한국공작기계학회 2004 추계학술대회 논문집 pp.213~218

# 광소자 정렬용 초정밀 다축 스테이지 개발

정상화*, 이경형+, 김광호++, 차경래+++, 김헌욱+++, 최석봉+++, 박준호+++

# Development of Multi-Axis Ultra Precision Stage for Optical Alignment

S. H. Jeong*, K. H. Lee+, G. H. Kim++, K. R. Cha+++, H. U. Kim+++, S. B. Choi+++, J. H. Park+++

Abstract

As optical fiber communication grows, the fiber alignment become the focus of industrial attention. This greatly influence the overall production rates for the opto-electric products. We proposed multi-axis nano positioning stage for optical fiber alignment. This device has 3 DOF translation and sub nanometer resolution. This nano stage consist of 3 PZT-driven flexure stages which are stacked parallel. The displacement of it is measured with capacitance gauge and is controlled by computer-embedded main controller. The design process of flexure stage using FEM is proposed and the performance evaluation of this system is verified with experiments.

Key Words : Optical fiber Alignement(광정렬), PZT Actuator(압전액츄에이터), Flexure(탄성힌지), Capacitance gauge(정전용량형 센서), FEM(유한요소법), Resolution(분해능), Travel(이송범위)

## 1. 서 론

초고속 통신망이 확대되고 광통신이 발달함에 따라 광섬유 정렬은 광산업에서 중요한 관심사가 되었다. 그 이유는 광정렬이 광통신에 사용되는 광통신 부품의 생산성에 중대한 영향을 미치기 때문이다. 광정렬은 신호가 입력되는 하나의 광섬유 스택과 하나 이상의 신호가 출력되는 다른 광섬유 도파로를 접합하는 공정의 전 단계 공정이다. 정렬 정밀도는 제품의 광소자 품질에 큰 영향을 미치는 요소이다. 광섬유를 접합하는 공정에서는 서브마이크로미터 수준의 정밀도를 요구한다.

본 연구에서는 평면도파로형 분배기(PLC), DWDM, AWG 등의 광부품 패키징 공정중 미세정렬에 적용하기 위해서 광소자 정렬용 극초정밀 다축 위치 제어 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 3개의 100㎛의 이송능력을 갖는 단축 스테이지가 직렬로 연결되어 3자유도 직선운동을 수행한다. 각각의 스테이지는 압전액츄에이터를 이용하여 구동되며 탄성힌지를 이용하여 변위가 확대되는 구조를 가지고 있다.

액츄에이터에서 발생되는 초정밀변위를 확대하고 안내하는 역할을 하는 탄성힌지 가이드를 개발하기 위하여 유한요소법을 이용하여 모드해석, 주파수해석 및 응력해석을 수행하였으며 이를 설계에 반영하였다. 또한 초정밀 다축 위치제어 장치의 분해능 및 이송능력을 실험을 통하여 검증하였다.

* 정상화, 조선대학교 기계공학과 (shjeong@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375
+,+++ 조선대학교 기계공학과
++ 조선대학교 광응용공학과

## 2. 시스템 구성

### 2.1 시스템 구성

본 연구에서 개발한 광정렬용 극초정밀 다축 위치제어장치의 구성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 시스템은 3자유도(X, Y, Z) 운동을 하는 스테이지부와 스테이지의 변위를 측정하는 정전용량형 센서와 컴퓨터에 장착된 메인 컨트롤러로 구성된다. 여기서 압전 액츄에이터에 전원을 공급해주는 파워서플라이 모듈은 D/A 채널에 연결되고 정전용량형 센서는 A/D채널로 입력된다.

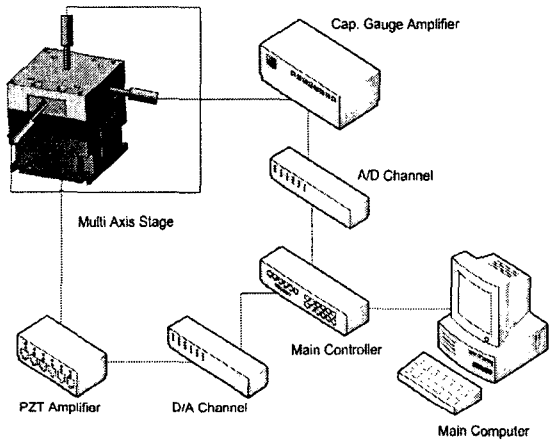



**Fig. 1 Schematic Diagram of Precision Positioning System**

### 2.2 탄성힌지 가이드 구조

본 연구에서는 탄성힌지 가이드를 설계하기 위하여 유한요소 해석법을 도입하였다. 모델링된 각축의 탄성힌지 가이드에 액츄에이터가 장착되는 접합면에 변위를 입력시켜 그때의 취약부의 파괴여부와 탄성힌지 가이드 전체의 응력분포 및 스테이지의 발생변위를 파악하였다. 또한 압전액츄에이터의 발생력의 변화에 대해 탄성힌지 가이드의 응력분포 및 발생변위를 파악하였다. 유한요소 해석을 수행함으로써 모델링된 탄성힌지 가이드의 설계 타당성을 검증할 수 있었고 액츄에이터의 변위와 힘의 변화에 따른 각각의 스테이지의 발생변위의 데이터를 얻을 수 있었다.

#### 2.2.1 탄성힌지 모델링

탄성힌지 가이드는 강체의 탄성변형을 이용하여 압전액츄에이터에서 발생되는 변위를 확대시키고 선형적으로 안내하는 기구이다. 본 연구에서 개발된 탄성힌지 가이드의 작동원리는 Fig. 2에 나타내었다. 압전액츄에이터에서 15 ㎛의 변위가 발생되면 약 6.67배 정도 변위가 확대되어 운동단에서 100 ㎛가 발생되는 구조로 설계하였다.

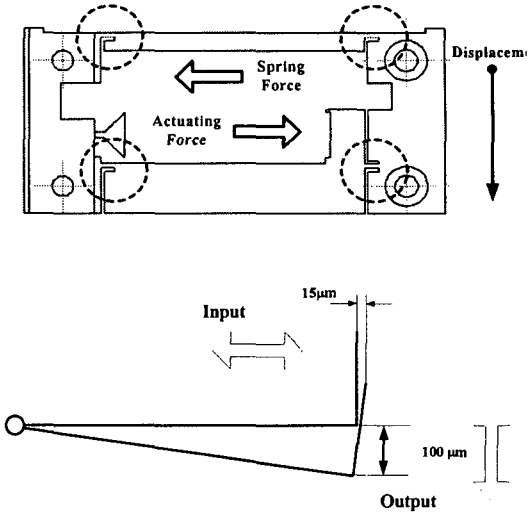



**Fig. 2 Mechanism of Flexure**

### 2.3 탄성힌지 가이드 응력 및 진동해석

#### 2.3.1 탄성힌지 가이드 응력해석

탄성힌지 가이드의 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 액츄에이터의 발생력과 발생변위에 대한 탄성힌지 가이드의 변형과 응력 분포를 해석하였다. 첫 번째 입력 조건은 액츄에이터 작용점에 힘을 입력하였다. 이는 발생력에 대해 각축의 스테이지의 변위가 얼마나 발생하는 지를 알기위한 것이다. 두 번째 입력 조건은 변위 발생지점에 변위를 입력하였다. 이 때 탄성힌지 가이드의 응력분포 및 파괴 여부를 해석하였다.

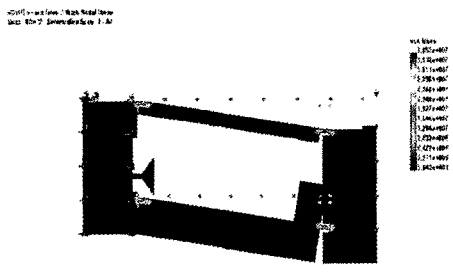
Table 1은 유한요소해석을 수행하기 위한 재료의 물성치와 유한요소 모델링 조건을 나타낸 것이다.

탄성힌지 가이드의 운동단에서 100 ㎛의 변위가 발생할 때 그때의 탄성힌지 가이드에 발생되는 응력분포를 파악하였다. 이때 가장 변형이 심하게 발생하는 부분의 응력집중 현상을 살펴보았다. 해석결과 X축 탄성힌지 가이드의 최대 응력은 3.8532E+7 N/m2, Y축은 3.756E+7 N/m2, Z축이 3.766E+7 N/m2 이 발생하였는데 이는 두랄루민의 항복하중 6.8 e+08N/m2 임을 고려하면 소성변형이 발생하지 않음을 알 수 있다. 발생변위에 따른 응력분포 해석 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

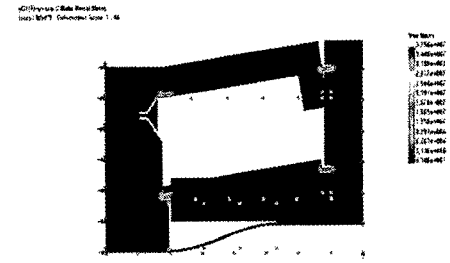
본 연구에서 목표로 하고 있는 100㎛의 변위가 발생하려면 어느 정도의 힘이 가이드에 작용해야 하는지 알기 위하여 힘에 따른 변위발생을 해석하였다. 해석결과 X축의 가이드의 경우 Face 427에 16N이 작용할 때 최대변위 100.69 ㎛가 Face 2186에서 발생되었고, Y축은 Face 954에 21 N이 작용할 때 최대변위 100.8 ㎛가 Face 2018에서 발생되었다. 또한 Z축의 경우 Face 883에 26 N이 작용할 때 최대변위 115 ㎛가 Face 1427에서 발생되었다. 그러므로 100㎛의 변위가 발생되기 위해서는 X축에서는 최소 16N, Y축의 경우 21N 그리고 Z축의 경우에서는 최소 26 N이 작용력이 발생하는 압전액츄에이터를 설정해야 함을 알 수 있었다. Fig. 4는 발생에 따른 변위발생을 해석한 결과를 나타낸 것이다.

**Table 1 Input Condition for FEM**

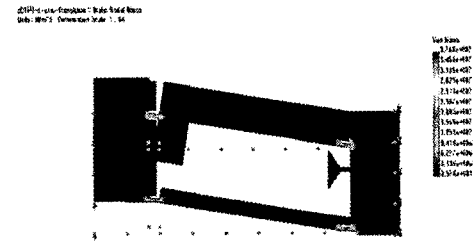
| | |
|---|---|
| **Mesh** | |
| Mesh Type | Solid Mesh |
| Mesher Typer | Standard |
| Element Size | 0.86977 mm |
| Tolerance | 0.0043489 mm |
| Nodes | 95441 |
| Elements | 65610 |
| **Properties** | |
| Elastic Modulus | 7.2e+10 $N/m^2$ |
| Poisson's Ratio | 0.34 |
| Shear Modulus | 2.7e+10 $N/m^2$ |
| Density | 2800 $kg/m^3$ |
| Yield Strength | 6.8 e+08$N/m^2$ |
| **Boundary Condition** | |
| - Force on Face 427(PZT Actuator) : 16 N<br>- Displacement on Face 2186 : 100 ㎛<br>- Fix on Face 2068 with 6 DOF | |



(a) Stress in X-Axis Flexure

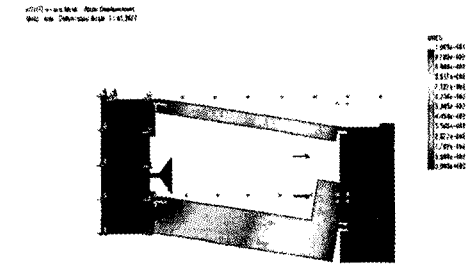


(b) Stress in Y-Axis Flexure

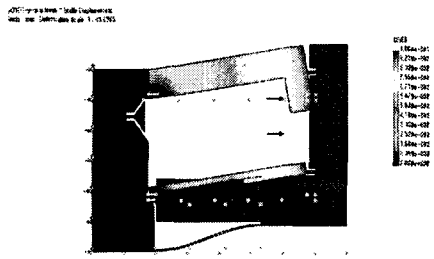


(a) Stress in Z-Axis Flexure

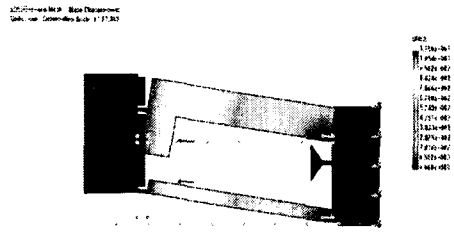
**Fig. 3 Stress Analysis with 100 ㎛ Input**



(a) Displacement in X-Axis Flexure



(b) Displacement in Y-Axis Flexure



(c) Displacement in Z-Axis Flexure

Fig. 4 Displacement Analysis with Applying force

### 2.3.2 진동해석

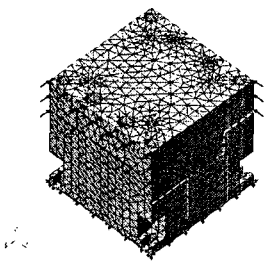
외부진동 및 장치내의 액츄에이터에 대한 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악 위하여 극초정밀 다축 위치 제어 장치의 진동해석을 수행하였다. 입력 조건은 장치 밑면을 고정하고 X, Y, Z축 방향으로 100 N을 입력하였다. 해석은 10차 모드까지 수행하고 결과를 나타내었다. 진동해석 결과 가장 큰 진동이 나타나는 1차 모드에서 156.18 Hz가 나타났다. 내부 진동원인 압전액츄에이터의 고유진동수가 20 kHz임을 고려할 때 공진현상이 발생하지 않음을 알 수 있었다. Table 2는 진동해석을 수행하기 위한 재료의 물성치와 경계조건을 나타낸 것이고, Table 3은 진동해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5는 진동해석후 모드형태를 나타낸 것이다.

Table 2 Input Condition for Frequency Analysis

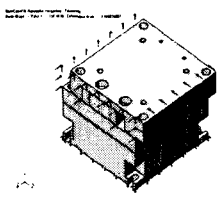
| | |
|---|---|
| **Mesh** | |
| Mesh Type | Solid Mesh |
| Mesher Typer | Standard |
| Element Size | 0.0033005 m |
| Tolerance | 0.00016503 m |
| Nodes | 43412 |
| Elements | 24550 |
| **Property** | |
| Elastic Modulus | 7.2e+10 N/m2 |
| Poisson's Ratio | 0.34 |
| Shear Modulus | 2.7e+10 N/m2 |
| Density | 2800 kg/m3 |
| Yield Strength | 6.8 e+08N/m2 |
| **Boundary Condition** | |
| - Force on Face 917 &965(PZT Actuator) : 100 N | |
| - Fix on Face 115 with 6 DOF | |

Table 3 Frequency Analysis of Multi-Axis Ultra Precision Stage

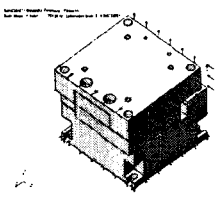
| Mode | Frequency (Hz) | Mode | Frequency (Hz) |
|---|---|---|---|
| 1 | 156.18 | 6 | 1385 |
| 2 | 189.69 | 7 | 1936.4 |
| 3 | 431.59 | 8 | 1946.4 |
| 4 | 812.1 | 9 | 2759.1 |
| 5 | 975.04 | 10 | 3843.4 |



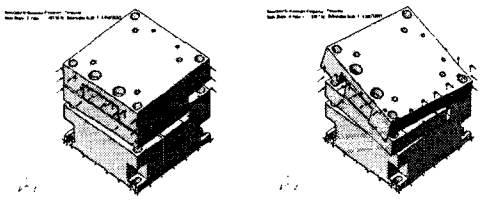
(a) FEM Modelling for Frequency Analysis



(b) 1st Mode Shape



(c) 2nd Mode Shape



(d) 3rd Mode Shape (e) 4th Mode Shape

Fig. 5 Mode Shape of Multi-Axis Ultra Precision Stage

## 3. 성능평가

### 3.1 초정밀 위치구동 이송범위 및 분해능 측정

Fig. 6은 제작된 초정밀 다축 위치 제어장치를 나타낸 것이다. 제작된 장치의 성능을 평가하기 위하여 구동범위 및 분해능을 시험하였다. 장치 구동은 Main Controller에서 DSP Terminal을 통해 PZT Amplifier에 입력전압을 입력하였다. 초정밀 다축 위치 제어장치의 변위는 25 nm의 분해능을 갖는 정전용량형 센서를 통해 측정하였다. 분해능 측정 실험을 위한 실험조건은 5 mV씩 계단함수로 입력하였고 구동범위 측정 실험에서는 1 V 스텝의 계단함수를 입력하였다.

실험결과 분해능은 Y축에서 최소 25 nm 정도로 나타났으며 최대변위 발생범위는 Y축에서 99 ㎛ 정도로 나타났다. Fig. 7은 분해능을 나타낸 것으로 X축이 약 31 nm로 검출되었고, Y축은 25 nm, Z축은 32.5 nm의 분해능을 보였다. Fig. 8은 구동성능을 나타낸 것으로 X축에서 97 ㎛, Y축 99 ㎛, 그리고 Z축에서 93.25 ㎛ 구동 범위를 보였다. Table 4는 초정밀 위치 제어장치의 각 축별 분해능과 구동범위를 나타낸 것이다.

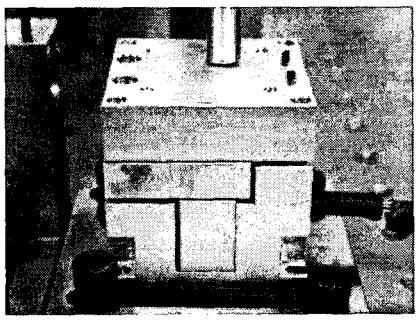
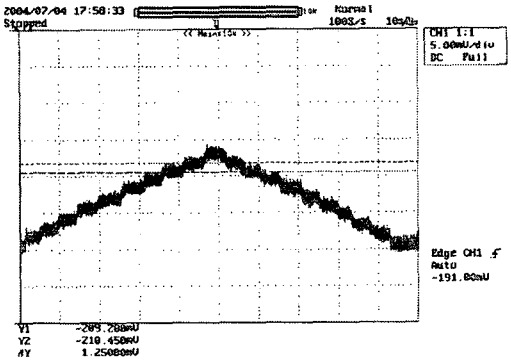


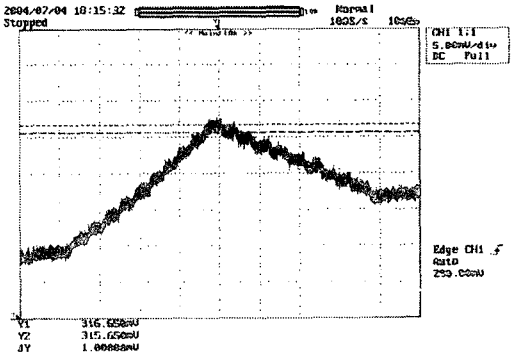
Fig. 6 Multi-Axis Ultra Precision Stage

Table 4 Resolution and Travel of Multi-Axis Ultra Precision Stage

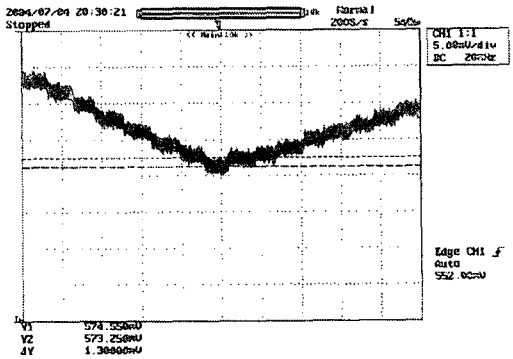
| Axis | Resolution | Travel |
|---|---|---|
| X | 31 nm | 97 ㎛ |
| Y | 25 nm | 99 ㎛ |
| Z | 32.5 nm | 93.25 ㎛ |



(a) Resolution of X-Axis

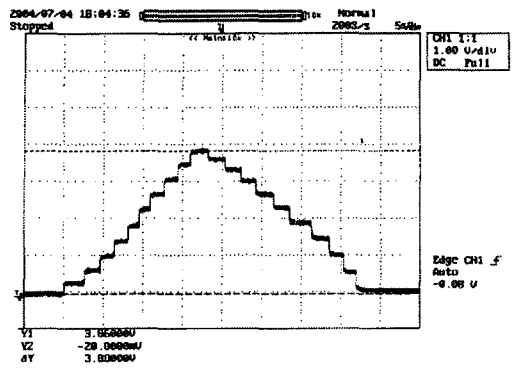


(b) Resolution of Y-Axis

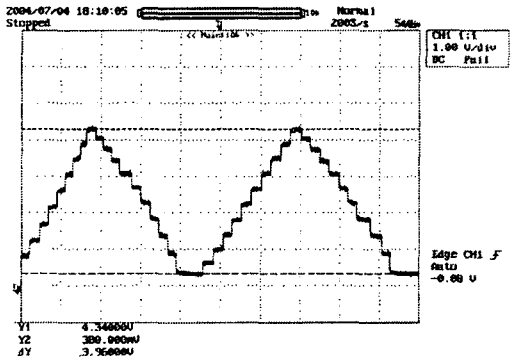


(c) Resolution of Z-Axis

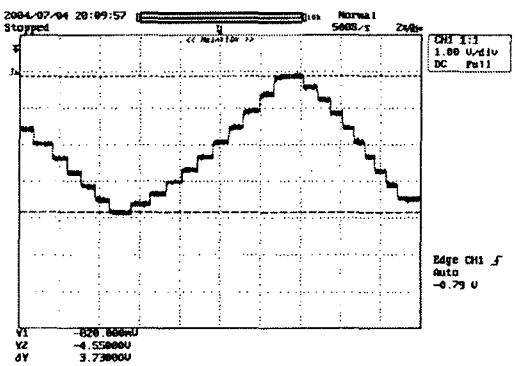
Fig. 7 Resolution of Multi-Axis Ultra Precision Stage



(a) Travel of X-Axis



(b) Travel of Y-Axis



(c) Travel of Z-Axis

**Fig. 8 Travel of Multi-Axis Ultra Precision Stage**

## 4. 결론

본 논문에서는 광통신에 사용되는 광소자를 생산하는 공정 중 가장 핵심인 광정렬공정에서 정밀도와 정렬시간을 단축시킬 수 있는 초정밀 다축 광정렬 위치 제어장치를 개발하였다. 개발된 장치는 직렬로 배치된 3개의 탄성힌지 가이드 스테이지에 의해 나노미터 수준의 3자유도 직선운동을 수행한다. 탄성힌지 가이드 스테이지를 설계하기 위하여 유한요소해석법을 사용하여 발생변위와 응력발생 그리고 응력발생에 따른 발생변위 관계를 검증하였고 위치 제어 장치 전체의 진동 모드를 해석하였다. 해석 결과 설계하였던 스테이지는 발생 변위(100 ㎛)를 구동할 때 각각의 축은 모두 소성변형에 대해 안정한 것으로 판명되었고 또한 외부 진동 및 내부 액츄에이터의 공진에 대해서도 안정한 것으로 판명되었다. 해석결과를 토대로 설계, 제작된 장치의 성능을 평가하고자 정전용량형 센서를 이용하여 분해능과 구동범위를 측정하였다. 측정 결과 각각의 축들의 분해능은 최대 25 nm, 구동범위는 99 ㎛로 나타났다. 이 결과로 본 연구에서 개발된 장치는 광정렬의 정밀도를 높여줌으로써 광정렬 시간을 단축시켜줄 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌


1. Hayes, J, "Fiber Optics Technician's Manual 2nd Ed., Delmar Publication, 2001
2. M. Murakawa, H. Nasato, and T. Higuchi, "Automatic Optical Fiber Alignment System using Genetic Algorithms", Proceedings of 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC 2003), pp. 2096-2101, IEEE, 2003
3. N.Taiguchi, "Future trends of nanotechnology", Int. Journ. Japan Soc Prec. Eng., Vol. 26, No. 1, Mar, 1992, p1-7
4. D. whitehouse, "Nanotechnology instrumentation , Measurement & Control", Vol. 24, 1991. p34-46
5. J. Manul, C. Hernandez, V. Hayward, "Phase conrol approach to hystresis reduction", IEEE Control System Technology Vol. 20, No. 1 pp.17-26