

## TDR센서를 이용한 사면거동 해석 Analysis of Slope Behavior Using TDR Sensor

박민철<sup>1)</sup>, Min-Cheol Park, 이재호<sup>2)</sup>, Jae-Ho Lee, 한희수<sup>3)</sup>, Heui-Soo Han

<sup>1)</sup> 금오공과대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept, of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>2)</sup> (주)메카지오텍 연구사업부 이사, Director, Researcher Div., Mecageotech Co.,Ltd

<sup>3)</sup> 금오공과대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept, of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**SYNOPSIS :** In this paper, using soil slope inclinometer observations of lateral flow is used as a traditional way, but there are some decisions. Inclinometers in the process of installing and monitoring is costly. Severe incline slope of the lateral flow is observed in the inefficient. As a solution for it using TDR sensors are used to. Metal conductors such as coaxial cable and general cable uses a measurement sensor can be installed on site at a lower cost and slope measurements are available for long-term monitoring. When TDR sensor is installed on the slopes, changes in the behavior of slopes causes the earth pressure. TDR sensors determine the change of earth pressure and tried to analyze the behavior of slopes.

**Keywords :** TDR센서, 사면파괴, 사면거동, 지중경사계, 측방유동

### 1. 서 론

사면안정은 강우로 인해 지하수위 및 지표면의 포화대 하강으로 인하여 점토성분이 많은 언덕이나 산 약지역, 준설된 제방의 경사면에서 항상 문제가 되어왔다. 붕괴가 진행될 것으로 예상되는 사면에 대한 효과적인 대응책을 고안하기 위해서는 파괴형상을 미리 예측하고 거동을 예측하는 것이 필수적이다. 지중경사계를 이용한 사면의 측방유동의 관측은 전통적으로 이용되어온 방법이지만, 몇 가지 결점이 있다. 경사계를 설치하고 모니터링을 하는 과정에서 비용이 많이 들고, 경사가 급한 사면의 측방유동의 관측에는 비효율적이다.

그에 대한 경제적인 대응책으로 TDR센서를 활용한 방법이 사용된다. 동축케이블 및 일반 전선 등의 금속 도체를 계측 센서로 사용하므로 저렴한 비용으로 현장에 설치할 수 있고, 사면계측에 대한 장기간 모니터링이 가능하다. 하지만 TDR센서는 온도, 변위, 전기적 저항 등의 여러 요소로 인하여 데이터가 변화하므로 계측자가 필요로 하는 요소 외의 인자로 인한 노이즈를 필터링하여야 한다.

본 연구에서는 쏘일네일링 인발실험에 TDR센서를 적용하여 이를 해석해보고 TDR센서로 사면의 거동을 예측에 활용하는 방안을 모색해 보았다. 그 결과 토압의 변화로 사면의 거동을 파악하려 하였고 토압은 TDR센서에 전단응력을 발생시키므로 실내실험에서 전단응력의 변화를 TDR센서로 계측하고 이를 검토해 보았다.

## 2. 쏘일네일링의 TDR센서 적용

### 2.1 쏘일네일링 현장 설치 및 TDR데이터

쏘일네일링에 TDR센서를 설치하여 사면의 파괴거동 및 인발시험 시의 TDR데이터의 변화를 파악하려하였다. 이를 위해 쏘일네일링에 동축케이블, 3종류의 구리전선, 철선을 설치하여 철근과 묶어 보링홀에 관입시킨 후 그라우팅을 실시하였다.

쏘일네일링에 TDR센서를 설치한 후 그라우팅 직 후, 양생 후, 인발시험 시로 나누어 3번 계측을 실시하였다. 그 결과 양생과정에서는 피복의 두께가 가장 얇은 동축케이블에서만 수화열에 의한 TDR데이터 변화가 나타났다(그림 1). 그리고 인발시험 시 인장력 162KN일 때 동축케이블을 계측한 결과 그림 1과 같이 인장력이 쏘일네일링 상부에만 전달됨을 확인할 수 있었다.

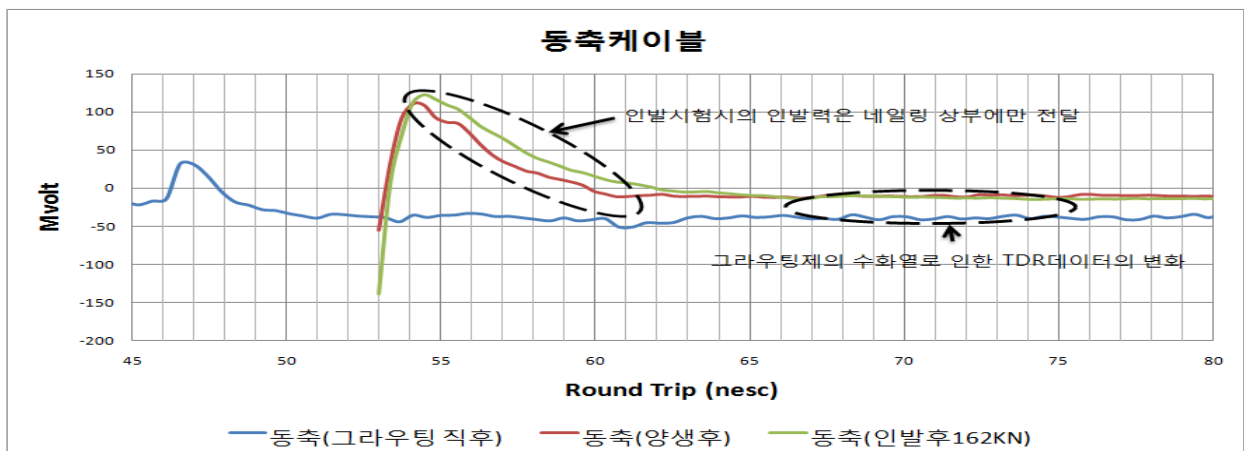
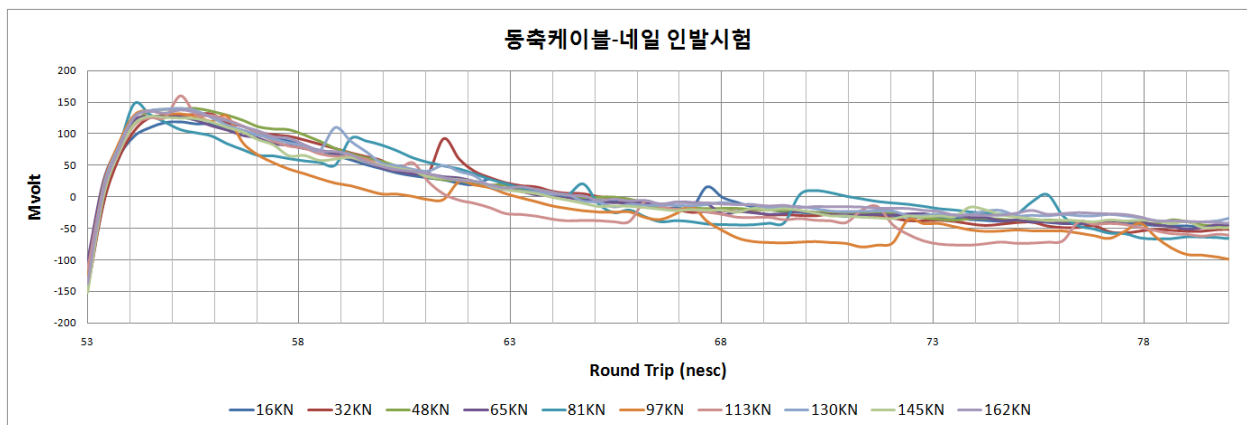
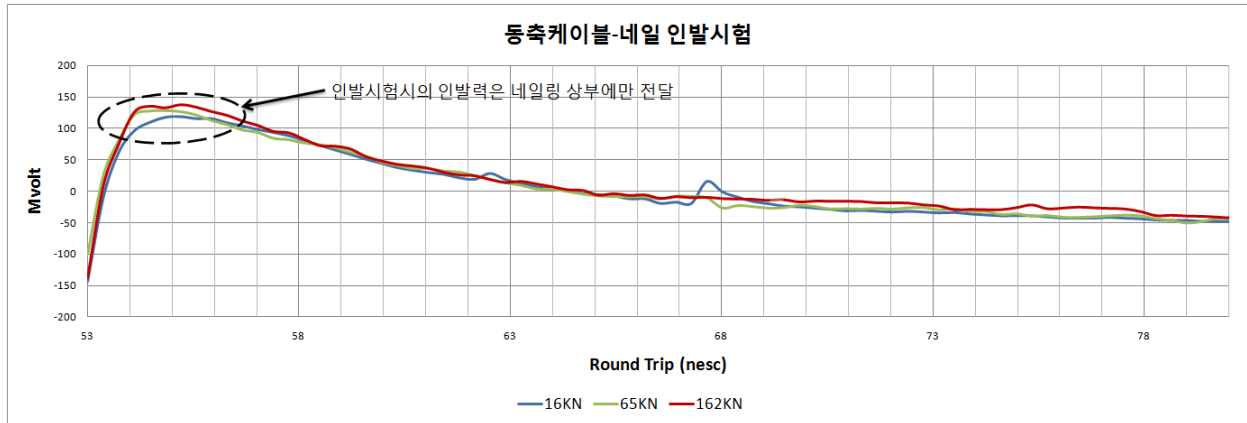


그림 1. 그라우팅 및 인발 시의 TDR데이터



(a) 쏘일네일링 인발에 따른 TDR데이터 변화(16KN~162KN)



(b) 쏘일네일링 인발에 따른 TDR데이터 변화(16, 65, 162KN)

그림 2. 쏘일네일링 인발에 따른 TDR데이터 변화

다음으로 쏘일네일링의 인발시험 시 동축케이블 한 선과 네일링 철근 자체를 한 쌍의 계측선으로 하여 계측하였다. 그림 2 (a)를 살펴보면 인장력의 단계별 TDR계측 데이터를 나타낸 것이다. 불규칙하게 보이는 것은 노이즈이며 이는 수치해석단계에서 필터링하여야하며 대체적으로 데이터에 큰 변화는 없다.

그림 2 (b)는 인발력 16, 65, 162KN일 때만을 살펴보면 쏘일네일링의 상부만 인장력을 받아 데이터가 변했고 쏘일네일링의 하부로 갈수록 인발력이 전달되지 않아 데이터가 변하지 않음을 확인할 수 있다.

## 2.2 TDR데이터 해석

인발시험시의 인장력에 의한 철근의 변위를 파악하여보았다.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{P}{A} = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (2)$$

여기서,  $P$  : 인장력(16 ~ 162KN)

$A$  : 철근의 단면적

$E$  : 철근의 탄성계수( $2.0 \times 10^{11} MPa$ )

$\varepsilon$  : 변형률

$\Delta L$  : 변위(mm)

식 (2)를 계산하여 변위를 구하면

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} = \frac{162000 \times 12}{7.068 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^5} = 0.01375m = 13.75mm \quad (3)$$

인발시험시의 인장력은 쏘일네일링의 전체에 전달되지 않고 상부에만 전달되는 것으로 나타났다. 발생된 변위 또한 쏘일네일링 자체의 변위가 아니라 그라우팅과의 전체 변위이므로 이를 TDR데이터로는 계측할 수 없었다.

이로 인해 TDR센서를 사면의 안정해석에 적용하기 위해서는 센서를 쏘일네일링이나 락볼트 또는 보링홀에 그라우팅하여 설치하였을 시에 인장, 압축의 축력보다는 토압에 의해 단면에 발생하는 전단응력에 대한 TDR데이터를 계측하여 해석에 활용하여야 함을 확인할 수 있었다. 이는 쏘일네일링과 락볼트는 고강도 철근을 사용하므로 강성이 크고 탄성계수가 크므로 축방향 변위가 거의 일어나지 않고 발생하는 변위 또한 철근 자체의 변위가 아니라 철근+그라우팅계 전체와 흙과의 변위이므로 이를 계측하기는 힘들다. 이러한 이유로 인하여 TDR센서로 사면의 안정해석을 수행하기 위해서는 전단응력에 대한 TDR데이터의 변화를 파악하고 이를 현장에 적용하여야 할 것이다.

### 3. 실내실험

#### 3.1 사면 거동 시 작용하는 토압

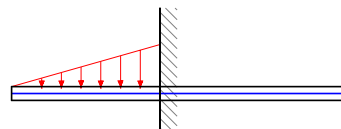
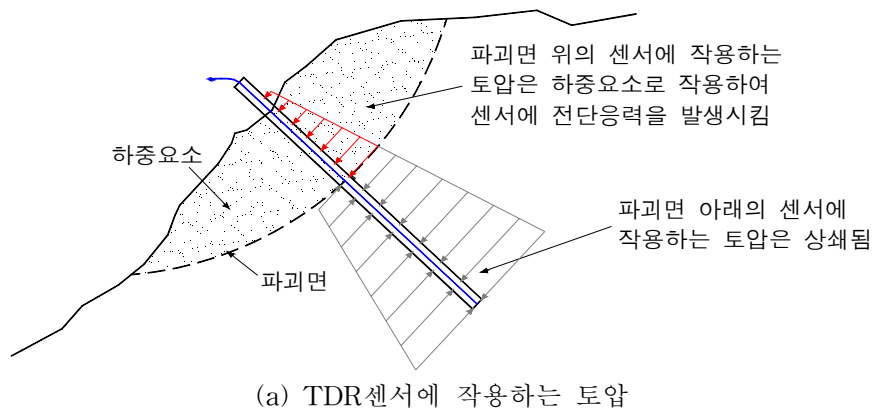


그림 3. 실내실험을 위한 TDR센서 모형

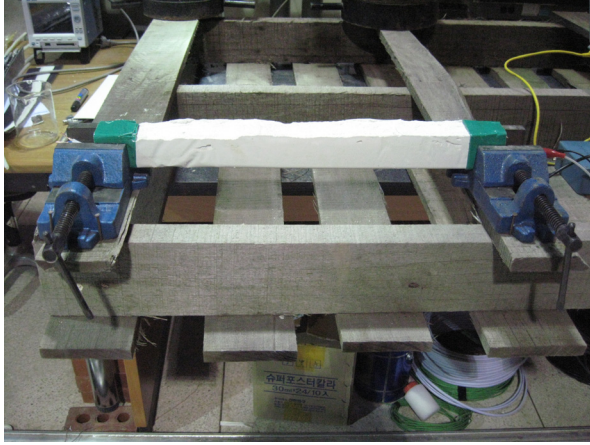
현장에 TDR센서를 설치하면 설치 직후 TDR데이터를 기본값으로 하여 그림 3 (a)와 같이 파괴시 파괴면 상부의 흙이 지지력을 상실하므로 센서에 하중으로 작용하게 되고 전단응력을 발생시킨다. 이를 계측하여 사면의 거동 및 파괴형상을 파악하고자 하였다.

전단응력에 대한 TDR데이터를 계측하기 위한 실내 모형실험에는 그림 3 (b)와 같이 캔틸레버보의 형태로 실험을 하여야 하나 본 연구에서는 석고와 모래를 배합하여 만든 보를 사용하여 사면의 강도와 최대 동일하게 하려 하였다. 제작된 석고보는 바이스로 고정시키기에는 강도가 작고 응력이 집중되므로 단순보에 하중을 작용시켜 전단응력의 변화에 대한 TDR데이터를 계측하였다.

#### 3.2 단순보 집중하중 재하실험

실내에서 전단응력의 변화에 대한 TDR데이터의 변화를 파악하기 위하여 석고와 모래를 혼합하여 모

래, 석고, 물의 배합비가 133 : 67 : 100 이고(정형래, 2006), 크기가  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 60\text{cm}$ 의 단순보를 만들고 가운데에 계측선으로 구리선과 철선을 설치하였다. 이 후 제작한 단순보를 양생시킨 후 고정하는 과정에서 파손되지 않게 테이프로 감고 바이스로 양단을 고정시키고 집중하중을 증가( $10\text{N} \sim 150\text{N}$  파괴시)시켜가며 변위(처짐) 및 TDR데이터를 계측하였다.



(a) 바이스를 이용한 양단고정



(b) 재하판 및 다이얼게이지 설치

그림 4. 단순보 파괴실험

### 3.3 단순보 집중하중 재하실험

단순보 파괴 실험결과 TDR계측선은 철선보다 구리선이 변위 및 전단력 변화에 적절한 것으로 나타났다. 해석결과 전단면에 걸쳐 전단응력이 일정하므로 TDR데이터의 변화 또한 일정했으며 수치해석기법을 통해 노이즈만 제거하면 TDR데이터를 이용하여 TDR센서에 작용하는 전단력을 구할 수 있다.

단순보에 작용하는 전단응력을 구하면

$$\tau = \frac{S \cdot G}{b \cdot I} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$  : 단면의 임의의 지점에서의 전단응력( $\text{MPa}$ ,  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$S$  : 전단력( $\text{kg}$ )

$G$  : 단면 1차 모멘트( $\text{cm}^3$ )

$b$  : 단면의 중심에서 단까지의 거리( $\text{cm}$ )

$I$  : 단면 2차 모멘트( $\text{cm}^4$ )

정사각형 단면이므로 단면의 중심에서 전단응력이 최대가 되고 센서 또한 단면의 중심에 있으므로 식 (1)에서 단면 1차 모멘트와 단면 2차 모멘트는 알고 있으므로 이를 약분하면

$$\tau = 1.5 \cdot \frac{S}{A} \quad (2)$$

여기서,  $\tau$  : 단면의 임의의 지점에서의 전단응력( $\text{MPa}$ ,  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

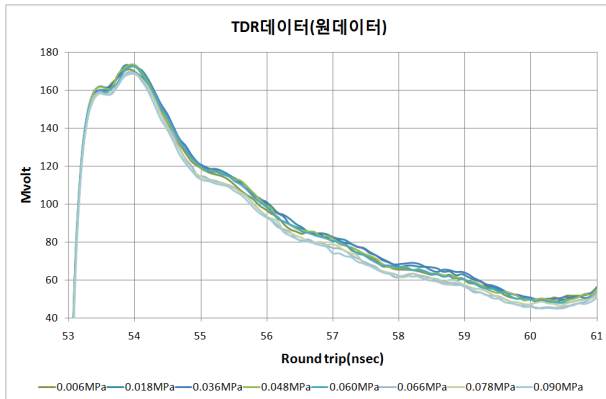
$S$  : 전단력( $\text{kg}$ )

$A$  : 단면의 면적( $cm^2$ )

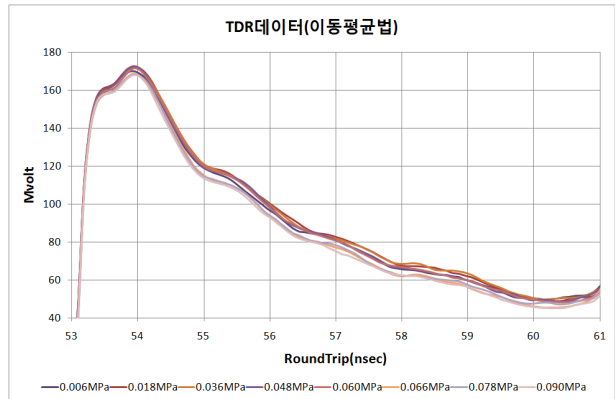
각각의 재하하중에 의해 발생하는 단면의 중심에서의 전단응력은 표 1과 같다.

표 1. 재하하중에 의한 단면중심에서의 전단응력

재하하중( $N$ )	30	60	80	100	110	130	150
전단응력( $MPa$ )	0.018	0.036	0.048	0.060	0.066	0.078	0.090
변위( $mm$ )	0.00	0.18	0.29	0.40	0.46	0.61	0.98



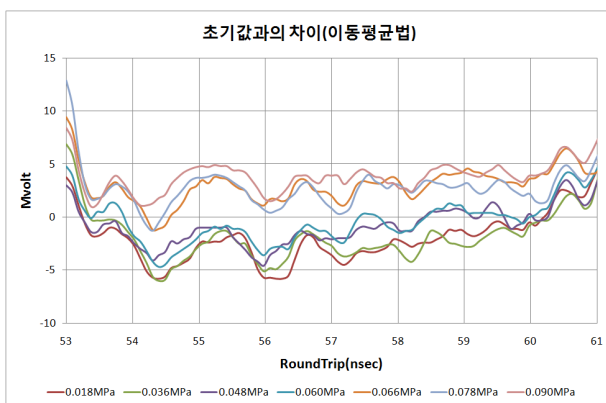
(a) 전단응력에 대한 TDR데이터



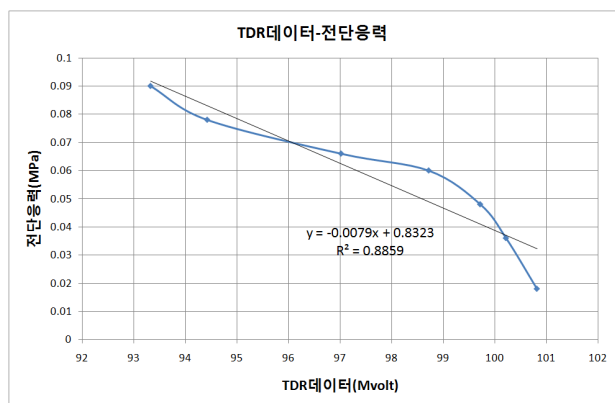
(b) 전단응력에 대한 TDR데이터(이동평균법)

그림 5. 전단응력에 대한 TDR데이터

단순보에 집중하중을 재하하여 전 단면에 동일한 전단응력이 발생되도록 하여 TDR데이터를 계속해 본 결과 구리선에서 그 경향이 뚜렷하게 나타났다. 그림 5 (a)를 보면 데이터의 곡선이 노이즈로 인하여 거친 모습을 보이니 이동평균법으로 1차 필터링을 하여 그림 5 (b)와 같이 곡선을 부드럽게 안정처리하였다.



(a) 초기값과의 차이(이동평균법)



(b) TDR데이터-전단응력 그래프

그림 6. TDR데이터의 해석

이동평균법으로 1차 필터링한 TDR데이터를 초기값과 비교해보면 그림 6 (a)와 같다. 이를 살펴보면 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 일정하게 굴곡이 발생하는 부분들은 추가 필터링을 통해 제거해야

하는 부분이다. 노이즈가 많아 보이지만 단순보의 길이가 60cm이기 때문에 그 부분만 확대한 것이어서 노이즈가 상대적으로 크게 나타나 보이는 것일 뿐이고 푸리에 변환 기법 등을 이용하여 필터링할 수 있을 것이다.

그림 6 (b)를 살펴보면 단순보의 중간지점에서의 TDR데이터와 전단응력의 그래프를 나타낸 것이다. 이를 회귀분석을 통해 추세선을 그리면 직선과 가깝게 나타난다. 이 함수식을 이용하여 TDR센서에 작용하는 전단응력을 파악할 수 있다.

## 4. 결 론

### 4.1 쏘일네일링 현장 적용

쏘일네일링에 TDR센서를 적용해 본 결과는 다음과 같다.

1. 피복두께가 얇은 동축케이블의 경우 그라우팅제의 양생 시 온도변화로 인해 TDR데이터가 변화됨을 확인할 수 있었다. 이는 사면의 거동 파악 시 계측선을 동축케이블보다는 피복의 두께가 두꺼운 일반 구리전선이 온도의 영향을 적게 받음을 확인할 수 있었다.
2. 계측 시 TDR데이터가 온도의 변화에 영향을 받더라도 필터링과정을 통해 제거할 수 있다.
3. 인발실험 시 TDR센서로 계측한 결과 인발력의 대부분이 쏘일네일링의 상부에만 전달되었고 그 변위가 크지 않았다. 또한 발생된 변위가 쏘일네일링 자체의 변위인지 그라우팅제와 지반과의 변위인지 정확한 파악이 어렵다.
4. TDR센서를 사면에 적용할 경우 축력보다는 전단력으로 해석해야 함을 확인할 수 있었다. 이는 사면의 거동을 고려해 보아도 파괴면 상부의 흙이 지지력을 상실하고 활동할 때 TDR센서에 하중으로 작용되며 이로 인해 전단응력이 발생되므로 이를 TDR센서로 파악할 수 있느냐가 핵심요소일 것이다.

전단응력의 변화에 대한 TDR데이터의 변화를 파악하기 위해 현장의 조건을 고려하여 컨틸레버보로 실험을 해야 하나 보를 고정하기 어려운 등의 문제들로 인하여 단순보에 집중하중을 재하시켜가며 전단응력의 변화에 대한 TDR데이터를 계측하고 이를 해석하였다. 이의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 단순보에 집중하중을 재하시켜 전단응력을 변화시켜가며 TDR데이터를 계측해 본 결과 그 경향이 뚜렷이 나타났으며 이동평균법으로 1차 필터링한 결과 더욱 데이터가 안정적으로 나타났다.
2. 현장에서 센서를 설치 직후에 작용하는 토압을 기준으로 삼아 추후 계측 시의 토압변화를 해석해야 하므로 실내실험 데이터 또한 초기값과 비교한 결과 그 경향이 뚜렷이 나타났다. 노이즈 또한 동일하게 발생되므로 이것은 필터링과정을 통해 제거할 수 있을 것이다.
3. 단순보의 중앙부분 작용한 전단응력과 TDR데이터간의 그래프를 그려 회귀분석을 통해 함수화한 결과 직선식을 찾을 수 있었으며 이 식을 활용해서 TDR센서에 작용하는 전단응력을 파악할 수 있을 것이다. 이것을 해석하면 센서에 작용하는 토압의 변화를 측정할 수 있으므로 파괴형상 및 파괴면 파악에 활용할 수 있을 것이다.

쏘일네일링과 실내실험과정에서의 몇 가지 문제점 등을 정리하면 다음과 같다.

1. 쏘일네일링에 설치된 계측선이 쏘일네일링과 같이 거동을 하는지가 가장 큰 문제점이었다. 이를 해

결하기 위해 쏘일네일링 자체를 계측선으로 이용하였다. 하지만 두 가닥의 계측선(쏘일네일링+동축 케이블)을 종류를 다르게 하였기에 이에 대한 추가적인 실험이 필요할 것이다.

2. 현장에 TDR센서를 설치할 경우 그라우팅제의 강도를 얼마로 할 것인가를 결정하는 것이 중요한 요소이다. 이는 시멘트 모르타르 등을 사용할 경우 강도가 매우 커 보강제 역할을 할 것이고 너무 약하면 사면이 파괴되기 전에 센서가 파괴되버릴 것이다. 이를 해결하기 위해 석고와 모래를 혼합하여 흙과 같은 Friction Material을 만들고 실내실험을 통해 지반과 같은 강도 정수인  $c$ ,  $\phi$ 을 찾아 현장과 동일한 강도의 TDR센서를 설치할 수 있을 것이다.
3. 본 연구에서는 단순보에서만 하중을 재하하였고 또한 집중하중이어서 보의 전 단면에 동일한 전단 응력에 발생되었지만 추후 연구에서는 등분포 하중 등을 재하하여 현장의 조건을 최대한 재현하여 실험해보아야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문으로 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Kane, W.F., Beck, T. J., "Development of a TDR system to Monitor Landslide Activity, Proceedings, 45<sup>th</sup> Highway Geology Symposium, 1994, pp 163~173.
2. Beck, T. J., Kane, W.F., "Current and Potential Uses of TDR for Geotechnical Monitoring", Proceedings, 47<sup>th</sup> Highway Geology Symposium, 1996, pp 94~103.
3. 한희수, "나노-TDR센서를 이용한 토목구조물 모니터링 시스템", 구조물진단학회지, 제13권 제5호, 2009, pp 93~100