

탈착계류시스템 반잠수식 무어링 풀리의 구조강도평가법에 관한 연구

이강수* · 박병재**

A Study on the Strength Evaluation Method of Submersible Mooring Pulleys for Detachable Mooring Systems

Kangsu Lee* and Byoungjae Park**

Key Words : SMP(Submersible Mooring Pulley) (반잠수식 무어링 풀리), Detachable mooring system (탈착계류시스템), AISC(American Institute of Steel Construction) (미국강구조학회), Finite element method (유한요소법), mesh convergence (메쉬수렴성)

ABSTRACT

Rapid progress is being made in foundational technology research and engineering for the construction of floating offshore wind farms. There is active development of technology for detachable mooring systems, which have strengths in addressing maintenance issues that arise in floating offshore wind farms and enhance their economic viability. Conventional detachable mooring systems use Kenter links inserted into the middle of mooring chains, which require excessive time for retrieval by Anchor Handling Tug Supply (AHTS) vessels during detachment operations. Moreover, these operations pose risks of link damage and accidents. Therefore, there is a demand for the development of a new concept of detachable mooring systems. The proposed detachable mooring system in this study simultaneously integrates a fairlead chain stoppers (FCS) and submersible mooring pulleys (SMP), which enables all operations to be conducted on the AHTS vessel without underwater tasks. This study detailed the design and safety evaluation of the SMP, a core component of the detachable mooring system, based on the minimum breaking load (MBL) of selected mooring lines according to the capacity of the floating platform. It referenced international codes (AISC Specification for Structural Steel Buildings D5, Pin-Connected Members) for design verification and performed finite element analysis to evaluate the strength of major components in installation and operation scenarios. Additionally, procedures and techniques for evaluating the structural strength of components under uncertain boundary conditions were proposed.

기호설명

R_u : LRFD 기반 설계강도
 Φ : 저항계수
 R_n : 허용강도
 R_a : ASD 기반 설계강도
 F_u : 재료의 인장강도
 F_y : 재료의 최소항복강도

약어

SMP : Submersible Mooring Pulley
FCS : Fairlead Chain Stopper
AISC : American Institute of Steel Construction
AHTS : Anchor Handling Tug Supply

* 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, 과학기술 연합대학원대학교

** 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소(교신저자)

E-mail : byounjae@kriso.re.kr

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2024.15.1.010>

Received : March 04, 2024, Revised : March 25, 2024

Accepted : March 25, 2024

1. 서론

최근 부유식 해상풍력발전단지건설을 위한 원천기술연구와 엔지니어링 기술의 급속한 발전이 진행되고 있다. 특히 단지건설을 위한 경제성과 기술적 안정성을 확보하기 위한 노력은 단지개발자 뿐만 아니라 부유식 풍력발전기를 구성하는 블레이드, 너트셀, 타워, 하부구조물 등 각각의 구성품에 관한 부품단위의 기술적 향상은 필수적으로 요구되고 있다. 특히 부유식 해상풍력발전단지의 경제성향상을 위한 기술적 노력 중 최근 부유체의 유지보수 이슈 발생 시 강점을 가질 수 있는 탈부착이 가능한 계류시스템에 관한 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 부유식 해상풍력발전 플랫폼의 위치 유지와 운동안정성 확보를 위한 필수적인 구성요소인 계류시스템은 중대손상으로 인한 대규모 유지보수 등 특별한 상황이 아니면 생애주기 동안 플랫폼에서 분리되지 않는다. 그러나 최근 기후변화로 인한 강력 태풍이 증가함에 따라 부유식 해상풍력 발전 시스템의 손실 및 붕괴 등을 방지하기 위한 피항에 대한 필요성에 대한 검토가 이루어지고 있는 실정이다. 기존 계류시스템의 탈부착은 Kenter Link를 Mooring Chain의 중간에 삽입하여 사용하고 있으나 탈부착 작업 시 수중에 존재하는 Kenter Link를 찾아 AHTS (Anchor Handling Tug Supply)로 인양하는데 과도하게 많은 시간이 소요되며, 해체 또는 연결 작업 시 Kenter Link의 파손뿐만 아니라 사고의 위험을 내포하고 있어 새로운 개념의 탈부착 계류시스템에 대한 개발이 요구된다. 본 연구를 통하여 개발하고자 하는 탈착식 계류시스템은 기존의 방식과는 달리 FCS (Fairlead Chain Stopper)와 SMP(Submersible Mooring Pulley)를 동시에 적용하여 설치와 탈착작업이 수중작업 없이 AHTS 위에서 모든 작업이 진행되며 특히, SMP에 Pulley를 적용하여 탈부착작업 시 제품 파손 및 손상이 없으며 해상에서의 작업시간을 획기적으로 감소시킬 수 있다.[1] 특히, SMP는 탈부착 작업 시, 부딪힘과 피로로 인하여 파손이 쉽게 발생할 수 있는 Mooring Line과 비교적 교체 없이 사용되는 Mooring Line을 분리·연결하는 구성품으로 설치 및 탈착 과정의 운영시나리오에 따라 발생하는 다양한 하중뿐만 아니라 계류라인의 일부로서 역할을 수행하여야 하므로 충분한 강도가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 탈착

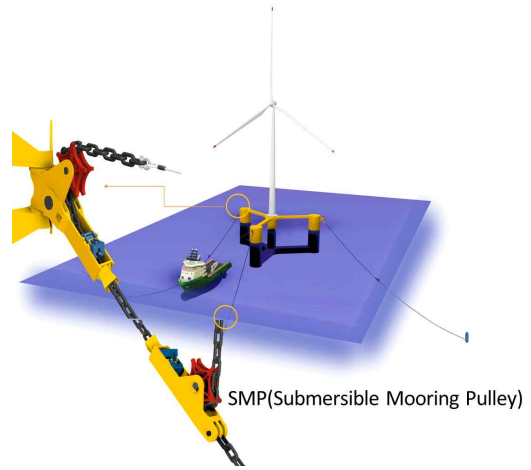


Fig. 1 SMP(Submersible Mooring Pulley) for FOWT

계류시스템의 핵심 구성품인 SMP 상세설계(안)에 대하여 부유체의 용량에 따라 선정된 계류선의 최소 파단 하중(Minimum Breaking Load, MBL)을 기반으로 국제코드(AISC Specification for Structural Steel Buildings D5, Pin-Connected Members)를 참고하여 설계를 검토하고, 설치 및 운용 시나리오에 따른 유한요소해석을 통하여 주요 부재의 강도평가를 수행하고 안전성을 검토하였다.[2] 또한, 이와 같이 경제조건의 불확실성으로 인한 구성품들의 구조강도평가에 관한 절차와 기법을 제안하고자 하였다. 본 연구에서는 부유식 해상풍력발전시스템이 거친 해양환경에서 25년 이상 수명 확보가 가능하도록 지속적인 위치유지가 중요하다. 이를 위한 계류선 설계에 따라 극한상태에 견딜 수 있는 최대장력 및 피로수명 확보가 필요하며 부유체 운동성능평가에 관한 상세연구가 진행되고 있다.[3,4] 본 연구에서는 공개된 DTU 모델인 10MW급 부유식 해상풍력터빈과 하부 부유체는 자체개발한 모델을 바탕으로 하여 전체 시스템을 구성하였다.[5] Fig. 1은 전체 시스템과 계류선의 배치 및 FCS(Fairlead Chain Stopper), 본 연구대상인 SMP(Submersible Mooring Pulley)에 대해 보여주고 있다. FCS는 부유체와 계류시스템 고정기능을 갖고 있으며 SMP는 계류시스템 탈부착 시 풀림과 조임을 양방향래치를 통해 구현될 수 있는 기능을 하게 된다.

2. 코드기반 설계 및 요구조건

2.1 3차원 형상설계 및 기능

SMP의 형상 모델은 계류선이 원활하게 양방향으로 이동 가능하도록 휠형상의 래치를 설치하고 계류선 단면이 용이하게 통과될 수 있도록 각 핵심 구성품들을 적절히 배치하였다. Fig. 2는 SMP를 구성하고 있는 각각의 핵심 구성품과 명칭을 보여주고 있고 Table 1은 구성품들의 재질과 항복강도, 형식 및 두께정보를 보여주고 있다. SMP에 작용하는 하중은 설치 및 탈착시 해상의 AHTS의 윈치를 통해 Chain Wheel Pin, Chain Wheel과 연결된 체인을 조작하는 경우와 운용시 FCS와 연결된 체인, 앵커와 연결된 체인이 각각 SMP의 Chain Stopper와 Shackle을 통해 장력을 유지하게 된다. 따라서 SMP를 구성하는 핵심 부품 중 Chain Stopper, Chain Wheel Pin과 연결된 Wall Plate, Shackle Pin Block에 관해 각각 구조강도와 설계강도를 만족해야 한다. 핀 연결부재로 구분할 수 있는 Wall plate와 Shackle Pin Block에 대한 AISC 코드 기반 설계치수에 대한 강도평가를 수행하고, 3차원 전선구조해석과 국부강도평가를 통해 응력분포를 확인하고 적절히 응력이 배분될 수 있도록 수치해석을 수행하였다. 각각의 구성품들이 하나로 조립된 경우에는 경계조건 설정에 따라 실제 하중부하위치가 변할 수 있고 응력집중 부위가 달라질 수 있다. 각 핵심구성품은 크게 회전부, 구조블럭, 핀 등으로 구성된다.

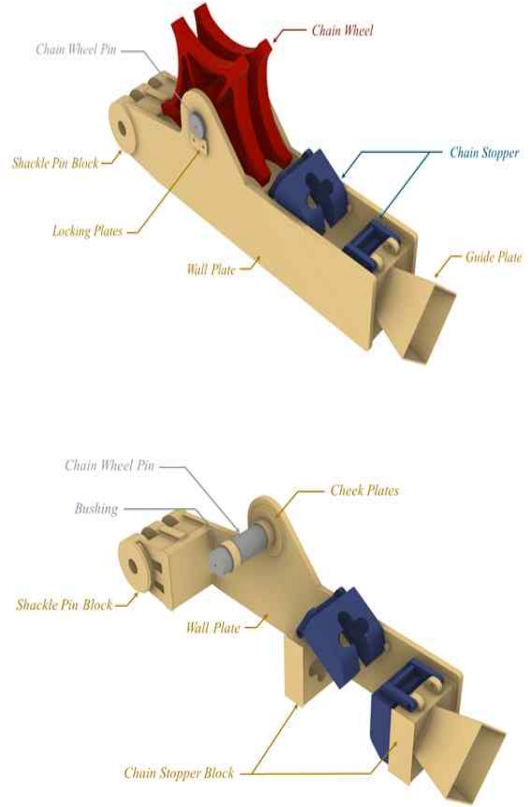


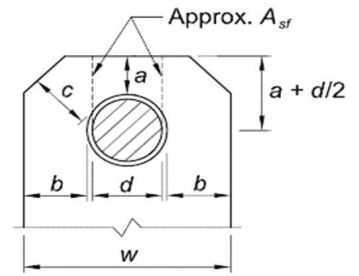
Fig. 2 Main component of Submersible Mooring Pulley

Table 1 List of Components for Submersible Mooring Pulley

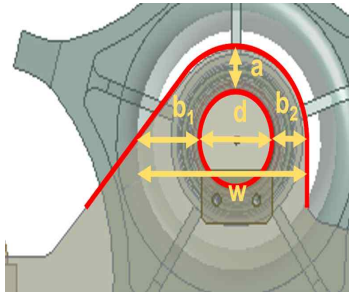
Components	Materials	Yield Strength(Mpa)	Allowable Strength(Mpa)
Chain Wheel	A148 Casting	585	526.5
Shackle Pin Block	A694 F65	450	405
Chain Stopper	A668 Class L	585~725	526.5~652.5
Chain Stopper Block	A668 Class L	585~725	526.5~652.5
Wall Plate	A131 Grade DH36	355	319.5
Cheek Plate	A131 Grade DH36	355	319.5
Locking Plate	A131 Grade DH36	355	319.5
Stiffener Plate	A131 Grade DH36	355	319.5
Guide Plate	A131 Grade DH36	355	319.5
Chain Wheel Pin	A479 Type 431 Stainless Steel	620	558
Chain Stopper Pin	A479 Type 431 Stainless Steel	620	558

2.2 설계치수 및 초기치 설정

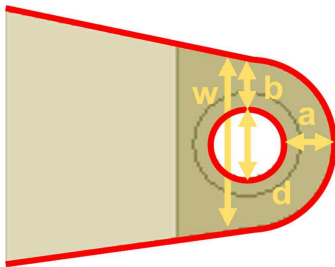
강도평가를 수행하고자 하는 Wall Plate와 Shackle Pin Block은 모두 핀과 연결된 부재로 볼 수 있으며, Fig. 3(a)와 같이 AISC(American Institute of Steel Construction) D5. Pin-connected member에 따라 설계치수를 정의할 수 있다. 여기서, d 는 핀의 지름, a 는 하중이 작용하는 방향의 판 모서리와 핀 모서리 사이의 거리, b 는 하중의 수직인 방향의 판 모서리와 핀 모서리 사이의 거리, c 는 부재의 fillet 처리된 부분의 판 모서리와 핀 모서리 사이의 거리, w 는 하중의 수직인 방향의 판의 총 길이를 의미한다. 각 컴포넌트의 설계치수는 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)와 같이 정의한다.



(a) Dimension of pin-connected members



(b) Dimension of wall plate



(c) Dimension of shackle pin block

Fig. 3 AISC based Initial design parameter and dimension

그에 따른 설계치수의 크기는 Table 2 및 Table 3과 같다. Wall Plate의 경우, 보수적인 설계 강도 평가를 위해 무어링 체인과 수직인 방향으로 윈치가 작용할 때를 기준으로 설계치수를 정의하였다.

Table 2 Dimensions of wall plate

Item	Symbol	Unit	Value
Plate thickness	t	mm	80
Pin diameter	d	mm	380
Plate width	w	mm	845
Distance between pin edge and plate edge measured plate's fillet edge	c	mm	160
Distance between pin edge and plate edge measured parallel to loading	a	mm	160
Distance between pin edge and plate edge measured normal to loading	b_1	mm	305
	b_2	mm	160

Table 3 Dimensions of shackle pin block

Item	Symbol	Unit	Value
Plate thickness	t	mm	205
Pin diameter	d	mm	207
Plate width	w	mm	500
Distance between pin edge and plate edge measured plate's fillet edge	c	mm	146.5
Distance between pin edge and plate edge measured parallel to loading	a	mm	146.5
Distance between pin edge and plate edge measured normal to loading	b	mm	146.5

위의 설계치수가 AISC D.5 Pin-connected member에 대한 설계요구사항을 만족하는지 검토를 수행하였다. AISC D.5 Pin-connected member 관련 코드는 아래의 식 (1)~(4)와 같은 설계요구조건을 제시하며 Table 3-2, 3-3의 설계치수가 식 (1)~(4)를 만족하는지 검토를 수행하였다. 여기서 식 (2)의 b_e 는 하중에 수직인 방향의 판 모서리와 핀 모서리 사이의 거리를 의미하는 b 에 대한 유효 길이를 의미하며, 식 (2)의 경우, b 의 값이 b_e 보다 작을 경우, b_e 대신 b 를 식 (3), (4) 계산에 사용한다. 강도만족은 wall plate와 shackle pin block으로 구분하여 평가하며 형상기반 코드체크 결과는 Table 4와 5에 나타내었다.

$$c \geq a \tag{1}$$

$$b_e = 2t + 16 \leq b \tag{2}$$

$$a \geq 1.33b_e \tag{3}$$

$$w \geq 2b_e + d \tag{4}$$

여기서, Wall plate와 Shackle Pin Block의 재료에 따른 강도는 ASTM Standard Specification for Structural Steel for ship에 따르며, 재질은 각각 ASTM A694 F65와 A131 Grade DH36, 항복강도는 460 및 355[Mpa], 인장강도는 530 및 490[Mpa]이다.

Table 4 Design requirements of wall plate

Item	Unit	Result	Criteria Check
$c \geq a$	mm	160	OK
$b_e = 2t + 16 \leq b$	mm	160	Not OK
$a \geq 1.33b_e$	mm	234.08	Not OK
$w \geq 2b_e + d$	mm	732	OK

Table 5 Design requirements of shackle pin block

Item	Unit	Result	Criteria Check
$c \geq a$	mm	146.5	OK
$b_e = 2t + 16 \leq b$	mm	146.5	Not OK
$a \geq 1.33b_e$	mm	198.8	Not OK
$w \geq 2b_e + d$	mm	500	OK

2.3 AISC 코드기반 설계 강도평가

설계치수를 기반으로 Wall Plate와 Shackle Pin Block의 허용강도를 계산할 수 있으며, 계산된 허용강도 (Available strength)와 설계 강도를 비교하여 설계 강도에 대한 평가를 수행하였다. 허용강도는 식 (5)의 LRFD(하중저항계수설계법, Load and Resistance Factor Design)와 식 (6)의 ASD(허용응력법, Allowable Strength Design) 방법으로 각각 계산을 수행하였다.

$$R_u \leq \Phi R_n \tag{5}$$

여기서, R_u 는 LRFD법을 통해 계산한 설계강도, Φ 는 저항계수, R_n 은 허용강도를 의미한다.

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \tag{6}$$

여기서, R_a 는 ASD법을 통해 계산한 설계 강도, Ω 는 안전율을 의미한다. AISC 설계코드에서 제안하는 pin-connected member에 대한 강도는 Fig. 4와 같이 인장으로 인한 (a)인장파괴강도, (b)전단파괴강도, (c)항복강도와 (d)핀으로 인한 베어링 강도의 총 4가지로 구분되며, 각각 계산한 허용강도 중 가장 작은 값이 해당 부재의 최종 허용강도가 된다. 4가지 경우에 대한 강도 계산은 식 (7)~(10)을 통해 SMP 컴포넌트의 치수를 토대로 계산을 수행하였다. 여기서, 식의 F_u 는 재료의 인장강도, F_y 는 재료의 최소항복강도를 의미한다.

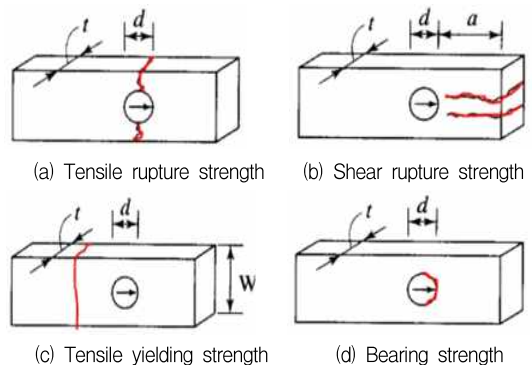


Fig. 4 AISC code based strength evaluation for design

$$R_n = F_u 2tb_e \tag{7}$$

$$R_n = 0.6F_u 2t(a + \frac{d}{2}) \tag{8}$$

$$R_n = F_y wt \tag{9}$$

$$R_n = 1.8F_y dt \tag{10}$$

위 식을 통해 계산한 강도를 LFRD, ASD 방법을 적용하여 각각 평가를 수행하였으며, 평가 결과를 Table 6과 7에 나타내었다.

Table 6 Design strength check for wall plate

Strength Check	LFRD Method			
	Tensile rupture [kN]	Shear rupture [kN]	Tensile yielding [kN]	Bearing [kN]
R_n	13,798	16,464	23,998	19,426
Φ	0.75			
ΦR_n	10,349	12,348	17,999	14,569
R_u	5,978			
$\Phi R_n / R_u$	1.73	2.07	3.01	2.44
Strength Check	ASD Method			
	Tensile rupture [kN]	Shear rupture [kN]	Tensile yielding [kN]	Bearing [kN]
R_n	13,798	16,464	23,998	19,426
Ω	2.0			
R_n / Ω	6,899	8,232	11,999	9,712
R_a	4,982			
$(R_n / \Omega) / R_a$	1.38	1.65	2.41	1.95

Table 7 Design strength check for shackle pin block

Strength Check	LFRD Method			
	Tensile rupture [kN]	Shear rupture [kN]	Tensile yielding [kN]	Bearing [kN]
R_n	31,834	32,595	46,125	34,372
Φ	0.75			
ΦR_n	23,875	24,446	34,593	25,779
R_u	8,917			
$\Phi R_n / R_u$	2.68	2.74	3.88	2.89
Strength Check	ASD Method			
	Tensile rupture [kN]	Shear rupture [kN]	Tensile yielding [kN]	Bearing [kN]
R_n	31,834	32,595	46,125	34,372
Ω	2.0			
R_n / Ω	15,917	16,298	23,063	17,186
R_a	7,431			
$(R_n / \Omega) / R_a$	2.14	2.19	3.10	2.31

LFRD 방법의 경우, resistance factor를 곱하여 최종 허용강도를 계산한다. 또한, 설계 강도가 활하중(Live load)인 경우 1.2, 사하중인 경우 1.6을 곱하여 적용한다. ASD 방법의 경우, safety factor로 나누어 최종 허용강도를 계산한다. Wall plate의 핀에 작용하는 하중의 경우, 해상의 AHTS 윈치에 의한 하중을 고려하였으며, 이 수치는 Winch capacity인 500 ton(4,982 kN)이 Wall Plate의 설계 강도에 해당한다. 윈치에 의해 작용하는 하중은 사하중으로 적용하여 LFRD 방법으로 평가 시 설계 강도에 계수 1.2를 곱하여 적용하였다. Shackle Pin Block에 작용하는 하중의 경우, SMP의 설계하중인 R5 등급 체인의 MBL(Minimum Breaking Load)인 22,294 kN의 절반에 해당하는 하중을 적용하였으며, 앵커와 연결된 체인 Shackle이 3개의 Shackle Pin Block과 연결되어 있으므로 위 하중의 1/3을 Shackle Pin Block의 설계 강도로 적용하였다. 설계 강도평가 결과, Wall Plate의 경우 Table 6과 같이 설계 강도가 최종 허용강도를 모두 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다. 최종 허용강도 대비 설계 강도의 비가 인장파괴강도에서 가장 작은 것으로 분석되었으며, 이는 Wall Plate가 인장파괴에 가장 취약할 수 있을 것으로 판단된다. Shackle Pin Block의 경우, Wall Plate와 마찬가지로 최종 허용강도 대비 설계 강도의 비가 인장파괴강도에서 가장 작은 것을 확인하였다.

3. 반잠수식 무어링폴리의 구조성능평가

3.1 SMP의 유한요소모델

SMP는 좌우가 동일한 형상이며 대칭면을 기준으로 하중이 작용하므로 대칭조건(Symmetry Condition)을



Fig. 5 FE model of SMP Whole system

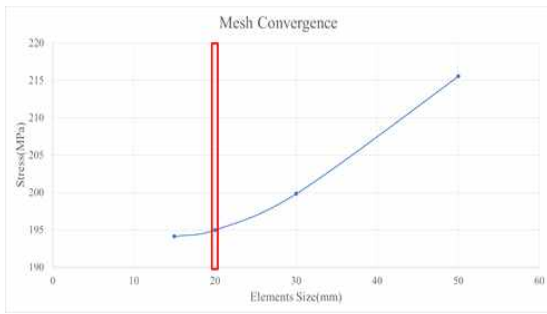


Fig. 6 Mesh convergence test result

적용하여 Fig. 5와 같이 모델의 절반에 대해서만 해석 모델을 작성하였다. SMP의 구조성능평가를 위한 모델링 및 해석은 상용해석 프로그램인 ANSYS Workbench V22 R1을 사용하였고 Fig. 6과 같이 구조격자(Mesh)는 수렴도 테스트를 수행하여 정확도와 해석시간을 고려하여 20 mm크기로 설정하였다.

3.2 SMP의 접촉 및 경계조건

각 Components 간의 접촉 및 경계조건에 사용된 마찰조건은 BV Guidance Note NI 604 DT R00 E pp.15를 참고하여 0.35를 적용하였다. Housing과 Stopper의 연결부는 Shackle의 움직임을 고려하여

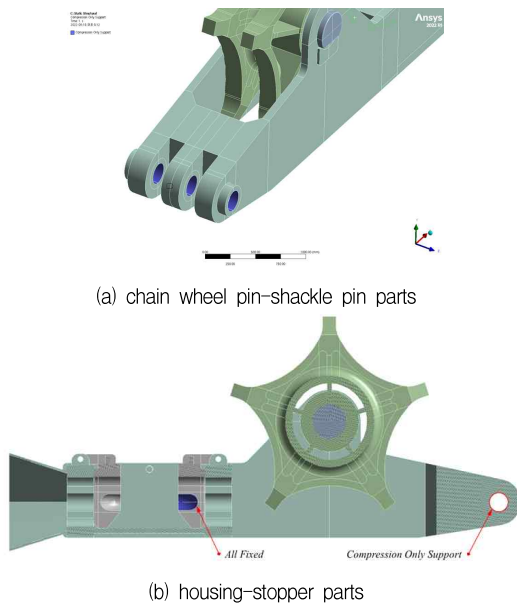


Fig. 7 Boundary conditions of SMP Components

'Revolute joint'를 적용하였다. Fig. 7과 같이 마찰로 인한 접촉응력을 고려하여 실제 발생하는 물리적 상황에 부합되도록 설정하였다.

3.3 SMP 작업 시나리오 및 하중케이스

SMP는 Mooring Chain의 일부로 Mooring Chain과 동등 혹은 그 이상의 강도를 확보하여야 하며 탈부착 작업 시 작용하는 하중을 극복하기 위한 강도가 확보되어야 한다. 따라서 본 SMP의 구조강도평가는 적절한 시나리오를 설정하고 구조강도 평가를 수행하였다.

3.3.1 Mooring Chain 역할에 관한 구조강도평가 (CASE 1)

SMP가 Mooring Chain의 역할을 수행하기 위해서는 Mooring Chain과 동등 혹은 그 이상의 강도를 확보하여야 하므로 탈착계류시스템에 적용되는 Chain의 MBL(Maximum Breaking Load)를 적용하여 구조강도평가를 수행하였다. 다만, 실제하중에 적용되지 않는 Chain Wheel, Bushing 및 Chain Stopper Pin은 해석시 고려하지 않았다. CASE 1의 경우에는 Shackle 연결부에 Shackle의 움직임을 고려하여 'Compression Only Support'를 적용하고 Upper Chain Stopper의 체인이 접촉하는 면에 MBL(22,294 kN)의 절반인 11.147 kN(Symmetry Condition)을 적용하였으며 적용된 경계조건 및 하중조건은 Fig. 8과 같다.

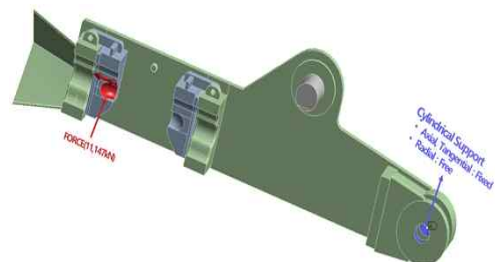


Fig. 8 Boundary conditions for CASE 1

3.3.1.1 CASE 1의 구조해석결과

Fig. 9와 Fig. 10과 같이 Chain Stopper와 Chain Stopper Block에서 사용된 재료의 항복응력 (526.5~652.5 MPa)을 초과하는 응력(최대 791 MPa)이 발생하

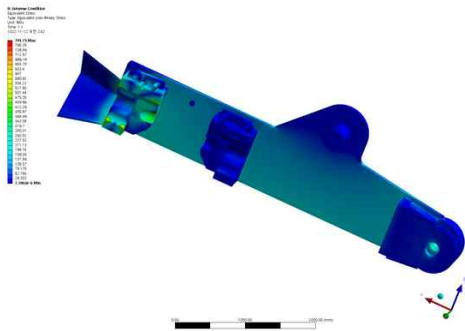


Fig. 9 Boundary conditions for CASE I

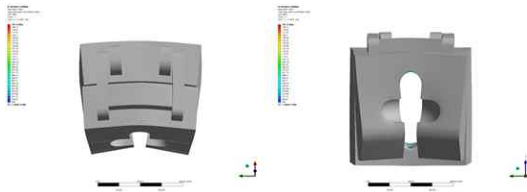


Fig. 10 Displacement of Chain Stopper & Stopper Block in CASE

Fig. 7 Boundary conditions of SMP Components

였으나 이를 제외하고 모든 파트에서 항복응력 이내의 응력분포가 나타난다. Fig. 9(a)와 (b)에서 SMP 전체 및 Chain Stopper와 Chain Stopper Block의 변위를 30 배 확대하여 보여주고 있으며 굽힘 하중에 의하여 최대응력이 발생하는 것으로 판단된다.

3.3.1.2 CASE I의 구조보강안

좌우의 Wall Plate는 얇고 길 형태로 굽힘에 취약할 수밖에 없으며 이를 보완하기 위하여 Chain Stopper와 Chain Stopper Block 하단부에 별도의 Plate를 설치하여 Wall Plate의 굽힘 강도를 증가시켜 구조강도평가를 재 수행하였다. 보강 Plate를 추가한 모델의 구조강도평가 결과는 Fig. 11과 같으며 최대응력이 579.61 Mpa로 최대응력이 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한, 변위측면에서도 Wall Plate의 변형이 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 따라서 SMP의 구조강도확보를 위하여 Wall Plate하단부에 보강판에 관한 상세한 수치최적화가 필요함을 확인하였다.

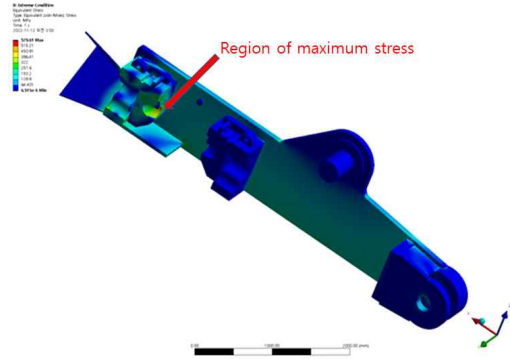


Fig. 11 Stress Distribution of Reinforced model of SMP in CASE I

3.3.2 Chain Wheel의 구조강도 평가(CASEII)

Chain Wheel은 5개의 Spoke를 가지고 있으며 Chain의 위치에 따라 Chain Wheel에 작용하는 하중이 달라지므로 Spoke에 수직으로 하중이 작용하는 경우와 Spoke가 없는 구역에 하중이 작용하는 경우에 대하여 구조강도 평가를 수행하였다. AHTS(Anchor Handling Tug Supply)에서 운용되는 Winch를 활용하여 SMP의 설치 및 탈착 작업이 수행되므로 Winch의 용량을 하중조건으로 적용하였다. 본 탈착계류시스템의 사양을 기준으로 활용될 수 있는 AHTS의 조사를 통하여 Winch의 용량은 500 ton으로 설정하였다. Chain Wheel은 Wheel Pin에 부착되어 회전하므로 중앙에 Cylindrical Support 조건을 적용하였으며 Wheel Spoke에 수직인 경우와 Wheel Spoke가 없는 부분에 500 ton(5,000 kn)을 적용하였으며 적용된 각각의 경계 조건 및 하중조건은 Fig. 12와 같다.

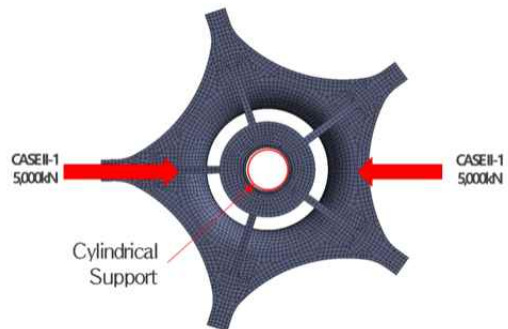


Fig. 12 Boundary conditions for CASE II

3.3.2.1 CASE II의 구조해석결과

Spoke에 수직으로 하중이 적용하는 경우의 변형과 응력분포는 Fig. 13의 위와 같으며 하중이 수직으로 작용하는 Spoke에 최대응력은 185.37 Mpa로 Chain Wheel 재료의 허용응력 (526.5 Mpa)을 만족한다. Spoke가 없는 구역에 수직으로 하중이 적용하는 경우의 변형과 응력분포 역시 응력이 241.25 Mpa로 Spoke에 수직하중이 작용하였을 때보다 큰 응력이 발생하지만 Fig. 12의 아래와 같이 Chain Wheel 재료의 허용응력 (526.5 Mpa)을 만족한다.

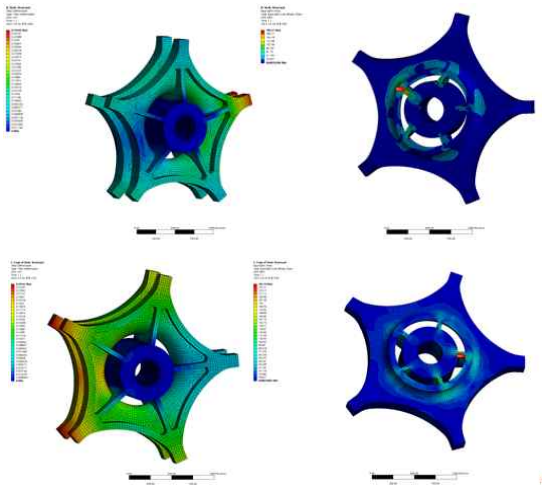


Fig. 13 Displacement and Stress of Chain Wheel in CASE II

3.3.3 설치 작업시의 구조강도 평가(CASE III)

SMP의 설치작업은 설치시나리오에 따라 AHTS에서 수행되며 SMP의 길이방향에 평행하게 하중이 작용하는 시나리오로 구조강도 평가를 수행하였으며 이때 사용된 하중은 Winch의 용량(500ton)을 적용하였다. 설치작업 시에는 Chain이 Lower Stopper에 접촉하고 Wheel Chain에 감겨 Winch를 통하여 SMP에 수직으로 당겨지므로 Shackle 체결부는 Cylindrical Support를 적용하고 Lower Chain Stopper에는 Compression Only Support 조건을 적용하였다. 앞의 CASE II에서 Chain Wheel의 구조강도가 허용응력을 만족하였으므로 본 해석에서는 Chain Wheel은 생략하고 Wheel Pin에 Symmetry Condition을 고려하여 Bearing Load(2,500 kN)를 적용하였으며 도식화하면 Fig. 14와 같다.

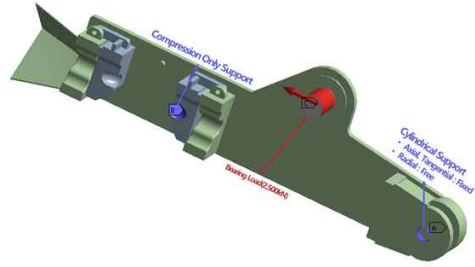


Fig. 14 Boundary conditions for CASE III

3.3.3.1 CASE III의 구조해석결과

Fig. 15와 Fig. 16은 CASE III 조건에서의 응력분포를 보여주고 있으며 모든 파트들은 허용응력을 만족하나 Chain Stopper와 Chain Stopper Block을 연결하는 파트에 최대응력이 1,165.2 MPa이 발생하였다. Fig. 15는 Chain Stopper와 Chain Stopper Block의 변위를 36 배 확대하여 보여주고 있다. Chain Stopper와 Chain Stopper Block은 일체형이 아니므로 하중 방향에 따라 미끄러짐이 발생하는 것으로 판단된다.

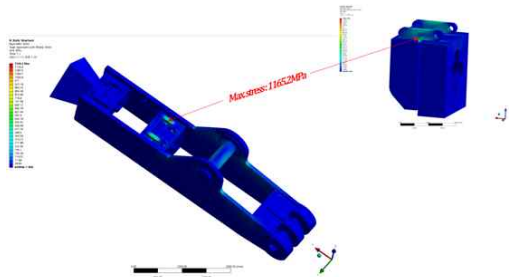


Fig. 15 Displacement of Chain Stopper & Chain Stopper Block in CASE III

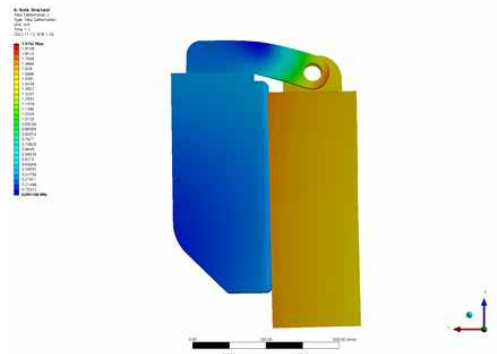


Fig. 16 Displacement of Chain Stopper & Chain Stopper Block in CASE III (Local)

3.3.3.2 CASE III의 구조보강안

Fig. 17과 같이 최대한 Chain Stopper 연결부 두께를 증가시켜 해석을 수행하였으며 강도평가결과, 최대응력은 670.59 MPa로 허용응력을 초과하나 항복응력범위에 놓여있음을 확인하였다. 이는 추가적인 보강재 추가를 통해 최적화를 수행할 예정이다.

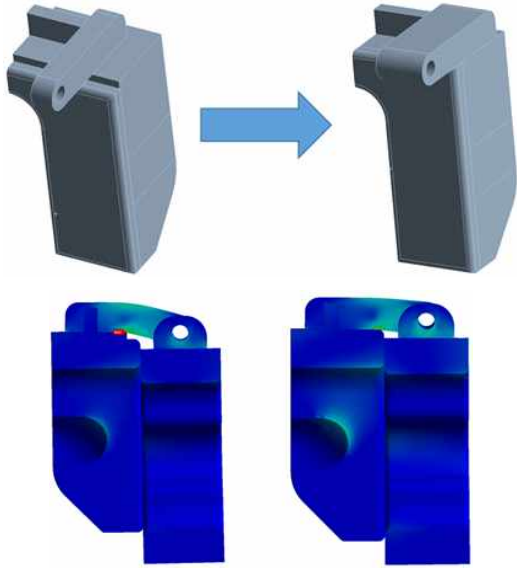


Fig. 17 Reinforcement model of Chain Stopper

3.3.4 탈착 작업시의 구조강도 평가(CASE IV)

SMP의 탈착작업은 탈착시나리오에 따라 AHTS를 활용하여 SMP의 길이방향을 기준으로 40°~60°의 각도를 갖고 하중이 작용하는 시나리오로 구조강도 평가를 수행하였으며 이때 사용된 하중은 Winch의 용량(500 ton)을 적용하였다. 탈착 작업시의 구조강도 평가의 경계조건은 설치 작업시의 구조강도 평가(CASE III) 시의 경계조건과 동일하며 탈착작업 시 초기조건이 40°~50°이므로 실제 Wheel Pin에 작용하는 하중은 20°, 25°, 30°로 250 ton(2,500 kN)을 부여하였다. 부여된 경계조건과 하중조건은 Fig. 18과 같다.

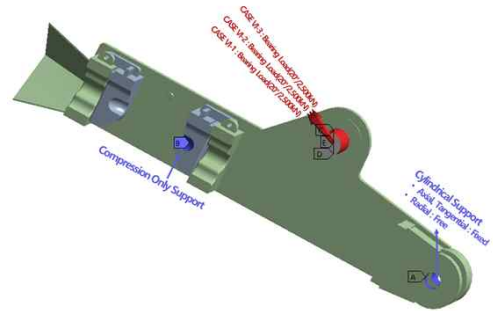
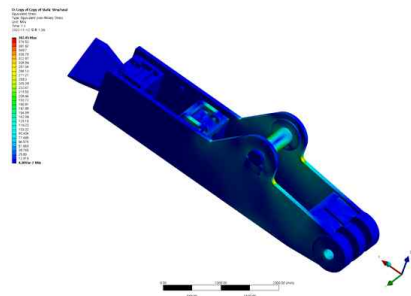


Fig. 18 Boundary conditions for CASE IV

3.3.4.1 SMP의 구조강도평가

탈착 작업 시나리오에 따른 구조강도평가 결과는 각도변화에 따라 Fig. 19에 보여주고 있고 그 결과는 Table 8과 같다. Fig. 20은 각 구성품에 작용하는 응력분포를 보여주고 있다. 응력은 직접 하중을 받는 Wheel Pin과, Chain Stopper와 Chain Stopper Block의 연결부 및 Wheel Pin이 연결되는 Wall Plate의 형상 변경지점에서 발생하고 있다. CASE IV-3(30°)의 Wheel Pin이 연결되는 Wall Plate의 형상 변경지점에서 최대응력이 322.92 Mpa로 허용응력을 초과하고 있으나 그 외의 모든 경우에는 항복응력을 만족한다. 허용응력을 초과하는 지점은 형상이 급격하게 변경되는 지점으로 보다 형상을 완만하게 수정함으로써 응력집중을 분산시키고 크기를 낮출 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Stress Distribution of SMP in CASE IV-1

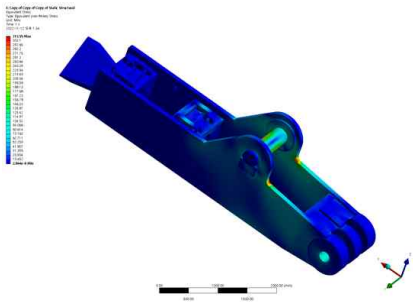
4. 결론 및 향후 연구

본 연구의 대상인 탈부착이 가능한 계류시스템은 기존에 없는 신형식의 novel design이며, 기존 가이드 라인을 따라 평가할 수 있는 부분도 있으나 수중에 중 성부력을 갖고, 다양한 해상환경조건에 견뎌야 하고 탈부착 시나리오에 따라 구조성능이 확보되도록 평가 되어야 한다. 탈착형 계류시스템의 개발을 위해 반잠 수식 무어링 폴리(SMP) 장치의 설계 및 적절한 경계 조건 설정기법, AISC코드기반 설계코드 체크 및 강 도평가를 수행하였다. 또한, 유한요소법 기반 3차원 상 세 구조해석을 통한 강도평가 및 구조성능개선, 보강 안을 마련, 제시하였고 그 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

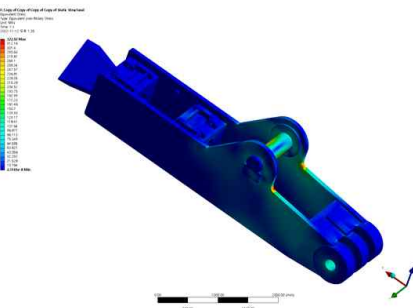
AISC기반 설계치수와 설정된 초기치를 통해 설정 한 형상정보는 휠이 부착되는 핀 구멍의 개구부 크기와 wall plate의 상하거리에 따라 강도변화는 매우 민감하다. 그에 비해 shackle pin plate의 상하거리는 상대적으로 덜 민감하다. AISC에서 제시한 LRFD 및 ASD법에 의한 강도평가 결과는 모두 만족한다. SMP 유한요소모델은 mesh convergence test를 수행하여 적절한 요소의 크기를 20 mm로 산정하여 합리적인 구조해석 결과를 도출하였다. 탈착계류시스템이 설치된 10 MW급 해상풍력발전시스템의 SMP 실제 운동 응답을 고려하여 SMP의 물리적인 거동에 부합하도록 적절한 경계조건과 접촉조건을 적용하여 구조해석을 수행해야 함을 알 수 있었다. SMP 설치 및 탈거 시에 관한 시나리오를 선정하고 구조취약부위를 파악하고 급힘 강도 증가를 위해 적절한 구조보강안을 마련하여 전체적인 응력분산과 허용범위 내에 만족할 수 있는 보강안을 제시하였다. 향후 연구에서는 각 핵심 구성 품의 치수를 결정하기 위한 파라미터 최적화와 구조경 량화를 통한 중량절감효과와 더불어 경제성 향상방안을 제안할 예정이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 신재생에너지핵심기술개발사업(한국에너지기술평가원-풍력분야)의 지원으로 ‘MW급 부유식 해상풍력 탈착형 계류시스템 개발(과제 번호: 20213000000030, 계정번호: PNS4560)’과제에서 수행된 연구결과 중 일부분을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.



(b) Stress Distribution of SMP in CASE IV-2



(c) Stress Distribution of SMP in CASE IV-3

Fig. 19 Stress Distribution of SMP in CASE IV

Table 8 Design strength check for shackle pin block

PART	Allowable Stress [Mpa]	Equivalent stress [Mpa]		
		CASE IV-1	CASE IV-1	CASE IV
Wall plate	319.5	304.19	313.55	322.92
Chain stopper	526.5~65 2.5	387.45	164.2	146.45
Chain wheel	526.5	227.04	227.38	227.38

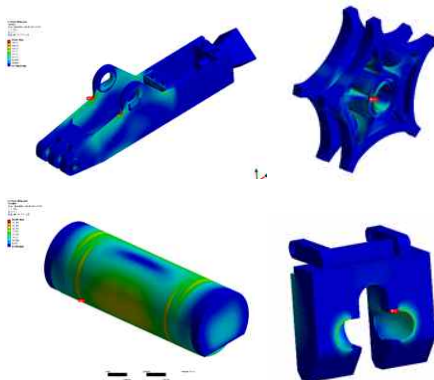


Fig. 20 Stress Distribution of Coponents for SMP in CASE IV

참고문헌

- [1] Youngjae Yu, Sanghyun Park, Youngsik Jang and Sangrai Cho, "Structural and Fatigue Strength Evaluation of a Fairlead Chain Stopper for Floating Offshore Wind Turbines", Journal of Wind Energy Vol. 14 No.4, pp.5-12
- [2] AISC, 2016, Specification for Structural Steel Buildings, D5, Pin-Connected Members
- [3] Kichan Sim, Kangsu Lee and Byoung Wan Kim, "Structural Response Analysis for Multi-Linked Floating Offshore Structure Based on Fluid - Structure Coupled Analysis", Journal of Ocean Engineering and Technology" Vol.37 No.6, pp.273-281
- [4] K Lee, Kim HS and KIM BW, 2023, "A study on the global motion performance of floater and mooring due to arrangement of detachable mooring system". Journal of Wind Energy Vol. 14 No.2, pp.26-33
- [5] Bak, Christian, 2013, "The DTU 10-MW Reference Wind Turbine", Denmark Technical University
- [6] IEC, 2019, Wind energy generation systems part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines, IEC 61400-3-2, 1st Edition, International Electrotechnical Commission.
- [7] DNV, 2021, Floating wind turbine structures, DNV-ST-0119, Edition June 2021.
- [8] DNV, 2021, Position mooring, DNV-OS-E301, Edition July 2021.
- [9] DNV, 2021, Part. 3 Hull - Chapter. 7 Finite element analysis, DNV-RU-SHIP, Edition July 2021