

## 실험계획법을 이용한 인치웜 리니어 모터의 설계

예상돈\* ( 동의대학교 대학원 기계공학과), 민병현( 동의대학교 기계공학과)

### Design of Inchworm Linear Motor Using Design of Experiment

S. D. Ye(Mech. Eng. Dept., DEU), B. H. Min(Mech. Eng. , DEU)

#### ABSTRACT

Inchworm linear motor is one of the ultra precision position apparatuses and has many kinds of forms and structures according to the conditions of working space and range. In this paper, the inchworm linear motor consists of three PZTs(Piezo-electric transducer), three columns and two plates. Finite element method was used to determine the type of hinges installed in column of inchworm linear motor. DOE(Design of experiment) was used to determine the optimal design condition of a column by comparing the von-mises stresses according to the change of thickness of hinge, round of hinge, height of arm, angle of v-notch, round of v-notch and thickness of column. From the result, round of hinge, height of arm and thickness of hinge were determined a effective design parameters.

**Key Words** : Inchworm linear motor(인치웜 리니어 모터), Ultra precision position apparatus(초정밀위치결정기구), PZT(압전소자), Finite element method(유한요소법), DOE(실험계획법)

#### 1. 서론

최근 초정밀 분야에서 고정도화, 고정밀화가 진행되어, 이러한 분야에서 위치결정 기술은 현재 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하고 있다. 앞으로의 가공정밀도는 정밀가공분야에서 10nm, 초정밀가공분야에서는 1nm의 수준까지 도달 할 것으로 예상되어지고 있다.

이러한 분야의 요구를 충족시키기 위해서는 소형화, 고정밀도, 작은 전력소모, 빠른 응답성의 특성이 요구된다. 최근 이러한 요구를 만족하는 액츄에이터로 압전소자(PZT)가 많이 응용되고 있다. 전기적 신호를 직접 기계적인 힘 또는 운동으로 바꾸어 주는 이 압전소자는 전압으로 정밀한 제어가 가능하고, 무한한 분해능, 빠른 응답성, 수백만 사이클이 넘는 작동성과 같은 장점으로 인하여 초정밀위치결정 기구들에 많이 응용이 되고 있다.

인치웜 리니어 모터(Inchworm Linear Motor) 는

Fiber optic alignment ,Optical lithography , Cell physiology , Storage media testing , Surface analysis 에 적용되고 있다. 그 형상과 구조는 일반적으로 두 개의 클램핑 부분과 하나의 수축 팽창하는 부분으로 나눌 수 있다. 그러나 세부적인 구조는 사용공간과 작업 범위에 따라 그 형상은 다양하게 나타나고 있다.

본 연구에서는 초정밀위치결정 기구중의 하나인 인치웜 리니어 모터를 설계함에 앞서서 실험계획법과 유한요소해석 기법을 이용하여 인치웜 리니어 모터의 일부분을 설계하고자 하였으며, 그 과정과 결과들을 언급하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 인치웜 리니어 모터

본 연구에서 설계하고자 하는 인치웜 리니어 모터는 100 nm의 분해능, 무한대의 이동영역을 갖고,

3개의 PZT 액츄에이터를 사용하여 설계하고자 한다. 두 개의 PZT 액츄에이터는 로드를 구속하는데 사용되고 나머지 하나는 실제 이동을 만들어 주는 역할을 하고 있다.

설계하고자 하는 인치웜 리니어 모터의 동작은 Fig. 2과 같이 수축(1), 팽창(2), 팽창(3), 팽창(4), 수축(5), 수축(6)의 사이클을 통하여 로드를 이동시킨다. 인치웜 리니어 모터의 설계시 로드를 구속하는 역할을 하는 컬럼 부분의 굽힘 힌지 부분의 설계가 중요하다.

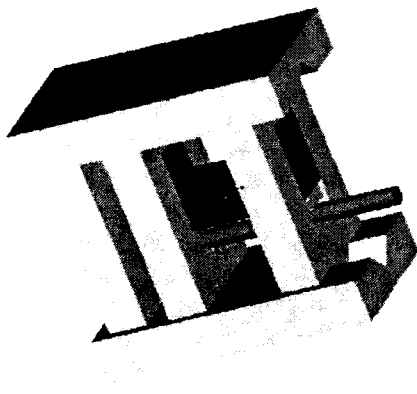


Fig. 1 Solid modeling of Inchworm linear motor

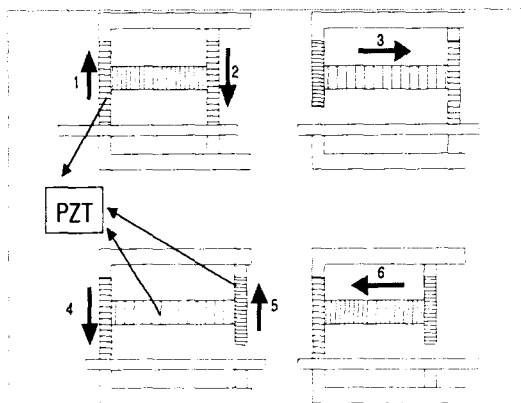


Fig. 2 Schematic diagram of operating procedures of inchworm linear motor

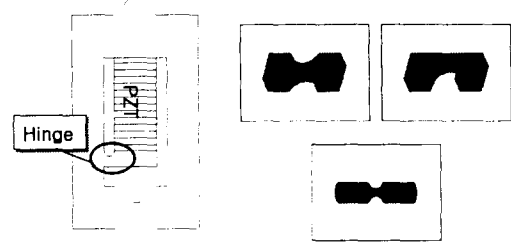


Fig. 3(a) Detail view of Hinge movable column

Fig. 3(b) Detail view of Hinge

몸체 및 컬럼은 알루미늄을 사용하며 재료에 대한 물성(material properties)은 Table 1 과 같다.

Table 1 Material properties of Aluminum

Material	Young's Modulus ( mN/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Yield strength ( mN/mm <sup>2</sup> )
Aluminum	72E6	0.34	270E3

### 2.1.1 힌지의 결정

힌지의 구조는 Fig.3 (b)와 같이 3종류가 있다. 본 논문에서는 컬럼부분의 굽힘 힌지를 결정하기 위해 힌지 구조 중 가공편의성을 고려하여 더블 노치와 싱글 노치 중에서 결정하고자한다. 더블 노치와 싱글 노치를 상용 소프트웨어인 ANSYS 6.0을 이용한 유한요소해석을 통하여 보다 적은 응력을 가지는 노치를 결정하여 컬럼에 적용하였다.

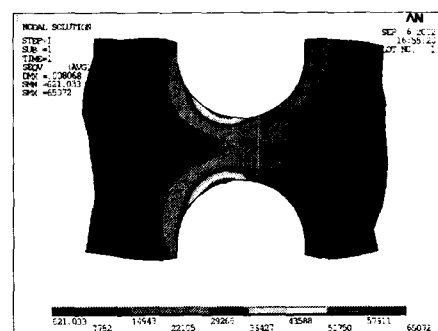


Fig. 4(a) Von-mises stress distribution of double hinge

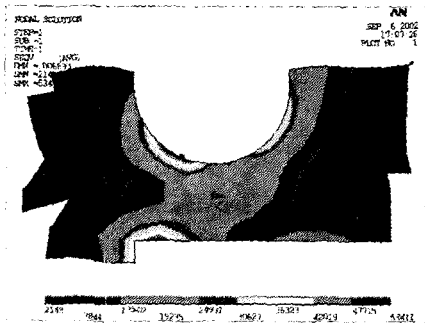


Fig. 4(b) Von-mises stress distribution of single hinge

Fig. 4의 유한요소 모델은 PZT를 강체라 가정하여 변위를 y 방향으로  $5.5 \mu\text{m}$ 를 적용하여 해석하였다. 그 결과 싱글 노치가 더블 노치 보다 응력이 적게 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 싱글 노치를 인치웜 리니어 모터 설계에 적용하였다.

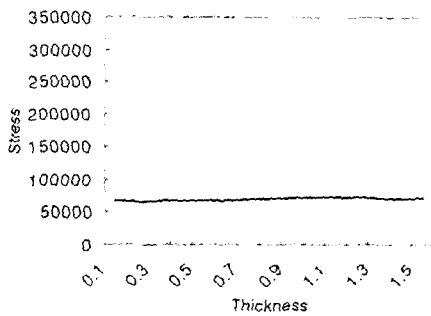


Fig. 5(a) Von-mises stresses according to the change of thickness of hinge

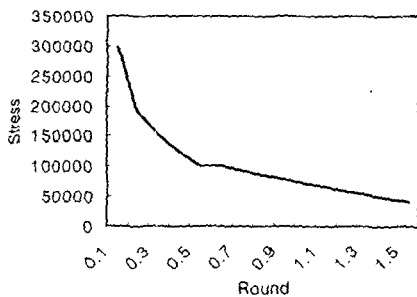


Fig. 5(b) Von-mises stresses according to the change of round of hinge

그러나 싱글노치의 응력에 영향을 미치는 인자들

이 여러 가지 존재한다. 대표적으로 힌지 부분의 두께 그리고 힌지 부분의 곡률을 예로 들 수 있다. 이들 인자들의 변화에 싱글 힌지 부분의 응력변화를 알기 위해 힌지 부분의 두께와 곡률을 각각 0.1 - 1.5 mm로 변화시켜 응력변화를 살펴보았다. Fig. 5와 같이 두께 변화 보다 곡률변화에 싱글노치의 응력 변화가 더 큼을 알 수 있었다.

### 3. 실험계획법

#### 3.1 해석모델

본 연구에서는 인치웜 리니어 모터 중에서 가장 중요하다고 생각되는 컬럼 부분을 PZT에서  $5.5 \mu\text{m}$ 의 변위가 발생한다고 가정하고 PZT와 압, 로드, 가이드의 접촉과 굽힘에 대해 해석을 다구적 실험계획법의 직교배열표(L25(5\*\*6))에 의해 수행하였다. 응력에 영향을 줄 수 있다고 여기는 6개의 인자를 Table 2와 같이 힌지 부분의 두께, 곡률, 높이 그리고 브이 홈 부분의 경사각도, 라운드, 컬럼 두께로 가정하고 수준을 각각 5수준으로 해석을 수행하였다. 해석은 상용유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 6.0 Multiphysics를 사용했다.

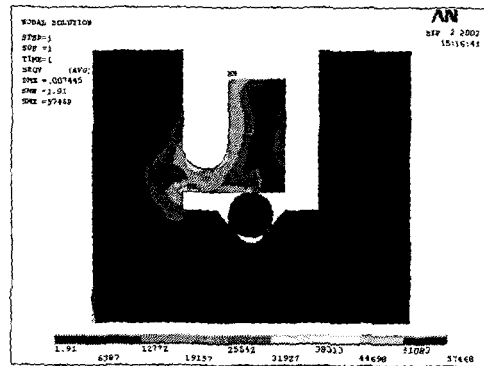


Fig. 6 Modeled column of inchworm linear motor

Fig. 6은 압 위에 PZT를 강체라 가정을 하고 변위를  $5.5 \mu\text{m}$  적용하여 PZT와 압의 접촉, 압과 로드와의 접촉, 로드와 브이 홈의 접촉에 의한 응력결과를 나타냈다. 응력집중은 노치 부분과 힌지 아래의 모서리 부분에 나타남을 알 수 있다.

본 논문에서 인치웜 리니어 모터의 컬럼부분의 굽힘 힌지는 응력을 작게 발생하도록 하는 것이 설계목표이므로 SN비는 망소특성에 해당하는 식 (1)로 계산되었다.

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

SN비에 대한 수준별 평균값과 기여율을 구한 결과는 Table 3, 기여율이 낮은 인자에 대해 풀링(Pooling)을 한 후의 분산분석 결과는 Table 4이다. Table 4의 분산분석표에서 제어인자의 기여율을 고려하면 힌지의 곡률이 발생하는 응력에 가장 큰 영향을 주며 총 변동량의 84.65%를 차지하고, 압의 높이, 힌지 두께 순으로 나타났다. 이에 대한 요인 효과도는 Fig. 7과 같다.

Table 2 Control factors and their levels concerned with the design of a column

Control factors	LEVEL				
	1	2	3	4	5
Thickness of hinge(A)	0.2 mm	0.4 mm	0.6 mm	0.8 mm	1.0 mm
Round of hinge(B)	0.2 mm	0.4 mm	0.6 mm	0.8 mm	1.0 mm
Height of arm(C)	3.0 mm	3.5 mm	4.0 mm	4.5 mm	5.0 mm
Angle of v-notch(D)	70°	80°	90°	100°	110°
Round of V-notch(E)	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm	0.7 mm	0.8 mm
Thickness of column(F)	2.0 mm	3.0 mm	4.0 mm	5.0 mm	6.0 mm

Table 3 Analysis of variance for SN ratios

Factors	S	DOF	V	Contribution rate
A	11.820	4	2.955	3.45%
B	290.198	4	72.549	84.65%
C	34.594	4	8.649	10.09%
D	2.626	4	0.657	0.77%
E	1.238	4	0.309	0.36%
F	2.364	4	0.591	0.69%
Error	0.000	0	0.000	0.00%
Total	342.840	24		

Table 4 Analysis of variance for SN ratios after pooling

Factors	S	DOF	V	Contribution rate	F
A	11.820	4	2.955	3.45%	5.69
B	290.198	4	72.549	84.65%	139.79
C	34.594	4	8.649	10.09%	16.66
Error	6.228	12	0.519	1.82%	
Total	342.840	24			

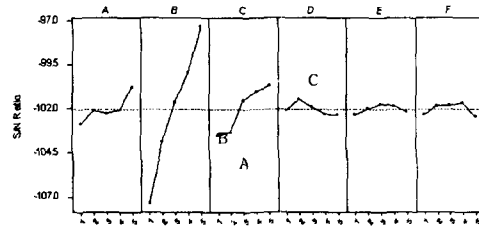


Fig. 7 Main effects plot for S/N ratios

결과에 유의한 영향을 주는 제어인자의 최적 수준은 SN비를 최대화 하는 수준이다. 따라서 인치웸 리니어 모터의 컬럼 부분의 최적 조건은 Table 3, Table 4와 Fig. 7로부터 A5, B5, C5, D2, E3, F4 임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 인치웸 리니어 모터 설계시 컬럼부분에 발생 응력을 줄이고자 모의 실험이 이루어졌으며 결과는 다음과 같다.

(1) 상용 소프트웨어인 ANSYS 6.0을 사용하여 인치웸 리니어 모터에 사용된 힌지를 결정할 수 있었으며 힌지 두께보다 힌지 부분의 곡률이 발생 응력에 더 영향력이 있음을 알 수 있었다.

(2) 상용 소프트웨어인 ANSYS 6.0과 강건설계기법인 다구치방법을 함께 이용하여 인치웸 리니어 모터의 컬럼 부분의 최적 조건을 도출하였다.

(3) 모의실험에 의한 인자들의 발생응력에 대한 기여율은 힌지 부분의 곡률이 다른 인자보다 많은 영향을 차지하며 기여율은 84.65% 였다.

(4) 모의실험에 의한 각 인자들의 최적 조건은 힌지 두께는 1.0 mm, 힌지 곡률은 1.0 mm, 압 높이는 5.0 mm, V홈 각도는 80°, V홈 라운드는 0.6 mm, 컬럼의 두께는 5.0 mm 로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Renyi Yang, "Design and Modeling of Single-Axis, Flexure-Hinge Type, Micro-Positioning Stages", University of Rhode Island, 1995
2. 한창수, 백석, 노명규, 이찬홍, "초정밀 마이크로 위치결정 스테이지의 제작 및 평가", 한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 244-247
3. 김재열, 윤성운, 김항우, 한재호, 박이구, "유한요소법을 이용한 초정밀 미동스테이지 설계에 관한 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 190-194