

Raman 역산란광을 이용한 온도분포 계측특성

김요희, 오상기, 박해수, 이한철, 노종대
한국전기연구소

Distributed Temperature Measurement Based on Raman Backscattering Light

Y.H.Kim, S.K.Oh, H.S.Park, H.C.Lee, J.D.Roh
KERI

Abstract - This paper presents a distributed temperature sensor which uses a multimode optical fiber. The temperature distribution is derived from the intensity of the Raman back scattering light. Testing the sensors on measurement length of 2km of this system shows good temperature characteristics of the heated/cooled section. These performance will useful to design such as monitoring abnormal temperature rise of electric facilities.

1. 서 론

광섬유를 이용한 계측기술은 고전압, 전기적 노이즈, 고온, 부식 등 악조건하의 환경에서 사용할 수 있다는 장점으로 인해 활발하게 이용되고 있다. 또한 특히 광섬유 자체를 센서(intrinsic sensor)로 사용할 수 있으며, 여러 지점의 물리량을 연속적으로 측정할 수 있다. 최근에는 광섬유를 이용하는 분포형 계측에 대한 연구가 활발해지고 있으며, 앞으로 이의 효용성이 더욱 커질 것으로 기대된다.

분포형 계측은 역산란광(back scattering)을 이용하게 되는데, Rayleigh 산란과 Raman 산란을 이용할 수 있다. 광케이블의 선로 보수용으로 이용되는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)은 Rayleigh 산란을 이용한 대표적 예이다.

Raman 산란의 온도 의존 특성은 레이저의 출력이나 광섬유의 형태, 산란 단면적 등에 의한 광 강도에 무관하며 온도에 민감하게 동작하므로 분포형 계측에 매우 효과적이다. 다만 역산란 신호가 Rayleigh 신호의 10^{-3} 정도로 매우 미약하기 때문에 미세 신호처리기술이 필요하며, 특히 Raman 역산란 신호의 미약한 Stokes와 Anti-Stokes의 분리 신호처리 등이 중요하다.

본 논문에서는 2km의 다중모드 광섬유를 센서로 사용한 Raman 분포형 온도계측 시스템을 구성하고 거리, 온도변화에 따른 특성을 실험하여 그 결과를 설명한다.

2. 본 론

2.1 기본 원리

Raman 산란은 입사한 광자와 산란 분자 사이의 에너지 전달에 의해 발생한다. 이러한 에너지 전달은 분자의 떨기상태(vibrational states)의 밀도(population)에 의존하며, 이는 Maxwell-Boltzmann 분포에 의한 온도의존성을 가진다.

이러한 Raman 산란은 산란되는 빛의 파장에 따라 Stokes 산란과 Anti-Stokes 산란으로 분류된다. Stokes 산란은 분자가 에너지를 얻고 산란되는 빛의 파장이 길어지는 현상이며, Anti-Stokes 산란은 분자가 에너지를 잃고 산란되는 빛의 파장이 짧아지는 현상이다. 이러한 에너지 전달 현상은 다음과 같이 표시된다.

$$\nu_s = \nu_o - \nu_k \quad (1)$$

$$\nu_a = \nu_o + \nu_k \quad (2)$$

여기서 ν_s 는 Stokes 신호의 파수, ν_a 는 Anti-Stokes 신호의 파수이며, ν_o 는 입사광의 파수, ν_k 는 산란에 의해 이동된 파수이다. 그리고 주어진 광원과 매질에서 Stokes와 Anti-Stokes의 광 강도(intensity) 비는 다음과 같다.

$$R(T) = \left(\frac{\nu_a}{\nu_s} \right)^4 \exp \left\{ - \frac{h c \nu_k}{k T} \right\} \quad (3)$$

여기서 h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수로 모두 기본 물리 상수들이다. 주어진 파수 이동에 대하여 위의 식(3)은 기본 물리 상수들과 산란 부분의 온도에만 의존하기 때문에 온도 측정에 좋은 수단으로 사용될 수 있다. 또한 이 결과는 Raman 산란의 두 성분의 비이기 때문에 광섬유내의 각종 손실(splice loss, micro bending loss 등), 입사하는 광의 세기 등에 영향을 받지 않는다. 그러므로 온도 측정의 제약이 작고, 정밀한 온도 측정에 적합하게 사용될 수 있다.

온도 감도는 위의 식(3)을 미분한 형태로 얻어지며, 다음과 같이 표시된다.

$$dT = \left(\frac{k T^2}{h c \nu} \right) \left(\frac{dR}{R} \right) \quad (4)$$

Stokes 신호의 피크 강도는 실리콘 글라스의 경우 약 $\nu = 4 \times 10^4 / \text{m}$ 정도이고, 상온에서 이 파수로의 이동에 대한 Stokes와 Anti-Stokes 신호의 광 강도 비는 약 0.15 정도이다. 위의 식(4)를 한번 더 미분하고, Raman 스펙트럼의 형태를 고려하면 $\nu = 4 \times 10^4 / \text{m}$ 이 상온 근방의 온도 측정에 적합하다는 것이 알려져 있다.

Raman 산란을 이용한 분포형 온도계측 시스템은 일반적인 Rayleigh 산란을 이용한 OTDR과 구조가 거의 유사하다. 짧은 펄스의 빛이 광섬유로 입사하고, 측정하고자 하는 위치에서의 산란은 입사한 펄스가 그 지점까지 왕복하는 시간 후 역산란된 광 출력으로 결정된다. 이 경우 광섬유의 거리 z 인 위치에서 산란된 광 출력은 다음과 같다.

$$P(z) = \frac{1}{2} E \cdot v_g \cdot \alpha_s(z) \cdot B \cdot \exp(-2\gamma z) \quad (5)$$

여기서 E 는 입사한 펄스의 에너지, v_g 는 군속도(group velocity), α_s 는 z 지점에서의 산란계수, B 는 역산란 포획 인자(capture factor), 그리고 γ 는 광섬유의 감쇠 계수이다. B 는 광섬유의 NA, 산란광의 공간 분포, 그

리고 광섬유 코어의 산란 단면적(scattering cross section)에 의존한다. Raman 산란은 Rayleigh 산란에 비하여 매우 약한 특성을 가지고 있으며 이로 인하여 Raman 신호는 Rayleigh OTDR 신호에 비하여 20~25dB 정도 낮으며 이로 인하여 시스템 구성에 있어 미세 신호 처리기술이 필요하다.

2.2 시스템 설계 및 구성

분포형 온도계측을 위한 실험 시스템을 다음의 그림(1)과 같이 구성하였다. LD에서 방사된 펄스는 센서용 광섬유로 입사한다. 센서용 광섬유 안에서 발생한 Raman 역산란광은 파장분리 광학계에 의해 Stokes 신호와 Anti-Stokes 신호로 분리된다. 분리된 각각의 신호는 APD에 의해 전기 신호로 바뀌고 이 신호를 증폭한다. 증폭된 신호는 A/D 변환기를 통해 디지털 신호로 바뀐 후 디지털 평균화 과정을 거친다. 이렇게 평균화 처리된 결과를 컴퓨터로 전송하면 광섬유의 온도 분포를 측정할 수 있다.

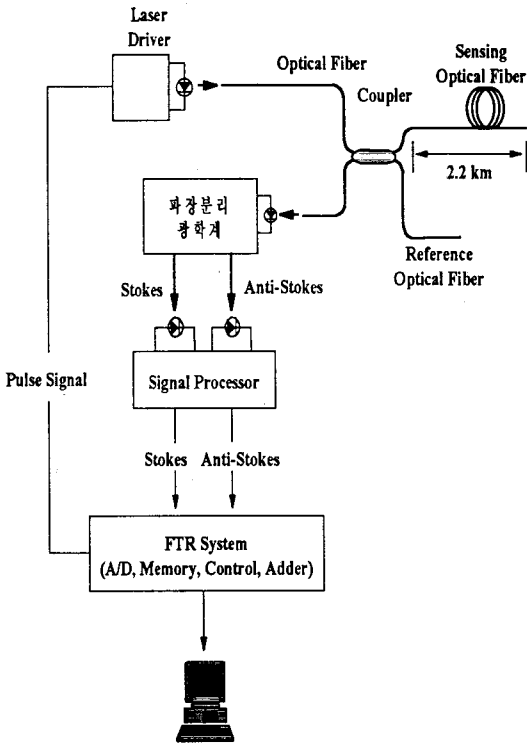


그림 1. 실험 시스템 구성도

광원으로는 최대 광출력 10W, 펄스폭 20ns인 고출력 LD를 사용하였다. 그리고 센서용으로는 2km 길이의 광섬유를 사용하였다. 근거리 측정의 경우는 전송 손실이 어느 정도 있어도 무방하기 때문에 NA가 크고 결합이 용이한 다중모드 광섬유를 사용하였다. 이 경우 펄스가 광섬유 끝단까지 진행하였다가 되돌아오는 시간은 약 11 μ m 정도가 소요되며, 이것은 사용되는 펄스의 반복주파수를 제한하게 된다.

Raman 산란을 이용한 분포형 온도계측 시스템은 일반적인 Rayleigh 산란을 이용한 OTDR과 거의 유사하지만 파장분리 광학계가 부가되어야 한다. 파장분리 광학계는 역산란광 성분 중에서 Rayleigh 산란 성분을 제

거하고 Raman 산란 성분의 Stokes 신호와 Anti-Stokes 신호를 분리하기 위한 장치이다. 간단한 구성의 파장분리 광학계를 위하여 광 커플러와 협대역 간섭 필터 등을 사용한 OWDD(Optical Wavelength Division Demultiplexer)를 설계 제작하였다.

Raman 역산란에 의한 광 신호는 크기가 매우 작기 때문에 직접 온도 측정 데이터로 사용할 수 없다. 그러므로 광 펄스를 연속적으로 광섬유에 입사하고 역산란광을 검출한 후 수만~수백만 회의 신호를 평균화 처리하여 측정 데이터로 사용하여야 한다. 이를 위해서 먼저 아날로그 신호를 A/D 변환기를 사용하여 10bit 디지털 신호로 변환한 후 고속 Adder, Data Router, 그리고 Main Control Unit 등으로 구성된 FTR(Fiber Temperature Radar)을 사용하여 평균화함으로써 S/N을 향상시켰다.

2.3 실험결과 및 고찰

그림(2)는 앞의 시스템을 사용하여 얻어지는 Raman 역산란광의 Stokes 신호와 Anti-Stokes 신호의 한 형태를 나타낸다. 이 신호는 S/N을 향상시키기 위하여 약 5만 회까지 평균화 과정을 거쳐 얻어진 것이다. 계측용 광섬유의 일부 지점을 80 $^{\circ}$ C로 가열하였을 경우 그림의 실선으로 표시된 Stokes 신호는 거의 안정적임에 비하여 점선으로 표시된 Anti-Stokes 신호는 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다.

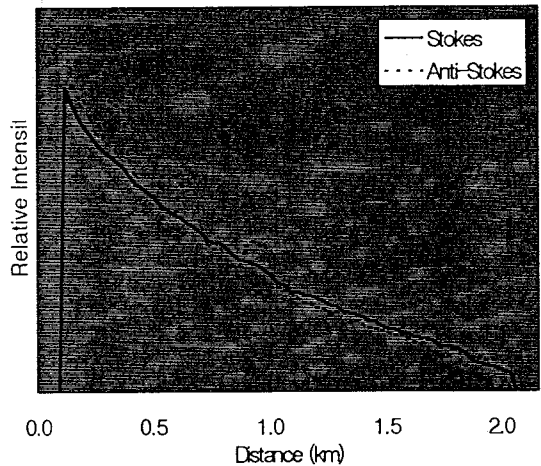


그림 2. Raman 역산란광의 형태

이러한 Anti-Stokes 신호의 온도에 따른 변화는 다음의 그림(3)에서 더욱 확실히 살펴볼 수 있다. 그림(3)은 광섬유의 일부지점의 온도를 0 $^{\circ}$ C에서 100 $^{\circ}$ C까지 20 $^{\circ}$ C 간격으로 변화시키면서 Anti-Stokes 신호를 표시한 것이다. 이 그림으로부터 Anti-Stokes 신호는 온도에 크게 의존하며, 온도에 따라 거의 직선적으로 변화함을 살펴볼 수 있다.

온도에 대하여 안정적인 Stokes 신호와 온도에 크게 의존 하는 Anti-Stokes 신호를 PC로 전송하여 계산하면 센싱 광섬유의 온도 분포를 측정할 수 있다. 다음의 그림(4)는 앞의 그림(3)으로 표시되는 Anti-Stokes 신호를 사용하여 온도분포를 측정한 결과이다. 그림에서 화살표로 표시된 0.35km, 0.65km, 0.95km, 1.95km 지점에 온도 변화(가열 혹은 냉각)가 가해져 있음을 정성적으로 살펴볼 수 있다.

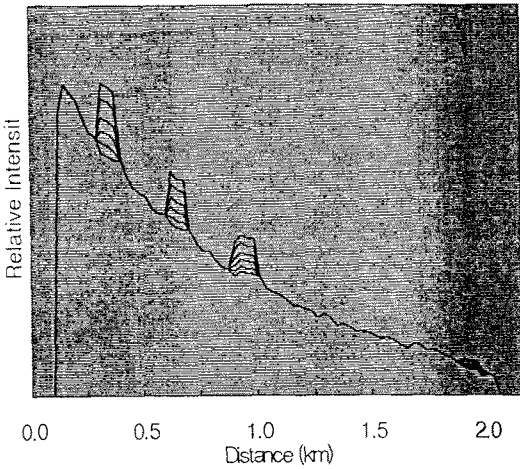


그림 3. 온도에 따른 Anti-Stokes 신호의 변화

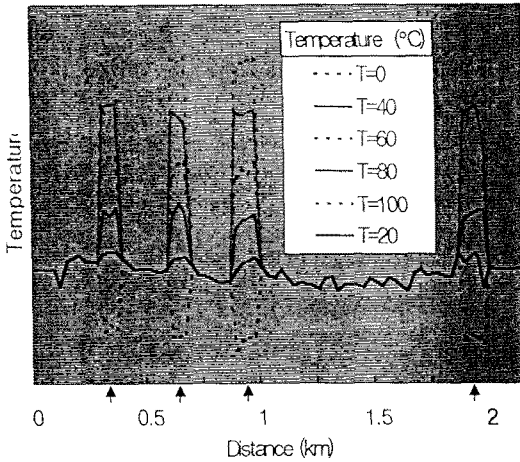


그림 4. 온도분포 측정결과

3. 결 론

본 논문에서는 Raman 역산란 신호를 이용한 분포형 온도계측 시스템을 구성하기 위하여 기본적인 시스템, 즉 광원부, 센싱 광 케이블, 광학계 및 신호처리회로를 구성하고 미세한 Raman 역산란신호(Stokes, Anti-Stokes)를 측정하였고 이를 거리별, 온도변화에 따라 역산란신호 변화 특성을 실험하였다.

실험에서 Stokes신호는 안정적임을 보여주었고 Anti-Stokes신호는 온도변화(0°C ~ 100°C)에 따라 거의 직선적으로 보여 주었다. 또한 거리별(0.35, 0.65, 0.95, 1.95km)로 온도변화를 주어 실험한 결과 양호한 특성을 얻었다.

앞으로 이를 실제로 현장에 적용하려면 거리분해능, 고속 신호처리기술, 정확도 등의 향상, 그리고 미세온도 변화 계측, 측정거리 확대 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

- [1] J. P. Dakin, D. J. Pratt, C. W. Bibby, and J. N. Ross, "Temperature Distribution Measurement Using Raman Ratio Thermometry", Proc. SPIE, 556, pp. 249-256, 1985
- [2] M. A. Marcus, A. H. Hortog, C. F. Purdum, and A. P. Leach, "Real-time distributed fiber-optic temperature sensing in the process environment", SPIE vol.1172, pp194-201, 1989
- [3] K. Ogawa, Y. Ozawa, S. Yamamoto, H. Kawakima, and T. Tsutsui, "Fiber Optic Temperature Laser Rader for Distributed Temperature Measurement", HITACHI Cable review, No.9 pp. 21-26, 1990
- [4] S. Iida, K. Matsuo, M. Asakawa, S. Yamamoto, and H. Kato, "Practical Use of a Long-Range Fiber Optic Temperature Laser Radar", HITACHI Cable review, No.11 pp. 11-66, 1992
- [5] S. Osawa, K. Takeda, M. Yamamoto, and T. Kashimura, "Surveillance System for Underground Power Transmission Facilities", HITACHI Cable review, No.9 pp. 15-20, 1990
- [6] 김요희, 오상기, 김인수, 박해수, 노종대, 김영수 "Rayleigh 역산란광을 이용한 광파이버 진단에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 1890-1892, 1997