

지반변형측정을 위한 TDR기술의 적용

Application of Time Domain Reflectometry to the Monitoring of Ground Deformation

이우진* · 김용진** · 이원제*** · 이웅주****

Lee, Woo-Jin · Kim, Yong-Jin · Lee, Won-Je · Lee, Woong-Joo

Abstract

Time Domain Reflectometry, or TDR, is a remote sensing electrical measurement technique that has been used for many years to determine the spatial location and nature of various objects, especially in the United States of America and Australia at mining industry. Since early on 1990, the TDR techniques have been applied to the geotechnical engineering such as : deformation measurement of rock slope and landslide, monitoring of ground water content and ground water level change, investigation of ground contamination and its movement. The first application of this technique, in 1996, to the domestic area is to determine the possibility of ground settlement caused by subsidence from abandoned underground mines at the Tongri and Gosari in Gangwon-d. In this paper, through the results of analysed deformation data between conventional measurements and the TDR, it was concluded that the TDR technique is a useful instrumentation method for the prediction of ground deformation.

Keywords : TDR, ground deformation, abandoned underground mines, remote sensing technique

요 지

TDR기술은 원격감지식 전기적 측정기술로서 여러 가지 물리적 변화량에 대하여 그 변화위치와 상태를 결정하는데 이용되어 왔으며, 미국과 호주 등지의 광산에서 주로 적용되던 TDR기술은 90년대 초반부터 토목공학에 응용되기 시작하였으며 산사태나 암반사면의 변형 파악, 지반의 함수비 변화 모니터링, 지반 오염물질의 종류 및 이동경로의 추정, 지하수위의 변동측정등에 사용되고 있다. 국내에서는 1996년부터 강원도 통리지역, 고사리 일대 등에 산재한 채굴적의 붕락으로 인한 지반침하의 가능성을 판단하기 위해 TDR을 설치/운용한 것이 우리나라 토목분야에서의 최초 적용사례이다. 본 논문에서는 강원도 태백시 추진지역 일대에서 기 개발된 석탄채굴적에 의한 철도선로, 터널 및 도로 등의 변형 안정성을 분석키 위해 TDR기술을 적용한 결과로부터 지반변형 계측기법으로서의 TDR기술의 활용성을 고찰하였다.

주요어 : TDR 기술, 지반변형, 폐광, 원격감지기술, 계측

* 정희원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

** (주)나우이엔지 대표이사

*** (주)도화지질 이사

**** 석탄산업합리화사업단 부장

1. 서론

TDR(Time Domain Reflectometry)은 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 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, 꺾임 등의 변형을 감지할 수 있다.

TDR기술은 원격감지식 전기계측기법으로서 원래 전기송전선이나, 전화선, 광케이블이 파손된 경우 그 위치를 파악하기 위해 개발된 기술이다. Fellner-Feldegg(1966)는 TDR로 화학적 용매의 유전특성(dielectric property) 변화를 측정하는 방법을 최초로 소개하였다. 그 후 많은 토질관련 연구자들도 지반에 매설된 탐침으로부터 반사신호의 진폭을 측정함으로써 흙의 전기전도도(electric conductivity)와 체적함수비(volumetric water contents)를 측정하는데 TDR을 이용하기 시작하였으며, Topp등(1980)은 실내실험을 통해 여러 종류의 흙에 대해 유전율(dielectric constant)과 체적함수비 사이의 관계를 제안하였다. Topp(1985)는 지반에 매설된 탐침을 이용하여 wetting front의 위치를 결정하는데 TDR기술을 이용하였으며, Topp등(1989)은 동축케이블(coaxial cable)과 여러 가지 종류의 탐침을 이용하여 물과 공기의 경계면을 측정하였다. 최근에는 핵폐기물이 저장된 지하구조물 인근 지반의 온도변화, 또는 지반이나 지하수의 오염물질의 종류를 알아내고 이동양상을 추적하는데 필요한 TDR기술의 개발에 많은 연구가 진행되고 있으며 포장구조물 하부에서의 함수비 변화를 지속적으로 모니터링하는 방법으로도 응용되고 있다.

기체굴착에 의한 대규모의 채탄이 실시되는 미국, 캐나다, 호주의 탄광에서는 채탄전후의 상부지반의 거동을 파악하기 위해 오래전부터 TDR을 사용하면서 독자적으로 TDR시스템을 개발하고 있다. O'Connor등(1984)이 지반에 동축케이블을 매설하여 TDR로 암반의 파괴위치를

파악하려고 시도하여 좋은 결과를 얻었으며, 근래에는 폐광의 붕락으로 인한 상부구조물의 변위를 관찰하기 위해 TDR이 이용되는 경우도 증가하고 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 동축케이블에 발생한 전단변형의 절대적인 크기를 정확히 알기는 힘들다는 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 있으므로 지반변형의 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 있으므로 산사태나 암반사면의 거동을 조기에 포착하여 보강대책을 강구하거나 피해를 최소화 할 수 있는 경제적인 기술로 많이 활용될 전망이다.

미국과 호주 등지의 광산에서 주로 적용되던 TDR기술은 90년대 초반부터 토목공학에 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, 고사리 일대 및 화전지역 등에 산재한 채굴적의 붕락으로 인한 지반침하의 가능성을 판단하기 위해 TDR을 설치/운용한 것이 우리나라 토목분야에서의 최초 적용사례이다. 이우진 등(1998)은 강원도 고사리 인근 폐광의 변형을 TDR기술로 측정기 위해 철도육교에 1개소, 교량인근에 2개소 등 3개소에 동축케이블을 설치하고 원격측정방법으로 지반의 전단변형이 발생하는 위치와 변형의 증가를 분석한 바 있다.

본 논문에서는 강원도 태백시 추전지역 일대에서 기 개발된 석탄채굴적에 의한 철도선로, 터널 및 도로 등의 안정성을 분석기 위해 시행한 일반계측 및 TDR기술에 의한 지반변형 계측결과를 비교 분석함으로써 TDR기술의 토목분야에의 적용사례를 고찰하고자 한다.

2. TDR시스템의 구성

지반변형의 측정을 위한 시스템은 TDR 케이블시험기(cable tester)와 동축케이블(coaxial cable)로 구성되며 그림 1과 같이 설치된다. 케이블 중간의 잘록한 부분은 반사신호의 발생위치를 정확하게 알기 위해 인위적으로 설치하는 기준점이며, 케이블은 그라우트케이블과 묶여 시추공 내에 삽입하며 소요강도의 시멘트 페이스트로 시추공과 케이블 사이를 채운다. 현재 시판되고 있는 TDR 케이블시험기는 약 6가지 종류가 있으며 그림 2는 그 중 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 반사계수(reflection coefficient)의 변화로 케이블시험기의 오실로스코프에 나타난다. 전달신호와 반사신호의 시간차를 알면 케이블의 변형위치를 결정할 수 있으며 반사신호의 발생시간 및 반사계수의 부호, 길이, 크기는 변형의 위치, 종류, 손상정도

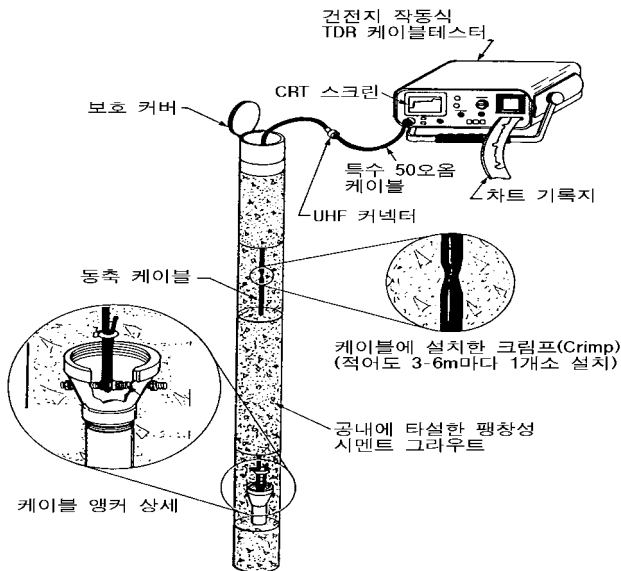
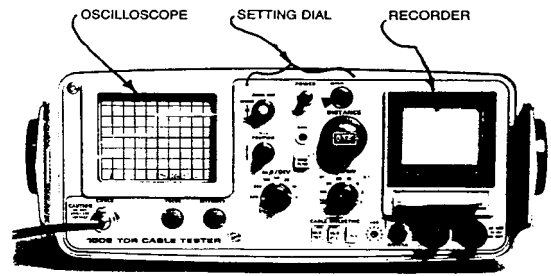
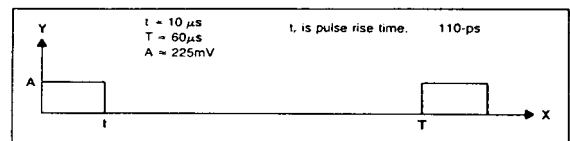


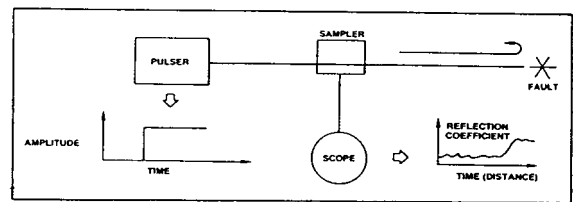
그림 1. 지반변형 측정을 위한 TDR시스템의 설치도



(a) TEKTRONIX 1502 TDR CABLE TESTER



(b) NOMINAL TIME DOMAIN WAVEFORM



(c) OPERATING PRINCIPLE

그림 2. TDR 케이블시험기의 작동원리

3. TDR 파형변화의 원리

3.1 동축케이블 선단조건에 의한 파형의 변화

TDR과 동축케이블로 지반의 변형을 측정하는 장치는 그림 3과 같은 시스템으로 도시할 수 있다. 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_0)는 신호발생기의 임피던스(Z_g)와 일치하도록 ($Z_0=Z_g$) 하는 것이 일반적이다. 동축케이블의 끝은 임의의 임피던스(Z)가 달린 것으로 표현된다.

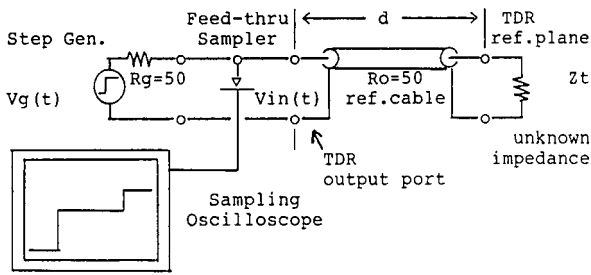


그림 3. Coaxial TDR의 시스템 Configuration

신호발생기에서 동축케이블로 전달된 신호가 V_p 의 속도로 전달되어 케이블 끝에 시간 TD 경과 후에 도달한다면 TD와 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(3×10^8 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 변형양상과 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. $Z_t=Z_o$ 인 경우, 반사신호가 없으므로 오실로스코프에 나타나는 TDR신호는 변화가

없는 수평선으로 나타난다. 만약 $Z_t > Z_o$ 이면 신호의 증가로 나타나며, $Z_t < Z_o$ 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,

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

위의 두 식을 조합하여 Z_t 에 대해 정리하면,

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

그러므로, $Z_t=Z_o$ 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.

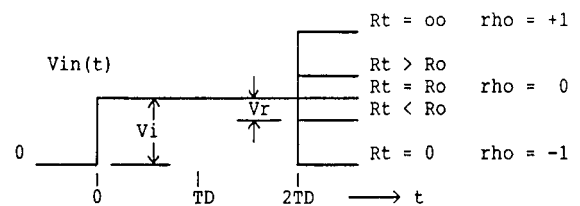


그림 4. 케이블 선단부의 저항에 따른 TDR 파형의 변화

3.2 동축케이블 변형에 의한 파형의 변화

신호발생기로부터 계단형 전압신호(step voltage pulse)가 동축케이블에 전달되면 케이블 임피던스의 변화

는 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 같다.

암반이나 지반에서의 굴착으로 인해 응력재분배나 불안정이 유발되었을 때 변위를 관찰하기 위해 TDR을 사용할 수 있다. 암반에 거동이 발생하면 동축케이블에 변위가 발생하므로 TDR에 나타난 신호를 분석하여 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 전단 변형에 의한 반사신호는 변형량이 적더라도 확실히 판별이 되나 인장변형은 파괴 전까지 음의 반사신호는 거의 없고 확실한 판별이 어렵다.

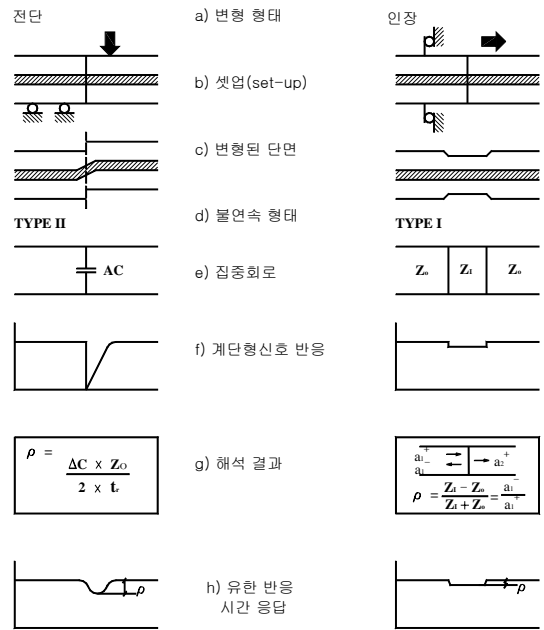


그림 5. Type I과 Type II 변형의 모델 및 반사신호

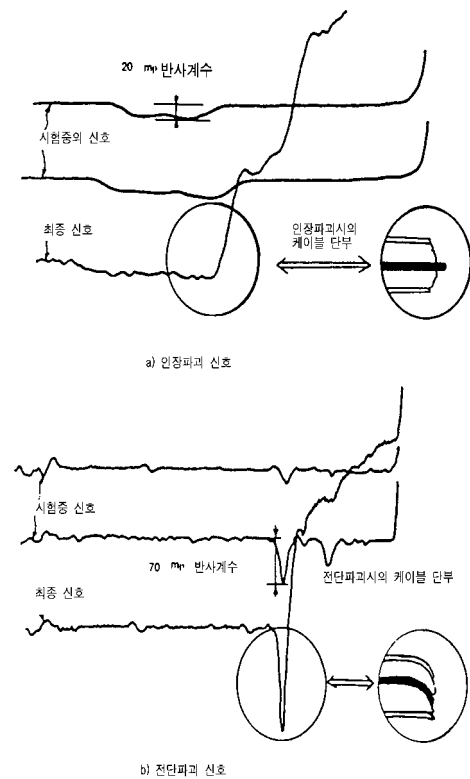


그림 6. 변형의 종류에 따른 반사신호의 모양

4. 측정대상지역 및 TDR설치

4.1 측정대상지역과 지질구조

강원도 태백시 화전동 추전지역 일대에서 기 개발된 석탄채굴적에 의한 철도선로, 터널 및 도로 등의 침하에 대한 안정성 분석 및 보강하기 위하여 1998~1999년 석탄산업합리화사업단에서 시행한 계측분석결과의 일부분이며 위치도는 그림 7과 같으며, 측정대상구역의 일반적인 지질구조는 표 1과 같다.

본 지역은 단층과 습곡작용에 의해서 복잡한 지질구조를 가지고 있으며, 탄층은 사동통내 장성층에 2~3매의 윤회층으로 얇은 판상으로 협재한다. 주가행 탄층은 중탄층으로 평균탄폭 1~3m이며 부광대는 5~10m에 이르는 곳도 있다. 지질구조 및 과업목적에 따라 전체구역을 6개 구간으로 분할하였는데, 어룡저탄장, 추전정차장 구간에서는 비교적 지표 가까이까지 탄층이 나타나고 있으며, 태백선

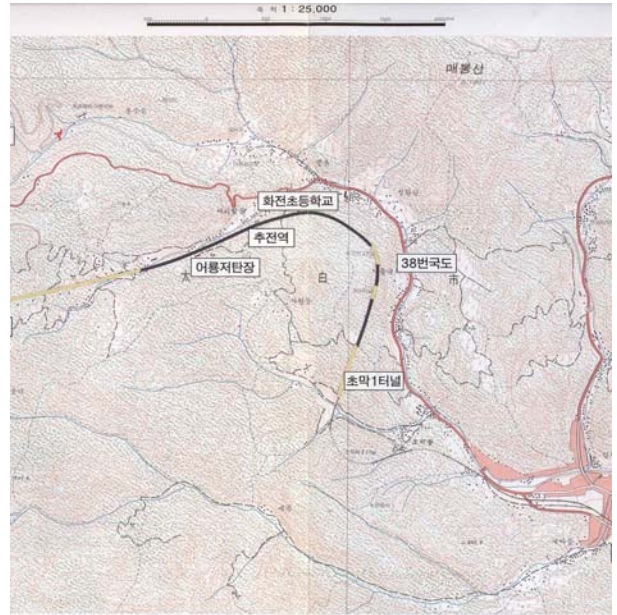


그림 7. 사업지구 위치도

표 1. 측정대상구역의 지질구조

지질시대		지층명		두께(m)	비 고
중생대	트라이아스기	녹암통	동고층	600	<ul style="list-style-type: none"> 담록색 또는 자색의 사암과 녹색 또는 자색 셰일로 구성 사암은 장석질 및 석회질이며 곳에 따라 석탄질 렌즈가 협재
			고생대	페름기	고방산통
도사곡층	250~350	<ul style="list-style-type: none"> 주로 유백색~담록색의 조립내지 극조립 사암과 회색~녹회색 셰일의 협층 구성 상부에 담홍색 조립 사암, 자색 셰일 및 회록색 사질 셰일이 협재 			
함백산층	70~250	<ul style="list-style-type: none"> 주로 유백색~담회색 조립 사암으로 구성 두께 2~3m의 흑색 셰일 및 사질 셰일이 간간히 협재 곳에 따라 기저에 역질 사암 분포 			
고생대	석탄기	사동통	장성층	80~150	<ul style="list-style-type: none"> 암회색 사암, 흑색 셰일 및 석탄층으로 이루어진 4~5조의 윤회층으로 구성 하부로부터 3~4번째 윤회층내의 석탄층이 주가행 탄층임
			금천층	50~100	<ul style="list-style-type: none"> 암회색 내지 흑색 셰일과 암회색 세립 사암으로 구성 암회색 석회암이 렌즈상으로 협재 연속성이 불량한 석탄층이 2~3매 협재
		홍점통	만항층	250~300	<ul style="list-style-type: none"> 주로자색, 녹회색 혹은 담록색의 셰일과 담록색~녹색 또는 담회색의 중립~극조립 사암으로 구성 렌즈상의 석회암이 3~4매 협재
오르도비스기	대석회암층	막동석회암층		<ul style="list-style-type: none"> 상부는 회색 내지 암회색 석회암으로 구성 돌로마이트가 중간협재 	

곡선구간과 초막 1터널부근, 화전초등학교 하부에서는 갱내도 상으로 볼 때 넓은 지역에 걸쳐 상당한 양의 채탄작업이 진행된 것으로 판단된다. 대부분의 탄층은 지질구조(습곡, 단층 등)와 같이 20~50 로 완경사와 급경사가 반복하여 나타나고 있다. 탄층의 폭은 주로 습곡작용에 영향을 받아 부광대(富鑛帶)와 빈광대(貧鑛帶)로 구분된다. 어룡저탄장 구간은 탄층이 급경사(50)를 이루며 지표 가까이 발달하고 있고, 추전정차장(B)구간은 하부에 탄층이 완만한 경사를 이루며 부존하고 함백산대단층과 상원단층에 의해 서쪽(정암터널측)경계가 구분되어지고 있다. 태백선 곡선구간은 전체적으로 탄층의 경사는 완만하나 산측옹벽하부에는 두터운 층(10m)이 발달하여 채탄작업이 집중적으로 이루어졌다. 화전초등학교앞 38번 국도 구간은 정도가 완만한 경사로 넓게 발달하였다. 초막 1터널 구간에서는 터널하부 50m까지 갱도가 나타나고 있으나 봉락식 채탄법으로 채탄하였을 경우 실제로는 철도하부 20~30m 정도까지 채탄작업이 진행된 것으로 판단된다. 또한, 탄층은 경사 50~70 정도의 급경사를 형성하고 있다.

4.2 TDR 설치

본 측정에서는 미국의 Comm Scope General Instrument 사 제품인 P-3 75-875CA가 동축케이블로 사용되었으며 제원은 표 2와 같다.

표 2. 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 %

지반침하의 징후와 양 등을 파악하기 위하여 지표 침하판, 경사계, 일점침하계, 다점지중침하계, 균열측정기,

TDR, 내공변위계 등이 설치되었으나 TDR은 태백선 곡선부 3개소 추전터널전방, 막수터널전방, 초막 1터널 전방 및 내부, 화전초등학교 운동장에 각 1개소가 설치되었다. TDR의 설치심도 및 특기사항은 다음 표 3과 같다.

표 3. 설치심도 및 특기사항

구역	No.	깊이 (m)	비고
태백선곡선부	T-1	54	-설치시 지하 18m 파쇄대
	T-2	60	-58m 지점 1.5m 두께의 공동
태백선곡선부~추전터널전방	T-3	75	-56m 천공시 지하수출현, 56m 이후 sol상태의 탄이 차오름
추전터널전방~추전터널	T-4	75	-80m 천공하였으나, 점토와 지하수 유입으로 75m까지 설치
추전터널~막수터널구간	T-5	65	-
초막 1터널전방 옹벽~초막 1터널	T-6	70	-
화전초등학교앞 38번국도	T-7	85	-도로하부 60~98m 탄층개발 -38번 국도침하로 몇차례 보정
초막 1터널	T-8	25	-탄층심도 철도하부 25~30m -터널라이닝에 균열 및 누수

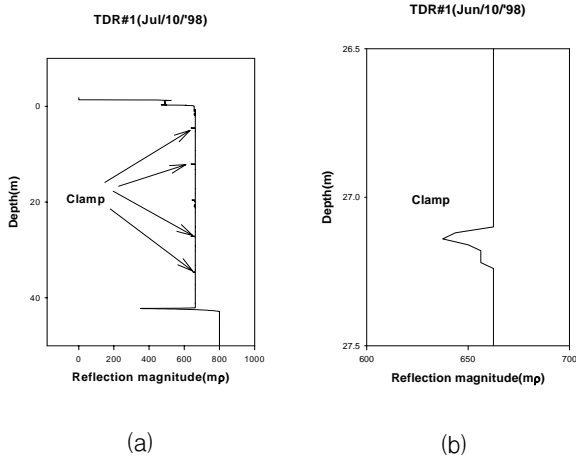
이상에 표기한 계측점 중에서 인접하여 설치한 일반계측 결과와의 비교가 가능하고 측정결과가 상대적으로 명확하게 분석된 T-1, T-2 및 T-5의 자료를 이용하여 지반 변위에 대한 분석을 고찰하였다.

5. 측정 결과 및 분석

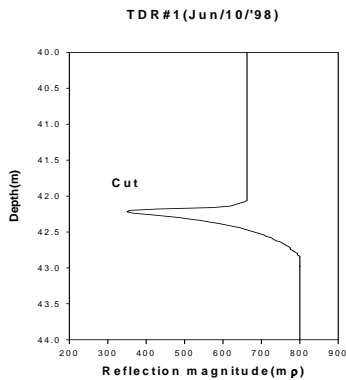
5.1 동축케이블 변형의 일반적 형태

그림 8은 T-1의 초기계측결과를 나타내고 있다. 설치 직후는 지반의 변동을 아직 나타내지 않고 있으나 그림에서는 Clamp부분의 신호가 감지되고 있다. 이것은 전기신호에 의하여 변화가 발생하는 부분을 검증하는 기술이므로 일종의 기준점을 만들기 위하여 매10m마다 표기를 한 결과를 반영하고 있다. Clamp표기는 일종의 인장변형을 나타내므로 그림 8(b)에서 보는 것과 같은 계단(step)형 신호를 나타내는 것으로 그림 6(a)에서 보여주는 것과 같은

신호임을 증명하고 있다. 한편 그림 8(c)는 동축케이블의 절단부분에서의 신호변화를 나타내는 것으로서 절단시에 전단이 발생하므로 그림 6(b)와 같은 신호양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) (b)



(c)

그림 8. T-1의 계측결과

5.2 태백선 곡선부

그림 9는 측정후 약 1년이 경과한 후의 신호를 비교한 것으로서 절대값의 차이는 있으나 기준점으로 비교해보면 신호의 차이가 거의 나지 않는다는 것을 알 수 있으며 결국 지반의 변형이 거의 없음을 나타내고 있다.

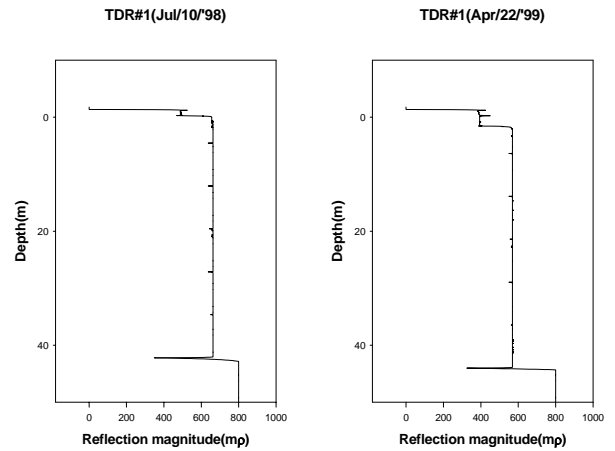
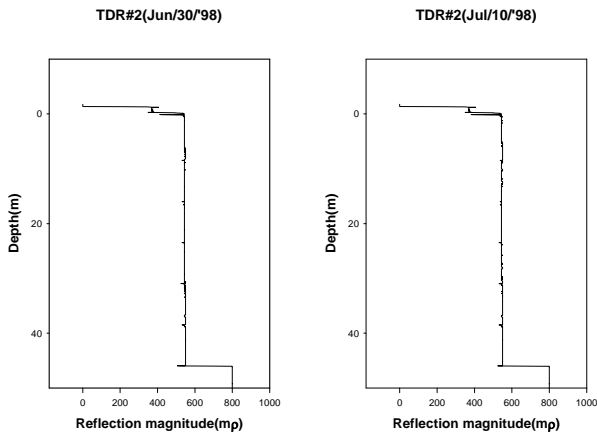


그림 9. 측정 1년후의 신호비교(T-1)

그림 10은 인접한 곳에 설치한 T-2의 결과를 나타내고 있다. 그림 중 (a)는 설치한 후의 가장 안정된 신호형상이며 (b)는 7월 10일의 신호인데 설치후 2주일정도가 경과 하였지만 지반의 변형을 감지할 수 있는 신호가 곳곳에 나타나고 있다. 그림 중 (c) 및 (d)는 10월 및 12월의 계측 결과를 나타내고 있으며, 7월의 계측결과에 비하여 상대적으로 신호의 불규칙한 변화가 두드러지고 있다. 특히, 그림 11은 99년 1월의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 5m 이내의 신호는 12월 29일의 신호와 비슷하지만 5m를 초과한 깊이에서는 신호의 변화가 없이 일정한 신호를 나타내고 있다. 따라서 5m를 중심으로 그림을 확대하면 약 3.2m 내외에서 취득한 신호는 전단파괴의 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 T-2의 경우는 하부지반의 변위에 의하여 3m 내외의 지점에서 동축케이블이 완전히 절단되었음을 유추할 수 있다. 그림 12는 초기치와 비교한 그림인데, 15m 및 38m 지점을 중심으로 반사계수의 변화가 감지되고 있는데 이곳은 세일과 사암의 경계부 즉 층리면에서 분리현상이 발생하고 있음을 유추할 수 있다. 인접하여 설치된 다점지중침하계와 비교하면 동일한 기간 내에서 12m 소자에서는 약 35mm, 39m 소자에서도 약 35mm의 침하량을 기록하고 있으므로 미루어보면 상당히 신빙성이 있음을 알 수 있다.



(a)

(b)

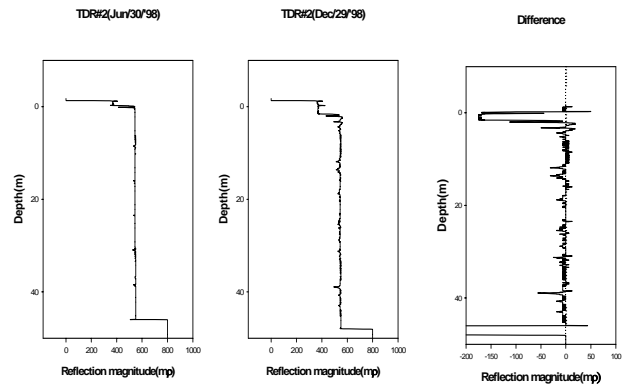
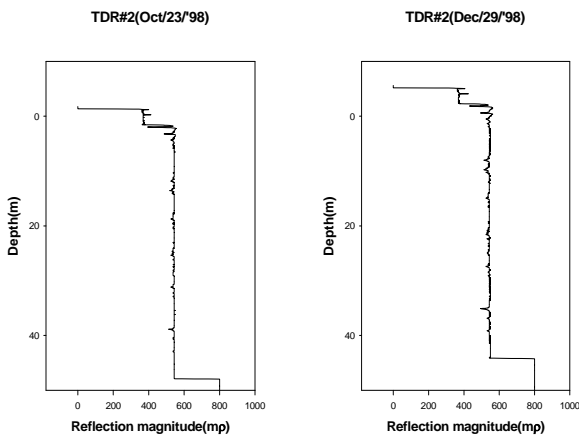


그림 12. 초기치와의 비교



(c)

(d)

그림 10. T-2의 계측결과

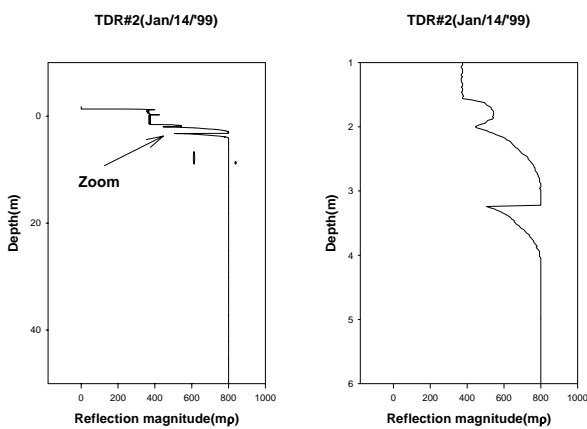


그림 11. 99년 1월 14일의 계측결과

5.3 추전터널~막수터널구간

그림 13은 T-5의 계측결과를 나타내고 있다. 초기에는 기준점의 반사계수만이 차이가 발생하지만 2개월 후인 9월에는 20m 및 35m 내외에서 변화가 감지되고 있으며, 12월에는 상부의 5m 및 38m 내외에서 전단변위의 양상을 나타낸다. 그림 14에는 인접지역에 설치한 경사계의 99년 2월 26일까지의 계측결과를 도시하였다. TDR의 결과와 비교하면, 일정한 변위를 보여주다가 28m 및 38m 지점에서 반대방향으로의 변위가 발생하고 있다. 결국 이것은 지층의 상대적인 변위의 차이 혹은 반대방향의 움직임을 나타내므로 전단변위가 발생하고 있는 것으로 추정된다. 이 부분은 계측기기를 매설하기 위하여 non-core 방식의 시추시에 확인된 암상의 변화가 발생하는 곳으로 28m지점은 동일한 사암이지만 경암과 연암으로 구분지어지는 곳으로서 하부층의 이동에 의하여 퇴적암의 대표적인 특성인 층분리현상이 발생함으로써 유발되는 변위인 것으로 판단되며, 하부 38m지점은 탄질세일층으로 그 하부에서 발생하는 암반층내의 붕락 등의 변화에 의해 발생한 것으로 유추된다. 그림 15에 나타낸 인접하여 설치된 다점지중침하계의 7, 21, 29 및 44m에 설치한 소자가 공통적으로 28mm 정도의 침하를 기록하고 있는 점이 이 같은 판단을 반영하고 있다. 그러나 하부 38m보다 28m 지점의 변위가 경사계상에서 더욱 크게 발생하는 것은 TDR에 사용된 동축케이블은 휨성(flexible)인데 반하여 경사계의 유도관은 강성(rigid)이므로 하부에서 발생하는 변위가 중첩되어 나타나는 것으로 사료된다. 매설 후 약 10개월 후인 99년 4월에는 38m 지점의 반사계수가 갑자기 증가하

는 양상을 나타내는데 이것은 지하수가 동축케이블에 영향을 끼친 것으로 이 지점부근에서 지하수의 유동은 암반의 유동이 발생함을 뒷받침하는 것으로 판단된다.

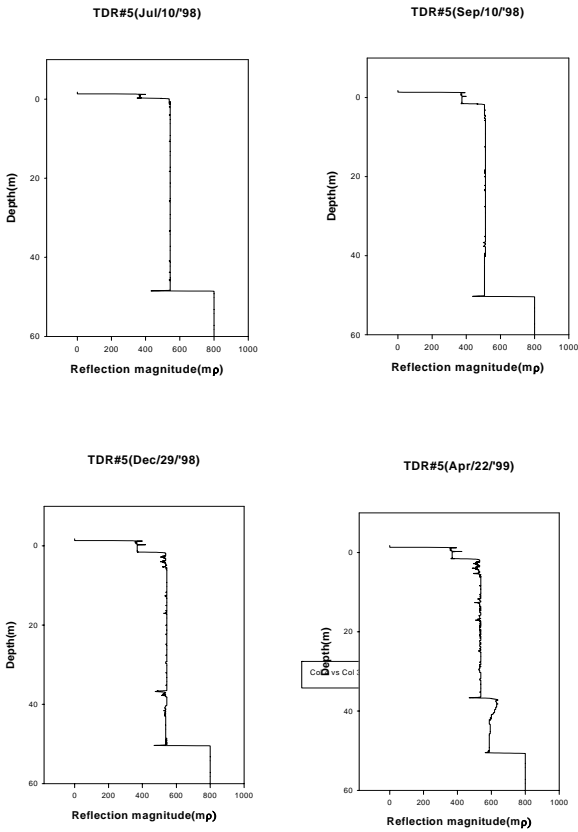


그림 13. T-5의 계측결과

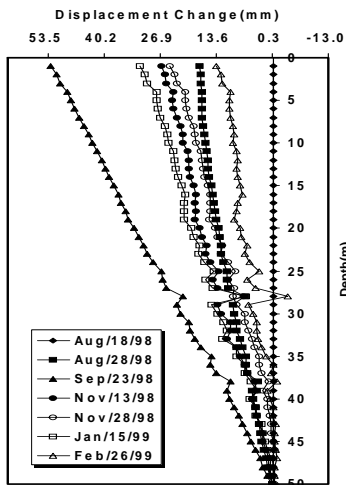


그림 14. T-5에 인접한 경사계 계측결과

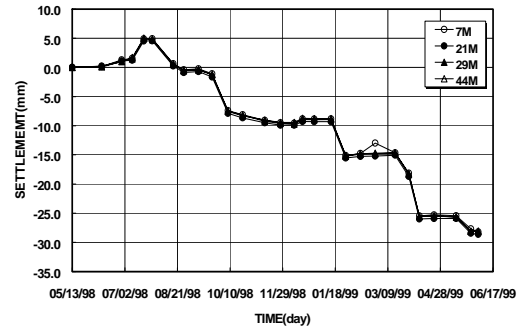


그림 15. T-5에 인접한 다점지중침하계 계측결과

그림 16은 초기치에 대하여 98년 9월 10일, 12월 28일 및 99년 4월 22일의 계측결과를 반사계수 차이를 비교한 것으로서 98년 12월 이후의 변화가 뚜렷이 나타나고 있다.

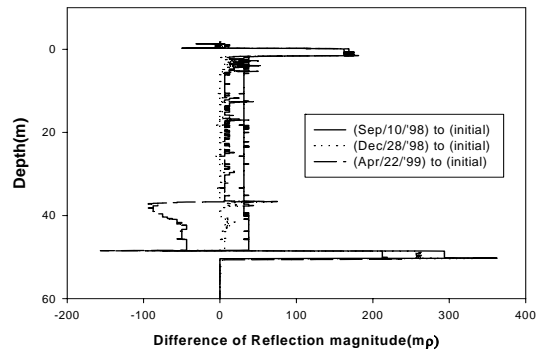


그림 16. 반사계수의 비교

6. 결론

TDR을 이용한 지반변형 측정사례를 검토한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

1) 화전지역일대에 산재한 폐광채굴적에 의한 철도, 도로 및 터널의 안정성 검증을 위하여 설치한 TDR케이블의 계측결과에 의하면 지반의 변형이 발생하는 위치 및 변형의 증가를 알아낼 수 있었으나 변형의 종류를 명확히 판단할 수는 없었다. 그러나 다른 종류의 계측결과와 비교하면 상당히 신뢰성이 있는 계측결과임을 알 수 있었다.

2) TDR 기술은 다중측정 시스템, 모뎀기법 이용, datalogger control program 등을 이용하여 임의의 시간에 사무실에서 원격측정 및 무인 데이터의 수집이 가능하므로 변형의 발생을 빠른 시간 내에 파악할 수 있고 대책을 강구할 수 있는 이점이 있는 유용한 계측방법이며, 아울러 측정기술자의 정기적인 접근이 어렵거나 사례지역과 같은 오지인 경우에는 구조물 계측의 효율적 방법으로 적용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

강원도 화전지역 정밀계측조사결과와의 일부를 인용하도록 허락하여 주신 석탄산업합리화사업단 관계자 여러분께 감사 드립니다.

(접수일자 : 2003년 2월 4일)

참 고 문 헌

1. 한국지반공학회(2000), 정보화시공, 지반공학시리즈 12, pp.497-511.
2. 석탄산업합리화사업단(1999), 화전지역정밀계측조사보고서, 기술총서 99-03.
3. 이우진, 김용진, 안신환, 조충봉, 이용주(1998), TDR을 이용한 지반변형의 측정, '98정보화시공·터널위원회 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.37-57.
4. 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.
5. Dowding, C. H., Su, M. B. and O'Connor, K. M.(1989), Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 22., No. 1, pp. 1-23.
6. Dowding, C. H., Su, M. B. and O'Connor, K. M.(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.
7. Fellner-Feldegg(1969), The Measurement of Dielectrics in the Time Domain, The Journal of Physical Chemistry, Vol.73, No.3, pp.616-623.
8. O'Connor, K. M. and Dowding, C. H. (1984), Application of Time Domain Reflectometry to Mining. Proceedings of 25th Symposium on Rock Mechanics, Northwestern University, Evanston, Illinois, pp.737-746.
9. 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.
10. Tektronix(1989), 1502B Metallic Time Domain Reflectometer Operator Manual, Beaverton, OR.
11. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P(1980), Electromagnetic determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resource Research., Vol.16, pp.574-582.
12. Topp, G. C. and Davis, J. L.(1985), Measurement of Soil Water Content Using TDR: A Field Evaluation, Soil Science Society of America Journal, Vol.49, pp.19-24.
13. Topp, G. C. and Culley, J. L. B.(1989), Correcting Soil Water Content Reading from IRAMS, Canadian Journal of Soil Science, Vol.69, pp.701-704.
14. Wade, L. V. and Controy, P. J(1980), Rock Mechanics Study of a Long Wall Panel, Mining Engineering , December, pp.1728-1734.