

원판형 압전액츄에이터의 샤프트 진동특성연구

A study on the vibration characteristics of shaft on a circular type piezoelectric actuator

*박기범¹, #김광²

*K. B. Park¹, #K. Kim(kimkwang@kpu.ac.kr)²

¹ 한국산업기술대학교 기계시스템설계 ² 한국산업기술대학교 기계설계공학과

Key words : Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor, Longitudinal Vibration, Natural Frequency, Mode Shape

1. 서론

탄성진동인 초음파 진동을 구동원으로 하는 압전 액츄에이터는 주로 마찰에 의해 얻어지는 추진력을 이용한다. 비교적 간단한 구조로 선형 구동이 가능하며 카메라의 초점장치, 보안 시스템, 원자로의 핵연료 작업용 로봇 팔 등에 적용되고 있다.[1]

현재 널리 쓰이고 있는 자기 모터에 비하여 중량당 토크가 크고 기동, 정지등의 제어 특성이 좋으며 전원을 끊어도 마찰력에 의해 제 자리에 머무는 자기유지 기능이 있으나 마찰에 의해 구동되므로 구동 시 접촉부 진동특성에 따라 이동소자의 움직임이 다르게 나타난다.

원판모양의 압전 세라믹에 전압을 인가하게 되면 세라믹이 수축 또는 팽창하게 되며 변형량이 구별되는 원판을 세라믹과 접착시키면 이로 인해 원판 중앙부는 면에 수직한 방향으로 변위를 발생시킨다. 이러한 원리를 이용하여 원판의 중앙에 샤프트를 결합시키면 샤프트의 축방향으로 변위가 발생된다. 또한 발생변위를 증폭시키기 위해 공진을 이용하고 축에 자중으로도 미끄러지지 않을 마찰력을 갖는 이동소자를 위치시키면 샤프트와 이동소자 사이에 발생하는 마찰력과 관성의 작용으로 인가되는 펄스의 위상차 (즉, duty 변화)에 의하여 이동소자가 샤프트에 대해 상대적으로 이동하게 된다.[2]

본 연구에서는 상기와 같이 위상차에 의한 임팩트 방식(초음파 영역)으로 구동되는 액츄에이터의 효과적인 구동을 위하여, 종진동하는 샤프트의 구속조건에 따른 진동특성을 해석과 실험을 통해 파악하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS 를 사용하여 고유진동수와 모드 형상을 통해 특성을 해석하였으며 실험을 위해 원판형의 압전 액츄에이터를 제작하여 임팩트 구동방식을 구현하여 실험을 진행하였다.

2. 종진동 특성

액츄에이터를 하나의 이산계로 가정하면 스프링과 감쇠기에 의하여 질량 전체는 동일한 영향을 받는다. 하지만 샤프트와 같이 이산된 질량, 감쇠, 스프링을 찾아내는 것이 불가능한 연속계는 질량, 감쇠, 탄성의 연속적인 분포를 고려하여 계의 무한한 점이 각각 진동할 수 있다고 가정하여야 한다.

전압을 인가하면 액츄에이터의 원판의 중심 부분이 세라믹의 변형에 의해 상하로 움직이게 된다. 이때 원판의 중앙에 붙어 있는 샤프트는 종으로 진동하게 되는데 이것은 정규함수 $U(x)$ 와 시간함수 $T(t)$ 로 표현된다. 이때 종방향으로 진동하는 샤프트의 진동수 방정식은 무한개의 고유진동수와 정규모드를 갖는 초월방정식으로 표현된다. 식(1)은 길이가 L인 균일 단면 봉의 자유진동 방정식이다.

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x,t) \quad (1)$$

여기서 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (ρ = 밀도 E = 탄성계수) 자유진동방정식은 변수분리를 이용하여 풀 수 있다.

$$u(x,t) = U(x)T(t) \quad (2)$$

식(2)에 식(1)을 대입하면

$$u(x,t) = U(x)T(t) = (A \cos \frac{wx}{c} + B \sin \frac{wx}{c})(C \cos wt + D \sin wt) \quad (3)$$

여기서 w 는 고유진동수이고 A, B, C, D는 경계조건과 초기조건으로 계산할 수 있다. 식(3)에 샤프트고정 경계조건 식(4)을 적용하면

$$u(0,t) = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial x}(l,t) = 0 \quad (4)$$

$$U(x) = C \sin \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (5)$$

정규모드 함수 $U(x)$ 는 식(5)으로 표현되며 진동형은 sine 곡선 모양으로 나타난다. 다시 식(3)에 양단자유의 경계조건은 식(6)을 적용하면

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0,t) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(l,t) = 0 \quad (7)$$

$$U(x) = C \cos \frac{n\pi x}{l} \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (7)$$

$U(x)$ 는 식(7)으로 표현된다. 따라서 양단자유 또는 양단고정이면 진동형은 cosine 곡선모양으로 나타나게 된다.

위 식을 통해 샤프트가 구속조건에 따라 무수한 점이 각기 다른 탄성변위를 보이는 것을 확인하였다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

구속조건에 따른 샤프트의 진동특성을 확인하기 위해 유한요소해석 프로그램을 사용해서 공진주파수와 변위를 계산했다. 시뮬레이션과 실험에 사용된 Fig. 1은 탄성체의 양면에 세라믹이 접착된 원판과 그 중앙에 샤프트가 접착된 bi-morph의 형태의 액츄에이터이다. 실험에서는 이동소자의 변위를 레이저변위계로 측정해서 샤프트의 임의의 구간별 속도를 구했으며 속도의 증가 감소는 샤프트 구간별 탄성변위의 크기와 비례하다고 가정하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

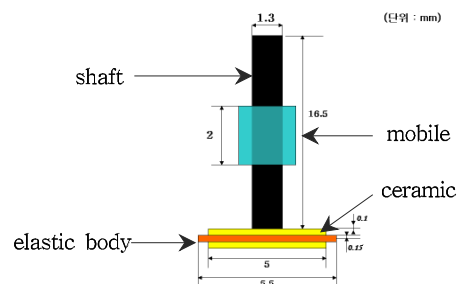
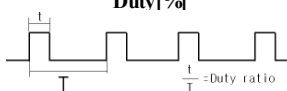


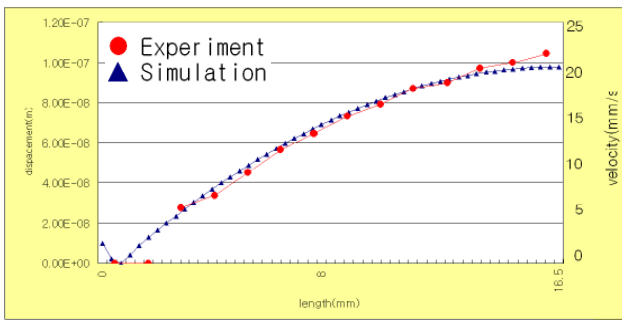
Fig. 1 A circular type piezoelectric actuator

Table 1 Simulation and experiment conditions

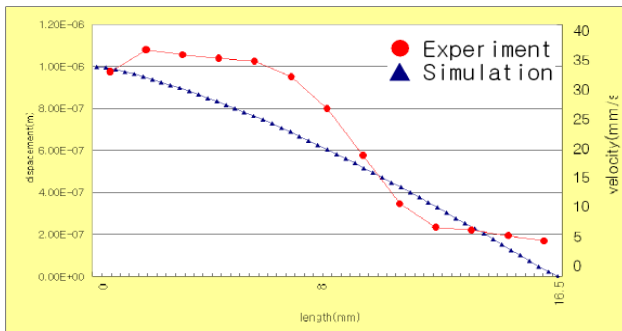
Mobile length[mm]	2
Driving voltage [V]	15
Duty[%]	25



먼저 Free-Free에서 액츄에이터의 공진주파수를 계산하였고 공진주파수 54 kHz임을 확인했다. Table 2의 결과와 같이 실험에서 이때의 공진주파수는 50~60 kHz정도로 유사한 결과를 얻었다. 시뮬레이션에서 구한 샤프트의 각 절점에서의 탄성변위를 Fig. 3 (a)에 나타내었다. 원판에서 약 1mm 지점의 샤프트에서 탄성변위가 0인 node가 생기는 것을 알 수 있다. 일종의 dead zone으로 실험결과에서도 원판에서 약 3mm 지점까지 이동소자가 움직이지 않는 것을 알 수 있으며 샤프트에서 이동소자를 왕복 구동하여도 이동소자는 원판으로부터 3mm 떨어진 나머지 영역에서만 움직임이 측정되었다. 또한 시뮬레이션의 탄성변위 크기와 비례하게 구간별 속도가 나타났다 (그래프의 우측 종축).



(a) Free-Free



(b) Shaft clamped

Fig. 3 Comparison of simulation and experiment

Table 2 Simulation and experiment results

구속조건	Free-Free		Shaft clamped	
	계산	실험	계산	실험
공진주파수 [kHz]	54	50~60	130	90~100
평균속도[mm/s]	16.85		35.5	

다음은 샤프트를 고정했을 때 액츄에이터의 공진주파수로 해석결과 130 kHz이었으며 Free-Free 조건보다 약 2배 이상 높게 나타났다. Table 2에서의 실험결과와 같이 해석보다 낮은 주파수로 측정 되었는데 이는 샤프트 구속부의 접착이 rigid 하지 못한 것이 원인으로 판단된다. Fig. 3 (b)의 시뮬레이션 결과에서는 샤프트 전체의 탄성변위가 고정부에서부터 sine곡선의 형태로 나타났고 샤프트에서 탄성변위가 0인 node가 나타나지 않았다. 실험결과에서도 dead zone 은 발생하지 않았으며 샤프트 전 구간에서 이동소자는 왕복운동을 할 수 있었다. 또한, 고정부 즉 구속부로부터 멀어질수록 이동소자의 이동속도가 증가함은 이론과 근사한 일치를 보였다. 그러나 free-free 상태에서의 이동속도 프로파일과는 달리 1cycle의 형태를 갖고 있어 일단이 구속된 형태의 종방향 운동과 유사한 형태의 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 임팩트 방식의 리니어모터의 보다 효과적인 구동에 위하여 시뮬레이션과 실험을 통해 샤프트의 구속조건에 따라 달라지는 진동특성을 비교하였다.

또한 구동시 샤프트에 dead zone 이 발생하는 문제점을 샤프트의 끝을 고정하는 방법으로 해결하였으며 해석과 실험이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

임팩트 구동 방식에서 이동소자의 운동을 샤프트의 전 영역에서 얻기 위해서는 구속조건이 중요하며, 끝단 지지의 경우 구동주파수가 2배 높아짐에 따라 더 빠른 속도를 얻을 수 있게 되었다.

이 경우 속도 프로파일이 일단 고정의 종방향 운동 형태와 유사함을 알 수 있었다.

또한, 이론과 같이 샤프트의 전 구간에 대한 이동속도는 동일하지 않았으며 이것은 종방향 탄성변위의 크기와 비례하게 나타났다.

향후 이를 통해 임팩트 방식의 리니어 모터의 구동특성을 이용하여 카메라 폰의 렌즈 구동 등에 활용하고자 한다.

후기

본 연구는 2007년 중소기업 기술혁신 개발사업의 연구비 지원으로 (주)피에조테크놀리지와 공동 진행한 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. 윤석진, 강종윤, "압전초음파모터의 개발과 응용현황," 세라미스트, 제8권 제1호, 2005년 2월.
2. 양해정, 김광, 박기범 외2인, "원판형 압전세라믹을 이용한 초소형 휴대폰 카메라 액츄에이터 개발", 한국정밀공학회 2007년도 춘계학술대회논문집, 111-112, 2007.