

# 전방과 측면 방사 조절이 가능한 의료용 광섬유 팁 가공 기술

## Laser Microfabrication of Multidirectional Side-fire Optical Fiber Tip

정덕<sup>1,2</sup>, 손익부<sup>1,✉</sup>, 노영철<sup>1</sup>, 김진혁<sup>2</sup>, 김창환<sup>3</sup>, 이호<sup>3</sup>  
Deok Jung<sup>1,2</sup>, Ik-Bu Sohn<sup>1,✉</sup>, Young-Chul Noh<sup>1</sup>, Jin-Hyeok Kim<sup>2</sup>, Changhwan Kim<sup>3</sup>, and Ho Lee<sup>3</sup>

1 광주과학기술원 고등광기술연구소 (Advanced Photonics Research Institute, GIST)

2 전남대학교 광공학협동과정 (Interdisciplinary Program for Photonic Engineering, Chonnam Univ.)

3 경북대학교 기계공학과 (Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.)

✉ Corresponding author: ibson@gist.ac.kr, Tel: +82-62-715-3337

Manuscript received: 2013.7.25 / Revised: 2013. 8. 19 / Accepted: 2013.9.9

*Currently, various optical fiber tips are used to deliver laser beam for endoscopic surgery. In this paper, we demonstrated multidirectional (forward and side) firing optical fiber tip using a femtosecond micromachining and CO<sub>2</sub> laser polishing technology. We controlled the edge width of optical fiber tip, by modulating the condition of CO<sub>2</sub> laser, to regulate the amount of side and forward emission. The distal end of the optical fiber with core/clad diameter of 400/ 440 μm was microstructured with cone shape by using a femtosecond laser. And then the microstructured optical fiber tip was polished by CO<sub>2</sub> laser beam result in smoothing and specular reflection at the surface of the cone structure. Finally, we operated the LightTools simulation and good agreement was generally found between the proposed model and experimental simulation.*

Key Words: Laser material processing (레이저 가공), Femtosecond laser (펨토초 레이저), CO<sub>2</sub> laser (CO<sub>2</sub> 레이저), Optical fiber tip (광섬유 팁), Multidirectional side-fire (다방향 방사)

### 1. 서론

현대 임상의학에서 레이저를 이용한 의료장비는 진단뿐만 아니라 수술적 치료에서도 광범위하게 이용되고 있다. 일반적인 수술 시 출혈로 인해 시야 확보가 어렵지만 레이저를 이용하면 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 비접촉식 수술로서 2차 감염의 문제가 없으며, 악성 종양 절제 시 조직이 기화되므로 악성 세포의 전이를 막을 수 있고 수술 시간이 단축되며 봉합이 필요 없어 수술 시간과 경제적 손실을 줄일 수 있다는 장점 등이 있다.<sup>1-3</sup>

현재 의료용 레이저 시장의 대부분은 미용적 성형, 라식수술 등 외부로 노출되어있는 신체 부

분만을 대상으로 하는 시술에 집중되어 있으며, 이는 레이저가 조직 내부로의 침투 깊이가 제한되기 때문이다. 이를 극복하고 다양한 의료분야에 레이저 치료를 확대하기 위해서는 광섬유 기반의 우수한 레이저 전달 시스템의 개발이 요구되며, 그에 따라서 다양한 시술에 응용이 가능한 광섬유 팁 제작 기술 개발이 필요하다.

최근에는 레이저 빔을 조사시키는 다양한 종류의 광섬유 팁 중에서 측면 조사 광섬유 팁(Side-fire optical fiber tip)에 관한 많은 관심이 집중되고 있다. 기존의 측면 방사가 가능한 광섬유 팁은 Metal reflector를 광섬유 앞 단에 접합하거나, 광섬유 끝단을 40도 가량 비스듬히 연마한 후, 금속 코팅을 하여 광섬유로 전달된 빔이 경사진 연마면

(Polished surface)을 통해 전반사(Total reflection)되어 빔의 방향을 바꾸는(Redirecting) 광섬유 팁 등이 개발되었다.<sup>4</sup> 그러나 Metal reflector를 광섬유 앞 단에 접합한 측면 방사 광섬유 팁은 가공 공정이 복잡하고 고가이며, Reflector에 의해 부피가 커지는 문제점이 있다. 또한 이렇게 제작된 광섬유 팁은 방사 반경이 좁고 특정 방향으로만 방사되며, 방사되는 형태를 제어하기 어렵다는 단점으로 인해 신체 내부의 암 조직 절제나 전립선 비대증 치료와 같은 전방과 측면 기술을 할 경우 방사 형태와 공간적 제약으로 인한 문제점이 발생 되고 있다.<sup>4,6</sup>

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 펄스 레이저와 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 의료용 광섬유 끝 단면을 원뿔형으로 가공하였다. 광섬유에 빔을 입사했을 때 빔이 전반사되어 다방향 조사가 가능하며 Edge 면 조절을 통하여 전방과 측면의 방사 비율조절이 가능한 광섬유 팁을 제작하고, 수치해석 결과를 비교하였다.

**2. 실험 및 결과**

다방향 조사 광섬유 팁 제작방법은 크게 두 가지 공정과정을 통하여 제작하였다. 먼저 펄스 레이저를 이용하여 광섬유 끝단에 원뿔형 구조를 제작하고, 가공 시 생기게 되는 원뿔 표면의 거칠기를 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용해 표면을 연마하여 빛의 손실을 최소화하였다. 이렇게 가공된 광섬유 팁을 CO<sub>2</sub> 레이저 가공을 통하여 광섬유 끝단의 폭을 조절하여 사용자가 원하는 형태의 빔이 방사되는 광섬유 팁을 제작하였다.

Fig. 1은 레이저를 이용한 다방향 조사 광섬유 팁의 가공 개념도이다. 본 실험에서는 코어(Core)와 클래드(Clad)의 직경이 각각 400 μm와 440 μm인 의료용 광섬유를 사용하였다(Fig. 1(a)). 펄스 레이저를 이용하여 직경 380 μm의 원 가공을 시작으로 매회 가공을 할 때마다 직경을 일정 간격씩 줄여가며 원 가공을 한다(Fig. 1(b), (c)). Z축은 매회 가공할 때마다 일정한 간격으로 내리면서 가공하여 원뿔형 구조를 제작하였다. 이렇게 제작된 원뿔의 표면은 거칠기가 생기는데 이는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 Fig. 1(d)와 같이 연마하였다. 이처럼 펄스 레이저 가공과 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 기술을 이용하여 전방방사(Forward emission)와 측면방사(Side emission) 조절이 가능한 다방향 조사 광섬유 팁을 제작하였다(Fig. 1(e)). 광섬유 끝단에 원뿔형 구조

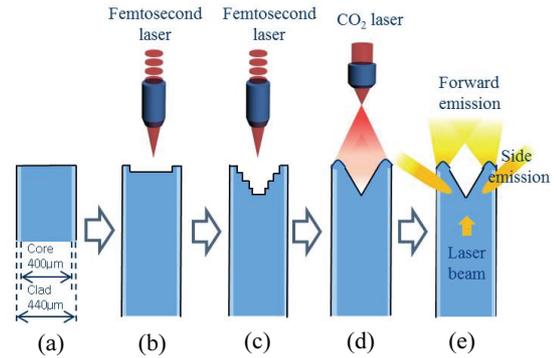


Fig. 1 Schematic diagram of multidirectional side-fire optical fiber tip

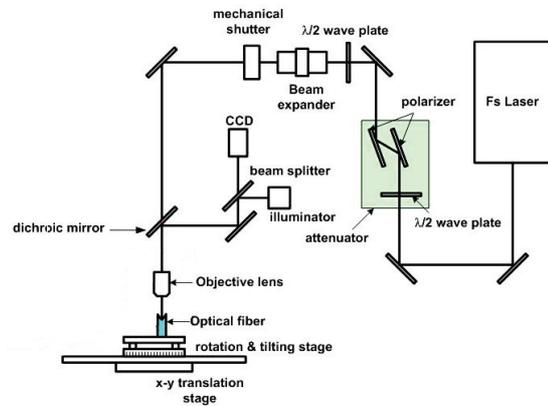


Fig. 2 Schematic diagram of femtosecond laser micro-machining system

물을 제작하여 연마한 이유는 입사된 빔이 제작된 원뿔형 구조물에 의해 전반사되어 진행방향을 바꾸고 가공 면의 거칠기에 의한 빔 손실을 줄이기 위해서이다.

다방향 조사가 가능한 원뿔형 구조를 가지는 광섬유 가공을 위하여 광주과학기술훈 고등광기술 연구소에서 보유하고 있는 펄스 레이저 가공 시스템(Cyber Laser, IFRIT)을 사용하였다. 이 펄스 레이저시스템의 사양은 785 nm의 중심파장, 185 fs의 펄스 폭과 1 kHz의 반복률을 가지며, 최대 출력은 1 W이다. 레이저 가공시스템에서 X, Y 축 선형 모터 스테이지는 300 mm × 300 mm의 가공범위, 20 nm의 정밀도, 20 mm/s의 최대 속도를 가지며, Z축 Ballscrew 스테이지는 200 mm의 범위, 0.5 μm의 정밀도, 20 mm/s의 최대 속도를 가지고 각각 독립적으로 구동된다. Fig. 2는 펄스 레이저의 전체적인

시스템 개략도이다. 광섬유 가공을 위해 사용된 펨토초 레이저의 펄스 에너지는 3.6  $\mu\text{J}$ 로 20배율을 가지는 Objective lens (NA = 0.4)를 사용하여 레이저 빔을 샘플에 집속하고, X-Y-Z stage를 구동하여 70도의 꼭지각을 갖는 원뿔을 제작하였다. 70도의 꼭지각을 갖는 원뿔을 제작한 이유는 파장이 633 nm 이고 광섬유의 코어와 클래드의 굴절률은 1.457과 1.44 일 때, 원뿔형으로 가공된 표면에서 전반사가 일어나는 임계각은 스넬의 법칙(Snell's Law)에 의해서 계산된 42.5도이고, 원뿔의 한 모선과 다른 한 모선이 가장 큰 각을 만드는 꼭지각은 그 두 배인 85도로 계산되었다. 그래서 우리는 전반사가 되기 위해서 원뿔의 모선과 모선이 이루는 꼭지각을 85도보다 작은 70도로 가공하였고 가공되는 경사면의 각은 레이저 가공 프로그램을 통해서 자유롭게 조절이 가능하다.<sup>7,8</sup>

이렇게 제작된 원뿔형 광섬유 팁은 이산적인 가공법에 의해 원뿔 내부의 벽면이 3~10  $\mu\text{m}$ 의 거칠기(Roughness)를 가진다. 펨토초 레이저 가공 시 발생한 표면의 거칠기 때문에 광섬유로 전달된 빔이 산란(Scattering) 되어 반사도가 감소하고 측면으로 방사되는 빔의 손실 원인이 된다. 따라서 원뿔형 구조의 광섬유 표면에 대한 연마가 필요하며, 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 광섬유 끝단의 표면을 연마하는 동시에 광섬유 Edge 면의 폭을 CO<sub>2</sub> 레이저의 가공 조건에 의해 조절하는 실험을 진행하였다. Edge 폭을 조절하는 이유는 입사된 빔이 광섬유를 따라 끝단으로 이동하고 그 빔들의 일부는 원뿔형 구조물의 측면에 의해 전반사되어 측면 방사가 되고, 원뿔형 구조물에서 전반사되지 못한 일부의 빔은 그대로 광섬유 끝단의 Edge 면에서 전방 방사가 된다. 이때 Edge 폭이 넓어짐에 따라 전방 방사량이 늘어나게 되고 나머지 빔의 양은 줄어들어 비율 조절이 가능하게 된다.

광섬유 연마에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저(Universal, ULR- 30)의 중심파장은 10.6  $\mu\text{m}$ , 최대출력은 30 W를 가진다. Fig. 3은 CO<sub>2</sub> 레이저 연마시스템의 전체적인 개략도이다. 이 시스템의 X, Y축 스테이지는 300 × 300 mm의 가공 범위, 10  $\mu\text{m}$ 의 정밀도, 100 mm/s의 최대속도를 가진다(Table 1). Z축 Ballscrew 스테이지는 50 mm의 이동 범위를 가지며 X, Y축 스테이지와 독립적으로 구동 된다. 펨토초 레이저에 의해 가공된 원뿔 구조의 광섬유 표면 연마와 Edge 제어를 위하여 7.8 W의 파워를 사용하였으며,

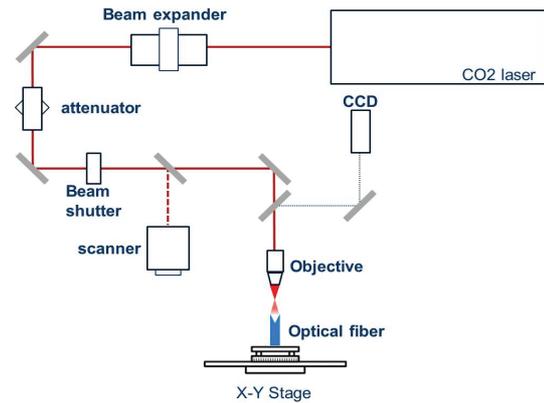


Fig. 3 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> laser polishing system

Table 1 Specification of femtosecond laser and CO<sub>2</sub> laser

|                | Femtosecond laser | CO <sub>2</sub> laser |
|----------------|-------------------|-----------------------|
| Wavelength     | 785.5 nm          | 10.6 $\mu\text{m}$    |
| Pulse width    | 185 fs            | CW                    |
| Max power      | 1 W(1 mJ@1 kHz)   | 30 W                  |
| M <sup>2</sup> | < 2.0             | 1.3 ± 0.2             |

Convex lens(f = 50 mm)를 통하여 집광하였다. 집광된 CO<sub>2</sub> 레이저 빔의 초점 크기는 약 50  $\mu\text{m}$  정도이며 직경440  $\mu\text{m}$ 의 광섬유를 연마하기 위하여 Z축을 5 mm 정도 상승시켜 Defocusing 된 빔을 이용하여 가공하였다. 이렇게 연마된 광섬유 팁의 Edge 조절 방법은 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용하여 원뿔형 구조물 연마 시 반복 수와 레이저 노출 시간을 조절하는 방법을 사용하였다.

Fig. 4는 연마 후의 원뿔형 광섬유 팁에 대한 100배율의 현미경 측정 이미지이다. 같은 광섬유의 직경과 원뿔 크기의 샘플에 CO<sub>2</sub> 레이저의 가공 조건을 조절하여 제작하였다.

Fig. 4(a)는 Z축을 5 mm 정도 상승시켜 0.03초 동안 4회 조사하였고, Fig. 4(b)는 0.05초 동안 6회 조사하였다. 레이저 빔의 노출 시간이 길고 반복 가공이 많아질수록 Edge가 녹아 폭이 넓어지는 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

Fig. 5는 광섬유 팁의 Edge 폭을 비교하기 위하여 백색 LED 광원을 입사시켜 끝 단면을 측정한 200 배율의 현미경 이미지이다. Edge 폭을 각각 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ 로 제작된 샘플들을 현미경으로 측정한 이미지에서 확인할 수 있듯이 Edge의 폭이 넓어짐에 따라 백색광의 방사되는 면적 또한 넓어지는 것을 확인할 수 있다.

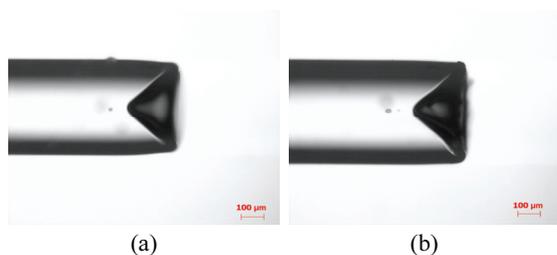


Fig. 4 Optical microscope side image of multidirectional side-fire optical fiber tip. Edge width is (a) 40 μm and (b) 60 μm

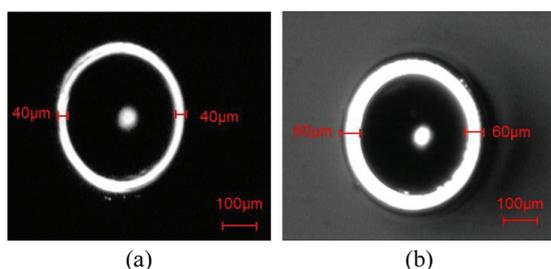


Fig. 5 Optical microscope forward image of multidirectional side-fire optical fiber tip. Edge width is (a) 40 μm and (b) 60 μm

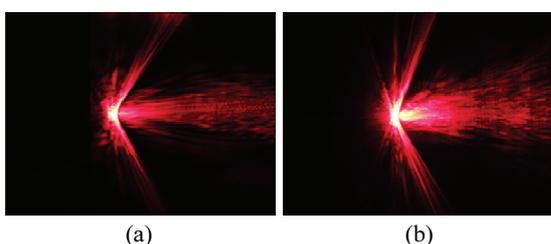


Fig. 6 Emission image of multidirectional side-fire optical fiber tip. Edge width is (a) 40 μm and (b) 60 μm

이처럼 펄초 레이저와 CO<sub>2</sub> 레이저 가공 기술을 이용하여 다방향 조사가 가능한 광섬유 팁을 제작하고 CO<sub>2</sub> 레이저 연마 조건에 의해 Edge 폭을 조절하였다. Fig. 6은 이렇게 제작된 다방향 조사 광섬유 팁의 방사 분포를 측정된 디지털카메라 이미지이다. Edge 폭이 40 μm인 Fig. 6(a)와 60 μm인 Fig. 6(b)에 632.8 nm 파장을 가지는 He-Ne laser를 입사시켜 측면에 스크린을 설치하여 측정하였다. 광섬유 끝단의 Edge 폭이 40 μm인 Fig. 6(a)보다 Edge 폭이 60 μm인 Fig. 6(b)에서 전방으로 빛이 더

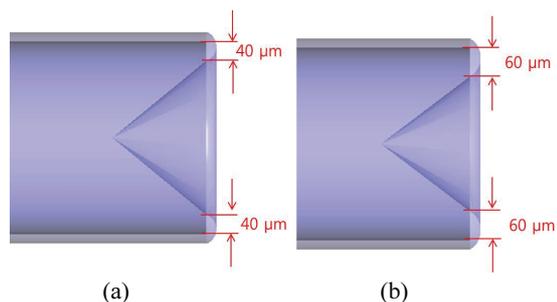


Fig. 7 Modeling image of multidirectional side-fire optical fiber tip using LightTools simulation program. Edge width is (a) 40 μm and (b) 60 μm

강하게 방사되는 것을 확인할 수 있다. 이때 방사되는 전방과 측면 방사량은 10 nW의 분해능을 갖는 Powermeter (Thorlabs, s121c)를 이용하여 측정하였다. 전방과 측면의 전체 방사량 측정방법은 조리개의 크기를 최대로 개방하여(조리개 직경: 12 mm) 광섬유 팁에서 방사되는 모든 빛을 측정하였으며 전체 방사량은 2.7 mW이고, 조리개를 800 μm의 직경으로 조절하여 측면 방사 빛을 완전히 차단 후 측정된 전방 방사량은 각각 1.12 mW와 1.23 mW이다. 이를 토대로 계산된 측면 방사량은 각각 1.58 mW와 1.47 mW이며, 조리개의 직경을 800 μm로 조절한 이유는 전방과 측면 방사 빛 사이에 Gap이 존재하기 때문에 이를 경계로 조리개의 직경을 800 μm로 조절하게 되면 전방 방사 빛만 방사되어 측정이 가능하기 때문이다.

이렇게 제작된 다방향 조사 광섬유 팁에 대해 Modern HighTech 사의 광학 설계 프로그램인 LightTools 7.2를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. LightTools 프로그램은 Ray casting에 기반을 두어 컴퓨터 그래픽의 영상화 기법 중 하나이다. 빛의 사실적인 표현이 어려웠던 점을 해결하기 위해 광원에서 나온 빛이 표면에 반사 또는 굴절되는 경로를 광자의 움직임 운동 크기와 방향을 백터화시켜 수학적으로 예측할 수 있는 기법을 사용하고 있다.<sup>9</sup>

Fig. 7은 앞선 실험에서 수행한 광섬유 끝단에 원뿔형 구조물을 설계하고 Edge의 폭을 (a) 40 μm, (b) 60 μm로 차이를 두어 설계한 다방향 조사 광섬유 팁을 Modeling 하였다. 제작된 광섬유의 사이즈는 실제 실험과 동일한 Core와 Clad 각각 400 μm, 440 μm이며 굴절률 또한 1.457과 1.44를 적용하였다. 이렇게 설계된 광섬유의 끝단에 70도의 꼭지

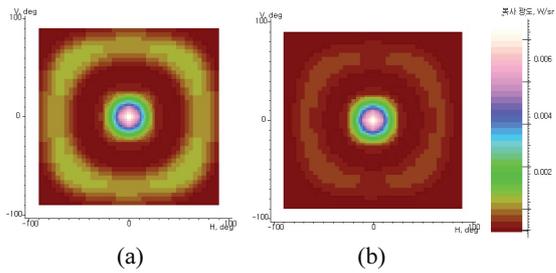
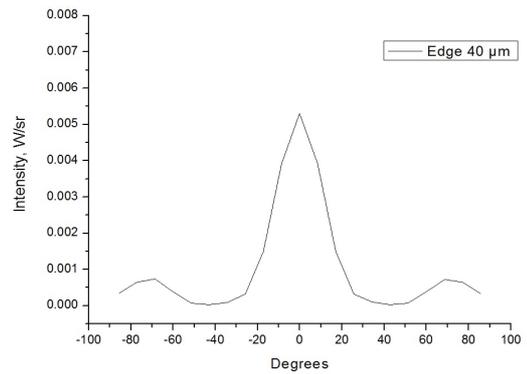


Fig. 8 Raster graphic intensity profile of multidirectional side-fire optical fiber tip using LightTools simulation program. Edge width is (a) 40  $\mu\text{m}$  and (b) 60  $\mu\text{m}$

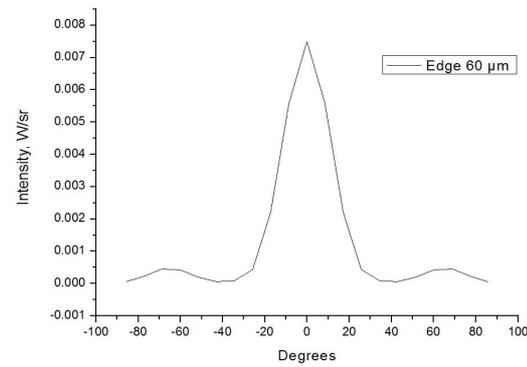
각을 갖는 원뿔 구조물을 Modeling 하였다. 광섬유의 외부는 공기의 굴절률 1을 대입하여 시뮬레이션을 진행한 결과, 입사된 빔은 광섬유 내부의 원뿔형 구조물과 Edge의 폭에 따라 전방과 측면의 방사량이 조절되는 것을 광선을 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 방사된 광선을 Receiver를 통해 얻은 광도를 Raster 도표로 나타낸 것이다. LightTools 7.2는 시뮬레이션에 있어서 추적광선의 개수를 설정하는데, 본 실험에서는 1,000,000개의 광선을 방사시켰으며 실제 실험과 같은 조건을 만들기 위하여 광섬유 끝단으로부터 5 cm 앞에서 평면 Receiver를 이용한 시뮬레이션 값이다. 이미지에서 보는 바와 같이 Edge 사이즈에 따라 전방과 측면의 방사량 차이가 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 광도를 평면그래프로 나타낸 결과이다. 시뮬레이션 시 적용된 광원은 실제 실험에서 광섬유에 빔을 입사시키기 바로 직전의 파워 3.47 mW를 설정하여 실험과 시뮬레이션의 조건을 동일하게 설정하였다. 0도를 기준으로 측면방사 빔은 약  $\pm 65^\circ$  가량 퍼져 방사되었으며 전방방사 빔은 약 0도에서  $\pm 40^\circ$  영역으로 방사되었다. Edge가 40  $\mu\text{m}$ 인 Fig. 9(a)의 전체 방사량은 3.09 mW이고, 전방방사 빔과 측면 방사 빔의 경계인  $\pm 40^\circ$ 를 기준으로 0도부터  $\pm 40^\circ$  영역의 전방 방사량은 1.25 mW였다. Edge가 60  $\mu\text{m}$ 인 Fig. 9(b)에서의 전체 방사량은 3.03 mW, Fig. 9(a) 동일한 0도부터  $\pm 40^\circ$  영역의 전방 방사량은 1.76 mW로 Edge 폭에 따라 전방과 측면의 방사량에 차이가 있는 것을 그래프로 확인하였다. 이때 전방과 측면의 방사되는 영역을  $\pm 40^\circ$ 로 설정한 이유는 Fig. 9의 그래프에서 보면  $\pm 40^\circ$ 의 영역에서는 빔 방사량이 0에 가깝기 때문에



(a)



(b)

Fig. 9 Line graph intensity profile of multidirectional side-fire optical fiber tip using LightTools simulation program. Edge width is (a) 40  $\mu\text{m}$  and (b) 60  $\mu\text{m}$

$\pm 40^\circ$ 를 기준으로 설정하였고, 실제 실험에서도 전방과 측면방사의 경계 부분에서 방사량은 미비하였다. 측면 방사량 값을 전체 방사량에서 전방 방사량 값을 빼고 계산하였을 때, Edge 폭이 40  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ 인 샘플에서 각각 1.84 mW, 1.53 mW 이었으며, 전방 방사 빔과는 달리 Edge의 폭이 넓어질수록 측면 방사량은 감소하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 Edge 사이즈에 따라 전방과 측면의 방사 비율이 차이가 나는 이유는 Edge가 넓어짐에 따라 방사되는 코어의 면적이 넓어져 전방으로 나오는 빔이 늘어나게 되고 사이드로 방사되는 빔은 줄어들기 때문이다. 또한 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 약간의 차이를 보이는 이유는 실험 중 측정 오차나 손실, 샘플 연마 시 시뮬레이션과는 달리 약간의 굴곡이나 거칠기가 남아 결과 값의 차이가 있는 것 판단된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 전방과 측면 방사량 조절이 가능한 광섬유 팁을 제작하였다. 펄스 레이저를 사용하여 의료용 광섬유 끝단에 원뿔형 구조를 가공하고, 가공된 표면의 거칠기를 줄이기 위해서 CO<sub>2</sub> 레이저로 연마하였다. 또한 연마 조건을 조절하여 Edge의 폭을 제어하였다.

그 결과 직선으로만 방사되던 일반 광섬유 팁은 전방과 측면으로 각각 방사되었으며 Edge 폭 조절을 통해서 그 빔들의 방사량을 조절할 수 있었다. 앞선 실험 조건들을 적용하여 광학 설계 프로그램인 LightTools 7.2로 설계하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 전방과 측면 방사량이 조절된다는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 다방향으로 조사가 가능한 원뿔형 구조의 광섬유 팁은 구조가 간단하며 광섬유와 일체형이기 때문에 기존의 공정을 단순화, 소형화하여 경제적이면서 체계적으로 변화시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한 사용자가 원하는 빔의 방향과 형태를 자유롭게 조절이 가능하여 보다 편리하고 효율적인 기술이 가능할 것으로 생각되며, 이러한 다방향 조사 광섬유 팁은 하지 정맥류, 전립선 비대증, 국소 지방분해뿐만 아니라 유방암 치료 등 다방향 측면 레이저 기술이 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Lee, M. N., Lee, S. H., and Kim, C. C., "Clinical Application of Argon Laser in Pediatric Dentistry," The Korean Academy of Pediatric Dentistry, Vol. 24, No. 1, pp. 149-147, 1997.
2. Park, C. H., "Current Application of Minimally Invasive Surgery for Gastrointestinal Diseases," The Korean Journal of Gastroenterology, Vol. 50, No. 4, pp. 217-219, 2007.
3. Yoon, G., "Prospect and Medical Application of Laser," Proc. of the Optical Society of Korea Conference, Vol. 12, pp. 2-6, 1995.
4. Swol, C. F. P., Verdaasdonk, R. M., Vliet, R. J., Molenaar, D. G., and Boon, T. A., "Side-Firing Devices for Laser Prostatectomy," World Journal Urology, Vol. 13, No. 2, pp. 88-93, 1995.
5. Anson, K. M., Watson, G. M., Shah, T. K., and Barnes,

D. G., "Laser Prostatectomy: Our Initial Experience of a Technique in Evolution," Journal of Endourology, Vol. 7, No. 4, pp. 333-336, 1993.

6. Scott, N. J., Barton, R. A., Casperson, A. L., Tchapyjnikov, A., Levin, K., Tran, D., and Fried, N. M., "Mid-IR Germanium Oxide Fibers for Contact Erbium Laser Tissue Ablation in Endoscopic Surgery," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 13, No. 6, 2007.
7. Sohn, I. B., Kim, Y. S., Noh, Y. C., Ryu, J. C., and Kim, J. T., "Microstructuring of Optical Fiber using a Femtosecond Laser," JOSK, Vol. 13, No. 1, pp. 33-36, 2009.
8. Sohn, I. B., Kim, Y. S., Noh, Y. C., Lee, I. W., Kim, J. K., and Lee, H., "Femtosecond Laser and Arc Discharge Induced Microstructuring on Optical Fiber Tip for the Multidirectional Firing," Optics Express, Vol. 18, No. 19, pp. 19755-19760, 2010.
9. Yeo, I. S., Kim, W. H., and Park, J. S., "Illuminating Optical Design of LED using LightTools," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 14-19, 2002.