

## 광소자 정렬용 극초정밀 다축 스테이지의 구동 메커니즘에 관한 연구

정상화\*, 김광호<sup>+</sup>, 차경래<sup>++</sup>, 이경형<sup>++</sup>, 송 석<sup>++</sup>

(논문접수일 2005. 4. 7, 심사완료일 2005. 10. 25)

### A Study on the Motion Mechanism of Multi-Axis Ultra Precision Stage for Optical Element Alignment

Sang-hwa Jeong\*, Gwang-ho Kim<sup>+</sup>, Kyoung-rae Cha<sup>++</sup>, Kyoung-hyoung Lee<sup>++</sup>, Suk Song<sup>++</sup>

#### Abstract

The communication through optical fiber is taking an important role of the expansion of communication network with excellent transmitting rate and quality. As the optical communication is introduced to the backbone network at first and becomes a general communication method of network, the demand of kernel parts of optical communication such as PLC(Planar Light Circuit), Coupler, and WDM(Wavelength Division Multiplexing) element increases. The alignment and the attachment technology are very important in the fabrication of optical elements. In this paper, the driving mechanism of ultra precision stage is studied with the aim of optimal design of stage. The travel and the resolution of stage are investigated. The hysteresis of the stage is generated because of PZT actuator. The hysteresis and the inverse hysteresis are modeled in X, Y, and Z-axis motion. The input data of desired displacement of the stage according to input voltage is obtained from the inverse hysteresis equation. In the result of experiments with the input data, the errors due to hysteresis are well compensated.

**Key Words** : Optical Fiber Alignment(광섬유 정렬), PZT Actuator(압전 액츄에이터), Elastic Flexure(탄성 힌지), Capacitance Gauge(정전용량형 센서), FEM(유한요소법), Resolution(분해능), Travel(이송범위)

\* 조선대학교 기계공학과 (shjeong@chosun.ac.kr)  
주소 : 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지  
<sup>+</sup> 교신저자. 조선대 광응용공학과  
<sup>++</sup> 조선대 기계공학과

## 1. 서론

현재 광통신 시스템은 광섬유의 저손실성과 광대역성을 충분히 활용할 수 있는 기간 전송망으로부터 도입되기 시작하여 현재는 기간 중계의 대부분이 광통신화 되어 있고 국내에서도 2.5Gbps까지의 전송 방식이 상용화되어 있다<sup>(1)</sup>. 초고속 광통신이 발전함에 따라 초고속 광통신 시스템의 핵심 부품인 평면도파로형 분배기(PLC Splitter) 및 결합기, 파장분할다중화(WDM) 소자, AWG(Arrayed Wave Guide) 필터 등 각종 광통신소자 부품들의 개발이 활발히 진행중이다<sup>(2,3)</sup>. 이에 따라 기존의 장치보다 정밀한 정렬을 필요로 하게 되었다. 특히 광통신소자 제조과정상 소자와 광섬유(Optical Fiber) 사이의 광학적인 정렬과 접합 공정은 부품 성능 및 생산성 향상, 그리고 비용절감을 위한 가장 핵심적인 문제로 대두되고 있다<sup>(4,5)</sup>. 최근 초정밀 스테이지 기술은 주로 반도체 기술과 초정밀 렌즈 금형의 가공 및 검사에 주로 사용되었으나 초고속 광통신이 발전함에 따라 광통신 소자의 자동정렬 공정에 사용되고 있다<sup>(6,7)</sup>. 현재 미국과 일본의 회사에서 광도파로 소자 정렬 시스템이 생산되고 있는데 스테이지 구동을 위해 스텝모터나 DC모터를 사용하고, 운동전달요소로서는 리드나사, 볼나사, 웜과 웜기어 등을 사용한다. 이들 대부분의 시스템들은 직선운동을 하는 리니어 스테이지를 직렬로 연결하여 X-Y-Z 직교 3축 직선변위를 발생시키고 고니어미터(Goniometer)를 이용하여 각변위를 발생시키는 구조이다<sup>(8,9)</sup>.

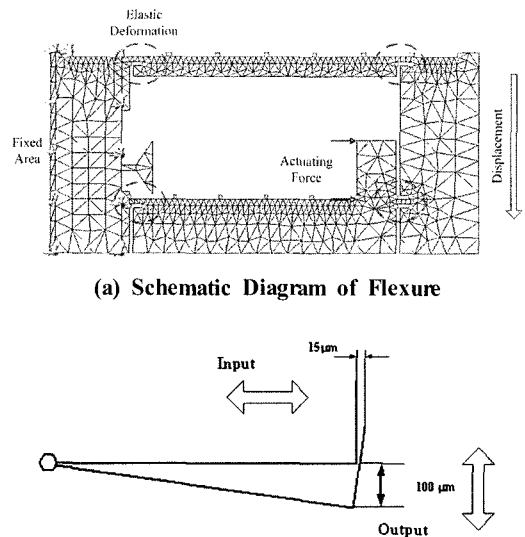
본 연구에서는 평면도파로형 분배기, WDM소자, AWG 필터 및 평면도파로 소자 등의 부품을 신속하고 정밀하게 정렬하기 위하여 극초정밀 다축 위치 제어 장치의 메커니즘에 관해 연구하였다. 이를 통해 얻은 데이터를 기준으로 제작된 극초정밀 다축 위치 제어 장치의 분해능 및 위치추적 성능을 평가하였고, 초정밀 다축 위치 제어 장치의 역 히스테리시스를 모델링하여 실험을 통해 히스테리시스 보상 성능을 평가하였다. 또한 광소자 정렬 공정에 적용함으로써 광소자 정렬 정밀도의 신뢰성을 확보하였다.

## 2. 연구 내용

### 2.1 스테이지 구동 메커니즘

극초정밀 스테이지의 구동메커니즘은 압전 액츄에이터 및 플렉서(Flexure)로 이루어져 있다. 플렉서(Flexure)는 강체의 탄성변형을 이용하여 압전 액츄에이터에서 발생하는

변위를 확대시키고 선형적으로 안내하는 기구이다<sup>(6)</sup>. 플렉서(Flexure)의 작동원리는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 (a)는 플렉서(Flexure)의 입력 작용점과 변위 발생 지점, 탄성 변형이 일어나는 지점을 나타내었고, Fig. 1 (b)는 변위 확대 구조의 원리를 나타내었다. Fig. 2는 입력 작용점의 위치에 따른 입력변위와 출력변위와의 관계를 규명하고자 기구학 해석을 하였다. 이를 통하여 압전 액츄에이터에서 변위가 입력되면 출력측에서의 변위가 어느 정도 발생하는지를 파악하였고 압전 액츄에이터의 변위사양과 입력 작용점의 위치를 설정할 수 있었다.



(b) Principle of Displacement Enlargement Construction

Fig. 1 Flexure Guide Mechanism

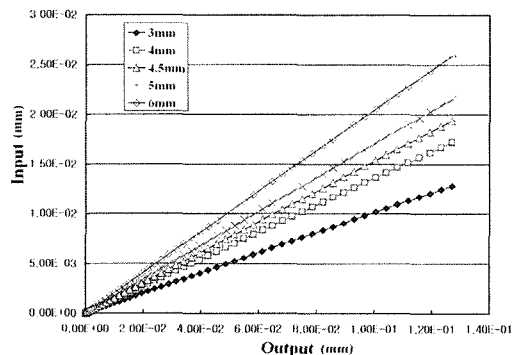


Fig. 2 Kinematic Analysis of Flexure Mechanism

## 2.2 유한요소 해석

### 2.2.1 Flexure 응력해석

일반적으로 탄성한계 이내에서는 하중과 변형은 선형적인 관계를 가지고 있고 액추에이터의 힘이 제거되면 원래 상태로 복귀되므로 미세 변위 영역에서는 가이드 역할을 할 수 있다. 그러므로 압전 액추에이터에서 변위가 발생하였을 때 플렉서(Flexure)의 응력 분포 및 발생 응력이 얼마나 되는지 그리고 발생력이 작용하였을 때 출력단에서 변위가 어느 정도 발생하는지를 파악하여야 한다. 압전 액추에이터의 작용력과 플렉서(Flexure)의 발생변위 관계, 작용 변위와 응력발생과의 관계를 유한요소 해석을 이용하여 파악하였고 그 결과들을 토대로 플렉서 설계 인자들을 결정하였다.

#### (1) 작용력에 대한 발생변위

압전 액추에이터에서 입력되는 힘과 출력단에서 발생하는 변위와의 관계를 파악하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 작용력에 대한 플렉서(Flexure)의 응력분포 및 변위에 대한 결과는 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 X축에서 작용력이 16N이 작용될 때 최대변위

Table 1 Maximum Stress and Deformation according to Applied Forces

Axis	Applied Force (N)	Max. Stress (Von Mises) (N/m <sup>2</sup> )	Max. Deformation (μm)
X	16	4.3187E+7	106.9
Y	21	4.0624E+7	100.8
Z	23	4.091E+7	101.7

106.9μm가 발생되고, Y축에서는 21N이 작용될 때 최대변위는 100.8μm가 발생되었다. 그리고 Z축에서는 23N이 작용될 때 최대변위 101.7μm가 발생됨을 알 수 있었다. 그러므로 100μm의 변위가 발생되기 위해서는 최소 X축은 16N, Y축은 21N, Z축은 23N의 작용력이 발생하는 압전 액추에이터를 설정해야 함을 알 수 있었다.

#### (2) 발생변위에 따른 응력분포

출력단에서 발생하는 변위에 대한 플렉서(Flexure)의 응력분포를 알아보기 위한 해석 결과는 Fig. 4와 Table 2에

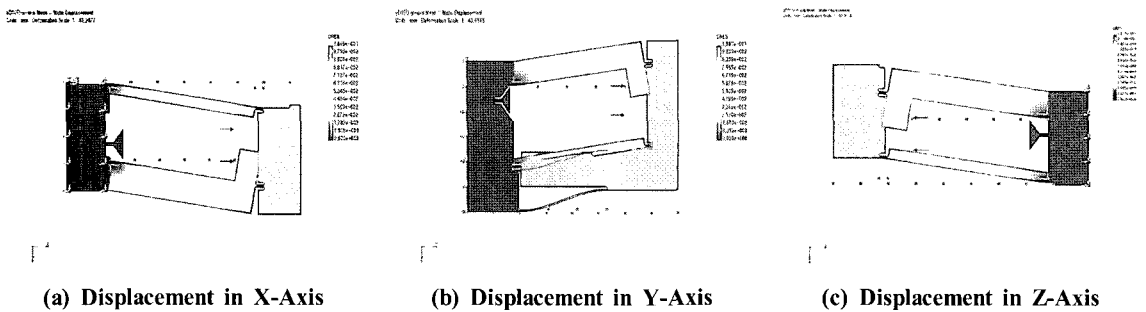


Fig. 3 Displacement according to Actuating Force

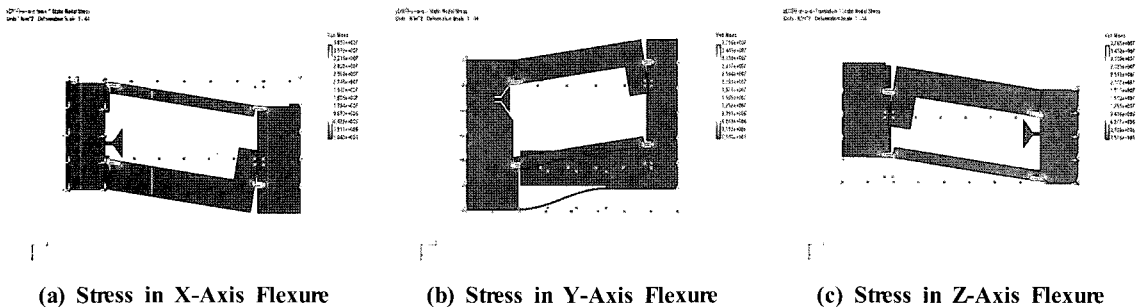


Fig. 4 Stress Distribution according to Input Displacement

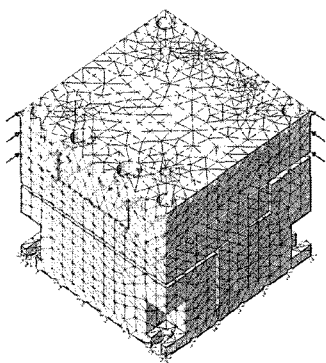
**Table 2 Maximum Stress according to Applied Displacement**

Axis	Applied Displacement( $\mu\text{m}$ )	Max. Stress (Von Misses)( $\text{N}/\text{m}^2$ )
X	100	3.8532E+7
Y	100	3.7563E+7
Z	100	3.7663E+7

나타났다. 플렉서(Flexure)의 운동단에서  $100\mu\text{m}$ 의 변위가 발생할 때 플렉서(Flexure)에 발생하는 응력분포는 X축에서 최대응력  $3.8532\text{E}+7\text{N}/\text{m}^2$ 로 나타났으며, Y축에서는  $3.7563\text{E}+7\text{N}/\text{m}^2$ 의 최대응력이 발생하였다. 그리고 Z축에서는 최대응력  $3.7663\text{E}+7\text{N}/\text{m}^2$ 이 발생함을 알 수 있었다. 이는 두랄루민의 항복하중  $6.8\text{E}+08\text{N}/\text{m}^2$ 임을 고려할 때 X, Y, Z축 플렉서(Flexure)는 소성변형이 발생하지 않음으로 탄성변형 영역 내에서 변위 확대 및 가이드 역할을 수행할 수 있음을 나타낸다.

### 2.2.2 스테이지의 진동해석

외부진동 및 장치 내의 액츄에이터에 대한 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악하기 위하여 극초정밀 다축 위치 제어 장치의 진동해석을 수행하였다. Fig. 5는 초정밀 다축 위치 제어 장치의 진동해석을 위한 모델로서 경계조건을 나타낸 그래프이다. 재질은 두랄루민으로 선정하였고, 베쉬조건은 전체를 34,550개로 분할하였고 장치 밀면을 고정하고 X와 Y축 방향으로 100N을 경계조건으로 설정하였다. Table 3은 진동해석 결과를 나타낸 것이다. 진동해석 결과 가장 큰 진동이 나타나는 1차 모드에서 156.18 Hz가 나타났다. 내부



**Fig. 5 FEM Model for Frequency Analysis**

**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

진동원인 압전 액츄에이터의 고유진동수가 20kHz임을 고려할 때 공진현상이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

## 3. 스테이지 제작 및 성능평가

### 3.1 스테이지 제작

유한요소 해석에 의해 검증된 설계 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치 제어 장치를 제작하였다. 다축 위치 제어 장치의 구성요소는 Fig. 6에서 보는 것처럼 베이스, 압전액츄에이터, X, Y, Z축 플렉서 및 이송단으로 이루어진다. 플렉서(Flexure)의 재질은 두랄루민을 사용하였고 베이스 및 이송단은 일반구조용 알루미늄으로 제작되었다. 각축의 구동부는 압전 액츄에이터에서 발생한 변위를 플렉서(Flexure)에서 확대하여 각각  $100\mu\text{m}$ 의 출력 변위를 발생시킨다. 각 축들은 Z축을 기반으로 하여 Y축 그리고 X축 순서로 직렬로 연결하였다. 그리고 광소자가 부착되는 이송단은 X축과 연결되어 있어 3자유도 합성변위를 발생시킨다. Fig. 6 (a)는 Y축 이송유닛, (b)는 조립된 초정밀 다축 스테이지를 보여준다.

### 3.2 시스템 구성

광소자 정렬용 극초정밀 다축 위치 제어 장치는 Fig. 7에서와 같이 극초정밀 스테이지부와 센서부 그리고 제어부로 구성된다. 극초정밀 스테이지는 압전 액츄에이터로 구동되고 플렉서로 가이드 되는 메커니즘으로 3자유도(X-Y-Z) 병진운동을 수행한다. Table 4는 개발된 스테이지의 사양을 나타낸 것이다. 센서부는 스테이지에서 발생하는 변위를 측정하는 정전용량형 센서와 정렬이 되었을 때 광소자에서 검출되는 신호를 측정하는 광 파워미터로 구성된다. 제어부는 압전 액츄에이터 앰프에 제어신호를 입력하고 정전용량형 센서와 광 파워미터의 광신호 출력을 나타내는 역할을 수행한다.

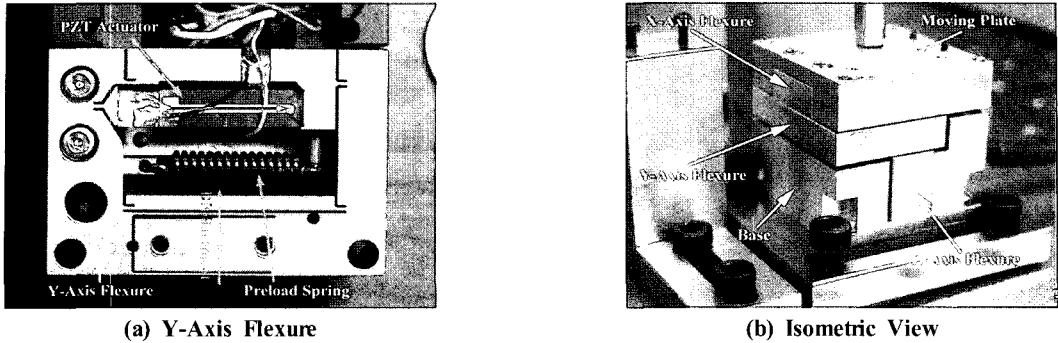


Fig. 6 Multi-Axis Ultra Precision Stage

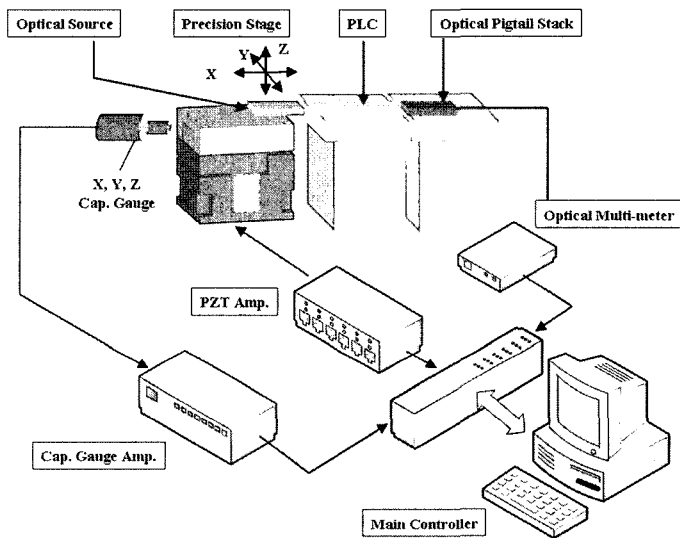


Fig. 7 Schematic Diagram of Ultra-Precision Optical Alignment System

Table 4 Specification of Ultra Fine Positioning Stage

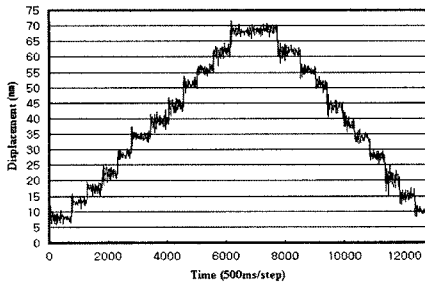
	Specification
Moving Axis	X-Y-Z Translation
Travel	100×100×100 $\mu$ m
Accuracy	X, Y, Z : 10nm
Resolution	X, Y, Z : 5nm

### 3.3 스테이지 성능평가

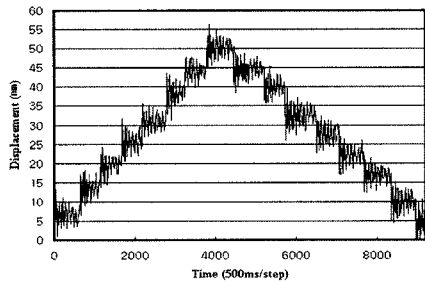
초정밀 다축 스테이지가 실제 광소자 정렬에 요구되는 정밀도 및 이송 범위를 만족하는지 파악하기 위해 성능평가를 수행하였다.

#### 3.3.1 분해능 측정

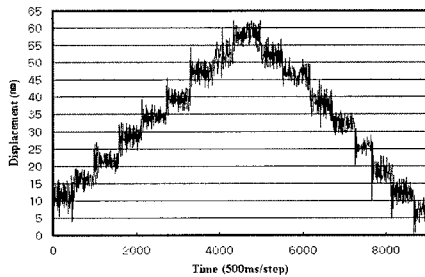
분해능을 평가하기 위한 입력 조건으로 메인 컨트롤러에서 1mV 스텝 신호를 입력하였다. 컨트롤러에서 발생된 신호는 압전 액추에이터 앰프로 전달되고 스테이지에서 변위가 발생된다. 발생된 변위는 측정범위  $\pm 100\mu$ m의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축 분해능 측정결과는 Fig. 8에 나타내었다. 측정결과로부터 X축에 대한 분해능은 약 5nm로 측정되었으며 Y축과 Z축의 분해능 또한 약 5nm임을 확인할 수 있었다. 광 정렬에 요구되는 정밀도가 0.6~1 $\mu$ m임을 고려해볼 때 연구된 초정밀 다축 스테이지의 분해능은 이 값을 잘 만족하고 있다.



(a) Resolution of X-Axis



(b) Resolution of Y-Axis

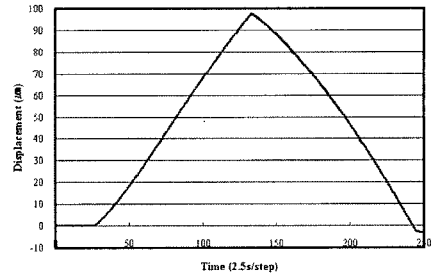


(c) Resolution of Z-Axis

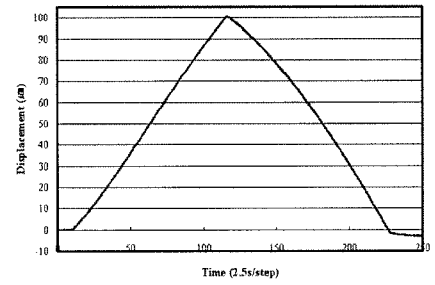
Fig. 8 Resolution of Multi-Axis Ultra Precision Stage

### 3.3.2 이송성능 측정

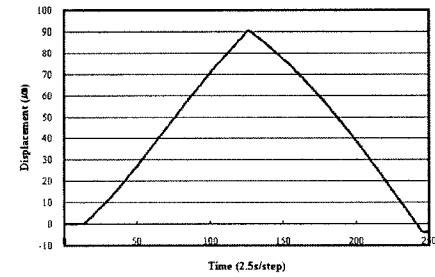
이송성능을 평가하기 위해 입력 조건으로 컴퓨터에서 0V~10V까지 100mV 스텝의 계단함수를 입력하였고 발생 변위는 최대 측정범위  $\pm 250\mu\text{m}$ 의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축 각각의 이송범위 측정 결과는 Fig. 9와 같이 나타났다. X축에 대한 최대 이송범위는  $97\mu\text{m}$ 로 측정되었고 Y축의 최대 이송범위는  $103\mu\text{m}$ , 그리고 Z축의 이송범위는  $92\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이 결과로부터 초정밀 다축 스테이지를 조동(Macro) 정렬장치에 장착했을 경우뿐만 아니라 독립적으로 광 정렬에 사용될 때도 충분한 운동 범위를 만족하는 것을 확인하였다.



(a) Travel of X-Axis



(b) Travel of Y-Axis



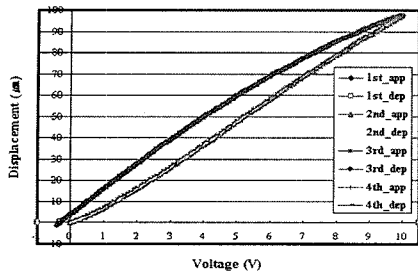
(c) Travel of Z-Axis

Fig. 9 Travel of Multi-Axis Ultra Precision Stage

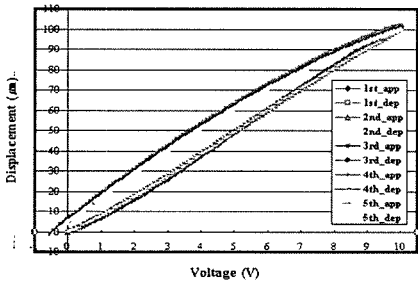
## 4. 역 히스테리시스 모델링

### 4.1 히스테리시스 특성

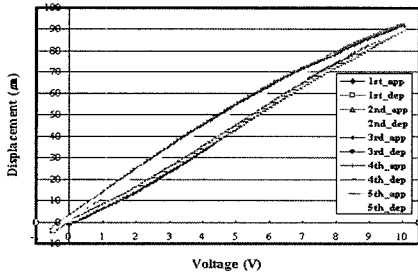
초정밀 다축 위치 제어 장치는 압전 액츄에이터에 의해 구동되므로 입력전압을 증가시킬 때와 감소시킬 때 각각 서로 다른 변위 곡선을 나타내게 된다<sup>(7)</sup>. 본 연구에서는 이러한 히스테리시스 특성을 보상하고 원하는 변위에 대한 입력 전압과의 관계를 규명하고자 히스테리시스를 모델링하고 다시 역 히스테리시스를 모델링하였다. 각 축들의 입력전압범위는 0에서 10V이고 100mV 단위로 증가 및 감소시켰다. 발생변위의 측정은 정전용량형 센서를 이용하여 각 축당



(a) X-Axis Stage Hysteresis



(b) Y-Axis Stage Hysteresis



(c) Z-Axis Stage Hysteresis

Fig. 10 Hysteresis of Multi-Axis Ultra Precision Stage

5회 측정하였다. 각 축들의 히스테리시스 측정 결과들은 Fig. 10에 나타내었다. 결과에서 보는 것처럼 각 축 모두 전압이 증가할 때와 감소할 때 서로 다른 변위를 나타내었다.

### 4.2 히스테리시스 모델링

초정밀 위치 제어 장치의 변위 궤적을 측정하고 각 축별로 히스테리시스를 모델링하였다. Fig. 11은 일반적인 히스테리시스의 궤적을 나타낸 것이다. 바깥쪽 루프를 메이저 루프라 하고 안쪽 루프를 마이너 루프라 한다.  $H_{up}$ 은 메이저 루프 상승 보간식 그리고  $H_{down}$ 은 메이저 루프 하강 보간식이라 한다면 마이너 루프 히스테리시스를 나타내는 식은 (1)

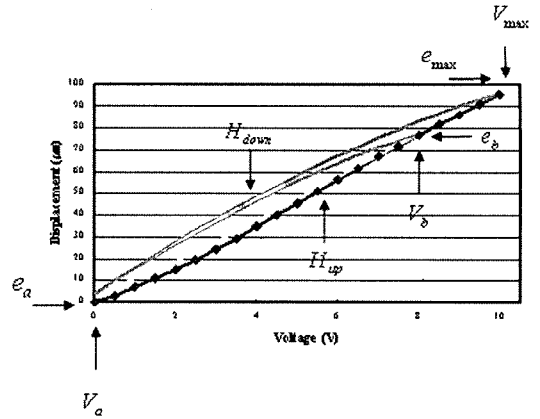


Fig. 11 Hysteresis Modeling

과 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 히스테리시스 모델링에 사용된 변수  $e$ 는 현재의 변위,  $V_a$ 는 하강도중 상승을 시작하는 전압,  $V_b$ 는 상승도중 하강을 시작하는 전압,  $e_a$ 는 하강도중 상승을 시작하는 변위,  $e_b$ 는 상승도중 하강을 시작하는 변위,  $e_{max}$ 는 하강곡선에서 최대 변위, 그리고  $V_{max}$ 는 하강곡선에서 최대 전압을 나타낸다.

식 (1)은 상승시 히스테리시스의 모델링이고 식 (2)는 하강시 히스테리시스를 모델링 한 것이다. 본 논문에서는 각 축별로 마이너 루프를 세 가지로 실험하여 모델링 하였다. 즉  $V_b$ 값을 5V, 6V, 그리고 8V로 변화시켜 각각의 히스테리시스 식을 구하여 최소자승법을 이용하여 3차식으로 보간하였다.

$$e = H_{up}(V - V_a) + e_a \quad (1)$$

$$e = H_{down}(V - V_b + V_{max}) + e_b - e_{max} \quad (2)$$

### 4.3 역 히스테리시스 모델링

앞 절에서 각각의 마이너 루프의 히스테리시스 모델링을 함으로써 입력 전압에 대한 초정밀 위치 제어시스템의 발생 변위를 예측할 수 있었다. 그러나 제어하고자 하는 대상이 스테이지의 변위이므로 원하는 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악하고자 역 히스테리시스 모델링을 하였다. 식 (3)은 변위가 증가할 때 역 히스테리시스 식이고 식 (4)는 변위가 감소할 때의 수식이다.

$$V_{up} = V_a + H_{up}^{-1}(e - e_a) \quad (3)$$

$$V_{down} = V_b - V_{max} + H_{down}^{-1}(e_{max} - e_b + e) \quad (4)$$

여기서 각각의 변수들은 히스테리시스 모델링에서와 동일하며  $H_{up}^{-1}$ 은 변위 증가 시 메이저 루프 보간식이며  $H_{down}^{-1}$ 은 변위가 감소할 때의 보간식이다. 역 히스테리시스 모델링은 초정밀 위치 제어장치의 X, Y, Z축 모두에 대해 수행하였고, 각 축당 5V, 6V, 8V의 마이너 루프에 대해 모델링 하였다.

#### 4.4 히스테리시스 보상

역 히스테리시스 모델링에 의해 구해진 발생 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악한 후 그 입력 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치 제어 장치의 구동실험을 하였다. 히스테리시스 보정 평가 실험 조건은 각 축별로 최대 운동영역인 X축 97 $\mu$ m, Y축 103 $\mu$ m, Z축 92 $\mu$ m 영역에서 입력변위를

1 $\mu$ m단위로 변화시키면서 발생된 변위를 측정하였다. Fig. 12는 식 (3)과 식 (4)를 통해 상승 시 보상되어진 전압과 하강시 보상되어진 전압을 입력으로 하여 변위의 형태를 파악하기 위한 히스테리시스 보상 그래프로 히스테리시스가 보상되었음을 확인하였다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 평면도파로형 분배기, WDM소자, AWG 필터 및 평면도파로소자 등의 광부품을 신속하고 정밀하게 정렬하기 위하여 극초정밀 다축 위치 제어 장치의 메커니즘에 관해 연구하였다.

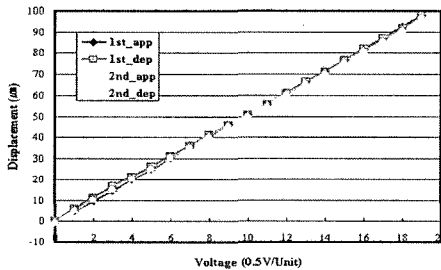
본 논문에서는 플렉서(Flexure)의 메커니즘을 연구하기 위해 기구학 해석을 통하여 액츄에이터의 입력과 출력과의 관계를 파악하였고 액츄에이터의 발생력에 따른 탄성힌지의 변형 그리고 탄성힌지의 변형에 따른 발생 응력과 관계를 유한요소해석방법을 이용하여 규명하였다. 해석 결과에서 얻은 데이터를 바탕으로 액츄에이터의 사양을 결정하였고 설계된 플렉서(Flexure)의 응력집중에 대한 안정성을 규명하였다.

구동부 메커니즘 연구결과를 토대로 초정밀 다축 위치 제어 장치를 제작하였고 위치분해능 및 이송능력을 평가하였다. 이 결과로부터 초정밀 다축 위치 제어장치를 조동(Macro) 정렬장치에 장착했을 때뿐만 아니라 독립적으로 광 정렬에 사용될 때도 충분한 운동 범위를 가짐을 알 수 있었다. 분해능 측정결과 각축에 대해 약 5nm임을 확인하였다. 이 결과로 광 정렬에 요구되는 정밀도가 0.6~1 $\mu$ m임을 고려해볼 때 본 논문에서 연구된 초정밀 다축 스테이지의 분해능은 정렬에 필요한 충분한 분해능을 가짐을 알 수 있었다.

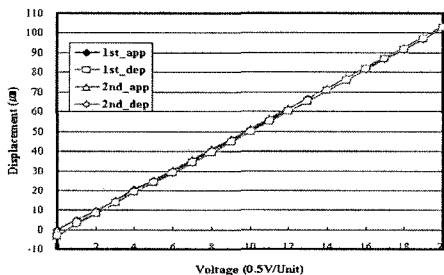
본 연구에서는 히스테리시스 특성을 보상하고 원하는 변위에 대한 입력전압과의 관계를 규명하고자 히스테리시스를 모델링하고 다시 역 히스테리시스를 모델링하였다. 역 히스테리시스 모델링에 의해 구해진 발생 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악한 후 그 입력 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치 제어 장치의 구동실험을 하였다. 실험 결과에 히스테리시스 오차는 상당부분 보상되었다.

#### 후 기

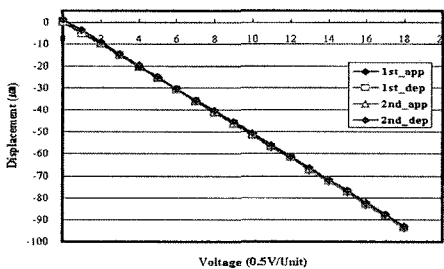
본 연구는 광주지역 첨단부품·소재산업육성사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음



(a) Displacement in X-Axis



(b) Displacement in Y-Axis



(c) Displacement in Z-Axis

Fig. 12 Hysteresis Compensation



## 참 고 문 헌

- (1) Kim, J. D., 2000, *Technology of optical communication devices*, KISTI S & T Information Analysis.
- (2) Shin, B. S., Kim, J. G., Chang, W. S., Yang, S. B., Kim, J. M. and Jeon, B. H., 2002, "Development of Direct Writing Technology using UV Laser," *Development of Micro Optical and Thermo-fluidic Device Technical Functionality Workshop*, pp. 1~5.
- (3) Chung, Y., Jeong, J. and Chung, L., 1994, "Aging-induced wavelength shifts in 1.5- $\mu$ m DFB lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 6, pp. 792~795.
- (4) Vodhanel, M., Wagner, R. E. and Sessa, W. B., 1994, "Long-term wavelength drift of the order of 0.01nm/yr for 15 free-running DFB laser modules," OFC94.
- (5) Chung, Y., Clark, L. and Fan, C., 1995, "Standardization of Optical Frequencies for WDM Networking Applications," *Proc. SPIE*, Vol. 2378, pp. 230~235, Feb.
- (6) Jeong, S. H., 2002, "A Study on the Development and Compensation of Precision Multi-Axis Positioning System," *Proc. of KSPE*, pp. 455~458, October.
- (7) Kim, J. Y., Lee, B. R., Yang, S. Y. and Ahn, K. K., 2003, "Precision Position Control of Piezoactuator using Inverse Hysteresis Model and Neuro-PID Controller," *Journal of Control, Automation and System Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 22~29.
- (8) Moritex, 2003, *Automated Optical Alignment/Focal Brochure*.
- (9) AEROTECH, 2003, *Automation Solutions for the Fiberoptics Industry*.