

광 산란파를 이용한 광역 사면 거동 예측:

Application of Brillouin Scattering Sensor for Broader Area Slope Movement

(1)장 기태, Ki-Tae Chang, (2)이 쌍덕, Ssang-Deok Lee, (3)유 병선, Byung-Sun Yoo, (4)김 경태, Kyung-Tae Kim, (5)정 성윤, Sung-Yun Jung, (6)이 원효, Won-Hyo Lee

- (1) 금오공과 대학교 토목공학과 부 교수, Associate Professor, Kum-Oh National University(KNUT).
- (2) (주) 유신 코퍼레이션 상림-해평간 포장공사 감리단 단장, Managing Director, Yooshin Engineering Corporation
- (3) FOS Tech. 과장, Section Chief, FOS Tech.
- (4) FOS Tech. 과장, Section Chief, FOS Tech.
- (5) FOS Tech. 과장, Section Chief, FOS Tech.
- (6) FOS Tech. 과장, Section Chief, FOS Tech.

Abstract: Optical fibre sensors have shown a potential to serve real time health monitoring of the structures. 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 and field tests using a novel optical sensor based on Brillouin scattering. 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 Civil Engineering Smart Structures.

1. 개요

국내 사면은 그 공학적 성질이 불균질한 경우가 많으므로 사면 규모가 커지면 사전조사에서 그 성상을 충분히 파악하기가 어렵다. 그 때문에 암반 사면 공사에 있어서 붕괴 사고를 일으키거나 설계조건이 실제와 다른 안전율이 부족한 사면이 될 가능성이 있다. 또한 현상에서는 사면의 거동을 정량적으로 추정하는 예측법이나 안정해석 방법이 확립되지 않기 때문에 사면 공사의 설계·시공에는 많은 불확정 요소가 포함되어있다. 이와 같은 사면의 거동 예측과 거동의 꺾을 때를 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 산란파를 이용한 Pipe 변위계와 지표면 이동 감지계를 개발, 현장에 적용함으로써 광역 사면 거동 실시간 예측 가능성을 구현시키고자 하였다.

2. 산란파를 이용한 광센서(BOTDR)의 원리

2.1 빛의 산란(light scattering)

광산란(Light Scattering)은 빛(전자기파)과 물질간의 상호작용의 결과이다. 물질 속에서의 전자기파의 속도(즉,굴절율)조차도 물질 속의 진동자(oscillator)의 여기(excitation)와 관련된 산란에 의해 결정된다.

결정이나 aerosol, 분자, 원자 등으로 구성된 계에 입사된 빛은 이 상호작용들에 의해 부분적으로 그 진행방향이 꺾일 수 있다. 어떤 산란과정에서는 방향의 꺾임 외에 주파수(파장)의 변화가 생기기도 한다. 그러므로 특정 산란 과정에 대한 물리적 이해를 바탕으로 산란된 빛의 세기나 파장 등을 분석함으로써 산란을 일으킨 물질의 성질에 관한 정보를 얻을 수 있다.

산란이 일어나려면 물질 내에 국소적인 불균일성(local non-homogeneity)들이 존재해야 한다. 불균일성들이란, 물질의 국소적 밀도, 조성, 구조 등이 주변공간의 평균적인 밀도나 조성, 또는 구조 등과 차이를 보이는 것들을 말한다. 산란은 관련된 불균일성의 종류에 따라서, 그리고 입사광 및 산란광의 주파수에 따라서 여러 가지로 나뉘어질 수 있다.

2.2 브릴루앙 산란 (Brillouin scattering)

1922년, 프랑스의 Brillouin은 매질 내에 탄성파가 존재할 경우, Bragg 조건을 만족하는 방향으로 입사파가 산란되며, 산란광의 주파수(파장)에 변화가 생기는 것을 예측하였는데 이것을 브릴루앙 산란이라 한다. 탄성파란 sound wave로 표현되기도 하지만 가청 주파수 영역의 “소리” 만을 의미하는 것이 아니라 10 GHz 정도까지의 높은 주파수를 가질 수 있으며 그런 의미에서 hypersonic wave로 표현되기도 한다. 또한 고체물리학에서는 격자 진동(lattice vibration), 포논(phonon)이라고도 한다. 탄성파는 물질의 밀도(즉, strain)를 주기적으로 변화하게 하며 그에 따라 굴절율도 주기적으로 변화하게 된다. (그림 2-1) 이렇게 공간적인 주기를 가지고 변화하는 굴절율 분포는 회절격자의 역할을 하여 입사하는 빛을 회절 시킬 수 있다. 브래그(Bragg) 조건이란 음파(sound wave)의 여러 위치에서 산란된 빔들이 보강간섭을 일으키기 위한 조건으로서 다음 식과 같다:

$$\text{Bragg 조건 : } \lambda = 2n\lambda_s \sin(\phi/2) = 2n\lambda_s \sin \theta \quad (1)$$

식 (1)에서 λ 는 입사광의 파장, n 은 입사광에 대한 물질의 굴절율, λ_s 는 광산란의 원인이 되는 sound wave의 파장, 그리고 ϕ 는 산란각도로서 그림 2-2에 의하면 2θ 와 같다.

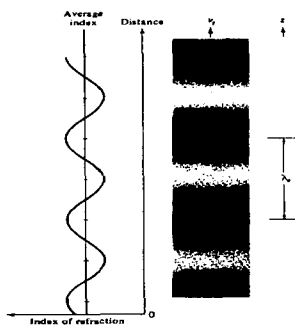


그림 2-1 sound wave와 굴절율 변화

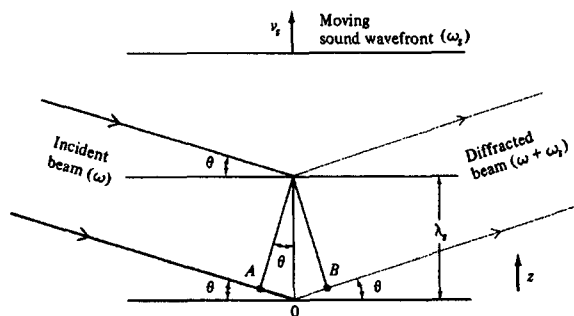


그림 2-2 브래그 조건을 만족하는 광파의 회절

Bragg 조건은 정해진 파장의 빛을 입사시키고, 관측 각도가 결정되었을 때 그 방향의 산란을 일으키는 acoustic wave의 파장에 관한 조건이 되기도 하며, sound wave의 파장과 진행방향이 주어졌을 때 어떤 파장의 입사각이 어떤 방향으로 산란될지를 결정하는 조건도 된다. Brillouin의 언급한 fine structure라 하는 것은 산란중심(탄성파)의 운동으로 인해 산란광의 파장(주파수)이 Doppler shift에 의해 변화하는 것을 말하는데 그 변화량은 다음과 같다 :

$$\Delta\nu = \pm\nu_s = \pm 2n\nu \frac{v_s}{c} \sin(\phi/2) = \pm 2n \frac{v_s}{\lambda} \sin\theta \quad (2)$$

식 (2)에서 ν_s 는 sound wave의 주파수, v_s : sound velocity, c 는 진공 중에서의 광속이다. 매질 속에서의 광속은 c/n 이다. 이 식으로부터 다음을 알 수 있다;

- ① 주파수 변화가 최대인 산란 방향은 $\phi=180^\circ$, 즉 후방산란(backward scattering)일 때로서 이 때의 주파수 변화는 $\Delta\nu = \pm 2n\nu \frac{v_s}{c} = \pm 2n \frac{v_s}{\lambda}$ 이다.
- ② $\phi=0^\circ$, 즉 전방(forward)으로는 주파수 변화가 없다.

특징은 주파수 변화량이 입사광의 주파수(파장)와 산란 각도에 따라 변화한다는 것인데, 가시광 영역의 입사광을 사용할 때 생기는 주파수 변화는 대략 10 GHz 이하 정도이다.

3. 시험 구성

3.1 시험장비

그림 3-1은 본 시험에 사용된 장비로서 산란파를 이용하여 광 케이블 상에 분포된 변형율을 측정할 수 있는 장비이며, 표 3.1은 장비의 제원을 나타낸다.

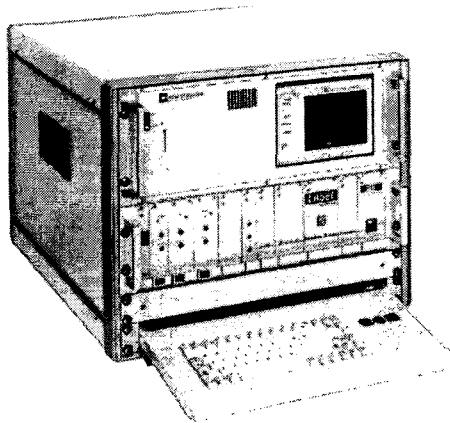


그림 3-1 Optical Fibre Brillouin Analyser

표 3.1 제원

operation wavelength	1550 nm
Strain measurement range	1%
Strain resolution	0.002%
Temperature range	-30°C ~ 500°C
Temperature resolution	±1°C
GeO ₂ doping concentration resolution	0.01 wt mol %
Polarisation beat length resolution	min 4 meter (4× spatial resolution)
Acquisition time	2 to 5 min. depending on the range
Size	60cm × 43cm × 51cm
Weight	45kg
Power supply requirements	180 ~ 260V

3.2 시험 구성도

그림 3-2에서 보는 바와 같이 DFB Laser와 마이크로 웨이브파, 펄스 제너레이터에 의해 생성된 펄스를 소스로 하여, EDF에서 30dB의 증폭을 시킨 후 커플러를 경유하여, 실제 테스트 광케이블을 거친 후 반사파를 수집하여 데이터를 얻는 방식으로 구성된다.

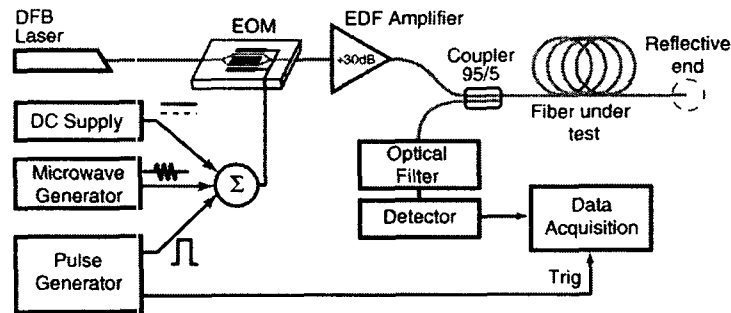


그림 3-2 Experimental set-up for distributed Brillouin gain spectrum measurements.

4. 실내 및 현장시험

4.1 PVC 파이프 시험

4.1.1 실험내용

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 4-1과 4-2 는 PVC 파이프 하중 재하점과 광센서의 부착위치를 나타내며, 우측 하단의 그림은 8줄의 광케이블이 표면 부착된 단면을 보여주고 있다.

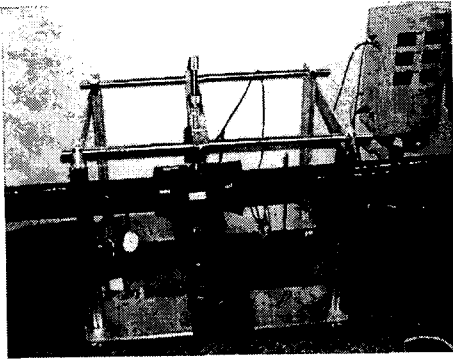


그림 4-1 PVC 파이프 시험

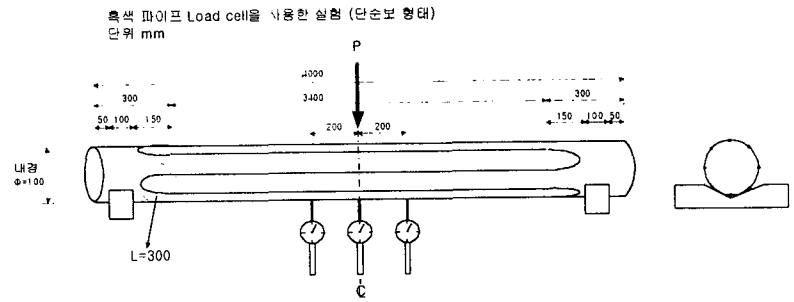


그림 4-2 PVC 파이프 광케이블 부착 위치

4.2.2 실험결과

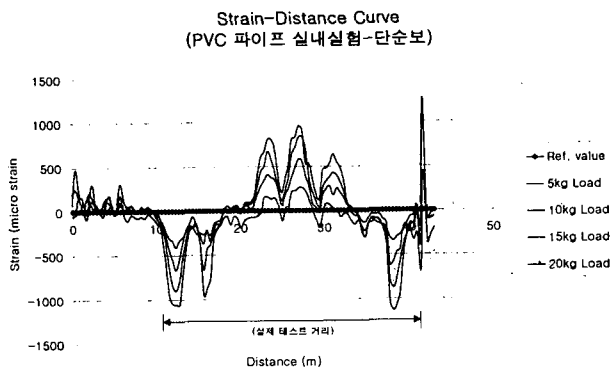


그림 4-3 산란파를 이용한 광센서 계측

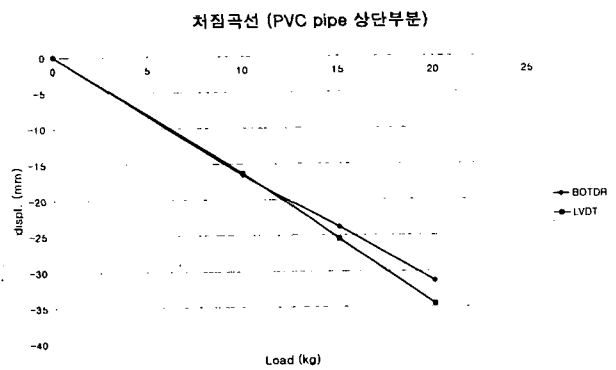


그림 4-4 측정 센서 비교

그림 4-3의 왼쪽 첫 만곡부의 경우는 PVC 파이프 상단 압축 축을 나타내며, 두 번째와 세 번째 만곡부 사이의 경우는 중립축, 네 번째 만곡부의 경우는 파이프 하단 인장축을 나타내고 있다.

그림 4-4는 측정된 결과치를 LVDT와 비교한 데이터를 보여주고 있으며, 91%이상의 수렴율을 보이므로, 만족스러운 결과값을 도출한 것으로 판단된다.

4.3 말뚝 이동시험 I

4.3.1 실험내용

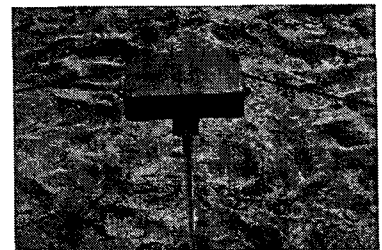
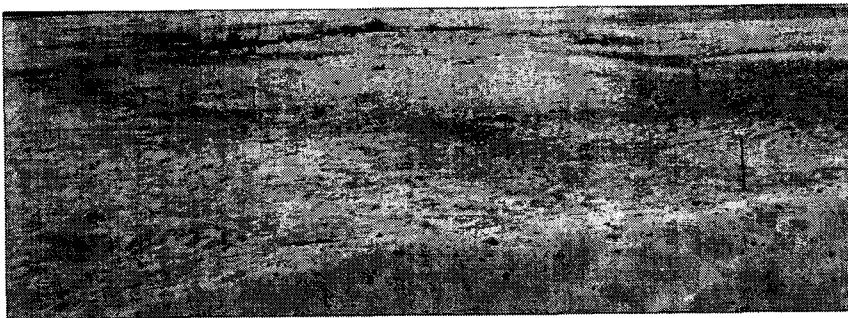


그림 4-5 말뚝 배치 형태

사면에서 토괴의 움직임을 감지하기 위한 이동 말뚝을 묘사하는 시험으로서 강변 저수부지인 모래사장에서 수행하였다. 그림 4-5 좌측에서와 같이 모래사장에 5m 간격으로 말뚝을 설치한 후 그 사이를 Polymer로 피복된 광케이블로 서로 연결시켰다. 우측 그림은 광케이블을 연결시키기 위한 말뚝 두부의 특수 연결 장치를 보여준다. 전부 9개의 말뚝을 총연장 40m의 케이블로 연결한 후 임의의 위치에 있는 말뚝 두부를 밀어 당김으로서 그 사이에 연결된 광케이블에 인장 혹은 압축력을 유발시키도록 하였다. 이 때 BOTDR 방법에 의한 변형을 분포를 측정함으로써 이동 말뚝의 위치와 변위량을 검출 하고자 하였다.

4.3.2 실험결과

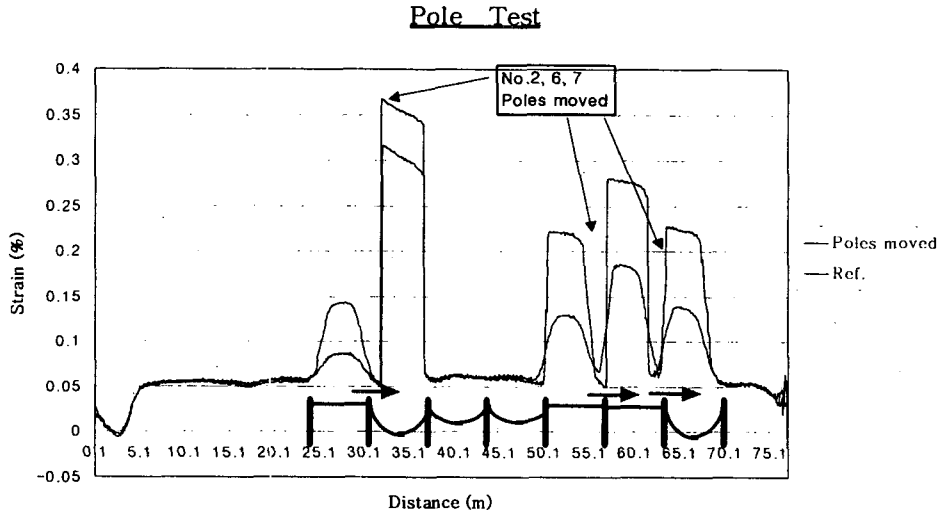


그림 4-6 말뚝 시험 계측 결과

그림 4-6에서 보는 바와 같이 ②, ⑥, ⑦번 말뚝을 각각 잡아 당겼을 때의 변형률 분포를 보게 되면, ①번 말뚝과 ②번 말뚝 사이의 그래프는 초기값과 비교시 인장을 받고 있으며, ②번과 ③번 말뚝 사이의 그래프는 압축을 받고 있음을 나타내고 있으며, ⑥번 말뚝과 ⑦번 말뚝의 경우도, 같은 분포를 보이고 있다. 이와 같이 좌측에서 두 번째 말뚝을 움직인 결과는 진행방향에서 후방에 있는 말뚝은 인장을, 전방은 압축을 받을 것이므로 이동말뚝의 위치를 알 수 있게되며, 변위량은 말뚝사이의 길이에 변형률을 곱해서 쉽게 추정할 수 있다.

4.4 말뚝 시험 II

4.4.1 실험내용

[사면 계측 실험, 백요 장비 사용]
(149.7mm)

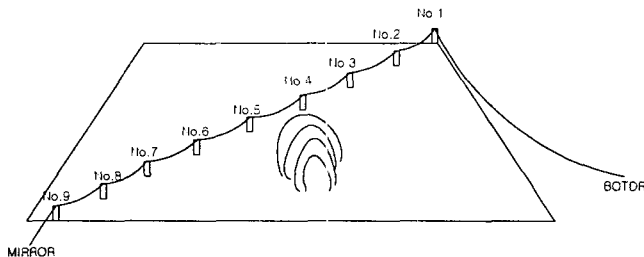


그림 4-7 말뚝 배치 형태(골재 야적장)



그림 4-8 굴삭기에 의한 굴착

이 실험은 앞에서의 실험과 동일한 목적으로 사면붕괴 상황을 좀더 현실화시킨 경우이며, 현장 골재 야적장에서 시험이 이루어졌다. 말뚝간 거리 5m, 총연장 40m인 이동 검측 말뚝이 사용되었으며, 말뚝의 배치형태는 그림 4-7과 같다. 그림 4-8에서와 같이 굴삭기를 사용하여 그림 4-7과 같이 배치된 말뚝의 하단부분을 굴착해감으로써 사면의 슬라이딩을 묘사하였으며 이때 검측 말뚝의 이동으로 인한 광센서에서의 변형을 분포를 측정하였다.

4.4.2 실험결과

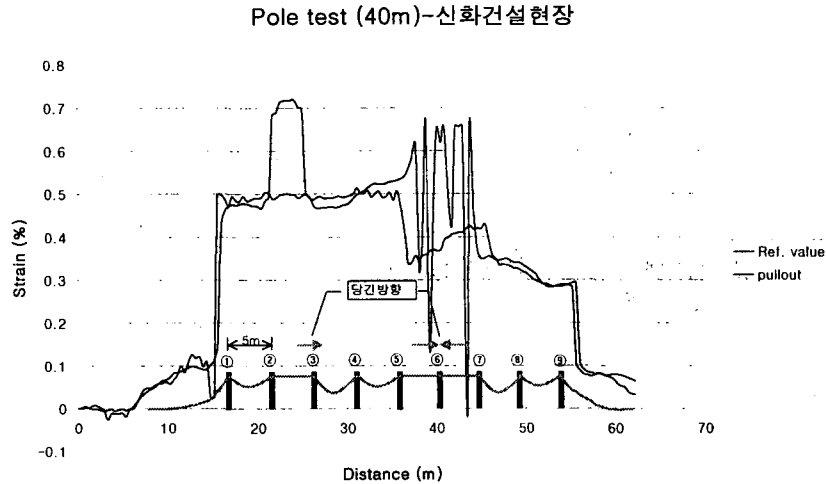


그림 4-9 말뚝시험Ⅱ 계측 결과

그림 4-9에서 보는 바와 같이 ③번 말뚝을 굴삭기로 굴착한 경우는, ②번 말뚝과 ③번 말뚝사이의 그래프가 초기값과 비교시 인장을 받고 있으며, 이는 ③번 말뚝이 우측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. ⑥번 말뚝의 경우는 과도한 굴착에 의해 말뚝이 ⑤번 말뚝과 ⑦번 말뚝 사이에 과도한 인장이 발생하면서, 그 변형을 그래프가 Saturation 되었다.

4.5 8m PVC 파이프 캔틸레버 시험

4.5.1 실험내용

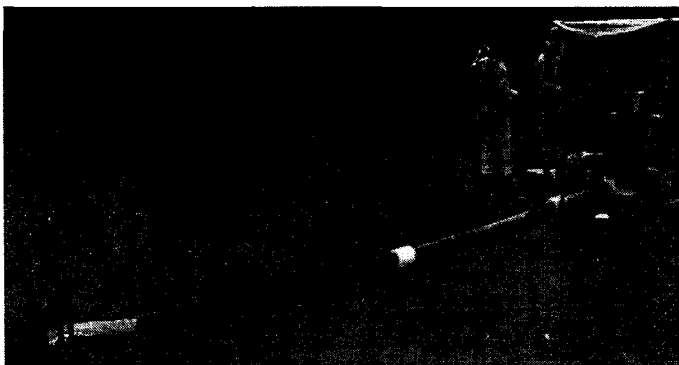


그림 4-10 8m PVC 파이프 배치 형태

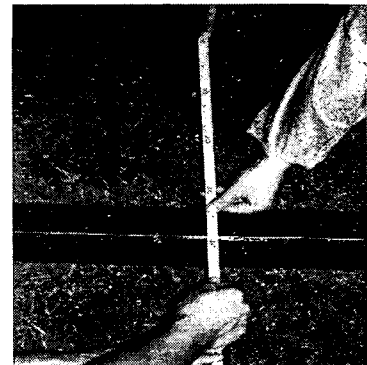


그림 4-11 파이프의 이동

그림 4-10은 8m PVC 파이프를 일단 고정, 타단 자유의 캔틸레버 형태로 모델링 한 것이며, 광케이블이 인장부분의 시점에서 압축 부분의 종점까지 한 줄로 연결 부착되었다. 그림 4-11에서처럼 실험 전

파이프의 초기 측정치를 Reference value로 설정한 후 파이프를 약 40cm 이동 시켰다. 실험의 목적은 외력의 작용으로 파이프에 휨이 유발되었을 때의 상대적 굴곡을 측정하기 위한 실험이다.

4.5.2 실험결과

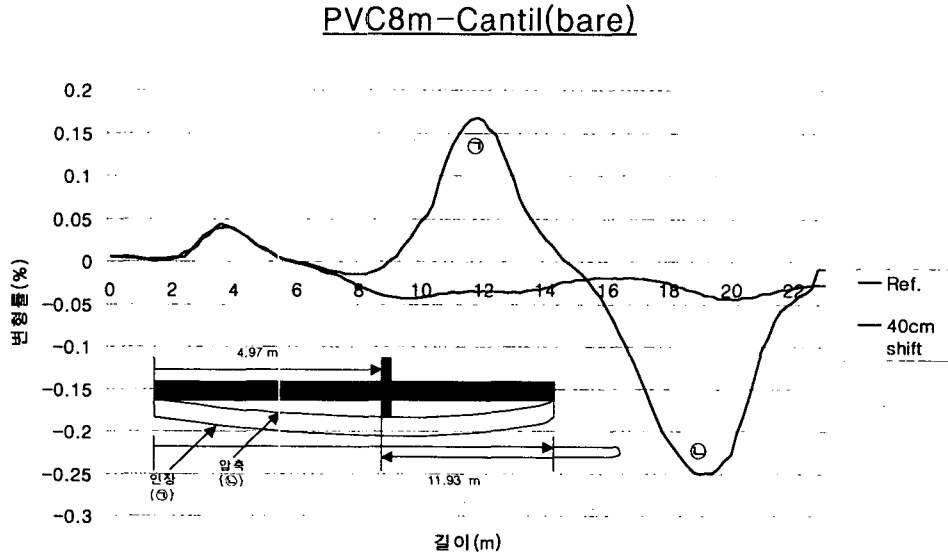


그림 4-12 산란파를 이용한 광센서(BOTDR) 계측 결과

위의 그림 4-12에 나타난 2개의 관곡부분은 서로 상대적 대칭을 이루고 있으며, 이는 인장과 압축부 위에서 절대값이 동일한 변형률 분포를 나타내고 있다. 그림에서 적색으로 표시된 말뚝의 위치가 최대 변곡점을 이루는 것으로 판단되며, 파이프 표면에 매설된 광케이블의 길이는 좌측 고정단으로부터 4.97m 지점(적색 표시 지점)인 ㉠부분에서는 압축을 받고 있으며, 11.99m 지점인 ㉡부분에서 현재 말뚝의 이동이 있음을 알 수 있다.

4.6 현장 적용예

동대구-구미간 8차선 확장공사 구간 중 K사면의 두 번째 소단에 인장균열의 발생으로 인한 표면 Sliding을 실시간으로 모니터링 하기 위해서 BOTDR을 활용하였으며, 지표면 표피 움직임을 측정하였다.

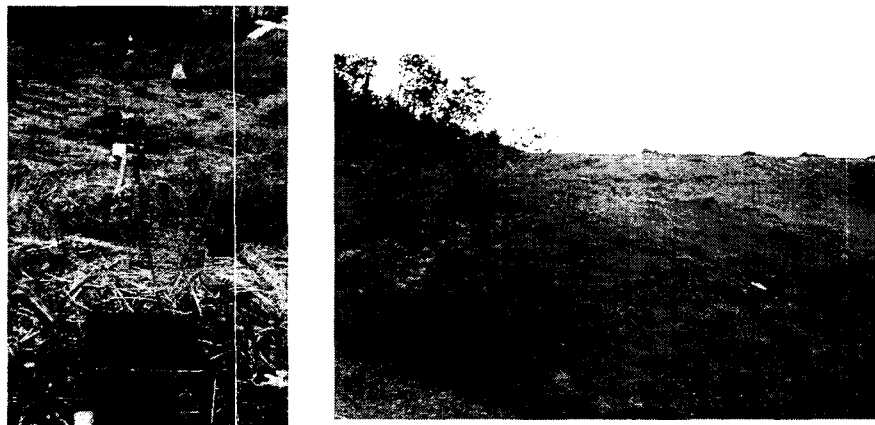


그림 4-13 현장 설치(K 사면)

4.6.1 설치 방법

표면에서 직경 90mm, 깊이 1500mm로 흠을 천공하여 철근을 삽입한 후 그라우팅 하였다. 24시간 경화 시킨 후 광케이블의 연결을 위한 말뚝의 두부 부분에 그림4-13과 같은 헤드 장치를 설치하여 말뚝과 말뚝사이에 광섬유를 연결하였다. 말뚝과 말뚝 사이의 간격은 설치상의 편의를 위해 사면의 경사에 맞추어 약 4.7m의 간격으로 하였다.

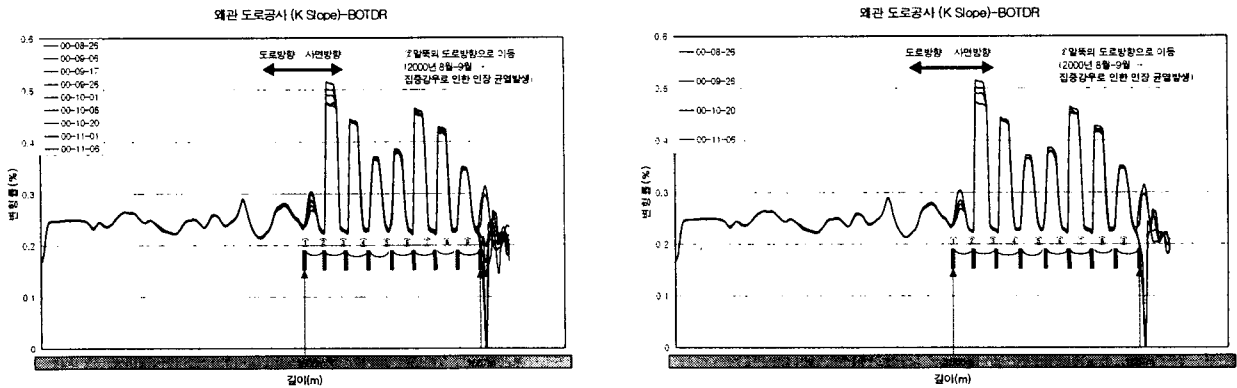


그림 4-14 산란파를 이용한 광센서(BOTDR) 계측 결과

4.6.2 검토

8월과 9월의 집중호우로 인해 1번과 3번 말뚝사이의 인장균열 진행이 그림 4-14와 같이 2번 말뚝을 중심으로 앞부분(1번 말뚝과 2번 말뚝 사이)은 압축을 뒷부분(2번 말뚝과 3번 말뚝사이)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 실측정치는 온도 보정에 의해서 수정이 가능하였다.

5. 결론

1. PVC 파이프 실험결과는 지금까지의 실험 중에서 가장 높은 신뢰성을 보여주었다. 가능한 이유로서는 다른 실험과는 달리, 부착된 bare fiber가 보호 피복을 가진 것에 비해 모재와의 일체성과 민감도(sensitivity)가 높은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이론에서 계산된 처짐값과 비교시 91%이상의 일치율을 보여, 재래적인 지중경사계와 파이프 변형계를 대체할 수 있을 것으로 전망된다.

2. 현장에서의 모형 말뚝 시험과 현재까지 약 2개월 간의 실사면 측정 결과를 미루어 볼 때 이러한 형태의 표피 이동 검측은 실제 붕괴 사면에서 토괴의 움직임을 충분히 감지해 낼 수 있을 것으로 판단되며, 향후 실제 지반 이동 검측, 활동 위치 파악 등, 사면 거동 계측의 활용에 크게 기여 할 것으로 사료된다.

3. 상기 1, 2에서처럼 PVC관과 이동 말뚝을 적절히 병행한다면, 활동토괴의 움직이는 방향과 이동량을 동시에 알 수 있어, 사면활동에 관련된 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 산란파를 이용한 광센서(BOTDR)의 경우, 여타의 다른 광섬유센서와는 달리, 가격이 저렴하고 케이블 그 자체가 센싱소자의 역할과 데이터 전송의 기능을 동시에 수행함으로써, 대형 토목구조물에 적합한 광섬유

센서로 그 유용성이 아주 높다고 판단된다.

참고문헌

1. L.Thevenaz, M.Nikl, A. Fellay, M.Facchini, Ph. Robert, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers", SPIE Proc. 3330, Conf. on Smart Structures and Materials
2. M.B. Kodindouma and R.L.Idriss, "An Integrated Sensing System for Highway Bridge Monitoring" New Maxico State University, Civil Eng. Dep, SPIE Vol. 2719 pp. 132-140, 1996.
3. Jean-Marie Caussignac, Mohamed Barbachi, Alain Chabert, "Bridge Bearings Equipped with Optical Fiber Sensor for Measuring Vertical Load through the Support", Lab. Central des Ponts et Chaussees, SPIE Vol. 2719 pp. 220-228,1996.
4. Daniele Inaudi, Nicoletta Casanova, "Embedded and Surface Mounted Fiber Optic Sensors for Civil Structural Monitoring", IMAC-Stress Analysis Lab., SMARTEC SA, IMM SA, DIAMOND SA(Swiss),SPIE Vol. 3044 pp. 236-243, 1997.
5. EIA Standard RS-455-47, Section 4.3.2, EIA, Engineering Dept. (Whashington D.C.) 1983
6. D. L. Franzen and E. M. Kim, "Interlaboratory measurement comparison to determine the radiation angle (NA) of graded-index optical fibers". Applied Optics 20, p.1220
7. D. Marcuse, Principles of Optical Fiber Measurements, Academic Press (New York) 1981, p.226-236
8. L.B. JeunHomme, Single-Mode Fiber Optics, Principles and Applications, Marcel Dekker (New York) 1983, p.16