2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

등가자기회로법과 유한요소법을 이용한 액츄에이터의 토크특성 해석

김영균 , 홍정표 , 김제덕*
창원대학교 , *주식회사 만도

Torque Analysis of Rotary Actuator Using Equvalent Magnetic Circuit method in combination with finite element method

Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Je-Deok Kim*
Dept. of Electrical Eng. Changwon Nat'l Univ. , *Mando Corp.

Abstract - Although Equvalent Magnetic Circuit (EMC) method Using lumped parameter and numerical analysis method are widely used for electric machine analysis. these are neither always accurate enough nor sometimes available to easily use. Moreover three dimensional finite element method (3D-FEM) is inherently unsuitable for electric machine performance evaluation due to its poor computational efficiency, such as too long calculation time and difficulty in modeling for analysis. In this paper, Nonlinear Equivalent Magnetic Circuit (NEMC) method in combination with 2D-FEM is proposed to analyze the electric machine requiring 3D-FEM, and this method applys to torque evaluation for rotary actuator of Electro Magnetic Electronic Controller Power Steering (EM-ECPS)

1. 서 론

오늘날, 자동차 제조산업에 있어서 자동차의 환경 및 안전규제가 강화됨에 따라, 자동차 시장의 경쟁이 치열해지고 있으며 보다 편리하고 안락한 차량의 개발이 요구되고 있다. 따라서 자동차의 각종 편의장치를 기계적인 장치에서 전기기기와 제어장치를 사용한 전기/전자장치로 대체하는 연구개발이 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라 오래전부터 시판되는 자동차에 이러한 편의장치들이 부착되고 있다[1,2].

각종 자동차의 편의 장치 중에서, 조향보조장치는 약 53년 전에 유압식 조향장치의 개념이 소개되었다. 그후 많은 시스템이 개발되었으며, 유압과 전동모터를 혼합한 조향보조장치에 사용되는 회전형 액츄에이터는 자동차의 편의 장치중 파워 도어록 등에도 사용되며 그 수요가 많다[2,3].

본 논문에서는 유압과 전동모터를 적절히 혼합한 자동차의 조향보조장치(EM-ECPS)의 구성요소중에서 반력기구부로 사용되는 회전형 액츄에이터의 자기회로를 해석하는 방법에 대해서 기술하고자 한다. 이 회전형 액츄에이터는 유압식 조향장치의 토크 성능을 증진시키기 위해 제한된 회전동작을 하면서 동시에 높은 토크특성이 필요하다. EM-ECPS의 반력기구부는 여자코일, 링 마그네트, EM-폴, PM-폴 등 크게 4부분으로 구성되며 그림 1.1에 그 구조를 나타내었다.

따라서, 회전형 액츄에이터는 그림 1.1과 같은 구조를 가지므로 2차원 유한요소해석만으로는 회전형 액츄에이터의 토크특성을 정확하게 해석하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 회전형 액츄에이터의 보다 정확한 특성해석을 위해서 등가자기회로법을 이용한 비선형해석과 유한요소법(FEM)을 결합한 해석방법을 제안하고자 한다. 그리고 기존의 유압식 조향장치에 전자제어 방식을 결합한 조향장치가 보다 편리하고 안락한 최적의 조타력을 확보할 수 있도록 하는 것이 특성해석의 목적이다. .

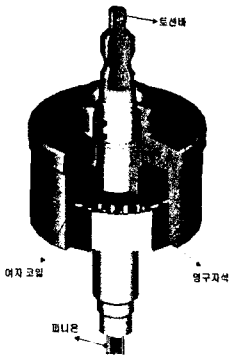

그림 1.1 회전형 액츄에이터 구조도

회전형 액츄에이터 설계시, 여자코일 및 영구자석, 자기회로 등의 설계변수를 고려할 수 있다. 본 논문에서는 이미 설계된 회전형 액츄에이터의 성능을 개선시키기 위해서 회전형 액츄에이터의 자기회로를 구성하는 Pole 형상치수와 Pole수를 변화시켜가며 토크특성을 해석하였다. 그리고 요구되는 특성을 만족하는 Pole의 형상치수와 Pole의 수를 결정하였으며 영구자석의 재질을 검토하였다.

2. 회전형 액츄에이터의 자기회로 해석이론

회전형 액츄에이터의 정확한 토크특성을 해석하기 위해서는 구조상 3차원 유한요소해석을 필요로 하지만 일반적으로 3차원 유한요소해석은 많은 양의 계산 시간과 노력을 필요로 한다. 고성능 컴퓨터의 발달로 이러한 계산시간을 단축할 수 있다고 하더라도 컴퓨터 가격이 고가이며, 해석대상이 복잡한 경우에는 모델링이 쉽지 않고 3차원 요소분할은 많은 경험과 주의를 필요로 한다. 반면에, 이러한 노력과 시간측면에 있어서 계산의 효율성을 비교해볼 때, 2차원 유한요소해석은 빠른 해석결과와 비교적 정확한 해를 제공한다[4].

따라서 본 논문에서는 2차원 유한요소해석을 이용하여 회전형 액츄에이터의 특성을 보다 정확하게 해석하기 위해서 비선형 등가자기회로법을 결합하여 유한요소해석으로 고려할 수 없는 부분들의 자기회로를 고려하였다.

2.1 해석 모델

회전형 액츄에이터의 전체 자기회로에서 자속의 자로를 그림 2.1에서와 같이 자기등가회로로 표현할 수 있다. 회전형 액츄에이터의 특성을 해석하기 위해서 크게 비선형 등가자기회로 해석 부분과 2차원 유한요소해석 부분으로 나눈다. 따라서, 그림 2.1에서 Ⓐ부분을 제외한 나머지 자기회로의 기자력강하 성분을 비선형 등가자

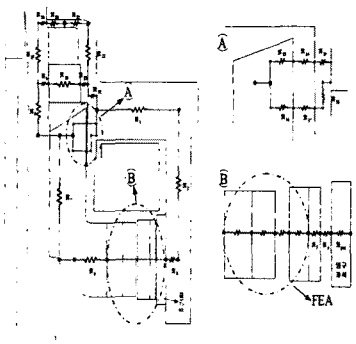

그림 2.1 회전형 액츄에이터의 자기회로

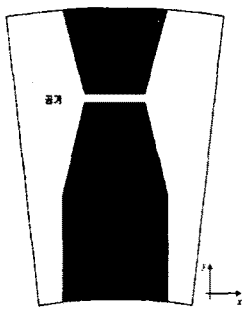

그림 2.2 회전형 액츄에이터의 FEA 영역의 해석 모델

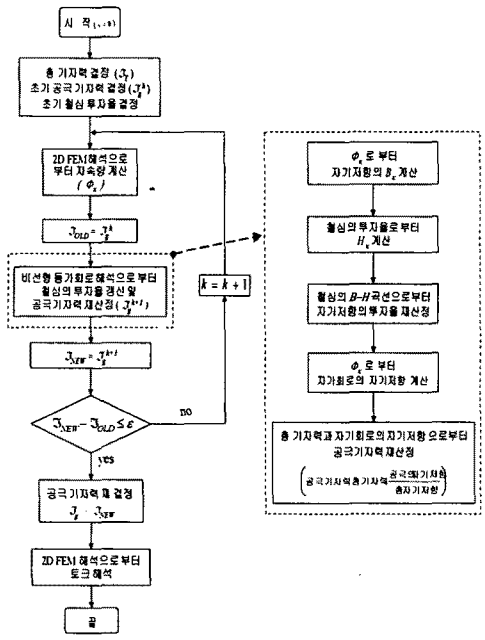

그림 2.3 등가자기회로법과 FEM을 결합한 자기회로해석 과정

기회로법으로 구하고 이렇게 구한 기자력강하 성분을 Ⓐ 부분 즉, FEA 영역의 공극기자력을 재산정하는데 이용하였다.

그림 2.2에 나타낸 FEA 영역의 유한요소해석에서 회전형 액츄에이터 1개의 Pole부분을 해석영역으로 선정하였다. 자기스칼라포텐셜을 계변수로 하는 지배방정식을 유도하고, 해석영역은 준 정상상태이므로 변위전류는 무시하였다. 그리고 철심의 재질은 등방성이고 균일하다고 가정하였으며, 철심 재질은 AB430을 사용하였다.

2.2 등가자기회로법과 FEM을 결합한 특성해석

회전형 액츄에이터의 특성을 해석하기 위해서 크게 비선형 등가자기회로 해석 부분과 2차원 유한요소해석부분으로 나눈다. 비선형 등가자기회로법을 도입하여 유한요소해석으로 고려할 수 없는 부분들에서의 기자력강하를 구하고 이것으로부터 공극기자력을 재평가하여 유한요소해석에 적용한다면 회전형 액츄에이터의 정확한 토크특성을 해석할 수 있을 것이다. 비선형 등가자기회로법과 유한요소법을 결합한 해석방법을 적용하기 위해서 회전형 액츄에이터의 전체 자기회로를 그림 2.1과 같이 가정하고 나머지 누설자속은 무시한다. 등가자기회로 해석으로부터 구해지는 자기저항의 기자력강하로부터 공극기자력을 재산정하여 토크를 해석하는 일련의 해석과정을 그림 2.3에 나타내었다.

2.3 FEA 영역의 특성방정식

전자기장에서 일어나는 제반특성을 해석하는데 있어서, 전계 $\vec{E}$와 자계 $\vec{H}$로써 특성식을 표현하여 제반현상들을 설명할 수 있다. 그러나 실제 유한요소해석에 있어서는 포텐셜을 계변수로 하여 다루는 것이 편리한 경우가 많다. 이러한 경우에 이용되는 포텐셜은 스칼라 포텐셜과 벡터 포텐셜로 구분된다. 해석모델의 유한요소해석을 위한 특성방정식은 멕스웰 전자방정식 및 보조 방정식으로부터 다음 식과 같이 자기 스칼라포텐셜 Ω로 표현한 정자계의 지배방정식을 구할 수 있다[5].

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \Omega) = 0 \qquad (2.1)$$

2차원 해석영역에서 이 지배방정식을 풀기위한 경계조건으로서는 두점간의 자위차를 이용하여 해를 구할 수 있다. 또한 투자율 μ에 대해 각 축방향성분만을 고려하면, B_x, B_y성분은 식(2.2)와 같다.

$$B_x = \mu_x H_x, \quad B_y = \mu_y H_y \qquad (2.2)$$

식(2.1)로부터 2차원 해석영역에서 자기 스칼라포텐셜을 계변수로 하는 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial \Omega}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial \Omega}{\partial y}) = 0 \qquad (2.3)$$

3. 해석 결과 및 검토

3.1 회전형 액츄에이터의 초기 설계 제원

회전형 액츄에이터는 영구자석과 결합되어 있는 PM-Pole, 축과 결합되어 있는 EM-Pole, 그리고 여자코일분으로 구성된다. 이러한 구성요소를 가진 EM-ECPS 반력기구부는 운전자에게 충분한 조타력과 안락한 조향력을 공급하기 위해서 큰 토크 특성을 가짐과 동시에 넓은 동작영역이 요구된다.

따라서, 회전형 액츄에이터의 자기회로를 설계하기 위해서 액츄에이터의 Pole 폭과 Pole 끝단폭 그리고 Pole 수를 변화시켜가면서 요구되는 성능을 만족하는 Pole의 형상치수를 결정하였으며, 표 3.1과 그림 3.1에 회전형 액츄에이터의 초기 개념설계 치수를 나타내었다.

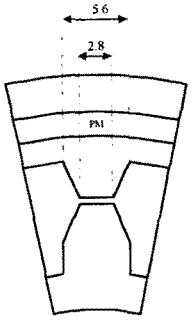

그림 3.1 초기 설계치수

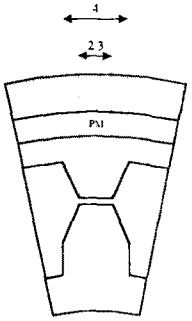

그림 3.2 개선된 형상치수

표 3.1 회전형 액츄에이터의 초기 설계사양

Pole 수	15 (개)	영구자석 두께	2 (*mm*)
공극	0.5 (*mm*)	철심 재질	AB430
여자 전류	0, ±3 (*A*)	잔류자속 밀도	1.1 (*T*)
여자코일 턴수	200 (턴)	영구자석 재질	ND계열

3.2 개선된 회전형 액츄에이터의 형상 치수

회전형 액츄에이터의 토크특성을 향상시키기 위해서 Pole 폭과 Pole 끝단폭 그리고 Pole 수를 변화시켜가면서 토크특성을 해석하였다. 그리고 요구되는 성능을 만족하는 회전형 액츄에이터 Pole의 형상치수를 표 3.2와 그림 3.2에 나타내었다.

표 3.2 회전형 액츄에이터의 개선된 설계사양

Pole 수	24 (*mm*)	영구자석 두께	2 (*mm*)
공극	0.3 (*mm*)	철심재질	S20C
여자전류	0, ±3 (*A*)	잔류자속 밀도	1.1 (*T*)
여자코일 턴수	200 (턴)	영구자석 재질	ND계열

3.3 영구자석의 잔류자속밀도에 따른 토크특성

영구자석의 잔류 자속밀도 변화에 대한 회전형 액츄에이터의 토크특성을 보면 영구자석의 잔류자속밀도가 1.1(*T*) 일 때는 토크의 값은 증가하지만 전체 자기회로가 포화되므로 여자전류의 변화에 따른 토크제어 범위가 매우 좁게 나타난다. 반면에 영구자석의 잔류자속밀도가 0.75(*T*) 일 때는 회전형 액츄에이터의 토크는 감소하지만 전체 자기회로에서 포화는 발생하지 않으므로 여자전류 변화에 대한 토크의 제어범위가 매우 넓게 나타난다. 또한 잔류자속밀도가 0.75(*T*) 인 경우는 Bonded Co-mpound Magnet를 사용할 수 있으므로 ND계열의 영구자석을 사용하는 것보다 경제적으로 유리하다. 그림 3.3에 영구자석의 잔류자속밀도 변화에 따른 토크특성을 해석한 결과를 나타내었으며, 그림 3.4에 영구자석의 잔류 자석밀도에 따른 회전형 액츄에이터의 최대 토크와 최소토크 사이의 토크편차를 나타내었다. 이 결과로부터 영구자석의 잔류 자속밀도가 0.75(*T*)일 때 여자전류의 변화에 따른 토크제어가 용이하다는 것을 쉽게 알 수 있다.

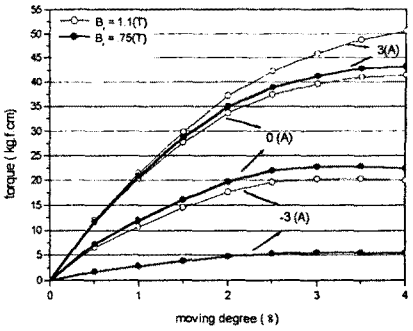

그림 3.3 잔류자속밀도에 따른 토크특성

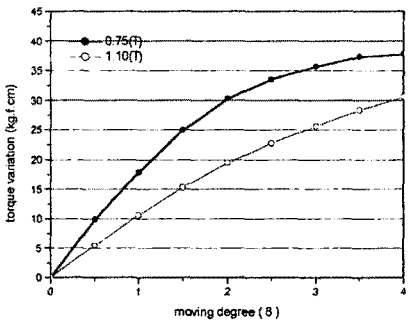

그림 3.4 잔류 자속밀도에 따른 토크편차

4. 결론

본 논문에서는 비선형 등가 자기회로해석법과 2차원 유한요소 해석을 사용하여 EM-ECPS 반력기구부로 사용되는 회전형 액츄에이터의 토크특성을 해석하였다. 그리고 충분한 조타력과 안락한 조향력을 공급하기 위해서 필요한 큰 토크 특성과 넓은 동작영역이 요구되는 회전형 액츄에이터의 성능을 개선시켰다.

또한, 본 논문은 회전형 액츄에이터와 같이 3차원 유한요소해석을 필요로 하고 동시에 형상이 복잡한 해석대상에 2차원 유한요소해석을 이용하였다. 본 논문에서 제안한 비선형 등가 자기회로해석과 결합한 2차원 유한요소 해석방법은 이러한 자기회로해석에 있어서 매우 유용할 것이라고 사료된다. 앞으로, 비선형 등가 자기회로해석법과 결합한 2차원 유한요소 해석방법의 정확성 검정을 위한 연구가 필요하며, 이러한 검정은 실험을 통해서 이뤄질 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] 박동진, "전동식 동력 조향 장치 연구를 위한 HILS 시스템 개발 ", 한양대학교 대학원 정밀기계공학과 석사학위논문, 1999.

[2] Cheryl, "Eletric Steering System Challenges Traditional Steering Approaches", ELECTRONIC DESIGN, JULY 7, 1997.

[3] Andrzej, "Rotary Actuators with Multi Ring Magnets", IEEE Tran. on INDUSTRY APPL., VOL. 31, NO. 6, P.1306, 1995.

[4] Vlado, "A Magnetic-Equivalent-Circuit-Based Performance Computation of a Lundell Alternator", IEEE Tran. on INDUSTRY APPL., VOL. 35, NO. 4, P.825, 1999.

[5] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1995.