

## 플라스틱 광섬유의 손실 특성을 활용한 아크플래시 위치추적 방법

정훈일 · 김영호 · 김영웅 · 노병섭 · 김명진<sup>+</sup>

### Method for Locating Arc-events by Utilizing Transmission Loss of Plastic Optical Fiber

Hoonil Jeong, Young Ho Kim, Youngwoong Kim, Byung Sup Rho, and Myoung Jin Kim<sup>+</sup>

#### Abstract

For an arc-flash protection system, the selection of arc-flash sensor in implementation is largely dependent on the coverage area and the spatial resolution. Typically, a point sensor is used to accurately measure an arc event within a very narrow region; whereas, a loop or a line sensor can cover several electrical compartment at the same time, but with a poor resolution. In this work, a novel scheme for an arc-flash sensor was developed by making use of the transmission loss of plastic optical fibers (POFs) to cover a broad range with a high spatial resolution. By relating the amplitude ratio of the arc-signals at the ends of the POF with the arc-location, arc events could be located with a resolution of ~5 cm within a spatial range of 10 m, which has not been reported yet.

**Keywords:** Optical losses, optical fiber sensors, sensor phenomena and characterization.

#### 1. 서 론

전기적 방전에 의한 아크플래시(Arc-flash)는 전력설비 분야에서 해결해야 할 난제 중 하나로 잘 알려져 있는 현상이다. 배전반 내부의 도체는 공기 등의 절연체로 분리되어있는데, 도체간의 간극이 너무 좁거나 전계의 세기가 절연과파 수준을 초과하게 되면 주변 공기가 이온화되며 아크플래시가 발생한다. 고온과 고압의 에너지를 수반하는 아크플래시는 장비나 주변의 작업자에 심각한 피해를 일으킨다[1-5]. 아크플래시 발생 후 200 ms가 지나면 배전반 내부의 대부분의 금속이 녹기 시작하는 등 그 피해 규모는 시간에 비례하기 때문에 아크플래시 발생 후 전원 차단 등 후속대처가 신속하게 이루어져야 한다[5-7].

아크플래시 사고로 인한 피해를 경감시키기 위한 방법으로서 전류센서 및 차단기가 일반적으로 사용되어 왔으며, 압력 센서 또한 아크플래시에 의한 압력 변화를 감지하기 위해 활용된 바 있다[8-11]. 최근에는 광센서가 보통 2.5 ms 이내의 반응속도를

보이면서 가장 빠른 보호 수단으로서 주목받고 있다[12]. 한편, 광센서는 포인트 센서와 광섬유를 이용한 루프 또는 라인센서로 구분되며, 종류에 따라 감지영역과 위치 정확도에 대해 대조적인 특성을 가진다. 예를 들면, 포인트 센서는 우수한 감도와 더불어 센서 주변의 아크 발생에 대한 대략적인 위치 정보를 제공한다[7]. 또한, 넓은 범위에 적용하기 위해서 다수의 센서와 연결 장치(interconnection)가 요구되는 등 적지 않은 비용과 설치 시간이 소요되는 단점이 있다. 반면, 루프 센서의 경우 한 가닥의 광섬유를 다수의 전기 장비에 적용할 수 있어 설치 및 운용 비용을 경감시킬 수 있다. 더욱이, 센서의 양 끝단에 송신부(Tx, Transceiver)와 수신부(Rx, Receiver)를 설치하고, 동기화된 신호의 변화를 모니터링하는 방법을 통해 센서 시스템의 이상 유무를 자체적으로 모니터링 할 수 있는 장점이 있다[13]. 그러나 이들 광센서를 이용하여 아크플래시의 발생 위치를 정확히 추적하는 방법은 아직 보고된 바 없다.

본 연구에서는 광섬유 라인센서를 통해 아크플래시의 발생 위치를 추적할 수 있는 방법을 구현하였다. 먼저, 플라스틱 광섬유(POF, Plastic Optical Fiber)의 길이 방향으로 발생된 아크플래시 신호를 양 끝단에 설치된 포토 디텍터(photodetector)를 통해 측정하였다. 이를 통해 실험적으로 얻어진 광섬유 내 광신호 감쇠상수는 약 1.3 dB/m으로서 양 끝단에서의 신호세기 비율은 아크플래시의 발생 위치와 1:1 대응을 보였고, 역으로 아크플래시 발생 위치가 신호 세기 비율을 통해 추적될 수 있었다.

한국광기술원 나노광전연구센터 (Nano Photonics Research Center, Korea Photonics Technology Institute)  
9, Cheomdan venture-ro 108beon-gil, Buk-gu, Gwangju, 500-799, South Korea  
<sup>+</sup>Corresponding author: mjinkim@kopfi.re.kr  
(Received: July. 21, 2016, Accepted: July. 28, 2016)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

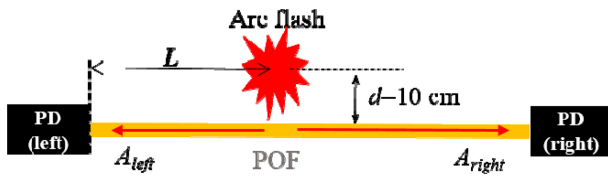


Fig. 1. The experimental scheme for locating an arc-generation. The separation  $d$  was kept to be 10 cm while the distance  $L$  was varied from 1 m to 10 m.  $A_{left}$  ( $A_{right}$ ) is the measured signal for an arc event at  $L$  at the left (right) end of the POF.

## 2. 실험 방법

### 2.1 아크플래시 위치 추적을 위한 센서 구성

아크플래시 검출을 위해 광섬유를 사용하는데 있어서 가장 중요한 점은 광섬유 표면을 통해 입사되는 빛에 대한 낮은 측면 수광 효율을 극복하는 것이다. 기존의 방법들은 내재된 낮은 효율을 극복하기 위해 추가적인 공정과, 그에 수반되는 공정비용이 필요하다[14,15].

본 논문에서는, 빛의 전송 손실 및 산란 특성을 측정 알고리즘에 적용하면 광섬유 코팅 등과 같은 부가적 공정 처리가 되지 않은 일반적인 플라스틱 광섬유를 통해서도 빛을 감지할 수 있음에 주목하였다. 이러한 관점에서, 실리카(silica) 광섬유 보다 높은 전송손실 특성(> 100 dB/km)을 보이는 메타크릴산메탈 수지 (PMMA, Polymethyl methacrylate)로 제작된 POF를 센서로 사용하였다[16,17].

광섬유의 센서부로서의 성능은 Fig. 1과 같은 구성으로 분석되었다. 이때, 아크플래시 광원으로는 제논 (Xenon) 램프(300-850 nm)가 사용되었으며, 광원의 불안정성을 보상하기 위해 각 신호는 10번의 측정을 통해 평균화 되었다. POF로 결합된 아크플래시 신호는 Alphalas UPD200 포토 다이오드(PD, photodiode)를 이용하여 측정하였고, 위치 추적을 위해 POF의 양 끝에 2개를 설치하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 플라스틱 광섬유 라인센서를 통한 아크플래시 위치 추적법

아크플래시 검출을 위해 상보적으로 활용되는 포인트 센서와 광섬유 라인 센서는 검출 범위와 공간 분해 측면에서 대조적인 특징을 가지고 있다[7]. 포인트 센서는 아크플래시가 발생된 위치 부근의 작은 영역에서 측정하기 때문에 위치 추적에 있어서 다소 유리한 면이 있지만, 넓은 범위의 적용을 위해서는 다수의 센서가 필요하다. 한편, 라인센서나 루프 센서와 같이 광섬유를

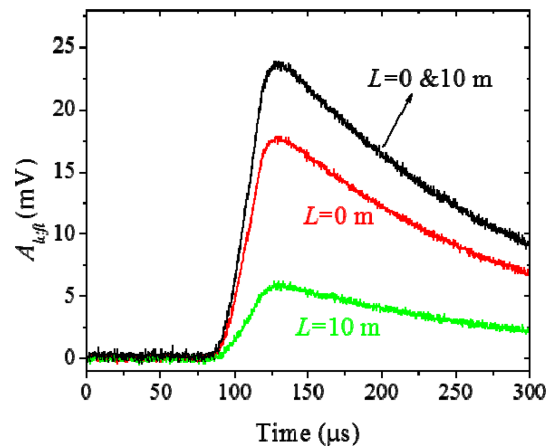


Fig. 2. Measured signals of arc-flashes separated by 10 m. The time-domain behaviors were not distinguished; on the other hand, the amplitude could be resolved with respect to the distance  $L$ .

사용하는 경우, 아크플래시의 위치에 관한 정보가 시간영역에서 구분하기 어렵기 때문에 훨씬 낮은 공간분해 특성을 보인다. 예를 들면, 동시에 발생되는 두 아크플래시의 간격이 10 m라고 가정할 때, 광섬유를 통해 PD에 도달하는 시간의 차이는 5 ns에 불과하다. 따라서, 아크 발생 후 검출된 신호의 상승시간(rise time)과 감쇠시간(decay time)을 비롯한 아크플래시의 시간영역 동역학 특성은 대부분 수십  $\mu$ s 이상임을 고려하면 정확한 발생 위치를 분석하기 어렵다.

Fig. 2는 아크플래시 발생에 대해 하나의 PD만을 이용하여 아크 인가 위치에 따른 검출신호로서의  $A_{left}$ 는 광신호를 전기신호로 광전변환한 값이다. 이는 배전반 등에서 발생하는 아크플래시의 세기가 일정하지 않기 때문에 실제 파형을 예측하기 어렵다는 것을 고려하면 Fig. 2와 같은 파형 분석을 통한 위치 추적을 더욱 어렵게 한다.

따라서, 본 연구에서는 광섬유를 따라 검출되는 광량의 비교를 통해 공간 분해 성능을 구현하기 위해서 POF 양 끝에서 검출된 두 아크플래시 신호의 세기( $A_{left}$ 와  $A_{right}$ )를 아크플래시의 발생 위치  $L$ 의 함수로 식 (1)과 같이 정의 하였다.

$$A_{left}/A_{right} = \frac{e^{-\alpha L}}{e^{-\alpha(10-L)}} = e^{-2\alpha(L-5)}, \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ 는 POF의 감쇠 상수를 의미한다. 식 (1)의 양변에 로그함수를 취한 후 식을 정리하면, 위치  $L$ 은 다음과 같이 신호세기의 비율의 함수로 표현할 수 있다.

$$L = 5 - \frac{1}{2\alpha} \ln(A_{left}/A_{right}) \quad (2)$$

식 (2)에 의하면 아크가 발생한 거리  $L$ 은 광섬유 양단에서 측정된 출력신호의 세기의 비율과 광섬유의 전송손실 특성의 함수로 정의된다. 또한, 실제 발생한 광의 세기는  $A_{left}$ 와  $A_{right}$  각

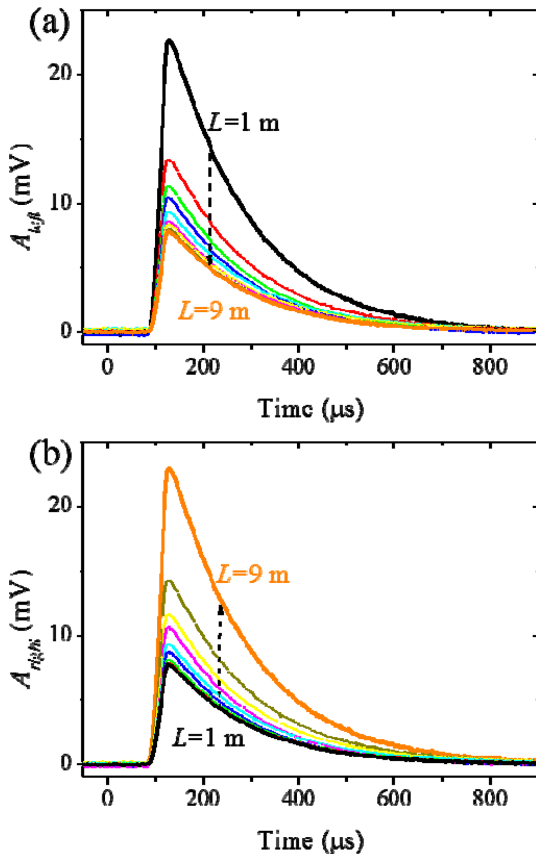


Fig. 3. Measurement results of arc-flashes generated at different  $L$  from (a) the left and (b) the right end of the POF.

각에 대해 절대값을 취함으로써 정의할 수 있다. 따라서, Fig. 1 과 같은 구성을 통해 아크가 발생한 위치와 크기를 동시에 측정하는 것이 가능하다. Fig. 3은 이에 대한 실험적 결과로서 POF의 왼쪽과 오른쪽 끝에서 각각 측정된 아크플래시 신호이다. 시간영역 특성은 거리  $L$ 에 의존적이지 않으며 두 개의 PD에서 검출된 신호의 비율로 정의할 수 있음을 보여준다. 상승 시간은 약  $40 \mu\text{s}$ , 감쇠 시간은 상승시간보다 약 4배 정도 길었으며, 시스템의 반응은 약  $90 \mu\text{s}$ 의 지연을 보였다. 반면, 전송 손실의 영향으로 신호의 세기  $A_{left}$ 는 거리  $L$ 에 따라 지수함수적으로 줄었다. 특히, 오른쪽 끝에서 측정된 신호의 세기  $A_{right}$ 는 거리  $L$ 에 대해  $A_{left}$ 와 정반대의 경향을 보임을 확인할 수 있다.

거리  $L$ 에 따른 신호의 세기변화를 정량화 하기 위해  $A_{left}$ 와  $A_{right}$ 의 피크 값들을 Fig. 4와 같이 추적하였다. 그 결과로서 피크 값 변화의 경향들은 중심부인  $L = 5 \text{ m}$  지점을 중심으로  $7.5 \text{ mV}$  부터  $23 \text{ mV}$ 의 값 사이에서 대칭적이였다. 신호의 세기-거리  $L$  관계의 분석을 통해, 아크플래시의 전송손실은 약  $1.3 \text{ dB/m}$  ( $\alpha = 0.32 \text{ m}^{-1}$ )임을 알 수 있었으며, 이 값은 PMMA에서 UV 영역 ( $< 400 \text{ nm}$ ) 빛의 감쇠 상수에 해당한다[16,18]. 측정에서 사용된 제논 램프의 파장범위 ( $300 \text{ nm} \sim 850 \text{ nm}$ )를 고려하면, 가시광 영역의 빛은 약  $0.1 \text{ dB/m}$ 의 상대적으로 작은 감쇠 때문에

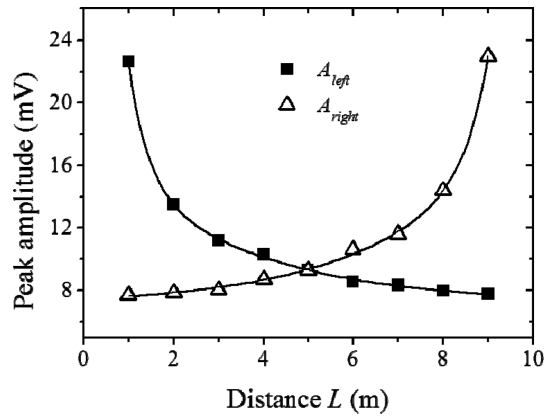


Fig. 4. Peak amplitudes of the arc-signals as functions of  $L$ . The filled squares (empty triangles) represent the peak values of  $A_{left}$  ( $A_{right}$ ) and the solid lines are the best-fit exponential curves of the data.

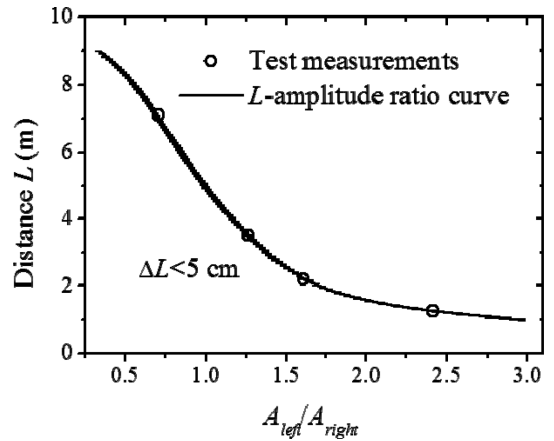


Fig. 5. The spot for an arc-generation can be traced simply by measuring  $A_{left}/A_{right}$  with a spatial resolution  $\Delta L$  of  $\sim 5 \text{ cm}$ . The test results (empty circles) show a good agreement with the curve.

광섬유로 거의 결합이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 나아가, 효과적인 측면 수광을 위해서는 광섬유의 전송 손실이  $1 \text{ dB/m}$ 보다 커야 함을 실험결과로부터 확인하였다.

한편,  $A_{left}$ 와  $A_{right}$ 에 대한 각각의 Fitting curve를 Fig. 4와 같이 표현할 수 있으며 앞에서 예상한 바와 같이 두 결과가 대칭임을 알 수 있다. 이로부터 Fig. 5와 같이 아크 발생 위치  $L$ 은 두 신호 세기의 비율로 표현할 수 있다. 아크플래시의 위치 추적에 있어 관계곡선의 유효성을 검증하기 위해  $10 \text{ m}$  광섬유 길이 방향으로 임의의 네 지점에서  $A_{left}/A_{right}$ 값과 이에 따른  $L$ 값들을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 측정 결과에 의하면 한 가닥의 POF를 따라 양쪽에서 측정된 광신호의 세기의 비율로부터 아크플래시의 발생 위치를 추적할 수 있었으며, 특히  $\Delta L = 5 \text{ cm}$  정도의 매우 우수한 공간 분해능으로 분석할 수 있음을 알 수 있다. 이때, 공간 분해능의 수준은  $L-A_{left}/A_{right}$  관계곡선의 오차에서 기인하는 것으로 관계곡선을 정의할 때 반복테스트를 통

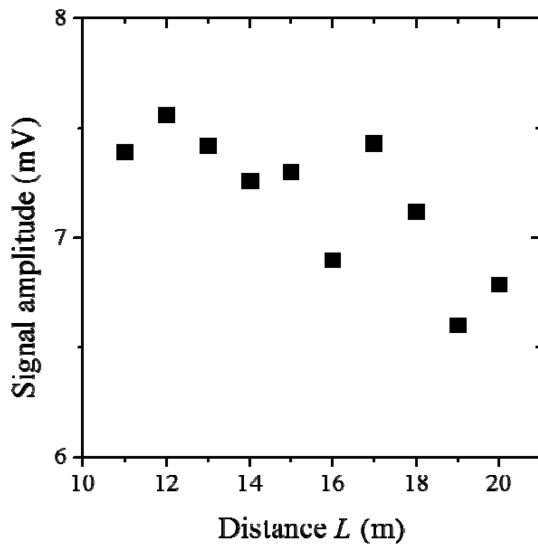


Fig. 6. Peak amplitudes of the arc-signals for  $L > 10$  m, where the amplitude cannot be resolved with respect to the distance  $L$ .

한 평균화 수를 증가시킴으로써 아크 발생 위치에 대한 공간 분해능을 더욱 향상시킬 수 있다.

한편, POF 내 전송 손실이 약 1 dB/m임에 따라 길이 10 m 이내에서 90% 이상 광신호의 감쇄가 일어나므로 그 이상의 거리에서는 추가적인 감쇄에 따른 검출 정확도가 낮아지는 결과를 보였다. 이에 대해 Fig. 6에서 보여진 실험결과를 보면, 광섬유 길이 10~20 m 범위에서 아크 발생 위치를 1 m 간격으로 변화하면서 측정한 결과 10 m 이내 범위에서 측정한 값보다 검출 신호의 변화폭이 매우 작음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 아크플래시가 발생한 위치를 추적하기 위한 광섬유센서를 실험적으로 구현하였다. 특히, 광섬유 측면을 통해 입사된 빛이 광섬유를 따라 전파하면서 발생하는 광섬유의 전송손실 특성을 이용하였으며, 실험에는 약 1 dB/m 정도의 전송손실을 갖는 플라스틱 광섬유를 사용하였다. 위치 추적에 사용된 광섬유의 길이는 10 m 정도이며, 광섬유 측면을 통해 입사된 빛이 광섬유 양단에 위치한 광수신부를 통해 검출되도록 구성하였다. 이때, 아크 발생 위치는 양단에서 측정된 신호의 상대적 비율로 표현됨을 이론적으로 분석하였다. 이를 토대로, 10 m 이내로 설치된 광섬유 주위에서 발생하는 아크플래시를 약 5 cm의 오차로 분석할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 구현된 아크플래시 센서는 국부적으로 설치하여 아크 발생 위치를 알 수 있는 포인트 광센서와 넓은 범위에 걸쳐 감지할 수 있는 광섬유 센서의 장점을 모두 가짐에 따라 아크플래시 센서의 제작과 설치 과정의 효율이 크게 향상될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20131020400970).

#### REFERENCES

- [1] R. Lee, "Pressures developed by arcs", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. IA-23, pp. 760-764, 1987.
- [2] R. Lee, "The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 1A-18, No. 3, p. 246, 1982.
- [3] T. E. Neal, A. H. Bingham, R. L. Doughty, "Protective Clothing Guidelines for Electric Arc Exposure", *IEEE Petrol. Chem. Ind. Conf. Rec.*, 1996, pp. 281-298.
- [4] "Electric Arc: The Unpredictable Phenomenon", ABB publication, 2006.
- [5] R. A. Wilson, R. Harju, J. Keisala and S. Ganesan, "Tripping with the speed of light: Arc flash protection", *Proc. 60th Annu. Conf. Protective Relay Eng.*, pp. 226-238, 2007.
- [6] IEEE Guide for Arc-Flash Hazard Calculations, IEEE Standard 1584-2002.
- [7] <http://www.avagotech.com/docs/AV02-4503EN> (retrieved on July 10, 2016).
- [8] C. Inshaw and R. Wilson, "Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation", *2006 Texas A&M Relay Conference*.
- [9] A. C. Bast, J. L. Bennett, N. E. Reifsnnyder, R. Mages, P. Cooper, "A Total Approach to Arc Flash Compliance", *Power-Gen International 2006 Conference*.
- [10] J. Vico, P. Parikh, D. Alcock and R. Luna, "A novel approach for arc flash detection and mitigation, at the speed of light and sound", in *Proc. IEEE Petroleum Chemical Ind. Conf. Rec.*, 2012, pp. 1-8.
- [11] J. Wu, H. Xia, R. Deveaux, Z. Mao, D. J. Allcock, and Q. Chen, "Arc flash detection system and method", *U.S. Patent* 20110267620, Nov. 2, 2011.
- [12] ABB Buyers Guide, REA 10\_Arc Protection Relay, 1MRS750929-MBG, May 1999.
- [13] Y.-W. Jeong, H.-W. Lee, Y.-S. Sin, and Y.-K. Kim, "Solution for internal arc flash hazards in air insulated switchgear", *21st International Conference on Electricity Distribution Frankfurt*, 6-9 June 2011.
- [14] See, e.g., <http://www.littelfuse.com/products/protection-relays-and-controls/protection-relays/arc-flash-detection.aspx> (retrieved on July 10, 2016).
- [15] See, e.g., <http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/mn026006en.pdf> (retrieved on July 10, 2016).
- [16] J. Zubia and J. Arrue, "Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications", *Opt. Fiber Technol.*, Vol. 7, pp. 101-140, 2001.
- [17] J. Arrue and J. Zubia, "Components choice to lengthen low

speed plastic-fiber-optical communications links”, in *Proc. Third International Conference on Plastic Optical Fibres and Applications-POF'94*, Yokohama (Japan), 1994, pp. 78-81.

[18] N. Ioannides, E. B. Chunga, A. Bachmatiuk, I. G. Gonzalez-

Martinez, B. Trzebicka, D. B. Adebimpe, D. Kalymnios and M. H. Rummeli, “Approaches to mitigate polymer-core loss in plastic optical fibers: a review”, *Mater. Res. Express*, vol. 1, no. 3, p. 032002, Sep. 2014.