

BLDC 모터의 3차원 유한요소해석 및 형상 최적설계

왕세명*, 강제남, 윤희수
 광주과학기술원, 광주과학기술원, 삼성전기연구소

3-D FEA and Shape Optimization of BLDC Motor

Semyung Wang*, Jenam Kang, Heesoo Yoon
 K-JIST(Kwangju Institute of Science & Technology), K-JIST, Samsung Electro-Mechanics

Abstract - 지금까지 사용된 2차원 유한요소해석은 자계의 프링징(Fringing) 및 누설 자계 등을 무시하기 때문에 정확한 특성을 파악하기 위해서는 3차원 모델을 사용하여야 한다. BLDC 모터의 회전자(자석)의 높이를 고정시킨 상태에서 고정자(Core) 높이의 변화에 따른 코깅(Cogging) 토크의 해석을 통해 높이 비에 대한 2차원과 3차원 유한요소해석 결과 사이의 상관 오차에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 정자기의 3차원 형상 설계 민감도 해석 기법을 개발하였다. 개발된 정자기 민감도 프로그램(MAGSEN-magnetic sensitivity)은 유용성과 실용성을 보이기 위하여 BLDC 모터의 코깅 토크를 줄이는 형상 최적설계에 적용되었다.

1. 서 론

정보 저장 기기나 로봇 시스템 등에서 널리 사용되어지고 있는 BLDC 모터의 최적설계를 위해선 토크 등과 같은 모터의 특성들에 대한 정확한 해석이 필요하다. 최근까지는 2차원 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)과 실험에 의해 모터의 특성들을 파악하였다. 이는 2차원 유한 요소 해석이 3차원 해석 보다 모델링이 쉬울 뿐만 아니라 계산 속도도 대략 10배 이상 빠르기 때문이다[1]. 그러나 2차원 유한 요소 해석은 자계의 프링징(Fringing)과 누설(End-leakage)을 무시하므로 결국 실험에 의한 시행 착오를 통한 접근이 이루어지게 되었다. 다시 말해서 자계의 프링징과 누설에 의한 영향들은 실험에 의해 보여지는 결과들에 근거를 둔 경험적 요소들의 사용에 의해 고려되어져야만 한다[2]. 최근에는 이런 영향들이 고려된 정확한 특성들을 파악하기 위해 3차원 유한 요소 해석이 기존의 2차원 유한 요소 해석 대신에 3차원 형상을 가진 전자기 기기의 설계에 사용되어지고 있다. 3차원 유한 요소 해석은 3차원 전자계를 다룰 수 있을 뿐만 아니라 경험적 요소들의 사용을 줄일 수 있다.

BLDC 모터의 자석의 높이는 고정시킨 상태에서 코어(Core or Teeth) 높이의 변화에 따른 3차원 코깅 토크의 해석을 통해 높이의 비에 대한 2차원 결과와 3차원 결과들 사이의 상관 오차에 대한 연구를 수행하였다.

최근에 구조역학 분야에서 소개된 설계 민감도 해석(Design Sensitivity Analysis, DSA)은 설계, 해석, 생산 과정을 연결하여 획기적으로 개발 시간을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 구조역학 분야에서 잘 발달된 설계 민감도 해석을 이용하여 정자기장의 형상 설계를 위한 민감도 해석을 개발하였다[3]. 정자기장의 변분식을 해석적으로 미분함으로써 형상 설계 민감도 해석을 위한 수식을 얻어내었으며 이때 연속체 역학의 물질 미분이 이용되었다. 그리고 선형 형상 함수를 도입하여 설계 민감도를 수치적으로 구하기 위한 불연속화된 민감도 공식을 유도하였다. 이러한 형상 설계 민감도 해석을 하기 위해 필요한 영역 설계 속도장은 CAD에 기초한 유한차분법을 이용하여 구해진 경계 속도장(경계 변위법)을 통

해 얻어내었다[4]. 이렇게 유도된 수식들은 MAGSEN이라는 본 연구를 통해 개발된 프로그램에서 연속 설계 민감도를 계산하는 데에 사용되었다. 개발된 프로그램은 유용성과 실용성을 보이기 위하여 BLDC 모터의 코깅 토크를 줄이는 형상 최적 설계에 적용되었다. MAGSEN에 의해 설계 민감도가 계산되었으며, 결과의 정확성을 확인하기 위하여 유한차분법을 이용하여 구한 민감도와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 모터의 유한요소해석

그림1의 8P12S BLDC 모터는 효율이 높을 뿐만 아니라 속도와 위치 제어가 쉽기 때문에 하드디스크에서 스핀들(Spindle) 모터로 많이 사용되어지고 있다. 하지만 코어와 영구자석의 자화된 극 사이의 상호작용에 의해 유발되는 코깅 토크 때문에 원치 않는 진동이 발생할 뿐만 아니라 제어하는 데에도 어려움이 따른다.

그림2의 (a)와 (b)는 각각 2차원과 3차원 유한요소 해석을 하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 FLUX2D와 3D로 만든 유한요소 모델들이다. 기하학적인 특성과 전기적인 성질로 인하여 1/4 모델을 해석하여도 전체 자기장의 분포를 알아낼 수 있다. 유한요소 해석에 사용된 물성치는 표1에 나타내었다.



그림 1. BLDC 모터

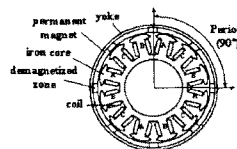


그림 2. 2차원 모델

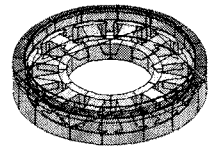


그림 3. 3차원 모델

표 1. 물성치

요소 이름	Relative Permeability	Coercive Force [kA/m]
Core	4000	
Yoke	2000	
N-magnet	1.15	484
S-magnet	1.15	-484

본 연구에 사용된 BLDC 모터는 그림4와 같이 자석과 코어의 높이가 다를 뿐만 아니라 모터의 축 방향으로도 비대칭이다. 또한 2차원 유한요소해석은 축 방향으로 길이가 무한대라고 가정하고 해석을 하기 때문에 그 방향으로의 프린징 및 누설 자계의 효과가 전혀 고려되지 않는다. 따라서 실제 모터의 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 3차원 유한요소해석 결과와의 비교가 무엇보다 필요하다. 그림5는 그림4에 나타난 모터의 2차원과 3차원 코깅 토크 해석결과를 실험치와 비교하여 나타낸 것이다.

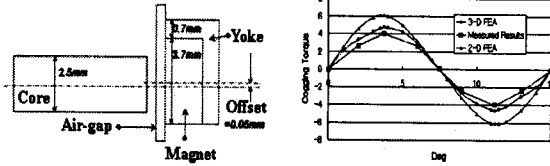


그림 4. 축 방향으로의 단면 그림 5. 코깅 토크 비교

표2에서는 BLDC 모터의 자석의 높이는 고정시킨 상태에서 코어 높이의 변화에 따른 각각의 2차원과 3차원 결과들 사이의 상관 오차에 대한 연구를 하기 위한 4 가지 경우를 나타낸다. 그림6은 각각의 경우에 대한 코깅 토크의 최대치들의 변화 추이이다. 2차원의 경우에는 코어의 높이가 감소할수록 코깅 토크 값이 선형적으로 감소하지만 3차원 경우에는 프린징 및 누설자계의 영향으로 그렇지 않다.

그림7은 자석과 코어의 높이의 비에 따른 2차원과 3차원 유한요소해석 결과 사이의 상대오차를 나타낸다. 즉, 자석과 코어의 비가 2.3보다 크거나 1.5보다 작을 경우에는 2차원 유한요소해석 결과의 정확성이 감소하게 된다.

표 2. 코어 높이의 변화(자석 높이 고정)

경우	자석의 높이	코어의 높이
1	2.5mm	3.0mm
2		2.5mm
3		2.0mm
4		1.5mm

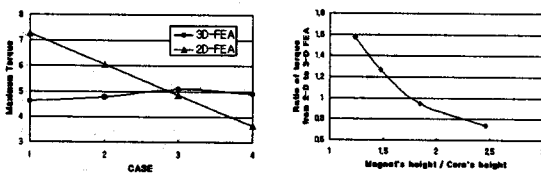


그림 6. 변화 추이

그림 7. 상대 오차

2.2 정자기장의 형상 설계 민감도

모든 정자기장 문제에서, 자기 벡터 포텐셜에 대한 변분식을 얻기 위해서 지배 (governing) 방정식의 양변에 가상의 벡터 포텐셜 \bar{A} 를 곱하고 영역적분을 한다. 이때 정자기장 해석에 쓰이는 일반적인 자속 평행과 자속 수직 경계 조건을 적용한다. 이 결과는 식 (1-3)에서 나타낸 것과 같이 A 와 \bar{A} 에 대한 쌍선형 형태 (bilinear form) $a_o(A, \bar{A})$ 로 나타낼 수 있고 우변은 \bar{A} 에 대한 선형 형태 (linear form) $l_o(\bar{A})$ 로 나타낼 수 있다(3).

여기서 H, J, B, M, \bar{A} 는 각각 자기장의 세기, 전류 밀도, 자속 밀도, 영구 자석에서 단위 부피당 자기

쌍극자 모멘트, 그리고 허용 벡터 포텐셜 공간(the space of admissible vector potential)을 나타낸다.

$$a_o(A, \bar{A}) = l_o(\bar{A}) \quad \text{for all } \bar{A} \in \bar{A} \quad (1)$$

$$a_o(A, \bar{A}) = \int \int \int_{\Omega} B^i(A) H^i(\bar{A}) d\Omega \quad (2)$$

$$l_o(\bar{A}) = \int \int \int_{\Omega} (J^i \bar{A}^i + e_{ijk} M^i \bar{A}^j) d\Omega \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서처럼 오른쪽 위첨자는 벡터 요소를 오른쪽 아래첨자는 편미분을 의미한다. 또한 e_{ijk} 는 아인슈타인 순환기호(permutation symbol)이다.

한편 자기장에서의 각종 목적함수를 다음과 같은 일반적인 적분식 (4)로 표현이 가능하다.

$$\Psi = \int \int \int_{\Omega} g(B(A)) d\Omega \quad (4)$$

이때 g 는 각 인자에 대해 연속적으로 미분이 가능한 함수이다. 목적함수 Ψ 를 형상 설계 변수로 미분하면 다음과 같은 설계 민감도 식을 얻을 수 있다(3).

$$\Psi' = \int \int \int_{\Omega} g_{B^i(A)}(B(A)) B^i(\dot{A}) d\Omega - \int \int \int_{\Omega} g_{B^i(A)}(B(A)) e_{ijk} (\nabla A^{kT} V_j) d\Omega + \int \int \int_{\Omega} g(B(A)) \text{div} V d\Omega \quad (5)$$

식 (5)에서 벡터 포텐셜의 전미분 값 \dot{A} 이 설계 속도장 V 의 함수이기 때문에 Ψ 에 대한 직접적인 표현으로 나타낼 수가 없다. 따라서 보조 변수법(adjoint variable method)을 이용하여 V 에 대한 직접적인 식으로 표현한다면 다음과 같다(3).

$$\Psi' = \int \int \int_{\Omega} [H^i(\lambda) e_{ijk} (\nabla A^{kT} V_j) + B^i(A) v e_{ijk} (\nabla \lambda^{kT} V_j)] d\Omega - \int \int \int_{\Omega} [B^i(A) H^i(\lambda)] \text{div} V d\Omega + \int \int \int_{\Omega} [(\nabla \lambda^{iT} V) \lambda^i + e_{ijk} (\nabla M^{iT} V) \lambda^j] d\Omega + \int \int \int_{\Omega} [2(J^i \lambda^i + e_{ijk} M^i \lambda^j) \text{div} V] d\Omega - \int \int \int_{\Omega} g_{B^i(A)}(B(A)) e_{ijk} (\nabla A^{kT} V_j) d\Omega + \int \int \int_{\Omega} g(B(A)) \text{div} V d\Omega \quad (6)$$

이때 보조 변수 λ 는 다음의 변분식을 이용하여 구할 수 있다.

$$a_o(\lambda, \bar{\lambda}) = \int \int \int_{\Omega} g_{B^i(A)}(B(A)) B^i(\bar{\lambda}) d\Omega \quad (7)$$

2.3 BLDC모터의 형상 최적설계

앞 절에서 유도된 설계 민감도식을 이용하여 8P12S BLDC 모터의 코깅 토크를 줄이기 위한 형상 최적설계를 수행하였다.

그림8과 같이 pro/Engineer를 이용하여 모터의 CAD 모델을 만들었다. 설계변수 중의 하나인 코어의 형상은 3개의 제어점 (control point)을 가진 B-spline으로 모델링 하였다(4). 대칭 조건을 고려하면 1개(C_2)만이 설계변수가 되며 코어의 중심으로부터 상판까지의 두께와 하판까지의 두께를 추가하여 그림9에서 3개의 파라미터를 설계변수로 잡았다.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3] \quad (8)$$

최적설계를 위한 설계변수들의 구속조건은 코어 형상의 평균 반지름이 최초 모델의 1% 한계범위 이내에 존재하도록 정하였다.

만들어진 CAD 모델과 범용 유한요소해석 프로그램 중의 하나인 ANSYS를 이용하여 그림9와 같은 유한요소 모델을 만들 수 있다. 만들어진 유한요소 모델을 이용하여 해석을 수행하게 되면 설계 민감도를 얻기 위해 필요한 A와 λ를 구할 수 있으며 설계 속도장 V만을 구하면 된다.

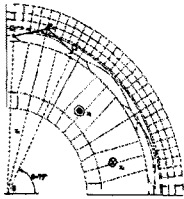


그림 8. CAD 모델

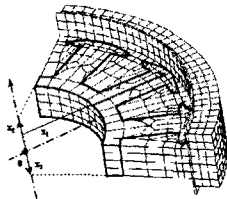


그림 9. 설계변수

설계 속도장을 구하기 위해 본 연구에서는 CAD 모델과 연결성이 우수한 경계 변위법(boundary displacement method)을 사용하였다. 즉 CAD 모델에서 유한차분법을 이용하여 임의의 설계변수에 대한 경계변위를 구한 후 이를 유한요소 모델의 경계조건으로 준 후 유한요소해석을 하면 그 결과는 설계 속도장이 된다[4].

BLDC 모터의 회전자의 위치에 대한 자기 에너지의 변화를 줄이게 되면 코깅 토크도 함께 줄일 수가 있다. 따라서 형상 최적설계를 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$f = \sum_{i=1}^{NR} (W_i - W_m)^2 \quad (9)$$

여기서 W_i 는 회전자의 각 위치에서의 자기 에너지이고 W_m 는 이들의 평균값이다. 그리고 목적함수의 구배(gradient)는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$f' = \sum_{i=1}^{NR} 2(W_i - W_m) W_i' \quad (10)$$

이렇게 얻어진 목적함수의 구배는 형상 최적설계를 수행하는데 쓰여진다. 표3은 0°에서 구한 연속설계민감도(continuum)의 값과 재해석을 통한 유한차분 설계민감도 값을 비교한 것이다.

표 3. 민감도 비교

	$\nabla \Psi$ (FFDM)	Ψ' (continuum)	$\Psi' / \nabla \Psi$ (%)
x_1	-3.471E-01	-3.237E-01	93.27
x_2	-3.200E-02	-3.071E-02	95.96
x_3	-3.200E-02	-3.064E-02	95.75

목적 함수를 최소화하기 위한 설계변수들의 값을 자동으로 얻기 위해서 순차 선형 프로그램(sequential linear programming, SLP) 알고리즘이 최적설계 알고리즘으로서 사용되어졌다. 그리고 SLP의 문제는 범용 최적설계 프로그램인 DOT(design optimization tools)을 사용하여 풀었다.

표4에서 보여지듯이 4번의 최적설계 되풀이 과정(step)을 통해 코어의 최적 형상과 높이를 얻었다. 그

림10에서 볼 수 있듯이 시스템 에너지의 변화와 코깅 토크가 최초보다 약 30% 가량 줄었다.

표 4. 목적함수와 설계변수들의 변화 추이

과정 (step)	$f(x)$	$x_1[m]$	$x_2[m]$	$x_3[m]$
0(초기)	0.012118	0.01380	0.00125	-0.00125
1	0.011155	0.013938	0.0012875	-0.0012875
2	0.010793	0.013979	0.0013125	-0.0013125
3	0.010575	0.014007	0.00135625	-0.00135625
4	0.010520	0.014007	0.001375	-0.001375

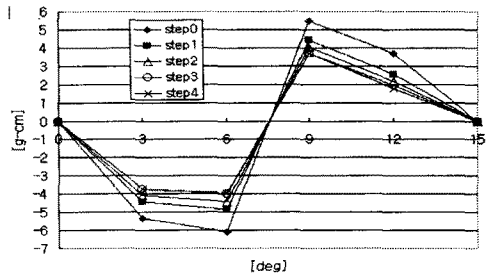


그림 10. 코깅 토크의 변화 추이

3. 결 론

BLDC 모터의 자석과 코어의 높이 비의 변화에 따른 2차원과 3차원에서의 코깅 토크 해석을 통해서 자계의 프린팅 및 누설을 무시하는 2차원 유한요소해석과 이들을 고려한 3차원 유한요소 해석 결과 사이의 상관관계에 대한 연구를 수행하였다. 이 결과를 통해 자석과 코어의 높이의 비가 다른 BLDC 모터의 2차원 유한요소해석 사용의 적합성에 대한 판별을 할 수 있을 것이다.

또한, 본 연구에서는 영역 적분법을 이용하여 3차원 정자기장의 연속 형상 설계 민감도 해석을 개발하였으며 그 정확성과 효율성을 확인하기 위하여 BLDC 모터의 코깅 토크를 줄이는 형상 설계 민감도 해석 및 최적설계를 수행하였다. 결국, 본 연구는 설계자에게 정확하고 효율적인 설계 환경을 제공하게 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] E. Logcais, J-P. Yonnet, J-L. Coulomb, G. Meunier, S. Gitosusastro, "Comparison between 3D, 2D finite element methods and analytical calculations for electromagnetic problems", IEEE Trans. on Mag., Vol. 24, No. 1, PP. 66-69, 1988
- [2] Wu, W., Lovatt, H. C. and Dunlop, J. B., "Analysis and Design Optimization of Magnetic Couplings Using 3D Finite Element Modeling", IEEE Trans. on Mag., Vol. 33, No. 5, PP. 4083-4085, 1997
- [3] Wang, S. M. and Jeong, S. K., "Continuum Shape Design Sensitivity Analysis of Magnetostatic Field Using Finite Element Method", IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 1998. 6
- [4] S.M.Wang and S.H.Ki, "Configuration Design Sensitivity Analysis using CAD-based Design Velocity Field", Proceeding of 2nd WCSMO Conference, Vol. 1, PP. 265-270, 1997. 5