

하이브리드 스테핑 모터의 치형상 변화에 따른 특성 해석

안호진, 강규홍, 홍정표, 김규탁, 이종배*, 성하경*, 임태빈*
 창원대학교 전기공학과, (주)모터넷*

Characteristic Analysis of a Hybrid Stepping Motor by Change of Teeth Shape

Ho-Jin Ahn, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim,
 Jong-Bae Lee*, Ha-Gyeong Sung*, Tae-Bin Lim*
 Department of Electric Engineering, Changwon National University,
 Motor-Net international Co.,LTD*

Abstract - In hybrid stepping motors, the shape of teeth is most important design variable which have critical influence on output characteristics. This paper deals with the characteristic analysis by change of teeth shape and present a improved model. FEM(Finite Element Method) and EMCM(Equivalent Magnetic Circuit Method) are used for analysis.

1. 서 론

하이브리드 스테핑 모터(Hybrid Stepping Motor)는 위치제어용 액츄에이터로서 사무자동화 기기와 공장자동화 기기에 널리 이용되고 있다. 이러한 하이브리드 스테핑 모터는 적용 분야의 특성상 소형화가 요구되므로 체적당 토크를 크게 하기 위해 일반 모터에 비해서 공극이 매우 작고, 포화영역에서 운전되고 있다. 따라서 하이브리드 스테핑 모터에서 공극부를 형성하는 회전자와 고정자의 치(teeth)형상은 출력특성에 가장 큰 영향을 주는 설계요소가 된다[1]. 본 논문에서는 하이브리드 스테핑 모터의 치형상이 출력특성에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

하이브리드 스테핑 모터는 포화영역에서 운전되므로 포화현상을 고려한 특성해석이 요구된다[2]. 특히 출력특성에 가장 큰 영향을 미치는 회전자 및 고정자의 치부분에서는 포화현상이 극심하므로 유한요소법(Finite Element Method : FEM)과 같은 수치해석적인 방법을 이용해야 한다. 그러나 하이브리드 영구자석의 자화방향이 축방향이므로 자속의 경로(flux path)가 3차원적으로 구성되어 2차원 유한요소법의 적용이 어렵다. 또한 일반 모터에 비해 공극이 매우 작으므로 3차원 유한요소법을 적용할 경우, 미세한 공극에 충분한 요소를 나누기 위해서는 고성능의 계산기가 필요하며, 전처리 및 해석과정에 많은 노력과 시간이 소요되므로 치형상과 같

은 설계 변수의 변화에 따른 특성해석에는 부적합하다. 이러한 어려움 때문에 하이브리드 스테핑 모터의 특성 해석에 등가자기회로법을 이용하기도 한다. 그러나 등가자기회로법은 포화현상을 고려할 수 없으므로 출력특성 중 하나인 홀딩토크(holding torque)는 실제보다 1.5~2배 정도 크게 나온다[1]-[2].

본 논문에서는 하이브리드 스테핑 모터의 보다 정확하고 효율적인 특성해석을 위해 유한요소법과 등가자기회로법을 결합한 방법을 이용하였다. 해석방법의 타당성을 검증하기 위해 실험결과와 비교하였으며, 이 방법을 바탕으로 회전자 치형상 변화에 따른 특성해석을 행하여 결과를 비교하고 설계개선방향을 제시하였다.

2. 특성해석 기법

본 논문에서 형상이 복잡하고 포화현상이 심한 치-공극부에 대해서는 자기스칼라퍼텐셜을 이용한 2차원 유한요소법을 적용하여 퍼미언스를 산출하고, 비교적 포화현상이 적은 나머지 부분은 설계치수로부터 선형적인 퍼미언스를 산정한 후, 등가자기회로를 구성하고 특성해석을 행하였다.

2.1 등가자기회로

그림 1의 자료를 살펴보면 영구자석에 의한 축방향 자속은 각 상의 자극에서 분리되어 반경방향으로 흐르고 고정자 철심을 따라 축방향으로 흘러간 후 다시 반대편 회전자 철심에서 모여 영구자석으로 되돌아 간다. 이를 바탕으로 그림 2와 같은 등가자기회로를 구성할 수 있다. 한편 공극부를 살펴보면 각 상의 자극 아래에서 회전자 치는 1/4피치 만큼 서로 어긋나 있으며, 고분해능을 얻기 위해 같은 자극 아래에 있는 두 회전자 철심의 치는 1/2피치만큼 서로 어긋나 있다. 따라서 각 상의 퍼미언스는 푸리에(Fourier)급수로 함수화 했을 때 주기는 같고 단지 위상만 다른 형태로 표현된다[1].

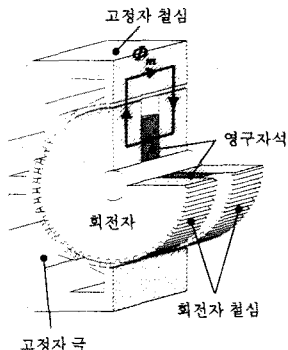


그림 1. 2상 하이브리드 스테핑 모터의 구조 및 자료

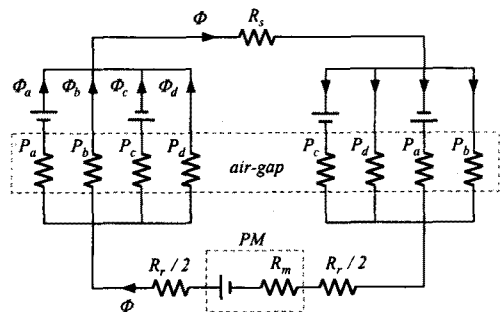


그림 2. 2상 하이브리드 스테핑 모터의 등가자기회로

2.2 유한요소법에 의한 치-공극 퍼미언스

본 논문에서는 포화현상을 고려한 치-공극의 퍼미언스를 산출하기 위해 그림 3과 같이 한 피치만큼만 따로 모델링 하여 유한요소법을 적용하였다. 그림 3과 같은 모델에서는 권선과 영구자석이 제외되었으므로 자기스칼라 퍼텐셜을 계변수로 두고, 치-공극 기자력은 고정경계조건으로 적용하였다[1]-[2].

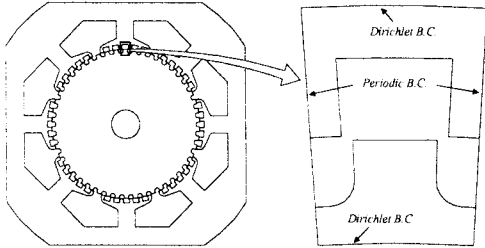


그림 3. 2차원 유한요소법을 적용하기 위한 모델

포화현상을 고려할 경우 치-공극에 인가되는 기자력을 알 수 없으므로 초기에 임의의 치-공극 기자력을 가정하고 치-공극 퍼미언스를 산출한 후에 등가회로 해석을 한다. 그리고 해석결과로 나온 치-공극 기자력을 처음에 가정했던 기자력과 비교하면서 오차가 만족하는 범위 내로 수정할 때까지 반복적인 계산을 해야한다.

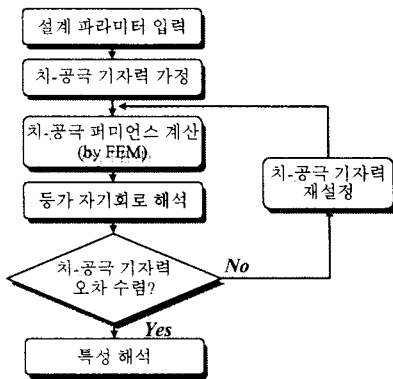


그림 4. 특성해석 프로세스

본 논문에서는 치-공극 기자력과 회전각도에 따른 퍼미언스 프로파일(profile)을 구한 후에 보간함수로 표현하여 특성해석을 하였다.

2.3 특성해석 결과

유한요소법에 의한 치-공극 퍼미언스와 설계치수로부터 산정한 회전자, 고정자 철심의 퍼미언스를 이용하여 등가자기회로를 해석하면 각 부분을 통과하는 자속과 기자력을 알 수 있다. 표 1은 특성해석 모델의 제원을 나타낸 것이다.

표 1. 해석 모델의 제원

홀딩토크 (1상 여자시)	2.6[kgf · cm]	고정자 외경	50.00[mm]
정격전류	1.2[A]	회전자 외경	25.91[mm]
상수	2상	축방향 길이	18.00[mm]
1step 각도	1.8[도]	공극 길이	0.04[mm]
극당 턴 수	53[턴]	잔류자속밀도	1.28[T]

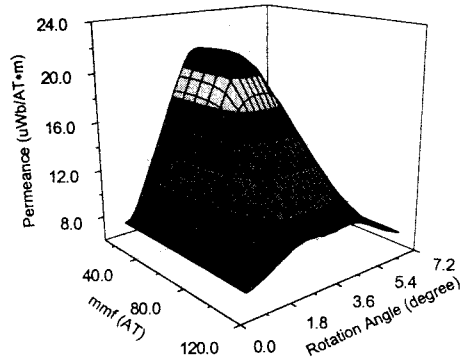


그림 5. 퍼미언스 프로파일

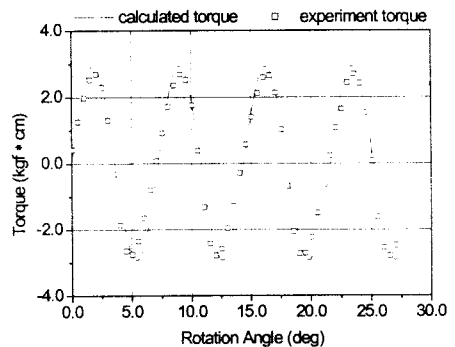
퍼미언스와 기자력으로부터 치-공극에 저장된 에너지를 식(1)과 같이 구할 수 있으며 토크는 가상변위의 원리를 이용하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[1].

$$W = \frac{1}{2} P F^2 \quad (1)$$

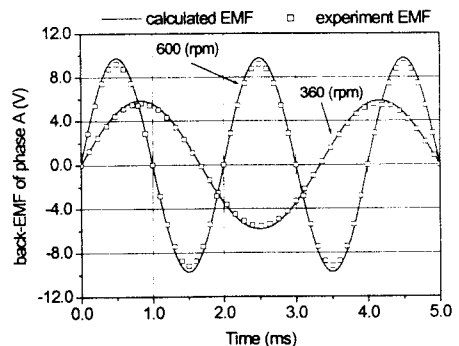
$$T = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (2)$$

여기서 P 는 치-공극 퍼미언스, F 는 치-공극 기자력을 나타낸다.

그림 6은 홀딩토크 및 역기전력의 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것으로써 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 홀딩토크와 역기전력의 최대값은 각각 12.6%, 5.1% 정도 오차가 발생하였다.



(a) 홀딩토크



(b) 역기전력

그림 6. 특성해석 결과

3. 치형상 변화에 의한 특성

본 논문에서는 치폭/치피치 (T_w/τ) 비율과 치측면각 (β)을 달리하여 치형상을 변화시키면서 특성해석을 하였다.

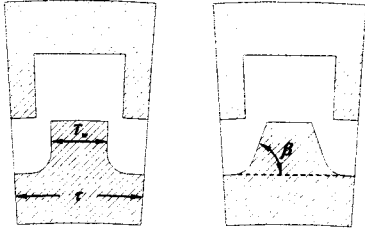


그림 8. 치형상 변화

3.1 치폭/치피치 변화에 따른 특성

T_w/τ 가 다른 여러 모델에 대하여 2차원 유한요소법으로 피미언스 프로파일을 구한 후에 고조파 분석을 통해서 그림 9와 같이 출력과 비례관계에 있는 P_1/P_0 를 구하였다. 그림 9에서 알 수 있듯이 T_w/τ 가 작을수록 P_1/P_0 가 큰 것을 알 수 있는데 이것은 치폭이 넓어지면서 공극의 자기저항이 감소하기 때문이다.

그림 10은 T_w/τ 에 따른 홀딩토크를 나타낸 것이다. P_1/P_0 은 T_w/τ 가 작을수록 증가하나 영구자석의 동작 점과 기자력 분배에 영향을 미치므로 각 모델의 치-공극 기자력은 달라지게 된다. 홀딩토크는 P_1/P_0 과 치-공극 기자력의 곱으로 표현되므로 T_w/τ 가 0.36일 때보다 0.42일 때 홀딩토크가 가장 크게 나타난다. 해석 모델은 T_w/τ 가 0.50으로써, 0.42로 변경하면 홀딩토크는 12.9% 증가한다.

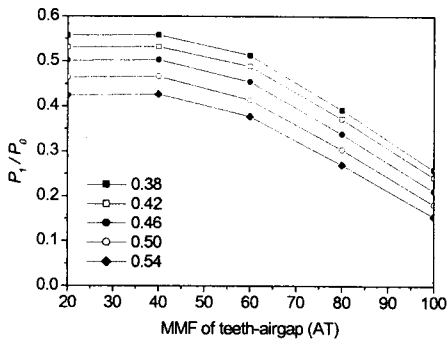


그림 9. 치폭/치피치에 따른 P_1/P_0

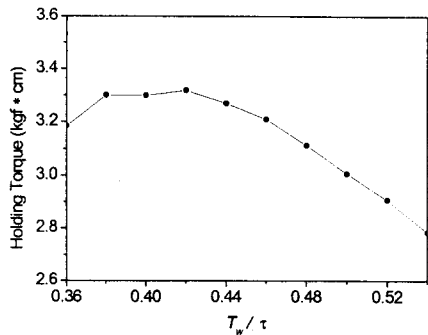


그림 10. 치폭/치피치에 따른 홀딩토크

3.2 치측면각 변화에 따른 특성

T_w/τ 를 0.42로 고정시키고 치측면각 β 를 변화시키면서 특성해석을 하였다. 해석결과 β 를 70도로 두는 것이 홀딩토크가 가장 크게 나왔다. 이것은 치측면각을 그대로 두었을 때보다 약 3% 증가한 것이며, 해석 모델의 홀딩토크보다 16.3% 증가한 것이다.

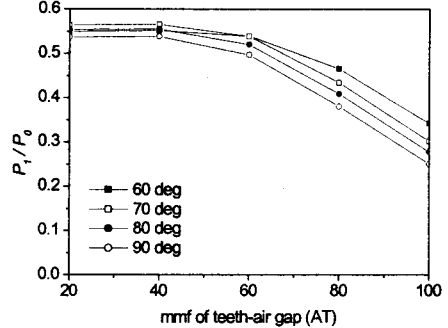


그림 11. 치측면각에 따른 P_1/P_0

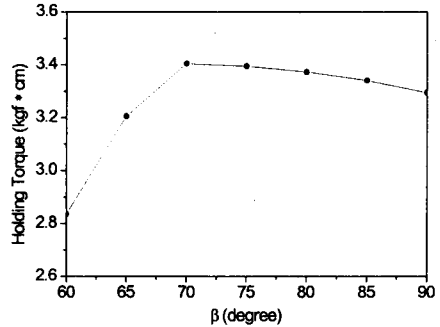


그림 10. 치측면각에 따른 홀딩토크

표 2. 해석 모델과 개선 모델의 특성 비교

	해석 모델	개선 모델
홀딩토크	2.93[kgf·cm]	3.40[kgf·cm]
역기전력(360 rpm)	5.84[V]	6.80[V]
역기전력(600 rpm)	9.74[V]	11.33[V]

4. 결 론

본 논문에서는 2상 하이브리드 스테핑 모터의 출력특성에 가장 큰 영향을 미치는 치형상을 변화시키면서 특성해석을 하였다. 정확하고 효율적인 특성해석을 위하여 2차원 유한요소법과 등가자기회로법을 결합한 방법을 이용하였고, 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 해석방법의 타당성을 검증하였다.

제시한 해석방법을 이용하여 기존의 모델에서 치폭/치피치와 치측면각을 변화시키면서 특성해석을 행하여 홀딩토크가 가장 큰 치형상을 제시하였다. 제시한 모델의 홀딩토크는 기존 모델보다 16.3%가 증가하였다. 치형상의 적절한 설계에 의해 특성 개선이 가능함을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- 1) 東芝小形モーター研究會, “實用モーター設計マニュアル”, p209-251, 1992.
- 2) 우준근, 임기채, 홍정표, 김규탁 “Hybrid Stepping Motor의 포화를 고려한 피미언스 산정 및 특성해석”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, p885-887, 2000.