

벡터 포텐셜에 대한 스칼라 포아송 방정식의 해를 구한 후, 각 영역의 경계조건을 이용하면, 1차축 전류에 의한 그림. 1 (b)의 경계면 (e)에 대한 자속밀도의 x성분과 z 성분을 식 (6)과 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$B_{xn}^e = j k_n A_{yn}^e = \frac{j\mu_0}{2k_n} J_{yn}(1 - e^{-\gamma_n r}) \quad (6)$$

$$B_{zn}^e = -\frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn}(1 - e^{-\gamma_n r}) \quad (7)$$

2.4 공극자속밀도, 추력 및 수직력 계산

Halbach 배열 가동자를 갖는 공심형 리니어 동기모터의 공극자속밀도의 수평성분과 수직성분은 각각 영구자석에 의한 자계와 1차축 전류에 의한 자계를 합성함으로써 식 (8)과 식 (9)로 구할 수 있다. 또한 식 (8)과 식 (9)에서 M_{zn} 을 zero로 놓음으로써 일반배열을 갖는 공심형 리니어 동기모터의 공극자속밀도의 각 성분을 구할 수 있다.

$$B_{xn}^d = \frac{j\mu_0}{2k_n} J_{yn} e^{-\gamma_n x_0} (1 - e^{-\gamma_n r}) e^{-jk_n z_0} + \left(-\frac{jk_n \mu_0}{2\gamma_n} M_{zn} + \frac{\mu_0}{2} M_{zn}\right) (1 - e^{-\gamma_n \Delta}) \quad (8)$$

$$B_{zn}^d = -\frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn} e^{-\gamma_n x_0} (1 - e^{-\gamma_n r}) e^{-jk_n z_0} + \left(-\frac{\mu_0}{2} M_{zn} - \frac{j\gamma_n \mu_0}{2k_n} M_{zn}\right) (1 - e^{-\gamma_n \Delta}) \quad (9)$$

두 가지 형태의 공심형 리니어 동기모터의 수직력 및 추력은 맥스웰의 stress tensor법을 이용하여 식 (8)과 식 (9)를 이용하여, 식 (10)과 식 (11)로 각각 구해진다.

$$F_x = -S \langle T_{xx}^d \rangle_z = -\frac{S}{2\mu_0} \langle B_x^d B_x^d - B_z^d B_z^d \rangle_z \quad (10)$$

$$F_z = -S \langle T_{xz}^d \rangle_z = -\frac{S}{\mu_0} \langle B_x^d B_z^d \rangle_z \quad (11)$$

여기서, S는 그림. 1 (b)의 경계면 (d)에서의 영구자석의 표면적이다.

2.5 역기전력

3상을 갖는 1차축의 1상 권선의 공간적 주기 l에 대한 Halbach 배열 영구자석 가동자의 직선 운동에 기인하는 역기전력은 식 (12)로 표현가능하다. 또한 일반배열 영구자석 가동자에 의한 역기전력은 식 (12)에서 M_{zn} 을 zero로 놓음으로써 구할 수 있다.

$$V_{bemf} = w \eta_0 \sum_{n=-\infty, \text{odd}}^{\infty} \left(\frac{\mu_0}{\gamma_n} M_{zn} + \frac{j\mu_0}{k_n} M_{zn} \right) \cdot \left(j \frac{v_x}{k_n} + \frac{v_z}{\gamma_n} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma_n \Delta}) (1 - e^{-\gamma_n r}) \cdot (e^{-j\pi n/3} - 1) e^{-\gamma_n x_0} e^{jk_n z_0} \quad (12)$$

3. 특성해석결과

그림. 2는 Halbach 배열 영구자석 가동자를 갖는 리니어 동기모터의 구성도를 보인 것이다.

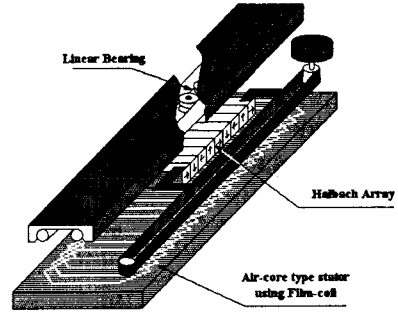


그림. 2 Halbach 배열 영구자석 가동자를 갖는 리니어 동기모터 시작기 구성도

그림. 3은 식 (3)을 이용하여 구한 Halbach 배열 영구자석 표면 B_x 성분 자속밀도분포를 보인다. 해석결과가 FEA 결과 및 실험결과에 대하여 잘 부합됨을 볼 수 있다.

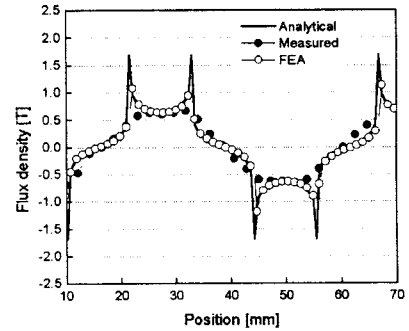


그림. 3 Halbach 배열 영구자석 표면 자속밀도분포

그림. 4는 일반배열 영구자석 표면 B_x , B_z 성분의 자속밀도분포를 각각 FEA 결과와 비교하여 도시한 것이다. 그림. 3과 비교하여 영구자석 일반배열에 의한 자속밀도분포는 영구자석 Halbach 배열에 의한 자속밀도분포와 크게 차이를 알 수 있다.

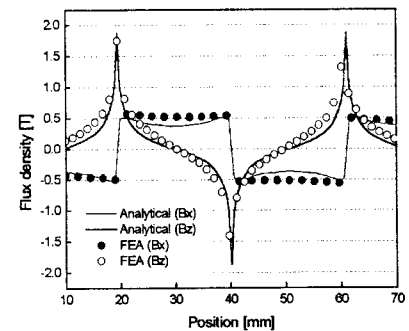


그림. 4 일반배열 영구자석 표면 자속밀도분포

그림. 5는 일반배열과 Halbach 배열 영구자석의 높이에 따른 기본파 성분 자속밀도 최대치를 서로 비교하여 도시한 것이다. 영구자석의 동일 높이에 대해 Halbach 배열이 일반배열 영구자석을 가동자로 사용하였을 경우에

대하여 자체특성이 우수함을 알 수 있다. 또한 영구자석의 높이 20 [mm] 이상에서 영구자석의 높이가 증가하더라도 자속밀도의 증가가 둔화됨을 알 수 있다.

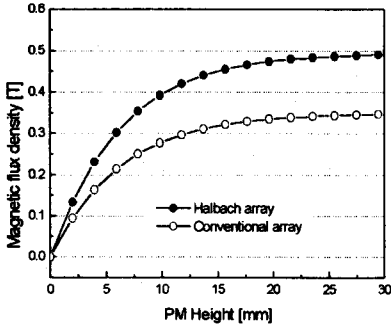


그림. 5 영구자석의 높이에 따른 일반배열과 Halbach 배열 영구자석에 의한 자속밀도 기본과 성분 최대치 비교

그림. 6은 가동자 영구자석 배열에 따른 공심형 필름코일을 1차측으로 하는 리니어 동기모터의 1차측 전류에 따른 추력특성을 비교하여 나타낸 것이다. 가동자 영구자석을 Halbach 배열을 사용한 리니어 동기모터에서, 식 (11)을 이용한 해석적인 방법에 의해 산출되는 추력과 실험치가 잘 부합됨을 알 수 있다.

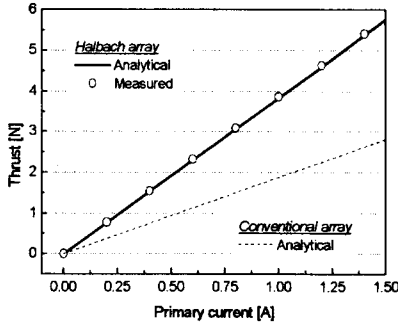


그림. 6 1차측 전류에 따른 가동자 영구자석 배열에 따른 공심형 리니어 동기모터의 추력특성 비교

그림. 7은 1차측을 개방회로로 하고, 가동자를 0.088 [m/s]의 속도로 직선운동 시켰을 경우, 영구자석 배열에 따른 역기전력의 파형을 상호비교하여 도시한 것이다. 식 (12)를 통해 구해진 가동자 영구자석 Halbach 배열에 의한 역기전력 해석치와 실험치가 잘 부합됨을 볼 수 있다.

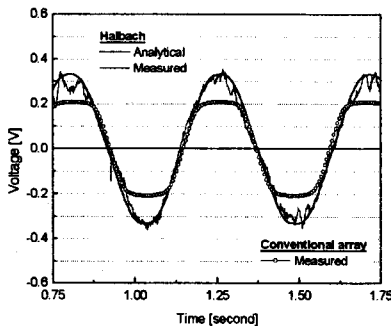


그림. 7 가동자 영구자석 배열에 따른 역기전력 파형 비교

그림. 8은 가동자 영구자석 배열에 따른 공심형 리니어 동기모터의 1차측 권선두께와 가동자 영구자석의 높이에 따른 추력특성을 보인 것이다. 권선두께 15 [mm] 이상에서 권선두께가 증가함에 따른 추력의 증가가 둔화됨을 알 수 있다.

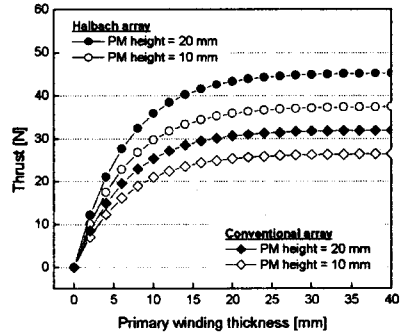


그림. 8 1차측 권선의 두께에 따른 추력특성 비교

4. 결 론

본 논문은 동일한 공심형 필름코일 1차측을 갖는, Halbach 배열 영구자석 가동자와 일반배열 영구자석 가동자로 각각 구성된 리니어 동기모터에 대한 설계 및 해석에 관한 자료를 제시하였다. 또한 두 가지 가동자 영구자석 배열에 따른 리니어 동기모터의 특성을 자속밀도 분포, 영구자석 높이에 따른 자체특성, 1차측 전류에 따른 추력특성, 가동자 직선운동에 따른 역기전력 파형, 1차측 권선 두께에 따른 추력 특성 등을 토대로 상호 비교 및 검토한 결과를 제시하였다.

[참고 문헌]

- [1] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim and D. S. Hyun, "Analysis of forces in short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1256-1270, 1999
- [2] T. Mizuno and H. Yamada, "Magnetic circuit analysis of a linear synchronous motor with permanent magnets," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 28, pp.3027-3029, 1992
- [3] K. Halbach, "Design of permanent multipole magnetics with oriented rare earth cobalt material", Nuclear Instruments and Methods, vol.169, no. 1, pp.1-10, 1980
- [4] R. J. Cruise and C. F. Landy, "Reduction of detent forces in linear synchronous motors," The Second International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Tokyo, April 1998
- [5] 장석명, 윤인기, 이성호, 이중호, "영구자석형 선형 동전 동기의 디텐트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호비교" 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집