

## 광섬유 레이저의 개발 현황 및 새로운 응용 분야

### 1. 서론

오래 전 스타워즈에서 본 3차원 동영상 홀로그램 통화는 당시에는 꿈 같은 얘기였는데 이젠 기술적으로는 구현 가능해졌으며, 머지않아 일상생활에서 접하게 될 것으로 기대되고 있다. 이는 레이저 없이는 불가능하며, 오늘날 레이저는 바코드 스캐너에서 피부치료까지 우리 생활 곳곳에 사용되고 있다. 레이저는 일반 빛과 달리 빛살이 매우 좁으며, 한 가지 색(파장)만을 가지며, 시간과 공간상에서 매우 높은 간섭성(정렬성)을 갖는 빛을 내는 장치이다.

레이저 발명에는 레이저 구현을 위해 많은 노력을 한 과학자나 공학자들 이외에도 굴트(Gould)의 특허와 연관된 사탕가게 주인, 메이먼(Maiman)의 최초 레이저

도 별도로 암모니아 메이저를 개발하였다[4]. 1957년, 타운즈는 매제인 솔로(Schawlow)와 함께 가시광 레이저(Optical maser)연구를 시작하였으며 1958년 피지컬 리뷰에 “적외선과 가시광 레이저(Infrared and optical masers)” 라는 레이저 이론 논문을 발표하였고[5] 이를 계기로 많은 연구자들의 레이저 개발 경쟁이 시작 되었다. 한편 1957년 또 다른 연구자 굴트는 타운즈가 가시광 레이저를 생각하고 있을 때 별도로 자신만의 레이저 아이디어를 가지고 있었으며 이를 노트에 기록한 후 사탕가게 주인에게서 증명 서명을 받아두었다. 이 노트는 후에 레이저 발명 특허권과 관련한 30년 분쟁을 승리로 이끈 중요한 물증이 된다[1].

이후 많은 연구자들이 레이저 개발에 뛰어 들었고, 후즈 연구소의 메이먼이 최초로 붉은색의 루비레이저 개발

## 특집 ■ 광섬유 레이저

# 광섬유 레이저의 개발 현황 및 새로운 응용 분야

이관일\*

개발 때 플래쉬 램프 사용 아이디어를 준 사진사 등 많은 사람들이 관련되어 있다[1]. 레이저의 기원은 1916년 아인슈타인의 빛과 물질의 상호작용에 의한 전자기파 유도방출 이론으로 거슬러 올라간다[2]. 그 후 1950년대 초반 타운즈(Townes)가 암모니아에서 마이크로파의 유도방출을 실험적으로 구현하였으며[3](이것이 레이저의 전신인 메이저(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)이다), 같은 시기에 러시아의 바조프(Basov)와 프로호로프(Prokhorov)

에 성공하였다[6]. 하지만 1964년 노벨상은 레이저-레이저 이론의 공로로 타운즈와 바조프, 프로호로프가 수상하였다. 스나이처(Snitzer)는 1961년 최초로 광섬유에서 레이저를 구현하였으며[7], 그 후 저 손실 광섬유 개발, 광섬유 광증폭기 개발과 함께 광섬유 레이저 기술의 비약적인 발전이 있었다. 그리하여 광섬유 레이저는 가볍고, 작으며, 구조적 특성에서 오는 우수한 빔 품질, 높은 효율, 저 손실, 좋은 열 특성으로 인해 기존의 가스나 고체 레이저를 대체할 수 있는 레이저로 각광받게 되었

\* 한국과학기술연구원

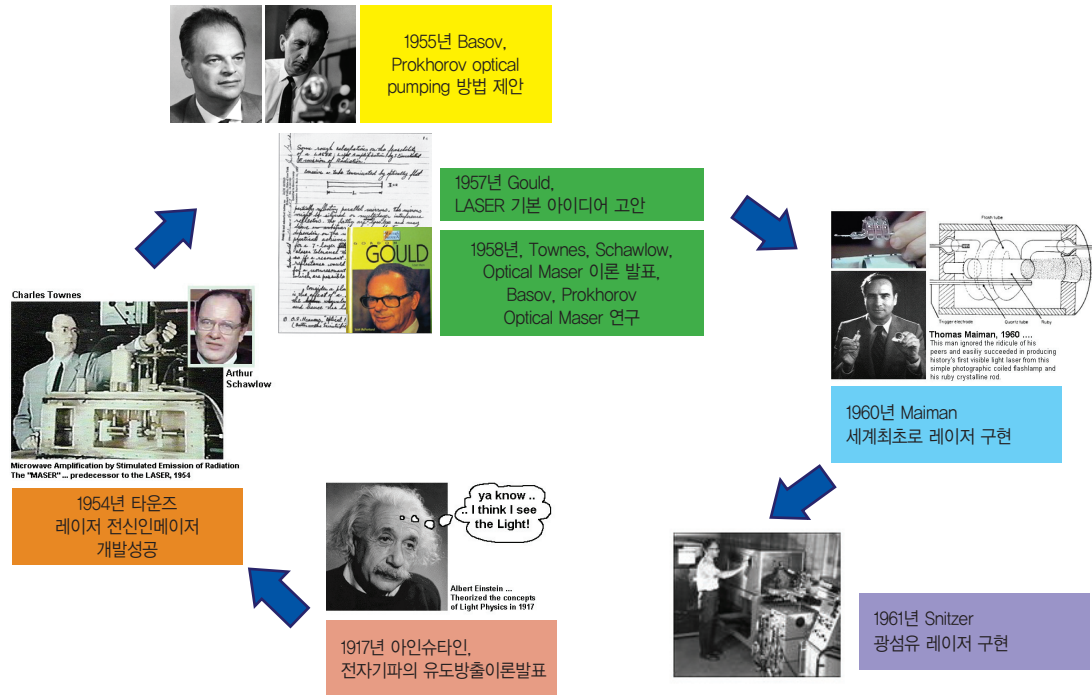
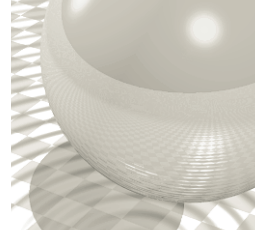


그림 1. 레이저 개발의 역사.

다[8-9].

본고에서는 광섬유 레이저의 개요 및 구조, 연구 동향을 살펴보고 새로운 응용분야를 소개하고자 한다.

## 2. 광섬유 레이저 개요

### 가. 광섬유 레이저의 구조

광섬유 레이저는 일반 레이저의 원리를 광섬유 구조 내에서 구현한 것으로 어븀, 이터븀, 툴륨 등의 희토류 원소가 첨가된 코어와 클래딩을 갖는 광섬유를 이득매질로 사용한다. 그림 2는 기본적인 광섬유 레이저의 구성도로 레이저 다이오드나 다이오드 스택으로 구성된 펌프광이 렌즈를 통해 광섬유 끝단에 집속되면 펌프광은 희

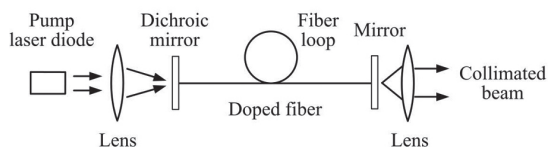


그림 2. 광섬유 레이저의 구성[10].

토류가 첨가된 광섬유를 지나면서 흡수되고, 이때 펌프광을 흡수한 희토류 원자들이 여기 상태로 올라 갔다 다시 내려오면서 특정 파장의 빛을 내게 된다. 이때 광섬유 양 끝단에 있는 거울은 레이저 공진기를 구성하는데 광섬유 끝단의 펌프광이 입력되는 쪽의 거울은 펌프광은 투과하고 광섬유 내에서 발진하는 광은 반사하는 이색필터 코팅이 되어 있으며, 반대쪽 거울은 공진기내의 빛 중 일부만 투과시키는 부분거울코팅을 하게 된다. 그리고 마지막에 있는 렌즈는 평행광을 만드는데 사용된다.

### 나. 광섬유 물질

희토류가 첨가된 광섬유의 기본 물질은 레이저가 동작하는 파장대에서 흡수가 없어야 하며, 실리카 유리가 널리 사용된다. 다른 물질로는 중적외선 대역에서 사용되는 불화지르코늄(Zirconium fluoride) 이 있다. 최근에는 희토류 원소의 농도증가가 쉬운 인산염 유리 연구가 활발하다. 광섬유 코어에 첨가되는 원소로는 주기율표상의 58번에서 71번의 원자가 +3인 희토류 원소들 중 이터븀, 어븀, 툴륨, 네오디뮴, 홀뮴, 프라세오디뮴 등이 있

광섬유 레이저의 개발 현황 및 새로운 응용 분야

표 1. 광섬유레이저에서 사용되는 희토류 원소의 펌프광 및 출력광 파장

| 첨가 원소              | 펌프광 파장 (nm) | 출력광 파장 (um)                   |
|--------------------|-------------|-------------------------------|
| 이터븀 (Yb)           | 910 또는 975  | 1.03-1.1                      |
| 어븀(Er)             | 1480 또는 980 | 1.5-1.6, 2.7, 0.55            |
| 네오디뮴(Nd)           | 808         | 1.03-1.1, 0.9-0.95, 1.32-1.35 |
| 툴륨(Tm)             | 793 또는 1064 | 1.9 - 2.1, 2.3                |
| 홀뮴(Ho)             | 810 또는 1150 | 2.0-2.15, 2.8-2.9             |
| 툴륨-홀뮴(Tm-Ho)       | 800         | 2-2.1                         |
| 홀뮴-프라세오디뮴 (Ho-Pr)  | 1064        | 2.87                          |
| 이터븀-프라세오디뮴 (Yb-Pr) | 650 또는 635  | 0.492                         |

다. 표 1은 각 원소들이 첨가된 광섬유 레이저의 펌프와 출력파장을 정리한 표이다.

다. 광섬유 구조

광섬유 레이저에 사용되는 광섬유는 펌프광을 직접 코어에 입력할 수 있는 일반 단일모드 광섬유의 코어에 희토류 원소가 첨가된 구조이다. 일반적으로 코어를 크게 하면 단위 면적당 파워를 낮출 수 있어 비선형 현상 및 광섬유 손상을 줄일 수 있고, 단일모드로 동작하면서 빔 퍼짐이 작게 되도록 개구값(NA: Numerical Aperture)은 작아야 한다. 하지만 구부렸을 때 손실이 크지 않도록 일반적으로 개구값은 0.06 이상, 코어 크기는 25 μm 이하가 되는 게 좋다. 따라서 모드단면적은 크면서 단일모드로 동작하는 레이저 빔을 얻기 위한 다양한 구조의 광섬유가 연구되고 있다.

요즘 대부분의 고효율 광섬유 레이저에서는 더블 클래드 광섬유를 사용하는데 구조는 그림3처럼 코어가 두 개의 클래딩으로 둘러싸인 형태이다. 펌프광은 안쪽 클래딩으로 결합되어 상대적으로 굴절률이 낮은 바깥 클래딩

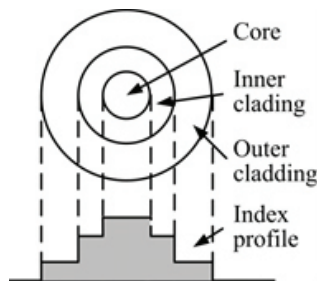


그림 3. 더블클래드 광섬유의 구조[10].

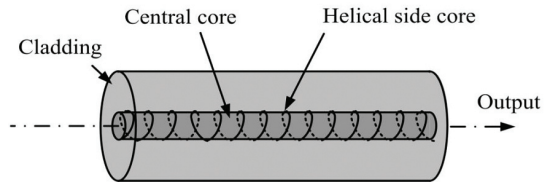


그림 4. 나선형 클래드 코어 (chirally clad core or chirally coupled core) 광섬유의 구조.

으로 인해 안쪽에 갇혀서 전파되며, 그러는 동안 점차 코어를 지나면서 레이저광을 발생시킨다. 더블 클래드 광섬유는 그림 3의 원형대칭구조뿐만 아니라, 코어가 중심에서 벗어난 구조(off-center core), 내부 클래딩안에 여러 개의 코어가 있는 구조, 타원형의 내부 클래딩 구조, 사각형의 내부 클래딩 구조, 팔각형의 내부 클래딩 구조 등 다양한 형태가 개발되어 사용되고 있다.

한편 미세가공에 사용되는 광섬유 레이저는 높은 출력의 짧은 펄스가 적합한데, 높은 출력을 얻기 위해 코어를 크게 하면 다중모드가 발진되기 때문에 단일모드로 동작시킬 수 있는 파워의 한계가 있다. 이를 해결할 수 있는 방법의 하나로 그림 4의 나선형 클래드 코어 구조가 제안되었다. 이 광섬유는 직경이 큰 코어 주위를 보조코어가 나선형으로 감싸고 있는 구조로 고차모드의 빛은 나선형의 보조 코어로 커플되어 진행하면서 클래드로 산란되기 때문에 가장 낮은 차수 모드의 빛만 중앙코어에 남게 되어 고품질의 고효율 레이저를 만드는데 사용할 수 있다[11]. 상기 광섬유는 중앙의 커다란 코어부분과 길이 방향으로 평행하게 위치한 작은 보조 코어부분을 갖는 모재를 스핀을 주면서 인장하여 제작한다.

라. 반사거울

광섬유 레이저에서 반사미러는 레이저의 공진기를 구성하는 소자로 유전체다층박막코팅미러, 분포형브래그 반사체, 반도체포화흡수체미러(SESAM) 등이 있다. 특히 반도체포화흡수체 미러는 피코초나 펨토초 펄

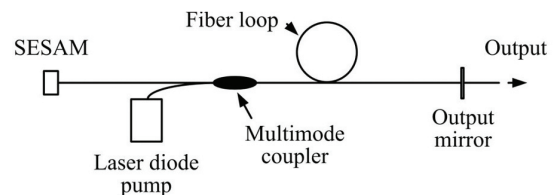
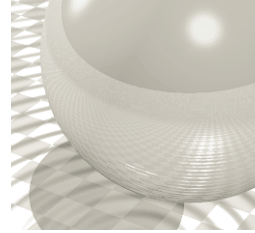


그림 5. SESAM 을 사용한 수동모드잠금 광섬유레이저의 구조[10].



스를 만드는데 흔히 사용하는 미러로 분포형브래그반사체 위에 굴절률이 다른 반도체물질을 교대로 적층하여 만든다. 광섬유레이저가 펄핑되면 광섬유내에서 광자수는 늘어나지만 이 광자들은 처음에는 InGaAs 층에서 흡수된다. 흡수된 광자들은 가전도대의 전자를 전도대로 이동시켜 가전도대의 전자수가 급격히 줄어들므로 흡수가 더 이상 되지 않고 포화상태가 된다. 그렇게 되면 광자는 브래그반도체 거울까지 도달할 수 있고 SESAM 에 의한 반사는 0에서 거의 1까지 순식간(1피코초 이하)에 올라가 공진기가 형성된다. 그리하여 광공진기가 형성되고 레이저 동작이 시작된다. 이후 어느 정도 시간이 지나면 전자들은 전도대에서 가전도대로 떨어지고 흡수가 다시 일어난다. 이러한 포화흡수체는 모드잠금 광섬유레이저를 구성하는데 흔히 사용되고 있다.

### 마. 펄프광원과 펄프광 결합기

대부분의 광섬유레이저는 반도체다이오드 레이저를 펄프광원으로 사용한다. 흔히 다이오드레이저의 출력은 직접 광섬유로 커플되어 레이저 광섬유로 입사되며 고출력 펄프광을 얻기 위해 여러 개의 다이오드 레이저를 컴바이너를 사용하여 결합시키기도 한다.

고출력 광섬유 레이저에서는 고출력의 펄프광이 필요하며 여러 개의 방사체 다이오드(single emitter diode)를 일렬로 연결한 다이오드 바(multi-emitter diode laser bars)가 사용되며, 킬로 와트급 펄프광을 얻기 위해서는 여러 개의 다이오드 바를 적층한 다이오드 스택을 사용한다.

흔히 다이오드 레이저 펄프광의 출력은 직접 광섬유에 결합되어 나오며 이는 다시 레이저 광섬유에 결합된다. 이때 다수의 광섬유 다발을 테이퍼링하여 만든 펄프광 결합기가 사용된다. 위의 펄프광 결합기는 펄프 다이오드 방향으로는 빛이 되돌아 가지 않는 단일방향결합기로

결합손실이 매우 작아서 광섬유 레이저 시스템을 소형화, 안정화하는데 큰 도움이 된다.

## 3. 광섬유 레이저의 연구동향

이중 클래드 광섬유 개발로 인하여 광섬유 레이저는 회절한계의 빔 품질을 갖는 킬로 와트급 고출력 레이저가 구현되었으며 특히 다중모드 광섬유 레이저의 경우 출력은 수십 킬로 와트까지 개발된 상태이다.

최근 광섬유 레이저 관련해서 단일 주파수 광섬유 레이저의 출력 증강, 고출력 초단펄스광섬유 레이저, 자기 유사 펄스(self-similar pulse)나 소산성의 솔리톤(dissipative soliton) 기반의 모드 잠금 기술, 증적외선 등의 새로운 파장대의 광섬유 레이저에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[12].

넓은 파장범위에서 단일모드로 동작하는 큰 직경의 광자결정광섬유는 비선형 및 분산 특성을 쉽게 조절할 수 있어 광섬유 레이저의 파워 증강을 위한 새로운 방법을 제시 할 것으로 기대된다. 파워증강을 위한 핵심은 모드 단면적을 증가시키는 것인데, 이는 기본적으로 한계가 있으므로 빔 결합을 위한 광섬유 위상 제어나 다중코어 광섬유 도입 등의 새로운 기술 개발이 필요하다. 한편 자기 유사 펄스나 소산성의 솔리톤 전파는 고전적인 솔리톤이나 늘어진 펄스(stretched-pulse)와는 본질적으로 다르며, 안정적인 고품질의 펄스를 유지한 채 파워 스케일링이 가능하기 때문에 정상 분산영역(normal dispersion regime)에서 동작하는 광섬유 오실레이터(fiber oscillator) 연구가 필요하다[13-14]. 새로운 종류의 유리나 희토류 금속이온이 첨가된 광섬유는 증적외선을 포함한 새로운 파장대에서 발진 특성이 있으므로 이를 이용한 새로운 파장대의 광원에 관한 연구가 활발하다.

필자가 있는 한국과학기술연구원의 광섬유 연구실에서는 이터븀첨가 더블클래드 광섬유 개발, 특수 광섬유 격자, 고출력의 광섬유 레이저 개발, 2 μm 광섬유 레이저, 광섬유 레이저의 펄스 웨이핑, 수퍼컨티뉴 발생을 위한 광자결정 광섬유 개발 등에 관한 연구를 하고 있으며 [15-16], 국내 여러 산업체 및 대학교, 연구소에서도 광섬유 레이저 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

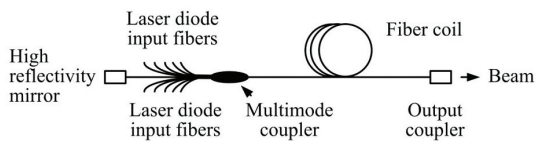


그림 6. 다수의 레이저다이오드를 사용하여 펄핑한 광섬유 레이저[10].

## 광섬유 레이저의 개발 현황 및 새로운 응용 분야

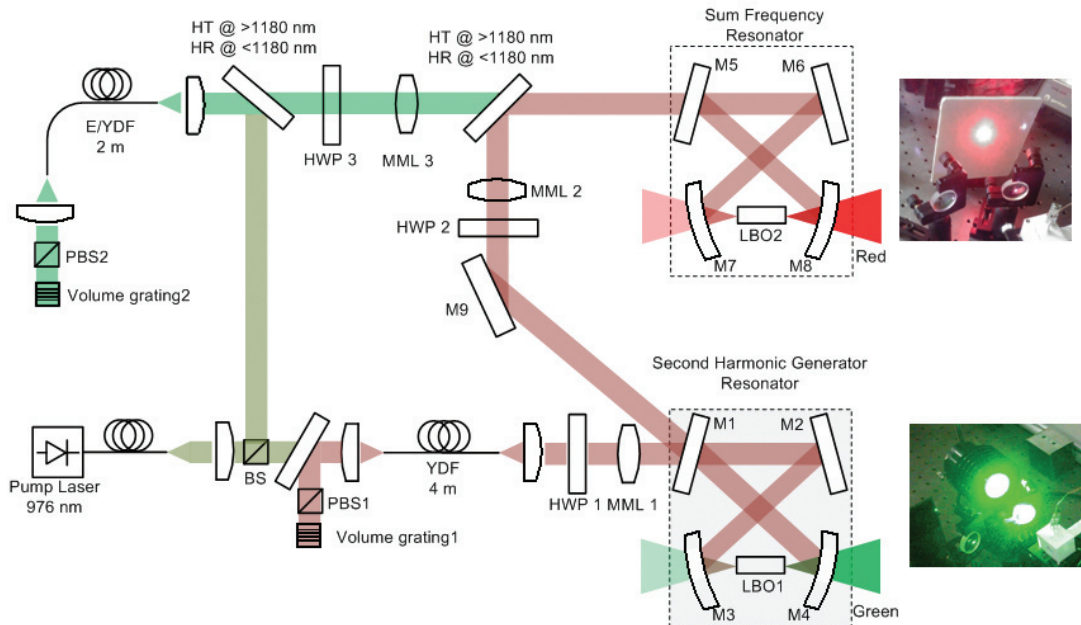


그림 7. 광섬유 레이저를 이용한 Red/Green 광 발생 (KIST 광섬유 연구실).

### 4. 광섬유레이저의 새로운 활용분야

현재 광섬유 레이저는 국내 반도체 및 휴대폰 산업의 레이저 마킹에 많이 사용되고 있으며, 고출력의 광섬유 레이저는 선박, 자동차, 비행기, 기계 산업에서 고정밀 가공 및 절단, 용접, 패터닝 등에서 기존의 CO<sub>2</sub> 레이저나 고체 레이저를 빠르게 대체하고 있다. 또한 군사용 미

사일 교란 및 파괴, 의료용 수술 및 치료 등 많은 분야에서 그 적용이 확대되고 있는 실정이다. 또한 펄스초 광섬유 레이저는 열에 취약하고 난삭성인 알루미늄, 유리, 질화규소 등의 세라믹 재료 및 텅스텐, 티타늄 등의 고온 재료 등의 가공에 사용 가능하다. 중적외선 대역의 광섬유 레이저는 플라스틱 가공이나, 대기 오염 측정 등의 환경분야에 매우 유용한 광원이다.

최근 수십 킬로 와트의 광섬유 레이저를 바위(rock)나 콘크리트를 부수는데 사용한 결과가 보고된 바 있다. 미국의 포로 에너지(Foro Energy) 사는 고출력 광섬유 레이저와 저손실 특수 광섬유를 사용하여 바위의 표면을 고온으로 가열한 후 시추 드릴로 바위를 깨뜨리는 방식으로 에너지 소모를 90% 가량 절감한 결과를 발표하였다. 이 회사는 이러한 기술을 석유나 가스 시추, 광산 산업에 적용하는 연구를 하고 있다.

그림 10은 ICAN 프로젝트 (International Coherent

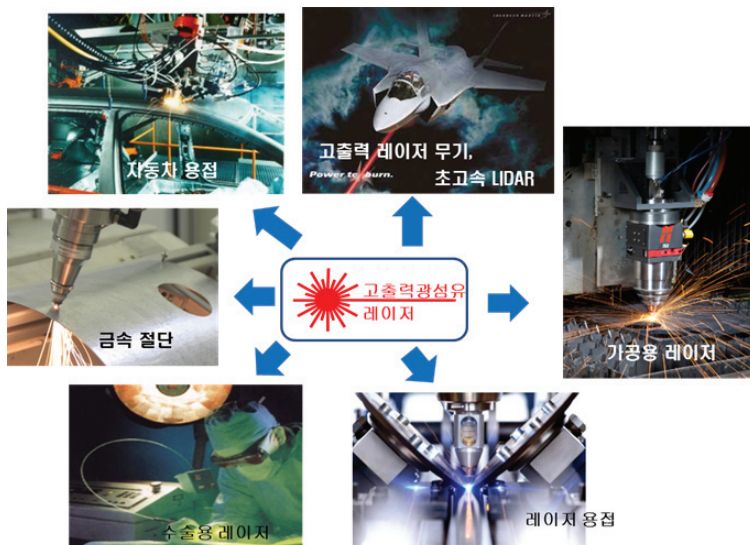


그림 8. 광섬유 레이저의 활용.

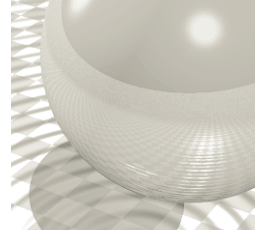


그림 9. 광섬유 레이저의 석유 시추에의 활용[17].

Amplification Network (ICAN) project) 에서 개발하고자 하는 광섬유 레이저 기반의 입자가속기로, 씨앗 레이저 (seed laser)의 펄스를 늘린 후 여러 광섬유 채널로 분리하여 각각의 채널에서 여러 번의 단계를 거쳐 증폭하여 고반복률을 갖는 밀리 줄 세기의 수천 개의 펄스를 만든 후, 이들을 다시 위상 결맞음 결합한 후 펄스를 압축하여 고반복률의 고에너지 펄스 레이저 (>10 kHz & 10 J)를 만든 후 이를 양성자가 포함된 목표물에 집속하면 (이때 광세기는  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>) 기가전자볼트 (~ GeV) 에너지를 갖는 양성자가 튀어나와 Pb-Bi 타겟에 충돌하면 핵이 부서지면서 고에너지의 중성자가 방출되는 구조이다[18].

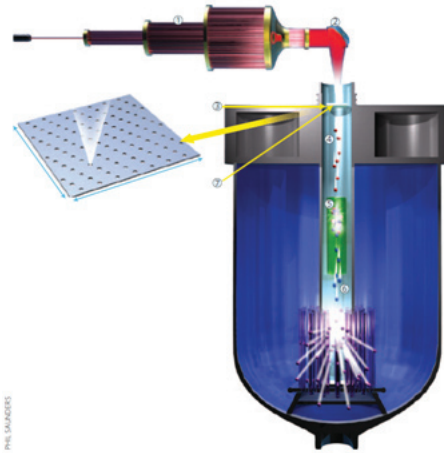


그림 10. 광섬유 레이저 기반 입자 가속기 개념도[18].

## 5. 결론

이 글에서는 광섬유 레이저의 개발 현황과 광섬유 레이저의 새로운 적용분야를 살펴 보았다. 1961년 스나이처에 의해 최초로 광섬유 레이저가 개발된 이후 저손실 광섬유 개발, 광섬유 증폭기 개발, 펌프레이저 기술의 발전 등에 힘입어 현재는 수십 킬로 와트급의 고출력 광섬유 레이저가 상용화 되었으며, 재료 가공, 절단, 용접 등의 산업분야 뿐만 아니라, 의료, 국방, 석유나 가스 시추 등의 에너지 분야, 입자 가속기 등 전에는 불가능했던 새로운 분야에 활용되고 있다.

향후 광섬유 레이저 분야의 연구는 위에서 언급한 새로운 분야에의 활용과 고출력 극초단 펄스 광섬유 레이저나 중적외선 대역의 광섬유 레이저 등의 연구가 활발할 것으로 예측된다. 더불어 고출력 레이저를 위한 광소자 (아이솔레이터, 펌프광 컴바이너, 광섬유 격자, 광섬유, 코팅) 개발도 꾸준히 진행될 것으로 생각된다. 앞서 언급한 바와 같이 산업 전반에 걸쳐 활용되는 광섬유 레이저 관련 연구에 정부와 연구자들의 지속적인 투자와 관심이 있기를 기대한다.

## 광섬유 레이저의 개발 현황 및 새로운 응용 분야

### 참고문헌

[1] J. Hecht: Beam: The race to make the laser (Oxford University Press, USA 2005).  
 [2] A. Einstein, Phys. Z. 18, 121 (1917).  
 [3] J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes, Phys. Rev. 95, 282 (1954).  
 [4] N. G. Basov and A. M. Prokhorov, J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.), 27, 431 (1954).  
 [5] A. L. Schawlow and C. H. Townes, Phys. Rev. 112, 1940 (1958).  
 [6] T. H. Maiman, Nature, 187, 493 (1960).  
 [7] E. Snitzer, J. of Appl. Phys. 32, 36 (1961). E. Snitzer, Phys. Rev. Lett. 7, 444 (1961).  
 [8] 전민용, 물리학과 첨단기술 11월호, 7 (2009).  
 [9] 이상배, 광학과 기술 14권 2호 19 (2010).  
 [10] [http://www.op-tec.org/pdf/Fiber\\_Laser\\_Basics](http://www.op-tec.org/pdf/Fiber_Laser_Basics).  
 [11] C. -H. Liu et al., Advanced Solid-State Photonics, paper ME2 (2007).  
 [12] O. G. Okhotnikov: Fiber lasers, 1st edn. (Wiley-VCH, Berlin 2012).  
 [13] D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, JOSA B27, 63 (2010).  
 [14] M. E. Fermann and I. Hartl, IEEE J. Quantum Electron. 15, 191 (2009).  
 [15] 정지호, 이관일, 이상배, 제 12회 첨단레이저 및 레이저응용 워크샵, 146 (2013).

[16] J. W. Kim, J. Jeong, K. Lee, S. B. Lee, Appl. Phys. B108, 539 (2012).  
 [17] <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-12/world-news/high-power-lasers-fiber-lasers-drill-for-oil.html>.  
 [18] G. Mourou, B. Broekjesby, T. Tajima, and J. Limpert, Nature photon. 7, 258 (2013).

### 약 력

#### 이관일



- 2011년 - 현재  
한국과학기술연구원 책임연구원
- 2007년 - 2010년  
한국과학기술연구원 선임연구원
- 2000년 - 2007년  
Novera Optics
- 1999년 - 2000년  
KAIST 박사후연구원
- 1994년 - 1999년  
서울대학교 물리학과, 이학박사
- 1992년 - 1994년  
서울대학교 물리학과, 이학석사
- 1988년 - 1992년  
서울대학교 물리학과, 이학사