

소형 모터의 자기장 해석 및 최적설계

심동준 · 정현교

서울대학교 공과대학 전기공학과
서울시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

(1994년 6월 13일 받음)

I. 서 론

최근 FA, OA 및 공작기계 등의 메카트로닉스 분야와 첨단산업의 눈부신 성장에 따라 그 요소부품인 소형 모터의 중요성이 점차 강조되고 있다. 특히, 성력화와 시스템의 고성능화 및 경박단소화의 필요성으로 인해 그 구동원인 모터의 고효율화 및 소형경량화가 요구되고 있다. 또한, 근래의 영구자석 재료를 비롯한 소재분야의 발전과 정밀가공 및 제작기술의 발달로 인해 과거보다 우수한 성능을 갖는 정밀 소형 모터의 제작이 가능해지면서 이를 뒷받침하기 위한 보다 정확한 모터특성 해석 및 최적설계의 필요성이 절실하게 요구되고 있다.

현재 소형모터의 시장은 고성능 모터의 경우 대부분 일본이 장악하고 있으며, 중저급 모터의 경우 한국과 대만을 비롯한 동남아시아 국가들이 분담하고 있다. 그런데, 국내의 기술수준은 대체로 일본과 미국의 모터 제작사와의 기술제휴를 통해 그들의 설계도면을 가져와 그대로 모터를 제작, 생산하는 수준에 머물고 있는 상황이다. 국내의 독자적인 모터의 특성해석 및 설계기술의 확보와 국산화는 수입대체효과를 가져와 국내의 기초기술 자립화는 물론 국산제품의 가격경쟁력 향상에도 이바지할 것으로 생각된다.

본고에서는 소형모터의 해석 및 설계에 대한 비전문가들의 이해를 돕기 위하여 자기 등가회로를 이용한 해석적인 방법과 수치해석적인 방법에 의한 모터 자기장 해석 방법을 소개한다. 그리고 기존의 모터설계 및 최적설계에 대한 현재까지의 연구결과 및 동향과 앞으로의 전개방향에 대해서 고찰하도록 한다.

소형 모터는 그 적용분야에 따라 용량에 따른 구분이 다르지만 본고에서는 주로 메카트로닉스 분야에서 사용되는 영구자석 모터와 유도기를 중심으로 용량 수십 마력 이하의 모터를 소형 모터로 정의하고 이를 중심으로 서술하도록 한다.

II. 자기장 해석

모터의 특성해석은 모터 내부의 자기장 분포해석으로부터 출발한다. 이를 위해서 종래에는 자기등가회로를 이용한 해석적인 방법으로 공극자속밀도를 구하는 방법이 사용되었으며, 근래에는 수치적인 방법을 이용하여 보다 정도 높은 해석이 널리 쓰이고 있다.

1) 자기등가회로에 의한 해석

이 방법은 모터 권선 혹은 영구자석에 의한 공극자속밀도를 해석적으로 구하고, 이로부터 얻어진 공극자속밀도를 이용하여 모터의 제특성치를 구하는 것이다.

대표적으로 공극자속밀도를 구하기 위해 형상을 단순화한 영구자석 모터의 해석 모델을 그림 1에 나타내고 있다.

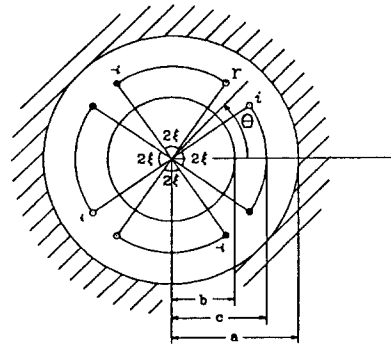


Fig. 1. 영구자석 모터의 공극자속밀도 해석 모델

그림에서 알 수 있듯이 모터의 형상을 슬롯이 없는 고정자와 회전자 철심사이에 공극을 갖는 두개의 동심 실린더로 가정한다. 또한, 철심의 투자율을 무한대로 가정하여 철심에서의 기자력 강하를 무시한 다음, 영구자석을 등가의 표면전류밀도를 가는 전류원으로 치환하여 2차원해석을 통해 공극자속밀도의 파형과 크기를 구한다.

이와같이 구한 공극자속밀도로부터 슬롯이 있는 실제

모터의 공극자속밀도의 파형과 크기를 구하기 위해 슬롯에 의한 공극 퍼미언스분포를 구하여 공극자속밀도분포와 중첩시킴으로써 실제 공극자속밀도의 파형을 구한다. 또한, 공극 퍼미언스 분포로부터 얻어진 카터 계수를 이용하여 그 크기를 보정한다. 그외에 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 모터 각부 치수의 함수로서 나타낼 수 있으므로 치수 제원이 특성에 미치는 영향을 파악할 수 있어 모터 특성에 대한 이해를 쉽게 할 수 있고, 용량이 다른 모터에 대해서도 쉽게 해석할 수 있어 특성해석 결과가 일반적으로 적용될 수 있다는 장점이 있는 반면, 해석적인 방법을 적용하여 공극자속밀도를 구할 수 있는 모터 형상이 극히 제한되어 있을 뿐만 아니라 그 경우에도 몇가지의 이상적인 가정을 통하여 형상을 단순화하여 구해야하기 때문에 정확한 공극자속밀도의 파형과 크기는 구할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

2) 수치해석

해석적인 방법에 의한 모터 자기장해석의 한계점을 극복하기 위한 방법으로 수치적인 방법이 널리 쓰인다. 현재 사용되고 있는 모터는 그 내부에 저장된 자기에너지를 매개로 하여 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 구동원리를 가지고 있으므로 그 특성이 경계치를 갖는 맥스웰 방정식에 의해서 지배된다. 수치적인 방법은 복잡한 형상을 갖는 모터의 자기장분포를 정량적으로 해석하는 방법으로 유한요소법과 경계요소법으로 대표된다.

수치적인 방법을 이용한 모터의 자기장 해석에 관한 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 영구자석 모터는 등가적으로 영구자석 자기회로를 이용하여 나타낼 수 있기 때문에 정자장 문제로써 해석할 수 있다. 정자장 문제에 대한 2차원 해석 및 3차원 해석에 관한 연구는 이미 상당 수준 진척되어 상용 패키지가 활용되고 있다. 유도기는 원리상 고정자 자기장에 의해 회전자에 발생하는 와전류에 의해 구동되기 때문에 정자장 문제로는 해결할 수 없으며 A-φ법 또는 T-Ω법 등의 2차원 또는 3차원 와전류 해석법을 적용하여 해석하는 연구가 진행되고 있다.

해석적인 방법으로 맥스웰 방정식을 풀 경우 또 하나의 문제점은 철심의 자기포화현상으로 인한 비선형 특성을 해석할 수 없다는 것이다. 그러나, 수치적인 방법을 이용할 경우 철심의 초기자화곡선을 입력하여 자기포화현상을 해석할 수가 있다. 그러나, 히스테리시스 현상은 어느 방법으로도 해석이 쉽지 않은데, 근래에는 Preisach 모

델 또는 벡터 히스테리시스 모델을 유한요소법과 결합하여 해석하는 방법을 사용하고 있다.

수치적인 방법으로 모터의 자기장을 해석할 경우 공극자속밀도만이 아닌 모터 각부의 자속밀도 분포 및 크기를 비교적 정확하게 구할 수 있고, 그 결과를 이용하여 정도 높은 모터의 특성해석이 가능하다는 장점이 있다. 그림 2에 2차원 유한요소법을 이용하여 구한 매입형 영구자석

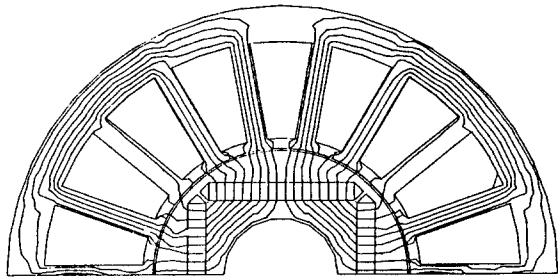


Fig. 2. 유한요소법에 의한 매입형 영구자석 모터의 자기장 분포 해석

모터의 자기장분포를 보이고 있다. 대상 모터와 같이 모터의 형상이 복잡하여 해석적인 방법으로는 정확한 자기장분포를 구할 수 없는 경우에 유한요소법은 특히 효과가 크다.

수치적인 방법은 모터의 자기장분포를 비교적 정확하게 구할 수 있다는 장점을 갖고 있는 반면 해석적인 방법과는 달리 모터 치수와 자기장분포 및 제특성과의 관계를 파악하기 힘들다는 점과 하나의 해석결과가 일반적으로 사용될 수 없고, 해석대상이 바뀔 때마다 새로이 해석을 해야만 하는 점이 단점이다.

Ⅲ. 모터 설계방법

자기 및 전기 등가회로부터 얻어진 특성식과 설계식을 이용하여 모터를 설계하는 것이 기존의 방법이다. 모터의 설계방법으로 널리 사용되는 것에는 장하분배법과 D^2L 법 - D 는 고정자내경, L 은 축방향 길이를 의미한다 - 이 있는데, 이들 방법은 근본적인 원리는 차이가 없고, 단지 계산순서와 수순에 차이가 있다. 그 원리를 살펴보면 다음과 같다.

모터의 설계이론은 토크식(혹은 출력식)에 대한 이해로부터 출발한다. 모터의 토크는 공극자속과 전기기 자자력의 상호작용에 의해서 발생하는데, 이를 수식적으로 표현하면 모터의 토크는 '전기장하와 자기장하, 그리고 모터

(회전자) 체적의 곱에 비례한다. 이때, 전기장하는 전기자 권선의 총도체수와 상전류의 곱을, 자기장하는 공극의 총자속을 의미한다. 또한, 모터의 체적은 D^2L 에 비례하므로, 전기장하, 자기장하, 고정자 내경 및 축방향길이의 관계를 결정하는 것이 설계의 출발점이라 할 수 있다.

장하분배법의 원리를 설명하기 위해 장하비에 대해 언급할 필요가 있다. 자기장하와 전기장하의 비를 장하비라 하는데, 그 값은 자속밀도, 전류밀도, 온도상승, 외형치수, 성능 및 경제성 등의 판단치수로서 작용하며 모터의 종류와 용량에 따라 적정한 값이 존재한다. 즉, 장하비가 작으면 자기장하에 비해 전기장하가 크므로 동손이 커져 권선의 온도가 상승하고, 특성의 변동이 커질 수 있다. 반대의 경우는 철량이 증가하여 모터의 부피와 중량 및 가격이 증가한다. 전자를 동기계, 후자를 철기계라 하는데, 이 중에서 어느 한쪽으로 치우치면 모터의 특성이나 가격 면에서 불리해지므로 모터의 설계시에는 용도에 적합한 장하비의 값을 선정하는 것이 중요하다.

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

장하분배법에서 모터의 고정자 내경과 축방향길이의 치수비는 기존의 모터와 유사한 값으로 취하거나, 전기장하와 장하분배정수에 의해서 종속적으로 결정된다. 반면에 D^2L 법에서는 먼저, 치수비를 결정하여 설계를 진행한다. 즉, D^2L 값과 토크와의 비를 출력계수라 하는데, 이 값 역시 모터의 종류와 용량에 따라 통계자료가 주어지고 있으므로 이를 이용하여 구하고, 적정한 치수비를 선정하여 설계를 진행하는 방법이다. 이 방법에서 장하의 값은 출력계수의 통계자료로부터 예측한다.

이상의 고찰로부터 알 수 있듯이 두 방법이 근본적인 차이는 없지만 장하분배법이 D^2L 법에 비해 주요특성과의 관계가 보다 명확하고 계산수준이 간단하다. 따라서, 장하분배법에 의한 설계가 보다 합리적이고 편리하여 D^2L 법보다 널리 쓰이고 있다.

어느 방법을 이용하든지 장하의 값과 치수비가 결정되면 설계식을 이용하여 세부 치수를 결정하고, 특성을 계산하여 모터의 성능을 평가한 후, 요구사항을 만족하지 않으면 재설계하여 원하는 특성을 얻을 때까지 반복설계

한다. 그러므로 이와같은 설계방법을 이용하여 모터를 최적설계할 경우 상당한 노력과 시간이 소요되고, 장하비와 치수비를 선정할 때와 이론적으로는 구할 수 없는 파라미터나 계수의 값을 선정하는 데에 있어 과거의 설계자료 및 설계자의 경험과 지식에 절대적으로 의존할 수 밖에 없다는 문제점이 있다.

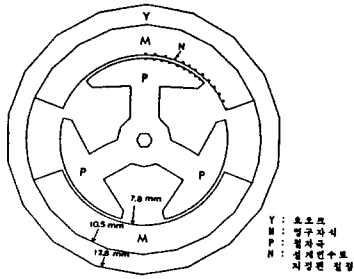
IV. 최적설계

기존의 설계방법은 위에서 언급한 문제점 이외에도 그와 같이 설계된 결과가 최적설계라는 것을 수학적으로 증명할 수가 없다는 문제점을 갖고 있다. 이 문제점을 해결하기 위한 노력은 근래에 들어 최적화기법에 대한 이론적인 연구의 진전과 컴퓨터의 발달에 힘입어 가속화되었다. 즉, 모터 설계에 최적화기법을 적용하여 원하는 특성을 수학적으로 최적화하는 최적설계에 대한 연구가 진행되고 있다.

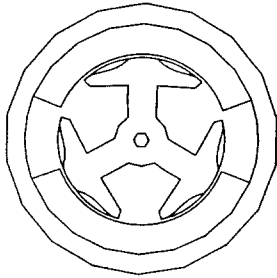
현재까지 보고된 모터의 최적설계에 관한 연구는 치수 최적화설계와 형상 최적화설계에 관한 연구로 대별된다. 전자는 해석적인 방법으로 구한 특성식과 설계식으로부터 최적화하고자 하는 특성을 하나의 목적함수로 선정하여 이를 최적화하는 모터의 설계 파라미터를 구하는 연구를 의미한다. 그리고, 후자는 원하는 특성을 얻기 위해 유한요소법을 이용하여 슬롯형상이나 자극의 형상 혹은 배치를 최적화하는 연구가 해당된다. 그 대표적인 연구결과 중의 하나로서 유한요소법에 기초한 민감도해석법을 적용하여 영구자석 모터의 코깅토크를 저감시키기 위한 철자극의 형상 최적화 설계에 대한 결과가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3(a)는 영구자석 모터의 초기설계모델을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 민감도해석법을 적용한 형상 최적화 설계의 결과로 얻어진 철자극의 형상을 보이고 있다. 이 모델의 경우 후자가 전자에 비해 코깅토크의 최대치가 약 1/2로 감소한다.[6]

그러나, 현재까지의 연구에서 사용된 최적화기법의 대부분은 경사도감소방법을 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 시뮬레이터드 애널링과 유전 알고리즘 등의 확률론적인 방법들을 최적화기법으로 사용한 최적설계기법에 대한 연구가 시도되고 있다. 이 방법들의 공통점은 목적함수의 값이나, 그 레디언트가 감소하는 방향만이 아닌 그 반대의 방향으로 도 변수를 탐색할 수 있는 가능성을 확률적으로 보장함



(a) 영구자석 모터의 초기설계 모델



(b) 철자극 형상최적화의 결과

Fig. 3. 민감도해석법을 적용한 영구자석 모터의 철자극의 형상최적화

로써 국소해가 아닌 최적해로 수렴할 수 있다는 것이다. 이 방법들의 최적해로의 수렴성은 수학적으로 증명이 되어 있어 이 방법을 사용할 경우 최적해를 구할 수 있다는 장점은 있지만, 확률적으로 변수탐색의 방향을 제어하므로 그 실행시간이 SUMT 등의 방법에 비해 상당히 길다는 단점이 있다.

실행시간이 길다는 확률론적인 방법의 단점을 해결하기 위하여 알고리즘 초기에는 확률론적인 방법을 이용하여 최적해가 존재하는 영역을 찾고, 최적해가 존재한다고 판단되는 영역에 이르르면 그 영역에서 경사도감소방법등 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.

그러나, 최적화기법은 앞으로도 더욱 발전할 것으로 생각되며, 모터의 최적설계에 있어서는 목적함수가 하나가 아닌 여러개의 목적함수를 동시에 최적화하는 다중목적

함수의 최적화 설계 및 등가회로로부터 얻어진 특성식과 설계식에 유한요소법 등의 수치해석적인 방법을 결합하여 모터의 치수 및 형상을 최적화하는 설계에 대한 연구가 기대된다 하겠다.

V. 결 론

메카트로닉스 분야에 사용되는 영구자석 모터와 유도기를 중심으로 모터의 자기장 해석기법과 설계방법 및 최적설계방법에 대해 현재까지의 연구결과와 앞으로의 전망에 대해 고찰하였다. 근래까지 자기장 해석방법은 주로 등가자기회로를 기초로 한 해석적인 방법이 주류를 이루고 있지만 점차 수치해석적인 해석법의 비중이 증가하는 추세에 있다. 또한, 설계방법 역시 등가자기회로 해석에 기초한 장하분배법과 D^2L 법이 사용되었고, 최적설계기법도 경사도감소방법을 기초로 한 SUMT가 주로 사용되었지만, 확률론적인 방법을 이용한 설계 최적화기법, 그리고 유한요소법을 이용한 형상 최적화설계기법에 대한 연구가 시도되고 있다.

앞으로는 자기장 해석방법의 경우 등가자기회로와 수치해석적인 방법을 상호보완적으로 혼합적용하는 연구가 시도될 것으로 전망되며, 최적화설계의 경우 다중목적함수의 최적설계 및 수치해석적인 방법을 이용하여 모터의 치수 및 형상을 최적화하는 연구가 시도될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Hague, "The Principles of Electromagnetism Applied to Electrical Machines", Dover, 1962.
- [2] 윤중석, "자극형상 최적화에 의한 표면부착 영구자석형 교류서보모터의 설계", 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원 전기공학과, 1993. 8.
- [3] 한송엽, "우리나라 전자장 수치해석분야의 현재와 미래", 대한전기학회지, 제39권 3호, pp. 4~8, 1990. 3.
- [4] 박현수, "최적치수설계에 의한 매입형 영구자석 동기전동기의 속도-출력영역 확장", 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원 전기공학과, 1993. 8.
- [5] 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.
- [6] 박일한, "전자소자의 형상최적화를 위한 민감도해석", 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원 전기공학과, 1993. 8.