



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2007 년 8 월

석사학위논문

**초음파 이송 시스템의 동특성
해석에 관한 연구**

조선대학교 대학원

기계공학과

신상문

초음파 이송 시스템의 동특성
해석에 관한 연구

*A Study on Analysis of Dynamic Characteristics for
Ultrasonic Transport System*

2007 年 8 月 24 日

조선대학교대학원

기계공학과

신상문

초음파 이송 시스템의 동특성 해석에 관한 연구

지도교수 정 상 화

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함.

2007 年 4 月

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

신 상 문

신상문의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 규 태 印

위원 조선대학교 교수 장 완 식 印

위원 조선대학교 교수 정 상 화 印

2007 年 5 月

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLE	IV
LIST OF FIGURES	V
ABSTRACT	VIII
제 1 장 서 론	1
제1절 연구배경 및 목적	1
제2절 연구내용 및 방법	3
1. 초음파 이송 시스템의 이론적 해석	4
2. 초음파 이송 시스템의 실험적 접근	5
3. 초음파 이송 시스템의 응용	6
제 2 장 초음파 이송 시스템의 설계 및 제작	7
제1절 실험 장치의 설계	7
1. 진동자	9
2. 혼의 설계	10

제2절 초음파 이송 시스템의 제작	12
제 3 장 초음파 이송 시스템의 이론적 해석	13
제1절 정상파와 진행파	13
1. 정상파의 해석	16
2. 진행파의 해석	18
3. 진행파의 관측	20
제2절 탄성빔의 이론적 해석	22
1. 탄성빔의 모델링	24
2. 탄성빔의 고유 주파수	29
제3절 위상차에 따른 이송 방향	35
1. 위상차에 따른 물체 이송에 관한 이론적 해석	35
2. 위상차에 따른 물체 이송 실험	38
3. 이론값과 실험값의 물체 이송 방향 비교	42
제4절 주파수에 따른 이송 방향	44
1. 주파수에 따른 물체 이송에 관한 이론적 해석	44
2. 주파수에 따른 물체 이송 실험	55
3. 이론값과 실험값의 물체 이송 방향 비교	59

제 4 장	광소자 자동 이송 시스템의 개발	61
제1절	광소자 픽업 장치의 구성 및 동특성	62
1.	광소자 픽업 장치의 구성	62
2.	광소자 픽업 장치의 시뮬레이션	64
제2절	광소자 자동 이송 시스템 제작	72
제3절	광소자 자동 이송 시스템의 검사 자동화 프로그램	76
제 5 장	결 론	79
참 고 문 헌	82

LIST OF TABLES

Table 3-1 Natural Frequency of Theoretical Analysis	29
Table 3-2 Input Conditions for FEM Analysis	30
Table 3-3 Natural Frequency Obtained by FEM Analysis	31
Table 3-4 Natural Frequency Obtained by Flexural Beam Theory and FEM	34
Table 3-5 Direction Change of Object in Case 1	41
Table 3-6 Direction Change of Object in Case 2	41
Table 3-7 Transport Direction according to Phase Difference	42
Table 3-8 Wave Propagation Direction according to Sign of A, B, C, D	51
Table 3-9 Wave Propagation Direction according to the Sign of Standing Wave	52
Table 3-10 Direction Change of Object at Phase Difference 30°	58
Table 3-11 Direction Change of Object at Phase Difference 140°	58
Table 3-12 Wave Propagation Direction	59
Table 4-1 Traveling Range and Velocity of Stage	68
Table 4-2 Features of Motors for Rotational Stage	72

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Flow Chart for Theoretical Analysis	4
Fig. 1-2 Comparing Theoretical Results with Experimental Results	5
Fig. 1-3 Composition of Ultrasonic Transport System for Optical Element	6
Fig. 2-1 Schematic Diagram of Ultrasonic Transport System	8
Fig. 2-2 Driving Principle of PZT	9
Fig. 2-3 Structure of Bolt Clamped Langevin Type Transducer	10
Fig. 2-4 Vibration Displacement of Horn	11
Fig. 2-5 Photograph of Experimental Apparatus	12
Fig. 3-1 A Typical Standing Wave	14
Fig. 3-2 A Typical Traveling Wave	14
Fig. 3-3 Elliptical Motion of Particles on Surface in Rayleigh Wave	15
Fig. 3-4 Elliptical Motion of Beam Particles on Surface in Flexural Wave	15
Fig. 3-5 Arbitrary Standing Wave	17
Fig. 3-6 Arbitrary Traveling Wave	19
Fig. 3-7 Traveling Wave on Flexural Beam	21
Fig. 3-8 Two Assumptions of Beam Theory	23
Fig. 3-9 Bending Moments and Shear Forces in Beam	24
Fig. 3-10 Intersecting Points of Curve	26
Fig. 3-11 Beam Model of Prototype	28
Fig. 3-12 Constraint Conditions of Flexural Beam for Modal Analysis	30
Fig. 3-13 Mode Shape from 32 nd to 40 th Mode	33
Fig. 3-14 Elliptical Locus of Particle on Flexural Beam	35
Fig. 3-15 Elliptical Motion of Particle on Flexural Beam with respect to Phase Difference	37

Fig. 3-16 Displacement according to Phase Difference	39
Fig. 3-17 Velocity according to Phase Difference	40
Fig. 3-18 Transport Direction Comparison in Case 1 and 2	43
Fig. 3-19 Mode Shape in l_1 and l_2	44
Fig. 3-20 Wave Propagation Direction produced by A and B	46
Fig. 3-21 Wave Propagation Direction produced by C and D	47
Fig. 3-22 Wave Propagation Direction produced by A, B, C and D	50
Fig. 3-23 Wave Propagation Direction in 30 th Simulation Condition	53
Fig. 3-24 Wave Propagation Direction in 31 st Simulation Condition	54
Fig. 3-25 Displacement according to Frequency	56
Fig. 3-26 Speed according to Frequency	57
Fig. 3-27 Displacement according to Frequency	60
Fig. 4-1 Schematic Diagram of Optical Element Transport System using Ultrasonic Wave	61
Fig. 4-2 Creative Process of Pickup Device	63
Fig. 4-3 Modeling of Pickup Device	63
Fig. 4-4 Classification Process of Optical Element	65
Fig. 4-5 Simulation of Pickup System	67
Fig. 4-6 Displacement and Velocity of Z-Stage for Pickup System	69
Fig. 4-7 Displacement and Velocity of X-Stage for Pickup System	70
Fig. 4-8 Yaw and Angular Velocity of Rotational Stage for Pickup System	71
Fig. 4-9 Photograph of Pickup Device	73
Fig. 4-10 Control Box for Pickup System	74
Fig. 4-11 Photograph of Optical Element Transport System using Ultrasonic Wave	75
Fig. 4-12 Flow Chart of Pickup Automation Program	77
Fig. 4-13 Pickup System Control Software using Visual C++	78

ABSTRACT

A Study on Analysis of Dynamic Characteristics for Ultrasonic Transport System

By Shin Sang Moon

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Methods of major transport system used in many industry field are conveyor belt, magnetic levitation system and indexing system. It is an indispensable device in many fields and especially it is very important in the factory automation. As the information and telecommunication industry starts to develop, the semiconductor and the optical industry are growing. In recent years, the faster network is required, the more demand of optical components is growing. However the conventional transport system is not adequate for transporting the precision optical component and the semiconductor.

Since the magnetic fields cause damage to semiconductor and the contact force can cause scratch on the optical lens, the new transport system for transporting the optical component and the semiconductor without damage is required and the ultrasonic wave transport system has been proposed to replace the previous

transport system. Actuators using the ultrasonic wave have been examined mainly in the USA and Japan since 1980. So far, most studies have developed for the purpose of reducing motor noises.

In this thesis, the object transport system using the ultrasonic wave is developed for transporting precision elements without damage. Two ultrasonic wave generators are used. It consists of the piezoelectric actuator which uses the bolted langevin-type transducer(BLT) and the horns. The ultrasonic transport system is a device that transports objects on the elastic body using ultrasonic wave. When ultrasonic wave is applied to flexural beam, the flexural beam vibrates to excite air layer, which lifts up the object on the beam to transport.

The principle of the object transportation is similar to the ultrasonic motor. The traveling wave which is produced on the flexural beam consists of the longitudinal wave and the transverse wave. Traveling wave of the ultrasonic transport system is theoretically analyzed. To observe a modeling equation for the vibration displacement of the flexural beam excited by two modes with the same frequency but a phase difference of 90° , the normal mode expansion is used. The modeling equation on steady state response of ultrasonic vibration is expressed and natural frequency of flexural beam in each mode is also estimated using the Euler-Bernoulli theory. In addition, the transport direction of objects depending on phase difference and frequency is theoretically analyzed and is verified the theoretical results by experiments. The optimal traveling frequency to generate traveling wave on the beam is measured.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

생산 과정의 효율화를 위한 기술혁신은 초기 공장자동화(Factory Automation)를 거쳐 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System)까지 계속되었다. 여러 분야의 산업에서 물체 이송 시스템은 필수적인 장치중의 하나이며 생산성 향상 및 생산 자동화에 매우 중요한 역할을 한다. 현재 사용되고 있는 이송 시스템은 컨베이어 시스템부터 자기를 이용한 이송 시스템과 반도체, 광소자와 같은 미세하고 정밀한 부품들을 이송하는 시스템까지 다양한 분야에 사용된다. 또한 복잡한 자동화 플랜트에서 서로 다른 작업 공정을 서로 연결해 주는 중요한 공정이라고 할 수 있다.

90년대 초·중반부터 정보통신 산업이 발전함에 따라 반도체 산업과 더불어 광통신 및 광정보기기 등 광산업 분야가 급속하게 발전되었다. 최근에는 보다 속도가 빠른 통신망이 요구됨에 따라 광통신망이 빠르게 확대되고 이로 인해 광통신에 필요한 광소자들의 수요가 급속하게 증가하고 있으며, 이동통신과 컴퓨터의 발달로 반도체의 수요 역시 급증하고 있다. 그러나 기존의 이송 시스템은 정밀하고 손상에 민감한 부품들인 반도체나 광소자 등의 이송에는 적합하지 않다. 반도체의 경우 자기적 영향은 소자 내에 전자적 배열을 손상시킴으로써 불량품이 될 수 있으며, 광소자는 이송 공정에서 접촉력에 따른 표면손상으로 인한 빛 손실이 불량률의 원인을 제공하기 때문에 기존의 이송 시스템은 도입되지 못하고 있는 실정이다.

이로 인해 최근에는 자기장의 영향을 받는 반도체 부품이나 접촉력에 따른 표면손상을 일으키는 광소자들을 결함없이 이송하기 위해 새로운 시스템의 개발이 요구되었다. 자기장이나 표면손실로 인한 결함을 줄일 수 있는 방법으로 초음파 여기를 이용한 이송 시스템을 제시하였다. 초음파 구동기의 적용 범위는 어군 탐상기, 세척기 및 의료용 장비까지 다양한 분야에 적용되고 있다.

초음파를 이용한 구동기에 대한 연구는 1980년대 말부터 미국과 일본을 중심으로 진행되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. Toshiiku Sashida⁽⁴⁾는 1993년에 초음파 모터의 이론적 원리를 설명하였고 Yoshiro Tomikawa⁽⁵⁾와 Kazunari Adachi⁽⁶⁾는 1989년 Ultrasonic Electronics 심포지엄에서 초음파로 진행되는 파형을 이용한 이송에 대해 발표하였다. Toshiiku Sashida는 1982년

에 진행파 모터(Traveling-Wave Motor)라고 불리는 초음파 액츄에이터를 제안하였고, P. I. Ro⁽⁷⁾⁽⁸⁾는 초음파를 이용한 물체 이송장치에 관하여 연구하였다. 지금까지의 대부분의 연구들은 모터 소음을 줄이기 위한 목적으로 초음파 로터리 모터에 대한 연구들이다⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. 초음파 로터리 모터는 Canon Camera Co.에서 렌즈 포커싱을 개선하는 데 사용되고 있으며, 국내에서는 2002년에 벤처회사인 (주)피에조테크놀리지에서 초음파 로터리 모터 및 컨트롤러를 연구하고 있다. 그러나 초음파 로터리 모터의 경우 스테이터 부분이 수입되고 있어 조립수준 밖에 미치지 않고 있으며 리니어 모터의 경우 이송거리가 짧아 제한적으로 사용되고 있다⁽¹¹⁾. 초음파 이송 시스템은 초음파 여기를 직접 이용하여 물체를 이송하므로 상대적으로 긴 이송거리를 가지고 있고 손상 없이 광소자를 안전하게 이송할 수 있을 뿐만 아니라 광소자의 생산성 증대에도 크게 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 초음파 이송 시스템의 이송 원리를 이론적으로 해석하고, 탄성빔의 진행 주파수를 예측하였다. 초음파 이송 시스템의 동특성을 규명하기 위해 이론적인 접근 방법으로 탄성빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하고, 위상차와 주파수가 물체 이송 방향에 미치는 영향을 이론적으로 해석하고 실험을 통해 검증하였다.

제 2 절 연구내용 및 방법

초음파 이송 시스템은 최근 급속히 발달하고 있는 광산업이나 반도체 산업에서 기존의 이송 시스템의 단점을 보완하기 위해 개발되었다⁽¹²⁾⁽¹³⁾. 기존의 이송 시스템들은 이송 공정이나 검사공정에서 광소자의 표면손상이나 자기장에 의한 반도체 소자의 전자적 배열의 손상이 우려된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 초음파 발생장치(Ultrasonic Wave Generator)에서 발생한 초음파 진동을 이용하여 물체를 이송하는 시스템을 제시하였다. 초음파 이송 시스템은 컨베이어 벨트나 기어 부분이 없기 때문에 간단한 구조를 가지고 있으며 인간의 귀에는 들리지 않는 초음파를 사용하므로 구동시에 소음이 발생하지 않는다.

초음파 여기를 이용한 물체 이송 시스템은 초음파를 발생하는 초음파 발생장치 사이의 위상차와 주파수에 밀접한 관계가 있다. 가진주파수의 위상차(Phase Difference)와 주파수를 변화함으로써 물체를 이송하는 진행파가 생성되며, 진행파의 위상차나 주파수의 변화 조건에 따라 물체의 이송 속도와 이송 방향을 바꿀 수 있다⁽¹⁴⁾.

본 연구에서는 초음파 이송 시스템의 구동 원리를 이해하고 물체의 이송 방향을 제어하기 위해 탄성빔의 진동 특성을 이론적으로 규명하였다. 주파수가 같고 위상차가 90°인 두 개의 모드에 의해 가진되는 탄성빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하기 위해 정규 모드 전개(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 초음파 여기를 이용한 물체 이송 시스템의 이송 메커니즘을 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

1. 초음파 이송 시스템의 이론적 해석

초음파 이송 시스템의 구동 원리는 초음파 모터와 유사하다⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾. 초음파 진동이 탄성빔에 전달되어 진행파가 생성되며 진행파의 전파 방향은 위상차와 주파수에 영향을 받는다. 이론적 해석을 위한 흐름도를 Fig. 1-1에 나타내었다. 초음파 이송 시스템을 구성하고 있는 탄성빔에 대한 모델링 방정식을 전개하고 개발된 시스템의 이송 원리를 이론적으로 해석하기 위해 오일러-베르누이 이론을 적용하였다. 변수분리법과 정규 모드 전개를 이용하여 두 개의 모드에 의해 가진되는 탄성빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하였다.

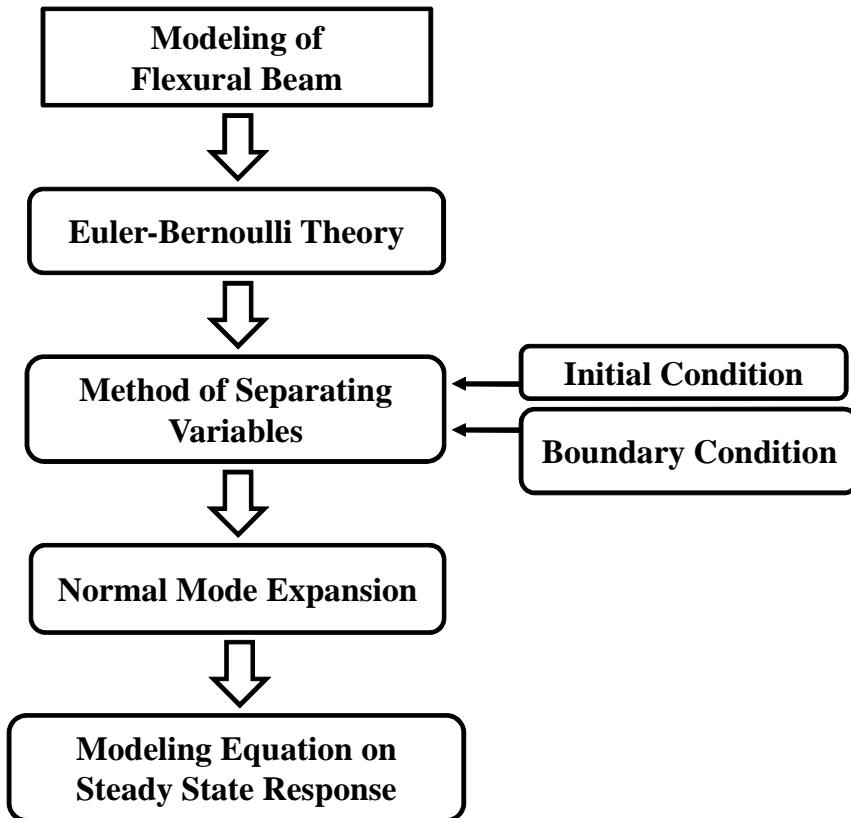


Fig. 1-1 Flow Chart for Theoretical Analysis

2. 초음파 이송 시스템의 실험적 접근

Fig. 1-2는 초음파 이송시스템의 이론적 해석과 실험의 흐름도를 나타낸다. 위상차와 주파수에 따른 물체 이송 방향을 이론적인 접근 방법으로 해석하고 실험을 통해 검증하였다. 위상차에 따른 물체 이송 방향을 검증하기 위해 두 초음파 발생장치 사이의 위상차를 0° 부터 360° 대역으로 10° 씩 증가, 감소시키면서 실험하였다. 주파수에 따른 물체 이송 방향을 검증하기 위해 주파수를 $25.5\text{kHz} \sim 28.1\text{kHz}$ 까지 100Hz 씩 증가시키면서 실험하였다.

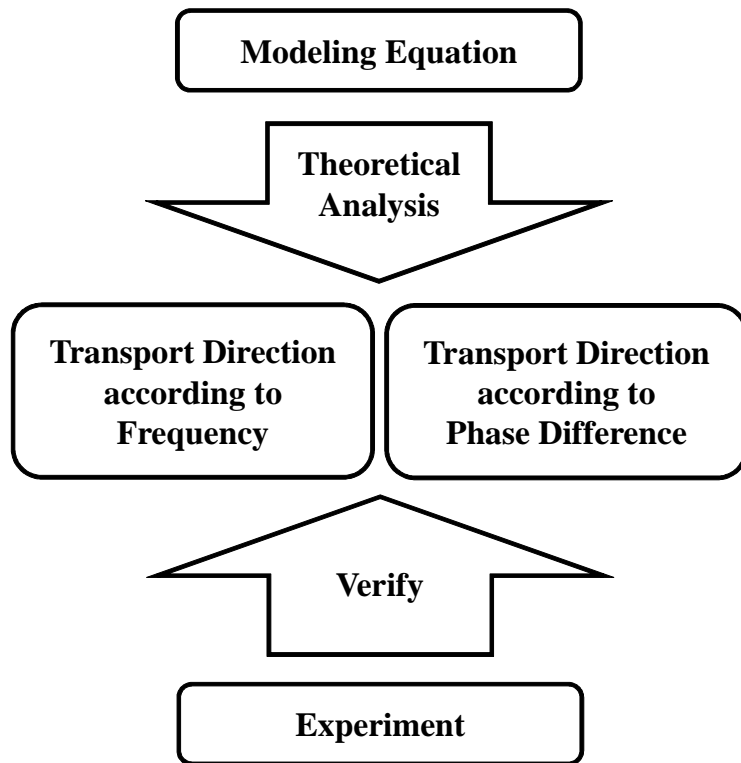


Fig. 1-2 Comparing Theoretical Results with Experimental Results

3. 초음파 이송 시스템의 응용

컨베이어 벨트와 같은 기존의 이송 장치는 광소자나 반도체를 이송하기에 적합하지 않기 때문에⁽¹⁸⁾ 기존 이송 장치를 대체하여 정밀 부품을 손상없이 이송하기 위한 광소자 자동 이송 시스템을 제작하였다. 초음파 광소자 이송 시스템은 Fig. 1-3과 같이 구성된다. 광소자 자동 이송 시스템은 광소자를 다른 이송 장치로 보내기 위한 픽업 시스템(Pickup System)과 광소자를 검사하기 위한 검사 시스템(Inspection System)과 광소자를 실시간으로 관찰하기 위한 비전 시스템(Vision System)으로 구성되며, 각각의 시스템을 하나의 컴퓨터로 제어하기 위해 검사 자동화 프로그램을 개발하였다.

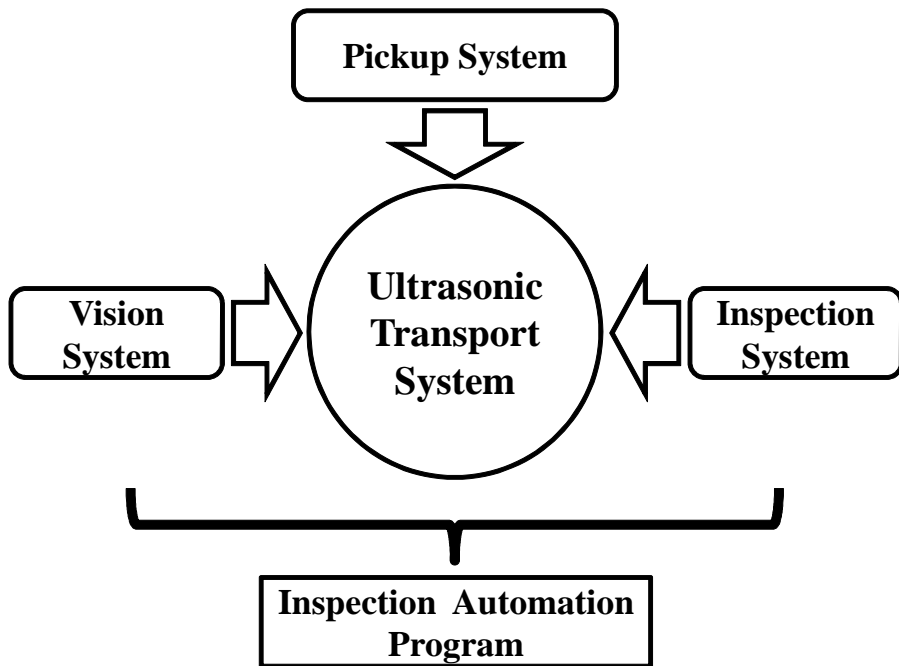


Fig. 1-3 Composition of Ultrasonic Transport System for Optical Element

제 2 장 초음파 이송 시스템의 설계 및 제작

제 1 절 실험 장치의 설계

초음파를 이용한 물체 이송 시스템은 Fig. 2-1과 같이 함수를 발생시키는 함수발생기(Function Synthesizer), 발생된 함수를 증폭하는 파워증폭기(Power Amplifier), 초음파를 발생하는 초음파 발생장치, 진행파를 발생하고 이송 가이드 역할을 하는 탄성빔(Flexural Beam)으로 구성된다. 채널 1과 2에 사용된 초음파 발생장치는 압전 액츄에이터(Piezoelectric Actuator) 및 부스터(Booster) 그리고 혼(Horn)으로 구성된다. 압전 액츄에이터는 초음파를 발생시키고, 부스터는 압전 액츄에이터의 파손을 방지하며 발생된 초음파를 일차적으로 증폭시킨다. 부스터를 통해 증폭된 초음파는 혼에서 이차적으로 증폭되며, 증폭된 초음파는 탄성빔에 전달되고 부상파와 진행파가 발생하여 물체를 이송한다. 압전 액츄에이터와 부스터와 혼은 나사로 체결되며 탄성빔의 양 끝단에 2개의 초음파 발생장치가 부착되어 가진된다. 길이는 500mm이고 11mm×3mm인 직사각형 모양의 단면을 갖는 탄성빔을 사용하였고, 탄성빔의 체결은 노달 라인(Nodal Line)이 아닌 위치에 원추형 혼(Conical Horn)과 볼트로 체결하였다.

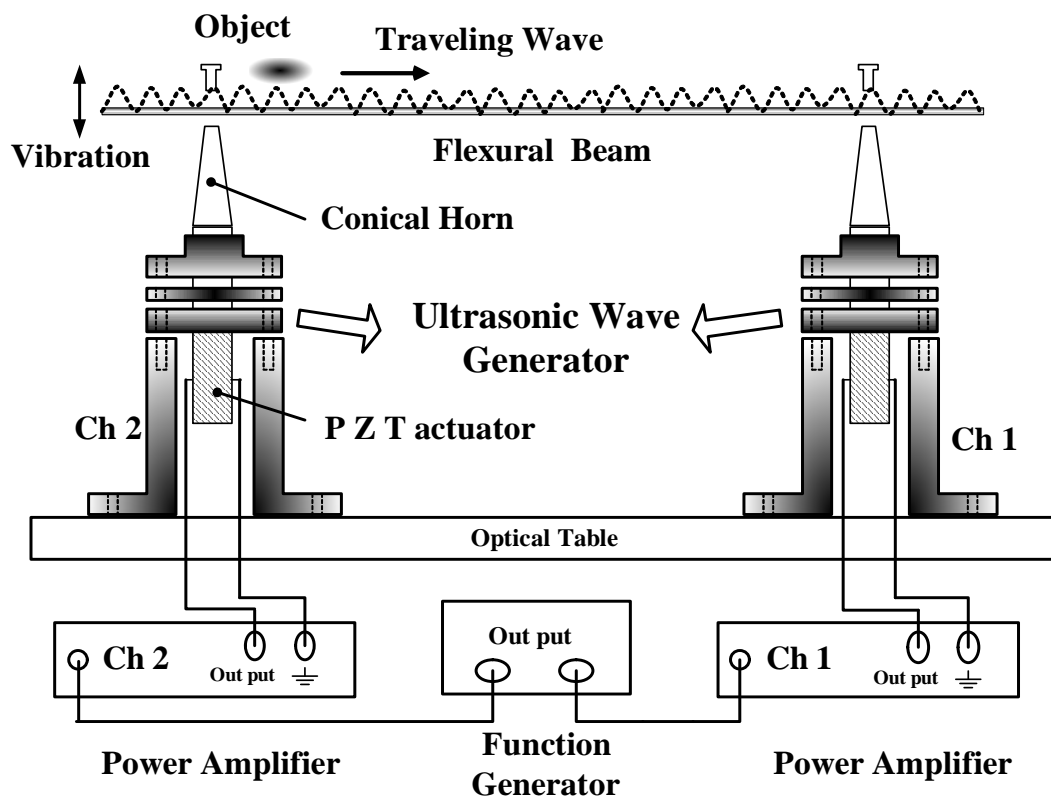


Fig. 2-1 Schematic Diagram of Ultrasonic Transport System

1. 진동자

초음파 발생장치는 압전 액츄에이터를 사용한다. 압전 액츄에이터에 사용된 압전 소자(PZT)는 수정 진동자보다도 약 160배의 압전율을 가지고 있으며 압축하면 큰 전하가 발생한다. 압전 소자는 전압이 가해지면 변형이 발생하고 압전 효과를 이용하여 수 μm 의 변위 제어를 할 수 있다. Fig. 2-2는 압전 소자의 구동 원리를 나타낸다. 압전 소자는 응답속도가 빠르고, 높은 분해능을 갖는다. 압전 소자에 전압을 가해주면 변위의 차가 생기므로 기계적인 진동이 발생되며, 이러한 압전 소자를 적층하여 일체화한다. 와이스 도메인(Weiss Domain)이란 다결정 강유전체 세라믹 재료(Polycrystalline Ferroelectric Ceramic Materials)의 같은 방향의 쌍극자(Dipole)를 갖는 도메인 그룹이다.

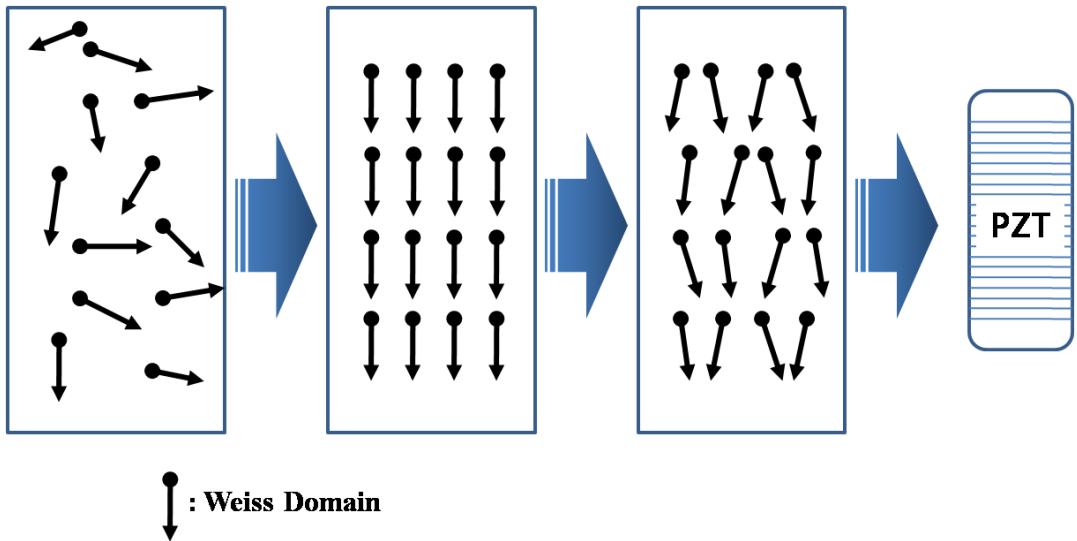


Fig. 2-2 Driving Principle of PZT

압전 소자는 인장 응력에는 약하지만 압축 응력에는 강하기 때문에 볼트로 조여 압축력을 인가해 큰 진폭을 갖도록 설계한 볼트 조임 랑지방형 진동자(Bolt Clamped Langevin Type Transducer)를 사용하였다. Fig. 2-3은 볼트 조임 랑지방형 진동자의 기본 구조를 나타낸다. 대출력 진동자로서 20kHz와 28kHz용이 널리 실용되고 있으며, 초음파 발생장치에 사용된 진동자는 NTK사의 제품을 사용하였다.

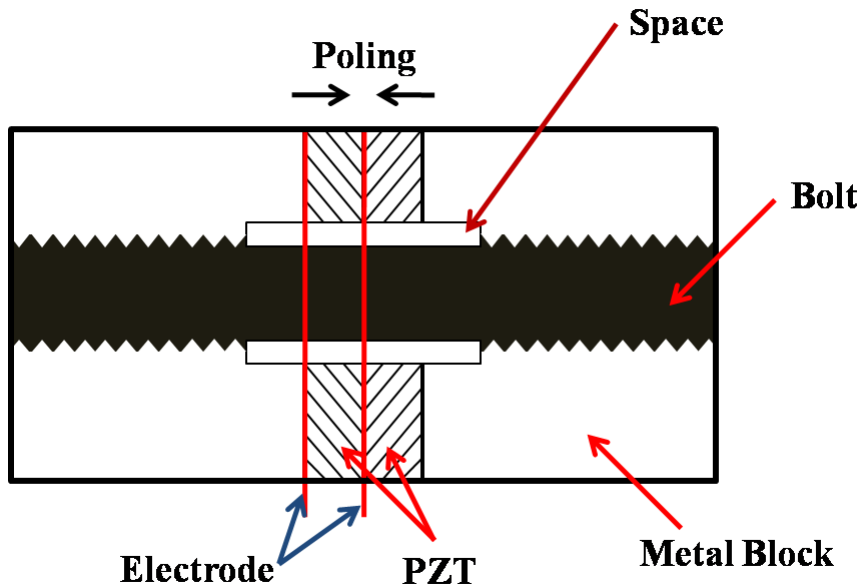


Fig. 2-3 Structure of Bolt Clamped Langevin Type Transducer

2. 혼의 설계

진동자의 강도에 따라 진폭에 한계가 있어 20kHz의 진동자의 진폭을 수 μm 이하로 낮추어야 한다. 진동자의 작은 진폭에서 공구의 큰 진폭을 얻기 위해서는 끝을 가늘게 설계한 혼을 진동자에 접촉하고 진동 에너지를 작은 면적에 집중시켜야 한다. 혼은 굵은 쪽의 직경을 혼 내부 파장의 절반으로 하거나 그 이상으로 크게 하면 반경방향의 공진이 일어나고 면이 같은 모양으로 진동하지 않게 되므로 너무 굵게 만들 수 없기 때문에 진동계에서 선단진폭을 크게 하려면 방사 면적을 작게 해야 한다. 혼의 형상으로는 단면이 지수함수적으로 변화하는 지수함수혼(Exponential Horn), 원추형의 원추혼(Conical Horn), 진동의 절부에서 불연속적으로 가늘게 한 단부가혼(Stepped Horn) 및 이것을 조합한 것이 있다. 어느 것이나 진동자의 공진 주파수로 반파장 정수배의 공진을 하도록 설계하였다. 가장 이상적인 지수함수혼(Exponential Horn)은 공작이 번거롭기 때문에 반파장 공진 사이에 큰 진폭 확대율을 얻으려는 경우에 많이 사용된다. 초음파 이송 시스템에 사용된 혼은 큰 진폭 확대율을 필요로 하지 않기 때문에 원추혼을 사용하

였고⁽¹⁹⁾ 혼의 증폭비는 1 : 2.5로 설계하였다. Fig. 2-4는 혼의 구조와 각 부분의 진동 진폭과 응력 분포를 나타낸 것이다. 플랜지부는 진동체의 지지부로서 작용하고 진폭이 제로인 위치에 고정되며, 진폭은 혼의 끝 부분에서 최대가 된다.

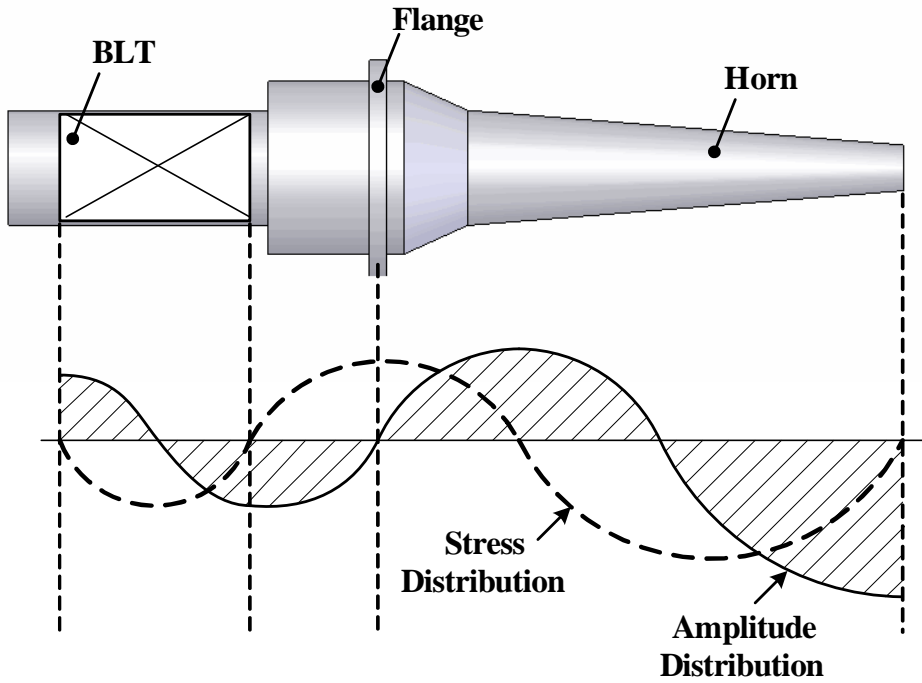


Fig. 2-4 Vibration Displacement of Horn

제 2 절 초음파 이송 시스템의 제작

본 연구에서 제작한 초음파 이송 시스템을 Fig. 2-5에 나타내었다. 탄성빔의 재질은 음향학적 성질이 뛰어난 두랄루민 7072(Duralumin 7072)를 사용하였다. 함수발생기와 파워증폭기는 두 개의 초음파 발생장치에 신호를 보내야 되기 때문에 두 개의 채널을 독립적으로 사용할 수 있도록 하였다. 함수발생기에서 생성된 신호는 파워증폭기를 통해서 출력된다. 함수발생기는 YOKOGAWA사의 제품을 사용하였고, 파워증폭기는 Trek사의 제품을 사용하였다.



Fig. 2-5 Photograph of Experimental Apparatus

제 3 장 초음파 이송 시스템의 이론적 해석

초음파 발생장치와 탄성빔으로 구성된 초음파 진동을 이용한 물체 이송 시스템을 제작하였다. 탄성빔의 진동 변위에 대한 모델링 방정식을 구하기 위해 정규모드전개를 이용하였으며, 이론식을 적용하여 탄성빔의 고유 주파수를 예측하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 물체를 이송하는 진행파의 원리를 이론적으로 전개하여 주파수와 위상차에 따른 파동의 전파 방향 변화를 예측하고, 실험을 통해 검증하였다.

제 1 절 정상파와 진행파

파동은 크게 종파(Longitudinal Wave)와 횡파(Transverse Wave)로 나눌 수 있다. 종파는 매질의 상태변화의 방향이 파동의 진행방향에 대해 평행하고 횡파는 매질의 상태변화 방향이 파동이 진행하는 방향에 수직이다. 일반적으로 물체에 전파되는 탄성과 중종파는 부피탄성에 의해 일어나며, 횡파는 형상탄성에 의해 나타난다. 따라서 고체 내에서 일어나는 파동은 탄성파로 종파와 횡파가 함께 일어날 수 있다. 형상탄성이 없는 유체의 경우에는 횡파가 발생하지 않는다.

매질의 상태량을 u 라고 하면, u 는 매질 내 위치(좌표 x, y)와 시간 t 의 함수로 표시될 수 있고 시간에 따른 파동의 변화를 기준으로 정상파(Standing Wave)와 진행파(Traveling Wave)로 나누어 진다. 정상파는 Fig. 3-1과 같이 파장, 진폭, 주기 및 파속이 같은 두 파동이 서로 반대 방향에서 진행하여 위 아래 방향으로 진동하는 단순조화운동을 한다. 진행파는 Fig. 3-2와 같이 노드 점(Nodal Point)이 고정되어 있지 않고 에너지를 이송한다. 진행파의 이러한 특징을 이용하여 탄성빔 위에 놓인 물체를 이송할 수 있다.

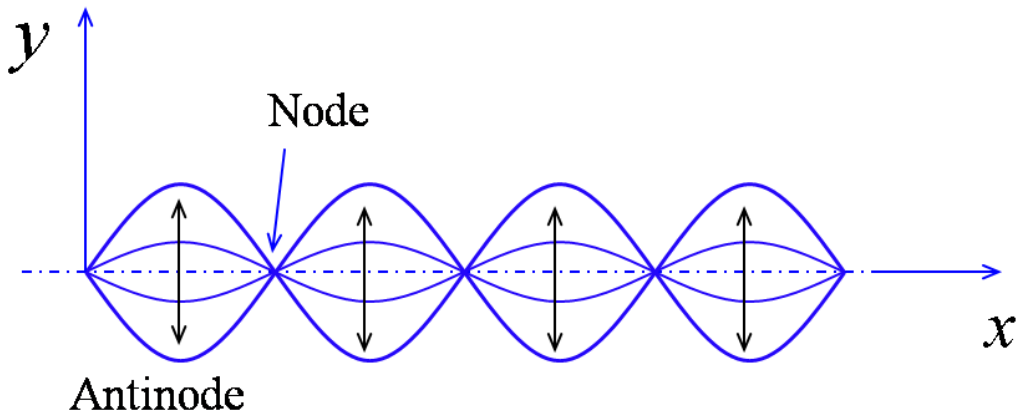


Fig. 3-1 A Typical Standing Wave

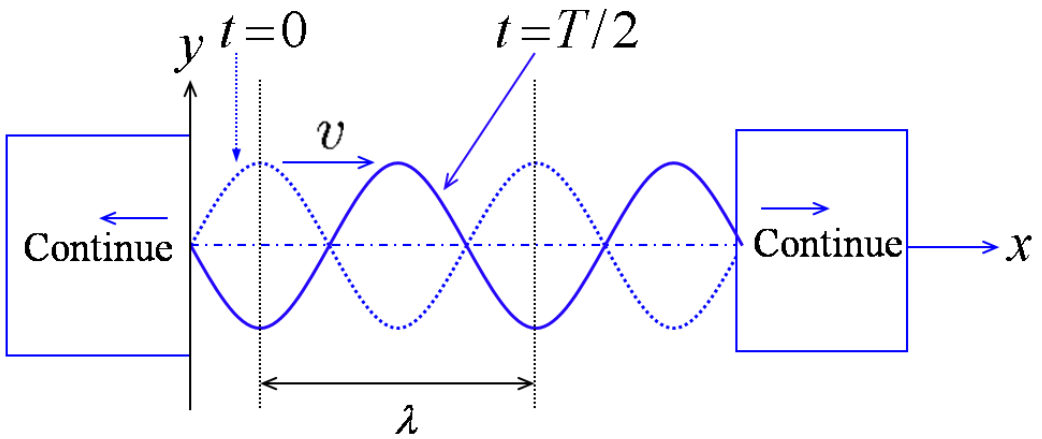


Fig. 3-2 A Typical Traveling Wave

탄성 매질을 통과하는 진행파는 레일리파(Rayleigh Wave)와 굽힘 파동으로 나누어진다⁽²⁰⁾. 레일리파의 표면에 있는 입자의 움직임을 Fig. 3-3에 나타내었다. 레일리파는 높은 주파수에서 일어나고 대체로 크고 두꺼운 구조물에서 발생하며, 표면으로부터 멀어질수록 진폭이 감소하고 대체로 긴 파장을 가지고 있기 때문에 초음파 액츄에이터(Ultrasonic Actuator)를 해석하기에 적합하지 않다. 굽힘 파동은 굽힘 강성을 갖는 보나 판의 굽힘 운동에 의한 파동을 뜻하며 표면위의 입자는 타원형의 궤적을 그린다. 이 타원형 운동(Elliptical Motion)에 의해 물체가 이송된다. 굽힘 파동은 Fig. 3-4와 같은 움직임을 보이며 진행하고, 굽힘 파동의 표면에 있는 입자의 움직임은 레일리파와 동일하게 타원형 운동을 한다⁽²¹⁾⁽²²⁾.

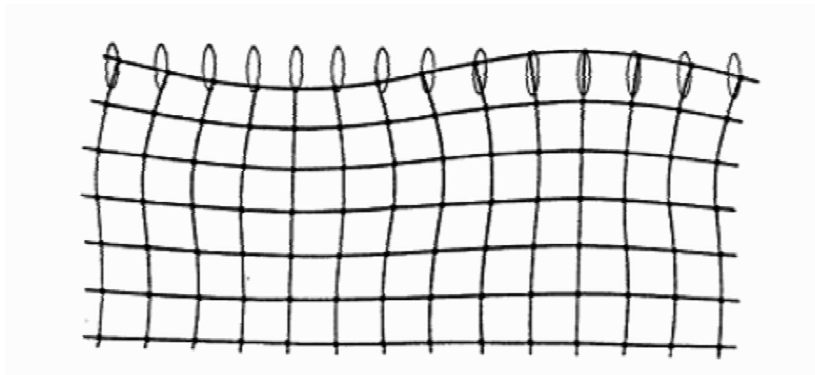


Fig. 3-3 Elliptical Motion of Particles on Surface in Rayleigh Wave

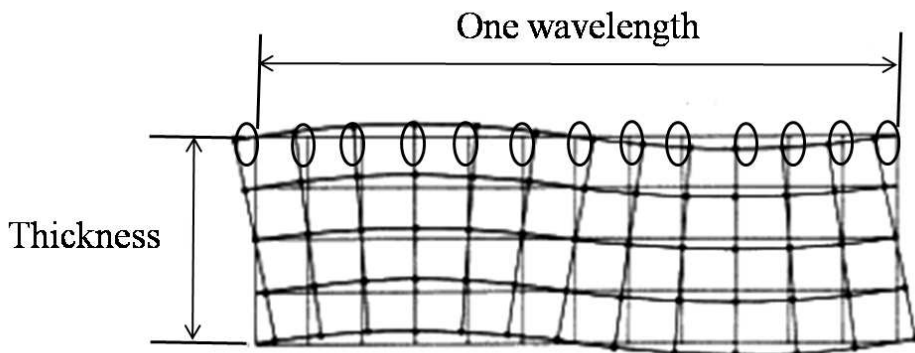


Fig. 3-4 Elliptical Motion of Beam Particles on Surface in Flexural Wave

1. 정상파의 해석

파형이 사인곡선으로 나타나는 것을 조화파(Harmonic Wave)라 하며 다음과 같이 나타낸다.

$$u(x,t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

where A : 진폭(Amplitude)

k : 파동수(Wave Number)

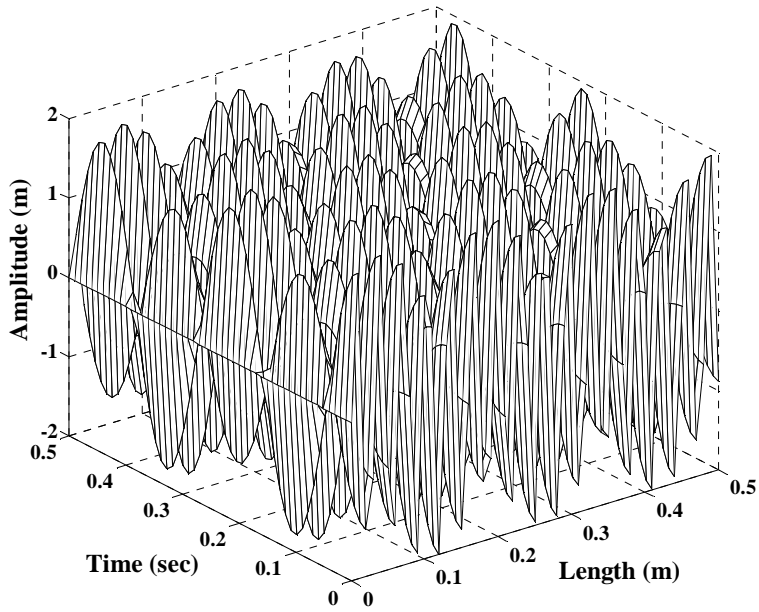
ω : 각진동수(Angular Frequency)

공간적으로는 $2\pi/k(=\lambda)$ 마다 되풀이 되고 시간적으로 $2\pi/\omega(=T)$ 마다 같은 상태가 되풀이되므로 λ 를 파장(Spatial Period)이라 하고 T 를 주기(Temporal Period)라고 하며, 주기의 역수 $1/T$ 를 주파수라고 한다. 파동을 많은 조화파가 겹친 것으로 가정하면 수식으로 쉽게 해석할 수 있다.

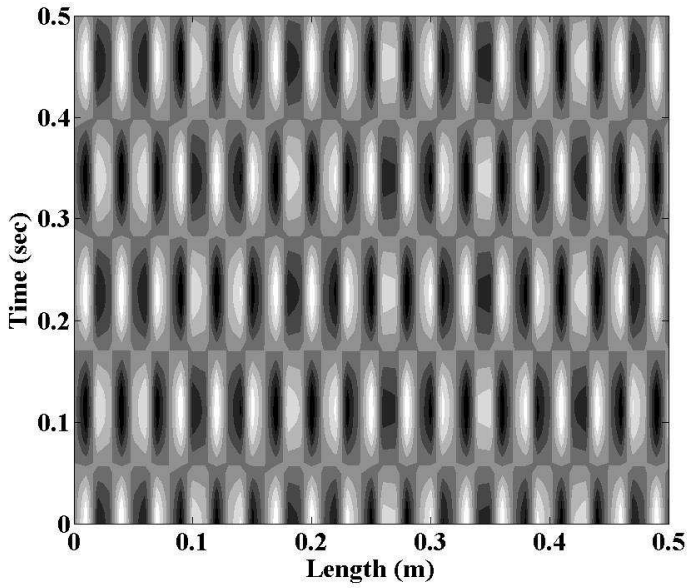
정상파는 같은 진폭과 진동수를 가지고 반대방향으로 진행하는 두 조화파가 중첩되어 발생하고 다음과 같이 표현된다.

$$A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (2)$$

임의의 정상파를 Fig. 3-5(a)에 3차원으로 나타내었고 이 그래프를 탄성빔의 길이(x)와 시간(t)에 대한 평면에 진폭을 투영하여 Fig. 3-5(b)에 나타내었다. 같은 진폭을 갖는 선을 연결하여 일정한 윤곽(Profile)이 형성되도록 하고, 이 윤곽은 시간을 따라 단순 조화 운동을 한다.



(a) Mesh View



(b) Contour View

Fig. 3-5 Arbitrary Standing Wave

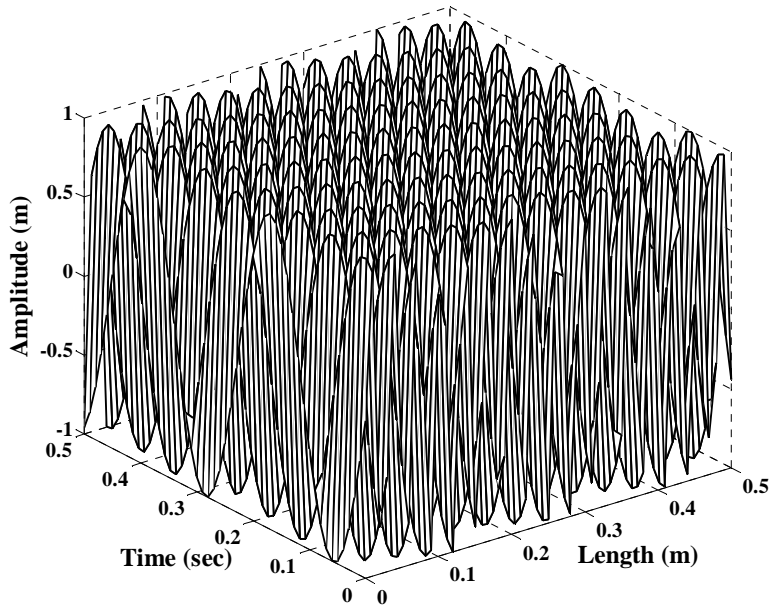
2. 진행파의 해석

진행파는 다음과 같이 두개의 정상파로 나누어 나타낸다.

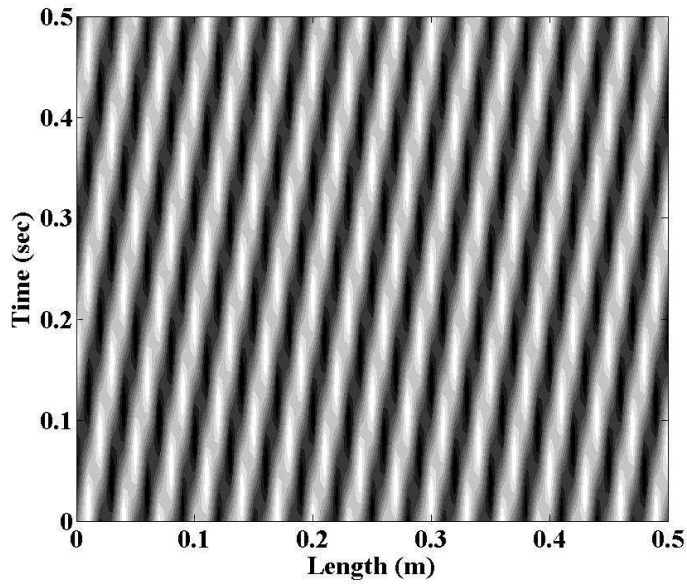
$$\sin(kx - \omega t) = \sin(kx)\cos(\omega t) - \cos(kx)\sin(\omega t) \quad (3)$$

$$\cos(kx - \omega t) = \cos(kx)\cos(\omega t) + \cos(kx - \frac{\pi}{2})\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

식 (3)에 의해 진행파는 주파수가 같고 90°의 위상차를 갖는 두 개의 정상파의 중첩에 의해 발생한다. 임의의 3차원 진행파를 탄성빔의 길이(x)와 시간(t)에 대한 평면에 진폭을 투영시켜 Fig. 3-6에 나타내었다. 같은 진폭을 갖는 선을 연결하면 기울기를 갖는 일정한 모양의 띠가 형성된다. 띠의 기울기가 양일 경우, 파동의 진행 방향은 오른쪽 방향(→)으로 표현하고, 띠의 기울기가 음일 경우는 왼쪽 방향(←)으로 표현하였다.



(a) Mesh View



(b) Contour View

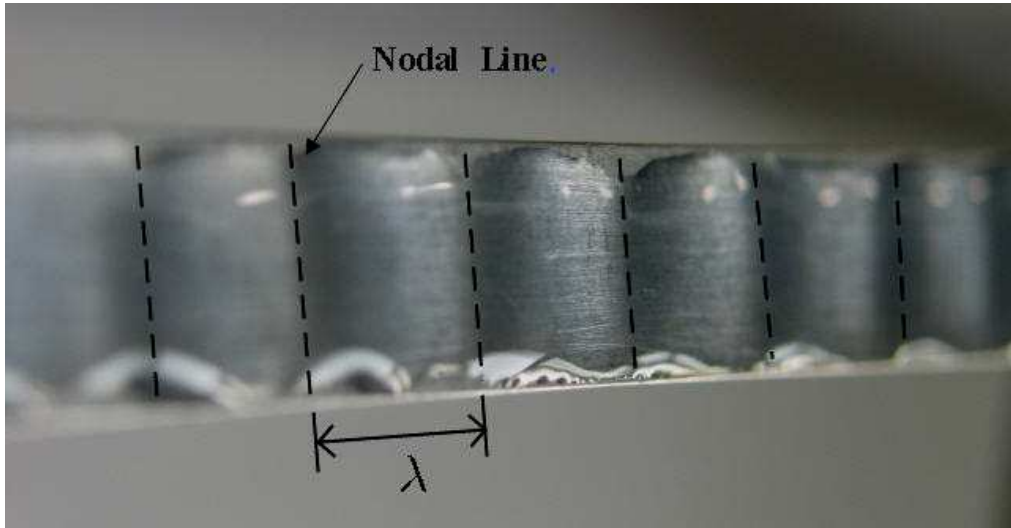
Fig. 3-6 Arbitrary Traveling Wave

3. 진행파의 관측

압전 액츄에이터에서 발생된 초음파는 부스터와 혼을 통해 증폭되고 탄성빔에 전달된다. 초음파 진동에 의하여 탄성빔에는 진행파가 발생하며, 발생한 진행파를 육안으로 확인하기 위해 Fig. 3-7과 같이 탄성빔 위에 물을 뿌려서 초음파를 가진하였다. 탄성빔의 양단을 가진하여 진행파를 발생하였을 때, Fig. 3-7(b)와 같이 일정한 간격으로 물결이 형성되었다. 어두운 색으로 형성된 부분이 진행파의 노달 라인이며, 최대 진폭을 얻기 위해 초음파 발생장치의 원추혼은 노달 라인을 피하여 탄성빔과 체결하였다.



(a) No Excitation



(b) Excitation

Fig. 3-7 Traveling Wave on Flexural Beam

제 2 절 탄성빔의 이론적 해석

보, 평판, 셸 등의 탄성체 변형을 단순한 기하학적 식으로 근사화시킬 때 탄성체의 두께 방향으로 직선상 질점들이 변형 후에도 동일 직선상에 위치한다고 가정한다. 탄성체 탄성빔의 진동 변위에 관한 모델링 방정식을 구하기 위해서는 전단 효과가 무시된 오일러-베르누이 이론(Euler-Bernoulli Theory)이나 전단 효과를 고려한 티모센코 이론(Timoshenko Theory)을 적용한다. Fig. 3-8에 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 구분하는데 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.
- 빔은 가늘다.
- 빔의 재질은 균일하고 후크의 법칙(Hook's Law)을 따른다.
- 축방향의 힘이 없다.
- 운동하는 동안 평면은 평면을 유지한다.
- 운동 평면은 빔의 대칭 평면과 같기 때문에 회전과 병진은 독립적이다.
- 에너지 손실은 무시하고, 진동의 진폭이 작다.
- 전단력과 전단 모멘트는 무시한다.

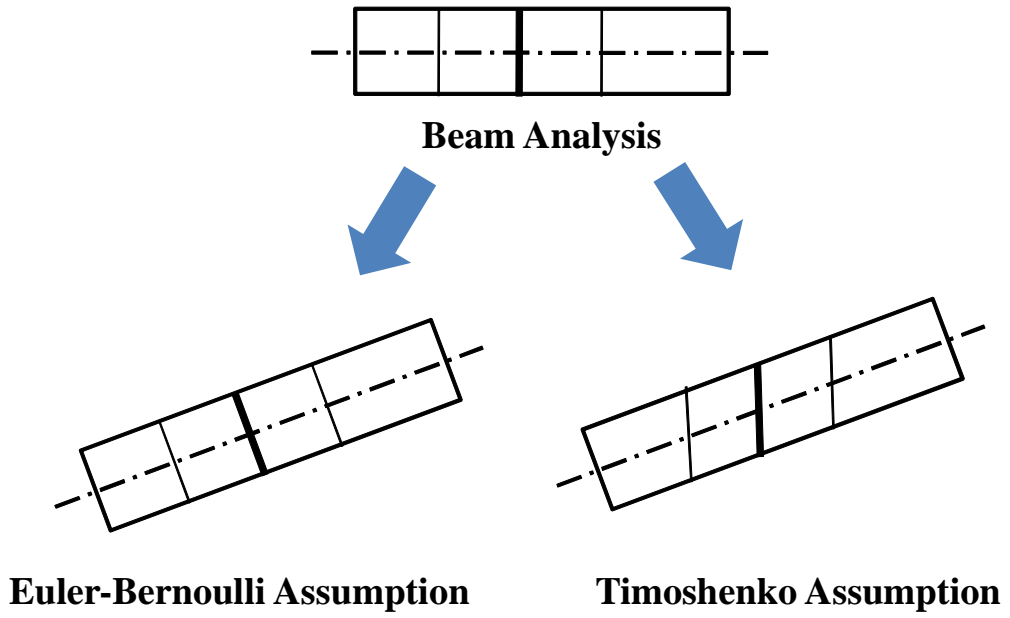


Fig. 3-8 Two Assumptions of Beam Theory

1. 탄성빔의 모델링

초음파 가진을 통해 탄성빔은 길이방향으로 횡진동을 한다. Fig. 3-9는 횡진동을 하는 탄성빔의 요소에 대한 굽힘 모멘트와 전단력을 나타낸 것이다⁽²³⁾.

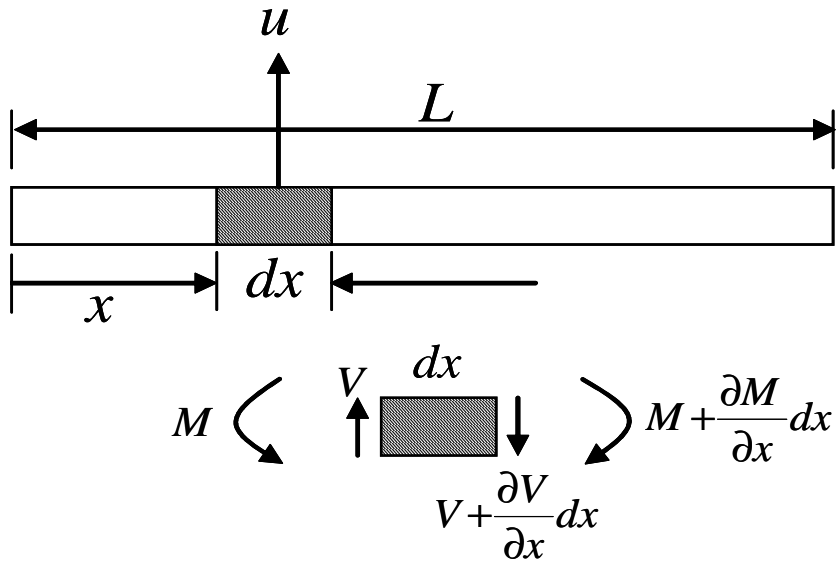


Fig. 3-9 Bending Moments and Shear Forces in Beam

굽힘 모멘트의 합과 빔의 휨(Deflection) 이론에 의해서 식 (4)와 같이 횡방향의 굽힘 운동에 대한 오일러 빔 방정식(Euler Beam Equation)이 유도된다⁽²⁴⁾.

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

where ρ : 탄성빔의 밀도(Mass Density of Flexural Beam)

A : 탄성빔의 단면적(Cross-Sectional Area of Flexural Beam)

E : 탄성 계수(Young's Modulus)

I : 단면모멘트(Cross Sectional Area of Moment)

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

$$u(x,t) = \varnothing(x)q(t) \quad (5)$$

공간함수 $\varnothing(x)$ 는 보의 임의의 위치 x 의 함수로서 어떤 순간에 보의 처짐 곡선을 나타내고, 시간함수 $q(t)$ 는 보의 임의의 위치의 진동 상태를 나타낸다. $\varnothing(x)$ 와 $q(t)$ 를 분리하면 식 (6)과 같다⁽²⁴⁾.

$$\frac{d^2q(t)}{dt^2} + w^2q(t) = 0 \quad (6)$$

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

$\varnothing(x)$ 는 경계조건을 이용하여 일반해를 구할 수 있다. 탄성빔의 경계조건은 양단 자유(Free-Free End)이므로 자유단에서 전단력과 굽힘 모멘트가 0이다. 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3\varnothing(0)}{\partial x^3} = 0, & \quad \frac{\partial^2\varnothing(0)}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^3\varnothing(l)}{\partial x^3} = 0, & \quad \frac{\partial^2\varnothing(l)}{\partial x^2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

경계 조건을 이용하여 전개하면 다음과 같은 주파수 방정식(Frequency Equation)이 유도된다. Fig. 3-10과 같은 $\cos k_B l$ 과 $\frac{1}{\cosh k_B l}$ 의 곡선의 교점을 이용하여 $k_B l$ 을 구한다.

$$1 = \cosh k_B l \cdot \cos k_B l \quad (8)$$

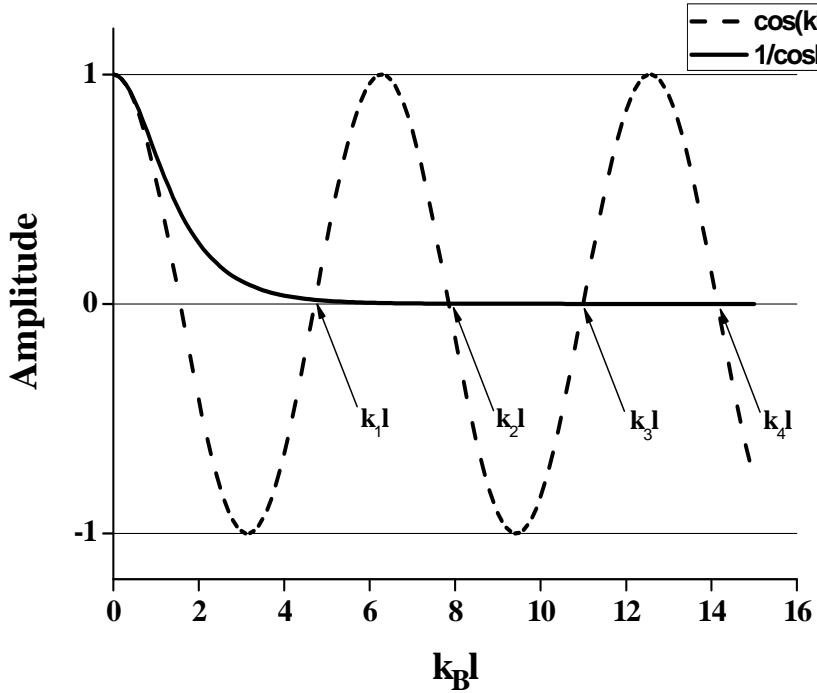


Fig. 3-10 Intersecting Points of Curve

모드 형상을 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.

$$\varnothing_n(x) = \left(\frac{\cosh(k_{Bn}l) - \cos(k_{Bn}l)}{\sinh(k_{Bn}l) - \sin(k_{Bn}l)} \right) (\sin(k_{Bn}x) + \sinh(k_{Bn}x)) \quad (9)$$

$$- (\cos(k_{Bn}x) + \cosh(k_{Bn}x))$$

탄성빔의 변위 x 의 위치에 외력 $F\sin(\omega t)\varnothing_n(x)$ 을 가할 때 초음파에 의해 진동하는 탄성빔의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M_N \ddot{q}_n + K_{SN} q_n = F\sin(\omega t)\varnothing_n(x) \quad (10)$$

where $M_N = \int_0^l \varnothing_n^2(x)\rho_l(x)dx$: 일반화된 질량(Normalized Mass)

ρ_l : 단위 길이당 질량(Mass per Length)

$K_{SN} = \omega_n^2 M_N$: 일반화된 강성(Normalized Stiffness)

연속계의 정규모드에서 시간함수 $q_n(t)$ 의 일반해는 다음과 같다.

$$q_n(t) = \frac{\varnothing_n(x)F\sin(\omega t)}{M_N(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (11)$$

연속체의 가정을 사용하면 물체의 특성이 공간상에서 연속적으로 변화하므로 정규진동형의 합으로 나타낸다. $u_n(x,t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_n(x,t) = \frac{F\sin(\omega t)}{m} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varnothing_n(x)\varnothing_n(l)}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

where m : 탄성빔의 질량

초음파에 의해서 진동되는 탄성빔의 모델링은 Fig. 3-11과 같다. 양단 자유인 탄성빔은 l_1 과 l_2 위치에 초음파를 전달하는 혼과 연결된다.

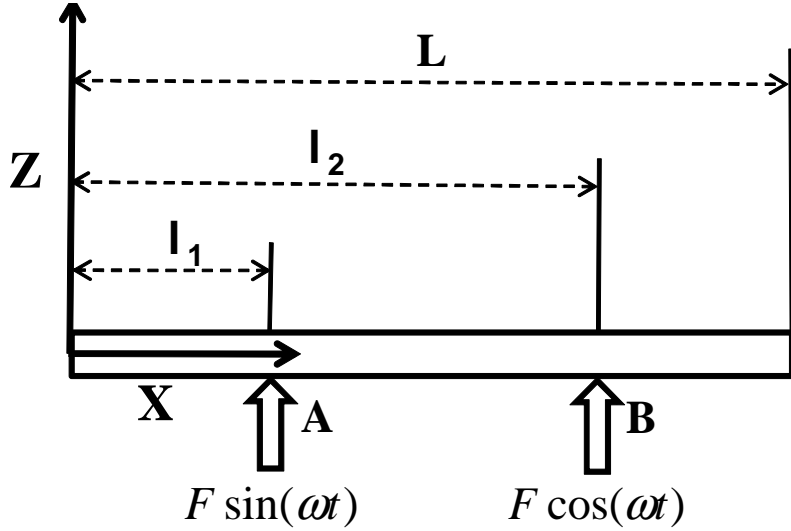


Fig. 3-11 Beam Model of Prototype

탄성빔에 발생하는 횡 방향의 진동변위에 관한 정상 상태 응답은 각각의 모드를 무한개 중첩한 것과 같다. 본 논문에서는 가진주파수(Excitation Frequency, ω)에 대하여 전체 응답에 대한 기여도가 높은 30th와 31st 모드를 사용하여 두 모드에 관해서 식 (13)과 같이 모델링 방정식을 구하였다. 대괄호 안의 식은 하나의 진행파를 나타내며 두 개의 진행파의 합으로 표현된다⁽⁸⁾⁽²⁵⁾.

$$u(x,t) = \left[A \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) + B \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \right] \quad (13)$$

$$+ \left[C \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) + D \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \right]$$

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

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

2. 탄성빔의 고유 주파수

탄성빔의 고유 진동수(Natural Frequency)는 파동수의 정의로부터 다음과 같이 나타낸다⁽²⁴⁾.

$$w_n = \frac{(k_{Bn}l)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (14)$$

where k_B : 탄성빔의 파동수(Wave Number of Flexural Beam)

식 (14)로부터 구한 고유 진동수를 Table 3-1에 정리하였다.

Table 3-1 Natural Frequency of Theoretical Analysis

n th Mode	Frequency (kHz)
26	19.1
27	20.6
28	22.1
29	23.7
30	25.3
31	27.0
32	28.7

Table 3-1의 고유 주파수를 검증하기 위해 유한 요소 해석(Finite Element Analysis)을 수행하였으며, 유한 요소 해석을 이용하여 탄성빔의 모달 해석(Modal Analysis)을 수행하였다. 유한 요소 해석을 위한 입력 조건은 Table 3-2에 나타내었고, 메쉬(Mesh)는 솔리드 메쉬(Solid Mesh)를 사용하였다. 탄성빔의 횡방향 변위만을 고려하여 Fig. 3-12와 같이 탄성빔 측면을 슬라이드 조건으로 구속하였다.

Table 3-2 Input Conditions for FEM Analysis

Flexural Beam		
Mesh	Mesh Type	Solid Mesh
	Element Size	0.003 m
	Nodes	5534
	Elements	668
Material Properties (Duralumin 7072)	Elastic Modulus	6.8×10^{10} Pa
	Poisson`s Ratio	0.33
	Density	2720 kg/ m ³
Boundary Condition	Constraint	Slide(- , 0 , -) in 2 Side Surfaces

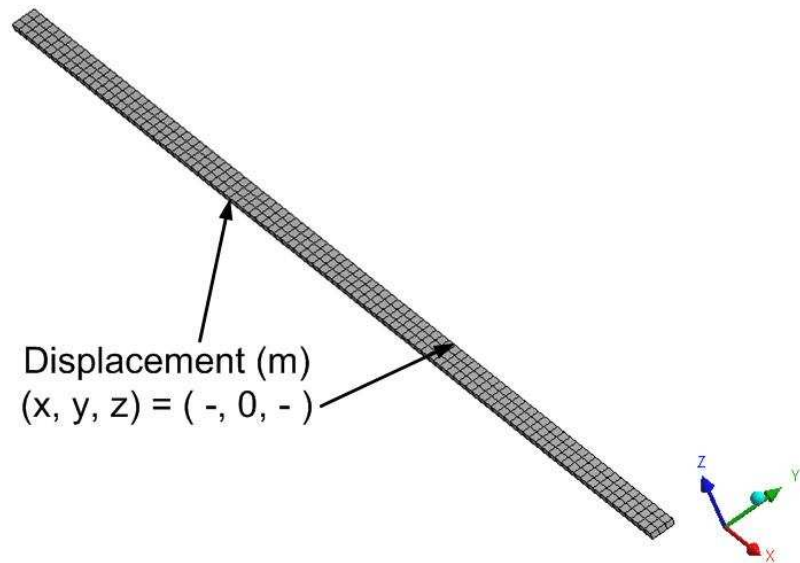
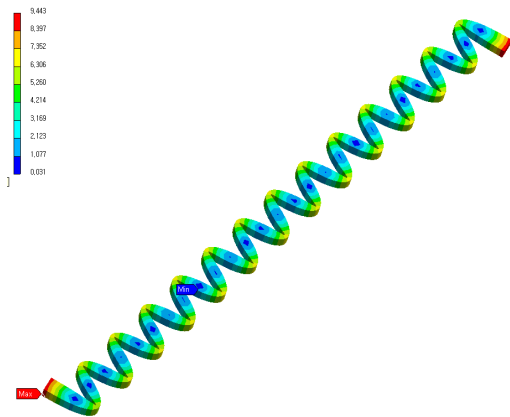


Fig. 3-12 Constraint Conditions of Flexural Beam for Modal Analysis

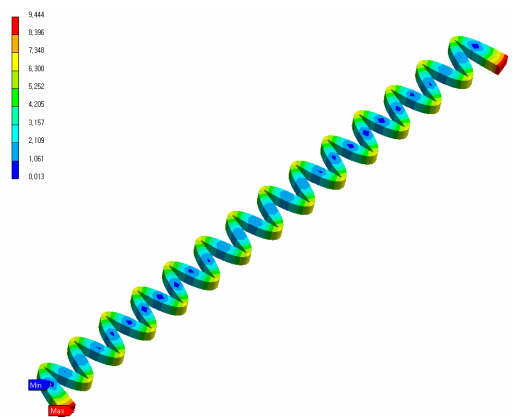
유한 요소 해석을 통해 구한 탄성빔의 고유 주파수는 Table 3-3에 나타내었고 각 모드에서 나타나는 모드 형상(Mode Shape)은 Fig. 3-13에 나타내었다. 34th와 38th 모드와 같이 횡방향 조화 운동이 일어나지 않는 경우를 모두 제외하여 정리하였으며, 오일러-베르누이 빔 이론을 사용하여 구한 고유주파수와 비교하여 Table 3-4에 나타내었다. 유한 요소 해석을 통해 구한 고유주파수는 식 (14)에 의해 구한 고유진동수와 잘 일치하였다.

Table 3-3 Natural Frequency Obtained by FEM Analysis

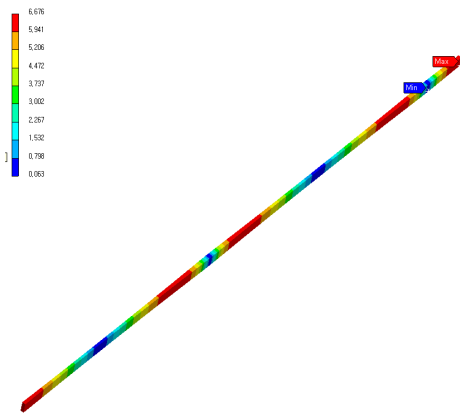
n th Mode	Frequency (kHz)
32	19.5
33	20.9
34	21.2
35	22.4
36	23.9
37	25.5
38	26.5
39	27.1
40	28.7



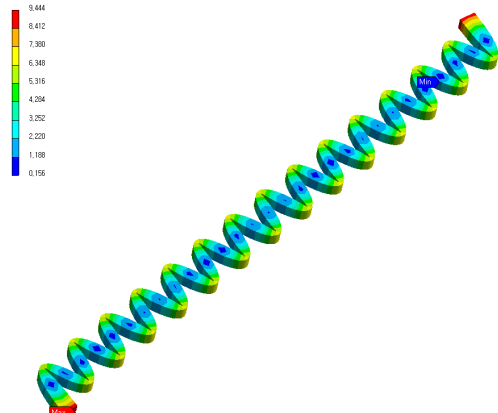
(a) 32nd Mode



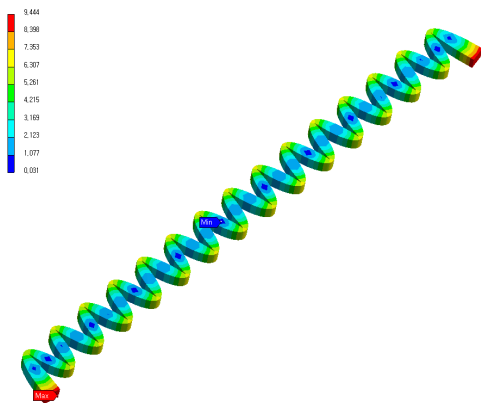
(b) 33rd Mode



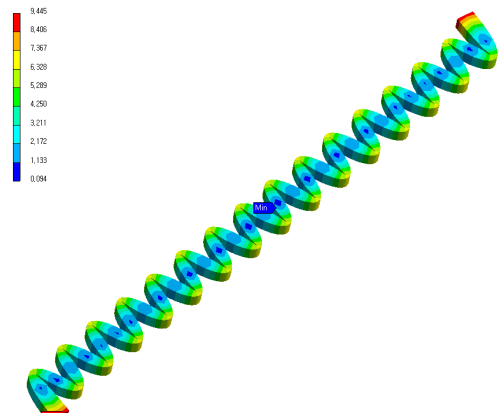
(c) 34th Mode



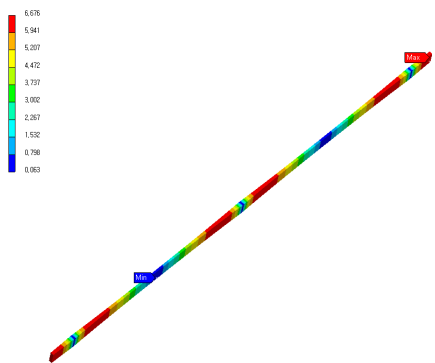
(d) 35th Mode



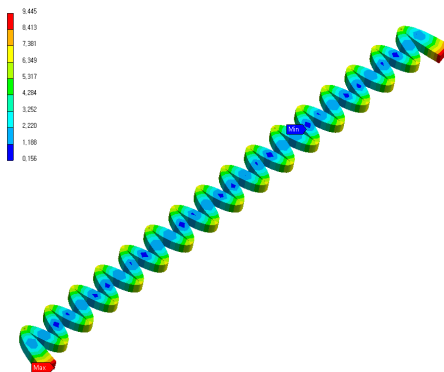
(e) 36th Mode



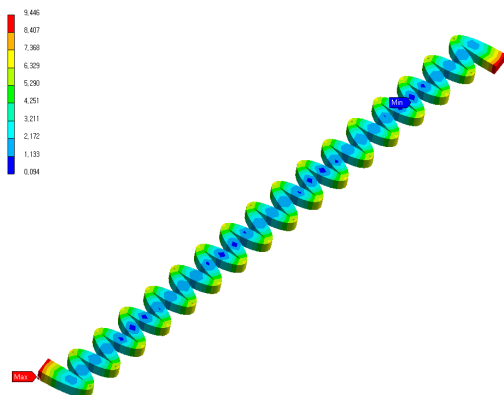
(f) 37th Mode



(g) 38th Mode



(h) 39th Mode



(i) 40th Mode

Fig. 3-13 Mode Shape from 32nd to 40th Mode

Table 3-4 Natural Frequency Obtained by Flexural Beam Theory and FEM

n th Mode	Frequency (kHz)	
	Theoretical	FEM
26	19.1	19.5
27	20.6	20.9
28	22.1	22.4
29	23.7	23.9
30	25.3	25.5
31	27.0	27.1
32	28.7	28.7

제 3 절 위상차에 따른 이송 방향

1. 위상차에 따른 물체 이송에 관한 이론적 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. 3-14와 같은 타원형 궤도(Elliptical Locus)를 그린다⁽⁸⁾.

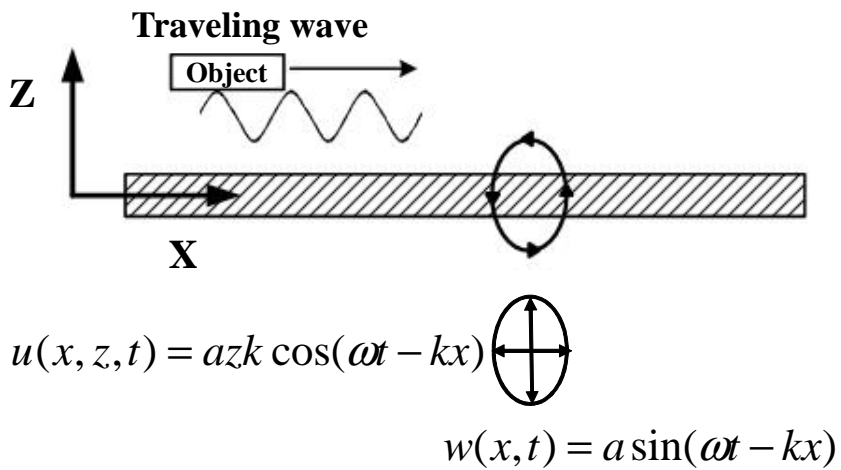


Fig. 3-14 Elliptical Locus of Particle on Flexural Beam

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

$$w(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (15)$$

where a : 진폭

ω : 굽힘 파동의 각진동수(Angular Frequency of Flexural Wave)

k : 파동수

굽힘 운동에서의 파동수 k_B 와 각진동수 ω 와의 관계는 다음과 같다.

$$k_B = 2\pi/\lambda = \omega_n^{1/2}(\rho A/EI)^{1/4} \quad (16)$$

탄성빔의 길이 방향의 변위를 $u(x, z, t)$ 로 정의하고 식 (17)과 같이 나타낸다.

$$u(x, z, t) = -z \frac{\partial w}{\partial x} = azk \cos(\omega t - kx) \quad (17)$$

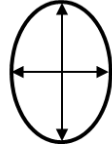
탄성빔 표면 위의 입자가 그리는 타원의 궤도는 식 (15)와 식 (17)로부터 다음과 같이 전개된다.

$$u^2/(azk)^2 + w^2/a^2 = 1 \quad (18)$$

같은 위상을 갖는 두 개의 파동은 단지 위아래 방향으로 진동하게 된다. 위상차에 따라서 그려지는 타원의 모양과 방향을 Fig. 3-15에 나타내었다. Fig. 3-15(b), (e)에서처럼 위상차가 90° 일 때 기울어지지 않은 타원형의 궤적이 형성되고, 이 때 물체는 접촉점의 타원운동에 의해 이송된다.

마찰구동일 경우 Fig. 3-15(b)와 같이 위상차가 90° 일 때 타원형의 궤적은 시계방향으로 회전하고 물체는 오른쪽으로 이송된다. Fig. 3-15(e)와 같이 위상차가 -90° 로 변하면 타원형의 궤적은 반시계 방향으로 회전하고 물체는 왼쪽으로 이송된다. 따라서 가진주파수의 위상차에 의해 물체의 이송 방향을 바꿀 수 있다⁽⁴⁾.

Transverse Wave



Longitudinal Wave

Phase Difference : θ

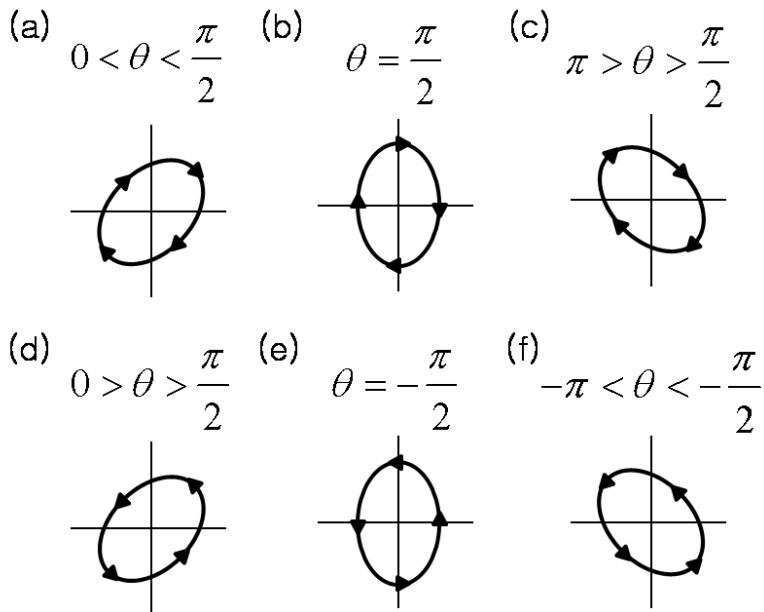


Fig. 3-15 Elliptical Motion of Particle on Flexural Beam with respect to Phase Difference

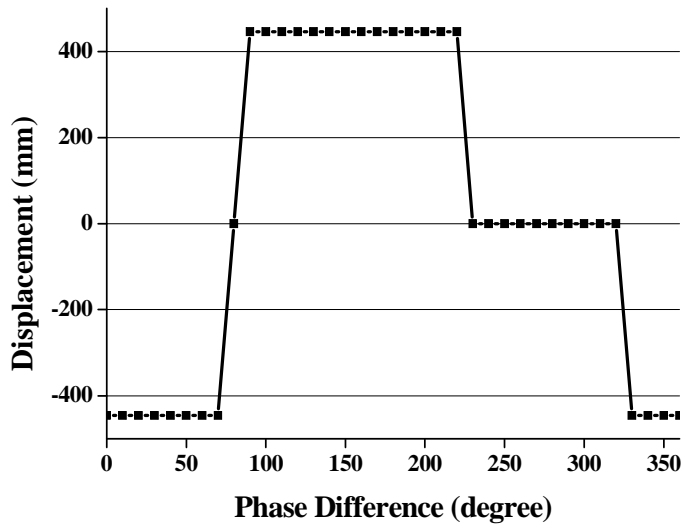
2. 위상차에 따른 물체 이송 실험

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° 부터 360° 대역으로 10° 씩 증가, 감소시키면서 2개의 경우로 각각 실험하였다. 함수발생기의 함수 발생 조건은 다음과 같다.

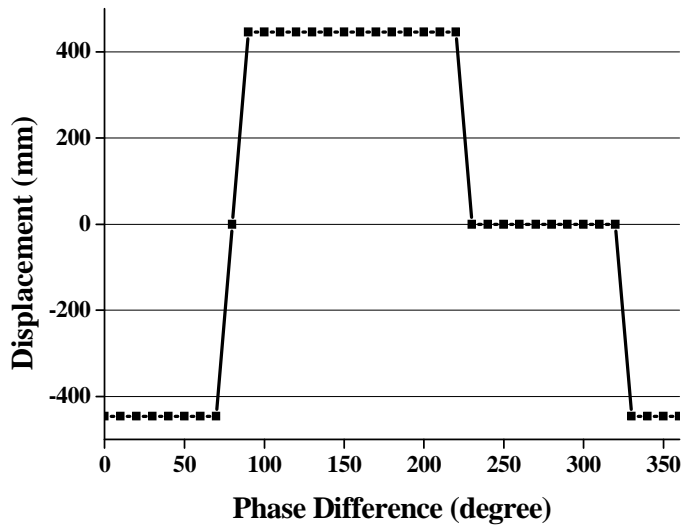
(Case 1) Ch1 : 0° 로 일정하게 유지; Ch2 : 10° 씩 감소

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

Fig. 3-16은 위상차에 따른 물체의 이송거리를 나타내고, Fig. 3-17에 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.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3-16 Displacement according to Phase Difference

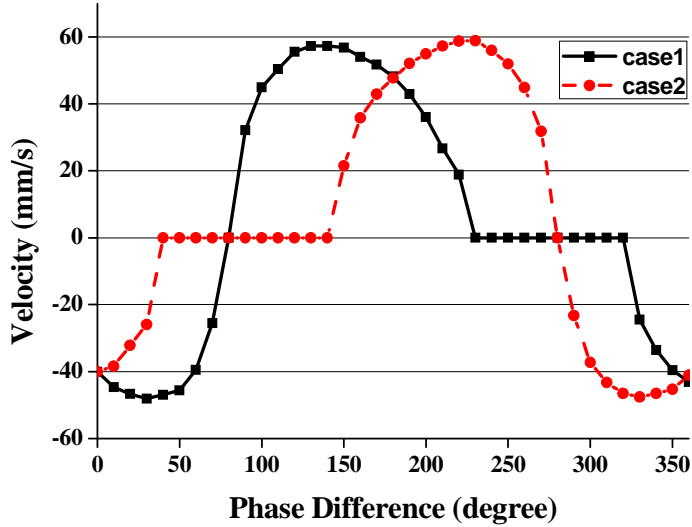


Fig. 3-17 Velocity according to Phase Difference

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. Case 1 조건과 Case 2의 조건에서의 물체 이송 방향 변화를 각각 Table 3-5와 6에 정리하였다.

Table 3-5 Direction Change of Object in Case 1

Phase Difference	Direction
0° ~ 70°	-
80°	0
90° ~ 220°	+
230° ~ 320°	0
330° ~ 360°	-

Table 3-6 Direction Change of Object in Case 2

Phase Difference	Direction
10° ~ 30°	-
40° ~ 140°	0
150° ~ 270°	+
280°	0
290° ~ 360°	-

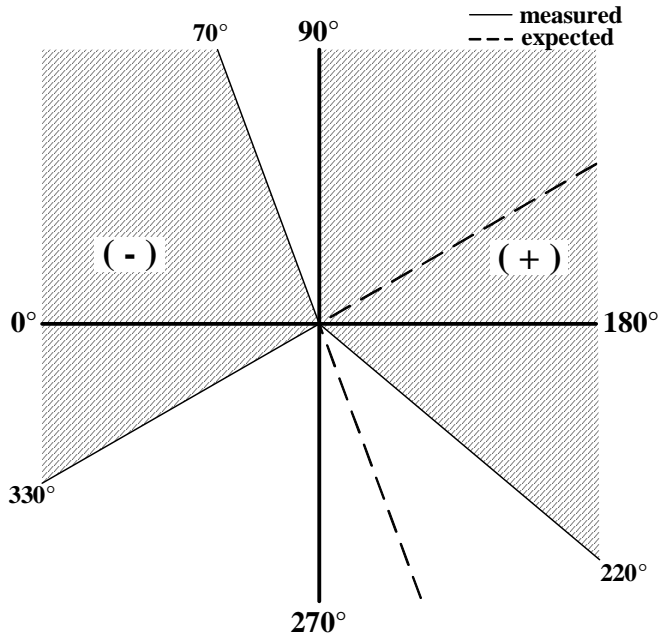
3. 이론값과 실험값의 물체 이송 방향 비교

위상차 변화에 따른 물체의 이송 방향 변화를 확인하기 위해 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통해 검토하였다. 초음파가 탄성빔에 전달되어 생성되는 파동의 결합에 의해 탄성빔 표면의 입자는 타원형 궤적을 그리게 되고 타원형 운동에 의해 물체의 이송과 방향이 결정된다. 이론적으로 두 가진주파수가 90° 의 위상차를 가질 때 물체가 이송되고, -90° 의 위상차를 가질 때 이송 방향이 반대가 된다. 이를 확인하기 위해 가진주파수의 위상차에 변화를 주어 실험하였다. 두 가진주파수의 위상차를 0° 부터 360° 대역으로 10° 씩 증가, 감소시키면서 실험하였다. Case 1은 Ch 1을 0° 로 고정하고 Ch 2를 10° 씩 감소하였고 Case 2는 Ch 2를 0° 로 고정하고 Ch 1을 10° 씩 감소하였다.

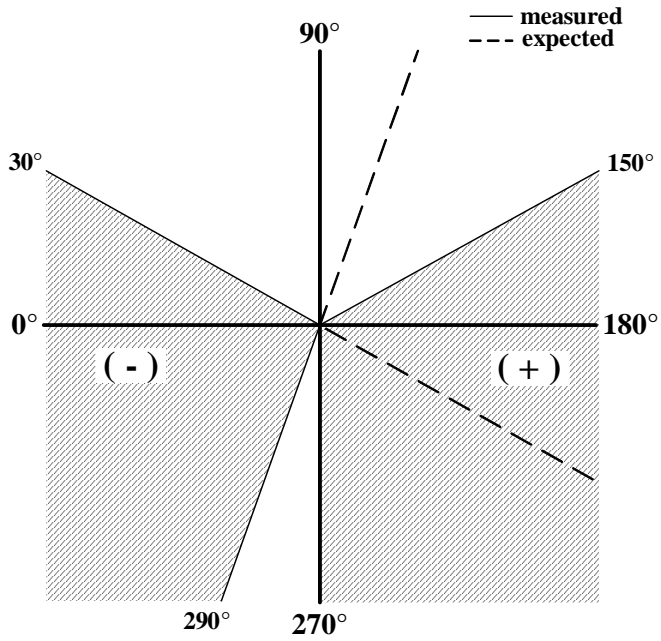
이론적인 방법과 실험적인 방법을 통해 구한 위상차에 따른 물체 이송 방향을 Table 3-7에 정리하였다. 진행파가 형성되기 위한 이론적인 조건을 통해 위상차 90° 를 기준으로 180° 간격으로 물체의 이송 방향이 변하였다. Fig. 3-18에 (-)방향으로 물체가 이송된 범위를 기준으로 $90^\circ \sim 270^\circ$ 축에 대칭하여 (+)방향으로 물체가 이송될 것으로 기대되는 영역과 실험 결과를 나타내었다. 예상 영역과 실험 결과가 일치하지 않았지만 두 가진주파수의 위상차에 의해 특정 구간에서 물체의 이송 방향이 규칙적으로 바뀌는 것을 확인하였다. Case 1과 Case 2를 비교하면, $0^\circ \sim 180^\circ$ 축을 기준으로 대칭적인 특성을 보였다. 따라서 두 개의 가진주파수의 위상차에 변화를 주어 물체의 이송 방향을 전환할 수 있음을 확인하였다.

Table 3-7 Transport Direction according to Phase Difference

Transport Direction	Phase Difference		
	Theory	Experiment	
		Case 1	Case 2
+	90°	140°	220°
-	270°	30°	330°



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3-18 Transport Direction Comparison in Case 1 and 2

제 4 절 주파수에 따른 이송 방향

1. 주파수에 따른 물체 이송에 관한 이론적 해석

과동의 진행 방향은 위치 l_1 과 l_2 에서의 n 차 모드 형상에 의해 결정된다. 탄성빔의 n 차 모드 형상은 다음과 같다.

$$\varnothing_n(x) = \sin(k_{Bn}x) - \cos(k_{Bn}x) \quad (19)$$

k_{Bn} 에 따른 모드 형상을 Fig. 3-19에 나타내었다. 길이 l_1 에서의 모드 형상은 30th와 31st 모드에서 음수 값이므로 식 (19)에서 $\varnothing_{30}(l_1)$ 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.

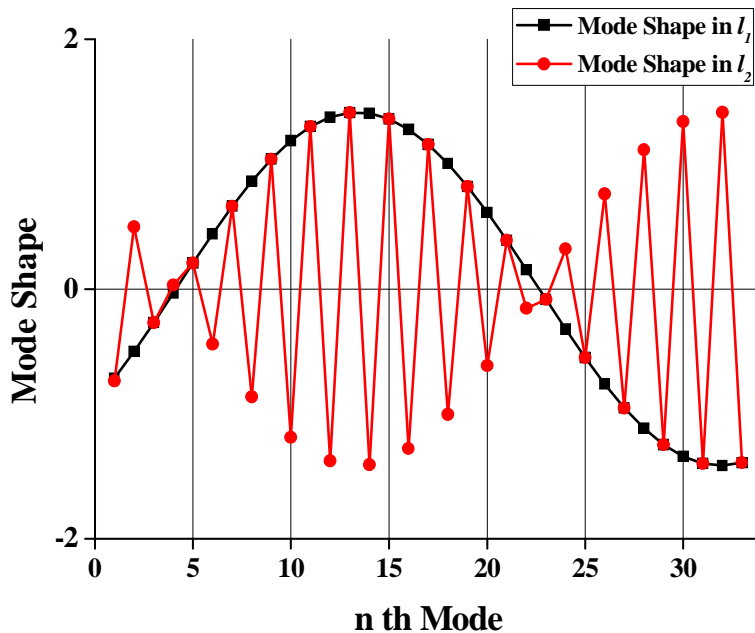


Fig. 3-19 Mode Shape in l_1 and l_2

탄성빔의 길이 방향을 따라 변위 x 만큼 떨어진 위치에서 시간 t 초 후의 탄성빔의 z 축 방향 변위 $u(x,t)$ 는 다음과 같다⁽⁸⁾⁽²⁵⁾.

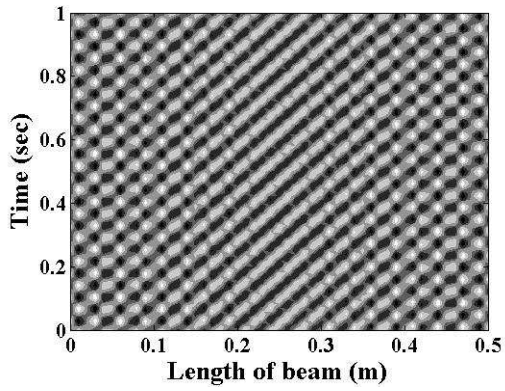
$$u(x,t) = \left[A \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) + B \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \right] \quad (20)$$

$$+ \left[C \sin(k_{B31}x - \frac{\pi}{4}) \cos(\omega t) + D \sin(k_{B30}x - \frac{\pi}{4}) \sin(\omega t) \right]$$

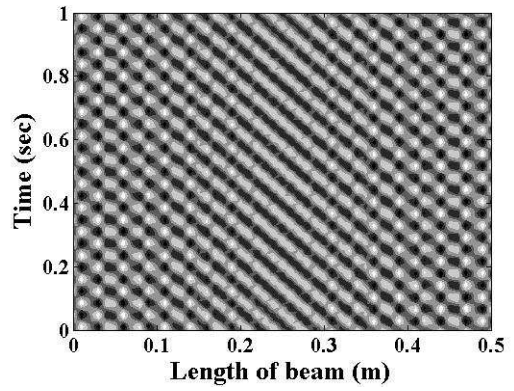
$$A = \frac{\sqrt{2} F \phi_{30}(l_1)}{m(\omega_{30}^2 - \omega^2)} \quad B = \frac{\sqrt{2} F \phi_{31}(l_2)}{m(\omega_{31}^2 - \omega^2)}$$

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

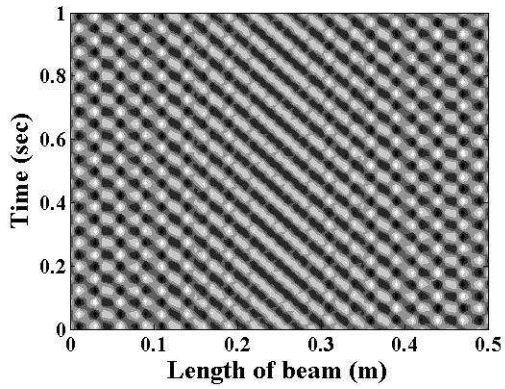
매트랩(Matlab)을 사용하여 파동의 진행 방향을 시뮬레이션하였다. 식 (20)에서 첫번째 진행파는 상수 A, B 의 부호에 따라 방향이 결정이 되고 두번째 진행파는 상수 C, D 의 부호에 따라 방향이 결정된다. 상수 A, B 의 부호에 따른 진행파의 파형과 상수 C, D 의 부호에 따른 진행파의 파형은 시뮬레이션을 통하여 Fig. 3-20과 21에 나타내었다. 상수 A, B 의 부호가 같으면 오른쪽 방향(\rightarrow)으로 전파되고 반대의 부호를 가지면 왼쪽 방향(\leftarrow)으로 전파된다. 상수 C, D 의 경우는 같은 부호일 때는 왼쪽 방향(\leftarrow)으로 전파하고 다른 부호를 가지면 오른쪽 방향(\rightarrow)으로 전파된다.



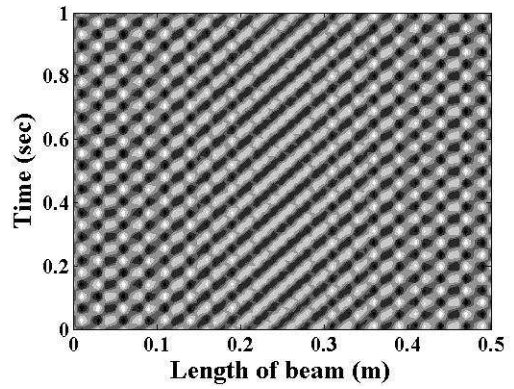
(a) A(+) and B(+)



(b) A(+) and B(-)

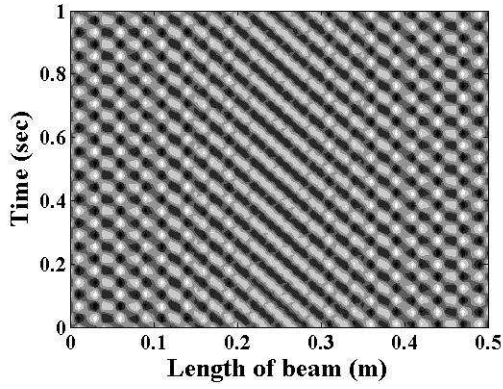


(c) A(-) and B(+)

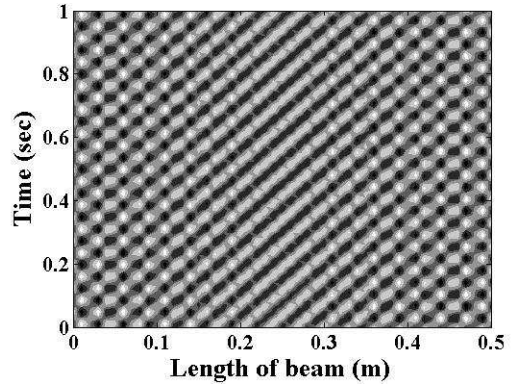


(b) A(-) and B(-)

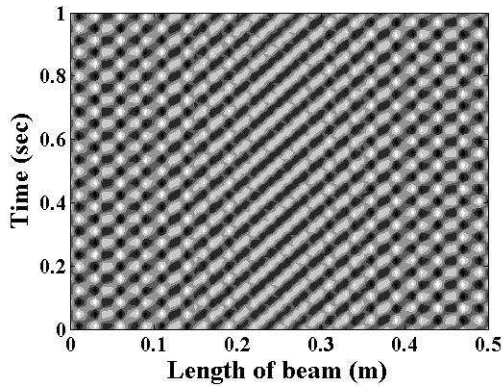
Fig. 3-20 Wave Propagation Direction produced by A and B



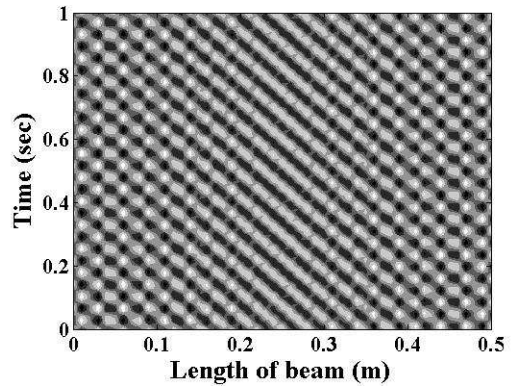
(a) C(+) and D(+)



(b) C(+) and D(-)



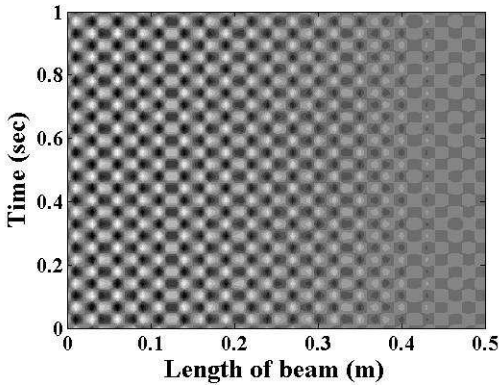
(c) C(-) and D(+)



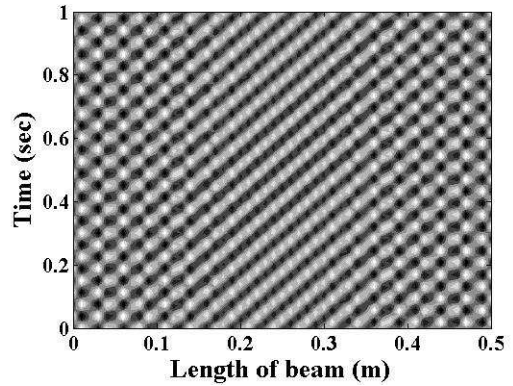
(b) C(-) and D(-)

Fig. 3-21 Wave Propagation Direction produced by C and D

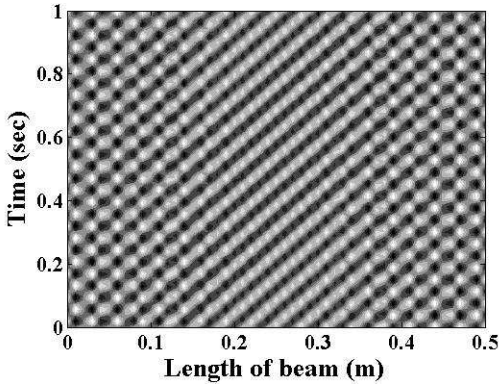
두 진행파를 조합하여 상수 A, B, C, D의 부호에 따른 진행파 파형은 시뮬레이션을 통해 Fig. 3-22에 나타내었으며 두 진행파의 방향이 같은 경우에는 물체가 이송되는 진행파가 발생한다. Fig. 3-22(b), (c), (n), (o)의 경우는 진행파가 오른쪽 방향(\rightarrow)으로 전파되고 Fig. 3-22(e), (h), (i), (l)의 경우는 진행파가 왼쪽 방향(\leftarrow)으로 전파된다. Fig. 3-22(a), (d), (f), (g), (j), (k), (m), (p)와 같이 두 진행파의 방향이 서로 반대일 경우에는 정상파가 발생한다. 상수 A, B, C, D의 부호에 따른 시뮬레이션 결과를 Table 3-8에 정리하였다.



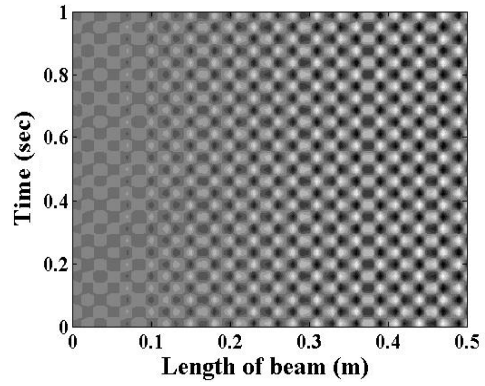
(a) A(+), B(+), C(+) and D(+)



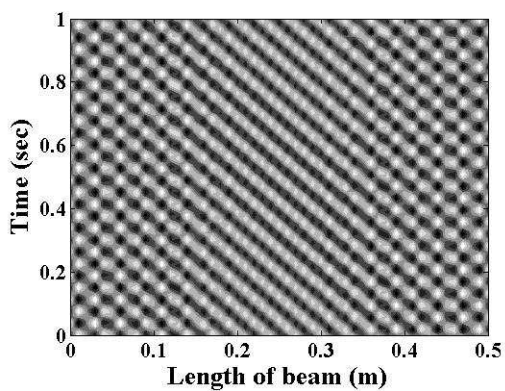
(b) A(+), B(+), C(+) and D(-)



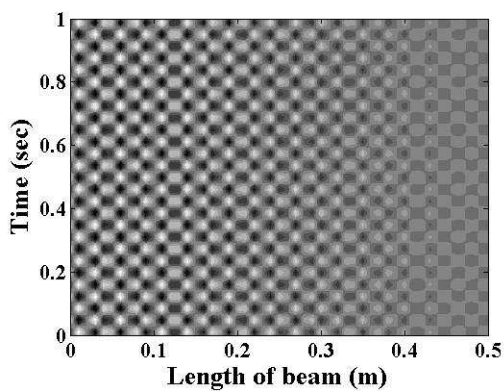
(c) A(+), B(+), C(-) and D(+)



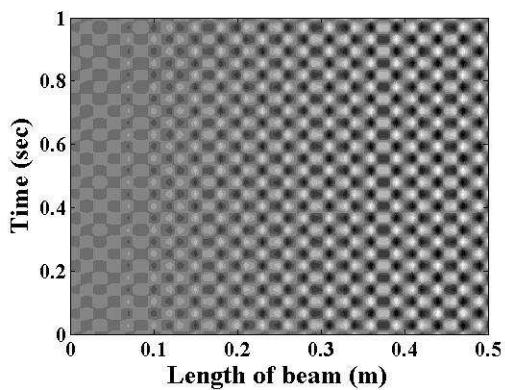
(d) A(+), B(+), C(-) and D(-)



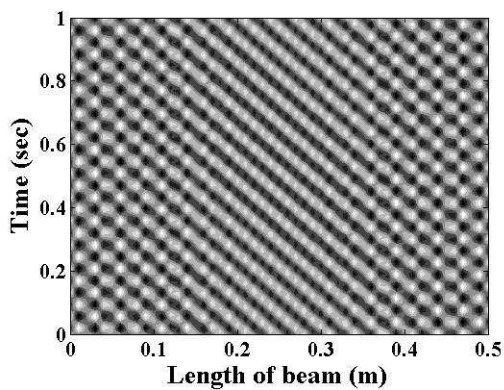
(e) A(+), B(-), C(+) and D(+)



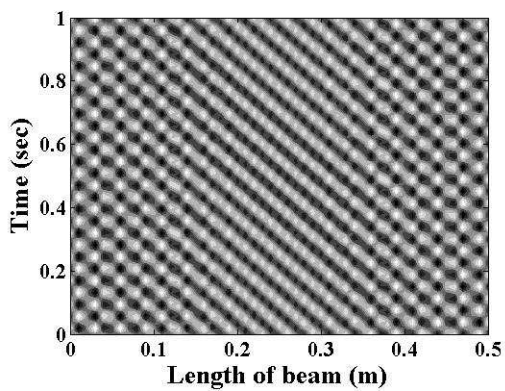
(f) A(+), B(-), C(+) and D(-)



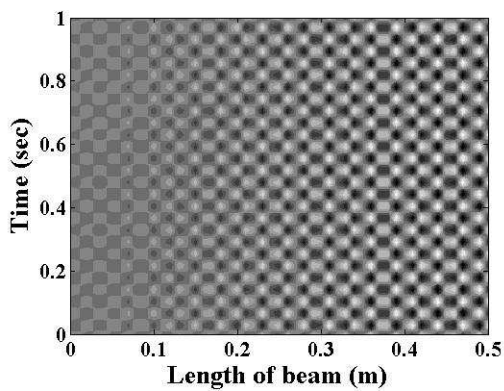
(g) A(+), B(-), C(-) and D(+)



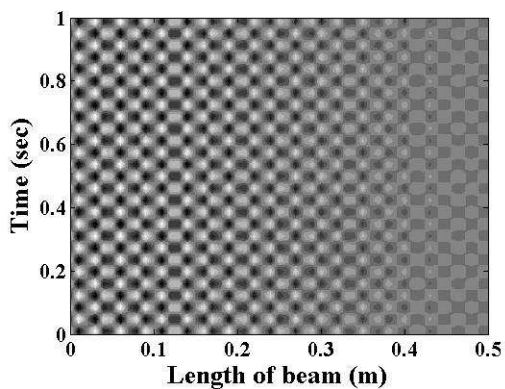
(h) A(+), B(-), C(-) and D(-)



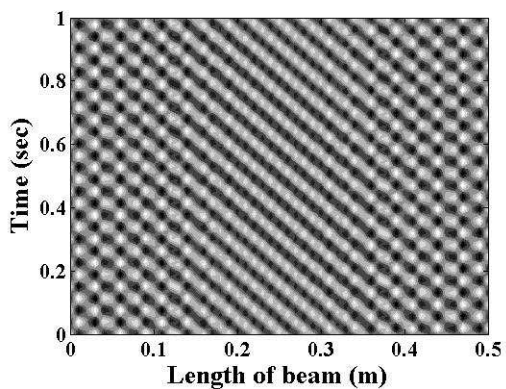
(i) A(-), B(+), C(+) and D(+)



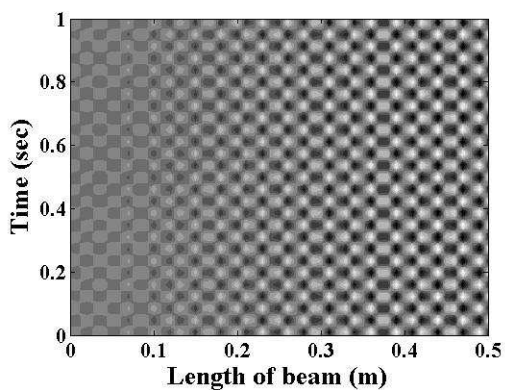
(j) A(-), B(+), C(+) and D(-)



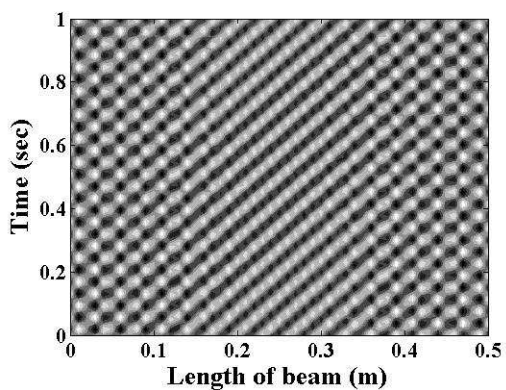
(k) A(-), B(+), C(-) and D(+)



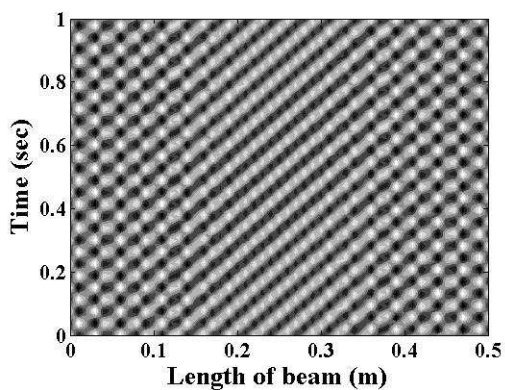
(l) A(-), B(+), C(-) and D(-)



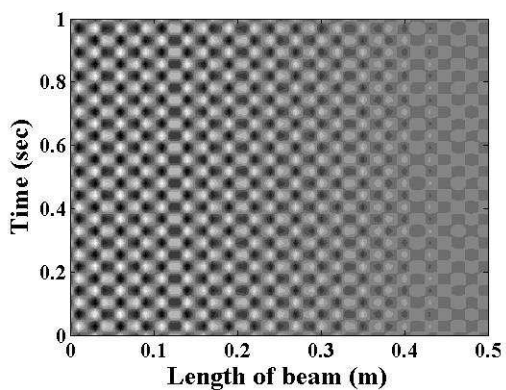
(m) A(-), B(-), C(+) and D(+)



(n) A(-), B(-), C(+) and D(-)



(o) A(-), B(-), C(-) and D(+)



(p) A(-), B(-), C(-) and D(-)

Fig. 3-22 Wave Propagation Direction produced by A, B, C and D

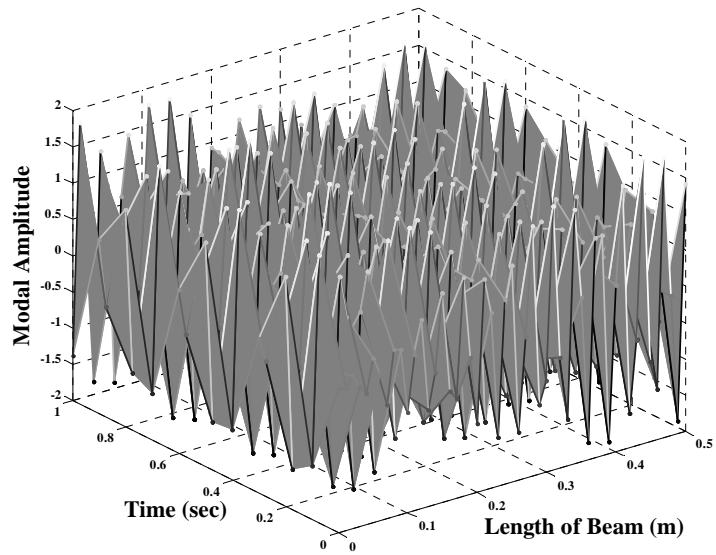
Table 3-8 Wave Propagation Direction according to Sign of A, B, C, D

No.	A	B	Wave Propagation Direction	C	D	Wave Propagation Direction	Transport Direction
1	+	+	→	+	+	←	Standing Wave
2	+	+	→	+	-	→	→
3	+	+	→	-	+	→	→
4	+	+	→	-	-	←	Standing Wave
5	+	-	←	+	+	←	←
6	+	-	←	+	-	→	Standing Wave
7	+	-	←	-	+	→	Standing Wave
8	+	-	←	-	-	←	←
9	-	+	←	+	+	←	←
10	-	+	←	+	-	→	Standing Wave
11	-	+	←	-	+	→	Standing Wave
12	-	+	←	-	-	←	←
13	-	-	→	+	+	←	Standing Wave
14	-	-	→	+	-	→	→
15	-	-	→	-	+	→	→
16	-	-	→	-	-	←	Standing Wave

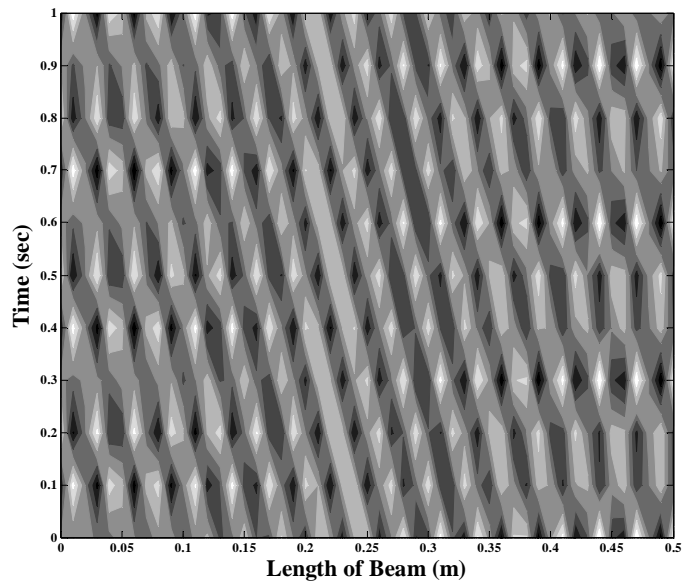
n차 모드와 (n+1)차 모드의 평균 주파수를 가진 주파수로 사용하였다. 모드가 증가할수록 상수 A, C의 부호는 변하지 않았으나 상수 B, D의 부호가 바뀌면서 진행파의 방향이 바뀌었다. 30th 시뮬레이션 조건은 가진주파수를 26.2kHz로 하였고, 가진주파수와 가장 인접한 두 개의 탄성빔 공진 주파수만을 고려하여 파동의 진행 방향을 예측하였다. 30th 모드의 경우 상수 A, B에 의한 파동의 전파방향은 왼쪽 방향(←)이고 상수 C, D에 의한 파동의 전파방향은 왼쪽 방향(←)이다. 따라서 초음파 이송 시스템의 진행파 방향은 왼쪽 방향(←)으로 전파된다. 31st 모드의 경우 상수 A, B에 의한 파동의 진행방향은 오른쪽 방향(→)이고 상수 C, D에 의한 파동의 진행방향이 오른쪽 방향(→)이므로 초음파 이송 시스템의 진행파 방향은 오른쪽 방향(→)으로 전파된다. 시뮬레이션 결과를 Table 3-9에 나타내었고 모드가 증가할수록 진행파의 전파 방향이 규칙적으로 전환되는 것을 확인하였다. 30th와 31st 모드의 파동의 진행방향을 확인하기 위해 Fig. 3-23과 24와 같이 시뮬레이션하였고, 이 시뮬레이션 결과는 Table 3-9에 나타난 결과와 잘 일치하였다.

Table 3-9 Wave Propagation Direction according to the Sign of Standing Wave

Simulation No.	Frequency (kHz)			A	B	Wave Propagation Direction	C	D	Wave Propagation Direction
	ω_n	ω_{n+1}	ω						
26	19.1	20.6	19.8	+	-	←	-	-	←
27	20.6	22.1	21.3	+	+	→	-	+	→
28	22.1	23.7	22.9	+	-	←	-	-	←
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	+	-	←	-	-	←

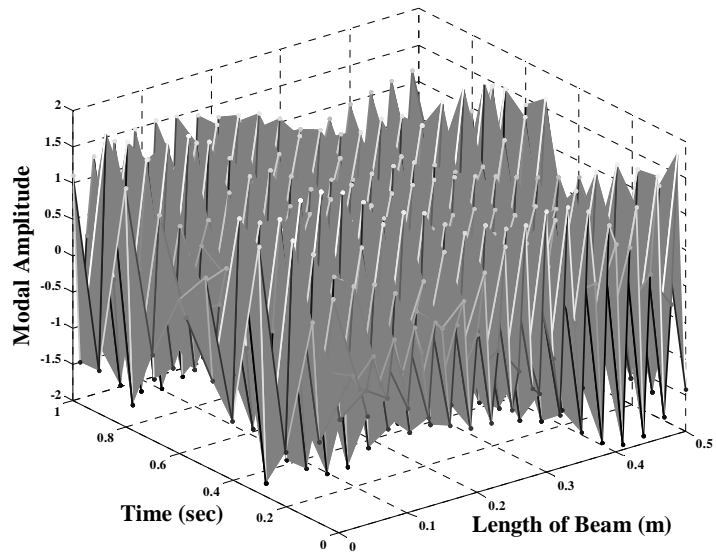


(a) Mesh View

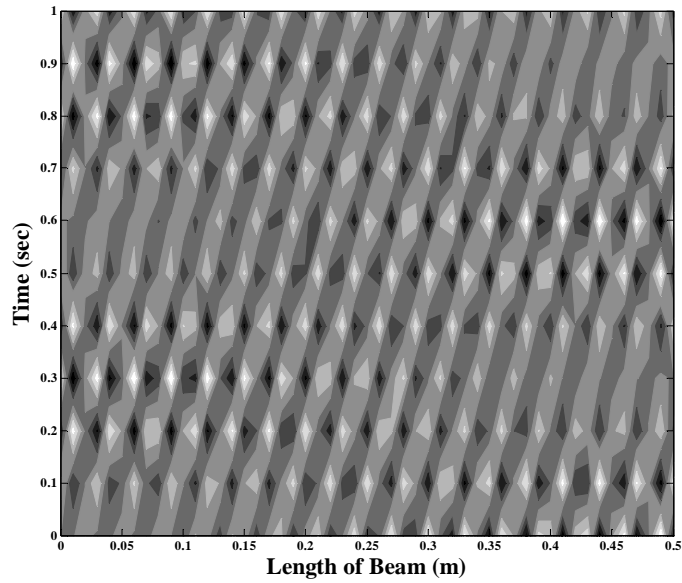


(b) Contour View

Fig. 3-23 Wave Propagation Direction in 30th Simulation Condition



(a) Mesh View



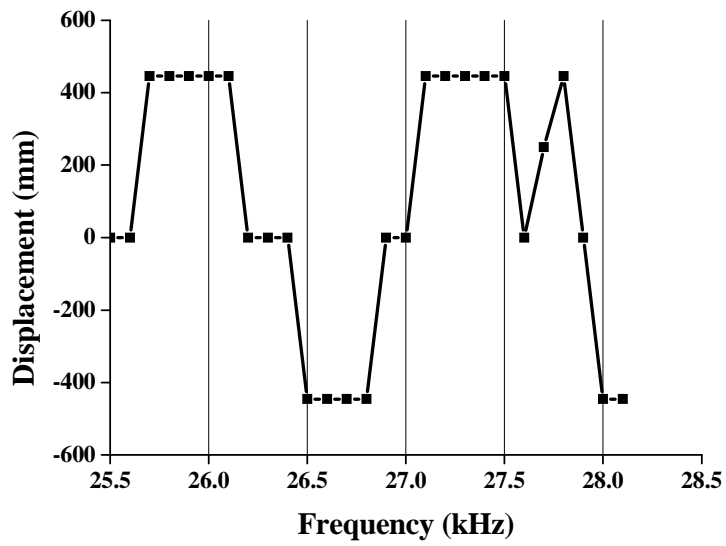
(b) Contour View

Fig. 3-24 Wave Propagation Direction in 31st Simulation Condition

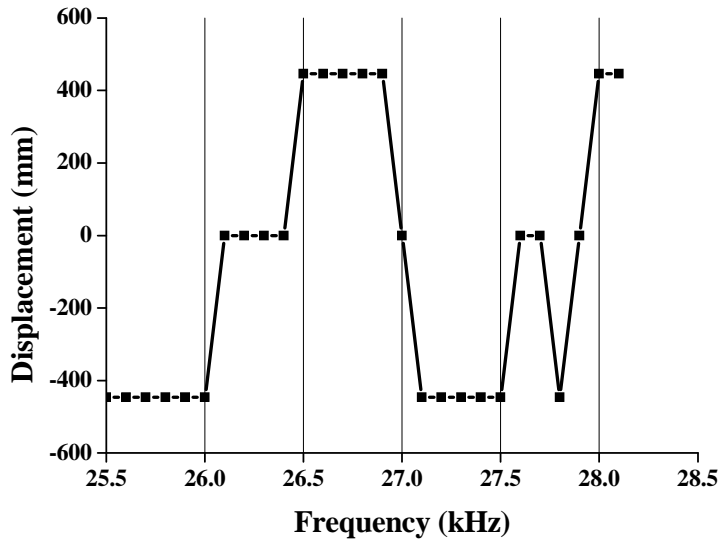
2. 주파수에 따른 물체 이송 실험

주파수 변화에 따른 물체 이송변화를 파악하기 위해 입력전압을 $\pm 500V$ 로 일정하게 유지하고, 주파수는 25.5kHz ~ 28.1kHz까지 100Hz씩 증가시키면서 물체의 이송변화를 관찰하였다. 위상차는 이송이 가장 안정적인 30°와 140°의 위상차를 사용하였다. 위상차를 30°와 140°로 일정하게 유지시켰을 때 주파수 변화에 따른 이송 거리를 Fig. 3-25에 나타내었고, 주파수 변화에 따른 속도를 Fig. 3-26에 나타내었다.

실험결과 Fig. 3-26(a)에서 보는 것과 같이 위상차가 30°일 때 26.1kHz에서 (+)방향으로 60.0mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였고, 26.5kHz에서 (-)방향으로 49.1mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였다. Fig. 3-26(b)에서 보는 것처럼 위상차가 140°일 때 26.9kHz에서 (+)방향으로 70.7mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였고, 27.8kHz에서 (-)방향으로 47.3mm/s의 가장 빠른 이송 속도를 보였다. Table 3-10과 11은 위상차가 30°일 때와 140°일 때 이송 방향 변화를 나타낸다.

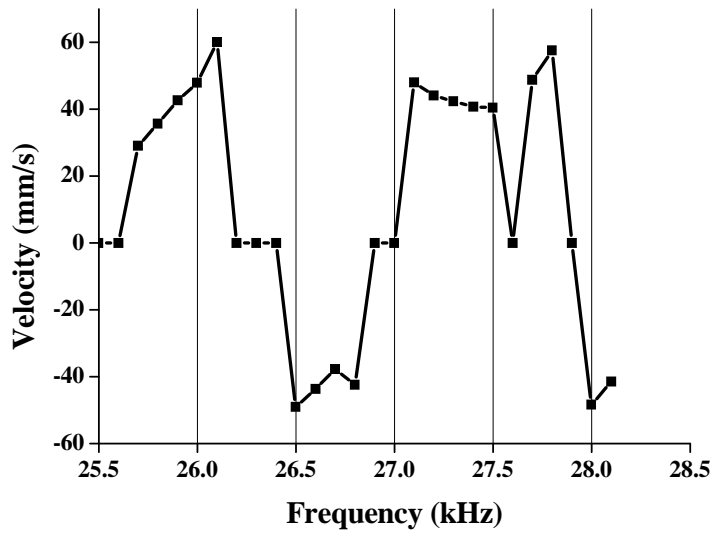


(a) Phase Difference : 30°

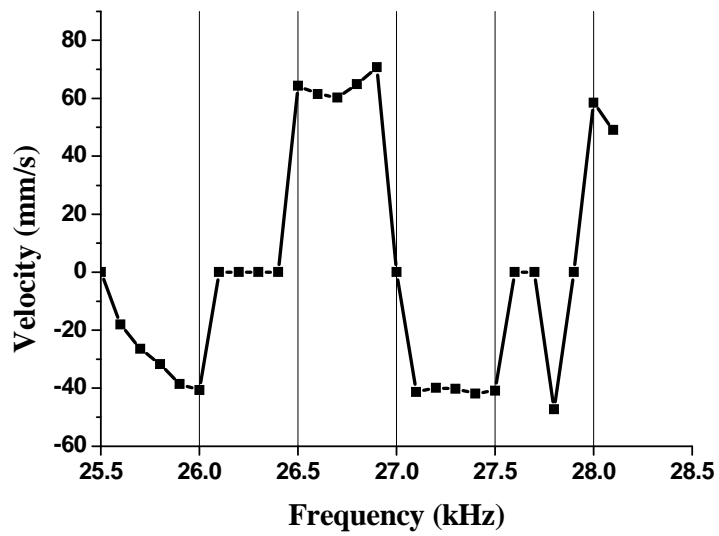


(b) Phase Difference : 140°

Fig. 3-25 Displacement according to Frequency



(a) Phase Difference : 30°



(b) Phase Difference : 140°

Fig. 3-26 Speed according to Frequency

Table 3-10 Direction Change of Object at Phase Difference 30°

Frequency (kHz)	Direction
25.7 ~ 26.2	+
26.3 ~ 26.9	-
27.0 ~ 27.9	+
28.0 ~ 28.1	-

Table 3-11 Direction Change of Object at Phase Difference 140°

Frequency (kHz)	Direction
25.6 ~ 26.1	-
26.3 ~ 26.9	+
27.1 ~ 27.8	-
28.0 ~ 28.1	+

3. 이론값과 실험값의 물체 이송 방향 비교

주파수에 따른 이송 방향 변화를 확인하기 위해 오일러 베르누이 빔 이론으로부터 유도된 탄성빔의 모델링 방정식을 이용한 이론적인 방법과 실험적인 방법을 비교하였다. 초음파 여기에 의해서 진동하는 탄성빔을 모델링하고 가진주파수에 인접한 주요한 두 개의 모드를 사용하여 모델링 방정식을 구하였다. 네 개의 정상파의 상수 A, B, C, D의 부호에 따른 진행파의 전파 방향을 매트랩을 이용하여 시뮬레이션하였다. 이론 전개로부터 가진주파수에 따른 파동의 전파 방향을 예측할 수 있었고, 진동자의 공진 주파수 대역을 기준으로 예측된 파동의 전파 방향을 Table 3-12에 나타내었다.

주파수에 따른 물체의 이송 방향을 측정하기 위해 주파수를 26.5kHz에서 27.5kHz까지 100Hz씩 증가하면서 실험하였다. Fig. 3-27에서와 같이 26.5kHz와 26.8kHz에서 물체는 (-)방향으로 이송되었고, 27.0kHz와 27.5kHz에서 (+)방향으로 이송되었다. 탄성빔의 공진주파수 27.0kHz에서 물체는 이송되지 않았다. Table 3-12에서 보면 26.2kHz로 가진 경우는 파동이 (←)방향으로 진행되었고, 27.9kHz로 가진 경우는 파동이 (→)방향으로 진행되어 탄성빔의 공진주파수 27.0kHz를 기준으로 파동의 진행 방향이 전환되었다. 따라서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

Table 3-12 Wave Propagation Direction

Simulation No.	Frequency (kHz)			Wave Propagation Direction
	ω_n	ω_{n+1}	ω	
30	25.3	27.0	26.2	←
31	27.0	28.7	27.9	→

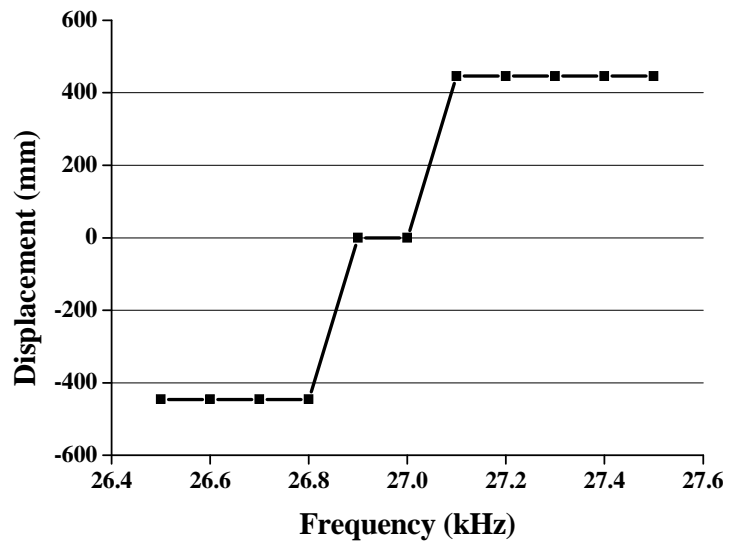


Fig. 3-27 Displacement according to Frequency

제 4 장 광소자 자동 이송 시스템의 개발

물체를 부상시켜서 이송하는 초음파 이송 시스템을 광학 렌즈 생산에 응용하기 위해 광소자를 검사하고 다음 공정으로 이송하는 광소자 픽업 장치를 제작하였다. 광소자 자동 이송 시스템의 구성도는 Fig. 4-1에 나타내었다. 광소자 자동 이송 시스템을 구성하기 위해 광소자를 픽업하기 위한 픽업 장치와 픽업 장치를 제어하기 위한 컨트롤러 박스를 제작하고, 광소자의 이송 과정을 실시간으로 관찰할 수 있는 비전 시스템과 광소자를 검사하는 검사 시스템을 통합하였다. 광소자 자동 이송 시스템을 구성하고 있는 시스템들을 컴퓨터에서 제어하기 위해 검사 자동화 프로그램을 개발하였다.

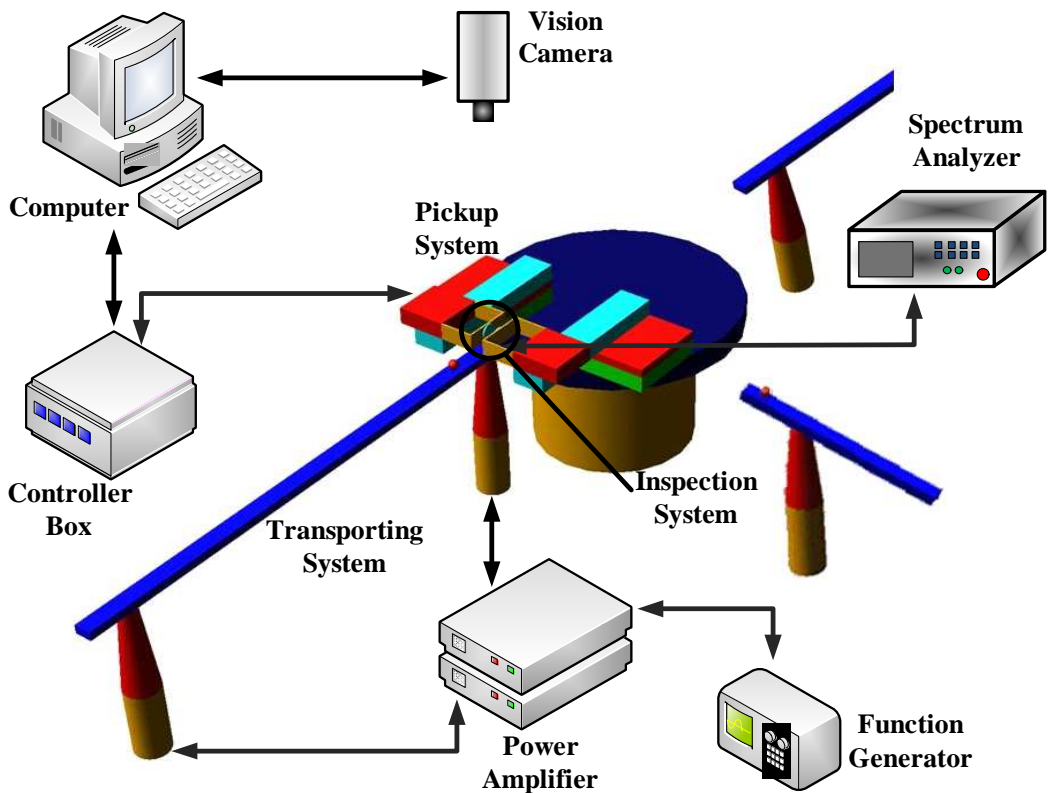


Fig. 4-1 Schematic Diagram of Optical Element Transport System using Ultrasonic Wave

제 1 절 광소자 픽업 장치의 구성 및 동특성

1. 광소자 픽업 장치의 구성

광소자 픽업 장치를 제작하기 위해 Fig. 4-2와 같이 부품설계를 하고 이를 3차원 형상으로 변환하여 어셈블리(Assembly)하였다. 부품설계를 위해 오토캐드(AutoCAD)를 사용하였고, 솔리드웍스(SolidWorks)를 사용하여 3차원 형상을 모델링하였다. 재질, 구속조건, 경계조건 등을 이용하여 동역학적 모션 시뮬레이션을 수행하였다. 해석프로그램으로는 COSMOSWorks/M을 사용하였고, 전후처리기로 Adams Engine이 내장된 COSMOSMotion을 사용하였다. 시뮬레이션을 통해 원하는 동작을 구현하기 위해 각 축의 이송 범위를 검토하고 공정에 소요되는 시간을 조절하여 모터의 사양을 결정하였다. 각 부품들의 간섭 발생 여부를 체크하였고, 이러한 데이터를 바탕으로 설계도면을 수정하여 제품의 가공비와 시제품제작을 위한 시간을 단축하였다.

광소자 픽업 장치를 Fig. 4-3과 같이 모델링하였다. 광소자 픽업 장치는 병진 운동을 위한 3개의 스텝핑 모터와 회전 운동을 위한 1개의 회전 모터(Rotary Motor)로 구성되고, 크게 X축 스테이지와 Z축 스테이지와 회전 스테이지로 나누어진다.

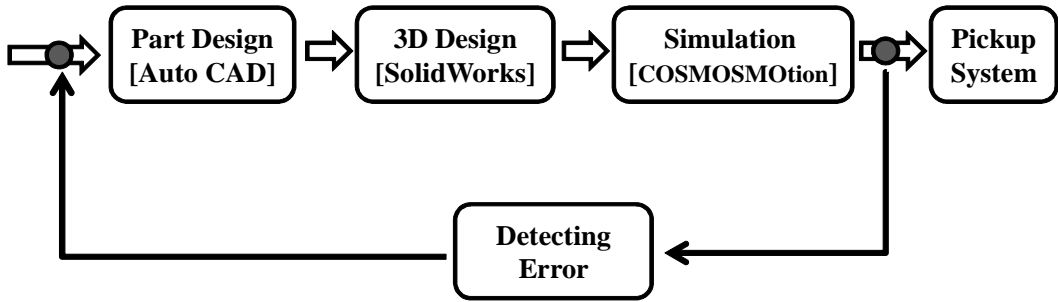


Fig. 4-2 Creative Process of Pickup Device

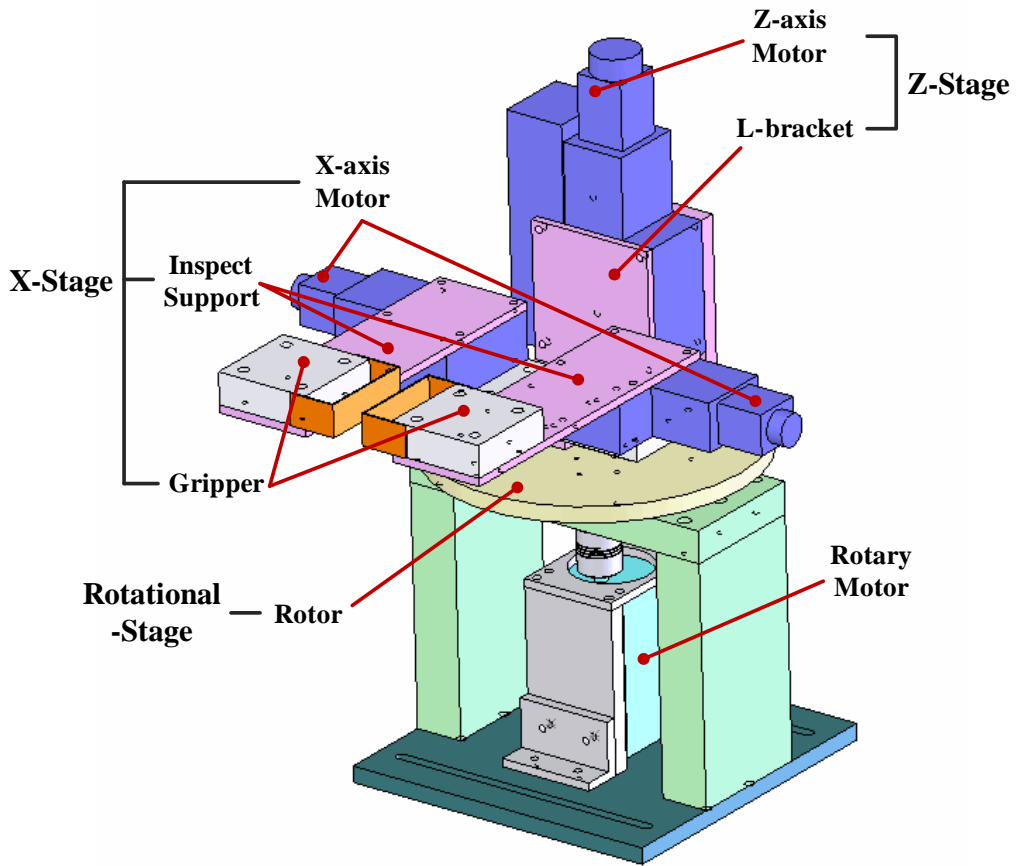


Fig. 4-3 Modeling of Pickup Device

2. 광소자 픽업 장치의 시뮬레이션

광소자 자동 이송 시스템은 초음파 이송 시스템에 의해서 이송된 광학 렌즈를 공명 초음파 법(RUS)을 이용한 검사 시스템에 의해 결함 여부를 판별한다. 이송된 광학 렌즈를 픽업 장치에서 픽업하여 결함 유무를 판별하고, 결함이 없을 경우에는 90° 회전하며 결함이 발견될 때에는 180° 회전하여 양품과 불량품을 분류한다. 광소자의 양품과 불량품 분류 공정을 Fig. 4-4에 나타내었다.

광소자 자동 픽업 장치의 동특성을 파악하기 위해 COSMOSMotion을 이용하여 Fig. 4-5와 같이 시뮬레이션하였으며, 모터의 회전량을 고려하여 실제 공정과 유사한 조건에서 동작되도록 하였다. 초음파 이송 시스템에 의하여 이송되어진 렌즈를 픽업하기 위해 Fig. 4-5(a)와 같이 픽업 장치를 초기 상태로 위치시킨다. Fig. 4-5(b)에서 이송되어진 광소자를 픽업하기 위해 픽업장치의 Z축 스테이지가 상하로 작동하여 광소자를 픽업하기 위한 위치로 이동한다. 그 후 두 개의 X축 스테이지가 좌우로 작동하여 광소자를 픽업하고 Fig. 4-5(c)와 같이 회전 스테이지가 회전을 하면서 광소자를 다음 이송 시스템으로 보낸다. 회전 스테이지는 잠시 동안 동작을 멈춰서 광소자의 결함 유무를 검사하고 이상 유무를 판별하여 Fig. 4-5(d)와 같이 광소자의 양품과 불량품을 분류한다. 광소자의 이송이 끝난 픽업 장치는 다시 Fig. 4-5(a)로 되돌아가서 작업 공정의 한 사이클을 이룬다.

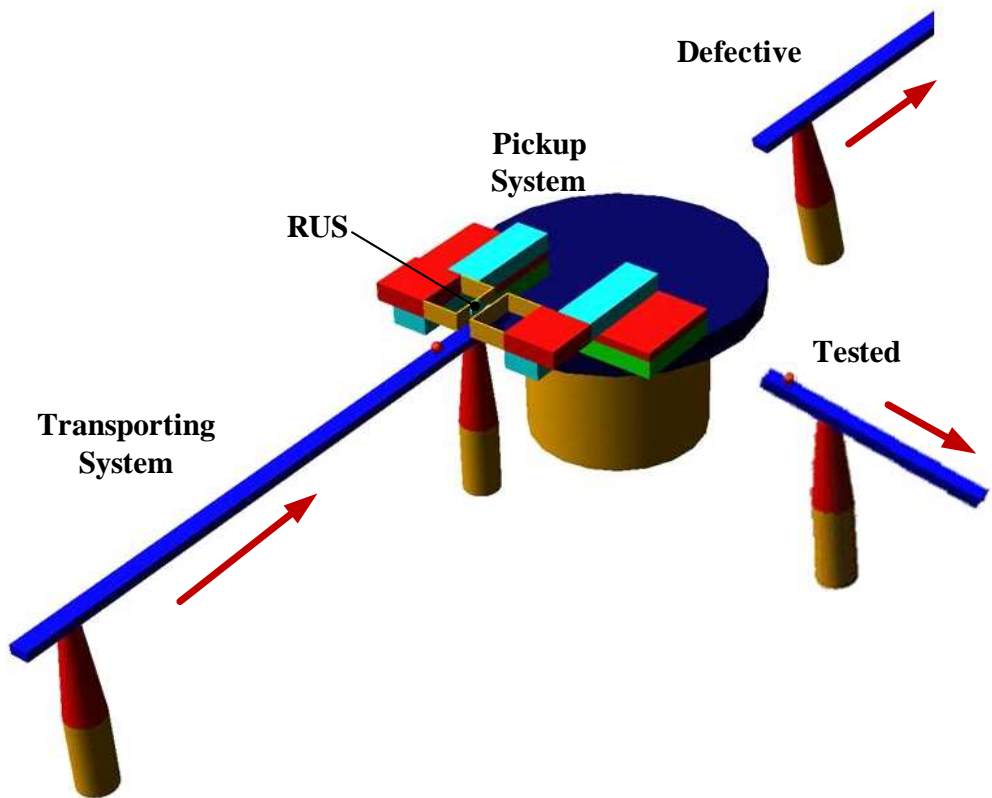
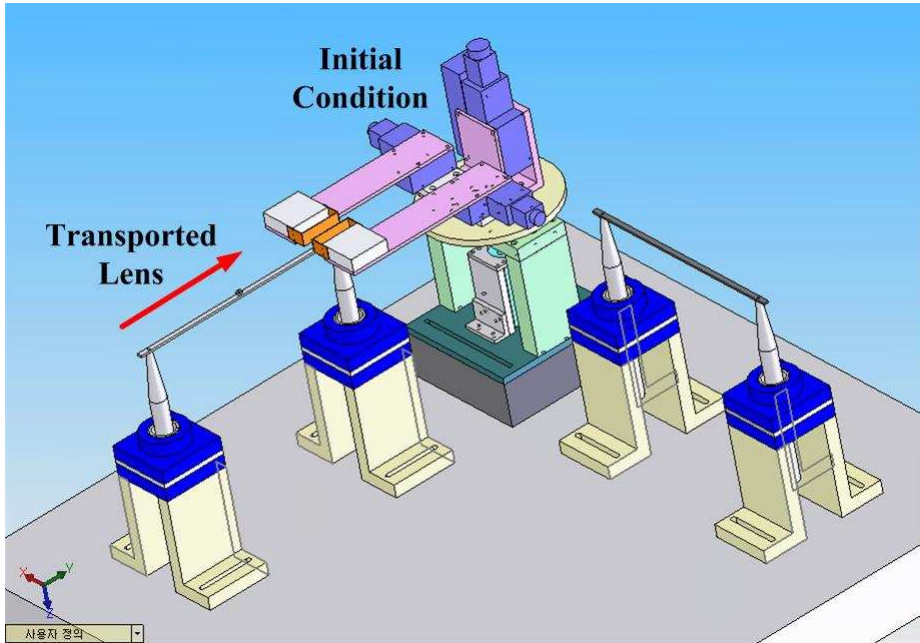
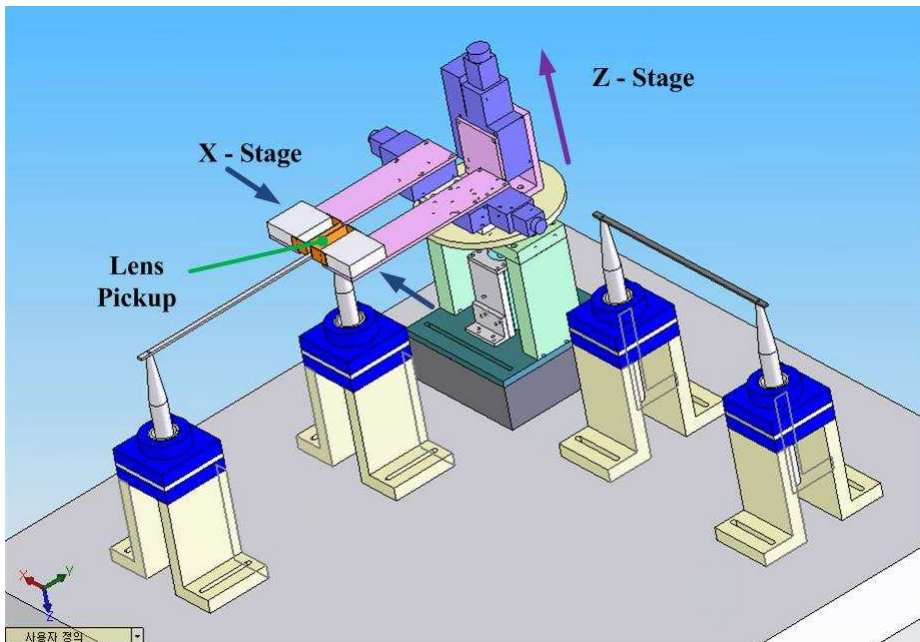


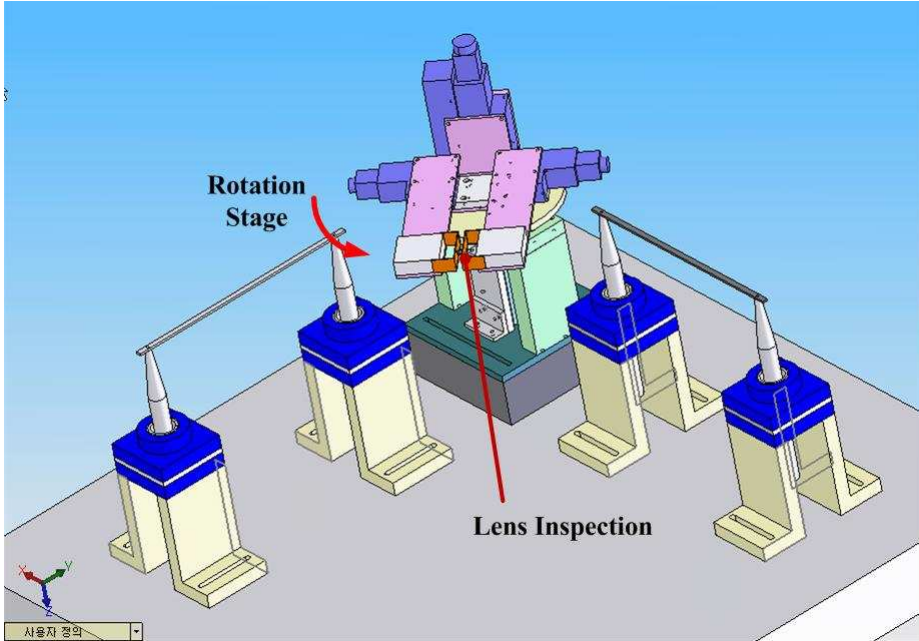
Fig. 4-4 Classification Process of Optical Element



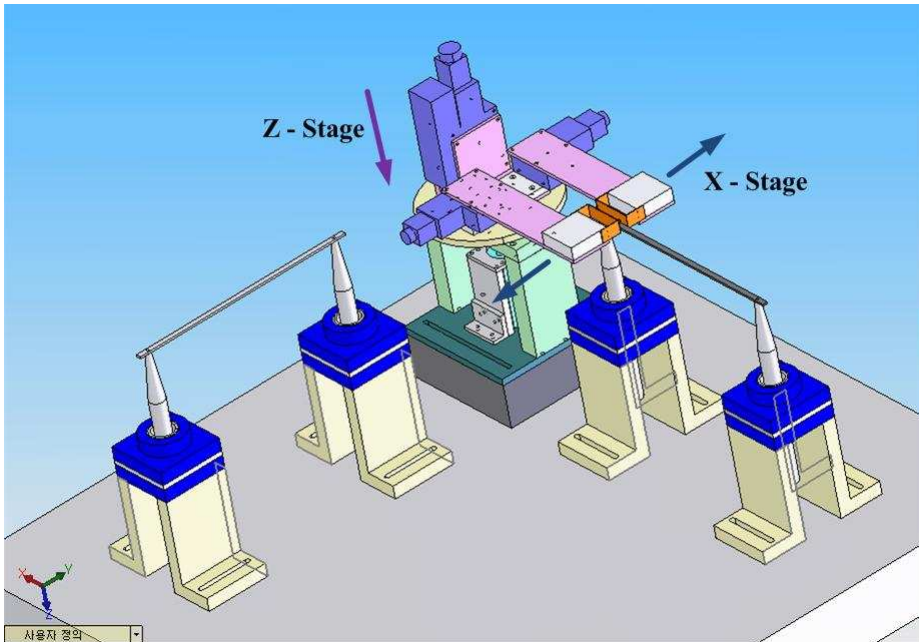
(a) Transport Process of Optical Lens



(b) Grasp Process



(c) Inspection Process



(d) Transport Process

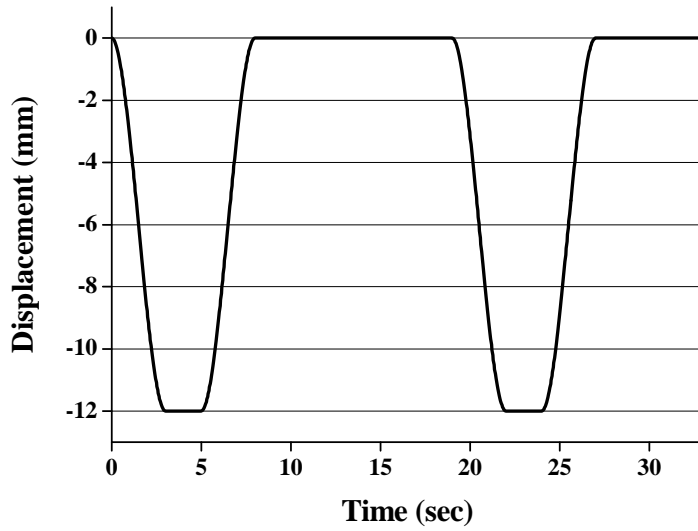
Fig. 4-5 Simulation of Pickup System

한 사이클에서 33초가 소요되도록 시뮬레이션하였다. Z축 스테이지의 운동 변위는 Fig. 4-6과 같이 이송 범위는 12mm이고 속도는 6mm/s이다. Fig. 4-7에 X축 스테이지의 변위와 속도를 나타내었고 이송 범위는 6mm이며 속도는 4.5mm/s이다. 회전 스테이지는 Fig. 4-8과 같이 90°의 이송 범위를 갖고 최대 속도는 22deg/s이다. Table 4-1에 정리한 시뮬레이션 결과를 통해 각 축의 이송 범위와 속도를 검토하고 이를 바탕으로 모터의 사양을 결정하였다.

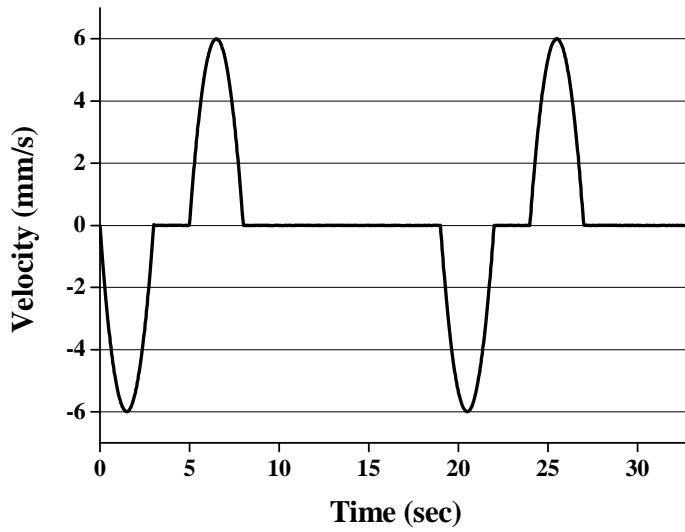
광소자가 픽업장치 앞에 도착하기 전에 처음 3초 동안 Z축 스테이지는 광소자를 집기 위한 초기화 상태를 마친다. 2초 동안 그리퍼(Gripper)로 이송되어진 광소자를 집은 후 Z축 스테이지는 12mm만큼 상승하였다가 8초 되는 지점에서 회전 스테이지가 회전하기 시작한다. 회전하기 시작하여 11초 되는 지점에서 광소자의 결합 유무를 5초 동안 검사하게 되고 다시 45° 회전하여 다음 이송 시스템으로 광소자를 옮겨놓는다. 픽업 장치는 다시 초기 위치로 복귀하여 한 사이클을 마치게 되며, 각 공정에 소요되는 시간과 각 축의 운동 순서를 고려하여 자동화 프로그램을 개발하였다.

Table 4-1 Traveling Range and Velocity of Stage

Stage	Traveling Range	Velocity
Z-Stage	12 mm	6 mm/s
X-Stage	6 mm	4.5 mm/s
Rotational Stage	90 deg	22 deg/s

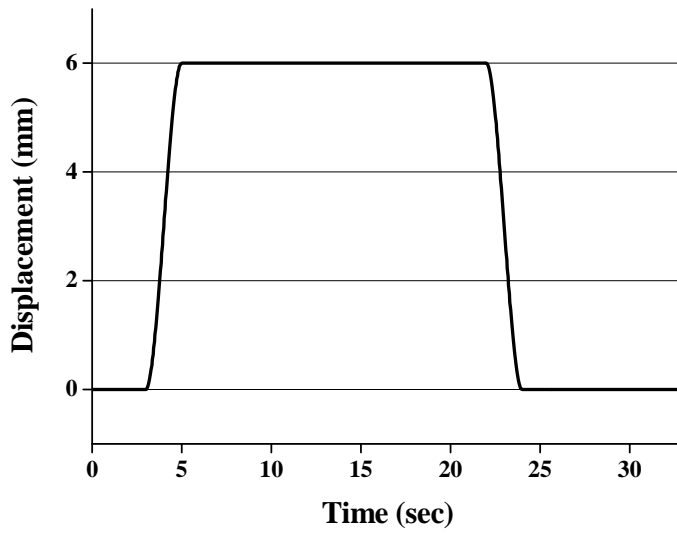


(a) Displacement of Z-Stage

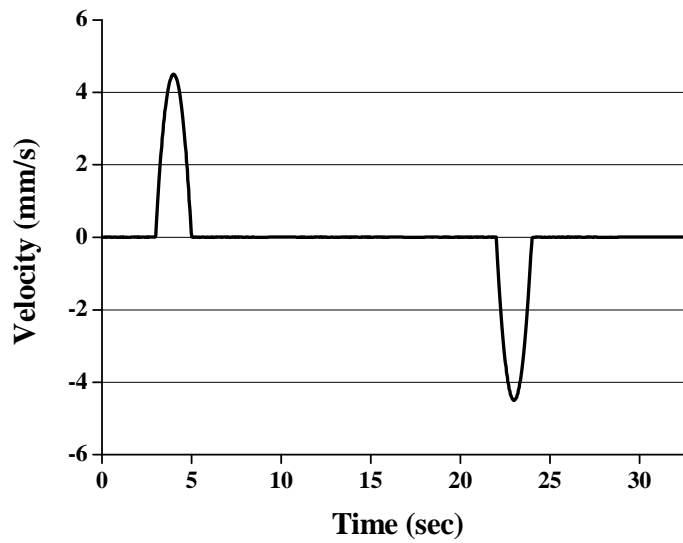


(b) Velocity of Z-Stage

Fig. 4-6 Displacement and Velocity of Z-Stage for Pickup System

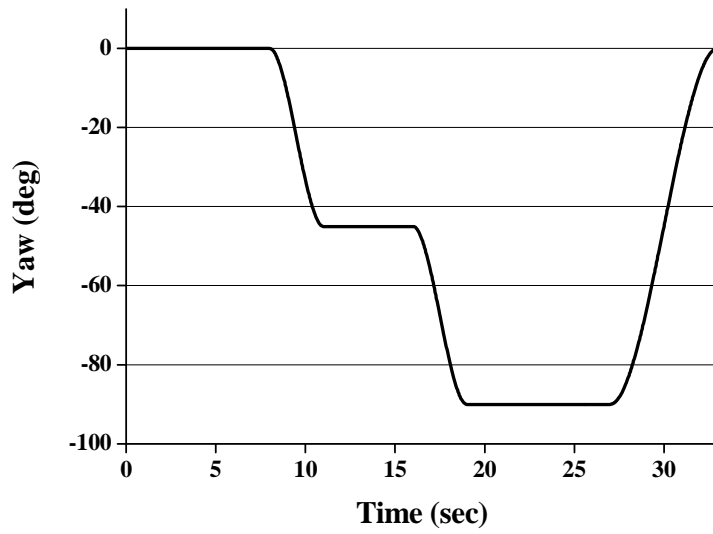


(a) Displacement of X-Stage

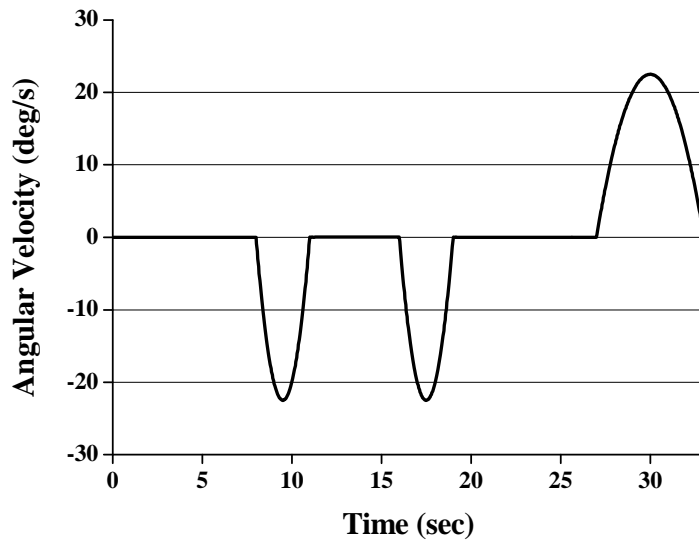


(b) Velocity of X-Stage

Fig. 4-7 Displacement and Velocity of X-Stage for Pickup System



(a) Angular Displacement of Rotational Stage



(b) Angular Velocity of Rotational Stage

Fig. 4-8 Yaw and Angular Velocity of Rotational Stage for Pickup System

제 2 절 광소자 자동 이송 시스템 제작

광소자 픽업 장치를 제작하기 위해 부품설계를 하고 어셈블리를 통하여 동역학적 모션 시뮬레이션을 수행하였다. 원하는 동작을 구현하기 위해 각 축의 이송 범위를 검토하고 공정에 소요되는 시간을 조절하여 모터의 사양을 결정하고, 모터의 사양을 Table 4-2에 정리하였다. 스텝핑 모터(Stepping Motor)는 5000pulse에 1회전하고 회전 모터는 1000pulse에 1회전 한다. 각 부품들의 간섭 발생 여부를 체크하였고 이러한 데이터를 바탕으로 설계도면을 수정하여 Fig. 4-9와 같이 시제품을 제작하였다. 픽업 장치를 제어하기 위해 모터 컨트롤러 박스를 제작하였으며, Fig. 4-10에 컨트롤러 박스의 사진을 나타내었다. 컨트롤러는 스텝핑 모터에서 출력되는 CW+, CW-, CCW+, CCW-의 4가지 신호를 사용하여 모터를 제어한다.

초음파 이송 시스템과 비전 시스템과 검사 시스템을 통합한 광소자 자동 이송 시스템의 사진을 Fig. 4-11에 나타내었다.

Table 4-2 Features of Motors for Rotational Stage

Motor	Stepping Motor	Rotary Motor
Quantity	3 EA	1 EA
Step Angle	0.072° /pulse	0.0036° /pulse
Traveling Range	30mm	360°

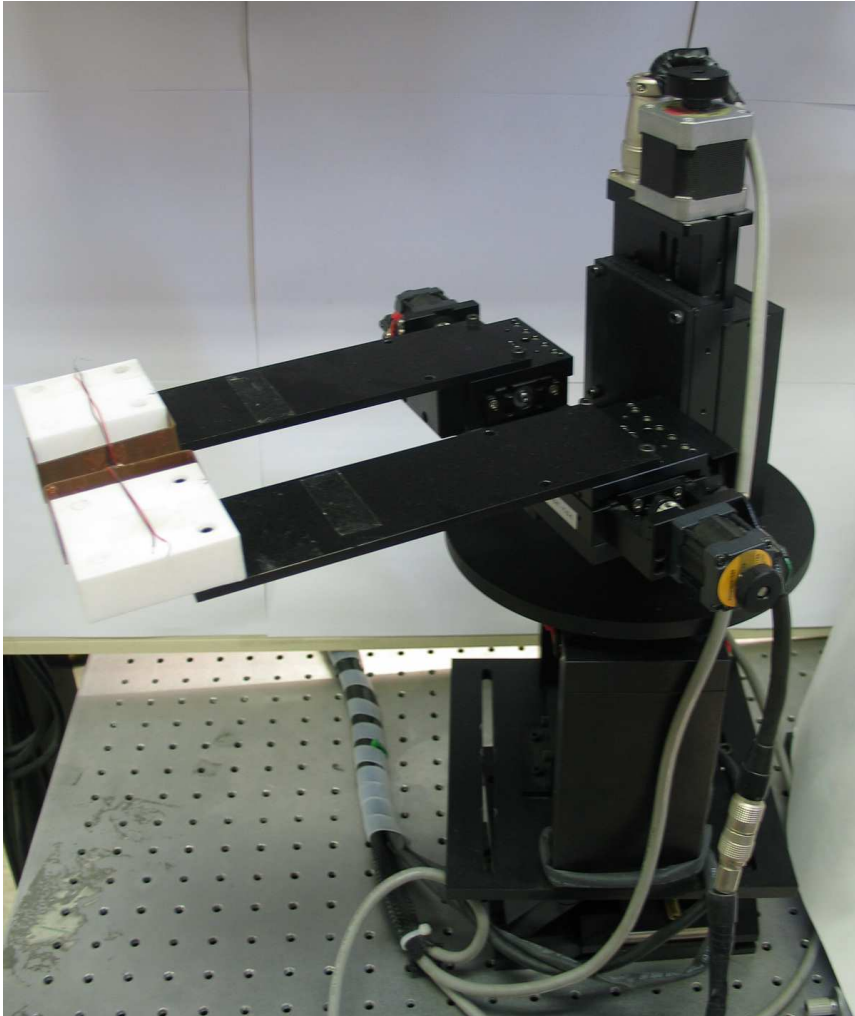
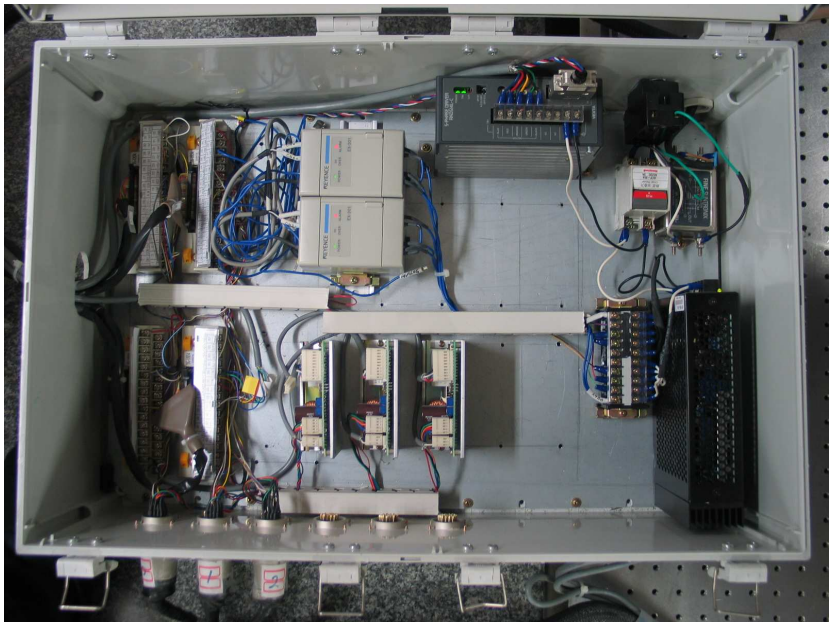


Fig. 4-9 Photograph of Pickup Device



(a) Outer Fit



(b) Inner Fit

Fig. 4-10 Control Box for Pickup System

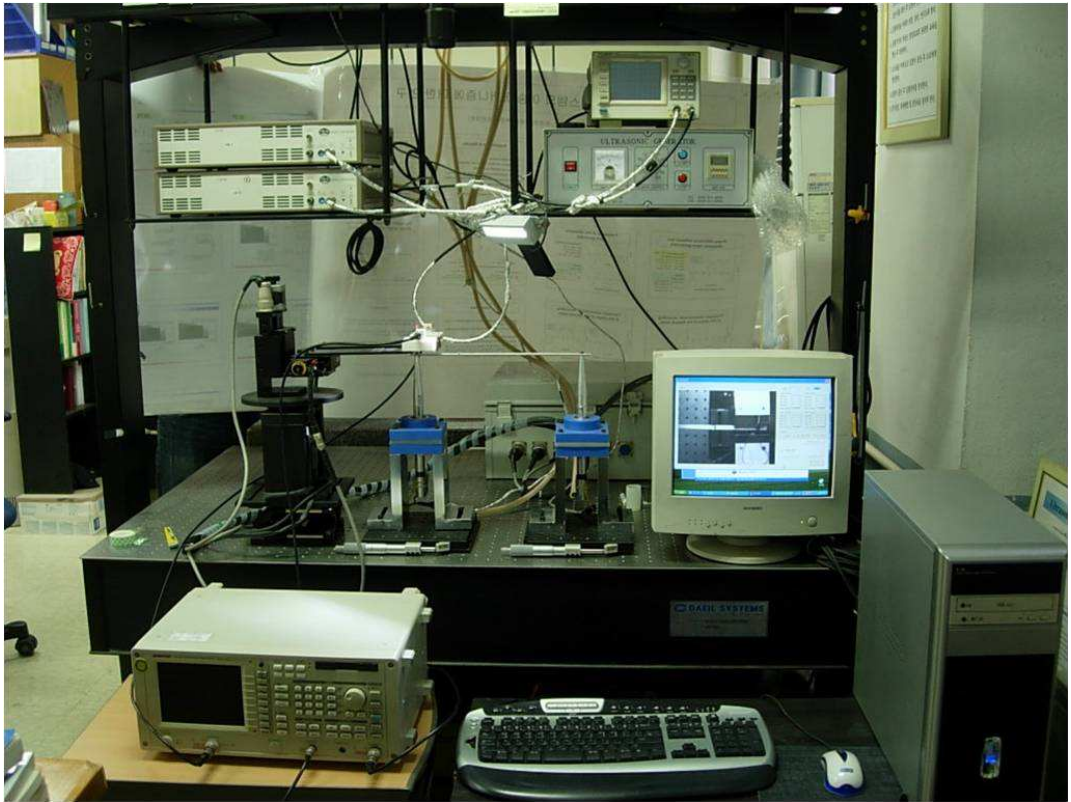


Fig. 4-11 Photograph of Optical Element Transport System using Ultrasonic Wave

제 3 절 광소자 자동 이송 시스템의 검사 자동화 프로그램

광소자 픽업장치를 제어하는 모터 컨트롤러를 제작하고, 이송 공정을 실시간으로 감시할 수 있는 비전 시스템을 통합하였다. 모터 컨트롤러는 FAS-3000을 사용하였고 비전 컨트롤러는 Matrox Frame Grabber를 이용하였다. 모터 컨트롤러와 비전 컨트롤러를 제어하기 위해 Fig. 4-12와 같은 과정을 통해 Visual C++를 이용하여 검사 자동화 소프트웨어를 개발하였다. 모든 모터의 스테이지는 Limit Sensor까지 이동하게 되고 현재 위치를 시작점으로 제로 셋팅을 하게 된다. 픽업 장치는 초기화 상태를 마치고 초음파 이송 시스템에 의해 이송된 광소자를 픽업하고, 불량 유무를 판별하여 다음 이송 시스템으로 연결시킨다. 픽업 장치는 처음의 초기화 상태로 돌아가서 다음 이송 공정을 준비한다.

Fig. 4-13은 컨트롤 장치의 제어를 통해 광소자 자동 이송 시스템을 구동시키는 검사 자동화 소프트웨어의 제어 화면을 나타낸다. 제어 화면은 크게 4개의 창(Window)으로 되어 있다. 비전 카메라(Vision Camera)를 통하여 화면을 실시간으로 보여지는 Vision 창과 픽업 장치의 구동 위치를 보여주는 Position 창과 픽업 장치를 제어하기 위한 Control 창과 광학 렌즈의 결합 여부를 판별시에 활성화되는 Inspection 창으로 구성되었다.

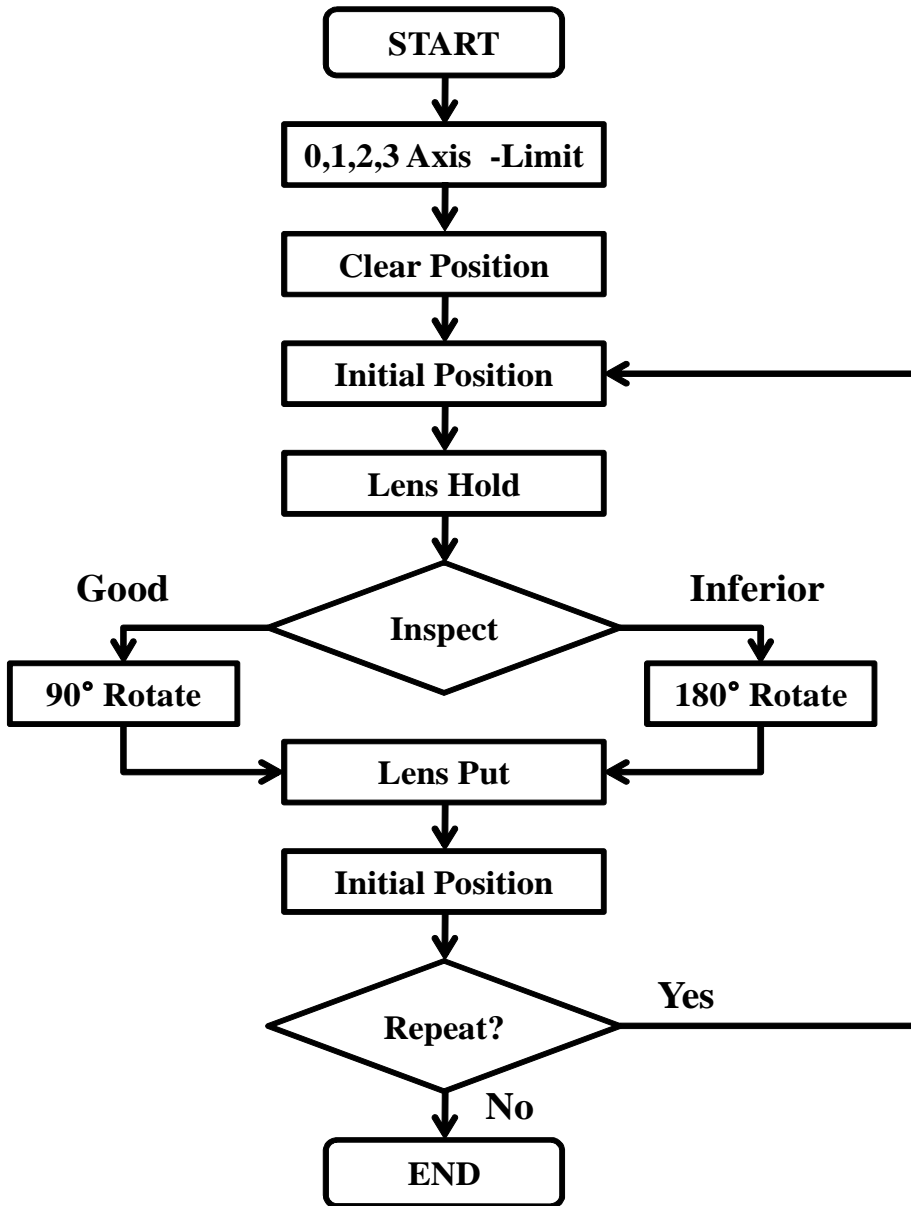


Fig. 4-12 Flow Chart of Pickup Automation Program

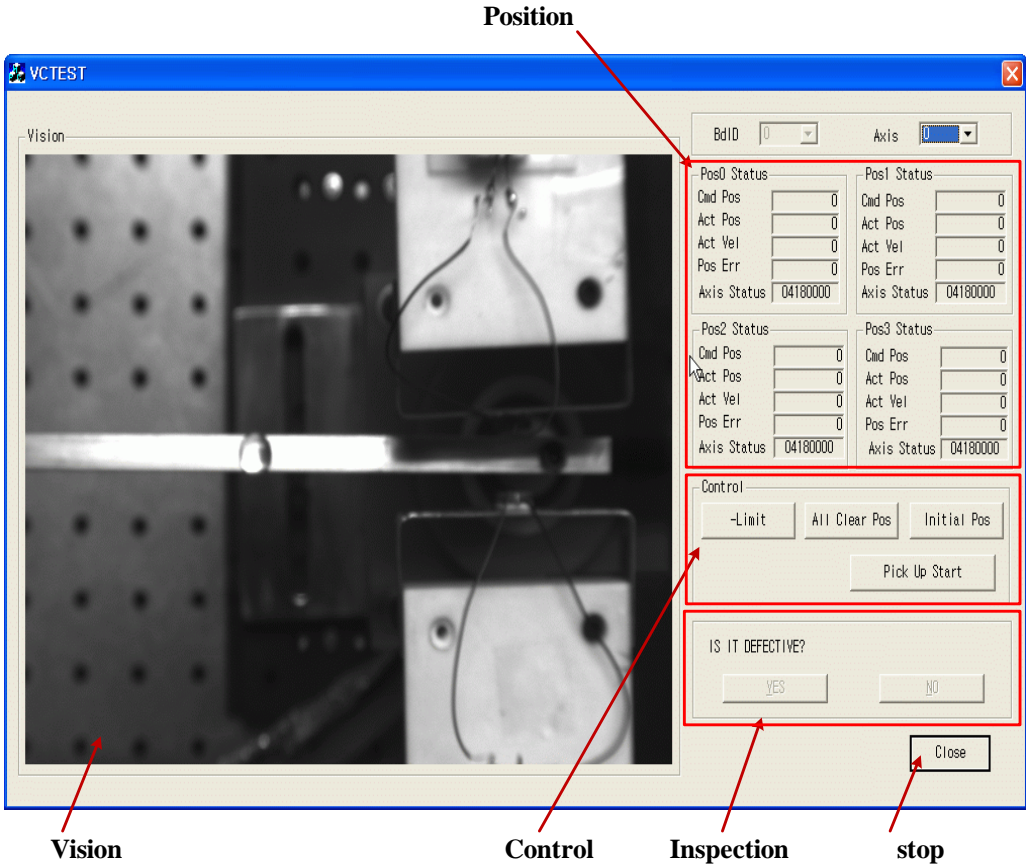


Fig. 4-13 Pickup System Control Software using Visual C++

제 6 장 결 론

본 연구에서는 기존의 이송 시스템의 문제점들을 보완하고 광소자에 적합한 이송 시스템을 개발하기 위해 초음파 진동을 이용한 물체 이송 시스템을 제작하였고, 이론 전개를 통해 위상차와 주파수에 따른 물체의 이송 방향 변화를 규명하였다.

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. 오일러-베르누이 빔 이론을 이용하여 탄성빔의 고유주파수를 유도하고, 유한요소해석을 통해 검증하였다. 정상파와 진행파에 대한 고찰을 통해 초음파 가진에 의해 탄성빔에 발생하는 진행주파수를 확인하고, 위상차에 따른 파동의 전파 방향을 평가하였다. 탄성빔의 모델링 방정식으로부터 가진주파수에 따른 파동의 전파 방향을 예측하고, 이론적인 해석 결과와 실험 값을 비교하여 이를 검증하였다.

초음파 진동을 이용한 물체 이송 시스템의 동특성을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탄성빔의 고유진동수를 이론식을 통하여 구하였다. 초음파에 의해서 진동하는 탄성빔을 모델링하고 유한 요소 해석을 통해 비교하였다. 이론식으로 구한 고유 진동수와 유한 요소 해석을 통한 고유진동수의 값이 잘 일치하였고, 유도된 고유진동수를 기준으로 초음파 이송 시스템의 진행주파수를 구하였다.

2. 위상차 변화에 따른 물체의 이송 방향 변화를 확인하기 위해 이론적인 방법과 실험적인 방법을 통해 검증하였다. 초음파가 탄성빔에 전달되어 생성되는 파동의 결합에 의해 탄성빔 표면의 입자는 타원형 궤적을 그리며, 타원형 운동에 의해 물체의 이송과 방향이 결정된다. 이론적으로 두 가진주파수가 90° 의 위상차를 가질 때 물체가 이송되고, -90° 의 위상차를 가질 때 이송 방향이 반대가 된다. 이를 확인하기 위해 두 가진주파수의 위상차를 0° 부터 360° 대역으로 10° 씩 증가, 감소시키면서 실험하였다. Case 1은 Ch 1을 0° 로 고정하고 Ch 2를 10° 씩 감소하였고, Case 2는 Ch 2를 0° 로 고정하고 Ch 1을 10° 씩 감소하였다.

이론적인 방법과 실험을 통해 구한 위상차에 따른 물체 이송 방향을 비교한 결과

물체 이송 방향이 변하는 위상차의 범위가 예상 영역과 실험 결과가 일치하지 않았지만 두 가진주파수의 위상차에 의해 특정 구간에서 물체의 이송 방향이 규칙적으로 바뀌는 것을 확인하였다. Case 1과 Case 2를 비교하면, $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 축을 기준으로 대칭적인 특성을 보였다. 따라서 두 가진주파수의 위상차에 변화를 주어 물체의 이송 방향을 전환할 수 있음을 확인하였다.

3. 오일러 베르누이 빔 이론으로부터 탄성빔의 모델링 방정식을 전개하고 시뮬레이션하여 구한 주파수에 따른 이송 방향 변화를 실험 결과와 비교하였다. 가진주파수에 대하여 인접한 주요한 두 개의 모드를 사용하여 모델링 방정식을 구하고, 네 개의 정상파의 상수 A, B, C, D의 부호에 따른 진행파의 전파 방향을 매트랩을 이용하여 시뮬레이션하였으며, 이론 전개로부터 가진주파수의 변화에 의한 파동의 전파 방향을 예측하였다.

주파수에 따른 물체의 이송 방향을 측정하기 위해 주파수는 26.5kHz에서 27.5kHz까지 100Hz씩 증가하면서 실험하였다. 실험 결과 26.5kHz와 26.8kHz에서 물체는 (-)방향으로 이송되었고, 27.0kHz와 27.5kHz에서 (+)방향으로 이송되었으며, 탄성빔의 공진주파수 27.0kHz에서는 물체가 이송되지 않았다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 탄성빔의 공진주파수 27.0kHz를 기준으로 파동의 진행 방향이 전환되었다. 따라서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

4. 초음파 이송 시스템을 광학 렌즈 생산에 적용하기 위해 광소자 자동 이송 시스템을 제작하였다. 광소자 자동 이송 시스템은 광소자를 픽업하여 이동시키는 픽업장치와 광소자의 불량 여부를 파악하는 검사 시스템과 광소자를 실시간으로 관찰하는 비전 시스템을 통합하였다. 각 시스템을 제어하고 통합시키기 위해 Visual C++를 이용하여 광소자 자동 이송 시스템의 제어 소프트웨어를 개발하였다. 광소자 자동 이송 시스템의 동특성을 파악하기 위해 SolidWorks를 이용하여 시뮬레이션하였으며, 시뮬레이션을 통해 각 축의 이송 범위와 속도를 구하고 이를 바탕으로 모터의 사양을 결정하였다.

본 연구에서는 초음파 진동을 이용한 물체 이송 시스템의 이송 원리를 이론적으로 해석하였다. 초음파 이송시스템의 물체 이송 방향을 결정하는데에는 두 가진주파수의 위상차와 주파수의 변화가 중요 인자임을 알 수 있었다. 이론적인 해석을 검증하기 위한 실험 결과가 이론적인 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 초음파 여기를 이용한 물체 이송 시스템은 실제 산업 현장의 이송공정에도 적용될 수 있으며, 특히 표면손상이 쉬운 광소자와 자기의 영향을 받는 반도체 소자의 이송에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. M. Kurosawa, K. Nakamura, T. Okamoto and S. Ueha, "An Ultrasonic Motor Using Bending Vibrations of a Short Cylinder." IEEE Transactions on Ultrasonics, Vol.36, No.5, pp.517-521, 1989.
2. K. Nakamura, M. Kurosawa and S. Ueha, "Characteristics of a Hybrid Transducer-Type Ultrasonic Motor." IEEE Transactions on Ultrasonics, Vol.38, No.3, pp.188-193, 1991.
3. E. Matsuo, Y. Koike, K. Nakamura, S. Ueha and Y. Hashimoto. "Holding Characteristics of Planar Objects Suspended by Near-Field Acoustic Levitation." IEEE. Ultrasonics, Vol.38, pp.60-63, 2000.
4. T. Sashida, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford Univ Press, 1994.
5. S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa and N. Nakamura, *Ultrasonic Motors*, pp.9-17, 1993.
6. Y. Tomikawa, K. Adachi, H. Hirata, T. Suzuki and T. Takano, "Excitation Go Progressive Wave in a Flexurally Vibrating Transmission Medium." Proc. 10th Symp. Ultrason. Electron, Vol.29, No.1, pp.179-181, 1989.
7. B. G. Loh and P. I. Ro, "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, 2000.
8. B. G. Loh and P. I. Ro, "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, 2000.
9. V. Vandaele, P. Lambert and A. Delchambre, "Non-Contact Handling in Microassembly : Acoustical Levitation." Precision Engineering, Vol.29, pp.491-505, 2005.
10. S. Ueha, Y. Hashimoto and Y. Koike, "Non-Contact Transportation using Near-Field Acoustic Levitation." IEEE. Ultrasonics, Vol.38, pp.26-32, 2000.
11. P. I. Ro and B. G. Loh, "Industrial Application of Ultrasonic Flexural waves: Object Transport and Cooling of Microelectronic Components.", RRC Workshop, 2001.

12. S. H. Jeong and B. S. Shin, "A Study on the Relationship between Flexural Beam Shape and Transport Characteristics for the Ultrasonic Transport Systems." Proc. KSMTE Autumn Conference, pp.25-29, 2003.
13. S. H. Jeong, T. H. Kim, B. S. Shin and K. R. Cha, "A Study on Object Transport System using 2-Mode Ultrasonic Wave." Proc. KSPE Spring Conference, pp.1170-1173, 2003.
14. M. Kuribayashi, S. Ueha and E. Mori, "Excitation Conditions of Flexural Traveling Waves for a Reversible Ultrasonic Linear Motor." J. Acoust. Soc. Am, Vol.77, No.4, pp.1431-1435, 1985.
15. M. Kurosawa and S. Ueha, "High Speed Ultrasonic Linear Motor with High Transmission Efficiency." Ultrasonics, Vol.27, pp.39-44, 1989.
16. K. Nakamura, M. Kurosawa, H. Kurebayashi and S. Ueha, "An Estimation of Load Characteristics of an Ultrasonic Motor by Measuring Transient Responses." IEEE Transactions on Ultrasonics, Vol.38, No.5, pp.481-485, 1991.
17. J. Hu, K. Nakamura and S. Ueha. "An Analysis of a Noncontact Ultrasonic Motor with an Ultrasonically Levitated Rotor." IEEE. Ultrasonics, Vol.35, pp.459-467, 1997.
18. S. H. Jeong, S. M. Shin, G. H. Kim, S. H. Lee and J. H. Kim, "Dynamic Characteristics of Optical Element Pickup Device used to Ultrasonic Transport System." KSMTE Spring Conference, pp.556-561, 2006.
19. S. Sherrit, B. P. Dlogin and Y. Bar-Cohen, "Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications." IEEE. Ultrasonics Symposium, 1999.
20. W. C. Elmore, *Physics of Waves*, New York:McGraw-Hill, pp.5-13, 1991.
21. M. Takasaki, N. Osakabe, M. K. Kurosawa and T. Higuchi, "Miniaturization of Surface Acoustic Wave Linear Motor." IEEE Ultrasonic Symposium, 1998.
22. B. G. Loh, "Friction-Based and Acoustically-Levitated Object Transport using Ultrasonic Vibration." Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol.27, No.5, pp.590-599, 2003.
23. K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids*, New York:Dover Publication, pp.163, 167,

180-187.

24. S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Reding, MA:Addison-Wesley, pp.527, 1995

25. M. P. Norton, *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge, pp.81-931, 989.