



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2018年 2月
석사學位論文

초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형
광섬유 제작연구

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

林祺棟

초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작연구

Study on micromachined lensed optical fiber using an
ultra-precision laser

2018年 2月 23日

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

林祺棟

초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형
광섬유 제작연구

指導教授 金 珍 泰

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2017年 10月

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

林祺棟

林祺棟의 碩士學位論文을 認准함

심사위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

심 사 위 원 고등광기술연구소 박사 손 익 부 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 김 진 태 인

2017 年 11月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

목 차

ABSTRACT

제 1장 서 론	1
제 1절 연구 배경	1
제 2절 연구 목적	3
제 2장 이 론	6
제 1절 초정밀 레이저 가공	6
1. 펨토초 레이저	6
2. CO ₂ 레이저	8
제 2절 렌즈일체형 광섬유	10
1. ABC 행렬을 이용한 렌즈일체형 광섬유에서 광선 추적	10
2. 렌즈일체형 광섬유 곡률 측정	13
제 3장 실험장치 및 방법	17
제 1절 실험 장치	17
1. 펨토초 레이저	17
2. CO ₂ 레이저	18
3. 레이저 가공 시스템	19
제 2절 실험 방법	24
1. 초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 방법	24

2. 펨토초 레이저를 이용한 광섬유 클리빙 방법	25
3. CO ₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률 제작 방법	26
4. ABC 행렬을 이용한 렌즈일체형 광섬유 시뮬레이션 방법	27
5. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 방법	29
제 4장 실험 결과	31
제 1절 초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작	31
1. 펨토초 레이저를 이용한 광섬유 클리빙 결과	31
2. CO ₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률 제작 결과	36
3. CSF 광섬유 용착을 통한 렌즈일체형 광섬유 제작 결과	41
제 2절 렌즈일체형 광섬유 특성 연구	43
1. ABCD 행렬을 이용한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 계산	43
2. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정	47
3. 렌즈일체형 광섬유 빔 크기 측정 결과	49
제 5장 결 론	50
【참고 문헌】	51
【감사의 글】	53

그림 목 차

그림 1. 렌즈일체형 광섬유 응용분야	1
그림 2. 렌즈일체형 광섬유 종류	2
그림 3. 극초단 펄스폭 발생 원리	5
그림 4. 미세가공에 사용되는 레이저 펄스 비교	6
그림 5. 펨토초 레이저에 의한 실리카 내부 국부적 굴절률 변화	7
그림 6. CO ₂ 레이저 공진기 구조	8
그림 7. 매질에 대한 파장별 흡수율	9
그림 8. 렌즈일체형 광섬유에서의 광선 진행경로 모식도	11
그림 9. 곡률 반경 계산 방법 개념도	13
그림 10. 단일모드 광섬유 코어로부터 출사되는 광선의 진행 모식도	14
그림 11. 광섬유 코어와 렌즈 사이의 거리에 따른 곡률의 변화	14
그림 12. 세 점을 이용한 곡률반경 계산 방법	15
그림 13. 펨토초 레이저 가공시스템 모식도	20
그림 14. 펨토초 레이저 가공시스템	21
그림 15. CO ₂ 레이저 가공시스템 모식도	22
그림 16. CO ₂ 레이저 가공시스템	23
그림 17. 펨토초, CO ₂ 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 개념도	24
그림 18. 펨토초 레이저를 이용한 광섬유 클리빙 방법	25
그림 19. CO ₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률제작 방법	26
그림 20. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 원리	29

그림 21. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 및 빔 크기 측정 방법 모식도 ... 30

그림 22. 펄스초 레이저 펄스에너지에 따른 클리빙시 발생하는 광섬유 단면 손상 현미경 측정 사진 32

그림 23. 펄스에너지에 따른 광섬유 표면에 손상 깊이 32

그림 24. 공초점 현미경을 이용한 광섬유 표면 거칠기 측정 33

그림 25. 현미경을 이용한 클리빙된 단일모드 광섬유 길이 측정 34

그림 26. 펄스초 레이저를 이용한 리본광섬유 길이 조절 현미경 측정 결과 · 35

그림 27. CO₂ 레이저 출력 0.5 ~ 0.7 W에서 조사 시간에 따른 광섬유 끝단 변화 36

그림 28. CO₂ 레이저 출력에 따른 광섬유 끝단 변화 37

그림 29. CO₂ 레이저 출력 0.5 ~ 0.7 W에서 조사 시간에 따른 광섬유 끝단 곡률 반경 측정 38

그림 30. 동일조건에서의 광섬유 끝단 곡률제작 재연성 결과 39

그림 31. 단일모드광섬유와 CSF 광섬유 용착 40

그림 32. 펄스초, CO₂ 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 결과 41

그림 33. 세 점을 이용한 렌즈일체형 광섬유 곡률 측정 41

그림 34. Lc 와 R 의 조건에 따른 초점거리 분포 43

그림 35 실제 제작한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 시뮬레이션 측정 44

그림 36. MFD를 대입하여 계산한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 시뮬레이션 46

그림 37. 실제 제작한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 결과 47

그림 38. 실제 측정한 초점거리와 MFD를 대입한 시뮬레이션 초점거리 비교 48

그림 39. knife edge method를 통한 가우시안 광선의 빔 크기 측정 결과 · 49

표 목 차

표 1. 실험에 사용된 100 kHz 레이저 사양	15
표 2. 실험에 사용된 CO ₂ 레이저 사양	16
표 3. Paros 펄스초 레이저 가공 시스템 사양	17
표 4. CO ₂ 레이저 가공 시스템 사양	17

ABSTRACT

Advisor : Prof. Jin-Tae Kim, Ph.D.
Department of Photonic Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently, the studies to simplify complex optical systems have been done in the fields such as an interferometer, a fiber laser, etc. using optical fibers. When the light beam traveling through an optical fiber exits from the optical fiber core, the light beam diverges according to a numerical aperture (NA) value of the optical fiber. Therefore, to converge the light, a lens is installed in front of the fiber. In order to overcome this complexity, researches have been conducted to fabricate a lens-integrated optical fiber that allows light beams emitted from the optical fiber to converge. Femtosecond and CO₂ lasers which can cleave precisely and melt easily a silica-based optical fiber, respectively were used.

A lens-integrated optical fiber can be fabricated by attaching a single mode optical fiber to core less silica fiber (CSF) with the radius curvature at the end of the CSF. For a converging lensed optical fiber, the length between the end of the single mode optical fiber and the CSF end and the radius of curvature are important. In order to fabricate a lensed optical fiber with a focal length, experiments cleaving a single mode optical fiber using a femtosecond laser have been done. In addition to these experiments, experiments to melt the end of the optical fiber using a CO₂ laser to generate a radius of curvature depending on CO₂ laser powers and exposure times were carried out. We get conditions for L_c (the distance from the front surface of the lens to the single-mode fiber core) and the radius curvature R using a MATLAB program. Using those parameters a lensed fiber was fabricated. We measured the focal length of the lens-integrated fiber using the power density of the light beam returning to the

lens-integrated optical fiber from a circulator and a mirror. The comparisons between theoretically estimated and measured focal length has been done.

제 1장 서 론

제 1절 연구 배경

광섬유는 빛을 전송하는 소자로 1970년 미국 코닝사에서 개발되어 현재까지 다양한 종류의 광섬유가 개발 되었다. 광섬유는 보통 클래드와 코어로 구성되어 있고 코어의 굴절률이 클래드의 굴절률 보다 크기 때문에 발생하는 원리를 이용하여 빛을 손실 없이 전송한다. 현재 광섬유는 레이저, 광섬유 센서, 간섭계 등 등 광학계 모든 분야에서 사용되고 있으며, 최근 복잡한 광학계 및 간섭계를 간단하게 만들 수 있는 연구들이 진행되어지고 있다. 이는 광섬유 끝단을 렌즈형태로 제작함으로써 빛을 전송하는 역할 뿐만 아니라 전송된 빛을 수렴해주거나 발산시키는 기능을 가지도록 하여 광섬유가 하나의 정밀 광학소자로서 역할을 수행 하도록 하는 연구들이다.⁽¹⁾ 그림1은 렌즈일체형 광섬유 응용분야다. 레이저 분야에서는 LD (Laser Diode)와 광섬유간 커플링 효율 높이기 위해 렌즈일체형 광섬유 구조를 분석하여 사용하는 연구가 진행되어지고 있으며⁽²⁾, OCT의 경우 탐색 프로브 끝단에서 반사되는 노이즈를 없애고 광선을 집속시켜 인체 내부 세포 관찰에 대한 분해능을 높이기 위해 렌즈 일체형광섬유 프로브에 관한 연구가 진행되어지고 있다⁽³⁾. MEMS는 소자의 특성상 매우 작다. 이에 광섬유가 이용되는 소자의 경우 광선 집속을 위해 렌즈가 삽입되어진다. 이러한 MEMS 소자 크기를 줄이기 위해서는 삽입된 렌즈를 제거해야 하므로, 렌즈일체형 광섬유가 사용되는 연구가 진행되어지고 있다.⁽⁴⁾ 또한, 렌즈가 삽입된 소자보다 렌즈일체형 광섬유의 경우 광선 정렬도 비교적 쉽다.

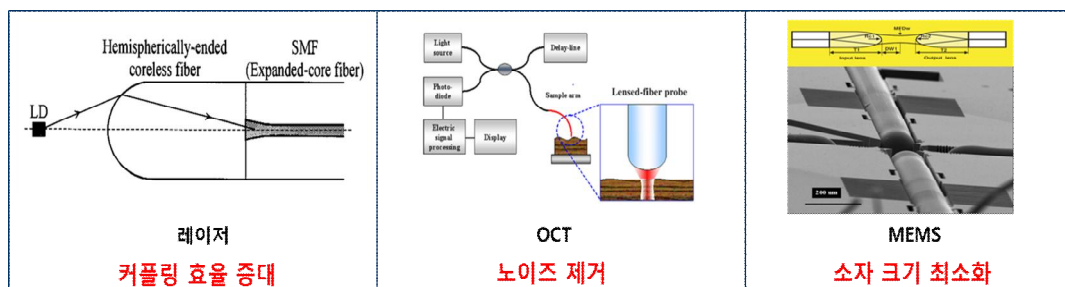
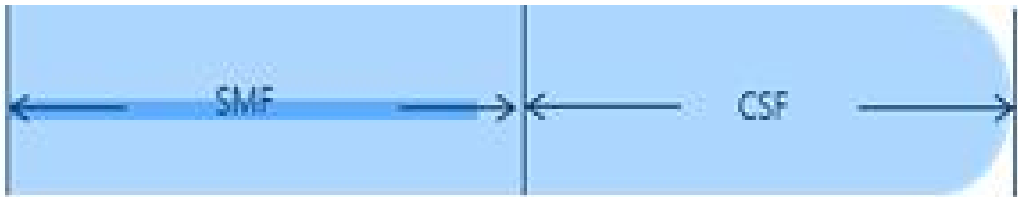
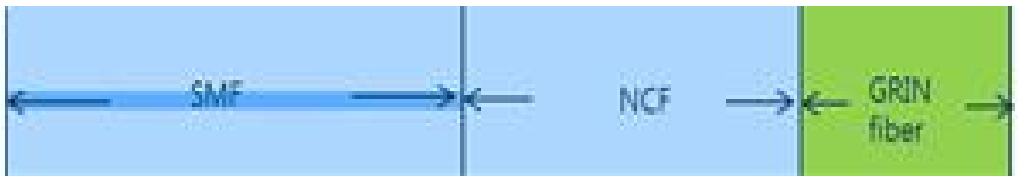


그림 1. 렌즈일체형 광섬유 응용분야

현재 렌즈일체형 광섬유를 제작하는 방법은 그림 2처럼 SMF (Single Mode Fiber)를 CSF (Coreless Silica Fiber)에 용착 시킨 다음, 끝단을 아크 방전을 통해 녹여 제작하는 방법과 SMF와 CSF, GRIN fiber를 용착 후 GRIN fiber를 절단시켜 제작하는 방법이 있다.^(5,6)



(a) 곡률형 렌즈 일체형광섬유



(b) GRIN 렌즈를 이용한 렌즈일체형광섬유

그림 2. 렌즈일체형 광섬유 종류

본 논문에서는 초정밀가공이 가능한 펄스 레이저와 실리카 재질에서 흡수율이 높은 CO₂ 레이저를 이용해 렌즈일체형 광섬유를 제작 하는 방법을 연구하고자 하며, q파라미터와 ABCD 행렬을 통해 렌즈일체형 광섬유를 설계하고, 제작된 렌즈일체형 광섬유 성능 평가를 통해 다양한 응용분야에 사용될 수 있는지 확인하는 연구이다.

제 2절 연구 목적

펄토초 레이저 가공 방식은 매우 미세하고 정밀하게 가공이 가능하여 반도체 및 디스플레이, 광통신, 정밀의료 등 다양한 분야에 광범위하게 적용되고 있다. 이는 펄토초 레이저 특성상 가공물질이 흡수하는 파장에 상관없이 서브마이크로 이하로 가공할 수 있는 장점이 있어 유리와 같은 난가공재에 홀 가공 및 절단등을 하는 연구가 진행되어지고 있다.^(7,8) 또한, 펄토초 레이저 가공은 레이저빔에 의해 발생 하는 열로 인한 HAZ (Heat affected zone)을 무시 할 만큼 작아 정밀 가공에 용의하다. 이러한 특성을 이용해 본 연구에서는 펄토초 레이저를 이용해 광섬유 정밀 클리빙 실험을 진행하였다.

기존의 광섬유를 절단하는 클리빙 방식은 다이아몬드 휠을 이용하여 절단하는 방식이 사용되고 있다. 이 방식은 다이아몬드 휠을 이용하여 광섬유 표면에 흠집을 내어 클리빙하는 방식으로 비교적 빠른 시간에 손쉽게 절단할 수 있는 장점이 있어 많이 사용되고 있다. 광섬유 클리빙 방식은 작업 시간이 짧고 손쉽게 적용할 수 있는 장점이 있지만, 광섬유를 고정시키는 홀더나 커넥터가 결합된 상태에서는 정밀 절단 및 클리빙을 할 수 없기 때문에, 홀더나 커넥터 끝단을 기준으로 마이크로미터 길이로 정밀하고 미세한 길이 조절이 불가능한 단점을 가지고 있다. 렌즈일체형 광섬유의 경우 CSF 광섬유 길이에 따라 전송 되는 빔이 초점에서 수렴하거나 발산하는 특성이 있다. 기존의 클리빙 방식은 사용자가 원하는 광섬유 길이를 정밀하게 조절하기가 힘들어 이러한 단점을 극복하고자 펄토초 레이저를 이용해 광섬유 정밀 클리빙 실험을 진행 하였다. 더 나아가 단일모드 광섬유 다발로 구성된 리본 광섬유에도 클리빙 됨을 보여 산업분야 및 연구에도 응용할 수 있는 연구를 진행하였다. 펄토초 레이저 클리빙 연구는 최적의 광섬유 클리빙 조건을 연구하고, 광섬유를 사용자가 원하는 길이로 클리빙이 가능한지 확인하는 연구이다.

렌즈일체형 광섬유는 광섬유 자체가 렌즈 효과를 가지도록 되어있는 광학소자이다. 이는 렌즈 끝단을 렌즈와 같은 형상으로 제작이 중요하다. 광섬유는 순수 실리카 계열로 만들어 지는데 이러한 실리카 계열은 10.6 μm 의 파장의 흡수율이 좋다. 이는 CO₂ 레이저의 파장으로 실제 CO₂ 레이저를 이용해 광섬유를 녹이거나 자르는 연구들이 진행되어지고 있다^(9,10). 본 실험에서는 CO₂ 레이저를 이용해 광섬유 끝단을 곡률형태로 녹여 렌즈일체형 광섬유를 만드는 연구를 진행하였다.

펄토초 레이저를 이용한 광섬유 정밀 클리빙과 CO₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률 제작을 연구를 통해 빔을 초점거리에서 수렴시킬 수 있는 렌즈일체형 광섬유 제작연구를 진행하고 실제 측정을 통한 제작된 렌즈일체형 광섬유에 초점거리를 가지는지 확인하였다.

제 2 장 이 론

제 1 절 레이저 가공

1. 펨토초 레이저

큐 스위칭 (Q-Switching) 기술의 기반을 통해 얻을 수 있는 펄스 레이저의 최소 펄스폭은 ns이다. 이는 나노초 레이저 펄스폭이며 펨토초 영역의 펄스폭을 얻기 위해서는 모드잠금 (mode-locking) 기술이 이용된다. 모드잠금 기술은 레이저의 구성 요소인 공진기 길이와 이득매질의 증폭대역 조절을 통해 다수의 공진모드를 발생시키고, 이러한 공진모드들의 위상이 일정 순간 일치되어 보강간섭을 일으키는 기술이다. 이러한 보강간섭에 관여하는 공진모드가 많을수록 파장 대역폭은 넓어지고 레이저의 펄스폭은 좁아진다. 좁아진 펄스폭은 낮은 에너지에서 높은 침투출력을 나오도록 만들어준다. 아래 그림 3은 펨토초 펄스폭의 발생 원리를 보여주는 그림들이다.⁽¹¹⁾

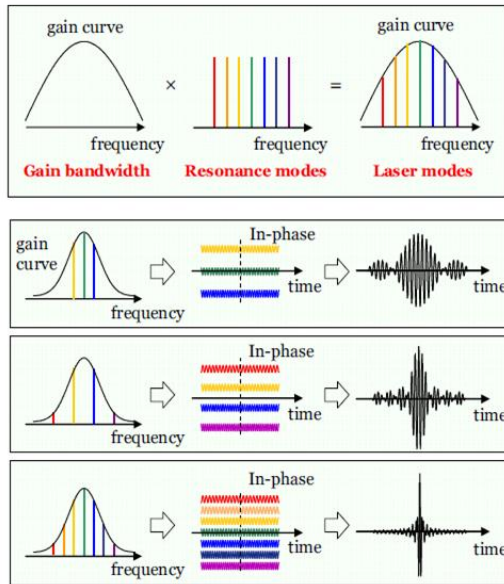


그림 3. 극초단 펄스폭 발생 원리⁽¹¹⁾

식 1은 펄스레이저의 침투출력을 계산하는 식으로 펄스폭이 짧을수록 침투출력이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

$$\text{침투출력}(W) = \frac{\text{펄스에너지}(J)}{\text{펄스폭}(s)} \quad (1-1-1)$$

펨토초 레이저의 출력을 파워미터로 측정하면 펄스 레이저의 평균 출력으로 측정 된다. 식2는 펄스 레이저의 평균출력을 계산 하는 식으로, 평균출력은 펄스에너지를 초당 나오는 펄스 개수 인 반복률을 곱해준 값으로 나타낼 수 있다.

$$\text{평균출력}(W) = \text{펄스에너지}(J) \times \text{반복률}(Hz) \quad (1-1-2)$$



(a) 나노초 레이저 펄스 가공

(b) 펨토초 레이저 펄스 가공

그림 4. 나노초 레이저 가공과 펨토초 레이저 미세가공 차이점

펄스폭이 펨토초 영역까지 줄어들면 가공물질은 비선형적인 다광자흡수가 일어나고 이는 가공물질의 원자간 결합을 끊어 플라즈마 현상을 발생시킨다^(12,13). 또한, 가공물질과 레이저빔 사이의 열전달 시간보다 펄스폭이 짧아 열적 변성 없이 가공 물질을 가공할 수가 있다. 그림 4는 나노초 레이저와 펨토초 레이저 가공 중 생기

는 현상을 보여준다. 나노초 레이저 경우 가공 범위 주변의 열로 인한 재료 변형과 마이크로 크랙 및 가공표면의 왜곡이 일어나지만 펨토초 레이저의 경우 열적 영향 없이 깨끗하게 가공됨을 알 수 있다.

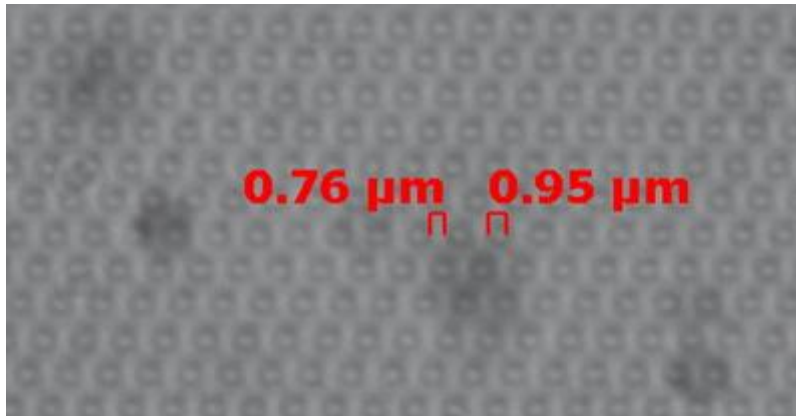


그림 5. 펨토초 레이저에 의한 실리카 내부 국부적 굴절률 변화

그림 5는 실리카 내부에 펨토초 레이저빔을 NA (Numerical aperture)가 큰 대물 렌즈를 이용해 빔을 집속시켜 실리카 내부를 국부적으로 가공하여 측정된 광학현미경사진이다. 펨토초 레이저 경우 높은 침투 출력으로 인해 $10^{15}/\text{cm}^2$ 의 높은 침투 출력밀도를 발생시킨다⁽¹⁰⁾. 이러한 높은 침투출력밀도는 레이저빔과 물질을 사이 상호작용을 일으켜 물질 본질에 변화를 줄 수 있다. 위의 그림 에서도 주변 보다 하얗게 보이는 부분은 펨토초 레이저에 의해 실리카의 굴절률이 국부적으로 변한 부분임을 확인할 수 있다. 식 3은 펨토초 레이저의 침투출력밀도를 구하는 식이며, r 은 $1/e$ 에서 레이저 빔의 반경 또는 FWHM (Full Width Half Maximum) 에서의 빔의 반경이다.

$$\text{평균출력 밀도} = \frac{\text{침투출력}}{\pi r^2} \quad (1-1-3)$$

이러한 원리를 이용해 실리카 계열의 광섬유의 코어 내부에 국부적인 굴절률 변화를 야기시켜 FBG (Fiber Bragg Grating)를 제작하는 연구도 진행되어지고 있다.⁽¹⁴⁾

2. CO₂ 레이저

CO₂ 레이저는 기체 레이저로 다음 그림 6과 같은 공진기 구조를 가진다. 공진기는 100% 반사율을 가지는 Au 코팅된 Si 거울과 85%의 반사율가지는 ZnSe 거울이 있고, CO₂, He, N₂의 혼합 기체를 방전시킬 수 있는 방전관으로 구성되어 있다.⁽¹⁵⁾

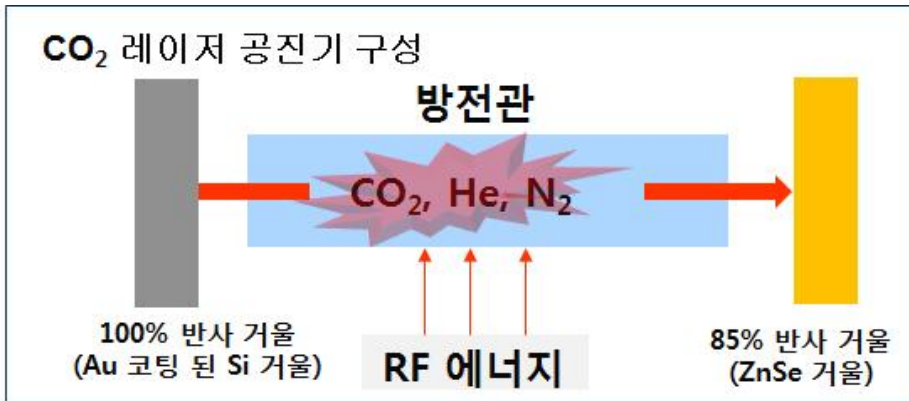


그림 6. CO₂ 레이저 공진기 구조

CO₂ 레이저의 원리는 RF 에너지를 방전관에 인가시켜 CO₂를 방전시켜 생성되는 전자가 다시 에너지를 잃으면서 레이저빔을 발생시키는 원리이다. He 기체는 CO₂ 기체의 온도 조절을 위해 존재하며, N₂는 전자를 잃은 CO₂가 재결합 하는 안정화 역할을 해준다. 이렇게 발생된 CO₂ 레이저는 보통 9.6 ~ 10.6 μm 의 파장을 가진다. 그림 7은 매질에 대한 파장별 흡수율 그래프이다. 9.6 ~ 10.6 μm 의 CO₂ 레이저 파장은 유리 재질에서 높은 흡수율을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 SiO₂의 용융실리카 재질은 Si-O 본드 결합으로 되어있다. 이 결합에서의 흡수 파장은 9.3 μm 로 알려져 있으며, 상온에서 350° 정도로 온도를 유지 시켜주면 Si-O에서의 흡수 파장 대역이 10.6 μm 로 이동한다.⁽¹⁶⁾

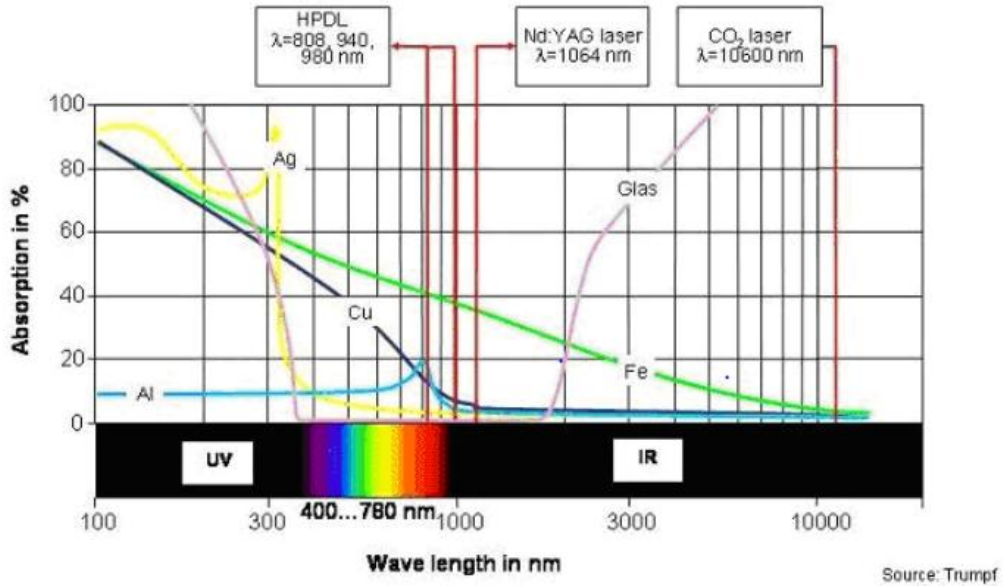


그림 7. 매질에 대한 파장별 흡수율

제 2절 렌즈일체형 광섬유

1. ABCD 행렬을 이용한 렌즈일체형 광섬유에서 광선 추적

가우시안 광선이 매질을 지나서 그 형태가 변화될 때 ABCD 행렬과 q 파라미터로 설명할 수 있다.⁽¹⁷⁾ 먼저 q 파라미터는 (2-1-1) 식처럼 표현된다. q 파라미터는 가우시안 광선이 매질을 통과한 후 출사 될 때의 관계로 q_1 은 매질에 입사 할 때의 상태를 나타내고, q_2 는 매질을 통과 한 후 출사 될 때의 상태를 표현한다.

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{n\pi(\omega_0)^2} \quad (2-1-1)$$

렌즈일체형 광섬유에 대한 q_1, q_2 의 관계를 다음과 같이 정리하였다.

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - i \frac{\lambda}{n_1\pi(\omega_i)^2} \quad , \quad (2-1-2)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{R_2} - i \frac{\lambda}{n_2\pi(\omega_z)^2} \quad q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad . \quad (2-1-3)$$

렌즈일체형 광섬유에서 q_1 은 w_i 에서 가우시안 광선의 진행 면은 평면이므로, $R \rightarrow \infty$ 일 때로 정의 된다.

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{\infty} - i \frac{\lambda}{n\pi(\omega_i)^2}, \quad q_1 = -\frac{1}{ia} \quad (2-1-4)$$

$$a = -i \frac{\lambda}{n\pi(\omega_i)^2} \quad . \quad (2-1-5)$$

식 (2-1-4)를 (2-1-3)에 대입하여 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$w_z = w_i \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \frac{A^2 + a^2 B^2}{AD - BC}} + q_2 (AC + BD a^2), \quad , \quad AC + BD a^2 = 0 \quad (2-1-6)$$

식 (2-1-5)의 방정식을 계산하기 위한 ABCD는 행렬로 표현되며, 그림 8의 렌즈 일체형 광섬유 모식도를 이용해 행렬 $M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 의 형태로 나타낼 수 있다. ABCD 행렬은 각 각의 매질에 따라 광선의 진행경로를 행렬의 곱으로 표현된다. ABCD 행렬은 근축 광학적 접근으로 광선의 경로를 추적하여 광선이 매질을 지날 때 경계면에서의 방향 변화와 경계면 사이에서의 전파에 의한 광선의 높이 변화를 행렬 값으로 표현할 수 있다.^(18,19) M_{12} 는 단일모드 광섬유와 CSF 광섬유의 경계면이고 M_{23} 은 CSF 광섬유와 렌즈에서 공기 중으로 진행되는 경계면이다. M_{34} 는 렌즈부터 초점거리까지의 진행되는 지점이다. n_1 은 CSF 광섬유의 굴절률, n_2 는 공기의 굴절률이며, L_c 는 M_{12} 부터 M_{23} 까지의 거리이며 CSF 광섬유의 부분의 길이이다. L_r 는 M_{23} 과 M_{34} 의 사이 거리이며, 즉 렌즈의 초점거리이다.

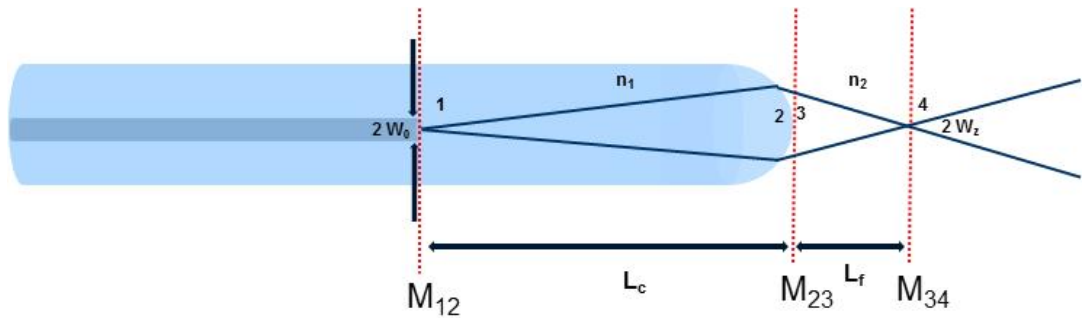


그림 8. 렌즈일체형 광섬유에서의 광선 진행경로 모식도

이를 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 주어진다.

$$M = M_{34} M_{23} M_{12} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (2-1-7)$$

여기서 각 행렬 M_{12} , M_{23} , M_{34} 은 아래와 같이 표현 하여 계산할 수 있다.

$$M_{12} = \begin{pmatrix} 1 & L_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2-1-8)$$

$$M_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}, \quad (2-1-9)$$

$$M_{34} = \begin{pmatrix} 1 & L_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-1-10)$$

2. 렌즈일체형 광섬유 곡률반경 측정

그림 9는 곡률 반경을 계산하기 위한 모식도로 R은 곡률 반경, h는 원주의 높이, s는 원주의 폭이다. 곡률 반경 R은 피타고라스의 정리에 의해 다음과 같이 표현된다⁽²⁰⁾.

$$R = \sqrt{\left(\frac{1}{2}s\right)^2 + (R-h)^2}, \quad (2-2-1)$$

여기서 양변에 제곱을 해주면 R^2 에 관한 식으로 표현이 된다.

$$R^2 = \left(\frac{1}{2}s\right)^2 + R^2 - 2Rh + h^2, \quad (2-2-2)$$

그 다음 R에 대하여 이항정리를 해주면 다음과 같은 곡률 반경을 계산할 수 있는 식이 얻어진다.

$$R = \frac{\left(\frac{1}{2}s\right)^2 + h^2}{2h}. \quad (2-2-3)$$

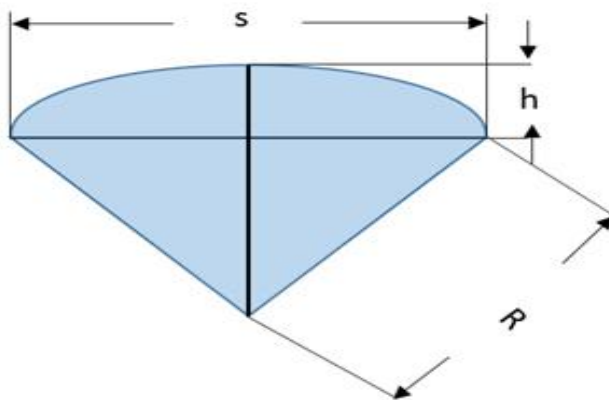


그림 9. 곡률 반경 계산 방법 개념도

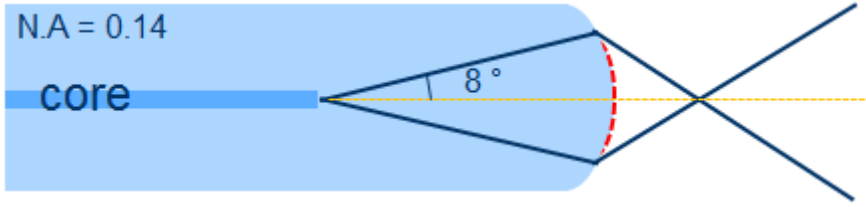


그림 10. 단일모드 광섬유 코어로부터 출사되는 광선의 진행 모식도

렌즈일체형 광섬유를 통해 실제 진행하는 광선에 대한 곡률 측정을 설명하면 다음과 같다. 그림 10은 단일모드 광섬유의 코어로부터 출사된 광선의 진행 경로를 보여주는 모식도이다. 여기서 빨간색 점선은 실제 광선이 입사되는 곡률 부분이다. 단일모드 광섬유에서 광선은 전반사를 통해 진행되며, 이는 단일모드 광섬유의 NA가 코닝사에서 제품의 경우 0.14를 가진다. NA 값을 통해 단일모드 광섬유 내부에서 광선들이 대략 8° 정도로 진행하는 것을 계산할 수 있다. 그러므로 8° 로 발산하는 광선은 그 거리에 따라 렌즈일체형 광섬유 곡률에 입사되는 크기가 달라진다.

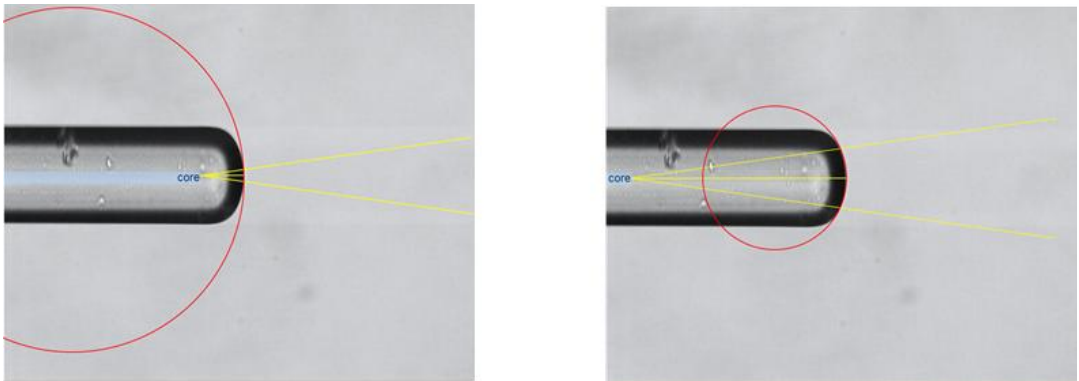


그림 11. 코어와 렌즈 사이의 거리에 따른 곡률의 변화

그림 11은 렌즈일체형 광섬유에서 코어와 렌즈사이의 거리에 따라 코어로부터 출사되는 광선이 곡률에 들어가는 크기가 다르다는 것을 노란색 선을 통해 표현하였다. 그에 따라 빨간색 점선 원의 크기도 달라짐을 보여주고 있다. 이를 통해 렌즈일체형 광섬유의 곡률은 실제 광선이 렌즈로 입사되는 부분이 중요하며, 다음과 같

은 방법으로 계산할 수 있다.

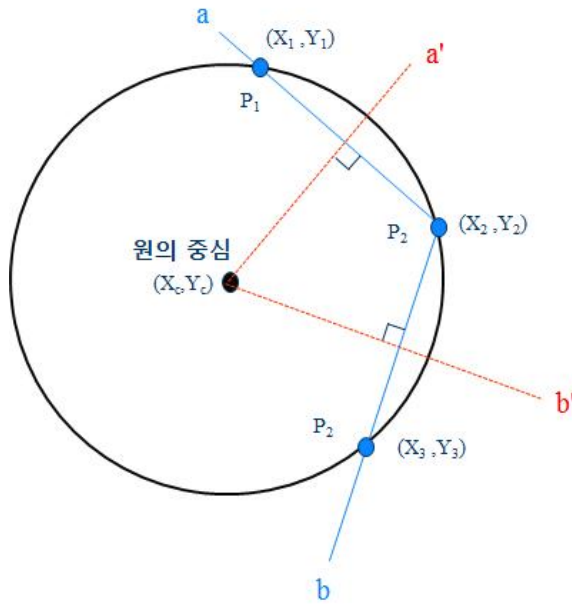


그림 12. 세 점을 이용한 곡률반경 계산 방법

그림 12는 세 점 P_1, P_2, P_3 를 통해 원의 반지름을 측정하는 방법의 모식도이다. 원 위의 임의의 점 P_1, P_2, P_3 에서 P_1 과 P_2 를 지나는 직선은 a , 점 P_2, P_3 를 지나는 직선은 b 라고 가정하여 다음과 같은 직선 방정식을 유도할 수 있다.

$$a = m_a(x - x_1) + y_1. \tag{2-2-4}$$

$$b = m_b(x - x_2) + y_2. \tag{2-2-5}$$

m_a 와 m_b 는 직선 a, b 의 기울기로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad m_b = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \tag{2-2-6}$$

위의 그림에서 빨간색 점선 a' ,와 b' 는 원의 중심부터 점 P_1 과 P_2, P_2 와 P_3 를 잇는

수직 이등분선으로 다음과 같은 직선 방정식이 유도된다.

$$a' = -M_a \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (2-2-7)$$

$$b' = -M_b \left(x - \frac{x_2 + x_3}{2} \right) + \frac{y_2 + y_3}{2}, \quad (2-2-8)$$

여기서, 기울기 M_a 와 M_b 는

$$M_a = \frac{1}{m_a}, \quad M_b = \frac{1}{m_b} \quad (2-2-9)$$

이다.

직선 a' 와 b' 가 교차 하는 지점이 원의 중심이며, 이 두 개의 직선을 연립 방정식으로 풀면 원 중심 좌표를 계산할 수 있다.

$$x_c = \frac{-M_a(x_1 + x_2) - (y_1 - y_2) + M_b(x_2 + x_3)}{2(M_b - M_a)}, \quad (2-2-10)$$

$$y_c = -M_a \left(x_c - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (2-2-11)$$

원의 중심 좌표 (x_c, y_c) 를 알면 다음과 같이 원의 반지름 R 이 유도된다.

$$R = \sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2}. \quad (2-2-12)$$

제 3장 실험장치 및 방법

제 1절 실험장치

1. 펨토초 레이저

광섬유 정밀 클리빙에 사용된 펨토초 레이저는 1030 nm의 중심파장을 가지며, 250 fs의 펄스폭, 10 ~ 200 kHz의 반복률을 가진다. 평균 레이저 출력은 6 W 를 가지는 LightConversion사의 Yb:KGW 다이오드 펨핑된 펨토초 레이저 시스템 (모델명: Pharos)이다. 아래의 표 1은 자세한 Pharos 레이저의 사양을 나타내었다.

제 품 명	Pharos (LightConversion)
파 장	1030 / 515 / 257 nm
평 균 출 력	6 W
반 복 률	100 kHz
펄 스 폭	250 fs
펄 스 에 너 지	60 μ J
펄스 간 안정성	1% rms
평균출력안정성	1% rms for 100 hours
빔 경	6 mm
빔 질	$M^2 < 1.2$
퍼 집 각	< 1.2 mrad
레이저 등급	Class 4

표 1. 실험에 사용된 100 kHz 펨토초 레이저 사양

Pharos 펨토초 레이저의 방출된 빔은 가우시안 형태로 선평광을 가진다. 펨토초 레이저를 이용해 광섬유 표면 라인 가공을 할 경우 레이저에 의한 열 영향을 거의 받지 않아 열에 의해 깨지는 현상없이 가공됨을 확인할 수 있다.

2. CO₂ 레이저

광섬유의 끝단을 곡률로 녹이기 위해 CO₂ 레이저 가공 시스템을 사용하였다. 사용된 CO₂ 레이저는 COHERENT 사의 (모델명 : C-55L)를 사용하였으며, 레이저 최대 출력은 55 W이며, 10.6 μm의 중심파장의 레이저이다. 아래는 표 2는 좀 더 자세한 CO₂ 레이저 가공시스템의 사양을 나타내었다.

제 품 명	C-55L (COHERENT)
파 장	10.6 μm
평 균 출 력	55 W
펄스 간 안정성	3%
빔 경	1.8 ± 0.2 mm
빔 질	M ² < 1.2
퍼 집 각	7.5 ± 0.5 mrad
편 광	선형편광

표 2. 실험에 사용된 CO₂ 레이저 사양

CO₂ 레이저는 레이저 매질을 이산화탄소를 사용하는 레이저로 레이징된 빔의 중심 파장은 10.6 μm를 가진다. 10.6 μm의 파장은 실리카 계열 유리에서 흡수율이 좋아 주로 레이저 가공공정에서 유리를 자르거나 녹일 때 많이 사용된다. 본 실험에서는 CO₂ 레이저를 이용하여 펨토초 레이저로 클리빙된 광섬유 끝단을 녹여 곡률을 제작하였다.

3. 레이저 가공 시스템

표 3은 실험에 사용된 펨토초 레이저와 CO₂ 레이저의 스테이지의 사양을 보여주고 있다. 펨토초 레이저 가공시스템에 사용된 스테이지 X Y 축은 선형 모터 스테이지로 구성되어 있으며, 300 mm × 300 mm 의 가공 범위와 300 mm/s 의 최대 이송 속도를 가진다. Z 축은 100 mm 의 가공 범위를 가진다.

	X-Y축 스테이지	Z축 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
이동거리	300 × 300 (mm)	100 (mm)
분해능	20 nm / count	0.5 μm / count
최대속도	300 (mm/s)	20 (mm/s)

표 3. pharos 펨토초 레이저 가공 시스템 사양

CO₂ 레이저 가공 시스템의 X, Y축 가공 범위는 300 mm x 300 mm이며, 1 μm 의 정밀도를 가진다. 또한, Z축 스테이지의 최대 이동 범위는 150 mm이며, 1 μm 의 정밀도를 가진다.

	X-Y축 스테이지	Z축 스테이지
스테이지	선형 모터 스테이지	Ballscrew 스테이지
이동거리	300 × 300 (mm)	50 (mm)
분해능	1 μm / count	1 μm / count
최대속도	100 (mm/s)	

표 4. CO₂ 레이저 가공 시스템 사양

그림 13은 실험에 사용된 펨토초 레이저 가공 시스템의 모식도이다. 1030 nm의 파장을 가지는 레이저 빔이 방출되어 아래의 광학계 빔 경로를 통해 대물렌즈로 집속시켜 가공을 하도록 설계 되어 있다. 또한, 감쇄기 (attenuator)를 통해 레이저의 출력을 조절 할 수 있고, 이색성 거울이 설치되어 있어 CCD를 통해 실시간으로 가공되는 모습과 가공위치를 볼 수 있다.

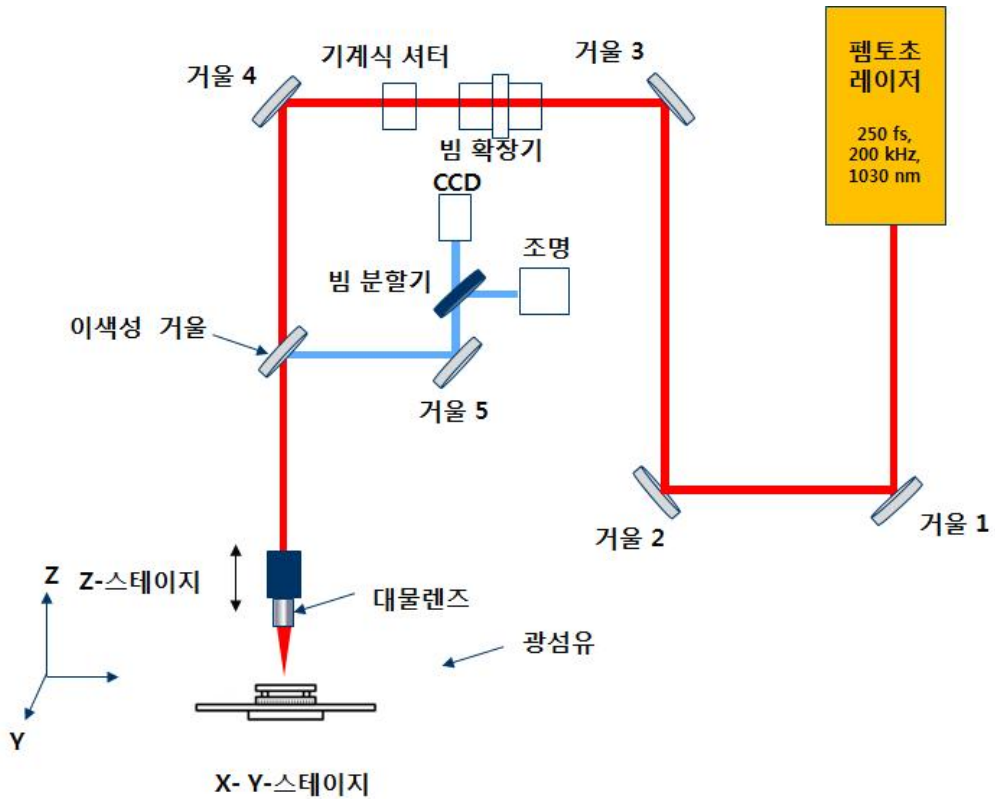


그림 13. 펨토초 레이저 가공시스템 모식도

그림 14는 실제 펨토초 레이저 가공 시스템 모습이다. Z축 스테이지는 위아래로 초점 거리를 맞출 수 있도록 움직일 수 있다. X, Y 스테이지에 가공 물체를 놓고 빔의 위치로 옮겨 가공 할 수 있도록 되어있다. 또한 블로잉이 설치되어 있어 가공 중에 생기는 미세 데브리 (debris)를 날릴 수 있도록 설계되어 있다.



그림 14. 펨토초 레이저 가공시스템

그림 15는 CO₂ 레이저의 가공 모식도이다. 10.6 μm의 파장의 레이저가 감쇄기를 통해 들어와 빔의 출력을 조절 할 수 있도록 설계 되어있다. CO₂ 레이저의 경우에는 기체 레이저이므로 레이저의 출력을 최대 상태인 55 W에서 감쇄기를 이용해 레이저 출력을 미세하게 조절이 가능하도록 되어있다.

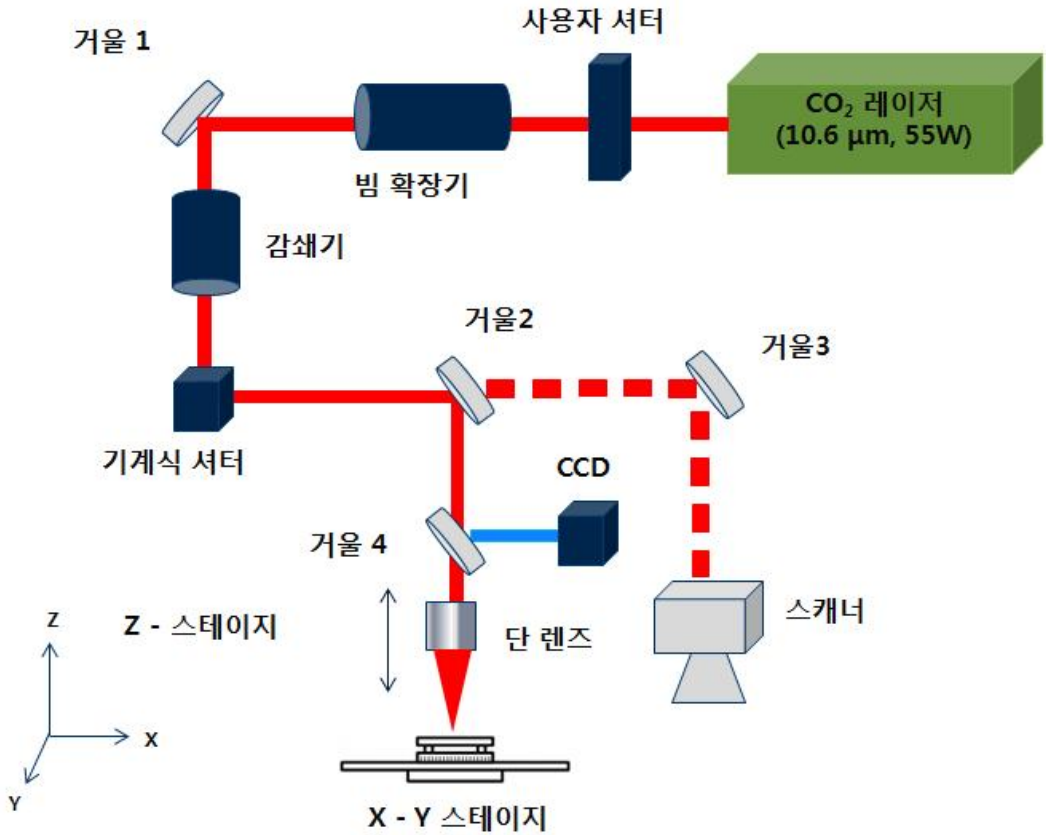


그림 15. CO₂ 레이저 가공시스템 모식도

그림 16은 실제 광섬유 끝단을 녹여 곡률을 제작 할 때 사용한 CO₂ 레이저 가공 시스템이다. 초점거리를 $f = 25 \text{ mm}$ 를 가지는 단 렌즈를 사용하여 광섬유를 Z축 방향으로 평행하게 세워서 가공 하였다. CCD를 통해 광섬유 끝단 위치 확인 한 후, X-Y 스테이지를 움직여 CO₂ 레이저 초점의 위치에서 광섬유 끝단을 녹여 가공 하였다. 광섬유 끝단에 곡률 제작하기 위해 CO₂ 레이저빔의 노출시간을 조절 하였다. 노출 시간 조절을 위해 CO₂ 레이저 매뉴얼 서터는 프로그램을 이용하여 설정할 수가 있다.

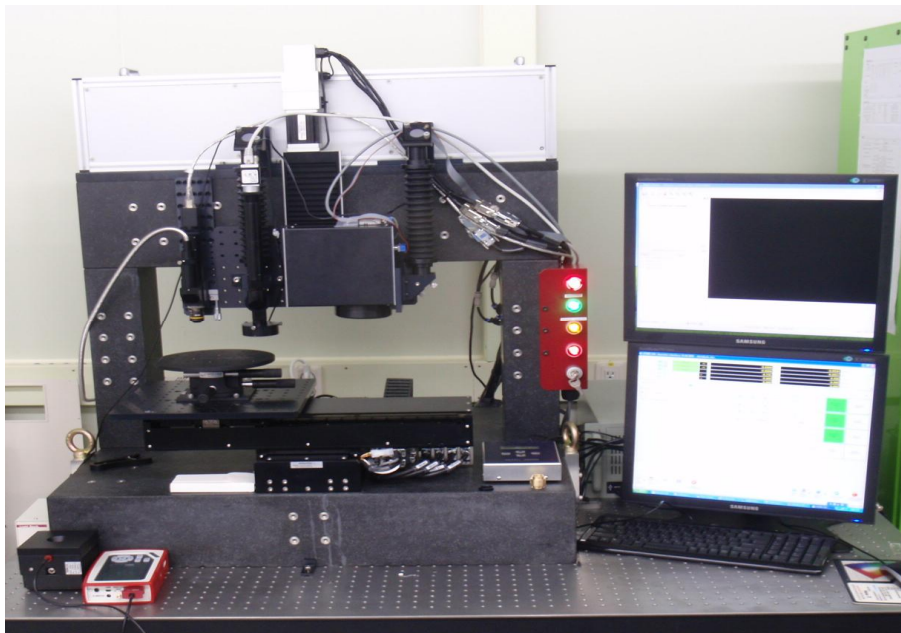


그림 16. CO₂ 레이저 가공시스템

제 2절 실험 방법

1. 초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 방법

그림 17은 펨토초, CO₂ 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 방법 개념도이다. 첫 번째로 단일모드 광섬유와 CSF 광섬유를 융착 시킨 다음, 펨토초 레이저를 이용해 특정 길이만큼 CSF 광섬유를 클리빙한다. 세 번째로 광섬유를 수직하게 세운 다음 CO₂ 레이저를 이용해 광섬유 끝단을 녹임으로써 렌즈일체형 광섬유를 제작할 수 있다.

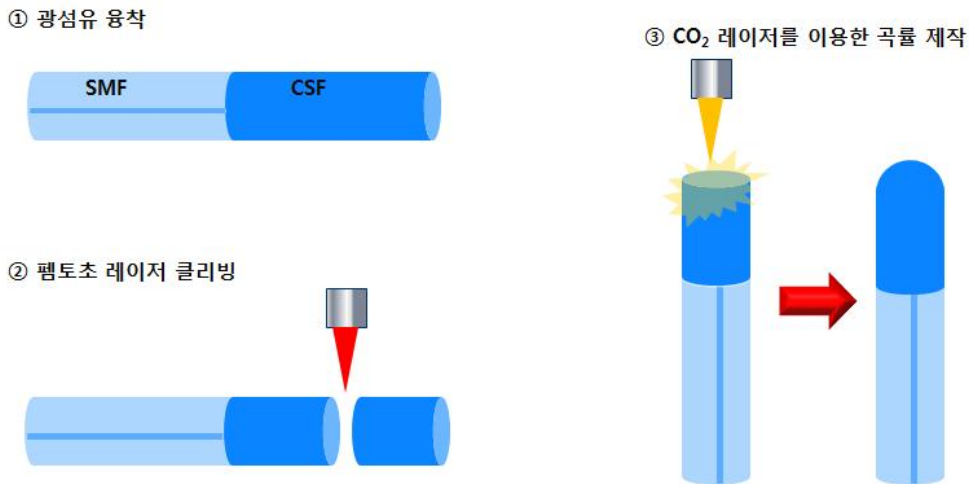
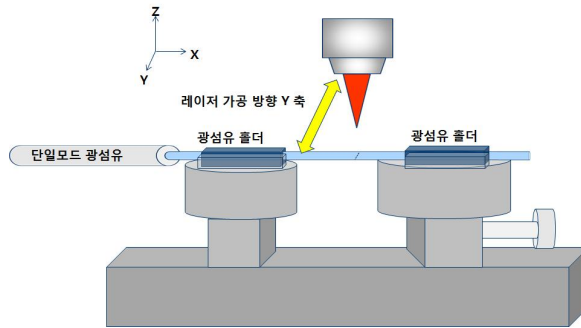


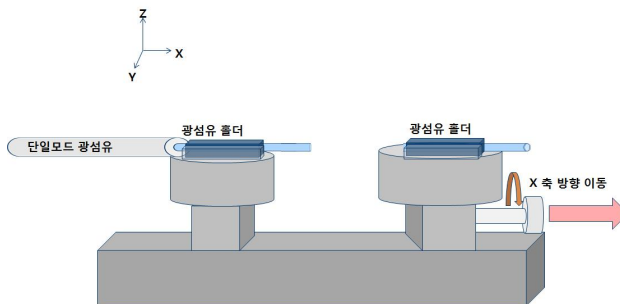
그림 17. 펨토초, CO₂ 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 개념도

2. 펨토초 레이저를 이용한 광섬유 클리빙 방법

그림 18은 펨토초 레이저를 이용하여 광섬유를 클리빙하는 방법의 모식도이다. 그림 18 (a)는 펨토초 레이저를 이용해 광섬유에 Y-축 방향으로 라인 가공을 하여 흠집을 만드는 방법으로 광섬유를 고정시킬 수 있는 지그가 위의 그림처럼 필요하다. 위의 지그는 광섬유를 고정시킬 수 있는 두 개의 광섬유 고정 홀더가 있으며, 오른쪽에 있는 홀더는 X-축 방향으로 움직일 수 있게 제작되었다. 우선 지그에 광섬유를 고정시킨 다음, 펨토초 레이저와 대물렌즈를 이용하여 광섬유 표면에 Y-축 방향으로 라인을 그어 흠집을 만들었다. 그다음 그림 (b)에 보이는 대로 광섬유 홀더의 나사를 돌려 오른쪽 광섬유 홀더를 X-축 방향으로 이동시켜 장력을 주어 클리빙을 진행하였다.



(a) 광섬유 표면 라인가공



(b) 광섬유 클리빙

그림 18. 펨토초 레이저를 이용한 광섬유 클리빙 방법

3. CO₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률 제작 방법

그림 19은 CO₂ 레이저를 이용하여 광섬유 끝단을 녹여 곡률을 제작하는 방법이다. 아래 지그에는 광섬유를 z 축에 평행하도록 고정 시킬 수 있는 광섬유 홀더가 있어 이를 이용하여 광섬유를 고정 시킨 다음 X-Y축의 기울기 조절을 통해 최대한 광섬유를 Z축에 평행하도록 하였다. 그 다음 CO₂ 레이저에 달려있는 CCD를 이용하여 광섬유 중앙에 초점이 맺히도록 한 다음 CO₂ 레이저를 조사시켜 제작하였다. CO₂ 레이저가 광섬유 중앙에 조사되지 않거나, 광섬유가 Z축에 평행하지 않으면 광섬유에 제작한 곡률이 기울어지게끔 제작될 수 있다.

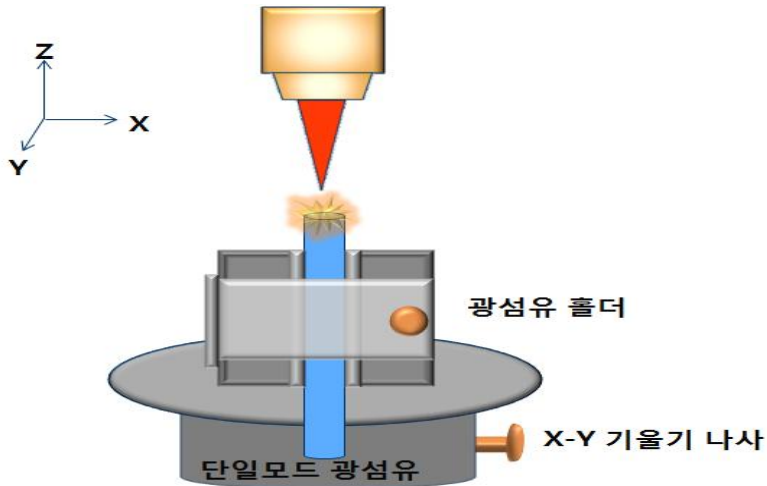


그림 19. CO₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률제작 방법

4. ABCD 행렬을 이용한 렌즈일체형 광섬유 시뮬레이션 방법

렌즈일체형 광섬유를 시뮬레이션을 위해 ABCD 행렬과 매트랩을 사용하였다. 먼저 매트랩을 사용하기 전, 다음과 같은 방법으로 수식을 정리했다. 위 (2-1-5), (2-1-6)식을 이용하여 다음과 같이 L_f 에 대한 함수를 L_c 와 R 의 값에 따라 어떠한 분포도를 가지는지 확인하기 위해 ABCD 행렬을 전개 하였다. 각 행렬 M_{12} , M_{23} , M_{34} 은 다음과 같다.

$$M_{12} = \begin{pmatrix} 1 & L_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}, \quad M_3 = \begin{pmatrix} 1 & L_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3-2-1)$$

그 다음 굴절률에 대한 함수를 α , β 로 치환하여 수식을 간단하게 정리할 수 있다.

$$\alpha = \frac{n_2 - n_1}{n_2 R}, \beta = \frac{n_1}{n_2} \quad (3-2-2)$$

그러므로 M_{12} , M_{23} , M_{34} 의 행렬의 곱을 계산 하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$M = M_{34}M_{23}M_{12} = \begin{pmatrix} 1 + \alpha L_f & L_c + \alpha L_c L_f \beta \\ \alpha & \alpha L_c + \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (3-2-3)$$

M_{12} , M_{23} , M_3 행렬의 곱인 M 행렬의 각 요소 A , B , C , D 는 식 (2-1-5)의 방정식을 만족하므로,

$$\alpha(1 + \alpha L_f) + (L_c + \alpha L_c L_f + L_f \beta)(\alpha L_c + \beta)a^2 = 0. \quad (3-2-4)$$

이다.

여기서, a 는 다음과 같다.

$$a = -i \frac{\lambda}{n_1 \pi \omega_i^2} . \quad (3-2-5)$$

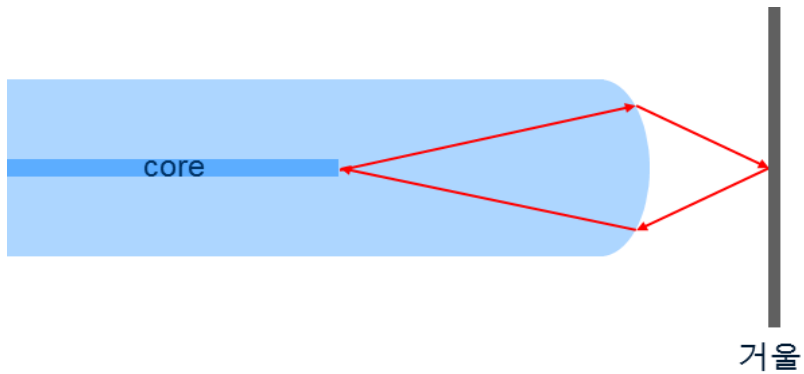
λ 는 렌즈일체형 광섬유에서 진행하는 광선의 파장 1550 nm, n_1 은 CSF 광섬유 굴절률 1.445이며, ω_i 는 단일모드 광섬유의 코어의 반경 4.5 μm 이다. 식 (3-2-4)를 전개하여 아래처럼 L_f 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_f = \frac{-\alpha + a^2(\alpha L_c^2 + \beta L_c)}{\alpha^2 + a^2(\alpha^2 L_c^2 + 2\alpha\beta L_c + \beta^2)} \quad (3-2-6)$$

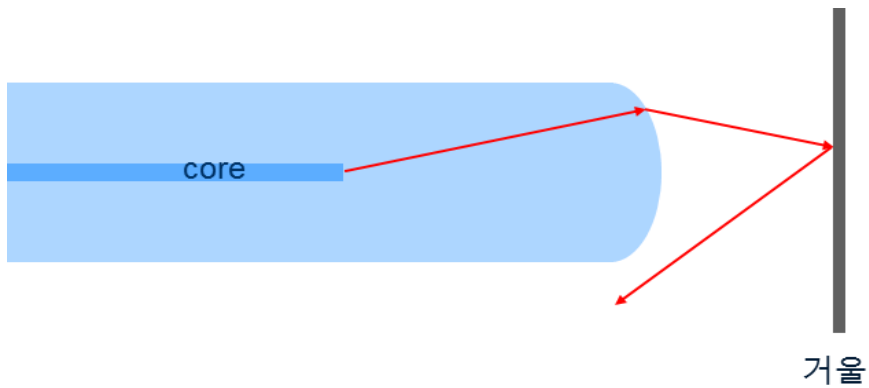
매트랩을 이용하여 식 (3-2-5)를 L_c 와 R 값의 변화에 따라서 L_f 가 어떻게 달라지는지 그래프로 경향성을 볼 수 있으며, 특정 L_c 와 R 의 값을 넣어 렌즈일체형 광섬유의 초점거리를 계산할 수 있다.

5. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 방법

렌즈일체형 광섬유의 초점거리를 측정하기 위해 그림 20의 원리를 이용하였다. 그림 20 (a)는 렌즈일체형 광섬유 초점거리에 거울이 있는 경우이며, 빨간색 선은 렌즈일체형 광섬유에서 출사된 광선의 경로이다. 렌즈일체형 광섬유 초점거리에 거울이 있으면 거울에 의해 반사되어 다시 렌즈일체형 광섬유로 집속이 된다. 그림 20 (b)의 경우에는 렌즈일체형 광섬유 초점거리 밖에 있을 때의 광선의 경로이다. 거울에 반사되어 나오는 광선이 광섬유에 집속되지 않고 외부로 빠져나가는 모습을 알 수 있다.⁽²¹⁾ 그러므로 거울에 반사되어 렌즈일체형 광섬유로 다시 집속 되었을 광섬유 코어를 통해 되돌아오는 광선의 세기가 가장 높은 지점이 초점거리로 볼 수 있다. 또한, 이러한 원리는 공초점 현미경에도 이용이 된다.



(a) 거울이 렌즈일체형 광섬유 초점에 위치했을 때 광선의 진행 경로



(b) 거울이 렌즈일체형 광섬유 초점에서 벗어났을 때 광선의 진행 경로

그림 20. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 원리

그림 21은 렌즈일체형 광섬유 측정방법의 모식도이다. 레이저 소스는 단일모드 광섬유의 동작 파장인 1550 nm를 사용했다. 써큘레이터의 끝단은 APC 타입으로 되어있으므로 렌즈일체형 광섬유에 APC 타입 패를 용착하여 연결시켰다. 초점거리 측정방법은 1550 nm에서 나온 광선이 써큘레이터를 지나 렌즈일체형 광섬유 안으로 들어가고 렌즈일체형 광섬유에서 출사된 광선이 모든 파장 대역에서 반사율이 좋은 금 코팅 미러에 의해 반사되어 다시 렌즈일체형 광섬유 안으로 집속되어 들어간다. 렌즈일체형 광섬유에 다시 들어온 광선은 써큘레이터를 통해 레이저 출력 측정기로 진행한다. 금으로 코팅된 거울을 1 μm 씩 움직여 레이저 출력 측정기로 가장 강한 출력이 들어 올 때의 거울의 거리가 초점거리이다. 또한, 초점거리를 측정 후 초점거리에서 거울을 옆으로 1 μm 씩 움직이며 레이저 광선의 출력을 측정하면 빔 크기를 측정 할 수 있다. 또한, 초점거리에서 거울을 옆으로 조금씩 움직여 가우시안 광선의 세기를 측정하면 광선의 크기를 구할 수 있다.

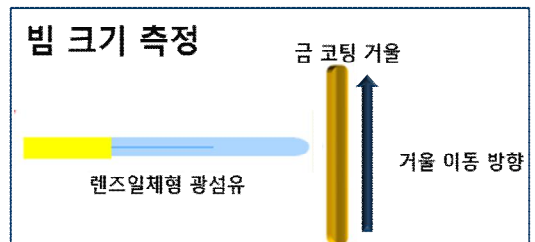
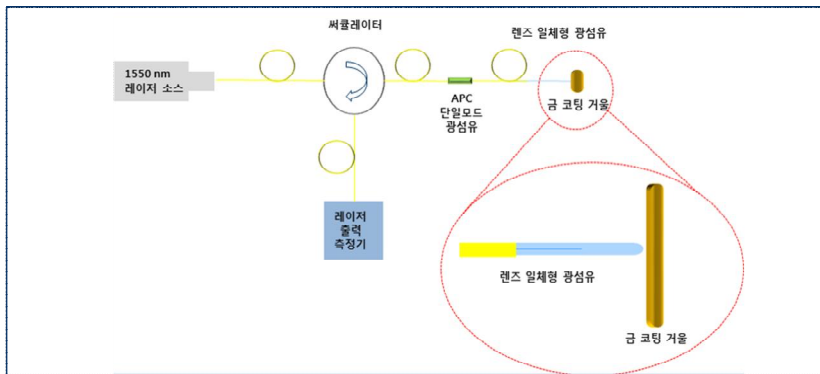


그림 21. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 및 빔 크기 측정 방법 모식도

제 4장 실험결과

제 1절 초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작

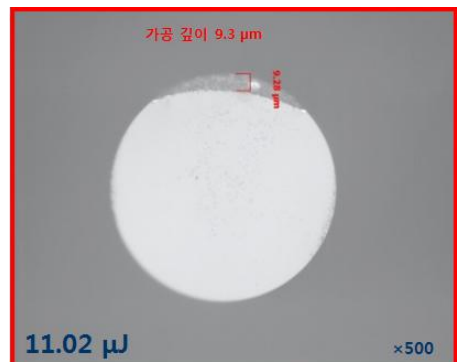
1. 펨토초레이저를 이용한 광섬유 클리빙

본 연구에서는 반복률 200 kHz 를 가지는 Pharos 펨토초 레이저를 사용하였다. 광섬유 표면에 Y축 방향으로 라인 가공을 한 다음, 광섬유의 한쪽 방향으로 장력을 주어 클리빙을 진행 하였으며, 실험에 사용된 광섬유는 SMF-28로 일반 통신용 단일모드 광섬유를 사용하였다. 광섬유를 클리빙 하기 위해 먼저 펨토초 레이저에 의해 가공된 광섬유의 단면 깊이를 조절하고자, 가공속도는 0.1 mm/s 로 고정하고 10 배율 (NA = 0.25)를 가지는 대물렌즈를 사용하였다.

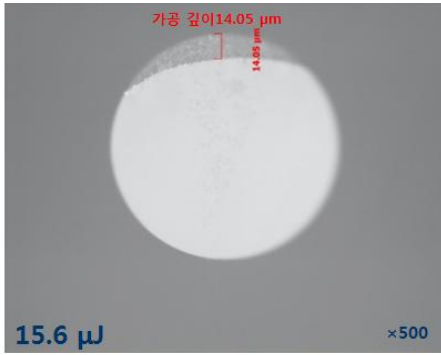
그림 22는 펨토초 레이저 펄스에너지에 따라 클리빙된 광섬유의 손상을 확인한 현미경 측정 사진이다. 그림 22의 (a),(b),(c),(d),(e),는 각각 9.5 μJ , 11.02 μJ , 13.9 μJ , 15.6 μJ , 18.4 μJ 의 펄스에너지로 클리빙 한 결과이다. 그림 23의 그래프는 펄스에너지에 따라 광섬유 표면에 손상되는 깊이를 측정한 결과이며, 펄스에너지가 클수록 깊게 가공됨을 알 수 있다.



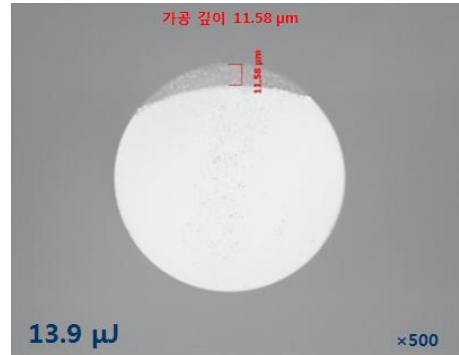
(a) 9.5 μJ



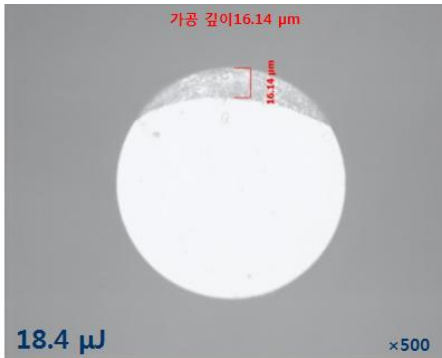
(b) 11.02 μJ



(c) 13.9 μJ



(d) 15.6 μJ



(e) 18.4 μJ

그림 22. 펄스 레이저 펄스에너지에 따른 클리빙시 발생하는 광섬유 단면 손상 현미경 측정 사진

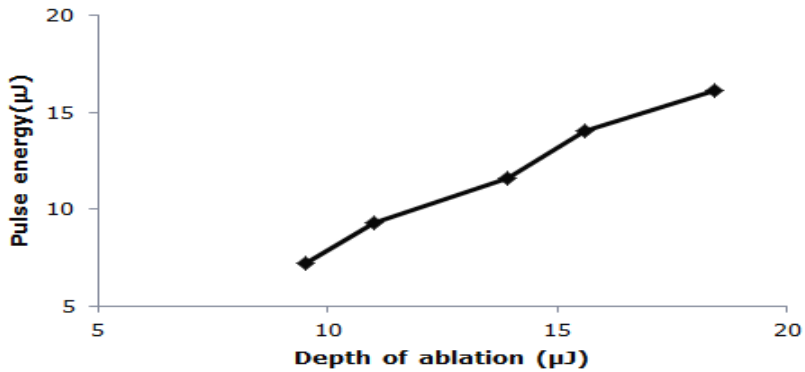
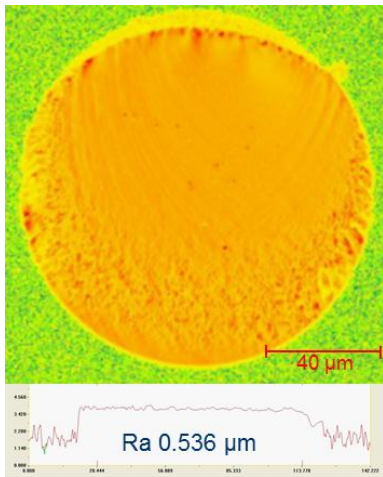
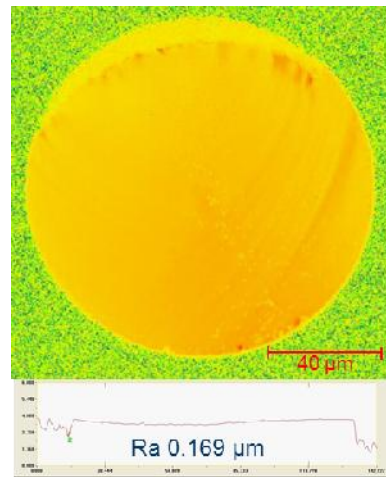


그림 23. 펄스에너지에 따른 광섬유 표면에 손상 깊이

그림 24는 공초점 현미경을 통해 클리빙된 광섬유의 표면 거칠기 Ra를 측정 한 사진이다. 9.5 μJ 로 가공된 경우와 11.02 μJ 로 가공된 광섬유의 표면을 측정 하였다. 펄스에너지 9.5 μJ 을 사용하였을 때, 표면의 깊이는 7.2 μm 로 가공이 되나 클리빙된 광섬유의 단면을 보면 광섬유가 깨끗하게 클리빙되지 않음을 육안으로도 확인할 수 있다. Ra 값을 측정 한 결과 9.5 μJ 로 클리빙 할 경우 표면의 거칠기가 0.536 μm 로 측정되었으며, 11.02 μJ 로 클리빙 했을 때 0.169 μm 로 측정되어 9.5 μJ 로 클리빙한 것보다 11.02 μJ 로 클리빙한 결과가 약 2.5배정도 거칠기가 줄어든 것을 확인하였다. 이번 실험결과로 펄스초 레이저에 의해 광섬유 단면의 손상을 최대한 줄이고 깨끗하게 클리빙하는 조건은 펄스에너지가 11.02 μJ 임을 알 수 있었다.

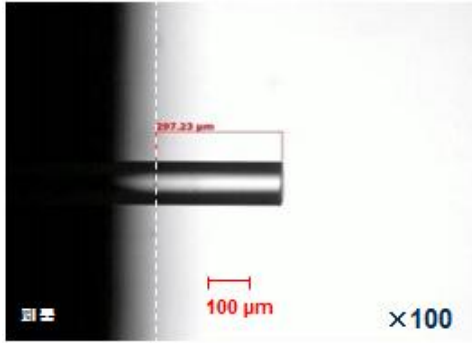


(a) Ra 0.536 μm

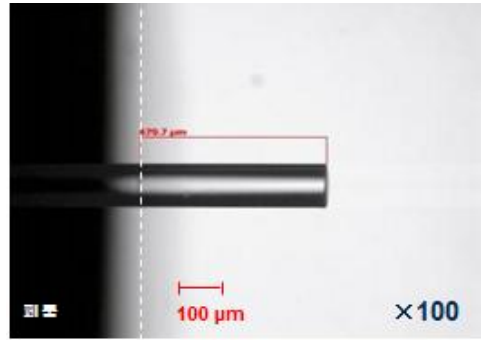


(b) Ra 0.169 μm

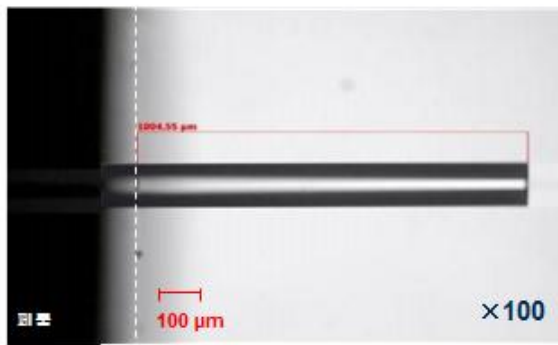
그림 24. 공초점 현미경을 이용한 광섬유 표면 거칠기 측정



(a) 297.23 μm



(b) 479.7 μm



(c) 1004.55 μm

그림 25. 현미경을 이용한 클리빙된 단일모드 광섬유 길이 측정

그림 25는 펨토초 레이저로 광섬유 끝단 길이 조절 실험을 진행한 결과를 광학현미경으로 측정한 사진이다. 그림 25 (a)는 폐를 앞 기준으로 300 μm 앞에서 클리빙한 결과이며, 그림 25 (b)와 (c)는 각각 480 μm , 1000 μm 로 클리빙한 결과이다. 현미경에 부속적으로 설치되어 있는 프로그램을 통해 각각의 실험결과를 측정한 결과 각각 297.23 μm , 1004.55 μm , 479.7 μm 로 측정 되었다. 각 조건 별로 1~4 μm 의 오차가 생김을 확인 되었으나, 이는 측정프로그램 내에서의 측정 오차로 생각되어 진다.

그림 26은 하나의 단일모드 광섬유뿐만 아니라 12개의 단일모드 광섬유 묶음으로 되어 있는 리본 광섬유에도 클리빙 기술을 적용한 결과이다. 이는 펨토초 레이저를 이용한 광섬유 클리빙 연구를 산업에 응용하고자 진행한 실험이다. 리본 광섬유도 자유롭게 사용자가 원하는 길이만큼 조절되는 결과를 보여준다. 펨토초 레이저에 의해 각 각 클리빙된 리본 광섬유의 길이는 임의적으로 20 μm 혹은 200 μm 씩 길이 차이를 준 결과이다. 12개의 광섬유 모두를 동일하게 클리빙할 수 있지만, 원하는 광섬유의 길이를 조절이 가능하다는 것을 부각시키기 위함이다.

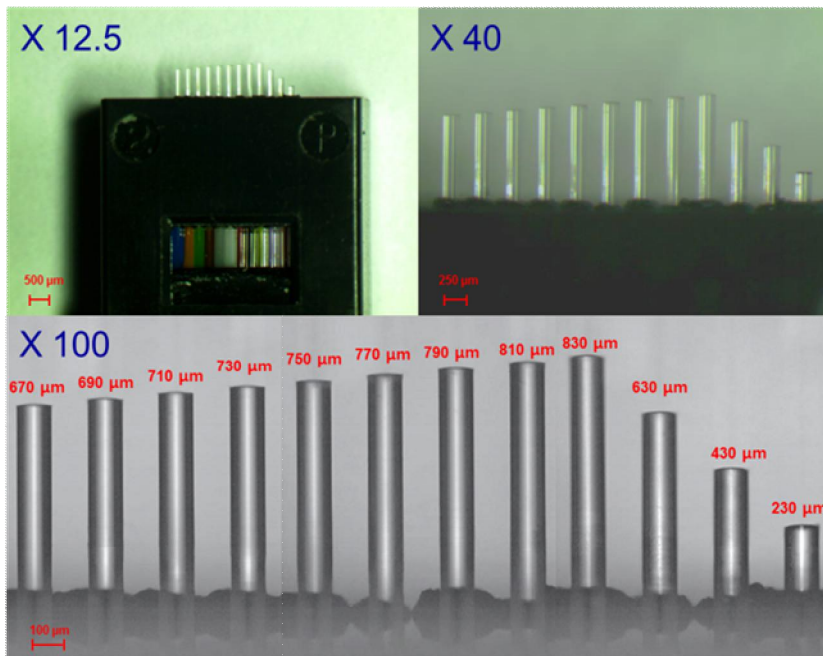


그림 26. 펨토초 레이저를 이용한 리본광섬유 길이 조절 현미경 측정 결과

2. CO₂ 레이저를 이용한 광섬유 끝단 곡률 제작

실험을 진행하기 위해 먼저 CO₂ 레이저를 이용해 광섬유 끝단에 레이저 출력을 변화시켜가며, 동일하게 1초 씩 노출시켜 광섬유 끝단이 얼마나 녹는지 확인하였다. 다음 그림 25는 노출 시간은 1초 씩 동일하게 조사 했으며, 레이저 출력만 변화를 주어 녹인 결과이다.

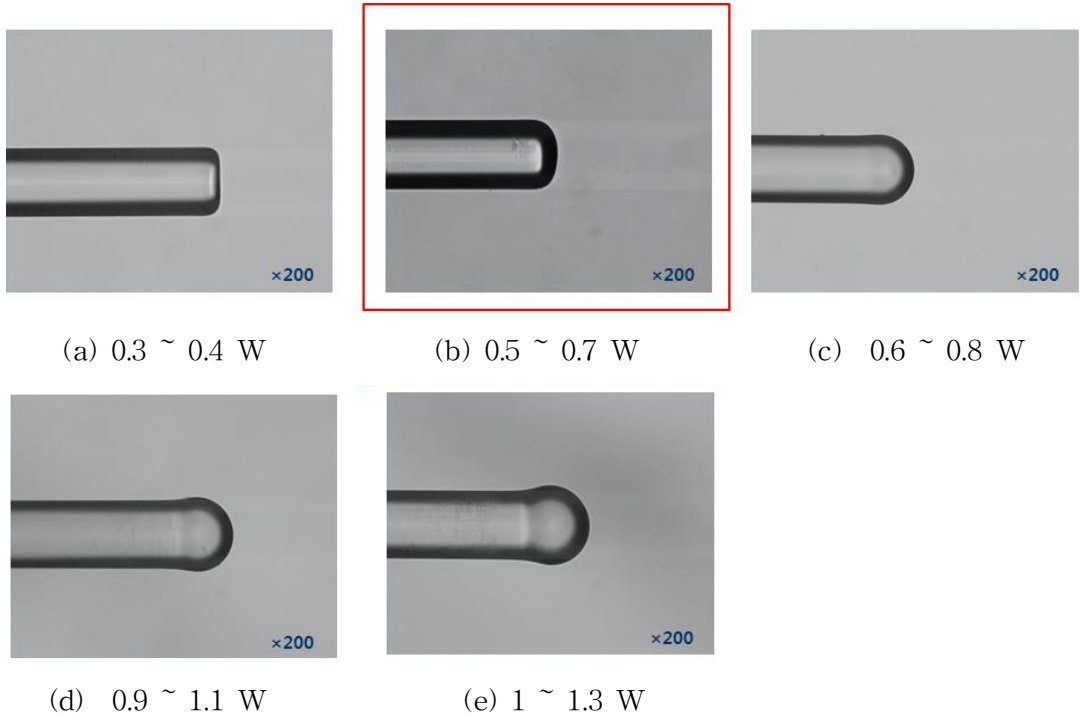
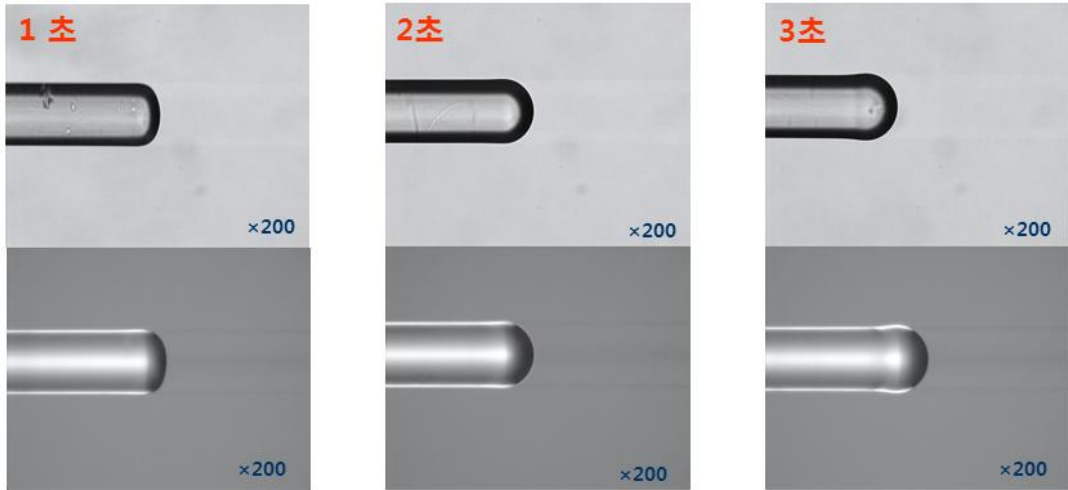


그림 27. CO₂ 레이저 출력에 따른 광섬유 끝단 변화

그림 27의 (a), (b), (c), (d), (e)는 각각 0.3 ~ 0.4 W, 0.5 ~ 0.7 W, 0.6 ~ 0.8 W, 0.9 ~ 1.1 W, 1 ~ 1.3 W로 녹인 결과를 광학현미경으로 측정한 사진이다. 그림 27 (a) 같은 경우 레이저 출력이 작아 광섬유 끝단 전체를 녹이지 않고 가운데 부분만 녹는 현상을 볼 수 있었다. 그림 (b)는 광섬유 끝단을 살짝 녹아짐을 확인 할 수 있다. 그림 27 (c), (d), (e)는 너무 많이 녹아 광섬유 끝단이 볼 (ball) 현상처럼 됨을 보여 곡률을 조절하기 어려울 것으로 판단하였다. 이번 결과를 통해 최적의 출력 조건은 그림 27 (b)임을 확인하였다.

그림 28의 (a), (b), (c)는 위의 그림 27 (b)의 조건으로 레이저 출력을 고정한 다음, 노출 시간을 1, 2, 3 초씩 변화를 주어 녹는 모습을 측정 한 현미경 사진이다. 그림에서 보듯 노출 시간이 늘어날수록 광섬유 끝단의 형상이 조금씩 볼 (ball) 렌즈 모양에 가까워지는 것을 확인하였다.



(a) 1초

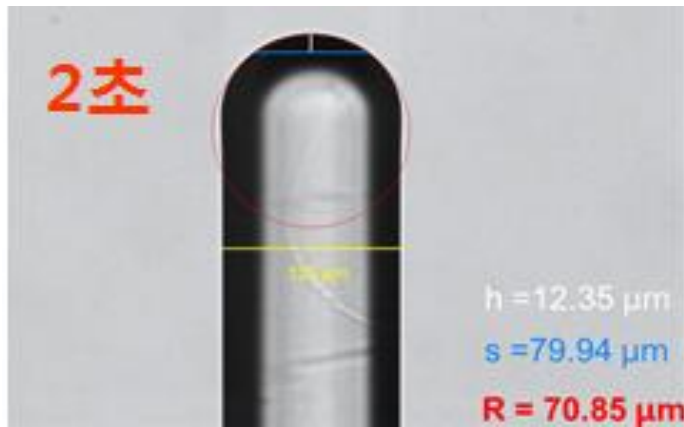
(b) 2초

(c) 3초

그림 28. CO₂ 레이저 출력 0.5 ~ 0.7 W에서 조사 시간에 따른 광섬유 끝단 변화



(a) $R = 100.2 \mu\text{m}$



(b) $R = 70.85 \mu\text{m}$



(c) $R = 69.84 \mu\text{m}$

그림 29. CO₂ 레이저 조사 시간에 따른 광섬유 끝단 곡률 반경 측정

그림 29는 곡률을 측정하는 방법이다. 측정 방법은 렌즈일체형 광섬유 전체적인 형상에 제일 가까운 원을 그린 다음, 현미경 측정 프로그램을 통해 h와 s를 측정 후 위의 식을 이용하여 곡률을 계산하였다. 곡률 측정 결과 (a),는 $100.2 \mu\text{m}$, (b)는 $70.85 \mu\text{m}$, (c)는 $69.84 \mu\text{m}$ 로 계산하였다. 아래 그림 30의 그래프는 그림 29 (a), (b), (c) 조건으로 각각 5개씩 샘플을 제작 한 다음, 위의 방법과 동일하게 곡률을 측정하는 결과이다. 동일한 샘플을 제작한 후 곡률 반경 측정결과 세 조건 모두 비슷한 결과로 녹는 것을 확인할 수 있다. 2초와 3초 씩 노출 시킨 결과를 보면 형상은 2초 노출 시킨 것 보다 3초 노출 시켜 제작한 결과가 볼(ball) 렌즈에 가까웠으나, 두 조건의 곡률 반경을 측정해 비교해보면 거의 차이가 없음을 보였다.

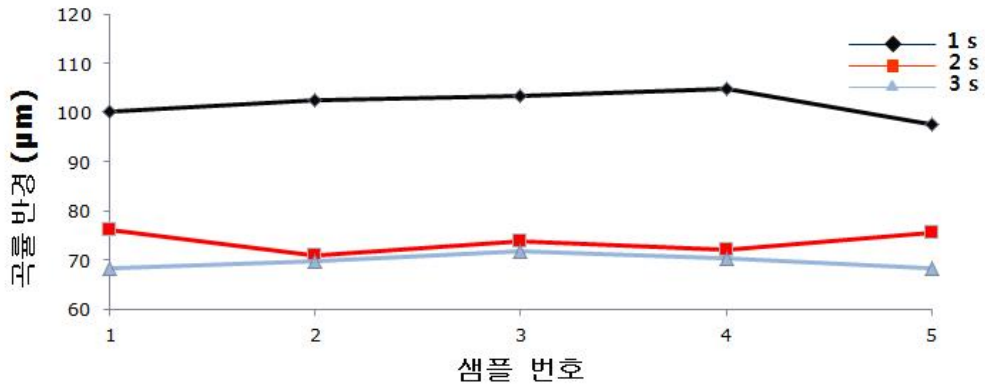


그림 30. 동일조건에서의 광섬유 끝단 곡률제작 재연성 결과

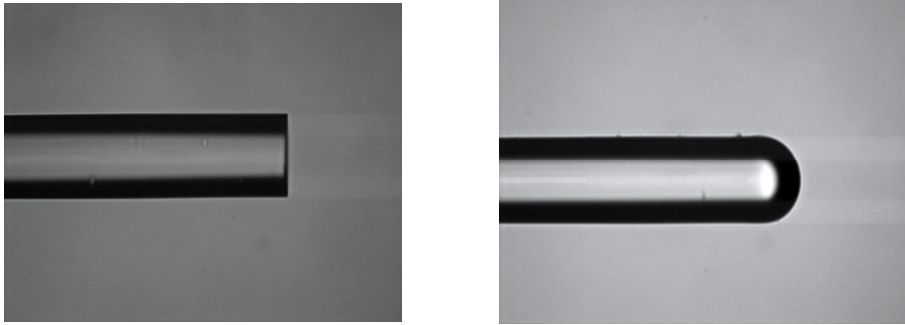
3. CSF 광섬유 융착을 통한 렌즈일체형 광섬유 제작

렌즈일체형 광섬유가 초점거리를 갖기 위해선 단일모드 광섬유의 코어와 곡률까지 사이의 거리가 중요하다. 그 사이의 거리를 조절하기 위해 CSF 광섬유를 융착 시킨 위의 조건에 맞게 펄스 레이저를 이용해 정밀 클리빙 하였고, CO₂ 레이저를 이용해 위의 선행 조건으로 CSF 광섬유 끝단을 녹여 제작 하였다.



그림 31. 단일모드광섬유와 CSF 광섬유 융착

그림 31는 단일모드 광섬유와 CSF 광섬유를 융착된 모습이다. 그림에서 왼쪽 단일모드 광섬유로 가운데 부분에 코어가 보이고, 반대로 오른쪽 부분은 CSF 광섬유로 코어가 없는 것이 확인된다. 또한, 융착시 발생되는 손실률도 0 dB가 됨을 알 수 있다.



(a) 펄초 레이저로 클리빙 된 광섬유 (b) CO₂ 레이저로 곡률 제작 결과
 그림 32. 펄초, CO₂ 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작 결과

그림 32의 (a)는 펄초 레이저를 이용하여 CSF 광섬유의 길이를 정밀 클리빙한 현미경 측정 사진이다. 그림 32 (b)는 클리빙된 CSF 광섬유표면에 CO₂ 레이저로 2 초 동안 조사하여 곡률을 제작하였다.



그림 33. 세점을 이용한 렌즈일체형 광섬유 곡률 측정

그림 33은 제작된 렌즈일체형 광섬유의 곡률 측정 사진으로 실제 코어에서 출사

되는 광선이 렌즈에 통과 되는 부분에서 임의의 세 개의 점을 찍어 직선의 방정식을 통해 원의 반지름을 계산하였다. 그림 33에서 빨간색 세 개의 점은 임의의 점이고, 노란색 선은 광선이 곡률을 지나가는 부분이며, 파란색 원은 빨간색 임의의 세 개의 점에 대한 직선방정식을 통해 얻어진 원이다. 코어와 렌즈 끝단까지의 거리는 $308 \mu\text{m}$, 곡률 반경은 $72.78 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. CO_2 레이저로 녹이면서 광섬유의 길이가 약 $8 \mu\text{m}$ 정도 증가되었다.

제 2절 렌즈일체형 광섬유 특성연구

1. ABCD 행렬을 이용한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 계산

그림 34는 L_c 와 R 의 값에 따라서 초점거리 L_f 에 대한 그래프이다. 그래프를 보면 Y축은 L_c 의 길이, X축은 R 은 곡률 반경이다. 그래프는 L_c 가 0부터 350 μm 에서 곡률 반경이 0부터 120 μm 까지 변할 때의 L_f 값을 보여주고 있다. 그래프에서 빨간색으로 표시된 곳으로 갈수록 초점거리가 길어짐을 나타내고 파란색 부분으로 갈수록 초점거리가 짧아지는 것을 나타낸다. 초점거리가 짧아지다가 - 값을 가지게 되면, 이는 렌즈일체형 광섬유가 초점거리에 광선을 수렴시키지 않고 발산을 하게 된다.

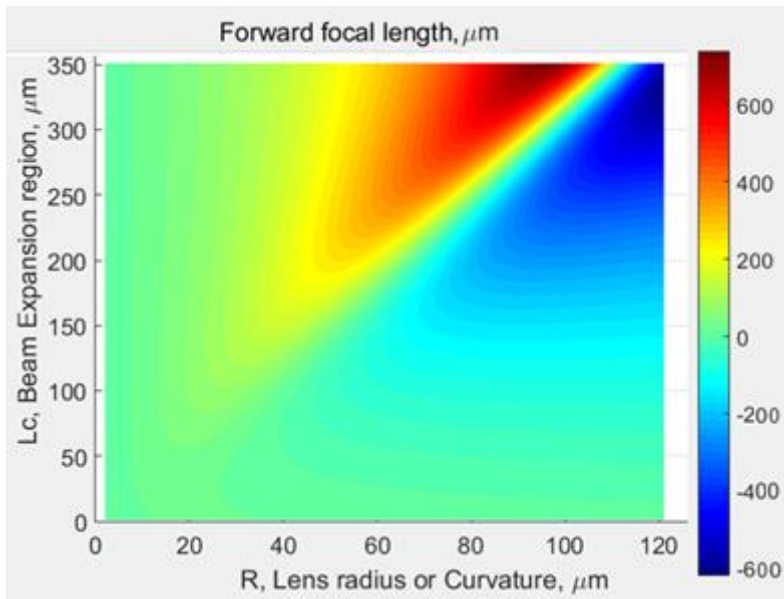
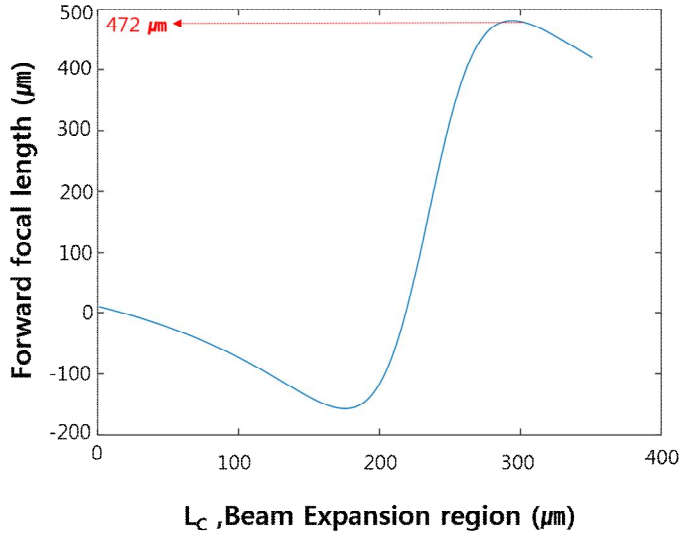
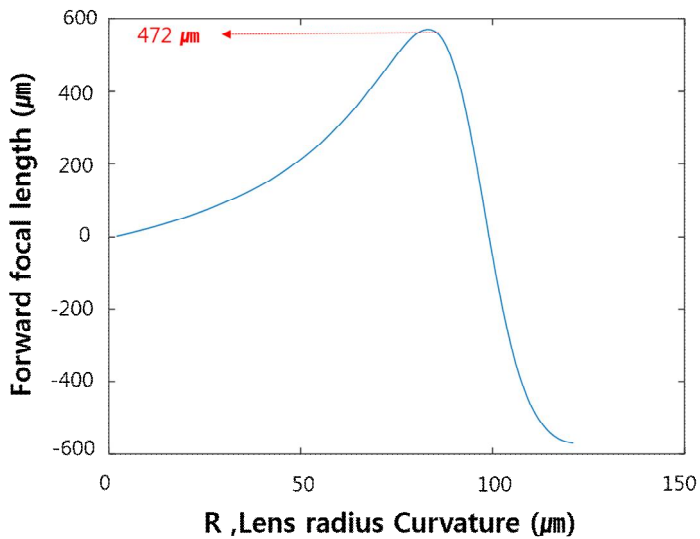


그림 34. L_c 와 R 의 조건에 따른 초점거리 분포



(a) 곡률 반경 R 을 $72.78 \mu\text{m}$ 로 고정 시키고, L_c 의 길이를 0부터 $350 \mu\text{m}$ 까지 변화에 따른 결과



(b) L_c 를 $308 \mu\text{m}$ 로 고정시키고 곡률을 0부터 $120 \mu\text{m}$ 변화에 따른 결과

그림 35. 실제 제작한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 시뮬레이션 측정

그림 35의 그래프는 CSF 광섬유를 용착시켜 렌즈일체형 광섬유를 제작한 다음, L_C 와 R 을 측정하여 L_f 의 값을 계산한 그래프이다. 그림 35 (a)는 곡률을 $72.78 \mu\text{m}$ 로 고정 시키고 L_C 의 길이를 0부터 $350 \mu\text{m}$ 까지 변화를 주어 계산한 그래프이며, 그림 35 (b)는 L_C 를 $308 \mu\text{m}$ 로 고정시키고 곡률을 0부터 $120 \mu\text{m}$ 변화를 주어 계산한 결과이다. 그래프를 통해 계산한 결과 L_C 가 $308 \mu\text{m}$, R 이 $72.78 \mu\text{m}$ 일 때 이론적으로 $472.9 \mu\text{m}$ 의 초점거리를 가지는 것으로 확인되었다. 또한, 그래프를 통해 보듯 곡률 반경과 R 과 L_C 의 값이 수십 마이크로 이상 차이가 나지 않으면, 비슷한 초점거리를 가짐을 확인할 수 있다.

그림 36의 그래프는 1550 nm의 파장이 단일모드광섬유 코어로 통해 출사 되는 광선의 직경인 MFD(Mode field Diameter)를 w_i 에 대입하여 얻은 그래프이다. 코닝사의 SMF-28 통신용 광섬유의 MFD는 $10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 를 가진다. 일반적인 단일 모드 통신용 광섬유를 통해 진행되는 광선의 직경은 코어의 직경 보다 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 정도 크다⁽¹⁹⁾. 보통의 경우 단일모드 광섬유 코어에서 출사되는 빔의 직경을 변수로 사용할 때, 광섬유 코어의 크기로 대신 사용한다. 식(3-2-6)에서 R과 LC를 측정하여 고정 변수로 사용하고, w_i 값을 $10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 의 반경을 계산하고 대입하여 MFD의 크기에 따른 초점거리를 계산하였다. MFD의 반경이 $0.1 \mu\text{m}$ 차이거나면, 렌즈일체형 광섬유의 초점거리는 수십 마이크로 차이가 나는 것을 확인하였다. 이를 통해 실제 측정된 초점거리는 MFD의 크기에 따라서 오차범위를 대략 385 ~ 440 μm 로 고려할 수 있다.

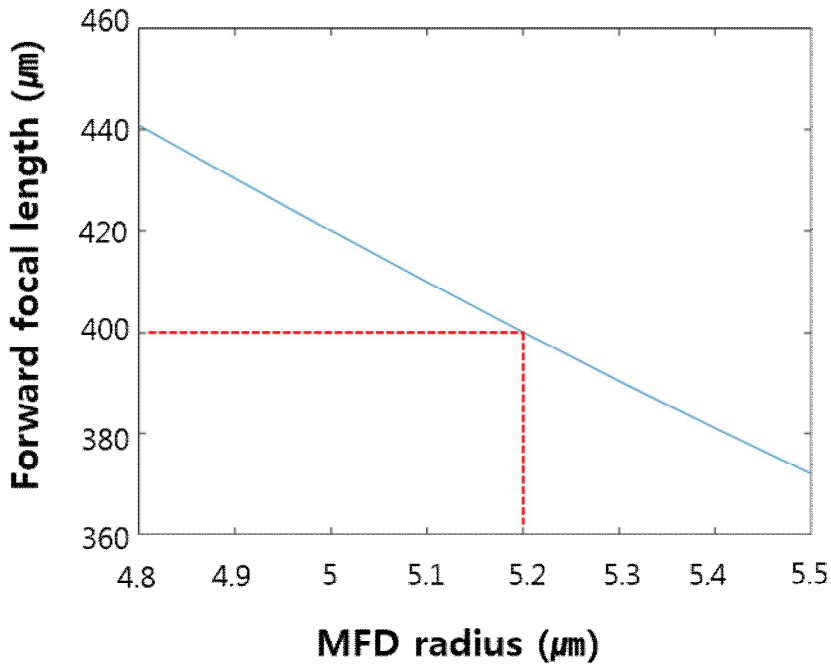


그림 36. MFD를 대입하여 계산한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 시뮬레이션

2. 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 결과

그림 37은 실제 제작한 렌즈일체형 광섬유의 초점거리를 측정한 것으로, 렌즈일체형 광섬유 통해 출사된 광선이 렌즈일체형 광섬유 앞 거울에 의해 반사되어 다시 렌즈일체형 광섬유로 들어가는 광선의 강도 (Intensity)를 측정한 결과이다. 거울과 렌즈일체형 광섬유 끝단이 닿도록 설치한 다음 거울의 위치를 $1\ \mu\text{m}$ 씩 총 $1.5\ \text{mm}$ 를 움직이도록 하여 측정하였다. 측정 결과 L_C 와 R값이 각각 $308\ \mu\text{m}$, $72.78\ \mu\text{m}$ 일 때 초점거리 L_f 는 $375\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. MFD의 값을 고려한 초점 거리는 $385 \sim 440\ \mu\text{m}$ 이지만, 실제 측정하는 방법에서의 오차범위 또한 고려하면 오차 범위가 늘어난다. 이는 측정할 시 렌즈일체형 광섬유 끝단과 거울이 닿지 않고 둘 사이의 거리가 생기면 오차가 발생된다.

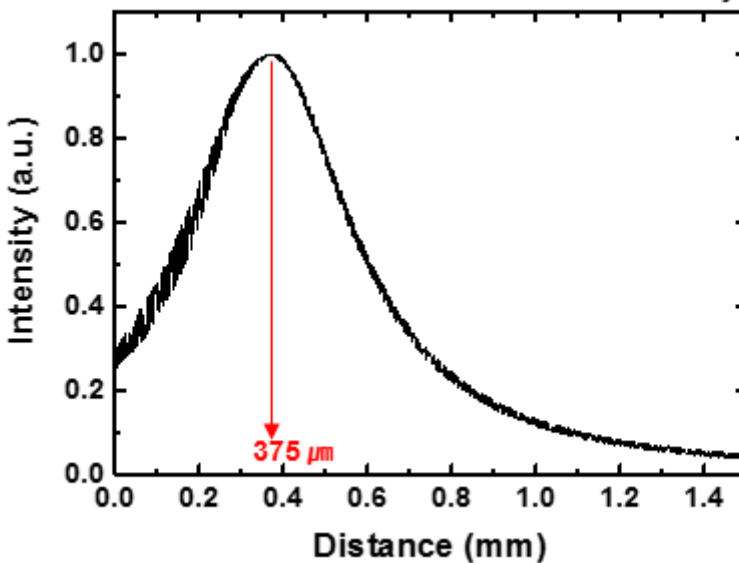


그림 37. 실제 제작한 렌즈일체형 광섬유 초점거리 측정 결과

그림 38은 실제 초점거리와 MFD의 평균값 $5.2 \mu\text{m}$ 를 대입하여 계산한 시뮬레이션을 비교한 그래프이다. 그래프를 보면 $31 \mu\text{m}$ 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 초점거리가 $31 \mu\text{m}$ 차이나는 이유는 ABCD 행렬을 이용한 계산은 근축 광학적 방식으로 접근 하여 해석하였기 때문이다. 이러한 이유 때문에 기존의 선행 연구 결과를 들과 비교해 봐도 실제 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 의 오차를 보인다.

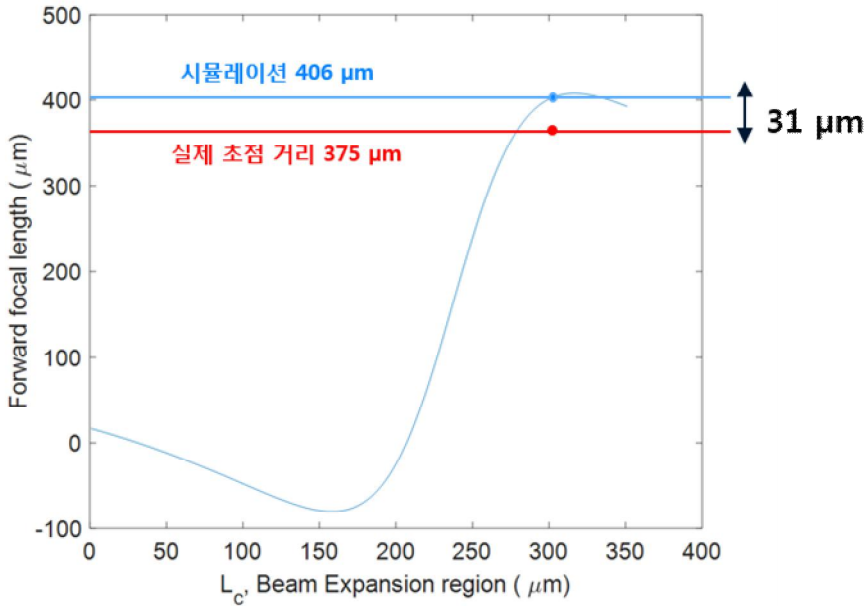


그림 38. 실제 측정된 초점거리와 MFD를 대입한 시뮬레이션 초점거리 비교

3. 렌즈일체형 광섬유 빔 크기 측정 결과

그림 39는 knife edge method 방법으로 가우시안 광선의 빔 크기를 측정한 결과이다. knife edge method 방법은 가우시안 광선의 크기를 측정하는 방법으로 거울에 반사되는 빔의 세기를 이용해 측정한다. 거울을 렌즈일체형 광섬유 초점거리에 위치시키고 그 다음 옆으로 조금씩 거울의 위치를 움직이면서 거울에 반사되어 들어오는 빔의 세기를 측정하면 아래 그래프처럼 검은 점선의 그래프를 얻을 수 있다. 이는 거울의 위치에 따라 상대적인 빔의 세기가 줄어듦을 확인하고, 이 그래프의 각각의 위치에서 기울기 즉 미분을 값을 계산하여 얻으면 아래의 파란색 그래프를 얻을 수 있다. 즉 파란색 실선은 가우시안 광선의 빔 크기를 나타낸다. 빨간색 실선의 볼츠만 피팅을 해준 값으로, 검은색 점선에 대하여 기울기 평균을 컴퓨터 계산하여 보정해주므로 좀 더 정확한 가우시안 광선의 빔 크기를 측정할 수 있다.

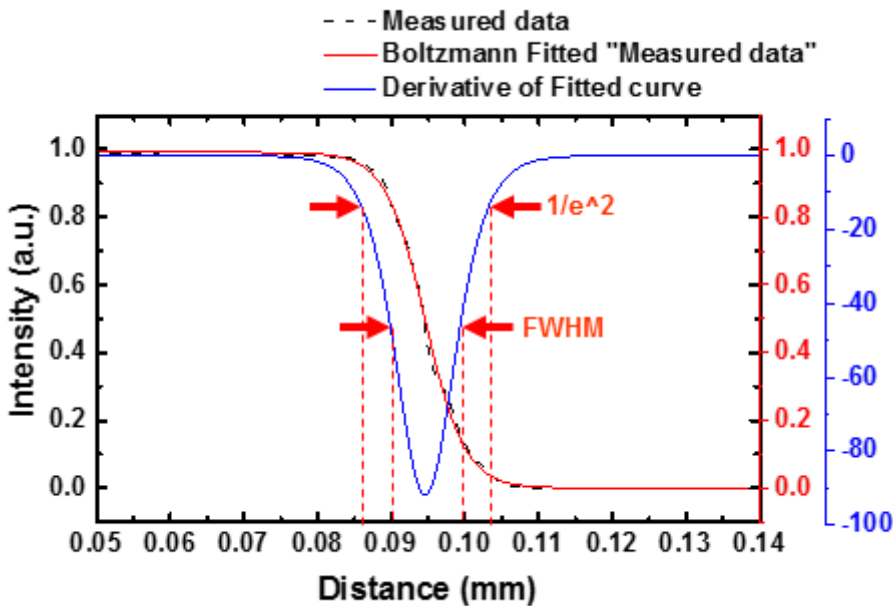


그림 39. knife edge method를 통한 가우시안 광선의 빔 크기 측정 결과

측정 결과 $1/e^2$ 에서의 렌즈일체형 광섬유 통해 출사된 광선의 빔 크기는 $27 \mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 이는 위의 식(2-1-6)을 이용하여 w_z 를 계산한 결과 값 $23 \mu\text{m}$ 와 $4 \mu\text{m}$ 오차를 확인하였다.

제 5장 결 론

펨토초 레이저를 이용한 광섬유 정밀 클리빙 실험을 통해 사용자가 원하는 길이만큼 광섬유 클리빙이 가능하다는 것을 확인하였다. 최적 조건은 11.02 μJ 의 펄스 에너지를 사용하여 광섬유 표면에 9.3 μm 로 깊이로 가공 되어야 표면이 깨끗하게 가공이 됨을 확인하였다. 또한, 리본 광섬유에도 펨토초 레이저 클리빙을 적용하여, 산업분야에도 응용이 가능함을 보였다. CO_2 레이저를 이용한 광섬유 끝단의 곡률 제작 연구를 통해 CO_2 레이저의 출력과 노출 시간을 조절해 녹는 경향성과 동일 조건에서 반복성 실험을 진행 해봤으며, 이로 인해 제작된 곡률 형상을 분석하여 곡률반경을 계산 하였다. 이를 활용하여 L_c 는 308, 곡률 R은 73의 렌즈일체형 광섬유를 제작하였으며, 매트랩을 이용한 시뮬레이션 초점거리 계산 결과와 오차를 비교 분석한 결과 곡률 R과 단일모드 광섬유 코어와 CSF 광섬유 곡률 끝단까지의 거리 L_c 의 차이에 대하여 오차 범위는 미미 하다는 것을 확인하였지만, 시뮬레이션 초점거리인 472 μm 와 실제 측정된 초점거리인 375 μm 는 약 100 μm 차이가 나는 데, 이는 MFD의 크기 차이가 0.1 μm 만 차이가 나도 초점거리에는 수십 마이크로미터 이상 차이가 나는 것을 확인하였다. 코닝사의 SMF-28 통신용 단일모드 광섬유는 1550 nm 파장이 진행할 때, MFD 크기는 9.9 ~ 10.9 μm 의 오차 범위를 가지므로 이를 이용하여 MFD에 대한 초점거리를 확인하였다. MFD를 이용하여 계산한 초점거리는 406 μm 이며, 이는 실제 측정된 초점거리 375 μm 와 31 μm 정도의 오차를 가진다. 빔 크기 측정은 knife edge method로 측정 하였으며, 실제 측정된 초점거리 $1/e^2$ 에서 27 μm 로 측정되었다. 이론적인 빔 크기는 대략 $2w_z$ 에서 23 μm 로 측정되었다. 두 결과를 비교하여 4 μm 의 오차를 확인하였다.

레이저를 이용하여 렌즈일체형 광섬유는 L_c 와 R값에 따라 광선을 수렴 해주거나 광선을 발산시키는 역할이 가능하며, 이를 응용하여 광선을 수렴해주는 렌즈일체형 광섬유 경우는 OCT나 MEMS와 같은 미세광학 소자에 응용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 발산하는 렌즈일체형 광섬유 경우 좁은 인체 내로 삽입하여 사용하는 의료용 내시경 조명 분야에 응용이 가능하다고 생각한다.

【참고문헌】

- [1] M. Mayeh and F. Farahi, "Laser Beam Shaping and Mode Conversion in Optical Fibers," *Photonic Sensors* **1**, 187-189 (2011).
- [2] K. Shiraishi and S. I. Kuroo, "A new Lensed-fiber Configuration Employing Cascaded GI-fiber Chips", *Journal of Lightwave Technology* **18**, 787-794 (2000).
- [3] S. Y. Ryu, H. Y. Choi, J. H. Na, W. J. Choi, and B. H. Lee, "Lensed Fiber Probes Designed as an Alternative to Bulk Probes in Optical Coherence Tomography," *Applied Optics* **47**, 1510-1516 (2008).
- [4] G. Wu, A. R. Mirza, S. K. Gamage, L. Ukrainczyk, N. Shashidhar, G. Wruck, and M. Ruda, "Design and use of Compact Lensed Fibers for Low Cost Packaging of Optical MEMS Components," *Journal of Micromechanics and Microengineering* **14**, 1367-1375 (2004).
- [5] Y. Qiu, Y. Wang, K. D. Belfield, and X. Liu, "Ultrathin Lensed Fiber-optic Probe for Optical Coherence Tomography," *Biomed Optics Express* **7**, 2154-2162 (2016).
- [6] C. Wang, J. Sun, F. Sun, J. Zhu, Z. Yuan, and A. Asundi, "Coupling Efficiency of Ultra-small Gradient-index Fiber Probe," *In Optics Communications* **389**, 265-269 (2017).
- [7] L. Shah, J. Tawney, M. Richardson, and K. Richardson, "Femtosecond Laser Deep Hole Drilling of Silicate Glasses in Air," *Applied Surface Science* **183**, 151-164 (2001).
- [8] K. K. Yoon, S. K. Lee, J. G. Kim, B. S. Shin, D. S. Choi, K. H. Whang, and J. Y. Park, "Laser Beam Application and Technology in Micro Machining," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* **17**, 8-35 (2000).
- [9] K. Boyd, N. Simakov, J. M. O. Daniel, R. Swain, E. Mies, A. Hemming, W. A. Clarkson, and J. Haub, "Novel Technique for the CO₂ Laser Fabrication of Optical Devices with Sub-micrometer Ablation Depth Precision," *In ECOC 2014 Conference, Cannes* **FR**, 21-25 (2014).
- [10] K. Boyd, S. Rees, N. Simakov, J. M. O. Daniel, R. Swain, E. Mies, A. Hemming, W. A. Clarkson, and J. Haub, "High Precision 9.6 μm CO₂ Laser End-face Processing of Optical Fibres," *Optics Express* **23**, 15065-15071 (2015).
- [11] Y. J. Kim, Y. S. Kim, S. M. Kim, and S. W. Kim, "Ultrafast Femtosecond Lasers Fundamentals and Applications," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*

27, 7-16 (2010).

[12] S. Nikumba, Q. Chen, C. Li, H. Reshef and H. Y. Zheng, and H. Qiu, “Low Precision Glass Machining, Drilling and Profile Cutting by Short Pulse Lasers,” *Thin Solid Films* **477**, 216-221 (2005).

[13] A. Saliminia, N. T. Nguyen and S. L. Chin, and R. Vallée, “The Influence of Self-focusing and Filamentation on Refractive Index Modifications in Fused Silica using Intense Femtosecond Pulses,” *Optics Communications* **241**, 529-538 (2004).

[14] K. Zhou, M. Dubov, C. Mou, L. Zhang, V. K. Mezentsev, and I. Bennion, “Line-by-Line Fiber Bragg Grating Made by Femtosecond Laser,” *IEEE Photonics Technology Letters* **22**, 1-3 (2010).

[15] K. Uno, T. Yamamoto, M. Watanabe, T. Akitsu, and T. Jitsuno, “SiO₂-glass Drilling by Short-pulse CO₂ Laser with Controllable Pulse-tail Energy,” *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing* **973519**, 1-6 (2016).

[16] M. R. Oh and C. An, “The Recrystallization of Polysilicon in SOI by CO₂ Laser Annealing,” *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers* **24**, 975-979 (1987).

[17] H. Kogelnik, “On the Propagation of Gaussian Beams of Light Through Lenslike Media Including those with a Loss or Gain Variation,” *Applied Optics* **4**, 1562-1569 (1965).

[18] W. L. Emkey and U. A. Jack, “Analysis and Evaluation of Graded-Index Fiber-Lenses,” *Journal of Light Wave Technology* **LT-5**, 1156-1164 (1987).

[19] R. Kishimoto and M. Koyama, “Coupling Characteristics Between Single-Mode Fiber and Square Law Medium,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **30**, 882-893 (1982).

[20] H. K. Choi, D. Y. Yoon, I. B. Sohn, Y. C. Noh, J. H. Sung, S. K. Lee, T. M. Jeong, M. S. Ahsan, and J. T. Kim, “CO₂ Laser Assisted Fabrication of Micro-lensed Single-mode Optical Fiber,” *Journal of the Optical Society of Korea* **19**, 327-333 (2015).

[21] E. Shafir and G. Berkovic, “Expanding the Realm of Fiber Optic Confocal Sensing for Probing Position, Displacement and Velocity,” *Applied Optics* **45**, 7772-7777 (2006).

[22] M. Artiglia, G. Coppa, P. D. I. Vita, M. Potenza, and A. Sharma, “Mode Field Diameter Measurements in Single-Mode Optical Fibers,” *Journal of Light Wave Technology* **7**, 1139-1152 (1989).

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20167101	과 정	석사
성 명	한글 임기동	한문 林祺棟	영문 ki-dong Lim		
논문제목	한글 초정밀 레이저를 이용한 렌즈일체형 광섬유 제작연구				
	영문 Study on micromachined lensed optical fiber using an ultra-precision laser				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(0) 반대()

2018년 02 월

저작자: 임기동 (인)

조선대학교 총장 귀하