

# 광섬유를 이용한 전력케이블의 온도분포 측정기술

이근영

(파이버컴)

## 1. 서론

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.

온도의 분포측정은 광섬유에서의 Raman산란을 이용하여 광섬유 주위의 온도를 10km 까지  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차로 측정할 수 있는 광섬유 분포형 온도 측정 시스템을 소개한다.

## 2. 측정 원리

광섬유에 광을 입사시키면 광섬유 내의 유리 격자( $\text{SiO}_2$ )들에 의해 산란, 흡수 등이 일어난다. 산란광 중에는 입사광과 동일한 파장 성분의 Rayleigh 산란광과 다른 파장 성분의 산란광이 존재하며 이를 Raman 산란광이라 한다.

광섬유 내부에서의 입사 광은 석영 분자에 흡수되어 열진동의 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.

그림 1은 입사광이 분자에 의해 산란 되는 예를 보여주며, 일정 거리  $x$  만큼 떨어진 곳에서 반사되는 Raman산란광의 위치는 (1)식으로부터 구할 수 있다.

$$x = v \times \frac{1}{2} \tag{1}$$

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

$t$  = 산란광이 되돌아 오는데 걸리는 시간

즉 시간을 알면 산란광이 반사된 온 지점을 정확히 알아낼 수 있다.

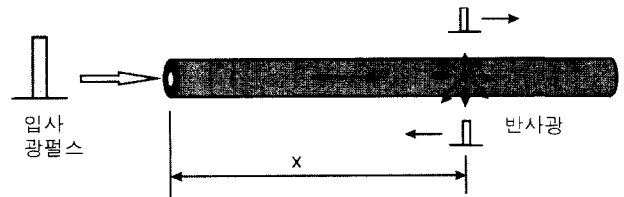


그림 1. 광섬유 내에서의 구성 입자에 의한 광의 산란

그림 2는 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.

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

여기서  $h$ 와  $k$ 는 각각 Planck 상수와 Boltzmann 상수이고,  $c$ 는 진공 중의 광속도,  $T$ 는 산란광을 수신한 광섬유 구간에서 코어의 절대온도,  $\nu$ 는 입사광의 주파수이다. 따라서 광섬유 주위의 온도는 아래와 같이 (3)식으로 부터 구할 수 있다.

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

$$f(j) = K1[j] + \log 2 \left( \frac{AS[j] - K2[j]}{S[j] - K3[j]} \right) \tag{3}$$

$tr$  = 기준점(센서 내부의 기준 광섬유) 절대 온도

$r$  = 기준 광섬유 내에서 기준 위치

$AS[j]$  = Anti-stokes광의 가산치,

$S[j]$  = stokes광의 가산치

$K1, K2, K3$ 는 상수 값이다.

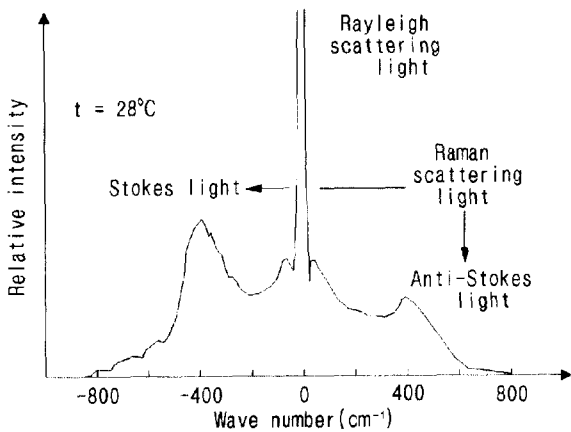


그림 2. Rayleigh 산란과 Raman 산란광의 스펙트럼

광섬유 내의 Stokes광과 Anti-Stokes광의 역 산란광 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.

### 3. 측정 시스템

그림 3과 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.

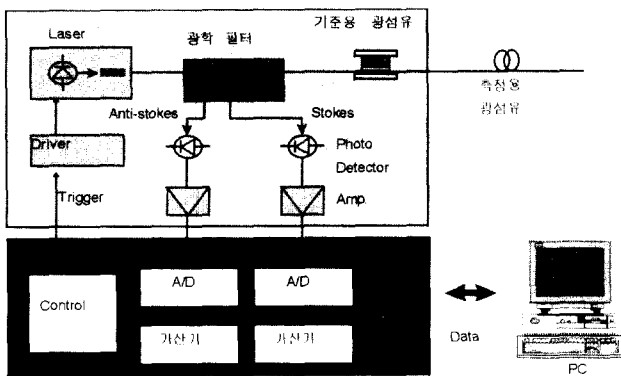


그림 3. 광섬유 분포 온도 측정 시스템

이 신호는 아날로그 앰프에 의해서 증폭된 후 A/D(Analog to Digital) 변환기로 디지털화 되어 측정때마다 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.

본 측정장치의 상세도는 그림 4와 같으며 온도특성은 12km의 일반 통신용 다중모드(Multi Mode 50/125) bare fiber를 사용한다.

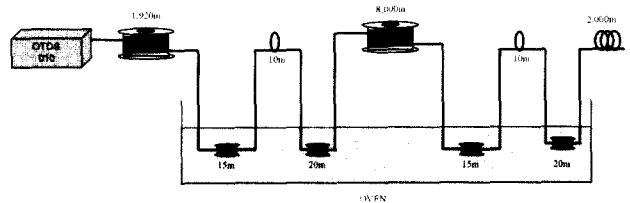


그림 4. 광섬유를 이용한 온도분포 측정 장치도

실제 현장에서는 광손실을 고려하여 10km보다 2km가 더 긴 12km로 하며, 본 장치의 측정의 가능성을 확인하기 위하여 0°C ~ 50°C의 온도의 범위에서 측정한다.

먼저 광섬유의 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 상승시키면서 얻어지는 결과는 그림 5, 6과 같다.

그림 5는 진구간의 온도 data로 앞단과 뒷단에서 동일하게 50°C로 상승한 부분을 볼 수 있으며, 그림 6은 뒷단 부분을 확대한 것이다. 최대 50.1°C의 값을 얻을 수 있다.

또한 저온에서의 특성을 확인하기 위해 0°C로 냉각하여 온도 특성을 확인한 결과를 그림 7, 8에 나타냈다. 50°C때와 동일하게 앞단과 뒷단이 0°C로 하강한 것을 볼 수 있으며, 뒷 단에서는 -0.3°C의 data를 얻을 수 있다.

저온에서의 특성을 확인하기 위해 0°C로 냉각하여 온도 특성은 그림 7, 8과 같다. 50°C때와 동일하게 앞단과 뒷단이 0°C로 하강한 것을 볼 수 있다.

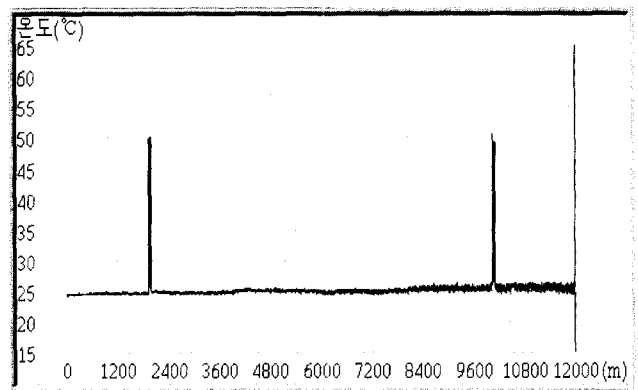


그림 5. 50°C로 가열한 경우 전선로의 온도특성

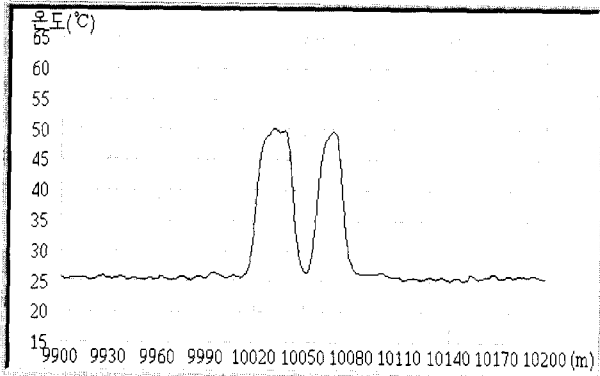


그림 6. 50°C로 가열한 경우 10km 부근 온도특성

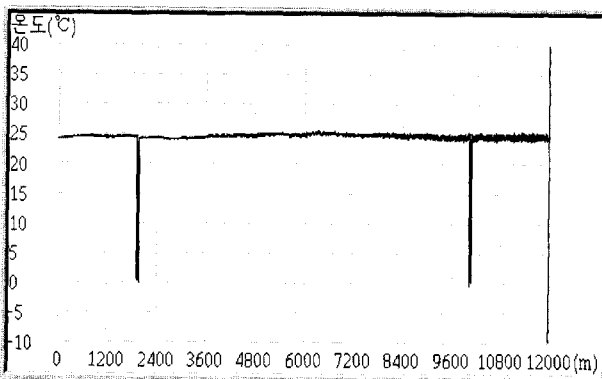


그림 7. 0°C로 냉각한 경우 전선로의 특성

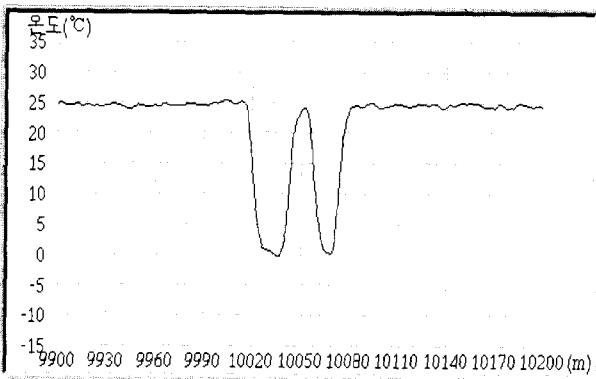


그림 8. 0°C로 냉각한 경우 10km 부근 특성

이같은 측정장치는 12km까지  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내의 오차 범위로 온도 측정이 가능하며 고온과 저온에서 동일한 특성을 확인할 수 있다.

#### 4. 전력구 선로에 적용에

전력 케이블의 온도는 여러 가지 면에서 중요한 측정 항목 중에 하나이다. 정상시에 측정된 케이블의 온도를 사고를 예측할 수 있으며 최고 전력 수요시 허용 가능한 최대 전류를 계산하기 위한 기준으로 사용이 가능하다 또한

실제로 지락 사고가 발생한 경우 케이블의 온도 변화를 측정하여 지락 사고의 위치를 파악함으로써 신속한 복구를 위한 중요한 정보가 된다.

실제적으로 응용된 예로서 전력구 선로 온도분포를 그림 9에 나타냈으며, 그림 10은 광화이버를 센서로 시이즈 안쪽에 사용된 전력케이블이며, 그림 11은 케이블의 표면에 설치되어진 광화이버 센서이다. 또한 사용되어진 온도 분포 측정 시스템의 사양은 표 1과 같다.

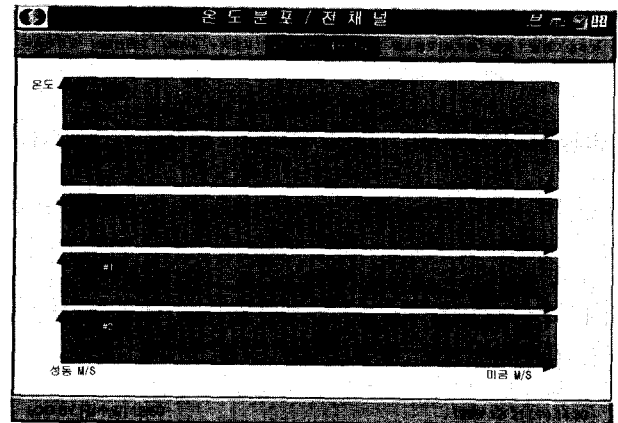


그림 9. 전력구 선로의 온도 분포에

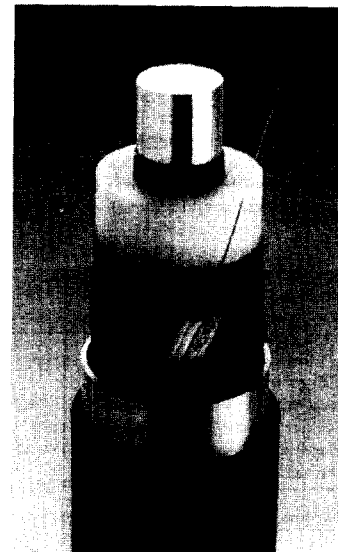


그림 10. 광센서를 갖는 전력케이블

이러한 의미 때문에 이미 여러 사례에서 광섬유를 이용한 광 분포 온도 측정 시스템이 전력 케이블에 포설되어 운영되어 지고 있으며 케이블의 온도 뿐 만 아니라 전력구의 화재 감시 용도로도 활용되고 있다.

시스템이 측정하는 온도는 전력 케이블의 온도 2CH과 전력구 상단의 터널 주위 온도를 측정하기 위한 1CH을 더해 모두 3Ch의 온도를 광스위치를 이용하여 순차적으로 측정한다. 본 시스템은 지락 시 신속한 온도 측정을 위하여 중앙 제어용 컴퓨터에 지락 접점 신호가 연결되어 순차적인

측정 도중에도 지락 신호가 입력되는 경우 바로 해당 선로로 광 스위치를 옮겨 온도 측정을 함으로써 사고 지점도 파악 할 수 있다.

광 분포 온도 측정 시스템의 원리는 광섬유에 광Pulse 열(train)을 입력시킨 후 산란되어 되돌아 오는 광신호 중 광섬유 주위 온도에 따라 광량이 변하는 2가지 Raman 산란광을 각각 측정하여 비율로 온도를 계산해 내고 온도 측정 위치는 OTDR ( optical time domain reflectometry )의 원리를 이용하여 계산한다.

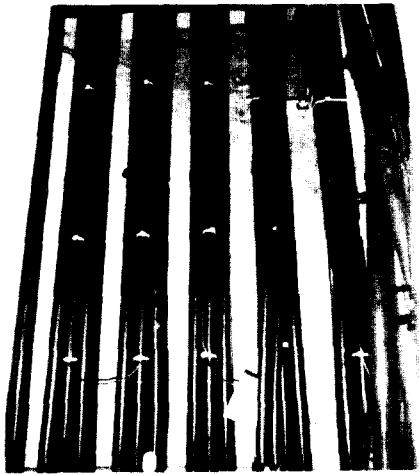


그림 11. 광센서가 외부에 부착된 전력케이블

표 1. 광 온도 분포 측정 시스템의 특성

항 목	사 양
측정 가능 거리	10 km
거리 분해능	5 m
사용 광케이블	Multi mode 50/125
측정 CH 수	6 CH
측정 온도 범위	-20 - 120℃
온도 정확도	± 1 ℃
측정 시간	CH 당 1 분

## 5. 결 론

광섬유 분포 온도 측정 시스템은 전선로가 최대 10km 까지 측정이 가능하며 측정 오차는  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내로 정밀한 측정을 할 수 있으며, 이같은 시스템은 전력구내에 포설하여 전력구의 화재 감시, 허용 전류 계산, 수냉시스템의 효율적인 운영등에 적용이 가능하여 보다 안정적이고 효율적인 전력케이블 운영에 적용이 예상된다. 전력 분야 이외에도 Pipe line 온도 감시등, 아래와 같이 다양한 분야에 응용이 가능하다.

- 유조선 및 대규모의 선박내의 다양한 감시
- Bus Duct, 건물 내 화재 감시
- 액화 Gas 누출 및 대형 콘크리트 경화 감시
- 도로 결빙 감시 등
- IBS내의 다양한 진단감시