

광소자 정렬용 초정밀 다축 위치제어장치 개발



정상화

조선대학교 기계공학과

1. 서론

광통신 시스템은 광섬유의 저손실성과 광대역성을 충분히 활용할 수 있는 통신방법으로 기간 전송망으로부터 도입되기 시작하여 기간 중계의 대부분이 광통신화 되어 있고 국내에서도 현재 2.5 Gbps까지의 전송 방식이 상용화 되어 있다. 초고속 광통신이 발전함에 따라 초고속 광통신 시스템의 핵심 부품인 평면도파로형 분배기 및 커플러, 파장분할다중화소자 등 광통신소자 부품들의 개발이 활발히 진행중이다. 특히 광통신소자 제조과정상 소자와 광섬유 사이의 광학적인 정렬 공정은 부품 성능 및 생산성 향상, 그리고 비용절감을 위한 가장 핵심적인 문제로 대두되고 있다. 현재 미국과 일본의 회사에서 광도파로 소자 정렬 시스템이 생산되고 있는데 스테이지 구동모터로 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 고니어미터를 이용하여 각변위를 발생시키는 구조이다.

최근 광소자의 채널수가 증가함에 따라 광소자간의 정밀한 정렬이 요구되고 있어 반도체기술과 초정밀 렌즈 금형 가공 및 검사에만 주로 사용되었던 초정밀 스테이지 기술이 광통신 소자의 자동정렬 공정에 사용되고 있다.

2. 연구내용

2.1 시스템 구성

광소자 정렬용 극초정밀 다축 위치제어장치는 Fig. 1에 서와 같이 극초정밀 스테이지부와 센서부 그리고 제어부로 구성된다. 극초정밀 스테이지는 압전액츄에이터로 구동되고 플렉서로 가이드 되는 메커니즘으로 3자유도(X-Y-Z) 병진운동을 수행한다. Table 1은 개발된 스테이지의 사양을 나타낸 것이다. 센서부는 스테이지에서 발생하는 변위

Table 1 Specification Ultra Fine Positioning Stage

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

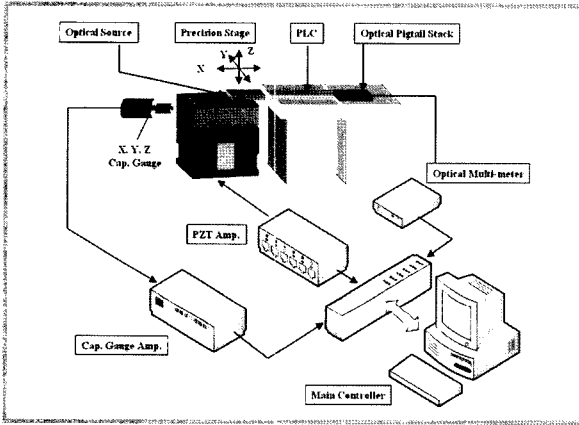


Fig. 1 Schematic Diagram of Ultra-Precision Optical Alignment System

를 측정하는 정전용량형 센서와 정렬이 되었을 때 광소자에서 검출되는 신호를 측정하는 광파워미터로 구성된다. 제어부는 압전액츄에이터 앰프에 제어신호를 입력하고 정전용량형 센서와 광파워미터의 광신호 출력을 나타내는 역할을 한다.

2.2 스테이지 메커니즘 해석

2.2.1 Flexure 응력해석

극초정밀 스테이지의 구동메커니즘은 압전액츄에이터 및 플렉서구조를 사용하였다. 플렉서는 재료의 탄성변형을 이용하여 압전액츄에이터의 변위를 확대하고 가이드하여 선형적인 운동을 유도한다. 그러므로 압전액츄에이터에서 변위가 발생하였을 때 플렉서의 응력 분포 및 발생 응력이 얼마나 되는지 그리고 발생력이 작용하였을 때 변위 출력단에서 변위가 어느 정도 발생하는지를 해석하여야 한다. 압전액츄에이터의 작용력과 플렉서의 발생변위 관계, 작용변위와 응력발생과의 관계를 유한요소 해석을 이용하여 파

Table 2 Maximum Stress and Deformation according to Applied Forces

Axis	Applied Force (N)	Applied Face	Max. Stress (Von Mises) (N/m ²)	Max. Stress Node	Max. Deformation (μm)	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	10054	101.7	79593

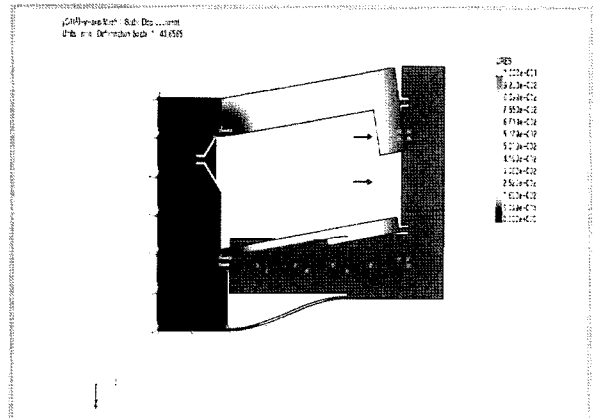


Fig. 2 Displacement of Y-Axis Flexure according to Actuating Force

악하였고 그 결과들을 토대로 플렉서 설계 인자들을 결정하였다.

(1) 작용력에 대한 발생변위

압전액츄에이터에서 입력되는 힘과 변위출력단에서 발생하는 변위와의 관계를 파악하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 작용력에 대한 플렉서의 응력분포 및 변위에 대한 결과는 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 100μm의 변위가 발생되기 위해서는 최소 X축은 16 N, Y축은 21 N, Z축은 23 N의 작용력이 발생하는 압전액츄에이터를 설정해야 함을 알 수 있었다.

(2) 발생변위에 따른 응력분포

출력단에서 발생하는 변위에 대한 플렉서의 응력분포를 알아보기 위한 해석 결과는 Fig. 3과 Table 3에 나타냈다. 플렉서의 운동단에서 100 μm의 변위가 발생할 때 각축 플렉서에서 발생하는 응력분포 및 소성변형 여부를 파악하였

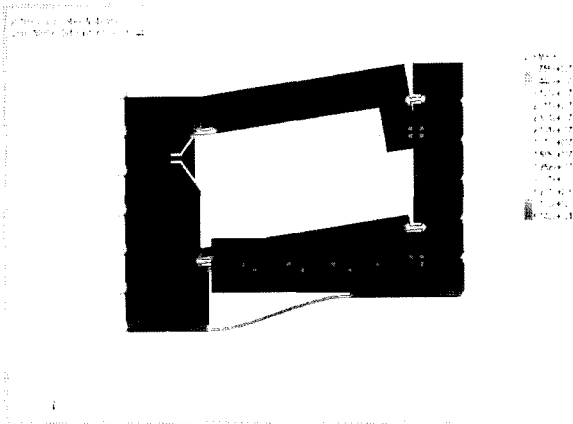


Fig. 3 Stress Distribution according to Input Displacement

Table 3 Maximum Stress according to Applied Displacement

Axis	Applied Displacement [μm]	Applied Face	Max. Stress (Von Mises) [N/m ²]	Max. Stress Node
X	100	2186	3.8532E+7	3472
Y	100	2018	3.7563E+7	73264
Z	100	1427	3.7663E+7	79811

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

다. 그 결과 X, Y, Z축 플렉서는 소성변형이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

2.3.2 스테이지의 진동해석

외부진동 및 장치 내의 액츄에이터에 대한 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악하기 위하여 극초정밀 다축 위치제어 장치의 진동해석을 수행하였다. 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.

3. 스테이지 제작 및 성능평가

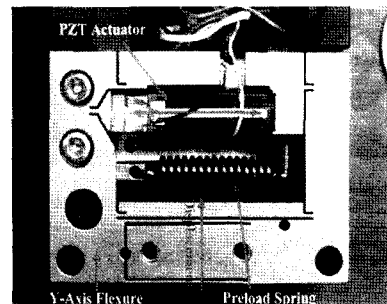
3.1 스테이지 제작

유한요소 해석에 의해 검증된 설계 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치제어 장치를 제작하였다. 다축 위치제어 장치의 구성요소는 Fig. 4에서 보는 것처럼 베이스, 압전 액츄에이터, X, Y, Z 축 플렉서 및 이송단으로 이루어진다. 각축들은 Z축을 기반으로 하여 Y축 그리고 X축 순서로 직렬로 연결하였다. 그리고 광소자가 부착되는 이송단은 X축과 연결되어 있어 3자유도 합성변위를 발생시킨다. Fig. 5(a)는 Y축 이송유닛을 나타낸 것이고 (b)는 조립된 초정밀 다축 위치제어 장치의 사진이다.

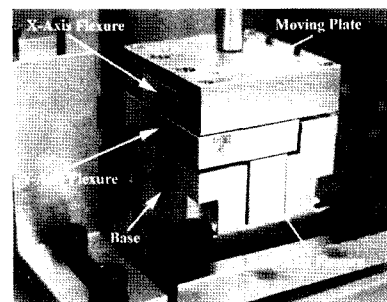
3.2 스테이지 성능평가

3.2.1 분해능 측정

초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축 분해능 측정결과

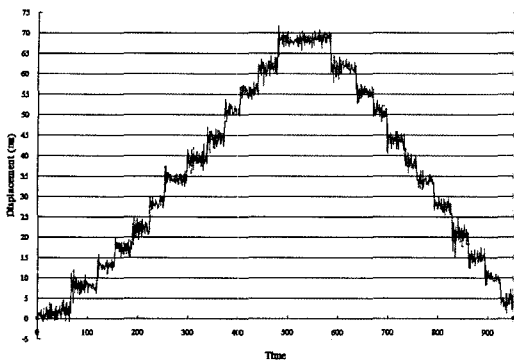


(a) Y-Axis Flexure

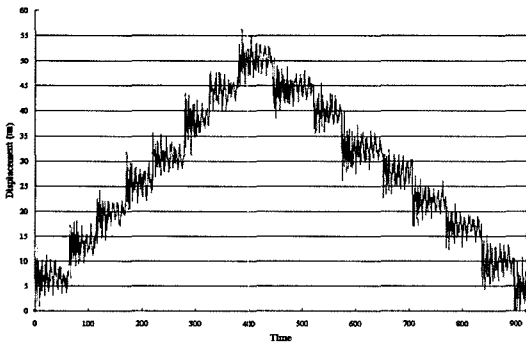


(b) Isometric View

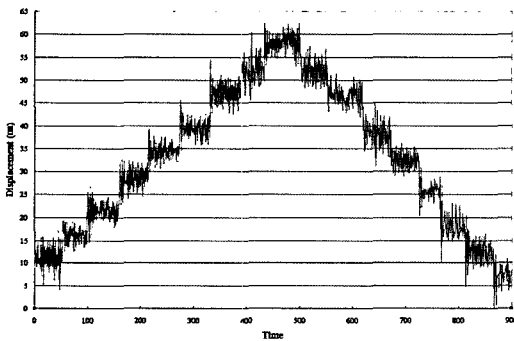
Fig. 4 Multi-Axis Ultra Precision Stage



(a) Resolution of X-Axis



(b) Resolution of Y-Axis



(c) Resolution of Z-Axis

Fig. 5 Resolution of Ultra Precision Multi-Axis Stage

Fig. 5에 나타내었다. 측정결과로부터 X축에 대한 분해능은 5 nm로 측정되었으며 Y축과 Z축도 5 nm임을 확인할 수 있었다.

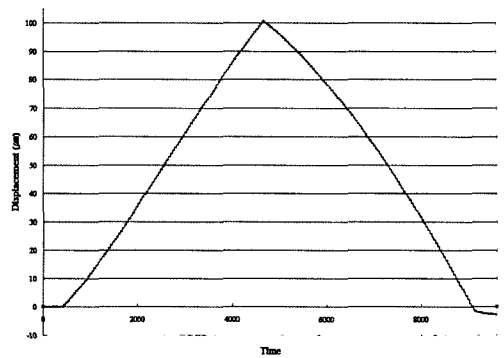


Fig. 6 Travel of Z-Axis of Multi-Axis Ultra Precision Stage

3.2.2 이송성능 측정

초정밀 다축 스테이지의 X, Y, Z축 각각의 이송범위 측정 결과는 Fig. 6과 같이 나타났다. X축에 대한 최대 이송범위는 97 μm 로 측정되었고 Y축의 최대 이송범위는 103 μm , 그리고 Z축의 이송범위는 92 μm 로 측정되었다.

4. 역히스테리시스 모델링

4.1 히스테리시스 모델링

초정밀 위치 제어 장치의 변위 궤적을 측정하고 각 축별로 히스테리시스를 모델링하였다. Fig. 7은 일반적인 히스테리시스의 궤적을 나타낸 그림으로 스테이지의 전체 변위 범위까지 증가시킨 후 감소시킨 다음 다시 전체 구간보다 작은 범위까지 구동시켜 얻은 궤적이다. Fig. 7에서 바깥쪽 루프를 메이저 루프라 하고 안쪽 루프를 마이너 루프라고 한다. H_{up} 은 메이저 루프 상승 보간식 그리고 H_{down} 은 메이저 루프 하강 보간식이라 한다면 마이너 루프 히스테리시스를 나타내는 식은 (1)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 최

대 전압을 나타낸다.

식 (1)은 상승시 히스테리시스의 모델이고 식 (2)는 하강시 히스테리시스를 모델링 한 것이다.

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

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

4.2 역히스테리시스 모델링

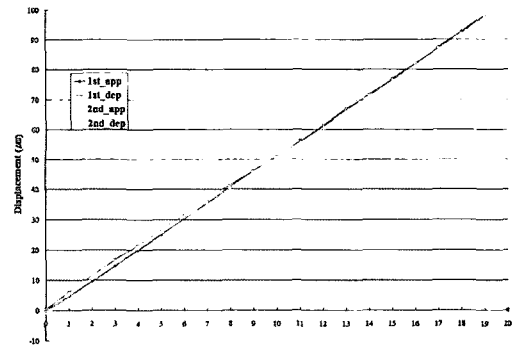
각각의 마이너 루프의 히스테리시스 모델링을 함으로써 입력 전압에 대한 초정밀 위치 제어시스템의 발생 변위를 예측할 수 있었다. 그러나 제어하고자 하는 대상이 스테이지의 변위이므로 원하는 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악하고자 역히스테리시스 모델링을 하였다. 식(4)는 변위가 증가할 때 역히스테리시스 식이고 (5)는 변위가 감소할 때의 수식이다.

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

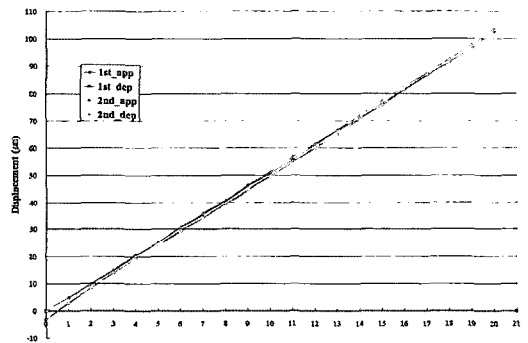
$$V_{down} = V_b - V_{max} + H_{up}^{-1}(e_{max} - e_b + e) \quad (5)$$

4.3 히스테리시스 보정

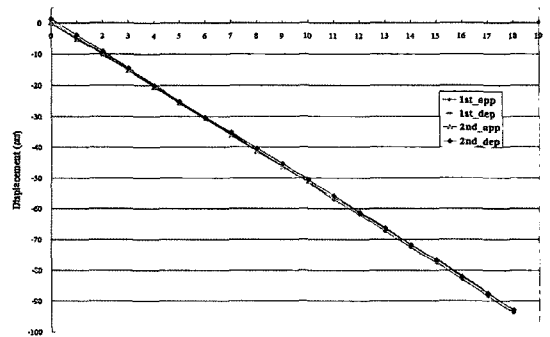
역 히스테리시스 모델링에 의해 구해진 발생 변위에 대한 입력 전압의 관계를 파악한 후 그 입력 데이터를 기준으로 초정밀 다축 위치제어장치의 구동실험을 하였다. 히스테리시스 보정 평가 실험 조건은 각 축별로 최대 운동영역



(a) Displacement in X-Axis



(b) Displacement in Y-Axis



(c) Displacement in Z-Axis

Fig. 8 Hysteresis Compensation

인 X축 97 μm , Y축 103 μm , Z축 92 μm 영역에서 입력변위를 1 μm 단위로 변화시키면서 발생된 변위를 측정하였다. Fig. 8은 각축별 보정 실험결과를 나타낸 것으로 히스테리시스가 보상되었음을 확인하였다.

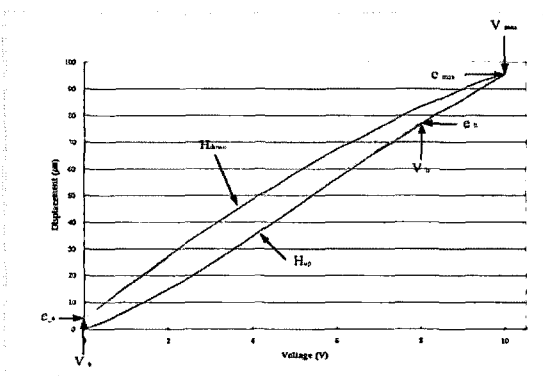


Fig. 7 Hysteresis Modeling

5. 광소자 정렬 특성

초정밀 다축 위치 제어장치의 광소자 정렬 특성을 평가하기 위하여 세가지 광소자를 정렬하였다. 정렬실험에서는 1채널 신호만을 전달하는 광스택과 다른 1채널 광스택의 정렬, 1채널의 신호를 8 채널로 분기하는 스플리터와 광스택의 정렬 그리고 패들과 패들을 연결하기 위한 정렬을 수행하였다.

5.1 광소자 정렬 알고리즘

광소자의 정렬은 레이저 광원에서 빛을 광소자에 입력하여, 상대측에서 출력되는 빛을 광파워미터로 측정하여 최고의 광파워(dBm) 값을 찾을 때까지 위치를 변화시키면서 운동한다. 광소자 정렬순서는 광소자를 접합 거리에 위치시킨 후 2차원 정렬을 수행하여 2차원 좌표에 대응하는 광파워 값을 파악한다. 이 공정을 2차원 영역 탐색이라고 한다. 영역 탐색이 끝나면 가장 큰 광신호가 출력되는 지점으로 이동하여 다시 힐 클라임 방식으로 가장 큰 신호가 출력될 때까지 정렬한다. 이 공정을 극점 탐색이라고 한다. Fig. 9는 광정렬 알고리즘의 순서를 나타낸 것이다.

5.2.1 채널 광소자 정렬

광소자의 입력 1채널과 출력 1채널을 정렬하는 방식은

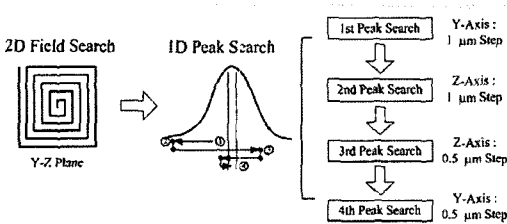


Fig. 9 Optical Fiber Alignment Algorithm

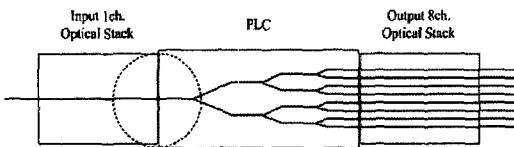


Fig. 10 Alignment between 1 Ch. Pigtail and 1 Ch. Input Part of PLC

광소자 스택과 광도파로소자의 입력측 정렬할 때 적용된다. 정렬순서는 사각 나선형 운동형태로 2차원 영역 탐색을 하여 최대 광신호 영역을 찾은 후 다시 4단계의 극점탐색을 수행하여 최대의 광신호 출력 위치를 찾았다. 영역 탐색에서는 5 μm 스텝의 2차원 광신호 프로파일을 측정하였고 극점 탐색에서는 0.5 μm 스텝의 1차원 프로파일을 측정하였다. Fig. 10은 입력 부분 1 채널 광소자 스택과 광도파로소자의 정렬 형태를 나타낸 것이다.

5.2.1 영역 탐색

영역 탐색을 할 때 얻어지는 광신호 프로파일은 크게 세가지 경우로 분류할 수 있다. Fig. 11과 같은 Case I 경우는 최대값을 갖는 광신호 검출영역이 탐색 영역의 가장자리에 치우쳐 위치해 있는 경우이다. Case II는 Fig. 12에

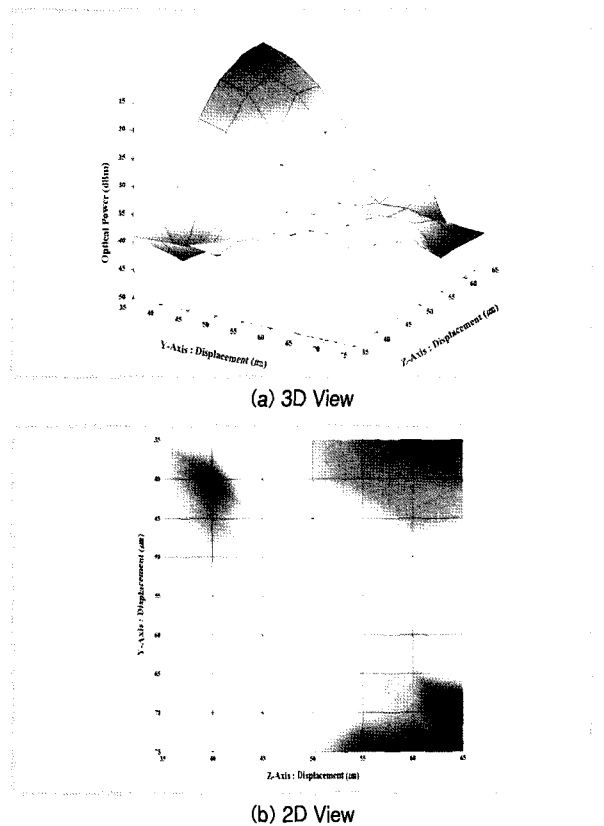


Fig. 11 Field Search Alignment for Optical Fiber Stack in Misalignment Case I

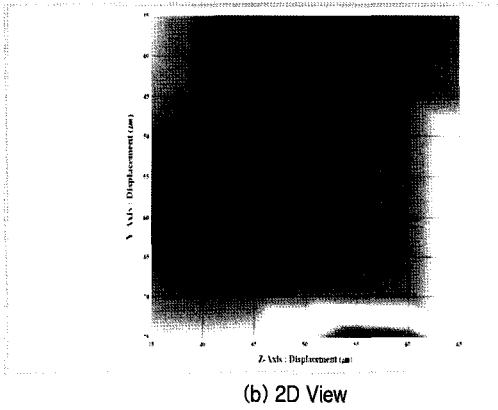
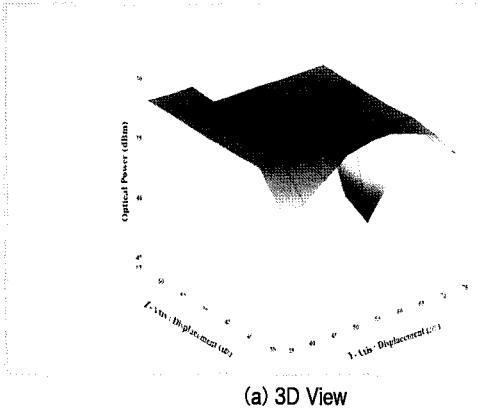


Fig. 12 Field Search Alignment for Optical Fiber Stack in Misalignment Case II

나타내었는데 최대 신호영역이 탐색 영역에서 나타나지 않을 때이다. 마지막으로 Fig. 13에 나타나 있는 Case III의 경우는 최대광신호 영역이 탐색한 2차원 프로파일의 중심 부근에 위치한 경우이다. Case I과 Case II의 경우는 극점 탐색이 불가능한 경우이고 Case III의 경우에만 극점 탐색이 가능하다. Case III의 경우에서 영역 탐색을 하여 2차원 좌표에 대한 광신호 프로파일을 구한 결과 최대 광파워값은 좌표 $(y, z)=(60\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$ 에서 -19.387 dBm 이 검출되었다. Fig. 9 (b)에서 보는 것처럼 이 좌표를 중심으로 높은 광신호들이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이 좌표는 극점 탐색을 수행할 때 출발 좌표가 된다.

5.2.2 극점 탐색

최대 광신호가 검출되는 보다 정밀한 좌표를 찾고자 영

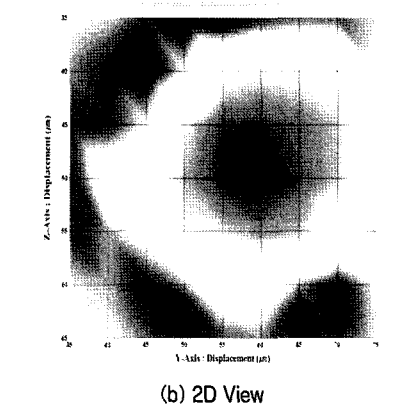
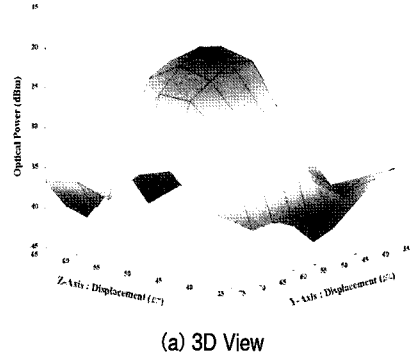
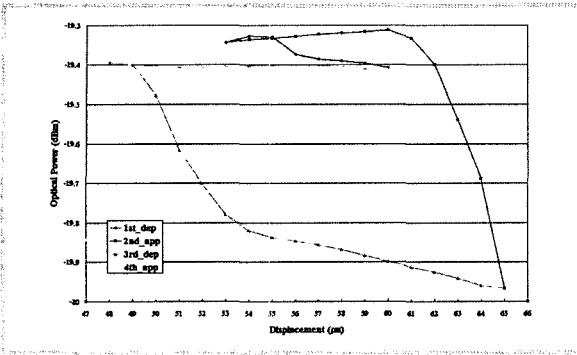


Fig. 13 Field Search Alignment for Optical Fiber Stack in Alignment

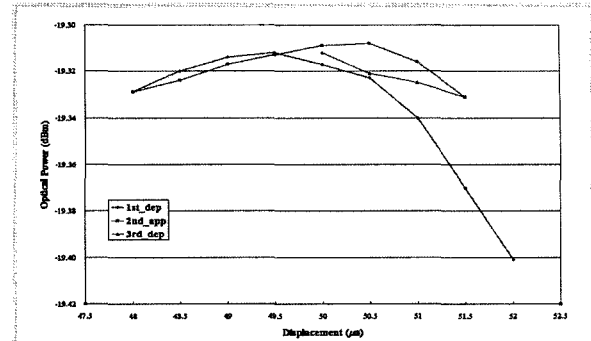
역 탐색을 한 결과 얻어진 좌표 $(y, z)=(60\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$ 를 중심으로 극점 탐색을 하였다. 극점 탐색은 4 단계로 이루어지는데 $(60\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$ 를 출발점으로 하여 Y축과 Z축 1차원 광신호 프로파일을 측정하였다. 4 단계의 극점 탐색을 마친 후에 얻은 최종 정렬위치 좌표는 $(y, z)=(53.5\mu\text{m}, 50.5\mu\text{m})$ 으로 판명되었고 그 때의 광파워 출력은 -19.305 dBm 이었다. 이는 영역 탐색에서 얻은 -19.387 dBm 보다 0.082 dBm 이 높은 값으로 보다 더 정밀한 정렬위치 임을 확인하였다.

5.3 8 채널 광소자 정렬

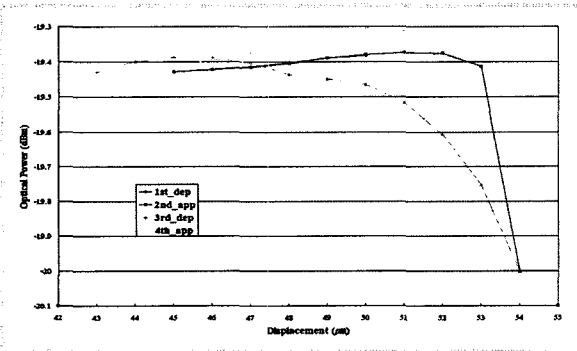
입력 1채널 광소자와 출력 8채널 광소자를 정렬하는 방식은 Fig. 15에서와 같이 광소자 스택과 출력측 광도파로



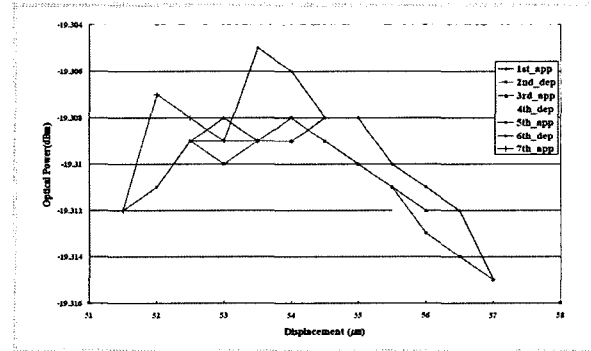
(a) 1st Peak Search with 1 μ m Step in Y-Axis



(c) 3rd Peak Search with 0.5 μ m Step in Z-Axis



(b) 2nd Peak Search with 1 μ m Step in Z-Axis



(d) 4th Peak Search with 0.5 μ m Step in Y-Axis

Fig. 14 Peak Search Alignment between 1pc Optical Fiber Stacks

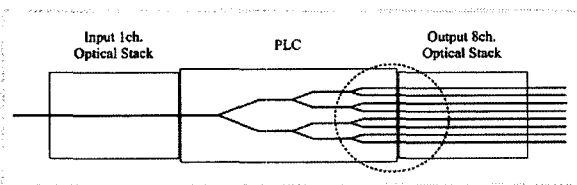


Fig. 15 Alignment between 1 Ch. Pigtail and 8 Ch. Output Part of PLC

소자를 정렬할 때 적용된다. 광소자 정렬을 위해 2차원 영역 탐색을 수행하여 최대 광신호를 찾은 후 다시 4단계의 극점 탐색을 수행하여 보다 정밀한 최대 광신호 출력 위치를 찾았다.

5.3.1 영역 탐색

영역 탐색을 하여 2차원좌표에 대한 광신호 프로파일을 구한 결과 최대 광파워값은 좌표 $(y, z)=(45\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$ 에서 -5.77 dBm 이 검출되었다. Fig. 16에서 보는 것처럼 이 좌표를 중심으로 높은 광신호들이 분포되어 있음을 알 수 있다.

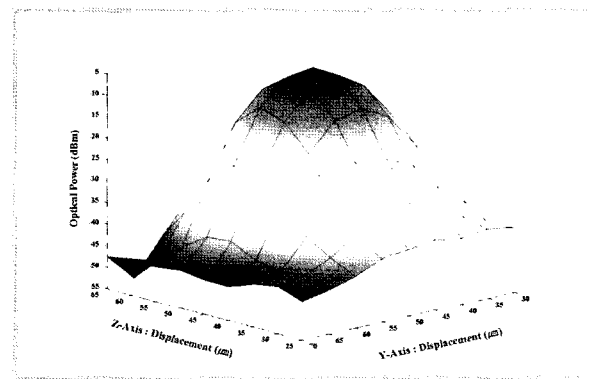
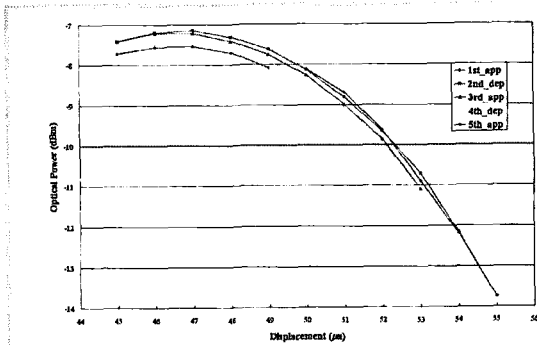


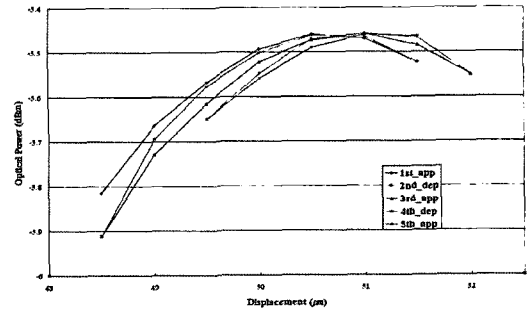
Fig. 16 Field Search Alignment between 1 Ch. and 8 Ch. Optical Fiber Stack

5.3.2 극점 탐색

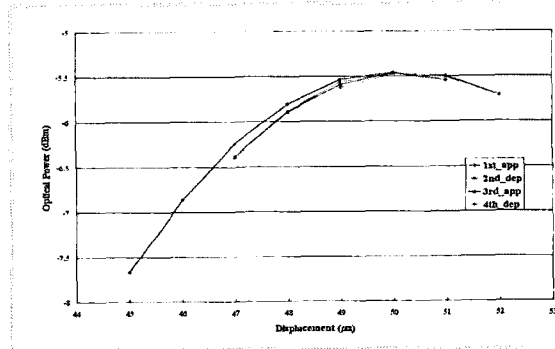
최대 광신호가 검출되는 보다 정밀한 좌표를 찾고자 영역 탐색을 한 결과 얻어진 좌표 $(y, z)=(47\mu\text{m}, 50\mu\text{m})$ 를 중심으로 극점 탐색을 하였다. 최종 정렬위치 좌표는 $(y, z)=(47$



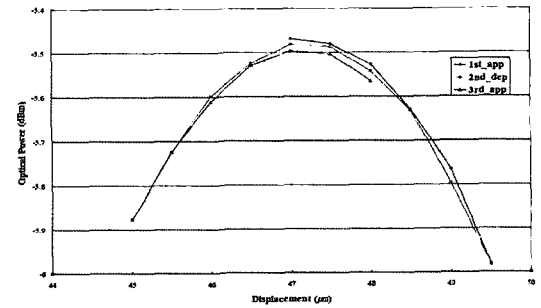
(a) 1st Peak Search with 1 μm Step in Y Axis



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



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



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

Fig. 17 Peak Search Alignment between 1 Ch. and 8 Ch. Optical Stack

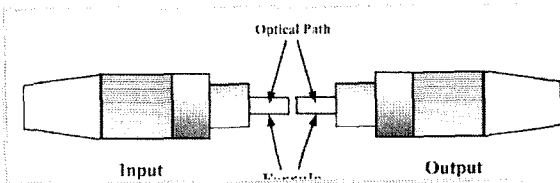


Fig. 18 Alignment of 2 Ferrule

μm , $51\mu\text{m}$)으로 판명되었고 그 때의 광파워 출력은 -5.469 dBm이었다.

5.4 페룰(Ferrule) 정렬

서로 다른 두 개의 페룰을 정렬하기 위하여 영역 탐색과 극점 탐색을 수행하였다. 페룰 간의 동심도 허용범위는 약 $1\mu\text{m}$ 이다. 영역 탐색에서는 $100\mu\text{m} \times 90\mu\text{m}$ 영역에서 $5\mu\text{m}$ 스텝의 2차원 광파워의 프로파일을 구하였다. 2차원 광프로

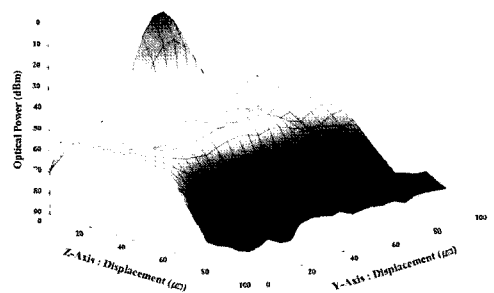


Fig. 19 Field Search Alignment between 2 Ferrules in $100\mu\text{m} \times 90\mu\text{m}$ Area

파일을 파악한 후 그 영역에서 최대신호가 출력되는 부근을 중심으로 극점 탐색을 수행하였다. 그 결과 $0.5\mu\text{m}$ 스텝의 1차원 프로파일을 측정하였고 페룰간의 최적 정렬 위치를 구하였다. Fig. 18은 페룰간의 정렬 형태를 나타낸 것이다.

5.4.1 100 μm ×90 μm 영역 탐색

페를을 정렬하기 위해 초정밀 스테이지의 Y-Z평면 최대 운동범위인 100 μm ×90 μm 의 영역에서 영역 탐색한 결과 최대 광파워값은 좌표 (y, z)=(45 μm , 10 μm)에서 -4.93 dBm 이었다.

5.4.2 극점 탐색

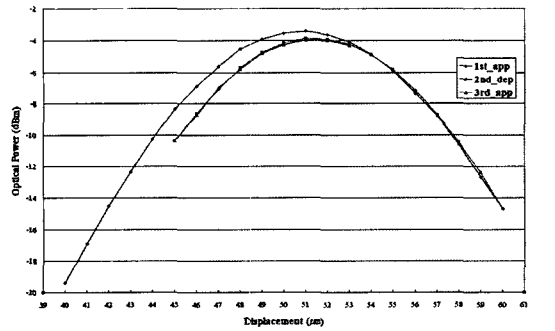
최대 광신호가 검출되는 보다 정밀한 위치를 찾고자 좌표 (y, z)=(45 μm , 10 μm)를 중심으로 극점 탐색을 한 결과 가장 큰 광신호가 출력되는 2차원 위치는 (y, z)=(51 μm , 10 μm)로 판명되었다. 그 때의 광출력 신호는 -3.61 dBm 이다.

6. 결론

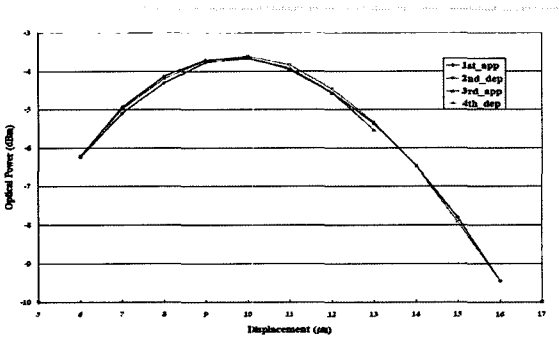
광소자 제조 공정 중 가장 중요한 핵심 공정은 광소자를

다른 광소자나 광섬유와 정렬하는 공정이다. 최근 들어 광통신의 수요가 증가함에 따라 신호를 전달하고 배분하는 다채널 광소자의 필요성이 증가되고 있다. 광소자의 채널이 다채널화 됨에 따라 보다 높은 정렬정밀도가 요구되고 있다. 본 연구에서 이와 같은 요구에 따라 기존의 장치보다 정밀한 정렬을 하기 위해 광소자 정렬용 초정밀 다축 위치 제어 장치를 개발하고 그 성능평가를 수행하였다. 초정밀 다축 위치제어 장치를 개발하기 위해 플렉서 메커니즘을 연구하였고 보다 향상된 정밀도를 위해 히스테리시스 보정에 관한 연구를 수행하였다. 또한 실제 광소자 정렬 공정에 적용하기 위해 세가지 광소자를 이용하여 광소자 정렬특성 시험을 수행하였다.

본 연구에서 개발된 광소자 정렬용 다축위치제어장치는 정밀한 광소자정렬에 이 시스템 단독으로 사용될 수 있으며 부피가 작아 기존의 스테이지에도 쉽게 장착되어 사용될 수 있으므로 광소자 정렬 공정에서 정밀도와 경제성을 동시에 얻을 수 것으로 사료된다.



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



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

Fig. 20 Peak Search Alignment between 2 Ferrules

참고 문헌

1. 심보성, 김재국, 장원석, "UV 레이저를 이용한 직접 묘화 기술 개발," 제 1회 고기능 초미세 마이크로부품 기술개발 Workshop, pp. 1-5, 2002
2. Y. C. Chung, J. Jeong, and L. S. Chung, "Aging-induced wavelength shifts in 1.5- μm DFB lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, pp.792-795, 1994
3. R. S. Vodhanel, M. Krain, R. E. Wagner, and W. B. Sessa, "Long-term wavelength drift of the order of 0.01 nm/yr for 15 free-running DFB laser modules," OFC94, 1994
4. 양순호, "다채널 광통신소자 정렬 시스템 개발," 중기거점 중간보고서, 산업자원부, 2002
5. EXFO, Inchworm Motor Catalog and Application Note, 2003