

분포형 광섬유센서의 응용 및 개발 동향

채광석^{1)*}, 이상필¹⁾, 이창호²⁾, 한성재³⁾

Application and Development Trend of OTDRs

Kwagn-Seok Chae, Sang-Pil Lee, Chang-Ho Lee, Sung-Jae Han

Abstract In these days, the development of optical fiber sensor technology is so remarkable that it can measure various physical and chemical quantities ranging from a few millimeters to over several kilometers. In addition, it is attempted to assess the structural integrity of the state of the advanced technologies and existing structures such as ships, aircrafts, and bridges. This paper introduced the case histories of the measuring technology of optical fiber applied on structures such as roads and tunnels. The case history using OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) was also introduced in this paper. Measurement of the pre-convergence of a tunnel is essential to assess the safety of a tunnel and understand the geological conditions ahead of an advancing tunnel. Therefore, the pre-convergence measuring technology using OTDR is expected to substitute conventional measuring techniques.

Key words Optical fiber sensing, OTDR, Tunnel, Pre-convergence measuring

초 록 최근 광섬유를 이용한 센싱기술은 비약적으로 발전하여 수 km의 광역지역에서 수mm 이하의 미소영역에 대한 계측 및 다양한 물리, 화학적인 측정을 가능하게 하였다. 또한 첨단 기술에 관련된 실험 및 선박, 항공, 교량 등 실제 구조물의 응답을 측정하여 건전성을 평가하는 시도가 이루어지고 있다. 본고에서는 광섬유 센서의 계측기술 및 터널, 도로 등의 구조물에 응용된 사례를 고찰하였다. 또한 당사에서 개발한 터널의 선행변위 계측을 위한 분포형 광섬유센서 방식인 OTDR센서의 적용 사례를 연구 성과로 소개하였다. 터널의 선행변위 계측은 안정성 평가를 위한 필요 조건으로 터널 막장의 전방 지질조건을 이해하는데도 도움이 되며, 향후 OTDR센서에 의한 터널 선행변위 계측은 기존 계측방법을 대체할 수 있을 것으로 기대한다.

핵심어 분포형 광섬유센서, 터널, 선행변위 계측

1. 서 론

초기의 광섬유 케이블은 통신 시스템을 기반으로 하는 FTTH(Fiber To The Home)에 의해 각 가정에 통신 회선으로 이용되었다. 최근에는 지속적인 연구 개발을 통하여 항공기, 선박, 교량 등의 실제 구조물의 안정성 계측기로 사용되고 있으며, 수 km의 넓은 지역에서 수 mm의 미세영역까지 계측이 가능하도록 적용 영역을 넓혀가고 있다. 광섬유를 센서로 활용하는 기술은 분포

형방식 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)과 포인트형방식 FBG(Fiber Bragg Grating sensor)방법으로 구분된다. 분포형 OTDR은 측정방식에 따라 간섭형 센서(Interferometer sensor)와 강도형 센서(Intensity sensor)로 세분된다. 간섭형 센서는 고밀도의 음향, 진동, 지진계측 등으로 활용되며, 강도형 센서는 광섬유의 힘 손실 및 반사광의 변동을 분석하여 광역지역의 변위, 수위, 우량 계측, 낙석 및 토사류의 감지 등에 활용되고 있다. 또한, 광섬유 Core의 회절격자(Grating)의 적외선 주기 및 굴절률을 이용하는 방법인 FBG(Fiber Bragg Grating sensor)는 변형률, 온도 센서로 활용되고 있다.

본고에서는 다양한 광섬유 센서의 계측기술의 원리와 터널, 도로 등의 구조물에 응용된 국내외사례를 소개하며, 분포형 광섬유센서 OTDR 계측기술의 터널 선행변위 계측에 적용한 사례를 소개하였다.

¹⁾ GS건설 기술연구소 첨단건설연구팀

²⁾ GS건설 토목사업본부 경부고속철도 6-4A공구

³⁾ GS건설 토목사업본부 의정부경전철

* 교신저자 : kschae@gconst.co.kr

접수일 : 2011년 2월 16일

심사 완료일 : 2011년 2월 21일

게재 확정일 : 2011년 2월 23일

2. 광섬유센서 계측기술

그림 1에 광섬유센서의 각 방식의 형태 및 센서의 출력이미지를 나타냈다. 광섬유내의 측정 위치에 따른 분류로 포인트형과 분포형으로 구분되는데, 미리 지정한 특정 위치에서 개별적으로 측정하는 포인트형 FBG센서 및 일정한 구간에서 계측값을 평균적으로 검출하는 분포형 OTDR센서의 원리에 대해 자세히 설명한다.

2.1 FBG 센서(Fiber Bragg Grating)

포인트형 FBG센서는 광섬유 케이블에 광대역의 레이저를 입광시키면, 케이블의 Core내 회절격자(Grating)에서 특정파장의 파장은 반사하고 나머지는 통과한다(그림 2). 반사된 특정파장을 Bragg파장이라 하며, 변형률과 온도에 의해 회절격자와 굴절률의 변화에 Bragg파장이 변동하므로 센서로서 이용할 수 있다. 일반적으로 관측점은 케이블당 10~30개로 제한되어 있는데, 시간분할 다중방법(TDM) 및 광주파수 영역의 반사측정법(OFDR) 등을 이용하면 다수의 측정점 배치가 가능하다.

2.2 OTDR 센서(Optical Time Domain Reflectometry)

분포형 OTDR센서에 레이저를 입사시키면 다양한 방

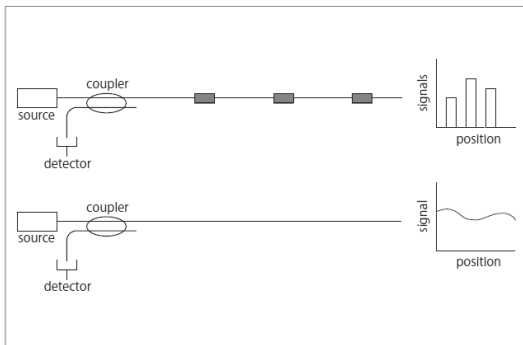


그림 1. 광섬유센서 검출 방식(포인트형 방식(상), 분포형 방식(하))

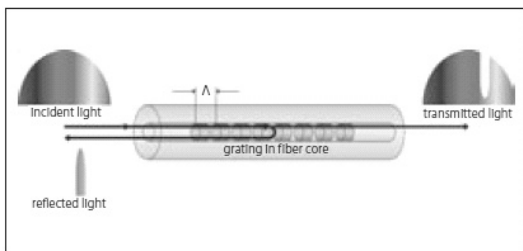


그림 2. FBG센서의 원리

향으로 산란(Scattering)이 일어나며 역방향으로 산란하는 후방산란(Back scattering)으로 Rayleigh, Raman, Brillouin의 3종류의 산란이 있다. 입사시와 관측시의 시간차에 의하여 케이블의 어느 위치에서 산란된 후방산란인가를 알 수 있는데, 일반적으로 입사광과 같은 주파수를 갖는 Rayleigh 산란파를 이용하여 위치를 파악한다.

그림 3에서 나타난 것과 같이, 큰 진폭을 갖는 Rayleigh 산란은 대체로 케이블 밀도의 변화와 연관되며 파장의 변위는 없다. 그러나 Raman 산란은 케이블 온도와 관련성을 갖는데 스토크스(Stokes) 범위에 속한 Raman 산란은 온도변화와 무관하지만 안티스토크스(Anti-stokes) 범위에서는 온도변화에 따라 진폭이 예민한 반응을 보여준다. 여기서 온도측정은 스토크스 및 안티스토크스의 Raman 산란조도(Intensities)를 분석함으로써 얻게 되는 결과이다. 마지막으로 Brillouin 산란은 케이블의 변형률 및 온도변화와 상관된다. Brillouin 산란의 스토크스 및 안티스토크스 신호는 주파수에 대해 Raman의 것보다 훨씬 인접하여 있고, 산란신호는 온도변화에 따라 그 주파수 위치를 달리하는 단점을 갖고 있으나, 온도측정과 동시에 변형률을 측정할 수 있는 유용성 때문에 폭넓게 사용되고 있다.

2.3 계측 종류

광섬유센서를 이용한 계측의 장점은 동일한 광섬유 케이블을 이용하여 다양한 물리적, 화학적 계측 및 감지가 가능하다는 것으로 계측 가능한 몇 가지 사례를 들어 보면 다음과 같다.

2.3.1 온도

온도를 계측할 수 있는 대표적인 센싱기술은 Ramam-OTDR, Brillouin-OTDR, FBG가 있다. Ramam-OTDR은

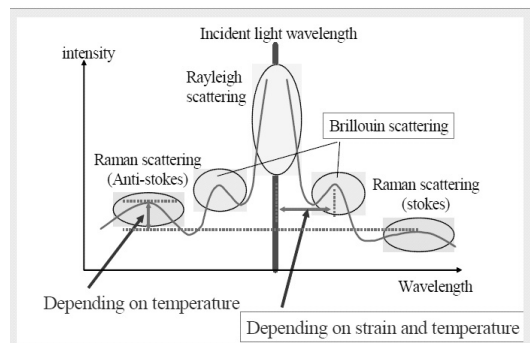


그림 3. OTDR 산란광의 주파수 대역에서의 형태

격자진동과 에너지의 비탄성적 상호작용에 의해서 발생하는데 스투크스와 안티스투크스의 산란조도(Intensities) 비율에서 온도를 구한다. Brillouin-OTDR에서도 온도 측정이 가능하며, 일반적으로 측정 정밀도 및 범위는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $-200 \sim +350^{\circ}\text{C}$ 이다. 그러나 FBG의 산란(Scattering)은 고온영역에서 시간과 함께 약해지는 현상이 있다.

2.3.2 변형률, 변위

변형률 측정에 가장 많이 사용되는 센서는 FBG와 Brillouin-OTDR이다. FBG센서는 특정 위치에서 측정하는 측정방식이고, Brillouin-OTDR은 불특정한 다수의 측정점을 갖는 특징을 갖고 있으며, 측정 정밀도는 스트레인 게이지와 동일한 오차범위를 가지며 Creep변형을 정량적으로 평가하는 것도 가능하다.

2.3.3 진동, 부식

진동계측은 OTDR센서의 간섭형 센서 (Interferometer sensor)와 FBG가 사용되고 있다. OTDR센서는 하이드로폰(Hydrophone)의 수중음향파 계측 및 지진계, 탄성파, Acoustic Emission(AE)의 감지를 위해 사용되며 배관 파이프의 모니터링에도 사용된다. FBG는 다수의 측정점에서 DC~수백 Hz의 진동 계측이 가능하다. 또한 유지관리 기술로 주목되고 있는 조기 부식감지 기능은 형광색소분자와 소멸파(Evanescence wave)를 이용한 부식 센서가 있으며, 케이블에 금속 박막을 부착하여 부식의 진행을 감지하는 방법이 있다.

2.3.4 가스, 방사선

분광분석(Spectrum analysis)을 이용한 가스의 종류와 농도를 계측하는 광섬유 센서는 오래 전부터 활용되었다. 특정 가스의 반응물질을 광섬유 케이블의 측면에 부착하여 입사광과 반사광의 강도변화에서 수소를 이용한 가스 감지를 하는 방법이 있으며, 소멸파(Evanescence wave)를 이용하는 방법도 개발되었다. 그리고 특수형 광섬유 케이블(Scintillation fiber)를 이용하면 방사선 분포계측이 가능하다.

3. 국내외 활용 사례

지구온난화에 의한 이상기후는 대기온도 상승과 더불어 태풍 등의 대형 강우와 지진, 강풍, 강설 등의 자연현상을 유발하며, 이로 인하여 도로, 철도 등의 인프라 시설을 비롯한 국가적으로 중요한 시설물의 안전이 상시적으로 위협에 노출되어 있다. 또한, 인프라 시설의 유지 관리하는데 많은 유지관리비용이 요구됨에 따라,

시설의 안전을 효율적으로 확보하기 위한 상시 감시시스템과 관련된 기술이 IT기술과 융합되어 활발하게 진행되고 있다. 국내에서도 광섬유 센서의 활용분야가 급속히 증가하고 있으며 터널의 내공변위 자동화 계측기술 분석 연구(정소걸, 2005), 광섬유센서케이블의 구조물 적용사례(김기수 등, 2007), (김경수 등, 2009)이 적용 연구가 보고되어 있다. 여기에서 대표적으로 국내외의 광섬유 센서를 활용한 도로, 철도의 관리시스템에 대해 소개한다.

3.1 국외 사례(일본 도로의 모니터링)

일본은 지진, 태풍, 적설 등의 자연환경 때문에 많은 재해에 노출되어 있으며 도로 연장이 방대하여 광섬유 센서 네트워크를 기반으로 광역망 시스템이 구축이 요구된다.

도로재해 모니터링시스템(藤橋一彦, 2003)은 사면표층 붕괴모니터링, 설빙(雪氷) 재해모니터링, 교량 모니터링, 터널 모니터링으로 구성되어 각종 센서의 개발, 설치방법, 계측기 제어, 내구성 검사 등과 더불어 데이터 처리를 위한 소프트웨어 개발을 수행하였다.

3.1.1 사면표층 붕괴모니터링

사면의 표층붕괴는 지형, 지질, 식생 등의 다양한 사면붕괴 원인때문에 붕괴발생 위치를 사전에 예측하는 것이 어렵다. 따라서 광역 범위를 감시할 수 있는 광섬유센서 모니터링 기술과 동시에 소규모 붕괴를 조기에 감지할 수 있는 기능이 필요하다. 일본 토목연구소, NTT, 다수의 민간 기업이 참여한 ‘광섬유센서를 활용한 도로 사면 붕괴모니터링 공동연구 프로젝트’에서 나가오카시 19호 국도의 사면을 대상으로 현장 모니터링을 수행하였다(그림 4).

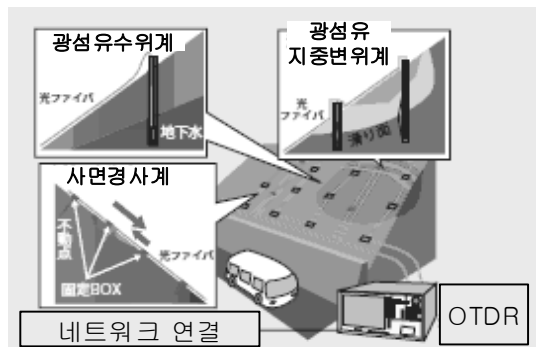


그림 4. 광섬유센서를 이용한 사면표층 붕괴모니터링 사례

3.1.2 설빙(雪氷) 재해모니터링

일본 국토의 약 60%는 적설 한랭지역으로 제설, 응설 작업 등의 동절기 도로유지 관리비용의 저감 및 환경부하의 억제가 필요하다. 따라서 OTDR센서의 적설계, 도로온도계 및 눈사태 감지계를 개발하여 홋카이도 998호 국도에 설치하였다(그림 5).

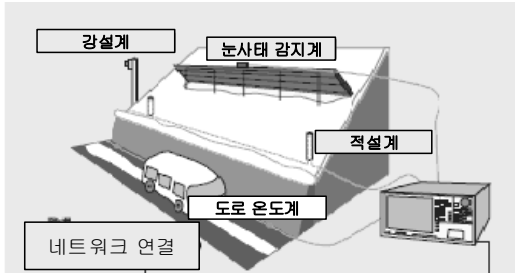


그림 5. 광섬유센서를 이용한 설빙(雪氷) 재해모니터링 사례

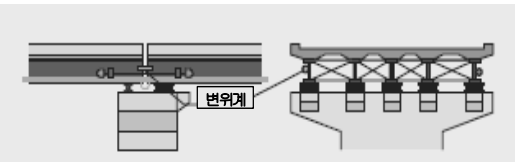


그림 6. 광섬유센서를 이용한 교량 모니터링 사례

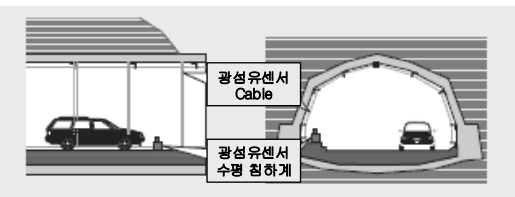


그림 7. 광섬유센서를 이용한 터널 모니터링 사례

3.1.3 교량 모니터링

교량 모니터링은 유지관리, 안전성 확보, 내진성 향상 등이 중요한 요소로서 지진 직후의 교량의 건전성 및 차량통행 여부의 판정을 목적으로 OTDR 센서의 변위계를 이용하여 정량적인 계측 및 관리기준치를 설정하여 모니터링에 활용하였다(그림 6).

3.1.4 터널 모니터링

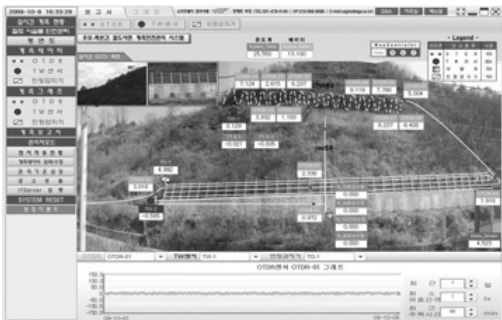
철도 터널의 내구성 열화로 인하여 내벽콘크리트 파편의 박리, 낙하 등의 사고가 발생하여 통행 차량의 안전성을 위협하게 하는 경우가 발생한다. 따라서 OTDR 센서의 구조물 감시시스템을 이용하여 광섬유 케이블을 2 m간격으로 터널 내면에 축방향으로 설치하여 균열을 감시하였다. 또한, 터널 경사의 계측을 목적으로 OTDR센서의 수평침하계를 설치하였다.

3.2 국내 사례(철도시설물 모니터링)

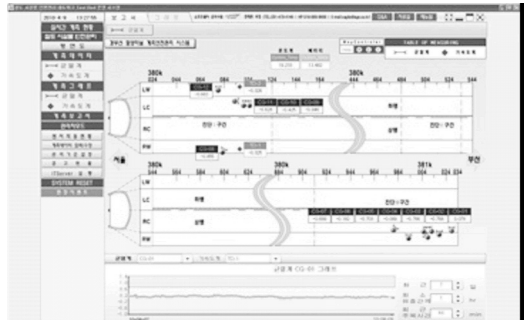
철도시설물의 안전을 목적으로 철도 주변의 사면, 터널, 지하철의 정거장 등의 철도시설물에 대하여 광섬유센서를 활용한 통합 모니터링 시스템이 운영되고 있다(김용수, 2010). 중앙선 구간의 철도 연변의 낙석사면을 대상으로 OTDR을 이용한 낙석발생 감지 센서를 설치하여 운영하고 있으며, 또한 일본의 경우와 같이 터널 내부의 시설물 안전관리를 위하여 OTDR센서를 활용하고 있다(그림 8, 9). 그리고 지하철 선상의 고압전류에 의한 자기장 노이즈 영향을 최소화하기 위하여 광섬유 FBG센서를 채택하였다.

4. OTDR을 활용한 터널 굴착시 선행변위 계측 기술

불연속 파쇄대가 포함된 연약지반 터널에 적용을 목적으로, 분포형 광섬유센서 OTDR를 활용한 터널 굴착



(a) 철도 낙석사면 감시 시스템



(b) 터널 상시 모니터링 화면

그림 8. 국내 철도시설물 모니터링 사례

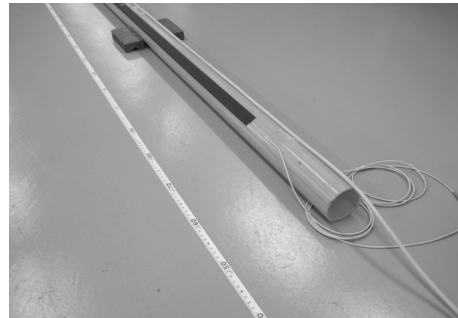
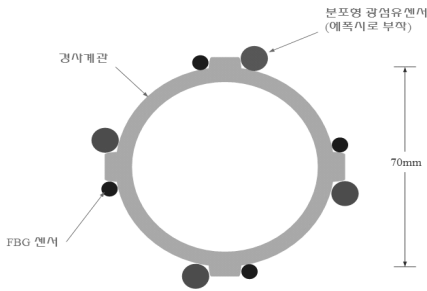


그림 9. 광섬유 센서부착 위치 및 모형실험 케이싱

시의 선행변위 계측 기술을 개발하였다.

2005년 터널붕괴가 발생한 소양강댐 여수로의 경우와 같이 불리한 지반 조건내의 터널 굴착시 터널 안정성 문제는 상존하며, 이에 대한 실시간 계측관리의 중요성이 높아지고 있다. 안정성 판단 기준이 되는 변위 계측치는 계측 시점과 막장으로부터 떨어진 거리 및 굴착후 지보재의 설치까지의 시간차 등으로 존재한다. 특히, 연약지반 터널의 경우에는 전체변위에서 선행변위의 비중이 높아서 기존의 변위계측으로 안정성 여부를 판단하는 것은 곤란하기 때문에 다양한 분야에서 신뢰성이 검증된 OTDR 센서를 활용하여 터널의 선행변위 계측을 검토하였다.

터널 굴착과 관련하여 선행변위에 대한 국외 연구는 Hanafy(1980), Panet(1982), Vassilev(1988) 등이 수치해석적 기법을 이용한 연구를 하였고 국내에서는 김광염 등(2003)이 수평경사계를 이용하여 터널내 선행변위 측정에 대한 연구를 수행하였으나, 광섬유 센서를 활용한 실규모 현장실험을 통한 계측 사례는 거의 없는 상황이다.

4.1 실내 모형실험

4.1.1 실내 모형실험 개요

광섬유센서의 신뢰도 및 적정성을 위해 실내 모형실험을 수행하였다. 그림 9에서 나타난 것과 같이, 분포형 광섬유센서(OTDR)와 포인트형 광섬유센서(FBG)을 이용한 변형을 및 변위 측정을 위하여 케이싱(약 70 mm, 길이 9.0 m) 외부에 OTDR 센서와 FBG센서를 부착시키고 수평재하로 케이싱에 변형을 유도하였으며, LVDT를 설치하여 정확한 변위값을 측정하였다. 변위형상에 따른 영향을 파악하기 위해 단순보 U자형과 복합 S자형, 캔틸레버형의 3가지 형태로 설정하고 최대 변위량을 60 mm로 하였다.

4.1.2 실내 모형실험 결과 및 분석

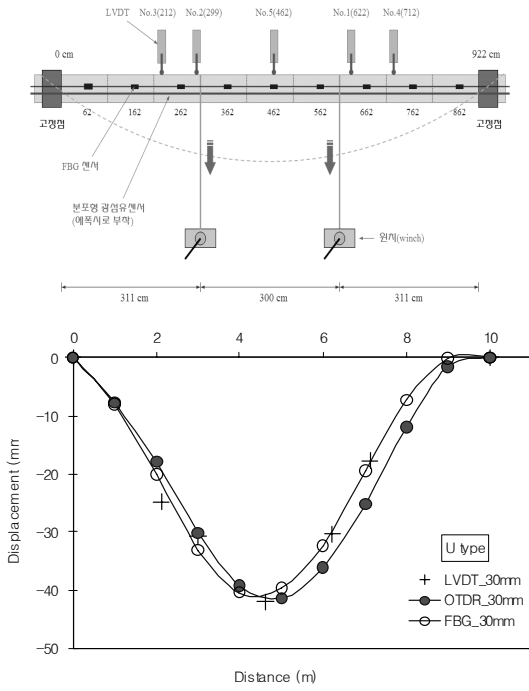
그림 10과 같이, 단순보 U자형(CASE1)의 경우, 케이싱의 양단을 고정하여 중앙의 2개 지점에서 동일한 하중을 재하하였다. OTDR과 FBG의 광섬유센서에서 측정된 결과는 상호간에 매우 유사한 거동을 보였으며, LVDT의 측정값과 매우 근접한 것을 알 수 있다. 그림 11에 나타난 것과 같이, (CASE2)의 복합 S자형의 경우에는 CASE 1과 동일한 양단 고정 조건에서 S자형 변형이 일어날 수 있도록 서로 반대 방향에서 하중을 가하였다. OTDR과 FBG의 측정값은 S자형 형상으로 상호간에 오차를 나타내고 있으며, LVDT의 측정값은 오차 범위내에서 위치하고 있다. 또한, 변위량이 60 mm로 증가함에 따라 FBG의 변위값이 LVDT값에 근접하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 OTDR센서는 분포형 방식으로 1.0 m 구간의 평균값으로 하는 분해능(Angular resolution)의 오차로 판단된다.

그림 12는 캔틸레버형(CASE 3)의 실험과 그 결과이다. 0.0 m 지점과 3.0 m 지점을 고정하고 반대 지점에서 하중을 가하였다. OTDR 측정값은 FBG값에 비해 LVDT값에 매우 유사하게 거동하는 것을 알 수 있으며, 실제 현장에서 수평경사계의 거동이 캔틸레버형 거동과 유사하므로 실제 사용에 적절한 것으로 판단된다.

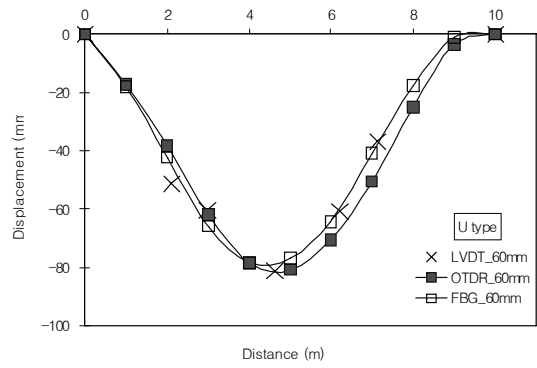
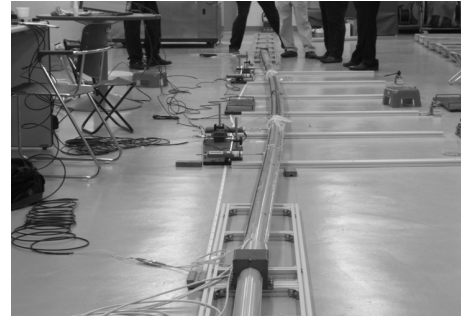
4.2 현장 적용실험

4.2.1 지반조건

현장 주변의 지형은 장년기~노년기의 구릉성 산지와 침식분지로 이루어져 있으며, 지질 분포는 옥천누층군 중 창리층 및 황강리층을 중생대 주라기/백악기의 화강암류 및 맥암류가 관입후 제4기의 충적층이 부정합으로 덮고 있으며, 주변의 하천과 저류지를 따라 충적층이 발달하고 있다. 현장은 경부고속철도 OO공구의 △△터널 NATM공사의 시점부이며, 설계 조사시 5 Type 지보패턴으로 설계되었다. 그림 13에서 알 수 있듯이 경

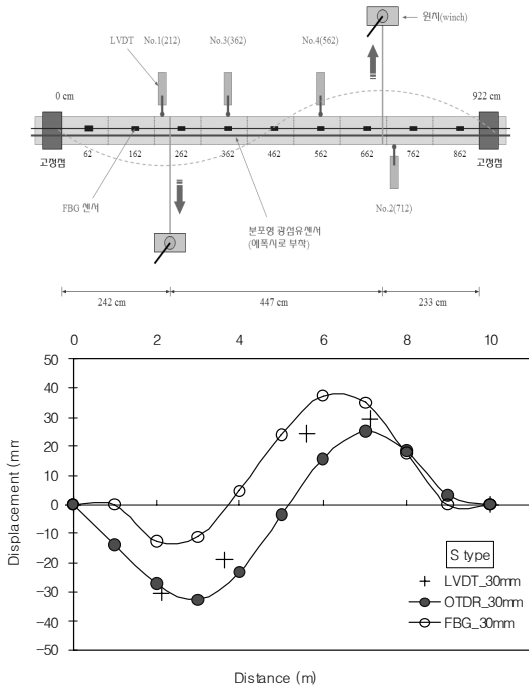


(a) 30 mm 변위 결과

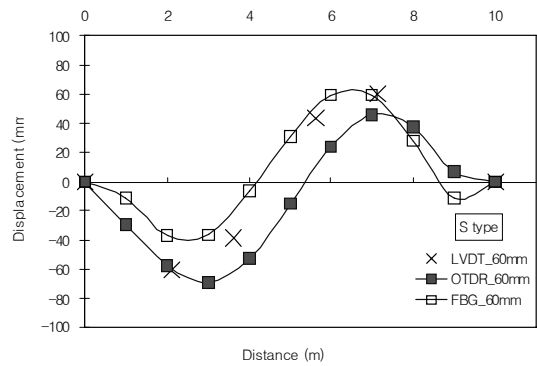
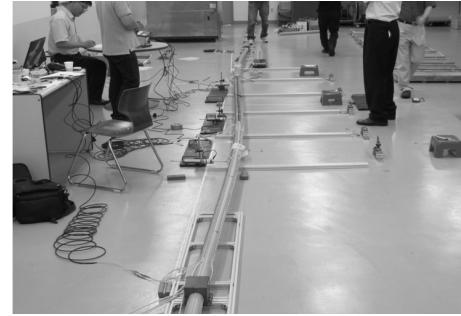


(b) 60 mm 변위 결과

그림 10. 단순보 U자형 모형실험 및 결과



(a) 30 mm 변위 결과



(b) 60 mm 변위 결과

그림 11. 복합 S자형 모형실험 및 결과

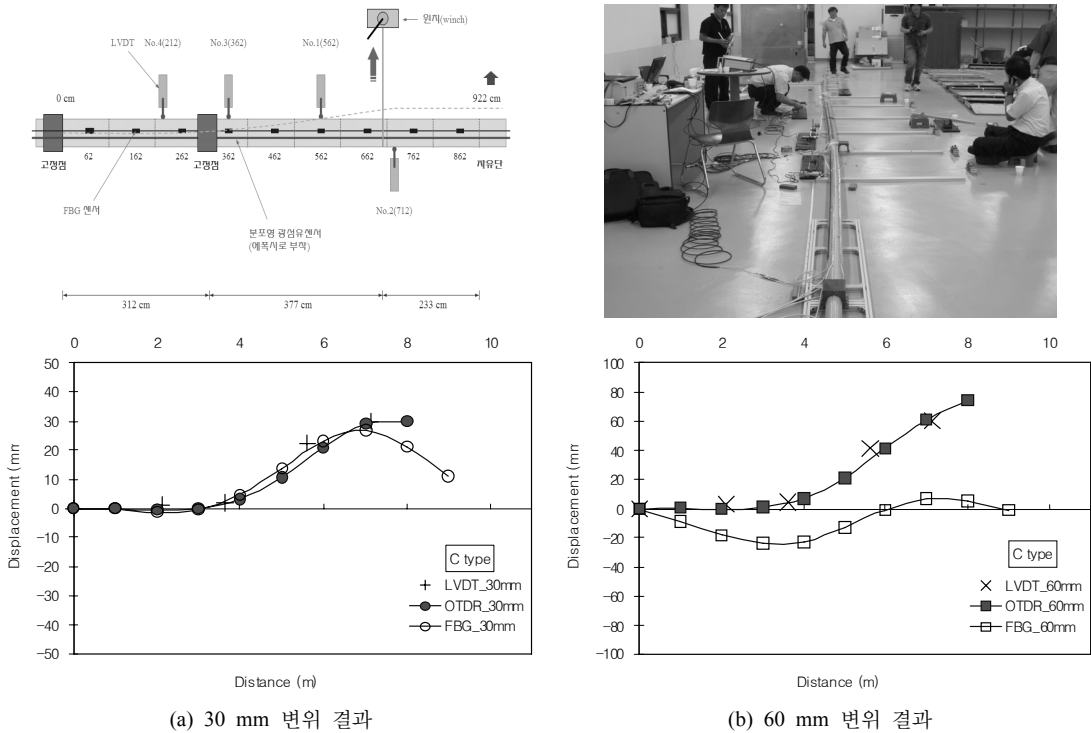


그림 12. 캔틸레버형 모형실험 및 결과

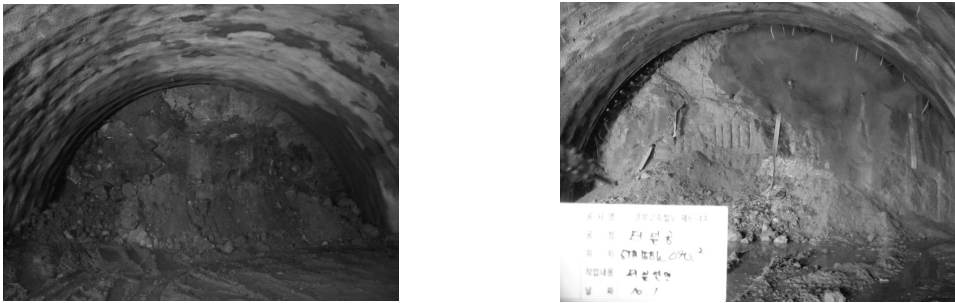


그림 13. 현장실험의 터널막장 현황(풍화대 구간)

표 1. 풍화대 구간의 지질 특성

| 지층 | 두께 (m) | 지층설명 | 색조 | 비고 |
|-----|----------|-------------------------|---------|-----------------------------------|
| 풍화토 | 2.0~26.0 | 실트섞인 모래, 암편 협재 | 담갈색~암갈색 | |
| 풍화암 | 1.5~22.0 | 굴진시 실트질 모래로 분해, 암편 협재 | 담갈색~암갈색 | 50/10~50/3 |
| 경암 | 2.8 | 화강암, 약간 풍화~신선, 매우 강한 강도 | 담갈색 | TCR: 91~100 (%) RQD: 50~70 (%) |

구부의 약 100 m구간의 터널 상부에서 풍화대 구간의 분포가 관찰되었고 다량의 용수가 유출되는 것이 확인 되었다. 풍화대 구간의 1, 2차 선진수평보링에서 통하

여 풍화암의 표준관입시험(SPT)의 N값 및 경암의 코아 회수율(TCR), 암질지수(RQD) 등의 지반강도 특성을 표 1에 나타내었다.

4.2.2 현장실험 개요

풍화대 구간의 굴착시, 지보패턴의 변경 및 보강공법 (강판단단 그라우팅 및 수발공 등)을 적용하여 터널의 안정성을 확보함과 동시에, 수평경사계와 분포형 광섬유센서 OTDR을 이용하여 터널 막장 전방의 선행변위를 계측하였다. 그림 14에 나타낸 것과 같이, 터널 상단에 수평경사계의 계측을 위한 케이싱 설치를 위해 약 15°로 상향 천공하였고 케이싱 관입깊이를 30 m로 하였다. 그림 15는 케이싱의 조립, OTDR 케이블의 케이싱 부착 및 터널 상단의 천공 홀에 관입하는 현황을 나타내었다.

의 시간별 경시변화 특성은 터널굴진과 함께 막장이 진행됨에 따라 막장면과 근접된 위치에서 최대변위가 증가하는 양상을 나타냈다. 그림 16은 수평경사계의 변위를 나타낸 것으로 20일 누적치를 최대 기점으로 하여 최대 변위가 불규칙적으로 증감하는 현상을 반복하고 있다. 이는 수평경사계 센서의 특성상 막장이 30 m 지점을 통과하여 부동점의 교란으로 인한 측정치의 이상으로 판단된다. 최대 변위발생량은 막장이 24 m 진행한 시점에서 발생하였고, -17.14 mm(센서 위치 12 m 지점)이다. 그림 17에 광섬유센서 OTDR의 변위분포를 나타냈는데, 여기에서 주지할 사항으로 천공 작업과정에서 천공홀 유지를 위해 삽입한 보조강관의 제거가 되지 않아서 일정구간의 실험결과에 영향을 미치게 되었다. 따라서 작업시 천공 보조 강관의 제거가 되지 않은

4.2.3 현장실험 결과 분석

1) 최대변위 발생량

총 3개월간의 측정 데이터의 분석 결과, 수평경사계

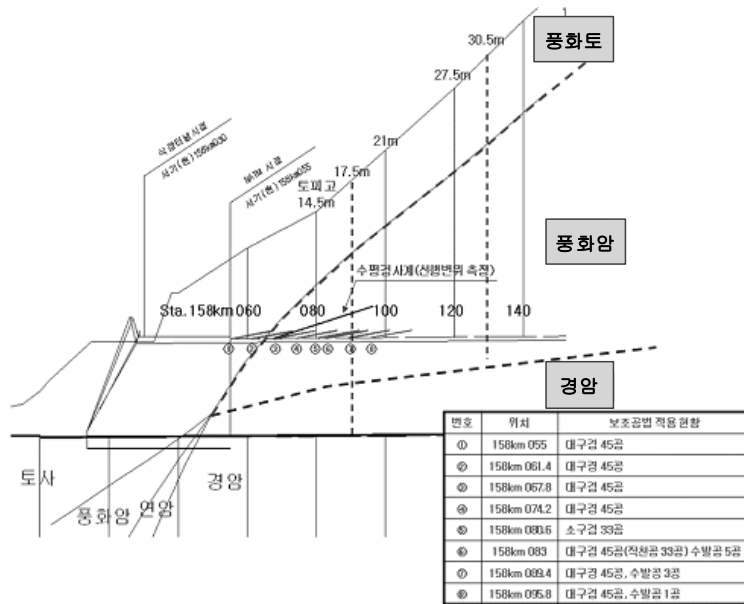


그림 14. 지질조건 및 선행변위 계측, 보강공법



(a) 케이싱 조립



(b) OTDR 부착



(c) 케이싱 삽입

그림 15. 케이싱 설치 현황

0.0~7.0 m구간의 변형율이 과대하게 발생되어 본 분석결과에서는 제외하였고 변위 분석은 8.0~30.0구간 내에서 수행하였다. 최대변위는 약 -16 mm 정도로 측정되었고 위치는 약 15 m 지점이다.

2) 선행 변위량 산정

수평경사계에서 측정되는 변위는 막장의 굴착전에 발생하는 변위(굴착전 변위)와 굴착 직후의 최초 계측시점 사이에서 발생하는 계측전 초기변위 그리고 시간경과에 따라 측정되는 계측변위 등으로 나누어지며, 이

를 이용하여 막장면과 막장전방에서 발생한 선행변위 비율을 측정할 수 있다.

① 계측변위 = 천단침하량

② 총변위 = 굴착전 변위 + 계측전 초기변위 + 계측변위(천단침하량)

③ 선행변위 비율 = (굴착전 변위+계측전 초기변위) / 총변위

막장이 센서의 설치지점을 통과할 때의 침하발생의 비율을 계산해 보면, 평균 54.07% 정도로 나타났고, 당 현장의 경우 터널 안정화에 소요되는 시간이 선행변위

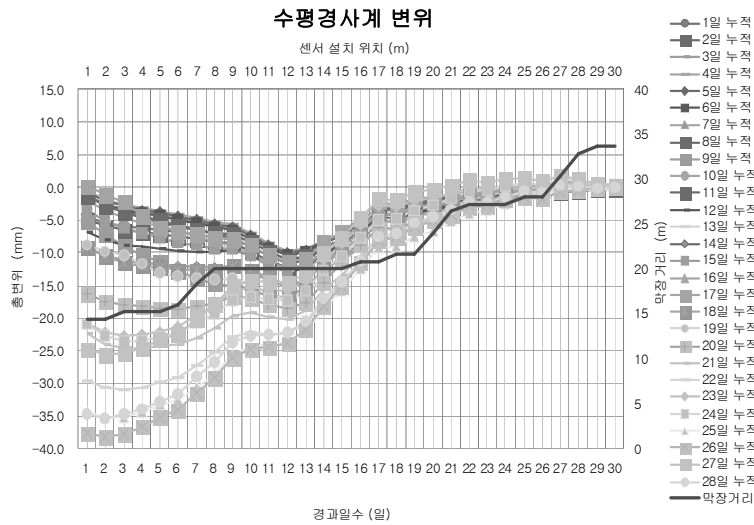


그림 16. 수평경사계 변위 분포

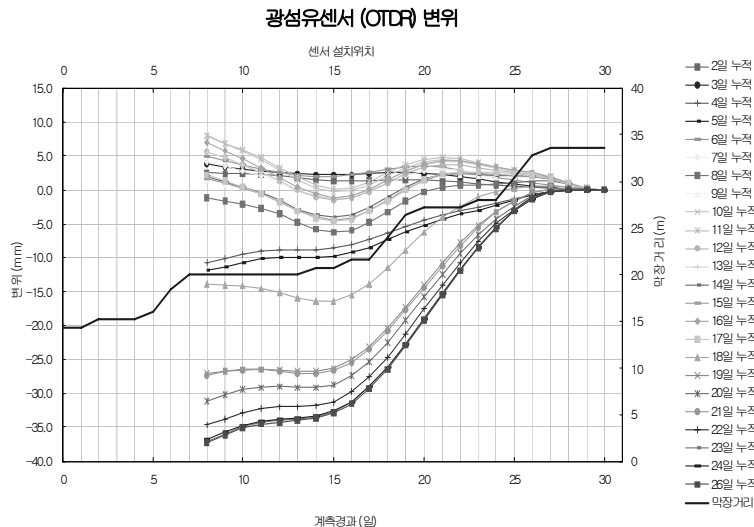


그림 17. 광섬유센서 OTDR 변위 분포

특성상 막장면 통과후 10일 정도(약 10 m/1D 미만)인 것으로 판단된다. 막장이 20 m진행한 시점에서 실제 발생된 전체변위량은 굴착전 변위량(-2.11 mm) + 계측전 초기변위량(-0.09 mm)에 천단 변위량(-2.73 mm)을 합한 총변위량(-4.93 mm)이다. 이를 바탕으로 선행변위 비율을 산정해보면 42.08%이며, 이는 일반적인 선행침하 비율(40~45%)에 해당된다.

5. 결 론

광섬유 센서의 터널, 도로 등의 구조물에 응용된 국내 외사례 및 분포형 광섬유센서(OTDR) 계측기술을 터널의 선행변위 모니터링에 적용한 연구사례를 소개하였다. 그러나 광섬유 센서는 기존 센서에 비해 여러 가지 장점이 있음에도 아직 폭넓게 적용되지 못하고 있는 실정이다. 광섬유센서를 토목구조물 계측에 적극적으로 활용하기 위해서는 지속적인 시스템 보완과 검증실험을 통하여 선형성 및 온도변화에 의한 안정성 확보, 다양한 계측분야별 센서 개발, 설치시간과 설치방법 등 사용 편리성에 대한 활발한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김광엽, 김창용, 홍성완, 배규진, 서용석, 전제성, 2003, 수평경사계를 이용한 터널내 선행변위 측정에 대한 연구, 토목학회 정기학술대회, pp. 4878-4883.
2. 김기수, 광섬유 센서를 이용한 사회기반시설 구조물의 스마트 모니터링 기법, 2007, 대한토목학회지 제55권 제4호, pp. 81-91.
3. 김경수, 배대석, 고용권, 김중열, 2009, 광섬유센서케이블을 이용한 지하연구시설의 지반변위 및 온도변화 감시시스템 구축, 지질공학 제19권 제1호, pp. 63-70.
4. 김용수, 신민호, 2010, 철도시설물의 통합감시시스템 개발 사례, 시설안전(KISTEK), pp. 89-97.
5. 정소걸, 2005, 터널의 내공변의 자동화 계측기술 분석, 터널과 지하공간 제15권 제1호 (통권 제54호), pp. 1-8.
6. Hanafy, E. A. and J. J. Emery, 1980, Advancing face simulation of tunnel excavation and lining placement, Proc. of the 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, pp. 19-25.
7. Penet, M. and A. Guenot, 1982, Analysis of Convergence Behind the Face of a Tunnel, Int. Symposium Tunneling 82, Brighton, pp. 197-204.
8. Vassilev, V. H. and T. N. Hrisstov, 1988, Influence of the Heading Face and a Two dimensional Calculation Model of Tunnel Linings, 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomech., Vol. 3, pp. 1151-1555.
9. 藤橋一彦, 上原秀幹, 奥津大, 小松宏至, 2003, 光ファイバセンシング技術を活用した道路災害モニタリングシステムの開発, NTT技術ジャーナル, Vol. 15, No. 10, pp. 38-41.

채 광 석



1994년 경기대학교 토목공학과 공학사
1999년 일본 Gunma대학교 대학원 기계시스템공학 공학석사
2002년 일본 Gunma대학교 대학원 지반공학 공학박사

Tel: 031-329-4638
E-mail: kschaе@gconst.co.kr
현재 GS건설 기술연구소 선임연구원

이 상 필



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 031-329-4640
E-mail: splee@gconst.co.kr
현재 GS건설 기술연구소 수석연구원

이 창 호



1992년 경상대학교 농공학과 공학사
2007년 토목시공기술사

Tel: 043-733-6409
E-mail: chlee5@gconst.co.kr
현재 GS건설 경부고속철도 6-4A공구차장

한 성 재



1980 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사

Tel: 031-853-6380
E-mail: sjhan@gconst.co.kr
현재 GS건설 의정부경전철 현장총괄상무