

산업용 DPSS 레이저 - 객관적인 투자 기준에 대한 고찰

박충범

하나기술(주)

1. 서 론

지금으로부터 약 20여 년 전, Laser Focus World (미국 Penn well Publication에서 발행하는 레이저 및 광학기술 전문 월간지)에 그 당시만 해도 아주 새로운 기술인 diode array-end-pumped solid-state 레이저 구조와 다이오드 여기 시스템(Diode Pumped system)의 장점이 소개되었으며, 1.064um 파장의 Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용한 미세가공(micromachining) 분야와 1.3um 파장을 발생하는 파이버 레이저(fiber laser)의 광통신 분야에 향후 잠재적인 응용 가능성을 전망하였었다.

그 이후 현재까지 DPSS레이저에 대한 기초 과학적인 연구와 이를 연계한 산업적인 기술개발이 지속적으로 활발히 진행되어 오고 있으며 레이저의 수명이 10,000시간대에 도달하게 되었다. 이는 기존의 램프 여기형 (lamp pumped type) 레이저 시스템이 200~500 시간의 수명을 갖는 것과 비교하여 볼 때에 레이저의 수명이 약 20~50배로 증가하게 하는 획기적인 레이저 기술혁신이었다. 특히 레이저 시스템을 사용하는 산업현장에서 기존의 램프 여기 된(lamp-pumped) 레이저 시스템의 램프를 200~500시간마다 한 번씩 교체함으로써 야기되는 레이저 시스템의 비가동시간(down time)이 그 만큼 줄어들게 되어 생산성 향상에 기여하고 있다¹⁾.

DPSS레이저 기술의 지속적인 발전과 고출력 다이오드 레이저 가격이 지난 20년 전과 비교하여 10배 이상 저렴해진 것에도 불구하고 DPSS레이저의 가격이 램프 여기형 레이저의 가격에 비해 1.5배~2배 정도 비싼 것이 현실이다. 산업현장에서 사업성 또는 생산성 검토를 할 때에 이에 대한 합리적 구체적인 결정방법이 없이 주관적인 입장에서 판단하는 것도 현실이다. 레이저 장

비 사용자의 입장에서는 초기의 레이저 구입가격만 고려하는 측면이 있어서 이에 대해 보다 합리적인 결정방법을 이 글을 통해서 제시하고자 한다.

DPSS레이저와 램프 여기형 레이저와의 비교, 그리고 DPSS 레이저와 그 외의 다른 종류의 레이저를 같은 가공용도에 사용할 때의 차이점을 레이저 사용자의 입장에서 생각해 보고자 한다. 이를 위해 비교기준을 합리적으로 마련코자 객관적인 자료를 조사 정리하려 노력하였다. 하지만 이런 내용의 자료들이 산업현장에서는 매우 필요한 실정임에도 불구하고 합리적이고 객관적인 데이터에 의해 정리된 자료들이 많지 않다.

그 동안 본 저자가 수집 한 자료들을 기초로 하여 미약하나마 이 작업을 위한 기본틀을 산업적인 응용 면에서 검토해본 “DPSS 레이저와 램프 여기형 레이저의 비교” 부분에 서술하고 본 저자는 계속 이 부분의 자료를 보완 또는 수정해 나갈 것이며 레이저 장비 사용자에게 입장에서 객관적이고 합리적인 자료를 구축해 나가려 한다.

이에 대한 독자들의 DPSS 레이저의 기술적인 이해를 돕고자 DPSS레이저에 대한 개요 및 DPSS레이저의 한 예를 아래와 같이 설명하고 본론에 들어가하고자 한다.

2. 광학적인 여기(Optical Pumping)

일반적인 램프 여기형 고체 레이저의 공진기 구조는 그림 1과 같이 구성된다. 미러 M1과 미러 M2 및 레이저 헤드로 기본적인 레이저 공진기(laser resonator)의 형상을 갖춘다. 레이저 헤드는 레이저 매질(laser rod)과 이를 여기 해 주는 Lamp로 구성되며, 이들은 금도금 반사체(gold reflector)안에 장착된다. 여기에 덧붙여 공진기 내부에 비선형 결정(nonlinear crystal)을 장착하여 레이저 출력의 파장을 다른 파장으로 변조시킬 수 있다²⁾.

고체 레이저(solid-state laser)의 광학적 여기원(optical pump source)는 레이저 매질의 흡수대(absorption band)에 속한 분광범위 내에서 빛을 방출한다. 연속 또는 펄스 형태의 전기적 에너지가 이러한 광학적 펌프 소스에 적용되면 유사한 모양(CW 또는 Pulse)을 갖춘 빛을 발생한다³⁾.

내부 반사율이 매우 높은 봉입체(封入體: enclosure) 내부에, 또는 광학계 내에서 이 여기원에서 발생하는 빛 에너지는 레이저 매질에 전달된다.

광학적 여기원의 종류로는 크게 램프와 다이오드 레이저 두 가지가 있다.

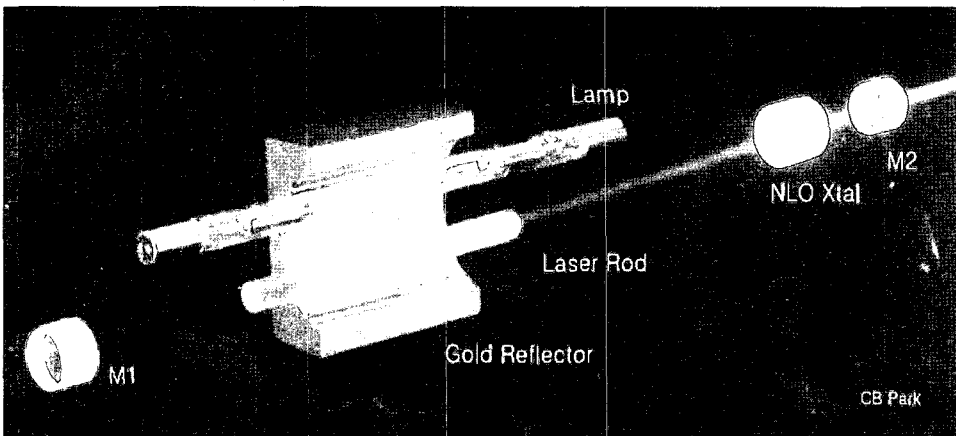


그림 1 램프 여기형 고체 레이저의 레이저 공진기 구조 (M1: High Reflection Mirror, M2: Output Coupler, NLO Xtal :Intracavity SHG crystal)

2.1 램프형(Lamp Type)

1) 플래시 램프(Flash Lamp)

레이저 펌핑 소스로 사용되는 플래시 램프는 유리관에 플라즈마(plasma)를 가득 채워 고안된 호광(弧光 : arc)장치이다.

플래시 램프의 형상은 선형 석영 유리관(linear quartz tube), 또는 나선형 석영 유리관(helical quartz tube)에 두 개의 전극이 봉합된 형태를 갖으며 이 석영 유리관 안에 적절한 가스(보통 Xe 또는 Kr)로 채워진다.

두 개의 전극 애노드(anode)와 캐소드(cathode)는 텅스텐 또는 그 합금물질로 제작된다⁴⁾.

2) CW 아크 램프 (CW arc lamp)

1964년도에 Nd:YAG레이저의 발명이래 이 레이저 매질을 좀 더 효율적인 방법으로 여기 하기 위해 지속적인 노력이 전개되어 왔다. 여기에 사용되는 가스 중 크세논(Xe)이 전파장대의 여기 효율이 좋게 나타나지만 크세논(Xe)의 적외선 스펙트럼은 Nd:YAG 여기폭(pump band : 0.73~0.76um, 0.79~

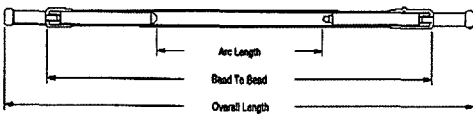


그림 2 플래시 램프(Flash lamp) 또는 아크 램프(Arc Lamp)의 형상

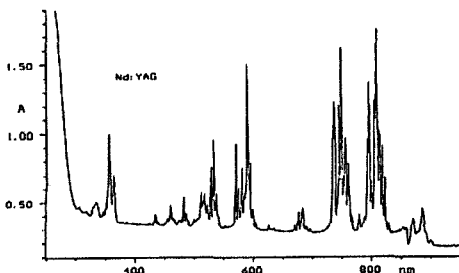


그림 3 Nd:YAG의 흡수 스펙트럼

0.82um, 0.86~0.89um, 그리고 0.57~0.60um)의 모든 부분을 놓치게 된다⁵⁾. (그림 3)

크립톤(Kr) 가스의 Nd:YAG의 여기폭에 크세논(Xe) 보다 2배정도 더욱 효율적인 것이 발견되었고 크립톤 아크 램프로 여기되는 Nd:YAG레이저가 최근까지 가장 높은 CW 파워를 내는 고체레이저로 알려져 왔다⁶⁾. (그림 4)

2.2 반도체 형(Semiconductor Type)

고체레이저의 가장 효율적인 여기원은 다이오드 레이저(diode laser)이다. 지난20년 동안 Nd:Galss나 Nd:YAG와 같은 Nd를 이득(gain)매질로 이용하는 레이저 매질을 여기하기 위해 작은 레이저 다이오드 배열, 또는 LED를 이용하여 수 많은 실험실 수준의 장치들이 개발되어왔다. 여러 가지 부정적인 요소들 즉, 저출력, 적은 패키징 밀도, 그리고 레이저 다이오드의 매우 고가의 비용 때문에 다이오드를 이용한 레이저 여기는 1980년대 중반까지 현실적인 적용이 어려웠다.

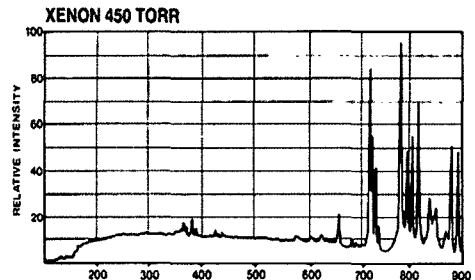
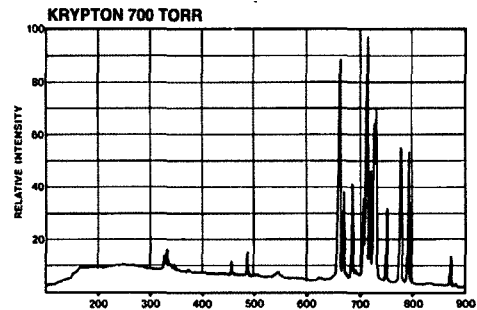


그림 4 크립톤(Kr) 가스와 크세논(Xe)가스의 방사스펙트럼(Radiation Spectrum)

가장 보편적으로 사용되는 여기원은 1cm 다이오드 바(diode bar)이다 (그림 5).

출력 빔은 매우 비대칭적이다. 그래서 대부분의 경우 타원형의 출력 빔을 원형으로 변형하여 사용한다

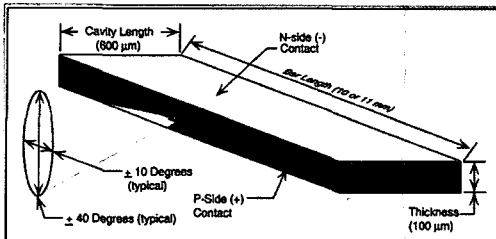


그림 5 레이저 다이오드 배열(laser diode array)의 레이저 바(laser bar) 구조

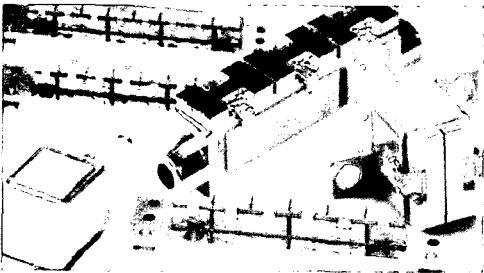


그림 6 상업용으로 출시되는 레이저 다이오드 바 (laser diode bar)의 여러 가지 형태

3. 다이오드 레이저를 이용한 DPSS 레이저의 여기 형상(Pumping Geometry)

고체레이저의 다이오드 여기구조는 전형적으로 두 가지 종류의 기하학적 형상을 갖는다. 레이저 매질에서 고체 레이저 출력 축을 기준으로 고체 레이저 출력 축과 같은 방향으로 다이오드 레이저의 출력이 진행되며 고체레이저 매질에 결합(coupling)되는 여기구조를 종단 여기(End Pumped)라 하고 고체 레이저 출력방향에 대해서 다이오드 레이저의 출력이 횡 측면으로 결합되는 여기구조를 측면 여기(Side Pumped)라고 한다.

3.1 종단 여기(End Pumping) 방식

다이오드 레이저의 독특한 여기 방식인 종단 여기 기술에서는 여기 방사가 매질에 종적으로 투입되며 고체레이저 공진기 축과 동축을 이룬다.

종단 여기(End Pumping)는 양질의 빔(diffraction limited) 특성을 가진 레이저를 생산하는데 아주 효율적이다. 그 이유는 여기 방사가 공간적으로 TEM₀₀ 고체레이저 모드와 중첩이 되기 때문이다. 하지만 다이오드 레이저의 출력의 가로축과 세로축의 발산각의 비율차이와 높은 발산각 때문에 다이오드 레이저에서 방사되는 빛의 모드와 고체레이저 공진기 내부의 레이저모드와 조화를 이루게 하는 것이 매우 어렵다. 이를 위해서는 광학적인빔 모양 만들기(beam shaping) 기술이 요구된다.

3.2 횡단 여기(Side Pumping) 방식

플래시 램프로 여기된 고체 레이저 개념과 유사한 형상을 갖는다. 다이오드 레이저의 여기 방사가 고체레이저 출력 축에 횡적으로 투입된다.

종단 여기(End Pumping)방식과 비교해볼 때에 효율은 다소 떨어지나 횡단 여기(side pumping) 기술은 다이오드 레이저의 출력을 고체레이저 매질에 비교적 쉽게 결합시킬 수 있고 단계적으로 고출력 레이저를 만들기 용이하기 때문에 고출력 레이저에는 종단 여기 기술이 유리하다. 하지만 종단 여기에 비해 고출력의 레이저 다이오드를 사용하기 때문에 이로 발생하는 열을 제거하기 위한 유체 냉각기의사용이 불가피하다.

종단 여기(a, b, c) 형상에서 검은색 사각형부분은 레이저 매질을 의미하고 원편의 사각형은 다이오드 레이저 배열을 의미한다. 다이오드 레이저에서 빔 모양 만들기나 파이버를 통하여 다이오드 레이저의 출력을

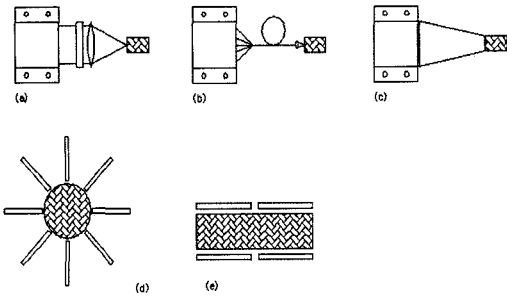


그림 7 다이오드 레이저 배열(diode laser array)로 DPSSL레이저의 여기(pumping)를 하기 위한 가장 전형적인 형상 : 종단 여기(End Pumping) (a, b, c) 과 횡단 여기(Side Pumping) (d, e)의 형상⁷⁾

레이저 매질에 투입한다.

횡단 여기(d, e)형상에서 하얀 직사각형 부분이 다이오드 레이저 배열을 의미하고 다이오드 레이저 출력을 가장 효율적으로 레이저 매질에 투입하는 형상을 설계하게 된다.

4. DPSS 레이저의 기술적 장점

DPSSL은 기존의 고출력 레이저인 CO₂ 레이저, 플래시 램프로 여기된 Nd:YAG 레이저, Excimer 레이저 등에 비해서 고출력, 고효율, 장수명, 고신뢰성, 경량 등의 탁월한 장점을 갖고 있다. 일례로, 지금까지 고체레이저의 여기에 사용되었던 플래시램프와 비교해 보면 플래시램프는 60%가 넘는 발광효율을 얻고는 있지만, 발광스펙트럼이 자외선영역에서 적외선영역에 이르기까지 넓은 파장대를 형성하고 있어 고체레이저 매질의 흡수스펙트럼과 정합성이 낮아 레이저 효율이 수 % 정도이다. 또 고체레이저 매질에의 열부하가 커서 고평균 출력을 얻는 것이 어려우며, 열 왜곡현상 때문에 레이저 빔의 균질성이 좋지 않다. 이와 대조적으로, 레이저 구조와 결정 성장기술의 급격한 진

전에 의해 최근 제작이 가능해진 출력 수십 W급의 GaAlAs계의 레이저 다이오드는 Nd⁺³을 활성이온으로 하는 고체레이저 매질의 흡수스펙트럼과 잘 일치하여 레이저 효율이 약 30%에 이르고, 수명도 약 1만 시간으로 플래시램프로 비해 약 100배 이상 길어진다. 따라서 다이오드레이저를 이용하여 Nd:YAG 등의 고체 레이저를 여기하는 DPSSL ((DPSSL, Diode-Pumped Solid-State Laser)은 플래시 램프로 여기된 Nd:YAG 레이저에 비하여 우수한 여기 효율과 출력 안정성을 가지고 있다. 여기원인 다이오드 레이저의 가격이 하락함에 따라 DPSSL은 중·고출력 레이저의 주력으로 자리를 잡아가고 있다⁸⁾.

기존의 자외선 레이저로는 아르곤 레이저, He-Cd 레이저, Excimer레이저가 주종을 이루고 있었으나, DPSSL을 비선형 변환시켜 가시광과 자외선 파장을 발생시키는 레이저가 이 파장대의 주력 레이저로 급속히 시장을 확대해가고 있는 추세이다.

DPSSL은 우수한 고유특성 때문에 응용 범위가 대단히 넓으며, 기존에 응용중인 분야로는 레이저 가공 산업, 의료용 레이저 산업, 원자력 산업, 반도체산업 및 환경 산업 등이 있다.

5. DPSS 레이저와 램프여기형(Lamp Pumped) 레이저의 수명 및 가격 비교

레이저 가격은 램프 여기형(lamp-pump) 레이저에 비해 초기 구입비가 비교적 높으나 장기간(3~5년) 가동비용을 고려하여 산출해 보면 DPSS 레이저의 가동비용이 적게 들어 결과적으로 초기 투자비용의 차이가 극복하고 레이저 장비 투자비용+가동 비용이 램프 여기형 레이저의 비용보다 저렴하다는 것을 알게 될 것이다.

각 나라마다 각 사업장마다 전력 사용비

용, 물값, 인건비등의 차이가 있으므로 좀 더 정확한 가동비용은 아래 표를 참고로 하여 산출해보면 각 사업장의 실정에 맞게 레이저를 선택할 수 있을 것이다. 참고로 아래 표는 Nd:YAG 레이저의 연속 출력100W를 기준으로 작성한 것이며 가장 중요한 레이저가동 비용 요소들을 열거한 것이다.

여기서 레이저 가격은 제조업체 마다 다르고 그 외의 비용도 사업장 마다 달라서 따로 공란으로 남겨 두었다. 그러므로 총 비용의 산출은 각자가 다르게 나올 수 있다.

참고로 지난 20여 년 이상 저 출력 Nd:YAG레이저(통상적으로 100W급 미만)의 산업적인 응용은 반도체 기억 소자 수리(semiconductor memory repair), 저항 절단 가공(resister trimming), 이미지 기록(image recording)-주로 마킹(marking) 분야에 가장 많이 적용되어 왔으며 이 분야에 DPSS 레이저의 이용이 현저하게 증가하고 있는 실정은 역으로 위 표의 DPSS 레이저 가동 총 비용이 램프 여기형 레이저의 비용보다 저렴함을 입증한다고 말할 수 있다.

5.1 DPSS레이저와 CO₂ 레이저의 비교

지난 20여 년간 전통적인 레이저 가공분야인 깊은 봉입 용접과 절단 분야에서는 kW급 CO₂ 레이저가 가장 주류를 이루는

레이저 장비였다.

지난 10여 년간 kW급 램프 여기형 또는 DPSS Nd:YAG 레이저로 CO₂ 레이저를 대체하려는 노력이 전개되어 왔으나 레이저 빔 질이 CO₂ 레이저의 빔 질에 비해 양호하지 못하여 이 분야의 DPSS 레이저 가공에 응용은 CO₂ 레이저에 비해 매우 저조한 현실이다.

최근 몇 년간 DPSS 고출력 화이버 레이저의 현격한 발달로 kW급 고출력 화이버 레이저가 상용화 되었으나 동급의 CO₂레이저에 비해 레이저 구입 가격이 높은 편이며(약 1.2~1.5배) 워낙 고가의 장비라 CO₂ 레이저 대비 가공 성능 비교는 극히 제한적으로 이뤄지고 있다. 지난 1년간 국내의 한 업체에서 6kW급 화이버 레이저를 도입하여 현장에 적용하고 CO₂레이저와 비교 실험되고 있으나, 작년11월말 현재까지의 성능 비교는 거의 비슷한 수준으로 나와 있으며 계속적인 비교 실험을 하고 있는 것으로 보고된 바 있다⁹⁾.

또한, 반도체 레이저를 직접 이용하는 방법으로 kW급 반도체 레이저를 제조하는 기술이 있다. 이는 초소형 도관 냉각기(micro-channel cooler)를 이용하여 20~25개의 다이오드 레이저를 직선형 배열로 배열하여 만든 출력 40W 급의 다이오드 바(diode

Table 1 램프 여기 레이저와 DPSS레이저의 비교표

	램프 여기 레이저	DPSS 레이저
1	여기원	램프
2	레이저 가격	다이오드 바(bar) 또는 배열(array)
3	장비 비 가동시간	램프교체로 인한 장비 비가동 시간
	200~500시간마다 교체	여기원 교체시간 약1년
	8일~20일마다 교체	
	교체소요시간×연간교체횟수	교체시간×연간교체횟수
4	램프/ 다이오드 가격	lamp 가격×연간 교체횟수
5	전력 소모	LD가격×연간 교체횟수
	레이저 출력	4 kW
	레이저 출력	1 kW
6	냉각수 소모	100W
	냉각수 소모	2차 냉각수
		없음

bar)를 여기 레이저 형상구조의 기본 단위로 이용하는 방법이다. 이 다이오드 바(diode bar)는 DPSS레이저의 여기원 으로 사용되 기도 하지만 이다이오드 바(diode bar) 150 개를 차곡차곡 쌓는 방식으로 봉입한 파장 790nm~980nm의 출력6kW급의 다이오드 레이저를 제조하여 CO₂ 레이저와 비교해본 결과, 레이저 가공성능 면에서 동급의 CO₂ 레이저보다 우수한 결과를 내지 못하였다. 표면 경화 공정 에서는 이상적인 결과를 보 였음에도 불구하고 가격 면에서는 CO₂에 비해 매우 비싼 편이다¹⁰⁾.

현재의 kW급 DPSS레이저(DPSS 화이버 레이저, 다이오드 레이저)는 전통적인 레이저 가공 분야인 깊은 봉입 용접과 절단 분야에서는 아직도 CO₂ 레이저의 성능을 능 가할 정도의 만족할만한 결과를 얻지 못하고 있는 것이 현실이다.

그 결과로 이 분야의 DPSS레이저 마켓은 그리 크지 않으나 이 분야에서 DPSS레이저의 시장이 서서히 성장하고 있는 것은 사실이다. kW급 고출력DPSS레이저나 다이오드 레이저의 빔 질이 CO₂ 레이저만큼 좋아지고 레이저 가격도 견줄만한 정도가 되면 고체 레이저의 장점인 화이버를 이용한 빔 전송을 할 수 있는 장점과 함께 이 분야에 매력 있는 레이저 빔원이 될 것이다.

5.2 DPSS레이저와 Excimer 레이저의 비교

박막 필름 트랜지스터(Thin Film Transistor)의 결정화에 사용될 때에 DPSS 레이저는 Excimer 레이저에 비해 가격 경쟁력이 있다. 레이저 가공이 비교적 적은 열적인 영향을 가공물질에 주게 됨으로 IC(integrated circuit)생산에 레이저 공정이 자주 적용되고 있다.

LCD(Liquid crystal display)와 OLED (organic Light-emitting diode) 생산공정에서 저온 폴리실리콘 기술(low- temperature polysilicon technology)에 레이저의 적용이 빠르게 확산되고 있지만 Excimer 레이저를 이용한 공정비용은 생산 원가에 큰 부담이 되고 있다.

아래 표는 LCD 제조에 있어서 TFT (thin-film transistor) 제조 공정에서 사용되는 Excimer 레이저와 DPSS UV 레이저의 비교표이다.

두 유형의 레이저들을 각각 하루에 20시간, 한 달에 25일 작동하는 것으로 기준을 삼고 산출한 가동비용이다. 레이저 비용(레이저 장비 값+가동비용)의 총계는 DPSS이 Excimer레이저에 비해 20%정도 밖에 들지 않는다¹¹⁾.

Table 2 Excimer 레이저 장비와 DPSS레이저 장비의 비용 비교표

		Excimer Laser	DPSS 레이저
1	장비가격	US\$600,000/5년	US\$150,000/5년
		US\$10,000/월	US\$2,500/월
2	설비면적	2.24 m ²	0 m ² (장비 내 부품으로 장착)
		US\$100/월	US\$ 0/월
3	전력소모비용	25 kW	1 kW
		US\$1,100/월	US\$50/월
4	소모품 비용	US\$40,000/월	US\$7,500/월
		US\$1,250/월	US\$125/월
5	장비 운용 인건비	US\$1,250/월	US\$125/월
		비용총계	US\$52,450/월

6. 향후 DPSS레이저의 전망

결론적으로 현재까지 kW급 고출력 CO₂ 레이저 응용분야를 제외한 산업용, 의료용, 군사용 및 과학연구용 분야에서 DPSS 응용이 현저히 증가하는 추세이다.

그 이유는 레이저 성능 면에서 고효율 (high efficiency), 양질의 빔질(diffraction limited beam quality)과 긴 수명(life time) 등의 장점을 갖고 있으며, 레이저 장비의 운용면에서 비교적 장비의 크기도 작아서 장비의 정비시간도 줄어들기 때문이다.

또한 DPSS레이저는 SHG(Second harmonic generation), THG(Third harmonic generation), OPO(Optical parametric oscillation)등과 같은 비선형광학(nonlinear optics)적인 기술을 접목하여 레이저 파장 면에서 UV부터 mid-IR까지 레이저 펄스형태에 있어서 CW부터 fs (femto-second)펄스까지 광범위한 레이저특성을 가진 레이저 장비를 제작하기 가장 적합한 레이저이기 때문이다.

위와 같은 이유로 향후 DPSS레이저의 시장전망은 장/단기적으로 계속 증가하는 추세이며 특히, 최근 한국의 3대 수출 효자 품목으로 각광받는 반도체, 평판 디스플레이, 핸드폰 제작 공정에 사용되는 레이저 장비에 주류를 이루고 있는 외국산 레이저 장비를 대체할 수 있는 국산 DPSS레이저의 개발/시판이 시급한 현실이다.

참고: 하나 기술은 지난 5개년간 정부 지원 과제로 DPSS 레이저를 2004년 하반기에 성공적으로 개발 완료했다. 또한 산업현장에서 외국산 레이저를 대체할 수 있는 모델들을 상품화하여 지난해 12월부터 시판하고 있다. 성능/가격 면에서 국내에 사용되고 있는 외국산 레이저와 우월한 경쟁력을 갖추고 있으며 상품명은 YAG MIA 시리즈 (7개 모델)이며 DPSS Nd:YAG

레이저로서 IR, Green, UV(TEM00), IR, Green (Multi mode) 레이저가 이에 해당 된다.

하나기술: www.hanalaser.com

참고문헌

1. Laser Focus World 1985-2005 issues.
2. A. Yariv, Quantum Electronics, 3rd ed. (wiley, New York 1988).
3. O. Svelto, Principle of Lasers, 3^d ed (Plenum, New York 1989).
4. Heraeus Lamp Catalogue.
5. A.E. Siegman, Lasers (University Science Book, Mill Valley, CA 1986)
6. M. Bass et. al, Hand Book Of Optics (McGraw-Hill, New York, 1995).
7. W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, 5th Rev.&Updated Ed.,(Springer, Berlin Heidelberg 1999
8. Photonic Spectra 1985-2005 issues
9. 2004년 추계 레이저 가공학회 발표
10. Industrial Laser Solutions, October, 2002
11. Laser Focus World , July, 2002