

다자유도 소형 스테이지 제작을 위한 피에조 선형모터의 구동특성 연구

A Study on the Driving Characteristics of Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor for Multi-DOF Miniaturized Stage

*김유현¹, 유호성², #강병훈²,

*Y. H. Kim¹, H. S. Yoo², #B. H. Kang(kangb@kpu.ac.kr)²

¹ 한국산업기술대학교 기계시스템설계, ² 한국산업기술대학교 기계설계 공학과

Key words : Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor, Piezoelectric Actuator, Natural Frequency, Resonance Frequency

1. 서론

초정밀 마이크로 스테이지는 높은 정밀도 및 반복성을 갖기 위하여 오차의 최소화와 이동시 높은 분해능을 가져야한다. 이러한 기능을 구현하기 위하여 이동가이드와 구동기 및 측정 보상을 위한 센서 등의 여러 가지 조합을 사용한다. 이동가이드는 탄성 변형을 이용하여 부드럽고 연속적인 운동이 가능한 이송 메커니즘 설계가 사용되어지며, 구동기는 나노미터 급의 분해능을 갖는 탄성힌지(Flexure Hinge)와 빠른 응답성과 높은 분해능, 저 전력으로 높은 변위를 갖는 압전소자 구동기(Piezoelectric Actuator)가 사용되고 있다^[1]. 또한 정밀한 다자유도의 스테이지의 형태를 보면 1축을 구동하는 하나의 스테이지를 여러개 조립하여 사용하는 적층형 스테이지와 단일 스테이지에서 다축운동이 가능하게 하는 병렬형 스테이지 등이 사용되고 있다.^[2]

본 연구에서는 Fig.1과 같은 적층형 스테이지의 형태를 갖는 3자유도 스테이지를 제작하기 위하여 피에조 선형 모터(Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor)를 구동기로 하는 1축 스테이지에 관한 구동특성을 연구하였다. 피에조 선형모터의 수학적 모델링과 기구해석 소프트웨어를 사용하여 피에조 선형 모터를 모델링 하고, 고유진동수(Natural Frequency)와 각 조건별 변위 및 속도를 측정하여 1축 스테이지 구동에 적합한 공진주파수(Resonance Frequency)를 알아보았다.

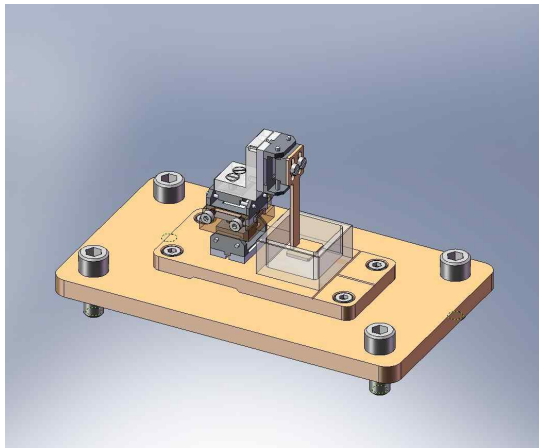


Fig. 1 Schematic Diagram of Multi-DOF Stage

2. 피에조 선형 모터

2.1 피에조 선형 모터 (TULA-50)

본 연구에 사용한 피에조 선형 모터는 피에조 테크놀러지(Piezo Technology)사의 TULA-50이라는 모델이다. TULA-50은 피에조 선형 모터로서 원판 모양의 압전 세라믹에 전압을 인가하게 되면 세라믹이 수축 또는 팽창하며 원판의 수직된 방향으로 변위를 발생한다. 이 원판에 Rod를 결합시켜 Rod의 방향으로 변위를 발생하게 된다. 이 발생변위를 증폭하기 위하여 공진을 이용하며 Rod와 결합한 Mobile과의 마찰력과 관성의 작용으로 인가되는 펄스(Pulse)의 위상차(Duty Ratio)에 의하여 Mobile이 움직이게 된다.^{[3][4]} 피에조 선형 모터는 Fig.2와같이 구성 되어있다.

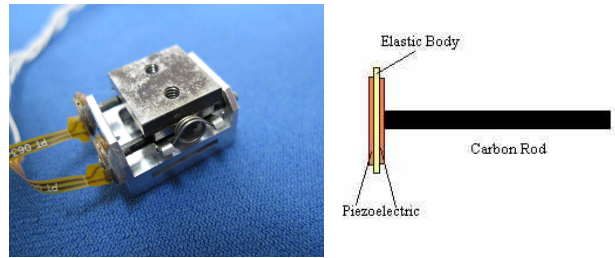
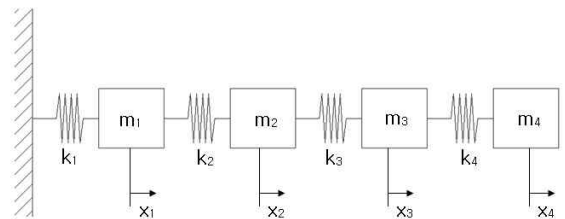


Fig2. Configuration of 1 DOF Piezo Linear Motor

2.2 시스템 모델링

고유 진동수를 구하기 위한 1자유도의 피에조선형 모터에 대한 시스템 모델링은 Fig.3 같이 4자유도로 구성을 하였으며 그에 따른 속성들은 Table1과 같다.



m1, m3: piezo material, m2: elastic body, m4: carbon rod

Fig. 3 System modeling

	Ceramic(①③)	Elastic Body (②)	Carbon Rod (④)
Elasticity(GPa)	93	83	150
Poisson's ratio	0.3	0.313	0.29
Diameter(mm)	5.3	5.5	1.3
Area(mm ²)	22.06	23.8	1.33
Length(mm)	0.14	0.15	16.5
Volume(mm ³)	3.09	3.57	21.9
Density(kg/m ³)	7500	7825	7800
Mass(10 ⁻³ kg)	2.31	2.79	17.08
Stiffness(kg/m)	1.4655e10	1.3146e10	1.2067e7

Table. 1 Material Properties

1자유도의 피에조선형 모터의 강성행렬은 식 (1)과 같으며 Fig3와 같은 모델은 등가강성을 갖는 스프링으로 모델링 할수있으므로 $k_{eq} = \frac{AE}{L}$ 와 같으며 이식에 Table1의 값들을 넣으면 Table1의 강성계수(Stiffness)값이 나오게된다.

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1+k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

고유진동수 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 는 감쇠계수와 관계가 없으므로

$$[M][\ddot{x}] + [K][x] = 0 \quad (2)$$

$$[M]^{-1}[M] = [I] \quad (3)$$

$$[M]^{-1}[K] = [A] \quad (4)$$

$$[I][\ddot{x}] + [A][x] = 0 \quad (5)$$

(2),(3),(4)의 식에서 (5)식으로 변환 할 수 있다. 여기서 sinusoidal 운동을 가정하여 $[x_i] = A \sin(w_i t + \phi_i)$ 라고 하면 $[\ddot{x}_i] = -A_i w_i^2 \sin(w_i t + \phi_i) = w_i^2 x_i$ 이 되고 $\lambda_i = w_i^2$ 이라고 하면 식 (5)는 $[A - \lambda I][x] = 0$ 으로 고유 벡터가 되고 $\lambda_i = w_i^2$ 의 관계식에서 고유 각속도를 구할수있다.

Table1의 Mass 값을 위의 식들에 대입하게 되면 4자유도 이므로 4개의 고유값들이 나오게 되고 그 값들이 바로 고유 각속도 이므로 $f = \frac{1}{2\pi} \omega_n$ 에 대입하게되면 다음의 4가지 고유진동수가 나온다.

$$f = 0, 768000, 390800, 6366200 \text{ Hz}$$

3. 실험결과

2절에서 다룬 해석 결과를 토대로 하여 실제 TULA의 구동조건인 공진점을 찾기 위하여 Evaluation Kit와 자체 제작한 MFC프로그램을 사용하여 입력을 주고 변위를 측정하기위하여 Keyence사의 LKG-150 제품을 사용하여 측정을 하였다.

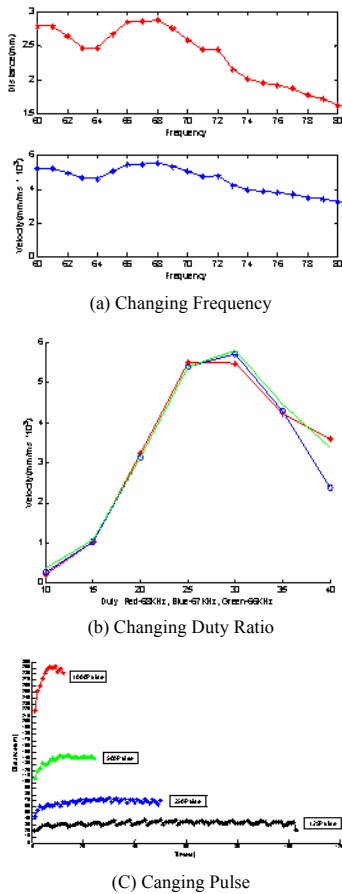


Fig. 4 Motion Characteristics

Mobile의 변위를 증폭시키기 위한 공진점을 찾기 위하여 2절에서 구한 고유진동수의 범위인 30V 60~80KHz의 신호를 Duty Ratio는 25%로 고정한 뒤 10,000Pulse를 인가하여 이동 변위를 측정해보았다. 그 결과 (a)의 그래프와 같이 66,67,68 KHz의 조건에서 가장 좋은 변위와 속도를 보여줬다. 이러한 결과는 2절에서 구한 고유진동수와 약 10KHz정도의 차이를 보여준다. 이는 모델링 및 해석 과정에서 압전 세라믹과 탄성체 그리고 Rod와의 이음을 위한 Epoxy나 Glue 그리고 Mobile과의 구속을 위한 스프링 및 기타 Jig들에 의하여 고유진동수에 오차가 생긴걸로 보여진다.

다음 실험으로 위의 상위 3가지의 Frequency조건에서 Duty Ratio를 변경하여 변위를 측정해보았다. 실험조건은 Frequency는 위의 3가지 조건이며 Duty Ratio는 10~40%로 변화를 주었다. 마찬가지로 10,000Pulse를 인가하여 변위를 측정하여 속도를 구해보았다.

(b)의 그래프를 보면 전체적으로 25%와 30%에서 가장 좋은 속도를 보임을 알수가 있다. 첫 번째 실험에서 68KHz의 경우가 가장 좋은 속도를 보인 반면 두 번째 실험에서는 66KHz의 주파수이면서 25%와 30%의 Duty Ratio를 갖을 때 높은 속도를 보임을 알 수가 있다. 하지만 (b)의 그래프에서 25%와 30%의 두가지 만을 비교해보면 3가지의 주파수 중에서 커다란 차이 없이 안정적으로 값이 유지되는 지점이 25%임을 알 수가 있다. 다음실험으로 Pulse조건에 따른 Mobile의 이동 거리를 측정해보았다. 실험조건은 두 번째 실험에서 얻은 결과로 66KHz의 Frequency에 25%의 Duty Ratio를 기본조건으로 하여 일정 양의 Pulse를 1초씩 간격을 주어서 인가한 뒤 이동 변위를 측정해보았다. 총 이동거리는 TULA가 이동할 수 있는 최대 거리인 34mm이다. 변위 측정결과는 (b)의 그래프와 같으며 실험 결과를 토대로 전체적으로 앞의 1mm지점까지는 변위가 증가함을 보이며 그 이후부터는 약간씩의 오차는 있지만 비슷한 현상을 보이면서 꽤 일정한 변위를 보임을 알 수가 있다. 그리고 인가해주는 Pulse를 줄일수록 비례하여 변위가 줄어들음을 알 수가 있다. 125Pulse를 인가할 경우 평균 25~30um의 변위를 보이는 것을 보았을 때 125Pulse의 약10%인 10Pulse를 일정시간 간격으로 인가했을 경우 1~3um의 변위를 보일 것으로 예상된다.

4. 결론

이번 연구는 압전소자를 구동기로 하는 피에조 선형모터를 구동할 조건 중 이동변위를 증폭시켜줄 공진주파수를 알아내고 그에 부가적으로 이동변위와 속도가 가장 좋을 Duty Ratio의 조건을 알게 되었다. 이번 연구로 마이크로미터 단위의 분해능을 갖는 스테이지 제작의 가능성을 보았다.

1mm 부분의 증가하는 변위는 임팩트 방식의 리니어모터 구동시 Rod의 전영역에 구속조건에 따른 Dead Zone 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 보여진다.^[5] 이에 따라 이를 보상해주기 위한 다른 구속 방법이나 이를 직접적으로 보상해줄 제어가 필요할 것으로 생각이 된다. 더불어 일정 오차를 주기적으로 보이며 생기는 변위를 더 정밀하게 보상해줄 제어기 또한 필요할 것으로 보여진다.

참고문헌

1. 박종성, 정규원, “초정밀 스테이지 설계 및 제어에 관한 연구” 한국 공작 기계 학회 논문집, 111-119 Vol15, No.3 2006.6
2. 강중욱, 백석 외 2인 “초정밀 3축 이송 스테이지의 개발: 2. 제작 및 성능 평가” 한국 정밀공학회지, 제 21권 3호, 155~162, 2004.3
3. 윤석진, 강중훈 외 1인 “ATILA를 이용한 소형 압전 선형 모터의 설계” 전기전자재료 제18권 제12호 18~26 2005.12
4. 양해정, 김광, 외 3인 “원판형 압전 세라믹을 이용한 초소형 휴대용 카메라 액추에이터 개발” 한국정밀공학회 2007년도 춘계 학술대회논문집 109~110
5. 박기범, 김광, “원판형 압전 액추에이터의 샤프트 진동특성연구” 한국정밀공학회 2008년도 춘계 학술대회논문집 185~186
6. S.J.Yoon, J.OPark " A Crawling Based Locomotive Mechanism Using a Tiny Ultrasonic Linear Actuator" 39th International Symposium on Robotics 2008Seoul, Korea / October 15~17, 2008
7. D. F. Ostergaard, T. P. Pawlak “THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENTS FOR ANALYZING PIEZOELECTRIC STRUCTURES” 1986 ULTRASONICS SYMPOSIUM 639~644