

초음파에 의해서 가진되어지는 Flexural Beam의 동특성에 관한 연구

A study on the dynamic characteristics of exciting Flexural beam
by ultrasonic wave

정상화* · 신상문† · 김광호** · 이상희** · 김주환**

Sang Hwa Jeong, Sang Moon Shin, Gwang Ho Kim, Sang Hee Lee and Ju Hwan Kim

Key Words : Ultrasonic Wave Generator (초음파 발생장치), Ultrasonic Levitation (초음파 부상), Vibration Characteristics(진동특성), Flexural Beam(탄성빔).

ABSTRACT

In recent years, the semiconductor industry and the optical industry is developed rapidly. The recent demand has expanded for optical components such as a optical lens, a optical semiconductor and a measuring instrument. Object transport systems are driven typically by the magnetic field and the conveyer belt. Recent industry requires more faster and efficient transport system. However, conventional transport systems are not adequate for transportation of optical elements and semiconductors. Because conveyor belts can damage precision optical elements by the contact force and magnetic systems can destroy the inner structure of semiconductor by the magnetic field.

In this paper, the levitation transport system using ultrasonic wave is developed for transporting precision elements without damages. This transport system is using 2-mode ultrasonic wave excitation and flexural beam modes shapes are evaluated. It compared simulation results with experimental results

기 호 설 명

- P : 진폭
- V : 전단력
- M : 굽힘모멘트
- L : 탄성빔의 전체 길이 (mm)
- w_n : 탄성빔의 고유 주파수 (Hz)
- w : 탄성빔에 가해지는 주파수 (Hz)
- k_B : 탄성빔의 웨이브 넘버
- λ : 웨이브 길이
- ρ : 탄성빔의 밀도 (g/mm^3)
- A : 단면적 (mm^2)
- E : 탄성 계수 (GPa)
- I : 단면모멘트 (mm^4)

1. 서 론

전자제품이나 광통신, 반도체등 광소자의 응용 범위가 상당히 넓어지고 있다. 광소자의 기술이 넓은 범위에 적용되면서 광소자의 부품들의 수요와 함께 광소자의 생산성도 증가하였다. 대부분의 공장에서는 설계, 제조, 검사, 출하 등 모든 공정이 자동화 시스템으로 이루어져있다. 모든 공정에서 빠질 수 없는 것 중에 하나가 이송 시스템이다. 기존의 이송 시스템은 컨베이어 벨트를 이용한 방식과 자기를 이용한 방식으로 이루어져 있다. 그러나 기존의 물체 이송 시스템들은 반도체나 광소자 부품들을 이송하는데 적합하지 않다. 반도체에 있어서는 자기적 영향이나 작은 정전기에 민감하게 작용되어 전자적 배열을 손상을 주어 불량품의 원인이 된다. 그리고 광학 렌즈 등의 광소자는 이송 공정에서 접촉력에 따른 표면 손상으로 인하여 작은 흠집이나 스크래치로 빛 손실을 가져오게 된다. 이러한 손상들은 광소자를 생산하는데 있어 불량품의 원인이 되고 생산성에도 영향을 미치므로 기존의 이송 시스템은 실무에 도입되어 사용하기

† 조선대학교 대학원
E-mail : moon694@lycos.co.kr
Tel : (062)230-7951 Fax : (062)230-7178

* 조선대학교 기계공학과

** 조선대학교 대학원

엔 부족한 실정이다. 초음파를 이용한 물체 부상 이송시스템은 반도체 산업과 광산업 분야에서 필요로하는 요구 조건을 충족시킬 수 있다. 초음파를 이용한 이송에 대한 연구는 80년대 말부터 일본을 중심으로 초음파 모터 개발에 관한 연구로 시작되었다.^{(1),(2)} 지금까지의 대부분의 연구들은 모터소음을 줄이기 위한 목적으로 초음파 로터리 모터에 대한 연구들이었다.

본 논문에서는 초음파 부상을 이용한 물체 부상 이송 시스템을 개발하였고 탄성빔 진동 모드의 시뮬레이션한 결과와 실험한 결과를 비교하였다.

2. 탄성빔의 진동 모드

2.1 정상파와 진행파

초음파에 의한 진동은 정상파(Standing wave)와 진행파(Traveling wave)로 이루어 진다. 정상파와 진행파의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{정상파} : u_s(x,t) &= A \cos kx \cos \omega t \\ \text{진행파} : u_t(x,t) &= A \cos(kx - \omega t) \\ u_t(x,t) &= A [\cos kx \cos \omega t] + \\ & \quad A [\cos(kx - \pi/2) \cos(\omega t - \pi/2)] \end{aligned}$$

진행파는 90°의 위상차를 갖는 두 개의 정상파를 중첩함으로써 진행파를 만들 수 있다. 종파와 횡파의 결합 때문에 탄성빔표면의 입자는 타원형의 궤도를 그리며 움직인다. 이러한 특징을 이용하여 물체를 부상 이송시킬 수 있다.

2.2 탄성빔의 횡 굽힘 진동 이론

초음파를 전달 받은 탄성빔은 길이방향인 횡진동을 하게 된다. Fig. 1은 횡진동을 하는 탄성빔의 요소 안에서 굽힘 모멘트와 전단력을 나타낸 것이다.⁽³⁾

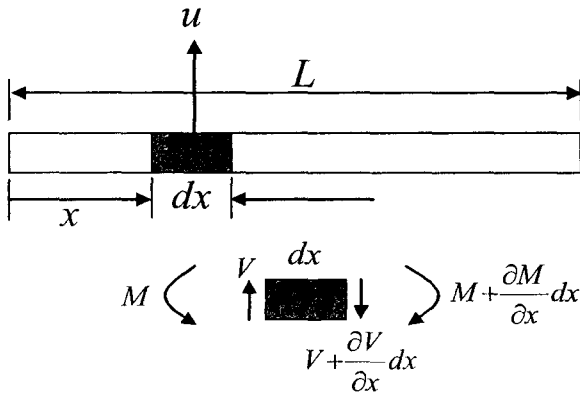


Fig. 1 Bending Moments and Shear Forces in a Beam

굽힘 모멘트의 합과 빔의 휨(Deflection) 이론에 의해서 식 (1)과 같은 횡방향에서 굽힘 모멘트의 오일러 빔 방정식 (Euler Beam Equation)을 유도 할 수 있다.

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

식 (1)에 대한 일반해는 식 (2)와 같이 표현되어진다.

$$u(x,t) = \varnothing(x)q(t) \quad (2)$$

시간에 대한 함수와 공간에 대한 함수를 분리하면 식 (3)과 같은 두 개의 방정식으로 표현 된다.

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \omega^2 q(t) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^4 \varnothing(x)}{dx^4} - k_B^4 \varnothing(x) = 0$$

경계 조건과 초기 조건을 이용하여 식 (3)을 전개할 수 있다. 경계조건을 이용하여 주파수 방정식을 유도하면 식 (4)를 구할 수 있다.

$$1 = \cosh k_B l \cdot \cos k_B l \quad (4)$$

$\cos k_B l$ 과 $\frac{1}{\cosh k_B l}$ 의 곡선의 교점을 이용하여 4.730041, 7.853205, 10.995605, 14.137165, 와 같은 $k_B l$ 을 구할 수 있다.

탄성빔의 고유 진동수는 식 (5)와 같다.

$$\omega_n = \frac{(k_B l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (5)$$

2.3 탄성빔의 모델링

두 개의 가진 주파수를 갖는 탄성빔의 자유물체도 (Free-Body Diagram)는 Fig. 2와 같다. $P \cos \omega t$ 와 $P \sin \omega t$ 는 탄성빔에 가해지는 주파수이고 l_1 과 l_2 는 탄성빔의 끝에서 각각의 혼과 연결된 부위까지의 거리이다. 이러한 시스템에 대한 정상 상태 응답은 식 (6)과 같다.⁽⁴⁾

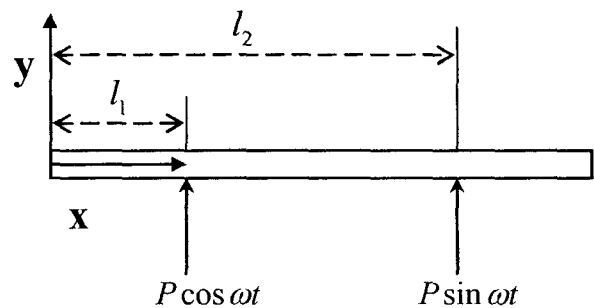


Fig. 2 Beam Model of Prototype

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\varnothing_n(x)P \cos \omega t \varnothing_n(l_1)}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} + \frac{\varnothing_n(x)P \sin \omega t \varnothing_n(l_2)}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \quad (6)$$

식 (6)에서 $\varnothing(x)$ 는 Mode Shape을 나타내는 것으로 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\varnothing(x) = \sinh k_B x + \cosh k_B x + \alpha (\cos k_B x + \cosh k_B x) \quad (7)$$

$$\text{where } \alpha = \frac{\sinh k_B l - \sinh k_B l}{\cosh k_B l - \cos k_B l}$$

식 (7)에서 모드가 증가함에 따라 α 는 -1에 근접하게 되고 $\sinh k_B x - \cosh k_B x \approx 0$ 이므로 $\varnothing(x)$ 는

$$\varnothing(x) = \sinh k_B x - \cosh k_B x = \sqrt{2} \sin(k_B x - \pi/4)$$

과 같은 Mode Shape 방정식을 구할 수 있다. 따라서 탄성 빔의 x 축을 따라 시간 t 에서 거리 x 만큼 떨어진 곳에서의 변위 u 는 식 (8)과 같이 정리 되어 진다.

$$u(x,t) = \left[\frac{2P \varnothing_n(l_1)}{(w_n^2 - \omega) \sqrt{\rho a}} \sin(k_{Bn} x - \pi/4) \cos \omega t + \frac{2P \varnothing_{n+1}(l_2)}{(w_{n+1}^2 - \omega) \sqrt{\rho a}} \sin(k_{Bn+1} x - \pi/4) \sin \omega t \right] + \left[\frac{2P \varnothing_{n+1}(l_1)}{(w_{n+1}^2 - \omega) \sqrt{\rho a}} \sin(k_{Bn+1} x - \pi/4) \cos \omega t + \frac{2P \varnothing_n(l_2)}{(w_n^2 - \omega) \sqrt{\rho a}} \sin(k_{Bn} x - \pi/4) \sin \omega t \right] \quad (8)$$

식 (5)를 이용하여 시뮬레이션한 탄성 빔의 고유 주파수를 Table 1에 나타내었다. Fig. 3에 31차 모드에서의 Mode Shape을 나타내었다.

Table 1 Natural Frequency of Euler Equation

n th Mode	Frequency (kHz)
26 th	20.2
27 th	21.7
28 th	23.3
29 th	25.0
30 th	26.7
31 th	28.5
32 th	30.4

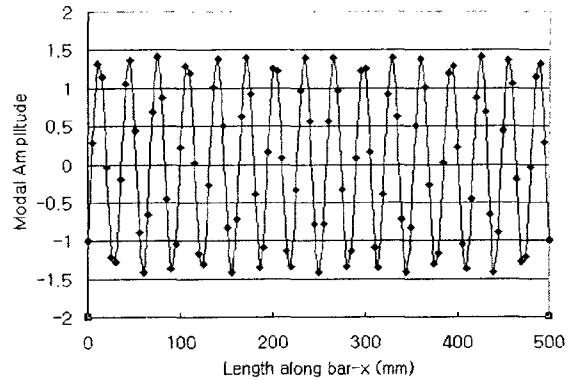


Fig. 3 Mode Shape of 28.5kHz

2.4 탄성 빔의 유한 요소 해석

유한 요소 해석을 통하여 탄성 빔의 고유 주파수를 찾기 위하여 Fig. 4와 같이 모델링 하였다. 유한 요소 해석을 위한 입력 조건을 Table 2에 나타내었다. 탄성 빔의 측면에 슬라이드 구속 조건을 주어 해석하였다.

해석 결과로 얻어진 탄성 빔의 고유 주파수를 Table 3에 나타내었다. 38차 모드에서 28.2kHz의 주파수가 발견되었다. 빔의 휨 현상이 나타나지 않는 경우를 제외하면 28.2kHz의 주파수는 31차 모드에서 형성된다. 이 때의 Mode Shape을 Fig. 5에 나타내었다.

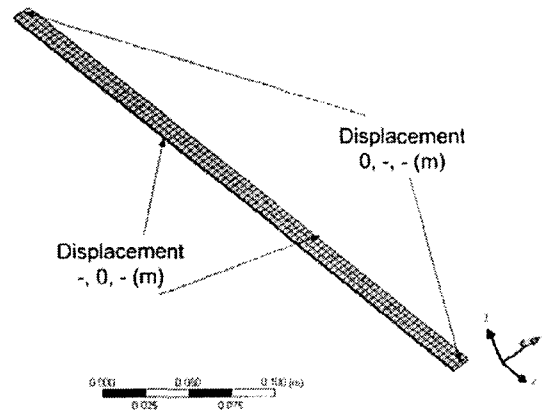


Fig. 4 Modeling of Flexural Beam

Table 2 Input Conditions for FEM Analysis

		Flexural Beam
Mesh	Mesh Type	Solid Mesh
	Meshing Type	Standard
	Element Size	0.005m
	Nodes	2618
	Elements	300
	Properties (Duralumin 7075)	Elastic Modulus
Poisson's Ratio		0.33
Shear Modulus		2.69E+10 N/m ²
Density		2810 kg/m ³
Yield Strength		5.03E+08N/m ²
Boundary Condition	Constraint	Side 2 face = (-, 0, -) End 2 face = (0, -, -)

Table 3 Natural Frequency of FEM Analysis

n th Mode	Frequency (kHz)
33 th	21.8
34 th	23.4
35 th	25.0
36 th	26.5
38 th	28.2
39 th	30.0
40 th	31.7

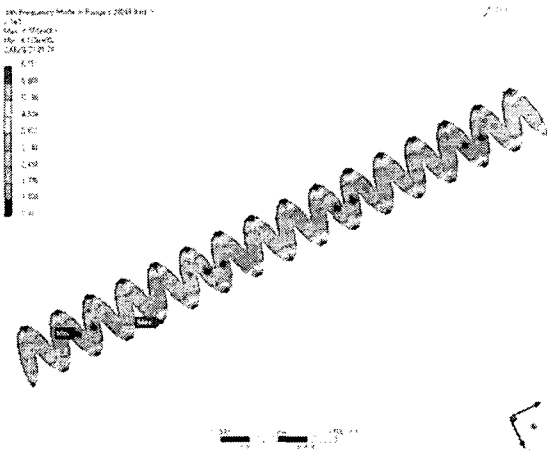


Fig. 5 Mode Shape of 28.2kHz

3. 초음파 이송시스템

3.1 실험 장치 구성

초음파 부상을 이용한 물체 부상 이송 시스템의 구성은 Fig. 6과 같이 함수를 발생시켜주는 함수발생기(Function synthesizer), 발생된 함수를 증폭시켜주는 파워증폭기(Power amplifier), 초음파를 발생시켜주는 초음파 발생 장치(Ultrasonic wave generator), 초음파를 전달받아서 부상과와 진행과를 발생시키고 물체를 이송시키는 가이드 역할을 하는 탄성빔(Flexural beam)으로 구성된다. 채널 1과 2에 사용되어진 초음파 발생장치는 본 연구를 통해 개발한 장치로서 PZT 액츄에이터, 부스터와 혼으로 구동된다.^{(5),(6)} 길이가 500mm이고 단면이 11mm×3mm인 직사각형 모양의 탄성빔은 Node Line이 아닌 부분에 원추형으로 설계한 혼과 볼트로 체결되어 있다. 혼과 탄성빔의 재질은 음향학적 성질이 뛰어난 듀랄루민 7075를 사용하였다.

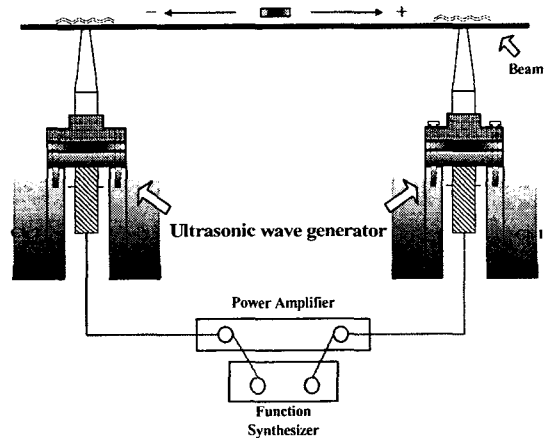


Fig. 6 Layout of an Object Transport System.

3.2 진행 주파수 측정

초음파 물체 부상 시스템에서 물체를 이송하기 위해서는 초음파 발생장치의 진행주파수를 찾아야 한다. 진행주파수를 찾기 위해서 ±500V의 일정한 입력전압과 두 개의 초음파 발생장치에 90°의 위상차를 주어 20g의 물체를 이송하는 실험을 수행하였다. 이 때 주파수를 26kHz부터 28.4kHz까지 100Hz씩 변화시키면서 물체의 이송변화를 관찰하였다.

Fig. 7은 주파수 변화에 따른 물체의 이송거리를 나타낸 그래프이고, Fig. 8은 주파수 변화에 따른 물체의 이송속도를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 거리와 속도 값의 (+)부분은 물체의 이송방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되는 경우이고, (-)부분은 이송방향이 오른쪽에서 왼쪽으로 진행되는 경우이다.

는 경우를 나타낸 것이다. 그리고 거리와 속도 값이 0인 부분은 물체가 움직이지 않은 부분이다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 물체는 28.0kHz에서 이송 속도가 32.2mm/s로 가장 빠른 이송 속도를 나타내었고, 안정적인 이송을 보였다. 그러므로 물체를 이송시키기 위한 최적 진행주파수는 28.0kHz 부근임을 알 수 있었다.

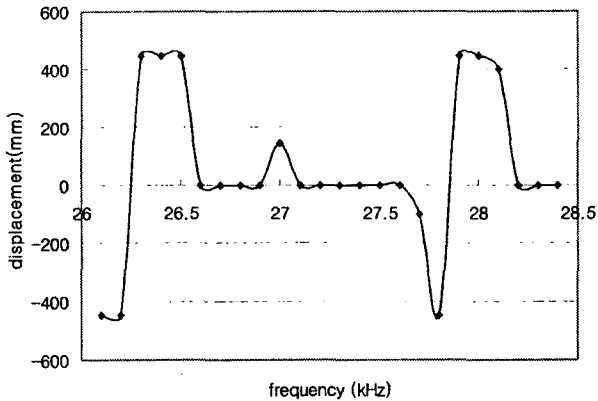


Fig. 7 Displacement according to Frequency

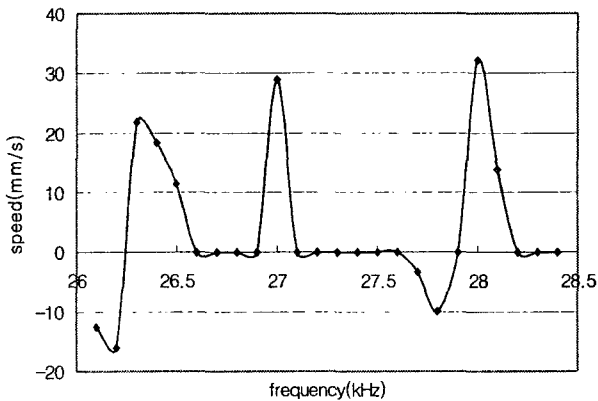


Fig. 8 Speed according to Frequency

4. 결론

본 논문에서는 초음파를 이용한 물체 부상 이송 시스템을 개발하였고 물체를 이송하는 진행 주파수를 찾았다. 진행 주파수를 찾기 위해서 진행파에 대한 이론적 접근을 통하여 진행 주파수를 찾고 유한 요소 해석을 통하여 데이터를 검증하였다. 또한 실제 초음파를 이용한 이송 장치를 구성하여 실험을 통해 진행 주파수를 측정하였다. 진동자의 공진 주파수를 고려하여 28kHz 부근에서 실험하였다.

이송 주파수를 이론적 식을 통하여 규명할 수 있었고 실제 시스템에서 이 값이 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한 주파수를 구하는 공식을 통해 탄성빔의 길이가

진행 주파수에 많은 영향을 줄 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Jeong, S. H., Kim, T. H., Shin, B. S. and Cha, K. R., 2003, A Study on Object Transport System using 2-Mode Ultrasonic Wave, Proc. KSPE Spring Conference, pp. 1170-1173.
- (2) Matsuo, E., Koike, Y., Nakamura, K., Ueha, S. and Hashimoto, Y., 2000, Holding characteristics of planar objects suspended by near-field acoustic Levitation, Ultrasonics 38, pp. 60-63.
- (3) Norton, M. P., 1989, Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, Cambridge University Press, pp. 81-85.
- (4) Rao, S. S., 2004, Mechanical Vibrations, MA, Addison-Wesley, pp. 609-622.
- (5) Kurosawa, M., Nakamura, K., Okamoto, T. and Ueha, S., 1989, An Ultrasonic Motor Using Bending Vibrations of a Short Cylinder, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control., Vol. 36, No. 5, pp. 517 ~ 521.
- (6) Nakamura, K., Kurosawa, M. and Ueha, S., 1991, Characteristics of a Hybrid Transducer-Type Ultrasonic Motor, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control., Vol. 38, No. 3, pp. 188 ~ 193.