

비접촉 선형 구동기를 위한 구동 알고리즘

이상헌*(연세대 대학원 기계공학과), 백운수(연세대 기계공학부)

Driving Algorithm for Contact-free Linear Actuator

S. H. Lee (Mech. Eng. Dept. YSU), Y. S. Baek (School of Mech. Eng., YSU)

ABSTRACT

Recently in the field of precision positioning device, the contact-free actuators are gaining focuses with their outstanding performances by eliminating mechanical frictions. This paper is about the driving algorithm for contact-free linear actuator. The proposed driving algorithm has similar structure of drives of switched reluctance motor and reduces the normal forces and force ripple. The simulation and experiment are executed to verify the proposed method.

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

1. 서론

급속한 전자부품의 미세화와 반도체의 회로집적 기술의 발달로 생산기술의 기존의 기계적 가공에만 한정되지 않고, 화학적 광학적 방법에 의해서 확대되고 있다. 이러한 생산기술을 뒷받침하기 위하여 초정밀 위치결정기구가 요구되고 있다. 초정밀 위치결정기구를 개발하기 기본요소로서 액추에이터의 개발이 병행되는데, 기계적 접촉을 배제하여 위치결정기구의 성능을 향상과 기구의 생산비절감을 가져올 수 있는 비접촉식 구동기가 각광을 받고 있다. 비접촉식 구동기는 주로 전자기력을 이용한 방식으로 힘의 발생원리에 따라서 코일과 영구자석간의 상호작용을 이용하는 영구자석형과 자속의 정렬현상으로 설명이 되는 가변 자기저항(variable reluctance)형으로 크게 나눌 수 있다⁽¹⁾. 가변 자기저항형은 앞서 영구자석형에 비해 에너지 효율이 높아서 열발생문제로부터 자유로우며, 유효구동거리의 확장이 영구자석형보다 유리하다. 그러나, 가변 자기저항형의 경우 폴의 끝단에서 발생하는 자기력의 요동과 구동자와 고정자의 폴의 상대거리에 따라 코일의 전류가 교번하여 인가되어야 하기 때문에 원활한 구동을 위해서는 구동드라이버가 따로 필요하다.

본 연구에서는 자기베어링을 이용하여 개발된

비접촉식 선형 구동기의 원활한 구동을 위한 구동 알고리즘에 대해서 다룬다. 기존의 리니어모터는 LM 가이드에 의해서 지지가 되기 때문에 수직방향으로의 외란이나 자기요소간에 작용하는 수직력은 시스템의 안정도나 성능면에서 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 기개발된 비접촉식 선형 구동기에서 추진력과 동시에 발생하는 수직력은 시스템의 안정도에 영향을 미칠 수 있다. 그리하여, 본 연구에서는 불필요한 수직력을 줄이며, 폴의 끝단에서 발생하는 자기력의 요동에 의한 성능 저하를 줄이는 구동 알고리즘을 연구한다. 2 장에서는 기개발된 비접촉식 선형 구동기의 구조와 구동원리에 대해서 간략히 설명하고, 3 장에서는 구동알고리즘에 대해서 다루며, 4 장에서는 모의실험과 실험결과를 통해서 제안된 구동알고리즘을 검증한다.

2. 비접촉 선형 구동기의 구조 및 구동원리⁽²⁾

2.1 구조

개발된 시스템의 구조는 Fig. 1 과 같다. 상부 고정자에는 네 개의 전자석이 부착되어 이동자의 철관과 상호 작용하여 부상력을 발생시킨다. 하부 고정자에는 추진을 위한 전자석이 배치되어 있으며, 이동자 하부에 돌출된 극들과의 상호 작용에 의하여 추진력을 발생시킨다. 또한 세 개의 정전 용량

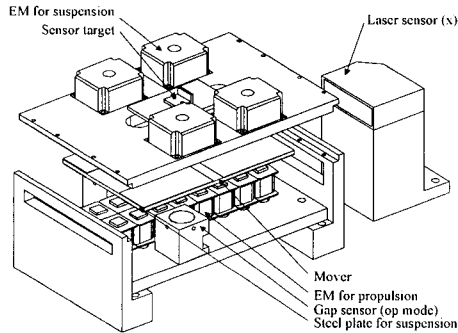


Fig. 1 Schematic diagram of the contact-free linear actuator

형 비접촉 변위센서가 부착되어 면외운동 (out-of-plane motion)을 측정한다. 수평 변위는 비교적 측정 영역이 큰 측면의 레이저 변위센서를 통해 측정된다. 이동자는 수동요소만으로 이루어져 외부와는 분리되어 완전한 자기부상이 이루어진다.

2.2 구동원리

Fig. 2 는 개발된 비접촉 선형구동기의 구동원리를 나타낸다. 그림에서 이동자는 상부고정자의 전자석에 의해서 부상을 비롯한 3 자유도 면외운동의 제어가 가능하며, 하부 고정자의 전자석에 의해서 1 자유도의 직선운동이 가능하다. 전자석의 결선과 구동법은 3 상 스위치드 릴럭턴스 모터(switched reluctance motor)와 유사하다. 그림에서 보면 전자석은 a, b, c 세 개의 상으로 각각 직렬 연결되었으며, 이동자의 위치에 따라서 각 상에 전류가 인가된다. Fig. 2 는 이동자의 초기위치를 나타내는데, 여기서 a-c-b 순으로 전류가 인가되면 이동자는 우측방향으로 이동하게 되고, b-c-a 의 순으로 인가되면, 이동자는 좌측방향으로 이동하게 된다.

3. 구동 알고리즘

앞 장에서 설명하였듯이 개발된 시스템에서의 구동법은 3 상 스위치드 릴럭턴스 모터와 유사

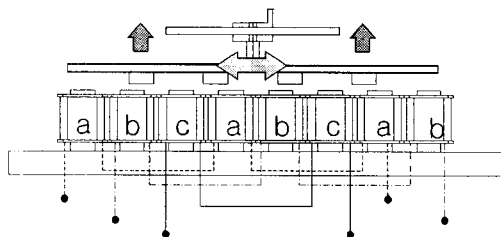


Fig. 2 Operating principle of the contact-free linear actuator

하다⁽³⁾. 그러나, 다음과 같은 문제를 해결해야 하는 점에서 기존의 구동알고리즘과는 차이가 있다. 우선, 이동자 구동시 추진용 전자석에서는 수평력과 수직력이 동시에 작용하는데, 수직력은 전자석의 스위칭 순서에 따라서 예상이 가능하므로 상부고정자의 전자석에 의해서 제거될 수 있다. 그러나, 과도한 수직력은 시스템의 안정도와 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 수직력을 줄이도록 하여야 한다. 둘째로 가변 자기저항방식의 구동기에서 발생하는 폴 끝단에서의 자기력의 요동과 스위칭시 급격한 입력의 변화로 인한 자기력의 요동은 구동기의 성능을 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 구동알고리즘은 이를 고려하여야 한다.

본 연구에서 적용 가능한 구동 알고리즘, 즉 스위칭 알고리즘은 다음과 여러 방법이 후보지로 정해졌다. (1) on/off 방식, (2) 선형 보간법, (3) 조화함수형태가 고려되었다. 우선 on/off 방식은 급격한 입력값의 변화로 스위칭시 큰 부상력이 발생하였다. 선형 보간법의 경우는 on/off 방식보다는 높은 성능을 보였지만, 상의 교차가 있는 부분에서 수직력의 발생이 컸으며, 수평력 자체도 매끄럽지 못하였다. 반면, 조화함수형태의 경우는 약간의 가중치를 준 상태에서 상의 교차가 있을 때 만족할 만한 제어력의 고른 분포로 만족할 만한 성능을 나타내었다. 그래서, 본 연구에서는 조화함수형태의 제어력분포 함수를 이용하여 구동기를 작동시켰다. 한편, 본 연구에서는 고려되지 않았지만, 조화함수보다 자유도 면에서 유리한 다항식 형태의 곡선 적합 방식도 가능하리라 기대된다.

다음은 본 연구에서 사용된 제어력 분포 함수를 나타낸다.

For $0 \leq x < 2.5e-3$:

$$Ph.a = cfx/2 - cfx/2 \times \sin(\pi/p \times x)$$

$$Ph.b = 0$$

$$Ph.c = cfx/2 \times \sin(\pi/p \times x)$$

For $2.5e-3 \leq x < 5e-3$:

$$Ph.a = cfx/2 - cfx/2 \times \sin(\pi/p \times x)$$

$$Ph.b = 0$$

$$Ph.c = cfx/2 \times \sin(\pi/p \times x)$$

For $5e-3 \leq x < 10e-3$:

$$Ph.c = cfx/2$$

$$Ph.a = 0$$

$$Ph.b = 0$$

For $10e-3 \leq x < 12e-3$:

$$Ph.c = cfx/2 - cfx/2 \times \sin(\pi/p \times (x-p));$$

$$Ph.b = cfx/2 \times \sin(\pi/p \times (x-p))$$

$$Ph.a = 0$$

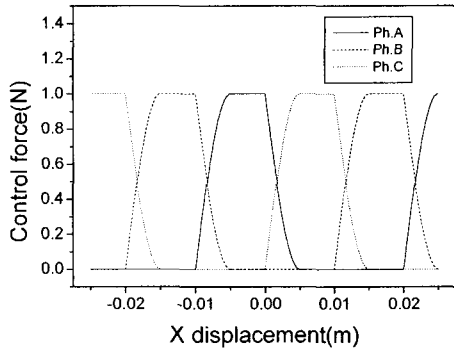


Fig. 3 Control forces of each phase w.r.t. x displacement

여기서 $p=10e-3$ m로 피치를 의미하며, cf_x 는 제어력, $Ph.a$, $Ph.b$, $Ph.c$ 는 각각 a , b , c 상의 힘을 의미한다.

Fig. 3은 위 알고리즘을 도시한 것으로 변위에 따른 조화함수의 형태로 나타남을 알 수 있다.

4. 실험

2장에서 제안한 구동 알고리즘을 적용하기 위하여 실험장치를 구성하였다. 부상한 상태에서 구동 알고리즘의 실험은 구동 알고리즘외의 외부적인 요소가 많이 작용하기 때문에 순수한 구동 알고리즘만의 성능을 검증하기 위하여 기 개발된 비접촉 선형구동기에서 이동자를 리니어 가이드를 고정하여 실험을 수행하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 선형구동기를 나타낸다. 이동자의 이동변위는 레이저 변위 센서를 사용하여 측정하였다. 실험은 하위 레벨의 제어개념 없이 주 제어기에서 모든 과정을 처리하는 단일 스테이지 방식으로 구동이 되었다. 주 제어기는 셸러론 마이크로 프로세서를 사용하였다. 제어명령의 출력과 궤환 제어를 위한 입력 신호의 변환은 각각의 D/A(PCL-726, 12bit, Advantech),

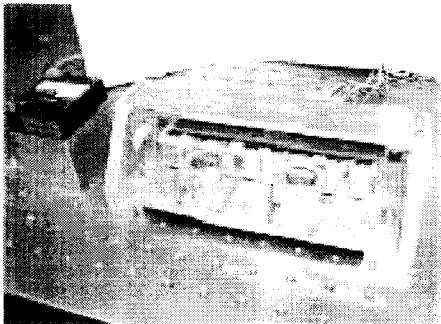


Fig. 4 Photograph of experimental setup using LM guide

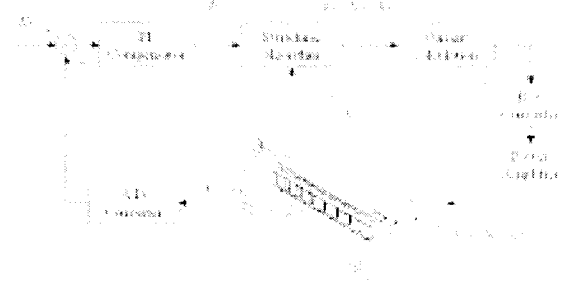


Fig. 5 Block diagram of the closed-loop control system

A/D(PCL-817, 100KHz 16-bit, Advantech co.)보드를 이용하였다. 그리고, 3 채널의 직류 파워증폭기(GA455P, Glentek)를 사용하여 전자석을 구동하였다.

Fig. 5는 앞서 말한 스위칭 알고리즘을 포함한 제어블록 선도를 나타낸다. 이동자의 변위는 되먹임 제어를 하기 위한 정보로 사용됨과 동시에 스위칭 알고리즘에서 위치정보로도 사용된다. 제어기로는 비례-적분 제어기를 사용하였다.

Fig. 6은 앞서 제안된 구동 알고리즘을 이용하여 직선운동을 한 결과를 나타낸다. Fig. 6(a)는 축 방향으로의 이동결과를 나타내는데, 모터가 명령치를 잘 추종함을 알 수 있으나, 10 초 부근에서 약간의 흔들림이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 현상은 Fig. 6(b)와 (c)를 결부하여 설명할 수 있는데, Fig. 6(b)에서 보면, 앞서 언급한 영역 부근에서 수직력이 증가하는데, 이 수직력으로 인해서 리니어 가이드부분에서의 저항이 증가하여, 코깅이 발생하게 된다. 또한 Fig. 6(c)에서도 이 근방에서 각 상의 힘 분포가 크게 교차하여, 이동자에 모멘트가 작용하게 됨을 예상할 수 있다. 결국 리니어 가이드에서의 저항의 증가와 이동자에서의 모멘트의 발생은 자기베어링을 적용하는 경우에는 보상이 가능하기 때문에 앞서의 흔들림은 개선이 가능한 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 자기 베어링에 의한 비접촉식 직선 구동기를 위한 구동 알고리즘에 관하여 다루었다. 대상이 되는 시스템의 추진 구동방식은 3상 스위치드 릴럭턴스 모터의 구동방식과 유사하다. 그러나, 추진용 전자석에서 추진력과 결합하여 나타나는 수직력의 영향과 추진력의 요동은 자기 부상을 불안정하게 만들기 때문에 이를 해결하기 위해서, 조화함수의 형태를 가진 스위칭 알고리즘을 적용하였다. 실험을 통해서, 수직력과 추진력의 요동에 의한 영향을 줄였다.

참고문헌

1. Nasar S.A. and Unnewehr L.E., Electromechanics and Electric Machines, John Wiley & Sons, Inc., pp.121~123, 1983.
2. 이상현, 백윤수, “능동 자기 베어링을 이용한 비접촉식 선형 구동기,” 한국 정밀공학회지, 제 20권, 제 7 호, 2003, 게재예정.
3. R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, pp.233~297, 2001.

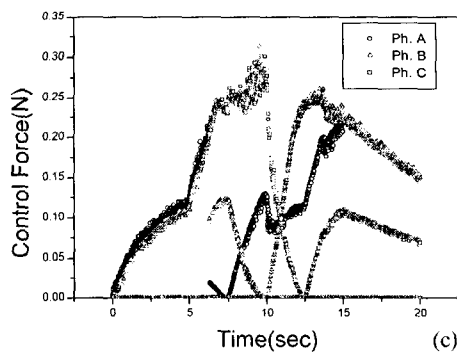
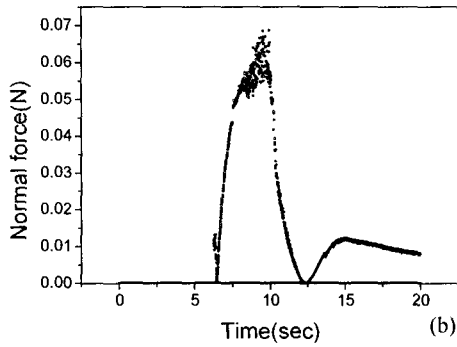
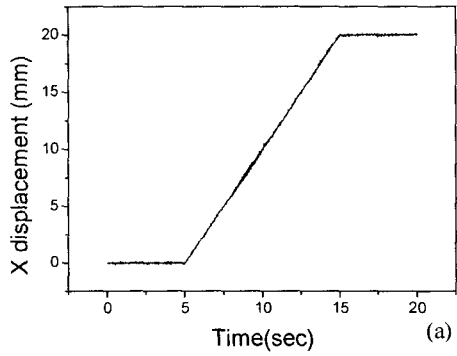


Fig. 6 Experimental results (a) displacement (b) normal force (c) control forces

후 기

본 연구는 2002년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제 (R01-2000-000-00304-0, 2002)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.