

DOE 를 이용한 간섭 효과를 이용한 레이저 마이크로 패턴 제작 Fabrication of Laser micro pattern using the DOE

*노지환¹, 서 정², 조일환³, #이제훈⁴

*J. W. Noh(njw733@kimm.re.kr)¹, J.Suh(jsuh@kimm.re.kr)², I.H. Cho(smilehwa@kimm.re.kr)³, #J. H. Lee(jaholee@kimm.re.kr)⁴

^{1,2,3,4}KIMM (Korea Institute of machinery & materials)

Keywords: four beam interference, laser ablation process, DOE(Diffractive Optical Element), mold surface micro pattern.

1. Introduction

레이저 ablation 공정은 펄스 레이저를 포커싱 시켜 높은 에너지를 이용한 미세 제거 공정으로 최근 많이 연구 되어졌다.^{1 2 3 4} 레이저를 이용한 ablation 공정은 다양한 소재에 가능하며, 친환경적인 공정이고 photolithography 공정에 비해 공정이 간단하다. 그리고 레이저 ablation 공정은 non-contact 가공 이므로 기계가공에 비해 열영향부없고, 열적 또는 기계적 변형이 적다. 또한 레이저 다이렉트 라이팅 방법을 이용하면 마스크 없이 미세 가공이 가능하다. 하지만 레이저 빔을 포커싱해서 가공면을 가공하는 레이저 마이크로 머신닝의 특성상, 포커싱 된 레이저 빔 사이즈 보다 작은 미세 가공은 매우 어렵다는 단점이 있다.⁵ 포커싱 유닛을 이용해 레이저빔을 포커싱을 시킬 경우 포커싱된 빔은 회절 한계 이하로 줄어들 수가 없다. 포커싱 빔의 크기를 작게 하기 위해서 포커싱 렌즈에 입사되는 빔의 크기를 크게 하거나, 입사 레이저 파장을 작게 하거나, focal length 가 짧은 포커싱 렌즈를 사용 할 수 있다. 입사빔의 크기를 크게 하는 방법으로 beam expander 를 쓰지만 입사빔의 크기를 크게 하는데 한계가 존재한다. 입사 레이저의 파장을 짧게 하는 방법은 레이저 소스의 가격 문제 때문에 한계가 존재한다. 그리고 focal length 가 짧은 렌즈를 사용 하면, 포커스 된 스팟 사이즈는 줄어들지만, “depth of focus” 가 짧아져서 가공하기 힘들어진다.⁶ Depth of focus 가 짧아져 가공 균일성의 문제가 생길 때에는 auto focus 유닛을 사용할 수 있지만 이 또한 레이저 가공 장비의 복잡성을 증가시킨다. Focal length 가 짧은 렌즈를 사용할 경우 ablation 되는 파티클이 렌즈를 손상시킬 가능성도 있다.

회절한계를 극복하기 위한 방법으로 간섭 효과를 이용한 광학계등이 연구되어지고 있다. Photo resistive material 을 감광시키는 경우 코히어런스가 우수한 CW(continuous wave) laser 를 사용하면 되지만 laser ablation processing 인 경우에는 높은 fluence 가 필요하므로 펄스 레이저를 사용해야 한다. 펄스 레이저인 경우 템포럴 코히어런스와 스페셜 코히어런스가 CW(continuous wave) laser 보다 좋지 않기 때문에 interference 광분포의 컨트라스트가 좋지 않아, 간섭 효과를 이용한 미세 가공에 불리한 점을 가지고 있다. 하지만 펄스 레이저를 이용하여 interference 패턴을 가공해야 하는 이유는 금형 재료에 마이크로 패턴을 단일 공정으로 제작 할 수 있다는 장점 때문이다. Photo resistive material 을 감광시키는 방법은 화학적 에칭 공정과 electroforming 공정을 거쳐야만 금형재료에 마이크로 패턴을 제작 할 수 있지만, 레이저 ablation process 은 단일 공정으로 금형재료에 마이크로 패턴이 가능하다.

간섭 효과를 이용한 광학계는 레이저 소스빔을 빔 스플리터를 사용하여 2 개의 빔으로 분기 시키고, 이를 다시 시편에 조사 시킴으로써, 간섭 패턴을 만들어서 시편에 가공을 하게 된다. 2 개의 레이저 빔이 간섭되는 패턴은 라인 패턴이 된다. 그러나 간섭 효과를 이용하여, 라인 패턴이 아니라 도트 패턴을 형성하기 위해서는 2 개의 빔의 아니라 4 개의 빔이 모아져야 한다. 빔스플리터를 이용한 광학계에서는 4 개의 빔을 간섭 시키는 것이 매우 힘들다. 이런학적 복잡성을 단순화 시키기 위해서 DOE(Diffractive Optical Element) 와 렌즈를 이용한 광학계가 연구 중이다.⁷

8 9

본 논문에서는 펄스 폭이 12picosecond 인 펄스 레이저와 DOE 와 렌즈를 이용한 간섭계 광학계를 이용하여 NAK80 이라는 금형 재료에 직접적으로 마이크로 패턴을 가공하였다. 간섭 광학계의 성능을 판단하기 위해서 오브젝티브 렌즈와 CCD 를 이용해 간섭되는 빔의 광분포를 측정하였다. 이 간섭된 광분포를 이용하여 마이크로 패턴의 사이즈가 1 μm 이하인 마이크로 도트 패턴이 가공되었다.

2. Experimental condition

간섭 광학계는 Fig.1 b 와 같이 구성하였다. 레이저빔을 4 개의 빔으로 나누어 주는 DOE 소자와 분기된 4 개의 빔을 평행하게 만들어 주는 렌즈 1 과 평행한 4 개의 빔을 집광 시켜주는 렌즈 2 로 구성하였다. 렌즈 1 은 focal length 가 150mm 이며 렌즈 2 의 focal length 가 75mm 였다. DOE 에서 분기된 4 개의 빔을 평행하게 진행 시키기 위해 DOE 와 렌즈 1 의 거리는 150mm 로 하였으며, 렌즈 1 과 렌즈 2 의 거리는 225mm 를 유지하였다.

3. experimental result and discussion

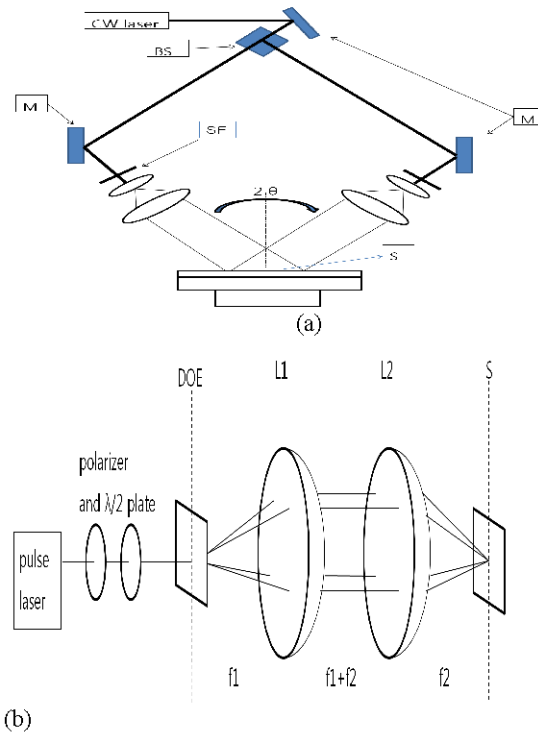


Fig.1 the schematics of interference optical system (a) two beam interference system using beam splitter: BS; Beamsplitter, M; Mirror, SF; Spatial Filter, S; Specimen, (b)four beam interference system using DOE(Diffractive Optical Element) : L1; Lens1, L2; Lens2, S; Specimen

Fig.1 은 two beam interference system using beam splitter 와 four beam interference system using DOE. 의 the schematics of interference optical system 을 보여 주고 있다. two beam

interference system using beam splitter 은 beam splitter 로 레이저 빔 분기 시키고, 다시 두 빔이 간섭이 일어날 수 있도록 시편에서 레이저빔이 모이게 된다. 이 방법은 시편에서 높은 laser fluence 를 구현해 내기가 힘들다. 그 이유는 높은 laser fluence 를 구현해 내기 위해서는 splitting 된 두 빔을 포커싱 렌즈를 써서 포커싱 시키면서 시편에 조사해야 하는데, 이 광학계의 구현이 힘들다. 더욱이 beam splitter 를 이용하여 4 개의 빔을 interference 시키기 위해선 더 많은 광학적 부품이 첨가되어 광학적 얼라인이 어려워진다. 그에 반해 four beam interference system using DOE. 은 간단한 DOE 소자를 이용해 레이저 빔을 4 개로 분기시키고 렌즈를 통해 집광시키기 때문에 4 개의 빔을 interference 시키면서 높은 laser fluence 를 구현하는 데는 매우 유용하다. 첫번째 렌즈는 4 개의 빔을 평행하게 만들어 주고, 두번째 렌즈는 4 개의 빔을 다시 모아 주는 역할을 한다. 동시에 2 개의 렌즈는 각각의 4 개의 빔을 포커싱하는 역할도 하기 때문에 시편에서 비교적 높은 fluence 를 얻게 된다.

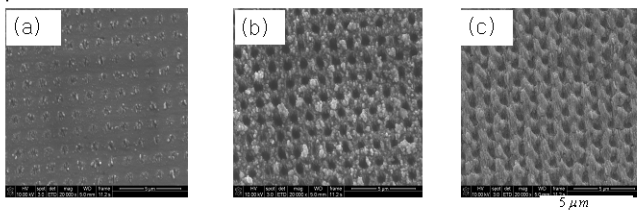


Fig.2 SEM image of 1 μm pitch pattern on the mold material : (a) 500 pulses shot, (b) 1000 pulses shot, (c)3000 pulses shot

Fig.2 은 four beam interference using DOE 와 picosecond laser 를 이용하여 mold material(NAK 80) 표면 위에 1 μm급 마이크로 패터닝을 한 결과를 보여준다. 네개의 빔이 모아지는 부분의 average laser power 는 2W 였고 포커싱된 스팟 사이즈는 60 μm 였다. The repetition rate was 50kHz. The laser fluence was 1.4J/cm². 레이저 ablation 프로세스는 모두 상온의 air 상태에서 수행되었으며, blowing gas 은 사용하지 않았다. Fig.2 a 은 펄스 개수가 500 개일 때 이며, Fig.2 b 은 펄스 개수가 1000 개일 때 이며, Fig.2c 은 펄스 개수가 3000 개일 때 이다. 펄스의 개수가 증가 될수록 가공 깊이가 증가됨을 알 수 있다. 그러나 펄스 개수가 증가됨에 따라 가공되는 부분과 가공되지 않는 부분이 경계가 모호해 지는 현상이 발생된다. 이 현상의 이유는 레이저 ablation 공정 중에 발생하는 heat affection zone 때문이다. 광 패턴 자체의 contrast 가 아주 높다고 하더라도, 에너지가 많이 주입될수록 가공된 부분에는 heat affect zone 이 발생된다. ultrashort pulse laser (pulse duration 이 100 femtosecond 에서 20picosecond 인 laser) 를 사용하면 heat affection zone 줄일 수 있다. 재료에 입사된 레이저 에너지는 초기에는 전자들 여기 시키는데 이용되고, 그 후에 여기된 고온의 전자가 고체 격자(lattice) 에 에너지를 전달되게 된다. 이러한 과정 중에 재료 내부에서 전자의 방출, 용융, 기화(vaporization), 상폭발(phase expolsion), spallation, electrostatic ablation 등의 복잡한 반응들이 일어나며 재료가 제거 되기 시작한다. 일반적인 펄스 레이저인 경우 펄스 duration 이 수십 nanosecond 에 해당된다. 이런 펄스 레이저는 재료 제거 과정에서 많은 heat affection zone 을 유발하게 된다. 그 이유는 레이저 조사되는 수십 nanosecond 동안 lattice 에 에너지가 전달되기 때문이다. 이에 반해 ultrashort laser 의 경우에는 레이저 에너지가 전자를 여기 시키고 난 후 레이저의 에너지가 재료에 더 이상 공급 되지 않기 때문에 전자의 에너지가 lattice 로 전달이 일어나지 않는다.

왜냐하면 전자의 에너지가 lattice 로 전달되는데, 재료에 따라 다르지만 보통 수십 picosecond 가 소요되기 때문이다. 전자의 에너지가 lattice 로 전달되지 않기 때문에 clean ablation , 즉 heat affection zone 이 줄어든 가공이 가능하게 되었다. 하지만 ultrashort pulse laser 와 재료의 상호 작용 메커니즘은 아직 확실하게 밝혀지지는 않은 상태이다.

4. conclusion.

본 논문에서는 20msec 가공 시간 동안 마이크로 패턴의 사이즈가 1 μm 이하인 도트 약 3000 개를 NAK80 이라는 금형 위에 제작하였다. 이를 제작하기 위해 DOE 를 이용한 four beam interference 광학계와 picosecond laser 를 사용하였다. 4 개의 빔을 간단한 optics 을 사용해 interference 시키기 위해 DOE 를 이용한 four beam interference 광학계를 사용하였고, 마이크로 구조물의 heat affection zone 를 줄이기 위해 picosecond laser 를 사용하였다. Interference 광 분포의 peak contrast 와 heat affection zone 을 고려하여 가공용 레이저의 pulse duration 을 결정해야 한다는 것을 알아내었다.

본 논문에서 제작된 마이크로 패턴의 활용 분야로서는 자동차 엔진등의 마찰력 감소를 위한 표면, 접착력 조절을 위한 표면, absorbance 를 증가시키기 위한 표면 등에 사용될 수 있다. 특히 사출 성형된 마이크로 스파이크 어레이는 값싼 초발수 표면에도 적용이 가능 할 것이다.

참고문헌

[1]¹ N.N. Nedialkov, S.E. Imamova, P.A. Atanasov, G. Heusel, D. Breitling, A. Ruf, H. Hügel, F. Dausinger, P. Berger, "Laser ablation of iron by ultrashort laser pulses" *Thin Solid Films* 453? 54 (2004) 496? 00
 [2]² Nadezhda M, Bulgakova, Igor M. Bourakov, "Phase explosion under ultrashort pulsed laser ablation: modeling with analysis of metastable state of melt," *Applied Surface Science* 197-198 (2002) 41-44
 [3]³ K.R.Chen, J.N. Leboeuf, R.F. Wood, D.B. Geohegan, J.M. Donato, C.L. Liu, A.A. Puretzky, "Laser-solid interaction and dynamics of laser-ablated materials" *Applied Surface Science* 96-98 (1996) 45-49
 [4]⁴ Ik-Bu Sohn , Young-Chul Noh , Young-Seop Kim , Do-Kyeong Ko , Jongmin Lee , Young-Jin Choi "Laser Ablation of Polypropylene Films using Nanosecond, Picosecond, and Femtosecond Laser" *Journal of the Optical Society Korea* vol. 12, No 1, pp. 38-41 (2008 March)
 [5]⁵ B. Wolff-Rottke, J. Ihlemann, H. Schmit, A. Scholl, "Influence of the laser-spot diameter on photo-ablation rates," *Applied Physics A*, 60, pp. 13-17, 1995.
 [6]⁶ Akifumi Yoshida, Toshimitsu Asakura "Propagation and focusing of Gaussian laser beams beyond conventional diffraction limit" *Optics Communications* 123 (1996) 694-704
 [7]⁷ Toshiaki Kondo, Saulius Juodkazis, Vyngantas Mizeikis, Shigeki Matsuo and Hiroaki Misawa "Fabrication of three-dimensional periodic microstructures in photoresist SU-8 by phase-controlled holographic lithography" *New journal of Physics* 8 (2006) 250
 [8]⁸ Toshiaki Kondo, Shigeki Matsuo, Saulius Juodkazis, Vyngantas Mizeikis, and Hiroaki Misawa "Multiphoton fabrication of periodic structures by multibeam interference of femtosecond pulses" *Applied Physics letters* Volume 82, Number 17 28 April 2003
 [9]⁹ Toshiaki Kondo, Shigeki Matsuo, Saulius Juodkazis, and Hiroaki Misawa "Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals" *Applied Physics letters* Volume 79, Number 6 6 August 2001