

## 공초점 원리와 광섬유 광원 변조를 이용한 무한보정 현미경 자동초점

박정재 · 김승우<sup>†</sup>

한국과학기술원 기계공학과 정밀측정연구실  
Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

이호재

한국생산기술연구원 광주지역본부  
Ⓣ 500-470 광주광역시 북구 대촌동 958-3번지

(2004년 5월 31일 받음, 2004년 10월 6일 수정본 받음)

비전을 이용한 광학식 검사공정이나 그 밖의 광학 현미경을 이용한 측정에 있어서 초점조절은 곧바로 측정 정밀도에 영향을 주는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 핀홀 대신 광섬유를 사용하는 공초점 현미경 구조와 하나의 광섬유가 광원과 검출기의 역할을 동시에 수행하는 상반구성(reciprocal scheme)을 적용함으로써 간결하게 시스템을 구성하면서 광축 정렬을 용이하게 하였으며, 압전소자(PZT)를 이용한 광섬유 광원의 광축 방향 변조를 통해 방향 정보가 실린 초점오차 신호를 획득함으로써 빠른 초점조절을 구현하였다. 대물렌즈 변조방식과 달리 광원 변조방식은 현미경 시스템에 미치는 물리적 영향을 줄일 수 있으며, 기존의 장치에 탑재가 비교적 용이하다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 변조 진폭과 시편의 반사도 및 기울기 변화에 따른 초점오차 신호의 변화를 측정하였으며, 거울 시편에 대한 초점조절을 통해 본 시스템의 성능을 평가해 보았다. 또한 종방향 특성곡선의 반치폭 비교실험을 통해 광원 변조는 광축 방향 분해능에 영향을 주지 않음을 확인하였다.

주제어 : autofocus, confocal microscopy, single mode fiber, light source modulation.

### I. 서 론

자동초점조절은 비전을 이용한 광학 측정분야 또는 제품의 가공 정도를 검사하는 분야에 있어서 가장 중요한 기술 중의 하나이며, 1970년대 비디오 디스크의 개발과 함께 활발히 연구되기 시작했다. 능동적인 초점조절 방법으로 먼저 빠른 속도의 스캐닝을 통한 초점 거리의 유동적 변화로부터 자동초점조절을 구현한 방법들을 들 수 있다. 빠르게 변하는 초점 거리를 가지는 렌즈는 영상획득, 현미경, 적응 광학계, 재료 가공, 광학식 검사 등의 많은 분야에 활용될 수 있으며, 특히 신속성 있는 미러의 곡률 반경을 변화시키는 방법<sup>[1]</sup>, 전기적으로 초점조절 장치의 굴절률을 변화시키는 방법<sup>[2]</sup>, 음향 광학 스캐너를 사용하여 렌즈의 초점 거리를 빠르게 변화시키는 방법<sup>[3]</sup> 등이 연구되어 왔다. 이와 달리, 초점 거리를 변화시키지 않고 대물렌즈 자체를 기계적으로 이동시켜서 초점조절을 수행하는 방법도 있는데, 이와 같은 방법들은 기본적으로 속도가 빠르다는 장점을 갖지만, 초점 오차 정보를 얻기 위한 주사 과정에 많은 광학 부품들이 들어가게 되며, 기존의 현미경 시스템에 적용이 어렵다는 단점을 갖는다. 능동적인 자동초점조절 방법들 중 다른 분야로서 보조 광원을 이용하여 반사되는 빔의 특성을 분석함으로써 자동초점조절을 수행한 연구들이 있었다. 먼저 비점수차방법<sup>[4,5]</sup>을 들 수 있

는데, 이 방법은 광선분할기와 최종 상평면 사이에 원통형 렌즈를 삽입하여 초점 위치에서 원의 형태를 갖는 광점이 초점 위치에서 벗어남에 따라 타원으로 바뀌면서 변하는 장축의 방향정보로부터 초점조절을 수행하는 방법이다. 이 방법은 검출기로 4분할 소자를 사용하게 되는데, 이 밖에 별도로 2개의 광검출기를 사용한 방법<sup>[6]</sup>, 이심 빔 방법을 이용하여 하나의 단일 실리콘 광검출 소자를 통해 초점조절을 수행하는 방법<sup>[7]</sup> 등을 들 수 있다. 이와 같은 초점조절 방법들은 측정 물체가 대물렌즈의 초점 거리에 위치해 있을 때의 검출기 신호를 0으로 만드는 초기화 과정이 반드시 필요하며, 이 과정에서 매우 정밀한 광축 정렬을 필요로 하기 때문에 시스템 구성이 어려워지고, 초점 오차 신호를 얻기 위한 알고리즘이 복잡해질 가능성이 매우 크다.

본 논문에서는 앞서 언급했던 능동적인 자동초점조절 방법들이 갖는 단점들을 극복할 수 있는 새로운 초점조절 시스템을 제시한다. 전통적인 공초점 현미경 구조에서 핀홀을 광섬유로 대체하게 되면 시스템 구성을 단순화시킬 수 있고, 광섬유 광원 자체를 다시 검출기로 활용하는 것이 가능해지기 때문에 광축 정렬의 어려움을 크게 해소할 수 있다. 또한, 광원 변조 방법을 통해 시스템에 대한 물리적 영향을 최소화하면서 왜란에 강인한 초점조절을 구현할 수 있게 된다.

<sup>†</sup>E-mail: swk@kaist.ac.kr

## II. 시스템 구성 및 특성

그림 1은 본 논문에서 제안한 자동초점 시스템 개략도를 나타낸다. 광원으로는 635 nm 파장을 갖는 LD를 사용하였다. LD에서 출발한 광은 2×1 광결합기를 거쳐서 폐를 연결된 광섬유 끝단으로 전파된다. 광섬유는 633 nm 파장대의 코어 직경이 3.3 μm인 단일모드 광섬유를 사용하였다. 폐를 광축 방향 변조를 위해 압전소자에 고정되어 있는데, 압전소자의 구동을 폐물에 전달하기 위해서 원형의 알루미늄 판 중심에 폐물 직경 크기의 구멍을 뚫어 폐를 삽입하고, 반지름 방향의 나사를 통해 고정시키는 구조로 설계하였다. 또한, 폐물의 끝단은 광축 정렬을 쉽게 하고 광원 변조를 위한 구조를 간단하게 하기 위해서 평탄한 면으로 가공하였다. 폐물 끝단에서 점광원의 형태로 출발한 광은 F/G와 압전소자 증폭기를 통해 발생하는 변조 신호에 의해 일정한 주파수와 진폭을 갖는 신호로 변조된다. 시준렌즈와 집광렌즈로 구성된 무한보정 광학계를 거쳐서 측정 시편 표면에서 반사된 광은 다시 같은 경로를 통해 광섬유 끝단으로 입사되고, PD를 통해 검출된다. 본 자동초점 시스템은 기본적으로 공초점 현미경의 구조를 적용하고 있는데, 공초점 원리의 특성상 핀홀의 역할을 하는 광섬유가 시편 상의 초점평면에서 반사된 광만을 받아들이며 불필요한 신호들을 차단시키는 역할을 하여 시편상의 공액점의 정보만을 얻는 결과를 가져오므로 광축 방향 분해능을 향상시킬 수 있게 된다. 공초점 현미경은 1950년대 Minsky에 의해 처음으로 제안되었고<sup>[8]</sup>, 1988년에 Harris는 최초로 핀홀이 단일 모드 광섬유로 대체된 시스템을 제안하였으며<sup>[9]</sup>, 1993년에 단일모드 반도체 레이저를 광원과 검출기로 동시에 사용하는 공초점 현미경이 Juskaitis에 의해 개발되었다(그림 1).<sup>[10]</sup>

핀홀이 광섬유로 대체된 공초점 현미경 구조에서 얻을 수 있는 장점은 첫째, 정렬오차로 인한 수차발생이 크게 줄어든다는 점이다. 단일모드 광섬유를 사용하는 경우, 광섬유의

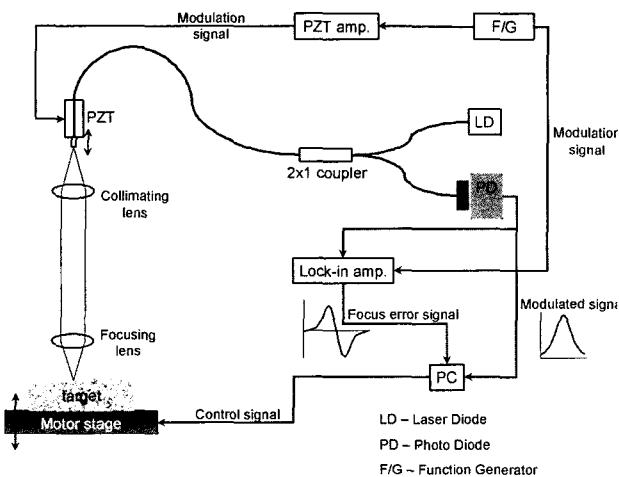


그림 1. 공초점 원리를 이용한 자동초점 시스템 개략도

코어가 오직 하나의 모드만을 받아들이기 때문에 레이저와 광원부분의 광섬유 사이에 정렬오차가 발생해도 광섬유로부터 출발하는 빔의 형태는 변하지 않으므로 시스템에 수차가 포함되지 않는다. 둘째, 먼지 등의 오염으로 인한 문제에 상당히 둔감해진다는 점을 들 수 있다. 핀홀의 경우, 먼지 등의 오염원으로 인해 핀홀이 쉽게 막히게 되어 신호 크기의 감소와 아울러 수차가 발생할 가능성이 크고 이를 제거하기 위해 시스템으로부터 분리시키고 다시 정렬해야 하는 어려움이 있지만, 광섬유의 경우에는 끝단면이 먼지로 인해 영향을 받을 가능성이 적으며, 광섬유를 사용함으로써 레이저와 검출기, 기타 전자 기기들을 현미경 자체로부터 분리시켜 놓을 수 있기 때문에 매우 단순하면서 왜란에 둔감한 시스템의 구현을 가능하게 한다.

한편, 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이, 무한보정 광학계를 적용함으로써 초점평면과 검출기 사이의 거리, D가 고정되지 않기 때문에 융통성 있는 시스템을 구성할 수 있게 되며, 일반적인 유한보정 광학계에 비해 정렬오차를 감소하는 효과를 가진다. 즉, 광학계 내부를 평행광이 진행하기 때문에 두 렌즈 사이의 광축 상의 정렬오차는 시스템 성능에 거의 영향을 미치지 않으며, 광원 변조 시에도 광섬유의 변조 진폭이 시준렌즈의 초점심도 보다 작도록 제한함으로써 변조로 인해 광학계 내부를 진행하는 광의 특성이 변하여 무한보정 광학계에 영향을 미치는 것을 방지할 수 있다. 또한, 단일모드 광섬유가 광원과 검출기의 역할을 동시에 수행하는 상반구조가 적용된 구조에서 광원과 광학계 사이의 광축 정렬은 곧바로 검출기와 광학계 사이의 광축 정렬을 보장해 주기 때문에 광학계 정렬의 어려움이 크게 줄어들게 되며, 별도의 검출기가 필요 없기 때문에 시스템 구성이 보다 간단해지게 된다(그림 2).

광축 방향에 따른 시편의 이동을 통해서 PD에서 검출되는 신호의 형태는 단일모드 광섬유를 이용한 공초점 시스템에

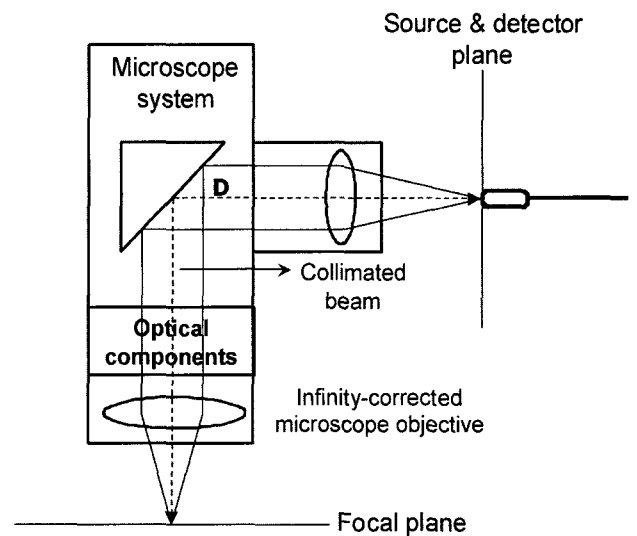


그림 2. 현미경 시스템에 적용된 무한보정 광학계와 상반구성.

서 종방향 특성 곡선(axial response curve)의 유도<sup>[11]</sup>를 통해 알아볼 수 있고, 이 과정에서 광섬유의 모드 특성과 상반구성이 적용된다. 그림 3을 살펴보면, 검출기로 사용되는 광섬유 끝단면에서의 입사광 진폭,  $U$ 는 수많은 고유모드(eigen mode),  $e_p$ 의 조합으로 완전하게 표현될 수 있고, 식 (1)과 같이 나타난다.

$$U = \sum_p a_p e_p \quad (1)$$

$a_p$ 는  $p$ 번째 고유모드의 여기효율(excitation efficiency)을 나타낸다. 본 시스템에서는 단일모드만을 사용하므로 기본 모드(fundamental mode)만을 고려한 검출 광강도,  $I$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = |a_1|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U \cdot e_1 dS \right|^2 \quad (2)$$

식 (2)에서  $a_1$ 은 최종 검출되는 진폭을 나타내며, 식 (3)과 같이 나타난다.

$$a_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dt_d dw_d dt_o dw_o e_1(t_d, w_d) h_2(t_o - t_d, w_o - w_d) h_1(t_o, w_o) \quad (3)$$

식 (3)에서  $h_1, h_2$ 는 각각 광원에서 물체로, 물체에서 검출기로 향하는 점퍼함수를 나타낸다. 여기서, 결상렌즈의 점퍼함수와 광섬유의 기본모드를 결합시킨 형태로 정의되는 유효점퍼함수,  $h_{2,eff}$ 를 도입하고, 상반구성을 적용하게 되면 식 (3)을 식 (4)와 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$a_1 = a_E \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dt_d dw_d h_{2,eff}(t_d, w_d) h_{2,eff}(t_d, w_d) \quad (4)$$

유효점퍼함수의 역푸리에 변환에 해당하는 유효동공함

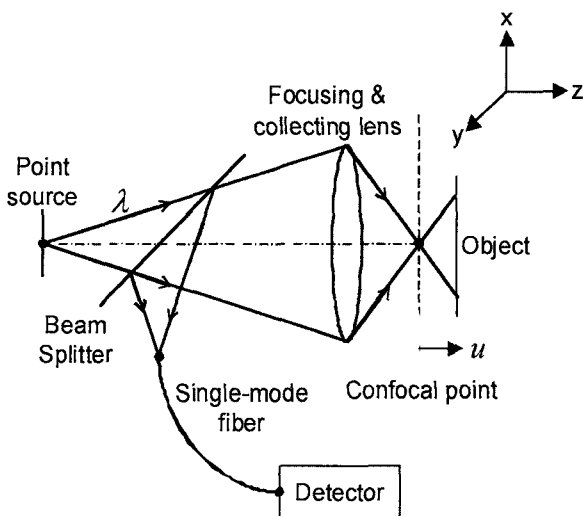


그림 3. 종방향 특성 곡선 유도를 위한 공초점 현미경 구조

수,  $P_{2,eff}$ 를 도입하여 광강도 식으로 다시 정리하여 표현하면 식 (5)와 같다.

$$I = |a_1|^2 = a_E^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{2,eff}^2 dA \right|^2 \quad (5)$$

마지막으로, 공초점 시스템의 종방향 특성 곡선을 얻기 위해서 유효동공함수에 탈초점 위상 계수(defocus phase factor),  $\exp\left(\frac{j u \rho^2}{2}\right)$ 를 도입한다. 결과적으로, 최종 광강도,  $I(z)$ 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$I(z) = a_E^2 \left| \int_0^1 P_{2,eff}(\rho) \exp\left(\frac{j u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2 \quad (6)$$

식 (6)에서  $\rho$ 는 광섬유 반경방향의 정규화된 변수를 나타내고,  $u$ 는 광축 방향의 실제거리,  $z$ 를 정규화한 변수를 나타낸다. 사용된 광원의 파장과 단일 모드 광섬유의 코어 반경, 결상렌즈의 N.A.값을 대입하면 식 (6)을 통해 이론적인 종방향 특성 곡선을 구할 수 있게 된다. 실제로 사용된 광원의 파장,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 광섬유 코어 반경,  $r_c = 1.65 \mu\text{m}$ , 시준 렌즈 NA는 0.15, 집광렌즈 NA는 0.28이었고, 이와 같은 값들을 이용하여 수치적인 방법을 통해 식 (6)을  $z$ 에 대하여 나타내본 결과는 그림 4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이, 분해능을 의미하는 종방향 특성 곡선의 반치폭은 대략  $u$  값으로 13,  $z$  값으로 환산하면  $5 \mu\text{m}$  정도로 나타났는데, 이는 측정 시편의 반사도가 100%, 광학계의 정렬오차가 거의 없고, 광섬유가 오직 단일모드만을 전파시킨다는 가정하에 계산된 결과이므로 실제 실험값과는 어느 정도 차이를 보일 것으로 예상된다. 또한, 위 결과는 이상적인 편향을 사용하였을 때의 값보다 2배 정도 크게 나타났는데, 단일모드 광섬유를 적용하여 얻은 결과와 같은 직경을 갖는 편향을 사용하였을 때와의 차이는 바로 유효동공함수의 차이에서 비롯된다. 편향의 경우에는 코어 직경 내에서 유효동공함수 값이 일정한 크

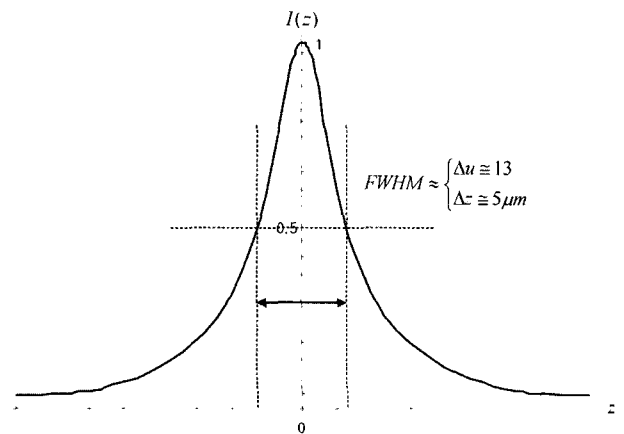


그림 4. 이론적인 종방향 특성 곡선의 형태와 분해능.

기로 유지되는 반면, 단일 모드 광섬유의 경우에는 기본 모드만을 받아들이는 특성으로 인해 가우시안 형태의 특정한 분포를 갖게 된다. 유효동공함수의 형태를 이상적인 핀홀에 가깝게 가져가기 위해서는 광섬유 코어 반경이 작아져야 하는데, 이는 한계를 가지고 있으므로 광원부의 N.A.값을 보다 작게 함으로써 깊이 방향 분해능을 높이는 것이 가능하다 (그림 3).

### III. 광원 변조와 초점오차신호 획득

그림 5는 종방향 특성 곡선 상의 임의의 위치에서 변조 신호에 대한 출력 신호, 즉 측정 물체 표면에서 반사되어 PD를 통해 검출되는 신호의 변화를 보여준다. 이 때, 광축 상의 위치에 따라서 진폭과 위상이 달라지게 되는데, 광강도가 가장 크게 나타나는 초점 위치에서는 진폭이 가장 최소값을 갖게 되며, 초점 위치를 지남에 따라 출력 신호 사이의 위상이 반전됨을 예상할 수 있고, 이는 미소신호동기증폭기(lock-in amp.)를 이용한 초점오차신호 검출 과정을 통해 확인할 수 있다. 먼저, 그림 5의 종방향 특성 곡선을  $y = f(z)$ 라는 함수로 가정하고,  $z = z_0$ 인 점에서 테일러 급수 전개를 해보면 식 (7)과 같다.

$$y|_{z=z_0} = f(z_0) + f'(z_0)(z-z_0) + \frac{1}{2}f''(z_0)(z-z_0)^2 + \dots \quad (7)$$

여기서  $z = z_0$ 인 점에서 변조 신호의 입력은 곧  $z$ 라는 변수에  $z_0 + A \cos \omega t$ 를 대입하는 것과 같고, 그 결과는 식 (8)과 같다.

$$y|_{z=z_0} = f(z_0) + f'(z_0)A \cos \omega t + \frac{1}{2}f''(z_0)(A \cos \omega t)^2 \dots \quad (8)$$

여기서  $\omega, A$ 는 각각 변조 주파수와 변조 진폭을 나타낸다. 식 (8)의 결과는 그림 5에서 출력 신호에 해당하고, 미소신호동기증폭기는 변조 신호와 출력 신호, 이 두 신호를 입력으로 받아들이게 된다. 미소신호동기증폭기상에서는 먼저 혼합(mixing)을 통해 두 신호의 곱이 이루어지게 되는데, 그 결과는 식 (9)와 같다.

$$y \cdot A \cos \omega t|_{z=z_0} = f(z_0)A \cos \omega t + f'(z_0)A^2 \cos^2 \omega t + \frac{1}{2}f''(z_0)A^3 \cos^3 \omega t \dots \quad (9)$$

마지막으로, 저대역 필터를 통과시켜 DC성분만을 추출하게 되면 식 (10)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$y|_{z=z_0, lock-in. out} \approx \frac{A^2}{2} f'(z_0) \quad (10)$$

식 (10)에서 알 수 있는 바와 같이, 미소신호동기증폭기를

통해 얻게 되는 신호는 종방향 특성 곡선상의 변조 위치에서의 미분값에 비례하는 크기를 가지고 있으며 변조 진폭의 크기에 비례하는 특징을 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 종방향 특성 곡선에 대한 미분 신호의 형태를 보여주고 있는데, 미분 신호 상의 선형적인 특성이 나타나는 구간, W에서 얻게 되는 미소신호동기증폭기 신호는 초점 위치에서 벗어난 정도에 해당하는 신호의 크기정보와 초점 위치에 대한 상대적인 방향을 의미하는 부호정보를 동시에 포함하고 있기 때문에 초점오차신호로 사용하는 것이 가능하며, 이를 통해 자동초점조절을 수행할 수 있게 된다(그림 5, 6).

### IV. 실험 결과

실험실에서 그림 1과 같은 자동초점조절 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다. 시준렌즈는 Nikon사의 BD Plan 5배 렌즈(NA = 0.15)를 사용하였고, 집광렌즈로는 Mitutoyo사의

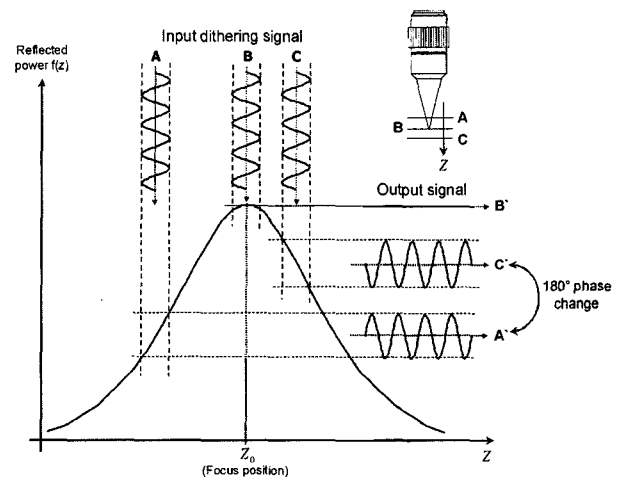


그림 5. 종방향 특성 곡선 상의 광원 변조 형태

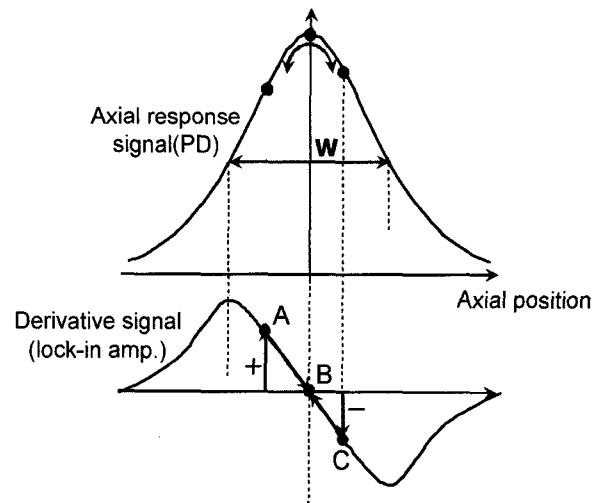


그림 6. 종방향 특성 곡선과 미분 신호

M Plan Apo 10배 렌즈(NA = 0.28)를 사용하였다. 측정 시편의 광축 방향 이송을 위해 SURUGA SEIKI사의 스텝 모터 스테이지를 사용하였는데, 분해능은 20 nm, 반복능은 300 nm, 최대 행정은 20 mm였다. 미소신호동기증폭기와 광축 방향 스테이지는 GPIB 통신으로 PC와 연결되어 있고, PD 신호는 A/D 보드를 통해서 PC에서 받게 된다. 합리적인 변조 진폭을 결정하기 위해 변조 진폭의 변화에 따른 미소신호동기증폭기 신호의 변화를 관찰한 결과는 그림 7과 같다. 변조 진폭은 정전용량형 센서를 이용하여 페룰이 고정되어 있는 알루미늄판의 진동 폭을 직접 측정함으로써 얻을 수 있었다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 미소신호동기증폭기 신호의 크기는 변조 진폭에 비례하는 형태로 나타나기 때문에 변조 진폭의 크기가 증가할수록 미소신호동기증폭기 신호의 크기가 같이 커지는 경향을 확인할 수 있다. 변조 진폭이 1  $\mu\text{m}$ 보다 작은 경우에는 초점 위치 근방에서 초점오차신호에 분별력이 없어질 정도로 신호 크기가 작아지기 때문에 변조 진폭은 이보다 커야 한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 종방향 특성 곡선의 반치폭에 비해 지나치게 큰 변조 진폭은 원하는 미분 신호의 형태를 왜곡시킬 우려가 있기 때문에 종방향 특성 곡선의 반치폭 정도를 상한선으로 설정하는 것이 바람직하다(그림 7).

그림 8과 9는 세 가지의 각각 다른 반사도를 갖는 시편(거울, 크롬, 유리면)에 대해서 시편의 기울기에 따른 PD신호의 최대값의 변화와 미소신호동기증폭기 신호의 선형구간 높이의 변화를 측정해본 결과이다. 시편을 기울인 각도는  $\pm 4 \sim 5^\circ$  정도였다. 예상할 수 있는 바와 같이, 반사도가 큰 시편일수록 두 그래프에서 신호의 크기가 모두 크게 나타나게 되며, 시편의 기울기가 커질수록 신호의 크기는 작아지게 됨을 알 수 있다. 실제로 측정 상에 존재하는 노이즈 크기( $\pm 0.000075V$ )를 고려하였을 때, 그림 9를 통해서 본 시스템에서 적용될 수 있는 반사도와 기울기에 대한 예측이 가능하다(그림 8, 9).

그림 10은 거울면을 이용하여 예상되는 초점 위치에 대해 양쪽 방향으로 10  $\mu\text{m}$  떨어진 위치에서 자동초점조절을 수행하는 과정을 보여준다. 앞서 언급한 노이즈 크기를 고려하여 초점 영역을 설정하고 그 영역 내로 미소신호동기증폭기 신호가 들어오도록 제어를 수행하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이, 제어가 끝난 위치에서 미소신호동기증폭기 신호는 양쪽 방향 모두 설정된 초점 영역 내로 수렴하였으며, 양쪽 방향의 초점 위치를 나타내는 스테이지 위치의 차이는 0.24  $\mu\text{m}$ 로 설정된 초점 영역에 대한 오차 범위인 0.6  $\mu\text{m}$  내로 들어왔음을 확인할 수 있다. 그림 11은 초점조절이 이루어지는 동안 PD신호의 변화를 나타낸 결과이며, 양쪽 방향에서 모두 초점 위치를 의미하는 최대값으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 거울면을 이용하여 초점 위치 수렴에 대한 반복능을 측정해본 결과를 보여준다. 예상되는 초점 위치에서 10  $\mu\text{m}$  떨어진 위치에서 24회 반복하여 자동초점조절을 수행하였는데, 그 결과 P.V. 값으로 0.5  $\mu\text{m}$ 를 얻었다. 이 값은 앞에서 언급한 초점 영역에 대한 오차 범위보다 작은 값

으로 일정한 위치에서의 반복적인 자동초점조절에 대한 신뢰도를 높여주는 결과라고 볼 수 있다(그림 10, 11, 12).

마지막으로, 광원 변조가 축방향 분해능에 미치는 영향을 알아보기 위해 광원을 고정시킨 상태와 변조시킨 상태, 두

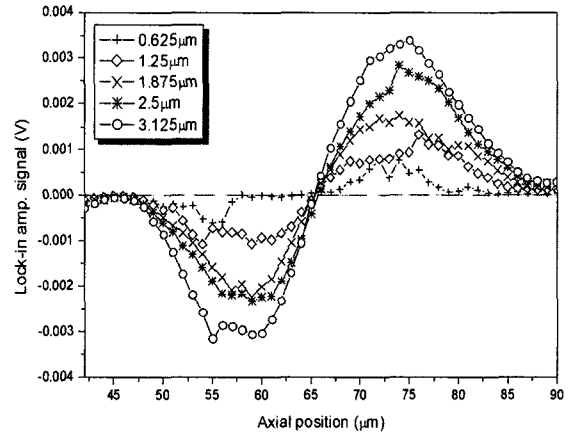


그림 7. 변조 진폭의 변화에 따른 미소신호동기증폭기 신호.

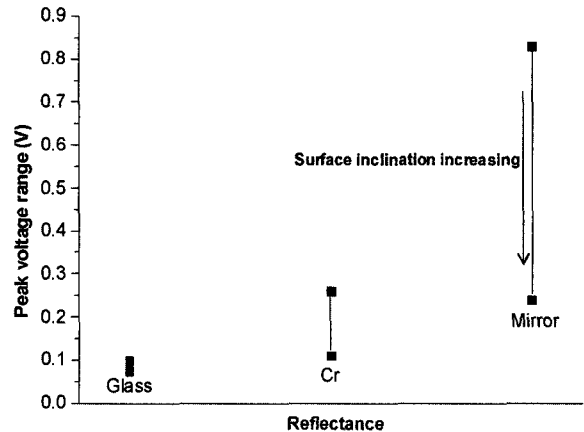


그림 8. 시편의 반사도와 기울기 변화에 따른 PD신호 최대 광강도 값의 변화.

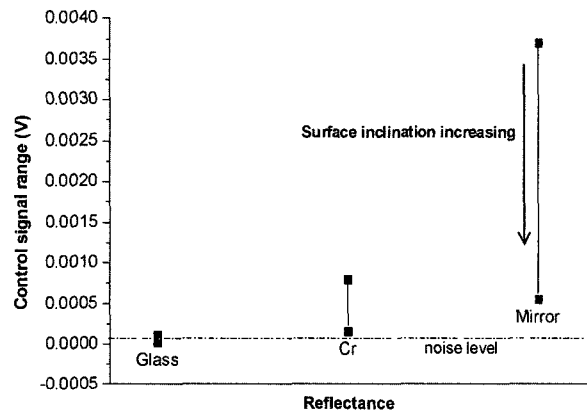


그림 9. 시편의 반사도와 기울기 변화에 따른 미소신호동기증폭기 신호의 선형구간 높이 변화.

가지 경우에 대해서 종방향 특성 곡선을 구해보았는데, 그 결과는 그림 13과 같다. 각각 반치폭은  $28\ \mu\text{m}$ ,  $25\ \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 이로부터 광원 변조는 축방향 분해능에 거의 영향을

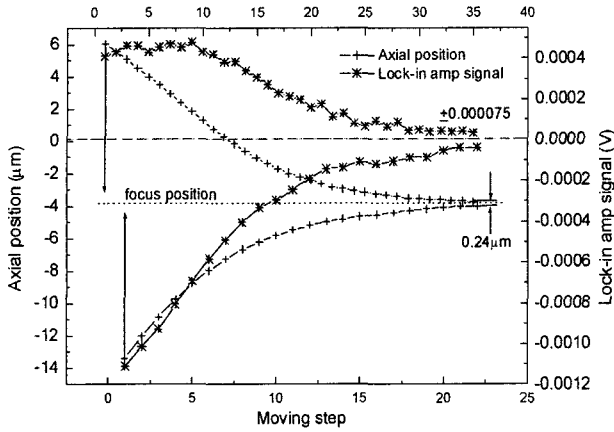


그림 10. 자동초점조절 실험 중 미소신호동기증폭기 신호와 스테이지 위치의 변화.

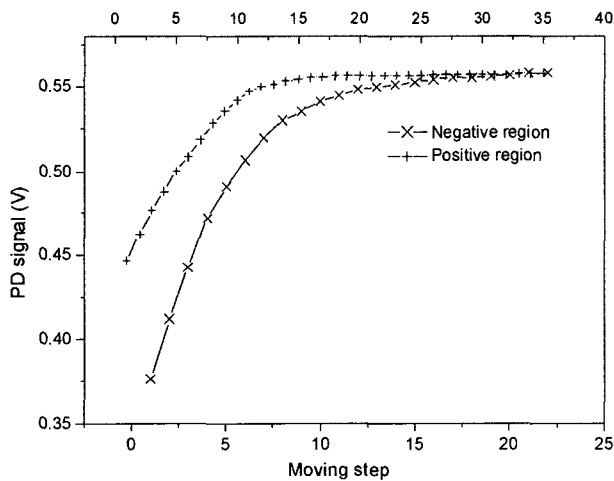


그림 11. 자동초점조절 실험중 PD신호의 변화.

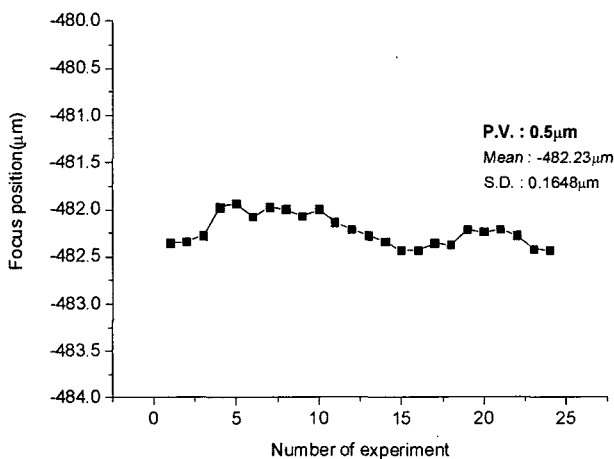


그림 12. 거울면에 대한 자동초점조절의 반복능 실험.

을 주지 않음을 확인할 수 있었다(그림 13). 또한, 위 결과는 2장에서 언급한 바와 같이 이론적으로 계산한 반치폭과  $20\ \mu\text{m}$  정도의 차이를 보이고 있는데, 분해능을 결정하는 반치폭은 초점위치 근방에서 초점조절의 민감도를 결정하는 중요한 요소이므로, 초점조절 성능을 향상시키기 위해서는 시스템 정렬오차를 최소화하고 고배율의 대물렌즈를 사용하는 것이 필요하다.

그림 14는 본 논문에서 제안한 자동초점조절 장치가 실제 현미경 시스템에 장착된 모습을 보여준다. 측정시편의 표면 영상을 획득하기 위한 CCD와 대물렌즈, 자동초점조절 장치가 장착되는 어댑터, 광선분할기로 구성되는 현미경 시스템은 앞서 언급한 초점오차신호에 따라서 발생된 제어신호에 의해 광축 방향을 따라 이동하면서 측정시편에 대해 초점을 맞추게 된다.

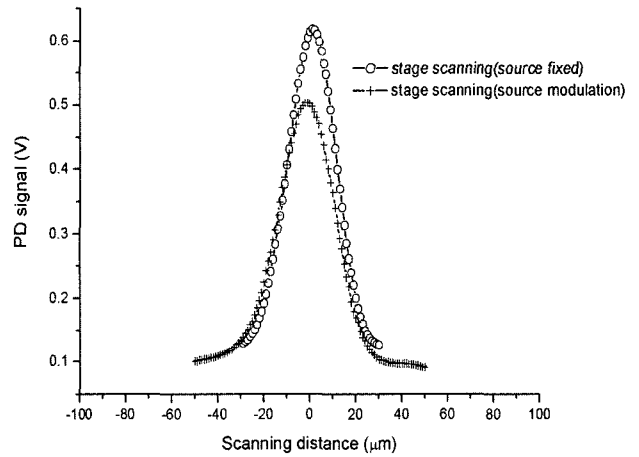


그림 13. 광원 변조가 축방향 분해능에 미치는 영향

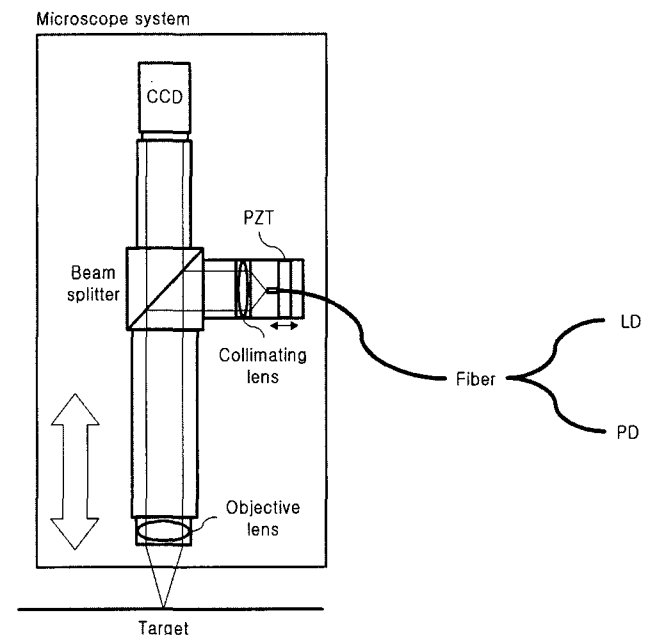


그림 14. 실제 현미경 시스템에 장착된 자동초점 장치

## V. 결 론

본 논문에서는 비전을 이용한 검사장비 또는 비접촉 3차원 형상측정기에 쉽게 적용될 수 있는 현미경 자동초점조절 시스템을 제안하였다. 편환 대신 단일 모드 광섬유를 사용하는 공초점 현미경 구조와 하나의 광섬유가 광원과 검출기의 역할을 동시에 수행하는 상반구성을 적용함으로써 간결하게 시스템을 구성하면서 광축 정렬을 용이하게 하였으며, 광원 변조 방법을 통하여 초점오차신호를 획득함으로써 시스템에 대한 물리적 영향을 최소화하면서 기타 왜란에 강인한 초점 조절이 가능하도록 하였다. 결과적으로, 다양한 시편의 반사도 및 기울기에 대한 본 시스템의 적용 가능성을 확인하였고, 변조의 효과가 광축 방향 분해능에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] L. Zhu, P. C. Sun, and Y. Fainman, "Aberration-free dynamic focusing with a multichannel micromachined membrane deformable mirror," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 25, pp. 5350-5354, 1999.
- [2] Y. Takaki, and H. Ohzu, "Liquid-crystal active lens: A reconfigurable lens employing a phase modulator," *Opt. Commun.*, 126, pp. 123-134, 1996.
- [3] A. Kaplan, N. Friedman, and N. Davidson, "Acousto-optic lens with very fast focus scanning," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 14, pp. 1078-1080, 2001.
- [4] D. K. Cohen, W. H. Gee, M. Ludeke, and J. Lewkowicz, "Automatic focus control: the astigmatic lens approach," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 4, pp. 565-570, 1984.
- [5] K. C. Fan, C. L. Chu, and J. I. Mou, "Development of a low-cost autofocusing probe for profile measurement," *Meas. Sci. Technol.*, 12, pp. 2137-2146, 2001.
- [6] 이호재, 1995, "고배율 현미경의 자동초점장치," 한국과학기술원, 석사학위 논문.
- [7] Li QX, Bai LF, Xue SF, Chen LY, "Autofocus system for microscope," *Opt. Eng.*, vol. 41, no. 6, pp. 1289-1294, 2002.
- [8] M. Minsky, "Microscope apparatus," U.S. Patent 3013467, 1961.
- [9] M. R. Harris, "Scanning confocal microscope including a single fibre for transmitting light to and receiving light from an object," U.S. Patent 5120953, 1992.
- [10] R. Juskaitis, N. P. Rea, and T. Wilson, "Semiconductor laser confocal microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 4, pp. 578-584, 1994.
- [11] S. Kimura, and T. Wilson, "Confocal scanning optical microscope using single-mode fiber for signal detection," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 16, pp. 2143-2150, 1991.

## **Autofocus of Infinity-Corrected Optical Microscopes by Confocal Principle and Fiber Source Modulation Technique**

Jungjae Park and Seung-Woo Kim<sup>†</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Science Town, Daejeon, 305-701, South Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: swk@kaist.ac.kr*

Hojae Lee

*Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju, 500-470, South Korea*

(Received May 31, 2004, Revised manuscript October 6, 2004)

The autofocus is one of the important processes in the automated vision inspection or measurements using optical microscopes, because it influences the measuring accuracy. In this paper, we used the confocal microscope configuration based on not a pinhole but a single-mode optical fiber. A single mode fiber has the functions of source and detector by applying the reciprocal scheme. As a result, we acquired a simple system configuration and easy alignment of the optical axis. Also, we embodied a fast autofocus system by acquiring the focus error signal through a source modulation technique. The source modulation technique can effectively reduce physical disturbances compared with objective lens modulation, and it is easily applicable to general optical microscopes. The focus error signal was measured with respect to the modulation amplitude, reflectance of the specimen and inclination angle of the measuring surface. The performance of the proposed autofocus system was verified through autofocusing flat mirror surface. In addition, we confirmed that source modulation rarely degrades the depth resolution by the comparison between the FWHMs of axial response curves.

OCIS Codes : 180.1790, 220.2560, 060.2430, 060.4080.