

## BLDC 전동기 회전자 자극의 최적화에 대한 진화전략 및 실험적 설계기법의 상호 비교

이현국, 배병현, 우장수, 한정호, 박성조, 권영안  
부산대학교

### Comparison of Experimental Design and Evolution Strategy for Optimal Design of BLDC Motor

H K Yi, B H Bae, J S Woo, J H Hahn, S J Park and Y A Kwon  
Pusan National University

**Abstract** - This paper presents the optimal design of a brushless DC motor(BLDC) keeping the average torque and cogging torque of the initial model while minimizing the volume of magnet pole. Experimental design method and evolution strategy technique are performed for the shape optimization. The presented optimal designs show the both methods have the almost same result.

#### 1. 서 론

Brushless DC(BLDC)전동기는 브러쉬가 없으므로 유지 보수가 간단하고, 회토티 자석과 같은 고에너지 밀도를 가지는 영구자석을 사용하여 고효율과 고회전비 특성을 가지므로 여러 분야에서 사용이 증대되고 있다.

본 연구는 BLDC 전동기에서 자석체적의 최소화를 위한 회전자 자극의 최적설계를 수행하는 연구이다.

제약조건을 가지는 비선형 문제의 최적화에 관한 연구로는 결정론적인 방법에서 제약조건을 페널티함수 및 배리어함수로 처리하여 무제약 비선형 문제로 변환하게 되며 최적화법으로 다차원 탐색법, 목적함수의 미분치를 요구하는 경사법 및 공액경사법, 그리고 목적함수 값에 의한 직접적인 방법으로 공액방향법 등이 있다. 목적함수의 미분치를 요구하는 경사법 및 공액경사법은 수렴이 빠른 속용성이 있으나 국지 최적화에 도달하는 취약성이 있으며 특히 FEM을 활용하는 최적설계에 있어서 목적함수의 경사를 구하는데 어려움이 따른다. 공액방향법은 보다 강인성을 가지나 수렴이 늦어 많은 FEM 반복계산을 요구한다. 확률론적인 방법으로서 최근에 신경회로망, 유전알고리즘, 진화알고리즘 등이 활용되고 있다. 이러한 방법들은 국지가 아닌 전체의 최적화에 수렴하는 확률이 높으나 수렴에 비교적 많은 평가가 수행된다,

본 연구에서는 Taguchi 표에 의한 응답표면법을 활용한 실험적 설계기법과 (1+1) 진화전략을 이용한 최적화 기법에 의해 최적해를 구하여 상호 비교하였다. 실험적 설계기법은 FEM 반복 계산 수를 감소하는 장점을 가져 최근 최적설계에 많이 응용되고 있으며, 진화전략을 이용한 최적 설계는 숙련도와 경험이 부족하더라도 최적의 해에 비교적 용이하게 접근할 수 있으며, 복잡하고 다양한 시스템에 적용이 상대적으로 용이한 장점을 가진다 [1]-[4]. 본 연구의 최적설계는 회토티계 영구자석을 이용한 상용 BLDC 전동기의 생산비용에 큰 영향을 미치는 회전자 자극의 형상에 중점을 두어, BLDC 전동기의 출력 토크 및 코깅 토크 특성을 유지하면서 자극의 체적을 최소화하는 최적해를 상기한 방법들과 FEM에 의해서 구하고, 최초 모델과 최적 모델을 비교하며 적합성을 검증한다.

#### 2. FEM을 이용한 BLDC 전동기의 토크계산

본 연구에서 제시한 최적설계의 설계사례로서 사용하는 상용 BLDC 모델의 제원 및 단면도는 각각 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1. 해석모델의 제원

출력	150w	상수	3상
정격전압	24V	결선	Y
회전수	1800rpm	토크상수	0.095Nm/A
철심길이	40mm	영구자석두께	5mm
자극각	120edeg	잔류자속밀도	1.12T
고정자상저항	0.162Ω	선간인덕턴스	0.303mH

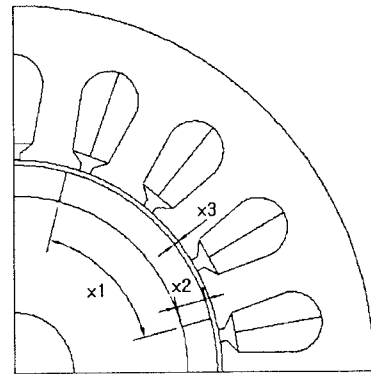


그림 1. 해석모델의 단면도

유한요소해석 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 그림 1과 같은 BLDC 전동기에서 속도 1800rpm, 무부하의

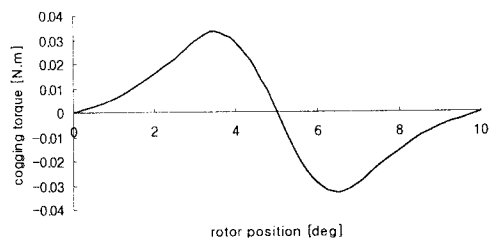


그림 2. 해석모델의 코깅토크 곡선

조건으로 계산한 코깅 토크와 출력 토크의 결과는 각각 그림 2 및 그림3과 같다.

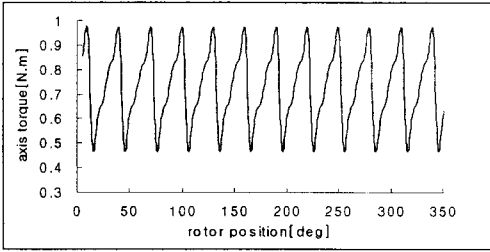


그림 3. 해석모델의 토크 곡선

여기서 코깅 토크의 첨두치는 0.0332 Nm, 평균 토크는 0.68059 Nm이고, 자극당 체적은 2375.05 mm<sup>3</sup>이다.

### 3. 회전자 자극의 최적 설계

회도류 자석은 페라이트계 자석 또는 알니코계 자석에 비해 잔류 자속 밀도가 높고 보자력 또한 크므로 고효율 영구자석 전동기에 사용되나 다른 계열의 자석에 비해서 고가이므로 전체 생산 단가를 증가시키게 된다. 본 연구에서는 기존 모델을 이용하여 성능을 유지하면서 회전자 자극의 치수를 변화 시켜 체적을 최소화 하는 최적설계를 수행한다.

그림 1에서 자석의 체적을 결정하는 요소에는 자극각 ( $x_1$ ), 자극의 두께( $x_2$ ), 공극의 길이( $x_3$ )가 있고 극당 체적은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{mag} = \frac{\pi l x_1}{360} [(R_i - x_3)^2 - (R_i - x_3 - x_2)^2] \quad (1)$$

여기서  $R_i$ ,  $x_3$ ,  $l$  은 각각 고정자의 내부 반지름, 공극의 길이 그리고 자극의 축방향 길이이다.

식(1)의 자석체적을 최소화하는 제약조건으로서 설계 치수의 제한과 함께 출력토크 및 코깅토크의 제한치를 기존모델의 토크 값으로 설정하였다.

실험적 설계기법에서는 FEM 반복계산 수를 감소하기 위하여 제약함수를 해석적인 근사로서 단순화하며, 본 연구에서는 Taguchi 표에 의한 응답표면법을 활용하여 다음과 같은 2차의 다항식 함수로서 근사한다.

$$y = f(x_1, x_2, x_3) \quad (2)$$

$$= a_0 + \sum_{i=1,2,3} a_i x_i + \sum_{ij=1,2,3} a_{ij} x_i x_j$$

식(2)와 같은 응답표면을 형성하기 위한 실험회수는 예를 들어 3개 변수, 3개 레벨에서  $3^3 = 27$  번이 된다. 이러한 종류의 설계는 전계승설계가 되며 설계변수가 증가하면 매우 큰 실험회수가 요구되고 FEM에 의한 반복계산에 많은 시간이 소요된다. 따라서 실험회수의 감소를 위한 부분계승설계로서 Taguchi 방법에 의한 직교계승설계가 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 3개 변수, 3개 레벨에서 실험회수가 9번이 되는 Taguchi의 L9 직교배열을 사용한다.

한편, 최적화를 수행하는 진화전략의 구조로서 (1+1)\_ES를 이용한다. (1+1)\_ES는 1개의 부모 개체를 이용하여 부모 개체의 각 변수 값에 난수를 발생하여 돌연변이시킨 자손 개체를 만들고 이 중 더 나은 개체가 생

존하여 다음 세대의 부모 개체가 되는 기법이다. 돌연변이가 연산은 평균적으로 돌연변이가 1/5의 성공률을 보일 경우, 목적함수가 최적의 수렴률을 보이는 1/5 success rule을 수식화 하였다.

$$x' = x + \sigma(t)N(0,1) \quad \forall i \in \{1,2,\dots,n\} \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma(t-n)/c & \text{if } P_m > 1/5 \\ \sigma(t-n)c & \text{if } P_m < 1/5 \\ \sigma(t-n) & \text{if } P_m = 1/5 \end{cases} \quad (4)$$

본 연구에서 최적화를 위한 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } V_{mag} [mm^3] \\ &\text{Subject to } T_{ave} \geq 0.68059 [Nm] \\ & \quad T_{cog(peak)} \leq 0.0332 [Nm] \\ & \quad 40 < x_1 < 80 [deg] \\ & \quad 2 < x_2 < 4 [mm] \\ & \quad 0.4 < x_3 < 0.6 [mm] \end{aligned}$$

여기서,  $V_{mag}$ ,  $T_{ave}$ ,  $T_{cog(peak)}$  는 각각 자극의 체적, 평균 토크, 코깅 토크의 첨두치이다.

### 4. 설계사례 및 검토

본 연구에서 제시한 최적설계의 설계사례로서 사용하는 상용 BLDC 모델의 설계변수는 표 2와 같다.

표 2. 초기모델의 설계 변수

자극각(x1)	자극두께(x2)	공극의길이(x3)	자극체적
60deg	3mm	0.5mm	2375mm <sup>3</sup>

본 연구에서 제약함수의 근사를 위하여 Taguchi L9 직교배열을 적용하여 설계 변수들을 변화시킨 뒤 그에 따른 응답을 FEM 해석에 의해 평균 토크와 코깅 토크를 구하는 총 9번의 FEM 해석으로부터 얻어진 응답표면이 그림 4 및 그림 5와 같다.

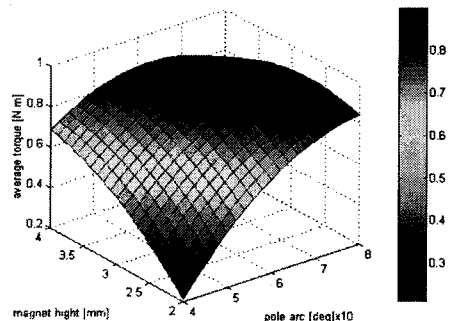


그림 4. 평균토크 응답표면 ( $x_3 = 0.5mm$  인 경우)

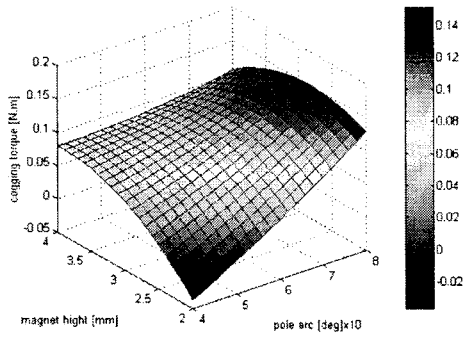


그림 5. 코깅토크 응답표면 ( $x_3 = 0.5\text{mm}$  인 경우)

한편, 본 연구에서 (1+1)\_진화 전략에 의한 최적화를 수행하여 얻어진 자극의 체적에 대한 100세대까지의 수렴 추이는 그림 6과 같다.

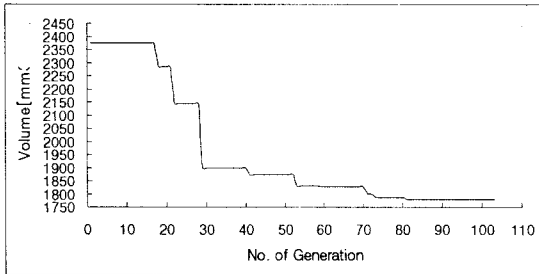


그림 6 진화전략 방식에서 수렴 추이

두가지 방식에 의한 최적화 모델의 설계 변수는 표3과 표4와 같다.

표 3. 실험적 설계기법 최적화 모델의 설계 변수

자극각( $X_1$ )	자극두께( $X_2$ )	공극의길이( $X_3$ )	자극체적
66.28deg	2mm	0.533mm	1792.33mm <sup>3</sup>

표 4. 진화전략 최적화 모델의 설계 변수

자극각( $x_1$ )	자극두께( $x_2$ )	공극의길이( $x_3$ )	자극체적
64.47deg	2.038mm	0.495mm	1778.76mm <sup>3</sup>

표 3과 표 4의 결과에서 나타난 바와 같이 두 방식의 최적화 모델 자극 체적이 초기 모델의 자극 체적에 비교하여 약 25%가 감소하였다.

두 방식의 최적 결과에서 자극체적의 차이는 1% 미만의 차이를 나타내고 있다.

그림 7은 실험적 설계기법에서 얻어진 최적모델에서 FEM에 의해 구한 토크 곡선을 나타내며 기존모델의 토크 제약조건이 잘 만족됨을 보인다.

그림 8은 진화전략기법에서 얻어진 최적모델에서

FEM에 의해 구한 코깅토크 곡선을 나타내며 기존모델의 코깅토크 제약조건이 잘 만족됨을 보인다.

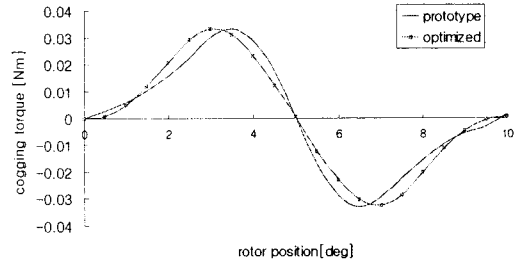


그림 7 해석모델과 실험적 설계기법 최적화모델의 토크 곡선

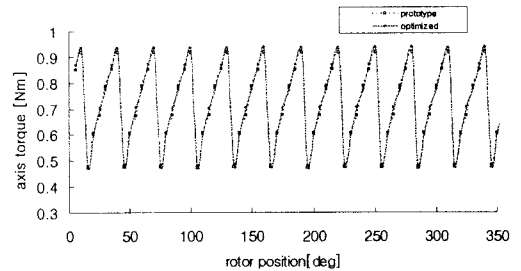


그림 8 해석모델과 진화전략 최적화모델의 코깅 토크 곡선

## 5. 결 론

본 연구에서 BLDC 전동기의 회전자 자극에 대하여 설계변수를 설정하고 실험적 설계기법 및 진화전략기법을 이용하여 제약 조건을 만족시키는 최적해를 구하였다. 본 연구에서 수행한 최적화에서 자극의 체적이 초기 모델에 비해 약 25%가 감소하는 결과를 나타내었으며 두 방식의 차이는 1% 미만임을 보이고 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] R. H. Myers, D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology*, Wiley, 1995.
- [2] Edwin B. Dean, "Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview", International Society of Parametric Analysis, Annual Conference, 1991.
- [3] K.Pries, C. Magele, "FEM and Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices", IEEE Trans. Magn., vol. 26, no. 5, Sept 1990
- [4] D Bochnia, W Hofmann, "Design Optimization of Permanent Magnet Motors by Evolution Strategies and Finite Element Analysis", IEE Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives, Conference Publication No.468, 1999