

TDR을 이용한 지반변형의 측정

Monitoring of Ground Deformation using Time Domain Reflectometry

이우진¹⁾, Woo-Jin Lee, 김용진²⁾, Yong-Jin Kim, 안신환³⁾, Shin-Whan An,
조충봉⁴⁾, Choong-Boong Cho, 이웅주⁵⁾, Woong-Joo Lee

¹⁾고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Korea University

²⁾(주)다산컨설턴트 전무이사, Managing Director, Dasan Consultants Co., Ltd.

³⁾고려대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Korea University

⁴⁾(주)바이텍코리아 전무이사, Managing Director, Baytech Korea Co., Ltd.

⁵⁾석탄산업합리화사업단 지반관리과 과장, Coal Industry Promotion Board

1. 서론

미국과 호주 등지의 광산에서 주로 적용되던 TDR(Time Domain Reflectometry)기술은 90년대 초반부터 토목공학 분야에 응용되기 시작하였으며 산사태나 암반사면의 변형 파악, 지반의 함수비 변화 모니터링, 지반 오염물질의 종류 및 이동경로의 추정, 지하수위의 변동 측정 등에 사용되고 있다. 국내에서는 1996년부터 강원도 통리지역 및 고사리 일대에 산재한 폐광의 붕락으로 인한 지반침하의 가능성을 판단하기 위해 TDR을 설치/운용한 것이 토목분야에서의 최초 적용사례로 알려져 있다.

TDR은 원격감지식 전기계측기술로 원래 전기송전선이나, 전화선, 광케이블이 파손된 경우 그 위치를 파악하기 위해 개발된 전기파형 분석기술이다. TDR은 전기신호를 발생하는 장치, 전기신호를 전달하고 환경의 변화를 감지하는 전달매체, 반사신호를 측정하여 분석하는 장치로 구성된다. 일반적으로 전기신호 발생장치와 반사신호 측정장치는 케이블시험기(cable tester)에 내장되어 있으며 케이블시험기에서 발생된 전기신호가 지반에 매설된 전달매체를 따라 전달되면서 전달매체 자체의 형상변화나 전달매체 주변의 물리적/전기적 변화가 있는 경우 신호가 반사되어 케이블시험기로 전달된다. 전기신호를 전달하는 매체는 지반이나 암반의 거동측정시 동축케이블(coaxial cable)을 일반적으로 사용하며 TDR신호는 동축케이블의 인장, 전단, 꺾임등의 변형을 감지할 수 있다.

TDR은 기존의 계측방식에 비해 시스템의 설치가 쉽고 모델이나 무선통신으로 데이터의 수집이 가능하므로 원거리에서 지반내부의 변화를 연속적으로 파악할 수 있으며, 전단변형 발생위치와 변위의 증감여부를 즉시 알 수 있다는 장점이 있다. 그러나 TDR반사파로는 동축케이블에 발생한 전단변형의 절대적인 크기를 정확히 알기는 힘들며 인장이나 휨에 대해서는 상대적으로 둔감하다는 단점이 있다. 경사계와 비교하여 TDR은 국부적인 변형으로 인한 jamming 가능성이 없으며 multiplexing system을 이용하면 다수의 시추공에 설치된 동축케이블을 1대의 TDR시스템에 연결하여 자동화 계측을 실시할 수 있다. 따라서 TDR은 지

반변형의 측정을 위한 여러 가지 계측기술의 하나로 추가될 수 있을 것으로 예상된다. 특히 암반사면이나 암반의 공동 주변에서 발생하는 전단변형의 측정시 경사계를 TDR로 보완 또는 대체할 수 있을 것으로 예상되며 산사태의 징후나 암반사면의 거동을 조기에 포착함으로써 보강대책을 강구하거나 피해를 최소화 할 수 있는 경제적인 기술로 많이 활용될 전망이다. 본 연구는 최근 토목공학 분야에 적용되기 시작한 TDR기술의 지반공학적 적용성을 파악하고 향후 국내에서의 TDR 응용방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. TDR에 의한 지반변형 측정의 원리

2.1 지반변형 측정을 위한 TDR시스템의 구성

지반변형의 측정을 위한 시스템은 TDR 케이블시험기(cable tester)와 동축케이블(coaxial cable)로 구성되며 그림 1과 같이 현장에 설치된다. 케이블 중간의 잘록한 부분은 reference crimp로 반사신호의 발생위치를 정확하게 알기 위한 기준점이며, 케이블을 시추공에 설치시에 플라이어 등으로 확실한 반사파가 생길 정도로 깊게 만들어야 한다. 케이블이 시추공 내에 설치되면 시멘트 그라우트로 시추공과 케이블 사이를 채운다.

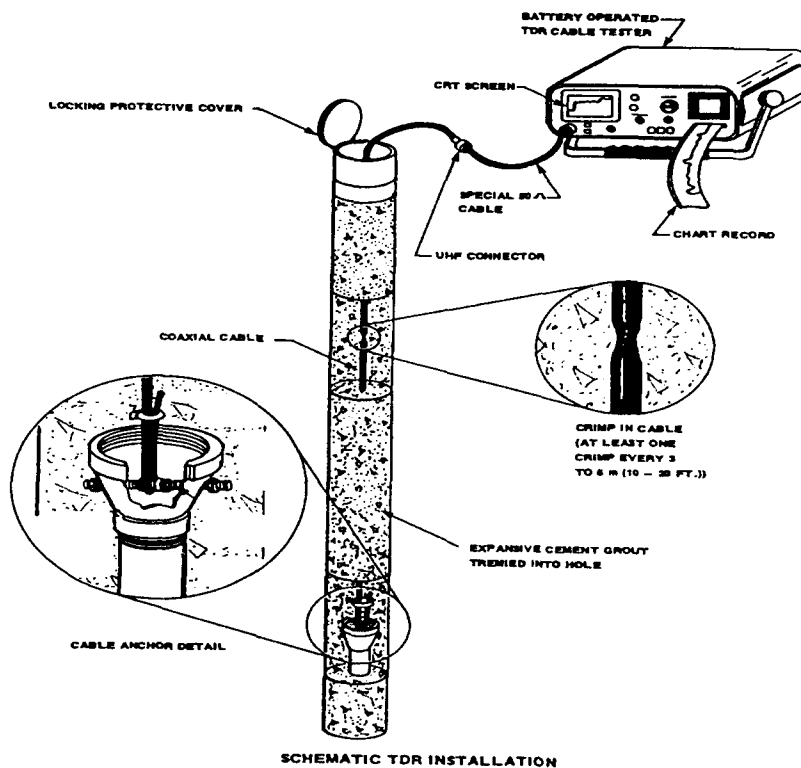
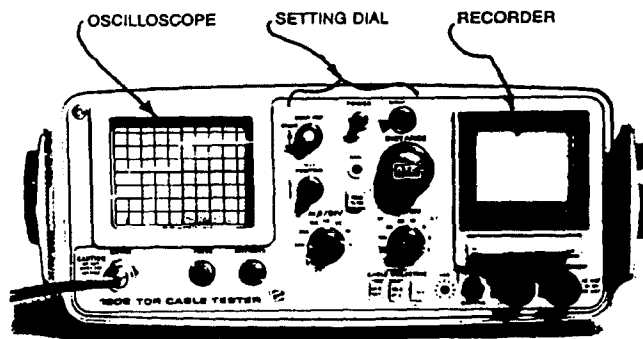
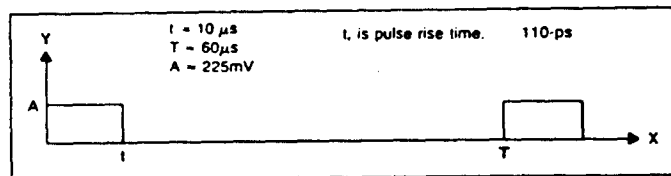


그림 1 지반변형 측정을 위한 TDR시스템의 설치도

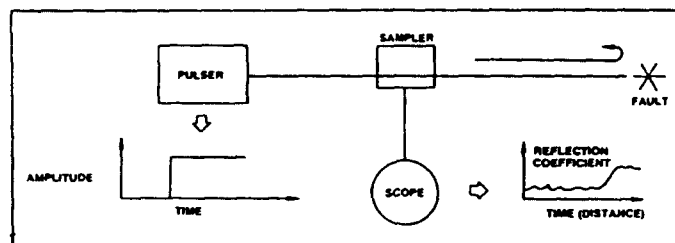
현재 시판되고 있는 TDR 케이블시험기는 약 6 가지 종류가 있으며 그림 2는 그중 하나인 Tektronix 1502 모델과 그 작동원리를 보이고 있다. 케이블시험기는 그림 2(b)와 같이 파의 상승시간이 아주 짧은 계단형 전압신호(ultra fast rise-time voltage step)들을 연속하여 발생시킨다. 케이블의 변형 등으로 인한 임피던스 변화가 발생한 곳에 전기신호가 도달하면 반사신호가 케이블시험기로 되돌아가며, 반사신호는 케이블에 전달되었던 신호와 중첩되어 시간에 따른 반사계수(reflection coefficient)의 변화로 케이블시험기의 오실로스코프에 도시된다. 전달신호와 반사신호의 시간차를 알면 케이블의 변형위치를 결정할 수 있으며 반사신호의 발생시간 및 반사계수의 부호, 길이, 크기는 변형의 위치, 종류, 손상정도를 결정한다.



(a) TEKTRONIX 1502 TDR CABLE TESTER



(b) NOMINAL TIME DOMAIN WAVEFORM



(c) OPERATING PRINCIPLE

그림 2 TDR 케이블시험기의 작동원리

2.2 동축케이블 선단조건에 의한 TDR 파형의 변화

TDR과 동축케이블로 지반의 변형을 측정하는 장치는 그림 3과 같은 시스템으로 도시된다. 신호발생기(pulse generator)는 전압(voltage source; $V_g(t)$)과 임피던스(source impedance; Z_g)로 표현되며, 동축케이블은 TDR의 출력포트에, 오실로스코프는 동축케이블의 입력부와 연결된다. TDR에 돌아오는 반사신호가 재반사되어 시험결과에 또 다른 영향이 가지 않도록 케이블의 임피던스(Z_o)는 신호발생기의 임피던스(Z_g)와 일치하도록($Z_o=Z_g$) 하는 것이 일반적이다. 동축케이블의 끝은 임의의 임피던스(Z_t)가 달린 것으로 표현된다.

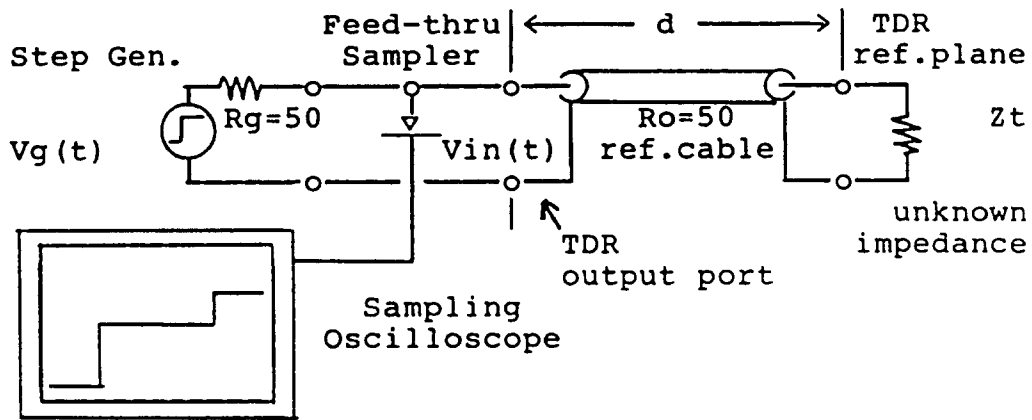


그림 3 Coaxial TDR의 시스템 Configuration

신호발생기에서 동축케이블로 전달된 신호가 V_p 의 속도로 전달되어 케이블 끝에 시간 TD 경과 후에 도달한다면 TD 와 V_p 는 다음과 같이 표현된다.

$$TD = \frac{d}{V_p} \quad (1)$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2)$$

여기서 d =TDR의 출력포트에서 동축케이블 끝까지의 거리, c =공기 중에서 빛의 속도(3×10^5 km/sec), k =동축케이블의 상대유전율(relative dielectric constant)이다.

만약 임피던스, Z_t 가 케이블의 임피던스, Z_o 와 일치하면 TDR신호는 완전히 흡수되어 반사파가 발생하지 않는다. 그러나, 만약 Z_t 가 Z_o 와 일치하지 않으면 전달신호의 일부가 반사되어 신호발생기 방향으로 되돌아간다. 반사된 신호는 TDR의 출력포트로 시간 $2TD$ 에 도착하며 오실로스코프를 통하여 케이블 입력부에서의 전체 파형, $V_{in}(t)$,을 관찰할 수 있다. $V_{in}(t)$ 는 신호발생기에서 나가는 계단형 신호(step pulse)와 반사신호의 합이며, $V_{in}(t)$ 의 모양과 지체시간(time delay)으로부터 동축케이블의 변형 양상과 위치, 케이블 끝의 상태를 결정할 수 있다.

동축케이블 선단이 순수히 저항의 변화로 끝나거나 특성 임피던스가 다른 케이블로 연결된 경우에는 (즉, 전류차나 전압차에 의한 L이나 C가 발생하지 않는 경우) 그림 4와 같이 동축케이블 끝부분의 저항(Z_t)에 따라 변화되는 TDR의 파형을 도시할 수 있다. $Z_t=Z_0$ 인 경우, 반사신호가 없으므로 오실로스코프에 나타나는 TDR신호는 변화가 없는 수평선으로 나타난다. 만약 $Z_t>Z_0$ 이면 신호의 증가로 나타나며, $Z_t<Z_0$ 이면 신호의 감소로 나타난다. 반사계수(reflection coefficient; ρ)는 반사신호(reflected pulse; V_r)와 전달신호(incident pulse; V_i)의 비로 정의되므로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} \quad (3)$$

V_r 은 양 또는 음의 값을 가질 수 있으므로 ρ 도 양 또는 음의 값으로 표현될 수 있다. Transmission line 이론에 의하면 ρ 는 케이블과 선단의 임피던스의 함수로 표현되며 (Mooijweer, 1971)

$$\rho = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0} \quad (4)$$

위의 두 식을 조합하여 Z_t 에 대해 정리하면

$$Z_t = Z_0 \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (5)$$

그러므로, $Z_t=Z_0$ 인 경우 $\rho=0$ 이며, 케이블이 완전히 절단된 경우에 해당하는 open circuit일 때는 $\rho=+1$, 케이블이 물에 잠긴 경우처럼 short circuit일 때는 $\rho=-1$ 이다.

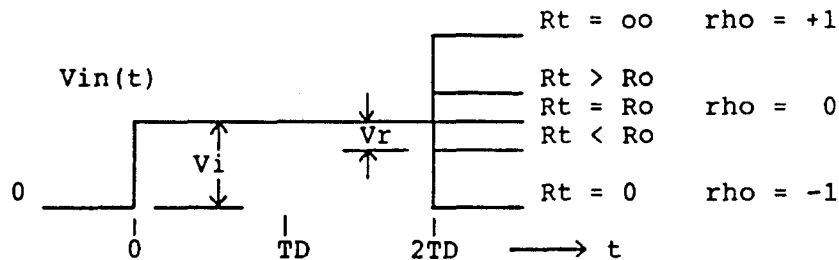


그림 4 케이블 선단부의 저항에 따른 TDR 파형의 변화

2.3 동축케이블 변형에 의한 TDR 파형의 변화

신호발생기로부터 계단형 전압신호(step voltage pulse)가 동축케이블에 전달되면 케이블 임피던스의 변화는 변화가 있는 위치에서 전압의 일부를 반사시킨다. 케이블의 모든 임피던스 변화 위치에서 반사된 신호들은 원래의 입력 전압신호에 중첩되어 TDR 케이블시험기의 화면에 반사신호로 나타난다. 동축케이블의 특성 임피던스가 변하거나, 임피던스가 다른 케이블에 연결되면 그 부분에서 전압신호의 반사가 발생한다. 이러한 반사는 케이블 직경의 국부적 변화, 외도선 상태의 변화, 내도선 위치의 편심, 케이블 주변의 유전특성 변화 등에 의해서도 발생한다.

TDR기술을 이용하여 지반의 변형을 측정시 자주 관찰되는 케이블의 변형은 다음과 같은 2가지가 일반적이다.

(a) 특성 임피던스 Z_0 의 변화로 인한 불연속점 (Type I)

(b) 동축케이블의 Inductance나 Capacitance의 변화로 인한 불연속점 (Type II)

Type I은 동축케이블의 인장이 대표적이며 Type II는 동축케이블의 전단이 발생한 경우에 해당한다. 위에서 언급한 두 가지 경우에 대한 모델링과 상응하는 반사신호는 그림 5와 같이 도시될 수 있다.

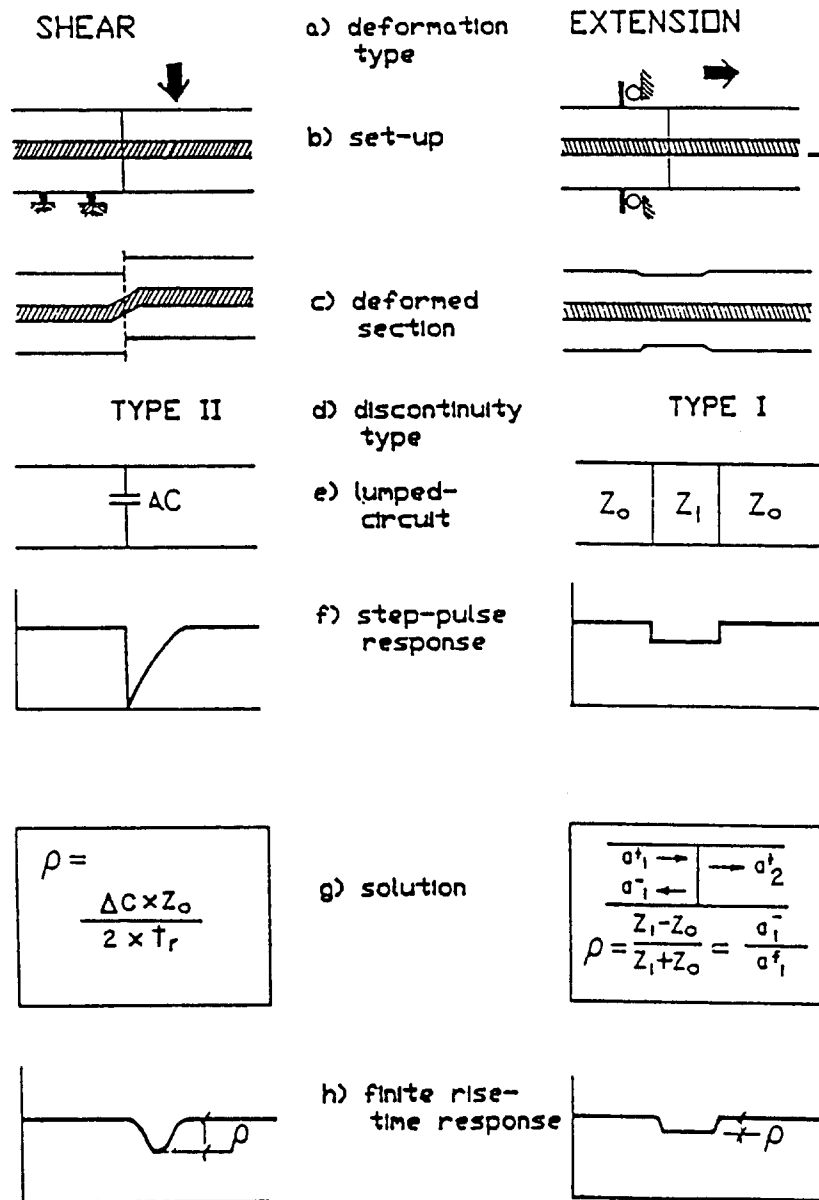


그림 5 Type I과 Type II 변형의 모델 및 반사신호

3. TDR에 의한 지중변형 측정 사례

3.1 Mine in Jefferson County, Illinois

일반적으로 암반이나 지반에서의 굴착으로 인해 응력재분배나 불안정이 유발되었을 때 변위를 관찰하기 위해 TDR을 사용할 수 있다. Reference reflection을 얻기 위해 동축케이블에 일정한 간격으로 crimp를 만든 후 시추공에 설치하고 시멘트로 그라우팅을 실시한다. 암반의 거동으로 인해 그라우트에 fracture가 생기면 동축케이블에 변위가 발생하므로 이를 TDR로 관찰하면 변위의 형태를 구분하거나 변형의 크기를 추정할 수 있다. 그림 6은 케이블에 인장과 전단이 발생하는 경우의 TDR반사신호를 보이고 있다. 케이블이 전단변형을 받으면 반사신호에는 음의 spike가 나타나며 spike의 크기는 전단변형의 크기에 비례한다. 반면 인장변형시에는 구분하기 어려운 trough 모양의 반사신호가 나타나며 케이블의 인장이 증가하면 trough의 길이가 길어진다. 그림에 보이는 바와 같이 전단변형에 의한 반사신호는 변형량이 적더라도 확실히 판별이 되나 인장변형은 파괴 전까지 음의 반사신호는 거의 없고 확실한 판별이 어렵다.

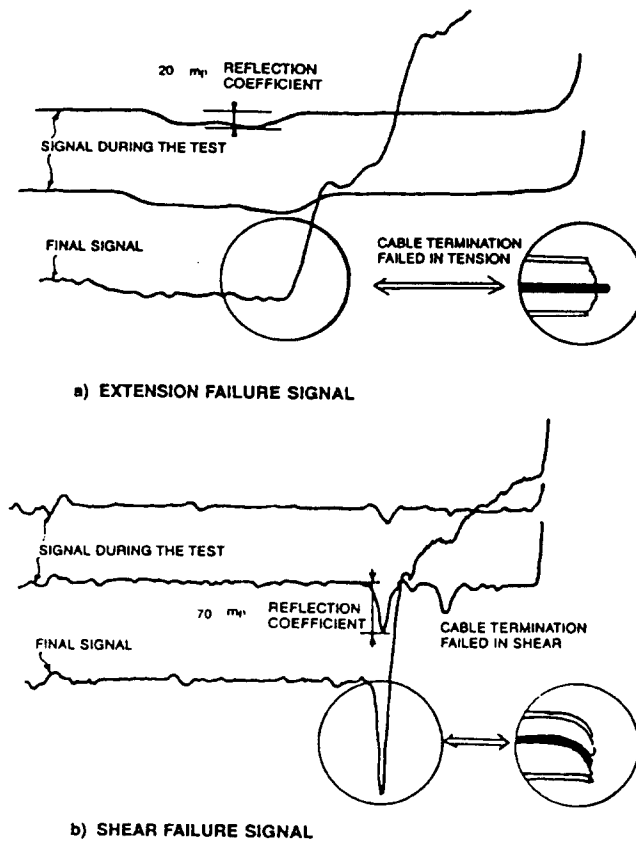


그림 6 변형의 종류에 따른 반사신호의 모양

Kawamura 등(1994)은 미국 일리노이주에 위치한 2개 탄광에서의 채탄중 거동을 파악하기 위해 3개의 시추공에 동축케이블을 설치하여 막장 접근시의 천정부 거동을 모니터링하였다. 이들 탄광은 수천 m²의 panel 전체를 한번에 채탄하면서 서서히 앞으로 진행되는 longwall 방식이기 때문에 막장이 전진하면 굴착된 부분은 무지보 상태가 되어 천정부가 빠른 시간 내에 붕락되면서 수평 및 수직변위가 상부지반으로 전달되어 결과적으로 지표면의 침하를 유발한다. 그림 7은 panel의 중앙에 설치된 TDR로부터 측정된 신호를 지질학적 조건 및 막장진행 상황과 비교한 것이다. 측정된 panel은 182.9m × 1524.0m의 면적으로 지표면에서 220m 지하에 존재하며 길이 208.6m의 동축케이블을 6.1m 간격의 crimp를 만들어 설치하였다. Panel의 막장이 TDR동축케이블 설치위치에 도달할 때까지 60mm 이하의 침하가 발생하였으나 막장이 측정점을 통과하여 30m 진행하였을 때부터 지표침하량이 급속히 증가하였다. 그림에 의하면 막장이 측정점을 통과하여 12.5m 진행하였을 때 지하 35.1m에서 동축케이블의 전단파괴가 발생하였으며 파단점에서의 반사계수는 시간이 경과함에 따라 계속 증가함을 알 수 있다. 그림 8은 동축케이블에서 4.8m 떨어진 곳에 설치된 경사계로 측정된 데이터를 TDR신호와 비교한 것이다. 이 그림에 의하면 경사계의 수평변위로부터 계산한 전단변형이 큰 깊이와 TDR반사계수의 변화가 발생하는 깊이가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 동축케이블의 길이가 100m 이상에서는 신호의 감쇄로 인해 해상도가 떨어지며 상대적으로 인장변형이 커서 해석상의 어려움이 있는 것으로 판단된다.

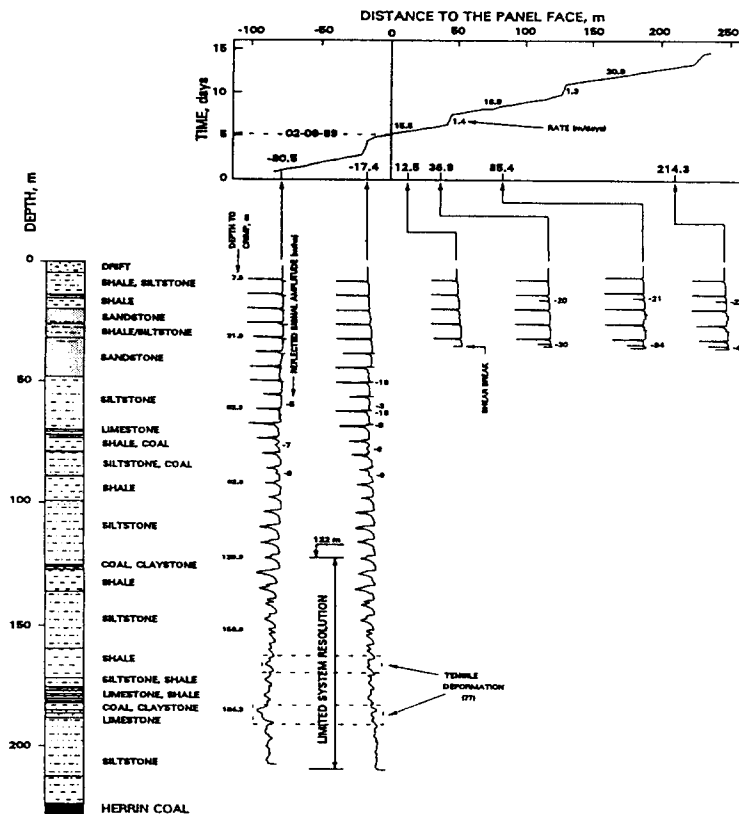


그림 7 막장위치에 따른 TDR신호 변화 (Kawamura, 1994)

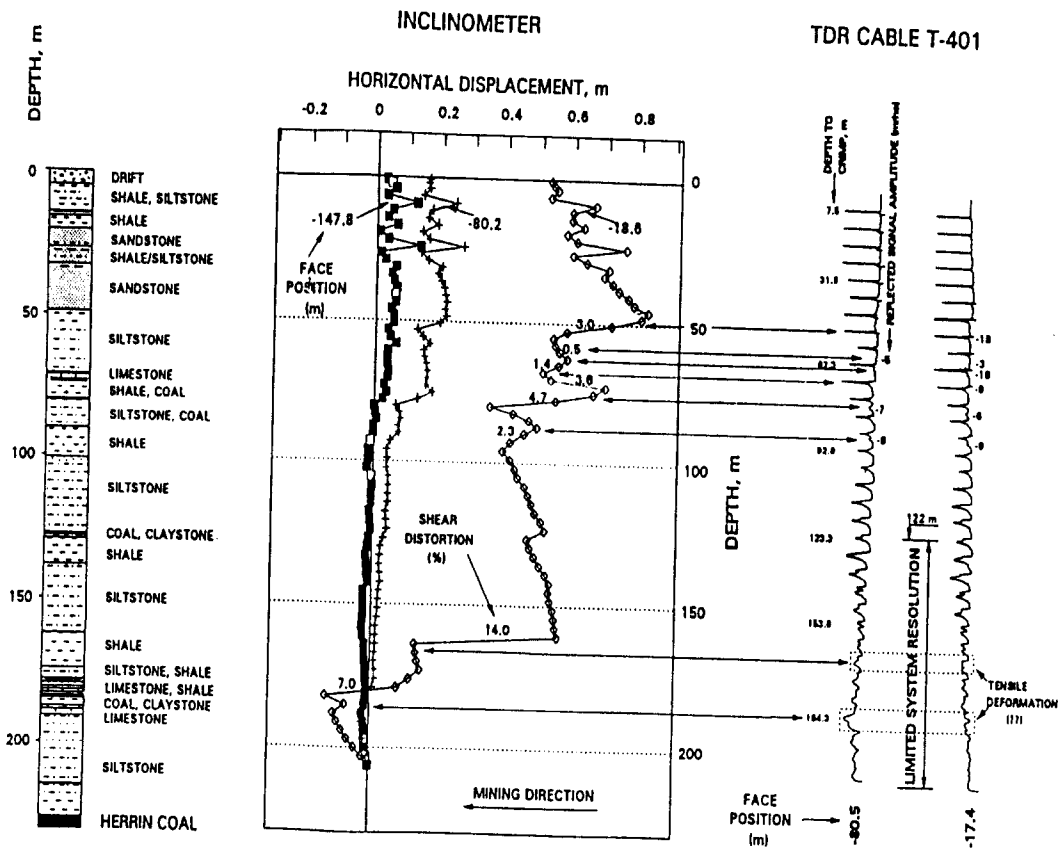


그림 8 경사계와 TDR신호의 비교 (Kuwamura, 1994)

3.2 강원도 고사리 인근 폐광의 변형 측정

3.2.1 TDR 시스템의 구성

3.2.1.1 동축케이블의 설치

본 연구에서는 계측위치에서 소정의 깊이까지 시추후 동축케이블을 삽입한 후 시멘트 몰탈로 그라우팅하여 케이블을 설치하였다. 지상에 노출된 동축케이블의 끝은 low-loss 연결케이블을 따라 분기함(multiplexer box)과 연결되며 분기함은 철도육교의 피어에 설치된 케이블시험기로 연결된다. 케이블과 멀티플렉스 설치 후의 사진은 그림 9 및 10에 나타나 있고, 동축케이블이 설치된 3곳의 위치는 그림 11과 같다. 현장에 설치된 케이블의 종류 및 제원은 표 1과 같고, 동축케이블 및 연결케이블의 길이는 표 2와 같다.

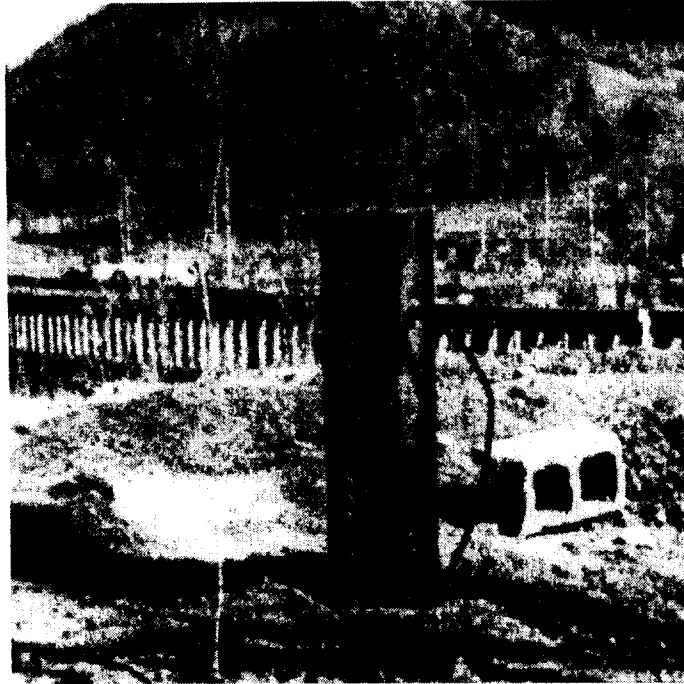


그림 9 TDR 3 (보호관 설치후)

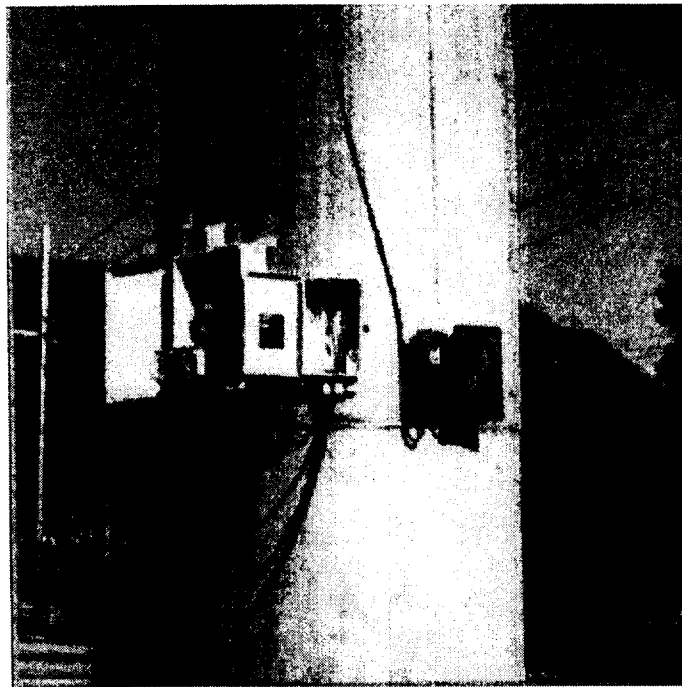


그림 10 멀티플렉스와 TDR본체의 설치

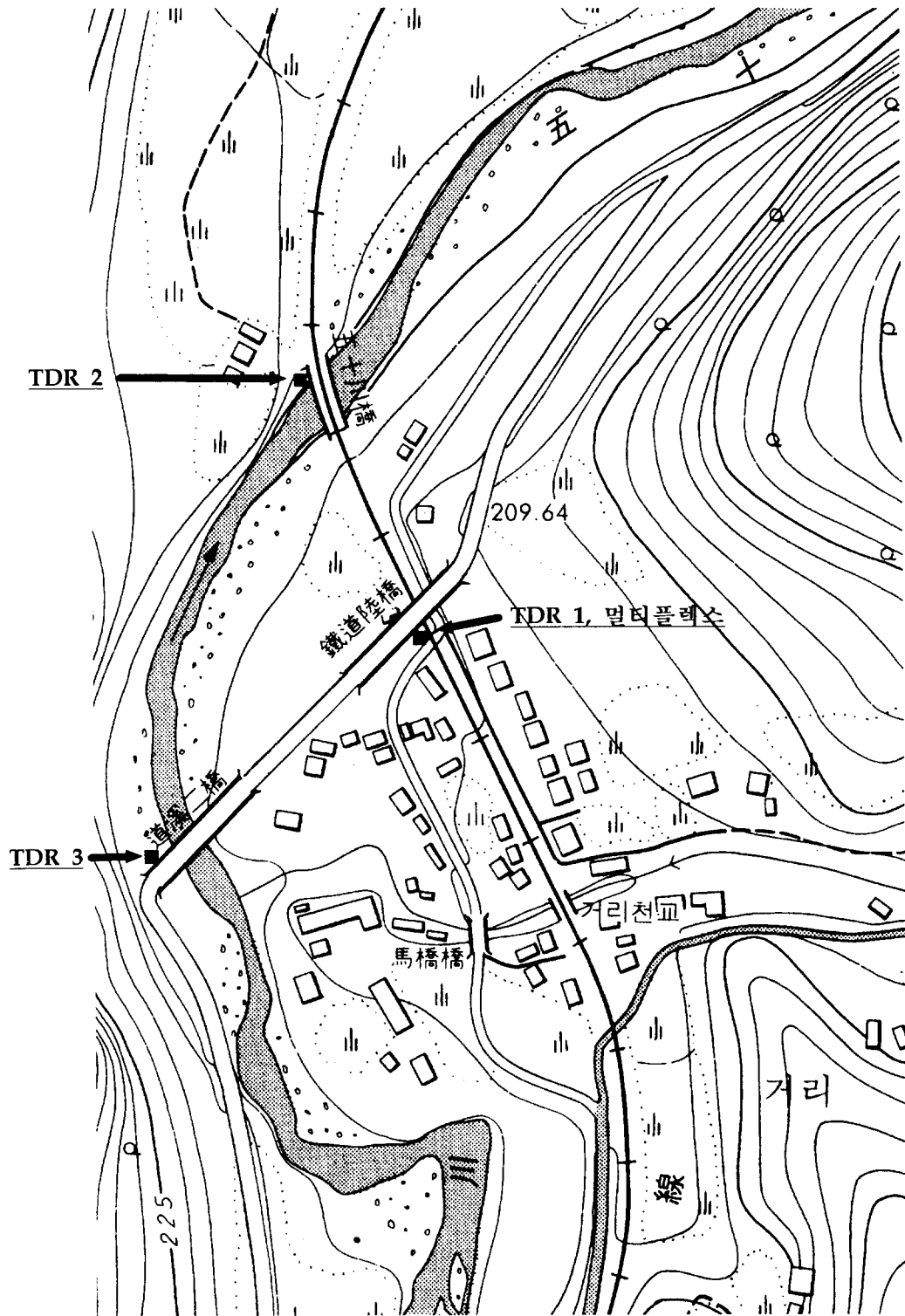


그림 11 TDR 케이블 매설 위치도

표 1 현장에 설치된 동축케이블의 제원

시추공에 설치된 케이블		연결케이블	
모델명	P3-75-875CA	모델명	F1160BEF (RG-11)
내도선 직경	4.93 mm	내도선 직경	1.63 mm
절연재 외경	20.24 mm	절연재 외경	7.11 mm
외도선 외경	22.23 mm	foil shield 외경	7.29 mm
외도선 두께	0.99 mm	Jacket 외경	10.03 mm
Capacitance	50±3.0 nf/km	Jacket 두께	1.07 mm
Impedance	75±2 ohms	Impedance	75 ohms
전달속도	87 %	전달속도	85 %

표 2 TDR 설치위치 및 케이블 길이

ID	TDR1	TDR2	TDR3
설치위치	철도육교	오십천 20교	도계2교
지반에 매설 동축케이블 (875CA)	50.0 m	72.0 m	70.0 m
동축케이블 상단 - multiplexer (RG11)	14.4 m	128.5 m	230.0 m
multiplexer - 케이블시험기 (RG11)	3.0 m	3.0 m	3.0 m
총 케이블 길이	67.4 m	203.5 m	303.0 m

3.2.1.2 TDR시스템

지반에 매설된 3곳의 동축케이블은 multiplexer를 통해 철도육교 피어에 설치된 케이블시험기와 datalogger로 연결되어 있으며 이들은 storage module과 모뎀에 접속되어 있다. 이 시스템은 전기로 작동하므로 전원과 연결되어 있고 모뎀은 전화선과 연결되어 원격측정이 가능하다. 표 3은 고사리 현장에 설치된 TDR관련 장비의 제원이다. 사무실의 컴퓨터는 모뎀을 통해 datalogger 작동을 위한 프로그램을 보내기도 하고 Storage module에 저장된 데이터를 1 ~ 2일에 한번씩 전송받는다. Datalogger에는 PC208E software인 EDLOG로 작성된 프로그램이 내장되어 있어 지정된 시간이 되면 TDR을 작동시켜 반사신호를 측정하고 측정된 신호는 디지털 신호로 바뀌어 storage module에 저장된다. PC208E 프로그램과 모뎀을 이용한 데이터의 회수 방법은 PC208E Support Software Instructional Manual에 상세히 설명되어 있다.

표 3 고사리 현장에 설치된 TDR관련 장비의 용도

장비명	용도
케이블시험기	케이블의 반사신호 측정
communication interface	케이블테스터의 신호를 datalogger에 전달
power control module	케이블 신호기의 power on/off
datalogger	케이블테스터의 on/off 및 반사신호의 측정을 위한 support software의 내장, A/D converter
storage module	측정된 반사신호를 저장하는 장치
모뎀	데이터/프로그램의 원거리 송신이나 수신
multiplexer	여러개의 케이블을 1대의 케이블 시험기로 측정

TDR은 전기/전자공학 분야에서 최초로 개발되어 지반공학 분야에 성공적으로 적용되고 있으나 아직도 데이터의 측정, 수집, 분석과정 등 많은 부분이 수동으로 실시되고 있다. 현장계측의 특성상 지반변형의 징후가 미리 감지되어야 인적/물적 손실을 방지할 수 있으며 변형의 진행을 방지하기 위한 보강 등의 대책을 수립할 수 있다. 주 또는 월 단위로 수동 측정되는 TDR시스템은 짧은 시간에 급격히 변위가 발생하는 경우를 즉시 감지할 수 없어 소기의 계측목적 달성을 할 수 없으며 계측대상이 원거리에 있는 경우 측정을 위해 매번 기술자가 현장을 방문해야 하는 번거로움 및 시간의 낭비가 상당한 제약요인이 된다. 따라서 변형현장의 거동을 수시 또는 정기적으로 관찰하고 원격조정으로 데이터를 수집할 수 있는 자동화 시스템이 필수적이라 판단된다. 그림 12는 설치된 장비의 구성을 도시하고 있다.

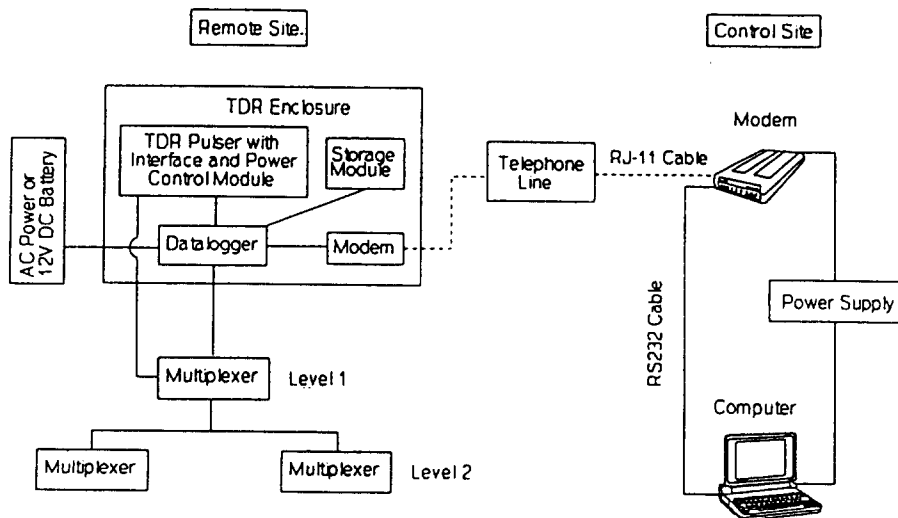


그림 12 고사리 현장에 설치된 TDR시스템의 구성도

3.2.2 측정된 TDR신호의 해석

PC208E의 DataCollection 메뉴로 현장의 storage module에서 회수된 데이터는 그림 3.22와 같이 구성되며, 데이터는 12개의 leading parameter들과 케이블로부터 측정된 251개의 반사신호로 이루어진다. Leading parameter는 처음 12개의 데이터를 말하고 한 window에서 측정된 반사신호에 공통적으로 적용할 수 있는 parameter들이다. Leading parameter의 뒤에 배열된 251개의 데이터는 케이블시험기의 오실로스코프에 나타난 1개 window의 반사신호이며, 만약 케이블의 길이가 길어 반사신호를 여러개의 window로 나누어 읽는다면 그림 13과 같은 데이터 블록은 window수만큼 발생한다.

Parameters	Data
108,1993,76,1450,28.38,13.2,22.7,1,37.5,.01,50,53264,	4064,4074,4122,4017,
4112,4078,4115,4060,4189,4113,4130,4132,4094,4094,4075,4116,4068,4101, 4039,4062,4110,4029,4077,4148,4099,4181,4169,4183,4119,4218,4158,4193, 4165,4179,4151,4160,4173,4110,4174,4182,4179,4165,4157,4163,4161,4171, 4192,4165,4167,4145,4244,4135,4139,4149,4158,4161,4157,4219,4113,4200, 4223,4237,4175,4237,4196,4237,4219,4209,4178,4154,4164,4161,4122,4068, 4133,4099,4100,4129,4189,4124,4176,4175,4174,4080,4153,4122,4128,4094, 4107,4114,4140,4125,4139,4158,4166,4188,4178,4179,4206,4210,4146,4148, 4122,4085,4140,4162,4074,4161,4145,4178,4151,4286,4167,4210,4243,4218, 4238,4244,4254,4213,4240,4177,4191,4166,4125,4174,4160,4168,4180,4211, 4235,4192,4275,4222,4255,4242,4212,4240,4228,4282,4205,4238,4168,4184, 4183,4191,4167,4220,4223,4202,4254,4252,4197,4298,4251,4243,4212,4179, 4152,4183,4189,4082,4167,4140,4180,4173,4260,4200,4209,4185,4198,4209, 4287,4272,4270,4228,4233,4237,4206,4219,4233,4182,4192,4208,4251,4125, 4216,4203,4195,4273,4249,4281,4206,4278,4171,4225,4183,4154,4181,4105, 4169,4189,4169,4180,4148,4229,4195,4276,4191,4189,4251,4214,4273,4176, 4264,4178,4186,4153,4154,4168,4150,4170,4159,4206,4222,4204,4233,4277, 4260,4258,4255,4269,4263,4284,4254,4278,4196,4223,4226,4278,4179,4283, 4274,4294,4286,4276,4252,4246,4329,4267,4309	

Parameter	Meaning	Parameter	Meaning
108	Channel ID number	22.7	module temperature (°C)
1993	Julian year	1	window number
76	Julian day	37.5	cursor distance (m)
1450	hour-minutes	.01	distance between points (m)
28.38	seconds	50	gain (mρ)
13.2	battery voltage	53264	offset
Following the above 12 data keys are the 251 waveform data numbers			

그림 13 TDR데이터의 구조 및 leading parameter settings

그림 13에서 측정시각은 2~5번째 leading parameter에 표시되며 Julian day는 1월 1일부터 누적된 날수, 시간은 0시부터 누적된 분을 말한다. 6~7번 parameter들은 현장에 설치된 측정시스템에 공급되는 직류전원의 voltage와 현장의 온도이다. 8번째 parameter인 window number는 측정된 데이터 블록이 1번째 window의 측정치임을 말한다. 9번 parameter인 cursor distance는 케이블의 37.5m 지점이 window에서 측정된 데이터의 시작점에 해당함을 말하며 10번 parameter는 251개의 반사신호 데이터를 0.01m 간격으로 측정한 것임을 말한다. 따라서 window 1개에서 측정하는 케이블의 길이는 2.5m임을 알 수 있으며 1번 window는 케이블 37.5m~40.0m 지점에서의 반사신호 데이터를 측정한 것임을 알 수 있다. 그러므로 2번 window에서는 케이블 40.0m~42.5m 지점의 반사신호를 측정할 것이고 8번과 9번 parameter는 각각 2와 40.0이 될 것이다. 11번 parameter는 반사신호를 도시하는 y축의 resolution을 결정하는 것으로 주어진 데이터 블록에서는 y축 1칸이 50 mrho에 해당함을 알 수 있다. 12번 parameter는 offset로 뒤의 데이터에 더해 주어야 251개 데이터의 참값이 얻어지며 데이터의 저장시 메모리의 저감을 위한 방법이다. 즉, 첫 번째 신호 4064의 참값은 $4064+53264=57328$ 이다.

회수된 데이터는 NUTSA(Northwestern University TDR Signature Analysis) 프로그램 2.0 버전으로 해석된다. 이 프로그램은 Huang과 Dowding(1994)에 자세한 사용법이 소개되어 있으며 주된 기능은 TDR신호의 display, 시간에 따른 반사계수의 변화, 반사신호의 발생 위치 확인 등이다. 그림 14는 측정된 TDR신호를 NUTSA화면에서 관찰한 것으로 측정시기가 다른 두 신호를 비교하여 반사계수의 증감을 계산하는 과정을 보이고 있다.

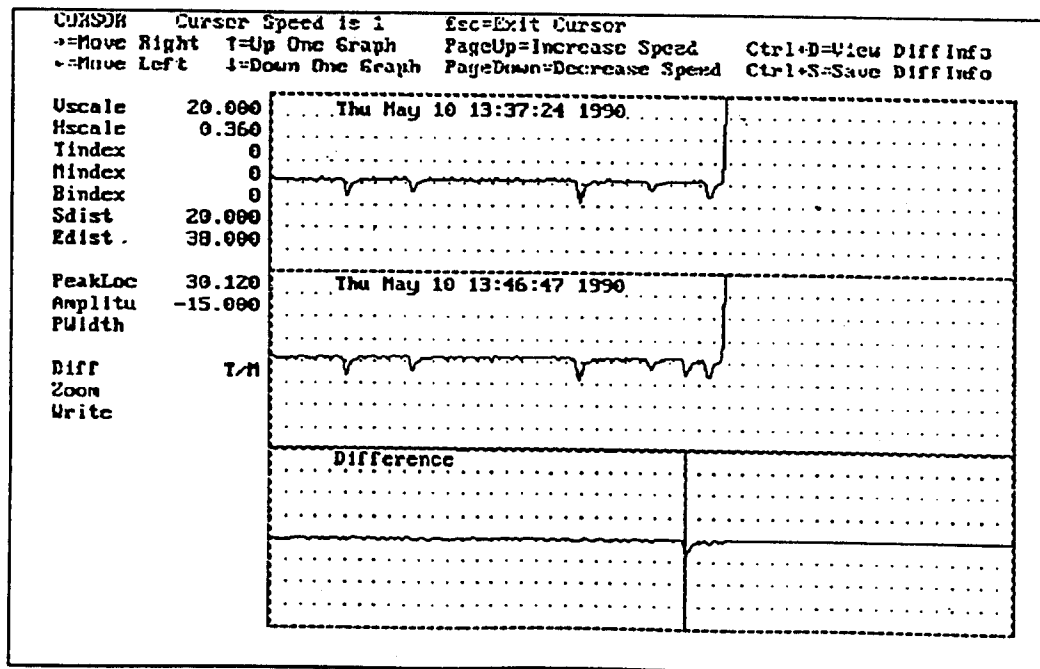


그림 14 NUTSA에 의한 반사신호의 해석

3.2.3 계측 DATA 분석

3.2.3.1 도계 육교 (TDR1)

동축케이블을 매설한 96년 11월 이후부터 측정된 파형은 그림 15에 요약되어 있고, 획득한 DATA를 대상 심도별로 파형분석한 결과는 그림 16과 같다. 또한 파형분석 결과에 의해 변위가 발생한 것으로 예상되는 지점은 표 4에 나타나 있다.

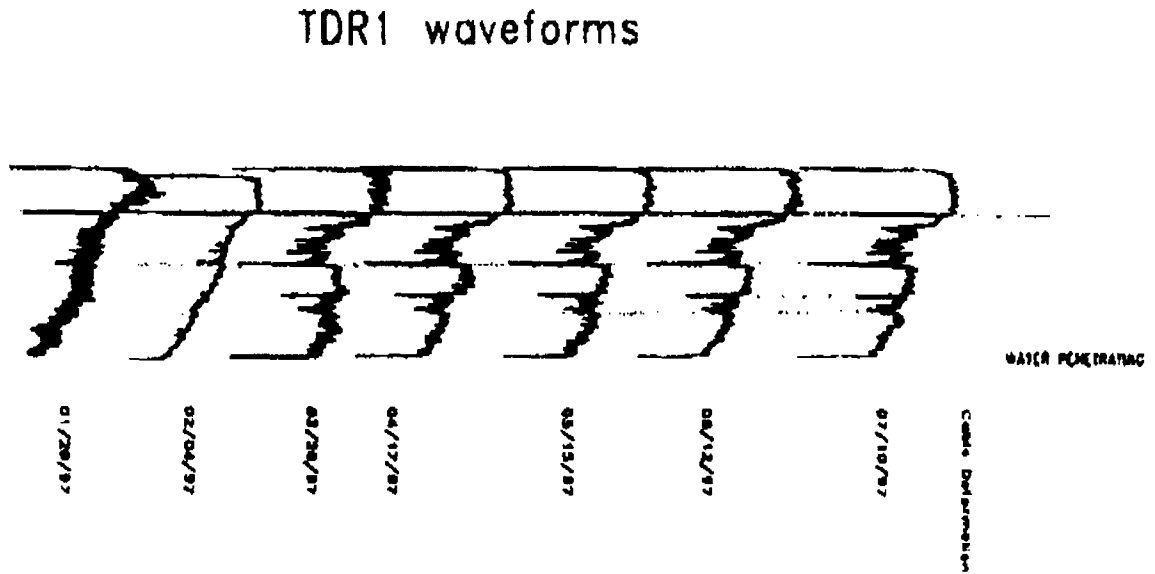


그림 15 TDR1 신호의 기간별 변화

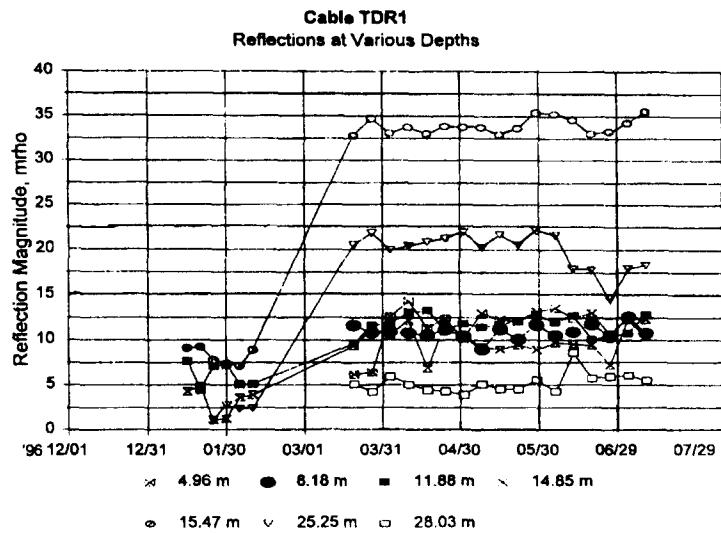


그림 16 TDR1의 심도별 반사계수의 변화도

표 4 TDR1의 변위 발생 지점

깊이(m)	압 질
4.36	사암, RQD=0, 약한 풍화 및 파쇄
4.96	
7.70	경암, 사암, RQD=62, 약한 파쇄
8.18	
9.11	경암, 사암, RQD=60, 8.9m 부근에 석영맥
9.95	경암, 사암, RQD=60, crimp 위치
11.88	경암, 사암, RQD=60, 부분적인 파쇄
13.65	중경암, 사암, RQD=0, 층리발달
14.37	중경암, 사암, RQD=0, 층리발달
14.85	경암, RQD=53, 약한 파쇄
15.47	
25.25	중경암, 사암, RQD=22, 보통풍화
26.95	연암, 셰일, RQD=30, 파쇄상태
28.03	
29.32	경암, 사암, RQD=60, 약한 파쇄
30.03	

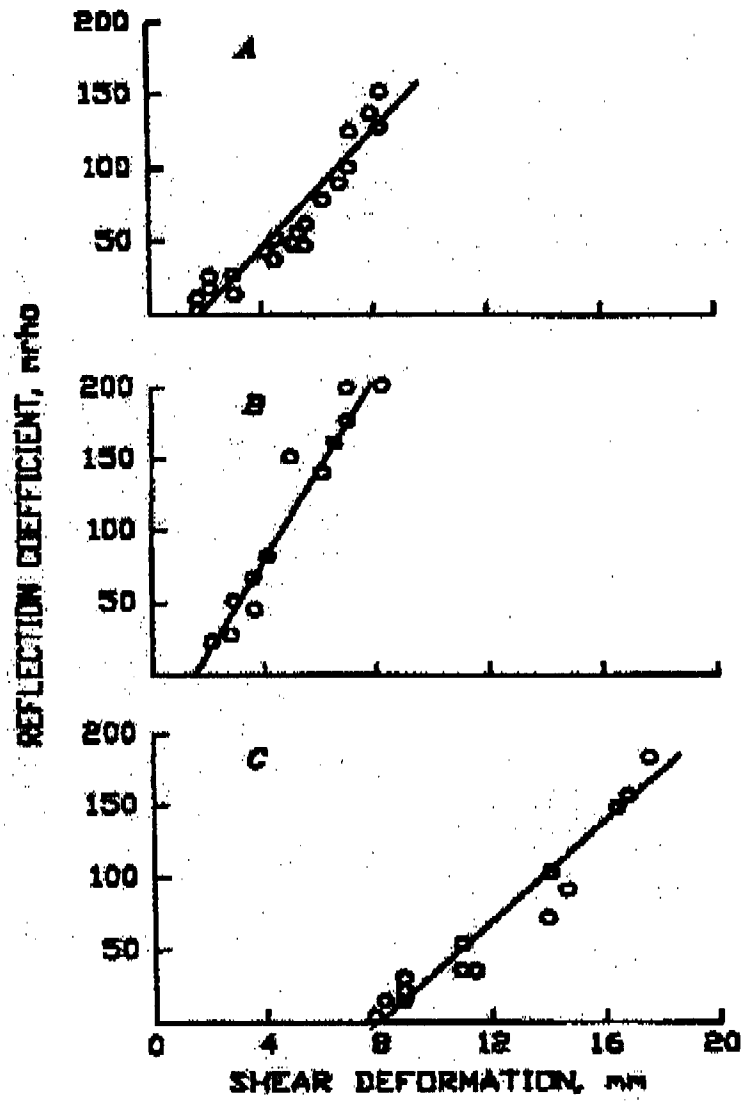
그림 16을 보면, 97년 3월 이후에 측정된 파형은 초기에 얻어진 파형과 형태가 다소 다른 것을 알 수 있고, 특히 -15.47m와 -25.25m 지점에서 다른 점들과는 상이한 양상을 보이고 있으며 현저하게 변위가 일어나고 있음을 예측할 수 있다. -15.47m 지점은 주상도 상에서 함백산층과 장성층의 경계부에 해당하며 그 하부층은 셰일로 구성되어있고, -25.25m 지점은 사암층이고 하부에는 셰일층으로 구성되어있다.

그림 16에 나타난 반사계수로부터 전단변위를 추정하기 위해서 동일한 직경의 동축케이블에 대해서 실내실험을 실시하여 그림 17과 같이 반사계수와 전단변위의 관계를 얻어야 한다. 현장에서는 전단변형외에 반사계수에 영향을 주는 요소가 있을 수 있고, 현장의 조건과 실험실의 조건이 서로 다르기 때문에 그림 17에서 나타난 관계가 정확한 것은 아니지만 대략의 전단변위량을 추정하는데 유용하다. 위에서 나타난 반사계수와 관계로부터 전단변위를 추정해 보면 표 5와 같다. TDR1에서 측정된 대다수 파형의 끝부분이 아래로 급격히 내려가는 것으로 미루어 동축케이블의 끝에 지하수가 침투한 것으로 판단된다. 동축케이블을 매설하기 위한 지반굴착 중 -50m 지점에서 공동이 발견된 것으로 보아 지층분리현상이 발생한 곳에 물이 고여있던 것으로 판단된다.

도계육교 지점에 설치된 TDR1은 시추공과 멀티플렉스가 가깝게 설치되어 다른 두 곳에 비해서 파형의 분석이 용이하고 결과 또한 신뢰도가 높은 것으로 판단된다. 시추공과 멀티플렉스가 가까이 위치하면 연결 케이블의 길이가 상대적으로 작아서 반사파의 산란으로 인한 신호의 감쇄를 막을 수 있고, 고압선등 주변 자기장에 의해 발생하는 noise의 영향이 적다는 장점이 있다.

표 5 반사계수로부터 추정한 전단변위

심도(m)	반사계수(mrho)		차이 (mrho)	추정전단변위
	'97/1/30	'97/3/31 이후		
15.47	8.6	35.0	26.4	9.48
25.25	2.5	21.5	19	8.88



A, 10-mm diameter, B, 10-mm diameter, C, 22-mm diameter.

그림 17 반사계수와 전단변위의 관계

3.2.3.2 오십천20교 (TDR2)

동축케이블을 매설한 96년 11월 이후 현재까지 측정된 파형은 그림 18에 요약되어있다.

TDR2 waveforms

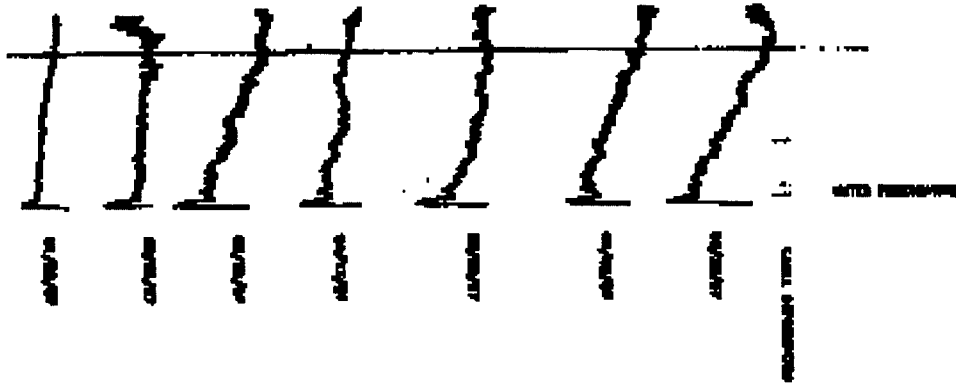


그림 18 TDR2 신호의 시간별 변화

위의 그림에서 보는 바와 같이 오십천20교에 설치된 TDR시스템에서는 해석이 용이하지 않은 파형이 측정되었다. 이는 그림 11의 케이블 매설 위치도에 나타난 바와 같이, 동축케이블 매설위치와 멀티플렉스와의 거리가 약 129m 가량으로 비교적 원거리일 뿐 아니라, 두 지점 사이에 통과하는 영동선 전철에서 발생하는 전자기파의 영향에 의해 심한 noise가 발생했기 때문으로 추정된다. 연결케이블이 길어지면 반사파의 산란효과로 TDR신호의 감쇄가 발생한다. 연결케이블로 사용된 RG11은 피복이 절연체로 되어있으나 고압선등 주변의 강력한 자기장에 의해 영향을 받을 수 있다.

측정된 파형에서 -44.4m와 -65m지점에서 반사파가 감지되므로 이 부분에서 변형이 있는 것으로 추정된다. TDR2에서 변위가 발생한 것으로 예상되는 지점은 표 6에 정리된 바와 같다.

표 6 TDR2의 변위 발생지점

깊이(m)	암 질
44.4	실트스톤, 연암, 높은 파쇄, RQD=17
65.0	사암과 셰일의 경계, RQD=0~37, 보통파쇄

3.2.3.3 도계2교 (TDR3)

동축케이블 매설이후부터 측정된 파형을 깊이별로 파형분석한 결과가 그림 19에 나타나 있다. 도계2교에 설치된 TDR은 동축케이블의 선단이 멀티플렉스와 약 230m 가량 떨어져 있는 등 오차요인으로 해석이 용이하지 않은 파형을 보이고 있다. 파형분석 결과 -27.47m, -38.15m, -69.71m에서 변위가 발생한 것으로 추정된다. -27.47m지점은 절리가 발달된 사암층으로 집토가 충전되어 있으며, -69.71m지점은 사암과 셰일의 경계부에 해당한다. 변위가 발생된 것으로 추정되는 위치와 암질은 표 7에 나타나 있다.

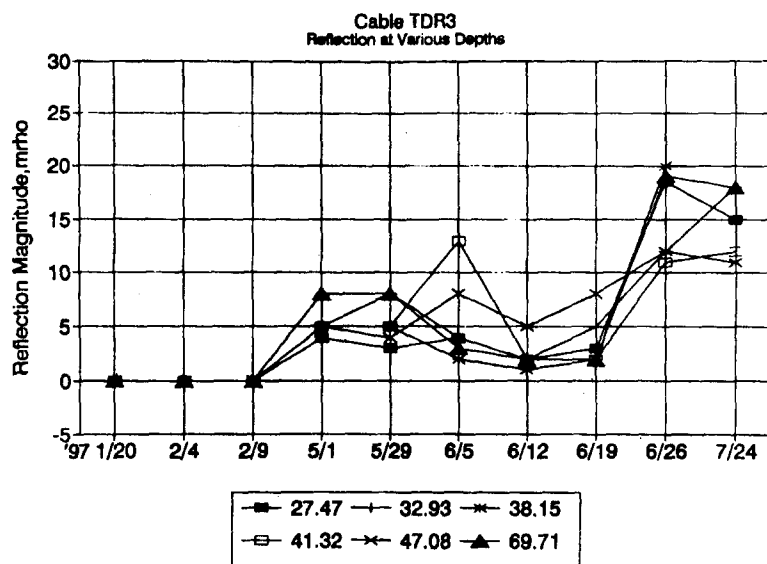


그림 19 TDR3의 각 심도별 반사계수의 변화도

표 7 TDR3의 변위 발생 지점

깊이(m)	암 질
27.47	경암, 사암, RQD=36, 약한 파쇄
32.93	경암, 사암, RQD=48, 약한 파쇄
38.15	경암, 사암, RQD=90
41.32	경암, 조립질사암, RQD=45, 약한 파쇄
47.08	중경암, 세립질사암, RQD=0, 층리발달
69.71	사암과 셰일의 경계부

4. 결론

TDR을 이용한 지반변형의 외국 및 국내의 측정사례를 검토한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

가. 고사리지역의 폐광에 설치한 TDR케이블의 반사신호에 의하면 지반의 전단변형이 발생하는 위치 및 변형의 증가를 알아낼 수 있었으나 지반의 인장변형 여부는 확실히 알 수 없었다. 그러나 비슷한 역할을 수행할 수 있는 기존의 계측장치에 비해 설치 및 운용비용이 저렴하므로 향후 기존 계측장비의 보완 및 대체의 용도로 널리 사용될 전망이다.

나. Multiplexing system, 모뎀, datalogger control program을 이용하여 임의의 시간에 사무실에서 원격측정 및 무인 데이터의 수집이 가능하므로 변형의 발생을 빠른시간내에 파악하여 대책을 강구할 수 있다. 따라서 계측인력의 정기적인 접근이 용이하지 않은 오지나 원격지에 위치한 구조물의 계측에 효율적으로 사용될 것으로 판단된다.

5. 감사의 글

강원도 고사리지역 정밀계측조사의 일부를 본논문에 인용하도록 허락하여 주신 석탄산업합리화사업단 관계자 여러분께 감사드립니다.

6. 참고문헌

- 석탄산업합리화사업단, 1996, 통리지역 지반침하 정밀계측조사보고서, 기술총서 96-10, 169p.
- 석탄산업합리화사업단, 1997, 고사리지역 정밀계측조사, 기술총서 97-05, 180p.
- Andrews, J. R. 1994. Time Domain Reflectometry, Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Illinois, pp. 4-13.
- Campbell Scientific, Inc. 1992b. CR10 Measurement and Control Module Operator's Manual. Logan, UT.
- Campbell Scientific, Inc. 1992c. PC208 Datalogger Support Software Introduction Manual, Logan, UT.
- Dowding, C. H., M. B. Su, and K. M. O'Connor. 1989. Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 22., No. 1, pp. 1-23.
- Dowding, C. H., M. B. Su, and K. M. O'Connor. 1988. Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 25., No. 5, pp. 287-297.

- Huang, F. C., K. M. O'Connor, D. M. Yurchak, and C. H. Dowding. 1993. NUMOD and NUTSA: Software for Interactive Acquisition and Analysis of Time Domain Reflectometry Measurements, I.C.9346, U.S.Bureau of Mines, Washington, D.C., 42p.
- Kuwamura, N., R. A. Bauer, B. B. Mehnert, and D. J. Van Rosendaal. 1994. TDR Cables, Inclometers and Extensometers to Monitor Coal Mine Subsidence in Illinois, Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Illinois, pp. 528-539.
- O'Connor, K. M. and C. H. Dowding. 1984. Application of Time Domain Reflectometry to Mining. Proceedings of 25th Symposium on Rock Mechanics, Northwestern University, Evanston, Illinois, pp.737-746
- O'Connor, K. M. and T. Zimmerly. 1991. Application of Time Domain Reflectometry to Ground Control in Potash Mining. Proceedings of the 10th International Conference on Ground Control in Mining. West Virginia University, Morgantown, WV., pp.115-121.
- Tektronix. 1989a. 1502B Metallic Time Domain Reflectometer Operator Manual, Beaverton, OR.
- Wade, L. V. and Controy, P. J., 1980. "Rock Mechanics Study of a Long Wall Panel", Mining Engineering , December, pp.1728-1734.