

# Solar Cell-Photo Diode 수신기 기반 에너지 하베스팅 수중 광통신 시스템 테스트베드 및 성능 검증

임효진, 박영호, 송유재  
영남대학교

dlagywls918@ynu.ac.kr, krik0897@yu.ac.kr, yjsong@yu.ac.kr

## 요약

본 논문은 Simultaneous Lightwave Information and Power Transfer 를 지원하는 수중 무선 광통신 시스템 프로토타입을 구현한 연구로서, 기존의 광통신 속도를 저하시키지 않으며 에너지를 얻을 수 있는 가능성을 보여주며 추후 연구방향에 대해 소개한다.

### I. 서론

수중 무선 통신은 해수면 아래의 세계를 연결하는 중요한 역할을 하며, 수중 관측 및 개발 연구에 매우 중요하다. 그 중 수중 무선 광통신은 light-emitting diode(LED)나 laser diode(LD)를 활용한 송신 및 photo diode(PD)를 활용한 수신 방법이다. 빠른 데이터 전송 속도와 높은 대역폭을 가지고 있지만 링크 정렬 문제와 통신 모델의 배터리 문제가 존재한다. 그 중 배터리 문제는 수신단에 태양광 패널을 장착하여 통신과 동시에 에너지를 받는 SLIPT 기술을 이용한다면 개선할 수 있다. 본 논문은 기존에 존재하던 수중 광통신 시스템을 유지하면서 태양광 패널을 부착하여 SLIPT 성능의 upper bound 를 확인하는 연구를 진행하였고 추후 연구방향에 대해 소개하며 극복해야 할 주제들을 파악했다.

### II. 본론

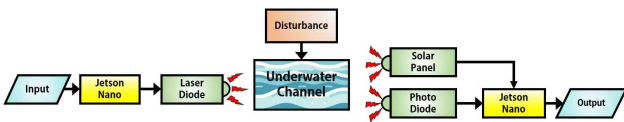


그림 1: 수중 무선 광통신 블록 다이어그램

그림 1 에서와 같이 본 연구에서는 송신단에서 LD 로 송신을 시작하면, 수신단에서 PD 와 태양광 패널에 동시에 조사되는 방법으로 진행하였다. 본 연구에서 사용한 수중 무선 광통신 시스템은 수조 1.85m, 변조 방법은 On-Off Keying 방식을 사용하였으며, 집광 렌즈가 장착된 660nm LD 를 사용하였다. 송수신단 모델으로는 Jetson Nano 를 사용하였다. 송신단의 LD 는 트랜지스터를 사용한 간접 구동형태로 이루어졌고, 수신단에서는 빛을 받아들이는 PD, 받아들인 신호를 증폭시킬 Operational Amplifier (OP-Amp), 아날로그 신호를 디지털화 시키는 트랜지스터를 통해 Jetson Nano 의 General-Purpose Input/Output 핀을 통해 데이터를 받아들인다. SLIPT 는 크게 세가지 방법을 고려할 수 있다. 시간에 따라 에너지를 받을지 데이터를 받을 지 고려하는 time switching(TS), 송신단에서 Direct Current(DC) 성분을 추가해 송신하여 수신단에서 DC 성분과 Alternating Current(AC) 성분을 분리해 데이터와 에너지를 분리하는 방법인 Power Splitting(PS), 두가지 방법을 함께 사용하는 Time Switching-Power Splitting 방법이 존재한다 [1]. 빛이라는 하나의 매개체에서 에너지와 데이터는 동

일한 스펙트럼 자원을 공유한다. SLIPT 를 사용할 경우 에너지를 전력으로 변환할 수 있는 수치인 Energy Harvesting(EH)와 데이터를 효율적으로 전송하는 수치인 Spectral Efficiency(SE)가 있다. EH 와 SE 는 상호 보완적인 관계로 최적화하는 연구가 진행 중이다 [2]. SE 은 사용된 주파수 대역폭에 대한 전송 데이터 속도이며, EH 는 사용가능한 에너지에서 수집된 에너지가 얼마나 되는지 수치로 나타낸 것이다. EH 와 SE 사이의 균형은 시스템의 전반적인 성능에 영향을 미친다. 예를 들어 너무 많은 스펙트럼을 EH 에 할당하면 데이터 전송 효율성이 떨어질 수 있고, 반대로 SE 에 너무 많은 스펙트럼을 할당하면 필요한 에너지를 충분히 확보하지 못할 수 있다.

본 연구에서는 수중 SLIPT 성능(EH 및 SE)의 upper bound 를 확인하기 위해, 수신단에서 PD 와 solar panel 의 동시 사용을 고려하는 수중 무선 광통신 시스템 프로토타입을 구현하였다.

사용한 태양광 패널은 50mm\*50mm 크기이며 중앙에 구멍이 뚫려 있는 형태이다. 그림 2 와 같이 구멍에 기존 시스템에 이용하던 포토다이오드를 넣어서 구성하였다. 태양광 패널에 빛을 660nm LD 을 PD 에 조사하였을 때 1.85m 의 수조 길이가 있기 때문에 PD 뿐만 아니라 태양광 패널에서 빛이 함께 조사된다. 이때 태양광 패널에서는 중앙부 기준 0.7V~1.0V 정도의 전압이 출력된다.

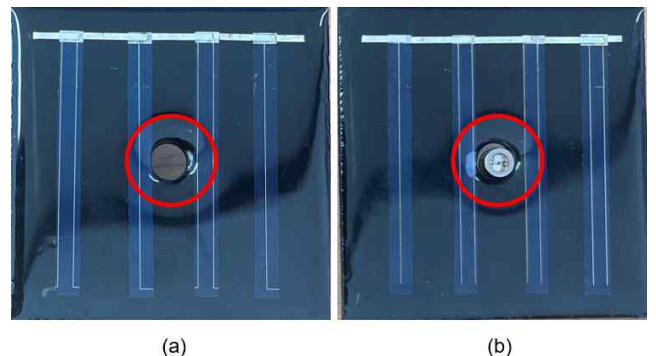


그림 2: Photo Diode (a) 장착 전 (b) 장착 후

실제로 수신을 담당하는 모델에 충전을 하기 위해서는 모델의 배터리 전압보다 높은 전압을 통해 충전을 해야 한다. 이를 위해 여러 개의 태양광 패널을 직렬 혹은 병렬로 연결하게 되면 각 패널에서 나오는 전압 및 전류가 합해지므로 충전에 필요한 전압 및 전류를 구성할 수 있다. 또한 태양광 패널의 출력이 아날로그 형태이기 때문에 AC 를 DC 로 바꿔주는 알고리즘이 필요한 PS 와 TS-PS 방법은 AC to DC Converter 가 필요하다.

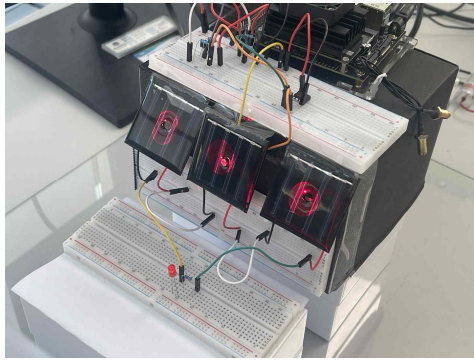


그림 3: 태양광 패널로 LED 작동 및 송수신

그림 3은 요구하는 전압을 만들기 위한 실험으로 적색 LED를 켜기 위한 태양광 패널 3개를 추가로 구성한 것이다. 중앙에 있는 태양광 패널은 PD를 포함하고 있어 통신과 충전을 동시에 담당하게 된다. 송신부에 LD를 2개 추가 설치하여 LED를 작동하기 위한 전압을 추가해주었다. 실제 수조를 통과하면 1개의 태양광 패널에서 0.9V의 전압이 측정되는데 적색 LED를 구동하기에는 부족한 전압이다. 따라서 태양광 패널을 3개를 직렬 연결하여 적색 LED를 구동하기에 충분한 전압을 인가하였다. 기존에 존재하던 시스템에 별다른 알고리즘 없이 태양광 패널을 부착한 시스템으로 기존 통신속도인 10Kbps의 통신속도를 유지하면서 SLIPT를 확인 할 수 있었다.

LD의 특성상 Field Of View(FOV)가 LED에 비해 작다. 이는 링크 정렬의 어려움을 가져올 뿐만 아니라 넓은 빛을 받아야 하는 태양광 패널의 특성에도 맞지 않을 수 있다 [4]. 현재 사용하고 있는 660nm LD의 초기 직경은 1.5cm이다. 31m 떨어진 곳을 조사하였을 때 직경은 17cm로 약 11배 정도 크기 차이가 난다. LD와 태양광 패널이 근접해 있을 때 빛을 조사하면 800mV의 전압을 생성하고 2m 부근까지 1V로 상승하다가 5m 50cm까지 1V의 전압을 유지했다. 그 후 26.5m 거리에 도달하면 600mV 전압을 출력했다. 이는 송신부와 수신부가 적절한 거리를 유지해야 함을 의미한다. 통신 거리가 너무 멀리 있을 경우에는 태양광 패널에 전체적으로 조사되더라도 빛의 세기가 매우 약하여 제대로 된 전압을 출력하지 못한다. 반대로 너무 가깝더라도 태양광 패널의 국소적으로 빛이 조사되며 해당 부분의 태양광 셀이 출력할 수 있는 전압이 한정적이기 때문에 적은 전압을 출력하게 된다. 따라서 적절한 세기로 적절한 면적을 조사할 수 있도록 송신단의 추가적인 움직임을 통해 최대거리로 성능을 보장하는 최적화 알고리즘을 통해 운용해야 할 것이다.

### III. 추후 연구방향

본 논문에서는 기존에 사용하던 수중 광통신 시스템에 태양광 패널을 부착하여 기존의 통신 속도에 영향을 미치지 않고 SLIPT를 재현한 시스템을 구현하였다. 현재 진행되고 있는 연구에서는 추가적인 증폭회로가 필요 없는 태양광 패널만을 이용해 수신단의 회로를 단순하게 만드는 것을 목표로 하고 있다 [3]. 그리고 필요한 배터리에 전압에 맞게 태양광 패널의 개수를 조절하거나 통신 속도가 빠른 Gallium-arsenide PV cell이나 EH이 높은 Monocrystalline silicon solar panel을 사용하는 연구를 진행하여야 한다 [1]. 추후 SLIPT 연구에서는 태양광 패널만을 사용하여 하기 때문에 TS, PS, TS-PS 방법과 같은 최적화된 알고리즘을 사용하여 적절한 EH와 SE의 비율을 조정해야 할 것이며 LD의 FOV를 고려하여

성능을 보장하는 거리를 유지할 수 있도록 하는 송신단의 알고리즘이 필요할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] M. Uysal, S. Ghasvarianjahromi, M. Karbalayghareh, P. D. Diamantoulakis, G. K. Karagiannidis and S. M. Sait, "SLIPT for Underwater Visible Light Communications: Performance Analysis and Optimization," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 10, pp. 6715-6728, Oct. 2021, doi: 10.1109/TWC.2021.3076159.
- [2] A. M. Abdelhady, O. Amin, B. Shihada and M. -S. Alouini, "Spectral Efficiency and Energy Harvesting in Multi-Cell SLIPT Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 5, pp. 3304-3318, May 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2972314.
- [3] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv and H. Haas, "On the Design of a Solar-Panel Receiver for Optical Wireless Communications With Simultaneous Energy Harvesting," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 8, pp. 1612-1623, Aug. 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2391811.
- [4] Chuying Yu, Xiao Chen, Zejun Zhang, Guangbin Song, Jiamei Lin, Jing Xu, Experimental verification of diffused laser beam-based optical wireless communication through air and water channels, Optics Communications, Volume 495, 2021, 127079, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127079>.