

레이저 빔 가공과 방전 가공을 이용한 복합 미세 가공

Micromachining Using Hybrid of Laser Beam and Electrical Discharge Machining

김산하¹, 정도관¹, 김보현^{2,✉}, 오광환³, 정성호³, 주종남¹

Sanha Kim¹, Do Kwan Chung¹, Bo Hyun Kim^{2,✉}, Kwang Hwan Oh³, Sungho Jeong³ and Chong Nam Chu¹

1 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

2 숭실대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.)

3 광주과학기술원 정보기전공학부 (School of Information & Mechatronics, GIST)

✉ Corresponding author: bhkim@ssu.ac.kr, Tel: 02-820-0653

Manuscript received: 2009.3.17 / Accepted: 2009.7.3

Although nanosecond pulsed laser drilling and milling are rapid and non-wear processes in micromachining, the quality cannot meet the precision standard due to the recast layer and heat affected zone. On the other hand, electrical discharge machining (EDM) is a well-known high precision machining process in micro scale; however, the low material removal rate (MRR) and tool wear remain as drawbacks. In this paper, hybrid process of laser beam machining (LBM) using nanosecond pulsed laser and micro EDM was studied for micro drilling and milling. While the quality of the micro structure fabricated by this hybrid process remains as high as direct EDM, the machining time and tool wear can be reduced. In addition, variable depth of layer was introduced as an effective method improving efficiency of hybrid milling.

Key Words: Micromachining (미세 가공), Electrical Discharge Machining (방전 가공), Nanosecond Pulsed Laser (나노초 펄스 레이저), Hybrid Machining (복합 가공)

1. 서론

최근 증가하는 초소형, 고정밀 기계 부품에 대한 수요에 맞춰 마이크로 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 근본적으로 2차원 가공에 국한되는 등의 단점이 있다. 이에 비해 다양한 금속 재료에 3차원 형상 가공이 가능한 미세 가공 기술로서 방전 가공, 레이저 빔 가공 등의 특수가공 기술을 들 수 있다.

미세 방전 가공(Micro electrical discharge machining, micro EDM) 기술은 비접촉식 가공 방법

으로써 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

Allen⁵ 등은 얇은 금속 박막에 Copper Vapor Laser(CVL) 레이저를 사용하여 고속으로 선-가공한 후 방전 가공으로 후-가공하는 복합 가공 공정을 이용하여 기존 방전 가공보다 적은 가공 시간과 전극 마모량으로 미세 구멍을 가공하였다. Li⁶ 등은 Nd:YAG 레이저와 방전 복합 가공으로 깊은 미세 구멍의 가공 시간을 효율적으로 단축시켰다. 하지만 이러한 복합 가공에 대한 연구는 미세 구멍 가공에만 국한되어 밀링 등 복잡한 3 차원 미세 형상 가공에 대한 연구가 전무한 실정이다.

본 논문에서는 Yb 이 도핑된 파이버레이저와 방전 복합 가공을 이용하여 미세 구멍뿐만 아니라 미세 홈 가공에 이를 적용하였다. 또한 기존 방전 가공과 레이저 빔 가공의 가공 특성과 비교함으로써 복합 가공의 가공 성능과 효율 향상 여부를 살펴보았다.

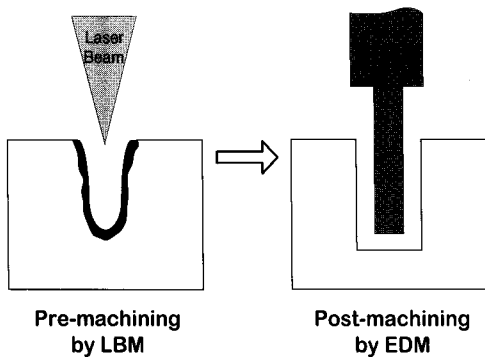


Fig. 1 Schematic diagram of hybrid process

2. 레이저/방전 복합 가공

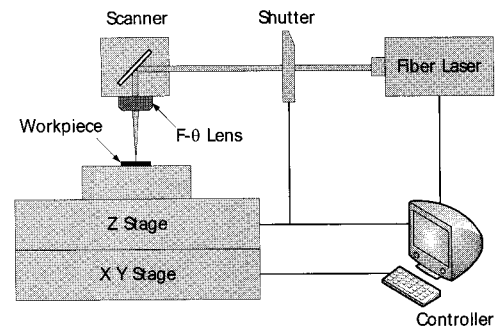
2.1 가공 원리

레이저 빔과 방전 복합 가공은 재료 가공율이 높고 공구 마모가 없지만 넓은 열영향부와 낮은 형상 정밀도를 갖는 나노초 펄스 레이저 가공의 특징과 재료 가공율이 상대적으로 낮고 공구 마모가 발생하지만 정교한 형상 가공이 가능한 방전

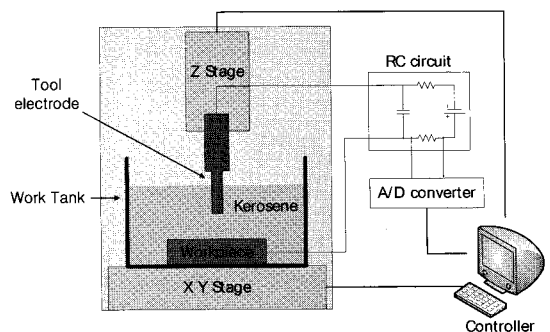
가공의 특징을 상호 보완하는 공정이다. 즉, Fig. 1에 나타난 것처럼 나노초 펄스 레이저를 조사하여 선-가공함으로써 일정량의 재료를 빠르게 가공한 후, 방전 가공으로 후-가공함으로써 레이저에 의해 발생한 재응고층 위주로 재료를 제거하기 때문에 가공 시간과 공구 마모를 단축시키면서도 정밀한 형상의 미세 구조물을 제조할 수 있다.

2.2 실험 장치

Fig. 2(a)는 본 실험에서 이용된 레이저 가공 시스템의 개략도를 나타낸다. 재료의 고속 선-가공을 위해 파장 1064nm, 펄스폭 150ns, 최대출력 30W, 최고펄스반복율 100kHz 의 특성을 가지는 IPG Photonics 사의 Yb-doped fiber laser($M^2 < 1.05$)를 사용하였다. 가공 재료는 1mm 두께의 스테인리스 강(STS 304)이며, 15×15mm² 크기로 절단된 가공물은 먼저 레이저로 선-가공된 후 초음파 세척이 된 다음 후-가공을 위한 방전 가공 시스템으로 옮겨진다.



(a) LBM system for pre-process



(b) Micro EDM system for post-process

Fig. 2 Schematic diagrams of hybrid process of LBM & EDM

가공물의 후-가공에 사용한 미세 방전 가공 시스템의 개략도는 Fig. 2(b)와 같다. 시스템은 크게 정밀 이송 장치, 공구 전극, 공작물, 절연액 수조, 방전 회로로 구성된다. 정밀 이송 장치는 X, Y, Z 이송축으로 0.1 μ m 의 분해능을 가지며, 공작물이 담긴 가공 수조는 X, Y 축에 위치시키고 공구 전극은 Z 축에 위치시켰다. 공구 전극과 공작물은 가공 중에 절연액 속에 담겨 있는데 각각 방전회로의 (-)극과 (+)극에 연결된다. 절연액으로는 일반적으로 방전 가공에 많이 사용되는 등유(kerosene)를 사용하였으며, 방전 회로는 미세 가공에 유리한 RC 회로를 사용하였다.¹

공구 전극은 수십 마이크로 직경에도 잘 휘지 않는 높은 강성의 텅스텐 카바이드(WC)를 사용하였으며, 와이어 방전 연삭(WEDG) 방법을 통해 제작하였다.⁷

2.3 실험 방법

본 연구에서는 미세 구멍과 미세 홈을 가공함으로써 복합 가공의 특성을 살펴보았다. 가공된 구조물의 특성을 조사하기 위해 스테인리스 강에 깊이 1mm 의 미세 구멍과 깊이 500 μ m, 길이 500 μ m 인 미세 홈을 가공하였다. 본 논문에 언급된 미세 구멍과 미세 홈은 모두 위와 동일한 조건으로 가공하였으며, 측정된 가공 시간과 공구 마모량은 총 3 회 실험한 평균값이다. 복합 가공에 사용된 기타 가공 조건은 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Machining conditions

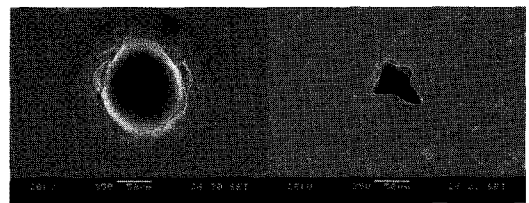
		Drilling	Milling
LBM	Avg. power	30 W	30 W
	Repetition Rate	40 kHz	40 kHz
	Scan speed		40 mm/s
	Number of scan	300 times	30 times
EDM	Tool Diameter	\varnothing 135 μ m	\varnothing 115 μ m
	Voltage	110 V	100 V
	Resistance	1 k Ω	1 k Ω
	Capacitance	7,500 pF	2,000 pF
	Feed Rate	Variable 0.5~5 μ m/s	Variable 1~50 μ m/s

방전 가공에서는 불필요한 가공 시간을 절약하기 위해 가변 이송 속도를 사용하였다. 즉, 최소 이송 속도로부터 출발하여 가공이 원활히 이루어질 때는 이송 속도를 0.5 μ m/s 만큼 증가시키고 가공이 불안정해지면 이송속도를 절반 값으로 감소 시킴으로써 가공 효율을 높였다. 최소 이송 속도는 구멍 가공에는 0.5 μ m/s, 미세 홈 가공에는 1 μ m/s 로 설정하였다.⁸

3. 미세 구멍 복합 가공

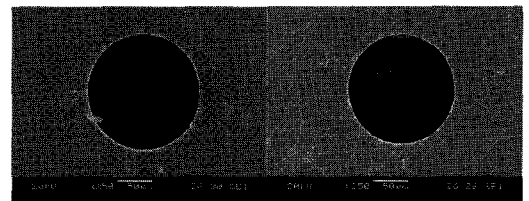
3.1 레이저 빔 가공과 복합 가공

레이저 미세 구멍 가공은 한 점에 펄스 빔을 구멍이 관통될 때까지 조사하여 가공하였고, 구멍 당 약 300 번의 펄스가 반복적으로 조사되었다. Fig. 3 은 각각 레이저 빔을 이용하여 가공한 구멍의 입구와 출구의 사진이다. 입구와 출구 모두 진원도가 크게 떨어지고, 입구 주변에는 재용고층을 포함하여 넓은 열영향부가 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 빔의 중심에서 가장 큰 레이저 강도(laser intensity)를 가지는 가우시안(Gaussian) 분포 특성 상 가공 깊이 방향으로 점점 폭이 좁아지는 경사진 단면 구조를 가지는 구멍이 제조된다. 가공된 구멍의 입구와 출구에서 측정된 직경은 각각 100 μ m 와 60 μ m 이다.



(a) Hole entrance (b) Hole exit

Fig. 3 SEM images of a micro hole fabricated by LBM



(a) \varnothing 165 μ m hole entrance (b) \varnothing 155 μ m hole exit
Fig. 4 SEM images of a micro hole fabricated by hybrid process of LBM and EDM

복합 가공에서 구멍의 형상 정밀도가 기존의 방전 가공과 같아지기 위해서는 방전 가공을 이용한 후-가공에 의해 입구의 외접원보다 크게 가공하면서 재웅고층 부분까지 제거가 되어야 한다. 따라서 본 실험에서는 135 μm 직경의 공구 전극을 선정하였으며, Fig. 4 와 같이 입구 직경 165 μm 의 미세 구멍을 가공하였다. 복합 가공으로 1mm 의 두께를 관통하는데 소요된 가공시간 및 전극 마모량은 Table 2 에 나타내었으며, 총 가공 시간은 37.5 분이 소요되었다. 구멍의 단면을 관찰하기 위해 ϕ 300 μm 공구 전극으로 구멍의 절반을 방전가공으로 절단하였다. Fig. 5 에 나타내듯이 복합 가공을 이용하면 입구와 출구의 진원도 뿐만 아니라 구멍의 직진도를 크게 향상시킬 수 있다.

Table 2 Machining characteristics of hybrid drilling

	Machining Time	Tool Wear
Pre-drilling By LBM	50 sec	
Post-drilling By EDM	2,200 sec	300 μm
Total of Hybrid process	2,250 sec	300 μm

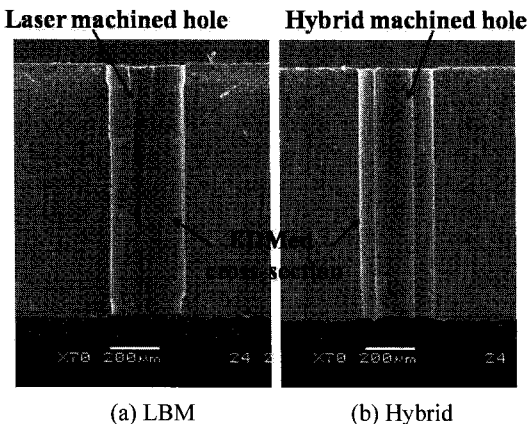


Fig. 5 Cross section of a micro hole fabricated by (a) LBM and (b) hybrid process

3.2 방전 가공과 복합 가공

복합 가공의 성능을 비교하기 위하여 동일한 가공 조건을 사용하여 기존의 방전 가공으로 같은 크기의 구멍을 가공하였다. Fig. 6 은 방전 가공과

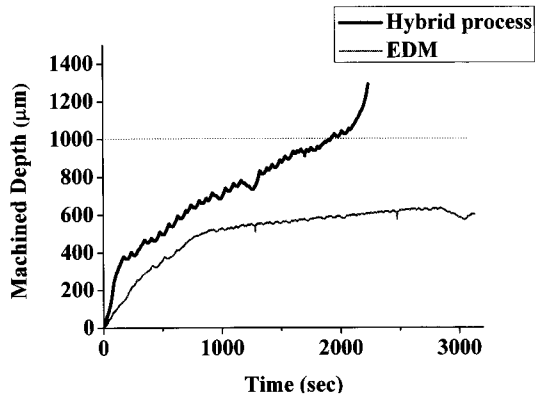


Fig. 6 Machined depth profile using EDM and hybrid process

복합 가공 각각에 대해 가공 시간에 따른 가공 시간에 따른 가공 깊이를 나타낸 그래프이다. 가공된 구멍의 깊이가 얕은 가공 초반에는 두 경우 모두 가공이 원활하게 수행되지만 레이저로 선-가공된 복합 가공의 경우 가공되어야 할 가공량이 작기 때문에 가공 속도가 더 빠르다. 또한 방전 가공의 경우 가공 깊이가 깊어지면서 방전 부스러기가 공구와 구멍 입구 사이의 간극으로 빠져나가지가 용이하지 않아 단락이 발생하고 가공 속도가 급격히 떨어진다. 이후 시간이 지나면 가공이 불안정해지고 공구 마모가 급격히 증가하기 때문에 방전 가공으로는 1 mm 두께 관통이 쉽지 않다.

한편 복합 가공의 경우 Fig. 7 과 같이 방전 기포와 부스러기가 가공 간극뿐만 아니라 레이저로 선-가공된 구멍의 출구로도 배출이 가능하므로 가공 깊이가 깊어져도 가공 속도가 크게 떨어지지 않고 가공을 수행할 수 있다.

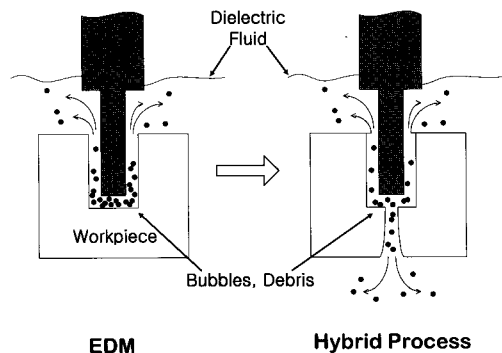


Fig. 7 Advantage of hybrid drilling of LBM & EDM

복합 가공이 갖는 또 다른 장점은 기존 방전 가공에 비하여 공구 전극의 마모량이 작다는 것이다. 복합 가공은 레이저 빔에 의해 일정량의 가공물을 먼저 가공하므로 방전 가공량이 기존 방전 가공에 비해 작기 때문에 방전 가공으로 소모되는 전극 마모가 더 적다. 복합 가공의 경우 1mm 두께의 가공물을 관통하는데 마모된 전극의 부피를 길이 단위로 변환시키면, 전극 마모량은 300 μ m 로 기존 방전 가공이 630 μ m 깊이까지 구멍을 가공하는데 소모된 전극 마모량 620 μ m 보다도 50%이상 작다. 구멍의 깊이를 630 μ m 까지 가공하였을 때 소요된 총 가공 시간과 전극 마모량을 Fig. 8 에 비교하여 나타내었다. 복합 가공의 경우 기존 방전 가공과 비교하여 가공 시간은 72%, 전극 마모량은 64% 감소하였다.

Fig. 9 는 복합 가공으로 미세 구멍을 가공하기 전과 가공한 후의 공구 사진이다. 복합 가공에서는 방전 가공으로 가공되는 부분이 구멍의 중심으로부터 바깥쪽에 집중되기 때문에 가공 후 공구는 원뿔 형태가 된다.

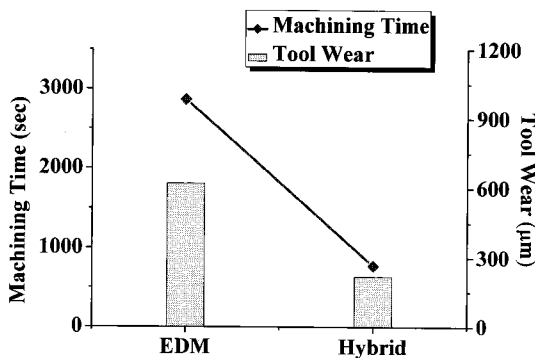


Fig. 8 Machining time and tool wear for micro hole

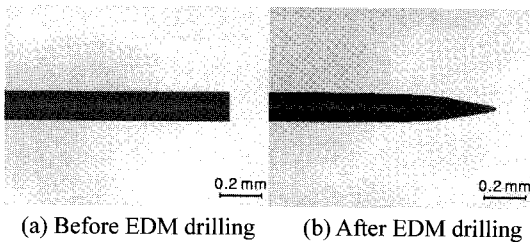


Fig. 9 Tool electrode used in hybrid drilling

4. 미세 홈 복합 가공

4.1 레이저 빔 가공과 복합 가공

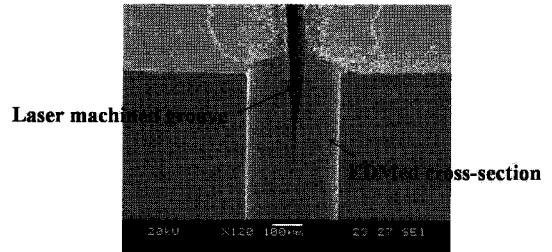


Fig. 10 Cross section of a micro groove machined by LBM

미세 홈의 복합 가공을 위한 선-가공으로 레이저 펄스 빔을 40mm/s 의 이송 속도로 조사하여 3mm 직선 경로를 30 회 왕복 수행하였다. Fig. 10 은 레이저 빔으로 가공된 미세 홈의 단면을 나타낸다. 레이저 빔에 의해 가공된 미세 홈은 깊이가 깊어질수록 폭이 작아지는 V 형태의 단면을 가지며, 미세 홈의 표면에서는 레이저 빔의 반복 조사에 의한 열 축적으로 비교적 넓은 열영향부가 형성된다. 또한 홈의 표면에는 가공 도중 레이저 열원에 의해 액화되어 분출된 표면의 가공물이 가공이 끝난 후 급속히 재응고하여 20~30 μ m 정도 높이의 버(burr)를 형성한다. 그리고 홈의 바닥면에는 50~150 μ m 정도 깊이의 열변형으로 인한 균열이 발생한다. 따라서 높은 형상 정밀도를 얻기 위해서는 선-가공에서 발생한 바닥 면의 균열과 표면의 재응고층을 후-가공으로 모두 제거해야 한다.

방전 가공은 Fig. 11 과 같이 공구 전극이 단계별로 내려가면서 직선 경로를 왕복하여 수행되었으며, 단계별 가공 깊이(depth of layer, d)는 20 μ m 이다. 이러한 다층 가공(layer-by-layer machining) 방식

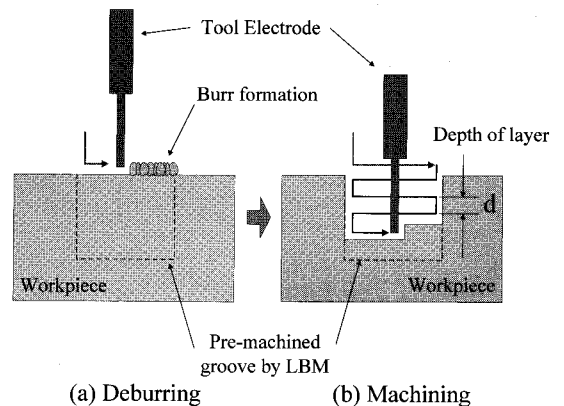


Fig. 11 Layer by layer milling process with extra tool path for deburring

은 방전 밀링시 한 층에서 가공되는 가공량을 조절하여 전극의 파손을 막고 전극 바닥면의 마모가 균일하게 일어나도록 한다. 특히 복합 가공에서는 효과적인 표면 재응고층 제거를 위해 공작물 표면 20 μm 위에서 공구 전극을 이송시키는 버-제거(deburring) 과정을 방전 가공 경로에 추가하였다.

Fig. 12 는 직경 115μm 의 공구 전극을 선정하여 가공한 미세 홈의 단면 사진으로, 폭 135μm 의 우수한 형상 정밀도를 갖는 미세 홈을 가공하였다. 복합 가공에 소요된 가공 시간과 전극 마모는 Table 3 과 같다.

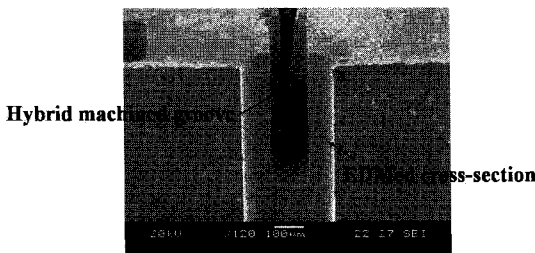


Fig. 12 Cross section of a micro groove machined by hybrid milling of LBM & EDM

Table 3 Machining characteristics of hybrid milling

	Machining Time	Tool Wear
Pre-milling By LBM	10 sec	
Post-milling By EDM	2,410 sec	240 μm
Total of Hybrid process	2,410 sec	240 μm

4.2 방전 가공과 복합 가공

동일한 방전 가공 조건을 사용하여 기존 방전 가공과 복합 가공의 성능을 비교하였다. 두 경우 모두 깊이 20μm 씩 동일한 단계별 가공 깊이를 사용하였다. 앞에서 언급하였듯이 가변 이송 속도를 사용하여 가공 상태가 양호할 때는 속도를 증가시키고 단락이 발생하면 속도를 늦추는 방법으로 가공 효율을 높였다. 기존 방전 가공의 경우 가공된 깊이가 깊어질수록 방전 기포와 부스러기 배출이 쉽지 않아 이송 속도가 조금씩 떨어지지만, 깊이에 따라 가공되는 양은 일정하므로 이송 속도의 편차가 크지 않다. 반면 복합 가공의 경우 미세 홈이 레이저에 의해 V 형태로 선-가공되므로 가공 깊이가 얇은 가공 초반에는 가공량이 작아져 공구

의 이송 속도가 빠르다. 따라서 총 가공 시간이 있어서 후-가공 프로세스인 방전 가공의 가공 시간이 절대적인 복합 가공에서는 기존 방전가공과 같은 가공 조건과 공구 이송 경로를 사용하여도 가공 시간이 단축된다. 또한 특정 깊이의 홈을 가공하기 위해서는 가공 과정에서 마모되는 전극 마모량을 예측하여 이송 경로를 보정해야 하는데, 복합 가공의 경우 방전 가공량이 작기 때문에 전극 마모량을 줄일 수 있어 보정된 이송 경로가 짧아진다. 즉, 같은 크기의 미세 홈 가공에서 복합 가공은 가공 초반에 이송 속도가 높고 이송 경로가 기존 방전 가공보다 짧아 총 가공 시간을 단축시킬 수 있으며, 전극 마모량 또한 줄일 수 있다.

Fig. 13 은 레이저/방전 복합 가공과 기존 방전 가공을 이용한 미세 홈 가공의 가공 시간과 전극 마모량을 비교한 그래프이다. 복합 가공의 경우 총 가공 시간은 40min 으로 63min 이 소요된 방전 가공에 비하여 약 37% 감소하였고, 공구의 마모량은 50% 감소하였다.

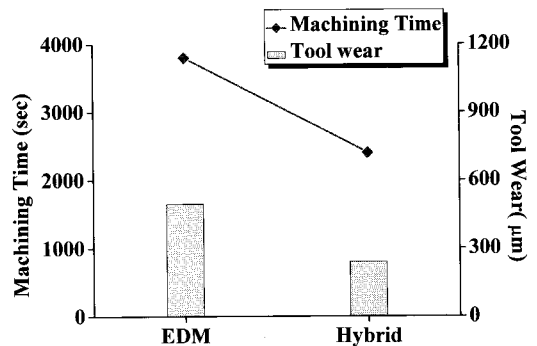


Fig. 13 Machining time and tool wear for micro groove

4.3 단계별 가공 깊이(Depth of layer)

일반적으로 방전을 이용한 밀링 가공시 일정한 단계별 가공 깊이를 사용하는데, 단계별 가공 깊이를 증가시키면 공구의 총 이송경로를 줄일 수 있어 가공시간을 단축시킬 수 있지만 전극 마모에 의해 미세 홈의 형상 정밀도는 떨어진다.

Fig. 14 에서는 복합 가공 시 단계별 가공 깊이, 즉 d 값에 따른 전극 마모량을 나타내고 있다. 단계별 가공 깊이가 증가할수록 총 가공 시간은 크게 감소하였고, 20μm 부터 80μm 까지는 서서히 증가하지만 길이 방향 전극 마모량의 변화가 크지 않다. 하지만 단계별 가공 깊이를 증가시킬 경우 전극의 마모는 모서리 부분에 더 집중되고, 마모

된 전극의 모양은 그대로 홈 바닥면에 전사되므로 형상 정밀도에 악영향을 미친다.⁹

Fig. 15 는 단계별 가공 깊이에 따라 복합 가공 후 마모된 전극 끝 모양의 사진이다. 단계별 가공 깊이가 증가할수록 마모에 의해 경사각이 커져 끝이 점점 뾰족해 지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 미세 홈 가공에서 바닥면의 형상 정밀도를 높이기 위해서는 단계별 가공 깊이를 최소화하여 마모가 전극 바닥면 전체에 균일하게 일어나도록 해야 한다.²

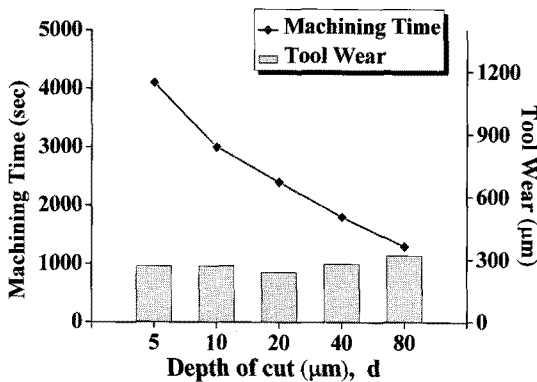


Fig. 14 Machining time and tool wear for micro groove according to the change of depth of layer

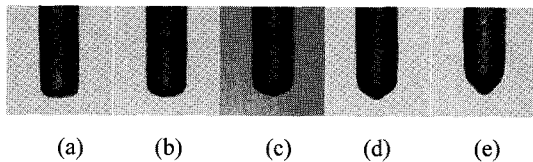


Fig. 15 Shape of tool electrode after machining micro groove with different depth of layer (a) d=5μm, (b) d=10μm, (c) d=20μm, (d) d=40μm and (e) d=80μm

4.4 가공 중 단계별 가공 깊이의 변화

레이저 빔에 의해 선-가공된 V 형태의 홈을 방전 가공을 이용하여 일정한 단계별 가공 깊이로 가공하게 되면, 가공된 깊이가 상대적으로 얇은 가공 초반에는 가공량이 작으므로 가공량이 많은 가공 후반보다 상대적으로 전극 마모가 작다. 따라서 바닥면의 형상 정밀도를 유지하면서도 가공 시간을 단축시키기 위해 가공 중에 공구 이송 깊이에 따라 단계별 가공 깊이를 변화시켰다. 즉, Fig. 16 과 같이 가공 초반에는 큰 단계별 가공 깊이를,

가공 후반에는 작은 단계별 가공 깊이를 적용시켜 가공하였다.

실험은 복합 가공 중에 단계별 가공 깊이를 $d_1=80\mu\text{m}$, 에서 $d_2=40\mu\text{m}$, $d_3=20\mu\text{m}$, $d_4=10\mu\text{m}$, $d_5=5\mu\text{m}$ 로 변화시켜 수행하였다. 가공된 미세 홈의 바닥면 형상을 확인하기 위하여 단면을 잘라 살펴보면, Fig. 17 과 같이 단계별 가공 깊이를 변화시킬 경우 80μm 의 일정한 단계별 가공 깊이를 적용하였을 때보다 우수한 형상 정밀도를 얻을 수 있다. 이를 5μm 로 일정한 단계별 가공 깊이를 적용한 기존 방전 가공과 비교하면, Fig. 18 에서 나타내듯이 단계별 가공 깊이를 변화시킨 복합 가공의 가공시간은 35 분으로 100 분이 소요된 기존 방전 가공보다 65.5% 단축시킬 수 있다. 또한, 약 68 분의 가공 시간이 소요된 일정한 단계별 가공 깊이의 복합 가공보다 총 가공 시간을 약 49% 단축시키면서도 전극 마모량은 크게 증가하지 않은 것을 확인할 수 있다.

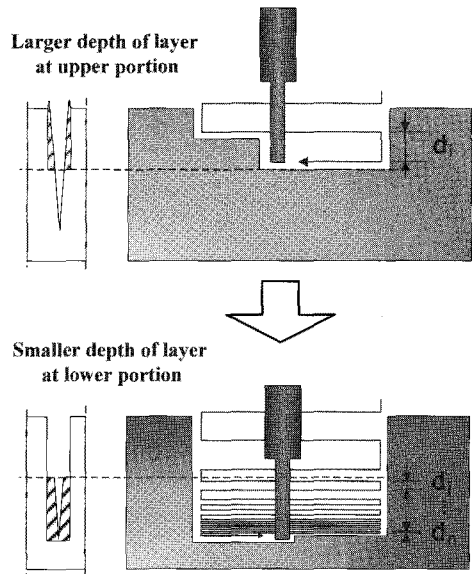


Fig. 16 Variable depth of layer

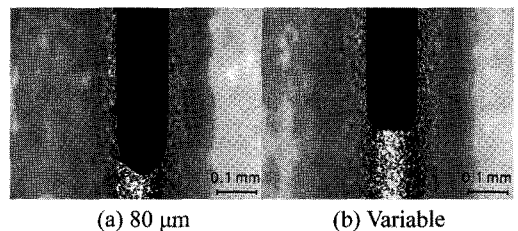


Fig. 17 Shape of bottom accuracy of a micro groove according to depth of layer

5. 결론

본 논문에서는 나노초 펄스 레이저를 이용한 레이저 빔 가공과 방전 가공의 복합 가공의 가공 특성을 살펴보았다. 복합 가공에서는 레이저 조사에 의해 발생하는 열영향부 및 재응고층을 방전 가공으로 완전히 제거하여 미세 형상의 정밀도를 높일 수 있다. 복합 가공을 이용한 미세 구멍 가공의 경우, 방전 기포와 부스러기의 배출이 용이하고 방전 가공량이 작기 때문에 기존 방전 가공보다 총 가공 시간과 전극 마모량을 단축시킬 수 있고 더 높은 세장비(aspect ratio)의 구멍을 가공할 수 있다. 또한 미세 홈 가공의 경우, 작은 방전 가공량으로 인하여 총 가공 시간과 전극 마모량이 줄어들었으며, 가공 중 단계별 가공 깊이를 변화 시킴으로써 가공 효율을 효과적으로 개선하였다.

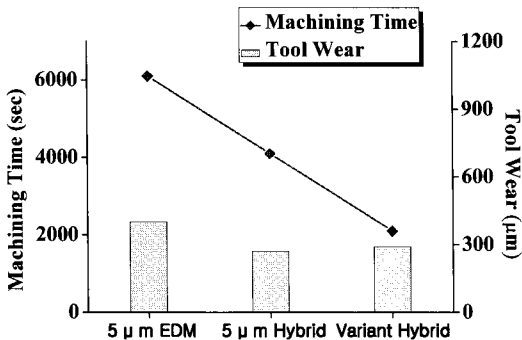


Fig. 18 Machining time and tool wear for micro groove according to depth of layer and type of machining

- 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.
- Allen, D. M. and Huang, S. X., "The Reduction of Tool Wear and Machining Time for the Micro-Electro Discharge Machining of Micro-holes by Using Copper Vapour Laser Machining as a Roughing Process," *International Journal of Electrical Machining*, No. 2, pp. 9-11, 1997.
- Li, L., Diver, C., Atkinson, J., Giedl-Wagner, R. and Helml, H. J., "Sequential Laser and EDM Micro-drilling for Next Generation Fuel Injection Nozzle Manufacture," *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 1, pp. 179-182, 2006.
- Masuzawa, T., Fujimoto, M. and Kobayashi, K., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 431-434, 1985.
- Lee, B. U., Yi, S. M., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Fabrication of 3D Micro structure Using Micro Electrical Discharge Milling," *Journal of the KSPE*, Vol. 21, No. 9, pp. 41-47, 2004.
- Tsai, Y. Y., Masuzawa, T. and Fujino, M., "Investigations on Electrode Wear in Micro-EDM," *Proceedings of the International Symposium on Electromachining(ISEM XIII)*, pp. 719-726, 2001.

참고문헌

- Yu, Z. Y., 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.
- Chung, D. K., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Micro Electrical Discharge Milling Using Deionized Water as a Dielectric Fluid," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 867-874, 2007.
- 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.