

광섬유가 삽입된 철도용 보강토 옹벽의 초기 변형을 측정 Strain measurement of optical fiber embedded in the reinforced retaining wall used in the railway

윤혁진* 송광용** 김대상*** 김기환**** 김정식***** 권태수***** 나희승*****
Hyuk-Jin Yoon, Kwang-Yong Song, Daesang Kim, Kihwan Kim, Jung-Seok Kim, Tae-Soo Kwon, Hee-Seung Na

ABSTRACT

The research of applying reinforced retaining wall due to support the land pressure that given from train's load has been accomplished actively in domestic area. After the retaining wall has been installed, the collapse or partial destruction that generated by effect of train's vibration and repetitive load of train may be induced. Accordingly in the period of using this, the sufficient durability should be guaranteed and years of durability are one hundred and as these are longer than road structure's, the technique that introduced to wall and monitor the long-term strain is necessary. In this paper, the optical fibre is induced vertically to the reinforced retaining wall and after the subsistence of optical fibre is confirmed, the early strain that applied to optical fibre after insertion is monitored. Before and after the concrete placing, damage feasibility of optical fibre is measured by using OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) and after concrete is cultivated, the early strain induced to optical fibre is measured by application of BOCDA (Brillouin Correlation Domain Analysis) system.

1. 서론

열차하중에 의한 토압을 지탱하기 위하여 보강토 옹벽을 적용하는 연구가 최근 국내에서 활발히 이루어지고 있다. 보강토 옹벽은 설치된 이후에 반복된 열차하중, 열차 진동에 의한 영향 등으로 인해서 국부적인 변형이 발생하거나 붕괴가 일어날 경우, 치명적인 열차사고를 유발시킬 수 있다. 따라서 사용기간 동안 충분한 내구성을 확보하여야 하며, 내구년수는 100년으로 도로 구조물의 70년에 비해서 크므로, 보강토 옹벽에 삽입되어 오랜 기간 동안 변형을 모니터링 하는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 광섬유를 보강토 옹벽 제작시 수직방향으로 삽입하여, 생존성을 확인하고 삽입된 이후 광섬유에 가해진 초기 변형을 모니터링 하였다.

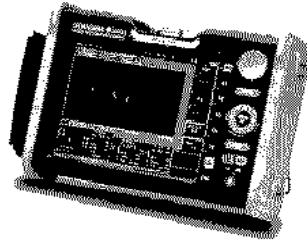
2. 측정 원리 및 이론

본 논문에서는 철도용 보강토 옹벽에 삽입된 광섬유의 파단을 감시하기 위하여 OTDR을 이용하였고, 변형율을 측정하기 위하여 브릴루앙 산란광을 이용하는 방법을 시도하였다

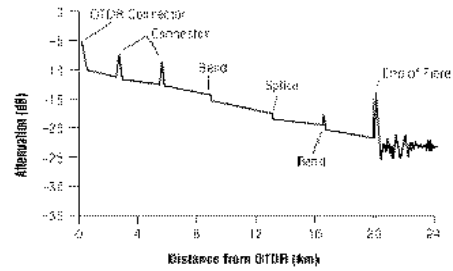
OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)은 광 펄스를 광섬유에 입사시킨 후, 레일라이 산란 현상에

* 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
E-mail : scipio@kri.re.kr TEL : (031)460-5565 FAX : (031)460-5289
** 비회원, 중앙대학교, 물리학과, 조교수
*** 정희원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원
**** 정희원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 연구원
***** 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원
***** 정희원, 한국철도기술연구원, 대륙철도연구실, 책임연구원

의해 그 후방으로 발생하는 산란 신호를 측정하여 위치에 따른 반사광의 크기를 측정하는 시스템이다[1].



(a)



(b)

그림 1. (a) OTDR 시스템, (b) 광섬유의 물리적 변화에 따른 광세기 변화

OTDR은 연결된 광섬유에 높은 세기의 광 펄스를 출력하는 레이저 다이오드(Laser Diode, LD), 레이저 다이오드의 펄스 주기를 바꿔주는 신호 발생장치, 되돌아온 광 펄스의 세기를 전기적 신호로 바꿔서 증폭시켜 주는 광수신부(Photo Detector), 취득된 신호를 디지털 신호로 변환시켜주는 A/D 보드, 디지털 신호를 분석하여 거리에 따른 광세기의 분포를 보여주는 화면표시부로 구성된다. 측정된 위치는 광섬유 내에서 진행하는 빛의 속도를 알면, 입사한 광 펄스가 되돌아오는 시간으로부터 결정된다.

그림 1의 OTDR은 레일리 산란 광의 변화를 이용하기 때문에, 레일리 산란의 낮은 신호 대 잡음 비 특성이나 단일 모드 광섬유 내에서 높은 파장의 광원에 대한 낮은 신호 특성을 갖는 단점이 있음에도 불구하고 광통신 분야에서 다양한 용도로 널리 쓰이고 있으며, 본 연구에서는 보강토 옹벽에 삽입된 광섬유의 과도한 굴곡이나 파단에 의해서 발생하는 반사광의 크기로부터 문제가 생긴 곳의 위치를 측정하는데 사용되었다.

그러나 OTDR 시스템은 단지 위치에 따른 광 펄스의 세기만 측정할 수 있으므로 온도나 변형률 등의 물리량 측정에는 적합하지 않다. 따라서, 브릴루앙 산란을 이용하여 이러한 물리량을 측정할 수 있다.

$$\nu_B(\Delta T, \Delta \epsilon) = \nu_{B0} + C_T \Delta T + C_\epsilon \Delta \epsilon \quad (1)$$

여기서 ν_{B0} 는 초기 브릴루앙 주파수, ΔT 는 온도변화, $\Delta \epsilon$ 은 변형률 변화, C_T 는 브릴루앙 온도계수 그리고 C_ϵ 은 브릴루앙 변형률 계수이다.

브릴루앙 주파수의 변화가 식 (1)에서처럼 광섬유에 가해지는 온도와 변형률의 변화와 선형성을 띄므로, 산란된 광의 브릴루앙 주파수의 변화를 측정하는 시스템을 구성하여 온도와 변형률의 변화를 측정할 수 있다. 광섬유내에 발생하는 브릴루앙 산란을 측정하는 방법 중 지속파 형태의 펄프광과 프로브광을 사용하여 위치 선택적으로 유도 브릴루앙 산란을 발생시키는 방법을 브릴루앙 상관영역 측정법(Brillouin optical correlation domain analysis; BOCDA)이라고 하며, 높은 공간 분해능, 빠른 샘플링 속도, 측정 지점의 임의 선택 등 많은 장점을 가지고 있다[2].

3. 실험방법 및 측정 결과

레도로부터 작용되는 열차하중에 의한 압력과 충격으로 침하가 되거나 변형이 되지 않도록 그림 2와 같이 높이 3m의 견고한 노반을 구축하였다.

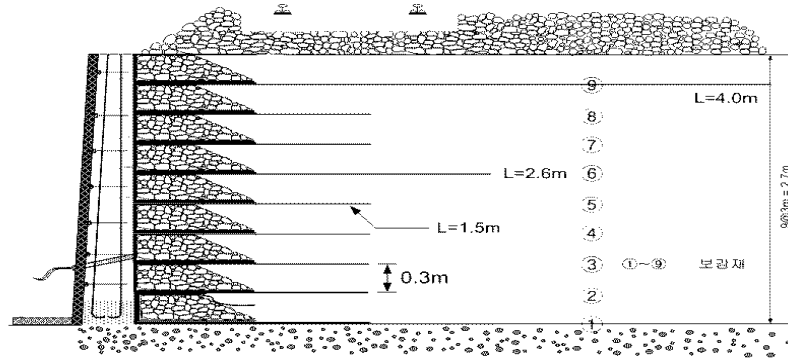


그림 2. 시험장치 구성

지반을 보강하기 위하여 30cm 간격으로 토사를 채우면서 토목섬유를 삽입하여 보강하고 높이 3m의 노반을 견고하게 구축한 후, 콘크리트를 타설하여 옹벽을 제작하였다. 시험을 위해 제작된 보강토 옹벽은 열차하중 작용 시 노반에 가해지는 수평응력을 지지하는 역할을 하므로, 광섬유를 옹벽에 삽입하여 변형을 분포를 상시 모니터링할 수 있는지를 알아보기 위하여 3(a)와 같이 옹벽을 구축하기 전에 전면부의 토목섬유에 900 μm 코팅된 단일모드 광섬유를 높이 방향으로 부착하였다.

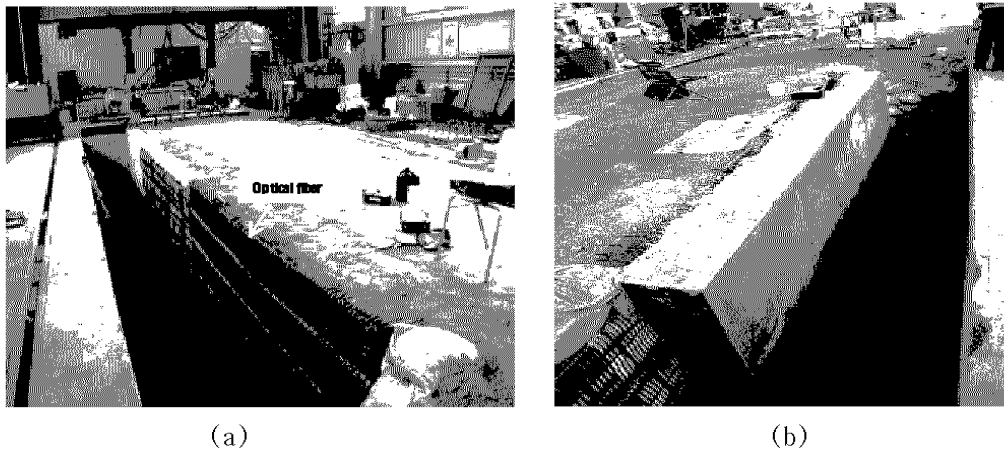


그림 3. (a) 보강토 옹벽 구축 전 (b) 보강토 옹벽 구축 후 사진

그 후, 콘크리트를 타설하여 옹벽을 제작하였으며, 이 과정에서 광섬유는 그림 3 (b)에 나타난 바와 같이 콘크리트 내에 삽입되어 경화되었다. 보강토 옹벽 제작 과정 중 광섬유의 생존성을 평가하기 위하여 OTDR(Yokogawa, AQ7275)을 이용하여 콘크리트에 삽입한 후의 거리에 따른 광신호의 세기를 측정하였다. 그림 4 (a)는 보강토 옹벽에 삽입된 광섬유를 연결하지 않고 OTDR에 더미 광섬유 31.26 m 를 연결한 데이터이다. 31.26 m 이후에 광섬유의 끝단 반사에 의해서 광 세기가 증가하고 그 이후 신호가 사라진 것을 알 수 있다. 그림 4 (b)는 더미 광섬유 뒤에 시험에 사용된 광섬유를 연결하여 측정된 데이터이다. 광섬유의 길이가 44.56m 이므로, 더미로 연결한 광섬유의 길이를 제외하면 13.3m 인 것을 알 수 있다. 이중 약 8m 만 보강토 옹벽에 삽입되어 있고, 5.3m 는 시스템과 연결하기 위하여 추가적으로 길게 뽑아놓은 광섬유이다. 화면에 나타난 데이터를 보면 레일라이 산란광의 세기 일정하게 유지되는 것으로 보아, 옹벽에 삽입된 광섬유가 심하게 굴곡이 있거나 파단되지 않았다는 것을 알 수 있다.

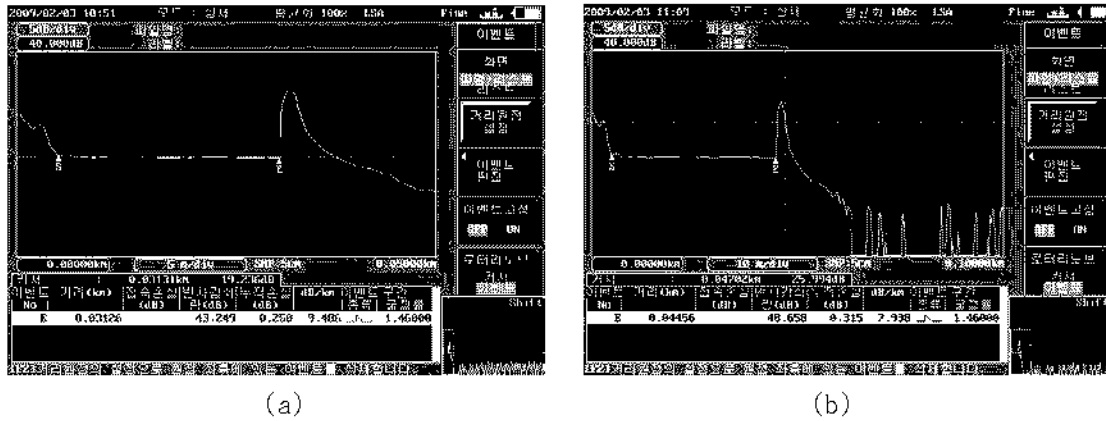


그림 4. (a) 삽입된 광섬유 연결전 (b) 삽입된 광섬유 연결후 OTDR 데이터

철도용 보강토 옹벽에 삽입된 광섬유의 초기 변형율을 측정하기 위하여 BOCDA 시스템을 자체적으로 구성하여 사용하였으며, 구성도는 그림 5에 나타내었다.

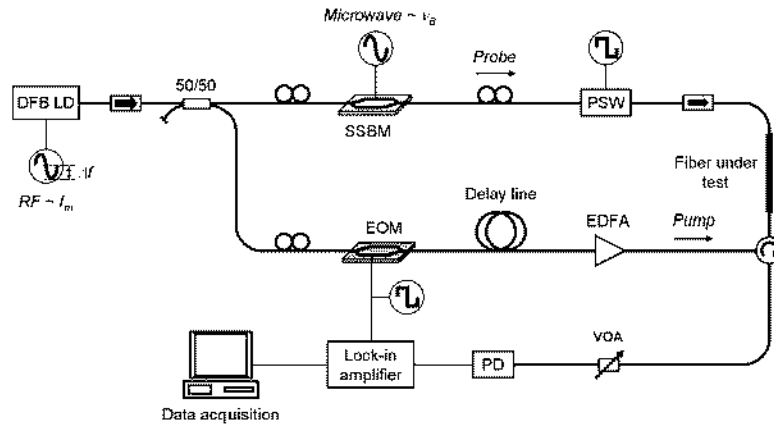


그림 5. BOCDA 시스템 구성도

1550 nm의 중심 파장을 갖는 DFB LD를 광원으로 사용하였고, 광출력을 커플러를 통해 펌프광과 프로브광 방향으로 분기시켰다. 확인 측정을 위해 펌프광에는 전기광학 변조기(EOM)를 설치하여 chopping을 가하고, 10 km의 광 지연 선로와 광섬유 증폭기(EDFA)를 통해 증폭시킨 후, circulator를 이용하여 측정용 광섬유(fiber under test)로 진행시켰다. 프로브광 방향으로 진행한 광파는 단일 측파 변조기(single-sideband modulator; SSBM)를 통해 본래 광파로부터 일정한 주파수 $\Delta\nu$ 만큼 낮은 주파수를 갖는 프로브광으로 변환시켰다. 프로브광은 유도 브릴루앙 산란의 편광 효과를 제거하기 위해 편광 스위치(polarization switch; PSW)를 거쳐 isolator를 통해 측정용 광섬유로 진행되었다. 브릴루앙 이득 스펙트럼(Brillouin gain spectrum; BGS)을 측정하기 위해 마이크로파 발생기(microwave generator)를 이용하여 $\Delta\nu$ 의 값을 10.3 - 11.3 GHz 영역으로 sweep하면서 확인 앰프를 이용하여 신호를 수집하였고 신호처리 프로그램을 통하여 광섬유의 위치에 따른 브릴루앙 주파수 변화를 측정하였고 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

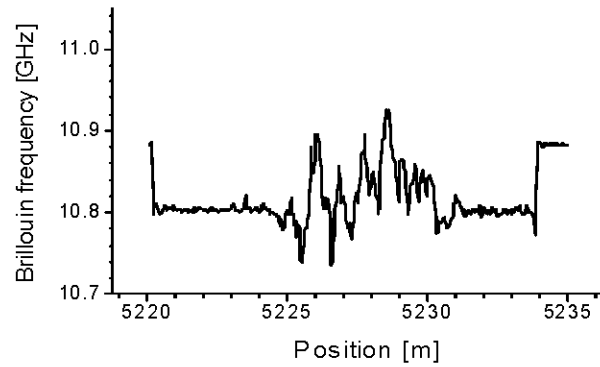


그림 6. 보강토 옹벽에 삽입된 광섬유의 브릴루앙 주파수 변화

광섬유가 보강토 옹벽에 삽입되어 있는 구간은 그림 6에서의 5224m 에서부터 5232m 까지 8m 구간이며, 이 구간내에서의 브릴루앙 주파수는 최대 100MHz 이내의 변화를 보였으며, 주로 파장이 증가하는 방향으로 데이터가 측정되었다. 브릴루앙 주파수 변화에 대한 변형률 변화는 약 $20\mu\epsilon/\text{MHz}$ 이다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유를 보강토 옹벽 제작 시 높이방향으로 삽입하여, 생존성을 확인하고 삽입된 이후 광섬유에 가해진 초기 변형율을 모니터링 하였다. 콘크리트 타설로 인한 옹벽 제작후 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)을 이용하여 광섬유의 생존성을 평가하였고, 콘크리트 양생 후 보강토 옹벽의 높이 방향으로 삽입된 광섬유에 가해진 초기 변형율을 BOCDA(Brillouin Correlation Domain Analysis) 시스템을 이용하여 측정하였다. 초기 변형율은 최대 약 $2,000\mu\epsilon$ 이내에서 주로 인장 변형이 가해졌고, 이는 콘크리트 타설 과정에서 점도가 높은 콘크리트의 유동에 의해서 발생하였다고 판단된다.

참고문헌

1. D. R. Anderson, F. G. Bell (1997), Optical Time-Domain Reflectometry, Tektronix, Inc., Wilsonville, Oregon.
2. K. Hotate, T. Hasegawa (2000), "Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation," IEICE Trans. Electron. E83-C, 405-412.