SPECIAL

직류형 리니어모터를 이용한 최근의 기술동향

백 수 현*, 윤 신 용**
(*동국대 전기전자공학부 교수, **同 대학원 박사과정)

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 기존의 노동력에 의존하여 제품을 생산하던 것과는 달리 자동화기술에 의한 노동력의 억제, 비용의 절감 및 생산량의 증대를 꾀할 수 있는 고부가가치의 기술이 더욱 중요시되고 있다. FA, OA, 정보기기, 반송용 기기등의 다양한 분야에서 고정도, 고속 및 고추력을 지닌 서보모터와 제어 시스템이 필요하다. 이를 위해서 종래의 서보모터 및 제어장치와는 달리 비접촉구동, 컴팩트화 및 신뢰성 등을 지닌 우수한 제품의 개발이 더욱 요구된다.

특히, 산업의 각 분야에서 직선운동이 가능한 각종 기기가 요구되고 있으며 이를 위하여 회전형 전동기의 축에 직선 변환기구를 결합하여 직선운동을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 직선운동은 변환기구의 종속에 따라 간소화, 진동억제, 고정밀 및 고속화 등에 한계가 있으므로 리니어 모터(Linear Motor)를 적용함으로써 이에 대한 한계를 극복할 수 있다. 그 동안 리니어 모터는 회전형 모터에 비해서 여러가지의 장점을 지니고 있으면서도 국내기술의 빈약에 따라 신뢰성 있는 제품이 대량생산되지 못하여 선진국으로부터 고비용으로 전량 수입하고 있는 실정이다[1]~[4].

본 기술동향에서는 리니어모터 중 고정밀, 고속운전으로 일정 추력을 발생하는 리니어 직류모터(Linear DC Motor, LDM)의 종류와 특성 및 각종 응용기기의 기술개발 동향에 관해서 살펴보고자 한다. LDM은 구조가 간단하면서도 고정밀, 고속운전 및 저추력용이 적합한 기본특성을 지니고 있으므로 이러한 각종 산업용 응용기기에 적용할 수 있다. 현재 국내의 연구소에서는 기술개발이 거의 진행되고 있지 않으며, 일부대학에서 약간의 연구가 진행 중에 있다. 아직까지 선진국의 신뢰성 있는 제품에 비해서 모터설계 및 제어기 설계 기술이 경미한 상태이므로 이에 대한 연구가 더욱 절실하다.

통계를 보면 1993년에서 1994년까지 세계 각국의 리니어 모터 연구자 수는 대략 일본 267, 미국 39, 독일 16, 러시아 10, 영국 10, 한국 2 정도인 것으로 발표되고 있다. 특히 일본이 LDM에 관한 많은 연구를 하고 있으며 이에 대한 응용 및 연구논문의 발표는 표 1과 같다.

표 1. LDM의 발표논문 분류표

응용 / 모터	특성	해석	제어	전원	의료용	교통	반송	FA	OA
LDM	28	5	19	0	1	1	0	9	10

2. LDM의 종류 및 특징

2.1 LDM의 종류

리니어 모터는 기어 등을 이용하지 않고 직접구동이 가능한 다이렉트 드라이브(Direct Drive)로서 자유도의 특성을 지니고 있다. LDM은 주로 브러시용 LDM, 브러시리스용 LDM 및 보이스 코일형 LDM으로 분류할 수 있다.

2.1.1 가동코일형 리니어 직류모터(Moving Coil Type LDM)

그림 1은 영구자석을 고정자로 하고 여자코일을 가동자(Mover)로 한 구조이다. 이 형태는 회전형 직류모터와 동일한 원리로 플레밍의 왼손법칙에 따라 영구자석에 의한 발생자장과 여자전류에 의해 발생된 직각의 쇄교으로부터 추력을 발생하며 가동자코일이 이동하는 구조이다[7][8][11].

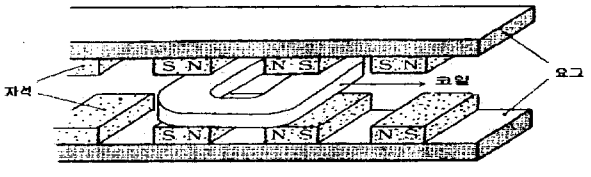

그림 1. 가동 코일형 LDM

2.1.2 가동자석형 리니어 직류모터(Moving Magnet Type LDM)

그림 2는 여자코일을 고정자로 하고 가동자를 자석으로한

구조로서 고정자의 평판코일에 가동자의 영구자석 자속을 직각으로 교차시킴으로서 영구자석의 가동자로부터 추력을 얻는 구조이다[9].

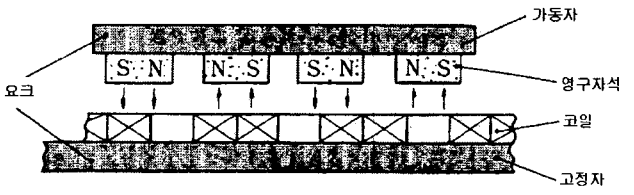

그림 2. 가동 자석형 LDM

2.2 LDM의 특성

LDM은 비교적 구조가 간단하고 추력/질량 비가 크므로 고속운전이 가능하다. 그러나 리니어 펄스 모터(Linear Pulse Motor, LPM)와 같이 모터 자체의 위치결정 능력이 없으므로 위치결정센서와 조합시켜 폐루프 제어를 하여야 한다. 고분해능 위치결정센서와 속도센서를 조합시키면 서보성이 좋은 고정도의 위치결정, 속도제어가 가능하다.

또한, LDM의 경우는 추력특성을 고려한 제어시스템을 고려할 필요가 있다. 따라서 LDM의 추력은 일정 정격전류에 대해서 각 위치 별로 추력의 리플이나 왜형이 발생하지 않고 정추력을 발생하는 것이 매우 중요하다. 따라서 정추력을 위한 LDM의 설계 방법은 다음과 같다.

(1) 단극 단 스트로크 형 (Short Stroke Type)일 경우 철심에 단극 코일을 성층함으로써 극수 절환과 여자절환에 따른 추력 리플의 억제와 추력의 왜형을 억제하기 위한 여자 철심폭과 스트로크를 고려하여 한다.

(2) 장 스트로크일 경우는 고정자의 다극형 여자코일이나 영구자석을 원하는 스트로크 만큼 설치함으로써 가능하다. 이 때 추력의 리플억제를 위한 가동자의 영구자석 배치와 고정자 코일의 배치 비율 및 영구자석과 코일의 폭 및 치수의 설정이 중요하다. 이러한 장, 단점은 다음과 같다.

이를 위한 LDM의 설계는 유한요소법과 퍼미언스법의 두 가지에 의해 가능하다. 유한요소법은 비선형성의 고려, 복잡한 수치해석, 계산상의 오차 및 고비용의 패키지가 필요하지만, 퍼미언스법은 간단한 해석모델에 대해 용이한 수치계산, 저비용 및 시간절약 등의 특징을 지니고 있다. 이에 대한 모터의 설계시 자계해석 결과는 일반적으로 유한요소법이 퍼미언스법에 비해 비선형성을 고려하므로 더욱 정확한 편이다.

3. LDM을 이용한 각종 응용기기의 사례

3.1 OA기기용 펜 레코더의 LDM

LDM은 폐루프에 의한 고속, 고정밀의 위치제어가 가능하므로 펜 레코더와 자기디스크 기록장치에 적용이 가능하다. 여기에 적용한 펜 레코더용 LDM은 고정도 위치결정, 작은 크기, 고추력 및 고속응답 특성을 지니고 있다.

그림 3은 펜 레코더용 단극 평판 가동 코일형 LDM을 나타낸 구조로서 중앙 요크(순철)와 측면 요크(SPCC), 영구자석, 가동자 코일, 변위센서 및 제어장치로 구성되어 있다. 여기서 펜 레코더용 LDM의 두께는 13[mm], 폭 192[mm], 스트로크 92[mm]이지만 최대스로크는 102[mm]까지 가능하다.

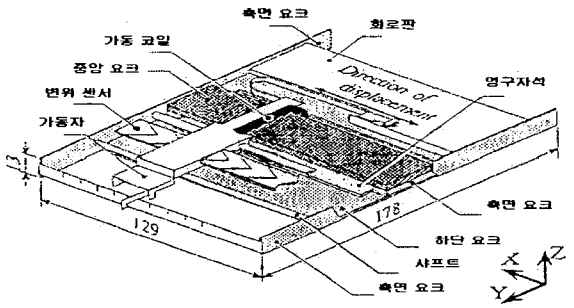

그림 5. 펜 레코더용 LDM

이때 LDM의 추력 F 는 다음과 같다.

$$F = K_f I\ [N]$$

여기서, F 는 LDM의 추력 $[N]$, K_f 는 추력정수 $[N/A]$, N 은 코일의 턴수[회], B 는 자속밀도 $[T]$, I 는 코일의 전류 $[A]$, $K_f = NIB$.

이때 설계방법은 영구자석의 두께와 코일의 턴수이며, 추력정수는 이 두변수의 영향을 받는다. 코일턴수 N이 증가함에 따라 중앙요크(Center yoke) 또는 하단요크(Bottom yoke)는 얇으며 중앙요크와 하단요크 사이의 공극은 증가한다. 여기서 영구자석 동작점의 하강은 자기회로의 퍼미언스를 감소시키며 이것은 N이 증가함에 따라 하단요크 B가 감소하는 것을 의미한다. 따라서 설계 변수로서 중앙요크와 하단요크의 두께를 너무 얇게하면 요크내의 자기포화가 발생하므로 이를 고려하여야 한다.

3.2 FA용 반송장치의 LDM

부품설치용 반송장치는 어떤 부품을 소정의 장소에서 원하는 위치로 운반하는 것이 가능하며, 그림 4는 부품설치용 LDM 반송장치의 외관이다[10].

여기서 적용한 구체적인 LDM 구조는 가동자석 브러시레스형 구조이다. 이 반송장치는 LDM에 의해 구동되며, 가동자는 이동변위의 끝 리밋스위치까지 이동하여 이 원점을 중심으로 다음의 최초위치로 돌아가며 그 위치단부터 설정위치까지 LDM을 이동하여 부품을 택한 후 끝 단부까지 설치할 수 있다. 이러한 운동으로 동일한 동작을 반복한다.

본 LDM은 부품설치용 반송장치에 적합하도록 다음의 사항을 고려하였다.

(1) 스트로크가 긴 것과 짧은 것을 간단하게 제작할 수 있도록 LDM을 장치화 하였다.

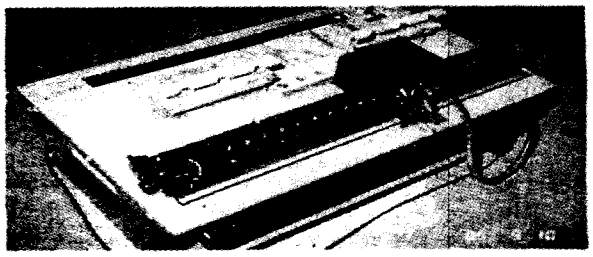

그림 4. 부품설치용 LDM 장치

(2) 구조가 간단하면서도 제작비용이 저렴하며, LPM(Linear Pulse Motor)와 같이 고정도의 기계적 가공도가 요구되지 않아도 된다. 또한, 다소 결합이 복잡해도 고정도의 엔코더를 이용하여 제어가 가능하게 하였다.
(3) LDM은 효율적이고 고속주행이 가능하며, 탈조현상이 없으며 필요에 따라 LPM과 같이 스텝구동으로 저속주행이 가능하다.
(4) 고정도의 기계적 가공정도가 요구되지 않아도 되도록 하기 위해 위치정도 및 분해능은 엔코더에 의존하게끔 하였다.
(5) 긴 수명인 브러시레스형 LDM을 적용하였다.

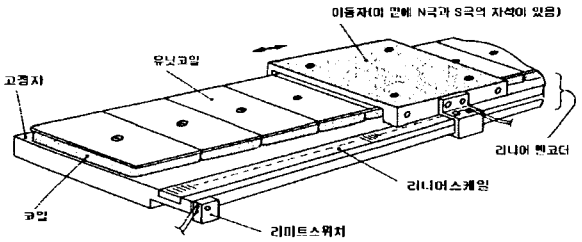

그림 5. 부품설치용 LDM의 구조

따라서 LDM은 그림 5와 같이 여자코일로 고정자의 전기자를 구성하여 스트로크를 따라 이동할 수 있도록 하였다. 또한, LDM의 측면에는 광학식 리니어 엔코더를 부착하고 있다. 여기에, 적용한 리니어 스케일의 분해능은 200[μm]을 사용하였다. 그림 6은 전개도를 나타낸다.

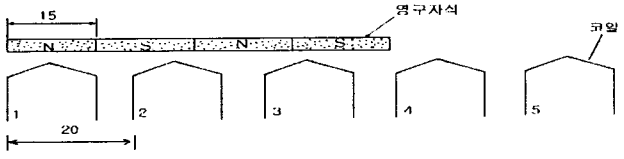

그림 6. LDM의 전개도

이와 같이 LDM은 리니어 엔코더의 피드백신호와 위치서보 회로에 의해 위치제어가 간단하게 실현되며, 이 때 분해능 및 위치정도는 리니어 엔코더에 의존한다.

표 2와 3은 적용한 LDM의 사양과 특성을 나타낸 것이다. 표 3으로부터 추력/입력비, 추력/체적비가 적음을 알 수 있다. 그러나 만약 더욱 큰 추력을 필요로 한다면 단순히 공심형 코일속에 철심을 넣는 것에 의해 약 2~3배의 큰 추력을 얻을 수 있다. 본 LDM의 구동은 180° 통전시는 철심의 개각(開角)을 계자자석의 자극 폭에 맞추지만, 120° 통전시는 2/3의 자극 폭으로 맞춤으로써 큰 추력을 얻을수 있으며 보다 좋은 제어성능을 얻을 수 있다.

표 2. LDM의 사양

항 목	수 치 (단위)
본 체 치 수	765×238×100 [mm]
가동자 치수	765×63×35 [mm]
영구자석 치수	40×40×7 [mm]
자 석 재 료	페라이트
착자방향의 두께	7 [mm]
영구자석의 개수	48 [개]
공 극	10 [mm]
공극의 자속밀도	0.15 [T]
코 일 턴 수	140 [회]
코 일 치 수	130×53×7 [mm]
코 일 개 수	6 [개]
최대의 스트로크	275 [mm]
총 질 량	24 [kg]
가동부 질량	10,2 [kg]

표 3. LDM의 특성값

항 목	치 수 (단위)
정격전압	±20 [V]
최대전류	±3 [A]
입력전력	0,24 [kVA]
최대추력	5,4 [N]
추력정수	8,99 [N/A]
기전력정수	9 [Vs/m]
최대속도	3 [m/s]
위치결정정도	10 [μm]
추력/입력비	0,023 [N/W]
추력/질량비	0,53 [N/kg]
추력/체적비	3,2 [N/L]

3.3 FA용 유압밸브의 LDM

공작용 프레스 기계, 사출성형기 등의 산업기계 가공축에 유압구동이 많이 사용되고 있다. 이것은 유압구동 시스템이 전동기에 비해 큰 추력을 발생할 수 있고, 위치, 속도 및 추력제어시 유압 밸브의 스풀을 이동시켜 작동유의 유입 방향이나 유량을 제어하고 있다.

LDM은 여자전류에 비례한 추력이 얻어지지만 모터 자체로는 위치결정 능력이 없기 때문에 가동자의 변위를 검출하여 폐루프계를 구성하여 위치제어를 행한다. 또한 LDM의 종류 중, 가동 코일형은 가동부의 질량을 작게 할 수 있기 때문에 고속, 고응답이며, 비교적 큰 스트로크를 용이하게 얻을 수 있어 고속/고정밀도의 직동형 유압 서보 밸브를 실현시킬 수 있다[19].

유압구동 시스템의 고속·고정밀도화, 에너지 절약형 등을 실현시키기 위해 고응답 LDM을 사용한 고속/고응답 유압 서보 밸브(Linear Servo Valve, LSV)에 대한 연구가 진행되고 있다. 여기서, 먼저 유압 밸브의 스풀을 구동하는 액추에이터에 대해서 살펴보고, 고응답 LDM을 사용한 유압 서보 밸브와 그 유압구동식 터릿 펀치 프레스에 대한 응용사례를 살펴 본다.

3.3.1 고응답 LDM을 사용한 고속유압 서보밸브

3.3.1.1 고응답 LDM을 사용한 직동형 유압 서보 밸브

그림 7은 고응답 LDM을 사용한 LSV의 구조이다. LSV는 4개의 포트(A, P, B, T)가 있는 서보 밸브로서 구동부, 유량제어부, 위치검출부로 구성되어 있다. 구동부는 코일 가동형

의 LDM으로서, 코일 보빈은 스풀에 직결되어 있다. 또한, 영구자석에는 동특성의 개선을 위해 동으로 된 단락링이 배치되어 있다.

유량제어부는 공급 포트 P, 제어 포트 A, B, 복귀 포트 T로 구성되어 있다. 제어 포트 A, B는 유압 실린더나 유압 모터 (그림 7에는 도시되어 있지 않다)에 접속된다. 그리고 스풀의 변위는 자기식 포텐쇼미터에 의해서 검출되어 제어장치에 피드백된다.

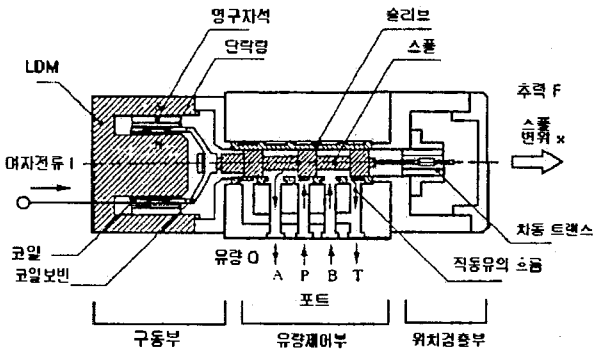

그림 9. 고응답 LDM을 이용한 LSV의 구조

여자전류 I를 코일에 흘리면 플레밍의 왼손법칙에 의해 추력이 발생되며, 그림 7의 오른쪽 방향으로 스풀이 x의 변위만큼 이동한다. 그러면 P에서 A포트로, B에서 T포트로 작동유가 흐르고, 스풀의 변위를 제어하여 LSV와 접속된 유압 실린더나 유압 모터의 위치 및 속도를 제어할 수 있다. 표 4는 고응답 LDM을 사용한 LSV의 주요 기본사양을 나타낸 것이고, LSV의 정격 스트로크는 ±0.5[mm]이며, 정격유량은 밸브 압력강하 7[MPa]로서 40[$l/\min$] 이다.

표 4. 고응답 LDM을 사용한 LSV의 기본 사양

항	목	기 호	수 치
LDM부	추력 정수	K_f	12,5 [N/A]
	최대 추력	F_m	87,5 [N] (I:7 [A])
	구동 전압	V	48 [V]
	영구 자석	Nd-Fe-B자석 (최대에너지적: 255 [J/m^3])	
유량 제어부	정격 유량	Q_r	40 [l/mm]
	정격 스트로크	L_s	±0,5 [mm]
	최대사용전력	P_m	35 [MPa]
위치 검출부		자기식 포텐쇼미터	
가동부 질량		m	70 [g]
최대추력/가동부질량		F_m/m	1,250 [N/kg]
LSV의 외형치수		80×80×232	

LSV의 고속·고응답화를 위해서는 LDM의 최대 추력 F_m과 LSV의 가동부 질량 m과의 비 F_m/m을 크게 하여야 한다. 따라서, 표 4에 나타낸 바와 같이 LDM의 소형화와 고추력화를 위해 Nd-Fe-B 자석을 계자로 사용하여 추력정수를 12.5 [N/A]이며, 여자전류 7 [A]로 최대 정추력을 87.5 [N]으로 크게 한다.

또한, 가동부의 경량화를 위해 코일과 코일 보빈에 각각 알루미늄선과 알루미늄 합금을 사용함으로써 LSV 스풀을 포함한 가동부 질량이 70[g]으로 하였고 이결과 F_m/m을 1.250 [N/kg]으로 크게 할 수 있었다. 그리고 스풀이 변위하여 유량 Q가 흐르면 스풀을 되돌리는 방향으로 유체력이 LDM의 추력에 대해서 외란으로 작용한다.

LDM은 이 유체력 이상의 추력이 필요하기 때문에 동손에 의한 온도상승의 증가와 LDM 대형화의 요인이 된다. 따라서 LDM의 고속·고응답화를 위해서 유체력를 종래 스풀의 1/3로 저감시켜 사용하였다.

표 5는 고응답 LDM을 사용한 LSV와 종래 밸브와의 특성 비교를 나타낸다.

표 5. 고응답 LDM을 사용한 LSV와 종래 밸브와의 특성 비교

항목	LSV	노즐 플래퍼형 서보 밸브	비례제어 밸브
정격 유량	40 [l/min]	1~40 [l/min]	5~60 [l/min]
주파수 응답	500 [Hz]	300 [Hz] 이하	5~30 [Hz]
스텝 응답	2 [ms]	2 [ms] 이상	10~200 [ms]

LSV의 정격 유량은 밸브 압력강하 7 [MPa]에 40 [l/min]으로서 응답주파수 (90° 위상이 뒤진 주파수)는 500[Hz]이다. 일반적으로 노즐 플래퍼형 서보밸브의 정격유량은 1~400 [l/min]범위이고 또 응답주파수는 300[Hz]이다. 리니어 전자 솔레노이드로 구동되는 비례제어 밸브의 응답주파수는 30[Hz] 정도이다. 고속·고응답의 LDM을 사용한 LSV는 종래의 노즐 플래퍼형 서보 밸브와 비교하여 1.67배나 응답주파수가 향상되었다.

3.3.1.2 고응답 LDM을 사용한 2단형 유압 서보 밸브

그림 8은 고응답 LDM을 사용한 2단형 LSV의 구조를 나타낸 것으로서 2단형 LSV는 LSV와 주밸브로 구성되어 있다. LSV의 공급 포트 P에는 파일럿 압력 (P_p)이 공급되고 있고 제어 포트 A, B는 각각 주밸브 스풀의 좌,우방에 접속되어 있다.

또한, 주 밸브의 공급 밸브 P에는 공급 압력이 공급되어 있고, 제어포트 A, B는 유압 실린더 등에 접속된다. 주밸브 스풀의 변위는 차동 트랜스(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)에서 검출되고 제어장치에 피드백된다.

여자전류를 코일에 흘리면 LDM에는 Bil 법칙에 의해 추력이 발생하며, 그림 8의 우측방향으로 LSV 스풀이 이동한다. 그러면 LSV의 P에서 A포트로, B에서 T포트로 작동유가 흐르며, 주 밸브 스풀은 그림 8의 왼쪽방향으로 이동한다. LSV 스풀의 변위를 제어함으로써 주 밸브 스풀의 변위를 제어, LSV의 제어 유량 이상의 대유량을 조작할 수 있다.

표 4 는 2단형 LSV의 기본 사양을 나타내며, 파일럿 밸브

는 LSV이다. 2 단형 LSV의 정격 스트로크는 ±5mm, 정격 유량은 밸브 압력 강하 7[*MPa*]에 800[*l*/min]이고 응답주파수는 100[Hz]이다. LSV와 비교하여 20배의 대용량화가 도모되고 있다.

표 6은 고응답 LDM을 사용한 2단형 LSV와 종래의 3단형 서보 밸브의 특성을 비교하였다.

표 6. 고응답 LDM을 사용한 2단형 LSV의 기본 사양

항 목		수 치
파일럿 밸브		LSV
주밸브	정격 스트로크	±5 [mm]
	정격 유량	800 [*l*/min]
외형 치수		333×118×262 [mm]

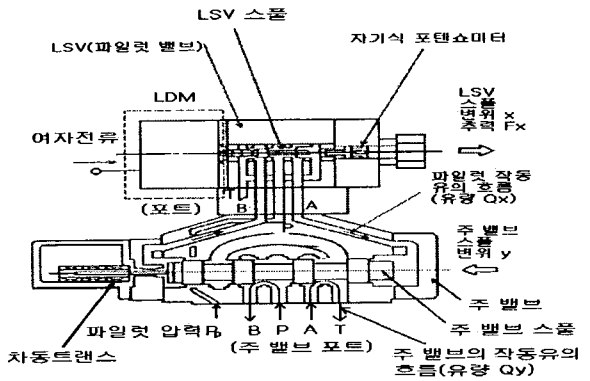

그림 8. 고응답 LDM을 이용한 2단 LSV 구조

3단형 서보밸브의 정격유량은 100~4,000[*l*/min] 범위이며, 응답주파수는 80[Hz] 이하이다. 고속·고응답의 LSV를 사용한 2단형 LSV는 3단형 서보밸브와 비교할 때, 1.25배의 고응답화가 실현되었다.

표 7. 고응답 LDM을 사용한 2단형 LSV와 종래 3단형 서보 밸브의 특성 비교

항 목	3단형 서보 밸브	2단형 LSV
파일럿 밸브	노즐 플래퍼형	LSV
정격유량	100~4,000[*l*/min]	800 [*l*/min]
응답주파수	80 [Hz]	100 [Hz]
스텝응답	10 [ms] 이상	8 [ms]

3.3.2 고응답 LDM을 사용한 유압서보밸브의 펀치 프레스기기

최근, 유압구동식 펀치 프레스 (판재의 타발·성형가공 등을 하는 기계)의 고속화와 에너지 절약화가 더욱 요구되고 있다. 펀치 프레스의 가공은 유압 피스톤에 설치된 램 (철제의 가동부)을 구동하여 터릿에 배치된 금형을 램으로 압압(押壓)하여 행하여진다.

그림 9는 고응답 LDM을 사용한 2단형 LSV를 탑재한 터릿 펀치 프레스의 외관이다. 종래의 램구동에는 노즐 플래퍼형

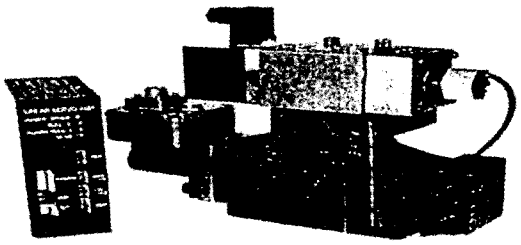

그림 9. 고응답 LDM을 이용한 2단 LSV와 서보앰프의 외관

서보밸브를 파일럿 밸브로하는 대용량 3단형 서보 밸브가 사용되고 있었다.

그러나 종래의 터릿 펀치 프레스와 비교하여 고응답 LDM을 사용한 2 단형 LSV를 탑재함으로써 램의 최대 속도를 종래기의 2배인 250 [*mm/s*]로 고속화하였으며 종래기와 비교해서 약 9%의 에너지를 절약하였다.

여기서는 리니어 모터의 FA기기에 대한 응용으로서, 고속구동, 고정밀도 위치결정 및 비접촉 구동 등의 잇점을 지니고 있는 LDM의 유압 서보밸브의 응용 예를 살펴보았다.

이 응용예는 LDM의 고속구동과 고정밀도 위치결정 성능을 활용한 것이다. 또한, 리니어 모터와 유압공학, 기계공학과의 분야에서 응용되므로서 앞으로 FA기기에 리니어 모터가 확대됨에 따라 더욱 개발이 많아질 것으로 생각된다.

3.4 프린터의 캐리지 반송용 LDM

데이터 통신서비스의 발달로, 대표적 단말기인 프린터에 고속화/소형경량화/고신뢰도화가 요구되고 있다. 일반적으로 프린터의 캐리지는 회전형 모터로 구동되므로 회전형 모터와 캐리지와의 사이는 회전운동을 직선운동으로 바꾸기 위한 동력전달기구가 필요하고, 그로 인해 기구구성이 복잡해지고, 고속/고정도화에 한계가 있었다.

기구가 간소화하며 신뢰성이 높은 프린터를 실현하기 위해 캐리지 이송 구동원으로서 복잡한 전달기구가 필요치 않는 LDM에 관심이 주목되면서, 그림 10과 같은 코어붙이 가동전기자형 LDM에 의한 인자속도 40[字/秒]의 중속도 프린터와 그림 11과 같은 가동계자형 LDM에 의한 인자속도 80 [字/秒]의 고속 프린터가 개발되었다. 표 8은 이들의 사양을 나타낸다.

3.4.1 LDM의 구조 및 사양

중속도 프린터용 코어붙이 가동전기자형 LDM은 소형경량화, 경제화를 지향한 것으로, 구조는 그림 10과 같다. 고정자측에 페라이트 영구자석, 가동자측은 2상 코일의 코어붙이 전기자이고, 브러시가 없고 계자 자속밀도분포는 계자극 피치의 2배를 주기로 하는 정현파 형태로 되어 있다. 그러므로 지령입력에 비례한 추력을 얻는 데는 코일 인가전압을 가동자 이동량의 정현극수로서 제어할 필요하다.

고속 프린터용은 가동계자형 LDM을 이용하여 고추력화를 지향한 것으로 그림 11에 그 구조를 나타내었다. 고정자측은 전기자, 가동자측은 희토류 사마륨·코발트 영구자석이다.

표 8. 프린터의 주요 사양

항 목		중속프린터	고속프린터
印字 方式		실린더 임팩트 방식	실린더 임팩트 방식
印字 속도	평균	40 [字/秒]	70 [字/秒]
	최고	56 [字/秒]	83 [字/秒]
활자종류		128종(英數, 英記號, 한글, 한글기호)	128종(英數, 英記號, 한글, 한글기호)
1행인자수		최대 132	최대 132
인자간 폭		10 [字/인치]	10[字/인치]
활자선택모터		브러시레스 서보 모터	브러시레스 서보 모터
캐리지이송 모터		전기자형 리니어 서보 모터	가동계자형 리니어 서보 모터

표 9. LDM 설계 사양

항 목	(단위)	수 치
영구자석의 두께	[㎜]	10.0
영구자석의 길이	[㎜]	47.0
영구자석의 폭	[㎜]	22.0
철심의 두 께	[㎜]	12.0
철심의 길 이	[㎜]	220.0
철심사이의 간격	[㎜]	14.0
코일의 턴 수	[회]	2128
정격전류	[A]	0.55
정 추 력	[N]	1.25
기 자 력	[AT]	1170
가동자 질량	[kg]	0.163
코일의 두께	[mm]	0.45

3.5 계기용 LDM

LDM은 계측정비의 기록계기로서 응용이 가능하며 이에 대한 계기용 LDM의 구비조건은 다음과 같다[5][6][11]~[14].

(1) 추력리플을 저감하기 위해서 공극의 철심구조는 치형상이 아닌 편평형 철심으로하고, 극수는 다극형이 아닌 단극형으로 하며 여자방식도 다상 여자방식이 아닌 단상여자 방식을 적용함으로써 치절환, 극수절환 및 여자절환에 따른 추력의 리플을 저감하도록 하였다.

(2) 장(長) 스트로크의 길이에 많은 코일을 성층하여 여자할 경우 큰 인덕턴스 값에 따라 철심의 중앙부분에서 철심의 포화가 심하므로 단(短) 스트로크가 적합하다. 장 스트로크시 다극형 여자 권선법이 필요하다.

(3) 우수한 응답특성, 정속도특성, 진동의 억제 및 구조의 간소화를 위해서 가동자의 질량이 가벼워야 하며 간소한 가동자석형 LDM이 적합하다.

(4) 힘의 방향과 마찰저항을 고려하여 정추력을 발생하기 위한 가이드레일 구조의 선택이 중요하다.

(5) 동일 변위에서 두배의 힘을 얻기 위해서는 양측식 구조의 LDM이 적합하다.

계기용 LDM의 설계는 먼저 응용분야에 적합한 형태, 부피, 정격용량, 정추력, 용도, 무게, 비용 등을 결정해야 한다. 설계/제작한 표 1의 사양은 계측용(유량, 수량, 공압)계기에 적합한 단 스트로크 가동자석형 LDM을 나타낸다. 본 LDM은 다극형, 여자절환, 치구조, 장스로크화에서 발생되는 추력의 리플을 발생하지 않는 구조로 설계/제작하였다.

따라서 계기용 LDM은 추력의 리플저감, 정추력의 발생, 진동의 억제, 고응답성, 단스트로크의 안정성 등을 지니고 있어야 한다. 표 11은 그림 12의 가동자석형 계기용 LDM 구조에 대한 설계사양을 나타낸다.

3.6 반송용 LDM

본 LDM은 1987년 초에 개발되어 산업현장에 적용되고 있으며, 더욱 정밀한 기계설계, 효율적인 전기회로 설계 등에 의해서 응용분야는 더욱 확대되고 있다. 본 LDM은 일정속

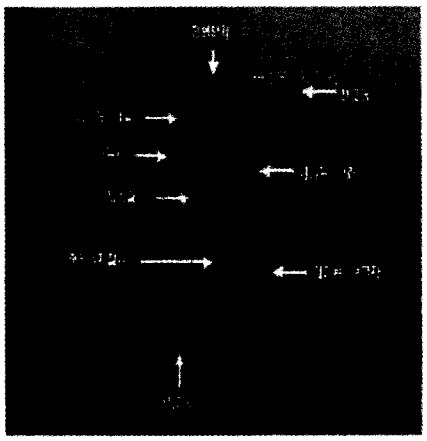

그림 12. 계기용 LDM의 구조

도뿐만아니라 고속 및 급가,감속 응용분야에도 사용된다. 모터의 위치검출용 장치로서 고분해능의 간섭계(Interferometer)를 사용함으로써 많은 반도체 생산분야의 Motion control 에서 우수한 성능을 보인다.

LDM은 볼 스크류, 타이밍 벨트, 랙/톱니바퀴을 이용하여 구동되는 회전형 모터에 비해 속도와 위치성능에 있어서 많은 잇점을 가지고 있다.

본 LDM은 AC 서보모터로 잘 알려진 3상 브러시리스 DC 모터로서, 위치, 속도 및 가속 등을 제어하기 위해 위치검출용 리니어 엔코더를 이용한 제어기의 출력신호에 의해 토크 및 전류모드로 구동되는 브러시리스 증폭기에 의해 제어된다.

LDM은 리니어 엔코더, 증폭기, 제어기 등의 조합에 의해 구동된다. LDM의 장점은 다음과 같다.

(1) 고정밀도 및 반복성

±1%의 고분해능을 갖는 엔코더에 의해 위치를 카운터한다.

(2) 간단한 기계적 구조

두 부분으로 분류하면 가동코일과 고정자 자석의 구조로 되어 있으며. 커플링이 없이 발생된 힘을 직접 부하에 인가할 수 있다.

(3) 고가속 및 고속

실제 가속도는 2~3 g이지만 특정한 시기에는 15 g까지 가속시킬 수 있다. 속도는 증폭기 전압과 엔코더에 의해 제한된다. 최고속도는 2 m/s 이지만 8 m/s 까지도 가능하다.

(4) 고열 억제력

권선과 부착된 막대사이에 형성된 일정한 평판면은 열발산을 증가시킬 수 있으므로 전류와 힘을 크게 할 수 있다. 온도센서와 공기 또는 유체 냉각장치는 제작된 모든 코일부분에 부착되어 비용이 저렴하다.

(5) 유지보수가 불필요

비접촉부분은 성능의 저하가 없이 긴 수명을 지닐수 있으므로 이상적이다.

(6) 유연한 설계

3가지 형태의 자석경로를 구성함으로써, 유연성을 최대로 발휘할 수 있으만, 기준자석 경로는 비용을 절약할 수도 있다.

(7) 위치 시스템 크기의 축소

볼 스크류나 타이밍 벨트로 결합된 모터와 회전형 모터에 필요한 부수적인 장치가 불필요하므로, 더욱 간소화되고 작게 설계가 가능하다.

(8) 우수한 성능

부하에 대한 적합한 크기의 모터로 구성된, 본 LDM은 다른 모터보다도 우수한 성능을 가지고 있으며, 정확성, 반복성, 가속, 속도, 강성, 수명 등에서 다른 모터보다도 더욱 우수하다.

본 LDM은 3상 브러시리스 서보모터이며, 플레밍의 왼손법칙에 의해 구동되는 모터이다. 코일의 패키지를 최대한 효율적으로 배치하고, 자석 경로에 가장 강력한 희토류계 자석을 사용함으로써, 크기의 최소화로 최대토크를 얻을 수 있다. 권선은 정확하게 120° 위상을 지니고 있으며, 권선은 모터를 구동할 수 있도록 연속적으로 스위치되거나 전류(轉流))되어야 한다.

본 LDM은 정현파 또는 홀효과 소자 (Hall Effect Device, HED 또는 사다리꼴) 형태의 2가지 전류모드를 이용하였다. 모터의 효율을 높이기 위해서는 정현파 전류모드로 구동하며, HED 전류모드에서는 약 10~15%정도 효율이 떨어진다. 정현파 전류모드에서, 위치 피드백으로 이용되는 리니어 엔코더는 모터의 전류신호를 발생하는 데 사용된다. 상 검출시에는 전압의 상승하며 이로 인해 모터의 상은 각 엔코더 펄스에 따라 점점 증가한다. 이로 인해 모터가 유연하게 구동된다. HED 전류모드에서는, 코일이 배치된 회로판에 작은 홀 IC를 부착하여 사용한다. HED 센서는 자극 트랙에서 극성변화를 검출하여, 매 60° 의 위상마다 모터를 스위칭하도록 한다.

실험적으로도 정현파 전류모드가 HED 전류모드보다도 약 10% 정도의 높은 효율을 나타내었다. 이러한 과정은 모터의 기본설계에 따라 역기전력 파형이 정현파가 되도록 모터 코일을 구성한다. 각상의 구동전압이 역기전력 파형과 일치될 때, 어떤 토크 리플도 발생하지 않는다. 따라서, 역기전력 파형은 자석과 권선의 기하학적 구조에 의해 발생되며, 정현파 전류모드로 본 LDM을 구동시킴으로써 고효율, 무소음, 유연한 코깅토크이 없는 구동이 가능게 구성되어 있다..
그림 13은 이러한 특성을 지닌 반송용 LDM을 나타낸다

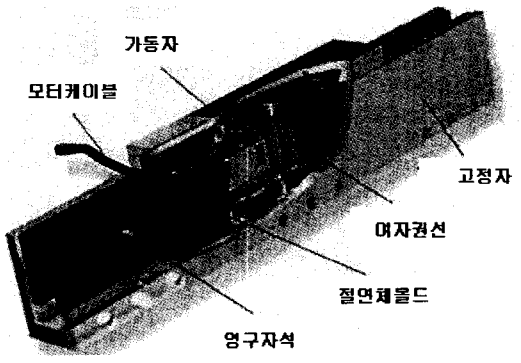

그림 11. 반송용 LDM

참고문헌

[1] 편집부, " 리니어 모터의 활용 핸드북", 세화출판사, 1988
[2] A. Basak, "Permanent Magnet DC Linear Motors", Oxford, 1996
[3] L. Honds, K. H. Meyer,"A linear DC motor with permanent magnets", Philips tech. Rev. 40, 329-337, 1982
[4] 기술조사보고서, " 소형모터의 기술현황", 대한전기학회, 1995. 4.
[5] 백수현, 윤신용, 김용, 김민수, 김학련, " 양측식 영구자석 가동형 LDM의 설계 및 특성해석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B). pp965-967. 1993
[6] 윤신용, " 양측식 영구자석 가동형 LDM의 설계·제작 및 구동특성에 관한 연구," 동국대학교 대학원 석사학위논문, 1993.
[7] 백수현, 박영호, 이준철, 함중걸, " Moving Magnet 형 LDM의 설계 및 해석," 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp951-953, 1993.
[8] 박영호, 리니어 브러시레스 DC 모터의 제작 및 특성해석에 관한 연구, " 동국대학교 대학원 석사학위논문, 1993
[9] 김학련, " 장스트로크 가동자석형 LDM의 설계 및 해석에 관한 연구, " 한양대학교 대학원 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1993.
[10] B. Brunelli, D. Casadei and G. Serra, "Analysis of a Slotless Permanent Magnet Brushless DC Linear Motor", Proc. of ICEM'90, Boston, pp. 173~178, 1990
[11] 이준철, " 슬라이딩모드 제어기를 이용한 가동자석형 LDM의 제어, " 동국대학교 대학원 석사학위논문. 1994.
[12] 맹인재, " 정전류 인버터로 구동되는 리니어 BLDC 모터의 설계 이론 및 특성연구, " 동국대학교 대학원 석사학위논문, 1994.

[13] 윤신용, 백수현, 김용, " Short Stroke에 적합한 LDM의 설계, " 대한 전기학회 추계학술대회, 1996. 11
[14] 강호성, " 자기회로 해석에 의한 영구자석형 LDM의 설계, " 동국대학교 대학원 석사학위논문, 1997.
[15] D. Casadei, G. Grand and G. Serra, "Design and Control of a Slotless PM DC Linear Actuator for Servo System", Proc. of ICEM'92, Manchester, pp. 132~136, 1992
[16] 백수현, 윤신용, 김용, 배성식. " 양측고정자형 LDM의 추력산정에 관한 연구, " 추계학술회대회 논문집, 1997. 11
[17] 백수현, 배성식, 윤신용, 김용, 김일남 " 퍼미언스법에 의한 양측식 영구자석 가동형 LDM의 설계, " 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998. 7
[18] D. Casadei, "Comparative Analysis of Slotless PM DC Linear Actuators with Different Magnetic Cores", Proc. of UPEC'93, Stanford, vol. 1, pp. 425~428, 1993
[19] Tsutomu Mizuno, Hajime Yamada, " Application of High Speed Hydraulic Servo Valve using Linear DC Motor for Bending Machine," 電氣學會 リニアドライブ研究會資料, LD-94-15, pp39-48. 1994

저 자 소 개

백수현(白壽鉉)

1947년 5월 2일생. 1972년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1977년-현재 동국대 공대 전기전자공학부 교수. 당학회 평의원.

윤신용(尹信容)

1964년 9월 1일생. 1992년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1994년 동국대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1997년-현재 동 대학원 전기전자공학부 박사과정. 1995년-현재 전자부품종합기술연구소 정밀기기연구실 위촉연구원.