

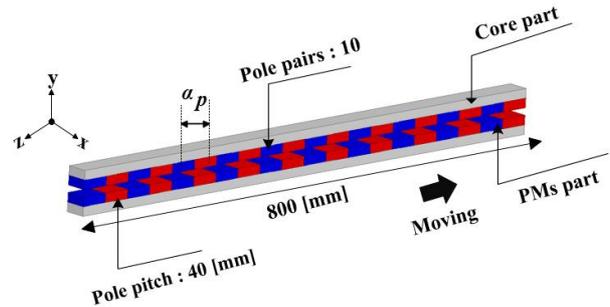
해석적 방법을 이용한 수직방향으로 자화된 영구자석 선형커플링의 힘 특성 해석

이재현\*, 최장영\*  
충남대학교 전기공학과\*

Force Characteristic Analysis of Permanent Magnet Linear Coupling with Vertical Magnetized using an Analytical Magnetic Field Calculations

Jae-Hyun Lee\*, Jang-Young Choi\*  
Chungnam National University\*

**Abstract** - Magnetic couplings are do not require any mechanical contact with the power transmitted to the secondary side according to the primary side. For this reason, well-suited for isolated systems such as vacuums or high pressure. So, this paper presents the force characteristic analysis of the permanent magnet (PM) linear coupling with vertical magnetized using an analytical magnetic field calculations. Based on the definition of governing equations and magnetic vector potential, we obtained the analytical solutions according to the boundary condition for each of the regions. Also, we derived from the force generated in the permanent magnet surface using the Maxwell stress tensor. The analytical results are proved the validity by comparing to the finite element method (FEM).



<그림 1> 선형커플링의 구조

1. 서 론

두 축 사이에서 서로 구조적인 연결을 통해 손실 없이 동력을 전달하는 커플링은 다양한 기계적인 분야에서 사용되고 있다. 이러한 기계적인 커플링은 소형기에 많이 적용되는 반면, 과부하시 과속될 우려가 있기 때문에 기계적 커플링의 단점을 보완하고자 자기력을 이용한 비접촉식 자기커플링의 사용이 증가하고 있다. 이처럼, 자기커플링은 1차축의 동력을 2차축으로 전달하는데 있어서 어떠한 기계적인 접촉도 필요하지 않다. 특히, 분리된 벽 또는 공간을 통해 에너지를 전달할 수 있기 때문에 이러한 특성으로 사람이 다가가기 힘든 위험한 환경, 진공 또는 고압의 고립된 시스템에서 사용하기에 적합하다. 동시에, 과도한 토크가 전달될 경우 슬립이 발생하여 기계적인 손상을 방지할 수 있으며, 다른 커플링에 비해 큰 토크를 가지고 있기 때문에 높은 안정성과 신뢰성을 요구하는 환경에서 많이 사용되고 있다[1-2]. 선형커플링의 전자기적 특성을 해석하는 방법에는 해석적 방법과 유한요소법이 있다. 유한요소법은 높은 정확도와 신뢰성을 가지지만, 다양한 변수를 갖고 있는 초기설계모델의 경우 해석시간이 길어 적합하지 않기 때문에 본 논문에서는 해석적 방법을 이용한 선형커플링의 힘 특성 해석을 진행하였다. 먼저, 각각의 영역별로 수학적으로 모델링하여 지배방정식을 도출하였고, 자기벡터포텐셜의 정의와 직교좌표계를 이용하여 각각의 경계조건에 따른 해석해를 구하였다. 또한, Maxwell stress tensor와 자속밀도식을 기반으로 영구자석 표면에서 발생하는 힘을 구할 수 있었다.

따라서, 본 논문에서 해석적 방법을 통해 얻은 결과를 바탕으로 유한요소법과 비교하였을 때 일치함을 확인하여 타당성을 입증할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 선형커플링의 구조 및 해석모델

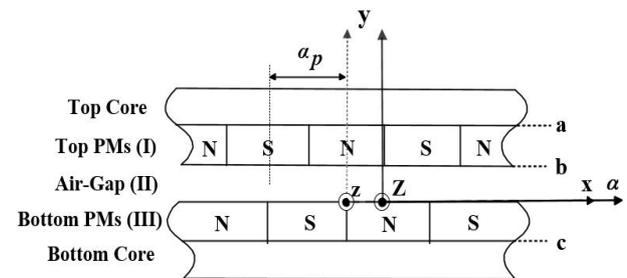
본 논문에서 해석한 선형커플링의 구조는 그림 1과 같다. 공극을 중심으로 각각 위쪽과 아래쪽에 코어부분과 수직방향으로 자화된 10극쌍의 영구자석 부분으로 이루어져 있다. 여기서,  $\alpha_p$ 는 극호비, 극피치는 40mm의 값으로 해석을 진행하고, 아래쪽 영구자석과 코어가 수평방향으로 움직이는 구조다.

2.2 영구자석에 의한 자계분포 특성 해석

영구자석의 자계분포 특성을 해석하기 위한 모델을 단순화하면 그림 2와 같다.

<표 1> 해석에 사용된 선형 커플링의 사양

Parameter	Value
Top Core	17 [mm]
Top PMs	15 [mm]
Air-Gap	10 [mm]
Bottom PMs	15 [mm]
Bottom Core	17 [mm]
극호비	1
잔류자속밀도	1.23 [T]
시 간	1 [s]
속 도	0.06 [m/s]

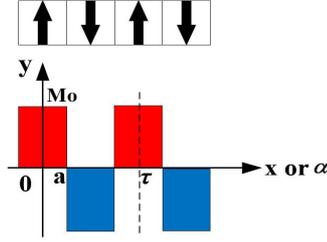


<그림 2> 자계 특성 해석을 위한 단순화 모델

해석의 편의를 위하여 아래쪽 영구자석의 표면을 영점에 놓았으며, 철심의 투자율은 무한대, 영구자석 영역과 공극 영역의 투자율은 공기와 같다고 가정하였다. 그리고, 각 영역의 관한 경계를 a,b,c로 놓았다. 위쪽 영구자석(I)에 관한 축을 (x,y,z)로, 아래쪽 영구자석(III)에 관한 축을 ( $\alpha$ ,y,Z)로 나타냈다. 공극(II)을 중심으로 아래쪽 영구자석과 코어가 v [m/s]인 속도로 움직인다고 가정할 때,  $\alpha = x + v \cdot t$ 인 관계식이 성립한다.

2.2.1 영구자석 자화모델링

그림 3은 주기가  $\tau$ 인 선형커플링을 수학적으로 모델링 하기 위해 푸리에 급수를 이용하여 나타내면 식 (1)과 같다.



〈그림 3〉 자화 모델링

$$\mathbf{M} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (M_{tyn} \vec{i}_y + M_{byn} \vec{i}_y) e^{-jk_n(x \text{ or } \alpha)} \quad (1)$$

여기서, 자화벡터의 크기  $\mathbf{M} = B_r/\mu_0$ ,  $K_n = n\pi/\tau$ 이며 y방향에 따른 자화성분을 구할 수 있다.

### 2.2.2 영구자석에 의한 자계 특성

영구자석 영역의 자속밀도 식은  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ 이다. 양변에 curl를 취하고, 자기벡터포텐셜의 정의( $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ )와 Coulomb's Gauge ( $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ )를 이용하여 풀면 최종적으로 푸아송 방정식을  $\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{M})$  얻게 된다. 이 때, 자기벡터포텐셜은 전류의 방향과 같고, 크기와 방향성분으로만 이루어진 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{A} = A_n(y) e^{-jk_n(x \text{ or } \alpha)} \vec{i}_z \quad (2)$$

각 재료의 투자율에 따라 영구자석 영역과 영구자석을 제외한 영역으로 나눌 수 있는데 공극 영역에서는 전류밀도가 존재하지 않기 때문에 우변은 0이 된다.

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{I,III} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{M}) \quad (3)$$

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

식 (2)를 (3)과 (4)식에 대입하여 나온 각각의 미분방정식의 해를 구하면 영구자석 영역 및 공극 영역의 자기벡터포텐셜 A를 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}^I = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} C_n^I \cosh(k_n y) \\ + D_n^I \sinh(k_n y) - \frac{j\mu_0 M_{tyn}}{k_n} \end{array} \right\} e^{-jk_n x} \vec{i}_z$$

$$\mathbf{A}^{II} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} C_n^{II} \cosh(k_n y) \\ + D_n^{II} \sinh(k_n y) \end{array} \right\} e^{-jk_n \alpha} \vec{i}_z \quad (5)$$

$$\mathbf{A}^{III} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} C_n^{III} \cosh(k_n y) \\ + D_n^{III} \sinh(k_n y) - \frac{j\mu_0 M_{byn}}{k_n} \end{array} \right\} e^{-jk_n \alpha} \vec{i}_z$$

그리고, 자기벡터포텐셜의 정의로부터 각 영역에 관한 자속밀도는 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{B}_x^I = \frac{\partial}{\partial y} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^I(y) e^{-jk_n x} \vec{i}_x$$

$$\mathbf{B}_y^I = \sum_{n=-\infty}^{\infty} jk_n A_n^I(y) e^{-jk_n x} \vec{i}_y \quad (6)$$

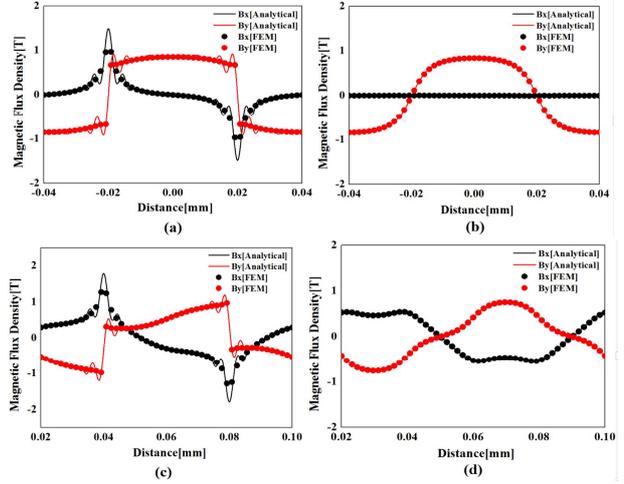
$$\mathbf{B}_x^{II,III} = \frac{\partial}{\partial y} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{II,III}(y) e^{-jk_n \alpha} \vec{i}_x$$

$$\mathbf{B}_y^{II,III} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} jk_n A_n^{II,III}(y) e^{-jk_n \alpha} \vec{i}_y$$

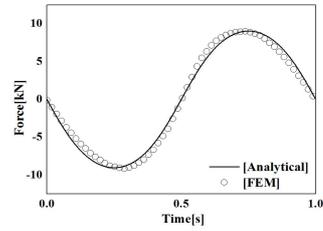
여기서, 미정계수  $C_n^{I,II,III}$ ,  $D_n^{I,II,III}$ 은 각 영역의 적절한 경계조건에 대입하여 구할 수 있다.

### 2.2.3 힘 특성 해석

위쪽과 아래쪽 영구자석에 의해 tangential 방향으로 유기되는 힘은 Maxwell stress tensor[3]를 이용하여 구할 수 있다.



〈그림 4〉 자속밀도(t=0) : (a) 영구자석 표면, (b) 공극 자속밀도(t=1) : (c) 영구자석 표면, (d) 공극



$$\mathbf{F}_t = \frac{1}{2\mu_0} \int_S (\mathbf{B}_n \cdot \mathbf{B}_t) ds = -\frac{S}{2\mu_0} \{ \mathbf{B}_n^{II} \cdot (\mathbf{B}_t^{II})^* \} \quad (7)$$

식 (7)에서 위첨자 \*는 켈레를 의미하고, S는 움직이는 면의 단면적을 나타낸다.

### 2.3 해석 결과 및 타당성 검증

그림 4는 각각 t=0, 1(s)일 때 위쪽 영구자석 표면에서의 자속밀도와 공극 중심 자속밀도를 서로 비교한 것을 나타낸 것이고, 그림 5는 0.06 m/s의 속도로 시간의 변화에 따른 힘 특성 해석을 서로 비교한 결과를 나타낸 것이다. 이로써, 해석적 방법을 이용한 풀이 결과가 유한요소법과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 해석적 방법을 이용하여 수직방향으로 자화된 영구자석 선형커플링의 힘 특성 해석을 다루었다. 영구자석의 움직임이 있을 때와 없을 때, 위쪽 영구자석 표면과 공극 영역에서의 해석결과는 유한요소법과 비교했을 때 일치함을 보임으로써 해석의 타당성을 입증하였다. 따라서, 본 논문에서 해석한 결과를 바탕으로 선형커플링의 설계 및 힘 특성 해석에 도움이 될 수 있을 것이라 사료된다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2014R1A1A1A05002745).

### [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 Modelling", *IEEE Trans. on Magn.*, vol.33, no.5, pp.4083-4085, 1997.
- [2] L. Zhu, S. Z. Jiang, Z. Q. Zhu, and C. C. Chan, "Analytical modeling of open-circuit air-gap field distributions in multisegment and multilayer interior permanent-magnet machines", *IEEE Trans. on Magn.*, vol.45, pp.3121-3130, 2009.
- [3] J. Mizia, K. Adamiak and A. R. Eastham, "FINITE ELEMENT FORCE CALCULATION: COMPARISON OF METHODS FOR ELECTRIC MACHINES", *IEEE Trans. on Magn.*, vol.24, no.1, pp.447-450, 1988.