

# LuGre 마찰 모델을 이용한 선형 임팩트 구동기의 Stick-slip 거동 시뮬레이션

## Stick-slip Motion Simulation of Impact Type Linear Actuator using LuGre Friction Model

\*이종현, 신영준, 김경수, #김수현

\*J. H. Lee, Y. J. Shin, K. S. Kim, #S. H. Kim(soohyun@kaist.ac.kr)  
한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공

Key words : LuGre friction model, Impact type linear actuator, Stick-slip

### 1. 서론

구동기는 산업 전반에 걸쳐서 광범위하게 사용되는 장치로서 사용되는 요구 조건에 따라 다양한 구동 방법 및 각 구동 방법에 따른 구동 메커니즘이 존재한다. 이러한 구동기는 과거로부터 오랜 기간 동안 연구되어 실용화가 이루어 지고 최적화가 상당히 이루어진 상태이다. 하지만 기존의 구동기로는 구현할 수 없는 영역이 있으며 이러한 영역을 극복하기 위하여 새로운 구동 원리를 개발하거나 기존의 구동원리를 이용한 새로운 구동 매커니즘의 개발이 진행되고 있는 상태이다.<sup>[1]</sup>

새로운 구동기 개발 중에서 압전소자의 압전성을 이용한 구동기가 가장 실용화에 접근했으며, 일부는 실용화되어 사용되고 있다. 압전소자는 양단의 전위차로 인한 전기장이 압전소자의 전기쌍극자를 전기장의 방향에 따라 배열시켜 구동된다. 따라서 구동변위가 수  $\mu\text{m}$  로 작다. 이러한 작은 구동변위를 극복하고 큰 이동변위를 얻기 위하여 인치웸 방식, 마찰 구동 방식, 표면 파동을 이용한 방식, 관성력을 이용한 방식 등이 사용되고 있다.<sup>[2]</sup> 특히 관성력을 이용한 선형 임팩트 구동기는 구조가 간단하고 하나의 압전소자로 구성할 수 있어 구현이 용이한 장점이 있다. 하지만 입력에 따른 출력특성을 예측하기가 어려운 단점을 가지고 있다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 다양한 입력과형에 따른 선형 임팩트 구동기의 출력특성을 시뮬레이션을 통하여 분석한다.

### 2. 선형 임팩트 구동기의 원리

선형 임팩트 구동기는 Fig. 1 과 같이 Slider, Driving part 및 Driving part 를 구동시키는 압전소자로 구성된다. 압전소자의 반복적인 수축-팽창은 Driving part 로 전달되고 Driving part 의 힘은 마찰력을 통해 Slider 로 전달된다. 이 때 압전소자를 천천히 팽창시키고 급속히 수축시키면 Slider 와 Driving part 사이의 마찰력과 Slider 의 관성력과의 관계에 의해 Slider 는 압전소자가 팽창하는 방향으로 구동된다.<sup>[4]</sup> 이러한 구동기는 단위 이동량을 정밀하게 제어할 수 있어 초정밀 변위가 필요한 분야에 사용될 수 있으며, 그 구조가 간단하여 소형 구동기로 응용이 가능하다.<sup>[2]</sup>

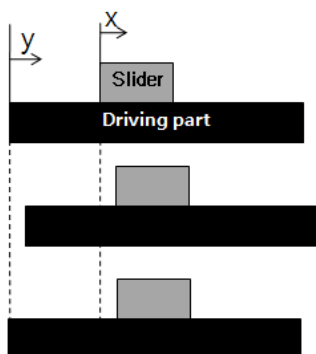


Fig. 1 Drive principle of impact type linear actuator

그러나 선형 임팩트 구동기는 Slider 와 Driving part 사이의 동적인 마찰 특성으로 인해 그 거동을 예측하기가 어렵다. 이러한 마찰 특성은 원하는 출력을 얻기 위한 입력과형을 결정하기 어렵게 한다. 따라서 다양한 입력과형에 따른 이 구동기의 출력 특성을 시뮬레이션 한다.

### 3. LuGre 마찰 모델

LuGre 마찰 모델은 각 마찰면에 탄성을 갖는 섬모 (bristle)가 있어, 마찰면 사이의 상대적인 움직임이 섬모의 변형을 일으키는 것으로부터 마찰력을 설명하고 있다. 이 마찰 모델은 Stribeck 효과, 히스테리시스, stiction 에서의 스프링과 같은 특성 및 다양한 break-away 힘 등의 마찰 특성을 표현 할 수 있으며, 정적-동적 마찰특성을 모두 표현할 수 있다. 또한 식(1)과 같이 간단한 식으로 이루어져 쉽게 적용할 수 있어 마찰을 모사하는 모델로 광범위하게 사용되고 있다.<sup>[5]</sup>

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z$$

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (1)$$

$$\sigma_0 g(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2}$$

여기서  $z$  는 섬모의 평균 변형량,  $v$  는 Slider 와 Driving part 의 상대속도,  $F$  는 마찰력,  $\sigma_0$  는 섬모의 탄성계수,  $\sigma_1$  은 섬모에 의한 댐핑계수,  $\sigma_2$  는 상대속도에 의한 댐핑계수,  $F_c$  는 쿨롱 마찰력,  $F_s$  는 stiction 힘,  $v_s$  는 stribeck 속도를 나타낸다.

### 4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 선형 임팩트 구동기의 거동을 시뮬레이션 하는 범위는 마찰력 및 Slider 의 운동에 한정된다. 고전압 Amp.의 capacitive load, slew rate 및 압전소자의 주파수 특성, 히스테리시스는 시뮬레이션 범위에 포함되지 않는다. 또한 Driving part 는 rigid 하다고 가정한다. 시뮬레이션을 위해 Slider 의 질량은 1kg 으로 결정했으며, LuGre 마찰 모델에 사용되는 각 요소는 Table 1 에 정리되어있다.<sup>[5]</sup>

Table 1 Parameter values used in the simulation

Parameter	Value	Unit
$\sigma_0$	$10^5$	[N/m]
$\sigma_1$	$\sqrt{10^5}$	[Ns/m]
$\sigma_2$	0.4	[Ns/m]
$F_c$	1	[N]
$F_s$	1.5	[N]
$v_s$	0.001	[m/s]

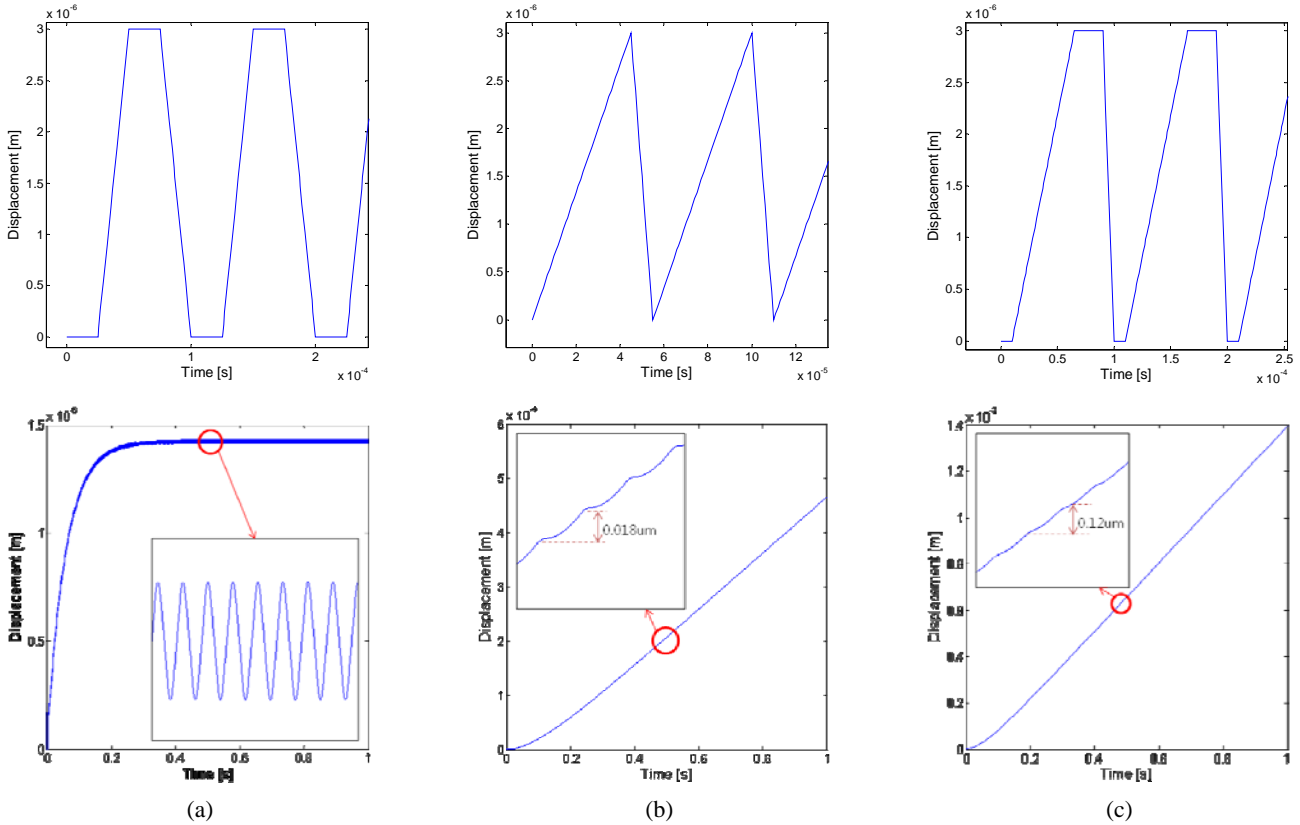


Fig. 2 Simulation results; (a) same rising and falling time input and slider displacement, (b) sawtooth wave input and slider displacement, (c) trapezoidal input and slider displacement

Fig. 2 와 같이 (a) 팽창·수축시간이 같은 입력파형, (b) 톱니파 모양 입력파형, (c) 사다리꼴 모양 입력파형에 대하여 Slider 의 거동을 시뮬레이션 하였다. 팽창·수축시간이 같은 경우 Slider 는 약 0.2 초까지 과도응답이 존재하여 이동하지만, 그 이후에는 안정화되어 제자리에서 머물며 압전 소자의 움직임에 따라 Slip 이 일어남을 알 수 있다. 톱니파 모양의 입력파형을 인가할 경우 1 초 동안 0.466mm 를 이동하며, 단위 이동거리는 0.018 $\mu$ m 이다. 사다리꼴 모양의 파형을 인가할 경우 1 초 동안 1.39mm 를 이동하며, 단위 이동거리는 0.12 $\mu$ m 이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 LuGre 모델을 이용하여 선형 임팩트 구동기를 시뮬레이션 하였다. 선형 임팩트 구동기는 Slider 와 Driving part 사이의 마찰력 및 Slider 의 관성력에 의해 그 거동 특성이 결정된다. 따라서 정확한 시뮬레이션을 위해서는 마찰모델의 선택이 중요하며, LuGre 마찰 모델은 동적인 마찰 특성을 잘 표현하고 있어 적합한 마찰 모델이라 할 수 있다.

시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 이 구동기는 입력파형의 영향을 크게 받으며, 입력파형의 선택에 따라 구동기의 사용 목적에 맞는 거동 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 같은 속도로 팽창·수축하는 경우 제자리에 머물러 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 직관적으로 생각한 결과와 잘 일치한다. 톱니파 모양의 파형과 사다리꼴 모양의 파형에 따른 Slider 의 움직임을 비교해 보면, 톱니파 모양의 파형에 비해 사다리꼴 모양의 파형이 더 큰 속도 및 단위 이동 거리를 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 반도체 공정과 같은 정밀한 움직임이 필요한 경우에는 단위 이동거리가 작은 톱니파형 파형을 입력파형으로 선택하는 것이 적합하며, 로봇 등에 적용하기에는 빠른 움직임을 갖

는 사다리꼴 모양의 파형이 적합함을 알 수 있다.

향후 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이션의 적합성을 확인할 것이며, 정확한 시뮬레이션을 위하여 본 논문에서 제외한 고전압 Amp., 압전소자, Drivig part 를 포함한 시뮬레이션이 진행될 것이다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력 양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참고문헌

1. Jose L. Pons, "Emerging Actuator Technologies", John Wiley & Sons Ltd, 2005.
2. 이상욱, 전종업, "스무즈 임팩트 구동 매커니즘을 이용한 초정밀 회전장치에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 25 권, 제 4 호, pp140-147, 2008.
3. S. H. Chang and S. S. Li, "A high resolution long travel friction-drive micropositioner with programmable step size", Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No. 6, pp2776-2782, 1999.
4. Yasuhiro Okamoto, Ryuichi Yoshida, "Development of Linear Actuators Using Piezoelectric Elements" Electronics and Communications in Japan, Part 3, Vol. 81, No. 11, 1998.
5. C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom and P. Lischinsky, "A New Model for Control of Systems with Friction", IEEE Transactions on automatic control, vol. 40, no. 3, March 1995.