

## 목표 성능치 기반의 확률구속조건 평가 기법을 이용한 전자기 장치의 신뢰도 기반 최적설계

김동욱 · 김동훈\*

경북대학교 전기공학과, 대구시 북구 산격동, 702-701

(2013년 3월 12일 받음, 2013년 4월 22일 최종수정본 받음, 2013년 4월 23일 게재확정)

본 논문에서는 전자기 관련 제품의 효율적인 신뢰도 기반 최적설계를 위해 확률구속조건을 평가하는 기법으로 해의 안정성과 효율성이 우수한 목표 성능치법을 제시 하였다. 목표 성능치법을 적용한 신뢰도 기반 최적설계의 효율성 검증을 위하여 스피커 모델과 초전도 자기에너지 저장장치 모델에 대한 최적설계를 수행하였고, 이를 기존 신뢰도 지수법을 적용한 최적설계 결과와 비교하였다. 또한 몬테카를로 수치모사기법을 이용하여 도출된 최적해의 신뢰도를 재 계산 후 비교함으로써 제안된 기법의 신뢰도 평가 결과의 정밀도를 검증하였다.

**주제어** : 전자기장, 목표성능치법, 확률구속, 신뢰도 기반 최적화, 불확실성

### I. 서 론

전자기 소자 및 장치의 설계는 대부분 설계변수들이 일정한 값을 갖는다는 가정 하에 최적 설계치를 도출하는 결정론적 최적설계(deterministic design optimization; 이하 DDO) 기법을 사용하고 있다. 그러나 모든 전자기 제품에는 필연적으로 재료 물성치, 제작공차, 동작조건 등에 관련된 불확실성이 내포되어 있다. 기존 설계 기법에서는 제품의 불확실성을 설계 단계에서 고려하기 위하여 주로 설계자의 경험에 의존한 안전계수 개념을 사용한다. 이러한 안전계수는 경험 부재로 인한 한계 및 불확실성을 수학적으로 정확하게 정량화하지 못하기 때문에, 부족한 안전계수 산정은 제품의 성능 및 수명 저하를 야기할 수 있으며 한편 과도한 안전계수 도입은 기기의 생산 단가 상승을 초래하는 문제점을 지니고 있다. 따라서 상기 기술한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 설계단계에서 전자기 관련 제품의 성능 및 수명에 관련된 불확실성을 확률론적 관점에서 체계적으로 고려할 수 있는 신뢰도 기반 최적설계(reliability-based design optimization; 이하 RBDO) 기법에 대한 집중적인 연구의 필요성이 대두되고 있다[1-3].

RBDO에서는 기존 설계방식과 달리 설계변수를 평균값을 중심으로 특정 분산특성에 따라 분포하는 임의변수(random variable)로 정의하여 불확실성에 대한 확률정보를 고려한다. RBDO의 프로그램 구조는 기존의 최적설계 과정에 확률구속

조건에 대한 평가가 추가되어, 목적함수와 별개로 확률구속조건에 대한 최적화가 수행되는 독특한 이중 순환 최적화구조(double-loop optimization structure)를 갖는다. 따라서 RBDO는 확률구속조건을 처리해야 하는 보조 최적화 문제가 추가적으로 다루어져야 하므로 기존의 최적설계 방법에 비해 수치비용이 크게 증가하는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최적화 과정에서 확률구속조건에 대한 신뢰도를 계산하는 과정에 수렴 안정성과 효율성이 우수한 평가 기법에 대한 연구가 절실히 요구된다.

확률구속조건을 평가하는 일차신뢰도기법(first-order reliability approach)에는 대표적으로 신뢰도 지수법(reliability index approach; 이하 RIA)과 목표 성능치법(performance measure approach; 이하 PMA)을 들 수 있다. RIA는 손상 확률에 대한 신뢰도 지수를 이용하여 확률구속조건을 평가하는 방식이고, PMA는 설정된 신뢰도 지수를 만족하는 목표 성능치를 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 전자기 설계에 처음으로 PMA 기법을 적용하여 스피커 모델(loudspeaker) 및 초전도 자기에너지 저장장치 모델(superconducting magnet energy storage system; 이하 SMES)의 RBDO가 수행되었다. 두 가지 신뢰도 기법의 결과를 비교하여 해의 효율성을 검증하였고, 몬테카를로 수치모사기법(Monte Carlo simulation; 이하 MCS)을 수행하여 설계결과의 정밀도를 검증하였다.

### II. 신뢰도 기반 최적설계

RBDO는 Fig. 1에서와 같이 확률구속조건을 만족시키면서 동시에 목적함수를 최적화하는 주 최적화(main optimization;

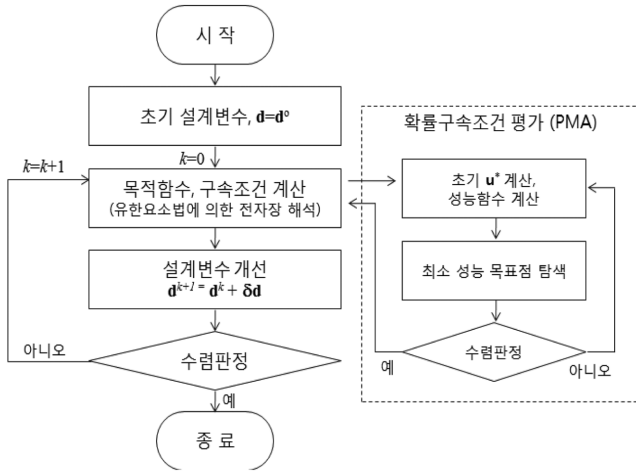


Fig. 1. Flowchart of the proposed RBDO method.

Fig. 1의 왼편 loop)단계와 확률구속조건을 평가하여 목표하는 신뢰성을 만족시키는 보조 최적화(suboptimization; Fig. 1의 오른편 loop) 단계의 이중 순환 구조를 가지고 있다. RBDO의 설계문제는 기존의 최적설계와 달리 설계변수의 확률적인 임의 변동특성에 대한 확률정보를 고려한 설계방법으로 식 (1)과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(\mathbf{d}) \\ & \text{Subject to } P_f(g_i(\mathbf{x}) > 0) \leq P_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & \mathbf{d}_L \leq \mathbf{d} \leq \mathbf{d}_U \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 목적함수, 설계변수 집합  $\mathbf{d}$ 는 임의 확률변수 집합  $\mathbf{x}$ 의 평균,  $g_i$ 는 확률구속조건을 나타내는  $i$ 번째 성능함수이며  $P_f$ 는 구속조건이 위반될 확률을 나타내며,  $P_i$ 는 설계자가 설정한 목표 손상확률,  $\mathbf{d}_L$ 과  $\mathbf{d}_U$ 는 각각 설계변수의 하한과 상한치를 의미한다. 성능함수의 손상영역을  $g_i(\mathbf{x}) > 0$ 로 정의하면,  $P_f$ 는 식(2)와 같이  $\mathbf{x}$ 에 대한 결합확률밀도함수(joint probability density function)  $f_{\mathbf{x}}$ 를 계산하여 구하게 된다.

$$P_f = P(g_i(\mathbf{x}) > 0) = \int_{g_i(\mathbf{x}) > 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2)$$

따라서 RBDO는 식(1)에 정식화된 설계문제를 성능함수로 정의된 확률구속조건을 만족하는 확률설계변수 대한 최적해를 찾는 문제로 귀착된다[3].

Fig. 1에서 제시된 PMA를 이용한 확률구속조건 평가기법에 기초한 RBDO의 계산과정은 아래와 같다.

- 1) 초기 설계변수  $\mathbf{d}^0$ , 성능함수 및 목표 신뢰도 지수를 정의한다.
- 2) 주 최적화 과정으로 설계문제로 정의된 목적함수를 계산한다.
- 3) 보조 최적화 과정에서는 현 설계점  $\mathbf{d}^k$ 에서 PMA에 의한 구속조건을 최소성능점을 탐색하여 확률구속조건을 평가한다.

4) 목적함수와 확률구속조건의 민감도 정보를 활용하여 향상된 다음 설계점  $\mathbf{d}^{k+1}$ 을 도출한다.

5) 목적함수 및 목표 신뢰도 지수를 만족할 때까지 상기 2)에서 4)의 반복 설계과정을 수행한다.

본 논문에서는 Fig. 1의 이중순환 구조를 갖는 최적화 문제의 효율적인 확률구속조건 처리를 위하여 SQP(sequential quadratic programming)에 기반한 수리탐색기법을 사용하였다.

### III. 확률구속조건 평가

결합확률밀도함수를 직접 적분하여 손상확률을 구하는 것은 매우 어렵기 때문에 일반적으로 식(2)의 성능함수  $g_i(\mathbf{x})$ 를 테일러 급수(Taylor's series)로 선형 근사하여 손상확률을 계산하는 방법이 사용된다. 이때 사용하는 근사함수의 차수에 따라 일차 또는 이차 신뢰도법으로 분류하게 되는데 본 연구에서는 일차신뢰도법에 해당하는 평가기법만을 다룬다. 한편 성능 함수의 형태에 관계없이 동일한 손상확률을 얻기 위해 Hasofer와 Lind는 개선된 근사신뢰도법을 제안하였다[2].

우선 정규분포 확률변수  $x_j$ 를 표준정규분포 공간 즉,  $U$ -space에서의 확률변수  $u_j$ 로 변환한다.

$$u_j = \frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad j = 1, 2, \dots, np \quad (3)$$

여기서  $\mu_j$ 와  $\sigma_j$ 는 각각  $j$ 번째 정규분포 확률변수의 평균과 표준편차를 나타내며  $np$ 는 확률변수 개수이다. 성능함수를 정규분포 확률변수의 선형결합으로 정의하여 손상확률의 상대 지표인 신뢰도 지수(reliability index)  $\beta$ 는 식(4)에 의해서 계산된다.

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{u}) &= a_0 + \sum_{j=0}^{np} a_j(\mu_j + \sigma_j u_j) \\ \beta &= \mu_g / \sigma_g = |g_i(u_j = 0)| / \sqrt{\sum_{j=0}^{np} \left( \frac{\partial g_i}{\partial u_j} \right)^2} \\ P_f(g_i(\mathbf{x})) &= \Phi(-\beta) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $a$ 는 표준 정규분포공간에서 성능함수의 선형조합 계수들을,  $\mu_g$ 와  $\sigma_g$ 는 각각 정규분포를 따르는 성능함수의 평균과 표준편차를,  $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규 누적분포함수(standard normal cumulative distribution function)를 의미한다. 이와 같이 선형 근사화된 성능함수의 신뢰도 지수  $\beta$ 를 찾는 방식에 따라 일차신뢰도법이 RIA와 PMA로 구분된다.

#### 1. 신뢰도 지수법

RIA는 Fig. 2와 같이 표준정규분포 공간에서 원점으로부터

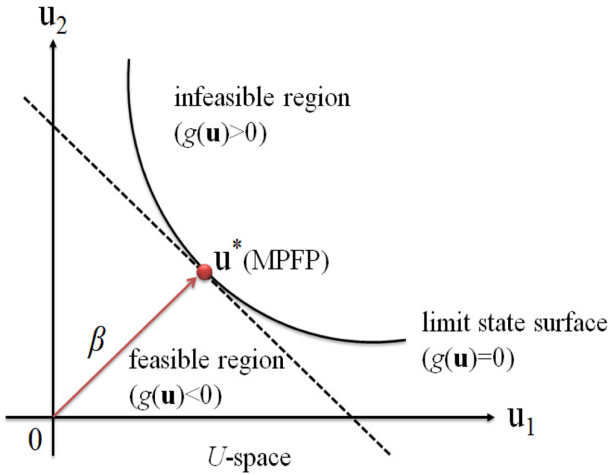


Fig. 2. (Color online) MPFP and reliability index in RIA.

안전영역(feasible/safe region)과 손상영역(infeasible/failure region)의 경계면 즉, 구속조건인 한계면(limit state surface;  $g(\mathbf{u}) = 0$ )까지의 최단거리를 의미하는 최대손상가능점(most probable failure point; 이하 MPFP) 사이의 거리로 정의된 신뢰도 지수를 계산함으로써 확률구속조건을 평가한다.

신뢰도 지수를 계산하기 위해 MPFP를 탐색하는 과정은 결국 식(5)와 같이 최적화 문제로 귀착된다. 이는 이중 순환 최적화 구조를 표현하는 Fig. 1의 오른쪽 보조 최적화 문제에 해당하며 식(5)의 해인 MPFP를 찾기 위해 구속함수의 일차 기울기 정보인  $\nabla g(\mathbf{U})$ 를 이용하는 식(6)의 반복계산을 수행하게 된다[2, 3].

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \beta = \sqrt{\mathbf{U}^T \mathbf{U}} \\ \text{Subject to} \quad & g(\mathbf{U}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{U}^{k+1} = \frac{\nabla g(\mathbf{U}^k)^T \mathbf{U}^k - g(\mathbf{U}^k) \nabla g(\mathbf{U}^k)}{\nabla g(\mathbf{U}^k)^T \nabla g(\mathbf{U}^k)} \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{U}^k, \mathbf{U}^{k+1}$ 은 각각  $k, k+1$ 번째 반복 탐색에서 얻어진 MPFP 후보점(candidate point)을 표시한다. Fig. 2은 표준정규분포 공간에서 구속조건인 한계면, MPFP 및 신뢰도 지수 등을 도식화 하였다.

## 2. 목표 성능치법

PMA는 목표 성능치와 동일한 신뢰도 지수를 갖는 설계점에서 성능함수 값을 최소화하는 점인 최소성능점(minimum performance target point; 이하 MPTP)을 찾아 확률구속조건인 만족여부를 판정하는 방법이다. MPTP는 설계자가 지정한 신뢰도 지수를 구속조건으로 갖는 식(7)의 보조 최적화 문제로부터 도출된다[4-6].

$$\text{Minimize } \pm g(\mathbf{U})$$

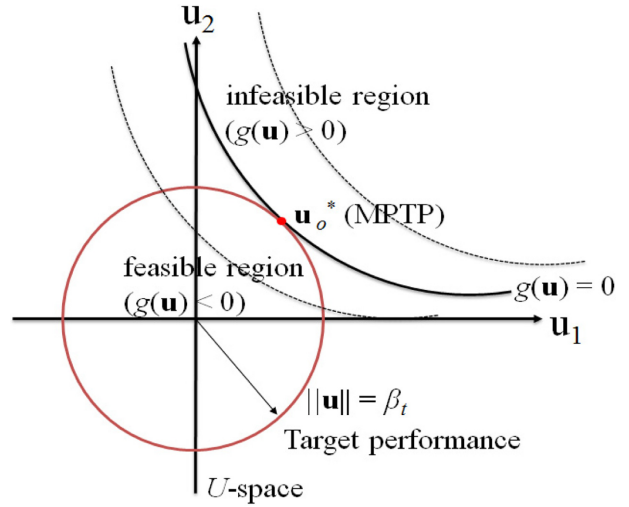


Fig. 3. (Color online) MPTP and reliability index in PMA.

$$\text{Subject to } \|\mathbf{U}\| = \beta, \quad (7)$$

여기서  $\beta$ 는 미리 설정된 목표 신뢰도 지수를 나타내며 식(7)의 해인 MPTP는 식(8)과 같은 반복 계산을 통하여 얻을 수 있다.

$$\mathbf{U}^{k+1} = \beta_t \mathbf{n}(\mathbf{U}^k) \quad (8)$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{U}^k) = -\frac{\nabla g(\mathbf{U}^k)}{\|\nabla g(\mathbf{U}^k)\|}$$

여기서  $\mathbf{n}(\mathbf{U}^k)$ 는  $k$ 번째  $\mathbf{U}^k$ 에서 성능함수에 대한 최속강하방향(steepest descent direction)을 의미한다. 이와 같이 PMA는 최소성능점에서 목표 성능함수의 값을 계산하여 확률구속조건인 만족여부를 판정하면서 Fig. 1의 왼쪽에 제시된 주 최적설계 문제를 수행한다. Fig. 3은 목표 신뢰도 지수, MPTP 및 구속함수 사이의 관계를 도식적으로 나타낸다.

## IV. 적용예제

제안된 기법의 검증을 위하여 스피커(loudspeaker) 및 초전도에너지저장장치(superconducting magnetic energy storage)의 두 가지 설계문제에 RBDO를 적용하였다. 제작공차에 관련된 설계변수의 불확실성을 확률구속조건에 반영하였으며, 최적화 과정 중 확률구속조건에 대한 평가 기법으로 RIA와 PMA를 각각 사용하였다. 반복설계 과정에서 목적함수와 구속조건인 평가는 상용전자기장 해석도구인 마그넷(MagNet ver.7.1)의 해석결과를 이용하였다[7]. 두 가지 신뢰도 평가기법을 기반으로 수행한 최적설계 결과들은 최적해 도출에 요구되는 함수 호출 횟수와 MCS를 이용한 최적해의 신뢰도 해석 결과를 비교함으로써 제안된 설계기법의 효율성과 정밀

도를 검증하였다. 또한 고려된 설계모델에 대해 기존 결정론적 최적설계 결과와 신뢰도 기반 최적설계 결과들의 비교를 통하여 RBDO 기법의 타당성을 제시하였다.

1. 스피커 모델

Fig. 4에 제시된 스피커 모델은 설계 문제의 단순화를 위해서 IW, MD, MH, TW1 4개를 임의 설계변수로 선정하였다. 설정된 설계변수들은 각각 표준편차가 0.05 mm, 0.08 mm, 0.25 mm, 0.38 mm인 정규분포(normal distribution)의 형태를 가지는 확률설계변수로 가정하였다.

목적함수는 Fig. 4에서 표시된 공극(air gap)의 평균 자속 밀도가 1.8 T를, 확률 구속조건으로는 스피커 모델의 질량 7.5 kg의 5% 오차범위 내에서 95% 신뢰도 수준(reliability/confidence level)을 만족시키도록 설정하는 것이다. 상기 요구조건을 반영한 스피커 모델의 RBDO 정식화는 식(9)와 같다[8].

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(\mathbf{d}) = |B_0 - B(\mathbf{d})|, \quad \mathbf{d} = \mu(\mathbf{X}) \\ & \text{Subject to } P(g(\mathbf{X}) > 0) - \Phi(-\beta_i) \leq 0 \quad (9) \\ & g(\mathbf{X}) = 1 - \left( \frac{Mass(\mathbf{X}) - Mass_t}{0.05 \times Mass_t} \right)^2 \end{aligned}$$

여기서  $\mathbf{d}$ 는 확률변수  $\mathbf{X}$ 의 평균값,  $B$ 는 공극의 평균자속밀도,  $P$ 는 확률구속조건인 손상확률을 의미한다.  $\Phi(-\beta_i)$ 는 목표 손상확률을 나타내며 5%로 설정하였으며 이는 확률구속조건인 신뢰도 수준이 95%에 해당한다.

Table I에서는 동일한 초기 설계점에서 설계민감도를 이용한 세 가지 서로 다른 최적설계기법(DDO, RIA-based RBDO, PMA-based RBDO)의 설계결과 및 그에 관련된 성능을 비교/제시하였다. DDO와 RBDO를 이용한 세 가지 각각 다른 최적설계 결과는 모두 공극의 평균 자속밀도가 1.8 T로 목표 성능을 만족하고 있다. 그러나 스피커 질량에 부여된 확률구속에 대한 세 가지 최적 설계점에서 MCS의 신뢰도 해석결과는

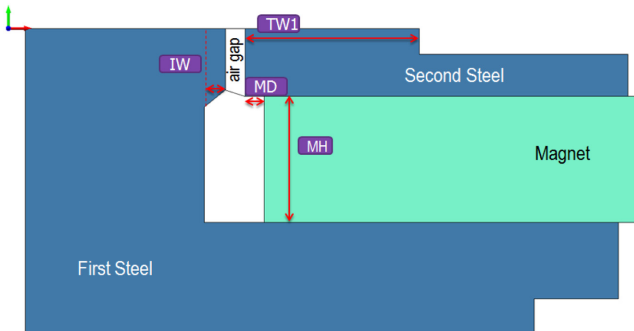


Fig. 4. (Color online) Two-dimensional axisymmetric configuration of a loudspeaker.

Table I. Performance indicators between three different optimum points.

Design variables	Unit	Initial design	DDO	RBDO	
				RIA	PMA
IW	mm	1.14	0.76	0.82	0.61
MD	mm	1.42	1.16	0.67	1.14
MH	mm	10.87	8.31	10.3	10.96
TW1	mm	14.86	20	14.69	13.5
$B_{gap}$	T	1.76	1.8	1.8	1.8
Mass	kg	7.85	7.84	7.55	7.48
$P_f$	%	44.6	43.85	6.14	4.91
Function calls	-	-	106	725	570
Relative ratio	%	-	-	100%	79%

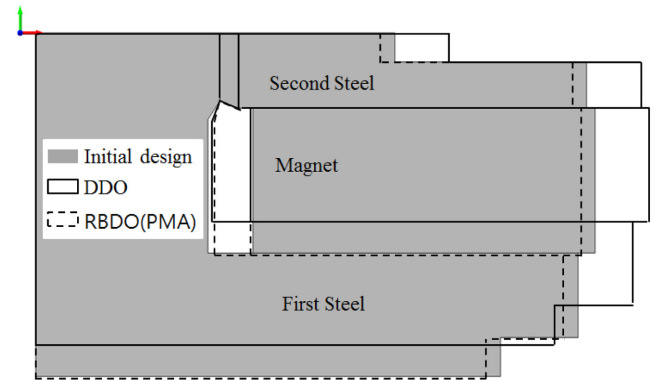


Fig. 5. (Color online) Comparison of three different loudspeaker designs.

DDO의 경우 손상확률이 44%에 이른 반면, RIA를 적용한 RBDO는 6.14%, PMA를 적용한 경우는 4.91%이다. RBDO 최적해 도출에 필요한 함수 호출(전자기장해석) 횟수는 PMA를 적용한 경우가 570회로 RIA를 적용한 RBDO에 비교하면 21% 정도 감소 경향을 보인다. 따라서 스피커 모델에 대한 세 가지 최적설계 결과에 대한 비교를 통하여 제안된 기법이 목표 손상확률인 5% 이내를 만족시키면서 동시에 RIA에 비해 계산 비용 측면에서 효율성을 지니고 있음을 확인하였다. Fig. 5에서는 초기 스피커 설계모델을 기준으로 DDO와 PMA-based RBDO로부터 도출된 설계결과들 사이의 차이를 보여준다.

2. SMES 모델

Fig. 6는 1차, 2차 초전도 권선으로 구성되는 SMES 모델에 대한 2차원 축 대칭 단면도를 보여준다. 그림에서 제시된 총 8 가지의 설계변수 중 2차 권선에 해당하는  $R_2, D_2, H_2$ 의 세 개를 확률설계변수로 설정하여 RBDO를 수행하였다. 설계변수는 모두 정규분포를 따른다고 가정하였으며 각 설계변수의 확률정보를 Table II에 제시하였다.

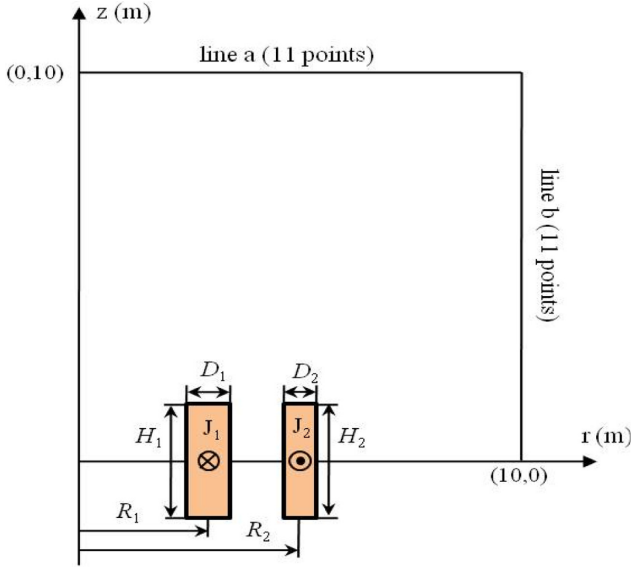


Fig. 6. (Color online) Configuration of the SMES device with design variables.

Table II. Probabilistic information of design variables.

Design variables	$d_L$	$d_U$	Standard deviation	Distribution type
$R_2$ (mm)	2300	2400	10	normal
$D_2$ (mm)	200	350	5	normal
$H_2$ (mm)	1600	1900	10	normal

\*The other variables were fixed:  $R_1 = 1977$  mm,  $D_1 = 404$  mm,  $H_1 = 1507$  mm,  $J_1 = 16.30$  A/mm<sup>2</sup> and  $J_2 = 16.19$  A/mm<sup>2</sup>.

설계목적은 Fig. 6에서 표기된 line a와 line b의 21개의 측정점에서 누설 자기장(stray field)을 측정하여 그 값을 최소화하는 것이다. 또한 확률 설계변수의 불확실성을 저장 에너지, 권선 간의 간격 및 각 권선의 퀘칭(quench) 등에 관련한 네 가지 구속조건에 각각 반영하였다. 목적함수와 확률 구속조건으로 구성된 SMES 모델의 설계문제는 식(10)과 같다[9].

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && f(d) = \sum_{i=1}^{21} |B_{stray,i}(d)|^2 && d = \mu(\mathbf{X}) \\
 &\text{Subject to} && P(g(\mathbf{X}) > 0) - \Phi(-\beta_i) \leq 0 && (10) \\
 &&& g_1(\mathbf{X}) = 1 - \left( \frac{E(\mathbf{X}) - E_0}{0.05 \times E_0} \right)^2 \\
 &&& g_2(\mathbf{X}) = (R_2 - R_1) - \frac{1}{2}(D_2 + D_1) \\
 &&& g_{3,4}(\mathbf{X}) = -|J_k| - 6.4|B_{max}| + 54.0
 \end{aligned}$$

여기서  $B_{stray,i}$ 는 Fig. 6의 line a와 line b에서  $i$ 번째 측정점에서 누설 자기장 값을 나타내며 네 가지 확률구속조건에 대한 목표 손상확률  $\Phi(-\beta_i)$ 는 모두 5%로 설정하였다. 위 식

Table III. Performance indicators between three different optimum points.

Design variables	Initial design	DDO	RBDO	
			RIA	PMA
$R_2$ (mm)	2340	2335	2348	2344
$D_2$ (mm)	310	238	233	233
$H_2$ (mm)	1780	1853	1867	1873
$B_{stray}$ ( $\mu$ T)	6,772	32	32	33
$E$ (MJ)	180	173	181	179
Function call			6968	4360
Relative ratio (%)			100	63

Table IV. Probabilistic values of failure between three different optimum points.

	Initial design	DDD	RBDO	
			RIA	PMA
$P_f(g_1)$	15.26	30.8	4.87	4.60
$P_f(g_2)$	28.08	$1.66 \times 10^{-2}$	$2.56 \times 10^{-4}$	0
$P_f(g_3)$	100	0	0	0
$P_f(g_4)$	100	0	0	0

에서 성능함수  $g_1(\mathbf{X})$ 는 목표 에너지 값인 180 MJ의 5% 오차범위를 만족시키기 위한 것이고,  $g_2(\mathbf{X})$ 는 1차, 2차 권선 사이에 기계적인 간섭이 발생하지 않도록 제한하는 조건에 해당한다. 나머지 두 개의 성능함수  $g_{3,4}(\mathbf{X})$ 은 초전도 선재에서 발생하는 퀘칭 현상을 방지하기 위한 조건이다.

Table III은 서로 다른 세 가지 최적 설계점에서 누설자속, 저장 에너지 및 함수 호출 횟수 관점에서 초기 설계점과 비교한 결과이다. DDO 및 두 가지 RBDO 설계점에서의 누설 자속 및 저장 에너지 값은 초기 설계점의 대비 당초 설정한 설계목적에 만족하는 것을 확인하였다. 한편 두 가지 기법에 기반한 RBDO 결과 도출에 요구되는 함수 호출 횟수는 PMA가 RIA에 비해 37% 정도 감소하였다.

고려된 네 가지 설계점(초기 설계점, DDO 및 두 가지 RBDO 결과)에 대한 MCS 결과를 Table IV에 제시하였다. 초기 설계점에서의 신뢰도 해석 결과는 네 가지 구속함수에 대해 각각 15.26%, 28.08%, 100%, 100%로 모두 큰 손상확률 값을 보인다. 반면 DDO 결과는 기계적 간섭 및 퀘칭조건에 대해서는 만족스런 손상확률을 보이지만 설계변수의 불확실성을 고려하였을 경우 도출된 설계점에서의 저장 에너지에 대한 손상확률이 30.8%에 이른다. 두 가지 RBDO의 설계점에서 고려된 구속조건에 대한 신뢰도 해석 결과가 모두 설정된 손상확률 5% 이내를 만족하고 있다. Fig. 7은 초기 SMES 초전도 권선 설계모델을 기준으로 DDO와 PMA-based RBDO로부터 도출된 설계결과들 사이의 차이를 제시한다.

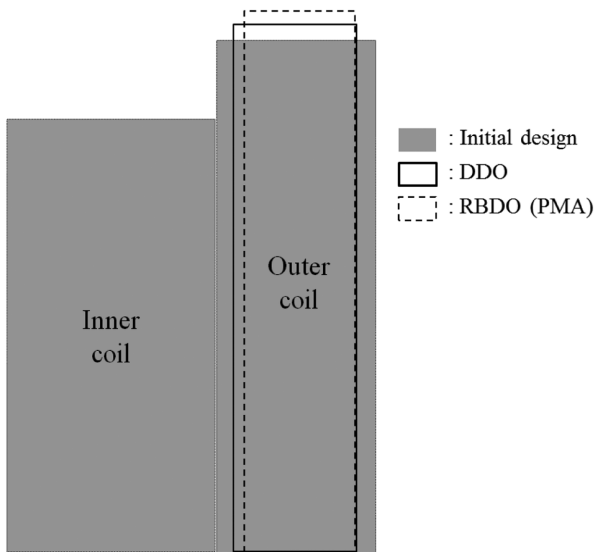


Fig. 7. Comparison of three different SMES coil designs.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 목표 성능치를 이용하여 확률구속조건을 평가하는 방법인 PMA를 적용하여 스피커 모델과 SMES 모델의 신뢰도 기반 최적설계를 수행하였다. 제안된 기법은 기존 RIA를 이용한 설계기법과 몬테카를로 수치모사 기법을 이용한 결과들과 비교/검증 하였다. PMA를 적용한 RBDO 결과는 설계 단계에서 고려된 목표 성능과 신뢰도를 만족함과 동

시에 RIA에 비해 계산 비용 측면에서 효율성을 지니고 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011학년도 경북대학교 전임교원 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] J. Tu, K. K. Choi, and Y. H. Park, *J. Mechanical Design* **121**, 557 (1999).
- [2] A. Haldar and S. Mahadevan, *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York (2000).
- [3] X. Du and W. Chen, *Journal of Design and Manufacturing Automation* **4**, 47 (2001).
- [4] B. D. Youn, K. K. Choi, and L. Du, *AIAA J.* **43**, 874 (2005).
- [5] B. D. Youn, et al., *J. Mechanical Design* **126**, 1 (2004).
- [6] B. D. Youn and K. K. Choi, *ASME J. Mech. Des.* **125**, 221 (2003).
- [7] *MagNet User's Manual*, Infolytica Corporation, Quebec, Canada (2012).
- [8] F. Guimaraes, et al., *IEEE Trans. Magn.* **42**, 1207 (2006).
- [9] D. H. Kim, J. k. Sykulski, and D. A. Lowther, *IEEE Trans. Magn.* **46**, 3117 (2010).

## Reliability-Based Design Optimization of Electromagnetic Devices by Evaluating Probabilistic Constraints Based on Performance Measure Approach

Dong-Wook Kim and Dong-Hun Kim\*

*Department of Electrical Eng., Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea*

(Received 12 March 2013, Received in final form 22 April 2013, Accepted 23 April 2013)

This paper introduces an effective methodology for reliability-based design optimization of electromagnetic products, where a performance measure approach is adopted to accurately assess probabilistic constraints. Two design problems consisting of a loudspeaker and a superconducting magnetic energy storage system are considered. The efficiency of the proposed method in evaluating the failure probability of performances during the optimization process are compared with the existing method based on the reliability index approach. Moreover, in term of the accuracy of probability failure values, optimized design results are examined with reference values obtained from the Monte Carlo simulation.

**Keywords :** electromagnetics, performance measure approach, probabilistic constraint, reliability-based optimization, uncertainty