

과학기술국제화사업-다자간공동연구

Global Joint R&D Program-Multilateral Joint Research Project

전방향성 초음파 선형 액츄에이터 개발

Development of Ultrasonic Linear Actuator for Omni-directional Motion

한국과학기술연구원

교육과학기술부

제 출 문

교육과학기술부장관 귀하

본 보고서를 “ 과학기술국제화사업-다자간공동연구”과제 (세부과제 “전방향성 초음파 선형 액츄에이터 개발”) 의 보고서로 제출합니다.

2008. 4. 10

주관연구기관명 : 한국과학기술연구원

주관연구책임자 : 윤 석 진

연 구 원 : 김 현 재

” : 김 진 상

” : 강 종 윤

” : 최 지 원

” : 송 현 철

여백

보고서 초록

과제관리번호	K20712000004	해당단계 연구기간	2006.4-2008.3	단계 구분	(2) / (2)
연구사업명	중 사업명	과학기술국제화사업			
	세부사업명	다자간공동연구			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	전방향성 초음파 선형 액츄에이터 개발			
연구책임자	윤 석 진	해당단계 참여연구원수	총 : 19 명 내부 : 6 명 외부 : 13 명	해당단계 연구비	정부: 280,000 천원 기업: 천원 계: 280,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국과학기술연구원 재료연구본부 박막재료연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 미국/독일/리투아니아 상대국연구기관명 : ICAT/HNI/VPU				
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	125
<p>본 연구는 고정밀도를 갖는 전방향(omni-direction)으로 움직이는 초음파 리니어 액츄에이터와 이를 기반으로 하는 전방향성 xy stage 개발을 목표로 하며 다음과 같은 연구 개발 성과를 달성.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 900℃ 이하의 소결 온도를 갖는 우수한 특성의 저온 소결 압전 조성 개발 - 0.01Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O₃ - 0.41Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ - 0.35PbTiO₃ - 0.23PbZrO₃ + 0.1 wt% Y₂O₃ + x wt% ZnO (0≤x≤2.5) - Q_m=70, k_p=56%, d₃₃=570 ○ 일축형 선형 액츄에이터 개발 - 변위확대 기구의 설계 및 동작구조 개선 - 마찰재의 성질에 따른 선형 액츄에이터의 동작특성 연구 및 최적 마찰재 개발 - 액츄에이터 구동용 전기회로의 개발 및 나노미터 정밀도의 일축형 초음파 stage 개발 ○ 전방향 선형 액츄에이터 개발 - Shaking beam 및 Corn type concentrator를 이용한 전방향성 압전 액츄에이터 설계 개발 - ATILA를 이용한 선형 액츄에이터의 동작 특성 전산모사 이론적 연구 ○ 전방향성 초음파 액츄에이터를 이용한 고정밀 xy stage 개발 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	압전 세라믹, 리니어 액츄에이터, 전방향성, 초음파, xy 스테이지			
	영 어	piezoelectric ceramic, linear actuator. omni-directional, ultrasonic, xy stage			

여백

요 약 문

I. 제 목

전방향성 초음파 선형 액츄에이터 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

초음파 리니어 액츄에이터는 nm scale의 높은 정밀도와 0.1ms이하의 빠른 응답성, 3 kg/mm^2 정도의 큰 발생력 등의 특성을 갖는 차세대 리니어 액츄에이터이다. 본 연구에서는 상기와 같은 특성을 갖으며 전방향(omnidirectional)으로 움직이는 압전 초음파 리니어 액츄에이터 개발을 목표로 하며, 이의 활용은 반도체 및 광학장비의 정밀위치 제어와 바이오/의료기술 분야 등에 적용할 수 있고, 액츄에이터용 압전재료, 전방향성 초음파 리니어 액츄에이터 설계기술, 액츄에이터 발진/제어기술, 시스템화 기술 등으로 이루어지는 복합기술 과제이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구 개발은 국제 다자간 공동 개발로서 한국의 한국과학기술연구원은 압전 액츄에이터용 저온소결 압전 소재 개발 및 일축형 리니어 액츄에이터 설계 및 개발, 전방향 리니어 액츄에이터 설계 및 개발을 담당하며, 미국 Penn State University의 ICAT은 압전 세라믹스의 진동 해석 및 xy stage 기계적 구동부 평가를 담당한다. 또한, 리투아니아 VPU는 전방향 액츄에이터 공동 설계 및 기구부 개발을 담당하고, 독일의 HNI는 전방향성 스테이지 기구부 설계 기술 개발을 담당한다.

IV. 연구개발결과

본 연구 개발 과제를 통해 다음과 같은 연구 개발 결과를 얻었다. 우선, 900°C 이하의 소결 온도를 갖는 우수한 특성의 저온 소결 압전 조성을 개발하였는데, 이는 $0.01\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3-0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.35\text{PbTiO}_3-0.23\text{PbZrO}_3+0.1 \text{ wt\% Y}_2\text{O}_3$ 의 조성성에 0~2.5 wt%의 ZnO를 첨가하여 900°C 이하의 소결 온도에서 $Q_m=70$, $k_p=56\%$, $d_{33}=570$ 의 우수한 압전 특성을 갖는 압전 조성을 개발하였다.

또한, 변위확대 기구의 설계 및 동작구조 개선을 통한 일축형 선형 액츄에이터 개발하였는데, 마찰재의 성질에 따른 선형 액츄에이터의 동작 특성을 연구하였고, 이에 따른 최적 마찰재를 개발하였다. 더불어, 액츄에이터 구동 회로의 개발 및 나노미터 정밀도의 일축형 초음파 stage를 개발 하였다.

일축 선형 액츄에이터 개발 결과를 바탕으로 전방향 선형 액츄에이터 개발을 개발하였는데, Shaking beam 일축 선형 액츄에이터 두개를 교차 결합한 형태의 전방향성 압전 액츄에이터와 Corn type concentrator를 이용한 전방향성 압전 액츄에이터를 설계 개발하였다. 전방향성 액츄에이터의 설계는 ATILA를 이용하여 이루어졌으며, 이를 통해 최적 액츄에이터 구조를 설계할 수 있었다.

개발된 전방향성 초음파 액츄에이터를 이용하여 고정밀 xy stage 개발하였는데, 이는 초음파 액츄에이터와 액츄에이터에 의해 전방향으로 구동되는 알루미늄 볼로 구성된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 과제를 통해 개발된 전방향 압전 액츄에이터는 반도체 제조 alignment 장비 및 기타 정밀 위치 제어 장비의 액츄에이터로 활용 가능하다. 또한 MEMS공정용 micro/macro actuator로 응용 가능하다. 또한, Robot의 관절 및 안구로 응용 가능하며, 그 활용 및 응용 분야가 매우 넓다.

S U M M A R Y

(영 문 요약 문)

I. Title

Development of Ultrasonic Linear Actuator for Omni-directional Motion

II. Objective and Needs

Ultrasonic linear actuators have the properties of high resolution of nm scale, fast response of less than 0.1 ms, and high generative force fo more than 3 kg/mm². They are considered as next generation linear actuator. In this project, omni-directional piezoelectric linear actuators have been developed. They are able to apply for semiconductor and optical equipment, and bio/medical technologies. The piezoelectric omni-directional linear actuator is a fusion technology which consists of piezoelectric materials, actuator design, driving and control circuit, and system technologies.

III. Project contents and scope

The project is international multilateral joint research project. Four different country research institutes involve in the project. KIST, Korea plays role in developing the LTCC piezoelectric materials and the design and fabrication of the uni- and omni-directional linear actuators. ICAT, Penn State University, USA has analyzed the vibration mode of the piezoelectric ceramics and mechanical driving part of xy stage. VPU, Lithuania cooperates the design of the actuators and implement. Also, HNI, Germany has designed the implement of omni-directional xy stage.

IV. Results

The following research results have been obtained.

Firstly, piezoelectric ceramic materials have been developed, which could be sintered less than 900°C and have excellent piezoelectric properties. The composition of the materials is 0.01Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O₃-0.41Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ -0.35PbTiO₃-0.23PbZrO₃+0.1 wt% Y₂O₃ added ZnO of 0~2.5 wt% ZnO. The materials have the excellent properties of Q_m=70, k_p=56%, and d₃₃=570 in condition of less than 900°C sintering temperature.

By design of displacement enhancement implement and improvement of the structure of the actuator, the uni-directional linear actuator has been developed. The optimum

friction condition and the movement properties according to the friction materials have been investigated. The driving circuit for the actuator and uni-directional stage of nm resolution have been developed.

Based on the research for the uni-directional linear actuator, the two kinds of omni-directional linear actuators have been developed. The one consists of the crossed two shaking beam linear actuators. The other is corn type concentrator divided by four sectors. The actuators have been analyzed and designed using ATILA.

The xy stage has been also developed using the omni-directional actuator. The stage consists of the actuator and alumina ball, and has multi-degree freedom on the plane.

V. Practical using plan

The omni-directional piezoelectric actuators are able to be used in the industry fields such as semiconductor fabrication and alignment, high resolution position control equipment, micro/macro actuator for MEMS process, and joints and eyes for Robot. The actuators have wide application range.

C O N T E N T S

(영 문 목 차)

Chapter 1. Abstract of research project	13
Chapter 2. State of arts	15
2.1 Domestic relative technology trends	15
2.2 International relative technology trends	15
Chapter 3. Contents and results	17
3.1. Piezoelectric ceramics for actuators	17
3.2. Piezoelectric vibrator	28
3.3. Driving circuit	41
3.4 Design of uni-directional piezoelectric linear actuator	45
3.5. Experimental results of uni-directional piezoelectric linear actuator	69
3.6. Design of omni-directional piezoelectric linear actuator	76
3.7. Experimental results of uni-directional piezoelectric linear actuator	84
Chapter 4. Research goals and contributions	91
Chapter 5. Application plan of the results	93
Chapter 6. International science and technology relative information	95
Chapter 7. Reference	103
Appendix	105
Self-evaluation	107
Research results and practical using report	112
Research results proofs	116

여백

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	13
제 2 장 국내외 기술개발 현황	15
2.1 국내 관련 기술 현황	15
2.2 국외 관련 기술 현황	15
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	17
3.1. 초음파 액츄에이터용 압전 세라믹스	17
3.2. 압전 진동자	28
3.3. 구동회로	41
3.4 일축 압전 리니어 액츄에이터 설계	45
3.5. 일축 압전 리니어 액츄에이터 제작 및 특성	69
3.6. 전방향 압전 리니어 액츄에이터 설계	76
3.7. 전방향 압전 리니어 액츄에이터 구동회로와 결과	84
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	91
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	93
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	95
제 7 장 참고문헌	103
부 록	105
자체평가의견서	107
연구개발 결과·활용보고서	112
연구성과 증빙 자료 사본	116

여백

제 1 장 연구개발과제의 개요

나노 미터 스케일의 조작/위치제어는 정밀측정, 정밀가공, LSI 제조, 그리고 반도체 기술을 적용하는 바이오/의료 기술분야에 필수적인 기술이며, 특히 최소 배선평이 0.1 μ m이 되는 LSI 제조기술의 경우 300mm의 웨이퍼 크기의 nm 정밀도를 가져야 한다. 현재 사용하고 있는 정밀 선반의 경우 일반적으로 선형 guiding rail, 마그네틱 모터, 그리고 ball/lead-screw로 구성되어 있으며, 마그네틱 모터의 정밀도(resolution)가 로터(rotor)와 고정자 코어 사이의 간격에 의해 결정되기 때문에 전기적으로나 기계적으로 정밀도를 향상시키기가 불가능하기 때문에 추가로 압전 적층액츄에이터와 같은 정밀위치 제어장치가 필요하다.

차세대 정밀 위치 제어용 액츄에이터 대체소자로 주목받고 있는 압전 액츄에이터는 표 1.1에 나타낸 바와 같이 액츄에이터의 주요특성인 변위 정밀도 (displacement accuracy), 위치정밀도 (positioning accuracy), 응답속도 (response speed) 등이 다른 경쟁 액츄에이터에 비하여 월등하므로, 반도체, 광학 및 절삭공구 시스템의 정밀 위치제어용 소자, HDD 등 각종 정보저장 장치의 track tracer 등의 사용을 위해 연구되고 있다.

압전 액츄에이터의 구동은 크게 AC 및 DC 구동으로 나눌 수 있으며 AC구동은 빠른 속도로 동작하지만 공진에 대한 전력소모가 변위 발생 전에 생기기 때문에 빠른 위치이동과 정밀도(0.1 μ m)에 한계가 있으며, DC구동의 경우 서브 나노미터급의 정밀도가 가능하지만 이동거리(stroke)가 매우 작은 특성을 가지고 있어 나노미터급의 위치제어를 위한 시스템의 구현은 구동메카니즘의 적절한 선택이 따라야 한다. 초음파 리니어 액츄에이터란 nm scale의 높은 정밀도와 0.1ms이하의 빠른 응답성, 3kg/mm²정도의 큰 발생력 등의 특성을 갖는 차세대 리니어 액츄에이터이다.

본 연구는 상기와 같은 특성을 갖는 압전 액츄에이터를 이용하여 전방향(omnidirectional)으로 움직이는 초음파 리니어 액츄에이터 개발을 목표로 하며, 이의 활용은 반도체 및 광학장비의 정밀위치 제어와 바이오/의료기술 분야 등에 적용할 수 있고, 구성기술로는 액츄에이터용 압전재료, 전방향성 초음파 리니어 액츄에이터 설계기술, 액츄에이터 발전/제어기술, 시스템화 기술 등으로 이루어지는 복합기술이다.

표 1.1 전동모터와 압전 액츄에이터의 특성

Name	Displacement Range	Displacement Accuracy	Generative Force	Response Speed
AC Servo Motor	Rotation	-	3kg · m	100msec
DC Servo Motor	Rotation	-	20kg · m	10msec
Step Motor	1000mm	10 μ m	30kg	100msec
Voice Coil Motor	1mm	0.1 μ m	30kg	1msec
Piezoelectric Actuator	0.1mm (Rotation/linear)	10nm	3kg/mm ²	0.1msec

나노미터급의 위치제어를 위한 압전액츄에이터 기술은 전기↔기계 상호변환 효율이 큰 액츄에이터용 압전재료 합성기술, 콤팩트(compact)하고 저전력형 및 적정 구조의 설계기술, 그리고 정밀 위치제어를 AC/DC 구동에 의한 나노위치제어용 액츄에이터의 구동/제어기술이 필요한 종합기술이다. 따라서 전방향성 초음파 리니어 액츄에이터 개발을 위해서는 경시변화가 작고 기계적 동특성이 우수한 액츄에이터용 압전재료, 2차원(x-y)의 운동방향을 갖는 액츄에이터의 설계 및 진동해석, nanometer scale을 갖는 정밀위치 시스템, 그리고 리니어 액츄에이터의 구동/제어 알고리즘 개발이 이루어져야 하는 복합적이고 기계, 전자, 재료 등의 interdisciplinary한 학문분야의 연구가 동시에 이루어져야 한다.

본 연구는 KIST의 압전액츄에이터 연구개발 경험을 토대로 미국의 Pennsylvania State University의 압전재료의 동특성 평가와 액츄에이터 전반에 대한 조언, 구소련 연방인 Lithuania의 Vilnius Pedagogical University의 단위 액츄에이터의 설계 및 진동해석, 그리고 독일의 Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn의 액츄에이터의 기계적인 특성평가 및 x-y stage 설계기술 등의 공동연구를 통해 nanometer scale의 정밀도를 갖는 전방향성 리니어 모터 개발을 통해 x-y stage를 개발하는 것을 목표로 한다.

우리나라는 반도체 및 통신분야에서 세계적인 수준으로 수출산업을 선도하고 있는 반면에 기간 산업의 근간이 되는 반도체 제조 및 광위치 조절을 위한 nanometer급의 정밀 위치제어기 전부는 일본이나 독일에서 수입하고 있는 실정으로 향후 나노시대의 강대국이 되기 위해서는 나노미터급의 정밀위치제어 시스템의 개발은 필수적으로 사료된다.

미국, 일본 등에서 개발 시판되고 있는 나노미터급의 정밀위치 제어시스템은 x, y축 방향 구동을 위한 각각의 구동 및 제어시스템과 2점의 구동 스테이지로 이루어져 있어 x-y 양방향 나노 위치제어 시스템의 구현이 어려운 실정으로 전방향성 초음파 리니어 액츄에이터가 개발되면 나노위치 제어시스템의 compact화, 제어 및 구동의 단순화로 기술적 및 경제적 파급효과가 매우 지대하리라 예상된다.

액츄에이터 연구분야는 다학제적인 성격으로 이미 미국을 중심으로 일본, 유럽간 상호연계를 가지고 연구하고 있으며, 따라서 본 연구를 통해 국제공동연구수행기관을 중심으로 현재까지 한국을 비롯하여 독일, 터키, 중국 등에서 "IWPMA, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications" workshop을 매년 개최하였고, 올해는 미국에서 workshop을 개최할 계획으로 이를 통해 국제적인 기술 인프라를 구축하였고, 향후에도 상호 교류 관계를 지속할 것으로 기대한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내 관련 기술 현황

국내 압전 액츄에이터 관련 기술은 주로 대학이나 연구소 중심으로 이루어지고 있으며, 주로 적층형 압전 액츄에이터에 집중되어 있어, 압전 모터 또는 액츄에이터 기술은 낙후되어 있는 것이 현실이다. 한국과학기술연구원에서 지난 10년 이상 압전 모터 및 액츄에이터 개발 연구를 집중하여 회전형 압전 모터, 선형 압전 모터, 초소형 선형 압전 모터 등의 개발을 성공적으로 수행하여, (주)피에조테크놀리지에 기술 이전하여 현재 양산 생산 중에 있다. 그 외, 창원대학교에서는 압전 선형 액츄에이터를, 포항공대 및 산업과학기술연구소에서는 압전 액츄에이터에 대한 기초 연구가 진행되고 있다. 광주과학기술원은 정밀 포지셔너, 정밀 기계 가공용 액츄에이터 적용 연구가 진행되고 있다.

정밀 스테이지 관련 기술은 국내의 벤처기업 1-2곳에서 스테이지를 생산 중에 있다. 그러나 이러한 스테이지는 전자기식 모터(VCM)로 구동되는 것으로써, 정밀도가 떨어지고 크기 또한 큰 편이다. 국내의 초음파 모터를 이용한 초정밀 스테이지는 대부분 외국에서 수입된 것이다. 압전 초음파 모터로 구동되는 스테이지 관련 특허는 20건 정도 등록되어 있으나 현재 제품으로 생산되고 있는 것은 없는 상태이다. 초소형 다자유도 압전 나노 스테이지를 개발하는데 필요한 핵심 기술인 초소형 압전 초음파 액츄에이터를 생산하거나 개발하고 있는 곳은 (주)피에조테크놀리지와 삼성전기 등 몇몇 기업에 국한 되어 있다.

2.2 국외 관련 기술 현황

기존 전자식 액츄에이터를 대체하기 위한 압전 액츄에이터에 대한 연구는 15년 전부터 시작되었으며, 독일의 Innotics와 PI사에서는 최대 스트로크가 50 μm 이며 최대 force가 11,000 N인 적층형 압전액츄에이터를 생산하여 판매중이다. 미국에서는 펜실바니아주립대 MRI의 ICAT를 중심으로 버클리대의 actuator center 등 여러 대학에서 우주 항공, 군사용, 민수용 등에 응용 가능한 다양한 압전 액츄에이터에 대해 폭 넓게 연구를 진행 중이다. 일본에서는 규슈대학에서 산화물 반도체를 이용한 화학 센서에 대하여 다양한 연구를 선도하고 있으며, AIST 및 동경대 생산기술연구소 등에서 smart 구조물 및 MEMS 등에 응용 가능한 압전 액츄에이터에 대해 연구를 진행하고 있고, Murata 등 전자세라믹 업체에서 민수용 액츄에이터 중심으로 연구개발 및 일부 생산중이다.

나노와 반도체 기술의 발달과 광기술의 발달에 따른 정밀 위치 제어 시스템에 대한 수요가 증가하고 있으면 이와 관련된 기술 개발 또한 활발히 진행되고 있다. 현재 독일의 PI사와 일본의 미쓰비시 등에서 압전 초음파 액츄에이터를 이용하여 초정밀 스테이지를 주로 생산하고 있다. 생산되고 있는 스테이지 또한 나노미터 급의 정밀도와 3자유도이상

의 moving 방향을 가지고 있다. 그러나 대부분 직경이 50~100mm 이상의 큰 사이즈의 스테이지를 생산하고 있으며, 다자유도의 스테이지는 거의 대부분 복수개의 액츄에이터 사용하여 일축 스테이지를 구동하도록 하고, 이를 결합하여 구현하는 실정이다. 현재 압전 스테이지 관련 특허가 100여건 등록되어 있으나, 하나의 압전 액츄에이터를 이용한 다자유도 압전 나노 스테이지에 관한 특허는 그 수가 매우 한정적이다. 따라서, 본 연구에서 개발된 전방향성 압전 액츄에이터 기술 및 이를 이용한 전방향 스테이지 기술은 세계 스테이지 시장을 선점할 수 우수한 선도 기술이라 할 수 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1. 초음파 액츄에이터용 압전 세라믹스

3.1.1. 압전 세라믹스 제작

본 연구에서는 전방향성 초음파 액츄에이터 설계 및 xy 스테이지 개발과 초소형 초음파 리니어 액츄에이터 개발을 목표로 하였다.

우선적으로 압전 액츄에이터를 개발하기 위해선 압전소재의 개발이 필요하며 압전 액츄에이터 제작에 사용되는 세라믹스는 큰 진폭의 기계적 진동을 얻을 수 있도록 압전 상수가 큰 조성이 요구된다. 또한 실리콘 소자와의 접목을 위해서는 900 °C 이하의 소결 온도가 필수적이다. 이는 고온 소성시 발생하는 PbO의 실리콘으로의 확산이나, 실리콘의 PbO로의 확산으로 인하여 압전 세라믹스의 특성저하를 야기하기 때문이다. 그러나 압전 특성이 높은 대부분의 PZT계 세라믹스는 소결 온도가 1200°C 이상이며, 1000 °C 부근에서 PbO가 급격하게 휘발함으로 인해 특성의 저하와 높은 에너지 소비 및 환경오염 문제가 부각되고 있다. 따라서 에너지와 환경문제 및 실리콘 소자와의 접목을 위해서는 저온 소결 압전 세라믹스의 개발이 반드시 이루어져야 한다.[1][2]

저온 소결을 위한 방법으로 미세한 원료분체를 이용하는 방법, 핫프레스에 의한 방법, 소결 첨가제에 의한 방법 등이 보고되고 있다. 이중 첨가제 및 조성의 제어를 통한 PZT계 세라믹스의 저온 소결은 압전 세라믹스의 입계에 액상을 생성시킴으로서 보다 낮은 온도에서도 물질의 확산을 용이하게 하여 낮은 온도에서도 소결이 가능하게 한다.

본 연구에서는 우수한 압전 특성을 갖는 $0.01\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3 - 0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.35\text{PbTiO}_3 - 0.23\text{PbZrO}_3 + 0.1 \text{ wt}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ 에 저온 소결 조제인 $x \text{ wt}\% \text{ ZnO} (0 \leq x \leq 2.5)$ 를 첨가한 후 900°C 이하에서 소결하여 압전 특성을 관찰하였다.

실험에 사용도니 원료의 종류와 제원은 표 3.1.1과 같고 주어진 원료로 제조된 압전 분체를 이용하여 시편을 제작한 후 그 특성을 평가하였다. 전체적인 실험공정을 Fig 3.1.1에 나타내었다.

시작 파우더는 정확한 칭량을 위해 전자저울로 사용하여 10^{-4}g 까지 칭량한 후, 플라스틱 통에 분산매인 증류수와 지르코니아 볼로 24시간 밀링 하였다. 혼합된 원료는 완전히 건조한 후 알루미늄 도가니에 넣어 850°C에서 2시간 하소하였다. 끝난 시료는 0.1 wt% $\text{Y}_2\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{ ZnO} (0 \leq x \leq 2.5)$ 를 첨가하여 24시간 밀링한 후 건조하였다. 건조된 파우더는 PVA를 5wt% 첨가하여 균일하게 섞은 후 $\phi 18$ 몰드(Mold)로 2 ton의 압력을 가하여 성형하였다. 성형된 시편은 600°C에서 3시간 번아웃(Burn-out)하였다. 탈지된 시편들은 PbO의 휘발을 억제하기 위해 시료조성과 동일한 분위기 분말을 사용하여 알루미늄 도가니에 넣고 각각 7의 소결 온도에서 1시간 및 2시간 동안 소결하였다. 소결이 끝난 시편은 1mm 두께로 연마한 후 전극을 도포하고 600°C에서 15분간 열처리를 하였으며, 전극이 형성된 시편은 120°C의 절연유(Silicon Oil) 속에서 3.5kV/mm의 직류전계를 30분간 가하여 분극하고 24시간이 경과한 후 시편의 특성을 측정하였다.

☞ 3.1.1 Manufacturer and materials grade

Materials	Grade(%)	Manufacturer
PbO	99.9	High Purity
MgO	99.99	Aldrich
WO ₃	99	Aldrich
NiO	99.99	Aldrich
Nb ₂ O ₅	99.9	Aldrich
ZrO ₂	99	Aldrich
TiO ₂	99.9	Aldrich
Y ₂ O ₃	99.9	Aldrich
ZnO	99.9	Aldrich

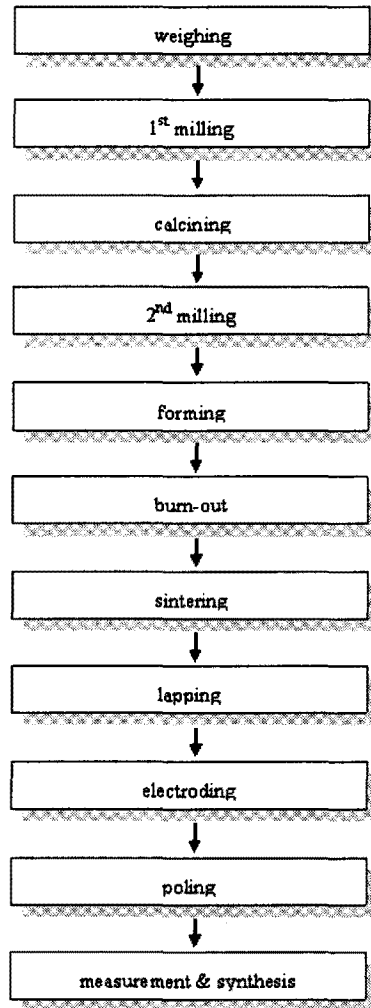


그림 3.1.1 Experimental procedure of piezoelectric ceramics

제조된 시편의 조성에 따른 소결성을 판단하기 위해 아르키메데스법(Archimedes Method)을 이용하여 다음 식과 같이 밀도를 구하였다.

$$\rho = \frac{M}{M - M_s} \times \rho' [g/cm^3]$$

여기서 ρ : 시편의 소결 밀도 [g/cm³], ρ' : 물의밀도 [g/cm³]

PWM-PNN-PZT계 세라믹스의 조성변화에 따른 결정구조를 측정하기 위해 X선회절장치 (Dmax2500, Rigaku)를 이용하여 분석하였다. X선 회절분석은 CuK α 를 사용하여 20 ~ 80° 위에서 2°/min의 주사속도로 각 조성에 따른 회절패턴을 측정하였고, 미세구조 분석을 위해 SEM(XL-30, Philips)으로 관찰하였으며, 비유전율은 Precision Impedance Analyzer (4294A, Agilent)에서 1 kHz에서의 정전용량 C를 측정하여 다음 식으로 계산하였다.

$$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot \epsilon_0 \cdot S}{t}$$

여기서 ϵ_{33}^T : 비유전율, ϵ_0 : 진공중의 유전율 (8.854×10⁻¹² [F/m])

S : 전극의 면적, t : 시편의 두께

압전 특성은 EMAS(Electronic Material Manufacture Association Standard)-6003[65]에 근거한 공진-반공진법에 의해서Piezometer(ZJ-3D, Sinica)를 사용하여 압전 상수(d₃₃)를 측정하였고, Precision Impedance Analyzer(4294A, Agilent)를 사용하여 공진, 반공진 주파수 및 공진저항을 측정하여 전기-기계 결합계수(k_p)와 기계적 품질계수(Q_m)를 다음과 같이 구하였다.

$$k_p^2 = 0.395 \frac{f_r}{\Delta f} + 0.574$$

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r (1 - f_r^2 / f_a^2) RC}$$

여기서 C : 1 [kHz]에서의 소자의 정전용량, R : 공진시 소자의 저항값

f_r : 반공진 주파수, f_a: 공진 주파수

3.1.2. 압전 세라믹스 특성

가. ZnO 첨가량에 따른 특성

Fig 3.1.2는 ZnO 첨가량에 따른 X선 회절 모양이다. 그림에서 나타난 바와 같이 제 이

상이 관찰되지 않는 것으로 보아 완전한 고상반응이 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 (200)면의 피크가 회절각(2θ) $43^\circ \sim 46^\circ$ 사이에서 관찰되었으며, 이는 일반적으로 정방정계상과 삼방정계상의 격자상수가 비슷하기 때문에 각 상의 (200)면의 회절각 2θ 값이 매우 근접되어 있으며 이들에 대한 X선 회절 피크는 서로 중첩되어 나타난다. 따라서, 정방정계와 삼방정계가 공존하는 상경계 영역(MPB)의 결정구조를 가지고 있음을 알 수 있으며, (200)면에 의해 쌍피크가 관찰되어 결정계가 정방정계로 이동함을 알 수 있다.[3][4] Fig 3.1.3은 900 °C의 소결 온도에서 ZnO의 첨가량과 1시간 및 2시간 소결한 시편의 밀도를 나타낸 것이다. ZnO첨가량이 증가됨에 따라 밀도가 증가하였으며, wt%에서부터 미세하게 감소되었다. ZnO 를 1.5 wt% 첨가하고 2시간 소결했을 때 시편의 밀도가 8.0 g/cm³로 가장 큰 값을 나타내었다.

Fig. 3.1.4는 ZnO첨가량에 따른 900 °C 에서 2시간 소결한 시편의 미세구조를 나타낸 그림이다. ZnO의 첨가량이 증가할수록 그레인(Grain)이 미세하게 커졌으며, 기공(Pore)이 줄어들음을 알 수 있다. 이는 ZnO에 의한 액상 소결의 결과로 사료된다.[3][5] 밀도 측정 결과에서 알 수 있듯이 ZnO첨가량이 증가 할 수록 밀도가 증가한 것은 그림에서와 같이 그레인의 성장으로 인해 기공이 줄어들어서 치밀한 구조가 이루어진 결과로 확인할 수 있다.

Fig. 3.1.5에 ZnO 첨가량과 소결 시간에 따른 기계적 품질계수를 나타내었다. ZnO첨가량에 따라 큰 변화없이 비슷한 값을 보였으며, 2.0 wt% ZnO에서 가장 높은 값을 나타내었다.

Fig. 3.1.6은 ZnO 첨가량과 소결 시간에 따른 전기-기계 결합계수를 나타낸 것이다. 1.5 wt% ZnO를 첨가하여 소결하였을 때 56.5 % 로 가장 높은 특성을 보였다. 1.5 wt% ZnO에서 가장 높은 특성을 나타내었고, 2.0 wt% ZnO 이상에서 변화가 미미하였다.

Fig. 3.1.7은 ZnO의 첨가량과 1시간 및 2시간 소결한 시편의 압전 상수 값을 나타낸 것이다. 1.5 wt% 첨가하였을 때 594 pC/N로 높은 특성을 보였다. 2.0 wt% ZnO 첨가시 미세하게 감소되는 것을 볼 수 있는데, 이는 밀도 측정 결과와 같이 많은 양의 ZnO 첨가로 인한 과잉 소결로 인한 것으로 생각된다.[7] ZnO의 첨가량이 증가하면서 소결성이 촉진되어 밀도와 함께 전기-기계 결합계수 및 압전 상수 값에 영향을 미친 결과로 해석된다.

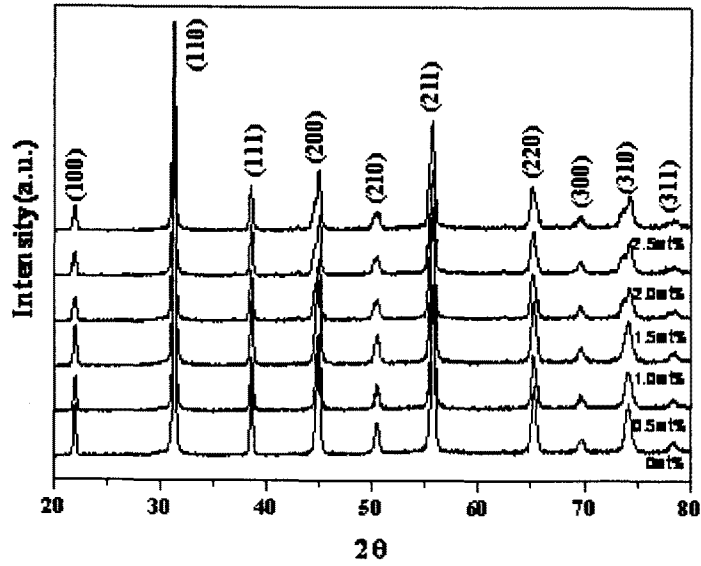


그림 3.1.2. XRD patterns of the PMW-PNN-PZT + 0.1 wt% Y_2O_3 and x wt% ZnO ceramics sintered at 900°C for 2h

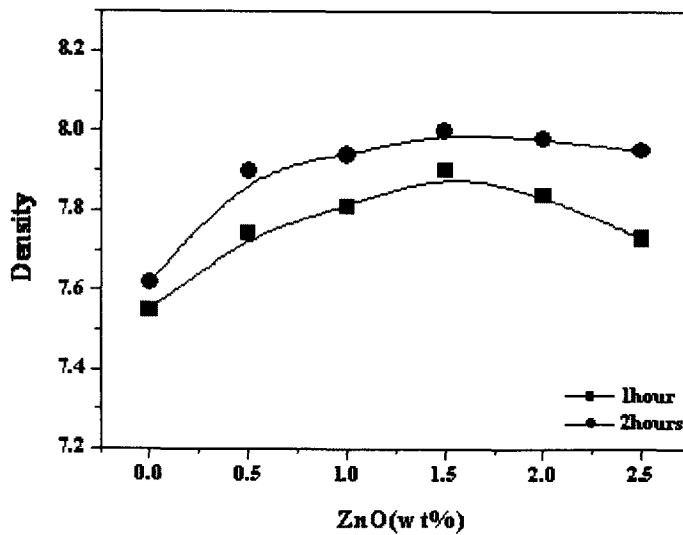


그림 3.1.3. Density of the PMW-PNN-PZT + 0.1 wt% Y_2O_3 and x wt% ZnO ceramics sintered at 900°C for 1h or 2h

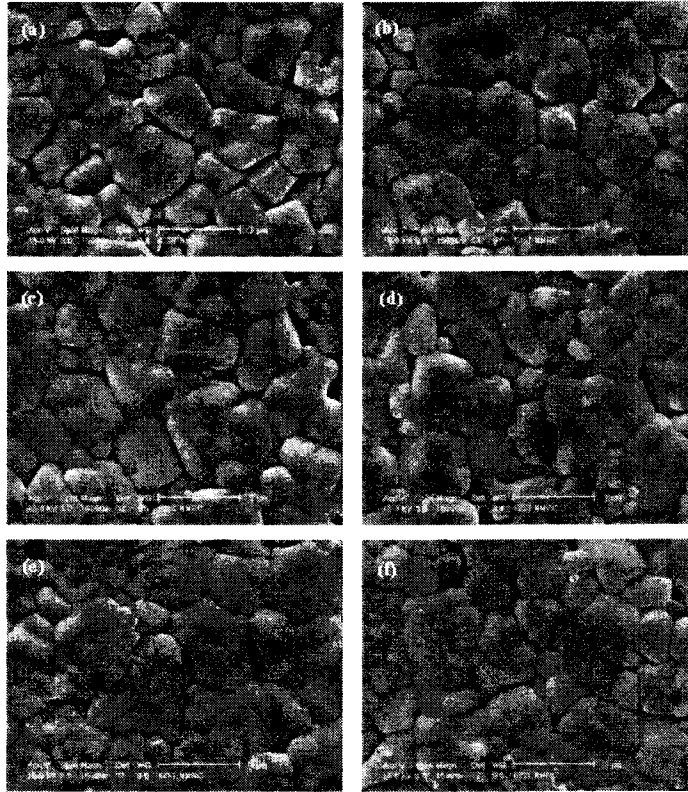


그림 3.1.4 SEM images of PMW-PNN-PZT + 0.1 wt% Y_2O_3 ceramics with various ZnO contents sintered at 900°C for 2h (a) 0wt%, (b) 0.5 wt%, (c) 1.0 wt%, (d) 1.5 wt%, (e) 2.0 wt%, (f) 2.5 wt%

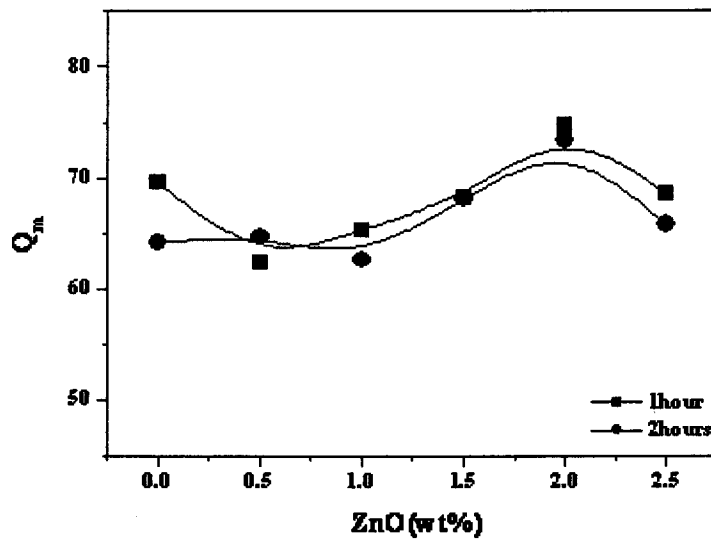


그림 3.1.5. Mechanical quality factor (Q_m) of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 900 °C for 1h or 2h

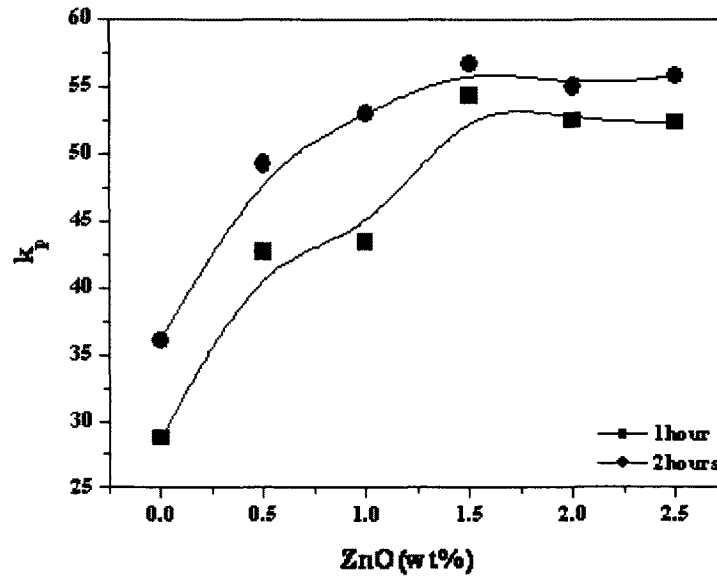


그림 3.1.6. Electromechanical coupling factor (K_p) of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 900 °C for 1h or 2h

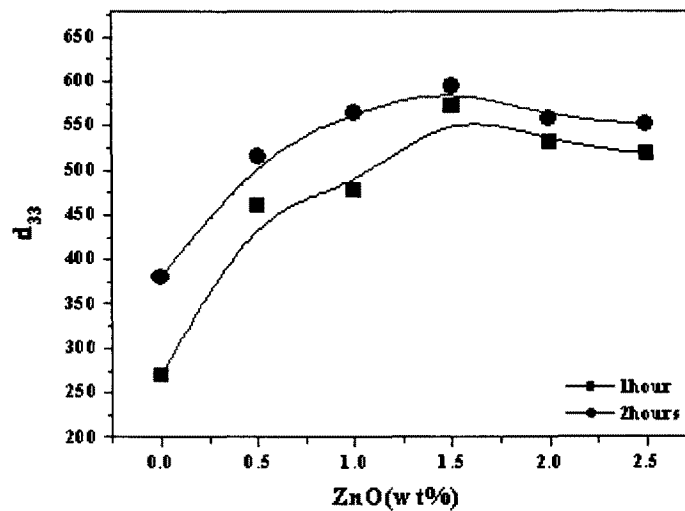


그림 3.1.7. Piezoelectric constant (d_{33}) of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 900 °C for 1h or 2h

나. 소결 온도에 따른 특성

Fig. 3.1.8은 소결 온도에 따른 밀도 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 온도에서 900 °C의 결과와 마찬가지로 ZnO 첨가량에 따라 특성이 증가하였으며, 1.5 wt%에서 가장 높은 밀도 값을 나타내었다. 또한 850 °C 와 860 °C 에서 ZnO 첨가하지 않았을 때를 제외하고 모

든 조건에서 비교적 높은 밀도가 나타났다.

1.5 wt% ZnO 첨가하고 850 ~ 900 °C 온도에서 소결한 세라믹스의 미세구조를 Fig. 3.1.9에 나타내었다. 소결 온도가 증가할수록 그레인 크기가 커지며, 미세하게 기공이 감소함을 알 수 있다. 이는 소결 온도가 증가함에 따른 밀도 변화에서의 결과와 일치한다.

Fig. 3.1.10은 소결 온도에 따른 기계적 품질계수를 나타낸 그래프이다. 모든 온도 및 첨가량에서 큰 변화 없이 비슷한 값을 나타내었다.

소결 온도에 따른 전기-기계 결합계수를 Fig 3.1.11에 나타내었다. 모든 온도에서 ZnO 첨가량이 증가할수록 특성이 증가하였으며, 1.0 wt% 이상 첨가하였을 때부터, 차이가 나지 않았다.

Fig. 3.1.12는 소결 온도에 따른 압전 상수를 나타낸 그래프이다. 이 역시 모든 온도에서 ZnO 첨가량이 증가할수록 특성이 증가하였다. 그러나, ZnO 첨가량이 2.0 wt% 이상부터는 미세하게 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 ZnO의 과첨가로 인해 과잉 소결된 것으로 생각된다.

모든 온도 조건에서 1.5 wt% ZnO 를 첨가하였을 때, 가장 높은 특성 값을 나타내었으며, 온도 감소에도 불구하고 특성의 저하는 비교적 미미하였다.

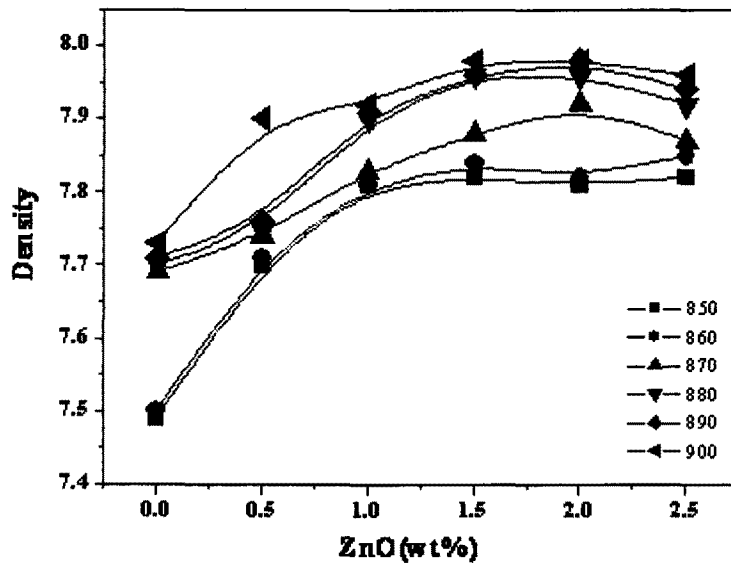


그림 3.1.8. Density of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 850 ~ 900 °C for 2h

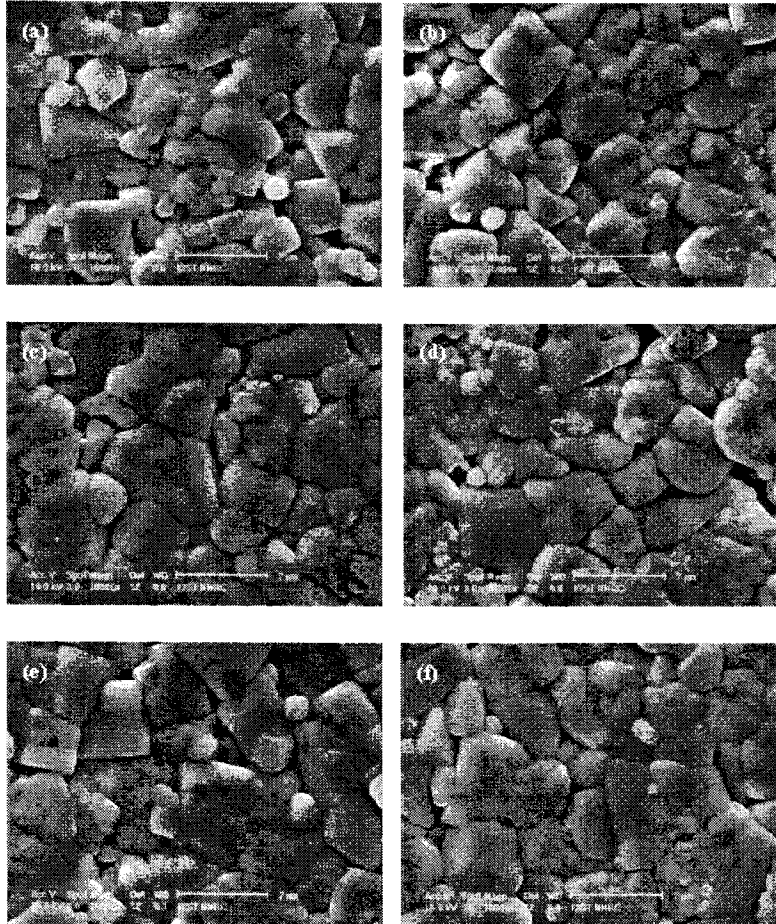


그림 3.1.9. SEM images of PMW-PNN-PZT + 0.1 wt% Y_2O_3 ZnO ceramics sintered at 850 ~ 900 °C for 2h :(a) 850 °C, (b) 860 °C, (c) 870 °C, (d) 880 °C, (e) 890 °C, (f) 900°C

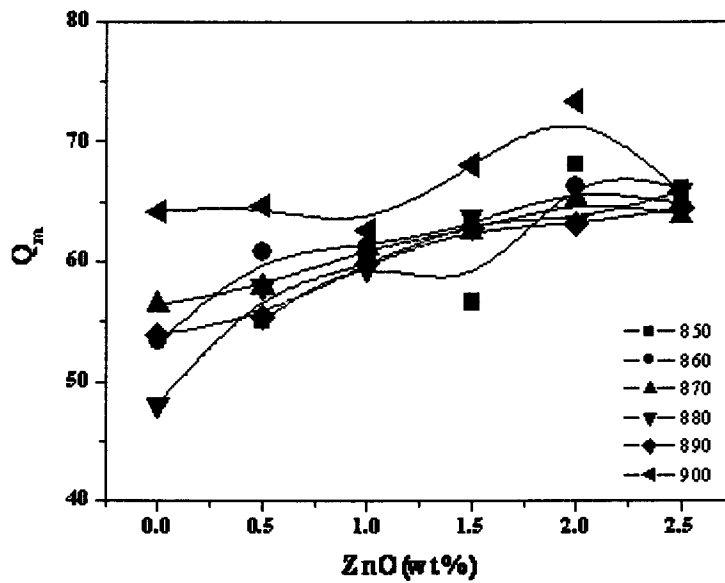


그림 3.1.10. Mechanical quality factor (Q_m) of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 850 ~ 900 °C for 2h

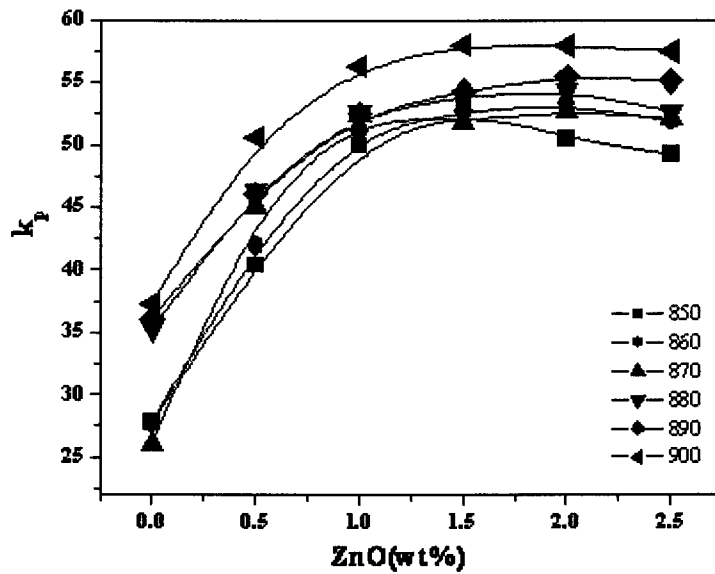


그림 3.1.11. Electromechanical coupling factor (k_p) of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 850 ~ 900 °C for 2h

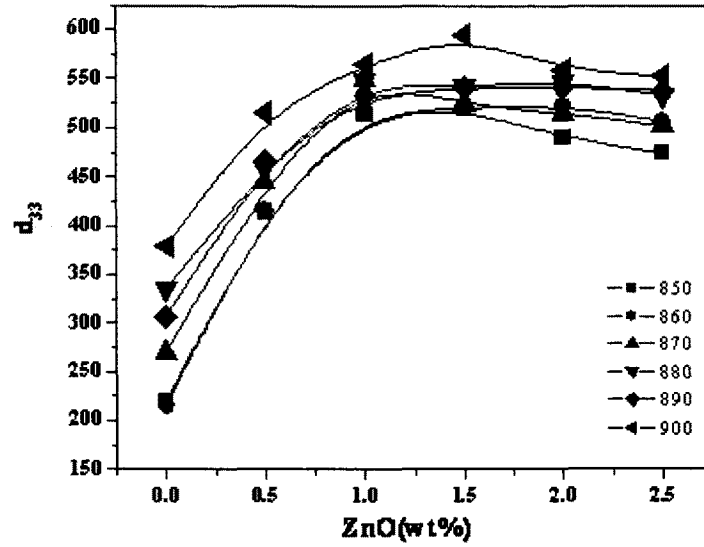


그림 3.1.12. Piezoelectric constant (d_{33}) of PMW-PNN-PZT ceramics with 0.1 wt% Y_2O_3 and various ZnO contents sintered at 850 ~ 900 °C for 2h

결론적으로 전방향성 초음파 액츄에이터의 세라믹으로 1.5 wt% ZnO를 첨가하였을 때 소결성, 압전 특성이 가장 좋은 값을 나타내었고 고품질의 저온 소결 압전 세라믹스의 제조가 성공적으로 이루어 졌다.

3.2. 압전 진동자

선형 초음파 모터의 돌출부에서 큰 타원 궤적을 발생시키기 위해서는 압전 세라믹스에서 발생하는 종방향 진동을 확대시키는 액츄에이터가 필요하다. 본 논문에서는 란쥬반(langevin) 진동자와 혼(horn)이 결합된 구조의 액츄에이터를 이용해 진동을 확대시켰다.

란쥬반 진동자는 2개의 압전체 양쪽에 탄성체를 볼트로 결합한 구조로서 $\lambda/2$ 모드로 동작을 하면 압전 세라믹스에서 발생하는 종방향 진동이 진동자의 끝에서 약 5-10배정도 확대된다. 또한 그림 3.2.1에서와 같이 란쥬반 진동자와 동일한 $\lambda/2$ 길이의 혼을 연결하면 혼의 위, 아래 단면적의 비율만큼 진동이 증폭된다. 이와 같이 λ 모드를 갖는 진동자를 $\lambda/2$ 모드로 구동시키면 동작주파수가 1/2로 감소하기 때문에 발생력이 증가하고 진동속도는 감소한다. 따라서 선형 초음파 모터를 정밀 위치제어용으로 사용하기 위해서는 관성(inertial)의 영향이 적은 $\lambda/2$ 모드가 적합하다.

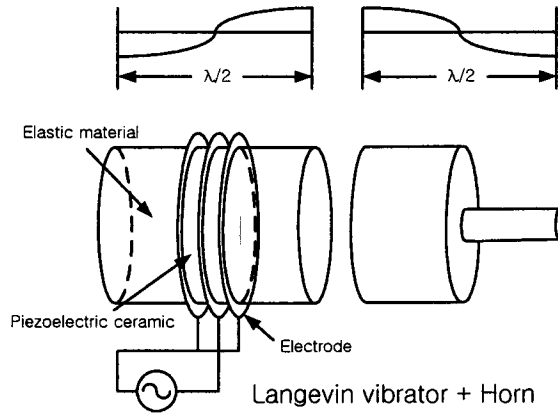


그림 3.2.1 란쥬반 진동자와 혼의 구조

반과장 진동자의 구동원리는 다음의 수식으로 표현된다. 반과장 진동자는 그림 3.2.2와 같이 압전 진동자를 볼트로 조인 구조로 e 형식 압전 방정식으로 설명된다.

$$D = e_{33}S + \epsilon_{33}^S E, \tag{1}$$

$$T = c_{33}^E S - e_{33} E. \tag{2}$$

여기서 D : 전속밀도(electric flux density), S : 외형률(strain)

E : 전계(electric field), T : 응력(stress)

e_{33} : 압전상수(piezoelectric constant)

c_{33}^E : 전계가 일정할 때의 탄성계수(elastic stiffness)

ϵ_{33}^S : 외형률이 일정할 때의 유전율(dielectric constant)

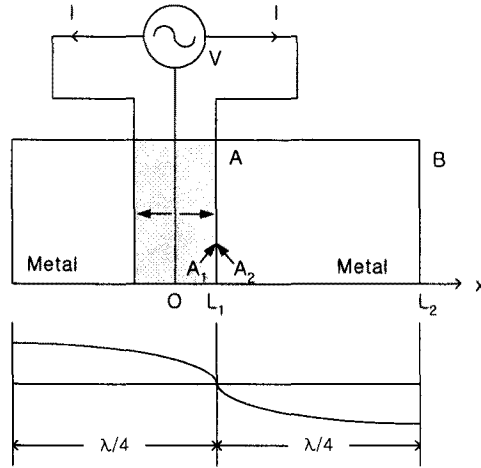


그림 3.2.2 반과장 진동자

그림에서 $x=0 \sim L_1$ 구간은 압전 세라믹스이고 $x=L_1 \sim L_2$ 는 $\lambda/4$ 로 진동하는 탄성체이다. 압전 세라믹스의 입자변위를 $u(x,t)$ 라고 하면 시정현계에서 입자 속도는 $c = \frac{\partial u}{\partial t} = j \omega u$

이므로 변형률은 $S = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{j \omega} \frac{\partial c}{\partial x}$ 이다.

식 (1)의 압전 방정식을 x 에 관해 적분하면 식 (3)과 같다. 이때 $x=L_1$ 에서 변위가 "0" 이므로 U_A 는 0이다.

$$\int_{x=0}^{x=L_1} D \, dx = \int_{x=0}^{x=L_1} [e_{33}S + \epsilon_{33}^S E] \, dx = \int_{x=0}^{x=L_1} \left[e_{33} \frac{\partial u}{\partial x} + \epsilon_{33}^S E \right] \, dx,$$

$$DL_1 = e_{33}(U_A - U_0) + \epsilon_{33}^S EL_1 = -e_{33}U_0 + \epsilon_{33}^S EL_1,$$

$$\therefore D = -\frac{e_{33}c_{10}}{j\omega L_1} + \epsilon_{33}^S \frac{V}{L_1}. \quad (3)$$

여기서 c_{10} : 단면 0에서의 입자속도

U_0 : 단면 0에서의 입자변위

U_A : 단면 A에서의 입자변위

한쪽 진동자에 유입되는 전류 I는 식 (2-3)의 전속밀도를 시간에 대해 미분한 후 면적분을 하면 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
I &= \int_{A_1} \frac{\partial D}{\partial t} dA = \int_{A_1} j\omega \left(-\frac{e_{33}c_{10}}{j\omega L_1} + \epsilon_{33}^S \frac{V}{L_1} \right) dA \\
&= j\omega \left[-\frac{e_{33}c_{10}}{j\omega L_1} + \epsilon_{33}^S \frac{V}{L_1} \right] A_1 = -\frac{e_{33}A_1}{L_1} c_{10} + j\omega C_d V. \quad (4)
\end{aligned}$$

여기서 $A_1 : x=L_1$ 에서 세라믹스의 단면적

$$C_d \left(= \frac{\epsilon_{33}^S A_1}{L_1} \right) : \text{압전 진동자 하나의 커패시턴스}$$

단면 A에서의 변형을 $S_{1A} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_A = \frac{1}{j\omega} \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_A = \frac{1}{j\omega} \frac{\partial c_{1A}}{\partial x}$ 을 식 (2)에 적용하면 A면에 작용하는 힘은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
F_{1A} &= A_1 T_A = A_1 [c_{33}^E S_{1A} - e_{33} E_A] = A_1 \left[\frac{c_{33}^E}{j\omega} \frac{\partial c_{1A}}{\partial x} - e_{33} \frac{V}{L_1} \right], \\
F_{1A} &= \frac{c_{33}^E A_1}{j\omega} \frac{\partial c_{1A}}{\partial x} - e_{33} A_1 \frac{V}{L_1}. \quad (5)
\end{aligned}$$

식 (2-1)을 식 (2-2)에 대입하면 식 (2-6)과 같다.

$$\begin{aligned}
S &= \frac{1}{c_{33}^E} (T + e_{33} E) = \frac{1}{c_{33}^D \{1 - e_{33}^2 / (\epsilon_{33}^S c_{33}^D)\}} \left(T + e_{33} \frac{D - e_{33} S}{\epsilon_{33}^S} \right), \\
\therefore S &= \frac{1}{c_{33}^D} T + \frac{e_{33}}{c_{33}^D \epsilon_{33}^S} D = \frac{1}{c_{33}^D} T g_{33} D. \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\text{여기서 } c_{33}^E = c_{33}^D \left(1 - \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S c_{33}^D} \right), \quad g_{33} = \frac{e_{33}}{c_{33}^D \epsilon_{33}^S}$$

진동자의 파동방정식은 뉴턴(Newton) 운동법칙으로부터 구해진다.

$$F = \rho \, dx \, dy \, dz \, \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \, dx \right) \, dy \, dz,$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \{ c_{33}^D (S - g_{33} D) \} = c_{33}^D \left(\frac{\partial S}{\partial x} - g_{33} \frac{\partial D}{\partial x} \right) = c_{33}^D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

$$\therefore \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\rho}{c_{33}^D} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0.$$

이때 압전 세라믹스의 전속밀도는 일정하기 때문에 $\frac{\partial D}{\partial x} = 0$ 이다. 또한 시정현계에서

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -w^2 u \text{이므로} \quad \gamma^2 = - \left(w^2 \frac{\rho}{c_{33}^D} \right) = - \left(\frac{w}{v^D} \right)^2 \text{라고 하면 파동방정식은}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \gamma^2 u = 0 \text{이 된다. 이 파동방정식의 특성근 } \pm \gamma \text{으로부터 구해진 입자변위 } u(x,t) \text{와}$$

입자속도 $c(x,t)$ 는 식 (7), (8)과 같다.

$$u(x,t) = (Ae^{-\gamma x} + Be^{+\gamma x})e^{j\omega t}, \quad (7)$$

$$c(x,t) = \frac{\partial u}{\partial t} = j\omega u(x,t) = j\omega (Ae^{-\gamma x} + Be^{+\gamma x})e^{j\omega t}. \quad (8)$$

$0 \leq x \leq L_1$ 구간에서 압전 세라믹스의 힘(F_1)과 입자속도(c_1)는 경계면 $x=L_1$ 에서의 반사와 투과를 고려할 때 시간항을 제외하면 식 (9), (10)과 같이 표현된다.

$$F_1 = (F_1^+ e^{-\gamma x} + F_1^- e^{+\gamma x}), \quad (9)$$

$$c_1 = -\frac{F_1}{Z_{01}} = -\frac{1}{Z_{01}} (F_1^+ e^{-\gamma x} + F_1^- e^{+\gamma x}). \quad (10)$$

여기서 Z_{01} : 세라믹스의 음향 임피던스(acoustic impedance)

동일한 방법으로 $L_1 \leq x \leq L_2$ 인 금속에서의 힘(F_2)과 속도(c_2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_2 = (F_2^+ e^{-\gamma_2 x} + F_2^- e^{+\gamma_2 x}), \quad (11)$$

$$c_2 = -\frac{F_2}{Z_{02}} = -\frac{1}{Z_{02}} (F_2^+ e^{-\gamma_2 x} + F_2^- e^{+\gamma_2 x}). \quad (12)$$

금속에서 A면($x=L_1$)의 힘(F_{2A})과 B면($x=L_1+L_2$)의 힘(F_{2B})은 각각 다음과 같다.

$$F_{2A} = F_2^+ e^{-\gamma_2 L_1} + F_2^- e^{+\gamma_2 L_1},$$

$$F_{2B} = F_2^+ e^{-\gamma_2(L_1+L_2)} + F_2^- e^{+\gamma_2(L_1+L_2)}.$$

또한 이것의 비(ratio)인 $\frac{F_{2B}}{F_{2A}}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{F_{2B}}{F_{2A}} = \frac{F_2^+ e^{-\gamma_2(L_1+L_2)} + F_2^- e^{+\gamma_2(L_1+L_2)}}{F_2^+ e^{-\gamma_2(L_1)} + F_2^- e^{+\gamma_2(L_1)}}.$$

$x=L_1+L_2$ 의 입자속도가 0인 경우(고정된 상태) 식 (12)는

$$\frac{F_2^-}{F_2^+} = \frac{e^{-\gamma_2(L_1+L_2)}}{e^{+\gamma_2(L_1+L_2)}} = e^{-2\gamma_2(L_1+L_2)}.$$

이고 이 식을 $\frac{F_{2B}}{F_{2A}}$ 에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{F_{2B}}{F_{2A}} &= \frac{F_2^+ [e^{-\gamma_2(L_1+L_2)} + e^{-2\gamma_2(L_1+L_2)} e^{+\gamma_2(L_1+L_2)}]}{F_2^+ [e^{-\gamma_2(L_1)} + e^{-2\gamma_2(L_1+L_2)} e^{+\gamma_2(L_1)}]} \\ &= \frac{2}{e^{+\gamma_2(L_2)} + e^{-\gamma_2(L_2)}} = \frac{1}{\cosh(\gamma_2 L_2)}. \end{aligned}$$

외부 영향에 의한 별도의 변형률이 없으면 A면에서의 왜형률은 $S=0$ 이므로 식 (6)에서 인가전압 V 에 의해 세라믹스의 A면에 작용하는 힘 (F_{1A})은 다음과 같다.

$$T = c_{33}^E S - e_{33} E = -e_{33} E = -e_{33} \frac{V}{L_1}$$

$$\therefore F_{1A} = e_{33} \frac{V}{L_1} A_1.$$

이 힘은 금속의 A면에 작용하는 힘 F_{2A} 와 동일하므로 식 (13)과 같은 관계식이 성립된다.

$$F_{1A} = e_{33} \frac{V}{L_1} A_1 = F_{2A}, \quad \therefore V = \frac{L_1 F_{2A}}{e_{33} A_1}. \quad (13)$$

따라서 인가전압(V)과 금속의 B면에서의 힘(F_{2B})의 비, 또는 입력전류(I)와 금속의 B면에서의 입자속도(c_{2B})의 비인 역계수(force coefficient) α 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\text{힘}}{\text{전압}} = \frac{F_{2B}}{V} = \frac{F_{2B}}{L_1 F_{2A} / (e_{33} A_1)} \\ &= \frac{e_{33} A_1}{L_1 \cosh(\gamma_2 L_2)} = \frac{\text{전류}}{\text{입자속도}} = \frac{I}{c_{2B}}. \end{aligned}$$

결론적으로 역계수 α 를 이용해 압전 세라믹스에 인가되는 전압, 전류로부터 반파장 진동자의 양끝단에서 발생하는 힘과 속도를 구할 수 있다.

선형 초음파 모터의 진동빔(shaking beam) 액츄에이터는 그림 3.2.3에서와 같이 타원 궤적이 발생하는 평판(plate)의 동작과 동일하므로 일반적인 초음파 모터의 구동원리로부터 설명될 수 있다.

그림 3.2.3과 같이 평판 표면상의 질점의 동작을 살펴보면 평판 표면상의 임의의 점 $A_0(x_0, y_0)$ 에서 $A_1(x_1, y_1)$ 로 변위할 때 x 방향의 변위를 x_a , y 방향의 변위를 y_a , 굴곡각을 θ_1 , 그리고 평판의 1/2 두께를 d 라고 하면 단면이 일정한 탄성체의 굴곡진동에 관한 파동방정식은 다음과 같이 표현된다[10].

$$\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} + \frac{YI}{\rho A} \frac{\partial^4 \xi(x, t)}{\partial x^4} = 0,$$

또는

$$k^2 \frac{\partial^4 \xi(x, t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (14)$$

여기서 $\xi(x, t)$: 탄성체 표면상 질점의 진동진폭

Y : 탄성체의 영율(Young's modulus)

I : 관성 모멘트(inertia moment)

A : 탄성체의 단면적(surface area)

ρ : 탄성체의 밀도(density)

$$k^2 : \frac{YI}{\rho A}$$

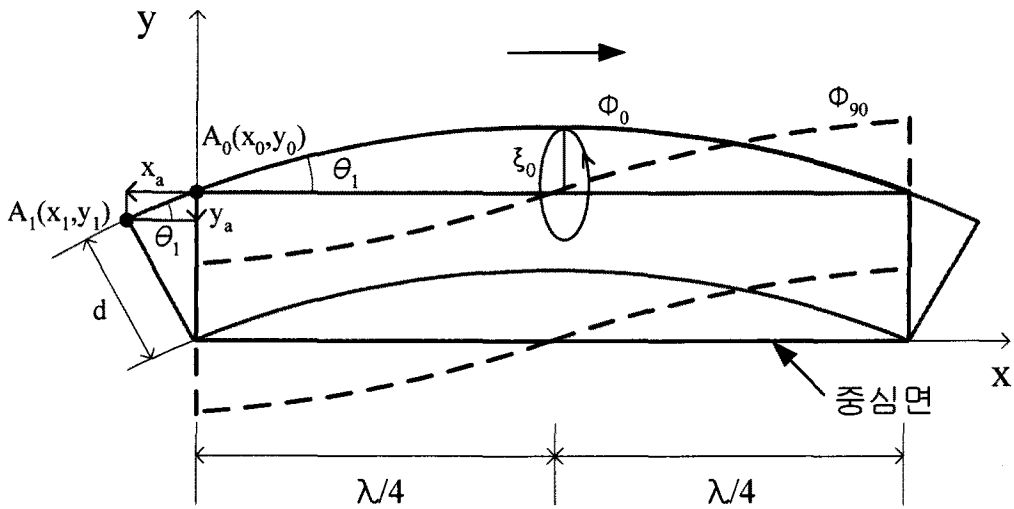


그림 3.2.3 평판의 운동

식 (14)의 해를 $\xi(x,t)=X(x)T(t)$ 로 변수 분리하여 대입하면 다음과 같다.

$$k^2 T \frac{d^4 X}{dx^4} + X \frac{d^2 T}{dt^2} = 0. \quad (15)$$

식 (15)의 양변을 XT 로 나누면 식 (16)과 같다.

$$\frac{k^2}{X} \frac{d^4 X}{dx^4} = -\frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2}. \quad (16)$$

식 (16)에서 t, x 가 독립적으로 변해도 항상 성립하려면 양변이 상수이어야 하므로 그 상수를 p^2 이라 놓으면 식 (17), (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{k^2}{X} \frac{d^4 X}{dx^4} = p^2, \quad \therefore \frac{d^4 X}{dx^4} - \frac{p^2}{k^2} X = 0. \quad (17)$$

$$-\frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = p^2, \quad \therefore \frac{d^2 T}{dt^2} + p^2 T = 0. \quad (18)$$

식 (18)의 해는

$$T(t) = A \cos(pt) + B \sin(pt). \quad (19)$$

이다. 그리고 식 (17)의 특성근은 다음과 같다.

$$s^4 - \frac{p^2}{k^2} = 0, \quad \left(s - \sqrt{\frac{p}{k}}\right)\left(s + \sqrt{\frac{p}{k}}\right)\left(s^2 + \frac{p}{k}\right) = 0,$$

$$\therefore s = \sqrt{\frac{p}{k}}, \quad s = -\sqrt{\frac{p}{k}}, \quad s = j\sqrt{\frac{p}{k}}, \quad s = -j\sqrt{\frac{p}{k}}.$$

$\sqrt{\frac{p}{k}} = q$ 라 놓으면 식 (17)의 해는 $e^{\pm qx} = \cosh(qx) + \sinh(qx)$ 와 공액 복소수 $\pm jq$ 의 일반해인 $A \cos(qx) + B \sin(qx)$ 로 부터

$$X(x) = C_1 \cos(qx) + C_2 \sin(qx) + C_3 \cosh(qx) + C_4 \sinh(qx),$$

또는

$$\begin{aligned} X(x) = & K_1 [\cos(qx) + \cosh(qx)] + K_2 [\sin(qx) + \sinh(qx)] \\ & + K_3 [\cos(qx) - \cosh(qx)] + K_4 [\sin(qx) - \sinh(qx)] \end{aligned} \quad (20)$$

으로 나타낼 수 있다. 식 (20)을 미분하면

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dx} = & qK_1 [-\sin(qx) + \sinh(qx)] + qK_2 [\cos(qx) + \cosh(qx)] \\ & + qK_3 [-\sin(qx) - \sinh(qx)] + qK_4 [\cos(qx) - \cosh(qx)], \\ \frac{d^2X}{dx^2} = & q^2 K_1 [-\cos(qx) + \cosh(qx)] + q^2 K_2 [-\sin(qx) + \sinh(qx)] \\ & + q^2 K_3 [-\cos(qx) - \cosh(qx)] + q^2 K_4 [-\sin(qx) - \sinh(qx)] \end{aligned} \quad (21)$$

이고, 그림 3.2.3의 굴곡진동에서 $x=0$, $x=\lambda/2$ 인 곳은 진동과 Bending moment가 0이므로 경계조건은 다음과 같다.

$$X|_{x=0} = 0, \quad X|_{x=\lambda/2} = 0, \quad \frac{d^2X}{dx^2}|_{x=0} = 0, \quad \frac{d^2X}{dx^2}|_{x=\lambda/2} = 0.$$

이 조건을 식 (20), (21)에 대입하면 다음과 같이 상수 K_1, K_2, K_3, K_4 를 구할 수 있다.

$$X(x) |_{x=0} = 2K_1 = 0, \quad \therefore K_1 = 0.$$

$$\frac{d^2X}{dx^2} |_{x=0} = -2q^2K_3 = 0, \quad \therefore K_3 = 0.$$

$$X(x) |_{x=\lambda/2} = K_2[\sin(q\lambda/2) + \sinh(q\lambda/2)] \quad (22)$$

$$+ K_4[\sin(q\lambda/2) - \sinh(q\lambda/2)] = 0.$$

$$\frac{d^2X}{dx^2} |_{x=\lambda/2} = q^2K_2[-\sin(q\lambda/2) + \sinh(q\lambda/2)]$$

$$+ q^2K_4[-\sin(q\lambda/2) - \sinh(q\lambda/2)] = 0.$$

(23)

$$2K_2\sinh(q\lambda/2) - 2K_4\sinh(q\lambda/2) = 0, \quad \therefore K_2 = K_4.$$

식 (20)에 상수 K_1, K_2, K_3, K_4 를 대입하면 식 (2-24)와 같다.

$$X(x) = K_2[\sin(qx) + \sinh(qx)] + K_2[\sin(qx) - \sinh(qx)] \quad (24)$$

$$= K\sin(qx).$$

q 는 경계조건 $X(x) |_{x=\lambda/2} = 0$ 에서 구할 수 있다.

$$X(x) |_{x=\lambda/2} = K\sin(qx) |_{x=\lambda/2} = 0,$$

$$\therefore q \frac{\lambda}{2} = \pi \quad \text{또는} \quad q = \frac{2\pi}{\lambda}$$

그림 3.2.3에서 $x=0, x=\lambda/2$ 인 곳에 진동이 없는 경우 식 (20)의 해는 다음과 같다.

$$X(x) = K\sin(qx) = K\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right). \quad (25)$$

따라서 파동방정식의 일반해는 식 (26)과 같다.

$$\xi(x,t) = X(x)T(t) \equiv K\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)[A\cos(pt) + B\sin(pt)]. \quad (26)$$

이 식에서 입력 교류전압의 주기와 주파수를 각각 T, f 라 하고 진동자를 반파장 모드로 구동시키면 $x=\lambda/4$ 인 곳의 변위는 $t=0$ 일 때 0이고 $t=T/4$ 일 때는 최대 변위 ξ_0 이므로 이 조건을 이용해 식 (2-26)의 상수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\xi(x, t) \Big|_{x=\lambda/4, t=0} &= K \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) [A \cos(pt) + B \sin(pt)] \Big|_{x=\lambda/4, t=0} \\ &= AK = 0.\end{aligned}$$

이때 $K=0$ 이면 무의미하므로 $A=0$ 이다. 따라서 최대변위 ξ_0 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\xi_0 = \xi(x, t) \Big|_{x=\lambda/4, t=T/4} &= \left[K \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \{B \sin(pt)\} \right] \Big|_{x=\lambda/4, t=T/4} \\ &= KB \sin\left(p \frac{T}{4}\right).\end{aligned}$$

위의 식에서 $KB=\xi_0$, $\sin\left(p \frac{T}{4}\right) = 1$ 이므로 다음의 관계식이 성립한다.

$$p \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}, \quad p = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega.$$

따라서 그림 3.2.3과 같은 평판에서 y 방향의 변위 $\xi(x, t)$ 는 식(27)과 같이 정재파가 된다.

$$\xi(x, t) = X(x)T(t) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \sin(\omega t). \quad (27)$$

특히, 굴곡의 크기가 매우 작으므로

$$\tan \theta_1 \approx \theta_1 \approx \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \approx \frac{dy}{dx} = \xi_0 \frac{2\pi}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \sin(\omega t).$$

이고 y 축과 x 축 방향의 변위는 각각 다음과 같다.

$$y_a = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \sin(\omega t), \quad (28)$$

$$x_a = -d \sin \theta_1 \approx -\theta_1 d = -\xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \sin(\omega t). \quad (29)$$

초음파 모터는 0° 정재파와 90° 정재파의 합성파로 구동되므로 90° 의 위상차를 갖는

정재파에 의한 질점 $A_0(x_0, y_0)$ 의 변위는 식 (2-28), (2-29)의 sine과 cosine을 각각 cosine, sine으로 치환한 것과 같다.

$$x_b = +\xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos(wt), \quad (30)$$

$$y_b = \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos(wt). \quad (31)$$

두 정재파 Φ_0, Φ_{90} 에 의해 나타나는 X축 및 Y축의 변위는 다음과 같다.

$$X = x_a + x_b$$

$$= -\xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \sin(wt) + \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos(wt),$$

$$\therefore X = \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - wt\right). \quad (32)$$

$$Y = y_a + y_b$$

$$= \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_0\right) \sin(wt) + \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_0\right) \cos(wt),$$

$$\therefore Y = \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - wt\right). \quad (33)$$

식 (32)와 식 (33)은 다음과 같이 타원 방정식으로 표현된다.

$$\sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - wt\right) + \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - wt\right) = \frac{X^2}{\left(\xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda}\right)^2} + \frac{Y^2}{\xi_0^2} = 1. \quad (34)$$

여기서 $\xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} < \xi_0$ 이므로 평판상의 한 질점은 평행한 횡진동($\xi_0 \cdot 2\pi d/\lambda$)과 수직방향의 종진동(ξ_0)으로 인한 타원진동을 하게되며, 그 평판과 접촉되어 있는 이동자는 이 타원진동에 의해 이동하게 된다.

시간에 따라 평판상의 질점인 $x = \frac{\lambda}{4}$ 에서 발생하는 변위는 다음과 같이 계산되며 그림 3.2.4는 이를 순차적으로 나타낸 것이다.

(i) $t=0$ 일 때 질점의 위치

$$X_0^{\lambda/4} = \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right) = \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda},$$

$$Y_0^{\lambda/4} = \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4}\right) = 0.$$

(ii) $t=T/4$ 일 때 질점의 위치

$$X_{T/4}^{\lambda/4} = \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} - w \frac{T}{4}\right) = 0,$$

$$Y_{T/4}^{\lambda/4} = \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} - w \frac{T}{4}\right) = \xi_0.$$

(iii) $t=T/2$ 일 때 질점의 위치

$$X_{T/2}^{\lambda/4} = \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} - w \frac{T}{2}\right) = -\xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda},$$

$$Y_{T/2}^{\lambda/4} = \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} - w \frac{T}{2}\right) = 0.$$

(iv) $t=3T/4$ 일 때 질점의 위치

$$X_{3T/4}^{\lambda/4} = \xi_0 \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} - w \frac{3T}{4}\right) = 0,$$

$$Y_{3T/4}^{\lambda/4} = \xi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} - w \frac{3T}{4}\right) = -\xi_0.$$

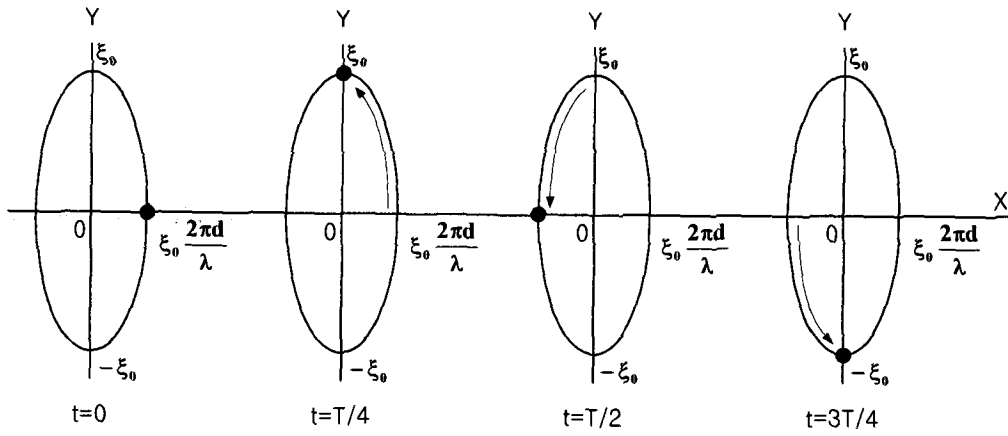


그림 3.2.4 질점의 타원궤적

3.3. 구동회로

압전 선형 초음파 모터를 구동하기 위해서는 양쪽 반과장 진동자의 압전 세라믹스에 고전압의 고주파 전원(300 [V_{p-p}], 50~80 [kHz])이 입력되어야 한다. 따라서 모터의 동특성을 측정하기 위해 고전압의 고주파 전원을 발생시키는 푸시-풀 인버터(push-pull inverter)와 제어회로를 설계하였다.

그림 3.3.1은 초음파 모터 구동 및 제어회로의 블록도이다. 전압 제어 발진기(voltage controlled oscillator, VCO)는 외부에서 인가된 직류전압을 조절함으로써 원하는 발진 주파수를 출력할 수 있게 해주는 장치이다. VCO는 입력 전압(V_f) 변화에 대해 선형적으로 가변되는 출력 주파수(4f)를 발생시키는 소자로 크게 사인파를 출력시키는 발진기와 구형파를 출력시키는 발진기로 구별된다. 그림 3.3.2에서 나타낸 PLL(phase locked loop)은 주파수원이 흔들리지 않도록 정확하게 가변시키는 회로이다. PLL회로에서 Phase Detector(P/D)는 입력된 2 개의 주파수 신호에서 주파수/위상차가 발생하면 그 차이에 해당하는 특정 클럭을 생성시킨다. 그림 3.3.3은 P/D의 출력 펄스 진행 과정이다. 2개 입력 신호의 위상차에 의해 발생한 펄스의 크기는 일정하지만 펄스의 폭과 부호가 바뀌기 때문에 예상된 신호와 실제 출력신호의 차이를 정량적으로 계산할 수 있다.

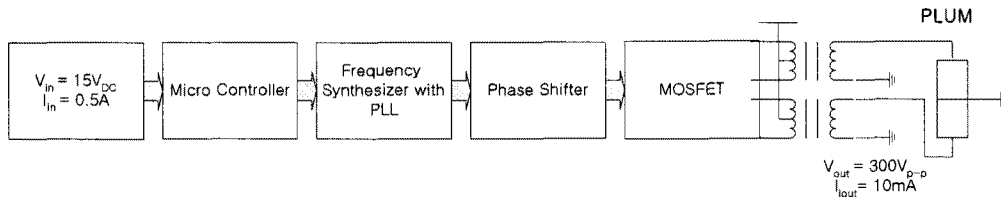


그림 3.3.1 PLUM 구동회로의 블록도

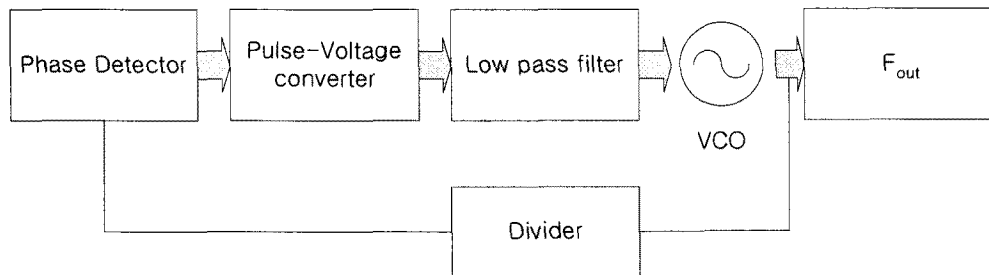


그림 3.3.2 PLL 회로의 블록도

그리고 VCO에는 특정 레벨의 전압만 입력되기 때문에 P/D에서 발생한 펄스 출력은 펄스-전압 변환기에 의해 펄스의 폭만큼 적분된 후 특정 레벨의 전압을 갖는 교류신호로 변환된다. 이처럼 PLL회로는 P/D에서 피드백(feedback)된 출력 주파수와 예상된 주파수의 값을 서로 비교하여 그 차이에 해당하는 펄스를 생성한 후 적절한 전압값으로 변환하여 VCO의 입력에 인가하여 정확한 출력 주파수를 얻을 수 있다.

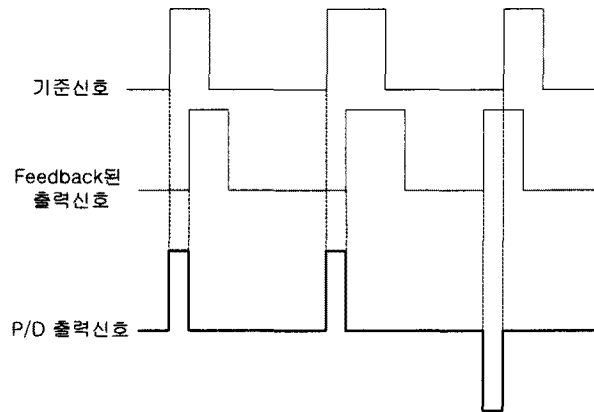


그림 3.3.3 P/D의 출력신호

그림 3.3.4는 푸시-풀 인버터의 구조이다. 푸시-풀 인버터는 그림과 같이 2개의 n-Channel MOSFET과 1개의 중간 탭을 갖는 변압기로 이루어진다. 그림 3.3.5은 푸시-풀 인버터의 동작모드이다. 초음파 모터의 A상에 연결된 푸시-풀 인버터는 MOSFET인 Q_1, Q_2 와 변압기 T_1 으로 구성되어 있고, B상에 연결된 푸시-풀 인버터는 Q_3, Q_4 그리고 T_2 로 구성되어지고 있다. 그림 3.3.7의 출력파형에서 동작 모드는 1주기를 4개로 나누어 mode 1과 mode 3에서는 A상에 전원을 공급하는 푸시-풀 인버터가 동작하고 mode 2와 mode 4에서는 B상에 전원을 공급하는 푸시-풀 인버터가 동작한다. VCO의 출력은 50 [%]의 듀티비를 갖는 펄스파이며 주파수는 초음파 모터에 인가되는 교류 전압의 4배를 갖는다. 또한 VCO의 출력 주파수는 외부 수동소자인 저항 및 콘덴서의 값에 의해 50~90 [kHz] 범위에서 쉽게 조절할 수 있다.

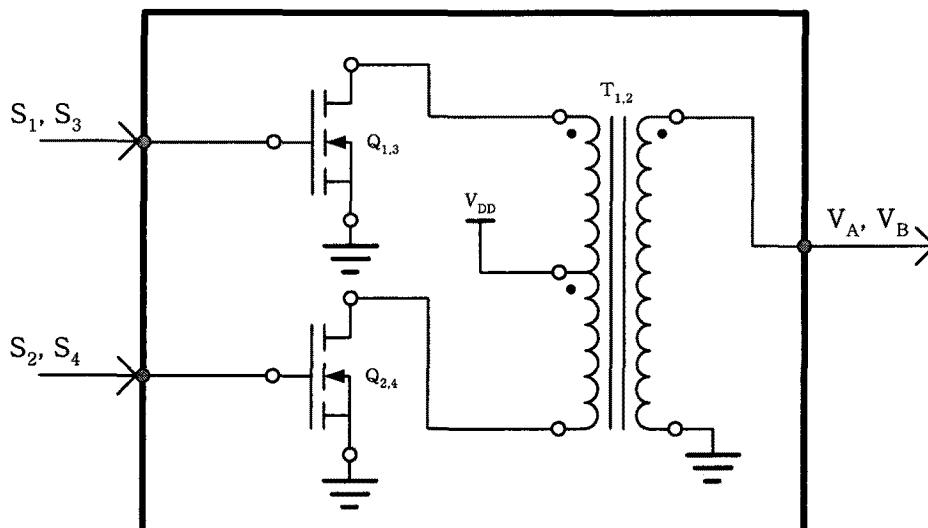


그림 3.3.4 푸시-풀 인버터의 구조

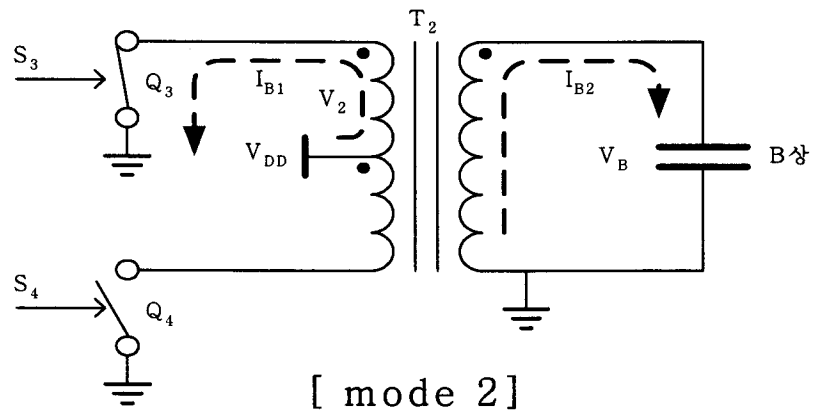
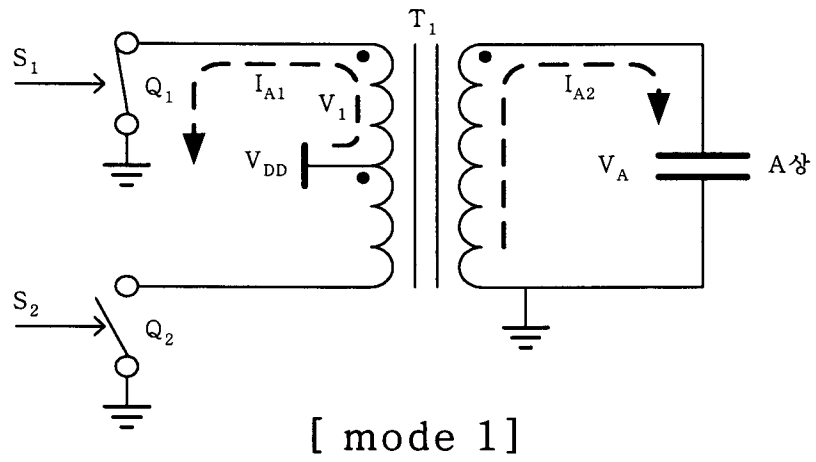
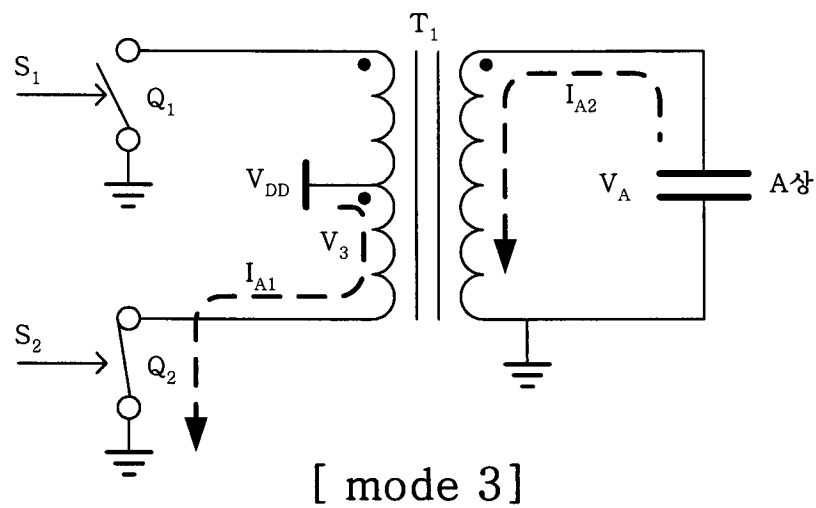


그림 3.3.5 푸시-풀 인버터의 동작



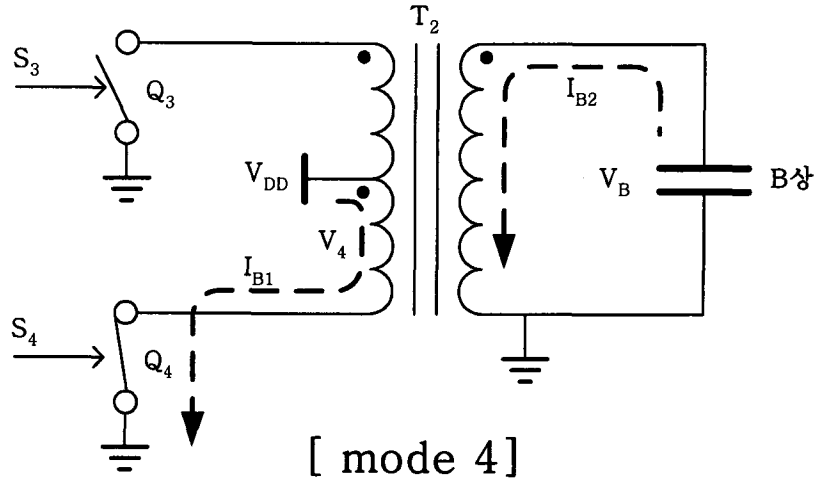


그림 3.36 푸시-풀 인버터의 동작

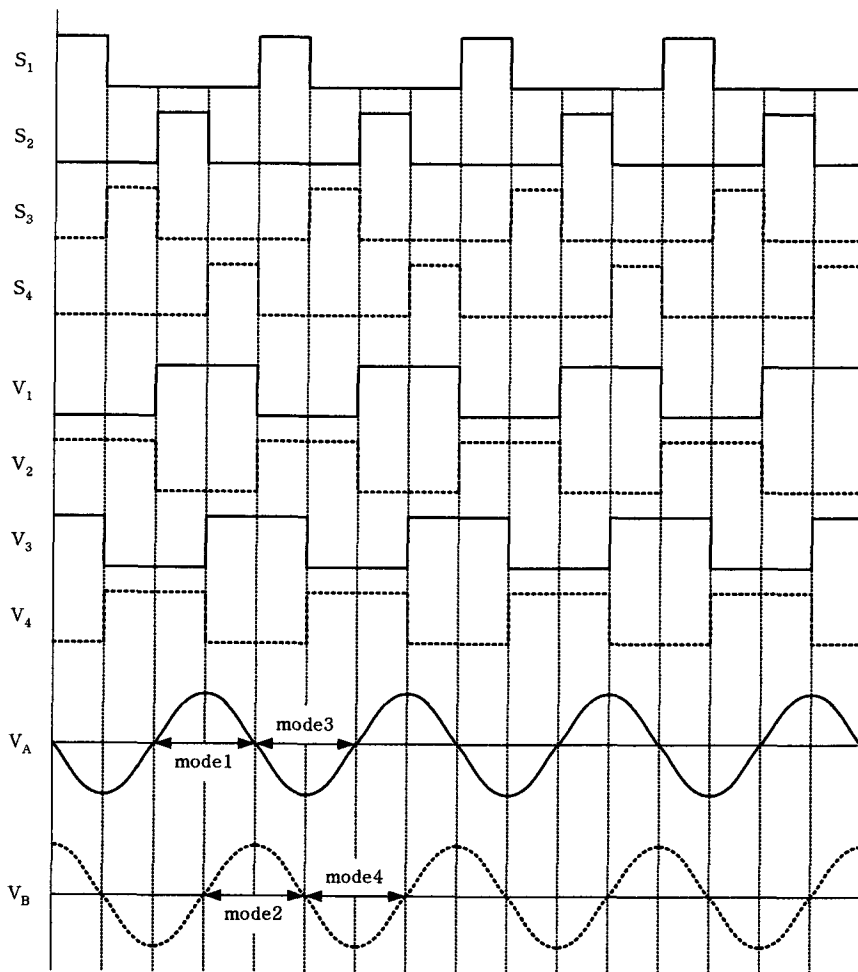


그림 3.37 푸시-풀 인버터의 동작 (출력신호)

3.4 일축 압전 리니어 액츄에이터 설계

3.4.1 선형 초음파 모터의 구동원리

본 연구에서 제안된 선형 초음파 모터는 두께방향 초음파 진동을 하는 두 개의 압전 액츄에이터에 90° 위상차를 갖는 sine과 cosine 교류전원을 각각 인가함으로써 직접 직선 운동을 얻을 수 있고 교류전원의 위상을 바꾸어 줌으로써 정·역의 이동이 가능하다[4].

선형 초음파 모터는 그림 3.4.2에서와 같이 압전 세라믹스에서 발생하는 종방향 진동을 확대하는 두 개의 반파장 진동자(half-wave transducer)와 이동자에 타원형의 진동을 전달하는 진동빔 액츄에이터(shaking beam actuator)로 구성된다. 반파장 진동자(A, B)에 서로 다른 2상을 갖는 고주파 교류 전계를 인가하면 진동빔 액츄에이터의 중앙(C)에 있는 돌출부에서 타원궤적이 형성되고 이와 압착된 이동자는 마찰력에 의해 선형적으로 동작한다.

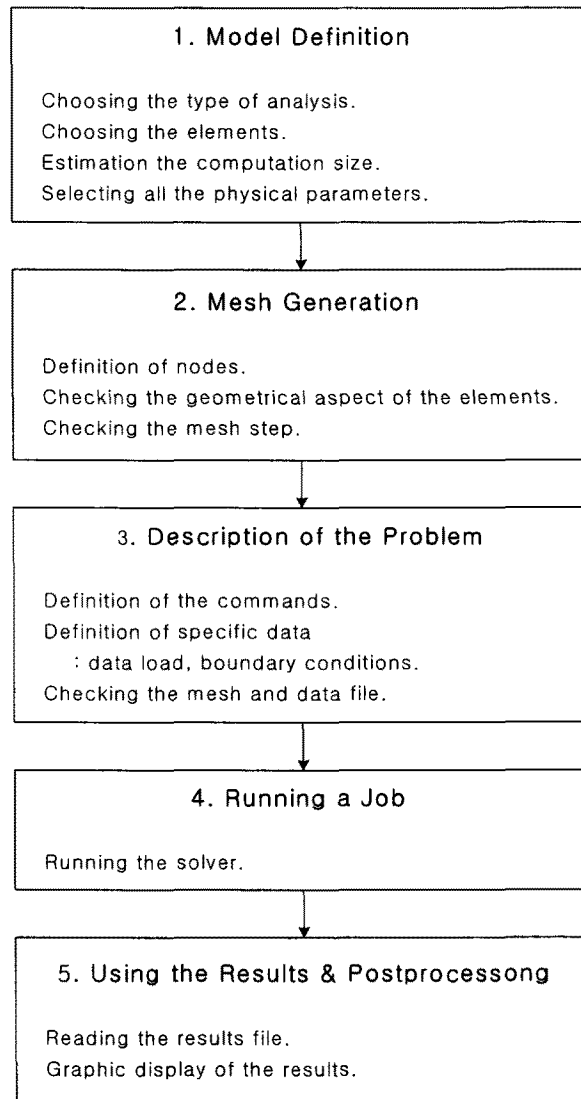


그림 3.4.1 시뮬레이션 순서도

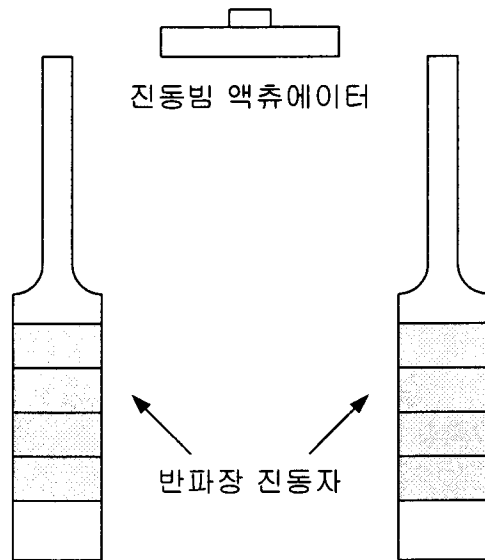
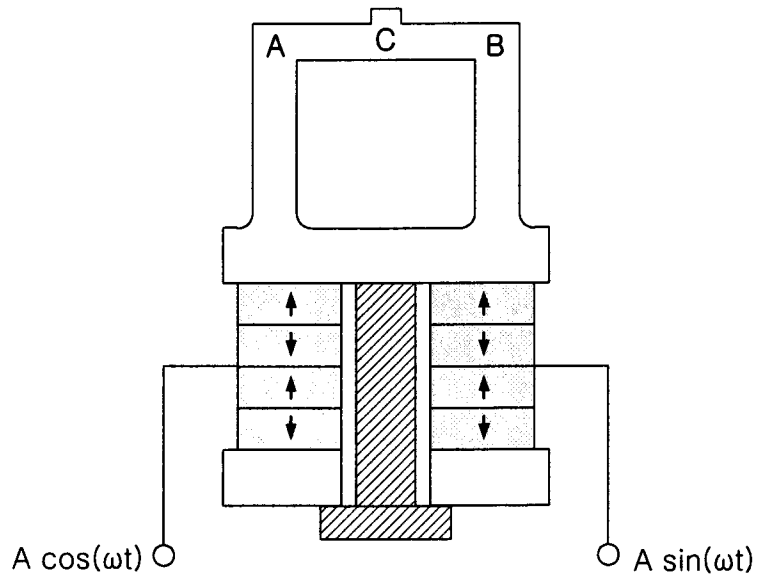


그림 3.4.2 선형 초음파 모터의 구조

그림 3.4.3은 돌출부에서 발생하는 타원 궤적을 순차적으로 나타낸 것이다. $t=T/4$ 일 때 반시계 방향으로 회전하고 $t=T/2$ 에서는 아래로, 그리고 $t=3T/4$ 에서 시계방향으로 회전한 후 $t=T$ 에서 다시 처음 상태로 되돌아온다. 따라서 선형 초음파 모터는 $t=0\sim T/4$ 구간, 즉 전체 동작주기(T)에서 $T/4$ 보다 짧은 시간동안 이동자를 구동시키게 되는 것이다.

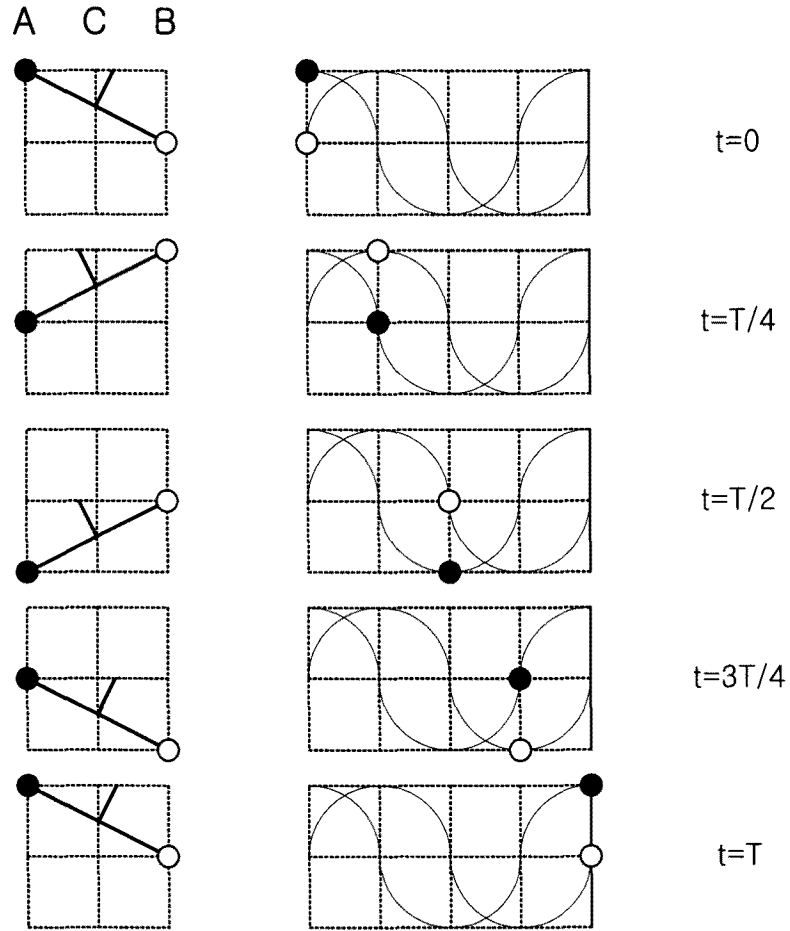


그림 3.4.3 진동빔 액츄에이터의 동작원리

3.4.2 반파장 진동자의 구조 설계

본 장에서는 압전 세라믹스에서 발생된 진동을 확대시키는 반파장 진동자의 변위특성을 해석하고자 혼의 구조, 반파장 진동자를 구성하는 혼(horn)의 위·아래 단면적의 비율, 혼의 길이, 압전 세라믹스의 위치 등에 대해 2 차원 시뮬레이션을 하였다. 설계시 반파장 진동자는 Stainless steel 재질의 금속과 본 논문에서 개발된 PAN-PZT + 0.8wt% Nb₂O₅ + 0.6wt% MnO₂ 세라믹스를 사용하였고 물질상수는 표 3. 1에 나타내었다.

표 3.4.1 압전 세라믹스와 금속의 물질상수

Material Property		Value	Unit
Metal	Density	7800	kg/m ³
	Poisson's ration	0.285	
	Young's modulus	2.1 x 10 ¹¹	N/m ²
Piezoelectric ceramic	Density	7500	kg/m ³
	s ^E ₁₁	12.3 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	s ^E ₁₂	-4.05 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	s ^E ₁₃	-5.31 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	s ^E ₃₃	15.5 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	s ^E ₄₄	39.0 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	d ₁₅	496 x 10 ⁻¹²	coul/N
	d ₃₁	-123 x 10 ⁻¹²	coul/N
	d ₃₃	287 x 10 ⁻¹²	coul/N
	ε ^S ₁₁ /ε ₀	762	
	ε ^S ₃₃ /ε ₀	662	

반파장 진동자의 동작주파수는 65 [kHz]로 설정하였으며 표 3.4.1의 재료상수로부터 계산된 압전 세라믹스와 금속의 음속과 파동 임피던스를 이용해 반파장 진동자의 구조를 설계하였다.

그림 3.4.4에서 AB-CD 구간은 2 [mm] 두께의 압전 세라믹스 4개와 금속판으로 이뤄진 란쥬반 진동자이고 EF 구간은 진동의 크기를 확대시키는 스텝(step) 구조의 혼(horn)으로 구성되어 있다. 표 3.4.1로부터 금속과 압전 세라믹스의 음속은 다음과 같이 구해진다.

$$c_1(\text{steel}) = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{210 \times 10^9}{7800}} \approx 5189 \text{ [m/s]},$$

$$c_2^E(\text{ceramic}) = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{s_{11}^E \left[1 - \left(\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E} \right)^2 \right] \rho}} \approx 3487 \text{ [m/s]}.$$

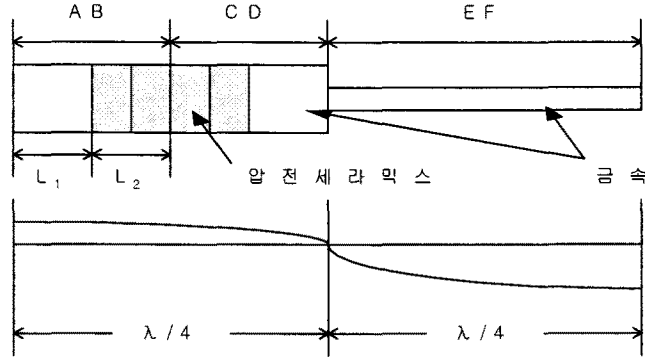


그림 3.4.4 반파장 진동자의 구조

금속으로 이뤄진 혼(EF 구간)의 길이는 $\lambda/4$ 이므로 $\lambda = \frac{c_1}{f} = \frac{5189}{65 \times 10^3} \approx 80$ [mm]에서 20 [mm]가 계산된다. 그리고 AB-CD 구간은 전체 $\lambda/2$ 로 진동하는 란쥬반 진동자와 동일하므로 한쪽 금속판의 길이 l_1 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$l_1 = \left(\frac{1}{k_1} \right) \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) / \tan(k_2 l_2) \right\}. \quad (1)$$

여기서 k : 파장정수, Z : 파동 임피던스, l_2 : 압전 세라믹스 2개의 두께

식 (1)에서 요구되는 값들은 다음과 같이 구해진다. 이때 란쥬반 진동자는 $\lambda/2$ 모드로 진동하기 때문에 공진주파수는 65 [kHz]의 두 배인 130 [kHz] 이고 압전 세라믹스와 금속판의 단면적은 동일하다.

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1} = \frac{2\pi f}{c_1} = \frac{2\pi \times 130 \times 10^3}{5189} \approx 157 \text{ [rad/m]},$$

$$k_2 = \frac{\omega}{c_2} = \frac{2\pi f}{c_2} = \frac{2\pi \times 130 \times 10^3}{3487} \approx 234 \text{ [rad/m]},$$

$$Z_1 = S_1 \rho_1 c_1 = S_1 \times 7800 \times 5189 \approx 40474200 S_1 \text{ [N/m/s]},$$

$$Z_2 = S_2 \rho_2 c_2 = S_1 \times 7500 \times 3487 \approx 26152500 S_1 \text{ [N/m/s]}.$$

따라서 한쪽 금속판의 길이 l_1 은 식 (1)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$l_1 = \left(\frac{1}{k_1} \right) \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) / \tan(k_2 l_2) \right\} = \left(\frac{1}{157} \right) \tan^{-1} (0.646/1.36) \approx 3 \text{ [mm]}.$$

결론적으로 반파장 변환기의 AB-CD 구간은 14 [mm]이고 EF 구간은 20 [mm]이다.

3.4.3 시뮬레이션 결과

란주반 진동자와 혼(horn)으로 구성되는 반파장 진동자의 전체적인 구조는 앞서 계산한 결과를 바탕으로 표 3.4.2와 그림 3.4.5와 같이 하였다. 이때 반파장 진동자의 길이는 34 [mm]이고 스텝구조를 갖는 혼(horn)의 위·아래 단면 비율은 1/2 이다. 적층된 압전 세라믹스의 분극 방향은 서로 반대방향이고 각층에 전계를 인가함으로써 동일한 진동모드를 발생시켰다.

그림 3.4.6과 그림 3.4.7은 반파장 진동자를 분석한 결과이다. 먼저 반파장 진동자의 공진주파수와 공진 모드를 해석하기 위해 모우드 분석을 실시한 결과, 그림 3.4.6(a)에서와 같이 64.5 [kHz]의 공진주파수에서 반파장 진동자는 길이 방향으로 변위가 확대되는 $\lambda/2$ 모드로 진동을 발생시켰다. 또한 그림 3.4.6(a)에서 변위가 "0"인 지점은 그림 3.4.6(b)에서와 같이 혼과 란주반 진동자의 연결부이다.

표 3.4.2 반파장 진동자의 시뮬레이션 조건

Material	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Type	Step	
Horn Length	20 [mm]	
Surface Ratio	1/2	
Ceramic Position	3 [mm]	

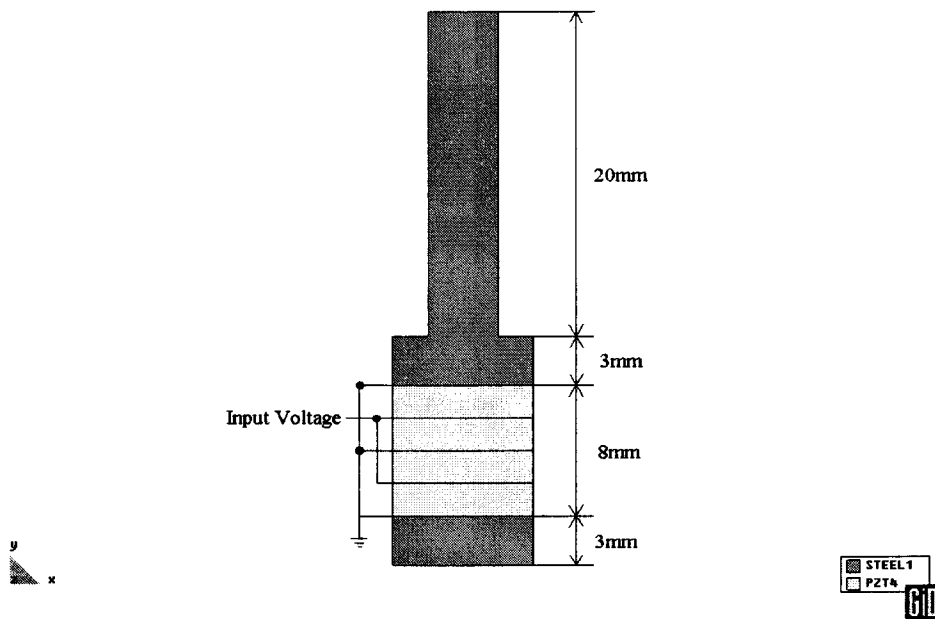
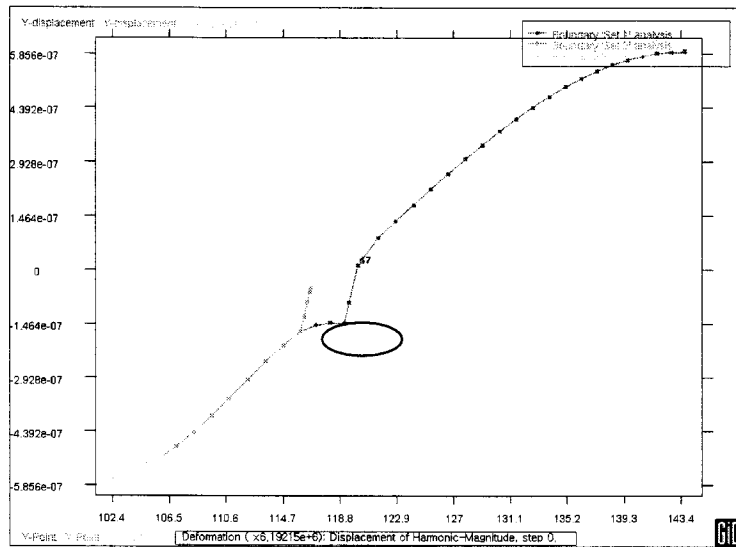
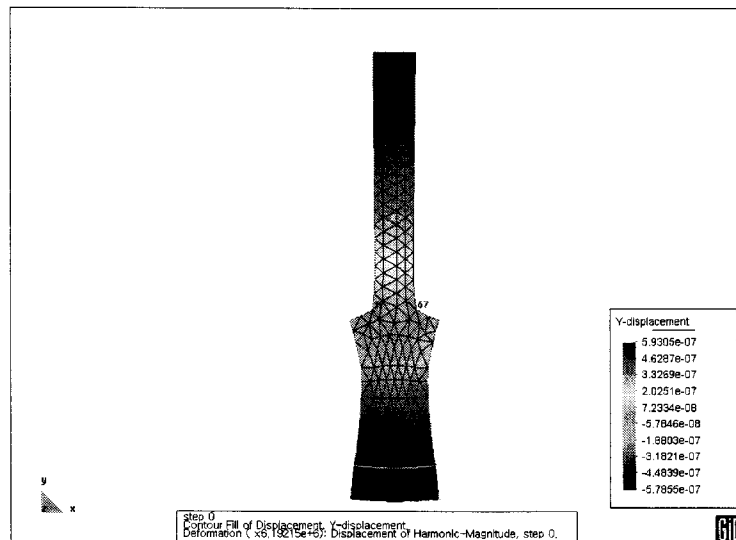


그림 3.4.5 반파장 진동자의 경계조건



(a)



(b)

그림 3.4.6 반파장 진동자의 변위특성

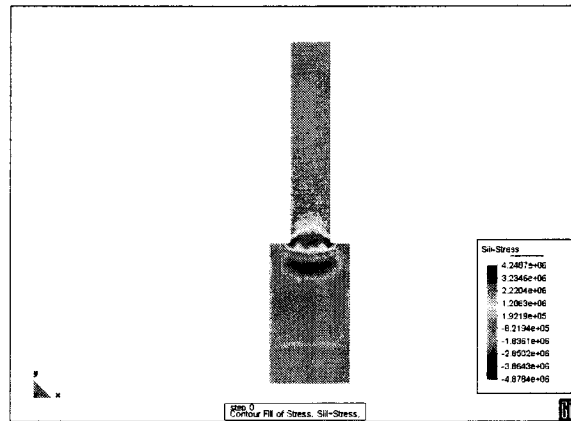
이와 같은 결과로부터 반파장 진동자의 설계값과 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 공진주파수에서 발생하는 응력의 분포를 해석하기 위해 실시한 조화 분석의 결과는 그림 3.4.7(a), (b)에 나타내었다. 그림 3.4.7(a)는 64.5 [kHz]에서 발생하는 반파장 진동자의 응력 분포를 나타낸 것이다. 그리고 그림 3.4.7(b)은 변위가 “0”인 란주반 진동자와 혼의 연결부에서 발생한 응력의 크기와 방향을 벡터로 나타낸 것이다.

반파장 진동자의 구조에 따른 특성을 비교하기 위해 그림 3.4.8에서와 같이 스텝(step) 구조, 쌍곡선(hyperbolic) 구조, 원뿔(conical) 구조, 지수(exponential) 구조 등 4가지에 대해 표 3.4.3의 경계조건을 적용하여 분석하였다. 표 3.4.4와 그림 3.4.9는 반파장 진동자의 구조

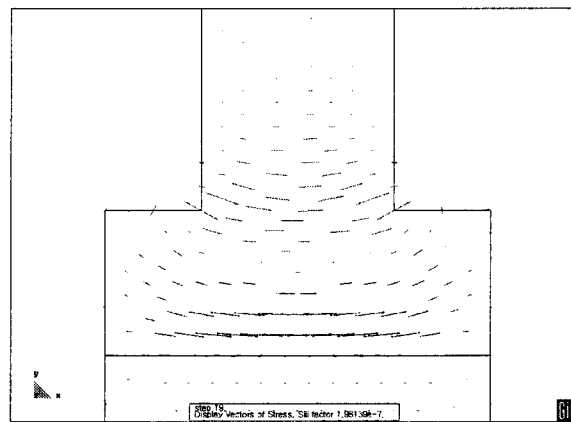
에 따른 변위특성을 나타낸 결과이다. 스텝 구조는 최대 변위를 발생시키지만 그림 3. 7의 (a), (b)에서와 같이 란주반 진동자와 혼의 연결부에 집중되는 응력에 의해 기계적인 결합이 쉽게 발생할 수 있고 혼의 끝부분에 부하를 연결하면 효율이 급격히 감소하는 단점을 가지고 있다. 그리고 지수 구조는 에너지 전달 효율은 가장 우수하지만 제작상의 어려움을 가지고 있어서 스텝 구조와 유사한 변위특성을 갖는 쌍곡선 구조나 원뿔 구조가 일반적으로 사용된다[5].

표 3.4.3 반파장 진동자의 시뮬레이션 조건 (혼의 구조)

Material	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Horn Length	20 [mm]	
Surface Ratio	1/2	
Ceramic Position	3 [mm]	



(a)



(b)

그림 3.4.7 반파장 진동자의 응력특성

표 3.4.4 혼의 구조에 따른 반파장 진동자의 변위특성

Type	Resonant frequency [kHz]	Y-displacement [$\mu\text{m}/\text{V}$]
Step	64.5	0.59
Hyperbolic	65.9	0.58
Conical	70.2	0.35
Exponential	70.7	0.40

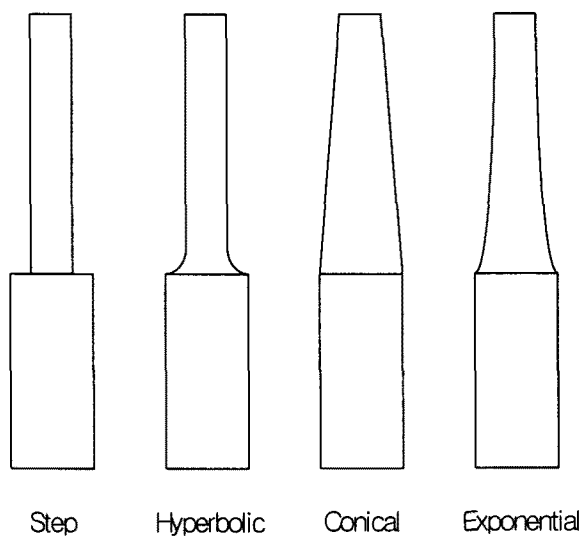


그림 3.4.8 반파장 진동자의 혼의 구조

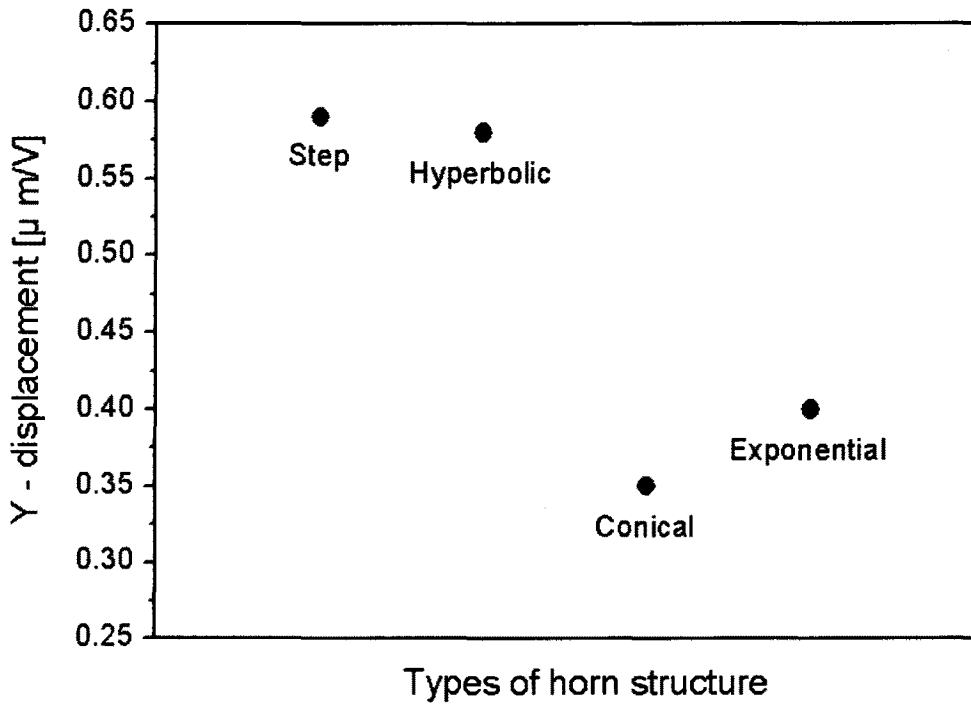


그림 3.4.9 혼의 구조에 따른 변위량

표 3.4.5와 그림 3.4.10은 반파장 진동자의 위·아래 단면 비율에 따른 특성을 해석하기 위한 조건이다. 단면적의 비율(A_1/A_2)은 1/8, 2/8, 4/8, 6/8, 8/8로 했으며 나머지 조건은 동일하게 설정하였다. 표 3.4.6과 그림 3.4.11은 반파장 진동자의 단면 비율에 따른 변위특성을 2 차원에서 분석한 결과이다. A_1/A_2 의 증가, 즉 혼의 위쪽 단면적(A_1)이 증가함에 따라 길이방향(Y-축)의 변위는 비례적으로 감소했으며 이 결과는 혼의 끝에서 발생하는 변위량이 단면적의 비율과 반비례하는 λ 모드 진동자의 특성과 일치한다[5]. 선형 초음파 모터에 의해 구동되는 이동자의 속도는 발생하는 타원궤적의 크기에 비례하므로[6] 이를 확대시키기 위해서는 식 (34)에서와 같이 반파장 진동자의 변위량을 증가시켜야 하지만 단면 비율을 감소시키면 발생력이 감소하고 기계적인 변형이 발생하는 단점이 있다. 따라서 반파장 진동자의 단면 비율은 선형 초음파 모터의 응용분야에 따라 결정되어야 하며 본 연구에서는 중간 비율인 4/8로 그 크기를 고정하였다.

표 3.4.5 반파장 진동자의 시뮬레이션 조건 (A_1/A_2)

Materials	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Type	Hyperbolic	
Horn Length	20 [mm]	
Ceramic Position	3 [mm]	

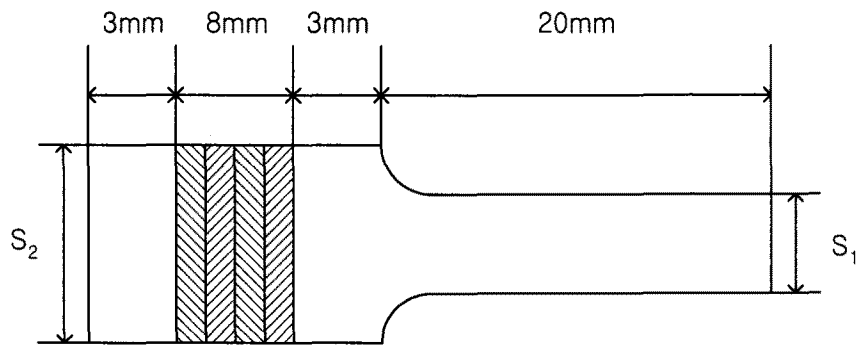


그림 3.4.10 반과장 진동자의 경계조건 (A_1/A_2)

표 3.4.6 단면적 비율에 따른 반과장 진동자의 변위특성

Surface Ratio	Resonant frequency [kHz]	Y-displacement [$\mu\text{m}/\text{V}$]
1/8	63.4	2.23
2/8	63.3	1.16
4/8	64.5	0.59
6/8	66.0	0.39
8/8	66.8	0.29

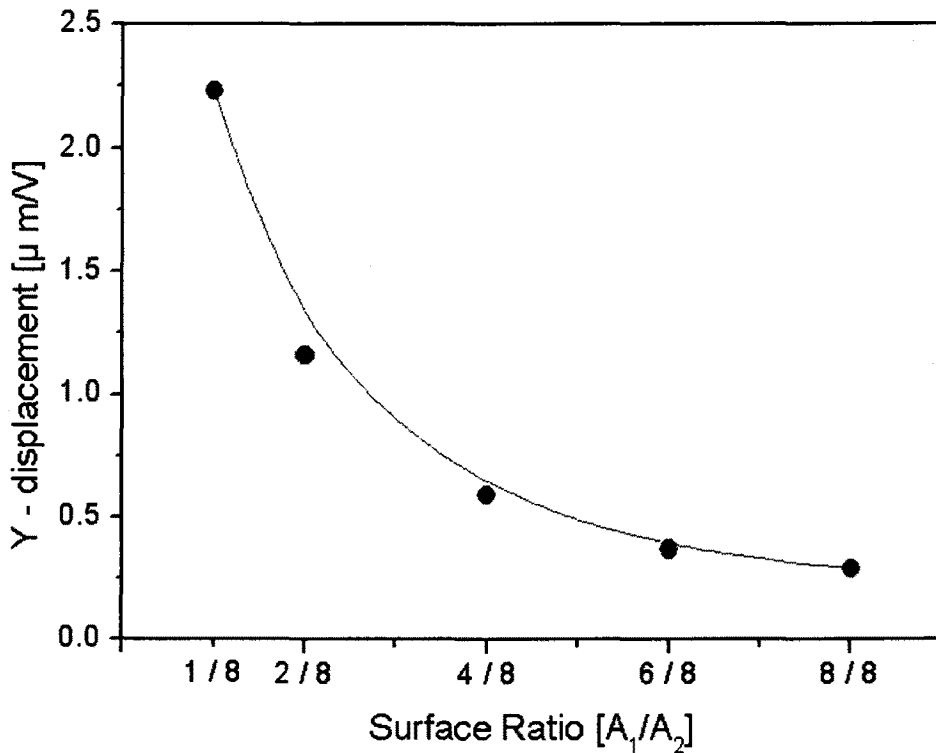


그림 3.4.11 단면적 비율에 따른 변위량

표 3.4.7과 그림 3.4.12는 혼의 길이(L)에 따른 변위 및 응력 특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 조건이다. 그림 3.4.7의 (a), (b)에서와 같이 집중 응력에 의한 기계적인 결함을 최소화시키기 위해 혼의 길이를 10~20 [mm]의 범위에서 변화시켰으며 이때 혼의 끝에서 발생하는 변위와 응력 특성을 살펴보았다. 표 3.4.8과 그림 3.4.13은 혼의 길이에 따른 특성을 2 차원에서 분석한 결과이다. 혼의 길이가 증가함에 따라 길이 방향의 변위와 최대 응력은 선형적으로 증가한다. 이때 반파장 진동자의 최대 응력은 변위가 "0"인 $\lambda/4$ 부분보다 혼과 란주반 진동자의 연결부에서 나타낸다. 따라서 변위의 감소를 최소화하는 범위에서 혼의 길이를 20 [mm] 보다 짧게 하면 응력의 집중을 효과적으로 피할 수 있다.

표 3.4.9와 그림 3.4.14는 적층된 압전 세라믹스의 위치(P)에 따른 특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 조건으로 세라믹스의 위치는 아래 부분을 기준으로 0, 2, 4, 6 [mm]로 하였고 나머지 조건은 동일하게 하였다. 표 3.4.10과 그림 3.4.15는 압전 세라믹스의 위치에 따른 변위특성을 2 차원에서 분석한 결과로서 적층된 세라믹스의 위치가 바닥면을 기준으로 증가함에 따라 공진주파수와 변위량은 거의 선형적으로 감소한다.

표 3.4.7 반파장 진동자의 시뮬레이션 조건 (혼의 길이)

Materials	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Type		Hyperbolic
Surface Ratio		1/2
Ceramic Position		3 [mm]

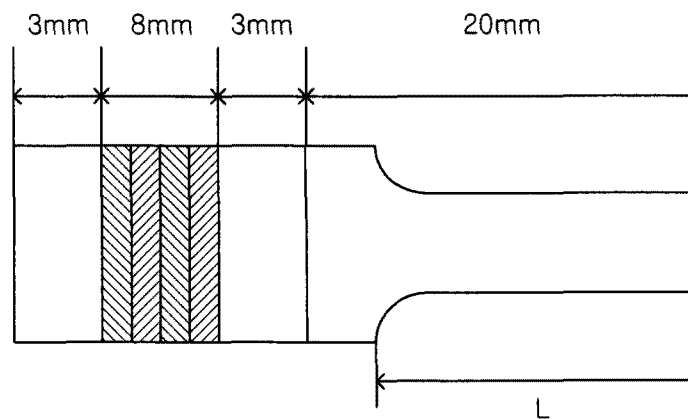


그림 3.4.12 반파장 진동자의 경계조건 (혼의 길이)

표 3.4.8 혼의 길이에 따른 반파장 진동자의 변위특성

Horn length [mm]	Resonant frequency [kHz]	Y-displacement [μm/V]
10	71.2	0.36
12	70.9	0.41
14	70.1	0.47
16	68.6	0.52
18	66.8	0.57
20	64.5	0.59

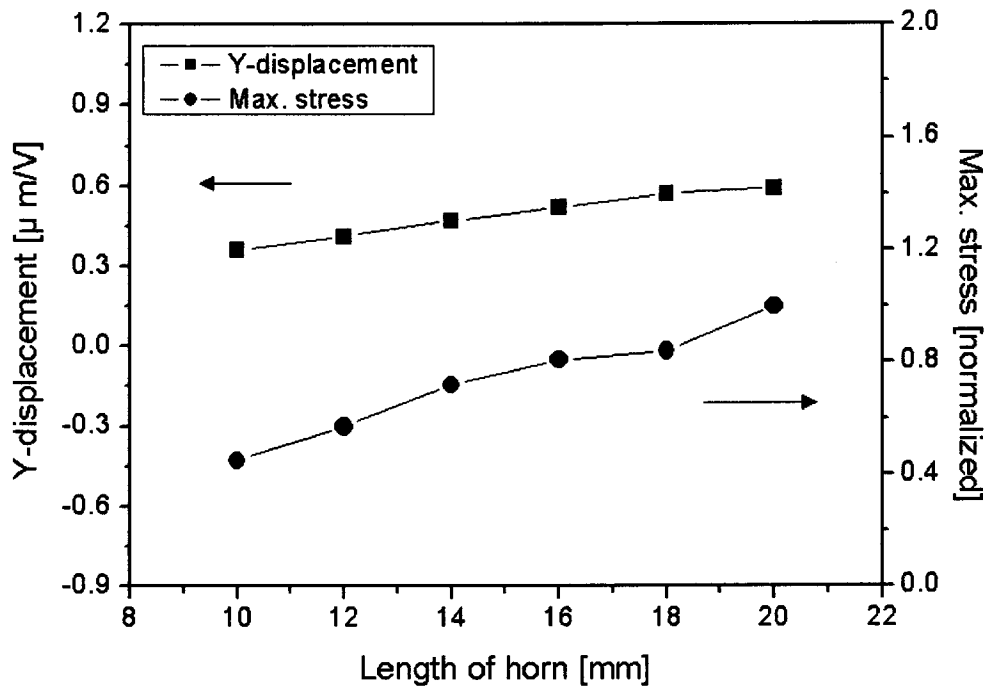


그림 3.4.13 혼의 길이에 따른 변위 및 응력 특성

시뮬레이션 결과에서 압전 세라믹스는 바닥에 있을 때 최대의 변위특성을 나타내지만 실제로 반과장 진동자의 압전 세라믹스는 금속판에 의해 위·아래로 압착되어 볼트(bolt)로 고정되기 때문에 최대한 얇은 금속판을 아래면에 연결시켜 반과장 진동자에서 발생하는 변위의 감소를 최소화시킬 필요가 있다.

표 3.4.9 반과장 진동자의 시뮬레이션 조건 (세라믹스 위치)

Materials	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Type	Hyperbolic	
Horn Length	20 [mm]	
Surface Ratio	1/2	

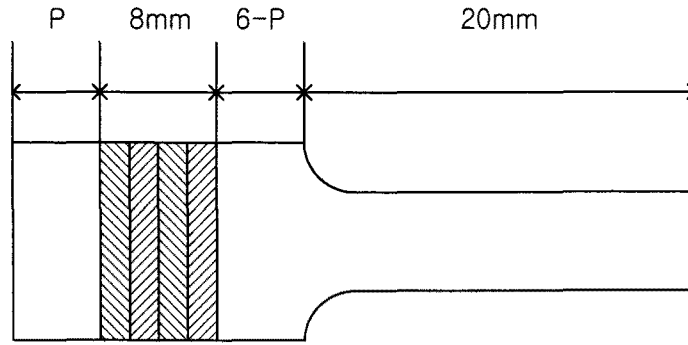


그림 3.4.14 반과장 진동자의 경계조건 (세라믹스 위치)

표 3.4.10 세라믹스 위치에 따른 반과장 진동자의 변위특성

Ceramics position [mm]	Resonant frequency [kHz]	Y-displacement [$\mu\text{m}/\text{V}$]
0	69.6	0.81
2	66.4	0.64
4	62.5	0.55
6	58.7	0.45

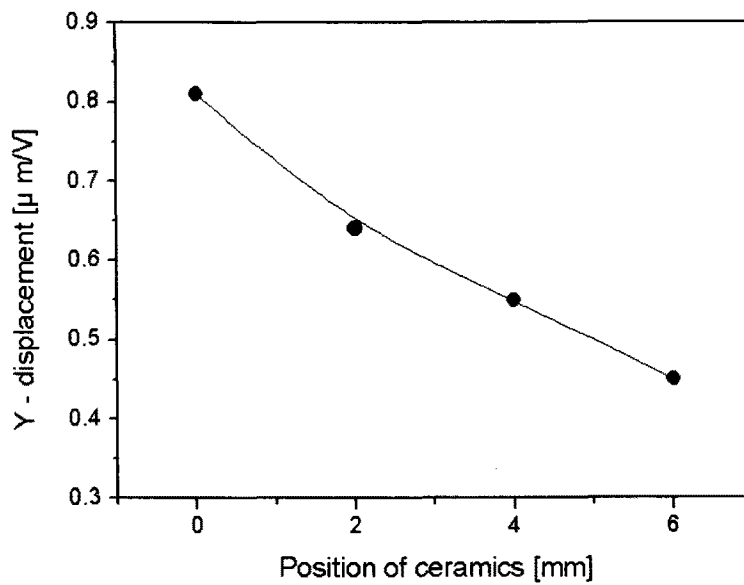


그림 3.4.15 세라믹스 위치에 따른 변위량

3.4.4 선형 초음파 모터의 구조 설계

표 3.4.11과 그림 3.4.16은 선형 초음파 모터의 길이에 따른 특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 조건으로 전체 길이를 31~36 [mm]로 했으며 $\lambda/4$ 구간을 기준으로 위쪽에 위치한 혼의 길이를 변화시켰다. 그림 3.4.17은 선형 초음파 모터의 길이에 따라 진동빔 액츄에이터의 돌출부에서 발생하는 변위를 2 차원에서 분석한 결과이다. 그림에서 돌출부의 변위궤적은 선형 초음파 모터의 길이가 증가함에 따라 증가했으며 34 [mm]를 기준으로 점차 감소하였다. 앞서 반파장 진동자의 변위는 길이방향(Y 방향)으로만 발생한 반면 선형 초음파 모터에 연결된 두 개의 반파장 진동자는 X, Y 방향으로 진동한다. 혼의 길이가 길어짐에 따라 X 방향의 변위는 증가하고 Y 방향의 변위는 감소하기 때문에 진동빔 액츄에이터에서 발생하는 타원 궤적의 크기를 감소시킨다.

표 3.4.11 PLUM의 시뮬레이션 조건 (전체길이)

Material	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Shaft	Length	1 [mm]
	Diameter	2 [mm]
Distance		10 [mm]
Surface Ratio		1/2

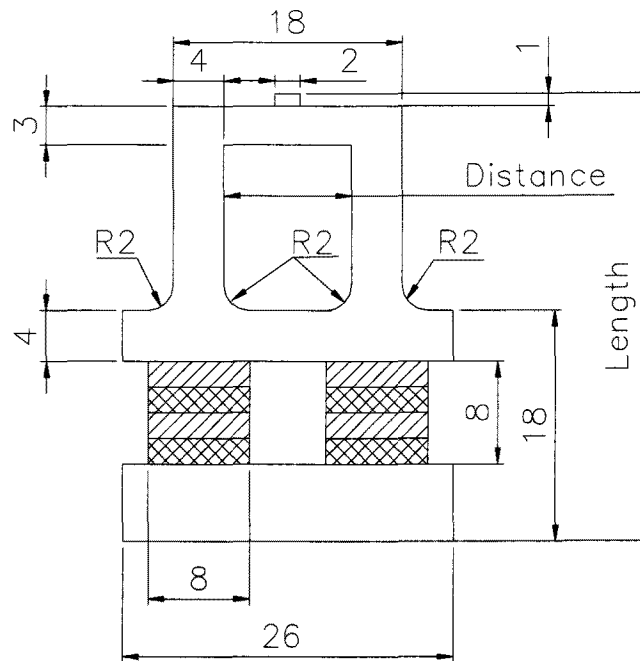


그림 3.4.16 PLUM 도면 (전체길이)

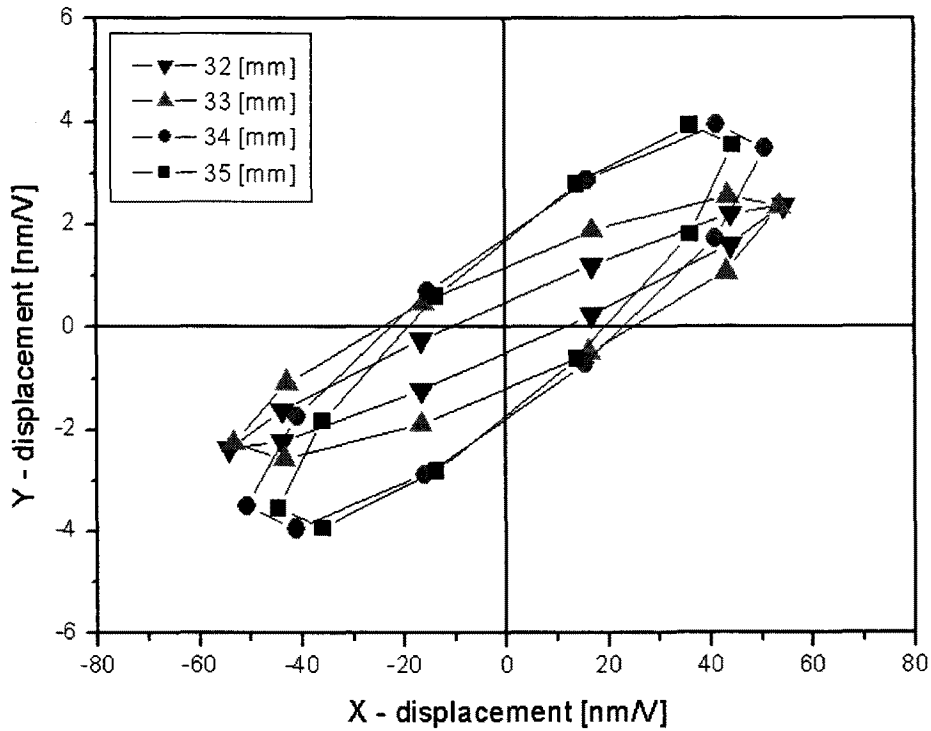


그림 3.4.17 PLUM 길이에 따른 돌출부의 변위계적

표 3.4.12와 그림 3.4.18은 반과장 진동자를 연결하는 진동빔 액츄에이터의 길이에 따른 특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 조건으로 길이는 9, 10, 11, 12 [mm]의 범위에서 실시하였다. 그림 3.4.19는 반과장 진동자를 연결하는 진동빔 액츄에이터의 길이에 따른 돌출부의 발생 변위를 2 차원에서 분석한 결과이다. 진동빔 액츄에이터의 길이, 즉 양쪽 반과장 진동자의 폭이 넓어질수록 횡방향 변위는 거의 일정하고 종방향 변위는 점차 감소하지만 12 [mm]에서는 반대로 크게 증가를 한다. 이는 진동빔 액츄에이터의 두께가 얇기 때문에 발생하는 현상으로 이동자와 강한 힘으로 압착되었을 경우 기계적인 휨이 발생할 수 있고 두께를 증가시키면 그만큼 변위가 감소하기 때문에 실제로는 큰 효과를 기대하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 압전 세라믹스를 고정하기 위해 양쪽 반과장 진동자의 중간에 삽입되는 볼트의 두께를 고려하여 10 [mm]로 설정하였다.

표 3.4.12 PLUM의 시뮬레이션 조건 (반과장 진동자간의 거리)

Material	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Shaft	Length	1 [mm]
	Diameter	2 [mm]
Length		34 [mm]
Surface Ratio		1/2

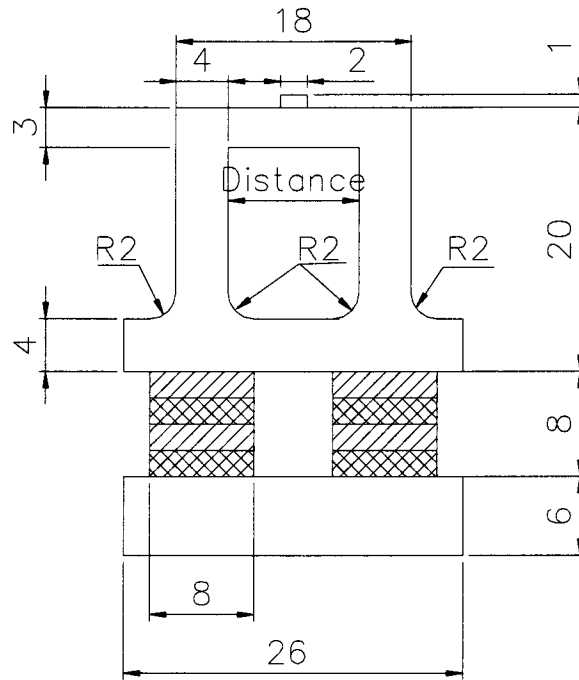


그림 3.4.18 PLUM 도면 (반파장 진동자간의 거리)

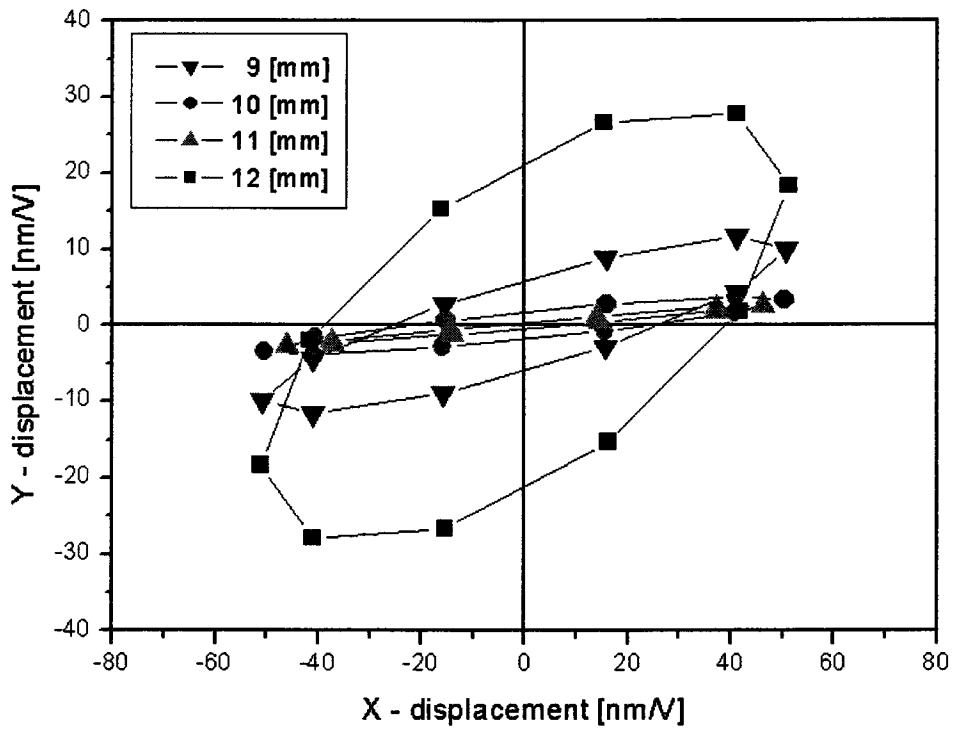
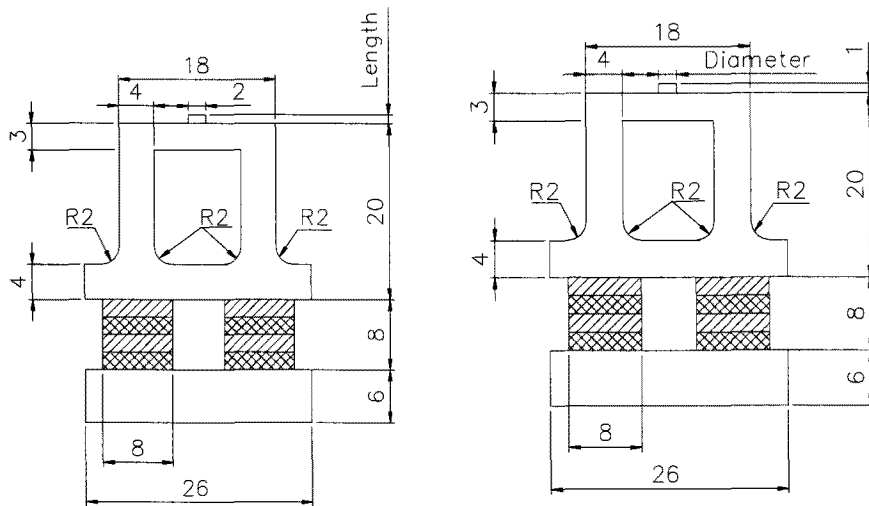


그림 3.4.19 반파장 진동자간의 거리에 따른 돌출부의 변위계적

표 3.4.13과 그림 3.4.20은 진동빔 액추에이터의 중앙에 위치한 돌출부의 길이와 단면적에 따른 특성을 분석하기 위한 시물레이션 조건이다.

표 3.4.13 PLUM의 시물레이션 조건 (돌출부의 길이와 단면적)

Material	Ceramic	PAN-PZT + 0.8wt% Nb ₂ O ₅ + 0.6wt% MnO ₂
	Metal	Stainless Steel
Length	34 [mm]	
Distance	10 [mm]	
Surface Ratio	1/2	



(a) 길이

(b) 지름

그림 3.4.20 PLUM 도면 (돌출부의 길이와 단면적)

그림 3.4.20(a)에서는 단면적의 지름이 2 [mm]인 돌출부의 길이를 0.5, 1, 1.5, 2 [mm]로 설정했고 그림 3.4.20(b)에서는 길이가 1 [mm]인 돌출부의 지름을 1.5, 2, 2.5, 3 [mm]로 하였다. 그림 3.4.21과 3.4.22는 돌출부의 길이와 단면적의 지름에 따른 돌출부의 발생 변위를 2 차원에서 분석한 결과이다. 그림 3. 21에서 돌출부의 길이가 길어짐에 따라 변위 궤적의 크기는 비례적으로 증가하지만 돌출부의 단면적에 따른 변위는 그림 3.4.22에서와 같이 약간씩 감소하지만 거의 차이가 없다. 진동빔 액추에이터에서 발생하는 타원 궤적은 변위 확대기구인 돌출부를 통해 확대되어 이동자의 속도 향상에 크게 기여하지만 발생력을 감소시키고, 반대로 단면적의 증가는 마찰면의 증가로 인해 발생력을 증가시킬 것으로 기대된다.

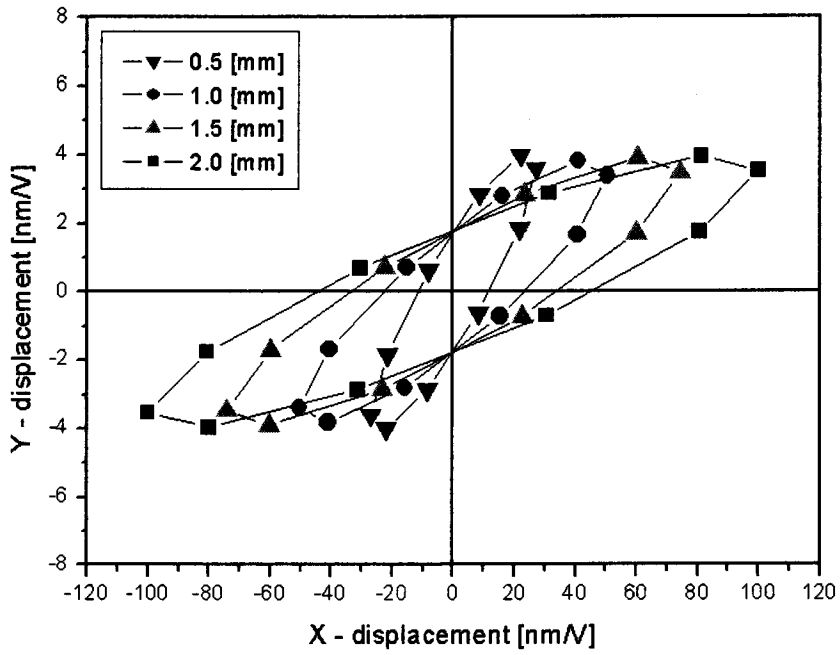


그림 3.4.21 돌출부의 길이에 따른 변위궤적

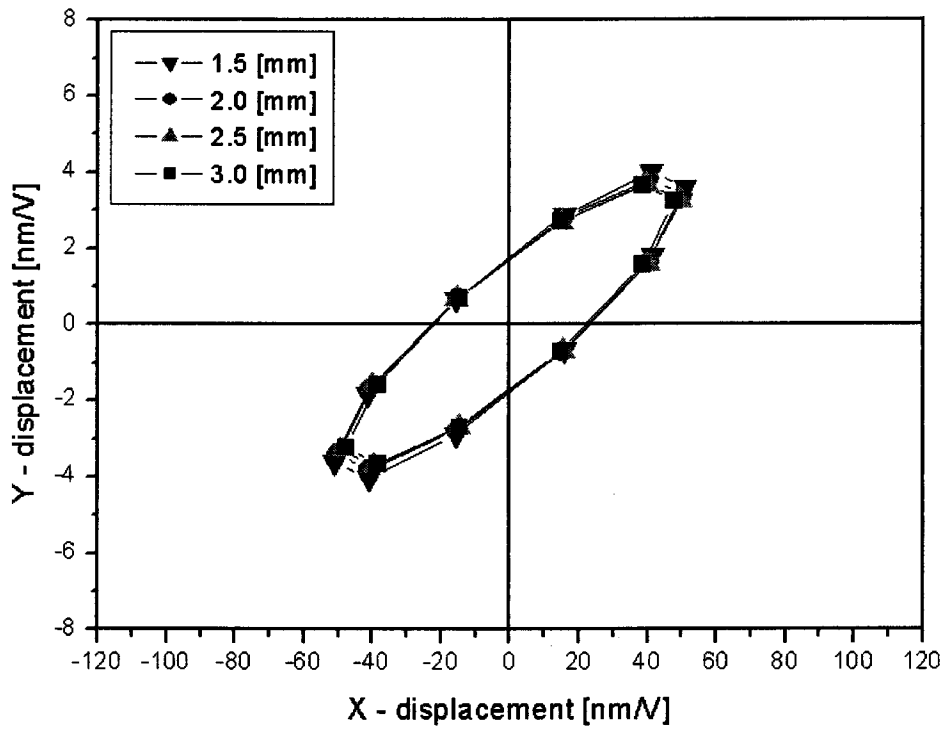


그림 3.4.22 돌출부의 지름에 따른 변위궤적

그림 3.4.23은 혼이 없는, 즉 2개의 란쥬반 진동자에 의해 진동빔 액츄에이터를 구동했을 때 발생하는 변위궤적을 선형 초음파 모터와 비교한 것이다. 본 논문에서 제안한 선형 초음파 모터는 반파장 진동자에서 변위를 크게 확대시키기 때문에 그림 3.4.24에서와 같이 타원 궤적이 발생하지만 혼이 없는 경우 변위의 크기가 작기 때문에 진동빔 액츄에이터의 돌출부는 거의 선형적으로 동작한다. 따라서 혼이 있는 경우 이동자를 빠른 속도로 동작시킬 수 있지만 정밀도에선 혼이 없는 선형모터가 유리하다.

그림 3.4.25는 2 차원의 분석 결과에서 가장 이상적인 특성을 갖는 선형 초음파 모터를 3 차원으로 나타낸 것이다. 선형 초음파 모터의 전체 길이는 34 [mm]이고 스텝구조를 갖는 혼의 위·아래 단면적 비율은 1/4 (2 차원에서는 1/2), 길이는 16 [mm]로 했다. 또한 돌출부는 지름 2 [mm], 길이 1 [mm]의 원주구조이다.

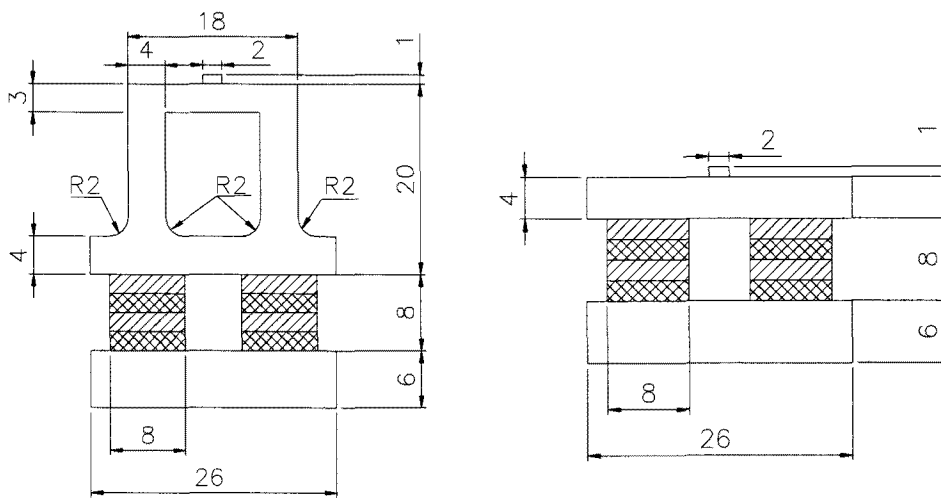


그림 3.4.23 PLUM 도면 (혼의 유무)

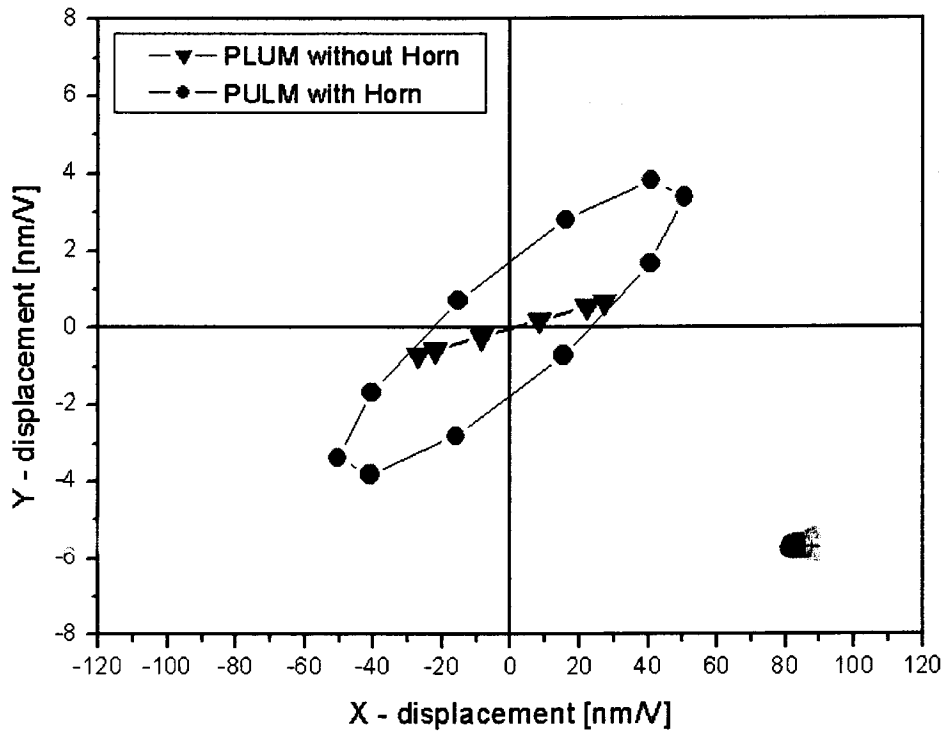


그림 3.4.24 혼의 유무에 따른 돌출부의 변위계적

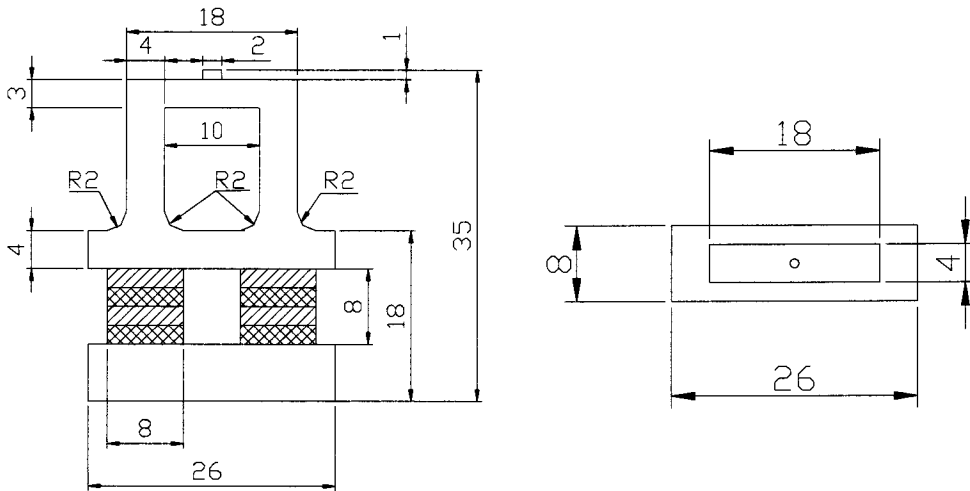
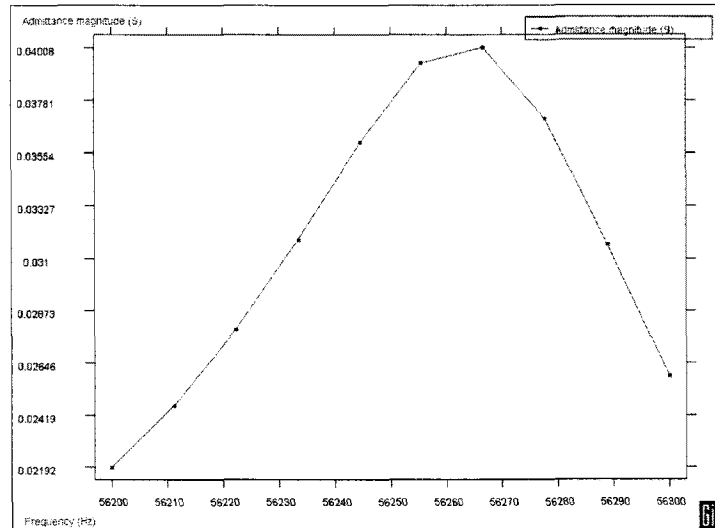


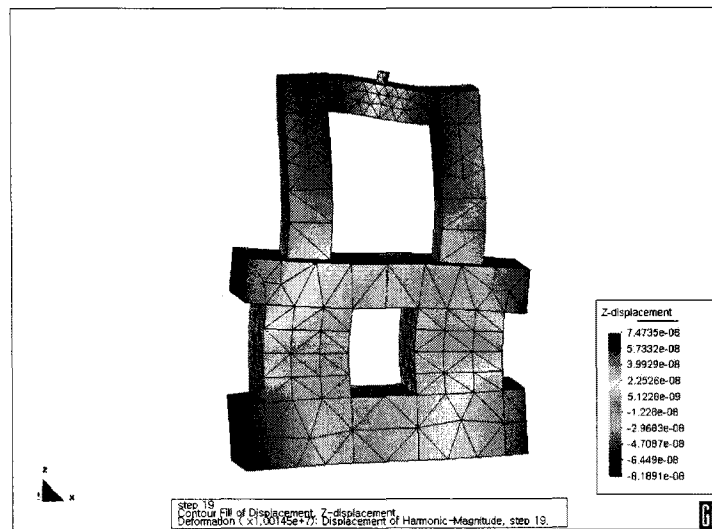
그림 3.4.25 PLUM의 도면

그림 3.4.26은 선형 초음파 모터를 3 차원에서 시뮬레이션한 결과이다. 선형 초음파 모터의 공진주파수를 구하기 위해 모드 분석을 실시한 결과, 그림 3.4.26(a)의 어드미턴스 특성 곡선으로부터 56.2 [kHz]의 공진주파수를 알 수 있다. 또한 공진주파수에서 발생하는 변위특성은 조화 분석으로부터 얻어지며 그림 3.4.26(b)는 T/4일 때 선형 초음파 모터에서 발생하는 길이방향의 변위를 색지수로 표시한 것이다. 표 3. 14는 전체 동작주기를

10단계로 나뉜 X, Y, Z 축 방향으로 발생한 변위를 각각 나타낸 것이다. Y 축 방향의 변위는 다른 방향보다 발생크기가 상대적으로 작기 때문에 무시하고 각 단계에서 발생한 X, Z 방향의 변위를 연결하면 그림 3.4.27에서와 같은 타원 궤적을 형성한다.



(a)



(b)

그림 3.4.26 PLUM의 FEM 분석 (T/4)

표 3.4.14 돌출부의 변위특성

Step	U_x	U_y	U_z
1	92.5E-09	-3.96E-09	-13.0E-09
2	73.5E-09	-3.20E-09	-31.5E-09
3	26.5E-09	-1.22E-09	-38.0E-09
4	-30.7E-09	1.23E-09	-30.0E-09
5	-76.1E-09	3.21E-09	-10.5E-09
6	-92.5E-09	3.96E-09	13.0E-09
7	-73.5E-09	3.20E-09	31.5E-09
8	-26.5E-09	1.22E-09	38.0E-09
9	30.7E-09	-1.23E-09	30.0E-09
10	76.1E-09	-3.21E-09	10.5E-09

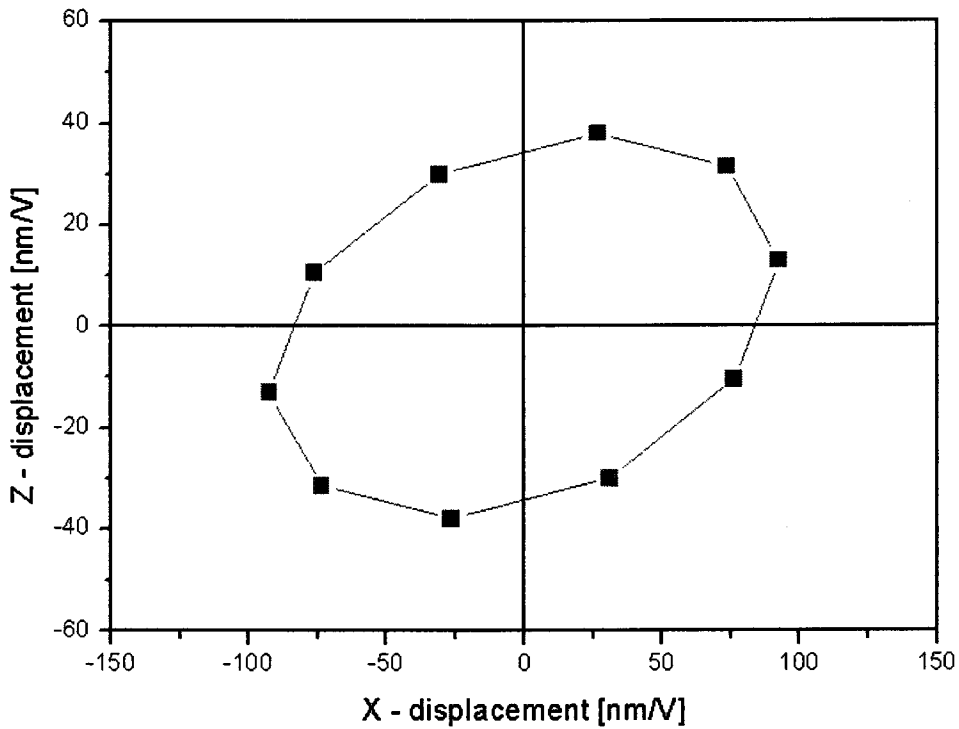


그림 3.4.27 돌출부의 변위궤적

그림 3.5.2는 선형 초음파 모터의 전체 구성도이다. 제작된 선형 초음파 모터는 테프론 (teflon) 코팅이 된 가이드(guide)로 양옆을 고정시켰고 진동 탄성력을 갖는 2개의 판스프링을 진동빔 액추에이터의 반대편에 삽입시켜 일정한 압력으로 이동자에 고정되도록 하였다. 그림 3.5.3은 제작한 선형 초음파 모터의 사진이다.

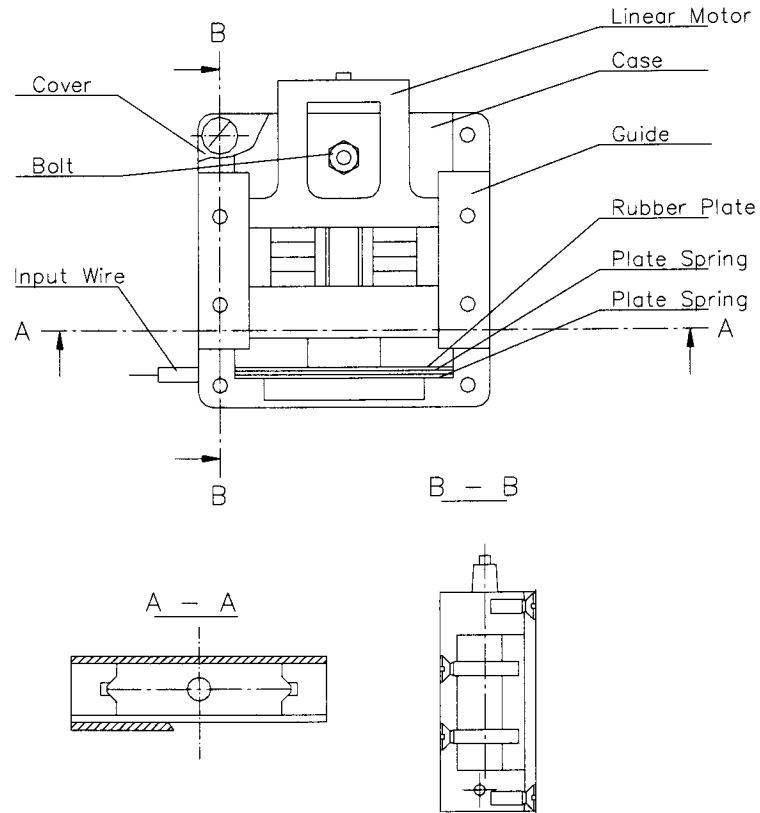


그림 3.5.2 PLUM의 도면

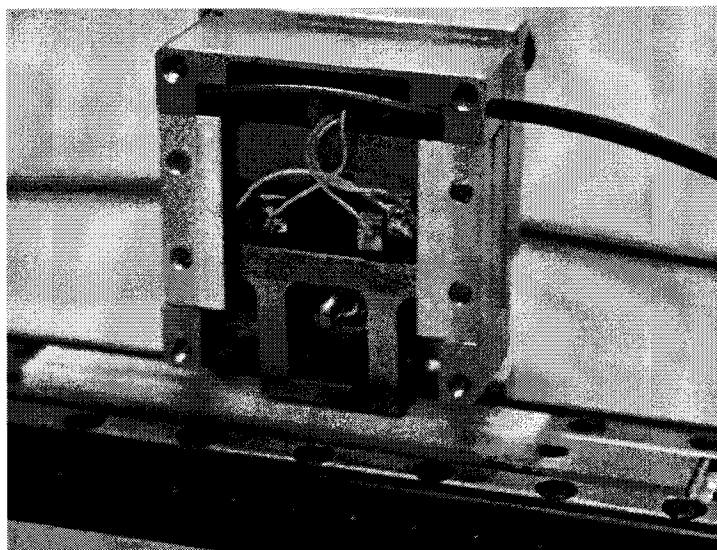


그림 3.5.3 PLUM의 사진

3.5.2 선형 초음파 모터의 변위특성

본 절에서는 제작된 선형 초음파 모터의 특성을 나타내었다. 먼저 선형 초음파 모터의 공진 주파수와 공진 모드에 따른 진동빔 액츄에이터의 변위특성을 측정하여 제안된 동작원리와 동일하게 동작하는지를 비교한 후 선형 초음파 모터와 이동자의 압착력에 따라 발생하는 힘과 속도 등의 동특성을 살펴보았다.

그림 3.5.4는 선형 초음파 모터의 변위특성을 측정하기 위한 시스템과 실제 측정장비의 사진이다. 함수 발생기(Tektronix, CFG 280)에서 발생된 신호는 2-채널 전력 증폭기를 통해 증폭된 후 90° 위상차를 갖는 sine과 cosine 신호의 형태로 압전 세라믹스에 인가된다. 이렇게 만들어진 신호는 오실로스코프로 측정했고 선형 초음파 모터의 진동측정은 X, Y, Z 방향으로 나누어 나타낼 수 있는 laser vibrometer(Polytec, CLV 3D)를 이용했다.

그림 3.5.5는 조립된 선형 초음파 모터의 주파수 특성을 Labview (National Instruments)를 이용해 측정한 결과이다. 그림 3.5.5(a)와 (b)에서 양쪽 반파장 진동자의 공진주파수는 67.5 [kHz] 정도로 거의 일치하고 이동자에 연결된 후에는 그림 3.5.5(c)와 같이 69 [kHz]로 증가한다. 실제로 선형 초음파 모터를 제작할 때 금속부의 가공이나 압전 세라믹스의 특성이 불균일한 경우에 공진주파수가 상이하게 나타나지만 제작된 선형 모터는 공진주파수의 특성만으로 판단할 때 동일한 동작특성을 기대할 수 있다.

그림 3.5.6은 주파수에 따른 진동빔 액츄에이터의 변위를 측정하기 위해 각 부분을 점 1-9로 표시한 것이다. 그림 3.5.7(a)에서 점 2와 8은 돌출부의 끝에서 발생하는 횡방향과 종방향 진동이고 점 7은 반파장 진동자의 종방향 진동이다.

그림 3.5.7(b)는 돌출부의 길이방향 위치에 따른 횡방향 변위를 나타낸 것으로 길이가 증가함에 따라 변위가 크게 발생하고 공진 특성의 영향을 받지 않는다.

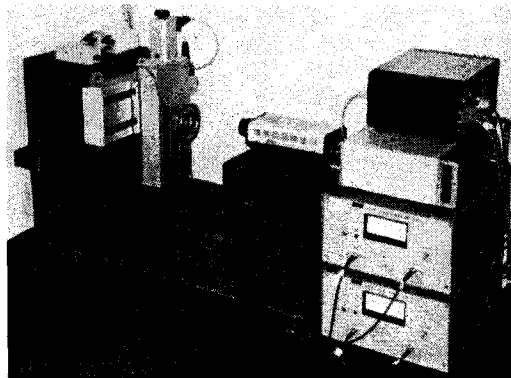
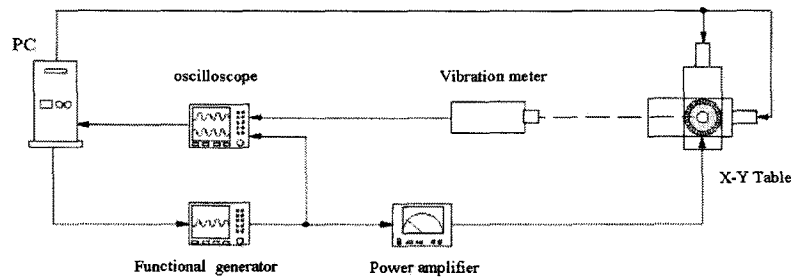
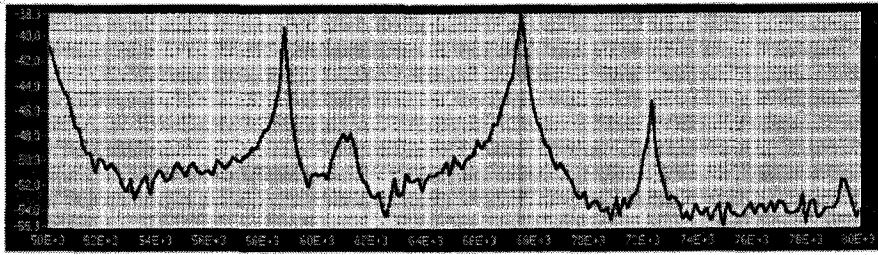
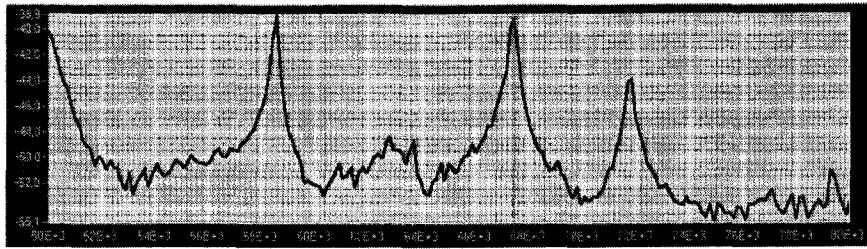


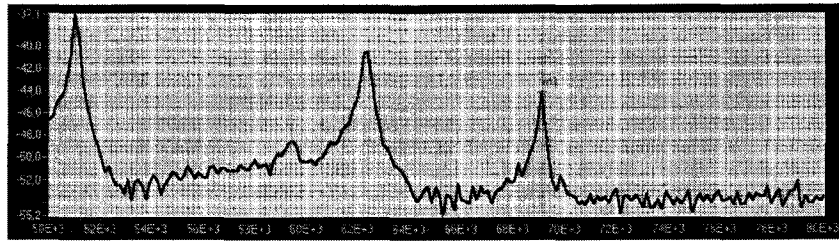
그림 3.5.4 PLUM의 측정 시스템



(a) 왼쪽 반파장 진동자



(b) 오른쪽 반파장 진동자



(c) 양쪽 반파장 진동자 (이동자와 연결)

그림 3.5.5 주파수-어드미턴스 특성

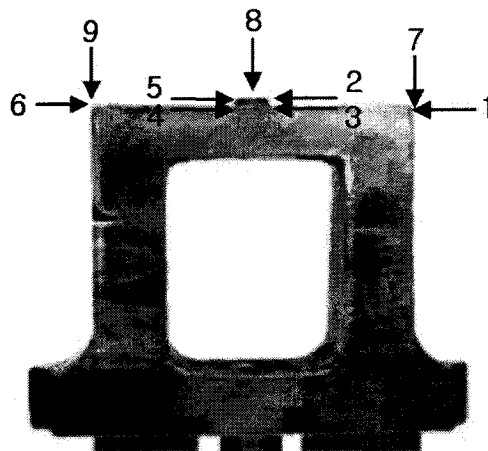
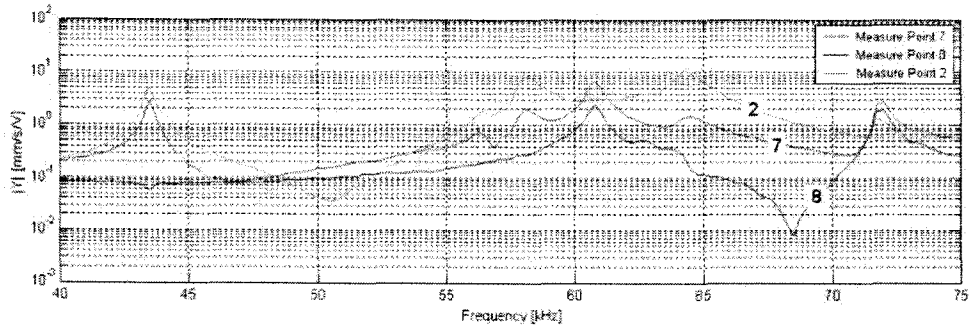
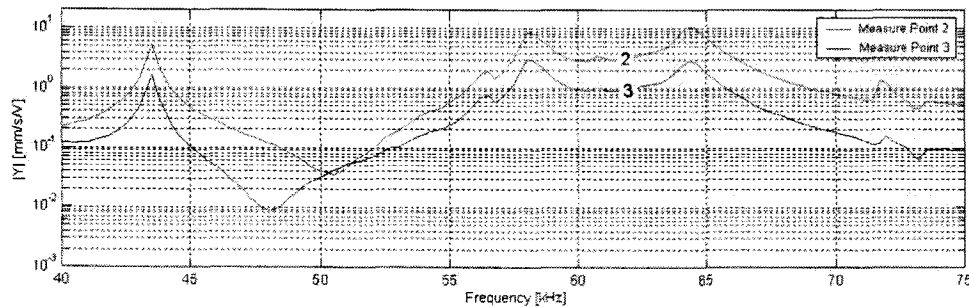


그림 3.5.6 진동빔 액츄에이터의 측정 위치

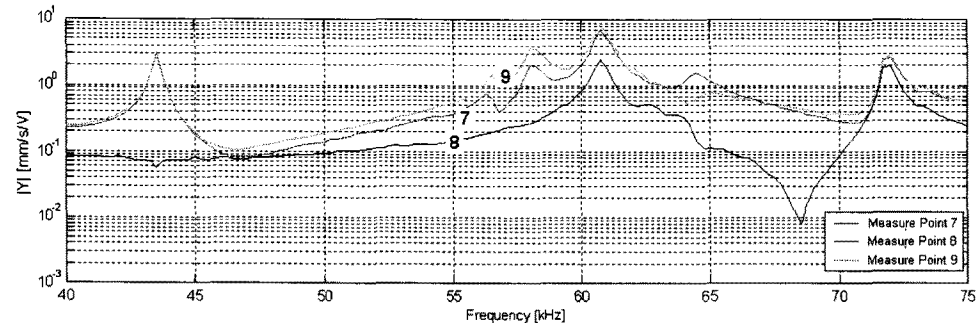
또한 진동빔 액추에이터의 위치에 따른 종방향 진동 성분을 나타낸 그림 3.5.7(c)에서 양쪽 반파장 진동자의 진동특성은 서로 유사하고 돌출부인 점 8에서는 약 61 [kHz]의 공진특성을 갖는다. 이와 같이 진동빔 액추에이터의 위치별 변위특성에서 구한 공진주파수와 Labview를 이용해 구한 공진주파수가 서로 다른 이유는 측정방식이 서로 다르기 때문이고 이는 실제 선형 초음파 모터의 동작주파수와도 다르다. 이렇게 구해진 돌출부의 종방향 진동(점 8)과 횡방향 진동(점 2)을 동시에 나타내면 그림 3.5.8과 같은 타원 궤적이 얻어진다. 선형 초음파 모터의 시뮬레이션에서는 양쪽 반파장 진동자의 특성이 대칭적이고 기계적 손실이 없으며 볼트에 대한 영향을 고려하지 않기 때문에 측정된 변위와 차이가 발생한다.



(a)



(b)



(c)

그림 3.5.7 진동빔 액추에이터의 주파수-속도 특성

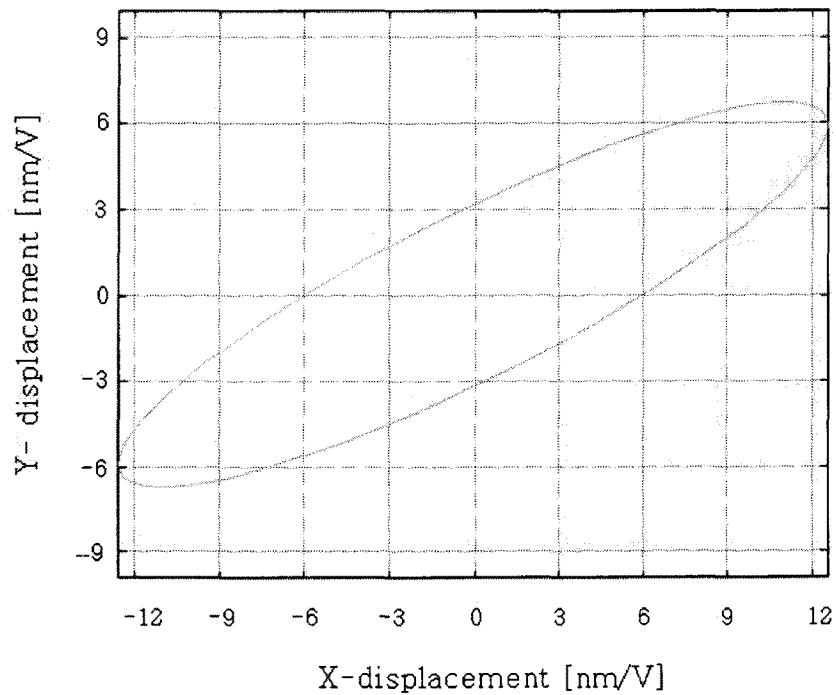


그림 3.5.8 접합점의 변위궤적 (점 2, 8)

3.5.3 선형 초음파 모터의 출력 특성

본 절에서는 이동자와의 압착력에 따라 발생하는 선형 초음파 모터의 발생력, 이동 속도, 그리고 전력 특성을 분석했다. 압착력과 발생력은 푸시-풀 스케일러(push-pull scaler, IMADA사)를 이용하여 측정하였다.

표 3.5.1와 그림 3.5.9은 제작된 선형 압전 액츄에이터의 특성이다. 최대 발생력은 이동자의 속도가 "0" 일 때의 힘이고 최대 속도는 무부하 상태의 이동 속도이다. 압착력이 40 [N]일 때 최대 발생력은 7.5 [N], 최대 속도는 0.1 [m/s]이고 압착력이 25 [N]일 때는 최대 발생력은 5 [N], 최대 속도는 0.2 [m/s]를 나타냈다. 이때, 인가 전압은 100 [V_{rms}]이고 공진주파수는 69 [kHz]이다. 이와 같이 압착력의 증가에 따라 발생력은 증가하고 이동 속도는 감소하며 부하에 따른 특성도 동일한 경향을 나타냈다.

표 3.5.1 PLUM의 측정결과

Property	Unit	Pressure	
		25 [N]	40 [N]
Force at rest	N	10	20
Max. Driving Force	N	5	7.5
Max. Speed	m/s	0.2	0.1
Electrical Power	W	7	8
Input Voltage	V_{rms}	100	
Input Current	A_{rms}	0.07	0.08
Volume	cm^3	28	
Resonant Frequency	kHz	69	

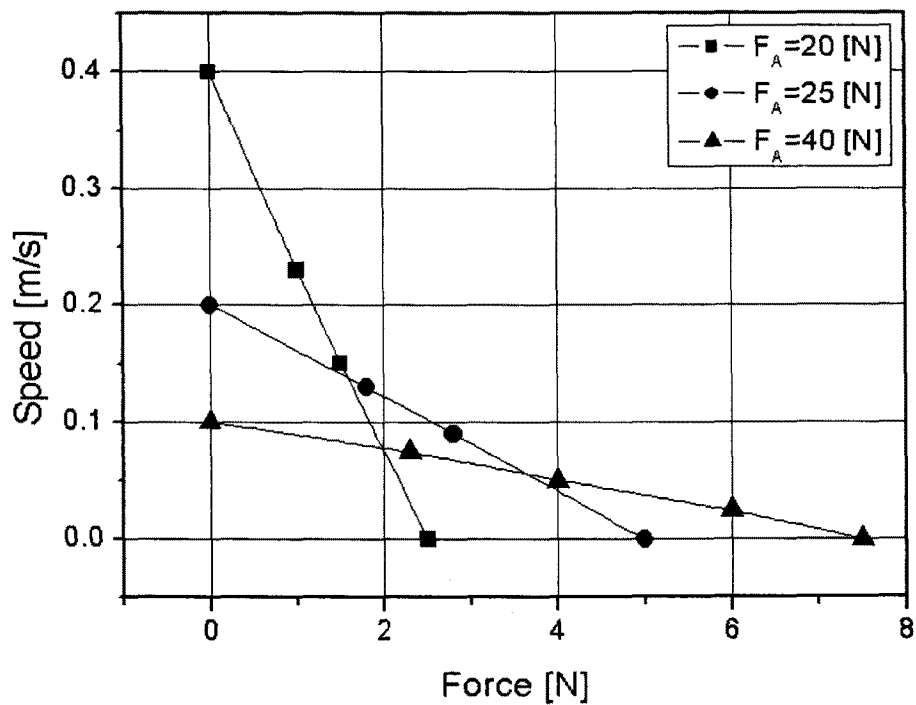


그림 3.5.9 PLUM의 실험 결과

3.6. 전방향 압전 리니어 액츄에이터 설계

본 절에서는 전방향 초음파 액츄에이터의 구조를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 액츄에이터의 주파수 특성 및 진동특성에 대하여 분석하였다.

본 연구에서는 액츄에이터의 시뮬레이션을 위하여 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용한 시뮬레이션 프로그램 Atila를 이용하여 압전 세라믹스와 금속의 재질과 크기, 전극의 패턴과 분극의 방향 등을 변수로 하여 공진 주파수와 공진 모드에 따른 변위량 등을 예측하였고 압전 액츄에이터를 최적화하는데 사용하였다.

제안된 전방향 초음파 액츄에이터의 구동원리는 그림 3.6.1과 같다.

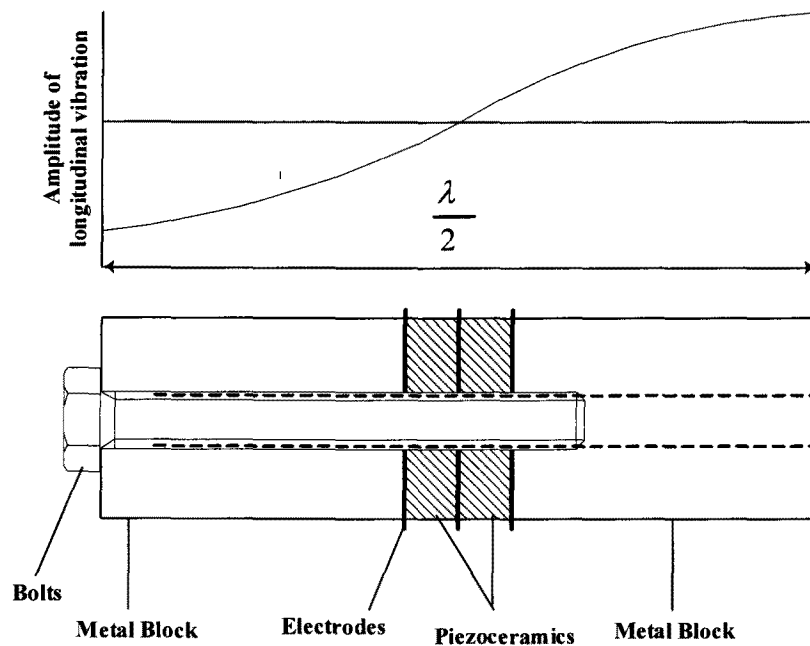


그림 3.6.1 라주반 진동의 원리

이 액츄에이터는 라주반 진동의 원리를 이용하였고 종진동 변위를 키우기 위하여 2개의 디스크형 세라믹스를 전극을 입히고 그 위와 아래에 Stainless Steel body가 볼트로 조여져 있는 구조이다.[6][7]

몸체의 길이는 전파되는 종파의 파장 λ 의 $1/2$ 로 되고 금속 블록의 끝단에서 진동의 크기가 최대가 되어 압전소자의 진동을 키울 수 있는 구조이다. 결론적으로 이 이론은 압전 세라믹 양단에 금속 진동체를 두고 볼트의 압력을 통하여 연결하고 압전세라믹의 종효과를 증대시키는 진동이론이다. 이 이론에 바탕을 두고 액츄에이터를 설계 하였으며 그림 3.6.2는 시뮬레이션을 위해 설계된 전방향 초음파 액츄에이터의 구조이다.

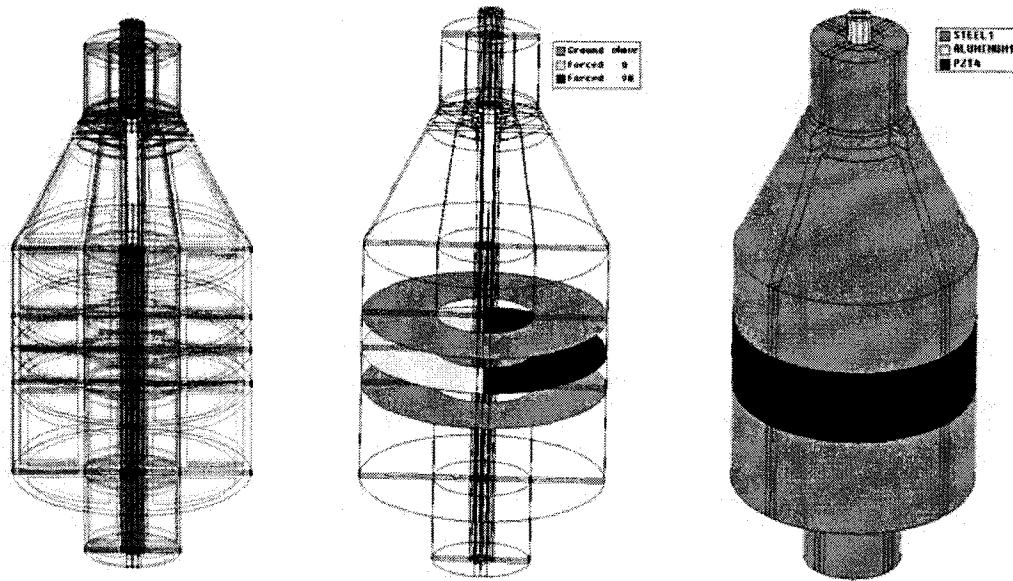


그림 3.6.2 제안된 전방향 초음파 액추에이터 구조

이 액추에이터는 높이가 50mm이고 직경이 $\Phi 20$ 인 콘타입의 액추에이터로 그 끝엔 알루미나로 된 접촉점을 가진다. 또한 전방향성을 갖게 하기 위하여 두 개의 링 세라믹의 전극은 4등분 되어 있으며 이 분할된 전극에 서로 다른 정현파를 인가하여 구동된다.

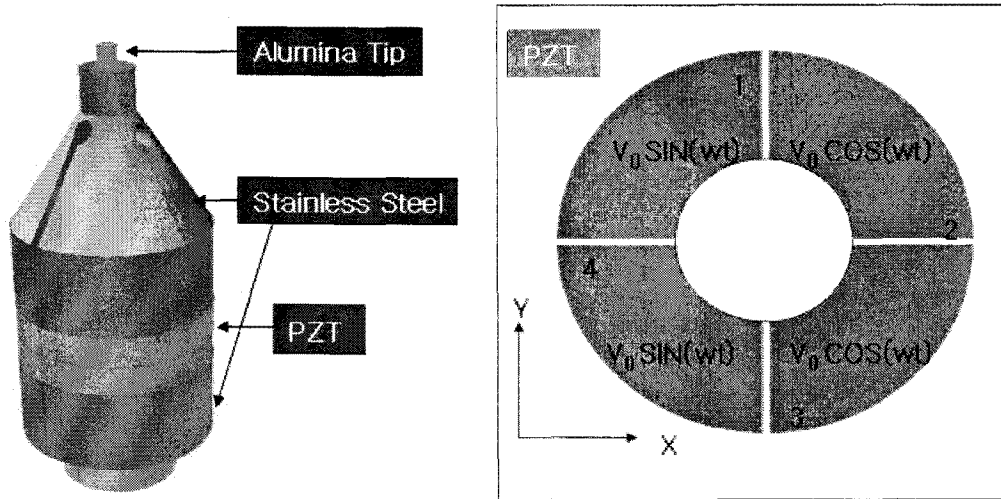


그림 3.6.3 전방향 초음파 액추에이터의 재질 및 세라믹 전극

우선, 이 액추에이터의 적절한 구동 주파수를 얻기 위하여 어드미턴스 특성을 Atila로 분석하였고 모달 분석 결과는 그림 3.6.4와 같다.

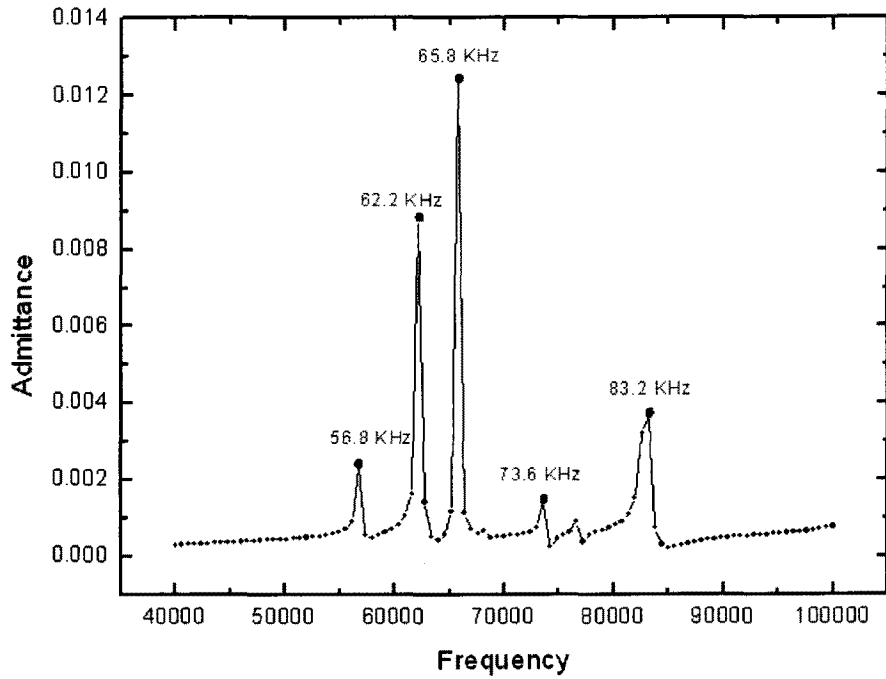


그림 3.6.4 전방향 액츄에이터의 어드미턴스 특성

주파수 대역은 40kHz에서 100kHz까지이고 약 5개의 공진 주파수를 갖는 결과를 얻었다. 각 공진 주파수에서의 액츄에이터 움직임을 분석 하였고 그 결과는 그림 3.6.5, 6, 7, 8과 같다.

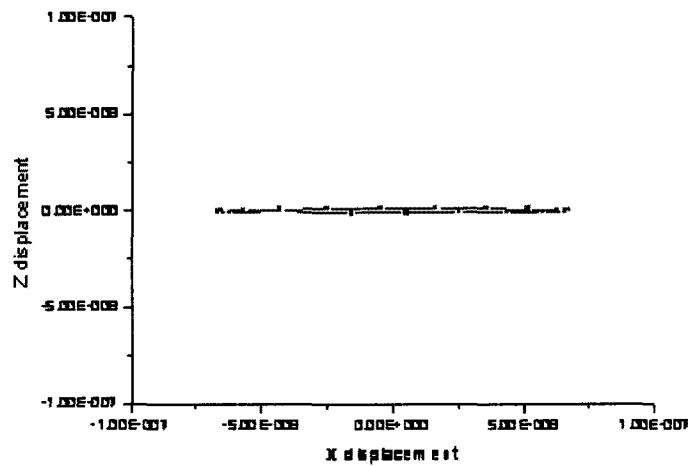


그림 3.6.5 56.8 kHz에서의 액츄에이터의 변위

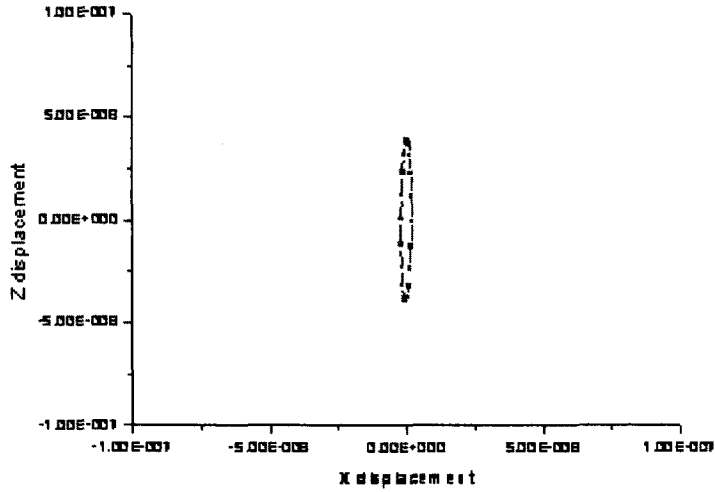


그림 3.6.6 62.2 kHz에서의 액츄에이터 변위

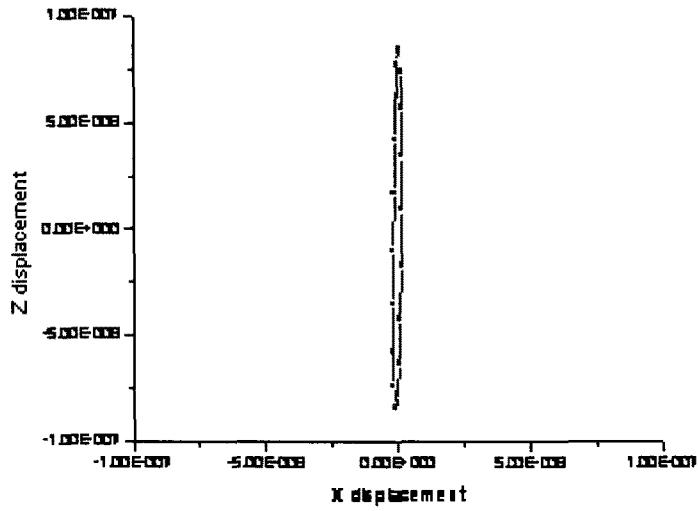


그림 3.6.7 65.8 kHz에서의 액츄에이터 변위

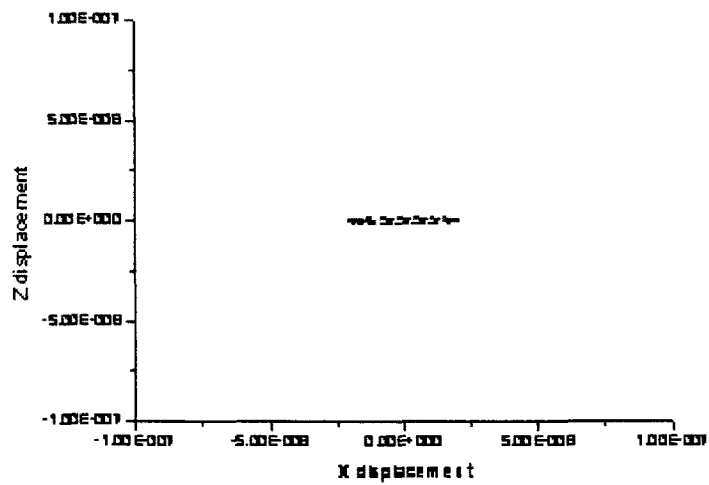


그림 3.6.8 73.6 kHz에서의 액츄에이터 변위

공진 주파수 영역에서의 움직임은 X 또는 Y 축으로 움직이는 모드와 Z 축으로만 움직이는 모드로 나눌 수 있으며 각각을 Transverse mode 와 longitudinal mode라 한다. 그림 3.6.5와 그림 3.6.8은 transverse mode이고 그림 3.6.6과 그림 3.6.7은 longitudinal mode이다. 또한 동작 모드는 first mode와 second mode 로 나눌 수 있으며 각 공진 영역에서의 동작 모드를 정리하면 다음과 같다.

- 56.8 kHz : first transverse mode
- 62.2 kHz : first longitudinal mode
- 65.8 kHz : second longitudinal mode
- 73.6 kHz : second transverse mode

그러나 전방향 초음파 액추에이터의 움직임 구현을 위해서는 타원 운동을 해야되며 이것은 longitudinal 모드와 transverse 모드 사이에 발생되고 이를 혼합 모드(mixed mode)라 한다. 따라서 전방향 초음파 액추에이터 구동을 위한 최적의 주파수를 확인하기 위하여 56 kHz에서 66 kHz까지 세밀하게 분석하였고 시뮬레이션을 위한 주파수는 다음 그림 3.6.9와 같다.

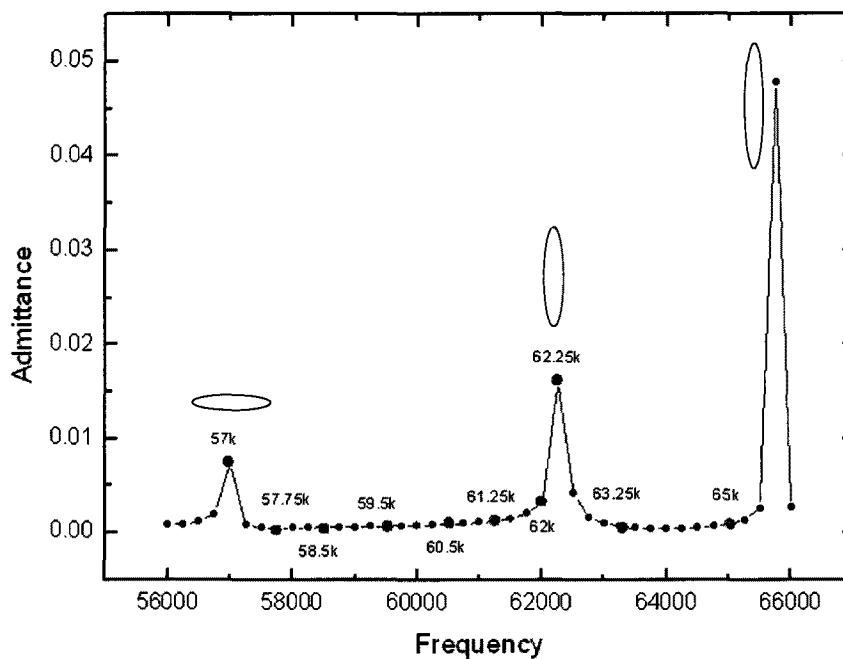


그림 3.6.9 56 kHz부터 66 kHz 까지의 어드미턴스 특성

총 8개의 주파수를 분석하였으며 혼합 모드 구간에서 액추에이터의 움직임은 타원 궤적을 그리며 그 분석 결과는 그림 3.6.10 과 그림 3.6.11에서 보여준다.

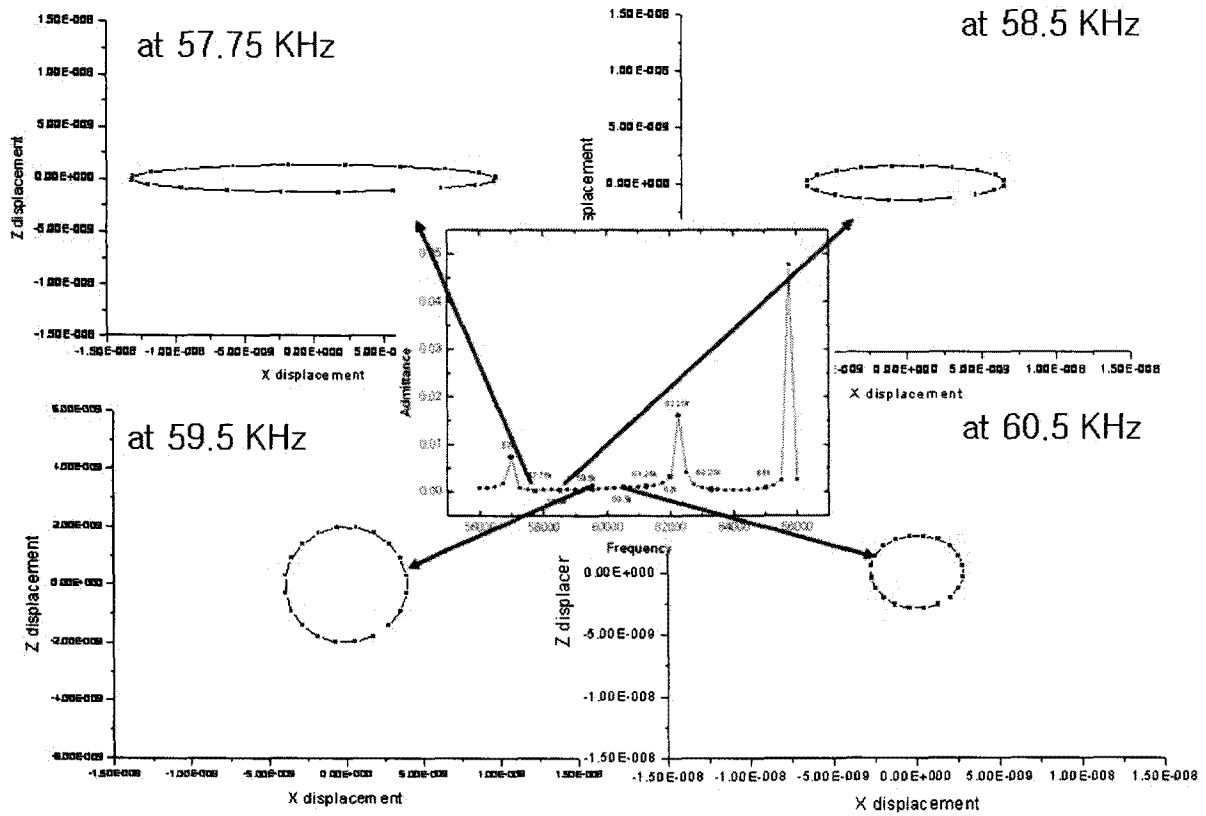


그림 3.6.10 혼합 모드 시뮬레이션 결과 I

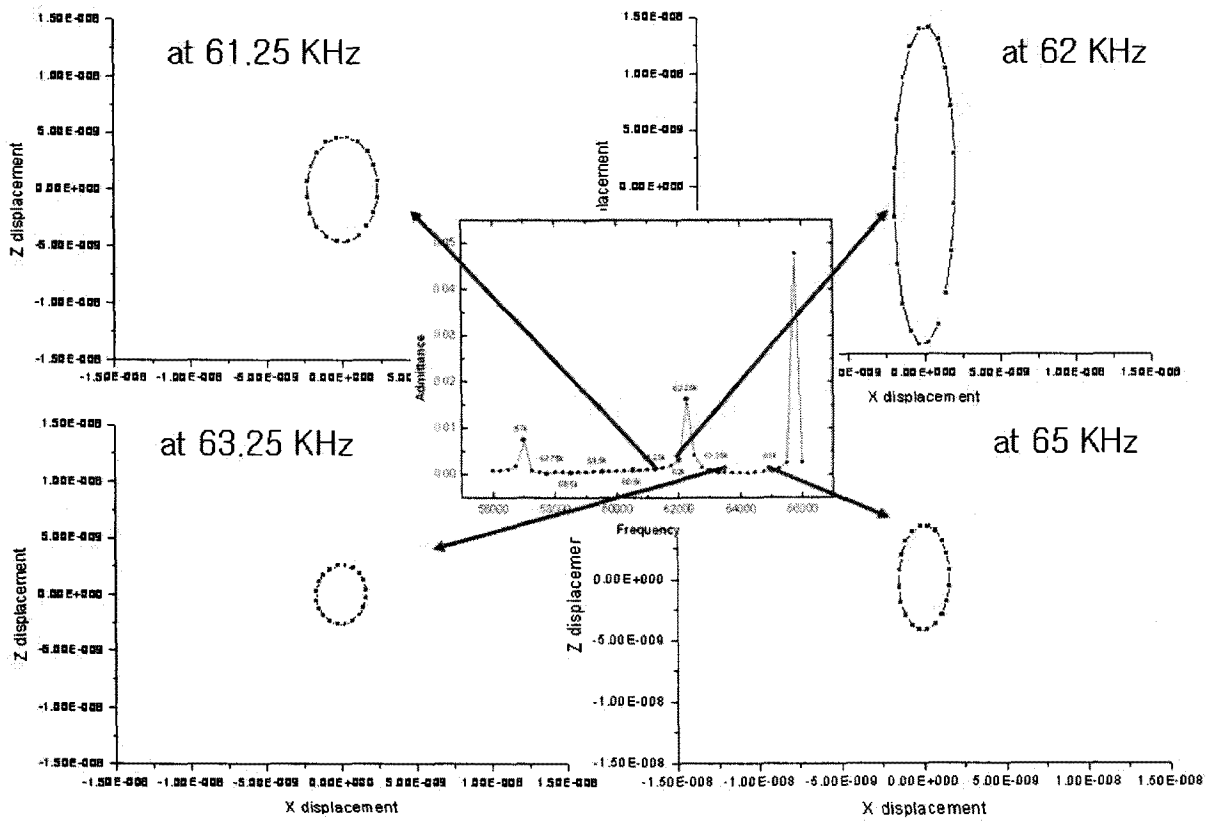


그림 3.6.11 혼합 모드 시뮬레이션 결과 II

결과를 통하여 액추에이터 구동을 위한 주파수는 transverse 와 longitudinal 모드 사이에서 타원 궤적을 확인 할 수 있었고 longitudinal 모드에 가까워질수록 Z 변위가 커지면 높은 토크와 낮은 스피드의 특성을 갖고 transverse 모드에 가까워질수록 X 또는 Y 변위가 커지며 낮은 토크와 높은 스피드의 특성을 갖는 것을 예측할 수 있다.

제안된 액추에이터의 기본적인 4방향 구동을 위한 신호는 그림 3.6.12와 같다.

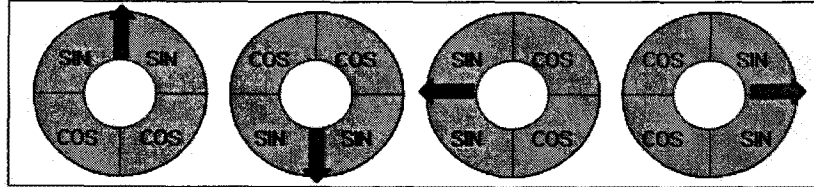


그림 3.6.12 기본적인 4방향 구동방법

그림 3.6.13은 XZ축 변위만을 갖도록 시뮬레이션을 하였고 그림 3.6.12의 위쪽 방향으로의 구동을 나타내고 그림 3.6.14는 YZ축 변위만을 갖으며 좌측 방향으로의 구동시 나타난 시뮬레이션 결과이다.

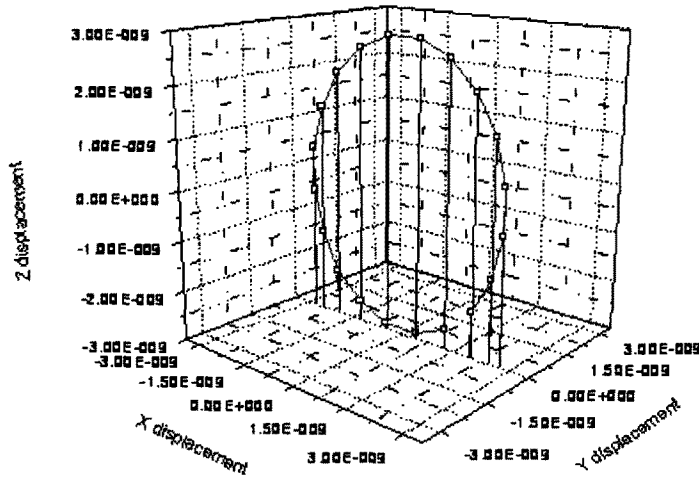


그림 3.6.13 XZ축 변위를 갖는 시뮬레이션 결과

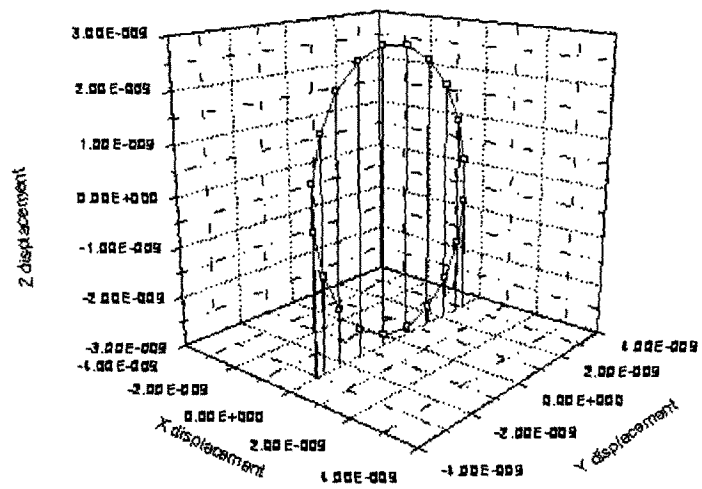


그림 3.6.14 YZ축 변위를 갖는 시뮬레이션 결과

3.7. 전방향 압전 리니어 액츄에이터 구동회로와 실험

본 절에서는 제작된 액츄에이터 스테이지 그리고 구동회로를 나타내었고 시뮬레이션 결과와 실험 데이터를 비교 분석하여 나타내었다.

그림 3.7.1은 실제 제작된 액츄에이터의 모습이다.

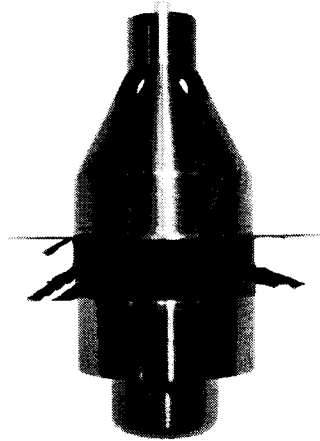


그림 3.7.1 제작된 전방향 초음파 액츄에이터

또한 제작된 액츄에이터의 구동을 테스트하기 위하여 그림 3.7.2와 같은 스테이지를 제작하였다.

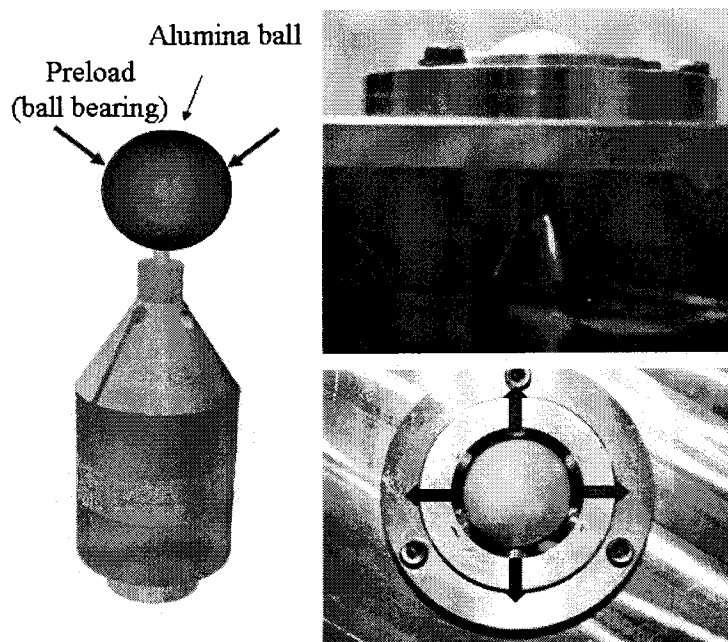


그림 3.7.2 전방향 액츄에이터 스테이지

제작된 스테이지는 베어링을 사용하여 액츄에이터와 함께 알루미나 볼을 압착하고 있고 액츄에이터가 스테이지에 장착되었을 때의 어드미턴스 특성은 그림 3.7.3과 같다.

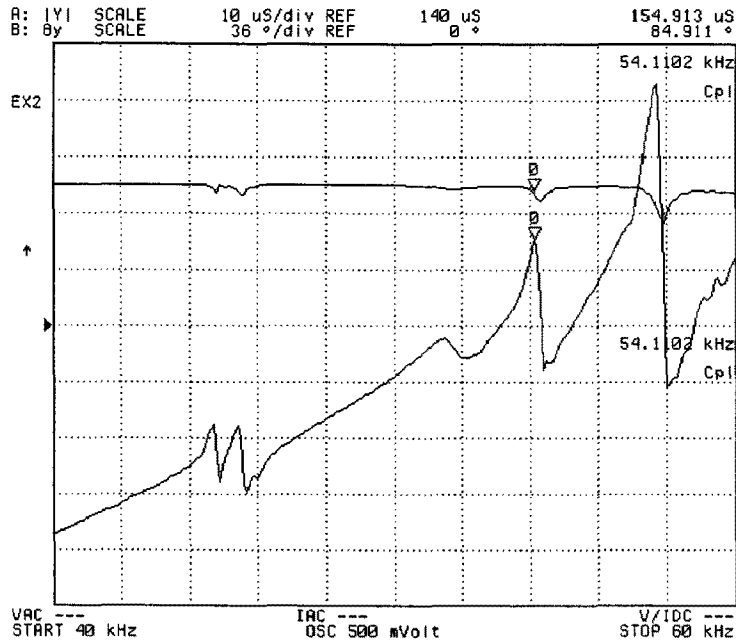


그림 3.7.3 스테이지 장착된 액추에이터의 어드미턴스 특성

시뮬레이션을 통하여 액추에이터의 구동 주파수는 대략 48 kHz에서 58 kHz 사이에서 사용 가능함을 예측할 수 있다. 또한 54 kHz, 45 kHz 그리고 57 kHz는 공진 주파수로 Transverse 모드와 Longitudinal 모드로 간주 될 수 있다.

이 주파수 내에서 액추에이터의 최적의 주파수를 찾아야 하며 이는 실제 구동을 통해 확인해야 하고 본 연구에서는 액추에이터 구동을 위하여 드라이버를 제작하였다.

그림 3.7.4는 액추에이터 구동을 위한 블록도를 보여준다.

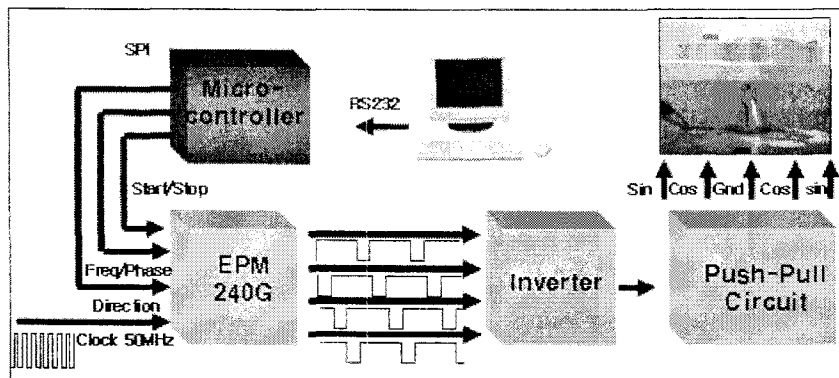


그림 3.7.4 전방향 액추에이터 구동 블록 다이어그램

구동원리는 최초 PC에서 RS232 통신을 이용하여 마이크로 컨트롤러에 주파수 데이터 또는 위상차 데이터를 보내게 된다. 마이크로 컨트롤러는 받은 데이터를 SPI 통신을 통하여 다시 EPM240G로 보내게 되고 이 칩에서는 데이터에 맞는 펄스를 생산한다. 또한 마이크로 컨트롤러는 전방향 액추에이터의 구동 시작 및 멈춤 신호를 보낼 수 있다. 생

산된 펄스들은 인버터를 거친 후에 Push-Pull 회로를 거쳐서 약 300 V_{p-p}의 출력을 갖게 되고 전방향 스테이지는 이 신호를 입력으로 구동하게 된다.

EPM240G는 Altera사의 PLD 칩이며 그림 3.7.5와 같이 내부적으로 DDS (Direct Digital Synthesis)와 링 카운터로 구성되어 있다.

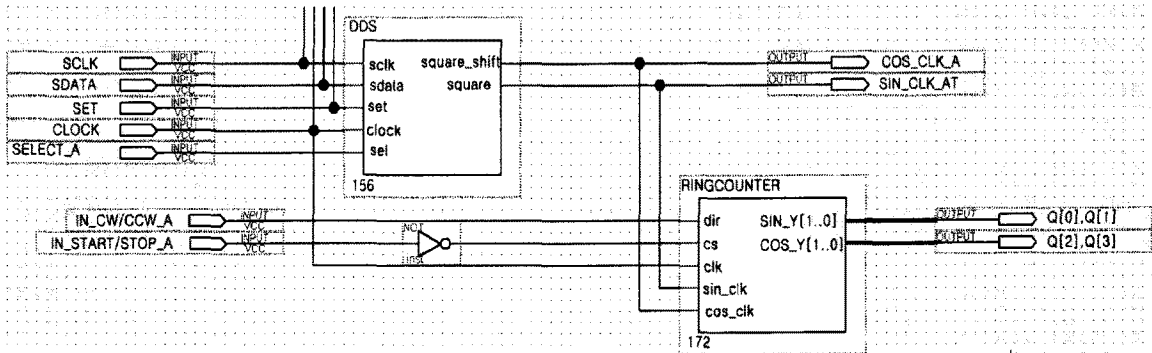


그림 3.7.5 EPM240G의 내부 구성

EPM 240G의 출력은 다음과 같다.

$$f_D = \frac{(50\text{MHz} \times \text{DATA})}{2^{22}}$$

여기서, DATA는 마이크로 컨트롤에서 보낸 16비트 데이터이며 f_D 는 DDS 회로의 출력이 되고 이 데이터는 링 카운터의 거쳐 4분주되고 다음식을 통해 4개의 출력을 갖는다.

$$f_Q = \frac{f_D}{4}$$

여기서 f_Q 는 Q[0], Q[1], Q[2] 그리고 Q[3]를 나타내고 90도의 위상차를 갖는다.

예로, 42 kHz의 구동 주파수를 출력해야 한다면, f_D 는 168 kHz이고 14093의 디지털 값을 갖는다. 또한, Push-Pull 회로의 출력을 사인파로 변환과 노이즈 제거를 위하여 액츄에이터와 드라이버 사이에 그림 3.7.6과 같은 LC 매칭을 한다.

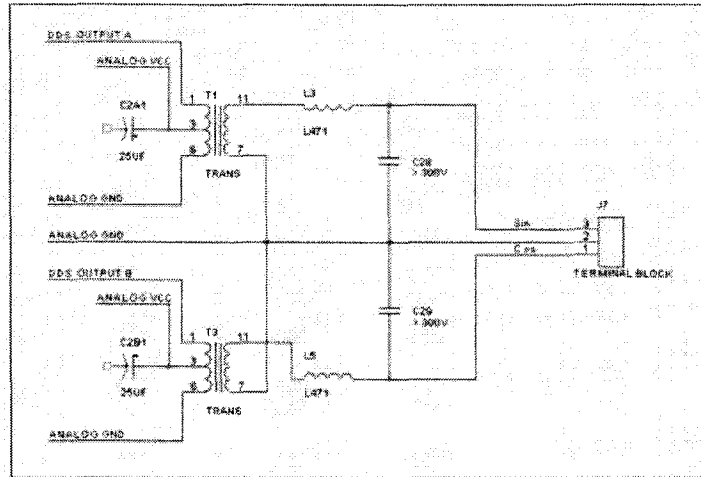


그림 3.7.6 LC 매칭을 위한 회로 구성

그림 3.7.7은 제작된 액츄에이터 드라이버를 보여주고 그림 3.7.8은 출력된 파형을 보여주고 있다.

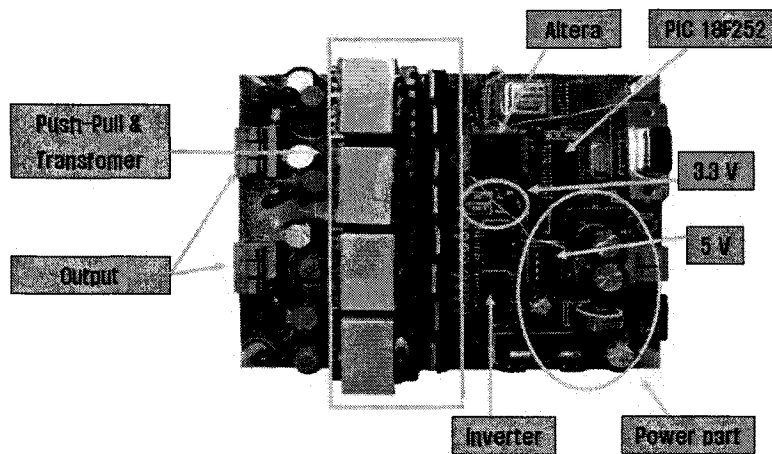


그림 3.7.7 전방향 초음파 액츄에이터 구동 드라이버

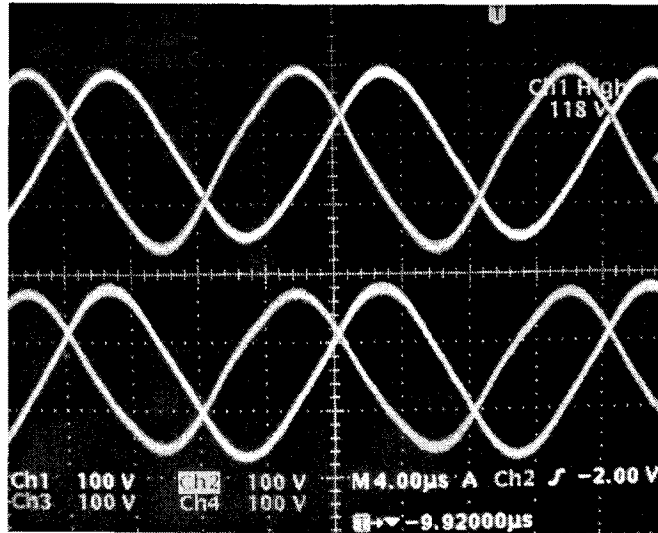


그림 3.7.8 구동 드라이버의 출력 파형

전방향 액츄에이터 스테이지에 4개의 정현파를 인가하였을 때 알루미늄 팁의 변위를 Laser Vibrometer를 통하여 측정하였고 그 결과는 그림 3.7.9와 같다.

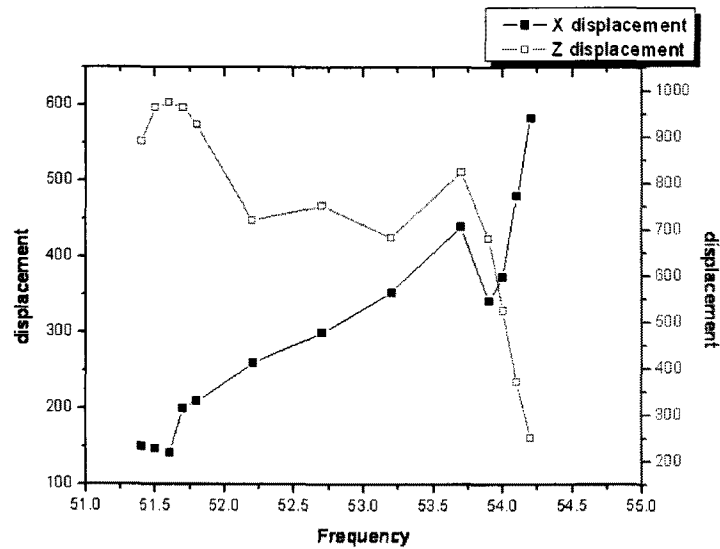


그림 3.7.9 알루미늄 팁의 변위

알루미늄 팁의 변위를 테스트 한 결과 이 액츄에이터는 구동 대역은 약 53 kHz에서 54 kHz 사이에서 X와 Z축의 변위가 크고 약 53.5 kHz에서 그림 3.2.12와 같이 4방향 구동을 테스트 하였다.

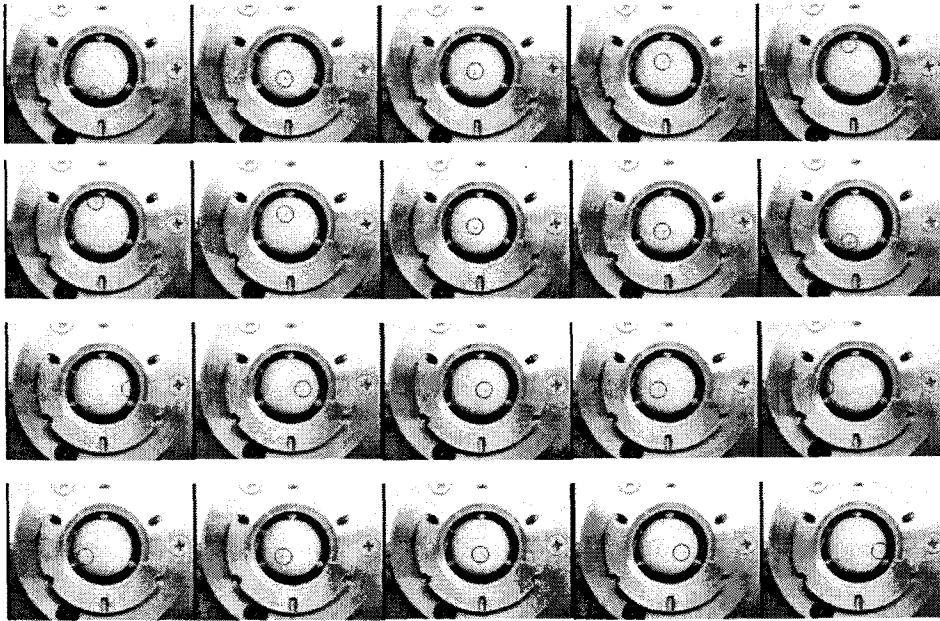


그림 3.7.10 전방향 초음파 액추에이터의 4방향 구동 테스트 결과

알루미나 볼에 검은 표시를 해두었고 움직이는 모습을 동영상으로 촬영하였으며 실험 결과 4개의 정현파의 조합에 따라 각각의 원하는 방향으로 정확히 움직이는 것을 확인하였다.

여백

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

구분	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1차년도	액츄에이터용 소재 설계기술	액츄에이터용 고성능 저온소결 압전 소재 개발	100
	진동속도 측정 장치 set-up	nm 해상도 Laser vibrometer 변위 측정 시스템 구축	100
	액츄에이터 발진회로 설계	Push-pull 구동회로 설계	100
2차년도	일체형 리니어 액츄에이터 설계	Shaking beam 리니어 압전 액츄에이터 설계	100
	마찰재에 따른 선형 액츄에이터 특성	마찰 특성 고찰	100
	마찰재 개발	최적 마찰재 선정	100
3차년도	액츄에이터 발진/제어 기술 확립	고전압 구동 회로 및 nm 해상도 제어 회로 구현	100
	스테이지 설계 기술 확립	일축 압전 액츄에이터 스테이지 설계	100
	일축 나노구동 stage 시제품	일축 압전 액츄에이터 스테이지 설계 및 제작	100
4차년도	Conical concentrator 전방향성 리니어 액츄에이터 개발	4개의 구역으로 분리된 conical concentrator 전방향성 리니어 액츄에이터 설계	100
	압전세라믹스의 진동해석	압전 액츄에이터의 진동 해석 시스템 구축	100
5차년도	초소형 압전 리니어 액츄에이터	conical concentrator 전방향성 리니어 액츄에이터 개발	100
	전방향 액츄에이터 구동회로	4상 제어가 가능한 구동 회로 개발	100

본 연구 과제 수행을 통해 다음과 같은 기술을 확보하여, 전방향성 리니어 압전 액츄에이터 및 정밀 스테이지 기술 발전에 기여하였다.

o 액츄에이터용 소재 기술

- 압전 액츄에이터용 고성능 압전 소재를 개발하였는데, 이는 900℃ 이하의 소결 온도를 갖는 고성능 압전 소재로서 적층형 압전 소재 및 응용에 적합한 소재.
- 적층형 액츄에이터에 적용이 가능함에 따라 압전 액츄에이터가 가지고 있는 높은 구동 전압을 낮춰 저전압 구동이 가능한 압전 액츄에이터의 개발이 가능케 함.

○ 일축 선형 액츄에이터 기술

- Shaking beam이라는 독자적 설계를 개발함으로써, point contact type 압전 액츄에이터 분야의 새로운 형태를 제시함.
- 압전 액츄에이터 설계 기술에 있어서 선진국에 비해 비교적 기술력이 낮은 국내 연구 수준을 한단계 진일보.

○ 전방향 선형 액츄에이터 기술

- 하나의 액츄에이터로 xy 평면의 어느 방향으로든 운동이 가능하도록 하는 전방향 압전 액츄에이터를 개발함으로써, 반도체 및 정밀 기기, 로봇 등 분야에서 새로운 액츄에이터를 제시.

○ 압전 액츄에이터 구동 및 제어 회로 기술

- 개발된 압전 액츄에이터의 특성을 극대화할 수 있도록 개발된 구동 및 제어 회로.

○ 압전 액츄에이터의 기계적 특성 평가 기술

- 압전 액츄에이터의 진동 특성 평가 등 기계적 특성 평가로 최적 구동 조건을 규명하였으며, 이를 위한 시스템 확보로 선진국 수준의 압전 액츄에이터 특성 평가 기술 확보.

○ xy 스테이지 기술

- 압전 액츄에이터를 이용한 xy 스테이지 설계 기술을 확보함으로써 압전 액츄에이터 기술을 진일보 하였음.

○ 국제 기술 교류 네트워크

- 매년 정기적으로 개최되는 IWPMA workshop을 한국 KIST에서 최초 설립하였고, 현재 독일, 터키, 중국 등에서 개최되었음.
- 본 과제의 다자간 공동 연구 국가인 미국, 독일, 리투아니아를 비롯하여, 일본, 중국, 터키 등 매년 압전 소재 및 소자 관련 전문가들의 참여율이 높아지고 있음.
- IWPMA workshop을 통해 국내 압전 전문가들의 기술 교류가 더욱 심화되었고, 결속력이 강화되었으며, 관련 분야의 국내 기술의 국제적 위상이 매우 고취됨.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 압전 액츄에이터는 전기 신호, 즉 전압의 인가에 따라 기계적인 변위가 발생하는 압전 세라믹스의 특성을 이용한 것으로, 전력 소비가 낮으며, 정밀한 변위 제어가 가능함. 최근 메카트로닉스와 정보통신의 발전에 따라 정밀 위치 제어의 핵심부품으로 기대되고 있으며, 광학기기, 정밀가공기기, 로봇, 분석기기 등에 응용분야가 확대됨.
- 전세계적으로 압전 기술과 관련된 미래산업에서는 산업 고도화, 정밀화, 소형화 등의 산업 동향에 따라 우수한 압전 특성을 갖는 압전 소재 부분과 이를 이용한 압전 소자, 즉, 압전 센서, 액츄에이터 등의 개발이 더욱 가속화될 것으로 전망.
- 현재 압전 액츄에이터(압전모터 포함)의 세계 시장 규모는 2006년 \$ 5.3 billion, 2011년 \$ 10.7 billion이며 매년 19.2%의 고 성장률을 나타내고 있으며, 2006년부터 2011년 사이의 평균 성장률은 15.1%로 추정하고 있음.

구 분	2006 년	2009 년	2011년
세계 시장 규모	5조 3,000 억원	7조 5,000억원	10조 7,000억원

[자료 : “Piezoelectric Operated Actuators and Motors”-A Global Industry and Market Analysis]

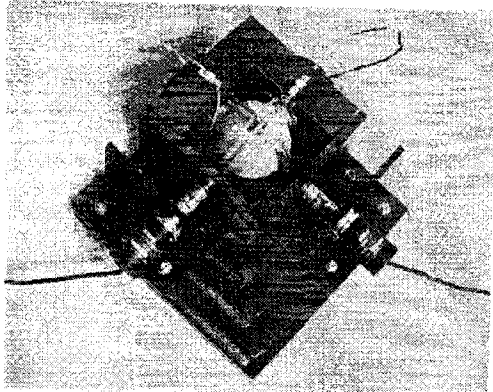
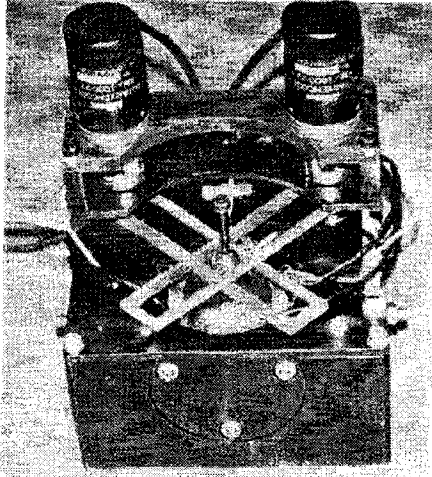
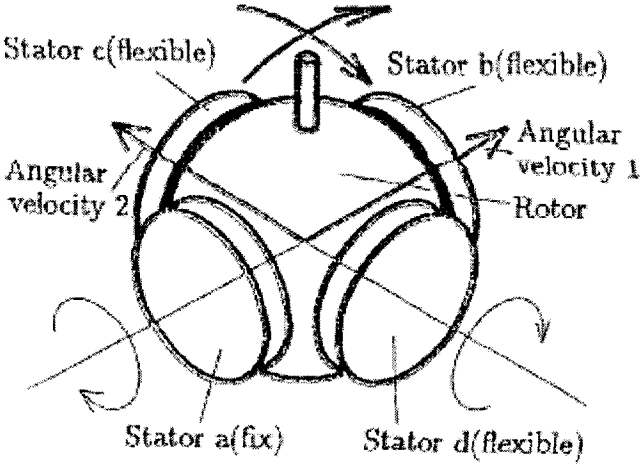
- 그러나 국내 시장의 경우 전자, 의료, 정밀기계 등에 적용될 시장은 일부 형성되어 있으나 대부분 외국 제품 등을 수입하여 사용하고 이러한 외산 제품들이 고가이므로 이를 이용한 제품 상용화할 수준이 되지 못하고 있으며, 국내 소자 개발업체들의 개발은 미진한 실정이며 초기단계임.
- 특히, 나노 연구 분야 및 응용에 대한 관심이 높아지는 현 시점에서 압전 액츄에이터를 이용한 산업은 반도체와 같이 고부가가치 산업으로서 발전 가능성이 큼.
- 일반적으로 구동 액츄에이터는 사회 및 산업의 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있는 부품으로서, 과거 산업용 기계의 핵심 구동원으로 중대형 구동 액츄에이터산업이 발전한 이후로 디지털 문명의 성숙기를 맞고 있는 최근에는 정밀산업의 다변화, 각종 IT 기기들의 급성장에 힘입어 나노급 초소형정밀 구동 액츄에이터 분야가 크게 발전하고 있으며, 21세기 디지털 기기산업의 중추적 부품분야의 하나로서 그 중요성이 매우 커지고 있음.
- 본 연구 개발을 통해 획득한 전방향성 압전 액츄에이터 및 스테이지 기술은 현재 관련 기업과의 기술 이전을 진행 중에 있으며, 각종 정밀 기기 및 반도체 장비에 활용을 위해 준비 중.
- 전방향성 압전 액츄에이터 기술은 다자간 국제 연구 교류를 통해 선진국 수준에 도달 하였음에도 불구하고, 이를 이용한 스테이지 기술로의 완전한 기술 개발이 이루어지지 못하였음. 압전 스테이지 관련 국제 기술 협력으로 국내 기술의 발전을 고취해야 할 것으로 사료됨.

여백

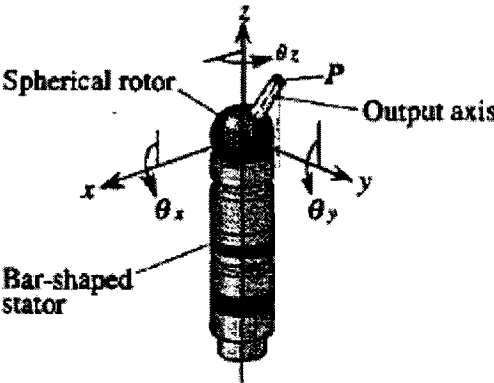
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

순서	제 목
1	Development of Multi-Degree of Freedom Spherical Ultrasonic Motor
2	Multi degree of freedom Spherical Ultrasonic Motor
3	An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and Longitudinal Vibrations of aSingle Stator.
4	Control of Multi-DOF Ultrasonic Motor using Neural Network based Inverse Model
5	Control Method of a Spherical Ultrasonic Motor
6	Modelling and analysis of omni-directional piezoelectric actuator

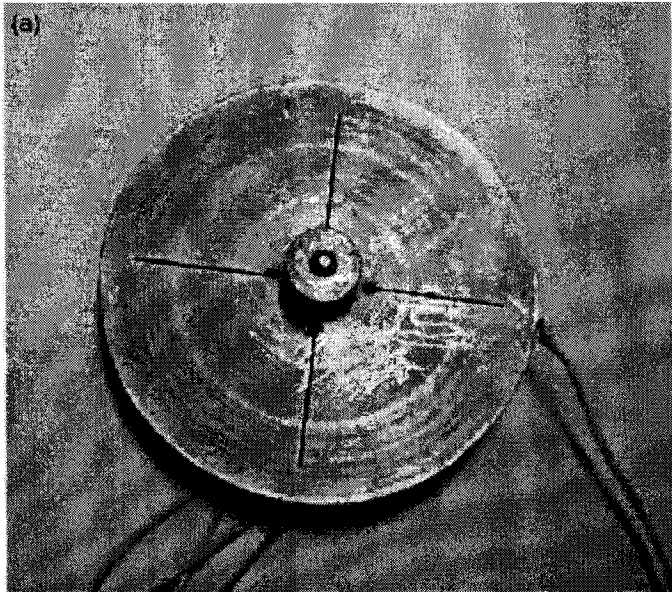
제목	Development of Multi-Degree of Freedom Spherical Ultrasonic Motor		
저자	Toyama Shigeki	저널명	Proceedings of the international symposium on industrial robots v.25
내용	<p>This paper presents the design concepts of a multi-degree of freedom spherical ultrasonic motor. It is expected to be applied to not only robotic manipulator's actuator capable of multi-degree motion in single joint but also assembling machine, laser cutting and many fields. For the first time,, the authors have proposed the concept of a new spherical ultrasonic motor based on new principle, and then, investigated the characteristics of disk type ultrasonic motor to determine the optimum design parameters.</p>		
대표도			

제목	Multi degree of freedom Spherical Ultrasonic Motor		
저자	Toyama Shigeki	저널명	IEEE International Conference on Robotics and Automation
내용	<p>This paper presents a multi-degree of freedom spherical ultrasonic motor. As a prototypical spherical ultrasonic motor, we have successfully developed two kinds of spherical ultrasonic motor with two degree of freedom. Each type has good controllability; the motor can drive a spherical rotor about an arbitrary axis; the maximum speed is 30 rpm; the maximum output torque is 0.7kg cm; the maximum positioning error is 0.3 mm. It is expected to be applied to not only robotic manipulator's actuator but also assembling machine, laser cutting and many fields.</p>		
대표도	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>Stator c(flexible) Stator b(flexible)</p> <p>Angular velocity 2 Angular velocity 1</p> <p>Rotor</p> <p>Stator a(fix) Stator d(flexible)</p> </div>		

제목	An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and Longitudinal Vibrations of a Single Stator.		
저자	Takafumi amano	저널명	IEEE Ultrasonics symposium
내용	<p>An ultrasonic actuator with multi-degree of freedom with a single stator is proposed and has been constructed for trial. Three sets of piezoelectric elements are installed in the stator, and two bending vibrations perpendicular to each other and a longitudinal vibration can be excited independently with three separate electrical ports. A spherical rotor is revolved on all the three axes by the combination of these vibrations</p>		
대표도			

제목	Control of Multi-DOF Ultrasonic Motor using Neural Network based Inverse Model		
저자	Kenjiro Takemura	저널명	Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
내용	<p>A multi-DOF ultrasonic motor developed by the authors is capable of generating multi-DOF rotation of a spherical rotor using three orthogonal natural vibrations of a bar-shaped stator. The ultrasonic motor is suitable for making small, light weight and simple multi-DOF motion unit. IN the present paper, a control methodology for the multi-DOF ultrasonic motor is proposed and a motion control test using the method is conducted. First, an inverse model of the multi-DOF ultrasonic motor is developed using our prior knowledge in ultrasonic motors and neural network technique in order to deal with the redundancy and non-linearity of driving characteristics. Second, a novel control method using the inverse model is proposed. Then, motion control tests are conducted to confirm the ability of the proposed control method. The results confirm that the rotor can be rotated around arbitrary rotational axis using the inverse model, and that the proposed control method does work successfully.</p>		
대표도			

제목	Control Method of a Spherical Ultrasonic Motor		
저자	Eko Purwanto	저널명	Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics
내용	<p>In this paper, we propose a control method for controlling an arbitrary orientation of a rotor of a spherical ultrasonic motor (SUSM) by using a magnetized rotor and Hall devices. The arbitrary orientation of the magnetized rotor is determined by detecting the output voltage of the magnetic pole axis measured by Hall devices embedded in the center of each stator. The sensing method offers a size reduction for the entire structure as well as giving the rotor room to move in a wider range, since there is no restriction from geometry constraints of sensor devices, such as rotary encoders or potentiometers. We describe a method for detecting the arbitrary orientation of the magnetized rotor and the magnetization method of the rotor. The experimental results show that the magnetic field generated around the rotor is equally distributed, and confirm the validity of the proposed control method.</p>		
대표도	<p>(a) Front view</p> <p>(b) Top view</p>		

제목	Modelling and analysis of omni-directional piezoelectric actuator		
저자	P. Vasiljev	저널명	Journal of sound and vibration
내용	<p>A study of a novel multi-degree of freedom piezoelectric actuator is given in the paper. Design of the actuator is based on the implementation of bending vibrations of a circular plate. The actuator consists of a vibrating disc with the driving tip mounted at the disc centre and a piezoceramic disc. This actuator can move a slider in two perpendicular directions in the plane and achieve a curvilinear or rotational motion of the positioned object depending on the excitation scheme of the electrodes. Numerical modelling based on the finite element method was performed to find resonant frequencies and modal shapes of the actuator and to calculate the trajectories of contact point's movements under different excitation schemes. The transient dynamic analysis of the actuator was performed to simulate the motion of the slider. A contact between the driving tip, slider and slider-way was taken into account in the finite element model. A prototype actuator was made and measurement results of actuator's top surface's oscillations are given Results of the numerical and experimental investigation are analysed and discussed</p>		
대표도			

여백

제 7 장 참고문헌

- [1] 정형진, 김현재, “산화물 압전재료”, 대한민국특허청 특허공고 91-6710.
- [2] M. S. Young, D. K. Lee, J. W. Choi, and H. J. Kim, " Piezoelectric and dielectric characteristics of PAN-PZT ceramics doped with Nb₂O₅ and MnO₂", *The 5th Internatioanl Meeting of Pacific Rim Ceramic Societies*, 2003.
- [3] T. Sashida, and T. Kenjo, "*An introduction to ultrasonic motors*", Clarendon Press, 1993.
- [4] 이동균, 한득영, 윤석진, “선형초음파 모터의 설계 및 제작”, 한국세라믹학회, Vol. 40, No. 10, pp. 225-228, 2003.
- [5] T. Sashida, and T. Kenjo, "*An introduction to ultrasonic motors*", Clarendon press, 1993.
- [6] S. Ueha, and M. Kurosawa, "Ultrasonic motors", *Ultrasonic Symposium*, pp. 519-522, 1988.
- [7] M. Kurosawa, H. Yamada, and S. Ueha, "Hybrid transducer type ultrasonic linear motor", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 28, Supplement 28-1, pp. 158-160, 1989.
- [8] T. Ikeda, "Studies on the (Ba,Pb)(Ti,Zr)O₃ systems", *Jpn. J. Appl. Phys. Soc.*, Vol.14, No. 2, pp. 168-174, 1959.

여백

부 록

1. 자체평가의견서
2. 연구개발 결과·활용보고서
3. 연구성과 증빙자료 사본

여백

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제코드		K20712000004	
사업구분	국제공동연구사업				
연구분야	0300	0320	과제구분		단위
사업명	다자간 공동연구사업				주관
총괄과제				총괄책임자	
과제명	전방향성 초음파 선형 액츄에이터 개발		과제유형	(기초, 응용, 개발)	
연구기관	한국과학기술연구원		연구책임자	윤석진	
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2003.7-2004.6	300,000		300,000
	2차년도	2004.7-2005.4	250,000		250,000
	3차년도	2005.5-2006.3	270,000		270,000
	4차년도	2006.4-2007.3	200,000		200,000
	5차년도	2007.4-2008.3	80,000		80,000
	계		1,100,000		1,100,000
참여기업					
상대국	미국, 독일, 리투아니아	상대국연구기관	ICAT, HNI, VPU		

2. 평가일 :

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명	서명
한국과학기술연구원	책임연구원, 센터장	윤석진	

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본자료가 전문가 및 전문기관 평가시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	
----	--

I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : (S, A, B, C, D)

독창적 전방향성 압전 액츄에이터 기술 개발 및 특성 평가 기술 확립

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (S, A, B, C, D)

반도체 및 정밀 기기 등 각종 정밀 산업 분야의 응용이 기대됨.

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (S, A, B, C, D)

관련 기업과 지속적으로 개발 기술의 산업화에 대해 토의 및 계획 수립 중.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (S, A, B, C, D)

본 연구 개발 과제를 통해 국제적 기술 교류 성과를 이루었고, 과제의 수행에 있어 성실도가 매우 높음.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : (S, A, B, C, D)

논문 (SCI):

특허 출원: , 등록:

압전 international workshop IWPMA 창설

(매년 국내 5개 기관 이상, 해외 7개 기관 이상이 참여)

II. 연구목표 달성도

번호	세부연구목표 (연구계획서상에 기술된 연구목표)	달성내용	달성도 (%)
1	액추에이터용 소재 설계기술 진동속도 측정 장치 set-up 액추에이터 발진회로 설계	액추에이터용 고성능 저온소결 압전 소재 개발 nm 해상도 Laser vibrometer 변위 측정 시스템 구축 Push-pull 구동회로 설계	100
2	일체형 리니어 액추에이터 설계 마찰재에 따른 선형 액추에이터 특성 마찰재 개발	Shaking beam 리니어 압전 액추에 이터 설계 마찰 특성 고찰 최적 마찰재 선정	100
3	액추에이터 발진/제어 기술 확립 스테이지 설계 기술 확립 일축 나노구동 stage 시제품	고전압 구동 회로 및 nm 해상도 제 어 회로 구현 일축 압전 액추에이터 스테이지 설 계 일축 압전 액추에이터 스테이지 설 계 및 제작	100
4	Conical concentrator 전방향성 리니어 액추에이터 개발 압전세라믹스의 진동해석	4개의 구역으로 분리된 conical concentrator 전방향성 리니어 액추 에이터 설계 압전 액추에이터의 진동 해석 시스 템 구축	100
5	초소형 압전 리니어 액추에이터 전방향 액추에이터 구동회로	conical concentrator 전방향성 리니 어 액추에이터 개발 4상 제어가 가능한 구동 회로 개발	100

Ⅲ. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

압전 선형 액츄에이터 기술에 있어 국제적 수준의 기술 성과를 성취하였음.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

연구 목표의 달성 여부
다자간 국제 공동 연구 여부
국제적 기술 교류장 확립 여부

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

현재 개발된 압전 액츄에이터 기술의 산업화를 추진중에 있음.
다만, 개발된 압전 액츄에이터를 이용한 정밀 압전 스테이지에 대한 연구 개발이 연구
기간 단축으로 지속되지 못해 안정도를 높이지 못한 아쉬움이 큼.

IV. 보안성 검토

1. 연구책임자의 의견

본 과제 수행에 있어 새로운 기술 개발이 이루어지면, 선 특허 출원 후 논문 발표로 기술의 보안성을 확보하는 한편, 기술의 우위성을 알리고 교류하였음. 따라서 기술 교류를 통한 산업화 및 기술 발전의 시너지 효과를 위해 보안과제로 설정할 필요는 없다고 사료됨.

2. 연구기관 자체의 검토결과

상동

연구개발 결과 · 활용보고서

① 과제번호		K20712000004							
② 사업구분	중사업명	국제공동연구							
	세부사업명	다자간 공동연구 사업							
③ 기술분야		소재 · 물질 · 공정분야/세라믹소재기술/전자기 기능재료 (0324)							
④ 연구과제명		전방향성 초음파 선형 액츄에이터 개발		⑤ 연구책임자	윤 석 진				
⑥ 연구기관명		한국과학기술연구원		⑦ 참여기업명					
⑧ 연구기간 및 연구개발비 (단위 : 천원)	연구기간 (년 월)		정부출연금	정부이외출연금	기업부담금	총연구비			
	1차	2003.7-2004.6	300,000			300,000			
	2차	2004.7-2005.4	250,000			250,000			
	3차	2005.5-2006.3	270,000			270,000			
	4차	2006.4-2007.3	200,000			200,000			
	5차	2007.4-2008.3	80,000			80,000			
	합계		1,100,000			1,100,000			
⑨ 연구개발성과의 활용 (해당란에 "○"표시)									
기업화 완료		기업화 추진중		2단계 연구추진		선행 및 기초 연구 활용			
기타목적 활용		연구성과 활용중단							
		○							
기타목적 활용실적을 선택한 경우 구체적인 활용실적을 서술									
⑩ 기업화(기업화 완료 또는 추진중인 경우, 반드시 기재)									
업 체 명		(주)피에조테크놀리지		기업화 완료() 기업화 예정(○)		년 월 일			
제 품 명		압전 선형 액츄에이터		제 품 용 도		정밀 스테이지			
기업화이용유형중 택일(해당란에 "√"표시)		신제품개발(○), 기존제품 개선(), 신공정개발(), 기존공정개선(), 기타()							
⑪ 기술료 징수(기업화 완료이거나 기술실시계약을 체결한 경우 기재)									
징 수 조 건				징 수 현 황		천원(전년도말 현재)			
⑫ 산업재산권(발명특허, 실용신안, 의장, 상표, 규격 등으로 구분하고, 산업재산권명을 세부적으로 전부(건별로)기록,국외인 경우 반드시 국명을 기록)									
구 분	산업재산권명칭 (총 11 건수)	국 명	출원			등록			기 타
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
※ 별지 참조									

⑬ 국내외 전문학술지 논문게재(전문학술지명을 세부적으로 전부(건별로)기록하고, 국외인 경우 반드시 국명을 기록)-본 연구과제 수행결과로서 발표하거나 게재한 것만 기재할 것						
학술지 명칭 (총 13 건수)	제목	년도	호	발행기관	국명	SCI여부
※ 별지 참조						
⑭ 학술회의 논문발표(학술회의명을 세부적으로 전부(건별로)기록하고, 국외인 경우 반드시 국명을 기록)-본 연구과제 수행결과로서 발표한 것만 기재할 것						
학술회의 명칭 (총 건수)	제목	년도	호	장소	국명	
⑮ 실적(1년동안)						
수입대체효과 (백만원/년)	수출증대효과 (백만원/년)	매출증대효과 (백만원/년)	생산성향상 효과 (백만원/년)	고용창출효과 (인력양성인원수)	기타	
⑯ 향후 기대효과						
수입대체효과 (백만원/년)	수출증대효과 (백만원/년)	매출증대효과 (백만원/년)	생산성향상 효과 (백만원/년)	고용창출효과 (인력양성인원수)	기타	
⑰ 타 연구개발사업에의 활용						
과제발주체(부처)		사업명	과제명	책임자		
⑱ 연구성과활용중단 사유						

※ 각 항목별 기재내용의 분량이 많을 경우, 별지 사용

※ 별지

⑫ 산업재산권

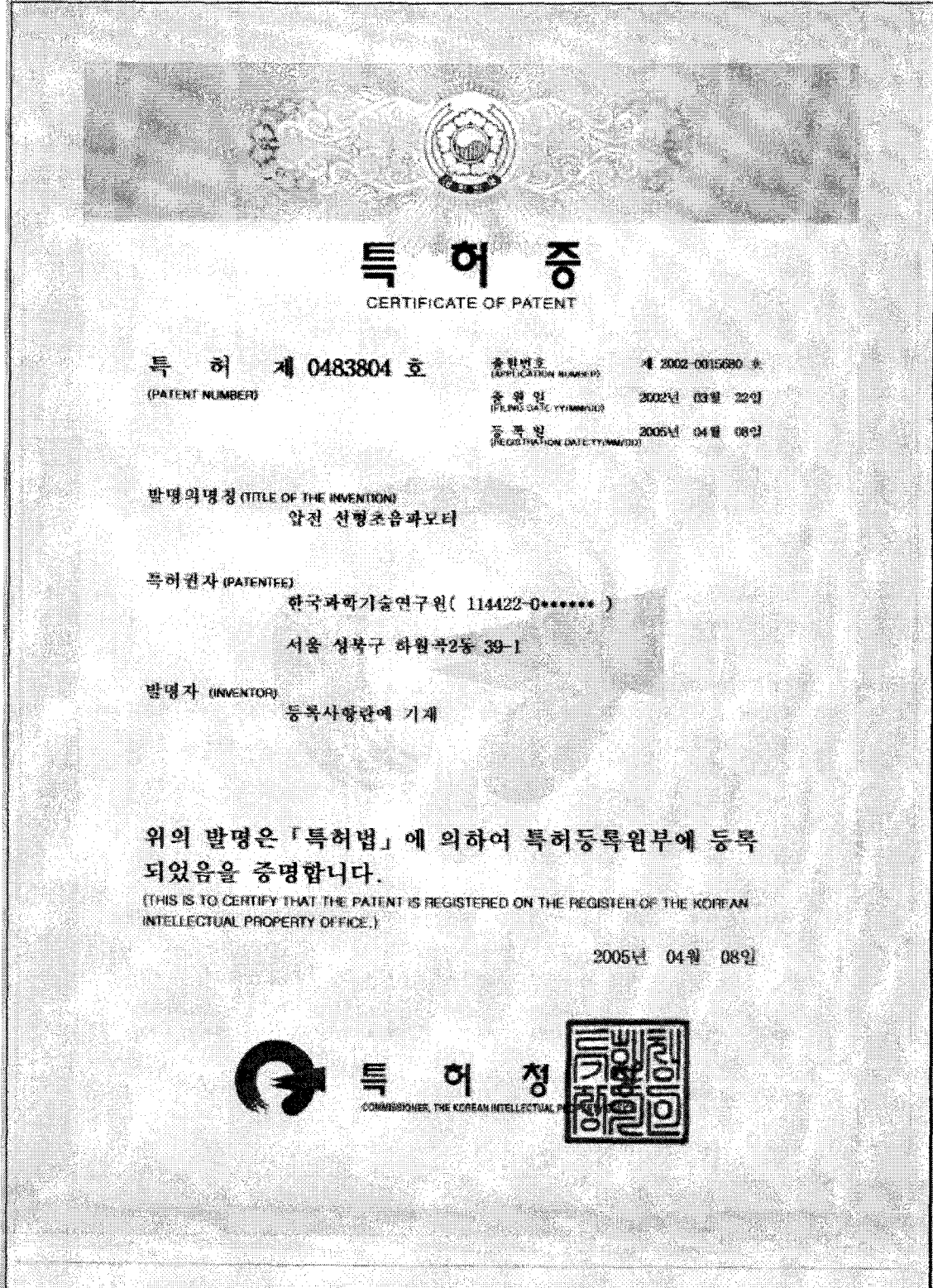
구 분	산업재산권명칭 (총 건수)	구 명	출원			등 록			기타
			출원인	출원 일	출원 번호	등록인	등록 일	등록 번호	
발명특허	압전 선형 초음파 모터	한국	윤석진, 이동균, 바십옵프피오, 강 종윤, 김현재, 최 지원	2002 0322	2002-0 01568 0	윤석진, 이동 균, 바십옵프피 오, 강종윤, 김 현재, 최지원	20050 408	483804	
발명특허	압전 선형 초음파 모터	미국	윤석진, 이동균, 바십옵프피오, 강 종윤, 김현재, 최 지원	2002 0802	10/21 1,868	윤석진, 이동 균, 바십옵프피 오, 강종윤, 김 현재, 최지원	20060 110	6,984,9 20	
발명특허	압전 선형 초음파 모터	일본	윤석진, 이동균, 바십옵프피오, 강 종윤, 김현재, 최 지원	2002 0821	2002-2 40758	윤석진, 이동 균, 바십옵프피 오, 강종윤, 김 현재, 최지원	20051 216	375127 3	
발명특허	복합 압전선형 초음파모터	한국	윤석진, 바십옵프 피오, 이동균, 강 종윤, 김현재, 최 지원	2003 0423	03-258 07	윤석진, 바십옵 프피오, 이동 균, 강종윤, 김 현재, 최지원	20051 117	530867	
발명특허	변위 확대 기구를 이용한 압전 선형 모터	한국	윤석진, 김현재, 고현필, 강종윤	2005 0518	2005-0 04137 6	윤석진 김현재 고현필 강종윤	20070 315	069843 8	
발명특허	변위 확대 기구를 갖는 압전 선형 모터	일본	윤석진, 김현재, 강종윤, 고현필	2005 1227	2005- 37579 1				
발명특허	변위 확대 기구를 갖는 압전 선형 모터	미국	윤석진, 김현재, 고현필, 강종윤	2005 1227	11/31 9,258				
발명특허	저온 소성 압전 세라믹 조성물	한국	강종윤, 윤석진, 김현재, 최지원, 김상중	2006 0329	2006-0 02838 6				
발명특허	전방향성 초음파 압전 액츄에이터 시스템	한국	윤석진, 김현재, 김달영, 강종윤	2005 1115	2005- 01091 93	윤석진 김현재 김달영 강종윤	20070 423	10-0712 591	
발명특허	전방향성 초음파 압전 액츄에이터 시스템	PCT	윤석진, 김현재, 김달영, 강종윤	2006 1115	PCT/ KR20 06/00 4805				
발명특허	전방향성 압전 선형 초음파모터	한국	윤석진, 김현재, 강종윤, 송현철	2008 0403	2008-0 03129 4				

⑬ 국내외 전문학술지 논문게재

학술지 명칭 (총 건수)	제목	년도	호	발행기관	국명	SCI 여부
Japanese Journal of Applied Physics	Compound linear ultrasonic motor based on shaking beam	2004	43 (4A)	Japan Society of Applied Physics	일본	Y
IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control	Analysis of Shaking Beam Actuator for Piezoelectric Linear Ultrasonic Motor	2004	51	IEEE	미국	Y
Materials Chemistry and Physics	The actuator for micro moving of a body in a plane	2005	91	Elsevier	영국	Y
Materials Chemistry and Physics	Optimization of a piezoelectric linear motor in terms of the contact parameters	2005	90	Elsevier	영국	Y
Materials Chemistry and Physics	Wear and dynamic properties of piezoelectric ultrasonic motor with frictional materials coated stator	2005	90	Elsevier	영국	Y
Materials Chemistry and Physics	Effects of ZnO on piezoelectric properties of 0.01PMW-0.41PNN-0.35PT-0.23PZ ceramics	2005	90	Elsevier	영국	Y
Traction on Electrical and Electronic Materials	Optimal Friction Materials of Tiny Piezoelectric Ultrasonic Liner Motor	2005	6[6]	전기전자재료학회	국내	X
Japanese Journal of Applied Physics	Analysis of tiny piezoelectric ultrasonic linear motor	2006	45(5B)	Japan Society of Applied Physics	일본	Y
Journal of electroceramics	A study on the friction and thrust force of the shaft and mobile element in the impact typed piezoelectric ultrasonic linear motor	2006	17	Springer	네덜란드	Y
Journal of electroceramics	Analysis of driving mechanism for tiny piezoelectric linear motor	2006	17	Springer	네덜란드	Y
Journal of electroceramics	Constructions and characteristics of a tiny piezoelectric linear motor using radial mode vibrations	2006	17	Springer	네덜란드	Y
Japanese Journal of Applied Physics	Piezoelectric and Dielectric Properties of 0.05Pb(AI0.5Nb0.5)O3-0.95Pb(Zr0.52Ti0.48)O3 Ceramics Doped with Nb2O5 and MnO2	2007	46(2)	Japan Society of Applied Physics	일본	Y
Japanese Journal of Applied Physics	Low Temperature sintering of ZnO-Doped 0.01Pb(Mg1/2W1/2)O3-0.41Pb(Ni1/3Nb2/3)O3-0.35PbTiO3-0.23PbZrO3 Ceramics	2007	46(1)	Japan Society of Applied Physics	일본	Y

연구성과 증빙 자료 사본

특허증





(12) **United States Patent**
Yoon et al.

(10) **Patent No.:** **US 6,984,920 B2**
 (45) **Date of Patent:** **Jan. 10, 2006**

(54) **LINEAR PIEZOELECTRIC ULTRASONIC MOTOR**

(58) **Field of Classification Search** 310/323.02, 310/323.12, 323.16, 325, 328
 See application file for complete search history.

(73) **Inventors:** **Seok Jin Yoon**, Seoul (KR); **Hyun Jai Kim**, Seoul (KR); **Ji Won Choi**, Seoul (KR); **Chong Yun Kang**, Seoul (KR); **Dong Kyun Lee**, Kyonggi-do (KR); **Piotr Vasiljev**, Vilnius (LT)

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

4,562,374 A * 12/1982 Sashida 310/328
 5,448,128 A * 9/1995 Endo et al. 310/323.12

* cited by examiner

(73) **Assignee:** **Korea Institute of Science and Technology**, Seoul (KR)

Primary Examiner—Mark Budd
 (74) *Attorney, Agent, or Firm*—Harness, Dickey & Pierce, P.L.C.

(*) **Notice:** Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 37 days.

(21) **Appl. No.:** 10/211,868

(57) **ABSTRACT**

(22) **Filed:** Aug. 2, 2002

The present invention relates to a linear motor which draws its operating power from ultrasonic vibration above the frequency of 20 kHz which is generated by piezoelectric ceramic. More particularly, the invention relates to a linear piezoelectric ultrasonic motor which linearly operates a slider due to a frictional force generated by applying sinusoidal electric field with a 90 degree phase difference to a pair of piezoelectric ceramic. This causes an elliptical mechanical vibration on a shaking beam which is connected to the piezoelectric ceramic.

(65) **Priority Publication Data**

US 2003/0178915 A1 Sep. 25, 2003

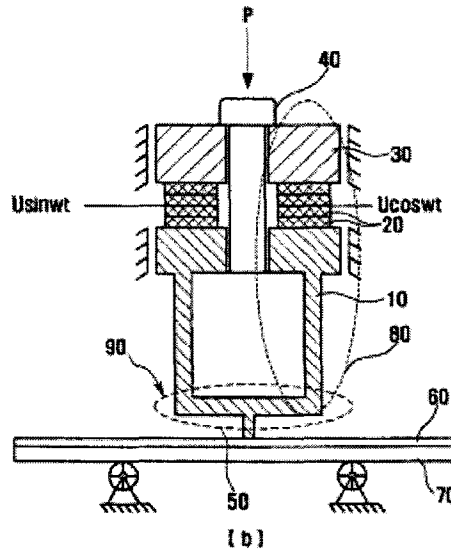
(30) **Foreign Application Priority Data**

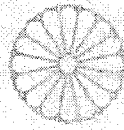
Mar. 22, 2002 (KR) 2002-15688

(51) **Int. Cl.**
H01L 41/08 (2006.01)

(52) **U.S. Cl.** 310/323.12; 310/323.02; 310/323.19

6 Claims, 3 Drawing Sheets





特許証
(CERTIFICATE OF PATENT)

特許第 3 7 5 1 2 7 3 号
(PATENT NUMBER)

発明の名称 (TITLE OF THE INVENTION)

圧電線形超音波モーター

特許権者 (PATENTEE)

大韓民国、ソウル特別市、城北区、卜月谷洞 39-1

国籍 大韓民国

韓国科学技術研究院

発明者 (INVENTOR)

尹錫珍

金賢在

崔志遠

その他別紙記載

出願番号 (APPLICATION NUMBER)

特願 2002-240758

出願年月日 (FILING DATE)

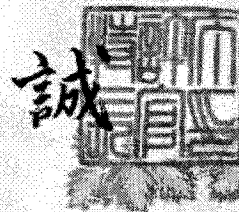
平成 14 年 8 月 21 日 (August 21, 2002)

この発明は、特許するものと確定し、特許原簿に登録されたことを証する。
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE JAPAN PATENT OFFICE.)

平成 17 年 12 月 16 日 (December 16, 2005)

特許庁長官 (COMMISSIONER, JAPAN PATENT OFFICE)

中嶋



008310



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-0698438 호	출원번호 (APPLICATION NUMBER)	제 2005-0041376 호
(PATENT NUMBER)	출원일 (FILING DATE YY/MM/DD)	2005년 05월 18일
	등록일 (REGISTRATION DATE YY/MM/DD)	2007년 03월 15일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
변위 확대 기구를 갖는 압전 선형 모터

특허권자 (PATENTEE)
한국과학기술연구원 (114422-0*****)
서울 성북구 하월곡2동 39-1

발명자 (INVENTOR)
등록사항관에 기재

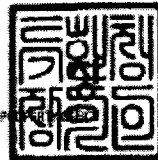
위의 발명은 「특허법」에 의하여 특허등록원부에 등록
되었음을 증명합니다.

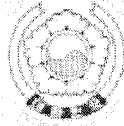
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN
INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2007년 03월 15일



특 허 청
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE





특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 0530867 호

(PATENT NUMBER)

출원번호
(APPLICATION NUMBER)

제 2003-0025807 호

출원일
(FILING DATE (Y/M/D))

2003년 04월 23일

등록일
(REGISTRATION DATE (Y/M/D))

2005년 11월 17일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)

복합 압전선형 초음파모터

특허권자 (PATENTEE)

한국과학기술연구원(114422-0*****)

서울 성북구 하월곡2동 39-1

발명자 (INVENTOR)

등록사항관에 기재

위의 발명은 「특허법」에 의하여 특허등록원부에 등록
되었음을 증명합니다.

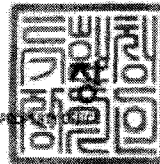
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN
INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2005년 11월 17일



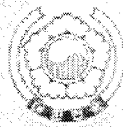
특 허 증

COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE



011951

K03648



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-0712591 호 (PATENT NUMBER)	출원번호 (APPLICATION NUMBER)	제 2005-0109193 호
	출원일 (FILING DATE:YY/MM/DD)	2005년 11월 15일
	등록일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD)	2007년 04월 23일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
전방향성 초음파 압전 액츄에이터 시스템

특허권자 (PATENTEE)
한국과학기술연구원(114422-0*****)
서울 성북구 하월곡2동 39-1

발명자 (INVENTOR)
등록사항관에 기재

위의 발명은 「특허법」에 의하여 특허등록원부에 등록
되었음을 증명합니다.
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN
INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2007년 04월 23일



특 허 증
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE



Compound Linear Ultrasonic Motor Based on Shaking Beam

Dong-Kyun LEE, Deuk-Young HAN¹, Sergejus BORODINAS, Piotr VASILJEV² and Seok-Jin YOON

Thin Film Materials Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea
¹*Department of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea*
²*Vilnius Pedagogical University, Vilnius Lithuania*

(Received July 30, 2003; accepted October 29, 2003; published April 9, 2004)

The transformation of high-frequency vibrations of piezoelectric elements into continuous linear motion of a slider is one of the main tasks of a linear piezoelectric motor. To produce a high thrust force in the piezoelectric linear actuator, we proposed the compound piezoelectric linear actuator based on a "shaking beam" excited by two sources of longitudinal mechanical vibrations shifted by $\pi/2$. The compound actuator consists of two shaking beams and is rigidly fastened. The finite element method (FEM) was used to define structural and electrical boundary conditions for the compound piezoelectric actuator. FEM analysis showed that the compound actuator's trajectory was elliptical. Experimental research has shown that the compound piezoelectric actuator has high thrust force. [DOI: 10.1143/JJAP.43.1454]

KEYWORDS: linear motor, thrust force, shaking beam, mechanical vibration, FEM

1. Introduction

High-speed and high-accuracy positioning systems are essential elements in advanced manufacturing systems such as in the semiconductor industry. Demand for new types of displacement transducers with exact positioning or high accuracy has increased significantly.

There are many distinct constructions of actuators that are used to transform mechanical vibrations of piezoelectric vibrators into the linear or rotational movement of the slider.¹⁾

A new idea for the elliptical trajectory formation of actuator for piezoelectric linear ultrasonic motors is introduced in this paper. Based on the elliptical trajectory formation, a new construction of the actuator, called the "shaking beam", was developed. The elliptical trajectory of the contact point is achieved by superposing two resonance vibration modes of the actuator, i.e., longitudinal and flexural vibrations. A compound piezoelectric linear actuator with two shaking beams which yield high thrust force was introduced to excite an effective vibration in the piezoelectric actuator.

2. Principle of "Shaking Beam" Actuator

Designing an actuator as the main part of an ultrasonic motor involves very complex scientific and engineering problems. We consider three ways of achieving an elliptical trajectory: (1) using a rectangular piezoelectric plate with split electrodes,²⁾ (2) using a ring with a packet actuator,³⁾ and (3) using flat rods near the central zones of displacement.⁴⁾ In addition to the above three ways, we would like to give attention to a new way of moving a slider. One of the purposes of developing a new actuator was to achieve as large a traction force of the motor as possible. The traction force or moment of the ultrasonic motor is proportional to the normal force that presses the actuator to the mobile element (slider or rotor) of the motor.^{4,5)} We introduce a new principle of closed trajectory formation for the contact point of the actuator, using only one excitation mode or resonant oscillation. This principle is based on exciting the ends of the "shaking beam" (Fig. 1) by two harmonic oscillations that have identical frequency but phases shifted by $\pi/2$.

Figure 2 shows the position of the beam through every

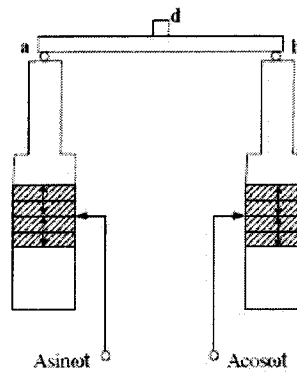


Fig. 1. Mechanical system of the shaking beam.

quarter-vibration period. From movement diagrams, we can see that the middle point "d" of the beam undergoes closed trajectory movement. If a linearly moving slider were pressed to the middle point "d" of the shaking beam, a linear vibrating motor would be obtained.

As shown in Fig. 3, the compound piezoelectric linear motor is composed of two shaking beams. Because A1-A2 has an opposite polarization to B1-B2, and A1-B1 and A2-B2 are excited by two sources ($A \sin \omega t$, $A \cos \omega t$) respectively, the two contact parts of the compound piezoelectric linear motor undergo elliptical trajectories with period $T/2$.

The speed of the moving part of the motor depends on the shaking beam vibration amplitude and frequency, and the pressure load of the normal part, because driving force depends on the friction between the moving part and the contacting part.

3. FEM Modeling of the Compound Piezoelectric Linear Motor

The actuator was modeled using the finite element method (FEM) analysis, because it is one of the most effective numerical methods for engineering problem solving. The

Analysis of Shaking Beam Actuator for Piezoelectric Linear Ultrasonic Motor

Kyongjai Lee, Dong-Kyun Lee, Sergejus Borodinas, Piotr Vasiljev, Sahn Nahm, and Seok-Jin Yoon

Abstract—In this paper, piezoelectric linear ultrasonic motors (PLUM) have been investigated on the elliptic trajectory of a contact point in shaking beam, which has been accomplished by two resonance vibration modes of the actuators. The actuators have generated the vibration modes, longitudinal and flexural, by two longitudinal mechanical vibrations with phase difference of $\pi/2$. Modal and harmonic analysis of the shaking beam actuator were performed by the finite element method (FEM) to calculate a resonance frequency and a modal shape and to perform harmonic response. Experimental results proved that a contact point of the PLUM tends to move with an elliptic trajectory.

I. INTRODUCTION

As electronic devices in a semiconductor industry grows smaller and smaller, the manufacturing equipments have required positioning systems with high speed and high accuracy. Especially, demands on displacement transducers, which can adjust a position with high accuracy, have increased rapidly. An ultrasonic motor is an attractive device in this application, using a powerful ultrasonic mechanical vibration generated by a piezoelectric actuator. It is entirely different from the conventional motors that use interactions of electromagnetic fields. It has the following several advantages: stable operation with low velocity and high torque, which is suited for direct drive; quick response and excellent controllability of starting, stopping, and reversing; small size and light weight; no electronic disturbances.

There are several ways in order to transform mechanical vibrations of the piezoelectric actuators into linear or rotational movement of the slider [1]–[3]. In particular, it is very critical to design a piezoelectric actuator with elliptical trajectory as a main part of ultrasonic motor. In our point of view, three ways for formation of elliptical trajectory are considered: rectangular piezoelectric and plate using the split electrodes by Bansevichyus and Ragukskis [4], ring with the packet actuator by Clæyssen [5], and excitation of standing wave in a flat rod and arrangement of rods near to the central zones of displacement [1].

In this paper, the distinct concept of elliptical trajectory formation of the actuator for the piezoelectric linear

Manuscript received February 11, 2004; accepted June 17, 2004.
K. Lee, D.-K. Lee, S. Borodinas, and S.-J. Yoon are with the Thin Film Materials Research Center, Korea Institute Science and Technology, Seoul Korea (e-mail: sjyoon@kist.ri.kr).
P. Vasiljev is with Vilnius Pedagogical University, Vilnius, Lithuania.
S. Nahm is with Korea University, Seoul, Korea.

TABLE I
NOTATION

A	amplitude of the oscillations;
ω	circular frequency of the oscillations;
t	time variable;
ρ	mass density;
α, β	constants;
V	volume of the structure;
$[C]$	damping matrix;
$[K]$	stiffness matrix;
$[M]$	mass matrix;
$[N]$	matrix of shape function used for evaluation of structural displacements;
$[B]$	matrix of shape functions derivatives;
$[D]$	elastic coefficient matrix;
$[T]$	matrix of electro-elasticity;
$\{u\}$	vector of structural displacements;
$\{F\}$	vectors of mechanical forces;
$\{U\}$	vector of voltage amplitude;
$\{\varphi\}$	vector of nodal electric potentials;

ultrasonic motors (PLUM) has been introduced. Based on the elliptical trajectory formation, the new construction of the actuator called shaking beam was developed using vibration modes of the actuator, i.e., longitudinal and flexural vibrations. One purpose of developing a new actuator was to achieve traction force of the motor as large as possible. Traction force or rotational moment of the ultrasonic motor is proportional to the actuator held-down force to the moving element of the motor [1], [2]. But an increase of the traction force results in the loss of the balance of interaction vibration modes used for elliptical trajectory achievement of the contact point.

II. PRINCIPLE OF SHAKING BEAM ACTUATOR

We realized a new principle for a closed-trajectory formation of the actuator. This principle is based on the exciting of the ends of the shaking beam indicated by a and b in Fig. 1 by two sources for the harmonic vibrations. Two sources have an identical frequency and a phase difference by $\pi/2$ (see Fig. 1) [6].

Let us analyze the shaking beam, of which free ends vibrates harmonically with the phase difference $\pi/2$. The vibrations of a and b ends of the beam can be written as:

$$y_a = A \sin \omega t, \quad (1)$$

$$y_b = A \cos \omega t. \quad (2)$$

Notation used in this paper is given in Table I.



Review

The actuator for micro moving of a body in a plane

P. Vasiljev^{a,*}, S. Borodinas^{a,b}, S.-J. Yoon^b, D. Mažeika^c, G. Kulvietis^c

^a Vilnius Pedagogical University, Studentų 39, Vilnius LT-2004, Lithuania

^b Korea Institute of Science and Technology, Cheongryang 131, Seoul 130-650, South Korea

^c Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio av. 11, Vilnius LT-2040, Lithuania

Received 31 March 2004; accepted 23 September 2004

Abstract

In present work, the analysis of moving of positioning table in a plane is indicated. For this purpose, only one piezoelectric motor without intermediate parts is created. Being based on researches of compound ultrasonic piezoelectric systems called "shaking beam" is developed actuator for moving of a body in a plane at any direction. Computer modeling of the actuator is carried out. The prototype is made. The experimental outcomes of the oscillation forms of working surfaces of an actuator are given.
© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

Contents

1. Introduction.....	237
2. Principle of positioning of a body in a plane.....	238
3. FEM modelling of the actuator.....	238
4. Numerical investigation.....	239
5. Experimental research.....	241
6. Conclusions.....	242
Acknowledgement.....	242
References.....	242

1. Introduction

The demand of new types of displacement transducers that can adjust exact position or drive objects in two-dimensional spaces with high accuracy increases significantly. There are

many devices based on different techniques but piezoelectric actuators have advantages in this field of machinery [1–4]. Implication of inverse piezoeffect in the mechanical system enables to transform electrical energy into mechanical and use it for the movement of an external object [5,6]. Usually piezoelectric actuators move an object in one-dimensional space and multidimensional movement is achieving by using complex system of actuators [2,4]. The new idea how to

* Corresponding author.



Optimization of a piezoelectric linear motor in terms of the contact parameters

Hyun-Phill Ko^{a,b}, Sangsig Kim^b, Chong-Yun Kang^a, Hyun-Jai Kim^a, Seok-Jin Yoon^{a,*}

^a Thin Film Materials Research Center, ETRI, Seoul 130-630, South Korea

^b Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 130-701, South Korea

Received 31 March 2004; accepted 23 September 2004

Abstract

The contact kinetics of piezoelectric linear motors determines the operational characteristics like speed and torque or transmitted mechanical power and efficiency. Piezoelectric linear motors are driven by tangential stress in the interface between tip of shaking beam and slider. A good contact between the tip and slider is necessary for a reliable analysis of the motor, which is needed for the optimization of its performance. The piezoelectric linear motor was fabricated and the characteristics of the motor were investigated by external conditions such as tip shape with different curvatures and contact force between the tip and the slider. It was found in this investigation that the optimal curvature of the tip and the contact force are curvature of 1 and 10, respectively, for the high actuating speed, and curvature of 1 and 40 N, respectively, for the high actuating force. Finally, tip shape has an influence on the characteristics of linear motor.
© 2004 Published by Elsevier B.V.

Keywords: Shaking beam; Mobile elements; Tip and curvature

1. Introduction

High-speed and high-accuracy positioning systems are essential elements in advanced manufacturing system as in the semiconductor industry. Demand for new types of displacement transducers with exact positioning or high accuracy has increased significantly. There are many distinct constructions of actuators that are used to transform mechanical vibrations of piezoelectric vibrations into the linear or rotational movement of a slider [1–3].

Designing an actuator as the main part of a piezoelectric ultrasonic motor involves very complex scientific and engineering problems. There are three ways of achieving an elliptical trajectory of the contact point of the actuator: (1) using a rectangular piezoelectric plate with split electrodes [4], (2) using a ring with a packer actuator [5,6], and (3) using flat rods near the central zones of displacement. Besides the above three ways, we would like to give atten-

tion to a new way of formation of the elliptical trajectory. One of the purposes of developing a new actuator was to achieve as large as a traction force of the motor as possible. The traction force or moment of the ultrasonic motor is proportional to the normal force that presses the actuator to the mobile element of the motor [1,2]. We introduce a new principle of closed trajectory formation on the contact point of the actuator, using only one excitation mode or resonant oscillation.

In this paper, we proposed the linear motor that excites an effective vibration to give a linear motion on mobile element in the piezoelectric actuator.

Finally, the piezoelectric linear motor was fabricated and the characteristics of the motor were investigated with external conditions such as contact force, operation voltages and tip shapes with various curvatures.

2. Experiments

The picture of the piezoelectric ultrasonic motor with mobile elements is shown in Fig. 1. The mobile element and tips

* Corresponding author.

E-mail addresses: ryunke@kist.ri.ac.kr (H.-P. Ko),

sjyoon@kist.ri.ac.kr (S.-J. Yoon).



Review

Wear and dynamic properties of piezoelectric ultrasonic motor with frictional materials coated stator

Hyun-Phill Ko^{a,b}, Sangsig Kim^b, Jin-Sang Kim^a, Hyun-Jai Kim^a, Seok-Jin Yoon^{a,*}

^a Thin Film Materials Research Center, KIST, Seoul 130-050, South Korea

^b Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, South Korea

Received 31 March 2004, accepted 23 September 2004

Abstract

Piezoelectric ultrasonic motors have been studied, developed and utilized by researchers and companies all over the world. Ultrasonic motors (USM) produce rotational motion based on traveling waves made by the resonant vibrations of piezoceramic. These motors have been recently developed and utilized in practical applications. The dynamic properties and life of piezoelectric ultrasonic motors are strongly related to the frictional material Fused on the sliding surface. In this study, effects of frictional material properties on the performances of piezoelectric ultrasonic motors are investigated. It was possible to improve the torque of a traveling wave type ultrasonic motor by stator's coating.

© 2004 Published by Elsevier B.V.

Keywords: Stator; Coating; DLC; GET; EAFN

Contents

1. Introduction	391
2. Experiments	392
2.1. Background	392
2.2. Experimental details	392
3. Results and discussion	393
4. Conclusions	395
References	395

1. Introduction

Ring type piezoelectric ultrasonic motors, which are different from the electromagnetically driven conventional motors, have applications in robotics, precise positioning x - y stage for semiconductor fabrication and optics and automation equipments.

* Corresponding author.

E-mail addresses: ryanko@kist.re.kr (H.-P. Ko), sjyoon@kist.re.kr (S.-J. Yoon).

0254-0584/\$ – see front matter © 2004 Published by Elsevier B.V.
doi:10.1016/j.matchemphys.2004.09.037

The basic principle of an ultrasonic motor of rotary type uses mechanical bending vibration as driving source with a ring type stator (Fig. 1).

On one face of the stator, piezoelectric ceramics that generate a mechanical vibration in order to allow their progression in the form of a wave are attached and at the other face, protruding teeth that transmit an ellipsoidal-phase change to the driving rotor are formed.

More specifically, the present experiment relates to a ring type piezoelectric ultrasonic motor with a frictional



Review

Effects of ZnO on piezoelectric properties of
0.01PMW–0.41PNN–0.35PT–0.23PZ ceramicsJong-Yoon Ha^{a,b,*}, Ji-Won Choi^a, Chong-Yun Kang^a, Doo Jin Choi^b,
Hyun-Jai Kim^a, Seok-Jin Yoon^a^a Thin Film Materials Research Center, KIST, Seoul 130-650, South Korea^b Department of Ceramic Eng., Inje University, Seoul 130-749, South Korea

Received 31 March 2004; accepted 23 September 2004

Abstract

The microstructure and piezoelectric properties of the 0.01Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O₃–0.41Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃–0.35PbTiO₃–0.23PbZrO₃–0.1 and 0.3 wt.% Y₂O₃–x ZnO ceramics were investigated. The crystal structure changed from pseudocubic to tetragonal when ZnO added. The average grain size increased from 4 μm to 8 μm with the addition of ZnO by oxygen diffusion, even if the growth rate was low. When ZnO added until 0.3 wt.%, the $\epsilon_{33}^*/\epsilon_0$, k_p and d_{33} values of specimens were slightly increased regardless Y₂O₃ contents. The curie point of PMW–PNN–PT–PZ ceramics were increased from 162 °C to 232 °C, as increasing the ZnO contents. When ZnO added, the k_p of specimens slightly was increased regardless Y₂O₃ contents. The mechanical quality factors were abruptly decreased regardless Y₂O₃ contents, when ZnO added until 0.75 wt.%. The optimized piezoelectric properties were obtained: $d_{33} = 730$ (pC/N), $k_p = 60$, $Q_m = 50$, and $\epsilon_{33}^*/\epsilon_0 = 4750$, when PMW–PNN–PT–PZ + 0.3 wt.% Y₂O₃ + 0.5 wt.% ZnO sintered at 1200 °C for 1 h.
© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Piezoelectric properties; High Piezoelectric constant; Addition; Curie point; Microstructure

Contents

1. Introduction	396
2. Experimental procedure	397
3. Results and discussion	397
4. Conclusions	400
Acknowledgment	400
References	400

1. Introduction

Piezoelectric ceramics are currently used in applications such as actuators, ultrasonic motors and piezoelectric

transformers. Piezoelectric actuators have many advantages, which are micro-displacement, quick response, low driving voltage, and low noise etc. Piezoelectric materials require high mechanical quality factor (Q_m), large piezoelectric constant (d_{33}), and high electromechanical coupling factor (k_p). The ceramics suitable for the application of actuators should generate large deformations. So, it is needed that the

* Corresponding author. Tel.: +82 2 958 5554; fax: +82 2 958 6851.

E-mail address: mickey71@kist.re.kr (J.-Y. Ha).

Optimal Friction Materials of Tiny Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor

Kyong-Jae Lee and Sahn Nahm

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University,
Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Korea*

Jin Kyu Kang

*Department of Electrical Engineering, Daelim College,
Bisan 1-dong, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi 431-715, Korea*

Hyun-Phill Ko, Chong-Yun Kang, Hyun-Jae Kim, and Seok-Jin Yoon*

*Thin Film Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology(KIST),
Hawolgok 2-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea*

*E-mail : sjyoon@kist.re.kr

(Received August 22 2005, Accepted December 6 2005)

In recent years, a novel tiny piezoelectric linear motor converting a radial mode vibration to a longitudinal mode vibration driven by the impact force has been developed for a camera optical module. The tiny piezoelectric motor is consisted of a shaft, mobile element, and piezoelectric transducer. In this work, the frictional coefficient and static friction force of the interface between the shaft and the mobile element have been investigated according to their respective materials. It was found that two combinations, namely Pyrex glass or stainless steel for the shaft and stainless steel (SUS) for the mobile element, exhibited good dynamic behaviors in the tiny ultrasonic linear motor, which was newly developed based on operating concepts based on Newton's law.

Keywords : Piezoelectrics, Linear motor, Friction coefficient, Transducer, Shaft, Mobile

1. INTRODUCTION

Many types of ultrasonic motors which are operated on principles entirely different from those known thus far have been developed since the first piezoelectric ultrasonic motor was developed in 1970s by H. V. Barth[1] and V. V. Lavrinenco[2]. In recent studies, a tiny ultrasonic linear motor which changes the vibration direction by piezoelectric ceramics has been introduced[3-6]. The driving force of ultrasonic motors is generated by piezoelectrically excited ultrasonic vibration and friction force, which differs significantly from electromagnetic motors that utilize the Lorentz force. In general, the ultrasonic motor's features are mentioned such as a high torque at a comparatively low speed of rotation, small volume with no gears, low energy consumption and no electromagnetic noise due to the absence of coil and magnetic material.

Several decades have passed since the development of ultrasonic motors and some instances of their

implementation are found[7-8], however the stage of their wide application has not been reached. Their characteristics, particularly the driving and control techniques, are completely different and their applications are not established. Since the driving force is transferred by friction on the contact surface, investigating the frictional properties take on an important role for improving the movement characteristic of a motor.

In this study the frictional properties between the shaft materials and the mobile materials were intensively considered by changing the materials which have different coefficient of friction, and the optimal combinations of material for shaft and mobile were recommended.

2. EXPERIMENTS

2.1 Material preparation

In order to investigate the frictional properties of the

Analysis of Tiny Piezoelectric Ultrasonic Linear Motor

Hyun-Phill KO^{1,2}, Kyong-Jae LEE¹, Kyoung-Ho YOO¹, Chong-Yun KANG¹, Sangsig KIM² and Seok-Jin YOON^{1,*}

¹Thin Film material Research Center, KIST, P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

²Department of Electrical Engineering, Korea University, Department of Electrical Engineering, Korea University, 1-5Ka, Anam-Dong, Sungbuk-Ku, Seoul 136-701, Korea

(Received November 30, 2005; accepted February 28, 2006; published online May 25, 2006)

A modified structure for tiny ultrasonic linear motors has been developed, and various shaft materials have been tested in order to improve dynamic properties. The shaft material has a direct influence on efficiency, reliability, and quality of the motors and their dynamic properties. The shaft material is crucial to achieve high performance. Shafts of with various materials, such as a stainless steel, stainless steel coated with diamond like carbon (DLC), a Pyrex, and a graphite, can make it possible to improve dynamic properties of the motors over a wide range of tribological conditions. For the motor with a stainless steel shaft coated with DLC at 47kHz, its velocity is 6.5 mm/s and its force is 110 mN. When the motor has a Pyrex shaft, a force of 140 mN is reached at 52 kHz. Accordingly, the maximum force produced by a motor with a graphite shaft is estimated as 97 mN. The velocity of this motor was 15 mm/s. We found that graphite has a fine surface and a directional texture which can help a moving element achieve linear motion. Finally, the use of a cap resulted in significantly improving stable operation. A motor with a graphite or a Pyrex shaft showed very stable operation and improved dynamic characteristics. [DOI: 10.1143/JAP.45.4782]

KEYWORDS: piezoelectric motor, radial mode, linear motor, velocity, actuating force

1. Introduction

In general, piezoelectric ultrasonic motors contain a source of vibratory motion that is transferred to a moving part via frictional interaction. The active piezoelectric element is excited in such a way that a high frequency, small amplitude flexural motion is generated in the transducer.¹⁻³⁾ The moving part is pressed against the transducer's surface and motion is produced by frictional interaction between the touching transducer and surfaces of the moving part. These motors display some exceptional properties: high resolution of displacement control, absence of a parasitic magnetic field, frictional locking at the power-off stage, and high thrust to weight ratio. These properties make them good candidates for use in precision portable image devices.⁴⁾ Today, the miniaturization of electronic and optical devices has fueled the information technology revolution. Especially, in optical devices, various types of ultrasonic motors which have compact size are found in wider applications. This study presents the development of a highly scalable piezoelectric ultrasonic motor in which a bimorph structure is used for the transducers of the motor. The motor's transducer is a bulk annular piezoelectric ceramic disk uniformly poled in its thickness direction and bonded to metallic disk. We have researched and developed a tiny ultrasonic linear motor for optical zooming in our previous work.⁵⁾ The feasibility and the operating principle of a tiny ultrasonic linear motor are demonstrated successfully. However the performance of the motor needs to be further improved to expand its application. Aiming at compactness in size, we further miniaturized our ultrasonic tiny motor, keeping the same operating principle proposed in our previous study. In this paper, to solve the disturbed and parasitic vibration problem and obtain the stable operation, we have developed a modified structure for our tiny ultrasonic linear motors and experimented with various shaft materials in order to improve the dynamic properties of

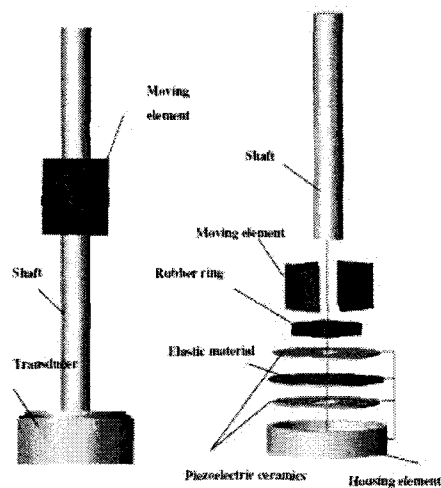


Fig. 1. Configuration of the piezoelectric ultrasonic linear motor.

the motors. Finally, the motors' performances in terms of velocity and maximum force are investigated and discussed.

2. Construction and Operating Principle

2.1 Construction

The configuration of the proposed piezoelectric ultrasonic motor is shown in Fig. 1. The motor is composed of four components; a transducer, a shaft, a moving element, and a housing element. The transducer is made of two active piezoelectric disks, poled in the direction of its thickness and a metal disk, which has the same bimorph structure shown in Fig. 2.⁶⁻⁸⁾ Two separate disks of a piezoelectric element are metallized and poled in the thickness expansion mode. They

*E-mail address: sjyoon@kist.re.kr

A study on the friction and thrust force of the shaft and mobile element in the impact typed piezoelectric ultrasonic linear motor

Kyong-Jae Lee · Hyun-Phill Ko · Chong-Yun Kang ·
Hyun-Jai Kim · Seok-Jin Yoon · Sahn Nahm

Received: 4 July 2005 / Revised: 16 July 2006 / Accepted: 3 August 2006
© Springer Science + Business Media, LLC 2006

Abstract Recently, a novel tiny piezoelectric ultrasonic linear motor driven by impact force which converts a radial mode vibration into a longitudinal one was developed for camera optical modules. This tiny piezoelectric motor consists of a shaft, mobile element and piezoelectric transducer. In this work, the frictional properties of the interface between the shaft and mobile element were investigated according to their respective materials. Five types of materials were used for the shaft, viz. stainless steel coated with DLC (Diamond like carbon) and PTFE (Polytetrafluoroethylene), uncoated stainless steel, Pyrex and Graphite. Bakelite and stainless steel (SUS) were used for the mobile elements. It was found that two combinations, namely Pyrex glass or stainless steel for the shaft and stainless steel for the mobile element, exhibited good dynamic behaviors in a tiny piezoelectric ultrasonic linear motor, which was newly developed based on operating concepts based on Newton's law.

Keywords Piezoelectrics · Linear motor · Static friction force · Shaft · Mobile

K.-J. Lee · S. Nahm
Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 1-5 Ka, Anam-Dong, Seongbuk-Ku, Seoul 136-701, Korea

H.-P. Ko
Department of Electrical Engineering, Korea University, 1-5 Ka, Anam-Dong, Seongbuk-Ku, Seoul 136-701, Korea

K.-J. Lee · H.-P. Ko · C.-Y. Kang · H.-J. Kim · S.-J. Yoon (✉)
Thin Film Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1, Hawolgok-dong, Seongbuk-Ku, Seoul 136-791, Korea
e-mail: sjyoon@kist.re.kr

1 Introduction

The miniaturization of electric and optical devices has brought about the information and communication technology revolution. In particular, an ultrasonic actuator is an attractive device in application for an imaging process such as personal computers, mobile telephones, Personal Digital Assistants (PDAs) and etc. It is entirely different from the conventional motors which utilize interaction of electromagnetic fields. In the past few decades, many new types of ultrasonic motor have been developed, which are operated on principles entirely different from those known at the time when the first piezoelectric ultrasonic motor was developed in the 1970s by H. V. Barth [1] and V. V. Lavrinenco [2]. In general, the ultrasonic motor's features are mentioned such as a high torque at a comparatively low speed of rotation, small volume with no gears, low energy consumption without application of a separate braking mechanism and no electromagnetic noise without coil system. In a recent study, a tiny ultrasonic linear actuator which changes the direction of the vibrations induced by piezoelectric ceramics was introduced [3–5]. The driving force of ultrasonic motors comes from piezoelectrically excited ultrasonic vibration and frictional force, which differs significantly from electromagnetic motors that utilize the Lorentz force.

Several decades have passed since the development of the first ultrasonic motors and there have been some isolated instances of their implementation [6–12], however the stage of their wide application has not yet been reached. The main reason for this is their high cost as compared to traditional motors. Moreover, their characteristics, particularly their driving and control techniques are completely different from those of conventional motors and this has impeded their wide application. Also, the reliability and the lifetime of the

Analysis of driving mechanism for tiny piezoelectric linear motor

Chong-Yun Kang · Kyoung-Ho Yoo · Hyun-Phil Ko ·
Hyun-Jai Kim · Tae-Kuk Ko · Seok-Jin Yoon

Received: 29 June 2005 / Revised: 20 March 2006 / Accepted: 11 April 2006
© Springer Science + Business Media, LLC 2006

Abstract Recently, a tiny piezoelectric linear motor using a vibration mode of the transducer has been invented. The motor consists of a shaft, mobile element, and piezoelectric transducer using a piezoelectric radial mode bimorph disk. The fringe of the bimorph disk is fixed firmly which means this area has no degree of freedom. Therefore, the radial mode of the transducer transfers to the flexure mode. The mobile elements move along the Pyrex shaft by the impact force generated by the flexure mode of the piezoelectric transducer. The motors are operated at their resonant frequencies. The dynamic properties of the motor have been intensively measured and analyzed according to the applied voltage waveforms at the resonant frequencies. As the sawtooth and rectangular voltage waveforms are applied, the velocity, the thrust force, and the velocity dependence of the mobile position are measured. The dynamic characteristics are also analyzed within a period of each wave using laser vibrometer. The velocity of the mobile is moderately constant along the shaft. The better dynamic characteristics are obtained in the case of applying the rectangular waveform.

Keywords Piezoelectric motor · Linear motion · Sawtooth waveform · Rectangular waveform

1 Introduction

The ultrasonic motor using piezoelectric ceramic is different from previous electromagnetic motor. It is focused that the

ultrasonic motor is compact and possible to construct simply due to disappearing the ball screw converting rotation to linear. There is also an advantage that the motor does not receive any effect from magnetic or electric field.

There are several ways in order to transform mechanical vibrations of the piezoelectric actuators into linear movement of the slider such as a rectangular piezoelectric plate using the split electrodes by Bansevichyus [1], ring with the packet actuator by Claeysen [2], excitation of standing wave in a flat rod [3], and an elliptical displacement from shaking beam by Yoon [4]. Recently, a novel tiny piezoelectric linear motor was invented by our group, which is able to be adapted to the mobile communication hand sets [5].

In this paper, the dynamic properties of the motor have been intensively measured and analyzed according to the applied voltage waveforms at resonant frequencies. As the two types of voltage waves are applied such as the sawtooth and rectangular waveform, the velocity and actuating force of the motor are investigated. The characteristics of movement with the applied voltage waveforms are also investigated to suggest optimized movement condition of the developed tiny piezoelectric linear motor.

2 Principle

The linear motion of tiny piezoelectric linear motor is operated by a principle of inertia displacement. The movement of mobile element can be explained under the applied sawtooth electrical potential as shown in Fig. 1. When the electrical potential is not applied, which is initially on the position 'a' in Fig. 1, the mobile element is on a distance S_a from the left end of the shaft. When the electrical potential increase with a gentle gradient from zero to the maximum electrical potential i.e. a–b region in Fig. 1, the shaft and the mobile

C.-Y. Kang (✉) · H.-P. Ko · H.-J. Kim · S.-J. Yoon
Thin Film Material Research Center, KIST, Seoul, Korea

K.-H. Yoo · T.-K. Ko
Department of Electrical and Electronic Engineering,
Yonsei University, Seoul, Korea

Constructions and characteristics of a tiny piezoelectric linear motor using radial mode vibrations

Hyun-Phil Ko · Chong-Yun Kang · Jin-Sang Kim ·
Serigey N. Borodin · Sangsig Kim · Seok-Jin Yoon

Received: 29 June 2005 / Revised: 13 February 2006 / Accepted: 29 March 2006
© Springer Science + Business Media, LLC 2006

Abstract A tiny ultrasonic linear motor with a structure has been developed, and various shaft materials were tested in the motor in order to improve its dynamic properties. We found that the shaft material has direct influence on efficiency, reliability and quality of the motors and their dynamic properties and is crucial to the achievement of high motor performance. The use of shafts of various materials such as stainless steel, stainless steels coated with DLC (Diamond Like Carbon) and PTFE (Teflon), a Pyrex, and a graphite, can make it possible to improve dynamic properties of the motors over a wide range of tribological conditions.

In a motor with a stainless steel shaft coated with DLC driven at 44 kHz, its velocity was 4 mm/s with a force of 75 mN. When a motor used the Pyrex shaft was used a force of 110 mN was attained at 51 kHz. Thus the maximum force produced by a motor with a graphite shaft is estimated to be 120 mN with a velocity of 8 mm/s. We found that graphite has the appropriate surface conditions and directional texture to promote the linear motion of the moving element. Finally, the use of a cap resulted in significant improvements in the stability of the motor's operation. Motor with graphite and Pyrex shafts were found to exhibit very stable operation and improved dynamic characteristics.

Keywords Piezoelectric motor · Radial mode · Linear motor · Velocity · Displacement

H.-P. Ko · C.-Y. Kang · J.-S. Kim · S.-J. Yoon (✉)
Thin Film Material Research Center, KIST, Seoul, Korea
e-mail: sjyoon@kist.re.kr

H.-P. Ko · S. Kim
Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea
e-mail: hp.ko@samsung.com

S. N. Borodin
Laboratory of Ultrasonic Mechanism, VPU, Vilnius, Lithuania

1 Introduction

The miniaturization of electronic and optical devices has fueled the information technology revolution. In particular, various types of ultrasonic motors of compact size have been found to have a wide range of optical device applications. Ultrasonic motors are of great interest due to the flexibility of their miniaturization, in contrast to that of conventional electromagnetic motors, whose efficiency decreases significantly with miniaturization [1–3]. In particular, ultrasonic motors have been developed for and applied in auto-focusing mechanisms to obtain linear motion. In previous research, we developed a tiny ultrasonic linear motor for use in optical zooming [4].

The feasibility and operating principles of this ultrasonic motor were demonstrated successfully [4]. However, the performance of this ultrasonic motor needs to be further improved to expand its applications. In this paper, we report the further miniaturization of this ultrasonic motor, which was achieved while maintaining the operating principles described in our previous study [4]. We solved the disturbed and parasitic vibration problems and obtained stable operation by modifying the structure of the tiny ultrasonic motor and experimenting with various shaft materials in order to improve its dynamic properties. To achieve high performance not only the stability of the motor must be considered but also its dynamic properties. Therefore we investigated the influence of the shaft material on the efficiency, reliability and quality of the motor and its dynamic properties. We found that the choice of shaft material is crucial to the achievement of high motor performance. In particular, the use of shafts of various materials such as stainless steel, stainless steels coated with DLC (Diamond Like Carbon) and PTFE (Teflon), a Pyrex, and a graphite, can improve the dynamic properties of the motor over a wide range of tribological conditions. We

Piezoelectric and Dielectric Properties of $0.05\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3\text{--}0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ Ceramics Doped with Nb_2O_5 and MnO_2

Sang-Jong KIM^{1,2}, Jong-Yoon HA¹, Ji-Won CHO¹, Chong-Yun KANG¹, Hyun-Jai KIM¹,
Dae-Yong JEONG¹, Man-Young SUNG², and Seok-Jin YOON^{1*}

¹Thin Film Material Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

²Department Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea

(Received September 7, 2006; revised October 26, 2006; accepted October 29, 2006; published online February 8, 2007)

The solid solution system of $0.05\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3\text{--}0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ (PAN–PZT) has been studied for the piezoelectric ultrasonic motor with its high T_c . In this article, we doped the Nb_2O_5 and MnO_2 into the $0.05\text{PAN--}0.95\text{PZT}$ ceramics as donor and acceptor respectively and reported the doping effect on the piezoelectric properties. Apparently, Nb_2O_5 induced the “soft” piezoelectric characteristics. However, as Nb_2O_5 also affected the sintered density, which is closely related with the piezoelectric properties, it is quite difficult to identify the role of Nb_2O_5 , which might act as the “donor” and/or sintering enhancer. The optimized piezoelectric properties were obtained $d_{33} = 430 \text{ pC/N}$, $k_p = 59\%$, $Q_m = 79$, and $\epsilon_3^T/\epsilon_0 = 1690$, when PAN–PZT + 0.7 wt% Nb_2O_5 sintered at 1200°C for 1 h. When MnO_2 was doped, Mn^{4+} ions induced the distortion of perovskite structure and T_c shifted to lower temperature. In addition, d_{33} and k_p decreased and Q_m dramatically increased with the addition of MnO_2 . From these results, it was believed that MnO_2 mainly acted as acceptor in PAN–PZT ceramics. The optimized piezoelectric properties were obtained $d_{33} = 340 \text{ pC/N}$, $k_p = 61.6\%$, $Q_m = 1725$, $T_c = 392^\circ\text{C}$, and $\epsilon_3^T/\epsilon_0 = 1250$, when PAN–PZT + 0.7 wt% Nb_2O_5 with 0.5 wt% MnO_2 ceramics sintered at 1200°C for 1 h.

[DOI: 10.1143/JJAP.46.691]

KEYWORDS: piezoelectric, PAN–PZT, actuator, Nb_2O_5 , MnO_2

1. Introduction

The piezoelectricity has been widely applied to transducers, actuators, surface acoustic wave devices, frequency control and ultrasonic motors because it has favorable characteristics such as electromagnetic-noise free, compact size, higher efficiency, and faster response time, compared with electromagnetic ones.^{1–4} Many researches are advanced for piezoelectric actuator which has many advantages; micro-displacement, quick response, low driving voltage, and low loss. Since the piezoelectric ultrasonic motors operated at their resonance frequency in transformation between electrical and mechanical energy, the properties of piezoelectric ceramics materials should combine high mechanical quality factor (Q_m), large piezoelectric constant (d_{33}), high electromechanical coupling factor (k_p), and low dielectric loss ($\tan\delta$) simultaneously.^{5–7}

In order to satisfy the requirements of practical applications, many ternary solid-solution ceramics have been synthesized over binary ceramics, consisting of complex perovskite compounds. For example, it is known that the piezoelectric properties of $\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$ solid solutions can be remarkably improved by compositional modifications. Even for the further improvements of piezoelectric properties, small amounts of dopants were added to the main compositions. Generally, doping can be categorized into three classification: lower valent (effective acceptors), higher valent (effective donors), and equal valent. Doping with lower valence introduce “hard” piezoelectric characteristics, while higher valent doping induce “soft” ones. “hard” piezoelectric ceramics have higher Q_m , but lower d_{33} and k_p ; on the other hand, “soft” piezoelectrics have lower Q_m , but higher d_{33} and k_p .^{8,9} However, MnO_2 doping has been reported to induce combinatory “hard” and “soft” piezoelectric characteristics.¹⁰

In our previous works,^{11,12} it was found that $0.05\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3\text{--}0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramics (PAN–PZT) exhibited high curie temperature ($350^\circ\text{C} < T_c$) and $d_{33} = 390 \text{ pC/N}$ but low $Q_m = 85$, and $k_p = 54.8\%$ values. PAN–PZT is not suitable for the application of piezoelectric ultrasonic motor and transducer even though it has a high T_c . In this article, we will dope the Nb_2O_5 and MnO_2 in $0.05\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3\text{--}0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramics as donor and acceptor respectively and report the doping effect on the piezoelectric properties.

2. Experiments

The $0.05\text{Pb}(\text{Al}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3\text{--}0.95\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ doped with Nb_2O_5 and MnO_2 composition were prepared using a conventional mixed oxide method. The starting materials were pure reagent-grade PbO (99.9%, High Purity Chemicals), ZrO_2 (99.9%, Aldrich), TiO_2 (99.9%, Aldrich), Nb_2O_5 (99.9%, Aldrich), Al_2O_3 (99.8% Junsei), and MnO_2 (99+%, Aldrich). The mixtures of the starting powders were homogenized by ball milling in distilled water for 24 h. The mixture was then dried at 100°C and calcined at 850°C for 2 h in static air atmosphere. The calcined powder was mixed for 24 h with additives (Nb_2O_5 and MnO_2) and then pressed into disk type (18 mm diameter, 2 mm thickness) under 1000 kg/cm^2 pressure. The specimens were sintered at 1200°C for 1 h in air with atmosphere powder (PAN–PZT piezoelectric powder). Silver paste was fired on both faces of the discs at 600°C for 15 min as electrodes. The specimen for measurement of piezoelectric properties was poled in silicon oil at 120°C under 3.5 kV/mm for 30 min. The bulk density of the sintered specimens was measured by the Archimedes method in distilled water. The crystalline phase and microstructure of the specimens were studied by X-ray diffraction (XRD; Philips PW1820RC), scanning electron microscopy (SEM; Hitachi S-4200). All electrical measurements were carried out approximately 24 h after poing. Piezoelectric constants were obtained using d_{33} meter (ZJ-

*Corresponding author. E-mail address: sjyoon@kist.re.kr

Low Temperature Sintering of ZnO-Doped $0.01\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ - $0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.35PbTiO_3 - 0.23PbZrO_3 Ceramics

Sang-Jong KIM^{1,2}, Chong-Yun KANG¹, Ji-Won CHOI¹, Hyun-Jai KIM¹, Man-Young SUNG², and Seok-Jin YOON¹

¹Thin Film Material Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

²Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea

(Received September 6, 2006; revised October 26, 2006; accepted October 29, 2006; published online January 10, 2007)

ZnO was added to $0.01\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ - $0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.35PbTiO_3 - 0.23PbZrO_3 (0.01PMW - 0.41PNN - 0.35PT - 0.23PZ) ceramics to reduce their sintering temperatures to below 900°C . The effects of the ZnO additive on the densification and piezoelectric properties of the $\text{PMW-PNN-PT-PZ} + 0.1 \text{ wt}\% \text{ Y}_2\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{ ZnO}$ ($0 \leq x \leq 2.5$) ceramics were investigated. The structure of the PMW-PNN-PT-PZ ceramics was found to change from pseudocubic to tetragonal as their ZnO content was increased. The piezoelectric constant, the mechanical quality factor, and the electromechanical factor of the ceramics increased as their ZnO content increased. The optimum piezoelectric properties were found to be $d_{33} = 594 \text{ pC/N}$, $k_p = 57\%$, and $Q_m = 64$, for $\text{PMW-PNN-PT-PZ} + 0.1 \text{ wt}\% \text{ Y}_2\text{O}_3 + 1.5 \text{ wt}\% \text{ ZnO}$ sintered at 900°C for 2 h. [DOI: 10.1143/JJAP.46.276]

KEYWORDS: piezoelectric, low temperature sintering, ZnO, PMW-PNN-PT-PZ

1. Introduction

Piezoelectric actuators have many useful attributes, including their simple structure, compact size, precise positioning, micro-displacement, quick response, low driving voltage, and low noise, and so have been widely used in applications such as micropositioners, miniature ultrasonic motors, and adaptive mechanical dampers.^{1,2)} To achieve high quality piezoelectric devices, piezoelectric materials require large piezoelectric constants, high electromechanical coupling factors, and high mechanical quality factors. In the fabrication of multilayer actuators,³⁾ piezoelectric materials can be co-fired with conductors such as Ag, and fabricated with Ag-Pd, Cu and Au internal electrodes without reducing their piezoelectric properties. Multilayer ceramic actuators have been extensively investigated with a view to achieving the miniaturization and hybridization of such devices. A multilayer ceramic actuator is composed of alternating piezoelectric ceramics and internal metallic electrode layers. Although Ag-Pd electrodes are generally used in multilayer ceramic actuators, silver metal electrodes are preferable because they are inexpensive and can enable the use of low sintering temperatures.^{3,4)} Since a high palladium mole fraction leads to a high sintering temperature and interdiffusion at the interface between the electrode and the ceramic layer, the expensive palladium proportion should be decreased, if possible to zero. The sintering temperature of co-fired multilayer ceramics with pure silver internal electrodes can be reduced to below 900°C .

In this study, ZnO was added to PMW-PNN-PT-PZ piezoelectric ceramics in order to reduce their sintering temperatures to below 900°C . The variations in the structural and piezoelectric properties of the ceramics with ZnO content were then investigated.

2. Experimental Procedure

The composition of the ceramics used in this study is $0.01\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ - $0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.35PbTiO_3 - $0.23\text{PbZrO}_3 + 0.1 \text{ wt}\% \text{ Y}_2\text{O}_3 + x \text{ wt}\% \text{ ZnO}$. All the specimens were prepared with a conventional solid solution method. Table I shows the grades of the raw materials.

All the starting powders were dried before use. The

Table I. The grades of the raw materials.

Materials	Grade	Manufacturer
PbO	99.9	High Purity
MgO	99.99	Aldrich
WO ₃	99	Aldrich
NiO	99.99	Aldrich
Nb ₂ O ₅	99.9	Aldrich
ZrO ₂	99	Aldrich
TiO ₂	99.9	Aldrich
Y ₂ O ₃	99.9	Aldrich
ZnO	99.9	Aldrich

starting materials were mixed in DI water for 24 h by ball-milling according to the desired stoichiometry, $0.01\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ - $0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.35PbTiO_3 - 0.23PbZrO_3 . The mixtures were dried and then calcined in an alumina crucible at 850°C for 2 h in air. The calcined powder was milled again with the additives $0.1 \text{ wt}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ and ZnO (0 - $2.5 \text{ wt}\%$) for 24 h. The dried powders were pressed into disks 18 mm in diameter and 2 mm in thickness under a uni-axial pressure of 11 t/cm^2 . The specimens were burned out at 600°C for 3 h and sintered at 850 to 900°C for 1 or 2 h with heating and cooling rates of 5°C/min in an alumina crucible with the same atmosphere powder. After sintering, the piezoelectric ceramics were lapped until they were 1 mm in thickness, after which they were metallized with Ag paste at 600°C for 15 min. The piezoelectric ceramics were poled under a DC field of 3.5 kV/mm in silicon oil at 120°C for 30 min. Electrical measurements were carried out about 24 h after poling. The bulk density of each ceramic was measured by the Archimedes method. The piezoelectric properties were measured using a network analyzer (HP3577A) and an impedance analyzer (HP4192A). The piezoelectric constants were obtained using a d_{33} meter (ZJ-3D, Sinica). The mechanical quality factor and electromechanical coupling factor were calculated using resonance and anti-resonance techniques respectively. Identification of the phases of the sintered pellets was carried out with powdered X-ray diffraction (XRD; Model Rint/Dmax