder에서 약 3,500kN, 시나리오 C에서의 최대부하가 support와 cylinder에서 약 2,500kN 정도 발생하였다.

운용 시나리오에 따른 하중 분석 결과, 가장 큰 하중은 시나리오 B에서 도출되었으며, 일반적인 선상 장비 운용 조건이 6~8초 주기의 거동이므로 환경 조건에 따른 하중은 크게 안전성에 영향을 주지는 않는다. 하지만, support와 cylinder 부하 결과에서 A-Frame이 구동될 시 거대 관성력의 영향으로 부하가 크게 발생함을 확인할 수 있었으며, 최대 6배까지도 부하가 크게 증가하는 경향을 보였다.

Support는 선체와 용접되는 부분으로 구조적

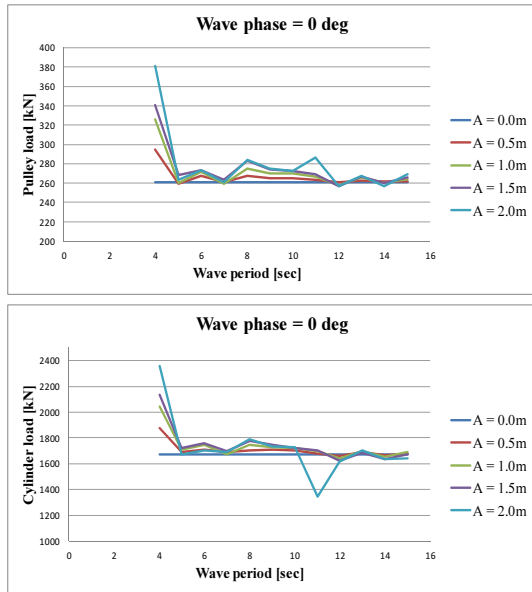


Fig. 20 Pulley and Cylinder loads in scenario C

강성을 확보한다면 큰 문제가 발생하지 않지만, cylinder의 경우 A-Frame 운용을 위한 구동 장치로써 최대 하중을 고려한 운용 제어 및 설치될 해양 장비의 중량 예측이 매우 중요하다. 따라서, A-Frame의 관성을 제어하기 위한 운용 각도에 따른 영향도가 분석되어야 한다.

### 3.2 운용 각도에 따른 결과

운용 각도에 따른 하중 영향도 평가를 위해, 그림 21과 같이 A-Frame의 기본 운용 각도인 90°와, 선체에 간섭되지 않는 최소 진수 각도인 60°에 대해 support, pulley, cylinder에 작용하는 부하를 분석하였다.

A-Frame 운용 각도에 따른 하중 검토 결과 표 1과 같이 90° 회전 운용에 비해 60° 회전 운용 시 부하가 절반 이상 감소함을 확인할 수 있다.

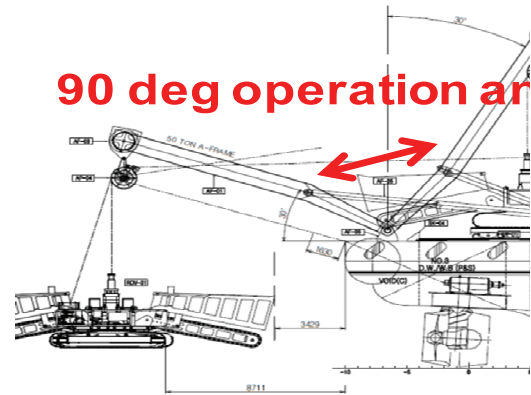


Fig. 21 Definition of operation angle

Table 1. Maximum applied loads by operation angles of A-Frame

	Operation Angle [deg]	Max. Applied Loads [kN]		
		at support	at pulley	at cylinder
Scenario A	90	310.39	303.53	314.08
	60	310.39	303.53	314.08
Scenario B	90	1842.45	282.62	1796.51
	60	786.92	271.99	671.17
Scenario C	90	1727.51	262.07	1681.89
	60	760.07	273.14	644.46

### 4. 결론

본 연구에는 개조 선박에 설치될 A-Frame의 설치 및 운용 안전성 검토를 위해 다양한 변화를 고려할 수 있는 동역학 시뮬레이션 기반 검증 기술을 적용하여 분석하였다. 분석을 위해 개발된 동역학 시뮬레이션 모델에 개조 선박의 거동 주기, 변위, 위상차와 A-Frame의 운용 각도 등의 운용 시나리오를 변화시켜 주요 하중 작용 지점인 support, cylinder, pulley의 작용 하중을 분석하



여 안전성 평가를 수행하였다.

개조 선박 A-Frame의 안전성 검토 결과 선박은 장주기의 낮은 변위를 갖을수록 선박 탑재 장비들에 작용하는 부하가 줄어들음을 확인할 수 있었으며, 위상차는 최대 부하에는 큰 영향을 주지 않았다. 또한, A-Frame 운용 시 가장 큰 부하는 진회수를 위해 해양 장비를 이송하는 시나리오에서 cylinder와 support에서 발생하였으며, 이는 A-Frame과 고중량의 해양 장비가 움직일 시 거대 관성력이 발생하여 cylinder와 support 부분에 큰 부하를 인가하기 때문이다.

A-Frame의 운용 각도 측면에서는 선체와 간섭이 발생하지 않으면서 해양 장비를 진회수시킬 수 있는 최소 각도로 운용하여야 시스템에 작용하는 부하가 최소화됨을 확인하였고, 이 역시 거대 관성력으로 인해 발생한다. 따라서, A-Frame의 효율적이고 안전한 운용을 위해서는 해양 장비의 중량에 따라, 안전 운용 각도를 정의하여 실운용에 활용하여야 한다.

따라서, 차기 연구에는 해양 장비 중량과 운용 각도에 따른 하중을 도출하여 cylinder 부와의 안전계수 평가를 통해 운용 매뉴얼을 개발할 계획이다.

## 사 사

본 논문은 해양수산부 국가연구개발사업 “해양 장비 실효역 시험평가 기술 개발”(PMS4090)으로 수행된 연구결과입니다.

## 참고문헌

[1] 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).

- [2] 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).
- [3] H. Kim, J. Kim, S. H. Park, S. Choi, and S. C. Huh, “A Study on the optimal design of lattice boom crane for offshore plant”, Journal of the Korea Society of Industry Convergence, vol. 22, no. 6, pp. 757-765, (2019).
- [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] H. J. Seong, C. K. Jeong, J. H. Jeon, S. H. Park, Y. G. Jung, and S. C. Huh, “A Safety Evaluation of Offshore Lattice Boom Crane”, Advances in Intelligent Systems Research, vol. 151, pp. 275-280, (2018).
- [6] Virtual Motion, “DAFUL 2020 R1 Verification Manual”, Virtual Motion, Inc., (2020).
- [7] J. W. Oh, C. H. Lee, S. Hong, D. S. Bae, J. H. Lim, and H. W. Kim, “Study on Optimum Curve Driving of Four-row Tracked Vehicle in Soft Ground using Multi-body Dynamics”, Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 28, no. 2, pp. 167-176, (2014).
- [8] J. Oh, D. Jung, H. Kim, C. Min, and S. Cho, “A study on the simulation-based installation shape design method of steel lazy wave riser (SLWR) in ultra deepwater depth”, Ocean Engineering, vol. 197, pp. 1-11, (2020).
- [9] J. Oh, C. Min, S. Cho, D. Bae, and H. Kim, “Concept of an advanced simulation-based design for engineering support of offshore plant equipment industries and its realization method”, Ocean Engineering, vol. 121, pp. 369-381, (2016).

- [10] K. Do, and J. Kim, "A Study on the Predictability of Eastern Winter Storm Waves Using Operational Wind Forecasts of KMA", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, vol. 30, no. 5, pp. 223-233, (2018).
- [11] 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).
- [12] J. W. Oh, J. Y. Jung, H. W. Kim, S. Hong, K. Y. Sung, and D. S. Bae, "Gap size effect on the tribological characteristics of the roller for deep-sea mining robot", *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 35, no. 1, pp. 120-126, (2017).

---

(접수: 2020.08.07. 수정: 2020.08.24. 게재확정: 2020.08.26.)