

압전구동기를 이용한 정밀 가공용 초음파 진동장치 설계

김우진*, Lu Fei*, 조성학⁺, 박종권⁺, 이문구^{**}✉

*아주대학교 기계공학과, ⁺한국기계연구원, ^{**}아주대학교 기계공학부

Design of Ultrasonic Vibration Device using PZT Actuator for Precision Laser Machining

W. J. Kim*, L. Fei*, S. H. Cho⁺, J. K. Park⁺, M. G. Lee^{**}✉

*Department of Mechanical Engineering, Ajou University

⁺Korea Institute Of Machinery and Materials

^{**}Department of Mechanical Engineering, Ajou University

Abstract

As the aged population grows around the world, many medical instruments and devices have been developed recently. Among the devices, a drug delivery stent is a medical device which requires precision machining. Conventional drug delivery stent has problems of residual polymer and decoating because the drug is coated on the surface of stent with the polymer. If the drug is impregnated in micro hole array on the surface of the stent, the problem can be solved. Micro sized holes are generally fabricated by laser machining; however, the fabricated holes do not have an enough aspect ratio to contain the drug or a good surface finish to deliver it to blood vessel tissue. To overcome these problems, we propose a vibration-assisted machining mechanism with PZT (Piezoelectric Transducers) for the fabrication of micro sized holes. If the mechanism vibrates the eyepiece of the laser machining head, the laser spot on the workpiece will vibrate vertically because objective lens in the eyepiece shakes by the mechanism's vibration. According to the former researches, the vibrating frequency over 20kHz and amplitude over 500nm are preferable. The vibration mechanism has cylindrical guide, hollowed PZT and supports. In the cylinder, the eyepiece is mounted. The cylindrical guide has upper and low plates and side wall. The shape of plates and side wall are designed to have high resonating frequency and large amplitude of motion. The PZT also is selected to have high actuating force and high speed of motion. The support has symmetrical and rigid characteristics.

Keywords: Ultrasonic vibration(초음파 진동), PZT actuator(압전소자구동기), Laser machining(레이저 가공), Precision device(정밀 장치), FEA(유한요소해석)

1. 서론

노인 증가율이 급속하게 커져감에 따라 그에 맞게 의료기기들이 발전하고 있다. 이 중에 약물 전달 스텐트(stent)는 매우 정밀함이 요구되는 의료장치(medical instrument)이다.¹ 기존의 약물 전달 스텐트는 폴리머(polymer)와 함께 약물코팅을 하여 인체에 약물뿐만 아니라 폴리머도 잔류하는 문제점을 가지고 있다. 이를 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.² 본 논문에서는 PZT(Piezoelectric Transducers) 구동기(actuator)를 이용하여 고주파v진동 장치를 설계 및 해석을 하고 제작하여, 미세형상 가공을 위한 진동 특성을 만족하는지 검증한다. 이 가공방법은 기존의 레이저 빔이 단독 가공하는 것과는 달리 레이저 빔이 PZT로 인해 고주파로 진동하는 렌즈 모듈(eyepiece)을 거쳐서 가공을 하게 된다.

투고일 : 2011년 5월 1일 심사완료일 : 2011년 6월 3일

계재승인일 : 2011년 6월 21일

교신저자 : 이문구 ✉ moongulee@ajou.ac.kr

이는 높은 종횡비와 깔끔한 가공 표면을 얻을 수 있고 기존의 레이저 가공 시스템보다 최소가공형상과 가공정밀도가 높다. 초음파 진동 장치를 통해 burr와 debris 발생을 억제하고 재료의 영향을 받지 않고 미세가공을 할 수 있다.³ 본 논문에서는 높은 주파수와 큰 변위가 일어나는 고주파 진동 장치를 설계하였고 유한요소해석(FEA)을 이용하여 장치의 정적과 모드해석을 하였다. 해석결과에서 음파 이상의 공진 주파수와 충분한 진폭을 예측하였고, 이를 실험으로 확인하였다.

2. 장치의 구성

2.1 시스템 구성

본 논문에서 제안된 시스템의 대략적인 구성인 Fig. 1과 같다. 레이저 헤드로부터 나온 레이저 빔이 렌즈모듈을 통과하여 가공물 표면에 닿게 된다. 이 때 렌즈모듈은 초음파영역인 20kHz 이상으로 진동이 되어야 가공면에 burr와 debris가 감소한다. 렌즈모듈의 진동은 PZT(P-025.10H, Physik Instrumente GmbH) 구동기를 사용하는데 이것은 레이저 빔이 통과 할 수 있는 중공형 PZT이다.⁵ 또한 PZT는 강한 힘을 가지고 있기 때문에 렌즈모듈에 직접 접촉을 막아야 한다. 이를 위하여 두 부품사이에 원통형 세라믹 판을 부가하였다. 높은 주파수로 진동이 되기 때문에 진동장치의 강성은 크고 직진 운동이 보장되게 설계되어야 한다.

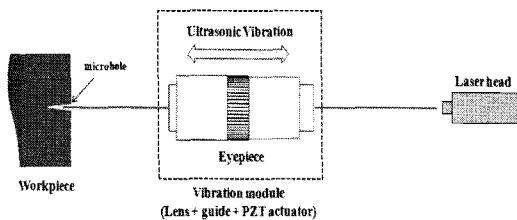


Fig. 1 Schematic diagram of system.

2.2 설계변수

높은 주파수로 진동이 되려면 초음파 진동장치의 강성이 높고 질량이 적어야 한다. 아래의 식(1)을 보면 강성과 질량이 주파수와 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

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

진동에 의해 움직임이 일어나는 초음파 진동장치의 총 가동질량(m)은 610g이고 식(1)에 의해서 진동장치의 강성 값(k)은 2,410 N/ μm 가 된다. 실제 모델의 강성은 수식적으로 나온 진동장치의 강성보다 높아야 20kHz이상에서 진동을 할 수 있다.

Fig. 2는 설계된 진동장치를 나타낸 것이다. 대칭적으로 설계를 하였고 충분히 큰 강성, 질량은 가볍고 큰 변위를 가지고 있다. 유한요소해석을 이용하여 모델링한 초음파 진동장치의 강성은 2,500N/ μm 로 나타났다.

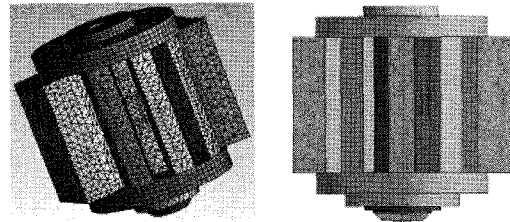


Fig. 2 Modeling of guide mechanism.

2.3 고주파 진동장치의 모델링

Fig. 3은 본 논문의 진동장치의 구성이다. PZT는 힘이 세기 때문에 지지하는 부분은 최대한 변형이 생기지 않게 설계를 하였고 PZT가 직접 닿는 부분은 집중하중이 발생하지 않게 세라믹(Al_2O_3 , 99.7%)재질로 하였다.⁴ 그리고 PZT의 한쪽 방향에 예압(preload)을 주도록 설계를 하였고 볼트 가운데 부분에는 구멍을 뚫어 레이저빔이 통과할 수 있게 하였다. 렌즈모듈의 윗부분은 수 나사산이 있어 윗 가이드판의 암나사산과 결합이 되어 있고 렌즈모듈의 아래 가이드판은 클램프방식으로 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.

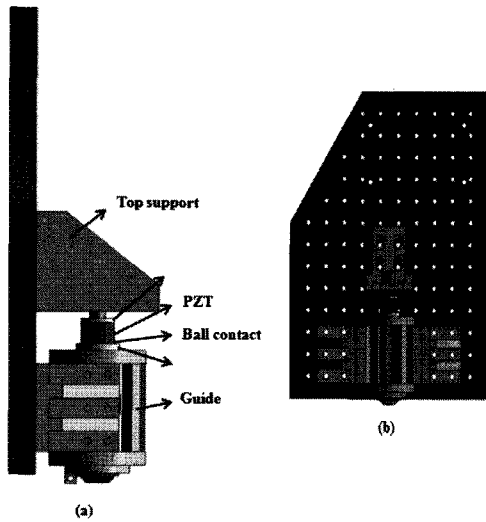


Fig. 3 Assembly mechanism: (a) side view and (b) front view.

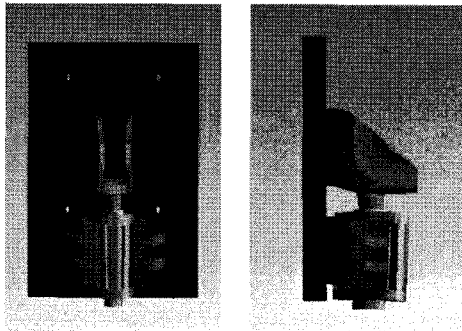


Fig. 4 Static analysis of vibrating system.

3. 유한요소해석

3.1 정적 해석

아래의 Fig. 4는 고주파 진동장치의 전체 정적 해석을 나타낸 그림이다. 재질은 강성을 높이기 위하여 스테인리스강으로 하였고, 구속조건으로는 양쪽에 옆면 rod를 지지해주는 부분은 모든 자유도에 대해서 고정을 하였다. 여기서 PZT 힘을 6,092N을 인가하였다. Fig. 4를 보면 렌즈는 거의 수직방향으로 직진하고 있으며 대칭적으로 변형이 생기는 것을 알 수 있다. 렌즈의 수직 방향 변위량을 확인하여 보니 3.5 μ m으로 측정되어 PZT를 이용해 수직적으로 구한 2.53 μ m보다 약 1 μ m정도 상하 방향으로 더 많이 움직였는데 그 이유로는 진동장치 양쪽에 대칭적으로 있는 지지대가 있고, 그 가운데 힘을 받게 되어 아래로 더 많이 변위량이 생기기 때문이다. 또 각 구성품들이 볼트로 연결되어 결속력이 떨어지는 이유도 있다.

3.2 모드해석

모드해석을 실시하는 이유는 수직방향의 움직임이 있는 고유진동수를 찾아내어 그 주파수에서 진동을 시키면 가장 큰 변위량이 나오기 때문이다. 진동 주파수는 20kHz이상을 목표로 잡고 설계를 하였기 때문에 모드해석시 주파수 범위는 15kHz 이상으로 놓고 해석하였다. Fig. 5에서 보이는 것과 같이 수직방향으로만 움직임이 22.21kHz에서 찾을 수 있었다. 이 주파수 영역에서 진동장치를 가진시킨다면 좀 더 큰 변위량을 얻을 수 있다.

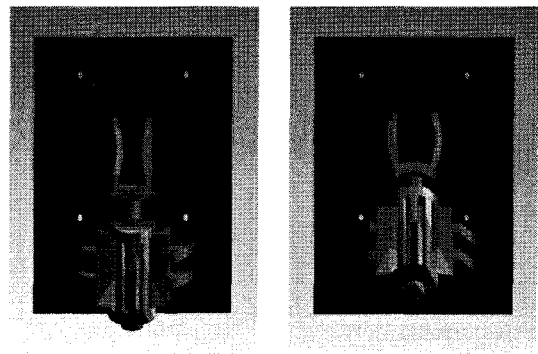


Fig. 5 Modal analysis of vibrating system.

4. 실험장치구성

설계된 초음파 진동장치는 Fig. 6에서 실제 실험 장치로 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 예압을 주고 있다. 가이드 중심부분에는 렌즈 모듈이 결합되어 있는 모습을 확인할 수 있다.

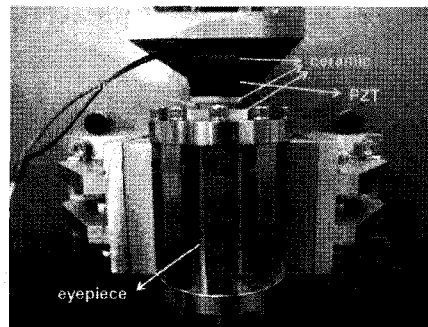


Fig. 6 Picture of assembly mechanism.

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 Analyzer, Agilent, 35670A), PZT에 증폭된 전압을 인가하는 실험장비인 저전압 압전소자앰프(low voltage PZT amplifier, Physik Instrumente GmbH & Co., E-663)가 있다.⁵ 이 앰프는 (-2V)-(12V)의 전압을 입력받고 최대 120V까지 출력을 낼 수 있다. 그리고 함수발생기(Function generator, Agilent, 33220A)와 오실로스코프(Oscilloscope, Tektronix, TDS 2004B)가 있다. 가이드의 주파수와 변위량을 측정하는 기구는 LDV(Laser Doppler Vibrometer, Polytec, OFV-5000)를 사용하여 측정하였다. 이 측정센서는 비접촉 센서로서 대역폭은 0-250kHz이고 분해능은 2nm이다. 그리고 LDV 컨트롤러(vibrometer controller, Polytec, OFV-352)가 있고 LDV에서 나오는 레이저 빔을 반사시키는 역할을 하는 He-Ne 레이저 거울(CVLHN-PM-1025-C-45UNP)이 렌즈모듈 아래 부분에 있다.

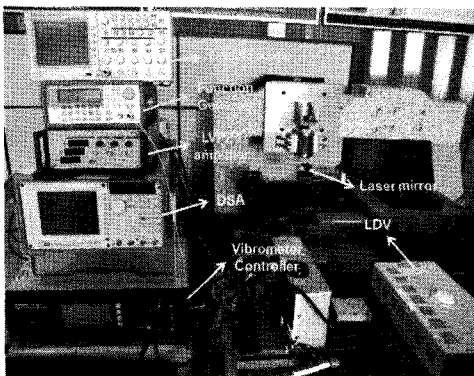


Fig. 7 Experiment setup.

5. 실험결과

5.1 주파수응답(FRF) 실험

Fig. 8은 초음파 진동장치의 주파수응답 측정을 한 결과 그래프이다. 입력전압은 10V로 인가하고 압전소자 앰프에서 증폭하여 최종 100V의 전압이 PZT에 인가되었다. 주파수 범위는 10-30kHz의 비교적 넓은 범위를 주어 측정을 하였는데 빨간색 동그라미 그려진 부분이 공진이 일어나는 부분이다. 약 23.56kHz에서 일어남을 알 수 있고 이 주파수에서 가장 큰 변위가 일어난다.

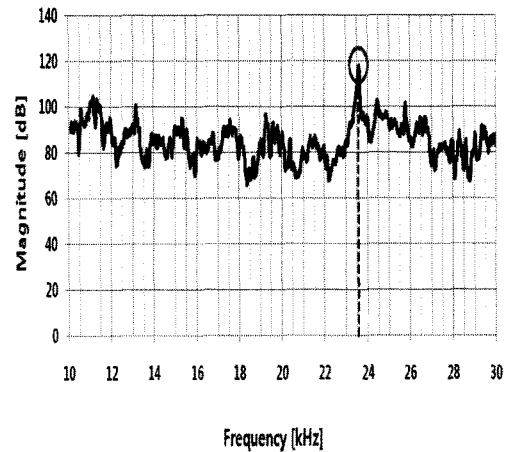


Fig. 8 Resonant frequency of vibrating system.

5.2 고유진동수에서의 변위량

Fig. 9는 앞서 구한 진동장치의 공진주파수인 23.56 kHz에서의 렌즈모듈의 수직방향 변위량을 측정한 그래프이다. 측정센서는 주파수응답측정 실험과 마찬가지로 LDV를 사용하였고 측정위치도 같게 하였다. 결과 데이터 그래프는 오실로스코프로 출력하였고 함수발생기에서 23.56kHz로 설정하였고 PZT에 인가되는 전압은 100V이다.

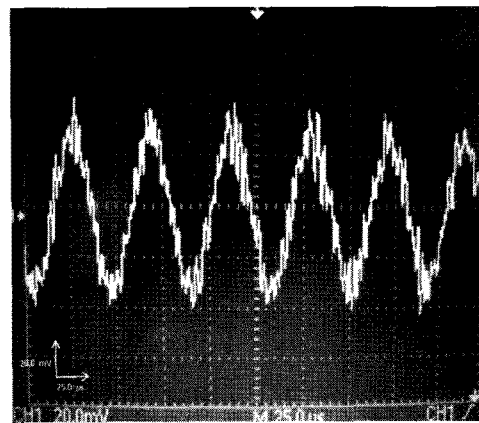


Fig. 9 Output displacement at resonance frequency.

위의 그래프를 보면 진폭이 80mV임을 알 수 있다. LDV센서의 민감도가 1 μ m/V이므로 계산을 해보면 80nm가 나오므로 렌즈모듈이 공진주파수에서의 최대 변위량이 80nm이 된다. 전압인가를 100V로 하였으므로 최대로 가능한 1,000V까지 전압을 높여 인가할 수 있다면 수치상으로는 800nm의 변위량이 발생 할 수 있다. 실제로 실험을 할 때에 PZT를 기준으로 아래부분의 진동장치에 진동을 가하였지만 볼트로 예압을 주고 있는 윗부

분의 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 정밀 가공시스템을 위한 초음파 진동장치를 설계, 해석 및 제작하여 목표 사양을 만족하는지 실험으로 검증하였다. 이장치는 충분한 직진성과 강성과 적은 질량을 가지도록 설계하여 고주파의 공진을 가진다. 20kHz이상의 초음파 영역에서 렌즈모듈의 진동을 일으키고 직진성과 선형성을 보장하는 가이드의 설계가 이루어져야 하고, 초음파에서 진동을 하기 때문에 진동장치의 강성은 높게 설계를 해야 한다. 진동을 가진하는 구동기는 PZT를 사용하였고 진동모듈의 가운데 부분은 가공 레이저 빔이 통과하여야 하므로 중공형 PZT를 사용하였다. 유한요소해석을 통해 고주파 진동장치의 상하모드의 공진주파수를 찾을 수 있었고 정적해석을 통해 진동장치의 수직방향 변위량을 얻을 수 있었다. 가공형상의 평탄도, 중형비, 표면조도 등 가공 품질에 더 우수한 결과를 얻기 위해서는 진동장치의 해석과 실험을 통해공진주파수가 초음파영역까지 도달했음을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- 1) J. G. Park, T. W. Kang, K. S. Lee and T. W. Kim, "Material Design and Analysis of Coronary Artery Stents," Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 44, No. 7, pp. 362-367, 2007.
- 2) J. G. Kim, K. G. Nam, S. H. Cho, W. S. Chang, S. J. Na and K. H. Whang, "Micromachining Characteristics inside Transparent Materials using Femtosecond Laser Pulses," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 190-196, 2006.
- 3) H. Y. Zheng and H. Huang, "Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, No. 8, pp. 58-61, 2007.
- 4) C. N. Chu, D. C. Han, H. J. Park, S. S. Park, S. U. Je, "A Study on the Ultrasonic Micromachining and Measurement System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 133-140, 2002.
- 5) Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, n.d. viewed, 13, September 2009. <<http://www.physikinstrumente.com>>