

신뢰성 해석 기반 10MW급 부유식 해상풍력발전기용 탈부착 계류장치의 확률론적 구조설계

정민석¹ · 송창용^{2,†}¹국립목포대학교 대학원 조선해양공학과 대학원생²국립목포대학교 기계조선해양공학부 교수

Probabilistic Structural Design of Detachable Mooring Apparatus for 10MW Floating Offshore Wind Turbine Based on Reliability Analysis

Minseok Cheong¹ and Chang-Yong Song^{2,†}¹Graduate Student, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School,
Mokpo National University, Jeonnam 58554, Korea²Professor, School of Mechanical & Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 58554, Korea

요 약

본 논문에서는 10MW급 부유식 해상풍력발전기에 적용되는 탈부착 계류 장치 중의 하나인 페어리드 체인 스톱퍼(Fairlead Chain Stopper, FCS)의 구조 설계 안전성을 확보하기 위해 다양한 신뢰성 해석 기법을 활용한 확률론적 구조 설계 특성을 비교 분석하였다. FCS의 주요 구조 부재 두께는 제조 공차의 불확실성을 고려한 랜덤 변수로 설정되었으며, 이는 FCS의 구조 설계 과정에서 제어할 수 없는 불확실성 요소로 적용되었다. 확률론적 성능 함수는 선급 규정 허용 응력을 고려한 FCS의 구조 강도 성능을 적용하였다. 신뢰성 해석 기법은 1차 신뢰성 해석 방법(First Order Reliability Method, FORM), 2차 신뢰성 해석 방법(Second Order Reliability Method, SORM), 평균값 신뢰성 해석 방법(Mean Value Reliability Method, MVRM), 그리고 적응 중요도 샘플링 방법(Adaptive Importance Sampling Method, AISM)을 적용하여 신뢰도 확률과 수치 해석 비용과 같은 확률론적 설계 성능을 비교하였다. FCS의 확률론적 구조 설계에 가장 적합한 신뢰성 해석 기법을 결정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS) 결과와 비교를 수행하였고, AISM이 가장 합리적이고 효율적인 성능을 보이는 것으로 확인되었다.

Abstract – In this study, the probabilistic structural design characteristics of the Fairlead Chain Stopper (FCS)—a detachable mooring apparatus applied to a 10 MW-class floating offshore wind turbine—were comparatively analyzed using various reliability analysis methods to ensure structural design safety. The thicknesses of the FCS's primary structural members were defined as random variables to reflect uncertainties due to manufacturing tolerances, which represent uncontrollable factors in the structural design process. Probabilistic performance functions were formulated based on the structural strength performances of the FCS, considering allowable stress criteria specified by classification society rules. To evaluate the probabilistic design performance in terms of reliability probability and computational cost, four reliability analysis methods were applied: the First Order Reliability Method (FORM), the Second Order Reliability Method (SORM), the Mean Value Reliability Method (MVRM), and the Adaptive Importance Sampling Method (AISM). In order to identify the most appropriate reliability analysis method for the probabilistic structural design of the FCS, the results of each method were compared against those of Monte Carlo Simulation (MCS). Among the methods considered, AISM was found to provide the most rational and efficient performance.

Keywords: Detachable mooring apparatus(탈부착 계류 장치), Fairlead chain stopper(페어리드 체인 스톱퍼), Floating offshore wind turbine(부유식 풍력 발전기), Reliability analysis(신뢰성 해석), Probabilistic structural design(확률론적 구조 설계)

[†]Corresponding author: cysong@mnu.ac.kr

1. 서 론

최근 지구의 온난화로 인한 기후 변화의 영향으로 태풍과 허리케인과 같은 극한의 해양 열대성 저기압의 강도가 점차 증가함에 따라, 부유식 해상풍력 발전기에 가해질 수 있는 대규모 손상 및 구조 붕괴의 위험 또한 함께 커지고 있다. 이러한 극한 해양환경 변화에 대응하기 위해서는 해상 유지보수 비용 절감과 함께 신속한 피항이 가능한 새로운 형태의 탈착식 계류 시스템 개발이 필요하다.

본 연구에서 고려된 10MW급 부유식 해상풍력발전기용 페어리드 체인 스톱퍼(Fairlead Chain Stopper, FCS)는 기존 부유식 해양 구조물용 탈착형 계류 장치에 비해 더욱 신속하고 안전한 탈부착 기능을 제공하도록 설계되었고, 부유식 해상풍력 발전기의 설치 및 해체 과정을 보다 효율적으로 수행하는 것을 목표로 한다. FCS와 같은 탈착식 계류 장치는 반드시 선급 기관에서 요구하는 구조 강도 성능 기준을 만족해야 하며, 동시에 높은 계류 하중에 대응하기 위해 고강도 특수 강재가 설계에 반영되어야 한다. 따라서 과거 품질 이력에 대한 데이터가 존재하지 않는 새로운 형태의 장비인 FCS의 구조안전도를 설계 단계에서 합리적인 수준으로 결정하기 위해서는 신뢰성 해석을 이용한 확률론적 구조 설계 평가가 필요하다.

부유식 해상풍력 발전기의 설계분석 및 개선과 관련하여 합리적 설계를 위한 신뢰성 해석 연구는 제한적으로 수행되어 오고 있다. 15MW 수평축 풍력터빈 블레이드의 신뢰성 분석을 위해 유체-구조연성해석 기반 고충실도 시뮬레이션과 적응형 Kriging 대리모델을 결합한 2단계 방법론이 제시되었으며, Kriging 모델은 유체-구조연성해석을 직접 수행하는 것보다 약 400배 빠른 예측 속도를 보였고, Kriging 기반-몬테카를로 시뮬레이션 기법을 통해 효율적으로 신뢰성 지수 및 고장 확률을 계산할 수 있음을 보였다(Keprate *et al.* [2023]). 통계적 Kriging 메타모델을 개발하여 반잠수식 해상풍력 구조물의 계류 시스템 신뢰도 분석에서 재료 불확실성을 정량적으로 다루었으며, OpenFAST 시뮬레이션 기반 계류 장력 결과에 정규 분포를 기반으로 축 방향 강성 변동을 몬테카를로 시뮬레이션 프레임워크에 통합하여 계류 시스템 신뢰성 평가를 수행하였다(Kumar *et al.* [2025]). 대리모델과 C-vine Copula를 활용하여 랜덤 풍해-파랑 환경하에서 부유식 해상풍력발전기의 피로 신뢰성을 분석하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 모델의 정확성을 검증하고, 유한 샘플링으로 인한 불확실성이 피로 신뢰성 추정에 유의한 영향을 미칠 수 있음을 정량적으로 평가하였다(Zhao *et al.* [2024]). 선박 레이더 마스트의 진동 및 구조 강도 성능에 대한 설계 신뢰도 평가를 위해 Sobol 수열 기반 준-무작위 샘플링을 적용하고, 해당 데이터를 활용하여 타원형 기저함수 기반 인공신경망 모델을 구축하여 고정밀 모델 근사가 가능함을 확인하였다(Song [2025]). 자동 채염기를 대상으로 부식 불확실성을 반영한 두께 치수의 확률 변수화를 포함한 신뢰성 해석 연구를 수행하여 신뢰성 평가 정확도가 가장 높은 신뢰성 해석 기법을 탐색하였다(Song [2020]). 수중 장치용 해수 유압 펌프의 밸브-포트 플레이트에 대해 비확률론적 신뢰성 해석 및 설계 최적화를 수행하였고, 불확실성을 구간 및 피

지 집합을 통해 모델링하여 최적화 과정에 적용하는 방식으로 구조 안전성을 향상시켰다(Lee and Park [2023]).

본 논문에서는 10MW급 부유식 해상풍력발전기에 적용되는 탈부착 계류 장치 중의 하나인 FCS의 구조 설계 안전성을 설계 단계에서 확보하는 것을 목표로 하여 다양한 신뢰성 해석 기법을 활용한 확률론적 구조 설계 특성을 비교 분석하였고, 신뢰성 해석 결과를 상호 비교하여 FCS의 확률론적 구조 설계에 적합한 신뢰성 해석 기법을 도출하고자 하였다. 신뢰성 해석 과정에서는 FCS의 주요 구조 부재 두께는 제조 공차의 불확실성을 고려한 랜덤 변수(Random variable)로 설정하였다. FCS의 구조 강도 성능은 확률 성능 함수(Probabilistic performance function)를 기반으로 평가하였다. 구조 강도 성능 평가를 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 활용하였으며, DNV 선급 기준과 실제 작동 조건을 반영하여 설계 하중 조건을 산정한 뒤, 각 하중 조건별로 계산된 최대 응력을 기준으로 분석을 수행하였다. FCS의 확률론적 구조 설계에 가장 적합한 신뢰성 해석 기법을 찾기 위해 1차 신뢰성 해석 방법(First Order Reliability Method, FORM), 2차 신뢰성 해석 방법(Second Order Reliability Method, SORM), 평균값 신뢰성 해석 방법(Mean Value Reliability Method, MVRM), 그리고 적응 중요도 샘플링 방법(Adaptive Importance Sampling Method, AISM)을 각각 적용하였다. 각각의 신뢰성 해석 기법에서 산출된 FCS의 구조 강도 성능에 대한 신뢰 확률, 수치 해석 계산량, 수렴 특성 등을 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS) 기반의 평가 결과와 비교 분석하여 FCS의 확률론적 구조 설계에 가장 적합한 신뢰성 해석 기법을 결정하였다. 또한, MCS 해석 결과를 통해 수집된 랜덤 변수 데이터의 산포 특성을 활용하여, 확률 성능 함수에 대한 랜덤 변수의 영향도를 분석하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FORM, SORM, MVRM, AISM, MCS 등의 이론적 배경을 간략히 정리하였으며, 3장에서는 FEA 기반 FCS의 구조강도 성능 평가 및 구조강도 성능에 대한 신뢰성해석 결과의 비교 내용을 다루었다. 마지막으로 결론에서는 연구의 주요 내용을 요약 정리하였다.

2. 신뢰성 해석의 이론적 배경

신뢰성 해석에 기반한 확률론적 구조 설계는 기계 장비나 구조물이 실제 운용 환경에서 직면할 수 있는 다양한 불확실성을 고려하여, 강도 성능과 같은 확률 성능 함수가 목표 안전도 수준을 어떤 확률로 만족하는지를 평가할 수 있는 방법이다. 이러한 신뢰성 해석에서는 확률 밀도 함수 계산의 복잡성과 과도한 샘플링으로 인한 연산량 증가 문제를 해결하기 위해, 여러 형태의 신뢰성 확률 평가 기법이 제안되어 활용되고 있다. 본 연구의 2장에서는 FCS의 확률론적 구조 설계 연구에 적용된 FORM, SORM, MVRM, AISM 및 MCS와 같은 신뢰성 해석 기법의 이론적 배경을 간략히 정리하였다.

FORM은 Fig. 1에 도시된 바와 같이, 표준 정규 확률 분포의 특성을 활용하여 표준 정상 공간(U-space)의 원점으로부터 한계 상

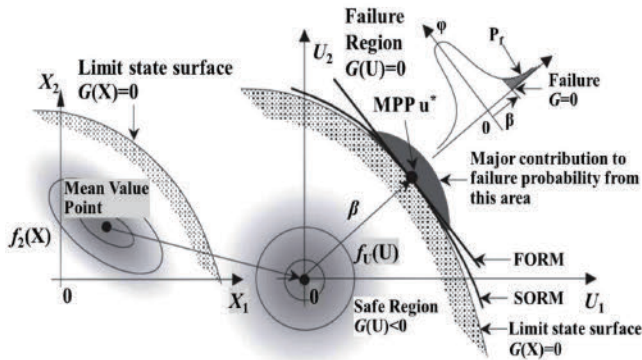


Fig. 1. Concept of FORM and SORM.

태 표면(Limit state surface) 상의 한 지점까지의 최단 거리를 기준으로 실패 확률을 정의하는 기법이다.

FORM에서 신뢰 지수(β)는 랜덤 변수에 대한 등가 제약 조건을 만족하는 최소 해를 탐색하는 다음의 식과 같은 최적화 문제로부터 결정된다(Nowak and Collins[2012]).

$$\beta = \min|U| \quad \text{s.t. } G(X) = G(T^{-1}(U)) = G(U) = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 s.t.(subject to)는 최적화 문제의 제약조건을 의미하며, 제약조건 $G(X)$ 는 한계 상태 함수(Limit state function)가 0이되는 지점, 즉 파괴 경계면(Limit state surface)상에 존재해야 함을 명시한다. 이때, T^{-1} 는 일반적인 랜덤변수 공간(X)의 변수를 표준 정규 분포 공간(U)의 변수로 역변환하는 함수를 나타내며, 이를 통해 비정규 분포를 따르는 실제 변수 X 에 대한 한계 상태 함수 $G(X)$ 를 표준 정규 변수 U 에 대한 함수 $G(U)$ 로 변환하여 해석을 수행한다. 해는 최대 가능 손상점(Most probable failure point, MPP)으로 불리며, 이를 U^* 로 표기한다. 만약 한계 상태 함수 $G(U)$ 가 정규 분포를 따르는 랜덤 변수 U_i 에 대해 선형 관계를 가진다면, 해당 조건에서의 파괴 확률(Probability of failure) p_f 는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

여기서 Φ 는 표준 정규 분포 함수(Standard normal distribution function)를 의미한다. 또한, FORM을 활용한 신뢰성 해석 결과의 정확도는 MPP 지점에서 한계 상태 함수의 비선형성이 크지 않을 때 보장되는 것으로 알려져 있다.

SORM을 활용한 신뢰성 해석은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, MPP 지점에서 한계 상태 함수의 비선형성이 큰 경우에 적용하는 것이 적합하다. SORM에서의 파괴 확률은 다음과 같이 근사적으로 계산된다(Breitung[1984]).

$$p_f = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^n \sqrt{1 + \beta k_i} \quad (3)$$

여기서 k_i 는 MPP 지점에서 한계 상태 함수의 주곡률(Principal curvature)을 의미하며, 이는 랜덤 변수에 대한 한계 상태 함수의 2

차 미분을 통해 계산된다.

MVRM은 테일러 급수 전개(Taylor series expansion, TSE)를 활용하여 한계 상태 함수 $G(X)$ 의 평균(μ_G)과 표준편차(σ_G)를 근사적으로 구하는 기법이다. 이 방법에서는 TSE의 적용 방식에 따라 신뢰성 해석의 정확도가 달라진다. MVRM에서의 신뢰 지수는 다음의 식을 통해 계산된다(Koch et al.[2004]).

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (4)$$

식 (4)에서 구한 신뢰 지수를 식 (2)에 대입함으로써 파괴 확률을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 2차 테일러 급수 전개(Second-order TSE)를 적용하였으며, 확률 성능 함수 Y 에 대한 2차 TSE는 다음과 같이 정의된다.

$$Y(x) = y + \frac{\partial Y}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \Delta x \quad (5)$$

식 (5)를 활용하여 확률 성능 함수의 평균과 표준편차를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_Y &= Y(\mu_x) + \frac{1}{2} \frac{d^2 Y}{dx_i^2} \sigma_{x_i}^2 \\ \sigma_Y &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 (\sigma_{x_i})^2 + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 (\sigma_{x_i})^2 (\sigma_{x_j})^2} \end{aligned} \quad (6)$$

AIMS은 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 파괴 영역을 주곡률을 이용한 차수 다항식으로 근사하여 표현한다(Lee and Park[2023]). 이 방법에서는 파괴 영역 내에 포함된 샘플 수를 기반으로 곡률의 값이 반복적으로 갱신되며, 이를 통해 파괴 영역을 포함하도록 근사 영역이 점진적으로 업데이트된다.

MCS는 목표 신뢰 수준(confidence level)에서 평가하고자 하는 신뢰 확률 또는 파괴 확률에 맞는 충분한 샘플 수가 확보될 경우, 랜덤 변수로 인해 발생하는 확률 성능 함수의 불확실성을 실제에 가깝게 산출할 수 있는 신뢰성 해석 기법이다. MCS 기반 신뢰성 해석에서는 확률 성능 함수 Y 가 샘플 수 N 만큼 계산되며, 이를 통해 평균 \bar{Y} , 분산 σ_Y^2 , 파괴 확률 p_f 등을 다음과 같이 구할 수 있다

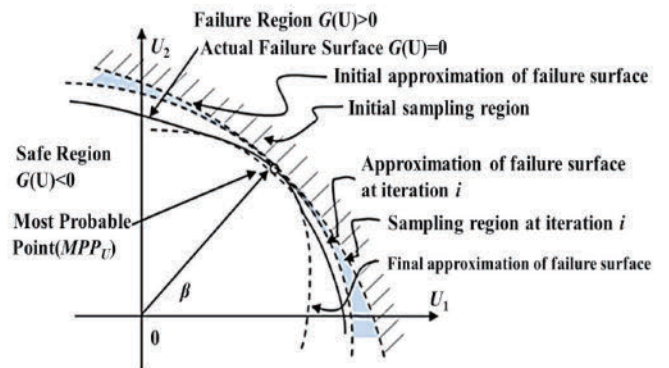


Fig. 2. Concept of AISM.

(Siddall[1983]).

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (7)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2$$

$$p_f = P_g \leq 0 = \int_{g(x) \leq 0} f_X(x) dx$$

where $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ and $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

식 (7)에서 파괴 확률 p_f 는 위와 같이 랜덤 변수 벡터 X 의 결합 확률 밀도 함수($f_X(x)$)를 한계 상태 함수 $g(x)$ 가 파괴 영역($g(x) \leq 0$)에 대해 적분한 값으로 정의된다. 이때, $P_g \leq 0$ 는 한계 상태 함수가 0보다 작거나 같을 확률, 즉 구조 강도 성능이 허용 기준을 만족하지 못하는 파괴 영역에 해당될 확률을 의미한다. 파괴 확률 p_f 는 지시 함수(indicator function) $I(x)$ 를 활용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) f_X(x) dx \quad \text{where } I(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(x) \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

파괴 확률은 지시 함수의 평균값을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$p_f = \bar{I}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i) = \frac{N_f}{N} \quad (9)$$

여기서 N_f 는 $g \leq 0$ 인 경우에 대한 샘플링 횟수이고, 신뢰확률인 R 은 다음과 같이 표현된다.

$$R = P_g > 0 = 1 - p_f = \frac{N - N_f}{N} \quad (10)$$

파괴 확률은 누적 분포 함수(Cumulative distribution function, CDF) $F_Y(y)$ 와 확률 밀도 함수(Probability density function, PDF) $f_Y(y)$ 를 활용하여 다음과 같이 계산된다.

$$F_Y(y) = P(g \leq y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I'(y_i) \quad (11)$$

where $I(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(x) \leq y \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

$$f_Y(y) = [F_Y(y)]'$$

식 (11)에 제시된 것처럼, PDF는 CDF를 미분하여 구할 수 있다.

3. FCS 구조강도 성능평가 및 신뢰성 해석

3.1 구조강도 성능평가

본 연구에서 다룬 FCS는 부유식 해상풍력발전기의 설치 지점에서의 운송 및 계류 작업 시 사용되는 탈착형 계류 장치로, 계류선과 부유체 플랫폼 간의 연결 및 해체를 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 설계되었다. FCS는 대규모 유지보수가 요구되거나 긴급 상

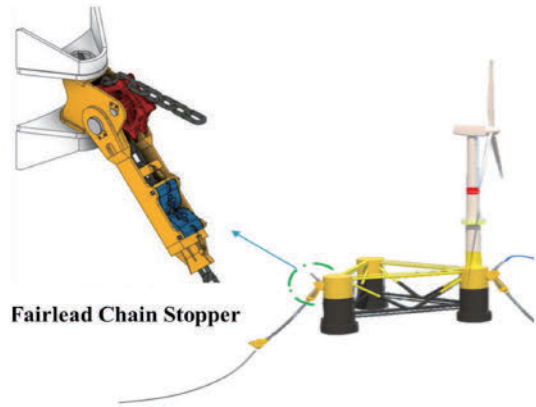
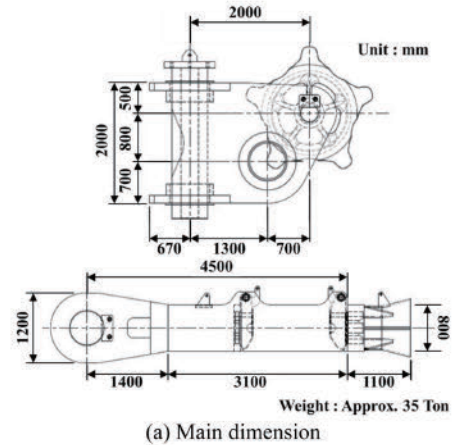
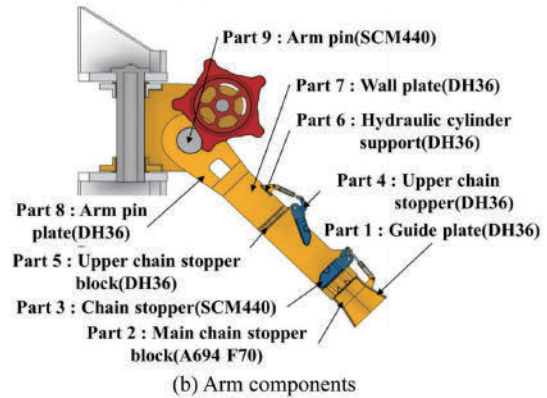


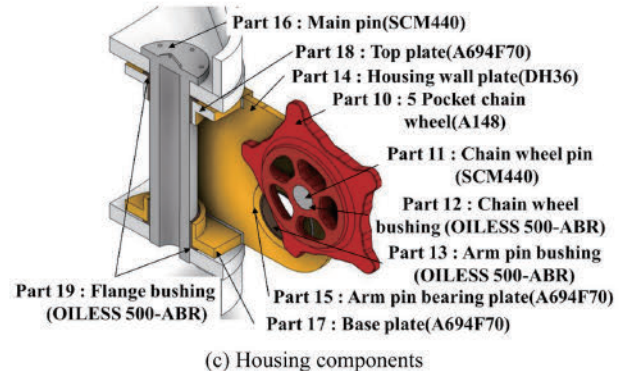
Fig. 3. FCS concept for SFOWT.



(a) Main dimension



(b) Arm components



(c) Housing components

Fig. 4. Overall design configuration of FCS.

황이 발생했을 때 부유체 플랫폼의 신속한 분리 및 이송을 가능하게 하는 기능적 이점을 제공한다. FCS의 설치 상태는 Fig. 3에 FCS의 구조 구성은 Fig. 4에 각각 도시하였다.

Fig. 3에 나타나 있는 것처럼, FCS가 설치되는 대상은 10MW급 부유식 해상풍력발전기이며, 하부 구조물은 3개의 부유체 플랫폼으로 이루어진 반잠수식 구조(Semi-submersible Floating Offshore Wind Turbine, SFOWT)로 구성되어 있다. FCS는 해수면 위에 위치한 계류 체인과 연결되어 있으며, 계류선에 작용하는 최소파단하중(Minimum Breaking Load, MBL) 조건에서도 구조적 안전성을 유지할 수 있도록 설계되었다.

Fig. 4에 나타나 있는 것처럼, FCS는 arm과 housing이라는 두 가지 핵심 구성 요소로 이루어져 있다. 5(Five) pocket chain wheel은 계류 체인의 설치 및 해체 시 체인의 유입 방향을 유도하는 역할을 하며, arm은 체인의 진행 경로를 안내함과 동시에 전달되는 하중을 chain stopper를 통해 전체 구조물로 균일하게 분산시키는 기능을 수행한다. chain stopper와 upper chain stopper는 체인의 운용, 설치 및 분리 과정에서 발생하는 하중을 직접 지지하며, housing은 FCS 전체를 부유체의 하부 구조물에 견고하게 고정하는 지지체 역할을 한다. 또한, hydraulic cylinder support는 upper chain stopper의 작동을 제어하는 유압 장치를 탑재하고 있으며, 이러한 주요 부품들은 모두 Pin 체결 방식을 통해 상호 연결되어 회전 작동이 가능하도록 설계되었다.

FCS와 같은 계류 장치는 설계 인증을 받기 위해 선급에서 규정한 계류조건 하에서 구조 성능이 설계 하중 조건을 만족하는지를 반드시 검토해야 한다. 또한, 실제 운용 시 발생할 수 있는 예인 조건 하의 하중 역시 구조 성능 평가에 포함되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 구조적 성능을 평가하기 위한 설계 하중 조건을 DNV 선급 기준 (DNV[2024]; DNV[2021a]; DNV[2021b])에 따라 설정하였다. FCS는 SFOWT 플랫폼에 직접 설치되는 구조물이기 때문에, 해수면 기준의 수평면에서의 설계 작동 범위(Design Working Range, DWR)와 수직면에서의 설계 인입각(Design Inlet Angle, DIA)은 해양 구조물 설계 관련 선급 규정에 정의된 범위 내에서 설정되어야 한다. DWR과 DIA의 적용 범위는 Fig. 5에 도식적으로 제시하였다.

수평 방향의 DWR은 0°로 설정하였으며, 수직 방향의 DIA는 10°와 더불어 통합하중 해석결과(IAE[2023])에서 계류선에 최대 인장력이 발생한 29°를 기준으로 설정하였다. 이러한 값들은 FCS의 구조 성능 평가시 주요 입력 조건으로 활용되었다. 계류조건에서 FCS의 chain stopper에 적용되는 설계 하중은 DNV 규정(DNV[2024]; DNV[2021a]; DNV[2021b])에 따라 MBL을 기준으로 설정되어야 한다. 본 연구에서는 10MW급 부유식 해상풍력발전기에 적합한

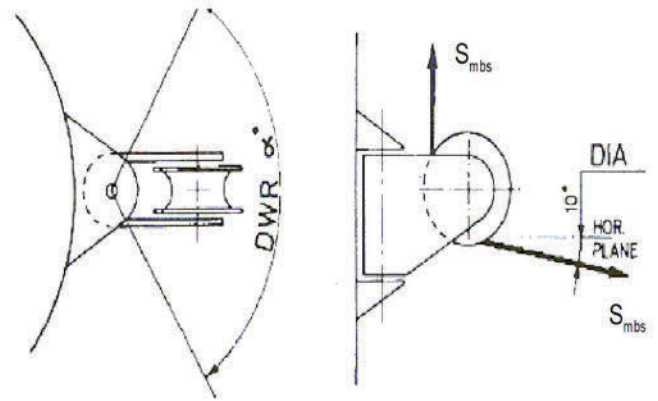


Fig. 5. Load application angles (DNV[2024]).

147 mm 직경의 스티드리스 체인을 선정하였으며, 해당 체인의 MBL은 21,179 kN으로 확인되었다. 반면, 예인 상태에서는 SFOWT에 체결된 FCS가 견인력을 직접 받게 되며, 이때 upper stopper와 chain wheel에 작용하는 하중은 통합하중 해석결과를 토대로 3,434 kN으로 산출되었다(IAE[2023]). 본 연구에서 구조 성능 평가를 위해 적용한 전체 설계 하중 조건은 Table 1에 종합 정리하였다.

Table 1의 내용을 바탕으로, 본 연구에서는 FCS의 구조 성능 평가를 위해 총 세 가지 하중 조합을 적용하였으며, 이를 각각 LC1, LC2, LC3로 구분하였다. 이 중 LC1과 LC2는 계류 상태에서 구조적 안전성을 검토하기 위한 조건으로 설정되었으며, LC3는 예인 상황에서 FCS의 구조 건전성을 평가하기 위해 정의된 하중 합이다.

FCS의 FEA 평가는 Altair사의 HyperWorks 소프트웨어 (AEI[2021])를 사용하여 전처리 및 후처리 작업을 포함해 수행되었다. Fig. 6에 도시된 바와 같이, 구축된 FEA 모델은 요소 크기

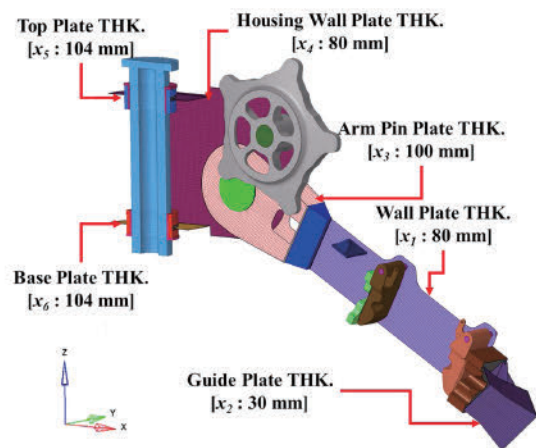


Fig. 6. FEA model of FCS.

Table 1. Design load conditions

# of load case	DWR [°]	DIA [°]	Force [kN]	Operation condition
LC1	0	10	21,179	Mooring
LC2	0	29	21,179	
LC3	0	46	3,434	Towing

Table 2. Material property

Material Name	Density [Ton/mm ³]	Elastic modulus [MPa]	Poisson's ratio	Yield Stress [MPa]
A694F70 (A694)	7.85E-09	209,000	0.3	485
DH36 (DH)	7.85E-09	209,000	0.3	310
SCM440 (SCM)	7.85E-09	209,000	0.3	834
A148	7.85E-09	209,000	0.3	585
OILESS 500-ABR (ABR)	7.4E-09	126,000	0.3	617

25 mm를 기준으로 구성되었으며, 총 496,472개의 요소와 384,305개의 절점으로 이루어졌다. FEA의 모델링 과정에서는 Shell 요소와 Solid 요소를 혼합하여 적용하였으며, 부품 간 접촉이 발생하는 면에는 접촉 조건을 부여하였다.

FCS의 구성 부품별 기계적 물성치는 Table 2에 요약하였으며, 해양 환경에서의 높은 하중 조건을 고려하여 재료가 설계에 반영되었다. stopper 및 pin류 부품에는 고강도 합금강인 SCM440을 사용하였고, 고체형 bushing에는 OILESS500-ABR 재질이 적용되었다. 계류 체인이 장착되는 chain wheel에는 A148 계열 강재를, 그 외 주요 구조 부재에는 DH36 및 A694F70 강재를 각각 채택하였다. 이들 재료는 일반 구조용 강재에 비해 높은 항복강도를 가져 우수한 기계적 성능을 제공하지만, 상대적으로 재료 단가가 높은 특징을 지닌다.

경계 조건은 SFOWT와 연결되는 FCS의 main pin의 고정 지점을 기준으로 설정되었으며, 중력 방향 회전을 제외한 모든 운동 자유도를 제한하였다. 또한, main pin과 flange bushing 사이 접촉면에는 접촉 해석을 위한 추가 경계 조건이 적용되었다. 이는 FCS의 주요 부품들이 pin 체결방식을 통해 상호 연결되어 회전 작동이 가능하도록 설계된 실제 운동 특성을 반영하고, main pin의 회전가능 방향을 제외한 모든 자유도를 제한하여 FCS에 적용되는 외력이 구조 전체에 분포되어 힘의 평형상태를 유지하기 위함이다. 전체 모델에는 대칭 조건을 부여하여 해석 효율을 높이고 계산 자원 소모를 최소화하였다. 모든 설계 하중 조건에서 주요 하중이 작용하는 chain stopper에는 계류삭과 chain stopper 간의 곡면 접촉을 통해 하중이 전달되며, 이 구간에는 베어링 하중 형태로 하중이 적용되었다. 반면, 예인 상황에서는 견인력이 FCS의 upper stopper와 chain wheel에 직접 작용하게 되므로, 해당 부위에는 분포 하중 형태의 하중이 부여되었다.

FEA는 범용 유한요소법 프로그램인 ABAQUS(SDS[2020])를 활용하여 수행되었으며, 해석 결과는 Table 3에 정리하였다. 응력 평가는 von-Mises 응력 기준으로 수행되었고, 설계 안전성 검토는 DNV 선급 기준(DNV[2024]; DNV[2021a]; DNV[2021b])을 기반

으로 진행되었다. 이때 허용 응력 값은 각 재료의 항복강도의 90% 수준으로 설정하였으며, 재료별 허용 응력은 A694F70에 대해 436.5 MPa, DH36은 279 MPa, SCM440은 750.6 MPa, A148은 526.5 MPa, OILESS500-ABR은 555.3 MPa로 각각 적용되었다.

Table 3에 정리된 해석 결과를 기반으로, FCS의 구조 성능 평가는 각 설계 하중 조합 별로 최대 응력이 발생한 부품을 기준으로 해당 재료의 허용 응력 충족 여부를 판단 기준으로 삼아 수행되었다. FEA 수행 결과, 모든 설계 하중 조건에서 도출된 최대 응력 값은 DNV 선급 기준(DNV[2024]; DNV[2021a]; DNV[2021b])에 명시된 허용 응력 범위를 초과하지 않았으며, 이를 통해 FCS 구조가 전반적으로 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다. 세부적으로 살펴보면, LC2 하중 조합에서 가장 높은 응력 값이 발생하였으며, 특히 DH36 강재가 적용된 부품에서 측정된 최대 응력이 허용 응력 값에 가장 근접한 수준으로 나타났다. FCS의 전체적인 응력 분포 경향은 LC2 조건을 기준으로 Fig. 7에 도식화 하였으며, 그림에서 확인할 수 있듯이 계류 상태에서 chain stopper 부위에 뚜렷한 응력 집중 현상이 관찰되었다. 또한, arm pin bearing plate와 arm

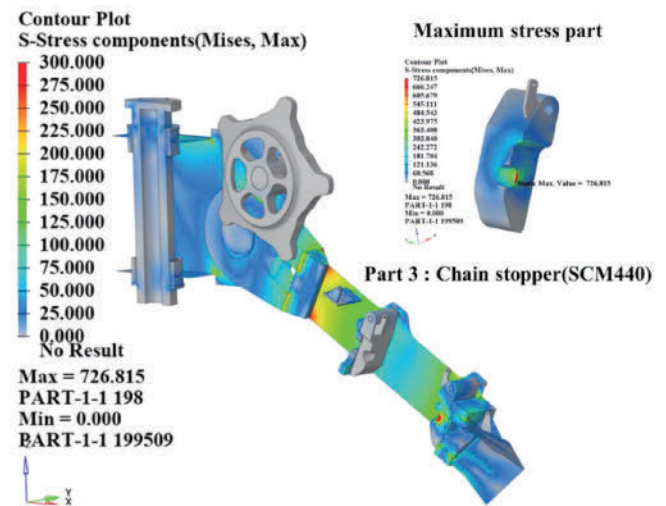


Fig. 7. LC2 stress contour results (unit: MPa).

Table 3. FEA results

Load cases	Max. stress [MPa]					Structure safety
	A694	DH	SCM	A148	ABR	
LC1	291.5 (Part 15)	272.3 (Part 7)	726.6 (Part 3)	7.9 (Part 10)	220.8 (Part 13)	OK
LC2	290.7 (Part 15)	270.0 (Part 7)	726.8 (Part 3)	8.8 (Part 10)	199.6 (Part 13)	OK
LC3	120.6 (Part 18)	122.7 (Part 14)	406.8 (Part 11)	168.2 (Part 10)	54.5 (Part 12)	OK

wall plate 영역에서도 상대적으로 높은 응력 분포가 형성된 것으로 분석되었다.

Table 3과 Fig. 7에 제시된 해석 결과에 따르면, FCS는 선급규정의 구조 안전도 기준을 충족하고 있으나, 안전 여유치가 2.5% 미만으로 성능 한계치에 근접한 상태임을 확인할 수 있었다. 따라서, 설계 인자에 존재하는 불확실성을 고려한 정량적인 신뢰성 평가가 필요하다고 판단되었다.

3.2 신뢰성 해석 결과 및 비교

본 연구에서는 설계 인자의 불확실성 요소로 강제 생산시의 공차(KS[2019])로 고려하였다. 신뢰성 해석 시 주요 구조 부재의 두께는 강제 생산 공차를 고려한 랜덤 변수로 정의하였으며, FEA의 하중 조건 또한 강제 생산 공차로 인한 확률 특성을 함께 반영하였다. 신뢰성 해석을 위한 랜덤 변수 설정은 Table 4에 제시된 값을 기반으로 평균 두께는 Fig. 6에 나타난 초기 설계 두께를 기준으로 하였다. 상대 표준 편차(Relative standard deviation, RSD)는 두께별 강제 생산 공차(KS[2019])로 설정하였으며, 확률 분포는 정규 분포를 가정하여 적용하였다.

목표 신뢰도 수준은 DNV선급 규정(DNV[2024]; DNV[2021a]; DNV[2021b])에 따라 정의된 사용 재질의 항복응력 중 최소치인 279 MPa로 설정하였다. 이러한 조건에서 Table 4의 랜덤 변수를 FEA 모델에 적용하여 FORM, SORM, MVRM, AISM의 해석 방법을 활용해 설계 하중 조건 별로 신뢰확률을 산출하였다. 신뢰성 해석 결과의 검증을 위해 MCS기반의 평가를 병행하여 표본 수에 따른 해석 결과를 비교 분석하였다. MCS는 목표 신뢰 수준(confidence level)에서 평가하고자 하는 신뢰 확률 또는 파괴 확률에 맞는 충분한 샘플 수가 확보될 경우, 랜덤 변수로 인해 발생하는 확률 성능 함수의 불확실성을 실제에 가깝게 산출할 수 있는 신뢰성 해석 기법으로 해석 수행에 높은 비용이 발생한다. FORM, SORM, MVRM, AISM과 같이 한계 상태 함수를 근사하는 방식을 사용하는 신뢰성 해석방법은 MCS대비 높은 수치계산 효율로 결과를 도출하

지만, 해석 대상의 확률성능 함수의 비선형성 정도에 따라 결과의 정확도 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 MCS 결과와 비교를 통해 오차율을 평가하여 설계 안전도를 합리적으로 보장할 수 있는 신뢰성 해석기법을 선정하고자 하였다. MCS에서 확률분포의 형태는 정규 분포로 정의하여 샘플 표본 수를 산정하였으며, 이를 위한 표본 수 산정 방법은 식 (12)을 참고하였다(Siddall[1983]).

$$e[\%] \approx 200 \sqrt{\frac{(1-p_f)}{Np_f}} \tag{12}$$

MCS의 샘플링 수는 식 (12)으로부터 파괴 확률 $p_f = 0.01$ 을 기준으로, 신뢰 수준 95%에서 $\pm 5\%$ 의 정확도(e)를 적용하여 샘플링 횟수는 158,400회로 설정하였다.

Table 5에는 FORM, SORM, MVRM, AISM의 신뢰 확률 해석 결과를 MCS 결과와 비교하여 정리하였으며, 각 신뢰성 해석 기법별 수치 계산량도 함께 제시하였다.

Table 5의 분석 결과, AISM의 해석 결과가 MCS의 결과와 가장 높은 일치도를 보였으며, MVRM의 경우 오차율이 가장 크게 나타났다. FORM과 SORM은 유사한 수준의 신뢰도를 나타냈으며, MVRM보다는 낮은 오차율을 보였지만, AISM의 정확도에는 미치지 못하는 것으로 확인되었다. 수치 계산량 측면에서는 AISM이 가장 높은 계산 비용을 요구하는 것으로 나타났으며, 반면 MVRM은 가장 낮은 계산 비용을 보였다. 그러나 MVRM은 계산량이 적은 장점에도 불구하고 신뢰성 해석의 정확도가 낮고 신뢰 확률을 과대 산출하는 경향이 있어, 설계 안전도 확보 측면에서 적합성이 떨어지는 것으로 평가되었다. 본 연구에서는 MCS를 기준으로 하여 FCS의 확률론적 구조설계에 적합한 신뢰성해석 방법을 탐색하는 것을 목적으로 하기 때문에, MCS의 신뢰확률 결과에 가장 정확도가 높은 AISM이 FCS의 확률론적 구조설계에 적합한 것으로 판단되었다.

신뢰성 해석 방법별 수렴 특성에 대한 분석 결과는 대표적으로 LC2 조건을 기준으로 Fig. 8에 도식화하여 제시하였다.

Fig. 8에 제시된 결과에서 확인할 수 있듯이, FORM과 SORM의

Table 4. Definition of random variables

Random variable	Standard deviation [mm]	Lower Bound [mm]	Initial design [mm]	Upper bound [mm]
x_1	1.5	78.5	80	81.5
x_2	1.2	28.8	30	31.2
x_3	1.9	98.1	100	101.9
x_4	1.5	78.5	80	81.5
x_5	1.9	102.1	104	105.9
x_6	1.9	102.1	104	105.9

Table 5. Comparison of reliability probability

	FORM	SORM	MVRM	AISM	MCS
LC1	98.53 (1.23)	98.53 (1.23)	99.37 (2.07)	97.29 (0.01)	97.30
LC2	97.63 (0.49)	97.63 (0.49)	98.44 (1.30)	97.04 (0.10)	97.14
LC3	100 (0.00)	99.97 (0.03)	100 (0.00)	100 (0.00)	100
# of iter.	145	227	8	303	-

(): error

[unit: %]

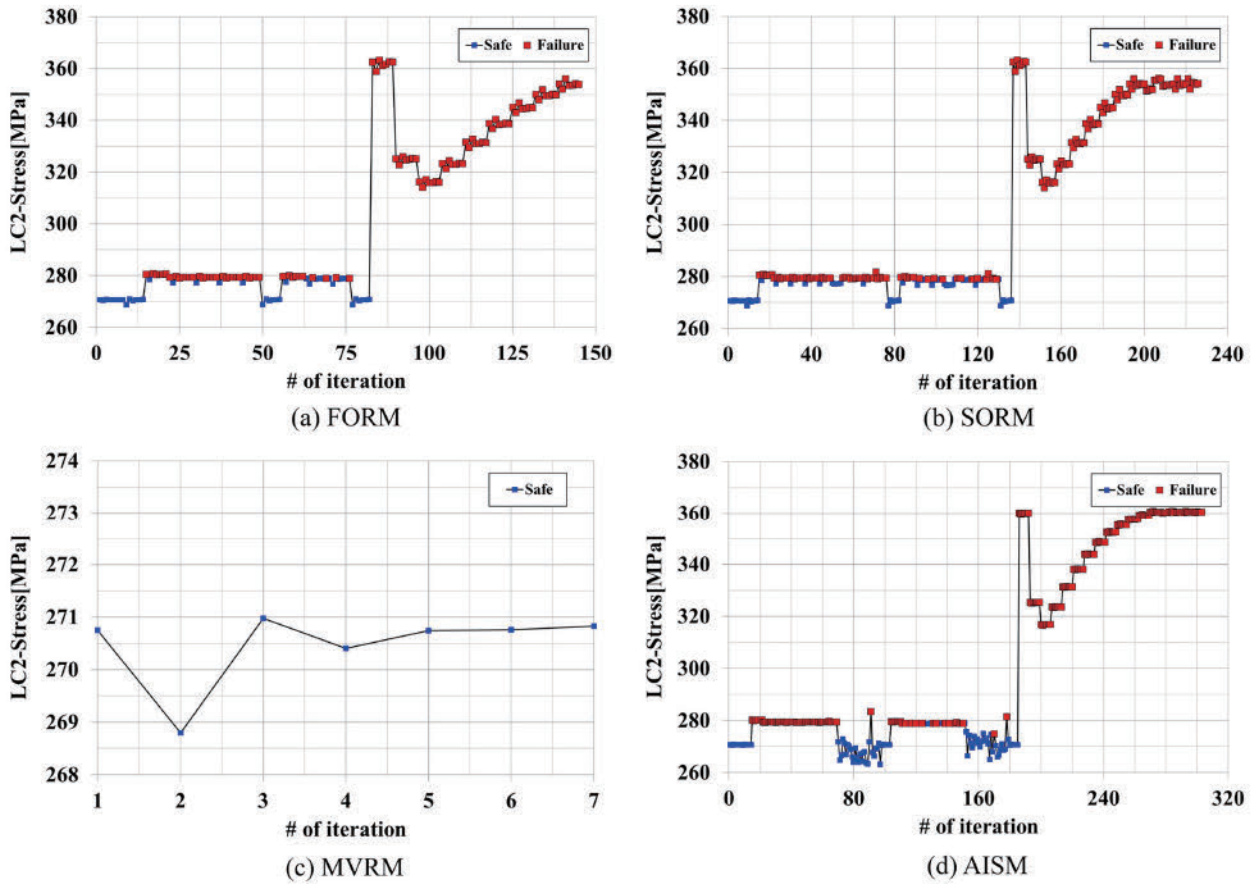


Fig. 8. Reliability analysis convergence history results.

수렴 특성은 MPP에서의 한계 상태 함수 근사 방식에만 차이가 존재하므로, 전체적인 수렴 과정에서는 유사한 경향을 보였다. Fig. 8(a)의 FORM 수렴결과에서 관찰되는 빠른 수렴특성은 한계상태면이 단일 failure mode를 가지며, 초기점이 MPP 근처에서 설정된 전형적인 FORM 수렴특성을 반영한 것으로 볼 수 있다. FORM 신뢰성 해석은 1차 근사 기반의 기울기 탐색 알고리즘을 사용하므로, 본 연구에서 고려한 응력함수와 같이 한계상태함수가 비교적 단순하고 비선형성이 낮을 경우 매우 빠르게 수렴한다. 반면, MVRM의 경우 다른 신뢰성 해석 방법과 달리 수렴 과정 전반에서 강도 성능 한계치를 모두 만족하는 경향을 나타냈으며, 이러한 특성이 신뢰 확률의 정확도 저하로 이어지는 원인으로 해석될 수 있었다. 본 연구에서 고려한 FCS의 확률론적 설계에서는 LC2 조건의 확률 성능 함수가 가장 중요한 평가 지표이기 때문에, MCS 기반 신뢰성 해석 결과를 활용하여 LC2 조건에서의 확률 성능 함수에 대한 랜덤 변수의 영향도를 분석하였다. Fig. 9에는 각 랜덤 변수 데이터의 산포 특성과 이를 차수 2 다항식으로 근사화 한 결과를 정리하여 제시하였다.

Fig. 9에 제시된 결과에서 확인할 수 있듯이, 랜덤 변수 설정 시 확률분포함수를 정규분포로 적용하였기 때문에 평가된 랜덤 변수 데이터가 평균치를 중심으로 밀집되어 있음을 알 수 있었다. 랜덤

변수는 Fig. 6에 나타나 있는 부재치수 별로 Table 4에 정의된 랜덤 특성이 반영된 것이며, Fig. 9의 산포 특성 및 근사화 결과는 랜덤 변수 변화에 따른 확률 성능 함수의 변화 경향과 비선형성 정도를 시각적으로 분석하기 위한 것으로 확률론적 설계에서 각 랜덤 변수가 구조 안전도에 미치는 영향도를 정량적으로 파악하는 데 중점을 둔다. 여기서 성능함수인 응력의 변화율은 해당 부재의 두께 변화에 대한 구조적 민감도를 의미하며, 기울기가 급격하고 비선형성이 높은 변수일수록 확률 성능 함수에 미치는 영향도가 높다고 판단된다. 이는 해당 부재의 불확실성이 전체 구조물의 파괴 확률에 가장 크게 기여함을 시사한다. 랜덤 변수별 MCS 기반 신뢰성 해석 데이터의 근사화 결과에 따르면, chain guide plate 부재의 랜덤 변수 X_2 가 LC2 조건의 확률성능함수에서 가장 급격한 기울기와 높은 비선형성을 나타냈으며, arm pin plate 부재의 랜덤 변수 X_3 가 그 다음으로 높은 기울기 분포를 보였다. 특히 X_2 (chain guide plate)의 경우, main stopper block과의 선 접촉 조건으로 인해 비선형성이 크게 나타난 것으로 판단되었으며, X_3 (arm pin plate)는 arm pin을 통해 FCS의 housing과 arm을 연결하는 역할을 하는 부재로, Fig. 9의 분석 결과를 통해 확률론적 설계에서 중요도가 높은 부재로 확인되었다.

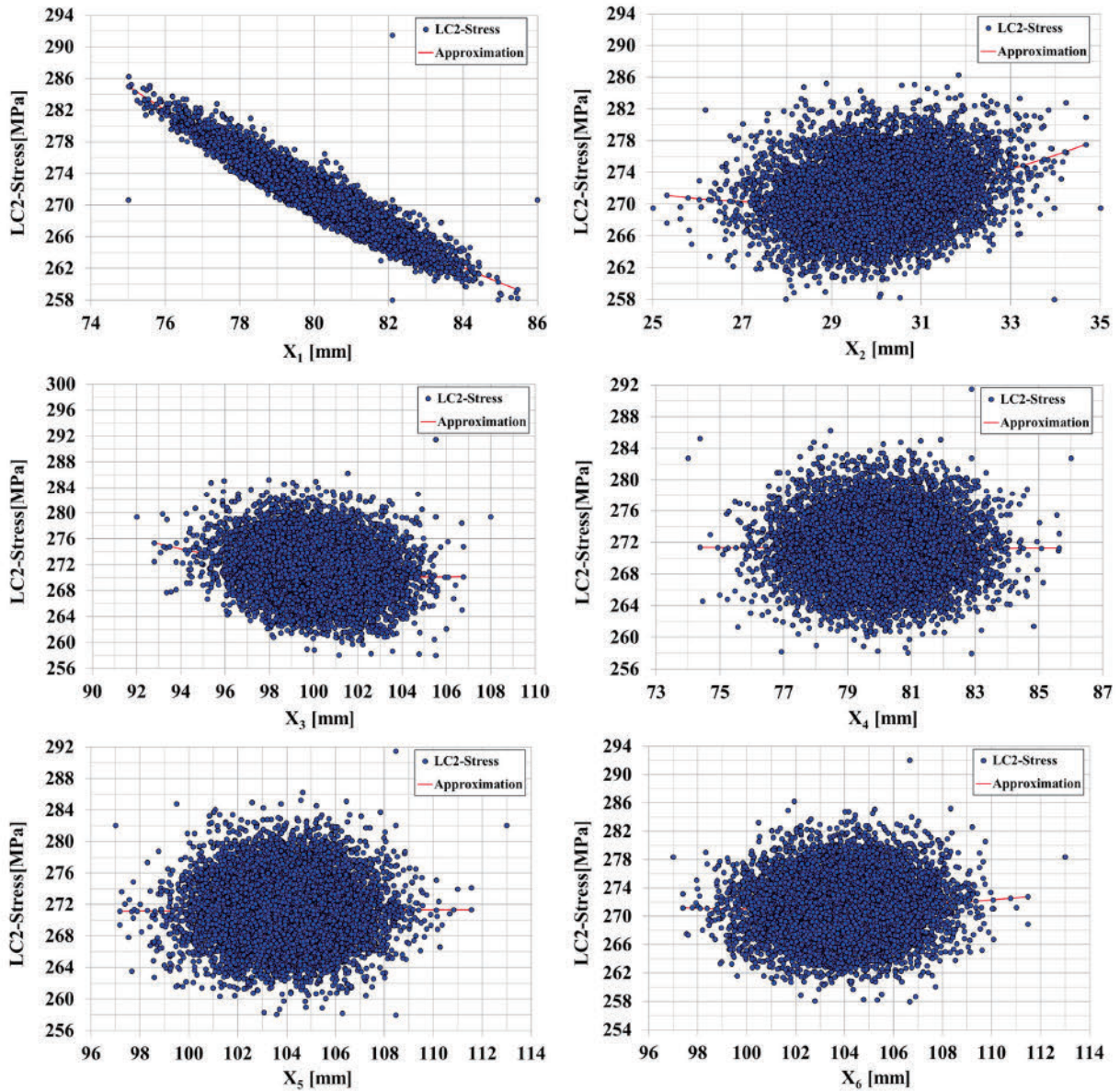


Fig. 9. MCS data distribution and approximation.

4. 결 론

본 연구에서는 10MW급 부유식 해상풍력발전기에 설치되는 FCS의 구조 설계 안전도를 효율적으로 평가하기 위해, FORM, SORM, MVRM, AISM, MCS 등의 신뢰성 해석 기법을 적용하였다. 또한, 강도 성능에 대한 신뢰 확률, 수치 계산량, 수렴 특성을 비교 분석하여 FCS의 확률론적 설계에 적합한 신뢰성 해석 기법을 도출하였다. 분석 결과, 적용된 신뢰성 해석 방법 중 AISM의 해석 결과가 MCS의 결과와 가장 높은 일치도를 보였으며, 반면 MVRM의 경우 오차율이 가장 크게 나타났다. 수치 계산량 측면에서는 AISM이 가장 많은 계산 비용을 요구한 반면, MVRM은 가장 적은 계산량으로 해석이 가능했으나, 해석 결과의 정확도가 낮고 신뢰 확률을 과도하게 산출하는 경향을 보여 설계 안전도 측면에서 적합성이 떨어

지는 것으로 확인되었다. 또한, 신뢰성 해석 방법별 수렴 특성 분석 결과, MVRM은 다른 해석 기법과 달리 수렴 과정 전반에서 구조 강도 성능 한계치를 모두 만족하는 경향을 나타냈으며, 이러한 특성이 신뢰 확률의 정확도 저하로 이어지는 것으로 분석되었다. 아울러, MCS 기반 신뢰성 해석 산포 데이터의 근사화 결과를 통해 arm pin plate 부재가 FCS의 확률론적 설계에서 가장 중요도가 높은 요소임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20223030020240)결과입니다.

References

- [1] Altair Engineering Inc. (AEI), 2021, HyperWorks User Guide, Altair Engineering, Troy, MI, USA.
- [2] Breitung, K., 1984, Asymptotic approximation for multi-normal integrals, *J. Eng. Mech.*, 110(3), 357-366.
- [3] DNV, 2021a, Floating Wind Turbine Structures (DNV-ST-0119, Det Norske Veritas), DNV.
- [4] DNV, 2021b, Position Mooring (DNV-OS-E301, Det Norske Veritas), DNV.
- [5] DNV, 2024, Structural Design of Offshore Units (DNV-OS-C101, Det Norske Veritas), DNV.
- [6] Institute for Advanced Engineering (IAE), 2023, Integrated Load Analysis Report (DMS-IA-GEN-DOC-REP-0005).
- [7] Keprate, A., Bagalkot, N., Siddiqui, M.S. and Sen, S., 2023, Reliability analysis of 15 MW horizontal axis wind turbine rotor blades using fluid-structure interaction simulation and adaptive Kriging model, *Ocean Eng.*, 288, 116138.
- [8] Koch, P.N., Yang, R.J. and Gu, L., 2004, Design for Six Sigma through robust optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 26(1), 235-248.
- [9] Korean Agency for Technology and Standards (KS), 2019, KS D 3500: Carbon Steel Plates for Pressure Purposes, Korean Agency for Technology and Standards.
- [10] Kumar, R., Prasad, K.J., Keprate, A. and Sen, S., 2025, Addressing material uncertainty in reliability analysis of floating offshore mooring through probabilistic meta-model developed with stochastic Kriging technique, *Ocean Eng.*, 335, 121697.
- [11] Lee, H. and Park, J., 2023, Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus, *Ocean Eng.*, 268, 114015.
- [12] Nowak, A.S. and Collins, K.R., 2012, Reliability of Structures, CRC Press, London.
- [13] Simulia Dassault Systèmes (SDS), 2020, Abaqus User Manual, Dassault Systèmes, Irving, TX, USA.
- [14] Siddall, J.N., 1983, Probabilistic Engineering Design, Marcel Dekker Inc., New York.
- [15] Song, C.-Y., 2025, Reliability analysis and neural-network modeling of ship radar mast structure by adopting quasi-random sampling, *J. Ocean Eng. Technol.*, 39(1), 23-31.
- [16] Song, C.Y., 2020, Reliability analysis application and comparative study for implementing probabilistic structural design of automatic salt collector, *J. Korean Soc. Manufact. Technol. Eng.*, 19(12), 70-79.
- [17] Wu, Y., 1994, Computational methods for efficient structural reliability and reliability sensitivity analysis, *AIAA J.*, 32(8), 1717-1723.
- [18] Zhao, G., Dong, S. and Zhao, Y., 2024, Fatigue reliability analysis of floating offshore wind turbines under random environmental conditions based on surrogate model, *Ocean Eng.*, 314, 119686.

Received 8 August 2025

Revised 23 October 2025

Accepted 7 November 2025