



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](#)

2019년 8월  
박사학위논문

# 고출력 광섬유 레이저 출력단의 광파워 안정화에 대한 연구

조선대학교 대학원

전자공학과(전자공학전공)

허 상 휴

# 고출력 광섬유 레이저 출력단의 광파워 안정화에 대한 연구

A Study on  
Stabilization of optical power of high power optical  
fiber laser output stage

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

전자공학과(전자공학전공)

허 상 휴

# 고출력 광섬유 레이저 출력단의 광파워 안정화에 대한 연구

지도교수 이 충 규

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2019년 04월

조선대학교 대학원

전자공학과(전자공학전공)

허 상 휴

## 허상휴의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 황 석 승 (인)

위 원 광주대학교 교수 조 영 탁 (인)

위 원 조선대학교 교수 최 현 식 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 충 규 (인)

2019년 06월

조선대학교 대학원

## 목 차

<b>제 1 장 서 론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구배경 .....	1
1. 광섬유 레이저 .....	1
2. 고출력 광섬유 레이저의 성능 저하 .....	5
제 2 절 연구필요성 .....	5
제 3 절 논문 구성 .....	6
<b>제 2 장 이론적 고찰</b> .....	<b>7</b>
제 1 절 표면 처리에 의한 CLS .....	7
1. 표면 재코팅 .....	7
2. 표면 손상 .....	8
제 2 절 주기적 격자구조를 이용한 CLS 기술 .....	9
1. 주기적 격자 구조 설계 .....	10
2. 펄프광 제거기의 잔류 펄프광원의 분포 특성 .....	23
3. CLS 소자 성능 시험 .....	25
4. CLS 기구물 제작 .....	28
<b>제 3 장 레이저 빔 전달을 위한 전송모듈</b> .....	<b>37</b>
제 1 절 End cap 광학계 설계 .....	38
제 2 절 고출력 광섬유 레이저 출력 모듈 .....	43
1. End cap 모듈 설계 및 제작 .....	43
가. End cap 외형 구조설계 및 제작 .....	43
나. End cap 하우징 구조설계 및 제작 .....	45

다. 고효율 광섬유 레이저 End cap 제작 ..... 50  
라. 고효율 광섬유 레이저 End cap 방열 및 구조 해석 ..... 67  
마. End cap 성능 시험 ..... 69

제 4 장 결론 ..... 74

참고문헌 ..... 75

## LIST OF FIGURES

그림. 1 레이저 기본원리 .....	1
그림. 2 광섬유 레이저 구성 .....	3
그림. 3 레이저 출력시 문제발생 사항 .....	6
그림. 4 고출력 CLS의 구조 .....	8
그림. 5 광섬유 표면 손상 방법 .....	9
그림. 6 광섬유 클래딩 영역에 새겨진 주기적 형태의 산란 유도 형상 .....	10
그림. 7 광섬유에 주기적인 격자를 통한 일정량의 펄프광 제거의 효과 .....	11
그림. 8 Wind Mark Pro 미세 격자 홈 설계 .....	11
그림. 9 LMA-GDF-20/400, 25/400 Fiber .....	15
그림. 10 CLS 소자 제조시스템 .....	17
그림. 11 SYNRAD LASER 48-1SAL CO <sub>2</sub> Laser .....	17
그림. 12 Telecentric Lens syset .....	18
그림. 13 CLS 제조시스템 구성도 .....	19
그림. 14 CLS 제조시스템 내부 설계 .....	20
그림. 15 CLS 제조를 위한 광학 시스템 구성 설계 .....	20
그림. 16 CLS 제조시스템 프레임 설계 .....	21
그림. 17 CLS 제조시스템 내부 프레임 .....	22
그림. 18 0° 기준부터 각30°씩 12회 회전을 통한 미세홈 격자 공정 .....	22
그림. 19 미세 홈 격자가 새겨진 CLS 소자 .....	23
그림. 20 Midas 시뮬레이션을 통한 분석 .....	23
그림. 21 Midas 시뮬레이션을 결과 그래프 .....	24
그림. 22 CLS 전단 및 후단에서의 온도 차 .....	25
그림. 23 CLS 성능 시험을 위한 구성도 .....	25
그림. 24 CLS 성능 시험을 위한 셋팅 .....	26
그림. 25 CLS 100W 기준 성능 측정 그래프 .....	27
그림. 26 CLS 200W 기준 성능 측정 그래프 .....	28
그림. 27 CLS 기구물 구성도 .....	29
그림. 28 설계된 펄프광 제거기 기구물 형상도 : 저출력용 .....	30
그림. 29 저출력 CLS 기구물 상부 세부 설계 .....	31
그림. 30 저출력 CLS 기구물 하부 세부 설계 .....	31
그림. 31 제작된 저출력 CLS 기구물 상부 .....	31



그림. 32	제작된 저출력 CLS 기구물 하부	32
그림. 33	설계된 펌프광 제저기 기구물 형상도 : 고출력용	33
그림. 34	고출력 CLS 기구물 상부 세부 설계	34
그림. 35	고출력 CLS 기구물 하부 세부 설계	34
그림. 36	고출력 CLS 기구물 하부 냉각 가이드 세부 설계	34
그림. 37	고출력 CLS 기구물 냉각 가이드 덮개	35
그림. 38	제작된 고출력 CLS 기구물 상부	35
그림. 39	제작된 고출력 CLS 기구물 하부	35
그림. 40	제작된 고출력 CLS 기구물 냉각 가이드	36
그림. 41	제작된 고출력 CLS 기구물 냉각 가이드 덮개	36
그림. 42	End cap 기본 구성	37
그림. 43	레이저 빔 전달을 위한 End cap 모델링	39
그림. 44	End cap 길이에 따른 에너지 밀도 분석	41
그림. 45	End cap 2D 외형도면	43
그림. 46	End cap 3D 외형도면	44
그림. 47	End cap 내부 구성	44
그림. 48	kW급 광섬유 레이저 출력 End cap	45
그림. 49	End cap 하우징 3D 도면	45
그림. 50	End cap 하우징	46
그림. 51	End cap 출력단 출력단 하우징 3D 도면	47
그림. 52	End cap 입력단 하우징 3D 도면	47
그림. 53	제작된 입/출력단 하우징	48
그림. 54	결합된 End cap assembly 하우징 3D 도면	49
그림. 55	End cap 결합 전	49
그림. 56	최종 제작된 End cap 메탈하우징	50
그림. 57	Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M	50
그림. 58	Nufern사의 FUD-3443	52
그림. 59	광섬유 절단장비 (LDC-200)	53
그림. 60	광섬유 용착접속기 (FSM-100P+)	54
그림. 61	광섬유 용착접속 과정	54
그림. 62	이중 광섬유 접합공정 순서도	55
그림. 63	접합된 이중 광섬유	55
그림. 64	베어파이버 어댑터 연마지그	56

그림. 65 이중 광섬유가 베어파이버 연마지그에 장착된 모습 .....	56
그림. 66 연마기 (Trig Fiber Shaping Workstation) .....	57
그림. 67 연마 단계별 공정 .....	59
그림. 68 최종 연마된 이중 광섬유 .....	60
그림. 69 Quartz Block(석영재질) .....	60
그림. 70 가공된 Quartz Block 도면 .....	61
그림. 71 Metal Ferrule (Cupro-nickel 재질) .....	62
그림. 72 적용된 온도센서 (MA100) .....	64
그림. 73 Photodiode (FGA 01) .....	65
그림. 74 PFA-EX 케이블 튜브 .....	66
그림. 75 이중광섬유가 용착된 End cap .....	66
그림. 76 End cap 3D 결합 형상 도면 .....	67
그림. 77 End cap 열해석 데이터 .....	68
그림. 78 End cap 전송 특성 측정을 위한 구성도 .....	69
그림. 79 End cap 코어 빔 특성 시험 .....	70
그림. 80 냉각을 위한 수냉 Cap 설계 .....	71
그림. 81 냉각을 위한 수냉 Cap 제작 .....	71
그림. 82 End cap 단계별 파워 테스트 시험 셋팅 .....	72
그림. 83 End cap 단계별 파워 테스트 시험 .....	72

## LIST OF TABLES

표. 1 레이저 기본원리 .....	2
표. 2 고출력 광섬유 레이저 응용분야 .....	4
표. 3 Win Mark Pro를 통한 격자 구조 설계 .....	12
표. 4 선정된 Fiber 특성 .....	15
표. 5 Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M, LMA-GDF 20/400-M 사양 .....	16
표. 6 Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M, LMA-GDF 20/400-M 사양 .....	16
표. 7 Midas 시뮬레이션 결과 값 .....	24
표. 8 최대 100W 제거 CLS 성능 측정 .....	26
표. 9 최대 200W 제거 CLS 성능 측정 .....	27
표. 10 저출력 펌프광 제거기 사양 .....	30
표. 11 저출력 펌프광 제거기 사양 .....	33
표. 12 레이저 빔 전달 광섬유 사양과 End cap용 Fused silica의 굴절률 .....	40
표. 13 End cap 길이에 따른 밀도 분석 데이터 .....	40
표. 14 레이저 출력 전달을 위한 End cap 구성 사양 .....	42
표. 15 선정된 Fiber 특성 .....	51
표. 16 Coreless MMF인 FUD-3443 제품 특성 .....	52
표. 17 이중 광섬유 단면 연마 공정 조건 .....	58
표. 18 온도 센서별 특성 .....	63
표. 19 Photodiode 규격 .....	64
표. 20 케이블 튜브 특성 분석 .....	65
표. 21 End cap Temperature .....	69
표. 22 End cap 코어 빔 특성 시험 측정 값 .....	70
표. 23 End cap 단계별 파워 성능 측정 값 .....	73

## ABSTRACT

### 고출력 광섬유 레이저 출력단의 광파워 안정화에 대한 연구

By Heo Sang-hu

Advisor : Prof. Lee chung-gyu, Ph.D.

Dept. of Electronic Engineering

Graduate School of Chosun University

레이저는 파장 폭이 수 MHz 이하로 매우 좁고 코히어런스 특성이 매우 강하여 빛을 멀리 보낼 수 있는 통신 수단 및 빛과 빛 사이의 간섭현상을 이용한 신호처리 등 다양한 분야에서 활용되어 왔다.

레이저 구성에 필요한 소자의 개발과 함께 레이저 출력 향상에 대한 연구 또한 활발히 진행되어 산업계 예를 들면 철판가공 및 군사적 측면에서 레이저 통신, 무기 등 분야에 놀라운 진보를 보이고 있으며, 고출력 레이저에 대한 수요 또한 날로 증가하고 있는 추세이다.

특히 에너지 전이 현상이 좋은 희토류 광섬유를 매체로 하는 광섬유 레이저는 소형화시키기 좋으며, 이동성이 좋아 최근 많이 연구되고 있으나 광섬유를 구성하는 빛이 전달되는 코어와 코어를 둘러싸고 있는 클래딩의 단면적이 좁아 주어진 광출력에 대해 에너지 밀도가 높다. 이로 인해 성능이 떨어지는 단점을

가진다. 특히 고출력 레이저 경우 광섬유 레이저 또는 광섬유 증폭기 출력단은 증폭된 고출력의 빛이 대기로 방출되는 부분이기에 굴절률의 차로 인해 레이저 빛이 광섬유로 일부 되반사 현상이 발생하며, 광증폭 시키기 위해 필연적으로 주입하는 고출력 펌프광이 클래딩 영역에서 잔류하는 경우 광섬유 온도를 상승시켜 매질의 손상을 가져오고 궁극적으로는 성능 저하와 함께 수명감소를 초래한다.

최근 이를 보완하기 위한 연구가 많이 진행되고 있는 추세로서 큰 흐름으로는 클래딩에 잔류하는 펌프광을 유효하게 제거하기 위한 방법과 광섬유 레이저 출력단에 에너지 밀도를 높이기 위해 빛의 퍼짐 현상이 유발되도록 코어 단면적이 다르고 매질 굴절률이 다른 이중 광섬유를 집합시켜 출력단의 손상을 지연시키기 위한 방법으로 구분된다.

본 논문에서는 광섬유 표면에 주기적 격자구조를 형성시켜 잔류광원을 효율적으로 제거시키는 연구를 수행함과 동시에 이중 광섬유를 융착 접속시키고 빔 사이즈를 유효 적절하게 확장시킬 수 있는 설계방법을 제안하고 실질적 응용을 위해 온도센서 및 잔류광원 모니터용 센서 등을 부가하여 열의 분산 등 성능이 향상된 레이저 전달 모듈을 실제 제작하였으며, 이와 같은 결과는 상용 레이저의 출력단에 효율적으로 장착 활용될 것으로 기대한다.

## ABSTRACT

A study on stabilization of high power fiber optic laser output

Laser is very narrow in wavelength and has very strong coherence characteristics. Lasers have been used in a variety of fields, such as communication that can send light away and signal processing that uses the phenomenon of interference between lights.

Development of devices required for laser configuration and research on improvement of laser output have been actively carried out, and demand of high power laser in industry - iron plate processing, military laser communication, weapons, etc. - is increasing.

Fiber optic lasers made of rare earth optical fibers with energy transfer phenomenon can be made small and are easy to move and are accordingly actively studied. However, the cross-sectional area of the core and the cladding of the optical fiber is so narrow that the energy density is increased and the performance is degraded. The output of a fiber optic laser or optical fiber amplifier where high power light is emitted into the atmosphere is refracted and part of the laser light returns to the optical fiber. If part of the laser light remains in the high-power pump for amplification, the temperature of the optical fiber is raised and damaged, which

causes deterioration of performance and reduction of the lifetime.

Much research has been done to overcome this problem. There is a method of efficiently removing the amplified light remaining in the cladding and a method of delaying the damage of the output terminal by bonding an optical fiber having a different cross-sectional area and refractive index so that light spreading occurs in order to increase the energy density at the output end of the optical fiber laser .

In this paper, we propose an efficient method of removing the residual light source using a grating structure on the surface of the optical fiber, and a method of appropriately controlling the beam size after fusion of different types of optical fibers. For practical use, we added a temperature sensor and a residual light source monitor sensor to fabricate a laser delivery module with improved heat dissipation and performance. This result will increase the efficiency of the commercial laser output stage and it will be practical.

# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경

### 1. 광섬유 레이저

Laser는 전기적 자극에 의해 유도물질로부터 광을 방출하게 하고, 공진기를 통해 증폭된 광을 말하며, 펌핑(pumping) 광원은 유도물질에 광을 공급하고, 전기적 자극에 의해 유도물질로부터 방출된 광은 공진기의 Reflection Mirror에 의해 증폭되는 원리이다.

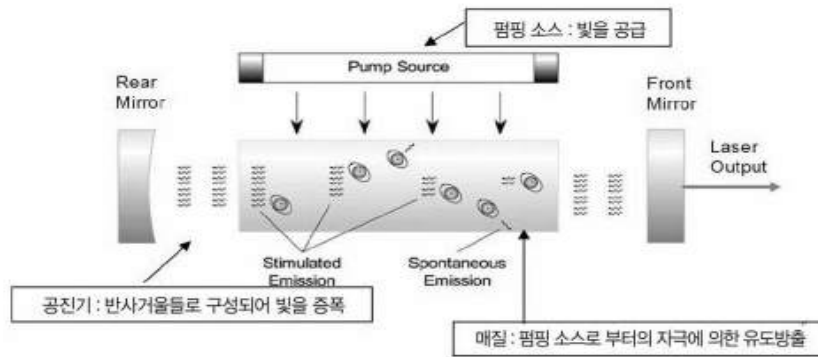


그림. 1 레이저 기본원리 [93]

레이저는 매질, 공진기, 펌핑(pumping)광원으로 구성 되고, 매질의 종류에 따라 분류되며, 그 종류로는 가스 레이저, 고체 레이저, 반도체 레이저, 광섬유 레이저 등으로 구분되고 있다. 최근에는 고출력 레이저의 활용성이 높아짐에 따라 산업계 요구의 증가로 파이버 레이저 개발을 위한 연구와 시장 형성의 주요 산업으로 파이버 레이저가 주목받고 있다. 표. 1은 레이저가 주로 응용되는 분야를 언급한 것으로 최근에 산업용 및 군사용으로서 레이저 응용이 확대됨에 따라 통신용에 사용되었던 반도체 소자를 이용한 레이저에서 고출력 레이저로



수요가 급속히 증가되고 있다[9].

표. 1 레이저 응용분야

응용분야	기술 및 제품	비고
가공	IT(반도체, 디스플레이), 기계 자동차, 조선	레이저 가공
에너지	태양에너지, 2차 에너지	레이저 가공
의료	레이저 치료, 영상진단	의료용
정보통신	광통신 시스템, 부품개발	광통신용
군사	레이저 유도 폭격, 미사일 격추 레이저	레이저 무기, 계측(관측)
보안	보안, 감시	감시시스템
환경	유해물질 분석시스템	레이저 환경감시

고출력 레이저는 1960년 메이만(Maiman)에 의해 루비 레이저가 개발된 이래로 CO<sub>2</sub> 레이저 와 ND:YAG 레이저를 중심으로 기술개발이 꾸준히 이루어졌으며, 그 후로 고출력 펄스광 LD 레이저의 발달로 고체 레이저 기술과 Nd:YAG 레이저 기술이 개발되었지만 레이저 출력이 높아짐에 따라 레이저 매질 내의 열 렌즈 효과에 의해 레이저 붕의 광섬유에 손상을 주게 되며, 이를 해결하기 위해 이득매질의 표면적 대 부피비율을 높이는 방법이 있으나 이상적인 이득매질은 Fiber 형태로 이루어져야 되며, 최근 들어 고출력 레이저는 광섬유를 이용한 레이저 형태로 급속히 전환되고 있다.

초기형태의 광섬유 레이저는 1980년대에 이르러 희토류 Fiber를 이용한 최초의 싱글모드 Fiber Laser와 Laser 증폭기 개발로 큰 성과를 이루었으며, 이러한 기술은 저손실 Fiber를 통한 초고속, 장거리 Fiber 통신기술의 발전을 이루고 오늘날 인터넷 시대의 도래를 이끌게 되었다. Fiber Laser은 Fiber 자체에 Rare-Earth Element 금속을 첨가하여 Laser를 만드는 기술로 기존의 Gas Laser나 고체형 Glass 기반의 Laser 광원에 비해 광원 자체의 경량화가 가능하고, Laser 자체가 Optical Fiber로 구성되어 있으므로 High Power 광

원을 목적지까지 도달시키기 위해 2차적인 Optical Fiber 연결이 없어 에너지 손실이 적으며, 기존의 Gas Laser나 고체형 Glass 기반의 Laser 광원에 비해 광원의 간섭성 등의 광원특성이 매우 뛰어나다. Gas Laser와 고체 Glass Laser의 경우 부피와 중량이 크며, 설치장소의 조건이 따르고, 한번 설치하면 쉽게 이동하기가 어려우며, 목표지점에 Laser 출력을 전달하기 위해 Optical Fiber를 연결해야 되며 그에 따른 결합손실로 인해 출력저하 현상이 나타나고, 전반적인 에너지 효율성이 Optical Laser에 비해 3배 이상 하락 되는 것으로 나타났다.

Semiconductor Laser의 경우 출력광의 특성이 낮아 Beam 특성의 향상을 위한 2차적인 광신호 처리단계의 필요성에 따라 Fiber Laser의 기존 Laser들에 비해 구입가격이 저렴하고, 유지보수 비용이 낮으며, High Power, 고성능을 갖는 새로운 Laser로 주목되고 있다[19-25].

고출력 광섬유 레이저는 그림. 2와 같이 구성되며, 앞서 언급한 희토류 광섬유 양단간에 반사체, 여기서는 Bragg grating(회절격자)을 형성시켜 특정 파장에 대해 빛을 반사시키는 기능을 구현하며, 결과로서 희토류 광섬유를 중심으로 특정 파장(우리가 얻고자 하는 레이저 빔의 파장)에 대한 공진기(cavity)를 형성시키고 이러한 공진기에 외부로부터 펌프광원을 주입시키면 펌프 광이 희토류 광섬유를 여기 시키고 여기상태에서 안정된 기저상태로 전환하는 과정에서 에너지 차에 해당되는 특정 파장의 빛이 방출되는 원리이다[2].

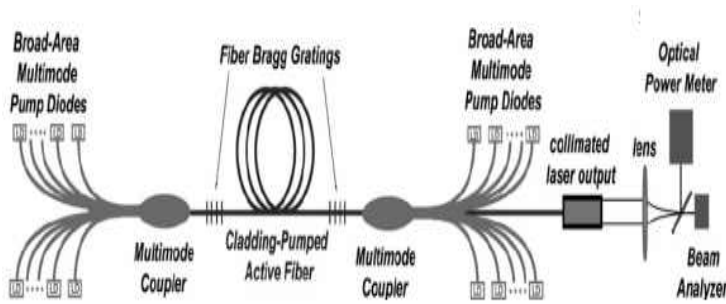


그림. 2 광섬유 레이저 구성[94]

고출력 광섬유 레이저 기술은 지속적인 발전과 Optical Fiber제작 기술과 펌프용 Semiconductor Laser 기술을 기반으로 빠른 속도로 성장하고 있으며, 2000년대 최초로 kW급 고출력 Single mode Fiber Laser을 개발하였고, 이후 성장을 통해 2010년에 kW급 이상의 출력이 가능한 Single mode Fiber Laser가 상품화되고 있으며, 다방면으로 응용기술과 산업현장에서 기존방식의 교체 및 기체 레이저를 대체하고 있으며, Fiber Laser 특성을 활용하여 다양한 기술분야에 활성화되고 있다. 표. 2는 High Power Fiber Laser의 응용분야를 보인 것으로 광범위한 분야에 활용성을 넓혀가고 있으나 특히 산업현장 및 군사적 측면에서 활발히 연구되고 있다.

표. 2 고출력 광섬유 레이저 응용분야

응용분야	기술 및 제품
정보통신	광대역 통신이 가능한 kW급 광원 및 증폭기술
의료	kW급 광섬유 레이저 시술용 및 의료 센서
국방	kW급 레이저 무기, 위치추적용 레이저
환경	환경오염 분석 센서 기술 및 레이저 감시 기술
기조과학	고출력 kW 레이저 기초분석, 광스위칭 소자에 관한 연구
항공우주	인공위성 고출력 레이저 기술, 우주환경 분석 레이저 기술
반도체, 이동통신	레이저 CSP 마킹기술, 레이저 클린 시스템, 레이저 용접 기술

## 2. 고출력 광섬유 레이저의 성능 저하

High Power Fiber Laser는 최종 Output 광섬유에서 대기 굴절률과 광섬유의 굴절률이 상이하며, Output 내부로 되반사가 발생됨에 따라 Laser 시스템의 오류 발생 및 내부 시스템 내부손상의 원인이 된다. 또한 출력단의 광원의 출력이 높기 때문에 출력단 Fiber의 손상이 발생한다.

이러한 Fiber 출력단의 손상과 시스템 내부로 돌아오는 현상을 방지하기 위해 High Power 광원의 전송을 위한 특수 Optical Fiber 출력단 소자가 요구되며, 소자는 광학적 안정성과 시스템적인 안정성을 갖추어 작업자의 안정성이 고려된 감시기능이 요구됨에 따라 High Power Fiber Laser 출력전송을 위해 kW급 Fiber Laser 광원의 전송기능과 전송상태 감시기능이 복합적으로 내재된 출력전송 모듈을 연구하고자 한다. 본 연구는 kW급 광섬유 레이저의 성능에 영향을 미치는 출력단에서의 펌프 광원의 잔류 현상을 제거하기 위한 연구로서 군사용 및 의료형 고출력 광섬유 레이저의 출력단에 범용으로 사용될 수 있는 전송 모듈 및 광섬유 클래딩에 잔류하는 광원을 제거하는 장치가 필요하다.

### 제2절 연구 필요성

산업 및 군사적 목적에서의 고출력 광섬유 레이저의 필요성이 높아짐에 따라 출력을 향상시키기 위한 연구도 활발히 진행되어 왔다. 광섬유 레이저의 출력 특성은 레이저 종단에서의 출력 특성, 즉 펌프 잔여 광원이 광섬유 출력 특성에 상당히 영향을 미치므로 이에 대한 제어가 광섬유 레이저의 출력 특성을 높이는데 필요한 기술로 인식되고 있다.

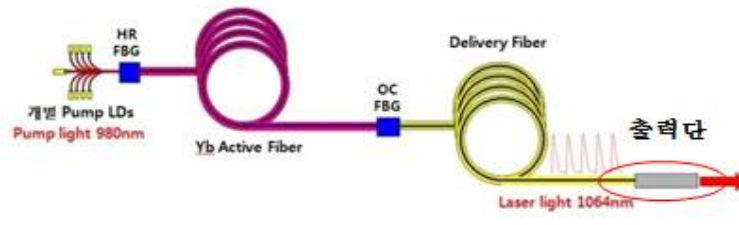


그림. 3 레이저 출력시 문제발생 사항

고출력 레이저 출력시 출력단 부의 잔여 펌프광원과 발열로 인한 문제점이 발생되고, 상이한 굴절률에 의한 되반사의 문제로 시스템의 손상이 발생할 수 있는 점을 해결해야 한다.

본 연구에서는 성능을 높이기 위한 방법으로 1) 펌프 잔여 광원을 유효하게 제거하기 위한 방법과 2) 레이저 전송 광섬유에 상태 모니터링 제어부를 접목하여 광섬유 출력상태를 실시간으로 제어함으로써 안정적 출력을 얻는 것이 가능한 기술을 연구하는데 있다.

### 제3절 논문 구성

본 논문의 구성은 제2장에서 kW급 고출력 광섬유 레이저의 클래딩에서의 펌프 광원을 유효하게 제거하기 위한 연구에 대해 언급하며, 제3장에서는 광섬유 레이저 종단에서의 안정적인 광출력을 제공하기 위한 전송 모듈에 관한 연구를 기술한다. 마지막으로 본 논문의 결론에 해당되는 내용이 제4장에서 언급된다.

## 제2장 이론적 고찰

광섬유 레이저의 출력을 원하는 값까지 확장하는 경우 최종 출력단에서의 출력특성은 광섬유 내에 특히 클래딩 영역에 남아있는 펌프 광원의 양에 의해 변하게 된다. 이와 같은 경우 응용 측면에서 광출력의 변화로 인해 산업적 및 군사적 측면에서의 응용성이 제한된다. 클래딩 광 제거기(CLS: cladding light stripper)는 이중 클래딩 구조를 갖는 광섬유의 내부 클래딩에 남아있는 잔여광을 제거함으로써 광신호 빔의 질을 높이고 고출력 광증폭기의 안정성을 증가시키는 중요한 역할을 한다[35-36].

### 제1절 표면 처리에 의한 CLS

광표면 처리에 의한 클래딩 광제거 방법으로는 표면 재코팅(surface recoating)과 표면손상(surface damage) 두 가지 방법이 일반적으로 사용한다. 표면 재코팅은 내부 클래딩을 광학적 젤(gel)이나 금속 또는 글래스(glass)로 재코팅하여 클래딩 광을 광섬유 바깥으로 유도하거나, 흡수하는 방법[37-38]이며, 표면손상은 내부 클래딩을 화학적, 광학적 또는 기계적 방법으로 손상시켜 내부 클래딩으로부터 전반사되는 것을 막는 방법이다.

#### 1. 표면 재코팅

클래딩에 높은 굴절률을 갖는 UV(ultra violet) 처리된 광학적 젤을 사용하여 클래딩으로 유도되는 빛을 클래딩 바깥으로 밀어내는 역할[39]을 한다. 그러나 이 방법은 전송되는 빛의 일부분을 흡수하여 내부온도 상승의 요인이 된다. 이러한 문제를 보완하기 위해 Guo 등은 다른 굴절률을 갖는 세 가지 종류의 광학적 젤을 연속으로 사용하는 방법 그림. 4을 제시한 바 있으며 결과로서 클래딩 광의 감쇠율을 18 dB 이하로 낮추고 150W의 출력 광에서 64°C 이하

로 온도를 낮출 수 있음을 보인 바 있다. 부드러운 금속을 재코팅 물질로 사용하여 높은 열전도상과 근적외선 광흡수 능력을 이용하는 방법[40-43]이 발표된 바 있다. 또한 Babazadeh 등은 In, Sn, Al 및 Au를 포함하는 금속을 코팅함으로써 클래딩 광을 제거하는 방법을 제시하였다. 특히 In 사용은 온도를 36°C 이하로 낮출 수 있어 좋은 재질로 사용되고 있다. Au 등으로 재코팅 된 튜브를 사용한 CLS로서 효율적인 열처리를 실현하여 1kW 출력을 무리없이 전송할 수 있음을 보였다.

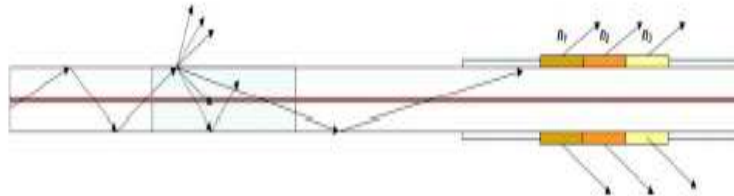


그림. 4 고출력 CLS의 구조 (잔여 펌프광원을 광섬유 클래딩 밖으로 제거하기 위한 고출력 레이저의 출력단, n1, n2, n3 굴절률이 다른 코팅, 축의 진한 부분은 증폭된 레이저 빛이 유도되는 광섬유 코어에 해당됨)

## 2. 표면 손상

표면손상 방법에서는 표면손상 정도와 적절한 기계적 강도 및 열처리를 보장하는 광감쇠 정도와의 균형이 매우 필요하다. Poozesh 등은 tapered fiber의 단면을 HF(hydrofluoric) acid를 사용하여 부식시킴으로써 단면에서의 반사를 줄이는 방법을 제시하였으며, Boehme 등은 CO<sub>2</sub> 레이저로 표면처리함으로써 215W 클래딩 광을 10 dB 제거시키는 방법을 그리고 Berisser 등은 미세 머신 고정기술을 이용하여 CLS를 얻을 수 있음을 보였다.[44-55].

또한 Li 등은 재코팅과 손상 두 방법을 겸용하여 표면에서의 파워 밀도를 낮추는 방법을 제시하였다.

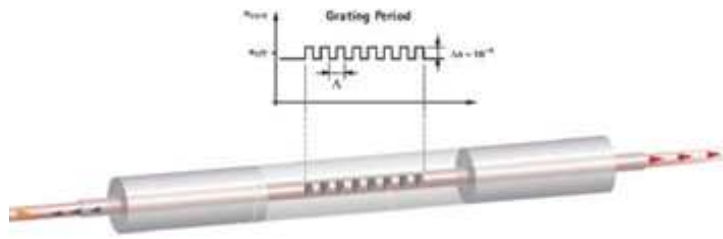


그림. 5 광섬유 표면손상 방법

## 제2절 주기적 격자구조를 이용한 CLS 기술

고출력 광섬유 증폭기 또는 라만 증폭기는 대개 고출력을 얻기 위해 다단 증폭기 형태를 취한다. 또한 증폭기 사이에 클래딩에서의 잔여 펌프광원을 없애기 위해 CLS를 사용하나 일반적으로 사용 가능한 펌프 광원의 경우 파장 안정화 기능이 없어 광원에서의 파장 변화가 흡수하지 못하는 펌프 광원의 양을 증가시킨다. 보통 한 단에서의 펌프 광출력이 10kW를 넘는 경우 CLS가 거르지 못하는 펌프 광은 1kW를 초과하여 앞서 언급한 CLS를 사용한다 하더라도 짧은 길이의 광섬유 내지는 유리관에서의 클래딩 광의 누수를 이용하는 경우 국부적인 온도상승을 초래하므로 성능에 큰 변화를 야기시킨다[56-65]. 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 클래딩에 주기적 격자구조를 배열하여 잔여 펌프광을 제거하는 방법을 택하였다.



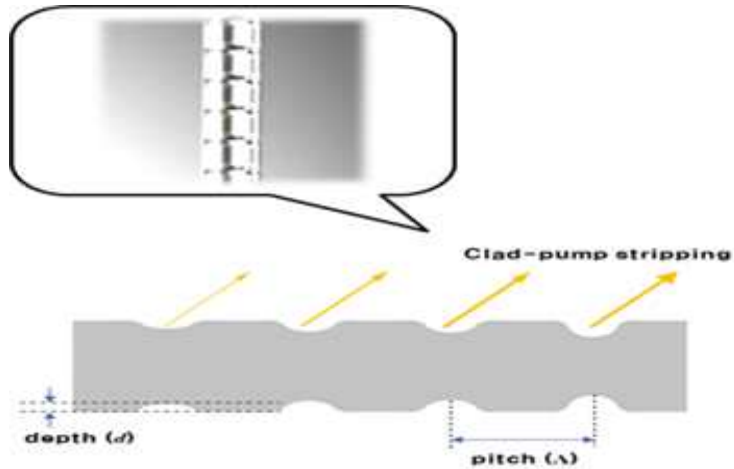


그림. 6 광섬유 클래딩 영역에 새겨진 주기적 형태의 산란유도 형상  
(위: 광섬유에 새겨진 구조, 아래: 주기적 pitch 로 식각된 홈으로 방사되는  
빛을 보여줌, depth는 홈의 높이를 의미함)

## 1. 주기적 격자 구조 설계

본 논문에서는 펌프광 제거기의 광학적 구조에 대한 전산모의 모델링과 해석을 수행하여 최적화된 펌프광 제거기의 광학 구조 기술을 개발하였으며, 그림. 6과 같이 주기적 형태의 산란유도 형상을 배치하고, 광원의 진행방향에 대하여 균일한 산란광이 발생하기 위한 산란광 정량화를 수행하여 산란부위에서 균일한 광원의 분포를 이루는 광학적 구조를 설계 제작하였다[66-73]. 설계된 구조는 5% 이내의 광원의 산란분포를 가지고 있으며, 이는 고출력 펌프광원의 제거 시에 발생하는 국부적인 온도상승을 방지 하여 효과적인 펌프광원의 제거가 가능한 결과이다. 또한 레이저를 이용하여 산란유도 형상을 가공하기 때문에 제작 반복성이 뛰어나고, 광학적 안정화된 형상 제작이 가능하다.

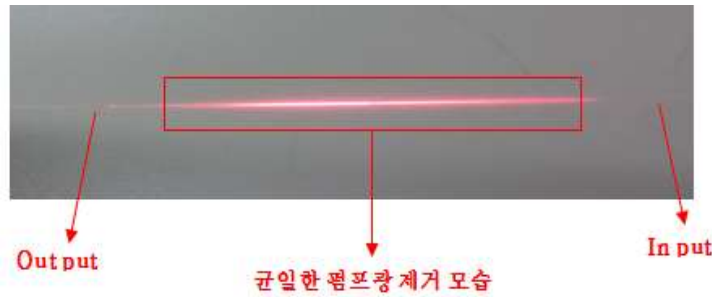


그림. 7 광섬유에 주기적인 격자를 통한 일정량의 펄프광 제거의 효과

Fiber의 길이방향으로 광원이 진행하며, 미세격자의 간격과 깊이에 따라 산란광의 양을 조절할 수 있는 광학구조로 최적화 연구를 진행하였다.

Fiber의 격자설계를 위하여 격자가공 시스템의 출력파워, 격자간의 거리, 레이저의 조사간격 등을 설계할 수 있는 Win Mark Pro 프로그램을 사용하여 원하는 미세 격자의 사양에 맞추어 설계를 하였다.

Win mark Pro를 통한 광학구조 설계에 따른 CLS 소자의 주기적 격자를 설계하였고, Groove 번호 1부터 Input 단을 시작으로 102번 Output 단까지의 광섬유 길이와 간격에 따른 Sweep 속도, Sweep 지점, 레이저 출력, Groove Depth, Groove 간 간격 등을 고려하여 미세 홈 격자구조 설계 연구를 진행하였다.

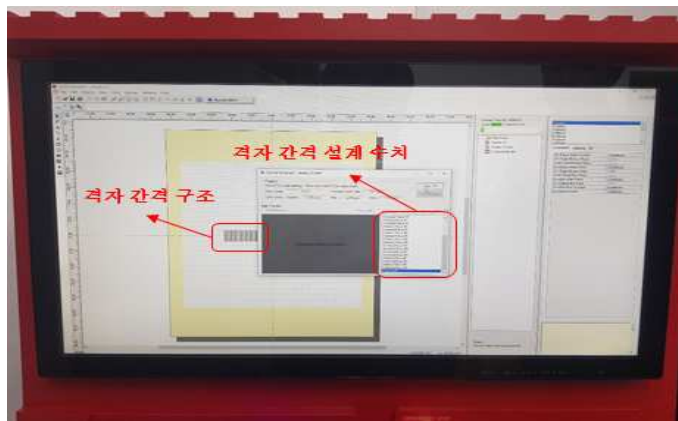


그림. 8 Win Mark Pro 미세 격자 홈 설계

Win Mark Pro의 미세 격자 홈의 설계는 아래와 같은 데이터를 설정하여 1번부터 102번까지의 각각의 Sweep속도, 레이저의 출력크기, Groove Depth의 깊이, Sweep 지점, Groove 간 간격을 계산하여 설계하였다[74-83].

저출력 CLS 소자의 경우 최적의 격자 구간의 값을 얻기 위해 격자의 간격을 1번부터 102번까지의 0.1, 0.2 0.3, 0.4, 0.5의 간격으로 연구를 하였다. 0.1의 격자 간격은 Fiber의 파손 우려가 크게 발생하였다.

0.2의 격자간격은 원활하게 빛이 세어 나오지 못하여 잔여 펌프광을 제거 시 급 상승하는 온도로 인하여 Fiber가 타버리는 현상이 발생하였다.

0.3, 0.4, 0.5의 간격으로 CLS 소자를 제작하여 분석한 결과 0.4에서 Fiber 격자 새겨지는 길이가 약 89 mm의 격자 구간으로 새겨지며 Input과 Output까지의 일정한 양의 펌프광 제거가 가능한 것으로 시험되었다.

0.5 mm 이상일 경우 격자가 새겨지는 구간이 길어지면서 잔여 펌프광이 Input에서부터 많은 양의 잔여 펌프광이 빠져 급격하게 온도가 상승하는 결과 값을 나타내어 최적의 격자간격을 0.4 mm로 결정하였다.

고출력용 CLS의 경우 격자의 경우 원활한 잔여 펌프광 제거를 위해 98mm의 격자 구간으로 설계를 하였다.

표. 3 Win Mark Pro를 통한 격자 구조 설계

Groove 번호	Sweep 속도 (m/s)	레이저 출력 (10W)	Groove Depth[um] (Fit)	Sweep 지점[mm]	Groove 간 간격[mm]
1	1129	100%	1.1	-20.00	0.4
2	1094	100%	1.2	-19.60	0.4
3	1059	100%	1.3	-19.20	0.4
4	1024	100%	1.5	-18.80	0.4
5	989	100%	1.6	-18.40	0.4
6	954	100%	1.8	-18.00	0.4
7	920	100%	2.0	-17.60	0.4
8	886	100%	2.1	-17.20	0.4
9	863	100%	2.3	-16.80	0.4
10	841	100%	2.5	-16.40	0.4
11	819	100%	2.8	-16.00	0.4
12	797	100%	3.0	-15.60	0.4
13	775	100%	3.2	-15.20	0.4

14	753	100%	3.4	-14.80	0.4
15	731	100%	3.7	-14.40	0.4
16	709	100%	4.0	-14.00	0.4
17	687	100%	4.3	-13.60	0.4
18	671	100%	4.6	-13.20	0.4
19	655	100%	4.8	-12.80	0.4
20	639	100%	5.1	-12.40	0.4
21	623	100%	5.4	-12.00	0.4
22	607	100%	5.7	-11.60	0.4
23	591	100%	6.0	-11.20	0.4
24	575	100%	6.3	-10.80	0.4
25	559	100%	6.6	-10.40	0.4
26	543	100%	6.8	-10.00	0.4
27	527	100%	7.1	-9.60	0.4
28	515	100%	7.5	-9.20	0.4
29	503	100%	7.9	-8.80	0.4
30	491	100%	8.4	-8.40	0.4
31	479	100%	8.9	-8.00	0.4
32	467	100%	9.3	-7.60	0.4
33	456	100%	9.7	-7.20	0.4
34	445	100%	10.1	-6.80	0.4
35	434	100%	10.5	-6.40	0.4
36	423	100%	10.8	-6.00	0.4
37	412	100%	11.2	-5.60	0.4
38	401	100%	11.6	-5.20	0.4
38	393	100%	11.9	-4.80	0.4
40	385	100%	12.1	-4.40	0.4
41	377	100%	12.5	-4.00	0.4
42	369	100%	12.8	-3.60	0.4
43	361	100%	13.2	-3.20	0.4
44	353	100%	13.6	-2.80	0.4
45	346	100%	14.0	-2.40	0.4
46	339	100%	14.4	-2.00	0.4
47	332	100%	14.8	-1.60	0.4
48	325	100%	15.3	-1.20	0.4
49	318	100%	15.8	-0.80	0.4
50	311	100%	16.3	-0.40	0.4
51	304	100%	16.8	0.00	0.4
52	297	100%	17.4	0.40	0.4
53	292	100%	17.8	0.80	0.4
54	287	100%	18.2	1.20	0.4
55	282	100%	18.7	1.60	0.4
56	277	100%	19.1	2.00	0.4

57	272	100%	19.6	2.40	0.4
58	267	100%	20.1	2.80	0.4
59	262	100%	20.6	3.20	0.4
60	257	100%	21.1	3.60	0.4
61	252	100%	21.8	4.00	0.4
62	247	100%	22.2	4.40	0.4
63	243	100%	22.7	4.80	0.4
64	239	100%	23.1	5.20	0.4
65	235	100%	23.6	5.60	0.4
66	231	100%	24.1	6.00	0.4
67	227	100%	24.6	6.40	0.4
68	223	100%	25.1	6.80	0.4
69	219	100%	25.7	7.20	0.4
70	215	100%	26.2	7.60	0.4
71	212	100%	26.6	8.00	0.4
72	209	100%	27.1	8.40	0.4
73	206	100%	27.5	8.80	0.4
74	203	100%	27.9	9.20	0.4
75	200	100%	28.4	9.60	0.4
76	197	100%	29.0	10.00	0.4
77	194	100%	29.4	10.40	0.4
78	191	100%	29.9	10.80	0.4
79	188	100%	30.5	11.20	0.4
80	185	100%	31.0	11.60	0.4
81	182	100%	31.6	12.00	0.4
82	179	100%	32.2	12.40	0.4
83	176	100%	32.8	12.80	0.4
84	173	100%	33.5	13.20	0.4
85	170	100%	34.1	13.60	0.4
86	167	100%	34.8	14.00	0.4
87	164	100%	35.5	14.40	0.4
88	161	100%	36.3	14.80	0.4
89	158	100%	37.0	15.20	0.4
90	155	100%	37.9	15.60	0.4
91	153	100%	38.4	16.00	0.4
92	151	100%	39.1	16.40	0.4
93	149	100%	39.6	16.80	0.4
94	147	100%	40.3	17.20	0.4
95	145	100%	40.9	17.60	0.4
96	143	100%	41.6	18.00	0.4
97	141	100%	42.2	18.40	0.4
98	139	100%	42.9	18.80	0.4
99	137	100%	43.7	19.20	0.4

100	135	100%	44.4	19.60	0.4
101	133	100%	45.2	20.00	0.4
102	131	100%	46.0	20.40	0.4

Win Mark Pro를 통해 미세 홈 격자를 설계하였으며, 이를 적용하기 위한 Fiber 조건 분석을 진행하였다.

CLS 소자 제작 시 산란광 분포에 따른 최적의 조건을 만족할 수 있는 Fiber 조건으로 분석을 하였으며, 레이저 출력이 용착 지그를 통하여 Fiber에 Laser의 손실이 없이 유지되기 위해서는 MFD(mode field diameter), Diameter와 NA값의 곱으로 정의되는 조건을 만족시켜야 한다.

$$NA_{pump} \times D_{pump} \leq NA_{fiber} \times D_{fiber}$$

따라서 광을 손실 없이 고효율로 이득 광섬유에 커플링하기 위해서는 Diameter와 굴절률에 따른 NA 값을 선정하는 것이 중요하며, 이를 근거로 표. 15과 같은 광섬유를 선정하였다.

표. 4 선정된 Fiber 특성

파장대	코어NA	킷클래딩NA	코어 감쇠	클래딩 감쇠
1060~1600nm	0.065 ±0.005	≥0.46	≤30.0dB/km @1300nm ≥15.0 dB/km @1200nm	≤15.0 dB/km @1095nm



그림. 9 LMA-GDF-20/400, 25/400 Fiber\

표. 5 Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M, LMA-GDF 20/400-M 사양

Optical Specifications	LMA-GDF-25/400-M+	Optical Specifications	LMA-GDF-20/400-M+
Operating Wavelength	1060 - 1600 nm	Operating Wavelength	1060 - 1600 nm
Core NA	0.065±0.005	Core NA	0.065±0.005
First Cladding NA(5%)	≥0.46	First Cladding NA(5%)	≥0.46
Mode Field Diameter	19.2±1.2um @ 1060nm	Mode Field Diameter	16.7±1.0um @ 1060nm
Core Attenuation	≤15.0dB/lm @ 1200nm	Core Attenuation	≤12.0dB/lm @ 1300nm
	≤30.0dB/lm @ 1300nm		≤8.0dB/lm @ 1200nm
Cladding Attenuation	≤15.0dB/km @ 1095nm	Cladding Attenuation	≤15.0dB/km @ 1095nm

표. 6 Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M, LMA-GDF 20/400-M 사양

Geometrical & Mechanical Specifications	LMA-GDF-25/400-M+	Geometrical & Mechanical Specifications	LMA-GDF-20/400-M+
Cladding Diameter	395.0±3.0um	Cladding Diameter	395.0±3.0um
Core Diameter	25.0±1.5um	Core Diameter	20.0±1.5um
Coating Diameter	550.0±15.0um	Coating Diameter	550.0±15.0um
Core/Clad Offset	≤ 1.20um	Core/Clad Offset	≤ 1.20um
Clad Non-Circularity	≤ 0.50%	Clad Non-Circularity	≤ 0.50%
Proof test Level	≥ 100kpsi(0.7 GN/m <sup>2</sup> )	Proof test Level	≥ 100kpsi(0.7 GN/m <sup>2</sup> )

위의 선정된 Fiber를 적용하여 보유중인 CO<sub>2</sub> 기반의 레이저 격자가공 시스템을 활용하여 미세 홈 격자 제조를 진행하였다[84-92].

CLS 소자 제작은 Win Mark Pro를 통한 설계를 바탕으로 제작진행을 하였으며, 10W의 파워로 30° 간격으로 총 12회 회전하여 미세홈 격자를 새겨 CLS 소자를 제작하였다.



그림. 10 CLS 소자 제조시스템

위와 같이 CLS 소자 제작을 위한 제조 시스템 개발을 진행하였으며, Fiber 단면의 미세한 광학적 구조를 성형하기 위한 레이저 가공기술 연구를 진행하였다. 우선적으로 유리 가공에 장점을 가지는 CO<sub>2</sub> 레이저 기반의 레이저 가공특성분석을 통한 제조 시스템에 결합할 CO<sub>2</sub> 레이저를 선정하였다.



그림. 11 SYNRAD LASER 48-1SAL CO<sub>2</sub> Laser

CO<sub>2</sub> Laser를 활용하여 특성분석을 진행하였으며, 이는 레이저 가공에 가장 중요한 요소인 광원의 출력 안정도이며, 레이저 특성분석을 통해 기체 레이저가 가지는 5% 이하의 안정도를 기반으로 3% 이하의 안정도를 가지는 레이저



출력안정화 기술을 획득하였다.

CO<sub>2</sub> 레이저를 활용하여 균일한 산란광 유도를 위한 광섬유 클래딩에 미세 홈 형상 격자를 설계하기 위해 미세 광학구조의 정밀 가공을 위한 텔레센트릭 (telecentric) 광학구조를 설계하였으며, 텔레센트릭 광학 시스템은 가공대상면에 대하여 동일한 초점면을 가지게 할 수 있으며, 이는 비교적 긴 가공길이와 가공면에 대하여 동일한 가공특성을 유도할 수 있는 장점을 가지고 있다.

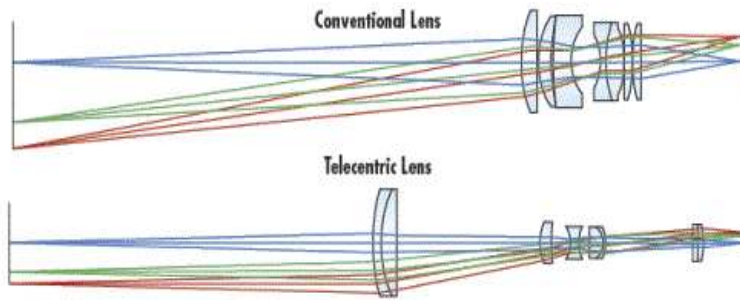


그림. 12 Telecentric Lens syset 설계 구성

미세 홈 형상 격자를 제작하기 위해서 CLS 제조 시스템을 내부 구조를 구성하였으며, 제조시스템에 결합될 부품들의 특성을 분석하여 선정을 진행하였다.



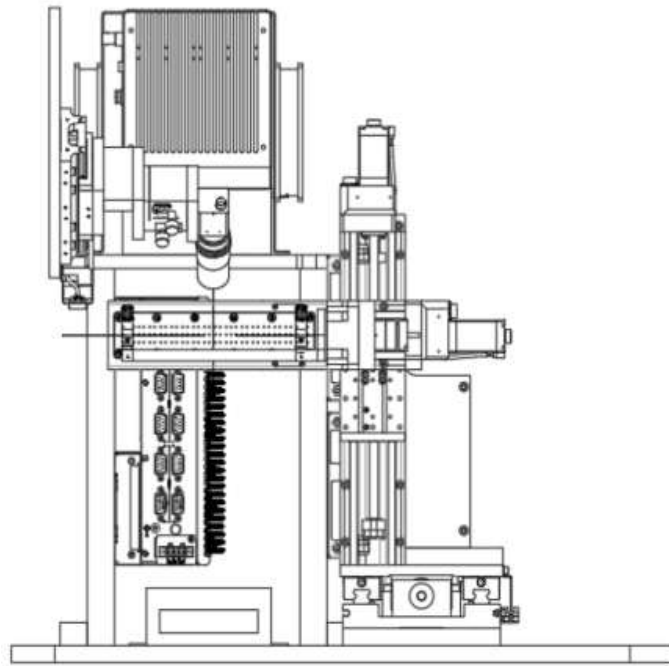


그림. 14 CLS 제조시스템 내부 설계

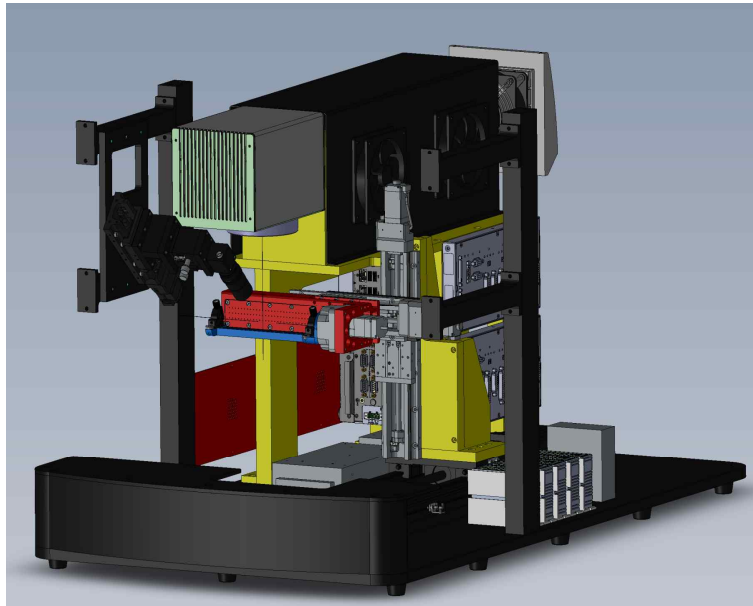


그림. 15 CLS 제조를 위한 광학 시스템 구성 설계

광학시스템 구성도는 광섬유 정렬지그가 대구경 광섬유 격자 가공시 중력에 의해 가공물의 변형을 방지할 수 있도록 수직 형상으로 설계를 하였다. 또한 4축 연동제어가 가능할 수 있도록 액추에이터 기반의 베이스와 액추에이터 X축, Y축의 결합을 통한 지그를 결합하였다.

정렬지그 및 스테이지 결합을 위해 CLS 제조시스템의 주축이 되는 프레임 설계를 진행하였다.

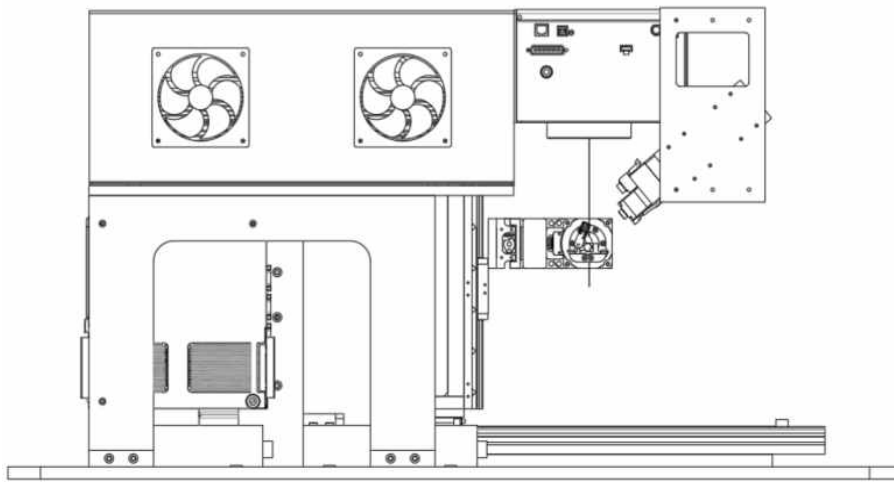


그림. 16 CLS 제조시스템 프레임 설계

위 프레임 설계도를 바탕으로 프레임 가공을 진행하였으며, 프레임 전체적 구조 Size는 X : 525mm, 이며 Y : 340mm 로 외부케이스 및 제조시스템 내부 부품 및 광섬유 격자 가공이 가능할 수 있는 공간 및 위치를 고려하여 가공을 완료하였다.



그림. 17 CLS 제조시스템 내부 프레임

설계 및 제작을 바탕으로 동작 알고리즘들을 설계하고 이를 통한 CLS 제조시스템을 제작하였다. 이를 통하여 제작하고자 하는 사양의 CLS 격자를 Win Mark Pro 프로그램과 연동가능하게 하여 설계된 격자를 장착된 Fiber에 새길 수 있게 설정하였다

아래의 그림. 18은 CLS 소자를 제작하는 모습을 나타내고 있다.

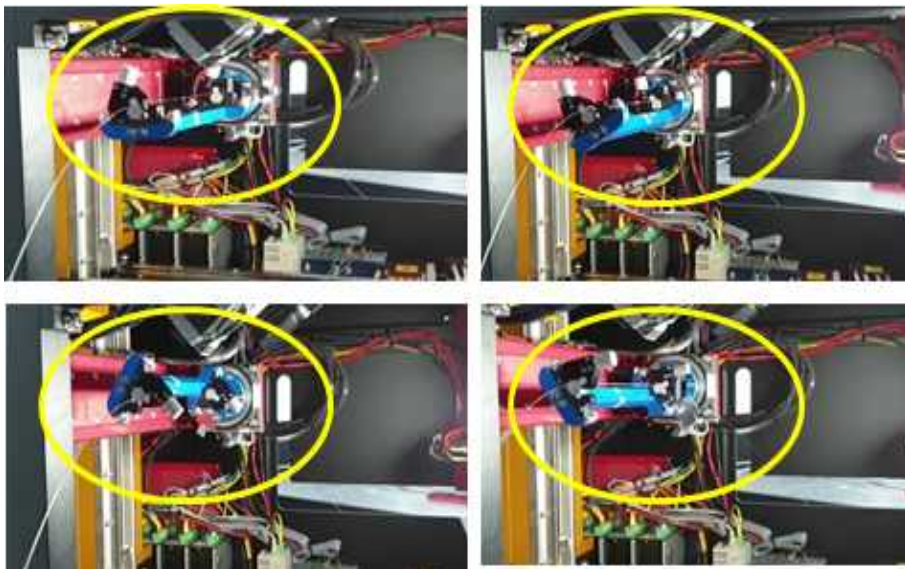


그림. 18 0° 기준부터 각30°씩 12회 회전을 통한 미세홈 격자 공정



그림. 19 미세 홈 격자가 새겨진 CLS 소자

## 2. 펌프광 제거기의 잔류 펌프광원의 분포 특성

그림 20의 Midas MeshFree 3.0은 접촉/재료비선형, 과도열전달 해석 기능들과 복잡한 해석 모델을 시뮬레이션 할 수 있는 EAE 활용법까지 다루고 있는 시뮬레이션 프로그램으로서, 설계된 펌프광 제거기의 잔류 펌프광원의 분포 특성을 분석하였다. 진행 길이방향에서 일정한 감쇠 비율을 보이고 있으며, 일정한 감쇠비율은 제거된 산란광원이 국부적으로 집중되지 않도록 하여 펌프광 제거기에서 요구되는 핵심적인 광학특성의 조건을 만족한다. 최대 200 W의 펌프광원 제거성능을 발휘할 수 있으며, 잔류되는 펌프광원의 크기를 입력 펌프광원의 크기 대비 0.3% 이하로 낮출 수 있는 장점을 가진다. 그림 21은 펌프 공 제거기를 사용하는 경우 주입되는 펌프광에 비해 어느 정도 제거효과가 있는지를 보여준다.

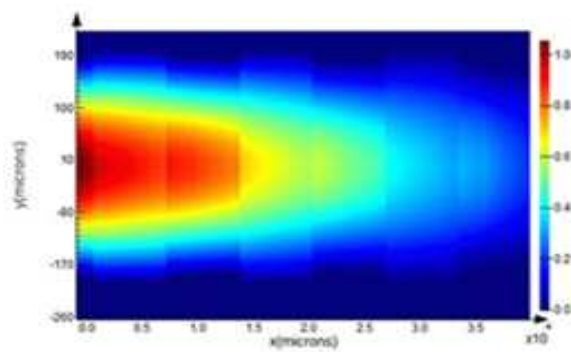


그림. 20 Midas 시뮬레이션을 통한 분석

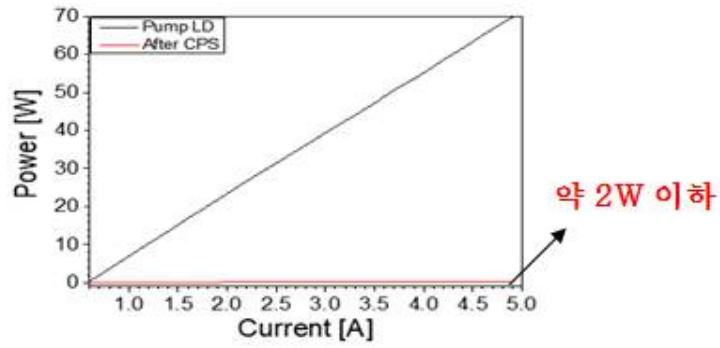


그림. 21 Midas 시뮬레이션 결과 그래프

표. 7 Midas 시뮬레이션 결과 값

Input current(A)	PCB Output(W)	CLS Output(W)
1	13.8	0.047
1.5	29.8	0.096
2	46.0	0.145
2.5	61.7	0.192
3	77.6	0.239
3.5	92.9	0.285
4	108.4	0.330
4.5	124.2	0.373
5	140.3	0.416
5.5	155.3	0.457
6	170.7	0.492
6.5	186.7	0.521
6.8	199.2	0.527

펌프광 인가전류를 1.0 A에서 4.5 A까지 증가시키는 경우 펌프광 파워는 6 W에서 64 W까지 증가하나 펌프광 제거기(CLS)를 사용한 결과 2 W 이하로 유지됨을 확인할 수 있었다. 그림 15는 CLS를 사용하기 전과 사용한 후 펌프광 증가에도 온도차가 5% 이하로 유지됨을 확인하였다.

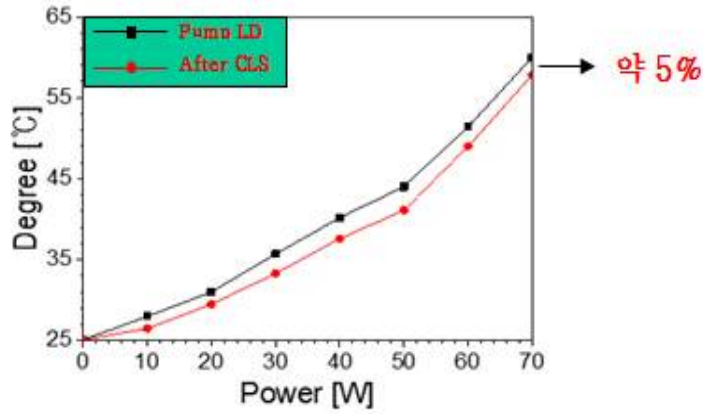


그림. 22 CLS 전단 및 후단에서의 온도 차

### 3. CLS 소자 성능 시험

미세 홈 격자를 새겨 제작한 CLS의 저출력 및 고출력 상태의 성능을 측정하기 위해 성능시험을 진행하였다.

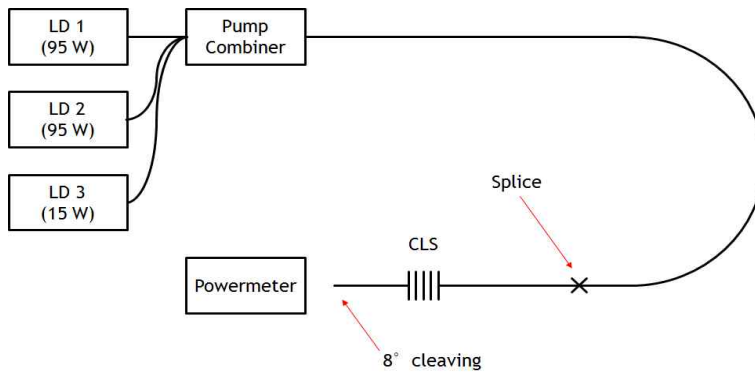


그림. 23 CLS 성능 시험을 위한 구성도



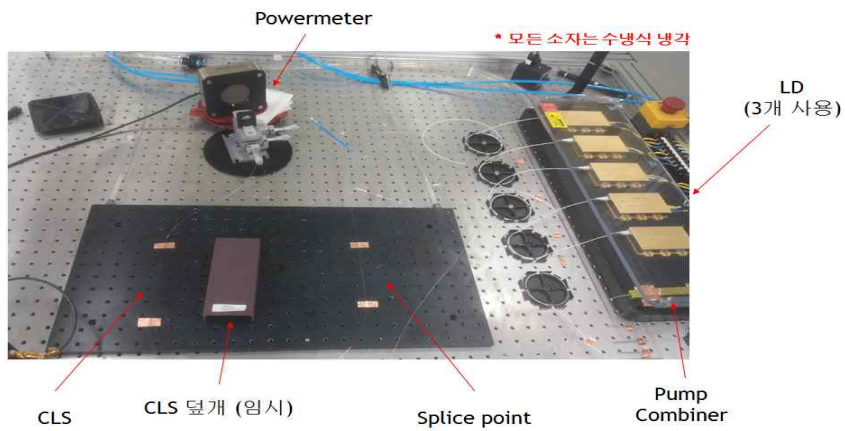
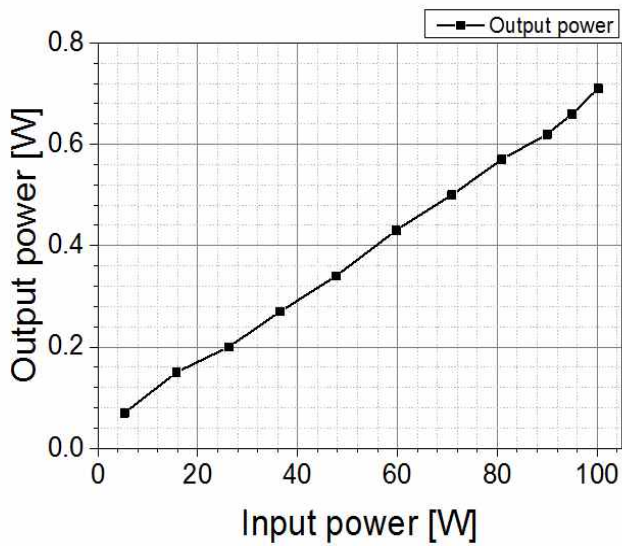


그림. 24 CLS 성능 시험을 위한 셋팅

CLS 성능 시험은 단계별로 Power를 높여 각 구간의 잔여광 제거율을 분석하였다.

표. 8 최대 100W 제거 CLS 성능 측정

LD	LD Input current(A)	CLS Input power(W)	CLS Output power(W)
LD1	1	5.39	0.07
	2	15.7	0.15
	3	26.2	0.20
	4	36.5	0.27
	5	47.7	0.34
	6	59.7	0.43
	7	70.9	0.50
	8	80.9	0.57
	9	90.0	0.62
	9.5	95.0	0.66
LD2	1	100.2	0.71



- ▶ 그래프 기울기 : 0.00662
- ▶ CLS 펌프광 제거율 : 99.3%
- ▶ TEST 시간 : 10분 유지

그림. 25 CLS 100W 기준 성능 측정 그래프

표. 9 최대 200W 제거 CLS 성능 측정

LD	LD Input current(A)	CLS Input power(W)	CLS Output power(W)
LD2	2	110.2	1.20
	3	120.2	1.30
	4	130.3	1.41
	5	140.3	1.41
	6	151.7	1.64
	7	162.6	1.77
	8	172.6	1.89
	9	182.3	2.00
	9.5	187.5	2.04
LD3	1	192.2	2.10
	2	203.0	2.20

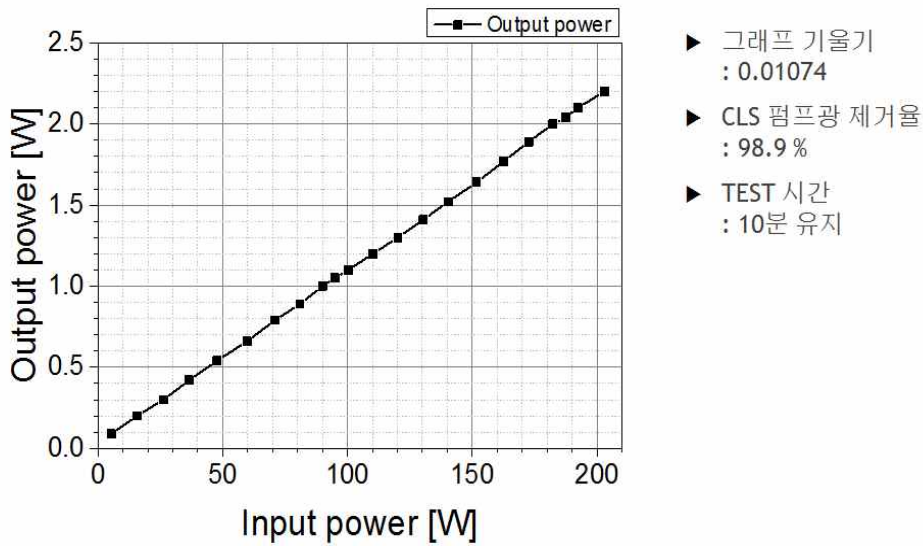


그림. 26 CLS 200W 기준 성능 측정 그래프

#### 4. CLS 기구물 제작

기술의 상용화를 위해서는 제품화에 필수적인 기구부 제작 기술의 높은 완성도가 요구됨에 따라 본 연구에서는 환경적 안정성과 기계적 내구성이 높은 펌프광 제거기의 기구를 제작하였으며, 고출력 펌프광원 제거 시 발생하는 산란광원에 의해 발생하는 발열 분포특성과 기계적 내구성 시험을 통해 내구성이 강화된 소형 경량화 구조를 제작하였다.

발열에 대한 효과적인 냉각 구조를 개발하기 위해 유동열해석을 수행하였으며, 실제 발열환경에서 열화상카메라를 이용하여 정확한 발열분포를 획득하여 열해석 결과와 비교 보완 하여 최적화된 냉각 구조를 구현하였으며, 개발된 냉각구조는 내구성 확보를 위해 가공재질과 형상 표면 처리를 수행하여 내구성이 뛰어난 구조물을 제작하였다.

그림. 27, 그림. 28 및 그림. 33은 설계된 저출력용 기구물과 저출력 및 고출력 펌프광 결합기 기구물의 형상도와 사양을 보여 준다.

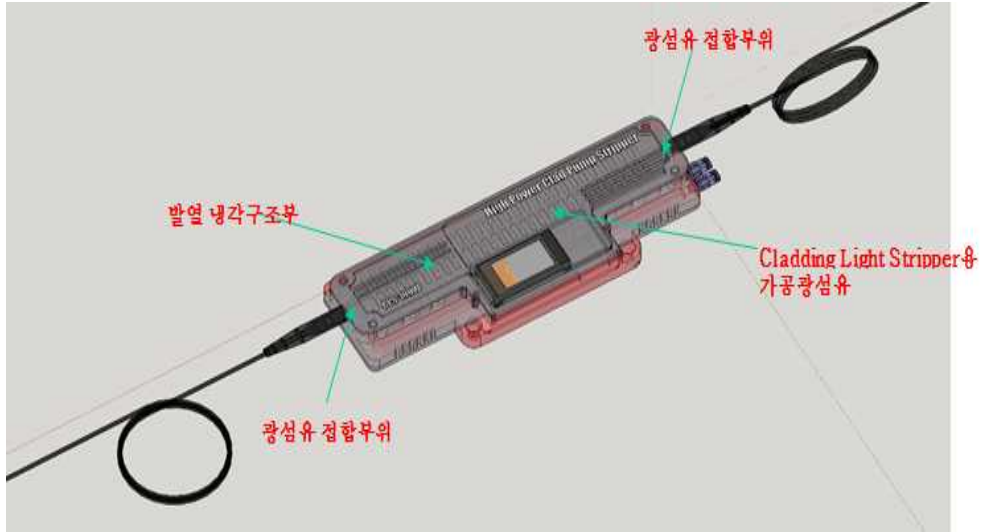


그림. 27 CLS 기구물 구성도

CLS의 직접적인 적용을 하기 위해서는 효과적인 발열기구물이 요구되고 있으며, 저출력의 경우 온도 상승폭이  $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$  인점을 고려하여 공랭식 방법으로 기구물을 설계하였다.

기구물의 구조는 CLS 소자와 패키징이 가능하며 방출되는 열의 자연제거를 위한 내부 설계 연구를 진행하였다.

저출력 기구물의 내부는 방열 채널을 구성하여 산란광원으로 인한 열원을 흡수하고 제거할 수 있도록 설계하였다.

표. 10 저출력 펌프광 제거기 사양

Parameters	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating wavelength	800		1100	nm
Cladding attenuation	10			dB
Polarization Extinction ratio	17			dB
Power Handling	60			W
Signal insertion loss(Maximum)		0.2		dB
Signal output beam M2		1.2		-
Operation temperature	-20		+70	°C
Storage Temperature	-40		+80	°C
Package				
Cooling	Air cooling			
Fault detection power supply			24	DCV
Fault Signal	Open circuit			



그림. 28 설계된 펌프광 제거기 기구물 형상도 : 저출력용

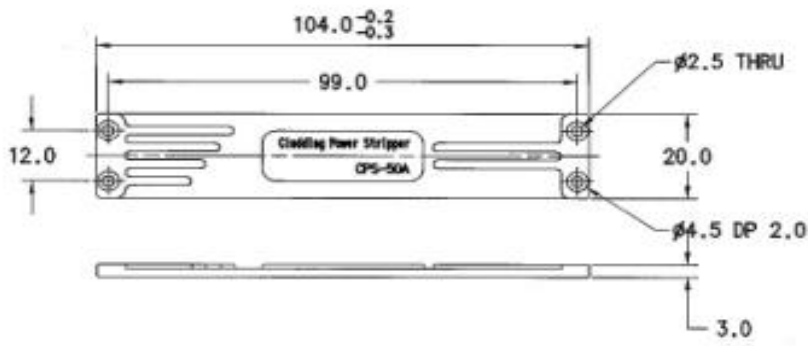


그림. 29 저출력 CLS 기구물 상부 세부 설계

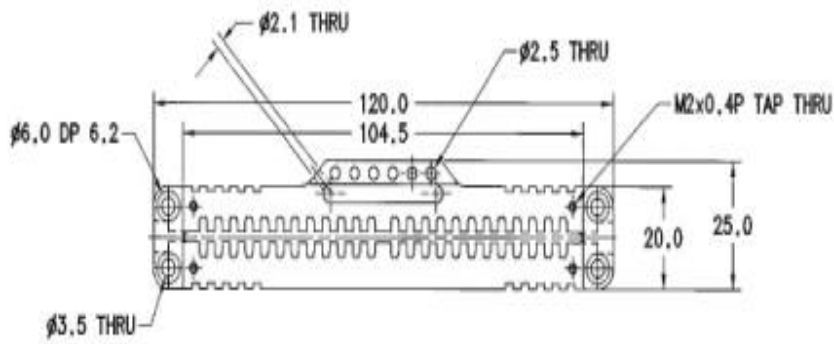


그림. 30 저출력 CLS 기구물 하부 세부 설계



그림. 31 제작된 저출력 CLS 기구물 상부



그림. 32 제작된 저출력 CLS 기구물 하부

고출력 펌프광 제거는 저출력에 비해 많은 허용 전력의 수치가 높으며 이로 인한 잔류 펌프광의 제거시 많은 양의 발열이 발생하므로 기존 저출력의 방열 구조체로만 발생하는 열 해결이 어려워 수냉 냉각방식의 기술을 추가로 적용하여 설계를 하였다.

고출력 펌프광은  $0^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  정도의 열을 발생시킨다.

표. 11 고출력 펌프광 제거기 사양

Parameters	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating wavelength	800		1100	nm
Cladding attenuation	10			dB
Polarization Extinction ratio	17			dB
Power Handling	100			W
Signal insertion loss(Maximum)		0.2		dB
Signal output beam M2		1.2		-
Operation temperature	-20		+70	°C
Storage Temperature	-40		+80	°C
Package				
Cooling	Water cooling			
Supply power	4.5	5	5.5	DCV
Fault Signal	LTTL(ACTIVE LOW)			



그림. 33 설계된 펌프광 제거기 기구물 형상도 : 고출력용



공랭식에 비해 수냉방식의 기구물은 하부 케이스의 2중 구조층으로 설계하여 발열이 원활히 순환될 수 있도록 하였다.

고출력 기구물의 하부는 전체적인 기구물 냉각을 고려하여 전반적으로 냉각수가 흘러갈 수 있도록 설계하였다.

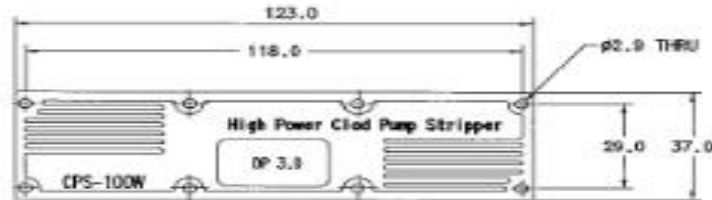


그림. 34 고출력 CLS 기구물 상부 세부 설계

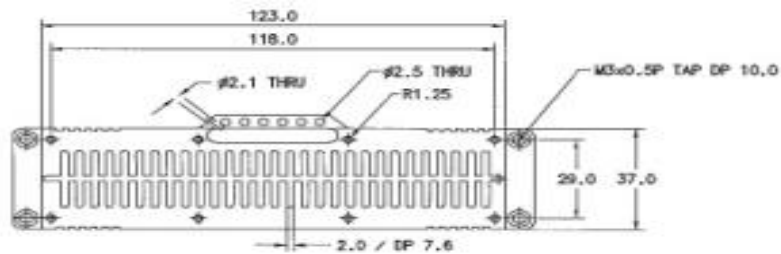


그림. 35 고출력 CLS 기구물 하부 세부 설계

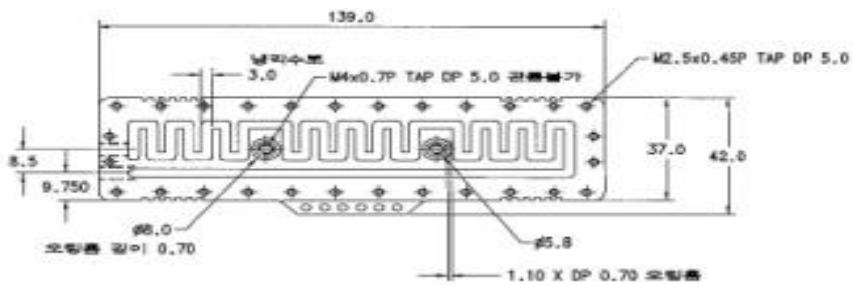


그림. 36 고출력 CLS 기구물 하부 냉각 가이드 세부 설계

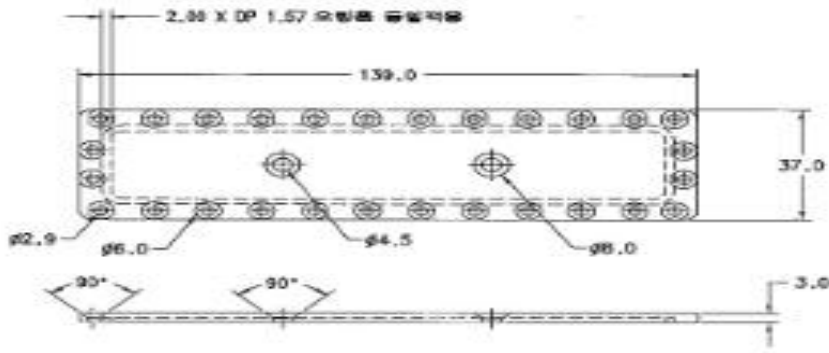


그림. 37 고출력 CLS 기구물 냉각 가이드 덮개

패키징이 용이한 기구물과의 통합을 통하여 펌프광 제거기는 공냉식의 구조를 기반으로 60W 정도의 펌프광 제거 특성이 예상되고, 수냉식 기반의 고출력 펌프광원 제거기의 경우 100W 정도의 펌프광 제거 특성이 예상된다.



그림. 38 제작된 고출력 CLS 기구물 상부



그림. 39 제작된 고출력 CLS 기구물 하부

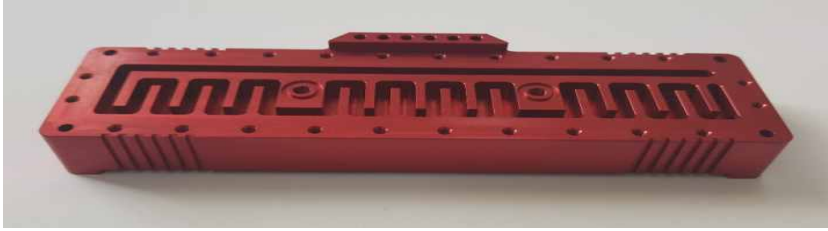


그림. 40 제작된 고출력 CLS 기구물 냉각 가이드



그림. 41 제작된 고출력 CLS 기구물 냉각 가이드 덮개

### 제3장 레이저 빔 전달을 위한 전송모듈

고출력 광섬유 레이저에 있어 전송모듈은 레이저 빔을 원하는 장소까지 전달 (delivery)하는 기능을 갖고 있으며, 그림. 42와 같다.

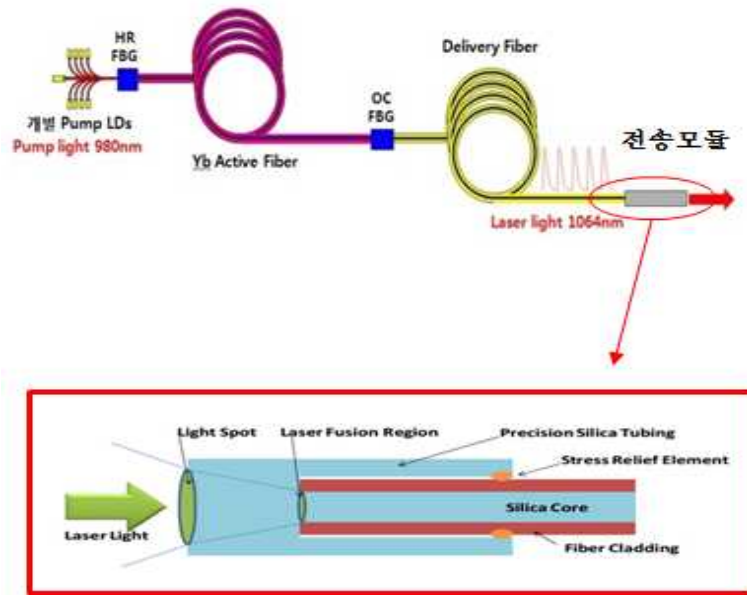


그림. 42 End cap 기본 구성

고출력을 얻기 위해 다수의 펌프광이 병렬로 연결된 형태의 광원부를 가지며, 증폭을 위한 특수 광섬유로 입사된다. 특수 광섬유 양단은 결합된 펌프광이 특수 광섬유내에서 발진을 일으키도록 양쪽에 광섬유 격자(FBG, fiber Bragg grating)가 형성되어 있으며, 왼쪽 HR(high reflection) 그리고 오른쪽은 출력 빔을 얻기 위해 LR(low reflection)로 형성되어 있다[12]. 광섬유 레이저 출력은 원하는 곳 까지 광섬유에 의해 길이가 확장된 후 fiber delivery에 해당되는 End cap을 통해 필요한 곳에 레이저 광이 분출되는 구조이다.

일반적으로 High Power Fiber Laser 광원은 출력단 광섬유에서 대기의 굴절률과 광섬유 굴절률 차이로 출력단 내부로 Reflection이 발생하며 이것은

Laser System의 성능을 저하시키는 주요 요인이 되며, 출력단에서의 광원의 세기가 강하기 때문에 광섬유의 출력단 단면에 손상이 발생한다.

이러한 Fiber의 출력단 손상과 시스템 내부로의 Reflection을 방지하기 위해 High Power Laser의 전송을 위한 고출력 광섬유 출력단 소자가 요구 된다[1].

## 제1절 End cap 광학계 설계

그림. 43은 전송 광섬유에 용착 접속되는 End cap의 길이 최적화를 위한 계산을 보여 준다. 전송 광섬유(delivery fiber)에서의 빛이 퍼지는 정도는 광섬유 코어와 클래딩의 굴절률에 의해 식 (2) 과 같이 결정되며, 따라서 제작하고자 하는 End cap의 방사각도  $\theta_{max}$ 가 결정된다[7].

레이저 모듈로부터 나오는 레이저 빔이  $20\mu\text{m}/400\mu\text{m}$ (코어/클래딩) 광섬유를 통해 전달되므로 출력되는 레이저 빔 에너지가  $20\mu\text{m}$  직경의 작은 면적에 집중되기 때문에 End cap을 붙여 빔이 퍼지도록 하여 단위 면적당 에너지를 낮추어 원활하게 레이저 빔 전달이 이루어지도록 하여야 하며, 다중모드 광섬유에서는 수광각(acceptance angle,  $\theta_{max}$ ) 안으로 들어온 빛만이 광섬유를 타고 전파되기 때문에 계단형 다중모드 광섬유의 경우, 수광각은 광섬유의 코어와 클래딩의 굴절률에 의해 결정된다.

굴절률이  $n$ 인 매질로부터 입사하는 빛이 수광각보다 큰 각으로 입사할 경우 코어-클래드 경계면에서 전반사가 일어나지 않기 때문에 광섬유를 통하여 반대쪽 끝까지 전송될 수 없으며, 빛이 최대 수광각으로 입사할 경우 스넬의 법칙에 따라 매질과 광섬유 코어의 경계면에서 빛의 반사되어 진행방향으로 전달된다[10-11]. 이는 앞서 설명한 바와 같이 광섬유의 NA(numerical aperture)를 정의하는 일반적인 표현식으로 나타낼 수 있다. 전달 광섬유를 통해 진행하는 레이저 빔이 광섬유에서 End cap으로 진행할 경우에도 동일하게 적용되며 이때 진행하는 빔은 End cap에서부터 자연스럽게 퍼지게 된다.

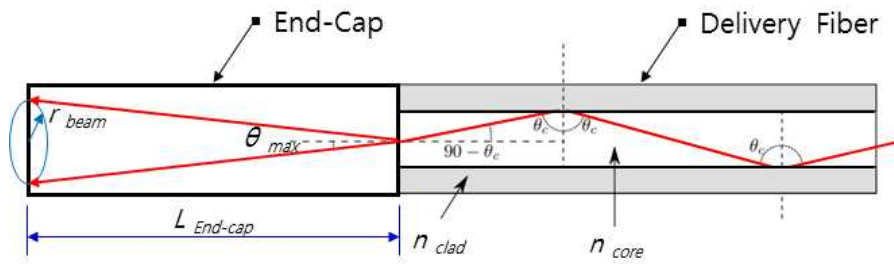


그림. 43 레이저 빔 전달을 위한 End cap 모델링

$$n_{silica} \cdot \sin \theta_{max} = \sqrt{(n_{core}^2 - n_{clad}^2)} = NA_{fiber}$$

(1)  $n_{core}$ 와  $n_{clad}$ 는 각각 광섬유 코어와 클래드의 굴절률 값이고  $n$ 은 빛이 입사하면서 진행하고 있는 매질의 굴절률을 나타낸다.  $n_{silica}$ 는 End cap 물질(fused silica)의 굴절률,  $NA_{fiber}$ 는 전달광섬유의 NA 값을 의미한다. End cap 매질의 굴절률을 알면 식 (2)로부터 End cap에서 진행되는 레이저 빔의 최대 발산각을 구할 수 있고 이로부터 진행 거리에 따른 빔의 크기를 계산할 수 있고 End cap 단면에서의 빔 크기와 단위면적당 레이저 빔 에너지 계산이 가능하다[3-5].

표. 12와 표. 13은 고려 대상인 광섬유의 파장과 굴절률의 관계와 이로부터 얻어진 NA와 에너지 밀도를 보인다. End cap으로 사용한 실리카 광섬유의 경우 사용 파장인 1064 nm에서 굴절률  $n=1.44963$ , 레이저 빔 전달 광섬유 코어의 NA 값 0.065를 사용하여 계산하였다.

표. 12 레이저 빔 전달 광섬유 사양과 End cap 용 fused silica의 굴절률

■ LMA-GDF_20/400_M		■ Fused Silica					
<b>Optical Specifications</b>		<b>Wavelength (nm)</b>					
Operating Wavelength	1060 – 1600 nm	330.3	1.48054	532.0	1.46071	1014.0	1.45024
Core NA	0.065 ± 0.005	340.4	1.47858	546.1	1.46008	1064.0	1.44963
First Cladding NA (5%)	≥ 0.46	351.1	1.47671	567.6	1.45846	1100.0	1.44920
Core Attenuation	≤ 12.0 dB/km @ 1300 nm ≤ 8.0 dB/km @ 1200 nm	361.1	1.47513	589.3	1.45840	1200.0	1.44805
Cladding Attenuation	≤ 15.0 dB/km @ 1095 nm	365.0	1.47454	632.8	1.45702	1300.0	1.44692
Birefringence	N/A	404.7	1.46962	643.8	1.45670	1400.0	1.44578
<b>Geometrical &amp; Mechanical Specifications</b>		435.8	1.46669	656.3	1.45637	1500.0	1.44462
Cladding Diameter	395.0 ± 5.0 μm	441.6	1.46622	694.3	1.45542	1550.0	1.44402
Core Diameter	20.0 ± 1.5 μm	457.9	1.46498	706.5	1.45515	1660.0	1.44267
Coating Diameter	550.0 ± 15.0 μm	476.5	1.46372	786.0	1.45366	1700.0	1.44217
Core/Clad Offset	≤ 2.00 μm	486.1	1.46313	820.0	1.45298	1800.0	1.44087
Clad Non-Circularity	≤ 0.50 %	488.0	1.46301	830.0	1.45282	1900.0	1.43961
Proofstest Level	≥ 100 kpsi (0.7 GN/m <sup>2</sup> )	496.5	1.46252	852.1	1.45247	2000.0	1.43809
		514.5	1.46156	904.0	1.45170	2100.0	1.43659

표. 13 End cap 길이에 따른 밀도 분석 데이터

NAfiber	nsilica	$\theta$ max	LEnd cap (mm)	rbeam (μm)	Dbeam (μm)	Energy Density (MW/cm <sup>2</sup> )
0.065	1.44963	2.576995	3	144.7	289.3	1.52
			4	189.5	379.1	0.89
			5	234.4	468.8	0.58
			6	279.3	558.6	0.41
			7	324.2	648.4	0.30
			8	369.1	738.1	0.23
			9	414.0	827.9	0.19
			10	458.8	917.7	0.15

※ 에너지 밀도는 End cap 취급 파워 목표치인 1 kW를 기준으로 계산한 값임

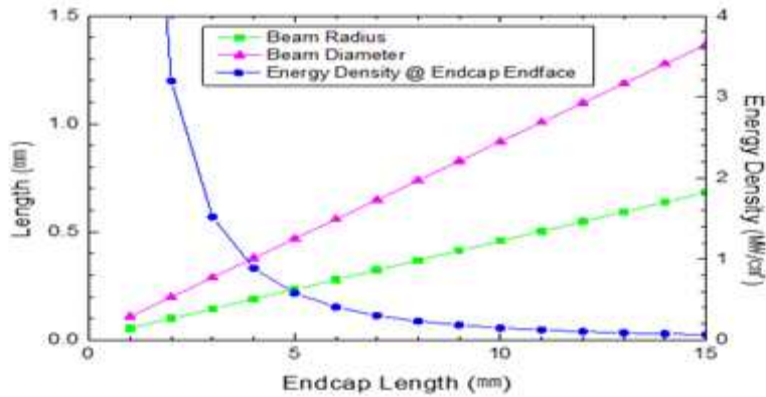




그림. 44 End cap 길이에 따른 에너지 밀도 분석

식 (1)의 계산식으로부터 End cap에서의 발산각, 단면에서의 빔 크기 및 단위면적당 에너지 밀도를 구하였다. 이 때 에너지 밀도는 End cap 취급파워 1kW를 기준으로 하여 계산한 값으로 위의 표에 그 결과를 정리하였다. 계산 결과로부터 End cap 길이가 길어질수록 단면에서의 빔 크기가 비례하여 커지기 때문에 적정한 End cap 길이만 확보할 경우 빔 발산이 충분히 이루어져 End cap 단면에서의 에너지 밀도를 크게 낮출 수 있음을 확인하였으며 이것으로부터 1kW 이상의 더 큰 레이저 출력도 충분히 전달 가능성을 확인하였다. End cap 으로 적용하기 위하여 순수한 실리카 재질로 이루어진 다양한 굵기의 광섬유를 사용하였다. 광섬유 굵기가 400, 500, 600, 800 및 1,000  $\mu\text{m}$ 인 대구경 광섬유를 이용하여 용이하게 End cap을 구현할 수 있을 것으로 판단되었으며 이를 기준으로 하여 End cap 구조를 표. 14와 같은 사양으로 선정하였다.



표. 14 레이저 출력 전달을 위한 End cap 구성 사양

	Fiber	Specifications	Comment
<p style="text-align: center;">High Power End cap</p>	<p>LMA-GDF-20/ 400-M</p> <p>Precision Matched Passive LMA Double Clad Fibers</p>	<p>Operating Wavelength: 1060~1600 nm Core/Clad Dia. 20±1.5/395±5.0 μm Core NA 0.065 Clad NA 0.46 Coating Diameter: 550±15 μm Coating: Low index polymer NuCOAT™ Proof test: &gt;100 kpsi</p> 	<p>Laser Beam Delivery Fibers</p>
	<p>End cap (Null Fiber)</p>	<p>Operating wavelength: 380~2200 nm Core/Clad Dia. 400/440, 500/550, 600/660 800/880, 1000/1050 μm Core: Pure silica step index Clad: Doped silica Core NA 0.22</p> 	<p>Pure Silica</p>

## 제2절 고효율 광섬유 레이저 출력 모듈 제작

### 1. End cap 모듈 설계 및 제작

고출력 광섬유 레이저 출력전송모듈 개발을 위해 기본적으로 구조 선정과 모듈 조립체 구성을 위한 기초 설계가 우선적으로 이루어져야 한다.

#### 가. End cap 외형 구조설계 및 제작

End cap 전체 길이는 173mm와 전체 폭 40mm로 구성하였으며, 광섬유가 결합될 좌측 종단부분은 대구경 광섬유와 융착이 이루어지도록 설계하였으며, 수냉식 냉각장치 및 산란광 감지센서와 도선감지센서, 온도 센서들이 포함된 핵심부분인 중앙홀 부분에 대한 길이를 110mm로 구성하고자 설계 하였다. 이 중 광섬유를 통해 레이저 출력 시 각각의 부품들이 고정된 간격에 따른 오차범위를 최소화 시키기 위한 구조로써 아래 그림. 45은 End cap 2D 외형도면과 이를 활용하여 구성된 End cap 3D 그림. 46은 외형도면을 나타내고 있다.



그림. 45 End cap 2D 외형도면

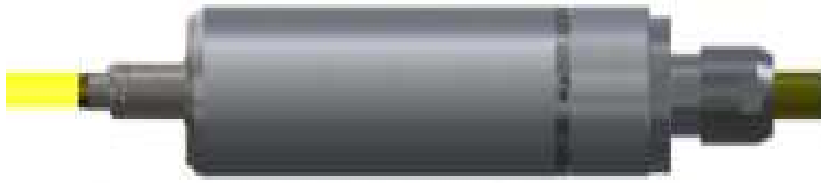


그림. 46 End cap 3D 외형도면

End cap 외부 메탈하우징과 내부 Quartz Block 사이에 적용될 온도감지 센서, 산란광 감시용 센서, 광섬유 전송상태 감시용 도선 센서는 광섬유 파장의 왜곡현상에 따른 Photo Diode의 오작동을 유발시키기 때문에 광섬유 파장이 최대한 노출되지 않는 위치에 각각의 센서를 적용시켜야 되며, 이를 고려한 내부 설계를 진행하였다. 그림. 47은 End cap 내부도면을 나타내고 있다.

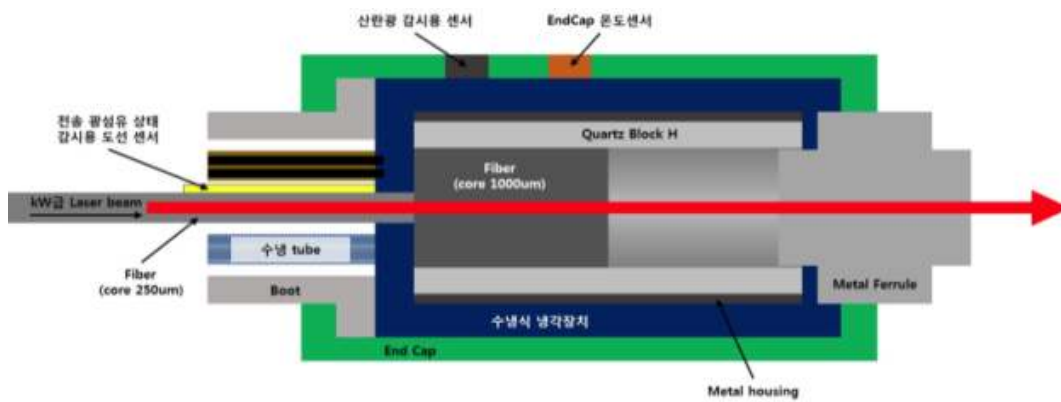


그림. 47 End cap 내부 구성

그림. 48은 최종적으로 3D 설계된 End cap 모듈을 보여 준다.



그림. 48 kW급 광섬유 레이저 출력 End cap

### 나. End cap 하우징 구조설계 및 제작

500W급 레이저 출력전송을 위해 효율적인 방열 구조체 설계 및 제작을 위해 공랭방식 구조로 변경 하우징 설계를 진행하였다. 그림. 49는 3D 설계된 End cap 하우징 구조를 나타내고 있다.

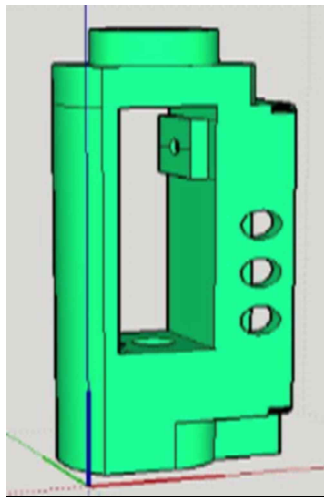


그림. 49 End cap 하우징 3D 도면

각각 X : 15.68mm, Y : 44.99mm, Z : 9mm로 출력단과 입력단의 구조와 결합이 안정적으로 구성될 수 있도록 제작을 완료하였으며, 그림. 50은 제작된 End cap 하우징을 나타내고 있다.

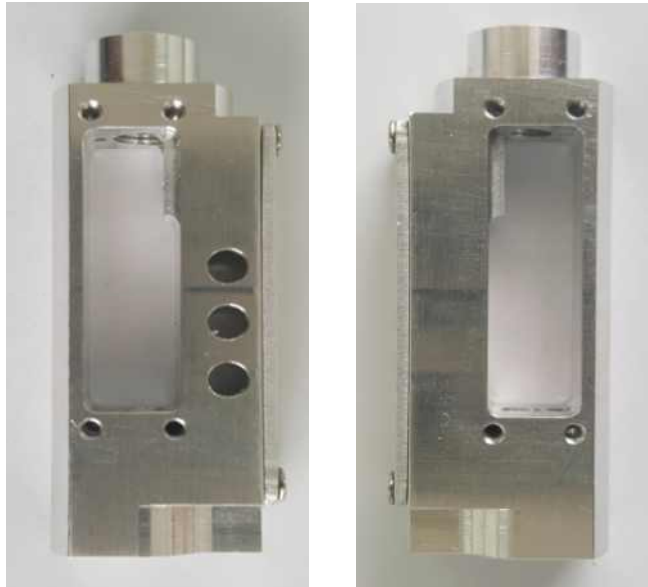


그림. 50 End cap 하우징

고출력 광섬유 레이저 출력시 안정적인 출력이 가능할 수 있도록 모듈 조립체인 출력단 하우징과 입력단 하우징을 설계를 진행하였다. 그림. 51 및 그림. 52는 End cap에 장착될 출력단 하우징 3D도면과 입력단 하우징 3D도면을 나타내고 있다.

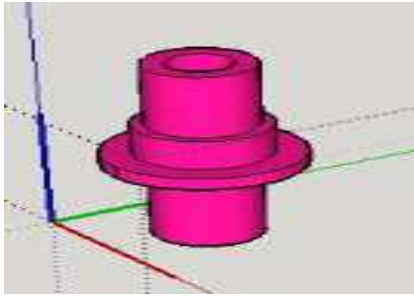


그림. 51 End cap 출력단 하우징 3D 도면

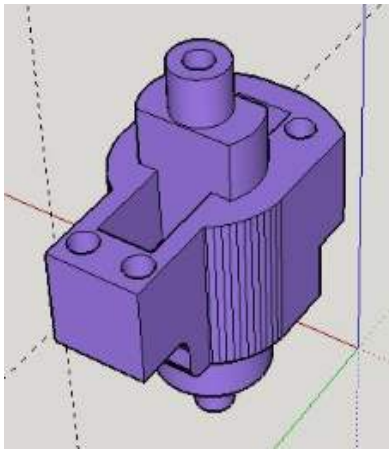


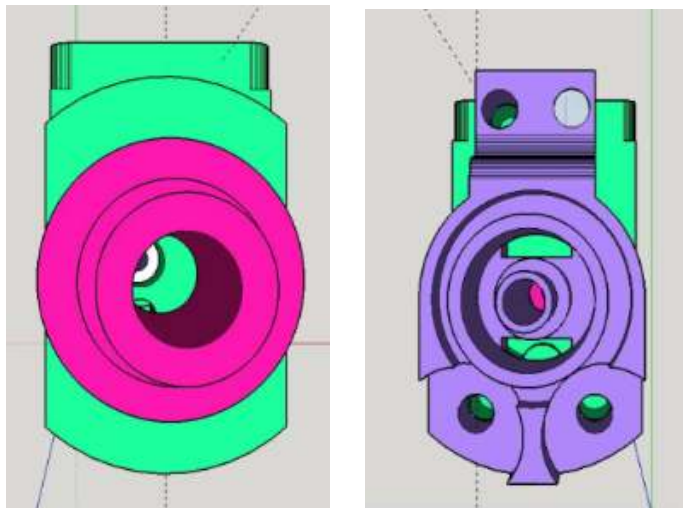
그림. 52 End cap 입력단 하우징 3D 도면

3D 설계도면을 바탕으로 조립진행시 규격발생 및 오차범위에 대한 구조분석을 진행하였으며, End cap 하우징과 안정적인 Assemble이 가능할 수 있도록 제작을 진행하였다. 그림. 53은 제작된 입/출력 하우징을 나타내고 있다.



그림. 53 제작된 입/출력 하우징

3D 설계도면을 바탕으로 제작된 End cap 하우징과 출력단 하우징 및 입력단 하우징의 조립을 위해 격차거리 및 조립 형태를 3D파일을 활용하여 시뮬레이션으로 분석하여 최종 End cap 조립도가 완성되도록 구성하였다. 이는 가공된 하우징들의 호환성 확보와 더불어 고출력 광섬유 레이저 출력 전송모듈 최종제작 진행시 케이블과의 결합을 위한 공정진행시 문제점을 미연에 방지하기 위해 3D 설계를 추가적으로 진행하였으며, 그림. 54는 최종 설계된 End cap Assembly 메탈하우징 3D 설계도를 나타내고 있다.



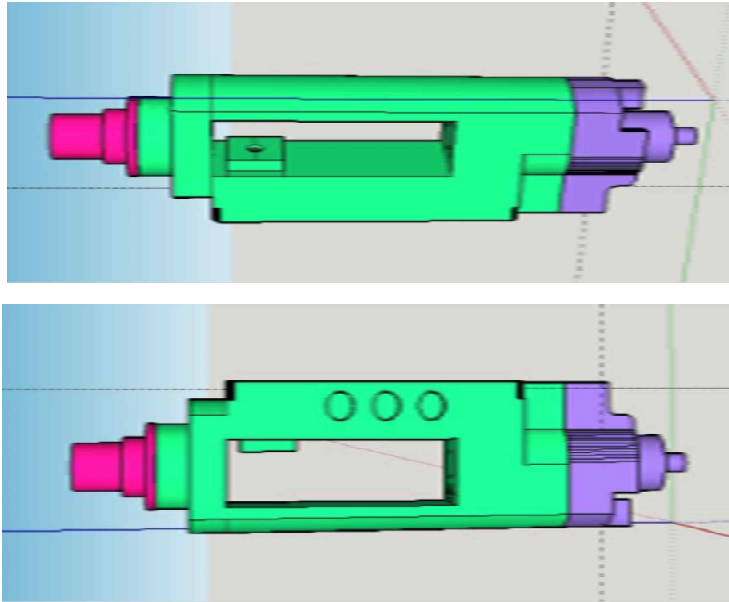


그림. 54 결합된 End cap assembly 하우징 3D 도면

End cap 하우징 재질 분석 및 호환성 확보를 위한 구조설계 연구를 수행한 결과 열적인 발열특성은 구리 재질의 기구가 유리하나 기계적 가공특성이 상대적으로 열악한 점을 발견하였다. 따라서 상대적으로 발열특성은 다소 낮지만 기계적 가공특성이 용이한 Aluminum 재질의 기구부를 구성하여 이를 적용시켰다.

이를 바탕으로 최종 End cap Assemble 그림. 55를 진행하였으며, 그림. 56은 최종 제작된 End cap 메탈하우징을 나타내고 있다.



그림. 55 End cap 결합 전





그림. 56 최종 제작된 End cap 메탈하우징

#### 다. 고출력 광섬유 레이저 End cap 제작

최적의 조건을 만족하는 광섬유를 활용하여 출력전송 모듈을 제작하기 위해서 광섬유 선정이 매우 중요시 되며, 광섬유 재질분석과 그에 맞는 성능 분석을 진행하였다. 일반적으로 레이저 펌핑 효율과 광 출력을 고출력으로 높이기 위해 멀티모드 광섬유가 사용되고 있으며, 이는 50 $\mu$ m에서 1mm의 범위에서 펌핑의 효율을 높일 수 있기 때문이다. 이를 활용하여 멀티모드 광섬유를 선정하였다. 그림. 57은 최종 선정된 Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M인 제품을 나타내고 있다.



그림. 57 Nufern사의 LMA-GDF 25/400-M

레이저출력 광섬유의 코어 Diameter 및 NA(Numerical Aperture)와 받아들이는 광섬유 1차 클래드의 Core Diameter 및 NA가 상이 할 경우 광의 입사효율이 현저하게 떨어지게 되며, 이러한 경우에는 Core Diameter 및 NA의 조정기능이 있는 Mode Coupler 광섬유가 필요하게 된다. 레이저 출력이 용착

지그를 통하여 Fiber에 Laser의 손실이 없이 유지되기 위해서는 MFD(mode field diameter), Diameter와 NA값의 곱으로 정의되는 조건을 만족시켜야 한다.

$$NA_{pump} \times D_{pump} \leq NA_{fiber} \times D_{fiber}$$

따라서 광을 손실 없이 고효율로 이득 광섬유에 커플링하기 위해서는 DIameter와 굴절률에 따른 NA 값을 선정하는 것이 중요하며, 이를 근거로 표. 15과 같은 광섬유를 선정하였다.

표. 15 선정된 Fiber 특성

파장대	코어 NA	첫 클래딩 NA(5%)	코어 감쇠	클래딩 감쇠
1060~1600nm	0.065 ±0.005	≥ 0.46	≤30.0 dB/km @ 1300nm ≤ 15.0 dB/km @ 1200nm	≤ 15.0 dB/km @ 1095nm

또한 입력부로 선정된 MMF와 출력단의 광섬유간 용착접속을 진행하기 위한 Coreless인 MMF를 선정하였으며, 기존 클래딩과 코어 구조로 구성된 일반적인 광섬유가 아닌 코어구조가 없고, 클래딩 구조로만 구성된 MMF이며, 외경은 400 $\mu$ m이다. 그림. 58은 본 과제에서 활용한 Coreless MM(Multi-Mode) Fiber로 Nufern사의 FUD-3443인 제품을 보여주고 있다.



그림. 58 Nufern사의 FUD-3443

표. 16은 출력단에 활용된 coreless MMF의 제품 특성을 보여 준다.

표. 16 Coreless MMF인 FUD-3443 제품 특성

Parameter	Min	Max	Unit
Operating Wavelength	800	1600	nm
Clad Diameter	385	415	$\mu m$
Coating Diameter	560	600	$\mu m$
Prooftest Level	100	120	kpsi

다음 선정된 광섬유 입력단의 MMF와 출력단의 coreless용 MMF간의 융착접속을 진행하기 앞서 서로 다른 이종 광섬유의 Splicing을 위하여 각각의 광섬유의 끝단면 절단공정을 진행하였다. 그림. 59는 절단공정에 사용된 장비인 VYTRAN사의 LDC-200을 나타내고 있다.



그림. 59 광섬유 절단장비 (LDC-200)

절단된 이중 광섬유간 용착접속을 진행하였으며, 용착접속 방법으로는 가열, 용융일체화를 위한 아크방전 방식을 사용하였다. 광섬유를 용융 연화하면 표면 장력에 의한 광섬유의 외표면이 일치하는 효과가 발생하고, 코어가 클래딩 중심에서 벗어난 경우, 코어를 축에 합치하더라도 축에 합치된 코어가 벗어나는 현상이 발생됨[26-29]에 따라 광섬유의 측면에서 클래딩을 통해서 코어의 위치를 관찰하여 축에 합치시키는 코어 직시 방식이 가능한 용착접속기 FSM-100P+ 장비를 활용하여 용착접속을 진행하였다. 그림. 60은 절단된 이중 광섬유간 용착접속에 사용된 FSM-100P+ 나타내고 있다.





그림. 60 광섬유 융착접속기 (FSM-100P+)

선정된 이중 광섬유간 양쪽 지그부분에 각각의 광섬유를 고정시켰으며, X축 Y축 각각의 기준점을 0으로 지정한 후 AUTO SETUP을 실행하였으며, 아크방전을 통한 광섬유간 Splicing 공정을 진행하였다. 그림. 62는 이중 광섬유간 융착접속 공정을 나타내고 있다.



그림. 61 광섬유 융착접속 과정

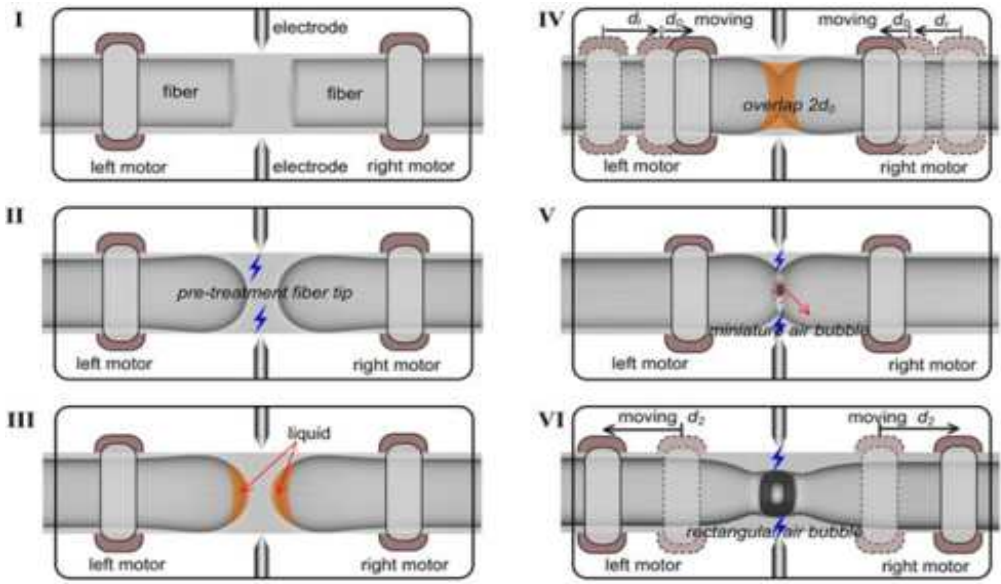


그림. 62 이중 광섬유 집합공정 순서도

이중광섬유 간의 집합공정은 6단계에 걸쳐 용착 접속을 진행하였으며, 전 송광섬유의 직경과 실리카 블록의 직경의 차이에 대한 최적화된 열원 가열 위치 선정에 관한 연구결과[13-19]를 적용하였다. 이에 전송광섬유와 최종 출력 실 리카 블록간 이중접합 공정을 완료하였으며, 그림. 63은 이중접합 공정을 통한 최종 제작된 이중광섬유를 나타내고 있다.

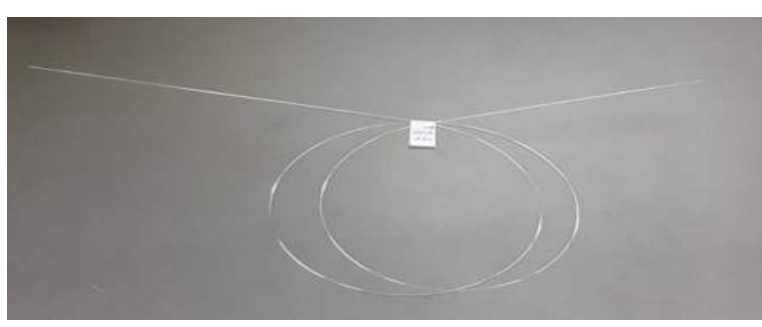


그림. 63 집합된 이중 광섬유

제작된 이중 광섬유 단면연마 진행을 위해 1차적으로 연마장비와 광섬유간

의 결합을 위한 이중광섬유를 베어파이버 어댑터 연마지그에 결합을 진행하였으며, 그림. 64는 베어파이버 어댑터 연마지그와 이중광섬유와 결합된 모습을 보여주고 있다.



그림. 64 베어파이버 어댑터 연마지그

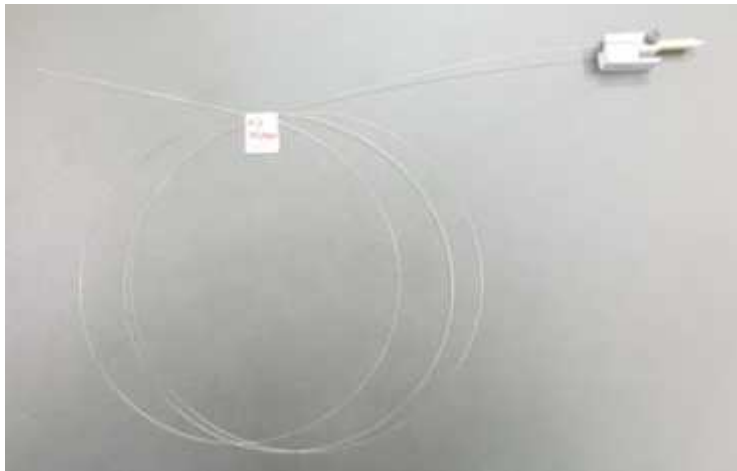


그림. 65 이중 광섬유가 베어파이버 연마지그에 장착된 모습

결합된 이중광섬유를 연마 장비인 Trig Fiber Shaping Workstation를 활용하여 단면연마를 진행하였으며, 베어파이버 어댑터 연마지그에 결합된 이중 광섬유 Core부의 연마 공정은 전처리 과정을 포함하여 총 4단계를 거쳐 진행하였다. 그림. 65는 단면 연마공정에 활용된 연마 장비를 나타내고 있다.

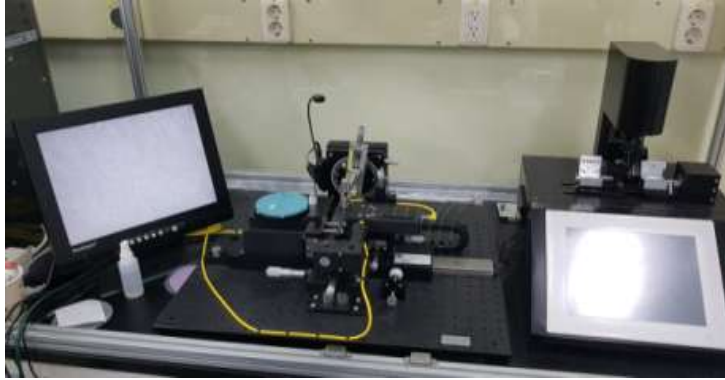


그림. 66 연마기 (Trig Fiber Shaping Workstation)

이중광섬유 Core Polishing 공정 순서는 다음과 같다.

〈 이중광섬유 단면 연마 공정 순서〉

- ① 베어파이버 어댑터에 이중광섬유 출력부를 고정한다.
- ② 장착된 이중광섬유를 연마장비와 결합한다.
- ③ 9um Polishing 공정을 진행 한다.
- ④ 3um Polishing 공정을 진행 한다.
- ⑤ 1um Polishing 공정을 진행 한다.
- ⑥ 0.3um Polishing 공정을 진행 한다.
- ⑦ 광학 현미경을 통한 단면 상태를 확인 한 후 Re-polishing 여부를 결정한다.

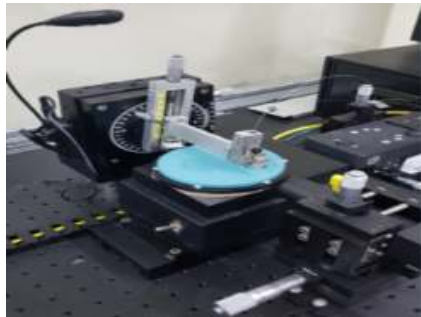
베어파이버 어댑터 연마지그의 고정을 통해 이중 광섬유 출력부 끝면의 Polishing 하였고, Polishing Film의 입도를 교체하여 광섬유 영역의 표면 입도가 10nm이하가 되도록 Polishing 조건을 설정하여 진행하였다.

각각의 연마 시간은 1m 10sec 까지 진행하였으며 이중 광섬유 단면연마 공정 조건은 표. 17과 같다.



표. 17 이중 광섬유 단면 연마 공정 조건

단 계	Polishing Film	Film 입도	단면 압력	Polishing Time
1	DR-5D (Silicon Carbide)	9 $\mu$ m	300 g	1m 10sec
2	DR-5D (Silica)	3 $\mu$ m	300 g	1m 10sec
3	DJ5D-1U (Diamond)	1 $\mu$ m	300 g	1m 10sec
4	XF5D (SiO <sub>2</sub> )	0.3 $\mu$ m	300 g	1m 10sec



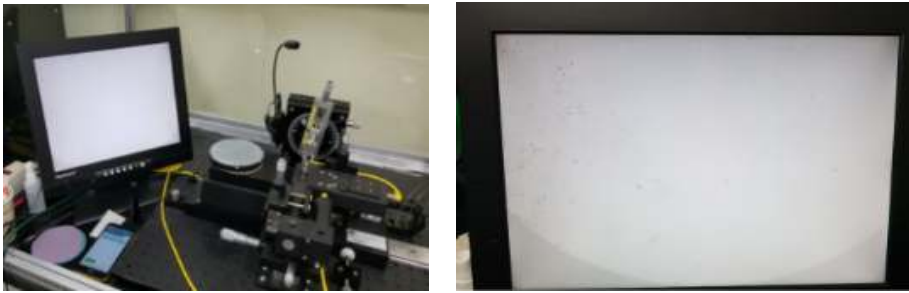
(a) 이중 광섬유 단면 연마 공정 조건



(b) Silica 연마공정 및 연마 단면



(c) Diamond 연마공정 및 연마 단면



(d) SiO<sub>2</sub> 연마공정 및 연마단면

그림. 67 연마 단계별 공정

연마필름 공정별 진행모습 (a) 이중 광섬유 단면 연마 공정 조건 (b) Silica 연마공정 및 연마 단면 (c) Diamond 연마공정 및 연마 단면 (d) SiO<sub>2</sub> 연마공정 및 연마단면을 나타낸다.

위 공정조건을 수립하여 연마공정을 완료하였으며, 그림. 67은 연마필름 공정별 진행모습을 나타내고 있다. 연마된 이중광섬유의 불량 유/무를 확인하기 위해 초음파세척기를 활용하여 이물질을 제거하여 광학현미경을 통한 최적의 연마 단면 상태를 확인하였다. 그림. 68은 최종 연마된 이중 광섬유를 나타내고 있다.

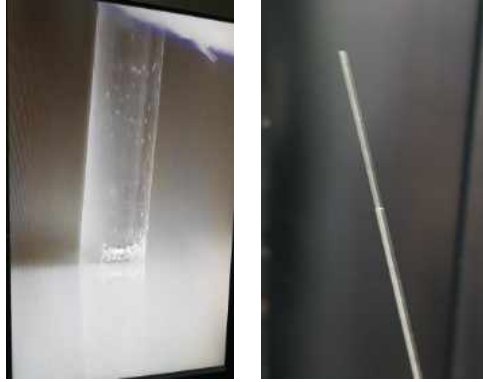


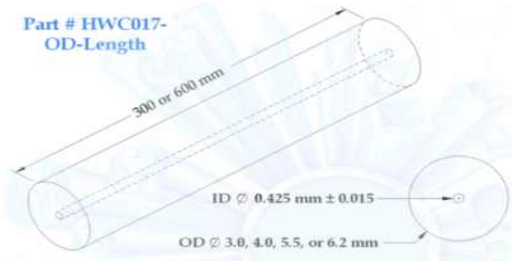
그림. 68 최종 연마된 이중 광섬유

광섬유간 용착접속기를 활용하여 용착된 이중 광섬유를 Quartz Block과 결합공정을 진행하였으며, 이 공정을 진행하기 위해 우선적으로 Quartz Block 가공을 진행하였다. Quartz Block은 실리카 소재로 구분되며, Quartz Block 규격가공을 진행하여 규격화된 튜브형 Quartz Block을 외부환경에 민감한 광섬유 외부에 cover형식으로 감싸게 되며, 외부로부터 보호가 가능한 클래딩 역할을 하게 된다. 그림. 69는 이중광섬유 외부 cover형식의 튜브형 Quartz Block 나타내고 있다.



그림. 69 Quartz Block(석영재질)

이중광섬유와 End cap 종단면에 들어갈 가공된 QB(Quartz Block)는 Optical Fiber 보호 및 정밀한 정렬이 가능한 중요한 요소이며, 출력단 끝단면의 Ferrule 역할까지 수행이 가능하며, 그림. 70은 가공된 Quartz Block 도면을 나타내고 있다.



OD (mm)				LENGTH (mm)	
3.0±0.1	4.0±0.15	5.5±0.2	6.2±0.25	300+10/-0	600+20/-0

그림. 70 가공된 Quartz Block 도면

추가적으로 기술적 요구사항에 따라 SMA용 이중광섬유 제작을 진행하기 위해 Metal Ferrule을 선정 하였으며, 사용되는 재료로는 Ceramics, Metal 및 Plastic으로 구분되고 있다[30-34]. 고출력 광섬유 레이저 모듈은 많은 열을 발생시키기 때문에 일반적으로 Zirconia Ferrule을 적용할 경우 변형과 특성의 변화를 가져오게 되며, 요청사항에 따라 물리적 특성이나 현상들을 보완하기 위해 MM(Multi-Mode) Fiber와 가장 적합한 Cupro-nickel재질의 Metal Ferrule을 선정하였다. Cupro-nickel은 니켈을 함유한 구리-니켈계의 합금으로 고용체형이며, 연성이 뛰어나고, Deep Drawing 가공성, 열간 단조성이 좋으며, 내식성도 우수하기 때문에 고성능 열 교환기에 많이 사용되는 재료로써, 열 특성 및 가공성, 내식성 등을 고려하여 니켈 함유량 25%의 Cupro-nickel의 재질로 구성된 Metal Ferrule이며, 그림. 71은 선정된 Cupro-nickel Ferrule을 나타내고 있다.

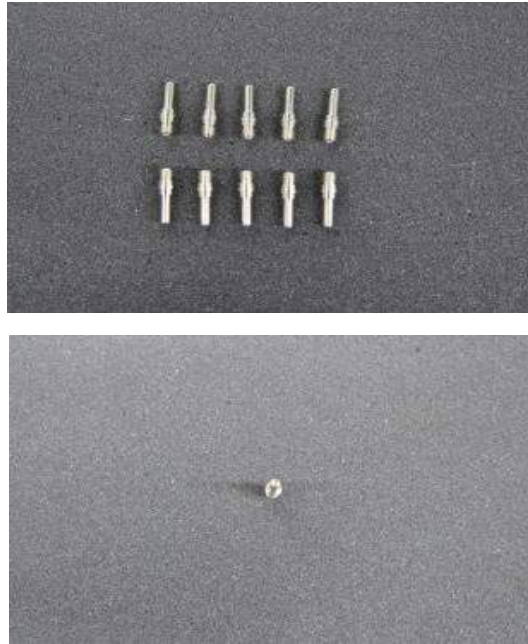


그림. 71 Metal Ferrule (Cupro-nickel 재질)

최종 제작된 고출력 파이버 레이저용 End cap은 레이저 발진시 고온이 발생하여 광섬유의 단선 등의 문제가 발생할 수 있어 온도를 수시로 모니터링이 필요하며, 상시온도를 체크하기 위한 온도센서를 End cap에 장착을 진행하기 앞서 최적의 온도센서 선정을 위한 특성분석을 진행하였으며, 표. 18은 적용된 온도 센서별 특성을 나타내고 있다.

표. 18 온도 센서별 특성

조립 형식	MA100	MA200	MA300
표준 직경 (D)	0.762 mm	3.96 mm	9.52 mm
	1.27 mm	-	-
	1.78 mm	-	-
	2.03 mm	-	-
바디 길이 (L)	9.52 mm	95.25 mm	N/A
리드 길이 (A)	9.52 mm	95.25 mm	N/A
와이어 게이지	20, 30, 32, 38 AWG	30 AWG	30 AWG
표준 전선 절연	Heavy Isomid Medical Grade PVC Polyurethane with Nylon Overcoat	- PTFE	Medical Grade PVC PTFE
바디 재료	성형 플라스틱이나 Kopton 소매	단단하고 샤프한 알루미늄 팁	스테인리스 강
기준 온도에 따른 저항값(25℃)	2,252Ω, 3,000Ω, 5,000Ω, 10,000Ω(세 가지타입 전부)		

End cap에 장착될 온도센서의 직경은 약 1mm미만이며, 고온에 따라 저항이 증가하기 때문에 재질 및 성분을 고려하였으며, MA100, MA200, MA300 각각의 센서별 특성을 분석, End cap 레이어 출력시 내부 센서부품들의 전기적 결함을 고려하여, 오차범위를 최소화하고, 향후 상시점검시 오류로 인한 예러현상 등을 미연에 방지할 수 있도록 내부환경에 가장 적합한 GE-Sensing사의 Kopton재질의 MA100(온도센서)를 선정하였다. 그림. 72는 최종 선정된 온도센서(MA100)을 나타내고 있다.

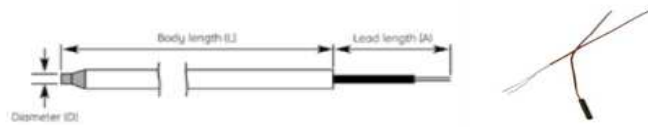


그림. 72 적용된 온도센서(MA100)

온도센서 외에도 산란광 감시를 위한 광센서는 다양한 형태가 있으며, 원리로 부터 그 종류를 분류하면 다음과 같이 분류된다. 특정 파장영역의 광의세기를 측정하는 광전효과를 이용한 광전소자인 포토다이오드, 광 열량을 측정하는 열 감지 센서인 초전효과를 이용한 초전소자, 열전효과(thermal electric effect)를 이용한 열전소자인 써모파일(thermopile) 등이 사용되고 있으며, 특정 파장영역의 광을 검지하기 위해 열 감지소자가 아닌 광전소자인 포토다이오드를 선정하였다. 표. 19는 최종 선정된 포토다이오드 특성분석을 나타내고 있다.

표. 19 Photodiode 규격

사양	기호	값
파장 범위	$\lambda$	800 ~ 1700 nm
피크 파장	$\lambda_P$	1550 nm
감응	$R(\lambda)$	1.003 A/W
상승/하강 시간 ( $R_L=50\Omega, 5V$ )	$t_r/t_f$	0.30 ns/ 0.30 ns
NEP, Typical (1550 nm, 20 V)	$W/\sqrt{Hz}$	$4.50 \times 10^{-15}$
암전류 (5 V)	$I_d$	0.05 nA (Typ.) 2.00 nA (MAX)
바이어스 전압(Reverse)	-	20 V (MAX)
반전 전류	-	2 mA (MAX)
전기 용량	$C_j$	2.0 pF (Typ.)
광 파워 손상 한계 값	-	18 mW

포토다이오드(Photo diode)는 에너지 준위차이에 해당하는 광을 흡수하여

전하량 또는 전류를 생성하는 원리로 동작하며, 반전전류 및 광파워 한계치를 고려하여 가장 적합한 PGA 01(Photodiode)를 선정하였다. 그림. 73은 최종 선정된 Photodiode(FGA 01)를 나타내고 있다.



그림. 73 Photodiode (FGA 01)

위 선정된 부품들을 활용하여 End cap 메탈하우징 내부에 선정된 온도센서(MA100) 결합을 진행하였으며, 산란감시를 위한 Photodiode (FGA 01) 결합공정을 실시하였다.

제작된 메탈하우징 입력부에 도출되어 있는 도선들과 내부부품들의 보호를 위해 보호 케이블링 구조분석을 진행하였으며, 최종 제작에 앞서 방열구조의 적합한 케이블튜브 특성분석을 진행하였다. 표. 20은 사용된 케이블 튜브 특성분석을 보여 준다.

표. 20 케이블 튜브 특성분석

내부직경(mm)	외부직경(mm)	벽 두께(mm)	굽힘 반경(mm)	버스트 압력
2.0	3.0	0.5	15	57
4.0	6.0	1.0	25	57
6.0	8.0	1.0	80	32
8.0	10.0	1.0	80	32
10.0	12.0	1.0	130	27

분석 결과 내부직경 6.0mm, 외부직경 8.0mm 구조의 케이블튜브인 PFA EX Zebra Explosion-Proof Tubing을 선정하였으며, 이는 투명소재의 가시성



을 갖고 있으며, 일반적인 금속튜브와는 다르게 부식성을 가지고 있지 않다. 또한 투명 PFA의 외부 표면에 검은색상의 세로 도선 줄무늬가 있는 튜브로써, 내부에 삽입된 광섬유에 손상이 있을 시, 그 손상된 부분으로 레이저가 도출되는 지점을 명확하게 구분이 가능하다. 그림. 74는 최종 선정된 케이블튜브를 나타내고 있다.

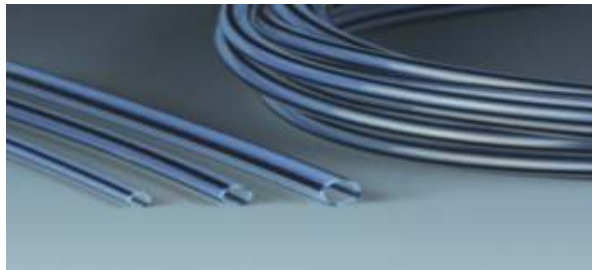


그림. 74 PFA-EX 케이블 튜브

가공된 PFA-EX 케이블 튜브를 도출되어 있는 센서부 도선들을 내부삽입 공정을 순차적으로 진행하였으며, 메탈하우징 외부 보호를 위한 2차적인 공정을 진행하였으며 그림. 75의 High Power Laser 출력 전송 Delivery 제작을 완료 하였다.



그림. 75 이중광섬유가 용착된 End cap

최종 제작된 High Power Fiber Laser출력 전송 모듈 End cap 하우징 열전달 해석 및 구조체 분석을 진행하였으며, 열전달 해석은 상용코드 해석툴인 ANSYS Workbench를 사용하였다.

해석조건에 앞서 ANSYS Workbench의 Design Modeler를 이용하여

3D 모델링을 통한 3D형상을 구성하였다. 그림. 76은 ANSYS Workbench에 적용된 End cap 3D형상도면을 나타내고 있다.

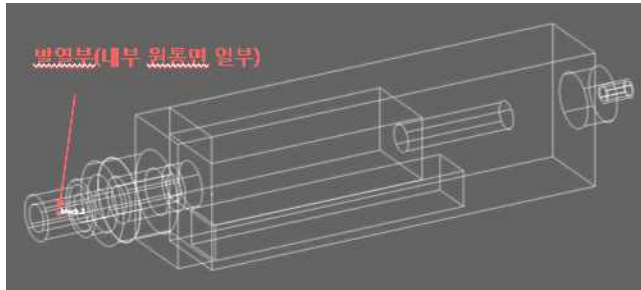


그림. 76 End cap 3D 결합 형상 도면

열해석의 조건으로는 End cap의 끝단부에 0.5, 1, 3, 5W별 10초동안 열원을 가하고 그에 따른 열전해석을 진행하였으며, 재질은 AI재질을 대입시켜 상온 20℃ 조건으로 진행하였다.

#### 라. 고출력 광섬유 레이저 End cap 방열 및 구조 해석

그림. 77은 End cap하우징의 열전달 방열부와 End cap에서 발생하는 손실량에 따른 열해석 데이터를 나타내고 있다. 분석 Data는 End cap 열원부에서 최고온도 분포도를 나타내며, 축 방향으로 열전달이 진행되고 있는 현상을 나타내고 있다.

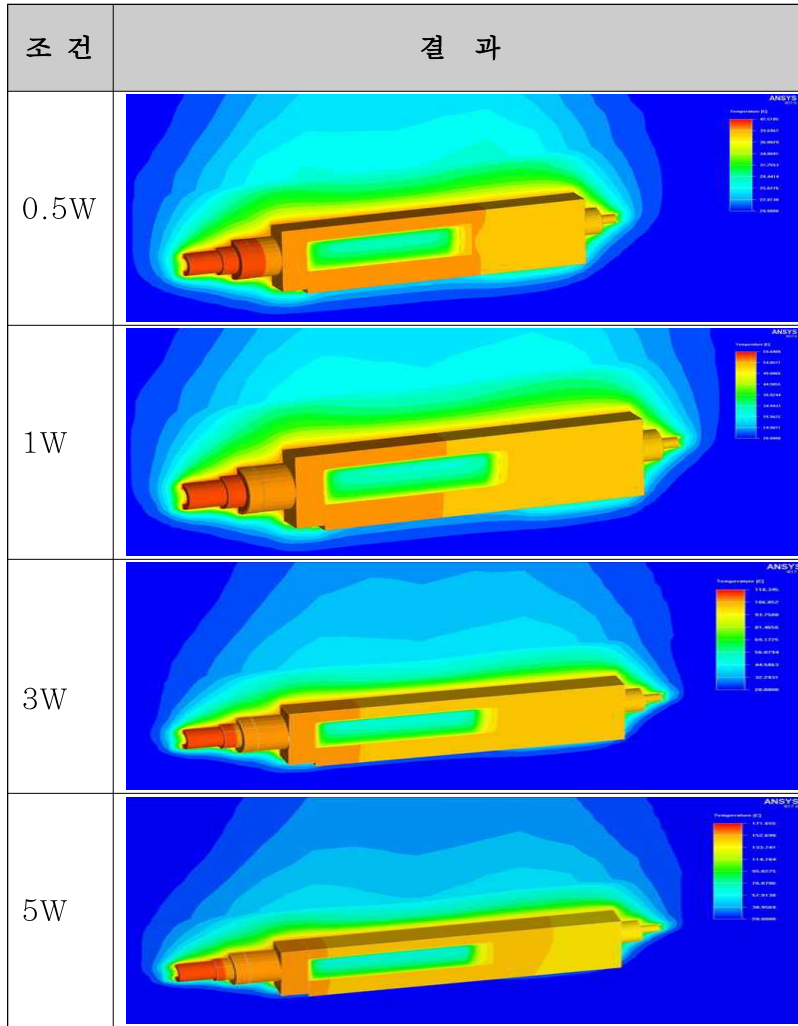


그림. 77 End cap 열해석 데이터

위 데이터를 바탕으로 열해석을 통한 발열부 End cap의 온도 분포를 보여 준다. 0.5W 출력시 발열부 최대 온도 42°C와 5W 출력시 최대 온도 171°C의 발열량을 확인하였다. 이를 통해 수냉식 칩러를 연동하여 레이저 출력시 End cap 발열량을 45%이상 저감효과를 가져올 수 있다. 표. 21은 열해석을 통한 발열부 End cap Temperature를 보여준다.

표. 21 End cap Temperature

조건	End-cap 출력 W			
	0.5 W	1 W	3 W	5 W
Temperature [C]	외부온도 : 20℃	외부온도 : 20℃	외부온도 : 20℃	외부온도 : 20℃
	MAX : 42.5 ℃	MAX : 59.8 ℃	MAX : 118.3 ℃	MAX : 171.6 ℃

### 마. End cap 성능 시험

최종 연구 제작이 완료된 End cap의 출력 빔 측정 성능 시험을 진행하였으며, 출력 빔의 사이즈는 각각 X:765.4, Y:749.2의 결과 값을 도출해낼 수 있었다.

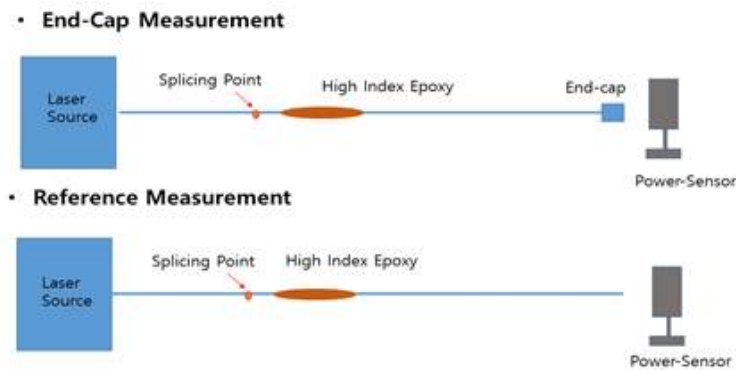


그림. 78 End cap 전송 특성 측정을 위한 구성도

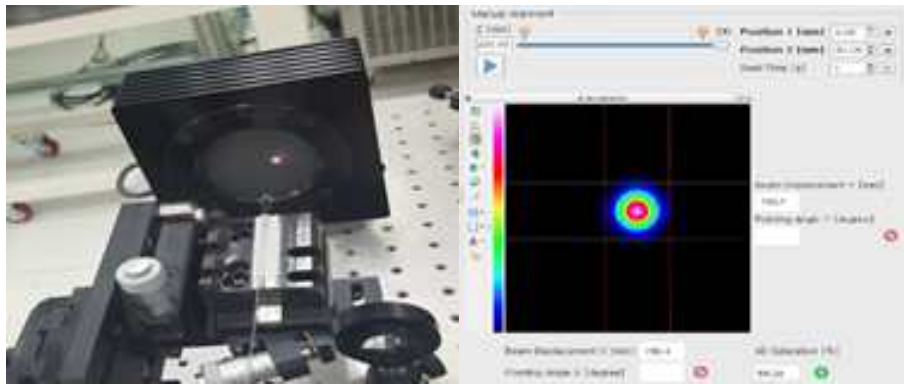


그림. 79 End cap 코어 빔 특성 시험

표. 22 End cap 코어 빔 특성 시험 측정 값

시료 NO	Ref. (W)	Mea. (W)	손실값(W)	Transmission (%)
1	10.34	10.28	0.06	99.41
2	10.29	10.23	0.06	99.42
3	10.33	10.25	0.08	99.23
4	10.30	10.23	0.07	99.32
5	10.32	10.22	0.10	99.04

단계별 파워 테스트를 위하여 End cap에 결함이 될 수냉 Cap을 추가로 연구하여 제작하였다.

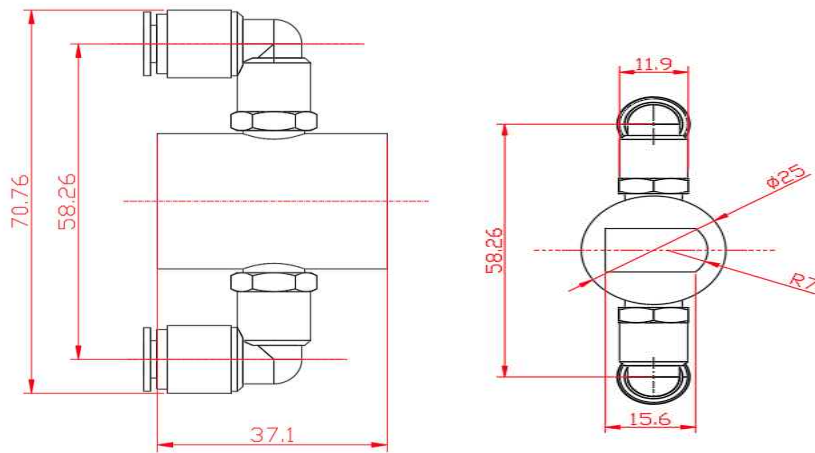


그림. 80 냉각을 위한 수냉 Cap 설계

설계된 수냉 Cap 2D도면을 활용하여 고풍력 광섬유 레이저 출력시 안정적인 방열이 가능할 수 있도록 수냉 Cap 제작을 진행하였으며, 아래 그림은 제작된 수냉cap을 나타내고 있다. 또한 수냉 Cap을 활용하여 제작된 End cap과의 결합공정을 진행하여 최종 고풍력 End capa 제작을 완료하였다.



그림. 81 냉각을 위한 수냉 Cap 제작

수냉 Cap이 결합된 End cap을 자체적으로 보유중인 kW급 레이저 시스템과 냉각을 위한 칠러 시스템, 측정을 위한 파워메타, 안전한 시험을 위한 광학 테이블을 구성하여 진행하였다.



그림. 82 End cap 단계별 파워 테스트 시험 셋팅

End cap의 단계별 파워 출력 성능 시험은 총 5단계의 파워를 적용하여 시험을 진행하였으며, 아래와 같은 결과를 낼 수 있었다.



그림. 83 End cap 단계별 파워 테스트 시험

표. 23 End cap 단계별 파워 성능 측정 값

구분(W)	출력파워(W)	출력파장(nm)	냉각방식
300	396	1084	수냉방식
500	559		
600	683		
800	890		
1000	1030		



## 제4장 결론

최근 활발히 응용되고 있는 고출력 광섬유 레이저에서의 광 출력을 안정화시킬 수 있는 연구를 수행하였다.

먼저 원하는 출력의 레이저 파장으로 전환되지 못하고 잔류한 펌프 광원을 효율적으로 제거 하는 방법을 검토하고 가능한 방법 중 양산에 장점을 갖고 있는 격자 구조에 착안하여 연구를 수행하였다.

잔류 광 제거 능력을 향상시키기 위해 주기적 격자 구조를 제안하고 대상 광섬유에 대한 굴절률 특성과 빛의 회절 특성을 감안하여 펌프광 파장에 따른 격자 홈의 depth와 pitch를 설계한 후 제작하였다. 제작된 펌프광 제거기 경우 동작 파장 범위 800nm에서 1100nm 에 걸쳐 최대 60W의 광출력에 대해 클래딩에서 10dB 광감쇠를 보였으며, 이때 원하는 출력 파장에 대해서는 0.2dB 이하의 감쇠를 보임으로써 경쟁력이 있는 펌프 광원 제거기를 제작할 수 있는 기반 기술을 확보하였다.

레이저 광 전달 모듈 (End cap)에 관한 연구에 있어서는 광섬유 레이저 출력을 원하는 장소까지 전달할 수 있도록 End cap과 하우징을 설계 및 제작하였다. 에너지 밀도를 낮추는데 필요한 빔 사이즈를 도출하였으며, 서로 다른 굴절률을 갖는 이중의 광섬유를 용착접속시킬 수 있는 접속기를 제작하였다. End cap 양쪽 단에서 온도 측정 결과 균일한 온도 값을 얻었으며, 결과로서 온도 분포가 End cap 전반에 걸쳐 균일하게 분포됨을 확인할 수 있었다. 제작된 End cap 전송 모듈은 동작파장 850-1100nm에서 출력 파워 1kW에 대해 종단길이 7.5mm의 End cap으로 최대 800um의 출력 빔 크기를 얻을 수 있어 에너지 밀도를 크게 낮출 수 있음을 확인하였다.

제작된 펌프광 제거기와 출력 전송모듈은 광센서 열센서 등과 결합하여 프로세서가 장착된 효율적 스마트 전송 모듈로 추후 연구될 계획이다.

## 참고문헌

1. V. P. Gapontsev, N. S. Platonov, O. Shkurihin, and I. Zaitsev, "400 W low-noise single-mode cw ytterbium fiber laser with an integrated fiber delivery," in Proc. CLEO 2003 Baltimore, USA, June 1-6, 2003, postdeadline paper CThPDB9
2. A. Galvanauskas, "High power fiber lasers," Opt. Photonics News (USA) 15, 42-47 (2004).
3. L. Chi-Hung, A. Galvanauskas, V. Khitrov, B. Samson, U. Manyam, K. Tankala, D. Machewirth, and S. Heinemann, "High-power single-polarization and single-transverse-mode fiber laser with an all-fiber cavity and fiber-grating stabilized spectrum," Opt. Lett. (USA) 31, 17-19 (2006).
4. F. Gonthier, L. Martineau, N. Azami, M. Faucher, F. Seguin, D. Stryckman, A. Villeneuve, "Highpower all-fiber components: the missing link for high-power fiber lasers," in Fiber Lasers: Tech. Syst. and Applications, Proc. SPIE 5335, 266-276 (2004).
5. F. Gonthier, "All-Fiber® pump coupling techniques for double-clad fiber amplifiers and Lasers", TFI11-3 Cleo Europe (2005).
6. M. Jäger, P. Verville, S. Caplette, L. Martineau, D-A. Brulotte, D. Gagnon, A. Villeneuve, paper JWB59 in CLEO 2005, Baltimore, MA (2005).
7. A. Wetter, M. Faucher, M. Lovelady, F. Séguin, Tapered fused-bundle splitter capable of 1kW CW operation, Proceedings of SPIE, Volume 6453 Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications, photonics west (2007)

8. A.Wetter, M.Faucher, B. Sevigny, "High power cladding light strippers" to be publish photonics west 2008 (6873-70) Proc.
9. V. P. Gapontsev, "Penetration of fiber lasers into industrial market," Proc. SPIE 6873, Fiber Lasers V: Technology, Systems, and Applications, edited by J. Broeng, et. al. (2008)
10. D. Kliner et. al., "4-kW fiber laser for metal cutting and welding," Proc. SPIE 7914, Fiber Lasers VIII: Technology, Systems, and Applications, edited by Jay W. Dawson (2011)
11. V. Gapontsev, F. A. Fomin, A. and M. Abramov, "Diffraction limited ultra-high-power fibre lasers," Paper AWA1 in Proc. Adv. Solid-State Photon. Topical Meeting, OSA (2010).
12. S. Maryashin, A. Unt, and V. P. Gapontsev, "10-mJ pulse energy and 200 W average power Yb-doped fiber laser," Proc. SPIE 6102, Fiber Laser III: technology, Systems, and Applications (2006)
13. Martin E. Fermann and Ingmar Hartl, "Ultrafast fibre lasers," Nature Photonics, October (2013)
14. A. D. Yablon, Optical Fiber Fusion Splicing, Springer (2005)
15. B. S. Wang, E. W. Mies, "Advanced topics on fusion splicing of specialty fibers and devices," Proc. of SPIE 6781, 678130 (2007)
16. B. S. Wang and E. Mies, "Review of Fabrication Techniques for Fused Fiber Components for Fiber Lasers," Proc. SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, edited by D. V. Gapontsev et. al. (2009)

17. A. Wetter et. al., "Tapered fused-bundle splitter capable of 1 kW CW operation," Proc. SPIE 6453, 64530I (2007)
18. B. S. Wang et. al., "All-fiber 50 W Coherently combined passive laser array," Opt. Lett., 34, 863 (2009)
19. R. Kashyap, "The Fiber Fuse - from a curious effect to a critical issue: a 25th year retrospective," Opt. Express, 21, 6422 (2013)
20. "반도체 레이저 다이오드", 심종인, 물리학과 첨단기술, pp. 14-18, April, (2010).
21. The world wide Market for Lasers Market Reviews and Forecast (2014).
22. The world wide Market for Lasers Market Reviews and Forecast (2013).
23. "고출력 광섬유 레이저 기술", 이상배, 광학과 기술 4권 2호, pp. 19-27, (2010).
24. "광섬유 레이저의 발전", 전민용, 물리학과 첨단기술, pp. 7-11, November (2009)
25. "레이저", 과학과 기술 Vol. 498, November (2011).
26. Inoue, K., Sasaki, K., Suzuki, Y., Kawanishi, N., and Tsutsumi, Y., "Method for fusion splicing optical fiber and fusion splicer," US Patent 6,294,760, Fujikura, Sept. (2001).
27. Noguchi, Y., Nishiwaki, K., Oda, K., Tanaka, H., Asano, K.,

Matsuura, T., Hosoya, H., "Subminiature micro-optic devices with mini quartz-rod-lens", Fujikura Technical Review, pp 5-9, (2004).

28. Zheng, W., Malinsky, B., "Arc Power Calibration for Fusion Splicing," Proc. of SPIE Vol. 8237 paper 82372E, San Francisco, (2011).

29. Duke, D., Zheng, W., Sugawara, H., Mizushima, T., and Yoshida, K., "Plasma zone control for adaptive fusion splicing capability," Proc. SPIE, Photonic West (2012).

30. Zheng, W., "Automatic Current Selection for Single or Ribbon Fiber Splicing," Proceedings of International OFC'97 Conference, in Dallas, Feb., 1997.

31. Zheng, W., Ola, H., Rylander, R., "Erbium-doped fiber splicing and splice loss estimation," IEEE J. Lightwave Tech., Vol. 12, No. 3, pp. 430-435, 1994.

32. W. Guo, Z. Chen, H. Zhou, J. Li, and J. Hou, "Cascaded cladding light extracting strippers for high power fiber lasers and amplifiers," IEEE Photon. J. 6, 1 - 6 (2014).

33. A. Babazadeh, R. R. Nasirabad, A. Norouzey, K. Hejaz, R. Poozesh, A. Heidariazar, A. H. Golshan, A. Roohforouz, S. Jafari, and M. Lafouti, "Robust cladding light stripper for high-power fiber lasers using soft metals," Appl. Opt. 53, 2611 - 2615 (2014).

34. H. An, X. Liu, and Z. Bi, "Study and design of cladding power stripper for high power fiber laser systems," High Power Laser Sci. Eng. 4, e28 (2016).

35. R. Poozesh, A. Norouzy, A. H. Golshan, A. Roohforouz, A.

Babazadeh, R. R. Nasirabad, N. T. Jafari, A. Heidariazar, K. Hejaz, and A. Alavian, "A novel method for stripping cladding lights in high power fiber lasers and amplifiers," *J. Lightwave Technol.* 30, 3199 - 3202 (2012).

36. A. Kliner, K.-C. Hou, M. Plötner, C. Hupel, T. Stelzner, T. Schreiber, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "Fabrication and evaluation of a 500W cladding-light stripper," *Proc. SPIE* 8616, 86160N (2013).

37. S. Boehme, K. Hirte, S. Fabian, C. Hupel, T. Schreiber, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "CO<sub>2</sub> -laser-based fiber coating process for high power fiber application," *Proc. SPIE* 8968, 89680Z (2014).

38. K. Boyd, N. Simakov, A. Hemming, J. Daniel, R. Swain, E. Mies, S. Rees, W. A. Clarkson, and J. Haub, "CO<sub>2</sub> laser-fabricated cladding light strippers for high-power fiber lasers and amplifiers," *Appl. Opt.* 55, 2915 - 2920 (2016).

39. M. Berisset, L. Lebrun, M. Faucon, R. Kling, J. Bouillet, and C. Aguergaray, "Laser surface texturization for high power cladding light stripper," *Proc. SPIE* 9730, 973014 (2016).

40. T. Li, J. Wu, Y. Sun, Y. Wang, and Y. Ma, "An improved method for stripping cladding light in high power fiber lasers," *Proc. SPIE* 9255, 92550M (2015).

41. Q. Xiao, P. Yan, D. Li, J. Sun, X. Wang, Y. Huang, and M. Gong, "Bidirectional pumped high power Raman fiber laser," *Opt. Express* 24, 6758 - 6768 (2016).

42. Chang D. I., Lim D. S., Jeon M. Y., Kim K. H and Park T., Cascaded Raman fibre laser for dual wavelength operation, *Electron. Lett.*, 37,12,740-741,(2001).
43. Leplingard F., Borne S., Lorcy, L., Lopez I., Gurin J.-J., Moreau C., Martinelli C. Bayart D., *Electron. Lett.*, 38, 16, 886-889, (2002).
44. Demidov A. A., Starodumov A. N., Li X., Martinez-Rios A. and Po H., "Three wavelength Raman fiber laser with reliable dynamic control", *Optics letters*, Vol.28, No.17, 1540-1542, (2003).
45. Feng Y., Huang S., Shirakawa A., and Ueda K., Multiple color cw visible lasers by frequency sum-mixing in a cascading Raman fiber laser", *Optics express*, 12, 9, pp. 1843~1847, (2004)
46. Cierullies S., Renner H. and Brinkmeyer E., Widely tunable CW Raman fibre laser supported by switchable FBG resonators, in *Proc.ECOC2003*, Tu3.2.3, 224-225, (2003).
- 47.. Lewis S. A. E., Chernikov V., and Taylor J. R., Fibre optic tunable CW Raman laser operating around 1.3  $\mu\text{m}$ , *Opt. Commun.*, 182, 403-405, (2000).
- 48.. Reeves-Hall P.C. and Taylor J. R., Wavelength tunable CW Raman fibre ring laser operating at 1486-1551 nm, *Electron.Lett.* 37,8,491-492, (2001).
49. Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Ryvakov M. A., and Vlasov A. A., All fibre widely tunable Raman fibre laser controlled output spectrum, *Optics Express*, 15, 12, 8438-8443, (2007).
50. Erick B, Daniel Coté, and , High-power and widely tunable

all-fiber Raman laser, *Journal of lightwave technology*, 26, 12, 1696-1701, (2008).

51. Wang Y. and Hong Po, Characteristics of fibre Bragg gratings and influences on high-power Raman fibre lasers, *Meas. Sci. Technol.*, 14, 883-891, 2003, *IEEE Photon. Technol. Lett.* Real Vallee, et al., Highly efficient and high-power Raman fiber laser based on broadband chirped fiber Bragg gratings, *Journal of lightwave technology*, 24, 12, 5039-5043, (2006).

52. S. Johansson, Concepts for Compact Solid-State Lasers in the Visible and UV, Department of Applied Physics Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden (2006).

53. H. Wang and AM. Weiner, "Second Harmonic Generation Efficiency with Simultaneous Temporal Walkoff, Spatial Walkoff, and Depletion," Conference on Lasers and Electro-optics, Baltimore, MD, June 2-6, (2003).

54. H. Wang and AM. Weiner, "Efficiency of Short Pulse Type I Second Harmonic Generation with Simultaneous Spatial Walk-off, Temporal Walk-off and Pump Depletion," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, in press.

55. Walter Koechner, Michael Bass, Solid state lasers, 2003 Springer-Verlag New York, Inc. G. D. Boyd and D. A. Kleinman, "Parametric interaction of focused gaussian light beams", *J. Appl. Phys.* 39, 3597-3639 (1968).

56. D. M. Keicher "High conversion efficiency pumped-cavity second harmonic generation of a diode laser" Sandia Report, New Mexico.

57. Yan Feng, Shenghong Huang, Akira Shirakawa and Ken-Ichi



Ueda "589 nm Light source based on Raman Fiber Laser", Jpn. J. Appl. Phys. 43, L722-724, (2004).

58. Heibo Peng, Wei Hou, Y ahui Chen, Dafu Cui, Zuyan Xu, "28W red light output 659.5nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YAG laser using LBO" Opt. Express 14, 3961-3967 (2006).

59. Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu, F. Q. Jia, And L. S. Qian "High-power efficiency diode-pumped Nd:YVO4/LiB3O5 457 nm Blue laser with 4.6 W of output power, Opt Letter 31, 1070-1072 (2006).

60. Baichang Wu, Fali Xie, and Chuangtian Chen " Type-i and Type II noncritical phase matching of LiB3O5 crystal" J. Appl. Phys. 73, (1993).

61. J. E. Bjorkholm, "Optical second harmonic generation" Phys. Rev. 142, 126-136 (1965)

62. E. Samsoe, P. M. Petersen, S. Andersson-Engels, P. E. Andersen "Second harmonic generation of 405 light using periodically poled KTiOPO4 Pumped by external-cavity laser diode with double grating feedback" Appl. Phys. B 80, 861-864 (2005).

63. Joseph D. Vance, Chiao-Yao she, and Hans Moosmuller, "Continuous-wave, all solid state, single-frequency 400mW source at 589nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in monolithic lithium niobate resonator" Appl. Opt. 37, 4891-4896 (1998).

64. Vittorio Magni, "Optimum beam for second harmonic generation" Opt. Commun. 176, 245-251 (2000).

65. Nicolaie Pavel and Takunory Taira "High-power continuous-wave intracavity frequency doubled Nd:GdVO<sub>4</sub>-LBO laser under diode pumping into the emitting lever" IEEE J. Quantum electron, 11, 631-637 (2005).
66. Akira Shirakawa, Hiroki Maruyama, and Ken-ichi Ueda, "30W, 1178nm Yb-doped Photonic Bandgap Fiber Amplifier", OSA/CLEO/IQEC 2009, Baltimore, June (2009), CThGG3
67. V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky, O.I. Medvedkov, E.M. Dianov, "Yellow Frequency-Doubled Self-Heated Yb Fiber Laser", OSA / CLEO/QELS 2008, San Jose, California, May (2008), CWB5
68. A.S. Kurkov, \* V.M. Paramonov, and O.I. Medvedkov, "Ytterbium fiber laser emitting at 1160 nm", Laser Phys. Lett. 3, 503 - 506 (2006).
69. D. Georgiev, V. P. Gapontsev, A. G. Dronov, M. Y. Vyatkin, A. B. Rulkov, S. V. Popov, J. R. Taylor, "Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589nm", Opt. Express, 13, 6772-6776 (2005).
70. Hiroki Maruyama, Akira Shirakawa, and Ken-ichi Ueda, Christina B. Olausson, Jens K. Lyngsa and Jes Broeng, "1178 nm All Yb-fiber Laser Source Power-scaled by Solid-core Photonic Bandgap Fiber for 589nm Generation", IEEE, (2009).
71. Akira Shirakawa, Makoto Kamijo, Jun Ota, and Ken-ichi Ueda, Kiminori Mizuuchi, Hiroyuki Furuya, and Kazuhisa Yamamoto, "Linearly-polarized Yb-doped Fiber Laser in an All-fiber Configuration", OSA Baltimore, May (2007), CMC5
72. Akira Shirakawa, Jun Ota, Hiroki Maruyama, and Ken-ichi

Ueda, "Linearly-polarized Yb-doped Fiber Laser Directly Operating at 1178 nm for 589-nm Generation ", OSA/ASSP 2007, Vancouver, January (2007), MD1

73. Shenghong HUANG, Yan FENG, Akira SHIRAKAWA and Ken-ichi UEDA, "Generation of 10.5 W, 1178nm Laser Based on Phosphosilicate Raman Fiber Laser", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. L 1439 - L 1441

74. Supriyo Sinha, Carsten Langrock, Michel J. F. Digonnet, Martin M. Fejer, and Robert L. Byer, "Efficient yellow-light generation by frequency doubling a narrow-linewidth 1150nm ytterbium fiber oscillator", Opt. LETTERS, Vol. 31, (2006).

75. Yan FENG, Shenghong HUANG, Akira SHIRAKAWA and Ken-Ichi UEDA, "589nm Light Source Based on Raman Fiber Laser", Jpn. J. Appl. Phys , Vol. 43, (2004), pp. L 722 - L 724

76. G. M. Hale and M. R. Querry, "'Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region,"Appl. Opt. 12, 555 - 63 (1973).

77. Y. Wang, Z. C. J. Nelson, B. Reiser, R. Chuck, and R. Windeler, "Optimal wavelength for ultrahigh-resolution optical coherence tomography," Opt. Exp. 11, 1411 - 417 (2003).

78. T. Mitsui, "Dynamic Range of Optical Reflectometry with Spectral Interferometry," Jpn. J. Appl. Phys. 38, 6133 - 66137 (1999).

79. R. A. Leitgeb, C. K. Hitzenberger, and A. F. Fercher, "Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography,"Opt. Exp. 11, 889 - 94 (2003).

80. J. F. de Boer, B. Cense, B. H. Park, M. C. Pierce, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography,"*Opt. Lett.* 28, 2067 - 069 (2003).
81. M. A. Choma, M. V. Sarunic, C. Yang, and J. A. Izatt, "Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography,"*Opt. Exp.* 11, 2183 - 189 (2003).
82. S. H. Yun, G. J. Tearney, J. F. de Boer, and B. E. Bouma, "Motion artifacts in optical coherence tomography with frequency-domain ranging,"*Opt. Exp.* 12, 2977 - 998 (2004).
83. W. Y. Oh, S. H. Yun, G. J. Tearney, and B. E. Bouma, "15 kHz tuning repetition rate ultrahigh-speed wavelength swept semiconductor laser,"*Opt. Lett.* 30, 3159 - 161 (2005).
84. R. Huber, M. Wojtkowski, and J. G. Fujimoto, "Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography,"*Opt. Exp.* 14, 3225 - 237 (2006).
85. R. Huber, D. C. Adler, and J. G. Fujimoto, "Buffered Fourier domain mode locking: Unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s,"*Opt. Lett.* 31, 2975 - 977 (2006).
86. J. Zhang, Q. Wang, B. Rao, Z. Chen, and K. Hsu, "Swept laser source at 1  $\mu\text{m}$  for Fourier domain optical coherence tomography,"*Appl. Phys. Lett.* 89, 073,901 (2006).
87. E. C. Lee, J. F. de Boer, M. Mujat, H. Lim, and S. H. Yun, "In

vivo optical frequency domain imaging of human retina and choroid,"*Opt. Exp.* 14, 4403 - 411 (2006).

88. R. Huber, D. C. Adler, V. J. Srinivasan, and J. G. Fujimoto, "Fourier domain mode locking at 1050nm for ultra-high-speed optical coherence tomography of the human retina at 236,000 axial scans per second," *Opt. Lett.* 32, 2049-2051 (2007).

89. Prabakar Puvanathan, Peter Forbes, Zhao Ren, Doug Malchow, Shelley Boyd, and Kostadinka Bizheva, "High-speed, high-resolution Fourier-domain optical coherence tomography system for retinal imaging in the 1060 nm wavelength region," *Opt. Lett.* 33, 2479-2481 (2008).

90. Shuichi Makita, Tapio Fabritius, and Yoshiaki Yasuno, "Full-range, high-speed, high-resolution 1- $\mu$ m spectral-domain optical coherence tomography using BM-scan for volumetric imaging of the human posterior eye," *Opt. Express* 16, 8406-8420 (2008).

91. Enrique J. Fernández and Pablo Artal, "Ocular aberrations up to the infrared range: from 632.8 to 1070 nm," *Opt. Express* 16, 21199-21208 (2008).

92. Yueli Chen, Daina L. Burnes, Martijn de Bruin, Mircea Mujat, and Johannes F. de Boer, Three-dimensional pointwise comparison of human retinal optical property at 845 and 1060nm using optical frequency domain imaging *J. Biomed. Opt.*, Vol. 14, 024016 (2009)

93. Principles and applications of Fiber Lasers 월간 기계기술기자 11월호 (2007)

94. L. Quintino, A. Costa, R. Miranda, D. Yapp, V. Kumer and C. J. Kong, *Materials & Design* 29, 1231 (2007).