

레이저 빔과 방전 복합 가공을 이용한 미세 홈 가공 Fabrication of Micro Groove using Hybrid of Laser Beam and Electrical Discharge Machining

*김산하¹, 정도관¹, #김보현², 오광환³, 정성호³, 주종남¹

*San H. Kim¹, D. K. Chung¹, #B. H. Kim(kimbh@andong.ac.kr)², Kwang H. Oh³, S. H. Jeong³, C. N. Chu¹
¹ 서울대학교 기계항공공학부, ² 안동대학교 기계공학부, ³ 광주과학기술원 정보기전공학부

Key words : Micromachining, Micro groove, Electrical Discharge Machining, Nanosecond pulsed laser, Hybrid machining

1. 서론

최근 증가하는 초소형, 고정밀 기계 부품에 대한 수요에 맞춰 미세 형상 가공에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 미세 형상 가공은 반도체 공정을 이용하여 만드는 것이 비교적 경제적이고 정밀도도 높은 것으로 잘 알려져 있지만, 가공 가능한 소재가 제한되어 있으며 2 차원 가공에 국한되는 등의 단점이 있다. 이에 비해 다양한 금속 재료에 3 차원 형상 가공이 가능한 미세 가공 기술로서 방전 가공, 레이저 빔 가공 등의 특수 가공 기술을 들 수 있다.

미세 방전 가공(Micro electrical discharge machining, micro EDM) 기술은 비접촉식 가공 방법으로써 전도성을 가진 광범위한 재료에 대해 가공이 가능하고 다른 가공 방법들에 비해 높은 정밀도의 미세 형상을 가공할 수 있다.¹ 그러나 재료 가공율(Material removal rate)이 비교적 낮고 전극 마모가 발생한다는 문제점이 있기 때문에 가공 효율 향상, 마모에 의한 형상 오차 보정 등에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다.²

반면, 나노초 펄스 레이저(nanosecond pulsed laser)를 이용한 레이저 빔 가공(Laser beam machining, LBM)은 비접촉식 방식으로써 거의 모든 재료에 대해 빠른 가공 속도로 가공할 수 있다. 하지만 나노초 펄스 레이저는 가공 형상 주변에 넓은 열영향부(Heat affected zone)와 재응고층(Recast layer)을 야기시키므로 정밀도가 상대적으로 낮아 3 차원 미세 가공에 적용하기 어렵다.³ 최근 활발하게 연구되고 있는 피코초 또는 펨토초 펄스 레이저(picosecond or femtosecond pulsed laser) 가공은 높은 정밀도의 미세 구조물 제조가 가능하지만 복잡한 광학계에 의한 광 정렬의 어려움, 느린 가공 속도에 의한 낮은 생산성 그리고 고가의 시스템 및 유지, 보수 비용이라는 단점을 가지고 있다.⁴

따라서 본 연구에서는 기계적 공구가 요구되지 않는 나노초 펄스 레이저 빔을 이용하여 고속으로 선-가공 한 후 정교한 형상 가공이 가능한 방전 가공으로 후-가공하는 레이저 빔/방전 복합 가공을 이용하여 미세 홈을 가공하였다. 또한 이를 기존 방전 가공과 레이저 빔 가공의 가공 특성과 비교함으로써 복합 가공의 가공 성능과 효율 향상 여부를 살펴보았다.

2. 실험 방법

레이저 빔과 방전 복합 가공은 Fig. 1에 나타낸 것처럼 나노초 펄스 레이저를 조사하여 선-가공함으로써 일정량의 재료를 빠르게 가공한 후, 방전 가공으로 후-가공함으로써 레이저에 의해 발생한 재응고층 위주로 재료를 제거하기 때문에 방전 가공만을 적용하는 것에 비해 가공 시간과 공구 마모를 단축시키면서도 정밀한 형상의 미세 구조물을 제조할 수 있다. 가공 재료는 1 mm 두께의 스테인리스 강(STS 304)이며, 15×15 mm 크기로 절단된 가공물은 먼저 레이저로 선-가공된 후 초음파 세척이 된 다음 미세 방전 가공 시스템에서 후-가공되었다.

미세 홈의 선-가공을 위해 파장 1064 nm, 펄스폭 150 ns의 특성을 가지는 IPG Photonics사의 Yb-doped fiber laser (M² < 1.05)를 사용하였으며, 후-가공을 위한 미세 방전 가공은

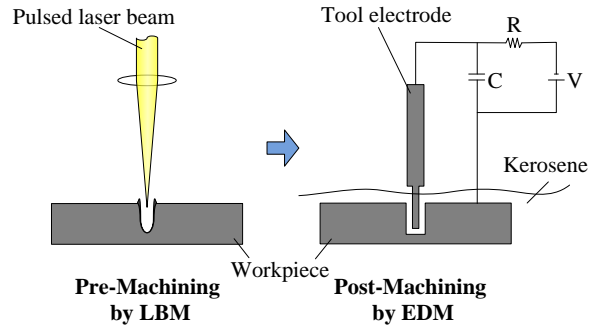


Fig. 1 Schematic diagram of hybrid process

Table 1 Experimental Conditions

Pre-machining by LBM		Post-machining by EDM	
Avg. power	30 W	Electrode	WC Ø 115 µm
Repetition Rate	40 kHz	Voltage	100 V
Scan speed	40 mm/s	Resistance	1 kΩ
Number of scan	30 times	Capacitance	2,000 pF
		Feed Rate	Variable 1 ~ 50 µm/s

일반적인 RC(resistor-capacitor) 회로를 이용하여 수행되었다. 레이저를 이용한 선-가공은 펄스 빔이 3 mm의 직선경로를 왕복하여 수행되었고, 방전을 이용한 후-가공은 공구 전극이 500 µm의 직선경로를 20 µm의 단계별 가공 깊이로 왕복하여 가공되었다. 미세 홈 가공을 위한 세부적인 가공 조건은 Table 1에 나타내었다.

3. 실험 결과

레이저 빔을 이용하여 가공한 미세 홈의 경우, 빔의 중심에서 가장 큰 레이저 강도(Laser intensity)를 가지는 가우시안(Gaussian) 분포 특성상 Fig. 2(a)에서와 같이 가공 깊이 방향으로 점점 폭이 좁아지는 경사진 단면 구조를 가지며, 홈의 표면에 가공 도중 레이저 열원에 의해 액화되어 분출된 표면의 가공물이 가공이 끝난 후 급속히 재응고하여 20 ~ 30 µm 정도 높이의 버(burr)를 형성한다. 또한 바닥면에는

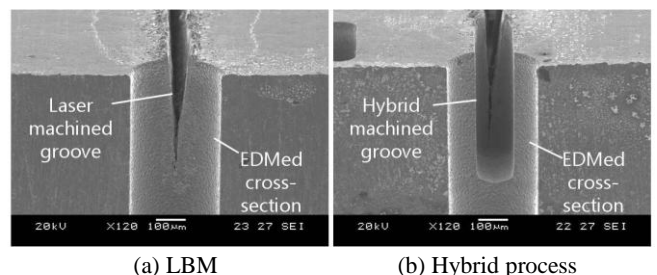


Fig. 2 Cross section of micro groove machined by LBM and hybrid process

50 ~ 150 μm 정도 깊이의 열변형으로 인한 균열이 발생한다. 따라서 방전 가공을 이용한 후-가공에서는 $\varnothing 115 \mu\text{m}$ 의 공구 전극을 선정하여 선-가공에서 발생한 바닥면의 균열과 표면의 재응고층을 후-가공으로 모두 제거하여 Fig. 2 (b)와 같이 폭 135 μm , 깊이 500 μm 의 높은 형상 정밀도를 갖는 미세 홈을 가공하였다.

Fig. 3 은 기존 방전 가공을 통해 같은 크기의 미세 홈을 가공하여 가공시간과 전극 마모량을 비교한 그래프이다. 가공 조건과 이송경로는 복합 가공의 후-가공에 사용된 것과 동일하다. 복합 가공의 경우 기존 방전가공보다 총 가공시간은 37 % 감소하였고, 전극 마모량은 50 % 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 방전 가공시 가변 이송 속도를 사용하여 가공 상태가 양호할 때는 속도를 증가시키고 단락이 발생하면 속도를 늦추는 방법으로 가공효율을 높였기 때문에 레이저에 의해 V 형태로 선-가공된 복합 가공의 경우 가공 깊이가 얇은 가공 초반에 공구 이송 속도가 빨라져 총 가공시간이 단축되기 때문이다. 또한 방전 가공으로 가공되는 가공량이 작으므로 전극 마모량이 감소한다.

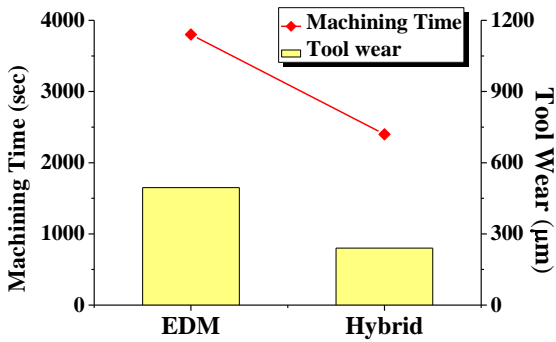


Fig. 3 Machining time and tool wear for micro groove

방전 가공에서 단계별 가공 깊이를 증가시키면 이송경로가 짧아지므로 가공 시간을 줄일 수 있지만, 전극의 마모가 모서리 부분에 더 집중되어 홈 바닥면에 전사되므로 홈의 형상 정밀도가 떨어진다.⁵ 하지만 복합 가공의 경우 가공 깊이가 얇은 가공 초반에는 단계별 가공 깊이를 증가시켜도 전극마모가 적으므로 모서리 부분의 전극 집중을 피할 수 있다. 따라서 바닥면의 형상 정밀도를 유지하면서 가공시간을 감소시키기 위해 Fig. 4 와 같이 가공 초반에는 큰 단계별 가공 깊이를 적용하여 빠른 속도로 가공한 후, 가공량이 많은 가공 후반에는 작은 단계별 가공 깊이를 적용함으로써 가공시간을 단축시키면서 우수한 형상 정밀도를 갖는 미세 홈을 가공할 수 있다. Fig. 5 에 가공 중 단계별 가공 깊이를 80 μm 에서 40 μm , 20 μm , 10 μm , 5 μm 로 변화시켜 가공한 미세 홈의 단면을 80 μm 의 일정한 가공 깊이로 가공한 미세 홈과 비교하였다. 가공 후반에 단계별 가공 깊이를 감소시킴으로써 우수한 형상 정밀도를 얻을 수 있다. Fig. 6 에 우수한 형상 정밀도를 얻을 수 있는 3 가지 가공 조건을 비교하였다. 복합 가공을 이용하고 방전 가공 중 단계별 가공 깊이를 변화시킴으로써 기존 방전 가공과 비교하여 총 가공 시간을 65.5 % 단축하였다.

4. 결론

레이저 빔 가공과 방전 가공의 복합 가공을 이용하면 레이저 조사에 의해 발생하는 열영향부 및 재응고층을 방전 가공으로 완전히 제거하여 미세 홈 형상의 정밀도를 높일 수 있다. 또한 기존 방전 가공과 비교하여 작은 방전 가공량으로 인하여 총 가공 시간과 전극 마모량을 단축시킬 수 있다. 또한 방전 가공 중 단계별 가공 깊이를 변화시킴으로써 가공 효율을 효과적으로 개선하였다.

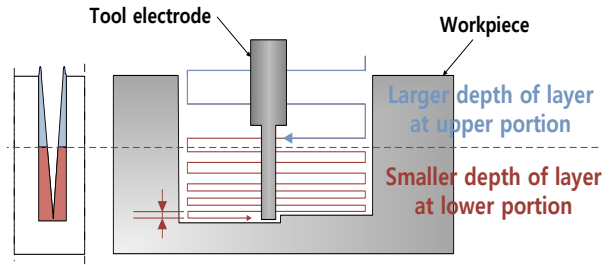


Fig. 4 Variable depth of layer

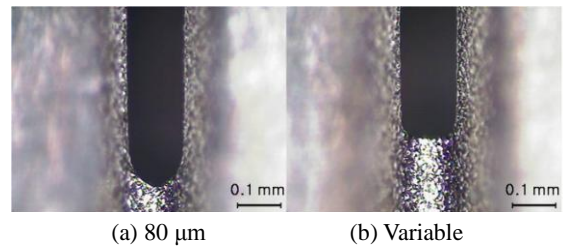


Fig. 5 Shape of bottom accuracy of a micro groove according to depth of layer

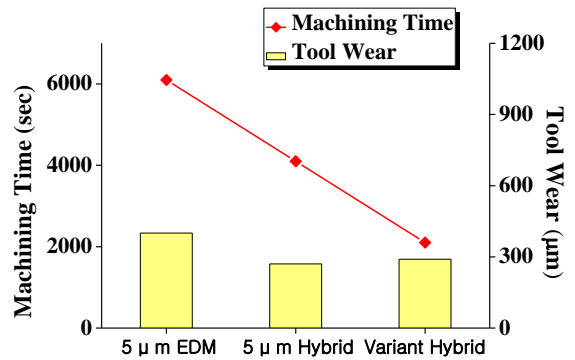


Fig. 6 Machining time and tool wear for micro groove according to depth of layer and type of machining. (a) only EDM (5 μm fixed depth of cut), (b) laser and EDM hybrid (5 μm fixed depth of cut), (c) laser and EDM hybrid (variable depth of cut)

참고문헌

1. Yu, Z., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities - Development of Uniform Wear Method -," Annals of the CIRP, Vol. 47, No.1, pp. 169 - 172, 1997.
2. Pham, D. T., Dimov, S. S., Bigot, S., Inanov, A. and Popov, K., "Micro-EDM - Recent Development and Research Issues," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, No. 1 - 3, pp. 50 - 57, 2004.
3. Tonshoff, H. K., Alvensleben, F., Ostendprf, A., Kamlage, G. and Nolte, S., "Micromachining of Metals Using Ultrashort Laser Pulses," International Journal of Electrical Machining, No.4, pp. 1-6, 1999.
4. Meijer, J., Du, K., Gilner, A., Hoffmann, D., Kovalenko, V. S., Masuzawa, T., Ostendon, A., Poprawe, R. and Schulz, W., "Laser Machining by Short and Ultrashort Pulses, State of the Art and New Opportunities in the Age of the Photons," Annals of the CIRP, Vol.51, No. 2, pp. 531- 550, 2002.
5. Tsai, Y. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Investigations on Electrode Wear in Micro-EDM," Proceedings of the International Symposium for Electromachining, ISEM XIII, Spain, pp. 719-726, 2001.