

# 파장 분할 다중방식을 활용한 광섬유 센서 기반의 실시간 원격 수위 감시 시스템

이훈근\*

## Quasi-Distributed Optical Fiber Sensor System Based on Wavelength Division Multiplexing for Remote Water Level Monitoring

Hoon-Keun Lee\*

### 요 약

본 논문에서는 원자력 발전소의 사용후연료 저장조 등의 수위 감시를 위한 광섬유 센서 기반의 수위 감시 시스템을 제안한다. 특히, 제안된 시스템은 여러 개의 단일 광섬유 센서들을 활용하기 위해 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing) 방식을 도입하고 있으며, 이를 통해 수위 측정을 위한 공간 분해능을 향상시킬 수 있다. 이를 위해, C-광대역 광원(C-Broadband Light Source)과 200 GHz 채널 간격의 16개 파장 채널을 가지는 도파로 배열 격자(Arrayed Waveguide Grating)를 이용하였으며, Rayleigh 산란으로 인한 원격 감지의 영향을 최소화하기 위해 이중 경로 네트워크 구조를 채택하였다. 실험 결과, 광증폭기와 같은 능동소자의 도움 없이 최대 60 km 정도 떨어진 위치에서도 수위 감시가 가능한 것으로 확인되었다.

### ABSTRACT

This paper presents an optical fiber sensor system based on optical fiber sensor (OFS) to monitor the water level of spent fuel pool in nuclear power plant. To increase the spatial resolution of water level measurement with several discrete sensors, we employed the wavelength division multiplexing technique with a C-band broadband light source (BLS) and 200 GHz x 16 channel arrayed waveguide grating. In addition, a simple dual-path network configuration was adopted for utilization of two different transmission paths to eliminate the Rayleigh Back-Scattering of the seeded BLS. Based on this scheme, the maximum remote sensing distance is up to 60 km without the support of any active components such as optical amplifiers.

### 키워드

Optical Fiber Sensor, Water Level Monitoring, Multiplexing, Wavelength Division Multiplexing, Nuclear Power Plant  
광섬유 센서, 수위 감시, 다중화, 파장 분할 다중화, 원자력 발전소

\* 교신저자: 국립안동대학교 전자공학과

• 접수일 : 2024. 10. 03

• 수정완료일 : 2024. 11. 07

• 게재확정일 : 2024. 12. 12

• Received : Oct. 03, 2024, Revised : Nov. 07, 2024, Accepted : Dec. 12, 2024

• Corresponding Author: Hoon-Keun Lee

Dept. of Electronics Engineering, Andong National University

Email : hoonkeun@anu.ac.kr

## I. 서론

원자력발전소에서는 쓰나미, 홍수 등의 극한 자연 재해(extreme natural hazard) 발생 시, 신속한 비상 대응을 위해 발전소의 신뢰할 수 있는 안전 정보(safety information)를 획득하는 것이 매우 중요하다. 일본 후쿠시마에서 발생한 원전 사고 이후, 원전을 운영하고 있는 세계 각국들은 원전의 안전성을 향상시키기 위해 국제 협력을 포함한 안전 규제의 강화 및 연구 개발 수행 등 다방면에 대해 많은 노력을 기울여 왔다[1].

원자력 발전소는 설계기준사고(Design Basis Accident) 등의 사건이 발생하면, 제어봉 낙하를 통한 원자로 정지 및 공학적 안전설비의 작동을 통해 발전소를 안전하게 유지하도록 설계되어 있다[2]. 하지만, 후쿠시마 사고와 같이 자연재해(쓰나미 등)로 인한 발전소의 소내·외 전원이 상실될 경우 발전소에 대한 실시간 감시가 어려워, 발전소를 안전하게 유지하기 어려운 상황에 직면할 수도 있다[3].

이를 해결하기 위한 방안 중 하나로, 현장의 전원이 상실되어도 발전소 내부의 안전 정보(수위, 온도 등)를 외부에서 실시간 감시할 수 있는 광섬유 센서를 활용한 연구가 진행되었다[4-8]. 광섬유 센서는 광섬유 자체가 가지는 고유 특성으로 인해 외부 전원의 공급이 없이 동작이 가능한 수동형(passive) 특성을 가진다. 또한, 적은 광신호 손실로 인해 먼 거리에서도 다양한 물리량(수위, 온도, 습도, 압력 등)의 측정이 가능하며, 전자기파 및 방사선 환경에서도 강한 내성을 지닌다[7, 8]. 국내에서는 사용후연료 저장조의 정보 감시를 위해, 시간 분할 다중화(TDM Time Division Multiplexing) 방식 기반의 광시간 영역 반사계(OTDR: Optical Time Domain Reflectometer)와 1x4 광분배기를 이용하여 100 m 정도 떨어진 위치에서 4개 포트에 대한 수위 측정 가능성을 시연한 사례가 있다[9].

본 논문에서는 파장분할 다중화(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 방식 기반의 광섬유 센서를 활용한 수위 감시 방법을 제안하고, 실험을 통해 그 가능성을 시연하였다. 우선, 16개의 다중화된 광섬유 센서를 활용하여 TDM 대비 공간 분해능(spatial resolution)을 향상시킬 수 있었다. 또한, Rayleigh 산란으로 인한 원격 측정의 영향을 최소화하기 위해 이중 경로 네트워크 구조를 채택하였으며, 이를 통해 수십 km 정도 떨어진 위치에서도 수위 측정이 가능한 것으로 확인되었다.

## II. 수위 측정 원리

본 논문에서 제안된 수위 측정을 위한 기본적인 원리는 광섬유 센서의 끝단에서 발생하는 프레넬 반사(Fresnel reflection)를 기반으로 한다. 그림 1은 실험에서 사용된 광섬유 센서의 구조도를 보여주고 있다. 해당 광섬유 센서는 단일모드 광섬유(SMF: Single Mode Fiber)를 기반으로 하며, 양 끝단에 표준 PC/LC 타입의 광케이블 커넥터가 연결되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 빛이 어떤 매질에 입사하여 진행할 때 굴절율이 다른 매질을 만나게 되면 매질의 경계면에서 반사가 발생하게 된다. 이를 프레넬 반사라고 하며, 해당 경계면에서 발생하는 매질(공기 또는 물)에 대한 반사율( $R_m$ )은 식 (1)과 같이 표현된다[10].

$$R_m = \left( \frac{n_f - n_m}{n_f + n_m} \right)^2 \quad \dots (1)$$

여기서  $n_f$ 는 광원이 진행하는 매질인 광섬유의 굴절율을 의미하며,  $n_m$ 은 경계면에서 만나게 되는 매질의 굴절율(즉, 공기 또는 물)의 굴절율을 의미한다. 즉, 위 수식을 이용하여 광섬유 센서의 종단에서 반사되는 광파워(스펙트럼)를 측정하면, 설치된 지점에서 광섬유 센서가 공기 중에 있는지 또는 물속에 있는지에 대한 감지가 가능하다.

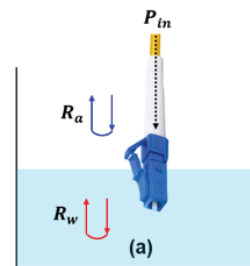


그림 1. 광섬유 센서의 구조도

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber sensor

광섬유( $n_f$ )를 포함한 공기( $n_a$ ) 및 물( $n_w$ )의 굴절율은 약 1.4492, 1.000 그리고 1.3152로 각각 나타나며, 배경 잡음(background noise)을 고려하지 않을 경우 두 매질

(공기, 물) 간의 반사율의 최대 차이( $R_a - R_w$ )는 약 11.6 dB로 계산된다. 본 논문에서는 수위 감시 시스템의 성능 저하를 확인할 수 있는 파라미터로 활용하기 위해 반사율의 최대 차이를  $\Delta P$ 로 정의한다. 그림 2는 광섬유 센서를 활용하여 실제 측정된 광스펙트럼을 보여준다. 광섬유 센서가 공기중 또는 물속에 있을 경우, 반사되는 스펙트럼의 최대값이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이때, 측정된 최대값의 차이( $\Delta P$ )는 약 10.6 dB로 이론치와 약 1 dB 정도 차이가 나타났으나, 이는 구현된 수위 감시 시스템이 가진 배경 잡음의 영향으로 볼 수 있다[11].

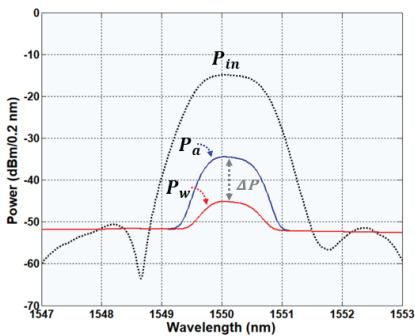


그림 2. 매질에 따라 측정된 프레넬 반사 광스펙트럼  
Fig. 2 Measured optical spectra according to the Fresnel reflection

### III. WDM 기반의 수위 감시 시스템의 구조

그림 3은 제안된 WDM 기반의 원격 수위 감시 시스템의 구조를 보여주며, 크게 3개의 하위 시스템으로 구성되어 있다. 구체적으로, ① 감시국(MS: Monitoring Station)에 설치되어 광섬유 센서에 의한 반사광을 측정하는 반사광 측정기(Reflectometer)와 ② 지역 기지국(RN: Remote Node)에서 WDM 채널의 다중화/역다중화를 위한 도파로 배열 격자(AWG: Arrayed Waveguide Grating), 그리고 ③ 저장소에서 수위 측정을 위한 광섬유 센서들로 이루어진다. 여기서, 반사광 측정기는 증폭 자연 방출광(ASE: Amplified Spontaneous Emission) 기반의 C-광대역 광원(BLS: Broadband Light Source)과 광스펙트럼 분석기(OSA: Optical Spectrum Analyzer)로 이루어져 있으며, 이 둘 각각은 지역 기지국에 위치한 광회전기(OC: Optical Circulator)와 함께 광섬유 케이블을

통해 연결된다. 사용된 케이블은 표준 단일모드 광섬유(SMF)로 약 0.22 dB/km의 손실을 가진다. 여기서, 광회전기는 BLS 광원의 송신 경로와 광섬유 센서의 반사광 수신 경로를 분리하기 위해 지역 기지국에 설치되었으며, 이를 통해 이중 경로 네트워크 구조를 구현하였다. BLS 광원의 전체 스펙트럼 폭(Spectral width)과 평탄도(Flatness)는 약 32 nm와 1.5 dB로 각각 나타났다. 지역 기지국에 설치된 16채널 AWG의 채널 간격과 채널의 대역폭은 1.6 nm와 1.03 nm로 나타났다. AWG 채널마다 하나의 광섬유 센서가 각각 연결되며, 연결된 각 센서들은 수조 안에 미리 설계된 높이에 따라 수직 방향으로 일렬로 설치된다.

즉, 감시국에 설치된 BLS 광원은 광섬유 케이블을 거쳐 지역 기지국에 위치한 AWG에 의해 과장별로 분할이 되고, 각 분할된 광원들은 수조에 위치한 광섬유 센서로 전달된다. 이때, 높이별로 설치된 각각의 광섬유 센서들은 현재 수위에 따라 일부는 공기중에 노출되거나 또는 물속에 침수되며, 그 결과 채널별로 측정되는 광원의 스펙트럼이 달라지게 된다. 따라서 이들 반사광의 측정을 통해, 현재 저장조의 수위를 실시간으로 정확하게 파악할 수 있게 된다. 본 논문에서는, 16개의 광섬유 센서를 이용하여 총 17가지의 수위 상태를 측정할 수 있다.

참고로, 제안된 수위 감시 시스템은 감시국에 설치된 반사광 측정기를 제외하고는 모두 광케이블로 연결된 수동소자들(AWG, 광회전기, 광섬유 센서 등)로 구성되므로, 현장의 전력 상실 시에도 동작이 가능하다.

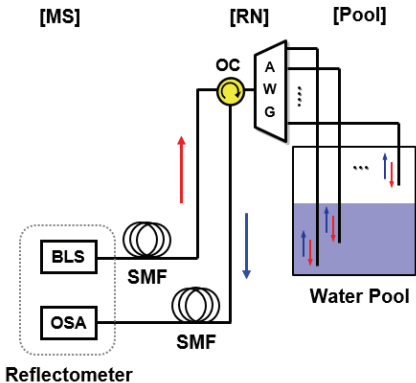


그림 3. WDM 기반의 원격 수위 감시 시스템의 구조  
Fig. 3 Architecture of the proposed remote water level monitoring system based on WDM

#### IV. 수위 감시 시스템의 성능

본 논문에서 제안된 광섬유 센서 기반의 수위 감시 시스템은 다중 채널의 감지를 위해 BLS와 AWG를 활용한 WDM 기술을 적용하고 있다. 본 장에서는 상기 수위 감시 시스템의 성능을 확인하기 위해, 다중 채널 감시 성능 및 전송 거리에 따른 감지 능력을 확인하였다.

먼저, 다중 채널 수위 감시 성능을 확인하기 위해 전송 거리를 고려하지 않은 상태(back-to-back)에서 저수위, 중수위, 만수위에 대한 해당 스펙트럼을 측정하여 그림 4에 나타내었다. 아래 그림에서 보는 바와 같이, 채널별 광섬유 센서가 공기중에 있을 때와 물속에 있을 때 발생하는 반사율의 차이( $\Delta P$ )는 약 10.6 dB로 나타났다. 따라서, 전 채널의 광섬유 센서에서 반사되는 광스펙트럼의 형태를 통해 현재의 수위 상황을 실시간으로 모니터링할 수 있음을 알 수 있다.

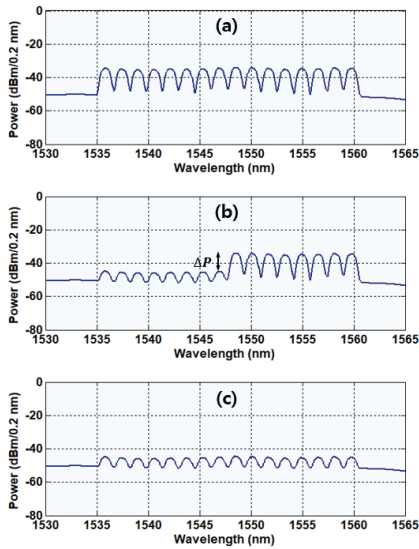


그림 4. 수위에 따라 측정된 광스펙트럼  
(a) 저수위 (b) 중수위 (c) 만수위

Fig. 4 Measured optical spectra according to water level  
(a) empty (b) half (c) full

참고로, WDM을 위해 사용한 AWG의 채널 수는 감시 시스템의 공간 분해능과 깊은 관련이 있다. 만약  $1 \times N$  AWG를 사용한 경우, 해당 시스템은  $N+1$  단계 ( $0 \sim N$ )의 수위 상태를 측정할 수 있다. 따라서, 채널

대역폭이 좁은 AWG를 사용하거나, L-대역과 같은 추가적인 파장 대역을 사용하면 감시 시스템의 공간 분해능은 더욱 향상될 수 있을 것이다 [11, 12].

다음으로, 수조의 수위를 중간 높이로 유지한 상태에서 전송 거리에 따른 수위 감시 시스템의 성능을 확인하였다. 참고로, 해당 시스템은 BLS 광원 전송 시 발생하는 Rayleigh 역산란(back-scattering)으로 인한 원격 감지의 영향을 최소화하기 위해 상·하향 신호가 격리되는 이중 경로 네트워크 구조를 적용하였다[13]. 이를 위해, 광섬유 케이블의 길이를 0 ~ 60 km까지 20 km 간격으로 바꾸어 가며 광섬유 센서에서 반사되는 스펙트럼을 측정하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 전송 거리가 증가함에 따라 수신되는 전 채널의 광신호 세기(스펙트럼)는 감소하였으나, 광섬유 센서가 공기중에 있을 때와 물속에 있을 때 발생하는 반사율의 차이( $\Delta P$ )는 약 10.6 dB로 일정하게 유지되었다. 따라서, 제안된 시스템의 원격 감지 성능은 수신단의 광신호 세기를 측정할 수 있는 계측 장비(광스펙트럼 분석기)의 성능에 의해 그 한계가 정해진다고 볼 수 있다. 만약, 고출력 BLS 광원 또는 삽입손실이 적은 수동 광소자를 사용할 경우에 광증폭기의 도움 없이 측정 가능한 감지 거리를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

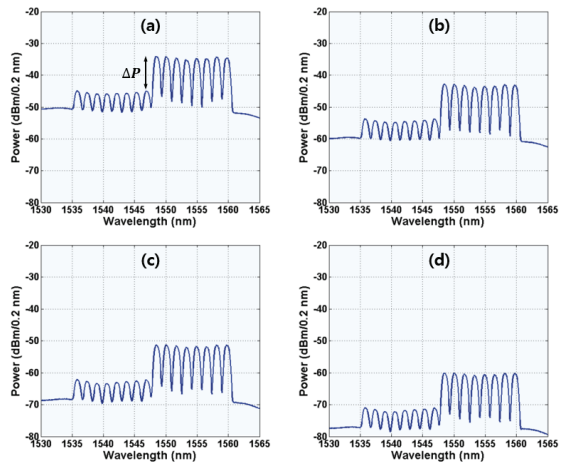


그림 5. 거리에 따라 측정된 광스펙트럼  
(a) 0 km (b) 20 km (c) 40 km (d) 60 km

Fig. 5 Measured optical spectra according to distance  
(a) 0 km (b) 20 km (c) 40 km (d) 60 km

## V. 결론

본 논문에서는 광섬유 센서를 활용하여 원자력 발전소의 사용후연료 저장조 등 다양한 분야에서 적용할 수 있는 수위 감시를 위한 방법을 제안하였으며, 실험을 통해 그 가능성을 확인하였다. 특히, 제안된 시스템은 여러 개의 단일 광섬유 센서들을 활용하기 위해 과장 분할 다중화(WDM) 방식을 적용하고 있으며, 이를 위해 C-BLS 광원과 200 GHz×16 채널 AWG를 도입하였다. 그 결과, 기존의 TDM 방식과 비교하여 수위 측정을 위한 공간 분해능을 높일 수 있었다. 또한, 광대역 광원 전송 시 발생하는 Rayleigh 역산란으로 인한 원격 감지의 영향을 최소화하기 위해 이중 경로 네트워크 구조를 채택하였으며, 실험 결과 광증폭기와 같은 능동소자의 도움 없이도 최대 60 km 정도 떨어진 위치에서도 수위 측정이 가능한 것으로 확인되었다.

본 논문에서 제안한 방식을 사용하면 현장에 전원이 공급되지 않는 위급 상황이 발생하여도, 원격지에서 저장조의 수위를 감시할 수 있는 보조 감시 계통으로서의 활용이 가능할 것으로 예상된다.

### 감사의 글

이 논문은 2024학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] A. Lee, C. Goo, H. Park, and I. Kim, "An analysis of the current status of nuclear advanced countries' countermeasure against the loss of electrical power after Fukushima accident," In *Proc. Annual Summer Conf. Korean Inst. Elec. Eng.*, Jeongsun, Korea, July 2012, pp. 1607-1608.
- [2] S. Kim and H. Lee "Remote water level monitoring system based on reflected optical power detection with an optical coupler for spent fuel pool at nuclear power plant," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, June 2019, pp. 505-512. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.3.505>
- [3] Korean Nuclear Society, "Analysis of the reason of Fukushima nuclear accident," *Technical report*, Mar. 2013.
- [4] H. M. Hashemian and W. C. Bean, "Sensors for next-generation nuclear plants: fiber-optic and wireless," *Nuclear science and Engineering*, vol. 169, no. 3, 2011, pp. 262-278. <https://doi.org/10.13182/NSE10-48>
- [5] U.S. Dept. of Energy, "Technical readiness and gaps analysis of commercial optical materials and measurement systems for advanced small modular reactors," *Technical report*, PNNL-22622, Rev. 1, Aug. 2013.
- [6] P. Ferdinand, S. Magne, and G. Laffont, "Optical fiber sensors to improve the safety of nuclear power plants," In *Proc. Asia Pacific Optical Sensors (APOS)*, Wuhan, China, Oct. 2013.
- [7] A. Stanciu and M. Stanciu, "Optical fiber sensors in nuclear plants," *EEA (Electrotehnica, Electronica, Automatica)*, vol. 53, 2005, pp. 15-20.
- [8] S. Rizzolo, J. Perisse, A. Boukenter, Y. Ouerdane, E. Marin, J.-R. Mace; M. Cannas, and S. Girard, "Real time monitoring of water level and temperature in storage fuel pools through optical fibre sensors," *Scientific Reports*, vol. 7, 2017, pp. 8766. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08853-7>
- [9] H. Sim, W. Yoo, S. Shin, J. Jang, J. S. Kim, K. Jang, S. Cho, J. Moon, and B. Lee, "Real-time measurements of water level and temperature using fiber-optic sensors based on an OTDR," *Trans. Korean Inst. Elec. Eng.*, vol. 63, no. 9, 2014, pp. 1239-1244.
- [10] K. Yüksel, "Optical fiber sensor for remote and multi-point refractive index measurement," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 250, 2016, pp. 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.09.003>
- [11] H. Lee, H. Lee, and C. Lee, "A simple and color-free WDM-passive optical network using spectrum-sliced Fabry-Perot laser diodes," *IEEE*

*Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, 2008, pp. 220-222.

<https://doi.org/10.1109/LPT.2007.912981>

- [12] J. Kim, S. Moon, S. Yoo, and C. Lee, "800 Gb/s ( $80 \times 10$  Gb/s) capacity WDM-PON based on ASE injection seeding," *Opt. Express*, vol. 22, 2014, pp. 10359-10365.

<https://doi.org/10.1364/OE.22.010359>

- [13] M. Fernandez-Vallejo and M. Lopez-Amo, "Optical fiber networks for remote fiber optic sensors," *Sensors*, vol. 12, 2012, pp. 3929-3951.

<https://doi.org/10.3390/s120403929>

## 저자 소개



### 이훈근(Hoon-Keun Lee)

2006년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부  
(공학사)

2014년 KAIST 전기및전자공학과  
(공학박사)

2016년~2024년 한국원자력안전기술원 책임연구원

2024년~현재 국립안동대학교 전자공학과 조교수

※ 관심분야 : 광통신, 광섬유 센서, 디지털 계측제어