

## 2차원 영구자석배열의 자속밀도 해석

서울 대학교 조한삼\*

서울 대학교 정현교

### Magnetic Field Analysis of 2D Permanent Magnet Array for Planar Motors

Seoul Nat'l Univ. H. S. Cho\*

Seoul Nat'l Univ. H. K. Jung

#### 1. 서론

영구자석을 사용한 평면모터는 펄스(Pulse)형, 동기(Synchronous)형등의 종류가 있다. 그중에 2차원 영구자석 배열을 사용하여 동기형으로 구동되는 형태의 평면모터는 이동거리가 길고, 이동자가 자유롭게 움직일수 있다는 측면에서 유리한 장점을 가지고 있다. 일본의 아사카와씨는 위와같은 영구자석 배열과 그 배열을 이용한 평면모터를 처음으로 제안하였다[1]. 그러나 단축 구동용 모터에 비해 영구자석의 사용률이 반밖에 안 되서 평면모터의 힘이나 효율등의 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있었다. 그래서 미국의 치타야씨는 영구자석의 사용률을 높인 배열을 발명하여 특허를 받았다[2]. 이외에도 트립퍼씨 등에 의해 할바크(Halbach) 배열을 이용한 영구자석배열이 제안되었다[3]. 그러나 지금까지 이러한 형태들의 자석배열에 의한 자속밀도의 해석에 대한 연구가 없었다. 본 논문에서는 두 가지 형태의 자석배열에 대해서 자속밀도를 해석적으로 구한다.

FEM과 같은 수치해석을 이용하는 것은 정확한 자속밀도의 분포를 구하는데 유용하기는 하지만, 모델이 커질 경우 계산하는 데 오래 걸리고, 모터의 특성을 계산할 때에도 수치해석을 이용하므로 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 자속밀도분포의 해석적인 해는 이러한 단점을 극복해준다. 해석해를 풀기 위한 지배방정식은 스칼라 포텐셜을 이용하였다[4][5]. 계산된 결과를 FEM에 의한 해석과 비교, 검토한다.

#### 2. 모델

그림1은 해석모델의 단면이고, 그림2는 아사카와씨와 치타야씨가 제안한 영구자석배열의 평면도를 나타내고 있다.

계산을 위해서 가정한 것은 아래와 같다.

- 요크(Yoke)의 비투자율은 무한대로 놓았다.
- 영구자석의 자화는 Z방향에 대해 상수이고, 영구자석의 리코일 투자율은 상수라고 하였다.
- 모터는 X, Y방향으로 주기성을 가지고 무한히 있다고 가정하였다.

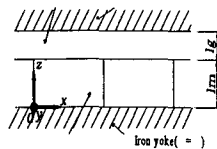


Fig.1. Cut-view of Planar Motor

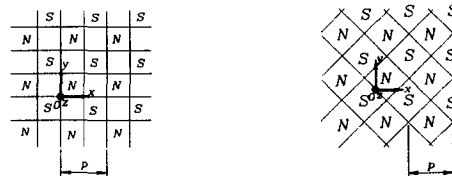


Fig.2. Magnet Array (a)Asakawa (b)Chitayat

### 3. 자속밀도 해석

#### (1) 자화의 표현식

영구자석의 자화분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} = M_z(x, y) \hat{z} \quad (1)$$

아사카와씨의 자석배열의 경우(I)와 치타야씨의 배열의 경우(II)  $M_z$ 는 아래와 같다.

$$M_{zI}(x, y) = \frac{2B_r}{\pi\mu_0} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{k} \left[ \sin\left(k\frac{2\pi}{p}x\right) + \sin\left(k\frac{2\pi}{p}y\right) \right] \quad (2)$$

$$M_{zII}(x, y) = \frac{16B_r}{\pi^2\mu_0} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{kl} \sin\left(\frac{k\pi}{p}(x+y)\right) \sin\left(\frac{l\pi}{p}(y-x)\right) \quad (3)$$

#### (2) 지배방정식의 해

공극에서의 자기스칼라 포텐셜은 다음과 같이 구해진다.

$$u_{gI}(x, y, z) = \sum_k B_k (e^{a_k z} - e^{2a_k(l_g+l_m)} e^{-a_k z}) \cdot [\sin(a_k x) + \sin(a_k y)] \quad (4)$$

$$\text{여기서, } B_k = -\frac{1}{2} \frac{M_k}{a_k} \frac{\exp(-a_k(l_g+l_m)) \sinh(a_k l_m)}{\mu_r \sinh(a_k l_g) \cosh(a_k l_m) + \cosh(a_k l_g) \sinh(a_k l_m)}, \quad a_k = k \frac{2\pi}{p} \quad (5)$$

$$u_{gII}(x, y, z) = \sum_k \sum_l B_{kl} (e^{\lambda_{kl} z} - e^{2\lambda_{kl}(l_g+l_m)} e^{-\lambda_{kl} z}) \cdot \sin(a_k(x+y)) \sin(a_l(y-x)) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } B_{kl} = -\frac{1}{2} \frac{M_{kl}}{\lambda_{kl}} \frac{\exp(-\lambda_{kl}(l_g+l_m)) \sinh(\lambda_{kl} l_m)}{\mu_r \sinh(\lambda_{kl} l_g) \cosh(\lambda_{kl} l_m) + \cosh(\lambda_{kl} l_g) \sinh(\lambda_{kl} l_m)}$$

$$a_k = k \frac{\pi}{p}, \quad a_l = l \frac{\pi}{p}, \quad \lambda_{kl} = \sqrt{a_k^2 + a_l^2} = \frac{\sqrt{2}\pi}{p} \sqrt{k^2 + l^2} \quad (7)$$

### 4. 해석결과 및 FEM에 의한 해석결과와의 비교

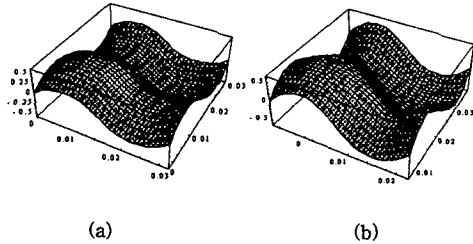


Fig.3. Air-gap Flux Distribution (Analytic) (a)I (b)II

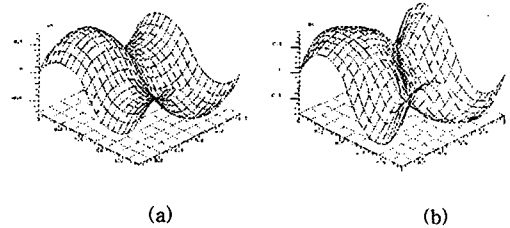


Fig.4. Air-gap Flux Distribution (FEM) (a)I (b)II

### 5. 결론

두 가지 영구자석 배열을 이용한 평면모터의 공극의 자속밀도를 자기스칼라 포텐셜을 이용하여 해석적으로 해를 얻었다. 해의 결과를 FEM에 의한 해석과 비교하여 타당성을 보였다. 해석적으로 얻어진 해는 모터의 토크상수, 인덕턴스 등을 구하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

### 6. 참고문헌

- [1] Asakawa, "Two Dimensional Positioning Device", US patent 4,626,749, Dec. 1986
- [2] Chitayat, "Two-axis Motor with High Density Magnetic Platen", US patent 5,777,402, Jul. 1998
- [3] D.L. Trumper, W.-J. Kim, and M.E. Williams, "Magnetic Arrays" US patent 5,631,618 May. 1997
- [4] Y. N. Zhilichev, "Calculation of 3D Magnetic Field of Disk-Type Micromotors by Integral Transformation Method," IEEE Trans. Magn. Vol.32, No.1, pp.248-253, Jan. 1996
- [5] Z.Q.Zhu and D.Howe, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motors, Part I: Open-Circuit Field", IEEE Trans. Magn., Vol.29, No.1 pp.124-135, Jan 1993