

청록색 레이저를 이용한 수중영상 연구

이상훈*, 김근배, 이광식, 김달우

Underwater imaging with a blue-green laser

S.H. Lee, G.B. Kim, K.S. Lee, D.W. Kim

Abstract - Laser emission, a part of electro-magnetic wave, has short propagation length in water, and the underwater applications of laser are limited. The acquisition of underwater imaging is possible only by using a blue-green laser since the blue-green range has relatively small absorption coefficient in water.

We introduce the conditions of the laser required for underwater imaging and the attenuation characteristics of a blue-green laser used in water.

1. 서 론

레이저가 발명된 이래 광학분야는 물론 다양한 과학분야에서 획기적인 발전이 있었고, 여러가지 실용적인 분야에서 레이저를 이용한 다양한 상품이 개발, 사용되어졌다. 그러나, 수중에서는 전자기파가 물분자나 부유물에 의해 대부분 흡수, 산란되기 때문에 수중에서의 응용은 극히 제한되었다. 최근에는 전자기파중 수중창(water window)에 해당하는 청록색 영역의 레이저가 개발되면서 레이저의 수중이용이라는 장을 마련하였다.⁽¹⁾ 레이저의 수중에서의 응용은 수중통신, 수중영상 등 많은 가능성을 가지고 있으며 수중영상은 군사적으로나 민수용으로 널리 쓰일 수 있어 수중응용의 대표적인 예라고 할 수 있다.⁽²⁾

레이저를 수중에서 사용하기 위해서 이동상태에서도 안정성 있는 작동을 할 수 있는 all-solid-state laser 가 연구되었고,⁽¹⁾ 특히 에너지의 효율과 크기의 간소화 때문에 펄스형 레이저가 많이 연구되고 있다. 또한 빛의 수중전파특성에 관한 물리적 이해는 이론적 난해성과 측정기술의 부족 등으로 인해 제한되어 왔다. 수중에서 전자기파의 산란 및 전파를 설명하는 최종적인 모델은 존재하지 않았으나, 최근 몇몇 연구들은 최종적인 모델링을 위한 초석이 되고 있다. 또한 실험적 측면에서는 광범위한 실험실에서의 측정과 현장 측정을 통해 자연에서 발생하는 광학변수들의 범위를 얻어냈다.

본 연구에서는 수중영상에 필요한 레이저의 여러 가지 조건에 대하여 검토하고, 수중에서의 청록색 레이저의 감쇄특성 실험결과와 앞으로의 연구방향에 관하여 기술하였다.

2. 수중 영상용 광원

전자기파는 거의 모든 영역에 걸쳐 해수에 강하게 흡수되지만, 투과 창에 해당하는 청록색 영역에서는 비교적 멀리까지 전파된다. 또한 분해능이 우수하기 때문에 수중에서의 응용에 가장 적합하다고 평가되고 있다. 수중영상용 광원으로서 일반적으로 요구되는 조건은 다음과 같다.

· 파장(투과 창 430~550nm)
최적의 파장은 바닷물의 상태에 따라 다르므로, 파장 가변형 레이저가 요구된다.

· 펄스 에너지(10~1000mJ)
펄스 에너지는 흡수계수와 원하는 침투깊이에 따라 결정된다. 또한 2차적으로는 수광면적과 검지기의 감도에 따라 결정된다.

· 펄스 폭(3~30ns)
거리분해능은 레이저의 펄스 폭에 의해 좌우되며, 분해능이 우수한 영상을 얻기 위해서는 펄스 폭이 짧아야 한다.

· 빔 퍼짐각
레이저 광선의 빔 퍼짐각은 목표물 위에서의 빔의 크기와 센서와의 거리에 따라 결정된다. 물 속에서 다중산란에 의한 빔퍼짐과 물의 표면에서의 효과는 일반적으로 빔의 유효크기를 크게 만든다.

· 펄스 반복율
영상처리를 통하여 영상이 연속적으로 보이기 위해서는 30(Hz)이상의 고반복율이 필요하다.

· 효율
선박, 항공기 기타 장비에 탑재를 위하여 크기가 작고 무게가 가벼우며 효율이 좋은 레이저가 필요하다.

· 밴드 폭
잡음을 줄여 신호 대 잡음비를 증가시키기 위해서는 레이저 펄스의 밴드 폭이 좁아야 한다.

· 편광성(선형)
편광된 빛을 사용함으로써 신호 대 잡음비를 증가시킬 수 있다. 그러나 다중산란에 의하여 편광이 감소되므로 수중에서 편광의 유용성은 극히 제한된다.

이상의 점들을 고려한다면, 콤팩트하고, 효율이 양호한 청록색 레이저 광원이 필요하며, 이를 위한 구체적인 해결방법으로는 다이오드로 펌프하고, 레이저 공진기 내부에서 주파수를 두배로 증가시킨 Q-스위치 Nd:YAG 레이저가 유용하다.

3. 청록색 레이저의 수중전파 특성

빛의 세기(spectral radiant power)가 $\Phi_i(\lambda)$ 인 단색광이 두께 z 인 물을 통과할 때 물에 흡수되는 빛의 세기를 $\Phi_a(\lambda)$, 전체 산란광의 세기를 $\Phi_s(\lambda)$, 투과하는 빛의 세기를 $\Phi_t(\lambda)$ 라 하면 에너지 보존법칙에 의하여 이들은 다음 식을 만족한다.

$$\Phi_i(\lambda) = \Phi_a(\lambda) + \Phi_s(\lambda) + \Phi_l(\lambda) \quad (1)$$

여기서, 전체 산란광의 세기 $\Phi_s(\lambda)$ 는 입사광선에 대하여 ψ 의 각도로 산란되는 빛의 세기 $\Phi_s(\psi, \lambda)$ 를 모든 산란각도에 대하여 적분한 양이다. 산란에 있어서 Raman 산란 또는 Brillouin 산란 등과 같이 산란 후 파장이 변하는 비탄성 산란은 무시하기로 한다.

$$\Phi_s(\lambda) = \int \Phi_s(\psi, \lambda) d\Omega = 2\pi \int_0^\pi \Phi_s(\psi, \lambda) \sin\psi d\psi$$

일정한 파장에서의 흡수율(spectral absorptance) $A(\lambda)$ 는 일정한 부피 내에서 입사 광선의 세기에 대한 흡수광선의 세기의 비

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (2)$$

로 정의된다. 마찬가지로 일정한 파장에서의 산란율(spectral scattering) $B(\lambda)$ 는 입사광선의 세기에 대한 산란광선의 세기의 비로 정의된다.

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_s(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (3)$$

일정한 파장에서의 투과율(spectral transmittance) $T(\lambda)$ 는 입사광선과 투과 광선의 세기의 비로 정의된다.

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (4)$$

이들 흡수, 산란, 투과계수들을 이용하면 에너지 보존법칙인 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A(\lambda) + B(\lambda) + T(\lambda) = 1 \quad (5)$$

수중광학(hydrologic optics)에서 보통 이용되는 고유한 광학적 성질들은 각각 매질에서 단위 거리당 일정 파장에서의 흡수율과 산란율로 정의하는 일정 파장에서의 흡수계수와 산란계수이므로 단위거리당 흡수율을 $a(\lambda)$ 라고 하면 $a(\lambda)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a(\lambda) \equiv \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{A(\lambda)}{\Delta z} (m^{-1}) \quad (6)$$

마찬가지로 단위파장에서의 산란계수 $b(\lambda)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$b(\lambda) \equiv \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{B(\lambda)}{\Delta z} (m^{-1}) \quad (7)$$

흡수 및 산란이 빛을 감쇠시키므로 일정한 파장에서의 감쇠계수(spectral beam attenuation coefficient) $c(\lambda)$ 는 $a(\lambda)$ 와 $b(\lambda)$ 의 합으로 정의된다.

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (8)$$

한편 부피 ΔV 내에서 에너지 변화를 다음과 같이 정의하고

$$\Delta\Phi(\lambda) = \Phi_i(\lambda) - \Phi_t(\lambda) \quad (9)$$

전자기파의 감쇠는 에너지 $\Phi(\lambda)$ 에 비례한다고 하면 에너지 변화는 다음의 식으로 주어진다.

$$\Delta\Phi(\lambda) = -c(\lambda)\Delta\Phi(\lambda)\Delta z \quad (10)$$

여기서 $c(\lambda)$ 는 식(8)에서 정의한 감쇠계수이며, 우변에 있는 음의 부호는 전자기파가 거리 z 만큼 전파한 후에 감쇠된다는 것을 의미한다. 식(10)에서 $\Delta z \rightarrow 0$ 인 경우는 다음과 같은 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{d\Phi(\lambda)}{dz} = -c(\lambda)\Phi(\lambda) \quad (11)$$

일반적으로 동일 수심에서 물은 근사적으로 등방성을 가지고 있으므로 감쇠계수 $c(\lambda)$ 는 z 에 대해 독립적이라고 가정할 수 있어 식(11)을 적분함으로써 간단한 감쇠 방정식을 구할 수 있다.

$$\Phi(z, \lambda) = \Phi(0, \lambda) e^{-c(\lambda)z} \quad (12)$$

식(12)에 의하면 광선은 전파되는 거리에 따라 지수함수적으로 감쇠되며 $c^{-1}(\lambda)$ 은 광선의 세기가 e^{-1} 으로 감쇠되는 거리이다. 실제로 일정 파장에서의 감쇠계수는 일정 파장에서의 흡수계수와 산란계수의 합으로 표현된

다.

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (13)$$

광선의 감쇠계수 $c(\lambda)$ 를 계산하기 위하여 많은 이론적인 연구가 이루어졌다.

Spinard는 입자에 의한 단위부피당 감쇠계수(volume-specific particulate beam attenuation coefficient)의 의존성을 계산하기 위하여 Mie theory를 사용하였으나³⁾ 예상결과는 Mie 계산에서 입자의 상한 및 하한 크기의 선택에 대단히 민감하게 나타나서 실제의 값과 큰 차이를 나타내었다. Voss는 $\lambda = 490\text{nm}$ 에서 $c(\lambda)$ 를 측정함으로써⁴⁾ empirical model을 개발했으며 다른 파장에서의 $c(\lambda)$ 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$c(\lambda) = c_w(\lambda) + [c(490\text{nm}) - c_w(490\text{nm})] [1.563 - 1.149 \times 10^{-3}\lambda] \quad (14)$$

여기서 λ 및 $c(\lambda)$ 의 단위는 각각 nm 및 m^{-1} 이다.

Table 1은 파장에 따른 바닷물에 대한 흡수계수 $c = a + b$ 를 나타낸 Smith의 실험결과이다.⁵⁾ 단위거리당 흡수율 $a(\lambda)$ 는 파장 430nm에서 가장 작고 $b(\lambda)$ 는 파장이 커질수록 작아지며 $c(\lambda)$ 는 파장 450nm에서 가장 작음을 알 수 있다. Voss 모델은 통계학적으로 유도된 것이며 Voss 모델의 이론치와 측정 데이터의 오차는 일반적으로 5% 정도이며 때로는 20%의 큰 오차를 나타내기도 한다.

Table 2는 여러 가지 종류의 물에 대해 산란각 ψ 에서의 흡수계수, 산란계수, 감쇠계수를 측정된 값을 보여 주고 있다. 순수한 물과 여러 가지 종류의 해수를 대상으로 청록색 레이저 광원의 수중전파특성을 실험한 결과 순수한 물일 경우 감쇠계수 c 가 0.043m^{-1} 임에 반해 해수의 경우 감쇠계수는 $0.151 \sim 2.190\text{m}^{-1}$ 의 큰 값을 나타내었다. 이와 같이 해수가 순수한 물보다 감쇠계수가 큰 것은 해수에 sodium, 마그네슘, 칼슘 등의 물질이 들어 있어 흡수 및 산란을 일으키기 때문인 것으로 생각된다. 또한 염분의 함량이 비슷한 해수의 경우 맑은 해수보다 탁한 해수의 경우 감쇠계수가 15배 이상 증가하였다. 이는 수중 부유물이 수중전파에 큰 영향을 미치기 때문이다.

Table 1 Spectral absorption coefficient of pure sea water.

λ [nm]	a_w [m^{-1}]	b_m^{sw} [m^{-1}]	λ [nm]	a_w [m^{-1}]	b_m^{sw} [m^{-1}]	λ [nm]	a_w [m^{-1}]	b_m^{sw} [m^{-1}]
200	3.07	0.151	410	0.0162	0.0068	620	0.309	0.0012
210	1.99	0.119	420	0.0153	0.0061	630	0.319	0.0011
220	1.31	0.0995	430	0.0144	0.0055	640	0.329	0.0010
230	0.927	0.0820	440	0.0145	0.0049	650	0.349	0.0010
240	0.720	0.0685	450	0.0145	0.0045	660	0.400	0.0008
250	0.559	0.0575	460	0.0156	0.0041	670	0.430	0.0008
260	0.458	0.0485	470	0.0156	0.0037	680	0.450	0.0007
270	0.373	0.0415	480	0.0176	0.0034	690	0.500	0.0007
280	0.288	0.0353	490	0.0196	0.0031	700	0.650	0.0007
290	0.215	0.0305	500	0.0257	0.0029	710	0.839	0.0007
300	0.141	0.0262	510	0.0357	0.0026	720	1.169	0.0006
310	0.105	0.0229	520	0.0477	0.0024	730	1.799	0.0006
320	0.0844	0.0200	530	0.0507	0.0022	740	2.38	0.0006
330	0.0678	0.0175	540	0.0558	0.0021	750	2.47	0.0005
340	0.0561	0.0153	550	0.0638	0.0019	760	2.55	0.0005
350	0.0463	0.0134	560	0.0708	0.0018	770	2.51	0.0004
360	0.0379	0.0120	570	0.0799	0.0017	780	2.36	0.0004
370	0.0300	0.0106	580	0.108	0.0016	790	2.16	0.0004
380	0.0220	0.0094	590	0.157	0.0015	800	2.07	0.0004
390	0.0191	0.0084	600	0.244	0.0014			
400	0.0171	0.0076	610	0.289	0.0013			

Table 2 Selected inherent optical properties for some water(All values for $\lambda=514\text{nm}$ except noted).

Water	a (m^{-1})	b (m^{-1})	c (m^{-1})	Ψ for 1/2b (deg)
Pure sea water	0.0405	0.0025	0.043	900.00
Clear ocean	0.114*	0.037	0.151**	6.25
Coastal ocean	0.179*	0.219	0.398**	2.53
Turbid harbor	0.366*	1.824	2.190**	4.69

* Estimated from $c(530\text{nm})-b(514\text{nm})$;

** Measured at 530nm;

4. 수중영상

가까운 측정 거리에서는 조명 장치와 센서 사이의 거리를 조절함으로써 후방 산란을 최소화 할 수 있지만, 측정거리가 멀어질수록 광원과 검지기가 beam space를 공유하기 시작하여 후방 산란이 영상의 해상도를 저하시켜 영상화가 어렵게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 능동형 수중영상으로 line scanning 방식과 range gating 방식이 고안되었다.

Line scanning 방식은 측정 대상을 조명하기 위해 연속 발진 레이저를 광원으로 사용하고 반사된 빛을 검지기로 측정한다.(그림 1) 이때 레이저빔을 측정 대상에 라인으로 조사하고 비취진 부분을 검지기로 scanning함으로써 영상을 얻는다. 이때 레이저 발생부와 검지기를 분리함으로써 빛의 후방산란에 의한 영상의 흐려짐을 막을 수 있다. 이는 산란 효율이 off-axis로 관측할 때 크게 저하되기 때문이다.^[6]

이에 비해 range gating 방식은 레이저 발생부와 검지기를 분리할 필요성이 없다. 검지기의 FOV(field of view)를 비추기 위해 펄스형의 레이저를 사용한다. 이 경우 측정대상을 한번에 비추고 대상에서 반사된 신호가 거의 동시에 측정된다. 따라서 만약 레이저 펄스의 주기가 30 [Hz] 이상이라면 측정대상을 실시간으로 관측할 수 있다. 하지만 이 시스템에서는 레이저가 전체 FOV를 동시에 발생시켜야 하므로 고효율의 레이저가 요구된다. 따라서 분해능이 레이저의 출력에 관계되고 그밖에 검지기의 pixel density와 후방산란의 정도에 따라 결정된다.(그림 2)^[7]

두 가지 측정 방식은 각각의 장단점을 모두 가지고 있다. 실제로 광원을 고려해 보았을 때 line scanning 방식에 사용되는 CW laser는 아직까지 고효율의 출력특성이 우수한 빔을 발생시키는 레이저가 개발되어 있지 않은데 비해, range gating 방식에 사용되는 펄스형 레이저는 고효율, 콤팩트한 레이저가 개발되어 있으므로 실제로 수중영상을 구현하는데 range gating 방식이 보다 더 실용적이다.

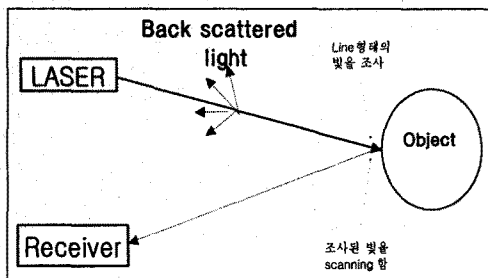


Fig. 1. Line scanning 방식.

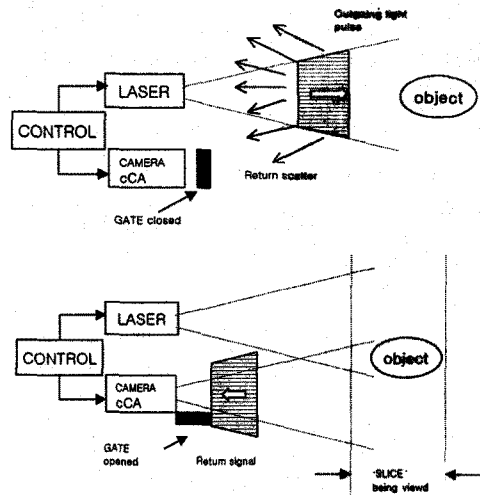


Fig. 2. Optical range gating 방식.

5. 결 론

본 연구에서는 레이저 광선의 수중전파 특성을 조사하고, 청록색 레이저에 의한 수중영상에 관해 연구하였다.

레이저의 수중전파 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 빛의 흡수 및 산란이다. 빛의 흡수는 레이저 광선의 파장에 따라 크게 영향을 받으며 물의 염도, 온도 등 여러 가지에 의해 영향을 받는다. 빛의 산란은 물을 구성하고 있는 여러 가지 종류의 물질이나 물 속에 떠있는 부유물에 의해 영향을 받는데 수중전파에서는 부유물에 의해 크게 영향을 받는다.

청록색 레이저를 이용한 수중 영상에 관하여는 기본원리 및 측정방법을 비교, 검토하였으며, 향후 range gated system을 이용한 수중영상 시스템을 체계적으로 발전시킴으로써 선명도가 우수한 영상 시스템을 실용화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

(참고 문헌)

- [1] D.P.Juyal, "Laser sources for underwater application", Def.Sci.J. Vol.34, No.1, pp.57-70, 1984.
- [2] Steven W.Pittman, "An Introduction to Underwater Imaging", UnderWater Magazine, Fall 1994.
- [3] G.Mie, Ann.d.Physik 25, 377, 1908.
- [4] K.J.Voss, "Spectral model of the beam attenuation coefficient in the ocean and coastal areas", Limnol. Oceanogr.37, 501, 1992
- [5] R.C.Smith, "Optical properties of the clearest natural water", Appl. Optics 20, 177, 1981.
- [6] Roswell W.Austin, "An underwater laser scanning system", SPIE, Vol.1537, pp.57-73, 1991
- [7] E.A.Mclean et al, "Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water", Applied Optics, Vol.34, No.21, pp4343-451, 1995.