

비선형 시뮬레이션에 의한 리니어 펄스모터의 특성해석

이 계 의 이 허 욱 령
인하대학교 공과대학 전기공학과

Linear Pulse Motor Characteristics Analysis using Non-linear Simulation

Je-Hie Lee, Uk-Youl Huh
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

ABSTRACT

Because linear motor directly drives linear motion, it does not need conversion equipment such as belt and gear. Especially linear pulse motor provide more precise positioning and large force than other linear motors. As current manufacture technic of linear pulse motor is much to be desired at home. This motor lay out to make use of computer aided design program. In this paper the experimental motor is 2-phases 4-poles hybrid pulse motor which has three teeth per pole. Simulation program is divided its function into 4 parts - air gap permeance analysis, permanent magnet & non-linear core operating point determine, winding configuration, leakage flux analysis. It is possible to make motor static and magnetic characteristics for this simulation program. Also, by varying input parameters of the program, experimental motor is to be compared to motor characteristics.

1. 서론 [1][2]

리니어 모터란 회전형 모터의 고정자(1차속)와 회전자(2차속)를 직선 평면구조로 전기한 모터이다. 즉, 전원으로 부터 공급된 전기 에너지를 직접 기계적인 직선 운동으로 변환해서 가동체를 움직인다. 이러한 모터의 개념은 약 100년쯤 이전부터 연구개발이 있었지만 당시에는 고속 스렛칭 소자를 얻을수 없다는 제약때문에 오랫동안 실용화 되지못했다. 그러나 최근의 반도체 기술의 발달에 의해 여러 분야에서의 리니어 모터의 활용이 급격히 증가 했다. 기존의 회전형 모터의 운동을 직선 운동으로 변환시키는 데에는 벨트, 볼스크류 또는 랙피니언 등의 변환기구를 사용하였다. 이러한 방법은 시스템이 대형, 복잡해지고 훼손, 소음, 진동의 문제가 있으며 변환장치를 거치면서 효율이 떨어진다. 리니어모터는 이러한 직선운동에 변환기구가 필요 없기때문에 전달효율이 좋고 비교적 조용해지며 소형 경량화된다. 또한 신뢰성이 높아져서 정확한 위치 제어가 가능하다. 특히 리니어 펄스 모터(LPM)는 직접 직선 구동 방식을 적용할수있어 백래쉬나 주행거리에 대한 누적오차가 없고 간단한 기구우프 제어로도 고정도의 위치결정을 할수있다는 잇점이 있으며 다른 리니어 모터의 비해 입력 펄스 신호에 따라 일정 스텝방향식 이동하기 때문에 응답성이 뛰어나다. 회전형 모터의 토오크에 해당하는 힘을 추력(Thrust), 추진력, 견인력으로 명칭하며 이 힘의 진행방향과 직각방향으로 작용하는 힘을 수직력(Normal force)이라 한다. LPM의 구분은 자모의 구성에 따라 가변 리턴스(VR)형과 영구자석형(PM)으로 구분되어진다. VR형은 구조가 간단하기 때문에 가공 자유도가 크고 관성이 작게되어 응답성이 뛰어나다. 반면 PM형은 필요한 자속을 영구자석과, 권선에서의 자속으로 분담하기 때문에 소비전력이 적고 교번자계이기 때문에

바이폴러 구동이 되어 권선의 이용률이 높고 효율이 좋다. PM형이 VR형 보다 큰추력을 발생하기 때문에 현재 많은 응용기에서 PM형이 사용되고 있다.

PM형 LPM의 동작 원리는 회전형 하이브리드 스텝모터와 같다. 각상의 권선은 두개의 극에 반대방향으로 감겨져있어 그림 1의 (1)에서 처럼 B상의 여자되어 3의 극이 PM의 자속과 Coil의 자속이 합해지는 형태로 되어 가동자와 고정자의 극이 일치하는 방향으로 이동하며 다음 단계 (2)에서 A상이 여자되어 극 2가 주자트의 극이 된다. 이러한 여자순서에 의해 모터는 동작하게 된다.

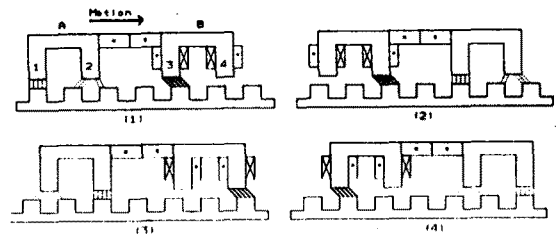


그림 1. PM형 LPM 동작원리

2. LPM 특성해석 프로그램

2.1 LPM 해석 프로그램의 전체 구성

실제 LPM을 제작하는 데에는 상당한 가공기술과 재료의 비용이 요구되기 때문에 여러가지 모터의 구조를 설정하여 각각의 구조에서 수학적 모델에 의해 모터가 어떻게 동작할것인가를 예측하는 것이 필요하다. 이 논문에서는 LPM의 자기 동가회로(Magnetic equivalent circuit)를 구성하여 모터의 위치에 대한 공극에서의 퍼미언스계산, 모터의 자속 경로에서의 자속을 계산하고 자기회로에서의 자장 에너지 해석을 통해 추력을 구한다. 또한 정확한 특성 해석을 하기위해 철심부에서의 비선형 요소의 계산, 원하는 모터의 특성을 구하기 위한 알맞은 권선의 감긴수 설정한다. 그림 2에서는 위 계산부분에 의한 해석 프로그램의 전체 흐름선도를 나타내었다.

2.2 공극의 퍼미언스 해석 [3][4][5]

공극에서의 퍼미언스를 구하는 방법에는 크게 두가지로 볼수 있다.

- 1) Reluctance 해석법
- 11) 유한요소방법(FEM)

첫번째 방법은 마르고 쉽게 퍼미언스를 결정할수있다. 또한 기본과 성분의외의 다른 고조파 성분을 계산할수있고 제4고조파 성분에 의하여 Detent force를 구할수 있다. 단, 정확도는 FEM 방법보다 저하된다. 두번째방법은 정확도는 높으나 계산

시간과 이 방법을 지원해주는 Software의 개발 때문에 PC를 이용한 계산에는 적당치않다. 또한 공구에서의 퍼미언스를 유도하는 문제를 푸는데에 어려움을 가지고있다. 본 논문에서는 첫번째 방법에 의해 퍼미언스를 계산 해석한다. 이 퍼미언스의 유도는 1986년 IMCSD에 발표된 "Permeance model and thier application of step motor design"의 결과를 이용하였다.

시뮬레이션의 대상 모터(그림 3)는 2상 하이브리드형 LPM으로 직선 운동하는 가동자(Slider)와 공구를 사이에 두고 고정자(Stator)가 있다. 가동자위에 영구자석이 종방 방향으로 구이 다르게 착화 되어있고 각상의 권선은 바이폴러 형태로 감겨져있다. 가동자와 고정자 모두 치(teeth)를 가지고 있는(Doubly-salient)구조이다.

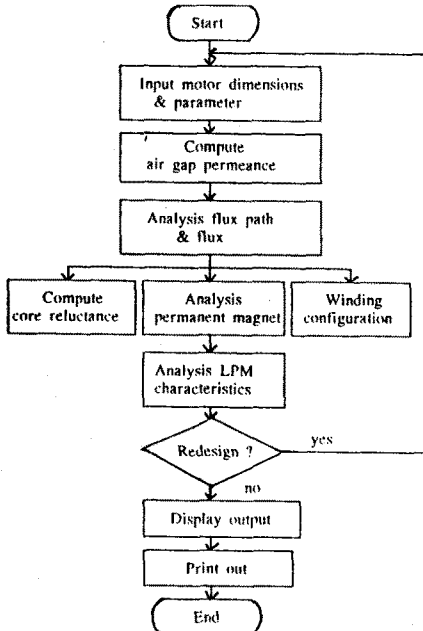


그림 2. LPM 특성해석 프로그램의 전체 흐름선도

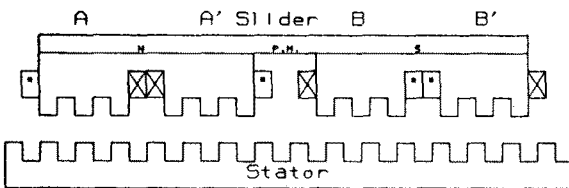


그림 3. 대상 Linear pulse motor

2.3 가동자의 영구자석 해석 [5][6][7]

등가자기 회로에서 자속을 계산하기 위해서는 권선과 영구자석의 MMF(Magneto motive force)의 결정이 필요하다. 권선의 MMF는 Turn수와 전류에의하여 쉽게 결정할수있다. 그러나 영구자석의 특성은 재질, 크기, 모터에 착화된 모양에 따라 차이가나며 모터의 퍼미언스의 변화에 따라 MMF는 변화된다. MMF의 결정은 B-H곡선상의 2상한에서의 감자곡선(Demagnetization curve)(그림 4)과 부하선의 동작점에 의해 할수있다.

감자곡선의 근사식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$B = Br \frac{H_c + H}{H_c + aH}$$

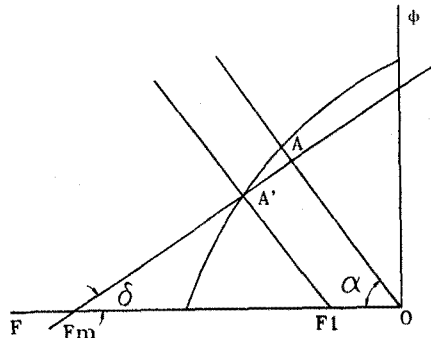


그림 4. 영구자석의 동작점 결정

$$a = \frac{2\sqrt{r} - 1}{r}$$

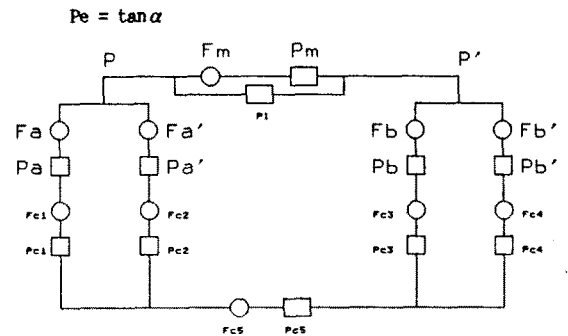
$$r = \frac{B_o H_o}{B_r H_c}$$

Br : 잔류자속 밀도

Hc : 보자력

Bo : 최대에너지에서의 B 값 Ho : 최대에너지에서의 H 값

그러므로 감자 곡선과 모터의 부하선 OA가 만나는점 A를 구할수있고 이 점이 모터의 동작점이된다. 부하선을 구하기 위해서는 '그림 5.'의 LPM 등가 자기 회로 에서 P - P'를 개방하고 들어다본 등가 전원 F1과 등가 부하 Pe에의해 부하선을 구한다.



Pa - Pd : 각상 공구의 Permeance

Pc1 - Pc5 : 각 철심부의 Permeance

Fa - Fd : 각상 권선의 MMF

Fc1 - Fc5 : 각 철심부의 MMF

그림 5. LPM 등가 자기 회로

$$P_e = (P_A + P_{A'}) // (P_B + P_{B'}) // P_{C5}$$

$$F_1 = \frac{P_A - P_{A'}}{P_A + P_{A'}} F_a + \frac{P_B - P_{B'}}{P_B + P_{B'}} F_b$$

$$P_A = P_a // P_{c1}, P_{A'} = P_{a'} // P_{c2}$$

$$P_B = P_b // P_{c3}, P_{B'} = P_{b'} // P_{c4}$$

$$F_a = F_{a'}, F_b = F_{b'}$$

부하선과 감자곡선이 만나점에서 동작점이 결정되고 이러한 동작점은 동작선(Recoil line)을 따라 움직이게 된다. 이때의 동작선의 기울기는 다음과 같이 감자곡선의 H=에서의 기울기와 근사적으로 일치한다.

동작선이 구해지면 X축과 동작선이 만나는 점이 영구자석의 MMF원인 F_m 이고 영구자석의 Permeance P_m 은 동작선의 기울기이다.

$$P_m = \tan \delta$$

2.4 철심부 해석 [8]

V.R형과 P.M.형이 복합된 하이브리드형 리니어 펄스모터는 동가 자기회로를 구성하면 철심부에 비선형적인 저항을 가지게 된다. 그러므로 과거 모터를 해석할때 공극에서의 자기특성만을 고려하여 선형적으로 해석하였으나, 이러한 해석 방법은 실제 측정치와는 많은 차이가 있었다. 이러한 비선형적인 요소를 정확히 해석하여야만 고정자와 가동자 모두 치를 가진 복잡한 구조에서 수력을 위시한 모터특성을 정확히 해석할수 있다. 모터의 철심부 해석은 철심부를 하나의 동작점에 대하여 선형모델을 설정하고 자기회로에서의 자속을 이용한 반복적인 방법으로 해석한다. 이 논문에서는 Newton-Raphson 방법을 이용하였다. 이 방법은 초기치 설정에 따라 수렴속도와 매우 느리거나 발산하는 문제가 있다. 그래서 확실한 수렴을 보장하기 위해서는 초기치를 적당한 값으로 설정 해야한다. 모터의 주자속 경로에서 자속의 양이 같은 구간을 철심의 한블럭으로 정의하여 각블럭의 자기저항을 계산해 나간다. 블럭은 크게 가동자의 극, 가동자의 요오크부, 가동자와 고정자의 치부, 고정자의 요오크부로 나눌수있다.

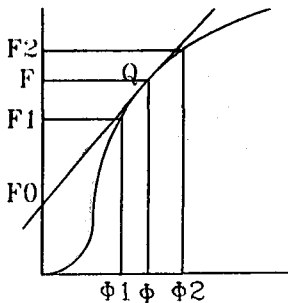


그림 6. 철심부 Φ -F 곡선

$$F = F_0 + \frac{dF}{d\Phi} \Phi \quad \Bigg| \quad Q$$

$$F = F_0 + R\Phi$$

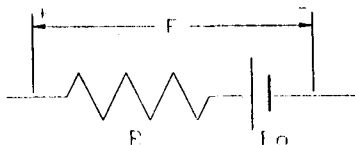
$$\Phi = B \times S, \quad F = H \times L, \quad R = F / \Phi \quad \text{--- (a)}$$

B : 자속밀도 H : 자계 Φ : 자속

S : 철심부 자로의 넓이 L : 철심부 자로의 길이

F : 철심부 MMF R : 철심부 자기 저항

그림 6에서 보이는것과 같이 식 (a)물에 의해 철심부의 B-H 관계를 Φ -F 곡선으로 변환시키고 직선의 접점 Q가 동작점으로 결정되면 아래와 같은 선형화된 모델도 설정할수있다.



2.5 권선설계와 누설자속 [5]

설계 프로그램에서 해석하려는 모터는 가동자극에 보빈을 결합시켜 그위에 각상에 바이플러 형태로 권선이 감기는 형태를 가지고있다. 이때 감기는 코일의 전체 저항이 여자전류를 흐르는것에 장이가 될정도로 크면 열 손실이 커지고 심각한 발열 문제가 일어난다. 또한 시간이 지날수록 권선에도 손실을 가져온다. 이러한 손실을 최소화 하기위하여 권선의 저항과 정격 저항을 고려하여 보빈에 권선을 감기게 하여야 한다. 이때 권선의 MMF에 영향을 미치는 권선의 감기는 횡수및 모터의 수직력에 영향을 미치는 권선 무게도 함께 고려해야 한다. 보빈의 크기에 따라 달라지는 권선의 전체길이, 코일의 전체 저항, 권선의 면적, 무게를 계산할수있다.

모터의 누설자속의 계산은 공극의 퍼미언스 계산방법과 같은 방법을 이용한다.

$$P_l = \mu_0 \int \frac{dS_1}{L_1}$$

P_l = 누설 퍼미언스 L_1 = 누설자속 경로의 길이
 S_1 = 누설자속 경로의 면적 μ_0 = 공극의 투자율

2.6 추력 해석 [8][9][10]

리니어 모터의 추력식을 다음과 같이 에너지관점에서 유도한다.

$$\left[\begin{array}{c} \text{전원에서의} \\ \text{전기적인} \\ \text{입력} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{자장에} \\ \text{저장된} \\ \text{에너지} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{기계적인} \\ \text{출력으로} \\ \text{바뀐 에너지} \end{array} \right]$$

결론적으로 모터에서의 추력은 자기회로의 자기 co-energy의 변위에대한 미분으로 나타낸다.

$$f = \frac{dwf'}{dx} \quad [N]$$

wf' = 자기 co-energy

윗 식을 공극에서의 자장에너지와 퍼미언스의 식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$f = 0.5 Fg^2 \frac{dPg}{dx} \quad [N]$$

Fg : 공극의 MMF 강하 Pg : 공극의 퍼미언스

3. 시뮬레이션 결과

그림 7은 가동자가 치의 한주기(One tooth pitch)를 움직였을때의 공극에서의 각상의 자기저항(Reluctance) 특성을 나타낸것이다.

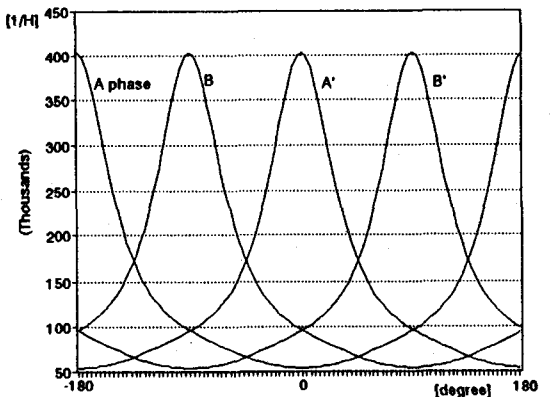


그림 7. 공극에서의 자기저항

그림 8은 A상의 자속을 주기에 대한 공극의 크기에 대해 변화시켰을때의 곡선이다. 공극의 자기저항이 커짐에 따라 자속이 줄어들어는것을 알수있다.

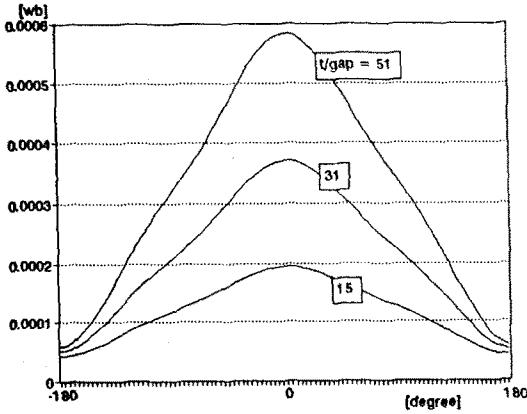


그림 8. 자속영태 (A상)

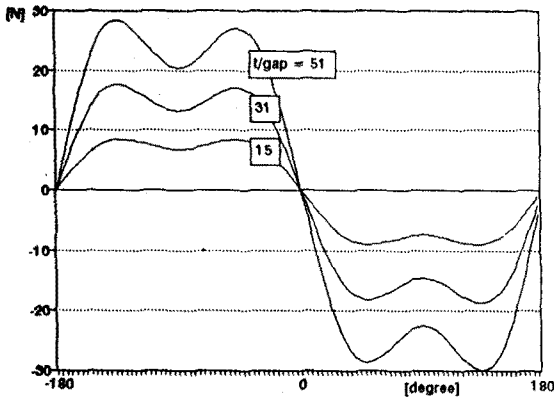


그림 9. 공극의 변화시 수력 특성 (철심부 무시)

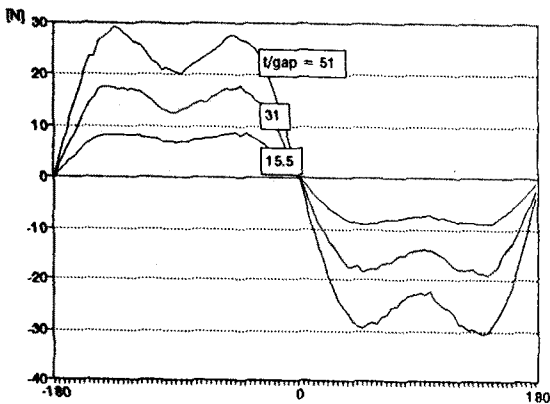


그림 10. 공극의 변화시 수력 특성 (철심부 고려)

그림 9,10는 치의 위치(t)에 대한 공극의 크기를 변화시켰을 때의 1상 여자시의 수력 특성을 보여주고있다. 그림 9는 철심부의 자기저항을 고려하지않은 특성이고 그림 10은 철심부의 자기저항을 고려 했을때의 수력특성이다.

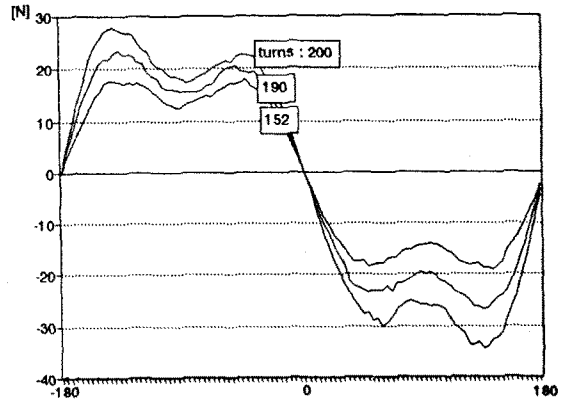


그림 11. 권선의 감긴수 변화시 수력특성

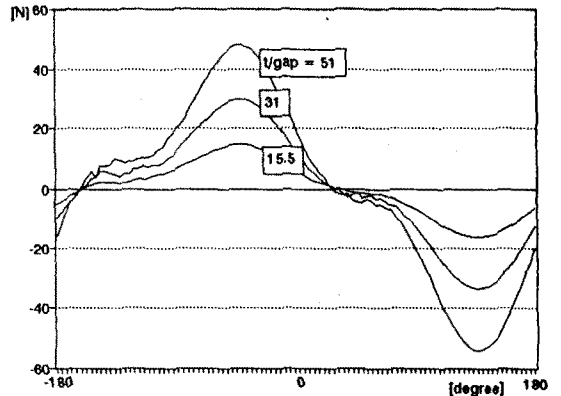


그림 12. 공극의 변화시 수력특성 (2상여자)

4. 결론

시뮬레이션은 수력에 직접적으로 영향을 미치는 공극의 크기와 Turn 수를 바꾸어 가며 모터의 특성을 구하였다. 모터의 수력특성에서 철심부의 자기저항은 공극의 자기저항에 비해 작기 때문에 큰영향을 미치지 않으며 제 3고조파성분은 공극이 커짐에 따라 더 커짐을 알수있다. 또한 Turn수가 증가함에 따라 수력은 비례적으로 증가한다. 모터의 구조적인 데이터들을 바꾸었을때 모터의 입력에 대한 힘의 크기는 300 - 800 [N/Kw]이며, 가동자의 질량에 대한 힘의 크기는 29 - 60 [N/Kg]로 변한다.

5 참고 문헌

- 1) "차세대의 최첨단 핵심기술 리니어모터", 전자과학 p198-205 10,1989
- 2) "리니어 모터 응용 핸드북", 世和 1988
- 3) B.C.Kuo and U.Y.Huh, "Permeance Models and their Application to Step Motor Design", 15th Annual Symposium Incremental motion Control Systems and devices(IMCSD) ed. B.C. Kuo, Urbana, ILLINOIS, June 1986
- 4) Marcel Jufer, Gunter Heine, "Hybrid stepper motor torque inductance characteristics with saturation effects", IMCSD, 1986
- 5) 허 옥 열, "구조적 오차를 갖는 HB 스텝 모터의 정밀도 해석", 인하대학교 산업 과학 기술 연구소, 1987
- 6) 大川 光 吉, "永久磁石磁氣回路の設計特性計算法", 総合電子リサーチ, 1961
- 7) 山田 山本 "平板状 永久磁石形 リニアハルスモータの磁氣回路と始動特性解析" 일본전기학회논문, 1984 Vol. 104-b No. 5 p265-272
- 8) B.C. Kuo, Y.J.Chen, "A nonlinear magnetic circuit model and its application to static holding torque prediction of hybrid step motors", IMCSD, 1984
- 9) Takashi KenJo, "Stepping Motors and their Microprocessor Controls" Clarendon Press, Oxford 1984
- 10) S.A.NASAR, I.BODEA, "linear Motion electric machines", JOHN WILEY & SONS, Inc. p255-261, 1976