

전단압전가진기를 이용한 인치웜 가진시스템의 개발

이상원[#]

Development of a New Inchworm Actuation System Using Piezoelectric Shearing Actuators

Sang Won Lee[#]

ABSTRACT

This paper presents the development of a new inchworm actuation system using the shearing deformation of the piezoelectric actuators. In this new actuation system, piezoelectric shearing/expanding actuators, an inertial mass and an advanced preload system are configured innovatively to generate the motion of an inertial mass. There are two modes in the new actuation system: (1) stick mode, and (2) clamp mode. In stick mode, the deformation of the piezoelectric shearing actuators drives an inertial mass by means of the friction force at their contact interface. On the other hand, in clamp mode, the piezoelectric expanding actuators provide the gripping force to an inertial mass and, as a result, eliminate its backward motion following the rapid backward deformation of the piezoelectric shearing actuators. To investigate the feasibility of the proposed new actuation system, the experimental system is built up, and the static performance evaluation and dynamic analysis are conducted. The open-loop performance of the linear motion of the proposed new actuation system is evaluated. In dynamic analysis, the mathematical model for the contact interface is established based on the LuGre friction model and the equivalent parameters are identified.

Key Words : Piezoelectric inchworm actuation system (인치웜 압전 가진시스템), Piezoelectric shearing actuator (전단압전가진기), Piezoelectric expanding actuator (인장압전가진기), LuGre friction model (LuGre 마찰 모델)

1. 서론

압전 가진시스템은 빠른 반응속도, 우수한 위치 분해능, 간단한 구조, 낮은 에너지 소비율 및 높은 가진력 등의 장점을 바탕으로 하여 정밀위치제어

시스템에 널리 사용되고 있다. 이러한 정밀위치제어 시스템을 요구하는 분야로는 마이크로 가공, 의료, 계측 그리고 나노기술 분야가 있다. 그러나 압전가진기 자체의 변위는 미소하기 때문에 압전가진기를 사용하여 밀리미터 범위의 이동거리를 얻기

접수일: 2007년 1월 4일; 게재승인일: 2007년 6월 13일

[#] 교신저자: 성균관대학교 기계공학부

E-mail: sangwonl@skku.edu Tel. (031) 290-7467

위해서는 인치웸 기술이 도입되어야 한다.

일반적으로 압전가진기를 사용한 인치웸 기구는 세 종류로 구분되어질 수 있다. 첫째, 'walker' 배열을 갖는 인치웸 기구이다. 이 경우는 압전소자가 이동축과 함께 움직인다. 두 번째는 'pusher' 형태의 인치웸 기구로서, 압전소자가 인치웸 기술을 이용하여 이동축을 밀어낸다. 마지막으로 세 번째는 'walker'와 'pusher' 형태를 결합한 것으로 압전소자가 이동축을 밀어내는 원리에 바탕을 두지만 완전히 축과 분리되지 않는 특징을 갖고 있다.

Stibitz¹는 정밀가공을 위한 위치 제어시스템으로서 유효한 인치웸 가진 기술을 처음으로 구현했는데 전형적인 'pusher' 방법으로 축을 이동시킨다. 이후 1960년대 후반에 정밀도가 향상된 압전 인치웸 시스템이 Locher²에 의해 개발되었다. 이 인치웸 시스템은 'clam-claw' 메커니즘에 기반한 하이브리드 구조를 가지고 있으며, 변위분해능이 12.7 μm 으로 향상되었다. Bizzigotti³ 등은 0.004 μm 의 최소 변위를 갖는 pusher 형태의 정밀한 압전 인치웸 가진기를 개발하였다. 이 가진시스템은 U자 형태의 압전소자를 사용하는데 최근의 전형적인 인치웸 가진기와 유사한 구조를 가지고 있다. Rennex⁴는 하이브리드 pusher-walker 원리에 의거하여 압전소자를 평행하게 배치하는 새로운 형태의 가진시스템을 제시하였고 전체 크기가 상당히 축소되었다.

Breguet^{5,7} 등에 의해 제시된 'Stick-and-slip' 가진 기술은 pusher 형태의 인치웸 가진시스템으로 분류될 수 있다. 이 가진시스템에서 전단압전가진기는 관성질량에 해당하는 슬라이더와 접촉하고, 전단압전가진기의 변형과 접촉점에서 발생하는 마찰력에 의해 슬라이더가 이동하게 된다. 또한, 접촉점에서의 수직력을 가하고자 자기력이 사용되었다. 그러나, Stick-and-slip 가진시스템은 전단압전가진기의 역방향 변형에 의한 슬라이더의 미소한 역방향 운동과 불필요한 회전운동이란 단점을 가지고 있다.

본 논문은 Stick-and-slip 가진시스템이 가지고 있는 위와 같은 단점을 극복하는 새로운 인치웸 압전 가진시스템의 개발에 관한 것이다. 제시된 가진시스템은 전단압전가진기, 인장압전가진기, 관성질량에 해당하는 슬라이더와 예압(Preload)시스템으로 구성되어 있고, Stick-and-slip 가진시스템의 단점을 극복하도록 혁신적으로 설계되었다. 본 논문에서는 제안된 인치웸 압전 가진시스템의 구성과 작동원리를 바탕으로 실제로 시스템을 구현하고 실험을 통

한 정적인 성능평가와 동특성 분석을 통해 그 타당성 및 적용성을 검토하고자 한다.

2. 인치웸 압전 가진시스템의 구성 및 작동원리

제안된 인치웸 압전 가진시스템은 전단압전가진기와 인장압전가진기를 사용하며 점착모드(Stick mode)와 고정모드(Clamp mode)에 의하여 슬라이더의 운동이 구현된다. 일반적으로 전단압전가진기는 전기장이 가해졌을 때 전단방향으로 변형이 발생한다. 이 때, 발생하는 변형량 δ 는 다음의 식 (1)에 의해 얻어진다.

$$\delta = d_{15}V \quad (1)$$

여기서 d_{15} 는 압전소자의 전단변형계수이며, V 는 가해진 전압을 의미한다. 이 전단압전가진기의 전단변형이 제안된 인치웸 압전 가진시스템에서 슬라이더를 구동시키는데 중요한 역할을 한다.

Fig. 1은 제안된 인치웸 압전 가진시스템의 작동원리를 보여주고 있으며, 2가지의 작동 모드로 구성되는데 첫 번째는 점착모드이고, 두 번째는 고정모드이다. Fig. 1에서 슬라이더(Slider)로 표시되어 있는 관성질량의 운동은 전단압전가진기에 톱니파형(Sawtooth) 전압을 가함으로써 효과적으로 발생시킬 수 있다. 이 때, 가해지는 톱니파형 전압에 있어서 특정한 기울기를 갖고 증가하는 램프 부분이 점착모드를 의미한다. 이 점착모드에서는 전단압전가진기의 변형이 상대적으로 '느리게' 발생하면서, 전단압전가진기에 부착되어 있는 반구형 금속 팁과 슬라이더 표면의 접촉부에서 발생하는 마찰력에 의해 슬라이더의 운동이 구현된다.

반면에, 톱니파형 전압이 갑자기 감소하는 경우, 전단압전가진기의 역방향 변형에 따른 슬라이더의 미소한 역방향 변위가 발생하게 된다. 이는 기존의 Stick-and-slip 가진시스템의 중대한 결함으로 인장압전가진기를 배치하여 고정모드를 구현함으로써 제거될 수 있다. 즉, 전단압전가진기에 가해지는 톱니파형 전압이 갑자기 감소할 때, 인장압전가진기에 펄스파형 전압을 가하여 인장변형을 발생시킨다. 이 인장변형은 전단압전가진기의 역방향 변형시 슬라이더를 고정시키는 고정모드를 구현하며, 결과적으로 슬라이더의 미소한 역방향 변위가

제거된다. 따라서 슬라이더의 순방향 운동이 점착 모드와 고정모드의 반복을 통해서 연속적으로 구현된다.

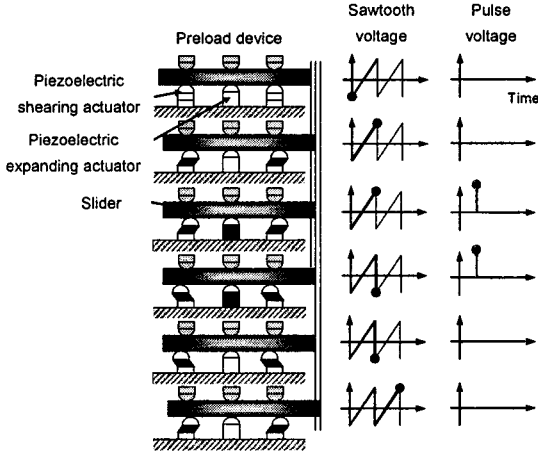


Fig. 1 Operating principle

3. 인치웜 압전 가진시스템의 설계 및 제작

제안된 인치웜 압전 가진시스템은 3개의 전단 압전가진기, 3개의 인장압전가진기, 그리고 예압시스템을 통합 배치함으로써 구현된다. Fig. 2에 주어진 인치웜 압전 가진시스템의 3차원 모델에서 알 수 있듯이 3개의 전단압전가진기를 120° 간격으로 하여 원형으로 배치시키고, 같은 방법으로 3개의 인장압전가진기를 120° 간격으로 원형으로 배치시킨다. 따라서 6개의 압전가진기가 60° 간격을 가지고 원형으로 배치되게 된다.

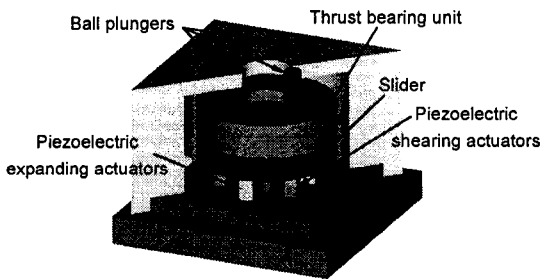


Fig. 2 3D model of the proposed piezoelectric inchworm actuation system

관성질량 역할을 하는 원형의 슬라이더는 3개의 전단압전가진기의 반구형 금속 텃 위에 위치시

킨다. 압전가진기와 원형 슬라이더를 조립한 후에 스러스트 베어링으로부터 분리된 볼 리테이너(Ball retainer)를 원형 슬라이더 표면에 위치시킨다. 이로 인해 볼 리테이너의 볼이 원형 슬라이더의 표면과 접촉을 이루게 된다. 또한, 베어링 덮개를 제작하여 볼 리테이너 위에 조립함으로써 볼 리테이너의 횡방향 운동을 제한한다. 이를 통하여 원형 슬라이더에 예압을 효과적으로 가할 수 있고, 슬라이더의 원활한 운동을 구현할 수 있다.

예압시스템은 금속 덮개에 3개의 스프링 볼 플런저(Spring ball plungers)를 나사 조립하고 각 플런저의 볼이 전단압전가진기와 동일한 위치에서 베어링 덮개와 접촉을 갖게 함으로써 완성된다. 스프링 볼 플런저는 위치지정기구로서 압축스프링과 스테인리스 스틸 볼로 구성되어 있다. 즉, 금속 덮개에 나사 조립되어 있는 스프링 볼 플런저를 죄고 풀어 줌에 따라 슬라이더에 가해지는 예압의 크기를 제어할 수 있다. 결국, 스프링 볼 플런저와 스러스트 베어링으로 구성되는 예압시스템을 통하여 슬라이더에 작용하는 수직력을 적절하게 제어할 수 있고, 원활한 슬라이더의 운동이 가능하게 된다.

제작된 인치웜 압전 가진시스템의 프로토타입과 조립과정에 관한 사진이 Fig. 3에 주어져 있다. 완성된 프로토타입의 크기는 70x70x50 mm 이다.

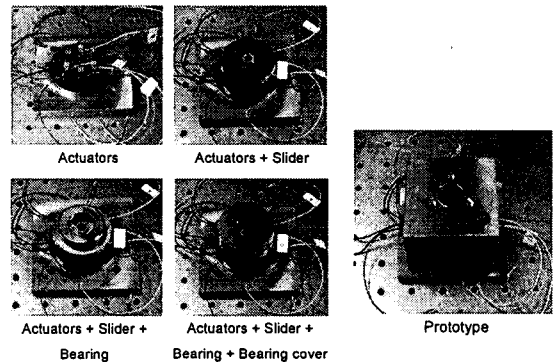


Fig. 3 Photos of components and completed prototype

인치웜 압전 가진시스템에 사용된 전단압전가진기는 4개의 얇은 전단압전소자를 쌓음으로써 제작되었고, 인장압전가진기도 동일한 방법으로 제작되어 압전세라믹소자의 적층 구조로 되어있다. 또한, 각 압전가진기의 표면에는 1 mm의 지름을 갖는 반구형의 스테인리스 스틸(SS440C) 텃이 부착되

어 원형 슬라이더의 하부 표면과 접촉을 이루고 있다. 전단압전가진기와 인장압전가진기의 크기는 각각 4.11x4.23x8.92 mm 와 5.12x5.21x10.07 mm 이다.

4. Open-loop 성능 평가

제안된 압전 가진시스템에서 전단 및 인장압전 가진기의 동특성은 각각의 압전가진기에 가해지는 톱니파와 펄스파의 주파수 및 펄스길이비(Duty ratio)를 결정하는데 큰 영향을 미치므로, 그 동특성에 대한 분석이 수행되었다. 압전가진기의 동특성 분석에 있어서 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하였고, 각 압전가진기의 고유모드별 공진주파수를 계산하였다. Table 1에 동특성 수치해석에 사용된 압전소자 및 스테인리스 스틸 반구형 팁의 재료 물성치가 주어져 있다.

Table 1 Physical and material properties of piezoelectric element and hemisphere tip

	Piezoelectric element (PIC-255)	Hemisphere tip (SS440C)
Young's modulus (E)	63 GPa	200 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.31	0.30
Density (ρ)	7750 kg/m ³	7800 kg/m ³

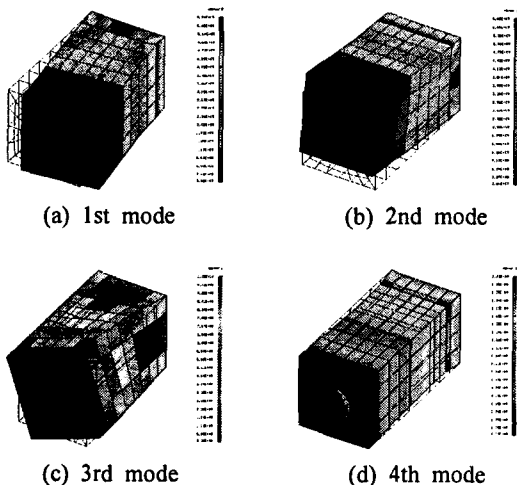


Fig. 4 Natural mode shapes of piezoelectric actuators

수치해석 결과, 전단 및 인장압전가진기는 동일한 고유모드형상의 순서를 가지는 것으로 분석되었으며, 4개의 저차 고유모드형상이 Fig. 4에 주어져

있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 각 압전가진기의 고유모드 중에서 1차와 2차는 굽힘 모드이고, 3차는 비틀림 모드, 그리고 4차는 인장모드이다. 또한, 각 고유모드의 고유진동수가 Table 2에 주어져 있다.

Table 2 Natural frequencies of piezoelectric actuators

Natural modes	Natural frequency [kHz]	
	Piezoelectric shearing actuator	Piezoelectric expanding actuator
1st mode	25.4	23.7
2nd mode	25.9	24.0
3rd mode	50.9	44.6
4th mode	90.0	79.0

압전 가진시스템에서 가해지는 전압신호의 주파수를 결정할 때, 압전가진기의 고유진동수를 취함으로써 작동효율을 증가시킬 수 있다. Fig. 4에 주어진 고유모드형상을 고려할 때, 굽힘 모드인 1차와 2차 고유모드에 해당하는 고유진동수가 전압신호의 주파수로 결정될 수 있다. 그러나 실제로 압전가진기의 가진주파수는, 전압증폭기의 전류한계(Current limit)를 초과하지 않도록 결정되어야 한다. Table 2에 주어진 압전가진기의 1차 및 2차 고유진동수를 가진주파수로 취하면, 인장압전가진기의 정전용량을 고려할 때, 전압증폭기의 전류한계를 초과하게 된다. 따라서 제안된 압전 가진시스템에서 각 압전가진기에 가해지는 가진주파수를 전류한계를 초과하지 않도록 1000 Hz 이하로 결정하였고, 실제로 선형운동 성능평가 실험에서 가진주파수로 500 Hz 와 1000 Hz 를 사용하였다.

제안된 압전 가진시스템 슬라이더의 선형운동 성능 평가실험에서 전단압전가진기에 가해지는 톱니파형 전압신호의 진폭은 ± 150 V 이고, 이에 상응하는 변형량은 ± 0.6 μ m 이다. 또한, 인장압전가진기에 가해지는 펄스파형 전압신호의 크기는 75 V 이고, 4.5 μ m 의 인장변형량이 발생한다. 입력되는 톱니파형 전압신호에서 톱니파형의 총 개수는 6000 이고, 따라서 전단압전가진기로부터 슬라이더에 입력되는 변형량의 총합은 7.2 mm 이다.

Fig. 5에 제안된 인치웜 압전 가진시스템의 선형운동 성능평가를 위한 실험 시스템 사진이 주어져 있다. 이 실험시스템은 가진시스템 프로토타입, 신호발생기, 전압증폭기, 레이저 모듈과 위치측정 광학센서(Position sensitive detector, PSD)를 사용한

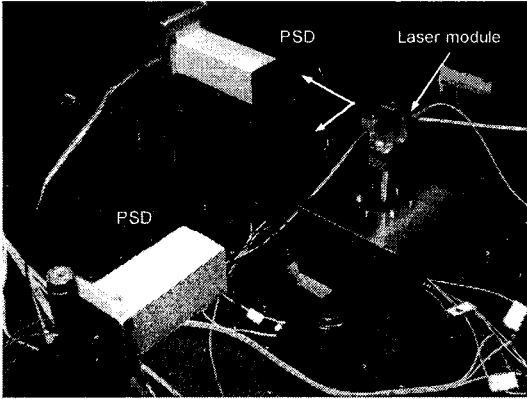


Fig. 5 Photo of experimental setup

비접촉 측정시스템으로 구성되어 있다.

Table 3은 슬라이더의 선형운동 실험결과를 보여주고 있다. 또한, Fig. 6은 슬라이더의 선형운동을 시간에 따른 그래프로 나타낸 것이다. Table 3과 Fig. 6에서 알 수 있듯이 실제로 슬라이더가 움직이는 거리는 접촉부의 마찰 지연(Friction lagging)현상에 의해 전단압전가진기의 총 입력 변형량인 7.2 mm 보다 작게 된다.

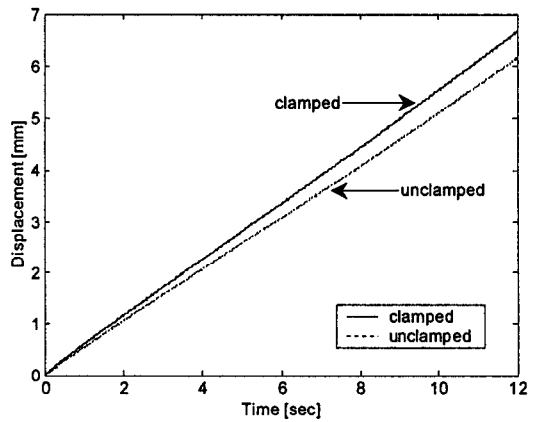
Table 3에는 인장압전가진기의 변형에 의한 고정모드가 없는 경우 슬라이더의 선형운동 실험결과도 포함되었는데, 이는 기존의 Stick-and-slip 가진기술에 의한 결과를 의미한다. Table 3에서 알 수 있듯이 고정모드가 있는 제안된 인치웜 압전 가진시스템에서의 슬라이더의 총 변위가 고정모드가 없는 경우보다 크다. 이러한 결과는 본 논문에서 제안된 압전 가진시스템의 고정모드가 기존의 Stick-and-slip 가진시스템의 결함인 슬라이더의 역방향 변위를 제거하였음을 의미한다. Fig. 6에 주어진 실험결과는 가진주파수가 500 Hz 와 1000 Hz 인 경우에서 슬라이더가 일정한 속도로 운동하고 있음을 보여준다.

또한, 가진주파수가 500 Hz 인 경우의 슬라이더의 총변위가 1000 Hz 인 경우의 총변위보다 큼을 Table 3 과 Fig. 6을 통해서 알 수 있다. 이는 인장압전가진기의 변형에 의해 발생하는 고정효과가 가진주파수가 높은 경우 덜 효과적이는데 기인한다. 즉, 상대적으로 큰 정전용량을 가진 인장압전가진기에 가진주파수가 높은 펄스전압신호가 가해지면, 전압증폭기의 전류한계로 인하여 증폭된 전압신호의 왜곡이 발생하게 된다. 이로 인해 가진주파수가 500

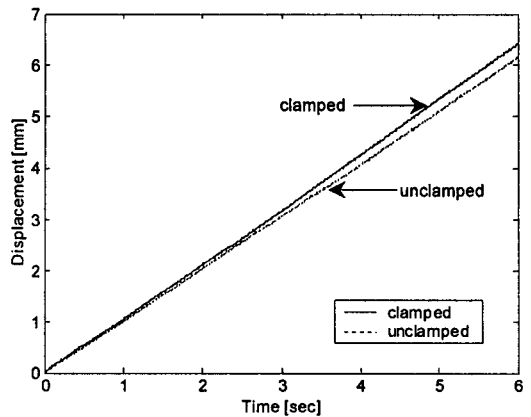
Hz 인 경우의 고정효과가 1000 Hz 인 경우보다 크게 되어 슬라이더의 총 변위가 더 크게 된다.

Table 3 Linear motion performances of the slider

	Driving freq. [Hz]	Total travel [mm]	Velocity [mm/s]
With clamping	500	6.664	0.56
	1000	6.447	1.07
Without clamping	500	6.158	0.51
	1000	6.146	1.02



(a) Driving frequency: 500 Hz

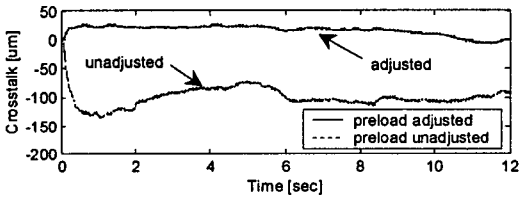


(b) Driving frequency: 1000 Hz

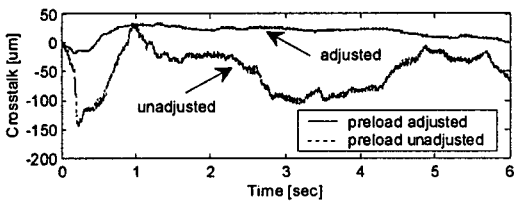
Fig. 6 Experimental results of linear motion of slider

제안된 인치웜 압전 가진시스템에는 미끄럼홈(Guideway) 구조가 없기 때문에 슬라이더의 운동의

직각방향으로 발생하는 횡방향운동과 회전운동이 발생하게 된다. 이러한 슬라이더의 횡방향운동 및 회전운동이 외란(Crosstalk)운동으로 정의되며 측정된 실험결과가 Fig. 7에 주어지고 있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 선형운동 시 슬라이더의 외란변위는 최대 150 μm 까지 발생한다. 이러한 슬라이더의 외란변위는 전단압전가진기의 정렬오차, 불균일한 접촉부 특성, 가진력의 불균형 등에 기인한다. 슬라이더의 불필요한 외란변위를 감소시키기 위해서 제안된 가진시스템의 예압기구를 이용한다. 예압기구를 구성하는 세 개의 볼 플런저를 조절함으로써 슬라이더와 전단압전가진기 사이의 각 접촉부의 수직력과 가진력의 미세한 제어가 가능하다. 이러한 가진력의 미세한 제어를 통해 슬라이더의 외란변위를 상당히 감소시킬 수 있는데 그 결과가 Fig. 7에 주어지고 있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 예압 조절을 수행한 경우의 외란변위가 예압 조절을 수행하지 않은 경우에 비해 대략 70% 이상 감소되었다.



(a) Driving frequency: 500 Hz



(b) Driving frequency: 1000 Hz

Fig. 7 Experimental results of crosstalks of the slider

5. 접촉부의 마찰 동역학

제안된 인치웜 압전 가진시스템에서 슬라이더의 운동이 슬라이더와 전단압전가진기 사이의 접촉부에서 발생하는 마찰력에 의해 구현되기 때문에 접촉부의 마찰 동역학에 관한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 Canudas de Wit 등에 의해 제시된

LuGre 마찰력 모델을 사용하여 접촉부 마찰 동특성 분석을 수행하였다.⁸ LuGre 마찰 모델은 접촉부를 등가의 강성과 감쇠를 갖는 스프링과 감쇠기(Damper)로 모델링한다. 이러한 LuGre 마찰 모델을 이용하여 제안된 가진시스템 점착모드의 동특성을 분석하였다. Fig. 8은 점착모드에서의 슬라이더와 이에 작용하는 수직력, 변위들을 포함한 자유물체도를 보여주고 있다.

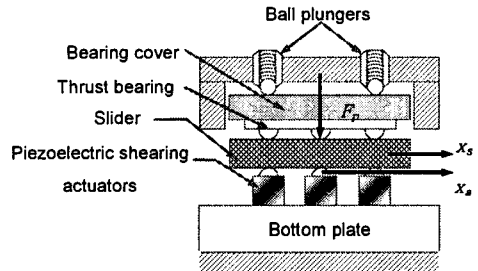


Fig. 8 Schematic diagram of slider in stick mode

Fig. 8에 주어진 슬라이더의 자유물체도에 LuGre 마찰 모델을 적용함으로써 등가의 강성계수와 감쇠계수를 갖는 스프링과 감쇠기로 구성된 접촉부 마찰 동역학 모델을 구할 수 있다. Fig. 9에 스프링과 감쇠기를 사용하여 표현된 접촉부 마찰 동역학 모델이 주어지고 있다.

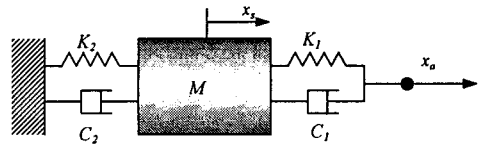


Fig. 9 Equivalent dynamic model of contact interfaces

Fig. 9에 주어지고 있는 등가 모델로부터 다음과 같은 슬라이더의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{x}_s + (C_1 + C_2)\dot{x}_s + (K_1 + K_2)x_s = C_1\dot{x}_a + K_1x_a \quad (2)$$

식 (2)에서 C_i 는 등가감쇠계수, K_i 는 등가강성계수, M 은 슬라이더의 질량, x_s 는 슬라이더의 변위, 그리고 x_a 는 전단압전가진기의 반구형 팁의 변위이다. K_1 과 C_1 은 슬라이더의 하부 표면과 전단압전가진기의 반구형 팁사이의 접촉부 1(Interface 1)의

등가강성계수 및 등가감쇠계수를 의미하고, K_2 과 C_2 는 슬라이더의 상부 표면과 스톱퍼 베어링의 볼 간의 접촉부 2(Interface 2)의 계수를 의미한다.

제안된 인치웸 압전 가진시스템에서 슬라이더 접촉부의 마찰 동역학 특성을 규명하기 위하여 식 (2)에 라플라스 변환을 적용한 후 슬라이더의 변위 (x_s)의 전단압전가진기의 변형량(x_a)에 대한 비율 (x_s/x_a)에 해당하는 전달함수를 계산하였다. 식 (3)은 계산된 전달함수를 의미하며 각 계수의 정의는 식 (4), (5)에 주어져 있다.

$$\frac{X_s(s)}{X_a(s)} = \frac{C_1s + K_1}{Ms^2 + (C_1 + C_2)s + (K_1 + K_2)}$$

$$= \frac{2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2} \quad (3)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K_1}{M}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{K_1 + K_2}{M}} \quad (4)$$

$$\zeta_1 = \frac{1}{2\omega_1} \frac{C_1}{M}, \zeta_2 = \frac{1}{2\omega_2} \frac{C_1 + C_2}{M} \quad (5)$$

식 (3), (4), (5)에 주어진 접촉부 마찰 동역학 모델의 등가강성계수 및 등가감쇠계수는 실험을 통해 얻을 수 있다. 즉, 전단압전가진기에 사각파형 전압 신호를 가한 후 발생한 전단압전가진기의 변형량과 슬라이더의 변위를 측정하고, 이를 이용하여 등가강성계수와 등가감쇠계수를 계산할 수 있다.

전단압전가진기에 가해진 사각파형 전압신호의 크기는 각각 ± 150 V ($V_{pp} = 300$ V) 와 ± 190 V ($V_{pp} = 380$ V) 이고, 이에 상응하는 전단압전가진기의 변형량은 각각 $1.2 \mu\text{m}$ 와 $1.5 \mu\text{m}$ 이다. 또한, 각각의 사각파형 전압입력에 따른 슬라이더의 정상상태 변위는 $1.07 \mu\text{m}$ 와 $1.33 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 따라서 사각파형 전압 입력에 의한 슬라이더 변위의 전단압전가진기의 변형량에 대한 비율(x_s/x_a)은 2가지 경우 모두 정상상태에서 0.89이다. 실험으로부터 얻어진 변위비율(x_s/x_a)의 과도시간응답을 분석하여 등가강성계수와 등가감쇠계수를 계산하였고, 그 결과가 Table 4에 주어져 있다. Table 4에서 알 수 있듯이 Case 1 과 Case 2의 경우 접촉부 1의 등가강성계수(K_1)가 접촉부 2의 등가강성계수(K_2)의 약 10배 정도로 큼을 알 수 있다. 반면에, 등가감쇠계수의 경우에는 접촉부 2의 등가감쇠계수(C_2)가 접촉부 1의 등가감쇠계수(C_1)보다 평균적으로 약 2배 정도

로 큼을 알 수 있다. 이는 각 접촉부의 상이한 조건에 의하여 발생하는 현상으로 이해할 수 있다.

Table 4 Identified equivalent parameters

	Interface 1	Interface 2
	$M = 0.163$ kg	
Case 1	$K_1 = 1.358 \times 10^4$ N/m	$K_2 = 1.697 \times 10^3$ N/m
$V_{pp} = 300$ V	$C_1 = 44.41$ N·s/m	$C_2 = 132.97$ N·s/m
	$\zeta_1 = 0.4720$	$\zeta_2 = 1.7776$
Case 2	$K_1 = 1.612 \times 10^4$ N/m	$K_2 = 1.992 \times 10^3$ N/m
$V_{pp} = 380$ V	$C_1 = 63.99$ N·s/m	$C_2 = 116.25$ N·s/m
	$\zeta_1 = 0.6241$	$\zeta_2 = 1.6584$

접촉부 1은 윤활제의 사용이 없는 건성접촉이고, 접촉부 2는 베어링 볼에 윤활제를 사용함으로써 윤활접촉의 특성을 가지고 있다. 따라서 접촉부 1에서 발생하는 마찰력이 접촉부 2에서의 마찰력보다 크게 되고 결과적으로 슬라이더의 운동이 발생하게 된다. 이로 인해 LuGre 마찰력 모델을 사용한 접촉부 1의 등가강성계수가 접촉부 2의 등가강성계수보다 크게 된다. 반면에, 등가감쇠계수의 경우에는 윤활접촉인 접촉부 2의 등가감쇠계수가 건성접촉인 접촉부 1의 등가감쇠계수보다 크다. 즉, 윤활제에 의하여 감쇠효과가 커지게 되고 이로 인하여 슬라이더 운동에 있어서 오버슈트(Overshoot)나 진동현상이 사라지게 된다. Fig. 10에 입력전압이 300 V 인 경우, 실험적으로 얻어진 변위비율의 과도응답과 등가의 마찰 동역학 모델에서 얻어진 변위비율의 과도응답이 주어져 있다.

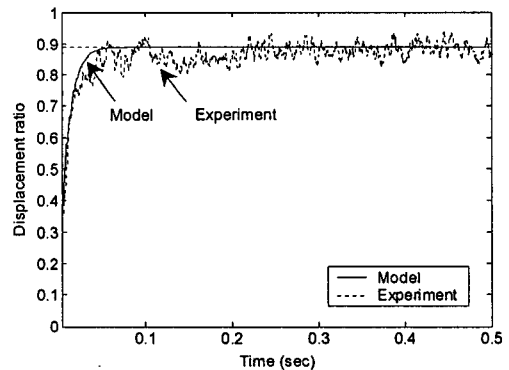


Fig. 10 Time responses of displacement ratio from experiment and model (Case 1: $V_{pp} = 300$ V)

6. 결론

본 연구는 전단압전가진기와 인장압전가진기, 그리고 스프링 볼 플런저를 이용한 예압시스템을 통합한 새로운 인치웜 압전 가진시스템의 개발에 관한 것이다. 개발된 인치웜 압전 가진시스템에서는 점착모드와 고정모드의 2가지 작동모드의 연속적인 변환을 통하여 관성질량인 슬라이더의 운동이 구현된다. 기존의 Stick-and-slip 가진시스템에는 점착모드와 미끄럼 모드가 존재하는데 이 미끄럼 모드를 인장압전가진기를 사용하여 고정모드로 대체함으로써 슬라이더의 역방향 변위를 제거할 수 있었다. 또한, 볼 플런저를 사용한 예압시스템은 횡방향운동과 회전운동이 결합되어 나타나는 슬라이더의 외란운동을 최소화함으로써 슬라이더 선형운동의 정밀도를 향상시키는 역할을 한다.

성능평가와 접촉부 마찰 동특성 분석을 위해 제안된 인치웜 압전 가진시스템의 프로토타입이 제작되었고, 선형 운동의 성능평가 실험을 통해 제안된 가진시스템의 우수성을 확인하였다. 또한, LuGre 마찰 모델을 사용하여 접촉부 마찰 동특성을 분석함으로써 건성접촉과 윤활접촉의 특징 및 차이점등을 파악하였다.

참고문헌

1. Stibitz, R., "Incremental Feed Mechanisms," U.S. Patent: 3,138,749, 1964.
2. Locher, G. L., "Micrometric linear actuator," U. S. Patent: 3,296,467, 1967.
3. Bizzigotti, R. A., "Electromechanical translational apparatus," U. S. Patent: 3,902,085, 1975.
4. Rennex, G., "Inchworm actuator," U. S. Patent: 5,332,942, 1994.
5. Breguet, J. M. and Clavel, R., "Stick and Slip Actuators: design, control, performances and applications," Proceedings of IEEE - International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp. 89-95, 1998.
6. Breguet, J. M. and Renaud, P., "A 4-degrees-of-freedom microrobot with nanometer resolution," Robotica, Vol. 14, pp. 199-203, 1996.
7. Breguet, J. M., Pernette, E. and Clavel, R., "Stick and slip actuators and parallel architectures dedicated to microrobotics," Proceedings of SPIE - Microrobotics: components and applications, pp. 13-24, 1996.
8. Canudas de Wit, C., Olsson, H., Åström, K. J. and Lischinsky, P., "A New Model for Control of Systems with Friction," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, 1995.