

배전반 화재 감시 시스템 구축을 위한 광섬유 센서 개발에 관한 연구

Study on Development of a Fiber Optic Sensor for Fire Monitoring System in Switchboard

위은재* · 최용운** · 김영복*** †

Eun-Jae Wi*, Yong-Woon Choi** and Young-Bok Kim*** †

(Received 10 July 2024, Revision received 13 August 2024, Accepted 13 August 2024)

초록 : 본 논문에서는 배전반 화재사고 방지용 모니터링 시스템 구축을 목적으로, 이상 상태를 감지하기 위한 센서개발을 목표로 하고 있다. 배전반 내에서 발생하는 화재는 배선의 접속불량에 따른 과열에 기인한 것이 대부분이다. 즉 차단기, 분배기 등에 연결·접속되는 전선의 접속상태가 불량한 경우에는 열이 발생하고, 이러한 상황이 지속되어 화재로 이어지게 된다. 일반적으로 배전반은 박스형태이고 내부 공간도 좁아 실시간으로 내부상황을 파악하기가 어렵다. 또한 복잡한 배선, 고압, 전자장이 존재하는 열악한 조건에서도 화재발생 가능성을 사전에 감지할 수 있는 센서개발이 필요하다. 본 논문에서는 효과적이고 안정적으로 배전반 내부상황을 감지하기 위한 광섬유기반 온도센서를 개발한다. 광섬유 센서를 기반으로 센싱시스템을 구성하고 기초실험을 통해 그 유효성과 활용성을 평가한다.

키워드 : 배전반, 화재사고, 모니터링 시스템, 광섬유센서, 센싱시스템

Abstract : This paper deals with development of a sensor for detecting abnormal conditions in electric power switchboard. Most fires occurring in switchboard are caused by overheating due to poor wiring connections. In other words, the temperature rises an abnormal condition which leads to a fire accident if the connection status of the power wire connected to the circuit breaker and distributor is poor. In general, the switchboard is box-shaped and the internal space is narrow such that it is difficult to grasp the internal state in real time. Despite the harsh conditions of complex wiring, high voltage and electromagnetic fields, it is absolutely necessary to develop sensors that can proactively monitor the possibility of fire outbreaks. In this paper, we develop an optical fiber-based temperature sensor that can effectively and reliably monitor the internal conditions of the switchboard. We evaluate its effectiveness and usability through basic experiments on a sensing system based on an optical fiber sensor.

Key Words : Switchboard, Fire Accident, Monitoring System, Optical Fiber Sensor, Sensing System

*** † 김영복(<https://orcid.org/0000-0001-6035-6744>) : 교수,
국립부경대학교 기계시스템공학전공
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*위은재(<https://orcid.org/0009-0004-4016-0305>) : 대학원생,
국립부경대학교 대학원 기계시스템공학과
**최용운(<https://orcid.org/0009-0007-8084-456X>) : 교수, SOKA
대학 공학부

*** † Young-Bok Kim(<https://orcid.org/0000-0001-6035-6744>) :
Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong
National University.
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*Eun-Jae Wi(<https://orcid.org/0009-0004-4016-0305>) : Doctorate
Student, Department of Mechanical System Engineering, the
Graduate School, Pukyong National University.
**Yong-Woon Choi(<https://orcid.org/0009-0007-8084-456X>) :
Professor, Faculty of Science and Engineering, SOKA University.

1. 서론

본 논문에서는 배전반 내에서 발생하는 화재¹⁾를 사전에 감지하고 예측하기 위한 모니터링 시스템 구축 기술개발에 대해 고찰하고 있다.

배전반 화재는 전기화재사고 중에서 가장 큰 비중을 차지한다.(Fig. 1 참조) 배전반은 수전 후 변압과정을 거쳐 전력을 전송하기 직전단계에 필요한 것으로 개폐기, 과전류차단기, 전압계, 전류계, 전력계 및 전력량계 등으로 구성된다. 또한 배전반에는 메인 차단기와 이것으로부터 전력을 공급받아 각각의 부하로 전력을 공급하는 다수의 분기 차단기도 설치된다. 그리고 전력케이블과 메인 차단기는 메인 버스바와 서브 버스바를 통해 연결된다. 배전반 화재발생 원인 대부분은 연결부에서 비정상적인 물리적 특성의 변화에 의한 것이다. 즉 버스바의 경우, 메인버스바와 서브버스바를 연결하는 연결부의 접촉불량에 따른 과열이 화재로 이어지게 된다. 버스바 연결부뿐만 아니라 전력계통에서의 모든 연결부에서도 접촉불량에 따라 전기저항이 증가하면 과열로 인해 화재사고로 이어질 수 있다.

화재사고를 예측하고 감지하기 위한 가장 단순한 방법은 온도변화를 계측하는 것이다.

지금까지 개발되어 활용되고 있는 대부분의 화재감시시스템은 온도센서를 기반으로 하고 있다.

예를 들어, 열화상카메라로 특정부위를 촬영하여 온도변화를 계측하는 것이 가장 일반적인 기술이라 할 수 있다.



Fig. 1 A fire accident in switchboard¹⁾

그러나 배전반 내에 카메라를 설치할 경우, 배전반 내부공간이 좁아 촬영하여 감시할 수 있는 영역이 특정 부분으로 제한된다. 따라서 모든 접속부를 감시하기 위해서는 열화상카메라의 설치갯수가 증가할 수밖에 없다. 만일 대규모 사업장이나 시설의 경우에는 설치된 배전반 수도 엄청나기 때문에 기존방식으로는 효율적이고 안정적인 화재방지시스템 구축이 어렵다. 이와 같은 기술적인 한계로 인해 활용성이 떨어지고, 그렇다고 대체기술이라 할 수 있는 뚜렷한 대안이 제시되지 못하고 있는 상황이다.

그래서 본 연구에서는 광섬유 기반의 온도센서를 이용하여 배전반 내 과열상황을 모니터링할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 광섬유 센서는 광섬유 자체를 온도센서로 활용하는 기술이다. 일반적으로 광섬유 센서는 전자장 영향을 받지 않고, 고전압, 고전류가 존재하는 조건에서도 광섬유 자체의 물리적 특성은 아무런 영향을 받지 않는다는 것이다.

반대로 전기식 센서는 고전압을 사용하는 조건에서는 전자장 영향에 의한 신호왜곡으로 정상적인 계측이 어렵다. 그러나 광섬유 센서는 전자장 영향을 거의 받지 않기 때문에 배전반과 같은 시설과 장비의 상태감시용으로는 최적의 도구라 할 수 있다.

그래서 본 연구에서는 먼저, 광섬유 센서의 물리적 특성을 설명하고, 이를 기반으로 배전반 상태모니터링을 위한 센서활용전략과 방법에 대해 소개한다. 배전반 상태모니터링을 위해 필요한 정보는 온도이다. 배전반에 설치된 부속장치, 특히 차단기 및 전력분배기 등에서 발생하는 과열현상을 효과적으로 계측할 수 있는 센싱기술을 개발한다. 광섬유 센서를 기반으로 한 센싱시스템 파일럿 모델을 제작하고 실험을 통해 센서로서의 활용가능성을 검증하도록 한다.

2. 광섬유 센서의 물리적 특성

2.1 헤테로코어형 광섬유 센서

광섬유센서는 광파이버선(optical fiber) 자체를

센서로 이용하는 기술이다. 광섬유센서가 주목을 받는 이유는 내부식성, 저전력소비는 말할 것 없고 전자장의 영향을 거의 받지 않기 때문이다. 또한 광섬유는 전기신호를 전달하는 것이 아니기 때문에 전력소모가 적어 케이블 길이에 대한 제약도 적다. 이러한 장점으로 광섬유 자체에 센서 기능을 부여한 것으로는 BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer), FBG(Fiber Bragg Grating) 등이 있다.²⁻⁹⁾ 이러한 센서도 각각의 장점을 갖고 있지만 제조과정이 어렵고 복잡하며 고가이고, 전문가가 아니면 센싱시스템 구성이 거의 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 저자 등은 헤테로코어형(Hetero-core Type) 광섬유센서를 개발하였다.¹⁰⁻¹³⁾ 이 센서는 광섬유 자체에 센서기능을 부가한 것으로, 섬유외곽의 변화를 이용하여 물리적특성 변화를 계측하도록 고안되었다. 헤테로코어 센서의 센싱기능이 어떻게 하여 만들어지는지는 Fig. 2를 통해 설명한다. 그림에 나타난 것과 같이 광섬유 케이블의 정보전달 기능은 코어부를 통해 이루어진다. 광케이블 피복을 전부 제거하고 나면 최종적으로 남은 부분이 코어부이고 코어부 직경은 다양한 크기로 제조된다. 본 연구에서 사용하는 헤테로코어 센서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 코어부의 직경이 다른 두 가지 광섬유로 제작된다.

기본적으로는 코어부 직경이 9 μm 인 케이블을 절단하여 그 사이에 직경 5 μm 광섬유를 삽입하여 융착한다. 구조상 9 μm 케이블을 광전송로라 하면 이것으로 입력되어 전달되는 광전송량은 5 μm 코어부에서 손실이 발생하게 된다. 더욱이 융착부분이 구부러지게 되면 광누설량은 더욱 증가한다. 이때 코어부 벤딩이 일어나게 하는 물리적 변화(직선적 변화)와 광누설량의 관계가 선형적이라는 것은 이전 연구 결과를 통해 확인되었다.^{10,11)} 즉 Fig. 3에서와 같이 코어부 좌우 양 끝단을 고정 한 후 수평방향으로의 변화를 주면 코어부는 구부러지게 된다. 이때의 수평적 변화와 코어부 벤딩을 통한 광전송량의 변화는 선형적인 특성을 나타낸다. 이러한 특성을 이용하여 구조물의 크랙, 변형 등을 검지하는 용도로 활용된다. 또한 변

형정도에 대한 광섬유센서의 반응이 상당히 정교하고 민감하여 미소변화에 대해서도 선형적으로 물리특성을 측정할 수 있다는 것이다. 즉 수 μm 단위의 크랙이나 변형도 측정할 수 있다.

결론적으로 온도변화를 광섬유센서 센싱부 벤딩변화로 변환하는 것으로 정교한 온도측정이 가능하게 된다. 즉, Fig. 3과 같이 온도변화에 따라 광센서 센싱부가 구부러지고 퍼지도록 고안하면 온도센서로 활용할 수 있게 된다. 예를 들어 Fig. 3에서 (a)는 정상적인 상태이며 코어부에 가장 큰 벤딩이 만들어진 경우라 광손실도 가장 크다. 이에 대해 (b)는 온도가 상승하여 센서접촉부가 팽창하고, 이에 따라 센서부가 직선적으로 늘어나게 되면 코어부 구부러짐 정도가 작아지게 되어 결과적으로 광손실량도 감소한다.

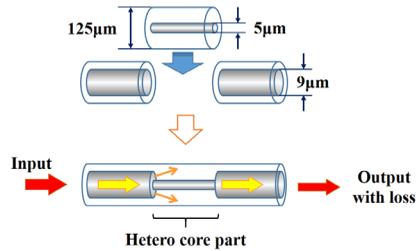
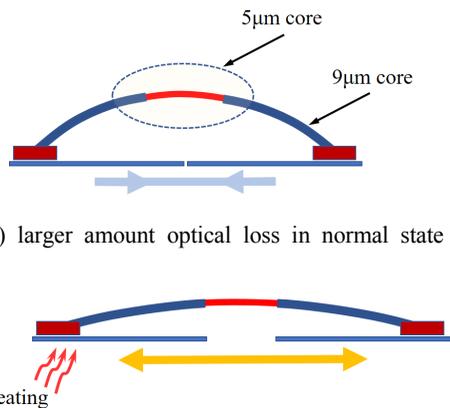


Fig. 2 Sensing part of Hetero-core type optical fiber sensor and working principle



(a) larger amount optical loss in normal state
(b) smaller amount optical loss in heating state
Fig. 3 Temperature sensing principle based on optical transmission loss

이와 같이 온도변화에 따른 센서부의 벤딩상태 변화를 유도함으로써 광손실량 변화로 온도 측정이 가능하게 된다.

2.2 온도센서와 측정시스템 구성

Fig. 2 및 Fig. 3을 통해 설명한 것을 기본으로 헤테로코어형 광섬유센서를 온도센서로 활용하는 방법에 대해 설명한다. 헤테로코어형 광섬유 센서는 센싱부 양단 고정부의 직선변위는 코어부 벤딩현상을 유도하고, 이로 인한 광누설량 변화를 통해 온도변화를 검출한다. 온도측정을 위해 온도센서는 배전반 내 차단기, 분배기 등에 직접 부착된다. 버스바 혹은 차단기 등에서 접촉불량이나 과전류 현상이 생기면 부품자체에 온도변화가 발생하게 된다. 따라서 부착되는 온도센서는 온도변화에 따라 센서부가 반응하도록 구성하면 된다.

기본적으로는, 온도변화에 민감하게 반응하는 소재에 Fig. 2와 같이 제작한 센서부를 Fig. 4와 같이 구성한다. 이것을 차단기 등의 몸체에 적절히 부착하면 이상현상 발생에 따른 온도변화를 감지할 수 있다. 광섬유 센서는 물리특성변화를 코어부를 통해 발생하는 광누설량으로 정량적으로 측정하는 원리이다. 따라서 온도측정시스템은 센서부, 광원발생부 및 수신부, 광전달양을 전압으로 변환하는 장치(Optical Amp)로 구성된다. 이때 광원발생부와 수신부 및 광누설량을 전압으로 변환하는 기능을 하나의 앰프로 구성하였다.

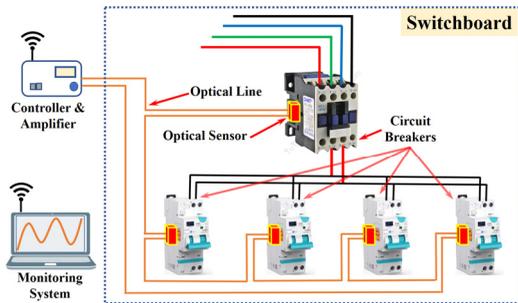


Fig. 4 Proposed switchboard monitoring system configuration using temperature measurement system with Hetero-core type optical fiber sensor

이것은 BODTR, FBG 광센싱 시스템이 복잡하고 고가인 탓에 그 활용도가 지극히 낮은 문제를 해소할 수 있는 단순한 구성의 측정장치라 할 수 있다.

3. 헤테로코어형 광섬유 온도센서 특성

본 장에서는 제안하는 광섬유 온도센서 실험장치를 구성하고, 온도변화에 따른 특성변화를 분석한다. 이 결과를 통해 온도센서로서의 성능을 평가하도록 한다. 먼저 실험장치는 Fig. 5와 같이 구성하였다. 센서부(Optical Temperature Sensor)와 앰프부(Optical Amplifier)를 기본으로 하고, 센서부는 금속판 위에 접착하였다. 이때 전기식 온도계 프로브(Electric Thermometer Probe)도 광섬유센서와 같은 위치에 두었다.

금속판에 열을 가하면 온도변화가 센서부에 전달되어 센서 코어부가 구부러지는 효과가 발생하도록 한다. 센서부 변형을 통해 광누설량이 달라지면 앰프에서는 그 변화 정도가 전압값으로 변환된다. 이것은 앰프출력포트(Optical Amp. Output)를 통해 전압계(Optical Power-meter)로 표시되고 확인된다. 이러한 준비로부터 실험을 수행하였고, 그 결과에 대해 설명한다.

먼저, Fig. 6은 온도변화에 대한 앰프출력변화를 전압으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 코어부를 두 가지 재질에 삽입하여 설치하는 방법으로 센서특성실험을 실시하였다. 즉, 하나는 경질의 아크릴 소재, 다른 하나는 이보다 부드러운 연질 플라스틱 소재로 센서부를 구성하였다.

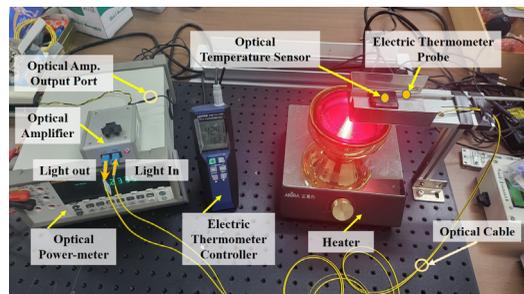
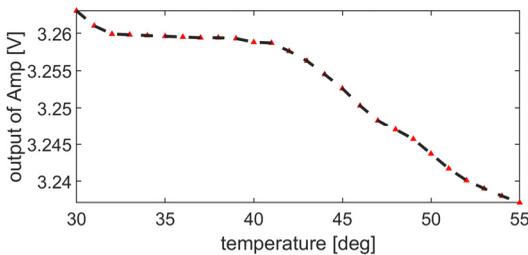
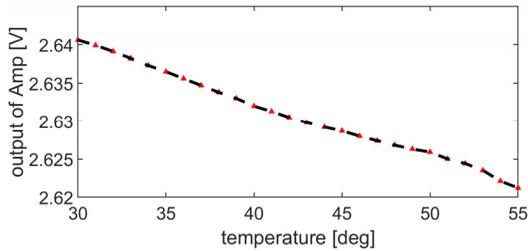


Fig. 5 Experimental apparatus

Fig. 5의 실험장치에서와 같이 히터로 센서부를 가열하면서 온도변화에 대한 센싱특성을 분석하였다. 이때 측정범위는 30~55°C로 하였다. 실험에 이용한 각 장치의 규격 등은 Table 1에 정리하였다. 먼저 Fig. 6의 (a)는 경질재료(아크릴)에 센서를 부착하여 실행한 실험결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 30~40°C 범위에서는 센서가 반응하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 센서부가 설치된 재료가 이 온도변화에서는 팽창하지 않기



(a) hard plastic body



(b) soft plastic body

Fig. 6 Measured temperature characteristics

Table 1 Specifications of experiment apparatus

Apparatus	Item	Type/Value
Power Meter	Model	FLUKE 8080A
	Measurement Range Accuracy	1kV(AC/DC) ±0.01%
Temperature Data Logger	Model	CENTER 376
	Measurement Range Accuracy	-100~400°C ±0.05%
Optical Amplifier	Type	Analog
	LED Wave Length	1.31 μm
	Input Output	5VDC 1.2VDC
Optical Fiber	Mode Type Core Diameter	SM(Single Mode) 5 μm, 9 μm

때문이다. 그러나 40°C를 초과하는 영역에서는 선형적으로 출력전압이 감소하는 것을 알 수 있다. (b)는 (a)의 경우보다 상대적으로 연질의 재료에 센서부를 구성한 경우의 실험결과이며, 측정온도 범위 전 영역에서 선형적인 특성을 나타내고 있다. 온도센서로 활용하기 위해서는 온도 측정범위가 중요하다. 배전반 화재방지를 위해 활용할 목적이란 일상적인 온도영역을 벗어나는지를 감지하면 된다.

본 연구에서는, 센서모듈 케이스 재료특성을 고려하여 측정한계온도를 +50°C 정도로 설정하였다. 이것은 실험을 위한 기준이며, 그 기준온도를 높게 설정해도 무방하다. 따라서 센싱부를 구성할 때 센서설치부 소재의 물리적 특성을 고려하고, 센서 코어부 벤딩범위를 다르게 하여 제작하면 된다. 즉 기술적으로 얼마든지 유연하게 대응할 수 있다는 것을 의미한다.

결론적으로 본 연구에서 제안하는 광섬유 센서는 배전반 화재감지를 위한 온도센서로 충분히 활용할 수 있다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이에 따라 화재발생 가능성을 판단하기 위한 온도 범위를 적절히 파악하여 센서설치부의 소재를 선정하는 것이 필요할 것이다.

4. 배전반 모니터링 시스템 구성 방법

지금까지는 광섬유 센서의 물리특성을 파악하였고, 결과적으로 온도센서로서의 활용가능성을 확인하였다. 단일 모듈로 구성하고 실험 결과를 통해 배전반 내 상태감시를 위한 유용한 도구로 활용할 수 있다는 것도 확인하였다. 배전반 내 차단기 및 분배기에 온도센서를 부착하는 방법을 고려하고 있으므로 부착대상(부속품)이 다수인 경우에는 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 광섬유 온도센서는 광섬유 케이블 자체를 센서로 활용하므로 고전압 전력계통에서도 전기적 영향을 받지 않는다. 또한 케이블 길이가 길어진다 하더라도 전기신호가 아닌 광전송방식이므로 신호가 왜곡되거나 양적인 손실도 거의 발생하지 않는다.

따라서 다수의 단일 센서모듈을 직렬(cascade)로 연결하고, 앰프는 배전반 외부에 설치해도 전혀 문제가 없다.

예를 들어 Fig. 4와 같이 배전반에 설치된 여러 개의 차단기나 분배기에 센서모듈을 적절히 부착하고, 각 센서모듈을 직렬형태로 접속 연결하여 하나의 앰프로 구성해도 된다. BOTDR이나 FBG 방식에서는 고가의 신호분석장치가 필요하지만 헤테로코어형 광섬유센싱 시스템의 경우에는 단순한 앰프 하나만으로도 적절히 대응할 수 있다. 따라서 화재감시 및 모니터링 시스템구축용으로 기술적, 경제적 측면에서의 유용성도 검증되었다고 할 수 있다. 향후에는 실질적인 적용환경을 면밀히 분석하고 고려하여 센싱시스템을 제작하고 그 성능을 검증하고자 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전반 상태모니터링시스템 구축을 위한 온도센서 개발에 대해 고찰하였다. 전력계통에서 발생하는 화재사고 예방이 목적으로 전기식 센서를 사용하는 것은 바람직하지 않다. 그 외 열화상카메라를 기반으로 하는 영상처리 방식이 제안되어 있으나, 협소한 배전반 내에서는 시야각 확보범위가 제한적이라 활용도가 떨어진다. 그래서 본 연구에서는 다수의 단일 모듈 센서를 직렬 연결하고, 하나의 앰프로 온도변화를 감지할 수 있는 광섬유기반 온도센서 모듈을 제안하였다. 고전압 전력계통에서도 전자장의 영향을 받지 않으며, 긴 전송로라 하더라도 신호왜곡과 정보손실이 거의 없다. 따라서 이러한 장점은 다양한 목적의 상태모니터링시스템 구축에도 활용이 가능하며, 높은 적용성과 실용성뿐만 아니라 확장 가능성도 기대된다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (No.2022R1

A2C1003486) and under Project BK21 FOUR (Smart Convergence and Application Education Research Center).

Author contributions

Y. B. Kim; Conceptualization. E. J. Wi; Supervision. Y. W. Choi; Formal analysis. E. I. Wi; Writing-original draft. Y. B. Kim; Writing-review & editing. Y. B. Kim; Methodology. Y. W. Choi; Investigation. Y. B. Kim; Funding acquisition. E. J. Wi; Software. E. J. Wi; Data curation. Y. B. Kim; Validation.

References

1. <https://www.kgnews.co.kr/news/article.html?no=599068>.
2. P. Raatikainen, I. Kassamakov, R. Kassamakov and M. Luukkala, 1997, "Fiber-Optic Liquid-Level Sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, 58(2), 93-97. ([https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(96\)01396-9](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(96)01396-9))
3. W. J. Lee, W. J. Lee, S. B. Lee and R. Salgado, 2004, "Measurement of Pile Load Transfer Using Fiber Bragg Grating Sensor System", *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1222-1232. (<https://doi.org/10.1139/t04-059>)
4. C. Vazquez, A. B. Gonzalo, S. Vargas and J. Montalvo, 2004, "Multi-Sensor System Using Plastic Optical Fibers for Intrinsically Safe Level Measurements", *Sensors and Actuators A: Physical*, 116(1), 22-32. (<https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.03.035>)
5. S. M. Chandani and N. A. F. Jager, 2007, "Optical Fiber-Based Liquid Level Sensor", *Optical Engineering*, 46(11), 114401-114407. (DOI:10.1117/1.2801506)
6. L. Deng and C. S. Cai, 2007, "Applications of Optic Sensors in Civil Engineering", *Structural Engineering and Mechanics*, 25(5), 577-596. (<https://doi.org/10.12989/sem.2007.25.5.577>)

7. K. Kuang, S. Quek and M. Maalej, 2008, "Remote Flood Monitoring System Based on Plastic Optical Fibres and Wireless Motes", *Sensor and Actuators A: Physical*, 147(2), 449-455. (<https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.05.030>)
8. Gas News, 2012, <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=57285>.
9. H. S. Lee, 2019, "A Study on the Safety Evaluation of the Landing Pier Structure Using FBG Sensor", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 23(2), 44-50. (<https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.2.44>)
10. K. Watanabe, S. Matsubara and Y. Kubota, 1999, "A Hetero-core Fiber Sensor Using OTDR", *Transaction of SICE*, 35(1), 32-37. (<https://doi.org/10.9746/sicetr1965.35.32>)
11. Y. B. Kim, K. S. Lee, K. Watanabe, H. Sasaki and Y. W. Choi, 2007, "Hetero-core Spliced Optical Sensing System for an Environment Monitoring", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(3), 46-51.
12. M. Iga, A. Seki, Y. Kubata and K. Watanabe, 2003, "Acidity Measurements Based on a Hetero-Core Structured Fiber Sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 96(1-2), 234-238. ([https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00530-6](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00530-6))
13. Y. B. Kim, 2012, "A Study on the Development of Optical-Fiber Water Leakage Sensing System", *Journal of Power System Engineering*, 16(6), 86-91. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2012.16.6.086>)