

# 진공용 초음파 리니어 모터의 강건설계 및 제어 Robust Design and Control of Ultrasonic Linear Motor in Vacuum Environment

\*김완수<sup>1</sup>, 윤철호<sup>2</sup>, 차현록<sup>3</sup>, 이선규<sup>1</sup>

\*W. S. Kim<sup>1</sup>, C. H. Yun<sup>2</sup>, H. R. Cha<sup>3</sup>, S. K. Lee(skyee@gist.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 광주과학기술원, <sup>2</sup> Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup> 한국생산기술연구원

Key words : Ultrasonic linear motor, Vacuum environment, Robust design, Practical control

## 1. 서론

최근 고진공 중 위치제어 시스템이 조명되고 있다. 일반적으로 원자 혹은 나노미터 크기의 구조물 조작이나 관찰은 고진공 조건하에서 수행한다. 또한 광학 소자 개발이나 반도체 공정에서도 진공 중 위치 제어가 필요하다. 진공 중 위치제어를 하기 위해 기존 전자기 모터와 다른 액츄에이터가 필요하다. 진공 중에서는 윤활이 불가능해 윤활이 필요한 부분에 치명적 손상이 일어날 수 있으며 대류 열 전달이 일어나지 못하므로 냉각이 힘들어 열에 의한 시스템 손상 역시 일어날 수 있기 때문이다.

전자기 모터에 비해 초음파 모터는 윤활이 필요 없는 구조에 열 발생에 비교적 자유로우며, 저속 고효율, 단순 구조, 빠른 응답 그리고 전자기력발생이 없는 장점을 가진다. 초음파모터 중 볼트 조임형 란주변 액츄에이터는 고효율을 발생시킬 수 있다. 저자의 이전 연구에서는 이 초음파 모터를 이용해 대기 중에서 나노미터 정도의 위치제어를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 다양한 대기조건 하에서 초음파 모터의 위치제어를 수행했다. 초음파 모터가 마찰면에 강건성을 가지도록 하기 위해 다구찌 방법을 사용한 강건설계를 수행했으며, 진공중 마찰 특성 변화를 보상 하기 위해 수정된 NCTF 제어방법을 사용했다. 결과적으로 초음파 모터 스테이지 시스템은 고진공 조건인  $8.5 \times 10^{-4} \text{Pa}$  상태에서 나노미터 수준의 위치제어에 성공했다.

## 2. 실험 장치 구성

그림 1은 진공 챔버용의 초음파 선형 모터 시스템을 나타내고 있다. 챔버내의 최대 진공도는  $8.0 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 이다. 횡진동 종진동의 두가지 모드 진동을 발생시키기 위해 극화 방향이 다른 두 가지 종류의 PZT가 모터 가운데에 위치하고 알루미늄 세라믹으로 된 마찰체가 슬라이더를 마찰력으로 구동시킨다. 마찰력 발생을 위한 수직 항력은 3점으로 구성된 지지부에서 발생시킨다. 그림 1의 우측면도에 나타나 있는 것 처럼 볼트의 회전으로 피스톤을 밀면 피스톤이 디스크 스프링을 탄성 변형시키고 이때 발생한 탄성력이 모터를 밀어 예압을 인가한다.

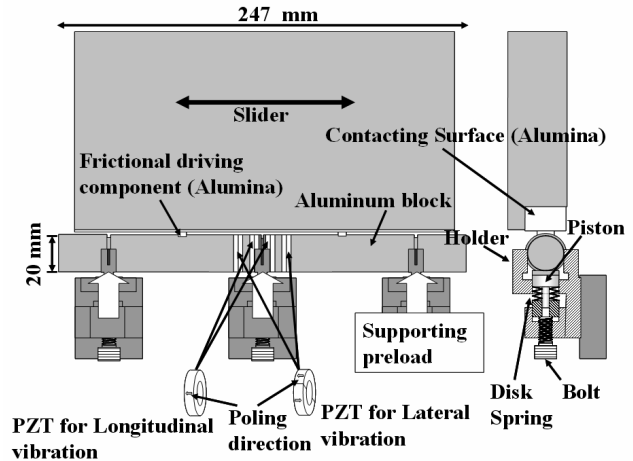
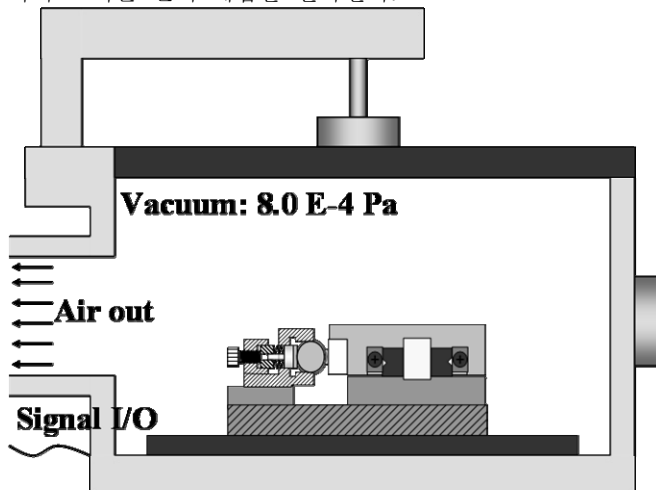


Fig. 1 Ultrasonic linear system for vacuum environment

스테이더의 마찰팁(구동점)이 슬라이더의 마찰표면을 마찰력으로 밀어 슬라이더가 움직이도록 한다. 모터의 횡진동이 마찰팁의 수직운동을 발생시키고 종진동이 수평운동을 발생시킨다. 횡진동과 종진동은 위상차 90도를 가지도록 하여 수평 수직 운동의 합성 패턴이 타원을 이루도록 한다. 또한 모터의 두개의 팁은 마찰 표면에 위상차 180도를 가지고 닿으므로 두개의 팁은 순차적으로 슬라이더를 구동하게 된다. 이때 횡진동 종진동의 위상차를 90도에서 -90도로 변화시키며 슬라이더 구동방향을 제어 할 수 있다.

## 3. 강건설계 및 진공중 위치제어

마찰표면이 완벽한 평면을 이루지 않는 한 구동 점은 불규칙적인 마찰 표면과 접촉할 수 밖에 없다. 또한 모터를 구동할 때 구동 점과 마찰 면이 부딪히며 미세한 마모를 일으키게 되는데 이는 구동 시 마찰 표면은 실시간으로 변화함을 의미한다. 진공 챔버내에 있는 모터시스템에 마찰 표면이 불규칙적으로 변화해 모터 출력에 영향을 주게 되면 모터의 초정밀 제어의 반복 실험성에 치명적인 영향을 주게 된다. 결과적으로 초음파 모터는 마찰표면에 강건성을 갖는 강건 설계가 필요하게 된다. 본 연구는 마찰 평면 잡음인자에 관해 강건성을 갖는 모터를 설계 하기 위해 다구찌 방법을 사용했다. 다구찌 방법은 특정 노이즈 인자에 관해 강건 설계 하는 것이 가능 하고 복잡한 인자들 사이 관계를 최소 실험수로 밝힐 수 있는 설계 방법이다. 그림 2는 다구찌 방법의 초기 설계에 해당하는 변수 구분화 과정을 도표로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 구동주파수, 시스템 인덕턴스, 종진동 입력 전압 그리고 횡진동 입력전압을 설계인자로 지정하고, 정방향과 역방향의 마찰 표면 상태를 잡음인자로 두었다. 스텝 구동을 했을 때에 등속 구간에서 빠른 출력을 나타낼수록 좋다는 목적 함수를 설정하고 실험을 수행했다. 결과적으로 모터는 31.81 kHz 수준의 진동 하에서 마찰에 강건성을 가지고 약 80 mm/sec 출력을 안정하게 구동했다.

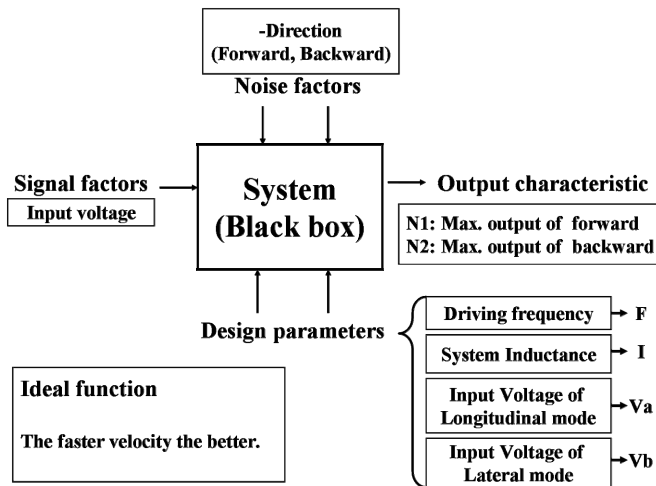


Fig. 2 P diagram for Taguchi method

그림 3 은 진공 중 초음파 모터를 구동하기 위한 제어 알고리즘의 블록 다이어그램을 나타낸다. 초음파 모터는 구동점과 마찰면 사이에 마찰력을 구동력으로 사용한다. 초음파 모터 구동에 가장 알맞은 알루미늄 세라믹은 대기의 압력 변화에 따라 마찰 계수가 바뀐다. 그러므로 본 연구에서는 대기에 따라 바뀌는 마찰력 특성을 보정할 수 있는 NCTF 제어 법을 도입했다.

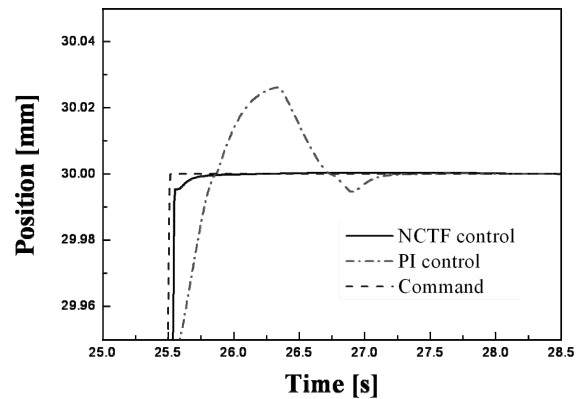


Fig. 4 Positioning control in high vacuum environment

설계된 블록 다이어그램을 토대로  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa 고진공중 30 mm 의 긴 스트로크를 35 mm/sec 의 속도로 위치 제어를 수행했다. 그림 4 는 위치제어 결과를 나타낸다. 그림 4 에서 보이는 것과 같이 고진공중 NCTF 제어를 수행했을 경우 P I 보상기만을 사용했을 때 정상상태 까지 약 2 s 가 걸리는데 반해, 정상상태에 이르는 시간이 약 250 ms 로 빠르게 수렴한 것을 관찰 가능했다.

#### 4. 결론

고진공중 구동이 가능한 초음파 모터를 개발했다. 마찰 표면에 강건성을 가지는 초음파 모터 변수 설계를 하기 위해 다구찌 방법을 도입 했다. 강건설계를 통해 설계된 변수를 기반으로 마찰 상태에 강건성을 가지는 구동 조건을 얻었다. 대기압 조건마다 달라지는 마찰 상태를 보상하기 위해 각각의 기압 조건에 알맞은 NCT phase plane 을 설계했다. 결과적으로 강건 설계를 바탕으로 한 초음파 모터는 수정된 NCTF 제어법을 통해 고진공중 나노미터 수준으로 기존 PI 보상기에 비해 우수한 성능을 나타내며 제어 성능을 발휘 했다..

#### 후기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단 국가지정연구실사업의 지원을 수행된 연구임 (No. R0A-2008-000-10065-0)

#### 참고문헌

1. Wan-Soo Kim, Cheol-Ho Yun, Sun-Kyu Lee, "Nano positioning of a high power ultrasonic linear motor," Japanese Journal of Applied physics, Vol. 47, 5687-5692, 2008.
2. ChaBum Lee, Kazuhiro Hane, WanSoo Kim, Sun-Kyu Lee, "Design of retrodiffraction gratings for polarization-insensitive and polarization-sensitive characteristics by using the Taguchi method", Applied optics , Vol. 47, 3246-3253, 2008
3. Takeshi Morita, Shunichi Takahashi, Hajime Asama, Toshiki Niino, "Rotational feedthrough using an ultrasonic mtor and its performance in ultra high vacuum condition", Vacuum, 70 (2003) 53-57
4. Yui Wu, Alan Wu, *Taguchi Method for Robust Design* (American Society of Mechanical Engineers, 2000)
5. S. Ueha, Y. Tomikawa, *Ultrasonic motors theory and applications*, NewYork ; Oxford Science Publications (1993)
6. K. Uchno, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Boston, London, Kluwer Academic Publishers (1997)

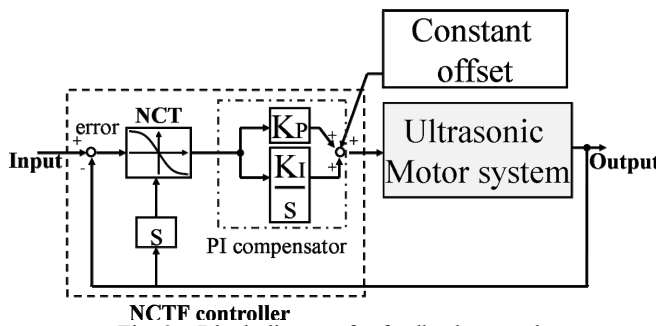


Fig. 3 Block diagram for feedback control

