

## 지중선로의 분포 온도 측정 시스템 개발

이근양, 송우성  
LG전선 연구소

### Development of optical temperature distribution measurement system for Underground Power Transmission tunnel

Lee Keun Yang, Song Woo Sung  
LGCable Fiber optic & Telecom. R&D Lab

**Abstract** - Optical Temperature Distribution measurement System(OTDS) is completely different from conventional electric point sensor in that it uses the optical fiber itself as the sensor.

This new concept in temperature measuring system requires only one fiber to be laid. The use of optical fiber also gives the advantage of small diameter, light weight, explosion resistance, and electromagnetic noise resistance.

The OTDS is a sensor which is capable of making a precise measurement over a wide range of areas using only a single optical fiber. Since current temperature sensors, such as the thermocouple, are only used to measure temperature of point, they are almost impractical for measuring a wider range because of the extremely high cost.

In comparison with current sensors, the optical fiber distributed temperature sensor can make much quicker and more precise measurements at a comparatively low cost.

#### 1. 서 론

광섬유를 이용한 센서는 기존 센서에 비해 전자기적 잡음에 대한 면역성과 전기적인 절연, 내 부식성 등의 많은 장점을 갖고 있어 철강, 석유화학 등의 산업현장이나 전력 계통에 적합하며, 특히 광통신 선로와 병행되면 우수한 계측 제어 시스템을 구축할 수 있어 다양한 형태로 응용되고 있다.

또한 기존 센서에 비해 감도가 우수하고 한 대의 계측 시스템에 여러 개의 센서를 연결하여 다지점의 변화를 동시에 측정하는 다중 계측은 물론 측정 대상을 연속적으로 계측할 수 있는 분포형 계측이 가능하다.

본 연구에서는 광섬유에서의 Raman 산란을 이용하여 광섬유 주위의 온도를 10km 까지  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차로 측정 할 수 있는 광섬유 분포형 온도 측정 시스템을(OTDS : Optical Temperature Distribution measurement System) 국내에서 처음으로 개발 하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 측정 원리

광섬유에 광을 입사 시키면 광섬유 내의 유리 격자(SiO<sub>2</sub>)들에 의해 산란, 흡수 등이 일어난다. 산란광 중에

는 입사광과 동일한 파장 성분의 Rayleigh 산란광과 다른 파장 성분의 산란광이 존재하며 이를 Raman 산란광이라 한다.

광섬유 내부에서의 입사광은 석영 분자에 흡수되어 열 진동의 횡파 모드를 여기한 후 재발광하여 광 에너지를 잃으면서 입사광보다 장파장의 Stokes 광( $\lambda_s$ )으로 변환되고, 횡파 모드를 흡수하고 재발광하여 에너지를 얻은 입사광보다 단파장의 Anti-Stokes 광( $\lambda_a$ )으로 변환된다.

그림1은 입사광이 분자에 의해 산란 되는 예를 보여 주며, 일정 거리 x 만큼 떨어진 곳에서 반사되는 Raman 산란광의 위치는 (1)식으로부터 구할 수 있다.

$$x = v \cdot \frac{t}{2} \quad \text{-----}(1)$$

v = 광섬유내에서 빛의 전송 속도( $2 \cdot 10^8 \text{m/sec}$ )

t = 산란광이 되돌아 오는데 걸리는 시간

즉 시간을 알면 산란광이 반사된 온 지점을 정확히 알아낼 수 있다.

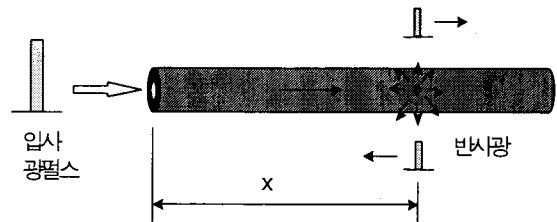


그림1. 광섬유 내에서의 구성 입자에 의한 광의 산란

그림2는 상온에서의 Raman과 Rayleigh 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 그림2에서 처럼 Rayleigh 광으로부터 주파수 분리 간격이 같은 Raman 산란광 중에서 Stokes 광과 Anti-Stokes 광의 강도 비 R(T)는 (2)식과 같다.

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a}\right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad \text{-----}(2)$$

여기서 h와 k는 각각 Planck 상수와 Boltzmann 상수이고, c는 진공 중의 광속도, T는 산란광을 수신한 광섬유 구간에서 코어의 절대온도,  $\nu$ 는 입사광의 주파수

이다. 따라서 광섬유 주위의 온도는 아래와 같이 (3)식으로부터 구할 수 있다.

$$t(j) = \frac{K_0}{K_0/tr + f(r) - f(j)}$$

$$f(j) = K1[j] + \log_2 \left( \frac{AS[j] - K2[j]}{S[j] - K3[j]} \right) \quad \text{---- (3)}$$

tr = 기준점(센서 내부의 기준 광섬유) 절대 온도

r = 기준 광섬유 내에서 기준 위치

AS(j) = Anti-stokes광의 가산치,

S(j) = stokes광의 가산치

K1, K2, K3는 상수 값이다.

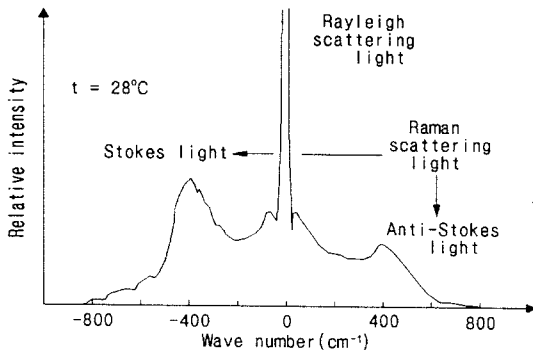


그림2. Rayleigh 산란과 Raman 산란광의 스펙트럼

광섬유 내의 Stokes광과 Anti-Stokes광의 역 산란 광 비를 측정하면 광 강도나 입사 조건, 광섬유의 구조, 재질의 조성에 상관없이 매체의 절대온도를 계측할 수 있다. 단, 실제 시스템에서는 Stokes와 Anti-Stokes 파장 사이의 광섬유 감쇄차가 있고, 파장 차이로 인해 광섬유 내에서의 빛의 진행 속도가 다르므로 약간의 보상이 필요하다

## 2.2 시스템 구성

그림3. 과 같이 Laser에서 나온 광 펄스는 광학 필터를 지나서 광섬유로 입사 되고 광섬유 안에서 Raman 산란광이 발생하여 입사단으로 돌아오면 분광 광학계에 의해서 Stokes 광과 Anti-Stokes광으로 분리된 후에 검출 소자(PD: Photo Detector)를 거치면서 전기 신호로 변환된다.

이 신호는 아날로그 앰프에 의해서 증폭된 후 A/D(Analog to Digital) 변환기로 디지털화 되어 측정 때마다 메모리에 기억되며, SNR(Signal to Noise Ratio) 개선을 위하여 평균화 처리된다. 이 과정을 수만번 반복하여 평균화 처리한 데이터는 컴퓨터로 전송하여 최종적으로는 온도 데이터로 환산된다.

이와 같은 구성법을 사용하면 원리적으로 각 지점간의 온도차 즉, 상대치는 간단히 측정할 수 있지만 절대치를 측정하기는 어렵기 때문에 장치 내부에 온도 기준

용 광섬유를 수십m 내장하고 있으며, 피측정 광섬유와 동시에 온도를 계측하고, 내장한 기준 광섬유의 온도는 Thermocouple을 이용, 측정된 온도와 비교함으로써 피측정 광섬유 전체 길이의 온도 절대치를 결정한다.

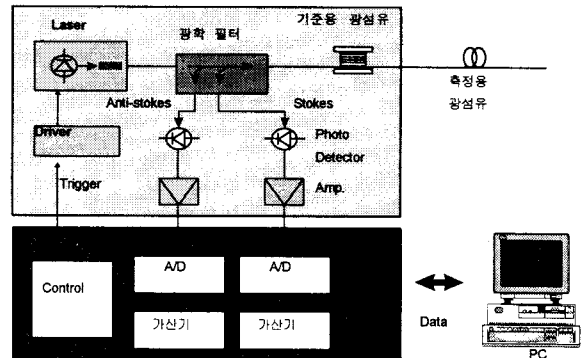


그림3. 광섬유 분포 온도 측정 시스템의 구성도

그림4는 개발된 광섬유 분포 온도 측정 시스템(OTDS)이다. OTDS는 19" Rack 실장 가능한 합체 2개로 광원부(Laser), 신호처리부(Signal Processor)와 PC로 구성 되어있다.

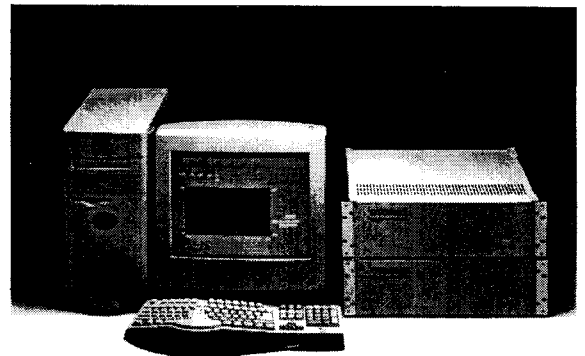


그림4. 제작된 광섬유 분포 온도 측정 시스템

## 2.5 실험 및 결과 고찰

제작된 OTDS를 이용하여 그림5와 같이 구성 하여 온도 특성 실험을 행하였다. 본실험에서는 12km의 일반 통신용 다중모드(Multi Mode 50/125) bare fiber를 사용하였다.

실제 현장에서의 광손실을 고려하여 10km보다 2km가 더 긴 12km로 실험하였다. 시료가 Bare fiber인 관계로 온도 시험 조건은 0°C ~ 50°C로 정하였다.

먼저 시료의 앞단인 1,920m 부근에서 각각 15m와 20m를 보빈에 감고, 뒷단인 10,030m 부근에서 다시 20m와 15m를 보빈에 감아 물이 담긴 항온조(OVEN)에 넣고 온도를 50°C로 상승 시켰다.

이렇게 측정된 결과를 그림6,7에 나타내었다.

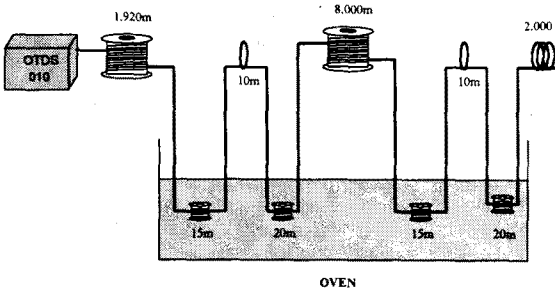


그림5. 실험 구성도

그림6은 전구간의 온도 data로 앞단과 뒷단에서 동일하게 50℃로 상승한 부분을 볼 수 있다. 그림7은 뒷단 부분을 확대한 것이다. 최대 50.1℃의 값을 얻을 수 있었다.

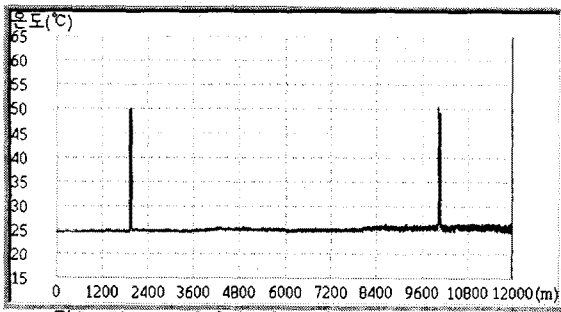


그림6. 50℃로 가열한 경우 전구간 특성

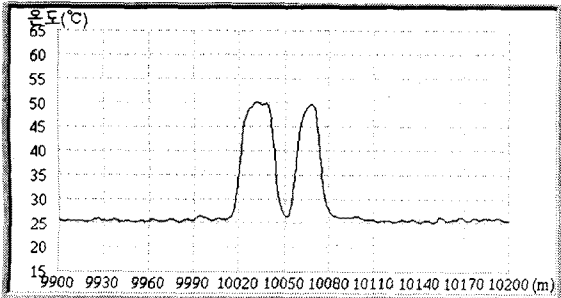


그림7. 50℃로 가열한 경우 10km 부근 특성

저온에서의 특성을 확인하기 위해 0℃로 냉각하여 온도 특성을 확인한 결과를 그림8, 9에 나타 내었다. 5 0℃때와 동일하게 앞단과 뒷단이 0℃로 하강한 것을 볼 수 있다. 뒷단에서는 -0.3℃의 data를 얻을 수 있었다.

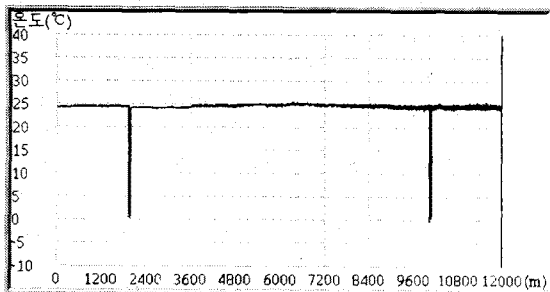


그림8. 0℃로 냉각한 경우 전구간 특성

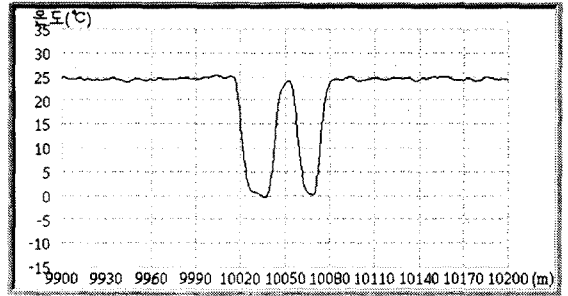


그림9. 0℃로 냉각한 경우 10km 부근 특성

실험 결과에서 알 수 있듯이 12km까지  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내의 오차 범위로 온도 측정이 가능하며 고온과 저온에서 동일한 특성을 확인 할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구는 한국전력의 생산 기술 지원 과제로 광섬유 분포 온도 측정 시스템을 국내에서 최초로 개발 하였다. 이번에 개발한 시스템은 최대 10km 까지 측정이 가능하며 측정 오차는  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내로 확인 되었다. 이번에 개발한 제품의 주요 특성을 표1에 정리하였다.

항목	특성
측정 거리	10km
온도 정확도	$\pm 1^\circ\text{C}$
온도 분해능	0.1℃
Sampling 거리	5m
측정 시간	최대 60초
센서 광섬유	MM 50/125

표1. 개발된 OTDS 규격

향후 계획으로는 실제 전력구내에 포설하여 전력 케이블의 온도를 측정하는 Field 시험을 통해 제품의 신뢰성을 확인할 예정이다. 따라서 신뢰성에 대한 평가가 완료 되는 내년에는 아래와 같이 다양한 분야에 응용이 가능하리라 생각한다.

- 전력 케이블 및 Pipe line 온도 감시
- Bus Duct, 건물 내 화재 감시
- 액화 Gas 누출 및 대형 콘크리트 경화 감시
- 도로 결빙 감시 등

### (참 고 문 헌)

- [1] Toshinori Wakami, "Accuracy of fiber optic distributed temperature sensor", Sumitomo electric review, no. 36, pp. 31-35, 1993
- [2] J. P. Dakin, "Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector", electron. Lett., vol. 21, no. 13, pp. 569-570, 1985
- [3] K. Okada, "Optical cable fault location using correlation technique", Electron. Lett., vol. 16, no. 16, pp. 629-630, 1980
- [4] 이근양, 송우성, "지중선로의 분포 온도 측정 시스템 개발 2차년도 보고서", 한국전력 기술 개발 보고서, 1997