

특집 : 특수 전동기

리니어 펄스 모터의 연구 동향

김광현*, 임영철*, 배동관**

(*전남대 전기공학과 교수, **전남대 전기공학과 박사과정)

1. 머리말

일반적으로 기술되는 특수모터는 구조, 형식, 적용조건 등이 매우 다양하고, 사용하고자 하는 목적에 따라라도 적절하게 개발될 수 있다는 점 때문에 관련 학회지 등에 몇 차례 소개된 바 있다. 본 고에서 기술하고자 하는 특수모터는 산업용 및 가정용, 정보화 전자기기용으로써 일반화되어 가고 있는 리니어 펄스모터에 대해 제어기술 및 실제 구현사례를 간략하게 서술하고자 한다.

최근 전자·통신산업이 급격히 발달함에 따라 반도체 제조 장비 등을 포함한 산업용 로봇, 사무자동화, 정보단말기, 공장 자동화 분야 등 각종 자동화시스템에 핵심 구동원으로써 리니어 펄스모터(LPM)의 이용이 날로 활발해지고 있다. LPM은 소형·경량화가 가능할 뿐만 아니라 가동자가 에어베어링 지지기구를 이용하기 때문에, 비접촉으로 직선구동이 가능하여 특성의 경년변화가 적고, 보수성, 신뢰성이 우수하기 때문에 마이크로프로세서 및 메카트로닉스 기술의 향상과 더불어 모터와 제어기의 일체화를 이루어 점차 응용범위가 확대되고 있다.^[1-3] 리니어 모터는 그 형태와 구동방식에 따라 다양하게 분류하며, 대추력을 얻기 위한 리니어 유도모터, 고속운송을 위한 리니어 동기모터, 고정밀도 위치결정을 위한 리니어 직류모터 등과 같이 각각 특징별로 구분하고 있고, 제어방법은 회전형과 거의 유사하다.^[4-5] 이 중에서 고성능 정밀위치 제어에 핵심 구동원으로 수요가 증가하고 있는 리니어 펄스모터에 대해 개루프 위치제어의 가/감속제어, 마이크로스텝제어, 정밀위치 및 진동저감의 페루프 제어방법에 대해 다루고자 한다.

2. 리니어 펄스 모터

리니어 모터는 일반 회전형 모터를 축방향으로 잘라서 펼쳐 놓은 형태이다. 일반 모터가 회전형의 운동력을 발생시키는 것에 비해 직선 방향의 힘인 추력을 발생시키는 점이 다르며 그 구동원리는 근본적으로 같다고 볼 수 있다. LIM은 유도기, LDM은 직류기, LSM은 동기기에서 구동원리를 찾을 수 있는 것처럼 LPM은 회전형 스텝모터에서 그 구동원리를 찾을 수 있다.

LPM은 일반적으로 표 1과 같은 방법으로 분류할 수 있으

표 1 리니어 펄스 모터의 분류

구분	형태
기하학적 구조	평판형(편축식, 양축식), 원통형
치, 구 형태	각형, 반원형, 사다리꼴
자기회로 상수	2, 3, 4, 5상
공극지지 기구	롤러 베어링, 마그네틱 베어링 에어 베어링
자기회로 구성	PM형, VR형, HB형
가동부 선택	1차축, 2차축
여자 방법	1상, 2상, 1-2상 여자 마이크로 스텝 여자
구동 방법	유니폴라, 바이폴라, 정전압 정전류
권선 방식	모노파일러 권선형 바이파일러 권선형

표 2 자로구성에 의한 분류 및 특징

분류	장점	단점
가변 릴렉턴스형 (VR형)	· 구조가 간단함. · 관성이 작아 응답성이 좋음. · 소음이 적고 고속 운전이 가능함.	무여자시 보자력이 없음
영구 자석형 (PM형)	· 한계추력이 영구자석 성능에 비례함. · 면적당 추력비가 HB형, VR형의 3배임.	착자 및 제작 기술이 비교 적 어려움
하이 브리드형 (HB형)	· 자속의 1/2을 영구자석이 부담하여 소비전력이 작음. · 교번자계이기 때문에 바이 플라구동이 가능하며, 효율이 좋음.	소음 및 진동 이 비교적 많음

며, 자로구성에 따라 구분하는 경우의 각각의 장단점은 표 2와 같다. HB형은 영구자석을 철심 상단과 중간에 접착시키는 형태이며, VR형은 코일로 전자석을 만든 형태이며, PM형은 양축식 고정자에 코일과 가동자에 영구자석으로 되어 있다.

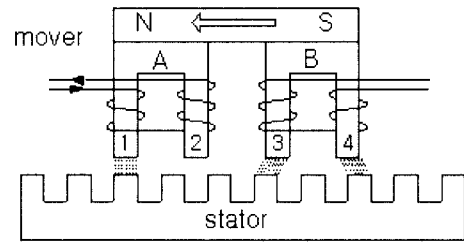
2.1 LPM의 구조 및 특징

회전 모터에 의한 서보기구와 같은 사양의 리니어 모터에 있어서도 속도제어나 위치제어 및 고응답 운전이 요구되고 또한 실현되고 있다. 가동자 자체가 직접 구동되기 때문에 회전형 모터에 비해 고속화, 고응답 회로의 개량을 도모할 수 있을 뿐만 아니라, 위치 결정 특성이 날로 개선되어 고분해능의 정지제어가 가능하게 되었다.

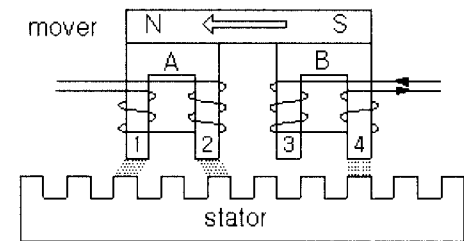
LPM에서 가동자는 기어형태의 치(tooth)와 구(slot)의 형태로 되어 있어, 그 이동속도는 주어진 입력펄스의 주파수로 비례하여 결정되며, 이동거리(변위)는 입력펄스 신호에 동기되어 이동한다. 직선추력은 가동자의 변위에 따라 가동자(Mover)와 고정자(Stator) 사이의 퍼미언스 값이 변화하여 발생하기 때문에, 가동자와 고정자 사이에 일정한 공극을 유지하여야 한다. 모터 자체는 각 치의 기계적 구조에 의한 정지위치 유지기능, 즉 自己保持力을 가지고 있다. 이 힘은 전원의 입력이 없이도 정지상태를 유지할 수 있음을 뜻한다. 가/감속 제어시에는 입력 펄스 간격을 조정하여 속도 제어를 행하며 목표위치에 대한 정지는 목표 위치까지의 구동 변위에 해당하는 입력 펄스수를 입력하여 모터를 정지시킬 수 있으므로, 간단하게 위치결정을 실현할 수 있다. 간단히 개루프 제어기법을 이용하여 가/감속제어나 위치결정제어를 할 수

있지만, 부하변동 등에 의한 탈조의 위험성이 있기 때문에 고도의 서보운전을 실현하기 위해서는 대부분 센서신호의 피이드백에 의한 폐루프 제어기법을 사용하고 있다.

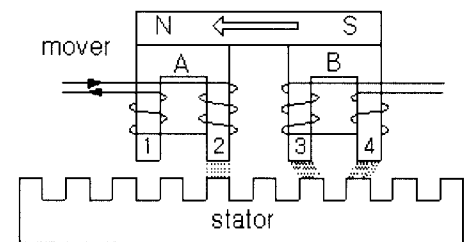
리니어 펄스 중에서도 가장 많이 사용되고 있는 하이브리드(Hybrid)형 LPM의 기본구조와 입력펄스에 따른 동작모드의 자로구성이 그림 1에 나타나 있다. 하이브리드형 LPM은 일반적으로 영구자석과 전자석이 결합된 2상 4극-1치(혹



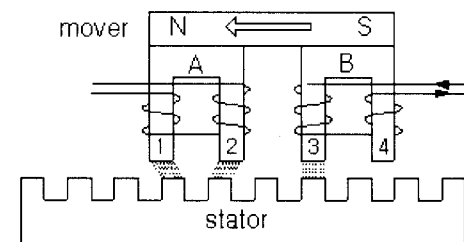
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 1 HB형 LPM의 동작모드별 자로구성

은 n치) 구조로 되어 있으며, 영구자석의 기자력과 상여자에 의한 전자석의 기자력이 중첩되어 보다 큰 추력을 발생시키는 특징을 갖는다.

그림 1은 영구자석을 이용한 전형적인 2상 4극 리니어 펄스모터로서 Sawyer의 구동원리를 보여주고 있다. 코일 1과 2의 A상은 서로 극성이 반대가 되도록 직렬로 접속되어 있으며, 코일 3과 4같은 형태로 연결되어 있다. 그림 1(a)에서 A상에 화살표 방향의 여자전류를 흘리면 극 1에서는 자로내의 자계는 증가하지만 극 2에서는 영구자석의 자계와 전자석의 자계가 서로 상쇄되어 그림 1(a)의 위치에서 정지하게 된다. 이때 B상에서는 자력의 균형이 유지되고 있다. B상에 여자전류를 흘리면 극 4의 자계는 증가하고 극 3에서는 상쇄되어 그림 1(b)의 위치에서 정지한다. 즉 그림 1(a)의 위치에서 1/4 피치만큼 전진한다. 다시 A상에 앞의 경우와 다른 방향으로 전류를 흘리면 가동자는 1/4피치 이동된 그림 1(c)위치에서 정지하게 되고, B상에 그림 1(b)의 경우와 반대방향의 전류를 흘리면 다시 1/4피치 이동하여 그림 1(d)의 위치에서 정지하는 패턴으로 구동된다.

2.2 LPM의 여자방법 및 제어시스템

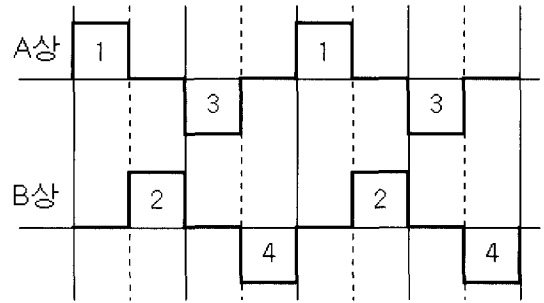
그림 2의 (a)의 1상 여자방식은 토크리플과 진동리플이 상당히 크게 나타나게 되나, 제어장치를 간단히 구현할 수 있어 단순 동력원으로 사용되는 스텝모터에 주된 제어법으로 쓰이고 있다.

이에 비해 큰 추력을 얻을 수 있는 LPM의 2상 여자(A+B+, A-B+, A-B-, A+B-)에 따른 각 가동자 극 간의 치 변위는 고정자 치 피치를 기준으로 구동 펄스당 $(1/4)\tau$ 만큼의 변위를 갖는다. 2상 여자권선에 대한 Full-step 구동은 360° 전기각을 90° 간격으로 4극 분할하여 2개극을 동시에 여자시켜 구동하는 방법이다.

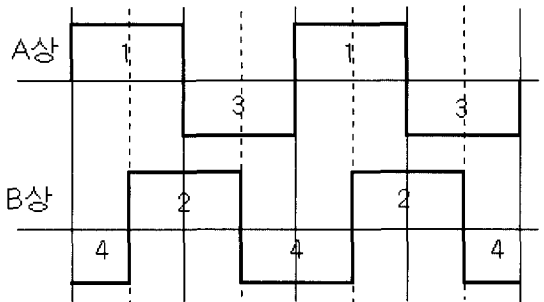
마이크로스텝 여자 전류구동 방법은 2상에 흐르는 전류를 좀더 미세(0~255펄스/1상)하게 분할하여 정현파($\sin\delta$), 여현파($\cos\delta$)의 전류가 인가되도록 하며, 2상 권선의 전류 벡터 합이 항상 최대가 되도록 하는 전류 벡터합에 비례한 위상으로 추력을 발생시키는 원리이다.

이 방식은 모터의 인접 상간의 여자전류를 그림 3과 같이 정현파적으로 변화시켜 기본 스텝각의 중간영역에서도 위치 결정이 가능한 구동방식으로, 2상 LPM에서는 마이크로스텝 구동으로 미소 변위를 얻는 동시에 각 여자 때의 합성추력이 1상 여자시의 추력과 동등해 지려면 정현파상의 여자 전류로 제어함으로써 고정밀 위치제어, 저속영역에서의 공진에 의한 탈조 방지, 속도 백동 감소, 응답 특성개선 등과 같이 성능이 향상된다.

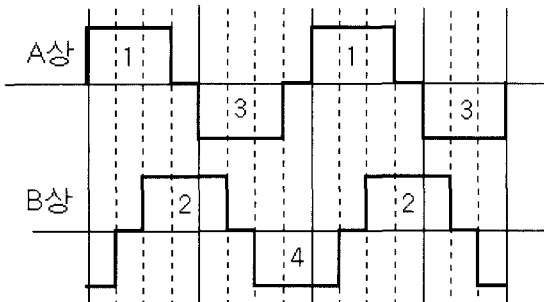
이와같은 구동원리에 이용한 여자방법은 각 여자방식에 적합한 구동 전압(또는 전류)제어장치가 필요하며, 고정밀도를



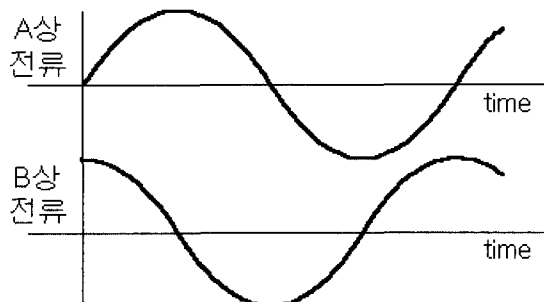
(a) 1상 여자 (Full step)



(b) 2상 여자 (Full step)



(c) 1-2상 여자 (Half step)



(d) 마이크로 스텝구동

그림 2 LPM의 여자방법

요하는 시스템에서는 마이크로스텝 모드의 상전류 여자방식을 사용하며 미세 정밀구동이 가능하게 되지만, 오차보정, 노이즈제거 등이 부가적으로 필요하다.

전류제어 명령신호를 발생시켜 제어법에 따라 구동장치가 달라지는 LPM의 구동시스템을 그림 4에 나타내었다. 리니어 모터의 고정자 몸체에 위치센서인 Linear Encoder가 부착되어 있으며, Rotary형에 비해 다소 가격이 비싸기 때문에, 최근 센서리스 제어법을 이용하여 진동을 저감시키는 연구도 활발히 진행되고 있다.^[6-7]

LPM의 마이크로스텝 구동을 위한 인버터의 전류제어 방법은 그림 5와 같이 여러 형태로 구분하여 적용할 수 있는데, 주로 정현파의 삼각파 비교 PWM 제어법, 히스테리시스 전

류제어법, PROM에 전류파형을 Table형태로 저장한 후, D/A 변환기를 통한 기준전류 제어방식의 ROM Table 전류 제어법이 있으며, 일반적으로 경제성, 고정밀성, 소형·경량화 측면에서 적절하게 이용되고 있다.

LPM 구동을 위한 인버터의 전압 인가방법에는 정전압, 정전류, 마이크로스텝 구동 등이 있다.

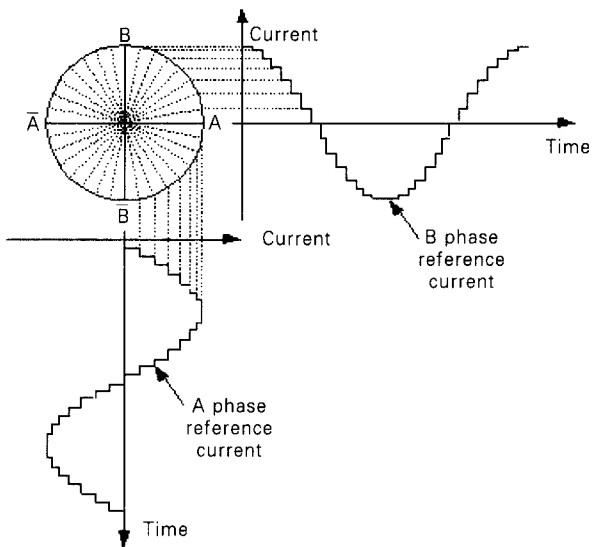


그림 3 전류지령과 토크벡터

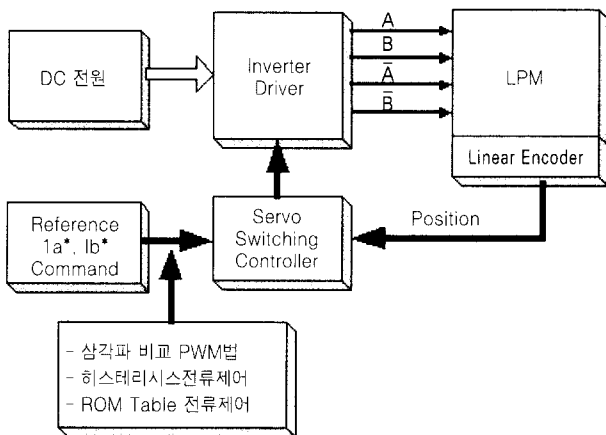
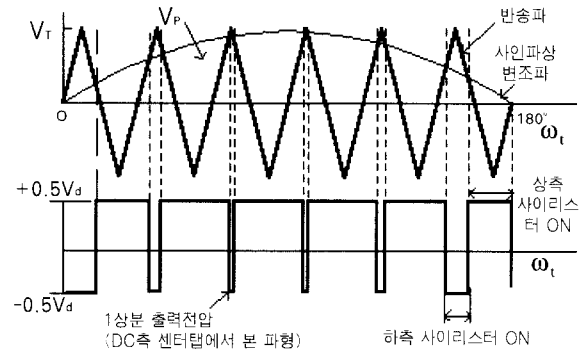
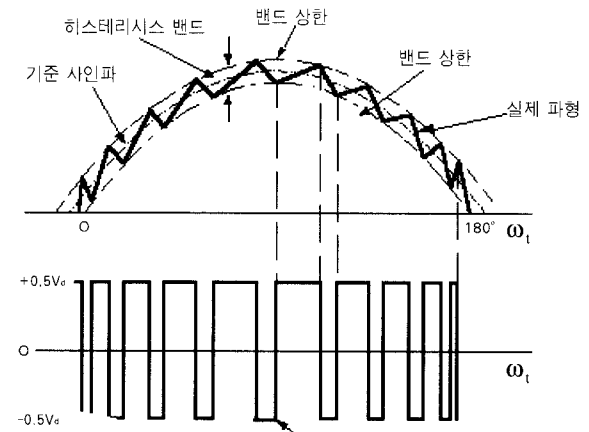


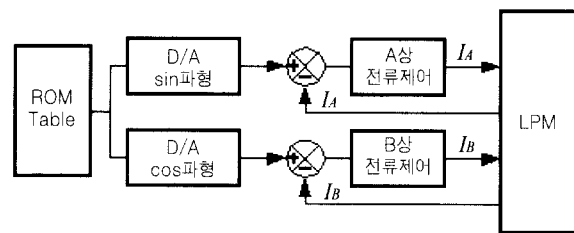
그림 4 LPM 구동시스템



(a) 삼각파 비교 PWM법



(b) 히스테리시스 제어법



(c) ROM Table 전류제어법

그림 5 마이크로 스텝구동의 정현파 전류제어법

정전압 전원에 의한 구동에서는 직렬 저항과 고전압 회로의 조합 때문에 소비 전력이 크다. 그리고 정전류 구동은 높은 전압을 직접 LPM에 무리없이 인가하면서 평균 전류가 일정하도록 스위칭을 하기 때문에 효율이 좋지만 구동회로가 복잡하게 된다.

3. LPM의 특성해석

3.1 자기등가회로 및 추력계산

모터의 특성해석을 위한 자기 등가회로는 기계적 구조에 따라 달라지며, 주로 설계·제작 및 제어의 용이성을 고려하여 2상 다극형태로 제작되어 각 적용분야별로 다양하게 이용되고 있다. 그림 6은 2상 4극 구조의 LPM의 특성해석을 위한 자기등가회로를 나타내고 있으며, 상수, 극수에 따라 점점 추가되어 다르게 모델링된다.

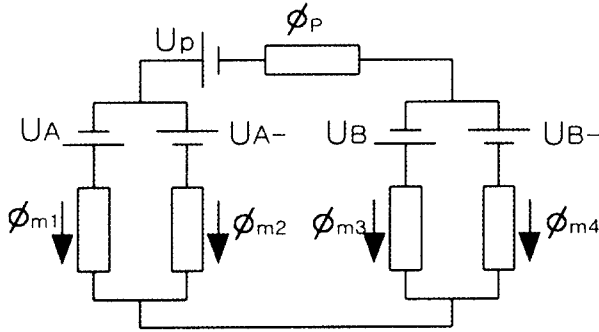


그림 6 2상 하이브리드형 LPM의 자기등가회로

일정 추력 및 진동저감을 위해 마이크로스텝 구동의 전류인가 파형을 위치이동에 따라서, 2상의 여자전류 I_a, I_b 는 변위 지령을 (x^0)으로 할 경우 다음 수식으로 표현된다.

$$I_a = I_m \sin \frac{2\pi}{\tau} x^0 \quad (1)$$

$$I_b = I_m \cos \frac{2\pi}{\tau} x^0 \quad (2)$$

LPM의 2상에 대한 발생 추력은 다음 계산식으로 일반적으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= F_a + F_b \\ &= I_m \cdot [2n_7 \Delta \Phi \frac{2\pi}{\tau}] \sin \frac{2\pi}{\tau} (x^0 - x) \\ &= I_m K_m \sin \frac{2\pi}{\tau} (x^0 - x) \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 특성 및 성능 평가

LPM의 성능을 결정하는 특성파라미터는 크게 추력/입력 [N/kW], 추력/질량[N/kg], 추력/체적[N/L], 추력/치단면적[N/m²] 등이며, 추력이란 최대 동추력을 나타내며, 질량과 체적은 가동자와 고정자 전체의 값이 아니라, 추력을 발생하는 작용 면적에 해당하는 부분만의 질량과 체적이다. 치 단면적은 추력이 직접 작용하는 치만의 면적이며, 그림 7에 입력, 출력, 부하파라미터를 나타내었다.

LPM의 추력은 정추력과 동추력으로 분류하며, 정추력에는 HB형 LPM의 경우, 영구자석과 자기회로에 의하여 정량적으로 산출하는 디텐트 추력과 LPM이 정지상태에 있을 때 직류여자 전류를 인가하여 홀딩 추력을 발생시킨 후, 변위에 따른 힘을 측정하는 것이다. 추력 측정장치에는 추력을 얻기 위한 로드셀(Load Cell)과 변위를 표시하기 위한 리니어 포텐쇼미터(Linear Potentiometer)나 마이크로스텝 구동의 변화에 따른 서브 마이크론(Sub-micron) 단위의 변위 측정이 가능한 레이저 광원 간섭계인 인터페로미터(Interferometer)로 구성되며, 시간에 대한 변위, 속도 및 가속도를 측정한다.

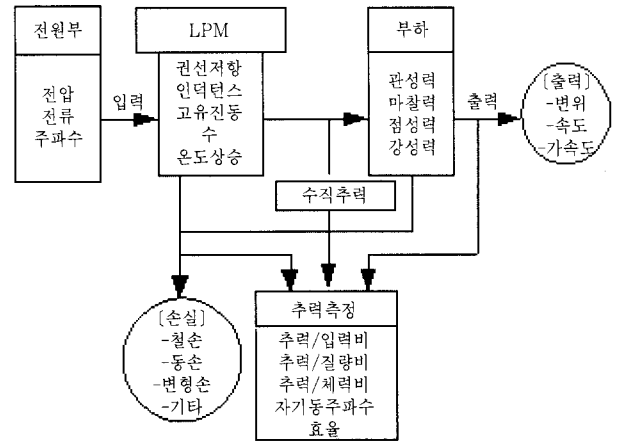


그림 7 LPM의 성능측정 파라미터

LPM 모터는 ①주행거리와 입력펄스수가 완전히 비례하고 ②펄스 주파수와 속도가 비례하며 ③무여자시 자기유지력이 존재하고 ④주행거리에 의한 누적오차가 없으며 ⑤초저속 구동이 가능하고 ⑥마이크로스텝 구동으로 정밀위치 제어가 가능하며 ⑦정전류 구동시에는 탈조를 방지할 수 있고, ⑧단위 입력당 추력이 가장 크다 등의 장점을 가지고 있다. 특히 최근에는 전자제어기술의 발달에 힘입어 초저속, 고속 및 고정밀도의 위치결정이 필요한 비례제어 밸브구동용 서보모터로도 LPM이 도입되어 시도되고 있다.

4. 연구동향 및 응용사례

모터 제조 및 제어기술에 있어서 활발히 연구되고 있는 일본은 이미 90년대 초반부터 LPM에 관한 연구논문들 가장 많이 발표하는 등 지금은 성숙기에 접어들었다고 한다면, 우리나라는 반도체 장비 등 생산장비의 부진으로 리니어 모터 설계·제작 수준은 아직 시작기라 할 수 있어 폭넓은 상용화를 위해서 많은 연구가 뒷받침되어야 할 것이다. 리니어 센서와 디지털 제어를 이용한 리니어 서보시스템의 발달로 새로운 형태의 소형·경량화, 고속화 고정밀 위치제어에 적합한 LPM 연구의 필요성이 제기되면서 미국이나 일본 등지에서 편축식 LPM, 지지기구의 부담을 줄일 수 있는 양축 LPM, 원통형 LPM 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

향후, 리니어 모터 자체의 제조 기술의 향상, 리니어 모터에 적용한 위치, 속도, 가속도 센서의 발전과 직진 동작을 위한 지지·안내 구조의 개발 및 주변 기술의 수준향상에 따라 성능은 향상되고 응용분야는 다양화되고 더욱 사용이 일반화될 것이다.

응용사례를 살펴보면, 산업기기로서 LPM이 응용될 수 있는 분야는 매우 광범위하며, 또한 응용기기의 고유의 구동 특성에 따라 다양한 응용성을 가지고 있다. LPM의 이용이 가능한 분야를 다음과 같이 분류할 수 있다.

4.1 정보·가전기기분야

- 전자 타이프라이터와 프린터의 헤드구동
- X-Y 플로터의 펜 구동
- OMR, OCR 카드 리더의 헤드 구동
- 자기기록장치(FDD, HDD)의 헤드 구동
- 복사기기의 렌즈미러(Lens Mirror) 구동
- 이미지 스캐너(Image scanner)를 박형으로 제작할 수 있는 센서 구동
- 음향기기
- 에어컨 컴퓨터사용 액츄에이터

4.2 산업기계분야

- 반도체 칩 자동반송 제조장비
- 각종 산업용 컴퓨터사
- 원자로 액츄에이터
- 산업용 작업 로봇
- X-Y 테이블 구동
- 자동 검색 장치
- 고정밀도를 요구하는 레이저 빔의 위치조정
- 마킹 장치의 펜 구동
- 스폿 용접시 용접 위치 조정
- 자동 배선기의 래핑건 구동

- 자동 탐색기의 위치 결정
- 각종 생산 라인의 이동 및 위치결정

4.3 의료 분야

- 인공심장용 액츄에이터를 비롯한 각종 의료장비

5. 맺음말

소형, 경량화 및 고성능 정밀제어를 추구하는 최근의 추세에 따라, 국내의 모터개발 경향에 맞추어 리니어 모터의 종류, 동작원리, 제어방법 및 응용사례 등을 살펴보았다. 리니어 펄스 모터는 진동저감 및 고정밀 제어를 위해 최근 실시간 연산이 가능한 DSP 등의 고속 마이크로 프로세서를 이용하여 다양한 제어 이론을 적용한 고성능 제어기의 구현이 가능하게 되었다. 일부 선진국은 모터의 설계제작 수준을 넘어 응용분야의 다양화에 따라 변경, 개발하여 실용화하고 있으나, 국내는 대형화 및 고정밀도의 리니어 모터를 개발, 제작하고 있고, 점차 그 격차는 좁혀지고 있다. 이중 리니어 모터는 구조적인 제약사항이 있어 회전형 기기에 비해 측정기술 및 기기가 낙후되어 성능의 검증에 많은 어려움을 갖고 있다. 따라서, 리니어센서를 비롯한 각종 계측시스템과 측정기술 개발도 리니어 모터 제어기술을 발전시키는 한 요소가 될 것으로 기대한다. ■

참고 문헌

- [1] TAK KENJO, Electric Motors and their Controls, OXFORD Science Publications, 1991.
- [2] Takashi Kenjo, Stepping Motors and their Microprocessor Controls, CLARENDON PRESS · OXFORD, 1984.
- [3] 白木 學, 宮尾 修美, 圖解リニアサーボモータとシステム設計, 綜合電子出版社, 1986.
- [4] 백수현 역, 소형모터 설계 편람, 世和出版社, 1988.
- [5] 편집부 역편, 리니어모터 핸드북, 世和出版社, 1988.
- [6] Junji Hiraí, Tae-Woong Kim, and Atsuo Kawamura, "Position-Sensorless Drive of Linear Pulse Motor for Suppressing Transient Vibration", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.47, NO.2, pp.337~345, April 2000.
- [7] Dong-Eui Chang, Yang-O Kim, In-Joong Ha, "A New Sensorless Control Method for a General Class of Linear Pulse Motors", pp.601~605, IEEE PCC-Nagoya '97.

〈저 자 소 개〉



김광현(金堯憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 공대 제어계측공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 부교수. 당 학회 편집위원.



임영철(任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템연구센터 소장, 당 학회 편집이사.



배동관(裵東冠)

1969년 3월 17일생. 1994년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 LG전자 근무. 1997년~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.