

광섬유와 OTDR을 이용한 실시간 수위 및 온도 측정

Real-time Measurements of Water Level and Temperature using Fiber-optic Sensors Based on an OTDR

심혁인* · 유욱재* · 신상훈* · 장재석* · 김재석* · 장경원* · 조승현** · 문주현*** · 이봉수†
(Hyeok In Sim · Wook Jae Yoo · Sang Hun Shin · Jaeseok Jang · Jae Seok Kim ·
Kyoung Won Jang · Seunghyun Cho · Joo Hyun Moon · Bongsoo Lee)

Abstract - In this study, two fiber-optic sensors were fabricated to measure water level and temperature using optical fibers, a coupler, a Lophine and an OTDR (optical time-domain reflectometer). First, using Fresnel's reflection generated at the distal-ends of each optical fiber, which was installed at different depth, we measured the water level according to the variation of water level. Next, we also measured the temperature of water using a temperature sensing probe based on the Lophine, whose absorbance changes with the temperature. The measurable temperature range of the fiber-optic sensor is from 5°C to 65°C because the maximum operation temperature of the optical fiber without a physical deterioration is up to 80°C.

Key Words : Fiber-optic sensor, Water Level, Temperature, Lophine, OTDR

1. 서 론

일반적으로 광섬유(optical fiber)는 고주파 및 전자기파에 간섭을 받지 않고, 방사선 환경에서 사용이 가능하며 신호의 원거리 전송이 가능하다는 장점을 가진다. 또한 광섬유는 광 신호의 전송부로서의 일반적인 역할뿐만 아니라 감지부로 사용이 가능하기 때문에 광섬유 기반의 물리, 생물, 화학 센서는 산업계, 의료계를 비롯한 원자력 계통 분야 등에서 널리 사용되고 있다[1-3]. 우리나라는 1978년 고리 원자력 발전소를 시작으로 현재까지 23기의 원자로가 가동 중에 있으며, 국내 총 전력 발전량의 약 24%를 차지하고 있다. 원자력 발전소는 다른 발전소에 비해서 건설비용과 기간이 많이 소요되고, 방사성폐기물이 발생한다는 위험성을 가지고 있음에도 불구하고, 원자력 발전의 전력 판매단가는 다른 발전소에 비해서 저렴하다는 장점으로 원자력 발전소의 수가 점점 증가하는 추세에 있다. 하지만 방사성 물질을 다루는

원자력 발전은 사고 발생 시 큰 위험을 초래하기 때문에 원전 내외부의 실시간 모니터링이 반드시 필요하다. 특히 방사선으로 인해 접근이 어렵고 내부의 전원이 상실되는 극단적인 상황이 발생할 경우, 실시간 내부정보를 제공받지 못함에 따라 안전성에 큰 문제가 발생할 수 있다. 따라서 원전 내부의 정보를 외부에서 실시간 감지할 수 있는 원거리 측정 시스템의 개발이 필요하다.

고준위폐기물(high-level waste)인 사용후핵연료(spent fuel)는 지속적인 핵분열(nuclear fission)로 인한 붕괴열(decay heat)이 발생하고 방사선을 방출하기 때문에 습식 저장조(spent fuel pool) 또는 건식 저장시설(spent fuel dry storage facility)에 보관되고 있다. 습식 저장조의 경우, 냉각수를 이용하여 사용후핵연료를 냉각 및 차폐시키므로 냉각수의 온도 및 수위 측정이 매우 중요하다. 현재 사용후핵연료 습식 저장조의 온도 측정에 사용되는 장비로는 열전대(thermocouple), RTD(resistance temperature detector) 등이 있으며, 초음파 수위계(ultrasonic water-level meter)가 수위 측정에 사용되고 있다. 하지만 기존의 온도 및 수위를 측정하는 장비는 전기전자 기반의 감지부(sensing element)를 가지고, 내부의 전원을 공급받아 작동되므로 내부의 전원이 상실될 경우, 정상적인 작동이 불가능하고 단일 물리량만 측정이 가능하다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 위험성을 보완하고자 여러 나라에서는 원전사고 발생 시에서도 사용이 가능한 온도 및 수위 센서 시스템을 개발하여 극단적인 상황에 대응하려 하고 있다.

OTDR (optical time-domain reflectometer)은 수백 km가 떨어진 곳에서도 광섬유에서 발생한 특정 이벤트(event)의 실시간 원거리 측정이 가능하고, 배터리로 구동되는 휴대용 장비이므로 원자력 관련 시설에서 특정 물리량의 측정에 적용할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 수위와 온도를 원

* School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, BK21 Plus Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University, Korea.

** Department of Organic Materials & Fiber Engineering, College of Engineering, Soongsil University, Korea.

*** Department of Nuclear & Energy Engineering, College of Energy & Environment, Dongguk University, Korea.

† Corresponding Author : School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, BK21 Plus Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University, Korea.

E-mail : bslee@kku.ac.kr

Received : December 18, 2013; Accepted : August 01, 2014

거리에서 실시간 모니터링할 수 있는 OTDR 기반의 광섬유 센서 시스템을 제작하였고, 실험실 환경에서 수위 및 온도 변화에 따른 반사광을 측정 및 분석하여 광섬유 센서의 성능을 평가하였다.

2. 서론

2.1 광섬유 수위 센서의 제작 및 실험결과

본 연구에서 제작한 광섬유 센서 시스템은 사용후핵연료 저장조의 수위 및 온도를 실시간으로 측정하기 위한 감지부, 외부 물리량에 의해 변화된 광 신호를 광 계측장비로 전송해 주는 전송용 광섬유 그리고 전송된 광 신호를 측정 및 분석하는 광 계측기와 컴퓨터 디스플레이 장치로 구성된다. 광 계측기로 사용된 OTDR (AQ7275-735041, Yokogawa Inc.)은 광통신에서 주로 사용되는 장비로서, 매설된 광선로의 결함 또는 손실 위치를 확인하는 장비이다. OTDR은 광섬유의 내부 또는 끝단에서 발생하는 산란/반사광의 실시간 측정이 가능하고, 감지부에서 발생한 이벤트의 위치 및 응답 신호의 데시벨(dB) 값 변화를 획득할 수 있으며 최대 400 km까지 측정이 가능하다. 감지부 및 광 신호 전송부로서 사용된 광섬유(980HP, Thorlabs)는 코어(core)의 지름과 굴절률이 각각 3.6 μm 와 1.46이고, 개구수(numerical aperture, NA)가 0.2인 싱글모드(single-mode) 광섬유이다. 전송 가능한 파장 대역은 980 ~ 1,600 nm이고, -55 ~ 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 사용 가능하다.

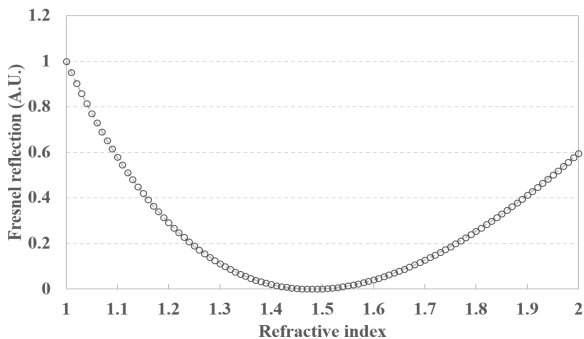


그림 1 광섬유 끝단에서 굴절률 변화에 따른 프레넬 반사율의 변화

Fig. 1 Calculation of Fresnel's law according to the refractive index

먼저, 광섬유 수위 센서를 이용하여 수위를 측정하기 위해 광섬유 끝단에서 발생하는 프레넬 반사(Fresnel reflection)에 따른 광 신호의 변화를 측정하였다. 프레넬 반사란 굴절률이 다른 두 매질을 빛이 통과할 때, 두 매질의 경계면에서 빛의 일부가 반사되는 현상으로, 광섬유의 끝단에 코어의 굴절률과 다른 굴절률을 가지는 매질이 접촉할 경우, 광섬유를 통해 전송된 빛의 일부는 광섬유 끝단의 경계면에서 반사된다. 광섬유 수위 센서의 경우, 광섬유의 끝단이 굴절률이 서로 다른 두 매질 즉, 물 또는 공기와 접촉할 때 반사율이 달라지는 현상을 이용하며 프레넬 반사에 의한 반사광의 광

파워(optical power, R)는 식 (1)로 표현된다[4].

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 수위 센서에 사용된 광섬유의 코어의 굴절률을 n_1 , 광섬유의 끝단에서 접촉하게 되는 외부 물질의 굴절률을 n_2 로 나타내면, 광섬유 끝단에 접촉하는 외부 물질의 굴절률에 따라 그림 1과 같은 프레넬 반사율에 대한 그래프를 획득할 수 있다. 그림 1에서 광섬유 끝단에 접촉하는 외부 물질의 굴절률에 따라서 반사율이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 접촉 물질의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률에 가까워질수록 반사율은 줄어들고, 반대로 접촉하는 물질의 굴절률이 광섬유 코어의 굴절률과 차이가 많이 날수록 반사율이 증가하는 것을 확인할 수 있다[5-6]. 식 (1)에 의해 1.46의 코어 굴절률을 가지는 광섬유의 끝단이 공기와 접촉할 경우 발생하는 프레넬 반사율이 약 3.5%라면 물과 접촉할 경우 발생하는 프레넬 반사율은 약 0.22%가 된다. 즉, 그림 1에서와 같이 굴절률이 1.33인 물이 접촉할 경우, 굴절률이 1인 공기에 비해 프레넬 반사율이 약 90% 이상 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같이 굴절률 변화에 따른 반사율의 차이를 측정하여 물의 존재 여부를 확인하고, 수위를 측정할 수 있게 된다.

그림 2는 프레넬 반사를 이용한 광섬유 수위 센서를 보여준다. OTDR에 100 m 길이의 전송용 광섬유를 연결하였고, 1 x 4 광섬유 커플러(fiber-optic coupler; FCQ1315-FC, Thorlabs)를 이용하여 서로 다른 길이(10, 13, 16, 20 m)를 가지는 4개의 수위 감지용 광섬유를 연결한 후 광섬유를 수조의 밑 부분부터 서로 다른 깊이에 위치시켰다. 이 때, 수조에 설치된 각 광섬유의 깊이가 차이는 1 cm이다. OTDR에서 방출된 근적외선 광 신호는 전송용 광섬유를 통하여 커플러로 전송되고, 4개의 수위 감지용 광섬유로 분배된다[7-8]. 수위 감지용 광섬유의 끝단까지 전송된 광 신호는 프레넬 반사에 의해서 동일한 경로를 통해 OTDR로 재전송되게 된다. 이 때, 수조의 내부에 위치시킨 광섬유의 끝단에서 반사되는 광 신호를 분석하여 수위를 측정할 수 있다.

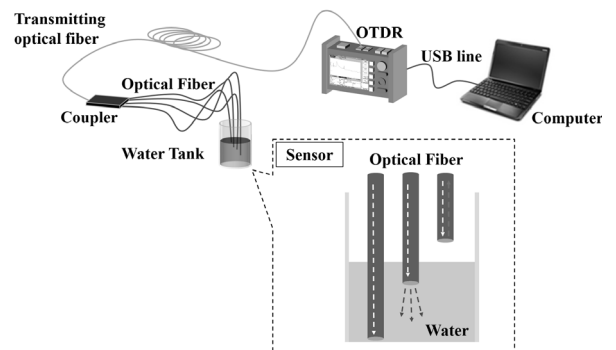


그림 2 OTDR과 광섬유 커플러를 이용한 광섬유 수위 센서의 실험구성

Fig. 2 Experimental setup of a fiber-optic water level sensor using an OTDR and a fiber-optic coupler

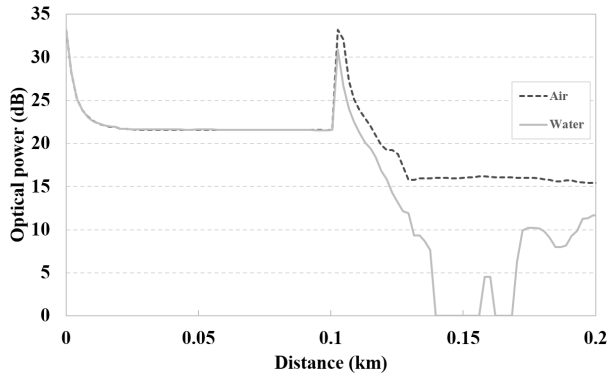


그림 3 광섬유 끝단과 물 또는 공기와의 접촉 시 OTDR의 출력신호 차이
 Fig. 3 Difference between two light signals measured by OTDR when the distal-end of an optical fiber contacts with air or water

그림 3은 감지용 광섬유의 끝단이 물 또는 공기와 접촉하였을 경우 변화된 신호를 보여준다. 광섬유 끝단에 접촉하는 물질이 공기에서 물로 바뀌게 되면, 프레넬 반사율이 감소하여 OTDR에서 측정되는 반사광의 광 파워 역시 낮아지게 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 외부 접촉 물질이 물인 경우, 프레넬 반사율은 약 0.22%이고, 공기일 경우는 약 3.5%의 반사율을 가지게 된다. 하지만 반사광의 광 세기가 (optical intensity)가 매우 미약하고, 100 m 길이의 전송용 광섬유를 통해 전송되는 과정에서 감쇄(attenuation) 되므로 측정된 광 신호를 분석해 보면 피크값(peak value)이 약 2 dB 정도 줄어든 것을 확인할 수 있다.

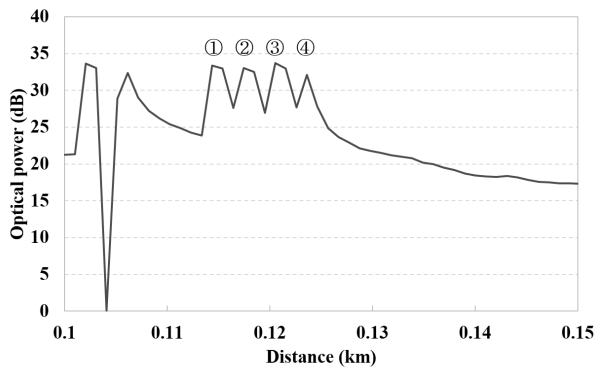


그림 4 물이 채워지지 않은 빈 수조의 각 깊이에 4개의 감지용 광섬유를 위치시켰을 때의 출력신호
 Fig. 4 Light output signals of the fiber-optic water level sensor when four optical fibers are located at difference depths in the empty water-tank

그림 4는 1 x 4 커플러에 서로 다른 길이(①: 10 m, ②: 13 m, ③: 16 m, ④: 20 m)를 가지는 4개의 감지용 광섬유를 연결하여 제작한 광섬유 수위 센서의 출력신호를 보여준다. OTDR로 측정 시, 서로 독립적으로 각각의 측정위치에서 반사광이 동시에 측정되는 것을 확인할 수 있다. OTDR

과 광섬유 커플러를 이용하여 다채널로 특정 물리량을 측정할 경우, 커플러에 동일한 길이의 광섬유를 연결하면 반사광 신호가 서로 겹쳐지므로 본 연구에서는 각 광섬유의 길이차이를 3 m 이상으로 하였다. 이 때 수조 내 감지용 광섬유 끝단의 위치는 임의로 조정하여 측정 위치 및 공간해상도 (spatial resolution)의 변경이 가능하다.

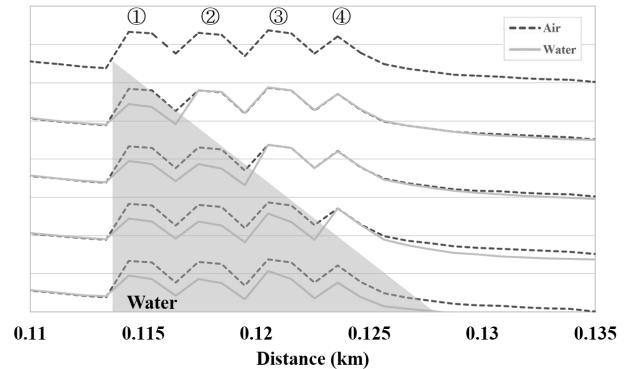


그림 5 수위 변화에 따른 광섬유 수위 센서의 출력신호의 변화
 Fig. 5 Variations of light output signals of the fiber-optic water level sensor according to the water level

그림 5는 수조 내에 4개의 감지용 광섬유를 1 cm의 간격으로 위치시킨 후 수위가 올라갈 때 측정한 광 신호의 변화를 보여준다. 수조의 맨 아래 위치한 1번부터 4번 감지용 광섬유까지 차례대로 광 신호가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 각 신호의 변화는 다른 광 신호의 변화에 영향을 주지 않으며, 서로 독립적으로 측정되어 수위 측정이 가능함을 확인할 수 있다.

2.2 광섬유 온도 센서의 제작 및 실험결과

다음으로 OTDR 기반의 광섬유 온도 센서를 개발하기 위하여 열변성 물질(thermochromic material)인 로핀(Lophine; 2,4,5-triphenylimidazole, Thermo Fisher Scientific)을 온도 감지물질로 사용하였다. 열변성 물질은 온도에 따라 흡광도(absorbance) 또는 색이 변하는 성질을 가지고 있으며, 열을 가해 녹인 후 광섬유에 딥 코팅(dip-coating)을 하거나 투명한 광학 에폭시(epoxy)와 혼합한 후 광섬유에 부착시켜 온도 센서로 사용할 수 있다. 그림 6은 열변성 물질인 로핀의 화학적 구조(C₂₁H₁₆N₂)를 보여주며, 로핀은 온도가 높아짐에 따라 분자 내에 수소원자를 잃고 공명구조로 변하게 되고, 이 때 흡광도가 감소하게 되는 특성을 가지고 있다. 이 반응에 따라 로핀은 온도가 초기 상태로 돌아가게 되면 화학적 구조 역시 되돌아가는 가역적 성질(reversibility)을 가지며, 물에 녹지 않는 소수성(hydrophobic) 물질이다[9-11]. 로핀을 온도 센서의 감지부로 사용할 경우, 온도가 올라갈 때 흡광도가 감소하게 되고, 이에 따라 광섬유 끝단에서 반사되어 돌아오는 광 신호의 광 세기는 커지게 된다.

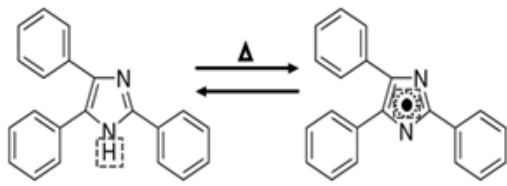


그림 6 온도에 따른 로핀의 화학 구조의 변화
Fig. 6 Thermal transition of a Lophine

그림 7은 로핀을 이용하여 제작한 광섬유 온도 센서의 감지부의 내부구조를 보여준다. 로핀이 외부 물질과의 접촉으로 오염 또는 변형되는 것을 방지하고, 측정 감도를 높이기 위하여 열전도도가 높은 스테인리스강(stainless steel) 케이스를 사용하였다. 또한 코어의 직경이 작음에 따라 온도 감지물질의 부착에 어려움이 있어 광섬유의 끝단을 FC 커넥터(FC connector)로 처리하였다. 로핀 분말(powder)과 에폭시를 5 : 100, 10 : 100, 15 : 100의 질량비(mass ratio)로 각각 혼합한 뒤 스테인리스 강 케이스 내부에 채우고, 광섬유 FC 커넥터와 결합한 후 24시간 동안 경화시킴으로써 온도 감지부를 완성하였다.

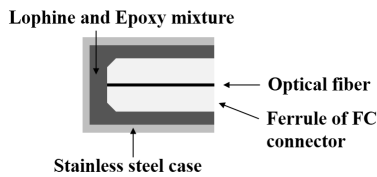


그림 7 광섬유 온도 센서의 감지부 내부구조
Fig. 7 Internal structure of a temperature sensing probe

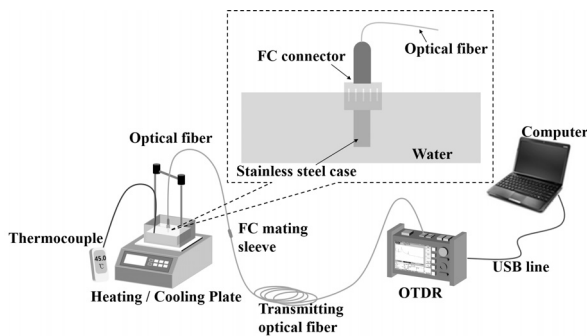


그림 8 광섬유 온도 센서를 이용한 온도 실험구성
Fig. 8 Experimental setup using a fiber-optic temperature sensor

그림 8은 광섬유 온도 센서를 이용한 실험구성을 보여준다. 광섬유 온도 센서의 감지부를 수조 내부에 위치시키고 냉온 플레이트(Heating/Cooling plate; CP-7200GT, Intec)를 사용하여 수조 내에 채워진 물의 온도를 조절하였다. 이 때 온도 불균형을 최소화하기 위하여 자동 교반기(stirrer)를 이

용하였고, 기준 온도 센서로 K-타입 열전대(thermocouple; 54II thermometer, Fluke)를 사용하여 물의 온도를 실시간 측정하였고, 광섬유 온도 센서를 이용하여 측정된 광 신호와 비교 분석하였다. OTDR에서 방출된 광 신호는 전송용 광섬유를 통하여 온도 감지부까지 전송되고, 감지부에서 반사되어 되돌아오는 광 신호는 물의 온도변화에 따른 로핀의 흡광도 변화에 의해 달라진다.

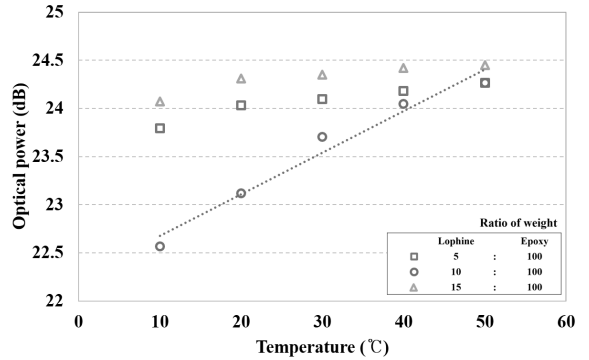


그림 9 로핀과 에폭시의 질량비에 따른 광섬유 온도 센서의 출력신호
Fig. 9 Light output signals of the fiber-optic temperature sensor according to the mixing mass ratio of Lophine and epoxy

그림 9는 서로 다른 질량비를 가지는 3종류의 온도 감지부를 이용하여 10 ~ 50°C의 온도범위에서 10°C간격으로 온도를 증가시키면서 측정된 그래프이다. 이 때 사용한 OTDR 광원의 파장은 1,310 nm이며, 10 : 100의 질량비를 가지는 온도 감지부를 사용할 경우 온도변화에 따른 광 신호의 변화가 가장 큰 것을 확인하였다. 이 결과를 토대로 온도 민감도(temperature sensitivity)가 좋은 10 : 100의 질량비를 가지는 온도 감지부를 선택하여 다음 실험을 수행하였다.

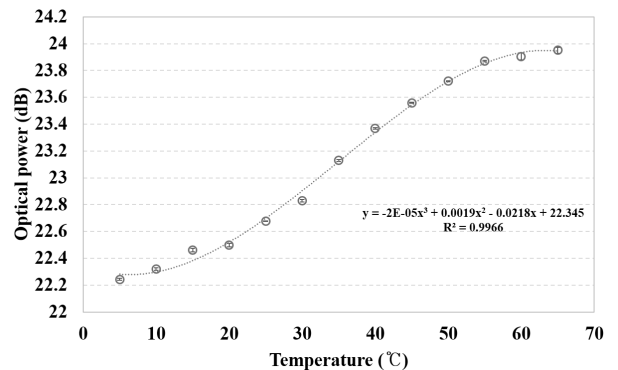


그림 10 로핀 온도 센서를 이용한 온도에 따른 출력신호 비교
Fig. 10 Relationship between the light output signals of fiber-optic temperature sensor and the temperature of water

그림 10은 10 : 100의 질량비를 가지는 온도 감지부를 이

용하여 물의 온도를 5℃에서부터 65℃까지 5℃ 간격으로 변화시키면서 측정된 결과를 보여준다. 물의 온도가 올라감에 따라 로핀의 흡광도가 감소하여 광섬유 끝단과 로핀의 접촉면에서 되돌아가는 반사광의 광량이 증가하게 되고, 그 결과 OTDR에서 감지되는 광 신호의 광 파워가 커지게 된다. 5 ~ 65℃의 온도범위에서 광섬유 온도 센서를 이용하여 측정된 결과를 살펴보면 온도가 올라감에 따라 측정된 광 신호의 광 파워가 커지는 것을 확인하였다. 측정된 광 신호와 온도 사이의 관계식 및 추세선(curve fitting)은 그림 10에 나타내었으며 S자형 곡선(sigmoid curve) 형태의 관계를 가지는 것을 확인하였고, 관계식과 측정값 사이의 정확도는 99.66% 이다.

3. 결 론

본 연구에서는 OTDR 기반의 원거리 광섬유 센서 시스템을 구성하였고, 키플러를 이용하여 수위 센서를, 로핀을 이용하여 온도 센서를 각각 제작하였으며, 실험실 환경에서 수위 및 온도 변화에 따른 반사광을 측정 및 분석하여 광섬유 센서의 성능을 평가하였다. 먼저 광섬유 수위 센서를 이용하여 감지용 광섬유의 끝단과 물 또는 공기와의 접촉에 따른 광 신호의 변화를 확인하였고, 수위변화에 따라 광섬유 수위 센서의 각 감지용 광섬유의 끝단에서 반사되는 광 신호가 개별적으로 실시간 측정되는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 광섬유 수위 센서는 구조가 매우 간단하고, 감지용 광섬유의 위치를 임의로 조정함으로써 측정해상도의 변경이 가능하다는 장점을 가진다.

다음으로 열변성 물질인 로핀과 에폭시를 10 : 100의 질량비로 혼합하여 온도 감지부를 제작하였다. 광섬유 온도 센서를 이용하여 5 ~ 65℃의 온도범위 내에서 온도변화에 따른 광 신호의 변화를 측정하였고, 광섬유 온도 센서의 출력신호와 물의 온도 사이의 관계식을 획득하였다. 본 연구에서 제안하는 광섬유 온도 센서는 사용된 광섬유의 동작온도 범위에 의해 측정 가능한 온도의 최댓값이 결정되므로, 로핀을 녹인 후 금속코팅 광섬유(metal-coated optical fiber)의 끝단에 딥 코팅하여 온도 감지부를 제작할 경우 측정 가능한 온도범위가 늘어날 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 OTDR 기반의 광섬유 센서 시스템은 작동원리 및 시스템의 구조가 간단하고, 수위 및 온도변화를 원거리에서 실시간 측정할 수 있으며, 배터리로 구동되는 휴대용 장비이므로 원자력 관련 시설에서 사용이 가능할 것으로 기대된다. 앞으로 더 수행해야 할 연구방향은 금속코팅 광섬유를 이용한 다채널 광섬유 센서 시스템을 제작하여 동일한 감지부로 수위와 온도를 동시에 측정하는 것이다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력연구사업임 (No. 2014040951, No. 2014031841).

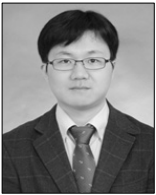
References

- [1] D. Jeon, W. J. Yoo, S. H. Shin, K.-T. Han, J.-Y. Park, B. G. Park, S. Cho, and B. Lee, "High-sensitive fiber-optic pH sensor using neutral red immobilized in porous sol-gel film," *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 21, No. 3, pp. 223-228, 2012.
- [2] S. Hong, W. J. Yoo, S. H. Shin, J. K. Seo, K.-T. Han, D. Jeon, S. Cho, and B. Lee, "Fabrication and characterization of a fiber-optic alpha/beta detector for nuclear medicine application," *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 21, No. 5, pp. 367-373, 2012.
- [3] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirotte, and A. Depre, "Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring," *IEEE Sens. J.*, Vol. 8, No. 7, pp. 1215-1222, 2008.
- [4] F. L. Pedrotti, L. S. Pedrotti, L. M. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Third Edition, Pearson, pp. 491-509, 2007.
- [5] D. King, W. B. Lyons, C. Flanagan and E. Lewis, "A multipoint optical fibre sensor system for use in process water systems based on artificial neural network pattern recognition techniques," *Sens. Actuators A*, Vol. 115, No. 2-3, pp. 293-302, 2004.
- [6] S.-H. Jung, D.-H. Lee, K.-H. Kwon and J.-W. Song, "Water sensor using macrobending-sensitive fiber for real-time submersion monitoring," *Opt. Commun.*, Vol. 260, No. 1, pp. 105-108, 2006.
- [7] S. Tomita, H. Tachino and N. Kasahara, "Water Sensor with Optical Fiber," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, No. 12, pp. 1829-1832, 1990.
- [8] W.-B. Lyons, H. Ewald, C. Flanagan and E. Lewis, "A multi-point optical fibre sensor for condition monitoring in process water systems based on pattern recognition," *Measurement*, Vol. 34, No. 4, pp. 301-312, 2003.
- [9] W. J. Yoo, J. K. Seo, K. W. Jang, J. Y. Heo, J. S. Moon, J.-Y. Park, B. G. Park and B. Lee, "Fabrication and comparison of thermochromic material-based fiber-optic sensors for monitoring the temperature of water," *Opt. Rev.*, Vol. 18, No. 1, pp. 144-148, 2011.
- [10] J. K. Seo, W. J. Yoo, D. H. Cho, K. W. Jang, J. Y. Heo, B. Lee and Y.-K. Koh, "Characteristic analysis of a thermochromic material based fiber-optic temperature sensor for measuring temperature of subsurface water," *J. of the Korean Sensors Society*, Vol. 18, No. 6, pp. 467-474, 2009.
- [11] C. Fernandez-Valdivielso, E. Egozkue, I. R. Matias, F. J. Arregui and C. Barriain, "Experimental study of a thermochromic material based optical fiber sensor for monitoring the temperature of the water in several applications," *Sens. Actuators B*, Vol. 91, No. 1-3, pp. 231-240, 2003.

저 자 소 개



심 혁 인 (沈 赫 仁)
2013년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2013년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



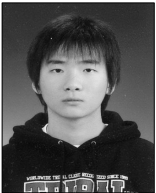
유 옥 재 (兪 昱 在)
2006년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2008년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사), 2012년 8월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학박사), 2013년 4월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 조교수



신 상 훈 (辛 尙 勳)
2007년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2009년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사), 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



장 재 석 (張 材 錫)
2014년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2014년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



김 재 석 (金 載 錫)
2014년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2014년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



장 경 원 (張 岡 源)
2005년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2007년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사), 2011년 8월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학박사), 2013년 4월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 조교수



조 승 현 (曹 丞 賢)
1989년 2월 서울대학교 섬유공학과 (공학사), 1991년 2월 서울대학교 섬유공학과 (공학석사), 2002년 8월 University of Florida (공학박사), 2010년 3월 ~ 현재 숭실대학교 유기신소재·파이버공학과 조교수



문 주 현 (文 註 鉉)
1990년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학사), 1992년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학석사), 1996년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학박사), 2007년 11월 ~ 현재 동국대학교 원자력및에너지시스템공학과 교수



이 봉 수 (李 奉 洙)
1989년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학사), 1991년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학석사), 1999년 8월 University of Florida(공학박사), 2001년 3월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 교수