

광섬유센서케이블을 이용한 지하연구시설의 지반변위 및 온도변화 감시시스템 구축

김경수^{1*} · 배대석¹ · 고용권¹ · 김중열²

¹한국원자력연구원, ²(주)소암컨설턴트

Monitoring System of Rock Mass Displacement and Temperature Variation for KURT using Optical Sensor Cable

Kyung-Su Kim^{1*}, Dae-Seok Bae¹, Yong-Kwon Koh¹, and Jung-Yul Kim²

¹Korea Atomic Energy Research Institute

²Soam Consultant Co., Ltd

한국원자력연구원 내에 위치하는 지하연구시설의 안정적인 운영을 위하여 터널 내 벽면과 주변 사면의 지반변위 및 온도 변화를 실시간 감시할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 광섬유센서케이블의 센서 기능을 활용하여 케이블 전체가 하나의 센서 기능을 하는 분포개념의 온도 및 변형을 측정기법을 이용한 것으로서 기존의 특정지점 계측방법과는 확연하게 차별된다. 이 기법은 구조물의 특성에 따라 선택적으로 탄력적 적용이 가능하며, 최대 매 1 m 간격으로 총연장 30 km까지 하나의 운영체제로 감시할 수 있는 기능을 가지고 있다. 변형특성의 계측 범위는 1 m 당 1 mm 변위 크기까지 계측이 가능하며, 변위 발생 위치와 변위가 진행되는 방향까지 계측 가능하다. 온도는 0.01°C 해상도를 가지며 케이블 종류에 따라 -160~600°C 까지 계측이 가능하다. 지하연구시설에서 1년 간의 모니터링 결과, 터널 벽면 및 주변 사면에서 뚜렷한 변위 혹은 거동은 확인할 수 없었으나, 지하수 누출에 의해 점진적으로 영향이 미칠 것으로 예상되는 징후를 확인하였다. 이로써 슛크리트로 처리한 터널 벽면의 균열변형 및 붕괴/낙반사고를 사전에 감지하고, 암반 내 지하수위의 등락과 함께 연구 터널내 환기상태를 감시, 관리할 수 있는 시스템을 구축하게 되었다. 이 외에도 이 시스템은 복잡한 구조를 갖는 플랜트의 변형은 물론 장대 구조물과 고층빌딩, 대형선박, 장대 교량, 댐과 송수관로 및 지하철 등의 안전 유지상태 및 누수 등의 감시에도 적용 가능하다. 특히 온도 변화 감시 기능은 목재 건조물에도 효과적으로 이용할 수 있다.

주요어 : 지하처분연구시설, 광섬유센서케이블, 분포개념 온도 및 변형을 감지, 자동감시관리시스템

The optical fiber cable acting as a sensor was embedded in the underground research tunnel and portal area in order to monitor their stability and the spatial temperature variation. This system includes two types of sensing function to monitor the distributed strain and temperature along the line, where sensor cable is installed, not a point sensing. According to the results of one year monitoring around the KURT, there is no significant displacement or movement at the tunnel wall and portal slope. However, it would be able to aware of some phenomena as an advance notice at the tunnel wall which indicates the fracturing in rockmass and shotcrete fragmentation before rock falls accidentally as well as movement of earth slope. The measurement resolution for rock mass displacement is 1 mm per 1 m and it covers 30 km length with every 1 m interval in minimum. In temperature, the cable measures the range of -160~600°C with 0.01°C resolution according to the cable types. This means that it would be applicable to monitoring system for the safe operation of various kinds of facilities having static and/or dynamic characteristics, such as chemical plant, pipeline, rail, huge building, long and slim structures, bridge, subway and marine vessel. etc.

Key words : KAERI Underground Research Tunnel(KURT), optical sensor cable, distributed temperature and strain sensing(DTSS), automatic monitoring system

*Corresponding author: kskim@kaeri.re.kr

서 언

모든 공학적 시설 혹은 구조물들은 시간이 경과함에 따라 기상, 지표/지하수문환경 변화, 진동 및 지진 등 여러 가지 외부 요인에 의한 영향으로 변형을 일으키게 되어 시설의 성능이 저하 또는 상실하게 되며, 지반함몰 또는 침하, 산사태, 사면붕괴 등 대규모 자연재해로 이어지기도 한다. 이러한 재해는 초기에는 조그마한 변형으로부터 출발하여 대규모 파괴에 도달하게 된다. 현재까지 대부분의 경우 특정 시설 및 구조에 나타나는 2차원 혹은 3차원적 변형특성을 계측하기 위해서 주요 지점에 설치한 개별 변형계측기 (strain gauge) 기록을 토대로 분석 및 평가하고 있다. 이때 평가대상 구조물의 규모 혹은 물질의 변형 특성에 따라서 특정 위치 및 적절한 센서의 선택과 수량을 결정하여야 한다. 이 과정에서 개별 센서와 원격 제어시스템 간에는 센서의 수에 해당하는 만큼의 연결선을 필요로 할 뿐만 아니라 모든 계측기를 동시에 측정하여야 하기 때문에 여러 가지 어려움이 직면하게 된다.

본 연구에서는 일반적으로 통신용으로 사용하는 광케이블 자체를 센서 (optical sensor cable: 광섬유센서케이블)로 활용하여 최소한 매 1m 간격으로 센서 기능을 할 수 있는 특성을 이용함으로써 각 센서와 수많은 연결선으로부터 해방하였고, 평가대상 구조물의 다양한 물리적, 기하학적 특성에 유연하게 대처할 수 있는 가능성을 확인하였다. 특히, 저준위방사성폐기물 지하처분 공동의 경우 처분장 운영 중 매 50m 간격으로, 그리고 지반이 취약한 구역에는 보다 조밀한 간격으로 지반변위 감시관리를 시행하도록 SRP (Standard Review Plan)에서 규정하고 있으며, 부지 내 인공사면의 경우도 동일하게 시행하도록 주문하고 있다. 본 연구를 통하여 한국원자력연구원 내에 위치하는 방사성폐기물 지하연구시설 (KURT: KAERI Underground Research Tunnel)의 안정적인 운영을 위하여

실시간 터널 내 벽면의 지반변위 및 온도 변화를 실시간으로 감시 가능한 체제를 확립함으로써, 벽면의 균열 변형 현상을 미리 감지하여 대규모 붕괴를 사전에 예방하고, 암반 내 지하수위의 등락 및 화재감시의 첨병 역할을 할 수 있게 되었다.

광섬유센서 계측기술의 근본원리

광섬유센서케이블을 통하여 대단히 폭이 좁은 레이저파 신호를 보내면, 케이블 내에서 산란 현상이 발생한다. 그 중 일부는 반사되며 광다이오드에 의해 수신되는 진폭은 입사광의 것보다 대단히 작다. 만약, 광케이블의 주변환경, 즉, 온도, 변형, 압력 등에 변화가 발생하면 세 가지 종류의 산란현상 (Rayleigh scattering, Raman scattering 및 Brillouin scattering)이 나타난다 (Fig. 1). 큰 진폭을 갖는 Rayleigh 산란은 대체로 케이블 주위 밀도변화와 연관되며 파장 변위는 없다. Raman 산란은 레이저파의 진행 방향의 전후방에서 케이블 주변의 온도 변화에 따라 영향을 받으며 나타난다. 즉, stokes 범위에 속한 후방-Raman 산란은 온도변화에 무관하지만 anti-stokes 범위의 전방-Raman 산란은 온도변화에 따라 그의 진폭 면에서 예민한 반응을 보여준다. 여기서 온도측정은 바로 stokes 및 anti-stokes의 Raman 산란 조도 (intensities)를 분석함으로써 얻게 되는 결과이다. 한편, Raman 산란은 파장 변위 폭이 크기 때문에 분석 측면에서 그의 분리가 비교적 용이하다. 이는 바로 온도측정 분해능을 높이는 유리한 여건이 된다.

Brillouin 산란 현상은 프랑스 물리학자 Lon Brillouin (1889-1969)에 의해 발견되었으며 이에 대한 측정은 바로 분포개념의 온도 및 변형을 측정기법인 DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensing) 시스템의 핵심이다. 광케이블에 빛을 보내게 되면 광파만이 전달되는 것이 아니라 자연적으로 음파가 발생한다. 이렇게 전파되는

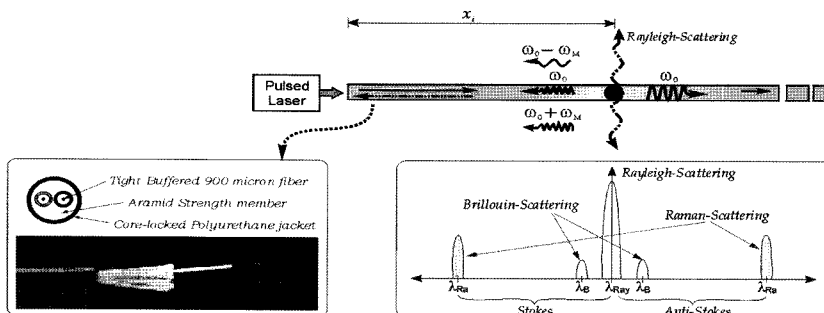


Fig. 1. Principles of temperature and strain measurement using the optical sensor cable.

광파와 음파 사이의 상호 작용에 의해 Brillouin 반사가 일어나게 된다. 이 Brillouin 반사 역시 두개의 성분 즉, Stokes (후방산란)와 anti-Stokes (전방산란) 범위의 파장으로 분리되기 되기 때문에 이들은 각각 원래 광케이블을 통해 보낸 빛의 색과는 다른 색을 띠게 된다. 이러한 Brillouin 산란은 온도, 변형을 및 압력과 같은 외부 영향에 따라 민감하게 반응한다. Fig. 1에서 도시한 바 같이 Brillouin 산란의 Stokes 및 anti-Stokes 신호는 주파수에 대해 Raman 산란의 것보다 Rayleigh 산란 지점과 훨씬 인접하고 있어 그에 대한 분석이 상대적으로 어렵다. Fig. 2는 온도 및 변형을 변화에 따른 Brillouin 산란 신호의 변화를 보여주고 있다. 즉, 케이블 주변의 온도가 변하게 되면 Stokes 및 anti-Stokes 신호의 진폭이 변하며, 변형률의 변화가 있는 경우에는 주파수 특성이 변하게 된다 (Paker *et al.*, 1997).

분석 측면에서 대단히 불리한 이러한 여건은 고도의 새로운 분석기법의 개발을 촉구하게 되었으며 이는 다음과 같이 요약된다.

- Brillouin 산란과 수신호로부터 온도측정이 가능하다. 비록 분해능이 Raman 산란과의 것보다 낮으나 (약 0.5°C) 온도 변화에 따라 변하는 변형률 값 교정을 위해서 중요한 자료이다.

- Brillouin 산란과 수신호 전체에 대한 주파수 분석을 통하여 변형을 분해능을 10 με 까지 높일 수 있다. 만약, 이러한 측정값에 온도 교정이 이루어지면 변형을 분해능은 20 με 에 달한다.

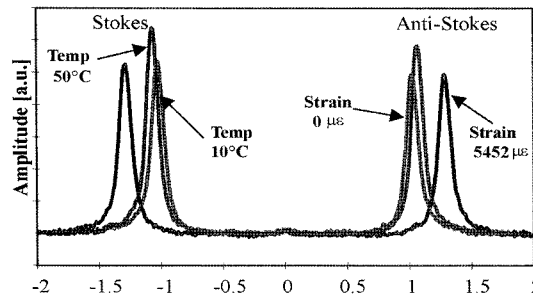


Fig. 2. Offset ranges of Brillouin frequency from center frequency (9.75 GHz).

현재 분포개념의 온도 측정기법은 크게 세 가지 유형으로 구분된다 (Table 1). 여기서 변형률에 대한 온도교정 여부에 따라 그 분해능이 약 10 με (0.01 mm/100 m)로 차별화되고 있다. 특히 세 번째 유형인 dynamic distributed strain은 비록 측정거리가 최대 5 km로 짧고 또한 분해능이 상대적으로 낮으나 (30 με) 대단히 짧은 시간 (0.1초)에 측정할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 독보적인 측정기법은 무엇보다 순간적으로 변화하는 구조물의 동적 변형률 측정을 가능하게 되었다. 광섬유센서케이블의 온도 감시 성능은 0.01°C의 해상도와 -150~600°C 범위의 측정이 가능하며 이는 광케이블의 피복물질 개발로 다양한 모델의 광섬유센서케이블을 적용함으로써 달성하였다.

KURT 적용 연구

KURT 개요

KURT는 방사성폐기물처분시설 개발 프로그램을 지원하기 위한 제반 행위 즉, 처분시스템의 예비안전성평가, 현장실증시험, 처분장 건설 및 운영 엔지니어링기술 실증, 지하심부 지질특성 조사기술 개발, 대국민 교육홍보이해 증진 등이 종합적으로 이루어지는 지하연구시설이다 (RWMC-NEA, 2001).

방사성폐기물처분 연구를 위한 선진국 수준의 실증연구 환경을 만족하는 지하연구시설 구축은 곧 원자력발전주기의 완성을 위한 하나의 기본요건이며, 우리나라는 기초연구단계 (1997~2006)를 수행하는 과정에서 2003년부터 소규모 지하연구시설 건설에 착수, 현재 지하 100 m 심도에 KURT 1단계 시설을 건설한 상태이다. KURT의 구축 목적과 필요성은 다음과 같다 (한필수, 2005).

- 방사성폐기물 처분시스템 개발 및 안전성 실증
- 처분장 부지의 적합성 평가와 특성해석 기술개발 및 처분시스템 설계
- 처분시스템 설계를 위한 전문분야의 기초기술 및 공학적 기술 지원
- 심부지질환경 조건에서의 처분시스템의 안전성 평가
- 심부지하지질 특성평가 및 이해도 향상
- 처분시스템 단위요소의 현장 성능시험 및 실증

Table 1. Strain measurement methods of DTSS.

Measurement Type	Strain Resolution	Estimated Measurement Time	Measurement Range
Distributed strain (non-compensated)	10 με	20 minutes	10 km
Temperature compensated Distributed strain	20 με	20 minutes	10 km
Dynamic Distributed strain	30 με	10 Hz	5 km

- 처분장 건설운영기술 개발 및 실증
- 전문기술인력 양성 및 국제협력연구 인프라 구축
- 방사성폐기물 처분에 대한 수용성 증진을 위한 대 국민 교육홍보

현재의 KURT 시설 수준은 고준위폐기물 처분기술을 실증하기 위한 초기 단계의 시설로서 향후에는 실제 처분예상 심도까지 확장하여 고준위폐기물 처분을 위한 세부 요소 기술의 실증을 위한 특수목적형 초심부 지하연구시험시설 (PBG-URL: Purpose-Built Generic Deep Underground Research Laboratory)로 확장할 계획이다.

사용후핵연료를 포함하는 고준위폐기물 장기관리에 관한 사항은 원자력법에 근거하고, 동법 시행령에서 이에 필요한 연구개발을 수행하도록 명시되어 있다. 한국원자력연구원은 관련 법규에 따라 1997년부터 고준위폐기물처분에 관한 연구개발사업의 주관연구기관으로 임무를 수행해 오고 있다. 2003년 원자력연구개발사업 기획위원회에서 고준위폐기물처분 연구개발의 핵심 시설인 KURT 1단계 시설을 한국 원자력연구원 부지 내에 건설하기로 계획하였고 (Fig. 3), 2003~2004년에 걸쳐 부지지질조사, 상세설계 및 건설과정을 거쳐 2006년 11월에 시설 운영을 시작하였다.

본 사업의 최종목표는 고준위폐기물 처분시스템 개발을

위한 지하 실증연구시설을 건설하는 것으로 처분장 예상 심도에서의 한국형 처분시스템의 안전성을 실증하고, 이와 더불어 방사성폐기물 처분에 관한 지속적인 교육 홍보를 통하여 국민 수용성을 증진시키는 것이다. 2009년까지는 1단계 시설에서 지하수 환원환경 조건의 지하지질 기초 자료를 확보하고 처분시스템 안전성 예비 실증시험을 수행하고 있다. 2단계는 처분장 예상심도의 환경과 유사한 450m 까지 시설을 확장하여 한국형 처분시스템의 안전성을 최종적으로 실증하고, 상용처분장의 운영 중 감시기술 및 폐쇄기술 실증도 병행할 계획이다.

광섬유센서케이블 설치

KURT의 터널 벽면 및 입구 주변 사면의 변형특성 (변위의 위치, 크기, 방향 등)을 계측하고 실시간 모니터링할 수 있는 기능을 확립하기 위해서 광섬유센서케이블을 설치하였다. 터널 벽면의 설치 위치는 터널 단면에서 응력 집중이 가장 크게 일어날 것으로 예상되는 천정 좌우 모서리 부근에 한 줄로 설치하였다 (Fig. 4). 설치 총연장은 650m이며 에폭시로 벽면에 고정시켰다. 효율적인 감시관리 및 자료 해석을 위하여 터널 진입방향을 기준으로 총 10개 구역으로 구분하여 관리하였다. 특히, 3 구역은 터널 입구의 콘크리트 라이닝 구간이며, 5 구역과 9 구역은 좌우 대칭이 되는 지점의 상대적인 특성을 파악할 수 있도록 체계화 하였고, 6 구역과 8 구역은 각각 좌우 연구 터널에 해당한다.

터널 입구부 사면은 남측 좌안 사면으로부터 시작하여 터널 입구 방향으로 도수로를 따라서 깊이 10 cm 지점에 연장 250 m까지 총 9개 구역으로 구분하여 매설, 설치 하였다 (Fig. 5). 입구방향으로 좌측사면에 1, 2 구역이며, 3-7 구역은 터널 입구 배후의 급사면에 해당하며, 8과 9 구역은 우측의 복측사면에 해당한다. 한편, 광섬유센서케이블은 터널 입구에 설치되어 있는 관리사무실 내에 화상시연시스템으로 연결하여 원격감시관리가 가능하도록 하였다.

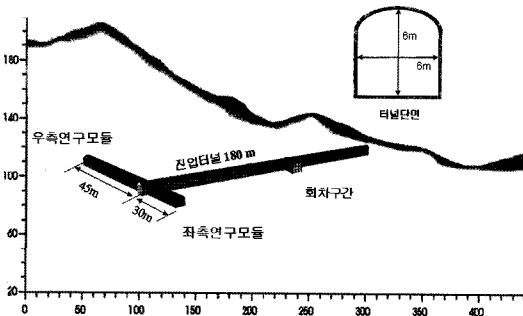


Fig. 3. Layout of the 1st stage KURT facility.

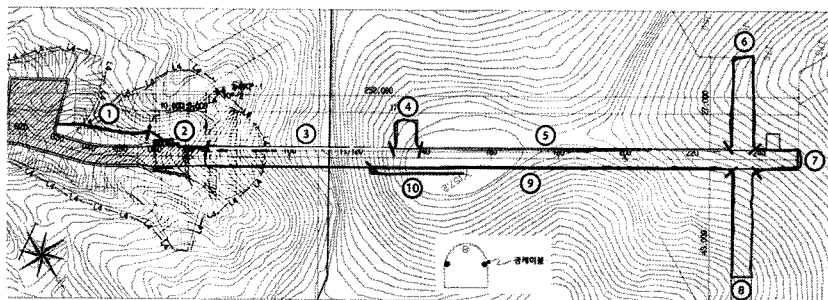


Fig. 4. The installation locations of optical sensor cable and monitoring sections in the tunnel.

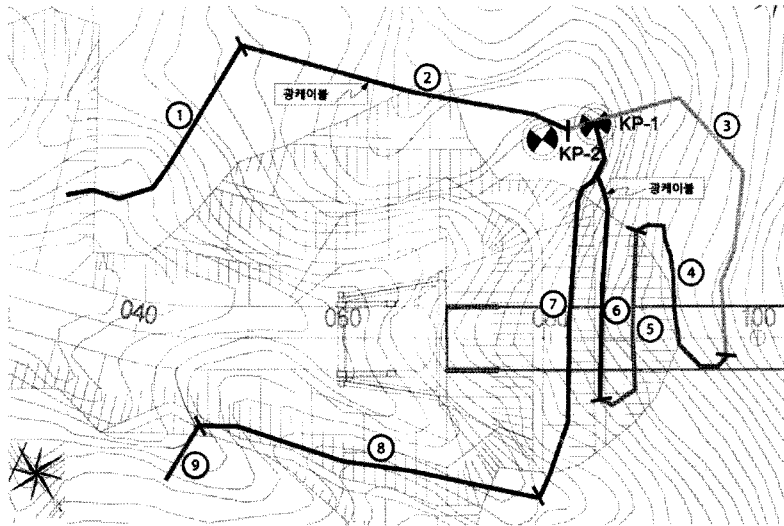


Fig. 5. The installation locations of optical sensor cable and monitoring sections around the tunnel portal.

계측시스템의 초기화

KURT의 공동 벽면 및 동굴 입구 주변 사면에 설치한 광섬유센서케이블은 설치 후 최초의 상태를 초기화하여 이 시점의 값을 기준으로 정하고 후속 측정값을 대비시키도록 설정하였다. 모니터링 주기는 시설의 기능과 목적에 따라 최소 수 초 단위로 감시할 수도 있으나, 본 시설은 운영 시 진동현상을 나타내는 특정 플렌트와 같이 동적 특성을 가진 시설이 아닐 뿐만 아니라, 효율적인 인력 및 시설투자 여건을 감안하여 월 1~2회 측정하는 것을 기본으로 하고 필요 시 횟수를 증가하도록 계획하였다.

감시시스템의 운영 결과 및 해석

감시시스템의 설치 (2008. 1. 7) 일 이후 현재까지 터널 벽면과 사면에서 최대 1000 $\mu\epsilon$ (약 1 mm/1 m) 이하의 미세한 변위가 확인되었으나, 이 규모는 터널 내부 온도 변화에 의한 수축과 이완 현상 수준으로 판단된다.

터널 내 감시 결과

터널 내 광섬유센서케이블 설치 후 1년 간의 관측 결과 중 대표적인 4 개 시점의 측정 결과를 제시하였다 (Fig. 6).

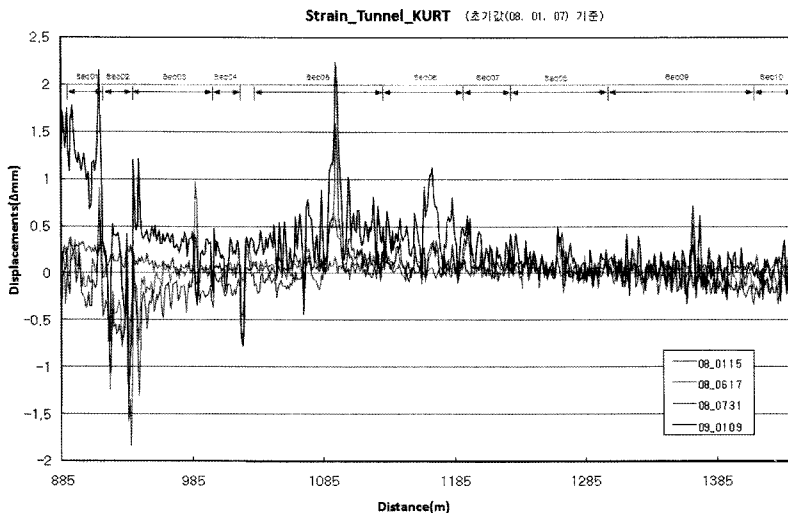


Fig. 6. Result of strain monitoring in the tunnel.

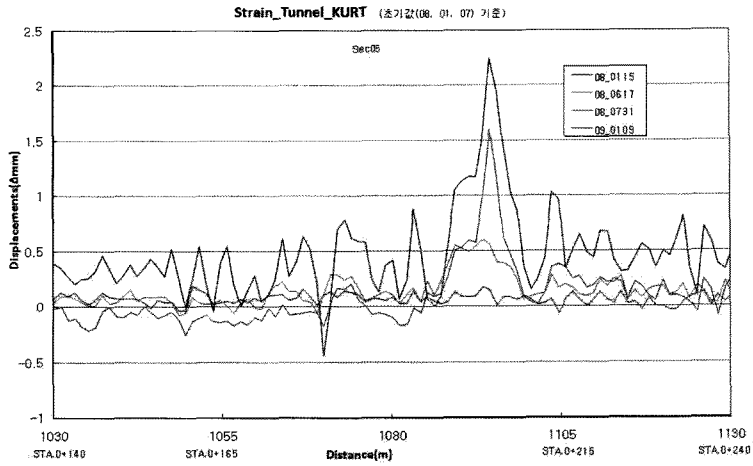


Fig. 7. Result of strain monitoring at the section 5.

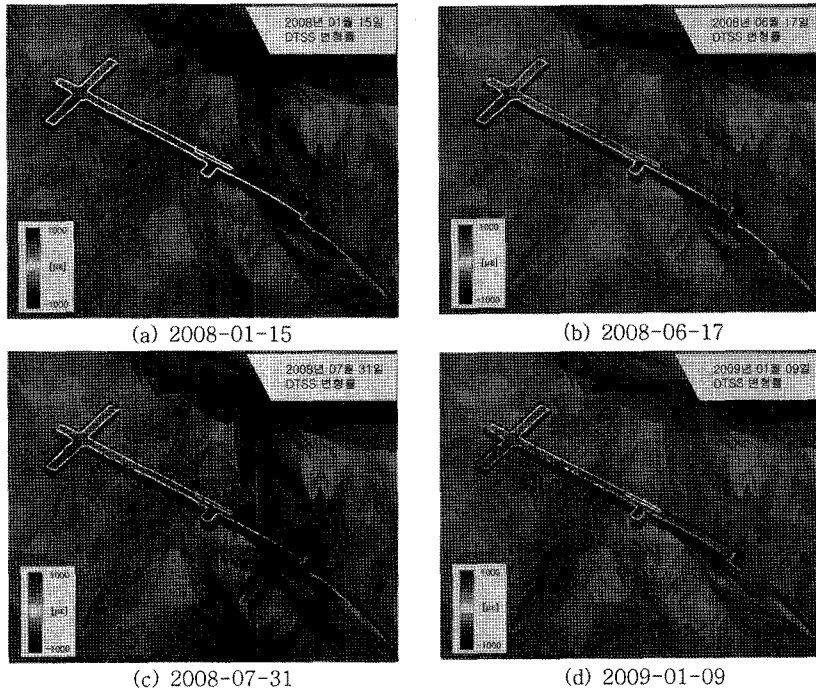


Fig. 8. The example of realtime presentation of strain intensity in the tunnel.

그림에서 파란색 실선은 최초 관측치이며, 녹색 실선은 2009. 1. 9일 측정 결과이다. 전반적으로 센서케이블이 설치된 전체 구간에서 1,000 $\mu\epsilon$ 이하의 범위 내에서 변위를 나타내었으나, 5 구역에서 2,000 $\mu\epsilon$ 이상의 크기를 갖는 누적 변위가 발생한 것으로 확인되었다. 이 지점은 터널 외부 도로 시작지점에서 터널 진입방향 거리 200m

지점 좌측 터널 벽면에 해당한다 (Fig. 7). 이 지점에서 이상 현상이 발생한 원인을 규명하기 위하여 확인한 결과, 지하수의 누출로 인하여 광섬유센서가 벽면으로부터 일부 이탈하기 시작하는 현상에 기인한 것으로 확인하였다. 이와 같은 모니터링 결과를 전체적인 경향으로 나타낸 도면은 Fig. 8(a)-(d)에 도시하였으며, 2008. 7월 측정

결과부터 이상대(붉은 색)의 수가 늘어나기 시작하였음을 알 수 있다. 또한 이러한 이상대는 지하수 누출로 인한 현상이며, 온도분포 변화에서도 이 지점이 이상대임을 확인 가능하다.

터널 입구부 사면구역 감시 결과

터널 입구부 사면구역에서 관측한 결과, 5~7 구역 (터널 입구부 상부 구역) 및 8~9 구역 (터널 입구부 우측 사면)에서 2~3 mm (2,000~3,000 $\mu\epsilon$)의 변위를 나타내었다. 이 값은 우려할 만한 수준의 값은 아니며 건설 후 다짐효과로 인정되지만 전반적으로 변위가 진행되고 있음을 시사한다. 그러나 2009. 1월 관측한 결과 (Fig. 9에서 녹색실선; Fig. 10(a) 및 (b)), 2 구역 중간부 이후 구간의 자료가 확인 불가능한 상태로 확인되었다. 이 지점의 현장 확인 결과, 센서케이블이 침승이나 사람의 통행과 같은 외부 힘에 의해 절단되어 있음을 확인하였다.

토의 및 결론

본 연구를 통하여 구축된 터널 내 벽면과 주변 사면의 지반변위 및 온도 변화에 대한 실시간 감시시스템을 이용하여 숏크리트로 처리한 터널 벽면의 균열변형 및 붕괴, 낙반사고를 사전에 감지하고, 암반 내 지하수위의 등락 및 화재감시 기능을 할 수 있는 시스템을 확립하게 되었다.

현재까지 1년 동안 감시한 결과, 터널 벽면의 숏크리트의 균열이나 터널 입구부 사면의 이동 등에 관한 한 뚜렷한 변위는 확인되지 않았다. 다만, 시간이 경과함에 따라 터널 내에서는 지하수의 누출현상으로 벽면의 누적된 변화가 예상되며, 2009년 봄철을 지나면서 사면에서 거동이 발생할 수도 있으므로 이에 대한 세심한 주의가 필요하다. 한편, 터널 벽면과 사면에는 동일한 모델의 광섬유센서케이블을 설치하였으나, 사면의 경우 상대적으로 지표 환경에서 일어날 수 있는 파손 등을 감안하여 단일 광

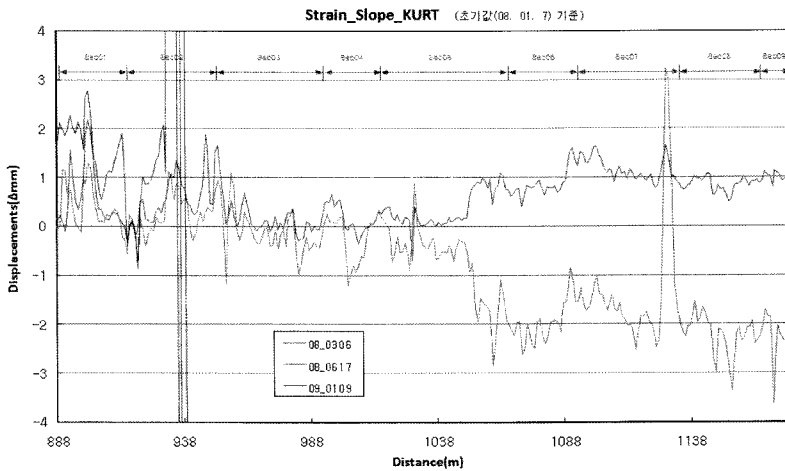


Fig. 9. Result of strain monitoring around the tunnel portal.

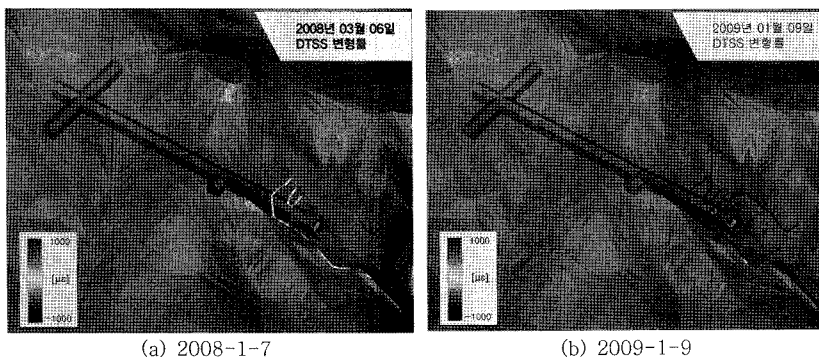


Fig. 10. The example of realtime presentation of strain intensity around the tunnel portal.

섬유센서케이블로 피복한 별도 모델로 교체하여 적용하는 방안을 검토하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구에 적용된 기술은 케이블을 따라 분포개념의 온도 및 변형을 측정기법을 이용하는 것이므로 기존의 특정지점 계측방법과는 확연하게 차별된다. 이러한 계측 기술은 구조물의 특성에 따라 선택적으로 탄력적 적용이 가능하여, 최대 매 1 m 간격으로 총연장 30 km 까지 최대 30,000 개의 센서를 하나의 운영체제로 감시할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이 기술은 KURT와 같은 지하시설 외에도 복잡한 구조를 갖는 플랜트시스템의 변형은 물론 장대 구조물과 고층빌딩, 대형선박, 장대 교량, 댐과 송수관로 및 지하철 등의 안전 유지상태 및 누수 등의 감시관리에 적용 가능하다 (김중열외, 2006; 김중열, 2007). 특히 온도 변화 감시관리 기능은 문화재와 같은 목재건조물에도 시설의 특성을 고려하여 안정적이고 효과적으로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구기반확충사업-연구시설/장비구축운영분야 지원 (과제번호: 2008-03796) 으로 수행되었으며, 원자력연구개발 중장기계획사업과제의 KURT 시설지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드린다.

참고문헌

- 김중열, 김태희, 김유성, 2006, 온도센서 배열 모니터링에 의한 매질이 투수성 및 절리 연결성 연구, 2006년 한국지반공학학회 봄학술발표회 논문집, pp.1110-1119.
- 김중열, 2007, 분포개념의 변형률 성분측정기법 개발을 통한 토목 구조물의 안전진단 연구, (주)소암컨설팅, 중소기업청.
- 한필수, 2005, 지하처분연구시설 확보 및 활용계획, 한국 원자력연구원, KAERI/TR-2969/2005.
- Paker, T. R., Farhadiroushan, M., Handerek, V. A., and Rogers, A. J., 1997, A Fully Distributed Simultaneous Strain and temperature Sensor using Spontaneous Brillouin Backscatter, IEEE Photonics Technology Letters, 9(7), 979-981.

Radioactive Waste Management Committee of NEA (RWMC-NEA), 2001, The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes, OECD/NEA.

2009년 1월 11일 원고접수, 2009년 3월 23일 게재승인

김경수

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
대전광역시 유성구 덕진동 150-1번지
TEL: 042-868-2365
FAX: 042-868-2064
e-mail: kskim@kaeri.re.kr

배대석

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
대전광역시 유성구 덕진동 150-1번지
TEL: 042-868-2030
FAX: 042-868-2064
e-mail: ndsbae@kaeri.re.kr

고용권

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
대전광역시 유성구 덕진동 150-1번지
TEL: 042-868-8159
FAX: 042-868-2064
e-mail: nykkoh@kaeri.re.kr

김중열

(주)소암컨설팅
대전광역시 유성구 관평동 테크노밸리 760번지
TEL: 042-863-2830
FAX: 042-863-2834
e-mail: soamkij@empal.com