

# 리니어 직류모터의 성능 평가



김 중 천

삼익THK(주) 기술연구소  
kimjch@samickthk.co.kr



이 세 훈

삼익THK(주) 기술연구소  
zenadu@samickthk.co.kr



김 성 준

삼익THK(주) 기술연구소  
sjkim@samickthk.co.kr



김 승 현

삼익THK(주) 기술연구소  
shkim@samickthk.co.kr

## 1. 서론

공작기계, 반도체 장비, FPD 장비 및 자동차 분야에서의 고속, 초정밀 이송장치의 필요성이 증대됨에 따라 기존의 볼나사를 대체하는 리니어모터의 적용이 급속도로 확산되고 있다. 기구학적 변환 장치를 사용하지 않는 리니어모터의 직접 구동 방식은 기존의 볼나사 방식의 단점 극복을 가능케 했을 뿐만 아니라, 가속도, 속도에 있어서 우수한 동특성 가지며, 스토르크에 제약이 없고, 동일 고정자에 다수의 가동자를 부착하여 다양한 구동이 가능한 유니트를 구성할 수 있다는 등의 장점을 제공한다.

일반 산업분야에 널리 이용되는 리니어 직류 모터의 동작은 회전형 직류 모터와 같다. 리니어 직류 모터(LDM)는 회전형 직류모터와 같이 자계와 전기자 전류사이에 작용하는 힘을 이용한 것으로 추력-속도 특성이 직선적이고 시정수

가 작은 특성이 있어 제어가 비교적 용이한 특징이 있다. 가동자와 고정자의 기본 구성에 따라 코일 가동형(Moving Coil Type), 자석 가동형(Moving Magnet Type) 및 전기자 가동형(Moving Armature Type) 모터로 구분 할 수 있다.<sup>(1,2,3)</sup>

이렇게 널리 사용되고 있는 리니어모터의 경우 제조업체에서 제시하는 주요 특성에 대하여 사용자는 이 특성을 제대로 이해하는 것이 필요하다고 생각된다.

따라서 본 내용은 리니어모터 특성평가는 현재 산업계에서 일반적으로 가장 많이 적용되고 있는 코일 가동형 리니어 직류 모터(LDM)에 대하여 국한한다. 기본적인 특성 값 중 일반 사용자 입장에서 이해가 필요한 추력상수, 정격전류에 대하여 기술하며 제작된 제품을 이용하여 특성을 평가하였다.

## 2. 특성 평가

### 2.1 추력 상수

리니어 직류 모터(LDM)에서의 추력은 플레밍의 왼손법칙에 따라 영구자석에 의한 공극 자속밀도와 가동자 코일에 흐르는 전류의 상호 작용에 의해 발생하므로 추력은 식 2.1과 같이 표현된다.<sup>(4,5)</sup>

$$F[N] = n \cdot t \cdot B \cdot I \cdot L \quad (1)$$

$$= K_g \cdot \Phi \cdot I = K_f \cdot I$$

식 (1)의  $K_g (= n \cdot t \cdot p/l)$ 는 전기력 상수,  $t$ 는 코일 권선수,  $n$ 은 전기자 코일의 유효 도체부수,  $\Phi$ 는 자극의 자속수(Wb),  $l$ 은 자석에 대향하는 코일의 길이(m),  $B$ 는 자속밀도(T),  $p$ 는 극(Pole) 수이다.

이 식에서 알 수 있듯이 추력  $F$ 는 전류  $I$  값에 따라 비례하는 형태로 나타난다. 이때 비례상수  $K_f$ 를 추력상수라 하며 단위는 [N/A]가 된다. 이는 모터 고유의 값이면 이론 설계에서 설정된 값인 경우 제작된 제품에 대하여서는 실험을 거쳐 추력상수를 결정해야 한다.

먼저 평가에 사용된 모터의 기본 사양은 Table 1과 같다. 추력 상수를 측정하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있는데 그 첫 번째 방법은 가동자에 DC전류를 가하고 가해진 전류 대비 발생한 힘을 측정하는 것이다. 측정하기 위한 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다.

Table 1 C모터 사양(CDM30-500)

항 목	단 위	특 성 값
정격 추력	N	500
최대 추력	N	1,000
연속 추력	$A_{rms}$	6.9
최대 전류	$A_{rms}$	13.8
추력 상수	$N/A_{rms}$	73
전기적 시정수	ms	12.9
자기 흡인력	N	3,530

측정하기 위한 가동자를 이송 테이블에 장착한다. 가동자의 추력을 측정하기 위한 로드셀을 지그의 앞단에 부착한다. 그런 다음 가동자에 전기를 인가하지 않은 상태에서 테이블을 손으로 움직여 로드셀에 살짝 닿도록 한다. 지그는 후단부에 있는 핸들을 돌리면 로드셀이 부착된 앞부분만 전후 방향으로 이동 할 수 있다. 이 지그를 이용하여 고정자 자극과 가동자 코일의 상호 위치를 맞출 수 있다.

먼저 Power Supply의 DC 출력 단자를 가동자의 커넥터 3상중 2상에 연결하고 테이블이 움직이기 시작할 때 까지 전류를 조금씩 증가시킨다. 테이블 이송 방향이 로드셀과 대향하는 쪽인지를 확인하고 반대 방향이면 인가 전류의 상을 서로 바꾸어 움직이는 방향을 변경하면 된다.

힘이 정상적으로 가해지는 지를 확인 한 다음 로드셀 이송 지그의 핸들을 돌려 테이블을 이송시키면서 추력의 변화를 본다. 최대 추력이 발생하는 지점이 나타나면 돌리는 것을 멈추고 테이블을 그 자리에 고정한다.

인가되는 전류가 DC 이므로 코일의 3상 중 해당되는 2상의 코일에만 전류가 가해지고 이에 해당하는 고정자 자극과 상호 위치가 일치하는 지점에서 최대 힘이 발생한다. 따라서 최대 추력이 발생하는 지점에서 로드셀과 테이블을 고정하고 인가 전류를 증가 시키면서 발생하는 힘을 측정한다.

이때 측정한 값에서 테이블 안내면의 마찰 저항의 값을 포함하고 있으므로 이 성분을 제거하고 순수 추력에 해당

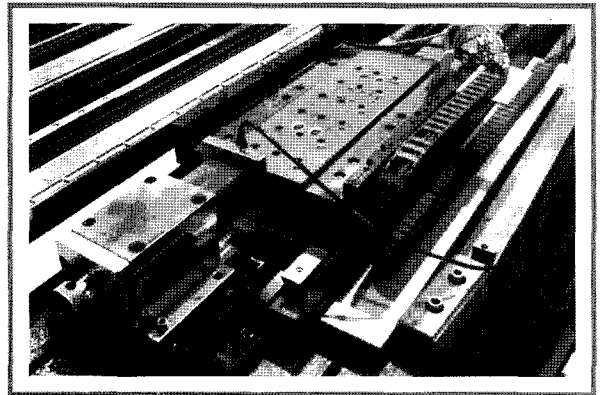


Fig. 1 추력 측정 장치

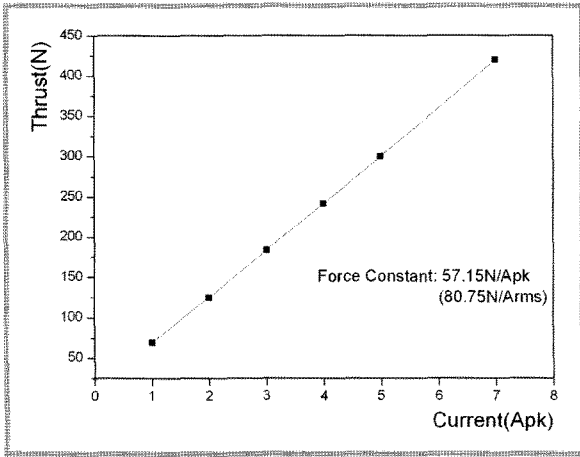


Fig. 2 DC전류 인가에 의한 측정 결과

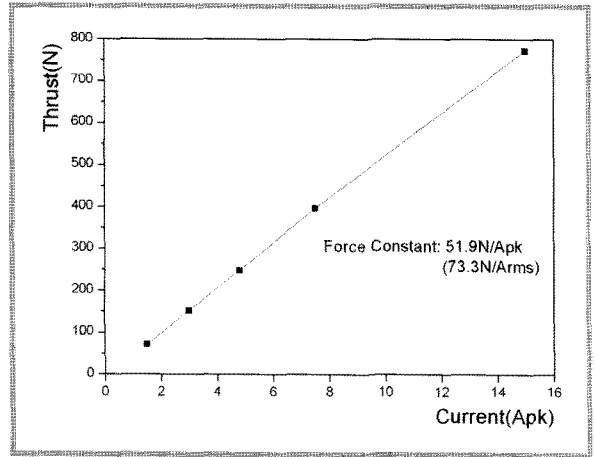


Fig. 3 Open loop 전류제어에 의한 측정결과

Table 2 제어부 사양

No.	항 목	사 양
1	Controller	Umac (Delta TAU)
2	Driver	A4L (Panasonic)
3	Linear Scale	MS20,04(RSF)

하는 부분만을 도출해야 한다. 이렇게 하여 측정된 결과는 Fig. 2와 같으며 추력 상수는  $80.8(N/A_{rms})$ 이었다.

두 번째는 모터, 드라이버, 상위 제어기를 서로 연결하고 상위 제어기에서 Open Loop로 제어하며 전류 지령값 대비 발생한 힘을 측정하는 방식이다. 여기서 사용된 제어부 사양은 Table 2와 같다.

먼저 Fig. 1의 유니트에 장착된 모터에 드라이버 및 컨트롤러를 연결한다. 여기에서도 리니어모터에 전원이 인가되기 전에 테이블을 손으로 밀어 로드셀에 살짝 닿도록 한다. 이는 상위 제어기에서 전류 제어를 할 경우 테이블이 갑자기 이송하여 로드셀에 부딪혀 충격이 가해지는 것을 최소화하기 위한 것이다. 테이블 위치가 선정된 다음 서보를 On 한 상태에서 컨트롤러 상에서 지령 전류를 변경해가면서 발생하는 추력을 측정한다. 이렇게 하여 측정 결과는 Fig. 3과 같으며 추력 상수는  $73.3(N/A_{rms})$ 이었다.

상계 중에 리니어 직류 모터(LDM)의 가동자 코일과 Driver와 연결이 되어있지 않은 상태에서 어떤 외력으로 이동하면 코일에는 이동 속도에 비례하는 전압이 유기된다. 이 유기전압을 역기전력이라고 한다. 세 번째는 이 역기전력을 측정하고 역기전력 상수와 추력상수의 관계식으로부터 추력상수를 구하는 방법이다.

역기전력  $E_c [V]$ 는 이송 속도  $v[m/s]$ 와 비례 관계가 있으며 관계식은 아래와 같다.

$$E_c = K_e \cdot v$$

역기전력 상수  $K_e [\frac{V}{m/s}]$ 와 추력상수  $K_f [N/A_{pk}]$ 의 관계는 아래식과 같다.

$$K_f = \frac{\sqrt{3}}{2} \times K_e$$

상기 두 식을 이용하여 역기전력과 추력상수의 관계로 표현하면 아래식과 같다.

$$K_f = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{E_c}{v}$$

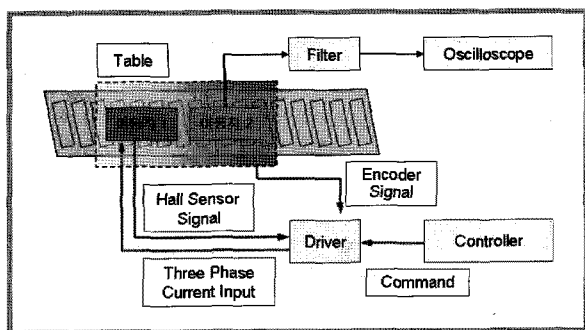


Fig. 4 역기전력 측정 방식

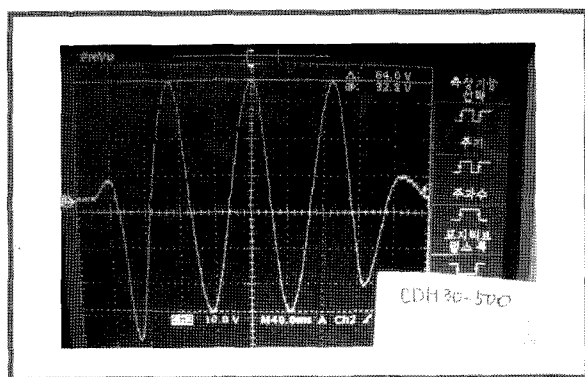


Fig. 5 역기전력 측정 결과

역기전력을 측정하기 위한 실험 방식은 Fig. 4에 도시하였다. 가동자 1과 가동자 2가 전기적으로 절연된 상태로 하고 가동자 2를 가동자1에 고정시킨다. 가동자 1을 일정한 속도로 이동시키면 가동자 2도 동일한 속도로 이동하게 된다. 이때 가동자 2의 A상, B상, C상에서 각각 발생된 역기전력을 측정한다. 측정된 역기전력 신호는 노이즈 성분을 포함하기 있기 때문에 신호의 진폭과 위상에 영향을 미치지 않도록 대역폭을 고려한 필터를 사용하여 이를 제거한다.

이러한 방법으로 역기전력을 측정할 결과는 Fig. 5와 같다. 이송 속도 0.50m/s에서 측정된 역기전력은 32V였으며 추력상수  $K_f$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$K_f = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{32}{0.5} \left[ \frac{V}{m/s} \right] = 55.4 [N/A_{pk}]$$

$$= 78.3 [N/A_{rms}]$$

Table 3 추력상수 측정 결과 요약

No.	측정 방법	측정값 ( $N/A_{rms}$ )
1	DC 전류 인가	80.8
2	Open Loop 전류 지령	73.3
3	역기전력 측정	78.3

지금까지 측정한 결과를 정리하면 Table 3과 같다. 추력상수는 드라이버와 컨트롤러가 연계된 상태에서 Open Loop로 전류 지령에 의한 경우가 가장 값이 작고 DC 전류를 직접 인가한 경우가 가장 값이 크다. Open Loop 지령에 의한 경우는 적용하는 드라이버에 따라 약간의 차이가 있으나 이 방식에 의해 측정된 값을 기준으로 설정하는 경우가 가장 타당할 것으로 판단된다.

## 2.2 정격 전류

리니어모터에서 정격 전류란 모터를 어느 일정 속도로 계속 운전하여 코일 온도 상승 값이 어느 일정값을 초과하지 않고 일정한 값에 수렴할 때 인가한 전류를 말한다. 여기서 어느 일정값의 온도 기준은 코일의 허용 온도, 코일을 보호하기 위하여 사용하는 에폭시의 변이 온도, 케이블 허용 온도 등을 고려하여 모터 제조업체에서 정한 값이나 일반적으로 코일 온도 100°C로 정하는 경우가 많다.

이론 설계에서 설정된 정격 전류도 실제 제작한 후 차이가 발생하므로 제작된 제품에 대하여 코일 온도 100°C에 포함되는 인가 전류값을 찾아야 한다. 측정 장치는 Fig. 5와 같다.

먼저 방열판(Heat Sink) 상면에 가동자를 사용 조건과 동일하게 볼트로 고정을 한다. 이 방열판은 가동자에서 발생한 열이 방열판을 거쳐 바닥으로 전달이 되지 않도록 바닥 접촉 면적을 최소화 하고 그 접촉 부위도 가능한 단열을 시킨다. 방열판 크기는 제품 사용 용도에 따라 각 제조업체마다 기준을 달리하고 있으며 표준 제품은 제조업체 카탈로그 상에 그 크기를 표시하고 있는 경우가 많다. 본 실험에서 사용된 방열판 크기는 254×254×25(가로×세로×높이)mm이다.

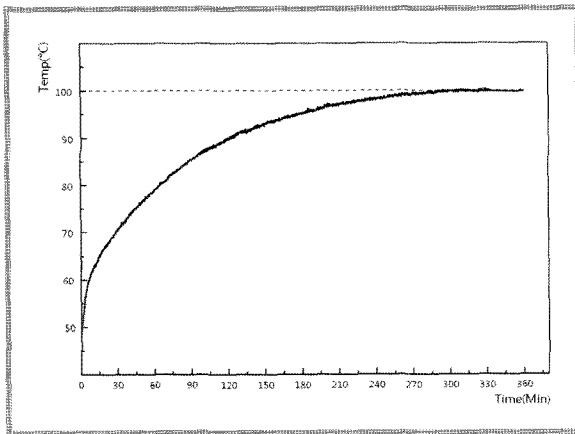


Fig. 6 온도 그래프 - DC전류 인가

그런 다음 DC Power Supply의 출력 단자를 가동자 전원 단자에 연결하고 전류를 인가하여 가동자의 코일 온도를 올린다. 여기서 코일 온도 측정은 다수의 열전대(Thermo Couple)를 사용하며 이 열전대는 코일 몰딩 전에 코일 표면에 부착하여 외부로 빼내어 두어야 한다. 100°C에 수렴하는 인가 전류를 찾기 위해서는 여러 번 시행착오를 거친다.

이러한 방법으로 측정된 결과는 Fig. 6과 같으며 약 5시간 후 100°C에 수렴하였으며 이때 가해진 전류는 DC 6.9A이다. 따라서 이 제품의 정격 전류는  $6.9A_{rms}$  ( $9.8A_{pk}$ )가 된다.

이렇게 선정된 정격 전류에 대하여 실제 움직이는 상태에서 가동자 수렴 온도를 확인한다. 운전은 실효추력이 정격 추력의 100%에 해당하는 조건으로 하며 적용 유니트는 Fig. 7과 같다. 실효 추력은 다음 식으로 표현된다.

$$F_{rms} [N] = \sqrt{\frac{F_a^2 \cdot t_a + F_L^2 \cdot t_c + F_d^2 \cdot t_d}{T}}$$

여기서,  $F_L [N]$ : 정격부하력,  $F_a [N]$ : 가속시 추력  
 $F_d [N]$ : 감속시 추력,  $T [sec]$ : 1 cycle 운전 시간  
 $t_a [sec]$ : 가속시간,  $t_d [sec]$ : 감속시간

정격 추력비(실효 추력/정격 추력)가 100% 되는 운전 때

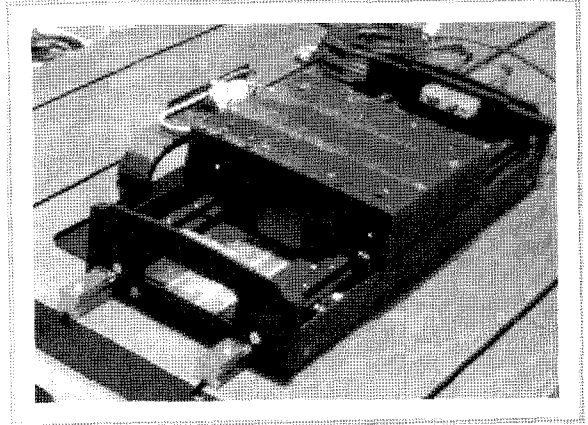


Fig. 7 RMS 정격 추력 테스트

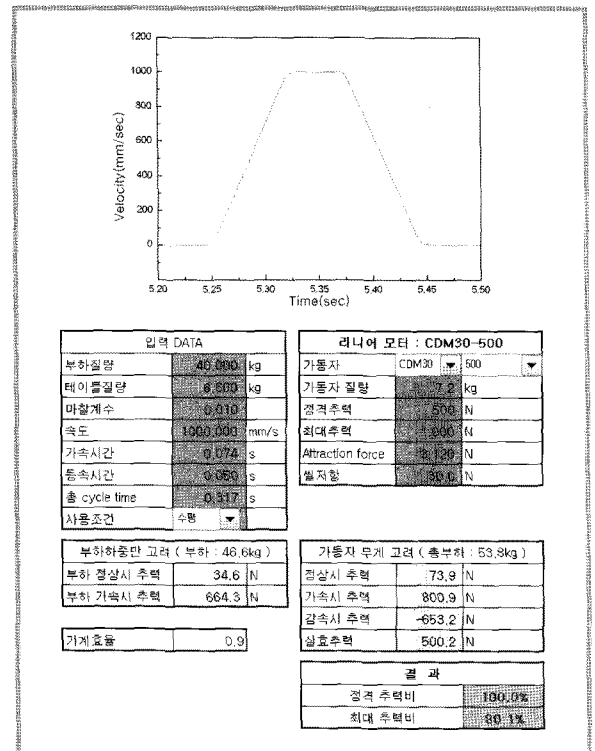


Fig. 8 동적 발열 실험 운전 조건

턴과 계산 결과는 Fig. 8와 같다.

운전 조건은 부하질량 40kg, 최대속도 1m/s, 가감속 시간 74ms, 등속시간 50ms, 휴지 시간 119ms이다. 이러한

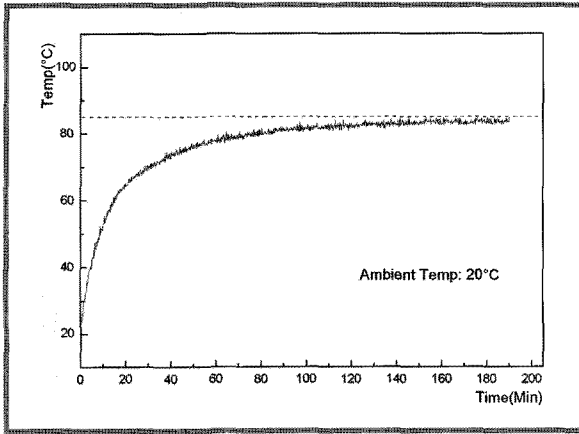


Fig. 9 온도 그래프 - 동적 상태

조건으로 장시간 운전한 결과 가동자 코일의 온도 상승 그래프는 Fig. 9와 같으며 약 3시간 후 약 83°C에서 수렴하였다.

움직이는 상태에서는 정적인 상태보다 대기에 의한 냉각이 더 크며 또한 유니트가 알루미늄으로 제작되어 비교적 열전달 경로가 좋아 유니트가 고정된 주철 정반으로도 열이 전달되었다. 따라서 정격 추력비가 100%이더라도 100°C보다 낮은 83°C에서 수렴한 결과를 얻었다. 따라서 사용자는 적용하는 분야 또는 환경에 따라 차이가 있으므로 이를 고려한 모델 선정이 필요하다.

#### 4. 결론

본 내용은 현재 산업계에서 일반적으로 가장 많이 적용되고 있는 코일 가동형 리니어 직류 모터(LDM)를 이용하여

리니어모터의 기본적인 특성 값 중 일반 사용자 입장에서 이해가 필요한 추력상수, 정격전류에 대하여 기술하며 제작된 제품을 이용하여 그 특성을 평가하였다.

1. 추력 상수의 측정 방식은 여러 가지 있으나 모터와 드라이버, 컨트롤러를 연결한 상태에서 상위 제어기에서 Open loop로 전류 제어하고 이때 발생하는 추력으로 드셀로 측정하는 것이 가장 적절한 것으로 판단됨.
2. 정격 전류는 모터 제조업체에 따라 선정 기준의 차이가 있으나 통상적으로 모터 코일의 허용 온도가 100°C에 수렴할 때 인가되는 전류를 말한다.
3. 또한 리니어모터를 이송 유니트에 장착하여 정격 추력비 (실효 추력/모터 정격 추력) 100% 조건으로 운전을 하더라도 적용하는 유니트 조건에 따라 모터 코일 수렴온도는 차이가 발생하며 일반적인 조건에서는 100°C이하에 수렴하는 것으로 판단됨.

#### 참고 문헌

- (1) L. Honds and K. H. Meer, "A Linear D. C. Motor with Permanent Magnets", *Philips Tech. REV(Netherlands)*, Vol. 40, No. 11-12, 1982, pp. 329~337.
- (2) "리니어모터 應用 핸드북", 세화도서출판사, 1988, pp.146~148.
- (3) 矢島久志, "高速位置決め用 可動 코일形 리ニア直流 모터의 특성檢討", *電學論D*, 199券3号, 平成11年, pp. 315~320.
- (4) 白木 學, 官尾 修美, "圖解 리ニアサーボ모터와 시스템 設計", 總合電子出版社, 1985.
- (5) Amitava Basak, "Permanent-Magnet DC Linear Motors", CLARENDON PRESS, OXFORD