

OTDR을 이용한 분포형 다채널 광섬유 온도센서 시스템의 개발을 위한 기초연구

이동은¹, 유육재¹, 신상훈¹, 김혜진², 김민건², 송영범², 장경원¹, 이봉수^{2*}

¹건국대학교 의료생명대학 의학공학부, 충북 충주시 충원대로 268, 대한민국

²중앙대학교 공과대학 에너지시스템공학부, 서울특별시 동작구 흑석로 84, 대한민국

*bslee@cau.ac.kr

1. 서론

원자로 내의 냉각재계통(coolant system)은 핵 연료의 핵분열 시 발생하는 막대한 열을 냉각재로 순환시켜 증기발생기로 전달하는 역할을 한다. 또한 원자로 냉각재계통은 배관의 파단(break)으로 인해 발생하는 냉각재상실사고(loss of coolant accident, LOCA)에 의한 비정상 운전 시, 원자로 노심 손상을 방지하기 위해 노심 냉각 기능을 수행한다[1]. 최근 냉각재계통 배관에서 마모, 침식, 부식 등으로 인한 균열 및 결함에 의해 냉각재 누설 사고가 발생하고 있다. 냉각재의 감소는 사고 시 노심으로부터 열을 제거하지 못하여 핵연료의 건전성을 보장하지 못하며, 2차적으로 방사선까지 누출될 수 있는 원인을 제공한다. 따라서 원자로 냉각재계통 배관에서의 냉각재 누설을 예방하고 냉각재상실사고로의 진행을 완화시키기 위해서 냉각재의 미세누설을 실시간 모니터링 하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 냉각재의 미세누설로 인한 온도 차이를 이용하여 냉각재 배관의 미세누설 위치를 감지 할 수 있는 실리콘 오일(silicone oil) 기반의 분포형 다채널 광섬유 온도센서(distributed multi-channel fiber-optic temperature sensor)를 제작하였다. 제작된 분포형 다채널 광섬유 온도센서는 OTDR(optical time-domain reflectometer)을 사용하기 때문에 실시간으로 측정이 가능하고, 배관의 크기에 제한을 받지 않으며 원거리에서 넓은 누설 범위의 감시가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 제작된 분포형 다채널 광섬유 온도센서의 성능평가를 위하여 온도 변화에 따른 광 파워를 측정하고 분석하였다.

2. 본론

2.1 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 온도 감지물질인 실리콘 오일(KF-54, Shin-Etsu)은 내열성이 뛰어난 무색투명의 액체로, 25°C의 온도에서 1.505의 굴절률을 가

진다. 실리콘 오일을 감지물질로 사용할 경우, -35 ~ 250°C의 온도 범위에서 측정이 가능하다. 광 계측기로 사용된 OTDR(AQ7280, Yokogawa)은 온도 변화에 따라 감지프로브(sensing probe)에서 발생한 광 파워의 변화 및 위치정보의 실시간 확인이 가능하고, 측정 가능한 거리 범위는 최대 400 km 이다[2].

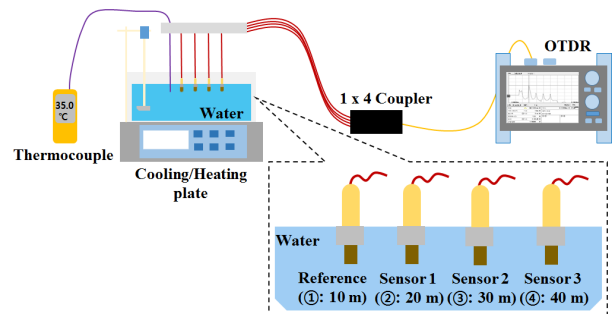


Fig. 1. Experimental setup using a distributed multichannel fiber-optic temperature sensor.

Fig. 1은 실리콘 오일 기반의 분포형 다채널 광섬유 온도센서와 냉온 플레이트(Heating/cooling plate)를 이용한 실험구성을 보여준다. 감지프로브는 실리콘 오일, FC 터미네이터, 황동관 및 광섬유로 구성되고, 기준프로브(reference probe)에는 실리콘 오일을 제외한 나머지 부품으로 구성된다. 각각의 프로브에 연결된 싱글모드 광섬유는 서로 다른 길이(①: 10 m, ②: 20 m, ③: 30 m, ④: 40 m)를 가지며, 1 X 4 광섬유 커플러를 통해 OTDR로 연결된다. 수조에 설치된 각 프로브 간의 간격 차이는 1 cm 이며, 냉온 플레이트(CP-7200GT, Intec)를 사용하여 수조에 채워진 물의 온도를 조절하였다. 또한 열전대(thermocouple: 54 II thermometer, Fluke)를 기준 온도센서로 사용하여 물의 온도를 실시간으로 측정하였고, 분포형 다채널 광섬유 온도센서의 출력 광 파워(dB)와 비교, 분석하였다.

2.2 실험 결과

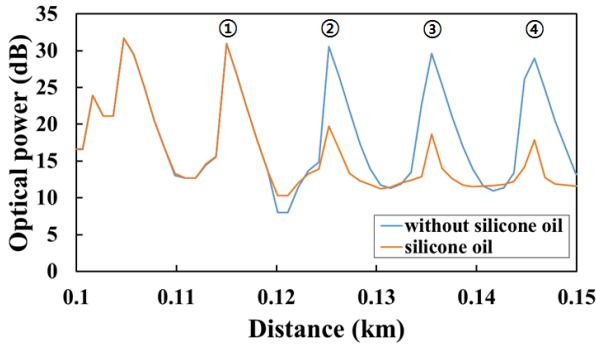


Fig. 2. Difference of the output signals with or without silicone oil.

Fig. 2는 서로 다른 길이를 가지는 1개의 기준프로브와 3개의 감지프로브를 1 X 4 커플러에 연결한 후, 25°C의 온도에서 측정된 다채널 광섬유 온도센서의 출력 광 파워의 차이를 보여준다. 감지프로브 또는 기준프로브의 내부에 위치한 광섬유의 끝단이 실리콘 오일과 접촉했을 경우, 공기와 접촉했을 때보다 프레넬 반사(Fresnel reflection)가 작아지므로 반사되는 광 신호의 광 파워가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 각각의 광 신호가 온도에 의해 개별적으로 변하므로, 실시간 온도 측정 및 위치정보의 확인이 가능함을 확인할 수 있다.

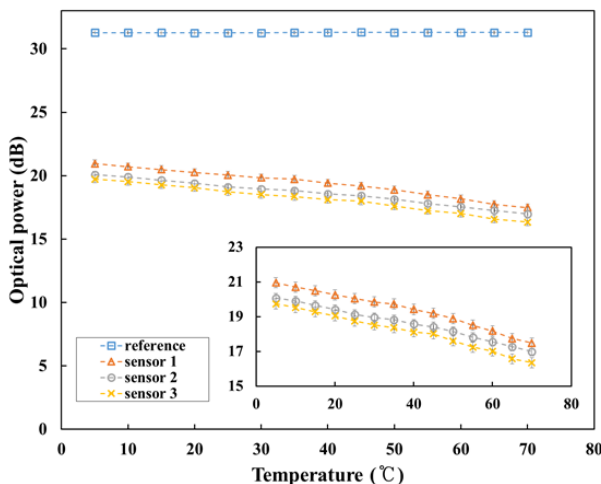


Fig. 3. Comparison of the output signals between three sensing probes and a reference probe according to the temperature.

Fig. 3은 물의 온도를 5 ~ 70°C의 온도 범위에서 5°C 간격으로 변화시키면서 측정된 광 파워의 변화를 보여준다. 실험결과, 온도가 올라감에 따라 감지프로브 내에 주입된 실리콘 오일의 굴절률이

작아지므로 반사광의 광 파워가 작아지지만, 실리콘 오일이 주입되지 않은 기준프로브의 경우에는 굴절률의 변화가 없으므로 광 신호가 일정한 값을 가지는 것을 확인하였다. 또한 광섬유 온도센서는 전송용 광섬유의 길이가 길어짐에 따라 전반적으로 광 신호가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 감지물질로 실리콘 오일을, 광 계측기로는 OTDR을 사용하여 분포형 다채널 광섬유 온도센서를 제작하였으며, 온도 변화에 따른 반사광을 측정 및 분석하여 광섬유 온도센서의 성능을 평가하였다. 실험결과, 실리콘 오일의 유무에 따라 프레넬 반사가 달라지므로 반사광의 광 파워가 차이를 보였다. 또한 물의 온도가 올라감에 따라 감지프로브에 주입한 실리콘 오일의 굴절률이 감소하여 반사광의 광 파워가 작아지는 반면, 실리콘 오일을 주입하지 않은 기준프로브의 경우에는 온도 변화에 무관하게 일정한 광 신호를 가지는 것을 확인하였다.

앞으로의 연구방향은 냉각재계통 배관이 설치된 환경과 유사한 고온환경에서도 온도 측정이 가능하도록 분포형 다채널 광섬유 온도센서의 감지프로브를 설계하고, 성능을 평가하는 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력 연구사업(No. 2014M2B2A9031841) 및 기초연구사업(No. 2015R1C1A1A02036364)의 연구결과입니다.

5. 참고문헌

- [1] 강한옥, 한훈식, 김영인, "일체형원자로 인쇄기판형 증기발생기 열수력학적 설계", 한국유체기계학회 논문집, 17(6), 77-83 (2014).
- [2] 장재석, 유욱재, 신상훈, 이동은, 김민건, 김혜진, 송영범, 장경원, 조승현, 이봉수, "OTDR을 이용한 실리콘 오일 기반의 광섬유 온도 센서", 전기학회논문지, 64(11), 1592-1597 (2015).