

**Halbach자화 및 원주방향 자화된 회전자를 갖는 영구자석 기기의
무부하시 자계분포 특성해석 및 비교**

장 석명, 최 장영, 조 한욱, 양 현섭*, 이 성호**, 정 상섭**
충남대학교, (주) 삼성테크윈*, LG D/A 연구소**

**Comparison and Analysis for Open-circuit Field of PM Machines
with Halbach and Circumferential Magnetized Rotor**

SeokMyeong Jang, JangYoung Choi, HanWook Cho, HyunSup Yang*, SungHo Lee**, SangSub Jeong
Chungnam National University, Samsung Techwin*, LG D/A Laboratory**

Abstract - This paper deals with the comparison and analysis for open-circuit field of PM(permanent magnet) machines with Halbach and circumferential magnetized rotor. The governing equation is derived in terms of magnetic vector potential and 2-d polar coordinate. And then, analytical results has been verified by comparison with those obtained from FE(finite element) method. On the basis of 2-d analytical results, this paper confirms that PM machines with circumferential magnetized rotor is superior to it with Halbach magnetized rotor in terms of magnitude and sinusoidal wave-forms of flux density due to PM and required magnet volume.

1. 서 론

Halbach자화된 회전자를 갖는 영구자석기기는 많은 장점을 갖는다. 예를 들어 반경방향 및 평행방향 자화된 회전자를 갖는 기기에 비해 공극자속밀도가 크므로 결과적으로 출력을 증대시킬 수 있으며, 더 정현적인 공극자속밀도를 얻을 수 있으므로 코깅토크가 줄어들고 정현적인 역기전력 파형을 얻어 제어적인 측면에서 유리하다. 또한 Halbach 자화의 자기차폐 특성은 자속경로를 위한 shaft를 비자성체 혹은 공기로 구성되게 하여 주므로 회전자 질량이 줄어 결과적으로 관성을 줄인다 [1-3].

Halbach 자화는 보통 등방성 영구자석 세그먼트로 구성되는데, 극 당 세그먼트의 수가 많을수록 좀더 정현적이고 큰 공극자속밀도를 얻을 수 있다. 한편, 착자기술 및 재료기술의 발달은 비등방성 Halbach 자화 모델의 출현을 가능하게 하였고 결과적으로 등방성 Halbach 자화모델에서 극 당 세그먼트의 수가 무한대로 구성되어 있는 것과 같은 착자를 가능하게 해주었는데, 이를 본 논문에서는 원주방향착자라 한다. 원주 방향 착자는 위에서 언급한 Halbach 자화의 장점을 모두 가지면서 공극자속밀도 및 파형의 정현성 측면에서 더 우수할 것으로 예측된다.

따라서 본 논문에서는 Halbach 자화 및 원주방향 자화된 회전자를 갖는 영구자석기기의 무부하시 자계 분포 특성에 관한 해석 및 비교를 수행하는데, 해석방법은 자기벡터자위와 2차원 극 좌표계를 이용하고, 해석결과는 유한요소법에 의한 결과와 비교하여 해석방법의 타당성을 입증하고자한다. 특히 원주방향 착자 모델의 경우 자화모델링의 해석적인 접근에 관한 연구가 미비하기 때문에 원주 방향 자화된 회전자의 자화 모델링 방법을 제시하고자 한다. 마지막으로 해석적인 결과를 바탕으로 두 자화 모델에 대해 공극길이 및 영구자석 두께에 따른 자속밀도 크기 및 자속밀도 파형의 일그러짐 정도를 비교하고 극수에 따른 영구자석의 사용량 비교를 통하여 동일 자속밀도를 얻기 위해 사용되어지는 영구자석 체적 측면에서 원주방향 착자가 우수함을 입증하고자한다.

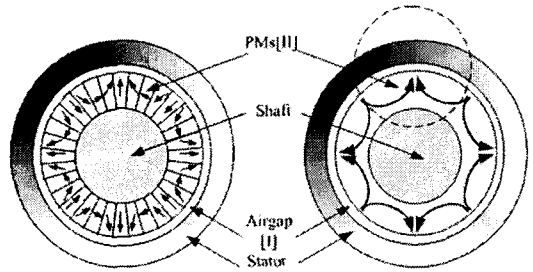


그림 1. 두 가지 다른 종류의 자화를 갖는 영구자석 기기의 구조 및 해석모델. (a) Halbach 자화 (b) 원주방향 자화.

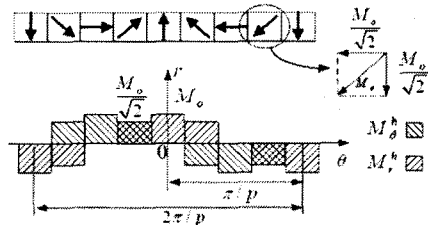


그림 2. Halbach 자화 모델링

2. 본 론

2.1 구조 및 해석 모델

그림 1(a) 와 (b)는 각각 8극 내전형 Halbach 및 원주방향 자화된 회전자를 갖는 영구자석기기의 구조 및 해석 모델을 보여준다. 그림 1에서 보는 바와 같이 영구자석에 의한 자계분포 해석 시 코일은 공기와 투자율이 같다고 보기 때문에 코일 부를 공극 영역으로 포함시키면 해석 모델은 영구자석 영역 (II)과 공극 영역(I)의 2영역 모델로 단순화 된다. 또한, 영구자석의 투자율은 공기와 같고 철심의 투자율은 무한이라 가정한다.

2.2 Halbach 자화된 회전자에 의한 자계분포

(1) 자화 모델링

영구자석에 의한 자계특성 해석 시 영구자석의 정확한 자화모델링이 먼저 수행되어야 하며 이를 위해서, 그림 2는 Halbach 자화에 대한 푸리에 전개를 위한 모델을 보여준다. 그림 2에서 알 수 있듯이, Halbach 자화 모델의 경우 자화는 반경방향 자화 성분과 θ 방향 자화 성분으로 나누어 푸리에 전개를 수행하여야 한다. 결과적으로 Halbach 자화에 대한 푸리에 전개식은 식 (1)로 주어진다.

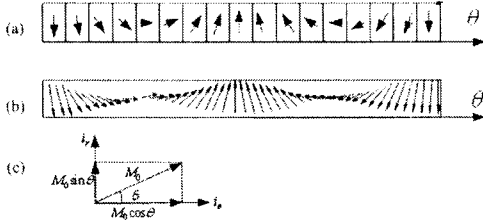


그림 3. 원주방향 자화 모델링 과정

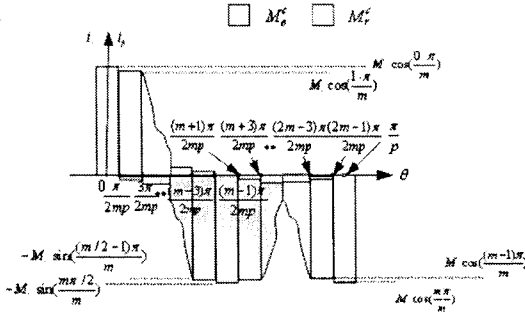


그림 4. 원주방향 자화의 푸리에 전개를 위한 모델

$$M^h = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} [M_{rn}^h \cos(q\theta) i_r + M_{\theta n}^h \sin(q\theta) i_\theta] \quad (1)$$

여기서 $q = np$ 이며 n 은 공간 고조파 차수이고 p 는 극 쌍수를 나타낸다. M_{rn} , $M_{\theta n}$ 은 각각 반경방향 및 θ 방향 푸리에 계수를 나타내며, 위 첨자 h 는 Halbach 자화를 의미한다.

(2) 자계 특성식

영구자석 영역에는 전류가 없으므로 맥스웰 방정식에 의해 $\text{curl} \mathbf{H} = 0$ 이므로 $\text{curl} \mathbf{B} = \text{curl} \mathbf{M}$ 이 되고 여기에 벡터자위의 정의 $\text{curl} \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 를 대입하여 풀면 Halbach 자화된 회전자에 의한 자계분포 예측을 위한 지배방정식은 식 (2)로 주어진다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{zn}}{\partial r} - \frac{q^2}{r^2} A_{zn} = -\frac{\mu_0 q}{r} M_n \quad (2)$$

여기서 A_{zn} 은 벡터자위의 z 성분이며 $M_n = M_{\theta n}/q + M_{rn}$ 이다. 식 (2)의 해석 해는 각각 식 (3)으로 주어진다.

$$A_{zn}^h = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} [A_n^h r^q + B_n^h r^{-q}] \quad (3.a)$$

$$A_{zn}^p = \begin{cases} \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{j\mu_0 q M_n}{(q^2 - 1)} & q \neq 1 \\ -\frac{j\mu_0}{2} r \ln r M_n & q = 1 \end{cases} \quad (3.b)$$

여기서 위 첨자 h 와 p 는 각각 일반해와 특수 해를 나타낸다. 식 (3)의 벡터자위 해석해와 벡터 자위의 정의 $\text{curl} \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 로부터 공극 및 영구자석 영역에 대한 Halbach 자화된 회전자에 의한 자계특성식은 식 (4)로 주어진다.

$$B_{\theta n}^I = -\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{q}{r} [A_n^I r^q + B_n^I r^{-q}] \cos(q\theta)$$

$$B_{\theta n}^{II} = -\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{q}{r} [A_n^{II} r^q + B_n^{II} r^{-q} + \frac{\mu_0 r q M_n}{q^2 - 1}] \sin(q\theta)$$

$$B_{\theta n}^I = -\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{q}{r} [A_n^I r^q + B_n^I r^{-q}] \cos(q\theta)$$

$$B_{\theta n}^{II} = -\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{q}{r} [A_n^{II} r^q + B_n^{II} r^{-q} + \frac{\mu_0 r q M_n}{q^2 - 1}] \sin(q\theta) \quad (4)$$

여기서 위 첨자 I 와 II 는 각각 공극 및 영구자석 영역을 나타낸다. 식 (4)는 극수가 4극 이상일 경우에만 성립하고 2극인 경우 식 (4)에서 $q=1$ 로 바꾸고 영구자석 영역의 특수 해를 $q=1$ 일 때의 값으로 바꾸어 주면 된다. 영역 I 와 II 에 대한 계수 A_n, B_n 은 경계조건을 대입함으로써 구할 수 있다.

2.3 원주방향 자화된 회전자에 의한 자계분포

그림 3은 원주방향 자화 모델링 과정을 보여주며, 그림 3(a)는 그림 1(a)의 점선으로 된 원 부분에 해당하는 자화를 극 당 8 세그먼트라는 가정 하에 원주방향으로 펼친 경우의 그림을 보여준다. 원주방향 자화모델링은 앞에서 언급했듯이 등방성 Halbach 자화 모델의 극 당 세그먼트의 수가 무한인 경우의 자화라 가정할 수 있으므로 그림 3(a)는 그림 3(b)와 같이 무한한 세그먼트의 조합으로 표현가능하다. 그림 3(c)의 원리를 그림 3(b)에 적용하면 그림 4와 같이 원주방향 자화의 푸리에 전개 모델로 표현가능하다. 여기서 m 은 극당 세그먼트의 수이다. 결과적으로 원주방향 자화의 푸리에 전개식은 식 (5)로 표현된다.

$$M^c = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} [M_r^c \cos(p\theta) i_r + M_\theta^c \sin(p\theta) i_\theta] \quad (5)$$

여기서 위 첨자 c 는 원주방향 자화를 나타낸다. 한편, 원주방향 자화된 회전자에 의한 자계분포 예측을 위한 지배방정식은 식 (2)와 같은 형태를 갖고 결과적으로 식 (4)와 같은 자속밀도 특성식을 얻는다. 원주방향 자화는 그림 1에 보이듯이 구조가 같고 그림 4에서 알 수 있듯이 Halbach 자화와 유사하게 반경방향 성분과 원주방향 자화성분을 가지므로 경계조건은 동일하다.

2.4 해석적 결과와 유한요소해석결과와의 비교

해석적 결과와 유한요소 해석결과와의 비교에 사용된 대략적인 제원 및 치수는 영구자석 내반경 및 외반경 그리고 고정자 내반경 즉 r_i, r_o 및 r_s 는 각각 45mm, 55mm 및 60mm이며 극 수는 8극, 영구자석의 잔류자속 밀도는 1.1[T]로 Halbach 자화 및 원주방향 자화모델 모두에 동일하게 적용되어졌다. 그림 5(a)와 (b)는 각각 Halbach 및 원주방향 자화된 회전자에 의한 자속흐름을 보여준다. 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 본 논문은 유한요소 해석 시 원주방향 자화를 극 당 45개의 세그먼트로 구성하였다. 그림 6(a)와 (b)는 각각 Halbach 자화 및 원주방향 자화모델의 반경방향 위치에 따른 해석적 결과와 유한요소해석결과와의 비교를 보여주며, 두 모델 모두 해석적 결과가 유한요소 해석결과와 잘 부합함을 볼 수 있다.

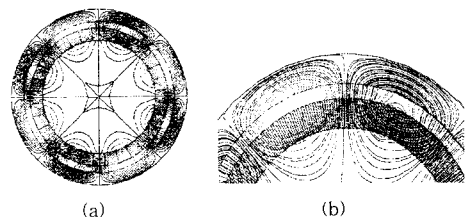
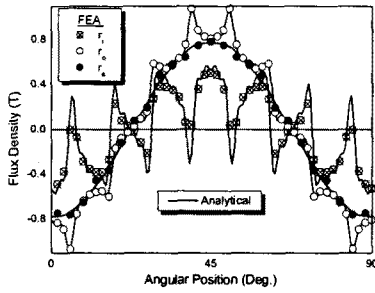
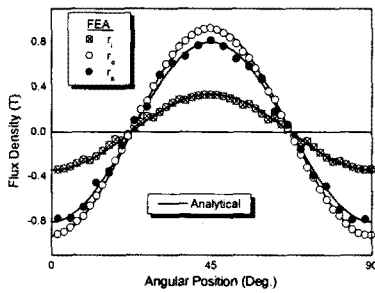


그림 5. 자속흐름 : (a) Halbach 자화 및 (b) 원주 방향자화



(a)



(b)

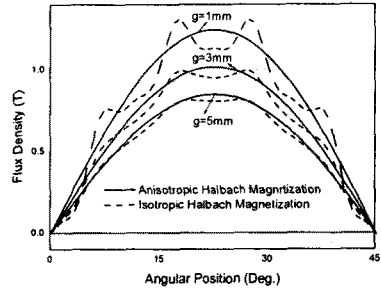
그림 6. 반경방향 위치에 따른 무 부하시 자계분포에 대한 해석적 결과와 유한요소 해석결과와의 비교: (a) Halbach 자화 모델 및 (b) 원주방향 자화모델

2.5 Halbach 및 원주 방향 자화의 특성 비교

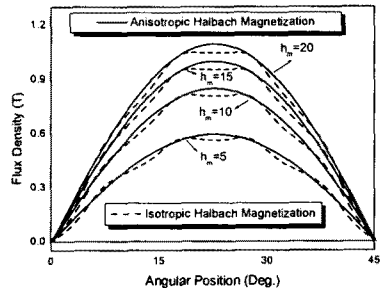
그림 7(a)와 (b)는 각각 고정된 자석두께 및 공극길이에 대한 공극길이 및 자석두께 변화에 따른 자속밀도 특성을 보여준다. 그림 7(a)에서 알 수 있듯이, 공극길이가 줄어들수록 두 자화 모델의 자속밀도의 크기는 커지며, 원주방향의 파형은 항상 정현적이지만, Halbach 자화 모델은 파형이 더 일그러진다. 또한 그림 7(b)에서 알 수 있듯이, 영구자석 두께가 증가할수록 두 자화 모델의 자속밀도 크기는 커지지만 증가폭은 둔화되며, Halbach 자화 파형의 일그러짐은 영구자석 두께에 별 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 그림 8은 동일한 자속밀도를 내기 위한 Halbach 자화 및 원주 방향자화 모델의 영구자석 체적량 비교를 보여주는데, 8극 Halbach 자화모델에 대해 4극 원주 방향 자화 모델을 제외한 6,8,10극 원주 방향 자화 모델이 동일한 자속밀도를 내기 위해서 Halbach 자화모델에 비해 영구자석 체적이 더 적게 필요함을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 Halbach자화 및 원주방향 자화를 갖는 영구자석 기기의 무부하시 자계분포의 특성해석 및 비교를 수행하였다. 해석방법은 2차원적인 극좌표계 및 공간고조파법을 이용하여 자계특성식을 도출하였고, 해석결과는 유한요소법과 비교하여 잘 부합함을 확인함으로써 해석법의 타당성을 입증함과 동시에 무부하시 자계분포에 대한 원주방향 자화의 전자장 해석법을 확립했다. 또한 자석두께 및 공극길이 변화에 따른 자계분포 특성을 제시하여 원주방향 자화가 Halbach 자화에 비하여 공극자속밀도의 크기 및 파형의 정현성 측면에서 우수함을 확인했다.



(a)



(b)

그림 7. 설계변수에 따른 Halbach 자화 및 원주방향 자화의 공극자속밀도 비교 : (a) 공극길이 및 (b) 영구자석 두께

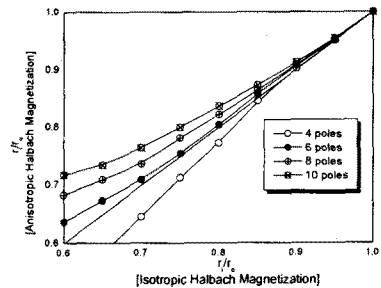


그림 8. Halbach 자화 및 원주방향 자화의 동일한 자속밀도를 내기위한 영구자석 체적 비교

References

- [1] Z.Q.Zhu, Z.P.Xia, K.Atallah, G.W.Jewell and D. Howe, "Intergrated Design of Magnet Powder Aligning System and Brushless Motor using Anisotropic Halbach Cylinders," *EMD99, IEE*, pp.123-127, 1999.
- [2] K.Atallah and D.Howe, "The Application of Halbach Cylinders to Brushless AC Servo Motors," *IEEE Trans. on Magn.* vol.34, No.4, July 1998.