

동축 케이블을 이용한 시간영역 반사법의 암반변위 계측에의 적용

정슬람¹⁾ · 정소길²⁾ · 정현기³⁾ · 박철환⁴⁾ · 이희근⁵⁾

Application of Time Domain Reflectometry to the Monitoring of Rock Mass Deformation with Coaxial Cable

Seul-Lam Chung, So-Keul Chung, Hyun-Ki Chung, Chul-Whan Park and Hi-Keun Lee

ABSTRACT This paper presents an application of the TDR(Time Domain Reflectometry) to the monitoring of the deformation of rock mass with grouted coaxial cables through laboratory tests. The grouted cable can easily deform together with the rock mass movements, and the deformed cable loses its original capacitance and the reflected waveform produced along the deformed cable consequently represents a change of voltage pulse. Therefore, it is possible to monitor the deformation of rock mass by measuring the changes in these reflection signatures. Shear test of the cemented mortar containing a specimen of coaxial cable showed that the shear deformation correlated linearly with the reflection coefficient, so the TDR was effective to monitor the displacement of the rock mass. Bending test were carried out in order to determine the influence of the crooked cables on the monitoring of rock mass movements. Controlled crimping and shearing test upon a cable of 50 m long, 12.7 mm diameter showed not only the fact that the reflection amplitudes decreased as the cable length increased but also the proper crimping depth, width and interval between two adjacent crimps. Two coaxial cables-one 100 m long and the other 175 m long-were installed and grouted into the separate boreholes drilled in a sedimentary formation. The behavior of the cable was monitored with metallic TDR cable tester to measure rock mass deformation based on the interpretative techniques developed through laboratory tests.

1. 서 론

지하 채탄작업으로 형성된 채굴공동, 터널의 굴착 및 지하 구조물의 시공 등으로 인한 지반침하하는 공동 및 지하 구조물 자체의 안정성에 영향을 미치는 한편 상부 및 근방에 있는 구조물(건물, 도로, 철도, 매설관 등)에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 지반침하가 예상되는 경우 계측을 통해 획득한 침하량의 데이터를 기초로 안정성 관리를 실시하여야 한다.

이러한 지반침하량의 계측을 위해 본 연구에서 사용된 시간영역반사법(TDR, Time Domain Reflectometry)은 초기에는 동축 전송 케이블의 불연속 지점을 찾아내는데 사용되던 기술이었다.¹⁾ 이 기술이 점차 발전하면서 토양 내의 수분함량,²⁾ 동축 케이블 유전특성의 연구³⁾ 등 동축 케이블이 매설된 지역 주변 물질의 특성을 측정하는데 까지 응용되게 되었다. 특히 암반역학 분야에서는 처음에 이 기술이 암반에 변형이 일어나 캐

이블이 끊어진 지점을 찾아내는데 사용되었다.⁴⁾

본 시스템은 설치가 용이하고, 계측장비와 케이블도 시중에서 쉽게 구입할 수 있으며, 자료의 취득 및 해석이 용이하기 때문에 다른 변위계측 장비에 비하여 매우 경제적이다. 동축 케이블의 가격은 1 m당 \$12.00 (1996 U. S.)로서 현장에서 손쉽게 시추공 속에 그라우팅 할 수 있다. 이동식 계측 기기 하나에 여러 개의 케이블을 연결하여 계측할 수 있고 케이블의 길이에는 제한이 없으며 본 시스템을 현장에 설치한 후 원격지에서 모니터링 할 수도 있다.

Dowding 등⁵⁾은 전자기파이론을 이용하여 케이블 단면의 기하학적인 변화와 반사되어온 전압파형의 관계를 정량적으로 연구하였고 시멘트로 그라우트된 동축

- 1) 정희원, 서울대학교 자원공학과 석사과정
- 2) 정희원, 한국 자원연구소 자원개발 연구부
- 3) 한국 자원연구소
- 4) 정희원, 한국 자원연구소 자원개발 연구부
- 5) 정희원, 서울대학교 자원공학과 교수

케이블에 전단 및 인장 변형을 가하여 변위량과 반사되어 온 파형을 분석, 암반 내에 그라우트된 케이블을 이용하여 변위지점, 변위형태, 변위량 등을 정량적으로 계측할 수 있음을 보여 주었다.⁶⁾ 또한 그는 암반 뿐 아니라 토질층에도 시간영역반사법을 적용하여 토질 내부의 전단변위를 측정할 수 있음을 보여주었으며⁷⁾ 시간영역반사기술을 홍수 등에 의한 교량의 유실, 교각, 교대의 모니터링 등에도 적용하였다.⁸⁾

Pierce 등⁹⁾은 비교적 긴 케이블을 이용한 전단 및 크립실험을 통해 반사신호의 감쇠가 변위측정에 상당한 영향을 끼침을 증명했다. Huang 등¹⁰⁾은 원격지측정 및 다점측정이 가능하도록 TDR 계측장비를 발전시키는데 성공하여 원거리에서 현장의 데이터를 수시로 받아 분석함으로써 계측의 효율성을 극대화하였으며 한대의 케이블 테스트를 사용하여 여러 지점을 측정함으로써 많은 비용절감 효과를 보였다. 본 연구에서는 암반변위 계측에 TDR을 적용하기 위해 계측기와 호스트 컴퓨터 사이의 대화를 가능하게 해 주는 프로그램을 개발하고, 지름 12.7 mm의 동축 케이블을 사용하여 실내 전단실험, 굴곡실험을 수행하였고 50 m 케이블을 사용하여 전단 및 크립실험을 수행하였다. 또한 현장에 100 m 및 175 m 길이의 케이블을 시추공 내에 삽입, 그라우팅한 후 시간이 지남에 따라 발생하는 반사파형의 변화를 실내실험의 결과를 토대로 분석, 각 지점에서의 전단변위량을 정량적으로 측정하였다.

2. TDR의 원리 및 암반변위계측에의 응용 원리

2.1 TDR의 원리

TDR은 공간에서의 위치, 다양한 대상체의 특성을 결정하기 위해 오래 전부터 사용되어온 원거리감지 측정 기술이다. TDR의 초기형태는 1930년대 부터 알려진 레이더이다. 레이더는 마이크로파 에너지의 짧은 펄스를 생성하는 전파 발신기, 안테나, 그리고 전파 수신기로 구성되어 있다. 발신기가 펄스를 전파하면 수신기는 비행기나 배와 같은 원거리의 물체에 반사되어 오는 반사파를 수신한다. 전파가 발신되어 수신되기까지의 시간과 공기 중에서의 전파의 전송속도를 알면 반사된 물체까지의 거리는 쉽게 알 수 있다. 반사파를 좀 더 자세히 분석한다면 반사물체를 식별할 수 있을 정도로 추가적인 정보를 얻을 수 있다. 동축 TDR, OTDR 등에 적용되는 원리도 위의 레이더와 같다.

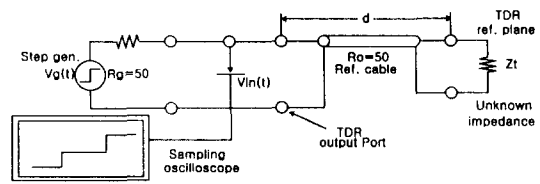


Fig. 1. TDR system configuration.

동축 TDR은 '폐쇄회로 레이더'라고 할 수 있다. 동축 TDR은 동축 케이블을 통해 전기적 펄스를 보내고 오실로스코프를 통해 입력단자로 반사되어 오는 파를 관찰한다.

동축 TDR은 Fig. 1과 같이 나타낼 수가 있는데 펄스 생성기는 전압 $V_g(t)$ 와 임피던스 R_0 로 나타낼 수가 있고 이는 스텝 펄스파를 생성한다. 이 펄스가 동축 케이블에 도착하고 오실로스코프가 케이블의 입력단자에 연결되어 있다. '기준 케이블'로 사용되는 동축 케이블은 TDR의 출력단자에 연결되어 있다. 만약 기준 케이블의 임피던스 R_0 를 알고 있다면 TDR 측정으로부터 정량적인 결과를 얻을 수 있다. 보통 기준 케이블의 임피던스는 펄스 생성기의 임피던스와 같게 만든다. 즉 $R_0=R_g$ 으로써 이는 기준 케이블로부터 파가 반사되어 파형분석에 방해가 되지 않게 하기 위함이다. 기준 케이블의 끝에는 기준면이 있으며 이 곳에 미지의 임피던스 Z_l 를 갖는 동축선을 연결한다. 오실로스코프를 통해 $V_m(t)$ 를 관찰할 수 있는데 $V_m(t)$ 는 펄스 생성기로부터 발신되는 스텝 펄스와 반사파의 대수합으로 나타난다. $V_m(t)$ 에 나타나는 시간 지연과 파형을 분석함으로써 케이블에 나타나는 불연속점의 위치와 형태를 알 수 있는 것이다.

Fig. 2에는 TDR에 여러 가지 저항 R_k 가 연결되었을 때의 다양한 파형 변화를 보여 준다. 만약 $R_k=R_0$ 라면 반사되는 파는 없을 것이고 TDR파형은 수평선이 될 것이다. R_k 가 R_0 보다 크다면 양의 방향으로 파형이 올라가고 R_k 가 R_0 보다 작다면 음의 방향으로 파형이 내려간다. 반사계수(Reflection Coefficient), ρ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = V_r/V_i \tag{1}$$

V_r 은 양이나 음의 값을 가질 수 있기 때문에 ρ 또한 양이나 음의 값을 가질 수 있다.

2.2 암반변위계측에의 응용원리

Fig. 3과 같이 암반 내 시추공에 동축 케이블을 삽입

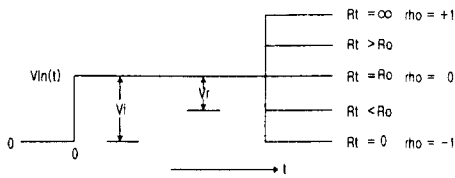


Fig. 2. TDR waveforms with various resistive terminations.

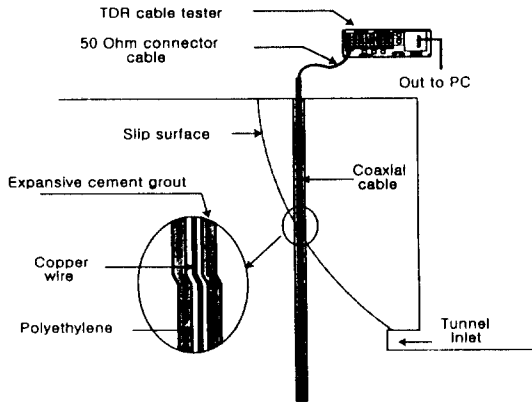


Fig. 3. TDR installation in rock mass showing relationship between cable and instrumentation.

한 후 시멘트로 그라우팅하여 케이블과 암반이 일체가 되게하면 암반 내의 전단변형이나 인장변형이 그라우트 부분에 전달되어 케이블의 변형을 일으키고 케이블의 변형은 그 지점에서 국부적인 커패시턴스의 변화를 일으키며 케이블 테스터에 나타나는 펄스의 반사파형이 변화하게 된다. 따라서 이 때 발생하는 반사파형을 모니터링하면 변위가 일어난 위치, 형태, 변위량 등을 계산해 낼 수가 있다.

동축 케이블의 변형은 전기회로의 불연속 지점을 생성하는데 이는 크게 두 가지 범주로 구분 지을 수 있다. 즉 특성 임피던스 Z_0 (type I)의 변화나 활성회로 요소의 변화(type II)로 구분 짓는데 케이블의 인장변형은 전자의 경우이고 전단변형은 후자의 경우이다(Fig. 4). 케이블에 전단변형이 일어나면 국지적으로 반사파형이 발생하고 변형된 케이블의 단면은 Fig. 4-E와 같이 전기회로에 커패시턴스의 변화를 더하는 것으로 모델화할 수 있다. 반면에 케이블에 인장이 일어날 경우 전단보다는 범위가 넓게 변형이 발생하며 케이블의 좁아진 부분은 임피던스의 감소로 나타낼 수가 있다.

전단변형이나 인장변형은 모두 전압펄스의 반사를 유발한다. 펄스를 보내는 최초의 시간과 반사되어온 시

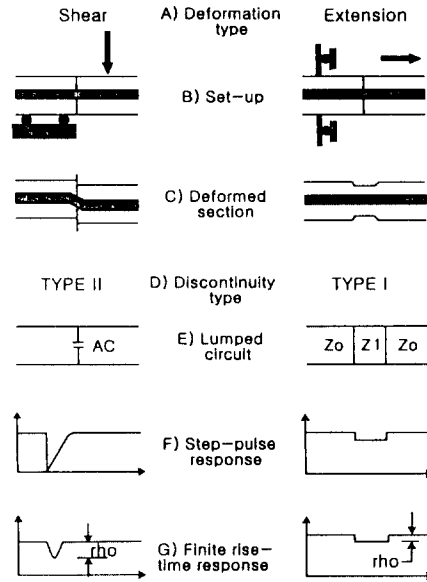


Fig. 4. Relationship between cable deformation and type of reflected signal.

간의 간격을 알면 불연속점의 위치를 찾을 수 있고, 반사신호의 경사와 진폭을 알면 케이블이 어떻게 변형되었는지를 알 수 있게 되는 것이다. 각각의 불연속점은 공간적으로 분리되어 있기 때문에 각 지점은 시간적으로도 분리되어 있고 따라서 개별적으로 분석할 수가 있다. 이렇게 변형지점과 전파속도 사이의 관계가 TDR을 암반변형 계측에 응용할 수 있는 기본을 이루게 되는 것이다.

현장에서 시추공에 케이블을 삽입하여 그라우트 하기 전에 알고 있는 위치에 크림프를 해 주는 경우 이는 변위발생 지점의 정확성을 높여주는데 많은 기여를 한다. 크림프란 케이블의 상부와 하부에 인위적으로 홈을 만들어 이 곳으로부터 신호가 반사되어 오게 하는 것이다. 기준이 되는 크림프가 없이 계측을 실시하였을 경우 위치의 정확성은 계측기로부터 케이블 변형지점까지 거리의 약 2%인데 반해 크림프가 있을 경우는 각 크림프로부터 2%밖에 오차가 발생하지 않아 정확성을 높여줄 수 있다.

3. 실험방법

3.1 측정장비 및 자료획득

본 연구에서는 계측장비로써 Tektronix 1502B TDR 케이블 테스터기를 사용하였으며 계측기와 호스

트 컴퓨터 간의 대화를 가능하게 해 주는 프로그램을 SP232모듈을 사용하여 제작하였다. 동축 케이블은 외부도선이 알루미늄으로 되어있고 내부도선은 구리이며 그 사이의 절연물질은 폴리에틸렌으로 구성되어 있다. 많은 형태의 반유연 동축 케이블이 있지만 Dowding 등⁵⁾은 외부도선이 고품 알루미늄으로 구성되어 있는 케이블이 TDR을 이용한 암반변위 계측에 매우 유리하다고 하였다. 외부 도선이 꼬인 형태는 현장에서 사용해 본 결과 시간에 따른 creep현상이 나타난다고 한다. 또한 케이블은 전단변형이 일어나 케이블이 끊어질 때까지 견딜 수 있는 충분한 지름을 가져야 하며 다른 특별한 장비 없이도 현장의 보아홀에 투입될 수 있을만큼 가볍고 유연해야 한다. 지름 12.7 mm의 동축 케이블은 이러한 두 가지 조건을 충분히 만족시킨다고 한다. 특히 중요한 것은 케이블이 그라우트를 통해 암반과 일체가 되게 하기 위해서 케이블을 둘러 싸고 있는 플라스틱 절연체가 제거된 케이블을 사용해야 한다는 것이다.

케이블 내에서 펄스의 전파속도는 광속도와 대비하여 백분율로 나타내는데 시험결과 본 연구에서 사용된 케이블의 전파속도는 0.83으로 나타났다.

3.2 전단시험

동축 케이블을 이용하여 지하 암반의 전단변위량을 측정하기 위해서는 케이블에 전단변형을 가했을 때 TDR 반사신호의 형태가 어떻게 바뀌는지와 반사계수와 전단변위량과는 어떤 상관관계를 가지는지를 알아야 한다.

지름 12.7 mm의 동축 케이블을 약 1.5 m 길이로 자른 후 TDR 테스터기와의 연결을 위하여 케이블의 한쪽 끝에서 약 1 cm 정도 외부 알루미늄 도선을 잘라내고 절연물질도 제거하여 내부 구리도선만 남기고 그 끝은 뾰족하게 갈아낸다.

보아 홀을 모사하기 위해 10×10×60 cm의 사각기둥 모양의 주물에 케이블을 삽입한 후 초속경 시멘트를 사용하여 그라우팅하여 일주일 간 양생시켰다. 양생시킨 시료의 주물을 제거하고 Fig. 5와 같이 시료의 양쪽 부분을 받침대로 지지하면서 가운데 부분을 아래 방향으로 밀어 그라우트와 그 안의 케이블에 전단변형을 가한다. 시료의 각 세 부분은 암반 블록을 나타내며 전단이 일어나는 두 부분은 암반 내 불연속면을 나타낸다. 변형이 진행되는 동안 전단이 일어나는 양 끝단에는 다

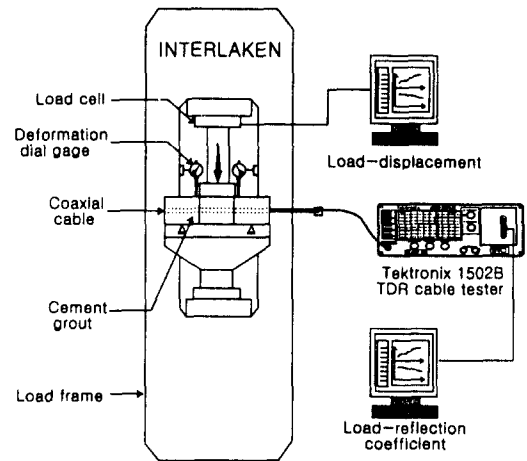


Fig. 5. Apparatus for cable shearing.

이알 게이지를 각각 설치하여 변위량을 측정하였고 매 1 mm의 변위가 발생할 때마다 가하던 하중을 정지시킨 후 그 때의 TDR 반사신호를 디지털 형식으로 PC에 저장하였다.

3.3 굴곡시험

일반적으로 현장에서 사용되는 케이블은 그 길이가 50~200 m 정도로 둥근 원통에 감겨져 있는 형태로 보아홀에 삽입된다. 케이블에 크리프를 주기 위해서는 감겨져 있는 케이블을 곧게 펴야 하며 보아 홀에 삽입할 때는 홀 입구에서 케이블이 휘어져서 들어가 홀 안에서 다시 곧게 펴지게 된다. 또한 TDR 계측에 사용되는 케이블은 매우 유연하여 케이블을 다시 감아 보관하거나 운반할 때도 휘어지거나 꺾여지기 쉽다. 이러한 경우가 반사되는 전압펄스와 TDR 계측에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 굴곡시험을 실시하였다.

이 실험은 Fig. 6과 같이 각각 지름이 47.3 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm의 둥근 원통에 케이블을 밀착시키고 0°에서 70°까지 매 10°마다 케이블을 휘면서 각 경우에 반사되어 오는 신호를 관찰하고 반대로 케이블을 펴면서도 파형을 관찰하였다. 또한 직각 모서리에 대해서도 동일한 실험을 실시하였다.

3.4 50 m 케이블의 전단 및 crimp실험

케이블의 시작점에서 측정지점까지의 거리가 늘어날수록 케이블 자체의 저항 때문에 반사계수의 진폭이 감소하게 된다. 따라서 현장에 적용된 케이블로부터 구한

반사계수를 이용하여 그 지점의 변위를 구하기 위해서는 그 케이블과 동일하거나 그 길이 이상의 케이블을 사용하여 전단실험을 수행하여야 한다.

지름 12.7 mm, 길이 50 m의 케이블을 장시간 동안 사람이나 차량 등이 다니지 않는 곳에 일직선으로 깔아 놓은 후, 매 5 m마다 전단변위를 주었다. 길이 30 cm, 지름 5.5 cm의 PVC파이프를 3등분 하여 자른 후 다시 이를 테이프 등으로 결합시켜 케이블을 관통하도록 한다. 3등분된 각 파이프는 상부에 지름 0.5 mm의 구멍을 뚫어 케이블의 매 5 m지점에 위치시킨 후 Hydrostone을 이용하여 파이프와 케이블을 그라우트 시켰다. 전단변위를 주는 방법으로는 바이스 세 개를 Hydrostone을 사용하여 일직선으로 붙여서 고정시킨 후 삼등분된 파이프를 각각의 바이스에 물린다. 양 끝 바이스를 조여 파이프를 고정시킨 후 가운데 바이스를 앞으로 밀어 전단을 주게 된다. 변위의 측정은 바이스의 회전각으로 계산할 수 있다. 본 실험에서 사용된 바이스는 한 바퀴당 4 mm를 전진하는 것으로 매 2 mm마다 반사계수의 데이터를 저장하였다.

변위가 발생한 지점의 위치를 정확히 알기 위해서는 케이블을 보아 홀 내에 삽입하여 그라우트하기 전에 이미 알고 있는 지점에 크림프를 만들어 주게 되는데 크림프의 길이가 너무 얇으면 케이블의 시작점에서 먼 곳으로 갈수록 신호가 작아져서 구분이 어렵고 또한 너무 길으면 변위 발생으로 인한 반사신호에 직접적으로 영향을 주게 된다. 따라서 케이블의 끝 부분까지 명확히 구분할 수 있고 또한 반사신호에 영향을 미치지 않는 적절한 크림프의 두께와 넓이를 아는 것이 중요

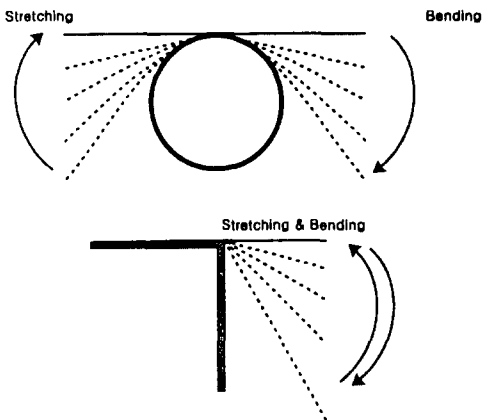


Fig. 6. Apparatus for cable bending.

하다.

크림프를 만드는 방법으로는 바이스를 Hydrostone에 고정시킨 후 11×20×50 mm의 사각기둥을 바이스의 양 쪽에 고정시킨 후 케이블을 그 사이로 관통되게 설치한다. 크림프의 길이는 바이스의 손잡이가 있는 부분의 맞은편에 다이알 게이지를 설치하여 측정하였다. 바이스는 1회전에 1.75 mm를 전진하는 것으로써 반 바퀴 전진할 때마다 반사신호를 저장하였다.

4. 실험결과

4.1 전단실험결과

전단변형 동안의 TDR 반사신호의 변화는 Fig. 7과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 전단이 진행됨에 따라 음의 방향으로 반사신호의 스파이크가 증가함을 알 수 있다. 전단이 최종 진행되어 외부 알루미늄 도선이 끊어지면 회로가 열리게 되고 결과적으로 양의 방향의 반사신호가 나타난다.

Fig. 8은 전단변위와 반사계수 사이의 관계를 나타낸다. 음의 방향으로의 반사계수는 전단변위와 선형적인 관계를 나타내지만 초기 변위가 발생할 때까지는 반사계수의 신호가 나타나지 않는다. 감지할 수 있을 정도의 반사계수가 나타나는데 필요한 변위량은 동축 케이블의 지름, TDR 케이블 테스트의 세팅상태, 케이블 테스트와 변위발생 지점과의 거리에 따라 달라진다. 수직 비율이 50 mrho/division이고 수평비율이 10 cm/division으로 케이블 테스트를 세팅하였을 경우 변위지점

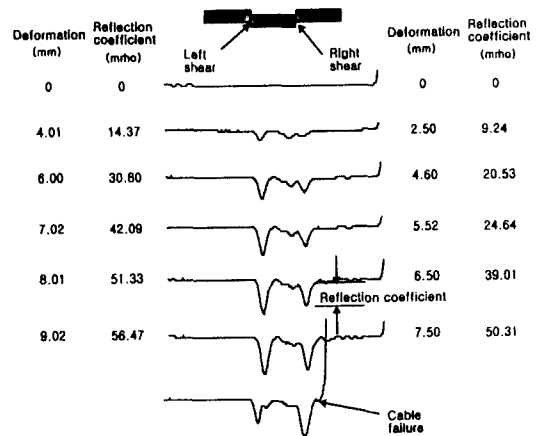


Fig. 7. Reflected voltage signals from shearing 12.7 mm cable to failure

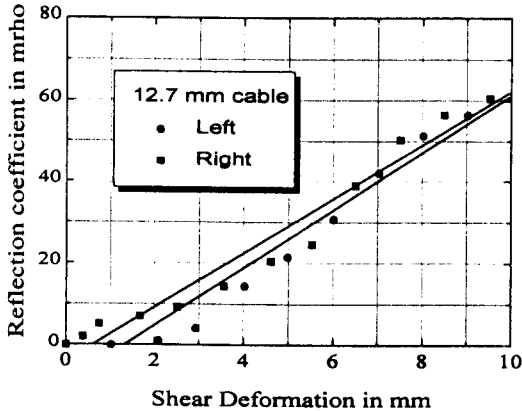


Fig. 8. Relation between reflection coefficient and shear deformation.

까지의 거리가 1.9 m에서 감지할 수 있는 반사계수의 신호가 잡히는 변위량은 약 0.56 mm에서 1.35 mm 가량이다. 위와 같은 실험조건과 케이블 테스트의 세팅상태에서는 반사계수와 전단변위량과의 선형적인 관계는 각각 6.66 mrho/mm, 7.04 mrho/mm로 나타났다. 이러한 실험결과들을 일반화하기 위해서는 케이블 테스트의 세팅을 다르게 하거나 변위지점까지의 거리를 다르게 하면서 실험을 하여야 한다. 지름이 작은 케이블은 작은 변위 변화에도 민감하게 반응하는 반면 최대 허용 변위가 작고 지름이 큰 케이블은 변위 변화에 따른 반사신호의 민감도가 떨어지는 반면에 케이블이 끊어지기까지의 최대 변위 허용량이 크다. 따라서 현장에 적용할 경우 위 두 가지 경우를 충분히 고려하여 케이블을 선택하여야 한다. 즉, 변위발생량이 크지는 않지만 변위 변화를 세밀하게 모니터링 할 필요가 있는 현장에서는 작은 지름의 케이블을 사용하고 변위 발생량이 크고 변위 변화를 조밀하게 모니터링 할 필요가 있는 현장에서는 비교적 큰 지름의 케이블을 사용해야 한다.

4.2 굴곡시험 결과

Fig. 9는 지름이 각각 47.3 mm, 100 mm, 그리고 직각으로 케이블을 휘 때와 펼 때의 휨 각도와 반사계수와의 관계를 보여준다.

굴곡지름 47.3 mm의 경우 70°로 휘었을 때의 반사계수의 변화는 4.33 mrho이고 다시 원 상태로 회복되었을 때의 반사계수 변화는 2.67 mrho이다. 굴곡지름 100 mm의 경우에는 각각 0.67 mrho와 0.33 mrho로

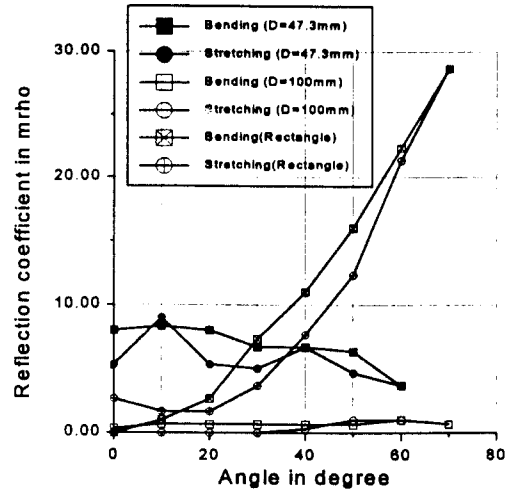


Fig. 9. Relation between reflection coefficient and bending angle.

나타났고 직각으로 휘었을 경우에는 반사계수의 변화가 70°에서 28.66 mrho, 원상태로 회복되었을 경우에는 2.66 mrho로 나타났다. 따라서 지름 100 mm에서부터 직각까지 70°로 휘었다가 다시 펼 경우 최대 반사계수의 변화량은 2.7 mrho 이하로써 매우 적음을 알 수 있다. 지름이 200 mm이상의 굴곡시험의 경우에는 굴곡지점을 찾아낼 수 없을 정도로 반사계수의 변화가 거의 없었다. 일반적으로 100-200 m의 비교적 긴 케이블을 운반하거나 보관시, 또는 보아 홀에 투입하는 과정에서 중대한 실수를 하지 않는 한 굴곡직경이 200 mm 이하이거나 휨 각이 70°이상을 넘어가는 경우는 거의 없으며 또한 휘었던 부분을 다시 펼 경우엔 반사계수의 변화가 미미하므로 TDR 케이블을 현장에 적용할 때 케이블의 휨 문제는 크게 고려되어야 할 사항이 아님을 알 수 있다.

4.3 50 m 케이블의 전단 및 crimp실험

Fig. 10으로부터 측정지점에서 변위지점까지 거리가 멀어지더라도 변위변화와 반사계수 사이에는 선형적인 상관관계가 있음을 알 수 있다. 하지만 거리가 늘어남에 따라 반사신호의 진폭이 점점 감소하게 된다.

8 mm의 변위를 주었을 때 측정지점으로부터 5 m 떨어진 지점에서의 반사계수는 93.88 mrho인 반면에 똑같은 변위를 주었을 경우 45 m떨어진 지점에서의 반사계수는 4 mrho 로써 4.26%로 작아졌다. 측정지점으로부터 멀어질수록 반사계수의 크기는 작아지고 음의 스

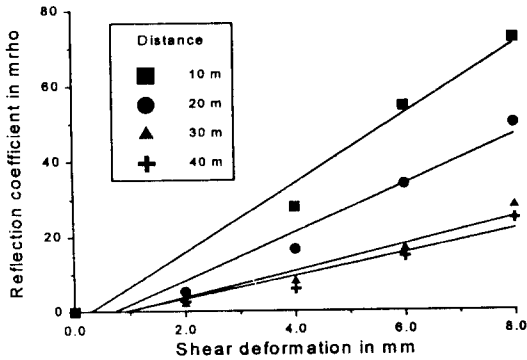


Fig. 10. Reflection coefficient versus shear deformation relationships for long coaxial cables up to 50 m.

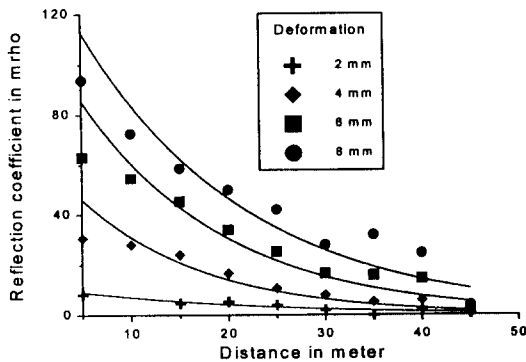


Fig. 11. Reflection coefficient versus transmission distance relationships for four different magnitudes of shear deformation.

파이크로 내려가는 부위의 넓이는 점점 더 벌어지지만 45 m 지점에서 2 mm의 전단변위가 발생하였을 경우에도 반사신호의 변화를 명백히 알 수 있다. 따라서 이 실험의 결과로 TDR을 이용한 계측이 50 m 길이까지의 전단변위를 파악하는데 충분히 이용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 현장에서 얻어진 반사신호의 자료를 이용하여 50 m까지 각 지점의 변위를 계산하기 위한 그림이다. 반사신호의 변화가 뚜렷한 지점의 반사계수의 양과 측정지점까지의 거리를 알면 Fig. 11로부터 그 지점의 대략적인 변위를 알 수 있다. 하지만 이 그림은 본 연구에서 사용된 것과 동일한 케이블, 케이블 테스터기, 테스터기의 셋팅 상태에 대해서만 적용할 수 있다.

Table 1은 넓이가 각각 11 mm와 20 mm인 경우에 계측기로부터의 거리에 따른 크립프의 길이와 반사계수를 비교하여 보여준다. 크립프의 넓이가 넓어질수록

Table 1. Summary of results for crimped cables

Width	Dist. Depth	10 m	20 m	30 m	40 m
		11 mm	0.875 mm 2.625 mm	6.12 36.72	5.33 28.00
20 mm	0.875 mm 2.625 mm	8.16 44.88	6.67 44.66	3.34 23.34	2.99 18.67

반사계수의 크기가 커짐을 알 수 있다. 크립프는 쉽게 알아 볼 수만 있으면 되므로 TDR 테스터기의 셋팅 상태에 따라 달라지겠지만 일반적으로 5~10 mrho 정도의 반사신호 크기면 적당하다. 그러나 크립프의 길이가 너무 길으면 그 영향으로 인해 반사신호의 해석이 왜곡될 수 있고 또한 크립프의 넓이가 너무 넓으면 그 부분에 전단변형이 일어날 확률이 높아진다. 따라서 일정한 크기의 반사계수가 나타나도록 크립프를 주되 그 넓이와 깊이를 모두 고려하여야 한다.

또한 크립프의 수를 너무 많이 주게 되면 크립프를 지나는 동안 펄스의 에너지가 많이 손실되게 된다. 따라서 현장 조건에 따라 크립프 간격을 적절히 조정해 주어야 한다. 즉, 관심있는 지점의 위치가 알려져 있다면 그 지점 부근에 단일 크립프만 주어도 된다. 또 케이블이 전단변형에 의해 끊어지기 전까지는 케이블의 끝 부분도 크립프의 역할을 대신할 수 있다.

5. 현장적용

현장 계측장소는 전라남도 화순군 화순광업소 일대로 이 일대의 석탄층은 지표 근처에서부터 부존되어 있는 경우가 많아 채굴구역이 마을이나 농경지 바로 하위의 천부에 형성된 곳이 여러군데 있다. 이와 관련, 일부 구역에 광해가 발생된 사례가 있었는데 본 조사의 대상지인 천덕리 성덕마을도 석탄개발지에 인접해 있는 탓에 1980년대 초부터 광해 관련 민원이 일기 시작하여 현재에까지 이르고 있다. 따라서 본 조사는 이 일대의 지반 안정성을 검토하고 지반침하 여부를 파악하는데 목적이 있다.

동축 케이블 외부의 알미늄 도선과 공내수가 일시적인 반응을 일으키지 않게 하기 위하여 표면에 페인트를 약간 분무하고 그라우팅의 강도를 약화시키는 고 PH 시멘트 그라우팅을 사용하였으며 케이블은 PVC 그라우팅 튜브에 묶어서 공 속으로 밀어 넣었다. 현장계측을 위하여 F2공에는 직경 12.7 mm, 길이 170 m의

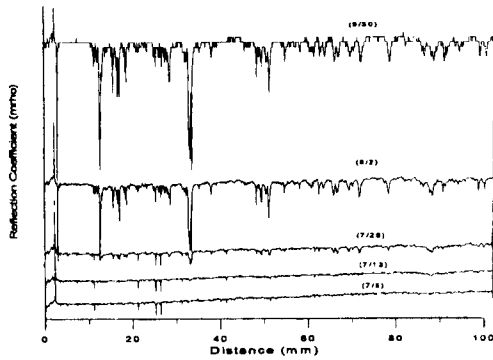


Fig. 12. Result of TDR monitoring in C4 site. (100 m)

TDR 케이블을 공속에 삽입하려 하였으나 공내에 있는 물의 부력으로 인해 120 m 이상은 삽입하기가 어려워 케이블의 하단에 무게 약 20 kg의 철근을 묶은 다음 삽입하였다. C4공에는 길이 100 m의 TDR 케이블을 삽입한 뒤 시멘트로 그라우팅하였다. TDR 케이블은 시추공 내에 삽입하기 전에 10 m마다 크림핑 도구로 길이 3 mm의 크림프를 주었고 케이블이 매설되기 이전 및 이후에 대해서 모두 계측을 실시하여 그라우팅 재료가 고결된 후 실시되는 계측결과와 비교 분석하는데 활용하였다.

데이터의 유실을 막기 위해 6개의 서로 다른 수직 스케일과 수직 위치를 이용하여 데이터를 저장하였다.

Fig. 12~ Fig. 13의 C4공 및 F2공에서의 계측된 파형을 보면 2.64 m 지점에서 강하게 위로 향하는 스파이크가 나타나는데 이는 케이블 테스터기로부터 나온 연결선이 매설된 동축 케이블에 연결되는 커넥터 부분의 효과로써 TDR 케이블과 케이블 테스터기의 연결에 세심한 주의(방수 및 이물질 최소화, 조임에 의한 실드 효과의 최대화)를 기울여 이 효과를 최소화하여야만 보다 나은 계측 결과를 얻을 수 있다.

연결부위의 길이 때문에 실제 심도는 계측 결과보다 약 2.7 m 더 깊다. C4공의 계측 결과를 보면 25 m 지점과 26 m 지점에서 아래로 향한 두 개의 스파이크 파형이 처음 계측부터 관측되는데 이는 케이블 매설시 케이블이 시추공에 삽입되는 과정에서 생긴 결함으로 지중 변위와는 무관한 현상인데 이와 같은 크고 작은 현상의 효과를 제거하기 위해서는 초기치를 면밀히 계측해 두었다가 차후의 계측파형으로부터 초기의 파형값을 빼 차이만으로써 계측결과를 분석할 수 있다.

C4공 및 F2공의 계측파형에서 $10\text{ m}+\alpha$, $20\text{ m}+\alpha$,

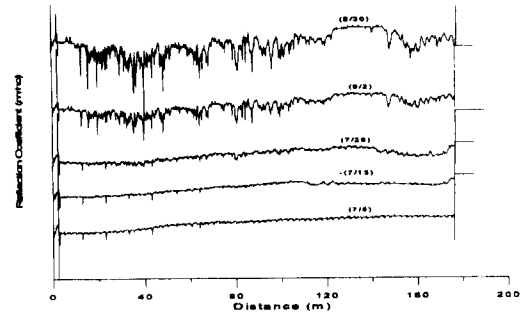


Fig. 13. Result of TDR monitoring in F2 site. (175 m)

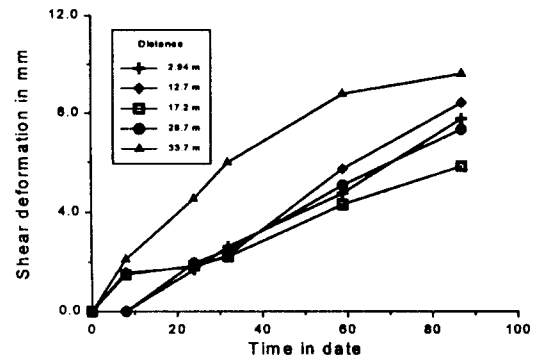


Fig. 14. Shear deformation versus time in C4 site.

$30\text{ m}+\alpha$, $40\text{ m}+\alpha$, $50\text{ m}+\alpha$, $60\text{ m}+\alpha$ 의 각 지점들에서 아래쪽으로 향한 스파이크 들이 관측되는데 이들이 인공적으로 만든 크림프에 의한 결과들이며 펄스 에너지의 손실로 인해 60 m 심도 이하부터는 잘 관측되지 않고 있다.

C4공의 계측결과에서 7.5일에서 7.13일의 계측파형은 8일이 경과하였지만 변화를 거의 감지할 수 없지만 7.29일의 계측파형에서는 약간의 변화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉, 13 m, 33 m, 50 m, 65 m, 70 m, 88 m 지점들에서 아래로 향한 스파이크 파형이 최대 1 m 이상의 폭을 가지고 나타남을 관측할 수 있다.

F2공의 계측결과 파형을 분석해보면 마찬가지로 7.5일에서 7.13일까지의 계측파형은 변화가 거의 없지만 마지막 관측일인 9.30일 자료를 보면 전 구간에 걸쳐 수 많은 전단변위가 일어났음을 알 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 C4공과 F2공에서 50 m 이내에 변위가 상당히 진행된 곳의 시간에 따른 반사계수의 변화값을 이용, 50 m 동축 케이블로 수행된 전단실험을 바탕으로 만들어진 Fig. 11에 의해 구한 각 지점의 시간에 따른 전단변위를 보여준다.

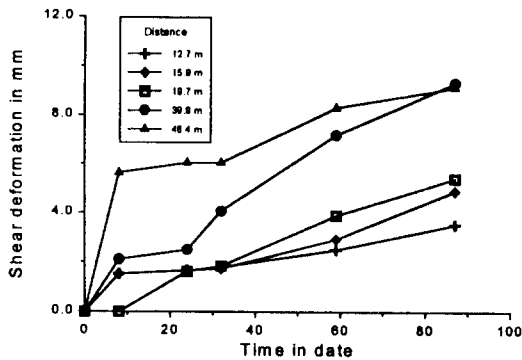


Fig. 15. Shear deformation versus time in F2 site.

6. 결 론

채광이나 지하 구조물의 시공 등으로 인해 발생하는 지반침하하는 지하 및 지상 구조물의 안정성에 중대한 영향을 미친다. 이러한 지반침하를 예측하고 적절한 보강법 등을 결정하기 위해 끊임없는 계측을 실시하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 TDR을 이용, 현장에서 전단변형을 측정하기 위해 실내 전단실험 및 굴곡실험, 그리고 50 m 동축 케이블을 이용한 전단 및 크림프실험을 수행하였고 100 m 및 175 m 길이의 케이블을 현장에 설치하여 반사되어온 파형을 분석함으로써 전단변위를 측정하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 지름 12.7 mm, 길이 1.5 m의 동축 케이블을 시멘트로 그라우트하여 전단변형을 주었다. 전단변위가 증가함에 따라 반사신호는 음의 방향으로 스파이크 형태를 나타냄을 알 수 있었다. 전단변위와 반사계수 사이에는 6.66~7.04 mrho/mm의 선형적인 상관관계가 나타났다.

2. 길이 2 m의 동축 케이블을 여러 지름을 갖는 원통과 직각모서리에 대고 휘는 굴곡실험을 수행하였다. 지름 100 mm에서부터 직각까지 70°로 휘었다가 폼을 경우 최대 반사계수의 변화량은 2.7 mrho이하로써 매우 적어 케이블의 굴곡 여부는 TDR 계측에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

3. 지름 12.7 mm, 길이 50 m의 케이블을 사용하여 전단실험을 수행하였다. 짧은 케이블에서의 전단실험과 마찬가지로 전단변위와 반사계수 사이에는 선형적인 상관관계가 나타났다. 하지만 케이블 자체의 저항

때문에 반사신호는 계측기로부터 거리가 멀어질수록 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다.

4. 3과 같은 케이블을 사용하여 넓이 11 mm 및 20 mm의 크림프를 매 5 m마다 만들어 반사신호와 크림프 넓이 및 길이와의 상관관계를 연구하였다. 크림프의 길이는 전단변위와 마찬가지로 반사신호와 선형적인 관계를 나타내고 계측기로부터 멀어질수록 전단변위와는 달리 선형적으로 감소함을 알 수 있었다.

5. 전남 화순지역에 100 m 및 175 m의 동축 케이블을 설치하고 시간에 따른 반사계수의 변화를 측정하였다. 50 m 케이블의 전단실험 결과를 바탕으로 각 지점의 전단변위량을 계산함으로써 TDR 계측이 지하 암반 내 전단변형을 측정하는데 매우 유효함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- Moffitt, L. R., 1964, Time Domain Reflectometry-Theory and Applications, Engineering Design News, November, pp. 38-44.
- Topp, G. C., Davis, J. C., Annan, A. P., 1980, Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resources Research, 16(no. 3), pp. 574-582.
- 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(no. 149), pp. 1459-1474.
- Panek, L. A., Tesch, W. J., 1981, Monitoring Ground Movements Near Caving Slopes - Methods and Measurements, RI 8585, U. S. B. M., Denver, Colorado
- Dowding, C. H., Su, M. B., O'Conner, K. M., 1988, Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurements of Rock Mass Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr. Vol. 25, No. 5, pp. 287-297.
- Dowding, C. H., Su, M. B., O'Conner, K. M., 1989, Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Antenna Cables, Rock Mech. and Rock Engng., 22, 1-23.
- Dowding, C. H., Pierce, C. E., 1994, Measurement of Localized Failure Planes in Soil with Time Domain Reflectometry, Symp. and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Evanston, IL
- Dowding, C. H., Pierce, C. E., 1994, Use Of Time Domain Reflectometry to Detect Bridge

- Scour and Monitor Pier Movement, Symp. and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Evanston, IL
9. Pierce, C. E., Bilaine, C., Huang, F. C., Dowding, C. H., 1994, Effects of Multiple Crimps and Cable Length on Reflection Signatures from Long Cables, Symp. and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Evanston, IL
 10. Huang, F. C., Dowding, C. H., 1994, Telemetric and Multiplexing Enhancement of Time Domain Reflectometry Measurements, Symp. and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Northwestern University, Evanston, IL