



분산온도측정(DTS) 기술의 지열분야 적용

김진상
(주)에코스 이사

1. 개요

광섬유 케이블(Fiber Optic Cable)을 이용하는 분산 온도 측정(DTS Distributed Temperature Sensing) 기술은 광섬유 케이블을 온도 센서로 사용하는 기술로서, 설치된 광섬유를 따라서 길이 방향으로 일정한 간격에서 온도를 측정하고, 일정한 시간 간격을 두고 거의 실시간으로 온도를 측정할 수 있다는 점에서 기존의 온도 측정 방식과 큰 차이가 있다.

기존의 RTD(Resistance Temperature Detector)와 Thermocouple은 온도차이로 발생한 전류를 측정하여 온도를 측정하는 방식인데 비하여, 광섬유를 이용한 분산 온도측정 방식은 광섬유 코어에 레이저 펄스를 전송하고 광섬유 코어를 통과하는 도중에 산란이 되어서 되돌아오는 신호를 측정하여 해당 지점의 온도를 측정하는 방식이다.

한 가닥의 선을 사용하므로 대규모 프로젝트에서 짧은 간격으로 많은 양의 온도 데이터를 수집할 수 있다. 이러한 프로젝트에서 RTD나 Thermocouple을 온도 데이터를 수집하는 지점마다 설치한다면 수 많은 온도 센서를 설치하게 될 것이다. 또한 광섬유는 다른 센서에 비하여 주변의 전자기장으로 인한 Noise에 민감하지 않으며 화학적으로 안정한 재질이며 또한 내부식성을 가지

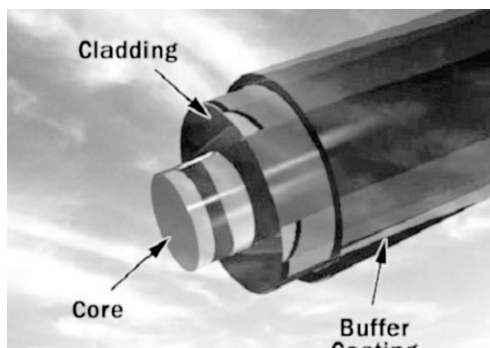
므로 적용 가능 분야가 매우 넓다.

광섬유를 이용한 분산 온도 측정 기술은 광통신 선로와 연계되면서 적용분야가 넓어지고 있으며, 소방분야에서 화재탐지 기술에서 사용되며, 또한 전력 및 가스 공급 계통과 산업 현장에서 적용이 활발하다.

광섬유를 이용한 분산온도 측정기술이 지하수 및 지표수 분야에 사용된 것은 1990년대이며, 이 당시에는 보어홀 내부의 온도를 의 0.1℃의 해상도로 측정하였으나, 2000년대 중반에는 측정 가능한 온도가 상승하고, 정확도와 더불어 공간 및 시간 해상도가 허용할 만한 수준에 도달하였다. 예를 들면 5km이하의 광섬유에서 적분시간을 1시간 이상으로 측정하면 1 m간격에서 0.01℃의 해상도를 얻을 수 있다. 여러 개의 많은 지점에서 온도를 정확하게 측정할 수 있는 능력으로 인하여 지열 및 관련 분야에서도 분산 온도 측정 기술을 확대되고 있다.

2. 분산 온도 측정의 원리

분산 온도 측정 기술에서 센서로 사용되는 광섬유 케이블은 그림 1과 같이 실리카로 구성된 내부의 코어와 코어를 둘러싸고 있는 클래딩 그리고 버퍼 코팅으로 구성된다. 코어는 통상적으로 9,

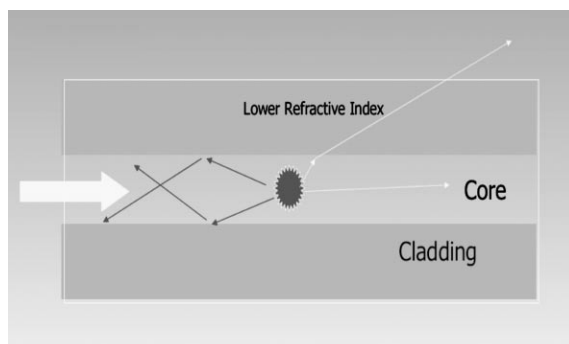


[그림 1] 시스템 주요 사양

50, 또는 $62.5\mu\text{m}$ 의 직경을 갖는다. 클래딩은 통상적으로 $125\mu\text{m}$ 의 직경이며, 코팅은 $250\mu\text{m}$ 의 직경이 일반적이다. 직경이 $9\mu\text{m}$ 인 코어는 Single Mode의 Brillouin DTS에서 사용되며, $50\mu\text{m}$ 직경의 코어는 Multi Mode인 Raman DTS에서 사용된다. 클래딩은 굴절률이 낮은 재료를 사용하며, Jacket는 버퍼라고도 하여 다중으로 사용되기도 한다.^[1]

Raman효과를 이용하는 DTS기술은 광섬유에 광선을 보내면 광섬유 코어 내부의 석영 입자에 의하여 산란 및 흡수가 발생한다. 그림 2와 같이 산란광선 중에서 일부는 진행방향과 같은 방향으로 계속 진행하고 일부는 되돌아오며, 일부는 각도가 커져서 코어 밖으로 나가 버린다.

산란광선 중에서 입사 광선의 주파수와 같은 Rayleigh 산란과 주파수 성분이 다른 산란광이



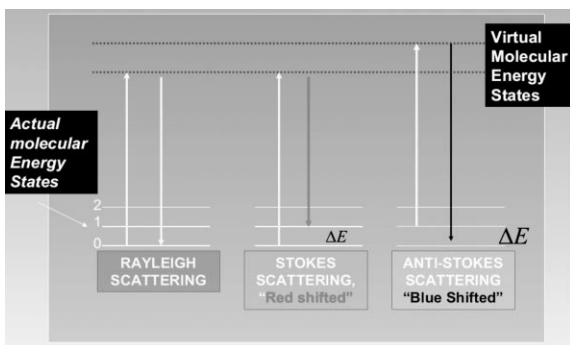
[그림 2] 코어 내부의 산란과 흡수

존재한다. Rayleigh 산란은 광자와 전자 간의 상호작용에 대한 탄성 반응을 나타낸다. 그림 3과 같이 분자가 들뜬 에너지 상태까지 상승되었다가 원래 상태로 되돌아오면서 입사광선의 파장과 같은 빛을 낸다.

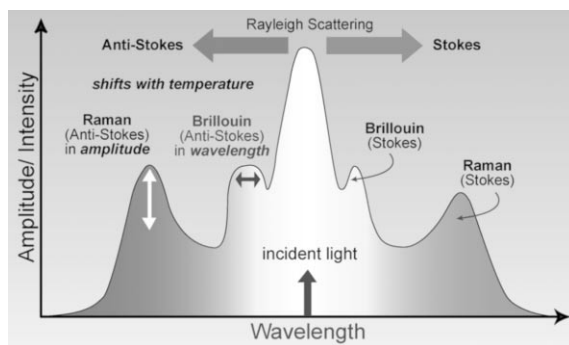
Brillouin 산란은 광자와 광섬유 재료의 격자구조의 진동상태 사이에서 비탄성 반응을 나타낸다. Raman산란은 분자내 진동과 SiO_2 와 GeO_2 의 회전에너지 수준의 차이로 인한 비탄성 상호작용에서 기인하며, Raman 산란은 산란에너지 중에서 가장 작은 에너지이다.(그림 4)

Brillouin과 Raman산란은 입사 광선의 파장보다 높거나 낮은 파장의 광자를 생성한다.(그림 3, 그림 4) 이로 인하여 붉거나 푸른 전이가 발생하며 이는 입사 광선과 재료의 함수이다.

Raman산란에서 DTS장비에서 수집되는 anti-



[그림 3] 산란에서 에너지상태의 변화



[그림 4] 주파수에 따른 산란의 종류

Stokes와 Stokes 신호의 강도를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{as}(z) &= I_0 \exp(-\alpha_0 z) \exp(-\alpha_{as} z) P_{as} \Gamma_{as} \\ I_s(z) &= I_0 \exp(-\alpha_0 z) \exp(-\alpha_s z) P_s \Gamma_s \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $I_{as}(z)$ 와 $I_s(z)$ 는 Raman산란의 anti-Stokes와 Stokes신호의 강도를 각각 가리키며, I_0 는 DTS 장비에서 전송하는 레이저 펄스의 강도이다. 그리고 α_0 , α_{as} , α_s 는 각각 전송된 레이저 펄스의 감쇠계수, 후방 산란된 anti-Stokes와 Stokes신호의 감쇠계수이다. α_{as} 와 P_{as} 는 Raman산란의 anti-Stokes와 Stokes신호에서 광자의 Bose-Einstein 확률분포를 나타내며, Γ_{as} 와 Γ_s 는 광원 방향으로 되돌아가는 산란 광선의 비율을 나타내는 anti-Stokes와 Stokes의 포획(capture) 계수이다. $\exp(-\alpha_0 z)$ 항은 DTS장비로부터 광선이 진행할수록 광선이 감쇠되는 것을 나타내고 있으며, $\exp(-\alpha_{as} z)$ 와 $\exp(-\alpha_s z)$ 항은 DTS장비 방향으로 광선이 되돌아올 때 anti-Stokes와 Stokes신호가 감쇠되는 것을 나타낸다. Raman 후방산란 신호는 주파수가 다르므로 감쇠도 다르다. 광자의 Bose-Einstein 확률분포는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} P_{as} &= \left[\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \right]^{-1} \\ P_s &= \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ΔE 는 Raman산란을 일으키는 분자에너지 상태의 차이를 나타내며, k 는 Boltzmann상수이며, T 는 절대온도이다. 위의 식(2)를 식(1)에 대입하여 anti-Stokes와 Stokes 신호강도의 비 $R(z)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$R(z) = \frac{I_{as}(z)}{I_s(z)} = \frac{\Gamma_{as}}{\Gamma_s} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \frac{\exp(-\alpha_{as} z)}{\exp(-\alpha_s z)} \quad (3)$$

여기서 anti-Stokes와 Stokes의 포획계수의 비

를 Γ_{as} / Γ_s 는 캘리브레이션 인자 C로 표시되며 이는 입사 광선의 파장과 주파수, 후방 Raman신호, DTS장비의 광자 detector, DTS장비의 운영 조건에 따라 영향을 받는다. 후방 Stokes와 anti-Stokes의 감쇠 차이를 $\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_{as}$ 로 정의하고, $\gamma = \Delta E/k$ 를 도입하면 식(3)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$R(z) = C \exp\left(-\frac{\gamma}{T}\right) \exp(\Delta\alpha z) \quad (4)$$

식(4)를 온도에 대하여 정리하면,

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln[z] - \ln[R(z)] + \Delta\alpha z} \quad (5)$$

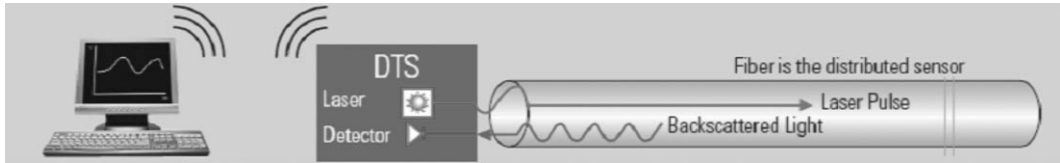
식(5)는 광섬유 센서의 길이 방향을 온도를 나타낸다. 여기서 단순화를 위하여 길이방향의 감쇠비를 상수로 가정하였지만, 실제로는 제조, 변형을 또는 다른 결함 등이 Stokes와 anti-Stokes 주파수가 다르게 산란시키므로 인하여 광섬유의 길이 방향으로 변화할 수도 있다. 공간과 시간에 대하여 광섬유 길이 방향으로 적분한 측정 온도 값이 Stokes와 anti-Stokes강도의 비를 이용하여 예측할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이, 광섬유 길이 방향으로 온도를 결정하기 위해서 산란 지점의 위치를 알아야 한다. 이 지점의 위치는 광섬유에서 빛의 반사시간을 측정함으로써 구할 수 있다. 광선이 이동한 거리 z 는 다음 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$z = \frac{ct}{2n} \quad (6)$$

여기서 c 는 진공상태에서 광선의 속도이며, n 은 광섬유의 굴절률이며, t 는 전방과 후방 방향으로 광선의 전파시간을 나타낸다.

3. 측정 시스템

분산 온도 측정 시스템은 광센서에 레이저 펄스



[그림 5] 분산 온도 측정 시스템

를 입사시켜서 필요한 데이터를 얻는 장치인 시간대역광반사측정기(OTDR, Optical time domain reflectometry)에 기반을 두고 있다. Raman 효과에 기반을 두고 있는 ROTDR(Raman optical domain reflectometry)와 fiber Bragg grating(FBG)가 현재 널리 사용된다. 최근에 측정 거리가 길고 온도와 변형율을 측정할 수 있는 Brillouin 효과에 기반을 두고 있는 BOTDR(Brillouin optical time domain reflectometry)가 관심을 끌고 있다.

DTS 장치는 그림 5와 같이 레이저를 발생시켜서 광섬유 센서로 광선을 내보내는 장치와 광섬유를 통과하면서 산란되어 되돌아오는 광선을 측정하는 장치(Detector)로 구성된다.

중전에 비하여 정확도와 더불어 공간 및 시간 해상도가 허용할 만한 수준에 도달하였다. 예를 들면 5km이하의 광섬유에서 적분시간을 1시간 이상으로 측정하면 1m간격에서 0.01℃의 해상도를 얻을 수 있으며, 공간적 해상도가 25 cm간격으로 측정값을 얻을 수도 있다.

상대적인 온도 변화를 정확하게 얻을 수 있는 해상도가 높은 ODTR은 온도의 절대값인 정확도를 확보하기 위하여 DTS장비 내부에 통상적으로 150 m 정도의 길의 기준 광섬유가 내장되어 있어서 온도의 정확도를 확보하도록 디자인 되어 있다.

DTS 장비는 장비내부에 내장된 광섬유 코일을 기준으로 온도를 계산하여 제공한다. 이러한 온도 값은 커넥터에서 손실에 대하여, 외부 광섬유에 대하여 감쇠에 대하여 가정을 기반으로 변환되며, 온도의 오차는 시간과 길이에 따라서 변화하므로 외부 환경을 측정할 때에는 유의해야 하며, 적절

한 캘리브레이션을 수행한다.^[2]

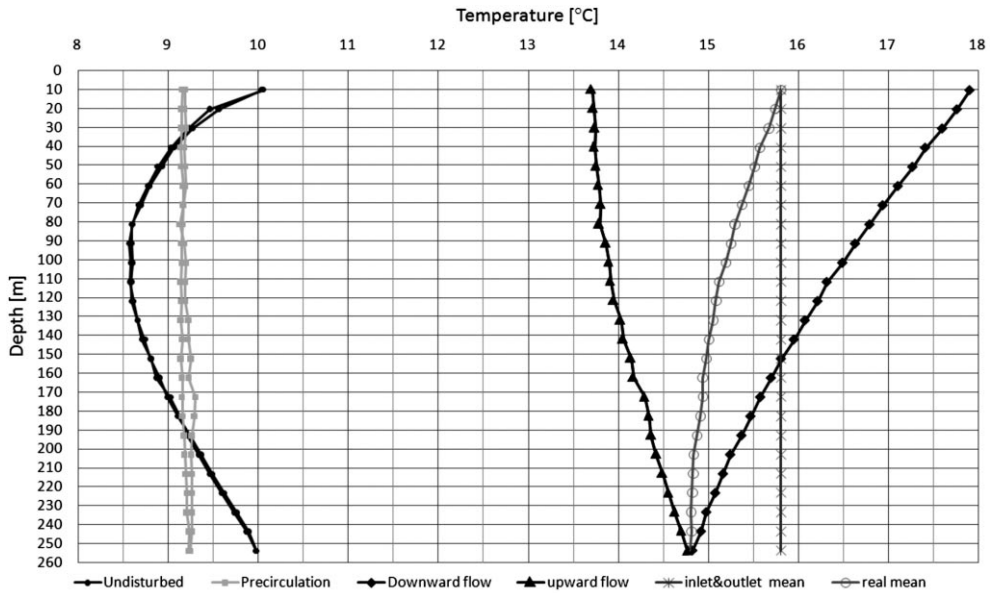
4. 적용 사례

보어홀에서 온도 측정에서는 Hurtig가 1992년에 DTS를 이용하여 측정한 것으로 발표되었으며, 수직밀폐형 지중열교환기에서 DTS를 이용한 TRT(Thermal Response Tests)에 대하여 큐슈대학의 Fujii가 2006년에 발표하였으며, DTS를 이용하여 U파이프의 온도분포 측정결과를 2008년 Acuna가 발표한 바 있다.

석유와 가스 산업에서도 정확하고 연속적이고 실시간으로 모니터링하기 위하여 DTS를 활용하고 있으며, 심부지열 개발에서도 DTS 기술이 활용되고 있으나, 본 기고문에서는 지표수 지하수 및 지열 냉난방에 관련하여 최근에 발표된 사례를 소개한다.

지하수와 지열 분야에도 DTS의 적용을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지표수에 지하수가 유입되는 현상과 유입되는 지하수의 양을 측정하는 연구결과가 Briggs등^[3]에 의하여 2012년도에 발표되었다. 지하수가 강물에 유입되는 분포와 양을 측정하기 위하여 음향 도플러 유속계등의 기존 방법과 비교를 수행하였다. 미국 뉴욕주 시라큐스 인근에서 900 m의 광섬유 케이블을 설치하여 1.4 m³/s의 저유량 지하수 유입을 측정함으로써 인하여 큰 강에서 적은 양의 지하수 유입을 찾아 내며 유량도 정확하게 예측할 수 있음을 보였다.

Striegel등^[4]은 현장에서 토양의 습도를 모니터링 하는 시스템을 개발하였다. 현장에서 장소에 따라 시간에 따라 습도의 변화를 파악하는 것은 종래 기술로서 어려웠으나, 지중에 매립한 전열선을 탐



[그림 6] DTS를 적용한 TRT에서 측정된 깊이별 온도 변화

제한 광섬유 케이블을 이용하여 히트펄스를 발생 시키며 이에 대한 반응을 2m간격으로 모니터링 하였다. 건조한 조건에서도 공간적 그리고 시간적으로 연속측정하여 RMSE가 0.016을 기록하였으나, 습도가 높은 조건에서는 민감도가 낮아져서 0.05를 기록하였다.

Acuna등^[5]은 보어홀에서 열전도율과 열저항을 측정하여 TRT결과와 DTS를 이용한 TRT결과를 비교하였다. DTS를 이용하는 TRT는 보어홀에서 열전도율과 보어홀 열저항을 보어홀을 따라서 여러 지점에서 측정할 수 있도록 하는 것이 특징이다. 여기서는 260 m깊이이며 지하수가 차 있는 관정에 U자관 열교환기가 들어 있고 그 내부에는 에탄올 수용액이 채워져 있으며, 분산 온도 측정을 위하여 U자관 내부에 광섬유를 설치하여 광섬유를 따라서 온도를 측정하였다.(그림 6) 시험을 4단계로 수행하며, line source 모델이 사용되며 보어홀의 열반응을 예측하였으며, 유체 온도 분포가 제시되며, 지중열전도율과 열저항이 깊이에 따라 차이가 나는 것을 보였다.

Bahr등^[6]은 보어홀에서 상세한 수리 특성 평가

를 목적으로 자연 상태와 인공가온 상태에서 온도를 모니터링하는 기존의 연구를 기반으로 연구 하였으며, DTS는 보어홀내 유동이 측정된 우물 내 지하수 온도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 사용되었다. DTS의 독특한 모니터링 능력으로 인하여 Sandstone Aquifer 시스템에 대하여 전례없이 상세하게 조사하였다.

5. 결론

광섬유 케이블을 이용하는 분산 온도 측정 기술은 설치된 광섬유를 이용하여 길이 방향으로 그리고 실시간으로 온도를 측정하는 기술이며, 이러한 기술은 지하수, 지표수, 토양 및 지열 TRT분야에서도 연구되었으며 향후에 적용이 확대될 것으로 예상된다.

기술의 발전으로 정확도와 더불어 공간 및 시간 해상도가 허용할 만한 수준에 도달하였다. 25cm의 공간적인 간격에서 0.01°C의 해상도를 얻는 수준에 이르러 지열분야의 연구에서는 물론 TRT 시험에서도 적용이 증가할 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. Suárez, Hausner, Dozier, Selker and Tyler, Heat Transfer in the Environment: Development and Use of Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing, Developments in Heat Transfer, 2011, InTech.
2. van de Giesen, Steele-Dunne, Jansen, Hoes, Hausner, Tyler and Selker, Double-Ended Calibration of Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data, Sensors 2012, 12, 5471-5485.
3. Briggs, Lautz and McKenzie, A comparison of fiber-optic distributed temperature sensing to traditional methods of evaluating groundwater inflow to streams, April 2012, Hydrological Processes, Vol. 26, Issues 9, pp.1277~1290.
4. Striegl and Loheide II, Heated Distributed Temperature Sensing for Field Scale Soil Moisture Monitoring, Groundwater, Vol 50, No. 3, pp.340~347.
5. Acuna, Mogensen, and Palm, Distributed Thermal Response Test on a U-Pipe Borehole Heat Exchanger.
6. Bahr, Hart and Leaf, Distributed temperature sensing (DTS) as a hydrostratigraphic characterization tool, Wisconsin Department of Natural Resources.