

# 청록색 레이저의 수중통신 응용

正會員 金 容 平\* 正會員 崔 鐘 云\*

## Blue-Green Lasers and Their Application to Underwater Communication

Young Pyung KIM\* Jong Woon CHOI\* *Regular Members*

**要 約** 최근 청록색 레이저를 이용한 수중통신 연구가 활발히 진행되고 있다. 본고에서는 수중통신에서 핵심적 역할을 하고 있는 해수의 광학적 특성을 흡수와 산란의 관점에서 기술하였고, 수중통신용 최신 청록색 레이저에 대해서 논하였다.

**ABSTRACT** The under water communication which use blue green lasers reviewed. In the view point of absorption and scattering, the optical characteristics of sea water are described. In addition, state of art blue green lasers for under water communication are summarized.

### 1. 서 론

미국 해군은 최근 청록색의 고체 레이저를 이용하여 비행기와 잠수함 사이의 통신 (airplane-submarine laser communication)에 성공하였다고 발표하였다<sup>1)</sup>. 즉, 파장변환된 다이오드 레이저 여기 Nd : YAG 레이저를 이용하여 지상 20,000feet 상공을 나르는 CV-580 비행기와 수심 수백 feet의 해저에서 이동중인 USS-Dolphin AGSS-555 잠수함 사이의 통신에 성공한 것이다.

수중 통신은 지금까지 알려진 어떤 통신 보다 복잡한 통신인데 수백 feet 아래의 물밑으로 신호를 보낼 수 있어 군사적 뿐만 아니라 상업용으로 매우 가치있는 통신수단이다. 더우기 고속의 데이터 교환기능을 첨부하면 잠수함의 지휘통제가 가능하므로 매력적이다. 이 통신은 심해에서 작전중인 잠수함이 통신을 하기위하여 수면으로 부상할 필요없이 적정 깊이와 속도를 유지하

면서 작전을 가능하게 한다. 수중통신을 하려면 기존의 통신방법으로는 초장파장 송신(ELF)이 있는데<sup>2)</sup>, 이방식은 데이터 전송율이 대단히 낮기 때문에 이는 오직 짧고 단순한 명령만을 전달할 수 있다. 또한 이방식은 통신하려는 수심에 제한이 있으므로 수심이 깊어질수록 느린속도로 통신을 하던가 혹은 수면 가까이 떠올라 정보교환을 하여야만 한다. 이런 경우 결국 심해의 고도를 깨뜨리므로 잠수함의 위치를 노출하는 위험을 초래한다. 그러므로 수중통신을 위해서 ELF이외의 다른 통신 방식을 찾아야 하는데, 이와같은 RF 통신을 대신할 좀더 매력적인 통신 수단은 광통신이라 할수 있다. 청색광(약 625 THz)은 전자기파중에서는 10Hz이하의 주파수를 제외하고서는 가장 물속을 잘통과할 수 있는 주파수이다. 바닷물은 전자기파를 깊이에 따라 지수 함수적으로 감쇄 시키지만 청록색의 광파장 영역에서는 다른 파장영역에 비해 60dB~80dB 정도 덜 감쇄시키는 성질이 있다. 충분한 세기로만 물위에서 비추어 주면 아무리 깊은 물속에 있는 수신기일지라도 내려갈수 있다. 과학자들은 이미 오래전에 이러한 “해수의 창문(sea window)”을

\*韓國標準科學研究院 레이저研究室  
論文番號 : 91-115

알고 있었고 어떻게하면 대기와 해면의 경계영역을 통과하여 변조된 레이저광을 바다속으로 보낼 수 있는가를 연구해 왔다.

시스템을 개념적으로 구상해 보면 우주 공간에서 어떤 특정지역 해양으로 수십혹은 수천 km의 반경으로 비추어지는 펄스 형태의 광원이 있고, 이 광원이 바다속 깊숙이 잠겨있는 수신기에 도달하기 위해서는 우주공간과 구름을 포함한 대기와 바다물로 구성된 전달 통로를 통과해서 광검출기에 도달할 수 있다. 광검출기는 아주 좁은 대역필터특성을 가져야하고, 약한 광을 검출하기 위해 넓은 면적을 가져야하며, 검출기의 수신 지향성은 내려오는 대부분의 에너지를 모으기 위해 충분히 넓어야 한다.

시스템 성능에서 몇가지 질적인 특성을 가감하여, 주어진 통로와 수신기 특성에서 만약 내려가는 빔의 크기를 줄이면 좀더 깊게 있는 곳까지 도달할 수 있으나 넓은 장소에 퍼져있는 수신기에 정보를 전달하려면 빔의 크기를 줄인 만큼 많은 시간이 소요돼야만 한다.

수중통신에는 필요로 하는 많은 기술이 있겠으나 본고에서는 그중에서도 근간이되는 해수의 광학적 특성과 청록색 레이저에 관하여 고찰한다.

## II. 해수의 광학특성

해수를 전파하는 광파의 감쇄 정도는 일반적으로 다음과 같은 지수함수로 표시된다.

$$H(d) = H_0 \exp(-kd)$$

여기서

d: 광파의 전파거리[m]

k: 감쇄상수[m<sup>-1</sup>]

H<sub>0</sub>: 광파의 초기강도[W/cm<sup>2</sup>]

이다. 레이저 빔과 같은 저발산의 평행광에 대하여 이 감쇄는 해수 자체 보다는 그속에 포함된 여러가지 입자 및 용해물질에 의한 흡수 및 산란에 의해 일어난다. 해수속에는 플랑크톤, 비생물인

유기 및 무기물질 그리고 용해된 유기물질등이 산재한다. 이들 각각의 구성요소들은 독자적으로 독특한 특성을 가지기 때문에 그 구성비율에 따라 해수가 다른 액체나 대기에 대해서는 물론 원해, 근해, 연해 사이에서도 서로 완전히 다른 광학적 특성을 갖는다.

### 흡수

그림 1은 여러가지 해수에 의한 광흡수의 변화를 보여준다. 물과 소금으로 구성된 순수한 해수는 청색의 광파장 영역에서 흡수가 가장 작는데 그 흡수계수는 0.015m<sup>-1</sup> 정도이다(그림 1a). 즉 식(1)에 의하면 평행광이 1m 전파하는데 1.49%의 감쇄를 일으킨다. 그러나 파장 300nm의 근자외선에서 흡수는 급격히 증가하고(k=0.14m<sup>-1</sup>), 더욱이 파장 200nm에서는 흡수계수가 3.1m<sup>-1</sup>에 달해 평행광이 1m를 전파하는데 95%의 에너지를 잃게 된다. 또한 녹색 및 적색광장영역에서도 흡수는 매우 커서 파장 700nm에서의 흡수계수는 0.65m<sup>-1</sup>나 된다.

플랑크톤(phytoplankton)은 단세포 식물이고 광합성 능력을 갖고 있다. 세포의 모양이나 크기는 종류 및 성장상태에 따라 다르지만 길이는 1 내지 100μm 정도이다. 대양의 해수에서 작은 플랑크톤은 1m<sup>3</sup>당 108개 정도 존재하지만 큰 것은 수천개 정도에 불과하다. 플랑크톤에 의한 광흡수는 엽록소(chlorophyll) 때문에 일어나는데 일반적으로 사용되는 프랑크톤의 농도는 해수 1m<sup>3</sup>당 엽록소가 몇 mg 들어있나로 결정된다. 대표적 플랑크톤의 농도는 깨끗한 해수에서 0.01mg/m<sup>3</sup>, 대양의 해수에서 0.1 내지 1.0mg/m<sup>3</sup>, 연안에서 0~10mg/m<sup>3</sup> 그리고 강어귀에서 100mg/m<sup>3</sup> 정도이다. 플랑크톤에 의한 광흡수는 청색 및 적색 광장에서는 크나 녹색광장에서는 상대적으로 작다. 그림 1b는 이러한 특성을 잘 보여준다. 생물학적으로 생산활동이 활발한 대양의 해수는 높은 플랑크톤 농도를 갖고 있기 때문에 가시광영역에서 V자형의 광흡수 특성을 갖는다. 즉, 청색영역 및 적색영역에서는 플랑크톤 및 해수 자체에 의해 많은 흡수가 일어나나 녹색영역에서는 상대적으로 적은 흡수가 일어난다.

플랑크톤이 죽으면 엽록소는 퇴화되고 세포 및 세포 부서기름 남기는데 이때 흡수는 주로 비 엽록소 세포성분에 의해 일어난다. 해수속에는 물론 엽록소를 갖고 있지않은 살아있는 세포도 함유되어 있다. 그림 1c는 이와같은 유기물 입자에 의한 대표적 흡수특성을 보여준다. 한편 해수 속에는 무기물 입자도 함유되어 있는데 주로 강으로 부터의 유입물, 침전물의 부유입자 그리고 바람에 날려온 먼지등 이다. 이들 무기물 입자들의 대부분은 석영이나 다른 광물들로 구성되어 있는데 광의 흡수에는 그다지 영향을 주지 못하지만 해수의 산란특성을 좌우한다.

유기물이 썩으면 해수속에는 여러가지 산성물이 생성된다. 이들 분해된 유기물질은 청색의 광영역에서 매우 큰 흡수계수를 가지며 적색으로 갈수록 지수적으로 작아진다. 그림 1d는 이러한

현상을 보여준다. 따라서 강으로 부터 많은 산성물이 유입되는 해안가의 해수에서 흡수특성은 주로 이들 분해된 유기물질에 의해 결정된다.

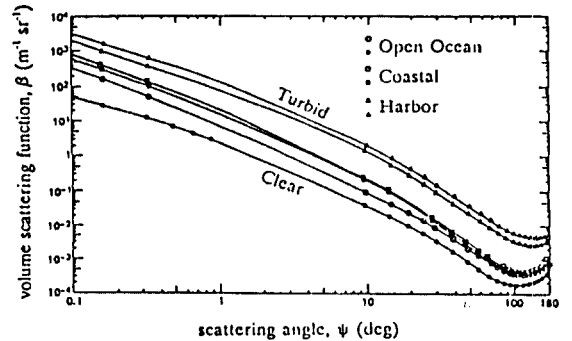


그림 2. 해수의 청정도에 따른 산란함수<sup>(3)</sup>  
Fig 2. Volume scattering functions for various water types ranging from very clear to very turbid.<sup>(3)</sup>

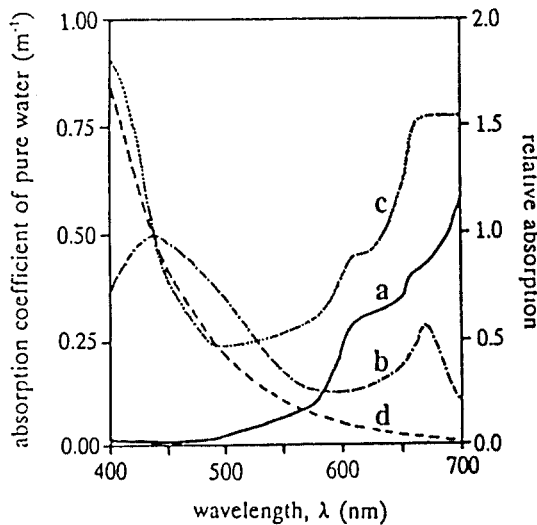


그림 1. 여러가지 해수의 흡수계수<sup>(3)</sup>  
a: 순수한 바닷물에 의한 절대흡수 계수  
b: 엽록소의 상대흡수 계수  
c: 엽록소를 가지고 있지않은 생물의 상대흡수 계수  
d: 황색류에 의한 상대흡수 계수  
(b-d는  $\lambda=440\text{nm}$ 을 기준으로 정규화 하였음)  
Fig 1. The absolute absorption coefficient of pure sea water is shown by curve a, with the scale on the left. The relative absorption coefficients of chlorophyll (curve b), nonchlorophyllous organic particles (curve c), and yellow matter (curve d) are shown with the scale on the right. Curves b-d are normalized to one at  $\lambda=440\text{nm}$ .<sup>(3)</sup>

### 산란

해수의 광산란 특성은 일반적으로 체적산란함수( $\beta(\Psi, \lambda)$ , 단위:  $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ )에 의해 표시된다. 여기서  $\Psi$ 는 산란각을 나타내며  $0 < \Psi < 180^\circ$ 의 값을 갖는다. 해수에 대한 체적산란함수는 다음과 같이 광파의 빔 산란계수  $b(\lambda)$ 와 위상함수  $p(\Psi)$ 로 분리하여 표시한다.

$$\beta(\Psi, \lambda) = b(\lambda)p(\Psi)$$

여기서  $b(\lambda)$ 는  $\text{m}^{-1}$ 의 단위를 가지며 전체산란강도를 나타내고,  $p(\Psi)$ 는  $\text{sr}^{-1}$ 의 단위를 가지며 광파가 입사된 방향으로 산란되는 확율을 나타낸다. 물분자나 용해된 입자는 가시광선의 파장에 비해 훨씬 작기 때문에 순수한 해수에 의한 산란은 그 구성분자의 열적요동에 의해 일어나며 Rayleigh 위상함수

$$p(\Psi) = 0.062(1 + 0.835 \cos^2(\Psi))$$

에 의해 표시된다. 한편 순수한 해수의 산란계수는  $b(\lambda)^{4.32}$ 로 광파의 파장에 의존한다.

그러나 보통의 해수속에는 여러가지 부유입자

들이 섞여있기 때문에 순수한 해수와는 산란특성이 전혀 다르다. 해수속에 함유돼 있는 대부분의 입자들은 가시광선의 파장에 비해 훨씬 커서 이들에 의한 산란은 Fraunhofer 회절에 의해 좌우된다. 회절에 의한 산란은 극히 작은 산란각을 가지며 입자의 구성성분에 영향 받지 않는다. 더구나 해수속의 입자들은 크기가 천차만별이고 임의의 운동방향을 갖기 때문에 동일한 입자들만으로 구성된 순수한 해수에서 나타나는 산란과는 그 특성을 달리한다. 이러한 특성으로 해서 위상함수는 광파의 진행방향으로 그 최대치를 갖게되고 입사광의 파장과 입자의 농도 및 크기에 의존하지 않게된다. 그림 2는 깨끗한 물에서 혼탁한 물까지의 6가지 경우에 대하여 측정된 체적위상함수  $\beta(\Psi, \lambda)$ 를 보여 주는데 형태가 거의 비슷함을 알 수 있다. 곡선의 아래부분 면적에 해당하는 총산란계수는 깨끗한 물로 부터 혼탁한 물로 갈수록 증가한다.

일반적으로 모든 산란의 절반정도는 입사각의 근처에서 일어나기 때문에 산란계수는 전방산란에 의해 거의 결정된다. 그러나 원격탐사와 같은 특별한 목적을 위해서는 입자를 통한 굴절이나 표면에서의 반사등 다른 산란과정을 강화 시켜야만 한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 해수 자체에 의한 산란은 후방산란에 대해 대단히 중요한 역할을 하며 깨끗한 물에서는 청색파장에서 후방산란이 일어날 확율이 크다.

## II. 청록레이저의 종류 및 개발현황

청록색광( $\lambda=450\sim530\text{nm}$ )을 발생시키는 고성능 레이저기술은 수중통신용 뿐만아니라 잠수함 검출용, 해저지형 관측용, 동위원소 분리용 등으로도 사용가능 하다. 초기에는 수중전파용으로 Nd : Glass레이저를 주파수 체배( $\lambda=532\text{nm}$ )하여 사용하거나 아르곤 레이저( $\lambda=488,514.5\text{nm}$ )를 사용하였으나, 이후로는 좋은 성능을 가진 레이저들이 많이 개발되었다. 도표 2는 수중 통신용으로 사용 가능한 레이저를 정리한 것이고 그중에서 가장 관심을 많이 끌고있는 몇가지 레이저에 대해 기술하고자 한다.

-아르곤 레이저( $\lambda=488,514\text{nm}$ )

아르곤 이온 레이저는 수중통신에 적합한 파장에 가장 가까운 파장을 내는 레이저이며, 50W 이상의 출력을 안정하게 낼수 있는 상용품들도 많이 개발되어 있다. 또한 실험실 수준에서는 150W 이상의 출력을 낼수 있는 것도 있으나, 이 레이저는 효율이 0.1% 이하인 점이 수중 통신용으로 사용 하는데는 최대의 단점이 되고 있다. 이와같이 낮은 효율은 많은 에너지를 중성인 아르곤 원자를 이온화 하는데 사용되어야하고 이 이온을 상위 레이저 레벨까지 여기해야 하는데 기인한다. 더우기 출력과 효율은 낮은레이저 레벨과 기저상태에 있는 이온사이의 방사트랩에 의해 더 낮아진다. 아르곤 이온레이저의 효율을 높이기 위한 여러가지 방법들이 제안되어 있는데, 예

표 1. 해양종류에 따른 청록색 창문 특성  
Table 1. Underwater windows for various ocean waters.

해양의 종류			청록색 창문특성		
구 분	위 치		K(m <sup>-1</sup> )	Loss(dB/m)	$\lambda(\text{nm})$
청정해역	태양 : 열대, 아열대	수면주위	0.02	0.087	430 ~ 470
			0.03	0.130	440 ~ 480
온난해역	북극해역 · 아북극해	심 해	0.04	0.170	470 ~ 490
한냉해역			0.07	0.300	475 ~ 495
대륙붕			0.10	0.430	490 ~ 510
근 해	비교적 얇은바다	수면 ~ 바다	0.16	0.695	490 ~ 550
혼탁해역	항만, 항구근해		0.40	1.737	550 ~ 570

표 2. 청록색 레이저의 종류 및 기술 수준  
Table 2. Technology status for blue-green lasers.

Laser	Mechanism	$\lambda$	문 제 점
Argon Ion	Elec. Dischro	488	펄스폭이 아주 길다.
	Mul. Collisions	514	효율이 낮아 실용적이지 못하다.
Freq. Doubled Nd : YAG	Nonlinear SHG	532	비선형 결정이 열을 받아 쉽게 손상된다.
	Elec. Dischrg.		수명 : 약 10 <sup>7</sup> 회 방전
Dye, Flashlamp pumped	Vortex Flowing	Blue	펄스폭이 비교적 길다. 수명이 색소와 Flashlamp에 의해 좌우됨
	Gas lamp	Green	
Dye, N <sub>2</sub> Laser pumped	Transverse N <sub>2</sub>	Tunable	N <sub>2</sub> 레이저의 효율이 낮다(0.05%) 출력이 제한된다
	Elec. Dischrg.	465	
Copper vapor	Low Imped. Elec. Dischrg.	510.6	낮은 레이저 레벨과 전기적 임피던스로 효율이 제한된다.
Copper Halide	Low Imped. Elec. Dischrg.	510.6	낮은 임피던스의 전원공급기 필요. 고온에 견디는 튜브 재료 필요.
Freq. Mixing Cs Vapor	Nonlinear Freq. Mixing	457	고체 레이저 매질 사용으로 효율 제한

를 들면 열을 제거하고 낮은 레이저 상태에서의 병목현상을 제거하기 위해 개스의 흐름을 빠르게 한다거나, 각각의 아르곤 이온들이 한번 이상 레이저 발진에 기여하게 하기 위해서 펄스 형태의 자장제한 장치를 사용하는 방법들이 그것이다. 그러나 이러한 기술들이 아직은 효율 좋은 소형 아르곤이온 레이저의 등장에까지는 이르지 못하고 있다.

- 주파수 체배된 Nd : YAG 레이저( $\lambda = 532 \text{ nm}$ )

고체 Nd : YAG 레이저에서 발생한 광을 비선형 결정을 이용하여 광주파수를 체배(second harmonic generation)하면 파장이 532nm인 광을 효율 0.1~0.4%로 얻을 수 있다. 이 기술은 많은 연구개발 되어 있는데, Flashlamp로 광펌핑을 하고 Q스위칭장치를 사용하면 펄스폭 10~20ns 이고, 단위 펄스당 5~500mJ의 출력을 5~1500Hz의 반복율로 얻을 수 있다. 레이저의 수명은 주로 Flashlamp 수명으로 결정되는데 10<sup>7</sup>회의 펄스를 발생시킬 수 있다. 평균출력은 사용된 비선형 결정의 열변형 때문에 현재 기술로는 7~10W 정도로 제한되고 있다. 이 레이저의 가장 큰 단점은 발진파장인 532nm가 수중통신에 사용하기에는 약간 길고 출력이 작다는 것이다.

- 색소 레이저( $\lambda = 430 \sim 540 \text{ nm}$ 에서 변환가능)

색소레이저는 청록색 전파장대역에서 선택적으로 발진이 가능하므로 해수의 상태에 따라서 광주파수를 선택하여 사용할 수 있다. 색소레이저는 펌핑방식에 따라서 Flashlamp 여기 방식과 레이저 여기 방식으로 구분된다. 그중에서 N<sub>2</sub> 레이저( $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ )로 여기하는 방식은 가장 잘 개발되어 있는데 변환효율은 0.05~0.1%이다. 이 경우 UV 영역에서 펄스폭 4~10ns, 1~7mJ의 에너지를 60~1200Hz 반복율로 만들 수 있다. 이 N<sub>2</sub> 레이저의 펄스는 10~20%의 효율로 청록색광( $\lambda = 465 \text{ nm}$  Courmarin 102 사용 경우)으로 변환할 수 있다. 평균출력을 약 1/2W 정도로 사용하면 비교적 오래 동안 사용할 수 있다. 이 경우에 N<sub>2</sub> 레이저가 전반적으로 효율이 낮기 때문에 청록색 광의 평균출력이 제한된다.

Flashlamp 여기 색소레이저는 높은 평균출력을 낼 수 있으나 비교적 짧은 수명을 가진다. Rhodamine 6G 색소를 사용할 경우 수분정도의 짧은 시간이지만 40W 이상의 평균출력을 얻을 수 있으므로 청록색광은 10~15W를 얻을 수 있다. Rhodamine 6G를 사용한 횡형 색소레이저(transverse flow dye laser)는 광대역에서 연속

적으로 작동할 경우 6W정도의 평균출력을 얻을 수 있고, 2Å 정도의 주파수 대역으로 발전시키면 3W정도의 출력을 얻을 수 있다. 이때 펄스에너지는 2~400mJ이고 500Hz 까지의 반복율로 발전한다. 레이저의 수명은 사용한 flashlamp와 색소에 의해 결정되는데 flashlamp는 107회 정도 사용 할 수 있고 색소는 1리터에 5×105J 정도를 통과시킬 수 있다. 이 레이저의 전반적인 효율은 0.1~0.4%이다.

-구리증기 레이저( $\lambda=501.6, 578.2\text{nm}$ )

급속상태인 순수한 구리를 약 1500 °C 정도의 온도로 가열하여 1cm<sup>3</sup> 공간에 1015~1016개의 원자가 증기상태로 있도록 하면, 파장이 510.6nm인 레이저를 1%의 효율로 발전시킬 수 있다. 여기에서 구리와 할로젠 화합물을 사용하면 좀더 낮은 온도인 450~650°C에서 이와 비슷한 원자 밀도를 얻을 수 있고 레이저 발전이 가능하다. 오븐을 사용한 순수한 구리증기레이저는 약 11W의 출력을 얻을 수 있고, 구리와 할로젠 화합물을 사용한 레이저 경우에는 약 1분동안 평균출력 20W를 발전시킬 수 있다. 현재는 펄스폭이 5~20ns, 펄스에너지 1~2.5mJ, 반복율 3~20kHz로 발전하는 레이저가 사용되고 레이저의 수명은 100시간 정도이다. 이 구리증기 레이저를 현장에서 사용하려면 아직도 많은 기술적 뒷바침이 필요하다.

-HgBr과 XeCl 레이저( $\lambda=502,308\text{nm}$ )<sup>(5)</sup>

Mercury-bromide dissociation 레이저와 Raman-shifted xenon chloride 레이저는 청록색광원으로 주목을 받고 있는 레이저이다. HgBr 레이저는 200W 출력을 1% 효율로 발전시킬 수 있는데 수명은 108회 정도이다. HgBr<sub>2</sub>가 해리의 부산물로 발생되기 때문에 수명이 급속히 단축되는데, 이러한 문제를 해결하는 기술이 활발히 연구되고 있다.

Raman-shifted xenon-chloride 레이저도 수명이 문제점이나, 현재는 1010회 정도의 동작이 가능하다.

Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 레이저( $\lambda=600\sim 1020\text{nm}$ )<sup>(7)</sup>

Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Sapphire) 고체레이저는 근적외선 영역인 600~1020nm 사이에서 발전 파장을 가지

며 상온에서 펄스 및 cw 동작이 가능하다. 근적외선 영역에서 파장을 가변할 수 있는 레이저로는 적외선 색소 레이저와 반도체레이저보다 여러면에서 우수한 레이저 특성을 가지고 있다. 특히 Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 레이저의 주파수 가변 영역은 3개의 색소레이저 파장가변 범위를 포함하여 색소레이저의 효율이 낮은 장파장(~1μm)에서 고출력 발전을 할 수 있다. 또한 Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 레이저의 흡수대가 400~600nm 사이에 광대역으로 있어 상용의 Ar<sup>+</sup> 레이저로 직접 광펌핑이 가능하다. Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 레이저는 출력의 감소없이 고출력 장시간 동작이 가능하다. 이외에도 Alexandrite, Co : MgF<sub>2</sub> 등 새로운 고체레이저 개발이 활발히 진행되고 있는데 그림 3은 그 동작파장 영역을 나타낸 것이다.

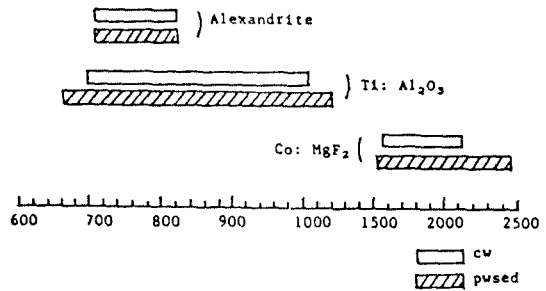


그림 3. 새로운 고체 레이저인 Alexandrite, Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co : MgF<sub>2</sub> 레이저의 주파수 가변범위<sup>(8)</sup>  
Fig. 3 Tuning ranges are indicated for Alexandrite, Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Co : MgF<sub>2</sub> laser system running continuous wave or pulsed.<sup>(8)</sup>

### 미래의 청록색 레이저

현재 수중통신에 적합한 새로운 청록색 레이저의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 주파수 체배된 Nd : YAG 레이저의 경우는 낮은 흡수율을 가진 비선형 결정이 개발된다면 평균출력 20~40W, 펄스에너지 1~2J인 장치들을 쉽게 만들 수 있다. 새로운 아크램프와 횡형 색소펌프를 개발하면 flashlamp 펌프형 색소레이저에서 100W 이상의 출력을 얻을 수 있다. 물론 이로부터 광주파수 변환에 의해 0.5~1J의 청록색 펄스 에너지를 얻을 수 있게 된다.

질소레이저로 펌핑되는 색소레이저는 쌍채널

구조와 여기펄스의 효율을 개선하면 앞으로 1~3년 안에 효율과 평균출력을 6~8배 가량 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

금속증기 레이저는 가까운 장래에 성능이 크게 개선 되리라고 생각된다. 구리 증기 레이저 경우는 앞으로 1~3년 안에 출력 20~30W, 펄스 에너지 5~20mJ, 수명 100시간 정도의 레이저가 등장할 것으로 예상된다.<sup>(5)</sup> 또한 가까운 장래에는 150W 이상의 큰출력을 내는 출력증폭기가 등장할 것으로 예상된다. 다른 금속증기 레이저로는 bismuth( $\lambda=472\text{nm}$ )와 chromium( $\lambda=494,496$ )을 사용하는 레이저가 청록색파장에서 사용될 것이다. bismuth를 사용하여 레이저를 발진시키려는 노력은 여기원자가 낮은 에너지 레벨로 너무 빨리 천이하기 때문에 아직 결실을 보지 못하였다. 왜냐하면 bismuth 레이저 발진을 위해 필요로 하는 여기용 고속 펄스( $dA/dt=10^{10}$  Amp/Sec) 전원의 구성이 아직 기술적으로 어렵기 때문이다.<sup>(6)</sup> Cr(chromium)은 구리증기 레이저와 비슷한 양자효율을 가지고 있으나 수명은 3배 정도 길다.

앞으로 가능성이 있는 다른 종류의 청록색 레이저와 색소레이저 펌핑용 레이저도 활발히 연구되고 있다. 가까운 장래(4~6년)에 가장 가능성이 있는 레이저로는 excimer나 transfer와 같은 고압가스 레이저이다. 예를 들면 16기압 정도의 고압 Argon-N<sub>2</sub> transfer 레이저로는 근래에 10MW의 첨두 출력을 효율 2%로 동작시킬 수 있는 장치가 개발되었다. 이 레이저는 출력 파장이 357.7nm이어서 청록색 발진용 색소 레이저의 펌핑에 적합하다. 그러나 펌핑기술이나 장치는 현재의 E-beam장치보다 더 많이 발전되어야 한다. 또 고압 Helium-N<sub>2</sub> 가스레이저는 파장 427.8nm에서 효율 0.5~1%로 직접 발진하는데 성공하였고, 475nm에서 발진하는 것도 가까운 장래에 가능할 것으로 보인다.

또한 Xenon-Fluoride와 Xenon-Chloride와 같은 고압가스 엑시머 레이저도 청록색 색소 레이저용 펌핑광으로 사용될 것으로 보인다. Xenon-Fluoride( $\lambda=303\text{nm}$ )와 Xeono-Chlor-

ide( $\lambda=308\text{nm}$ )는 transfer형과 같이 직접 청록색 영역에서 발진하지는 않고 현재는 UV영역에서 5%이상의 효율로 발진하고 있다.

장래의 청록색 레이저 발진기에는 주파수 혼합기술과 주파수 체배기술을 사용한 것들도 있다. 예를들면 cesium 증기가 Nd:YALO<sub>3</sub> 레이저빔(2 photons,  $\lambda=1,079\text{nm}$ )과 적외선 레이저빔(3,100nm 광매개 발진기)을 흡수할때 청록색 빔( $\lambda=456\text{nm}$ )을 발생한다. 이와 유사하게 CO<sub>2</sub> 레이저빔( $\lambda=9,260\text{nm}$ )과 Nd:YAG 레이저로 펌핑되는 LinbO<sub>3</sub> 광매개 발진기 빔의 주파수가 혼합될때 색소 레이저를 펌핑하기에 적당한 UV( $\lambda=330\text{nm}$ )가 발생한다. 이 경우에는 주파수 체배용 비선형 결정을 사용할 때의 고출력에 의한 손상이나 열손실과 같은 일이 일어나지 않아서 실제적인 광자 변환 효율은 50~100%에 달한다.

또다른 청록색 레이저로는 CO<sub>2</sub> 레이저로 발생시킨 Xenon 플라즈마로 펌핑하는 색소레이저이다. 이는 5.6J가량의 CO<sub>2</sub> 레이저를 Xenon 가스 플라즈마에 가하면 이온과 전자가 재결합하는 과정에서 UV가 발생하게 되는데 이 UV를 색소 레이저 펌핑광으로 사용하는 것으로 flashlamp로 펌핑하는 만큼의 효율을 얻을 수 있고, 수십 ns의 짧은 펄스를 발생시킬 수 있다. 여기에서 효율은 Xenon 플라즈마의 재결합 시간에 의해 제한된다.

#### IV. 결 론

물속에서 광이 지수함수적으로 감쇄하는 현상은 수중통신을 하는데 고려해야 하는 가장 중요한 요소이며, 통신하려고 하는 두시점 사이에 있는 해수에 가장 적절한 “해수의 창문”을 찾는 것도 또한 중요하다. 레이저광이 해수의 종류에 따라 변화하는 해수의 창문을 통과할 수 있도록 얼마만큼 레이저의 파장을 조절할 수 있는냐에 따라서 레이저광이 해수를 통과하는 깊이가 좌우될 것이다. 또한 송신부에서는 짧은 펄스폭과 높은

평균 출력의 레이저광을 사용하고, 수신부에서는 튜닝 가능한 협대역 광학필터와 고감도 광증배관을 사용한다면 수백 피트 아래의 바다밑과 통신을 할수 있을것이다. 최근에 가장 유력한 청록색 레이저로는 구리증기 레이저, 색소레이저, 주파수 체배된 Nd : YAG 레이저, HgBr과 XeCl 레이저 등이 있고, 현재 기술로는 앞의 세종류 레이저가 01.~1% 효율로 3~15W정도 출력을 갖는 것으로 보고되고 있으나, 가까운 장래에 이러한 레이저의 출력은 2~4배 정도 증가할 것이다. 장래에 유망한 청록색 레이저 광원으로는 excimer나 transfer와 같은 고압가스 레이저가 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. Gerald D.Ferguson. "BLUE-GREEN LASER FOR UNDERWATER APPLICATIONS," 150-156 pp.

Ocean Optics, SPIE Vol.64(1975).  
 2. James B.Schultz, "Navy, DARPA Evaluate Blue-Green Lasers as Communications Link With Submarines," 50-60pp, DEFENSE ELECTRONICS : NOV.1983.  
 3. Curtis Mobley, "Oceanic Optics," 14-19pp, Optics & Photonics News, July 1991.  
 4. THOMAS F.WIENER, SHERMAN KARP, "The Role of Blue/Green Laser Systems in Strategic Submarine Communications," 1602-1607pp, IEEE TRANSACTIONS OF COMMUNICATIONS, VOL. COM 28, NO.9, SEP.1980.  
 5. M.B.White. "Laser for Hydrographic Applications" 28-38pp, NR Reviews, summer, 1981.  
 6. "ANNUAL REVIEW : NEW LASERS," Laser Focus, Jan.1982.  
 7. 한국표준연구소, "레이저 기술 개발, 레이저 계측기술 개발 보고서," KSRI-91-99-IR, 1991.  
 8. 한국표준연구소, "레이저 계측기술 개발," KSRI-90-78-IR, 1990.



金容平(Young Pyung KIM) 正會員  
 1955년 2월 9일생  
 1979년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업  
 1986년 3월 : 일본 慶應대학교 전기공학  
 학과(레이저전공, 공학박사)  
 1986년 4월~1988년 7월 : 영국 Imperial College, London 연구원

1988년 8월~현재 : 한국표준과학연구원 레이저연구실, 실장



崔鐘云(Jong Woon CHOI) 正會員  
 1959년 2월 16일생  
 1981년 2월 : 단국대학교 전자공학과 졸업  
 1981년 6월~1984년 12월 : 육군기술장교  
 1985년 9월~1988년 2월 : 단국대학교 전자공학과(공학석사)  
 1986년 7월~1988년 7월 : 나우정밀

연구소 연구원

1988년 7월~현재 : 한국표준과학연구원 레이저연구실, 선임 연구원