한국공작기계학회 2005 춘계학술대회 논문집 pp.81~86

초정밀 광소자 정렬 스테이지의 구동 특성에 관한 연구

정상화*, 차경래+, 김현욱+, 최석봉+, 김광호++, 박준호+

A Study on the Motion Characteristics of Ultra Precision Optical Element Alignment Stage

Sanghwa Jeong*, Kyoungrae Cha+, Hyunuk Kim+, Sukbong Choi+,
Gwangho Kim++, Juneho Park+

Abstract

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 to 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**(광정렬), **PZT Actuator**(압전액츄에이터), **Flexure**(탄성힌지), **Capacitance gauge**(정전용량형 센서), **FEM**(유한요소법), **Resolution**(분해능), **Travel**(이송범위)

1. 서 론

현재 광통신 시스템은 광섬유의 저손실성과 광대역성을 충분히 활용할 수 있는 기간 전송망으로부터 도입되기 시작하여 현재는 기간 중계의 대부분이 광통신화 되어 있고 국내에서도 2.5 Gbps까지의 전송 방식이 상용화 되어 있다[1]. 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

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

활발히 진행중이다[2,3]. 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[4,5]. 최근 초정밀 스테이지 기술은 주로 반도체기술과 초정밀 렌즈 금형의 가공 및 검사에 주로 사용되었으나 초고속 광통신이 발전함에 따라 광통신 소자의 자동정렬 공정에 사용되고 있다[6,7].

본 연구에서는 평면도파로형 분배기, WDM소자, AWG 필터 및 평면도파로 소자 등의 부품을 신속하고 정밀하게 정렬하기 위하여 극초정밀 다축 위치제어 장치의 메커니즘에 관해 연구하였다. 이를 바탕으로 얻은 데이터를 기준으로 제작된 극초정밀 다축 위치제어 장치의 분해능 및 위치추적 성능을 평가하였고, 초정밀 다축 위치제어장치의 역히스테리시스를 모델링하여 실험을 통해 히스테리시스 보상능력을 평가하였다. 또한 광소자 정렬공정에 적용함으로써 광소자 정렬 정밀도의 신뢰성을 확보하였다.

2. 연구 내용

2.1 스테이지 구동 메커니즘

극초정밀 스테이지의 구동메커니즘은 압전액츄에이터 및 플렉셔구조를 사용하였다. 플렉셔는 강체의 탄성변형을 이용하여 압전액츄에이터에서 발생되는 변위를 확대시키고 선형적으로 안내하는 기구이다[6]. 플렉셔의 작동원리는 Fig. 1에 나타내었다. 입력작용점의 위치에 따른 입력변위와 출력변위와의 관계를 규명하고자 기구학 해석을 하였다. 이를 통하여 압전액츄에이터에서 변위가 입력되면 출력측에서의 변위가 어느 정도 발생하는지를 파악하였고 압전액츄에이터의 변위 사양과 입력 작용점의 위치를 설정할 수 있었다. Fig. 2는 입력 작용점 변화에 따른 압전액츄에이터의 입력과 플렉셔의 출력과의 관계를 나타낸 것이다.

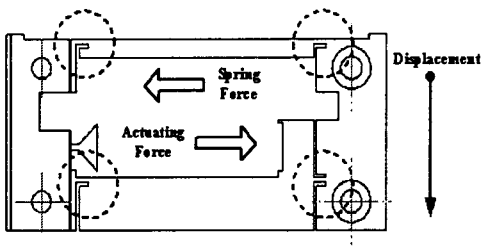


Fig. 1 Flexure Guide Mechanism

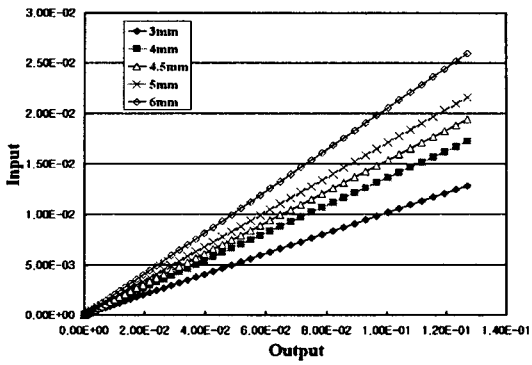


Fig. 2 Kinematic Analysis of Flexure Mechanism

2.2 유한요소 해석

2.2.1 Flexure 응력해석

일반적으로 탄성한계 이내에서는 하중과 변형은 선형적인 관계를 가지고 있고 액츄에이터의 힘이 제거됐을 때도 원래 상태로 복귀되므로 미세 변위 영역에서는 가이드 역할을 할 수 있다. 그러므로 압전액츄에이터에서 변위가 발생하였을 때 플렉셔의 응력 분포 및 발생 응력이 얼마나 되는지 그리고 발생력이 작용하였을 때 변위 출력단에서 변위가 어느 정도 발생하는지를 파악하여야 한다. 압전액츄에이터의 작용력과 플렉셔의 발생변위 관계, 작용 변위와 응력발생과의 관계를 유한요소 해석을 이용하여 파악하였고 그 결과들을 토대로 플렉셔 설계 인자들을 결정하였다.

(1) 작용력에 대한 발생변위

압전액츄에이터에서 입력되는 힘과 변위출력단에서 발생되는 변위와의 관계를 파악하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 작용력에 대한 플렉셔의 응력분포 및 변위에 대한 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Maximum Stress and Deformation according to Applied Forces

Axis	Applied Force [N]	Applied Face	Max. Stress (Von Misses) [N/m2]	Max. Stress Node	Max. Deformation [㎛]	Max. Deformation Node
X	16	427	4.3187E+7	72911	106.9	5293
Y	21	954	4.0624E+7	1805	100.8	2166
Z	23	883	4.091E+7	100541	101.7	79593

(2)발생변위에 따른 응력분포

출력단에서 발생되는 변위에 대한 플렉셔의 응력분포를 알아보기 위한 해석 결과는 Table 2에 나타냈다.

Table 2 Maximum Stress according to Applied Displacement

Axis	Applied Displacement [㎛]	Applied Face	Max. Stress (Von Misses) [N/m2]	Max. Stress Node
X	100	2186	3.8532E+7	3472
Y	100	2018	3.7563E+7	73264
Z	100	1427	3.7663E+7	79811

2.2.2 스테이지의 진동해석

외부진동 및 장치 내의 액츄에이터에 대한 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악하기 위하여 극초정밀 다축 위치제어 장치의 진동해석을 수행하였다. 입력 조건에서 재질은 두랄루민으로 선정하였고, 메쉬조건은 전체를 24,550개로 분할하였고 장치 밑면을 고정하고 X, Y, Z축 방향으로 100 N을 경계조건으로 설정하였다. 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 3은 진동해석 결과를 나타낸 것이다.

Table 3 Frequency Analysis of Ultra Precision Multi-Axis 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

3. 스테이지 제작 및 성능평가

3.1 시스템 구성

광소자 정렬용 극초정밀 다축 위치제어장치는 Fig. 3에서와 같이 극초정밀 스테이지부와 센서부 그리고 제어부로 구성된다. 극초정밀 스테이지는 압전액츄에이터로 구동되고 플렉셔로 가이드 되는 메커니즘으로 3자유도(X-Y-Z) 병진운동을 수행한다. Table 4에 개발된 스테이지의 사양을 나타낸 것이다. 센서부는 스테이지에서 발생되는 변위를 측정하는 정전용량형 센서와 정렬이 되었을 때 광소자에서 검출되는 신호를 측정하는 광파워미터로 구성된다. 제어부는 압전액츄에이터 앰프에 제어신호를 입력하고 정전용량형 센서와 광파워미터의 광신호 출력을 나타내는 역할을 수행한다.

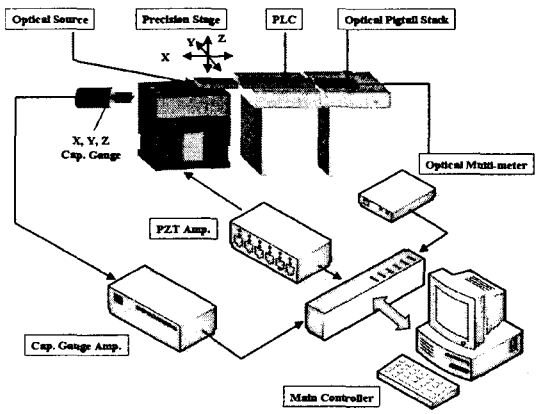


Fig. 3 Schematic Diagram of Ultra-Precision Optical Alignment System

Table 4 Specification Ultra Fine Positioning Stage

	Specification
Degree of Freedom	X-Y-Z Translation
Travel	100×100×100 ㎛
Accuracy	X, Y, Z : 10 nm
Resolution	X, Y, Z : 5 nm

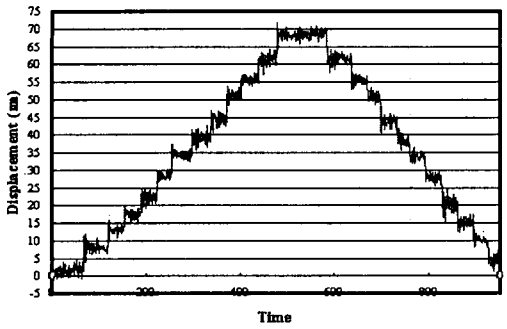
3.2 스테이지 성능평가

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

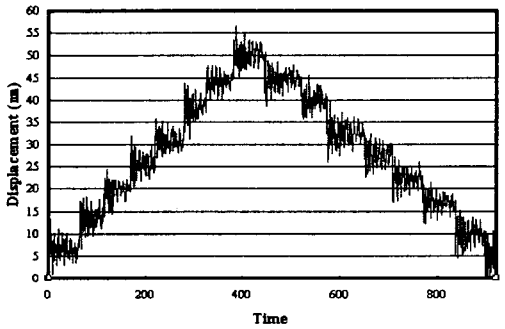
3.2.1 분해능 측정

분해능을 평가하기 위한 입력 조건으로 메인 컨트롤러에서 1 mV 스텝의 계단함수를 입력하였다. 컨트롤러에서 발생된 신호는 압전액츄에이터 앰프로 전달되고 스테이지에서 변위가 발생된다. 발생된 변위는 측정범위 ±100 ㎛의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축 분해능 측정결과는 Fig. 4에 나타내었다. 측정결과로부터 X축에 대한 분해능은 5 nm로 측정되었으며 Y축과 Z축도 5 nm임을 확인할 수 있었다. 이 결과로 광정렬

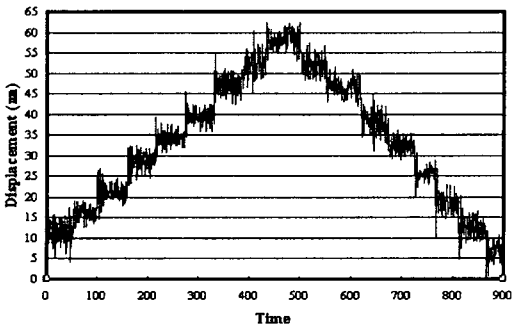
에 요구되는 정밀도가 0.6~1 ㎛임을 고려해볼 때 본 논문에서 연구된 초정밀 다축 스테이지의 분해능은 이 값을 잘 만족하고 있다.



(a) Resolution of X-Axis



(b) Resolution of Y-Axis



(c) Resolution of Z-Axis

Fig. 4 Resolution of Ultra Precision Multi-Axis Stage

3.2.2 이송성능 측정

이송성능을 평가하기 위해 입력 조건으로 컴퓨터에서 0 V~10 V까지 100 ㎷ 스텝의 계단함수를 입력하였고 발생변위는 최대 측정범위 ±250 ㎛의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 초정밀 다축 스테이지의 X축 이송범위 측정 결과는 Fig. 5와 같이 나타났다. X축에 대한 최대 이송범위는 97 ㎛로 측정되었고 Y축의 최대 이송범위는 103 ㎛, 그리고 Z축의 이송범위는 92 ㎛로 측정되었다. 이 결과로부터 초정밀 다축 위치 제어장치를 조동 정렬장치에 장착했을 경우뿐만 아니라 독립적으로 광정렬에 사용될 때도 충분한 운동 범위를 만족하는 것을 확인하였다.

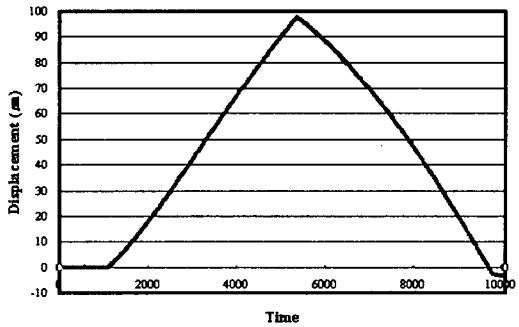


Fig. 5 Travel of Multi-Axis Ultra Precision Stage

4. 역히스테리시스 모델링

4.1 히스테리시스 특성

초정밀 다축 위치제어 장치는 압전액츄에이터에 의해 구동되므로 입력전압을 증가시킬 때와 감소시킬 때 각각 서로 다른 변위 곡선을 나타내게 된다[7]. 본 연구에서는 이러한 히스테리시스 특성을 보상하고 원하는 변위에 대한 입력전압과의 관계를 규명하고자 히스테리시스를 모델링하고 다시 역히스테리시스를 모델링하였다. 각 축들의 입력전압범위는 0 에서 10 V이고 100 mV 단위로 증가 및 감소시켰다. 발생변위의 측정은 정전용량형 센서를 이용하여 각 축 당 5회 측정하였다.

4.2 히스테리시스 모델링

초정밀 위치 제어 장치의 변위 궤적을 측정하고 각 축별로 히스테리시스를 모델링하였다. Fig. 6은 일반적인 히스테리시스의 궤적을 나타낸 그림으로 스테이지의 전체 변위범위까지 증가시킨 후 감소시킨 다음 다시 전체 구간보다 작은 범위까지 구동시켜 얻은 궤적이다. 바깥쪽 루프를 메이저 루프라 하고 안쪽 루프를 마이너 루프라고 한다. H_up은 메이저 루프 상승 보간식이라 하고, H_down은 메이저 루프 하강 보간식이라 한다면 마이너 루프 히스테리시스를 나타내

는 식은 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 히스테리시스 모델링에 사용된 변수 e는 현재의 변위, V_a는 하강도중 상승을 시작하는 전압, V_b 는 상승도중 하강을 시작하는 전압, e_a 는 하강도중 상승을 시작하는 변위, e_b는 상승도중 하강을 시작하는 변위, e_max는 하강곡선에서 최대 변위, 그리고 V_max는 하강곡선에서 최대 전압을 나타낸다.

식 (1)은 상승 시 히스테리시스의 모델이고 식 (2)는 하강 시 히스테리시스를 모델링 한 것이다. 본 논문에서는 각 축별로 마이너 루프를 세 가지로 실험하여 모델링 하였다. 즉 V_b값을 5V, 6V, 그리고 8V로 변화시켜 각각의 히스테리시스 식을 구하였다.

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

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

여기서, H_up은 상승 시 보간식이고 H_down은 하강 시 보간식인데 최소자승법을 이용하여 3차식으로 보간하였다. 각각의 식을 3차식이라 한다면 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3)$$

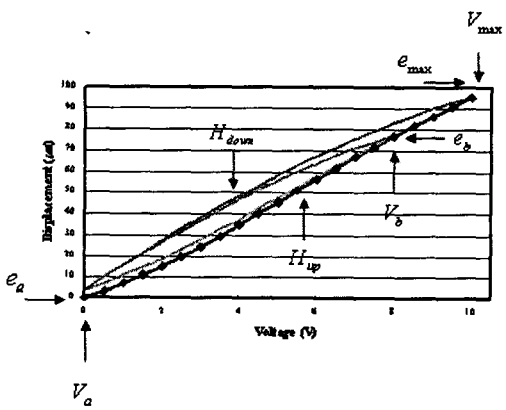


Fig. 6 Hysteresis Modeling

4.3 역히스테리시스 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 역히스테리시스 모델링을 하였다. 식 (4)는 변위가 증가할 때 역히스테리시스 식이고 (5)는 변위가 감소할 때의 수식이다.

$$V_{up} = V_a + H_{up}^{-1}(e - e_a) \quad (4)$$

$$V_{down} = V_b - V_{\max} + H_{down}^{-1}(e_{\max} - e_b + e) \quad (5)$$

여기서 각각의 변수들은 히스테리시스 모델링에서와 동일하며 H_{up}^{-1}은 변위 증가시 메이저 루프 보간식이며 H_{down}^{-1} 은 변위가 감소할 때의 보간식이다.

4.4 히스테리시스 보정

역 히스테리시스 모델링에 의해 구해진 발생 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악한 후 그 입력 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치제어장치의 구동실험을 하였다. 히스테리시스 보정 평가 실험 조건은 각 축별로 최대 운동영역인 X축 97 ㎛, Y축 103 ㎛, Z축 92 ㎛영역에서 입력변위를 1 ㎛ 단위로 변화시키면서 발생된 변위를 측정하였다. Fig. 7은 X축에 대한 보상 실험결과를 나타낸 것으로 히스테리시스가 보상되었음을 확인하였다. Y축과 Z축에 대해서도 같은 방법으로 히스테리시스를 보상할 수 있었다.

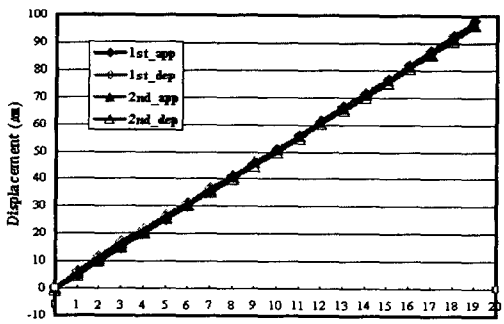


Fig. 7 Hysteresis Compensation

5. 결 론

본 논문에서는 플렉셔의 메커니즘을 연구하기 위해 기구학 해석을 통하여 해석하여 액츄에이터의 입력과 출력과의 관계를 파악하였고 액츄에이터의 발생력에 따른 탄성힌지의 변형 그리고 탄성힌지의 변형에 따른 발생 응력과의 관계를 유한요소해석방법을 이용하여 규명하였다. 해석 결과에서 얻은 데이터를 바탕으로 액츄에이터의 사양을 결정하였고 설계된 플렉셔의 응력집중에 대한 안정성을 규명하였다.

구동부 메커니즘 연구결과를 토대로 초정밀 다축 위치제

어장치를 제작하였고 위치분해능 및 이송능력을 평가하였다. 다축 위치제어 장치는 3자유도 운동을 하며 X축에 대한 최대 이송범위는 97 ㎛로 측정되었고 Y축의 최대 이송범위는 103 ㎛, 그리고 Z축의 이송범위는 92 ㎛로 측정되었다. 이 결과로부터 초정밀 다축 위치 제어장치를 조동 정렬장치에 장착했을 때뿐만 아니라 독립적으로 광정렬에 사용 될 때도 충분한 운동 범위를 가짐을 알 수 있었다. 분해능 측정결과 각 축에 대해 5 nm임을 확인하였다. 이 결과로 광정렬에 요구되는 정밀도가 0.6~1 ㎛임을 고려해볼 때 본 논문에서 연구된 초정밀 다축 스테이지의 분해능은 정렬에 필요한 충분한 분해능을 가짐을 알 수 있었다.

초정밀 다축 위치제어장치는 압전액츄에이터에 의해 구동되는데, 압전소자의 히스테리시스 특성 때문에 입력전압과 장치의 발생변위에 대해 히스테리시스가 발생된다. 본 연구에서는 이러한 히스테리시스 특성을 보상하고 원하는 변위에 대한 입력전압과의 관계를 규명하고자 히스테리시스를 모델링하고 다시 역히스테리시스를 모델링하였다. 역 히스테리시스 모델링에 의해 구해진 발생 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악한 후 그 입력 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치제어장치의 구동실험을 하였다. 실험 결과에 히스테리시스 오차는 상당부분 보상되었다.

후 기

본 연구는 광주지역 첨단부품 · 소재산업육성사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

참 고 문 헌

1. 김정두, 2000, *광통신 소자 기술 현황*, KISTI S&T Information Analysis.
2. 심보성, 김재국, 장원석, 2002, "UV 레이저를 이용한 직접 묘화기술 개발", *제 1회 고기능 초미세 마이크로부품 기술개발 Workshop*, pp. 1-5.
3. Y. C. Chung, J. Jeong, and L. S. Chung, 1994, "Aging-induced wavelength shifts in 1.5-m DFB lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp.792-795.
4. R. S. Vodhanel, M. Krain, R. E. Wagner, and W. B. Sessa, 1994, "Long-term wavelength drift of the order of 0.01 nm/yr for 15 free-running DFB laser modules", *OFC94*.
5. 양순호, 2002, "*다채널 광통신소자 정렬 시스템 개발*", 중기거점 중간보고서, 산업자원부.
6. 정상화, 2002, "초정밀 다축 위치제어장치 개발 및 보정에 관한 연구", *한국정밀공학회 2002년 추계학술대회논문집*, pp. 455-458.
7. 김정용, 2001, *역 히스테리시스 모델과 신경회로망을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어*, 울산대학교 석사학위논문, pp. 8-10.