

비점수차법을 이용한 초정밀변위측정법 연구

이상현[#], 정광석^{*}

Precision Displacement Measurement Using Astigmatism

Sang Heon Lee[#] and Kwang Suk Jung^{*}

ABSTRACT

The displacement sensor using optical pickup head is presented. The measuring principle of optical pickup head in focusing direction is adopted to measure displacement. The preliminary tests were carried out to verify the feasibility of the optical pickup head as a displacement sensor and optical pickup head showed about 8 μm measuring range and 10nm resolution. The methodology to expand measuring range is proposed and proved its validity. The proposed displacement sensors are applied to AFM(Atomic Force Microscope) probe head to measure the deflection of micro-cantilever.

Key Words : Astigmatism (비점수차법), Displacement sensor (변위센서), Geometrical Optics (기하광학)

1. 서론

근래에 들어 부품의 초소형화에 따른 나노관련 기술의 기술적 수요를 만족시키기 위해 초정밀 위치측정 및 결정기구의 필요성이 매우 높아지고 있다. 그러나 이러한 서보기술을 구현하기 위한 부품들 즉 센서와 구동기의 가격은 대부분 고가이므로 관련 기구와 기기의 개발에 있어 큰 장벽으로 작용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 주위에서 쉽게 구할 수 있는 CD-ROM의 광픽업헤드(Optical Pickup Head; 이하 OPH)를 저가형 초정밀 위치 측정기구로서 활용하는 방법에 대해서 논한다.

현재 마이크로미터급 작동 범위와 나노미터수준 (<10 nm)급분해능을 갖는 변위센서는 가격이 천만 원대 수준에 달한다. 그러나 본 논문에서 다루는 OPH는 부품자체의 가격은 대량생산으로 인해 아

주 저렴하지만 헤드 종단의 서보정밀도는 마이크로미터급 이하로 억제될 정도로 정밀하므로 OPH에 내재된 원리를 준용하면 저가로 나노미터수준의 변위센서를 구성하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한 광학을 이용한 변위센서들은 많이 소개되고 있으나^{1,2} 광픽업헤드는 레이저, 거울, 포토다이오드 등의 광학요소가 일체형으로 구성되어 있기 때문에 광학설계없이 바로 사용할 수 있는 장점이 있다. 데이터 저장 및 기록장치의 요소로서 광픽업헤드 자체의 성능향상을 위한 설계 및 실험에 관한 연구는 활발히 진행되었으나^{3,4} 본 논문에서는 광픽업헤드를 변위센서로의 적용가능성을 체계적으로 다루고자 한다.

따라서 본 논문에서는 OPH의 변위센서로의 적용 가능성에 대한 검증과 또한 적용에 따른 실제적인 문제 그리고 실제 응용 예에 대해서 다루는

☞ 접수일: 2007년 11월 5일; 게재승인일: 2008년 4월 5일

교신저자: 안동대학교 기계공학부

E-mail: shlee@andong.ac.kr Tel. (054)820-5908

* 충주대학교 기계공학과

데, 2 장에서는 OPH 에서의 비점수차법을 이용한 포커싱 방식과 이에 따른 포커스 오차식을 기하광학에 근거하여 모델링하고, 3 장에서는 사용된 OPH 의 자체 성능테스트결과와 적용가능성에 대해서 기술한다. 그리고 마지막으로 센서로의 활용을 위한 방법제고와 실제 활용 예를 다룬다.

2. OPH

2.1 OPH 의 측정원리

OPH 는 센서와 구동기가 합쳐진 하나의 서보시스템으로 미디어의 트랙, 포커싱방향으로 2 자유도를 갖는다. 본 논문에서는 포커싱 제어에 사용되는 센서부를 변위측정센서로 사용하고자 한다. 우선 포커싱 방향으로의 오차 측정 원리는 일반적으로 비점수차법(astigmatism)에 의해 이루어지는데 미디어가 광픽업헤드의 대물렌즈의 초점 안으로 들어오거나 초점 밖으로 벗어난 경우에 Fig. 1 에 나타난 것처럼 4 분할 다이오드에 주사되는 빔스팟 (beam spot)의 형태가 달라진다. Fig. 1(b)와 같이 포커스 오차가 없는 경우 빔의 형태는 진원의 형태로 나타나고, 초점 안으로나 밖으로 미디어가 벗어나는 경우는 빔의 형태가 타원으로 나타난다. 이때 4 분할 다이오드에 주사되는 광량의 차이가 발생하게 되는데 이 값들은 아래 식(1)에 의해서 포커스 오차로 변환된다.⁵

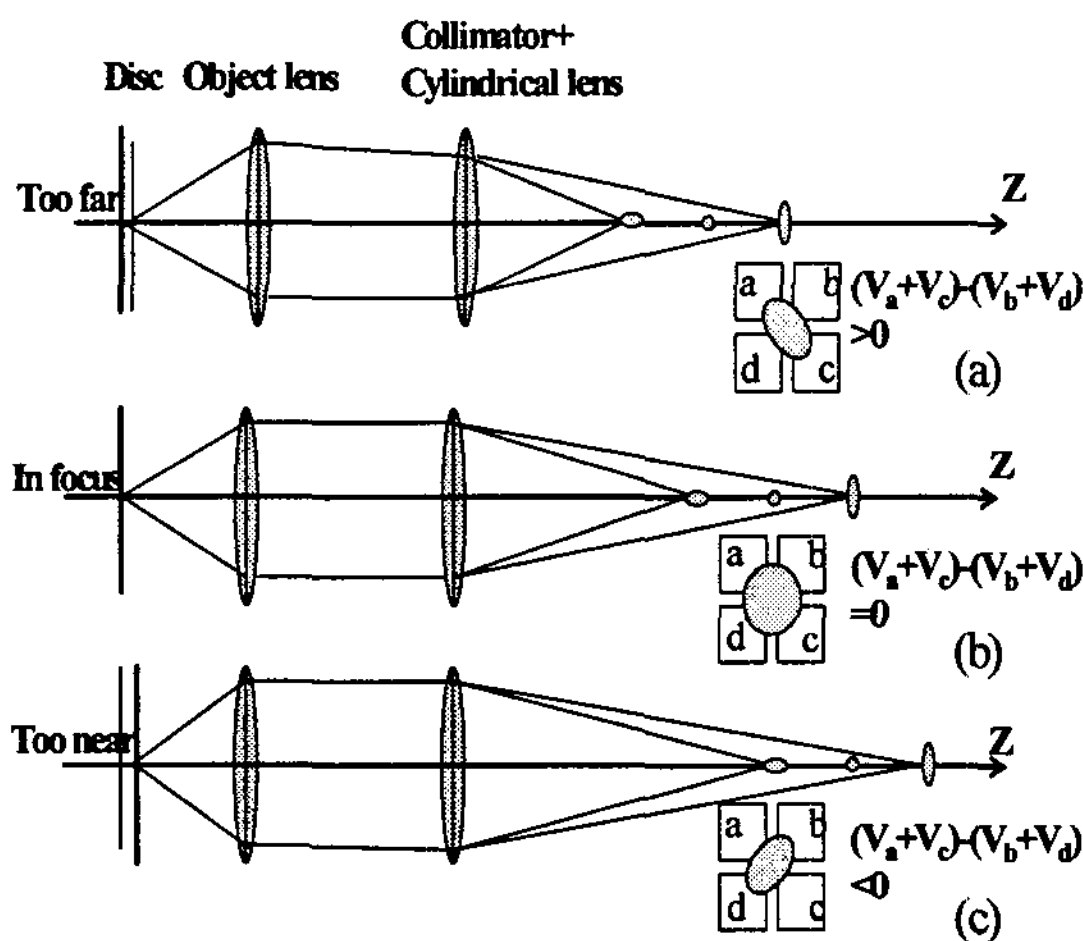


Fig. 1 Principle of astigmatism (a) too far, (b) in focus, (c) too near

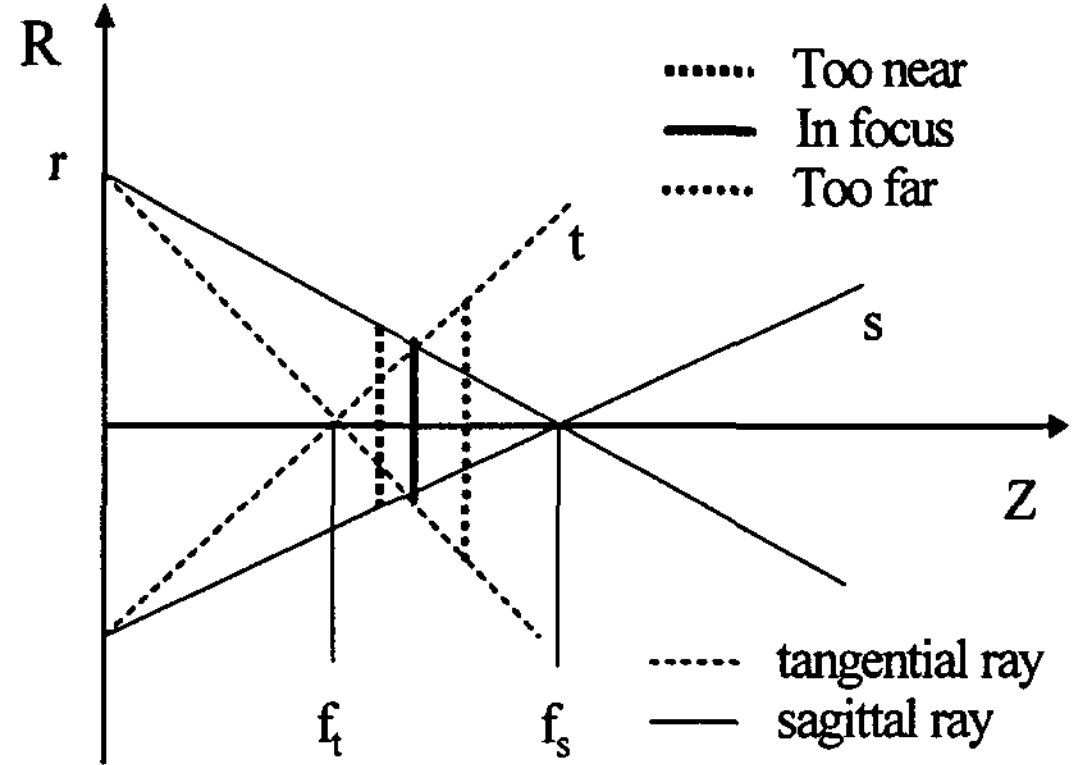


Fig. 2 Astigmatism model

$$V_{out} = (V_a + V_c) - (V_b + V_d) \quad (1)$$

2.2 오차신호의 모델링

앞서의 설명과 같이 OPH 는 비점수차법을 이용하여 포커싱을 하는데 비점수차법에 의한 오차신호의 모델링을 통하여 포커스 오차를 변위로 변환할 수 있다. 비점수차법은 Fig. 2 에서와 같이 타원렌즈의 적용을 통해서 고의적으로 수평면 (tangential)의 초점과 수직면(sagittal)의 초점길이의 불일치를 유발하여 Fig. 1 에서와 같이 포토다이오드에 맺히는 상의 수평축, 수직축의 길이가 달라지는 현상을 이용한다.⁶ 따라서 레이저 빔의 광경로에 대해 기하광학적 개념만을 적용하면 Fig. 3 을 바탕으로 빔스팟의 형태를 아래와 같이 모델링할 수 있다. 우선 수평면과 수직면의 주사광을 아래와 같이 각각 포커스방향으로의 변위에 대한 함수로 표현이 가능하다.

tangential ray:

$$t(z) = \frac{r}{f_t} z - r \quad (2)$$

sagittal ray:

$$s(z) = \frac{r}{f_s} z - r \quad (3)$$

여기서 r 은 렌즈의 반경이며, f_s 와 f_t 는 각각 수직, 수평면의 초점거리를 나타낸다.

그리고 포토다이오드에 생성되는 타원의 식은 아래와 같은 식으로 정리될 수 있다.

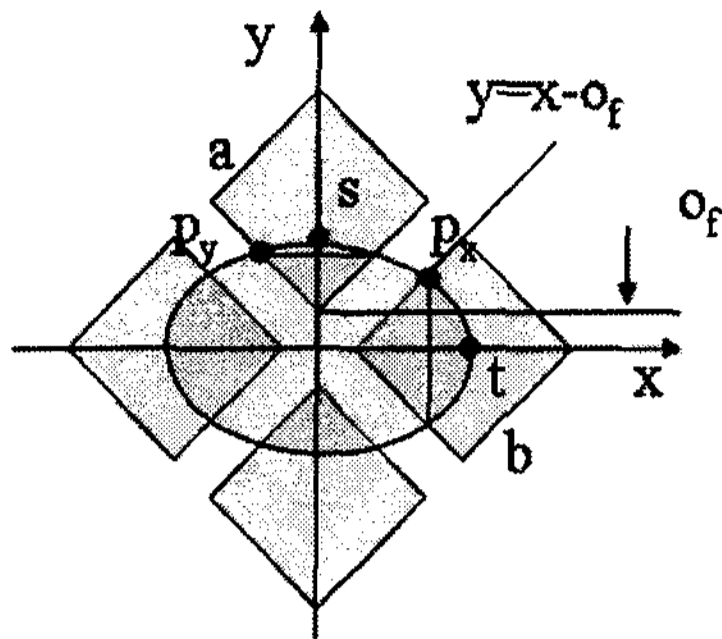


Fig. 3 Area of beam spot on the photo-cell

$$\frac{x^2}{t^2} + \frac{y^2}{s^2} = 1 \quad (4)$$

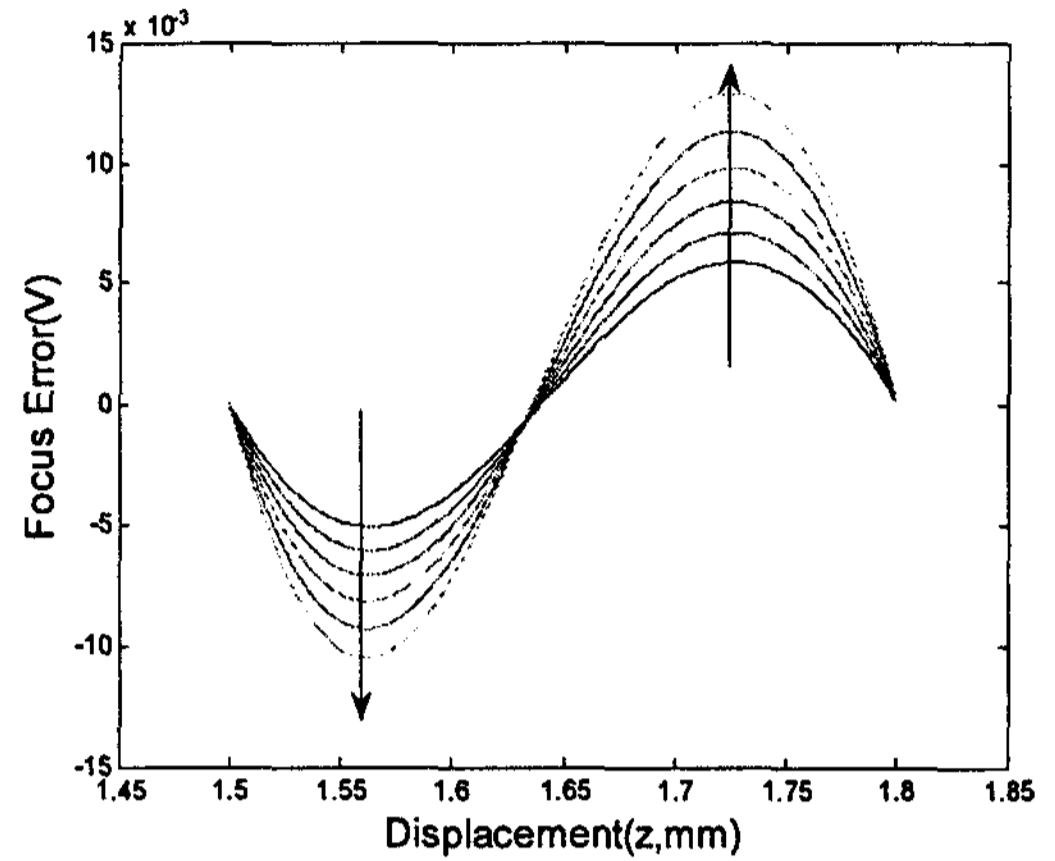
이 빔스팟은 Fig. 3 에서와 같이 4 분할 다이오드에 주축이 45 도 기울어진 형태로 형성된다. 레이저빔의 세기분포는 가우시안 분포로 표현이 되지만 본 연구에서는 유도식을 간결하게 나타내기 위해서 균일한 세기분포를 가지는 레이저로 가정한다. 따라서 각 셀에 주사되는 빔의 세기는 각 셀에 주사된 빔의 면적으로 구할 수 있다. Fig. 3 의 포토다이오드 b 에 주사된 빔은 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$S_b = (p_x - o_f)^2 + 2 \int_{p_x}^{t} \int_0^{f(x)} dy dx \quad (5)$$

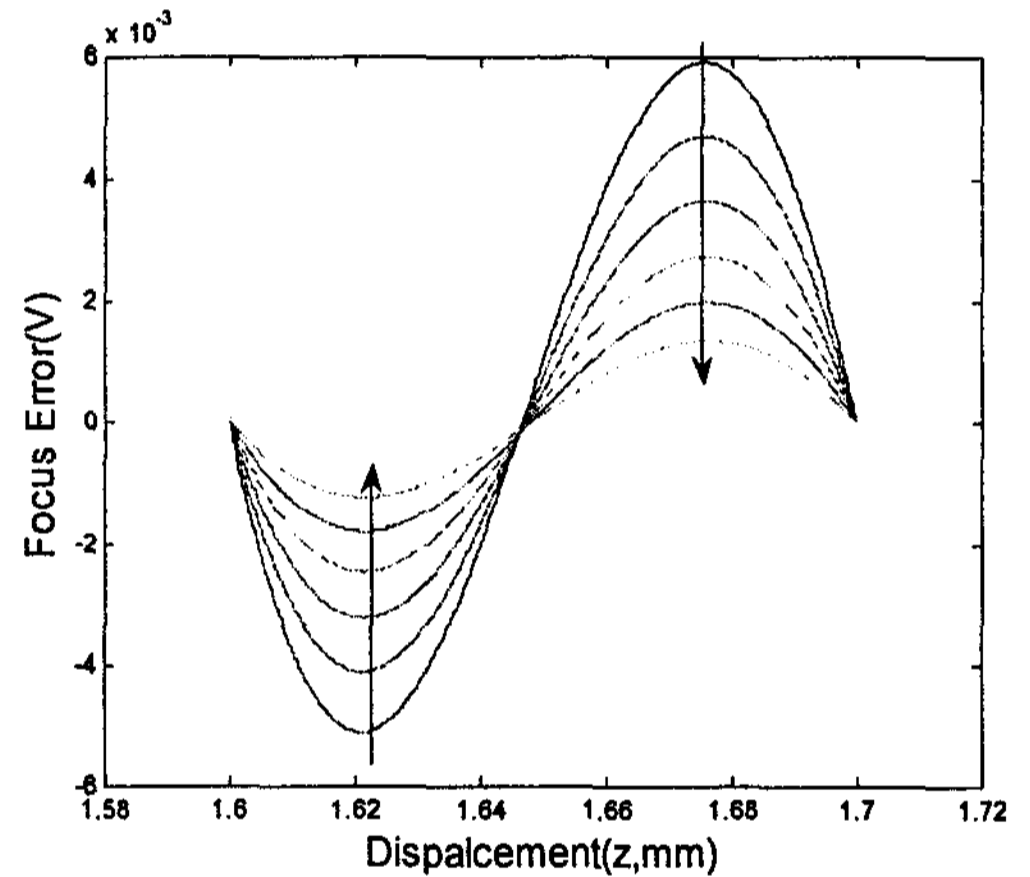
여기서, o_f 는 포토다이오드간의 대각선 간격을 나타내고, p_x 는 $y = x - o_f$ 로 정의되는 셀의 경계선과 빔의 교점을 나타내는데, 식(5)에서 첫 번째 항은 o_f 에서 p_x 까지의 삼각형 면적을 나타내고, 두 번째 항은 p_x 점에서 t 점까지의 면적을 나타낸다. 그리고 $f(x)$ 는 타원의 면적을 구하기 위한 식으로 식(4)의 타원 방정식에서 y 값을 x 의 함수로 나타낸 식이다. 동일한 방법으로 포토다이오드 a 에서의 출력 값을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$S_a = (p_y - o_f)^2 + 2 \int_{p_y}^{t} \int_0^{f(y)} dx dy \quad (6)$$

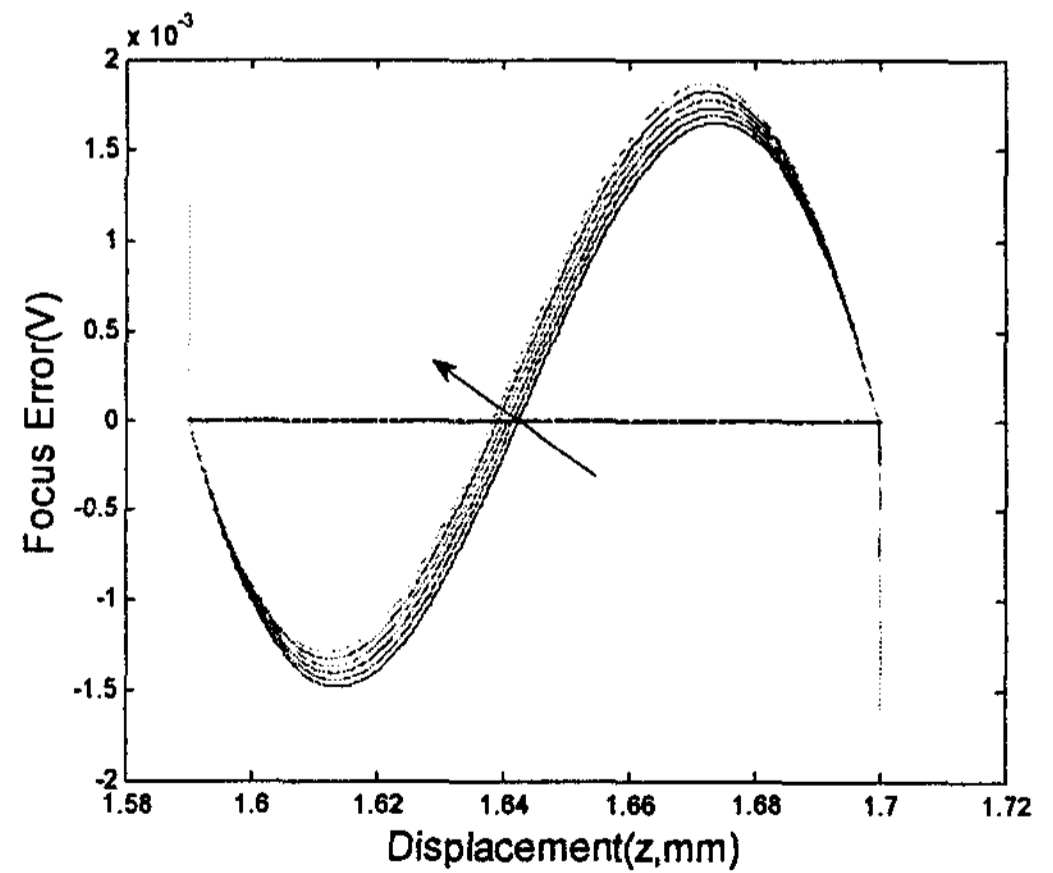
포토다이오드 c 와 d 에서의 출력은 각각 a 와 b 와 같기 때문에 포커스 오차는 식(1)에 의해 아래



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Sensitivity analysis (a) f_t , (b) f_s and (c) o_f

와 같이 계산된다.

$$FE = 2(S_a - S_b) \quad (7)$$

Fig. 4 는 식 (7)을 이용하여 z 의 변화에 따른 포커스 오차의 계산값을 나타낸다. 여기서 오차값이 0 이 되는 지점이 광픽업헤드의 대물렌즈의 초점거리에 해당한다.

본 연구에서는 정확한 포커스 오차식을 구하기 위해 앞서의 오차식 모델에서 각 파라미터가 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 4(a), (b), (c)는 각각 f_b, f_s, o_f 의 변화에 따른 영향을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보면 f_i 가 증가할수록 포커스 오차값에서의 최대, 최소치간의 차이가 증가하는 경향을 확인할 수 있고, Fig. 4(b)를 통해서 f_s 는 f_i 와는 다르게 피크치가 감소하는데 큰 역할을 하는 것을 할 수 있다. 마지막으로 o_f 의 증가는 포커싱 포인트의 위치를 좌측으로 이동시키는 것과 동시에 그래프를 상단으로 수평 이동시키는 것을 확인할 수 있다. 각 파라미터가 포커스 오차에 미치는 영향을 기초로 다음 장에서 최종 모델식을 수립할 수 있다.

3. 기초실험

OPH 를 변위센서로 바로 적용하기에 앞서 기초 실험을 통하여 실제 OPH 의 기본적인 사양과 변위 센서로의 적용 가능성을 파악하였다.

3.1 측정가능영역

우선 OPH 의 반응구간 측정을 통해서 측정 가능영역을 파악하였다. Fig. 5 는 실험에 사용된 스캐

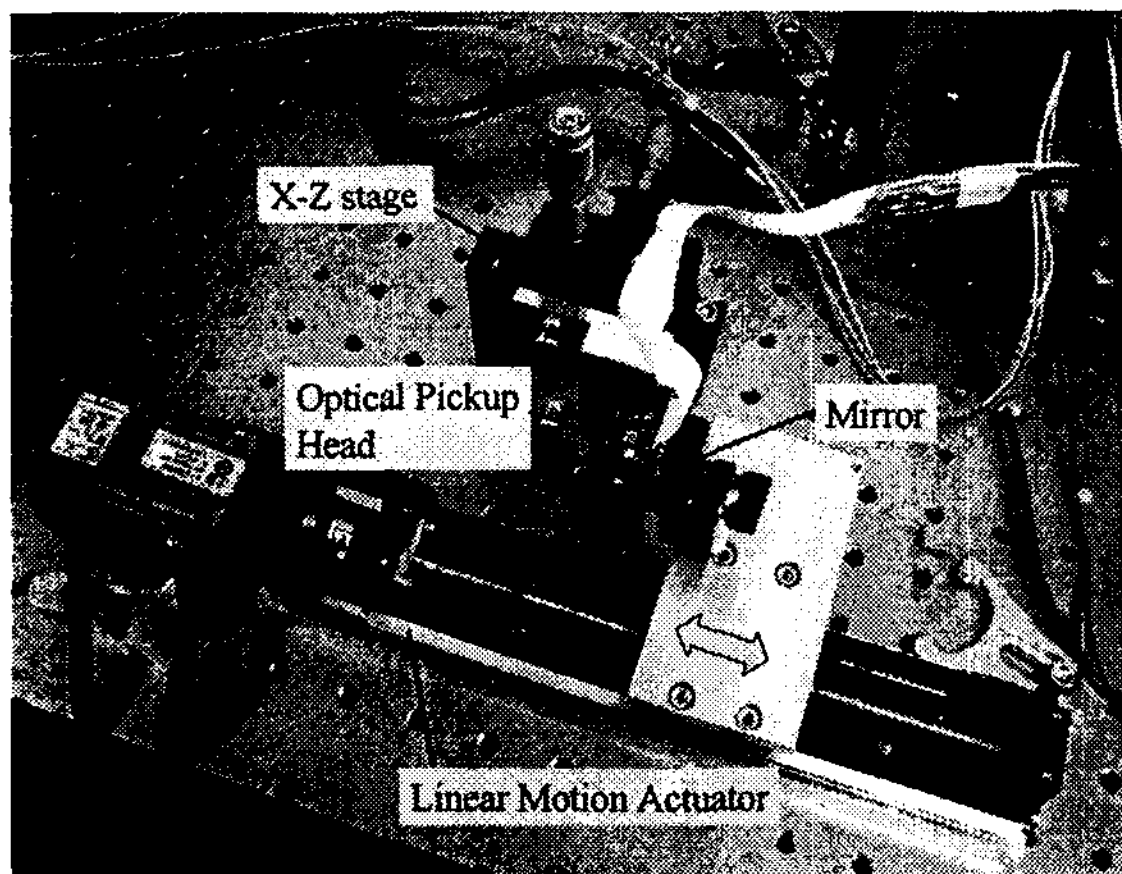


Fig. 5 Coarse scanning system with linear motion actuator

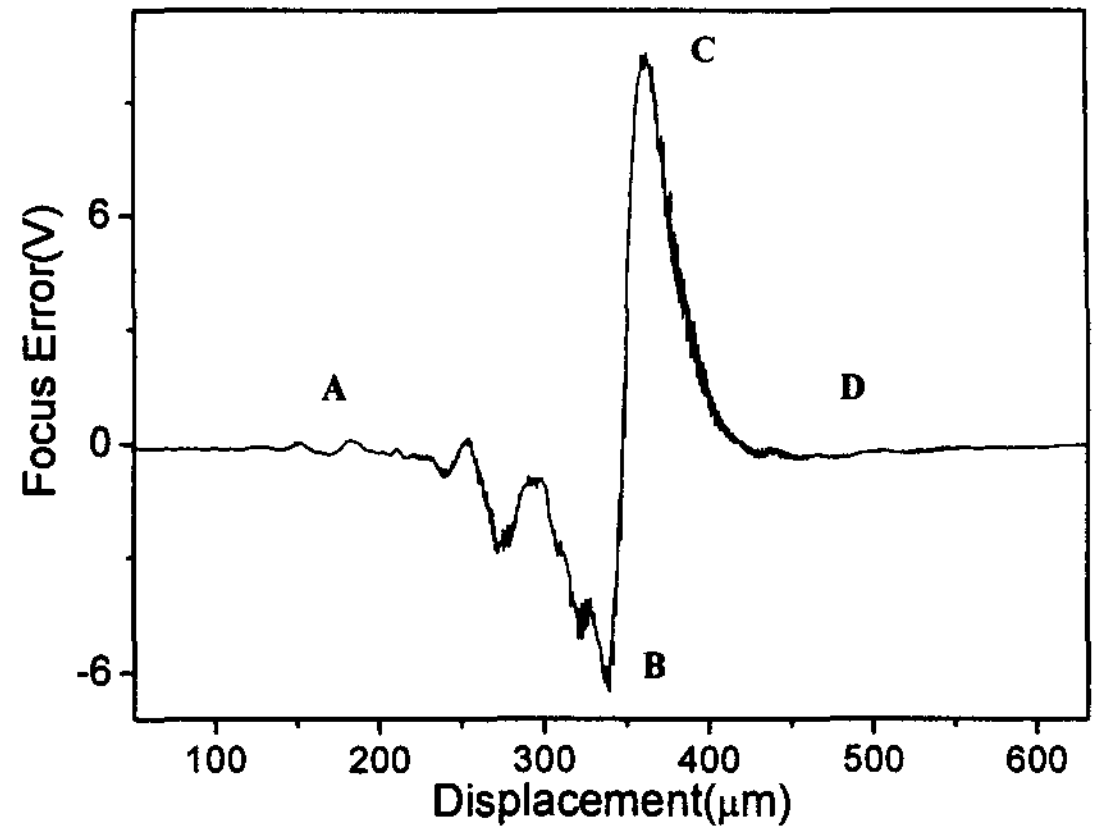


Fig. 6 Focus error during coarse scanning

닝장치로서 0.2 μm 의 위치결정정도(KR2001, THK)를 가지며, 스캐닝을 통하여 Fig. 6 과 같은 결과를 얻었다. 포커스 오차값이 발생하는 구간은 그림에서와 같이 A-D 까지이며, 구간의 길이는 약 250 μm 이다. 그러나 실제 센서로 적용될 구간은 선형적 특성을 지니는 B-C 구간이 적합하므로 이 구간의 길이를 유효측정거리로 채택할 수 있다. 이때 B-C 구간은 약 20 μm 이다. 한편 Fig. 6 에서 신호의 채터링은 대영역 구동을 위한 볼/스크류 이송방식과 이에 따른 진동으로 인한 제약된 서보 성능에 기인한다. 따라서 OPH 자체의 성능을 검증하기 위해서는 더욱 정밀한 구동기가 필요한데, 다음 절에서 서브나노급 정밀도를 갖는 나노스테이지를 사용한 센서 성능 시험에 대해 논한다.

3.2 변위변환

Fig. 6 의 실험결과로부터 OPH 의 측정영역을 확인하였지만, 실제 변위센서로 사용되기 위해서는 선형출력구간으로 측정영역을 한정하는 게 좋다. 이러한 선형구간에서의 정확한 포커스 오차식을 구하기 위해 2 장에서 구한 식의 주요 파라미터를 튜닝하고 이를 이용하여 모의시험한 결과를 전 절의 실험결과와 함께 Fig. 7 에 나타내었다. 이때 $f_i=1.50 \text{ mm}$, $f_s=1.585 \text{ mm}$, $o_f=0.004 \text{ mm}$ 이다. 실험을 통한 포커스 오차는 식(1)을 구현한 연산증폭기를 통해 측정되었고, 이 때 증폭비는 7.5 로 하였다. 또한 이론식 식(7)에서의 증폭비는 피크치를 비교하여 15.8 로 설정하였다. Fig. 7 에서 보면 선형구간에서는 실험치와 이론치가 거의 일치함을 알 수 있으나, A-B 와 C-D 구간에서는 두 값이 현

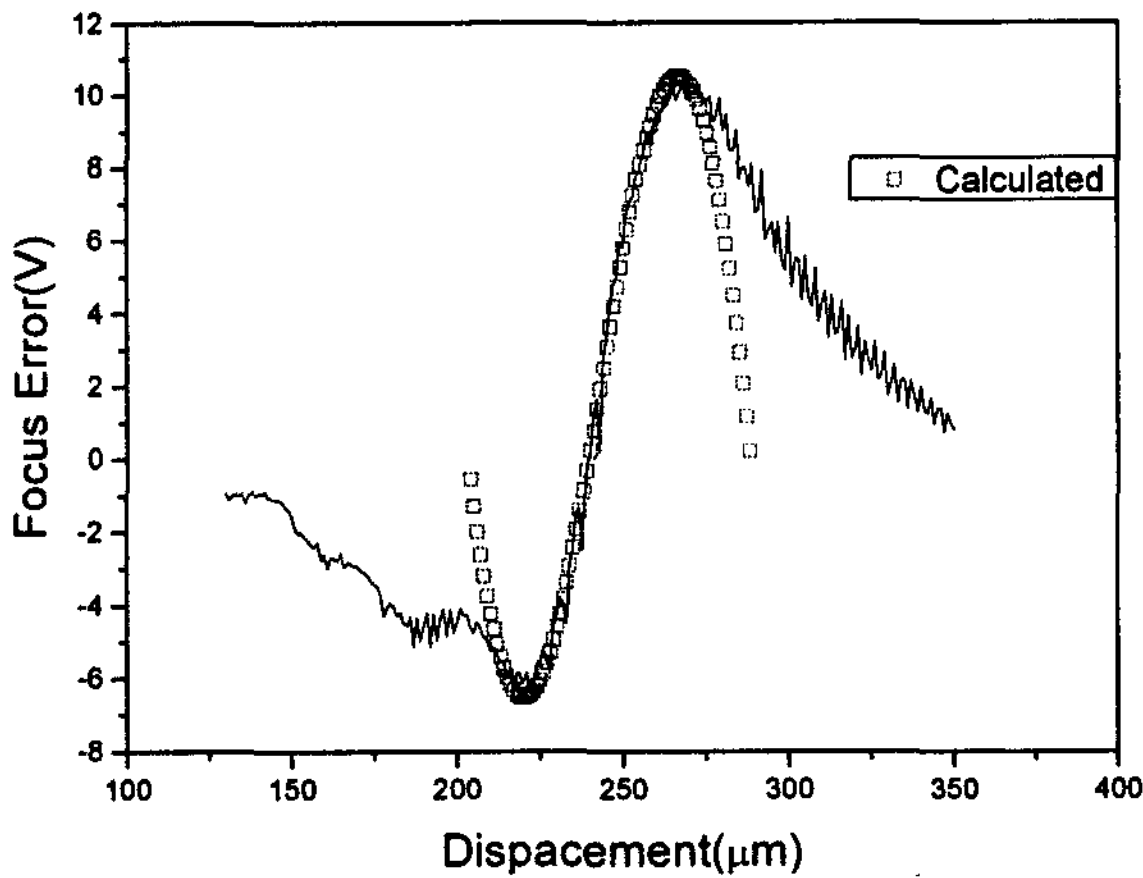


Fig. 7 Theoretical and experimental focus errors

저한 차이를 내는 것을 확인할 수 있다. 이는 계산식에서 포토 다이오드의 크기를 고려하지 않았기 때문에 발생하는 오차로 예상된다. 하지만 본 연구에서는 선형구간이 주 관심부분이기 때문에 이러한 오차는 무시하도록 한다.

Fig. 7의 결과를 바탕으로 포커스 오차가 0인 지점을 기준으로 선형화된 식을 구하였다. 그리고 이 식을 바탕으로 센서의 정밀도를 검증하기 위해서 나노스테이지를 이용하여 계단운동을 수행하였다. Fig. 8은 실험에 이용된 초정밀 구동 장치를 나타내는데 나노스테이지로는 PI사의 P-753.21C가 사용되었다. 이 모델은 0.1 nm의 분해능으로 20 μm의 운동이 가능하므로 OPH의 선형구간을 시험하는 데에 있어서 충분한 성능을 지닌다.

Fig. 9는 0.25 μm 계단운동을 측정된 결과로 이

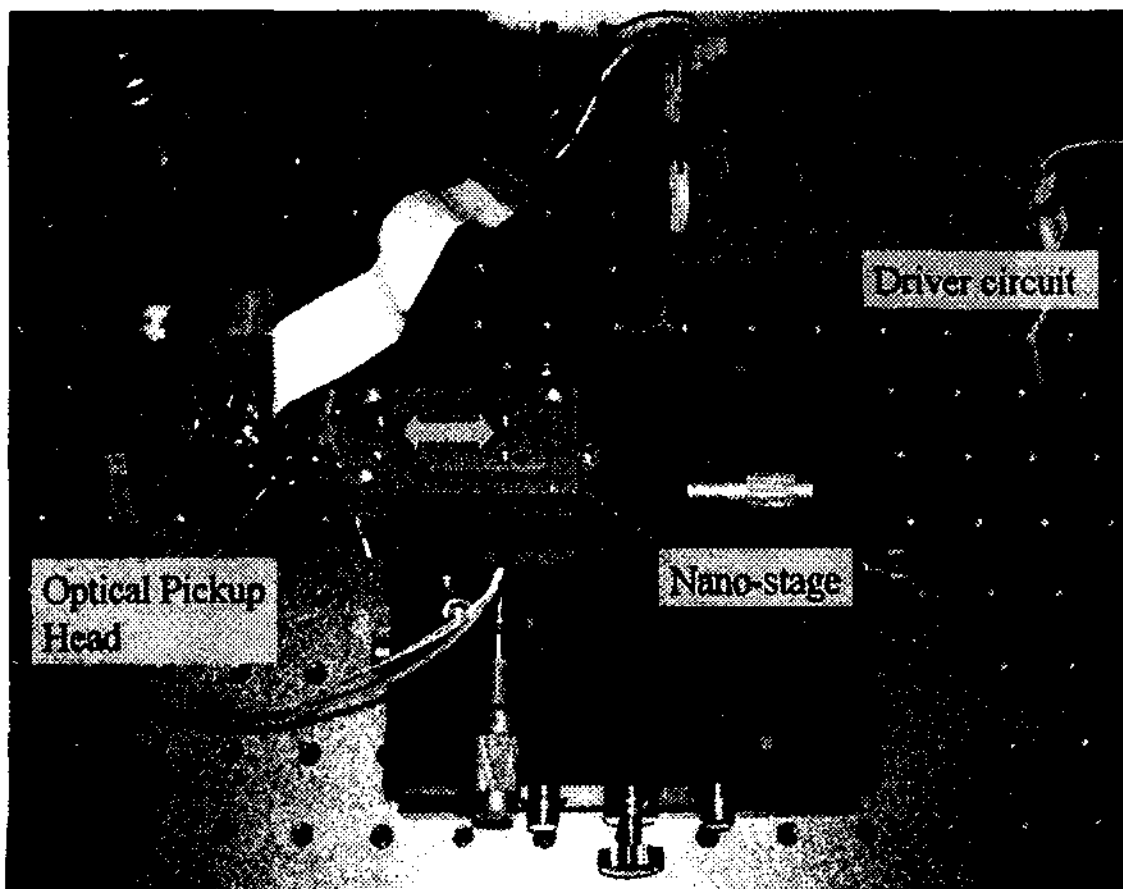


Fig. 8 Fine scanning system with nano-stage

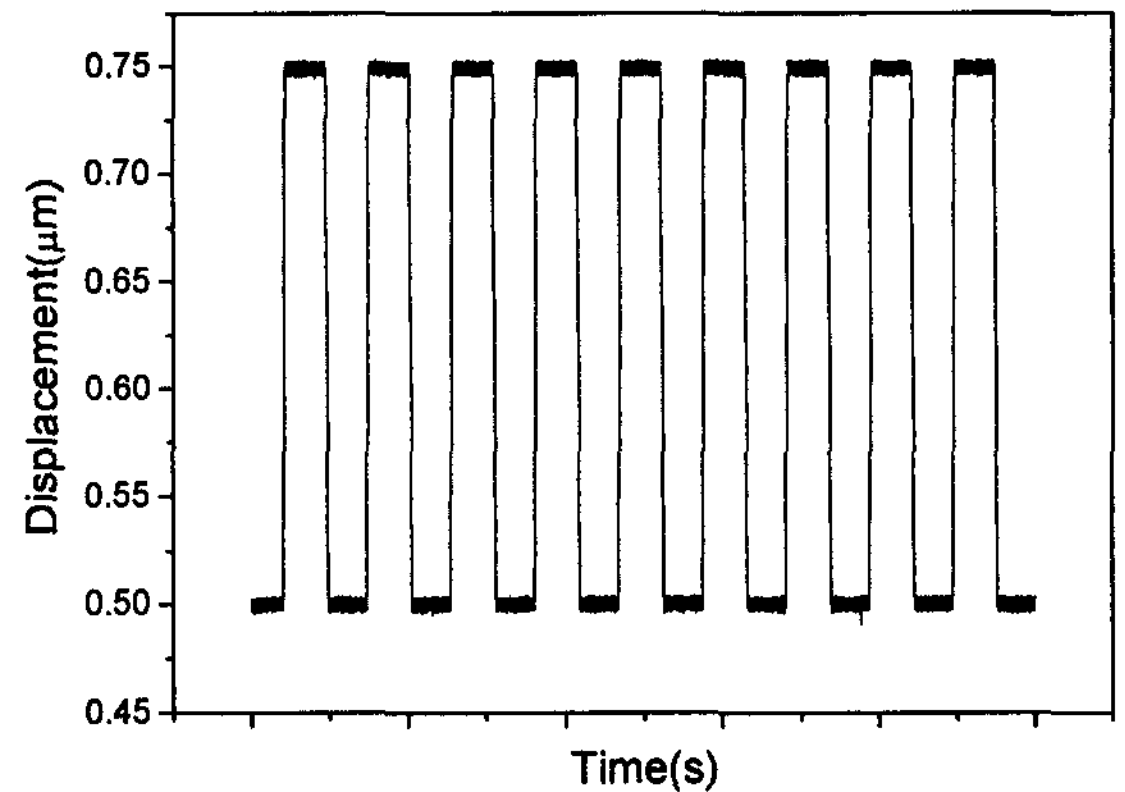


Fig. 9 Step response measured by optical pick-up head (0.25 μm)

때 노이즈의 정도는 약 10 nm로 나타났으며, 이 노이즈는 광픽업의 광학부품과 주변회로의 성능에 의해서 한정되어짐을 예상할 수 있다. 이 때 실험은 LabVIEW 기반의 데이터수집(PXI-6221, 16bit)에 의해 이루어졌다.

4. 센서로의 활용

본 장에서는 OPH의 센서로의 활용도를 높이기 위해서 고려되어야 할 몇 가지 사항과 실제 센서로의 적용 예를 다룬다.

4.1 측정영역의 확장

3.1 절의 실험을 통해서 변위측정으로 적합한 선형출력구간은 약 8 μm(linearity: ±1% F.S.)로 확인되었다. 하지만 필요에 따라서는 측정영역의 확장이 요구되기도 한데, 이를 위해서는 Fig. 1의 개념도에서 대물렌즈의 초점거리를 증가시키는 방법이 가능하다. 그러나 초점거리가 길어지는 경우, 센서의 감도가 떨어지기 때문에 감도를 유지하기 위해서는 Fig. 1의 원통형 렌즈도 교체하여야 하는데 이 작업은 광픽업헤드의 완전한 분해와 조립이 필요하기 때문에 다소 어려운 작업이다. 따라서 본 연구에서는 대물렌즈의 교체만을 통해서 측정영역을 확장하였는데, 감도향상을 위해서는 앞서 기술한 바와 같이 원통형 렌즈에서의 f_s 와 f_t 의 차이가 적은 것으로 교체하여야 한다. 본 연구에서는 기 부착된 대물렌즈(NA:0.45, WD=1.61 mm)만을 새로운 대물렌즈(NA:0.18, WD=13.86 mm, NT46-

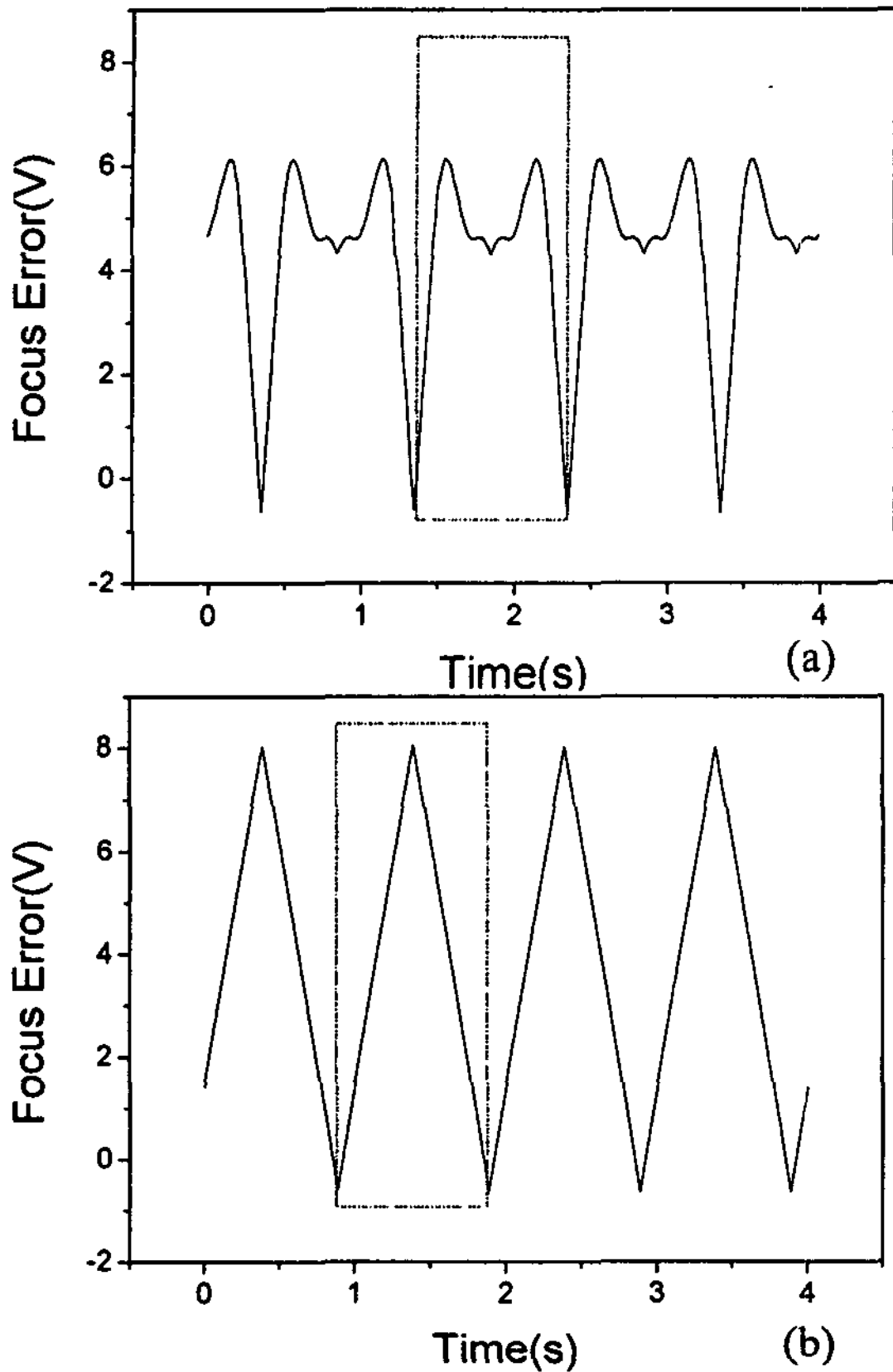


Fig. 10 Focus error for 10 μm reciprocating motion (a) before lens change, (b) after lens change

357, Edmund Optics)로 교체하여 10 μm 의 왕복운동을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 10 과 같이 얻었다. 렌즈를 교체하기 전후의 출력값을 비교하여 렌즈 교체 후 선형구간 즉 측정가능 구간이 확장되었음을 확인할 수 있었다.

4.2 효율적인 보정

본 연구에서는 다양한 CD 롬의 OPH 사용을 목적으로 하기 때문에 각 OPH 의 제 특성이 동일하지 않은 경우가 많기 때문에 이에 대한 대응 방법이 필요하다. Fig. 11 은 여러 OPH 를 이용하여 얻은 포커싱 오차에 대한 결과인데 (단, 횡축은 포커싱 방향으로의 이동 대신 정속 구동기의 구동 시간으로 표현하고 있음) 이를 통해서도 OPH 의 특성이 일정하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 기초실험을 통한 센서의 출력값이 현저히 다르게 나타나는

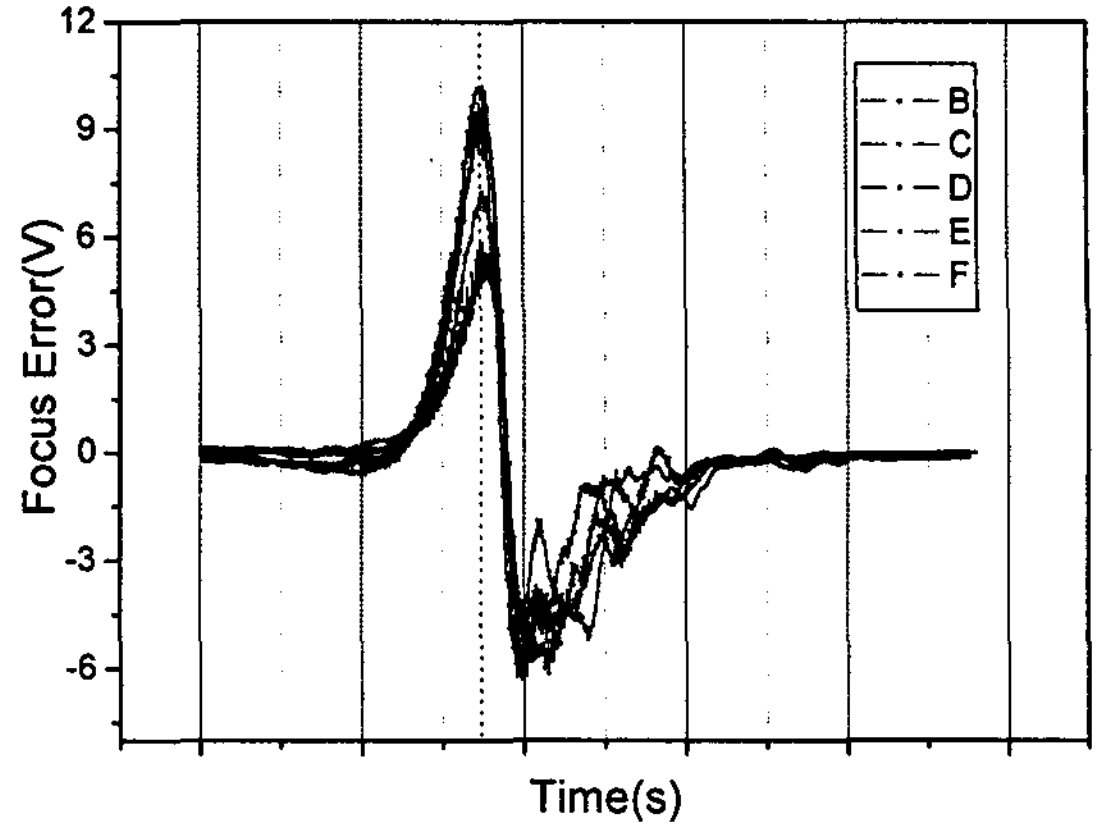


Fig. 11 Focus error of the various optical pickup heads

OPH 는 우선적으로 제외시켰다. 한편 Fig. 11 의 결과에서 보면 출력치의 피크치는 각 OPH 마다 차이가 있지만 발생하는 지점은 동일함을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 앞서 구한 포커싱 오차 모델에서 다른 파라미터는 수정이 불필요하고, 증폭비만 조절해주면 정확한 모델식을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 OPH 의 교체에 따른 효율적인 보정작업은 이론 식에서의 증폭비 변경만으로 가능하다. 표 1 은 Fig. 11 에서의 각 픽업의 최대, 최소값과, 피크치 발생지점간의 간격을 나타낸다. 본 실험에 사용된 광픽업헤드는 모두 LG 전자의 52 배속 CDROM 드라이브에서 확보되었고, 광픽업헤드의 모델은 SANYO 사의 SF-P151 의 여러 버전이다.

4.3 마이크로 캔틸레버의 굽힘 측정

OPH 를 이용한 변위센서의 실례로 나노 이미징 및 매니플레이션을 위한 AFM 에서의 마이크로 캔틸레버(cantilever)의 굽힘을 측정하였다. Fig. 12 는 마이크로 캔틸레버를 AFM 의 시편 매니플레이터로 이용하는 실험장치로 z 축 스캐너를 이용하

Table 1 Focus errors of the tested sensors

	V_{\max}	V_{\min}	V_{p-p} distance (μm)
B	9.83799	-6.31205	23.4
C	5.81781	-4.97623	23.0
D	7.2459	-5.22020	23.2
E	9.55272	-6.133305	23.2
F	10.18787	-6.26234	23.4

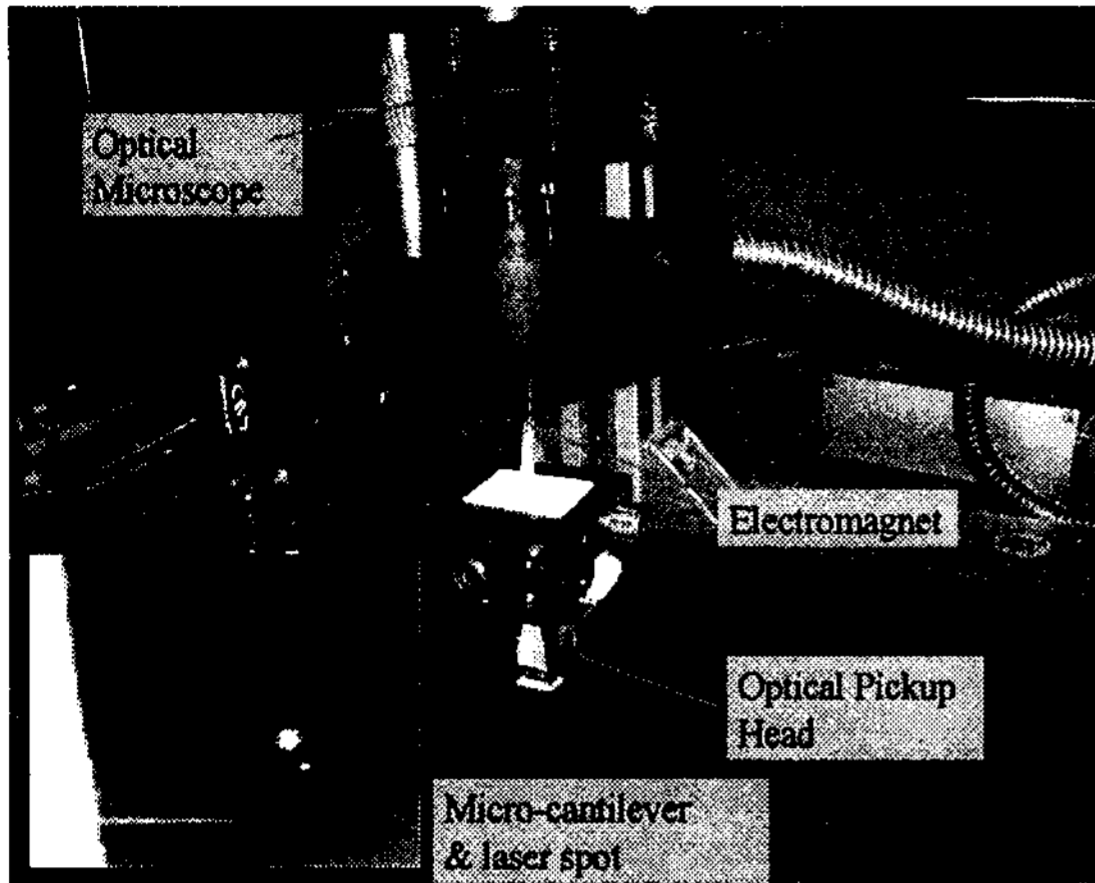


Fig. 12 AFM probe head using the proposed displacement sensor

여 예압을 주는 것과 동시에 외부의 자기력으로 캔틸레버의 강성을 조절하여 시편과의 컴플라이언스를 보상하는 장치이다.⁷ 캔틸레버의 끝단에는 자성재료가 부착되어 외부 전자석의 자기장에 의해서 굽힘이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 캔틸레버 지지단의 전자석에 전류를 인가하여 캔틸레버에 외력을 인가하고, 이 때 발생된 캔틸레버의 굽힘을 제안된 OPH 기반의 측정법을 이용하여 측정 한 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. 타 측정기를 통한 450 nm 의 반복 변위가 안정되게 측정되는 것을 확인할 수 있으며 이러한 측정법을 기반으로 향후 z 축 스캐너의 위치제어와 캔틸레버의 컴플라이언스 제어에 적용될 예정이다.

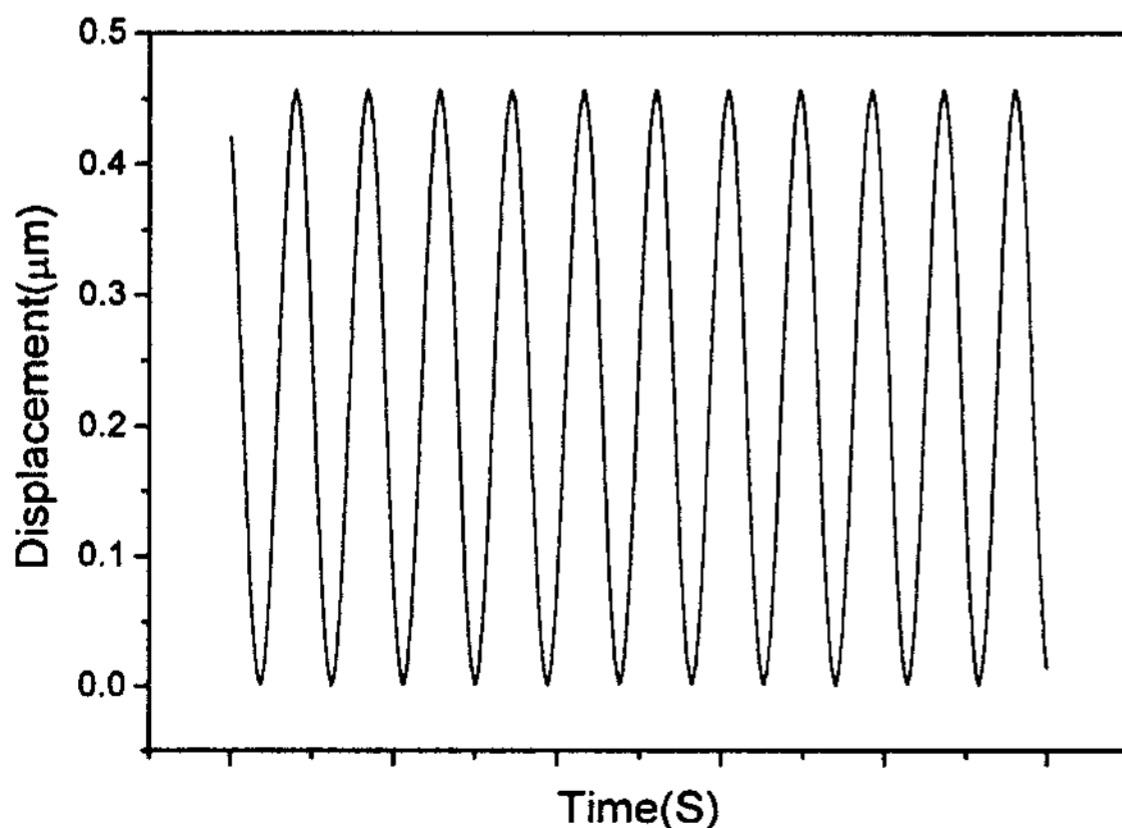


Fig. 13 Sinusoidal motion measured by the optical pick-up head

5. 결론

본 논문에서는 고가의 정밀변위센서를 대체하기 위한 수단으로서 OPH의 적용가능성에 대해서 다루었다. 비점수차법을 기초로 하여 OPH의 오차신호를 모델링하였으며, 이 식을 기반으로 변위변환식을 유도하였다. 기초실험을 통해 OPH의 측정가능영역파악이 이루어졌으며, 센서로의 활용도를 높이기 위한 방안으로 측정영역의 확장법과 효율적인 보정법이 제시되었다. 그리고 최종적으로 AFM에서의 마이크로 캔틸레버의 굽힘측정에 적용되어 OPH의 변위센서로의 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2005 학년도 안동대학교 학술연구지원 사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Saito, Y., Gao, Wei. and Kiyono, S., "A Single Lens Micro-Angle Sensor," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 8, No.2, pp. 14-20, 2007.
2. Choi, S. C., Park, J. W., Kim, Y. W. and Lee, D. W., "Self Displacement Sensing (SDS) Nano Stage," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 8, No. 2, pp. 70-75, 2007.
3. Park, J. H., Lee, S. H. and Baek, Y. S., "Mechanism Design of Optical Pickup Actuator for Fast Access of Optical Disk Drive," J. of KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 109-119, 2002.
4. Jun, H. G. and Park, Y. P., "Velocity Profile Analysis to Reduce Residual Vibration in Optical Pick-up," Trans. Of KSNVE, Vol. 10, No. 2, pp. 221-228, 2000.
5. Hnilicka, B., Besancon-Voda, A., Schroder, H. -J. and Filard, G., "Modelling the focus error characteristic of a DVD player," Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 629-630, 2002.
6. Wright, F. E., "The Methods of Petrographic-microscopic Research, Their Relative Accuracy," Carnegie Institution of Washington, p. 204, 1911.

7. Lee, S. H. and Jung K. S., "Magnetic Manipulation of a Microcantilever for a New Concept in Atomic Force Microscopy," IEEE Trans on Magnetics, Vol. 43, No. 6, pp. 2737-2739, 2007.