

◆ 특집 ◆ 최신 레이저 가공 및 해석 기술

압전구동기를 이용한 정밀 가공용 초음파 진동장치 해석 및 실험

Analysis and Experiment of Ultrasonic Vibration Mechanism using PZT Actuator for Precision Laser Machining

김우진¹, 전용호^{1,✉}, 조성학²
Woojin Kim¹, Yongho Jeon^{1,✉} and SungHak Cho²

¹ 아주대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

² 한국기계연구원 (Korea Institute of Machinery and Materials, Sinseongno, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea.)

✉ Corresponding author: princaps@ajou.ac.kr, Tel: 031-219-3652

Manuscript received: 2011.10.12 / Accepted: 2011.10.21

Recently, as the aged population grows around the world, many medical instruments, devices, and their fabrication processes are developing. Among the devices, a drug delivery stent is a good example for precision machining. Conventional drug delivery stent has problem of the remaining polymer because the drug is coated on the surface with it. If the drug is impregnated into the micro hole array on the stent surface, the polymer can be perfectly eliminated. 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 the stent to blood vessel tissue. To overcome these problems, we propose a vibration-assisted machining mechanism with PZT (Piezoelectric Transducers) for fabrication of micro sized holes better. The results indicated that the burr size can be significantly decreased with vibration assisted in nano-second pulse laser drilling test.

Key Words: Ultrasonic Vibration (초음파 진동), PZT Actuator (압전소자구동기), Laser Machining (레이저 가공), Precision device (정밀 장치), FEA (유한요소해석)

1. 서론

노인 인구의 증가율이 급속하게 증가함에 따라 의료 기기 또한 지속적으로 발전하고 있으며, 노인성 질환에 주로 사용되는 약물 전달 스텐트(Stent)와 같이 인체에 직접적으로 투입되는 이유로 매우 정밀하게 제작되어야 하는 의료 장치(Medical instrument)의 수요는 지속적으로 증가하고 있다.¹ 기존의 약물 전달 스텐트는 폴리머(Polymer)와 함께 약물을 코팅 하여 인체에 약물과 함께 폴리머

도 잔류하는 문제점을 가지고 있다. 이 문제점을 해결하기 위해서 스텐트 표면에 펄스 레이저를 활용하여 미세한 구멍(Hole)을 뚫고, 그 안에 약물을 주입하여 폴리머를 삭제하는 공법이 제안되었다.² 정밀 홀 가공과 원활한 디버링을 위해 초음파를 활용한 연구는 이미 진행 되어왔고,³⁻⁶ 또한 레이저를 활용한 미세 홀의 가공법은 이미 널리 알려져 있었으나, Zheng 과 Huang 은 펄스 레이저를 초음파 진동함으로써 미세 홀 가공에 도움을 준다는 것을 확인하였고,⁷ Kang 과 동료 연구자

들은 가공물을 초음파 진동하여 홀 가공 품질을 개선하는 연구를 진행하였다.^{8,9} 본 연구에서는 나노 세컨 펄스 레이저에 PZT (Piezoelectric Transducers) 구동기(Actuator)를 이용하여 고주파 진동을 부여 함으로써 가공 효율을 향상 시키고자 한다. 이를 위해 PZT 구동기 장치를 해석을 하고 제작하여, 미세 형상 가공을 위한 진동 특성을 만족하는지에 대해 검증하려 한다. 본 연구에 사용된 가공방법은 레이저 빔이 PZT 에 의해 고주파로 진동하는 렌즈 모듈(Eyepiece)를 거쳐 가공함으로써, 기존 레이저 가공 시스템 대비 높은 중형비 확보하고 burr 와 debris 발생 억제를 통해 가공 품질 및 정밀도의 향상은 물론 미세 가공을 기대할 수 있다. 본 연구를 통하여 높은 주파수와 큰 변위가 일어나는 고주파진동 장치를 설계하고, 유한요소해석(FEA)을 이용하여 변위 모사하고, Gap sensor 를 이용하여 실제 변위 측정을 한 후, 레이저 드릴링 실험을 통하여 초음파 진동의 효과를 확인하고자 한다.

2. 장치의 구성

2.1 시스템 구성

본 연구에서 제안하는 시스템의 개요는 Fig. 1 과 같다. 레이저 드릴링 실험은 레이저 헤드로부터 조사되는 레이저를 초음파 영역으로 진동하는 집광 렌즈를 통과하게 하여 가공물의 표면에 닿아 재료를 제거하도록 설계하였다. 이때 렌즈모듈은 20 kHz 이상으로 진동함으로써, 가공면에 burr 와 Debris 를 감소시킬 것으로 예상된다. 렌즈모듈의 진동은 PZT (P-025.10H, Physik Instrumente GmbH) 구동기를 사용하는데 이것은 레이저 빔이 통과 할 수 있도록 중공형 PZT 로 선정하였다.¹⁰ 또한 렌즈 모듈에 PZT 가 직접 접촉을 할 경우 모듈에 집중 하중이 발생하고, 이로 인하여 직진성을 잃어 버릴 수 있으므로 두 부품 사이에 원통형 세라믹 (Al₂O₃, 99.7%) 판을 추가함으로써 보완하였다.

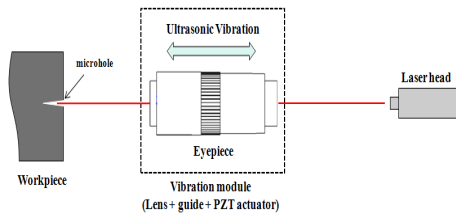


Fig. 1 Schematic diagram of system

2.2 설계 변수 및 모델링

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.¹¹ 강성을 높이고자 스테인레스 스틸로 진동장치를 제작하고, 질량을 줄이고자 사이드 가이드를 이용해 윗판과 아랫판을 연결하였다.

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

본 연구에 사용된 진동 장치는 Fig. 2 에서 보는 바와 같다. PZT 의 한쪽 방향에 예압 (Preload)을 주도록 설계를 하였고 볼트 가운데 부분에는 구멍을 뚫어 레이저 빔이 통과할 수 있게 하였다. 높은 주파수에서 진동을 하므로 진동 장치 지지부를 보장하여 강건하게 설계를 하였고, 렌즈 모듈의 움직임은 직진성을 보장하도록 양쪽에서 대칭적인 가이드를 설계하였다. 만약 진동 장치의 직진성이 보장되지 않으면 가공물 가공 시에 홀의 정확한 가공위치가 달라질 수 있고 선폭 및 직경이 부정확하거나 가공표면이 매끄럽지 못한 결과가 예측 된다.

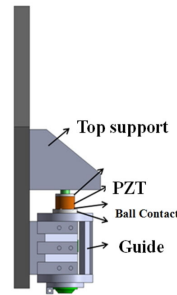


Fig. 2(a) Assembly mechanism of side view

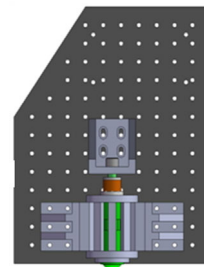


Fig. 2(b) Assembly mechanism of front view

3. 유한요소해석

3.1 변위해석

진동 장치의 변형은 가공 결과에 직접적인 영향을 미치므로, 고주파 진동장치의 수직, 수평 방향의 변형량을 알아보기 위해 정적 해석을 진행하였다. 설계 시 강성 향상을 위해 스테인리스강을 선택 하였고, 해석을 위한 구속 조건으로 체결된 볼트 부분을 고정하였다. PZT 를 이용하여 운동하는 시스템 해석을 위해 식(2) 와 식(3)이 사용되었다.

$$K_{PZT} = (\Delta L_0 - L_0) = K_m \times \Delta L \quad (2)$$

$$F_{working} = K_m \times \frac{K_{PZT}}{K_{PZT} + K_m} \Delta L_0 \quad (3)$$

식 (2)는 PZT 의 강성과 목표 구동거리(ΔL)를 이용하여 구동 축 방향 장치의 강성을 구하는 식이며, 식 (3)은 설계된 강성에서 목표 구동거리를 운동하기 위해 PZT 가 발생시켜야 하는 힘을 계산하는 식이다. 식 (3)을 이용하여 구해진 힘은 고주파 진동장치의 유한 요소 정적 구조 해석 시뮬레이션을 실행할 때 진동장치에 인가되는 힘으로 활용된다. 식 (2)와 식 (3)의 ΔL₀ 은 PZT 에 강성을 갖는 어떠한 기구도 연결되지 않은 상태에서 발생할 수 있는 PZT 의 최대 변위량을 나타낸다. 사용된 PZT 의 기본 사양은 최대 변위량 15μm, 강성 490 N/μm 로 제작 되었다. 식 (1)에 의해서 진동장치의 강성은 408 N/μm 로 계산되었다. 이 값들을 이용해서, 식(2)에 대입하면 구동거리인 ΔL 은 약 2.53μm 이고, 식(3)을 활용해서 PZT 가 발생시켜야 하는 힘, F_{working} 은 6,092N 으로 계산 되었다. Fig. 3 은 ANSYS 를 활용한 변위 해석의 결과로 렌즈는 거의 수직 방향으로 직진하고 있으며 좌우 대칭적으로 변형이 생기는 것을 알 수 있다. 식 (2)를 통해서 렌즈를 감싸고 있는 진동 장치에서 2.53μm 변위량이 계산되었고, 해석을 통한 렌즈의 수직 방향 변위량은 3.8μm 로 계산 대비 약 1.3 μm 더 많이 움직였다. 또한, 해석 결과 좌우 방향으로의 움직임은 약 0.03μm 로 측정되어 수직 방향 대비 수평방향으로의 변형은 작았다. 이는 PZT 의 수평 변형이 수직 변형 대비 1/100 수준이므로 수평 방

향 변형은 고려하지 않아도 문제가 없을 것으로 판단된다.

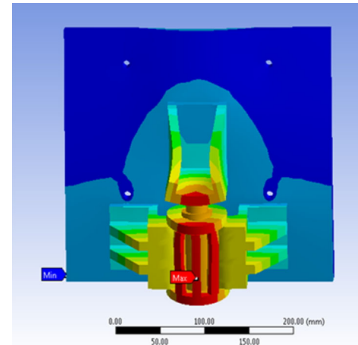


Fig. 3(a) Analysis of vertical deformation

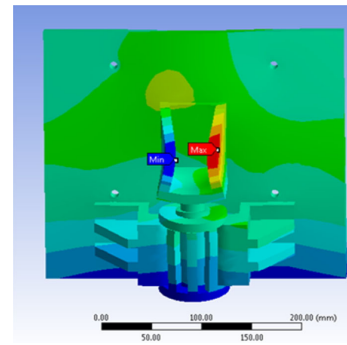


Fig. 3(b) Analysis of lateral deformation

3.2 민감도 해석

높은 초음파 진동을 구하기 위해 고주파 진동 장치의 설계변수에 대해서 민감도 분석을 실시하였다. 설계 변수는 진동 장치 윗판과 아랫판의 구멍의 크기, 중심으로부터의 거리, 구멍의 개수로 설정하였다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 질량을 줄이면 고유진동수가 올라간다. 이것은 Rayleigh's quotient 로 개념적으로 설명할 수 있다.¹² 고유진동수는 진동모드 {u}와 탄성행렬 [k]와 관성행렬 [m]의 함수로, 분모는 운동에너지, 분자는 스트레인 에너지에 해당된다. 스트레인 에너지가 적은 곳에 구멍을 뚫으면 분자에 비해 분모의 크기가 작아져서 진동수가 커진다.

$$\omega^2 = \frac{\{u\}^T [K] \{u\}}{\{u\}^T [m] \{u\}} = R(\{u\}) \quad (4)$$

이런 이유로, 초음파 진동 장치 윗판의 스트레인 에너지에 대하여 해석하였다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 원판의 정가운데 부분이 스트레인 에너지가 가장 크고 중심에서 24 mm 지점에서 가장 적게 나타났다. 스트레인 에너지가 가장 큰 부분에서 가장 적은 부분으로 홀을 옮겨 뚫으면 더 높은 진동수 값을 얻을 수 있다.

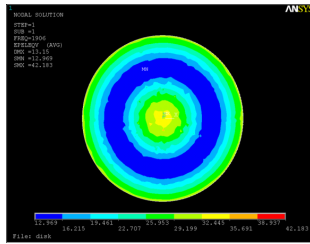


Fig. 4 Strain energy distribution

홀의 개수와 홀의 직경 또한 진동수에 영향을 미치므로 각각의 조건에 대하여 해석을 진행하였다.

Table 1 은 고주파 진동장치의 설계변수를 민감도 분석하여 최적의 값을 얻어낸 수치를 정리 한 것으로 중심으로부터 24 mm 떨어진 곳에 M5 공칭 직경 홀 6 개를 뚫었을 때 가장 큰 고유진동수를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Table 1 Modified Design of Mechanism

| | |
|--------------------|----|
| Hole position (mm) | 24 |
| Hole number | 6 |
| Hole size (mm) | 5 |

Fig. 5 는 윗판과 아랫판을 최적화 된 설계 변수를 통해 나타낸 1 차 모드의 최종 해석 결과이다. 본 모델에서 제시된 변수를 적용하여 진동 장치를 제작하였다.

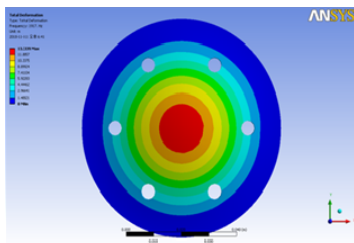


Fig. 5 Result of optimized design

4. 실험

4.1 변위 측정 실험

Fig. 6 은 변위 측정 실험 장비 구성을 나타낸 것이다. 세 개의 Capacitive sensor 를 이용해 공진 주파수에서의 수직과 수평 방향의 변위를 측정 할 수 있다. PZT 에 증폭된 전압을 인가하기 위해, -2 ~ +12 V 의 전압을 입력 받고 최대 120 V 까지 출력을 낼 수 있는 장비인 저전압 압전 소자 앰프(Low voltage PZT amplifier, Physik Instrumente GmbH & Co., E-663)와, 함수발생기(Function generator, Agilent, 33220A)를 사용하였고, 가이드의 주파수와 변위량을 측정하기 위하여 대역폭은 0 Hz ~ 100 kHz 이고 분해능은 22.3nm 인 비접촉식 Gap Sensor (Capacitance sensor, ADE, Model5810)와 오실로스코프(Oscilloscope, Tektronix, TDS 2004B)를 사용하였다.

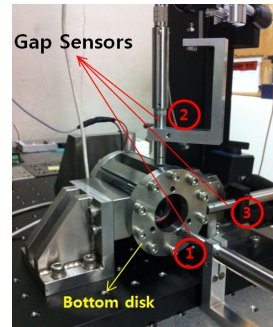


Fig. 6 Experiment setup

Fig. 7 은 진동장치의 공진주파수인 23.56 kHz 에서의 렌즈모듈의 수직방향과 수평방향의 변위량을 측정한 그래프이다. 측정센서는 정전 용량형 센서를 이용했고 데이터 그래프는 오실로스코프로 출력하였다. 함수발생기에서 23.56 kHz 로 설정하였고, PZT 로 인가할 수 있는 최대 전압인 100 V 로 설정하였다.

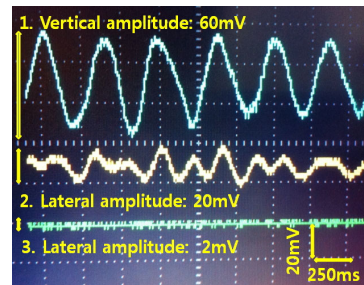


Fig. 7 Output displacement at resonance frequency

Gap sensor 의 민감도는 50 μ m/V 이고, 위의 그래프를 보면 수직 방향 진폭이 60mV 임을 알 수 있다. 수평 방향의 진폭은 20mV, 2mV 가 나왔다. 이는 수직 방향으로 약 3 μ m, 수평방향으로 각각 1 μ m, 0.1 μ m 가 나온 것이다. 각 구성품들이 볼트로 연결되어 결속력이 떨어지는 이유로 수평 방향의 실험 값이 해석 값에 차이가 많이 났다. 실제 실험에서는 해석과 다르게 볼트 체결로 각 구성품이 연결되어 변위가 더 커질 수도 있는데, 이는 판을 용접해서 일체형으로 제작해 강건하게 보완한다면 수평 방향의 진폭이 더 작아 질 것으로 예상된다.

4.2 가공 실험

Fig. 8 은 초음파 진동장치를 이용해 스테인리스 스틸의 레이저 드릴링을 위한 실험장비 구성이다. 실험장비로는 진동을 위한 저전압 압전소자앰프 (Low voltage PZT amplifier, Physik Instrumente GmbH & Co., E-663)와 함수발생기 (Function generator, Agilent, 33220A), 측정을 위한 오실로스코프(Oscilloscope, Tektronix, TDS 2004B)와 레이저 조사를 위한 IPG 사의 YLPM-Series 0.5 and 1mJ energy pulsed laser 가 사용되었다. 조사되는 레이저의 집광을 위해 Mitutoyo 사의 렌즈(M Plan Apo NIR 5X Objective)를 사용하였고, 두께 200 μ m, 4mm x 4mm 너비의 스테인레스판을 시편으로 사용하여 레이저 드릴링 실험을 진행하였다. Table 2 와 Table 3 은 실험에 사용된 조건을 정리한 것이다.

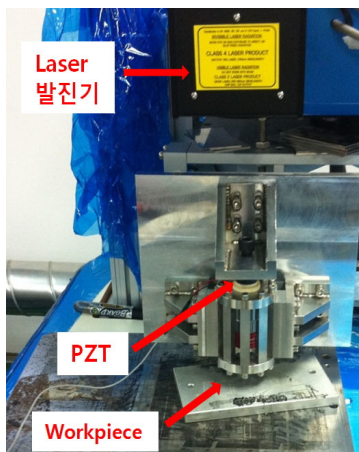


Fig. 8 Experiment setup

Table 2 Condition of Ultrasonic Vibration Mechanism

| | |
|-------------------------------|-------|
| Resonant frequency [kHz] | 23.56 |
| Vertical amplitude [μ m] | 3.8 |
| Lateral amplitude [μ m] | 0.03 |

Table 3 Laser setup condition

| | |
|-----------------------|-----|
| Working distance[mm] | 125 |
| Pulse energy[W] | 95 |
| Pulse duration [nm] | 200 |
| Spot size [μ m] | 30 |
| Repetition rate [kHz] | 20 |

Fig. 9 는 레이저 드릴링 시험 시편을 전자 주사 현미경(SEM)을 이용해 측정한 결과이다. 초음파 진동의 유무와 상관없이 가공부 주위에 burr 가 발생하였으나, burr 발생부위와 스페어의 확산 부위로 판단하였을 때 초음파 진동을 할 경우에 보다 우수한 표면 결과를 확인할 수 있었다.

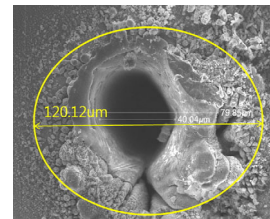


Fig. 9(a) Microhole at the entrance with no vibration (850 magnifications)

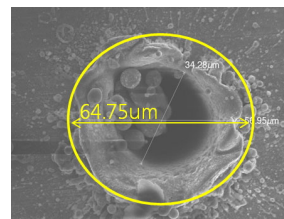


Fig. 9(b) Microhole at the entrance with ultrasonic vibration-assistance (1200 magnifications)

5. 결론

본 연구에서는 상용 나노 세컨 펄스 레이저를 활용하여 미세 형상을 정밀 가공할 수 있는 시스

템의 개발을 위해 필요한 초음파 진동 장치를 설계하고 그 변위를 해석적 및 실험적으로 검토하였으며, 시스템을 구축하여 레이저 드릴링에 적용하였다. 진동 장치는 충분한 직진성과 강성과 적은 질량을 가지도록 설계하였고, 고주파에서 공진할 수 있도록 설계되었다. 진동을 가진 하는 구동기는 레이저 조사를 방해 받지 않도록 중공형 PZT를 사용하였다.

유한요소해석을 통하여 진동장치는 $3.8\mu\text{m}$ 의 수직방향, $0.03\mu\text{m}$ 의 수평방향의 변위량을 얻을 수 있었고, 실제 변위 실험을 통해 비교한 결과 수직방향은 79% 유의성을 확인할 수 있었다. 그러나 수평 방향은 해석과 실험값의 차이가 크다. 이는 볼트 체결에 의한 결속도가 떨어졌는데, 장치의 구조물을 용접하면 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 설계의 개선 및 최적화를 위해, 고주파 진동 장치의 설계 변수 민감도를 분석하여 스트레인 에너지가 가장 적은 부분의 질량을 제거하면 공진 주파수가 올라간다는 결과를 얻어 가장 높은 공진 주파수를 갖는 최적화된 모델링을 얻을 수 있었다. 가공 실험을 통해 초음파 진동을 하더라도 burr가 발생하였지만 진동을 하지 않았을 경우보다 표면의 개선이 있음을 확인하였다. 향후 실험 결과의 개선을 위하여 Pulse energy, Pulse duration, Repetition rate와 같은 레이저 가공 조건을 최적화 하여 표면 개선에 대한 효과를 검토할 예정이다. 초음파 진동이 실제 가공 깊이에도 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구가 계속될 예정이다.

후 기

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

참고문헌

1. Park, J. G., Kang, T. W., Lee, K. S. and Kim, T. W., "Material Design and Analysis of Coronary Artery Stents," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 44, No. 7, pp. 362-367, 2007.
2. Kim, J. G., Nam, K. G., Cho, S. H., Chang, W. S., Na, S. J. and Whang, K. H., "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. Azarhoushang, B. and Akbari, J., "Ultrasonic-Assisted Drilling of Inconel 738-LC," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 1027-1033, 2007.
4. Yeo, S. H., Ngoi, B. K. A. and Chua, L. Y., "Ultrasonic Deburring," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 333-341, 1997.
5. Shibano, Y., "Ultrasonic Micro Deburring Application," 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, pp. 157-166, 1994.
6. Chu, C. N., Han, D. C., Park, H. J., Park, S. S. and Je, S. U., "A Study on the Ultrasonic Micro-machining and Measurement System," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 133-140, 2002.
7. Zheng, H. Y. and Huang, H., "Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 58-61, 2007.
8. Zhang, D., Feng, X., Wang, L. and Chen, D., "Study on the Drill Skidding Motioning Ultrasonic Vibration Microdrilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 6, pp. 847-857, 1994.
9. Kang, B., Kim, G., Cho, S., Park, J. and Yang, M., "The Effects of Ultrasonic Vibration on Surface Finish in Nano-second Laser Machining," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 402-406, 2010.
10. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co., <http://www.physikinstrumente.com>
11. Rao, S. S., "Mechanical Vibrations, 3rd Ed.," Addison-Wesley, pp. 37-39, 1992.
12. The CVI Melles Griot Catalog, "All Things Photonic," Vol. 1, No. 2, pp. 7-14, 2009.