

# 인치웜 리니어 모터 시스템 설계 및 제작에 관한 연구

예상돈\*, 정재훈\*, 민병현<sup>#</sup>

A Study on Design and Manufacture of an Inchworm Linear Motor System

Sang Don Ye\*, Jae Hoon Jeong\* and Byeong Hyeon Min<sup>#</sup>

## ABSTRACT

Ultra precision positioning mechanism has widely been used on semiconductor manufacturing equipments, optical spectrum analyzer and cell manipulations. Ultra precision positioning mechanism is consisted of several actuators, sensors, guides and control systems. Its efficiency depends on each performance of components. The object of this study is to design, analysis and manufacture all of the inchworm linear motor system, which is one of the equipments embodied in ultra precision positioning mechanism. Inchworm linear motor system is consisted of a controller system and an inchworm linear motor, and its driving form is similar to a motion of spanworm. A design and manufacture of inchworm linear motor, which is consisted of three PZT actuators, a rod, two columns and a guide plate, are performed. Minimizing the von-Mises stress of the hinge using Taguchi method and simulation by FEM software optimizes the structural design in a column of flexure hinge. The designed columns and guide plates are manufactured by a W-EDM and NC-milling. A controller system, which is an apparatus to drive inchworm linear motor, can easily adjust driving conditions by varying resonance frequency and input-output voltage of actuators and amplifiers. The performance of manufactured inchworm linear motor system is verified and valuated. In the future, inchworm linear motor system will be used to make a more precision positioning by reinforcing a sensor and feedback system.

**Key Words :** Inchworm Linear Motor(인치웜 리니어 모터), Ultra Precision Position Apparatus(초정밀 위치결정기구), PZT Actuator(PZT 액추에이터), Taguchi Method(다구찌법), Finite Element Method(유한요소법), Pulse Generator(펄스생성기)

## 기호설명

T\_h = Thickness of hinge

R\_h = Radius of hinge

W\_a = Width of arm

H\_a = Height of arm

T\_c = Thickness of column

## 1. 서론

한 때 산업은 더 큰 것을 지향한 적이 있었으나 산업이 발전할 수록 그 관심은 작은 것으로 바뀌었으며, 최근에는 나노 수준의 크기까지 작아지고 있다. 이런 나노 기술은 반도체 업계에서는 작은 칩 하나에 도서관의 서적 내용이 다 들어갈 수

\* 접수일: 2004년 3월 16일; 게재승인일: 2004년 10월 7일

\* 동의대학교 기계공학과 대학원

# 교신저자: 동의대학교 기계공학부

E-mail: [bhmin@deu.ac.kr](mailto:bhmin@deu.ac.kr) Tel.(051)890-1647

있도록 하였으며, 생명 공학에서는 유전자 변형을 통한 동물 복제가 가능하도록 하였다. 이렇게 나노 기술이 발전 할 수 있었던 것은 그에 제반 되는 모든 분야에서의 발전을 통해 그것이 가능하게 되었다. 나노 기술은 나노 미터와 옹스트롬 수준의 분해능을 요구하며, 여기에는 초정밀 위치결정 메카니즘이 중요한 기술로 자리 잡고 있다. 초정밀 위치결정 메커니즘은 반도체분야의 스텝퍼, 미세가공분야의 미세형상가공, 측정기분야의 원자현미경, 항공우주분야의 대형 천체망원경등에서 광범위하게 사용되고 있다.<sup>1</sup> 이 같은 초정밀 위치결정 메카니즘을 구현하기 위해서 일반적으로 사용되는 압전 액추에이터는 높은 분해능과 빠른 응답 성의 장점을 가지고 있는 반면, 아주 작은 작동 영역을 가지고 있다. 요즘 가공오차는 0.1 나노미터의 초 정밀도를 요구하며, 제품의 크기는 0.1 미터의 대형화 추세를 가지고 있다.<sup>2</sup> 따라서 단점을 보완하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 볼 스크류 타입, 스테이지를 이용한 듀얼 서보 타입<sup>3</sup>, 인치웜 타입<sup>4</sup> 등이 제시 되었다.

본 연구에서는 초정밀 위치결정을 구현하기 위한 장치 중의 하나인 인치웜 리니어 모터 전체 시스템을 설계, 구성하고 제작하는데 있다. 인치웜 리니어 모터 시스템은 크게 제어 시스템과 인치웜 리니어 모터 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫째, 인치웜 리니어 모터는 세 개의 압전 액추에이터와 로드, 두개의 칼럼과 가이드 플레이트로 구성되어 있다. 이중 중요 부분인 칼럼을 다구찌 법과 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션으로 구조적 설계를 최적화 하였다. 이렇게 설계된 칼럼과 가이드 플레이트를 와이어 방전 가공과 NC-밀링을 이용하여 제작하였다. 둘째, 컨트롤러 시스템은 인치웜 리니어 모터를 구동시키기 위한 장치로 압전 액추에이터와 증폭기 등의 규격을 고려하였고, 구동 조건의 입력이 용이하도록 하였다. 셋째, 제작된 인치웜 리니어 모터의 성능을 측정하고 평가하였다.

## 2. 인치웜 리니어 모터 설계 및 제작

### 2.1 압전 액추에이터

압전체 세라믹스는 기계적 에너지와 전기적 에너지의 상호 변환을 가능하게 하는 성질을 갖고 있는 소자로 변위의 정밀제어가 요구되는 전자기

기 및 정밀기계장치의 발달로 새로운 형식의 변위 트랜스듀서(Transducer)로서 주목 받고 있다. 이런 압전체 세라믹스의 종류는 티탄산바륨계 세라믹스, 티탄산납계 세라믹스, 티탄산지르콘산납(PZT) 세라믹스, 3 성분계 세라믹스 등이 있다. 이 중 티탄산지르콘산납 세라믹스는 다결정구조를 가지며 압전 액추에이터의 재료로 사용된다. 압전 액추에이터의 장점을 보면 반응시간이 수  $\mu\text{ sec}$ 이며, 공진 주파수가 수 kHz ~ 수십 kHz 인 빠른 응답속도 가진다. 열의 발생이나 전자기적 잡음이 적으며, 또한 가해주는 입력 전압의 높은 분해능을 가지며, 최대 압축하중이 수십 N ~ 수천 N에 달하는 높은 하중 능력을 가지고 있다. 반면 압전소자 액추에이터의 정밀도의 한계를 결정하는 변위간의 비선형성인 이력(Hysteresis)과 크립(Creep)을 가지며, 인장에 약한 단점을 가지고 있다.

본 연구에서 사용된 압전 액추에이터는 각각의 세라믹 요소들을 절연하고 내부 전극을 외부전극으로 연결한 다층구조를 하고 있다. 사용하고자 하는 압전 액추에이터의 규격은 Table 1 과 같다.<sup>5</sup> 두 가지 종류의 압전 액추에이터를 사용했으며, 구동 전압은 0 ~ 150 V이며 적정 사용 전압은 100 V DC이다. 온도의 범위는 -25~85°C이며, 인장강도는 발생하는 힘의 1/10 정도이다.

Table 1 Specification of used piezoelectric actuators

Specification	AE0203D08	AE0203D16
Displacement [ $\mu\text{m}$ ]	Maximum driving voltage	9.1±1.5
	Recommended driving voltage	6.1±1.5
Generated force [N]	200	200
Resonance frequency [kHz]	138	69
Capacitance [ $\mu\text{F}$ ]	0.18	0.35
Overall length [mm]	10	20

### 2.2 인치웜 리니어 모터의 구성

압전 액추에이터를 이용한 리니어 모터는 크게 두 개의 방식으로 나누어진다. 첫째는 준정적 구조로 주로 액추에이터의 변위를 직접적으로 이용하는 방식이다. 둘째는 초음파를 이용하는 방식이 있으며 이 방식은 스탠딩 웨이브(standing wave)와 트레블링 웨이브(traveling wave)를 이용하는 방

식으로 나눌 수 있다. 준정적 구조에서의 인치웜 리니어 모터 방식은 사용된 압전 액추에이터의 수축과 팽창의 반복을 통해 자벌레가 기어가는 듯한 형태로 선형적인 변위를 만들어 낸다.

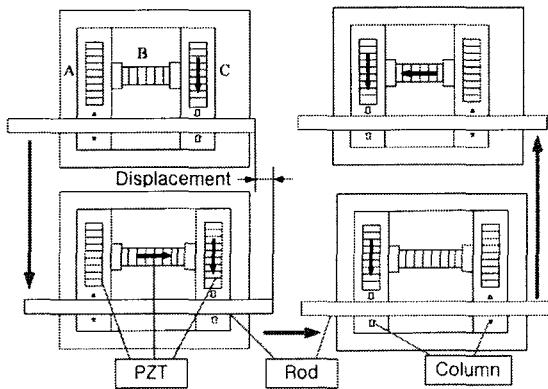


Fig. 1 Driving procedure of inchworm linear motor

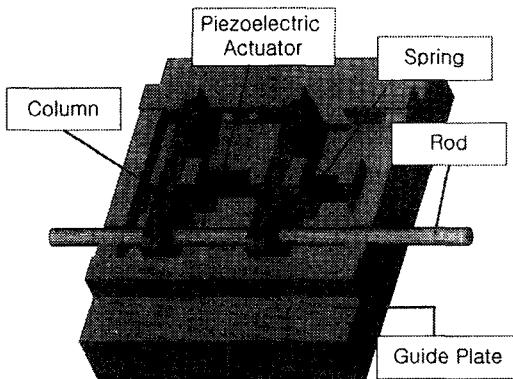


Fig. 2 Solid model of inchworm linear motor

본 연구에서 설계하여 제작한 인치웜 리니어 모터는 무한대의 선형적인 변위를 발생시킨다. 그 구조는 Fig. 2 과 같이 3 개의 압전 액추에이터가 사용되며 2 개의 칼럼 부와 외부 가이드 플레이트 그리고 실제 변위가 표현되는 로드, 가운데 압전 액추에이터에 예압을 걸어주기 위한 스프링으로 구성된다. 두 개의 압전 액추에이터(AE0203D16)는 칼럼 부에 설치되어 로드를 잡는 역할을 하며, 가운데 압전 액추에이터(AE0203D08)가 실제 로드를 서브마이크로 수준의 변위를 발생시키는 역할을

한다. 여기서 칼럼 부와 가이드 플레이트의 재료는 알루미늄 6061 을 사용하였으며, 그 재료의 물성(material properties)은 Table 2 와 같다.

Table 2 Material properties of Aluminum

Material	Modulus of Elasticity [N/mm <sup>2</sup> ]	Poisson's Ratio	Yield Strength [N/mm <sup>2</sup> ]
Aluminum (6061)	69e3	0.33	386

### 2.3 칼럼의 헌지 설계

본 연구에서는 인치웜 리니어 모터에서 가장 중요한 부분인 칼럼 부의 헌지 형상을 다구찌 방법과 상용 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 통해 최적설계를 수행하였다. 다구찌 방법은 종래에 제어 불가능한 환경조건이나 제어하기 어려운 조건 등의 원인(잡음인자)들이 데이터에 주는 영향의 정도를 객관적이고 계량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시한 것으로, 결과 값 산포의 크기를 계량특성치(손실함수, SN 비 등)로 변화하여 산포를 작게 하는 인자들의 최적조건을 찾아가는 강건설계(robust design)에 주로 사용된다.

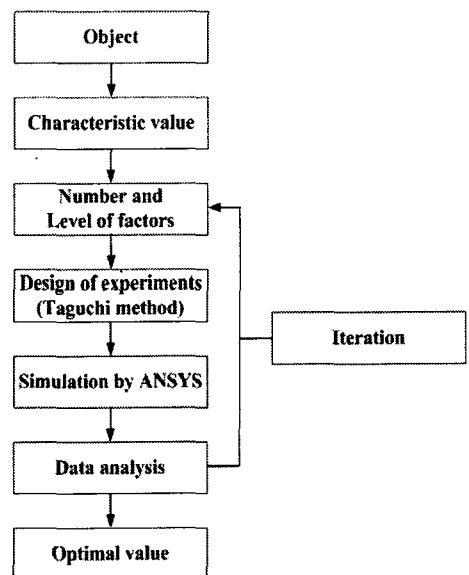


Fig. 3 Procedure of optimal design

또한 직교배열표를 사용하여 인자의 수가 많은 경우에도 크게 실험횟수를 증가시키지 않고 실험하는 일부 실시 법이 주로 사용된다. 이 같은 이점으로 다구찌 기법을 사용하였으며 최적화 공정은 Fig. 3 과 같다.

압전 액추에이터는 인장에 약한 단점을 가지고 있으므로 액추에이터를 고정하고 예압을 걸어 액추에이터의 구동 변위를 전달하기 위해서 칼럼의 아래 부분에 플렉슈어 힌지 형상을 적용하였다. 이 힌지의 형상에서 구조적으로 응력 집중이 발생되므로, 최대 사용 변위에 대해 힌지부의 응력이 최소가 되는 형상 설계를 목적으로 하였다. 구조 해석으로 얻는 힌지 부에서 발생되는 최대 Von-Mises 응력 값을 특성치로 선택하였다. 설계의 목적을 탈성하기 위하여 이와 관련된 인자 수와 수준을 결정함에 있어서 과다한 인자의 수는 오히려 실험의 정도(precision)를 떨어뜨리므로 목적에 적당한 범위 내에서 최저의 인자를 결정해야 한다. 또한 수준과 수준의 수를 결정하는데 있어서도 제약조건 내에서 결정한다. 불필요한 부분은 제외시키고 최적이라 예상되는 수준은 빠짐없이 포함 시킨다. 여기서는 힌지부에 발생되는 응력에 영향을 줄 것으로 예상되는 인자를 Table 3 과 같이 힌지의 두께( $T_h$ ), 힌지의 반경( $R_h$ ), 암의 폭( $W_a$ ), 암의 높이( $H_a$ ), 칼럼의 두께( $T_c$ ) 이렇게 5 개의 인자로 결정하였으며, 또한 각각의 변수를 전체적인 크기의 제약에 따라 4 수준으로 나누었다.

Table 3 Control factors and their levels concerned with the design of a column

Control factors	Level [mm]			
	1	2	3	4
Thickness of hinge( $T_h$ )	0.3	0.4	0.5	0.6
Radius of hinge( $R_h$ )	0.3	0.4	0.5	0.6
Width of arm( $W_a$ )	2.6	2.8	3	3.2
Height of arm( $H_a$ )	1.8	2	2.2	2.4
Thickness of column( $T_c$ )	3	4	5	6

다구찌 실험계획법에 따른 직교배열표는 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횟수씩 나타나도록 구성되어 있으며, 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 만들어 놓은 표이다. 직교배열표의 작성은 선택된 인자의 수준을 조합하고, 실험의 횟수를 정하는 것으로 여기서는 Table 4 와 같은 직교배열표( $L_{16}(4^5)$ )를 선택하였다. 상용 유한요소해석 소프트웨어를 사용해서 직교배열표에 따라 16 회의 시뮬레이션을 했으며, 조합에 따른 각 형상에서의 힌지부에 발생되는 최대 Von-Mises 응력 값을 얻었다. 여기서 구조해석의 과정은 Fig. 4 와 같이 APDL(ANSYS Parametric Design Language)를 이용하여 시뮬레이션 순서와 반복 횟수를 제어하였으며, Table 3 의 인자 수와 수준별 값을 데이터로 입력하여 각각의 원하는 결과 값을 얻을 수 있게 작성 하였다.

Table 4 Table of orthogonal arrays & S/N ratios

	$T_h$	$R_h$	$W_a$	$H_a$	$T_c$	S/N
1	1	1	1	1	1	-37.7940
2	1	2	2	2	2	-38.2681
3	1	3	3	3	3	-38.7189
4	1	4	4	4	4	-38.9539
5	2	1	2	3	4	-38.7380
6	2	2	1	4	3	-38.1248
7	2	3	4	1	2	-36.2711
8	2	4	3	2	1	-34.9798
9	3	1	3	4	2	-35.9547
10	3	2	4	3	1	-33.9065
11	3	3	1	2	4	-36.2960
12	3	4	2	1	3	-36.5645
13	4	1	4	2	3	-35.4400
14	4	2	3	1	4	-36.1236
15	4	3	2	4	1	-32.3901
16	4	4	1	3	2	-33.9966

해석 과정 중 칼럼의 힌지 상부에서 PZT 액추에이터에 의해  $5 \mu\text{m}$ 의 변위가 발생한다고 가정하였고, 상단 부분은 영향이 거의 없으므로 해석의 시간을 줄이기 위해 대칭 조건을 주었다. 여섯 번째는 시뮬레이션 한 반응 값을 데이터로 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터에 대하여 어떠한 통계적인 방법으로 분석할 것

인가를 정하는 것으로, 다구찌 기법에서는 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 SN 비를 제시한다. SN 비는 신호 대 잡음의 비율(signal-to noise ratio)을 의미하는 것으로 손실함수의 종류에 따라 망목 특성, 망소특성, 망대특성으로 나누어 계산될 수 있다.

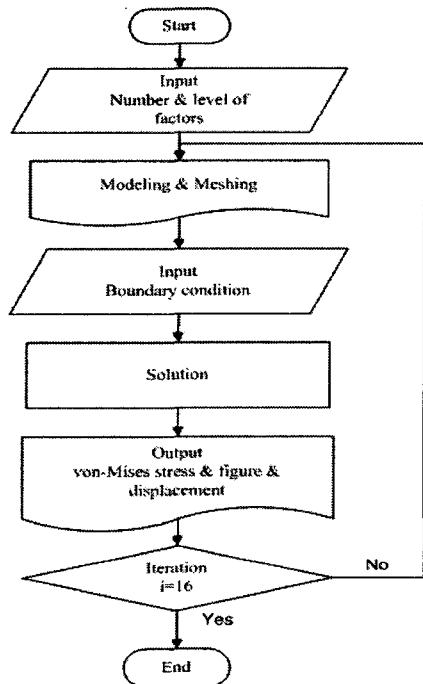


Fig. 4 Flowchart of simulation

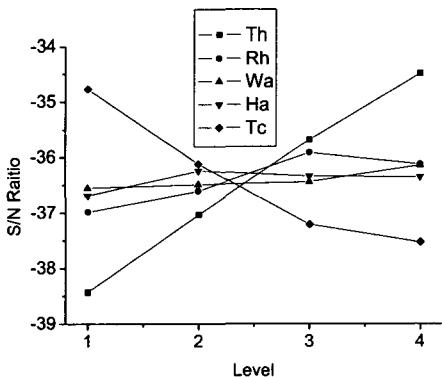


Fig. 5 Main effect from plots of S/N ratios

여기서는 힌지 부에서 응력을 작게 발생하도록 하는 것이 설계 목표이므로 SN 비는 망소특성에 해당하는 식 (1)에 의해 계산되었다.

$$SN_i = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \left( \sum_{j=0}^n y_{ij}^2 \right) \right\} \quad (1)$$

망소특성 식에 의해 Fig. 5 와 같이 SN 비 그래프를 얻을 수 있다. 마지막으로 최적값을 선정하였다. SN 비는 높을수록 좋으며, 평균이 같은 두 집단에서 분산이 작을수록 SN 비는 높아지므로, Fig. 5 에서 각 인자의 최고 일 때의 수준이 인자의 최적 값이 된다. 최종 설계치수는 힌지의 두께 ( $T_h$ )는 0.6 mm, 힌지의 반경( $R_h$ )은 0.5 mm, 암의 폭( $W_a$ )는 3.2 mm, 암의 높이( $H_a$ )는 2 mm 마지막으로 칼럼의 두께( $T_c$ )는 3 mm 이다. 이렇게 최적 설계된 형상에서의 응력 값은 38.9791 MPa이며, Fig. 6 는 최종 설계치수에서의 변위 발생 시 힌지 부의 응력 값과 응력 분포 상태를 나타낸 것이다.

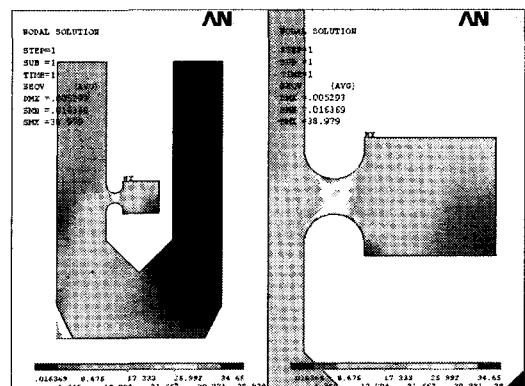


Fig. 6 Von-Mises stresses on the hinge

## 2.4 인치원 리니어 모터 제작

다구찌 방법에 의해 설계된 칼럼과 가이드 플레이트를 알루미늄 6061 소재를 사용하여 칼럼의 가공에는 주로 와이어 방전가공을 이용했으며, 초기 플레이트 두께를 일정하게 가공하기 위해 밀링 가공을 했다. 또한 형상의 가공오차를 줄이기 위해 내부 형상과 외부 형상의 기준을 한 곳으로 두고 코드를 작성하여 가공 했다. 이때 가공에 사용된 와이어의 직경은 0.25 mm 이며, 가공오차는 13

$\mu\text{m}$  이내로 하였다. 이렇게 가공된 칼럼의 형상은 Fig. 7 과 같다.

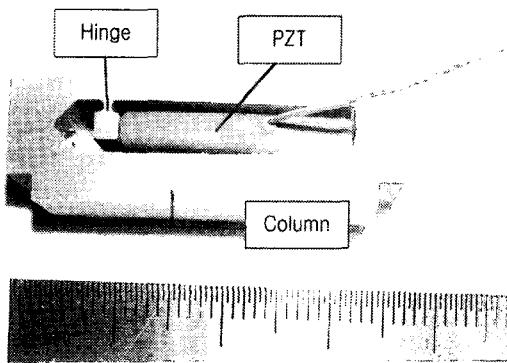


Fig. 7 Manufactured column of inchworm linear motor

외부 가이드 플레이트는 NC 밀링 가공을 주 가공으로 하였으며, 그 형상의 설계에는 다음의 사항을 고려하였다. 첫째, 인치웜 리니어 모터의 동작 시 칼럼이 작동 방향을 제외한 다른 축 방향의 움직임을 없도록 설계하였다. 둘째, 3 개의 PZT 중 가운데 실제 변위를 발생시키는 PZT에 예압을 걸어주기 위한 설계를 하였다. 마지막으로 로드 설치부의 진직도가 인치웜 리니어 모터의 작동에 아주 큰 영향을 주므로 그 진직도를 맞추기 위한 설계를 하였다. 이렇게 설계되어 제작된 가이드 플레이트의 형상은 Fig. 8 과 같다.

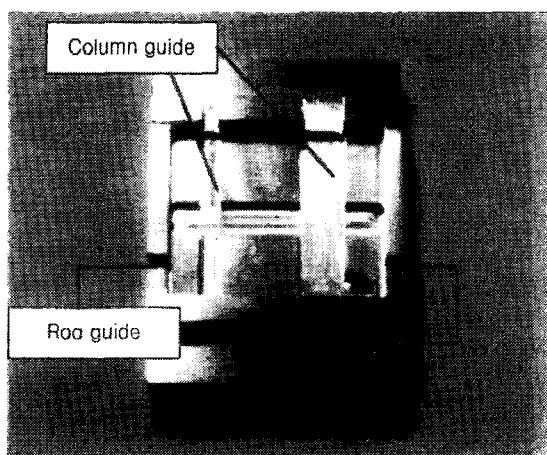


Fig. 8 Manufactured guide plate of inchworm linear motor

### 3. 컨트롤러 시스템의 구성 및 제작

#### 3.1 컨트롤러 시스템의 구성

인치웜 리니어 모터는 3 개의 액추에이터가 Fig. 9 과 같은 타이밍 차트에 따른 펄스를 받아 구동된다. 본 연구에서는 3 개의 액추에이터를 구동 시키기 위해 컨트롤러 시스템을 구성하였으며, 그 구성은 펄스 생성기와 전압 증폭기로 이루어져 있다. 먼저 인치웜 리니어 모터를 구동하기 위해 Fig. 9 의 타이밍 차트를 구성하였다. 반복하여 변위를 만들 수 있도록 알맞은 타이밍 차트를 만들 필요가 있다. 이후 실제 펄스를 만들기 위한 코딩 단계에서 타이밍 차트는 구동의 성공 여부에 아주 큰 영향을 주는 요인 중에 하나이다.

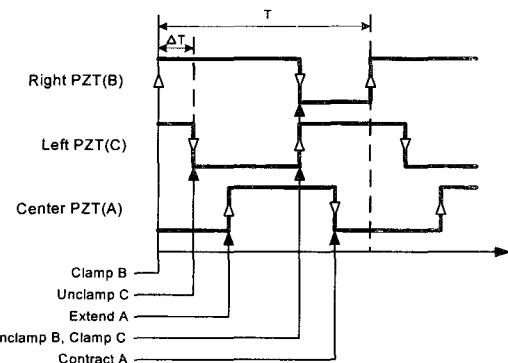


Fig. 9 Time chart for generating pulse

3 개의 액추에이터 구동 순서를 살펴보면 먼저 액추에이터 A가 수축이 되어 초기 위치에 있으며, 좌측 칼럼의 액추에이터 C가 확장되어 로드를 고정하고, 이어서 액추에이터 B가 확장되어 로드를 잡는다. 그리고 액추에이터 C가 수축되어 로드를 놓아주고, 액추에이터 A가 확장되어 로드에 실제 변위를 발생 시킨다. 다시 액추에이터 C가 확장되어 로드를 고정하고, 액추에이터 B가 수축하여 로드를 놓아준 후 액추에이터 A가 수축하여 오른쪽 칼럼을 초기 위치로 옮긴다. 이 과정을 계속 반복하여 실제 구동을 만든다. 따라서 3 개의 포트가 사용되고, 타이밍 차트에서 높은 부분에서 전원이 공급되어 액추에이터가 팽창되는 부분이고, 낮은 부분에서 전원 공급이 중단되어 액추에이터가 다시 수축되는 부분이다. 3 개의 액추에이터

터가 이 과정을 시점을 달리하여 조합되어 전체 인치웜 리니어 모터가 구동된다. 이후 Fig. 9의 타이밍 차트에 따른 펄스를 구현하기 위한 펄스 생성기를 제작하였다. 본 연구에 사용된 압전 액추에이터와 증폭기의 사용 전압과 주파수역을 보면, 압전 액추에이터는  $0 \sim 150$  V 까지 사용 가능하며 주파수는 AE0203D16 인 경우  $69$  kHz 까지, AE0203D08 인 경우  $138$  kHz 까지 사용이 가능하다. 증폭기의 경우 입력 받을 수 있는 전압은  $0 \sim 10$  V 까지이며, 출력할 수 있는 전압은  $-10 \sim 150$  V 까지이다. 사용 주파수는  $350$  Hz 까지이다. 따라서 이에 맞게 펄스 생성기를 구성 및 제작하였으며, 전압은  $5$  V 와  $10$  V 모두 사용 가능하게 하였고, 주파수는  $10 \sim 990$  Hz 까지 생성이 되도록 하였다. 본 연구의 시스템은 증폭기의 사용 주파수로 인하여  $300$  Hz 이하에서 동작하도록 하였다.

### 3.2 펄스 생성기의 제작

펄스 생성기는 마이크로 프로세서를 사용하여 Fig. 10의 회로도와 같이 구성하였다. 동작 상태여부와 조건 입력을 위해 외부 표시 장치로  $16 \times 2$  라인의 LCD를 사용하였다. 펄스 발생 부분은 마이크로 프로세서의 외부에 키패드를 달아서 원하는 주파수를 입력 받는 방식으로 제작하였다. 또한  $5V$  와  $10V$  두 가지 영역으로 입력 할 수 있도록 레귤레이터를 설치하였으며, 입/출력을 할 수 있도록 각종 컨넥터를 설치하였다.

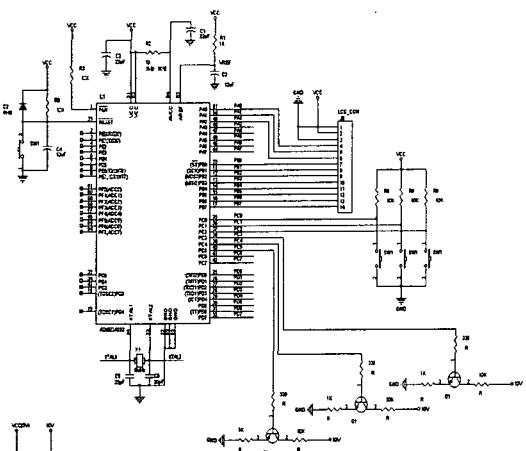


Fig. 10 Circuit of pulse generator

펄스 생성기는 마이크로 프로세서를 사용하여 Fig. 10의 회로도와 같이 구성하였다. 동작 상태여부와 조건 입력을 위해 외부 표시 장치로  $16 \times 2$  라인의 LCD를 사용하였다. 펄스 발생 부분은 마이크로 프로세서의 외부에 키패드를 달아서 원하는 주파수를 입력 받는 방식으로 제작하였다. 또한  $5V$  와  $10V$  두 가지 영역으로 입력 할 수 있도록 레귤레이터를 설치하였으며, 입/출력을 할 수 있도록 각종 컨넥터를 설치하였다. 주파수 입력을 위해 소스 코드를 제작하였으며, 메인 프로세서의 포트 A를 데이터 라인으로 사용하고 제어신호는 포트 B의 하위 3 비트, 출력부분은 포트 B의 상위 3 비트를 이용하여 제작하였다. 최상위부터 차례로 압전 액추에이터 A, B, C의 신호를 생성하는데 타이밍 차트를 확인하여 순서적으로 마이크로 프로세서에서 그 신호를 만들어 줄 수 있도록 소스를 프로그래밍하였으며, 실제 모듈 제작 후 모듈에 적용과정에 있어서 좀더 능동적 제어를 위해 타이밍 차트를 쉽게 변경하여 가면서 재 프로그래밍 할 수 있도록 프로그램 선두에 정의하여 제작하였다.

### 3.3 인치웜 리니어 모터 시스템 구동

인치웜 리니어 모터 시스템의 구동은 다음과 같은 과정을 거쳐서 이루어진다. 먼저 3 개의 압전 액추에이터의 작동 순서에 따라 앞의 Fig. 9 과 같은 타이밍 차트를 구성하고, 구성된 타이밍 차트에 맞게 코딩 된 소스에 의해 펄스 생성기에서 펄스를 만든다. 이렇게 생성된 펄스는 각각의 압전 액추에이터에 전달될 수 있게 3 개의 컨넥터에 의해 증폭기로 전달되어 압전 액추에이터의 필요 전압에 맞게 증폭된다. 이후 증폭된 전압은 각각의 압전 액추에이터에 전달되어 수축 팽창과 클램핑을 반복하여 로드를 움직이게 된다.

### 3.4 측정

제작된 1 차 시제품의 성능 평가를 위하여 본 연구에서 측정되어야 할 값은 인치웜 리니어 모터에 설치된 로드의 선형 변위이다. 측정장치는 접촉 센서인 lever probe 와 변위 지시계인 아날로그 방식의 뮤체커(MU-Checkers)를 사용하여 Fig. 11 과 같이 구성하였다. 로드의 변위를 감지하는 유효범위는  $\pm 0.5$  mm,  $0.5\%$ 의 선형성을 가지고, 변위 출력의 범위는  $\pm 0.1$   $\mu$ m ~  $\pm 1500$   $\mu$ m이다

Table 5 Specification of measuring sensor and mean displacement of rod under one step

Devices of measurement	Driving condition of pulse generator			Displacement of one step
	Volt	Cycle	Fre.	
Lever Probes/ Analogue MU- Checkers	5V	10	200 Hz	25 $\mu\text{m}$

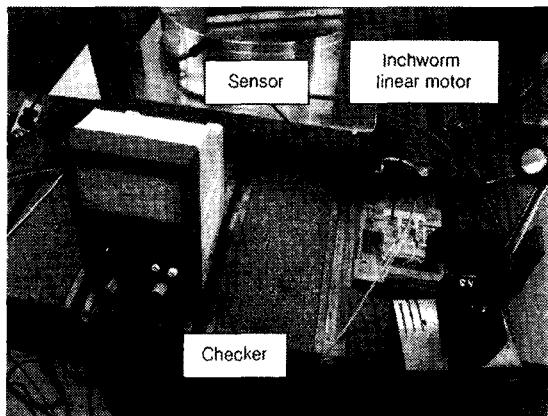


Fig. 11 Measurement of displacement of rod

측정 시 인치웜 리니어 모터의 구동 조건은 펄스 생성기에서 5V 의 전압, 10cycle 및 200 Hz 의 주파수의 펄스를 입력했으며, 이는 증폭기를 통해 인치웜 리니어 모터에 전해졌다. Fig. 9 의 타이밍 차트에 따른 10cycle 을 10 회 적용하여 측정하였는데 뮤체커(MU-Checkers) 아나로그 계기를 통하여 매회 25  $\mu\text{m}$ 의 변위가 확인되었으며 10 회 반복에 따른 표준편차 등의 오차는 출력 값이 디지털 값이 아닌 관계로 이번 측정에서는 확인되지 않았다. 향후 디지털 측정 방식을 채택한다면 반복에 따른 측정 오차가 규명되리라 생각된다. 따라서 인치웜 리니어 모터의 로드는 평균 25  $\mu\text{m}$  가 전진한다는 것을 알 수 있었고, 이는 1 회 이송이 10cycle 로 구성되어 1 cycle 당 2.5  $\mu\text{m}$ 이 평균적으로 이송된 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 연구는 인치웜 리니어 모터 시스템의 설계, 제작 및 구동 여부의 확인을 위한 간단한 측정 장치를 구성하는 것으로 아래의 결론을 도출하였다.

첫째, 본 연구의 인치웜 리니어 모터 시스템에 사용되는 압전 액추에이터는 인장에 약한 단점을 가지고 있으므로 액추에이터를 고정하고, 예압을 걸어 액추에이터의 구동 변위를 전달하기 위해 칼럼의 아래 부분에 플렉슈어 힌지를 채택하였다.

둘째, 플렉슈어 힌지에서 구조적으로 응력 집중이 발생되므로, 힌지 부의 Von-Mises 응력이 최소가 되는 형상 설계를 최적화하기 위해 실험계획법을 적용하였으며, 그 결과 힌지 두께 0.6 mm, 힌지 반경 0.5 mm, 암의 폭 3.2 mm, 암의 높이 2 mm, 칼럼의 두께 3 mm인 최적 설계치를 얻었다.

셋째, 3 개의 압전 액추에이터를 구동 시키기 위해 펄스 생성기와 전압 증폭기로 이루어진 컨트롤러 시스템을 구성하였으며, 인치웜 리니어 모터의 구동을 위해 펄스 생성기의 타이밍 차트를 결정하여 펄스 생성기를 제작하였다.

넷째, 접촉 센서인 lever probe 를 이용하여 인치웜 리니어 모터의 구동을 확인하였는바, 10 회의 측정을 통하여 매회 10 cycle 당 평균 이송 거리가 25  $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있었으며, cycle 당 이송 거리는 2.5  $\mu\text{m}$ 였다. 향후 인치웜 리니어 모터를 이용한 정밀이송시스템의 측정에 보다 좋은 분해능과 정밀도 및 정확도의 향상을 위해, 전압을 정밀하게 컨트롤할 수 있는 증폭기의 제작과 고가의 측정시스템 및 지그를 이용하여 인치웜 리니어 모터 시스템의 개발에 활용할 예정이다.

#### 참고문헌

- Lee, Chang Hong, "Ultra-precision Positioning Technology," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 9-15, 2000.
- Kim, Seung Woo, "Design and Control of Nano-Precision Machine Systems," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 1, pp. 13-17, 2002.
- Kim, J. Y., Kwac, L. K., Han, J. H., Kim, H. W. and Akira Shimokohbe, "A Study on the Optimal Structural Design using FEM for Micro Stage," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 10, pp. 60-65, 2002.
- Vaughan, M. E., "The Design, Fabrication, and Modeling of a Piezoelectric Linear Motor," State University of Virginia, 2001.
- NEC/TOKIN, "Multilayer Piezoelectric Actuators," Vol. 2. 2002 catalog.