

# 유전알고리즘과 반응표면법을 이용한 BLDC 전동기용 영구자석 최적설계

(Optimum Design of BLDC Motor Magnet Using Genetic Algorithm and Response Surface Method)

김창업\* · 전문호

(Chang-Eob Kim · Mun-Ho Jeon)

## 요 약

본 논문에서는 유전알고리즘, 반응표면법을 이용하여 BLDC 전동기의 코깅 토크를 최소화 하기 위한 최적화 설계 방법을 제안하였다. 유전알고리즘, 반응표면법을 이용하여 BLDC 전동기의 설계변수를 추론하고 유한요소법으로 코깅 토크를 구하였다. 유전알고리즘, 반응표면법을 유한요소법과 결합하여 사용함으로써 BLDC 전동기의 코깅 토크를 최소로 하는 영구자석의 형상을 보다 빠르고 정확하게 구할 수 있었다.

## Abstract

In this paper, an optimum design method is presented for BLDC motor magnet using genetic algorithm(GA) and response surface method(RSM). The cogging torque is calculated by finite element method for the designs obtained by GA and RSM. The results are compared and discussed for the simulation time and the cogging torque.

Key Words : Genetic algorithm, Response surface method, Cogging torque, Finite element method

## 1. 서 론

코깅 토크는 전동기내의 비균일 토크로서, 전동기 시스템의 자기 에너지가 최소인 위치로 이동하려는 접선 방향의 힘으로 부하 전류와는 상관없이 회전자 영구자석과 고정자 슬롯의 상호 작용에 의해 발생한

다.

BLDC 전동기는 전기자 권선으로 구성되어 있는 고정자와 영구자석을 가지는 회전자로 구성되어 있다. 영구자석 재료로는 가격이 저렴한 페라이트 재질을 가장 많이 사용하고 있으며 다양한 형상의 제작이 가능한 플라스틱 영구자석의 사용도 증가하고 있다[1]. 또한 고효율, 고출력을 얻기 위해 에너지 밀도가 높은 희토류 재료의 영구자석의 사용도 최근 증가 추세이다. 이런 고 효율화를 목적으로 높은 에너지를 가진 영구자석을 사용하는 경우 에너지에 비례하여 코깅 토크의 크기가 커지고 있다. 이러한 코

\* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수

Tel : 041-540-5657, Fax : 041-540-5693

E-mail : cekim@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2004년 8월 9일

1차심사 : 2004년 8월 11일

심사완료 : 2004년 9월 8일

킹 토크는 전동기의 소음과 진동의 주요 원인이 되므로 전동기 설계시 반드시 고려해야 한다[2,3].

본 논문에서는 코깅 토크의 크기를 줄이기 위해 4극 24슬롯의 내전형 BLDC 전동기의 영구자석 형상을 유전알고리즘과 반응표면법을 사용하여 구하였다. 또한 주어진 영구자석의 형상에 대하여 유한요소법을 이용하여 코깅 토크를 구하고 이 값이 최소가 되는 영구자석을 설계하는 방법에 대하여 검토하였다.

## 2. BLDC 전동기의 최적설계

### 2.1 BLDC 전동기

BLDC 전동기는 종래의 DC 전동기에서 계자에 영구자석을 사용하는 브러쉬(Brush)가 없는 DC 전동기이다. BLDC 전동기는 우수한 토크 특성을 가져야 할 뿐만 아니라 코깅 토크 저감을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 본 논문에서 적용 대상인 BLDC 전동기의 해석 모델로 초기 설계 사양을 그림 1과 표 1에 나타내었다.

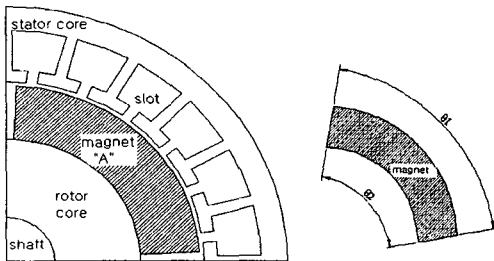


그림 1. BLDC 전동기의 해석모델  
Fig. 1. Analysis model of BLDC motor

표 1. 초기 모델의 설계변수  
Table 1. Design variables for initial model

| 설계변수                         | 치수      |
|------------------------------|---------|
| 자극각 ( $\theta_1, \theta_2$ ) | 80[°]   |
| 자석계자외경                       | 90[mm]  |
| 전기자철심내경                      | 92[mm]  |
| 슬롯개구폭                        | 2.5[mm] |
| 철심치폭                         | 3.5[mm] |
| 요크두께                         | 5.5[mm] |
| 철심외경                         | 129[mm] |
| 공극길이                         | 0.5[mm] |

### 2.2 유한요소법을 이용한 영구자석 형상 최적설계

코깅 토크는 영구자석이 부착된 회전자에 의하여 공극중에 비교적 저차의 고조파 자속밀도와 고정자 철심 슬롯의 상호작용에 의하여 발생하는 것으로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$T(a) = -\frac{\partial W(a)}{\partial a} \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 회전자의 회전각도이고,  $W$ 는 에너지이다. 자계의 에너지는 식(2)와 같다.

$$W_f = \int (H_c l_c + H_g l_g) A dB \quad (2)$$

여기서,  $H_c$ 는 철심에서 자계의 세기,  $H_g$ 는 공극에서 자계의 세기,  $l_c$ 는 철심의 길이,  $l_g$ 는 공극의 길이를 나타내며,  $A$ 는 자속경로의 단면적,  $B$ 는 자속밀도이다.

코깅 토크가 최소화되는 형상을 찾기 위해 BLDC 전동기의 영구자석의 윗각과 아랫각을 변화시키며 유한요소법으로 해석하였다. 4극 24슬롯 110[V], 400[W]용량의 BLDC 전동기에서 영구자석의 윗각과 아랫각의 초기값은 각각 80[°]로 주었다. 윗각과 아랫각을 75~85[°]사이에서 1[°]씩 변화를 주어 121개의 해석모델들을 만들고, flux 2d를 사용하여 계산하였다. 그림 2는 초기 영구자석의 모형의 자속분포를 나타내고, 그림 3은 초기모델을 계산한 코깅 토크 값을 나타낸다.

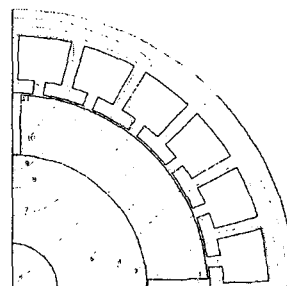


그림 2. 초기 모델의 자속분포  
Fig. 2. Flux distribution for initial model



그림 3. 초기 모델의 코깅 토크  
Fig. 3. Cogging torque for initial model

그림 4는 영구자석의 윗각과 아랫각을 각각 1[°]씩 변화시켜 유한요소법으로 계산한 코깅 토크 분포이다. ( $\theta_1, \theta_2$ )가 (85[°], 83[°])일 때 코깅 토크값이 최소가 되는 값을 얻었다.

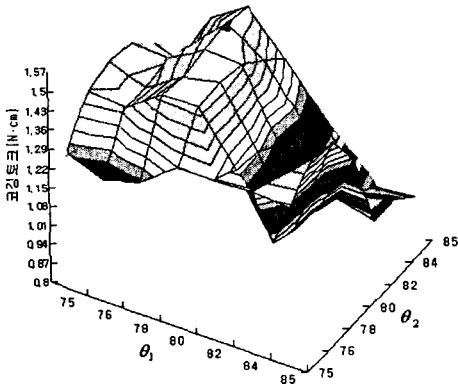


그림 4. 영구자석 자극각에 대한 코깅 토크  
Fig. 4. Cogging torque distribution for magnet angles

### 2.3 유전알고리즘과 유한요소법을 이용한 영구자석 형상 최적설계

일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며, 교배와 돌연변이의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태 되어 간다[4].

본 논문은 초기에 적절한 설계점의 수를 결정하고 설계점들이 적합인지 판명한 후, 교배와 돌연변이를 거쳐 초기의 설계점 수와 같은 새로운 세대를 만들어 이를 반복하여 원하는 값을 찾아 나가는 것을 프

로그램화 하였다. 새로운 설계점들을 찾고 주어진 제약에 적합할 때, 최소의 코깅토크를 찾아 가는 것으로 그림 5에서 그 구조도를 나타내었다.

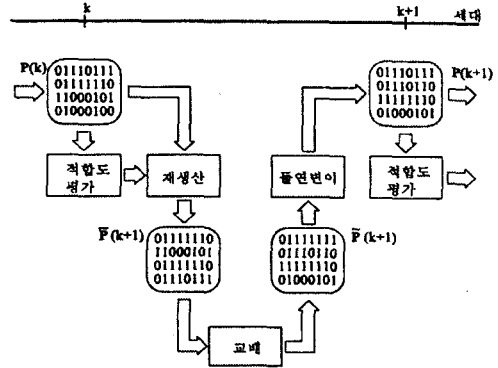


그림 5. 유전알고리즘의 구조  
Fig. 5. Genetic algorithm structure

자극각  $\theta_1, \theta_2$ 을 75~85[°] 사이의 121개 값 중 무작위로 10개의  $\theta_1, \theta_2$ 의 값을 선택해 이들 중 선택된 10개의  $\theta_1, \theta_2$ 의 값을 적합도 계산을 통하여 재생산 하였다. 재생산한 값들 중 40[%]를 교배, 5[%]를 돌연변이 시켜 새로운  $\theta_1, \theta_2$ 의 값을 생성하여 새로운 세대를 만들어 반복수행 후 마지막으로 얻은 값들의 최적해가 어느 정도 진화 후에는 더 이상의 진화가 발견되지 않고 같은 값이 관찰되어질 때 정지하였다.  $\theta_1=85[°], \theta_2=84[°]$ 일때 코깅 토크가 최소로 수렴함을 알 수 있었다. 그림 6은 유전알고리즘에 의한 최적 설계 과정으로 20세대 이후에서 수렴해 나가는 모습을 보여주고 있고, 그림 7은 세대의 변화에 따른 각각의  $\theta_1, \theta_2$  값을 나타내었다.

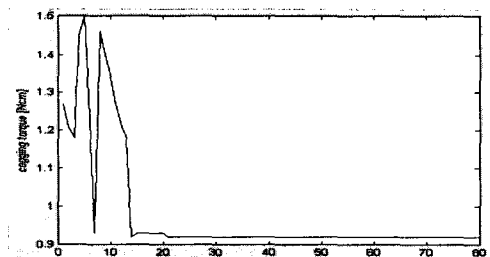


그림 6. 목적함수의 수렴과정  
Fig. 6. Object function to generation

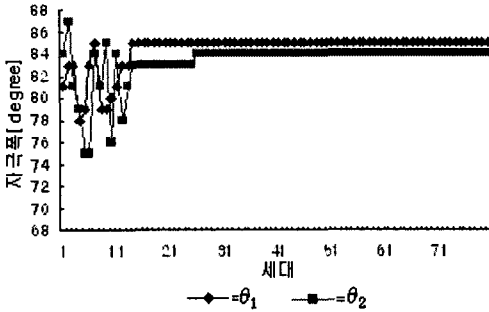


그림 7. 설계변수의 수렴과정  
Fig. 7. Design variables to generation

그림 8은 유전알고리즘을 이용한 최적설계 흐름도를 도시화 한 것이다.

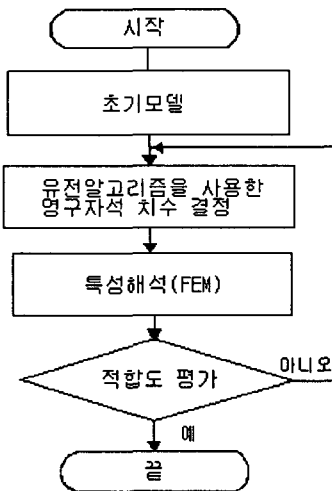


그림 8. 최적설계 흐름도  
Fig. 8. Flow chart of optimum design

## 2.4 반응표면법과 유한요소법을 이용한 영구자석 형상 최적설계

반응표면법은 여러 개의 설계 변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다[5]. 본 논문에서는 설계자가 관심을 가지고 있는 반응과 설계 인자들의 관계를 근사적으로 모델링하고 최적화를 위해 반응표면법을 사용하였다. 우선  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 가 75~85°사이의 범위에서 변화를 가질 때 반응하는 값을 가지고 최적

점을 찾아 나갔다. 최적점을 찾기 위한 실험계획법으로는 중심합성법을 사용하였다[6]. 그림 9는 2인자에 대한 중심합성법이고, 중심합성계획법의 실험횟수는 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

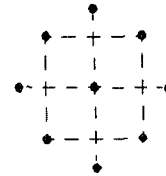


그림 9. 2-수준 2-인자 중심합성계획법  
Fig. 9. 2-level, 2-factor central composite design

$$N = 2^k + 2k + n_c \quad (3)$$

여기서,  $2^k$ 은 요인 배치법에 의한 설계를 위한 실험수이고,  $2k$ 는 축에서의 점의 수이며  $n_c$ 는 중심점에 대한 반복 실험 횟수이다. 따라서 실험횟수는 13 번으로 유한요소법을 사용하여 코깅 토크를 구하였다.

Response Surface Regression: cogging torque versus theta1, theta2

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for cogging

| Term          | Coef   | SE Coef | T      | P     |
|---------------|--------|---------|--------|-------|
| Constant      | -48.15 | 9.21998 | -5.006 | 0.002 |
| theta1        | 1.35   | 0.14070 | 9.572  | 0.000 |
| theta2        | -0.10  | 0.14070 | -0.736 | 0.485 |
| theta1*theta1 | -0.01  | 0.00081 | -9.974 | 0.000 |
| theta2*theta2 | 0.00   | 0.00081 | 1.591  | 0.163 |
| theta1*theta2 | -0.00  | 0.00081 | -2.189 | 0.065 |

S = 0.02504 R-Sq = 98.9% R-Sq(adj) = 98.1%

Analysis of Variance for cogging

| Source         | DF | Seq SS   | Adj SS    | Adj MS   | F      | P     |
|----------------|----|----------|-----------|----------|--------|-------|
| Regression     | 5  | 0.399515 | 0.3994515 | 0.079903 | 127.44 | 0.000 |
| Linear         | 2  | 0.325504 | 0.069453  | 0.034727 | 55.39  | 0.000 |
| Square         | 2  | 0.071005 | 0.072119  | 0.036059 | 57.51  | 0.000 |
| Interaction    | 1  | 0.003005 | 0.003005  | 0.003005 | 4.79   | 0.065 |
| Residual Error | 7  | 0.004389 | 0.004389  | 0.000627 |        |       |
| Lack-of-Fit    | 3  | 0.004389 | 0.004389  | 0.001463 |        |       |
| Pure Error     | 4  | 0.000000 | 0.000000  | 0.000000 |        |       |
| Total          | 12 | 0.403804 |           |          |        |       |

그림 10. 회귀 분석 결과  
Fig. 10. Result of regression

그림 10은 회귀 분석결과 교호작용의 p값이 0.065로 반응표면에 곡면이 있다는 것을 알려준다. 또한 R-Sq가 98.9%로 전체 변동 중 회귀 곡선에 대하여 설명되는 변동이 높아 반응표면이 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 자극각의 변화에 따른 반응 값을 분석이 유리한 3차원 표면으로 출력한 반응표면의 그래

프를 나타내고, 그림 12는 설계변수들의 조합에 대한 코깅 토크 값의 반응 값을 등고선으로 표현했다. RSM을 이용하여  $\theta_1=85^\circ$ ,  $\theta_2=83.7^\circ$ 로 수렴함을 알 수 있었다.

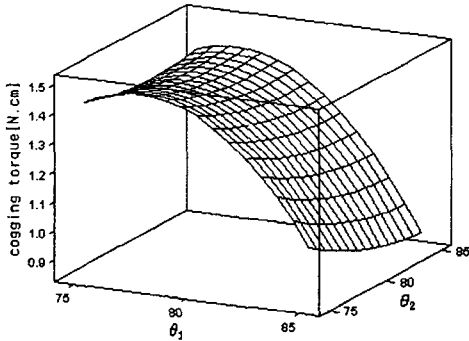


그림 11. 3차원 반응표면 그래프  
Fig. 11. Surface plot by RSM

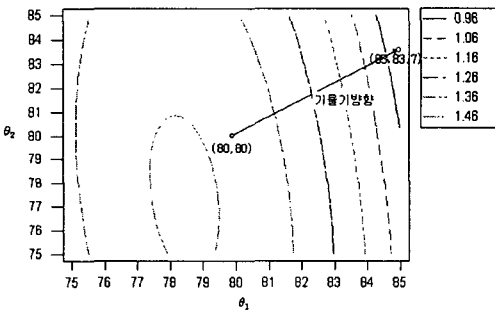


그림 12. 반응표면법의 등고선 그래프  
Fig. 12. Contour plot by RSM

### 3. 최적설계 결과 검토

그림 13은 영구자석 자극각의 초기 모델, 유전알고리즘을 사용한 최적설계 모델, 반응표면법을 사용한 최적설계 모델의 코깅 토크 분포를 나타내었다. 표 2와 표 3은 GA와 RSM을 이용하여 코깅 토크 최소화를 위한 최적 설계값을 나타낸다. GA와 RSM을 이용한 최적설계에서 코깅 토크 값은 초기모델의 약 68%, 66%로 줄어들었다. 코깅 토크 값은 전 영역에서 유한요소법으로 계산하여 구한 해석 결과와 비교할 때 약 2%내외의 오차내로 수렴한 반면, 계산시간은 1/4 이내로 줄어들었다.

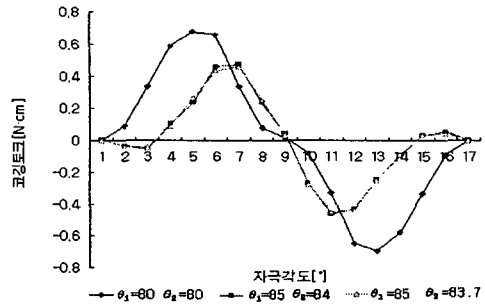


그림 13. 초기모델과 최적모델의 코깅 토크  
Fig. 13. Cogging torque for initial and optimum designs

표 2. 초기 모델과 최적설계시 코깅 토크  
Table 2. Cogging torque of initial design and optimum design

| 설계 변수 | 초기모델                                       | 최적설계 (GA)                                  | 최적설계 (RSM)                                   | 전영역계산                                      |
|-------|--|--|--|--|
| 자극각   | $\theta_1=80^\circ$<br>$\theta_2=80^\circ$ | $\theta_1=85^\circ$<br>$\theta_2=84^\circ$ | $\theta_1=85^\circ$<br>$\theta_2=83.7^\circ$ | $\theta_1=85^\circ$<br>$\theta_2=83^\circ$ |
| 코깅 토크 | 1.36<br>[N·cm]                             | 0.93<br>[N·cm]                             | 0.90<br>[N·cm]                               | 0.91<br>[N·cm]                             |

표 3. 최적설계 소요시간  
Table 3. Total times of optimum designs

| 방법       | GA       | RSM      | 전영역계산     |
|----------|----------|----------|-----------|
| FEM 계산횟수 | 25[번]    | 24[번]    | 121[번]    |
| 총소요시간    | 500[min] | 480[min] | 2420[min] |

### 4. 결 론

본 논문에서는 유전알고리즘, 반응표면법을 이용하여 BLDC 전동기의 코깅 토크를 최소화 하는 계자 자석의 최적 설계를 제안하였다. 유전알고리즘, 반응표면법에 의해 설계 변수를 찾고 이를 유한요소법을 이용하여 코깅 토크를 구하였다. 해석 결과, 전체 형상에서 구한 해석 결과보다 유전알고리즘, 반응표면법을 이용한 경우, 코깅 토크 값은 2%내외로 수렴하고 계산 시간은 대폭 단축되었다. 즉, 유전알고리즘과 반응표면법을 사용함으로써 BLDC 전동기의 코깅 토크가 최소화 되는 영구자석의 형상을 모든

형상을 계산하지 않고도 빠른 시간 내에 정확한 최적 형상을 구할 수 있음을 보여주었다.

본 연구는 2004년도 호서대학교 벤처산학컨소시엄연구 지원과제로 수행된 연구결과입니다.

### References

- [1] 大川光吉, 패라이트 磁石回轉機의 設計, 동일출판사, pp.79-182, 1995.
- [2] 大川光吉, 永久磁石磁氣回路의 設計·特性 計算法II, 종합전자 출판사, pp.175-355, 1987.
- [3] 김성철, 주수원 “내전형 BLDC 전동기의 코강토크 저감을 위한 영구자석의 형상설계,” 대한전기학회하계학술대회 논문집, pp.864-866, 2000.
- [4] 신강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [5] 백운봉, 실험계획법, 진영사, pp.118-156, 1974.
- [6] 이레테크 미니텨사업부·새한미디어주식회사공저, MINITAB 실무완성, 이레테크, 2001.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 김창업 (金昌業)

1959년생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000~2001년 Post doc.(University of Southampton). 1997년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.

#### 전문호 (全文鎬)

1976년 12월 11일생. 2002년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.