

Halbach 배열 자화를 갖는 Tubular 타입 커플링의 힘 특성 해석

김창우*, 김정만*, 최장영*
충남대학교 전기공학과*

Force Characteristics Analysis of Halbach Array Magnetized Tubular-Type Magnetic Coupling

Chang-Woo Kim*, Jeong-Man Kim*, Jang-Young Choi*
Dept. of Electrical Eng. ChungNam National University*

Abstract - Magnetic coupling is used where required high reliability, because magnetic coupling's durability is stronger than mechanical coupling's durability. This paper shows the force characteristics of halbach array magnetized tubular type magnetic coupling using Analytical method. Analytical method was used, to find force characteristics. Finite element method (FEM) is used to validate force characteristics.

1. 서 론

커플링은 1차 축과 2차 축을 연결하여 동력을 전달하는 기계요소로서 크게 접촉식 커플링과 비접촉식 커플링으로 나누어진다. 자기 커플링은 자기력을 이용하여 동력을 전달하는 대표적인 비접촉식 커플링이다. 따라서 접촉식 커플링에 비해 진동과 소음의 절연 효과를 기대 할 수 있다. 또한 과도한 힘 발생 시에는 커플링 자체에서 슬립이 생겨 커플링 양단에 위치한 기기를 보호하기 때문에 기계적인 손상을 방지 할 수 있어 교체 비용에 대한 절감 효과가 매우 크다[1].

직선형 기기는 회전형 기기와 다르게 직선운동을 회전운동으로 변환할 필요가 없기 때문에, 구조가 보다 간단하고, 효율이 높은 장점이 있다. 같은 영구자석 직선형 기기 중에서도 Tubular 타입의 기기는 더 높은 효율을 얻을 수 있다[2]. 또한 Halbach 배열을 갖는 영구자석은 별도의 철심이 필요 없이 자기회로를 구성할 수 있어, 히스테리손이나 와전류손이 발생하지 않고, 누설되는 자속을 줄일 수 있어 더 높은 힘을 얻을 수 있다.

본 논문에서 Halbach 배열 자화를 갖는 Tubular 타입 커플링의 힘 특성을 해석적 방법인 Maxwell stress tensor를 통해 유도했고, 해석 결과는 유한요소 해석결과(FEM)와 비교하여 본 논문에서 사용된 해석 방법의 타당성을 입증하였다.

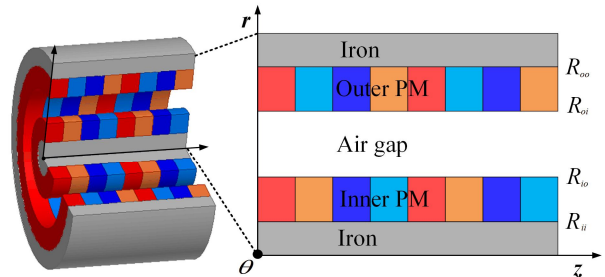
2. 본 론

2.1 해석모델

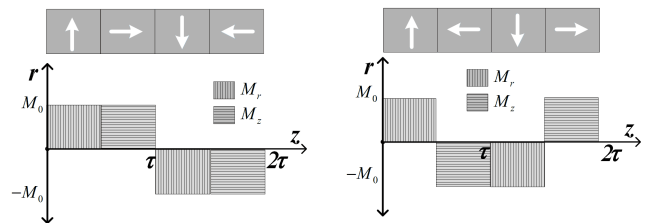
<그림 1>은 Halbach 배열 자화를 갖는 Tubular 타입 자기 커플링의 구조와 그 구조를 5개의 영역으로 단순화한 해석모델이고, <표 1>은 해석 모델의 사양을 나타낸다. Tubular 타입 자기 커플링은 이동자인 외측 철심과 외측 영구자석, 고정자인 내측 철심과 내측 영구자석, 그리고 그 사이에 공극으로 이루어져 있다. 본 해석모델은 1차 축에서 자기 커플링으로 동력이 전달되면 외측 철심과 영구자석이 2차 축으로 이동하게 되고 자기력에 의해서 내측 철심과 영구자석이 이동하여 동력을 전달하게 된다.

<표 1> 해석 모델 사양

기호	명칭	수치
R_{oo}	외측 영구자석 외경	50 mm
R_{oi}	외측 영구자석 내경	40 mm
R_{io}	내측 영구자석 외경	20 mm
R_{ii}	내측 영구자석 내경	10 mm
τ	극 피치	20 mm
l	축 방향 길이	200 mm
v	이동자의 이동 속도	0.5m/s
B_{pm}	영구자석 잔류 자속밀도	1.23T



<그림 1> 자기 커플링 해석 모델



<그림 2-1> 외측 영구자석 자화 모델링

<그림 2-2> 내측 영구자석 자화 모델링

이때 해석의 편리성을 위하여 철심 투자율은 무한대로 가정하고, 영구자석의 투자율은 공기와 같다고 가정하였다.

2.2 자화 모델링

Halbach 배열을 갖는 자기 커플링의 자화량은 <그림 2>와 같다. 반경방향으로의 자화량은 외측 영구자석과 내측 영구자석의 자화량이 같지만, 축방향으로의 자화량은 외측 영구자석과 내측 영구자석이 반대가 되므로 외측 영구자석과 내측 영구자석의 자화량을 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$M_{Outer} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_r(n) \vec{i}_r e^{-jk_n z} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_z(n) \vec{i}_z e^{-jk_n z} \quad (1.a)$$

$$M_{Inner} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_r(n) \vec{i}_r e^{-jk_n z} - \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_z(n) \vec{i}_z e^{-jk_n z} \quad (1.b)$$

$M_r(n)$ 은 반경방향으로의 푸리에 계수를, $M_z(n)$ 은 축 방향으로의 푸리에 계수를 의미한다.

$$M_r(n) = \frac{jM_o}{k_n \tau} (e^{-j\frac{1}{2}k_n \tau} - 1)(e^{-jk_n \tau} - 1) \quad (2)$$

$$M_z(n) = \frac{jM_o}{k_n \tau} (e^{-j\frac{3}{2}k_n \tau} - e^{-j\frac{1}{2}k_n \tau})(e^{-j\frac{1}{2}k_n \tau} - 1) \quad (3)$$

여기서 $M_o = B_{pm}/(\mu_0 \mu_r)$ 의 크기를 가지며, τ 는 극 피치, k_n 은 n 차 공간 고조파 성분을 의미한다.

2.3 자계 특성

지배방정식을 유도하기 위해서 자속밀도(\mathbf{B})를 자계(\mathbf{H})와 자화 성분(\mathbf{M})으로 표현하였다.

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (4)$$

영구자석 영역에는 전류가 없기 때문에 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0}$ 이 성립하며, 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 에 대한 정의($\nabla \times \mathbf{A} \equiv \mathbf{B}$)와 Coulomb's Gauge ($\nabla \cdot \mathbf{A} = \mathbf{0}$) 를 적용하면 각 영역에서의 지배 방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{A}^I = -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}_{Outer}) \quad (5.a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{II} = 0 \quad (5.b)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{III} = -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}_{Inner}) \quad (5.c)$$

위첨자 I, II, III는 각각 외측 영구자석 영역, 공극, 내측 영구자석 영역을 의미한다. 원통형 좌표계에서는 z 방향과 θ 방향에서 공간 고조파 성분이 존재 하고, 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 는 θ 방향으로 존재하기 때문에 다음과 같이 정의 한다.

$$\mathbf{A} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(r) \vec{i}_\theta e^{-jk_z z + m_n \theta} \quad (6)$$

식 (5)에 식 (1)과 (6)을 대입하고 전개하면 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 에 관한 2차 미분 방정식형태로 표현 할 수있는데, 이때 m_k 를 1로 간이화 하면 수정된 베셀 함수의 일반형이 된다. 따라서 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 의 해는 다음과 같다.

$$\mathbf{A}^I = C_n^I I_1(k_n r) + D_n^I K_1(k_n r) - \frac{j\mu_0 M_r(n)}{k_n} \quad (7.a)$$

$$\mathbf{A}^{II} = C_n^{II} I_1(k_n r) + D_n^{II} K_1(k_n r) \quad (7.b)$$

$$\mathbf{A}^{III} = C_n^{III} I_1(k_n r) + D_n^{III} K_1(k_n r) - \frac{j\mu_0 M_r(n)}{k_n} \quad (7.c)$$

I_1 은 1차 제1종 베셀함수, K_1 은 1차 제2종 베셀 함수이다.

자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 에 대한 정의($\nabla \times \mathbf{A} \equiv \mathbf{B}$)에 식 (7)을 대입하면 반경 방향으로의 자속밀도(\mathbf{B}_r)와 축 방향으로의 자속밀도(\mathbf{B}_z)를 구할 수 있다.

$$\mathbf{B}_r^{I,II,III} = \sum_{n=-\infty, odd}^{\infty} jk_n \mathbf{A}^{I,II,III} e^{-jk_z z} \vec{i}_r \quad (8.a)$$

$$\mathbf{B}_z^{I,II,III} = \sum_{n=-\infty, odd}^{\infty} \left(\frac{\mathbf{A}^{I,II,III}}{r} + \frac{\partial \mathbf{A}^{I,II,III}}{\partial r} \right) e^{-jk_z z} \vec{i}_z \quad (8.b)$$

식 (7)의 미정 계수 $C_n^I, C_n^{II}, C_n^{III}, D_n^I, D_n^{II}, D_n^{III}$ 는 적절한 경계 조건을 이용하여 구할 수 있다.

2.4 힘 특성

본 해석 모델에서 외측 철심영역과 영구자석영역은 축 방향으로 이동한다. 이때 발생하는 힘은 Maxwell stress tensor를 이용하여 계산 할 수 있다[3].

$$\mathbf{F}_z = \frac{1}{\mu_0} \int_S \mathbf{B}_z \mathbf{B}_r ds \quad (9)$$

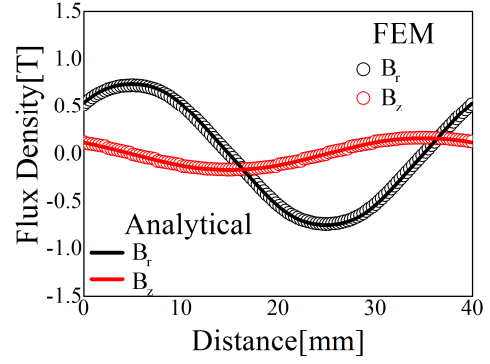
식 (10)을 전개하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\mathbf{F}_z = -\frac{S}{2\mu_0} \{ \mathbf{B}_r^{II} (\mathbf{B}_z^{II})^* \} \quad (10)$$

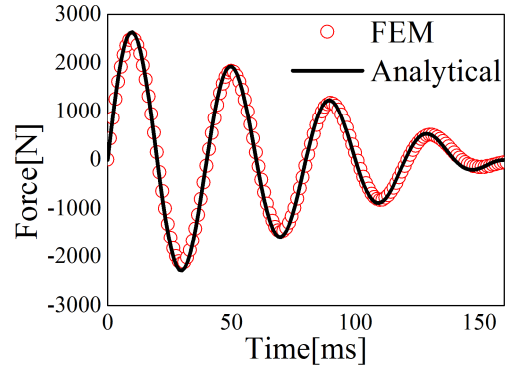
식 (10)에서 *는 켤레를 의미하고, S 는 움직이는 면의 단면적을 의미한다. 단면적은 시간에 따라 변하기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = 2\pi R_{oi} (l - \mathbf{v}t) \quad (11)$$

l 은 축 방향 길이, \mathbf{v} 는 이동자의 이동속도, t 는 시간을 의미한다.



<그림 3> 공극 중앙 자속밀도



<그림 4> 힘 특성

2.5 해석 결과 검증 및 비교

<그림 3>은 공극 중앙에서의 반경 방향으로의 자속밀도와 축 방향으로의 자속밀도를 비교한 그래프이다. 두 그래프 모두에서 해석적 방법과 유한요소 해석법이 일치함을 확인할 수 있다. <그림 4>는 0.5m/s의 속도로 200mm 이동할 때까지의 힘 특성을 해석적 방법과 유한요소 해석법을 통해 비교한 그래프이다. 이때 최대 힘은 줄어들게 되는데, 이는 1차 축 동력에 의해 외측 영구자석이 이동함에 따라 내측 영구자석과 외측 영구자석이 마주하는 면적이 줄어들기 때문이다.

3. 결 론

본 논문은 Halbach 배열을 갖는 Tubular 타입 자기 커플링의 자속밀도를 지배방정식을 통해서 유도하였고, Maxwell stress tensor를 이용하여 힘 특성을 해석하였다. 그 결과를 해석 모델을 통해 유한 요소 해석법과 비교하여 해석의 타당성을 입증할 수 있었다. 힘 특성 해석 결과는 힘 제한 기능으로 사용할 수 있기 때문에 커플링 초기 설계 및 Parameter 선정을 수행하는데 있어 도움이 될 것으로 사료 된다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A1A 05002745).

[참 고 문 헌]

- [1] W. Wu, H. C. Lovatt, and J. B. Dunlop, "Analysis and Design Optimisation of Magnetic Couplings Using 3D Finite Element Modeling", *IEEE Trans. on Magn.*, vol.33,no.5m pp.4083-4085, 1997.
- [2] J. F. Eastham, "Novel synchronous machines : Linear and disc", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 137, pp 49-58, 1990.
- [3] David L. Trumper, Won-jong Kim, and Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines", *IEEE, Trans. IAS*, vol.32, pp.371-379, 1996