

# Switched Reluctance 형 비접촉 선형 스테이지를 위한 구동 알고리즘

이상현<sup>#</sup>

## A Driving Algorithm for a Switched Reluctance type Contact-Free Linear Stage

Sang Heon Lee<sup>#</sup>

### ABSTRACT

Recently in the field of precision positioning device, the contact-free stages are gaining focuses with their outstanding performances by eliminating mechanical frictions. This paper presents the driving algorithm for contact-free linear stage based on switched reluctance principle. The proposed driving algorithm has a similar structure of that of switched reluctance motor but this study has its own originality in terms of reducing the normal forces and force ripple at the same time. The simulation and experiment are executed to verify the proposed algorithm.

**Key Words** : Contact-free linear stage (비접촉식 선형 스테이지), Linear motor (리니어 모터), Driving algorithm (구동 알고리즘), Magnetic suspension(자기부상)

### 1. 서론

급속한 전자부품의 미세화와 반도체의 회로집적기술의 발달로 생산기술의 기존의 기계적 가공에만 한정되지 않고, 화학적 광학적 방법에 의해서 확대되고 있다. 이러한 생산기술을 뒷받침하기 위하여 초정밀 위치결정기구가 요구되고 있다. 초정밀 위치결정기구를 개발하기 위한 기반요소로서 액추에이터의 개발이 병행되는데, 기계적 접촉을 배제하여 위치결정기구의 성능향상과 기구의 생산비절감을 가져올 수 있는 비접촉식 구동기가 각광을 받고 있다. 비접촉식 구동기에서의 추진력은 주로 전자기력을 이용하며, 힘의 발생원리<sup>1</sup>에 따

라서 코일과 영구자석간의 상호작용을 이용하는 영구자석형과 자속의 정렬현상으로 설명이 되는 가변 자기저항(variable reluctance)형으로 크게 나눌 수 있다. 영구자석형은 보통 공심형 전자석이 이용되기 때문에 비선형적인 특성을 줄일 수 있어, 공압베어링을 이용한 정밀기기에 많이 이용되고 있다.<sup>2</sup> 그러나 자유도 확장면에 있어 솔레노이드의 부피가 증가하기 때문에 이에 따른 열문제 발생과 높은 제조가격을 필요로 하는 단점이 있다. 한편, 가변 자기저항형은 영구자석형에 비해 큰 힘을 얻을 수 있어 구동기 자체의 열발생이 적으며, 유효구동거리의 확장이 영구자석형보다 유리하다. 그러나 영구자석형과는 달리 폴의 끝단에서 발생

✉ 접수일: 2005년 6월 8일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

# 교신저자: 국립 안동대학교 기계공학부

Email shlee@andong.ac.kr Tel. (054) 820-5908

하는 자기력의 요동과 구동자와 고정자의 폴의 상대거리에 따른 자기력이 변하기 때문에 정밀구동 시스템에는 많이 적용되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 단점을 극복하기 위한 연구가 시도되고 있고, 그 적용분야도 점점 넓어지고 있다.<sup>3</sup> 현재까지 성능향상을 위해 진행된 관련연구로 Yusuf Ozoglu 등에 의해 일정한 자기력을 얻기 위한 폴의 형상을 최적화하는 하는 연구가 수행되었다.<sup>4</sup> 그리고 드라이버와 제어기관점에서 성능향상을 위하여 구간별 구동알고리즘을 세분화하는 방법이 Husain I 등에 의해 제안되었고,<sup>5</sup> 슬라이드 모드 제어를 이용한 제어방식도 Nihat Inanc 등에 의해 진행되었다.<sup>6</sup> 그러나 이들 연구는 수직방향으로의 외란이나 자기요소간에 작용하는 수직력이 구조적으로 해결되는 회전형 모터나 LM 가이드에 의해서 지지되는 선형모터를 대상으로 하였다. 한편 본 연구에서의 적용대상인 비접촉식 선형 구동기는 자기력에 의해 부상되기 때문에 추진력과 동시에 발생하는 수직력은 시스템의 안정도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 추진력과 동시에 이에 동반되는 수직방향으로의 힘까지 고려하는 구동 알고리즘을 연구한다. 2 장에서는 본 연구에서의 대상으로 하는 비접촉식 선형 구동기의 구조와 구동원리에 대해서 간략히 설명하고, 3 장에서는 구동알고리즘에 대해서 자세히 다루며, 4 장에서는 모의실험과 실험결과를 통해서 제안된 구동알고리즘을 검증한다.

## 2. 비접촉 선형 구동기의 구조 및 구동원리<sup>7</sup>

### 2.1 구조

본 연구에서의 적용대상이 되는 시스템의 구조는 Fig. 1 과 같다. 상부 고정자에는 네 개의 전자석이 부착되어 이동자의 철펠과 상호 작용하여 부상력이 작용하고, 하부 고정자의 추진을 위한 전자석과 이동자 하부에 돌출된 폴들과의 상호 작용에 의하여 추진력이 작용한다. 변위측정은 세 개의 정전 용량형 비접촉 변위센서에 의해 면의운동(out-of-plane motion)과 측면의 레이저변위센서에 의해 구동자의 이동거리가 각각 측정된다. 여기서 이동자는 수동요소만으로 구성되어 외부장치와 완전히 분리된 형태의 자기부상이 이루어진다. Fig. 2(a)는 구동원리와 이동자와 고정자에서의 폴의 배치를 나타내는데, 이동자의 폴 개수는 고정자의

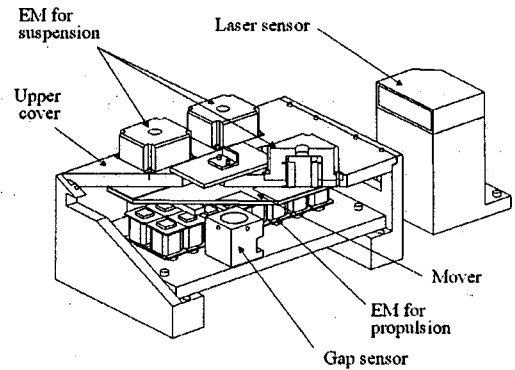


Fig. 1 Schematic of the contact-free linear actuator

폴의 개수와 상(phase)의 개수에 상관관계로 정해지는데 본 연구에서 채택한 조합은 회전모터로 등가화시킬 경우 고정자/이동자의 비가 6/4 인 3 상 모터에 해당되며, 참고문헌에서 적용한 모델과는 약간의 차이가 있다.<sup>17</sup> 고정자와 이동자는 모두 같은 폭의 폴을 가지며, 대칭적인 추진력을 얻기 위하여 이동자 폴의 간격은 폴의 폭 두 배값을 가지도록 설계되었다. 비접촉식 구동기에서의 정밀도는 서보장치의 한계 즉 제어기와 센서에 의해 정해지기 때문에 센서의 정밀도를 제어정밀도로 정하였으며, 운동범위는 30mm로 설정하였다.<sup>7</sup>

### 2.2 구동원리

구조에서 알아본 바와 같이 부상력과 추진력이 이동자의 양면에 작용하여 부상과 동시에 추진이 가능하다. Fig. 2(b)에서 이동자에 작용하는 힘을 보면, 상부고정자의 네 개의 전자석의 부상력에 의해 3 자유도 면의운동이 제어되며, 하부 고정자의 전자석에 의해서 1 자유도의 직선운동이 이루어진다. 전자석의 결선과 구동법은 3 상 스위치드 릴럭턴스 모터(switced reluctance motor, SRM)와 동일한 형태로 Fig. 2(a)에서 전자석은 A, B, C 세 개

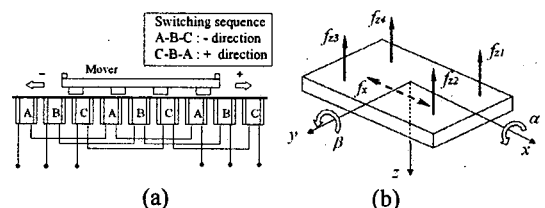


Fig. 2 (a) Operating principle (b) force diagram

의 상으로 각각 직렬 연결되며, 이동자의 위치와 구동방향에 따라서 각 상에 전류가 인가된다. 이때, 한 상의 여자에 의해서 이동자의 중심으로 양측에 대칭적으로 힘이 작용하게 된다. 이동자의 진행은 Fig. 2(a)에서 A-C-B 순으로 여자되면 우측 방향으로 이동하고, B-C-A 의 순으로 여자되면, 좌측 방향으로 이동하게 된다.

### 3. 구동 알고리즘

앞 장에서 설명하였듯이 기 개발된 시스템에서의 구조와 구동원리는 3 상 SRM 과 유사하지만 LM 가이드와 같은 지지부가 없기 때문에 안정된 구동을 위해서는 기존의 구동방식과는 다른 구동 알고리즘이 제안되어야 한다. 따라서 본 목표에 부합하는 구동알고리즘의 개발하기 위해 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다. 우선, 시스템 구동시 추진용전자석에서 부가적으로 발생하는 수직력은 스위칭에 따라 그 정량적 특성이 예상가능하여 부상용전자석에 의해 보상될 수 있지만, 수직력 자체가 너무 클 경우 부상용전자석의 부하증가로 인해 시스템이 불안정해질 가능성이 있다. 따라서 추진시 동반되는 수직력이 작을수록 시스템의 안정도와 제어능력 확보면에서 유리하다. 그리고 SRM 에서 풀 끝단에서 발생하는 자기력의 요동과 스위칭시 급격한 입력의 변화로 인한 자기력의 요동을 줄여 구동기의 성능을 높이도록 하여야 한다.

#### 3.1 자기력 분포

우선 스위칭 알고리즘을 다루기 앞서 자기력의 분포를 알아보면, 전자석에서의 자기력은 철심의 자기포화나 이력의 특성으로 인해 비선형으로 나타나기 때문에 폐형해를 구하기가 힘들다. 따라서 자기력의 정보를 얻기 위해 실험이나 유한요소 해석법을 이용한 계산을 통해 구해지는 룩업테이블(look-up table)을 만들기도 한다. 그러나, 철심이 포화가 되지 않을 정도로 전류를 인가하며, 이력 특성을 선형으로 근사할 경우 폐형해를 구할 수 있다. 이러한 가정으로 추진용 전자석에 의한 수평력과 수직력은 아래와 같이 구할 수 있다.<sup>7</sup>

$$f_h = -\frac{\partial W_m}{\partial x} \quad (1)$$

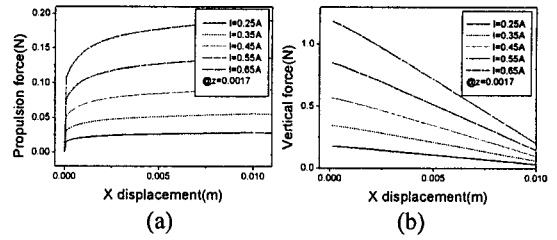


Fig. 3 Force characteristics w.r.t. displacement (a) Horizontal force (b) Normal force

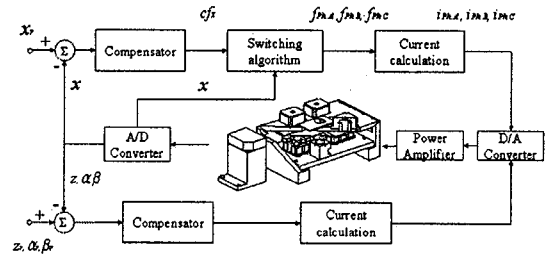


Fig. 4 Block diagram of the closed-loop control system

$$f_v = -\frac{\partial W_m}{\partial z} \quad (2)$$

여기서,  $W_m$  은 저장된 자기에너지를 나타내며  $f_h, f_v$  는 각각 수평력과 수직력을 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 한 주기에 대해서 도식화하면, Fig. 3 과 같다. 수직력은 이동자와 고정자의 두 풀이 완전히 일치된 점( $x=0$ )을 기준으로 대칭적으로 값이 나타나며, 수평력은 부호가 반대로 나타나기 때문에 일정한 추진력을 얻기 위해서는 풀의 상대위치에 따른 스위칭이 이루어져야 함을 알 수 있다. 그리고, 여기서 수직력은 이동자를 아래로 끌어당기는 힘으로 상부 고정자에 의한 부상력에 반하는 힘을 나타낸다. 폐형식 (1)과 (2)를 통해 원하는 수평력에 대해서 인가전류를 구할 수 있다.

#### 3.2 제어기의 구조

본 연구에서는 부상을 위한 제어기는 언급하지 않고, 추진을 위한 제어기에 대해서 집중적으로 다룬다. Fig.4 는 추진을 위한 제어기의 블록 다이어그램을 나타낸다. 변위 명령( $x_r$ )에 대해서 PI 제어기에서는 센서를 통해 측정된 이동자의 위치에 따라서 제어를 위한 명령값( $c_f$ )을 결정한다. 그러면 이동자의 위치와 이동방향에 따라 스위칭

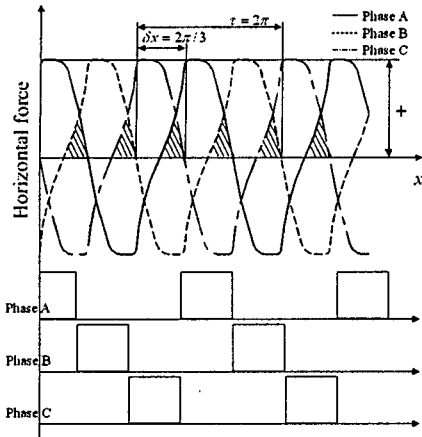


Fig. 5 Schematic switching principle

알고리즘에서는 각 위상에 대해서 제어명령 값을 분배 한다. 각 위상의 필요 전류값은 앞서 힘과 전류의 관계식을 통해서 구해진다. 여기서, 스위칭 알고리즘은 이동자의 위치에 따른 각 위상의 전류를 결정한다고 볼 수 있기 때문에 정류자(commutator)의 역할을 한다고 생각할 수 있다.

### 3.3 스위칭 알고리즘

본 시스템에서의 스위칭 알고리즘은 직류모터에서의 정류자와 동일한 역할을 한다. 그러나, 직류모터에서의 정류자와는 달리 각 위상에서 작용하는 추진력을 분배할 수 있는 자유도를 가지고 있다. 따라서 폴의 끝단 또는 스위칭이 일어날 때의 추진력의 요동을 감소시킬 수 있는 특징을 가진다. 우선, 기본적인 스위칭 알고리즘을 Fig. 5로 알아보면, 일정한 전류에 대해 각상에 대한 추진력은  $2/3\pi$ 의 위상차( $\delta x$ )를 가지고 주기적으로 반복된다. 여기서 +부호로 표시된 부분은 양의 추진력을 나타내는데, 이동자가 양의 방향으로 이동하기 위해서는 이동자의 위치정보에 따라 Fig. 5의 하부 그림에서와 같이 해당 위상에 위치 한 전자석이 여자되어야 한다. 그림에서 각상에 배분되는 물리량은 경우에 따라 추진력이나 인가전류가 될 수 있는데, 전류와 자기력간의 관계에서 폐형해를 구할 수 없어 록업테이블을 이용하는 경우에는 인가전류값을 이용하며, 본 연구에서처럼 근사한 폐형해를 구할 수 있는 경우에는 추진력을 배분한다. Fig.5의 하부 그림에서처럼 추진력 배분 함수 역시 주기함수의 형태를 나타내는데, 한 주기내에서 추진력 특성곡선에 따른 각 위상의 스위칭은 다음 식과 같이 이루어 질 수 있다.

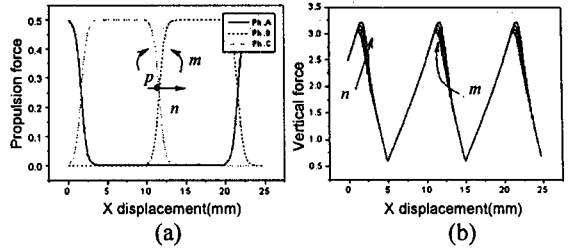


Fig. 6 (a) phase forces, (b) the total normal force of all phases

$$\text{Phase A: } x_0 < x < x_0 + \tau/2 \quad (3a)$$

$$\text{Phase B: } x_0 + \delta x < x < x_0 + \delta x + \tau/2 \quad (3b)$$

$$\text{Phase C: } x_0 + 2\delta x < x < x_0 + 2\delta x + \tau/2 \quad (3c)$$

여기서,  $x_0$ 는 초기 읍셋값을 나타내며,  $\tau$ 는 주기로서 개발된 시스템에서 30mm에 해당된다. 식(3)은 그림에서 빗금으로 친 중복구간이 모두 포함되도록 설정되었기 때문에 각 상이 작동되는 최대구간을 의미한다. Fig. 5에서는 기본적인 스위칭 개념을 나타내기 위해서 각 상에 배분되는 추진력이 사각파의 형태로 나타내었으나, 만족스러운 성능을 얻기 위해서는 분배함수의 형태 그리고 식(3)에서 함수의 지속구간의 길이등의 변수를 고려하여야 한다. 다양한 경우의 스위칭에 대해서 그 결과를 보면, 스위칭구간의 힘 분포함수의 차수가 높아지거나,<sup>9</sup> 곡선에 가까워질수록 높은 성능의 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.<sup>10</sup> 따라서, 본 연구에서는 지수함수의 형태를 유지하며 두개의 파라미터에 의해서 곡선의 기울기와 전이구간이 결정되는 특성을 가지고 있는 sigmoid 함수를 이용하여, 힘 분포함수를 정의하였다. 식(4)는 sigmoid 함수의 기본형태를 나타내는데, 이 함수를 이용할 시, 힘 분배를 두 개의 파라미터만을 이용하여 체계적으로 할 수 있는 장점이 있다.

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{mx-n}} \quad (4)$$

여기서, 파라미터  $m$ 과  $n$ 은 각각 기울기 및 전이 구간결정 상수이다. Fig. 6은 힘분포함수와 추진력에 동반된 수직력의 총합을 각 파라미터값의 변화에 따라서 나타내는데, 파라미터  $n$ 이 고정된 상태에서 파라미터  $m$ 이 증가하면 상변화구간에서 함수의 기울기가 증가하고, 파라미터  $m$ 이 고정된

상태에서 파라미터  $n$  이 증가하면, Fig.6(a)에서 교차점  $p$  는 오른쪽으로 이동하고, 수직력은 증가한다. 이 결과로부터 작은  $m$  와  $n$  의 값이 유리해 보이나, 함수의 연속성을 유지하기 위해서  $m, n$  의 값은 한정된 영역 내에서 선택되어야 한다. 그래서, 전 구간에 대해서 수직력을 최소화하는 것을 목적으로 파라미터 최적화를 수행하였다. 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Min. } \Phi(a, b) = \int_0^{op} f_{zsum} dx, \quad (5)$$

$$(f_{zsum}(x) = f_{za}(x) + f_{zb}(x) + f_{zc}(x))$$

s.t.

$$g_1 = -f_{zsum} < 0$$

$$g_2 = \left| \frac{\Delta F_a}{\Delta x} \right| - \varepsilon < 0, \quad g_3 = \left| \frac{\Delta F_b}{\Delta x} \right| - \varepsilon < 0,$$

$$g_4 = \left| \frac{\Delta F_c}{\Delta x} \right| - \varepsilon < 0$$

여기서,  $f_{zsum}$  은 이동자의 위치에 따른 A, B, C 상에서의 수직력의 총합을 나타내고,  $g_{1-4}$  는 구속함수로서 분배함수가 불연속일 경우, 함수의 구배가 큰 값으로 변하기 때문에 연속성확보를 위해 분배함수의 구배가 일정값( $\varepsilon$ )을 넘어가지 않도록 설정하였다. 최적화작업을 통하여, 수직방향으로의 힘이 약 10% 감소되었다. 이 결과와 초기치는 표 1에 정리하였고, 전 구간에 적용된 Sigmoid 형태의 힘분배 함수를 적용한 구동알고리즘은 부록에 정리하였다.

Table 1 Initial values and optimized results

	Initial spec.	Optimized spec.
$m$	0.075	0.0523
$n$	120	107.2
$\int f_{zsum} dx$	41290 N	37219N
Initial value		
Control force ( $cf_x$ )	1 N	
Air gap ( $z_0$ )	1.2 mm	
Coil turns	335	

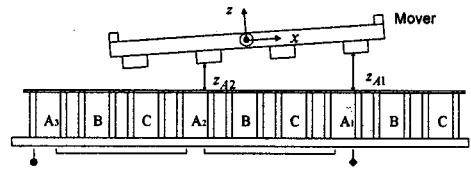


Fig. 7 Side view of the contact-free linear actuator with the inclined mover

### 3.4 입력전류 계산

본 연구에서 제안된 구동원리가 적용되는 시스템은 상부의 전자석에 의해 지지가 되기 때문에, Fig. 7 과 같이 회전이 일어날 수 있다. 이로 인해서 이동자의 풀과 고정자의 풀사이의 상대거리가 변하게 되는데, 단상으로 구동되는 경우에는 이 변화가 시스템의 구동에는 큰 영향을 미치지 않지만, 3상으로 구동되는 경우에는 각 전자석( $A_1, A_2$ )에 동일한 전류가 인가되기 때문에 예상 하지 못한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이동자의 회전에 따른 문제점을 줄이기 위해 다음과 같은 계산방법이 사용되었다. 추진력은 3.1 절에서 구한 것과 같이 변위와 전류의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x, z, i) = k \frac{i^2}{(x+z)}. \quad (6)$$

제어법칙에 의해서 결정되는 제어력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$cf_x = f_{A1}(x_{A1}, z_{A1}, i_A) + f_{A2}(x_{A2}, z_{A2}, i_A) \quad (7)$$

그러면, 전자석에 인가되는 전류는 다음과 같이 구해진다.

$$i_A = \frac{cf_x}{k_{A1} + k_{A2}} \quad (8)$$

여기서  $k_{A1} = k/(x_{A1} + z_{A1})$ ,  $k_{A2} = k/(x_{A2} + z_{A2})$  로 각각 정의된다.

## 4. 실험 및 실험 결과

본 장에서는 제안된 구동알고리즘을 적용한

실험결과에 대해 서술한다. 실험결과에 서술에 앞서 실험장치의 구성에 대해 알아보면, 이동자의 수평 이동변위는 레이저 변위 센서 (PSD, Hamamatsu co.)로 측정되고, 부상방향으로의 변위는 정전용량형 센서(Micro-Epsilon, SD-20)으로 측정된다. 실험은 하위 레벨의 제어개념 없이 주 제어기에서 모든 과정을 처리하는 단일 스테이지 방식으로 구동되었다. 주 제어기는 셀러론 마이크로 프로세서가 사용되었다. 제어명령의 출력과 궤환 제어를 위한 입력신호의 변환은 각각의 D/A (Advantech co. PCL-726, 12bit), A/D(Advantech co., PCL-817, 100KHz 16-bit.)보드가 이용되었다. 그리고, 7 채널의 직류 파워증폭기 (GA455P, Glentek)를 사용하여 부상용 전자석과 추진용 전자석을 구동하였다.

Fig. 8 은 제안된 구동알고리즘을 적용한 실험 결과를 나타내는데, Fig. 5 에서와 같은 스위칭이나

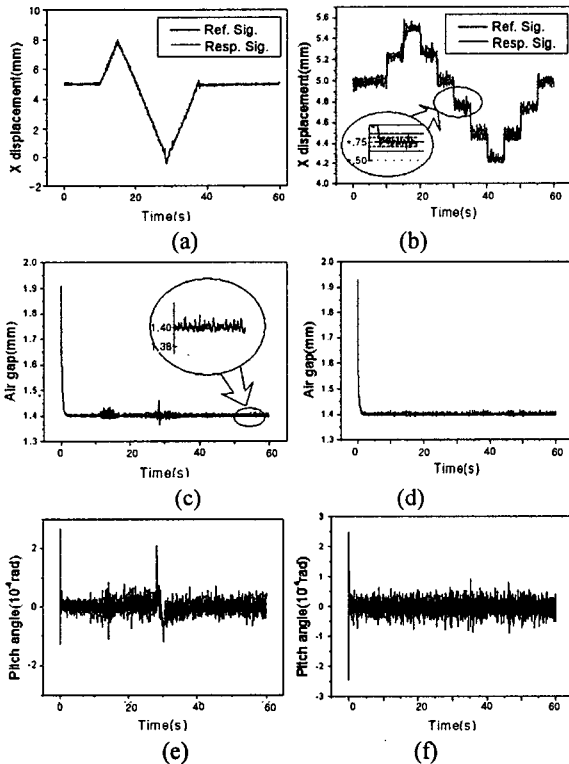


Fig. 8 Experiment results in left column are for linear motion and the results in right column are for 250  $\mu$ m step motion. (a) and (b) x displacement, (c) and (d) Air gap, (e) and (f) Pitch angle

기존의 회전모터나 가이드지지형 선형모터에 적용되는 구동알고리즘을 사용한 경우, 이동자의 부상 자체가 불가능하였다. Fig.8 의 좌측열은 직선왕복 운동에 대한 결과로서 각각 수평변위, 공극의 크기, 그리고 회전각을 나타낸다. 결과를 보면, 속도의 큰 변화부분, 즉 방향 전환부분에서는 공극과 회전에서 큰 피크가 발생하지만, 보통 주기적으로 나타나는 추진력의 요동과 이에 부가된 수직력의 변화는 발생하지 않는 것으로 확인되기 때문에 제안된 구동알고리즘이 효과적으로 작용됨을 알 수 있다. Fig. 8 의 우측 열의 그림들은 250  $\mu$ m 계단입력에 대한 결과를 각각 나타낸다. Fig.(b)에서 정지상태에서의 심한 운동상태를 보이는데 이것은 미스매치된 스위칭의 영향으로 기인된다고 할 수 있다. SR 형 구동기는 이동자와 고정자의 상대변위에 따라 스위칭이 진행되는데, 센서좌표계와 이동자의 이동좌표계가 불일치하는 경우 미스매치된 스위칭이 발생할 수 있으며, 또 자기 요소의 가공 오차에 의한, 즉 폴의 폭과 피치의 오차와 오차누적으로 인해 발생할 수 있다. 전자의 경우는 보정작업을 여러 번의 보정작업을 통해 제거될 수 있으나, 후자의 경우는 구동알고리즘만으로 제거가 될 수 없어, 계단입력에 대해 정지상태에서 심한 요동을 보이는 것으로 파악된다. 따라서 제어정밀도도 센서의 한계치(5  $\mu$ m)보다 낮은 값으로 나타났다. Fig.8(a)에서의 비주기적인 피크도 동일한 원인에서 기인된다고 볼 수 있다. Fig. 9는 미스매치된 스위칭으로 인한 결과를 나타내는데, Fig. 9(a)에서 이동자의 변위를 보면, 센서를 통해서 들어오는 위치정보와 실제 폴의 위치가 동일하지 않아, 이동자가 역방향으로 이동하다, 제어기에 의해 다시 순방향으로 진행하는 것을 확인할 수 있다. Fig 9(b)는 이때 위치오차와 제어력을 보여주었고, Fig. 9(c)는 각 상으로 분배된 제어력을 나타낸다. Fig. 9(d)는 공극의 크기를 나타내는데 미스 스위칭은 수평방향으로의 오차발생뿐만 아니라, 부상방향 즉 공극의 변화에도 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 서술한 바와 같이 좌표계불일치로 인한 스위칭의 오류보다 기계가공오차에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있었다. 실제 시스템 제작시 자기특성 향상을 위해 규격화된 규소강판을 적용한 형태로 전자석을 하였는데 제작 후 전자석의 폭길이 측정시 그 값이 일정하지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 미스매치 스위칭

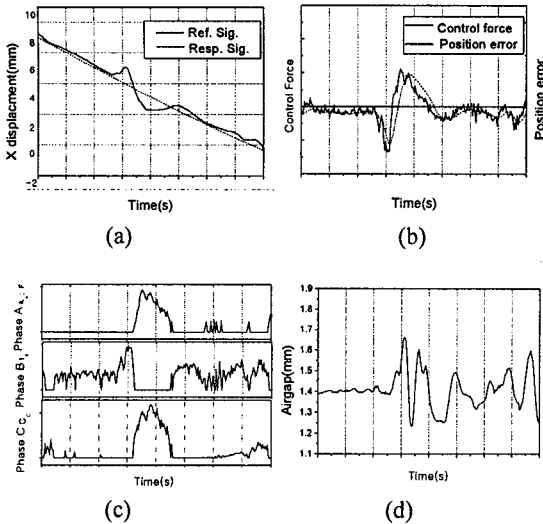


Fig. 9 Effects of the mismatched switching. (a) x displacement with reference, (b) control force and position error, (c) distributed control force into each phase, (d) air gap

에 관한 영향은 시스템 제작시 기계가공오차의 향상을 통해서 개선될 것으로 기대된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 자기 부상에 의한 비접촉식 선형 스테이지를 위한 구동 알고리즘에 관하여 다루었다. 대상이 되는 시스템의 추진 구동방식은 3상 스위치드 릴럭턴스 모터의 구동방식과 유사한 형태를 지니지만, 추진용 전자석에서 추진력과 결합하여 나타나는 수직력의 영향과 추진력의 요동은 자기 부상을 불안정하게 만들기 때문에 이를 해결하기 위해 sigmoid 형태의 힘분배함수를 이용한 스위칭 알고리즘이 제안되었고, 실험을 통하여 그 유효성이 판명되었다. 그리고, mismatch에 의한 영향은 시스템 제작시 기계가공오차의 향상을 통해서 개선될 것으로 기대되었다.

### 후기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수 지원(M01-2004-000-10345-0)에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. Nasar, S. A. and Unnewehr, L. E., "Electromechanics and Electric Machines," John Wiley & Sons, Inc., pp. 121~123, 1983.
2. Gao, W., Dejima, S., Yanai, H., Katakura, K., Kiyono, S. and Tomita, Y., "A surface motor-driven planar motion stage integrated with an XYθ Surface encoder for precision positioning," *Precis Eng.*, Vol. 28, No. 3, pp. 329~337, 2004.
3. Wallace, S. S. and Taylor, D. G., "Low-Torque-Ripple Switched Reluctance Motors for Direct-Drive Robotics," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 6, pp. 733-742, 1991.
4. Nihat, I. and Veysel, O., "Torque ripple minimization of a switched reluctance motor by using continuous sliding mode control technique," *Electric Power Systems Research*, Vol. 66, pp. 241-251, 2003.
5. Yusuf, O., Muhammet, G. and Erkan, M., "New pole tip shapes mitigating torque ripple in short pitched and fully pitched switched reluctance motors," *Electric Power Systems Research*, Vol. 74, pp. 95-103, 2005.
6. Husain, I. and Hossain, S. A., "Modeling, Simulation and control of switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 6, pp. 1625-1634, 2005.
7. Lee, S. H. and Baek, Y. S., "contact-free Linear Actuator using Active Magnetic Bearing," *Journal of the KSPE*, Vol. 20, No. 7, pp. 91-98, 2003.
8. Pollock, C. and Michaelides, A., "Switched reluctance drives: a comparative evaluation," *Power engineering journal*, pp. 257-266, 1995.
9. Krishnan, R., "Switched Reluctance Motor Drives," CRC Press, pp. 233~297, 2001.
10. Lee, S. H. and Baek, Y. S., "Driving Algorithm for Contact-free Linear Actuator," *Proceedings of KSPE spring 2003*.

APPENDIX. Driving algorithm for one period

	Forward	Backward
$0 \leq x < \tau/6$	$F_b = cf_x'$	$F_a = \frac{cf_x'}{1 + e^{(m( x \tau, -n))}}$ $F_c = cf_x' \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{(m( x \tau, -n))}} \right)$
$\tau/6 \leq x < \tau/3$	$F_a = \frac{cf_x'}{1 + e^{(m( x-10 \tau, -n))}}$ $F_b = cf_x' \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{(m( x-10 \tau, -n))}} \right)$	$F_c = cf_x'$
$\tau/3 \leq x < \tau/2$	$F_a = cf_x'$ ,	$F_b = cf_x' \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{(m( x-10 \tau, -n))}} \right)$ $F_c = \frac{cf_x'}{1 + e^{(m( x-10 \tau, -n))}}$
$\tau/2 \leq x < 2\tau/3$	$F_a = cf_x' \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{(m( x-20 \tau, -n))}} \right)$ $F_c = \frac{cf_x'}{1 + e^{(m( x-20 \tau, -n))}}$	$F_b = cf_x'$
$2\tau/3 \leq x < 5\tau/6$	$F_c = cf_x'$	$F_a = cf_x' \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{(m( x-20 \tau, -n))}} \right)$ $F_b = \frac{cf_x'}{1 + e^{(m( x-20 \tau, -n))}}$