일차근사신뢰도법을 이용한 초전도 자기에너지 저장장치 권선 최적설계

논 문
60-7-9

Optimization of SMES Windings Utilizing the First-Order Reliability Method

김 동 욱* · 정 상 식** · 성 영 화*** · 김 동 훈†
(Dong-Wook Kim · Sang Sik Jung · Young Hwa Sung · Dong-Hun Kim)

Abstract - This paper presents a novel methodology for improving the reliability of electromagnetic devices and machines based on the reliability-based design optimization method. To achieve this, the method includes reliability analysis and optimization process taking into account uncertainties of design variables. One of the first-order reliability analysis techniques, called reliability index approach, is adopted to evaluate the reliability of performance functions with respect to probabilistic design variables. The proposed method has been successfully applied to designing a superconducting magnetic energy storage system. For verifying the efficiency and accuracy of the method, the results are compared with those of conventional optimization methods.

Key Words : Design, Electromagnetic analysis, Optimization, Reliability, Uncertainty

1. 서 론

최적설계는 구속조건을 만족시키면서 목적함수를 최대/최소화하는 설계변수를 결정하는 방법이다. 기존의 최적설계는 설계변수들이 불변의 값을 갖고 있다고 가정하여 하나의 고정된 값만을 대표값으로 사용한다. 이를 확정론적 최적설계(deterministic optimization)라 한다. 하지만 실제 설계문제에서 가공오차, 물성치, 운전조건 등은 어떤 일정한 값을 가지지 않고 평균값을 중심으로 분산특성에 따라 값이 분포되어 있다. 이러한 불확실성(uncertainties)은 실제 제품에서 목표성능을 달성하지 못하는 원인이 되고 있다. 최근 이러한 단점을 보완하기 위해서 불확실 요소를 확률, 통계적 접근법을 활용하여 설계단계에서 고려하는 신뢰도 기반 최적설계(reliability-based design optimization; 이하 RBDO)와 강건 최적설계(robust optimization)에 대한 관심이 증가하고 있다[1-9].

RBDO는 제품의 설계단계에서 불확실 요소를 고려하기 위하여 설계변수들을 확률변수로 가정하고 확률통계 기법을 도입하여 확률변수에 대한 시스템의 응답특성을 구한다. 그리고 응답특성의 확률분포 함수로부터 제품의 안전성을 평가하는 신뢰성 해석(reliability analysis)을 수행하여 신뢰도(reliability)를 평가하고 이를 바탕으로 주어진 구속조건을 만족하는 최적해를 도출하는 확률론적 최적설계(probabilistic optimization) 방법에 속한다. 반면 강건 최적설계는 신뢰도 해석 수행의 가부와 별개로 주어진 최적화 문제에서 설계 변수와 구속조건으로 이루어진 설계 파라미터의 불확실성이나 변동의 영향을 최소화 하는 것을 그 목적으로 하고 있다[2,3].

본 논문에서는 먼저, 성능함수(performance function)를 일차근사하여 손상확률을 계산하는 일차근사신뢰도법(first-order reliability method; 이하 FORM) 중 하나인 신뢰도 지수 기법(reliability index approach; 이하 RIA)을 이용하여 연속체 설계 민감도법(continuum design sensitivity analysis; 이하 CDSA)에 의한 확정론적 최적설계와 강건 최적설계 결과들에 대한 신뢰도 해석을 수행하였다. 다음으로 RIA를 적용하여 초전도 자기에너지 저장장치(superconducting magnet energy storage system; 이하 SMES)의 신뢰도 기반 최적설계를 수행하였다. 도출된 최적설계 결과의 타당성 및 적용기법의 유효성을 몬테카를로 수치모사기법(Monte Carlo simulation; 이하 MCS)과의 비교분석을 통하여 검증하였다.

* 정 회 원 : 경북대학교 전기공학과 박사과정
** 준 회 원 : 경북대학교 전기공학과 석사과정
*** 정 회 원 : KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터 박사후 연수원
† 교신저자, 정회원 : 경북대학교 전기공학과 부교수 · 공박
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 23일
최종완료 : 2011년 6월 16일

2. 신뢰도 해석

2.1 해석 기법

신뢰도는 설계문제에서 원하는 목표성능에 얼마나 만족하는지를 나타내는 성능지수로서 설계 영역을 만족하는 확률로서 표현된다. 제품의 재료특성, 가공오차 등에 의해서 손상이 발생할 때 제품의 신뢰도를 정량적으로 나타내기 위하여 확률설계변수 $\boldsymbol{X}_i$로 표현된 성능함수 $G(\boldsymbol{X}_i)$를 식 (1)과 같이 정의한다.

$$G(\boldsymbol{X}_i) = G(X_1, X_2, X_3, \cdots, X_i) = 0 \tag{1}$$

손상이 발생하는 영역을 $G(\boldsymbol{X}_i) \le 0$으로 정의하면 손상확률(probability of failure) P_f는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P_f = P[G(\boldsymbol{X}_i) \le 0] = \int_{G(\boldsymbol{X}_i) \le 0} f_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{X}_i) d\boldsymbol{X} \qquad (2)$$

여기서 $f_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{X}_i)$는 결합확률밀도함수(joint-probability density function)이다.

RBDO에서 제품의 설계 시 고려된 구속조건의 만족여부는 성능함수를 통하여 수식화 할 수 있으며, 성능함수가 0 보다 작은 영역에서 각 확률변수의 확률밀도함수를 적분함으로써 손상확률이 계산된다. 성능함수의 적분기법에 따라서 신뢰도 해석 기법은 직접법과 간접법으로 구분된다. 직접법은 기기의 손상에 관계된 모든 확률변수들의 평균, 분산 및 결합확률밀도함수를 이용하여 성능함수가 0 보다 작을 확률을 추정한다. 즉, 성능함수나 확률변수에 대한 단순화 가정을 배제함으로써 계산량이 많은 반면 비교적 정확하게 손상확률을 계산하는 방법으로 MCS가 이에 속한다. 간접기법은 근사기법이라고도 할 수 있으며 성능함수를 테일러 전개를 통하여 일차 또는 이차 함수로 근사하고 확률변수의 정규화 과정을 통하여 손상확률을 계산하는 방법으로 FORM과 이차근사신뢰도법(second-order reliability method)이 이에 속한다.

2.2 신뢰도 지수 기법

성능함수를 일차 함수로 근사하여 손상확률을 구하는 FORM의 하나인 RIA는 성능함수의 표현 형태에 관계없이 동일한 손상확률을 계산하기 위해 정규분포 공간에 존재하는 서로 독립인 정규분포 확률변수를 식 (3)을 이용하여 표준 정규분포 공간으로 변환하여 성능함수를 표현한다[4].

$$U_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \qquad (3)$$

여기서 U_i는 평균이 0인 표준정규분포 확률변수를 나타낸다. 또한 식 (4)와 같이 성능함수와 신뢰도 지수 β를 정의한다.

$$G = a_0 + \sum_{i=0}^{n} a_i (\mu_i + \sigma_i \boldsymbol{U}_i)$$
$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{|G(\boldsymbol{U}_i = 0)|}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n} \left(\frac{\partial G}{\partial \boldsymbol{U}_i} \right)^2}} \qquad (4)$$

여기서 a_0는 $\boldsymbol{U}_0$에서의 성능함수 값을 나타내고, a_i는 $\boldsymbol{U}_i$에서 성능함의 구배지수(gradient)를 나타낸다. 신뢰도 지수는 그림 1에서와 같이 표준정규분포 공간에서 원점으로부터 $G(\boldsymbol{U})=0$인 안전영역(safe region)과 손상영역(failure region)의 경계면까지의 최단거리를 나타낸다. 그림 1의 경계면 상의 최단거리의 점은 신뢰도 지수를 계산하기 위하여 탐색된 점으로 성능함수 상에 존재하는 모든 점들 중에서 가장 발현빈도가 높은 점이고 최대손상가능점(most probable failure point; 이하 MPFP)이라 한다[5]. 따라서 신뢰도 지수를 계산하여 손상확률을 구하는 과정은 식 (5)와 같이 MPFP를 찾기 위한 전형적인 최적화 문제로 정의된다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \beta = \sqrt{\boldsymbol{U}^T \boldsymbol{U}} \\ &\text{Subject to} && G(\boldsymbol{U}) = 0 \end{aligned} \qquad (5)$$

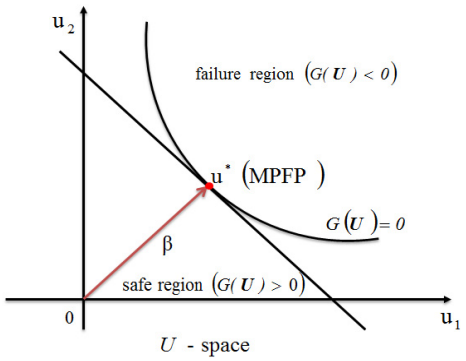

그림 1 표준정규분포 공간에서 MPFP
Fig. 1 MPFP in standard normal distribution space (U-space)

표준정규분포 공간에서 MPFP는 식 (6)을 이용하여 반복계산하여 그 값을 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{U}^{k+1} = \frac{\nabla G(\boldsymbol{U}^k)^T \boldsymbol{U}^k - G(\boldsymbol{U}^k)}{\nabla G(\boldsymbol{U}^k)^T \nabla G(\boldsymbol{U}^k)} \nabla G(\boldsymbol{U}^k) \qquad (6)$$

여기서 $\boldsymbol{U}^k$는 k번째 반복 점에서의 표준정규분포 상의 점을 나타낸다. 식 (6)을 통하여 얻어진 MPFP와 원점과의 최단거리인 신뢰도 지수는 식(7)의 표준정규분포의 누적분포함수(cumulative distribution function) 계산을 통하여 손상확률을 구할 수 있다.

$$P_f = P[G \le 0] = \Phi(U) = \Phi(-\beta)$$
$$\Phi(U) = \int_{-\infty}^{U} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{1}{2} U^2 \right] dU \qquad (7)$$

여기서 $\Phi(U)$는 표준정규분포의 누적분포함수를 표현한다.

손상확률을 구하는 신뢰도 지수 기법의 순서도는 그림 2와 같다.

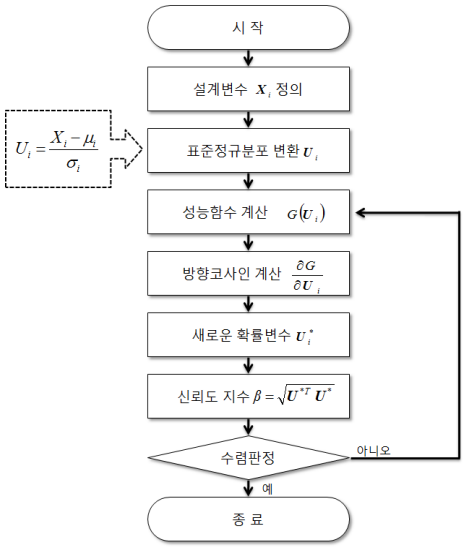

그림 2 신뢰도 지수 기법 순서도
Fig. 2 Flowchart of reliability index approach.

2.3 몬테카를로 수치모사기법

MCS는 식 (2)로 표현된 손상확률을 확률변수의 난수(random number)를 발생하여 추정하는 기법으로 계산량이 많지만 비교적 정확한 확률정보를 추정할 수 있는 가장 보편적인 기법이다. 각 확률변수의 확률분포특성이 반영된 난수를 추출하여 표본 집단을 형성한 후, 각 성능함수에 대한 모의실험을 통하여 식 (8)과 같이 전체 실험횟수에 대한 손상발생 횟수 n_f의 비로 손상확률을 계산한다[6].

$$P_f \simeq \frac{n_f(G(\boldsymbol{X}) \le 0)}{N} \tag{8}$$

MCS는 기본 개념이 단순할 뿐만 아니라 성능함수를 사용하여 손상여부의 판단만 가능하면 쉽게 사용된다. 하지만 추정한 손상확률의 정확성을 보장받기 위해서는 전체 추출횟수 N의 값이 충분히 클 필요가 있다. 일반적으로 계산된 손상확률의 역수의 10배 또는 100배 이상의 값을 전체 추출횟수의 값으로 요구한다[4].

3. 신뢰도 기반 최적설계

3.1 설계문제 정식화

확률론적 최적설계 기법인 RBDO는 구속조건을 만족함과 동시에 목적함수를 최대/최소화하는 기본 개념에서는 확정론적 최적설계와 동일하다. 그러나 RBDO는 구속조건의 신뢰도 평가를 요구하는 확률구속조건을 가지며, 설계자가 요구하는 목표 신뢰도 지수 또는 목표 손상확률을 만족하는 최적해를 도출한다는 점이 기존 확정론적 최적설계 기법과 상이하다. 즉 설계변수를 확률변수로 취급하여 제품의 설계 시 존재하는 불확실성을 최적설계 과정에서 직접 고려한다. 확률론적 최적설계 문제를 정식화하면 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad f(\boldsymbol{X}) \\ &\text{Subject to} \quad P_f(G_i(\boldsymbol{X}) \le 0) \le P_t, \; i = 1, 2, \ldots n \\ &\qquad \boldsymbol{X}_L \le \boldsymbol{X} \le \boldsymbol{X}_U \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 P_f는 구속조건에 위반될 손상확률을 나타내고, P_t는 확률구속조건에 대해 설계자가 원하는 확률로서 구속조건의 손상확률을 제한하는 목표 손상확률을 의미한다. 위 식에서와 같이 RBDO는 각각의 성능함수로 정의된 확률구속조건의 손상확률이 목표 손상확률을 만족하는 확률설계변수 대한 최적해를 찾는 문제로 귀착된다. 따라서 확률구속조건을 평가하기 위하여 손상확률을 구하는 신뢰도 해석이 요구된다.

3.2 신뢰도 기반 최적설계 시스템 구조

RBDO를 구현하기 위한 프로그램 순서도는 그림 3과 같이 전역 최적화과정(global optimization)안에 신뢰도 해석을 수행하여 확률구속조건에 해당하는 손상확률을 계산하는 부최적화과정(sub-optimization)으로 구성된다. 일반적으로 RBDO는 이러한 이중구조(double-loop)에 해당하는 최적화 과정이 수행되므로 확정론적 최적설계 기법에 비해 많은 반복설계 과정이 요구된다.

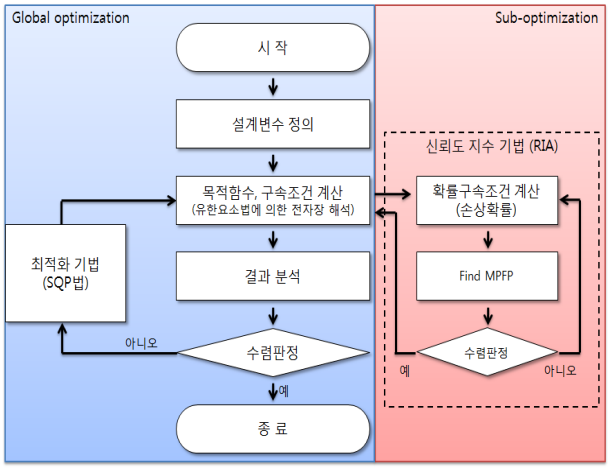

그림 3 신뢰도 기반 최적설계 순서도

Fig. 3 Flowchart of reliability-based design optimization.

4. 적용사례

본 논문에서는 FORM의 하나인 RIA를 이용하여 SMES의 RBDO를 수행하였다. 먼저 기존의 CDSA에 의한 최적설계와 강건 최적설계의 각각의 결과에 대한 신뢰도 해석을 수행한 후, RIA를 적용한 최적설계 결과와 비교 하였다.

4.1 해석 모델

설계 대상은 1차 코일과 2차 코일로 이루어진 솔레노이드(solenoid) 형태의 SMES 모델로서 그림 4에 2차원 평면 모델을 나타내었다. 그림에서 line a와 line b는 모두 21개의 점에서 1 m 간격으로 누설 자장(stray field)을 측정하고 측정된 누설 자장의 값이 최소가 되도록 하는 각 코일의 8개의 설계변수의 최적 값을 찾는 문제이다. 고려된 설계문제를 단순화하기 위해서 초전도선재에서 발생하는 퀜치(quench)현상은 고려하지 않았다[7-9].

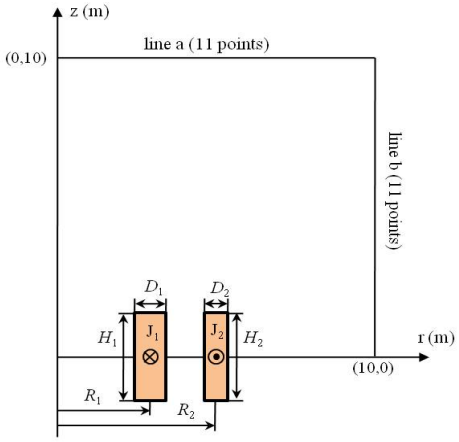

그림 4 초전도 자기에너지 저장 시스템 개략도

Fig. 4 Schematic diagram of superconducting magnetic energy storage system.

4.2 설계문제 정식화

확률정보를 고려한 목적함수와 구속조건을 정식화하면 식 (10)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(d)=\sum_{i=1}^{21}|B_{stray,i}(d)|^2 \ , \qquad d=\mu(\boldsymbol{X}) \\ \text{Subject to} \quad & P_1\left(G_1(\boldsymbol{X})\le 0\right)-\Phi(-\beta_t)\le 0 \\ & P_2\left(G_2(\boldsymbol{X})\le 0\right)-\Phi(-\beta_t)\le 0 \\ & d_L\le d\le d_U \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 d는 확률변수 $\boldsymbol{X}$의 평균값, $B_{stray,i}$는 그림 4의 line a와 line b에서 i번째 측정 점의 누설 자장 값을 나타낸다. 식 (10)에서 P는 각 확률구속조건의 손상확률, $\Phi(-\beta_t)$는 목표하는 손상확률을 나타내며 d_L은 확률변수의 하한(lower bound), d_U는 상한(upper bound)을 나타낸다. 위 식의 확률구속조건에 고려된 성능함수 $G(\boldsymbol{X})$는 식 (11)과 식 (12)에 제시하였다.

$$G_1(\boldsymbol{X})=1-\left(\frac{E(\boldsymbol{X})-E_0}{0.05\times E_0}\right)^2 \tag{11}$$

$$G_2=(R_2-R_1)-\frac{1}{2}(D_2+D_1) \tag{12}$$

식 (11)은 목표하는 에너지 값으로부터 5 %의 오차범위를 만족하도록 제한한 구속조건으로 $E(\boldsymbol{X})$는 설계변수의 변화에 따라 유한요소 해석을 통하여 계산되는 저장된 자기에너지 값이고, E_0는 목표하는 자기 에너지 값으로 180 MJ로 설정하였다. 식 (12)는 1차 코일과 2차 코일이 설계변수의 변화에 따라 각 코일의 위치가 변경될 경우, 코일이 서로 겹쳐지지 않도록 제한한 구속조건이다. 식 (11)의 비선형 성능함수는 신뢰도 지수 기법을 이용하여 손상확률을 계산하였고, 식 (12)의 선형 성능함수는 별도의 신뢰도 해석 없이 평균 μ_{G_2}과 표준편차 σ_{G_2}로 구성된 식 (13)과 같은 해석적인 식을 통해 손상확률을 예측하였다.

$$\begin{aligned} \mu_{G_2} &= \left(\mu_{R_2}-R_1\right)-\frac{1}{2}\left(\mu_{D_2}+D_1\right) \\ \sigma_{G_2} &= \sqrt{\sigma_{R_2}^2+\frac{1}{4}\sigma_{D_2}^2} \\ P_2\left(G_2(\boldsymbol{X})\le 0\right) &= \Phi\left(-\frac{\mu_{G_2}}{\sigma_{G_2}}\right) \end{aligned} \tag{13}$$

4.3 신뢰도 해석

표 1에서 제시된 CDSA를 이용한 확정론적 최적설계와 강건 최적설계 결과들은 기존 연구들 통하여 동일 설계모델에 대하여 설계변수의 불확실성에 대한 확률정보를 고려하지 않은 상태에서 수행되었다[9]. 우선 기존 최적설계 결과들에 대해 2차 코일의 설계변수 R_2, D_2, H_2를 확률설계변수로 설정하여 신뢰도 해석을 수행하여 설계변수의 불확실성이 고려되었을 경우 신뢰도 만족도를 평가 하였다.

확률설계변수 R_2, D_2, H_2는 평균과 표준편차(standard deviation)에 의해서 분포형태가 결정되는 정규분포(normal distribution)라 가정하였고, 표 2에 확률설계변수의 확률정보를 나타내었다.

표 1 확정론적 최적설계와 강건 최적설계의 최적해
Table 1 Design variables and performances at deterministic and robust optima [9]

Design variables	Unit	Lower bound (X_L)	Initial design	CDSA optimum	Robust optimum	Upper bound (X_U)
R_1	mm	1000	2000	2108	1977	4000
D_1	mm	100	400	412	404	800
H_1	mm	200	1500	1504	1507	3600
R_2	mm	2300	2360	2462	2348	2400
D_2	mm	200	300	294	233	350
H_2	mm	1700	1730	1756	1871	1900
J_1	A/mm^2	10	17	16.39	16.3	30
J_2	A/mm^2	10	17	14.49	16.19	30
$B_{stray,i}$	μT	–	5633	162	37	–
Energy	MJ		186	183	181	

표 2 확률설계변수의 확률정보
Table 2 Probabilistic information of design variables

Design value	Distribution type	Mean	Standard deviation
R_2	normal	μ_{R_2}	10
D_2	normal	μ_{D_2}	5
H_2	normal	μ_{H_2}	10

초기 설계(initial design), CDSA에 의한 최적설계 및 강건 최적설계의 각각의 결과에 대한 신뢰도 해석을 RIA를 이용하여 수행하였다. 식 (11)과 식 (12)에서 제시한 성능함수의 신뢰도 해석 결과는 표 3과 같다. $G_1(\boldsymbol{X})$은 구속함수가 확률설계변수에 대한 비선형 성능함수로 RIA를 이용하여 해석하였고, 신뢰도 해석 시 요구되는 함수 호출 횟수를 Function call로 나타내었다. $G_2(\boldsymbol{X})$는 선형 성능함수로 식 (12)를 적용하여 한 번의 해석으로 손상확률을 도출하였다. 해석결과 불확실 요소에 둔감하게 설계한 강건 최적설계의 경우 손상확률 $P_1(G_1)$은 4 %, $P_2(G_2)$는 1.76×10^{-5}로 목표성능을 만족하면서 안전하게 설계된 것을 확인하였다. 또한 신뢰도 지수 기법의 정확성과 효율성을 검증하기 위하여 일반적으로 정확성이 검증된 MCS를 10,000회 수행하여 각각의 결과와 비교하였다. 비교 결과 RIA는 적은 수의 함수 호출 횟수로 비교적 수용할 만한 정확성을 가지는 것을 확인하였다.

표 3 확정론적 최적설계와 강건 최적설계의 신뢰도 해석
Table 3 Reliability analysis of deterministic and robust optimum

	Initial design		CDSA optimum		Robust optimum	
Method	RIA	MCS	RIA	MCS	RIA	MCS
% $P_1(G_1)$	32.7	33.2	15.2	16.0	4.0	6.2
Function calls(G_1)	12	10,000	16	10,000	20	10,000
% $P_2(G_2)$	16.6	16.6	46.1	46.1	1.76×10^{-5}	1.76×10^{-5}

4.4 신뢰도 기반 최적설계 결과

표 2에 제시한 R_2, D_2, H_2를 확률설계변수로 정의하고 RBDO는 각각의 성능함수 $G(X)$가 0보다 작은 손상확률 P가 만족확률 $\Phi(-\beta_t)$를 넘지 않도록 확률구속조건을 정의하였다. RBDO의 신뢰도가 95 %, 즉 손상확률이 5 %를 넘지 않도록 설정하여 RBDO를 수행한 결과는 표 4에 제시하였고, 그림 5에 최적설계 전후의 형상 비교하였다. 표 3의 CDSA에 의한 확정론적 최적설계의 경우 목적함수인 누설자장의 경우 162 μT로 수용할 만하다. 그러나 설계변수의 불확실성을 고려한 신뢰도 해석결과는 손상확률이 $P_1(G_1)$의 경우 15.2 %, $P_2(G_2)$는 46.1 %로 95 %의 신뢰도에 훨씬 미치지 못하는 사실을 확인하였다. 반면에 표 4의 RBDO의 설계결과는 목적함수의 누설 자장 평균값 $B_{stray,i}$이 86 μT로 설계 목표치를 만족하고, 손상확률 $P_1(G_1)$은 1.16 %, $P_2(G_2)$는 7.12×10^{-5} %로 확률구속조건에 대한 설계 요구치를 모두 만족함을 확인하였다. 또한 도출된 최적 설계결과에서 10,000회 모의실험에 의한 MCS의 손상확률과 비교를 통하여 제안한 설계기법의 정확성을 확인하였다.

표 4 신뢰도 기반 최적설계의 최적해

Table 4 Design variables and performances at RBDO optimum

Design variables		Unit	RBDO optimum
R_1		mm	1977
D_1		mm	404
H_1		mm	1507
R_2		mm	2349.6
D_2		mm	241.8
H_2		mm	1799.6
J_1		A/mm^2	16.3
J_2		A/mm^2	16.19
$B_{stray,i}$		μT	86
Energy		MJ	178
$P_1(G_1)$	RIA	%	1.16
	MCS	%	4.51
$P_2(G_2)$	RIA	%	7.12×10^{-5}
	MCS	%	7.12×10^{-5}

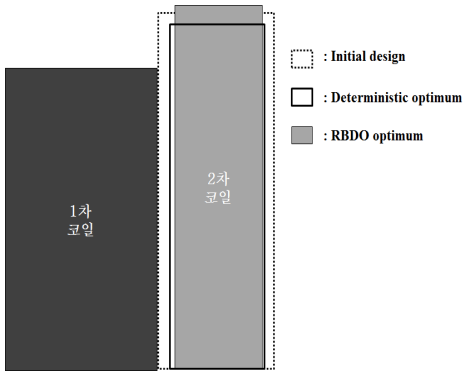

그림 5 최적설계 전후의 형상 비교

Fig. 5 Comparison of magnet shapes before and after optimization.

5. 결 론

본 논문에서는 불확실성을 내재한 설계변수의 확률정보를 이용하여 확률구속조건의 손상확률을 계산하는 신뢰도 해석방법을 제시하였다. 확률구속조건의 신뢰도 정보를 이용하여 SMES의 신뢰도 기반 최적설계를 수행하였다. 또한 MCS의 결과와 비교하여 제안된 신뢰도 해석기법의 효율성 및 정확도를 검증하였다. 본 논문에서 제시한 설계기법은 설계대상의 불확실성을 고려하여 설계단계에서 제품의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 고급설계기법으로써 실제 산업분야의 제품개발에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0021544)

참 고 문 헌

[1] Youn, B. D. and Choi, K. K., “Hybrid analysis method for reliability-based design optimization,” ASME J. Mech. Des., pp. 221-232, 2003.

[2] D. Kim, K. Ship, and J. Sykulski, “Applying continuum design sensitivity analysis combined with standard EM software to shape optimization in magnetostatic problems,” IEEE Trans. Magn., vol. 40, pp. 1156-1159, 2004.

[3] Youn, B. D., et. al. ”An investigation of nonlinearity of reliability-based design optimization approaches”, J. Mechanical Design, 123, pp. 1-10, 2004.

[4] Hadlar, A. and Mahadevan, S., Probability, reliability, and statistical methods in engineering design, Wiley: New York, 2000.

[5] Du, X. and Chen, W., “A most probable point based method for uncertainty analysis,” Journal of Design and Manufacturing Automation, pp. 4:47-66, 2001.

[6] Ramana V. Gr , Liping Wang, Structural reliability analysis and optimization: Use of Approximations, 1999.

[7] G. Steiner, A. Weber, and C. Magele,″ Managing uncertainties in electromagnetic design problems with robust optimization,″IEEE Trans.Magn., vol. 40, no. 2, pp. 1094-1099, Mar. 2004.

[8] F. G. Guimaraes, D. A. Lowther, and J. A. Ramirez, “Multiobjective approaches for robust electromagnetic design,” IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 4, pp. 1207-1210, 2006.

[9] D. H. Kim, J. k. Sykulski, and D. A. Lowther, “Robust optimization utilizing the second-order design sensitivity information,” IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 8, pp. 3117-3120, 2010.

저 자 소 개

김 동 욱 (金 東 昱)

1982년 7월 18일생
2009년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업
2011년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학석사)
2011년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 박사과정
E-mail : bloodkdw@nate.com

정 상 식 (鄭 相 識)

1983년 4월 25일생
2009년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업
2010년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 석사과정
E-mail : illuminat0r@nate.com

성 영 화 (成 英 和)

1981년 2월 11일생
2002년 KAIST 기계항공시스템학부 졸업
2004년 동 대학원 기계항공시스템학부 졸업(공학석사)
2010년 동 대학원 기계항공시스템학부 졸업(공학박사)
2010년~현재 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터 박사후 연수원
E-mail : bindy@kaist.ac.kr

김 동 훈 (金 東 勳)

1968년 2월 26일생.
1992년 서울대학교 전기공학과 졸업
1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
1998년 동 대학원 전기동학과 졸업(공학박사)
1998.3~2001.2 LG전자 디지털어플라이언스 연구소 선임연구원
2001.3~2002.2 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 연구교수
2002.3~2002.8 기초전력원 특별연구원,
2002.9~2004.2 영국 Southampton대학 ECS Research Fellow
2004.3~현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 부교수
Tel : 053-950-5603
Fax : 053-940-8503
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr