



Power Laser 개발 기술동향

이 홍 식
한국전기연구소 전기물리연구팀 책임연구원

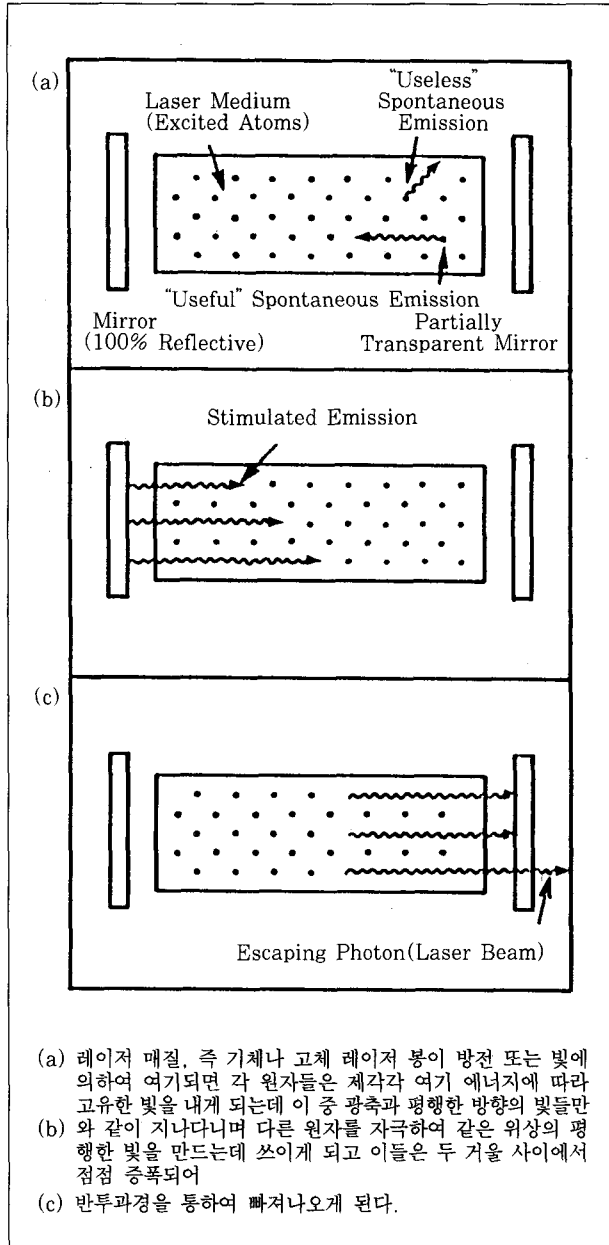


1. 머리말

레이저의 개발은 1960년에 루비 레이저로 최초의 발진에 성공한 후 지금까지 꾸준한 발전을 이룩해 오고 있다. 여러 종류의 신형 레이저가 개발되어 레이저의 발진 파장(發振波長)은 밀리미터 정도의 장파장에서 극단자외역(極端紫外域)에 이르는 단파장까지 이르고 있고 레이저의 출력이나 수명 등의 성능 향상과 더불어 그 응용분야도 확대일로에 있다. 레이저는 정밀가공, 절단, 표면처리 외에도 광파이버와 병용하여 의료용 또는 정밀계측용으로도 쓰이고 있으며, High Power Pulse Laser는 군사용 계측, 레이저 핵융합 연구용, 레이저 유뢰(誘雷), 우주공간 위성 에너지 전송 수단 등으로서 그 연구가 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다. 이런 관점에서 대출력 레이저의 개발상황과 기술개발 추세에 대하여 간략히 기술하기로 한다.

2. 레이저란?

레이저(Laser)라는 말은 "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"의 머리 글자를



〈그림 1〉 레이저의 원리

따서 생겨난 말로 "유도방사(誘導放射)에 의한 복사광(輻射光)의 증폭"으로 번역할 수 있겠다. 그림 1에 레이저의 원리를 간단히 설명하였다.

레이저가 보통의 빛과 비교하여 무엇이 다른지를 우선 설명하고 넘어가기로 한다. 빛을 파장이 짧은 전자파로 볼 때 보통의 빛은 아주 다양한 파장의 빛이 혼합되어 있으나 레이저는 그 파장이 거의 일정하여 단색성이 아주 뛰어나다. 뿐만 아니라 빛의 다발을 이루고 있는 파동의 결(마루와 골)이 서로서로 일치하여 간섭무늬를 선명하게 만들어 낼 수 있다. 이러한 성질은 레이저를 이용한 정밀 계측이나 형상표현에 쓰인다. 작은 크기의 광원을 포물면경의 초점에 두면 평행광을 만들 수 있으나 이 평행성은 멀리가지 못하며 집광하여도 초점크기를 레이저만큼 작게 할 수가 없다. 레이저는 멀리 보내도 그 퍼지는 정도가 아주 작아 지구에서 달표면을 직경 3km 정도로 조명할 수 있고 집속성이 뛰어나 단위 면적에 쏟아 부을 수 있는 파워 밀도가 다른 방법과는 비교가 되지 않게 크게 할 수 있기 때문에 철판의 절단, 용접, 세라믹 등 재료의 가공에 이용된다. 레이저의 간섭성을 이용한 측정기술은 레이저만이 가능케 하는 측정기술인 경우가 많다. 속도, 거리, 압력, 온도, 전류, 전압, 자계 등 대단히 많다. 대출력 레이저는 간섭성을 이용하는 것은 별로 없으나 단색성과 에너지의 집속성을 이용하게 되는데 레이저장치의 고효율화 고신뢰성화에 연구가 집중되고 있다.

3. Power Laser

가. 엑시머 레이저(Excimer Laser)

엑시머 레이저의 역사는 1970년 소련의 Basov 등이 액체Xe를 전자빔으로 조사 여기하여 진공자외역의 레이저 발전에 성공한 것이 효시이다. 1975년에 와서야 Rare Gas Halide형(할로겐 가스와 불활성 기체를 적

절히 혼합한 형태)고효율 엑시머 레이저가 전자빔 여기 형으로 처음 개발되었고 그 후에 방전 여기방식이 개발되었다. 전자빔 여기방식은 펄스당 에너지의 대출력화가 용이한 대신 펄스의 반복률을 높이기가 곤란하여 주로 레이저 핵융합, 레이저 유도연구 등 기초과학연구용으로 쓰이고 있으며 방전여기방식은 소펄스 에너지로 높은 반복률을 실현할 수 있어 광화학 프로세스용으로 반도체 리소그래피(Lithography) 기술이나 안과 등의 의료용으로 널리 쓰이고 있다. 반응성 가스를 자외선 레이저로 광화학적으로 분해하면 고체표면에 박막을 형성하거나 이종(異種)의 원소를 기판표면 가까이 Doping하거나 그 표면을 Etching할 수 있어 차세대 ULSI 제조프로세스 등에서 저온으로 처리할 수 있으며 높은 에너지를 가진 입자를 사용하지 않기 때문에 표면에 주는 손상이 작아 매우 유력한 방법으로 주목 받고 있다. 단파장화에 의하여 회절한계가 내려가므로 반도체 제조공정의 리소그래피에의 응용이 특히 기대되고 있다.

현재의 레이저 제조 기술 수준은 방전여기 방식은 반복률 1kHz, 평균출력 수백와트 급의 것이 시판되고 있으며 전자빔 여기방식은 핵융합 연구용으로 미국 Los Alamos 연구소에서 개발한 것으로 10.5kJ, 펄스 폭 500ns(순간 출력은 20GW에 달한다)의 KrF 레이저가 있다. 앞으로의 기술개발 과제를 표1에 요약하였다.

〈표 1〉 방전여기 엑시머 레이저의 기술과제

기술과제	문 제 점	기술개발동향
大口經化, 大出力化	불균일 방전, 빔의 質改善	X선 豫備電離 방식
반복률 향상	발열, 불균일 가스 흐름	고속회전 Fan, 반도체 스위치 방식 채택
수명개선	가스의 열화(劣化)	재료의 고순도화, 최적화 가스 순환 재생장치
	Thyratron의 劣化	반도체 스위치로 대체하고 磁氣飽和 스위치를 並用하여 펄스폭 壓縮
펄스폭 연장, 狹帶域化	效率低下	Spike-sustainer 등의 전원장치와 공진기 구성에 대한 새로운 고안

나. 자유전자 레이저(Free Electron Laser)

자외역에서 대출력화가 진행되고 있는 것이 엑시머 레이저라면 적외역에서 대출력화의 연구가 주목되고 있는 것은 자유전자 레이저이다. 자유전자 레이저는 고속의 자유전자가 그 진행방향이 자장에 의하여 굽혀질 때 나오는 제동방사광을 이용하는 레이저로서 1971년 Stanford Univ.의 J.Madey에 의하여 제안되어 1977년 최초의 레이저 발전에 성공하였다. 고에너지 소전류 전자빔을 이용한 콤팩트형 자유전자 레이저는 可視域에서 近赤外域까지의 레이저 발전이 연구되고 있고 저 에너지 대전류 전자 빔을 이용한 라만형 자유전자 레이저는 원적외에서 밀리미터파 영역까지의 레이저 발전이 연구되고 있다. 파장 9~35 μ m대의 평균출력 6kW급의 자유전자 레이저가 개발되어 있다.

다. 고체 레이저

대표적인 고체 레이저인 Ruby Laser(1960, 694.3nm), Nd:Glass laser(1961, 1064nm), 반도체 레이저(1962), Nd:YAG Laser(1964, 1064nm) 등은 1960년대 전반에 發振에 성공한 것으로 그 당시에 고체 레이저 붐을 일으켰다. 최근에는 Alexandrite Laser(700~818nm)로 대표되는 波長可變 펄스 고체 레이저의 개발과 대출력화의 연구, 고효율화 연구, 평균출력 kW급을 목표로 하는 대출력 Slab형 고체 레이저의 개발, 고효율 반도체 레이저 勵起 全 고체화(즉 플래시 램프와 같은 기체방전 소자가 없는)레이저의 개발 등이 활발히 이루어지고 있다.

(1) 반도체 레이저 여기 고체 레이저

효율 높기로 으뜸인 반도체 레이저의 고효율화가 이루어짐에 따라 방전 램프로 여기하던 고체 레이저를 반도체 레이저로 여기하는 방식의 고체 레이저 연구개발

이 활발하다. 반도체 레이저 여기 고체 레이저는 다음과 같은 장점이 있다.

(가) 빔 확산이 크고 단색성이 좀 떨어지는 반도체 레이저를 여기광원으로 사용해도 고품질의 레이저 발진이 가능하다.

(나) 종합 효율이 10% 정도로서 방전 램프 여기형에 비하면 10배 정도 높아 소비전력이 작고 소형경량으로 만들 수 있어 인공위성이나 기기탑재용으로 적합하다.

(다) 반도체 레이저는 방전 램프에 비해 수명이 훨씬 길어 레이저의 유지보수 비용이 대폭 절감된다.

(라) 반도체 레이저의 파장역을 비교적 넓은 범위에서 선정할 수 있기 때문에 방전 램프 여기에서 효율이 너무 나빠 사용할 수 없었던 레이저 붕의 재료도 고효율 동작을 기대할 수 있다.

(2) Er : 고체 레이저

최근에 들어서는 의료용 레이저로서 파장 $2.9\mu\text{m}$ 대의 Er(Erbium)레이저의 유용성이 인정되어 $2.94\mu\text{m}$ 의 Er : YAG 레이저, $2.92\mu\text{m}$ 의 Er : YA103 레이저 등 $2.9\mu\text{m}$ 대의 Er 레이저 개발이 활발하다. 고체 매질내에 Er농도는 30~50% 정도의 고농도 레이저 결정이 이용된다. 물은 이 $2.9\mu\text{m}$ 근처에서 에너지 흡수가 가장 크게 일어난다. 이 파장의 빛은 놀랍게도 두께 $5\mu\text{m}$ 정도의 물을 통과하지 못하고 99% 이상이 흡수된다. 따라서 의학용으로 쓰일 때 불필요한 손상을 주지 않고 수술부위의 표면만을 높은 정밀도로 얇게 제거할 수 있다. Er : YAG 레이저의 전기-광 변환 효율의 1.5% 정도이다.

라. 이산화탄소(CO₂) 레이저

주로 기계가공용으로 용도가 많은 CO₂레이저는 현재 출력 10kW 이상의 대형기종과 출력 1kW 전후의 기종이 시판되고 있다. 1kW급의 고속 축류형에서는 방전 단위길이당 출력 600W/m, 방전입력에 대한 변환

효율은 저차모드에서도 20% 이상을 달성하고 있다. 특히 RF(2~13.56MHz) 여기형 고속축류형은 직류 여기에 비하여 제작비는 더 드나 가스의 순도유지 문제, 전극의 손상 문제 등이 작기 때문에 생산 라인에 투입하기에는 더 적합하므로 선호하는 레이저가 되고 있다. 선진국의 경우 연속출력 CO₂ 레이저는 기본적 기술개발이 끝나고 앞으로는 상품수준에서의 성능향상, 원가 절감에 주력할 것으로 보인다.

도파관(Waveguide)형 Slab Laser는 별도의 냉각 장치가 필요 없고 방전부 투입전력밀도를 일반 고속기류형 레이저의 2~3배에 해당하는 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 를 넘게 운전할 수 있어 Ultra-compact Laser로서 CO₂ Laser 분야에서 개발중인 기술이다. 펄스형인 TEA CO₂ 레이저도 반도체 패키지의 마킹(Marking)용으로 생산라인에 도입되어 신뢰성 제고, 컴팩트화 등 실용화 중심의 기술개발이 이루어지고 있다.

3. 산업용 신형 High Power Laser

가. CO Laser

CO Laser는 발진 파장이 $5\mu\text{m}$ 로서 CO₂ 레이저의 절반에 해당하고 발진방식은 CO₂ 레이저와 비슷하나 그 장단점을 CO₂ 레이저와 비교하면 아래와 같다.

(1) 장 점

가) 파장이 CO₂ 레이저의 1/2이어서 빔 발산각이 CO₂ 레이저보다 작고 따라서 에너지 집중능력이 더 높다.

나) CO₂ 레이저는 광 파이버를 통과하지 못하는데 비하여 $5\mu\text{m}$ 부근에서 아주 손실이 작은 광 파이버가 개발될 가능성이 있으며 그 손실을 석영보다 더 작게 할 수 있다고 하므로 CO레이저는 광 파이버를 사용하여 전송이 가능하다. $10\mu\text{m}$ 부근에서는 석영 파이버에 필적할 만한 광 파이버의 개발 가능성은 현재로서는 없다.

다) CO₂레이저의 양자 효율이 40%인데 CO Laser

는 100%에 가깝고 전기효율도 CO Laser가 좋아서 kW급의 횡방전형에서도 20%를 상회한다.

(2) 단 점

(가) 200°K 정도의 저온냉각이 필요하다.

(나) 가스의 열화가 빠르다(그러나 이것은 가까운 장래에 해결될 문제임).

공업용 CO Laser를 최초로 개발한 것은 구 소련의 Danlichev 등으로서 e-beam으로 예비전리하는 방식을 써서 10kW의 출력을 얻었다고 보고하고 있다. 유럽에서는 Eureka Project로 5kW급의 공업용 CO Laser를 개발하였다. 같은 출력, 같은 가공조건에서 CO Laser쪽이 CO₂레이저에 비하여 가공성능이 5배 정도 우수하다고 한다.

나. 요오드 화학 레이저(Chemical Oxygen Iodine Laser ; COIL)

요오드 화학 레이저는 발진 파장이 1.3μm으로 YAG 레이저(1.06μm)와 파장대역이 비슷하다. 그러나 YAG 레이저에 비하여 아주 좋은 성능을 지니고 있기 때문에 그 실용화가 매우 기대되는 레이저이다. YAG 레이저 대비 장단점을 비교해 보기로 한다.

(1) 장 점

(가) 훨씬 큰 출력을 얻을 수 있다.

YAG레이저의 최대출력은 4개의 대형 Rod를 직렬 연결하는 방식으로 1.6kW 정도로 요오드 화학 레이저는 미국에서 38kW를 얻었다고 보고되고 있으며 기체 레이저이기 때문에 더 큰 출력까지 Scale Up이 가능하다.

(나) 빔 질이 극히 좋다.

요오드 화학 레이저는 수 Torr 정도의 저압력에서 동작해서 기체의 소란요인이 없으며 따라서 매질의 광학적 특성이 극히 균일하며 모든 레이저 중에서 가장 질 좋은 모드가 얻어진다고 보고 있다. YAG Laser는 결

정의 불균일성이 크고 특히 대출력에서는 파장이 열 배 큰 CO₂ 레이저보다도 빔 발산각이 훨씬 크게 된다. 모드의 관점에서는 최악의 레이저라 할 수 있다.

(다) 석영 파이버와의 결합이 양호하다.

파장 1.3μm는 석영 파이버의 최소손실 파장인 1.5μm에 가깝고 또 모드가 좋기 때문에 석영 파이버와의 결합성이 매우 좋다.

(라) 스펙트럼 폭이 좁다(단색성이 우수하다).

저압 가스 레이저이므로 스펙트럼 폭이 좁고 비선형 효과의 의한 팽창변환 등 광을 가공하는데 매우 유리하다.

(마) 효율이 높다.

COIL은 화학효율(화학반응에 의하여 발생된 에너지 안에서 레이저 출력으로 변환되는 에너지 비율)이 40%를 상회하고 있는데 이것은 대출력 레이저로서는 최고수준이다. YAG 레이저는 전기효율(전기입력 중 레이저로 변환되는 비율)이 저출력에서는 수%, 대출력에서는 1% 이하이다.

(2) 단 점

(가) 연료로서 H₂O₂, Cl₂, NaOH, I₂를 소비하고 폐기물로서 NaCl, I₂의 처리가 필요하다.

(나) 장치가 대형이다.

유럽에서는 Eureka Project, Brite Project로 개발 중이며 일본에서는 통산성 산하 공업개발연구소와 가와자키 중공업이 협동연구를 하고 있다.

CO Laser나 요오드 화학 레이저가 다 개발도상의 기술이지만 산업용으로서 그 장점이 아주 돋보이는 실용화가 크게 기대되는 레이저이다.

4. Power Laser 개발을 위한 전기 요소기술

Power Pulse Laser 개발을 위한 전기기술의 요약 을 표 2에 실었다.

〈표 2〉 High Power Pulse Laser의 개발을 위한 전기 요소기술

요소기술	연구개발과제	내용·목표
Energy Storage System	커패시터 뱅크 방식을 벗어나 誘導性 에너지 貯藏방식 개발	Compulsator, Homopolar Generator, Superconducting Coil etc.
Pulse Forming & Transmission	傳播 라인의 최적설계	1)Skin Effect 검토 2)과도현상 해석기술확립 (EMTP or New Code)
Switches	1)Opening Switch의 개발 2)고효율 投入 스위치	1)Plasma Opening Switch 2)Pseudospark Switch Laser Triggered Gap Switch
계측기술	1)펄스 파위에 의한 急峻波 전류(자계), 전압(전계) 파형의 측정 2)생성 플라즈마 또는 전자빔의 밀도, 에너지 계측	1)외부 설치형 계측기 개발 2)비접촉형 계측기 개발 強誘電體 素子 및 Hall소자 개발
주변기술	1)절연설계 합리화 2)기계설계 합리화 3)복합요소 검토	1)강전계, 급준파 펄스 전압하에서의 가스, 액체, 진공의 절연 특성 규명(沿面 포함) 2)전자력에 대한 지지물 소요 강도계산 3)기계력 및 열에 의한 지지물, 액체의 절연성능 저하 평가기술

5. 맺는말

이제 레이저 기술은 우리생활 주변으로 점점 가까이 다가오고 있다. 계측 및 정보의 전송과 기억, 연산도 전자적 방법에서 광기술로, 정밀 가공도 기계적인 방법에서 광기술로 변천되어 가고 있다. 21세기에는 전자기 에너지가 담당하던 상당 분야를 광 에너지가 담당하게 될 것으로 보인다. 특히 High Power Laser는 정착된 기술인 CO₂ 레이저와 YAG 레이저를 주축으로 산업 가공기 시장과 의료용 시장을 주도할 것으로 보이며 Excimer Laser의 비열적 프로세스의 의한 정밀가공기

도 엑시머 레이저의 성능 및 신뢰도 향상과 더불어 급증할 것으로 예상하고 있다. 또한 CO₂, Nd:glass, Excimer 레이저는 레이저 유리와 레이저 핵융합 연구용 레이저로 그 출력의 거대화 기술이 필요한 시점에 와 있다. 그러기 위하여는 우선 펄스 파워 기술로 불리는 펄스 전력공학(Pulsed Power Technology)의 기초를 확고히 할 필요가 있으며 아울러 대출력 레이저 빔의 시간적 공간적 성형, 가공, 전송기술과 전력전자 및 제어기술, 고체 레이저 결정의 제조, 강유전체, 특수 자성체, 극저온 기술 등의 레이저 및 그 전원용 부품 소재 기술도 확보하여야 한다. ■

●참고문헌●

1. 最先端 レーザ. テクノロジー-集成, オプトロニクス社 編集部, pp3~98
2. 이홍식 외, "대출력 엑시머 레이저 개발연구(III)", 과학기술처, 1993, pp9~68
3. 이홍식 외, "1kW급 축류형 RF 여기 CO₂ 레이저개발 연구", 과학기술처, 1994, pp12~20
4. 日本 電力中央研究所報告, 調査報告 T93020, パルス パワ-技術の 現状と 課題, 1994. 3