

초음파 이송시스템의 진행파에 따른 이송 방향 예측 및 해석

정상화*, 김광호⁺, 신상문⁺

(논문접수일 2007. 9. 6, 심사완료일 2007. 12. 3)

Estimation and Analysis of Transport Direction according to Traveling Wave in Ultrasonic Transport System

Sang Hwa Jeong*, Gwang Ho Kim⁺, Sang Moon Shin⁺

Abstract

An object transport system is driven by a conveyor belt system or a magnetic levitation system. It is an indispensable device in many fields and especially it is very important in the factory automation. However, the conventional transport system can damage precision optical components by the contact force and destroy the inner structure of semiconductor by the magnetic field. The new transport system for transporting without damage is required. The ultrasonic transport system is a device that transports objects on the elastic body using ultrasonic wave. In this paper, an object transport system using the ultrasonic wave is developed for transporting precision elements without damage. Traveling waves are generated by the ultrasonic wave generator fixed in both ends of the beam. The traveling wave of the ultrasonic transport system is theoretically analyzed. Transport direction of the object is examined according to phase difference and frequency. The theoretical results are verified by experiments.

Key Words : Ultrasonic Wave Generator(초음파 발생 장치), Vibration Characteristics(진동 특성), Flexural Beam(탄성빔), Mode Shape(모드 형태), Standing Wave(정상파), Traveling Wave(진행파), Phase Difference(위상차)

1. 서론

광소자의 수요가 증가하면서 광소자의 생산 자동화 공정에 대한 관심이 높아지고 있다. 적합한 이송시스템의 구축은 생산 자동화를 위한 중요한 요소이다. 컨베이어 이송장치는 접촉력에 의해 광소자의 표면에 손상을 주고, 자기 부상을

이용한 이송장치는 자기장의 영향으로 반도체의 내부 부품에 영향을 주어 불량품 발생 원인이 된다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 이송 방법으로 초음파 부상을 이용하여 물체를 이송하는 시스템이 연구되고 있다⁽¹⁾. 초음파를 이용한 구동기에 대한 연구는 1990년대 초반부터 미국과 일본을 중심으로 진행되었다. Toshiku Sashida는 1982년에 진행파 모터

* 조선대학교 기계공학과 (shjeong@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
+ 조선대 대학원 기계공학과

(traveling-wave motor)라고 불리는 초음파 액츄에이터를 제안하였고, P. I. Ro는 초음파를 이용한 물체 이송장치에 관하여 연구하였다. 지금까지의 대부분의 연구들은 모터 소음을 줄이기 위한 목적으로 진행되었다^(2,3).

본 논문에서는 초음파 이송장치의 동특성을 이론적으로 규명하였다. 주파수가 같고 위상차가 90°인 두 개의 입력에 의해 가진되는 탄성빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하기 위해 정규모드전개(normal mode expansion)를 이용하였다. 오일러-베르누이 빔 이론(Euler-Bernoulli beam theory)을 사용하여 탄성빔의 고유 주파수를 구하고, 진행 주파수를 예측하였다. 또한 위상차와 주파수에 따른 물체 이송방향 변화에 대하여 이론적으로 해석하고 실험을 통해 검증하였다.

2. 초음파 이송 장치의 제작

초음파를 이용한 물체 이송 시스템은 Fig. 1과 같이 함수를 발생하는 함수발생기, 발생된 함수를 증폭하는 파워증폭기, 초음파를 발생하는 초음파 발생장치, 진행파를 발생하고 이송 가이드 역할을 하는 탄성빔으로 구성된다. 채널 1과 2에 사용된 초음파 발생장치는 압전 액츄에이터 및 부스터 그리고 혼으로 구성된다. 압전 액츄에이터는 초음파를 발생시키고 부스터는 압전 액츄에이터의 파손을 방지하며 발생된 초음파를 일차적으로 증폭시킨다. 부스터를 통해 증폭된 초음파는 원추형 혼에서 이차적으로 증폭되며, 증폭된 초음파는 탄성빔에 전달된다. 초음파 발생 장치는 탄성빔의 양 끝단에 각각 체결되어 탄성빔을 가진하고, 탄성빔에 부상파와 진행파가 발생하여 물체가 이송한다. 탄성빔은 길이가

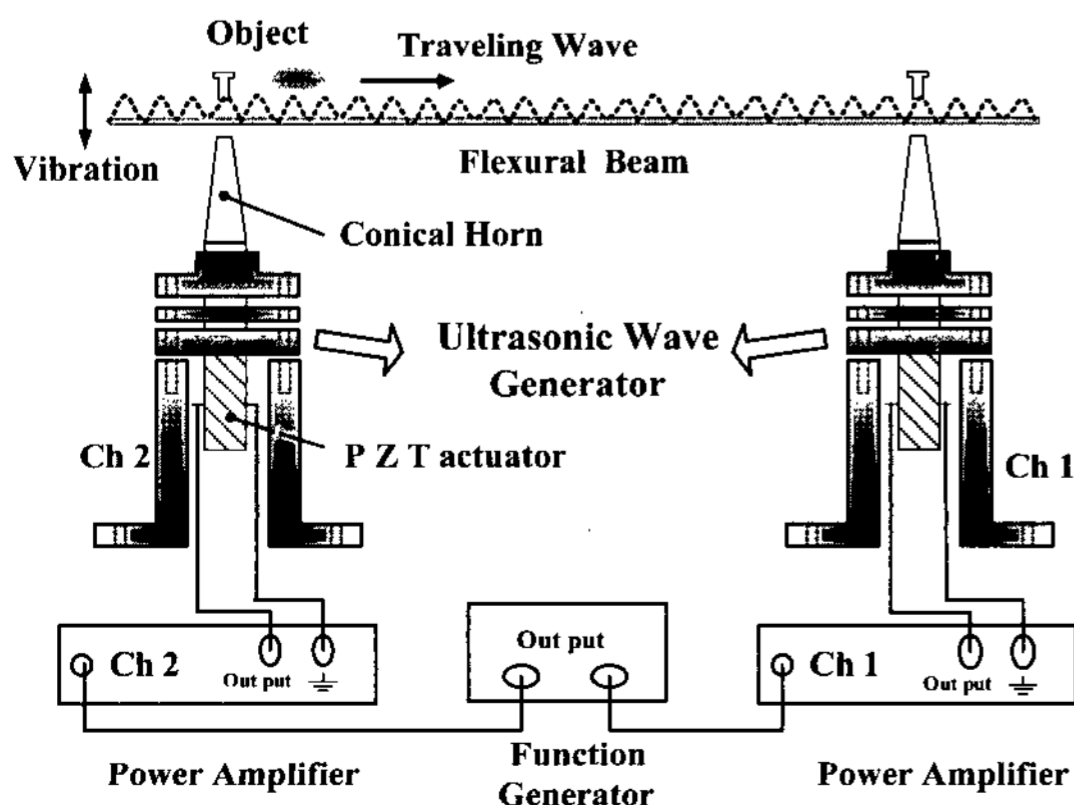


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic transport system

500mm이고 11mm×3mm인 직사각형 모양의 단면을 갖도록 설계하였고, 음향학적 성질이 뛰어난 두랄루민을 이용하여 제작하였다. 탄성빔의 모달 해석(modal analysis)을 통해 노달 라인(nodal line)이 아닌 위치에 원추형 혼과 볼트로 체결하였다^(4,5).

3. 초음파 이송 시스템의 이론적 해석

3.1 탄성빔의 축약 이론

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

본 연구에서 사용된 탄성빔은 길이 대 두께비가 20 : 1 이상이므로 오일러-베르누이 빔 이론을 사용하였고, 탄성빔의 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.

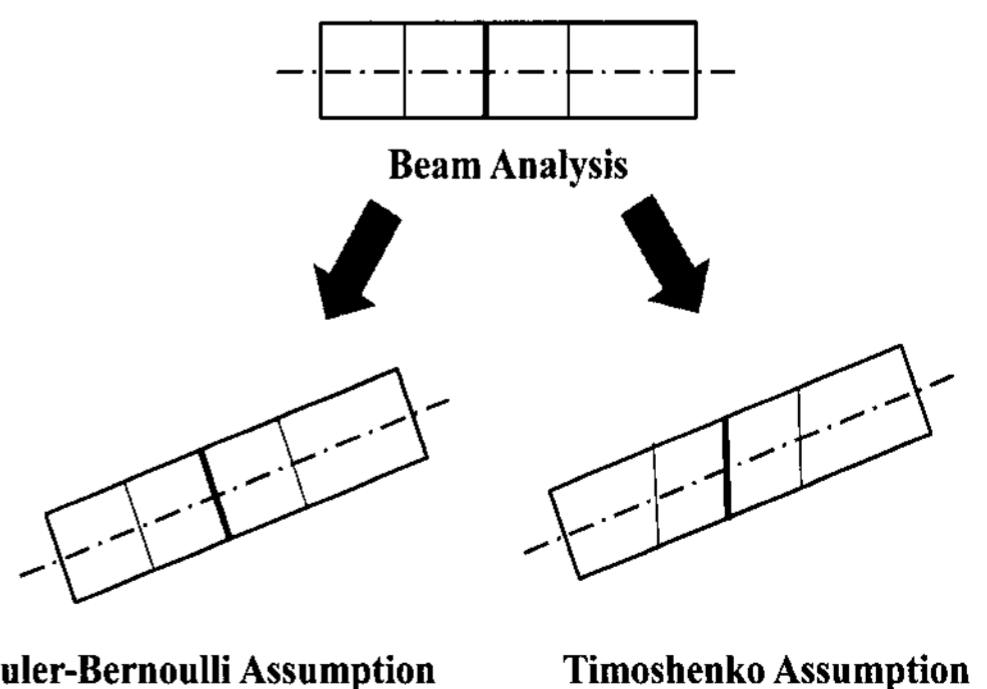


Fig. 2 Assumption of beam theory

- 운동하는 동안 평면은 평면을 유지한다.
- 전단력과 전단 모멘트는 무시한다.

3.2 탄성빔의 모델링

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

굽힘 모멘트의 합과 빔의 힘 이론에 의해서 식 (1)과 같이 횡방향의 굽힘 운동에 대한 오일러 빔 방정식이 유도된다.

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

여기에서, ρ : 탄성빔의 밀도(g/mm^3)

A : 단면적(mm^2)

E : 탄성 계수(GPa)

I : 단면모멘트(mm^4)

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

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

공간의 함수 $\varnothing(x)$ 는 경계조건에 의해서 구할 수 있고 경계조건을 사용하여 탄성빔의 모드 형태와 고유 주파수를 결정할 수 있다. 시간의 함수 $q(t)$ 는 초기조건에 의해서 결정된다. $u(x,t)$ 는 탄성빔을 연속체로 해석하므로 각각의 모드

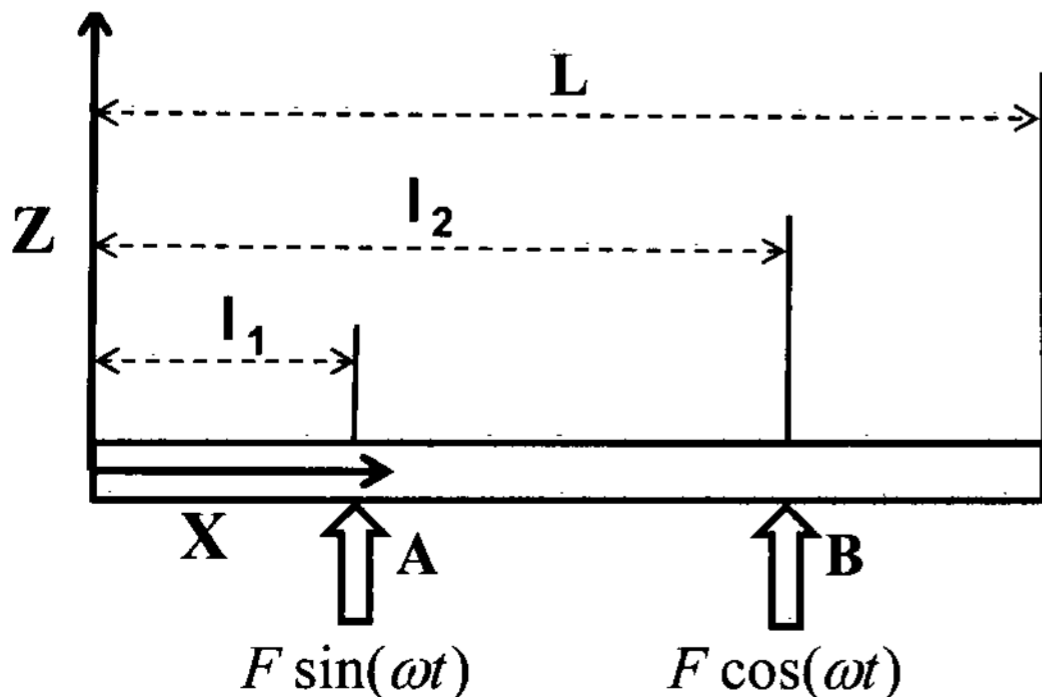


Fig. 3 Beam model of prototype

를 무한개 중첩한 것과 같다. 따라서 식 (3)과 같은 정규모드의 합으로 이루어진다.

$$u_n(x,t) = \frac{F \sin(\omega t)}{m} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varnothing_n(x)\varnothing_n(l)}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (3)$$

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

여기에서, F : 탄성빔에 가해지는 힘(외력)

m : 탄성빔의 질량

4. 위상차에 따른 이송 방향

4.1 위상차에 따른 이송 방향 해석

탄성빔에 전달되는 초음파는 순수 종파와 횡파의 결합으로 되어 있기 때문에 탄성빔의 길이 방향과 수직 방향으로 진동하는 두 개의 진동 요소를 갖는다. 따라서 진행파의 전달에 의해서 탄성빔 표면의 입자는 Fig. 4와 같은 타원형 궤도를 그린다.

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

$$w(x,t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (4)$$

여기에서, a : 진폭

ω : 굽힘 파동의 각진동수

k : 파동수(wave number)

탄성빔의 길이 방향의 변위를 $u(x,z,t)$ 로 정의하고 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$u(x,z,t) = -z \frac{\partial w}{\partial x} = azk \cos(\omega t - kx) \quad (5)$$

탄성빔 표면 위의 입자가 그리는 타원의 궤도는 식 (4)와

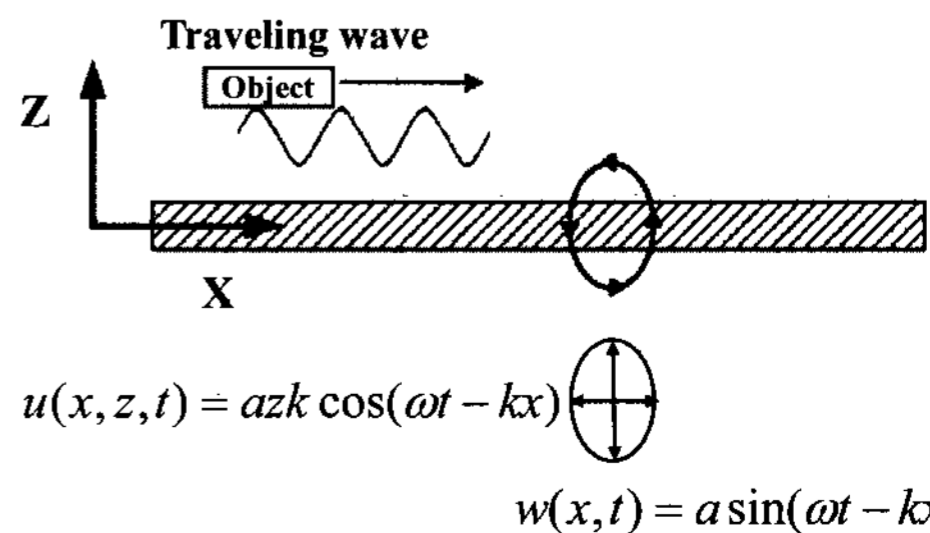


Fig. 4 Elliptical locus of particle on flexural beam

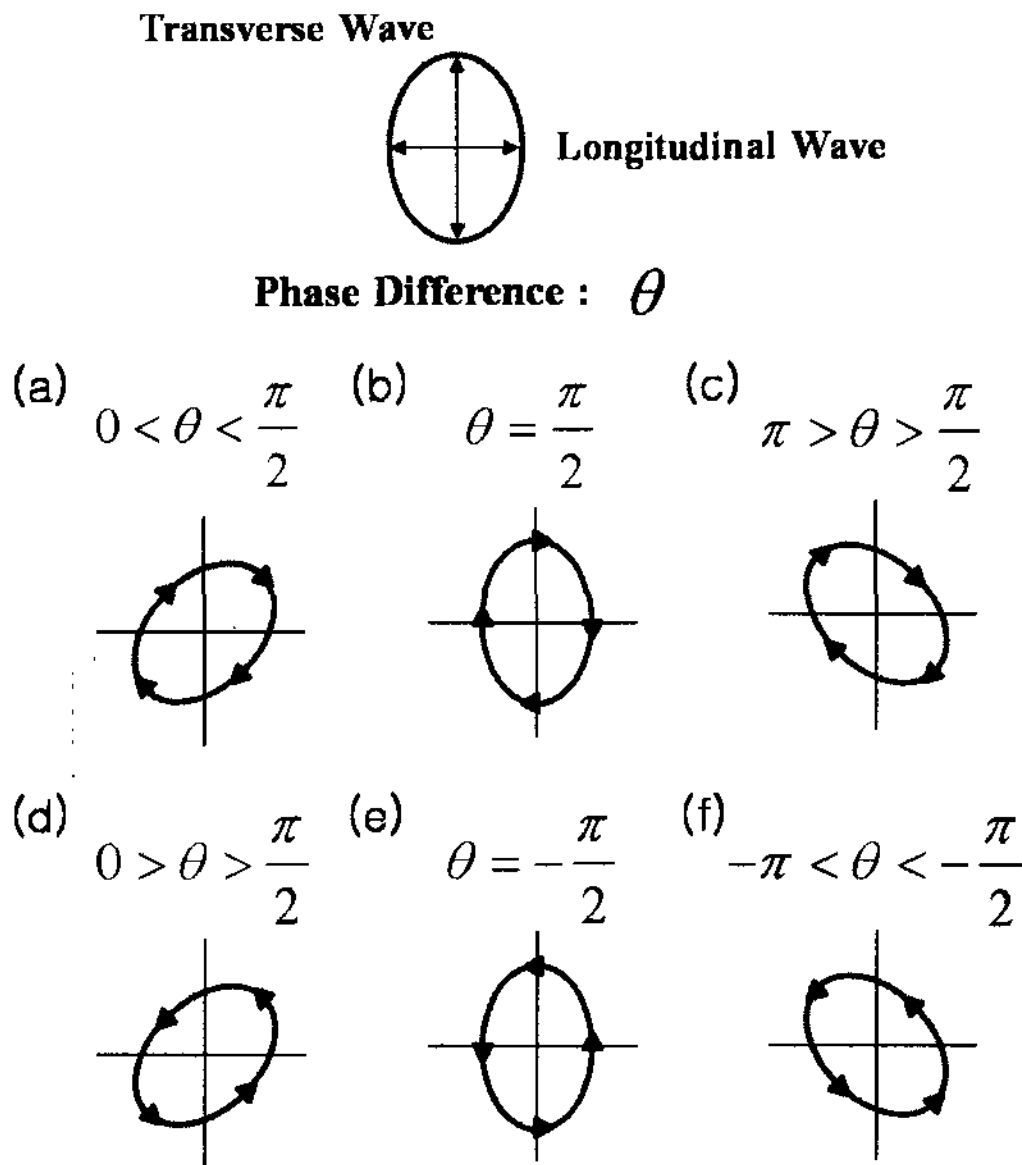


Fig. 5 Elliptic motion of particle on flexural beam with respect to phase difference

식 (5)으로부터 다음과 같이 전개된다.

$$u^2 / (azk)^2 + w^2 / a^2 = 1 \quad (6)$$

위상차에 따라서 그려지는 타원의 모양과 방향을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5 (b), (e)에서처럼 위상차가 90°일 때 기울어지지 않은 타원형의 궤적이 형성되고, 이 때 물체는 접촉점의 타원운동에 의해 이송된다.

마찰구동일 때 Fig. 5 (b)에서와 같이 위상차가 90°일 때 타원형의 궤적은 시계방향으로 회전하고 물체는 오른쪽으로 이송된다. Fig. 5 (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⁽⁶⁾.

4.2 위상차에 따른 물체 이송 실험

일정한 주파수와 전압에서 위상차를 변화시켰을 때 물체의 이송변화를 파악하기 위해 실험을 수행하였다. 주파수는 28.0kHz로 고정하고 입력전압은 ±500V로 일정하게 하고 물체의 무게는 20g으로 하였다. 이 때 두 초음파 발생장치 사이의 위상차는 0°부터 360°대역으로 10°씩 증가, 감소시

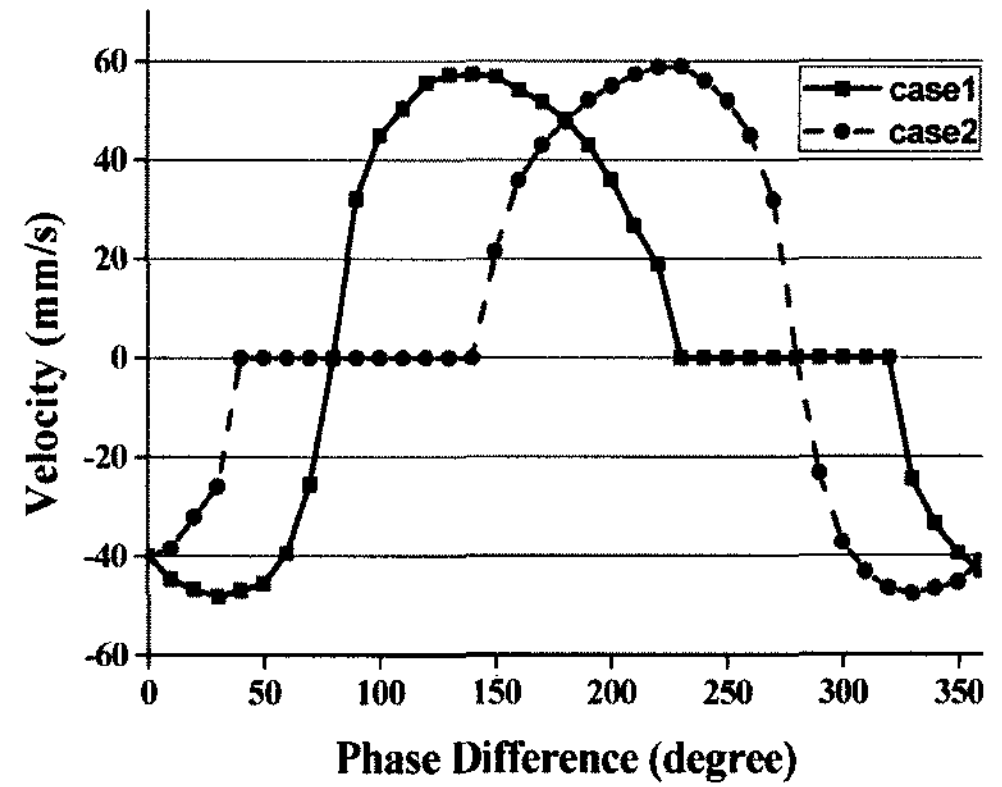


Fig. 6 Velocity according to phase difference

키면서 2개의 경우로 각각 실험하였다. 함수발생기의 함수 발생 조건은 다음과 같다.

- (Case 1) Ch1 : 0°로 일정하게 유지;
Ch2 : 10°씩 감소
- (Case 2) Ch1 : 10°씩 감소;
Ch2 : 0°로 일정하게 유지

Fig. 6에 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°에서 (-)방향으로 48.1mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였고, 위상차가 140°일 때 (+)방향으로 58.0mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였다. Case 2의 조건에서는 위상차가 330°일 때 (-)방향으로 47.6mm/s의 가장 빠른 이송속도를 보였고, 위상차가 220°일 때 (+)방향으로 59.2mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였다.

4.3 물체 이송 방향을 전환하기 위한 위상차 예측

위상차 변화에 따른 물체의 이송 방향 변화를 확인하기 위해 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통해 검토하였다. 이론적으로 두 가진 주파수가 90°의 위상차를 가질 때 물체가 오른쪽으로 이송되고, 오른쪽으로 이송되는 위상차와 180°의 위상차 변화를 주어 가졌을 때 물체는 왼쪽으로 이송된다. 따라서 물체의 이송 방향을 전환하기 위한 위상차를 예측하기 위해 위상차에 변화를 주어 실험을 수행하였다. 먼저

물체가 채널 1에서 채널 2로 이송되는 위상을 찾고, 위상차에 따른 빔의 타원운동 이론에 의해 채널 2에서 채널 1로 물체가 이송되는 위상차 영역을 예측하였다. 예측된 영역을 기준으로 위상차에 변화를 주어 물체의 이송 방향을 확인하였다. Fig. 7과 같이 두 가진 주파수의 위상차에 의해 특정 구간에서 물체의 이송 방향이 규칙적으로 바뀌는 것을 확인하였고, 물체의 이송 방향을 전환하기 위한 위상차를 예측할 수 있었다. Case 1의 실험 결과를 0-180° 축을 기준으로 위쪽 영역과 아래쪽 영역을 뒤집으면 Case 2와 같은 결과가 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 탄성빔의 모달 해석을 통해 초음파 발생장치와 탄성빔의 체결 위치를 선정하였는데, 유한요소해석과정에서 발생한 가진 위치의 오차에 기인된 것

으로 판단된다.

5. 주파수에 따른 이송 방향

5.1 가진주파수에 따른 이송 방향 해석

전체응답에 대한 기여도가 높은 30th와 31st 모드를 사용하여 모델링 방정식을 다음과 같이 전개하였다^(7,8).

$$u(x,t) = \begin{bmatrix} A \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) \\ + B \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \\ + C \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) \\ + D \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} A &= \frac{\sqrt{2} F \phi_{30}(l_1)}{m(\omega_{30}^2 - \omega^2)} & B &= \frac{\sqrt{2} F \phi_{31}(l_2)}{m(\omega_{31}^2 - \omega^2)} \\ C &= \frac{\sqrt{2} F \phi_{31}(l_1)}{m(\omega_{31}^2 - \omega^2)} & D &= \frac{\sqrt{2} F \phi_{30}(l_2)}{m(\omega_{30}^2 - \omega^2)} \end{aligned}$$

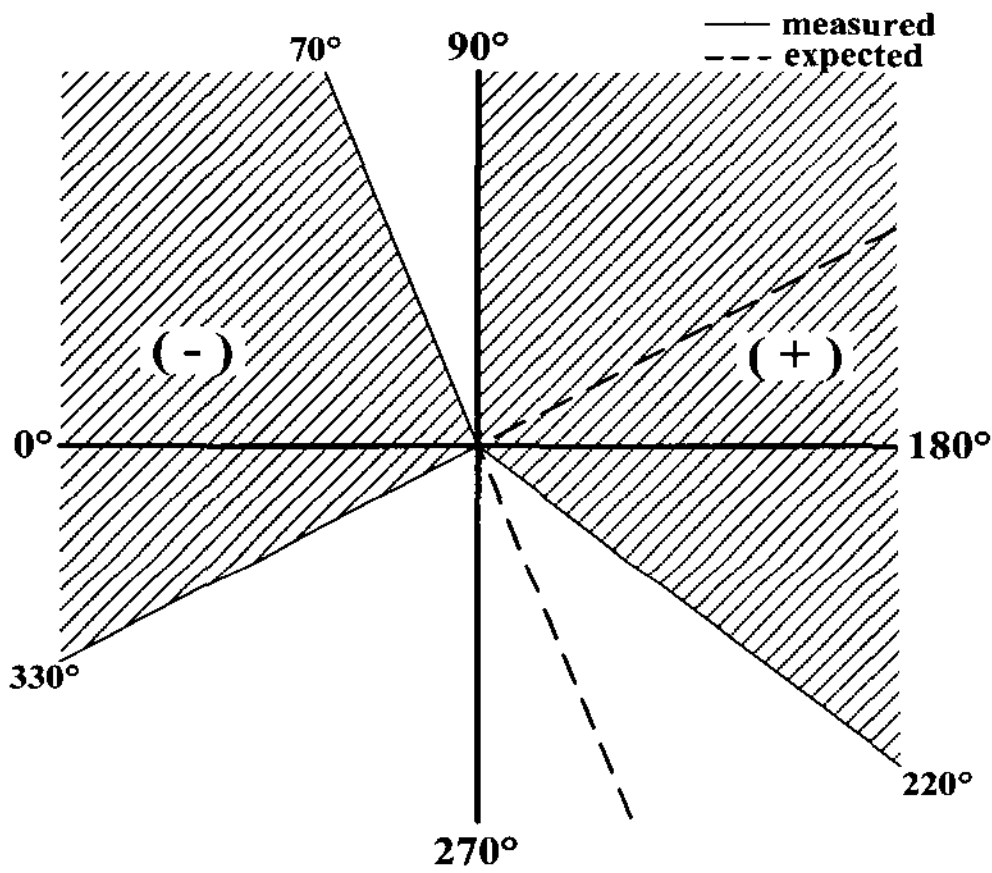
대괄호 안의 식은 하나의 진행파를 나타내며 두 개의 진행파의 합으로 표현된다^(8,9). 식 (7)에서 첫번째 진행파는 상수 A, B의 부호에 따라 방향이 결정되고, 두 번째 진행파는 상수 C, D의 부호에 따라 방향이 결정된다. 상수 A, B, C, D는 공간함수로 표현되고, 모드 형상(mode shape)을 나타내는 정규화된 공간함수 $\phi_n(x)$ 는 식 (8)과 같이 전개할 수 있다.

$$\phi_n(x) = \frac{(\cosh(k_{Bn}l) - \cos(k_{Bn}l))}{(\sinh(k_{Bn}l) - \sin(k_{Bn}l))} \times (\sin(k_{Bn}x) + \sinh(k_{Bn}x)) - (\cos(k_{Bn}x) + \cosh(k_{Bn}x)) \quad (8)$$

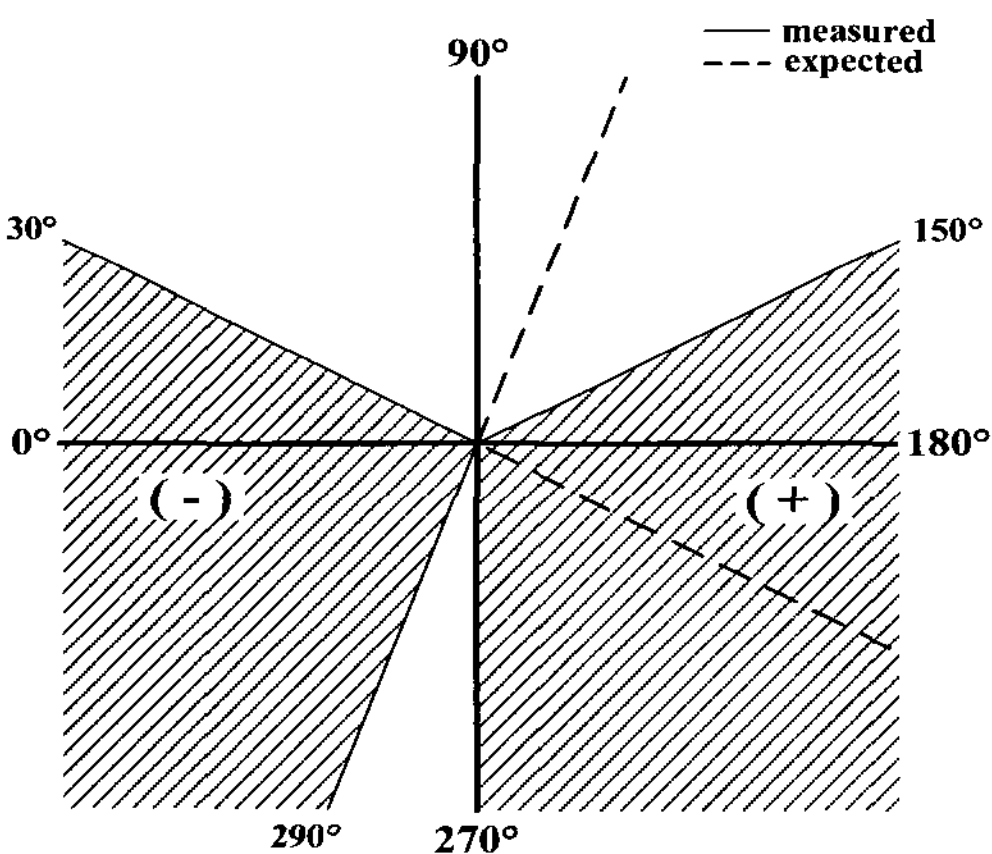
$(\cosh(k_{Bn}l) - \cos(k_{Bn}l)) / (\sinh(k_{Bn}l) - \sin(k_{Bn}l))$ 는 $k_{Bn}x$ 가 증가함에 따라 1이 되므로 식 (9)와 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$\phi_n(x) = \sin(k_{Bn}x) - \cos(k_{Bn}x) \quad (9)$$

양단 자유인 경계조건을 사용하여 주파수 방정식을 구할 수 있고, 모드 형상을 확인할 수 있다. 파동의 진행 방향은 위치 l_1 과 l_2 에서의 n차 모드 형상에 의해 결정된다. k_{Bn} 에 따른 모드 형상을 Fig. 8에 나타내었다. 길이 l_1 에서의 모드 형상은 30th와 31st 모드에서 음수 값을 갖는다. 따라서 식



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 7 Comparison of transport direction in Case 1 and 2

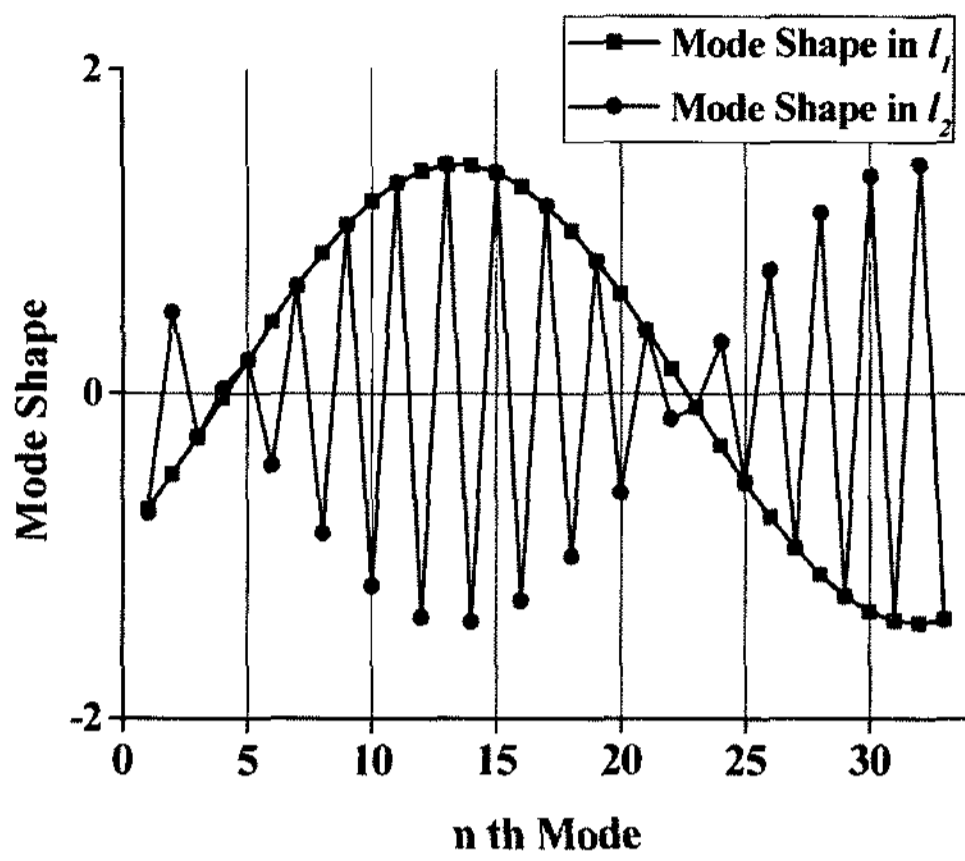


Fig. 8 Mode shape in l_1 and l_2

(7)에서 $\phi_{30}(l_1)$ 과 $\phi_{31}(l_1)$ 은 음수 값을 갖는다. l_2 에서는 모드에 따라 부호가 바뀌므로 $\phi_{30}(l_2)$ 는 양수 값을 갖고 $\phi_{31}(l_2)$ 는 음수 값을 갖는다.

식 (7)에서 구한 모델링 방정식을 기준으로 하여 주파수에 따른 파동의 진행 방향을 시뮬레이션하였다. 30th 시뮬레이션 조건은 가진 주파수를 26.2kHz로 하였고, 가진 주파수와 가장 인접한 두 개의 탄성빔 공진 주파수만을 고려하여 파동의 진행 방향을 예측하였다. 30th와 31st 시뮬레이션 조건에서 파동의 진행방향을 확인하기 위하여 Fig. 9, 10에서와 같이 3차원 그래프를 그리고 빔의 길이에 대한 시간의 평면에 진폭을 투영하였다. 탄성빔의 길이와 시간에 대한 평면에 진폭을 투영시켜 보면 같은 진폭을 갖는 윤곽에 의해 일정한 모양의 띠가 형성되고 기울기를 갖는다. Fig. 10 (b)와 같이

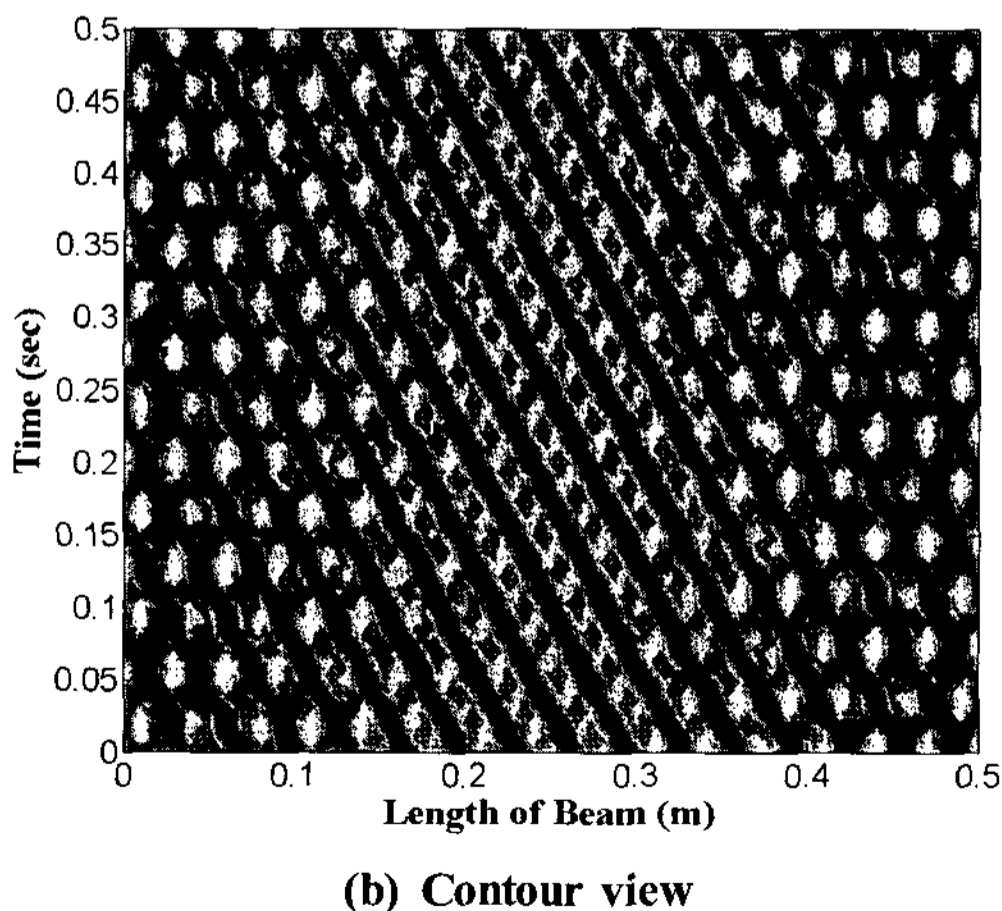
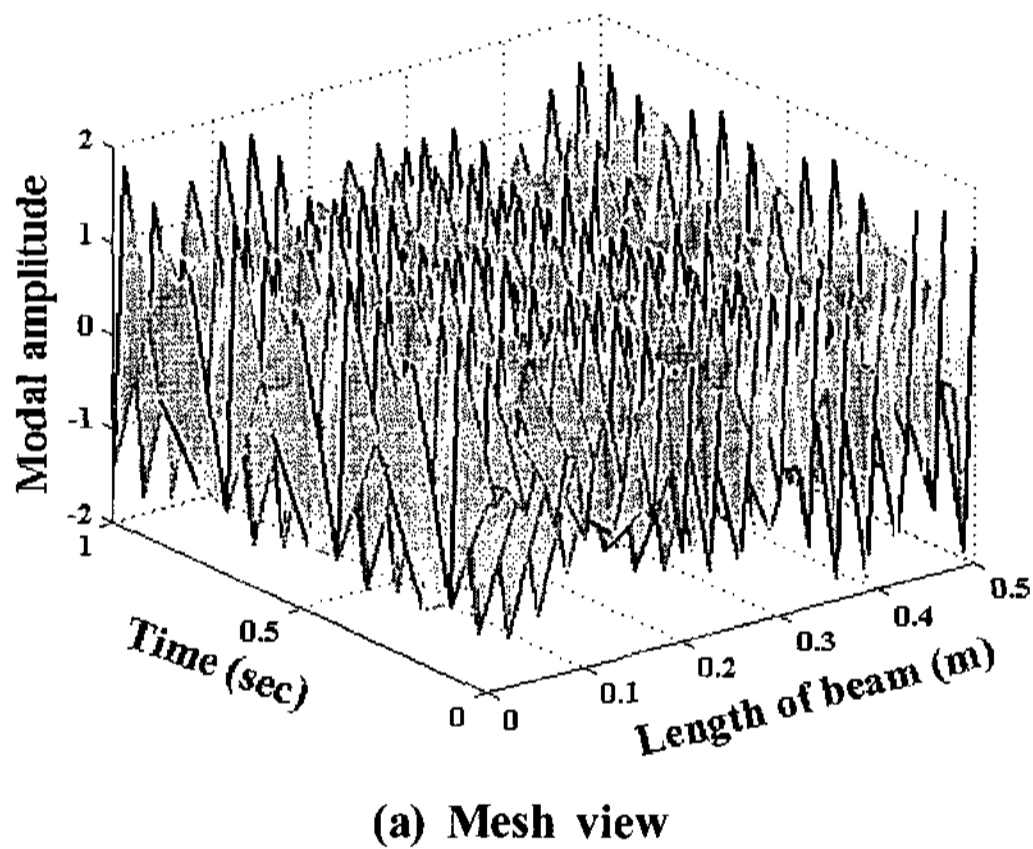


Fig. 9 Wave propagation direction in 30th simulation condition

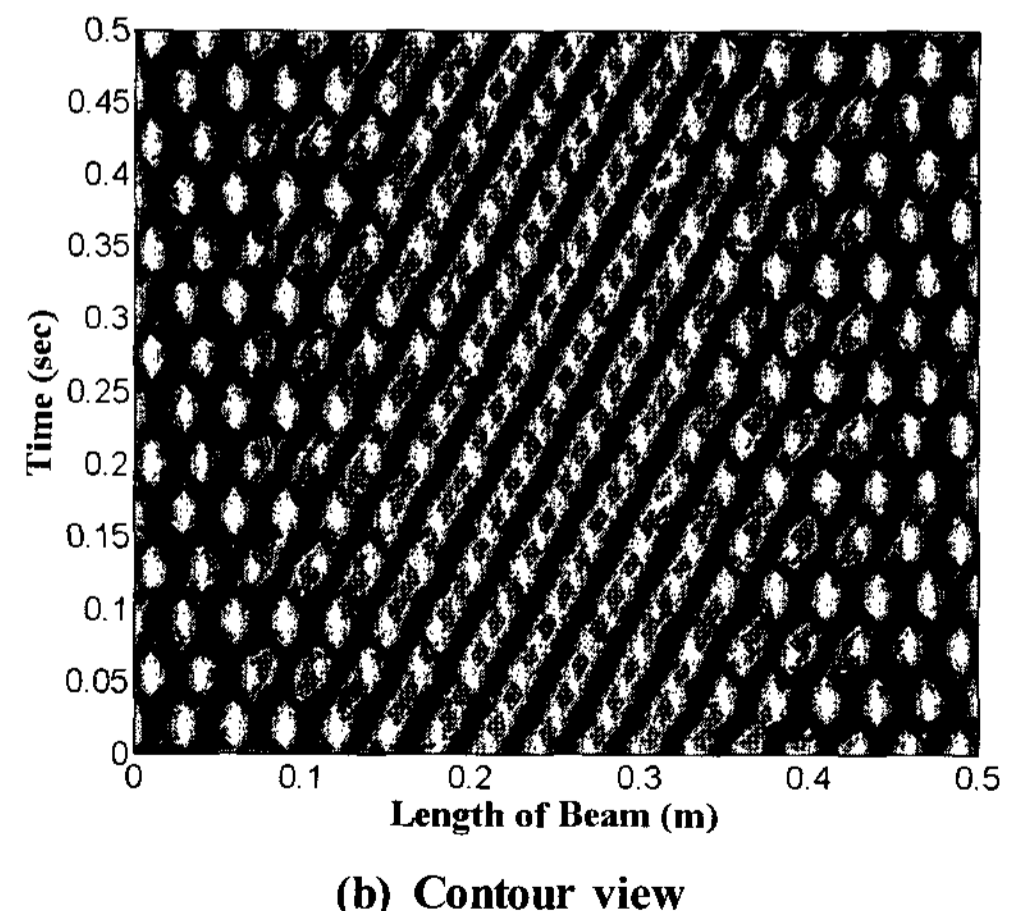
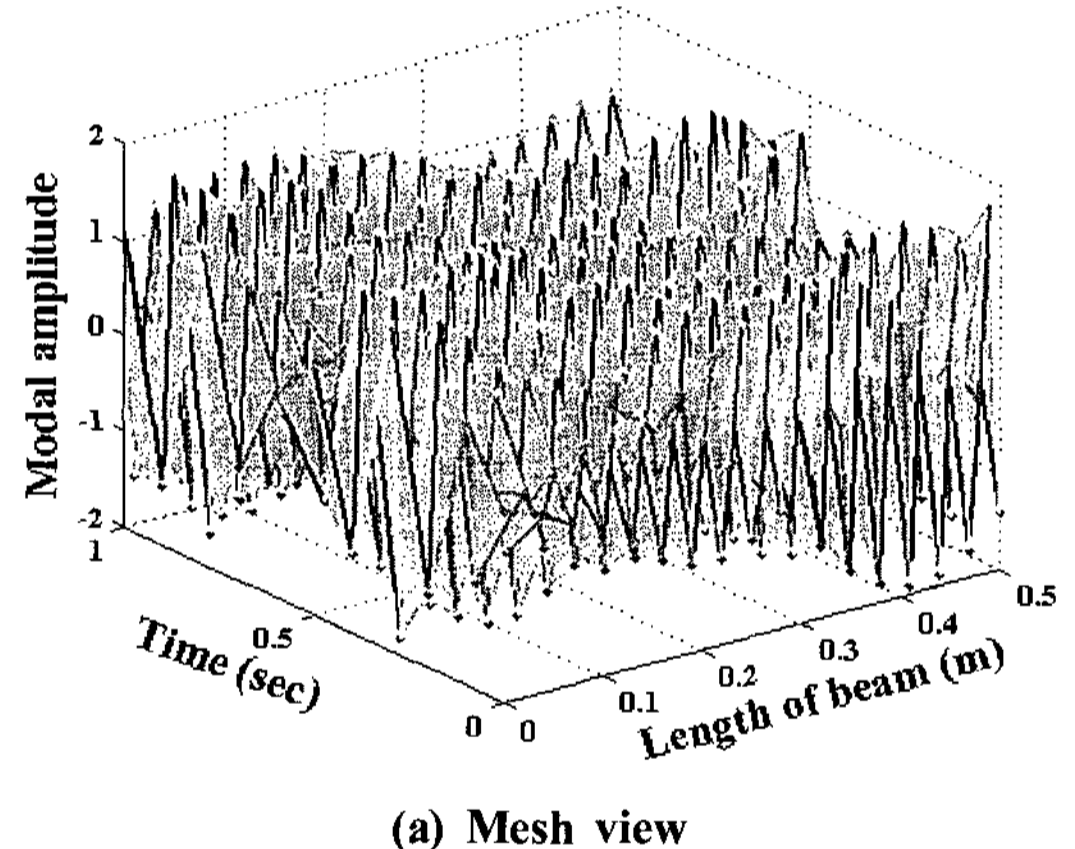


Fig. 10 Wave propagation direction in 31st simulation condition

Table 1 Wave propagation direction according to the sign of standing wave

n th	Frequency(kHz)			A	B	Wave Propagation Direction	C	D	Wave Propagation Direction
	ω_n	ω_{n+1}	ω						
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	+	-	←	-	-	←

띠의 기울기가 양일 경우, 파동의 진행 방향을 (→)로 표현하고, Fig. 9 (b)와 같이 띠의 기울기가 음일 경우를 (←)로 표현하였다. 30th 시뮬레이션 조건의 경우 Fig. 9 (b)에서와 같이 A, B, C, D에 의해 파동이 (←)방향으로 진행하였고 31st 시뮬레이션의 경우 Fig. 10 (b)에서와 같이 정상파의 상수에 의해 파동이 (→)방향으로 진행하였다. 시뮬레이션 결과를 Table 1에 정리하였다. 가진 주파수에 따라 식 (4)에서 정규화된 공간함수로 표현되는 상수 A, B, C, D의 부호가 규칙적으로 바뀌고 A, B에 의한 파동의 진행방향과 C, D에 의한 파동의 진행방향의 합성에 의해 $u(x,t)$ 의 파동의 진행방향이 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.

5.2 가진주파수에 따른 물체 이송 실험

주파수에 따른 물체의 이송방향을 측정하기 위하여 BLT (Bolt-clamped Langevin type Transducer)의 가용범위 내에서 26.5kHz에서 27.5kHz까지 100Hz 간격으로 가진주파수에 변화를 주어 실험하였다. 측정결과를 Fig. 11에 나타내었다. 26.5kHz와 26.8kHz에서 물체는 (-)방향으로 이송되었고, 27.0kHz와 27.5kHz에서 (+)방향으로 이송되었다. 탄성빔의 공진 주파수인 27.0kHz에서 물체는 이송되지 않았다. Table 1에서 보면 26.2kHz로 가진한 경우 파동은 (←)방향으로 진행되었고, 27.9kHz로 가진한 경우 파동은 (→)방향으로 진행되어 탄성빔의 공진주파수 27.0kHz를 기준으로 파동의 진행방향이 변화하였다. 따라서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

6. 결론

기존의 이송 시스템의 문제점들을 보완하고 광소자에 적합한 이송 시스템을 개발하기 위해 초음파 진동을 이용한

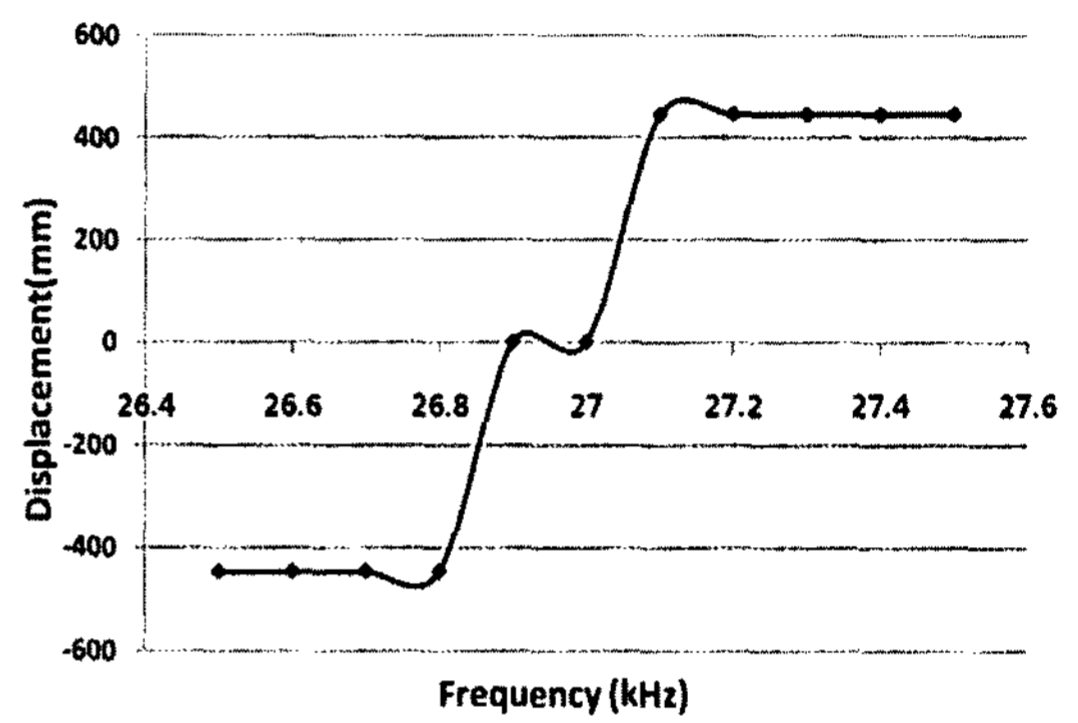


Fig. 11 Displacement according to frequency

물체 이송 시스템을 제작하였고, 초음파 이송 시스템의 동특성을 파악하기 위해 물체가 이송되는 원리를 이론적으로 해석하였다. 정규모드전개를 통해 주파수가 같고 위상차가 90°인 두 개의 모드에 의해 가진되는 탄성빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하였다. 이론식의 전개를 통해 위상차에 따른 물체의 이송 방향 변화를 규명하였다. 위상차 변화에 따른 물체의 이송 방향 변화를 확인하기 위해 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통해 검토하였다. 물체 이송 방향이 변하는 위상차의 범위가 두 가진주파수의 위상차에 의해 특정 구간에서 물체의 이송 방향이 규칙적으로 바뀌는 것을 확인하였다. Case 1과 Case 2를 비교하면, 0°~180°축을 기준으로 대칭적인 특성을 보였다. 따라서 물체의 이송 방향을 전환하기 위한 위상차를 예측할 수 있었다. 또한 주파수에 따른 초음파 이송시스템의 진행파 방향 변화를 시뮬레이션 하였고 실험을 통해 검증하였다. 주파수에 따른 이송 방향 변화를 관측한 결과 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치하였다. 따라서 두 개의 가진주파수의 위상차와 주파수에 변화를 주어 물체의 이송 방향을 전환할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 개발한 초음파 이송장치는 광학 렌즈 및 반도체의 이송 공정에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

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) 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) Jeong, S. H. and Shin, B. S., 2003, "A Study on the Relationship between Flexural Beam Shape and Transport Characteristics for the Ultrasonic Transport System," *Proc. KSMTE Autumn Conference*, pp. 25~29.
- (5) Jeong, S. H., Kim, G. H., Choi, S. B., Cha, K. R., and Song, S., 2006, "A Study on the Transportation Characteristics according to Beam Shape of Optical Lens Transport System using Ultrasonic Wave," *Transactions of KSMTE*, Vol. 15, No. 6, pp. 8~14.
- (6) Sashida, T., 1994, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford Univ. Press, New York.
- (7) Rao, S. S., 2004, *Mechanical Vibrations*, Addison Wesley, Massachusetts, pp. 527.
- (8) Norton, M. P., 1989, *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge Univ. Press, New York, pp. 81~93.
- (9) Loh, B. G. and Ro, P. I., 2000, "An Object Transport System Using Flexural Ultrasonic Progressive Waves Generated by Two-Mode Excitation," *IEEE Transactions on Ultrasonics*, Vol. 47, No. 4, pp. 994~999.