

분포형 광섬유센서를 활용한 지표이동 측정에 관한 연구

A Study of Slope Movements using Fibre Optic Distributed Deformation Sensor

장기태¹⁾, Ki-Tae Chang

¹⁾ 금오공과대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering Kum-Oh National Institute of Technology

SYNOPSIS : Optical fibre sensors have shown a potential to serve real time health monitoring of Slope and structure. They can be easily embedded or attached to the structures and are not affected by the electro-magnetic field. Furthermore, they have the flexibility of the sensor size and very highly sensitive. In this study, we conducted several laboratory on slope and field tests using a novel optical sensor based on Brillouin scattering and PVC pipe. One of the advantages of this technique is that the bare fibre itself acts as sensing element without any special fibre processing or preparation. Test results have shown that BOTDR can be a great solution for sensor systems of Slope.

Key words : Optical fibre sensor, BOTDR, Monitoring, Slope

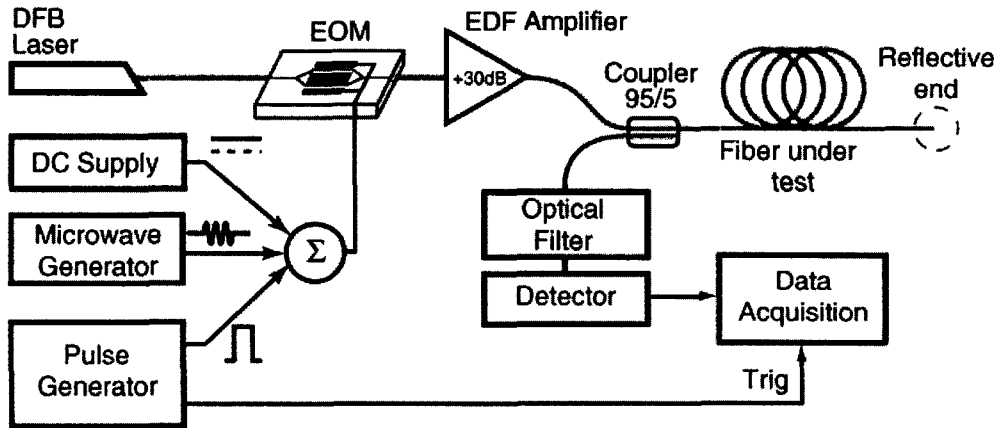
1. 서론

국내 사면은 그 공학적 성질이 불 균질한 경우가 많으므로 사면 규모가 커지면 사전조사에서 그 성상을 충분히 파악하기가 어렵다. 그러므로 사면 공사에 있어서 붕괴 사고를 일으키거나 설계조건이 실제와 다른 안전율이 부족한 사면이 될 가능성이 높으며, 사면 공사의 설계·시공에는 많은 불확정 요소가 포함되어있다. 사면의 거동 예측과 실제거동의 갭을 매우기 위해 시공 중 혹은 완성 후의 사면을 계측하여 그 거동을 파악하고 문제가 있을 때에는 적절한 대응 조치를 취할 필요가 있다. 특히, 도로 절개면의 유지 관리에 의한 사전 재해 예방의 관점에서는, 사면 안정성을 평가하고 그 대비책을 수립함에 있어 조사자료의 정량적 처리를 통해 그 신뢰성을 향상시킬 수 있어야 할 것이다. 이러한 노력의 일환으로, 광 섬유 분포형 센서를 이용한 Pipe 변위계와 지표면 이동 감지계를 개발, 현장에 적용함으로써 지표이동 감지 실시간 예측 가능성을 구현시키고자 하였다.

2. 시험 구성

그림-1은 본 시험에 사용된 장비로서 산란파를 이용하여 광 케이블 상에 분포된 변형율을 측정할 수 있는 장비(BOTDR system)이며, 그림-1에서 보는 바와 같이 DFB Laser와 마이크로 웨이브파, 펄스 제너레이터에 의해 생성된 펄스를 소스로 하여, EDF에서 30dB의 증폭을 시킨 후 커플러를 경유하여, 실

제 테스트 광케이블을 거친 후 반사파를 수집하여 데이터를 얻는 방식으로 구성된다. 입사파의 각도와 반사파의 각도가 동일하다는 Snell의 법칙에 의해, 초기상태를 Calibration 시킨 후 광케이블이 부착된 부재의 변형을 계산한다.

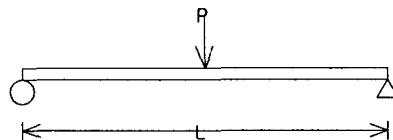


<그림-1> 산란형 광섬유를 이용한 계측시스템(BOTDR system)

3. 실내 및 현장시험

3.1 변형계산

측정된 변형율로부터 처짐을 구하기 위해서 그림-2와 같은 단순보 모델로부터 처짐계산식을 유도하였다.



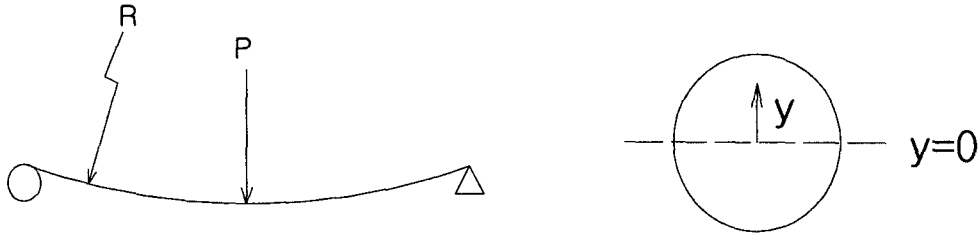
<그림-2> Simple Beam Model

위 그림에서 $x = 0$ 와 $x = L$ 에서 처짐량 $v = 0$ 이다. 보 이론을 적용하면

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI(x) \frac{d^2 v}{dx^2} \right) = q(x) \quad (1)$$

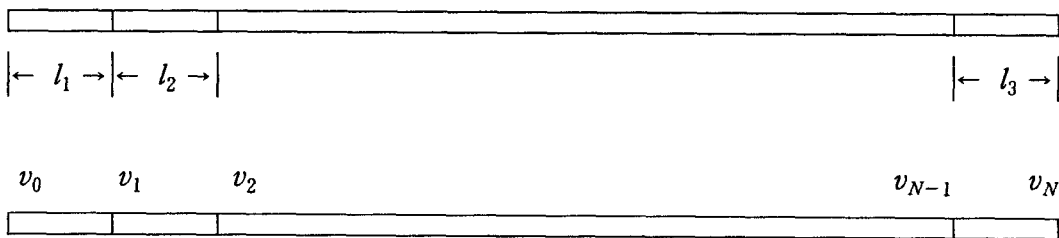
이나, 현재의 연구는 strain이 주어진 경우 처짐량 $v(x)$ 를 구하는 것이므로, 이를 위해 보 이론의 기본 정의로부터 출발하고자 한다. 먼저, 그림-3과 같은 단면형상을 갖는 단순 지지보가 변형되었을 때 변형된 모습을 나타내는 곡률은 곡률반지름 R의 역수이다. 이는 임의의 점 y에서 측정된 스트레인과 다음의 관계식을 갖는다.

$$\frac{1}{\rho} = R = \frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{E_{xx}}{y} \quad (2)$$



<그림-3> 곡률관계 및 단면

다시 양단 지지된 보를 생각해 보면, 현재 측정된 변형률이 구간별로 일정하다면 구간 $l_i (i=1, \dots, N)$ 에서 strain이 N 개가 존재할 것이다.



<그림-4> 보의 분할

이 때, 각 구간의 시작점과 끝점에서 변형량을 위 그림에서 보는 바와 같이 $v_i (i=0, \dots, N)$ 이라 하면 식(1)로부터 각 구간에서 변형량 v 는 식 3과 같다

$$v^{(i)}(x) = \frac{1}{2\rho_i} x(x-l_i) + \frac{v_{i-1}}{l_i}(l_i-x) + v_i \cdot \frac{x}{l_i} \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N \quad 0 \leq x \leq l_i$$

여기서, 측정된 값 $\frac{1}{\rho_i} = (-\frac{\epsilon_{xx}}{y})_i$ 이다. (3) 식을 살펴보면 미지수 v_i 는 v_0, \dots, v_N 의 N+1 개다. 그런데, 각 구간별로 (3) 식으로 정의된 $v^{(i)}(x)$ 식이 v_1, \dots, v_{N-1} 이 있는 점에서 1차 미분 연속이라는 조건을 부여하면 (4) 식이 성립한다.

$$\frac{dv^{(i)}}{dx} \Big|_{x=l_i} = \frac{dv^{(i+1)}}{dx} \Big|_{x=0} \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N-1$$

(4) 식을 정리하면

$$\frac{l_i}{2\rho_i} - \frac{v_{i-1}}{l_i} + \frac{v_i}{l_i} = -\frac{l_{i+1}}{2\rho_{i+1}} - \frac{v_i}{l_{i+1}} + \frac{v_{i+1}}{l_{i+1}} \quad (5)$$

$$i = 1, \dots, N-1$$

그런데, 앞서 설명하였듯이 v_i 는 $N+1$ 개 이나 방정식 (4) 는 $N-1$ 개 이므로 조건 2개가 더 필요하다. 현재의 단순 지지보에서는 $v_0 = 0$ 이고 $v_N = 0$ 이므로 식 (5) 를 정리하면

$i=1$ 에서

$$\left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2}\right)v_1 - \left(\frac{1}{l_2}\right)v_2 = -\frac{l_2}{2\rho_2} - \frac{l_1}{2\rho_1}$$

$i = 2, \dots, N-2$ 까지

$$-\left(\frac{1}{l_i}\right)v_{i-1} + \left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i+1}}\right)v_i - \left(\frac{1}{l_{i+1}}\right)v_{i+1} = -\frac{l_{i+1}}{2\rho_{i+1}} - \frac{l_i}{2\rho_i}$$

$i = N-1$ 에서

$$-\left(\frac{1}{\rho_{N-1}}\right)v_{N-2} + \left(\frac{1}{l_{N-1}} + \frac{1}{l_N}\right)v_{N-1} = \left(\frac{l_N}{2\rho_N} - \frac{l_{N-1}}{2\rho_{N-1}}\right)$$

이를 정리하면 $A\bar{x} = \bar{b}$ 형태가 된다.

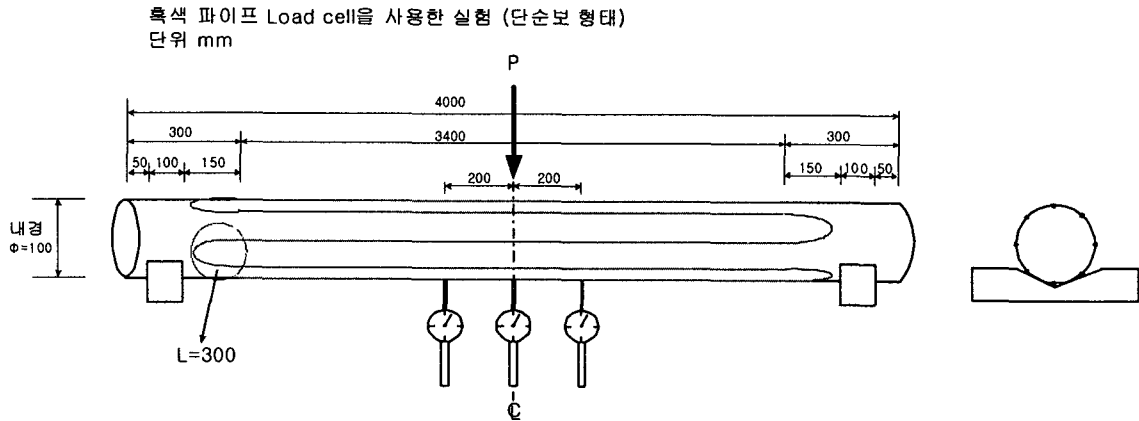
$$\text{즉, } \bar{x} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{N-1} \end{pmatrix} \quad \text{이고, } \bar{b} = \begin{pmatrix} -\frac{l_1}{2\rho_1} - \frac{l_2}{2\rho_2} \\ -\frac{l_2}{2\rho_2} - \frac{l_3}{2\rho_3} \\ \vdots \\ -\frac{l_{N-1}}{2\rho_{N-1}} - \frac{l_N}{2\rho_N} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2}\right) & -\frac{1}{l_2} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ -\frac{1}{l_2} & \left(\frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3}\right) & -\frac{1}{l_3} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -\frac{1}{l_{N-1}} & \left(\frac{1}{l_{N-1}} + \frac{1}{l_N}\right) \end{bmatrix}$$

이 식의 해를 구하면, 단순보의 변형량을 알 수 있다. 단순보의 경우, 양단에서 strain이 0라는 사실에 착안하여 처짐을 계산하는 프로그램을 개발하였으며, 이하에서 계산되는 모든 처짐은 위의 프로그램을 통해서 계산된 값들이다.

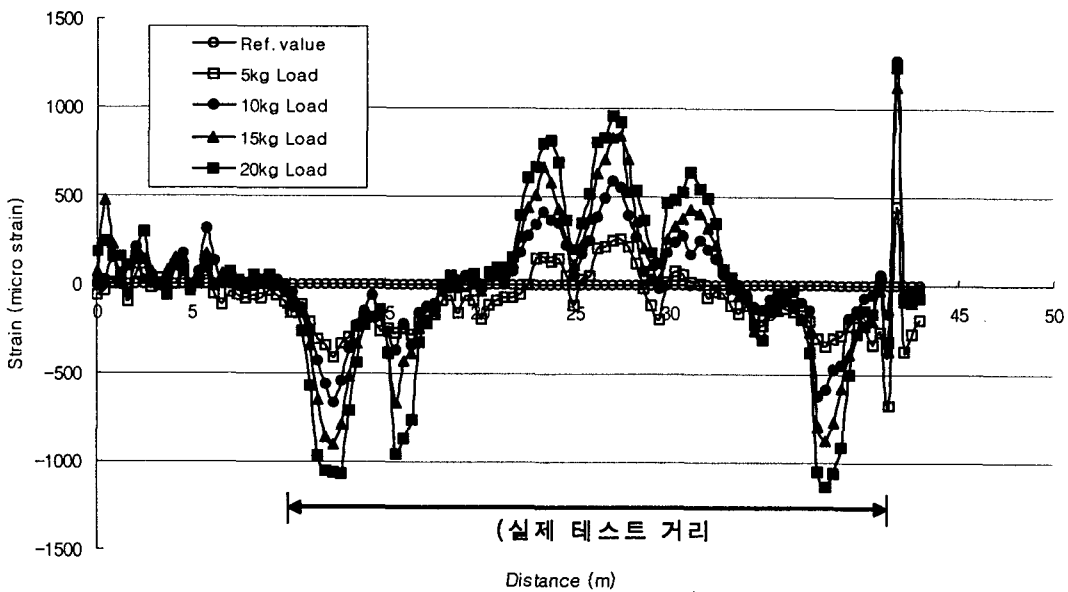
3.2 실내시험

광케이블을 PVC 파이프에 축방향으로 8줄로 설치한 후 단순보 형태의 지지점을 두고 5kgf의 하중 단계로 최대 20kgf의 정적하중을 가하였으며, 처짐 측정을 위하여 중앙에 1개의 다이알 게이지와 파이프 하단에 2개의 다이알 게이지를 파이프 중앙점에 2m 간격으로 설치하였다. 그림-5 는 PVC 파이프 하중 재하점과 광센서의 부착위치를 보여주고 있다.

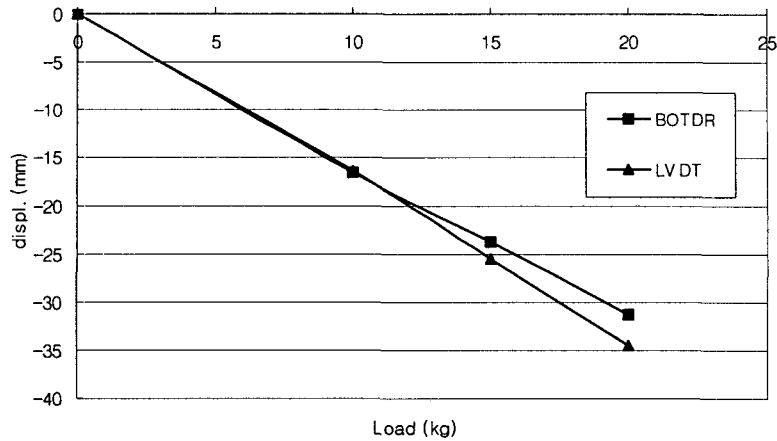


<그림-5> PVC 파이프 광케이블 부착 위치

그림-6은 PVC 파이프를 이용한 하중단계별 실내시험결과를 보여주고 있다. 그림-6의 그래프에서 왼쪽 첫 만곡부의 경우는 PVC 파이프 상단 압축 측을 나타내며, 두 번째와 세 번째 만곡부 사이의 경우는 중립축, 네 번째 만곡부의 경우는 파이프 하단 인장측을 나타내고 있다. 여기서 계측된 strain 값들을 변위로 계산된 결과치를 LVDT와 비교한 데이터를 그림-7에서 보여주고 있으며, 이 값들은 91%이상의 수렴율을 보이므로, 만족스러운 결과값을 도출한 것으로 판단된다.



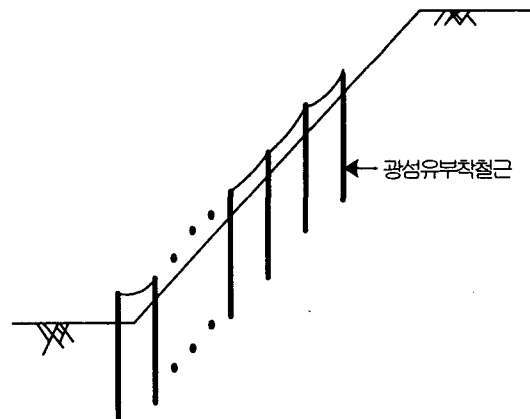
<그림-6> 산란파를 이용한 광센서 계측



<그림-7> 측정 센서 비교

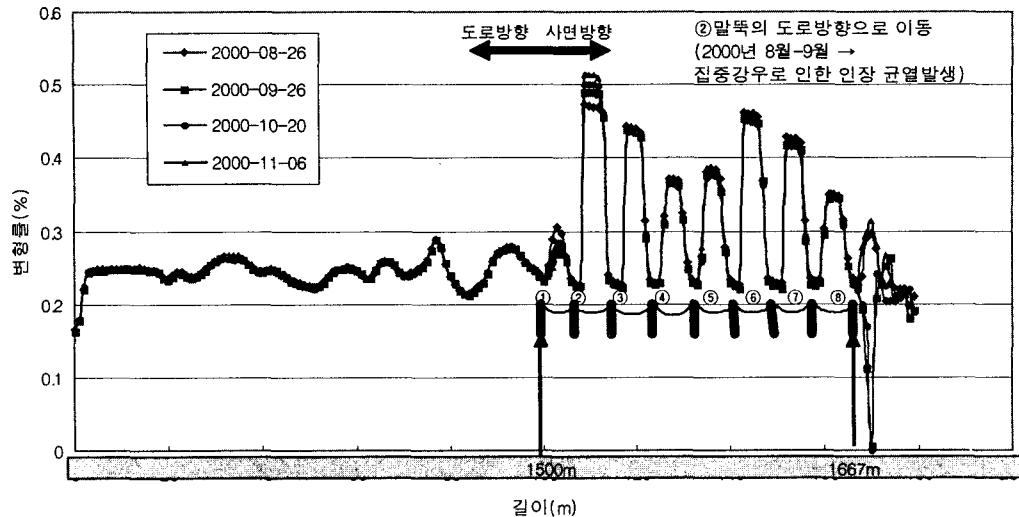
3.3 현장 적용

경부고속도로 동대구-구미간 8차선 확장공사 구간 중 K사면의 두 번째 소단에 인장균열의 발생으로 인한 표면 Sliding을 실시간으로 모니터링 하기 위해서 실내시험에서 사용된 것과 같은 광섬유 계측센서를 활용하여 사면의 지표면 표피 움직임을 측정하였다. 표면에서 직경 90mm, 깊이 1500mm로 홀을 천공하여 철근을 삽입한 후 그라우팅 하였다. 24시간 경화 시킨 후 광케이블의 연결을 위한 말뚝의 두부 부분에 그림-8과 같은 시스템을 설치하여 말뚝과 말뚝 사이에 광섬유를 연결하였다. 말뚝과 말뚝 사이의 간격은 설치상의 편의를 위해 사면의 경사에 맞추어 약 4.7m의 간격으로 하였다.



<그림-8> 광섬유 계측기의 사면 현장 설치

2000년 8월과 9월의 집중호우로 인해 1번과 3번 말뚝사이의 인장균열 진행이, 그림-9에서 보여주는 바와 같이 2번 말뚝을 중심으로 앞부분(1번 말뚝과 2번 말뚝 사이)은 압축을, 뒷부분(2번 말뚝과 3번 말뚝 사이)은 인장을 받은 것으로 나타났으나, 10월 중순을 전후로 해서 더 이상의 진전은 없는 상태다. 그러나, 전체적으로 말뚝이 조금씩의 인장을 받은 것으로 나타났으며, 이는 계절의 변화로 인한 온도의 영향으로 판단되며 실 측정치는 온도 보정에 의해서 수정이 가능하였다.



<그림-9> 산란파를 이용한 광센서(BOTDR) 계측 결과

4. 결론

1. PVC 파이프 시험결과는 LVDT에서 계측된 처짐값과 비교시 91%이상의 일치율을 보여, 재래적인 지중 경사계와 파이프 변형계를 대체할 수 있을 것이다.
2. 현장에서의 모형 말뚝 시험을 이용한 사면 측정 결과, 광섬유를 이용한 계측기가 사면내 토피의 움직임을 훌륭히 감지하였으며, 향후 실제 지반 이동 검측, 활동 위치 파악 등, 사면 거동 계측의 활용에 크게 기여 할 것으로 사료된다.
3. 상기 1, 2의 시험내용을 적절히 병행한다면, 활동토피의 움직이는 방향과 이동량을 동시에 알 수 있어, 사면활동에 관련된 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.
4. 산란파를 이용한 광센서(BOTDR)의 경우, 여타의 다른 광섬유센서와는 달리, 가격이 저렴하고 케이블 자체가 센싱소자의 역할과 데이터 전송의 기능을 동시에 수행함으로써, 대형 토목구조물에 적합한 광섬유 센서로 유용성이 아주 높다고 판단된다.

5. 참고 문헌

1. Chang, K. T., & Milligan, G. W. E.(1996), "Effect of the transition zone in a nailed wall model test" University of Oxford, UK
2. 장기태, 한상목, 김경태, 유원위(2000), "FBG센서를 이용한 철근 콘크리트의 휨거동 실험", 대한토목학회, 구조/원자력2000학술발표회 논문집, pp.469-472
3. 장기태, 강창국, 홍성진, 정경선, 김성환, 박권제, 이원효, 김경태(2001), "광섬유격자 센서를 활용한 사면거동 실시간 안전 진단 시스템", 한국지반공학회 사면안정기술위원회 학술발표회, pp.59-79
4. 장기태, 권병근, 이선경, 남궁한, 유병선, 김경태(2001), "네일로 보강된 구조물에서의 변이영역과 변형

를 분포”, 한국지반공학회 사면안정기술위원회 학술발표회, pp.233-248

5. 윤기재(1989), “보강토의 강도특성에 관한 보강효과의 실험적 연구”, 금오공대 토목공학과 석사논문
6. 권병근(2000), “대절토 사면안정을 위한 Nailing공법과 현장계측 분석에 관한 연구”, 금오공대 토목공학과 석사논문
7. 강창국(2000), “현장계측을 통한 억지말뚝 분석에 관한 연구”, 금오공대 토목공학과 석사논문참고문헌