

# 주사 레이저 광집계를 위한 압전 구동기 주파수 특성 분석과 주사 경로 추적 및 보상

황선욱 · 이송우 · 이용구<sup>†</sup>

광주과학기술원 기전공학과  
☎ 500-712 광주광역시 북구 오룡동 1번지

(2008년 2월 18일 받음, 2008년 2월 27일 수정본 받음)

주사 레이저 광집계에서 대물렌즈에 의해 집중된 레이저 초점을 제어하기 위해 사용되는 고속 구동기는 입력 신호의 주파수가 증가함에 따라 출력이 감소한다. 이러한 입출력의 괴리는 CCD 카메라를 통해 관찰이 어려우며 사용자는 희미하게 보이는 레이저 주사 형상을 보고 물체를 조작하여 물체를 포획할 수 없거나 포획하더라도 안정된 제어를 할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 사용된 고속 구동기의 주파수 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 입력 주파수에 따른 실제 주사 경로를 측정하여 시각화해 주는 방법과 입출력 데이터의 차이를 계산하여 입력 데이터를 보상하는 방법을 제안한다.

주제어: Optical tweezers, Laser scanning, Piezo actuators, Feedback control

## I. 서 론

최근에 대두되고 있는 마이크로/나노 기술을 지속적으로 발전시키기 위해서는 마이크로 나노크기의 물체를 효과적으로 제어할 수 있는 기술이 필수적이다. 광집계(OT, Optical Tweezers)는 이러한 기능을 할 것으로 기대되는 기술 중의 하나로서 레이저 빔을 대물렌즈로 강하게 집중하여 반사와 굴절을 통해 생기는 운동량(momentum) 차이로 인한 광압(radiation pressure)으로 대상 물체를 포획하는 기술이다.<sup>[1]</sup> 이 기술은 수십 나노미터에서 수십 마이크로미터에 이르는 크기의 물체를 원하는 위치로 배치하고 제어할 수 있으며 AFM(Atomic Force Microscopy) 및 그리퍼(gripper)에 비해 포획과 방출이 쉬워 기계, 물리, 화학, 생명공학 등 다양한 분야에서 효율적인 수단으로 활발한 연구가 이루어지고 있다.<sup>[2]</sup> 개발 초기에는 하나의 물체를 포획하거나 포획된 물체의 특성을 분석하는 데 이용되었으나 여러 분야로 그 응용이 확대되면서 많은 물체를 동시에 포획해서 원하는 위치로 제어해야 하는 필요성이 생겼다. 이러한 다수 포획 및 제어를 가능하게 하는 대표적인 방법은 SLM(Spatial Light Modulator) 또는 DOE(Diffractive Optical Element)로 만든 홀로그램을 이용하는 HOT(Holographic Optical Tweezers)<sup>[3-4]</sup>와 갈바노(galvano) 또는 압전(piezoelectric) 기반의 구동기(stage) 및 AOD(Acousto-optic Deflector)를 이용하여 레이저 빔 경로를 빠르게 변조하는 주사 레이저 광집계(SLOT, Scanning Laser Optical Tweezers)<sup>[5-7]</sup>가 있다.

본 연구에서는 다수의 구형체를 동시에 포획하거나 로드와 같은 비대칭 형상의 물체를 정교하게 포획하기 위해 고속 주사가 가능한 압전 구동기(piezo stage)를 사용한다. 압전 구동기는 대물렌즈에 의해 집중된 레이저 초점을 3차원으로 위

치 제어하기 위해서 경사 구동기(tilt stage)와 선형 구동기(linear stage)로 구성된다. 경사 구동기는 두 개의 축으로 회전할 수 있으며 이를 통해 레이저 초점을 광학축에 수직인 평면상에서 움직이게 한다. 선형 구동기는 대물렌즈를 직선 이동시킬 수 있으며 이는 광학축 상으로 레이저 초점을 대물렌즈 이동량만큼 움직이게 한다. 따라서 두 장비의 조합으로 레이저 초점을 3차원 공간상에서 제어하여 복잡한 형태의 트랩을 만들 수 있다. 그러나 경사 구동기와 선형 구동기는 주파수 특성을 가져 입력 주파수에 따라 출력 신호의 크기가 변한다. 일반적인 기계시스템의 주파수 특성은 고주파 영역에서 입력 신호 대비 출력 신호가 감소하고 위상 지연이 발생하며, 대역폭에 의해 입력 신호를 잘 추종할 수 있는 주파수 범위가 결정된다. 사용한 압전 구동기는 이러한 주파수 특성을 나타내며 이로 인해 두 장비를 구동할 때 입력 신호의 주파수에 따라 출력이 감소하여 주사할 수 있는 범위가 좁아지게 되고, 결국 다른 형태의 경로를 주사하게 된다.<sup>[8]</sup> 그러나 실제 실험에서 이러한 입출력 신호의 괴리를 관찰하는 것은 쉽지 않다. 그 이유는 레이저에 의한 CCD(Charge Coupled Device) 카메라의 손상을 방지하기 위해 거울 또는 필터를 이용하여 대부분의 레이저를 차단하고 미량의 레이저만 CCD 카메라로 전달하기 때문이다. 따라서 사용자는 원하는 형태로 레이저가 주사되는지 확인하기 어려우며 희미하게 보이는 레이저 주사 형상을 보고 대상 물체를 조작해야만 한다. 이러한 문제로 정밀한 레이저 트랩의 구현이 어려워지고 대상 물체의 형상에 따라 물체를 포획할 수 없거나, 포획하더라도 안정된 제어를 할 수 없게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 고속 구동기의 주파수 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 주파수에 따른 실제 주사 경로를 측정하여 시각화해 주는 방법과, 입출력 데이터의 차이를 계산하여 입력 데이터를 보상하는 방법을 제안한다.

<sup>†</sup>E-mail: lygu@gist.ac.kr

## II. SLOT 시스템 구성 및 컴퓨터를 이용한 시스템 제어

### 2.1. SLOT 시스템 구성

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험 구성을 나타낸다. 실험 장치는 도립 현미경(inverted microscope) 형태의 구조를 가지고 있으며 사용된 레이저는 1064 nm의 파장을 갖는 광섬유 레이저(fiber laser)로 가우시안(Gaussian) 에너지 분포를 갖는 TEM<sub>00</sub> 모드 레이저이다. 광집계에서 가장 중요한 역할을 하는 광학요소인 대물렌즈는 포획과 동시에 샘플 영상 획득을 위해 사용되며 배율이 100×, 개구수(NA)가 1.4인 유침(oil immersion) 타입이 사용되었다. 4개의 양면 볼록(bi-convex) 렌즈(L1~L4)는 직경이 약 2.4 mm인 입력 레이저 빔을 약 3배 확대하여 직경 7.2 mm인 평행광(collimated beam)으로 만들고, 이 레이저 빔은 대물렌즈로 입사할 때 약 7 mm인 대물렌즈 구경(objective back aperture)을 가득 채우면서(overfilling) 강하게 집속된다. 이 집속된 레이저 초점은 물체를 포획하거나 제어하는 데 사용되며 샘플에 산란된 후 다시 대물렌즈로 수집되어 튜브 렌즈(L5)에 의해 CCD 카메라에 상을 맺게 된다. 샘플 영상은 할로겐 램프 광원을 이용하여 명시야상(bright field) 방법으로 획득한다. 그러나 포획과 영상 획득이 하나의 대물렌즈로 구현되므로 레이저 빔이 영상 경로를 통해 CCD 카메라로 들어갈 수 있다. 강한 파워의 레이저 빔은 직접적으로 CCD 카메라로 들어가면 CCD 카메라에 심각한 손상을 줄 수 있으므로 이를 막기 위해 색선틀거울(DM, Dichroic Mirror)을 사용하였다. 이 색선틀거울은 물체 포획을 위해 사용하는 레이저 파장인 1064 nm 파장의 레이저는 반사시키지만 영상 획득을 위한 가시광선 영역의 파장은 투과시켜 CCD 카메라를 레이저 빔으로부터 보호한다. 집속된 레이저 초점은 nPoint 사의 경사 구동기(RXY5A), 선형 구동기(NPX 150Z) 및 제어 컨트롤러(C300 Series Controller)에 의해 3차원으로 위치제어되며, 사용자의 직관적인 제어를 위해서 경사 구동기, 선형 구동기, 샘플 구동기(sample stage), CCD 카

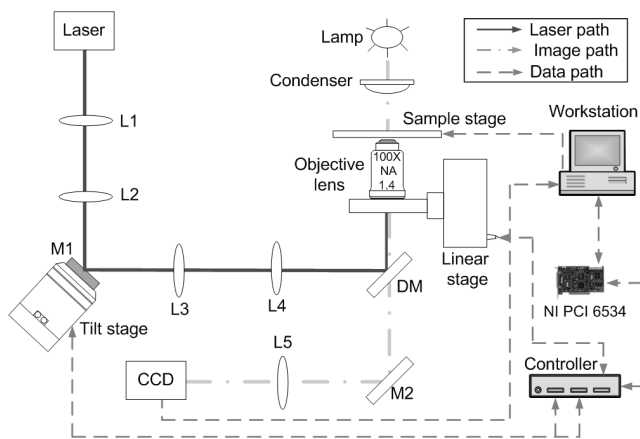


그림 1. 주사 레이저 광집계 시스템(L1~L5: 양면 볼록 렌즈, M1, M2: 거울, DM: 색선틀거울, CCD: CCD 카메라)

메라는 컴퓨터에 의해 제어된다.

### 2.2. 시분할 기반 3차원 레이저 초점 제어

제안된 주사 레이저 광집계 시스템은 대물렌즈에 의해 집속된 레이저 초점을 3차원으로 위치 제어하기 위해 시분할 방법을 사용한다. 시분할 방법은 고속 구동기를 이용하여 레이저의 경로를 빠르게 변조시키는 기술을 말한다. 기존의 주사 레이저 광집계는 레이저 초점을 광축 방향으로 움직이기 위해 L1 또는 L3 렌즈를 선형 구동기에 부착하여 움직였다. 그러나 이 방법은 렌즈의 이동량과 레이저 초점의 실제 이동량 사이에 큰 손실이 있어 고속 주사를 얻을 수 없다.<sup>[9]</sup> 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 렌즈를 움직이는 기존 연구와는 달리 대물렌즈를 선형 구동기에 직접 부착하여 대물렌즈를 고속으로 이송한다. 그림 2는 경사 구동기와 선형 구동기를 이용한 레이저 초점의 제어를 나타낸다. 사용된 경사 구동기는 질량 10g의 거울을 부착하고 있으며 두 개의 축으로 ±5 mrad 회전하여 그림 2(a)와 같이 레이저 초점을 광축에 수직인 평면상에서 움직이게 한다. 선형 구동기는 대물렌즈를 부착하여 ±75 μm의 거리를 직선 운동할 수 있으며 그림 2(b)와 같이 광축 방향으로 레이저 초점을 대물렌즈 이동량만큼 움직이게 한다. 따라서 두 장비의 조합으로 레이저 초점을 3차원 공간상에서 제어할 수 있으며 이를 통해 복잡한 형태의 트랩을 만들 수 있다. 그러나 안정되게 물체를 포획하기 위해서는 대물렌즈 구경에 입사하는 레이저 빔이 대물렌즈 구경을 가득 채워야 할 뿐 아니라 경사 구동기의 회전에 의해 반사된 레이저 빔이 대물렌즈 구경 중심을 축으로 회전해야 한다.<sup>[9]</sup> 이는 경사 구동기의 거울 면과 대물렌즈의 구경이 공액면(conjugate plane)이 되도록 함으로써 이를 수 있다.

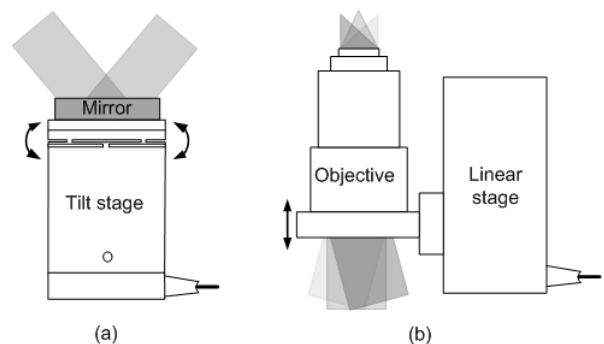


그림 2. 경사 구동기(a)와 선형 구동기(b)를 이용한 레이저 초점 3차원 제어

### 2.3. 컴퓨터를 이용한 압전 구동기 제어

사용된 압전 구동기는 제조사에서 제공된 컨트롤러, PCI-6534 디지털 I/O 카드<sup>[10]</sup> 및 NI-DAQmx 라이브러리<sup>[11]</sup>를 이용하여 컴퓨터로 제어된다. 그림 1에서 도식화한 것처럼 컨트롤러는 컴퓨터로부터 PCI-6534 카드를 통해 전송된 디지털 신호를 압전 구동기를 구동하기 위한 전압 신호로 변경

하여 압전 구동기를 구동한다. 이때 디지털 신호는  $\pm 20$ 비트 ( $\pm 524,287$ )의 디지털 신호로 표현되며 이 값은 최대 입력 전압  $\pm 10$  V에 해당한다. 즉 입력신호가 524,287(10 V)의 진폭을 가질 때 압전 구동기가 최대로 움직이게 된다. 또한 압전 구동기에는 실제 움직인 양을 측정하기 위한 정전용량 센서 (capacitance sensor)가 내부에 장착되어 있어, 압전 구동기의 움직임을 측정할 수 있으며, 측정된 신호는  $\pm 10$  V의 출력 신호로 컨트롤러를 통해 수집된다. 수집된 출력 신호는 컨트롤러에 의해  $\pm 20$ 비트의 디지털 신호로 변경되며 PCI-6534 카드를 통해 컴퓨터로 입력된다. 본 연구에 사용된 컨트롤러는 NI PCI-6534와의 조합으로 빠르게 데이터를 전송할 수 있는 HSP(High Speed Parallel) 방식을 지원한다.<sup>[12]</sup> HSP 방식은 최소 24 microsecond마다 1개의 위치 데이터를 압전 구동기로 전송하거나 압전 구동기로부터 전송 받을 수 있어 초당 최대 41,667개의 데이터를 전송할 수 있다.

### III. 압전 구동기 실제 이동량 및 주파수 응답 특성 측정

사용된 압전 구동기는 폐쇄회로(closed loop)로 제어되며 고유한 주파수 특성을 가지고 있다.<sup>[13]</sup> 이 특성은 압전 구동기에 전류를 공급하는 증폭기(amplifier)의 성능에 밀접한 영향을 받게 되는데, 일반적으로 제조사에서 제공하는 장비의 주파수 특성은 부가 장치가 부착되지 않은 상황에서 측정 또는 전산모사(simulation)한 이상적인 데이터이다. 그러나 주사 레이저 광집계를 위해 압전 구동기를 사용할 때에는 레이저 초점의 위치 제어를 위해 거울과 대물렌즈를 압전 구동기에 부착하게 되므로 고유한 주파수 특성이 바뀌게 된다. 또한 장비의 높은 주파수로 구동할 경우, 증폭기의 전류 증폭 한계로 인해 출력 신호가 감소하고 왜곡된다.<sup>[8]</sup> 고속 주사에서 출력 신호의 감소는 피할 수 없는 일이며 레이저 초점을 정밀하게 제어하기 위해서는 압전 구동기의 주파수 특성을 잘 파악해야 한다.

### 3.1. 압전 구동기 실제 이동량 측정

2.3절에서 설명하였듯이 압전 구동기의 이동량은 경사 구동기와 선형 구동기에 부착된 정전용량 센서의 출력 신호를 수집하여 측정할 수 있다. 그러나 수집된 출력 데이터를 주사 레이저 광집계를 위한 모니터링 기준신호(reference signal)로 사용하기 위해서는, 실제 이동량을 측정하여 센서가 정확한 데이터를 보내는지 신뢰도를 확인하는 것은 중요한 일이다. 압전 구동기는 2.3절에서 설명한 방식으로 구동되며, 먼저 경사 구동기의 실제 회전량은 그림 3(a)와 같이 파장이 685 nm인 다이오드 레이저를 거울에 반사시켜 회전 전, 후의 레이저 위치 신호를 QPD(Quadrant Photodiode) 센서를 통해 측정하였다.

그리고 입력 주파수 증가에 따른 출력 신호의 변화를 알아보기 위해서 입력 주파수를 증가시키면서 실제 회전 각도를 측정하였다. 경사 구동기의 실제 회전각( $\phi$ )은 경사 구동기가 회전할 때 만들어지는 반사각의 합의 절반이므로 식 (1) 같이 나타낼 수 있다. 식에서  $\theta$ 는 경사 구동기가 회전할 때 만들어지는 반사각의 합을 나타내고  $a$ 는 경사 구동기에서 QPD 센서까지의 물리적 거리이다.  $b$ 는 QPD 센서에 레이저가 맺힌 위치로 QPD 센서 신호 값을 수동 구동기를 이용하여 길이로 환산한 값이다.

$$\phi = \theta / 2 = \tan^{-1}(b / 2a) \tag{1}$$

선형 구동기의 실제 이동량은 광집계 시스템에서 구동기를 탈거한 후 레이저 진동계(laser vibrometer)를 이용하여 측정하였다. 레이저 진동계는 입력 빔과 반사 빔의 경로 차에 의한 전압의 변화를 측정하여 변위를 측정한다. 제안된 주사 레이저 광집계 시스템과 동일한 조건의 시스템을 구성하기 위해서 그림 3(b)와 같이 선형 구동기에 대물렌즈 및 대물렌즈 고정구(bracket)에 해당하는 무게를 가지는 거울 및 고정구를 부착하였다. 거울은 레이저를 반사시키기 위해서 필요하며, 선형 구동기의 실제 이동량은 입력 주파수를 증가시키

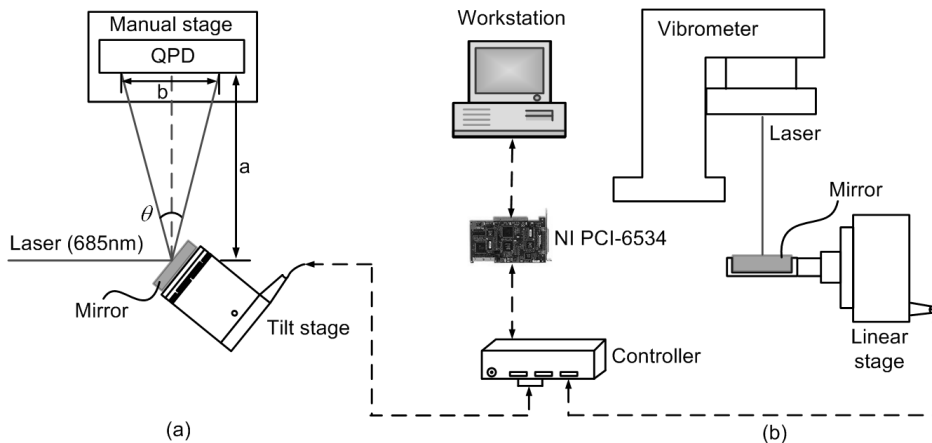
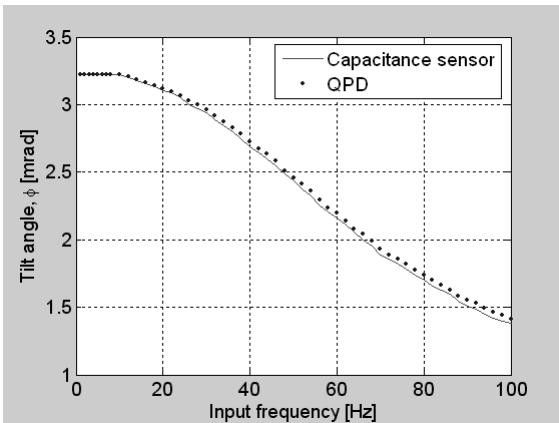


그림 3. 압전 구동기의 실제 이동량 측정을 위한 실험 구성 (a) QPD를 이용한 경사 구동기 회전각 측정 (b) 레이저 진동계를 이용한 선형 구동기 이동량 측정.

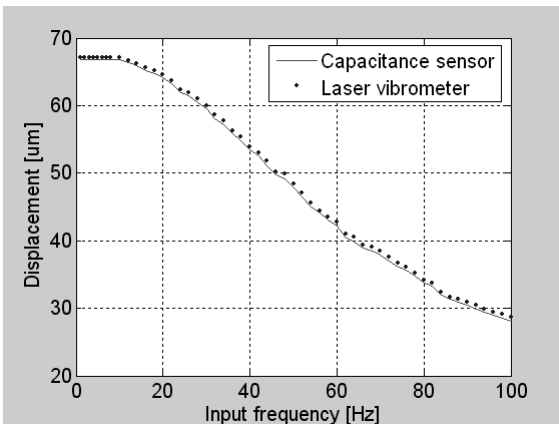
면서 전압으로 출력되는 변위 신호를 오실로스코프(oscilloscope)로 측정하였다.

### 3.2. 주파수 응답 측정

주파수 응답은 3.1절에서 기술된 방법 및 정전용량 센서의 출력 값을 컴퓨터로 수집하여 측정하였다. 사용된 파형은 정현파이며 압전 구동기는 컴퓨터에 의해서 구동된다. 입력 신호의 진폭은 입력 주파수(1~100 Hz) 구간에서 출력 신호의 형상이 왜곡 되지 않는 최대값을 이용하였다. 경사 구동기의 경우 진폭이 320,000(~6.1 V), 선형 구동기의 경우 진폭이 220,000(~4.2 V)으로 이 값은 장비 컨트롤러의 PID 제어를 위한 파라미터를 최적화한 상황에서 입력 신호의 크기를 변화시키며, 신호 왜곡의 발생 여부를 테스트하여 얻는 최대값이다. 이 진폭보다 큰 값으로 장비를 구동하면 입력 주파수 영역에서 신호 왜곡이 발생한다. 그림 4는 주파수 변화에 따른 압전 구동기의 응답을 보여준다. 그림에서 (a)와 (b)는 QPD 및 레이저 진동계를 이용하여 측정한 주파수 응답과 정전용량 센서를 이용한 주파수 응답을 비교한 것으로 (a)는 경사 구동기, (b)는 선형 구동기를 나타낸다. 또한 점선은



(a) 경사 구동기(실선: 정전용량 센서, 점선: QPD)



(b) 선형 구동기(실선: 정전용량 센서, 점선: 레이저 진동계)

그림 4. QPD 및 레이저 진동계를 이용하여 측정한 주파수 응답과 정전용량 센서를 이용한 주파수 응답 비교.

QPD 및 레이저 진동계로 측정한 이동량을, 실선은 정전용량 센서 출력을 이동량으로 환산한 값을 나타낸다.

그림 4에서 알 수 있듯이 입력 주파수가 증가함에 따라 압전 구동기의 실제 이동량은 감소한다. 또한 QPD 및 레이저 진동계를 이용하여 측정한 데이터가 정전용량 센서 출력과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 경사 구동기의 경우 정전용량 센서와 QPD로 측정한 신호의 평균 오차는 약 0.05 mrad 이고 선형 구동기의 경우에는 약 0.45  $\mu\text{m}$ 이다. 이 오차는 QPD 및 레이저 진동계의 미소한 오정렬(misalignment)에 의한 것으로 추정된다. 따라서 정전용량 센서를 통해 측정된 출력 신호는 주사 레이저 광집계를 위한 실제 움직임으로 간주할 수 있으며 이는 입력 신호를 보상하는데 사용할 수 있다. 그림 5는 입력 주파수 변화에 따른 출력 신호의 크기 변화를 로그 척도로 나타낸 그래프이다. 그림에서 출력 신호는 약 10 Hz까지 입력 신호를 잘 추종하고 있고, 입력 주파수가 증가함에 따라, 출력 신호의 크기가 감소함을 알 수 있다. 여기서 입력 신호를 잘 추종할 수 있는 주파수 범위는 대역폭(bandwidth)<sup>[14]</sup>에 의해서 결정된다. 두 장비의 대역폭은 입력 신호의 크기가 약 3 dB 떨어지는 지점으로 그림에서 보듯이, 경사 구동기의 경우 약 54 Hz, 선형 구동기의 경우 약 50 Hz 이다. 대역폭에서 경사 구동기와 선형 구동기는 각각 4.3 mrad 과 48  $\mu\text{m}$  크기로 주사가 가능하다. 만약 장비의 제어 신호로 대역폭보다 큰 주파수를 입력한다면 출력 신호의 위상 지연이 심해져 레이저 초점의 정밀한 제어가 힘들어지므로 안정된 포획을 이룰 수 없다. 따라서 본 연구에서는 포획한 물체를 안정적으로 제어하기 위해서는 대역폭보다 작은 주파수를 사용하였다.

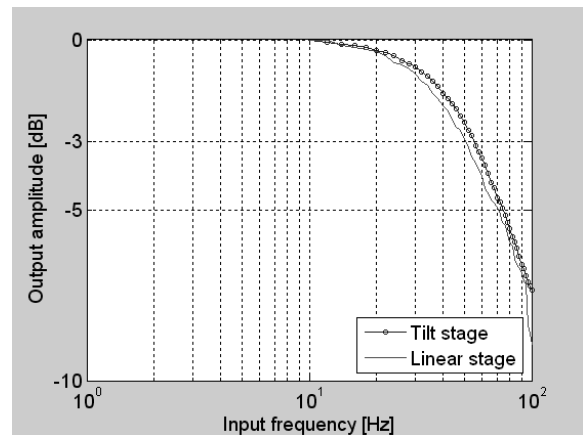


그림 5. 압전 구동기의 주파수 응답(로그 척도).

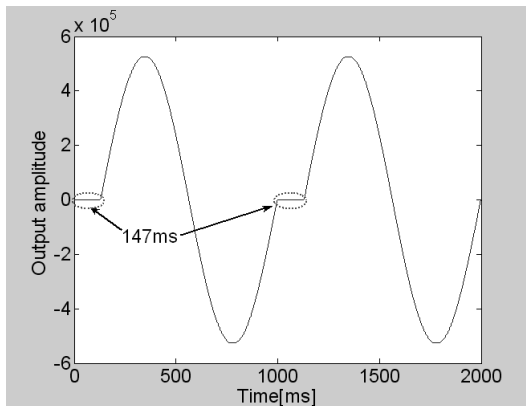
## IV. 주사 경로 추적 및 보상

주사 레이저 광집계에서 물체 포획을 위한 레이저 주사 경로는 압전 구동기의 주파수 특성에 영향을 받는다. 따라서 고속 주사가 필요한 다수의 구형체를 동시에 포획하거나 로드와 같은 비대칭 형상을 포획할 때에는 입력으로 주어지는

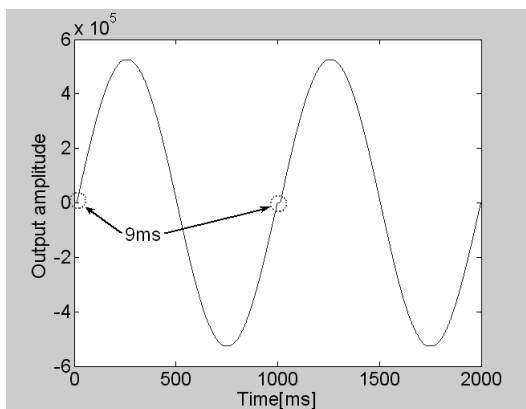
레이저 주사 영역보다 작은 영역을 주사하거나 장비의 대역폭보다 높은 주파수로 구동했을 경우 두 장비간의 위상차가 커져서 레이저 초점을 정확한 위치에 위치시킬 수 없다.<sup>[8]</sup> 이 경우 물체를 안정적으로 포획할 수 있도록 주파수 응답을 고려하여 입력 데이터를 사용자가 조정해야 한다. 본 절에서는 주사 경로를 실시간으로 추적하여 시각화하고 입력신호와 출력신호의 괴리를 보상하는 방법을 제안한다.

**4.1. 실시간 제어를 위한 최적의 데이터 수 결정**

앞에서 언급했듯이 HSP 방식은 초당 최대 41,667개의 데이터를 전송할 수 있다. 그러나 주사 경로를 제어하기 위해 사용자가 실시간으로 입력 데이터를 갱신하는 경우 PCI-6534 카드에 새로운 데이터를 갱신하는데 시간이 걸려 압전 구동기에 시간 지연(time delay)을 발생시킨다. 시간지연은 매 데이터 갱신 마다 레이저 주사를 불연속적으로 만들게 되므로 실시간 제어를 위해서 반드시 최소화되어야 한다. 그림 6은 1초에 41,667개와 2,083개의 데이터를 전송할 경우 발생하는 시간지연을 나타낸다. 그림에서 시간 지연은 각각 약 147 ms와 약 9 ms로 점의 개수가 감소함에 따른 시간 지연이 감소한다. (b)의 경우에는 시간지연이 비교적 적으나 (a)의 경우에는 시간지연이 너무 길어서 실시간 제어를 하는데 부적합



(a) 입력 데이터 개수 41,667개



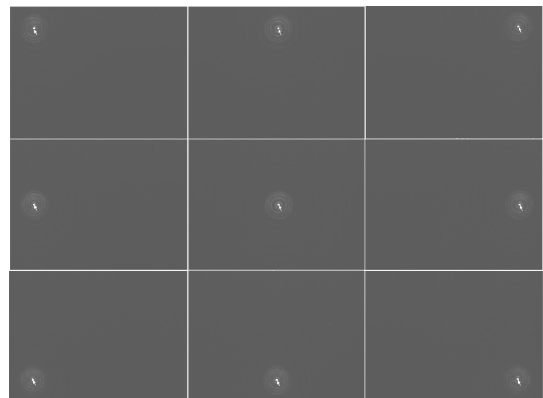
(b) 입력 데이터 개수 2,083개

그림 6. 입력 데이터 개수에 따른 시간 지연.

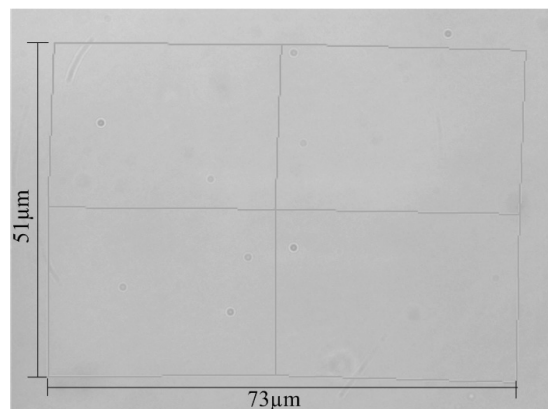
하다. 본 연구에서는 복잡한 형태의 주사가 가능하도록 하기 위해 시간지연이 적으면서 비교적 많은 데이터를 전송할 수 있는 2,083개를 입력 데이터의 개수로 사용하였다.

**4.2. 작업공간 맵핑**

집속된 레이저 초점을 주사할 때 정밀하게 위치를 제어하고 입출력 주사 경로를 시각화하기 위해서는 작업공간 맵핑이 필요하다. 작업공간 맵핑에서는 레이저 주사 경로를 시각화하기 위해서 경사 구동기와 선형 구동기가 최대로 움직일 때 만들어지는 영역을 결정한 후 이를 이용하여 화면(screen) 좌표를 압전 구동기의 입력 데이터로 맵핑한다. 이를 위해 먼저 경사 구동기가 최대로 움직일 때 만들어지는 영역을 그림 7과 같이 바둑판 형태로 9개의 점을 마우스로 입력하여 작업영역을 측정한다. 선형 구동기의 경우 실제 이동량이 그대로 레이저 초점의 이동이 되므로 측정된 작업공간은 73 μm × 51 μm × 150 μm의 직육면체 형상이 고려되었다. 그러나 경사 구동기 회전에 의해 만들어진 작업 공간은 가로, 세로 비율이 다르며, 작업공간의 원점에 대해서 4개의 사분면이 약간의 비대칭을 보인다. 이는 경사 구동기에 입사하는 레이저 빔과 두 회전축이 이루는 각도가 각각 90°, 45°로 다르기 때문이며 이러한 이유로 거울이 각 축으로 같은 양만큼 회전



(a) 마우스를 이용한 작업 공간 입력



(b) 작업 공간의 비대칭성(중형비: 0.7)

그림 7. 마우스를 이용한 작업공간 입력 및 작업공간의 비대칭성.

하더라도 레이저 빔의 반사각을 다르게 하여 작업공간의 비대칭을 만들게 된다.<sup>[15]</sup> 또한 약간의 레이저 초점 오정렬로 작업공간이 시계방향으로 약간 회전한 형상을 보인다. 이러한 비대칭성은 주사 경로의 작업 공간 내 위치에 따라 입출력 주사 경로의 시각적인 차이를 만들고 주사 경로의 정밀한 제어를 방해한다. 이러한 문제는 참고문헌 [16]과 같은 방법으로 각 사분면을 개별적으로 선형 보간함으로써 어느 정도 해결할 수 있었다.

**4.3. 입력 데이터 보상 알고리즘 및 결과**

그림 8은 입력 데이터 보상 방법을 나타내는 알고리즘을 나타낸다. 알고리즘은 크게 작업공간 맵핑, 입력 데이터 전송 및 출력 데이터 수집, 입출력 주사 경로 시각화, 입력 데이터 보상으로 이루어진다. 그림에서 X, Y, Z와  $V_x, V_y, V_z$ 는 입력 경로의 화면 좌표 및 디지털 신호로 변환된 입력 데이터를 나타내고  $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$ 와  $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$ 는 출력 경로의 화면 좌표 및 디지털 형태로 변환된 출력 데이터를 나타낸다. 또한  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 와  $\Delta \hat{V}_x, \Delta \hat{V}_y, \Delta \hat{V}_z$ 는 화면 좌표 상의 입출력 경로 차이 및 디지털 형태로 변환된 입출력 경로 차이를 나타낸다. 먼저 작업공간의 맵핑이 이루어지며, 다음 맵핑 요소를 이용하여 화면 좌표를 압전 구동기를 구동하기 위한 입력 데이터로 변경하여 이 데이터를 전송한다. 이때 경사 구동기와 선형 구동기의 실제 이동 데이터는 각 구동기에 부착된 정전용량 센서에 의해 측정되어 컨트롤러를 통해 컴퓨터로 전송된다. 다음으로 계산된 맵핑 요소를 이용하여 입출력 레이저 주사 경로를 CCD 영상 위에 시각화한다. 만약 시각화된 입출력 주사 경로가 다르다면 입출력 차이를 계산한 후 입력 데이터를 보상한다.

보상 과정은 주파수에 따른 출력신호의 감소가 선형적이지 않으므로 한번의 과정으로 끝나지 않으며 여러 번 루프를 돌면서 입력과 출력이 거의 같아질 때까지 입력 데이터를 보상한다. 입력 데이터가 보상되면 입력 주파수에 따른 출력 데이터의 감소를 보상할 수 있어 결국 사용자가 원하는 경로로 장비를 제어하여 물체를 안정되게 포획할 수 있다. 그림 9는 라인 형태로 레이저 주사 경로를 만들고 주파수 변화에 따른 출력 신호를 모니터링하여 입력 신호와 괴리가 생겼을 경우 입력 데이터를 보상하는 그림을 나타낸다. 그림에서 검은색의 두꺼운 실선은 입력 신호를 흰색의 얇은 실선은 출력 신호를 나타낸다. 실험에서 사용한 입력 신호의 진폭은 약 160,000(~3.05 V)이며 주파수를 40 Hz로 증가시켰을 경우 그림 9(a)와 같이 출력 신호가 입력 신호 대비 약 19% 정도 감소한다. 이러한 입출력의 괴리는 보상 알고리즘을 통해 자동으로 갱신되며 그림 9(b)와 같이 원래 원하던 주사 경로로 레이저를 주사할 수 있다. 또한 키보드, 마우스를 이용하여 시각화된 주사 경로를 작업 공간상에서 이동, 회전하고 동시에 변경된 입력 데이터를 압전 구동기로 전송함으로써 물체를 안정되게 이동하거나 회전할 수 있다.

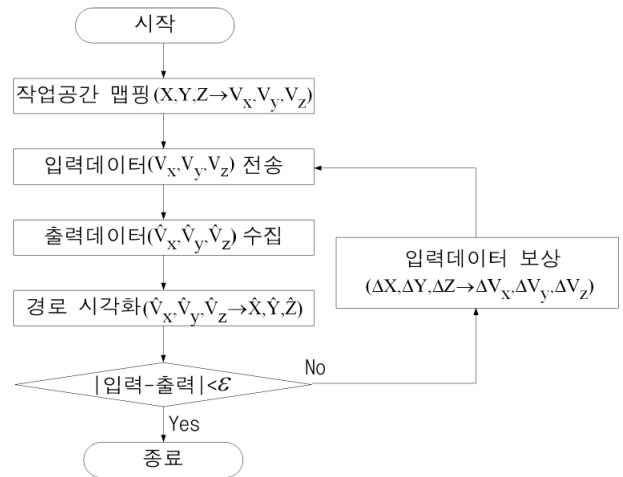
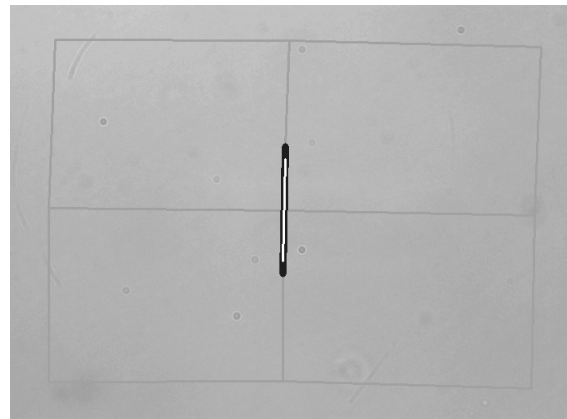
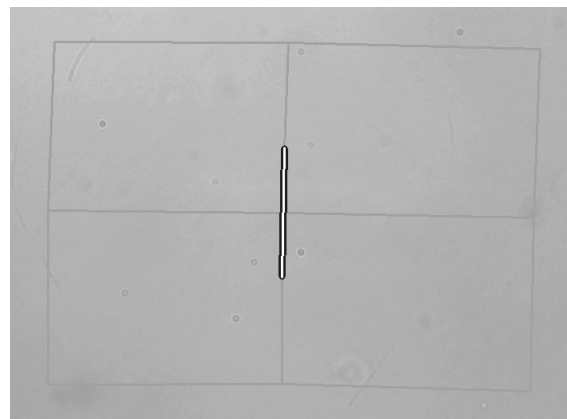


그림 8. 입력 데이터 보상 알고리즘(X, Y, Z,  $V_x, V_y, V_z$ : 입력 경로의 화면 좌표 및 디지털 신호로 변환된 입력 데이터,  $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$ : 출력 경로의 화면 좌표 및 디지털 형태로 변환된 출력 데이터,  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \hat{V}_x, \Delta \hat{V}_y, \Delta \hat{V}_z$ : 화면 좌표 상의 입출력 경로 차이 및 디지털 형태로 변환된 입출력 경로 차이,  $\epsilon=0.01$ )



(a) 입력 신호 보상 전



(b) 입력 신호 보상 후

그림 9. 입출력 경로 시각화 및 입력 경로 보상(검은색의 두꺼운 실선: 입력 신호, 흰색의 얇은 실선: 출력 신호)

## V. 결 론

본 연구에서는 주사 레이저 광집계에서 고속 구동기를 빠르게 제어할 경우 나타나는 입력 신호와 출력 신호의 괴리를 해결하기 위한 방법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 압전 구동기의 실제 이동량을 QPD 및 레이저 진동계를 이용하여 측정하고 압전 구동기에 부착된 정전용량 센서의 출력 값과 비교 분석하여 정전용량 센서의 출력값을 입력 신호 보상을 위한 출력 신호의 기준값으로 사용할 수 있음을 검증하였다. 또한 주파수 특성을 분석하여 압전 구동기를 정밀하게 제어할 수 있는 방법을 제시하였다. 그리고 입출력 경로를 모니터링하여 시각화함으로써 주사 경로의 인식성을 높였다. 마지막으로 고속 주사 시 발생하는 입출력의 괴리를 계산하여 입력 신호를 보상함으로써 사용자가 원래 원하는 주사 경로로 물체를 안정적으로 제어할 수 있는 방법을 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 생체적용나노기초기술연구센터의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] A. Ashkin, "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," *Biophysical Journal*, vol. 61, no. 2, pp. 569-582, 1992.
- [2] K. C. Neuman and S. M. Block, "Optical trapping," *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, pp. 2787-2809, 2004.
- [3] G. Sinclair, P. Jordan, J. Courtial, M. Padgett, J. Cooper, and Z. J. Laczik, "Assembly of 3-dimensional structures using programmable holographic optical tweezers," *Optics Express*, vol. 12, no. 22, pp. 5475-5480, 2004.
- [4] R. Agarwal, K. Ladavac, Y. Roichman, G. Yu, C. M. Lieber, and D. G. Grier, "Manipulation and assembly of nanowires with holographic optical traps," *Optics Express*, vol. 13, no. 22, pp. 8906-8912, 2005.
- [5] C. Mio, T. Gong, A. Terray, and D. W. M. Marr, "Design of a scanning laser optical trap for multiparticle manipulation," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 5, pp. 2196-2200, 2000.
- [6] R. Nambiar, A. Gajraj, and J. C. Meiners, "All-Optical Constant-Force Laser Tweezers," *Biophysical Journal*, vol. 87, pp. 1972-1980, 2004.
- [7] K. C. Vermeulena, J. van Mameren, G. J. M. Stienen, E. J. G. Peterman, G. J. L. Wuite, and C. F. Schmidt, "Calibrating bead displacements in optical tweezers using acousto-optic deflectors," *Review of Scientific Instruments*, vol. 77, pp. 013704, 2006.
- [8] S.-U. Hwang, I.-Y. Park, J.-H. Song, T. W. LeBrun, N. G. Dagalakis, C. Gagnon, A. Balijepalli and Y.-G. Lee, "Three-dimensional scanning optical tweezers," *Proceedings of SPIE*, vol. 6048, pp. 604803, 2005.
- [9] E. Fallman and O. Axner, "Design for fully steerable dual-trap optical tweezers," *Applied Optics*, vol. 36, no. 10, pp. 2107-2113, 1997.
- [10] National Instruments, 653X User Manual, 2001.
- [11] National Instruments, NI-DAQmx Reference Manual, 2007.
- [12] nPoint, C-300 Series Controller Manual, Version 1.2, 2005.
- [13] B.-S. Kim, S. Gibson and T. C. Tsao, "Adaptive Control of a Tilt Mirror for Laser Beam Steering," *Proceeding of the 2004 American Control Conference*, pp. 3417-3421, 2004.
- [14] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems, 9th Edition*, (Prentice Hall Inc., New Jersey, 2000). Chapter 4, Chapter 8-9.
- [15] M. Hafez, T. C. Sidler, and R. P. Salathe, "Study of the beam path distortion profiles generated by a two-axis tilt single-mirror laser scanner," *Optical Engineering*, vol. 42, pp. 1048-1057, 2003.
- [16] S.-W. Lee, T. Lee and Y.-G. Lee, "Stable manipulating of nanowires by line optical tweezers with haptic feedback," *Proceedings of SPIE*, vol. 6644, pp. 66441X, 2007.

## **Analysis of Frequency Response of Piezo Stages and Scanning Path Monitoring/Compensation for Scanning Laser Optical Tweezers**

Sun-Uk Hwang, Song-Woo Lee, and Yong-Gu Lee<sup>†</sup>

*Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju, 500-712, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: lygu@gist.ac.kr*

(Received February 18, 2008, Revised manuscript February 27, 2008)

In scanning laser optical tweezers, high speed scanning stages are used to manipulate a laser beam spot. Due to the inertia of the stage, the output scanning signal decreases with increased frequency of the input signal. This discrepancy in the signals is difficult to observe since most of the energy from the laser beam is blocked out to avoid CCD damage. In this paper, we propose two methods to alleviate these problems. Firstly, frequency responses of piezo stages are measured to analyze the signal drops and the input signal is compensated accordingly. Secondly, an overlay of the scanning path is drawn on the live monitoring screen to enhance the visibility of the scanning path. The result is a drop-compensated scanning with clear path view.

OCIS code: 0140.0140, 120.7280, 120.0120, 110.0110.