

## 온도 모니터링을 위한 광섬유 센서와 온도센서 배열 케이블의 비교 연구 A Study on the Comparison between an Optical Fiber and a Thermal Sensor Cable for Temperature Monitoring

김중열<sup>1)</sup>, Jung-Yul Kim, 김유성<sup>2)</sup>, Yoo-Sung Kim, 송윤호<sup>3)</sup>, Yoon-Ho Song

<sup>1)</sup> (주)소암컨설팅 대표이사, CEO, Soam Consultant Co., Ltd.

<sup>2)</sup> (주)소암컨설팅 이사, Director of Research and Services, Soam Consultant Co., Ltd.

<sup>3)</sup> 한국지질자원연구원 지열지하수연구부 책임연구원, Principal Researcher, Groundwater & Geothermal Research Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

**SYNOPSIS** : In this study, two different technologies which can measure temperature simultaneously at many points are introduced. One is to use a thermal sensor cable that is comprised of addressable thermal sensors connected in parallel within a single cable. The other is to use an optic fiber with Distributed Temperature Sensing (DTS) system. The difference between two technologies can be summarized as follows. A thermal sensor cable has a concept of "point sensing" that can measure temperature at accurate position of a thermal sensor. So the accuracy and resolution of temperature measurement are up to the ability of the thermal sensor. Whereas optic fiber sensor has a concept of "distributed sensing" because temperature is measured by ratio of Stokes and anti-Stokes component intensities of Raman backscatter that is generated when laser pulse travels along an optic fiber. It's resolution is determined by measuring distance, measuring time and spatial resolution.

The purpose of this study is that application targets of two temperature measurement techniques are checked in technical and economical phases by examining the strength and weakness of them. Considering the functions and characteristics of two techniques, the thermal sensor cable will be suitable to apply to the assessment of groundwater flow, geothermal distribution and grouting efficiency within 300m distance. It is expected that the optic fiber sensor can be widely utilized at various fields (for example: pipe line inspection, tunnel fire detection, power line monitoring etc.) which need an information of temperature distribution over relatively long distance.

**Key words** : Optic fiber sensor, Thermal sensor cable, DTS, Temperature monitoring

### 1. 서 론

온도 측정의 중요성과 그 결과에 대한 유용성은 오래전부터 인식되어 왔다. 그러나 재래의 온도 측정은 대체로 단일 센서에 바탕으로 두고 있었기 때문에 그의 공간적인 온도 측정 면에서 기술적 및 경제적인 측면에서 많은 제약이 뒤따르게 되었다. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 여러 위치의 온도를 동시에 모니터링 할 수 있는 기법들이 개발되고 있으며, 본 논문에서는 최근 개발된 여러 위치의 온도를 모니터링 할 수 있는 두 가지 기법을 소개하고 있다. 그 중 하나는 단일 케이블 내에 여러 개의 온

도센서(addressable thermal sensor)가 병렬로 장착된 온도센서 배열 케이블을 이용하는 기법이며 다른 하나는 광섬유 센서(optic fiber)를 이용하여 분포적인 개념을 갖는 온도를 모니터링 하는 기법(Distributed Temperature Sensing: DTS)이다. 두 가지 기법의 가장 큰 차이점은 우선 온도센서 케이블의 경우는 센서가 놓인 정확한 위치에서 온도를 측정하는 소위 “point sensing” 개념이며, 광섬유 센서의 경우는 일정 구간의 평균온도를 대변하는 분포 온도 측정 즉, “distributed sensing” 개념이다. 즉, 온도센서 케이블은 직접 온도를 측정하는 센서를 사용하기 때문에 정확한 위치에서의 온도를 측정할 수 있으며 그의 대한 정확도 및 분해능은 사용된 온도센서의 성능에 따라 결정된다. 한편, 광섬유 센서의 경우에는 광섬유를 따라 빛(또는 레이저)이 전달될 때 연속적으로 역산란 되는 Raman 반사파의 Stokes와 anti-Stokes 성분의 산란조도(intensity)의 비를 분석함으로써 온도를 측정하는 것이기 때문에 방사되는 레이저의 파장과 연관된 분포 개념의 온도 측정이 이루어진다. 이러한 경우 온도 분해능은 측정거리, 측정시간, 위치 분해능(spatial resolution)에 따라 결정된다.

본 연구에서는 상기 두 기법의 다양한 비교 실험을 통해 기능적인 면에서 그들의 장단점을 검증함으로써 그 응용 대상을 기술적 및 경제적 측면에서 분석하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 온도센서 배열 케이블과 광섬유 센서 케이블을 함께 동일한 구간에 설치하고 동시에 온도를 측정하는 다양한 실험이 수행되었다. 한편, 두 개의 온도모니터링 기법의 현장 응용 사례를 예시함으로써 각 기법의 현장 응용성도 검증하고 있다.

## 2. 온도센서 배열 케이블 및 광섬유센서 케이블을 이용한 온도측정의 근본원리

그림 1은 기존의 단일 온도센서를 이용한 측정기법과 상기 온도센서 배열 케이블을 이용하여 온도를 모니터링 하는 기본 개념을 비교하고 있다 단일 온도센서를 이용하는 경우에는 단일 온도센서 케이블을 여러 개 묶어 온도를 측정하기 때문에 전체 케이블 다발의 두께에 대한 제한성과 더불어 측정 제어에 대한 문제점, 그리고 케이블 다발을 이동하며 반복 측정함으로 인한 인력과 시간의 소모에서 오는 문제점들이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해

개발된 것이 바로 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 측정시스템이다(김중열 외, 2004). 온도센서 배열 케이블의 기본 착상은 각기 고유의 주소를 가지고 있는 온도센서(addressable thermal sensor)의 개발에 의해 비롯되었다.

그림 2는 상기 온도센서의 구성(block diagram)을 나타내고 있다. 이 온도센서는 parasite power circuit, 64bit ROM, 1-wire port, memory control logic, scratchpad, temperature sensor 등으로 구성되어 있다. 여기서 센서의 가장 중요한 특성은 각 센서가 고유주소(64-bit serial code)를 가지고 있다는 것이다. 이러한 특성 때문에 단지 1-wire bus를 이용하여 여러 위치에 분포되어 있는 온도 센서들을 조정할 수 있게 됨으로써 하나의 microprocessor에 의해 여러 위치의 온도를 동시에 할 수 있는 것이다. 또한 이 온도센서에는 자체 기억장치(memory)도 가지고 있기 때문에 단일 케이블 내에 여러 개의 온도 센서를 장착할 때 각 센서의 위치 정보도 저장할 수 있게 되어 있다. 따라서 케이블 내에 많은 센서가 장착되더라도 각 센서가 장착된 케

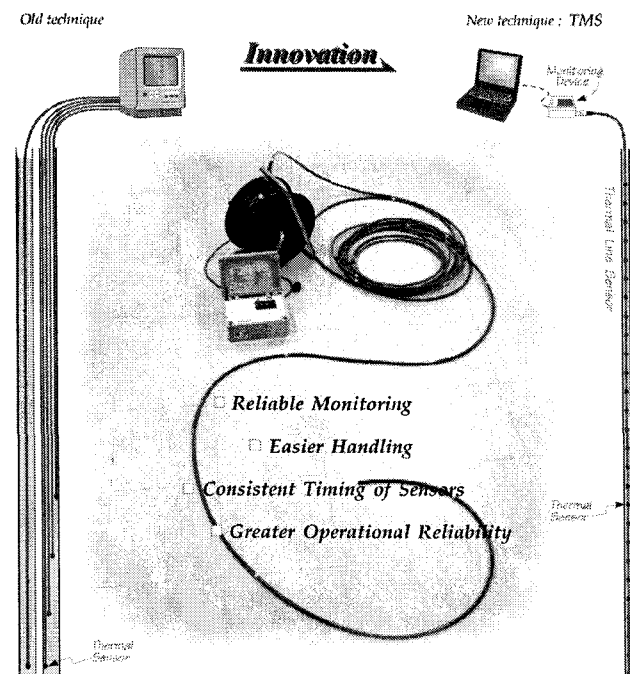


그림 1. 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도모니터링 시스템

이들의 정확한 위치에 대한 온도 값이 동시에 측정될 수 있는 것이다. 한편, 모니터링 장치(control unit) 내에 장착된 충전 배터리만으로도 장기적인 모니터링을 수행하기 위해서는 온도 센서의 전력 소모량이 매우 적어야 한다. 그런데 상기 온도센서는 모니터링 장치에서 통신을 위해 송신하는 펄스 신호만으로도 구동이 가능하도록 설계(parasite power circuit)되어 있어 그 전력소모량이 극히 적게 고안되어 있다. 이러한 특성들로 인해 단일 케이블 내에 여러 개의 온도센서를 장착하여 모니터링 할 수 있는 온도센서 배열 케이블 개발이 가능하게 되었다고 볼 수 있다.

한편 광섬유센서 케이블을 이용한 온도측정의 근본원리는 다음과 같다. 광섬유에 대단히 폭이 좁은 레이저(pulsed laser) 파형 요소를 보내면 극히 일부분이 흡수되고 산란(scattering) 현상이 발생한다. 그중 일부분은 반사되며 광다이오드(수신기)에 의해 수신된다. 만약 광섬유의 주위 환경(예: 온도, 변형, 압력)의 변화가 있으면 세 가지 종류의 산란현상(그림 3 참조)이 관심의 초점이 된다. 즉, Rayleigh scattering, Raman scattering 및 Brillouin scattering 이다. 여기서 온도와 관련된 산란은 Raman scattering 이다. Raman 산란은 Stokes와 anti-Stokes 범위의 산란으로 구분되는데 여기서 Stokes 범위의 산란은 온도 변화에 무관하지만 anti-Stokes 범위의 것은 온도변화에 따라 그의 진폭 면에서 예민한 반응을 보여준다. 여기서 온도측정은 바로 Stokes와 anti-Stokes의 Raman 산란조도(intensities)를 분석함으로써 얻게 되는 결과이다. 한편, Raman 산란은 파장 범위 폭이 크기 때문에 분석 측면에서 그의 분리가 용이하기 때문에 바로 온도측정 분해능을 높이는 유리한 여건이 된다. 광섬유센서 케이블에 의한 온도 측정은 연속적으로 역산란(back scattering)되는 신호를 대상으로 하기 때문에 대체로 그의 파장 크기는 최소 측정점 간격으로 간주된다. 현재 기술 수준의 온도측정 간격은 0.5m 이다(그림 4 참조).

예를 들면, 만약 10km 광케이블이 설치되어 온도를 측정하는 경우 20,000(=10km/0.5m) 지점에서의 온도 값을 동시에 얻을 수 있다는 것이다. 이는 바로 20,000개의 온도센서를 0.5m 간격으로 배치시켜 온도를 측정하는 것과 대등하다. 편의상, 이러한 광섬유센서 케이블에 의한 온도측정방법을 DTS (Distributed Temperature Sensing) 기법이라 한다. 광섬유센서에 의한 온도측정은 역산란되는 Raman 반사파를 측정 분석하는 결과에 바탕을 두고 있기 때문에 온도측정 분해능은 ① 측정 거리, ② 측정 시간, ③ 위치 분해능(spatial resolution) 선정에 따라 결정된다. 그림 5는 Senso-net 사의 DTS system 에 의한 온도 분해능에 대한 상관 관계를 나타내고 있다. 일별하여 측정시간이 길어지면 그만큼 분해능이 높아지고 측정 거리가 길어지면 그만큼 온도 분해능이 낮아짐을 알 수 있다. 예를 들면 케이블 길이가 2km 일 때 측정 시간이 1분이면 그 분해능은 약 0.14℃, 측정시간이 10분이면 그 분해능은 약 0.04℃가 된다.

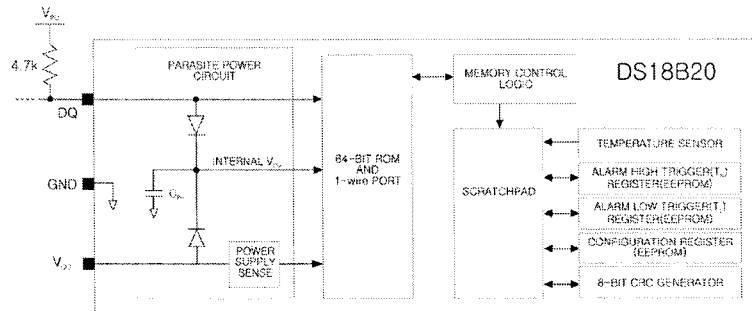


그림 2. 온도센서 케이블에 장착된 addressable thermal sensor의 block diagram.

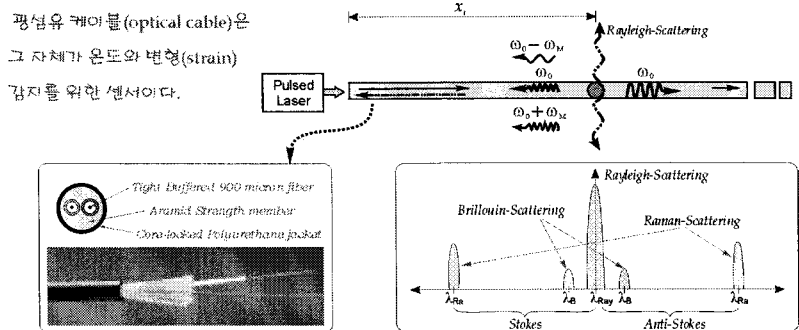


그림 3. 광섬유센서 이용기술의 근본원리.

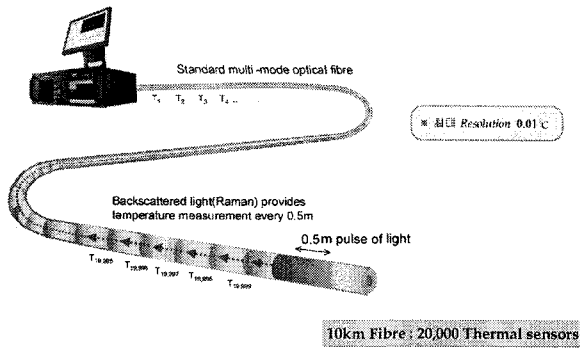


그림 4. 광섬유센서 케이블을 이용한 DTS 온도 측정기법의 원리.

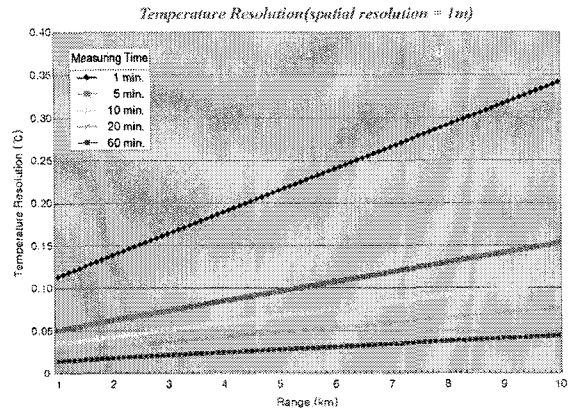


그림 5. 거리 및 측정시간에 따른 DTS의 온도분해능.

### 3. 온도센서 배열 케이블 및 광섬유센서 케이블에 의한 온도측정 비교 실험

광섬유센서 케이블을 이용한 온도 측정의 정확성을 확인하고 분포온도 측정의 개념을 설명하기 위하여 광섬유센서 케이블과 온도센서 배열 케이블을 함께 화를 주면서 동시에 온도를 측정하는 다양한 실험을 실시하였다. 여기서 사용된 온도센서 배열 케이블은 50cm 간격으로 온도센서가 배열된 것이다. 그림 6(a)는 온도센서 배열 케이블과 광섬유센서 케이블을 약 33.5m부터 50m까지의 구간에 나란히 배열하고 두개의 케이블에서 측정된 온도 분포를 상호 대조하여 나타내고 있다. 전체적으로 비슷한 온도분포 양상을 보이고 있으며 각 위치에서 약간의 온도 차이를 보이는 것은 온도센서 배열 케이블의 경우에는 온도센서 위치에서의 온도를, 광섬유케이블의 경우에는 약 50cm 구간의 평균온도를 대변하고 있기 때문이다. 그림 6(b)는 두개의 케이블 구간 중 약 42.25m~44.5m 구간에 약 10cm 폭을 갖는 5개의 찬 물수건을 그림과 같이 배치하여 온도 변화를 준 후 얻어진 결과를 상호 대조하여 나타내고 있다. 온도센서 배열 케이블의 경우에는 물수건이 정확하게 온도센서 위에 놓여 있는 상태에서만 큰 온도 변화를 보여주고 있다. 반면 광섬유센서 케이블의 경우에는 5개의 물수건이 배치된 전체 구간에서 온도 변화를 보여주고 있으며 특히 5개 물수건의 중앙에서 가장 낮은 온도 값을 보여주고 있다. 이는 온도센서 배열 케이블의 경우에는 바로 온도센서가 위치한 곳의 온도 변화만을 감지하지만 광섬유센서 케이블의 경우에는 어느 위치에서 온도변화가 일어나더라도 이를 분포 개념으로 감지할 수 있음을 보여주는 결과라 하겠다.

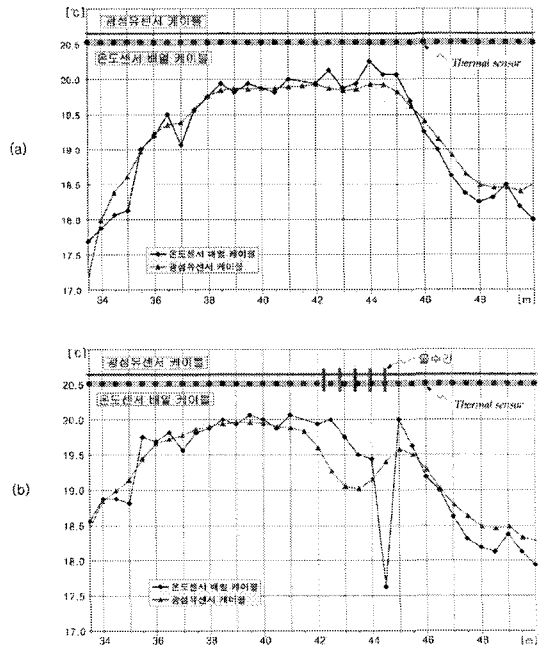


그림 6. 온도센서 배열 케이블과 광섬유센서 케이블의 측정 결과 비교 (a) 상온에서의 측정 결과 (b) 42.25m~44.50m 구간에 5개의 찬 물수건으로 온도변화를 준 후 측정 결과.

그림 7은 광섬유센서 케이블과 온도센서 케이블에 온도 변화를 주기 위해 찬 물수건을 점차 늘려가고 있는 장면을 보여주고 있다. 그림 8은 상기 실험에 대한 온도 측정 결과를 나타내고 있다. 즉, 두 개의 케이블 구간 중 38m 지점을 중심으로 폭 약 10cm의 찬 물수건을 1개, 3개, 5개, 7개, 9개로 추가해 가면서 온도변화를 준 후 광섬유센서 케이블과 온도센서 케이블에 의한 온도 측정 결과를 상호 대조하고 있다. (a)는 물수건을 올려놓지 않은 상온의 온도 분포를 보여주고 있으며 대체로 비슷한 온도 분포 양상을 보이고 있다. 두개 케이블 구간 중 38m 지점을 중심으로 찬 물수건이 1개(b)에서부터 9개(f)로 증가함에 따라 두개의 케이블에 의한 온도 변화 양상을 살펴보면 온도센서 배열 케이블의 경우에는 찬 물수건이 정확하게 온도센서 위치에 놓이기 때문에 찬 물수건의 개수와 관계없이 약 18℃의 온도를 보이고 있다. 그러나 광섬유센서 케이블의 경우에는 찬 물수건 9개 까지 증가한 후에나 약 18℃의 온도를 나타내고 있다. 이는 바로 상기에서 서술한 바와 같이 광섬유센서 케이블의 경우에는 약 50cm 구간의 평균온도를 대변하고 있다는 것을 입증한 것이 된다. 그림 9는 두개 케이블 구간 중 40.75m를 중심으로 폭 10cm의 찬 물수건을 1개(a), 3개(b), 5개(c)로 추가해 가면서 온도 변화를 준 후 그 측정결과를 상호 대조하여 나타내고 있다. 여기에서도 찬 물수건은 온도센서 사이에 위치하기 때문에 온도센서 배열 케이블 보다 광섬유센서 케이블의 경우가 온도 반응에 민감함을 알 수 있다. 그림 10은 한국지질자원연구원 내 시추공에서 온도센서 배열 케이블과 광섬유센서 케이블을 약 심도 50m까지 동시에 배열한 상태에서 측정된 결과를 상호 대조하여 나타내고 있다. 전 구간에서 온도 변화가 거의 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 상기 실험 결과들을 분석하면 광섬유센서 케이블을 이용한 온도 측정의 정확도는 온도센서 배열 케이블과 거의 대등하다고 할 수 있다. 또한 광섬유센서 케이블을 이용한 온도 측정은 약 50cm 구간의 평균 온도를 나타내기 때문에 온도센서 배열 케이블과 같이 한 지점의 정확한 온도변화는 감지할 수 없는 반면, 온도센서 배열 케이블에서 감지할 수 없는 위치의 온도 변화는 오히려 광섬유센서 케이블에서 감지해 낼 수 있다는 특징을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

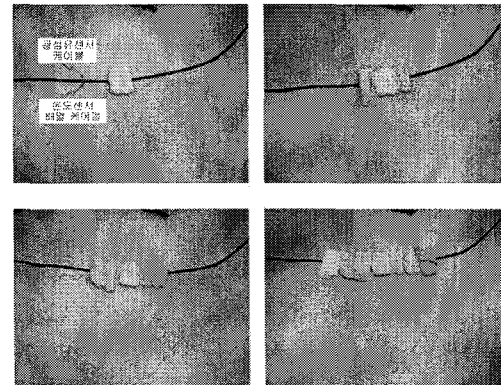


그림 7. 온도변화를 주기위해 찬 물수건을 점차 늘려가는 장면.

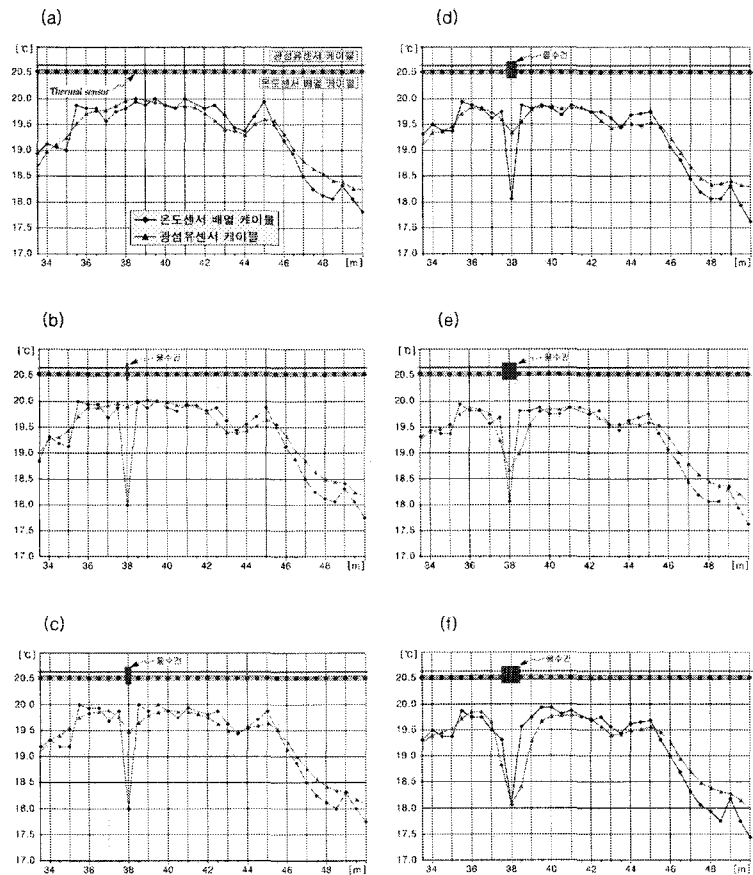


그림 8. 케이블 위치 38m지점을 중심으로 폭 10cm의 찬물수건을 1개(b), 3개(c), 5개(d), 7개(e), 9개(f)로 추가해 가면서 온도변화를 준 후 온도센서 배열케이블과 광섬유센서 케이블의 측정 결과를 상호대조하여 나타내고 있다.

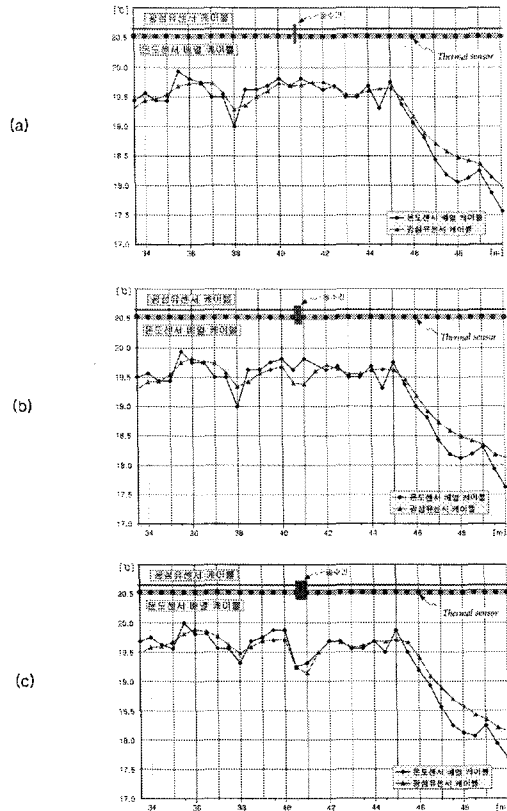


그림 9. 케이블 위치 40.75m를 중심으로 폭 10 cm의 찬 물수건을 1개(a), 3개(b), 5개(c)로 추가해 가면서 온도변화를 준 후 온도센서 배열 케이블과 광섬유센서 케이블의 측정 결과를 상호대조하여 나타내고 있다.

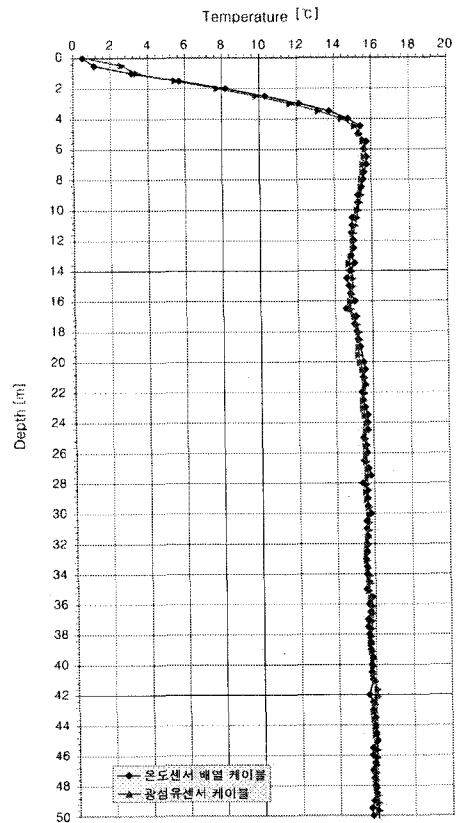


그림 10. 한국지질자원연구원내 실험시추공에서 얻게 된 온도센서 배열 케이블 및 광섬유센서 케이블에 의한 측정결과를 상호대조하고 있다.

#### 4. 온도센서 배열 케이블 및 광섬유센서 케이블의 현장 응용성

온도센서 배열 케이블의 현장 응용성 연구는 그라우팅 성과 판단, 지하수 유동, 담체 침투수 탐지 등 다양한 분야에서 수행된 바 있다(김중열 외, 2004, 2005). 그림 11은 직경 약 40cm, 길이 3m의 PVC 파이프(두께 약 7mm) 내에 모래층과 시멘트층의 두께를 달리하도록 배치하여 시멘트가 양생되는 과정에서 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도 모니터링 결과를 나타내고 있다. 이 실험의 목적은 약 5cm 정도의 모래층도 그 위치가 온도 측정에 의해 인식될 수 있는가를 점검함으로써 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도모니터링으로 그라우팅 성과 판단이 가능한지를 판단하는 데 있었다. 그림 11은 그라우팅 모형이 완성된 후 약 80시간 동안 10분 간격으로 측정한 결과를 각 센서 위치(센서 1은 상단, 센서 28은 하단)에 따라 표현한 것이다. 측정 초기에는 온도가 급상승(약 50°C)하며 온도 하락은 대체로 완만한 형태를 보여주고 있다. 화살표로 표시한 온도변화는 지면의 인접된 센서에 의한 것으로서 지면의 온도 변화가 반영된 것이다. 그림 12는 상기 실험에서 양생초기(그림 11에서 화살표 A로 표시한 시간 구간)의 각 센서에 대한 온도 변화를 나타내고 있다. 모래층이 두꺼울수록 상대적인 온도 편차가 두드러지게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 한편 약 5cm 두께의 모래층의 경우에도 미세한 온도 편차를 보임으로 해서 그에 대한 식별이 가능함을 알 수 있다.

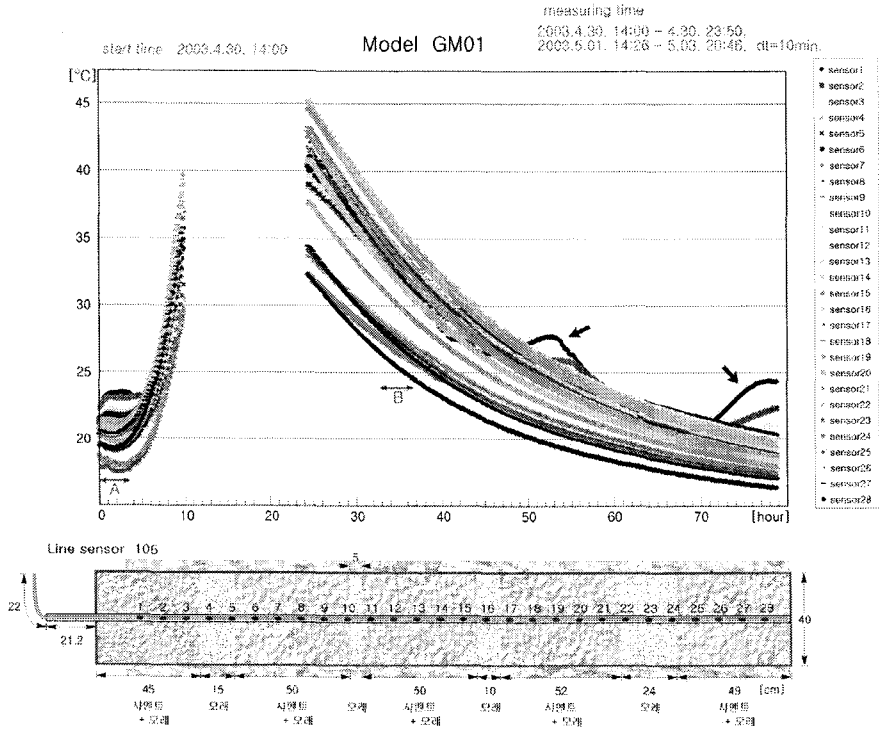


그림 11. 그라우팅 매질 양생시 각 온도 센서에서 측정된 온도 변화.

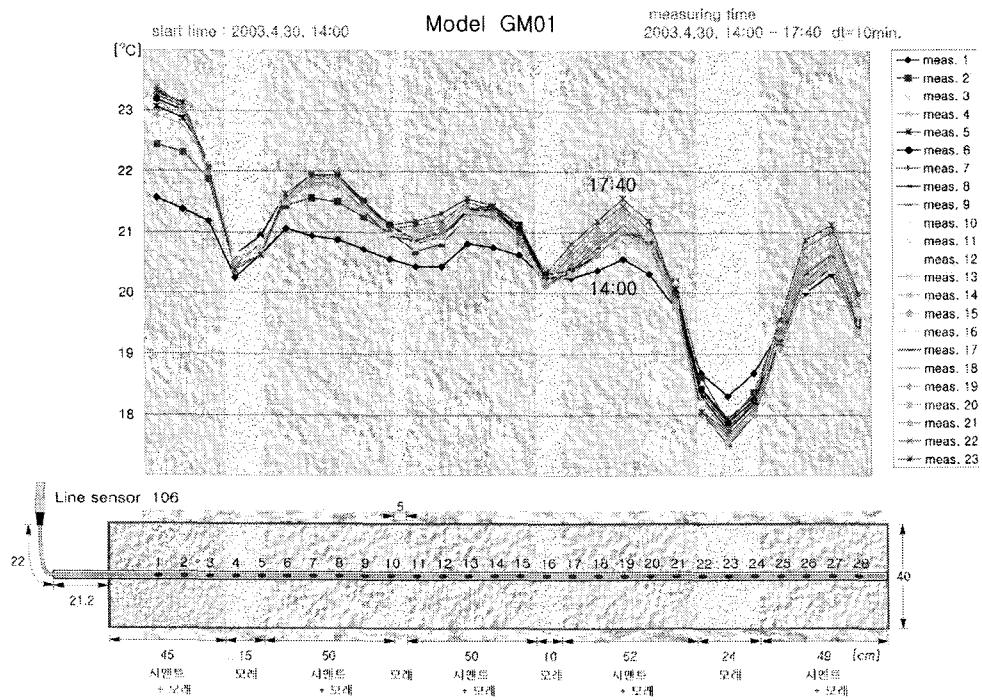


그림 12. 양생초기(그림 11의 화살표 A로 표시된 시간 범위) 각 센서에서 관찰된 온도 변화.

다음은 댐체 기초 차수를 위한 그라우팅 시험 구간에서 실시된 온도모니터링의 현장 응용 사례를 예시하고 있다. 그림 13은 그라우팅 시험 시공 구간의 그라우팅 주입공(GBH-1, GBH-2 및 GBH-3), 확인 시추공(MDB-5) 및 온도 모니터링 시추공(적색원으로 표시)의 위치를 나타내고 있으며, 그림 14는 4개 시추공(MDB-5, GBH-1, GBH-2 및 GBH-3)에서 수행한 텔레뷰어 자료로부터 얻어진 3차원 절리틈새 밀도 입체 영상과 온도모니터링 시추공에 대한 텔레뷰어 이미지와 3D-log 그리고 온도센서 배열 케이블의 위치를 보여주고 있다. 온도 모니터링 시추공은 심도 약 10m까지 천공되었으며 여기에는 10cm 간격으로 총 27개의 온도센서가 장착된 온도센서 케이블이 6.8m~9.4m 심도구간에 놓이게 하였다. 그림 15는 상기 온도센서 배열 케이블에 의해 약 19일간 측정된 온도 결과 중 약 4일간의 자료만을 예시하고 있다. 여기에는 작업을 할 수 있는 낮 시간(노란색으로 표시)과 작업이 없는 밤시간(회색으로 표시)을 구별하고 있으며, 시추공 천공 시간, 수압시험 시간, 그라우팅 주입 시간을 표시하고 있다. 대체로 수압시험 시간동안

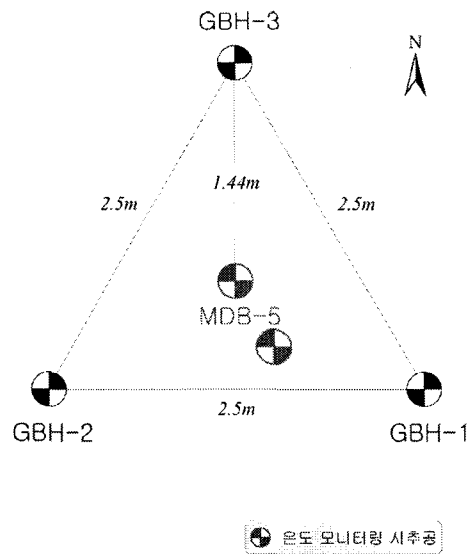


그림 13. 그라우팅 시험구간에서 온도센서 배열 케이블 설치를 위한 온도 모니터링 시추공(적색원으로 표시)의 위치를 나타내고 있다.

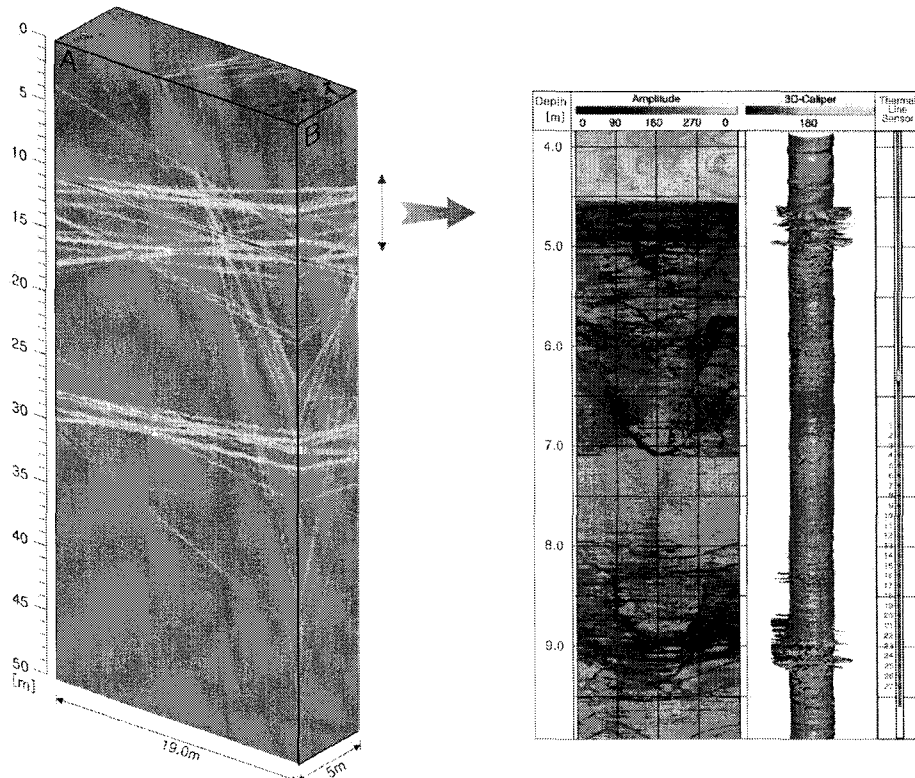


그림 14. 그라우팅 시험구간의 4개 시추공(MDB-5, GBH-1, GBH-2 및 GBH-3)에 대한 절리틈새 밀도의 입체영상, 온도 모니터링공에 대한 텔레뷰어 이미지와 온도센서 배열 케이블의 놓인 위치를 나타내고 있다.



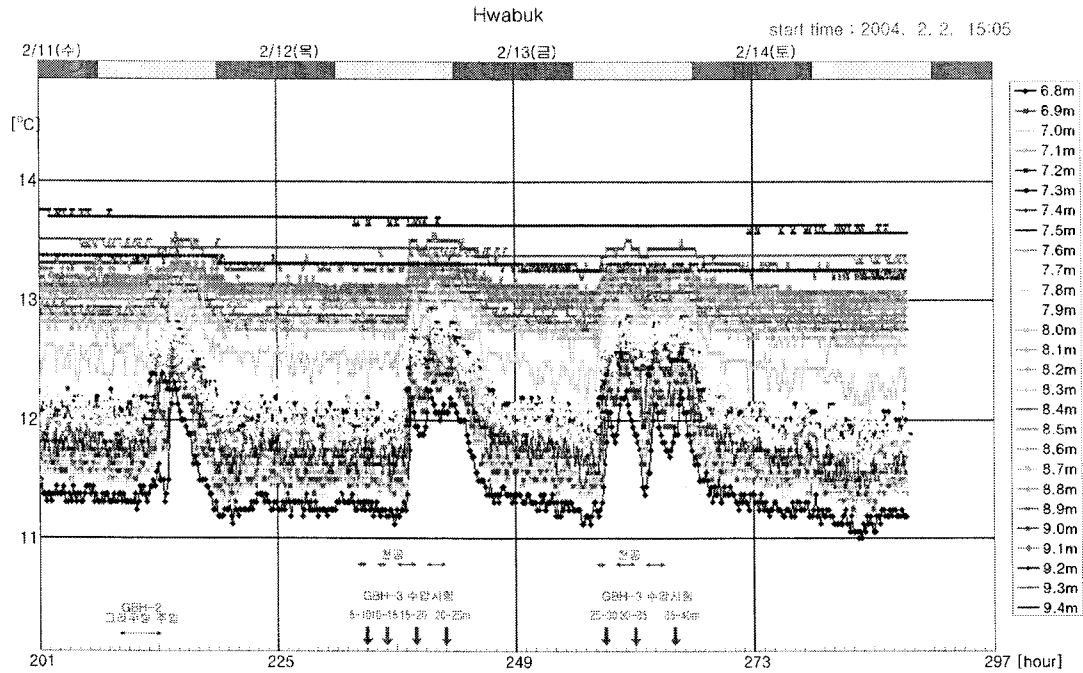


그림 15. 그라우팅 시험구간에서 온도센서 배열 케이블을 이용한 온도모니터링 결과

온도의 급격한 변화가 관찰되고 있다. 이는 온도 모니터링 시추공에 표출된 절리의 투수성이 좋다는 것을 시사하는 것이라 할 수 있다. 또한 그라우팅 주입 이후 온도가 상승하였다가 하락하는 현상은 바로 온도모니터링 시추공까지 그라우팅 매질이 유입되어 그에 대한 양생에 따른 온도 변화가 감지된 것으로 판단된다.

다음은 광섬유센서 케이블의 현장 응용 사례를 예시하고 있다. 그림 16은 한국지질자원연구원 내 지열 연구를 위한 시추공(심도 약 300m)에서 텔레뷰어 탐사를 통해 얻게된 절리구조 3차원 입체 영상, 3D-log 및 광섬유센서 케이블에 의해 얻어진 온도 측정 결과를 상호 대조하고 있다. 온도 측정 결과는 대체로 심도가 증가할수록 지열 상승에 의한 효과가 그대로 관찰되고 있다. 한편, 일부 심도 구간(화살표 구간으로 표시)에서는 온도가 상승되지 않고 일정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있는데 이는 바로 이 구간의 지하수 유동이 상대적으로 원활하다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

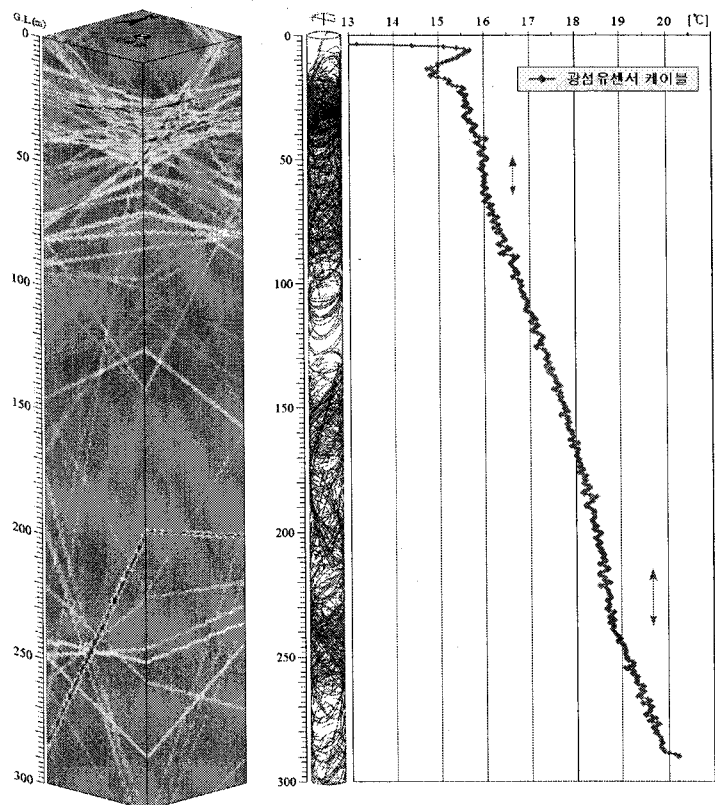


그림 16. 한국지질자원연구원 실험시추공에서 얻게된 절리구조 3차원 입체 영상, 3D-Log 및 광섬유센서 케이블에 의한 온도 측정결과를 상호대조하고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 우선 여러 위치의 온도를 동시에 측정할 수 있는 두 가지 최신 기법 즉, 온도센서 배열 케이블을 이용한 기법과 광섬유센서 케이블을 이용한 기법을 소개하였으며, 온도센서 배열 케이블을 이용한 기법은 “point sensing” 개념으로, 광섬유센서 케이블을 이용한 기법은 “distributed sensing” 개념으로 온도를 측정하기 때문에 그에 대한 비교 실험을 통해 각 기법의 장·단점을 비교 분석하였다. 실험 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. ① 광섬유센서 케이블을 이용한 온도측정 결과는 직접 온도센서를 사용하는 온도센서 배열 케이블과 그 정확도 측면에서 거의 대등한 결과를 보여 주고 있다. ② 광섬유센서를 이용한 온도 측정은 측정 지점을 중심으로 약 50cm 구간의 평균온도를 나타내기 때문에 온도센서 배열 케이블과 같이 한 지점의 온도 변화를 직접적으로 감지할 수는 없는 반면 온도센서 배열 케이블에서 감지할 수 없는 위치의 온도 변화는 오히려 광섬유센서 케이블에서 감지할 수 있다. 각 측정 기법의 특징, 장·단점 및 현장 응용 사례를 감안한다면 온도센서 배열 케이블은 약 300m 이하의 상대적으로 짧은 거리에 대한 지하수 유동, 지열 분포, 그라우팅 검증 등에 활용될 수 있을 것이 기대된다. 한편, 광섬유센서 케이블은 장거리(약 30 km 이내)에 걸쳐 온도 모니터링이 필요한 터널 및 건물 화재 감시, 댐체 누수, 파이프 라인 감시, 전력선 감시, 유류 및 가스 저장 탱크 감시, 공정설비 운전관리, 상·하수도 누수 감시 등 다양한 분야에 활용될 것이 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 김종열, Hornamand, H., 김유성, 남지연(2004), “그라우팅 누수 문제에 대처한 온도센서 배열 모니터링 장치 개발”, 한국지반공학회 2004 봄학술발표회 논문집, pp.509~516.
2. 오석훈, 김종열, 박한규, 김형수, 김유성(2005), “댐 침투수 탐지를 위한 멀티 채널 온도 모니터링 연구”, 한국지반공학회 2005 봄학술발표회 논문집, pp.1211~1218.