

# 레이저 다이오드를 이용한 수중 광 정보 및 전력 동시전송

김성만\* · 신재우\*\*

Underwater Simultaneous Light Information  
and Power Transmission using a Laser Diode

Sung-Man Kim\* · Jae-Woo Shin\*\*

## 요 약

본 논문에서는 레이저 다이오드를 활용하여 수중 광 전력과 수중 광 무선통신의 동시전송을 연구하고 이에 대한 실험 결과를 보인다. 본 실험에서는 송신부에 전/광 변환을 위한 레이저 다이오드를 사용하고 수신부에는 광/전 변환을 위한 태양전지를 사용하였다. 수중 전송 실험을 위해서는 플라스틱 관에 물을 채워 구현하였으며, 수중 광 무선통신 및 수중 광 무선충전을 위해 레이저 송신단과 수신단 시스템을 최적화하였다. 본 실험에서는 100 mW 급 레이저를 사용하였으며, 레이저의 최대 전/광 변환효율을 18.5 % 였다. 수중 광 무선충전 및 수중 광 무선통신의 동시전송 실험결과, 수중에서 최대 5 m 전송시에 0.33 %의 DC-to-DC 전송효율을 보였으며, 수중 무선 광통신은 수중에서 1 m 전송시에 최대 50 kbps의 전송속도를 보였다.

## ABSTRACT

In this paper, we show a simultaneous transmission of underwater optical wireless power transfer and underwater optical wireless communication. A laser diode is used for electric-to-optic conversion at the transmitter and a solar cell is used for optic-to-electric conversion at the receiver. We optimized the transmitter and receiver for the best performance. The laser diode is a 100-mW laser diode and showed a conversion efficiency of 18.5%. The experimental results showed a 0.33-% DC-to-DC underwater power transfer efficiency at 5 m and a data rate of 100 kbps at 1 m.

## 키워드

Simultaneous Light Information And Power Transmission, Underwater Optical Wireless Communication, Underwater Optical Wireless Power Transmission  
광 정보 및 전력 동시 전송, 수중 무선 광통신, 수중 무선 광충전

\* 제1저자 겸 교신저자 : 경성대학교 전자공학과  
(sungman@ks.ac.kr)

\*\* 경성대학교 전자공학과 (t1swodn205@naver.com)  
• 접수일 : 2022. 09. 02  
• 수정완료일 : 2022. 09. 22  
• 게재확정일 : 2022. 10. 17

• Received : Sep. 02, 2022, Revised : Sep. 22, 2022, Accepted : Oct. 17, 2022

\* Corresponding Author : Sung-Man Kim  
Dept. Electronic Engineering, KyungSung University,  
Email : sungman@ks.ac.kr

## 1. 서론

최근에 여러 무선충전 기술이 다양하게 연구되고 있으나, 장거리 전송에서 가장 강점을 보이는 것은 레이저를 활용한 무선 광 충전 기술이다[1-5]. 이런 무선 광충전 기술은 전자파 장애가 없고 장거리 전송이 가능한 장점 뿐만 아니라 수중에서도 전송이 가능한 장점을 가지고 있다[6, 7].

또한, 최근에는 레이저를 활용하여 정보와 전력을 동시에 전송하고자 하는 시도가 많이 연구되고 있다 [8-11]. 이렇게 전력과 통신을 동시에 보낸다면, 별도의 전력선이 필요없이 전력과 정보를 동시에 보낼 수 있어서 다양한 응용이 가능해진다. 또한, 수중과 같은 환경에서는 전력을 전달하는 것도 매우 중요한 일이므로 전력과 정보를 동시에 전달한다면, 수중에서 다양한 응용이 가능해질 것이다. 하지만, 지금까지 수중에서 전력과 정보를 동시에 보내는 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

이에 본 논문에서는 레이저 다이오드(LD, Laser Diode)를 활용하여 수중에서 통신신호와 전력을 동시에 보내는 방안을 연구하였으며, 이를 실험으로 구현하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본 논문의 2장에서는 연구를 위해 구현한 송/수신단의 구성에 대해서 설명할 것이고, 이의 최적화 기법에 대해서 설명할 것이다. 본 논문의 3장에서는 이렇게 최적화된 송/수신단을 활용하여 얻어진 전력 및 통신의 동시전송 실험 결과에 대해서 설명하도록 하겠다.

## II. 송/수신단 구성

### 2.1 전체 실험구성

그림 1은 본 실험에서 구현한 실험 구성도를 나타

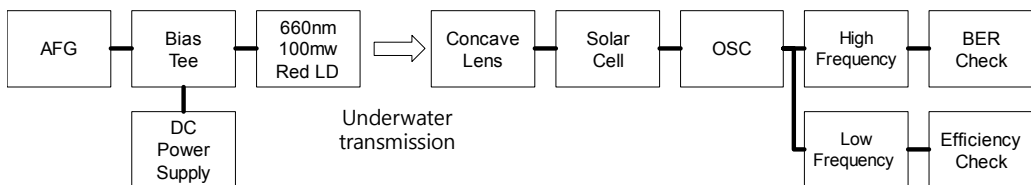


그림 1. 수중 광 정보 및 전력 동시전송의 실험 구성도

Fig. 1 Experimental setup of underwater light information and power transmission

낸다. 레이저 다이오드에 바이어스티(Bias Tee)를 연결하여 DC 파워와 함수발생기를 연결하였다. 이를 통해 DC 전력 및 통신신호를 동시에 보낼 수 있도록 하였다. 통신신호로는 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 넣었으며, Hermitian Symmetry 기법을 이용하여 허수가 없는 OFDM 신호가 나오도록 설계하였다[12-14].

수신단에서는 오목렌즈를 통해 수신용 태양전지에 끌고루 퍼져서 가장 높은 효율을 낼 수 있게 배치하였고, 태양전지에서 발생하는 전기신호를 DC 부분과 AC 부분으로 나누어 수신하도록 하였다. 수신된 DC 부분은 수신된 전력이 될 것이고, 수신된 고주파 영역은 통신신호로 분류된다. 그림 2는 수중 실험 이전에 구현한 실험구성도의 사진이다.

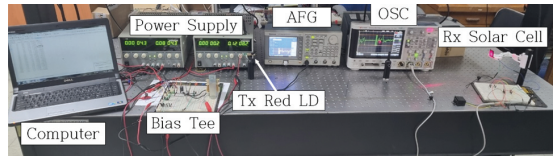


그림 2 실험 구성도의 사진 (수중 실험 전)

Fig. 2 Picture of the experimental setup (before underwater transmission)

### 2.2 송신단 특성 측정 및 최적화

본 실험의 성능을 최고로 높이기 위해서 송신단을 최적화하고자 하였다. 그림 3은 본 실험에서 사용된 레이저 다이오드의 광 전력 및 전/광 변환효율을 측정된 그래프이다. 참고로 본 실험에서 사용한 레이저 다이오드는 100 mW 급 레이저였으며, 중심파장은 660 nm로 측정되었다.

그림 3에서 나타냈듯이, 본 레이저는 3.1 V의 동작 전압에서 가장 높은 효율을 나타내었으며, 그 때의 광 파워는 114 mW, 전/광 변환효율은 18.5 %에 해당하

였다. 광 전력을 송신하기 위해서는 전/광 효율이 가장 높은 동작점으로 보내는 것이 좋기 때문에, DC 전력을 보내는 동작점은 3.1 V의 전압으로 정하였다.

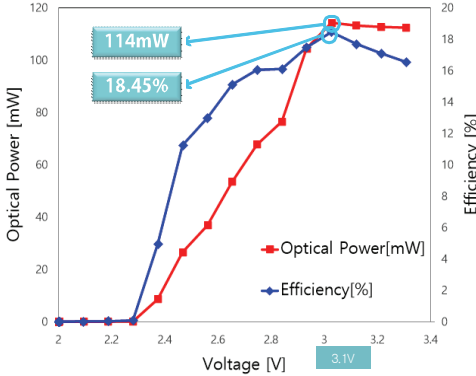


그림 3. 레이저 다이오드의 광 전력 및 전/광 변환효율  
Fig. 3 Optical power and electric-to-optic conversion efficiency of the laser diode

### 2.3 수신단 특성 측정 및 최적화

본 실험의 성능을 최고로 높이기 위해 수신단의 최적화도 실시하였다. 그림 4는 본 실험에서 사용된 태양전지의 전류-전압 그래프이다. 레이저 다이오드의 동작점을 최적의 효율이 나오는 3.1 V의 동작 전압에 (광전력은 114 mW) 맞추고, 그에 따라 태양전지에 연결된 부하 저항값을 바꾸어 가면서 전류와 전압을 측정할 그래프이다.

그림 4에서 알 수 있듯이, 태양전지에 연결된 부하 저항이 40 Ω일 때에 13.95 mW의 전력을 얻어 12.2 %로 가장 높은 광/전 변환효율을 보였다. 따라서, 수신단의 부하저항은 40 Ω으로 정하였다.

또한, 표 1에서 알 수 있듯이 송신단의 전/광 변환 효율이 18.5 %이고, 수신단의 광/전 변환효율이 12.2 % 이므로, 전체 전송효율은 2.3 %의 DC-to-DC 전송 효율을 가지게 된다.

표 1. 전송효율 (수중 전송전)  
Table 1. Transmission efficiency (before underwater transmission)

Laser efficiency	18.5 %
Solar cell efficiency	12.2 %
Total efficiency	2.3 %

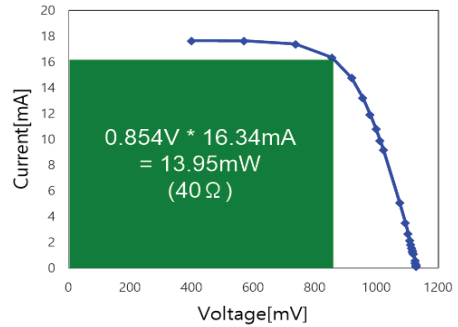


그림 4. 태양전지의 전류-전압 그래프  
Fig. 4 Current-Voltage graph of the solar cell

## III. 광 정보 및 광 전력 동시 전송

### 3.1 통신신호 전송 특성

2장에서 최적화한 송/수신단 구성에서 통신신호의 전송특성을 측정하였다. 그림 5는 송신부에 인가된 전압에 대한 수신부의 전압을 나타낸 그래프이다. 이 결과를 살펴보면, 송신부의 전압이 2.3 V에서 3.1 V사이에서 선형적인 관계를 보였다. 송신부에서 레이저의 전/광 효율이 가장 높은 지점이 3.1 V의 동작전압이므로 통신신호를 동시에 보내기 위해서는 최대 동작 전압을 3.1 V로 하고 변조지수(modulation index)를 바꾸도록 설계하였다.

그림 6은 본 시스템의 주파수 응답을 측정한 그래프이다. 10 Hz부터 45 kHz 까지의 3 dB 대역폭을 확인할 수 있었다. 저주파에서 약간의 왜곡이 있는데, 이는 바이어스터의 특성 때문인 것으로 판단된다.

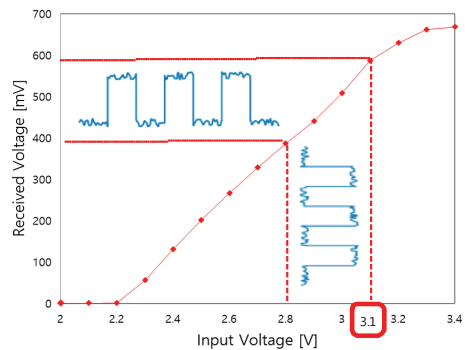


그림 5. 송/수신부의 전압 전달특성  
Fig. 5 Voltage relation between the transmitter and the receiver

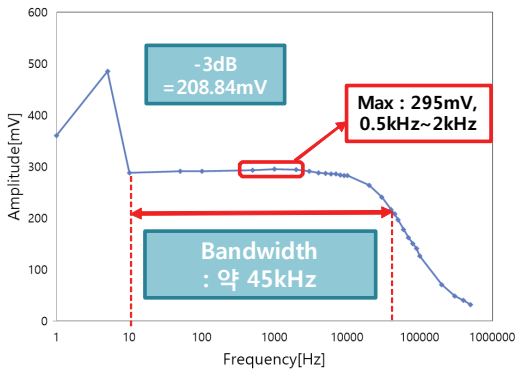


그림 6. 시스템의 주파수 응답  
Fig. 6 Frequency response of the system

### 3.2 변조지수에 따른 성능

최적의 변조지수를 찾기 위하여 변조지수에 따른 비트오율(BER, bit error rate)을 측정해 보았다. 송신 부에서 동작 전압의 최대값은 3.1 V로 설정하고 동작 전압의 최저값을 변화하면서 이에 따른 비트오율을 측정하여 그림 7에 나타내었다. 이 실험결과에 따르면, 변조지수가 높아질수록 비트오율은 좋아지나, 변조지수가 3.4 %를 넘으면 비트오율이 더 이상 좋아지지 않는 것으로 나타났다. 그리고, 변조지수가 3.4 % 일 때에 최대 100 kbps의 속도로 통신이 가능함을 확인하였다.

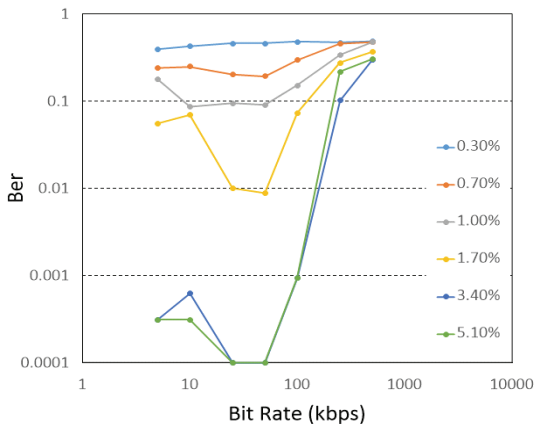


그림 7. 변조 지수와 전송률에 따른 비트오율  
Fig. 7 BER as a function of modulation index and bit rate

### 3.3 수중 광통신 실험

앞 절의 결과를 사용하여 변조지수를 3.4 %로 맞추었다. 변조지수를 이 값보다 더 올리게 되면, 통신 성능에는 큰 차이가 없지만, 평균 송신 전력이 감소하여 광전력 전송의 효율이 떨어지기 때문이다.

그림 8은 실제로 수행한 수중 광 정보 및 전력 동시실험의 사진이다. 플라스틱으로 된 관에 물을 채워 실험하였으며, 레이저 빛이 잘 보이고, 태양광의 간섭이 없는 밤에 실험을 수행하였다.

그림 9는 수중 전송거리와 데이터 전송률에 따른 비트오율의 특성이다. 이 결과에서 알 수 있듯이, 수중 전송거리가 1 m에서 50 kbps의 데이터 전송이 가능함을 확인하였다.



그림 8. 수중 전송 실험 사진  
Fig. 8 Picture of the underwater transmission experiments

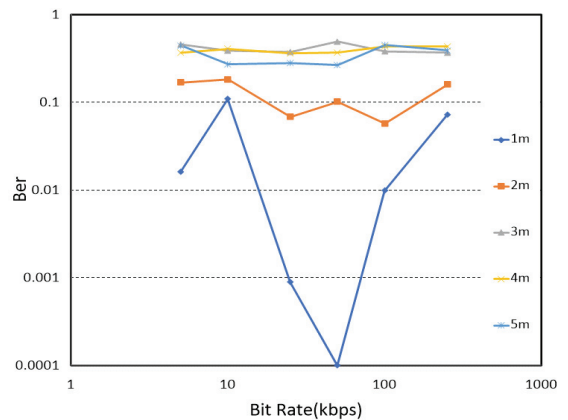


그림 9. 수중 전송 거리에 따른 BER  
Fig. 9 BER as a function of underwater transmission distance

### 3.4 수중 동시전송 결과

표 2는 3가지 경우에 대한 실험결과를 보이고 있다. 첫 번째는 광전력만 전송한 결과이고, 두 번째는

광전력과 광정보를 동시에 전송한 결과이고, 세 번째는 수중에서 광전력과 광정보를 동시에 전송한 결과이다. 세 번째의 경우에 수중 전송거리는 1 m 였고, 광정보의 전송량은 50 kbps 였다.

수중에서 1 m의 전송거리에서 수중감쇄를 포함하여 최종 DC-to-DC 전력전달 효율은 0.33 %를 보였다. 그리고 이 때에 50 kbps의 데이터를 동시에 전송할 수 있었다. 참고로 이때에 변조지수의 값은 3.4 % 였다.

표 2. 각 조건에 따른 전력전송효율  
Table 2. Power Transmission efficiency in different conditions

	Only power transfer	Simultaneous transmission in the air	Simultaneous transmission in the water
Transmitter efficiency	18.5 %	17.4 %	17.4 %
Receiver efficiency including transmission attenuation	12.2 %	10.9 %	1.9 %
Total transfer efficiency	2.3 %	1.9 %	0.33 %

#### IV. 결론

본 논문에서는 수중에서 광정보와 광전력을 동시에 전송할 수 있는 방법을 연구하여 이에 대한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 송신단 및 수신단을 최고의 효율이 나오도록 최적화를 하였고, 광전력의 효율저하가 최소한으로 되도록 광정보 전달이 가능하도록 시스템을 구성하였다.

본 논문에서 보여준 실험결과에 따르면, 수중에서 1 m의 전송거리에서 광정보 및 광전력의 동시전송이 가능하였고, 그 때에 보여준 DC-to-DC 전송효율은 0.33 %였고, 광정보의 전송용량은 50 kbps에 달하였다.

본 논문에서는 수중에서 고속으로 통신을 하면서 동시에 전력도 전송할 수 있는 방법을 제시하고 이를 실험으로 증명하였다. 본 논문의 내용이 앞으로 많은

연구자들에게 영감을 줄 수 있기를 바라는 바이다.

#### 감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2021R111A3047031).

#### References

- [1] S. Kim and D. Rhee, "Experimental demonstration of optical wireless power transfer with a DC-to-DC transfer efficiency of 12.1%," *Optical Engineering*, vol. 57, no. 8, Aug. 2018, pp. 086108.
- [2] S. Kim and H. Park, "Optimization of optical wireless power transfer using near-infrared laser diodes," *Chinese Optics Letter*, vol. 18, no. 4, 2020, pp. 042603.
- [3] J. Fakidis, S. Videv, S. Kucera, H. Claussen, and H. Haas, "Indoor Optical Wireless Power Transfer to Small Cells at Nighttime," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 13, July 2016, pp. 3236-3258.
- [4] S. Kim and H. Lee, "Study on a Laser Wireless Power Charge Technology," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 12, Dec. 2016, pp. 1219-1224.
- [5] K. Jin and W. Zhou, "Wireless laser power transmission: A review of recent progress," *J. Trans. Power Electron.* vol. 34, no. 4, Apr. 2019, pp. 3842-3859.
- [6] S. Kim, J. Choi, and H. Jung, "Experimental demonstration of underwater optical wireless power transfer using a laser diode," *Chinese Optics Letter*, vol. 16, no. 8, 2018, pp. 080101.
- [7] S. Kim and D. Kwon, "Transfer efficiency of underwater optical wireless power transmission depending on the operating wavelength," *Current Optics and Photonics*, vol. 4, no. 6, Dec. 2020, pp. 571-575.
- [8] J. Shin, T. Yun, and S. Kim, "Simultaneous Transmission of Optical Wireless Power Transfer and Optical Wireless Communication using a Laser Diode," *J. of the Korea Institute*

of *Electronic Communication Science*, vol. 16, no. 4, Aug. 2021, pp. 605-610.

- [9] L. R. Varshney, "Transporting Information and Energy Simultaneously," *IEEE International Symposium on Information Theory*, Toronto, Canada, July 2008, pp. 1612 - 1616.
- [10] K. Ye, C. Zou, and F. Yang, "Dual-hop underwater optical wireless communication system with simultaneous lightwave information and power transfer," *IEEE Photonics J.*, vol. 13, no. 6, Dec. 2021, p. 7300107.
- [11] P. D. Diamantoulakis, G. K. Karagiannidis, and Z. Ding, "Simultaneous lightwave information and power transfer (SLIPT)," *IEEE Trans. Green Commun.*, vol. 2, no. 3, Sep. 2018., pp. 764.773.
- [12] H. Jung and S. Kim, "Experimental Demonstration of 3x3 MIMO LED-to-LED Communication Using RGB Colors," *Sensors*, vol. 21, no. 14, Jul. 2021, p. 4921.
- [13] H. Jung and S. Kim, "A full-duplex LED-to-LED visible light communication system," *Electronics*, vol. 9, no. 10, Oct. 2020, p. 1713.
- [14] D. Kwon and S. Kim, "Experimental demonstration of micro LED-to-LED visible light communications," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 16, no. 2, Apr. 2021, pp. 219-225.



**신재우(Jae-Woo Shin)**

2016년~현재 경성대학교 전자공학과

2020년~현재 경성대학교 광통신 실험실

※ 관심분야 : 광통신, 무선 광통신, 광전력 전송

저자 소개



**김성만(Sung-Man Kim)**

1999년 KAIST 전기및전자공학과 공학사

2001년 KAIST 전기및전자공학과 공학석사

2006년 KAIST 전기및전자공학과 공학박사

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원  
2009년~현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신, 무선 광통신, 광 전력전송