

# 초음파 이송장치에서 탄성 빔의 진동을 이용한 물체 이송방향 제어

## Control of Object Transport Direction Using Vibration of Flexural Beam in Ultrasonic Transport System

정상화†·박진완\*

Sang Hwa Jeong†, Jin Wan Park\*

**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 are developed rapidly. The recent demands have expanded for optical components such as the optical lens, the optical semiconductor and the 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. The 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. The steady state flexural vibration of the beam is expressed using Euler-Bernoulli beam theory. The transport direction of an object is examined according to phase difference and frequency. The theoretical results are verified by experiments.

### 기 호 설 명

- $F$  : 진폭  
 $V$  : 전단력  
 $M$  : 굽힘 모멘트  
 $l$  : 탄성 빔의 전체 길이 ( $mm$ )  
 $w_n$  : 탄성 빔의 고유 주파수 ( $Hz$ )  
 $w$  : 탄성 빔에 가해지는 주파수 ( $Hz$ )  
 $k_B$  : 탄성 빔의 파동수  
 $\lambda$  : 파장  
 $\rho$  : 탄성 빔의 밀도 ( $g/mm^3$ )  
 $A$  : 단면적 ( $mm^2$ )  
 $E$  : 탄성 계수 ( $GPa$ )  
 $I$  : 단면모멘트 ( $mm^4$ )  
 $m$  : 질량

### 1. 서 론

광통신의 발달로 광소자의 적용분야가 넓어지면서 광소자의 생산량이 증가하고 있다. 이송 공정은 생산 공정에서 빠질 수 없는 중요한 공정이며 생산성에 막대한 영향을 준다. 현재까지는 이송 공정에 컨베이어 벨트나 자기를 이용하여 물건을 이송하고 있다. 그러나 기존의 물체 이송 시스템들은 반도체나 광소자 부품들을 이송하는데 적합하지 않다. 광학렌즈를 컨베이어 벨트로 이송하는 경우 접촉력에 의해 렌즈 표면이 손상 될 우려가 있다. 또한 자기를 이용하는 경우 반도체는 자기적 영향이나 작은 정전기에도 민감하게 작용되어 전자적 배열에 손상을 입기 때문에 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 이송 방법으로 초음파 부상 (ultrasonic levitation)을 이용하여 물체를 이송하는 시스템이 연구되고 있다.<sup>(1)</sup> 초음파를 이용한 구동기에 대한 연구는 1990년대 초반부터 미국과 일본을 중심으로 진행되었다. P. I. Ro<sup>(2)(3)</sup>는 초음파를 이용한 물체 이송장치에 관하여 연구하였고, Toshiku Sashida<sup>(4)</sup>는 1982년에 진행파 모터 (traveling-wave motor)라고 불리는 초음파 액츄에이터를 제안하였다. 지금까지의 대부분의 연구들은 모터 소음을 줄

† 교신저자; 조선대학교 기계공학과  
E-mail : shjeong@chosun.ac.kr  
Tel:(062) 230-7178, Fax:(062) 230-7178

\* 조선대학교 대학원

이기 위한 목적으로 진행되었다.

본 논문에서는 초음파 이송장치에서 탄성 빔의 진동을 이용하여 물체 이송방향을 제어하였다. 오일러-베르누이 빔 이론(Euler-Bernoulli beam theory)을 사용하여 탄성 빔의 고유 주파수를 구하고, 진행 주파수를 예측하였다. 또한 위상차에 따른 물체 이송방향 변화에 대하여 이론적으로 해석하고 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 초음파 이송 장치의 제작

초음파를 이용한 물체 이송 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. 초음파 이송 시스템은 함수발생기(function synthesizer)에서 발생된 신호를 파워증폭기(power amplifier)에서 증폭시킨다. 증폭된 신호는 초음파 발생 장치(ultrasonic wave generator)에 입력되어 초음파를 발생하게 되고 물체를 이송시키는 가이드 역할을 하는 탄성 빔(flexural beam)에 전달된다. 탄성 빔의 양쪽 끝 부분에 결합한 초음파 발생 장치는 BLT(Bolt-clamped Langevin type Transducer), 부스터(booster), 혼(horn)으로 구성된다. BLT는 하이파워 용도를 목적으로 개발한 압전 세라믹으로 구성되어 있고 혼은 발생된 초음파를 이차적으로 증폭시켜 탄성빔에 전달하기 위해 원추형으로 제작하였다. 혼과 탄성빔은 음향학적 효과가 뛰어난 두랄루민 7075를 사용하였다. 탄성 빔은 11mm × 3mm인 직사각형의 단면을 갖고 길이는 500mm이다. 탄성 빔의 체결은 노달 라인(nodal line)이 아닌 위치에 혼과 볼트로 체결하였다.

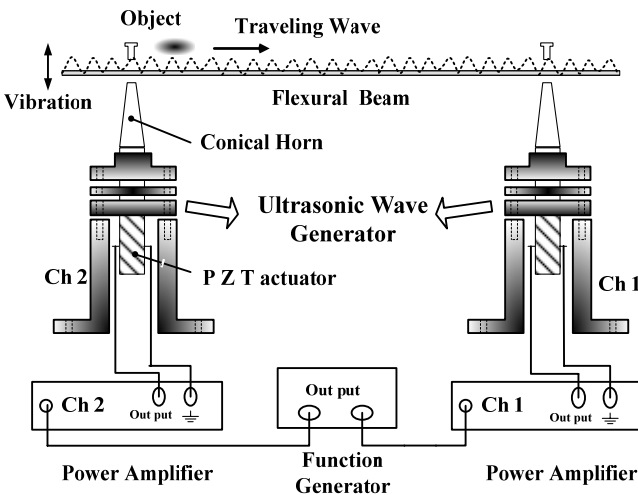


Fig. 1 Schematic Diagram of Ultrasonic Transport System

## 3. 초음파 이송 시스템의 이론적 해석

### 3.1 정상파와 진행파

초음파에 의한 진동은 정상파(standing wave)와 진행파(traveling wave)로 이루어진다. 정상파와 진행파의 식은 다음과 같다.

$$\text{정상파} : u_s(x,t) = a \cos kx \cos wt \quad (1)$$

$$\text{진행파} : u_t(x,t) = a \cos(kx - wt) \quad (2)$$

$$u_t(x,t) = a[\cos kx \cos wt] + a[\cos(kx - \pi/2)\cos(wt - \pi/2)]$$

진행파는 90°의 위상차를 갖는 두 개의 정상파가 중첩되어 발생한다. 종파와 횡파의 결합으로 탄성 빔 표면의 입자는 타원형의 궤도를 그리며 움직인다. 이러한 특징을 이용하여 물체를 부상 이송시킬 수 있다.

### 3.2 탄성 빔의 축약 이론

탄성체 변형을 단순한 기하학적 식으로 근사화할 때 탄성체의 두께 방향으로 직선상 질점들이 변형 후에도 동일 직선상에 위치한다고 가정한다. 탄성 빔의 진동 변위에 관한 모델링 방정식을 구하기 위해서는 전단 효과가 무시된 오일러-베르누이 이론이나 전단 효과를 고려한 티모셴코 이론(Timoshenko theory)을 적용한다. Fig. 2에 오일러-베르누이 이론과 티모셴코 이론의 가정을 나타내었다. 중심선에 수직인 직선이 변형 후에도 직선으로 남는 것은 동일하지만 오일러-베르누이 가정의 경우는 중심선에 수직으로 남고, 티모셴코 가정에서는 중심선에 수직으로 남지 않고 기울어지게 된다. 두 이론의 선택은 길이에 대한 두께비가 구분한다. 일반적으로 보의 길이 대 두께비가 20 : 1 이상이면 오일러-베르누이 이론을 적용하고 10 : 1보다 작으면 티모셴코 이론을 적용한다.

본 연구에서 사용된 탄성 빔은 길이 대 두께비가 20 : 1 이상이므로 오일러-베르누이 빔 이론을 사용하였고, 탄성 빔의 진동변위에 관한 모델링 방정식을 전개하기 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 빔은 균일한 성분을 갖는다.
- 빔의 재질은 균일하고 후크의 법칙(Hook's law)을 따른다.
- 축방향의 힘이 없다.
- 운동하는 동안 평면은 평면을 유지한다.
- 전단력과 전단 모멘트는 무시한다.

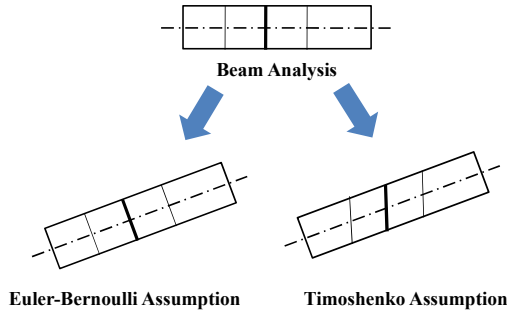


Fig 2. Assumptions of Beam Theory

### 3.3 탄성 빔의 해석

초음파 진동이 탄성 빔에 전달되어 진행파가 생성되고 진행파의 전파 방향은 위상차와 주파수에 영향을 받는다. 초음파에 의해서 진동하는 탄성 빔에 대한 모델링을 Fig. 3에 나타내었으며, 양단 자유인 탄성 빔은  $l_1$ 과  $l_2$  위치에 초음파를 전달하는 혼과 연결된다.

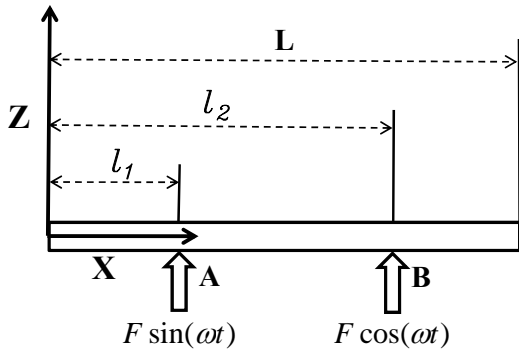


Fig. 3 Beam Model of Prototype

오일러 빔 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

탄성 빔의 길이 방향을 따라 변위  $x$ 만큼 떨어진 위치에서 시간  $t$ 초 후의 탄성 빔의  $Z$ 축 방향 변위  $u(x,t)$ 를 구하기 위하여 변수분리법을 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$u(x,t) = \varnothing(x)q(t) \quad (4)$$

시간에 대한 함수와 공간에 대한 함수를 분리하면 식 (5)와 같은 두 개의 방정식으로 표현된다.

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \omega^2 q(t) = 0 \quad (5)$$

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

경계 조건과 초기 조건을 이용하여 식 (5)를 전개할 수 있다. 경계조건을 이용하여 주파수 방정식을 유도하면 식 (6)을 구할 수 있다.

$$1 = \cosh k_B l \cdot \cos k_B l \quad (6)$$

$\cos k_B l$ 과  $1/\cosh k_B l$ 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 (7)과 같다.

$$w_n = \frac{(k_{Bn} l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 시뮬레이션한 탄성 빔의 고유 주파수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Natural Frequency of Flexural Beam

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

$u(x,t)$ 는 탄성빔을 연속체로 해석하므로 각각의 모드를 무한개 중첩한 것과 같다. 따라서 식 (8)과 같은 정규모드의 합으로 이루어진다.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{F \cos \omega t \varnothing_n(x) \varnothing_n(l_1)}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} + \frac{F \sin \omega t \varnothing_n(x) \varnothing_n(l_2)}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \quad (8)$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$

모드형태(mode shape)를 나타내는 정규화된 공간함수  $\varnothing_n(x)$ 는 식 (9)와 같이 전개할 수 있으며  $k_B x$ 가 증가할수록  $(\cosh(k_{Bn} l) - \cos(k_{Bn} l)) / (\sinh(k_{Bn} l) - \sin(k_{Bn} l))$ 이 1이 되므로  $\sin(k_{Bn} x) - \cos(k_{Bn} x)$ 에 가까워진다.

$$\begin{aligned} \varnothing_n(x) &= \frac{(\cosh(k_{Bn} l) - \cos(k_{Bn} l))}{(\sinh(k_{Bn} l) - \sin(k_{Bn} l))} \\ &\times (\sin(k_{Bn} x) + \sinh(k_{Bn} x)) \\ &- (\cos(k_{Bn} x) + \cosh(k_{Bn} x)) \\ &\cong \sin(k_{Bn} x) - \cos(k_{Bn} x) \\ &= \sqrt{2} \sin(k_B x - \pi/4) \end{aligned} \quad (9)$$

$k_{Bn}$ 에 따른 모드형태를 Fig. 4에 나타내었다. 길이  $l_1$ 에서의 모드형태는 30<sup>th</sup>와 31<sup>st</sup> 모드에서 음수 값이므로  $\varnothing_{30}(l_1)$ 과  $\varnothing_{31}(l_1)$ 은 음수 값을 갖는다.  $l_2$ 에서는 모드에 따라 부호가 바뀌므로  $\varnothing_{30}(l_2)$ 는 양수 값을 갖고,  $\varnothing_{31}(l_2)$ 는 음수 값을 갖는다.

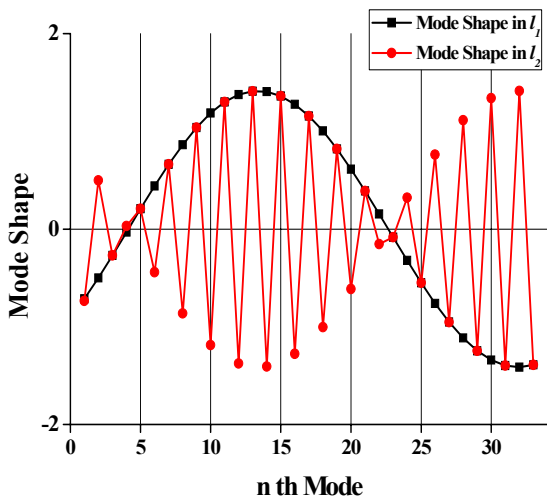


Fig.4 Mode Shape in  $l_1$  and  $l_2$

가진 주파수(excitation frequency,  $\omega$ )에 대하여 전체 응답에 대한 기여도가 높은 30<sup>th</sup>와 31<sup>st</sup> 모드를 사용하여 두 모드에 관해서 식 (10)과 같이 모델링 방정식을 구하였다. 대괄호 안의 식이 하나의 진행파를 나타내며 두 개의 진행파의 합으로 표현된다.<sup>(5)(6)</sup>

$$u(x,t) = \left[ \begin{array}{l} A \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) \\ + B \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \\ + C \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) \\ + D \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \end{array} \right] \quad (10)$$

$$A = \frac{\sqrt{2} F \phi_{30}(l_1)}{m(\omega_{30}^2 - \omega^2)} \quad B = \frac{\sqrt{2} F \phi_{31}(l_2)}{m(\omega_{31}^2 - \omega^2)}$$

$$C = \frac{\sqrt{2} F \phi_{31}(l_1)}{m(\omega_{31}^2 - \omega^2)} \quad D = \frac{\sqrt{2} F \phi_{30}(l_2)}{m(\omega_{30}^2 - \omega^2)}$$

### 3.4 위상차에 따른 이송 방향 해석

탄성 빔에 전달되는 초음파는 순수 종파와 횡파의 결합으로 되어 있기 때문에 탄성 빔의 길이 방향과 수직 방향으로 진동하는 두 개의 진동 요소를 갖는다. 따라서 진행파의 전달에 의해서 탄성 빔 표면의 입자는 Fig. 5와 같은 타원형 궤도를 그린다.

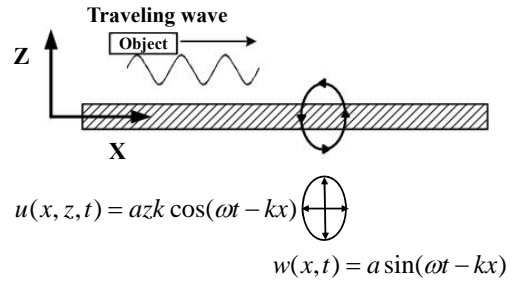


Fig. 5 Elliptical Locus of Particle on Flexural Beam

타원형의 장축에 관한 변위를  $w(x,t)$ 로 정의하고 일반해는 다음과 같다.

$$w(x,t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (11)$$

탄성 빔의 길이 방향의 변위를  $u(x,z,t)$ 로 정의하고 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$u(x,z,t) = -z \frac{\partial w}{\partial x} = azk \cos(\omega t - kx) \quad (12)$$

탄성 빔 표면 위의 입자가 그리는 타원의 궤도는 식 (11)과 식 (12)로부터 다음과 같이 전개된다.

$$u^2 / (azk)^2 + w^2 / a^2 = 1 \quad (13)$$

위상차에 의해 그려지는 타원의 모양과 방향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(b), (e)에서처럼 위상차가 90°일 때 기울어지지 않은 타원형의 궤적이 형성되고, 이 때 물체는 접촉점의 타원운동에 의해 이송된다. 마찰구동일 때 Fig. 6(b)에서와 같이 위상차가 90°일 때 타원형의 궤적은 시계방향으로 회전하고 물체는 오른쪽으로 이송된다. Fig. 6(e)와 같이 위상차가 -90°로 변하면 타원형의 궤적은 반시계 방향으로 회전하고 물체는 왼쪽으로 이송된다. 따라서 가진 주파수의 위상차에 의해 물체의 이송 방향을 바꿀 수 있고, 물체의 이송 방향을 바꾸기 위해서는 180°의 위상차 변화를 필요로 한다.

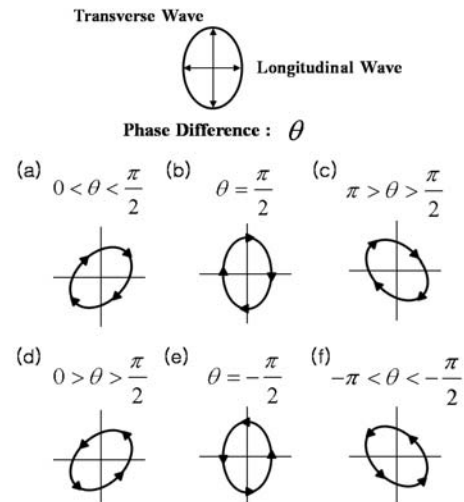


Fig. 6 Elliptical Motion of Particle on Flexural Beam with respect to Phase Difference

### 3.5 위상차에 따른 물체 이송 실험

일정한 주파수와 전압에서 위상차를 변화시켰을 때 물체의 이송변화를 파악하기 위해 실험을 수행하였다. 주파수는 28.0kHz로 고정하고 입력전압은  $\pm 500V$ 로 일정하게 하고 물체의 무게는 20g으로 하였다. 이 때 두 초음파 발생장치 사이의 위상차는  $0^\circ$ 부터  $360^\circ$ 대역으로  $10^\circ$ 씩 증가, 감소시키면서 각각 실험하였다. 함수발생기의 함수 발생 조건은 다음과 같다.

- ( Case 1 ) Ch1 :  $0^\circ$ 로 일정하게 유지;  
Ch2 :  $10^\circ$ 씩 감소
- ( Case 2 ) Ch1 :  $10^\circ$ 씩 감소;  
Ch2 :  $0^\circ$ 로 일정하게 유지

Fig. 7에 위상차에 따른 이송 속도를 나타내었다. 그래프에서 Y축의 값이 (+)부분은 채널 2에서 채널 1로 물체가 이송되는 경우이고, (-)부분은 채널 1에서 채널 2로 물체가 이송되는 경우이다. 그리고 0일 때 물체는 어느 쪽으로도 움직이지 않는다. 실험결과 Case 1의 조건으로 실험을 수행했을 때 초음파 발생장치 사이의 위상차가  $30^\circ$ 에서 (-)방향으로 48.1mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였고, 위상차가  $140^\circ$ 일 때 (+)방향으로 58.0mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였다. Case 2의 조건에서는 위상차가  $330^\circ$ 일 때 (-)방향으로 47.6mm/s의 가장 빠른 이송속도를 보였고, 위상차가  $220^\circ$ 일 때 (+)방향으로 59.2mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였다.

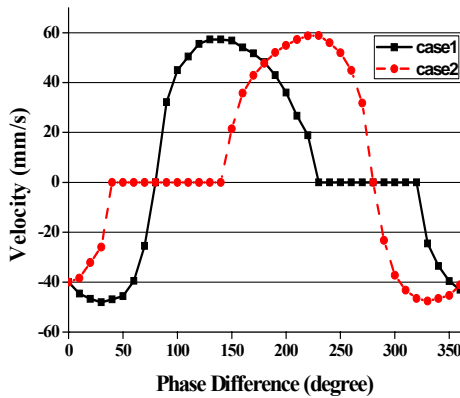


Fig. 7 Velocity according to Phase Difference

### 3.6 주파수에 따른 이송 방향 해석

식 (10)에서 구한 모델링 방정식을 기준으로 하여 주파수에 따른 파동의 진행 방향을 시뮬레이션하였다. 30<sup>th</sup> 시뮬레이션 조건은 가진 주파수를 26.2kHz로 하였고, 가진 주파

수와 가장 인접한 두 개의 탄성 빔 공진 주파수만을 고려하여 파동의 진행 방향을 예측하였다. 30<sup>th</sup> 와 31<sup>st</sup> 시뮬레이션 조건에서 파동의 진행방향을 확인하기 위하여 Fig. 8, 9에서와 같이 빔의 길이에 대한 시간의 평면에 진폭을 투영하였다. 그 결과, 같은 진폭을 갖는 윤곽에 의해 일정한 모양의 띠가 형성되고 기울기를 갖는다. 여기에서 띠의 기울기가 양일 경우, 파동의 진행 방향을 (→)로 표현하고, 띠의 기울기가 음일 경우를 (←)로 표현하였다. 30<sup>th</sup> 시뮬레이션 조건의 경우 Fig. 8에서와 같이 A, B, C, D에 의해 파동이 (←)방향으로 진행하였고 31<sup>st</sup> 시뮬레이션의 경우 Fig. 9에서와 같이 정상파의 상수에 의해 파동이 (→)방향으로 진행하였다. 시뮬레이션 결과를 Table 2에 정리하였다. 가진 주파수에 따라 A, B, C, D의 부호가 규칙적으로 바뀌고 A, B에 의한 파동의 진행방향과 C, D에 의한 파동의 진행방향이 합성에 의해  $u(x,t)$ 의 파동의 진행 방향이 결정된다. 예를 들면 A, B에 의한 파동의 진행방향이 (→)이고 C, D에 의한 파동의 진행방향이 (→)이면  $u(x,t)$ 의 파동은 (→)방향으로 진행한다. 서로 반대 방향인 경우에는 진행파가 발생하지 않고 정상파가 발생하였다.

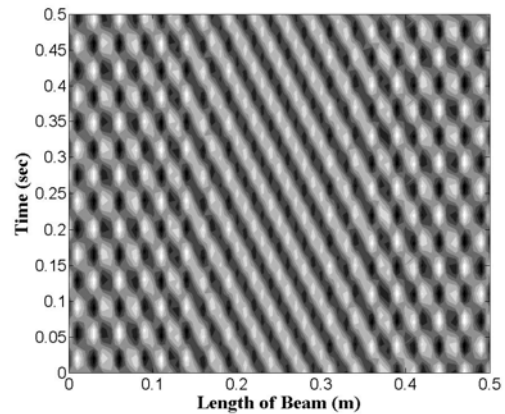


Fig. 8 Wave Propagation Direction in 30th Simulation Condition

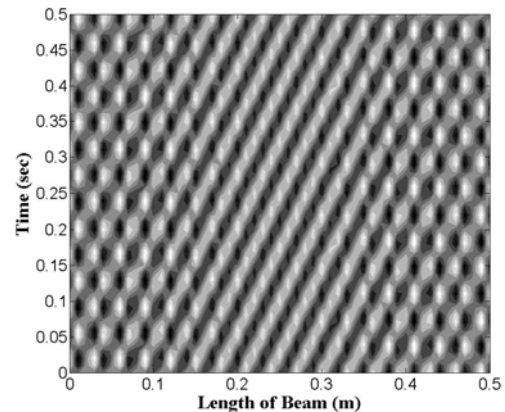


Fig. 9 Wave Propagation Direction in 31st Simulation Condition

Table 2 Wave Propagation Direction according to the Sign of Standing Wave

n th	Frequency (kHz)			A	B	Wave Propagation Direction	C	D	Wave Propagation Direction
	$\omega_n$	$\omega_{n+1}$	$\omega$						
29	23.7	25.3	24.5	+	+	→	-	+	→
30	25.3	27.0	26.2	+	-	←	-	-	←
31	27.0	28.7	27.9	+	+	→	-	+	→
32	28.7	30.5	29.6	+	-	←	-	-	←

### 3.7 주파수에 따른 물체 이송 실험

주파수에 따른 물체의 이송방향을 측정하기 위하여 26.5kHz에서 27.5kHz까지 100Hz 간격으로 주파수에 변화를 주어 실험하였다. Fig. 10에서와 같이 26.5kHz와 26.8kHz에서 물체는 (-)방향으로 이송되었고, 27.0kHz와 27.5kHz에서 (+)방향으로 이송되었다. 탄성 빔의 공진 주파수인 27.0kHz에서 물체는 이송되지 않았다. Table 2에서 보면 26.2kHz로 가진한 경우 파동은 (←)방향으로 진행되었고, 27.9kHz로 가진한 경우 파동은 (→)방향으로 진행되어 탄성 빔의 공진주파수 27.0kHz를 기준으로 파동의 진행 방향이 변화하였다. 따라서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

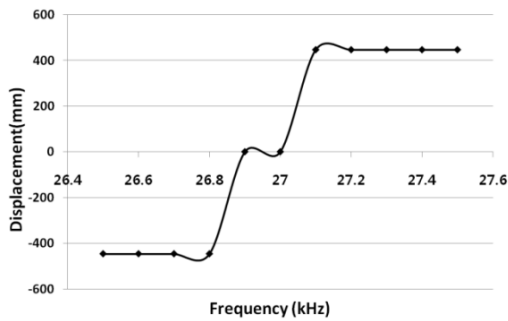


Fig. 10 Transport Displacement of object according to Frequency

### 4. 결론

기존의 이송 시스템의 문제점들을 보완하고 광소자에 적합한 이송 시스템을 개발하기 위해 초음파 진동을 이용한 물체 이송 시스템을 제작하였고, 초음파 이송 시스템의 동특성을 파악하기 위해 물체가 이송되는 원리를 이론적으로 해석하였다. 정규모드진개를 통해 주파수가 같고 위상차가 90°인 두 개의 모드에 의해 가진되는 탄성 빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하였다. 이론식의 진개를 통해 위상차에 따른 물체의 이송 방향 변화를 규명하였다.

위상차 변화에 따른 물체의 이송 방향 변화를 확인하기 위해 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통해 검토하였다. 물체의 이송 방향이 변하는 위상차의 범위가 두 가진 주파수의 위상차에 의해 특정 구간에서 물체의 이송 방향이 규칙적으로 바뀌는 것을 확인하였다. Case 1과 Case 2를 비교하면, 0° ~ 180°축을 기준으로 대칭적인 특징을 보였다. 따라서 물체의 이송 방향을 전환하기 위한 위상차를 예측할 수 있었다. 또한 주파수에 따른 초음파 이송시스템의 진행과 방향 변화를 시뮬레이션하였고 실험을 통해 검증하였다. 주파수에 따른 이송 방향 변화를 관측한 결과 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치하였다. 따라서 두 개의 가진 주파수의 위상차와 주파수에 변화를 주어 물체의 이송 방향을 전환할 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- (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) Loh, B. G. and Ro P. I., 2000, "Changing the Propagation Direction of Flexural Ultrasonic Progressive Waves by Modulating Excitation Frequency," Journal of Sound and Vibration, Vol. 238, No. 1, pp. 171-178.
- (3) Loh, B. G., 2004, "Acoustic Levitation and Rotation Produced by Ultrasonic Flexural Vibration," Transactions of the KSNVE, Vol. 14, No. 5, pp. 432-438.
- (4) Sashida, T., 1994, An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford Univ Press.
- (5) Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa M., and Nakamura, N., 1993, Ultrasonic Motors, pp.9-17.
- (6) Norton, M. P., 1989, Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, Cambridge, pp.81-931.