

# 10 MW급 부유식 해상풍력장치용 패어리드 체인스토퍼의 구조 및 피로 강도 평가

유영재\* · 박상현\* · 장영식\* · 조상래\*\*

## Structural and Fatigue Strength Evaluation of a Fairlead Chain Stopper for Floating Offshore Wind Turbines

Youngjae Yu\*, Sanghyun Park\*, Youngsik Jang\* and Sangrai Cho\*\*

*Key Words* : Floating Offshore Wind Turbine (부유식 해상풍력발전기), Fairlead Chain Stopper (패어리드 체인스토퍼), Structural Strength Analysis (구조강도해석), Fatigue Strength Analysis (피로강도해석), Disconnectable Mooring System (탈착형 계류시스템)

### ABSTRACT

In this study, a structural and fatigue strength evaluation of the Fairlead Chain Stopper (FCS) was performed as a part of the development of a disconnectable mooring system to be applied to 10MW floating offshore wind power generation systems. To estimate the load acting on the FCS, a 10 MW semi-submersible floater was designed using the 10 MW wind turbine developed by Technical University of Denmark(DTU). The minimum breaking load (MBL) of the grade R5 and 147mm mooring chain was applied for the FCS strength analysis. The fatigue load was obtained from the coupled analysis results conducted by a collaborating research institute. The structural and fatigue safety of FCS were evaluated in accordance with DNV codes. From the evaluation results, it was confirmed that the FCS satisfies the structural and fatigue safety requirements.

### 기호설명

*COD* : Co-Direction  
*DFE* : Design Fatigue Factor  
*DWR* : Design Working Range  
*DIA* : Design Inlet Angle  
*FLS* : Fatigue Limit State  
*FOWT*: Floating Offshore Wind Turbine  
*MBL* : Minimum Breaking Load  
*MUL* : Multi-Direction  
*NTM* : Normal Turbulence Model  
*NSS* : Normal Sea State  
*ULS* : Ultimate Limit State

$A_A$  : The area of the overturning moment curve  
 $A_B$  : The area of the righting moment curve  
 $d$  : Mooring chain diameter [mm]  
 $D$  : Accumulated fatigue damage  
 $k$  : Number of stress block  
 $n_i$  : Number of cycles in  $i^{th}$  stress block  
 $N_i$  : Number of cycles to failure at constant stress range  $\Delta\sigma_i$   
 $V_{in}$  : Cut-in wind speed [m/s]  
 $V_{out}$  : Cut-out wind speed [m/s]  
 $V_{hub}$  : Wind speed at hub height [m/s]  
 $V_{ref}$  : Reference wind speed [m/s]

\* (주)울산랩 기업부설연구소

\*\* (주)울산랩 (교신저자)

E-mail: srcho@ulsanlab.com

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.4.001>

Received : August 11, 2023, Revised : October 10, 2023

Accepted : October 11, 2023

## 1. 서론

현재 울산 앞바다에는 6 GW 이상의 부유식 해상풍력 단지 개발이 계획되어 있다[1]. 국내기업들이 이 시장에 진입하기 위해서는 고부가가치 핵심 부품들에 대한 기술경쟁력 확보가 절실히 필요한 시점이다. 또한 지구온난화로 해마다 강력해지는 태풍을 고려할 때 부유식 풍력발전기의 유지보수 비용 저감을 위한 새로운 형식의 탈착형 계류시스템 개발이 요구되고 있다. 본 연구는 10 MW급 부유식 해상풍력발전기에 적용할 수 있는 탈착형 계류시스템 개발의 일환으로 수행한 핵심 탈부착 장치인 Fairlead Chain Stopper(FCS)의 구조 및 피로 강도 평가에 관한 내용을 정리하였다. 개발 중인 탈착형 계류시스템은 FCS와 Submerged Mooring Pulley(SMP), Chain으로 구성되며 개발된 FCS는 기존 부유식용 FCS에 비하여 안전하고 빠른 탈부착이 가능하여 부유식 해상풍력발전기의 설치 및 해체 시간을 단축할 수 있다. 구조 및 피로 강도 평가를 위한 하중을 도출하기 위해서는 부유식 해상풍력발전기의 통합 하중해석이 필요하다. 이를 위해 10 MW급 반잠수식 부유체의 기본설계를 수행하였으며 개발된 부유체의 통합하중해석은 공동연구기관에서 수행하였다. 구조 강도 평가를 위한 하중은 R5 등급의 직경이 147 mm인 계류체인 MBL을 적용하였다. 피로 강도 평가는 설계 수명 동안 발생할 수 있는 피로하중을 산출하여 사용하였다. 구조 및 피로해석 결과를 사용하여 DNV 규정에 따라 강도 평가를 수행하였다. 본 연구의 수치해석에는 Abaqus 프로그램[2]을 사용하였다.

## 2. 부유체 기본설계

### 2.1 기본형상

탈착형 계류시스템 개발을 위한 부유식 해상풍력발전기는 반잠수식 형상의 부유체와 DTU의 10MW급 해상풍력발전기를 적용하였다[3]. 적용된 반잠수식 부유체는 Fig. 1과 같이 외측으로 3개의 칼럼(Column)과 타워를 지지하는 센터 칼럼 및 이를 연결하는 하부 폰툰(Pontoon)과 상부 데크(Deck)로 구성되었다. 부유체 내부에는 3개의 평형수 탱크를 구획하였으며 주요 제원은 Table 1에 정리하였다. 설치 수심은 150m이며 3개의 계류선을 Fig. 2와 같은 Catenary 형태로 설계하였다.

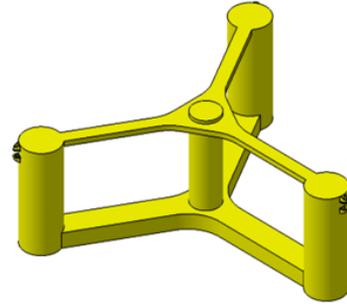


Fig. 1 Semi-submersible floating platform

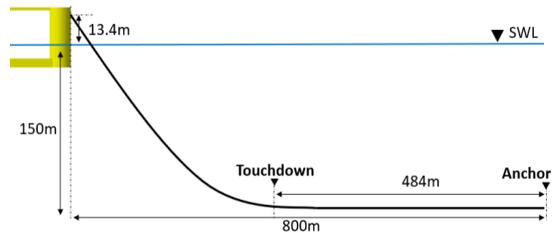


Fig. 2 Mooring configuration

Table 1 Principal particulars of FOWT

Parameter	Unit	Value
Design length	m	67.5
Design beam	m	44.97
Length over all	m	79.5
Design draft	m	15.5
Floating structure weight	ton	3400
Wind turbine with tower	ton	1330
Outfitting weight	ton	250
FCS weight	ton	120
Static mooring load	ton	461
Water ballast	ton	5167
Displacement	ton	10728

### 2.2 안정성 평가

설계된 부유체 선형과 평형수 탱크의 적합성을 확

인하기 위해 안정성(Stability) 평가를 수행하였다. IEC[4]와 DNV 규정[5]을 참고하여 정상 작동 및 정지 상태에서의 비손상 안정성을 평가하였다. 준정적 해석을 통한 안정성 평가 기준은 식 (1)을 만족할 것을 요구하며 반잠수식 구조물의 복원성능에 관한 안전 계수 ( $\gamma_{stability}$ )는 1.3을 적용한다.

$$A_B \geq \gamma_{stability} A_A \quad (1)$$

Table 2에는 정상 작동 상태와 정지 상태에서의 비손상 복원성 평가 결과를 정리하였다. 정상 작동 조건에서 정지 조건보다 안전 계수가 작게 나타나는데 이는 로터 회전으로 발생한 추력에 의한 Overturning moment가 50년 주기 극한 풍속에 의한 Overturning moment보다 크게 발생하기 때문이다. 결과적으로 설계된 부유체는 비손상 복원성 평가 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Intact stability evaluation

Condition	Requirement	Result( $A_B/A_A$ )
Operating	1.30	1.50
Parked	1.30	2.21

### 3. 구조 및 피로해석

#### 3.1 FCS 모델

개발 중인 탈착형 계류시스템의 핵심 장치인 FCS는 Fig. 3과 같으며 부유체 외측 칼럼 상부에 부착되어 계류선과 부유체를 연결한다. 현재 설계된 FCS 1개의 중량은 32톤이며 부품별 부재에 적용된 재질과 항복강도를 Table 3에 정리하였다. FCS의 구성 부품과 기능은 아래에 정리하였다.

- FCS housing: 다른 부품들을 지지하고 부유체 지지구조와 연결
- FCS arm: 체인을 가이드하고, stopper 하중을 FCS housing에 전달
- Chain wheel: 설치/해체 중 체인을 가이드
- Chain stopper: 운용 중 또는 설치/해체 중 발생하는 체인 하중을 지지

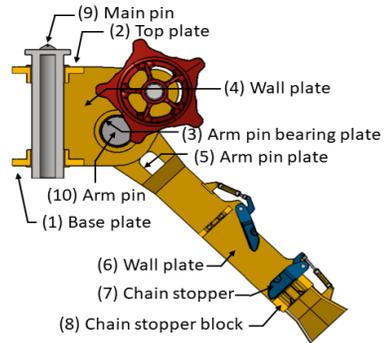
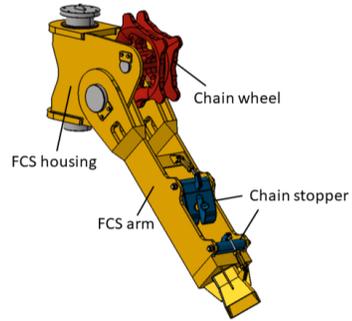


Fig. 3 Designed FCS

Table 3 FCS components and their yield strengths

Component		Material	Yield strength [MPa]
FCS housing	(1) Base plate	A694 F70	485
	(2) Top plate	A694 F70	485
	(3) Arm pin bearing plate	A694 F70	485
	(4) Wall plate	A131 DH36	310
FCS arm	(5) Arm pin plate	A131 DH36	310
	(6) Wall plate	A131 DH36	310
	(7) Chain stopper	SCM 440	834
	(8) Chain stopper block	A694 F70	485
Pins	(9) Main pin	SCM 440	834
	(10) Arm pin	SCM 440	834

### 3.2 유한요소 모델

유한요소해석은 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하였으며 재질 특성은 탄성계수 206 GPa, 포아송비 0.3을 적용하였다. 비선형 접촉 해석의 수렴성을 검증하기 위해 접촉부에서의 요소 크기에 따른 수렴성을 확인하였다. Fig. 4에 요소 크기에 따른 등가응력 결과를 보여주며 Plate는 30 mm 이하에서, Pin은 20 mm 이하에서 등가응력이 수렴된다. 수렴성 해석의 결과를 바탕으로 접촉부의 요소 크기는 15 mm 이하로 생성하였으며 생성된 유한요소 모델은 총 313,621개의 요소와 418,921개의 절점을 가진다. 생성된 유한요소 모델은 Fig. 5와 같다.

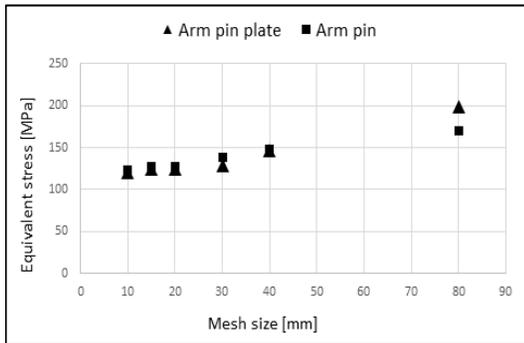


Fig. 4 Result of mesh convergence test

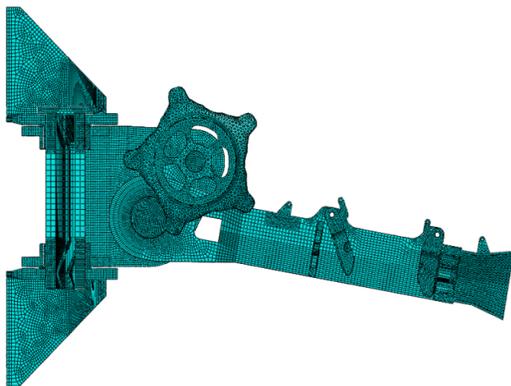


Fig. 5 Finite element model

### 3.3 해석 경계조건

해석 모델은 Fig. 6과 같이 FCS와 부유체 지지구조 일부를 포함하며 부유체 칼럼과 연결되는 부분의

변위는 구속하였다. 해석 시간을 줄이기 위해 수직면에 대한 대칭 조건을 이용하여 반 모델을 사용하였다. 적용된 구속조건 및 접촉 조건은 Table 4와 같다.

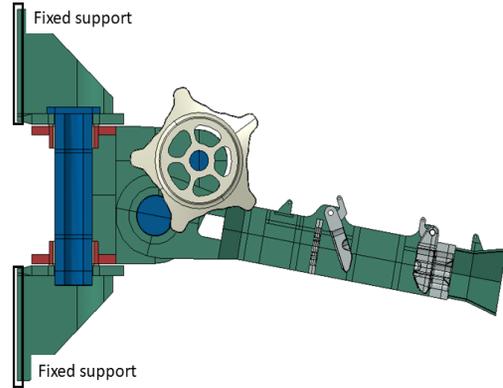


Fig. 6 Analysis model

Table 4 Boundary conditions

Boundary	Component	Condition
Constraint	Support	Fixed
Contact	Steel to steel	Friction coefficient (0.5)
Contact	Steel to bushing	Friction coefficient (0.3)
Contact	Bolting	Tie

## 4. FCS 구조 강도 평가

### 4.1 구조 하중 산정

구조 강도 평가를 위한 하중은 체인의 MBL을 적용하며 R5 등급의 147 mm 직경 계류 체인의 MBL은 DNV 규정에 따라 수식 (2)로부터 계산되었다[6].

$$MBL = 0.0304d^2(44 - 0.08d) \quad (2)$$

하중이 적용되는 설계 각도는 Fig. 7과 같으며 본 해석에서는 수평면에서의 설계 각도(DWR) 0°와 수직면에서의 설계 인입각(DIA) 10°와 24.5°를 적용한다.

10 °는 DNV 규정에서 요구하는 최소 각도이며, 24.5 °는 통합하중해석 결과로부터 도출된 계류선 최대 장력 발생 각도이다.

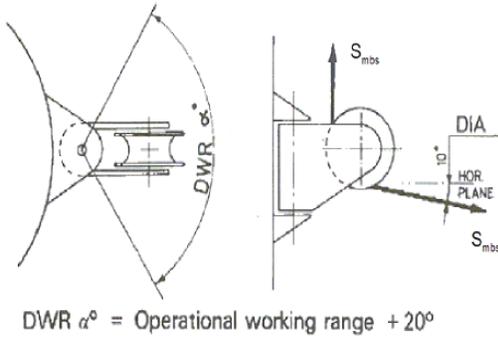


Fig. 7 Load application angles [6]

#### 4.2 구조해석

구조해석은 Abaqus 6.22 버전 소프트웨어를 사용하였으며 최종 변위와 등가응력 값을 확인하였다. 계류시스템의 구조해석에서 체인의 MBL을 적용할 때 FCS 자재의 허용 등가응력은 재질의 항복응력의 90%를 적용한다[6]. Fig. 8과 Fig. 9는 DIA가 10°일 때의 해석에서 FCS의 등가응력 분포와 FCS Arm의 변위 분포 결과를 보여준다. 최대 등가응력은 662 MPa로 Chain과 Chain stopper의 접촉부에서 발생하며 이때 FCS Arm에서는 5mm 정도 변위가 발생한다.

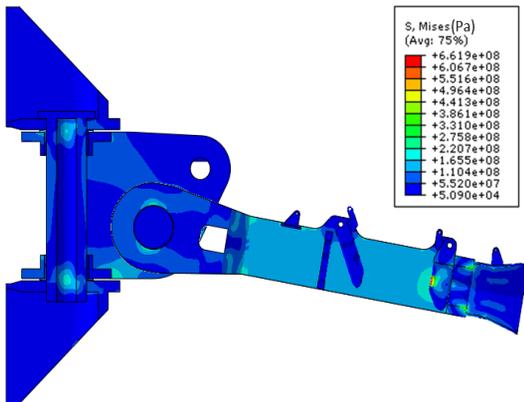


Fig 8 Equivalent stress of FCS at 10°

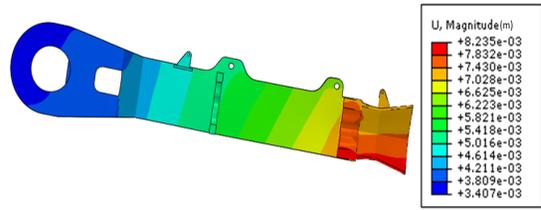


Fig. 9 Displacement contour of FCS Arm at 10° (scale factor x50)

#### 4.3 구조 강도 평가

구조해석 결과 발생하는 최대 등가응력과 허용응력 만족 여부를 Table 5에 정리하였다. 결과를 보면 다른 경우는 기준을 모두 만족하지만 FCS housing의 wall plate(part 4)에서 최대 등가응력(283 MPa)이 허용응력(279MPa)을 초과하는 것을 볼 수 있다.

FCS housing의 Wall plate에서의 응력 분포는 Fig. 10과 같다. 그림에서 Base plate와 Wall plate가 직각으로 교차하는 부에서 큰 응력이 발생하는 것은 fine mesh(20x20x20mm)의 적용과 급격한 형상 변화로 인하여 국부적으로 Peak stress가 나타난 결과로 볼 수 있다. Peak stress의 경우 허용응력의 1.7배까지 적용할 수 있으므로 구조 강도를 만족한다[7]. 결과적으로 설계된 FCS는 구조 강도를 만족한다.

Table 5 FCS Structural safety evaluation result

Part	Component	Allowable stress [MPa]	Max. equivalent stress [MPa]	
			10°	24.5°
(1)	Base plate	437	236	190
(2)	Top plate	437	199	277
(3)	Arm pin bearing plate	437	319	304
(4)	Wall plate	279	283	217
(5)	Arm pin plate	279	246	250
(6)	Wall plate	279	246	267
(7)	Chain stopper	751	662	662
(8)	Chain stopper block	437	436	436
(9)	Main pin	751	242	257
(10)	Arm pin	751	95	93

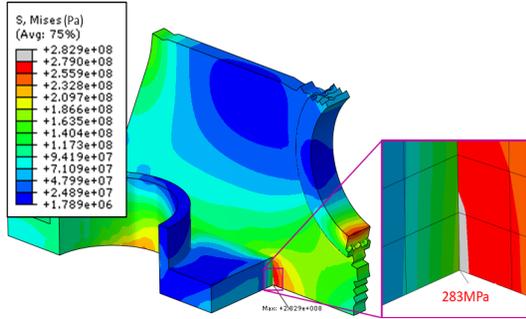


Fig. 10 Equivalent stress of part 4:FCS housing - wall plate

## 5. FCS 피로 강도 평가

### 5.1 피로 하중 산정

피로 강도 평가를 위한 하중은 피로에 크게 영향을 주는 하중 성분을 적용하며 본 연구에서는 계류선의 인장력을 적용하였다. 설계수명 중 발생할 수 있는 인장력 범위와 사이클 수는 공동연구기관의 통합하중해석 결과로부터 산출하였다. 피로한계상태의 DLC는 Lifes50+ 프로젝트[8]를 참조하여 Table 6과 같이 선정하였다. 시간 이력의 계류선 장력을 Rainflow counting 방법으로 인장력 범위와 이의 반복 횟수를 산출하고 각 해석 조건에서의 풍속 발생확률을 고려하여 25년의 피로하중을 산출한다. Table 7에는 해석 조건과 발생확률을 정리하였으며 Fig. 11과 Fig. 12는 DLC 1.2와 DLC 6.4의 설계 수명 동안 발생하는 피로 하중을 보여준다.

Table 6 Design load cases for fatigue analysis

DLC	Metoccean			
	Wind	Wave	Direction	Current
1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	COD MUL	n/a
6.4	NTM $V_{hub} < V_{in}$ $V_{out} < V_{hub} < 0.7V_{ref}$			

Table 7 Probability of each design load cases

DLC	Condition	Wind speed	Wave height	Probability
		[m/s]	[m]	
1.2	Operating	4	0.21	18.705
		6	0.21	21.599
		8	0.66	19.147
		10	1.26	11.883
		12	2.14	5.817
		14	3.34	2.341
		16	4.3	1.105
		18	4.95	0.407
		20	5.43	0.141
		22	5.82	0.054
6.4	Parked	0	0.21	3.595
		2	0.21	15.174
		26	6.42	0.004
		28	6.67	0.001
		30	6.9	0.001
		32	7.11	0.002

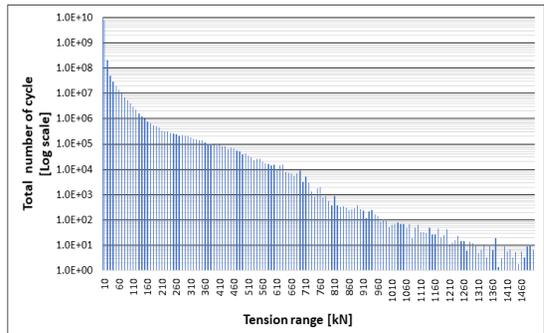


Fig. 11 Fatigue load of mooring line #2 at DLC 1.2

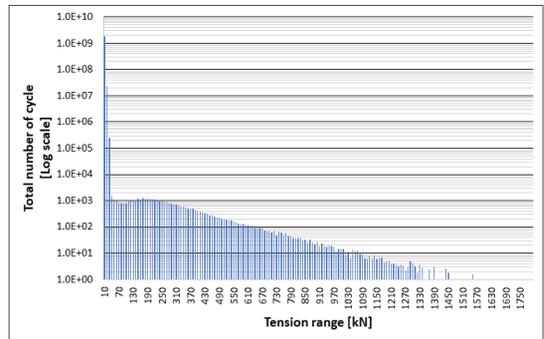


Fig. 12 Fatigue load of mooring line #2 at DLC 6.4

### 5.2 피로 취약 부위 선정

많은 피로 평가 부위 중 상대적으로 피로에 취약한 부위를 선정한다(Screening). 이를 위해 단위 인장력(1kN)을 가하여 상대적으로 큰 응력이 발생하는 부분을 선정하며 선정된 피로 취약 부위에 대한 피로 강도를 평가하였다. Fig. 13은 선정된 피로 취약 부위를 보여주며 Table 8에는 DLC별 취약 부위에 대한 Hot-spot stress를 정리하였다.

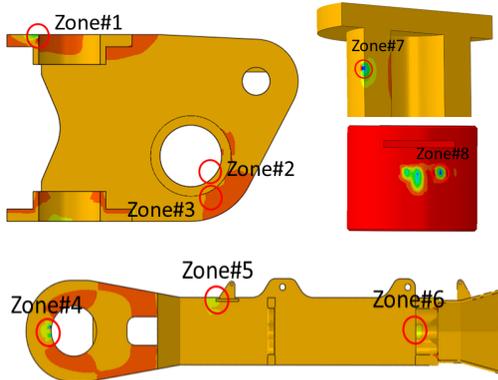


Fig. 13 Screened zones under unit tension

Table 8 Hot-spot stress for screened zones under unit tension of 1kN

Zone#	Component	DLC	Max. Principal stress [MPa]
1	FCS housing - Top plate	1.2	0.1361
		6.4	0.1294
2	FCS housing - Arm pin bearing plate	1.2	0.1883
		6.4	0.2129
3	FCS housing - Wall plate	1.2	0.0342
		6.4	0.0506
4	FCS arm - Arm pin plate	1.2	0.1028
		6.4	0.0895
5	FCS arm - Wall plate	1.2	0.0592
		6.4	0.0703
6	FCS arm - Chain stopper block	1.2	0.1603
		6.4	0.1601
7	Main pin	1.2	0.1874
		6.4	0.1789
8	Arm pin	1.2	0.0854
		6.4	0.1542

### 5.3 S-N Curve

설계된 FCS는 공기 중에서의 피로 선도를 적용하여 평가하였다[9]. Table 9에는 부재별 적용된 피로 선도를 정리하였으며 Fig. 14는 적용된 피로 선도를 보여준다.

Table 9 S-N curves for fatigue life calculation

Zone #	Component	Condition	S-N Curve
1	Top plate	Non-welded	C
2	Arm pin bearing plate	Non-welded	B1
3	Wall plate	Welded	D
4	Arm pin plate	Non-welded	C
5	Wall plate	Welded	D
6	Chain stopper block	Non-welded	B1
7	Main pin	Non-welded	B1
8	Arm pin	Non-welded	B1

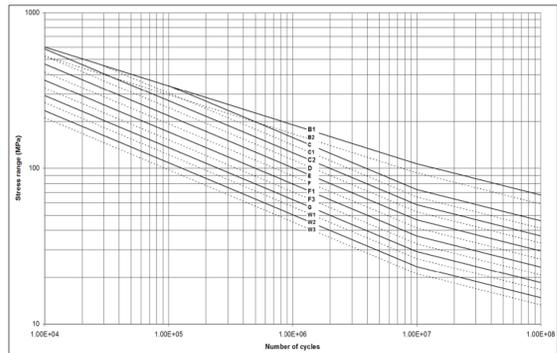


Fig. 14 S-N Curves in air[9]

### 5.4 피로 강도 평가

FCS의 피로 수명을 계산하여 설계 안전 계수(DFF)에 대한 만족 여부로 피로 강도 평가를 하였다. 설계 수명은 정상 작동 상태 20년, 정지상태 5년을 가정하여 총 25년으로 계산하였으며 DFF는 2를 적용한다. 피로수명은 Palmgren-Miner의 선형 피로축적법(linear cumulative damage)으로 계산하였으며 식 (3)

과 같다[9]. 피로 강도 평가 결과는 Table 10에 정리하였으며 평가 결과 8개의 피로 취약 부위 모두 DFF가 9 이상으로 피로 강도를 만족한다. FCS를 해수 중 음극 방식환경에서 적용할 경우 DFF는 이보다 낮아질 것이다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\Delta\sigma_i)^m \quad (3)$$

Table 10 Fatigue evaluation results in Air

Zone #	Component	DFF		
		DLC 1.2	DLC 6.4	Combined
1	Top plate	9	3689	9
2	Arm pin bearing plate	15	1990	15
3	Wall plate	641	19686	621
4	Arm pin plate	33	14560	33
5	Wall plate	44	5818	43
6	Chain stopper block	33	6537	32
7	Main pin	16	4097	16
8	Arm pin	727	7667	664

## 6. 결론

본 연구에서는 탈착형 계류시스템의 개발을 위해 패어리드 체인스토퍼 장치의 구조와 피로 강도를 평가하였다. 통합하중해석을 위한 부유체의 기본설계를 수행하였으며 설계된 부유체는 안전계수 1.5 이상으로 비손상 복원성 규정을 만족한다. 구조와 피로 강도 평가를 위한 하중은 공동연구기관의 통합하중해석 결과로부터 도출하였다. 구조 강도 평가 결과로 FCS housing의 Base plate와 Wall plate 교차부에서 응력이 크게 나타났으나 Peak stress에 따른 허용응력을 적용하면 구조 강도를 만족한다. 피로 강도 평가 결과 8개의 피로 취약 부위에서 모두 DFF가 9 이상으로 피로 강도를 만족한다. 결론적으로 설계된 FCS는 구조 강도와 피로 강도를 모두 만족한다. 현재 해석은 지지구조 일부만 모델링하여 구속조건을 부여하였으므로 부유체의 변위로 인한 하중 전달 메커니즘을 반영하지 못하는 한계가 있다. 향후 연구에서는 경량화를 위한 강도 검토를 수행하고 구조 최적화를 통해 경량화 설계 방안을 제안할 예정이다.

## 후기

본 연구는 2021년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구(No20213000000030)입니다.

## 참고문헌

- [1] Ryu, G., Park, J., Lee, A., Kim, Y., and Moon, C., 2022, Tracking trends for offshore wind energy industries and infrastructures in the South Korea: Focused on the Jeonnam Shinan 8.2GW and Ulsan 6GW offshore wind farm projects, IntechOpen.
- [2] Simulia, 2022, Abaqus/CAE User's manual, Abaqus 6.11.
- [3] Christian, B., Frederik, Z., Robert, B., Taeseong, K., Anders, Y., Lars, C. H., Anand, N., and Morten, H. H., 2013, Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine, DTU Wind Energy Report-I-0092.
- [4] 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.
- [5] DNV, 2021, Floating wind turbine structures, DNV-ST-0119, Edition June 2021.
- [6] DNV, 2021, Position mooring, DNV-OS-E301, Edition July 2021.
- [7] DNV, 2021, Part. 3 Hull - Chapter. 7 Finite element analysis, DNV-RU-SHIP, Edition July 2021.
- [8] LIFES50+, 2015, Qualification of innovative floating substructures for 10MW wind turbines and water depths greater than 50m-Deliverable 7.2: Design Basis, pp. 28-34.
- [9] DNV, 2019, Fatigue design of offshore steel structures, DNV-RP-C203, Edition September 2019.