

<기술해설>

## 時間 領域 反射法에 의한 岩盤 變位の 計測 技術 分析

정 소 걸<sup>1)</sup>

### Analysis of the Time Domain Reflectometry for the Monitoring of Rock Displacement

So-keul Chung

#### ABSTRACT

Two types of deformations can occur on the cable during the monitoring of the rock displacement by the time domain reflectometry. One is the impedance model for tensile deformation, and the other is the capacitance model for the shear deformation. The former gives a response signal with a gradual change in the amplitude of the reflected voltage, meanwhile the latter produces a signal with a blunted spike. The resolution of the TDR can be improved to 0.125% using calibration crimps on the cable of 60 meters long. It is recommended that the diameter of the cable should be 18 mm at least in order to induce a better reflected pulse without any open-circuit. The actual TDR technique cannot characterize the type and the magnitude of rock displacement quantitatively. Systematic investigation of the TDR parameters, such as the exact effect of cable diameter, cable length, number of crimps, combination of shearing and extension, and environment of the TDR equipment, will be able to improve the resolution to 0.01 mm.

#### 1. 서 론

시간영역 반사법(TDR, Time Domain Reflectometry)은 전기적 펄스를 이용하여 처음에는 전선이 斷線된 지점을 찾아 내는데 사용하던 기술로서 활용되던 중 점차 그 기술이 발전되면서 시추공내에 同軸케이블을 넣고 그라우팅한 다음 동축케이블의 변형 특성을 규명하는 방법을 고안함으로써 암반의 변형을 모니터링하는데 응용하게 되었다<sup>1), 2)</sup>. Fig. 1에서와 같이 암반내 변위가 발생할 때 시추공내 있는 케이블을 변형시킴으로써 국부적인 커패시턴스의 변화와 함께 펄스의 반사파형의 변화를 유발하게 된다. 진단변형이 한계에 이르면 케이블이 크게 변형되고 반사파의 길이를 단축시키는데 이 때 반사파의 변화를 계측함으로써 국부적인 인장변위와 전단변위를 모니터링할 수 있으며 각 반사 펄

스의 위상, 길이 및 진폭에 따라 변위가 일어난 위치, 형태 및 강도 등이 결정된다. NUTSA 및 NUMOD<sup>3)</sup>과 같은 프로그램은 이를 원격적으로 모니터링하기 위해 개발된 것으로서 수백 미터에 이르는 TDR 케이블로부터 반사되어 오는 방대한 양의 자료에 대한 고해상도 디지털 신호의 그래픽 분석을 가능하게 한다.

Dowding 등<sup>4)</sup>은 암반변위가 일어나는 초기단계에 實時間 遠隔 모니터링을 위하여 TDR을 적용함으로써 Tektronix의 케이블 테스터에 통신용 인터페이스와 모듈을 장착하여 원격 제어가 가능하게 되어 현지에서 직접 계측작업을 하는 필요성이 없게 되었다. TDR을 이용한 사례중 상당한 수<sup>4), 5), 6), 7), 8)</sup>는 長壁式 採炭作業場 상부에 케이블을 미리 매설한 다음 작업장이 진행되는 과정에 일어나는 암반내 변위를 모니터링하는데 활용되었으며, 이 때 TDR 신호는 하루에 여러 번 측정하고

\* 1995년 3월 15일 접수

1) 정회원, 한국자원연구소 채광기술실 실장

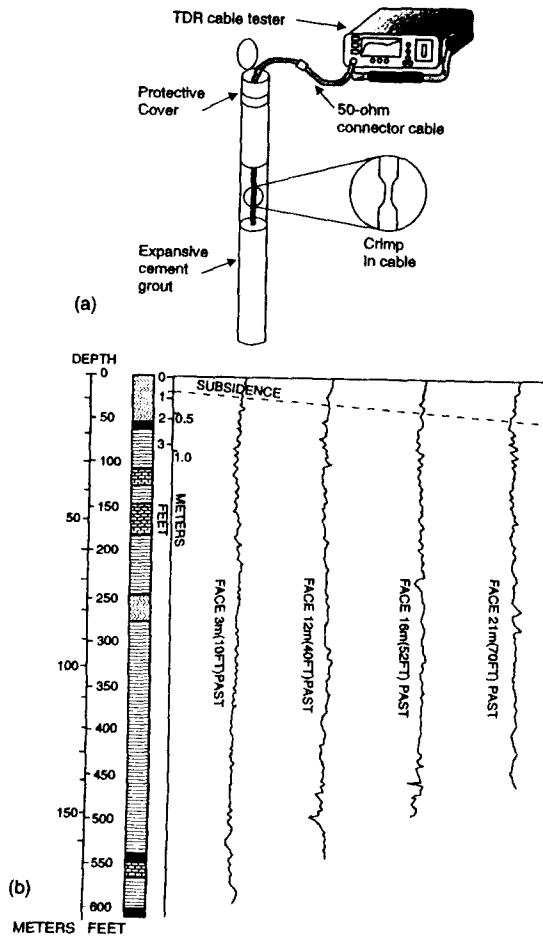


Fig. 1. (a) Installation for monitoring of rock deformation; and (b) associated TDR data for deformation longwall mine (After Dowding and al<sup>(4)</sup>)

지표의 변위계측치와 비교분석함으로써 채탄작업으로 형성된 공동의 상부 암반이 붕락됨으로 인해 발생하는 地盤沈下를 사전에 예측할 수 있다. 이와 같이 지반침하 현상이 지표에 도달하기 전에 미리 지표 하부에 있는 암반의 변형거동을 계측하고 경보하는데 TDR을 적용하는 것은 일반적인 암반의 변위계측에 필요한 정도의 정밀도(보통 0.01 mm)를 필요로 하지는 않는다.

O'Conner 등<sup>(6)</sup>은 장벽식 채탄작업으로 생성된 채굴 공동 상부 암반의 붕락과정 즉, 지표 침하과정에 대한 모니터링 및 블록케이빙 작업장의 케이빙과정을 모니터링하기 위해 TDR을 적용하였으며, 장비를 매설하기 전에 직경 12.5 mm인 동축케이블의 표면에 홈을 만든 다음 암반의 표면과 접촉이 잘 이루어지도록 매설하여

탄층 및 경암층내에서 암반의 변위가 발생하는 지점을 효과적으로 모니터링하였다. 케이블의 매설은 하향 및 상향으로 모두 가능하며 본 연구 결과에 따르면 측정 심도가 30 m인 로드형 혹은 와이어형의 다점 지중변위계로 암반변위를 계측하는 것 보다 TDR을 적용하는 것이 더 저렴한 것으로 나타났다. Charette<sup>(7)</sup>은 폐광산의 채굴공동 상부의 지반침하 문제를 분석하기 위하여 6개의 채굴공동 상부의 Crown Pillar의 변위계측에 TDR이 적합한 방법임을 입증하였으며, 장비 매설후 즉시 초기치를 계측하고 계측이 진행되면서 Crown Pillar 내부에 변위가 발생되는 것을 발견하였다. 일반적으로 반사 펄스는 대체로 시추코어가 파쇄된 지점 혹은 절리면이 벌어진 지점에서 집중적으로 관측되며, 암반 변위 계측을 위해 TDR을 적용하면 지표 계측만으로는 감지할 수 없는 지하 암반내 변위를 계측할 수 있는 커다란 장점이 있다. 본 연구에서는 국내에서는 처음으로 현지 암반변위의 계측에 TDR을 적용하기 위해 TDR의 원리, TDR 기술의 이론적 배경 및 응용, TDR 계측 자료의 해석, 계측에 관련된 H/W 및 S/W, 외국의 현장계측 사례 등을 분석하였다.

## 2. TDR의 원리

TDR은 레이더와 같은 원리를 이용하며 송신장치로부터 펄스를 내보낸 후 반사되어 돌아 오는 시간을 측정하는 기술이다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 동축케이블에 단선 혹은 합선 등이 나타나거나 케이블의 물성이 바뀌게 되면 송신된 펄스가 결함이 생긴 곳으로부터 반사되어 돌아 오게 되므로 TDR은 케이블의 결함이 발생된 위치를 측정하는데 적합한 기술이다. 송신되는 전자기적 시그널의 속도는 케이블의 유전상수의 크기에 따라 변하며 유전상수는 다시 케이블 속에 있는 절연체의 물성에 영향을 받는다. 시그널의 속도  $V_p$ 는 보통 光速度와 대비하여 백분율로 나타내며 대부분의 시그널의  $V_p$  범위는 광속의 0.66배로부터 0.84배의 범위에 속한다. 따라서  $V_p$ 가 0.66인 시그널이 케이블내에 전파되는 속도는 광속의 66%에 해당되며 시그널의 속도는 보통 케이블의 제작사에서 결정한다.

레이더에서는 에너지의 펄스가 송출되어 물체를 만나면 일부의 에너지를 반사시키고 레이더 장비는 송출된 펄스가 물체에 반사되어 오는 시간을 측정하여 거리로 환산한다. TDR에서는 에너지의 펄스가 케이블에

구속되어 있다는 사실을 제외하고는 TDR의 원리는 레이다의 원리와 유사하다. TDR에서 케이블에 임피던스의 변화가 발생되면 송신된 에너지중 일부가 TDR 장비로 반사되어 돌아오며 반사된 에너지는 TDR의 모니터에 나타나고 이를 분석하면 결함이 발생한 위치 및 결함의 종류를 규명할 수 있다.

### 3. TDR 기술의 이론적 배경 및 응용

TDR은 同軸(Coaxial) 케이블 선로의 斷線된 위치를 찾기 위해서 최초로 개발되었던 기술<sup>9)</sup>로서 점차 그 활용범위가 넓어져서 土壤속의 含水量<sup>10)</sup>이라든가 同軸케이블의 절연 거동의 평가<sup>11)</sup> 등 도체가 들어 있는 물질의 특성을 규명하는데 응용되고 있다. 암반역학 분야에는 케이블의 손상이 발생하는 지점을 분석함으로써 암반의 변위가 발생하는 지역을 찾아 내는데 적용이 되었다. 본 시스템은 설치가 용이하고, 장비와 케이블도 시공에서 구입할 수 있으며, 자료취득 및 해석이 용이하기 때문에 다른 변위계측 장비에 비하여 경제적이다. 동축케이블의 가격은 1 m당 \$3.30(1986 U.S.)로서 현장에서 손쉽게 시추공속에 그라우팅할 수 있다. 이동식 계측 기기(Readout Unit) 하나에 여러 개의 계측용 케이블을 연결하여 계측할 수 있고 케이블의 길이에는 제한이 없으며 자료의 형태는 스트립 차트형과 아날로그형 등이 있어 현장 계측에서는 선택하여 활용할 수 있다. 아날로그형 자료는 다시 디지털형식으로 전환하여 파형등의 분석을 가능하게 하며 본 시스템을 현장에 설치한 후 원격지에서 모니터링할 수 있다. TDR 신호가 케이블로부터 반사되어 오는데 이 때 케이블이 손상되었거나 절단이 되면 반사펄스의 형태가 바뀌거나 반사펄스가 중단된다.

Dowding 등<sup>11)</sup>은 반사파의 형태변화와 케이블의 변형(혹은 암반 변위)과의 관계를 정량적으로 분석할 수 있는 이론적 배경을 유도하고 이를 활용하여 이론적 분석 결과와 실험실에서 변형된 케이블로 실험한 결과를 비교 분석하였다.

TDR에 사용되는 동축케이블 전송선은 1차원적으로 전파되는 전자파이다. 동축케이블 전파에 관계되는 방정식은 회로이론이나 Maxwell 방정식으로부터 유도될 수 있는데 결과는 동일하다. 동축케이블은 외부 도선(Outer Conductor)과 내부 도선(Inner Conductor)으로 구성되어 있는데 동축케이블의 종단면을 보면 두 개

의 도선으로 나타나며 이 두 도선에 전류가 흐를 때 전위차가 발생한다. 동축선을 따라 전파되는 전압펄스의 거동은 단순화된 모델(Fig. 2.)에서 다음과 같은 네 가지 요인에 의해 결정된다. 즉,

- L(인덕턴스) : 단위시간에 단위 길이의 도선에 흐르는 전류에 의해 유도되는 단위 길이당 자기장의 세기
- R(저항) : 단위길이의 도선에서 발생하는 에너지 흡수 감소 혹은 전위차의 축소
- C(커패시턴스) : 외부도선과 내부도선 사이에 발생하는 전위차를 유발하는 양으로서, 두 도선 사이의 거리와 두 도선사이에 있는 물질의 유전상수(Dielectric constant)에 의해 결정된다.
- G(전도도) : 두 도선 사이의 순간적인 전위차에 의해 발생하는 전류의 축소

따라서 동축케이블에서 발생하는 전자펄스는 위의 네 개의 변수에 의해 나타낼 수 있다. 동축케이블의 변형으로 말미암아 회로가 변화하는 형태로는 도체내의 저항(Impedance)의 변화 혹은 도선의 변형 등 크게 두 가지의 유형이 있다. 케이블에 인장력이 작용하여 늘어나게 되었을 때, 늘어난 부위의 단면의 길이가 전자펄스의 파장에 비하여 길 경우 늘어난 부분의 임피던스가 감소되므로 임피던스형으로 모델링할 수 있고 전단변형은 커패시턴스형으로 모델링할 수 있다(Fig. 3).

이와 같은 두 모델에서는 반사펄스가 발생되는데, 전

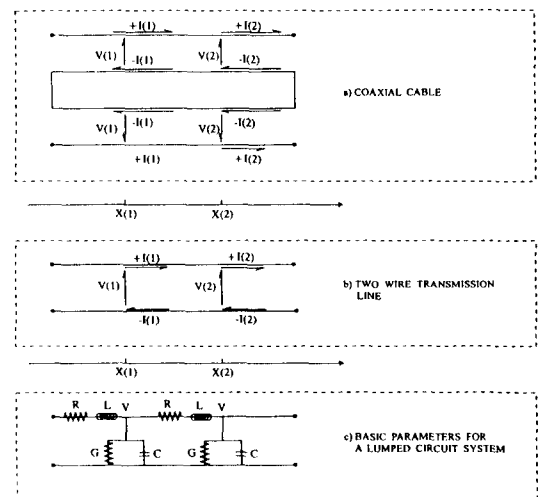


Fig 2. Idealization of a coaxial cable as lumped circuit system.

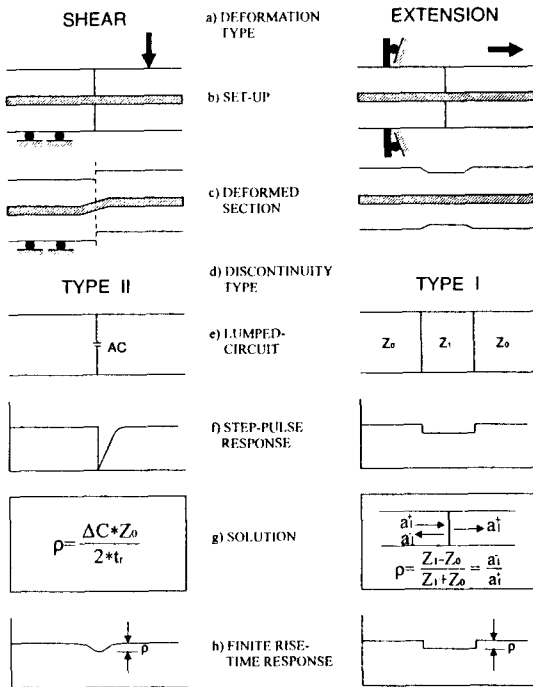


Fig. 3. Relationship between cable deformation, type of reflected signal and idealization for analysis.

자펄스가 송신되고 나서 반사되어 돌아오는 시간을 측정하여 케이블의 변형이 일어난 지점을 알 수 있는 점을 이용한 것이 바로 시간영역 반사법(TDR)이다. 이 때 반사파의 경사 및 진폭은 케이블의 물성에 따라 달라진다.

케이블의 변형과 전기적인 불연속성은 시간과 공간에 따라 달라질 수 있으며, 이는 반사파의 감쇠현상 및 케이블의 변형정도와 변형된 부위간의 거리 등에 의해 해상도를 달리할 수 있다. 산란이 일어나지 않는 TEM 파는 주파수가 증가할수록 감쇠가 커지므로 주파수 영역에서 전파효과를 분석해야 한다. 각 주파수에 해당되는 진폭은 감쇠함수으로써 예측할 수 있으며 주어진 지점에서의 펄스의 최종 형태는 감쇠된 파형을 각 주파수 대역별로 Fourier 변환을 통해 구할 수 있다. 이러한 변환을 통해 결정된 펄스의 전위차는 직경 12 mm 케이블의 경우 152 m 지점에서 초기치 보다 3.4% 감소되어 나타나며 Rise Time(전위차가 0으로부터 최대치까지 도달되는데 걸리는 시간)은 20% 커진다. 또한 1528 m 지점에서도 전위차가 29%, Rise Time은 단지 33% 정도 증가된다. Rise Time을 근사치의 主周波數 대역으로 바꿀 수 있으며, 대표적인 Rise Time이 110

psec이므로 주주파수는 152 m에서 3.2 GHz - 2.7 GHz이며 1520 m에서는 2.5 GHz로 나타난다.

대부분의 TDR 케이블의 길이는 60 m로부터 240 m까지이므로 이러한 범위에서의 감쇠정도 및 Rise Time의 증가는 크지 않을 것으로 생각되기 때문에 감쇠 및 Rise Time의 주원인인 저항과 전도도를 무시하고 반사파를 분석해도 좋을 것이다. 그러나 케이블의 길이가 수 km가 되면 산란효과와 Higher Mode 효과를 무시할 수 없게 되므로 긴 케이블은 실측해야 한다. 인접하는 두 개의 서로 다른 변형지점 혹은 전기적인 불연속점으로부터 가장 가까운 지점에 있는 기준점을 계속함으로써 두 지점이 하나로 나타나기 이전에 변형지점의 위치를 파악할 수 있으므로 기준점의 간격이 가까울수록 측정 정밀도 즉 해상도를 향상할 수 있으며 이 때 위치의 측정은 불연속점에 도달되는 펄스의 Rise Time으로 결정된다. 어떠한 펄스의 Rise Time이 감소하거나 증가하는 현상은 펄스를 발생시키는 TDR 장비와 펄스를 감쇠하는 케이블에 의해 좌우된다. 케이블상에 여러 개의 전단력이 근접하여 일어날 경우에는 TDR 시스템의 감쇠와 해상도로서 변형이 발생한 지점과 반사파형이 중첩되는지를 분석함으로써 각각의 압반변형을 구분할 수 있다. 해상도를 평가하기 위해서는 케이블상에 홈의 간격을 TDR 반사파의 파형과 구분할 수 없을 때까지 점차적으로 줄여 간다. 계속지점으로부터 60 m 떨어진 지점에서는 0.125% 까지의 해상도로 계속할 수 있다. 반사파에 의해 계속할 수 있는 변위의 크기는 케이블의 직경, TDR 장비의 설정 환경 및 전단 변형이 발생한 지점으로부터 TDR 장비 사이의 거리 등에 관계된다. 예를 들면 TDR이 50 mv/division 및 0.5 ft/division으로 설정되어 있고 직경이 각각 9.5 mm, 12.7 mm 및 22.2 mm인 케이블의 1.3 m인 지점에서 일어나는 전단변위의 측정에 필요한 최소 변위량은 적어도 1.58 mm, 1.37 mm 및 7.76 mm 이상이 되어야 하는 것이 현재 TDR 기술의 해상도이다.

#### 4. TDR 계측치의 해석

##### 4.1. 위치에 관한 정밀도

TDR 케이블을 매설하기 전에 미리 일정한 간격으로 케이블의 표면에 홈을 내어 표시를 하는 것은 변위가 발생된 지점의 정확한 위치를 규명하는데 큰 도움이 된다. 케이블에 홈을 내지 않았을 때에는 측정오차가 2%

로서 예를 들면 30 m 지점에서 발생된 암반의 변위를 0.6 m 오차로 예측해 내는 반면 케이블에 일정 간격으로 홈을 내었을 때에는 계속시 마다 표시된 지점이 기록되므로 예를 들어 홈 사이의 간격이 6 m 인 경우에는 전체 케이블 길이에 관계없이 오차의 범위가 12 cm에 불과하게 되어 정밀도가 훨씬 커진다.

#### 4.2. 케이블 변형의

식별 변위를 모니터링하는데 변위의 변화속도를 측정하는 것이 중요한 만큼 변위의 형태를 결정하는 것도 역시 중요하다. 실험실 시험에 의하면 케이블의 전단변위는 스파이크형 반사파를 발생시키고 진폭의 크기도 변위의 크기에 정비례하는 것으로 나타난 반면 인장변위는 아주 작은 홈모양의 반사파를 만들고 케이블이 늘어난 길이가 길어질수록 그 길이 또한 커진다(Fig. 3 참조). 이와 같이 인장 변형에 의한 반사펄스의 크기가 작기 때문에 인장변형에 따른 파괴가 일어나기 전 TDR 펄스는 전단변형으로 인한 파괴가 일어나기 전 펄스의 형태와 전혀 다르게 나타난다. 인장변형은 길고 좁은 펄스를 발생시키고 전단변형은 큰 반사 펄스가 일어나기 전에 뚜렷한 반사파를 발생시킨다.

#### 4.3. 전단변위와 인장변위의 구분

인장변위가 발생한 지점으로부터 반사되어 오는 펄스는 폭이 넓은 파형을 가지면서 파의 정점(Spike)의 위치 또한 약간씩 변화하는 반면 전단변위가 발생한 지점으로부터 반사되어 오는 펄스는 파의 폭이 좁은 한편 정점의 위치는 일정하다. 전단변위가 발생한 지점으로부터 반사된 펄스의 파는 진폭이 점차 커지는 특성을 가지는 반면 인장변위가 발생한 지점으로부터 반사된 펄스의 폭은 점점 넓어지지만 진폭의 크기는 그다지 증가하지 않는 특성을 가진다. 암반내 변위(전단변위 혹은 인장변위)를 평가하는 기술로서 붕괴할 가능성이 있는 암주(Pillar)를 모니터링할 수 있고 전단변위가 일어날 가능성이 큰 지점을 예측하는데 Aston 등<sup>12)</sup>이 제안한 방법을 적용할 수 있다.

### 5. 장비 및 현장적용

#### 5.1. 제한

먼저 외경 12.7 mm의 알미늄(Smooth-walled) 동축 케이블(Cable Wave Systems 1/2" Foamflex FXA)을

시추공 속에 매설하고 Portland 시멘트로 그라우팅하여 계속준비를 한다. 설치 이전에 케이블의 끝을 처리하여 UHF 커넥터로 연결하는 방법을 사용할 수 있으며, 케이블상의 지정된 위치에 홈을 내어 홈 간격의 2% 오차범위로 변위발생 지점을 예측할 수 있다. 모든 데이터는 Tektronix 1502B Cable Test Unit과 SP232 Interface를 통하여 데이터 취득 기능 S/W "SPHOST"를 수행할 수 있는 386급 혹은 486급 Notebook PC로부터 처리할 수 있다. 케이블 커넥터의 돌출부 끝에 강철 보호마개를 씌우며 설치 및 시멘트 작업을 완료할 무렵 각 케이블의 초기치를 읽어 들어 그 이후의 계속자료와 비교할 수 있고 초기치와 계속치는 USBM에서 개발한 "NUTSA"와 Wordperfect 5.1 "GRAB"를 이용하여 그래픽 처리할 수 있다.

#### 5.2. 계속장비 및 설치

암반변위의 계속에 사용된 동축케이블의 직경은 22.2 mm(7/8 in.)이며 반사 펄스는 케이블 테스트인 Tektronix 1502B로 계속한다. 해상도를 높이기 위해서는 케이블을 매설하기 전에 일정한 간격(15 m)으로 전체 케이블의 길이가 91 m이내일 때는 길이 13 mm, 그리고 그 이상일 때는 길이 25.4 mm의 홈(Crimp 혹은 Pinch)을 만든다. 이 때 케이블이 절단되지 않으면서 반사 펄스의 강도를 크게 유도하기 위하여 홈을 낸 부위의 케이블 직경은 최소 18 mm가 되도록 하는 것이 바람직하다. 케이블이 외부의 알미늄 도선과 일시적인 반응을 일으키지 않게 하기 위하여 표면에 페인트를 약간 분무하고 그라우팅의 강도를 약화시키는<sup>13)</sup> 高 PH 시멘트 그라우팅을 하는 것이 좋으며, 케이블은 PVC 그라우팅 튜브에 묶어서 공속으로 밀어 넣는다. 계속에 활용되는 H/W 및 S/W 중 대표적인 것으로는 Aston등이 제안한 것으로서 다음과 같이 구성되어 있다.

#### 5.3. 하드웨어 구성

현장계측에 소요되는 Hardware의 구성은 다음과 같다.

- Tektronix 1502B 혹은 1502C TDR Cable Tester
- SP232 Serial extended function module
- External 1,200 Baud Hayes-compatible "smart" Modem
- 케이블 테스터와 모뎀을 연결하기 위한 Null

#### modem DB-25 Serial Cable

- 낙뢰로부터 보호된 AC 전원과 전화선 및 50-ohm 연결단자에 의한 케이블과 펄스발생기의 연결 그 밖에 원격지에서 현장으로부터 직접 데이터를 전송받을 경우에는 PC와 모뎀 그리고 RS-232C Serial Cable 등이 필요하다.

#### 5.4. 소프트웨어 구성

계측자료의 취득 및 처리에 사용되는 Software는 다음과 같다.

- NUMOD 통신용 Protocol
- NUTSA

위에서 언급한 H/W의 S/W는 현재 시중에 다량으로 공급되고 있는 것들로 대체될 수 있을 것으로 판단되며 최근의 H/W 및 S/W의 발전경향에 비추어 볼 때 본문에서 열거된 것 보다 더 발전된 경우도 허다하다.

### 6. 결론 및 고찰

시간영역 반사법에 의한 암반변위의 계측에 응용되는 케이블의 변형의 유형에는 케이블에 인장력이 작용하여 늘어나게 되었을 때의 임피던스형과 전단변형이 일어날 때의 커패시턴스형 등 두 가지의 모델이 있으며, 현장계측시 케이블상에 홈의 간격을 TDR 반사파의 파형과 구분할 수 없을 때까지 점차적으로 줄어가면서 계측할 경우 계측지점으로부터 60 m 떨어진 지점에서는 0.125% 까지의 해상도로 계측할 수 있다. 케이블에 홈을 내지 않았을 때에는 측정오차가 2% 오차로 예측해 내는 반면 케이블에 일정 간격으로 홈을 내었을 때에는 계측시 마다 표시된 지점이 기록되므로 예를 들어 홈 사이의 간격이 6 m 인 경우에는 전체 케이블 길이에 관계없이 오차의 범위가 0.4%에 불과하게 되어 정밀도가 훨씬 커진다. 실험실 시험에 의하면 케이블의 전단변위는 스파이크형 반사파를 발생시키고 진폭의 크기도 변위의 크기에 정비례하는 것으로 나타난 반면 인장변위는 아주 작은 홈모양의 반사파를 만들고 케이블이 늘어난 길이가 길어질수록 그 길이 또한 커지는 점에 착안하여 현장계측에서 암반의 인장변위와 전단변위를 해석할 수 있다. 현장계측시에 케이블이 절단되지 않으면서 반사 펄스의 강도를 크게 유도하기 위하여 홈을 낸 부위의 케이블 직경은 최소 180 mm 이상이 되는 것이 바람직한 것으로 분석되었다. 아울러 현재의

TDR기술을 이용하여 현장계측을 할 때 엑스텐소미터와 같은 보조 계측을 활용하면 암반거동에 대한 규모, 형태 및 범위 등을 보다 정확하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

케이블이 절단되기 직전에 케이블 끝으로부터 오는 반사펄스의 진폭이 커지지만 아직까지는 반사되어 오는 파형의 분석으로 암반변위의 형태와 크기를 정량적으로 분석하기는 어렵다. 따라서 암반변위의 양상파와 등 정성적인 특성을 가진 현재의 TDR기술을 개선하여 변위량을 측정할 수 있게 하고 또한 계측의 정밀도를 향상시키기 위한 연구를 수행해야 할 것으로 분석되었으며, 반사파와 변위 사이의 관계식은 케이블의 길이, 직경, TDR 장비의 설정환경 및 전단변위가 발생한 위치 등을 변수로 하고 있기 때문에 앞으로 관계식을 유도하기 위해서는 실험실에서 충분한 모델실험을 필요로 하며, TDR 장비의 특성과 전기전자적인 정밀도를 향상시키는 연구를 통해 케이블의 길이, 직경, 변형양상 및 홈의 갯수 등의 영향을 규명하면 암반변위 계측 해상도를 일반적인 암반변위계측기 수준(0.01 mm)까지 향상할 수 있을 것으로 전망된다.

### 참 고 문 헌

- 1) Dowding C. H., Su M. B. and O'Conner K. M., 1988, Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr. Vol. 25, No. 5, pp. 287-297.
- 2) Dowding C. H., Su M. B. and O'Conner K. M., 1989, Measurement of rock mass deformation with grouted antenna cables. Rock Mech. and Rock Engng. 22 1-23.
- 3) Huang Fei-Chiu, O'Conner K. M., M. Yurchak D. M., and Dowding C. H., 1993, Software for Interactive Acquisition and Analysis of Time Domain Reflectometry Measurements, 42p. 39 illus.
- 4) Dowding C. H. and Huang Fei-Chiu, 1994, Early Detection of Rock Movement with Time Domain Reflectometry, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 8, Paper No. 5680.
- 5) Forrester D. J. and Aston T. R. C., 1987, A Review of Mining Subsidence Instrumentation and its Potential Application for Seabed

- Monitoring, Mining Science and Technology vol 4. 225-240, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- 6) O'Connor K. M., Dowding C. H. and Su M. B., 1989, Monitoring rock mass deformation using time domain reflectometry, Surface crown pillar evaluation for active and abandoned metal mines, International Conference Proceedings, Ontario, Canada, Nov. 15-17, pp 123-132.
  - 7) Charette F., 1993, Installation and Monitoring of three abandoned mine crown pillar sites, cobalt, Ontario, MRL, CANMET, Government of Ontario Min. North. Dev. and Min. Min. Div. Reh. Bran.
  - 8) Kawamura N., Bauer R. A., Mehnert B. B. and Van Rosendaal D. J., 1994, TDR Cables, Inclometers and Extensometers to monitor coal mine subsidence in Illinois, Proceedings of Symposium on Time Domain Reflectometry, Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A.
  - 9) Moffitt L. R. 1964, Time domain reflectometry-theory and application. Engng. Des. News, 38-44.
  - 10) Topp G. C, Davis J. C. and Annan A. P. 1980, Electromagnetic determination of soil water content; measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16(3), 574-582.
  - 11) Cole R. H. 1975, Evaluation of dielectric behavior by time domain spectroscopy; 1, dielectric response by real time analysis; 2, complex permeability; 3, precision difference methods. J. Phys. Chem. 79(14). 1459-1474.
  - 12) Aston T. R. C., Bournay M. C., Hill J. D. and Charette F., 1994, Application of TDR for Monitoring the Long Term Behavior of Canadian Abandoned Metal Mines, Proceedings of Symposium on Time Domain Reflectometry, Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A.
  - 13) Kim M. H., 1989, Quantification of rock mass movement with grouted coaxial cable, MS thesis, Northwestern Univ. Evanston, Ill.