

전기기기의 해석 및 설계 기술

한송엽, 정현교, 전장성
 (서울대 전기공학부 교수, 동 대학원 박사과정)

1. 서론

일반적으로 전기기기는 수차, 엔진, 증기터어빈 등 구조 내에 에너지 물질 즉, 물, 기름, 가스 등을 유입하여 기계 에너지를 발생시키는 동력 장치와는 달리 시스템의 일부를 구성하는 도선 내의 전자 운동 및 영구 자석의 자장 등에 의해 에너지를 발생시키는 장치이다. 일반 동력 기계는 금속을 주요 재료로 사용하지만, 전기기기에서는 금속 외에 다량의 자성 재료 및 유기, 무기질의 절연 재료 등도 사용되고 있다. 전기기기에 사용되는 많은 재료 기술 및 전자 제어 성능에 기반을 둔 전력 전자 기술의 발전은 시스템의 고효율화를 주도하고 있다.

최근의 FA, OA 및 공작기계 등의 메카트로닉스 분야와 첨단 산업의 눈부신 성장은 그 요소부품인 전기기기의 발전에 기인하고 있다. 특히, 시스템의 고성능화 및 경박단소화는 전기기기의 고효율화 및 소형경량화에 의해 구체화되고 있다. 그런데 기존에 비해 우수한 성능의 전기기기를 제작하는 것은 영구자석 재료, 전기 강판 재료 및 절연 재료를 비롯한 소재 분야의 발전과 정밀 가공 및 제작 기술의 발달 외에도 정확한 해석 기술에 의한 전기기기의 특성 해석, 설계 및 최적 설계 기술에 의해서만 가능하다.

현재의 전기기기 산업에서 고급화된 설계관련 핵심 기술은 미국, 일본 등의 선진국에서 확보하고 있으며, 중저급의 일반 기술만을 한국, 대만, 중국 등의 국가들이 분담하고 있다. 그런데, 국내에서는 선진 국가들과의 기술 제휴를 통해 핵심 기술의 확보를 위한 노력을 기울이고 있으나 기대와는 달리 이전 받은 도면만으로 모방 설계하는 수준에 머무르고 있다. 전기기기의 해석, 설계 관련 기반 기술의 이해 및 구체화에 의한 기술의 자립화와 국산화는 전기기기의 변형 설계 및 최적 설계를 위해 필수적일뿐만 아니라 이는 전기기기의 수입대체 효과 및 국제 경쟁력 강화에도 큰 도움을 줄 것으로 생각된다.

본고에서는 전기기기의 해석 및 설계에 필요한 여러 기술들을 간략히 소개하고자 한다. 설계의 초기 단계에서 시

스템의 전체적인 기본 특성 파악에 주로 사용되는 자기 등가회로에 의한 방법과 이산화된 모델에 수치 해석적 원리를 적용하여 보다 정확하고 국부적인 특성을 파악하는데 사용되는 수치 해석 방법을 중심으로 설명하고자 한다. 그리고, 위의 방법들로 해석, 설계된 연구 결과 및 동향과 앞으로의 전개 방향에 대해서도 고찰하고자 한다. 소개되는 연구 결과는 여러 가지 전기기기 중에서도 주로 메카트로닉스 분야에서 사용되는 영구자석 전동기와 유도기 및 영구자석 Lifting 시스템 등을 중심으로 서술하고자 한다.

2. 자장 해석

일반적으로 전기기기는 특정 계(주로 공극이 이에 해당한다.)내에 저장된 자장 에너지의 변화에 의해 동력을 발생시키는 장치이다. 따라서 전기기기의 특성 해석에 대한 정확도는 전기기기 내부의 자장 분포 해석의 정확도에 기인한다. 전철에서도 언급한 바와 같이 구형의 편이성 및 계산 시간상의 장점 등으로 기존에는 자기 등가회로에 의한 자속 분포 해석이 주류를 이루었다. 그러나, 오늘날에는 수치해석에 필요한 하드웨어, 소프트웨어 등의 발전으로 설계 초기 단계에서도 수치해석 방법에 의한 전기기기의 해석이 많이 이루어지고 있다. 각각의 해석 기술에 관하여 아래에 간단히 소개한다.

2.1 자기 등가회로에 의한 해석

자기 등가회로에 의한 해석이란 전기기기의 제구성요소(영구 자석, 철심, 권선, 공극 등)들을 파라미터로 하는 등가회로를 구성하여 회로 해석을 통해 각부의 자속 분포 및 자속 밀도 등을 계산한 후, 이렇게 구해진 자장 분포에 의해 특정 운전 조건에서 전기기기의 특성을 해석하는 방법을 말한다.

2.1.1 간단한 영구자석 시스템

그림 1과 같이 영구 자석을 포함하는 가장 간단한 형태

의 자기 시스템을 생각하자[6]. 자기 회로법은 본 시스템에서 영구자석을 기자력원으로, 자속의 통로를 자기저항으로 등가화하여 자기회로의 자속을 계산하는 방법이다. 이 회로에서 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\phi_m = B_m \cdot A_m = \sigma \cdot B_g \cdot A_g \quad (1)$$

$$H_m \cdot l_m + f \cdot H_g \cdot l_g = 0 \quad (2)$$

여기에서,

ϕ_m : 영구자석에서 나오는 자속 [W]

B_m : 자석에서의 자속밀도 [Wb/m²]

B_g : 공극에서의 자속밀도 [Wb/m²]

A_m : 자석에서 자속이 통과하는 단면적 [m²]

A_g : 공극의 단면적 [m²]

l_m : 자석의 자화방향 길이 [m]

l_g : 공극의 길이 [m]

σ : 자속 누설 계수(leakage factor) ($\sigma \geq 1$)

f : 자기 저항계수(reluctance factor) ($f \geq 1$)

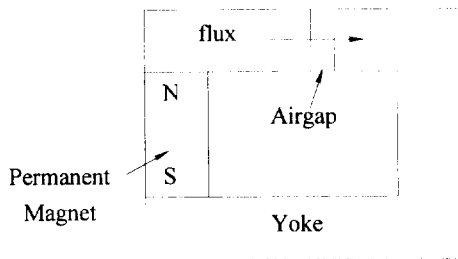


그림 1. 간단한 자기 시스템의 자기회로

위에서의 자속 누설 계수 σ 및 저항 계수 f 는 시스템 구성요소의 재질 및 시스템의 구조에 의해 결정되는 비값들이다. 본 시스템의 해석에서 가장 중요한 구성 요소는 영구 자석인데 일반적인 영구자석의 특성 곡선은 그림 2 와 같다. 여기서 실제로 영구자석을 사용해야 할 부분은 ab구간(영구자석의 사용 효율을 높이기 위해서는 이 구간에서 사용해야함)이 되는데 이 구간에서는

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot M_r + \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \\ &= B_r + \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다.

그림 2에서 직선 op는 부하선이라고 하는데 이는 식 (1), (2)로부터 계산되어지며 식 (4) 와 같다.

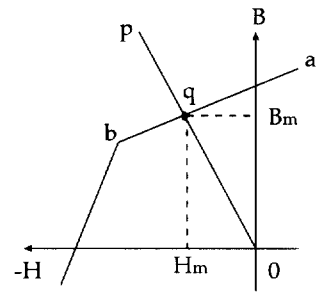


그림 2. 영구자석의 감자 특성 곡선

$$\begin{aligned} B_m &= \frac{\sigma \cdot A_g}{A_m} \cdot B_g \\ &= \mu_0 \cdot \frac{\sigma}{f} \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{l_m}{l_g} \cdot (-H_m) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 직선 op와 감자 곡선 ab(여기서는 해석상의 편의를 위해 직선으로 한다.)의 교차점 q가 특정 운전 조건에서의 영구 자석의 동작점이 된다. 동작점 q가 결정되면 그림 2 에서 B_m 과 H_m 이 결정되고 식 (1)로부터 B_g 를 구할 수가 있다. 앞서 언급했듯이 자기 시스템의 해석에서 가장 중요한 요소는 공극에서의 자속 밀도이며 이 B_g 의 계산에 의해 시스템의 제특성에 해석된다. 자기 등가회로법은 자기시스템을 자기회로로 치환하여 해석하는 방법이며 그림 3 으로 표현된 등가회로에서 각각의 회로 정수는 아래 식들로 표현된다.

F_m' 는 등가 기자력으로써 식 (5)와 같다.

$$F_m' = \frac{l_m}{\mu_r} \cdot M_r = l_m' \cdot M_r \quad (5)$$

마찬가지로 R_g' 는 등가 공극 자기저항으로

$$R_g' = \frac{l_g'}{\mu_0 \cdot A_g'} \quad (6)$$

의 관계를 만족하고 등가 영구 자석 자기저항은

$$R_m' = \frac{l_m'}{\mu_0 \cdot A_m} \quad (7)$$

이다.

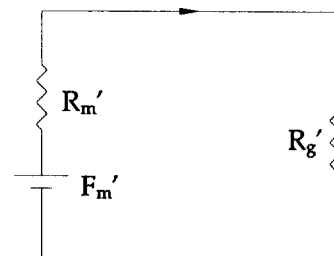


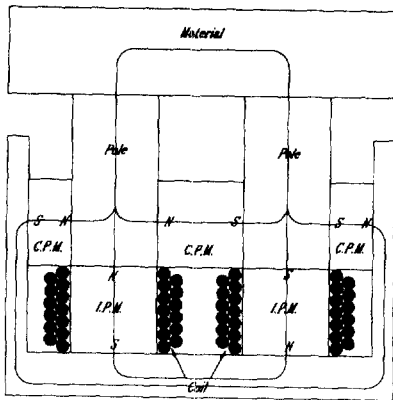
그림 3. 그림 1 모델의 등가 자기회로

이와 유사한 구성 요소(영구 자석, 철심, 공극 - 대부분의 전기기기가 이에 속한다.)를 가지는 어떠한 자기 시스템도 위의 방법에 의해 간단히 자기 등가회로로 나타낼 수 있으며, 회로를 해석하면 특정 운전 조건에서의 시스템의 자장 분포 및 특성 해석이 가능하다. 그러나, 상기와 같이 경험 요소가 가미된 집중 정수에 의해 시스템을 표현하므로 부정확하다는 단점이 있다.

위에서 설명된 자기 등가회로법을 영구자석식 Lifting 시스템에 적용하여 해석된 결과는 그림 4 (b)와 같다. 영구자석식 Lifting 시스템은 영구자석에 의해 철강재와 같은 자성 재료를 이동시키는 것으로 그림 4 (a) 는 물체를 흡착한 경우의 자속 흐름도를 나타내고 있으며 그림 4 (b) 는 특정 운전조건에서의 흡착력이 39.075 [ton]임을 나타내고 있다.

2.1.2 영구자석 전동기에서의 자기 등가회로 해석

자기 등가회로에 의한 해석으로 공극 자속밀도를 구하기 위해 형상을 단순화한 영구자석 전동기의 모델을 그림 5 에 나타내고 있다[2].



(a) 흡착시의 자속 흐름도

===== THE RESULT OF ANALYSIS BY EQUIVALENT CIRCUIT METHOD =====			
Item	Value	Unit	The meaning of thr Item
B_IPM	1.220	[T]	Flux Density in IPM magnet
B_PMS	0.333	[T]	Flux Density in PMS magnet
B_PML	0.375	[T]	Flux Density in PML magnet
B_PMS2	0.357	[T]	Flux Density in PMS2 magnet
B_PML2	0.378	[T]	Flux Density in PML2 magnet
B_pole	<1.207>	[T]	Flux Density in airgap
Gap_len	0.100	[mm]	Airgap Length
Force	[39.075]	[ton]	Total Force

(b) 흡착시의 자속 분포 및 특성 해석 결과

그림 4. Lifting 시스템에서의 자기등가회로법의 적용

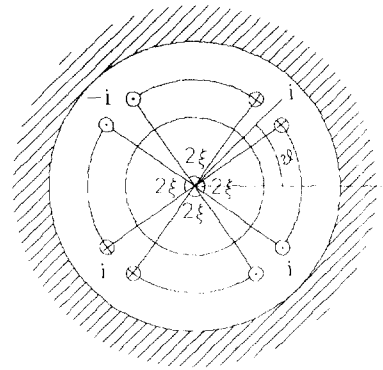


그림 5. 영구자석 전동기의 공극 자속 밀도 해석 모델

먼저 전동기의 형상을 슬롯이 없는 고정자와 회전자 철심 사이에 공극을 갖는 두개의 동심 실린더로 가정한다. 또한, 철심의 투자율을 무한대로 가정하여 철심에서의 기자력 강하를 무시한 다음, 영구자석을 등가의 표면 전류 밀도를 갖는 전류원으로 치환하여 2차원해석을 통해 공극 자속 밀도의 파형과 크기를 구한다. 이와 같이 구한 공극자속밀도로부터 슬롯이 있는 실제 전동기의 공극자속밀도의 파형과 크기를 구하기 위해 슬롯에 의한 공극 퍼미언스분포를 구하여 공극자속밀도 분포와 중첩시킴으로써 실제 공극자속 밀도의 파형을 구한다. 또한, 공극 퍼미언스 분포로부터 얻어진 카터 계수를 이용하여 그 크기를 보정한다. 그 외에 자속의 누설이나 프린징 효과, 철심에서의 기자력 강하 등 해석적인 방법으로는 고려할 수 없는 요인들은 과거의 자료, 경험식, 그리고 실험을 바탕으로 보정한다.

이 방법을 이용하면 공극자속밀도를 전동기 각부 치수의 함수로서 나타낼 수 있으므로 치수 제원이 특성에 미치는 영향을 파악할 수 있어 전동기 특성에 대한 이해를 쉽게 할 수 있고, 여러 정격의 다른 전동기에 대해서도 쉽게 해석할 수 있어 특성해석 결과가 일반적으로 적용될 수 있다는 장

점이 있는 반면, 해석적인 방법을 적용하여 공극자속밀도를 구할 수 있는 전동기 형상이 극히 제한되어 있을 뿐만 아니라 그 경우에도 몇 가지의 이상적인 가정을 통하여 형상을 단순화하여 구해야 하기 때문에 정확한 공극자속밀도의 파형과 크기는 구할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

2.2 수치해석

부분적인 해석이 불가능하고 부정확할 수 있는 해석 결과를 주는 자기 등가회로 해석법의 한계점을 극복하기 위한 방법으로 수치적인 방법이 널리 쓰이고 있다. 그러나, 모델 이산화 과정에서 발생하는 모델 크기의 한계 및 계방정식 계산 과정에서의 계산 방법, 계산 시간 등의 여러가지 문제로 인해 현재까지도 국내 산업계에서는 극히 한정된 경우에만 한하여 수치해석적 방법을 사용하고 있다. 그러나, 컴퓨터 관련 주변 기술의 눈부신 발전은 위의 많은 문제들을 해결하고 있으며 다양한 상용 프로그램의 개발로 수치 해석 방법에 의한 전기기기 해석 영역이 날로 확대되고 있다.

대부분의 전기기기는 그 내부에 저장된 자기 에너지를 매개로 하여 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 구동원리를 가지고 있으므로 그 특성이 경계치를 갖는 맥스웰방정식에 의해서 지배된다. 복잡한 형상을 갖는 전동기의 자장 분포를 정량적으로 해석하는 수치 해석적 방법은 크게 유한 요소법과 경계 요소법으로 대별된다. 기본적인 교류 자장 문제의 수식화 과정은 식 (8)의 지배방정식으로부터 출발한다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (8)$$

해석 영역을 2차원으로 가정하고 모든 변수가 정현적으로 변화한다고 가정하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + j\omega \sigma A_z = -J_s \quad (9)$$

식(9)에 Galerkin방법을 적용하여 이산화하면 식 (10)과 같다.

$$\sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{\Omega_k} \nu \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dx dy A_j + \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{\Omega_k} j\omega \sigma N_i N_j dx dy A_j = \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^3 \int_{\Omega_k} N_i J_s dx dy \quad (10)$$

식 (10)을 행렬방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$[K + T][A] = [F] \quad (11)$$

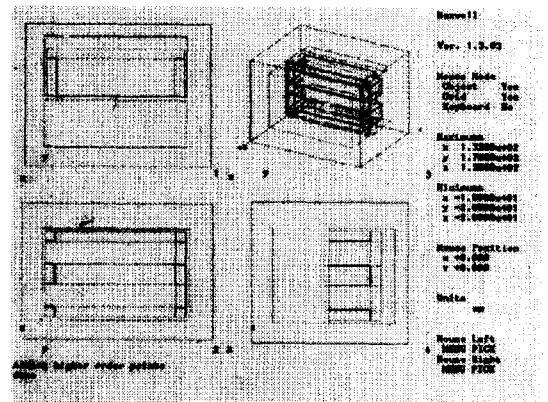
마지막으로 비선형을 고려하기 위해서는 식 (11)에 Newton-

Rhapon법을 이용하여 비선형 행렬방정식을 유도하면 식 (12)와 같이 된다.

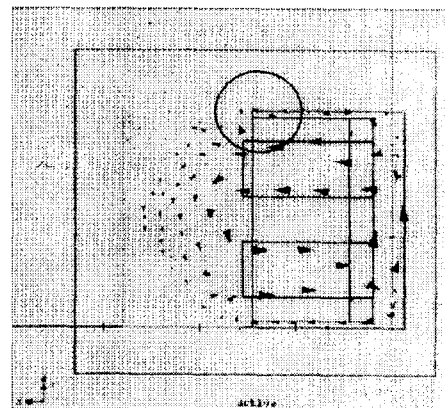
$$[K + T + R][\Delta A] = [K + T][A] + [F] \quad (12)$$

결론적으로 식 (11) 또는 (12)를 풀면 전 영역의 각 절점에서 자기포텐셜 값을 얻을 수 있으며 이 값을 이용하여 다양한 전기기기의 특성을 해석할 수 있다. 유도 전동기는 원리상 고정자 자장으로 인해 회전자에 발생하는 와전류에 의해 구동되기 때문에 정자장 문제로는 해결할 수 없으며 A-ψ 법 또는 T-Ω 법 등의 2차원 또는 3차원 와전류 해석법을 적용하여 해석하는 연구가 진행되고 있다. 위의 수치해석 방법에 관한 식의 전개는 유도 전동기와 같은 교류 자장 문제에 바로 적용되며 같은 원리 및 식의 전개를 다른 문제에도 적용할 수 있다.

이러한 수치 해석적 방법을 이용하여 영구자석 전동기의 자장 해석에 관한 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 영구자석 전동기는 등가적으로 영구자석 자기회로를 이용하여 나타낼 수 있기 때문에 정자장 문제로서 해석할 수 있다. 정자장 문제에 대한 2차원 해석 및 3차원 해석에 관한 연구는



(a) 해석 모델



(b)자속 분포도

그림 6. Lifting 시스템의 유한 요소 해석 결과

이미 상당 수준 진척되어 상용 패키지가 활용되고 있다. 해석적인 방법으로 맥스웰방정식을 풀 경우 또 하나의 문제점은 철심의 자기포화현상으로 인한 비선형 특성을 해석할 수 없다는 것이다. 그러나, 수치적인 방법을 이용할 경우 철심의 초기 자화 곡선을 입력하여 자기포화현상을 해석할 수가 있다. 그러나, 히스테리시스 현상은 어느 방법으로도 해석이 쉽지 않은데, 근래에는 Preisach모델 또는 벡터 히스테리시스 모델을 유한요소법과 결합하여 해석하는 방법을 사용하고 있다.

수치적인 방법으로 전동기의 자기장을 해석할 경우 공극 자속 밀도만이 아닌 전동기 각부의 자속밀도 분포 및 크기를 비교적

정확하게 구할 수 있고, 그 결과를 이용하여 정도 높은 전동기의 특성 해석이 가능하다는 장점이 있다. 그림 6에 2.2.1 절에서 설명한 Lifting 시스템의 유한 요소 해석 결과를 나타내었다[8]. 이 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 MAXWELL에 의한 해석 결과이며 그림 6 (b) 에 시스템 각 부분의 자속 분포 및 자속 밀도를 화살표의 방향과 크기로 표현하고 있다.

그림 6 (a) 에서와 같이 유한 요소 해석방법은 전기기기의 형상을 그대로 모델링하기 때문에 실제의 운전 조건과 유사하고, 물리적인 현상을 설명하는 방정식에 기초를 두기 때문에 국부적인 정확한 해석이 가능하다. 위와 같은 Lifting 시스템외에도 대부분의 전기기기에 대해 2차원 또는 3차원의 유한요소 해석이 가능한데, 그림 8은 영구 자석 전동기에 대한 2차원 유한요소 해석의 결과를 나타내고 있다. 해석 전동기는 주로 로봇 시스템에 사용되는 3상, 12 슬롯, 8극의 정현파 구동 영구자석 동기 전동기이며 그림 7 (a), (b), (c) 는 각각 전동기의 1/4 단면도, 이산화 모델 (mesh), 자속 분포도를 나타내고 있다. 본 모델은 해석 기법상 1/4 해석 만으로도 충분하다.

그림 7의 영구 자석 동기 전동기와 같이 전동기의 형상이 복잡하여 해석적인 방법으로는 정확한 자장분포를 알 수 없는 경우에 있어 유한요소법은 특히 효과가 크다. 그러나, 수치적인 방법은 전동기의 자장분포를 비교적 정확하게 구할 수 있다는 장점을 갖고 있는 반면 해석적인 방법과는 달리 전동기 치수와 자기장 분포 및 제 특성과의 관계를 파악하기 힘들다는 점과 하나의 해석결과가 일반적으로 사용될 수 없고, 해석대상이 바뀔 때마다 새로이 해석을 해야만 하는 점이 단점이다.

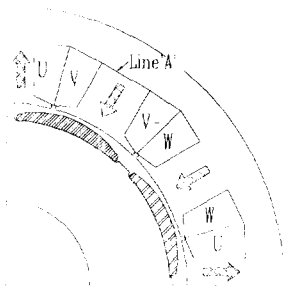
3. 전기기기 설계방법

지금까지 설명된 자기 등가회로법에 의한 해석 방법 및 수치 해석방법에 기초하여 본 절에서는 전기기기, 그 중에서도 특히 전동기의 설계 방법에 대해 기술하고자 한다[4].

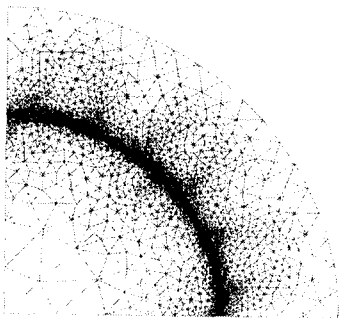
기존의 전동기 설계는 자기 및 전기 등가회로로부터 얻어진 특성식과 설계식을 이용하여 이루어졌다. 전동기의 설계 방법은 크게 나누어 장하분배법과 D^2L 법(D는 고정자 내경, L은 축방향 길이) 이 있는데, 이들 방법은 근본적인 원리는 차이가 없고, 단지 계산순서와 수순에 차이가 있을 뿐이다. 그 원리는 다음과 같다.

전동기의 설계이론은 토크식(혹은 출력식)에 대한 이해로부터 출발한다. 전동기의 토크는 공극자속과 전기자 기자력의 상호작용에 의해서 발생하는데, 이를 수식적으로 표현하면 전동기의 토크는 전기장하와 자기장하, 그리고 전동기(회전자)체적의 곱에 비례한다. 이때, 전기장하는 전기자 권선의 총도체수와 상전류의 곱을, 자기장하는 공극의 총자속을 의미한다. 또한, 전동기의 체적은 D^2L 에 비례하므로, 전기장하, 자기장하, 고정자 내경 및 축방향길이의 관계를 결정하는 것이 출발점이라 할수있다.

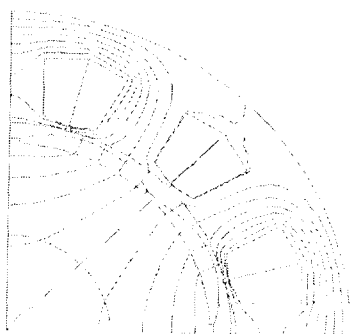
장하분배법의 원리를 설명하기 위해 장하비에 대해 언급



(a) 전동기의 단면도



(b) 이산화 모델(Mesh)



(c) 자속 분포도

그림 7. 영구자석 전동기의 유한 요소 해석 결과

할 필요가 있다. 자기장하와 전기장하의 비를 장하비라 하는데, 그 값은 자속밀도, 전류밀도, 온도상승, 외형치수, 성능 및 경제성 등의 판단지수로서 작용하며 전동기의 종류와 용량에 따라 적절한 값이 존재한다. 즉, 장하비가 작으면 자기장하에 비해 전기장하가 크므로 동손이 커져 권선의 온도가 상승하고, 특성의 변동이 커질수 있다. 반대의 경우는 철량이 증가하여 전동기의 부피와 중량 및 가격이 증가한다. 전자를 동기계, 후자를 철기계라 하는데, 이 중에서 어느 한쪽으로 치우치면 전동기의 특성이나 가격면에서 불리해지므로 전동기의 설계시에는 용도에 적합한 장하비의 값을 선정하는 것이 중요하다.

이미 설계되어 있는 전동기의 장하비를 기준으로 삼아 자속밀도, 전류밀도 및 전동기 치수에 따른 장하, 손실, 온도 상승 등의 특성을 고려하여 온도상승이 전동기의 냉각능력 한계를 넘어서지 않도록 설계하고자 하는 전동기의 장하비를 결정할 수 있다. 이 경우 전동기 제작사에 따라 전동기의 종류와 용량에 따른 전기장하와 자기장하의 관계를 나타내는 통계자료가 그래프 혹은 표로서 주어지 있으므로 이를 참조하여 적절한 전기장하와 자기장하의 값, 또는 자기장하와 장하분배정수를 선정하여 설계를 진행한다.

장하분배법에서 전동기의 고정자 내경과 축방향길이의 치수비는 기존의 전동기와 유사한 값으로 취하거나, 전기장하와 장하분배정수에 의해서 종속적으로 결정된다. 반면에 D²L법에서는 먼저, 치수비를 결정하여 설계를 진행한다. 즉, D²L값과 토크와의 비를 출력계수라 하는데, 이 값 역시 전동기의 종류와 용량에 따라 통계자료가 주어지 있으므로 이를 이용하여 구하고, 적절한 치수비를 선정하여 설계를 진행하는 방법이다. 이 방법에서 장하의 값은 출력계수의 통계자료로부터 예측한다.

이상의 고찰로부터 알 수 있듯이 두 방법이 근본적인 차이는 없지만 장하분배법이 D²L법에 비해 주요특성과의 관계가 보다 명확하고 계산수준이 간단하다. 따라서, 장하분배법에 의한 설계가 보다 합리적이고 편리하여 D²L법보다 널리 쓰이고 있다.

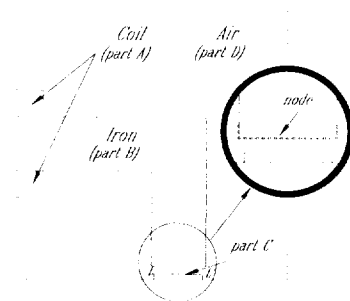
어느 방법을 이용하든지 장하의 값과 치수비가 결정되면 설계식을 이용하여 세부 치수를 결정하고, 특성을 계산하여 전동기의 성능을 평가한 후, 요구사항을 만족하지 않으면 재설계하여 원하는 특성을 얻을때까지 반복설계한다. 그러므로 이와같은 설계방법을 이용하여 전동기를 최적설계할 경우 상당한 노력과 시간이 소요되고, 장하비와 치수비를 선정할 때와 이론적으로는 구할수 없는 파라미터나 계수의 값을 선정하는 데에 있어 과거의 설계자료 및 설계자의 경험과 지식에 절대적으로 의존할 수 밖에 없다는 문제점이 있다.

4. 최적설계

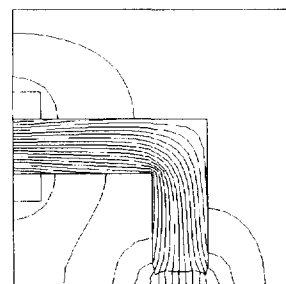
기존의 설계방법은 위에서 언급한 문제점 이외에도 그와 같이 설계된 결과가 최적설계라는 것을 수학적으로 증

명할 수가 없다는 문제점을 갖고 있다. 이 문제점을 해결하기 위한 노력은 근래에 들어 최적화기법에 대한 이론적인 연구의 진전과 컴퓨터 발달에 힘입어 가속화되었다. 즉, 전동기 설계에 최적화기법을 적용하여 원하는 특성을 수학적으로 최적화하는 최적설계에 대한 연구가 진행되고 있다.

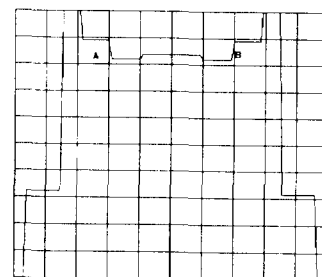
현재까지 보고된 전동기의 최적설계에 관한 연구는 치수 최적화설계와 형상 최적화설계에 관한 연구로 대별된다. 전자는 해석적인 방법으로 구한 특성식과 설계식으로부터 최적화하고자 하는 특성을 하나의 목적함수로 선정하여 이를 최적화하는 전동기의 설계 파라미터를 구하는 연구를 의미한다. 그리고, 후자는 원하는 특성을 얻기 위해 유한요소법을 이용하여 슬롯형상이나 자극의 형상 혹은 배치를 최적화하는 연구가 해당된다.



(a)전자석 초기 모델



(b)최종 형상에서의 자속분포



(c)공극에서의 자속밀도 분포

그림 8. 면역 알고리즘과 유한요소법을 결합한 전자석 자그 형상 최적화

그 대표적인 연구결과의 하나로서 유한 요소법과 면역 알고리즘[5]을 적용하여 전자석의 자극 형상 최적화 설계에 대한 결과가 그림 8에 나타나 있다[9]. 그림 8 (a)는 전자석 자극의 초기 설계모델 및 설계 변수들을 나타낸 것이고, 그림 8 (b)는 면역 알고리즘을 적용하여 형상 최적화한 설계의 결과로 얻어진 철자극의 형상 및 자속 분포를 보이고 있다. 이 모델에서의 최적화 목적은 공극 부분(그림 8 (a) LL-부분)에서의 균일한 자속 밀도 분포를 얻는 것이며, 그림 8 (c) (A-B)의 그래프로부터 비교적 균일한 자속 밀도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그런데, 몇년 전만해도 연구에서 사용된 최적화기법의 대부분은 경사도감소법을 기반으로 한 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)로서 이 방법은 해를 빠른 시간내에 정확하게 찾을 수 있다는 장점이 있으나, 많은 국소해를 갖는 함수에 적용할 경우에는 최적해가 아닌 국소해밖에 찾을 수 없다는 단점이 있다.

이러한 단점을 해결하기 위하여 최근에는 시뮬레이티드 애널링, 유전 알고리즘, 면역 알고리즘 등의 확률론적인 방법들을 최적화기법으로 사용한 최적설계기법에 대한 연구가 시도되고 있다. 이 방법들의 공통점은 목적함수의 값이

에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[10].

앞서 지적한 바와 같이 실행시간이 길다는 확률론적인 방법의 단점을 해결하기 위하여 알고리즘 초기에는 확률론적인 방법을 이용하여 최적해가 존재하는 영역을 찾고, 최적해가 존재한다고 판단되는 영역에 이르면 그 영역에서 경사도 감소방법등 결정론적인 탐색법을 적용하여 최적해로의 수렴시간을 단축시킬 수 있는 알고리즘에 관한 연구가 시도되고 있다.

그러나, 최적해가 존재하는 영역에 대한 판단기준을 일반적으로 제시하는 것이 사실상 불가능하므로 현재까지의 연구는 주어진 문제에 따라 적절한 판단기준을 결정하여 사용하는 수준에 머물고 있다. 뿐만 아니라 오늘날에는 전기기기의 최적설계에 있어서 목적함수가 하나가 아닌 여러개의 목적함수를 동시에 최적화하는 다중목적함수의 최적화 설계에 관한 요구에 부응하여 그 연구가 활발히 진행되고 있다.

다중목적함수 최적화란 해석자가 최적화하려는 목적이 2개 이상인 것을 의미하는 것으로서 목적 함수 최적화 작업을 행하는 해석자(analyst)와 최적해를 결정하는 의사결정자(decision-maker)의 두 범주가 있으며 의사결정자의 최적해에 대한 의지가 반영된 무관심곡선(indifference curve)으로 최적해 군(群)중에서 최적해를 찾아내게 된다[7]. 이러한 다중목적함수 최적화와 아울러 관심을 가져야 하는 분야는 등가회로부터 얻어진 특성식과 설계식에 유한요소법 등의 수치해석적인 방법을 결합하여 전동기의 치수 및 형상을 최적화하는 설계에 대한 연구이며 이미 상당 수준의 연구 결과가 발표되어 있고 앞으로도 이 부분에 관한 깊이 있는 연구가 활발히 진행되리라 본다.

5. 결 론

메카트로닉스 분야에 사용되는 영구자석 전동기와 유도기 및 영구자석식 Lifting 시스템을 중심으로 자장 해석기법과 설계방법 및 최적설계방법에 대해 현재까지의 연구결과와 앞으로의 전망에 대해 고찰하였다. 근래까지 자장 해석방법은 주로 등가자기회로를 기초로 한 해석적인 방법이 주류를 이루고 있지만 점차 수치해석적인 해석법의 비중이 증가하는 추세에 있다. 또한, 전동기의 설계방법 역시 등가자기회로 해석에 기초한 장하분배법과 D^2L 법이 사용되었고, 최적설계기법도 경사도감소방법을 기초로한 SUMT에서 탈피하여 확률론적인 방법을 이용한 설계 최적화기법, 그리고 유한요소법을 이용한 형상 최적화설계기법에 대한 연구가 시도되고 있다.

앞으로는 자장해석방법의 경우 등가자기회로와 수치해석적인 방법을 상호보완적으로 혼합적용하는 연구가 많이 진행될 것으로 전망되며, 최적화설계의 경우 다중목적함수의 최적설계 및 수치해석적인 방법을 이용하여 전동기의 치수 및 형상을 최적화하는 연구가 활발해질 것으로 기대된다.

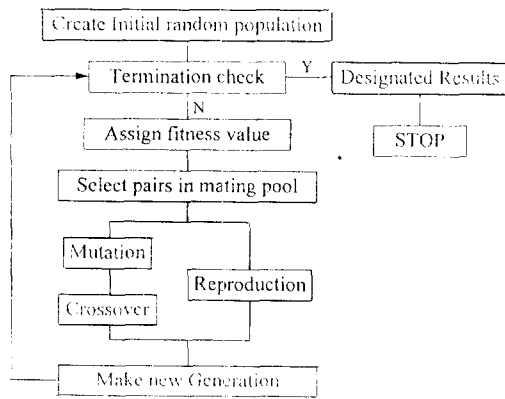


그림 9. 유전 알고리즘의 흐름도

나, 경사도가 감소하는 방향만이 아닌 그 반대의 방향으로 변수를 탐색할 수 있는 가능성을 확률론적으로 보장함으로써 국소해가 아닌 최적해로 수렴할 수 있다는 것이다. 이 방법을 사용할 경우 최적해를 구할 수 있다는 장점이 있지만, 확률적으로 변수탐색의 방향을 제어하므로 그 실행시간이 SUMT등의 방법에 비해 상당히 길다는 단점이 있다.

현재까지 알려진 많은 확률론적 최적화 기법 중 공학 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 유전 알고리즘의 흐름도를 그림 9에 나타내었다. 유전 알고리즘은 생명체의 유전 과정을 모사한 것으로서 그림 9에서와 같이 돌연 변이, 교차, 재생산 등의 과정을 거쳐 최적화 작업을 행하게 된다. 오래전부터 연구가 진행되어 현재에는 다양한 공학문제에 적용되어 그 실효성을 입증받았으며, 보다 개선된 알고리즘

참고 문헌

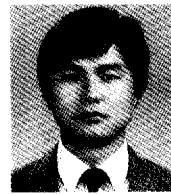
- [1] B. Hague, *The Principles of Electromagnetism Applied to Electrical Machines*, Dover, 1962
- [2] 윤중석, 자극형상 최적화에 의한 표면부착 영구자석형 교류서보모타의 설계, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원 전기공학과, 1993.8.
- [3] 박현수, 최적치수설계에 의한 매입형 영구자석 동기전동기의 속도-출력영역 확장, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원 전기공학과, 1993.8.
- [4] 大木創, 田中國昭, 電氣機器論-設計思想と技術の變遷, 實教出版株式會社, 1984.
- [5] Kazuyuki Mori, Makoto Tsukiyama, Toyoo Fukuda, "Immune Algorithm with Searching Diversity and its Application to Resource Allocation Problem" *IEEE Japan*, vol. 113-C, no. 10, pp. 872-878, 1993.
- [6] 스피커의 자기회로 설계 및 시작, 롯데 그룹 삼남 장학회, 1994.
- [7] Jared L. Cohon, *Multiobjective Programming and Planning*, ACADEMIC PRESS, 1978.
- [8] 영전식 Magnetic Lifter의 특성 해석 및 최적 설계, 산업과학기술원, 1996.
- [9] J.S. Chun, H.K. Jung, J.S. Yoon, "Shape Optimization of Electromagnetic Devices Using Immune Algorithm" *IEEE CEFC96 Conf.*, PB2-11, 1996.
- [10] G. Fuat Uler, Osama A. Mohammed, Chang-Seop Koh, "Utilizing Genetic Algorithms for the Optimal Design of Electromagnetic Devices" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, no. 6, pp. 4296-4298, 1994.

저 자 소 개



한송엽(韓松暉)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1967년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년~1979년 불란서 로렌공과 대학원 졸업(공학). 현재 서울대 공대 전기공학부 교수 및 공대학장. 1995년 당학회 회장.



정현교(鄭炫敎)

1955년 8월 17일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1985년~1993년 강원대 공대 전기공학과 교수. 현재 서울대 공대 전기공학부 부교수.



천장성(千長成)

1968년 12월 13일생. 1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.