

해석적 방법을 통한 할박 배열 슬롯리스 표면부착형 영구자석 기기의 자계 특성 분석

윤성준*, 양준원*, 김용주*, 신경훈**, 최장영*
충남대학교*, 국립창원대학교**

Magnetic Characteristics Analysis of a Slotless Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine Considering a Halbach Array Using an Analytical Method

Sung-Jun Yoon*, Jun-Won Yang*, Yong-Joo Kim*, Kyung-Hun Shin**, Jang-Young Choi*
Chungnam National University*, Changwon National University**

Abstract - This paper applies a halbach array to compensate for the low air gap flux density of slotless machines and analyzes magnetic characteristics according to the number of segments. The analytical method was verified through comparison with finite element analysis (FEA).

1. 서 론

회로류 계열의 영구자석은 고출력 및 소형화에 유리하지만, 고정자 슬롯 간 자기적 상호작용에 의해 코깅 토크를 발생시켜 소음과 진동 및 정밀도 저하를 유발한다. 이를 해결하기 위한 대안으로 슬롯리스 구조가 제안되지만, 고정자 치가 없는 구조적 특성상 공극 자속밀도가 낮아져 출력 밀도가 낮아진다는 단점이 있다 [1]. 공극 자속밀도를 높이기 위해서는 높은 등급의 자석을 사용하거나 자석의 두께를 늘려야한다. 이러한 조건이 제한되는 환경에서는 영구자석에 할박 배열의 적용을 통해 낮은 공극 자속밀도를 보상해줄 수 있다 [2].

본 논문에서는 슬롯리스 기기의 낮은 자속밀도를 보상하고자 영구자석에 할박 배열을 적용하였으며, 세그먼트 수에 따른 모델 별 자기적 특성을 분석하였다 [3]. 또한, 신속한 경향성 파악이 요구되는 초기 설계 단계에서 해석적 방법을 통해 접근하는 방식을 유한요소해석(FEA) 결과와 비교 분석하여 본 논문에서 사용된 해석적 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 분석 모델의 단순화

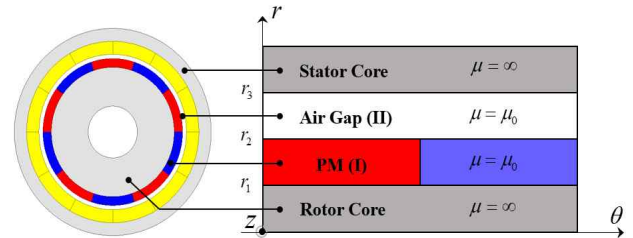
그림 1은 해석 모델과 해석적 방법을 적용하기 위한 단순화 모델을 나타낸다. 해석영역은 영구자석 영역(I), 공극 영역(II)으로 나누어진다. 그림 1의 r_1 , r_2 , r_3 는 각각 회전자 코어까지의 반지름, 자석 표면까지의 반지름, 고정자 내측까지의 반지름을 의미한다.

해석적 접근을 위한 전자기 해석 모델링은 단순화를 위해서 다음과 같은 가정을 갖는다. 첫째, 철심의 투자율은 무한대($\mu = \infty$)이다. 둘째, 고정자 및 회전자 코어의 재질은 선형성을 갖는다. 마지막으로, 와전류와 단부효과는 무시한다 [3].

2.2 지배방정식

슬롯리스 타입 표면부착형 영구자석 모터의 전류원은 고정자에만 존재하기 때문에 영구자석 영역은 $\nabla \times H = 0$ 가 된다. 즉, 영구자석 영역의 자속밀도 B , 자기장의 세기 H , 자화의 세기 M 은 $B = \mu_0(H + M)$ 처럼 나타낼 수 있다. 양변에 curl을 취해 가우스 법칙 $\nabla \cdot B = 0$ 을 적용하면 식 (1)과 같다 [3].

$$\nabla \times B = \mu_0 \nabla (H + M) \quad (1)$$



〈그림 1〉 해석적 방법을 적용하기 위한 단순화 모델

μ_0 는 진공 상태의 투자율을 의미한다. 또한, 모터 내부 자기장의 분포는 직접 계산하는 과정이 복잡하기 때문에 수식 단순화가 필요하다. 식 (1)을 참고하여 라플라스 방정식과 푸아송 방정식을 통해 미분 방정식의 형태로 나타내는 것이 유리하다. 따라서, 자기 벡터 포텐셜 A 를 $B = \nabla \times A$ 와 Columb gauge 법칙 $\nabla \cdot A = 0$ 를 적용하면 식 (2)과 같이 정리할 수 있다.

$$\nabla^2 A = -\mu_0 (J + \nabla \times M) \quad (2)$$

식 (3)은 전류소스 J 성분이 없는 영구자석 영역(I)의 푸아송 방정식을 나타내었고, 식 (4)은 J 와 M 성분이 모두 없는 공극 영역(II)의 라플라스 방정식을 나타내었다.

$$\nabla^2 A^I = -\mu_0 (\nabla \times M) \quad (3)$$

$$\nabla^2 A^{II} = 0 \quad (4)$$

2.3 자화모델링

주기성을 갖는 모터의 특성에 따라 공간 고조파 성분 $k_n = np$ 는 고조파 차수 n , 극쌍수 p 를 통해 표현할 수 있고, 할박 배열 적용에 따른 M 은 다음처럼 표현할 수 있다 [2].

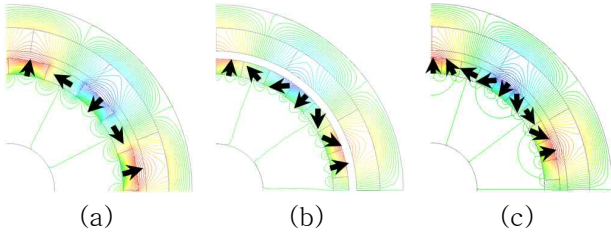
$$\sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_{rn} \cos(np\theta) \mathbf{i}_r + M_{\theta n} \sin(np\theta) \mathbf{i}_\theta \quad (5)$$

M_{rn} , $M_{\theta n}$ 은 각각 반경, 원주 방향의 값이며, $\mathbf{i}_r$, $\mathbf{i}_\theta$ 는 각각 방사 방향과 원주 방향의 단위벡터를 나타낸다. θ 는 세그먼트 별 자화 각도를 의미한다.

2.4 자기 벡터 포텐셜

단부 효과를 무시하므로 자기 벡터 포텐셜은 z 축에 대하여 일정하기 때문에, 이를 원통 좌표계의 형태로 $A_z(r, \theta)$ 나타내면 식 (6)과 같다.

$$A_z(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{zn}(r) e^{-jnp\theta} \quad (6)$$



〈그림 2〉 할박 배열: (a) 세그먼트 2, (b) 세그먼트 3, (c) 세그먼트 4

라플라스 방정식의 일반해는 Cauchy-Euler 방정식을 적용하여 식 (7)처럼 나타낼 수 있다.

$$A_{zn} = (C_n^{I, II} r^{np} + D_n^{I, II} r^{-np}) e^{-jnp\theta} \mathbf{i}_z \quad (7)$$

푸아송 방정식의 특수해는 식 (3)을 참고하여 r 에 관한 미분 방정식을 풀면 식 (8)과 같다.

$$A_{zn} = \frac{\mu_0 (M_{\theta n} + jnp M_{rn})}{(np)^2 - 1} r \cdot e^{-jnp\theta} \mathbf{i}_z \quad (8)$$

따라서, 식 (7)과 식 (8)에 의해 최종 벡터포텐셜의 해는 $A_{zn} = A_{zn}^I + A_{zn}^{II}$ 로 표현된다. 그림 1에 정리된 경계조건에 따라 다음과 같이 정리할 수 있다.

〈표 1〉 슬롯리스 모터의 반경 방향 위치에 따른 경계 조건

$r = r_1$	$H_{\theta}^{II} = 0$	$\mu = \infty, H^I = 0$ 에 수렴
$r = r_2$	$B_r^I = B_r^{II}$	B_r 은 연속
	$H_{\theta}^I = H_{\theta}^{II}$	H_{θ} 는 연속
$r = r_1$	$H_{\theta}^I = 0$	$\mu = \infty, H^I = 0$ 에 수렴

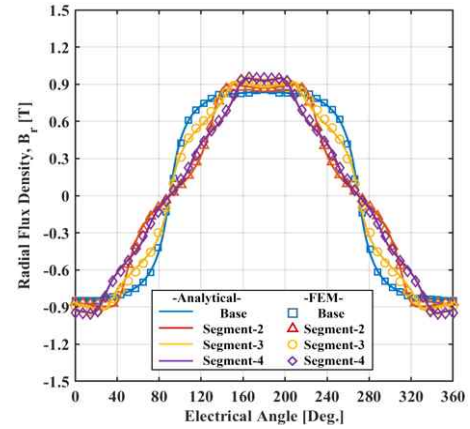
표 1을 참고해 미정계수 $C_n^I, C_n^{II}, D_n^I, D_n^{II}$ 에 관한 연립방정식을 풀면 반경 방향 자속밀도와 원주 방향 자속밀도를 계산할 수 있다.

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} \mathbf{i}_r, \quad B_{\theta} = \frac{\partial A_z}{\partial r} \mathbf{i}_{\theta} \quad (9)$$

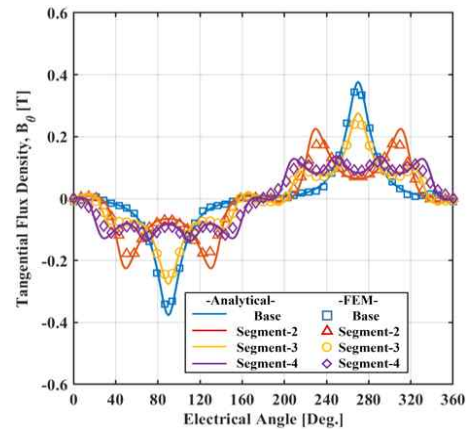
그림 2는 할박 배열의 세그먼트 수에 따른 해석 모델 별 자화 방향을 나타내었다. 그림 2의 세그먼트 수와 자화 방향에 따른 자계 특성 분석 결과를 그림 3에서 확인할 수 있다. 그림 3의 (a)와 (b)는 각각 반경 방향과 원주 방향의 공극 자속밀도를 나타낸 모습이다. 분석 결과, 기본 모델에서 세그먼트 수에 따라 할박 배열이 적용된 모델에서 공극 자속밀도가 개선되었음을 확인할 수 있다. 최종적으로, 할박 배열 슬롯리스 기기의 자계 특성 분석을 해석적 방법과 FEM 데이터를 비교함으로써 경향성이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 초기 설계 단계에서 빠른 경향성 파악을 위해 해석적 방법을 활용하여 슬롯리스 기기의 자계 특성을 분석한다. 슬롯리스 구조적 특징으로 인한 낮은 자속밀도를 보완하기 위해 영구자석에 할박 배열을 적용하였다. 이후 해석 모델 내부를 각 영역별 변수 분리법을 통해 지배방정식의 해를 구한 다음, 공극 자속밀도를 도출하였다. 도출된 결과와 FEM 데이터가 잘 일치함에 따라, 본 논문에서 사용된 해석적 방법의 타당성을 검증하였다.



(a)



(b)

〈그림 3〉 슬롯리스 기기 자계 특성 분석: (a) 반경 방향 공극 자속밀도, (b) 원주 방향 공극 자속밀도

감사의 글

This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (20023098, Development of power train system for 55kW class electric tractor) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea). This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry(IPET) through Eco-friendly Power Source Application Agricultural Machinery Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA)(322047-5)

[참 고 문 헌]

- [1] R. P. Praveen, M. H. Ravichandran, V. T. Sadasivan Achari, V. P. Jagathy Raj, G. Madhu and G. R. Bindu, "A Novel Slotless Halbach-Array Permanent-Magnet Brushless DC Motor for Spacecraft Applications," in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 9, pp. 3553-3560, Sept. 2012.
- [2] Y. Shen and Z.-Q. Zhu, "General analytical model for calculating electromagnetic performance of permanent magnet brushless machines having segmented Halbach array," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 3, no. 3, pp. 57-66, 2013.
- [3] C. Xia, L. Guo and H. Wang, "Modeling and Analyzing of Magnetic Field of Segmented Halbach Array Permanent Magnet Machine Considering Gap Between Segments," in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 12, pp. 1-9, Dec. 2014.