

유한요소해석을 이용한 전기기기의 설계

■ 정재우 / 한양대학교
 ■ 정인성, 김영균 / 전자부품연구원

I. 서론

21세기 정보·지식 집약형 산업사회에서 컴퓨터 활용에 대한 요구는 날로 커지고 있다. 이러한 시대적 요구에 따라 대학에서의 컴퓨터 관련 교육은 어느 특정 전공분야를 막론하고 그 중요성이 크게 인식되고 있으며, 그 중에서도 자연과학현상을 수학적 모델링을 거쳐서 수치적으로 컴퓨터 해석하는 방법은 기초학문 연구분야뿐만 아니라 고도화된 산업사회에서의 중요성이 날로 증대되고 있는 실정이다[1].

수치해석의 기법에는 여러 가지가 있지만 특히 유한요소해석 기법은 여러 공학분야에서 널리 사용되고 있다. 유한요소해석은 1943년에 리하르트 쿠랑이 Ritz method를 사용하여 진동시스템의 근사해를 시스템 범함수의 변분원리(variational calculus)를 이용해 수치해석 하는 방법을 제안하는 것으로 시작되었다. 얼마 뒤 1956년에 논문을 출간함으로써 수치해석의 새로운 정의를 성립하였다. 그 후 구조, 열, 전자기, 유체등과 같은 여러 분야에 걸쳐 사용되고 있다. 주로 전자기적 현상을 응용하는 전기기기의 설계에 있어 유한요소해석은 전자기력, 에너지, 자속밀도 등의 산정에 많이 사용되고 있다 [2].

최근 전기구동시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며, 특히 환경문제의 대두로 친환경 자동차에 대한 관

심이 높아지면서 기존의 내연기관과 전기기기를 함께 구동원으로 사용하는 하이브리드 자동차와 순수 전기기기로 구동하는 전기자동차 또는 수소연료전지 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 친환경 차량의 구동원으로 응용되는 전동기는 magnetic torque와 reluctance torque를 동시에 사용하여 출력밀도가 비교적 높은 매입형 영구자석 동기전동기(Interior permanent magnet synchronous motor; IPMSM)가 사용되며, 유한요소해석을 이용하여 이러한 IPMSM이 효과적으로 설계가 가능하다. 비선형성을 고려할 수 있는 유한요소해석을 이용하여 IPMSM의 역기전력, d, q축 인덕턴스, 철손 등을 산정할 수 있으며 이를 통하여 특성해석의 신뢰성을 높일 수 있다. 이렇게 유한요소해석은 전기기기 설계에 있어 유용하게 사용되며, 본 글에서는 특히 IPMSM의 설계에 있어 유한요소해석의 사용 범위에 대해서 구체적으로 다루어 본다.

II. DESIGN OF IPMSM

1) IPMSM의 설계 process

IPMSM의 설계과정은 설계자의 주관에 따라 미세한 차이를 보이지만 전체적인 설계과정은 비슷할 것이다. 본 글에서는 저자의 연구실에서 주로 사용하는 설계과정에 대해 소개하며 IPMSM의 설계과정에서 유한요소

해석이 어떠한 형태로 사용되는지에 대해서 다루었다.

그림 1.에서는 IPMSM 설계과정의 개략적인 순서도를 보여준다. 전동기의 설계에 있어 최우선으로 검토되어야 하는 것이 적절한 극 수와 슬롯 수의 조합의 선택이다. 이 때 구조적인 제약을 고려함과 동시에 진동 및 소음에 대한 검토가 이루어진다. 극 수와 슬롯 수의 조합이 결정된다면 전동기의 설계 목표 파라미터 분석이 이루어진다. 이 때 전동기에서 가장 중요한 파라미터인 역기전력과 인덕턴스의 변화에 따라 선전류, 선간전압, 효율, 역율, 전류 위상 각과 같은 여러 가지 특성의 변화 양상을 판단한 후 목표 설계 파라미터 범위를 결정한다. 그 후 공간고조파 해석을 통하여 역기전력의 범위가 목표로 하는 범위를 만족하는지 판단한 후 초기 모델을 결정한다. 결정된 초기모델을 유한요소해석을 통하여 역기전력, 인덕턴스와 같은 파라미터를 확인하고 전압 및 기계방정식을 고려하여 특성을 확인한다. 이 때 특성을 만족한다면 목적함수를 설정하고 최적설계를 수행하는데 이 때 목적함수는 역기전력의 왜형을, cogging torque, torque ripple과 같이 여

러 가지 특성들이 될 수 있으며 전기기기의 사용 목적에 따라 달라진다. 최적설계를 통하여 결정된 최적모델을 대상으로 다시 한번 유한요소해석을 통하여 파라미터들을 산정하게 되고 등가회로 해석을 이용하여 특성해석을 수행함으로써 설계된 전동기의 특성을 최종적으로 확인하게 된다.

2) 극 수 및 슬롯 수에 따른 특성검토

최초의 설계에 있어 극 수와 슬롯 수 선정은 매우 중요하다. 극 수와 슬롯 수의 선정은 구조적인 제약조건에 의해서 결정되기도 하지만 진동 및 소음 측면에서 우수한 조합을 선정해야 한다. 표 1.은 세 가지 극수에 대해 어떠한 슬롯이 진동 및 소음에 우수한 특성을 나타내는지 보여준다. 표에 나타난 각각의 항목은 다음의 수식으로부터 산정된다[3].

$$\mu = \frac{|0.5r_\lambda \mp s_1|}{p} = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

$$r_\lambda = 2(\mu p \pm ks_1) \quad (2)$$

$$f_\lambda = 2\mu f \quad (3)$$

여기서 μ 는 rotor MMF harmonic이고 p 는 극쌍수를 의미한다. 그리고 s_1 은 슬롯 수이며 f 는 입력전류의 기본파 주파수이다. r_λ 는 normal force의 order를 나타내며 $1/r_\lambda^4$ 에 비례하여 진동이 발행한다. 이 값이 작을 수록 진동 및 소음에 취약한 특성을 보인다. 이것은 극 수와 슬롯 수에 따라 전기자 기자력의 분포가 정현적으로 분포하지 못하는 데에 기인한다.

3) Parametric design

극 수와 슬롯 수 조합을 선택한 후 원하는 특성을 만족할 수 있는 파라미터 범위를 결정해야 한다. 전동기에 있어 특성을 결정짓는 가장 중요한 파라미터는 역기전력과 인덕턴스이다. 설계에 앞서 인덕턴스와 역기전력의 설정 목표범위를 결정해야 된다. 역기전력과 인덕턴스 변화에 따른 효율, 역율, 선전류, 전류 위상 각, 선간전압, 출력등을 분석하여 가장 최적의 파라미터 범위를 결정하게 되는데 이것을 E-L map이라고 하

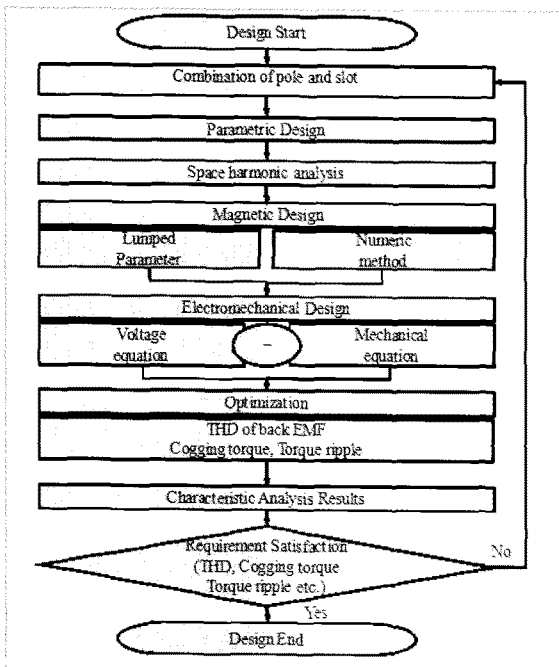


그림 1 Design process of electric machine

며, 그림 2와 같다 [4]. 모든 속도영역에서 특성을 만족시켜야 하므로 E-L map은 각 속도 별로 구성하는 것이 좋지만 시간과 노력을 단축시키기 위하여 가장 중요한 운전 구간인 기저속도와 최대속도에서만 구성하여 설계 목표 파라미터 범위를 결정한다.

4) 공간고조파 해석 (Space harmonic analysis)

E-L map을 구성하여 설계 목표 파라미터 범위를 결정한 후 치수 제약조건을 고려하여 대략적인 치수를 결정하여 초기설계를 한다. 이 때 유한요소해석을 이용하여 초기설계를 할 수도 있지만 모델링에 있어 많은 시간이 필요하므로 공간고조파 해석을 이용하여 초기설계를 수행한다. 공간고조파 해석이란 전동기의 복잡한 형상을 단순화 한 후 전자계 지배 방정식을 푸는 해석적인 방법으로써 정밀도는 다소 떨어지나 전동기의 특성을 짧은 시간에 계산할 수 있으므로 초기설계 단계에서 유용하게 사용된다. 또한 형상 및 치수 변화에 따른 전동기의 파라미터 분석에 용이하므로 치수변화에 따른 특성 변화의 양상을 볼 수 있다. 기본 원리는 그림 3과 같다. 여기에는 몇 가지 가정이 있으며 다음과 같다[5].

공간고조파 해석을 통하여 표 2와 같이 전동기의 대략적인 치수를 결정할 수 있다. 이 때 역기전력이 E-L map으로부터 결정된 설계 목표 파라미터를 만족하는 초기모델이 결정된다. 그림 4는 초기모델의 역기전력 파형을 나타내며 이렇게 산정된 역기전력은 목표 파라미터 범위를 만족해야 한다.

표1 극 수와 슬롯 수에 따른 noise/vibration order

8극				10극				12극			
S_1	r_2	μ	f_s [Hz] @1000rpm	S_1	r_2	μ	f_s [Hz] @1000rpm	S_1	r_2	μ	f_s [Hz] @1000rpm
9	2	2	266.7	9	2	2	333.3	9	6	2, 3	400, 600
12	8	2, 4	266.7, 533.3	12	4	2	333.3	12	12	1, 3	200, 600
15	2	7, 8	933.3, 1066.7	15	10	2, 4	333.3, 666.7	15	6	2, 3	400, 600
18	4	4, 5	533.3, 666.7	18	4	4	666.7	18	12	2, 4	400, 800
21	6	3	400	21	2	4	666.7	21	6	3, 4	600, 800
24	8	5, 7	666.7, 933.3	24	2	5	833.3	24	12	3, 5	600, 1000

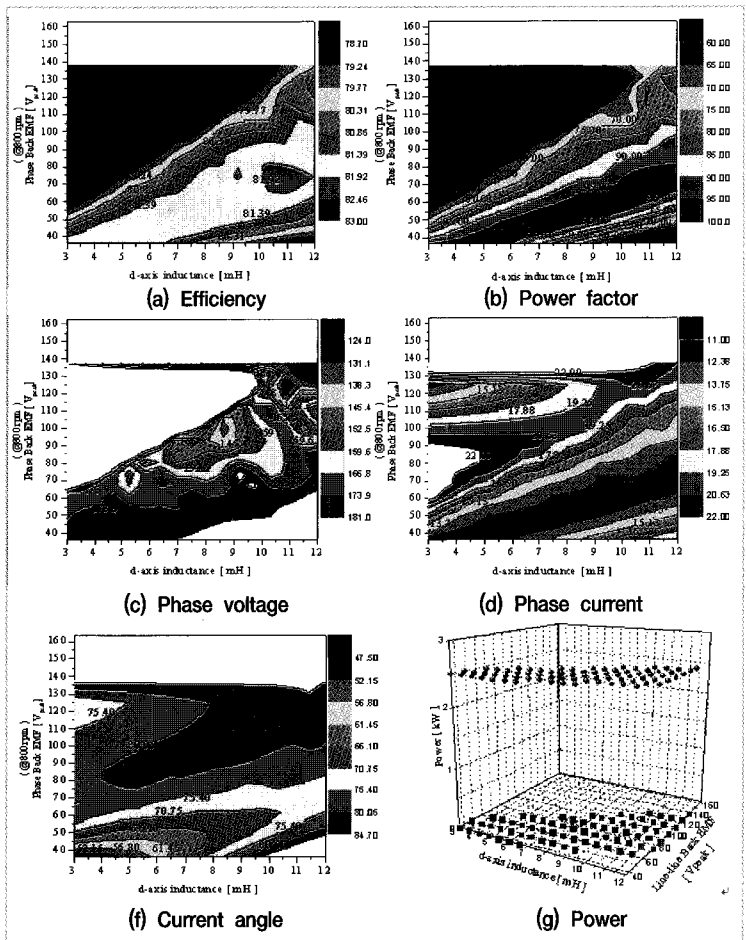


그림 2 Parametric design (최대 속도에서의 E-L map)

- 자성재질의 비 투자율은 무한대이며 등방성 재질이다.
- 영구자석의 감자특성은 선형적이다.
- End effect는 무시한다.
- 고정자의 권선은 대칭적이다.
- 와전류는 무시한다.

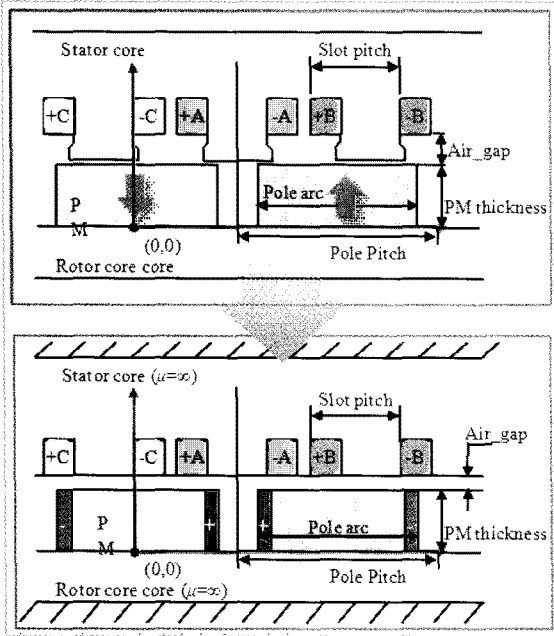


그림 3 공간고조파 해석의 기본 원리

표 2 공간고조파 해석법을 통하여 결정된 초기모델

항목	값	비고
극 수	P_n	μ
슬롯 수	S_w	
회전자 외 반경 [mm]	R_{ro}	TRV를 통하여 결정
영구자석 두께 [mm]	t_m	
공극 [mm]	g	
영구자석 각도 [°]	P_a	Pole pitch의 80%
영구자석 (Neomax 42AH) Br [T]	B	
영구자석 recoil permeability	1.05	
적층길이 [mm]	L_{stk}	
상당 직렬 턴 수 [turns]	N_{ph}	

5) Magnetic design

공간고조파 해석을 수행하여 역기전력이 설계목표 파라미터 범위를 만족한다면 등가회로 해석을 통하여 인덕턴스를 산정한다. 이 때 인덕턴스는 회전자 rib의 포화를 고려하여 산정한다. 여기서 rib는 극 간의 flux가 누설되는 통로이다. 그림 5.는 IPMSM의 d, q축의 등가회로를 보여주며 식 (4), (5)는 d, q축 인덕턴스 산정 수식을 나타낸다.

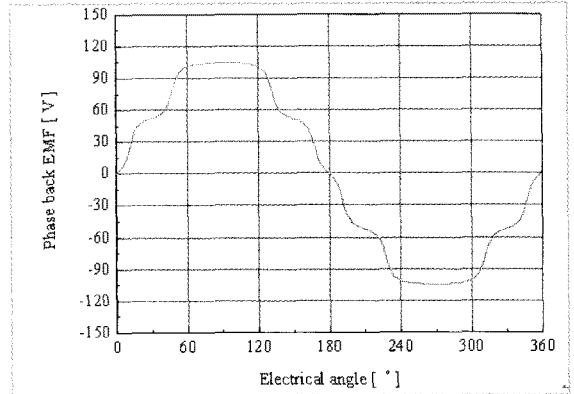


그림 4 공간고조파를 이용하여 산정된 역기전력 파형

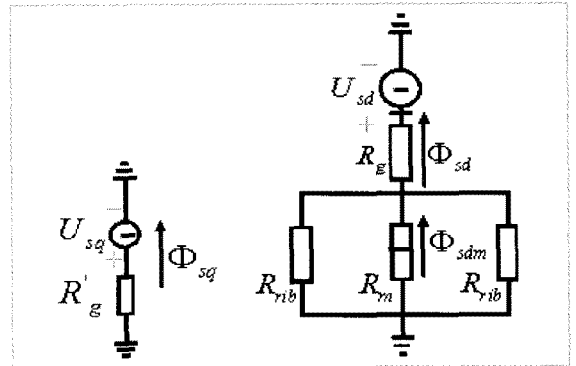


그림 5 IPMSM의 d, q축 등가회로

$$L_q = \frac{3}{\pi} \mu_0 \left(\frac{k_w N}{2p} \right)^2 \frac{DL_{stk}}{g'}$$

$$L_d = \frac{\Lambda_{1d}}{I_d} = \frac{3}{\pi} \mu_0 \left(\frac{k_w N}{2p} \right)^2 \frac{DL_{stk}}{g} \left[1 - \frac{8 R_m K}{\pi^2 R_t} \right]$$

μ_0 : air permeability

k_w : winding factor

N : conductor number

p : pole number

D : Inner diameter of the stator

L_{stk} : Stack length

g' : Effective Air - gap length

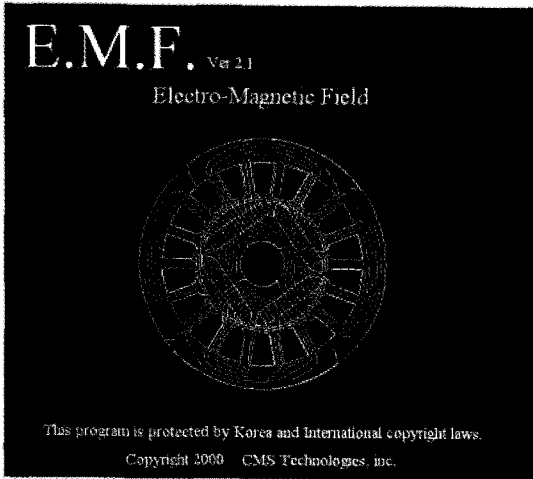


그림 6 유한요소해석 프로그램

공간고조파 해석과 등가회로해석을 통하여 산정된 초기모델의 역기전력과 인덕턴스는 최종적으로 유한요소해석을 통하여 검증한다. 유한요소해석은 자기회로의 비선형성과 누설 등을 고려할 수 있으므로 보다 정확한 파라미터 값을 산정할 수 있다. 특히 전류와 전류 위상 별로 변화하는 d, q축 인덕턴스의 산정이 가능하다. 이러한 유한요소해석은 정확하지만 해석에 있어 시간과 노력이 많이 든다는 단점이 있다. 그림 6.은 저자의 연구실에서 개발한 유한요소해석 프로그램이며 이 프로그램을 사용하여 초기모델의 역기전력과 인덕턴스를 산정한 결과는 그림 7.과 같다.

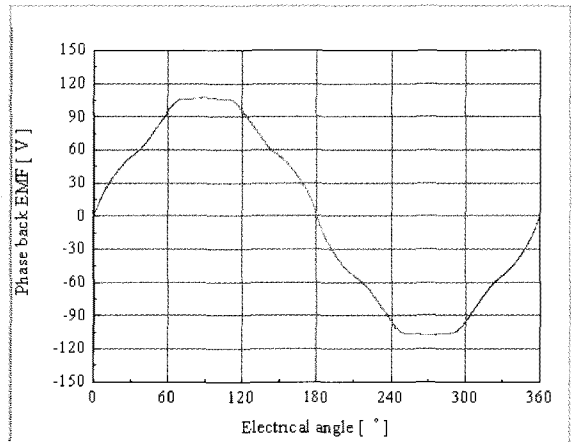
유한요소해석을 이용한 인덕턴스 산정은 그림 8.의 벡터도와 무 부하 쇠교자속량과 전류 및 전류 위상 각에 따른 부하 시 쇠교자속량의 크기와 위상 관계를 통하여 식 (6), (7)로부터 산정된다 [6].

$$L_d = \frac{\psi_0 \cos \alpha - \psi_a}{i_d} \quad (6)$$

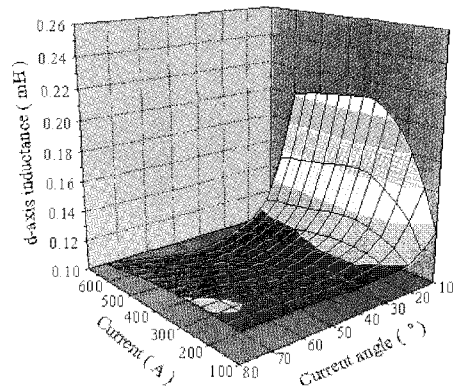
$$L_q = \frac{\psi_0 \sin \alpha}{i_q} \quad (7)$$

$$i_a = -I_a \sin \beta$$

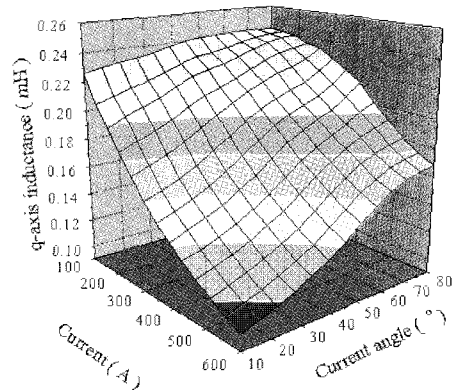
$$i_q = I_a \cos \beta$$



(a) 초기모델의 역기전력



(b) d축 인덕턴스 프로파일



(c) q축 인덕턴스 프로파일

그림 7 유한요소 해석을 이용한 초기모델의 파라미터 산정

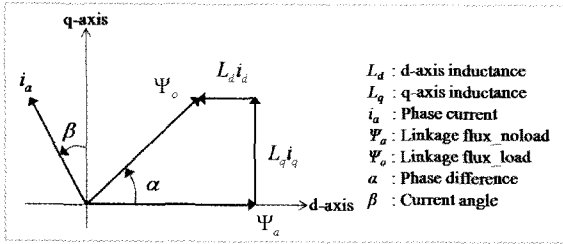


그림 8 유한요소 해석을 이용한 초기모델의 파라미터 산정

6) Voltage equation

유한요소해석을 이용하여 산정한 초기모델의 파라미터를 바탕으로 특성을 분석한다. 이 때 IPMSM의 특성 해석에는 주로 d, q축 등가회로해석이 이용된다. 그림 9는 IPMSM의 d, q축 등가회로를 나타내고 이를 통하여 전압방정식을 유도할 수 있으며 식 (8), (9)와 같다.

$$V_a = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_s}{R_c} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{R_s}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s L_q \\ \omega_s L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_s \Psi_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d - i_{cd} \\ i_q - i_{cq} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \omega_s \begin{bmatrix} -\frac{L_q i_{oq}}{R_c} \\ \frac{(\Psi_a + L_d i_{od})}{R_c} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 v_d, v_q 는 각각 d, q축 전압을 의미하고 i_d, i_q 는 각각 d, q축 전류를 의미한다. 그리고 i_{cd}, i_{cq} 는 각각 d, q축 철손분 전류이고 ω_s 는 전기각속도를 의미한다. R_s 와 R_c 는 각각 권선저항과 철손저항이다.

전압방정식에 유한요소해석을 이용하여 산정된 각각의 파라미터를 입력하여 해석을 한 후 토크, 효율, 손실 등 특성분석을 빠른 시간 내에 수행 할 수 있으며 각각은 식 (10)-(12)와 같다 [7].

$$T = P_n \left\{ \Psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \right\} \quad (10)$$

$$W_c = R_s I_a^2 = R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (11)$$

$$W_i = R_c I_{co}^2 = R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2)$$

$$\eta = \frac{P}{P + W_{loss}} = \frac{P}{P + W_c + W_i} \quad (12)$$

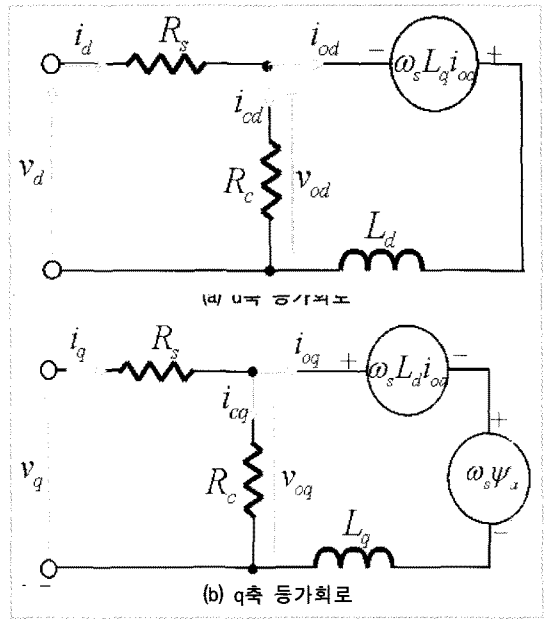


그림 9 IPMSM의 d, q축 등가회로

7) Mechanical characteristics

IPMSM의 설계에 있어 전기적 특성을 만족시키는 부분뿐만 아니라 기계적 소음 저감 설계 또한 중요하다. 대부분의 소음은 전자기적 가진력에 의한 소음이며 설계 단계에서 미리 예상하고 형상설계를 통하여 전자기적 가진력을 최소화 시켜야 한다. 이 때 유한요소해석을 이용하여 전자기적 가진력을 계산하게 된다. 전자기적 가진력에는 global force와 local force로 구분되며 global force에는 cogging torque와 torque ripple이 있다. 그림 10은 유한요소해석을 통하여 산정한 cogging torque와 torque ripple의 산정 결과를 보여준다. IPMSM의 치 하나에서 받는 local force 또한 유한요소해석으로 산정할 수 있으며 그 결과는 그림 11과 같다. 이러한 전자기적 가진력을 저감시키기 위한 형상설계에 유한요소해석이 사용된다 [8].

8) Optimization

초기설계 이후 최적화된 모델을 찾기 위하여 실험계 획법과 연계된 반응표면론법을 사용하여 최적설계를 수행한다. 반응표면론법이란 목적함수에 대하여 각 설

계변수들의 상관관계를 통계적 방법을 통하여 분석하고 그 결과로부터 목적함수에 대한 설계변수들의 근사 등가 다항식을 구성하여 반응표면을 구성할 수 있다. 이 때 목적함수는 역기전력, 토크 또는 철손등 설계 목적에 적합하게 설계자의 임의로 설정할 수 있다. 이렇게 얻어진 반응표면을 통하여 설계변수의 최적포인트를 찾게 된다. 또한 설계변수의 변화에 대한 반응의 추이를 볼 수 있으므로 설계변수의 변화에 따른 목적함수가 변화하는 양상을 볼 수 있다. 그림 12.는 반응표면론법의 개략적인 원리를 나타낸다 [9].

9) Characteristics analysis

반응표면론법으로부터 결정된 최종모델에 대하여

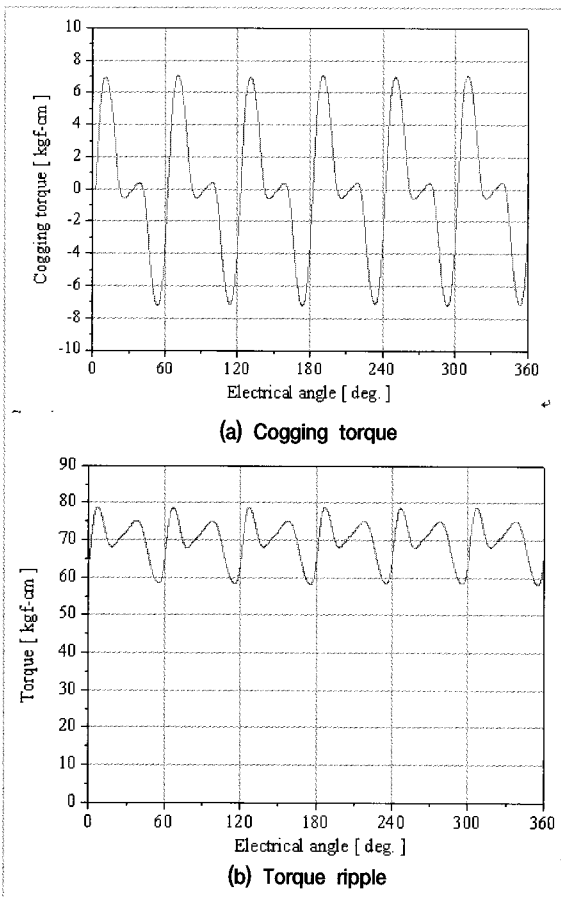


그림 10 유한요소해석을 이용한 Global force 해석

특성해석을 수행하여 최종적으로 확인작업을 하는데 특히 이 과정에서 등가회로 해석과 유한요소해석이 많이 사용된다.

i) T-N-I curve

우선 최적모델의 전반적인 전기적 특성이 설계 사양을 만족하는지의 여부에 대한 판단을 하기 위하여 등가회로 해석을 수행한다. 이 때 얻을 수 있는 결과로서 그림 13.과 같이 속도에 따른 토크, 전류, 단자전압, 전

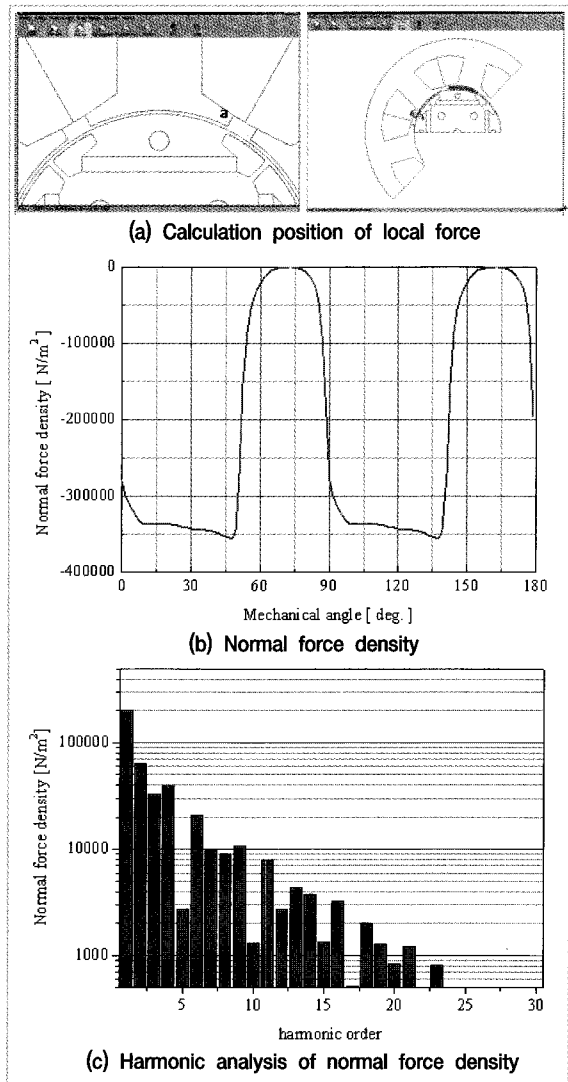


그림 11 유한요소해석을 이용한 Local force 해석

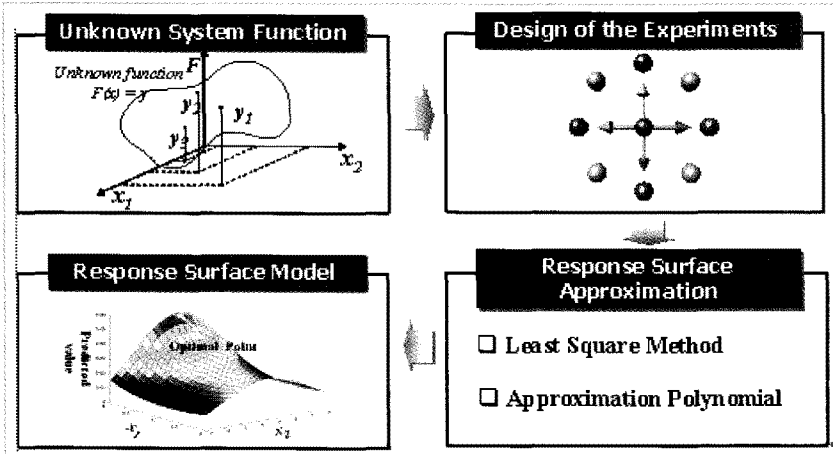


그림 12 반응표면론법

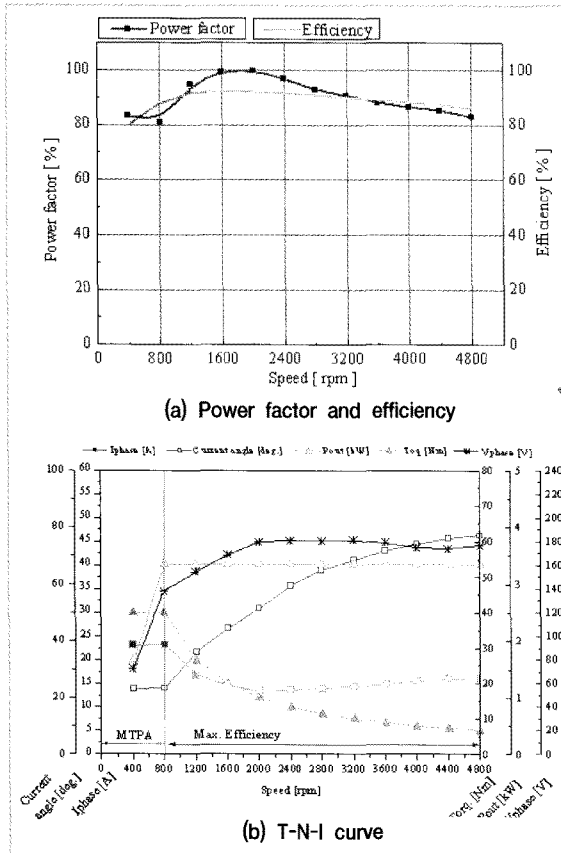


그림 13 등가회로 해석을 이용한 특성해석 결과

류 위상 각, 효율, 역율, 등을 해석할 수 있다. 앞서 설명하였듯이 등가회로 해석을 수행하기에 앞서 유한요

소해석을 이용하여 역기전력, d, q축 인덕턴스 프로파일과 같은 파라미터를 산정하고 등가회로에 입력하여 그 해를 구하게 된다.

ii) Coreloss analysis

전동기의 특성을 분석하는데 있어 손실해석은 중요한 부분을 차지한다. 전기기기의 손실에는 크게 동손, 철손, 기계손이 있으며 여기서 동손은

i2R 에 의해서 산술적으로 구할 수 있다. 하지만 철손의 경우 그 해석 방법이 복잡하므로 유한요소해석을 이용하여 예측할 수 있다. 그림 14.는 본 연구실에서 사용하고 있는 철손해석의 과정을 나타낸다. 무 부하 또는 특정한 부하 상태에서 유한요소해석을 수행한 후 회전자 위치에 따른 각 요소 별 자속밀도를 산출한다. 이렇게 산출된 자속밀도의 변화는 여러 고조파를 포함하고 있으므로 고조파분석을 통하여 기본파와 주파수별 고조파 크기를 분석한다. 각 주파수 별 자속밀도에 해당하는 철손 값을 철손 데이터로부터 불러들여 모든 고조파의 철손을 합산하고 모든 요소에 대하여 다시 합산하여 최종적으로 전동기 전체의 철손을 산정한다[7].

iii) Irreversible demagnetization

약 계자 제어를 주로 하는 IPMSM의 경우 특히 불가역 감자에 대한 특성해석을 수행해야 한다. 여기서 불가역 감자란 영구자석에 반작용 자계가 걸리게 되면 본래의 영구자석 특성을 잃어버리는 현상을 말하며 전기기기 성능에 치명적인 성능저하를 야기시킨다. 이러한 영구자석의 불가역 감자 또한 유한요소해석을 통하여 그 특성을 계산할 수 있다.

iv) Eddy current loss in PM

Nd-Fe-B 영구자석을 IPMSM에 적용할 경우 약 계자 제어 시 영구자석 내부에서는 전자기 유도법칙에 의하

여 전압이 유기되고 도전율을 가지는 영구자석 내부에서 와전류 손실이 발생한다. 이러한 와전류 손실은 영구자석의 온도를 상승시키고 불 가역 감자의 원인이 되므로 설계 단계에서 충분히 예상하고 저감시켜야 한다 [10]. 영구자석 내부의 와전류 손실 또한 유한요소해석을 이용한 과도해석을 통하여 산정할 수 있다. 그림

15.는 영구자석 내부의 와전류 손실을 해석하기 위한 3차원 모델과 해석결과로써 나타나는 와전류 분포를 나타낸다.

III. 결론

본 글에서는 전기기기 설계에 있어 유한요소해석이 어떻게 사용 되는지 설계 과정을 통하여 설명하였다. 컴퓨터의 발달로 유한요소해석은 전기기기 기술개발에 있어 혁신적인 발전을 가져온 것 만은 사실이다. 하지만 이러한 유한요소해석은 해석을 위한 모델링에 많은 시간이 걸리고 비선형성을 고려해야 되는 전기기기의 해석에 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 그러므로 어떠한 변수에 대한 영향을 분석하기 위하여 많은 노력이 필요하므로 설계 초기단계부터 유한요소해석으로 접근하는 것은 바람직하지 않다. 그리고 현상 자체를 이해하지 못하고 유한요소해석에만 의존할 경우 유한요소해석으로부터 나온 결과에 대한 분석을 할 수 없으므로 결과의 옳고 그름에 대한 판단을 할 수 없다. 전기기기의 설계는 본론에서 언급한 공간고조파 해석이나 등가회로해석을 최대한 활용하여 전기기기의 파라미터와 특성을 미리 예측하고 최종적으로 실제현상과 가장 근접한 해를 도출 할 수 있는 유한요소해석을 통하여 확인작업을 함으로써 설계가 진행되어야 할 것이다.

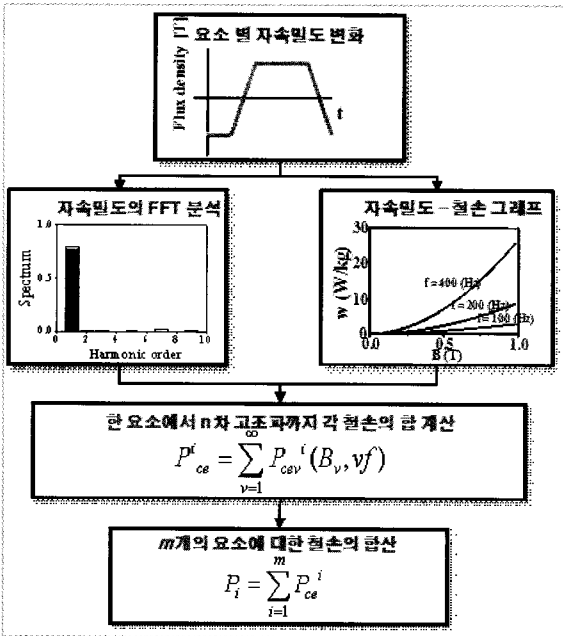


그림 14 유한요소해석을 이용한 철손해석 과정

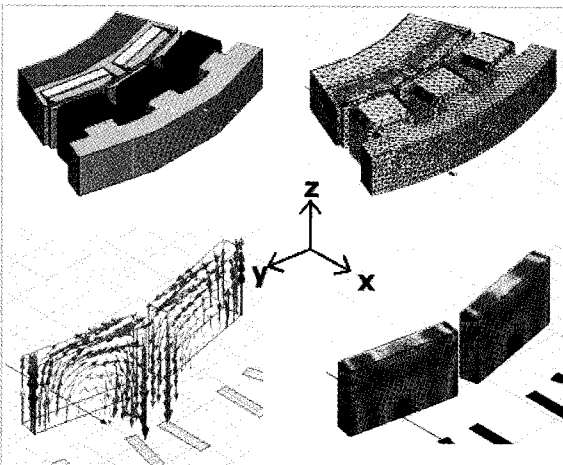


그림 15 영구자석 내부의 와전류 손실 해석

참고문헌

- [1] 홍준표, "컴퓨터수치해석," 문운당, 1991.
- [2] Grub, Kris W., "A process for investigating geometric sensitivity optimization of a vehicle structure," Ford Research Publication, EM-89, 1989.
- [3] Jacek F. Gieras, Chong Wang, Joseph Cho Lai, "Noise of polyphase electric motors," CRC, 2005.
- [4] Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Ji-Young Lee, Young-Kil Kwon, Young-Sik Jo, Seung-Kyu Baik, and Jae-Deuk Lee, "Parameteric design

- superconducting synchronous motor with 2D equivalent magnetic circuit network model," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no. 2, pp.1541-1544, June 2007.
- [5] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, and Gyu-Tak Kim, "A novel design of an air-core thepe permanent magnet linear brushless motor by space harmonics field analysis," IEEE Trans. Magn., vol.37, no. 5, pp.3732-3736, Sept. 2001.
- [6] Yoji Takeda, Nobuyuki Matsui, Shigeo Morimoto, and Yukio Honda, "Design and control of interior permanent magnet synchronous reluctance motor," Ohmsa, 2001.
- [7] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, and Jin Hur, "Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Magn., vol.42, no. 4, pp.1303-1306, Apr. 2006.
- [8] Sang-Moon Hwang, Hong-Joo Lee, Tae-Soon Kim, Yoon-Ho Jun, and Jung-Pyo Hong, "The influence of electromagnetic force upon the noise of an IPM motor used in a compressor," IEEE Trans. Magn., vol.42, no. 10, pp.3494-3496, Oct. 2006.
- [9] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, "Response Surface Methodology," John Wiley & Sons
- [10] Jae-Woo Jung, Sung-Ill Kim, and Jung-Pyo Hong, "Optimum design for eddy current loss reduction to prevent irreversible demagnetization," Journal of The Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Vol. 56, pp.55-59, May 2007.