

권상 작업 중 슬링 파손으로 인한 블록 지상 낙하 충격에 대한 준정적 해석

김선엽¹·이탁기^{2,†}·윤정호³

동일조선 주식회사¹

경상국립대학교 조선해양공학과, 해양산업연구소²

경상국립대학교 대학원 조선해양공학과³

Quasi-Static Analysis of Block Impact Against the Ground Due to Sling Failure During Block Lifting

Seon-Yeob Kim¹·Tak-Kee Lee^{2,†}·Jung-Ho Yoon³

Dongil Shipyard Co., Ltd.¹

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry²

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recently, shipyards are making many efforts to reduce the number of the mounted blocks by increasing the block size. This is to improve productivity and reduce related costs by minimizing block movement and shortening the building period. However, as the blocks become larger, the weight increases considerably. If the target block has a damage due to an unexpected accident during block lifting, it may seriously cause a problem of the reusability of the block. In this study, a large-sized block of the offshore structure weighing 480 tons was lifting with a total of seven sling belts, and one sling belt was broken while it was moving, resulting in a situation in which a part of the edge of the block collided with the ground. The aim of this paper is to verify the structural integrity of the block that directly collides with the ground in the form of free fall due to the sling breakage. Considering that the hook loads acting on several sling belts holding the block are redistributed when a sling belt is broken, the hook loads were recalculated at the angle just before the sling breakage. These loads were used to check the safety of the sling belts. In addition, FE analysis was performed by calculating the amount of impact from the free fall condition, obtaining the impact area by using Hertz's contact theory, and then applying the impact load to the area.

Keywords : Block lifting(블록권상), Lifting lug(권상고리), Sling failure(슬링 파손), Block damage(블록 손상), Hook load(후크 하중), Structural integrity(구조 건전성)

1. 서론

최근 생산현장에서는 부분품 블록을 대형화하여 탑재 횟수를 최대한 줄임으로써 블록 이동 및 건조공기를 단축하고, 관련 경비를 줄이기 위해 많은 노력을 기울이고 있다(Richard, 1973). 그러나 블록이 대형화되면 중량 또한 상당히 증가하게 되며, 대형 중량 블록을 대상으로 권상 작업을 하기 위해서는

블록의 중량 계산, 권상 고리(lifting lug) 위치, 권상용 와이어 및 슬링 벨트(sling belt) 종류 등 전반적인 권상 작업에 대한 절차서에 따라 안전하게 작업이 수행되어야 한다. 특히 권상을 위한 와이어 또는 슬링벨트의 주기적인 검사와 관리는 작업 중 작업자의 안전 및 구조물 낙하 방지를 위해 철저히 준수되어야 한다.

산업안전보건법에 의하면, 화물 호이스트(Hoist)용 슬링 작업 시 안전사용하중(Safe Working Load, S.W.L)은 최소 파단하중

의 1/5로 규정되어 있으며, 검증용 하중시험(proof load test) 등 다양한 방법에 의해 반드시 증명을 받아 사용하도록 하고 있다. 이러한 슬링 벨트에 대한 엄격한 안전 관리에도 불구하고 Fig. 1과 같이 권상 또는 이송 중 슬링의 파손으로 블록이나 보트 등 권상 대상체의 낙하 및 파손이 발생하기도 한다. 블록이 파손이나 충격을 받은 경우, 주문주는 손상의 범위와 크기 등을 기초로 하여 구조 해석을 통한 건전성 평가를 수행하여 해당 블록의 폐기 또는 재사용 범위를 선정하기도 한다.

본 연구에서는 480톤에 달하는 대형 중량 구조물을 총 7개의 슬링 벨트로 권상하여, 이동하던 중 한 개의 슬링 벨트가 파단되고, 이로 인하여 해당 구조물의 모서리 일부가 지상과 충돌한 사고를 다루고 있다. 슬링 벨트의 파손으로 블록의 구조에 작용하는 하중이 재분포되는 점을 고려하여 각 슬링 연결부에 걸리는 하중을 재계산하였으며, 이를 정적 해석에 적용하고 그 블록의 손상 여부를 검토하였다.

이전의 관련 연구로 Jang and Lee (2017)의 정량적 위험 해석을 이용한 크레인 낙하물의 위험성 평가에 관한 연구와 Kim and Kim (2019)의 크레인 중량물 낙하사고에 대응한 설계개념과 간이 해석법에 대한 연구 등이 수행되었다. 또한, Cho (2010)에 의해 수행된 충돌 및 좌초에 의한 선체구조 손상 연구와 Yeom and Noh (2015)의 충돌에 의한 소성변형을 갖는 보강판의 잉여강도 해석 등이 수행되기도 하였다. 또한, Liu (2018)은 선박 간의 충돌이나 해양구조물과 선박 등의 충돌손상을 다룬 연구들을 고찰하면서 충돌 시 손상계산에 대한 절차를 정리하였다.

그렇지만, 건조과정에서 블록 권상 중 권상 대상체의 손상을 다룬 충돌 해석은 매우 드문 내용으로 거의 찾아보기가 어려웠으며, 토목, 항공, 건축 등 타 분야로 확대하여 충돌 손상에 대한 연구 결과를 참고하였다. 특히 자동차 분야의 경우 Jang and Chae (2000)에 본 논문에서 제시할 준정적 해석을 통하여 해석을 수행한 연구 내용이 있어, 이를 참조하여 준정적 해석을 통해 검증을 수행하였다.



(a) Damaged blocks



(b) Damaged boats (Kim et al., 2019)

Fig. 1 Examples of damaged blocks or boats during lifting

2. 대상 블록 구조물과 슬링배치

2.1 대상 블록 구조물

본 구조물은 해양용 강재인 API-2W-Gr.50으로 제작되었으며, 탄성 계수는 205,000 N/mm², 항복 응력은 355 N/mm², 밀도는 7,850 kg/m³이다. 블록 지상 낙하의 경우 주문주 측에서 선급 규칙 적용을 요구하는 사례가 빈번함으로 좀 더 엄격하게 판단하고자 이 계산에서는 DNV 규칙 (DNV-GL, 2016a, 2016b; DNV, 2014)을 바탕으로 항복응력의 1/3에 해당하는 118 N/mm²을 허용 응력으로 산정하였다. 참고로, 이중선체유조선과 산적화물선에 대한 공통구조규칙 (IACS, 2020)에 의하면, 선체구조에 대한 응력 평가 시에는 하중조건과 부재위치에 따라 항복응력의 0.5~1.0배의 허용응력이 적용된다. Fig. 2는 본 연구의 대상체와 매우 유사한 대형 중량 구조물의 권상 작업 준비 모습이다.

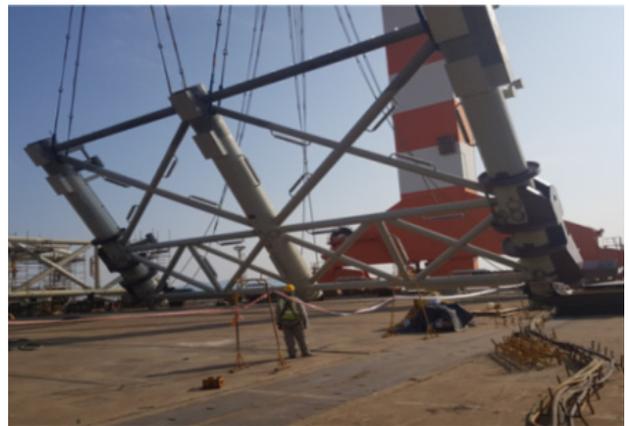


Fig. 2 Lifting tubular jacket structure by sling belt

2.2 슬링 배치

권상 작업을 위해 배치되는 슬링은 크게 상부 파트(upper part)와 하부 파트(lower part)로 나누어 Fig. 3과 같이 설치되었다. 이때, 상부 파트에는 안전사용하중이 140톤인 슬링 와이어를 4곳에 배치하였으며, 하부 파트에는 안전사용하중이 200톤인 슈퍼 슬링 벨트를 그림과 같이 3곳에 배치하였다.

상·하부에 적용한 모든 슬링은 모두 Endless 타입이며, Basket hitch 타입(U자로 구조물을 감싼 형태, Fig. 4)으로 연결하였다. 이때, ISO (1986) 및 KS (2017)을 참고하여 슬링 선택 시 2배의 안전율을 추가 고려하였다. 즉, 140톤인 상부 파트 적용 슬링의 안전사용하중을 280톤으로, 200톤인 하부 파트 적용 슬링의 안전사용하중을 400톤으로 높여 이를 만족하는 슬링을 선택하였다.

그러나 불행히도 하부 파트에 설치된 슬링 벨트 하나가 끊어지는 사고가 발생하였다. Fig. 3에 적색의 화살표로 별도로 표시한 L-SL30이 파손된 슬링이며, 이 사고로 인하여 지상과 충돌한

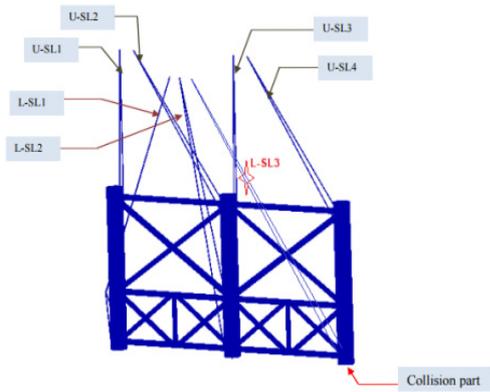


Fig. 3 Arrangement of sling belts



(a) Sling belt for lifting a tank



(b) Sling belt for lifting boats (Kim et al., 2019)

Fig. 4 Examples of sling belt and use case

부분은 그림에서 나타낸 바와 같다. 여기서 슬링 파손의 원인을 규명하는 것도 관심사일 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 슬링 파손에 의해 지상과 충돌한 구조물의 손상을 평가하고 사용 가능 여부를 판단하는 것에 초점을 두었다.

3. 구조 건전성 평가 과정 및 고려조건

3.1 개요

본 연구는 충돌 시, 발생하는 충격력을 구조물에 작용하는 하중으로 가정하고 구조물과 지상의 이격 간격이 작은 점을 고려하여 충격 지속시간이 짧을 것이라는 가정 하에 준정적 해석을 수행함으로써 낙하 충격에 대한 대상 구조물의 구조 건전성 여부를 검증하고자 하였다.

먼저, 권상 시 발생하는 Hook 하중을 산출하여 파손되지 않은 다른 부위의 슬링은 잔여하중을 견딜 수 있는지와 이 하중에 대하여 구조적으로 문제가 없는지에 대한 검토 후, 자유낙하에 의한 충격량을 계산하여 이를 유한요소해석 모델링에 하중으로 적용하여 결과를 도출하는 방법으로 수행하였다.

3.2 전체 평가 과정

본 연구를 수행하기 위해 적용된 전체 평가 과정을 단계별로 구분하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) Step-1 해석 조건(실작업 상황 반영)의 정의
 - 구조물 중량 : 480톤
 - 지면 충돌각도 : 70도
 - 지면과 충돌 거리 : 400mm
 - 슬링 배치 : 2.2절의 Fig. 3 참조
- (2) Step-2 Hook 하중 산출
 - 모든 슬링이 연결되어 있을 때의 Hook 하중 산출
 - 1개 슬링 파단 시, Hook 하중 재산출
- (3) Step-3 자유낙하 시, 충격량 계산
 - 계산에 의한 낙하 충격 에너지 계산
 - 충격에너지의 지속 시간은 짧음을 가정, 정적인 힘으로 하중 적용
- (4) Step-4 충돌부 강도 및 변형 계산
 - 유한요소 모델링
 - 만약 응력 수준이 적합한 허용 응력보다 낮으면 구조물에 위해가 되는 영향은 없는 것으로 판단함

3.3 고려조건

총 구조 중량은 총 480톤의 중량으로 산정되었다. 권상 조건은 일반적인 조선소의 골리앗 크레인을 이용하여 권상하는 것으로 가정하였는데, 충돌 시 지면과의 직립(Up-righting) 각도는 70도이고, 블록 구조의 최하부에서 지면까지 거리는 400mm로 설정하였다. 또한, 7개의 슬링 중 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 블록의 하부 파트인 한 개소의 슬링에서 파단되었고, 파단 이후 낙하 상태는 자유낙하 조건을 가정하였다.

4. Hook Load 산정

4.1 하중 계수

설계 하중과 실제 하중 간의 차이 및 하중을 작용 외력으로 변환시키는 해석상의 불확실성, 환경 작용 등의 변동을 고려하기 위한 Hook 하중을 산출하기 위해서 DNV(2014), DNV-GL(2016a) 및 DNV-GL(2016b)를 바탕으로 Table 1과 같이 하중계수를 선정하였다.

C4의 D.A.F(Dynamic amplitude factor)는 DNV-GL(2016b)의 Table 1에서 육상 작업 중 이동하는 경우를 고려하고 중량 100톤 이상 500톤 미만에 해당되는 계수 값을 적용하였다. Skew 하중 계수는 골리앗 크레인의 Equalizer 블록에 의해 각

Table 1 Load factors for hook load

Load case	Description	Factor
C1	Weight contingency	1.10
C2	CoG envelope	1.03
C3	CoG inaccuracy	1.10
C4	D.A.F	1.10
C5	Skew load	N/A
C6	C.F	1.30
Applied total load factor		1.78

슬링 포인트에 연결되므로 슬링 길이에 의한 차이는 없는 것으로 가정할 수 있으므로, 적용하지 않는다.

C6의 CF(Consequence Factor)는 골리앗 크레인의 Equalizer 블록에 의해 각 슬링 포인트에 연결되므로 DNV-GL (2016b)에서 제공하는 계수 중 Spreader beam and frames에 해당하는 값을 이용하였다. 최종적으로 적용된 하중 계수는 C1~C6로부터 계산된 계수들을 모두 곱한 값이다.

4.2 Hook 하중 산출

Hook 하중 산출을 위하여 일반적으로 권상 해석에 이용하는 빔 해석 모델링을 이용하였다. Fig. 5에는 모델링 형상 및 슬링 번호를 명기하여 보여주고 있다. 이 그림 내에 권상 작업 과정에서 손상된 슬링 부위와 그 손상에 의해 충돌이 발생한 부위 (Fig. 3 참조)를 별도로 표시하였다.

권상 작업을 위해 적용한 하중은 총 구조 중량에 상기 하중 계수를 곱한 480톤×1.781=855.1톤을 적용하였다. Table 2에 상기 하중을 적용하여 Hook 하중을 산출하였으며, 슬링 파단 전, 후로 나누어 표기하였다. 이는 각 슬링 포인트에서 아래의 Hook 하중을 버티기에 충분한 강도를 가지고 있는지 검토할 목적으로 SACS 프로그램 (Bentley, 2015)을 이용하여 계산하였다.

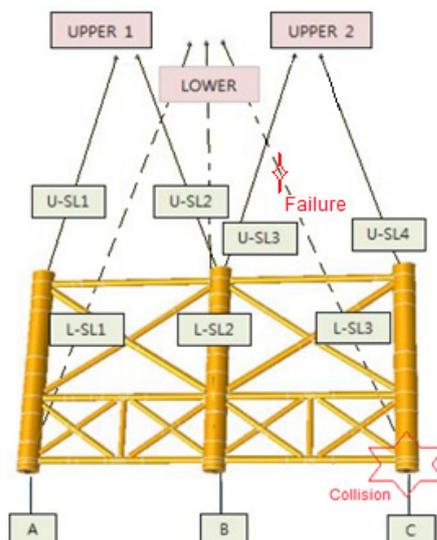


Fig. 5 Lifting analysis modeling by SACS program

Table 2 Hook load before and after breaking [unit: ton]

Hook no.	Hook load before breaking	Hook load after breaking
U-SL 1	109.3	142.5
U-SL 2	100.6	65.4
U-SL 3	102.0	69.2
U-SL 4	110.7	146.8
L-SL 1	131.1	2.9
L-SL 2	170.2	428.1
L-SL 3	131.1	-
Sum	855.1	855.1

Table 2에서 L-SL 3의 파손 이후 hook 하중 계산 결과에 의하면, L-SL 2를 제외하고 그 최대값이 146.8톤으로 앞서 2.2절에서 언급한 슬링의 사용안전하중 이하의 값이다. 그런데, L-SL 2의 경우 슬링 파손 후 계산된 hook 하중이 428.1톤이어서 2.2절에서 제시한 사용안전하중 400톤을 초과하고 있다. 이는 이러한 권상상태가 지속될 경우 안전상 문제가 발생할 수 있음을 보여주는 계산 값이라 할 수 있다.

다만, 서론에서 기술하였듯이 이들 슬링의 안전사용하중이 최소 파단하중의 1/5인 점을 감안하면 위의 계산과 같은 순간적인 사고에 의해 매우 커진 hook 하중 하에서도 파단은 발생하지 않을 것으로 추정되며, 실제 상황에서도 추가적인 슬링의 파단은 발생하지 않았다.

5. 충돌에 의한 충격량 계산

자유낙하로 인하여 발생하는 충격량을 자유낙하시의 속도와 그 지속 시간을 이용하여 수식으로 표현하여 산정하고, 산출된 충격량을 정적인 힘으로 간주하였다. Fig. 6의 아래 그림과 같이 Hertz의 접촉이론을 적용하여 지면과 접촉하는 면적을 산출하고, 앞서 구한 충격 하중을 그 면적에 분포 하중으로 적용하였다. 지면과의 접촉 면적을 구하기 위한 과정으로 지면과 충돌한 부분을 묘사하여 보여주고 있다.

적용하는 충돌 하중 F를 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$F_{impact} = MV/t \tag{1}$$

여기서 M 은 충격체의 질량, V 는 충격체의 낙하 속도, t 는 충격 시간을 의미한다.

총 7개의 슬링 중 하나만 파손된 상황과 준정적 해석을 위해 구조물의 중량에 이미 동적 효과를 반영한 점을 고려하여 충격 시간을 1초로 가정하였고, 이에 따라 위 수식으로 계산된 충격량은 4,203.4kN이며, 3.3절에서 가정한 직립각도 70도를 고려하면 실제 지면과 충돌한 부분의 각도는 20도가 되며, 이를 반영하여 실제 적용된 하중은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{applied} = F_{impact} \times \cos(20^\circ) \tag{2}$$

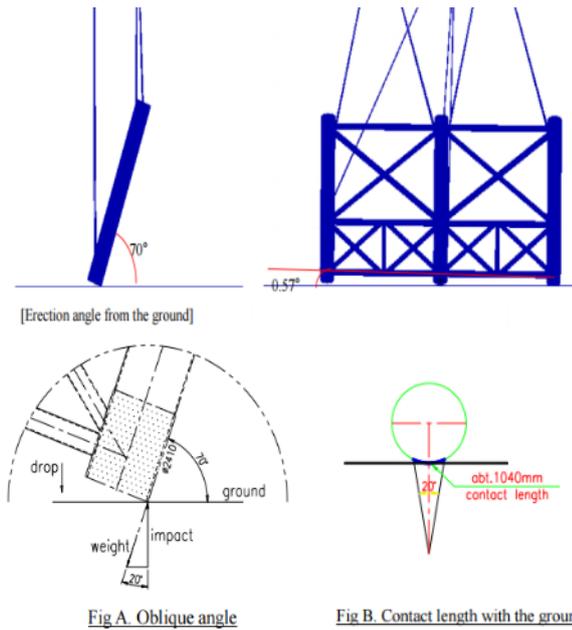


Fig. 6 Contact geography between structure and ground

따라서 위의 식을 적용하여 구해진, 실제 본 연구에서의 하중은 3,949.9kN이 된다.

6. 유한요소 해석을 통한 검증

검증하고자 하는 대형 블록 구조물에 대한 유한 요소 모델링은 Fig. 7에서 보여 주는 바와 같다. 요소의 크기는 50mm × 50mm로 구성하였으며, 각 슬링 접촉부와 주요 용접부에는 상세 요소 모델을 심어서 PATRAN/NASTRAN (MSC, 2011) 프로그램으로 해석을 수행하였다. 이때, 경계조건은 권상 작업을 위한 슬링 배치도와 같이, hook 포인트에서 고정 조건을 취하였다. 또한, 모델링 시 3 또는 4절점의 판요소를 적용하였으며, 슬링 라인은 dummy인 선요소로 취하였다.

유한 요소 해석 결과는 Fig. 8에 응력과 변형 측면에서 나타내었다. Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이, 지면과 직접 충돌한 부위에서 가장 높은 응력 값을 나타내고 있다. 즉, 충돌이 발생한 Row-C 하부에서 102.9 MPa의 응력이 발생되어, 앞서 선정한 허용응력 118.3 MPa보다 낮은 결과 값이 산출되었다.

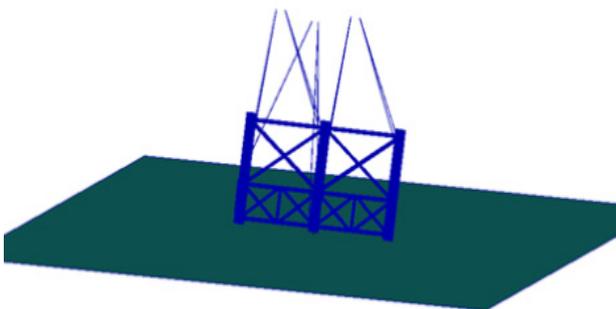
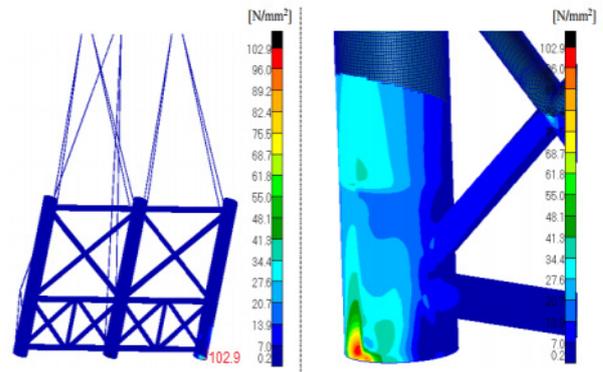
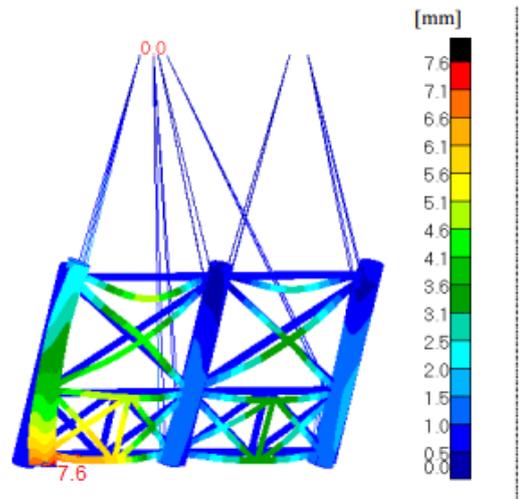


Fig. 7 Modeling for finite element analysis



(a) Stress plot



(b) Deformation plot

Fig. 8 Finite element analysis results for block

변형 측면의 결과는 상대 거리를 통한 값으로 산출되었으며, Fig. 8(b)에 변형 관련 결과를 나타내었다. 해석상, 탄성범위 내에서 7.6mm의 변형이 발생하며, 제한 기준인 23mm(L/100) 이 내에 있어 전체적인 결과 값은 만족한다고 할 수 있다.

7. 결론

본 해석은 중량 구조물인 대형 블록에 대한 권상 작업 중, 슬링의 파단에 의해 자유 낙하하여 지면에 충돌하는 구조물의 지면 충돌 부위의 구조적 건전성을 파악할 목적으로 유한요소법에 의한 구조해석을 수행하였다. 이때, 낙하하는 시간과 거리가 짧아 상대적으로 적은 충격량이 발생할 것을 고려하여 일반적인 동적 해석이 아닌 준정적 해석으로 구조해석을 수행하였다.

한편 지면과 직접 충돌한 부분 근처에서 국부적 함몰(dent)이나 굽힘이 발생할 가능성이 있었으나, 구조물 자체의 강성만으로도 이러한 변형에 견딜 수 있는 수준이었다고 생각되며 실제 구조물에서도 국부적인 변형이 발견되지 않았다.

본 연구에서는 몇 가지 가정을 통해 준정적 해석만으로 구조 건전성에 대한 검증을 수행하였지만, 차후 슬링의 파단 상황별, 구조물의 낙하 높이와 중량물에 무게에 따른 정적 및 동적 해석

을 함으로서 다양한 상황에 따른 좀 더 상세한 구조 건전성 판단이 가능하리라 생각된다.

References

- Bently, 2015, SACS Ver.5.7.
- Cho, S.R., 2010. Ship structural damages due to collision and grounding. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.7–10.
- DNV-GL, 2016a. *General Guideline for Marine Project*, 0001/ND.
- DNV-GL, 2016b. *Guidelines for Marine Lifting & Lowering Operations*, 0027/ND.
- DNV, 2014. *Lifting Operation*, OS-H205.
- IACS, 2020. *Common Structural Rules for Bulk Carrier and Oil Tankers*.
- ISO 8792, 1986. *Wire Rope Slings – Safety Criteria and Inspection Procedures for Use*.
- Jang, I.S. & Chae, D.B., 2000. The derivation of simplified vehicle body stiffness equation using collision analysis. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 8(4), pp.178–185.
- Jang, C.H & Lee, J.S., 2017. Risk assessment of dropped object in offshore engineering through quantified risk analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.143–150.
- Kim, B.S., 2019. Development of transporter for marine leisure ship with safety and operation support system. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(5), pp.486–494.
- Kim, U.N. & Kim, H.B., 2019. A study on the design concept and simplified analysis method in dropped object accidents by lifting crane. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.251–262.
- KS, 2017. *Webbing Slings for Lifting Purposes*, B 6241.
- Liu, B., Pedersen, P.T., Zhu, L., & Zhang, S., 2018. Review of experiments and calculation procedures for ship collision and grounding damage. *Marine Structures*, 59, pp.105–121.
- MSC, 2011, PATRAN/NASTRAN Ver.2012.
- Richard, M., 1973. *Systematic layout planning*, Boston, MA: Canners Books.
- Yeom, C.U. & Noh, I.S., 2015. Redundancy analysis of stiffened panel with plastic deformation due to collision. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(2), pp.161–169.

