

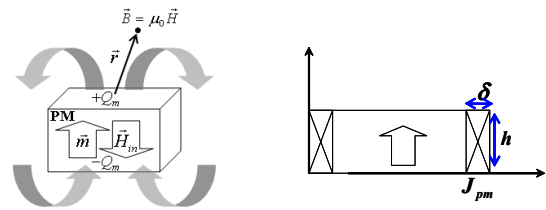
Magnetic charge를 이용한 Axial-gap 전동기의 특성해석

이상호, 김도진, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Characteristic Analysis of Axial-gap Motor using Magnetic Charge

Sang-Ho Lee, Do-Jin Kim, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper deals with analytical solution concerning the image method using the magnetic charge instead of 3D FEA(finite element analysis) in the slotless single air-gap motor. The theory of analytical method and the design procedures are introduced. The reliability and validity of proposed analytical solution are verified through the comparison with the results of commercial 3D FE software. In addition, calculation time between proposed analytical solution and 3D FEA is compared. Finally, characteristics, such as Back-EMF and phase resistance, between calculated and experimental results are compared. From the verification with 3D FEA and experimental results, it is proved that presented analytical method provided very effective and precise results.



〈a〉 영구자석 (b) 전기자 권선
〈그림 1〉 Magnetic charge 개념

1. 서 론

Axial-gap 전동기는 VCR, CD 플레이어 그리고 플로피 디스크 등의 전자제품에 적용되며 Fan 구동 및 식기 세척기용과 같은 가전제품 등에도 적용된다 [1]. 축방향으로 공극이 존재하는 Axial-gap 전동기의 대부분은 슬롯이 존재하지 않는 공심형이므로 전동기의 코깁 토크 및 토크 리플이 철심형 구조보다 작다. 반면에 공심형 구조로 인하여 전동기 효율이 낮은 단점을 지닌다. 그리고 편축식 axial-gap 전동기의 구조적 특징으로 인하여 코일에서 발생하는 축방향으로의 힘은 고정자의 진동을 유발시키므로 전동기의 진동/소음에 영향을 준다 [2].

Axial-gap 전동기의 특성해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하지만 모델링이 복잡하고 해석시간이 많이 소요되므로 형상변화에 따른 전동기 특성을 유추하는데 있어 많은 노력과 함께 시간이 요구된다. 그러나 자화(magnetic charge, m)와 자기영상법(image method)을 이용한 analytical solution은 3차원 FEA에 비해 해석 시간을 단축시킬 수 있고 형상 변화에 따른 특성유추가 용이해진다 [1], [3]-[4].

본 논문에서는 자화와 자기영상법을 이용하여 편축식 axial-gap 전동기의 특성해석을 위한 analytical solution에 대해 다룬다. 그리고 본 논문에서 다루었던 해석이론 및 해석방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 3차원 상용 자계해석 프로그램의 결과와 비교하고 실험적인 방법을 통하여 검증하도록 한다.

2. 본 론

2.1 해석이론 및 과정

그림 1은 영구자석과 전기자 권선에 대한 자화 개념을 간략하게 나타낸 것이고 Biot-Savart 법칙에서 자계세기의 개념을 반영하여 식을 변형하면 아래와 같다 [1].

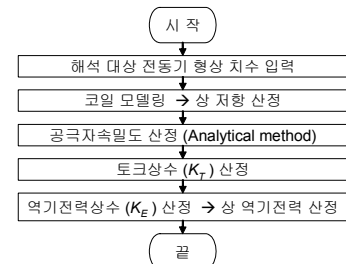
$$d\vec{H} = \frac{dm}{4\pi r^2} \vec{a}_r = \frac{B_r dS}{4\pi r^2 \mu_0} \vec{a}_r = \frac{NI dS}{4\pi r^2 h} \vec{a}_r$$

여기서 m은 자화, B_r은 영구자석의 잔류자속밀도, NI는 전기자 권선의 기자력, h는 전기자 권선의 자화방향 높이, dS는 자화방향의 단면적, 그리고 r은 측정 지점과 요소사이의 거리이다.

그림 2는 본 논문에서 analytical method를 이용한 전동기 특성 해석 과정을 나타낸 것이다. 코일의 상 저항은 입력된 코일의 형상치수를 이용하여 코일 요소에 해당하는 중심좌표를 산정하고 power loss를 이용하여 산정한다.

$$P = I^2 R = \int \frac{J^2}{\sigma} dV$$

여기서 J는 도체의 전류밀도 [A/m²], σ는 도체의 도전율 [□/m], 그리고 dV는 도체의 부피[m³]이다.



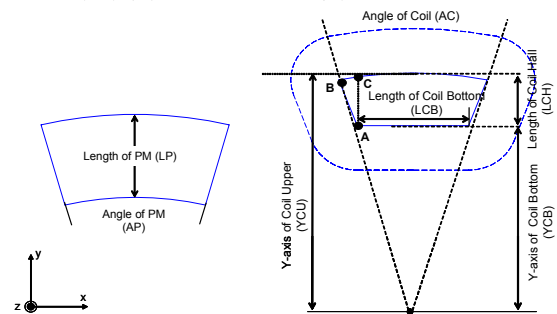
〈그림 2〉 해석 과정

2.2 설계인자

그림 3은 analytical method를 이용하여 영구자석과 코일의 형상을 모델링 할 때의 설계인자를 나타낸 것이다. 영구자석 형상은 기본적으로 부채꼴 형태이고 발생토크에 기여하는 힘 성분(F_θ)을 극대화시키기 위해 설계변수 BAC가 이루는 각도는 항상 0보다 크다 [1].

2.3 신뢰성 검증

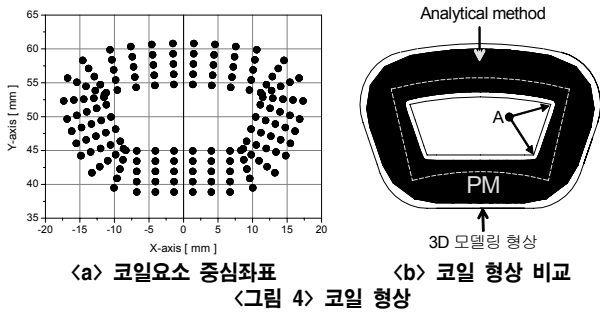
본 논문에서 제안한 analytical method를 이용한 해석 방법 및 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 3차원 상용 자계해석 프로그램의 해석결과와 비교하였다. 해석 대상 전동기는 8극의 12코일을 가지는 편축식 형태이며 영구자석과 코일에 대한 형상치수는 표 1과 같다. 그리고 영구자석의 잔류자속밀도는 1.0 T, 상당직렬턴수는 2,100 turns, 그리고 영구자석과 코일간의 기계적 공극은 1.5 mm 이다.



〈그림 3〉 설계인자

〈표 1〉 설계인자 및 형상치수

AP [°]	35.5	LCB [mm]	16.2
LP [mm]	13.4	YCB [mm]	45.7
AC [°]	23.0	YCU [mm]	54.0



<표 2> 역기전력 및 계산 시간 비교

@ 1000 rpm	실효값 [V]	기본파 크기 [V]	THD [%]	계산시간 [min]
3D FEA	66.3	94.4	17.0	30
Analytical method	68.1	96.0	15.5	0.4

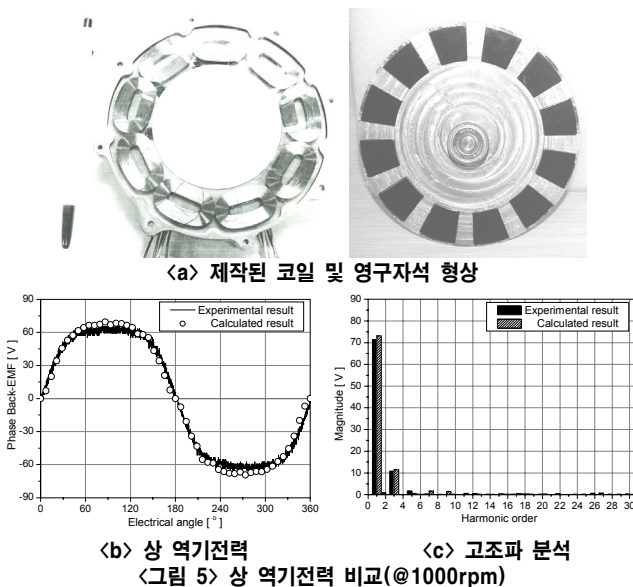


그림 4는 analytical method로 해석할 때 반영된 코일과 실제 3D FEA에 모델링된 코일 형상을 비교한 것이다. 그림 4-(a)는 analytical method를 이용한 자계 해석시 반영된 코일 요소의 중심좌표를 나타낸 것이다. 그리고 그림 4-(b)는 그림 4-(a)에 나타난 점들을 연결한 것(검은색 영역)과 3차원 유한요소 해석시 반영된 코일의 형상(실선)을 영구자석의 형상(점선)과 오버랩해서 나타낸 것이다. 그림 4-(b)에 나타나 있는 A 지점은 analytical method로 코일의 형상을 모델링할 때 두 개의 선이 만나는 영역으로써 실제 코일 제작에 있어서는 아크형상으로 제작된다. 그러나 코일에 채교하는 자속량 중에서 A 지점의 영향은 미소하므로 역기전력의 값에는 큰 변화가 없지만 역기전력의 THD에는 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 THD의 영향을 최소화하고 신뢰성 검증 방법을 단순화하기 위하여 A 지점에서 아크 형상은 고려하지 않는다.

표 2는 해석 방법에 따른 상 역기전력 산정 결과와 계산 시간을 비교한 것이다. 그림 4에 나타나 있는 영구자석 및 코일 형상이 반영되었으며 운전속도가 1000 rpm 일 때 두 방법에 의한 상 역기전력 값은 거의 동일하다. 그러나 analytical method를 이용한 계산 시간은 3D FEA를 이용한 계산 시간보다 매우 짧으므로 (3D FEA의 약 1/45) 전동기 형상 변화에 따른 역기전력 특성을 빠르고 정확하게 산정/유추 할 수 있다.

그림 5는 제안된 해석 방법에 대한 실험적 검증을 위하여 해석, 실험값을 비교/분석한 것이다. 그림 5-(a)는 제작된 전동기의 형상으로써 12극의 9코일을 가지는 편축식 axial-gap 전동기이다. 영구자석의 잔류자속밀도는 1.3 T, 상당직렬턴수는 1,200 turns, 그리고 영구자석과 코일간의 기계적 공극은 1.5 mm 이다. 그림 2에 언급된 해석 과정을 통하여 전동기 파라미터를 산정하였고 이를 실험결과와 비교하였다. 상 역기전력 실효값의 해석값과 실험값은 각각 64.5, 62.8 V이고 이 때 THD는

12.8, 16.3 % 이다. 그리고 상 저항값은 각각 90.8, 92.3 Ω 으로 analytical method를 이용한 해석 방법의 타당성과 결과의 신뢰성을 실험적으로 검증하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 자화와 자기영상법을 이용한 analytical method으로 편축식 axial-gap 전동기의 특성해석을 수행하였다. 3차원 상용 자계해석 프로그램의 해석결과와 측정값을 비교하여 제안된 해석방법의 신뢰성을 검증하였다. 제안된 analytical solution은 3차원 해석에 비해 모델링이 매우 용이하고 해석 시간이 짧으므로 전동기 형상 변화에 따른 영향분석을 하는데 있어 유용하게 사용될 수 있다. 그리고 전동기 진동/소음에 영향을 미치는 전자기력 즉, 코일에 미치는 힘에 대한 해석 및 분석 방법을 보완하여 전동기 진동/소음과 코일에 미치는 힘 사이의 관계에 대해 연구할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sang-Ho Lee, Su-Beom Park, Soon-O Kwon, Ji-Young Lee, Jung-Jong Lee, Jung-Pyo Hong, and Jin-Hur, "Characteristic Analysis of the Slotless Axial-Flux Type BLDC Motors using Image method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 1327-1330, April 2006.
- [2] R. Hanitsch, R. Belmans, and R. Stephan, "Small Axial Flux Motor with Permanent Magnet Excitation and Etched Airgap Winding," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 2, pp. 592-594, Mar. 1994.
- [3] S. A. NASAR and GUANGYU XIONG, "Determination of the Field of a Permanent-Magnet Disk Machine using the Concept of Magnetic Charge," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 3, pp. 2038-2044, May 1988.
- [4] GUANGYU XIONG and S. A. NASAR, "Analysis of Field and Forces in a Permanent Magnet Linear Synchronous Machine Based on the Concept of Magnetic Charge," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 25, no. 3, pp. 2713-2719, MAY 1989.