

# 반응표면방법론을 이용한 BLDC전동기의 코깅토크 저감에 관한 연구

論 文
51B-2-2

## A study on Reduction of Cogging Torque for BLDC Motor Using Response Surface Methodology Optimization

金永均\*, 李根浩\*, 洪正杓\*\*

(Young-kyoun Kim · Lee-Geun Ho · Jung-Pyo Hong)

**Abstract** - This paper presents an optimization procedure by using Response Surface Methodology(RSM) to determine design parameters for reducing cogging torque. RSM is achieved through using the experimental design method in combination with Finite Element Method and adapted to make analytical model for a complex problem considering a lot of interaction of these parameters. Sequential Quadratic Problem (SQP) method is used to solve the resulting of constrained nonlinear optimization problem.

**Key Words** : BLDC motor, Optimization, Response Surface Methodology

### 1. 서 론

일반적으로 공학적인 설계문제는 주어진 요구사항에 대한 해결책을 최적화 하는 자연스런 과정이다. 그러나, 많은 설계 변수들과 그 설계 변수들 상호작용 때문에 설계문제는 복잡해 질 수 있다. 이러한 복잡한 문제에서 최적해를 찾기 위해서 여러 가지 최적설계기법이 연구되어왔다. 이 최적설계기법들은 설계변수 분포의 취급유무에 따라 결정론적 방법(deterministic approach)과 통계적 방법(stochastic approach)으로 분류할 수 있다[1]. 여러 가지 공학적 설계문제 중에서도, 특히 전기기기의 설계는 많은 설계 변수들과 그 설계 변수들 상호 작용 그리고 경험적인 인자 때문에 매우 복잡한 공학적인 문제라고 할 수 있다. 이러한 전기기기 설계 문제에 기존의 최적화방법을 적용하는 것은 상당히 비효율적인 측면을 가지고 있다. 대부분의 최적화 문제가 부여된 제약조건을 만족하는 목적함수를 최소화시키는 작업이라 정의된다면, 설계변수의 상호작용이 존재하며 손실등을 포함하는 복잡한 설계문제에 있어서 실질적인 목적함수 형태를 정의하는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한, 기존의 최적화 방법은 설계공간에 대한 전반적인 상황을 알 수 없다. 즉, 설계자는 전역 또는 국부적인 최적해만을 구할 수 있을 것이다. 반면에, 공정최적화문제에 많이 응용되고 있으며, 근래에 전기기기 성능에 대한 근사모형을 만드는 방법으로서 주목받고 있는 반응표면방법론(Response Surface Methodology : RSM)은 통계적 근사방법으로써 여러개의 독립변수 또는 설계변수가 복합

적인 작용을 하여 어떤 시스템 응답 또는 전기기기에서 출력을 생성할 때 해석적인 모형 즉, 근사 모형을 만드는데 매우 유용하다. 따라서, 최적화 문제의 적용에 있어서 RSM을 통해서 만들어지는 해석적인 모형은 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있을 뿐만 아니라 최적화 수행에 필요한 계산시간도 많이 단축할 수 있다[1],[2]. 또한, 분산분석을 통해서 출력값에 기여하는 설계변수의 영향도 해석에 있어서 체계적이고 효율적인 접근방법을 제공한다.

따라서, 본 연구에서는 RSM을 이용한 전기기기 최적설계의 예로서 BLDC 전동기의 코깅토크 최소화를 위한 최적설계를 수행하였다. 일반적으로 영구자석 전동기의 코깅 토크는 rotor magnet 와 slotted stator간의 상호 자기저항 차에 의해서 나타난다. 코깅 토크의 크기에 영향을 주는 설계변수로서 슬롯 개구폭, 자화 분포, 스큐각, 자극비, 공극의 길이, 극수, 극당 슬롯수, 치 두께, 슬롯 폭, 영구자석 자속 밀도, 요크 두께등을 들 수 있다[3],[4]. 따라서, BLDC 전동기의 코깅토크를 줄이기 위해서는 많은 설계변수의 상호작용에 대한 영향을 고려해야하므로 실질적인 목적함수 형태를 구하기가 어려우며 유한요소법을 이용한 최적화를 수행한다 하더라도 많은 계산시간이 요구된다. 따라서, 설계변수와 응답(출력)에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 만듦으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 RSM을 적용하였다. 장하분배법으로 초기설계된 BLDC의 코깅토크 저감을 위한 형상 최적화문제는 설계공간 내에서 실험 계획법을 이용하여 만들어지는 각 설계변수 조합들에 대한 전동기 코깅토크의 peak-to-peak값과 운전토크 실효값에 대한 관측자료를 얻기 위해서 유한요소법을 이용하였으며, 코깅토크의 peak-to-peak값에 대한 근사모형을 목적함수로 정의하고 운전토크 실효값에 대한 근사모형을 제약조건으로 사용하였다.

\* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 07月 27日

最終完了 : 2001年 09月 13日

## 2. BLDC 전동기

### 2.1 전동기 설계 사양 및 설계변수

최근에 BLDC 전동기는 영구자석의 가격 감소와 반도체 소자의 기술발달로 말미암아 경제성이 부각되어 자동차용 전장부품등으로써 주목을 받고 있다. 표 2.1에 BLDC 전동기의 주요 사양을 나타내었으며, 장하분배법을 이용하여 설계사양 대로 전동기의 초기 형상을 설계하였다. BLDC전동기는 영구 자석을 가진 회전자와 치 슬롯 구조를 가진 고정자의 상호작용에 의해서 코깅토크를 발생하므로 전동기 설계시 우수한 토크 특성을 확보하기 위해서는 코깅 토크 리플의 저감을 고려한 설계가 이뤄져야 한다. 따라서 초기 설계된 BLDC 전동기의 코깅토크 및 토크 리플의 저감을 위해서 통계적 근사법인 RSM을 적용하여 최적설계를 수행하였으며, 고려할 설계 변수로서 슬롯 개구폭, 보조슬롯 폭, 스큐각, 자극비를 각각 선정하였다. 그림 2.1에 BLDC 전동기의 해석모델과 설계변수를 나타내었다.

### 2.2 해석이론

BLDC의 특성을 해석하기 위한 해석모델의 특성방정식은 맥스웰 전자 방정식 및 보조 방정식으로부터 다음 식과 같이 유도된다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (1)$$

여기서,  $\mu$ 는 재료의 투자율,  $\mu_r$ 은 영구자석의 비투자율,

표 2.1 BLDC 전동기의 주요 설계 사양

Table 2.1 Specification of the BLDC motor

항 목	사 양	항 목	사 양
영구자석 재료	희토류 (Nd)	철심 재료	SE18C
정격 토크	2.41 [N·m]	극 수	6
상 수	3	공극의 길이	7 [mm]

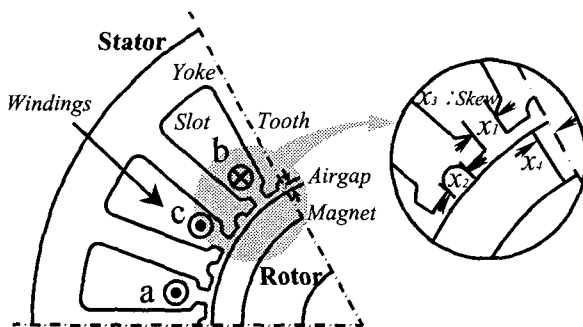


그림 2.1 BLDC 전동기의 해석 모델 및 설계변수

Fig. 2.1 The analysis model and the design variables of the BLDC

$\vec{J}_0$ 는 입력전류 밀도,  $\vec{J}_m$ 은 영구자석의 등가자화전류 밀도를 각각 나타낸다. 그리고, BLDC 전동기의 토크 및 코깅토크는 맥스웰 응력법을 이용하여 구하였다. 자계 내에서 자성체에 작용하는 전자력  $\vec{F}$ 는 식 (2)와 같이 그 자성체를 둘러싸는 표면에 대하여 맥스웰 응력 텐서(Maxwell Stress Tensor)를 폐적분함으로써 구할 수 있다.

$$\vec{F} = \oint_s \vec{P} d\vec{S} \quad (2)$$

여기서, 임의의 한 요소 내에서 발생하는 맥스웰 응력 텐서의  $x, y$  성분인  $P_x^{(e)}, P_y^{(e)}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_x^{(e)} = \frac{1}{2\mu_0} \{ (B_x^{(e)2} - B_y^{(e)2}) n_x + 2 B_x^{(e)} B_y^{(e)} n_y \} \quad (3)$$

$$P_y^{(e)} = \frac{1}{2\mu_0} \{ 2 B_x^{(e)} B_y^{(e)} n_x + (B_y^{(e)2} - B_x^{(e)2}) n_y \}$$

따라서, 공극에 작용하는 토크 성분은 식 (2)에서 구한 전자력으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T = r_g h \oint_l P_x^{(e)} dl \quad (4)$$

여기서,  $r_g$ 는 회전자 반경,  $h$ 는 해석 모델의  $z$ 축 방향 길이를 의미한다.

## 3. 응답표면 모델 생성

### 3.1 RSM의 개념

RSM은 설계변수와 응답간의 관계를 찾아 구하고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사 방법을 통해 최적 시스템 응답을 찾아낸다[1],[2],[5].

RSM은 어떤 공정이나 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 실제 응답  $\eta$ 와  $k$ 개의 설계 변수들 사이의 인과관계를 통계적인 방법으로 근사하게 된다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어지고, 이 실제 응답  $\eta$ 는 기대값 또는 평균값이다. 따라서, 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한요소해석을 통해서 관측자료를 확보하였으며, 실제 응답  $\eta$ 는 다음과 같이 가정한다[1],[5].

$$\eta = F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (5)$$

식 (5)에서 변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 는 소위 자연변수로 불리며 실

제의 측정 단위를 가진다. 유한 요소해석으로부터 얻어지는 관측응답  $y$ 는 임의의 근사 오차로 인해 기대값  $\eta$ 와 다르다. 따라서, 실제적인 응답 함수  $F$ 는 미지의 값이고, 경우에 따라 매우 복잡해 질 수 있기 때문에 그것을 가정해야만 한다. 따라서, 관측값  $y$ 와 기대값  $\eta$ 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (6)$$

$\varepsilon$ 은 응답에 대한 오차항이고, 변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 는 자연 변수들을 코드화 시킨 코드 변수이다. 여기서는  $\varepsilon$ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 정규분포로 가정한다. 많은 경우에 있어서, 실제 응답  $\eta$ 의 함수  $F$ 는 테일러 급수 전개로부터 1차 또는 2차의 다항식 모델의 형태로 나타낼 수 있다. 일반적으로 1차 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (7)$$

2차 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

식(8)을 식(6)에 대입하여 정리하면 관측값  $y$ 에 대한 2차의 다항식 모델은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (9)$$

여기서,  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}, \beta_{ij}$ 는 미지수로서 회귀계수이다. 따라서  $n$ 개의 관측자료에 대한 응답  $y$ 는 다음 식(10)과 같이 행렬로 표현할 수 있다.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (10)$$

회귀계수행렬  $\beta$ 는 식(10)에 최소자승법을 적용하여 식(11)과 같이 구할 수 있으며, 식(11)을 일반식이라 한다.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (11)$$

여기서,  $\hat{\beta}$ 는 다항식 모델의 추정된 회귀변수,  $X$ 는 다항식 모델의 항을 나타내는 행렬,  $X^T$ 는  $X$ 의 전치행렬을 각각 나타낸다. 따라서, 근사된 2차 다항식 모델은 다음 식(12)와 같이 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$\hat{y} = X \hat{\beta} \quad (12)$$

여기서,  $\hat{y}$ 는 추정된 응답을 나타낸다.

### 3.2 실험계획법

많은 학자들에 의해서 가장 적은 수의 샘플자료로부터 설계변수와 출력값 사이의 관계식을 구하기 위해서 여러 가지 실험계획법이 개발되어왔다. 일반적으로 다항식 모형에서는 직교실험계획법과 중심합성계획법을 많이 사용한다[5],[6]. 1차 다항식 모형은  $2^k$  요인실험 또는 부분 요인 실험으로부터 얻을 수 있다.  $2^k$ 요인 실험은  $k$  개의 인자(설계변수)들이 2 개의 수준(레벨)을 각각 가진다. 2차 다항식 모형은 각 설계변수의 수준이 3 개 이상이 되어야 한다. 따라서, 2차 다항식 모형을 만들기 위해서는  $2^k$ 요인 실험으로 부족하다. 그리하여  $3^k$  이상의 요인 실험이 요구된다. 그러나, 변수의 개수가 많아지면 관측해야하는 샘플자료수가 많아진다. 예를 들어,  $3^k$  요인 실험인 경우에 설계변수가 2 또는 3개이면 필요한 샘플자료 개수는 각각 9번과 27번이지만 설계변수의 개수가 4개만 되어도 81번의 관측자료가 필요하다.

따라서, Box와 Wilson은  $3^k$  요인 실험의 대안으로 소위 중심합성계획이라는 특별한 형태의 실험계획을 개발하였다[5]. 중심합성계획(CCD)에서 샘플자료의 관측수는 그림 3.1에 예를 들어 나타내었다, 설계변수 수가 3일 때, 그림 4의 직육면체에서 각 모서리에 해당되는 관측자료는 1차 모형을 형성하는데 사용되고, 2차 모형은 육면체에서 나머지 축상에 추가된 관측자료로 부터 고려된다. 따라서, 중심합성 계획법은 각 설계변수들에 대해 5개의 수준을 제공한다[1],[5],[6]. 그리고 관측자료의 시행횟수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$T = 2^k + 2k + n_0 \quad (13)$$

여기서  $2^k$ 는  $2^k$ 인수 설계를 위한 실험 수이고,  $2k$ 는 축 상의 점의 수이다.  $n_0$ 는 중심점에 대한 반복실험 횟수이다.

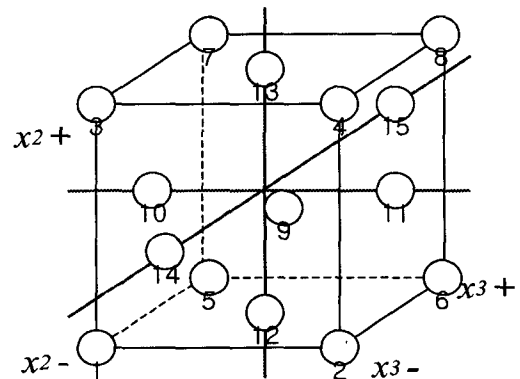


그림 3.1 설계변수 수가 3개일 때 중심합성 계획  
Fig. 3.1 Central composite design for the number of three design variables

### 3.3 설계 변수의 코딩

실험계획에 있어서, 설계 변수의 실제값을 사용하는 것 보다 코드화된 값을 사용하는 것은 때때로 편리하다. -1은 변수의 낮은 수준을 나타내고 +1은 높은 수준을 나타낸다 [5]. 설계 변수들의 코딩 규칙은 다음의 변환 식으로부터 얻을 수 있다.

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_{i0}}{d_i} \quad (14)$$

$\xi_i$ 는 자연변수,  $x_i$ 는 자연변수의 코드값,  $\xi_{i0}$ 는 0 수준에 대응하는 자연변수의 값이고,  $d_i$ 는 변수의 각각의 수준사이의 등 간격을 나타낸다. 설계 변수들의 자연 값에 대한 코드 변수의 대응관계는 표 3.1에 나타내었다.

### 3.4 회귀계수의 추정

중심합성계획법을 이용하여 25번의 유한요소해석으로 구한 관측자료로부터 설계변수와 출력변수사이의 관계를 나타내는 2개의 응답함수를 식(15)와 같이 2차 다항회귀 모형으로 정의하였다[1],[5].

표 3.1 설계변수의 범위

Table 3.1 A range of the design variables

설계 변수	설계변수의 레벨				
	-2	-1	0	+1	+2
슬롯오픈폭: $x_1$ [°]	3	4	5	6	7
보조슬롯폭: $x_2$ [°]	3	4	5	6	7
스큐각: $x_3$ [°]	5	7.5	10	12.5	15
바극비: $x_4$ [°]	0	1	2	3	4

표 3.2 근사 모형에 대한 회귀계수

Table 3.2 Regression coefficients of the predictive model

회귀 계수	$\widehat{y}_{co}$ (N·m)	$\widehat{y}_{rms}$ (N·m)	회귀 계수	$\widehat{y}_{co}$ (N·m)	$\widehat{y}_{rms}$ (N·m)
$\beta_0$	$5.72 \times 10^{-1}$	$2.559 \times 10^{-1}$	$\beta_{44}$	$9.586 \times 10^{-4}$	$5.012 \times 10^{-4}$
$\beta_1$	$-6.295 \times 10^{-2}$	$-2.285 \times 10^{-2}$	$\beta_{12}$	$-3.280 \times 10^{-2}$	$2.370 \times 10^{-3}$
$\beta_2$	$-2.653 \times 10^{-2}$	$8.241 \times 10^{-3}$	$\beta_{13}$	$-1.204 \times 10^{-3}$	$-5.750 \times 10^{-5}$
$\beta_3$	$-6.654 \times 10^{-2}$	$1.326 \times 10^{-3}$	$\beta_{14}$	$2.589 \times 10^{-3}$	$1.962 \times 10^{-4}$
$\beta_4$	$1.351 \times 10^{-2}$	$-9.841 \times 10^{-3}$	$\beta_{23}$	$-3.175 \times 10^{-4}$	$-4.200 \times 10^{-5}$
$\beta_{11}$	$2.481 \times 10^{-2}$	$-1.325 \times 10^{-4}$	$\beta_{24}$	$-7.971 \times 10^{-3}$	$-3.925 \times 10^{-4}$
$\beta_{22}$	$2.108 \times 10^{-2}$	$-2.766 \times 10^{-3}$	$\beta_{34}$	$5.500 \times 10^{-5}$	$-5.450 \times 10^{-5}$
$\beta_{33}$	$3.347 \times 10^{-3}$	$-3.740 \times 10^{-5}$			

$$\widehat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (15)$$

그리고 2개의 응답함수, 코깅토크의 피크값과 운전토크의 실효값을 나타내는 각각의 2차 다항식 회귀 모형의 회귀계수값을 표 3.2에 나타내었다. 여기서,  $\widehat{y}_{co}$ 는 코깅토크의 피크값을 나타내며  $\widehat{y}_{rms}$ 는 토크의 실효값을 나타낸다.

### 4. 최적화 수행 결과

일반적으로 제약조건을 가진 최적화 문제는 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Minimize : } f(x) \quad (16)$$

$$\text{Subject to : } \begin{aligned} h_i(x) &= 0, \quad i=1, \dots, l \\ g_j(x) &\leq 0, \quad j=1, \dots, m \\ x_L &\leq x_k \leq x_U, \quad k=1, \dots, k \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,  $f(x)$ 는 목적함수,  $h_i(x)$ 는 등호 제약함수,  $g_j(x)$ 는 부등호 제약함수이다. 그리고  $l$ 과  $m$ , 등호 제약조건 수와 부등호 제약조건 수를 각각 나타낸다.  $x_L$ 과  $x_U$ 는 설계변수의 하한과 상한의 경계치를 나타내며  $k$ 은 설계변수 수이다. 본 논문에서는 제약 조건을 가진 최적화 문제의 해를 구하기 위해서 순차 이차계획법을 사용하였다[8],[9]. 목적함수로서 설계변수와 코깅 토크의 피크값의 관계를 나타내는 2차 근사 다항식을 목적함수로 정의하고 요구된 정격 토크를 만족시키기 위해서 운전토크에 대한 2차 근사 다항식을 이용하여 정격토크 2.41 [N·m] 이상을 확보할 수 있도록 부등호 제약조건을 정의하고, 각 변수들의 상한과 하한을 다음과 같이 제한하였다.

$$\text{Objective function : } f(x) = \widehat{y}_{co}(x) \quad (18)$$

$$\text{Subject to : } \begin{aligned} g_1(x) &= \widehat{y}_{rms}(x) \geq 2.41 \\ 3 &\leq x_1 \leq 7, \quad 3 \leq x_2 \leq 7, \\ 5 &\leq x_3 \leq 15, \quad 0 \leq x_4 \leq 4 \end{aligned} \quad (19)$$

BLDC 전동기의 코깅토크를 저감하기 위한 최적화 수행결과를 표 4.1에 나타내었다. 이때, 코깅토크의 peak to peak 값은  $0.0018[N \cdot m]$ 이고 운전토크의 실효값은  $2.44[N \cdot m]$ 로써 제약조건을 만족하였다. 그림 4.1과 그림 4.2에 코깅토크와 운전토크에 대한 반응표면(response surface)을 각각 나타내었다. 이러한 반응표면은 설계변수의 변화에 대한 출력값의 변화를 쉽게 예측할 수 있다. 그리고 설계자가 관심을 두고 있는 영역내에서 설계변수의 범위를 재결정할 수 있도록 도와준다.

5. 결론

본 논문에서는 유한요소해석과 통계적 근사방법인 RSM을 적용하여 BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 형상최적화 방법을 제시하였다. 제한한 방법으로부터, 운전토크의 실효값이  $2.44[N \cdot m]$ 로써 제약조건을 만족하는 최적 설계 모델을 구할 수 있었다. BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 형상최적화에 있어서 RSM방법의 적용은 설계변수와 응답(출력)에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 만듦으로써, 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있었으며, 최적해를 찾기 위한 계산시간도 많이 단축할 수 있었다. 또한, 기존의 최적화 방법들이 전역적 또는 국부적인 최적해만을 제공하는 반면에 설계변수의 변화에 따른 기기의 성능변화에 대한 전반적인 현상을 쉽게 예측할 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제시한 통계적 근사방법인 RSM은 전기기기의 최적설계 방법으로서 유용할 것으로 사료된다.

표 4.1 최적화 수행 결과  
Table 4.1 Result of the numerical optimization

$x_1$ [ ° ]	$x_2$ [ ° ]	$x_3$ [ ° ]	$x_4$ [ ° ]	코깅 토크 [N · m]	운전 토크 [N · m]
4.73	5.15	11	4	0.0018	2.44

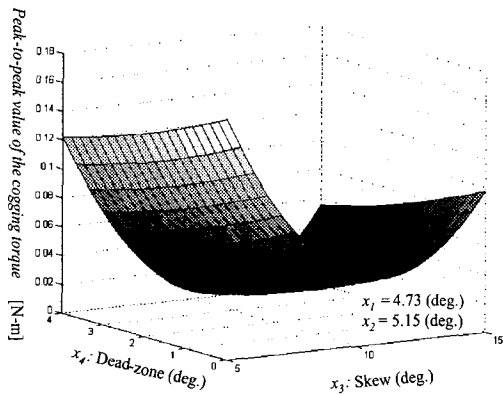


그림 4.1 코깅토크 peak-to-peak값에 대한 반응 표면  
Fig. 4.1 The response surface for the peak-to-peak value of the cogging torque

참고 문헌

- [1] Y. K. Kim, Y. S. Jo, J. P. Hong, J. Lee, "Approach to the shape optimization of racetrack type high temperature superconducting magnet using response surface methodology," *Cryogenics*, vol. 41/1, pp.39-47, 2001.
- [2] R. Rong, D. A. Lowther, "Applying response surface methodology in design and optimization of electromagnetic devices," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, No. 2, pp. 1916-1919, Mar. 1999.
- [3] Gillon 외 1명, "Shape Optimization of a Permanent Magnet Motor Using the Experimental Design Method", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol.35, No.3, pp.1278-1281, May 1999.
- [4] S. X. Chen, T. S. Low, B. Bruhl, The robust design approach for reducing Cogging Torque in Permanent Magnet Motors, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, No. 4, pp. 2135-2137, Jul. 1998.
- [5] R. H. Myers, *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, 1995.
- [6] M. Alauddin et al., Prediction of tool life in end milling by response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, 71, pp456-465,1997.
- [7] F. Gillon, P. Brochet, Screening and response surface method Applied to the numerical optimization of electromagnetic devices, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No. 4, pp. 1163-1167, Jul. 2000.
- [8] J. S. Arora, *Introduction to Optimum Design*, McGraw Hill, 1989.
- [9] A. D. Belegundu, *Optimization concepts and applications in engineering*, Prentice Hall, 1999.

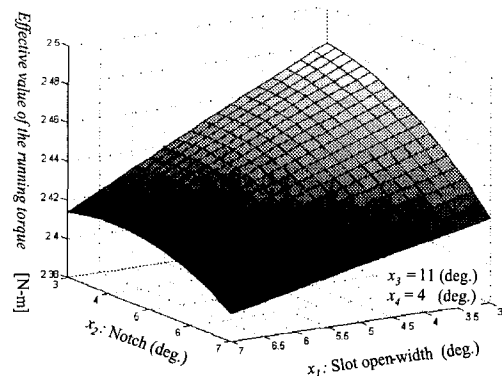


그림 4.2 운전토크 실효값에 대한 반응 표면  
Fig. 4.2 The response surface for the effective value of the running torque

저 자 소 개

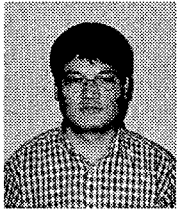


**김 영 균(金永均)**

1971년 7월 14일생. 1998년 창원대 전기공학과 졸업. 2000년 전기전자제어 대학원졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel: 055-262-5966

E-mail: ensigma@hitel.net



**이 근 호(李根浩)**

1969년 4월 11일생. 1992년 한양대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원졸업(석사). 1994년~2002년 2월 LG-OTIS 선임연구원. 현재 창원대 대학원 전기공학과 박사과정

Tel: 055-262-5966

E-mail: lgh700@korea.com



**홍 정 표(洪正杓)**

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기학과 졸업(공박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수.

Tel : 055-279-7517

E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr