

직선운동하는 Halbach 배열 가동자와 페루프 코일 사이의 작용력 해석

장석명, 차상도*, 이성호
충남대학교

Analysis of force between linear moving Halbach array and a closed loop

S. M. Jang, S. D. Cha*, S. H. Lee
Chungnam National Uni.

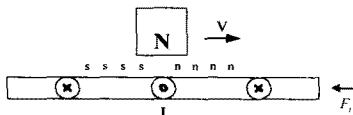
Abstract - The lift and drag forces on various magnet moving with a velocity is developed above a closed loop coil. These forces are affect by resistance and inductance of circuit, velocity of magnet. To obtain strong magnetic flux density, the magnet is replaced by Halbach array. This paper presents analysis of force between linear motion Halbach array and a closed loop having the constant resistance and inductance as a various speed.

1. 서 론

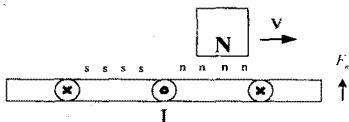
정자계 중에서 도체가 움직일 때, 또는 도체는 정지 상태이고 자계가 시간적으로 변화할 때 도체에는 유기 전압이 발생한다. 유기 전압에 의해 도체에는 유도 전류가 흐르게 되고, 자계와 유도 전류와의 상호 작용에 의해 도체에는 수직력과 수평력이 발생한다. 그림 1은 정지 도체 위를 영구자석(가동자)이 속도 v 로 직선 운동할 때 도체에 유도되는 전류 분포를 도시한 것이다. 그런데 그림 1(a)와 같이 영구 자석의 이동 속도가 비교적 느리면 주로 수평력이 발생하고 이 힘은 영구 자석의 운동을 방해하는 쪽으로 작용한다. 또한, 그림 1(b)와 같이 영구 자석의 이동 속도가 비교적 빠르면 주로 수직력이 발생하고 이 힘은 영구자석을 부상시키는 쪽으로 작용한다(1).

도체에 쇄교되는 자속을 증가시키거나 유도 전류를 증가시키면 영구 자석에 작용하는 로렌츠 힘은 증가된다. 2차측을 초전도체로 구성하면 작용력은 크게 발생하지만 초전도체를 사용하기 위해서는 극저온 상태를 유지하기 위한 부수적인 장치가 필요하다.

본 논문의 해석모델은 2차측을 상전도체로 하고 로렌츠 힘을 증가시키기 위해 가동자를 Halbach 배열로 구성하였다. 영구자석 Halbach array가 페루프 도체 위 이동할 때 속도에 따라 발생하는 수평력과 수직력의 특성 해석결과를 제시하고자 한다.



(a) 속도가 느릴 때



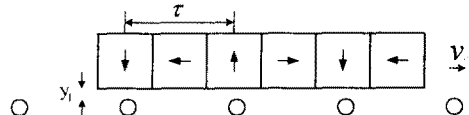
(b) 속도가 빠를 때

그림 1 영구자석 속도에 따라 발생하는 힘 특성

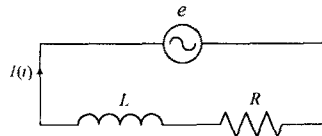
2. 본 론

2.1 해석 모델

해석모델의 가동자는 그림 2(a)와 같이 영구자석의 자화방향에 따라 배열된 직선형 Halbach array로 구성된다. Halbach array는 백이런 없이 원하는 방향의 자속경로를 만들 수 있다. 그림 2(a)와 같은 배열에선 아래 방향으로 일반 배열에 비해 강한 자계를 형성하게 되고 그 밑에 페루프를 이루는 도체를 정렬하였다. Halbach array가 직사각형 페루프 도체 위를 속도 v 이동하면 페루프 도체에는 유기전압이 발생하고 도체 내에는 전류가 흐른다. 이 때 발생하는 유기전압은 페루프를 쇄교하는 자속의 시간적 변화에 비례한다. 유기전압과 전류 사이의 관계는 그림 2(b)와 같이 등가 회로로 나타낼 수 있다.



(a) Halbach 배열과 페루프 도체



(b) 등가 회로

그림 2 해석 모델과 등가 회로

Halbach array를 무한길이로 영구자석을 배열한다 밑면에 발생하는 자속은 매끄러운 정현파를 이룬다. 정현파를 이루는 자속이 속도 v 로 직선 운동하는 것은 한 점에서 자속이 시간에 따라 교변하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 속도 v 로 이동하는 자속은 식(1)과 같이 시간에 의존하는 함수로 표현할 수 있다.

$$\phi = \phi_0 \sin(kt) e^{(-\frac{\pi}{\tau} y_1)} \quad k = \frac{v}{\tau} \pi \quad (1)$$

여기서, τ 는 Halbach array로 이루어진 정현파의 간격을 나타내고 y_1 은 Halbach array와 페루프 도체의 간격을 표시한다.

식 (1)로 표현된 ϕ 에 의해 페루프 도체에는 패러데이 유도 법칙에 의해 유기기전력이 발생한다. 그림 2(b)의 등가회로에서 페루프의 저항을 R , 인덕턴스를 L 이라 하면 한 루프에 대한 전기 회로방정식은 식 (2)와 같이

나타낼 수 있다.

$$\dot{V} = L \frac{d\dot{I}}{dt} + R\dot{I} = k\phi_o \cos(kt) \quad (2)$$

식 (2)에 대한 정상상태 해는 식 (3)과 같이 표현된다

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{k\phi_o}{L} \left[\frac{1}{1+(R/kL)^2} \right] [B \sin(kt) + C \cos(kt)] \\ &= \frac{k\phi_o}{L} \left[\frac{1}{1+(R/kL)^2} \right] D[\sin(kt + \theta)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= 1 - (R/kL)^2 \quad C = R/(k^2L) \\ D &= 1/\sqrt{B^2 + C^2} \quad \theta = \tan^{-1}(C/B) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 통해 유도 전류는 회로의 시정수가 일정할 때 속도에 따라 크기와 위상이 변한다.

유도 전류와 이동 자속과의 상호작용력은 식 (4)와 같이 이동 자속의 x 성분과 y 성분에 의해 각각 수직력과 수평력이 발생한다.

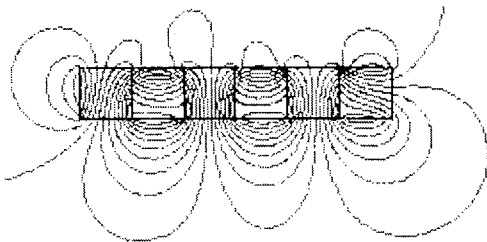
$$\begin{aligned} F_n &= \int_{-\tau}^{\tau} [I(t)w \times B_x] dl \quad [N] \\ B_x &= B_o \sin(kt) e^{(-\frac{\pi}{\tau}y)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_t &= \int_{-\tau}^{\tau} [I(t)w \times B_y] dl \quad [N] \\ B_x &= -B_o \cos(kt) e^{(-\frac{\pi}{\tau}y)} \end{aligned} \quad (5)$$

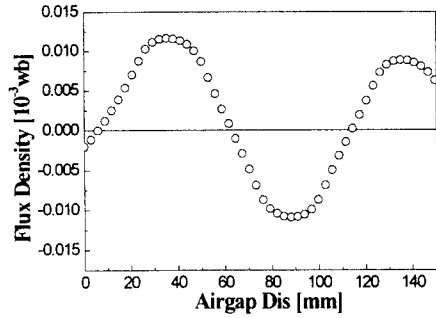
여기서 w 는 페루프 도체의 유효 길이이다. 식 (4)와 식 (5)로부터 수직력과 수평력은 회로의 저항, 인덕턴스 1차축과 2차축 사이의 상대 속도에 따라 다양하게 변함을 알 수 있다.

2.2 해석 모델의 정특성 시뮬레이션

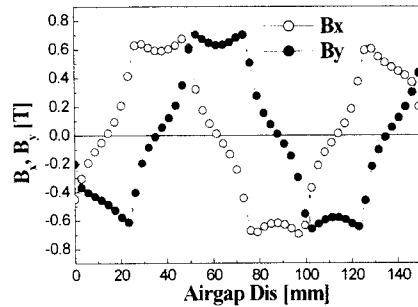
해석 모델은 한 번의 길이가 25[mm]인 정육면체 모양의 NdFeB 계열 영구자석을 직선형 Halbach array 구로 형성되었다. 해석에 사용된 영구자석의 B_r 은 1.1[T]이다. 그림 3은 그림 2(a)와 같이 유한 길이로 영구자석을 배열했을 때 공극이 2[mm] 지점에서 나타나는 공극 자속 밀도이다. Halbach array로부터 형성된 자속의 간격 τ 는 50[mm]이다. Halbach array에 의한 자속도는 B_x 와 B_y 성분으로 나타나는데 크기는 동일하고 위상이 90° 차이가 난다.



(a) 자속 분포도



(b) 공극 자속 분포



(c) 공극 자속밀도 분포

그림 3 Halbach array의 자속 및 자속밀도 특성

2.3 해석 모델의 동특성 시뮬레이션

2차축 페루프 도체는 극간격과 동일한 도체 간격을 갖고 권수는 50[Turn]으로 하였다. 해석 모델의 도체 간격은 속도에 따른 이동 자계의 편중을 고려하지 않고 가장 정현적인 유기기전력을 얻기 위해서 극간격과 동일하게 선정했다. 그림 4는 Halbach array가 페루프 도와 상대 속도 1[m/s]를 갖을 때 한 페루프 도체에 쇄교되는 자속과 이때 발생하는 유기전압, 유도 전류를 각각 나타낸 것이다.

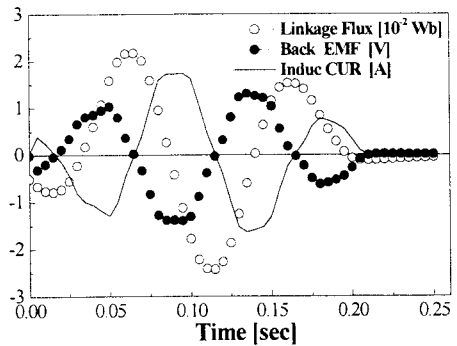


그림 4 페루프 도체의 쇄교자속, 유기기전력과 유도전류

무한히 나열된 페루프 도체위를 영구자석 Halbach array가 이동하면 영구 자석 6편에는 식 (4)와 식 (5) 표현된 수평력과 수직력이 발생한다. 그림 5는 Halbach array가 극간격과 같은 폭의 페루프 도체위를 속도 1[m/s]로 이동할 때 발생하는 수직력과 수평력을 나타낸 시뮬레이션 결과이다.

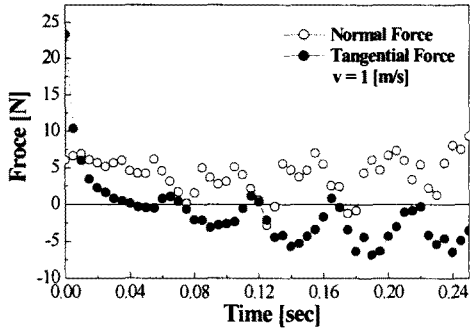


그림 5 속도 1 [m/s]에서 발생하는 수직력과 수평력

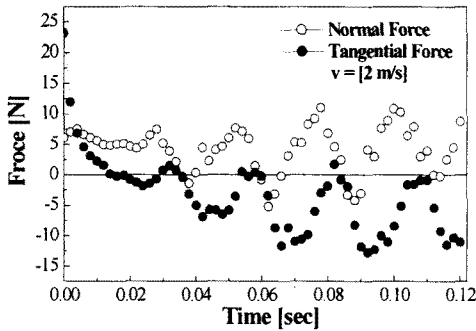


그림 6 속도 2 [m/s]에서 발생하는 수직력과 수평력

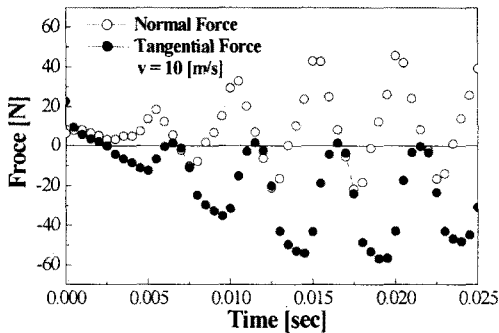


그림 7 속도 10 [m/s]에서 발생하는 수직력과 수평력

영구자석 Halbach array가 움직이기 시작한 초기에 시뮬레이션의 해가 수렴 오차가 큰 범위로 만족스러운 결과를 얻지 못했다. 그림 4로부터 약 0.05[sec] 이후 정상상태를 관찰해보면 약 0.075[sec]와 0.115[sec]에 발생한 수직력과 수평력은 Halbach array를 밀어는 반발력과 잡아당기는 제동력이다.

그림 4에서 0.075[sec]와 0.115[sec] 사이의 구간은 교자속과 유도 전류의 방향이 반대 방향으로 작용하는 구간이다. 0.13[sec]과 0.17[sec] 구간 사이도 같은 결과를 갖는다.

그림 4와 그림 5의 결과로부터 쇠교 자속과 유도 전류와의 위상차가 180° 에 가까워지면 큰 반발력을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 해석 모델에서 회로의 시정수와 페루프 도체의 형상을 일정하게 하고 수직력과 수평력을 속도에 관한 함수로 표현했을 때 그림 6과 그림 7은 속도에 따라 발생한 수평력과 수직력의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

그림 5에서 그림 6까지 결과에서 수평력은 이동 방향과 반대 방향으로 작용하는데, 속도에 따른 시뮬레이션 결과는 이동방향과 반대로 작용하는 수평력은 고려하지 않고 단지 일정한 속도로 움직인다고 가정했을 때 발생한 수직력을 계산한 것이다.

속도 10[m/s]일 때 수직력의 최대값은 약 40 [N]이 생겼다. 해석 모델에 사용된 영구 자석의 밀도를 고려해서 산정된 무게는 약 7[N]으로 그림 5의 결과부터 수직력이 Halbach array에 작용한다면 가동자는 부상할 있을 것이다.

3. 결 론

본 논문에선 Halbach array로 구성된 가동자가 페루프 도체 위를 움직일 때 발생하는 힘 특성을 제시했다. 속도에 따른 시뮬레이션 결과로부터 직선 운동에너지를 갖는 가동자가 자체 무게를 부상시키기 위한 수직 운동에너지를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 수직력의 리플을 줄일 수 있고 또한 수평력을 최소로 하는 페루프 도체의 구조에 대한 연구가 향후 진행될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives, and Systems. Prentice-Hall
- [2] K. Halbach, "Physical and Optical Properties of Rare Earth Cobalt Magnets." Nuclear Instruments and Methods. 187. 1981. pp. 109-117.
- [3] J. A. Tegopoulos, "Eddy Currents in Linear Condu Media." ELSEVIER.
- [4] Maxwell User Manual, ANSOFT, 2000