

TDR을 이용한 지반변형의 측정사례

Monitoring of Ground Deformation using Time Domain Reflectometry

이우진¹⁾, Woo-Jin Lee, 김용진²⁾, Yong-Jin Kim, 이웅주³⁾, Woong-Joo Lee

¹⁾고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Korea University

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

³⁾석탄산업합리화사업단 부장, Coal Industry Promotion Board

1. 서론

1.1 일반

미국과 호주 등지의 광산에서 주로 적용되던 TDR(Time Domain Reflectometry)기술은 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.

TDR은 원격감지식 전기계측기술로 원래 전기송전선이나, 전화선, 광케이블이 파손된 경우 그 위치를 파악하기 위해 개발된 기술이다. 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 전달매체를 따라 전달되면서 전달매체 자체의 형상변화나 전달매체 주변의 물리적/전기적 변화가 있는 경우 신호가 반사되어 케이블시험기로 전달된다. 전기신호를 전달하는 매체는 지반이나 암반의 공동측정시 동축케이블(coaxial cable)을 일반적으로 사용하며 TDR신호는 동축케이블의 인장, 전단, 꺾임 등의 변형을 감지할 수 있다.

TDR은 기존의 계측방식에 비해 시스템의 설치가 쉽고 모뎀이나 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.

1.2 TDR시스템의 구성

지반변형의 측정을 위한 시스템은 TDR 케이블시험기(cable tester)와 동축케이블(coaxial cable)로 구성되며 그림 1과 같이 설치된다. 케이블 중간의 잘룩한 부분은 반사신호의 발생위치를 정확하게 알기 위해 인위적으로 설치하는 기준점이며, 케이블은 그라우트케이블과 묶여 시추공 내에 삽입하며 소요강도의 시멘트페이스트로 시추공과 케이블 사이를 채운다.

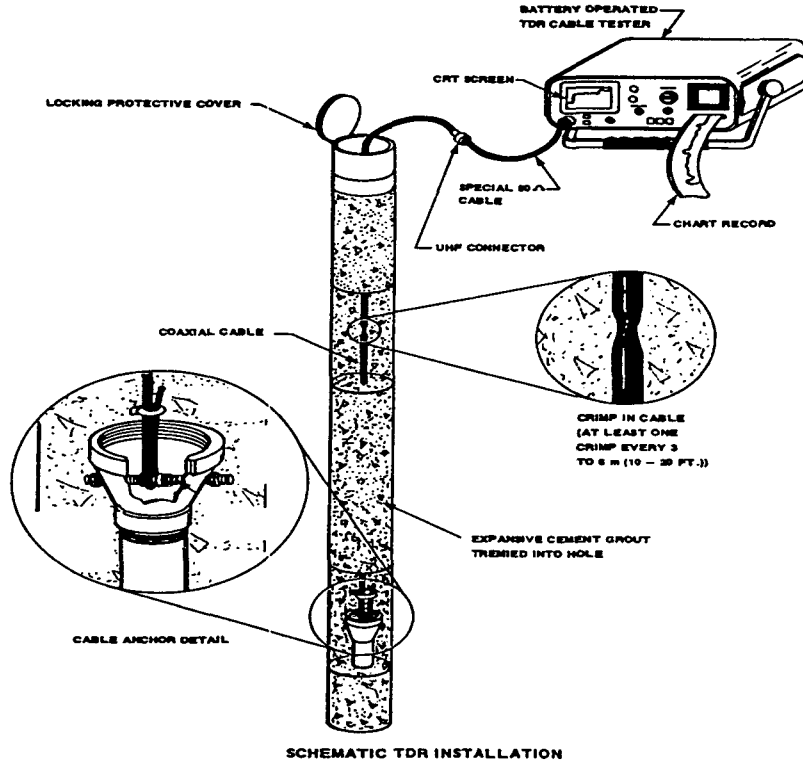
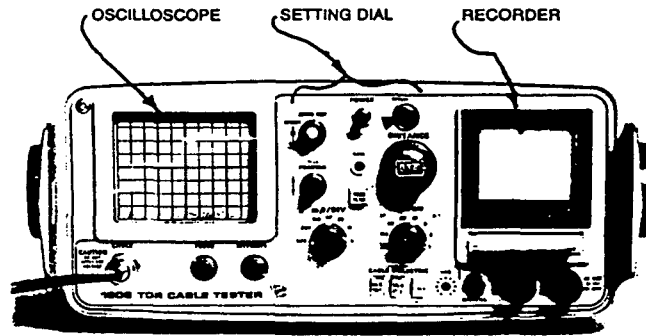
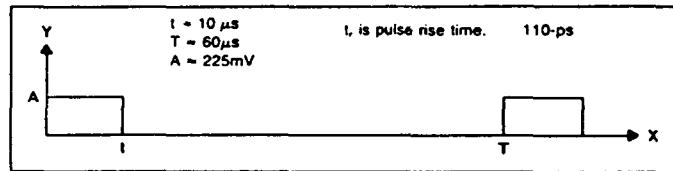


그림 1 지반변형 측정을 위한 TDR시스템의 설치도

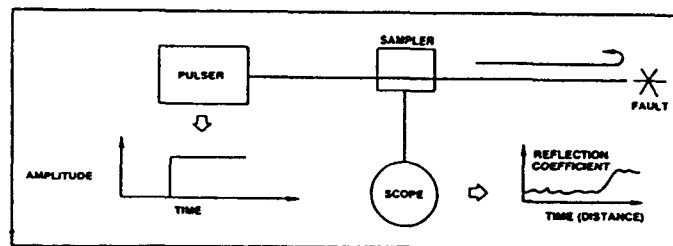
현재 시판되고 있는 TDR 케이블시험기는 약 6 가지 종류가 있으며 그림 2는 그중 하나인 Tektronix 1502 모델과 그 작동원리를 보이고 있다. 케이블시험기는 그림 2(b)와 같이 파의 상승시간이 아주 짧은 계단형 전압신호(ultra fast rise-time voltage step)들을 연속하여 발생시킨다. 케이블의 변형 등으로 인한 임피던스 변화가 발생한 곳에 전기신호가 도달하면 반사신호가 케이블시험기로 되돌아가며, 반사신호는 케이블에 전달되었던 신호와 중첩되어 반사계수(reflection coefficient)의 변화로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



(a) TEKTRONIX 1502 TDR CABLE TESTER



(b) NOMINAL TIME DOMAIN WAVEFORM



(c) OPERATING PRINCIPLE

그림 2 TDR 케이블시험기의 작동원리

1.3 동축케이블 변형에 의한 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. 동축 케이블의 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 3과 같다.

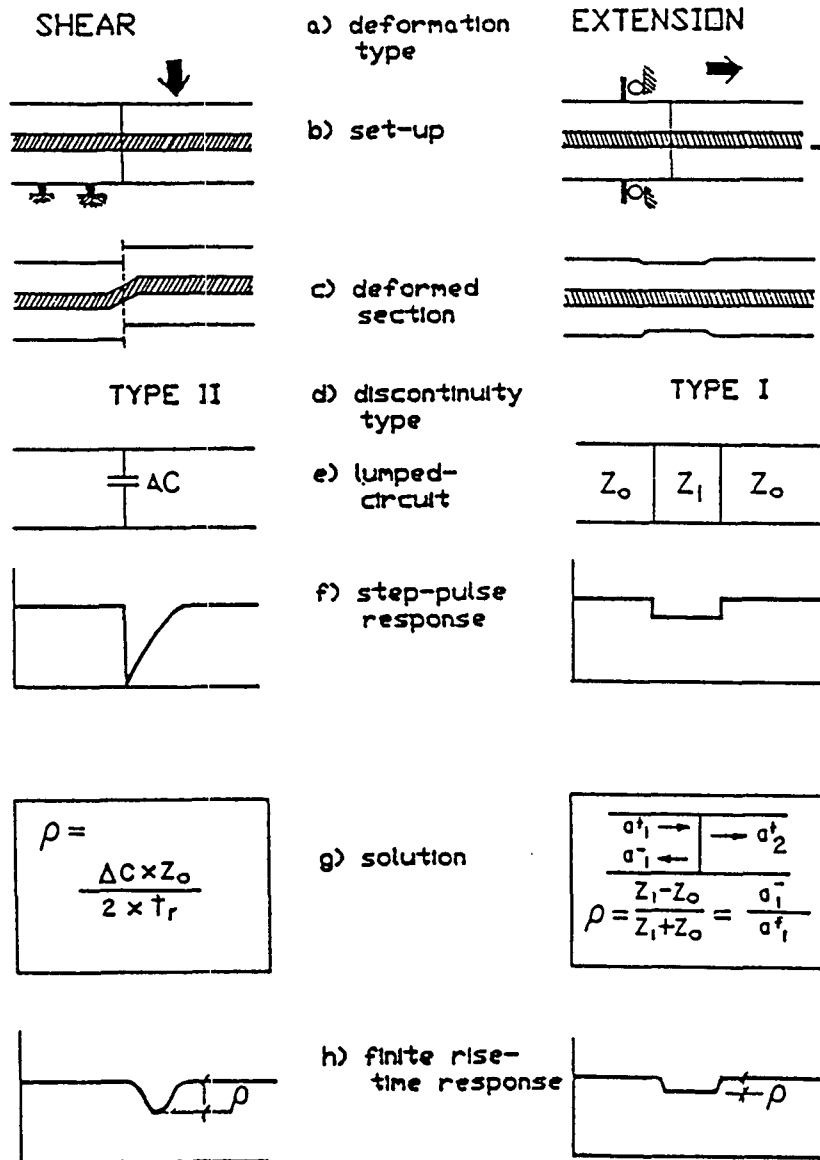


그림 3 Type I과 Type II 변형의 모델 및 반사신호

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 4는 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.

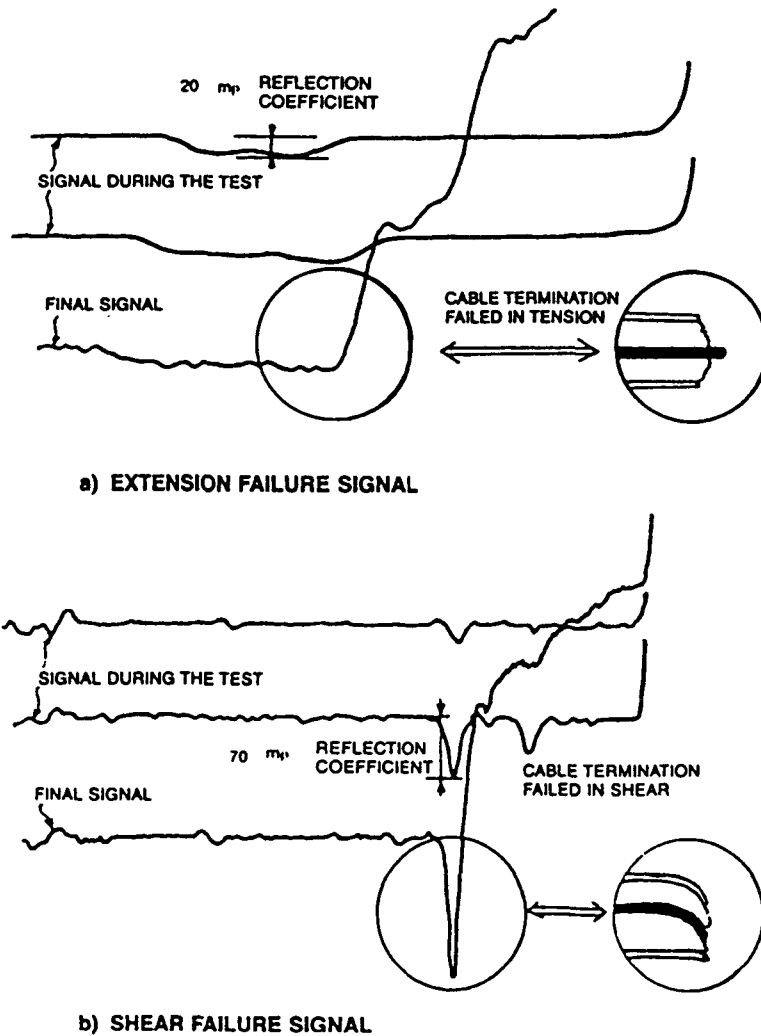


그림 4 변형종류에 따른 반사신호의 모양

2. 대상구간의 지질 및 설치

2.1 측정대상지역

강원도 태백시 화전동 추전지역 일대에서 기개발된 석탄채굴적에 의한 철도선로, 터널 및 도로 등의 침하에 대한 안정성분석 및 보강하기 위하여 1998~1999년 석탄산업합리화사업단에서 시행한 계측분석 결과의 일부분이며 위치도는 그림 5와 같다.

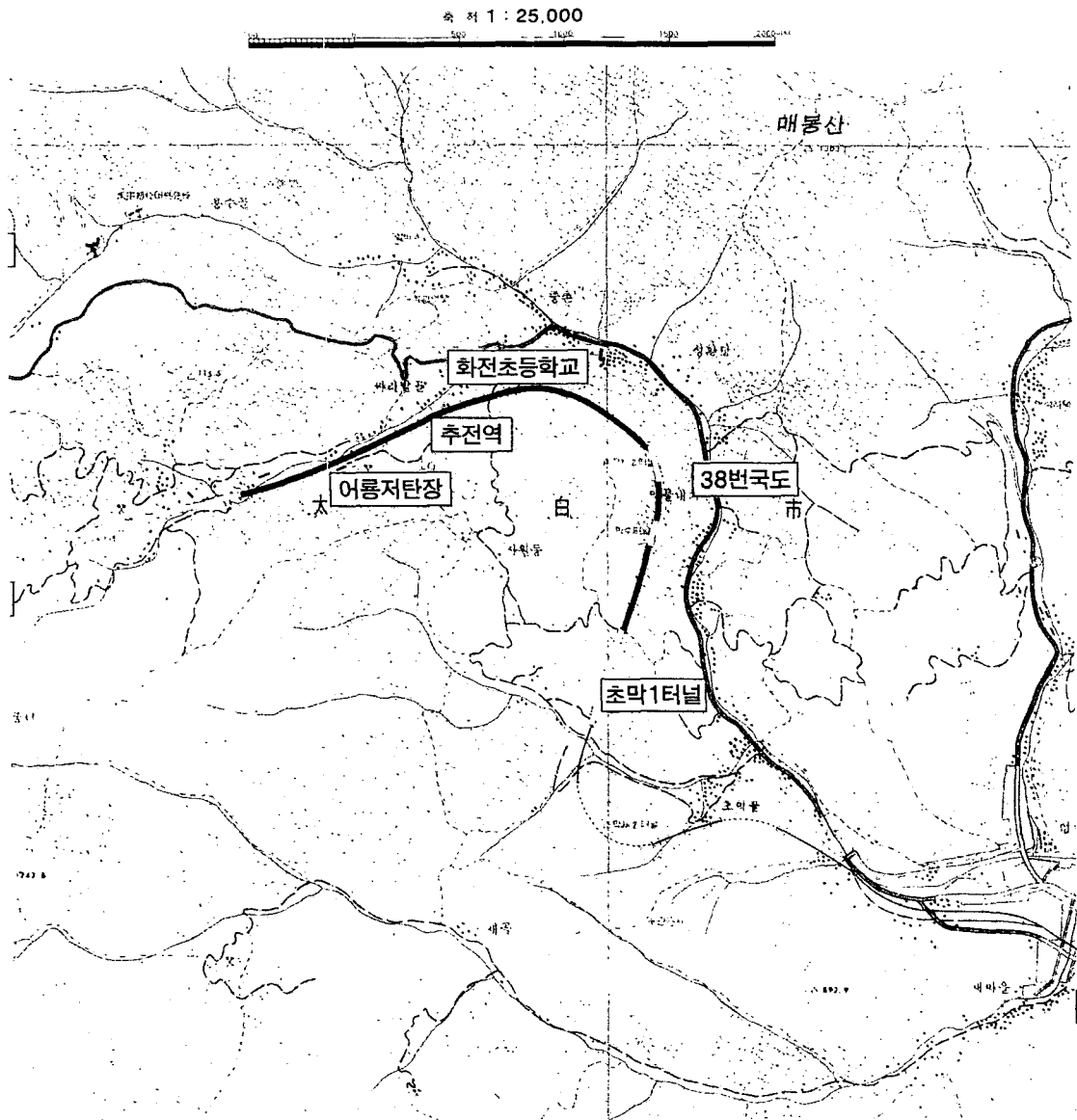


그림 5 사업지구 위치도

2.2 지질구조

측정대상구역의 일반적인 지질구조는 다음과 같다.

지질시대		지층명		두께	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
		페름기	고방산통	고한층	150~300
도사곡층	250~350			<ul style="list-style-type: none"> 주로 유백색~담록색의 조립내지 극조립 사암과 회색~녹회색 셰일의 협층으로 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 역질사암 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 셰립 사암으로 구성 암회색 석회암이 렌즈상으로 협재 연속성이 불량한 석탄층이 2~3매 협재
		홍점통	만항층	250~300	<ul style="list-style-type: none"> 주로 자색, 녹회색 혹은 담록색의 셰일과 담록색~녹색 또는 담회색의 중립~극조립 사암으로 구성 렌즈상의 석회암이 3~4매 협재
		오르도비스기	대석회암층	막동 석회암층	

본 지역은 단층과 습곡작용에 의해서 복잡한 지질구조를 가지고 있으며, 탄층은 사동통내 장성층이 2~3매의 윤회층으로 얇은 판상으로 협재한다.

주가행 탄층은 중탄층으로 평균탄폭 1~3m이며 부광대는 5~10m에 이르는 곳도 있다.

지질구조 및 과업목적에 따라 전체구역을 그림 6과 같이 6개 구간으로 분할하였다.

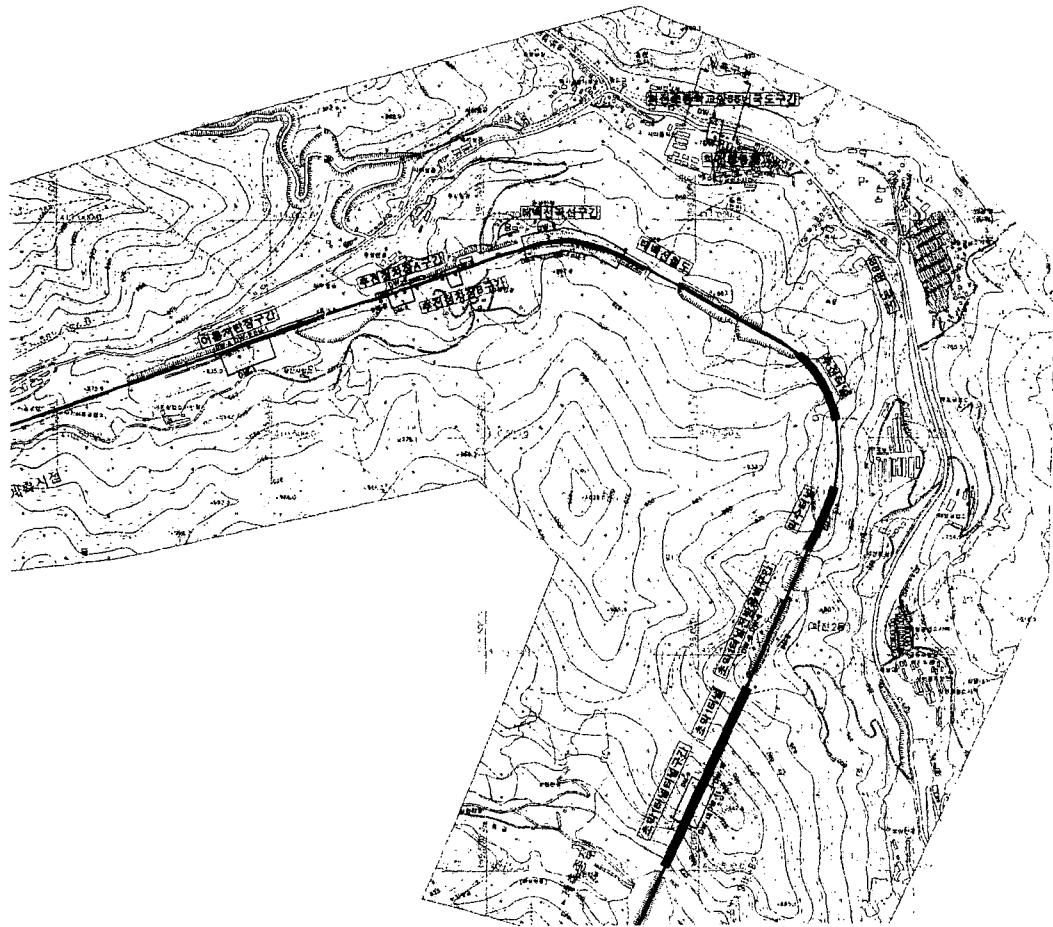


그림 6 과업대상구간 위치도

어룡저탄장, 추전정차장 구간에서는 비교적 지표 가까이까지 탄층이 나타나고 있으며, 태백선 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 지표가까이 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 국도구간은 정도가 완만한 경사로 넓게 발달하였다. 초막1터널 구간에서는 터널하부 50m까지 갱도가 나타나고 있으나 봉락식 채탄법으로 차탄하였을 경우 실제로는 철도하부 20~30m 정도까지 채탄작업이 진행된 것으로 판단된다. 또한, 탄층은 경사 50~70°정도의 급경사를 형성하고 있다.

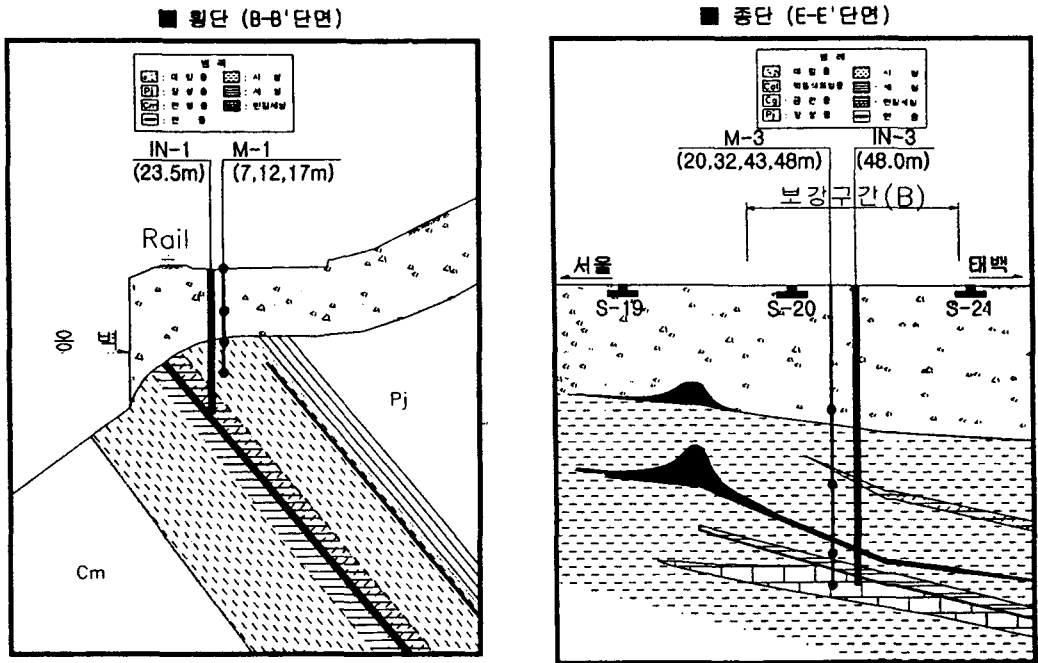


그림 7 지질횡단도의 예

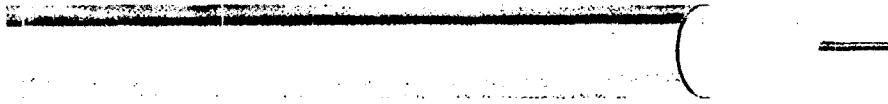
2.3 설치

본 과업에서는 미국의 Comm Scope General Instrument사 제품인 P-3 75-875CA가 동축케이블로 사용되었으며 제원은 표1과 같다.

표1 현장에 설치된 동축케이블의 제원

모델명	P-3 75-875CA
내도선 직경	4.93mm
절연재 외경	20.24mm
외도선 외경	22.23mm
외도선 두께	0.99mm
Capacitance	50±3.0nf/km
Impedance	75±2 ohms
전달속도	87%

P-3 75-875CA



Copper clad aluminum center conductor; expanded polyethylene dielectric; solid aluminum sheath.

그림 8 동축케이블의 예

지반 침하의 징후와 양 등을 파악하기 위하여 지표 침하판, 경사계, 일점침하계, 다점지중침하계, 균열측정기, TDR, 내공변위계 등이 설치되었으나 TDR은 태백선곡선부 3개소 추진터널전방, 막수터널전방, 초막 1터널전방 및 내부, 화전초등학교 운동장에 각 1개소가 설치되었다. TDR의 설치심도 및 특기사항은 다음 표와 같다.

표 2. 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~ 추진터널전방	T-3	75	56m 천공시 지하수출현, 56m 이후 sol상태의 탄이 차오름
추진터널전방~ 추진터널	T-4	75	80m 천공하였으나, 점토와 지하수 유입으로 75m까지 설치
추진터널~ 막수터널구간	T-5	65	-
초막1터널전방옹 벽~초막1터널	T-6	70	-
화전초등학교앞 38번국도	T-7	85	-도로하부 60~98m 탄층개발 -38번 국도침하로 몇차례 보정
초막1터널	T-8	25	-탄층심도 철도하부 25~30m -터널라이닝에 균열 및 누수

이상에 표기한 계측점중에서 T-1, T-2 및 T-5의 자료를 이용하여 실제 계측결과와 지반의 변위에 대하여 검토하고자 한다.

3. 계측결과 및 분석

3.1 동축케이블 변형의 일반적 형태

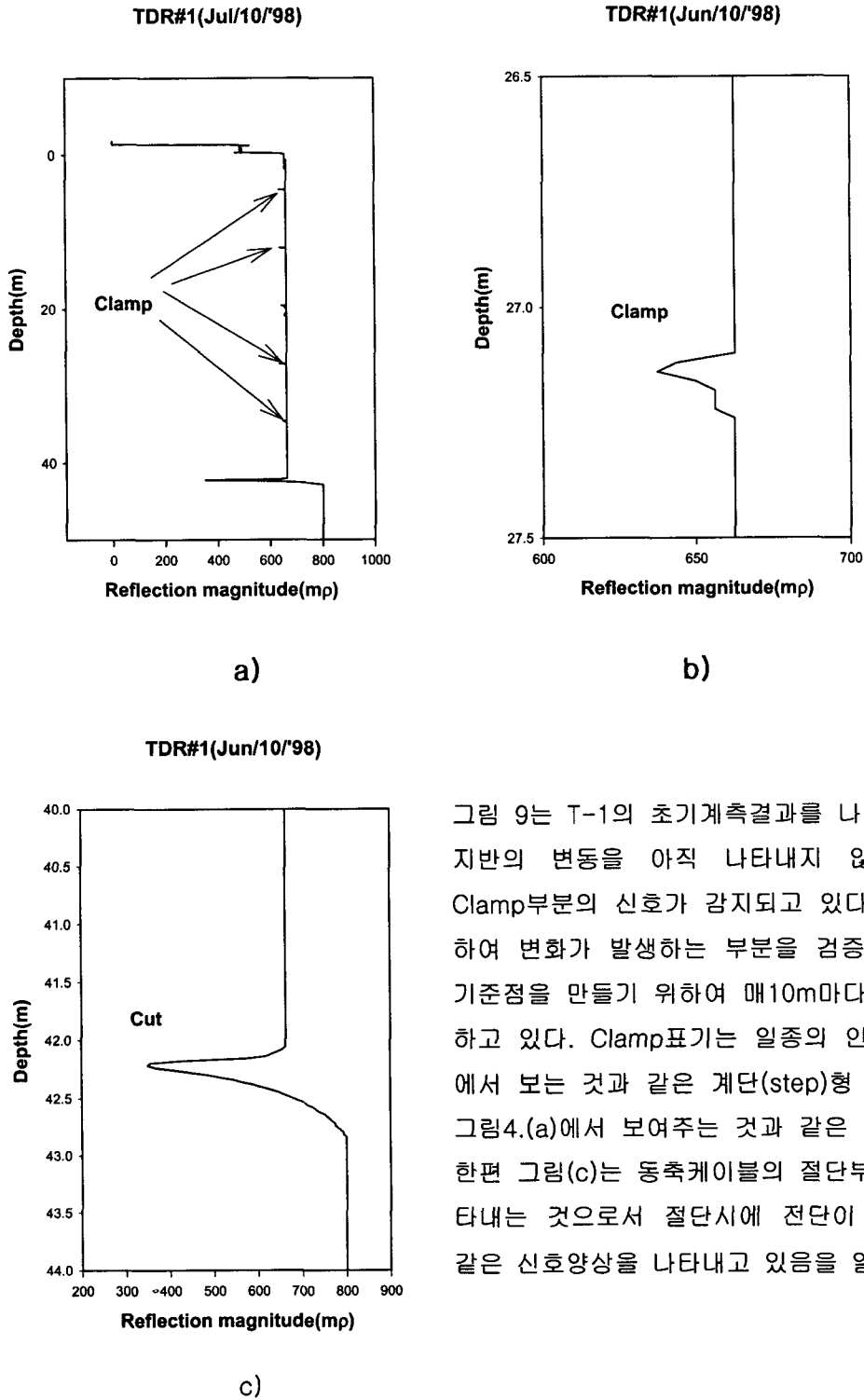


그림 9. T-1의 계측결과

그림 9는 T-1의 초기계측결과를 나타내고 있다. 설치직후는 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 b)에서 보는 것과 같은 계단(step)형 신호를 나타내는 것으로 그림4.(a)에서 보여주는 것과 같은 신호임을 증명하고 있다. 한편 그림(c)는 동축케이블의 절단부분에서의 신호변화를 나타내는 것으로서 절단시에 전단이 발생하므로 그림4.(b)와 같은 신호양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 태백선곡선부

태백선곡선부의 지층의 종, 횡단도 및 설치도는 그림 10과 같다.

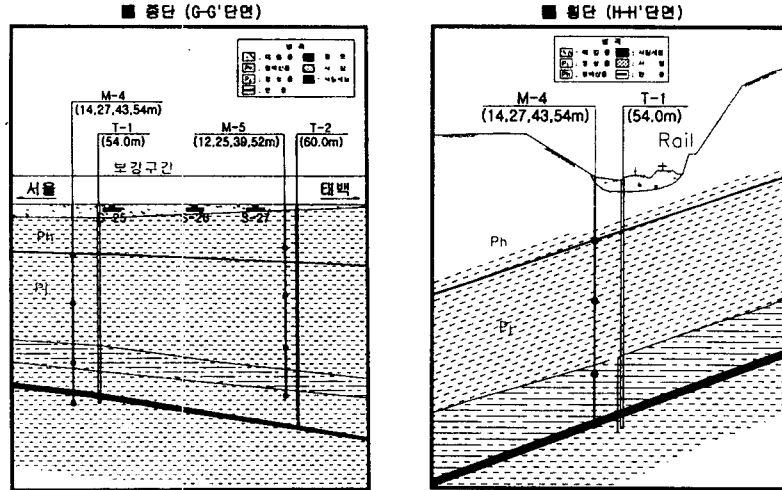


그림 10. 태백선 곡선부 구간

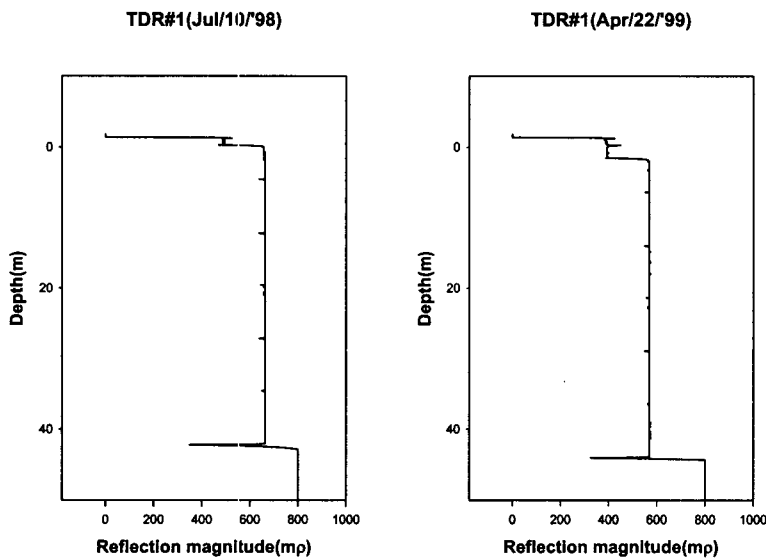


그림 11. 측정 1년후의 신호비교(T-1)

그림 11은 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 12는 인접한 곳에 설치한 T-2의 결과를 나타내고 있다. 그림 (a)는 설치한 후의 가장 안정된 신호형상이며 (b)는 7월10일의 신호이며 설치후 2주일정도가 경과하였지만 지반의 변형을 감지할 수 있는 신호가 곳곳에 나타나고 있다.

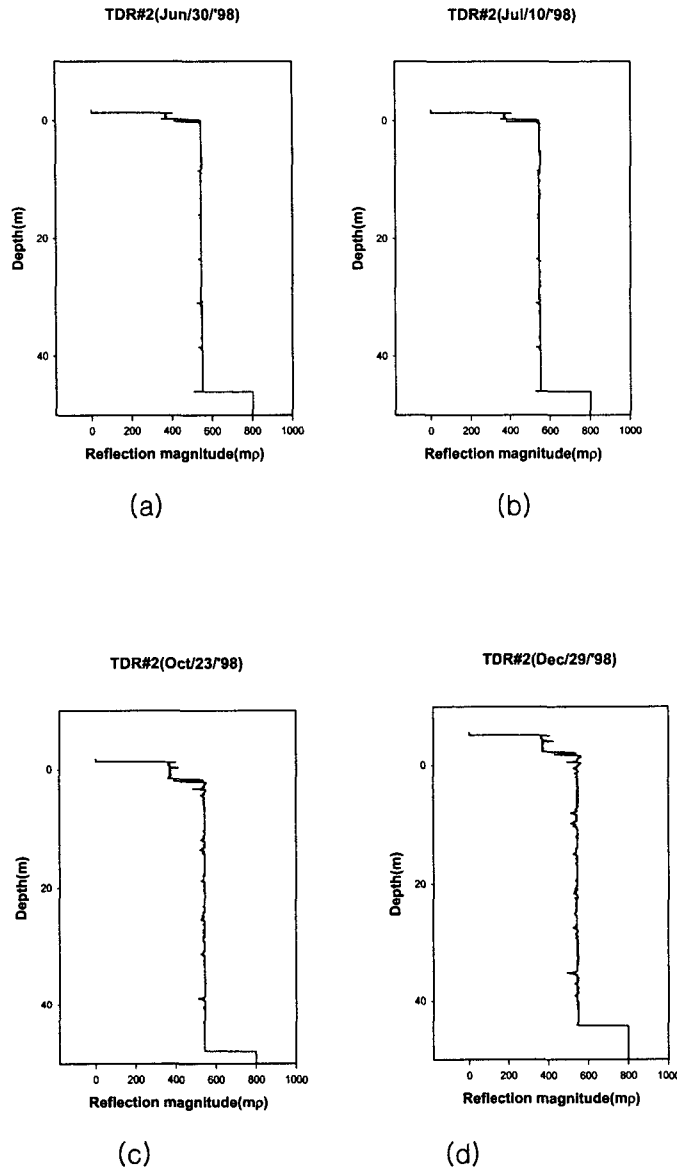


그림 12. T-2의 계측결과

그림 (c) 및 (d)는 10월 및 12월의 계측결과를 나타내고 있으며, 7월의 계측결과에 비하여 상대적으로 신호의 불규칙한 변화가 두드러지고 있다. 특히, 그림 13은 99년 1월의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 5m 이내의 신호는 12월29일의 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.

15m 및 38m 지점을 중심으로 반사계수의 변화가 감지되고 있는데 이곳은 세일고 사암의 경계부 즉 층리면에서 분리현상이 발생하고 있음을 유추할 수 있다. 인접하여 설치된 다점지중침하계와 비교하면 동일한 기간내에서 12m 소자에서는 약 35mm, 39m 소자에서도 약 35mm의 침하량을 기록하고 있음으로 미루어보면 상당히 신빙성이 있음을 알 수 있다.

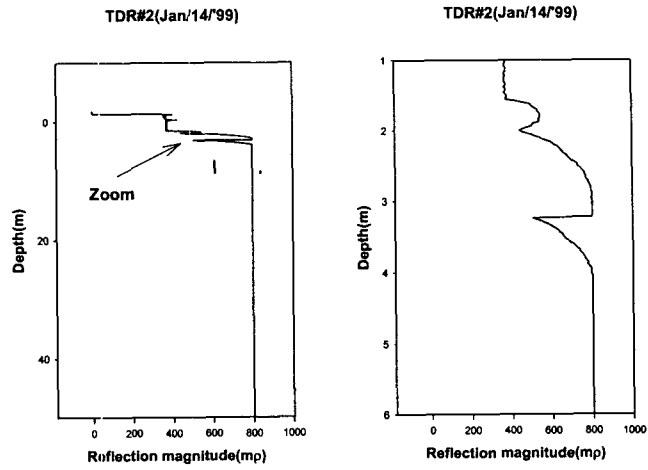


그림 13. 99년1월14일의 계측결과

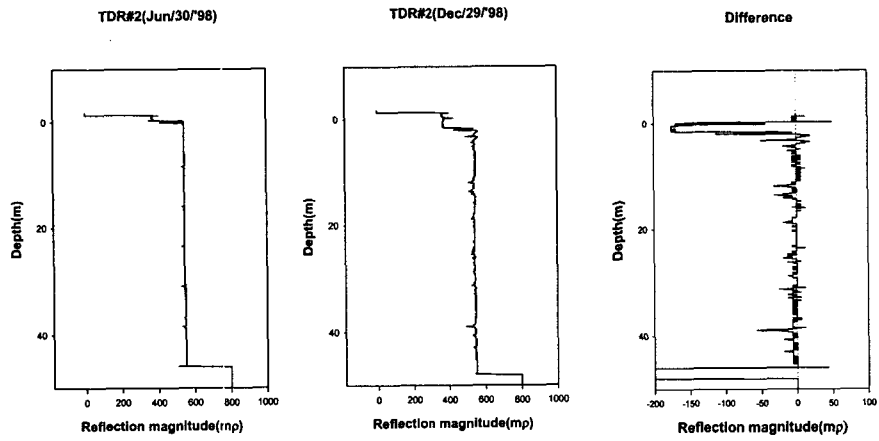


그림 14. 초기치와의 비교

3.3 추진터널~막수터널구간

그림 15는 T-5의 계측결과를 나타내고 있다.

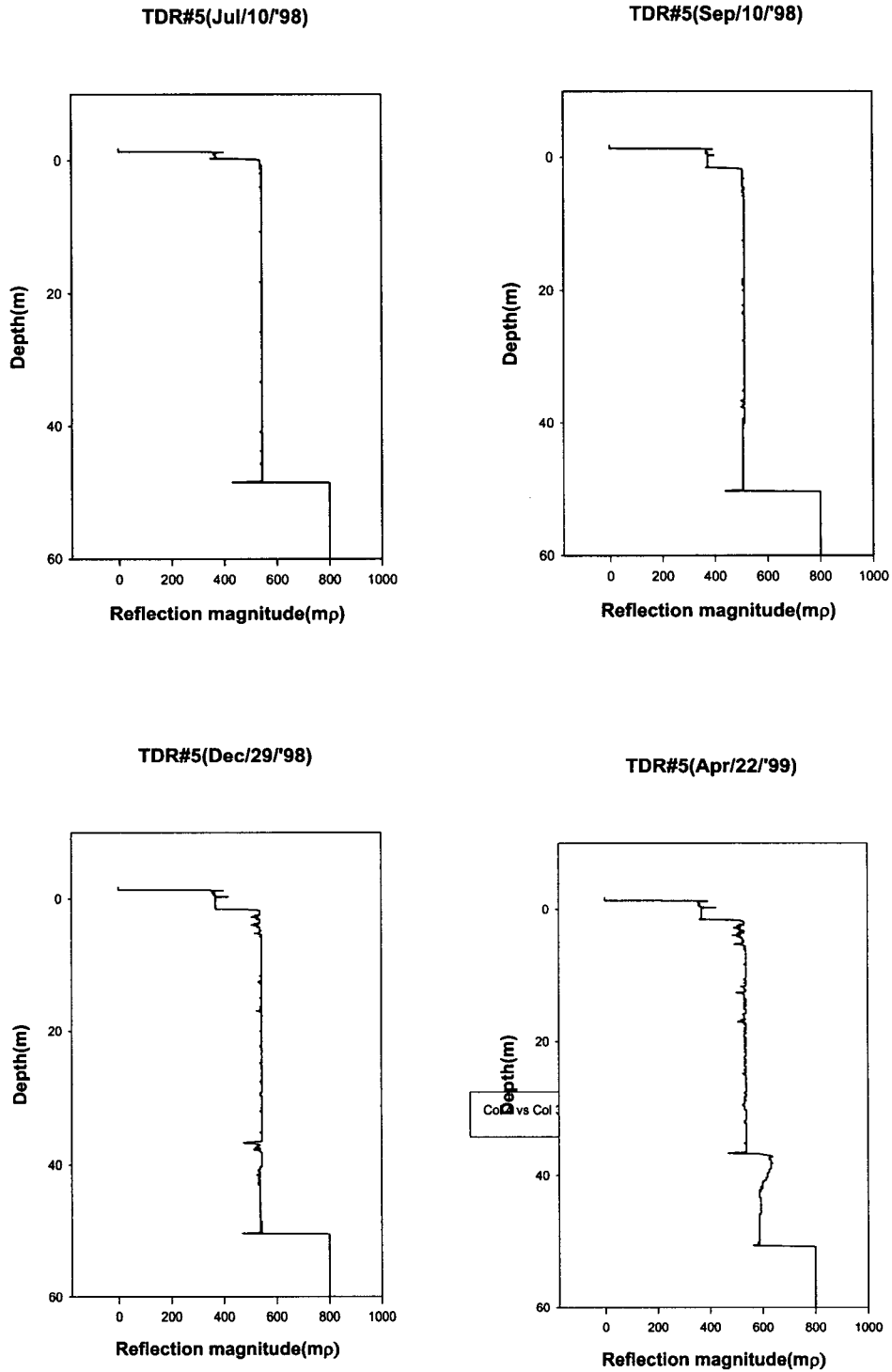


그림 15. T-5의 계측결과

초기에는 기준점의 반사계수만이 차이가 발생하지만 2개월후인 9월에는 20m 및 35m 내외에서 변화가 감지되고 있으며, 12월에는 상부의 5m 및 38m 내외에서 전단변위의 양상을 나타낸다. 20m 및 38m 지점부근은 암상이 변화하는 지점으로 특히 38m 부근에는 탄질세일층으로 나타나 있다. 매설후 약 10개월후인 99년 4월에는 38m 지점의 반사계수가 갑자기 증가하는 양상을 나타내는데 이것은 지하수가 동축케이블에 영향을 끼친 것이며, 이때에 지반 곳곳에서 변위가 발생하고 있다.

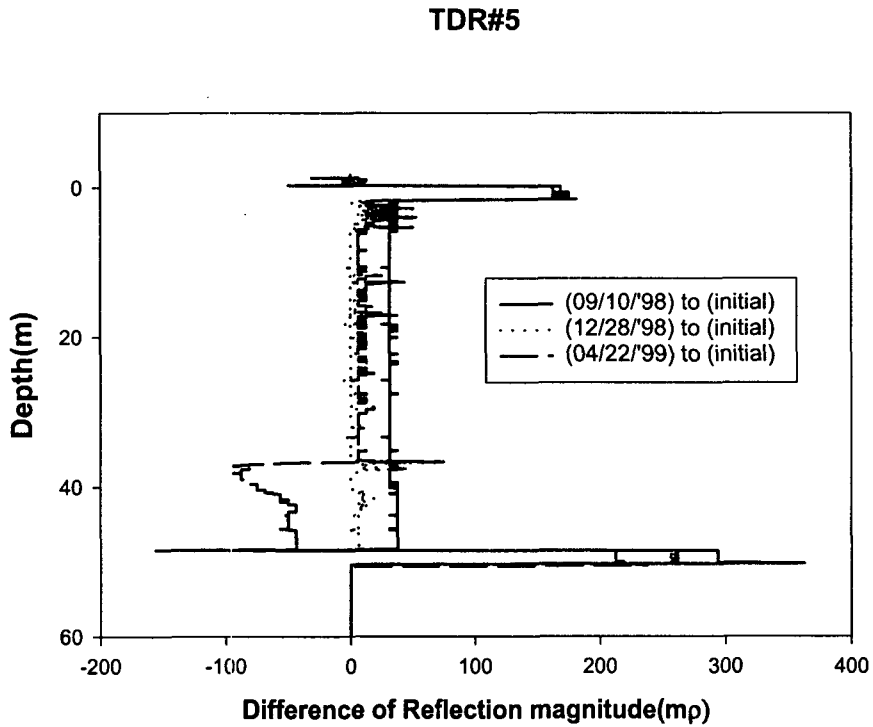


그림 16 반사계수의 비교

그림 16.은 초기치에 대하여 98년9월10일, 12월28일 및 99년4월22일의 계측결과를 반사계수차이로 나타낸 것으로서 99년12월 이후의 변화가 뚜렷이 나타나고 있다.

인접하여 설치된 다점지중침하계와 비교하면 7,21,29 및 44m에 설치한 소자가 공통적으로 28mm 정도의 침하를 기록하고 있으며, 경사계에서는 심도28m에서 침하에 의한 변위가 관측된 것으로 나타났다.

4. 결 론

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

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 없었지만 다른 종류의 계측결과와 비교하면 상당히 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

5. 감사의 글

강원도 화전지역 정밀계측조사의 일부를 인용하도록 허락하여 주신 석탄사업합리화사업단 관계자 여러분께 감사드립니다.

6. 참고문헌

- 정보화시공, 한국지반공학회, 2000, 지반공학시리즈 12, pp.497-511
- 석탄사업합리화사업단, 1999, 화전지역정밀계측조사보고서, 기술총서 99-03
- 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.
- 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.
- 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.