

압전구동기를 이용한 초정밀레이저 가공의 고주파진동 장치설계

김현욱*, 황동현⁺, 박종권⁺⁺, 조성학⁺⁺, 이문구⁺⁺⁺

(논문접수일 2010. 04. 22, 심사완료일 2010. 06. 09)

Design of High frequency Vibration Mechanism with PZT actuator for Ultraprecision Laser Machining

Hyun-Uk Kim*, Donghyun Hwang⁺, Jong-Kweon Park⁺⁺, Sung-Hak Cho⁺⁺, Moon G. Lee⁺⁺⁺

Abstract

To machine the micro hole, laser machining system is widely used, however, the system cannot fabricate the micro hole with high aspect ratio and good surface finish. To break the obstacles, the high frequency vibration mechanism with PZT (Piezoelectric Transducers) is proposed in this paper. The mechanism will vibrate the laser beam in vertical direction so that the aspect ratio and surface finish may be higher than the conventional. The mechanism vibrates the eyepiece of laser optics. In addition to the benefits, the mechanism enables us to have high precision and flexibility. It decreases burr and debris during machining. And it is able to machine various materials of workpiece. This research include high frequency and large travel range of the proposed mechanism. The PZT motion of mechanism and analysis on the sensitivity of design parameters are extracted from a finite element method (FEM) simulation. In the analysis, the target vibration mode without parasitic motion is designated to have the target frequency and high amplitude.

Key Words : PZT(압전소자), High frequency Vibration(고주파 진동), Vibration Mode(진동모드), Flexure Guide(유연한지 가이드), Vibration-assisted machining(보조진동가공), Laser Machining(레이저가공)

* 아주대학교 기계공학과
+ 아주대학교 기계공학과
++ 한국기계연구원
+++ 교신저자, 아주대학교 기계공학부 (moongulee@ajou.ac.kr)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지

1. 서론

전 세계적으로 노인증가율이 급속하게 커져감에 따라 그에 맞게 의료기들이 발전하고 있다. 그 중에서도 약물전달 스텐트(Stent)는 매우 정밀한 가공이 필요한 의료장치(Medical instrument)이다. 기존의 약물 전달 스텐트는 폴리머(Polymer)와 함께 약물코팅을 하여 인체에 약물뿐만 아니라 폴리머도 잔류하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 스텐트 표면에 미세한 구멍(Hole)을 뚫고 그 안에 약물을 주입하면 폴리머가 더 이상 필요 없어져서 문제점이 해결된다. 이런 미세한 홀을 가공하는 방법으로 레이저 가공이 넓게 사용된다. 하지만 기존의 레이저 가공 시스템으로는 높은 종횡비(Aspect ratio)와 깔끔한 가공 표면을 구현하기 힘들다. 만약 가공물 면에 맺히는 레이저 빔의 초점을 고주파(High frequency)로 진동시킬 수 있으면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 PZT(Piezoelectric Transducers) 구동기(Actuator)를 이용하여 고주파진동 장치를 설계 및 해석을 하고 실험을 통하여 미세형상가공이 가능한 초정밀 가공시스템에 대한 적용성을 언급한다. 이 가공방법은 기존의 레이저빔이 단독 가공하는 것과는 달리 레이저빔이 PZT로 인해 고주파로 진동하는 렌즈모듈(Eyepiece)를 거쳐서 가공을 하게 된다. 이는 높은 종횡비와 깔끔한 가공 표면을 얻을 수 있고 기존의 레이저 가공시스템보다 최소가공형상과 가공정밀도가 높다. 또한 burr과 debris 발생을 억제하고 재료의 영향을 받지 않고 미세가공을 할 수 있다. 본 논문에서는 높은 주파수와 큰 변위가 일어나는 고주파진동 장치를 설계하였고 유한요소해석(FEA)을 이용하여 장치의 운동을 분석하였다⁽¹⁻³⁾.

2. 장치의 구성

2.1 시스템 구성

본 논문에서 제안된 시스템의 대략적인 구성이 Fig. 1와 같다. 레이저 헤드로부터 나온 레이저빔이 렌즈모듈을 통과하여 가공물 표면에 닿게 된다. 이 때 렌즈모듈은 고주파영역인 10kHz 이상으로 진동이 되어야 가공면에 burr과 debris가 감소한다. 렌즈모듈의 진동은 PZT(P-025.10H, Physik Instrumente GmbH)구동기를 사용하는데 이것은 레이저빔이 통과 할 수 있는 중공형 PZT이다. 또한 PZT는 강한 힘을 가지고 있기 때문에 렌즈모듈에 직접 접촉하지 않고 고주파진동장치와 접촉이 되어야 한다. 높은 주파수로 진동이 되기

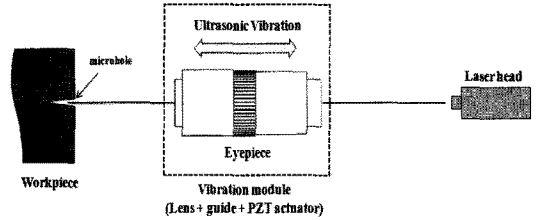


Fig. 1 Schematic diagram of system

때문에 진동장치의 강성은 크고 직진 운동이 보장되게 설계되어야 한다.

2.2 설계변수

높은 주파수로 진동이 되려면 고주파 진동장치의 강성이 높고 질량이 적어야 한다. 식 (1)에서 목표 주파수는 10kHz로 정하고 질량과 강성(k)을 조절하면서 원하는 값을 얻을 수 있다. 진동에 의해 움직임이 일어나는 고주파 진동장치의 총 가동질량(m)은 610g이고 식에 의해서 진동장치의 강성값은 2410N/μm가 된다. 실제 모델의 강성은 수식적으로 나온 진동장치의 강성보다 높아야 10kHz이상에서 진동을 할 수 있다⁽⁴⁾. 유한요소해석을 이용하여 모델링한 고주파 진동장치의 강성은 2500N/μm로 나타났다.

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

2.3 고주파 진동장치의 모델링

Fig. 2을 보면 본 논문에서 제시하는 진동장치의 구성을 볼 수 있다. PZT는 힘이 세기 때문에 지지하는 부분은 최대한 변형이 생기지 않게 설계를 하였고 PZT가 직접 닿는 부분은 집중하중이 발생하지 않게 세라믹(Al₂O₃, 99.7%)재질로 하였다⁽⁵⁾. 그리고 PZT의 한쪽 방향에 예압(Preload)을 주도록 설계를 하였고 볼트 가운데 부분에는 구멍을 뚫어 레이저빔이 통과할 수 있게 하였다. PZT와 아래쪽 세라믹 사이에 구(120° 간격 3개)를 넣어 면접촉 대신 점접촉으로 설계를 하여 PZT 굽힘이 적게 걸리게 하였다. 이러한 설계는 PZT가 운동을 할 때 직진성 확보가 용이하고, 과구속을 시키지 않는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 렌즈모듈에 PZT가 직접적으로 힘을 가하지 않게 고주파 진동장치와 면저 연결이 되어 힘을 받을 수 있도록 하였다.

렌즈모듈의 윗부분은 수 나사산이 있어 윗 가이드판의 암 나사산과 결합이 되어 있고 렌즈모듈의 아래 가이드판은 클

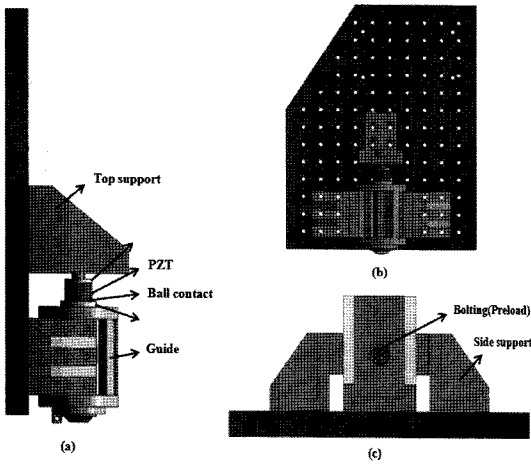


Fig. 2 Assembly mechanism ; (a) Side view (b) Front view (c) Magnified top view

램프방식으로 만들어 조여서 고정을 할 수 있게 설계를 하였다. 높은 주파수에서 진동을 하므로 진동장치 지지부는 보강대를 대어서 강건하게 설계를 하였고 렌즈모듈의 움직임은 직진성을 보장 받을 수 있게 양쪽에서 대칭적으로 가이드 설계가 이루어졌다. 만약 진동장치의 직진성이 보장되지 않으면 가공물 가공시에 홀의 정확한 가공위치가 달라질 수 있고 선폭 및 직경이 부정확하거나 가공표면이 매끄럽지 못한 결과를 얻을 수 있다.

마지막으로 렌즈모듈은 탈부착을 쉽게 하기 위하여 모든 부품들이 볼트로 결합이 되도록 설계를 하였다. 이는 추후에 설계변경이 있을 때 많은 부품들을 다시 제작하는 낭비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그렇지만 베커니즘이 매우 높은 주파수 영역에서 운동을 하므로 볼트로 결합되어 있는 부분이 풀려서 강성이 낮아지는 단점을 초래할 수 있다.

3. 유한요소해석 결과

3.1 PZT 해석

본 연구에서 사용된 PZT는 역압전효과(Inverse piezo effect)를 이용하며, PZT에 전압을 인가하여 늘어나거나 줄어드는 변형을 이용하여 구동기로서 역할을 하게된다.

본 연구에서 사용된 PZT는 PI社의 P-025.10H 모델로써 중공형 압전소자이며, 유한요소해석에 사용된 프로그램은 ANSYSTM/Multiphysics로서 연성해석 분야에 주로 사용되는 범용 프로그램이다.

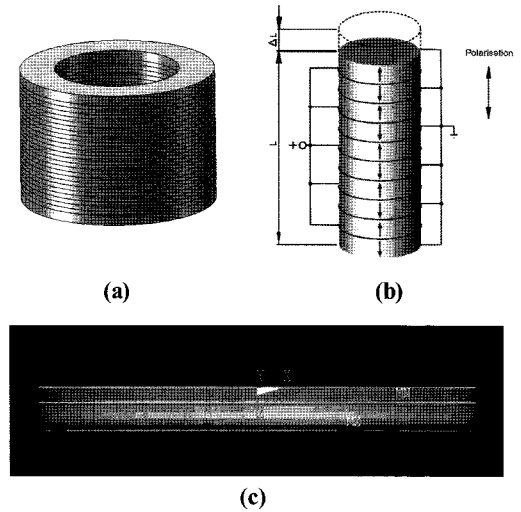


Fig. 3 (a) Modeling of PZT (b) Polarization and displacement of stack PZT and (c) Static analysis of one layer PZT

위의 Fig. 3은 PZT를 모델링 한 그림이다. Fig. 3 (a)는 실제 사이즈의 PZT 모델링인데 총 26개의 얇은 층으로 PZT들이 쌓여있다. 그 사이사이에는 각각의 PZT들이 전압을 인가 받을 수 있게 전극으로 이루어져있다.

Fig. 3 (b)는 적층형 PZT의 분극방향 및 변형량을 나타낸 그림이다. 자세히 살펴보면 PZT 사이에 있는 전극들이 하나 건너씩 연결이 되어 각각 양극과 음극으로 연결이 된다. 가운데 화살표 방향은 PZT의 분극방향을 띠게 되고 ΔL 만큼 변위가 늘어나게 된다. PZT에 인가하는 전압의 크기에 따라 ΔL 의 변화량을 조절할 수 있고 보통 전압이 높을수록 변화량은 커진다.

$$\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot V \quad (2)$$

위의 식 (2)는 변형량 ΔL 값을 나타낸 식이다. d_{33} 은 PZT가 가지고 있는 고유 물성치 값인데 앞의 숫자 3은 전기장의 방향을 나타내고 뒤의 3은 변형의 방향을 나타낸다. 두 방향 모두 PZT의 수직방향(적층된 방향)으로 향한다. 적층형 PZT는 수직의 변형 방향으로 고유 물성치 값을 갖는다. 이 연구에서 쓰이고 있는 PZT는 총 26층으로 적층이 되어 있다. V 는 인가하는 전압을 나타내며, 최대 1000V 까지 전압을 인가할 수 있고 위의 값들을 대입하여 식 (2)와 같이 계산을 하면 ΔL 값은 약 $13\mu m$ 으로 결과가 나온다.

Fig. 3 (c) 그림은 총 26 개의 층으로 이루어진 PZT 중에서 한 층의 해석을 나타내었다. 총 26 층으로 이루어진 PZT 를 해석하기에는 적층간의 에폭시(Epoxy)의 성질과 극판(Electrode)의 물성(Material property)까지 고려해야 하고 해석 시간이 많이 소요되므로 본 논문에서는 한 층의 PZT에 대해서만 정적해석(Static analysis)을 실시하였다. 연구에 활용된 PZT 모델의 최대변위를 알아보기 위하여 PI社에서 제공한 PZT의 물성치값을 적용하고 전압은 0V에서 1000V 까지 인가하여 해석을 수행하였다. Fig. 3 (c)의 그림을 다시 보면 아래쪽으로 변위가 일어나는 현상을 볼 수 있다. 윗면은 고정되어 있다고 가정하고 모든 자유도에 대해서 구속을 하였기 때문에 변형된 모습이다. 수직 아래 방향으로 일어난 총 변위량은 $0.55\mu\text{m}$ 이다⁶⁾.

PZT에 1000V가 인가되었을 때 발생하는 변위량에 대한 각각의 값들이 Table 1에 비교 되어있다. PZT 제조사의 제원에는 $15\mu\text{m}$ 의 변위가 발생하는 것으로 나와있다. 수식적인 값으로 계산을 한 것은 앞에서 설명을 하였다. 해석한 값을 보면 앞에서 PZT 한 층의 변위가 $0.55\mu\text{m}$ 였으므로 총 26층에 대해서는 $14.3\mu\text{m}$ 가 나온다. 위의 세가지 값에 대해서 거의 비슷한 변위값들이 나오는 것을 확인 할 수가 있다⁷⁾.

3.2 모델링 해석

아래의 Fig. 4는 고주파 진동장치의 모드해석을 나타낸 그

Table 1 Comparison of PZT displacement

Specification Data (μm)	Formula Data (μm)	Analysis Data (μm)
15	$\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot V = 13$	1 EA = 0.55 ↓ 26 EA = 14.3

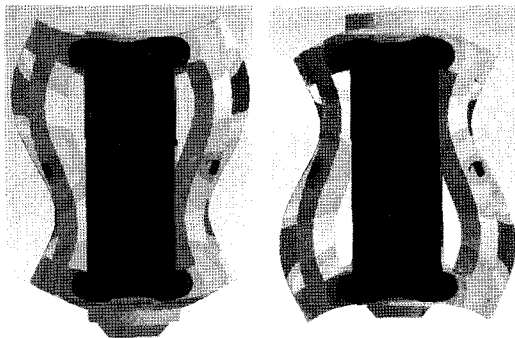


Fig. 4 Modal analysis of vibrating system

림이다. 재질은 강성을 높이기 위하여 스테인리스강으로 하였다. 모드해석을 한 이유는 수직방향의 움직임이 있는 고유진동수를 찾아내어 그 주파수에서 진동을 시키면 가장 큰 변위량이 나오기 때문이다.

주파수 범위는 10kHz 에서부터 15kHz 까지의 모드형상을 보았다. 3차 모드인 13.03kHz에서 Fig. 4 와 보이는 것과 같이

수직방향으로만 움직임이 생기는 형상을 찾아내었다. 이 주파수에서 진동장치를 가진 시킨다면 좀 더 큰 변위량을 얻을 수 있다⁸⁾. 1,2차 모드는 11.16kHz 와 11.28kHz에서 나타났는데 좌우로 흔들리는 움직임으로 형상이 나타났다.

Fig. 5 는 위의 모드해석에서 구한 13.03kHz 에서의 정적 해석을 나타낸 그림이다. 이 주파수에서 가진을 시켜 최대변위를 얻고자 하였다. 구속조건으로는 양쪽에 가이드를 지지해 주는 부분은 모든 자유도에 대해서 구속을 하였고 PZT와 맞닿는 부분에는 PZT의 힘(Blocking force)인 7,400N을 주었다.

해석된 그림의 색을 보면 렌즈모듈이 수직방향으로 거의 직진하고 있으며 그 외의 변형이 대칭적인 것을 알 수 있다. 이 점은 미세형상가공을 요구하는 초정밀 가공시스템에서 중요하다.

렌즈모듈 제일 아래부분의 수직방향 변위량은 $2.48\mu\text{m}$ 가 나왔다. 이 결과는 상당히 만족스러운 변위량이다. 스텐트에 미세가공을 할 때에 가공방법과 용도, 재질에 따라 다르지만 변위량이 큰 가공시스템을 필요로 할 수도 있고 작은 가공시스템을 필요로 할 수도 있다. 이러한 점에 의하여 큰 변위가 일어나는 가공시스템을 개발하면 진폭을 조절하여 변위량이 작은 가공시스템에도 적용을 할 수 있는 장점이 있다.

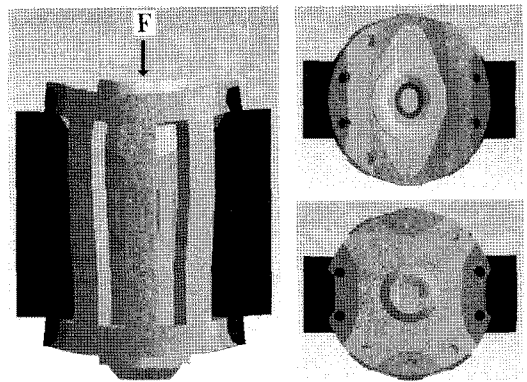


Fig. 5 Static analysis of vibrating system

4. 실험장치구성

위의 Fig. 2에서 설계된 고주파 진동장치는 Fig. 6에서 실제 실험장치로 구현하였다. 가운데 PZT를 중심으로 위쪽에는 세라믹이 있고 아래쪽에는 구 3개로 지지되고 그 밑에 세라믹이 있다. 즉, 가이드는 PZT에서 나오는 힘을 3개의 구를 지나 세라믹을 거쳐서 힘을 전달받게 된다. 그림에는 보이지 않지만 PZT 위쪽 세라믹의 윗부분에는 가운데 구멍이 난 볼트가 연결되어 있어 에압을 주고 있다. 가이드 중심 부분에는 렌즈모듈이 결합되어 있는 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 전체적인 실험장비 구성을 나타낸 것이다. 고강성 지지부에 실험장치를 설치하여 놓았다. 실험장비로는 주파수응답분석(FRF) 기능을 이용하여 렌즈모듈 가이드의 공진 주파수 대역을 찾을 때에 필요한 DSA(Dynamic Signal

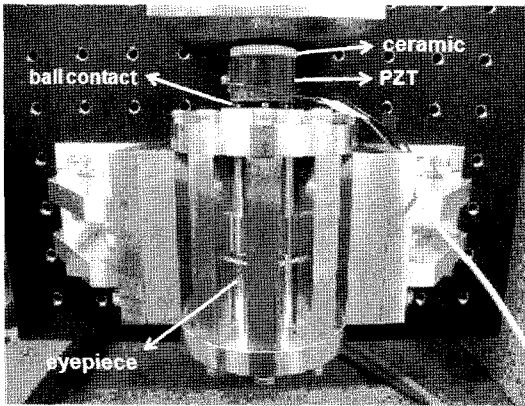


Fig. 6 Picture of assembly mechanism

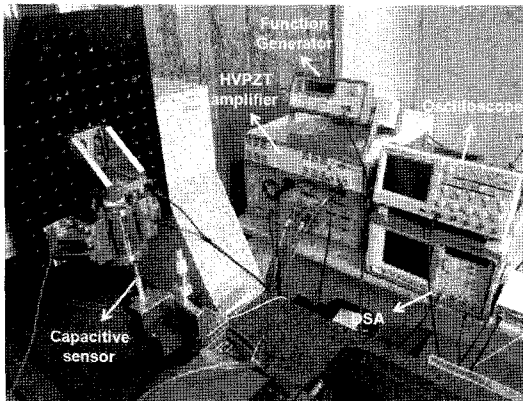


Fig. 7 Experiment setup

Analyzer, Agilent, 35670A), PZT에 증폭된 전압을 인가하는 실험장비인 고전압 압전소자앰프(High voltage PZT amplifier, TREK®, PZD350 M/S)가 있다.

이 앰프는 0 ~ 10V의 전압을 입력받고 최대 700V까지 출력을 낼 수 있다. 그리고 함수발생기(Function generator)와 오실로스코프(Oscilloscope)가 있다. 가이드의 주파수와 변위량을 측정하는 기구는 정전용량형 센서(Capacitive sensor, ADE technologies, 5810 module & 5503 probe)를 사용하여 측정하였다. 이 측정센서는 비접촉 센서로서 대역폭은 1kHz ~ 100kHz 이고 분해능은 2nm 이다.

5. 실험결과

5.1 주파수응답(FRF) 실험

Fig. 8은 고주파 진동장치의 주파수응답 측정을 한 결과 그래프이다. 입력전압은 50V로 인가하고 고전압 압전소자 앰프에서 증폭하여 최종 500V의 전압이 PZT에 인가되었다. 측정은 정전용량형 센서를 고주파 진동장치 아래 부분에 설치하고 실험을 하였다. Fig. 8 (a) 그래프는 주파수 범위를 5kHz ~ 15kHz의 비교적 넓은 범위를 주어 측정을 하였는데 빨간색 동그라미 그려진 부분이 공진이 일어나는 부분이다. 하지만 그래프를 보면 눈에 띄기 쉽게 공진영역의 결과가 나오지 못하였다. 이는 센서 사양이 측정변위가 25 μ m 이하의 영역에서는 신뢰성이 떨어져서 노이즈 수준 정도의 결과밖에 얻을 수 없었다.

고주파에서의 결과를 얻어야 하므로 10kHz 이상의 구간에서 공진이 일어나는 영역대를 좀 더 세밀하게 좁혀서 실험을 하였다. Fig. 8 (b)는 주파수 범위를 9kHz ~ 11kHz로 좁혀서 측정을 하였다. 이 결과 약 10.3kHz에서 진동장치의 공진이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 진동장치의 첫 번째 공진주파수는 실험적으로 10.3kHz 인 것이다. 앞서서 언급하였던 해석결과에서의 첫 번째 공진주파수인 11.16kHz와는 약간 차이가 있었다.

Fig. 8 (c) 그림은 주파수 범위를 13kHz ~ 15kHz로 설정하여 측정을 하였다. 이 결과 약 13.9kHz에서 진동장치의 공진이 일어나는 것을 확인할 수 있었고 이는 앞서 해석결과에서 구하였던 공진주파수 13.03kHz와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

5.2 고유진동수에서의 변위량

Fig. 9은 앞서 구한 진동장치의 공진주파수인 13.9kHz에

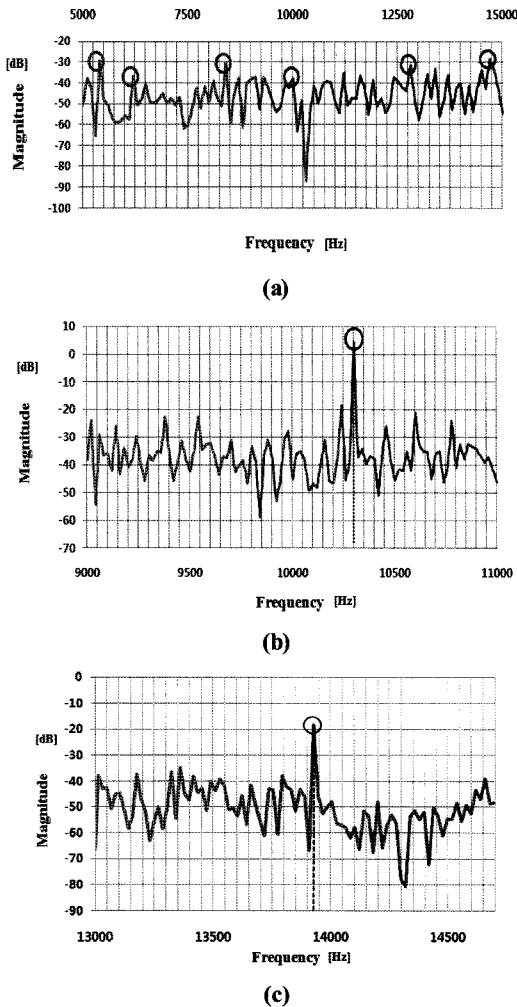


Fig. 8 Resonant frequency of vibrating system ; (a) 5kHz~15kHz, (b) 9~11kHz and (c) 13~15kHz

서의 렌즈모듈의 수직방향 변위량을 측정한 그래프이다. 측정센서는 주파수응답측정 실험과 마찬가지로 정전용량형 센서를 사용하였고 측정위치도 같게 하였다. 결과 데이터 그래프는 오실로스코프로 출력하였고 함수발생기에서 13.9kHz로 설정하였고 PZT에 인가되는 전압은 500V이다.

위의 그래프를 보면 진폭이 20mV 임을 알 수 있다. 정전용량형 센서의 민감도가 50 μ m/V 이므로 계산을 해보면 1 μ m이 나온다. 즉, 렌즈모듈이 공진주파수에서의 최대 변위량이 1 μ m이 된다는 말이다. 실험에서는 전압인가를 500V로 하였으므로 1000V 까지 전압을 높여 인가할 수 있다면 수치상

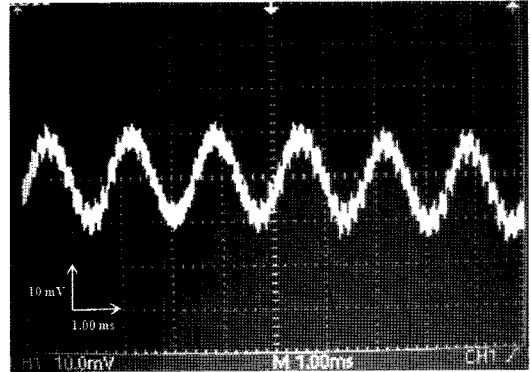


Fig. 9 Output displacement at resonance frequency

으로는 2 μ m의 변위량이 발생 할 수 있다. 유한요소해석으로 구한 변위량은 2.48 μ m으로 실험값과 비슷한 값이 나왔다고 볼 수 있다.

실제로 실험을 할 때에 PZT를 기준으로 아래부분의 진동장치에 진동을 가하였지만 볼트로 예압을 주고 있는 윗부분의 지지부가 같이 진동이 일어나는 것을 촉감으로도 알 수가 있었다. 뿐만 아니라 화강암 재질의 고정부도 PZT의 강한 힘에 같이 진동을 하였다. 진동이 외부로도 많이 분산되는 것을 알 수 있는데 이를 좀 더 강건하게 보완한다면 2 μ m보다 좀 더 큰 변위량을 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

6. 결론

본 논문에서는 미세형상가공이 가능한 초정밀 가공시스템을 위한 고주파 진동장치를 언급하였다. 10kHz 이상의 고주파영역에서 렌즈모듈의 진동을 일으키고 직진성과 선형성을 보장하는 가이드의 설계가 이루어졌다. 고주파에서 진동을 하기 때문에 진동장치의 강성은 높게 설계를 하였다. 진동을 가진하는 구동기는 압전구동기를 사용하였고 진동모듈의 가운데 부분은 가공레이저 빔이 통과하여야 하므로 중공형 PZT를 사용하였다. DSA 장비를 사용하여 설계한 렌즈모듈 진동장치의 주파수응답 실험을 하였다. PZT에 500V의 전압을 인가하였을 때 10.3kHz와 13.9kHz에서 공진주파수가 일어났다. 좀 더 높은 공진주파수인 13.9kHz에서 렌즈모듈의 수직방향 변위량은 1 μ m 이었다. 최대로 인가 가능한 1000V까지 전압을 인가한다면 약 2 μ m의 변위량을 얻을 수 있었다. 따라서 압전구동기를 이용한 초정밀 레이저가공의 고주파 진동장치 설계에 대한 연구가 목표한대로 수행되었음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업지원으로 수행되었고 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Kim, J. G., Nam, K. G., Cho, S. H., Chang, W. S., Na, S. J. and Whang, K. H., 2006, "Micromachining Characteristics inside Transparent Materials using Femtosecond Laser Pulses," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 190~196.
- (2) Chu, C. N., Han, D. C., Park, H. J., Park, S. S. and Je, S. U., 2002, "A Study on the Ultrasonic Micromachining and Measurement System," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 133~140.
- (3) Park, J. G., Kang, T. W., Lee, K. S. and Kim, T. W., 2007, "Material Design and Analysis of Coronary Artery Stents," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 44, No. 7, pp. 362~367.
- (4) Singiresu S. Rao, 1992, "Mechanical Vibrations", 3rdEd. Addison-Wesley, pp. 37~39.
- (5) Provis Co., n.d., viewed 25 February 2010, <<http://www.provis.co.kr>>
- (6) Kang, D. W., Lee, M. G. and Gweon, D. G., 2007, "Development of compact high precision linear piezoelectric stepping positioner with nanometer accuracy and large travel range," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 78, No. 7.
- (7) Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, n.d., viewed 13 September 2009, <<http://www.physikinstrumente.com>>
- (8) Hwang, D. H., Lee, D. K., Jeong, J. H. and Lee, M. G., 2010, "Vibration transmissibility reduction module with flexure mechanism for personal tools," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 223~226.