



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2006 년 2 월

석사학위논문

**초정밀 다축 스테이지를 이용한
광소자 정렬 특성 향상에 관한 연구**

조선대학교 대학원

광응용공학과

김광호

**초정밀 다축 스테이지를 이용한
광소자 정렬 특성 향상에 관한 연구**

*A Study on the Improvement of Optical Element
Alignment Characteristics using Precision
Multi-Axis Stage*

2006 年 2 月 日

조 선 대 학 교 대 학 원

광 응 용 공 학 과

김 광 호

초정밀 다축 스테이지를 이용한
광소자 정렬 특성 향상에 관한 연구

지도교수 정 상 화

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2005 年 10 月 日

조 선 대 학 교 대 학 원

광 응 용 공 학 과

김 광 호

김광호의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 유영태 印

위원 조선대학교 교수 정상화 印

위원 조선대학교 교수 김진태 印

2005 年 11 月 日

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	IV
LIST OF FIGURES	V
ABSTRACT	VIII
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 국내·외 연구 동향	4
1. 국내 연구 동향	4
2. 국외 연구 동향	5
제 3 절 연구내용	8
1. 광소자 정렬 장치의 구성	8
2. 세부연구내용	8
제 2 장 초정밀 다축 스테이지를 이용한 광소자 정렬 장치의 구성	10
제 1 절 광소자 정렬 장치의 구성	10
제 2 절 초정밀 다축 스테이지의 메커니즘 연구	11
1. 구동 메커니즘	11
2. 플렉서의 유한요소해석	12
3. 초정밀 다축 스테이지의 진동 특성 해석	20
제 3 절 광소자 정렬 알고리즘	24
1. 영역 탐색 알고리즘	25
2. 극점 탐색 알고리즘	25
제 4 절 광소자 정렬 자동화 프로그램의 개발	28
1. 자동화 프로그램의 구성	28
2. 영역 탐색 탭	29

3. 플로팅 탭	34
4. 극점 탐색 탭	37
제 3 장 초정밀 다축 스테이지 제작 및 성능평가	40
제 1 절 초정밀 다축 스테이지 제작	40
제 2 절 초정밀 다축 스테이지 성능평가	43
1. 분해능 측정	44
2. 이송성능 측정	46
제 3 절 초정밀 다축 스테이지의 히스테리시스 특성	48
1. 히스테리시스 모델링	50
2. 역 히스테리시스 모델링	57
3. 히스테리시스 보정	60
제 4 장 광소자 정렬 특성 평가	64
제 1 절 광소자 정렬 특성	65
제 2 절 수동 광소자 정렬	69
1. 영역 탐색	69
2. 극점 탐색	70
제 3 절 자동화 프로그램에 의한 광소자 정렬	74
1. 영역 탐색 탭	74
2. 플로팅 탭	75
3. 극점 탐색 탭	78
제 5 장 결 론	80
참 고 문 헌	82

LIST OF TABLES

Table 1-1 Specifications of Optical Alignment Systems	5
Table 2-1 Input Conditions for FEM Analysis of Flexure	14
Table 2-2 Maximum Stress and Deformation according to Applied Forces	19
Table 2-3 Maximum Stress according to Applied Displacements	19
Table 2-4 Input Conditions for Frequency Analysis	20
Table 2-5 Frequency Analysis of Precision Multi-Axis Stage	21
Table 2-6 Specifications of Main Controller	29
Table 3-1 Variables for Hysteresis Modeling	49
Table 3-2 Variable Values for Hysteresis Modeling	56
Table 3-3 Variable Values for Inverse Hysteresis Modeling	58
Table 4-1 Device Configurations of Optical Alignment System	74

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Optical Alignment System with Goniometer	7
Fig. 1-2 Optical Alignment Algorithm	7
Fig. 2-1 Schematic Diagram of Precision Optical Alignment System	10
Fig. 2-2 Flexure Guide Mechanism	12
Fig. 2-3 Finite Element Analysis Process	13
Fig. 2-4 Displacement according to Actuating Force	16
Fig. 2-5 Stress Distribution according to Input Displacement	18
Fig. 2-6 FEM Model for Frequency Analysis	21
Fig. 2-7 Mode Shape of Precision Multi-Axis Stage	23
Fig. 2-8 Optical Fiber Alignment Procedure	24
Fig. 2-9 Path of 2-Dimensional Field Search	25
Fig. 2-10 Peak Search Procedure	26
Fig. 2-11 Hill Climb Peak Search Procedure	27
Fig. 2-12 Flow Chart of Field Search	30
Fig. 2-13 Field Search Alignment for Optical Fiber Stack in Misalignment	31
Fig. 2-14 Picture of Field Search Tab	32
Fig. 2-15 Analog Output Signals for Spiral-Rectangular Path	33
Fig. 2-16 Flow Chart of Process for Moving Stage to Maximum Optical Power Position	35
Fig. 2-17 Picture of Plotting Tab	35
Fig. 2-18 Y-Z Plane Graph of Precision Stage in Field Search	36

Fig. 2-19 3D Graph of Line-Point Style	37
Fig. 2-20 Flow Chart of Peak Search	38
Fig. 2-21 Picture of Peak Search Tab	39
Fig. 3-1 Precision Multi-Axis Stage	40
Fig. 3-2 Flexure of Precision Multi-Axis Stage	42
Fig. 3-3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus	43
Fig. 3-4 Resolution of Precision Multi-Axis Stage	45
Fig. 3-5 Travel of Precision Multi-Axis Stage	47
Fig. 3-6 Experimental Apparatus for Hysteresis Modeling	48
Fig. 3-7 Hysteresis Modeling	50
Fig. 3-8 Hysteresis Modeling of X-Axis	52
Fig. 3-9 Hysteresis Modeling of Y-Axis	53
Fig. 3-10 Hysteresis Modeling of Z-Axis	55
Fig. 3-11 Hysteresis Compensation in X-Axis	61
Fig. 3-12 Hysteresis Compensation in Y-Axis	62
Fig. 3-13 Hysteresis Compensation in Z-Axis	63
Fig. 4-1 Schematic Diagram of Optical Element Alignment System	64
Fig. 4-2 Structure of Optical Fiber	65
Fig. 4-3 Coupling Efficiency with Distance	66
Fig. 4-4 Alignment between 1 Ch. Pigtail and 8 Ch. Output Part of PLC	67
Fig. 4-5 Alignment between 1 Ch. Input and 8 Ch. Output Pigtail	68
Fig. 4-6 Field Search Alignment between 1 Ch. and 8 Ch. Optical Fiber Stack	69

Fig. 4-7 Peak Search Alignment between 1 Ch. and 8 Ch. Optical Stack	73
Fig. 4-8 Result of Field Search Tab	75
Fig. 4-9 Result of Plotting Tab	76
Fig. 4-10 Rearrange Process of Capacitance Gauge Acquisition Data	77
Fig. 4-11 3D Graph of Line-Point Style for Matching between Displacement and Optical Power	77
Fig. 4-12 Result of Peak Search Tab	79

ABSTRACT

A Study on the Improvement of Optical Element Alignment Characteristics using Precision Multi-Axis Stage

Gwang Ho Kim

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Department of Optical Application
Engineering,

Graduate School of Chosun University

The communication through optical fiber is taking an important role in the expansion of communication network with excellent transmitting rate and quality. The optical communication is introduced to the backbone network at first and becomes a general communication method of network.

In recent years, as the demands of VBNS(Very high speed Backbone Network Service) and VDSL(Very high-data rate Digital Subscriber Line) increase, the development of kernel parts of optical communication such as PLC(Planar Light Circuit), Coupler, and WDM(Wavelength Division Multiplexing) elements increases. The alignment and the attachment technology are very important in the fabrication of optical elements.

In this thesis, a mechanism of precision multi-axis stage for optical alignment is studied. The major researches are as follows.

At first, the driving unit mechanism of precision stage is studied with the aim of optimal design of stage. The driving unit consists of piezoelectric actuator and flexure guide. The strain of flexure due to the actuating force and the stress distribution for the output displacement are analyzed with FEM. The precision multi-axis stages are fabricated based on the result of analysis. This travel and the resolution of stage are evaluated from the view of optical element alignment.

The hysteresis of the stage is generated due to PZT actuator. The hysteresis and the inverse hysteresis are modeled with the experiments 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 error due to hysteresis is well compensated.

The alignment algorithm is studied for applying it to the precision multi-axis stage. The field search and peak search algorithms are used for the optical alignment algorithm. The 2-D profile with 5 μm grid of the optical power is obtained with field search alignment. After the field search, peak search alignment is performed for the precise position of the maximum optical power. The precision accuracy of peak search is 0.5 μm . To automate the process of optical element alignment, the automation program of optical element alignment is developed by using LabView programming and composed of three tabs that are field search tab, plotting tab, and peak search tab. The process of the optical element alignment is performed by pushing the related buttons using event function. Between 1 ch. input and 8

ch. output PLC stack are performed for the alignment evaluation.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

현대 산업 사회는 초정밀 가공, 반도체 산업, 초정밀 측정 및 광소자 정렬과 같은 첨단 분야가 전체 산업을 주도하고 있으며, 이러한 첨단 산업의 화두는 극초정밀(Ultra Precision)이다. 극초정밀기술 중에서 나노미터(nm) 수준까지의 정밀한 이송에 관련된 기술을 나노 위치결정기술이라고 한다. 초정밀 위치결정기술에 필요한 공통적인 핵심기술로는 이송 장치가 받는 하중을 지지하면서도 이송기구에서 발생하는 마찰력 및 그 변동량을 최소화하여 운동오차 요인을 감소시킬 수 있는 정밀 이송계 설계 및 제작에 관한 기술과 이송계가 지니고 있는 고유의 운동 정밀도를 손상시키지 않으면서 위치결정정도(Positioning Accuracy) 및 반복 정밀도(Repeatability)를 향상시킬 수 있는 초정밀 구동계 설계 및 조립에 관한 기술이 있다. 또한, 이송계 및 구동계로 구성된 시스템을 모델링하고, 그로부터 도출된 변수를 최적 제어하여 응답특성(Response) 및 안정성(Stability)을 향상시킬 수 있는 초정밀 제어에 관한 기술과, 구축된 이송장치의 정밀도를 평가하고 목표에 도달하지 못할 경우 내부의 제어시스템 또는 외부 메커니즘의 도입으로 그 오차가 최소화되도록 보정(Compensation)할 수 있는 초정밀 측정 및 보정 기술이 있으며, 초정밀 위치결정에 영향을 주는 환경변화에 대한 제어기술 등이 있다. 이러한 기술들이 종합적으로 확보되어야 나노미터 수준의 위치결정에 도달할 수 있다^[1].

장거리 통신이나 근거리 통신망을 구현할 때, 광통신은 광대역과 다중 채널 수요능력의 잠재성을 지니고 있다. 이를 효율적인 방법으로 극대화하기 위해서는 광소자의 집적화 기술과 이를 제어하는 회로, 이들 간의 연결 및 정보를 전달시켜 주는 통로인 광섬유와의 접속기술이 개발되어야 한다. 또한, Gbps 급 이상의 광통신 시스템은 광소자 배열과 다발 형태의 광섬유와의 접속 연결 형태가 효율적이며 작은 부피로 자유롭게 시스템을 구성할 수 있는 구조가 필요하다^{[2][3]}. 종전에는 하나의 광케이블에서 하나의 레이저 파장을 이용해 최대 2.5 Gbps의 속도로 데이터를 전송했으나 WDM 기술의 개발로 하나의 광케이블에 여러 개의 레이저 파장을 동시에 전송해 전송 속도와 전송 용량을 비약적으로 확장하였다^{[4][5][6]}. 이와 같은 초고속 광통신이 발전함에 따라 초고속 광통신 시스템의 핵심 부품인 평면도파로형 분배기(Splitter) 및 결합기(Coupler), 파장분할다중화 소자, AWG(Arrayed Wave

Guide) 필터 등 각종 광통신소자 부품들의 개발이 활발히 진행 중이다^{[7][8][9][10]}. 광통신 시스템 및 소자부품 수요시장 확대와 급격한 기술적 발전에 따라 관련 제조업체들은 제품의 성능 및 생산성 향상이라는 복합된 목표를 동시에 달성해야 하는 문제에 직면하였다. 이에 따라 기존의 장치보다 정밀한 정렬을 필요로 하게 되었고 정확한 성능평가를 위한 측정과 생산자동화가 요구되었다. 특히 광통신소자 제조과정상 소자(Devices)와 광섬유(Optical Fiber) 사이의 광학적인 정렬과 접합 공정은 부품 성능 및 생산성 향상, 그리고 비용 절감을 위한 가장 핵심적인 문제로 대두되고 있다^{[9][10]}. 이처럼 광정렬이 광통신에 사용되는 광통신 부품의 생산성에 중대한 영향을 미치기 때문에 초고속 통신망이 확대되고 광통신이 발달함에 따라 광섬유 정렬은 광산업에서 중요한 관심사가 되었다. 광정렬은 신호가 입력되는 하나의 광섬유 스택과 하나 이상의 신호가 출력되는 다른 광섬유 도파로(WDM)를 접합하는 공정의 전 단계 공정이다. 정렬 정밀도는 광소자 품질에 큰 영향을 미치는 요소이다. 이에 따라 광관련 측정장비 또는 생산장비 제조업체에서는 품질 및 생산성 향상을 위해 정밀도와 분해능이 우수한 장치에 대해 연구하고 있다. 광모듈 패키지에 사용하고 있는 정렬 방식 중, 능동정렬(Active Alignment) 방식은 페룰(Ferrule)에 레이저 혹은 광검출기와 광섬유를 각각 고정시키고 이들을 정렬하는 과정에서 레이저로부터 광섬유로 혹은 광섬유로부터 광검출기로 전달된 빛을 직접 모니터링하여 최적의 위치에서 레이저로 용접시키는 것이다. 이 방식은 기계적인 견고성을 바탕으로 높은 광결합 효율과 신뢰도가 요구되는 분야에 사용되고 있다 [11].

본 논문에서는 광소자 정렬 특성을 향상시키기 위해 광소자 정렬 장치에 초정밀 다축 스테이지를 적용하였다. 스테이지를 개발하기 위하여 초정밀 위치결정장치의 메커니즘에 관해 연구하였고, 이 데이터를 기준으로 스테이지를 제작하였으며 분해능 및 위치추적 성능을 평가하였다. 또한 압전 액츄에이터가 갖는 히스테리시스 특성을 보상하기 위하여 초정밀 다축 스테이지의 역 히스테리시스 모델링을 하여 보상능력을 평가하였다. 제작한 초정밀 다축 스테이지를 광소자 정렬 공정에 적용하기 위해 광소자 정렬 알고리즘을 개발하여 광소자 정렬에 소요되는 시간을 단축하였다. 또한 복잡한 광소자 정렬 공정을 쉽고 반복 정밀도를 높이기 위하여 광소자 정렬 자동화 프로그램을 개발하였다. 광소자 정렬 장치의 정렬 성능은 1 채널 스택과 1 채널의 신호를 8 채널로 분기하는 분배기 간의 실험으로 평가하였다.

제 2 절 국내 · 외 연구 동향

1. 국내 연구 동향

위치결정기술은 원하는 목표위치에 도달하기 위한 기술을 일컫는 총체적인 용어로써 CD-ROM, 하드디스크 등의 기록매체, 프린터, 스캐너 등의 사무용 기계, 공작기계, 노광장치 등의 산업장비에 이르기까지 많은 분야에서 사용하고 있는 기반 기술이면서, 자체로서 핵심이 되는 기술이다. 첨단산업에 주로 적용이 되는 초정밀 위치결정기술은 이송방향을 제외한 이송체의 5 자유도 자세를 가능한 한 일정하게 유지하면서 목표 위치에 정확하고 신속하게 도달시킬 수 있는 기술을 일컫는다. 그래서 이송 경로상의 궤적 정확도를 나타내는 운동 정밀도, 목표 위치로의 도달 정밀도를 나타내는 위치결정 정도와 도달 위치에 대한 반복 정밀도 및 목표 위치까지의 도달 시간을 좌우하는 응답특성이 초정밀 위치결정기술의 평가 척도가 된다^[12]. 초정밀 위치제어장치는 반도체 노광장치와 초정밀 다이아몬드선반의 공구이송 기구에 일찍이 적용되기 시작하였다. 국내에서도 90년대 초에 플렉서 기구를 사용한 스테퍼 스테이지 개발을 비롯하여, KIMM의 초정밀 선반의 공구 미세 이송기구 개발에도 적용되었다. 1999년에는 플렉서 기구를 사용한 미세 이송 스테이지의 역학적 해석과 최적 설계 방법 그리고 디지털 필터를 사용한 제어기술이 제시되었고^[13], 2000년 들어서 SPM, AFM 등에 사용될 수 있는 초정밀 플렉서(Flexure) 스테이지가 개발되고 있다. 그러나, 초정밀 스테이지 개발은 그 대부분이 반도체 생산과 초정밀 가공기계의 관점에서 이루어 졌고, 광통신 소자의 미세 조립을 위한 장치로서의 스테이지 개발은 거의 이루어지지 않고 있다. 국내에서 광학 정렬을 위한 스테이지를 생산하는 소수 회사에서 스텝모터를 장착한 직선 운동 기구와 회전 운동 기구를 시판하고 있으나, 그 이송 정도가 마이크로미터(μm) 수준 정도에 머물러 있는 상태이다. 국내에서도 다채널 광소자의 생산과 관련하여 패키징의 주요 부분을 담당하고 있는 정렬 장치의 수입이 급증하고 있어서 광소자 조립장치 개발의 관심은 크게 높아지고 있다.

2. 국외 연구 동향

광통신망의 확충에 따라서 국내는 물론 미국을 비롯한 주요 선진국의 장거리 및 대도시 백본망의 종속 신호 전송 속도는 2.5 ~ 10 Gbps 급으로 상향되었고, DWDM을 통한 대역폭은 수 Tbps 급으로 발전하고 있다. 이러한 초고속망에는 고품질의 능동소자(LD/PD), 광스위치, 초고속 라우터, DWDM 소자, 광회선분배기(Optical Cross Connect) 소자 등이 사용되는데 이들 광부품의 패키징 공정에 있어 저비용으로 광결합 효율을 높이는 여러 가지 기술들을 개발하고 있다. 기존의 마찰안내기구나 공기정압식 나사구동방식과 볼스크류 구동시스템에 볼의 미세변형 구간을 압전소자 같은 나노기구로 보상함으로써 기존의 구동시스템의 정밀도를 초고정도화하여 넓은 구간의 정밀도를 높이는 노력이 지속되고 있는데 그 대표적인 예가 Paul I. Ro에 의해 제안된 바 있다^{[14][15][16]}. Holmes M. L^[17] 등이 제안한 2차원 3축 리니어 모터는 움직이는 축의 수를 줄임으로써 컴팩트한 구동부를 구성하려는 새로운 시도를 하였고 이 기술을 토대로 BALDOR가 평면 리니어 모터를 시판하고 있으며 현재 5 μm 의 정밀도를 보여 주고 있다^[18]. 최근에는 미동영역(Nano Scale)의 정밀도를 보장하면서 조동영역(Meso Scale)의 운동 영역에 적용하기 위해 인치웜 방식의 액츄에이터가 연구되고 있고, 그 적용 범위가 확대될 것으로 전망되고 있다^[19]. Table 1-1에는 광정렬 시스템의 성능 및 사양을 요약하였다.

Table 1-1 Specifications of Optical Alignment Systems

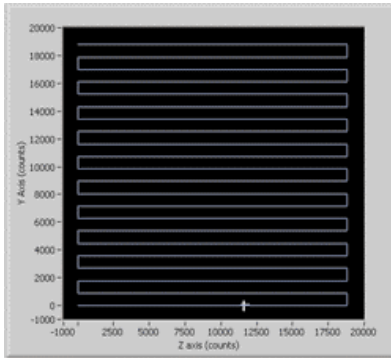
	New Port	Moritex	Suruga Seiki	PI-Polytec	Elliot / Martok	Melles Griot
Driving Axis	6	6	6	6	6	6
Actuator	Step motor	Step motor	Step motor	Step motor	Step motor	Step motor
	lead screw	lead screw	lead screw	lead screw	lead screw	lead screw
Travel	25 mm	20 mm	25 mm	12 mm	25 mm	25 mm
Repeatability	100 nm	100 nm	100 nm	100 nm	50 nm	50 nm

초정밀 스테이지 기술은 주로 반도체기술과 초정밀 렌즈 금형의 가공 및 검사에 주로 사용되었으나 초고속 광통신이 발전함에 따라 광통신 소자의 자동정렬 공정에 사용되고 있다^{[7][8][9][10]}. 현재 Newport^[20], PI-Polytec^[21], Elliot Mortok, Burleigh(EXFO)^[22], Melles Griot, Moritex^[23], Aerotech^[24] 및 Suruga Seiki^[25]

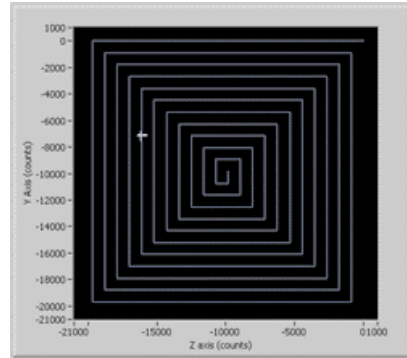
등에서 광도파로 소자 정렬 시스템을 생산하고 있는데 이러한 시스템들은 공통적으로 도파로 양측에 6 자유도 스테이지를 배치하고 정렬하는 방식으로 구성되어 있다. 스테이지 구동모터로 스텝모터나 DC모터를 사용하고, 운동전달요소로서는 조동계(1 μm 이상 구간)에 리드나사, 볼나사, 웜과 웜기어 등을 사용하며 미동계(100 nm 이하 구간)에는 압전 액츄에이터를 사용한다. 이들 대부분의 시스템들은 직선운동을 하는 리니어 스테이지를 직렬로 연결하여 X-Y-Z 직교 3 축 직선변위를 발생시키고 고니어미터(Goniometer)를 이용하여, θ_x , θ_y , θ_z 의 각변위를 발생시키는 구조이다. Fig. 1-1은 Suruga Seiki에서 개발한 고니어미터에 의해 구동되는 광도파로 소자 자동 정렬 시스템을 나타낸 것이다. 정렬방식을 보면 현재의 시스템들은 다중 도파로 소자 출력 축의 몇 개의 단자출력을 기준으로 최적의 정렬위치를 찾아가는 방식으로 되어 있고, 극대 신호 구간 탐색하는데 있어서 일정 구간을 계단상으로 전·후진해서 움직이는 궤적(Back-and-Forth Path)이 사용된 결과, 정렬시간이 오래 걸리는 단점이 있었다. 이를 개선하기 위하여 NI사에서는 사각나선궤적(Rectangular-Spiral Path) 알고리즘을 개발하여 궤적오차를 줄이는 기법을 발표하였다^{[26][27][28]}. Fig. 1-2(a)는 계단식 신호 탐색 알고리즘을 나타낸 것이고, (b)는 사각나선궤적에 의한 신호탐색 알고리즘을 나타낸 것이다.



Fig. 1-1 Optical Alignment System with Goniometer(Suruga Seiki)^[25]



(a) Back-and-Forth Path



(b) Rectangular Spiral Path

Fig. 1-2 Optical Alignment Algorithm

제 3 절 연구내용

1. 광소자 정렬 장치의 구성

초정밀 다축 스테이지의 구성은 3 자유도(X-Y-Z) 변위를 발생시키는 초정밀 위치 조정 스테이지와 구동앰프(PZT Amplifier), 스테이지의 변위를 측정하는 정전용량형 센서(Capacitance Gauge)와 광신호를 입·출력할 수 있는 광 파워미터(Optical Multimeter), 알고리즘을 구현할 수 있는 신호를 출력하고 스테이지의 위치와 이에 대응하는 광신호를 검출하는 중앙 제어기(Main Controller)로 구성된다.

2. 세부연구내용

본 논문에서는 광소자 정렬 특성을 향상시키기 위해서 초정밀 다축 스테이지를 개발하고 영역 탐색 알고리즘과 극점 탐색 알고리즘을 적용할 수 있는 자동화 프로그램에 대해 연구하였다. 주요 연구내용은 구동부 메커니즘 연구, 다축 스테이지 제작 및 성능평가, 그리고 광소자 정렬 알고리즘을 적용하고 자동화할 수 있는 프로그램 개발을 주된 내용으로 한다.

가. 구동부 메커니즘 연구

초정밀 다축 스테이지의 구동부는 압전 액츄에이터와 액츄에이터에서 발생된 변위를 안내하는 관스프링 구조의 탄성 힌지(Elastic Hinge) 가이드로 구성된다. 압전 액츄에이터에서 발생하는 변위는 단일구조(Monolithic)로 된 플렉서에 의해 가이드 되고 변위가 확대된다. 탄성힌지 메커니즘은 두 개의 강체를 잇는 연결부분의 탄성 변형(Elastic Deformation)을 이용하는 것으로써 두 강체 간의 미끄럼 마찰을 하지 않고 정밀한 상대 운동을 발생할 수 있다. 탄성 힌지를 사용하는 메커니즘은 백래쉬(Backlash)와 스틱슬립(Stick-Slip)현상을 피할 수 있고, 반복성능이 우수하고 입력과 출력의 관계가 선형적이며 분해능이 우수하다는 장점을 갖고 있다.

본 논문에서는 액츄에이터의 발생력에 따른 탄성 힌지의 변형과 탄성 힌지의 변형에 따른 발생 응력과의 관계를 규명하기 위해 유한요소해석 방법을 이용하였다. 또한 이 결과를 토대로 탄성 힌지 및 구동부를 설계하였다.

나. 초정밀 다축 스테이지 제작 및 성능평가

본 논문에서는 구동부 메커니즘 연구결과를 토대로 초정밀 다축 스테이지를 제작하였고 분해능 및 이송능력을 평가하였다. 성능평가 실험을 위해 컴퓨터에서 프로그램하여 제어기의 최소전압 단위로 계단함수를 입력하였고 발생된 변위는 정전용량형 센서(Capacitance Gauge)를 사용하여 측정하였다. 또한 압전 액추에이터에 의해 발생하는 히스테리시스를 역 히스테리시스 모델링을 통하여 보상하였다.

다. 광소자 정렬 알고리즘

광소자를 정렬하기 위하여 영역 탐색(Field Search)과 극점 탐색(Peak Search)을 수행하였다. 영역 탐색은 사각나선방식을 이용하여 정렬범위의 평면좌표와 대응하는 광신호를 측정하였다. 극점 탐색에서는 영역 탐색에서 측정된 최대 광신호가 출력되는 위치에서 전·후진 방식(Ascend and Descend) 및 힐 클라임 방식(Hill Climb)을 이용하여 최적의 위치를 정렬하였다. 광신호의 측정은 광 파워미터를 이용하여 한쪽의 광소자에서 광원(Optical Source)을 입력하고 반대 쪽의 광소자에서 광신호를 측정하였다.

라. 광소자 정렬 자동화 프로그램 개발

광소자 정렬 과정을 자동화하기 위하여 초정밀 다축 스테이지에 영역 탐색과 극점 탐색 알고리즘을 구현할 수 있는 자동화 프로그램을 개발하였다. 자동화 프로그램의 성능을 평가하기 위하여 1 채널의 입력 신호 스택(Stack)과 1 채널의 신호를 8 채널로 분기하는 스플리터(Splitter)를 사용하여 실험하였으며 수동 정렬의 경우와 자동화 프로그램을 이용하여 정렬하였을 경우를 비교하여 광소자 정렬 자동화 프로그램의 성능을 평가하였다.

제 2 장 초정밀 다축 스테이지를 이용한 광소자 정렬 장치의 구성

제 1 절 광소자 정렬 장치의 구성

초정밀 다축 스테이지를 이용한 광소자 정렬 장치는 Fig. 2-1에서와 같이 초정밀 스테이지부와 센서부 그리고 제어부로 구성된다. 초정밀 스테이지는 압전 액츄에이터로 구동되고 플렉서로 가이드 되는 메커니즘으로 3 자유도(X-Y-Z) 병진운동을 수행한다. 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 광신호를 검출 및 저장하는 중앙 제어기와 컴퓨터로 구성된다.

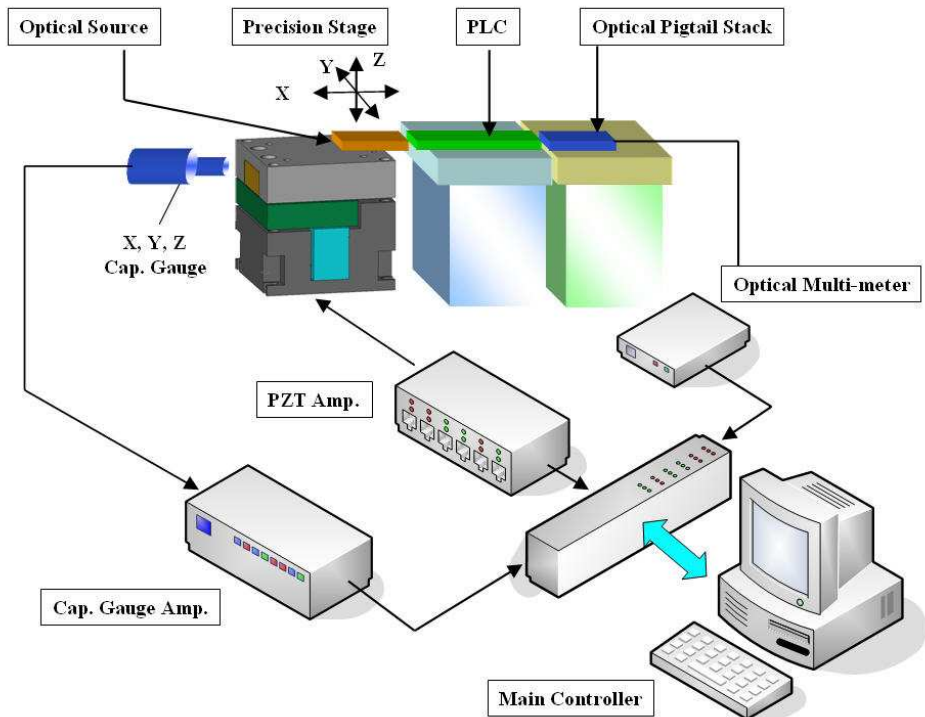
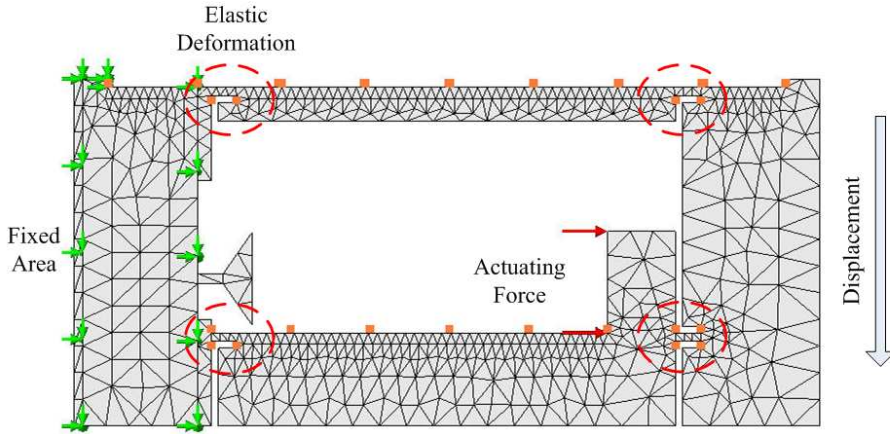


Fig. 2-1 Schematic Diagram of Precision Optical Alignment System

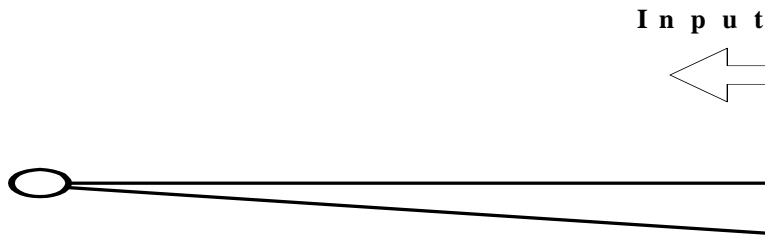
제 2 절 초정밀 다축 스테이지의 메커니즘 연구

1. 구동 메커니즘

초정밀 다축 스테이지에서 정밀구동과 반복성은 필수적이다. 미끄럼이나 구름 접촉과 같은 방식으로 움직이는 기계요소는 마찰에 의한 스틱슬립이나 백래쉬 등의 문제로 마이크로미터 이하의 연속적이고 높은 반복 정밀도를 갖는 정밀한 운동을 실현하기에 부적합하다. 이러한 이유로 초정밀 위치 제어 시스템의 구동메커니즘은 압전 액츄에이터 및 플렉서 구조를 사용하였다. 플렉서는 강체의 탄성변형을 이용하여 압전 액츄에이터에서 발생하는 변위를 확대시키고 선형적으로 안내하는 기구이다. 굽힘을 이용한 탄성변형은 형태가 간단하고 동작이 편리하여 마찰이나 백래쉬가 없고 응답속도가 비교적 빠른 장점으로 미세구동에 많이 응용되고 있다. 플렉서 가이드는 어느 한 방향의 입력에 대해서만 유연하고 나머지 방향의 입력에 대해서는 견고한 성질을 가지고 있다. 따라서 원하는 방향의 운동만 발생시키고 나머지 방향에 대해서는 운동을 유발하지 않아 운동의 간섭을 줄일 수 있다. 플렉서의 작동원리는 Fig. 2-2에 나타내었다. 압전 액츄에이터에서 $15\ \mu\text{m}$ 의 변위가 발생되면 약 6.67배 변위가 확대되어 운동단에서 $100\ \mu\text{m}$ 의 변위가 발생하는 구조이다.



(a) Schematic Diagram of Flexure



(b) Displacement Enlargement Construction

Fig. 2-2 Flexure Guide Mechanism

2. 플렉서의 유한요소해석

플렉서는 재료의 탄성변형을 이용하여 압전 액츄에이터의 변위를 확대하고 가이드하여 선형적인 운동을 유도하는 역할을 한다. 일반적으로 탄성한계 이내에서 하중과 변형은 선형적인 관계를 가지고 있고 액츄에이터의 힘이 제거됐을 때도 원래 상태로 복귀되므로 미세 변위 영역에서는 가이드 역할을 할 수 있다. 그러므로 압전 액츄에이터에서 변위가 발생하였을 때 플렉서의 응력 분포 및 발생 응력이 얼마나 되는지 그리고 발생력이 작용하였을 때 변위 출력단에서 변위가 어느 정도

발생하는지를 파악하여야 한다. 압전 액츄에이터의 작용력과 플렉서의 발생변위 관계, 작용 변위와 응력 발생과의 관계를 유한요소해석을 이용하여 파악하였고 그 결과를 토대로 플렉서 설계 인자를 결정하였다.

가. 입력조건

유한요소해석을 위해서 재료의 물성치와 메쉬분할조건 그리고 힘과 변위 조건을 입력하였다. 재료는 두랄루민을 사용하였고 메쉬는 솔리드 메쉬형태로 생성하였다. 입력된 경계조건은 두 가지 경우로 입력하였는데, 첫째 고정단을 고정하고 압전 액츄에이터가 입력되는 부분에 하중을 입력하여 변위 출력단에서의 발생변위를 해석하였고, 둘째 고정단을 고정하고 변위 발생단에 100 μm 를 입력하여 발생응력 분포를 해석하였다. Fig. 2-3은 유한요소해석 과정을 나타낸 그림이다. Table 2-1은 플렉서의 유한요소해석을 위한 입력 조건을 나타낸 것이다.

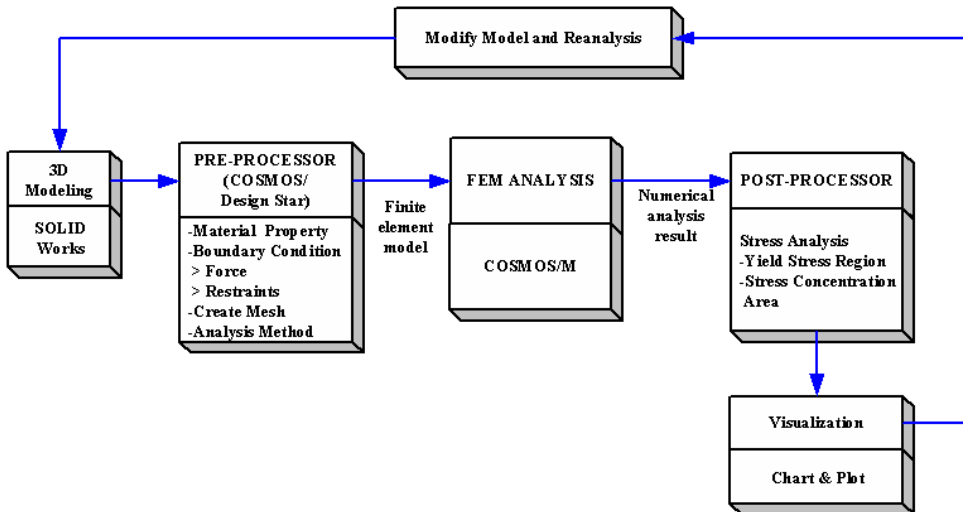


Fig. 2-3 Finite Element Analysis Process

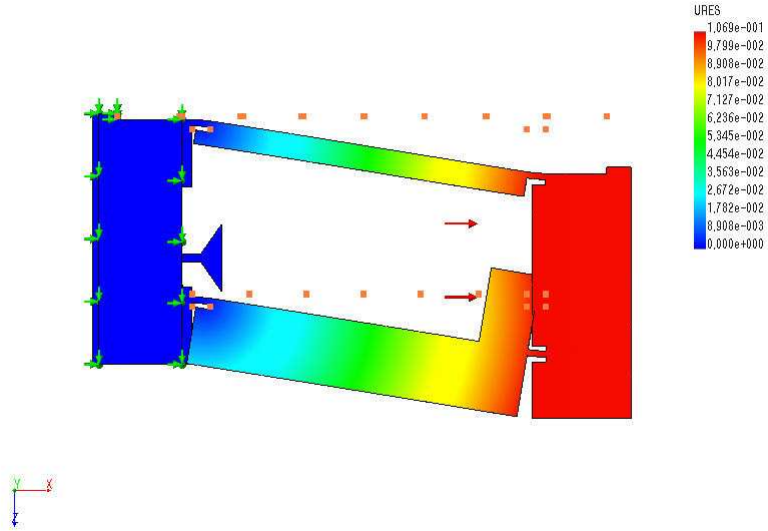
Table 2-1 Input Conditions for FEM Analysis of Flexure

		X-Axis Flexure	Y-Axis Flexure	Z-Axis Flexure
Mesh	Mesh Type	Solid Mesh		
	Mesher Typer	Standard		
	Element Size	0.86977 mm	1.0449 mm	0.95427 mm
	Tolerance	0.0043489 mm	0.052246 mm	0.047714 mm
	Nodes	95441	108570	101289
	Elements	65610	69488	66634
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	6.8E+08 N/m ²		
Boundary Condition	Force	16 N	21 N	16 N
	Displacement	100 μ m		
	Fix	Restraint Face with 6 DOF		

나. 작용력에 대한 발생변위

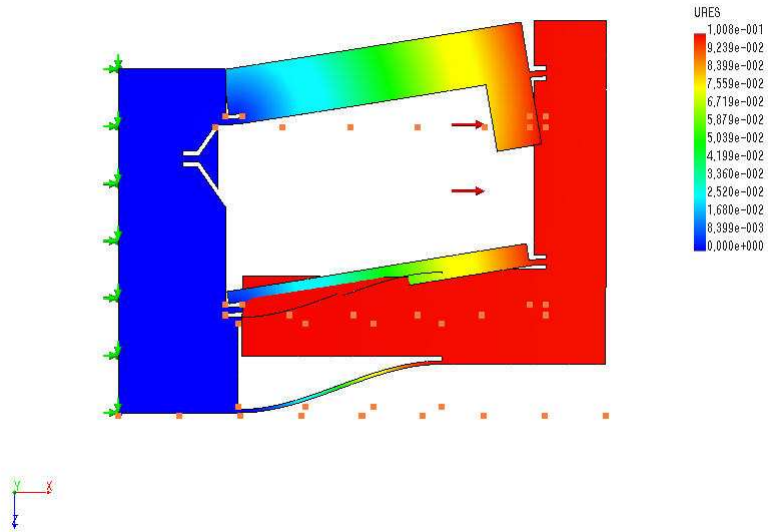
입력되는 압전 액츄에이터의 힘과 출력단에서 변위의 관계를 파악하기 위해 유한 요소해석을 수행하였다. Fig. 2-4는 각 축의 작용력에 따른 플렉서의 발생변위에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다.

xD1(4)-x-axis Mesh :: Statio Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 41,2877



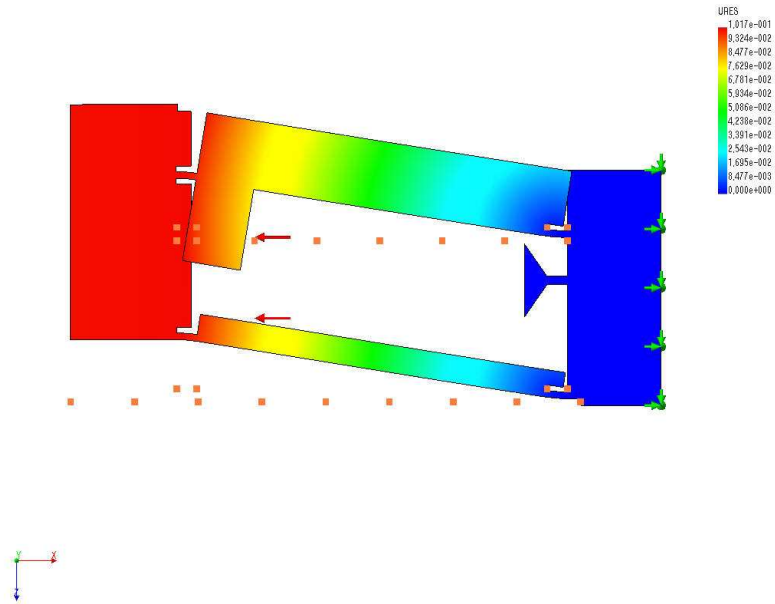
(a) Displacement according to Actuating Force in X-Axis

yD1(4)-y-axis Mesh :: Statio Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 43,6565



(b) Displacement according to Actuating Force in Y-Axis

zD1(4)-z-axis Mesh :: Static Displacement
Units : mm Deformation Scale 1 : 43,3669



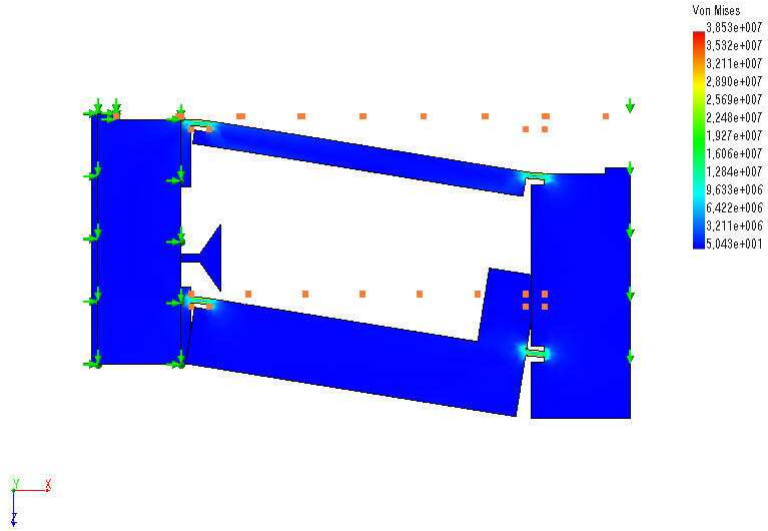
(c) Displacement according to Actuating Force in Z-Axis

Fig. 2-4 Displacement according to Actuating Force

다. 발생변위에 따른 응력분포

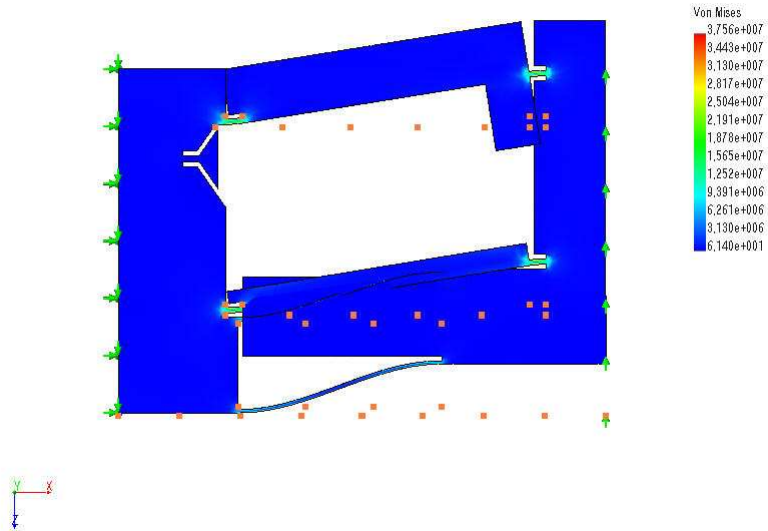
플렉서에서 출력단에 발생하는 변위에 대한 응력의 분포를 파악하였다. 플렉서의 운동단에서 $100 \mu\text{m}$ 의 변위가 발생할 때 플렉서에 발생하는 응력 분포는 Fig. 2-5와 같이 해석되었다.

xD1(4)-x-axis force :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 44



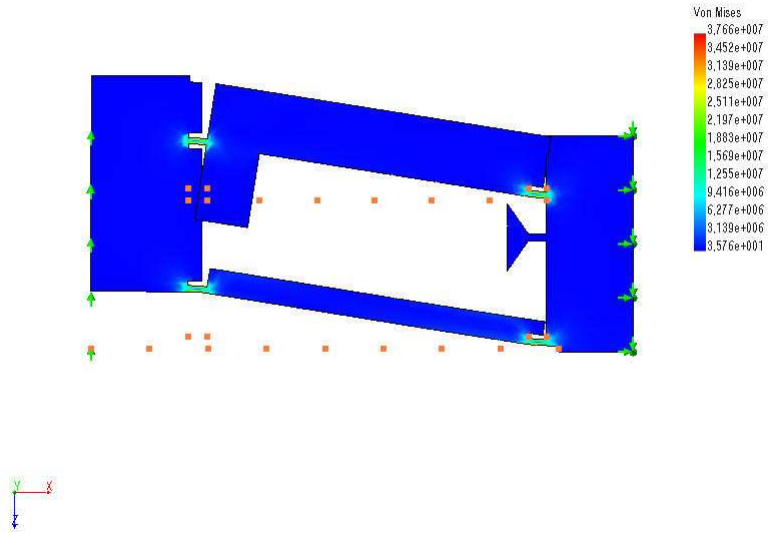
(a) Stress Distribution according to Input Displacement in X-Axis

yD1(4)-y-axis :: Static Nodal Stress
Units : N/m² Deformation Scale 1 : 44



(b) Stress Distribution according to Input Displacement in Y-Axis

zD1(4)-z-axis-Translation :: Static Nodal Stress
Units: N/m² Deformation Scale 1 : 44



(c) Stress Distribution according to Input Displacement in Z-Axis

Fig. 2-5 Stress Distribution according to Input Displacement

라. 플렉서의 유한요소해석 결과 및 고찰

압전 액츄에이터에서 입력되는 힘과 변위 출력단에서 발생하는 변위와의 관계를 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 작용력에 대한 플렉서의 응력분포 및 변위에 대한 결과는 Table 2-2에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 100 μ m의 변위가 발생되기 위해서는 최소 X축은 16 N, Y축은 21 N, Z축은 23 N의 작용력이 발생하는 압전 액츄에이터를 선정해야 함을 알 수 있었다.

출력단에서 발생하는 변위에 대한 플렉서의 응력분포를 알아보기 위한 해석 결과는 Table 2-3에 나타냈다. 해석 결과, 두랄루민의 항복하중 6.8E+8 N/m² 임을 고려할 때 설계된 X, Y, Z축 플렉서는 소성변형이 발생하지 않음을 나타낸다.

Table 2-2 Maximum Stress and Deformation according to Applied Forces

Axis	Applied Force [N]	Max. Stress (Von Misses) [N/m ²]	Max. Deformation [μ m]
X	16	4.3187E+7	106.9
Y	21	4.0624E+7	100.8
Z	23	4.091E+7	101.7

Table 2-3 Maximum Stress according to Applied Displacement

Axis	Applied Displacement [μ m]	Max. Stress (Von Misses) [N/m ²]
X	100	3.8532E+7
Y	100	3.7563E+7
Z	100	3.7663E+7

3. 초정밀 다축 스테이지의 진동 특성 해석

외부진동 및 장치 내의 액츄에이터에 대한 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악하기 위하여 초정밀 다축 스테이지의 진동 특성을 해석하였다. 재질은 두랄루민을 사용하였고, Table 2-4에 입력 조건을 나타내었으며 Fig. 2-6은 초정밀 다축 스테이지의 진동 해석을 위한 모델이다.

진동 해석 결과 가장 큰 진동이 나타나는 1 차 모드에서 156.18 Hz 가 나타났다. 내부 진동원인 압전 액츄에이터의 고유진동수가 20 kHz 임을 고려할 때 공진현상이 발생하지 않음을 알 수 있었다. Table 2-5는 진동 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2-7은 X와 Y방향으로 100 N 의 힘이 입력될 때 모드형태를 분석한 것으로 1 차에서 10 차 모드까지 나타내었다.

Table 2-4 Input Conditions for Frequency Analysis

Mesh	
Mesh Type	Solid Mesh
Mesh Type	Standard
Element Size	0.0033005 m
Tolerance	0.00016503 m
Nodes	43412
Elements	24550
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	6.8E+08 N/m ²
Boundary Condition	
<ul style="list-style-type: none"> - Force on PZT Actuator in X, Y Axis : 100 N - Fix on Restraint Face with 6 DOF 	

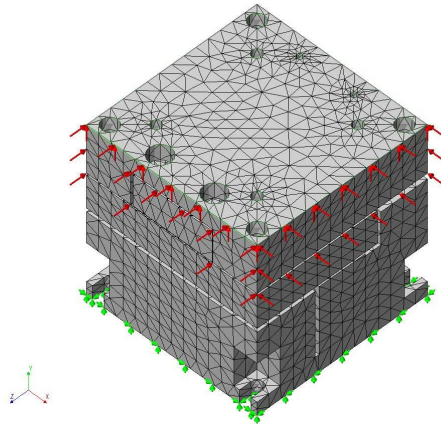
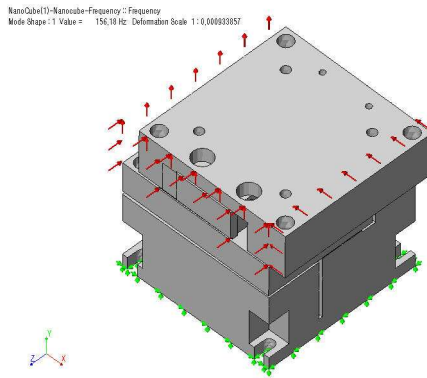


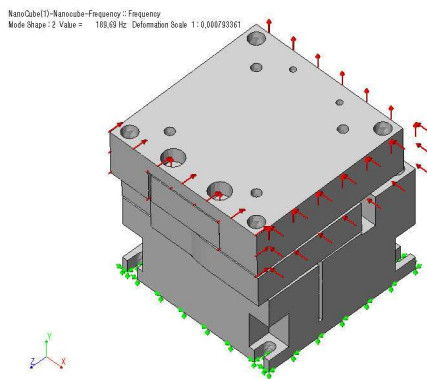
Fig. 2-6 FEM Model for Frequency Analysis

Table 2-5 Frequency Analysis of Precision Multi-Axis Stage

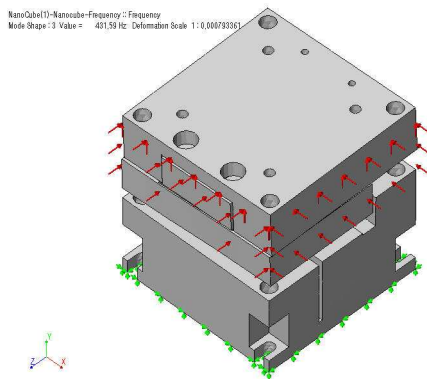
Mode	Frequency (Hz)
1	156.18
2	189.69
3	431.59
4	812.1
5	975.04
6	1385
7	1936.4
8	1946.4
9	2759.1
10	3843.4

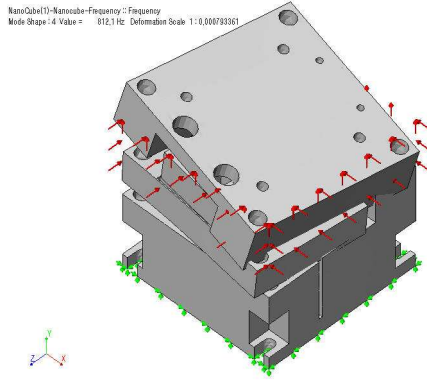


(a) 1st Mode



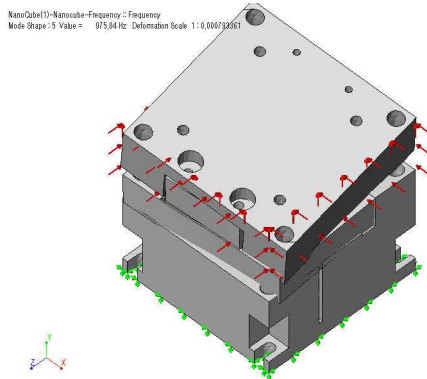
(b) 2nd Mode





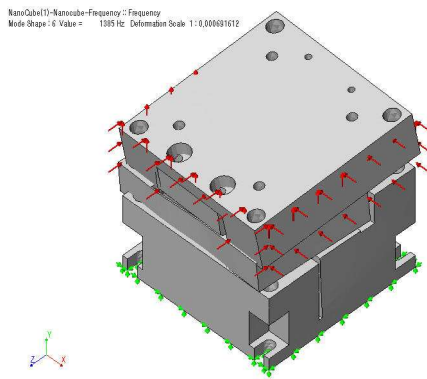
(c) 3rd Mode

(d) 4th Mode

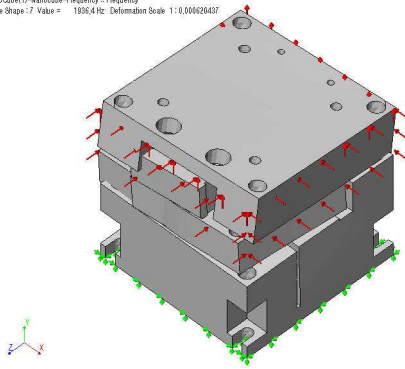


(e) 5th Mode

(f) 6th Mode

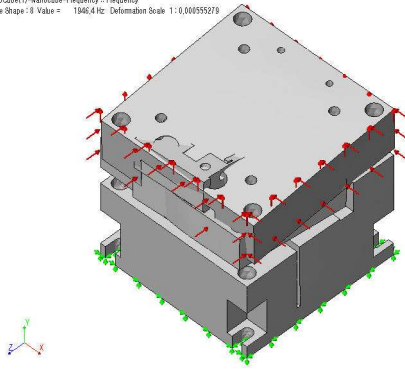


NanoCube110-Nanoscale-Frequency-Frequency
Mode Shape : 7 Value = 1936.4 Hz Deformation Scale 1 : 0.00020407



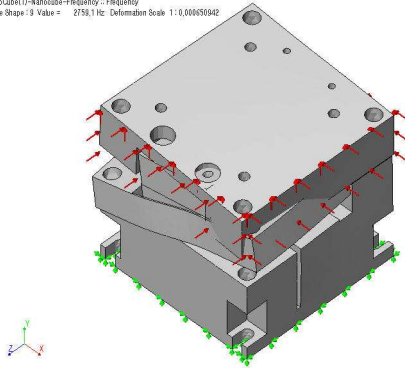
(g) 7th Mode

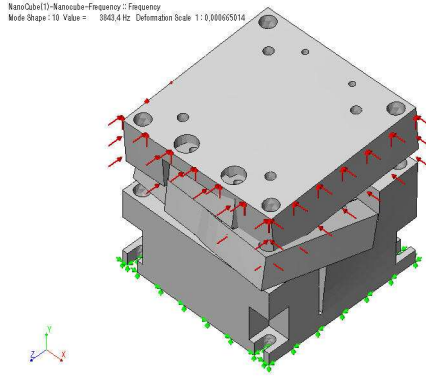
NanoCube110-Nanoscale-Frequency-Frequency
Mode Shape : 8 Value = 1946.4 Hz Deformation Scale 1 : 0.00059279



(h) 8th Mode

NanoCube110-Nanoscale-Frequency-Frequency
Mode Shape : 9 Value = 2758.1 Hz Deformation Scale 1 : 0.00050942





(i) 9th Mode

(j) 10th Mode

Fig. 2-7 Mode Shape of Precision Multi-Axis Stage

제 3 절 광소자 정렬 알고리즘

광소자의 정렬은 레이저 광원에서 빛을 광소자에 입력하여, 상대측에서 출력되는 빛을 광 파워미터로 측정하여 최대 광파워(dBm) 값을 찾을 때까지 위치를 변화시키면서 운동한다. 광소자 정렬 순서는 광소자를 접합 거리에 위치시킨 후 2 차원 정렬을 수행하여 2 차원 좌표에 대응하는 광파워 값을 파악한다. 이 공정을 2 차원 영역 탐색이라고 한다. 영역 탐색이 끝나면 가장 큰 광신호가 출력되는 지점으로 이동하여 다시 힐 클라임 방식으로 전·후진하는 궤적을 따라 가장 큰 신호가 출력될 때까지 정렬한다. 이 공정을 극점 탐색이라고 한다. Fig. 2-8은 광정렬 알고리즘 순서를 나타낸 것이다.

본 논문에서는 정렬 위치에 광소자를 이동시킨 후 Y-Z 평면에서 5 μm 스텝으로

영역 탐색을 시행한 후 최대 광신호 영역에서 4 단계의 극점 탐색을 수행하였다. 1 단계 극점 탐색은 Y축에서 $1\ \mu\text{m}$ 간격으로 전·후진하여 최대값을 찾고 2 단계에서는 Z축에서 $1\ \mu\text{m}$ 간격으로 전·후진하여 최대값을 찾는다. 3 단계는 다시 Z축에서 $0.5\ \mu\text{m}$ 스텝으로 전·후진하여 최대 광신호 값을 찾아 낸 후 마지막 4 단계에서는 Y축에서 $0.5\ \mu\text{m}$ 스텝으로 이동하여 광신호가 가장 많이 출력되는 지점을 찾았다.

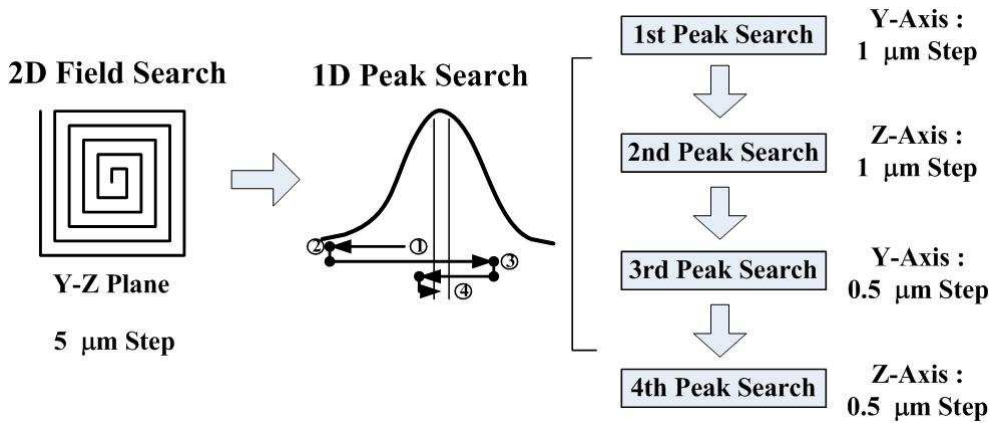


Fig. 2-8 Optical Fiber Alignment Procedure

1. 영역 탐색 알고리즘

두 개의 광소자가 정렬 간극인 약 $10\ \mu\text{m}$ 에 위치하게 되면 Fig. 2-9와 같은 형식으로 바깥쪽에서 안쪽으로 $5\ \mu\text{m}$ 간격으로 사각 나선궤적을 그리면서 이동하여 2차원 좌표를 획득한다. 이때 각각의 좌표에 대응하는 광파워 값을 측정하고 저장하여 광신호에 대한 2차원 프로파일을 얻고 가장 큰 광파워 값이 검출되는 영역을 파악할 수 있다. 1 채널 스택과 8 채널 스택간의 정렬에서는 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 의 영역을 탐색하였다.

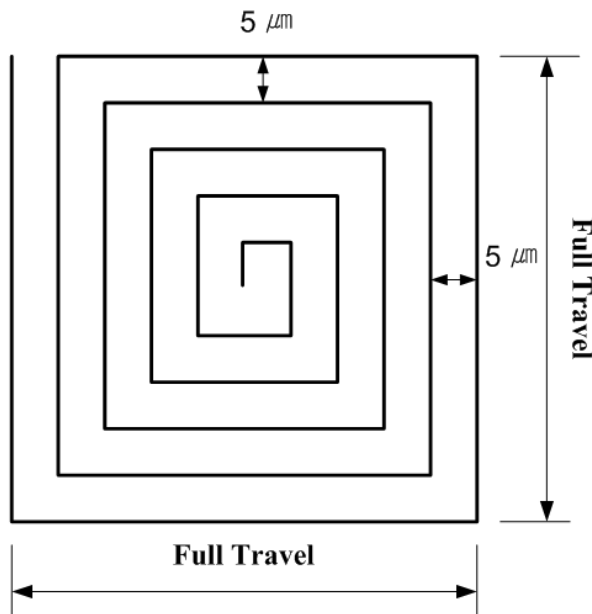


Fig. 2-9 Path of 2-Dimensional Field Search

2. 극점 탐색 알고리즘

2차원 영역 탐색을 마치고 나면 가장 큰 광신호가 검출되는 영역으로 광소자를 이동시키고 다시 Fig. 2-10과 같은 방식으로 광소자를 전·후진 운동시킨다. 그림에서 보는 것처럼 초기 위치 ①에서 어느 한 방향 ②로 이동하면서 광신호 프로파일을 측정하고 ①값과 ②값을 비교한 후 ②값이 작으면 다시 ③방향으로 이동하면서 프로파일을 측정한다. 프로파일 측정도중 그림과 같이 변곡점이 발생하면 다시

후진하면서 변곡점 근처 ④까지 운동한다. 그리고 다시 전진하면서 광신호를 측정하여 최대 광신호가 출력되는 점 ⑤에 도달한다.

극점 탐색은 힐 클라임 방식으로 4 단계로 수행되는데, 1 단계 극점 탐색에서는 Y 축에서 $1\ \mu\text{m}$ 스텝으로 운동하여 프로파일을 측정하고 2 단계에서는 Z 축에서 $1\ \mu\text{m}$ 단위로 이동하여 프로파일을 측정한다. 2 단계 극점 탐색을 마치고 나면 각 축에서 최대의 광신호가 출력되는 새로운 위치가 파악된다. 3 단계 극점 탐색에서는 Z 축의 최대값 좌표 부근에서 $0.5\ \mu\text{m}$ 스텝으로 전·후진하여 보다 정밀한 최대값을 찾게 된다. 4 단계는 Y 축에서 $0.5\ \mu\text{m}$ 스텝으로 이동하면서 측정하여 최종 Y 좌표를 찾는다. Fig. 2-11은 1 차원 광신호 프로파일을 측정하는 알고리즘을 나타낸 것으로 (a)는 $1\ \mu\text{m}$ 스텝으로 1 단계 및 2 단계 극점 탐색에 적용되며 (b)는 3 단계 4 단계에 적용되며 $0.5\ \mu\text{m}$ 스텝으로 이동하면서 광신호 프로파일을 측정하는 방식이다.

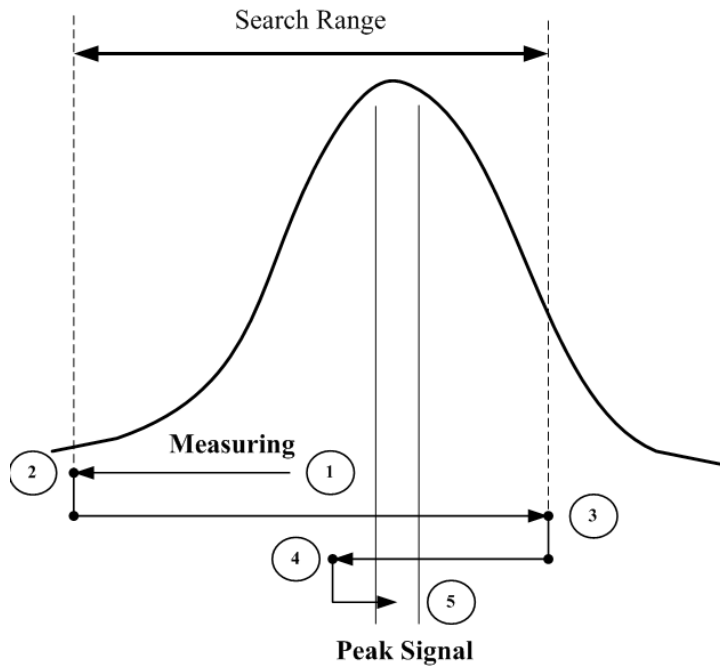
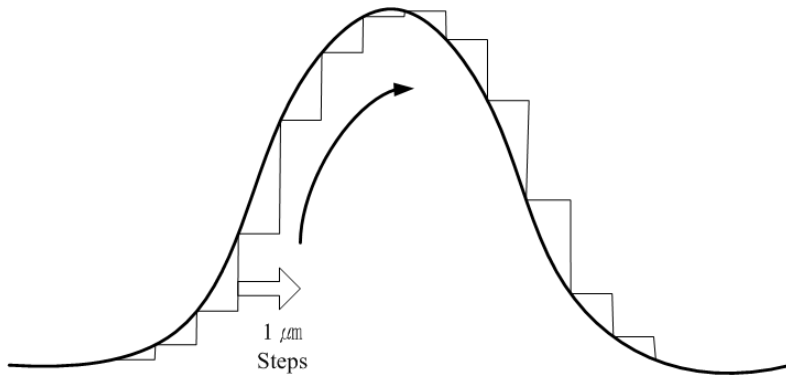
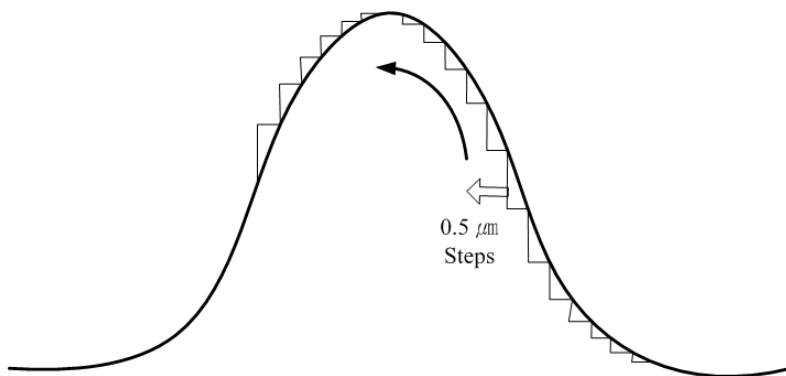


Fig. 2-10 Peak Search Procedure



(a) 1st and 2nd Peak Search with 1 μm Step



(b) 3rd and 4th Peak Search with 0.5 μm Step

Fig. 2-11 Hill Climb Peak Search Procedure

제 4 절 광소자 정렬 자동화 프로그램의 개발

광통신은 전자기 장애(ENI)가 발생하지 않으며, 무중계기로 50 Km 이상으로 선로를 연장할 수 있고 전송 용량도 매우 크며, 기존의 선로보다 무게가 가볍고 부피가 적어 경제적인 시스템 구축이 가능하다. 이러한 초고속망에는 고품질의 능동소자(LD/PD), 광스위치, 초고속 라우터, DWDM 소자, 광회선분배기(Optical Cross Connect) 소자 등이 사용되는데 이들 광부품의 패키징 공정에 있어 저비용으로 광결합 효율을 높이는 여러 가지 기술들을 개발하고 있다. 특히 광부품의 저가격화와 정밀도를 높이기 위해 자동화가 필요하다. 현재는 광소자 정렬 공정은 반자동화 과정으로 환경적 요인에 의해 불량품을 양산할 소지가 높고 광소자 정렬에 많은 시간이 소요되고 있다. 본 논문에서는 광소자 정렬 알고리즘을 구현할 수 있는 자동화 프로그램을 개발하여 반복 정밀도를 높이고, 균일한 광 결합효율(Coupling Efficiency)을 나타내며, 광소자 정렬 소요시간을 줄여 광소자 정렬 특성을 향상하였다.

1. 자동화 프로그램의 구성

초정밀 다축 스테이지를 광소자 정렬 분야에 적용하기 위하여 영역 탐색과 극점 탐색으로 이루어진 광소자 정렬 알고리즘을 개발하고, 이를 자동화하여 정밀도를 향상시키고, 정렬에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 자동화 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 LabVIEW를 사용하였다. 이벤트 구문(Event Structure)을 사용하여 버튼을 누름으로써 원하는 작업을 실행할 수 있도록 하였고 영역 탐색 탭(Field Search Tab), 플로팅 탭(Plotting Tab), 극점 탐색 탭(Peak Search Tab)으로 나누어 구성하였다. 영역 탐색 탭에서는 영역 탐색 알고리즘을 구현할 수 있도록 출력 신호를 내보내고 동시에 정전용량형 센서와 광 파워미터에서 들어오는 신호를 검출하여 저장한다. 플로팅 탭에서는 영역 탐색 탭에서 검출된 데이터를 재배열하여 스테이지가 구동한 Y-Z 평면과 각 좌표에 대응하는 광신호 값을 배열하여 3 차원 그래프를 표시함으로써 영역 탐색 결과 최대 광신호 출력 위치와 광파워 값을 표시해 준다. 또한 탐색 결과 얻어진 데이터를 바탕으로 스테이지를 최대 광신호 출력 위치로 이동한다. 극점 탐색 탭에서는 영역 탐색 후 최대 광신호 출력 위치로 스테이지가 이동한 좌표를 기준으로 힐 클라임 방식으로 전·후진 궤적을 따라 4 단계의 극점 탐색을 수행하고 그 결과를 그래프로 보여주며 최적 광소자 정렬 위치를 찾을 수 있도록 하였다. Table 2-6은 메인 컨트롤러의 사양을 나타내었

다.

Table 2-6 Specifications of Main Controller

	Device	Channel	Sampling
Analog Input Board	PCI-6031E	Two 16-bit analog outputs 8 digital I/O lines two 24-bit counters analog triggering	100 kS/s
Analog Output Board	PCI-6733	8 digital I/O lines two 24-bit counters digital triggering	Arbitrary Waveform Generator - Up to 400 MS/s Function Generator - Up to 100 MS/s Dynamic Signal - Up to 24-bit resolution
GPIB	PCI-GPIB		Transfer rates of more than 1.5 MB/s
Optical Powermeter	Source	+7 ±0.5 dBm, 1300nm	
	Sensor	+10 to -80 dBm, 75 ~ 1700nm	

2. 영역 탐색 탭

영역 탐색 탭에서는 아날로그 출력 보드(Analog Output Board)와 아날로그 입력 보드(Analog Input Board), 그리고 GPIB 보드의 환경 파라미터를 설정하고 영역 탐색 알고리즘을 구현하기 위해 탐색 영역을 사각나선형 궤적을 따라 스테이지가 구동할 수 있도록 출력 신호를 내보낸다. 스테이지의 구동에 따른 위치 정보는 정전용량형 센서를 통해 획득하고, 광 파워미터를 통해 각 좌표에 대응하는 광파워(dBm) 값을 검출한다. Fig. 2-12는 영역 탐색 과정의 플로차트이다. 스타트 버튼을 누르면 사각나선형 궤적을 구현할 수 있는 아날로그 신호가 AO 보드를 통해 출력되고, 스테이지는 출력된 신호에 의해 Y-Z 평면을 탐색하게 된다. 이때 스테이지의 위치 정보는 정전용량형 센서를 통해 검출하게 된다. 만약 Fig. 2-13(a)와 같이 최대 광신호 출력 위치가 Y-Z 평면의 가장자리에 치우쳐 있거나, (b)와 같이

Y-Z 평면상에 나타나지 않을 경우에는 초기 스테이지 위치를 수정하여 재탐색 과정을 거치게 된다. 이 경우 극점 탐색에서 전·후진 궤적을 구현하기 위해 스테이지를 원점 방향으로 약 10 μm 이동하기 때문에 Y-Z 평면의 가장자리에 치우쳐 있는 경우는 Y 축 절대 좌표가 10 μm 이내의 좌표에서 정렬이 된 경우 재탐색 과정을 거쳐야 한다.

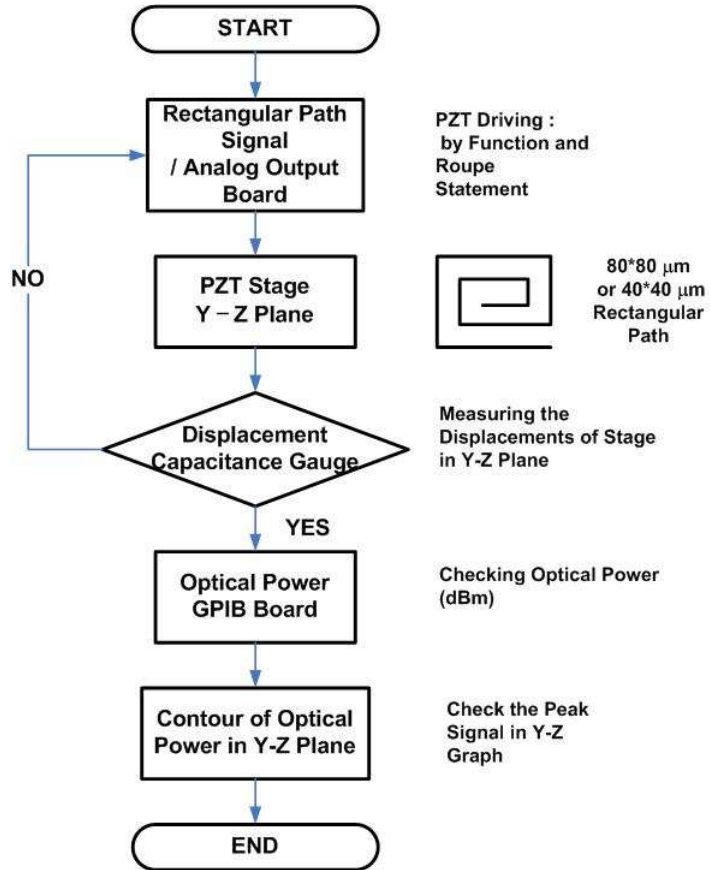
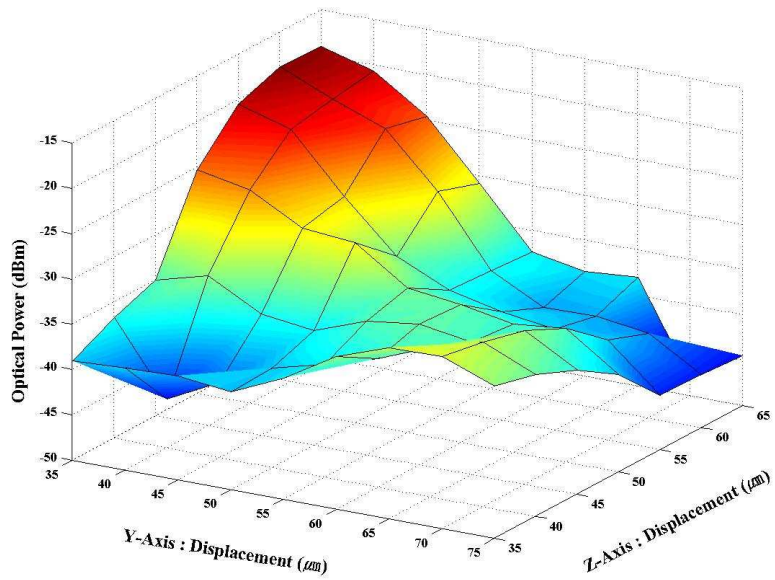
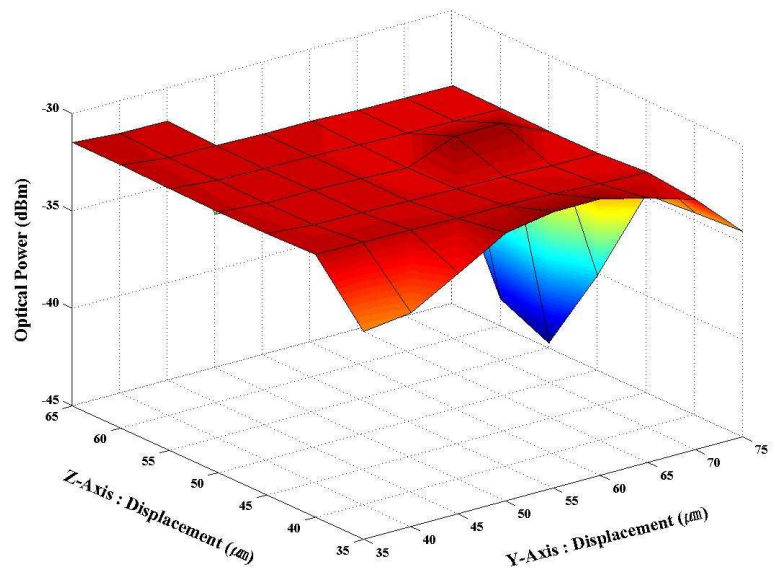


Fig. 2-12 Flow Chart of Field Search



(a) Misalignment Case I



(b) Misalignment Case II

Fig. 2-13 Field Search Alignment for Optical Fiber Stack in Misalignment

Fig. 2-14는 영역 탐색 탭의 구성을 나타내고 있다. Start 버튼을 누르면 사각나선형 궤적을 구현하기 위한 아날로그 신호가 AO 보드 2 채널을 통해 압전 액츄에이터 앰프에 전달되고, 증폭되어진 신호는 스테이지에 전달되어 Y-Z 평면의 사각나선형 궤적을 따라 구동하고 2 차원 프로파일을 획득하게 된다. 정전용량형 센서에서 측정되어진 데이터는 Y & Z axis Cap.gauge Acquisition Data 창에 나타나며 광 파워미터로부터 획득되어진 데이터는 Optical Powermeter Acquisition Data 창에 실시간으로 나타나도록 하였다. Fig. 2-15와 같이 사각나선형 궤적 구현을 위한 아날로그 출력 신호는 Simulate Arbitrary Signal 함수를 이용하였으며, $40 \times 40 \mu\text{m}$ 와 $80 \times 80 \mu\text{m}$ 의 영역 탐색 구간에 상관없이 소요되는 시간은 40 초를 기준으로 하였다. 또한 동일한 시간에 동일한 양의 전압을 출력하기 위해서 기울기를 일정하게 유지하였다. 사각나선형 궤적 구현을 위한 신호의 기준은 전압값을 기준으로 프로그래밍하였다.

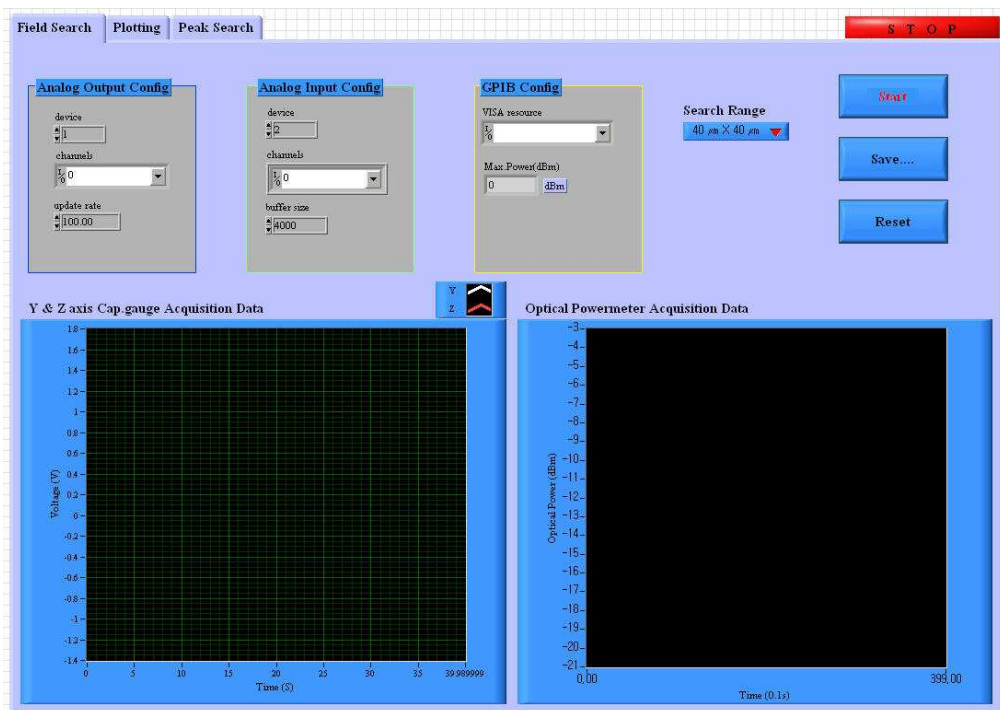
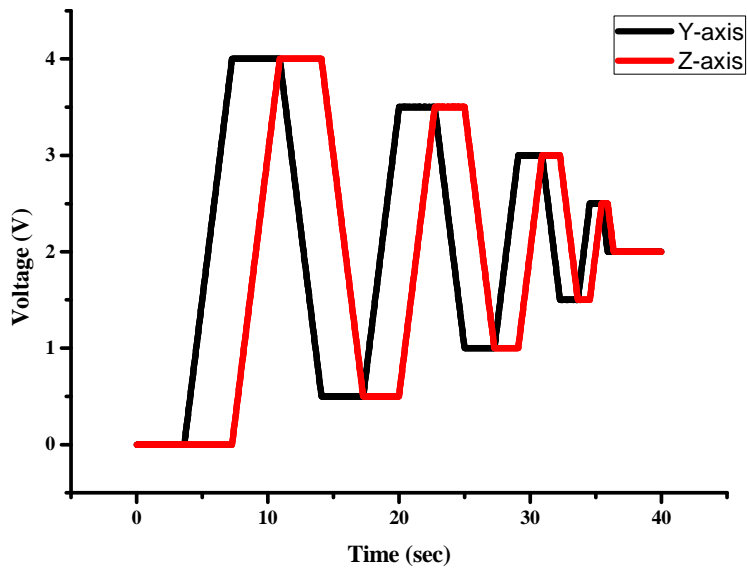
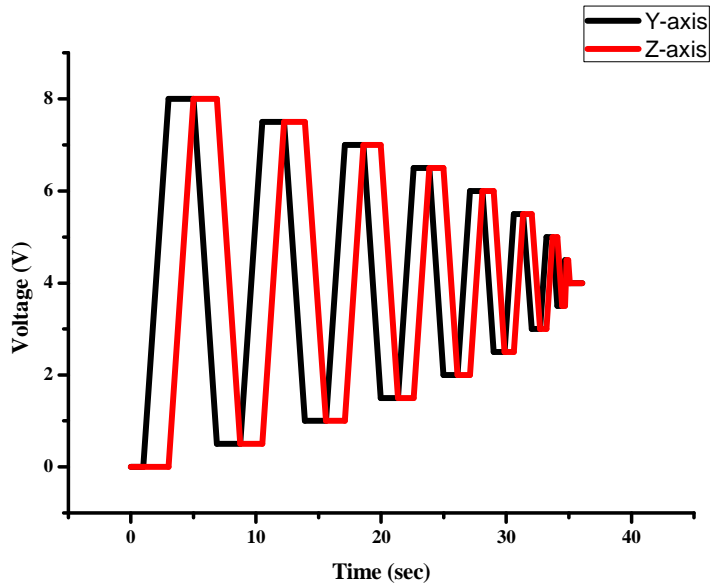


Fig. 2-14 Picture of Field Search Tab



(a) Analog Output Signals for $40 \times 40 \mu\text{m}$ Spiral-Rectangular Path



(b) Analog Output Signals for $80 \times 80 \mu\text{m}$ Spiral-Rectangular Path

Fig. 2-15 Analog Output Signals for Spiral-Rectangular Path

3. 플로팅 탭

플로팅 탭은 영역 탐색 탭에서 획득한 데이터를 재배열하여 그래프로 도식화하고, 최대 광신호 출력 지점으로 스테이지를 이동하는 역할을 수행한다. Fig. 2-16은 영역 탐색 후 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 옮기는 과정을 나타낸 플로차트이다. Go max.dBm Position 버튼을 누르면 현재 스테이지의 좌표와 최대 광신호가 출력된 좌표를 비교하여 현재 스테이지의 좌표보다 최대 광신호 출력 좌표가 작은 경우 50 mV 씩 감소시키고, 최대 광신호 출력 좌표가 큰 경우 50 mV 씩 증가시키며 스테이지의 좌표를 비교하여 최대 광신호가 출력되는 위치로 스테이지를 옮긴다. 영역 탐색을 통해 구한 최대 광신호가 출력되었던 좌표와 현재 스테이지의 좌표가 가장 가까울 때 스테이지를 정지시키고 최대 광파워 값을 검출한다. 이 과정을 통해 획득되어진 스테이지의 좌표와 광파워 값은 극점 탐색이 이루어지는 기준 위치가 된다. 영역 탐색 과정은 최대 광신호 출력 위치를 대략적으로 찾기 위한 과정으로 무작위 탐색(Blind Search)을 통해 지역 최대값(Local Maximum)에 빠지는 경우를 막아 전역 최대값(Global Maximum)을 찾고, 최적 광소자 정렬 위치를 찾는 시간을 줄이는데 목적을 두었기 때문에 스테이지를 영역 탐색에서 구한 최대 광신호 출력 위치와 정확하게 일치시키는데 중점을 두지 않고 근사치의 값에 가능한 빨리 찾아갈 수 있도록 프로그래밍하였다.

Fig. 2-17은 플로팅 탭의 구성을 나타내고 있다. Plotting 버튼을 누르면 영역 탐색 탭에서 획득되어진 데이터가 재배열 되어 YZ axis Rectangular Spiral Path 창과 3D Curve 창에 도식화된다. 이러한 그래프를 통해 검출된 데이터를 쉽게 확인할 수 있도록 하였고, F.S Result 항목을 통해 최대 광신호가 출력되는 좌표와 최대 광파워 값을 디지털 수치로 표시하였다. 또한 Go max.dBm Position 버튼을 눌러 영역 탐색에서 구한 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 이동할 수 있게 하였고, 스테이지를 옮긴 후의 값을 비교하기 위해 After Stage Moving at Max.dBm Position 항목에 결과를 표시하도록 하였다.

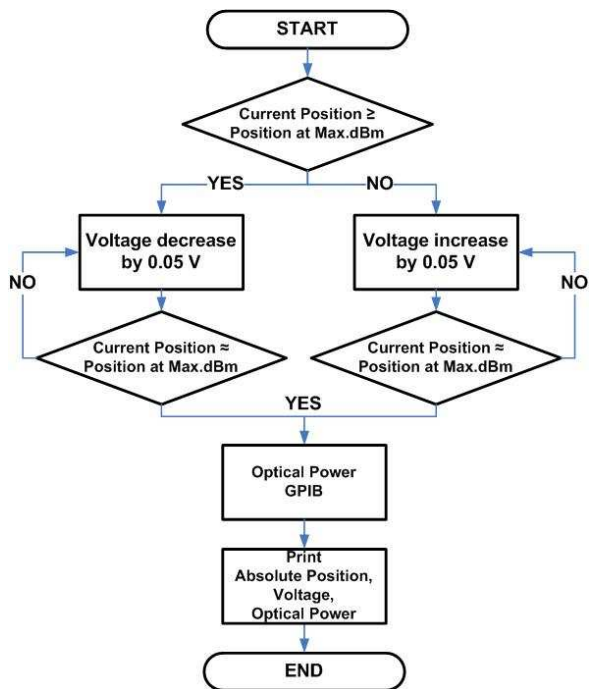


Fig. 2-16 Flow Chart of Process for Moving Stage to Maximum Optical Power Position

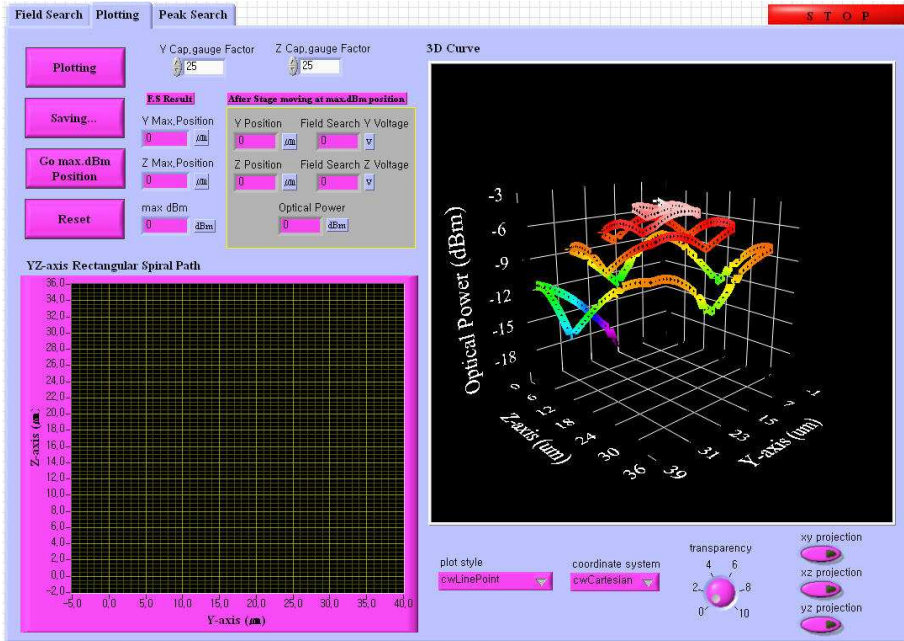


Fig. 2-17 Picture of Plotting Tab

Fig. 2-18은 사각나선형 궤적 구현을 위한 아날로그 출력 신호를 따라 스테이지가 구동한 실제 Y-Z 평면을 나타낸다. 정전용량형 센서에서 검출되어진 스테이지의 위치 정보는 정전용량형 센서 앰프를 통해 메인 컨트롤러에 저장된다. 이 데이터는 전압 값이므로 변위로 환산하여야 한다. 여러 종류의 정전용량형 센서를 사용할 수 있도록 하기 위하여 정전용량형 센서의 이득(gain) 값을 이용하여 정전용량형 센서의 사양에 따라 변위 값으로 환산할 수 있도록 프로그래밍하였다.

정전용량형 센서와 광 파워미터에서 획득한 데이터의 샘플링(Sampling) 개수가 다르므로 데이터를 재배열하여 Fig. 2-19와 같이 스테이지가 구동한 Y-Z 평면의 각 좌표에 대응하는 광파워 값을 표시하여 3 차원 그래프를 도식화하도록 하였다. 그래프는 줌 인/아웃(Zoom In/Out) 및 팬(Pan) 기능이 가능하고 각 평면에 투영도를 볼 수 있다. 또한 플롯 스타일과 좌표계를 변환하여 볼 수 있도록 하였다.

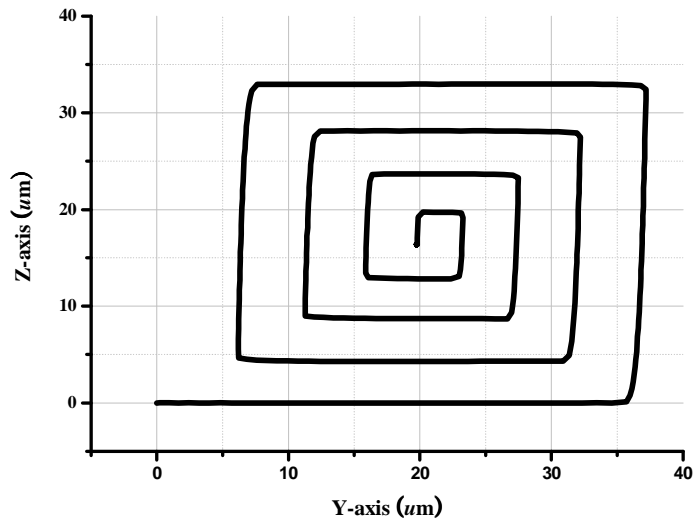


Fig. 2-18 Y-Z Plane Graph of Precision Stage in Field Search

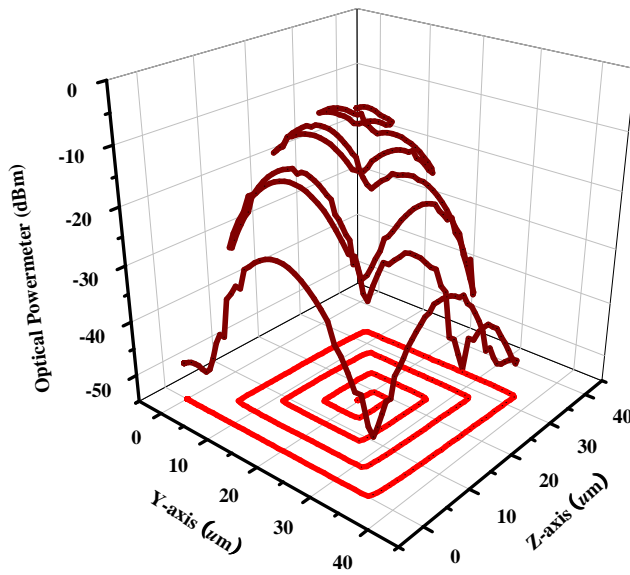


Fig. 2-19 3D Graph of Line-Point Style

4. 극점 탐색 탭

극점 탐색 탭에서는 영역 탐색을 통해 획득한 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 이동시킨 좌표를 기준으로 힐 클라임 방식으로 전·후진하는 궤적을 따라 4 단계의 극점 탐색 과정을 거쳐 최적 광소자 정렬 위치를 찾는다. Fig. 2-20은 극점 탐색 과정의 플로차트를 나타내었다. Search 버튼을 누르면 플로팅 탭에서 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 옮긴 좌표를 기준으로 4 단계의 극점 탐색이 수행된다. 1 단계 극점 탐색에서는 스테이지를 원점 방향으로 $1\ \mu\text{m}$ 간격으로 $10\ \mu\text{m}$ 이동하며 각 좌표에 대응하는 광파워 값을 측정하고, 반대 방향으로 $1\ \mu\text{m}$ 간격으로 $20\ \mu\text{m}$ 이동하여 Y 축 위치에 따른 광파워 값을 측정하여 1 차원 프로파일을 측정한다. 이를 통해 최대 광신호 출력 좌표가 검출되면 다시 원점 방향으로 $0.5\ \mu\text{m}$ 단위로 이동하며 광파워 값을 비교하여 최대 광신호가 검출되는 위치에서 스테이지가 정지하도록 하였다. 2 단계 극점 탐색에서는 1 단계와 같은 방법으로 Z 축에 대하여 1 차원 프로파일을 측정한다. 3 단계 극점 탐색에서는 2 단계 극점 탐색에서 측정되어진 최대 광신호 출력 좌표를 기준으로 스테이지를 원점 방향으로 $0.5\ \mu\text{m}$ 간격으로 $2.5\ \mu\text{m}$ 이동하며 Z축 좌표와 광파워 값을 측정하고 반대 방향으로 $0.5\ \mu\text{m}$ 간격으로 $5\ \mu\text{m}$ 를 이동하며 Z축에 대하여 1 차원 프로파일을 측정한다. 최대 광파워 값이 측정되면 Z축을 다시 원점 방향으로 $0.1\ \mu\text{m}$ 간격으로 이동하며 광파워 값을 비교하여 최대 광신호가 출력되는 위치에서 스테이지를 정지시킨다. 4 단계 극점 탐색에서는 Y축을 3 단계 극점 탐색과 같은 방법으로 구동시켜 최종적으로 최대 광신호가 출력되는 좌표와 광 파워 값을 찾게 된다.

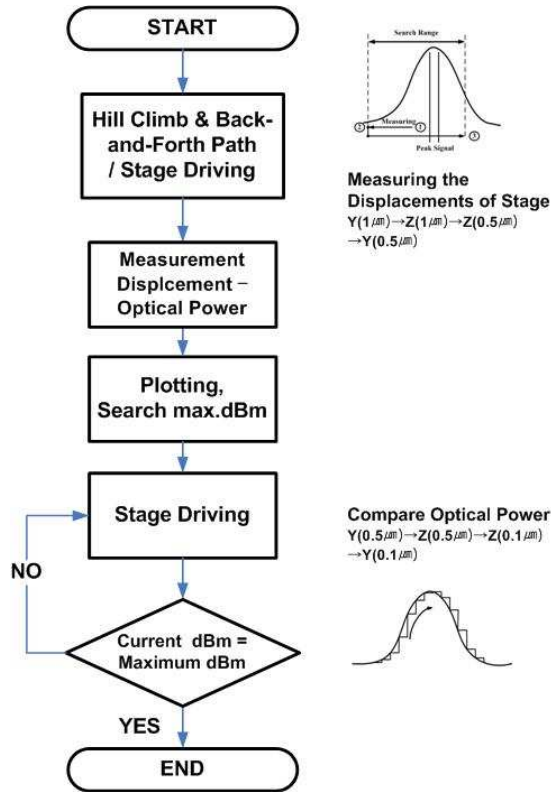


Fig. 2-20 Flow Chart of Peak Search

Fig. 2-21은 극점 탐색 탭의 구성을 나타내고 있다. 4 단계 극점 탐색의 결과를 그래프로 도식화하고 이를 통해 획득한 최종 정렬 좌표와 광 파워 값이 표기되도록 하였다. 또한, 광소자 정렬 공정이 완료되면 스테이지를 초기화할 수 있도록 Reset 버튼을 두었으며, 모든 과정은 ASCII 형식으로 저장할 수 있도록 프로그래밍하였다.

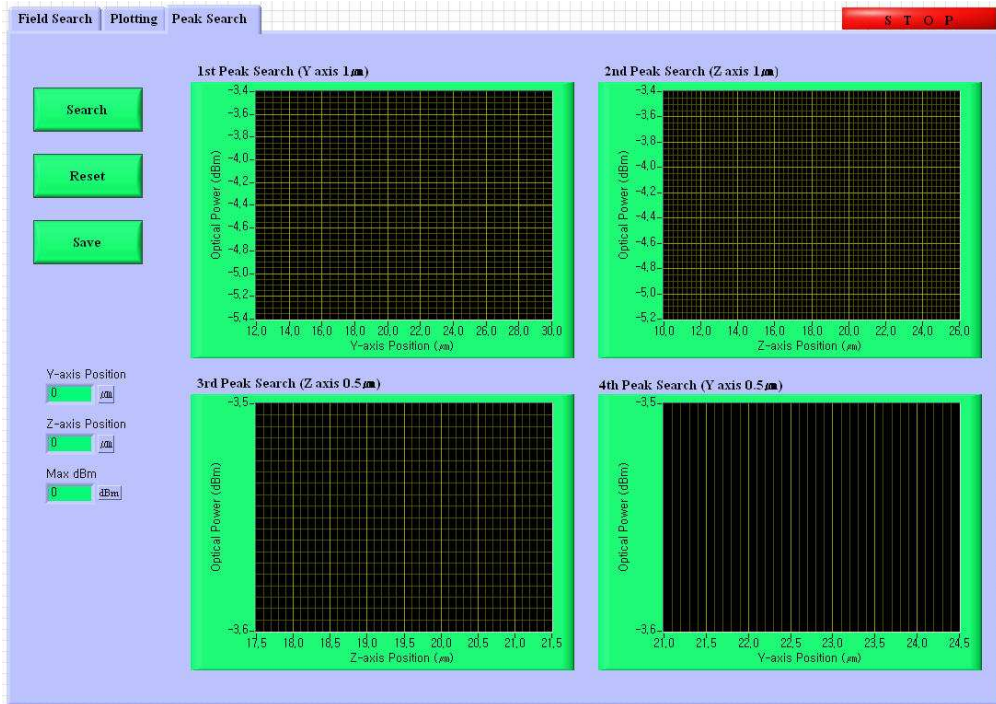


Fig. 2-21 Picture of Peak Search Tab

제 3 장 초정밀 다축 스테이지 제작 및 성능평가

제 1 절 초정밀 다축 스테이지 제작

유한요소해석에 의해 검증된 설계 데이터를 기준으로 초정밀 다축 스테이지를 제작하였다. 다축 스테이지의 구성 요소는 Fig. 3-1에서와 같이 베이스, 압전 액추에이터, X, Y, Z 축 플렉서 및 이송단(Moving Plate)으로 이루어진다. 플렉서의 재질은 두랄루민(Duralumin 6061)을 사용하였고 베이스 및 이송단은 일반구조용 알루미늄으로 제작되었다. 각 축의 구동부는 Fig. 3-2와 같이 압전 액추에이터를 플렉서와 접합하였고 액추에이터의 수축과 팽창시 변위 차이 및 플렉서와의 간극을 줄이기 위해 예압 스프링(Preload Spring)을 변위 발생 반대방향에 부착하였다. 또한 압전 액추에이터가 팽창방향과 법선방향의 힘에 대해 취성이 발생할 우려가 있으므로 플렉서의 압전 액추에이터 부착부분을 노치형상으로 가공하였다.

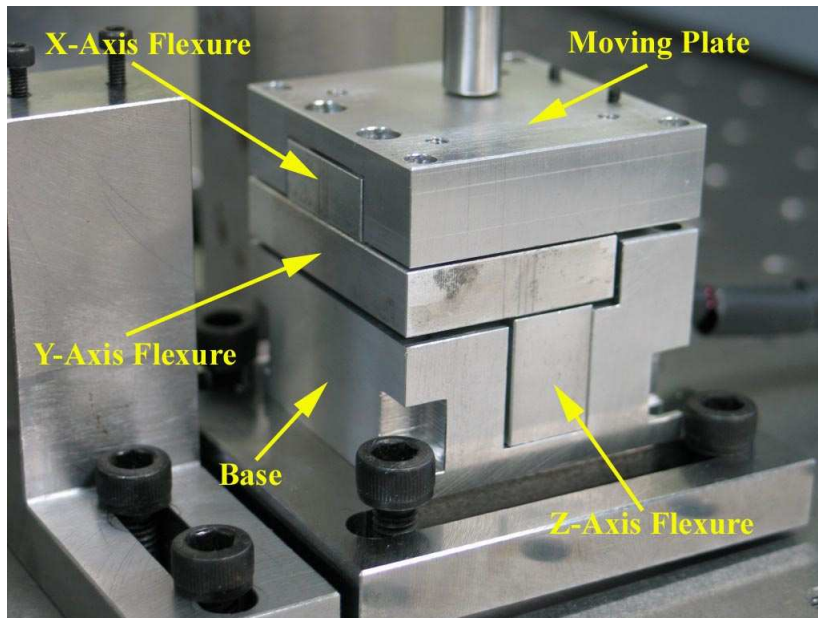
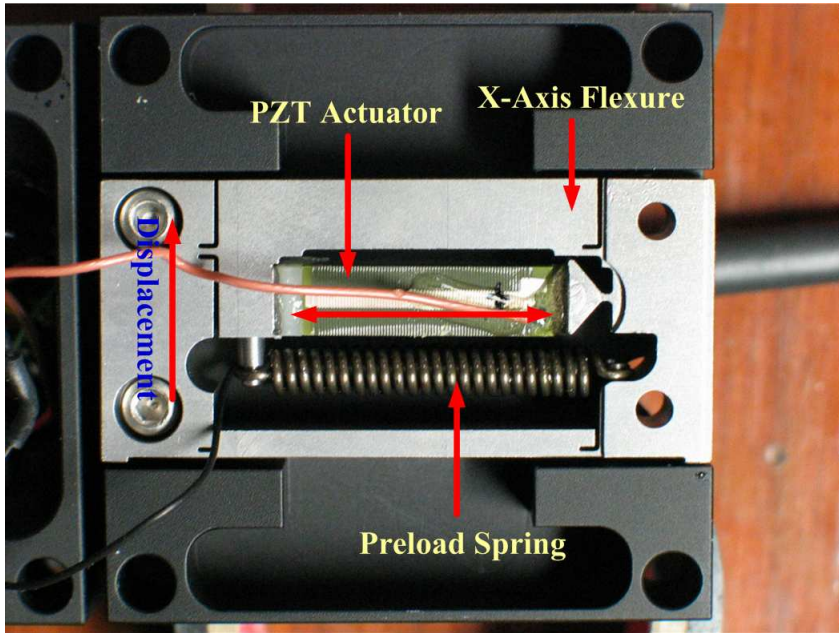
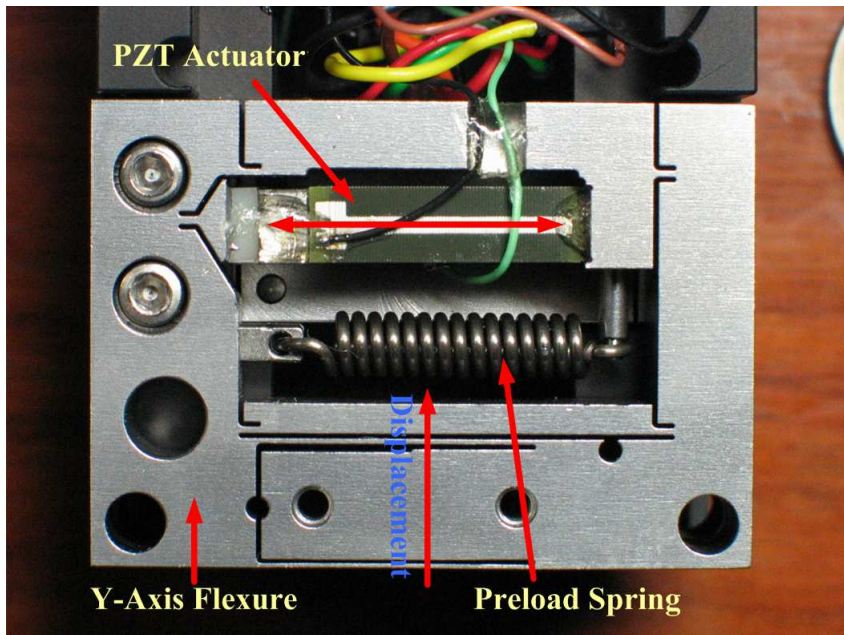


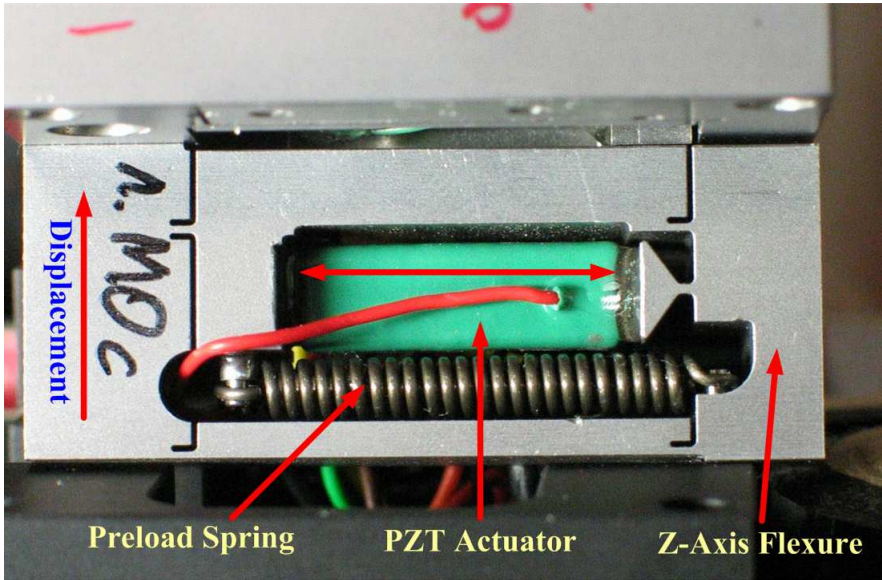
Fig. 3-1 Precision Multi-Axis Stage



(a) X-Axis Flexure



(b) Y-Axis Flexure



(c) Z-Axis Flexure

Fig. 3-2 Flexure of Precision Multi-Axis Stage

제 2 절 초정밀 다축 스테이지 성능평가

초정밀 다축 스테이지가 실제 광소자 정렬에 요구되는 정밀도 및 이송 범위를 만족하는지 파악하기 위해 성능평가를 수행하였다. 초정밀 다축 스테이지의 성능평가를 위해 분해능 및 전 이송구간에서의 추종 능력 및 선형성을 측정하였다. 분해능은 광소자 정렬시 정렬 정밀도와 직결되는 사양으로 분해능이 높을수록 높은 정렬 및 접합 정밀도를 얻을 수 있으며 정렬시간도 단축시킬 수 있다. 일반적인 광정렬 장치에서 요구되는 정밀도는 약 0.6~1 μm 이다.

Fig. 3-3은 성능평가를 위한 실험 기구도이다. 그림에서 보는 것처럼 스테이지를 구동하기 위해 압전 액추에이터 앰프에 전압 신호를 입력하였다. 입력 신호는 메인 컴퓨터의 구동프로그램에 의해 장착된 DSP 컨트롤러에서 입력된다. 초정밀 스테이지에서 발생된 변위는 정전용량형 센서로 위치 신호를 검출하고 이 변위 신호를 오실로스코프로 측정하고 저장하였다.

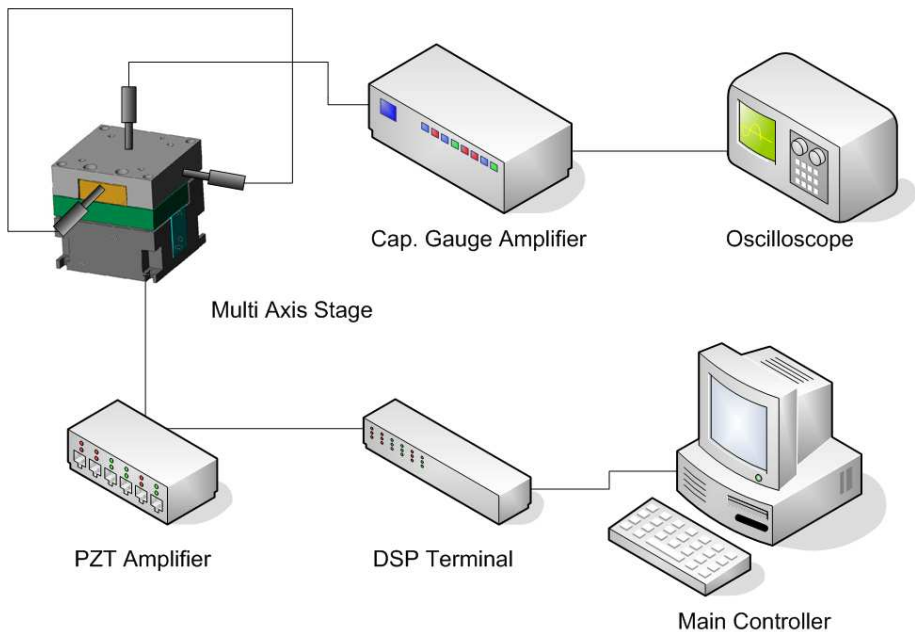
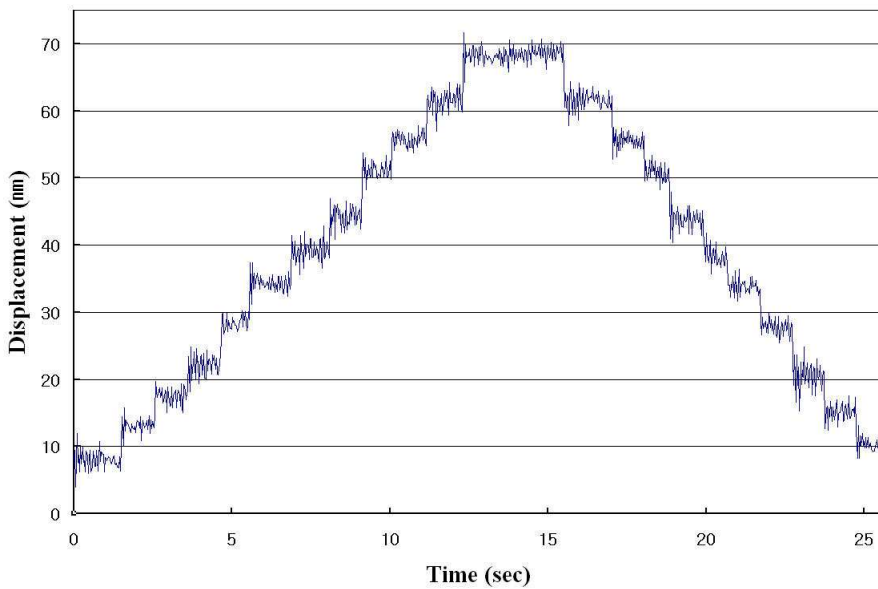


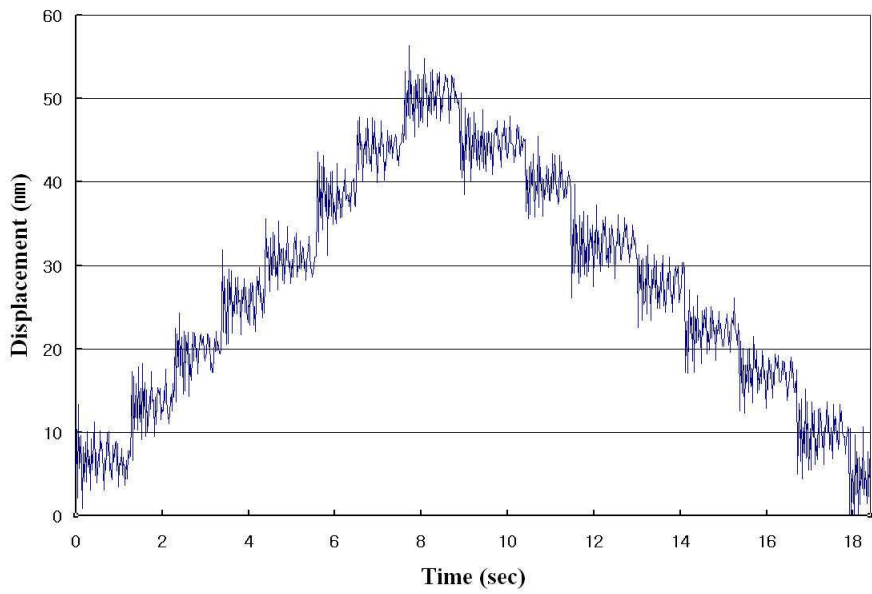
Fig. 3-3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

1. 분해능 측정

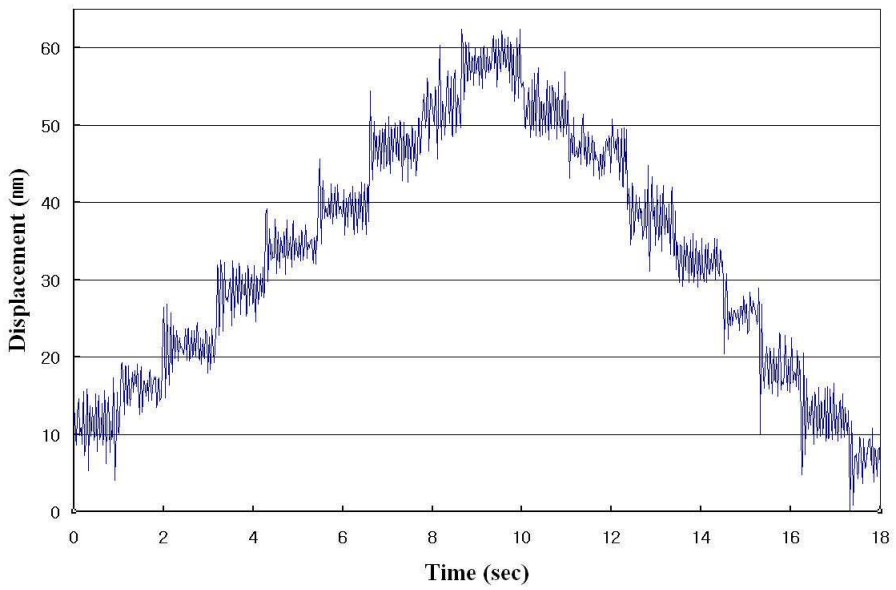
분해능을 평가하기 위한 입력 조건으로 메인 컨트롤러에서 1 mV 스텝함수를 입력하였다. 컨트롤러에서 발생된 신호는 압전 액추에이터 앰프로 전달되고 스테이지에서 변위가 발생된다. 발생된 변위는 측정범위 $\pm 100 \mu\text{m}$ 의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 정전용량형 센서에서 출력된 변위 신호는 센서 앰프를 통하여 오실로스코프에서 그 파형을 화면으로 확인하고 데이터로 저장하였다. 초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축 분해능 측정 결과는 Fig. 3-4에 나타내었다. 측정 결과로부터 X축, Y축, Z축 모두 약 5 nm의 분해능을 보였다. 본 논문에서 연구된 초정밀 다축 스테이지의 분해능은 광소자 정렬에 요구되는 정밀도를 잘 만족하고 있다.



(a) Resolution of X-Axis



(b) Resolution of Y-Axis

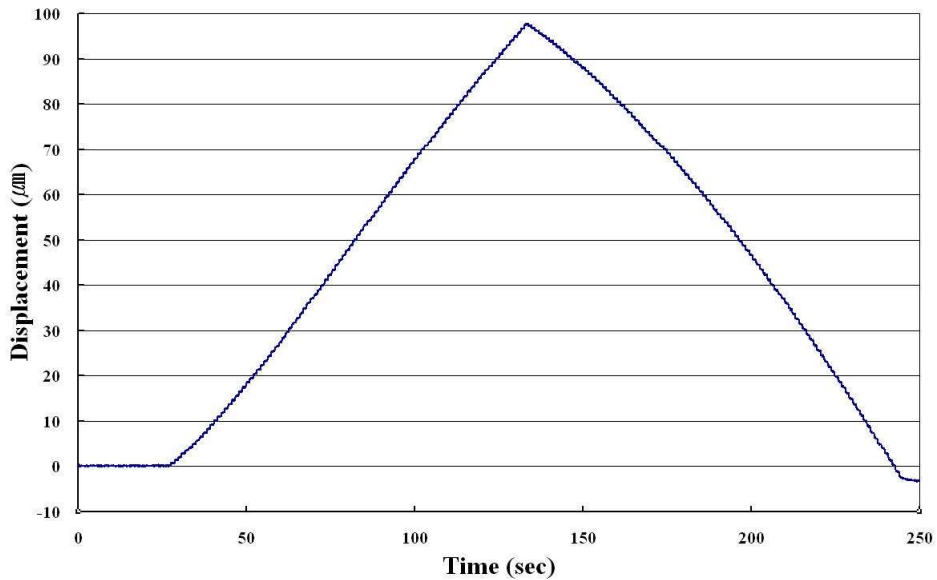


(c) Resolution of Z-Axis

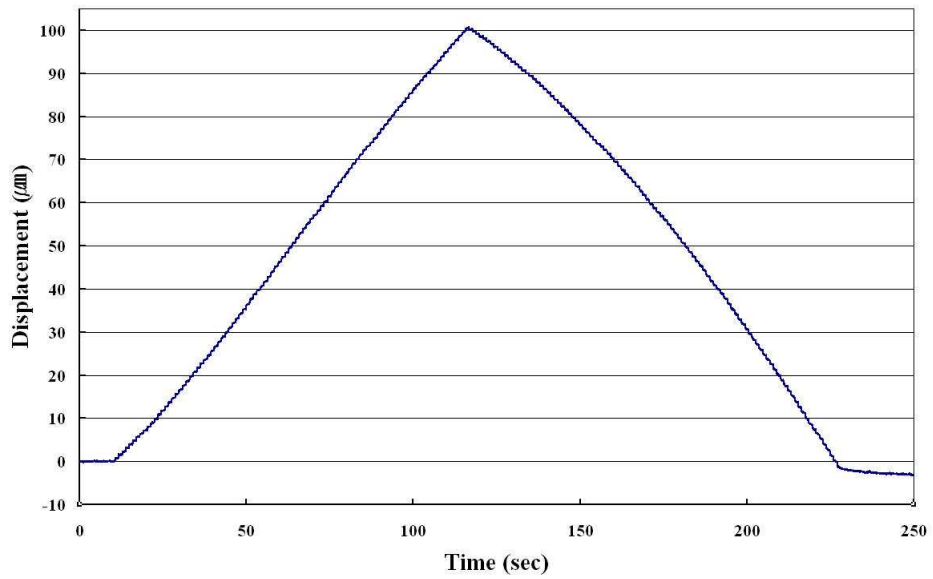
Fig. 3-4 Resolution of Precision Multi-Axis Stage

2. 이송성능 측정

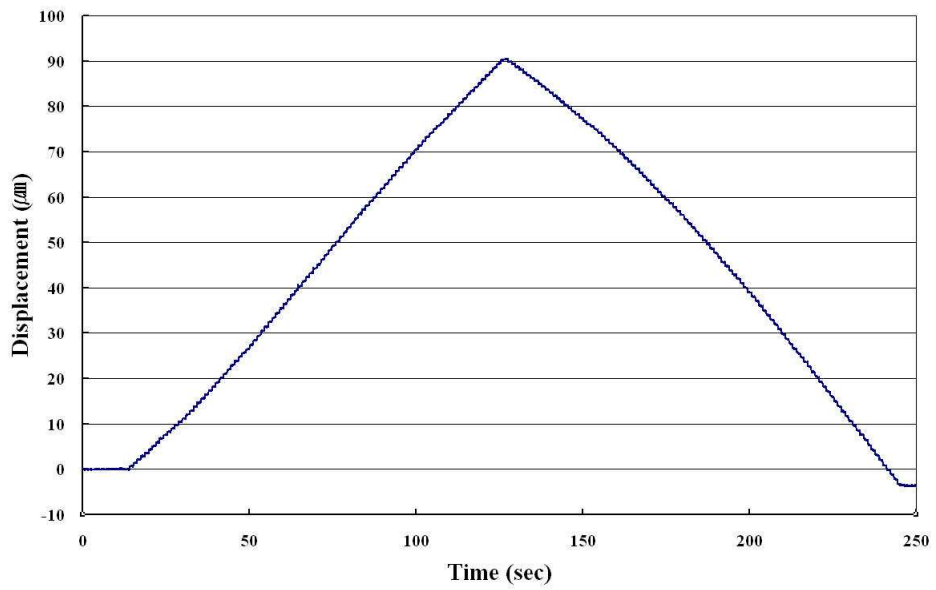
이송성능을 평가하기 위해 0 V ~ 10 V 까지 100 mV 스텝함수를 입력하였다. 변위는 최대 측정범위 $\pm 250 \mu\text{m}$ 의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 초정밀 다축 스테이지의 이송범위 측정 결과는 Fig. 3-5와 같이 나타났다. X축에 대한 최대 이송범위는 $97 \mu\text{m}$ 로 측정되었고 Y축의 최대 이송범위는 $103 \mu\text{m}$, 그리고 Z축의 이송범위는 $92 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이 결과로부터 초정밀 다축 스테이지를 조동(Macro) 정렬장치에 장착했을 때뿐만 아니라 독립적으로 광정렬에 사용할 때도 충분한 운동 범위를 갖음을 알 수 있다.



(a) Travel of X-Axis



(b) Travel of Y-Axis



(c) Travel of Z-Axis

Fig. 3-5 Travel of Precision Multi-Axis Stage

제 3 절 초정밀 다축 스테이지의 히스테리시스 특성

초정밀 다축 스테이지는 압전 액츄에이터에 의해 구동되므로 입력 전압을 증가시킬 때와 감소시킬 때 각각 서로 다른 변위 곡선을 나타내게 된다. 본 연구에서는 이러한 히스테리시스 특성을 보상하고 원하는 변위에 대한 입력 전압과의 관계를 규명하고자 히스테리시스를 모델링하고 다시 역 히스테리시스를 모델링하였다. 각 축들의 입력 전압 범위는 0 ~ 10 V 이고 100 mV 단위로 증가 및 감소시켰다. 발생 변위의 측정은 정전용량형 센서를 이용하여 각 축 당 5 회 측정하였다. 히스테리시스 측정 기구도는 Fig. 3-6에 나타내었다.

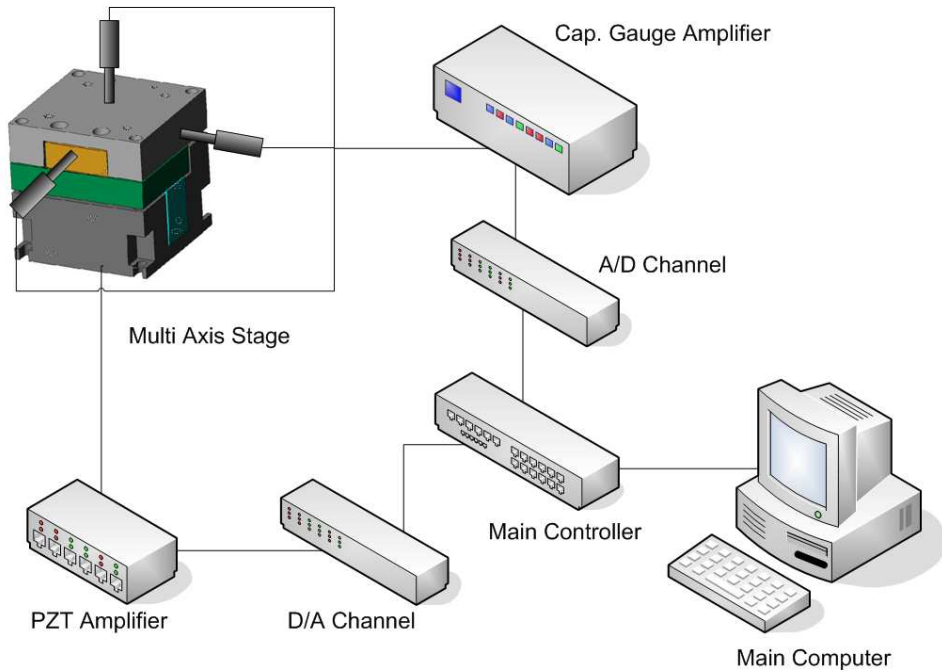


Fig. 3-6 Experimental Apparatus for Hysteresis Modeling

초정밀 스테이지의 변위 궤적을 측정하고 각 축별로 히스테리시스를 모델링하였다. Fig. 3-7은 일반적인 히스테리시스의 궤적을 나타낸 그림으로 스테이지를 전체 변위범위까지

증가시킨 후 감소시킨 다음 다시 전체 구간보다 작은 범위까지 구동시켜 얻은 궤적이다. 히스테리시스 모델링에 사용된 변수는 Table 3-1과 같다. 식 (3-1)은 상승시 히스테리시스를 모델링한 것이고 식 (3-2)는 하강시 히스테리시스를 모델링한 것이다. 본 논문에서는 각 축별로 마이너 루프를 세 가지로 실험하여 모델링 하였다. 즉 V_b 값을 5V, 6V, 그리고 8V로 변화시켜 각각의 히스테리시스 식을 구하였다.

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

$$e = H_{down}(V - V_b + V_{max}) + e_b - e_{max} \quad (3-2)^{[29]}$$

여기서, H_{up} 은 상승시 보간식이고 H_{down} 은 하강시 보간식으로 최소자승법을 이용하여 3차식으로 보간하였다.

Table 3-1 Variables for Hysteresis Modeling

Variable	Means
e	Present Position
V_a	Increasing Voltage Point after Decreasing
V_b	Decreasing Voltage Point after Increasing
e_a	Increasing Displacement Point after Decreasing
e_b	Decreasing Displacement Point after Increasing
e_{max}	Maximum Displacement
V_{max}	Maximum Voltage
H_{up}	Major Loop Equation in Increasement
H_{down}	Major Loop Equation in Decrement

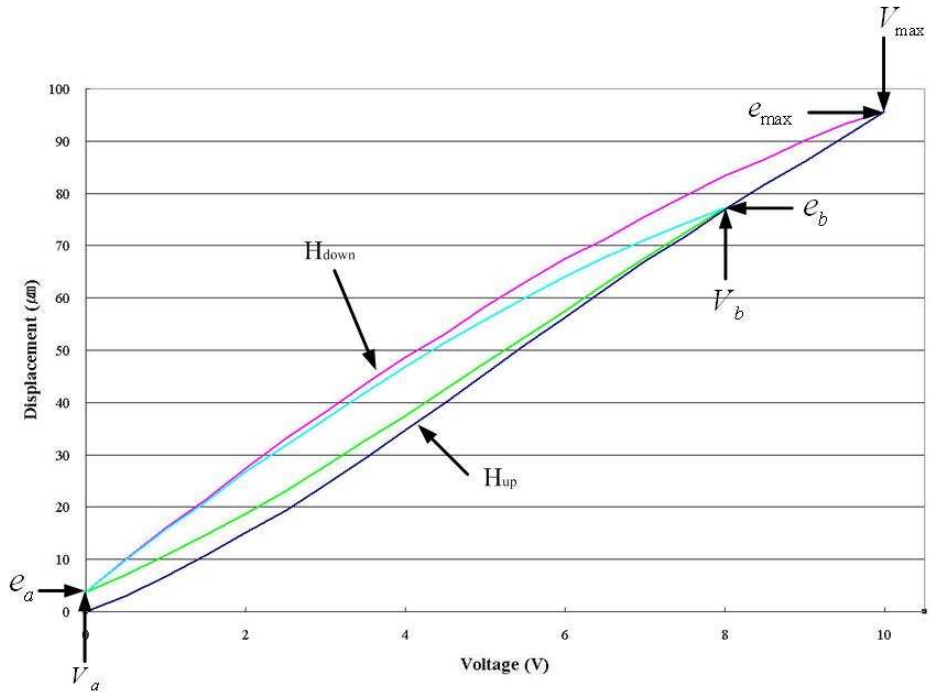
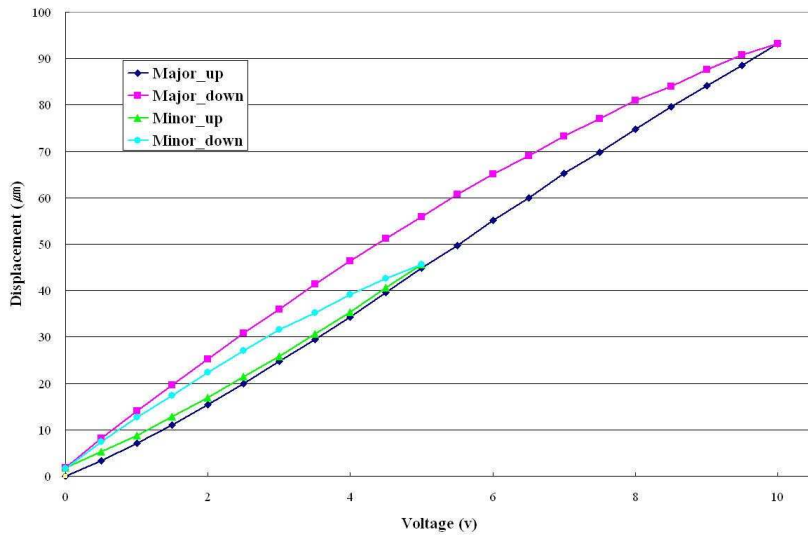


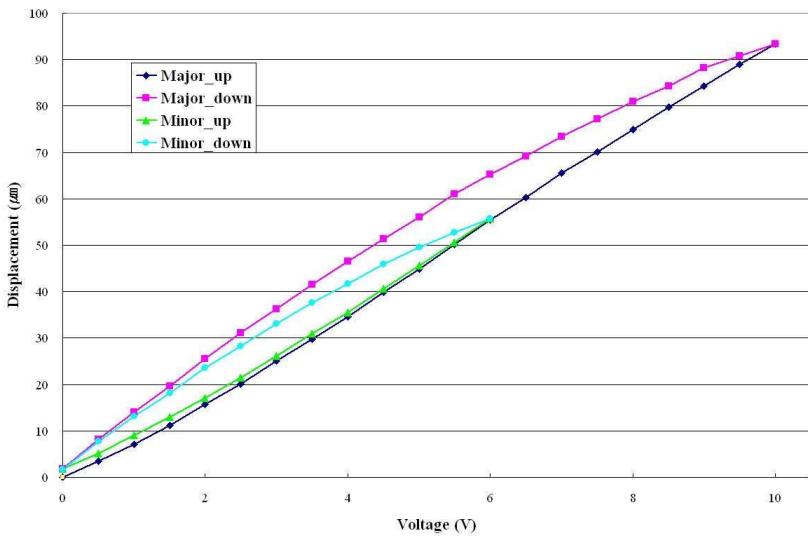
Fig. 3-7 Hysteresis Modeling

1. 히스테리시스 모델링

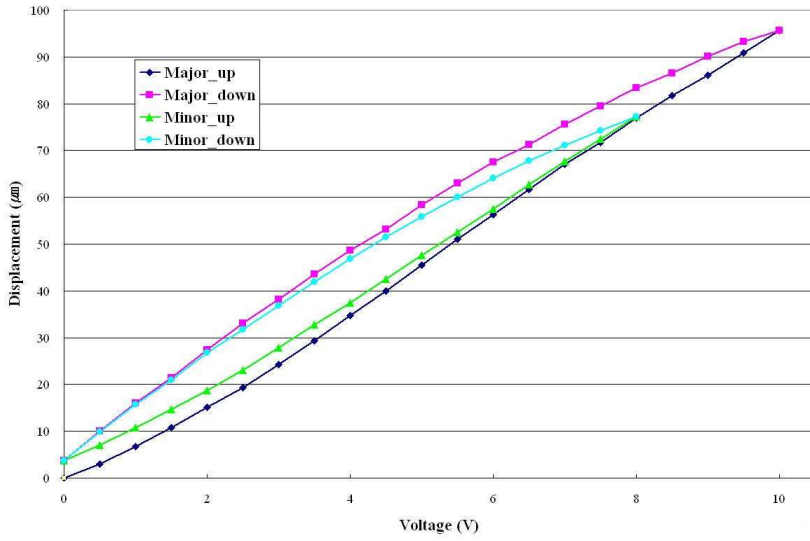
히스테리시스를 모델링하기 위해 5 V 와 6 V 그리고 8 V 의 마이너 루프를 만들어 실험하였다. 입력 전압은 5 mV 단위로 상승 및 하강하였다. Fig. 3-8, 9, 10은 X축, Y축, Z축의 마이너 루프를 모델링하기 위한 실험결과를 나타낸 것이다. Table 3-2는 실험을 통해 얻은 히스테리시스 모델링 변수들을 마이너 루프별로 정리한 것이다. 이 변수와 보간식을 식 (3-1)과 식 (3-2)에 대입하면 마이너 루프의 히스테리시스 식을 구할 수 있다. 여기서 상승 및 하강 메이저 루프의 보간식은 2 차 최소자승근사법을 이용하여 구하였다.



(a) 5V Minor Loop

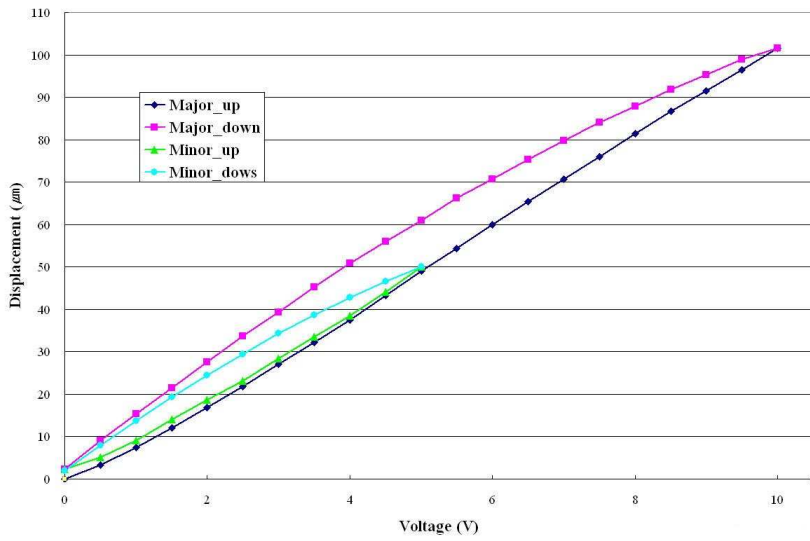


(b) 6V Minor loop

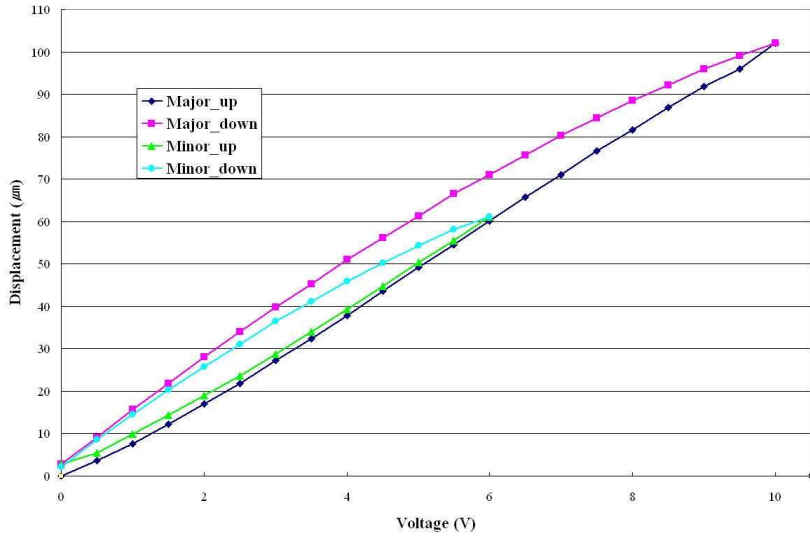


(c) 8V Minor Loop

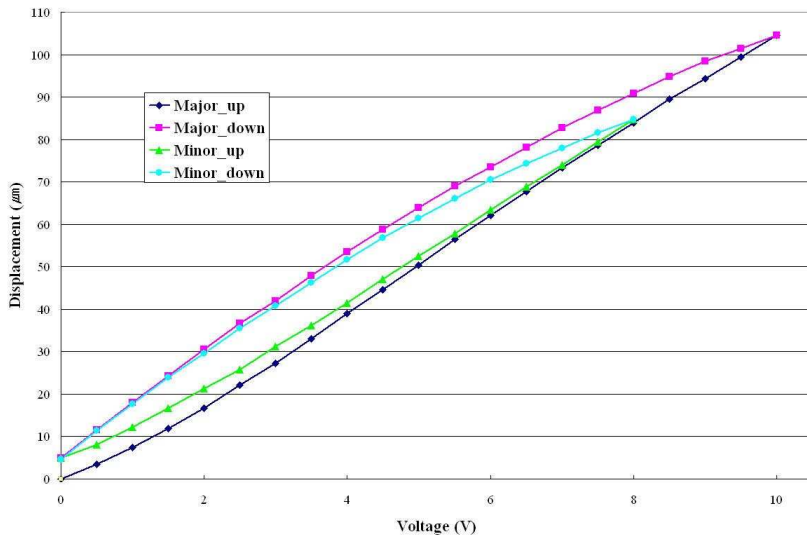
Fig. 3-8 Hysteresis Modeling of X-Axis



(a) 5V Minor Loop

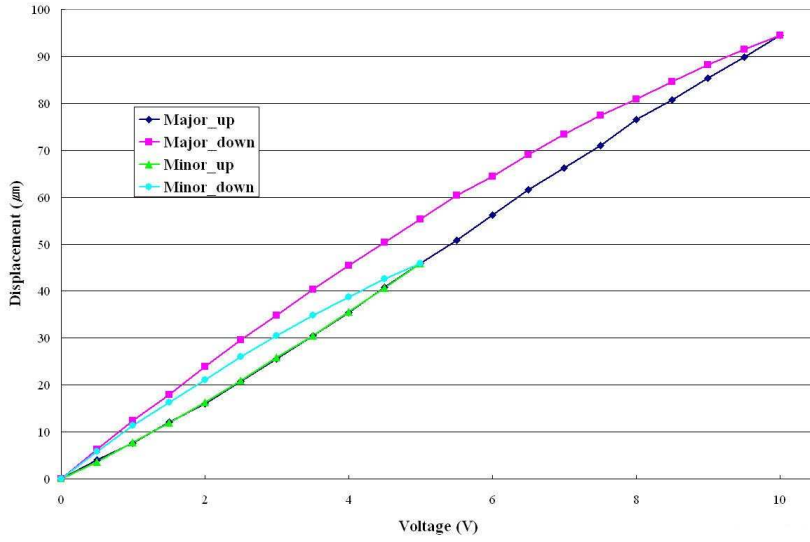


(b) 6V Minor Loop

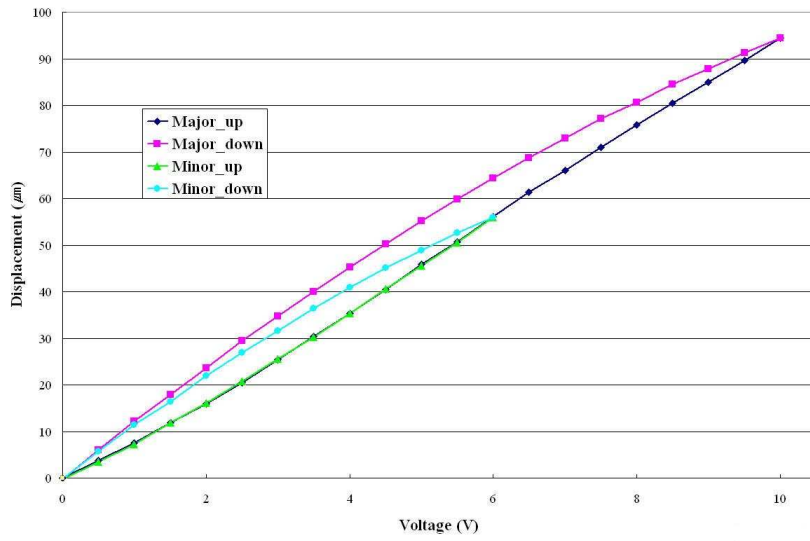


(c) 8V Minor Loop

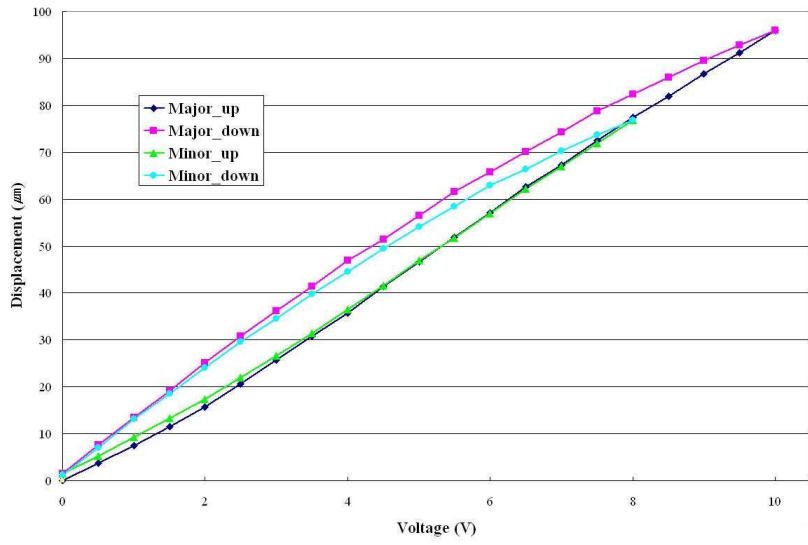
Fig. 3-9 Hysteresis Modeling of Y-Axis



(a) 5V Minor Loop



(b) 6V Minor Loop



(c) 8V Minor Loop

Fig. 3-10 Hysteresis Modeling of Z-Axis

Table 3-2 Variable Values for Hysteresis Modeling

Minor Loop	Variable	X-Axis Value	Y-Axis Value	Z-Axis Value	
5V	V_a	0 V	0 V	0 V	
	V_b	5 V	5 V	5 V	
	e_a	1.81 μm	2.376 μm	0.04070 μm	
	e_b	45.68 μm	49.991 μm	45.9225 μm	
	V_{max}	10 V	10 V	10 V	
	e_{max}	93.16 μm	101.506 μm	94.5075 μm	
	H_{up}	a	-3.7607E-02	-3.7678E-02	-3.6204E-02
		b	6.3173E-01	6.3431E-01	5.9955E-01
		c	6.7484E+00	7.5875E+00	7.0324E+00
		d	-2.1954E-01	-4.5659E-01	1.2666E-01
	H_{down}	a	-6.9588E-03	3.2479E-06	6.3846E-03
		b	-2.2892E-01	-1.6427E-04	-2.2781E-01
		c	1.2123E+01	8.3180E-02	1.2354E+01
		d	1.9896E+00	-2.2988E-01	1.2075E-01
6V	v_a	0 V	0 V	0 V	
	V_b	6 V	6 V	6 V	
	e_a	1.831 μm	2.825 μm	-0.285 μm	
	e_b	55.745 μm	61.125 μm	55.8835 μm	
	V_{max}	10 V	10 V	10 V	
	e_{max}	93.3 μm	102.043 μm	94.4735 μm	
	H_{up}	a	-3.6683E-02	-3.9410E-02	-3.5208E-02
		b	6.1293E-01	6.5406E-01	5.8443E-01
		c	6.8627E+00	7.5590E+00	7.0784E+00
		d	-1.7617E-01	-3.3498E-01	-5.1478E-02
	H_{down}	a	-5.4591E-03	-8.0335E-03	-3.6578E-03
		b	-2.5547E-01	-2.3675E-01	-2.6776E-01
		c	1.2265E+01	1.3111E+01	1.2502E+01
		d	1.9802E+00	2.7805E+00	-2.0668E-01
8V	V_a	0 V	0 V	0 V	
	V_b	8 V	8 V	8 V	
	e_a	3.711 μm	4.932 μm	1.52175 μm	
	e_b	45.68 μm	84.667 μm	76.87125 μm	
	V_{max}	10 V	10 V	10 V	
	e_{max}	95.598 μm	104.607 μm	96.02875 μm	
	H_{up}	a	-5.0176E-02	-4.8078E-02	-4.1762E-02
		b	8.3768E-01	7.8442E-01	6.8010E-01
		c	6.1695E+00	7.4097E+00	6.9398E+00
		d	-2.1484E-01	-4.7004E-01	-1.3930E-01
	H_{down}	a	-7.0645E-03	-6.8860E-03	-6.4584E-03
		b	-2.3220E-01	-2.6078E-01	-2.1600E-01
		c	1.2228E+01	1.3266E+01	1.2255E+01
		d	3.8474E+00	4.9835E+00	1.4795E+00

2. 역 히스테리시스 모델링

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

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

$$V_{down} = V_b - V_{\max} + H^{1\ down}(e_{\max} - e_b + e) \quad (3-4)$$

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

역 히스테리시스 모델링은 초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축을 모두 모델링하였으며 각 축 당 5 V, 6 V, 8 V의 마이너 루프에 대해 모델링 하였다. 히스테리시스 모델링에서 얻었던 변수들과 각각의 메이저 루프 보간식을 대입하면 역 히스테리시스식을 구할 수 있다. Table 3-3은 역 히스테리시스 모델링에 필요한 변수와 보간식을 정리한 것이다. 식 (3-5)은 X축 5 V, 식 (3-6)는 X축 6 V, 식 (3-7)은 X축 8 V 에 대한 역 히스테리시스를 모델링한 것이다. 식 (3-8)은 Y축 5 V, 식 (3-9)는 Y축 6 V, 식 (3-10)은 Y축 8 V 에 대한 역 히스테리시스를 모델링한 것이다. 식 (3-11)은 Z축 5 V, 식 (3-12)는 Z축 6 V, 식 (3-13)은 Z축 8 V 에 대한 역 히스테리시스를 모델링한 것이다.

Table 3-3 Variable Values for Inverse Hysteresis Modeling

Minor Loop	Variable	X-Axis Value	Y-Axis Value	Z-Axis Value	
5V	V_a	0 V	0 V	0 V	
	V_b	5 V	5 V	5 V	
	e_a	1.81 μm	2.376 μm	0.04070 μm	
	e_b	45.68 μm	49.991 μm	45.9225 μm	
	V_{max}	10 V	10 V	10 V	
	e_{max}	93.16 μm	101.506 μm	94.5075 μm	
	H_φ	a	4.8681E-06	3.4140E-06	4.4949E-06
		b	-7.4900E-04	-5.7342E-04	-6.9543E-04
		c	1.3466E-01	1.2109E-01	1.3169E-01
		d	6.0174E-02	8.2959E-02	7.6898E-03
	H_{dun}	a	4.1634E-06	3.2501E-06	3.4338E-06
		b	-1.8876E-04	-1.6457E-04	-1.2583E-04
		c	9.0055E-02	8.3191E-02	8.6995E-02
		d	-2.0497E-01	-2.2995E-01	-3.5517E-02
6V	v_a	0 V	0 V	0 V	
	V_b	6 V	6 V	6 V	
	e_a	1.831 μm	2.825 μm	-0.285 μm	
	e_b	55.745 μm	61.125 μm	55.8835 μm	
	V_{max}	10 V	10 V	10 V	
	e_{max}	93.3 μm	102.043 μm	94.4735 μm	
	H_φ	a	4.7136E-06	3.5170E-06	4.3611E-06
		b	-7.2418E-04	-5.8552E-04	-6.7434E-04
		c	1.3348E-01	1.2126E-01	1.3093E-01
		d	5.1141E-02	6.8870E-02	3.0646E-02
	H_{dun}	a	3.9585E-06	3.2453E-06	3.0810E-06
		b	-1.5782E-04	-1.7247E-04	-7.3342E-05
		c	8.8468E-02	8.3648E-02	8.5114E-02
		d	-1.9884E-01	-2.5962E-01	-3.6244E-03
8V	V_a	0 V	0 V	0 V	
	V_b	8 V	8 V	8 V	
	e_a	3.711 μm	4.932 μm	1.52175 μm	
	e_b	45.68 μm	84.667 μm	76.87125 μm	
	V_{max}	10 V	10 V	10 V	
	e_{max}	95.598 μm	104.607 μm	96.02875 μm	
	H_φ	a	5.8186E-06	3.8177E-06	4.7720E-06
		b	-9.0957E-04	-6.4026E-04	-7.3573E-04
		c	1.3820E-01	1.2050E-01	1.3089E-01
		d	8.0171E-02	9.2284E-02	4.7693E-02
	H_{dun}	a	4.1398E-06	3.1836E-06	3.2758E-06
		b	-2.1502E-04	-1.8076E-04	-1.2994E-04
		c	9.0237E-02	8.3285E-02	8.7712E-02
		d	-3.7158E-01	-4.3840E-01	-1.5392E-01

$$V_{up} = 4.89681E-6(e-1.81)^3 - 7.49E-4(e-1.81)^2 + 1.3466E-1(e-1.81) + 6.0174E-2$$

$$V_{down} = -5 + 4.1634E-6(e+47.48)^3 - 1.8876E-4(e+47.48)^2 + 9.0056E-2(e+47.48) - 2.0497E-1 \quad (3-5)$$

$$V_{up} = 4.7136E-6(e-1.831)^3 - 7.2418E-4(e-1.831)^2 + 1.3348E-1(e-1.831) + 5.1141E-2$$

$$V_{down} = -4 + 3.9583E-6(e+37.555)^3 - 1.5782E-4(e+37.555)^2 + 8.8468E-2(e+37.555) - 1.9884E-1 \quad (3-6)$$

$$V_{up} = 5.8186E-6(e-3.71088)^3 - 9.0957E-4(e-3.71088)^2 + 1.3820E-1(e-3.71088) + 8.0171E-2$$

$$V_{down} = -2 + 4.1398E-6(e+18.3525)^3 - 2.1502E-4(e+18.3525)^2 + 9.0237E-2(e+18.3525) - 3.7158E-1 \quad (3-7)$$

$$V_{up} = 3.4140E-6(e-2.3763)^3 - 5.7342E-4(e-2.3763)^2 + 1.2109E-1(e-2.3763) + 8.2959$$

$$V_{down} = -5 + 3.2501E-6(e+51.515)^3 - 1.6457E-4(e+51.515)^2 + 8.3191E-2(e+51.515) - 2.2995E-1 \quad (3-8)$$

$$V_{up} = 3.5170E-6(e-2.8248)^3 - 5.8552E-4(e-2.8248)^2 + 1.2126E-1(e-2.8248) + 6.8870E-2$$

$$V_{down} = -4 + 3.2453E-6(e+40.9175)^3 - 1.7247E-4(e+40.9175)^2 + 8.3648E-2(e+40.9175) - 2.5962E-2 \quad (3-9)$$

$$V_{up} = 3.8177E-6(e-4.9318)^3 - 6.4026E-4(e-4.9318)^2 + 1.2050E-1(e-4.9318) + 9.2284E-2$$

$$V_{down} = -2 + 3.1836E-6(e+19.93)^3 - 1.8076E-4(e+19.93)^2 + 8.3285E-2(e+19.93) - 4.384E-1$$

(3-10)

$$V_{up} = 4.4949E-6(e-0.04075)^3 - 6.9543E-4(e-0.04075)^2 + 1.3169E-1(e-0.04075) + 7.6898E-3$$

$$V_{down} = -5 + 3.4338E-6(e+48.585)^3 - 1.2583E-4(e+48.585)^2 + 8.6995E-2(e+48.585) - 3.5517E-2$$

(3-11)

$$V_{up} = 4.3611E-6(e+0.285)^3 - 6.7434E-4(e+0.285)^2 + 1.3093E-1(e+0.285) + 3.0646E-2$$

$$V_{down} = -4 + 3.081E-6(e+38.59)^3 - 7.3342E-5(e+38.59)^2 + 8.5114E-2(e+38.59) - 3.6244E-3$$

(3-12)

$$V_{up} = 4.7720E-6(e-1.52175)^3 - 7.3573E-4(e-1.52175)^2 + 1.3089E-1(e-1.52175) + 4.7693E-2$$

$$V_{down} = -2 + 3.2758E-6(e+19.1575)^3 - 1.2994E-4(e+19.1575)^2 + 8.7712E-2(e+19.1575) - 1.5392E-1$$

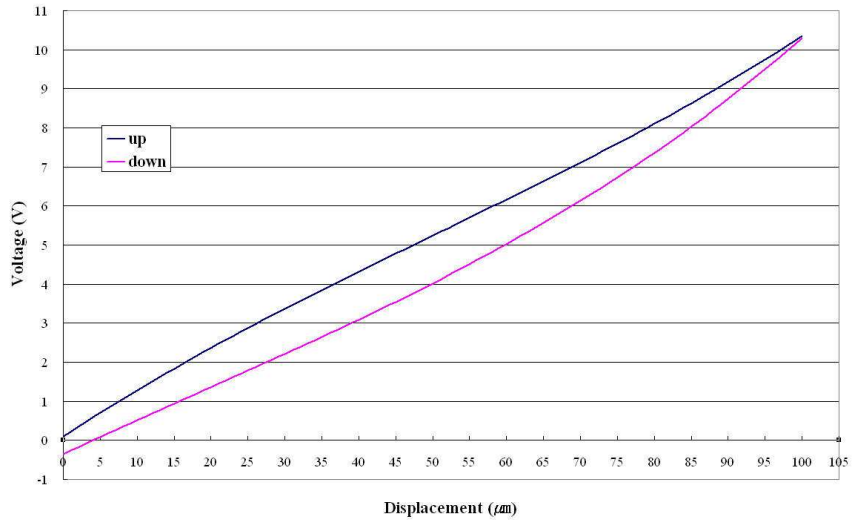
(3-13)

3. 히스테리시스 보정

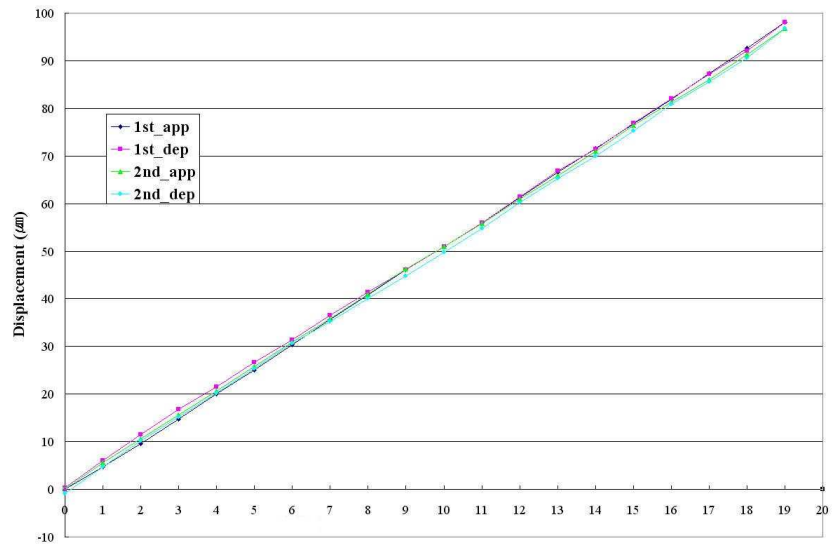
역 히스테리시스 모델링에 의해 구해진 발생 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악한 후 그 입력 데이터를 기준으로 초정밀 다축 스테이지의 구동실험을 하였다. 히스테리시스 보정 평가 실험 조건은 각 축별로 최대 운동영역인 X축 97 μm , Y축 103 μm , Z축 92 μm 영역에서 입력변위를 1 μm 단위로 변화시키면서 발생된 변위를 측정하였다. 측정센서는 정

전용량형 센서이며 입력 신호는 다축 스테이지 구동 프로그램에서 입력하였다.

Fig. 3-11은 X축에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 Fig. 3-11(a)는 역 히스테리시스 모델링 실험으로 구해진 히스테리시스 보정곡선이며 (b)는 보정된 입력 데이터를 초정밀 스테이지에 입력하여 발생된 변위를 측정된 결과이다. 5 μm 간격의 변위를 발생시키기 위해 역 히스테리시스 모델링에서 구한 상승시 전압과 하강시 전압을 입력으로 하여 실제 스테이지의 변위를 측정된 결과 히스테리시스 오차는 상당부분 보상되었다. Y축과 Z축에서도 히스테리시스 오차를 감소시킬 수 있었다. Y축과 Z축의 히스테리시스 보상실험 결과는 Fig. 3-12, 13에 나타내었다.

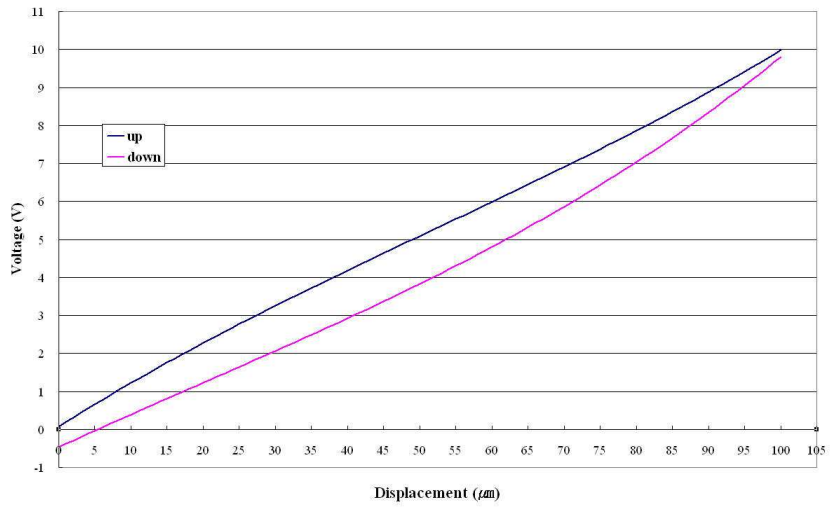


(a) Compensated Input Curve

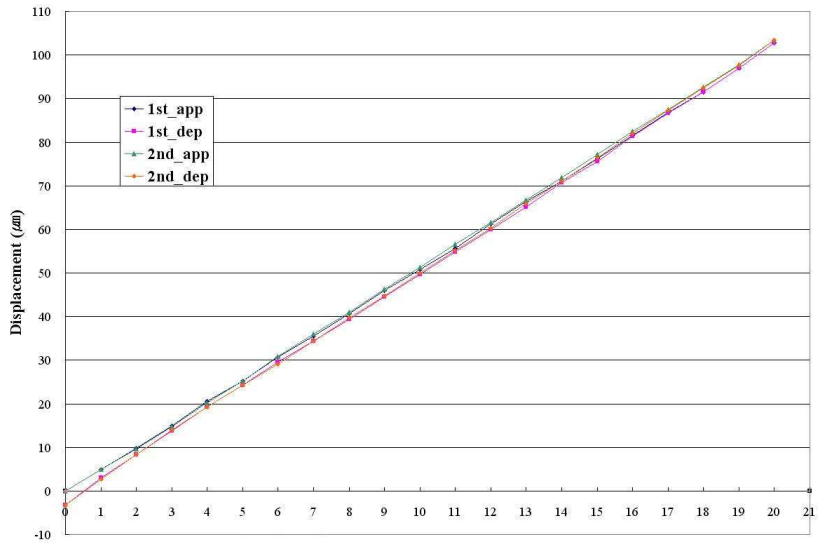


(b) Compensated Output Displacement

Fig. 3-11 Hysteresis Compensation in X-Axis

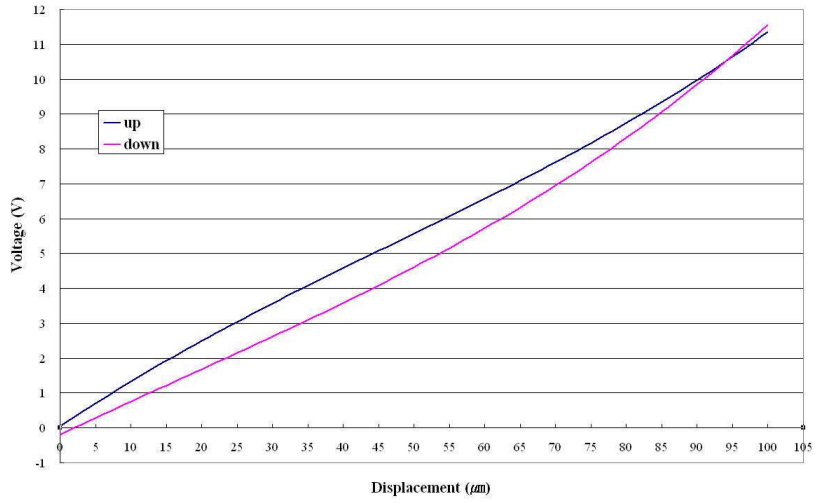


(a) Compensated Input Curve

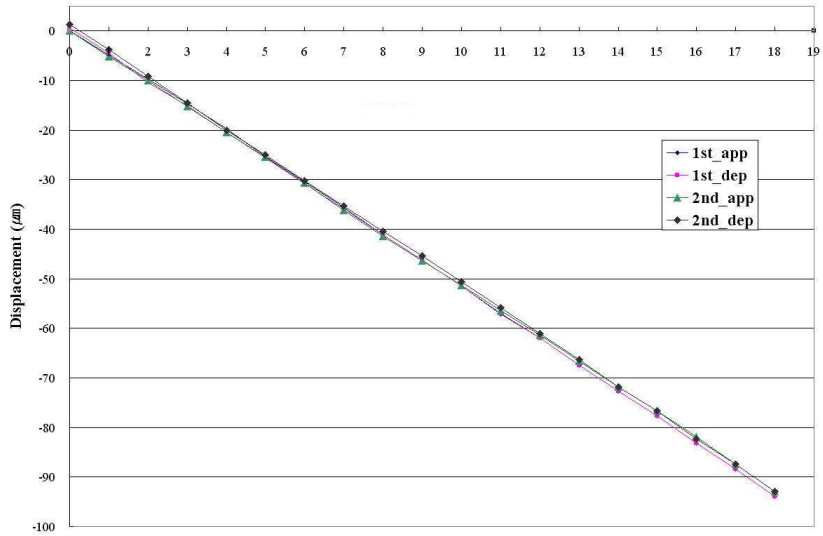


(b) Compensated Output Displacement

Fig. 3-12 Hysteresis Compensation in Y-Axis



(a) Compensated Input Curve



(b) Compensated Output Displacement

Fig. 3-13 Hysteresis Compensation in Z-Axis

제 4 장 광소자 정렬 특성 평가

본 논문에서는 초정밀 다축 스테이지를 이용하여 광소자 정렬 특성을 향상시키기 위해 광소자 정렬 알고리즘과 자동화 프로그램을 개발하고 이를 평가하기 위하여 1 채널의 신호를 8 채널로 분기하는 스플리터와 1 채널 광스택의 정렬 실험을 수행하였다. 광소자 정렬 특성을 실험하기 위한 실험장치의 구성도는 Fig. 4-1에 나타내었다. 광소자 정렬 알고리즘을 구현할 수 있는 스테이지 구동 신호를 메인 컨트롤러에서 스테이지로 입력하여 2 차원 변위를 발생시키고 스테이지가 구동한 궤적 좌표 정보는 정전용량형 센서를 통해 검출하고 검출한 데이터는 메인 컨트롤러에 저장된다. 스테이지가 구동한 각 좌표에 대응하는 광 신호는 광 파워미터에 의해 측정된다. 검출된 광 출력 신호는 dBm 으로 표시되며 위치 신호와 함께 메인 컨트롤러에 저장된다.

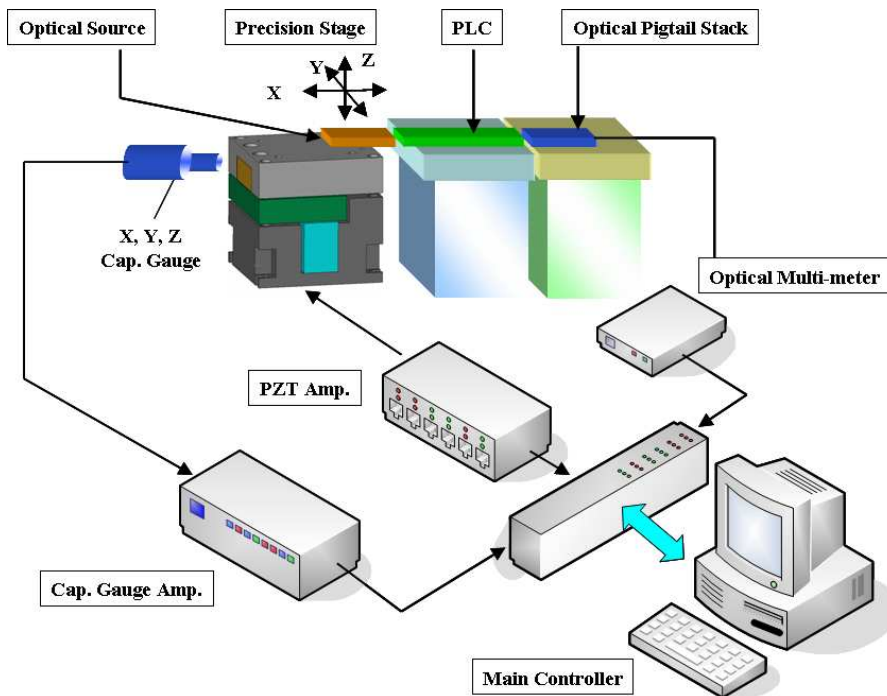


Fig. 4-1 Schematic Diagram of Optical Element Alignment System

제 1 절 광소자 정렬 특성

빛의 전송을 목적으로 하는 섬유 모양의 도파관을 광섬유(Optical Fiber)라고 하고, 광학섬유라고도 한다. 광섬유를 여러 가닥 묶어서 케이블로 만든 것을 광케이블이라고 하며, 그 사용이 늘어나고 있다. 광섬유는 합성수지를 재료로 하는 것도 있으나, 주로 투명도가 좋은 유리로 만들어진다. 광섬유는 보통 중앙의 코어(Core)라고 하는 부분을 주변에서 클래딩(Cladding)이 감싸고 있는 이중원기둥 모양을 하고 있다. 그 외부에는 충격으로부터 보호하기 위하여 합성수지 피복을 1 ~ 2 차례 입힌다. 보호피복을 제외한 전체 크기는 지름 수 백 μm 로 되고, 코어 부분의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 높게 되어 있어서, 빛이 코어 부분에 접촉되어 잘 빠져나가지 않고 진행할 수 있게 되어 있다. Fig. 4-2는 광섬유의 구조를 보여주고 있다.

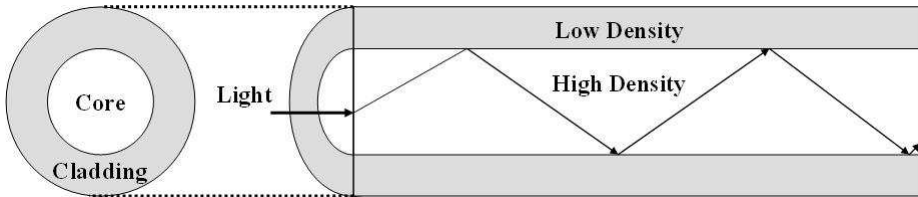


Fig. 4-2 Structure of Optical Fiber

광 부품 중 LD(Laser Diode)와 SMF(Single-Mode Fiber) 사이의 효율적인 광 커플링은 많은 적용에 있어서 커다란 관심의 대상이며, 광섬유 통신 시스템에 있어서 작은 손실의 커플링은 광 성능을 위해 필수적인 요건이다. 광 부품 및 모듈 패키징시에는 광축 위치 정렬이 서브마이크론(Submicron) 범위에서 제어되어야 한다. 일반 광섬유(Conventional SMF) 간의 결합은 10 μm 이내의 거리에서 90%의 결합효율(Coupling Efficiency)을 갖는다. 광섬유 결합 시 10 μm 이격 거리(Working Distance)는 광섬유와 광 부품 간에 부딪치는 경우가 발생하여 광섬유가 파손되거나 광 부품 정렬 단면에 스크래치를 유발하는 경우가 있어 정렬 조립 장치에서 X-Y-Z축 및 각도 조절을 자동화된 정렬 장비로 정렬시 특히 이격 거리가 짧을수록 문제시 된다. Fig. 4-3은 광섬유간의 거리에 따른 광섬유의 결합효율을 보여준다.

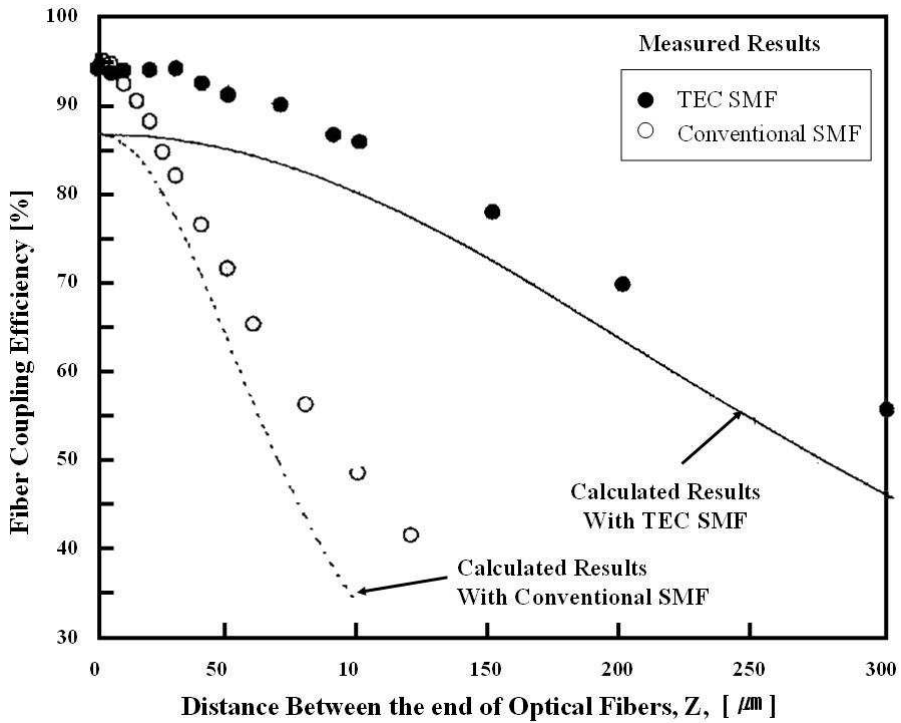


Fig. 4-3 Coupling Efficiency with Distance^[30]

광 결합 손실(Coupling Loss)은 하나의 광 장치에서 다른 쪽으로 결합시킬 때 나타나는 광 출력 손실로서 광원과 광섬유를 결합하는 경우와 광섬유 상호 간을 결합하는 경우의 손실로 구분할 수 있다. 광섬유의 접속시, 코어를 상호 정확히 맞추어 완전히 균일하게 접속하여야 한다. 이것이 완전치 않으면 보통 코어에서 나온 광의 일부가 다른 방향의 코어로 입사하지 못하고 클래드로 방사되어 손실이 된다. 접속 손실의 요인으로는 광섬유 코어径의 차이, 비굴절률의 차이 등 광섬유에 기인하는 것과, 축 어긋남, 사이의 틈, 단면의 경사, 단면의 불완전이 있는 접속 작업의 불량에 기인하는 것으로 분류할 수 있다. 축 어긋남 손실(Axial Misalignment Loss)은 접속하는 2 개의 광섬유가 동일한 중심축 상에 있지 않아서 발생하는 광 전력 손실로서 접합면에서 송신 측 광섬유와 수신 측 광섬유 코어가 상호 겹치지 못하는 면이 있기 때문에 발생한다. 결합 손실은 면적비로 나타나므로 코어의 반경을 a , 광섬유의 축 어긋남을 d 라 하고, 어긋남이 그리 크지 않아 $d/a < 0.2$ 라 가정할 때, 손실 L 은 식 (4-1)과 같이 나타난다.

$$L=1-\left(\frac{2d}{\pi a}\right) \quad (4-1)$$

광소자 정렬 특성 평가 실험에 사용된 소자는 Fig. 4-4에서와 같이 입력 1 채널 광소와 출력 8 채널 광소자를 정렬하였다. Fig. 4-5는 정렬 실험에 사용되는 광소자 스택을 정렬 위치로 접근시키고 있는 사진이다. 광소자 정렬을 위해 2 차원 영역 탐색을 수행하여 최대 광 신호를 찾은 후 다시 4 단계의 극점 탐색을 수행하여 보다 정밀한 최대 광 신호 출력 위치를 찾았다. 영역 탐색에서는 5 μm 스텝의 2 차원 좌표에 대한 광 신호 프로파일을 측정하였고 극점 탐색에서는 0.5 μm 스텝의 1 차원 프로파일을 측정하였다. 자동화 프로그램을 통한 광소자 정렬 특성 향상을 위한 성능 평가를 위해 수동 정렬을 하였을 경우와 자동화 프로그램을 사용하여 정렬한 경우를 비교하였다.

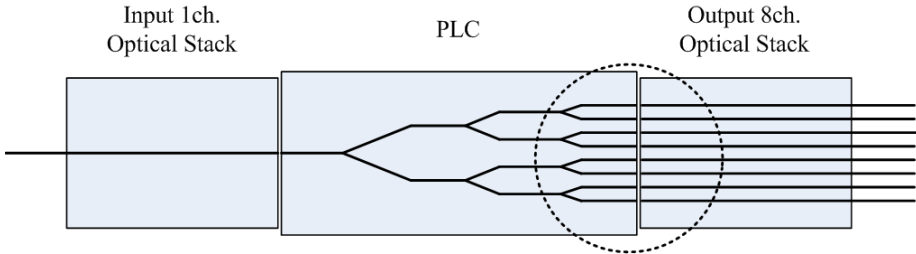


Fig. 4-4 Alignment between 1 Ch. Pigtail and 8 Ch. Output Part of PLC

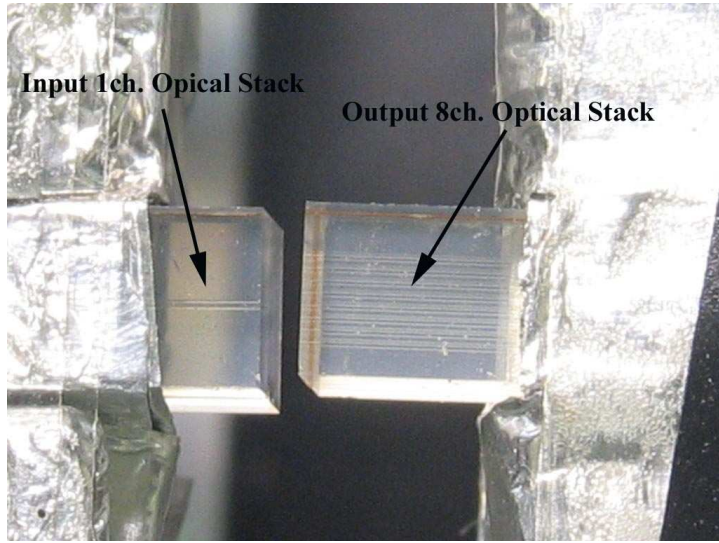


Fig. 4-5 Alignment between 1 Ch. Input and 8 Ch. Output Pigtail

제 2 절 수동 광소자 정렬

1. 영역 탐색

입력 1채널 광소자와 출력 8 채널 광소자의 정렬에서 영역 탐색을 할 때 사각나선 방식으로 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 의 영역에서 $5 \mu\text{m}$ 단위격자로 구성된 2 차원 광신호 프로파일을 측정하였다. 측정범위를 스테이지 전체 구동 범위보다 작게 잡은 이유는 광스택의 접촉면이 일정 각도로 기울어져 있기 때문에 Z축 방향으로 운동할 때 소자간에 간섭이 발생하여 파손우려가 있기 때문이다.

영역 탐색을 하여 2 차원좌표에 대한 광신호 프로파일을 구한 결과 최대 광파워 값은 좌표 $(y, z) = (45 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m})$ 에서 -5.77 dBm 이 검출되었다. Fig. 4-6에서 보는 것처럼 이 좌표를 중심으로 높은 광신호들이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이 좌표를 중심으로 극점 탐색을 수행하게 된다.

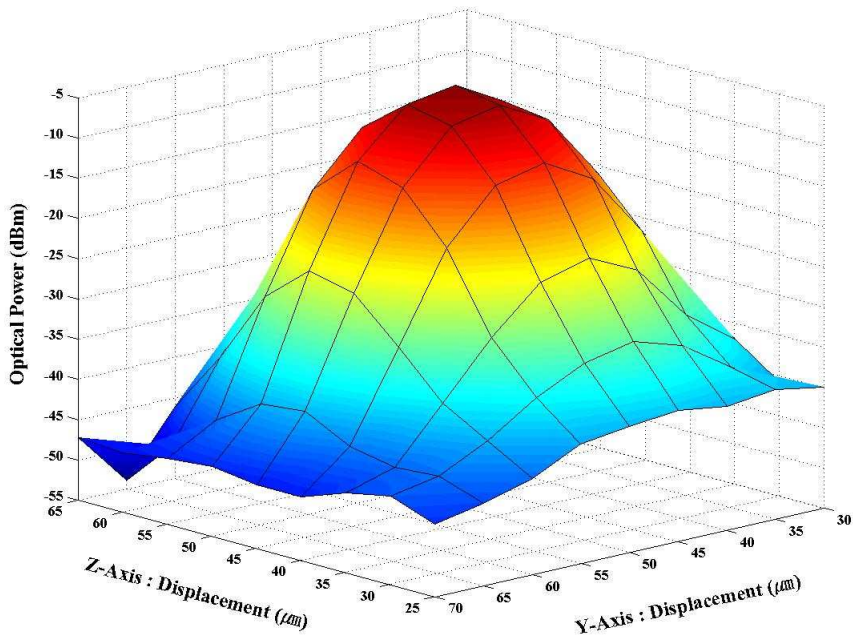


Fig. 4-6 Field Search Alignment between 1 Ch. and 8 Ch. Optical Fiber Stack

2. 극점 탐색

최대 광신호가 검출되는 보다 정밀한 좌표를 찾고자 영역 탐색을 한 결과 얻어진 좌표 $(y, z) = (45 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m})$ 를 중심으로 극점 탐색을 하였다. 극점 탐색은 4 단계로 이루어지는데 $(45 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m})$ 를 출발점으로 하여 Y축과 Z축 1 차원 광신호 프로파일을 측정하였다.

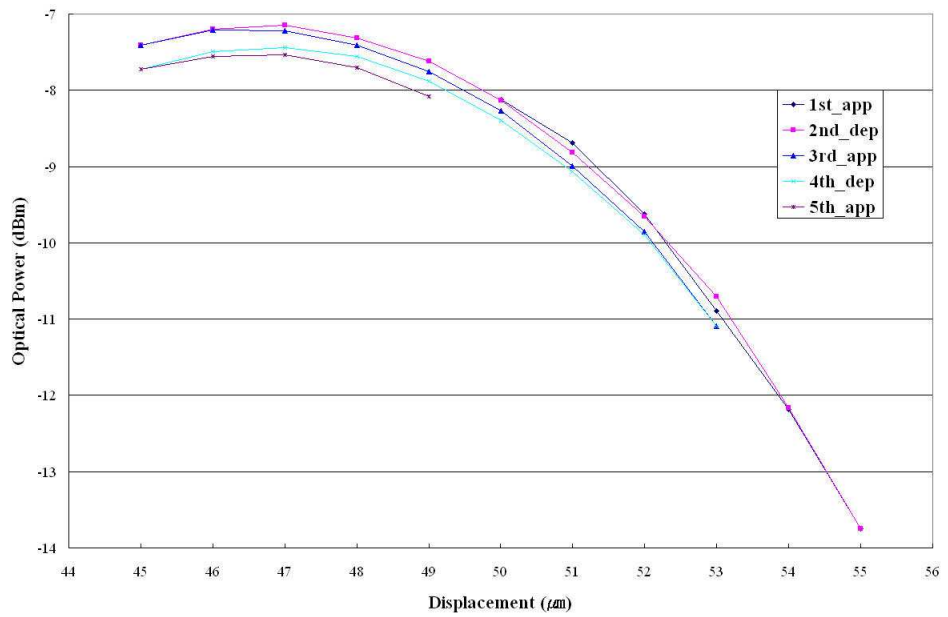
1 단계 극점 탐색은 Y축에서 $1 \mu\text{m}$ 스텝으로 전진하여 광신호 프로파일의 변곡점이 발생하는 $55 \mu\text{m}$ 지점까지 이동한 후, $45 \mu\text{m}$ 지점까지 후진하여 광신호 프로파일을 측정하였다. 그 후 다시 $53 \mu\text{m}$ 까지 전진하고, $45 \mu\text{m}$ 까지 후진한 다음 마지막으로 $49 \mu\text{m}$ 까지 전진하여 최대 광신호가 검출되는 위치를 찾았다. 1 단계 극점 탐색 결과 Y좌표가 $47 \mu\text{m}$ 인 점에서 최대 광신호가 검출됨을 결정할 수 있었다. 따라서 1단계 탐색 결과 최대 광신호 검출 좌표는 $(47 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m})$ 로 수정되었다. Fig. 4-7(a)는 1 단계 극점 탐색 결과로 얻은 Y축 1 차원 광신호 프로파일을 나타낸 것이다.

2 단계 극점 탐색은 Fig. 4-7(b)의 결과에서 보는 바와 같이 $1 \mu\text{m}$ 단위로 전·후진하여 최대 신호가 검출되는 점을 찾는다. 운동 경로는 $45 \mu\text{m}$ 에서 출발하여 변곡점을 통과하여 신호가 감소하는 $51 \mu\text{m}$ 까지 이동하였다. 그 후 변곡점 $50 \mu\text{m}$ 지점을 통과하여 $47 \mu\text{m}$ 지점까지 이동하였다. 그리고 $52 \mu\text{m}$ 까지 전진한 다음 다시 후진하여 $49 \mu\text{m}$ 까지 이동하면서 프로파일을 측정하였다. 2 단계 탐색 결과 최대 광파워가 출력되는 지점의 Z좌표는 $50 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있었다.

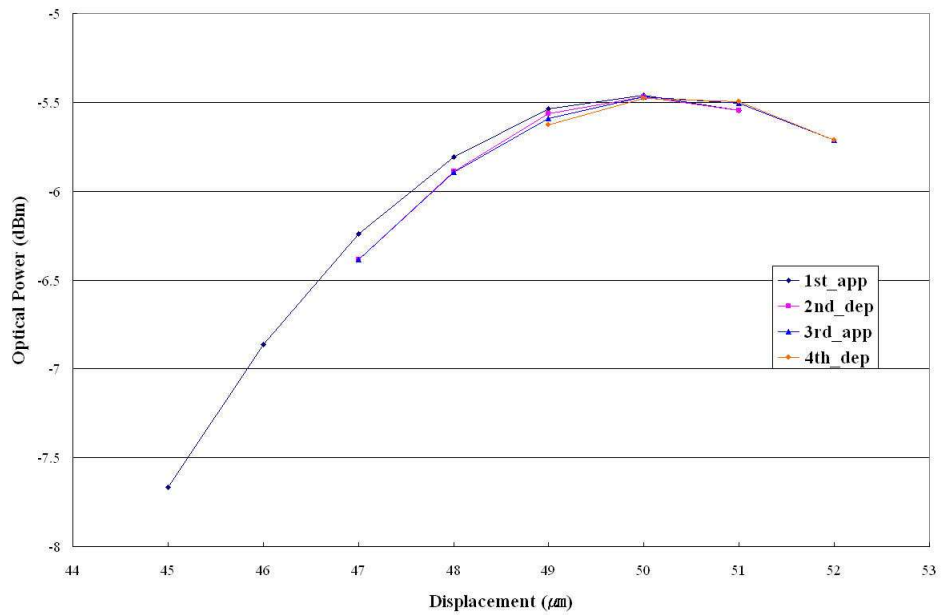
3 단계와 4 단계 극점 탐색에서는 1, 2 단계에서 좌표를 중심으로 보다 정밀한 좌표를 찾기 위해 $0.5 \mu\text{m}$ 스텝으로 이동하면서 광신호 출력을 측정하였다. 3 단계 극점 탐색에 대한 결과는 Fig. 4-7(c)에 나타내었다. 출발점은 $48.5 \mu\text{m}$ 이고 이 위치에서 $0.5 \mu\text{m}$ 스텝으로 변곡점을 지나 $51.5 \mu\text{m}$ 까지 전진한 후 $48.5 \mu\text{m} \rightarrow 52 \mu\text{m} \rightarrow 49.5 \mu\text{m} \rightarrow 51.5 \mu\text{m}$ 의 전·후진을 반복하면서 광파워 프로파일을 측정하였다. 측정결과 Z축 좌표의 최종 위치를 결정할 수 있었으며 그 때의 Z축 좌표 값은 $51 \mu\text{m}$ 였다.

4 단계 극점 탐색에 대한 광신호 프로파일은 Fig. 4-7(d)에 나타내었다. 출발 위치는 1 단계에서 얻은 $47 \mu\text{m}$ 이고 $0.5 \mu\text{m}$ 스텝으로 $49.5 \mu\text{m}$ 까지 전진한 후, 다시 후진하여 $45 \mu\text{m}$ 까지 광신호 프로파일을 구하고, 다시 $48 \mu\text{m}$ 까지 전진하면서 광파워 프로파일을 측정하였다. 측정결과 Y좌표의 최종 위치는 $47 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다.

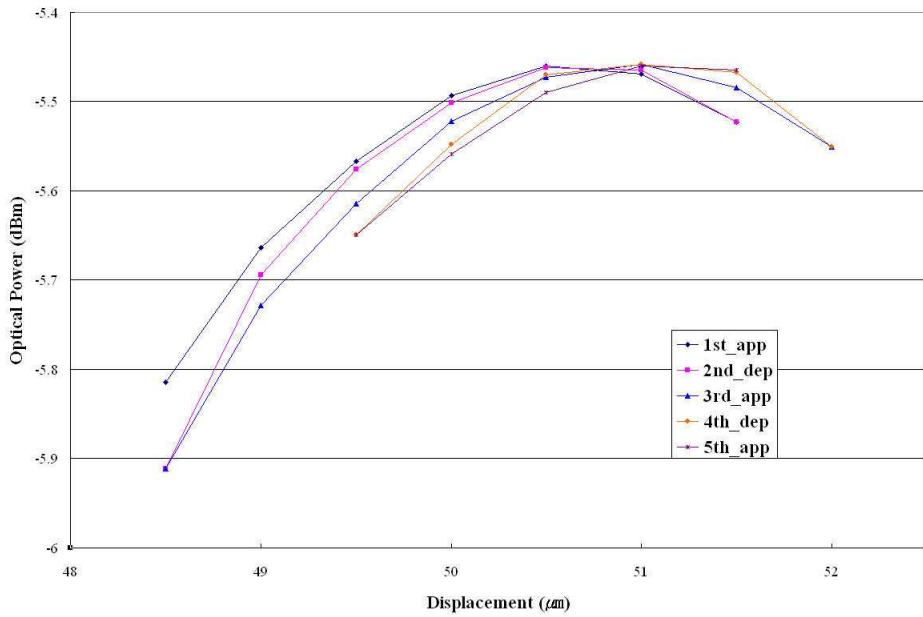
4 단계의 극점 탐색을 마친 후에 얻은 최종 정렬 위치 좌표는 $(y, z) = (47 \mu\text{m}, 51 \mu\text{m})$ 으로 판명되었고 그 때의 광파워 출력은 -5.469 dBm 이었다. 이는 영역 탐색에서 얻은 -5.77 dBm 보다 0.301 dBm 이 높은 값으로 보다 더 정밀한 정렬 위치임을 확인하였다.



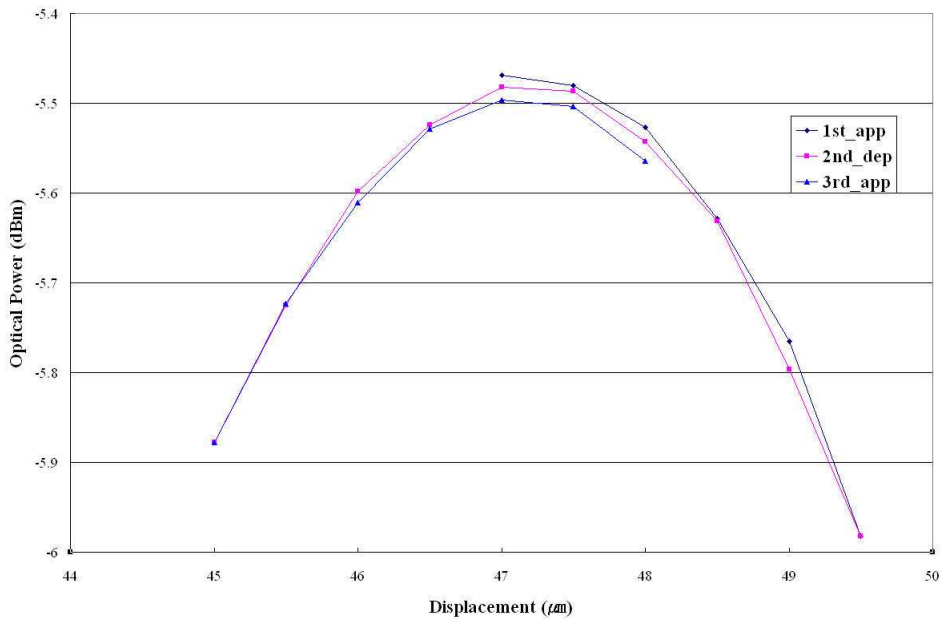
(a) 1st Peak Search with 1 μm Step in Y Axis



(b) 2nd Peak Search with 1 μm Step in Z Axis



(c) 3rd Peak Search with 0.5 μm Step in Z Axis



(d) 4th Peak Search with 0.5 μm Step in Y Axis

Fig. 4-7 Peak Search Alignment between 1 Ch. and 8 Ch. Optical Stack

제 3 절 자동화 프로그램에 의한 광소자 정렬

1. 영역 탐색 탭

광소자 정렬 자동화 프로그램을 이용하여 입력 1 채널 광소자와 출력 8 채널 광소자의 정렬실험을 하였다. 사각나선 방식으로 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 의 영역에서 $5\ \mu\text{m}$ 단위 격자로 구성된 2차원 광신호 프로파일을 측정하였다. 사각나선형 궤적 구현을 위한 아날로그 출력 신호는 Search Range 파라미터를 선택함에 따라 미리 프로그램되어진 신호를 출력하게 된다. 초정밀 스테이지의 Y-Z 평면 위치 정보와 광파워 값은 Y & Z axis Cap.gauge Acquisition Data 창과 Optical Powermeter Acquisition Data 창을 통해 실시간으로 표시해 준다. 영역 탐색 탭에서 장치의 설정은 Table 4-1과 같이 설정하였다. Fig. 4-8은 영역 탐색 탭의 실행 결과를 보여준다. 탐색 결과 최대 광파워 값은 $-3.8246\ \text{dBm}$ 을 얻었다.

Table 4-1 Device Configurations of Optical Alignment System

	Board	Device	Channel	Sampling
AO Board	PCI-6733	1	0,1	100 scans/sec
AI Board	PCI-6031E	2	0,1	100 scans/sec
GPIB	PCI-GPIB	GPIB		10 scans/sec
Search Range	$40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$			

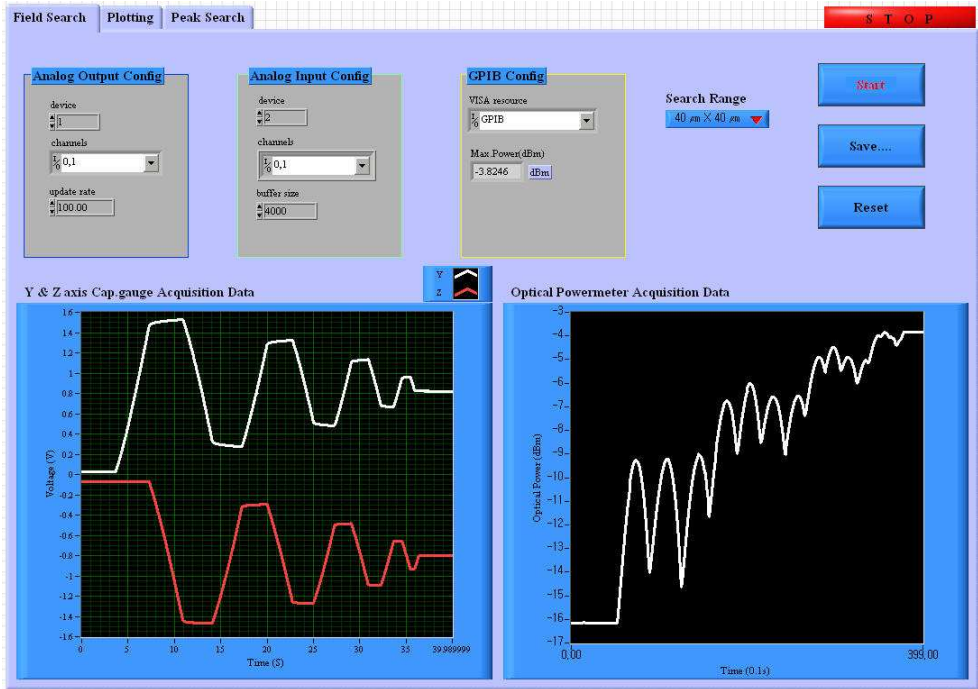


Fig. 4-8 Result of Field Search Tab

2. 플로팅 탭

플로팅 탭은 영역 탐색 탭에서 획득한 데이터를 재배열하여 도식화하고 최대 광신호 출력 위치와 광파워 값을 검출하여 스테이지를 이동시키는 역할을 수행한다. Fig. 4-9는 플로팅 탭의 실행 결과를 나타내었다. Plotting 버튼을 누르면 정전용량형 센서 이득 값을 기준으로 영역 탐색에서 획득한 정전용량형 센서의 전압 값을 변위로 환산하여 초정밀 스테이지가 실제 구동한 Y-Z 평면을 YZ-axis Rectangular Spiral Path 창에 표시해 준다. 스테이지의 각 좌표에 대응하는 광파워 값을 매칭하여 3D Curve 창에 표시하여 탐색 영역의 결과를 쉽게 알아볼 수 있도록 하였고, 최대 광신호 출력 좌표와 광파워 값을 F.S Result 항을 통하여 표시하였다. 실행 결과 좌표 $(y, z) = (19.9127 \mu\text{m}, 18.2953 \mu\text{m})$ 에서 -3.8246 dBm 이 검출되었다. Fig. 4-10은 정전용량형 센서 검출 데이터 변환 과정으로 (a)는 영역 탐색 탭에서 획득한 정전용량형 센서의 전압을 보여주고, (b)는 정전용량형 센서 이득 값을 기준으로 변위 값으로 변환되어진 Y-Z 평면을 나타내고 있다. Fig. 4-11은 초정밀 스테이지의 좌표에 광파워 값을 매칭시킨 3D 그래프이다.

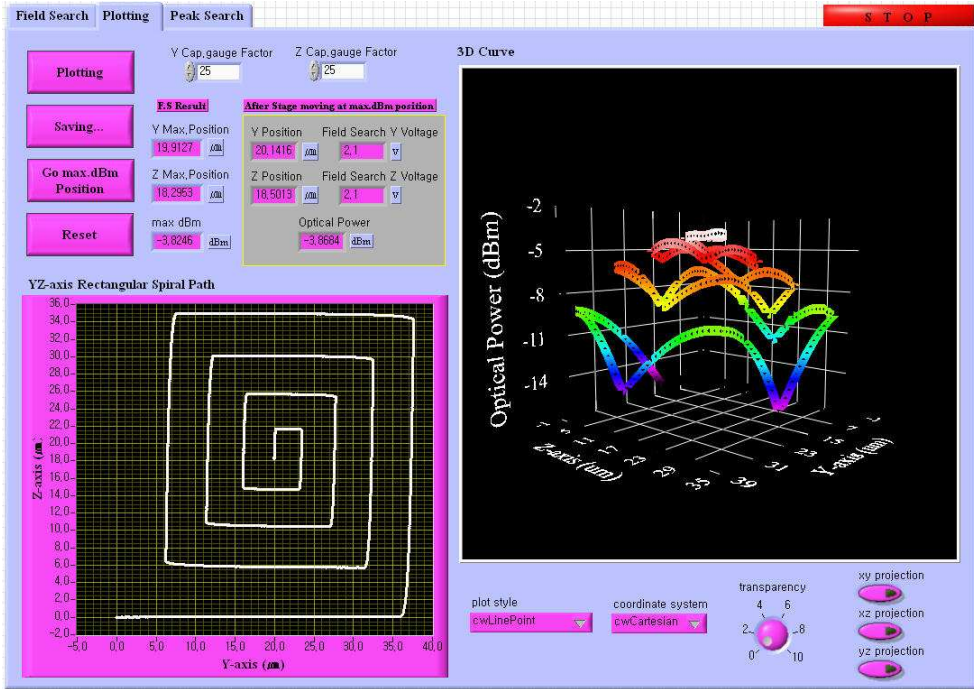
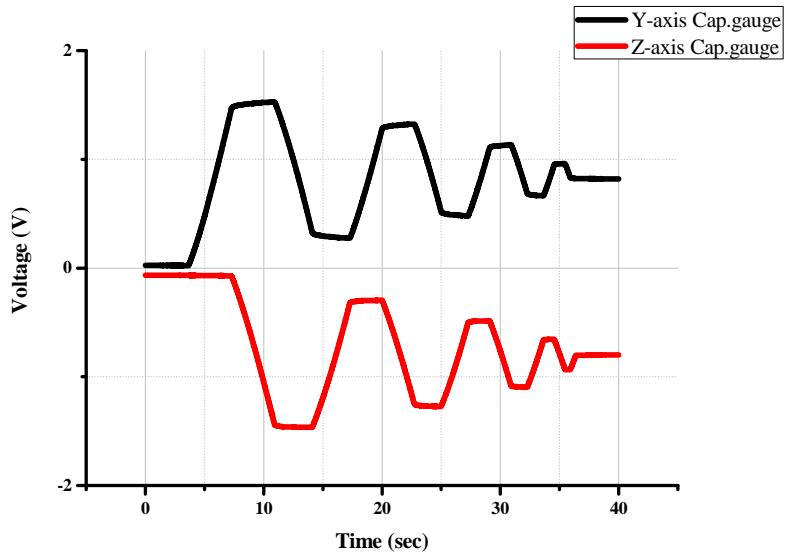
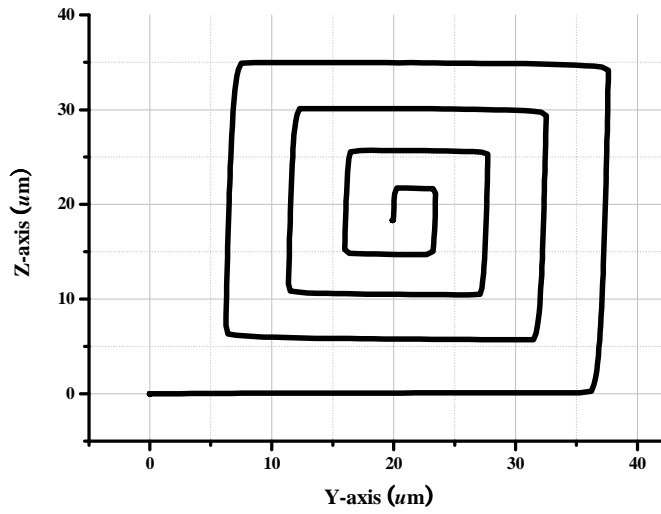


Fig. 4-9 Result of Plotting Tab



(a) Capacitance Gauge Acquisition Voltage in Field Search



(b) Y-Z Plane

Fig. 4-10 Rearrange Process of Capacitance Gauge Acquisition Data

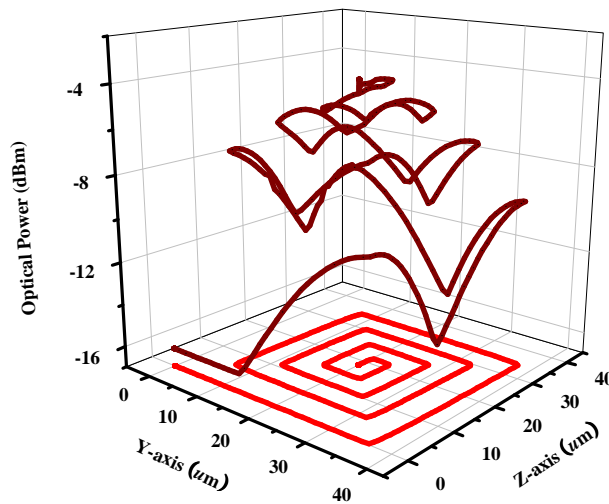


Fig. 4-11 3D Graph of Line-Point Style for Matching between Displacement and Optical Power

영역 탐색을 마친 후 스테이지의 좌표는 $(y, z) = (2 \text{ V}, 2 \text{ V}) = (19.8975 \text{ } \mu\text{m}, 18.2953 \text{ } \mu\text{m})$ 이다. 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 이동하기 위해 현재 스테이지의 위치와 최대 광신호 출력 위치를 비교하여 50 mV 의 스텝 신호를 주어 최대 광신호 출력 위치에서 스테이지가 정지하도록 하였다. 그 결과 $(y, z) = (20.1416 \text{ } \mu\text{m}, 18.5013 \text{ } \mu\text{m})$ 에서 -3.8684 dBm 을 얻을 수 있었다. 최대 광신호 출력 좌표 $(y, z) = (19.9127 \text{ } \mu\text{m}, 18.2953 \text{ } \mu\text{m})$ 와 비교했을 때 $(\Delta y, \Delta z) = (0.2289 \text{ } \mu\text{m}, 0.2060 \text{ } \mu\text{m})$ 의 차이를 보였으며 0.0438 dBm 낮은 광파워 값에서 스테이지가 정지하였다. 이는 50 mV 간격으로 스테이지를 구동하였으므로 $\pm 0.5 \text{ } \mu\text{m}$ 이내의 오차는 프로그래밍 과정에서 허용한 오차 범위이다.

3. 극점 탐색 탭

극점 탐색 탭은 영역 탐색에서 구한 최대 광신호 출력 위치를 기준으로 힐클라임 방식으로 전 · 후진하는 궤적을 따라 4 단계의 극점 탐색을 통해 1 차원 프로파일을 획득하여 최종 광소자 정렬 위치를 찾게 된다. 영역 탐색을 통해 구한 최대 광신호 출력 위치로 초정밀 스테이지를 옮긴 좌표 $(y, z) = (20.1416 \text{ } \mu\text{m}, 18.5013 \text{ } \mu\text{m})$ 를 기준으로 1 단계에서 1 μm 간격으로 Y축을 탐색하여 얻은 데이터를 기준으로 최대 광신호가 출력되는 위치로 스테이지를 옮기고, 2 단계에서 1 μm 간격으로 Z축을 탐색하여 최대 광신호가 출력되는 위치로 스테이지를 옮긴다. 3 단계에서는 다시 Z축을 0.5 μm 간격으로 탐색하여 Z축 최종 광신호 출력 위치를 찾는다. 4 단계에서는 Y축을 0.5 μm 간격으로 탐색하여 Y축 최종 광소자 정렬 위치를 찾는다. 극점 탐색 결과 좌표 $(y, z) = (19.3253 \text{ } \mu\text{m}, 16.983 \text{ } \mu\text{m})$ 에서 -3.7794 dBm 으로 영역 탐색에서 구한 -3.8246 dBm 보다 0.0452 dBm 높은 광파워 값에서 정렬이 되었다. 최대 광신호 출력 위치가 5 μm 간격의 사각나선형 궤적에 가깝게 위치한 경우 위 실험의 경우와 같이 광파워 값의 변화가 적게 나타났고, 영역 탐색의 사각나선형 궤적의 5 μm 간격 사이에 최대 광신호가 나타날 경우에는 차이가 좀 더 크게 나타났다. Fig. 4-12는 극점 탐색 탭의 실행 결과를 나타내었다.

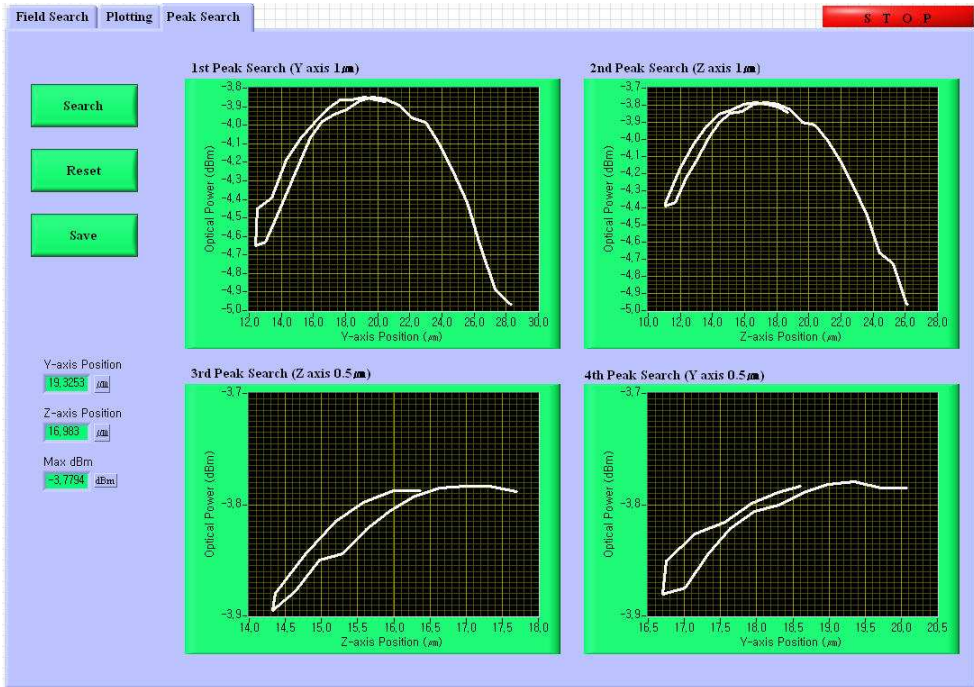


Fig. 4-12 Result of Peak Search Tab

제 5 장 결 론

본 논문에서는 광소자 정렬 특성을 향상시키기 위해서 광소자 정렬 장치에 초정밀 다축 스테이지를 적용하였다. 초정밀 다축 스테이지를 개발하기 위하여 구동 메커니즘에 관해 연구하였다. 유한요소해석을 통해 얻은 데이터를 기준으로 초정밀 다축스테이지의 분해능 및 위치추적 성능을 평가하였다. 또한, 영역 탐색과 극점 탐색 알고리즘을 개발하고 자동화할 수 있는 프로그램을 개발하여 광소자 정렬 실험을 하였다.

1. 초정밀 다축 스테이지의 메커니즘 연구

초정밀 다축 스테이지의 구동부는 압전 액츄에이터와 액츄에이터에서 발생된 변위를 가이드하는 탄성힌지 가이드로 구성된다. 본 논문에서는 액츄에이터의 발생력에 따른 탄성힌지의 변형 그리고 탄성힌지의 변형에 따른 발생 응력과의 관계를 유한요소해석 방법을 이용하여 규명하였다. 해석 결과에서 얻은 데이터를 바탕으로 액츄에이터의 사양을 결정하였고 설계된 플렉서의 응력집중에 대한 안정성을 규명하였다.

2. 초정밀 다축 스테이지 제작 및 성능평가

구동부 메커니즘 연구 결과를 토대로 초정밀 다축 스테이지를 제작하였고 분해능 및 이송능력을 평가하였다. 측정결과 X축 $97\ \mu\text{m}$, Y축 $103\ \mu\text{m}$, 그리고 Z축 $92\ \mu\text{m}$ 로 조동 정렬장치에 장착했을 때 뿐만 아니라 독립적으로 광정렬에 사용할 때도 충분한 운동 범위를 가짐을 알 수 있었다. 분해능은 약 $5\ \text{nm}$ 로 측정되었으며 이 결과로 광정렬에 요구되는 정밀도가 $0.6\sim 1\ \mu\text{m}$ 임을 고려해볼 때 본 논문에서 연구된 초정밀 다축 스테이지의 분해능은 정렬에 필요한 충분한 분해능을 가짐을 알 수 있었다. 또한 역 히스테리시스 모델링을 통해 압전 액츄에이터가 갖는 히스테리시스를 보상할 수 있었다.

3. 광소자 정렬 알고리즘 개발

광소자를 정렬하기 위하여 영역 탐색과 극점 탐색을 수행하였다. 영역 탐색은 사각 나선방식을 이용하여 정렬범위의 평면좌표와 대응하는 광신호를 측정하였다. 극점 탐색에서는 영역 탐색에서 측정된 최대 광파워가 출력되는 위치에서 전·후진방식 및 힐클라임 방식을 이용하여 영역 탐색에서 보다 정밀한 위치로 정렬하였다. 실험 결과 영역 탐색에서는 5 μm 스텝의 2 차원 광신호 프로파일을 얻을 수 있었고 극점 탐색에서는 0.5 μm 스텝의 1 차원 프로파일을 측정하여 최대 광파워 출력 위치를 찾을 수 있었다.

4. 광소자 정렬 자동화 프로그램 개발

초정밀 다축 스테이지를 이용한 광소자 정렬 장치의 정렬 특성을 평가하기 위하여 1 채널의 신호를 8 채널로 분기하는 스플리터와 1 채널 광스택의 정렬을 수행하였다. 실험 결과 영역 탐색 과정은 최대 광신호가 출력되는 위치를 대략적으로 파악하기 위한 과정으로 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 옮기면서 영역 탐색에서 구한 위치로 정확하게 이동하지 못했지만, 이 값은 프로그래밍 과정에서 허용한 오차이며 극점 탐색을 통해 보상 및 더 높은 광파워 값을 얻을 수 있었다. 또한 광소자 정렬공정의 중요한 지표가 되는 광정렬에 소요되는 시간은 영역 탐색 결과 최대 광신호가 출력되는 위치가 Y-Z 평면의 중앙에서 얼마나 떨어진 위치에 형성되는지에 따라 약간의 차이가 있었지만, 영역 탐색에서 40 초, 최대 광신호 출력 위치로 스테이지를 옮기는 과정에서 약 1 분, 극점 탐색에서 2 분미만으로 약 4 분의 광소자 정렬 시간이 소요되었다.

참 고 문 헌

1. 한창수, 2002, "나노위치결정기술," 기계와 기술, Vol. 14, No. 1, pp. 54-59.
2. Cinato, P. and Young, K. C., 1993, "Optical Interconnections within Multichip Modules," Optical Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 852-860.
3. Matthews, M. R., Macdonald, B. M., and Preston, K. R., 1990, "Optical Components - The New Challenge in Packaging," IEEE Trans. on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 798-806.
4. Jang, J. H., Shin, S. K., Kim, H., Lee, K. S., Park, K. J. and Chung, Y. C., 1997, "A Cold-Start WDM System Using a Synchronized Etalon Filter," IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 9, NO. 3, pp.383-385, MARCH.
5. Liu, K. H., Wilson, B. J. and Wei, J. H., 2000, "A Scheduling Application for WDM Networks," IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 18, NO. 10.
6. Chung, Y. C., Clark, L. and Fan, C., 1995, "Standardization of Optical Frequencies for WDM Networking Applications," Proc. SPIE, vol. 2378, pp. 230-235, Feb.
7. 심보성, 김재국, 장원석, 2002, "UV 레이저를 이용한 직접 묘화기술 개발," 제 1 회 고기능 초미세 마이크로부품 기술개발 Workshop, pp. 1-5.
8. Chung, Y. C., Jeong, J. and Chung, L. S., 1994, "Aging-induced wavelength shifts in 1.5- μ m DFB lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, pp.792-795, June.
9. Vodhanel, R. S., Krain, M., Wagner, R. E. and Sessa, W. B., 1994, "Long-term wavelength drift of the order of 0.01 nm/yr for 15 free-running DFB laser modules," presented at OFC 94, San Jose, CA, Feb.

10. 양순호, 2002, "다채널 광통신소자 정렬 시스템 개발," 중기거점 중간보고서, 산업자원부.
11. 임정운, 2005, "광모듈용 고정밀 플립칩 본딩 기술," 광주광산업 기술인력양성 사업.
12. 이찬홍, 황주호, 2002, "초정밀 위치결정 및 응용," 한국공작기계학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 55-59.
13. 박희재, 김종원, 이준식, 이정호, 최두선, 2002, "미세 설계를 의한 차원 형상 측정 장치 및 Manipulator 경계 추출 알고리즘 개발," 고기능 초미세 광 열유체 마이크로부품 기술 개발 Workshop.
14. 정상화, 2002, "초정밀 다축 위치제어장치 개발 및 보정에 관한 연구," 한국정밀공학회 2002년 추계학술대회논문집, pp. 455-458.
15. 과학기술부 정책연구과, 2002, "국가기술지도- 비전IV 기반주력산업 가치창출," 과학기술부, Vol. 2 pp.176-178.
16. Ro, P. I., Shim, W. B. and Jeong, S., 2000, "Robust Friction Compensation for Submicron Positioning and Tracking for a Ballscrew-driven Slide System, ASPE, Vol. 24, No. 2, pp.160-173.
17. Holmes, M. L., Hocken, R. J. and Trumper, D. L., 1997, "A Long-Range Scanning Stage (The LORS Project)," Proceedings of 1997 ASPE Annual Meeting, October 7-9.
18. BALDOR, Linear Motion Catalog, pp.49-53, BALDOR Motors and Drives, 2003
19. Chen, Q., Yao, D. J., Kim, C. J. and Carman, G. P., 1999, "Mesoscale Actuator Device: Micro Interlocking Mechanism to Transfer Macro Load," Sensors and Actuators, Vol. 73, pp. 30-36.
20. Mobarhan, K. S., Hagenbuechle, M. and Heyler, R. 2002, "Automated Assembly of Planar Waveguide Devices," Application Note of Automated of Planar Waveguide Devices, pp.1-9, Newport Application.
21. PI-Polytec, 2001, MicroPositioning, NanoPositioning, NanoAutomation, Solution for Cutting-Edge Technologies, PI-Polytec.

22. Ragona, S., 2002, "Yield-Enhancing Solutions for Photonics Manufacturing Workstations," EXFO Application Note 068, pp. 1-2.
23. Moritex, 2003, "Automated Optical Alignment/Focal Brochure."
24. AEROTECH, 2003, "Automation Solutions for the Fiberoptics Industry."
25. SURUGA SEIKI Optronics Catalog, 2003.
26. Mobarhan, K. S., Hagenbuechle, M. and Heyler, R., 2002, "Fiber to Waveguide Alignment Algorithm," Application Note 7, Newport.
27. EXFO Brochure : Nanoalignment Software for FR-3000 NanoRobot System.
28. Ragona, S., 2002, "Automated Pivot Point Location for Optical Component Manufacturing," Burleigh Application Note No. 65.
29. 김정용, 2001, "역 히스테리시스 모델과 신경회로망을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어," 울산대학교 석사학위논문, pp. 8-10.
30. 박찬식, 2003, "Development of TEC lensed ribbon fiber for optical devices packaging," 정보통신 산업기술개발사업 최종연구개발결과보고서, pp. 69-70.