

고추력 저가동률 리니어모터에 관한 연구

방영봉*, 이경민**

Large Thrust Linear Motor for Low-duty-cycle Operation

Young-Bong Bang*, Kyung-Min Lee**

ABSTRACT

This paper presents a linear motor, which generates large thrust with a low operating rate. In industrial fields there is a need for actuators that work with a low duty cycle but generate large thrusts. An example of such a case is provided by the actuators for ejector mechanisms in electric injection molding machines. The ordinary LSM (linear synchronous motor) is unsuitable for this large-thrust and low-operating-rate usage, because of its large size and high cost. This paper contains experimental results on linear motors that can generate large thrusts for a short time, and which can be cheaply produced. The described linear motor could be contained space of 250mm × 250mm × 250 mm and generate a maximum thrust of about 20000 N at a current of 250 A.

Key Words : Linear motor(리니어모터), Large thrust(고추력), Voice coil motor(보이스코일모터), Ejector(이젝터), Injection molding machine(사출성형기)

1. 서론

기계 메커니즘에서 직선운동을 하는 부분은 상당히 많고 그들 중 많은 부분은 회전식모터와 '회전-직선운동변환기구'에 의해서 실현되고 있다. 리니어모터는 이 '회전식모터-직진운동기구'의 단점인 저 가속성, 백래시, 기구의 복잡성, 구동방향의 충격하중을 받을 수 없음 등을 해소할 수 있는 직접적인 해결책이지만 크기에 비해서 발생추력이 그다지 크지 않고 고가인 단점이 있다.

현재 시판되고 있는 리니어모터는 고속구동형 공작기계나 가동부의 운동량을 이용한 편칭기구, 초고속사출성형기의 사출기구 등에 사용되고 있다^[1]. 이러한 용도에서 리니어모터는 '회전식모터-직

진운동기구'와 마찬가지로 수십 퍼센트정도의 가동률을 고려하여 설계되어 같은 출력일 때 '회전식모터-직진운동기구'보다 크기가 커지고 고가가 되는 것을 피할 수 없다.

그러나 직선구동시스템 중에서는 간헐적으로 가동하며-즉 낮은 듀티비로 가동하며-가동시에는 큰 출력이 요구되는 경우도 있다. 전동식 사출성형기의 이젝터기구가 그 예이다. 이젝터기구는 계량, 사출 그리고 응고과정에서 작동을 하지 않으며 응고가 끝난 후 일순간 작동하여 성형품을 금형에서 제거한다. 이 경우 이젝터기구는 단지 수 퍼센트 정도의 가동률로 작동하게 된다. 그러나 이러한 이젝터기구의 가동시에는 금형의 리턴스프링을 압축해야 하고, 빠른 속도로 움직여 사이클

☞ 2002년 1월 2일 접수
* 서울대학교 기계항공학부
** 서울대학교 기계항공학부 대학원

타임을 줄여야 하므로 clamping force 50 tonf 정도의 전동식 사출성형기에서도 이젝터 메카니즘으로서 1 tonf 이상의 추력을 낼 수 있는 '회전식 서보 모터-풀리, 타이밍벨트식 감속기구-볼스크류'의 동력 메커니즘이 사용되고 있다. 만일 이 동력 메커니즘을 기존의 리니어모터로 대체하려고 한다면 이젝터기구의 크기가 커지고 - 특히 기존의 산업용 리니어모터는 길이가 긴 판형상이므로 설치가 곤란하다 - 가격이 매우 비싸져서 실용화시키기는 매우 부적합하다.

최근 사출 성형기의 추세가 유압식 사출성형기보다는 에너지 소비량의 절감과 유압유를 사용하지 않는 친환경성, 고제어성에 의한 정밀성형가능 등을 목적으로 전동식 사출성형기 사용을 선호하지만, 전동식 사출성형기의 이젝터 기구가 기존 유압식 사출성형기 이젝터 기구의 성능에 미치지 못하는 점이 문제가 되었다. 유압식 사출성형기는 직동운동을 하는 실린더에 의해서 이젝터기구를 구동하여, 소형화 되어있고, 고속이며, 이젝팅작업시에 이젝터 판이 급형에 부딪혀 충격을 가할 수 있는 장점이 있지만 기존의 회전식 모터를 사용하는 사출성형기는 그렇지 못하다. 즉, 소형 커넥터 등의 경량 제품을 성형하는 경우에 있어서 이젝터 판에 의해 밀려나간 성형품이 성형작업시 발생하는 정전기에 의해서 다시 끌려들어와서 급형 외부로 방출되지 않는 현상이 발생할 수 있다. 이 때문에 성형품 제거를 확실하게 하기 위해서 이젝터 판을 여러 번 움직이게 되고 이는 성형사이클을 길게 하지만, 이런 노력에도 불구하고 성형품이 급형으로부터 제거되지 않는 일이 발생하여 그 다음의 성형사이클에서 제거되지 않은 성형품에 의해 급형이 파손되기도 한다. 이 경우 유압식에서 처럼 급형에 충격력을 가할 수 있다면 그 충격시의 진동에 의해서 성형품이 확실히 제거될 수 있으나, 볼스크류 구조의 경우 충격력을 받을 수 없는 단점이 있다.

이러한 문제점들을 해결할 수 있는, 저가동물로서 가동하되 가동시에는 큰 추력을 발생하고, 간단한 구조로 값싸게 만들 수 있고, 충격력을 받을 수 있는 리니어모터를 개발하는 것이 이 연구의 목표이다. 이를 위해 기존의 행하여진 연구들을 조사해 보면 전기적인 힘에 의해서 순간적으로 큰 추력을 얻는 개념의 액추에이터에 관한 연구는 그다지 찾아볼 수 없고, 제한된 운동범위를 갖는

액추에이터보다는 유도전류와의 반발력을 이용한 전자성형이나, 포나 로켓 등의 발사를 위한 추력의 제공수단으로서 전자기력을 이용하는 것이 연구되었다. 예를 들어 Yamori 등은 레일건 실험에서 최대전류 700 kA 의 전류를 1.1 g 의 발사체에 흘려서 발사체를 6 km/s 의 속도로 발사하였다^[2]. Higuchi 등은 전자성형에 사용되는 것과 같은 방식으로 순간적인 큰 전류를 코일에 흘려서 이 코일이 만드는 강한 자기장과 유도전류에 의하여 발생하는 큰 힘으로 물체를 고속으로 이동시키는 연구를 행하였다^[3,4]. 이 경우는 콘덴서를 이용하여 순간적인 대전류를 코일에 흘리며, 코일에 흐르는 순간적인 전류 값은 10000 A 이상에 달했다. 또한 반발력 만을 발생시킬 수 있으므로 스트로크의 양 끝단에 코일을 설치하여 순차적으로 순간적인 강한 전류를 흘림으로써 이동체를 가속 및 정지시켰다. 이러한 방식들을 통해 전기 에너지를 이용한 고추력의 모터 제작이 가능하다는 것을 알 수 있으나, 위의 장치 들은 수백 암페어 정도의 전류용량으로 연속적으로 구동되는 전동식 사출성형기의 제어부와 직결되어 동작되기에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 고추력을 얻기 위하여 콘덴서에 전류를 모아서 순간적으로 방출하는 것 등은 하지않기로 하였다.

2. 고추력 모터에 관한 고찰

현재 공작기계나 산업용 제어기기에서 구동원으로 사용되는 전기 액추에이터의 대부분은 영구자석이 만드는 자속과 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하는 힘을 이용하는 것이며, 이 경우 발생토크 혹은 추력은 공급되는 전류에 비례하게 되어 제어성에 있어서 유리하게 된다. 그러나 이러한 비례관계는 영구자석에 의해서 공급되어 코일을 통과하는 자속밀도가 일정하다는 가정 하에서 성립한다. 실제로는 전류가 어느 한계를 넘어서면 코일에서 발생하는 기자력이 영구자석이 만드는 자속을 감소시켜서 전류의 증가에 따른 토크 혹은 추력의 증가량은 작아지기 시작하고 어느 값 이상으로는 토크 혹은 추력이 증가하지 않을 뿐 아니라, 코일의 강한 기자력이 영구자석을 감자시켜서 모터를 파손시키는 상태에 이르게 된다. 따라서 영구자석으로 자속을 공급하고 있는 형식의 액추에이터는 에너지 효율이 좋고 컴팩트한 사이즈로

만들 수 있는 장점이 있지만, 원리상으로 볼 때 어느 이상의 큰 힘은, 순간적으로라도, 발생될 수 없다. 전자포, 레일건, 전자성형 등 순간적으로 큰 힘이 발생하는 장치들은 어느 것도 영구자석을 사용하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 전자석에 의하여 자속을 공급하는 방식을 채택하였다. 또한 저가 생산을 위한 간단한 구조 및 고출력성, 제어성 등을 고려하여 보이스코일모터(Voice Coil Motor) 식이 적합하다는 결론을 얻었다. 기존의 보이스코일모터는 영구자석으로 자속을 공급하고 있으며 코일전류와 추력이 비례하는 특성을 가지고 있으나, 전류가 어느 이상이 되면 전술한 바와 같이 추력이 더 이상 증가하지 않고 수렴하게 된다(Fig. 1(a)). 반면 자속의 공급부에 전자석을 설치하고 전자석의 코일과 가동부코일을 직렬로 연결하여 전류를 흘리면 초기에는 전류의 제곱에 비례하여 추력이 증가하나 어느 이상 전류가 커질 경우는 전류의 증가에 거의 비례하여 추력이 커질 것으로 예상할 수 있다(Fig. 1(b)). 이것은 강자성체의 자화곡선이 마치 Fig. 1(a)의 추력곡선과 같이 포화되고 포화된 후에는 공기의 투자율에 의한 자속밀도의 증가만이 있기 때문이다. 즉 초기구간에서는 자속밀도의 증가와 가동부코일 전류증가의 효과가 곱해져서 거의 제곱에 가까운 추력증가를 나타내지만, 요크부의 자기포화로 코일을 통과하는 자속이 거의 증가하지 않을 경우는 코일에 흐르는 전류만에 비례하여 추력이 증가하게 되어 추력의 증가와 전류의 증가가 거의 비례하게 될 것으로 생각된다. 즉 낮은 전류영역에서 1 차적 '전류-추력' 특성을 가지던 영구자석식 액추에이터는 높은 전류영역에서는 0 차적 '전류-추력' 특성을 가지며, 낮은 전류영역에서 2 차적 '전류-추력' 특성을 가지던 전자석식 액추에이터는 높은 전류영역에서는 1 차적 '전류-추력' 특성을 가지게 된다. 따라서 작은 전류값에서는 영구자석형이 추력을 얻기에 유리하나 전류값이 커질 경우 전자석형이 유리할 것으로 판단된다. 물론 이와 같이 전류를 크게 한 경우는 코일에서의 발열도 심하여 고가동률로서 사용되기에는 문제가 발생할 수 있지만, 서론에서 언급한 것과 같이 순간적으로는 큰 추력을 필요로 하나 저가동률로서 가동되는 기구의 구동원으로서 사용이 가능하다.

3. 試作모터 1의 예비실험 및 결과

전 절에서 언급한 내용을 바탕으로 본 연구에서 전자석식 보이스코일모터를 기본형태로 하여 간단한 구조의 고추력 리니어모터를 얻을 수 있다고 판단하였다. 그러나 순간적으로 큰 전류를 흘리는 방식으로 전자석식 직류모터 혹은 유니버설모터를 구동한 예를 찾아볼 수 없었고, 실험을 해보기 전에는 큰 추력이 나오는 것에 대한 확신을 할 수 없었다. Fig. 2는 예비실험을 위해서 만든 전자석식 보이스코일모터이다. 간단한 구조를 취하기 위해서 축대칭형상으로 설계했고, 영구자석 대신에 코일에 의해서 가동부코일을 통과하는 자속을 공급하도록 하였다.

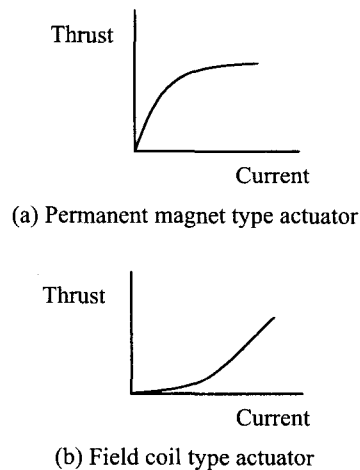


Fig. 1 Thrust of electromagnetic actuators in wide current range

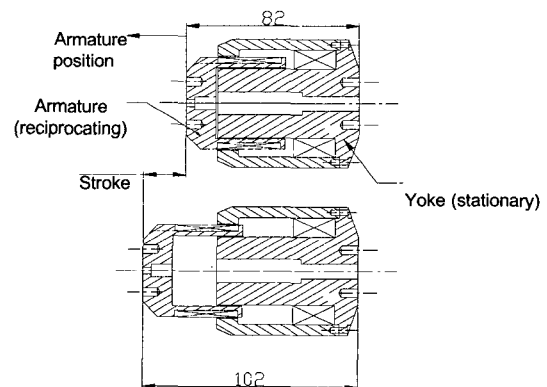


Fig. 2 Cross-sectional view of motor 1

Table 1 에 시작모터 1 의 사양이 나타나 있다. 요크(Yoke) 재료는 저가이며 가공이 쉬운 구조용 재료인 0.45%탄소강을 사용하였다. 만일 0.15% 탄소강 혹은 permendur 등 자기포화치가 높은 재료를 사용하면 더 큰 추력을 얻을 수 있을 것이다. 추력의 측정은 로드셀(CAS SB-200L)을 이용하여 행하였고, 가동부의 위치를 바꾸어가며 양방향 추력을 측정할 수 있도록 Fig. 3 과 같은 실험장치를 제작하여 실험을 행하였다. 구동회로 전원으로는 220 V 3 상교류를 정류하여 사용했으며, 전류의 입력 시간을 조절하기 위한 회로의 제작은 내부에 IGBT 와 구동 회로를 포함하고 있어 고압 회로의 제작에 용이한 IPM(intelligent power module : Mitsubishi PM400DSA060)을 사용 하였으며 이것으로 구성된 구동회로를 이용하여 60 ms 동안 전류를 흘려서 발생하는 추력을 측정하였다.

Table 1 Specifications of motor 1

Item	Specification
Yoke material	0.45 % carbon steel (S45C)
Material of moving part frame	Al 2014
Coil	Conductor diameter: 0.7 mm, 152 turns for armature and 250 turns for field, net resistance: 3 Ω
Material of experimental setup frame	Al 2014
Load cell for thrust measurement	CAS SB-200L

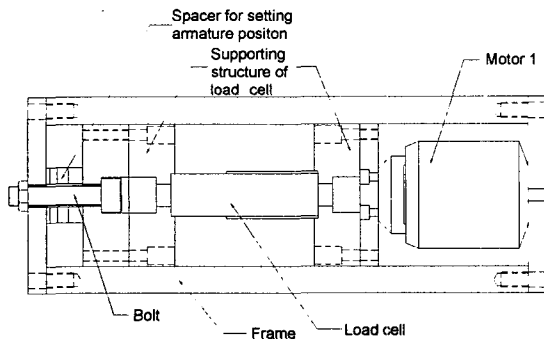
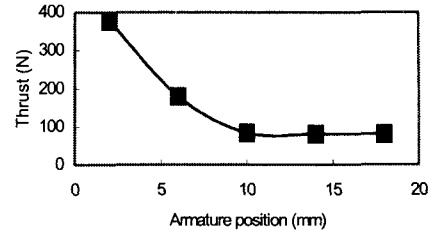
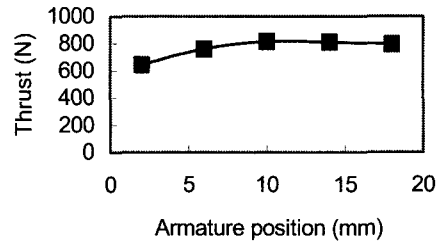


Fig. 3 Experimental setup of motor 1 for thrust measurement

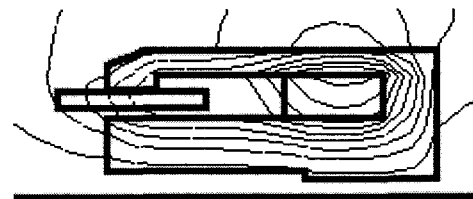


(a) Pushing thrust

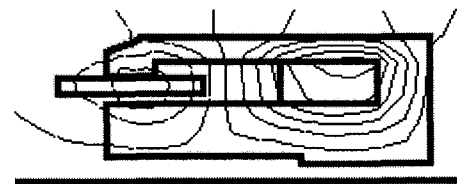


(b) Pulling thrust

Fig. 4 Thrust of motor 1 according to armature position (current = 100A)



(a) When the armature current and the field current are the same direction



(b) When the armature current and the field current are the opposite direction

Fig. 5 Magnetic flux in motor 1 at a current of 100 A

Fig. 4 는 시작모터 1 에 100 A 의 전류를 흘렸을 때 발생하는 추력을 나타낸다. 시작모터 1 의 경우, 같은 전류를 흘려도 가동부의 위치에 따라서 추력

이 변화하고 또한 계자코일과 가동자코일의 상대적인 전류방향에 따라서도 추력의 크기와 방향이 바뀐다. 이것은 Fig. 5의 수치해석결과로도 예측되는 것인데, 계자코일에서 발생하는 강한 기자력으로 인해 누설자속이 많고, 또한 가동자코일에서 발생하는 기자력이 가동자코일을 통과하는 자속수에 영향을 주기 때문이다. Fig. 5(a)는 가동자 코일과 계자 코일에 동일한 방향의 전류를 가하는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 가동자코일과 계자코일에서 동일한 방향으로 기자력이 발생되고 있다. 계자 코일에서 발생한 자속들의 많은 부분이 가동자 코일의 자속 흐름에 큰 영향을 받지 않고 가동자 코일을 통과 하고 있다. 이 경우 가동자코일의 기자력은 추력(흡인력)을 증가시키는 역할을 하게 된다. 그러나 Fig. 5(b)와 같이 가동자 코일과 계자 코일에 반대 방향의 전류를 흘리는 경우에는, 가동자코일과 계자코일에서 반대방향의 기자력이 발생하며 이로 인해 가동자코일의 기자력이 가동자코일을 통과하는 계자 코일의 자속 흐름을 방해하고 있어서, 계자 코일에서 발생한 자속들의 많은 부분이 가동자 코일에서 작용하지 못하고 외부로 누설되게 된다. 그 결과 발생추력이 흡인의 경우보다 작아지는 것을 예상할 수 있다.

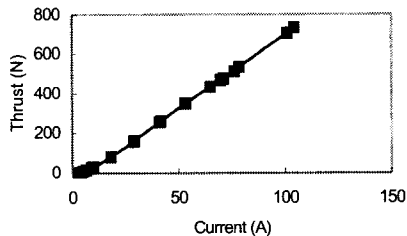


Fig. 6 Pulling thrust of motor 1 vs. current for armature stroke of 18mm

Table 2 Required specifications of linear motor for ejector mechanism

Item	Specification
Size	Below 250mm×250mm×250 mm including linear guide
Maximum thrust	Over 15000 N
Stroke	100 mm
Applied electric power	Below DC 300 V, 360 A

Fig. 6은 가동부의 위치가 18 mm (가동부가 고정부의 가장 안쪽으로 들어간 위치로부터 18 mm 나왔을 때) 이고 흡인력을 발생할 때, 전류의 변화에 따른 추력의 변화를 나타내고 있다. 전류가 작을 때는 추력의 변화가 전류변화의 거의 제곱에 비례하여 증가하고 있으나, 전류가 커질 경우(약 10 A 이상) 전류변화와 추력변화는 거의 선형적인 관계를 나타내고 있다. Fig. 4, Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 시작모터 1은 최대 800 N 이상의 힘을 발생하고 있고 이것은 같은 크기의 영구 자석식 보이스코일모터가 발생하는 추력의 수십 배에 해당된다. 따라서 시작모터 1을 통한 실험을 통해, 계자부에 전자석을 사용한 보이스코일모터에 순간적인 큰 전류를 흘리는 것에 의해서 큰 추력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 시작모터 1의 경우 추력계수(추력/전류)가 일정하지 않고, 특히 추력방향에 따른 그 값의 차이가 크게 나타나고 있다. 한쪽 방향으로만 큰 힘이 발생하는 점은 사출성형기의 이젝터기구나 편칭머신과 같이 한쪽 방향으로만 큰 힘이 필요한 경우에는 허용될 수 있는 점이나, 제어기의 구성을 어렵게 하므로 가능하다면 추력계수의 차이가 크지 않도록 할 필요가 있다.

4. 이젝터기구에 사용을 위한 고찰

앞에서 언급한 바와 같이 저가동률로 가동되며 큰 추력이 발생하는 리니어모터를 필요로 하는 곳의 하나가 전동식 사출성형기의 이젝터기구이다. 전동식 사출성형기 중에서 가장 수요가 많은 clamping force 500 - 1000 kN 모델의 경우, 이젝터기구의 최대추력은 10 kN 이상이 요구되며 상용제품의 경우 최대추력 15 kN 이상의 사양으로 되어 있다. 따라서 개발될 리니어모터도 최대추력 15 kN 이상을 발생할 수 있어야 한다. 그러나 순간적인 큰 전류를 흘리기 위해서 승압장치나 대용량 콘덴서 등이 부가적으로 필요하게 된다면 개발된 리니어모터의 효율성은 줄어들게 된다. 따라서 실제의 전동식 사출성형기, 공작기계 등에 손쉬운 적용을 위해서는 이러한 산업용기계의 제어기구에서 사용되는 전원모듈을 공통으로 사용하고 가능하다면 시판되는 앰프를 그대로 사용할 수 있으면 매우 유리하게 된다. 이러한 것을 고려해서 구동전압은 300 V, 구동전류는 360 A 이하로 모터에 공급되는

전력을 제한한다면 기존의 전원모듈과 앰프를 그대로 사용할 수 있게 된다. 이젝터기구에 적용을 위해서 필요한 리니어모터의 요구사양을 정리하면 Table 2 와 같다(이 사양은 전동식 사출성형기 제조사에 의해서 제시된 사양이다).

전절에서 언급한 시작모터 1 의 실험결과로부터, 시작모터 1 과 같은 구조의 리니어모터가 실제의 전동식 사출성형기에서 요구되는 사양을 만족시킬 수 있는가를 검토하였다. 상사관계로 생각해 볼 때,

1) 코일의 단위체적당 발생하는 열량을 일정하게 하는 조건으로 생각하면, 모터의 길이가 n 배가 되었을 때 부피는 n³ 배가 되고, 코일의 직경과 길이는 n 배, 가해지는 전압은 n 배, 따라서 전류는 n² 배가 된다. 또한 자속을 통과하는 가동자코일의 길이도 n 배가 되므로 자속밀도가 포화자속밀도로 일정하다고 할 때(실제로는 공기의 투자율에 의한 자속증가가 있다), 발생추력은 n³ 배가 된다.

수식으로 표현 하면 다음과 같다.

$$R' = \rho \frac{L'}{A'} = \rho \frac{nL}{n^2 A} = \frac{1}{n} R \quad (1)$$

$$I' = \frac{V'}{R'} = \frac{nV}{\frac{1}{n} R} = n^2 I \quad (2)$$

$$q' = Q' / Vol' = \frac{I'^2 R'}{n^3 Vol} = \frac{I^2 R}{Vol} = q \quad (3)$$

$$F' = BI' L' = n^3 BIL = n^3 F \quad (4)$$

여기서 R 은 코일 저항값, ρ 는 코일의 비저항 값, L 은 코일의 길이, A 는 코일의 단면적, V 는 앰프에서 가하는 전압, I 는 코일에 흐르는 전류, q 는 단위 부피당 발생하는 열량, Vol 은 모터의 전체 부피, F 는 발생추력 B 는 코일을 통과하는 자속 밀도를 나타낸다. 그리고 R',L',A',V',I',q',Vol',F' 은 모터의 크기를 n 배하는 경우의 저항, 길이, 단면적, 전압, 전류, 발열량, 부피, 추력 값들이다.

2) 모터에 가하는 전압과 전류를 일정하게 하는 조건으로 생각하면, 모터의 길이를 n 배로 했을 경우 코일의 단면적과 길이는 n^{1.5} 배가 되어야 하고, 전류는 제한조건에서부터 일정하므로 발생추력은 n^{1.5} 배가 된다.

수식으로 표현하면 다음과 같다

V, I : 일정

$$R' = \rho \frac{L'}{A'} = \rho \frac{n^{1.5} L}{n^{1.5} A} = R \quad (5)$$

$$(A_{tot}' = n^2 A_{tot} = n^2 AN_{turn} = A' N_{turn}') \quad (6)$$

$$L = \pi DN_{turn}, L' = \pi m DN_{turn}'$$

$$A' = \alpha A, L' = \beta L, \alpha = \beta$$

$$\therefore \alpha = \beta = n^{1.5}$$

$$F' = BI' L' = n^{1.5} F \quad (6)$$

여기서 N_{turn} 은 코일을 감은 횟수이며 N_{turn}' 은 크기를 n 배 한 경우의 값이다. 이외의 기호는 앞의 식과 동일하다.

3) 모터에 가하는 전압은 일정하게 하고 전류를 3.6 배 했을 경우(360 A), 코일저항은 1/3.6 이 되어야 하므로, 경우 2)의 수식을 이용해서 계산해 보면 코일의 길이는 2)의 경우보다 1/√3.6 배, 단면적은 √3.6 배가 되어야 하고, 발생추력은 2)의 경우보다 √3.6 배 즉 모터의 길이를 n 배 하기 전보다 √3.6 n^{1.5} 배가 된다.

위의 식들과 앞의 실험 결과를 이용하여 실제 사용하고자 하는 직경 250mm 의 모터에서 발생할 수 있는 힘을 알아 보도록 한다. 앞의 실험에서 모터의 직경은 60mm 이고 발생하는 최대 힘이 800N 이므로 실제 모터에서 가능한 추력은 다음과 같다.

$$1) \text{의 경우 } 800N \times (250/60)^3 = 57900N$$

$$2) \text{의 경우 } 800N \times (250/60)^{1.5} = 6800N$$

$$3) \text{의 경우 } 800N \times \sqrt{3.6} \times (250/60)^{1.5} = 12900N$$

1)의 경우 원하는 최대추력 15000 N 의 4 배 가까이 되나, 모터에 가해지는 전압이 1250V, 전류가 1740A 가 되어서 사출성형기 내부의 전원모듈과 구동앰프를 그대로 이용할 수는 없게 된다. 2)와 3)의 경우는 전압, 전류는 제한조건을 만족하나 최고추력이 15000 N 에 이르지 못한다. 즉, 시작모터 1 과 같이 기존의 보이스코일모터 구조에서 영구자석을 전자석으로 치환한 구조는 주어진 제한조건(전압, 전류제한을 포함)에서 원하는 추력을 얻

을 수 없음을 알 수 있다. 따라서 주어진 제한조건에서 15000 N의 추력을 얻기 위해서는 추력계수를 더 크게 할 수 있는 방법을 찾아야 한다. 또한 각 위치에 따른 추력계수의 변동이 크지 않도록 하는 것이 바람직하다.

5. 추력을 크게 하기 위한 구조

추력계수를 더 크게 하기 위해서는 자기회로를 효율적으로 구성하여, 강한 기자력 하에서도 누설자속이 많지 않도록 하며 또한 자속을 통과하는 코일의 길이를 되도록 길게 하여야 한다. 이와 같은 조건을 어느 정도 만족하는 리니어모터가 Fig. 7에 나타낸 리니어직류모터이다(two-pole type heteropolar DC linear motor)^[6,7]. 이 리니어모터는 1960년대에 개발되었었고, 누설자속을 줄일 수 있는 자로형태를 취하고 있으며, 자로 중에 에어갭이 2곳 있어서 자속을 통과하는 코일의 길이도 길게 되어 있다. 반면 이 형식의 리니어모터는 스트로크를 거의 취할 수 없어서 Fig. 7(a)와 같이 force motor로 사용되거나, Fig. 7(b)와 같이 브러시를 이용하여 긴 스트로크를 취하고 있었다. 이 모터의 실제 사용조건은 Table 3에 제시되어 있다. 코일의 윗면을 깎아내어 브러시를 통하여 전류를 공급하고 있는 탓에 큰 전류를 흘리지 않아, 결과적으로 현재의 회로류 영구자석을 사용한 보이스 코일모터보다도 작은 추력만을 얻고 있었다.

그러나 이 리니어모터는 좋은 자로형태를 가지고 있고 본 연구에서 추구하는 순간적으로 큰 힘을 내는 리니어모터에 적용될 수 있는 형태로 판단되었다. 단, AC 서보모터가 보편화되어 있는 지금 브러시를 사용하는 것은 유지보수를 고려하면 합당하지 않고 큰 전류를 흘리기 위해서는 더욱 그러하므로 코일이 상전환을 하는 등의 복잡한 구조를 가지지 않으며, 브러시를 사용하지 않고도 어느 정도의 스트로크를 취할 수 있는 형태를 얻으려고 노력했다. Fig. 8이 결과적으로 얻은 시작 모터 2의 단면도이다. 현재 목표로 하고 있는 바와 같이 큰 전류를 흘려서 순간적인 큰 힘을 얻으려고 하는 경우에는, 기자력이 충분히 큰 값을 가지므로, 기자력 값이 작아서 공극부에서 기자력의 강하치가 자속밀도에 큰 영향을 미치는 일반적인 전기 모터와는(Fig. 9(a)) 달리, 공극에서 기자력 강

하치가 자속밀도에 큰 영향을 미치지 않으며 요크부의 자속 밀도는 항상 포화 자속값에 가까운 값을 유지하고 있으므로(Fig. 9(b)), 에어갭으로 연결되는 부분의 요크 단면적을 줄이고 요크의 길이가 줄어든 만큼 스트로크를 취할 수 있도록 하였다. Fig. 10은 자속의 흐름을 보여주는 수치해석 결과이다. 강한 기자력으로 인하여 일반적인 전기모터보다는 누설자속이 많으나 누설자속을 포함한 대부분의 자속이 추력에 유효하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

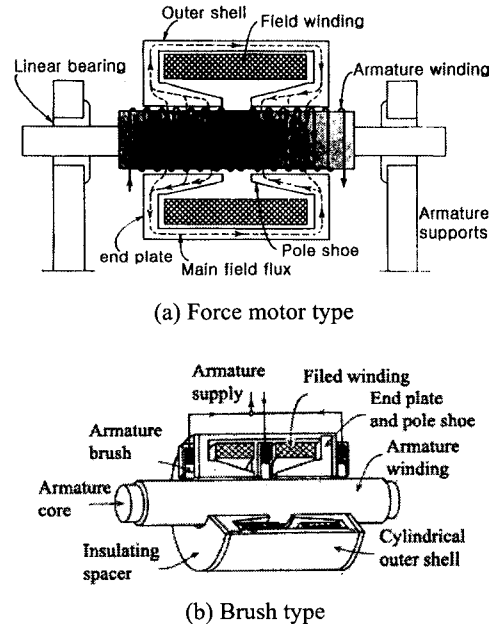


Fig. 7 Two-pole type heteropolar DC linear motor^[6,7]

Table 3 Operating conditions of the linear motor shown in Fig. 7(b)

Item	Specification
Applied voltage	DC 6 V
Total length excluding armature	120 mm
External diameter	86 mm
Mass excluding armature	1.8 kg
Thrust at 40% duty cycle	14 N at 0 m/sec

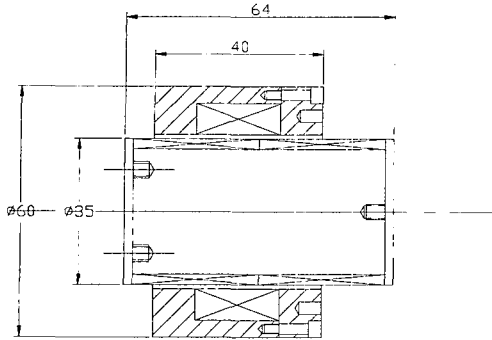


Fig. 8 Cross-sectional view of motor 2

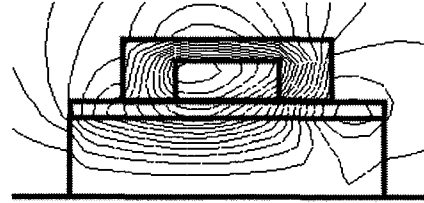
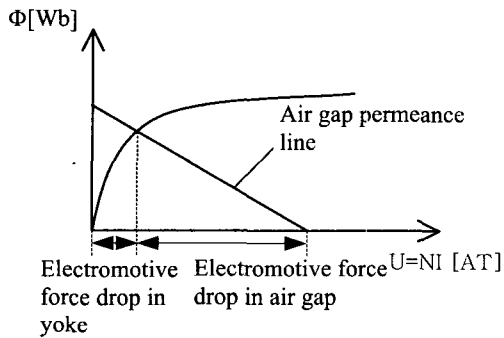


Fig. 10 Magnetic flux in motor 2 under 100A current

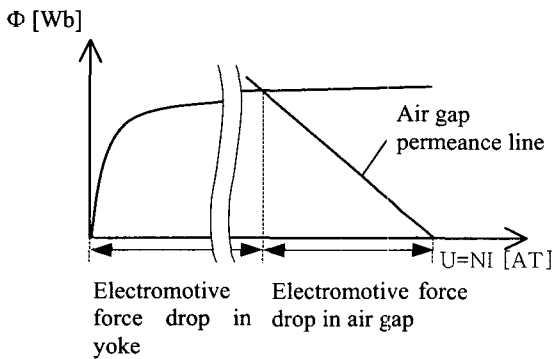
6. 試作모터 2 의 실험 및 결과

실험을 위하여 Fig. 8 에 나타난 것과 같은 모터가 제작되었고, 그 사양을 Table 4 에 나타낸다. 구동회로는 시작모터 1 의 실험에 사용한 구동회로를 사용했다. Fig. 11(a)에 전류증가에 따른 발생추력을 나타낸다. 시작모터 1 에서와 마찬가지로 처음에는 2 차적으로 증가하다가 전류가 어느 이상으로 커진 후는 전류와 추력이 거의 비례하는 관계로 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 낮은 전류 영역에서 전류와 힘의 관계와 그 결과를 2 차원으로 fitting 한 그래프이다. 낮은 전류 영역에서는 로드셀의 분해능 문제로 인해 정확하지는 않지만 근사적으로 전류와 힘이 2 차적인 관계를 보인다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 11(c)는 전류 100 A 를 흘렸을 때 가동자 위치에 따른 발생추력을 나타낸다. 시작모터 1 의 경우보다 추력의 변화가 심하지 않고, 1.5 배 이상의 추력을 발생하고 있음을 알 수 있다. 자로형태의 대칭성으로 인해서 전류의 방향이 반대일 경우는 추력패턴은 스트로크의 중심에 대하여 대칭이 된다.



(a) In case of ordinary electromagnetic motor

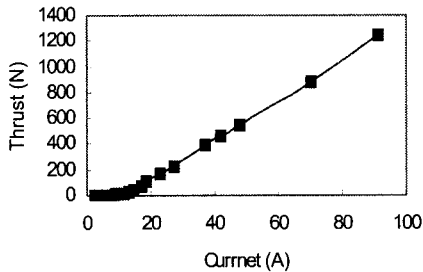


(b) In case of large thrust motor with large magnetomotive motor

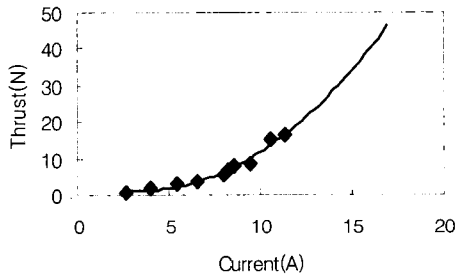
Fig. 9 Influence of air gap on magnetic flux

Table 4 Specifications of motor 2

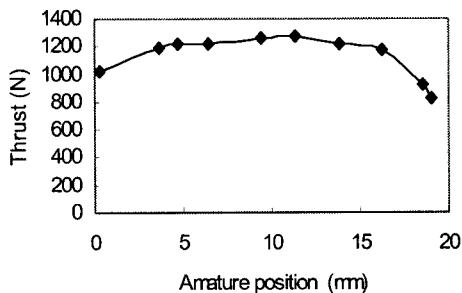
Item	Specification
Yoke material	0.45 % carbon steel (S45C)
Coil	Conductor diameter: 0.7 mm, 208 turns for armature and 304 turns for field, net resistance: 3 Ω
Material of experimental setup frame	Al 2014
Load cell for thrust measurement	CAS SB-200L



(a) Thrust vs. current (armature is located at the center of stroke)



(b) Thrust vs. current at low current (fitting in second order)



(c) Thrust according to armature position (current = 100A)

Fig. 11 Thrust of motor 2

7. 試作모터 3 의 실험 및 결과

앞의 실험을 통해서 시작모터 2 는 시작모터 1 보다 크기가 작음에도 불구하고 같은 전류에서 더 큰 추력을 얻을 수 있고 추력계수의 변동도 적음

을 알 수 있었다. 이와 같은 구조의 리니어모터가 Table 2 에서 언급한 이젝터기구 요구조건을 만족하는지 실험을 통하여 확인하기 위해서 Fig. 12 에 나타낸 시작모터 3 을 제작했다. 시작모터 3 은 248mm × 248mm × 250 mm 의 크기로 Table 2 의 크기제한조건을 만족하고 있다. 시작모터 2 와 마찬가지로 中空형의 코일을 내장한 가동부와 원통형의 고정자로 구성되어 있으며, 가동부는 미끄럼부싱과 연마봉에 의해서 직진안내되고 있다(Fig. 13). 영구자석을 사용하고 있는 리니어모터의 경우, 영구자석에 의한 흡인력은 발생추력의 수배나 되어^[5] 코일관과 자석판이 휘지 않도록 견고한 프레임에 고정되어야 하므로 모터만으로는 가동부를 구성할 수 없고, 직동가이드도 상당한 하중에 견딜 수 있는 것이어야 하므로, 실제 리니어모터로 인해 소요되는 면적은 더욱더 커지게 된다. 보이스 코일모터의 경우 영구자석식 리니어모터에서와 같은 불평형력(자석 흡인력)을 발생하지 않으므로 직동가이드도 미끄럼부싱 등으로 간단히 구성할 수 있는 장점이 있다. 시작모터 3 의 요크재료는 손쉽게 구할 수 있고 저가인 구조용 강재 SS400 을 사용했다. 탄소함유량이 시작모터 1 과 2 에 사용한 S45C 보다 낮아서 추력발생에 조금 더 유리하다. 실험장치에 구속된 상태에서의 스트로크는 80 mm 로 요구사양 100 mm 에는 이르지 못하지만 리니어가이드부를 제거하고 사출성형기 본체 등에 고정된다면 추력이 감소하는 영역을 이용하여 100 mm 스트로크도 얻을 수 있다.

실험장치는 앞의 두 경우와 마찬가지로 리니어모터를 고정하는 프레임과 위치를 바꾸어가며 추력을 측정할 수 있는 로드셀로 구성되어 있다. 추력을 측정하기 위해서 사용한 로드셀은 CAS SBA-5 이다. Table 5 에 시작모터 3 실험장치의 사양을 나타낸다. Fig. 14 는 실험결과를 보여준다. 250 A 에서 20000 N 정도의 추력을 얻을 수 있고, 가동부 위치변동에 따른 추력변화도 적음을 알 수 있다. 시판되는 고성능 리니어모터로서 300 V, 180 A / 360 A 의 전력공급으로 15500 N 의 최대추력을 발생하는 리니어모터^[5]와 비교하면, 모터의 체적은 비슷하나 길이가 1/4 정도로 짧아져서 이젝터기구에 사용하기에 적합하고, 최대추력은 20000 N 으로 커졌으며, 영구자석을 쓰지 않고 훨씬 간단한 구조를 취함에 의해서 생산비용을 대폭으로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

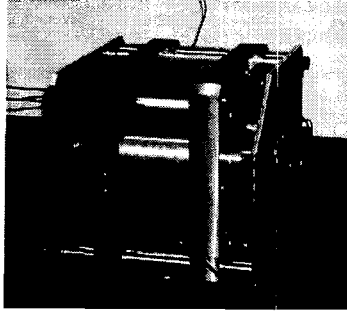


Fig. 12 Motor 3

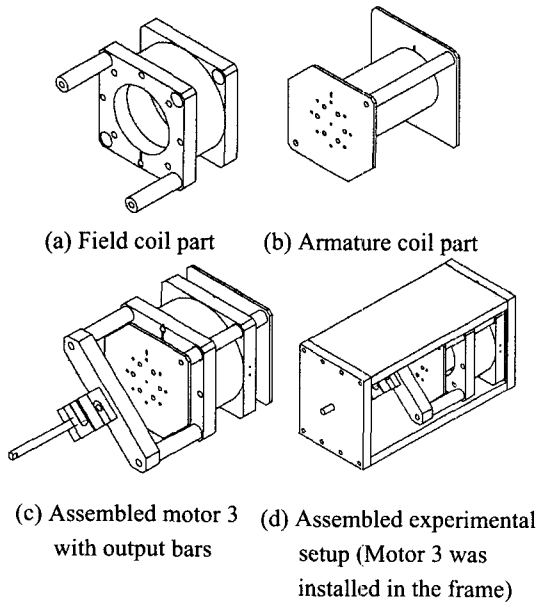
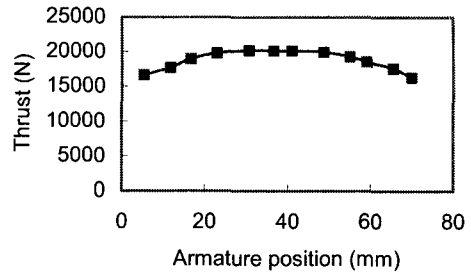


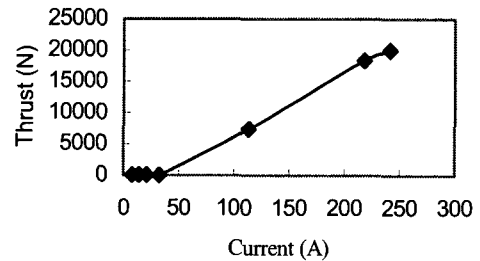
Fig. 13 Experimental setup of motor 3 for thrust measurement

Table 5 Specifications of motor 3

Item	Specification
Yoke material	SS400 (structural rolled steel, yield strength is 400-510 N/mm ²)
Coil	Conductor diameter: 2.6 mm, 203 turns for armature and 344 turns for field, net resistance: 0.98 Ω
Material of experimental setup frame	Al 2014
Load cell for thrust measurement	CAS SBA-5



(a) Thrust vs. current (armature is located at the center of stroke)



(b) Thrust according to armature position (current=250 A)

Fig. 14 Thrust of motor 3

8. 결론

사출성형기의 이젝터기구와 같이 저가동물로 작동하나 작동시에는 큰 힘을 필요로하는 경우가 있고, 이 경우 기존의 동기형 리니어모터를 사용하는 것은 크기와 가격에 있어서 불리하다. 이러한 경우 전자석식 보이스코일모터는 하나의 해결 방안이 될 수 있다. 즉,

1. 전자석식 보이스코일모터에 흐르는 전류를 증가시켜갈 경우 초기에는 전류의 제공에 비례하여 추력이 증가하고, 전류 값이 어느 이상이 될 경우는 전류의 증가에 비례하여 추력이 증가하게 된다.
2. 영구자석을 사용한 모터의 경우 자기포화에 의해서 추력증가가 한정되는 반면, 전자석식 계자를 갖는 경우 큰 전류를 흘림에 의해서 큰 추력을 얻을 수 있다.
3. 전자석식 보이스코일모터는 영구 자석식 동기형 리니어모터에 비해서 간단한 구조이므로 생

산비의 면에 있어서 유리하다.

4. 전자석식 보이스코일모터는 영구 자석식 동기형 리니어모터와는 달리 가동자, 고정자 간의 흡인력을 발생하지 않으므로 가동자의 지지구조를 간단히 할 수 있다.

후 기

이 연구는 서울대학교 발전기금 일반학술연구비의 지원에 의하여 행하여졌습니다.

참고문헌

1. Y-B Bang and S Ito, "Linear Motor Drive Ultra High Speed Injection Molding Machine," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, To be published.
2. Akira Yamori, Masahisa Yanagisawa, Kei-ichi Sato, Nobuki Kawashima. Rail gun experiment (HYPAC) at ISAS. IEEE Transactions on magnetics 1991; 27(1):126-129.
3. I. Aoki and T. Higuchi, "Quick stopping system of high-speed movement by electromagnetic force and its applications," Proceedings of the Third International ISEM Symposium on the Application of Electromagnetic Forces, pp. 523-526, 1992.
4. Yusof Hojjat and Toshiro Higuchi, "Application of Electromagnetic Impulsive Force to Precise Positioning," International Journal of The Japan Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 39-44, 1991.
5. FANUC Linear motor catalogue, 2001.
6. S. A. Nasar, I. Boldea, "Linear motion electric machine," A Wiley-Interscience Publication, pp. 28, pp. 244-255, 1976.
7. C. W. Green and R. J. A. Paul, "Application of dc linear machine as short stroke and static actuators," Proc. IEE, Vol. 116, pp. 599-604, 1969.