

유한요소법에 의한 스텝모터의 토크특성 해석

배동진⁰, 이종인*, 이정일*, 박현준*, 김종구*

* 현대중전기(주) 기술연구소

한송엽**

** 서울대학교 전기공학과

Analysis of Torque Characteristics of Step Motor by FEM

D.J.Bae⁰, J.I.Lee, J.I.Lee, H.J.Park, J.K.Kim
R&D CENTER,
HYUNDAI ELECTRICAL ENGINEERING CO.

S.Y.Hahn
DEPT. OF ELECTRICAL ENG.
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

Abstract - The technique to design high performance small motors has been based on experimental data, which results from lots of cost, experience and time in manufacturing. Recently, as high-performance computer appears, many engineers use numerical methods to design and analyze electric machine. Since, the step motor which has very small air gap(0.02-0.05mm) is different from other electric machine in its structure. The shape of rotor teeth and stator teeth influence seriously on the torque characteristics. And it is operated over magnetic saturation point. Therefore, the design of step motor needs to solve nonlinear problem and to calculate magnetic field precisely.

In this paper, we solve nonlinear problem by employing Finite Element Method and obtain torque-displacement characteristics for the design of step motor. We also manufacture VR step motor according to the obtained results, and measure some torque characteristics. Through comparing calculated results with experimental results, it is verified that FEM is very useful to design step motor, and the motor designed by our technique is improved in its step accuracy.

I. 서 론

스텝모터는 외부에서의 펄스입력신호에 의해 개루프를 제어할 수 있으므로, 위치결정제어에 사용할 때 구동시스템이 비교적 저렴하게 되므로, 최근 들어 이런 장점을 살려 OA(사무자동화)기기, FA(공장자동화)기기, 산업기기 등에 제어용, 구동용으

로 많이 사용되고 있다.

전기기기의 설계는 가장 고전적인 방법으로 등가자기회로로 모델링하여 전기적 입력에서 기계적 출력을 얻는 구조를 결정하는 방법으로 행해져 왔다. 정밀소형모터도 기본적인 토크식은 등가자기회로를 이용하여 설계해 왔으나, 특성개선을 위한 구조변경에는 많은 시행착오를 거친 경험적 데이터를 기반으로 설계의 방향을 결정지어 왔다.

최근에는 컴퓨터의 발달에 힘입어, 전자장 수치 해석을 이용하여, 기기 내부의 형상을 모델링하여 정확한 자장계산을 통하여 설계, 해석하는 방법으로 시뮬레이션한 결과를 특성개선에 적용하여 성공하는 사례가 늘고 있다.

본 연구에서는 스테핑모터의 설계시, 유한요소법을 이용하여 비선형 자기포화현상에 따른 토크특성을 계산하고, 설계결과로 제작된 시제품을 특성시험하여 해석결과를 검증하고, 추후 설계의 방향을 제시하는 과정을 다루었다.

II. 본 론

스텝모터는 일반적으로 자기회로의 구성에 따라 VR형(가변릴럭턴스형), PM형(영구자석형), HB형(복합형)으로 분류가 되는데, 여기서는 VR형에 대해서 다루기로 한다.

그림 1에 분해능 200, 기본스텝각 1.8 도의 스텝모터 단면도를 나타내었다. 회전자 치수 50개, 고정자 극수 8극, 극당 치수 5개의 구조로 2상 스텝모터이다. 공극의 길이는 0.05mm이고, 한 극당 권선 횟수는 37회이며, 정격전류는 3.1A일 경우를 기본모델로 택하여 해석을 실시하였다.

스텝모터의 특성은 크게 정특성, 동특성, 과도응답특성이 있는데, 특히 정특성은 토크와 위치정밀도

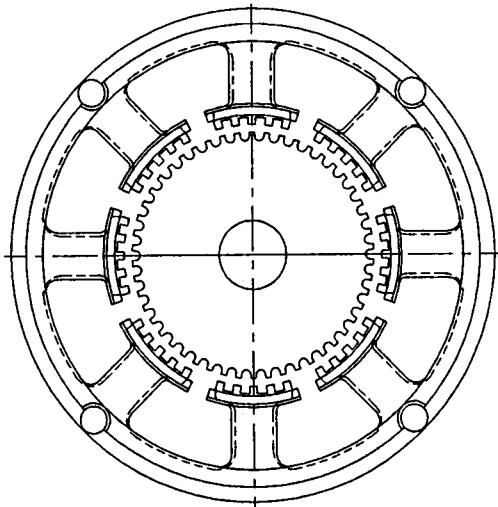


그림 1 VR형 스텝모터의 단면도

등을 결정짓는 중요한 설계주안점이 되므로, 이에 대한 세밀한 검토가 필요하다. 정특성은 구체적으로, 각도-토크 특성, 여자시 최대정지토크, 무여자시 최대정지토크, 정지각도정밀도, 스텝각도정밀도 등으로 분류되어 진다. 여기서는 주로 각도-토크 특성에 대한 수치해석결과와 제작된 시제품의 시험 결과를 비교 분석하기로 한다.

스텝모터의 설계이론 중 일반전기기계와 크게 다른점 중의 하나는, 공극이 작아서 (0.02 - 0.05mm) 고정자와 회전자의 치형상이나 치폭이 발생토크에 미치는 영향이 크고, 대부분의 경우 치끝단에서의 자속밀도가 자기포화점을 넘어 동작한다는 것이다. 따라서, 설계시에는 자기적인 포화특성을 잘 알고, 비선형해석을 통하여 선형해석시 생기는 오차를 충분히 줄여나가는 해석기법을 써야 한다. 본 연구에서는 전자기장수치해석의 하나인 유한요소법을 적용하여 비선형수렴을 거쳐 정확한 자장계산을 통해 발생토크를 계산했다.

II. 1 유한요소법 지배방정식

유한요소법은 전자기장방정식을 수치해석적으로 풀이하여 해석하는 기법으로, 특히 비선형문제를 해석함에 있어 다른 수치적 해법보다 우수한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 고정자권선의 전류를 전류원으로 하는 정자장 문제를 해석한다.

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에 서 성립하는 Maxwell방정식과 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J_0 \quad (1)$$

$$B = \mu H \quad (2)$$

$$B = \nabla \cdot A \quad (3)$$

여기서, B는 자속밀도, A는 자기벡터포텐셜, H는 자기세기, J는 전류밀도, μ 는 자성체의 투자율(permeability)이다.

해석영역을 고정경계조건(Dirichlet Boundary Condition)과 자연경계조건(Natural Boundary Condition)으로 나눈 후 전체영역에 대해 적분하여 2차원으로 전개하면 다음과 같다.

$$\iint_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] dx dy - \iint_{\Omega} J_0 N_i dx dy = 0$$

여기서, v 는 $\frac{1}{\mu}$ 을 의미하며 비선형의 경우에는

자기벡터포텐셜 A의 값에 따라 다르므로, 매 경우 각 요소마다 비선형데이터 상의 값을 찾아서 대입하여 주어야 한다.

비선형을 고려하여 최종적으로 이산화된 계수행렬을 수식화 하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A_1 \partial A_1} & \dots & \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A_1 \partial A_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A_i \partial A_j} & \dots & \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A_i \partial A_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A_n \partial A_1} & \dots & \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A_n \partial A_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta A_1 \\ \vdots \\ \delta A_i \\ \vdots \\ \delta A_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \gamma}{\partial A_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial \gamma}{\partial A_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial \gamma}{\partial A_n} \end{Bmatrix}$$

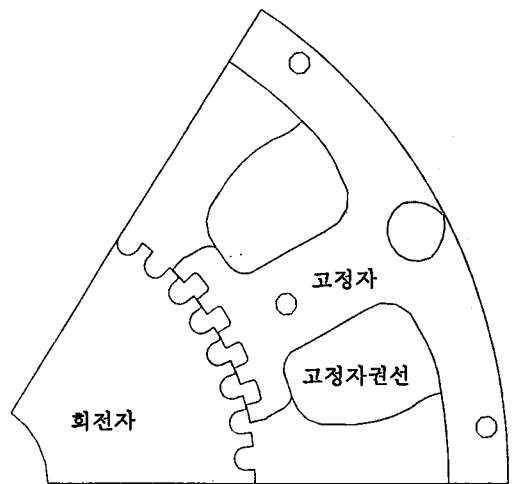


그림 2 유한요소법 해석 단면

II. 2 유한요소법 모델링

그림 2 에 유한요소법으로 해석하기 위한 단면을 나타내었다. 고정자의 한 극이 여자되었을 때의 자로는 여자된 극을 중심으로 이루어지므로, 토크는 여자된 고정자 극의 치와 회전자 치의 릴럭턴스를 최소화하는 방향으로 발생된다. 따라서, 모델링은 해석의 간편을 위해 여자된 극을 중심으로 1/8 만 해석하였다. 고정자와 회전자의 재질은 규소강판이며, 자속밀도와 자화의 세기의 관계를 그림 3 에 나타내었다. 최대자속밀도는 1.4 [T] 정도이고, 이 때의 비투자율은 5000인 것으로 나타난다.

본 연구에서는 규소강판의 자기적 비선형현상을 고려하여 NEWTON-RAPHSON법에 의한 비선형수렴방식과정을 거쳤다. 이에 대한 순서도를 그림 4 에 나타내었다. 이 때, 발생하는 토크의 계산은 MAXWELL STRESS TENSOR 법을 이용하였다.

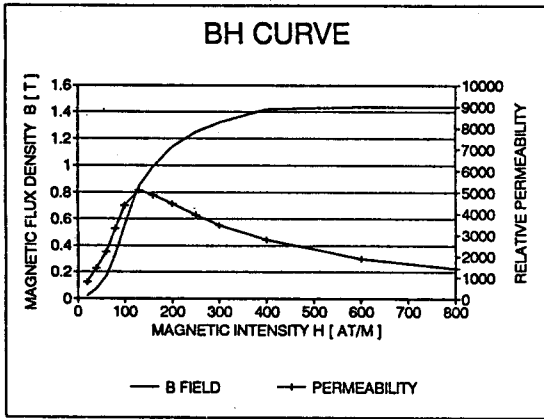


그림 3 규소강판의 BH곡선

II. 3 해석결과와 특성시험과의 비교검토

(1) 자속분포와 치끝단에서의 자속밀도

위의 절차에 따라 계산을 한 결과에 따라 그림 5 에 자속분포도를 나타내었다.

스텝모터는 공극이 작으므로 공극에서 소요되는 기자력이 작다. 이 때문에 대부분의 경우 치 끝단에서는 자기포화현상이 일어난다. 그림 6에서는 치 끝단의 자속밀도를 계산하여 도식화한 것이다. 고정자 전류가 3.1 [A]일 때 치 끝단의 자속밀도의 최고치가 1.42 [T]로 나타나고 있다.

일반기계의 경우 동작점이 대개 1 [T] 미만에서 결정된다는 것을 감안할 때 상대적으로 높은 자속밀도를 나타냄을 알수 있다.

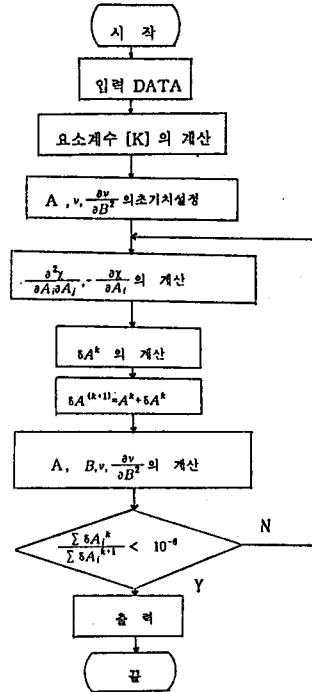


그림 4 비선형 수렴을 위한 순서도

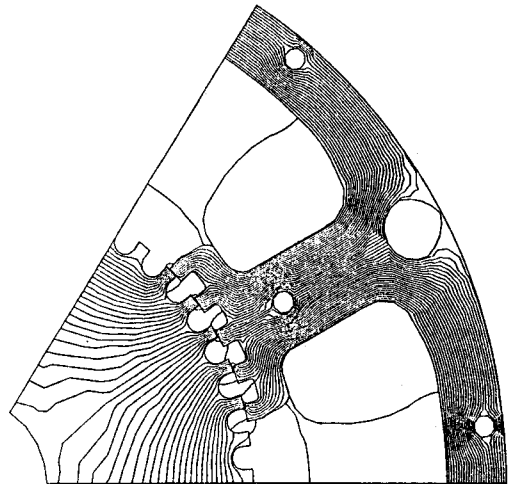


그림 5. 자속분포도

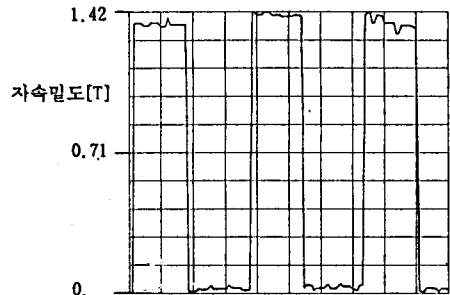


그림 6 치 끝단에서의 자속밀도

(2) T-I 특성곡선

스텝모터는 공극이 작고 대부분의 경우 치끝단에서는 자기포화의 범위를 지나 동작하게 되므로, 전류의 증가에 따른 발생토크는 비선형과 포화현상을 동시에 포함하고 있다. 최대 토크의 시점에서 전류의 값을 변화시켰을 때 토크의 변화를 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서 나타났듯이, 일반적으로 선형부자율을 갖는다고 가정했을 때는 전류의 제곱에 비례하게 나타나지만, 3.1A에서 자기포화현상으로 토크파형의 증가세가 둔화되는 현상을 나타내고 있다.

시험치에서는 포화되기 전의 범위에 대하여 토크값을 측정했으며 계산값보다는 약간 큰 값으로 나왔다. 이는 2차원 모델링의 경우 단부 효과(End Effect)를 무시하고 계산했으므로, 실험값이 약간 크게 나오므로 타당성이 있다고 하겠다.

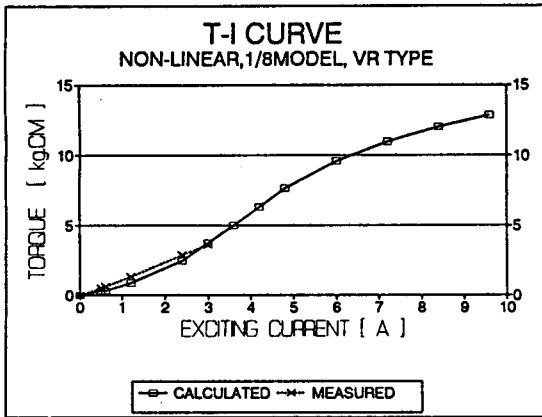


그림 7 전류의 변화에 따른 토크값 (실험치와 계산치)

(3) 토크-변위 특성곡선

고정자치와 회전자치의 엇갈림에 따른 토크의 변화를 나타낸 것이 그림 8이다. 이는 회전자 치의 중심과 고정자치의 중심이 일치했을 때를 기준으로 0.05도 씩 회전자를 회전해가며 계산한 값이다.

스텝모터의 위치정밀도는 그림 8와 같은 토크-변위곡선에서 추정할 수 있다. 일반적으로 위치정밀도는 변위에 따른 토크의 변화분(torque gradient)이 클수록 정밀하다고 되어 있다. 따라서, 위치정밀도를 개선하기 위한 많은 연구가 토크파형에 큰 영향을 주는 치폭 대 치피치 비, 치의 형태, 슬롯깊이 등에 관하여 이루어졌고, 이의 이론적 배경을 바탕으로 제작되어 많은 경험을 축적하여왔다. [1],[4]

여기서는 앞서의 참고문헌을 토대로 위치정밀도

가 좋은 경우와 포화의 영향을 줄이고 효율을 최대화하는 방향으로 설계의 방향을 잡고 여러 경우를 계산해 보았다.

그림 8에 나와 있는 파형은 그 중 개발품으로 결정된 파형이고 이를 시험치와 비교하여 보았다.

토크파형은 대체로 일치해 보이며, 특히 토크의 변화분은 잘 들어맞는 것으로 나타나고, 최대토크의 지점과 최대토크값에서 약간 차이를 보이고 있다. 측정기기의 오차 및 회전자관성을 감안해서 토크파형이 뒤로 밀린다고 보면 매우 잘 일치하는 결과라고 할 수 있다. 본 설계에 의한 스텝모터를 제작하여 테스트한 결과 각도위치정밀도가 5%오차범위 안에 수렴했다.

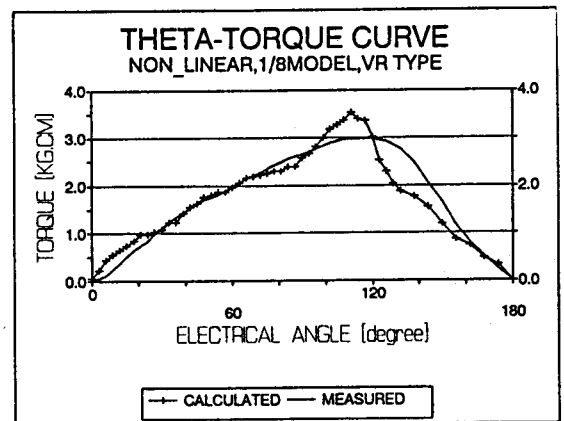


그림 8 토크-변위의 변화 비교(실험값+계산값)

III. 결 론

스텝모터의 설계 및 해석은 자기회로의 비선형성을 수반한 치형상의 변화를 고려해야 하므로, 기존의 자기회로법에 의한 방법으로는 해석의 한계가 있었다.

유한요소법에 의한 토크해석은 기기내부의 자장을 비선형성을 고려하여 해결할 수 있어서 최근 들어 전기기기의 해석에 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 비선형성을 고려한 토크해석을 하였으며 실험으로 나온 결과와 비교하여 매우 잘 일치하는 결과를 얻었다. 또한, 위치정밀도에 직접적인 영향을 미치는 토크-변위 곡선을 구하고 시험을 통하여 이를 검증하였다.

본 연구결과는 앞으로 스텝모터의 설계, 개발시 기본자료로 이용할 수 있으며, 이는 향후 회전자에 영구자석이 있는 복합형(HB TYPE) 스텝모터의 해석에 적용될 수 있으며, 궁극적으로는 최근의 설계 방향인 진동, 소음을 줄이는 방향으로도 연구되어야겠다.