

자동채염기의 확률론적 구조설계 구현을 위한 신뢰성 해석 응용과 비교연구

송창용*[#]

*목포대학교 조선해양공학과

A Reliability Analysis Application and Comparative Study on Probabilistic Structure Design for an Automatic Salt Collector

Chang Yong Song*[#]

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

(Received 11 September 2020; received in revised form 15 September 2020; accepted 21 September 2020)

ABSTRACT

This paper describes a comparative study of characteristics of probabilistic design using various reliability analysis methods in the structure design of an automatic salt collector. The thickness sizing variables of the main structural member were considered to be random variables, including the uncertainty of corrosion, which would be an inevitable hazard in the work environment of the automatic salt collector. Probabilistic performance functions were selected from the strength performances of the automatic salt collector structure. First-order reliability method, second-order reliability method, mean value reliability method, and adaptive importance sampling method were applied during the reliability analyses. The probabilistic design performances such as reliability probability and numerical costs based on the reliability analysis methods were compared to the Monte Carlo simulation results. The adaptive importance sampling method showed the most rational results for the probabilistic structure design of the automatic salt collector.

Key Words : Automatic Salt Collector(자동채염기), Probabilistic Structure Design(확률론적 설계), Reliability Analysis(신뢰성해석), Adaptive Importance Sampling Method(적합중요도 샘플링방법)

1. 서 론

해양수산업의 주요 배후 산업 중 하나인 해양수산기계 산업은 미래 식량자원 확보와 연계되어 세계적으로 시장규모가 증가하고 있는 것으로 보고되고 있지만, 국내 해양수산기계의 기술수준과 국산화 비율이 매우 낮은 상태이다^[1]. 중요 해양수산기

계 중의 하나인 채염기는 노동력 의존도가 높은 해양염전작업의 특성을 개선하기 위해 자동화 전환이 시급한 장비 중 하나이다. 기존 해양채염 및 이송작업의 안전성 확보와 염전의 단위면적 당 생산량의 증대를 위해 최근 전동구동방식 자동채염기(Automatic salt collector)의 국산화 개발이 시작되고 있다. 해양수산기계의 설계와 관련된 국내외 설계규정이 마련되어 있지 않기 때문에 자동채염기와 같은 새로운 장비의 구조설계 안전성은 실제 작업조건이 반영된 설계하중조건 산정과 이를 적용한

Corresponding Author : cysong@mokpo.ac.kr

Tel: +82-61-450-2732, Fax: +82-61-452-7774

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <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.

구조해석을 통해 평가되게 된다. 그러나 기존의 품질문제에 대한 데이터가 존재하지 않는 새로운 형태의 장비인 자동채염기의 구조안전도를 설계단계에서 합리적인 수준으로 결정하기 위해서는 신뢰성 해석을 이용한 확률론적 설계 평가가 필요하다.

해양기계장비의 설계안전도를 검증과 관련하여 다수의 확률론적 설계 응용 연구가 수행되어 오고 있다. Song et al.^[2]은 부유식 생산저장하역 설비의 라이저 부가물에 대한 신뢰성 기반 설계최적화를 위해 제한조건 가용성 이동최소자승 근사모델을 개발하여 설계위험도를 최소화할 수 있는 최적설계안을 제시하였다. Bai et al.^[3]은 경량 해저 파이프라인의 신뢰성해석을 위해 유한요소해석과 반응표면법을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. Lee and Kim^[4]은 무어링 체인에 내재된 결함에 대한 확률론적 결함평가를 수행하기 위해 근사적으로 한계상태함수의 파손확률을 계산하고, 실제 한계상태함수를 구해 얻은 확률과 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 계산된 파손확률과 비교하였다. Yin et al.^[5]는 심해장비 해수유압펌프의 밸브 포트 관의 신뢰성해석과 민감도평가를 위해 비확률적 신뢰성 Convex 모델을 개발하였다. Park et al.^[6]은 선박용 항해 통신용 레이더 마스트의 공진문제를 해결하기 위해 통계적 설계실험방법을 이용하여 공진을 회피할 수 있는 설계방안을 탐색하였다.

본 연구에서는 설계단계에서 자동채염기의 구조설계에 대한 안전도를 효율적으로 평가할 수 있는 확률론적 설계 방법을 구현하기 위해 다양한 신뢰성해석 방법을 적용하였고, 신뢰성해석 결과를 비교하여 자동채염기의 확률론적 설계에 적합한 신뢰성해석 방법을 선정하였다. 신뢰성해석에서 자동채염기의 해양염전 작업환경으로 인해 발생할 수 있는 부식의 불확실성을 고려하여 주요 구조부재의 두께치수는 랜덤변수(Random variable)로 고려하였으며, 강도성능은 확률성능함수(Probabilistic performance function)로 적용하였다. 강도성능은 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)을 기반으로 실제 작동조건을 고려한 설계하중조건을 산정하여 각 설계하중조건 별로 계산된 최대응력을 기준으로 평가하였다. 자동채염기의 확률론적 구조설계에 가장 적합한 신뢰성해석을 도출하기 위해 1차 신뢰성

해석 방법(First order reliability method, FORM), 2차 신뢰성해석 방법(Second order reliability method, SORM), 평균점 신뢰성해석 방법(Mean value reliability method, MVRM), 그리고 적합중요도 샘플링방법 (Adaptive importance sampling method, AISM)을 적용하였다. 각각의 신뢰성해석 방법으로부터 산출된 자동채염기의 강도성능에 대한 신뢰확률, 수치계산량 및 수렴특성을 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation, MCS) 방법을 이용한 신뢰성해석 결과와 비교하여 자동채염기의 확률론적 설계에 가장 적합한 신뢰성해석 방법을 탐색하였다. 또한 MCS의 신뢰성해석 결과로부터 랜덤변수 데이터의 산포특성을 이용하여 확률성능함수에 대한 랜덤변수의 영향도를 검토하였다. 본 논문은 다음의 순서로 내용을 구성하였다. 2장에서는 FORM, SORM, MVRM, AISM, 그리고 MCS에 대한 이론적 배경을 간략히 정리하였다. 3장에서는 FEA 기반 강도성능 평가와 신뢰성해석 결과비교의 내용을 기술하였다. 마지막으로 결론에서 전체 연구내용을 정리하였다.

2. 신뢰성해석 이론

신뢰성해석에 기반한 확률론적 구조설계는 기계장비나 구조물이 실제 운용될 때 고려되어야 할 다양한 불확실성에 대해 강도성능과 같은 확률성능함수가 목표 안전도에 어느 정도의 확률로 만족할 수 있는지를 평가할 수 있다. 신뢰성해석에서는 확률 밀도함수 계산의 복잡성과 과도한 샘플링 계산량의 문제를 해결하기 위해 다양한 형태의 신뢰확률 평

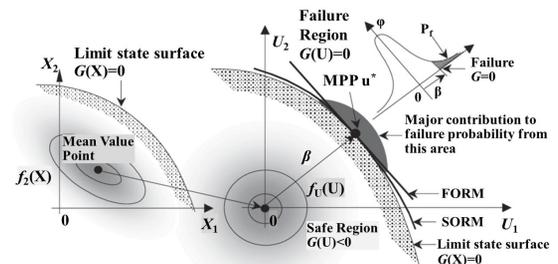


Fig. 1 Concept of FORM and SORM^[7]

가 방법이 제안되어 오고 있다. 2장에서는 본 연구에서 사용된 FORM, SORM, MVRM, AISM, 그리고 MCS와 같은 신뢰성해석 이론에 대해 간략히 살펴 보았다.

FORM은 Fig. 1과 같이 표준 정규 확률 분포의 특성을 이용하여 표준 정상 공간(U-space)의 원점에서 한계상태표면(Limit state surface)의 한 지점까지의 최단 거리를 실패확률을 정의한다.

FORM에서 신뢰지수 β 는 수학적으로 랜덤변수 X 에 관한 등가제약조건의 최소해를 탐색하는 최적화 문제로 결정된다⁸⁾.

$$\beta = \min |U| \quad (1)$$

s.t. $G(X) = G(T^{-1}(U)) = G(U) = 0$

상기 식의 해는 최대 가능 파괴점(Most probable failure point, MPP)인 U^* 이다. 한계상태함수 $G(U)$ 가 정규분포랜덤변수 U_i 에 대해 선형관계이면, 파괴확률은 다음과 같이 계산된다.

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

여기서 Φ 는 표준정규분포함수이다. FORM의 신뢰성해석 결과의 정확도는 MPP에서 한계상태함수의 비선형성이 크지 않은 경우에 보장되는 것으로 알려져 있다.

SORM을 이용한 신뢰성해석은 Fig. 1에 나타난 것처럼 MPP에서 한계상태함수의 비선형성이 큰 경우에 적합하다. SORM에서 파괴확률은 다음과 같이 근사적으로 계산된다⁹⁾.

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

여기서 k_i 는 MPP에서 한계상태함수의 주곡률(principle curvature)이며 랜덤변수에 관한 한계상태함수의 2차 미분으로부터 구해진다.

MVRM은 테일러급수전개(Taylor series expansion, TSE)를 이용하여 한계상태함수 $G(X)$ 에 대한 평균 μ_G 과 표준편차 σ_G 를 근사적으로 산출하는 방법

이며, 테일러급수전개 방법에 따라 신뢰성해석의 정확도가 달라진다. MVRM에서 신뢰지수는 다음의 식과 같이 계산된다¹⁰⁾.

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

식 (4)로부터 계산된 신뢰지수를 식 (2)에 대입하면 파괴확률을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 2차 TSE를 사용하였으며, 확률성능함수 Y 의 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 이용하여 확률성능함수에 대한 평균과 표준편차를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\mu_Y = Y(\mu_x) + \frac{1}{2} \frac{d^2 Y}{dx_i^2} \sigma_{x_i}^2 \quad (6)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 (\sigma_{x_i})^2 + \frac{1}{2} \sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 (\sigma_{x_i})^2 (\sigma_{x_j})^2}$$

AISM은 Fig. 2에 보여진 것처럼 파괴영역이 주곡률을 이용한 2차 다항식으로 근사화된다¹¹⁾. AISM에서 곡률 값은 파괴영역에 존재하는 샘플수를 기반으로 파괴영역을 포함하도록 반복적으로 업데이트된다.

MCS는 목표 신뢰수준(confidence level)에서 평가하고자 하는 신뢰확률 혹은 파괴확률에 부합하는

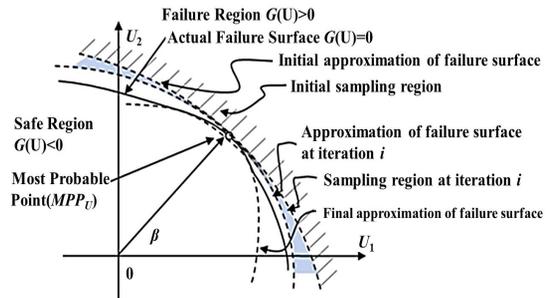


Fig. 2 Concept of AISM^[11]

샘플링횟수가 적용될 경우 랜덤변수로 인한 확률성능함수의 불확실성을 실질적으로 산출할 수 있는 신뢰성해석 방법이다. MCS를 이용한 신뢰성해석에서 확률성능함수 Y 가 샘플링횟수 N 만큼 산출되면 다음과 같은 평균 \bar{Y} , 분산 σ_Y^2 , 파괴확률 p_f 등을 산출할 수 있다^[12].

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

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

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

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

식 (7)에서 파괴확률 p_f 는 지시함수 $I(x)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) f_X(x) dx \quad (8)$$

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

파괴확률은 지시함수의 평균치를 이용하여 다음과 같이 정리된다.

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

여기서 N_f 는 $g \leq 0$ 인 경우에 대한 샘플링횟수이다. 신뢰확률 R 은 다음의 식으로 정의된다.

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

파괴확률은 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF) $F_Y(y)$ 와 확률밀도함수(probability density function, PDF) $f_Y(y)$ 는 다음의 식으로 구해진다.

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

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

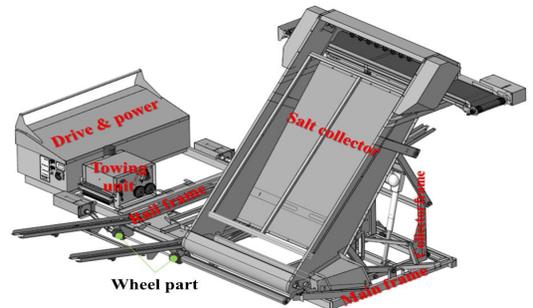
$$f_Y(y) = [F_Y(y)]'$$

식 (11)에 나타난 바와 같이 PDF는 CDF의 미분으로부터 구해진다.

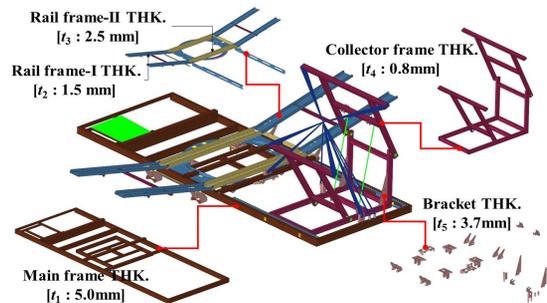
3. 강도성능 평가 및 신뢰성해석

3.1 FEA 기반 강도성능 평가

자동채염기의 시스템 구성은 Fig 3(a)에 나타나 있으며, 자동채염기는 채염작업 자동화를 위한 Salt collector와 Towing unit 시스템, 전기구동력 전달을 위한 Drive & power 시스템, 채집된 소금의 이송을 위한 Rail frame, 그리고 기계구성품의 장착과 하중



(a) system configuration



(b) FEA model

Fig. 3 System configuration and FEA model

지지를 위한 Collector frame, Rail frame 및 Main frame으로 구성되어 있다. 신뢰성해석에서 사용된 주요 Frame의 FEA 모델링 및 초기설계 두께치수는 Fig. 3(b)에 나타나 있다. FEA 모델의 구조부재는 셸(shell) 요소로 생성되었고, 각 기계구성품의 중량은 집중질량 요소를 사용하여 구현하였으며, 각 구조부재의 연결과 집중질량 및 설계하중의 적용을 위해 강체연결요소(rigid link)를 사용하였다. Main frame, Rail frame, Collector frame 그리고 Bracket의 초기설계 두께치수는 각각 5.0mm, 1.5~2.5mm, 0.8mm, 그리고 3.7mm로 적용되어 있다. FEA 모델의 요소 수와 절점 수는 각각 112,896개와 114,431개이며, 재료 물성치는 밀도 8,000kg/m³, 탄성계수 193GPa, 프와송 비(Poisson's ratio) 0.29, 그리고 항복강도 215MPa인 오스테나이트계 스테인레스 강재(SUS316)이다. 자동채염기의 구조해석을 위한 하중조건조합과 하중조건에 적용된 설계하중은 Table 1에 나타났다.

자동채염기의 구조해석을 위한 하중조건은 Table 1에 나타낸 것처럼 가장 가혹한 작동상태를 고려하기 위해 시스템 중량과 작동하중 상태를 조합하여 최대 적재조건(Loading, LC1), 최대 적재조건 하에서의 운전조건(Operating, LC2), 그리고 정지조건(Braking, LC3)으로 산정하였다. Table 1에서 판성하

Table 1 Load cases

Design loads	Load cases		
	Loading [LC1]	Operating [LC2]	Braking [LC3]
Salt collector weight (0.2 ton)	✓	✓	✓
Drive & power part weight (0.23 ton)	✓	✓	✓
Towing part weight (0.07 ton)	✓	✓	✓
Wheel part weight (0.03 ton)	✓	✓	✓
Inertial load (1.0 G)	✓	✓	✓
Max. salt collecting capacity (0.7 ton)	✓	✓	✓
Max. towing capacity (490 N)	-	✓	-
Acceleration at operating (1.25 G)	-	✓	-
Acceleration at braking (-1.25 G)	-	-	✓

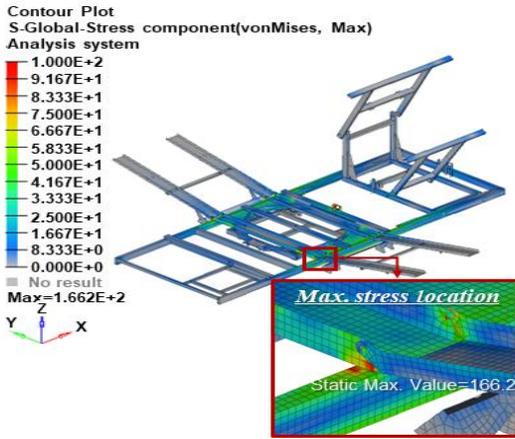
Table 2 Structure analysis results

Structure part	Max. von-Mises stress [MPa]			Safety check
	LC1	LC2	LC3	
Overall structure	166.2	149.2	173.8	OK
Main frame	166.2	142.0	164.2	OK
Rail frame	151.7	149.2	155.5	OK
Collector frame	51.0	55.4	54.1	OK
Bracket	159.9	139.7	173.8	OK

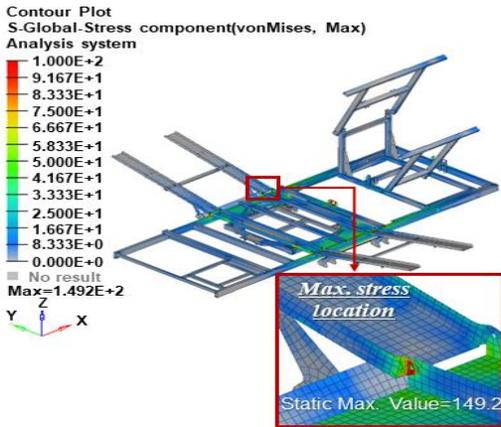
중(inertial load)은 중력방향, 작동조건 가속도는 이송방향, 그리고 정지조건 가속도는 이송방향과 반대방향으로 각각 적용하였다. 구조해석의 경계조건은 Rail frame 하부에 장착된 각각 Wheel의 주행방향의 회전자유도를 제외한 나머지 자유도를 모두 구속하여 적용하였다. 구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/Implicit를 이용하여 하중조건 별 최대응력(Max. von-Mises stress)을 산출하고, 재료의 항복응력을 기준으로 구조안전도를 평가하였다. 구조안전도 기준은 하중조건 별 최대응력이 재료항복강도 85%인 183 MPa 이하로 나타날 경우 적절한 것으로 고려하였다¹¹⁾.

자동채염기의 구조해석 결과는 Table 2와 Fig. 4에 정리하여 나타내었다. Table 2에 나타난 것처럼 모든 하중조건에서 구조안전도 기준을 만족하는 것으로 나타났고, LC3의 Bracket part에서 발생한 최대응력치가 가장 높게 나타났다. 하중조건 별 최대응력이 발생하는 구조부재는 LC1에서 Main frame part, LC2에서 Rail frame part, 그리고 LC3에서 Bracket part로 각각 나타났으며, 모든 하중조건에서 Collector frame part의 응력수준이 가장 낮게 나타났다.

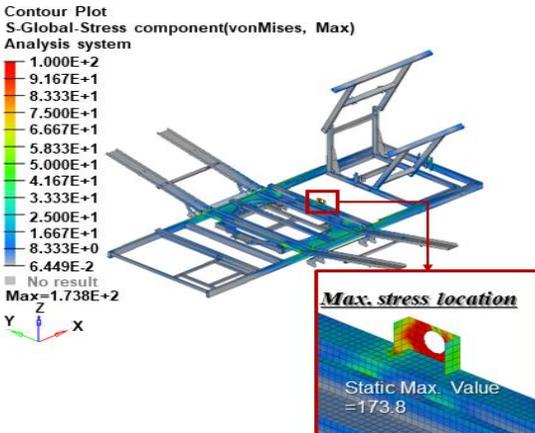
Fig. 4에 보여진 것처럼 LC1에서 최대응력은 Rail frame과 연결된 Main frame 부재에서 발생하였고, LC2에서 최대응력은 Rail frame의 연결부재에서 나타났으며, LC3에서 최대응력은 중앙부의 Bracket 부재에서 발생하였다. 자동채염기 구조해석 결과로부터 구조설계의 구조안전도는 기준 이하를 만족하고 있지만, LC3에서 안전여유치가 5% 미만으로 성능



(a) LC1



(b) LC2



(c) LC3

Fig. 4 Stress contour results [unit: MPa]

한계치에 가까운 상태이기 때문에 설계인자의 불확실성에 따른 정량적인 신뢰성 검토가 필요한 것으로 판단되었다.

3.2 신뢰성해석 결과 비교

자동채염기는 해양염전에 사용되는 기계장비이기 때문에 본 연구에서는 설계인자에 대한 불확실성 요소로 부식을 고려하였다. 신뢰성해석에서 주요 구조부재의 두께치수는 부식을 고려한 랜덤변수로 정의하였고, 구조해석의 각 하중조건 별 강도성능은 확률성능함수로 고려하였다. 신뢰성해석을 위한 랜덤변수 설정사항은 Table 3에 정리하였다. Table 3에 정리된 바와 같이 평균치는 Fig. 3(b)에 나타난 초기설계 두께로 설정하였으며, 상대 표준 편차 (relative standard deviation, RSD)는 기존의 오스테나이트계 스테인레스 강재의 부식특성에 대한 실험연구결과^[13]를 참조하여 10 %로 설정하였고, 확률분포 함수는 정규분포(Normal distribution)를 따르는 것으로 정의하였다. 확률성능함수인 강도성능의 한계치는 구조안전도 기준인 183 MPa로 설정하였다. 신뢰성해석은 Table 3에 정리된 랜덤변수를 구조해석모델에 적용하여 FORM, SORM, MVRM 및 AISM의 신뢰성해석 방법에 따른 하중조건 별 강도성능의 신뢰확률 산출하는 방식으로 수행하였다.

각각의 신뢰성해석 방법으로부터 산출된 결과는 MCS의 결과와 비교하여 자동채염기의 확률론적 설계평가에 가장 적합한 신뢰성해석 방법을 검토하였다. 본 연구에서는 MCS로부터 확률성능함수의 불확실성을 실질적으로 산출하기 위해 다음의 식을 이용하여 샘플링횟수를 산정하였다(Siddall, 1983).

Table 3 Definition of random variables

Random variable	RSD	Distribution type	Design variable	Mean
X_1	10 %	Normal	t_1	5.0 mm
X_2	10 %	Normal	t_2	1.5 mm
X_3	10 %	Normal	t_3	2.5 mm
X_4	10 %	Normal	t_4	0.8 mm
X_5	10 %	Normal	t_5	3.7 mm

Table 4 Comparison of reliability probability

	FORM	SORM	MVRM	AISM	MCS
					[unit: %]
LC1	95.19 (0.98)	95.25 (0.92)	98.86 (2.84)	96.37 (0.25)	96.13
LC2	99.72 (0.01)	99.72 (0.01)	99.99 (0.26)	99.73 (0.00)	99.73
LC3	93.75 (2.02)	93.52 (1.77)	96.55 (5.07)	92.72 (0.90)	91.89
# of iter.	96	154	11	324	-

() : error

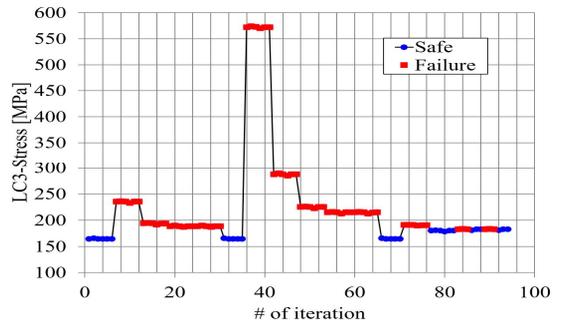
$$e [\%] \approx 200 \sqrt{\frac{(1-p_f)}{Np_f}} \quad (12)$$

식 (12)으로부터 파괴확률 $p_f = 0.01$ 를 기준으로 신뢰수준 95%에 대한 오차율(e) $\pm 5\%$ 의 정확도를 적용하여 샘플링횟수는 158,400번을 적용하였다. Table 4에는 FORM, SORM, MVRM 및 AISM의 신뢰성확률의 결과를 MCS의 결과와 비교하여 나타내었고, 신뢰성해석 방법에 따른 수치계산량도 정리하여 나타내었다. Table 4에 나타난 바와 같이 AISM의 신뢰성해석 결과가 MCS의 결과와 가장 좋은 일치를 나타내었으며, MVRM의 결과는 오차율이 가장 높은 것으로 나타났다. SORM의 결과는 FORM보다는 다소 우수하지만 AISM의 결과성능에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 신뢰확률은 모든 신뢰성해석 방법에서 LC3이 가장 낮고, LC2가 가장 높은 경향을 나타내었다. 수치계산량은 AISM을 적용했을 경우에 가장 높게 나타났고, MVRM이 가장 낮은 것으로 나타났다.

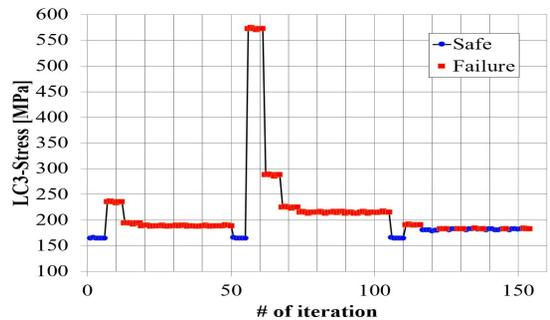
MVRM이 가장 적은 수치비용을 필요로 했지만, 결과의 정확도가 낮고 신뢰확률을 높게 산출하는 경향이 나타나기 때문에 설계 안전도 측면에서 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다.

신뢰성해석 방법에 따른 수렴특성의 결과는 대표적으로 LC3에 대해서 Fig. 5에 나타내었다.

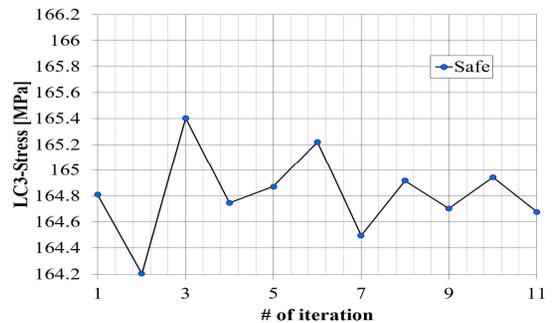
Fig. 5에 나타난 것처럼 FORM과 SORM의 수렴 특성은 이론적으로 MPP에서 한계상태함수의 근사화에만 차이가 있기 때문에 전체적인 수렴과정이 거의 유사하게 나타났다. MVRM은 다른 신뢰성해석



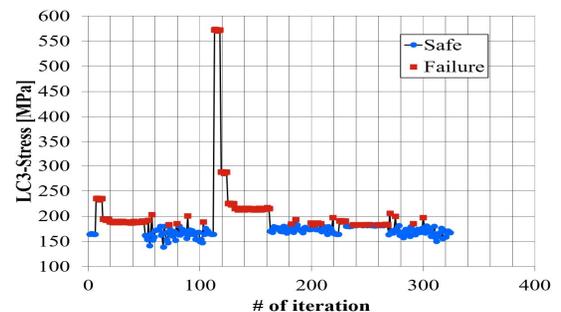
(a) FORM



(b) SORM



(c) MVRM



(c) AISM

Fig. 5 Convergence history results

방법과 달리 전체 수렴과정에서 강도성능 한계치를 모두 만족하는 것으로 나타났는데, 이러한 특성이 신뢰확률 정확도의 저하로 연계된 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서 고려한 자동채염기의 확률론적 설계에서 LC3의 확률성능함수가 가장 중요하기 때문에 MCS의 신뢰성해석 결과로부터 LC3의 확률성능함수에 대한 랜덤변수의 영향도를 검토하였다. Fig. 6에는 각각의 랜덤변수 데이터의 산포특성과 2차 다항식으로 근사화한 결과를 정리하여 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 것처럼 랜덤변수 설정에서 확률 분포함수를 정규분포로 사용하였기 때문에 평균치를 중심으로 랜덤변수 평가 데이터가 밀집되어 있는 것을 알 수 있다. 랜덤변수 별 MCS의 신뢰성해석

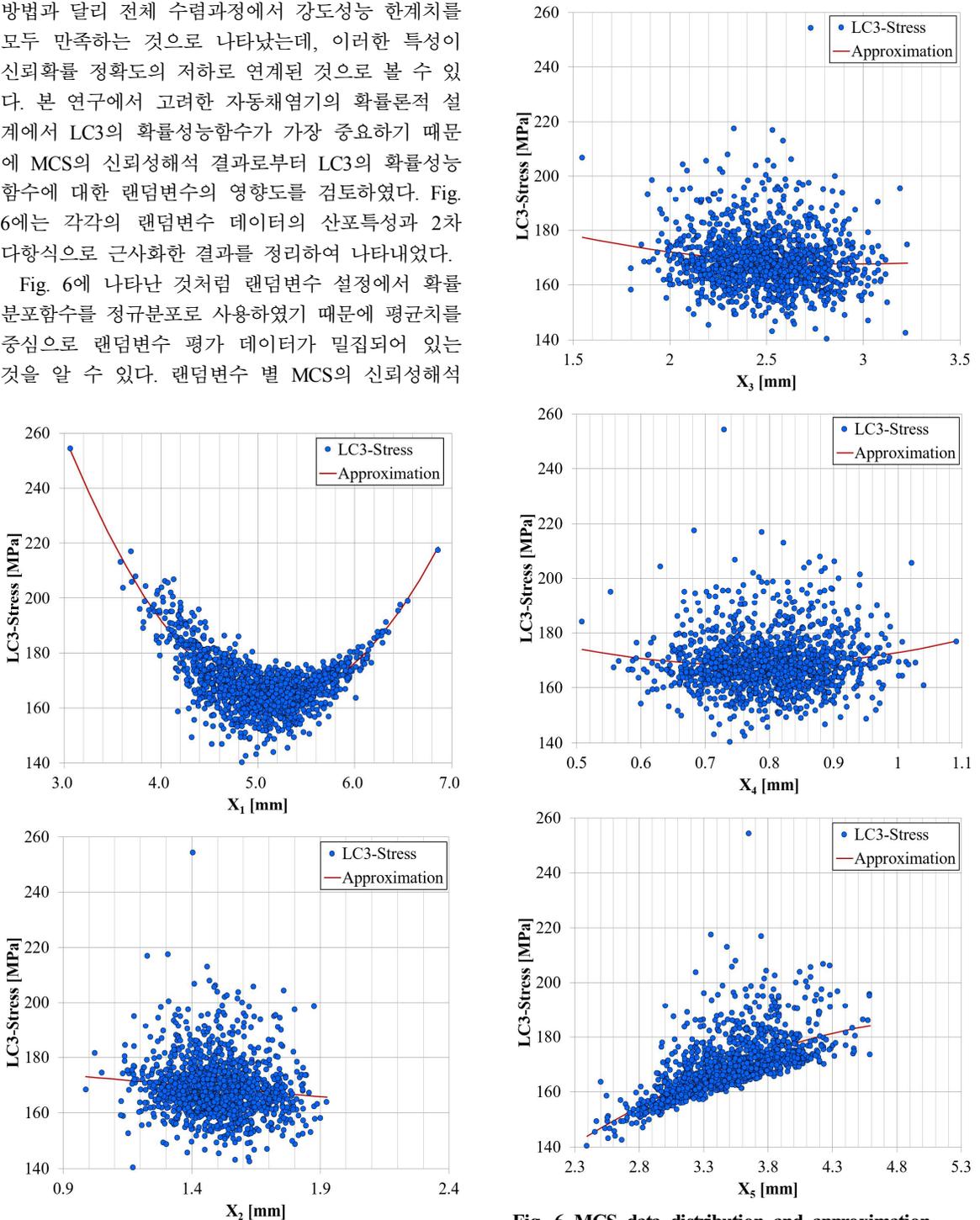


Fig. 6 MCS data distribution and approximation

데이터의 근사화 결과로부터 Main frame 부재의 랜덤변수인 X_1 이 LC3의 확률성능함수에 대해 가장 급격한 기울기와 비선형성을 나타내었고, Bracket 부재의 랜덤변수인 X_5 가 다음으로 높은 기울기 형상을 나타내었다. 이를 통해 Main frame 부재와 Bracket 부재가 자동채염기의 확률론적 설계에 가장 중요도가 높은 부재인 것으로 파악되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동채염기의 구조설계에 대한 안전도를 효율적으로 평가할 수 있는 확률론적 설계 방법을 구현하기 위해 FORM, SORM, MVRM, AISM 및 MCS의 신뢰성해석 방법을 적용하였고, 강도성능에 대한 신뢰확률, 수치계산량 및 수렴특성을 비교하여 자동채염기의 확률론적 설계에 적합한 신뢰성해석 방법을 도출하였으며, 주요 연구결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 본 연구에서 고려한 신뢰성해석 방법 중 AISM의 신뢰성해석 결과가 MCS의 결과와 가장 좋은 일치를 나타내었으며, MVRM의 결과가 오차율이 가장 높은 것으로 나타났다.
2. 수치계산량은 AISM을 적용했을 경우에 가장 높게 나타난 반면 MVRM이 MVRM이 가장 적은 수치비용을 필요로 했지만, 신뢰성해석 결과의 정확도가 낮고 신뢰확률을 높게 산출하는 경향이 나타나기 때문에 설계 안전도 측면에서 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다.
3. 신뢰성해석 방법에 따른 수렴특성분석으로부터 MVRM은 다른 신뢰성해석 방법과 달리 전체 수렴과정에서 강도성능 한계치를 모두 만족하는 것으로 나타났는데, 이러한 특성이 신뢰확률 정확도의 저하로 연계된 것으로 파악되었다.
4. MCS의 신뢰성해석 산포 데이터의 근사화 결과로부터 Main frame 부재와 Bracket 부재가 자동채염기의 확률론적 설계에 가장 중요도가 높은 부재인 것으로 파악되었다.

후 기

“본 논문은 2019학년도 목포대학교 교내연구비지원에 의하여 연구되었음”

REFERENCES

1. Song, C. Y., Lee, D., Lee, J. S., Kim, E. M. and Choi, B., “Evaluation of Structural Design Enhancement and Sensitivity of Automatic Ocean Salt Collector According to Design of Experiments,” Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 34, No. 4, pp. 253-262, 2020.
2. Song, C. Y., Lee, J. and Choung, J., “Reliability-based Design Optimization of an FPSO Riser Support Using Moving Least Squares Response Surface Meta-models,” Ocean Engineering, Vol. 38, No. 1, pp. 304-318, 2011.
3. Bai, Y., Tang, J., Xu, W. and Ruan, W., “Reliability-based Design of Subsea Light Weight Pipeline Against Lateral Stability.” Marine Structures, Vol. 43, No. 1, pp. 107-124, 2015.
4. Lee, C. H. and Kim, Y., “Reliability-based Flaw Assessment of a Mooring Chain Using FORM and SORM,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 54, No. 5, pp. 430-438, 2017.
5. Yin, F., Nie, S., Ji, H. and Huang, Y., “Non-probabilistic Reliability Analysis and Design Optimization for Valve-port Plate Pair of Seawater Hydraulic Pump for Underwater Apparatus,” Ocean Engineering, Vol. 163, No. 1, pp. 337-347, 2018.
6. Park, J. H., Lee, D., Yang, J. W. and Song, C. Y., “Design Enhancement to Avoid Radar Mast Resonance in Large Ship using Design of Experiments,” Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 33, No. 1, pp. 50-60, 2019.
7. Youn, B. D., Choi, K. K., and Du, L., “Adaptive Probability Analysis Using an Enhanced Hybrid Mean Value (HMV+) Method,” Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 29, No. 2, pp. 134-148, 2005.

8. Nowak, A. S. and Collins, K. R., Reliability of Structures, CRC Press, London, 2012.
9. Breitung, K., "Asymptotic Approximation for Multi-normal Integrals," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 110, No. 3, pp. 357-366, 1984.
10. Koch, P. N., Yang, R. J. and Gu, L., "Design for Six Sigma Through Robust Optimization," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 26, No. 1, pp. 235-248, 2004.
11. Wu, Y., "Computational Methods for Efficient Structural Reliability and Reliability Sensitivity Analysis," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1717 - 1723, 1994.
12. Siddall, J. N., Probabilistic Engineering Design, Marcel Dekker Inc., New York, 1983.
13. Han, J. W., and Park, Y.S., "Evaluation of Corrosion Characteristics of Pipeline Material(SUS316) for the Geothermal Power Plant," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 142-146, 2012.