

## 봉상 초음파 리니어 모터의 정밀 위치제어 특성

윤철호, 김완수\*, 정태욱, 차현록, 이선규\*  
 한국생산기술연구원, \*광주과학기술원

### Precision Control of Ultrasonic Linear Motor

C.H. Yun, W.S. Kim\*, T.W. Jung, H.R. Cha, S.K. Lee\*  
 KITECH, \*GIST

**Abstract** - 반도체산업과 광산업 분야에서 고정도의 위치제어 및 고출력 구동이 가능한 초음파 리니어 모터 시스템의 개발을 목표로, 최대 출력 75N, 위치제어 정밀도 100 nm의 고출력, 고정도 구동 시스템을 제안해 왔다. 본 연구는 nm order의 위치제어와 구동 안정성 향상을 위해 종래 시스템의 지지부 및 제어 시스템을 개선하였다. 개선된 PID 피드백 제어시스템을 구성하여, 6 kg의 스테이지를 step 구동을 수행하여 위치 분해능 20 nm, 속도 70 mm/s로 왕복구동을 수행하여 20 nm의 위치제어를 달성하였다.

#### 1. 서 론

본 논문의 저자는 고강성 지지 가능한 직경 20 mm의 봉상 초음파 리니어 모터를 제안하여 추력 75N, 위치제어 정밀도 100 nm의 고출력, 고정도 구동을 실현하였다.[1] 이 모터 시스템은 동작 안정성과 제어능력을 달성 하였지만, 지지 시스템이 공간 활용에 부적절하고, 100 nm 이하로 위치제어 정밀도를 향상시키기 위한 강성이 부족하였다. 본 연구는 지지부의 문제점을 개선하기 위해 지지부의 소형화와 고강성화 및 신뢰성 높은 지지구조를 제안하고, 새로운 모터 시스템을 설계하여 시스템의 위치제어 능력 향상 및 구동 안정성에 대해 조사 하였다.

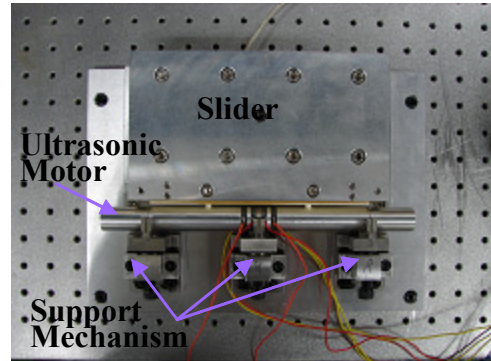
#### 2. 본 론

##### 2.1 초음파 모터 시스템의 구성

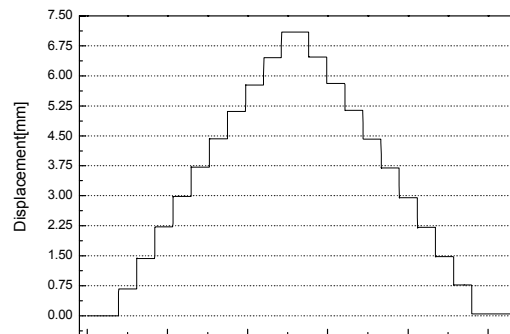
그림1.은 BLT(bolt clamped Langevin-type transducer)방식의 종진동 횡진동 복합 트랜스듀서 타입의 초음파 리니어 모터 시스템을 나타내고 있다. 이 시스템은 종전에 제안한 시스템[1]을 개량한 형태로, 코일 스프링과 리니어 가이드를 사용한 복잡한 지지구조를 디스크 스프링의 채용과 지지부의 강성을 높일 수 있는 고강성화, 소형화를 실현한 구조를 채택하였다. 또한 지지부의 공진주파수를 모터와 동일한 주파수를 갖도록 FEM 해석을 통해 설계하였다. 지지에 의한 진동에의 영향을 줄이기 위해 진동자와의 접촉 부분은 1 mm 폭의 슬릿 상태로 설계하였고, 관성력의 영향이 가장 많은 슬라이더의 진행 방향으로는 슬라이더 정지시의 충격에 견딜 수 있도록 볼트에 의해 견고하게 고정될 수 있도록 설계하였다. 지지기구의 슬릿 부분이 진동자(모터)에 끼워진 상태에서 디스크 스프링에 의해 예압이 조절되고 진동자(모터)와 슬라이더의 접촉면에는 일정 압력의 접촉 상태가 유지된다. 개선된 시스템은 진공중에서의 구동을 고려하여 진공용 스테이지로 제작하였다. 슬라이더의 위치 검출을 위한 엔코더는 기존 구형과 엔코더 (분해능: 50nm)에 비해 분해능이 개선된 정형과 방식의 엔코더 (분해능: 1.56 nm)를 채용하였다. 횡진동 소자에는 외부 코일 인덕터에 의해 증폭된 전압이 인가되며, 또한 외부 물리적 변화에 의한 공진주파수 변화를 보상하는 기능을 가지고 있다. 외부 인덕터를 조정하여 횡진동 공진주파수를 종진동의 공진주파에 일치시킬 수 있다.

##### 2.2 Open Loop Step 구동 특성

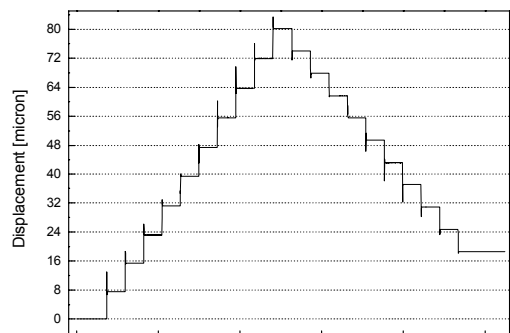
개선된 시스템의 위치제어 특성을 검토하기 위해 우선 Openloop step 구동 특성을 측정하였다. step 구동의 1 step 길이는 100 ms 이며, 이중 구동 전압이 인가되는 시간을 duty로 정의하여 구동하였다. 그림 4.는 duty 10 msec의 결과이며, 그림 5.는 duty 0.5 msec 구동결과를 나타낸다. duty 10 msec 구동의 경우 1step의 변위는 약 750 um 정도로 어느 정도 안정된 구동을 나타내고 있다. duty 0.5 msec의 경우는 1step 변위가 약 8 um 이나 Over shoot가 크게 발생하고 진행 방향에 따른 step 당 변위의 크기가 달라짐을 알 수 있다. Openloop step 구동의 경우 duty가 길어지면 수십 um 정도의 위치제어는 가능할 것으로 예상되나, nm 정도의 위치제어를 달성하기는 어렵다고 할 수 있다. 이는 모터 자체의 구동방향에 따른 속도의존성으로 생각할 수 있으며, 사용하고 있는



<그림 1> 초음파 리니어 모터 시스템



<그림 2> Openloop step 구동 (duty 10 msec)

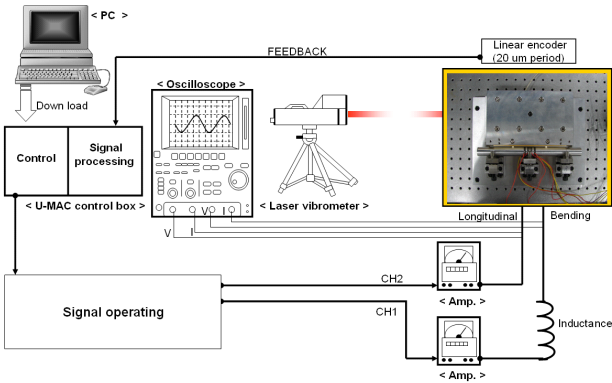


<그림 3> Openloop step 구동 (duty 0.5 msec)

두 진동모드의 커플링, 예압 인가의 불평등, 공진주파수의 불일치, 마찰력의 변화 등 외부인자의 상태에 기인한 것으로 생각할 수 있다. 이러한 구동방향에 따른 특성의 차이를 극복하기 위해서는 시스템 전체를 고려한 종합적인 검토가 더 필요하나, 현 시점에서는 피드백 제어를 구성하여 구동방향에 따른 특성 차이를 개선할 수 있다.

### 2.3 PID 피드백 제어 (Closed Loop Step 구동)

그림 6은 PID feedback 제어 시스템의 구성도이며, 소형, 고강성 지지 기구가 적용된 초음파 리니어 모터 구동 시스템의 위치 제어 특성을 측정하였다. 제어 시스템은 15 nm의 분해능(시스템 잡음을 고려한 분해능)을 가지고 슬라이드의 위치를 검출하기 위해 광학식 선형 엔코더를 사용했고, 엔코더에서 나오는 정현파상의 위치 정보 신호는 피드백 되어 PID제어기를 통해 Motion controller (U-MAC)에 전송 된다. 초음파 모터에 인가되는 구동전압의 진폭은 함수 발생기에 인가된 제어신호가 진폭 변조(AM)되고, 전압증폭기를 거쳐 적절한 진폭 및 위상을 갖는 전압 신호를 중진동과 횡진동 모드의 PZT에 인가하게 된다. 제어 루프는 PC를 이용해 프로그래밍 되어 제어기(U-MAC)로 다운로드 된다. 위치 제어 특성의 향상을 위해 종래의 시스템에서 소프트웨어적인 연산에 의해 처리된 부분을 하드웨어적인 연산시스템으로 구성함으로써 제어속도를 10배 향상 시켰다.



〈그림 4〉 PID feedback 제어 시스템 구성도

제안된 제어 시스템의 성능 평가를 위해 closedloop step 구동 시험을 실행 하였다. 그림 5는 step size 8 um 구동 결과이며, 그림 6은 step size 20 nm 구동 결과를 나타낸다. 진향방향으로 10 step, 역방향으로 10 step, 총 20 step을 구동한 결과이다. step size 8 um 구동의 경우 약간의 over shoot가 관찰되었으나, 정확히 8 um씩 이동하여 최종적으로 초기 위치로 되돌아 오는 것을 알 수 있다. 시스템의 한계를 확인하기 위하여 step size를 시스템의 노이즈 레벨 정도인 20 nm로 조정하여 특성을 측정하였다. step size 20 nm 구동의 경우 시스템 노이즈에 기인하는 15 nm 정도의 노이즈가 발생하고 있지만, 20 nm step의 정밀 구동이 가능한 것을 알 수 있다. 따라서 현 시스템의 step 구동 분해능은 약 20 nm로 정의할 수 있다. 그러나, 시스템 노이즈를 개선 할 경우 수 nm의 step 구동이 가능할 것으로 예상할 수 있다.

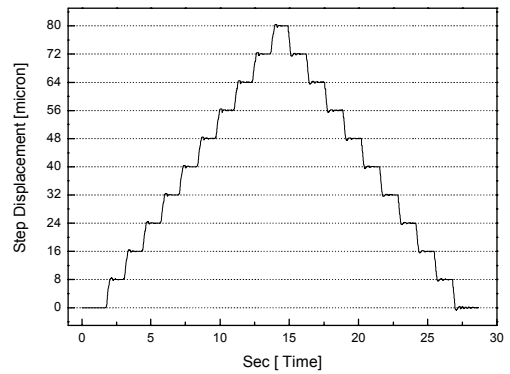
그림 7은 PID피드백 제어를 통해 위치제어 허용오차 50 nm를 가지고 반복 왕복 운동 시의 측정 결과이다. 구동 범위 리셋 위치로부터 ± 20 mm, 속도 75 mm/sec로 구동하였다. 종래의 시스템에 비해 시스템 안정도가 향상되어 반복적으로 안정적인 위치제어가 이루어 질을 알 수 있다. 그림 8은 최종 위치제어가 이루어지는 부분을 확대한 그래프이다. 최종 위치제어는 허용오차 50 nm 이내에서 50 msec의 시간동안 안정적인 위치제어가 가능할 때 성공한 것으로 판단하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 왕복운동의 경우도 최종위치제어 정밀도는 시스템의 노이즈 레벨인 15 nm 정도임을 알 수 있다.

### 3. 결 론

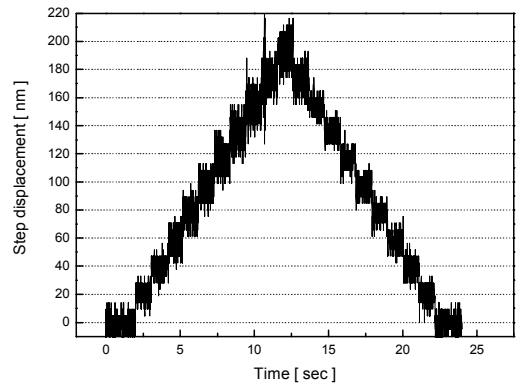
본 연구에서는 종래의 시스템을 개선하여 nm order의 초정밀 위치제어가 가능한 봉상 초음파 리니어 모터 구동시스템을 제안하였다. 이 시스템은 종래의 시스템에 비해 지지기구의 소형화, 고강성화를 달성하였고, 고분해능의 엔코더와 하드웨어적인 연산시스템의 구성을 통해 제어 속도를 10배 향상시킴으로써 nm order의 안정적인 위치제어를 달성하였다. 개선된 PID 피드백 제어시스템을 구성하여, 6 kg의 스테이지를 step 구동을 수행하여 위치 분해능 20 nm, 속도 70 mm/s로 왕복구동을 수행하여 20 nm의 위치 제어를 달성하였다. 향후 반도체 가공공정에서 사용될 수 있는  $10^{-6}$  Torr 이하의 고진공하에서 제안한 시스템의 제어특성을 검토할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

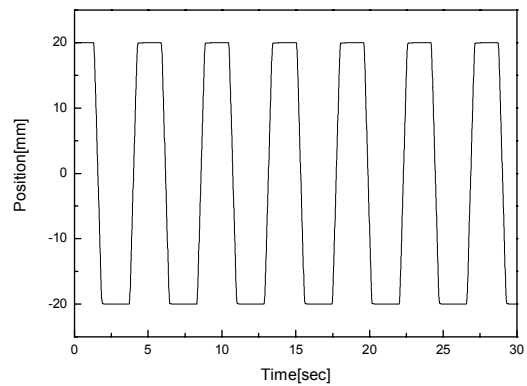
[1] 윤철호, 김완수, 정태욱, 차현록, 김정철, 이선규, “고출력 고정도 초음파 리니어 모터”, 2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 667



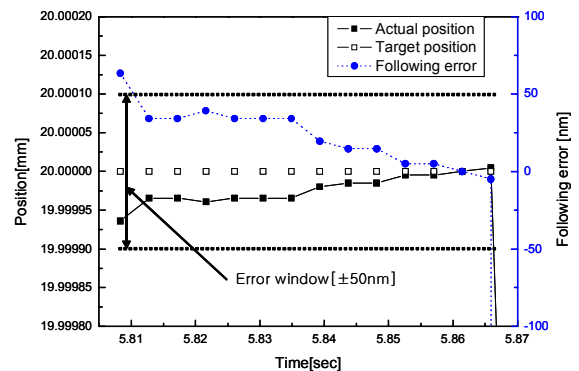
〈그림 5〉 Closedloop step 구동 (step size : 8um)



〈그림 6〉 Closedloop step 구동 (step size : 20 nm)



〈그림 7〉 PID feedback 위치 제어 특성



〈그림 8〉 최종 위치 제어 특성