

# 복합형 자외선 DPSS(diode pumped solid state) 레이저 발전기 기술

노영철, 이영락, 유봉안, 신우진, 정창수  
광주과학기술원 고등광기술연구소

## [ 요약문 ]

초미세 레이저 가공기술은 미세화, 대면적화, 고속화의 방향으로 발전되고 있다. 이에 따라 이를 대응한 레이저의 사양도 파장의 단파장화 또는 펄스폭의 극초단화, 펄스 반복률의 고반복률화, 출력의 고출력화가 요구되고 있다. 극초단 펄스레이저는 사용자 편의성, 안정성 측면에서 산업체의 요구에 미흡하다. 이에 따라 산업용 초미세 레이저 가공을 위한 광원으로 고품질, 고출력의 단파장 자외선 레이저 활용에 집중하고 있다. 현재 고품질 자외선 레이저는 DPSSL 형태로 구성되어 출시되고 있고, 거의 대부분 수입에 의존하고 있다. 국내의 자외선 UV 현황을 간단히 기술하고, 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 산업원천기술개발사업의 일환으로 개발중인 복합형 자외선 DPSSL에 대한 개발 계획 및 레이저 특성과 현재의 개발 진행 상황을 소개한다.

## 1. 서론

레이저 가공 기술은 전자산업 등의 정밀 부품 가공을 위해 점점 더 초정밀화, 초고속화, 대면적화 가공으로 기술 발전이 이루어지고 있다. 특히 반도체, 디스플레이, 태양전지, 차세대 고부가/고기능 PCB, 차세대 패키징 산업 등을 포함하는 마이크로 전자산업 분야의 부품을 가공하기 위해서는 초정밀 가공이 필수적이다. 이러한 마이크로 크기의 초정밀 가공을 위해서 레이저 사양도 고성능이 요구된다. 가공의 미세화를 위해 자외선 영역의 레이저를 이용하거나, 펄스폭이 짧은 극초단 펄스 레이저를 이용하는 방법이 이용된다. 또한 고속화 및 대면적화를 위해서는 고반복률, 고출력의 펄스 레이저가 요구된다. 현재의 펨토초 펄스 레이저와 같은 극초단 펄스 레이저는 광학계가 매우 복잡하고, 고반복률 작동 및 고출력화도 쉽지 않고, 구동 안정성이 기존의 나노초 펄스 레이저에 비해 떨어지기 때문에 산업적으로 이용하기는 힘들다. 따라서 초정밀 고속 가공을 위한 레이저는 고출력, 고반복률의 자외선(UV) 레이저가 현재로서는 적절한 광원이다. 일반적으로 자외선 고체 레이저는 Nd:YAG 나 Nd:YVO4 등의 이득 매질을 flash lamp 여기방법이나 LD 여기방법 등을 이용하여 높은 출력의 적외선(1064nm) 레이저 광원을 만들고, 이를 비선형 파장 변환 방법(SHG, THG)을 이용하여 355nm의 자외선 레이저로 발전시키는 방법이 이용되고 있다. 최근에는 flash lamp 여기방법에 비해 비교적 부피가 작으면서도 높은 출력 안정성과 광효율이 뛰어난 특성 등의 장점을 가진 LD 여기방법이 주로 이용되고 있다. 레이저 광원의 품질은 가공 공정성능에 미치는 영향이 지대하고, 기술적 파급효과가 매우 크며, 시스템 원가비율이 높아 국내 독자 기술 개발이 시급함에도 불구하고, 현재 레이저 가공 시스템에 사용되는 DPSS(diode pumped solid state) 자외선 레이저는 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 개선하기 위해 산업원천기술개발사업의 일환으로 진행되고 있는 '신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템 개발' 사업에서는 단일모드 고출력(30W급, 355nm) DPSS 자외선 레이저 발전기 개발을 수행하고 있다. 본 과제에서 개발하고 있는 고출력 펄스 레이저는 기존의 Q 스위칭 MOPA(Master Oscillator Power Amplifier) 증폭기를 이용하지 않고, 새로운 형태의 신개념 복합형 MOPA 증폭기를 사용하는 형태를 가지고 있다. 본 고에서는 고출력 펄스 DPSS 자외선 레이저 기술에 관한 국내외의 기술동향 및 현재 고등광기술연구소에서 개발되고 있는 자외선 레이저에 대해 논의하였다.



## 2. 국내외 기술개발 및 연구 동향

### 2.1 국외 기술개발 및 연구 동향

DPSS UV 레이저는 전 세계적으로 Coherent사가 선도해 나가고 있으며, 현재 355nm파장의 28W 출력을 갖는 UV 레이저를 공급하고 있다. 또한 Spectra Physics를 인수한 Newport에서도 20W 출력의 UV DPSS 레이저를 공급하고 있다. 미국의 Photonics industry사에서 40W 출력의 UV DPSSL을 공급하고 있다. JDSU사에서도 10W 출력의 UV DPSS 레이저를 공급중이다. JDSU사의 제품은 타사 제품에 비해 펄스폭이 상대적으로 긴 편이다. 상용화하여 판매중인 주요 제품을 표 1에 나타내었다<sup>[1]</sup>.

표 1. 해외 주요사의 상용화 제품 현황

회사명	파장	출력	펄스폭	비고
Coherent	355 nm	28 W	40 ns 이하	@110kHz PRR
Newport(Spectra-Physics)	355 nm	20 W	23 ns 이하	@100kHz PRR
Photonics industry	355 nm	40 W	15~50 ns	10~100 kHz PRR
JDSU	355 nm	11 W	95±30 ns	@40kHz PRR

이와 함께 대형 레이저 업체에서도 레이저 가공기의 성능 및 원가경쟁력을 높이기 위하여, 고출력 자외선 레이저 개발에 필수적인 LD 모듈을 포함한 레이저 발전기 제작 전 공정의 핵심기술을 M&A를 통해 확보하고 있다. 대표적인 선진 기업들의 현황은 아래와 같다<sup>[2]</sup>.

- 미국 GSI사가 10여개의 핵심 레이저 발전기 회사를 갖고 있는 Excel Technology Group를 2008년 7월에 M&A하였음.
- 독일 Roфин사는 2000년대 초반에 DPSS Nd:YAG 레이저의 핵심기업 중 하나인 미국 LEE Laser사를 M&A하였음. 또한 최근 광섬유 레이저 전문기업인 미국 Nufern사를 M&A하였음. 독일 Trumpf사는 최근에 광섬유 레이저 전문기업인 영국 SPI사를 M&A하였음. 이를 통해 Roфин사와 Trumpf사는 펌핑 LD-레이저 발전기-레이저 가공시스템 그룹을 모두 보유하여 수직계열화를 완성함.
- 미국 JDSU사는 이미 수년 전에 DPSS 레이저 전문기업인 Lightwave사를 M&A하였음.
- 미국 Coherent사는 UV 레이저 발전기 기술을 꾸준히 개발하여 2007년 23W UV 레이저 발전기를 출시하였음. 2008년 중반에 UV 28W 레이저 발전기를 출시하고, 성능 안정화에 주력하고 있음.
- 미국 Newport-Spectra-Physics사도 20W UV 레이저 발전기를 2008년 초에 개발하여 출시하였음. 하지만 선발 주자인 Coherent사를 따라 잡는데 어려움을 겪고 있음.

일반적으로 UV DPSS 레이저는 1064nm 파장에서 발전하는 Nd:YAG 또는 Nd:YVO<sub>4</sub>를 이득매질로 사용하여, Q-switched oscillator를 구성하고, 이의 출력을 고출력으로 증폭하는 증폭기 및 UV 파장 변환을 위한 비선형 광학 계로 구성되어 있다. 최근에는 발전기 및 전치 증폭기를 광섬유 기반으로 구성한 복합형 MOPA 구조의 연구가 발표되고 있다<sup>[3]</sup>. 또한 모든 증폭기를 광섬유 기반으로 구성한 광섬유 기반 UV DPSSL도 발표되고 있다<sup>[4]</sup>.

### 2.2 국내 기술개발 및 연구 동향

국내 DPSS 자외선 레이저 발전기는 주로 Nd:YAG 매질을 기반으로 개발되고 있으며, 국내 최대 레이저 발전기 평균출력은 10W로 세계 최고 수준인 28W에 비해 크게 뒤져 있다. 또한 레이저 발전기의 안정성(pulse-to-pulse stability, pointing stability) 측면에서도 기술 수준이 낮은 상태이다. 국내 주요 기업들의 UV 발전기 제품은 아래와

같다<sup>[2]</sup>.

- 하나기술(주)에서는 펄스 반복률 1-15kHz, 펄스폭 < 100ns, 빔모드 < 1.2, pulse-to-pulse 안정도(stability) < 10% 정도의 5W급 DPSS Nd:YAG 레이저 (355 nm)를 개발하여 판매하고 있음.
- 레이저엔피즈스(주)에서는 10W 355nm DPSS Nd:YAG 레이저를 자사 레이저 가공기에 장착하여 공급하고 있음.

자외선 레이저 발전기 개발에 반드시 필요한 적외선(1064nm) 및 가시광(532nm) 레이저의 경우, 국가 출연연구소인 한국원자력 연구소, 고등광기술연구소를 중심으로 많은 연구 개발이 이루어진 상태이다. 또한 여러가지 종류의 DPSS 레이저가 (주)금광, 하나기술(주) 등의 기업체에서 판매 또는 제작되고 있다. (주)이오테크닉스는 영국의 레이저 회사인 Powerlase사를 2009년도에 인수하였다. 그리고 코셋(주), (주)이오테크닉스, 하나루미너스(주) 등에서 여기용 LD 패키징 기술을 개발하여 10W 내외의 여기용 LD를 공급 또는 자체 레이저 제품에 활용하고 있다. 그러나 고성능의 자외선 레이저의 국산 개발을 위해서 필수적인 비선형 광결정은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 안정적인 구동이 가능한 고크터 UV 레이저의 THG에 필수적인 비선형 광결정의 개발 및 비선형 광결정 코팅 기술에 대한 연구개발이 시급히 요구되고 있다.

### 3. 복합형 DPSS 자외선 레이저(Hybrid UV DPSSL)

본 절에서는 산업원천기술개발사업의 일환으로 진행되고 있는 ‘신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템 개발’ 사업에서 개발될 복합형 DPSS 자외선 레이저(30W급, 355nm) 발전기의 개요, 구조적 장점, 연구 개발 목표 및 현재 연구 진행 상황에 대하여 소개한다.

#### 3.1 MOPA 구조의 복합형 DPSS 자외선 레이저의 개요

고출력 레이저 공진기에서는 열적인 문제 등으로 고품질의 레이저 빔을 발생시키기에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고출력의 고품질 레이저에서는 그림 1과 같이 MOPA 구조를 채택하고 있다. MOPA 구조에서는 저출력 공진기에서 고품질의 레이저빔을 먼저 발생시키고, 이 씨앗빔을 증폭기에서 증폭하는 구조를 택함으로써, 레이저 빔을 고품질로 유지하며 동시에 고출력을 달성할 수 있다.

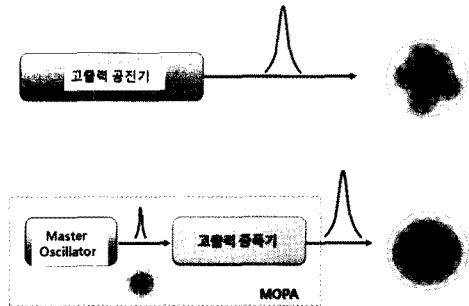


그림 1. MOPA 구조의 레이저 개요

MOPA 구조의 복합형 DPSS 자외선 레이저는 주 발전기(master oscillator) 역할을 하는 LD와 광섬유 기반의 전치 증폭단, DPSS 주증폭기, 자외선 파장변환을 위한 파장변환 광학계로 구성되어 있다(그림 2). LD 주 발전기와 광섬유 전치증폭기로 전단부를 구성하면, 펄스의 반복률, 펄스폭, 펄스모양의 변경이 매우 쉽고, 레이저 빔의 횡모드도 단일모드 발전이 손쉽다는 장점을 갖기 때문에 가공 시스템 구성시 용도에 맞게 맞춤형으로 제작할 수 있어서 다양한 용도의 가공 시스템에 적용이 용이하다. 이와 같이 광섬유 기반 전치증폭단과 DPSS 주증폭단이 복합형 결합된 레이저는 아직까지 상용화 되지는 않았지만, 최근 미국의 Coherent사와 같은 선진 기업에서 연구 개발이 진행되고 있어서, 멀지않은 장래에 상용화 제품이 나올것으로 예상된다<sup>[3]</sup>.

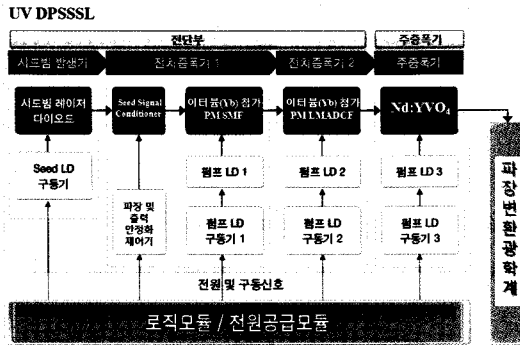
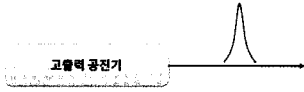
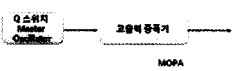



그림 2. MOPA 구조의 복합형 UV DPSSL의 개요

광섬유 레이저는 빔 품질의 우수성, 뛰어난 안정성, 광학계 구성의 간결성, 유지 보수의 용이성 등 많은 장점을 갖고 있어서 중간 출력 규모는 광섬유 레이저가 기존의 레이저를 빠르게 대체해 가고 있다. MOPA 구조의 레이저 시스템에서 전단부의 빔 품질 및 안정성은 최종 출력의 빔 품질과 안정성에 직결되므로, 안정성이 뛰어난 광섬유 레이저로 전단부를 구성한 복합형 DPSS 자외선 레이저는 기존의 DPSS 자외선 레이저보다 많은 장점을 가진다. 복합형 DPSS 자외선 레이저는 LD 주발진기에 인가되는 전류 변조만으로 펄스 반복률, 펄스폭, 펄스모양의 변경이 가능할 뿐만 아니라 이미 성숙된 복합 기술을 융합하여 활용함으로써, 기술개발의 성공 가능성이 매우 높다. 표2에 복합형 MOPA와 기존의 고출력 레이저 구조에 따른 특성을 비교하여 나타내었다.

표 2. 고출력 펄스 레이저 특성 비교

방법	형태	장점	단점
고출력 펄스 공진기		<ul style="list-style-type: none"> <li>설계 제작 수월함</li> <li>구조 간단</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>빔품질 낮음</li> <li>상대적인 저출력</li> <li>상대적으로 크기가 큼</li> </ul>
Q 스위치 MOPA		<ul style="list-style-type: none"> <li>빔품질이 우수</li> <li>고출력 가능</li> <li>비교적 구조가 간단</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>정렬에 민감</li> <li>내환경성이 낮음</li> <li>펄스폭, 반복률 변경이 어려움</li> </ul>
복합형 MOPA		<ul style="list-style-type: none"> <li>안정적인 출력</li> <li>빔품질 우수</li> <li>펄스폭, 반복률 가변 용이</li> <li>펄스모양 재단 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>융합 기술(광섬유 레이저 기술과 crystal 레이저 증폭기술)이 요구됨</li> </ul>

### 3.2 연구 개발 목표 및 연구 개발 내용

#### 3.2.1 연구 개발 목표

본 연구 개발의 최종 목표는 30W급 DPSS 자외선(355nm) 레이저 발진기 개발로서 두 단계에 걸쳐 진행된다. 주요 성능 목표는 펄스폭은 40ns 이하, 빔 품질은 M<sup>2</sup> 1.3 이하를 목표로 한다. 1단계에서는 20W급 DPSS 자외선 레이저 발진기를 개발한다. 본 연구에서 제한한 복합형 MOPA 구조의 DPSS 레이저는 반복률, 펄스폭, 출력 등을 각각 독립적으로 조절이 가능한 형태여서, 기존의 DPSSL 기술과 차별성을 갖고 있다. 이러한 기술은 아직 상용화가 진행되지 않은 기술이므로, 그 타당성과 경쟁력을 특허 등을 통해 1단계에서 확보하도록 한다. 2단계에서는 최종 목표인

30W급 DPSS 자외선 레이저를 개발하게 된다. 1단계 개발 경험을 바탕으로 고반복률, 고출력화 기술 및 고효율화 기술을 개발하여 관련 국내 기업체와 공동으로 경쟁력 있는 레이저 시스템 상용화를 추진하도록 한다. 또한 DPSSL 레이저의 중요한 구성품인 여기용 LD 패키징 기술 개발도 동시에 수행하여, 핵심 구성품의 국산화도 추진하고 있다.

### 3.2.2 연구 개발 내용

다음 그림은 본 연구에서 개발할 복합형 DPSS 자외선 레이저 발전기의 광학계 구성을 보여주고 있다. 이 레이저는 앞서 설명한 바와 같이 기본적으로 MOPA 구조로서, 주 발전기 역할을 하는 LD와 광섬유 기반의 전치증폭단, DPSS 주증폭기, 자외선 파장변환을 위한 파장변환 광학계로 구성되어 있다.

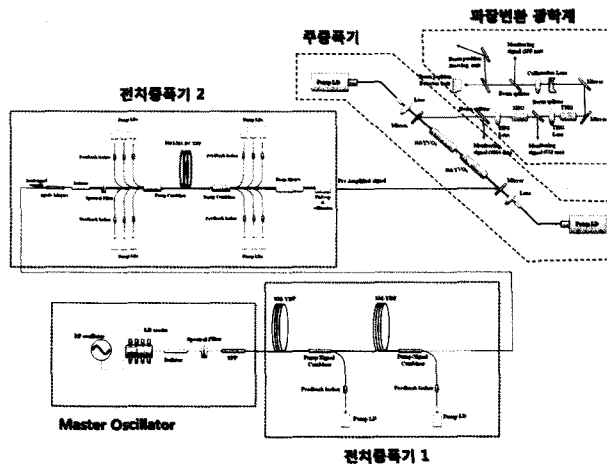


그림 3. MOPA 구조의 복합형 UV DPSSL 광학계 구성도

우선 주 발전기는 직접 전류 변조 방식을 이용한 레이저 다이오드 기반의 40ns 이하의 펄스폭을 가지는 시드빔 발생기로서 이를 위한 최적화된 전류 제어 회로와 출력 안정도를 위한 제어기를 개발한다.

광섬유 기반의 전치 증폭단은 2단으로 구성되는데, 전치 증폭기 1단은 우수한 출력 빔 특성 획득을 위해 광섬유로 커플링된 단일모드 펌핑 LD 모듈과 시드빔을 WDM을 통해 결합하는 단일모드 광섬유 증폭기로 개발하며, 전치 증폭기 2단은 고출력을 얻기 위해 여러 개의 다중모드 펌핑 LD 모듈들과 광섬유 펌프빔 결합기를 이용한 클래드 펌핑 구조의 더블 클래드 광섬유 증폭기로 개발한다. 안정적인 증폭을 위해서 ASE 억제 필터 및 레이저 빔 고립계가 적용되며 출력 안정도를 위해 재귀한 폐회로 구성을 이용한 펌핑 광원 특성 제어기를 개발한다. 또한 이중 광섬유간의 저손실, 무반사를 위한 모드 정합기, 잔여 펌핑 빔 제거 기술 및 광섬유 전치 증폭기 출력단 손상 방지를 위한 end-cap 기술을 개발한다. 그 결과로 100kHz 이상의 반복률 가변이 가능한 평균출력 20W 이상, 1% 이내의 출력 안정도를 갖는 전치증폭기를 목표로 한다.

주 증폭기는 100W급 출력이 가능한 고체 레이저 증폭기로 구성한다. 고품질의 레이저 빔을 얻기 위하여 종방향 여기(end-pumping) 방법을 사용하며, 레이저 crystal은 레이저 발전 단면적(emission cross section)이 큰 Nd:YVO4 crystal을 사용한다. 고출력 고품질의 레이저 빔 발생을 위하여 여기광과 시드 빔의 최적 모드 매칭 조건을 전산모의 및 실험적 방법으로 도출하여 적용하며, 수냉식 냉각 마운트를 자체 설계하여 효율적인 crystal 냉각이 이루어지도록 한다. Nd:YVO4 crystal의 열렌즈(thermal lens) 효과를 상쇄하기 위하여 crystal을 쌍으로 배치하여 열렌즈에 의한 집속효과를 이용하거나, Nd 도핑이 낮은 crystal을 이용하는 방법을 적용한다. 외부 진동에 의한 레이저 불안정성을 최소화하기 위해 일체화된 블록형 증폭기를 설계하며, 출력 안정화를 위해 여기광 피드백 구동 제어



기를 개발한다.

파장 변환계는 IR광(1064nm)을 두 차례 비선형 파장변환 과정(SHG, SFG)을 거쳐 355nm의 UV 광을 발생시키는 구조로 구성한다. 파장변환용 비선형 광결정은 손상문턱값이 높고, 워크오프가 상대적으로 적은 LBO를 이용할 계획이다. 파장변환 효율을 극대화하기 위해 532nm 빔 발생에는 방식 I(type I), 355nm 발생에는 방식 II(typeII)를 적용하며, 전산 모의 및 실험적 방법을 통해 워크오프 보상을 위한 비선형 광학계를 구현한다. 출력 안정성을 위해 정밀 온도 제어 오븐에 비선형 crystal를 장착하며, 광 손상에 따른 비선형 crystal의 수명 연장을 위해 정렬 시스템을 추가로 제작하여 안정성에 대한 실증연구를 수행한다.

최종적으로 위 광학 모듈들은 진동 및 온도 변화에 대한 불안정성을 최소화하기 위해 1개의 블록에 설치하고, 전체 시스템 냉각기는 별도의 unit으로 제작한다. 아래 그림은 그 시작품 개념 설계도를 보여주고 있다.

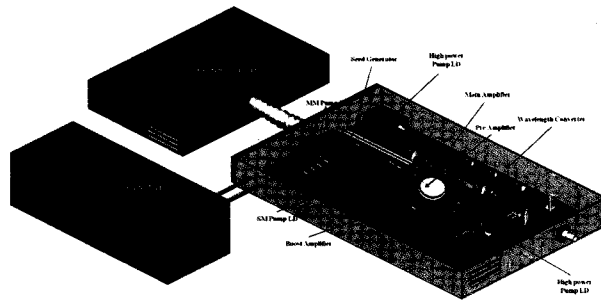


그림 4. 복합형 UV DPSS의 개념 설계도

### 3.2.3 연구 개발 진행 상황

현재 고등광기술연구소에서 진행중인 복합형 UV DPSSL 개발은 광섬유 기반의 진단부는 구성을 완료하여 20W 이상의 출력을 달성하였고, bulk crystal을 이용한 주 증폭기를 구성하여 개발을 진행해 나가고 있다. LD를 이용한 Master oscillator는 LD에 가해지는 전류를 변조하여 펄스를 발생시키는 방법으로 구현하였다. 제작한 LD 펄스 발생기는 1064nm 출력 파장을 가지며 최소 펄스폭은 1ns 이하까지 가능하였다. 펄스 첨두 출력은 300mW 이상, 펄스 반복률은 1MHz 까지 가능하다. 그림 5는 모듈 형태로 제작한 LD seed 레이저를 나타낸다.

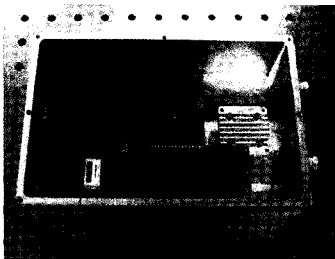


그림 5. LD 씨앗 펄스 발생기 모듈



그림 6. 작동중인 광섬유 증폭기

Seed 레이저로부터의 출력을 single mode fiber와 DCF로 구성된 증폭단을 이용하여 증폭하였다. 펄스 반복률은 100kHz 였으며, 펄스폭은 20ns, 파장 1064nm, 최대 평균 출력은 20W 이상을 달성하였다. 그림 6은 구성된 LD seed laser와 광섬유 증폭기의 작동 모습을 IR viewer로 본 모습이다.

## 4. 맺음말

고품질 UV 자외선 레이저는 반도체, PCB 가공 등을 포함하는 마이크로 전자산업 분야의 부품을 가공하기 위해서 필수적인 초정밀 레이저 가공기의 핵심 구성요소인 광원으로 거의 전량 수입되어 활용되고 있는 실정이다. 이의 국내 개발을 위해, 산업원천기술개발사업의 일환으로 진행되고 있는 ‘신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템 개발’ 사업의 세부과제로 복합형 DPSS 자외선 레이저 발진기를 광주과학기술원 고등광기술연구소에서 개발하고 있다. 현재 펄스형 작동을 통하여 20ns 펄스폭, 100kHz 반복률, 1064nm 파장의 IR 출력을 20W 이상 달성하였다. 본 과제에서 개발하고 있는 레이저는 기존의 방식인 Q-switching 방식을 이용하지 않고, 전류 직접 변조 방식의 LD seed laser과 광섬유 기반의 전치 증폭기를 구성하여 개발하고 있다. 이와 같은 방법은 광섬유 레이저의 특성인 빔 품질의 우수성, 뛰어난 안정성, 광학계 구성의 간결성, 유지 보수의 용이성 등 많은 장점을 갖고 있다. 특히 레이저 시스템의 안정성, 유지 보수 문제는 국내 레이저 업체의 시장진입에 장애 요소로 작용하고 있었다. 복합형 UV DPSSL 개발이 성공적으로 추진되면, 국내 레이저 업체의 성공적인 시장진입 및 초미세 레이저 가공기 분야의 국산화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

## ✻ 참고 문헌

- [1] Coherent, Spectra-physics, Photonics industry, JDSU사 웹페이지(www.coherent.com, www.spectra-physics.com, www.photonix.com, www.jdsu.com) 자료.
- [2] 나석주의 12명 “신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템 개발,” 지식경제부 연구기획 보고서, 2009.
- [3] Andrei N. Starodoumov et al., “Hybrid fiber MOPA --bulk amplifier system for frequency conversion”, Proc. of SPIE Vol. 6871, 68710V, 2008.
- [4] X. Peng et al., “355 nm Tailored Pulse Tandem Amplifier”, Advanced Solid-State Photonics 2008, MC35
- [5] Yong Zhou et al., “High-efficiency 355 nm generation in barium aluminum borate difluoride”, Opt. Lett., Vol. 34, 746, 2009.



노 영 철

- 광주과학기술원 고등광기술연구소 광정보통신 연구실 책임연구원
- 관심분야 : 펄스 레이저
- E-mail : ycnoh@gist.ac.kr



이 영 락

- 광주과학기술원 고등광기술연구소 광정보통신 연구실 선임연구원
- 관심분야 : 파장변환 레이저
- E-mail : laks@gist.ac.kr



유 봉 안

- 광주과학기술원 고등광기술연구소 광정보통신 연구실 선임연구원
- 관심분야 : 광섬유 레이저
- E-mail : bayu@gist.ac.kr



신 우 진

- 광주과학기술원 고등광기술연구소 광정보통신 연구실 선임연구원
- 관심분야 : 광섬유 레이저
- E-mail : swj6290@gist.ac.kr



정 창 수

- 광주과학기술원 고등광기술연구소 비선형광학 연구실 선임연구원
- 관심분야 : 비선형 파장변환
- E-mail : csjung@gist.ac.kr