

펄초레이저를 이용한 금속 재료의 레이저 밀링 가공에 대한 연구

강필식[✉], 박종인

마이크로인스펙션(주) LAE개발팀

Study on Laser Milling Process of Metal by Femtosecond Laser

Pil Shik Kang[✉], Jong In Park

Micro INSPECTION Inc. LAE dev. team

Abstract

By the specific character of femtosecond laser controlled volume of magnitude of micrometer scale could be ablated without melting phase in SKD11 and SUS304. According to the laser machining parameters various sectional shapes could be engraved on the surface of metals. Typical engraved lines were 10 μ m wide and deep. Coarse-milled surface was made 10 μ m lower than the original elevation by a bunch of laser-engraved lines in suitable spacing. The repeated banks with a height of 10 μ m could be made with the combination of the intact area .

Keywords: Femtosecond laser(펄초 레이저), Milling(밀링), Laser engraving(레이저 인그레이빙), SKD11, SUS304

1. 서 론

3차원 형상을 만드는데 있어서 다양한 방법이 존재하지만 적층가공(additive manufacturing)과 절삭가공(subtractive manufacturing)이라는 두 가지 공정으로 크게 분류할 수 있다. 적층가공의 대표적인 공정으로는 3차원 인쇄(3D printing)을 들 수 있고, 절삭가공의 대표적인 공정으로는 밀링 공정을 들 수 있다. 밀링 공정은 작은 크기에서부터 큰 부피까지 넓은 범위를 잘 정의된 형상으로 가공하는 데에 사용되는 기술로써 최근 들어 새로운 에너지(energy)를 사용하여 전통적인 기계 밀링(mechanical milling)과는 다른 다양한 방식의 밀링공정으로 그 영역을 확장하고 있다.¹⁻³

특히 다양한 재료에 대한 가공요구가 증가하면서 기존 밀링의 한계를 극복할 수 있는 레이저 밀링(laser milling)이 그 중 대표적인 공정 기술이라고 할 수 있다. 그러나 기존의 고체 레이저(laser)를 중심으로 하는 레이저 밀링 공정기술은 나노초(nanosecond)이지만 상대적으로 긴 펄스폭(pulse duration)으로 용해상(melting phase)이라는 상변화

의 흔적이 무시할 수 없으므로 요구되는 정밀도를 충족할 수 없는 문제점이 있었다.

그러나 최근 들어 펄초 레이저(femtosecond laser)로 대표되는 극초단 펄스 레이저(ultrashort pulse laser)의 발전과 더불어 수-수십 μ m의 부피를 열영향부(HAZ; Head-Affected Zone)를 최소화하면서 용융제거(ablation) 시킬 수 있게 되었으므로 기존 레이저 밀링에서 구현하기 어려웠던 수 μ m급의 형상과 1 μ m 이하의 조도(roughness)를 구현할 수 있게 되어, 마이크로 몰드(micro-molds) 생산, 마이크로 스탬핑 기구(micro-stamping tools) 생산 등 다양한 분야에의 적용이 연구되고 있다. 이 때의 가공 품질은 사용된 레이저와 가공 방법, 재료에 따라 결정되며, 입자 사이즈가 작거나, 무정형(amorphous)인 재료에서 우수한 가공 품질을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 먼저 펄초 레이저를 이용하여 레이저 출력(laser power), 겹침 비율(overlap ratio) 등을 조절하면서 SKD11과 SUS304에 폭10 μ m, 깊이 10 μ m의 홈(groove)을 음각하였다. 각 조건에서의 용융제거량 및 엔그레이빙(engraving) 형상을 현미경으로 관찰하고, 그 데이터를 이용하여 릴리프(relief) 엔그레이빙을 통해 양각 가공을 진행하였다.

투고일 : 2014년 9월 22일 심사완료일 : 2014년 9월 24일

게재승인일 : 2014년 9월 26 일

교신저자 : 강필식 ✉ pchic@microinspection.co.kr

2. 실험 구성

본 실험에서 사용된 펄초 레이저는 Light Conversion사의 PHAROS-SP로 1034nm의 중심파장을 가지며, 분광 대역폭은 15nm, 최대 출력은 100kHz에서 6W이고 M₂값은 1.3이하이다. 2nd 하모닉 제너레이션(harmonic generation)의 경우 515nm의 중심파장과 3.5nm의 분광 대역폭을 갖는다.

Table 1 Test specification of the femtosecond laser

항 목	성능 지표 값
모델명	PHAROS-SP
제조사	Light Conversion
중심파장	1034nm(Fundamental) 515nm(2HG)
spectral width	15nm @ 1034nm, 3.5nm @ 515nm
M2	< 1.3
beam diameter	2.9mm(FWHM) @ 1034nm 2.7mm(FWHM) @ 51nm

레이저의 주요 성능은 Table 1에 정리하였다. Fig. 1은 레이저 본체와 이를 기반으로 하여 구성된 가공시스템이다. 가공 시스템의 제어는 Delta-tau사의 turbo PMAC을 이용하였다.

Fig. 2는 레이저와 가공시스템을 포함한 실험 장치 구성도이다. 레이저의 파워의 미세조절과 편광도 개선을 위해 박막판 편광기(thin film plate polarizer)를 이용한 빔 감쇄기(beam attenuator)를 설치하였다.



Fig. 1 Photo of PHAROS-SP laser and its laser processing system.

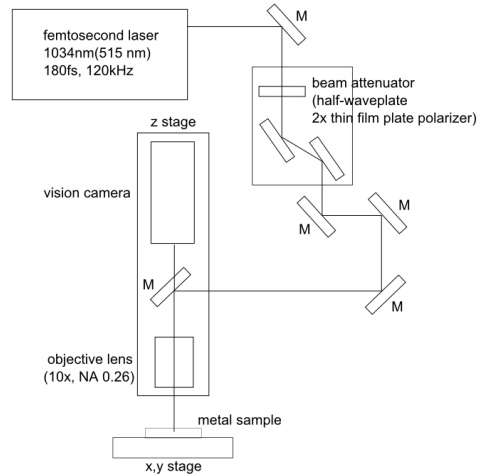


Fig. 2 Schematic of PHAROS-SP laser and its laser processing system.

레이저 빔을 집속하는 데에는 NA 0.26의 대물렌즈(objective lens)를 사용하였으며, 미세가공을 위해 가장 작은 초점 크기(spot size)를 얻을 수 있는 가우시안 빔(Gaussian beam)을 그대로 사용하였다. PHAROS-SP laser의 빔 직경(beam diameter)는 2nd 하모닉 제너레이션(2HG) 파장에서 4.59mm(1/e²)이며, NA 0.26의 대물렌즈로 빔을 집속하면 spot size는 1.3μm로 계산된다.⁴

3. 결과 및 고찰

3.1 Laser engraving on metal(음각 가공)

기본적인 밀링기능을 확인하기 위해 을 수행하였다. 레이저 엔그레이빙은 레이저를 가공물에 대해 직선 또는 곡선을 따라 적당한 속도로 움직여 해당 표면을 용융제거하는 가공 방법이다. 레이저 엔그레이빙의 대상은 일반적인 판재 금속 가공에 많이 사용되는 SUS304를 우선 선정하였고, 기하학적 정밀성과 표면조도 특성이 좋은 SKD11도 함께 선정하였다.

정밀가공을 위해 1034nm 비해 초점 크기를 작게 할 수 있는 515nm로 먼저 테스트 해보았다. 가공 테스트에 사용된 파라미터는 4가지로 절정 세기(peak intensity), 겹침 비율(overlap ratio), 레이저 초점 위치(laser focal position), 중복 가공 횟수이다.

수백 펄초 레이저에 의한 용융제거는 10¹³-10¹⁴ W/cm²이상에서 발생한다.⁵ 따라서 절정 세기의 범위를 10¹⁴ W/cm² 영역으로 설정하였다. 펄스의 겹침이 있을 경우, 물질에 도달하는 두 번째 레이저

펄스들은 물질 표면보다 더 깊은 위치에서 상호작용하게 된다. 따라서 초점 위치(focal position)의 위치도 중요한 변수가 된다. NA 0.26의 대물렌즈의 레일리 길이(Rayleigh length)는 $2.5\mu\text{m}$ 이므로 초점 심도(depth of focus)는 $5\mu\text{m}$ 이며 변별력 있는 실험 가공 변수(parameter) 설정을 위해 초점 깊이(focal depth)의 간격은 $10\mu\text{m}$ 로 하였다.⁶ 겹침 비율(overlap ratio)는 스테이지의 속도 범위에 따라 90-98%의 범위로 설정하였다. 반복 가공 횟수는 그 횟수에 비례하여 가공 시간이 증가하므로 1-5회까지의 범위에서 테스트를 실시하였다.

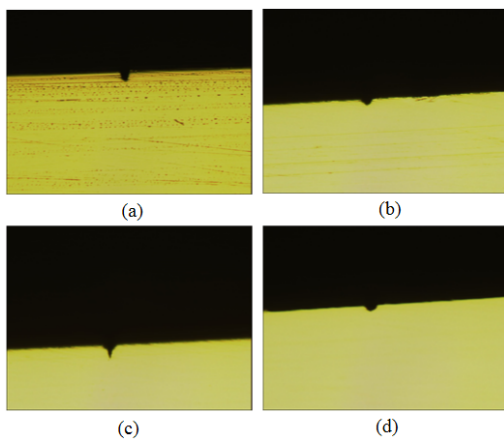


Fig. 3 Section of grooves laser-engraved on SUS304 surfaces (see Table 2. for processing parameters).

Fig. 3은 각 파라미터 별로 나타나는 다양한 홈형상의 대표적인 유형들이다. 홈의 폭과 깊이 사면의 형상에 따라 u자형, v자형, y자형, 반원형 등의 다양한 형태의 홈들을 관찰할 수 있었다. Fig. 3에서 볼 수 있는 $10\mu\text{m}$ 크기의 홈들 이외에도 반복 가공에 의해 폭 $15\mu\text{m}$ 깊이 $25\mu\text{m}$ 이상 깊어지는 것도 관찰할 수 있지만 가공 형상의 유형들은 앞서 얘기된 4가지 범주에서 벗어나지는 않았다.

SKD11에서도 같은 과정으로 실험 가공 변수를 설정하여, 200mW, 10 mm/s, $0\mu\text{m}$, 3회 중복 가공에서 폭 $10\mu\text{m}$, 깊이 $10\mu\text{m}$ 의 홈을 엔그레이 할 수 있었다.



Fig. 4 Schematic of stepwise laser relief engraving.

Table 2 Processing parameters of the grooves

	average power(W)	overlap ratio(%)	focal depth(μm)	repeating
(a)	0.875	97.9	+20	1time
(b)	1.14	97.9	+40	3times
(c)	1.14	91.7	+0	1time
(d)	1.14	91.7	-40	3times

3.2 Laser relief engraving on metal(양각 가공)

3.1의 음각 실험에서 실험 가공 변수에 따라 홈의 크기와 단면 형상에 대한 조절이 가능하였다. 넓은 면적에 대해 중복된 위치에 엔그레이빙을 한다면 밀링으로 면을 깎는 것과 동일한 과정이 될 수 있다. 이를 근거로 하여 원하는 부위를 남겨두고 나머지 부분을 엔그레이빙 하여 양각의 형상을 얻을 수 있다.

Fig. 4는 개별 레이저 가공이 폭 $10\mu\text{m}$, 깊이 $10\mu\text{m}$ 의 홈(groove)을 가공한다고 할 때, 2회의 가공으로 폭 $10\mu\text{m}$, 높이 $10\mu\text{m}$ 의 뚝(bank)을 형성하는 설명도이다. 1차 가공에서는 $10\mu\text{m}$ 간격으로 레이저를 조사하여 해당 간격의 홈을 형성하고 2차 가공 시 시작점에서는 $5\mu\text{m}$ 를 더 움직인 뒤 $10\mu\text{m}$ 간격으로 레이저를 조사한다.

$5\mu\text{m}$ 를 더 움직여 가공하는 이유는, 1차 가공에서 형성된 연속된 뚝들의 꼭지점에 레이저가 조준되어 남아있는 뚝을 없애기 위함이다. 1차 가공에서 용융제거되는 형상을 v자 형이 되도록 실험 가공 변수를 정한다면, 단위 가공 면적당 1차 가공 후 남아있는 물질의 양은 1차 가공에서 용융제거된 물질의 양과 동일하다. 한편, 기하학적인 형상을 무시한다면 1, 2차 가공에서 동일한 가공 실험 가공 변수를 사용하여 용융제거되는 양이 같아지도록 만들 수 있다.

따라서 개별 엔그레이빙 가공에서의 실험 가공 변수를 v자형의 홈이 만들어 지도록 설정하고 1차 가공과 2차 가공에서 동일한 실험 가공 변수를 사용한다면, 1차 가공에서 형성된 뚝(홈이 형

성되고 남아있는 부분)의 꼭지점 부분에 레이저 엔그레이빙으로 2차 가공을 하게 되면 해당 가공 영역이 평탄화되는 효과를 볼 수 있을 것이다.

이 때, 양각을 하고자 하는 위치에서 2차 가공을 생략한다면 해당 위치를 남기고 다른 부분은 모두 10 μ m 로 평탄하게 용융제거되므로, 릴리프 엔그레이빙의 방식으로 양각이 구현된다.

먼저 1차 가공에 대한 효과를 확인하기 위해 10 μ m 간격으로 레이저 엔그레이빙을 실시하였다. Fig. 5는 10 μ m 간격으로 1차 가공만 되어 있는 시편을 관찰한 것이다. 각 홈 간의 간격은 10 μ m 이고 깊이 또한 약 10 μ m이다. 홈 간의 간격이나 크기가 균일하지는 않지만 홈 바닥면의 평균 높이는 기존의 금속 표면보다 일정하게 낮다.

Fig. 6는 2차 가공까지 실시하여 레이저 릴리프 엔그레이빙을 구현한 사진이다. 양각의 형상은 나타나 있지만 엔그레이빙이 이루어진 곳의 조도는 그다지 좋지 못하다. Fig. 4와 같이 의도된 3개의 독의 형상 중 좌측과 중앙의 두 개는 명확해 보이지만 우측의 다른 하나는 구분이 어렵다. 그림 상의 독의 높이와 폭은 각각 10 μ m이다.

본 실험에서는 레이저 엔그레이빙에 의한 면의 평탄 가공이 시도되었다. 조도가 좋지 않았지만 일정한 깊이에 대한 어블레이션(ablation)이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

개별 엔그레이빙의 실험 가공 변수를 조절하여 전체 가공면의 균일도는 개선의 여지가 충분히 있다고 판단된다. 예를 들어, 본 논문의 실험 가공 변수에 의해서는 홈의 형상이 v자형이었지만, 3.1에서 가공했던 실험 가공 변수 중 u자형이나 반원형에 해당하는 실험 가공 변수로 가공한다면 용융제거의 양이 더 많아져 1회의 가공만으로도 일정한 깊이의 평탄면 밀링이 가능하리라 추측할 수 있다. 가공 횟수나 개별 레이저 엔그레이빙의 간격을 조절하는 것도 방법이 될 수 있다.

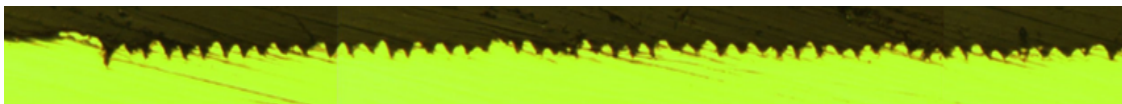


Fig. 5 Photo of 1st step of laser relief engraving.



Fig. 6 Laser-relief-engraved surface of SUS304 with three banks.

4. 결론

펄토초 레이저를 이용하여 금속 표면을 이동 가공하여 레이저 엔그레이빙을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 절정 세기, 겹침 비율, 초점 깊이, 반복 가공 횟수의 4가지 실험 가공 변수를 조절하여 다양한 형상과 깊이의 홈을 만들어 낼 수 있었다.
- 2) 폭10 μ m, 깊이 10 μ m의 groove를 가공하였고, u자형, v자형, y자형, 반원형으로 형상조절이 가능한 실험 가공 변수를 확인하였다.
- 3) 음각의 엔그레이빙을 비교적 넓은 면적에 반복적으로 적용하여 밀링의 효과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 양각을 가공하는 레이저 릴리프 엔그레이빙을 구현하였다.

실용적인 레이저밀링기술이 되기 위해선 조도의 개선이 선결과제이다. 기 실험에서의 조도를 정량화하고 이 값을 개선해 나갈 예정이다. 또한, 본 논문에서 기술된 4가지 실험 가공 변수에 따른 가공 현상의 이론적인 분석도 병행할 계획이다. 평면 밀링이 외에 개별 가공의 반복에 따른 연속적인 패턴 제작에 대한 연구도 진행하고자 한다.

References

- 1) Campanelli, S.L., Ludovico, A.D., Bonserio, C., Cavalluzzi, P., Cinquepalmi, M., “Experimental analysis of the laser milling process parameters,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, Issue 1, 220-223, 2007.
- 2) Pham, D.T., Dimov, S.S., Petkov., P.V., “Laser milling of ceramic components,” International

- Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, Issue 3, 618-626, 2007.
- 3) Pham, D.T., Dimov, S.S., Ji, C., Petkov, P. V., Dobrev, T., "Laser milling as a 'rapid' micromanufacturing process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 218, No. 1, 2004, pp. 1-7.
 - 4) Wilson, J., Hawkes, J.F.B., Lasers, Principles and Applications., pp. 86, Prentice Hall, 1987.
 - 5) Gamaly, E.G., Rode, A.V., Luther-Davies, B., Tikhonchuk, V.T., "Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics," Physics of Plasmas, Vol. 9, Issue 3, 949-957, 2002.
 - 6) A.E. Siegman, Lasers, pp. 677, University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.
 - 7) Kim, Young-Jin, Kim, Yunseok, Kim, Seungman, Kim, Seung-Woo, "Ultrafast Femtosecond Lasers: Fundamentals and Applications," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol 27, No.6, 2010, pp. 7-16.
 - 8) Kim, Myung-Ju, Kim, Yong-Hyun, Yoon Ji-Wook, Choi, Won-Seok, Cho, Sung-Hak, Choi, Jiyeon, "Patterning of ITO on Touch Screen Panels using a beam shaped femtosecond laser," Korean Society of Laser Processing, Vol. 16, Issue 4, 2013, pp. 1-6.