

광섬유 센서를 이용한 온도 및 변형 모니터링에 대한 현장응용 사례 Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing(DTSS) by using an Optical fiber

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성²⁾, Yoo-Sung Kim, 이성욱³⁾, Sung-Uk Lee, 민경주⁴⁾, Kyoung-Ju Min, 박동수⁵⁾, Dong-Su Park, 방기성⁶⁾, Gi-Sung Pang, 김강식⁶⁾, Kang-Sik Kim

¹⁾ (주)소암컨설팅 대표이사, CEO, Soam Consultant Co., Ltd.

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

³⁾ 한국철도공사 철도연구개발센터 기술연구팀장, Team manager, Korail Research & Development Center, Korea Railroad

⁴⁾ 한국철도시설산업(주) 선로시설연구소장, Director, Korea Railroad Facilities Industry.Co., KFI

⁵⁾ 한국전력공사 전력연구원 환경구조연구소 내진기술그룹 선임연구원, Senior Researcher, Earthquake Engineering Group, Environment & Structural Laboratory, Korea electric Power Research Institute, KEPCO

⁶⁾ 한국전력공사 전력연구원 구조연구실 건전성평가그룹 선임연구원, Senior Member of Technical Staff, Structural Safety Group, Structural Engineering Laboratory, Korea electric Power Research Institute, KEPCO

SYNOPSIS : Brillouin backscatter is a type of reflection that occurs when light is shone into an optical fibre. Brillouin reflections are very sensitive to changes in the fibre arising from external effects, such as temperature, strain and pressure. We report here several case studies on the measurement of strain using Brillouin reflections.

A mechanical bending test of an I beam, deployed with both fiber optic sensors and conventional strain gauge rosettes, was performed with the aim of evaluating: (1) the capability and technical limit of the DTSS technology for strain profile sensing; (2) the reliability of strain measurement using fiber optic sensor. The average values of strains obtained from both DTSS and strain gauges (corresponding to the deflection of I beam) showed a linear relationship and an excellent one-to-one match.

A practical application of DTSS technology as an early warning system for land sliding or subsidence was examined through a field test at a hillside. Extremely strong, lightweight, rugged, survivable tight-buffered cables, designed for optimal strain transfer to the fibre, were used and clamped on the subsurface at a depth of about 50cm. It was proved that DTSS measurements could detect the exact position and the progress of strain changes induced by land sliding and subsidence. We also carried out the first ever distributed dynamic strain measurement (10Hz) on the Korean Train eXpress(KTX) railway track in Daejeon, Korea. The aim was to analyse the integrity of a section of track that had recently been repaired. The SensorNet DTSS was used to monitor this 85m section of track while a KTX train passed over. In the repaired section the strain increases to levels of 90 microstrain, whereas in the section of regular track the strain is in the region of 30-50 microstrain. The results were excellent since they demonstrate that the DTSS is able to measure small, dynamic changes in strain in rails during normal operating conditions. The current 10km range of the DTSS creates a potential to monitor the integrity of large lengths of track, and

especially higher risk sections such as bridges, repaired track and areas at risk of subsidence.

Key words : Optic fiber, Distributed Temperature and Strain Sensing(DTSS), Slope sliding monitoring, Land subsidence monitoring, Rail strain monitoring

1. 서 론

제반 토목 시설물은 시간이 경과함에 따라 여러 요인(예: 지반상태, 지진, 진동 등)에 의해 변형(deformation)이 발생한다. 여기서 변형은 변형률(strain) 측정에 의해 판단될 수 있다. 즉, 시간이 경과함에 따라 변형률 측정이 반복된다면 시설물 안전을 위한 적절한 대책이 수립될 수 있다는 것이다. 그러나 지금까지 변형률 측정을 위해 상용되어온 스트레인 게이지(strain gauge)는 한 지점에 대한 정보(point data)를 제공하기 때문에 측정 구간이 길 경우에는 수많은 스트레인 게이지가 필요하게 되며 더구나 그들의 동시 측정은 대단히 어려운 작업이라 할 수 있다. 반면, 광섬유 센서 케이블을 이용한 변형률 측정 기법은 토목 시설물(예: 댐, 터널, 교량, 원자력 시설물, 건축물 등)을 따라 광케이블을 구조물에 고정시키면 일정한 거리 간격(예: 1m)으로 변형률이 측정되기 때문에 현실적 측면에서 대단히 유리하다고 하겠다. 또한 토목 시설물의 폭 넓은 구간(최대 10km)에 설치한 광케이블을 따라 1m 간격으로 고분해능 변형률 값(도합 10,000개 지점의 변형률 값)을 동시에 얻을 수 있기 때문에 무엇보다 계측의 경제성과 효율성이 보장된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 영국 Sensornet사의 DTSS(Distributed Temperature and Strain Sensing) 장비를 이용한 다양한 실내 및 현장 실험을 통해 광섬유 센서 케이블을 이용한 변형률 측정의 신뢰성, 한계성 및 현장 응용성을 점검하는 데 있다. 우선 실내 실험에서는 ① 온도 변화에 따른 변형률 측정의 문제점을 제시하고 이에 대한 보정의 필요성을 강조하고 있으며, ② 철재 I빔에 스트레인 게이지와 광섬유센서를 동시에 부착하고 그에 대한 휨 실험을 통해 광섬유 센서에 의한 변형률 측정의 신뢰성을 검증하였다. 현장 실험에서는 ① 지반 침하(subsidence) 및 사면 미끄러짐(slope sliding)에 대한 조기 경보 시스템으로서 광케이블 변형 측정 기법의 현장 응용성을 검증하였으며, ② 열차 운행 중 하중 및 진동에 의한 철도 레일의 변형률 변화를 초당 10회(10Hz) 측정함으로써 취약 구간에 대한 정보를 제공할 수 있는지를 점검하였다.

2. 광섬유 센서 이용기술의 근본원리

광섬유에 대단히 폭이 좁은 레이저(pulsed laser) 파형요소를 보내면 산란(scattering) 현상이 발생한다. 그 중 일부는 반사되며 광 다이오드(수신기능)에 의해 수신되는 진폭은 입사광의 것보다 대단히 작다. 만약, 광섬유의 주위 환경(예: 온도, 변형, 압력)에 변화가 있으면 다음 세가지 종류의 산란 현상(그림 1 참조)이 관심의 초점이 된다.

- Rayleigh scattering
- Raman scattering
- Brillouin scattering

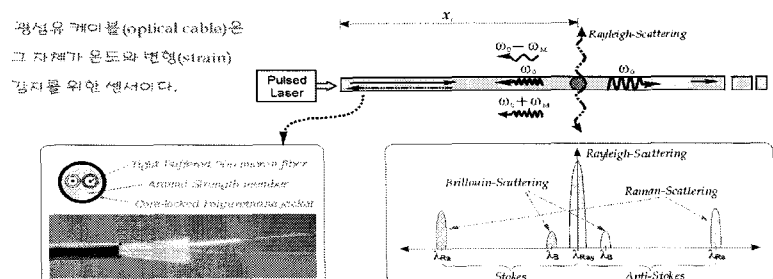


그림 1.

큰 진폭을 갖는 Rayleigh 산란은 대체로 케이블 주위 밀도변화와 연관되며 그의 파장 변위는 없다. Raman 산란은 케이블 주위 온도 변화와 유관하다. 즉, Stokes 범위에 속한 Raman 산란은 온도변화에

무관하지만 anti-Stokes 범위의 것은 온도변화에 따라 그의 진폭 면에서 예민한 반응을 보여준다. 여기서 온도측정은 바로 Stokes 및 anti-Stokes의 Raman 산란조도(intensities)를 분석함으로써 얻게 되는 결과이다. 한편, Raman 산란은 파장 변위 폭이 크기 때문에 분석측면에서 그의 분리가 비교적 용이하다. 이는 바로 온도측정 분해능을 높이는 유리한 여건이 된다.

Brillouin 산란 현상은 프랑스 물리학자 Léon Brillouin (1889-1969)에 의해 발견되었으며 이에 대한 측정법은 바로 DTSS system의 핵심이 된다. 광섬유에 빛을 보내게 되면 광파(light waves)만이 전달되는 것이 아니라 자연적으로 음파(sound waves)가 발생한다. 이렇게 전파되는 광파와 음파 사이의 상호작용에 의해 Brillouin 반사가 일어나게 된다. 이 Brillouin 반사 역시 두개의 성분 즉, Stokes와 anti-Stokes 범위의 파장으로 분리되기 되기 때문에 이들은 각각 원래 광섬유에 보내진 빛의 색과는 다른 색을 띠게 된다. 이러한 Brillouin 산란은 온도, 변형률 및 압력과 같은 외부 영향에 따라 민감하게 반응한다. 그림 1에서 예시한 바 Brillouin 산란의 Stokes 및 anti-Stokes 신호는 주파수에 대해 Raman의 것보다 훨씬 인접하고 있어 그에 대한 분석이 상대적으로 어렵다고 할 수 있다. 그림 2는 온도 및 변형률 변화에 따른 Brillouin 산란의 신호의 변화를 보여주고 있다. 즉, 케이블 주변의 온도가 변하게 되면 Stokes 및 anti-Stokes 신호의 진폭이 변하며, 변형률의 변화가 있는 경우에는 주파수 내용이 변하게 된다(Parker, T.R. et. al., 1997).

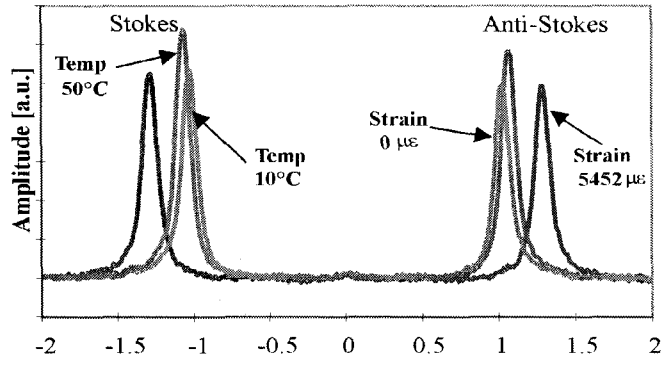


그림 2. (9.75GHz) Brillouin 주파수의 offset.

분석측면에서 대단히 불리한 이러한 여건은 고도의 새로운 분석기법 개발을 촉구하게 되었으며 다음은 그에 따른 주요 연구결실을 요약하고 있다.

- Brillouin 산란 신호로부터 별도로 온도측정이 가능하게 되었다. 비록 그의 분해능이 Raman의 것보다 낮으나(약 0.5°C) 온도변화에 따라 유동적인 변형률 값의 교정을 위해서는 바람직한 자료가 되었다.
- Brillouin 산란 신호 전체에 대한 주파수 분석을 통하여 변형률 분해능을 10 $\mu\epsilon$ 까지 높일 수 있게 되었다. 만약, 이러한 측정값에 온도 교정이 이루어지면 변형률 분해능은 20 $\mu\epsilon$ 에 달한다.

현재 DTSS 측정기법은 크게 세 가지 유형으로 구분된다(표 1 참조). 여기서 변형률에 대한 온도교정 여부에 따라 그 분해능이 약 10 $\mu\epsilon$ 으로 차별화되고 있다. 세 번째 유형은 “dynamic distributed strain”은 비록 그의 측정거리가 짧고(최대 5km) 또한 분해능(30 $\mu\epsilon$)이 상대적으로 낮으나 대단히 짧은 시간(0.1초)에 측정할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 독보적인 측정기법은 무엇보다 순간적으로 변화하는 구조물 변형률 측정을 가능하게 하였다.

표 1. DTSS-3가지 유형의 변형률 측정 기법.

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

3. 변형률 측정을 위한 실내 실험

3.1. 온도변화에 대한 변형률 교정

본 실험은 다양한 환경여건(그림 3 참조)하에 보여주는 DTSS의 측정결과(그림 4 참조)를 상호 비교함으로써 온도 모니터링의 필요성과 변형률 측정의 실효성을 보여주는 데 초점을 두고 있다. 그림에서는 이해를 돕기 위해 각 세부 측정 내용을 A-I 단계로 구분하여 서술하고 있다.

A단계는 케이블이 풀어진 상태로서 그의 변형률은 $0\mu\epsilon$ 이다. B단계에는 케이블이 50°C 물에 담겨있기 때문에 열에 의해 다소 팽창되었다고 볼 수 있다. 그에 따라 측정된 변형률은 약 $600\mu\epsilon$ 이 되고 있다. C단계는 케이블이 상대적으로 찬 물(10°C)에 놓여있는 경우이다. 이번에는 다시 케이블의 수축현상으로 측정된 변형률은 약 $-350\mu\epsilon$ 에 달하고 있다. D 단계는 다시 케이블이 풀어진 상태를 나타내기 때문에 변형률은 $0\mu\epsilon$ 이 된다. E단계(12m 구간)는 변형률이 $2500\mu\epsilon$ 이 되도록 추를 달아 인장을 유도하였다. 케이블은 다시 찬물, 더운물을 통과한 후 F단계(케이블이 풀어진 상태) 이전에서는 피복이 된 케이블(DTSS 케이블)에 연결되었다. G단계에는 약 4m 길이 케이블 양 끝을 고정된 후 점진적인 인장을 가하였으며 H단계는 다시 케이블이 느슨한 상태를 나타내고 있다. I단계는 케이블이 릴 통에 감겨있는 상태로서 변형률 변화폭이 약 $2000\mu\epsilon$ 에 달하고 있음을 볼 수 있다.

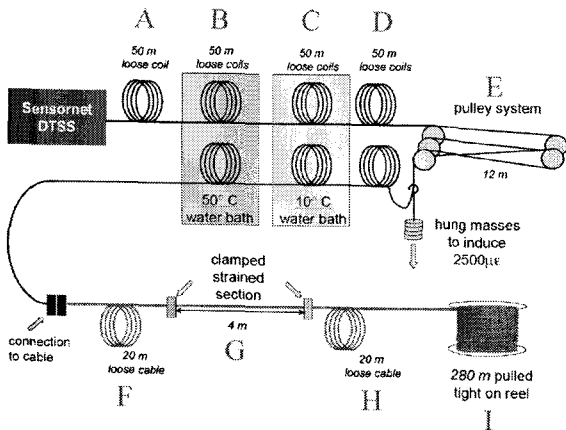


그림 3. DTSS 변형률 측정에 대한 실내 실험.
black: calibrated test fibre, red: DTSS cable(Johansson et al., 2003).

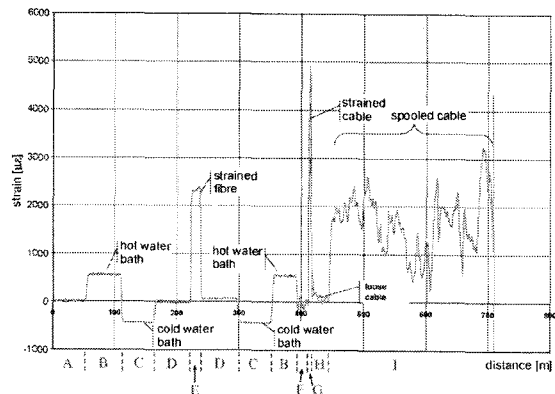


그림 4. DTSS에 의한 변형률 측정결과
(without temperature correction).

측정된 변형률의 전체적인 경향을 요약하면 다음과 같다.

- 변형률 측정 분해능이 최소 $10\mu\epsilon$ 인 것을 고려하면 상온으로부터의 온도변화(50°C hot water, 10°C cold water)가 변형률 최대 약 $600\mu\epsilon$ 을 초래한 것은 결코 간과될 수 없다. 즉, 온도 교정이 요구된다. 그림 5는 DTSS에 의해(Brillouin 산란 이용) 측정된 온도분포를 나타내고 있다. 이러한 독보적인 온도 측정기능은 상기 변형률 분포(그림 4 참조)의 교정을 가능하게 할 수 있었으며 그 결과는 그림 6에 나타내고 있다.
- Test Fibre(피복이 되지 않은 상태: fibre+cladding)와 피복된 fibre를 연결(fusion splicing)하였을 경우에도 변형률 측정분해능이 잘 유지되고 있음을 볼 수 있다.

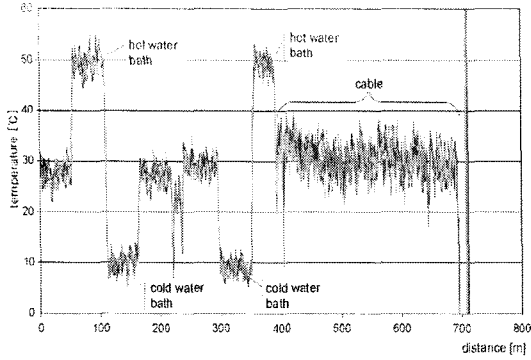


그림 5. DTSS에 의해 측정된 온도분포 (Brillouin scatter 사용).

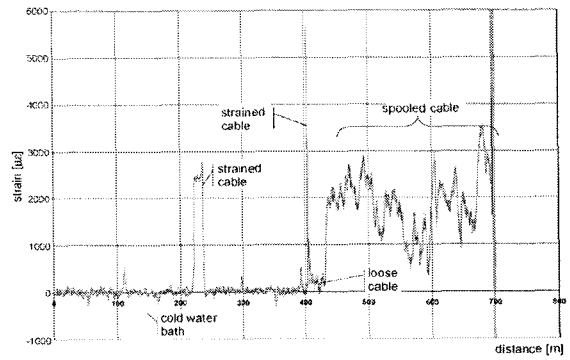


그림 6. DTSS에 의한 변형률 측정 결과 (with temperature correction).

3.2. 철재 I빔에 대한 변형률 측정

그림 7은 한국전력연구원 실험실에서 수행한 철재 I빔의 변형률 실험장면을 보여주고 있으며, 그림 8은 그에 대한 실험 모식도를 나타내고 있다. 여기서 철재 I빔 바닥 면에는 광섬유 케이블을 약 3m 구간에

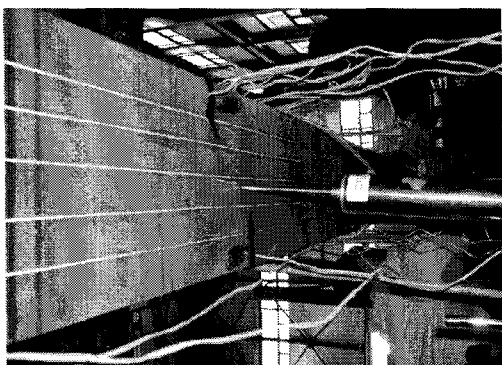
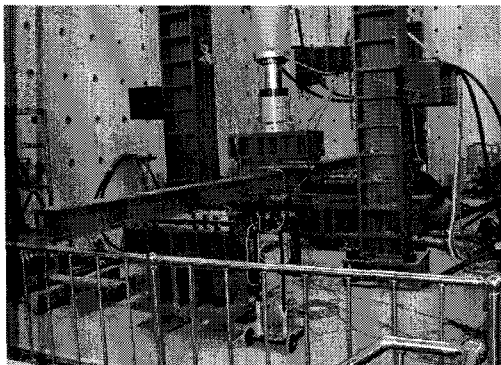


그림 7. 철재 I 빔 변형 실험장면(한국전력연구원, 2005). 상: 철재 I 빔에 하중을 가하고 있는 장면, 하: 광섬유센서와 strain gauge가 부착된 장면.

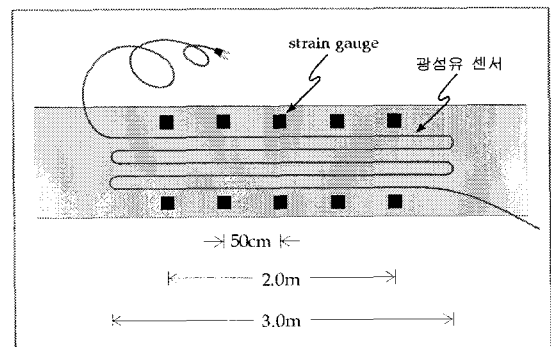
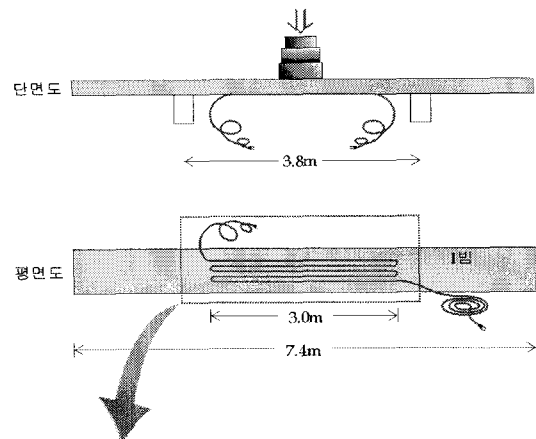


그림 8. 철재 I 빔 변형 실험모식도. 철재 I 빔 바닥에는 10개의 strain gauge와 광섬유센서가 동시에 부착되어 있다.

대해 5개 라인을 부착하였으며 변형률 측정치의 비교를 위해 별도로 10개의 스트레인 게이지(strain gauge)를 설치하였다. 그림 9(a)에는 DTSS 시스템을 이용하여 하중에 대한 I빔 처짐에 따른 변형률 측정결과를 보여주고 있다. 여기서 광섬유센서가 I빔 바닥 면에 5개 라인을 따라 설치되어 있기 때문에 변형 곡선에서는 5개의 peak값이 관찰되고 있다. 여기서 처짐이 증가함에 따라 5개 라인에 대한 변형값도 증가함을 알 수 있다. 한편, 20mm 처짐 이후에는 다시 9mm 처짐으로 회복하였으며 그에 대한 변형률 반응도 정확하게 일치되고 있음을 볼 수 있다. 그림 9(b)는 스트레인 게이지에 의해 철재 I빔의 처짐에 대한 변형률 측정 결과를 보여주고 있다. 여기서 특이한 점은 비록 스트레인 게이지가 철재 I빔 바닥에 5개씩 2개 라인에 걸쳐 서로 대칭되게 부착되어 있음(그림 8 참조)에도 불구하고 두개 라인의 변형률 값이 상대적으로 차이를 보이고 있다. 이는 철재 I빔 처짐이 약간 뒤틀려서 휘어진다는 것을 의미한다. 그림 10은 철재 I빔 처짐에 따라 DTSS에 의한 평균 변형률 값과 스트레인 게이지에 의한 평균 변형률 값을 상대적으로 비교하여 나타내고 있다. 두 개의 변형률 측정값들이 선형적인 분포를 보이며 훌륭하게 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과는 바로 구조물 변형률 모니터링을 위해 DTSS 케이블이 재래의 point sensing 개념의 스트레인 게이지와 대등하게 활용될 수 있음을 보여주는 것이 된다.

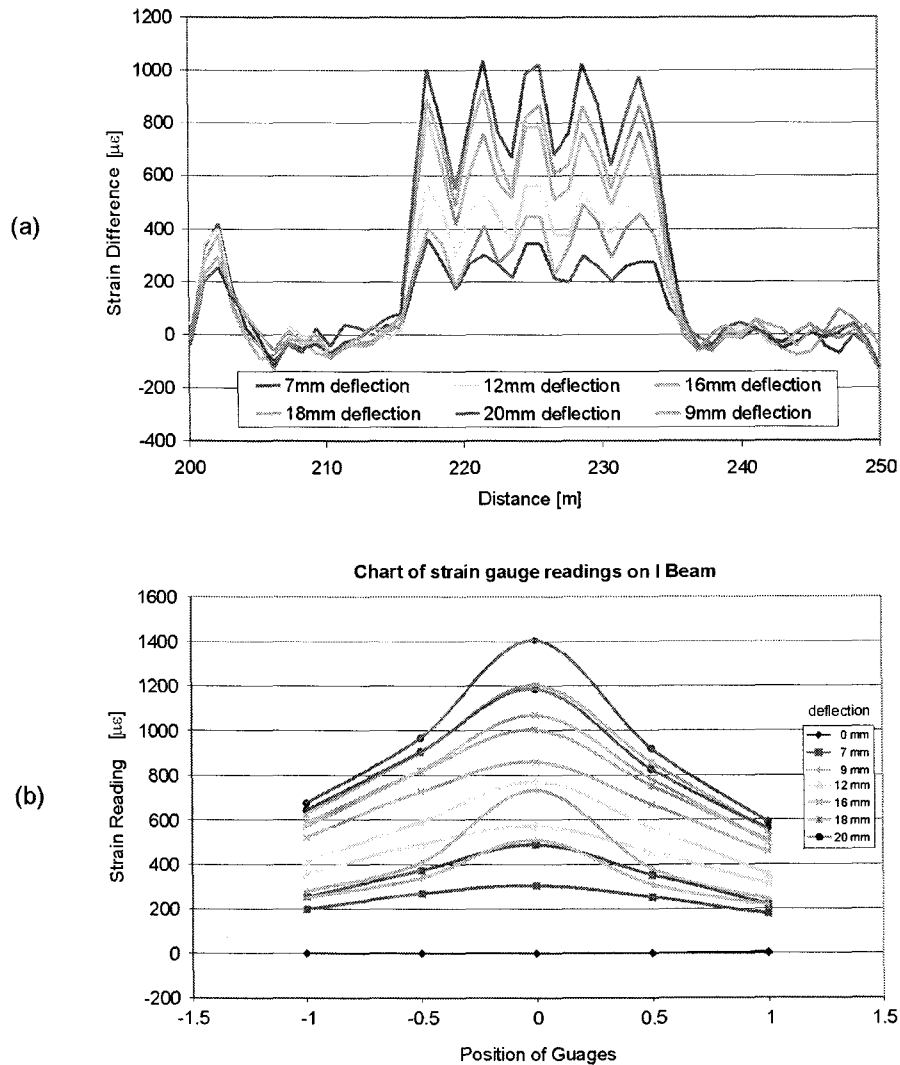


그림 9. (a) DTSS를 이용한 철재 I 빔 처짐에 따른 변형률 측정결과,
 (b) Strain gauge를 이용한 철재 I 빔 처짐에 따른 변형률 측정결과.

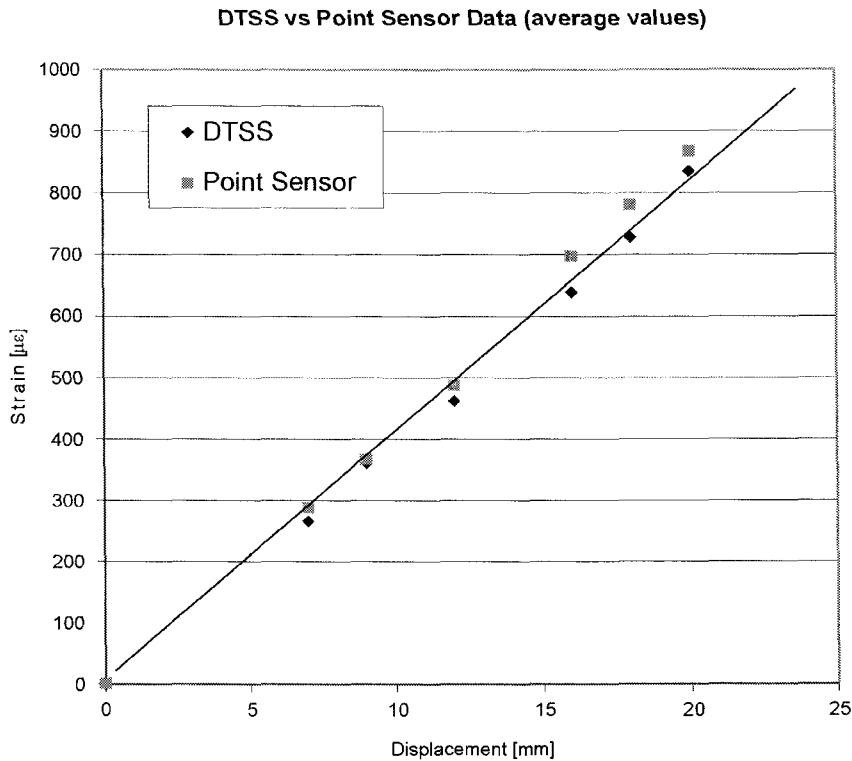


그림 10. DTSS와 strain gauge에 의한 측정결과 상대비교.

4. 변형률 측정을 위한 현장 실험

4.1. 지면의 sliding 및 침하 측정

암반(지반)의 거동은 그 이전 상태와 비교하여 모니터링 개념의 변형률 변화로 대변될 수 있다. 우선 침하가 예상되는 전 지역을 대상으로 광섬유케이블을 지표에 인접하여 매설한 후 시간 경과에 따른 변형률 측정이 수행되었다. 침하 및 sliding이 진행되는 곳에는 반드시 변형률 변화가 관찰될 것이며 측정된 변형률 변화폭에 따라 안전에 대한 대책방안이 수립될 수 있다. 이해를 돕기 위해 다음은 지반 sliding 및 침하에 대한 현장 사례를 예시하고 있다. 그림 11은 한국지질자원연구원 구내 야산에 광섬유케이블 매설 과정 및 측정장치의 전모를 보여주고 있다. 본 야외 실험장에서는 sliding 내지 지반침하가 발생할 가능성이 거의 기대될 수 없기 때문에 밀림장치 및 다짐을 통하여 인위적으로 변형률 변화를 유도하였다. 그림 12는 그에 대한 DTSS 측정결과를 나타내고 있다. 여기서, 밀림장치는 지면의 sliding 효과를 초래하였으며 그 정도에 따라 변형치가 1,500 $\mu\epsilon$ 까지 점진적으로 차별화되고 있음을 볼 수 있다. 한편, 무거운 추(탄성파 발생원 “붐저”)에 의한 다짐(그림 11 참조)은 미소한 지면 침하를 유도할 것이 기대 되었으며 그 효과는 약 1,400 $\mu\epsilon$ 변형률로 대변되었다. 변형률 실험 경험에 의하면 본 실험에서 사용된, 특수한 생산공정을 거친 광섬유 케이블은 약 28,000 $\mu\epsilon$ 측정에서 그 기능을 상실하였다. 상기 실험 내용 및 결과를 고려하면 DTSS 기법은 사면 안정성 내지 침하 예측을 위해 재래의 어떠한 계측기법(예: TDR)보다 효율적이며 경제성을 띤 방법이 될 것으로 본다.

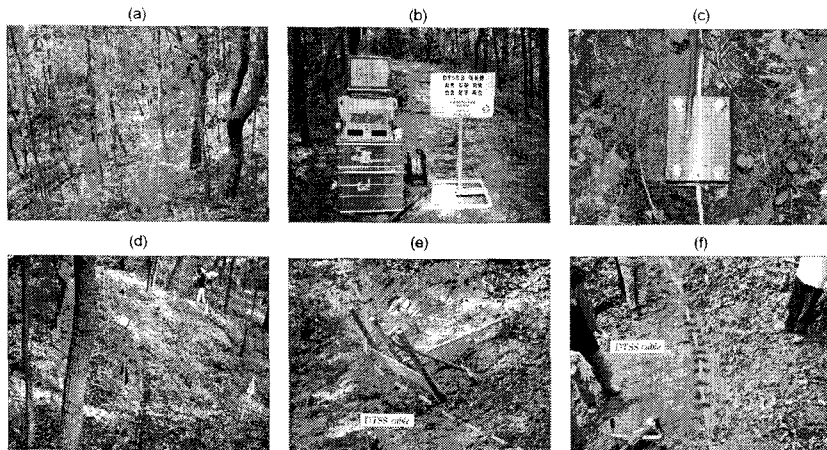


그림 11. 광섬유센서케이블을 이용한 변형률 모니터링 야외실험 전경.

(a) 광섬유센서 케이블이 매설된 위치(깃발로 표시), (b) DTSS 장비에 의한 변형률 측정, (c) 광섬유센서 케이블 고정 장치, (d) 광섬유센서 케이블이 매설되는 전경, (e) 매설된 광섬유센서 케이블을 밀림장치에 의해 늘어나게함, (f) 매설된 광섬유센서 케이블 상부 지면을 붐저에 의해 다짐으로써 미소 지반침하를 유발함.

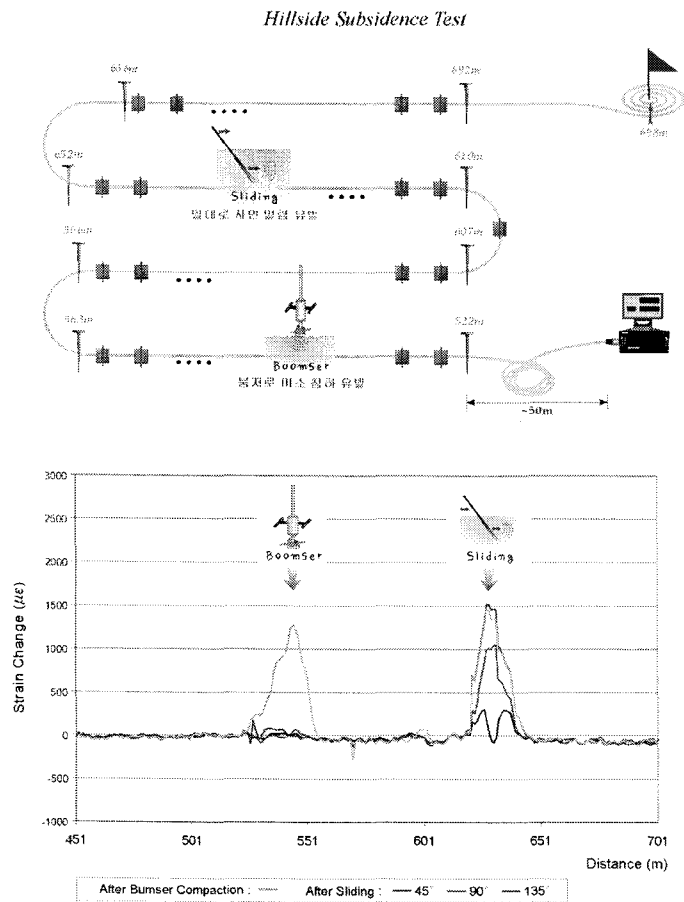


그림 12. 사면 sliding 및 지반침하 현장사례(KIGAM 구내 야산).

4.2. 철도레일 변형률 모니터링

그림 13의 좌상단 그림은 DTSS 케이블(광섬유센서)이 철도레일 측면 하단부에 약 85m 구간에 걸쳐 부착된 장면을 보여주고 있다. 사용된 광섬유센서는 single mode fibre cable로 직경은 약 900 μ m 이며 epoxy 접착제를 이용하여 철도레일 실험구간 전체에 연속적으로 부착되었다. 그림 13의 좌중간 그림은 광섬유센서 설치구간으로 KTX 열차가 진입하고 있는 장면을 보여주고 있으며 그에 대한 실시간 변형 측정결과는 그림 13의 좌하단 그림에 나타내었다. 여기에는 KTX 운행시 거리(distance) 대 시간(time) 축에 대한 2차원적인 변형률 측정치를 보여주고 있다. 변형률 이상대 위치로 간주될 수 있는 거리 약 260m 부근과 약 185m 부근에서는 큰 변형값을 보여주고 있다. 이러한 변형률 이상대 위치는 역시 일반 열차가 진입(그림 13의 우중간 그림 참조)하였을 때의 결과(그림 13의 우하단 그림)에서도 관찰되고 있다.

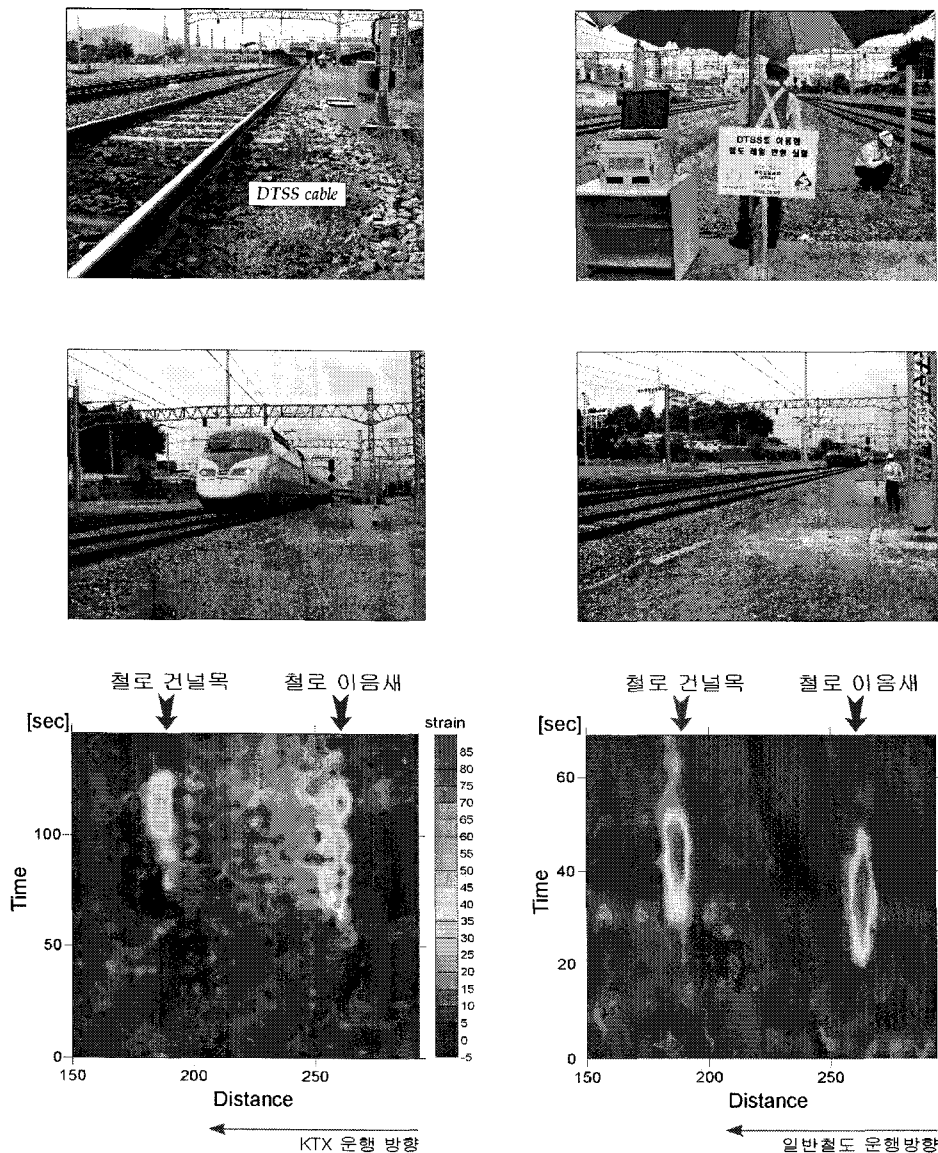


그림 13. DTSS를 이용한 철도레일 변형률 측정 (대전역사, 2005).

본 실험에서 사용한 DTSS 측정기법 유형은 “dynamic distributed strain(표 1 참조)”으로서 그 목적은 열차가 운행함에 있어 변형률 변화를 관찰하는 데 있었다. 열차는 대단히 서서히 정지하는 과정에 있었기 때문에 변형률 변화는 근소한 값(약 $90\mu\epsilon$)을 보여주었다. 레일 관찰에 의하면 이상대 위치 185m는 철도 건널목에, 250m는 철도 이음새에 대응되었다.

일반적으로 DTSS의 측정시간은 대체로 10분~20분 소요된다(표 1 참조). 이것은 장기간(수개월~수년) 모니터링을 통하여 철도레일이 서서히 변형되는 과정을 관찰하는 데 주안점을 두고 있다. 본 실험에서는 변형률 측정이 단지 0.1초 만에 이루어졌다. 즉, 이와 같이 순간적으로 변형률을 측정하는 독보적인 기술로 인하여 열차 운행으로 인한 변형률 변화(예: 열차 진동, 하중)가 파악될 수 있다는 것이다. 이러한 측정기법은 최근 KTX 운행시 열차 요동이 상대적으로 큰 구간, 교량구간, 터널내 소음이 큰 구간 등에 우선적으로 활용됨으로써 그 결과가 고속철도 안전운행을 위한 기본 자료로 반영됨이 바람직하다고 하겠다.

5. 결론

본 연구는 다양한 분야의 각종 시설물에 대한 변형 모니터링을 통해 그 시설물의 안정성 확보에 필요한 정보를 제공할 수 있음을 밝히고 있다. 이를 위해 영국 Sensornet사의 DTSS(Distributed Temperature and Strain Sensing) 장비를 이용한 다양한 실내 및 현장 실험을 통해 광섬유 센서 케이블을 이용한 변형률 측정의 신뢰성, 한계성 및 현장 응용성을 점검하였다. 우선 온도 변화에 따른 변형률 실험에서는 전혀 변형을 주지 않은 상태에서 단순히 온도 변화만으로도 상당히 변형률 값을 보임을 증명하였으며, 이를 통해 온도가 일정하지 않은 지역에서의 변형 측정을 하는 경우에는 반드시 온도 보정 과정을 거쳐야 함을 강조하고 있다. 철재 I빔 휨 실험에서는 광섬유센서를 이용한 변형 측정 결과를 상용되는 스트레인 케이지의 결과와 비교함으로써 DTSS에 의한 변형률 측정의 신뢰성이 검증되었다. 지반 침하(subsidence) 및 사면 미끄러짐(slope sliding)에 대한 변형 모니터링 현장 실험에서는 미세한 미끄러짐 및 침하에 대해 그에 대한 정확한 위치 및 그의 변형 정도를 정확하게 감지함으로써 사면 안정성 및 지반 침하의 조기 경보 시스템으로서 광케이블 변형 측정 기법이 활용될 수 있음을 보여주었다. 마지막으로 대전역사 철로에서는 DTSS 기술이 철도 운행 중 진동에 의한 철로 변형 모니터링에 사용될 수 있는지를 점검하기 위해 동적인 변형 측정(10Hz) 실험이 최초로 수행되었다. KTX가 통과되는 동안 철로 이음새 구간 및 철도 건널목 구간에서는 약 $90\mu\epsilon$ 정도의 변형율을 보여주는 반면 나머지 다른 구간에서는 약 $30\sim 50\mu\epsilon$ 수준을 나타내었다. 이 결과는 DTSS 기술이 동적이면서도 매우 작은 변형률 변화를 측정할 수 있으며 향후 긴 철도 레일 구간 중 문제가 되는 취약 개소 쉽게 파악하기 위한 장기적인 모니터링 기술로 활용될 수 있음을 시사하는 것이 되었다.

한편, 광섬유케이블을 이용한 변형률 모니터링에 대한 응용은 댐체 및 댐체 주변 사면의 안정성 확보를 위해 이미 여러 차례 DTSS 응용 성공사례가 발표되고 있다(Johansson, S., 2003). 또한 DTSS에 의한 지상 전선 검진도 시도된 바 있으며, 각종 파이프 라인(상·하수도관, 가스관)을 대상으로 한 현장응용은 초기 단계라 할 수 있다. DTSS 기술은 다양한 토목 시설물의 안전을 위한 변형률 모니터링 기술로서 경제적이고 효율적인 기법으로 정착될 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Johansson, S., Farhadiroushan, M., Parker, T., Watley D.(2003), *Distributed strain measurements for embankment dams - Laboratory tests, installation and initial monitoring experiences*, Elforsk rapport 03:19 Stockholm, 22p.
2. Parker, 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*, vol. 9., No. 7., pp.979-981.