

펨토초 레이저를 이용한 미세 연소노즐 가공 기술

Machining Technology of Micro Combustion Nozzle Using a Femtosecond Laser

김경찬¹, 김경호², 하지수³, 손익부⁴, 최해운⁵, 김태권^{5,✉}
Kyung Chan Kim¹, Kyung Ho Kim², Ji Soo Ha³, Ik Bu Sohn⁴, Hae Woon Choi⁵ and Tae Kwon Kim^{5,✉}

- 1 계명대학교 화학과 (Department of Chemistry, Keimyung Univ.)
 - 2 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터 (Center for Automotive Parts Technology, Keimyung Univ.)
 - 3 계명대학교 에너지환경과학과 (Department of Environmental Science, Keimyung Univ.)
 - 4 광주과학기술원 고등광기술연구소 (Advanced Photonics Research Institute, GIST)
 - 5 계명대학교 기계자동차공학부 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)
- ✉ Corresponding author: tkkim@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5551

Manuscript received: 2010.2.24 / Revised: 2010.7.27 / Accepted: 2010.9.2

The shape of combustion nozzles varies from large diameter to small diameter ones. In the case of small nozzle, nozzle exit can be easily wrinkled or damaged in machining process. Femtosecond laser is a micro machining technology that is able to drill a small nozzle without damaging the nozzle exit. In this experiment, a small nozzle of combustion was fabricated by using a femtosecond laser. The fabricated nozzle of combustion provided a very small nozzle diameter with clean nozzle exit without wrinkling or collateral damage.

Key Words: Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Ultrashort Pulse Laser (극초단 펄스 레이저), Combustion Nozzle (연소노즐), Flame (화염).

기호설명

- ΔE = photon energy of electromagnetic wave
- Δt = duration time of photon energy
- $\Delta \nu$ = frequency of electromagnetic wave

1. 서론

레이저 가공 기술은 100 μm 이상의 크기로 가공할 수 있는 레이저 매크로 가공 기술 (laser macro machining)과 50 μm 이하에서 0.1 μm 까지 가공할 수 있는 레이저 마이크로 가공 기술 (laser micro machining)로 크게 구분할 수 있다. 레이저 매크로 가공 기술은 자동차, 선박, 항공기 등 중공업 분야에서 활용되고 있으며, 마이크로 가공 기

술은 극초단 펄스 레이저를 이용한 초정밀 (ultra precision) 시간의 측정, 초고속 (ultra fast) 현상의 측정과 제어 및 초고출력 레이저를 이용한 가공 등에서 응용되고 있다. 레이저 빔을 이용한 가공에 사용되는 파장의 범위는 파장이 짧은 자외선 (ultraviolet)에서부터 파장이 긴 적외선 (infrared) 영역으로 분포되며, 펄스폭에 따라서 시간이 긴 영역인 나노초 (nanosecond)에서부터 짧은 영역인 피코초 (picosecond) 및 펨토초 (femtosecond) 영역에 분포되어 있다. 특히 극초단 영역인 피코초 및 펨토초의 경우 미세 가공 분야에서 많이 이용되고 있다.¹⁻⁸

펨토초 레이저 가공은 빛의 흡수에 의하여 발생한 열이 주변으로 전달되기 전에 가공이 끝나게 되어 가공부의 주변에 열적 손상이나 구조변화를

최소화 할 수 있는 장점이 있다.

극초단 펄스 레이저를 이용한 기존 연구들로는 피코초 레이저를 이용한 미세 가공 기술이¹ 소개되었고, 펨토초 레이저를 이용한 플라스틱 필름 가공 기술이² 보고되었다. 또 펨토초 레이저를 이용한 광통신 소자 제작과³ 리소그래피 기술에⁴ 대한 연구도 이루어졌으며, 그 외에도 다양한 연구 분야에서 활발하게 연구되고 있다.⁵⁻⁸

부상화염의 실험에 있어서 연료노즐은 안정된 화염을 형성하는데 상당히 중요한 요인이다. 연소에 필요한 연료 노즐 및 여러 가지 형상의 노즐을 가공할 경우 노즐의 굽기에 따라 가공하는 방법이 달라야 한다. 외경 및 내경이 큰 노즐의 경우 기계적인 절단이나 절곡을 통하여 가공할 수 있지만 외경이나 내경이 작은 노즐의 경우 기계적인 절단이나 절곡은 가공되는 노즐에 치명적인 손상을 입히게 된다.

본 논문에서는 기계적인 가공으로는 연소노즐에 치명적인 손상을 입힐 수 있는 직경이 아주 작은 미세 연소노즐의 가공에 관한 것으로 지금까지 수행되지 않았던 펨토초 레이저를 이용하여 미세 연소노즐을 가공하였고 이에 대한 연소실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전자기파의 광자 에너지

파동-입자 이중성에서 기인된 불확정성의 원리는 입자의 위치와 운동량을 모두 정확하게 알 수 없음을 표현한다. 이것은 입자의 에너지와 그 에너지가 지속되는 시간에 대해서도 동일하게 적용되며, 에너지와 시간에 대한 불확정의 정도는 다음과 같이 표현된다.^{9,10}

$$\begin{aligned} \Delta E \cdot \Delta t &\geq \hbar \text{ or } \hbar/2 \\ \hbar &= h/2\pi \\ \Delta E &= h \cdot \Delta \nu \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 ΔE 는 입자가 가진 에너지이고, Δt 는 그 에너지가 지속되는 시간이다. h 는 프랑크상수로 6.6×10^{-34} Js 이며, $\Delta \nu$ 는 입자의 진동수이다. 프랑크상수 h 의 크기가 너무 작아서 불확정성의 원리가 제한하는 한계는 원자크기 영역에서만 의미를 가진다. 식(1)의 에너지와 지속시간의 곱이 $\hbar/2$ 인

경우는 최소의 경우이므로 실제 매우 드물며, 통상적으로 에너지와 지속시간의 곱이 \hbar 또는 $h/2$ 가 된다.¹¹

Gaussian 형태의 레이저의 경우 펨토초(10^{-15} s) 영역에서 양자화된 광자의 에너지 또는 주파수와 조사시간에 대한 불확정의 정도는 다음과 같다.

$$\Delta \nu \cdot \Delta t \geq 0.44 \tag{2}$$

식(2)는 조사되는 레이저의 출력 에너지를 높이기 위해서는 레이저를 압축하는 시간, 즉 지속시간을 작게 하는 것이 상당히 중요함을 알 수 있다.

2.2 레이저와 금속 및 유전물질의 상호작용

전자가 가속 또는 감속하게 되면 전자기파를 발생하게 되며, 금속 내에서 빠르게 움직이던 전자가 금속 등과 부딪쳐 갑자기 멈추게 되면 제동복사가 일어난다. 그러나 레이저와 금속물질의 상호작용에 있어서는 금속에 조사된 레이저는 역제동복사에 의해 금속에 흡수되고 음향양자(phonon)에 의해 격자로 전해지는 것이 일반적이다.⁷(copper, titanium niobium stainless steel) 특히 피코초이하로 조사된 레이저의 광자에너지는 나노초 레이저에 비해 잔류열영향(residual thermal effect)이 현저히 작으며, 펨토초 레이저의 열영향부는 수백배 정도까지 작아지는 것으로 밝혀졌다.¹² 펨토초 레이저의 경우 금속에 조사된 빛이 흡수되어서 발생한 열이 주변으로 전달되기 전에 화학적 결합을 끊어서 금속을 가공하게 되므로 열에 의한 매질의 변형이 최소화되는 등의 장점이 있다. 자유전자 밀도가 상당히 높은 금속을 가공하는데 비해서 유전물질을 가공하기 위해서는 레이저를 흡수할 수 있는 자유전자의 생성이 선행되어야 한다. 극초단 펄스 레이저가 물질에 조사되면, 입사된 에너지의 일부가 유전물질을 이루는 원자를 이온화시키고 원자가 전자형태에서 전도전자로 천이되며, 이때 발생된 자유전자를 통해서 에너지가 흡수되는 메커니즘을 가진다. 따라서 금속물질을 가공할 때 보다 유전물질을 가공할 때 더 높은 에너지원이 요구된다.¹³⁻¹⁵ 유전물질내에 조사된 레이저는 원자와 상호작용하여 새로운 자유전자를 발생시키거나 또는 전기적으로 중립인 물질을 이온화 시켜서 화학적 결합(chemical bonding)을 끊거나 양전하로 대전된 이온의 상호반발력으로 인해서 가공하게 된다.

3. 실험 장치

화염을 관찰하기 위해 제작되는 연소노즐은 크기가 상당히 작은 것에서부터 큰 것까지 여러 가지가 있다. 큰 노즐의 경우 기계적인 가공이 용이하여 통상적인 가공방법을 통해 가공할 수 있으나, 작은 노즐의 경우 가공에 따른 찌그러짐 등의 부수적인 손상으로 인해 정확한 연소실험이 어렵다. 따라서 작은 연소노즐의 기계적인 가공에 따른 어려움을 해결하기 위해 펨토초 레이저를 이용하여 가공하는 것은 기계적인 가공에 따른 손상을 방지하고 연소실험 시 정확한 실험을 할 수 있게 하는 좋은 방법이 될 수 있다.

본 연구에서는 기계적인 가공으로는 제작하기 어려운 45 및 150 μm 의 미세 연소노즐을 가공하였으며, 미세 연소노즐을 가공하기 위해 사용된 펨토초 레이저 가공 시스템을 그림 1 에 나타내었다. 레이저의 파장은 785 nm 이고, 펄스폭은 184 fs 이다. 최대 출력은 1 w 이고 레이저의 펄스 반복율

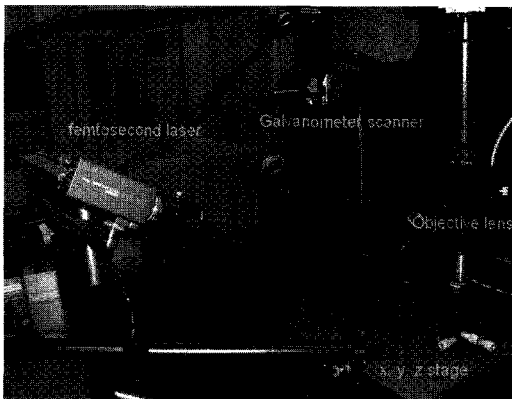


Fig. 1 Femtosecond laser system for machining the micro combustion nozzle

Table 1 Specification of femtosecond laser system

Stage Spec.	x-y Stage	z Stage
Stage	Linear Motor stage	Step Motor stage
Travel	300×300 mm ²	200 mm
Resolution	20 nm/counter	0.5 μm /counter
Laser Spec.	Wavelength	785 nm
	Pulse width	184 fs
	Average power	1 W
	Repetition rate	1 kHz

은 1 kHz 이다. x-y state 의 이송 영역은 300×300 mm² 이고 z 축의 이송거리는 200 mm 이다. 펨토초 레이저 가공 시스템의 자세한 사양을 표 1 에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 내경 150 μm 미세 연소노즐의 가공

펨토초 레이저를 이용하여 미세 연소노즐을 가공하기 위해 그림 1 의 stage 위에 연소노즐을 위치시킨다. 내경 150 μm 의 미세 연소노즐을 가공하기 위하여 그림 2 에서 처럼 외경 270 μm 및 내경 150 μm 인 노즐을 펨토초 레이저를 이용하여 절단 (cutting)하였다. 스캐너 가공 시스템을 이용하여 가공하였으며, 스캐너 렌즈의 초점거리는 80 mm 이고, 펄스 에너지는 177 μJ 이다. 가공 속도는 500 $\mu\text{m}/\text{s}$ 이고 z 축으로 15 μm 씩 내리면서 반복 가공하였으며, 그림 2 에 가공된 노즐의 단면을 나타내었다.

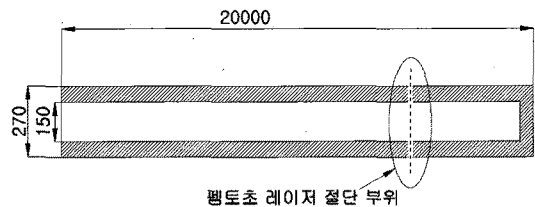


Fig. 2 Cross-Sectional diagram of micro combustion nozzle which has a diameter 150 μm

펨토초 레이저를 이용하여 가공된 내경 150 μm 노즐의 현미경 측정 사진을 그림 3 에 나타내었다. 그림 3 에서 보아 알 수 있듯이 노즐 입구 주위는 정밀하게 가공되었다.



Fig. 3 Machined micro combustion nozzle using a femtosecond laser (I.O 150 μm , D.O 270 μm)

4.2 내경 45 μm 연소노즐의 가공

내경 150 μm 노즐과는 달리 내경 45 μm 노즐의 경우 1차 가공이 필요하다. 45 μm 노즐을 제작하기 위해 기계적인 작업을 통해 천공되는 면의 두께를 500 μm 이하로 제작하였으며, 그림 4에 가공되는 노즐의 단면을 나타내었다.

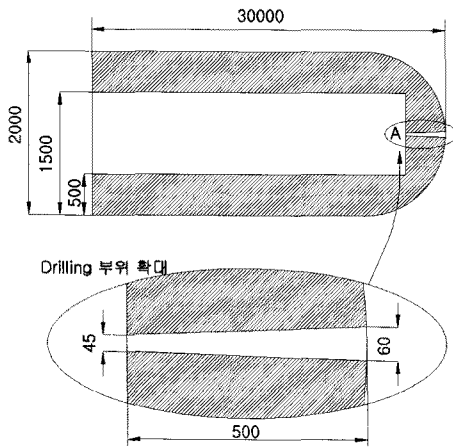
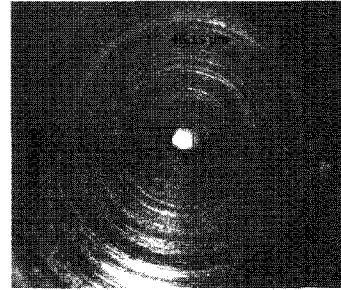


Fig. 4 Cross-sectional diagram to make a combustion nozzle (I.O 45 μm)

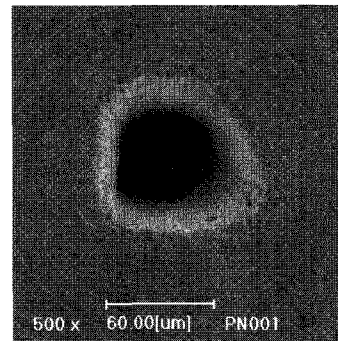
그림 4와 같이 길이가 30 mm인 스테인레스(SUS304) 원형관을 이용하여 내경이 1 mm가 되도록 기계적으로 제작하고 펄토초 레이저를 이용하여 가공될 부위는 가공이 용이할 수 있도록 가공하고자 하는 노즐 직경의 약 10 배 정도 두께가 되도록 하였으며, 라운드가 되도록 제작하였다.

연소노즐을 stage 위에 올려두고 스캐너를 이용하여 1차 가공하였다. 스캐너를 이용하여 가공한 후 Objective 렌즈를 이용하여 정밀 가공하였으며, 정밀 가공에 사용된 렌즈의 초점거리는 20 mm 이고 레이저의 펄스 에너지는 180 μJ 이었다. 가공하고자 하는 부위의 원반직름은 40 μm 로 세팅하였다. 레이저를 조사하게 되면 직경이 약간 크게 제작되기 때문에 그 부분을 감안하여 원하는 반경보다 5 μm 정도 작게 세팅하였다. 실험에 사용된 장비에 대한 자세한 사양은 표 1에 기재된 내용과 같다. 펄토초 레이저를 이용하여 가공된 45 μm 미세 연소노즐의 현미경 측정 사진을 그림 5에 나타내었다.

그림 5는 미세 연소노즐의 바깥쪽 윗 면에서 본 직경을 나타낸 것이다. 현미경 측정 결과 가공 조건에 따라서 약간의 오차가 발생할 수 있으나,



a) Photomicrograph of micro combustion nozzle



b) SEM picture of micro combustion nozzle (20kV, Sp=8, WD=5.0)

Fig. 5 Inner diameter and outer diameter of micro combustion nozzle

잘 가공되었음을 알 수 있다. 또 Sem 사진을 통해 고배율 현미경에서 관찰하기 어려웠던 노즐의 형상을 좀 더 정확히 확인할 수 있었다. 정확한 원에서 조금 벗어나 있으나 연소실험을 위한 관으로서의 유용할 것으로 판단된다.

4.3 미세 노즐의 연소실험

펄토초 레이저로 가공된 연소노즐을 이용하여 연소실험을 실시하였다. 그림 6에 펄토초 레이저를 이용하여 가공한 후 연소실험에 사용된 연소노즐을 나타내었다.

또 펄토초 레이저를 이용하여 정밀 가공한 내경이 150 μm 인 미세 연소노즐을 이용하여 연소실험을 수행한 사진을 그림 7에 나타내었다. 연소실험을 할 때에 노즐의 입구가 얼마나 정확한지 잘 보이질 않았으나, 실제 화염의 부상 및 날림 조건 등을 통하여 판단할 때 가공된 노즐의 단면이 깨끗하며, 노즐 입구의 면적이 정확하다는 것을 추측할 수 있었다. 이는 화염의 부상 및 날림의 경우 노즐 출구에서 속도와 면적에 비례하는 유량을

통하여 확인할 수 있었다.

기계적인 작업을 통해 제작되었던 노즐의 경우 찌그러짐 등으로 노즐 입구가 줄어들었을 때 화염의 부상 및 날림의 유량이 작아져 작은 유량에서 화염의 부상 및 날림 현상을 관찰할 수 있었기 때문이다.

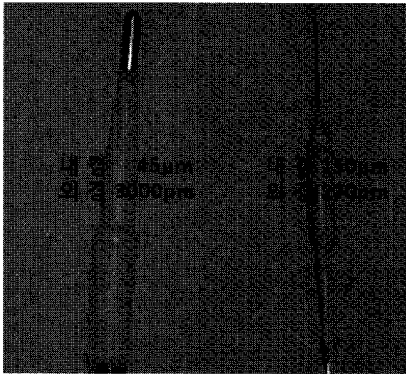


Fig. 6 Combustion nozzle for combustion experiment

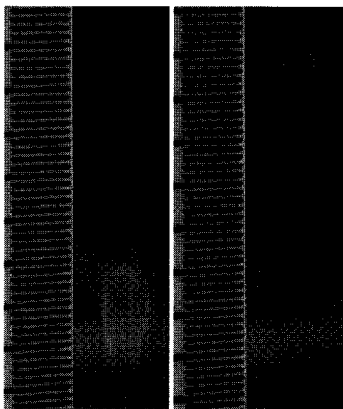


Fig. 7 Combustion experiment of micro combustion nozzle which diameter is 150 µm

5. 결론

연소실험에 따른 연소노즐의 경우 직경이 큰 것에서부터 작은 것까지 아주 다양하다. 그러나 가공성에 있어서는 500 µm 이하의 작은 노즐과 500 µm 이상의 큰 노즐로 구분된다. 노즐 직경이 작은 경우 기계적인 가공으로는 노즐 입구의 찌그러짐과 같은 손상이 있기에 특별한 가공이 필요하다. 펨토초 레이저는 아주 높은 순간정점에너지를 이용하여 노즐 입구의 손상이 최소화 되게 하여 가공할 수 있는 미세 가공 기술이다. 펨토초 레이

저를 이용한 미세 연소노즐 가공을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 아주 미세한 연소노즐의 경우 펨토초 레이저를 이용하여 가공하였을 때 가공부의 찌그러짐 및 손상을 최소화 하여 가공면이 상당히 깨끗하게 가공될 수 있음을 알 수 있었다.

2) 내경이 150 µm 인 노즐의 경우 펨토초 레이저만 사용하여 가공하므로 가공면이 상당히 깨끗한 미세 연소노즐을 제작할 수 있었다.

3) 내경이 45 µm 인 연소노즐을 제작하기 위해서는 스캐너를 이용하여 1 차 가공 후 펨토초 레이저로 가공하였으며 가공면이 상당히 양호하였다.

4) 실제로 가공된 미세 연소노즐을 이용하여 연소실험을 수행한 결과 화염의 부상 및 날림 조건 등을 통하여 판단할 때 가공된 노즐의 단면이 상당히 깨끗함을 알 수 있었다.

따라서 펨토초 레이저를 이용하여 150 µm 이하의 미세 연소노즐 및 이에 대한 연소실험을 수행하였으며, 이러한 펨토초 레이저를 이용한 가공 기술은 미세 연소노즐 제작과 같은 기존의 기계적인 드릴링에서 어려운 미세 가공분야에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 계명대학교 비사연구비 지원으로 수행되어 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Lee, J. H., Shon, H. K., Kim, J. G. and Shin, D. S., "Advanced Laser Micromachining Technology," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 13-22, 2006.
2. Sohn, I. B., Noh, Y. C., Choi, S. C., Ko, D. K., Lee, J. M. and Choi, Y. J., "Femtosecond laser of polypropylene for breathable film," Applied Surface Science, Vol. 254, No. 16, pp. 4919-4924, 2008.
3. Sohn, I. B., Lee, M. S., Woo, J. S., Lee, S. M. and Chung, J. Y., "Fabrication of photonic devices directly written within glass using a femtosecond laser," Optics Express, Vol. 13, No. 11, pp. 4224-4229, 2005.
4. Sohn, I. B., Ko, M. J., Kim, Y. S. and Noh, Y. C., "Femtosecond Laser Lithography for Maskless PR

- Patterning,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 36-41, 2009.
5. Aguilar, C. A., Lu, Y., Mao, S. and Chen, S., “Direct micro-patterning of biodegradable polymers using ultraviolet and femtosecond lasers,” *Biomaterials*, Vol. 26, No. 36, pp. 7642-7649, 2005.
 6. Farson, D. F., Choi, H. W., Zimmerman, B., Steach, J. K., Chalmers, J. J., Olesik, S. V. and Lee, L. J., “Femtosecond laser micromachining of dielectric materials for biomedical applications,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, No. 3, Paper No. 035020, 2008.
 7. Momma, C., Chichkov, B., Alvensleben, F. and Tunnermann, A., “Precise laser ablation with ultrashort pulses,” *Applied Surface Science*, Vol. 109, No. 110, pp. 15-19, 1997.
 8. Yum, J. H., Choi, S. K., Lee, J. H. and Lee, D. H., “A Case Report of Fungal Keratitis Diagnosed by Femtosecond Laser Assisted Corneal Biopsy,” *J. Korean Ophthalmol. Soc.*, Vol. 49, No. 1, pp. 164-167, 2008.
 9. Gasiorowicz, S., “Quantum Physics,” John Wiley & Sons, pp. 27-36, 1996.
 10. Song, H. S., “Quantum mechanics,” *Kyohak*, pp. 74-77, 1994.
 11. Beiser, W., “Concept of Modern Physics, 4th,” Bando, p. 132, 1992.
 12. Valette, S., Huot, N., Audouard, E. and Fortunier, R., “2D Calculations of the thermal effects due to femtosecond laser-metal interaction,” *Applied Surface Science*, Vol. 247, No. 1-4, pp. 238-242, 2005.
 13. Gamaly, E., Luther-Davies, B. and Tikhonchuk, V., “Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanisms and ablation thresholds for metals and dielectrics,” *Physics of Plasma*, Vol. 9, No. 3, pp. 949-957, 2002.
 14. Mannion, P., Coyne, E., O'Connor, G. and Glynn, T., “The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air,” *Applied Surface Science*, Vol. 223, No. 1-4, pp. 275-287, 2004
 15. Choi, H., Johnson, J., Nam, J., Farson, D. and Lannutti, J., “Structuring electrospun polycaprolactone nanofiber tissue scaffolds by femtosecond laser ablation,” *Journal of Laser Applications*, Vol. 19, No. 4, pp. 225-231, 2007.