CO_2 레이저를 이용한 음각 원뿔 구조 광섬유 팁 가공 최적화 연구

유동윤[*], 최훈국[*,***], 손익부[*,✉], 노영철[*], 정덕[**], 김영섭[**], 이호[†], 김창환[#]
[*]광주과학기술원 고등광기술연구소, [**]애니모션택, [***]조선대학교 광기술공학과,
[†]경북대학교 기계공학과, [#]부산과학기술대학교 기계계열

CO_2 Laser micro-structuring of optical fiber with negative conical shape

Dongyoon Yoo[*], Hun-Kook Choi[*,*], Ik-Bu Sohn[*,✉], Young-Chul Noh[*], Deok Jung[**]**
Young-Sup Kim[**], Ho Lee[†], Chang-Hwan Kim[#]

[*]Advanced Photonics Research Institute, Gwangju Institute of Science and Technology
[**]Ani Motion Tech
[***]Department of Photonics Engineering, Chosun University
[†]School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University
[#]School of Mechanical design and Manufacturing, Busan Institute of Science and Technology

Abstract

A helical fabricating method using CO_2 laser was utilized for producing cone-shaped structure on a silica substrate. Output power and the number of scanning radiation were modified in order to control the structure. The experiment shows that the depth and width of cone-shape were increased with higher output power of the laser and the number of scanning. We demonstrate fabrication of multidirectional side-firing optical fiber with diameter of 440 um using the CO_2 laser fabrication technique.

Keywords: Laser micro-structuring(레이저 미세가공), CO_2 laser(CO_2 레이저), Optical fiber tip(광섬유 팁)

1. 서 론

최근 레이저 가공 기술은 다양한 금속재료나 목재, 아크릴, 플라스틱과 같은 비금속 재료, 신소재 합금, 세라믹, 석영유리와 같은 난삭재 가공까지 다양한 분야에서 이용되고 있다. 가공에 이용되는 레이저 가운데 CO_2 레이저는 저렴한 가격의 고출력 레이저로서 산업적용에 용의하며 용접, 절단, 마킹(Marking)과 같이 대면적 가공에 주로 적용되었다. 최근에는 반도체 공정기술의 미세 공정 기술의 발달에 맞춰 레이저를 이용한 국부적인 표면 열처리, 비아 홀(Via hole) 가공, 광섬유 가공 등 마이크로(Micro) 단위의 소자 가공에 대한 연구도 활발히 진행 중이다.[1-5] 특히 석영유리 가공에서는 기존 다이아몬드 휠에 의해 절단 시 절단 속도가 느리고 절단면에 마이크로 크랙(Micro Crack)이 발생하여 유리의 강도가 떨어지거나 파손되는 단점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 유리가공을 위해 CO_2 레이저를 주로 사용한다. 이는 일반 레이저와는 다르게 절단 시 절단면이 고온의 레이저 빔에 녹아 마이크로 크랙이 발생하지 않기 때문이다. 이러한 장점으로 단시간 내에 국부적으로 유리를 연마나 가공하는 데에 용의하여 현재는 유리가공 뿐만 아니라 다양한 분야에서 많이 활용되고 있다.[6-7] 뿐만 아니라 CO_2 레이저를 이용하여 다방향 조사 광섬유 팁을 개발되어왔다. 다방향 조사 광섬유 팁은 펨토초와 CO_2 레이저를 이용하여 제작하였고 의료용으로 사용하는데 충분한 성능을 보였다. 그러나 제작 공정 과정이 복잡하고 시간이 오래 걸려 양산 및 산업화 적용에는 애로사항이 있다.[8-9] 이를 해결하기 위하여 2단계로 나누어진 공정을 정밀 단일 공정의 개발이

투고일 : 2015년 9월 30일 심사완료일 : 2015년 10월 27일
게재승인일 : 2015년 10월 29일
교신저자 : 손익부 ✉ ibson@gist.ac.kr

필요하다.

본 논문에서는 다방향 조사 광섬유를 정밀 단일 가공 공정으로 산업화하기 위하여 10.6μm 파장을 가지는 CO_2 레이저를 이용하여 실리카(SiO_2) 기판과 광섬유 팁 위에 원뿔형상 가공 기초실험을 진행하였다. 실험은 헬리카 가공을 적용하여 광섬유의 재질인 실리카 기판에 레이저의 출력과 가공 반복 횟수를 조절하여 음각 원뿔 형상 가공 및 형상제어로 진행하였다. 그 이후에 실제로 직경 440μm 인 광섬유 끝단에 진행한 실험 결과를 바탕으로 CO_2 레이저로 직접 음각 원뿔형 구조물을 제작하여 전방과 측면으로 동시에 방사가 가능한 광섬유 팁을 만들었다. 그 결과를 다방향 조사 광섬유를 만드는 다른 방법인 레이저 충격 방식(Laser percussion)으로 제작한 결과와 비교하여 정밀한 가공 및 형상제어가 가능함을 보고자 한다.

2. CO_2 레이저를 이용한 음각 원뿔 구조 가공실험

2.1 CO_2 레이저 가공 시스템

본 연구를 위해서 코어/ 클래드 직경 400/440μm 인 광섬유와 가로 20mm, 세로 10mm, 두께 10mm인 실리카 기판에 CO_2 레이저를 사용하여 가공을 진행하였다. 가공에 사용된 CO_2 레이저는 Coherent사의 Diamond C–55L 모델로 10.6μm의 중심파장과 55W의 최대 출력을 가진다. Table 1에 CO_2 레이저의 사양을 자세하게 나타내었다. Fig. 1은 CO_2 레이저 가공 시스템의 개략도이다. CO_2 레이저 가공 시스템은 레이저와 반사거울, 셔터, 빔 확장기, 빔 감쇠기, CCD, 대물렌즈, X, Y, Z의 3축 스테이지로 구성되어 있다. CO_2 레이저 시스템의 X, Y 스테이지의 최대 가공 범위 300 x 300mm이며, 1μm의 정밀도를 가진다. 또한 Z 축 스테이지의 최대 이동 범위는 150mm이며 1μm의 정밀도를 가진다.

2.2 정밀 원뿔구조 가공 최적화 실험

기존에는 음각 원뿔 구조를 가공하기 위해서 펨토초 레이저를 이용하여 음각 원뿔형상을 가공하고 그 후에 CO_2 레이저를 이용하여 거친 표면을 연마하는 방법을 이용하여 원하는 형상을 만들었다. 이 가공 방법은 선가공과 후가공시 가공 실패 요인이 많고 형상을 가공하는데 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이러한 실패 요인을 줄이고 형상을 보다 쉽게 가공하기 위하여 레이저 충격 방식과 헬리카 가공 방식을 적용할 수 있는데, 본 연구에서는 정밀 음각 원뿔구조의 가공 최적화 실험을 위해서 저출력에서 반복 가공으로 정밀한 형상을 만드는데 용이한 헬리카 가공을 실리카 기판에 적용하였고 레이저 충격 방식의 제작하는 방법과 비교하였다.

Table 1 CO_2 laser Specification

Model	Diamond C-55L
Wavelength	10.63μm
Output max Power	55W
Power Stability (%)	±3%
Beam Size	1.8±0.2mm
Mode Quality	(M2)<1.2
Beam Divergence	(mrad, full angle) 7.5±0.5

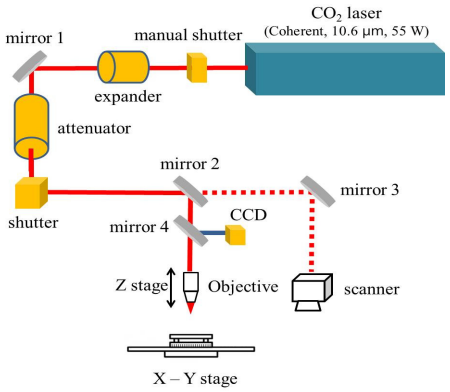


Fig. 1 Schematic diagram of CO_2 laser machining system.

이를 위해서 레이저 빔은 50mm의 초점거리를 가지는 Convex lens로 집광시켜 가공에 이용하였다. 레이저 빔의 직경은 약 50μm이며, 가우시안 모드(Gaussian Mode)의 빔 형상을 갖는다. 그리고 Fig. 3과 같이 실리카 기판 위에 직경 300μm, 20μm 간격의 헬리카 가공(Helical machining) 방법을 적용하였다. 이 가공 방법은 CO_2 레이저 빔을 헬리카의 가장자리부터 가공을 시작하며, 점차 중심으로 이동하면서 빔이 중첩되어 원뿔 형상이 가공되는 원리이다. 실험 방법은 0.5mm/s의 가공 속도는 고정하고 CO_2 레이저의 출력을 각각 1.3W, 1.8W, 2.3W의 출력을 사용하여 가공되는 형상을 비교하였다. 또한 가공 반복수를 1회부터 10회까지 반복하여 가공되는 형상변화에 대한 실험을 진

행하였다.

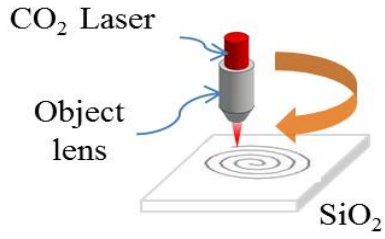


Fig. 2 Helical type of round-machining patterns.

2.3 가공형상 측정 및 분석

실험의 결과는 Fig. 3 - Fig. 5에서 확인할 수 있다. 먼저, Fig. 3(a)는 0.5mm/s의 가공 속도는 고정하고 1.3W 출력의 CO_2 레이저 빔을 가공 반복수가 각각 1회, 5회, 10회에 대한 가공 결과 이미지이다. 100배율의 광학현미경을 이용하여 측면에서 측정하였다. 1회 가공한 Fig. 3(a)의 가공 폭은 329μm 였으며 깊이는 114μm로 측정되었다. 또한 동일 조건으로 5회 반복 가공한 Fig. 3(a)의 가공 폭과 깊이는 각각 347μm, 156μm로 측정되었다. 10회 반복 가공한 Fig. 3(a)의 가공된 폭은 362μm이며 가공 깊이는 168μm로 반복수에 따라 점차적으로 깊게 가공된 것을 확인하였다.

두 번째로 Fig. 3(b)는 0.5mm/s의 가공 속도는 고정하고 1.8W의 CO_2 레이저 출력으로 1회, 5회, 10회 반복 가공하여 측면에서 100배율로 측정한 광학 현미경 이미지이다. 1회 가공한 Fig. 3(b)의 가공 폭은 340μm, 가공 깊이는 278μm이며, 5회 가공한 Fig. 3(b)의 가공 폭과 깊이는 각각 367μm, 312μm로 측정되었고, 10회 가공한 Fig. 3(b)의 가공 폭과 깊이는 각각 373μm, 373μm로 측정되었다.

마지막으로 Fig. 3(c)는 0.5mm/s의 가공 속도는 고정하고 2.3W의 출력으로 1회, 5회, 10회 반복 가공된 실리카 기판의 측면에서 100배율로 측정한 광학현미경 이미지이다. 출력이 2.3W의 레이저 빔으로 1회 가공하였을 때의 가공 폭은 348μm, 가공 깊이는 377μm이며(Fig. 3(c)) 동일한 출력으로 5회 반복 가공한 폭과 깊이는 각각 385μm, 467μm 였다(Fig. 3(c)). 10회 반복 가공한 형상의 폭과 깊이는 각각 400μm, 522μm로(Fig. 3(c)) 본 실험에서 측정된 사이즈 중 가장 넓고 깊은 형상으로 가공되었다. CO_2 레이저의 출력이 높아짐에 따라 가공 깊이가 깊어지며 가공 반복수에 따라 깊이 제어가 가능한 것을 확인하였다.

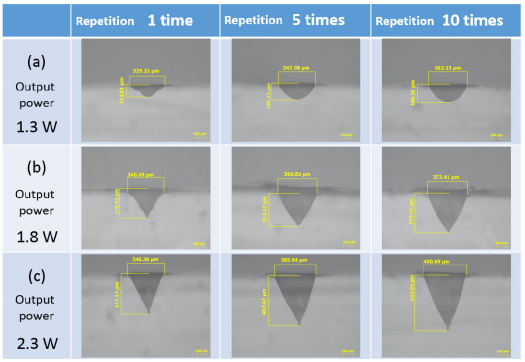


Fig. 3 Optical microscope image at output power and repetition.

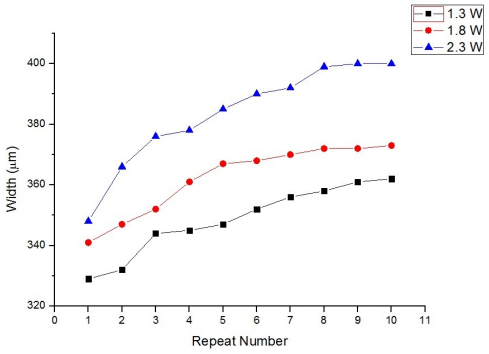


Fig. 4 Graph of ablated width versus number of repetition.

이러한 실험을 토대로 0.5mm/s의 가공 속도는 고정하고 1.3W, 1.8W, 2.3W의 출력에 따라 1회부터 10회까지 반복 가공하여 가공된 폭과 깊이를 측정한 결과를 Fig. 4과 Fig. 5의 그래프로 나타내었다. Fig. 4는 1.3W, 1.8W, 2.3W 각각 세 가지 출력으로 CO_2 레이저 가공 반복수에 따라 가공되는 폭의 변화를 나타내는 그래프이다. 음각 원뿔의 폭은 출력이 0.5W씩 높아짐에 따라 가공 폭도 약 10μm 씩 넓어졌으며 가공 반복수가 많아짐에 따라 약 5μm 정도씩 미세하게 가공 폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 1.3W, 1.8W, 2.3W 각각 세 가지 출력으로 CO_2 레이저가공 반복수에 따라 가공되는 깊이 변화를 나타내는 그래프이다. 음각 원뿔의 깊이는 출력이 0.5W 씩 높아짐에 따라 약 100μm 정도씩 깊게 가공되었으며 가공 반복수에 따라 미세하게 조절이 가능하였다. 그리고 Fig. 4와 5를 비교하였을 때 레이저 출력 조절과 반복수에 따라 가공 폭의 변화보다 가공 깊이의 변

화가 더 큰 것을 알 수 있다.

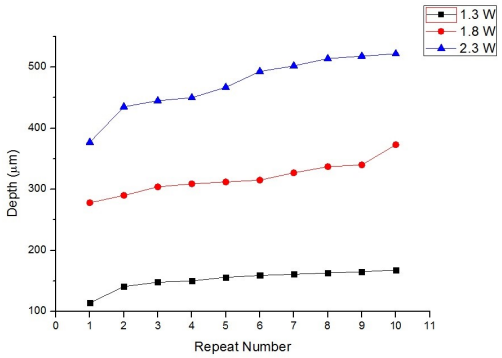


Fig. 5 Graph of ablated depth versus number of repetition.

3. CO_2 레이저를 이용한 광섬유 팁 가공

CO_2 레이저로 제작하고자 하는 다방향 조사 광섬유 팁은 광섬유 끝단에 제작된 원뿔형 구조물은 입사된 빔이 광섬유 끝단으로 이동하고 음각 원뿔형 구조물의 표면에서 전반사 되어 일부의 빔이 측면으로 방사가 가능한 광섬유 팁이다.

이러한 다방향 조사 광섬유 팁을 제작하기 위해서 앞에서 언급한 것처럼 기존에는 Fig. 6(a)와 같이 펨토초 레이저로 형상을 가공한 후 형상에 있는 거칠기를 CO_2 레이저를 이용하여 연마하는 방법을 사용하였다. 그러나 제작 효율성을 향상시키기 위해서 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)처럼 CO_2 레이저만을 이용하여 음각 원뿔 구조 가공 방법을 다방향 조사 광섬유 팁 제작에 적용하였다. 이를 위해서 먼저 다방향 조사 광섬유 팁 제작에 위의 기초 실험에서 적용하였던 헬리카 가공 방법을 이용하였다. 그리고 또한 CO_2 레이저로 가공 접근성이 용이한 레이저 충격(laser percussion) 방법을 적용하였는데, 이 방법은 헬리카 가공 방법과는 다르게 레이저 빔을 포커싱하거나 디포커싱하여 가공 원점에서 레이저 펄스를 일정 시간 여러 번 중첩하여 가공하는 방법으로, 원하는 형상 가공을 위해서는 헬리카 가공 방법에 비해 상대적으로 고출력의 레이저 빔이 필요하다. 이 두 가지 방법의 단일 레이저 가공 공정으로 광섬유 팁을 제작하여 만들어진 광섬유 팁의 형상과 빔 방사 특성을 비교하였다.

먼저, 레이저 충격 방식으로 음각 원뿔 구조를 직경 440μm의 광섬유에 가공하기 위하여, 광섬유를 CO_2 레이저 시스템의 스테이지에 고정하고,

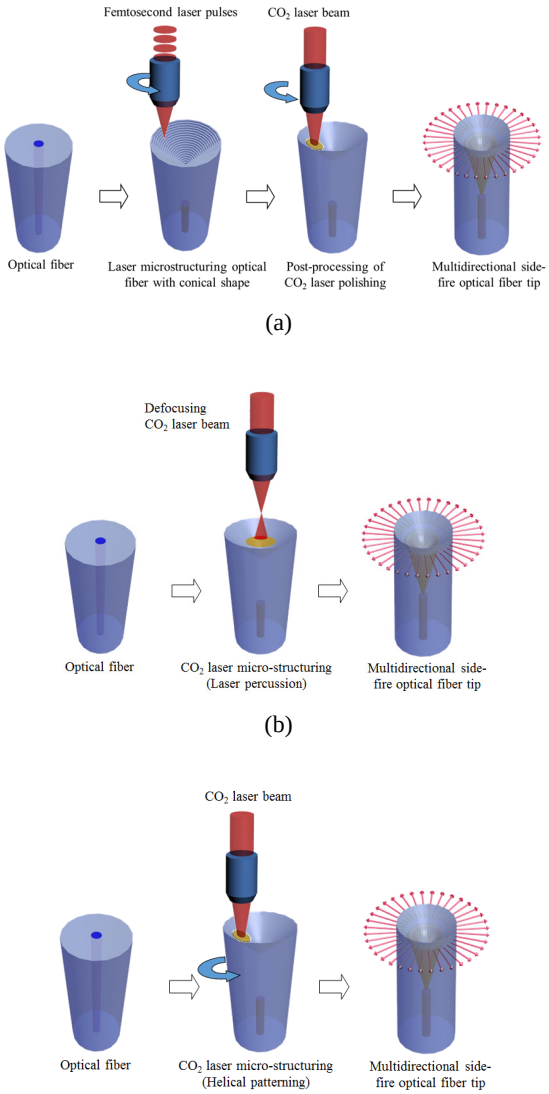
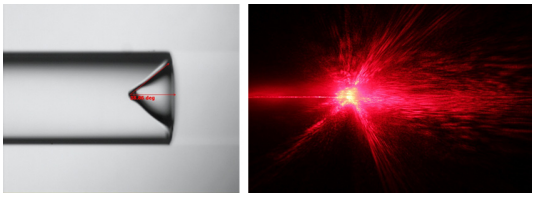


Fig. 6 Schematic of laser structuring cone shape using (a) femtosecond laser machining and CO_2 laser polishing method (conventional method), (b) CO_2 laser micro-structuring by using laser percussion, (c) CO_2 laser micro-structuring by using helical patterning.

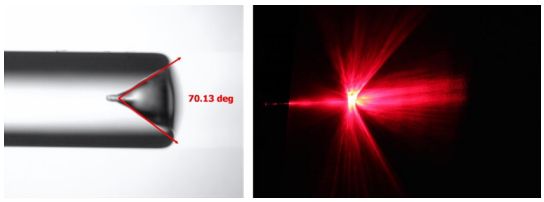
기초 실험에 사용했던 f=50mm의 Convex lens로 레이저 빔을 집광시켜 가공하였다. 빔의 중심을 광섬유의 중심이 가공 원점이 되도록 맞추고 레이저를 디포커싱하여 레이저의 출력과 노출 시간을 조절하여 조사하고 형상을 조절하는 실험을 하였다. 출력은 36.3W의 고출력에서 0.02, 0.03sec 사이의 매우 짧은 노출 시간과 광섬유 표면에서 1.5mm의 거리로 디포커싱하여 가공하였다. 가공된 결과는 Fig. 7(a)와 같이 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)의 왼쪽 사진은 100배율의 광학현미경

을 이용하여 측정하였고, 볼 수 있듯이 원뿔의 중심각은 약 76도로 동일 조건으로 반복적으로 가공할 경우 ±3도 정도의 오차로 가공됨을 확인할 수 있었다. 그러나 원뿔의 중심각을 다양하게 조절하는 것과 같은 정밀한 형상 가공은 아주 어려웠다. 그리고 Fig. 7(a)의 오른쪽 그림과 같이 633nm 파장의 He-Ne 레이저를 사용하여 빔 방사를 하여 디지털 카메라(Canon-550D)로 측정한 결과를 보면 빔의 산란이 많고 빔의 방향성이 뚜렷하지 않음을 확인할 수 있다. 빔의 열영향으로 인하여 원뿔의 표면이 불규칙적으로 형성되어 효율이 높은 소자를 만들기 어려움을 확인하였다. 그래서 정밀한 형상 재현성을 위해서는 보다 레이저 빔의 열영향을 줄이는 방법으로 접근하여야 된다는 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 7 Optical microscope side image and He-Ne emission image of CO_2 laser micro-structured optical fiber tips by (a) the laser percussion, (b) the helical machining.

그 다음으로 앞에서 접근하였던 저출력에서 헬리카 가공을 반복적으로 진행하였던 기초 실험 결과를 토대로 코어와 클래드의 직경이 각각 400μm, 440μm인 광섬유 끝단에 CO_2 레이저를 이용하여 Fig. 3과 같이 직경 360μm, 간격 20μm인 헬리카 패턴의 가공을 가장자리부터 시작하여 다방향 조사 광섬유 팁을 제작 하였다. Fig. 7(b)의 왼쪽 사진은 100배율의 대물렌즈와 광학현미경으로 측정된 가공된 광섬유 팁의 측면 사진이다. 원뿔의 중심각은 가공 속도와 출력, 반복 횟수에 따라 원하는 각도로 다양하고 일정하게 제어가 가능하였고, 동일 조건으로 가공 시 ±1도의 오차가 있음을 확인하였다. 또한 He-Ne 레이저를 입사시켜 디지털 카메라(Canon-550D)로 측면에서 측정한 결과를 Fig. 7(b)의 오른쪽 그림에서 볼 수 있다. 그림처럼 방사되는 빔의 산란이 적고 전방과 측면으로 뚜렷하게 나뉘어져서 퍼지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 가공된 광섬유 팁의 원뿔 표면이 일정하게 형성되기 때문이다. 이를 통해 저출력의 헬리카 가공 방법이 레이저 충격 방식에 비해 다양하고 정밀한 형상 가공이 가능하며 광효율이 높은 소자를 제작하는데 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 CO_2 레이저를 이용하여 광섬유 팁에 정밀한 음각 원뿔 구조을 가공하기 위해 기초 실험을 진행하여 그 결과를 바탕으로 실제로 광섬유 팁에 적용하여 다방향 조사 광섬유 팁을 제작하였다.

빔의 열영향이 적은 저출력에서 헬리카 가공 방법으로 실리카 기판에 기초 실험한 결과, 2W 이하의 저출력에서 반복 횟수를 조절하여 가공하였을 때, 음각 원뿔 구조의 깊이와 폭 그리고 중심각까지 제어가 가능하여 원하는 형상에 대한 최적화가 가능함을 확인하였다.

또한 응용 실험으로 선행 연구에서 제작하였던 펨토초와 CO_2 레이저를 이용하여 제작한 다방향 조사 광섬유 팁을 본 연구에서는 CO_2 레이저만을 이용하여 가공하였다. 가장 접근이 용이한 CO_2 레이저 충격 방법을 적용하여 광섬유의 중심에 빔을 디포커싱하여 레이저를 짧은 순간에 높은 출력으로 반복 조사하여 제작한 광섬유 팁의 가공 결과와 본 연구에서 진행한 저출력에서 중앙으로 갈수록 빔을 중첩시키는 헬리카 가공 방식을 적용하여 제작한 광섬유 팁의 가공결과와 빔방사 분포를 비교하였다. 레이저 충격 방식에 비해 헬리카 가공으로 반복 가공하였을 때 기초 실험 결과와 같이 다양하게 형상 제어가 가능하며 가공 오차가 적고 표면이 일정하게 재현성 있게 음각 원뿔 구조를 광섬유 팁에 가공 가능함을 확인하였다. 또한 빔의 방사를 측정한 결과 또한 헬리카 가공방식을 적용한 다방향 조사 광섬유 팁이 뚜렷한 방향성과

적은 산란성을 보여 고효율 소자로 사용이 가능함을 확인하였다. 이러한 CO_2 레이저 미세 가공 기술을 이용하면 고효율 마이크로 소자의 정밀 가공에 유용하게 적용될 것이라 기대된다.

후 기

본 연구는 2015년도 광주과학기술원의 재원인 아시안레이저센터의 지원을 받아 수행된 연구이며, 부분적으로 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신 방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [R014-15-1003, 펨토융합 기반 구축]

References

1) Kyung Ku Yoon, Sung Kuk Lee, Jae Gu Kim, Bo Sung Shin, Doo Sun Choi, Kyung Hyun Whang and Jin Yong Park, “Laser Beam Application and Technology in Micro Machining”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 7, 2000.
2) I. B. Sohn, M. S. Lee, J. S. Woo, S. M. Lee, J. Y. Chung, “Periodic patterning using a femtosecond laser, Korean society Laser Processing,” Vol. 8, No. 1, pp. 39-44, 2005.
3) W. S. Choi, J. W. Yoon, S. H. Cho, M. C. Kang, “Development of Vibration Assisted Hybrid Femtosecond Laser Ultra-precision Machining System and Cu-Zn alloy Application,” Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 20, No. 4, pp. 308-312, 2013.
4) D. C. Ko. C. J. Lee. B. M. Kim, “Production of CO_2 Laser Forming Machine for Bending of Sheet Metal Using the FE-Analysis,” The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 15, No. 4, pp. 319-325, 2006.
5) J. H. Lee, H. K. Sohn, “Ultrafast laser micro-machining Technology,” Journal of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 7-12, 2010.
6) M. R. Oh, C. AN, “The Recrystallization of Polysilicon in SOI by CO_2 Laser Annealing,” Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 24, No. 6, pp. 975-979, 1986.
7) Heramanns, CH., “Laser Cutting of Glass,” Proc. Of SPIE, 4102, 219(2000).
8) D. Jung, I. B. Sohn, Y. C. Noh, J. H. Kim, C. H. Kim, H. Lee, “Laser Microfabrication of Multidirectional Side-fire Optical Fiber Tip,” Journal of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 10, pp. 1017-1022, 2013.
9) I. B. Sohn, H. Lee, D. Jung, Y. C. Noh, and C. H. Kim, “Fabrication of a bi-directional firing multimode fiber using a high repetition rate femtosecond laser and a CO_2 laser,” Laser Phys. Lett. Vol. 10, 106101 (6pp), 2013.