

## 지하처분연구시설의 광섬유센서 모니터링시스템 운영 결과 분석

배대석, 김경수, 고용권, 김중열\*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

\*(주)소암컨설턴트, 대전시 유성구 관평동 760

ndsbae@kaeri.re.kr

## 1. 서론

모든 공학적 시설들은 자연환경 조건 하에서 다양한 외부의 자연 및 인위적 요인에 의한 변형·변질은 시설 성능의 저하 또는 상실에 이르게 한다. 이러한 극단적인 파국은 급속적 외력에 의한 파괴를 제외하고, 초기에는 조그마한 변형·변질로부터 출발하는 것이 일반적이다. 따라서 성능 상실이나 파괴될 경우 큰 피해가 예상되는 특정 시설이나 구조물에는 2차원, 3차원적 변형특성을 계측, 평가하기 위해 특정지점에 적절한 센서를 설치해서 운영하고 있다. 저준위방사성폐기물 지하처분 공동의 경우 매 50m 간격으로, 그리고 지반이 취약한 구역에는 보다 조밀한 간격으로 지반 변위 감시관리를 시행하도록 SRP (Standard Review Plan)에 규정하고 있다. 하지만 여러 개소의 측정지점에서 동시측정의 필요성, 센서가 설치된 매 지점을 직접 확인하고 수치를 기록해야 하는 불편함, 개별 센서 사이 구간에 대한 변화특성 감시 불가능, 원격제어시스템으로 전환할 경우 개별 센서의 수에 해당하는 개수의 전원공급 및 측정자료 송수신용 연결선 등의 필요와 이에 따른 효율성 저하, 개별 센서의 수가 증가할 경우 유지관리의 비효율성 등 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 통신용으로 사용하는 광섬유케이블 자체를 센서로 활용하여(optical fiber sensor cable: 광섬유센서케이블) 감시관리 대상 구조물전 구간을 감시할 수 있는 기술을 확보하였고 2년 간의 감시관리 결과를 통해 유용성을 확인하였다.

대상시설은 한국원자력연구원 내에 위치하는 방사성폐기물 지하처분연구시설 (KAERI Underground Research Tunnel: KURT)로서 시설의 안정적 운영을 위해 실시간 감시관리 가능한 시스템 구축하였다(2008년 1월). 이 시스템은 광섬유센서케이블을 KURT 터널 단면의 상부 좌우측 모서리 부분을 중심으로 입구에서 좌측으로부터 벽면을 따라서 터널 입구 우측벽면 지점까지 한 개의 광섬

유센서케이블로 연장 포설한 형태이다 [1]. 최초 설치 시점인 2008년 1월부터 2009년 11월까지 측정된 자료를 토대로 온도 및 변형률에 대한 감시관리 결과를 정리 및 분석하였다.

## 2. 본론

## 2.1 광섬유센서 계측 근본원리

광섬유센서케이블을 통하여 폭이 좁은 레이저파 신호(pulsed laser)를 보내면 케이블 내에 산란(scattering) 현상이 발생하며 광섬유케이블의 주변환경인 온도, 변형, 압력 등에 변화가 생기면 세 가지 종류의 산란현상(Rayleigh scattering, Raman scattering, Brillouin scattering)이 나타난다[2] [3].

Rayleigh 산란은 큰 진폭을 갖고 케이블 주위 밀도변화와 연관되며 파장변화는 없으며 주로 통신용으로 활용되어 진다. Raman 산란은 레이저파의 진행 방향의 전·후방에서 케이블 주변의 온도 변화에 영향을 받으며 나타나며 후방산란(stokes) 범위에 후방-Raman 산란은 온도변화에 무관하지만 전방산란(anti-stokes) 범위의 전방-Raman 산란은 온도변화에 따라 진폭이 틀리게 나타나서 후방산란과 전방산란의 산란조도(intensities)를 분석함으로써 알 수 있다.

분포개념 온도 및 변형을 측정기법인 DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensing) 시스템의 핵심이 되는 Brillouin 산란은 후방산란과 전방산란 범위의 파장으로 분리되기 때문에 이들은 각각 원래 광케이블을 통해 보낸 빛의 색과 다른 색을 띄고 온도, 변형률 및 압력과 같은 외부 영향에 따라 민감하게 반응하며, 케이블 주변의 온도가 변하면 후방산란과 전방산란 신호의 진폭이 변하고 변형률이 변하면 주파수 특성이 변하게 된다.

분석측면에서 이러한 현상은 새로운 분석기법 개발을 촉구하게 되었고 그 결과 Brillouin 산란 신호로부터 별도로 온도측정이 가능하게 되었다.

비록 그 분해능(약 0.5°C)이 Raman의 것(약 0.01°C)에 비해서 낮으나 온도변화에 따라 유동적인 변형률 값의 교정을 위해서는 유용한 자료가 되었다. 또 Brillouin 산란 신호 전체에 대한 주파수 분석을 통하여 변형률 분해능을 10 $\mu\epsilon$ 까지 높일 수 있게 되었다.

이러한 독자적인 측정기법은 무엇보다 순간적으로 변화하는 구조물의 동적변형률 측정을 가능하게 하였다[3].

## 2.2 계측 결과

터널 내에서 온도 변화 특성은 대체로 투수성단열대 혹은 지하수누출 지점 부근에서 온도이상대가 확인된다. 터널입구 영역은 13~20°C 범위를 보이며 터널 내측에서는 15~18°C의 변화를 나타낸다. 좌우대칭 특성을 나타내는 진입터널 구역은 전반적으로 진입방향 우측 압반이 상대적으로 2~3°C 높은 경향을 나타낸다. 이는 지하수위가 터널 진행방향의 좌측이 우측보다 약간 높게 형성되어 나타나는 결과로 판단된다. 특히 진입터널 우측 지반이 포화 상태가 아니기 때문에 터널 벽면의 증발현상으로 좌측 벽면이 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 온도 변화 특성을 크게 우기-하절기(5월~9월) 및 건기-동절기(10월~4월)로 구분하여 볼 때, 하절기는 15~20°C까지 범위를 보이나 높은 온도는 외부 영향을 받은 것으로 판단된다. 동절기는 13~17°C의 범위를 나타낸다.

2년여 동안 감시 관리한 결과 터널 벽면의 쇼크리트의 균열 등 벽면 변위와 관련 한 뚜렷한 징후는 발견되지 않았다. 다만, 시간이 경과함에 따라 터널 내에서는 지하수의 누출 지점을 중심으로 벽면에서 누적 변형의 크기가 완만하게 증대되어가는 경향을 보이나 그 크기는 미약하다.

## 3. 토의 및 결론

광섬유센서케이블의 센서 기능을 활용하는 분포개념의 온도 및 변형률 측정기법(DTSS)은 기존의 특정지점 계측방법(Point Sensor)과는 확연하게 차별된다. 광섬유센서케이블을 이용한 분포개념의 측정 및 분석기술은 구조물의 특성에 따라 선택적·탄력적 적용이 가능하며 변형률의 계측 범위는 20 $\mu\epsilon$ (0.02mm/m)~28,000 $\mu\epsilon$ (28mm/m) 크기까지 변위 계측이 가능하다. 또한, 변위 발생 위치뿐만 아니

라 변위가 진행되는 방향까지 계측 가능하며, 최소 매 1m 간격으로 총연장 30km까지 하나의 운영체제로 감시 관리할 수 있는 기능을 가지고 있다. 온도는 0.01°C 해상도로, 계측 가능한 온도의 범위는 케이블 종류의 선택에 따라 -160~600°C 범위까지 가능하다. 온도 계측 간격은 매 0.5m 간격으로 30km까지 하나의 운영체제로 감시 관리할 수 있다. 이러한 기능을 이용하여, 한국원자력연구원 내에 위치하는 KURT의 안정적인 운영을 위하여 터널 내 벽면과 주변 사면의 지반변위 및 온도 변화를 실시간 감시관리시스템을 구축하였다. 2년여 동안 모니터링한 결과 터널 벽면의 쇼크리트 구간은 시간이 경과함에 따라 터널 내 지하수의 누출 지점을 중심으로 벽면에서 변형의 크기가 완만하게 증대되는 경향을 보이나 그 크기는 미약하다. 하지만 지속적인 지하수에 의한 포화-습윤-건조 등의 순환현상이 반복되는 구간이나 포화상태에 있는 구간은 점진적으로 영향이 커질 것으로 예상된다.

## 4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구기반확충사업-연구시설/장비구축운영분야 지원으로 수행되었으며, 원자력연구개발 중장기계획사업과제인 KURT 시설지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 5. 참고문헌

- [1] 한필수, 지하처분연구시설 확보 및 활용계획, 한국원자력연구원, KAERI/TR-2969, 2005
- [2] Paker, T.R., Farhadiroushan, M., Handrek, V.A. and Rogers, A.J., "A Fully Distributed Simultaneous Strain and temperature Sensor using Spontaneous Brillouin Backscatter", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 7, pp979~981, (1997).
- [3] 김중열, 분포개념의 변형률 성분측정기법 개발을 통한 토목 구조물의 안전진단 연구, (주)소암컨설턴트, 중소기업청(2007).