

초음파 절삭기 핸드피스부 제작 및 변위 특성 시뮬레이션

김승원¹, 류주현^{1,a}, 이지영^{2,b}

¹ 세명대학교 전기공학과

² 세명대학교 컴퓨터과학과

Fabrication and Simulation of Displacement Properties of Ultrasonic Generator Handpiece

Seung-Won Kim¹, Ju-Hyun Yoo^{1,a}, and Jie-Young Lee^{2,b}

¹ Department of Electrical Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

² Department of Computer Science, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

(Received December 5, 2017; Revised December 20, 2017; Accepted January 22, 2018)

Abstract: Ultrasonic wave technologies have been widely used in ultrasonic washing machines, ultrasonic surgery, ultrasonic welding machines, ultrasonic sensors, and medical instruments. Ultrasonic surgery can be realized through the cavitation effect of ultrasonic waves. In this study, piezoelectric ceramics were manufactured to achieve the optimum design of a piezoelectric vibrator in a handheld generator for ultrasonic surgery. The best specimen showed the excellent piezoelectric properties of $k_p = 0.624$, $Q_m = 1,531$, and $d_{33} = 356$ pC/N. Numerical modeling based on the finite element method was performed to find the resonance frequency, the anti-resonance frequency, and the displacement properties of the handheld ultrasonic generator. Maximum displacement was observed in the six-step piezoelectric vibrator at $6.36 \mu\text{m}$.

Keywords: Ultrasonic generator handpiece, Piezoelectric, Piezoelectric vibrator

1. 서론

최근에, 초음파 기술이 초음파세탁기, 초음파 용착기, 초음파 수술기, 초음파 센서 및 의료기기 등에 많이 사용되고 있다. 국내외에서 고출력이 요구되는 초음파 세척기 및 용착기는 20~50 kHz 대역의 저주파 초음파가 사용되고 있으며, 사람의 의료 기기, 정밀도가 요구되는 분야에서는 1 MHz 이상의 고주파 대역이 일반적으로 사용되고 있다. 인체 조직에 대한 초음파의 영향은 크게 열 효과와 기계적 효과로 나뉘며 주로 세

포의 미세한 온도 상승에 의한 대사를 촉진시키고, 고주파 진동에 의한 기계적인 마사지를 수행하는 것이 가능하다.

또한, 초음파의 캐비테이션 효과로 의료용 초음파 수술이 가능하다. 초음파 수술기는 소수의 기업에 의해서 주도되어 왔으며, 이 기업들로 상용화되어 왔다. 복강경 수술을 위한 의료 초음파 절삭기의 미국 시장은 12억이다. 자본력과 브랜드 파워를 기반으로 한 존슨 앤 존슨(Johnson & Johnson)과 코비디엔(Covidien)과 같은 다국적 기업이 압전 변환기를 응용한 의료용 초음파 수술 시장을 장악하고 있기 때문에, 국내 개발이 시급한 실정이다.

최근 들어 유한 요소 해석을 쉽게 수행할 수 있도록 모델링을 도와주는 전처리기, 해석 결과를 효율적으로 보여 주는 후처리기의 개발이 발전하고, 이를 수행할 수 있는 PC, 이들 세 기능을 한 개의 소프트웨어로 통

a. Corresponding author; juhyun57@semyung.ac.kr

b. Corresponding author; ljy409@semyung.ac.kr

합시켜 작업이 가능한 소프트웨어로 인해서 유한 요소 해석을 설계업무에 보편적으로 적용할 수 있다. 이러한 FEA (fnite element analysis) 소프트웨어인 ANSYS, PZFLEX, ATILA는 공학용으로 상업화되어 사용되고 있다. ATILA는 압전 소자 및 디바이스를 설계하고 해석할 수 있는 대표적인 소프트웨어 중 하나이다 [1,2]. ATILA를 이용하면 압전 세라믹스와 탄성체의 크기와 재질 등 변수로 하여 공진 주파수와 반공진 주파수, 공진모드에 따른 변위량 등을 쉽게 예측할 수 있고, 향후 초음파 절삭기 핸드피스 개발에 시간과 비용적인 측면에서 유용하게 사용될 수 있다. 압전진동자를 병렬로 연결하여, step을 증가시키면, 진동자 한 개당 인가되는 전계가 높아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 ATILA를 사용하여 압전 진동자의 step 변화에 따른 초음파 절삭기 구동부의 공진 주파수를 측정하고, 최대 변위의 모델을 관찰하여, 최적의 초음파 절삭기 핸드피스부를 설계 및 시뮬레이션하고자 한다. 또한, 압전 특성이 우수한 PMN-PNN-PZT 세라믹스를 이용하여 초음파 절삭기 핸드피스부를 제작하여 그에 대한 특성을 조사하고자 한다 [3,4].

2. 실험 방법

2.1 실험

2.1.1 시편 제작

본 실험은 일반적인 산화물 혼합법으로 시편을 제조하였으며, 실험에 사용된 조성식은 다음과 같다. Pb($Mn_{1/3}Nb_{2/3}$)_{0.07}($Ni_{1/3}Nb_{2/3}$)_{0.10}($Zr_{0.48}Ti_{0.52}$)_{0.83}O₃ 조성에 시료의 정확한 몰비를 10⁻⁴까지 칭량하여 아세톤을 분산매로 하여 불밀을 24시간 동안 혼합 분쇄하였으며, 80°C의 항온건조기에서 12시간 이상 건조하였다. 건조한 시료를 850°C에서 2시간 동안 1차 하소하여 기본 물질을 합성한 후, 하소된 파우더에 Bi₂O₃, CuO, Li₂CO₃를 소결 조제로 첨가하여 24시간 동안 재혼합 분쇄하였다. 건조된 파우더에 PVA 5 wt%를 혼합하고 직경 17 mm의 원통형 몰더로 1 ton/cm²의 압력으로 성형하였다. 성형된 시편은 600°C에서 3시간 동안 결합제를 태워 버린 후, 승하강온도 3°C/min로 하여 ZnO와 Nb₂O₅를 첨가한 후 940°C의 소결온도에서 2시간 소결하였으며 특성 측정을 하기 위하여 1 mm로 연마 후 Ag 전극을 도포하고 600°C에서 10분간 열처리하였다.

2.1.2 ATILA 시뮬레이션

ATILA 시뮬레이션에서 압전세라믹스는 표 1의 재료 정수를 가진 PZT4의 조성을 사용하였고, 압전진동자의 step변화를 하기 위하여 그림 1과 같이 볼트 조임 란 쥘반형 진동자로 설계하였으며, 압전 진동자 step 변화에 따른 최적의 조건을 시뮬레이션하였다.

그림 2는 초음파 절삭기 핸드피스부의 모양을 나타낸 것이다. 전체 두께를 10 mm로 고정된 상태에서 외경 16 mm, 내경 6 mm를 가지는 압전 초음파 진동자를 2, 4, 6 스텝에 따라 진동자 하나의 두께를 각각 5 mm, 2.5 mm, 1.66 mm로 변화를 주었으며, 란쥘반형 진동자로 설계하여 병렬 연결하여, 220 V의 전압을 가해 시뮬레이션하였다. 그림 3은 4 step 진동자로 제작된 초음파절삭기 핸드피스부를 나타낸 것이다.

그림 3은 초음파 절삭기 핸드피스부의 재질을 나타낸 것이다. 초음파 절삭기핸드피스부는 Steel1, Aluminum1의 재료정수를 주어 시뮬레이션하였으며, 진동자는 PZT4를 조건으로 주었다.

Table 1. Material constants of PZT4 ceramics.

Material constants	PZT4
Density (kg/cm ³)	7,500
S ^E ₁₁ (10 ⁻¹² N/m ²)	12.3
S ^E ₁₂ (10 ⁻¹² N/m ²)	-4.05
S ^E ₁₃ (10 ⁻¹² N/m ²)	-5.31
S ^E ₃₃ (10 ⁻¹² N/m ²)	15.5
S ^E ₄₄ (10 ⁻¹² N/m ²)	39
d ₅ (10 ⁻¹² N/m ²)	496
d ₃₁ (10 ⁻¹² N/m ²)	-123
d ₃₃ (10 ⁻¹² N/m ²)	289

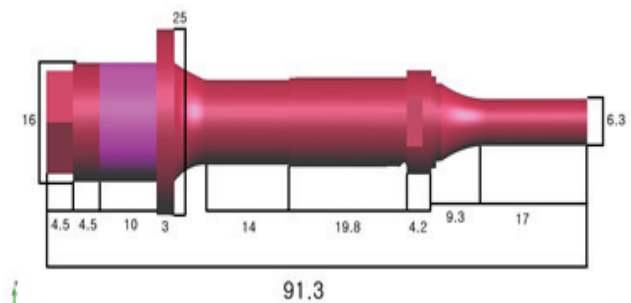


Fig. 1. Specification of ultrasonic generator handpiece.



Fig. 2. Fabricated ultrasonic generator handpiece.

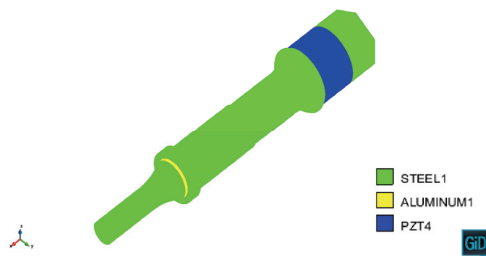


Fig. 3. Materials of ultrasonic generator handpiece.

3. 결과 및 고찰

표 2는 본 초음파절삭기에 사용할 시편의 물성을 나타낸 것이다. 전기기계결합계수(k_p)가 0.624, 유전상수가 1,361, 기계적 품질계수(Q_m)가 1,531로서 초음파절삭기용 진동자로 사용하기에 적합한 특성을 나타내었다.

표 3은 본 초음파절삭기에 사용된 진동자를 스텝 변화를 하여 제작된 구동부의 물성을 나타낸 것이다. 두께가 2.53인 시편으로 제작된 4 Step 초음파 절삭기

Table 2. Physical properties of composition ceramics for ultrasonic vibrator.

Density (g/cm ³)	k_p	Dielectric constant	Q_m	d_{33} (pC/N)
7.90	0.624	1,361	1,531	356

Table 3. Physical properties of fabricated ultrasonic generator handpiece.

	Fr (kHz)	Fa (kHz)	Keff	Q_m'	d_{33} (pC/N)
2 Step	55.585	56.3950	0.1689	2,231	376
4 Step	55.365	56.2100	0.1727	2,338	377
6 Step	55.285	56.0600	0.1656	1,831	381

핸드피스부가 유효 전기기계결합계수 $keff' = 0.17$, 유효 기계적 품질계수 $Q_m' = 2,338$, $d_{33} = 377$ pC/N으로 우수한 특성을 나타내었으며, 두께가 1.66 mm인 시편으로 제작된 6 Step 초음파 절삭기 핸드피스부가 $keff' = 0.165$, $Q_m' = 1,831$, $d_{33} = 381$ pC/N의 값을 나타냈다.

그림 4는 압전 초음파진동자 step에 따른 초음파 절삭기 핸드피스부의 끝단 선단 변위특성을 나타낸다. 6 step 초음파 진동자에서 6.36 μ m로 최대의 선단변위를 얻었으며, 2 step 초음파 진동자에서는 최대 변위가 2.13 μ m로 가장 낮았다. 이는 압전 진동자가 병렬 연결되었으므로, 스텝 증가에 따라 진동자 1개당 걸리는 전계가 증가되는 방식으로 구동부의 설계가 변경되었기 때문이라고 사료된다. 진동자 스텝을 8 step으로 증가할 경우는 두께당 걸리는 전압이 증가하기 때문에 변위는 증가하지만 $keff$, Q_m' 값이 감소하여 효율이 감소하고, 1.76 kV/Cm로 높은 전계가 걸리기 때문에 진동자의 열화 등 문제가 생길 수 있게 된다.

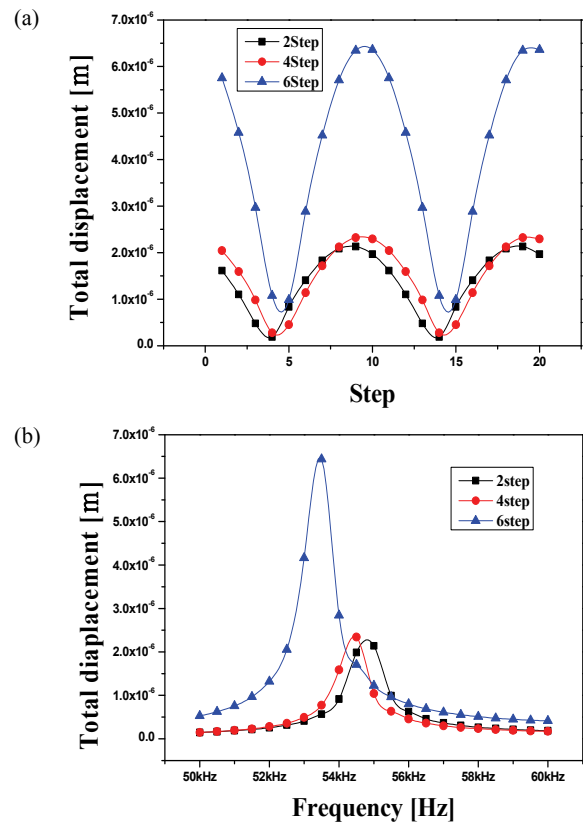


Fig. 4. Total displacements of ultrasonic generator handpiece. (a) Total displacements according to step and (b) total displacement according to frequency.

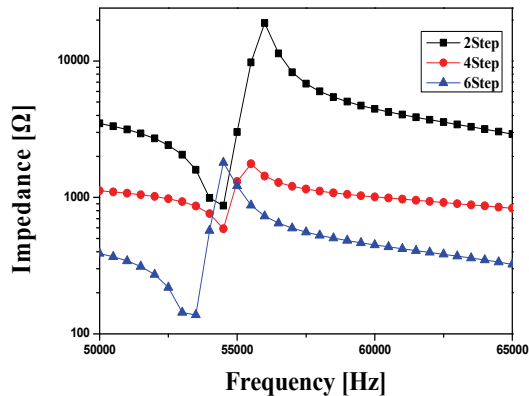


Fig. 5. Impedance properties of ultrasonic generator handpiece.

그림 5는 압전 초음파진동자 Step에 따른 초음파 절삭기 핸드피스부의 공진 및 반공진주파수를 보여 준다. 2 step, 4 step, 6 step 주파수에서 공진주파수가 각각 56, 55.5, 54.5 KHz로 6 step 주파수에서 공진 주파수가 가장 낮게 나타났다. 2 step, 4 step 진동자에서는 56.5 kHz에서 반공진 주파수를 나타내었다. 6 step 주파수에서는 반공진 주파수가 54.5 kHz로 가장 낮게 나타났다. 이 값들은 표 1처럼 제작된 초음파 절삭기 핸드피스부의 공진 반공진 주파수의 변화 경향과 일치하는 특성을 나타내었다.

4. 결론

본 연구 결과, 초음파절삭기를 개발하기 위하여 PMN-PNN-PZT 조성을 이용하여 시편을 제작하였으며, 그 시편의 압전 특성은 전기기계결합계수(k_p)가 0.624, 유전상수 1,361, 기계적 품질계수(Q_m)가 1,531로서 초음

파절삭기용 진동자로 사용하기에 적합한 특성을 나타내었다. 초음파 절삭기를 개발하기 위해 본 ATILA를 이용하여 최적화된 초음파 절삭기 핸드피스부를 설계 및 시뮬레이션하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다. 초음파 진동자의 step 개수가 6개일 때 6.36 μm 로 최대의 변위를 얻었으며, 최대변위는 초음파진동자 step에 증가에 따라 증가하는 경향성을 보였다.

결론적으로, 두께가 1.66 mm인 시편으로 제작된 6 step 초음파 절삭기 핸드피스부가 $k_{\text{eff}}' = 0.165$, $Q_m' = 1,831$, $d_{33} = 38$ pC/N의 값을 나타냈고, 선단변위가 6.36 μm 로 최대의 변위를 얻어서 초음파절삭기핸드피스부로 적용하기에 적합하였다.

감사의 글

본 연구는 세명대학교 2017년 교내과제연구로 이루어졌음.

REFERENCES

- [1] K. S. Lee, J. H. Yoo, E. S. Hwang, and D. W. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **21**, 49 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2008.21.1.049>]
- [2] H. P. Ko, C. Y. Kang, and S. J. Yoon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **18**, 18 (2005).
- [3] J. Yoo, T. Kim, E. Lee, N. G. Choi, and H. S. Jeong, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **18**, 334 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.6.334>]
- [4] J. H. Yoo, S. W. Kim, D. H. Seo, E. S. Lee, N. G. Choi, and H. S. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 152 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.3.152>]