

# 유한요소해석을 통한 잠수함 계류용 초크 받침대 변형 원인 분석 및 개선방안에 대한 연구

이영석<sup>1\*</sup>, 구자길<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국방기술품질원, <sup>2</sup>대우조선해양

## A Study on Plastic Deformation of Chock Stopper Equipped on Submarine and its Improvement Verified using FEM

Young-Suk Lee<sup>1\*</sup>, Ja-Gil Koo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Defense Agency for Technology and Quality, <sup>2</sup>Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering

**요 약** 본 연구는 유한요소해석을 통한 잠수함 초크 받침대 소성변형의 개선에 관한 내용으로 잠수함 건조 중 발생한 초크받침대 변형의 발생원인 및 개선방안에 대해 연구하였다. 초크받침대는 함을 고박하기 위해 설치된 계류훅줄의 장력으로부터 외력을 받는다. 이 때, 계류훅줄의 수량과 설치각도에 따라 초크받침대의 응답이 달라지는데, 초크받침대 설계 시 고려한 하중조건과 실제 함 운용 시 하중조건에 차이가 식별되었다. 이로 인해, 초크받침대 설계하중 이상의 외력이 작용하였고, 항복강도 이상의 응력이 발생하여 소성변형으로 이어졌다. 초크받침대의 구조 보강을 위해 부재의 형상 및 수량을 개선하였고, 일부 부재의 재질을 기존 DH36강에서 HY80강으로 변경하였다. 개선된 형상에 대해서는 유한요소 해석을 통해 설계타당성을 검증하였다. 설계단계에서 검토조건과 실제 장비운용 특성간의 상이함으로 인해 품질문제가 발생했던 사례를 고찰해보았으며, 향후 잠수함 갑판장비 설계 시 참조자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** This study presents a root cause analysis for plastic deformation of chock stopper equipped on submarines. The improved design with more structural capacity was verified using the finite element method. The chock stopper is subject to the tension of mooring ropes when a ship is moored at a pier. The mechanical response of the chock stopper affects the mooring arrangement, including the number of mooring ropes and configuration with the mooring bitt on the pier. A discrepancy was observed between the concept of the mooring arrangement designed at the beginning of the project and the actual operation later on. This difference overloaded the chock stopper than the design load and subjected it to higher stress over its yield stress, which caused plastic deformation. More stiffeners were applied, and the configuration of the chock stopper was improved to enhance the structural strength. The material of some stiffeners was changed from DH36 steel to HY80 steel. The reliability of the improved design of the chock stopper was verified using the finite element method. The discrepancy of the concept between engineering at early and actual operation could cause significant problems. This study would be useful for the engineering of mooring equipment on submarines.

**Keywords** : Chock, Chock Stopper, Plastic Deformation, Finite Element Method, Mooring, Mooring Rope

---

\*Corresponding Author : Young-suk Lee(Defense Agency for Technology and Quality)

email: Youngsuk\_lee@dtaq.re.kr

Received August 12, 2021

Revised September 6, 2021

Accepted October 1, 2021

Published October 31, 2021

## 1. 서론

계류(Mooring)란, 함정이 항구의 안벽에 정박하였을 때 함정의 안전을 도모하고자 로프(Rope)를 이용하여 안벽에 붙잡아 주는 방법을 뜻한다[1]. 함정은 조류, 파도, 바람 등의 영향으로 수상에서 위치 움직임이 끊임없이 발생하기 때문에 계류 시 단단한 고박을 통해 함정에 가해지는 충격이나 손상 등을 방지하여야한다. 계류 시스템의 설계 오류 또는 운용자의 미흡으로 인한 사고가 발생할 경우, 함정 손상, 계류훅줄 절단 등의 피해가 발생할 수 있으며, 이는 중대한 인명사고로도 이어질 수 있다[2].

한편, 잠수함의 갑판은 상선 및 수상함정과 같은 수상함과 대비하여 다음과 같은 특성을 지닌다. 첫째, 갑판면적의 제한이 매우 크며, 제한된 갑판설비의 종류와 수량으로 최적의 예인 및 계류 성능을 구현해야한다. 또한, 갑판설비의 설치 형태와 선체지지구조 등에 차이가 있다. 둘째, 잠항 시 유체저항 및 소음발생 최소화 등을 위하여 필요에 따라 갑판 장비를 탈부착하거나 갑판 하부로 설치위치를 이동시킬 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 잠수함 계류설비 설계 시에는 함정에 가해지는 외력과 외력으로부터 함의 움직임을 고정시키기 위한 계류설비의 형태와 운용개념, 용량 등을 면밀히 검토하여야한다.

함정 계류 시 계류훅줄은 갑판의 부가물에 긁히지 않도록 초크를 통과하여 캡스ตัน과 육상계류지점에 연결된다. 초크는 다양한 각도로 포설되는 계류훅줄의 이탈을 방지하며 3차원 방향의 하중을 지지한다. 따라서, 초크 및 초크 하부의 선체지지구조는 이 하중에 대한 구조강도적 안전성을 확보해야한다.

국내에서 건조되고 있는 잠수함의 초크 하부 선체지지구조에 소성변형(Plastic Deformation)이 발생하였다. 본 연구에서는 기존 구조설계의 원인을 분석하고 개선안을 제안하였으며, 개선 전/후의 설계에 대해 유한요소해석을 활용한 설계검증을 실시하였다.

## 2. 본론

### 2.1 잠수함 계류설비 개발 프로세스 검토

잠수함 계류설비의 사양과 용량을 선정하기 위한 탐색 개발 절차는 Fig. 1과 같으며, 소성변형의 원인파악을 위해 각 단계별 설계과정을 검토해본다.

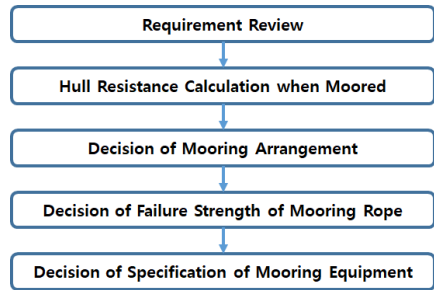


Fig. 1. Flow chart of basic design for mooring equipment

#### 2.1.1 잠수함 계류설비 개발 요구조건 분석

잠수함은 계류작업에 필요한 최소한의 갑판과 갑판설비를 갖추어야하며, 갑판과 압력선체 사이에 설비를 보관할 수 있어야한다. 계류설비 개발 시 설계기준은 미 해군의 계류설비 설계기준(DDS 582-1)으로 선정하였다 [3]. 이에 따르면, 함 계류 시 선체에 작용하는 외력은 풍력(Wind Force)과 조류력(Wave Force) 두 가지로, 함에 동시에 작용하는 것으로 가정한다. 외력의 작용점은 함의 무게중심(COG, Center of Gravity)이며, 방향은 Fig. 2와 같이 함을 계류지점으로부터 이격시키는 방향이다. 환경조건은 보수적인 설계를 위하여 황천 시로 설정하며, 황천 시 바람과 조류의 조건은 Table 1.과 같다.

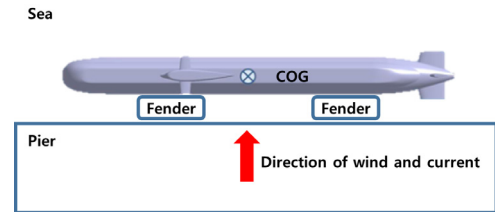


Fig. 2. External force on submarine when moored at pier

Table 1. Wind and Current condition of Heavy Sea

Weather Condition	Velocity
Wind(kts)	50
Current(kts)	3

#### 2.1.2 잠수함 계류 선체저항 계산

상기 황천 시 환경 조건에서 함에 작용하는 선체저항과 요우 모멘트(Yaw Moment)를 산출한 결과는 Table 2.와 같다.

Table 2. Summary of External Force on Submarine when Moored at Heavy Sea

External Force	
Longitudinal Resistance	0.2 kN
Transverse Resistance	1234.7 kN
Yaw Moment	2788.64 kN · m

2.1.3 계류훅줄 운용조건 설정 및 파단강도 선정

계류훅줄 운용조건은 Fig. 3과 같이 선수/미, 함 중앙 볼라드에 각각 2본씩, 총 6본을 육상과 연결하여 함을 고박하는 것으로 설정하였다. 이 때, 계류훅줄 식별을 위해 함수에서 함미방향으로 오름차순으로 식별번호를 부여하였다.

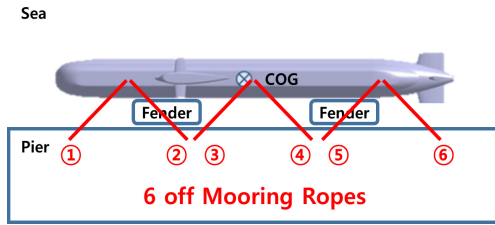


Fig. 3. Concept of mooring arrangement at pier at basic design stage of submarine development

2.1.2절에서 도출한 선체저항이 함에 작용할 경우, 계류훅줄에는 함의 움직임을 저지하기 위한 장력이 발생하며, 그 값은 Table 3.과 같다.

Table 3. Tension Force of 6 Mooring Ropes when Moored at Heavy Sea

	No. of Mooring Rope					
	1	2	3	4	5	6
Tension Force (kN)	325.0	341.5	323.7	273.9	351.2	211.7

Table 3과 같이 5번 훅줄에서 가장 높은 장력이 발생하였고, 이 값을 계류훅줄의 파단강도(최대 장력)으로 선정하였다. 이를 만족하는 계류훅줄 사양을 영국표준협회(BSI, British Standards Institution) 계류훅줄 표준인 BS 4928에서 탐색하였고, Table 4에 나타난 파단강도 353kN의 직경 40mm의 나일론로프를 최종 사양으로 선정하였다.

Table 4. Specification of Nylon Ropes from BS 4928-2[4]

Diameter(mm)	Breaking Strength(kN)
36	284
40	353
44	422

2.1.4 계류설비 사양(초크 구조강도) 선정

갑판과 압력선체 사이에 갑판설비를 보관할 수 있어야 하는 개발 요구조건을 충족시키기 위하여 초크는 Fig. 4와 같이 힌지를 적용하여 갑판하부로 접힘이 가능도록 설계되었다. 초크 사용을 위해 갑판상부에 설치했을 때는 초크 후미방향으로 발생하는 하중을 지지하기 위하여 초크받침대(Chock Stopper)를 적용하였다.

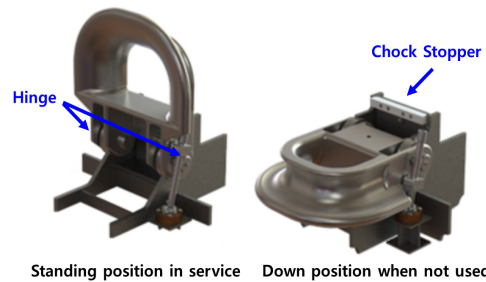


Fig. 4. Configuration and operation concept of chock and chock stopper

계류훅줄의 파단강도를 초크에 작용하는 최대하중으로 설정하고 구조설계를 진행하였다. Fig. 5는 초크에 설치된 계류훅줄의 개요이며, 계류훅줄에 작용하는 파단강도와 이를 지지하는 초크받침대의 반력을 나타내었다. 계류훅줄의 장력에 대한 초크의 반력은 식 1과 같으며, 계류훅줄의 설치각도에 따라 응답이 달라진다.

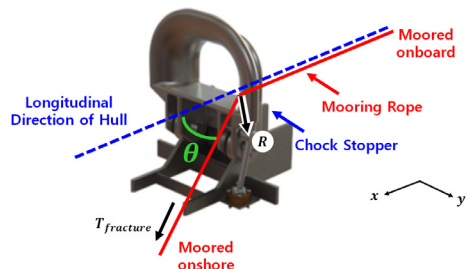


Fig. 5. Schematic Diagram of mooring rope and load

$$R_x = \begin{cases} 0 & (0^\circ < \theta < 90^\circ) \\ -T_{fracture} \cdot \cos\theta & (\theta > 90^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

$$R_y = -T_{fracture} \cdot \sin\theta$$

Where,  $R_x$  and  $R_y$  denote reaction force of chock in longitudinal and transverse direction respectively.  $T_{fracture}$  denotes fracture strength of mooring rope and  $\theta$  denotes angle of mooring rope with longitudinal direction of hull

보수적인 설계를 위하여 동일한 크기의 계류훅줄 장력 작용 시 가장 큰 반력을 발생시키는 운용각도( $\theta$ )를 일반적인 계류훅줄 운용각도 범위인 0도에서 90도 범위 내에서 탐색하였다.

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (2)$$

Where, R denotes net force of reaction force

식1과 식2에서 계류훅줄 각도가 예약일 경우  $R_x = 0$  이므로, 반력  $R$ 은  $R_y$ 와 같으며,  $R_y$ 는  $\theta = 90^\circ$  에서 최대가 된다. 따라서, 초크의 구조강도 해석은 계류훅줄 운용각도  $\theta = 90^\circ$  인 조건에서 실시하였다. 하중의 작용점은 계류훅줄이 초크에 지지되는 점으로 설정하였다.

상기 하중조건에서 초크에 발생하는 최대응력은 Fig. 6과 같이 255.9MPa로, 초크의 재질인 선박 선체용 고장력강 DH36강의 항복강도(355MPa) 이하이다[5]. 따라서, 황천 시 Fig. 3과 같이 안벽에 계류할 경우, 계류훅줄 및 초크는 구조강도적으로 운용상 이상이 없는 것으로 해석되었다.

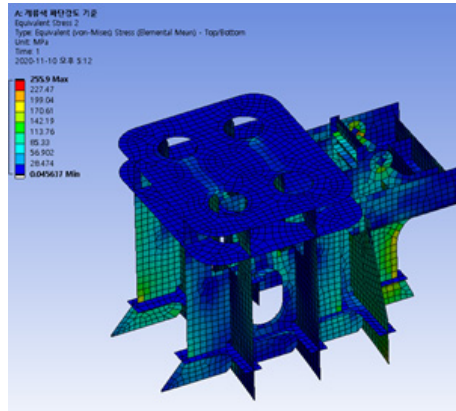
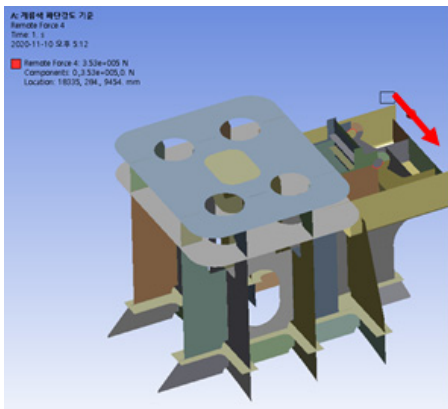


Fig. 6. Result of structural analysis of chock support and its foundation under maximum load in 90 degree direction

## 2.2 초크 받침대 소성변형 현상 원인분석

일반적인 선형의 상선 및 수상함정의 경우 충분한 갑판공간을 보유하고 있기 때문에 계류훅줄이 초크를 통과할 때 Fig. 7과 같이 계류훅줄이 예약범위 이외의 각을 형성하며 설치되도록 충분한 수량의 블라드와 초크를 배치할 수 있다.

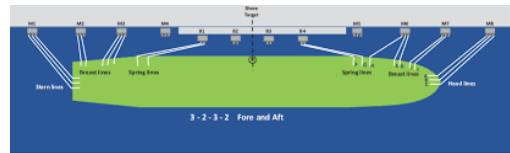


Fig. 7. Typical mooring arrangement of commercial ship

하지만, 잠수함의 경우 갑판구역의 공간적 제한으로 인해 Table 5.와 같이 선수 선미에 각 1개씩 총 2개의 초크를 배치하는 것이 일반적이다.

Table 5. Chock Application in Various Submarine

Ship Name	No. of Chocks
KSS-I/II/III (KR)	2
Colins(AU)	2
Harushio(JP)	2
Oyashio(JP)	2

따라서, 외부환경 및 함 운용조건에 따라 1개의 초크에 복수의 계류훅줄을 설치할 수 있고, Fig. 3상의 2번,

5번 계류훅줄의 경우 육상 계류지점(비트)와의 상대 위치에 따라 초크를 통과하며 90도 이상의 각도를 형성할 수 있다. 실제로 한국 해군은 갑판설비 운용 시, Fig. 8과 같이 5번, 6번 계류훅줄을 선수호스를 통과하여 설치하고 있으며(선미호스의 경우 1번, 2번), 이는 탐색개발 단계에서 고려한 하중조건과 상이하다.

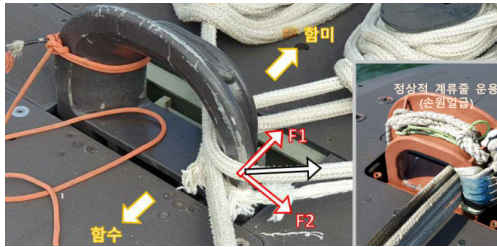


Fig. 8. Practice of mooring ropes' operation on chock

이로 인해, 함 진수 후 안벽 계류 중 Fig. 9과 같이 초크받침대에 초크 후미방향으로 약 5mm의 소성변형이 발생하였다.

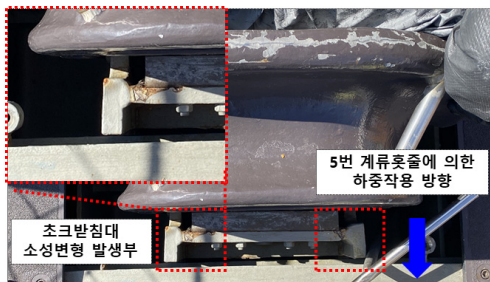


Fig. 9. Plastic deformation of chock support in longitudinal direction of hull

Fig. 10은 Fig. 8의 실제 계류훅줄 운용조건을 도식화한 것이며, 함미 초크에 5번, 6번 계류훅줄이 동시에 설치되었다.

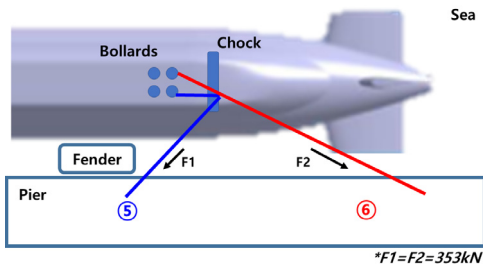


Fig. 10. Schematic Diagram of mooring ropes' operation practice

각 계류훅줄에 계류훅줄의 파단강도인 353kN의 장력이 작용했을 때, 초크의 기계적 응답을 유한요소해석을 통해 분석해본 결과, Fig. 11과 같이 최대 920MPa의 응력이 발생하였으며, 이는 재료의 항복강도를 크게 넘는다.

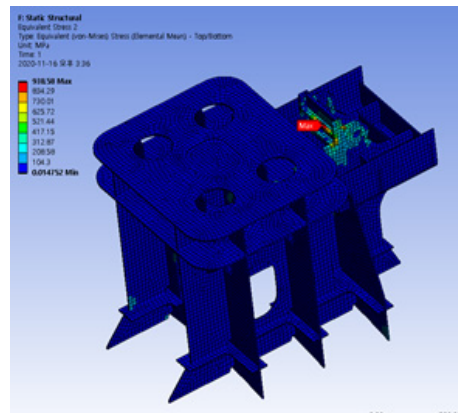
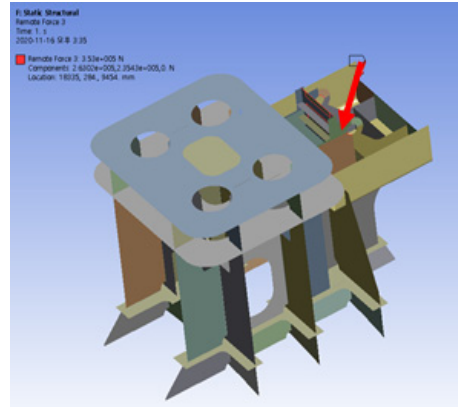


Fig. 11. Result of structural analysis of chock support and its foundation under maximum load in 90 degree direction

### 2.3 초크 받침대 구조강도 개선 결과

Fig. 10과 같이 5번, 6번 계류훅줄 두 본이 선수초크를 통과하는 계류훅줄 운용개념을 하중조건으로 설정하였고, 이에 맞는 초크의 구조설계를 진행하였다. 2.2절 및 Fig. 11을 통해서 재료의 항복강도를 넘는 응력이 초크받침대의 일부 구역에 발생하는 것을 식별하였다. 하중을 분산시키기 위하여 초크받침대의 형상을 개선하고 부재 개수 및 치수를 증가시켰다. 공간의 제약에 의한 형상 개선의 제한에 따라 형상 개선 후에도 기존 재료의 항복강도를 넘는 응력이 발생한 구역이 일부 존재하였다. 이러한 구역에는 약 552MPa의 항복강도를 가진 HY80 강을 적용하여 받침대의 구조강도를 강화하였다[6]. 형상

개선 전/후의 초크받침대 형상은 Fig. 12와 같다.

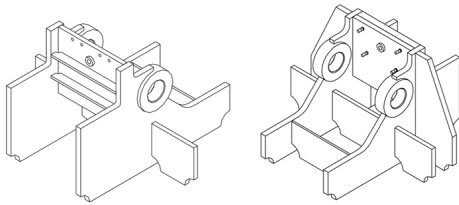


Fig. 12. Isometric View of Original Design of Chock Stopper(left) and Improved(right)

개선된 초크의 기계적 응답을 유한요소해석을 통해 분석해보았다. 하중조건은 Fig. 10에 기술된 하중조건으로 실시하였다. 그 결과, Fig. 13과 같이 최대 429Mpa의 응력이 발생하였으며, 이는 해당부의 재질인 HY80강의 항복강도 이하이다. 이로써, 개선된 초크 설계의 구조설계적 타당성을 검증하였다.

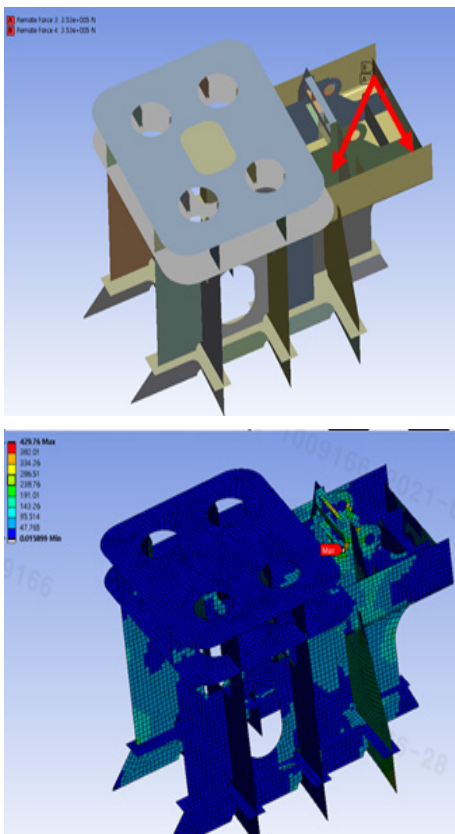


Fig. 13. Result of structural analysis of chock support and its foundation under maximum load

### 3. 결론

본 연구는 잠수함 건조 중 발생한 초크받침대의 소성 변형에 대한 원인을 규명하고 개선방안을 도출하였으며, 유한요소해석을 통해 개선방안에 대한 타당성을 검증하였다.

탐색개발 시 고려한 초크의 하중조건보다 실제 함 운용 시의 하중조건이 더욱 가혹하였으며, 기존의 초크에 항복강도 이상의 응력이 발생하여 소성변형으로 이어졌다.

초크에 작용하는 하중조건 설정 시, 탐색개발단계에서 설정한 것과 실제 운용방식에 차이가 있었고, 이로 인해 초크받침대에 소성변형이 발생하였다. 실제 계류훅줄 운용조건을 기존 초크에 적용해본 결과, 부재 항복강도의 약 3.6배의 응력이 발생함을 유한요소해석을 통해 검증하였다.

실제 계류훅줄 운용개념을 반영한 수정된 하중조건은 두 가지로, 초크 1기에 계류훅줄 2본이 설치되는 점과 계류훅줄 중 1본은 초크 후미방향으로 꺾여 함 종방향 기준선과 90도 이상의 각을 형성한다는 점이다.

상기의 운용조건을 고려하여 초크받침대 보강재의 수량과 형상을 개선하고, 응력이 높게 발생하는 일부 부재의 재질을 기존 DH36강에서 HY80강으로 변경하여 초크받침대의 구조강도를 향상시켰다. 개선된 형상에 대해서 유한요소해석을 통해 부재의 항복강도보다 낮은 응력이 발생함을 확인함으로써 설계 타당성을 확인하였다.

수중함은 수상함 대비 갑판면적이 협소한 특징으로 인해 일부 갑판장비의 운용특성에 차이가 발생한다. 그러나, 미 조선해양학회, 미 해군설계기준 등 대부분의 갑판장비 설계기준이 이러한 특성을 반영하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 설계단계에서 검토조건과 실제 장비운용 특성간의 상이함으로 인해 품질문제가 발생했던 사례를 고찰해보았으며, 향후 잠수함 갑판장비 설계 시 참조자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] The society of naval architects of Korea, Naval ships, pp.613, 2012, pp.198
- [2] Lessons learned for presentation to seafarers, Outcome of the fourteenth session of the sub-committee on flag state implementation, Committee report, IMO, pp. 8-9.
- [3] DDS 582-1 Calculations for mooring systems, p.77.

Department of The Navy Naval Sea Systems Command, 1987, pp.11-31

- [4] British Standard 4928 Specification for man-made fibre ropes.
- [5] Rajiv Mishra, Murray W. Mahoney, Yutaka Sato, Yuri Hovanski and Ravi Verma, Friction Stir Welding and Processing VII, p.362, Springer Cham, 2013, pp.49  
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48108-1>
- [6] John E. Holthaus, Michelle G. Koul, Angela L. Moran, "Property and microstructure evaluation as a function of processing parameters: Large HY-80 steel casting for a US Navy submarine", *Engineering failure analysis*, Vol.13, Issue 8, pp.1397-1409, Dec. 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.engfailanal.2005.10.004>

---

이 영 석(Young-Suk Lee)

[정회원]



- 2014년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 (공학사)
- 2014년 3월 ~ 2019년 7월 : 삼성중공업 재직
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

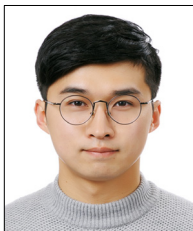
<관심분야>

기계/재료, 국방/과학

---

구 자 길(Ja-Gil Koo)

[준회원]



- 2013년 3월 : 대우조선해양 특수선품질경영부 근무
- 2016 2월 : 대우조선해양 공과대학교 조선해양공학과 (전문학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 조선해양공학과 학사 재학중 (졸업 예정)

<관심분야>

기계/재료, 국방/과학