

나노입자 세정을 위한 노즐형 메가소닉 웨이브가이드 설계 및 제작

Design and Fabrication of a Megasonic Waveguide with Nozzles for Nano-particle Cleaning

김현세*† · 임의수*
Hyunse Kim*† and Euisu Lim*

(Received 02 February 2026, Revision received 10 March 2026, Accepted 17 March 2026)

초록 : 초음파를 이용한 세정은 근래에 많이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 특히 1 MHz급의 주파수를 이용하는 메가소닉 세정 장치를 개발하였다. 이 메가소닉은 쿼츠로 제작되었으며, 90개의 $\phi 20 \mu\text{m}$ 인 미세 노즐이 포함되어 미세한 액적을 분사하여, 세정이 가능하게 된다. 이를 위해 유한요소해석을 이용하여 압전소자와 웨이브가이드를 해석하고 임피던스 값을 예측하였다. 그 결과, 예측한 임피던스의 최댓값은 압전소자의 경우, 998 kHz였으며, 측정한 값은 999 kHz로 0.1%의 오차로 잘 예측하였다. 또한 웨이브가이드의 경우, 이 값이 1,000 kHz였으며, 제작한 웨이브가이드의 측정값도 일치하였다. 이를 이용하여, 쿼츠 소재로 웨이브가이드를 제작하였으며, 피코초 (Pico Second) 레이저를 이용하여 노즐을 가공하였다. 이에 본 연구 결과를 활용하여 미세입자의 세정에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 메가소닉, 초음파, 웨이브가이드, 유한요소해석, 세정

Abstract : Recently, cleaning processes using ultrasonics are being actively developed and used in industrial areas. Especially, a 1 MHz type is called a megasonic. In this research, we used the megasonic wave for the development of a cleaning system. It was made of a quartz material, and it has 90 micro holes with $\phi 20 \mu\text{m}$ sizes. They eject nano-sized droplets, thus they can remove nano-particles from a contaminated surface. For the development of the system, finite element methods (FEM) were utilized for the analysis of a piezoelectric actuator (PZT, Lead Zirconate Titanate) and a waveguide to predict impedance values. As a result, the peak value for the PZT, was 998 kHz, which agreed well with the measured value of 999 kHz with 0.1% error. In addition, for the waveguide, the predicted value coincided with the experimental value of 1 MHz. Using them, the quartz waveguide was fabricated, and micro nozzles were micro-machined using a pico second laser. Reflecting these results, it might be applied in cleaning nano-sized particles.

Key Words : Megasonic, Ultrasonic, Waveguide, Finite Element Methods, Cleaning

*† 김현세(<https://orcid.org/0000-0002-6302-7628>) : 책임연구원,
한국기계연구원 탄소중립기계연구소
E-mail : hkim@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7967

*임의수(<https://orcid.org/0009-0005-9041-2539>) : 책임연구원,
한국기계연구원 탄소중립기계연구소

*† Hyunse Kim(<https://orcid.org/0000-0002-6302-7628>) : Principal
Researcher, Research Institute of Carbon Neutral Energy
Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials.
E-mail : hkim@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7967

*Euisu Lim(<https://orcid.org/0009-0005-9041-2539>) : Principal
Researcher, Research Institute of Carbon Neutral Energy
Machinery, Korea Institute of Machinery and Materials.

1. 서 론

최근 산업 전반에 인공지능(Artificial Intelligence, AI)과 로봇의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 여러 분야에 활용되고 있다. 생성형 AI나 Physical AI 등은 많은 계산량을 요구하므로, 이를 구현하기 위한 고성능 CPU(Central Processing Unit), GPU(Graphics Processing Unit) 및 DRAM(Dynamic Random Access Memory)과 HBM(High Bandwidth Memory)의 기술 개발에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.¹⁾

한편, CPU, 메모리 등의 반도체 제조 공정에는 필수적으로 세정 공정이 포함된다.²⁾ 기존의 화학적 세정만으로는 미세한 입자 (Particle)들을 제거하는데, 한계에 다다르게 되었다.

초음파는 다양한 산업 분야에 적용이 가능하다.³⁾ 초음파를 밀링에 사용하게 되면, 높은 정도와 낮은 연성의 재료를 가공할 수 있다.⁴⁾ Noh 등은 집속형 초음파 장치용 압전 세라믹의 소결특성에 대한 연구를 발표하였다.⁵⁾ 또한 Lee 등은 텅스텐의 열충격 손상에 대하여 초음파를 이용한 특성 평가에 관한 연구를 수행하였다.⁶⁾

본 연구팀에서는 1 MHz 이상의 주파수를 이용하여, 반도체 세정 공정 및 Post-CMP (Chemical Mechanical Polishing) 세정에도 적용할 수 있는 메가소닉 웨이브가이드를 설계·제작하였고,⁷⁾ 반도체 세정용 3 MHz 메가소닉도 개발하여 결과를 발표하였다.⁸⁾ 그러나 아직 노즐 타입의 미세액적이 분사되는 메가소닉은 연구가 미진한 편이며, 이에 미세노즐을 통해 미세액적을 발생시켜 세정을 할 수 있는 장치를 설계 제작하고자 하였다.

본 연구에서는 기존 연구들과는 다른 노즐을 포함한 세정용 메가소닉을 개발하고자 하였다. 시스템의 개발을 위해서 유한요소법 (Finite Element Methods, FEM)을 이용하여, 해석을 진행하였다. 압전소자와 웨이브가이드의 임피던스 커브 (Curve)를 예상하고 이를 실험과 비교하였다. 마지막으로 미세노즐을 레이저로 가공하고 이를 측정하여, 본 시스템의 세정공정 적용 가능 여부를 토론했다.

2. 메가소닉 장치

2.1 메가소닉 작동 원리

메가소닉 세정 장치의 작동 원리가 Fig. 1(a)에 나와 있다. 메가소닉이 웨이퍼 상에서 근접해서 위치하게 되며, 웨이퍼가 천천히 회전하면서 바깥 쪽으로 이동하게 되면, 전체 면적을 세정할 수 있게 된다. 그리고 Fig. 1(b)에 미세 노즐을 통해 액적이 분사되면서, 패턴 (Pattern) 상에 있는 오염입자들을 세정하는 원리가 설명되어 있다. 압전소자에서 발생한 진동이 내부의 액체에 전달되고, 노즐에서 미세한 액적이 발생하게 된다. 이 액적이 패턴 상에 있는 오염 입자에 물리적인 힘을 가하게 되어 세정이 이루어지게 된다. Fig. 2에는 제작한 웨이브가이드와 발진기의 사진이 나와 있다.

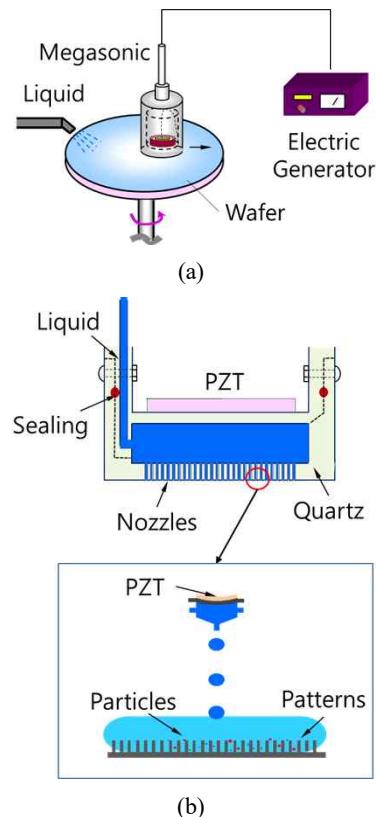
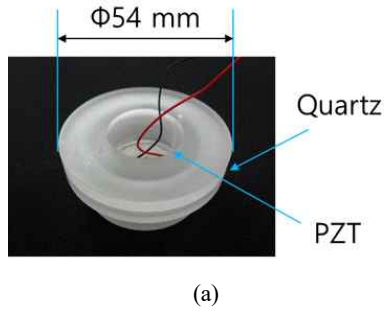


Fig. 1 (a) Working principle of a megasonic cleaning system and (b) cleaning mechanism with it's structure



(a)



(b)

Fig. 2 Megasonic cleaning system; (a) a fabricated waveguide, and (b) an electric generator

2.2 웨이브가이드 FEM 해석 및 제작

웨이브가이드의 설계를 위하여 FEM 프로그램인 Ansys를 이용하여 해석을 수행하였다. 우선 압전소자(Lead Zirconate Titanate (PZT) Actuator, $\Phi 24 \times 2$ mm)의 임피던스를 해석하였다. 초음파 시스템에서 임피던스는 압전소자를 지나는 전류 (I)의 저항 (R)을 의미하며, 아래 식 (1)에서 전력 (P)을 구할 수 있다.⁹⁾

$$P = I^2 \cdot R \quad (1)$$

이때, 아래 관계식 (2)에서 동일한 전압 (V)를 가해 줄 경우, 저항이 클 경우 전류값이 낮아져 압전소자의 발열량을 낮출 수 있으므로 이 값을 구하기 위해 해석을 진행하였다.⁹⁾

$$V = I \cdot R \quad (2)$$

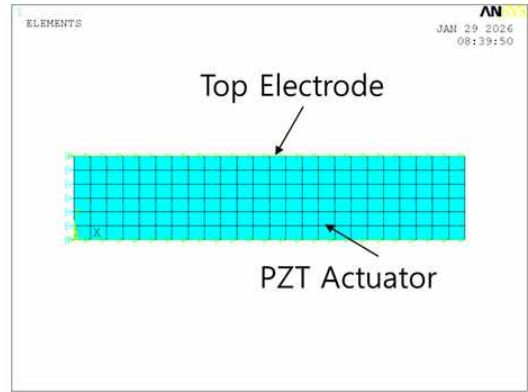
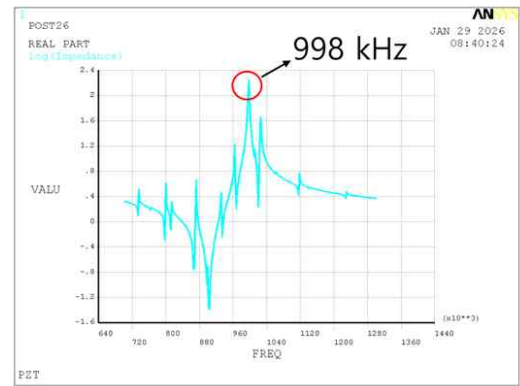
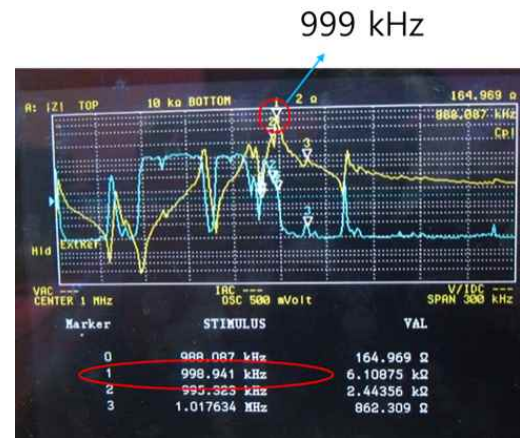


Fig. 3 FEM analysis model of the PZT



(a)



(b)

Fig. 4 (a) FEM analysis result and (b) the experimental result of the PZT

해석을 위해 압전소자를 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 상부와 하부에는 전극 로드 (Load)를 가해 주고 축대칭으로 모델링을 하였다. 즉 압전소자에 전기를 가해 주었을 때 일어나는 변화를 예측하기 위하여 이와 같이 모델링하였다. 700 kHz부터 1,300 kHz까지 해석을 수행하였으며, 그 결과, 임피던스 값이 최대를 갖는 주파수는 Fig. 4(a)와 같이 998 kHz로 나왔다. 실제로 제작한 압전소자의 임피던스를 Analyzer (Agilent, 4294A)로 측정한 결과, Fig. 4(b)와 같이 999 kHz가 나와서 0.1%의 오차로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

이번에는 압전소자와 웨이브가이드를 Fig. 5와 같이 모델링하였다. 이번 해석은 압전소자 단독의 해석과는 달리, 압전소자의 위쪽에 웨이브가이드를 붙여서 모델링하였다. 즉 압전소자에 전압을 가해 주었을 때, 진동이 발생하고, 위쪽의 웨이브가이드에 변형이 일어나는 것을 예측하기 위해 이를 수행하였다.

역시 압전소자에 전압 로드를 가해 주고, 700 kHz부터 1,300 kHz까지 해석을 수행한 결과, 임피던스 값이 최대를 갖는 주파수는 Fig. 6(a)와 같이 1,000 kHz로 나왔으며, 이는 측정값(Fig. 6(b))과 일치하였다. 이번에는 구동 주파수인 1,000 kHz일 때의 웨이브가이드의 변위를 예측하였다. 그 결과, Fig. 7과 같이 끌고루 초음파가 나옴을 예측할 수 있었다.

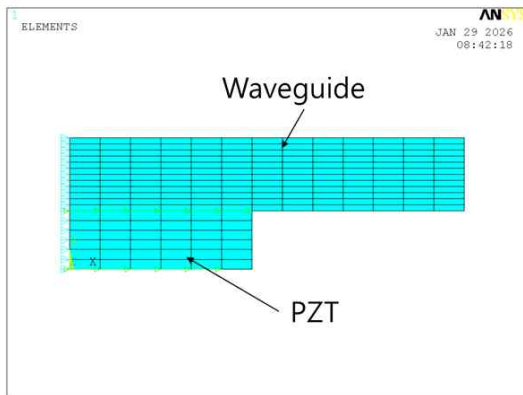
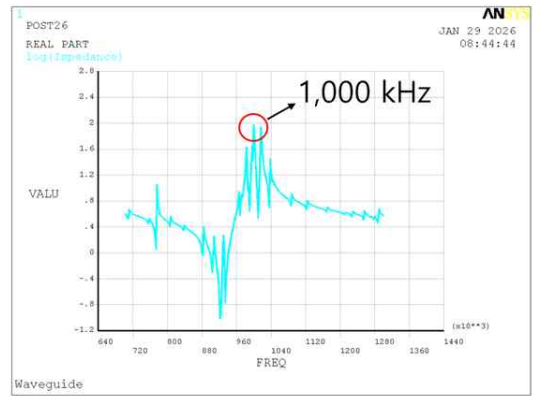
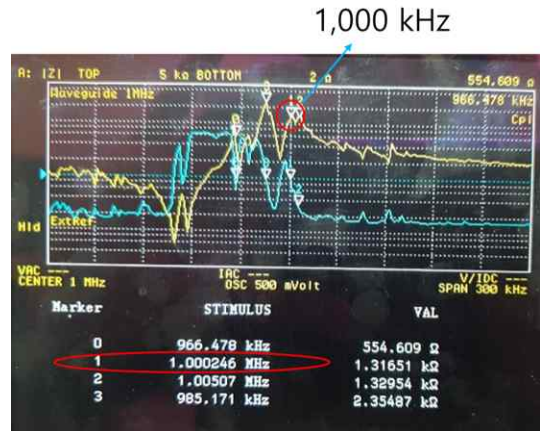


Fig. 5 FEM analysis model of the waveguide



(a)



(b)

Fig. 6 (a) FEM analysis result and (b) the experimental result of the waveguide

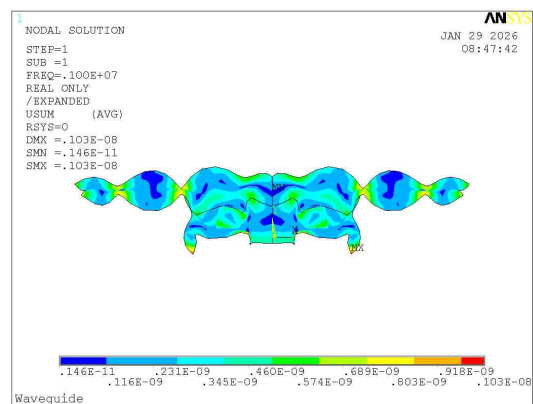


Fig. 7 FEM analysis result of a deformed shape

3. 실험 결과 및 고찰

앞 장에서 구한 치수를 이용하여, 퀴츠 소재로 웨이브가이드를 제작하였고, 피코초(Pico Second) 레이저를 이용하여 미세노즐을 가공하였다. 가공한 결과, 사진이 Fig. 8에 나와 있으며, Hole의 지름이 약 $\Phi 20 \mu\text{m}$ 로 잘 가공되었음을 알 수 있었다.

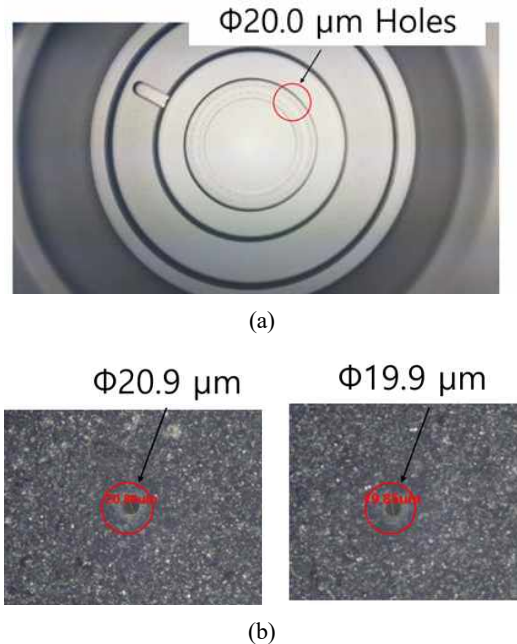


Fig. 8 (a) Micro-machined holes in the quartz waveguide, and (b) microscopies of holes with measured dimensions

4. 결 론

본 연구에서는 미세노즐을 포함한 세정용 메가소닉을 개발하였다. 이를 위해 유한요소해석을 이용하여 압전소자와 웨이브가이드의 임피던스 커브를 예측하고 이를 실험과 비교하였다. 그 결과, 임피던스 값이 최대를 갖는 주파수는 998 kHz로 제작한 압전소자의 값인 999 kHz와 0.1%의 오차로 잘 일치하였다. 그리고 압전소자와 웨이브가이드의 해석을 수행한 결과, 임피던스 값이 최대를 갖는 주파수는 1,000 kHz로 측정값과 일치함을 알

수 있었다.

이러한 해석 결과를 이용하여 퀴츠로 제작한 웨이브가이드에 미세노즐을 피코초 레이저로 가공하였으며, Hole의 지름이 약 $\Phi 20 \mu\text{m}$ 로 잘 가공되었음을 알 수 있었다. 그러므로 본 시스템은 세정공정에 적용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구에 기여한 한국기계연구원 이양래 박사님에게 감사드립니다. 또한 본 연구는 한국기계연구원 주요사업 (OS102H)의 지원으로 수행되었습니다.

Author contributions

H. Kim; Analysis and Experiments, Paper Writing. E. Lim; Measuring and Data Acquisition.

References

1. M. Ozkan, L. Pompa, M. S. B. Iqbal, Y. Chan, D. Morales, Z. Chen, H. Wang, L. Gao and S. H. Gonzalez, 2025, "Performance, Efficiency, and Cost Analysis of Wafer-scale AI Accelerators vs. Single-chip GPUs", Device, 3(10), 100834. (<https://doi.org/10.1016/j.device.2025.100834>)
2. K. A. Reinhardt and W. Kern, 2018, "Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology (Third Edition)," Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 467-471.
3. D. Ensminger and L. J. Bond, 2014, "Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications", CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 510-515.
4. D. Ma and T. Zhang, 2026, "Machining Characteristics of Fe-based Amorphous Alloys via Ultrasonic Vibration-assisted Milling", Materials Letters, 405, 139677. (<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.139677>)
5. S. Noh, B. A. Kim and G. T. Hwang, 2023,

- “CIP Effect on Sintering Properties of Piezoelectric Ceramic for Focused Ultrasonic Devices”, *Journal of Power System Engineering*, 27(2), 21-26.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2023.27.2.021>)
6. J. Y. Lee, S. P. Lee, S. W. Kim, D. S. Bae and J. K. Lee, 2018, “Characteristics of Ultrasonic Wave on Thermal Shock Damage of Tungsten”, *Journal of Power System Engineering*, 22(4), 5-10. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.005>)
 7. H. Kim and E. Lim, 2023, “Development of a Plate-type Megasonic with Cooling Pins for Sliced Ingot Cleaning”, *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, 22(3), 21-27.
 8. H. Kim, E. Lim and Y. Lee, 2022, “Finite Element Analysis and Fabrication of a 3 MHz Megasonic System for Semiconductor Cleaning”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 31(3), 147-153.
(<https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.3.147>)
 9. N. P. Cook, 2001, “Practical Electronics,” Prentice Hall, New Jersey, USA.