

물리탐사 기법에 의한 지반침하 조사 및 그에 따른 현장응용 사례

Geophysical applications for the investigation of ground subsidence and field examples

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성²⁾, Yoo-Sung Kim

¹⁾ 한국자원연구소 자원연구부 책임연구원, Principal Researcher, Resources Division, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

²⁾ 한국자원연구소 자원연구부 선임연구원, Senior Researcher, Resources Division, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

1. 서 론

지하에 공동이 생성되면, 그것이 자연발생(예: 석회암 동굴)이거나 혹은 인위적(예: 채굴적, 터널)이든, 기존 암반의 응력상태는 평형을 잃게되며 그 이후의 새로운 응력분포 형성과정은 자연스럽게 공동을 메우려는 경향으로 진전하게 된다. 이러한 과정이 지표면에 인접하여 진행된다면 지표면이 하락하는 즉, 지반침하 현상이 유발될 수 있는 것이다. 그림 1은 일종의 지반침하 과정을 예시하고 있다. 만약, 침하가 진전되면 침하 중심부에는 거의 수직방향으로, 침하 가장자리에는 횡압력이 크게 작용되어 지표면의 압축(compression) 내지 신장(extension)이 유발된다. 그림 2에는 이러한 점진적인 침하과정으로 인해 우선 여러 가지 시설물(예: 철로, 가스파이프)들이 다양한 형태로 파손되고 있음을 보여주고 있다. 물론, 상기 유형의 침하가 바로 인명피해를 유발하는 경우는 드물다고 할 수 있겠으나 그에 대한 적절한 대책은 경제적 및 기술적인 면에서 하나의 난제가 되고 있는 실정이다. 지반침하가 때로는 급격히 발생하는 경우도 국내에서 쉽게 접할 수 있다. 90년대 초 부평 공원묘지 붕락사고(묘지면적 약 200m²가 폭음과 함께 심도 약 10m 붕락됨)나 지표함몰로 인한 구포기차 전복사고는 이에 대한 대표적인 사례라 할 수 있다(그림 3 참조). 이와같이 시간적으로 급격히 발생하는 소위 sink-hole형 침하는 대체로 그 면적 규모는 작으나 때에 따라 인위적인 요인으로 가속화될 수 있다.

암석공학 측면에서, 단순히 지하에 공동이 형성되어 있다고 해서 반드시 침하가 일어난다고는 할 수 없다. 즉, 침하를 유발할 수 있는 지질구조 특히, 단층 내지 단층파쇄대의 발달상태(예: 경사, 폭, 충전 물질)가 무엇보다 중요한 침하 요인이 되는 것이다. 예를 들면, 상기 부평 공원묘지 붕락사고의 경우 그 하부에는 미충전 채굴적이 여러 심도에서 존재하며 동시에 크고 작은 단층 및 단층파쇄대가 급경사를 띄고 있음이 관찰되었으며 그로 인해 오랜 기간 동안 하부로부터 부분적인 붕락이 불연속면을 따라 연쇄적으로 발생되면서 사고 시점에는 급격한 지표함몰로 진전된 것으로 판단되고 있다(권광수 외, 1993). 국내 대부분의 광산지역은 이러한 특유한 지질구조를 보여주고 있기 때문에 상기 sink-hole형 침하는 여러 곳에서 쉽게 관찰되고 있다. 태백지역 어느 초등학교에서는 수업도중 교실 내 일부 지반이 함몰된 사례도 보고되고 있다. 따라서, 지반침하 과정을 이해하고 또한 그에 대한 안정성평가를 위해서는 무엇보다 지반에 대한 다음 세 가지 정보가 요구되고 있는 것이다.

- 공동(예: 채굴적, 터널)의 존재 및 그의 규모

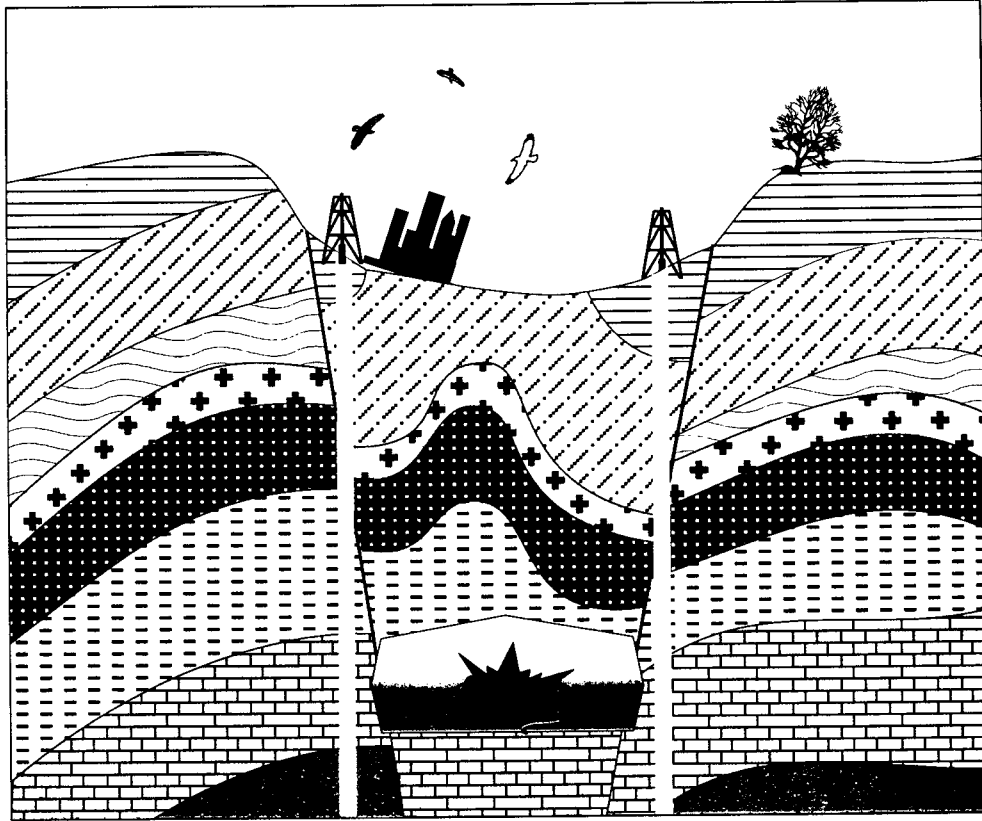


그림 1 지하에 공동이 생성되면, 그것이 자연발생(예: 석회암 동굴) 이거나 혹은 인위적(예: 채굴적, 터널)이든, 기록의 압반 응력상태는 평형을 잃게 되며 그 이후의 새로운 응력분포 형성과정은 자연스럽게 공동 을 매우려는 경향으로 진전하게 된다. 이러한 과정이 지표면에 인 접하여 진전하게 되면 지표면이 하락하는 즉, 지반침하 현상이 발생 된다. 이때 침하 중심부에는 거의 수직방향으로, 침하 가장자리에는 횡압력이 크게 작용되어 지표면의 압축 내지 신장이 유발된다.

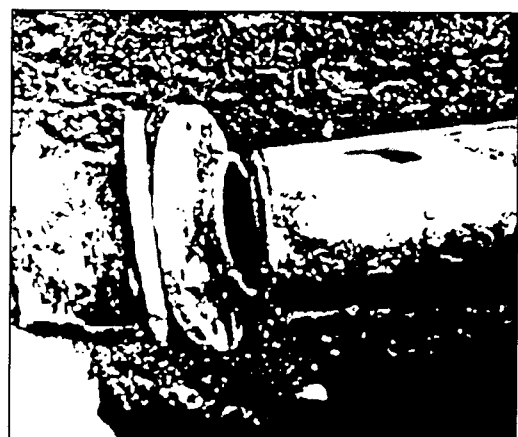
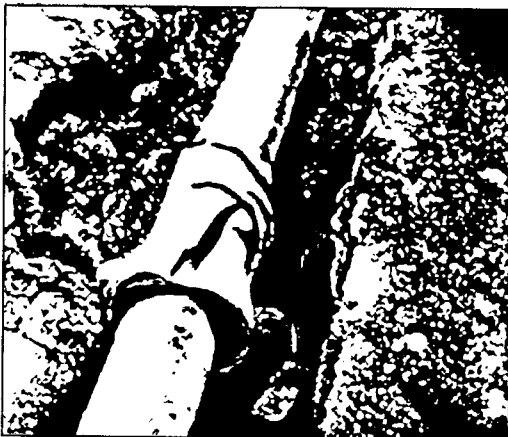
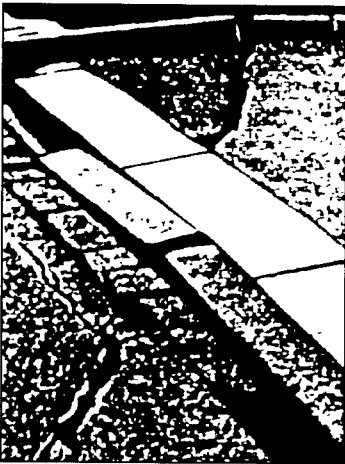
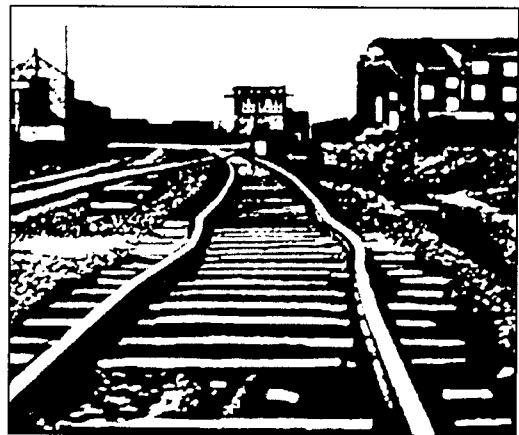


그림 2 지반침하로 인한 지표면의 압축(compression) 내지 신장(extension)에 의해 시설물들이 다양한 형태로 파손되고 있다.



그림 3 지반침하 현장사례
상 : 부평 공원묘지 붕락사고 전경
하 : 구포 기차전복사고 전경

- 공동 상부 지질구조(예: 단층 및 단층파쇄대)
- 지표면 침하에 대한 장기적 계측 자료

최근, 국내에도 지반상태에 대한 불확실성을 극복하고자 하는 노력이 크게 확대되고 있는 실정이며 그로 인해 다양한 정밀 물리탐사 기법들이 보급되고 있다. 본 논문에는 우선 상기 지반정보를 얻기 위해서는 핵심요소기술로 간주될 수 있는 선진 물리탐사 기법을 소개하고 나아가서 그에 따른 실효성을 요약하고 있다. 일반적으로 침하가 일어나는 지역은 넓게 자리잡고 있기 때문에 조사의 첫 단계로 지표 물리탐사의 응용이 바람직하다. 이를 위해 상용되는 물리탐사 기법은 비저항 이상대(예: 파쇄대, 공동) 분포에 대한 개략적인 정보를 제시할 수 있는 전기비저항 탐사가 된다. 여기서 얻게되는 결과를 바탕으로, 만약 지표면이 대체로 평탄할 경우, 흔히 탄성과 반사법 응용을 위한 탐사축선이 선정된다. 탄성과 반사법은 축선하부 수직단면에 대한 지층구조(예: 지층경계면, 공동)를 재현할 수 있는 고유의 기능을 갖고 있기 때문에, 비록 그의 분해능이 국내 천부 지질의 특이성으로 인하여 크게 떨어지는 경향이 있으나, 그 결과는 대부분의 경우 지반상태를 상당부분 대변할 수 있는 바람직한 정보가 되고 있다. 상기 탐사에 의한 종합적인 분석결과는 우선 시추공 위치 선정을 위한 것은 물론 나아가서 조사의 두 번째 단계인 소위 시추공을 이용한 정밀 물리탐사 기법의 응용을 위한 기본 자료로 반영된다. 여기에는 인접된 두 개의 시추공을 이용하는 탄성과 토모그래피 기법과 각 시추공에 응용되는 텔레뷰어 기법이 상기 침하 지반조사에 효율적으로 대처할 수 있는 핵심요소기술로 간주되고 있다. 지금까지 서술한 탐사 기법들은 어디까지나 탐사시점의 지반상태를 나타내게 된다. 그러나, 조사대상이 되는 침하 지역에는 시간적 및 공간적인 측면에서 침하가 서서히 진전된다고 볼 수 있기 때문에 지표면 변위에 대한 장기적인 계측 결과는 침하지역의 안정성평가를 위한 주요 자료가 된다. 본 논문에는 이에 대한 첨단 정밀 전자계측 시스템인 ROTLEVEL을 소개하고 있다.

다음은 상기 핵심 탐사기법에 대한 기본 개념을 요약하고 동시에 그에 따른 현장 사례를 예시하고 있다.

2. 지표 물리탐사

2.1 개요

서로 다른 암반은 그들 각각의 물성(예: 탄성과속도, 비저항 등)에 의해 차별화 된다. 즉, 지반상태는 대체로 물성 분포에 의해 표현될 수 있다는 것이다. 물리탐사는 바로 이러한 물성분포를 재현하는 기능을 갖고 있으며 여기에는 관심의 대상이 되는 물성에 따라 전기비저항탐사, 전자파탐사, 탄성과탐사 및 자력탐사 등으로 세분화되어 활용된다. 지표 물리탐사는 탐사가 지표면에서 수행되는 모든 탐사기법들을 말하며 그들은 대체로 광역의 지반을 조사 대상으로 삼고 있기 때문에 그에 따른 탐사 분해능은 흔히 주어진 불리한 탐사여건(예: 지표면의 굴곡, 시설물, 특이한 지질구조)에 의해 크게 떨어질 수 있다. 그러나, 지표 물리탐사는 탐사지역 지반에 대한 전반적인 상태를 보여줄 수 있는 유일한 조사법이 기 때문에 최근 국내에서도 시추위치 선정은 물론 나아가서 시추공을 이용한 또 다른 정밀 물리탐사법의 응용을 위해서도 크게 활용되고 있는 실정이다. 일반적으로 국내 침하지역은 대단히 복잡한 지질구조를 나타내고 있고 또한 인위적인 공동(예: 채굴적, 갱도)이 수직 및 수평적으로 널리 분포되고 있기 때문에 지표 물리탐사의 기능이 크게 기대되고 있으며 특히 전기비저항 탐사 및 탄성과 반사법 탐사의 실효성은 국내에서도 여러 차례의 현장실험을 통하여 널리 알려지고 있다.

2.2 전기비저항 탐사

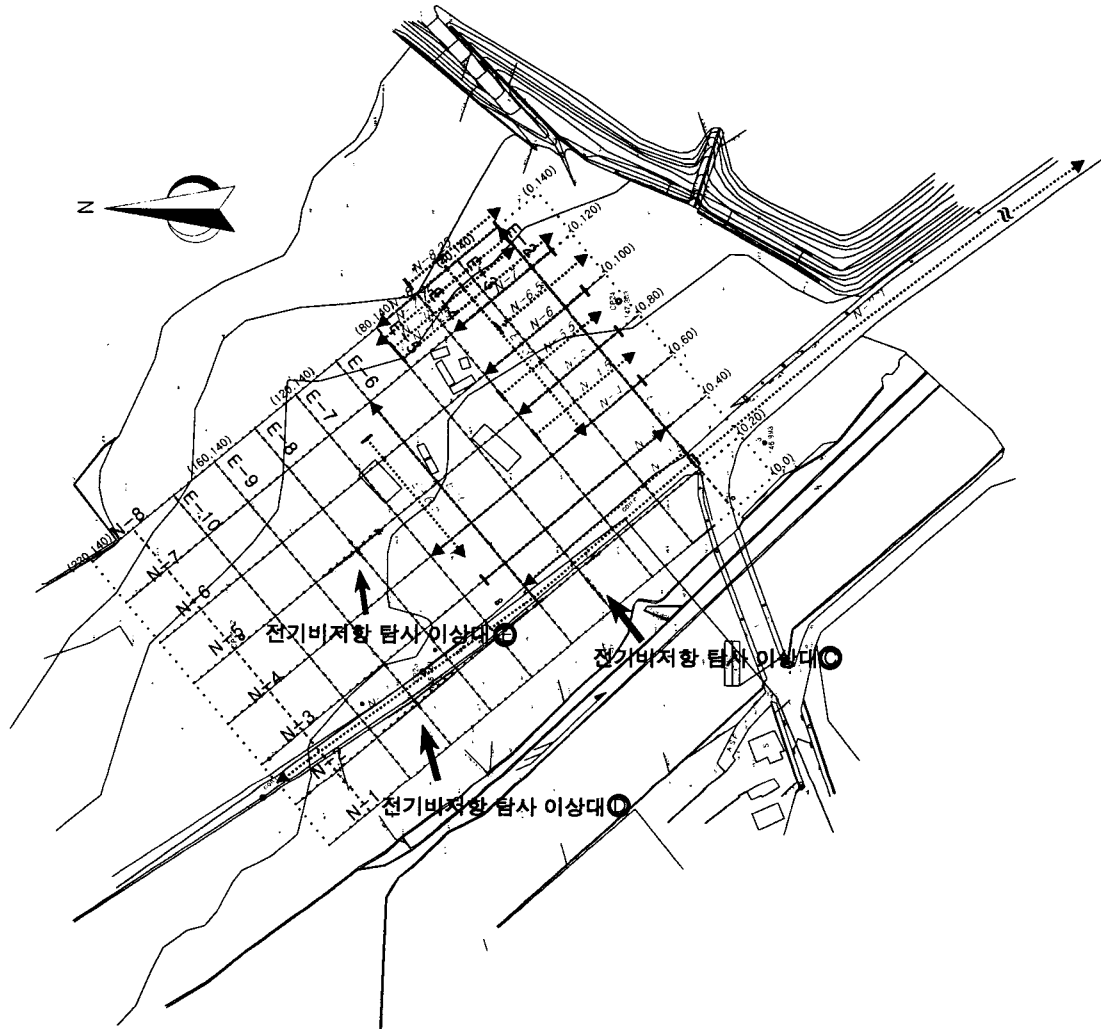
전기비저항 탐사는 지하 매질의 전기비저항 차이에 의해 야기되는 이상(異常, anomalous) 전위차를 측정하고 또한 분석함으로써 지하구조를 비저항 분포로 영상화하는 일종의 물리탐사법이다. 일반적으로

로 신선한 결정질 암반은 거의 부도체에 가까운 대단히 높은 비저항치를 보여주고 있으나 반면, 점토나 지하수는 상대적으로 대단히 낮은 비저항치를 갖고 있다. 특히, 국내 암반의 전기비저항치는 외국의 것보다 대체로 높은, 때에 따라 수백 배에 달하는 높은 값을 보여주고 있기 때문에 지하수나 점토로 충전된 단층과쇄대의 비저항치는 그 변화폭 면에서 주위 암반의 것보다 크게 차별화 되고 있다. 이러한 물성 특성은 바로 국내 전기비저항 탐사의 응용도를 높일 수 있는 유리한 여건을 마련하는 것이 되었다고 볼 수 있으며 더구나 침하지역의 단층과쇄대는 주요 탐사대상이기도 한 것이다. 종래의 국내 전기비저항 탐사는 주로 선정된 축선에 대한 하부 구조 영상화에 초점을 두었으며 그에 따라 개발된 2차원 역산 기법은 현재 국내 대부분의 지하수 용역업체 및 건설회사에서 활용되어 왔다. 최근에는 서로 교차하는 여러 개의 축선에 대한 비저항 데이터를 해석할 수 있는 소위 3차원 역산 기법이 개발되어 지하의 3차원적 전기비저항 분포를 표현할 수 있게 되었다(김정호 외, 1998). 그림 4는 문경 석탄박물관 전방의 공터에서 지반침하 안정성평가를 위해 수행한 전기비저항 탐사의 탐사축선들을 나타내고 있다. 여기에는 격자형으로 설정된 20m 간격의 축선들이 남북방향으로는 8개 축선(N 축선), 동서방향으로는 9개 축선(E 축선)이 선정되었다. 그림 5는 도합 17개의 축선 자료에 3차원 역산 소프트웨어를 적용하여 구해진 지하의 3차원적 전기비저항 분포를 각 심도별 평면도로 예시하고 있다. 전체적으로 독립된 이상대로 간주될 수 있는 세 개의 지역(C, D, E)이 분리되어 식별되고 있으며 또한 비저항 경계 A(점선으로 표시)도 역시 심도에 따라 일관성을 띠면서 관찰되고 있다. 이와 같이 확인된 이상대(그림 4에서 축선도와 함께 나타내고 있음)는 바로 정밀 조사를 위한 표적이 되는 것이다.

2.3 탄성과 반사법 탐사

인위적으로 암반에 역학적인 힘(충격)을 가하면 암반은 진동하게 되며 그 진동은 하나의 특별한 형태(예: 파형, 진폭, 주파수내용, 속도)를 띠면서 사방으로 전달된다. 이러한 물리적인 전달현상은 학술적인 용어로 “탄성파가 전달된다”라고 표현한다. 탄성파를 일으키는 장치인 소위 탄성과 발생원은 항상 P파(종파)와 S파(횡파)를 동시에 생성한다. 탄성파가 전달되는 과정은 미시적 측면에서 하나의 입자움직임으로 관찰되며 이때 P파는 파의 진행에 평행한, S파는 그와 수직한 입자움직임을 나타내고 있다. 탄성파 전달 측면에서 각 암층은 그들 각각의 임피던스(ρV : 밀도×탄성파속도)에 의해 차별화 된다. 즉, 지층경계면이란 그 경계면에 인접된 암반의 임피던스가 달리하는 경우를 말하며 탄성파가 이러한 경계면에 입사되면 그로부터 반사되고 동시에 굴절된다. 이러한 반사 및 굴절과정은 지층경계면이 증가하면 할수록 그로 인해 파생되는 P파와 S파는 기하급수적으로 늘어가게 된다. 그들의 진행상황을 전체적으로 관찰하면 이들은 지표로 상향하는 탄성파와 또한 지하로 하향하는 탄성파로 구분된다. 여기서 관심의 대상은 바로 상향하는 탄성파(반사파)이며 이들은 지표에 놓여있는 수신기들(수진기 배열)에 의해 포착된다. 주시적으로 빨리 도달되는 탄성파는 대체로 천부 지층경계면에서, 늦게 도달되면 심부 경계면에 의한 반사파로 간주되며 그들 각각은 그 나름대로 각 경계면에 대한 정보를 갖게 된다. 일반적으로 발생원과 수신기 배열은 하나의 직선 상에 놓이게 되며 이러한 기본적인 발생원-수진기 배열은 탐사 대상 심도, 지표면 상태 및 지하 암반상태를 고려하여 타당하게 선정되어야 한다.

탄성파 반사법 탐사의 일반적인 측정원리는 발생원-수진기 배열에 대한 구체적인 내용(발생원 선정, 수신기 수, 수신기 간격 등)이 설정된 후 이러한 기본 배열 자체가 주어진 축선을 따라 일정간격(예: 수신기 간격) 이동하면서 측정이 반복되는 데 있으며(흔히 roll-along technique라 함)(예: 그림 6 참조) 그로 인한 탄성파 기록 혹은 좀더 구체적으로 표현하면 발생원 기록(shot gather)은 축선 하부 지층구조 규명을 위한 기본 데이터(raw data)로 주어진다. 대체로 각 발생원 기록은 그의 기본 배열 구간(발생원 위치와 마지막 수신기 위치간의 간격) 하부 지층경계면에 대한 정보를 담고 있다고 할 수 있다. 따라서, 상기 측정배열이 이동하게 되면 경계면에 대한 수직 및 수평적인 정보가 중첩되어 얻어지게 되는 것이다. 각 발생원 기록에는 무수히 많은 반사파의 도달이 기대되며 그들 각각은 도달주시와 진폭에 의해 차별화 된다. 여기서, 탄성파 반사법의 응용성을 높이기 위해서는 우선 측정과정에서 각 경계면 규명을 위해 크게 기여할 수 있는 유용한 탄성파 도달만을 포착함이 바람직하며 나아가서 데이터 전산



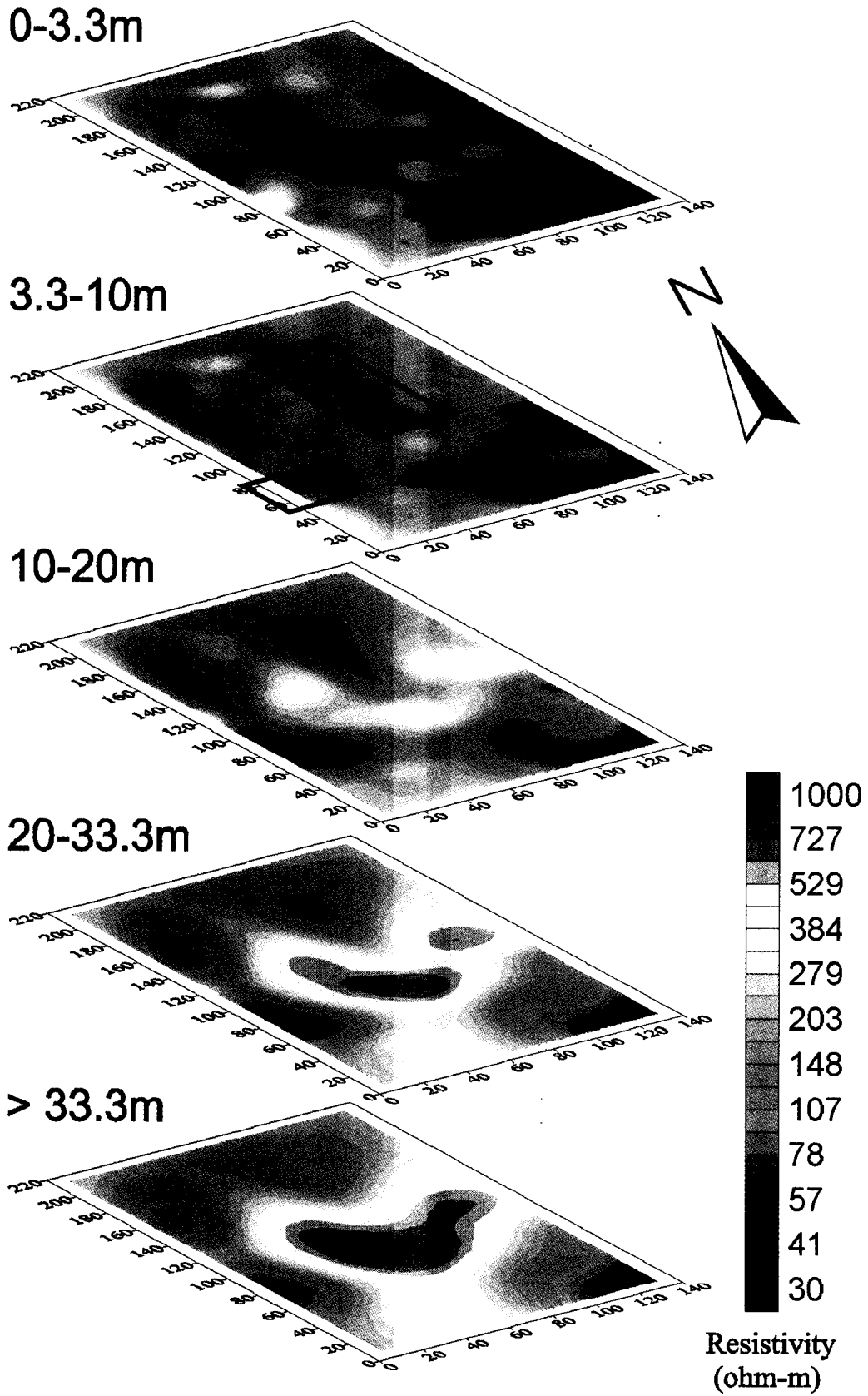


그림 5 전기비저항 자료의 3차원 해석결과인 심도별 전기비저항 분포 평면도

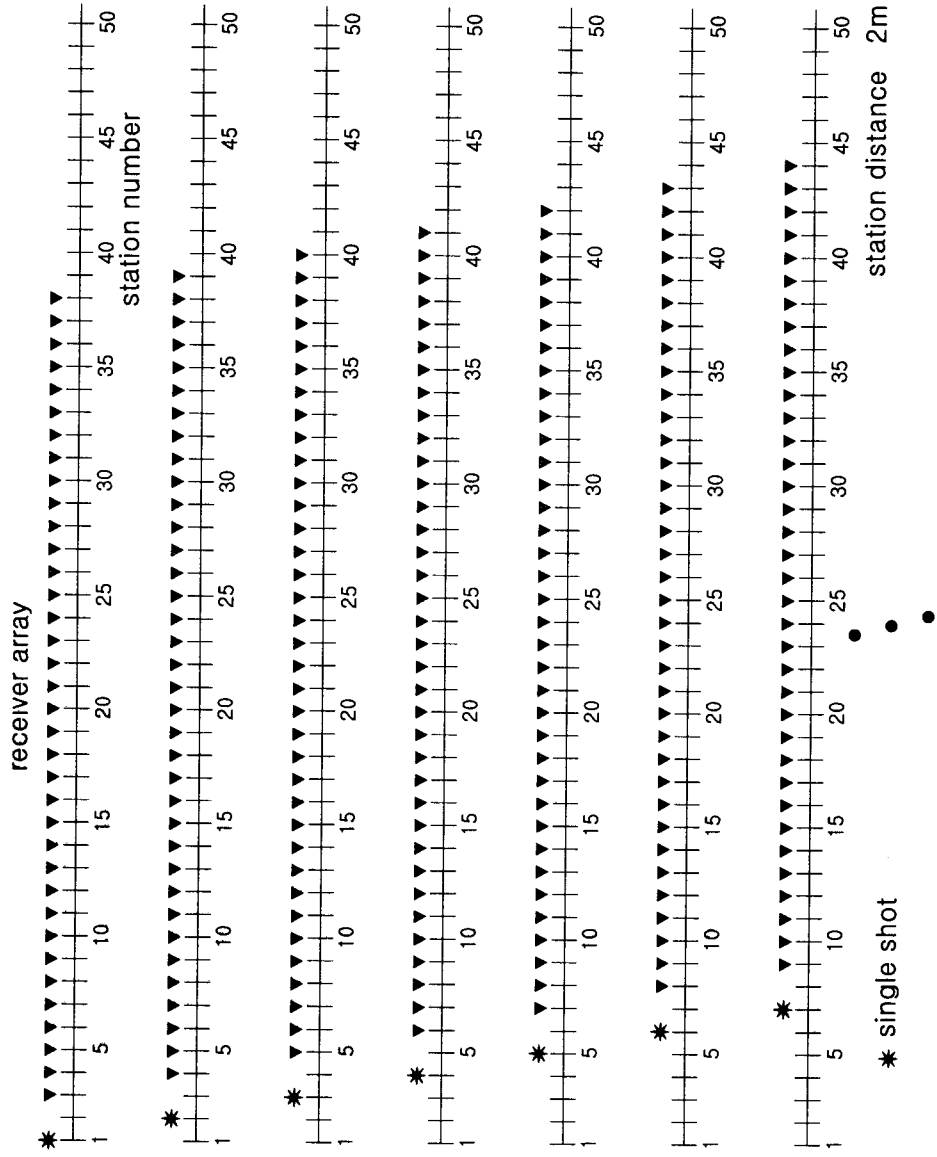


그림 6 탄성파 반사법 측정기법 중의 하나인 roll-along technique.

처리 과정에서도 이러한 작업이 방대한 전산처리 프로그램에 의해 진행된다.

탄성과 반사법은 일찌기(약 1924년) 미국 텍사스 연안 심부에 부존된 석유를 찾는 데 직접적인 기여를 함에 따라 그에 대한 기술개발 의욕이 크게 촉진되었다. 그 이후 지난 70여 년 간 수많은 학자들에 의해 현장탐사 기술은 물론 분석기술에 이르기까지 폭넓은 연구가 진행되어 물리탐사 분야에서는 주류를 이루는 탐사기술로 발전하게 되었다. 그림 7은 심부 지층구조 규명을 위해 탄성과 반사법이 현장응용되는 전경과 그로 인해 최종적으로 얻게되는 지층구조 단면도를 입체화하여 나타내고 있다. 비록, 현장탐사에서 막대한 노력과 경비가 소요되고 있으나 이러한 탐사기법이 지하 지층구조를 그대로 재현할 수 있는 유일한 수단이기 때문에 현재에도 널리 활용되고 있는 것이다. 한편, 탄성과 반사법의 가탐심도는 단순히 탄성과 발생원의 에너지가 크면 클수록 점차 심부 경계면에 대한 반사파의 도달이 포착될 수 있기 때문에 현실적으로 지하 약 5km까지도 가능하게 된다.

탄성과 반사법 탐사가 지반침하 지반상태 조사에서 직접적으로 기여할 수 있는 정보는 이전의 전기비저항 탐사결과와 비교하여 대체로 보다 구체적인 다음과 같은 내용을 담고 있다. 즉,

- 천부 단층발달 상태
- 풍화암 및 경암 경계면의 연속성 여부
- 공동 상부경계면의 규명

그림 8의 윗그림은 가은역 구내에서 침하지역 안정성평가를 위해 얻게된 탄성과 반사법 측정데이터를 예시하고 있다. 여기서 반사파의 도달이 단층에 의해 이격되어 있음이 여실히 관찰되고 있다. 만약, 지하에 공동이 형성되어 있다면, 그의 상부 경계면의 반사계수는 극대화되기 때문에 그로 인한 반사파 진폭이 상대적으로 두드러지게 관찰될 수 있다. 그림 8의 아랫그림은 가은역 구내 축선 약 100m에 대한 탄성과 반사법 탐사결과(지하 지층구조 단면도)를 나타내고 있다. 전체적으로 심도 약 5m 및 45m는 풍화암 및 경암 상부경계면에 해당한다. 여기서 각 경계면의 단절은 단층파쇄대이거나 혹은 함몰된 경우에 의해 초래되었다고 해석될 수 있다. 한편, 화살표로 표시된 높은 반사파 진폭은 임피던스 대조가 큰 불균질 매질(예: 공동) 경계면에 기인된다고 간주될 수 있다. 즉, 침하를 유발할 수 있는 여러 가지 여건(예: 단층, 경계면의 연장상태, 공동에 의한 높은 반사계수)이 탐사결과(해석단면도)에서 동시에 관찰되면 광역 침하지역의 독립된 이상대 지역으로 판단되는 것이다.

국내 탄성과 단면해석도의 분해능이 저하되는 주된 요인은 지층구조면에서 특유의 물성을 갖는 표토층의 내부에서 전달되는 대단히 복잡한 탄성과 전달현상에 있다. 즉, 표토층 하부경계면의 반사계수는 흔히 0.7 이상의 이례적인 높은 값을 나타내고 있기 때문에 표토층 내의 다중반사와 표면파와의 중첩현상은 실제로 지층구조 규명에 기여할 수 있는 반사파의 도달을 크게 압도하는 경우가 허다하다. 따라서, 상기 표토층으로 인해 유발된 반사파를 제거하는 과정에서, 비록 여기에 고도의 전문성에 의한 노력이 경주된다고 하더라도, 상당부분의 유용한 정보가 유실됨은 불가피한 실정이다. 그럼에도 불구하고 탄성과 반사법이 갖는 고유의 기능은 지반상태 파악을 위한 귀중한 정보를 제시할 수 있음을 경험하게 되는 것이다.

3. 시추공을 이용한 물리탐사

상기 전기비저항 탐사 및 탄성과 반사법에 의한 결과는 무엇보다 광역 침하지역에서 다시 가장 침하 안정성평가를 요구하는 지역으로 세분화하기 위한 기본 자료가 되며 그로부터 선정된 시추공은 다음에 소개할 정밀 물리탐사 즉, 텔레뷰어 및 탄성과 토모그래피 응용을 위해 주어진다. 지반침하 지반상태와 연계하여, 텔레뷰어의 주된 기능은 절리발달 상태(특히 단층 내지 단층파쇄대)에 대한 정확한 정량적인 자료를 제시할 수 있으며 탄성과 토모그래피는 주로 공동의 존재 및 그의 크기 규명을 위해 활용된다.

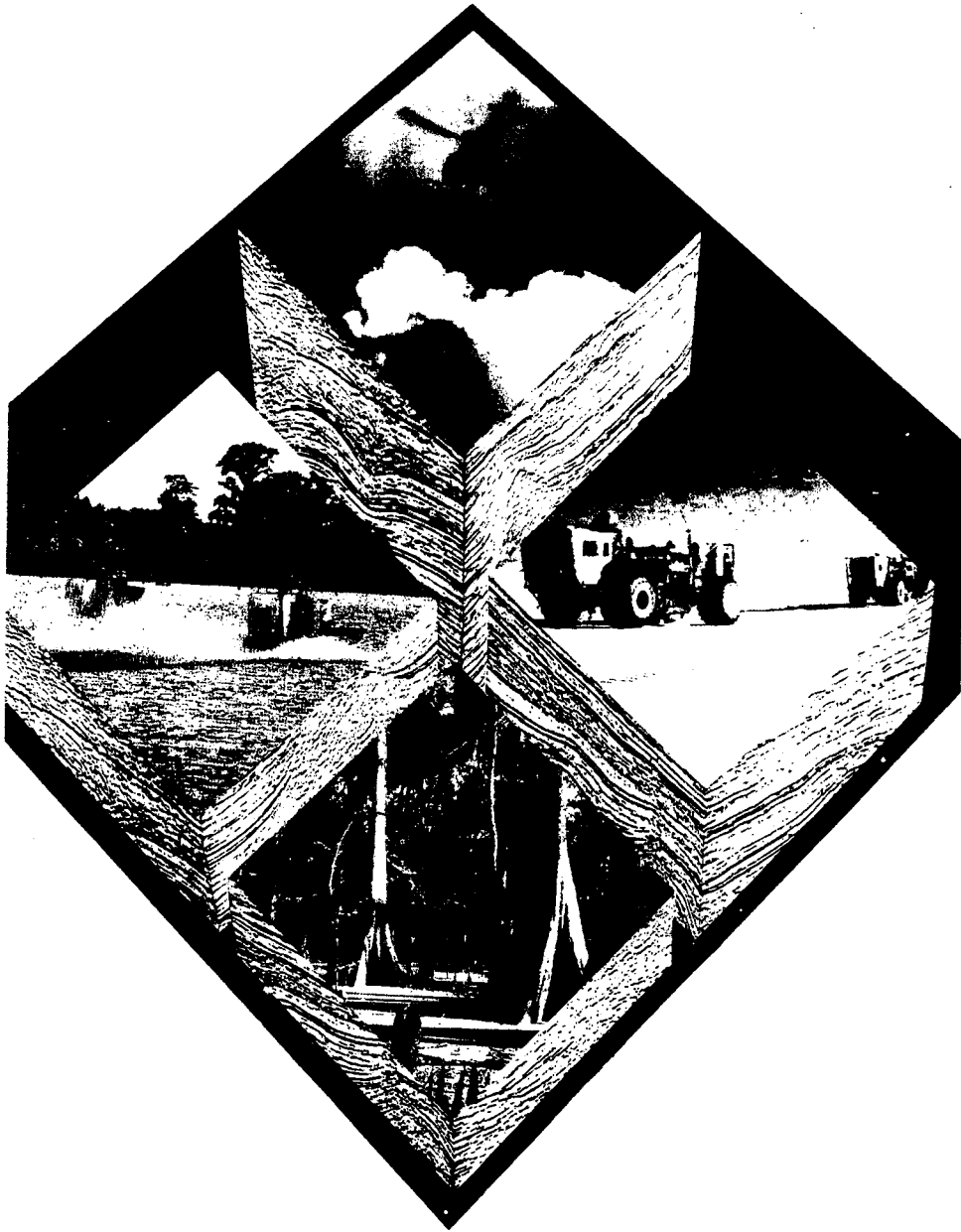
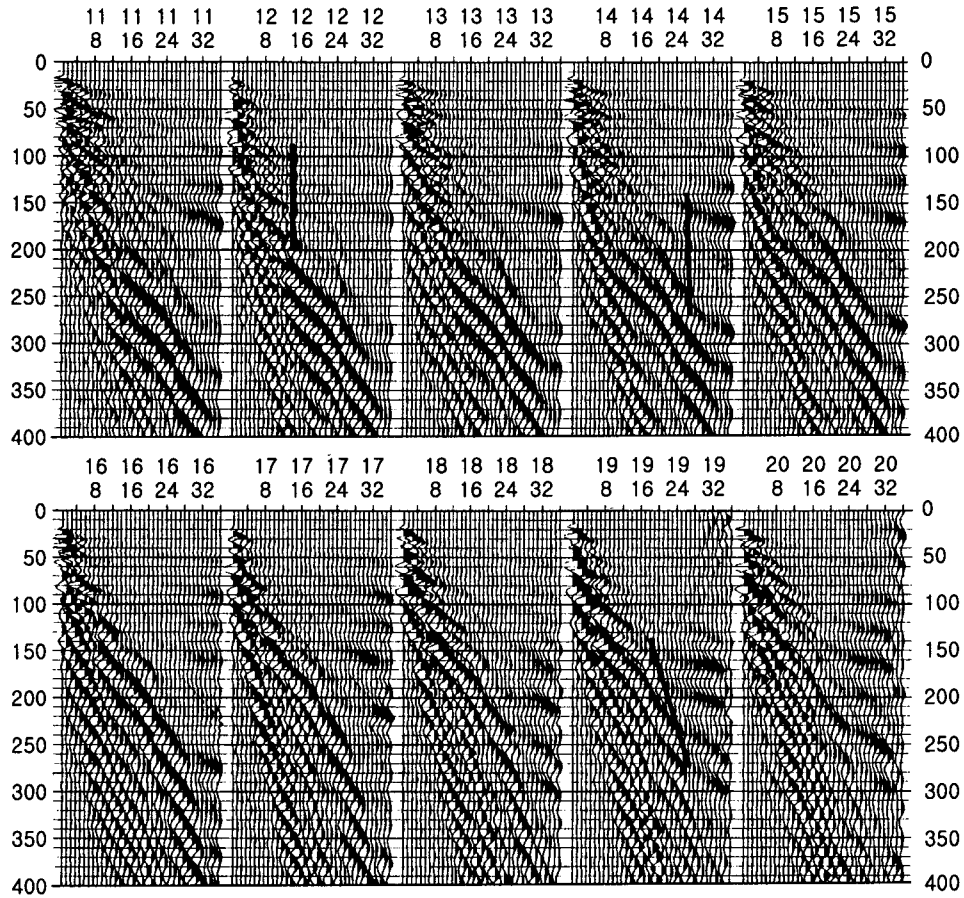


그림 7 심부 탄성파탐사의 전형적인 현장응용 전경.

K5S-DYNAMITE RAW SHOTS



K5 Depth Section

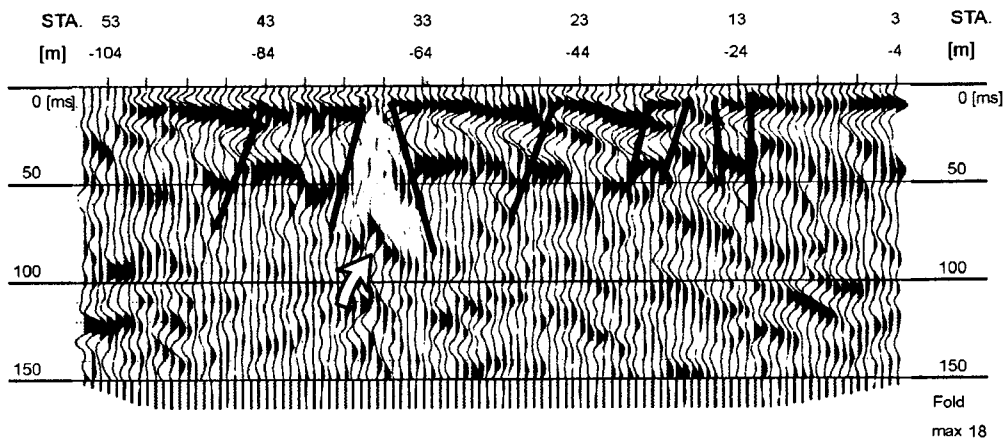


그림 8 탄성과 반사법의 응용(가은읍내 지반침하 안전진단).

상: 지표에 인접한 단층면이 측정데이터에서 뚜렷이 인식되고 있다.

하: 탄성과 반사법 지하 단면도. 경계면의 불연속성, 강한 반사면(화살표로 표시), 단층경계가 동시에 인식되고 있다.

3.1 텔레뷰어 탐사

텔레뷰어는 초음파 빔(ultrasonic beam)을 이용하여 공벽을 빈틈없이 스캐닝함으로써 공벽에 표출된 암반의 물성 및 절리 발달 상태를 규명할 수 있는 일종의 첨단 물리검층이다. 즉, 시추공 중심으로부터 공벽을 향하여 거의 수직적으로 초음파 빔을 방사하였을 경우 공벽에 의해 반사되어 다시 시추공 중심으로 되돌아 온 초음파 빔의 진폭과 주시는 텔레뷰어 측정의 핵심 데이터이다. 여기서 진폭치는 공내 매질(물과 공벽 암반과의 임피던스(밀도×탄성파속도) 대조 혹은 공벽의 반사계수 $R(0\sim 1)$ 에 따라 달라지기 때문에 바로 암반의 물성과 직접적으로 연관된다. 만약, 초음파 빔이 공내 단열(혹은 절리)에 입사되면 산란현상에 의해 되돌아오는 초음파는 상당한 에너지를 잃게 되며 그로 인해 단열의 식별이 용이하게 된다. 한편, 반사파의 주시는 시추공 크기 및 공벽 상태를 파악할 수 있는 훌륭한 자료가 된다. 즉, 시추공 중심과 공벽간의 왕복주기는 이미 알려진 물의 탄성파속도($\approx 1500\text{m/s}$)에 의해 그 거리(시추공 단면이 원형일 경우 반경에 해당)로 전환될 수 있기 때문에 그 결과는 바로 고분해능 공경 검층결과가 된다. 따라서, 반사파 주시는 공벽의 거칠음, 공벽의 크기, 공벽의 원형상태에 따른 응력분포 추정, 절리의 열린상태 등에 대한 정보를 제시하게 된다.

텔레뷰어 현장탐사를 위한 FACSIMILE-40(Focussed ACoustic System to Image the Inside of boreholes and pipes)(독일 DMT사)은 현 기술수준에서 가장 우수한 측정시스템으로 간주되고 있다. 특히, 센서장치는 압전소자 양극에 한계주파수 1.4MHz 전위차를 줌으로써 이미 빔(beam)화된 초음파를 다시 오목거울에 의해 자유자재로 초점화할 수 있는 기능을 갖고 있다. 따라서, 3인치 시추공 공벽에 입사되는 초음파 빔의 spot size는 약 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 에 달하고 있으며 나아가서 10인치 시추공에도 바람직한 이미지 분해능에 도달될 수 있게 되었다. 시추공 축 상에 놓여있는 초음파 발생원은 모터에 의해 일정 속도로 회전한다(그림 9의 왼쪽 부분 참조). 일반적인 텔레뷰어 응용에서는 매 회전마다 144차례 초음파 빔을 방사하며 이러한 측정과정은 발생원이 시추공의 중심축 상에서 이동하는 동안 반복된다. 한편, 각 초음파 방사각에 대한 반사파(analog signal)의 진폭 및 주시는 마이크로프로세서에 의해 수치화 되어 발췌되며 그 값들은 다시 그 시점의 자력계(3 component flux-gate magnetometer)와 경사계(2 component inclinometer) 수치와 대응된다. 환언하면 두개의 독립변수 즉, 일정심도 및 그에 따른 일정 방사각에 대하여 진폭치와 주시치가 주어지며 그들은 다시 자력계 수치에 의해 재정돈(자북 기준)된다. 이러한 2차원 데이터를 텔레뷰어 이미지라 하며 여기에는 진폭이미지와 주시이미지로 분리된다. 그림 9의 오른쪽 그림은 임의의 절리면이 존재할 경우 공벽에서 관찰되는 타원형이 텔레뷰어 진폭이미지에서는 정현곡선(흔히 fracture signature이라 함)으로 표현되고 있음을 나타내고 있으며 또한 그로부터 그 절리면에 대한 경사방향 ϕ 및 경사각 α 가 쉽게 산출될 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 정현곡선의 최소 진폭치에 대응되는 방사각이 경사방향에 해당되며, 경사각은 정현곡선의 진폭크기(h)가 커짐에 따라 큰 값을 나타낸다.

그림 10은 문경 가운읍내 밀집된 주택지에서 지반 안정성 정밀조사를 위해 천공된 시추공 S1(그림 11 참조)에 대한 텔레뷰어 이미지(심도구간 약 27.6m~31.6m)를 예시하고 있다. 첫 번째 그림은 시추공벽에서 반사된 초음파의 진폭치를 나타내고 있으며(진폭이미지) 여기서, 상대적으로 낮은 진폭은 그만큼 짙은(푸른) 색깔로 표현된다. 그로 인해 다양한 형태(sine curve)의 불연속면(예: 절리, 단층 등)의 발달 상태가 관찰될 수 있다. 단순히 색깔농도 비교에 의해서도 심도 약 28.4m에서 암층의 경계(중경암/경암)가 인식된다. 두 번째 그림은 소위 텔레뷰어 암석강도(김중열, 1998)를 나타내며 단층이나 절리 틈새가 큰 곳에서 매우 낮은 값은 보이며 절리가 밀집된 곳에서 크게 변화한다. 세 번째 그림은 공벽에서 반사된 초음파의 주시를 이용하여 표현된 3D caliper log를 나타내고 있다. 공벽의 열린상태(방향 및 경사)가 뚜렷이 인식되며 또한 암반내의 미소절리 내지 연약함으로 인한 공벽의 거칠음도 상대적으로 잘 표현되고 있다. 마지막 그림은 흔히 arrow plot라 불리며 편의상 여기서는 화살머리(원형)의 크기 및 색깔로써 절리 및 단층이 구분된다(큰 원내 흰색: 암층경계면, 큰 원내 흑색: 단층(파쇄대), 작은 원의 흑색: 뚜렷한 절리면, 작은 원의 회색: 보통의 절리면, 작은 원의 흰색: 미세한 절리면). 한편, arrow plot의 눈금은 9개로 나누어지며 여기서 하나의 눈금은 경사각을 의미하는 10° 가 된다. 즉, 이러한 눈금

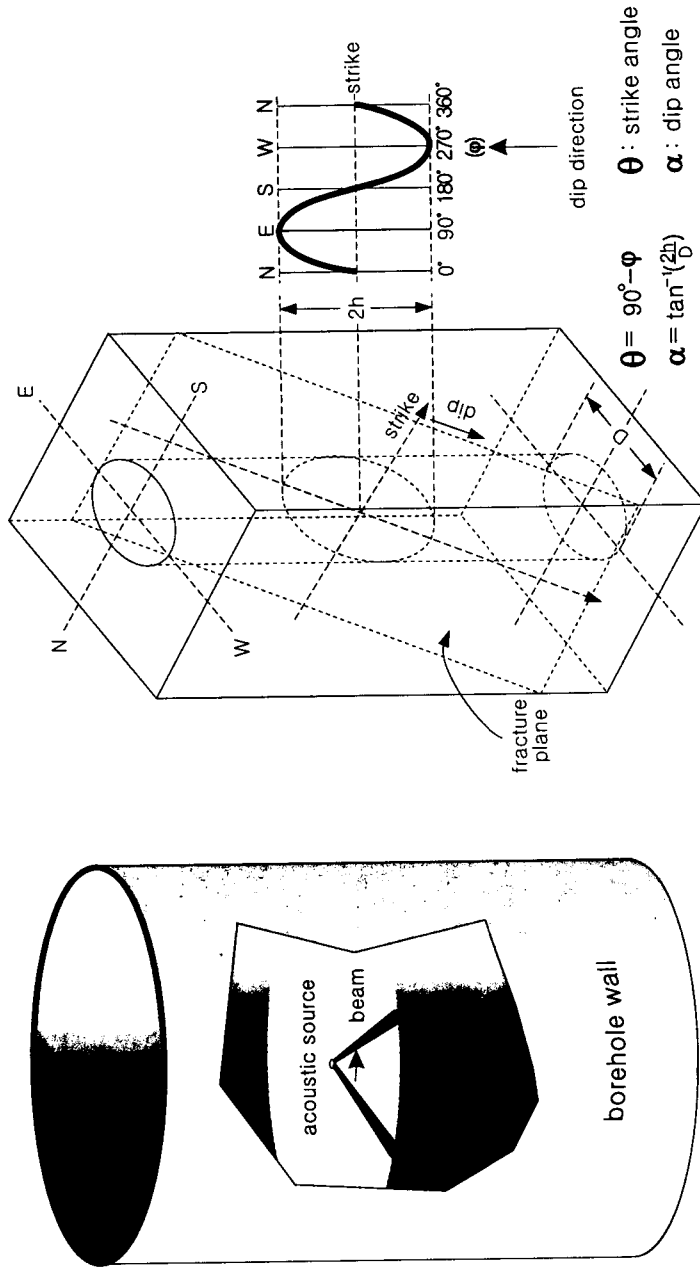


그림 9 텔레뷰어의 근본원리.
 좌 : 시추공 축 상에 위치한 초음파 빔 발생원이 회전하고 또한 상하로 이동하면서 공벽을 향하여 초음파
 빔을 빈틈없이 방사한다.
 우 : 임의의 경사를 띤 절리면이 시추공을 절단하면 시추공벽에 타원형의 절리흔적이 형성된다. 이러한 절
 리흔적은 텔레뷰어 측정에 의해 지자기 북극을 기준으로 하여 sine curve로 표현되며 그로부터 절리면
 의 주향 내지 경사가 결정된다.

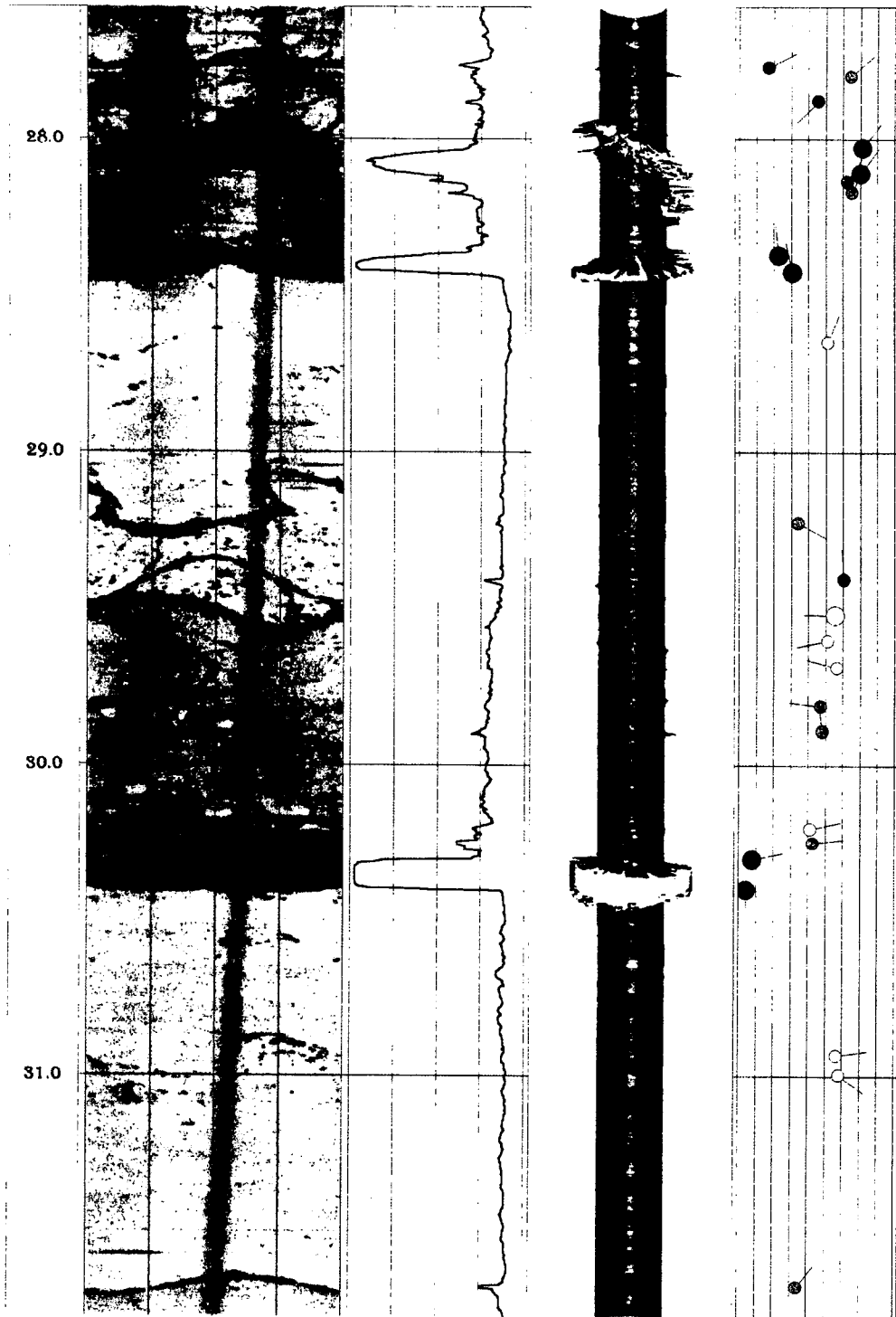


그림 10 텔레뷰어의 응용.
 가은읍내 시추공 S1에서 얻게된 텔레뷰어 자료로부터 전산 처리된
 진폭이미지, 텔레뷰어 암석강도, 3D caliper log 및 arrow plot가 차
 례로 나타나고 있다.

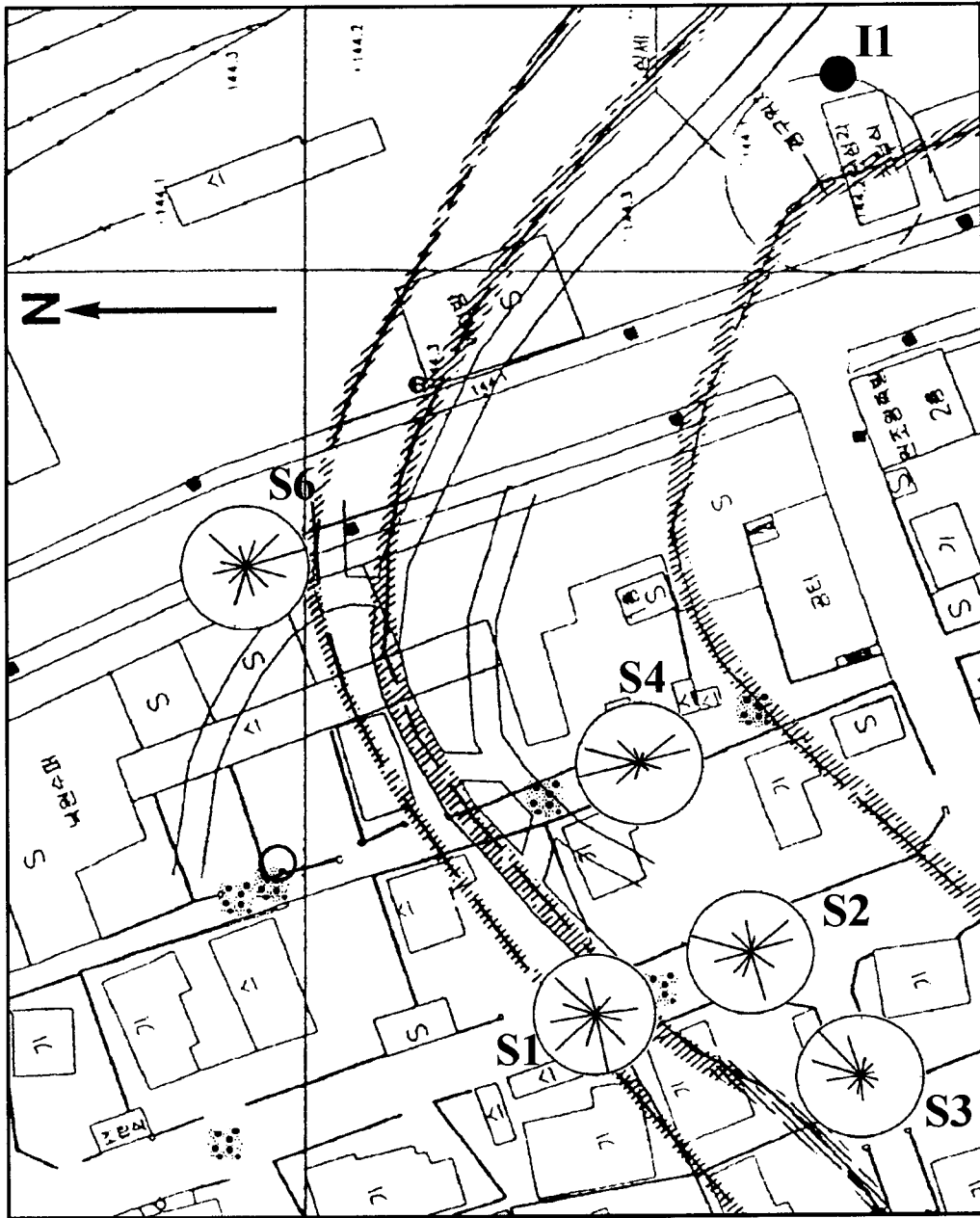


그림 11 시추공 S1, S2, S3, S4 및 S6의 텔레뷰어 이미지에서 인식된 모든 불연속면에 대한 rose diagram이 각 시추공의 위치에서 표현되고 있다

상에 화살머리의 위치는 바로 그 절리의 경사각이 되며 화살대는 자북을 기준으로 한 경사방향이 된다.

그림 11 및 12는 텔레뷰어 탐사를 위해 선정된 시추공 S1~S4 및 S6에서 얻어진 이미지들로부터 발췌된 모든 불연속면을 통계학적 자료처리 기법에 의해 분석한 결과를 나타내고 있다. 예를 들면, 절리의 전체 경사방향 범위 360° (azimuth)를 12로 분할한 후 각 분할된 경사방향 범위 30° 에 속한 절리들을 바탕으로 경사방향에 대한 빈번도를 통계학적으로 계산한 후 그중 빈번도가 가장 높은 경사방향을 상기 분할된 범위 내의 주된 경사방향으로 결정한다. 이러한 과정을 모든 분할된 범위에서 수행한 후 상대적으로 선의 굵기와 길이에 따라 표현한 것이 소위 rose diagram(그림 11 참조)이다. 한편, 각 절리들의 경사각은 평사투영법에 의해 원주 내에 투사되며 투사된 모든 점으로부터 다시 면적당 밀도를 계산한 후 그들을 등분화하여 표현한 것이 소위 pole diagram(그림 12 참조)이다. 시추공 S3의 경우, 대부분의 불연속면들의 경사방향은 주로 북동방향으로 뚜렷한 지향성을 띠고 있으며 그 경사각은 평균 약 60° 내외의 급경사를 이루고 있다. 반면, 시추공 S1 및 S2에서는 그들의 주된 경사방향이 분산되고 있으며 그들의 경사각은 평균 약 50° 내외가 되고 있다. 시추공 S4에서는 다시 지향성을 띤 두개의 주 경사방향이 관찰되고 있다. 그 하나는 대체로 북쪽 경사방향을 갖는 것으로 그 경사각은 평균 40° 정도이며, 또 다른 하나는 그와 정반대인 남쪽방향 경사를 갖는 것들로서 그 경사각은 평균 50° 내외가 되고 있다. 시추공 S6의 경우에는 다른 시추공(시추공 S1: 97개, 시추공 S2: 62개, 시추공 S3: 117개, 시추공 S4: 89개)과 비교하여 많은 양의 불연속면(554개)이 관찰되었으며 이는 시추공이 습곡의 가장 굴곡진 곳에 위치하고 있어 그에 대한 지질구조 운동에 의해 초래된 것으로 판단되며 그에 따라 그들의 경사방향 및 경사각들도 다양하게 나타나고 있다.

텔레뷰어 탐사는 그의 독특한 고분해능 데이터 성격으로 인하여 상기 분석결과 이외에도 암반의 연속적인 강도, 불연속면 틈새, 고분해능 공경검층, 불연속면의 연속상태, 불연속면 밀도, 3D caliper log, 절리의 거칠음 상태, 시추편차 및 자력변위 등 동시에 다양한 정보를 제시하고 있기 때문에 이들 각각의 자료는 그 자체로써 지반상태를 훌륭하게 대변하고 있을 뿐만 아니라 나아가서 향후 지반침하 모델링 연구를 위한 주요 입력자료가 되고 있다.

3.2 탄성과 토모그래피 탐사

탄성과 토모그래피는 의료용 CT(Computerized Tomography)촬영기법의 근본원리가 탄성과 이용 기술분야에 도입되어 연구 개발된 하나의 첨단 정밀 탐사기술이다. 그러나 CT 촬영기법의 응용을 위한 제반조건은 지질조사에서 주어진 탐사여건과는 큰 차이를 나타내고 있기 때문에(예: 조사 대상의 규모, 사용되는 주파수, 발생원-수진기 배열상태(scanning geometry)) 탄성과 토모그래피는 우선 응용기법이나 전산처리 기법 면에서 다양한 기술로 세분화되어 발전하여 왔다.

그림 13은 탄성과 토모그래피 분야에서 그 응용성이 가장 높은 측정과정(이를 흔히 시추공-시추공 토모그래피라 부른다)을 나타내고 있다. 하나의 시추공에는 발생원 장치를, 또 다른 시추공에는 수신기 장치를 삽입하여 여기서 탄성과 발생원을 시추공 내부에서 그 위치를 이동하면서(토목분야에서는 약 1m 간격) 탄성파를 생성한다. 각 발생원 위치에서 생성된 탄성파는 지하 사방으로 전달되고 그들은 또 다른 시추공에 삽입된 각 수신기에 도달하게 된다. 그림에서 발생원으로부터 수신기에 도달하는 탄성파를 파선으로 나타내고 있으며 각 파선에 대응되는 탄성파 기록을 편의상 트레이스(seismic trace)라 한다. 전산처리 과정에서 주로 관심의 초점이 되는 것은 각 트레이스에서 관찰되는 P파의 초동주시이다. 역산을 위해서는 대부분의 경우 시추공 사이를 수백~수천 개의 미소 cell(각 cell의 매질은 균질하다고 가정)로 나눈 후 각 파선에 대응되는 실제 주시시간과 계산된 주시시간과의 비교에 의해 이루어진다. 즉, 각 파선에서 각 cell의 속도에 대한 하나의 방정식이 성립된다. 현실적인 응용에서 만약 심도 50m 시추공이 주어지고, 수신기를 1m 간격으로 설치한 후(도합 50개 수신기) 발생원을 50회(1m 간격으로 이동) 구사한다면 trace 수는 $50 \times 50 = 2500$ traces 즉, 2500개의 방정식이 성립되며 이때 두 시추공 사이의 지질단면을 $50 \times 50 = 2500$ 개의 cell로 나누게 되면 각 cell의 탄성파속도는 상기 2500개의 방정식으로부터 고도의 전산처리 기술에 의해 그 해를 구함으로써 얻어지게 되는 것이다. 이를 흔히 토모그

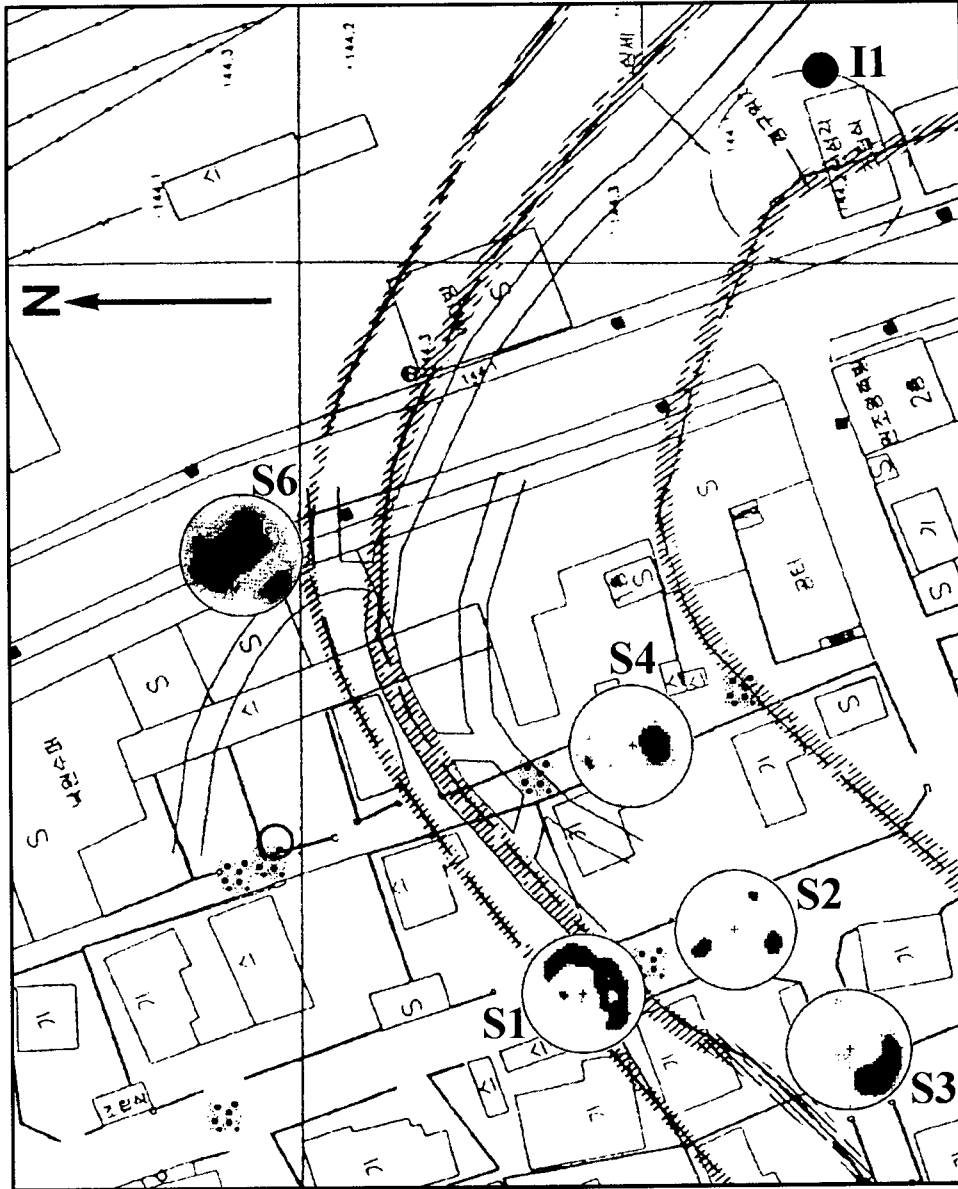


그림 12 시추공 S1, S2, S3, S4 및 S6의 텔레뷰어 이미지에서 인식된 모든 불연속면에 대한 pole diagram이 각 시추공의 위치에서 표현되고 있다.

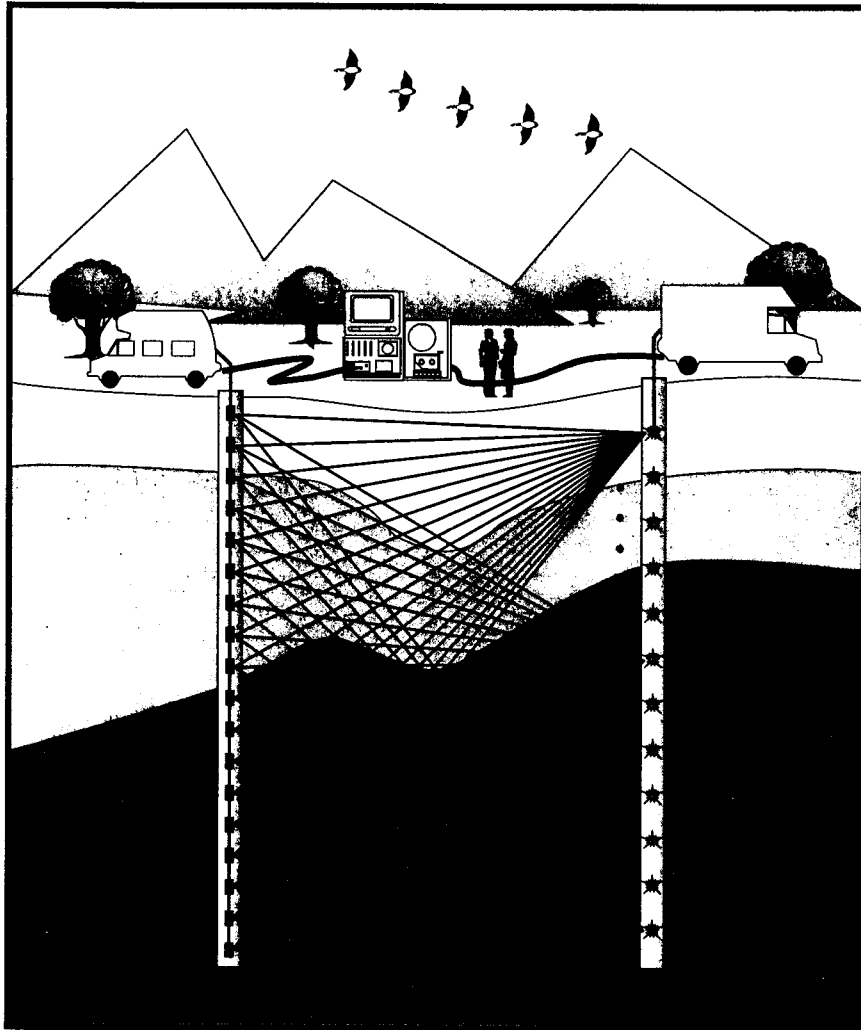


그림 13 탄성파 토모그래피(시추공-시추공 토모그래피)의 근본원리.
 하나의 시추공에는 발생원을, 또 다른 시추공에는 수신기를 삽입하여
 두 시추공 사이에 탄성파를 교신하고 있음(CT 촬영)을 나타내고 있다

램 혹은 주시역해 결과라 한다. 즉, 토모그램은 시추공 사이 지질단면에 대한 탄성파속도 분포를 의미하며 그로부터 암층의 분리 및 각 암층의 탄성파속도가 규명되는 것이다.

국내 탄성파 토모그래피 응용에는 발생원-수진기 배열구간의 일반적인 제약이외에도 각 암층간의 탄성파 속도차가 상대적으로 대단히 크고 동시에 암층 경계면이 거의 일관성을 잃고 있다는 문제점이 부각되고 있다. 이러한 문제는 비록 양질의 데이터와 적절한 역산기법이 주어진다 하더라도 흔히 주어진 지질상태와 전혀 부합될 수 없는 결과를 초래할 수 있는 것이다. 따라서, 소기의 탐사결과를 얻기 위해서는 무엇보다 측정데이터 그 자체에 대한 포괄적인 분석이 요구되며 그로 인한 풍부한 정보는 역산과정 내지 토모그램 해석에 반영됨이 바람직하다. 따라서, 토모그래피 최종 결과인 해석단면도는 바로 토모그램을 바탕으로 측정데이터 분석에서 얻게되는 모든 정보가 고려되어 작성되는 것이다(김중열, 1998). 다음은 침하지역에서의 탄성파 토모그래피 응용 사례를 예시하고 있다.

1995년 5월 인천시 북구 부평동에 위치한 작은 하천에서 소규모 지반(약 5m×1.5m)이 약 8m 침하한 사고가 발생하였다(그림 14 아랫그림 참조). 하천 주위에는 많은 민가가 운집되고 있었으나 다행히 그로 인한 인명 및 재산 피해는 발생하지 않았다. 그림 14의 윗부분은 본 침하지역 하부 채굴적(#9-1)에 대한 평면도를 나타내고 있다. 여기에는 지표로부터 약 20m 간격으로 갱도 및 채굴적(노란색: -20m level, 연두색: -40m level, 주황색: -60m level)이 불규칙하게 분포되고 있음을 볼 수 있다. 침하구의 규모 및 위치가 바로 지표 지질조사에서 인식된 단층(경사각 약 70°)에 접하고 있음에 비추어 우선 단층에 협재된 파쇄대가 단층면을 따라 봉락된 것으로 추정되고 있으며 나아가서 관찰된 침하 정도(약 8m)는 상당한 크기의 채굴 공동이 주위에 존재하고 있음을 시사하는 것이 되었다. 시추조사에 의하면 시추공 H-1 및 H-3에서 이미 기대한 바, 각각 40m level 및 60m level의 갱도가 존재하고 있음이 확인되었다.

그림 15는 시추공 H-2 - H-3 단면측정에 의해 얻게된 해석단면도를 나타내고 있으며 그에 따라 다음과 같은 정보를 추출할 수 있다. 즉, 토모그램에서 인식된 두개의 갱도(시추공 H3 주위 -40m level 및 -60m level, 화살표로 표시) 주위의 탄성파속도가 대단히 높게 나타나고 있음에 비추어 그들은 그 자체로서 잘 보존되고 있으며, 또한 그들 사이의 암반상태는 대단히 양호하다고 볼 수 있다. 한편, 시추공 H2에 인접하여 심도 약 -45m level로부터 저속도 이상대가 시추공 H3을 향하여 비스듬히 상향된 형태를 보여주고 있음은 그 주위 채굴적의 끝부분 혹은 공동이 본 측선단면에 인접되고 있는 것으로 간주될 수 있다. 만약 침하가 주어진 단층면(경사각 약 70°)상에서 발생하였을 경우에는 그림 14에서 예시한 바 각 갱도 혹은 채굴적 level에 대한 소위 침하 반경(점선으로 표시)을 추정할 수 있다. -20m level에는 만약 채굴적의 위치가 정확하다는 가정 하에 침하가 일어날 수 없다. 그러나 -40m level 및 -60m level에서는 채굴적 방향으로 침하가 일어날 가능성을 보여주고 있다. 여기서 더구나 두 채굴적의 연장이 침하지역에 다다르고 있다는 점은 상기 가정에 또 다른 신뢰를 부여하는 것이 되겠다.

4. 장기 계속

4.1 개요

최근 매스컴을 통해, 신축되고 있는 혹은 기존 아파트가 기울어지고 있다는 보도를 흔히 접하게 된다. 이러한 사고에는 우선 여러 가지 요인이 결부되고 있겠으나 무엇보다 지반상태에 의한 요인도 역시 결코 간과될 수 없는 것이다. 대부분의 지하철공사가 진행되는 주변 건물은 굴착작업 내지 지반상태 변화(예: 지하수 유동)에 의해 유발되는 지반침하 현상으로 인하여 다소 기울어지고 있음을 흔히 볼 수 있으며 그로 인해 많은 민원이 제기되고 있는 실정이다. 대형 교량시설의 기울어짐, 사력 댐의 미소 침하 정도 및 폐광된 후 지반침하로 인한 주변 시설물(예: 다리, 건물, 철교)의 기울어짐도 정기적인 계측을 통하여 관찰됨이 바람직하다. 인쇄소의 종이말이 장치의 미소한 기울어짐도 전체 기계의 훼손을 쉽게 유발할 수 있으며 오래된 문화재 건축물(예: 피사탑)의 기울어짐은 문화재 보호 측면에서 항상 관찰되어야 할 것이다. 나아가서, 운하 하부 터널 내벽의 변형, 고속도로 경사면의 일관성, 터널의 경사각 유지 및

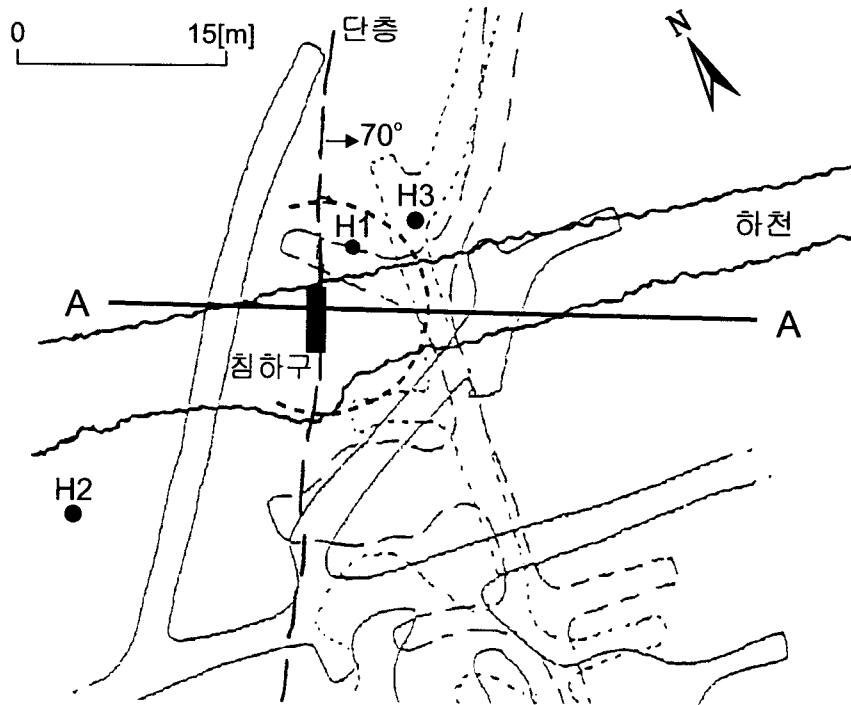


그림 14 부평지구 소하천 지반 침하 전경.

상: 침하구 주위 심도별 채굴적 상태를 평면도로 나타내고 있다. 시추
공 H2 및 H3은 탄성과 토모그래피 응용을 위해 사용되었다.

하: 침하 후 전경.

Seismic Tomographical Interpretation (P-wave velocity distribution)
 YongPung Subsidence Site (H2-H3 section)

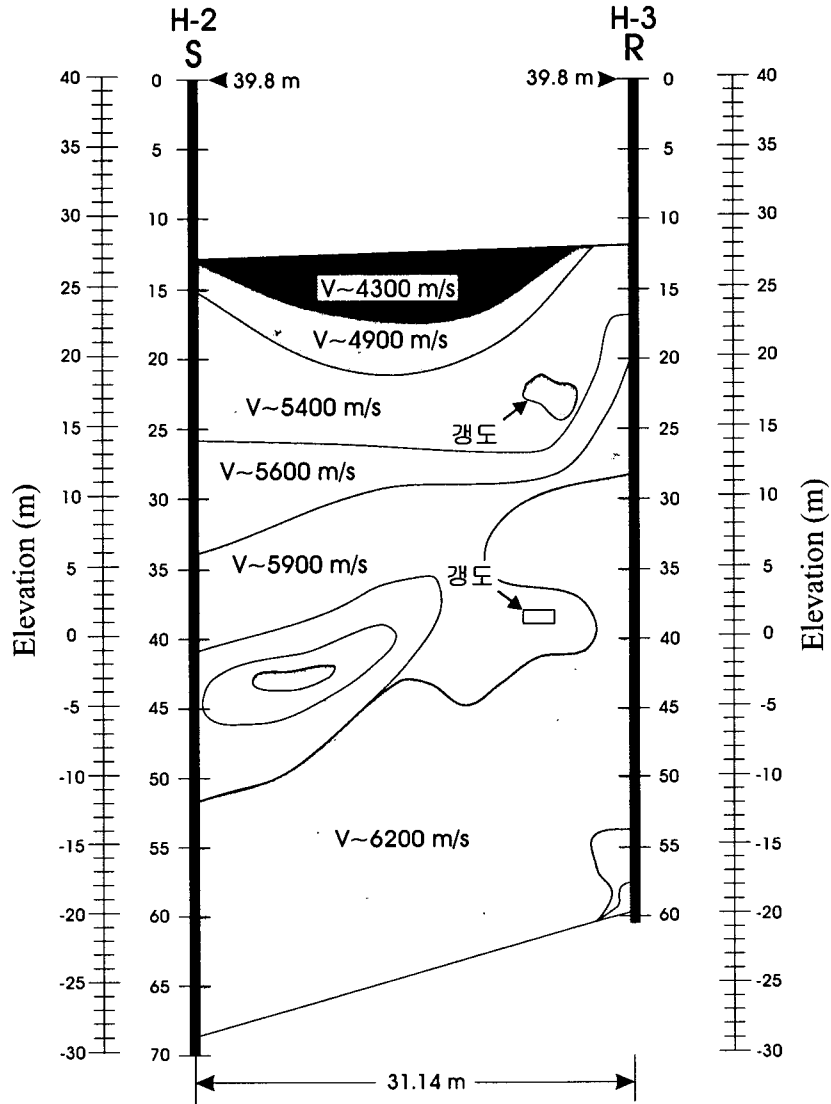


그림 15 탄성과 토모그래피의 응용.
 시추공 H-2 : H-3 단면측정에 의해 얻어진 해석단면도.

수문 몸체의 기울어짐으로 인한 수문 개폐의 어려움 등 많은 분야에서 경사에 대한 계측의 필요성이 대두되고 있다.

일반적으로 물체의 움직임(movement) 내지 진동(swing, vibration)은 흔히 주기(period)로 표현된다. 그림 16은 전형적인 물체 움직임에 대한 주기를 나타내고 있으며(Pelzer, 1985) 여기에는 크게 세 가지 부류로 구분되고 있음을 볼 수 있다. 대체로 발파진동이나 토목 구조물의 고유진동은 1초 내외가 되는 반면 물체의 변형 내지 기울어짐은 단시간에서 수십 년에 이르기까지 주기의 폭은 대단히 넓다. 여기서 상기 구조물 기울어짐은 대체로 단기 및 장기 움직임에 해당되기 때문에 그에 따른 측정 기법도 조사 대상에 따라 달리하게 된다(예: mobile application, data tele-communication with network capability etc.).

상기 물체 변형을 측정할 수 있는 계측기로는 현재 여러 가지 종류의 전자 경사계(electric inclinometer)가 시판되고 있다. 비록 그들의 작동 원리는 서로 달리고 있으나(예: mass, fluid, gas의 움직임) 역학적인 에너지를 전기적인 진폭 크기로 변환하여 경사의 크기를 가늠하는 데에는 상호 공통점을 찾을 수 있다. 예를 들면, Tiltmeter Model 701-2(Applied Geomechanics, U.S.A)는 전해액 센서(electrolyte sensor)가, Schaevitz Inclinometer는 진자(pendulum)가, DMT ROTLEVEL은 accelerometer Q-Flex(Quarzflexure) QA 700(Company SUNDSTRAND DATA CONTROL, U.S.A)이 미소한 기울어짐에 대해서도 민감히 반응할 수 있기 때문에 그로부터 전환되는 전기적 진폭 크기를 타당한 스케일링에 의해 고분해능으로 계측할 수 있는 전자 경사계이다. 한편, 이들 각 경사계에 구성된 센서는 그 자체로서 0.1 mgon ($360 \text{ degree} = 400 \text{ gon} = 400 \times 10^3 \text{ mgon}$, $2\pi = 360 \text{ degree}$, $1 \text{ deg} = 3600 \text{ arcsec}$) 이하라도 감지할 수 있는 기능을 갖고 있다. 그러나 이것만으로는 상기 경사계의 실질적인 분해능은 평가될 수 없다. 즉, 현장응용 측면에서 그들이 보여주는 실질적인 분해능은 주로 다음과 같은 요인에 의해 크게 달라지는 것이다.

- 편차(drift) 현상
- 경사계의 고유주파수
- Calibration 과정

편차 현상은 크게 정적인 요인(static element)과 동적인 요인(dynamic element)으로 구분되어 발생된다. 정적인 요인으로는 외부 온도의 변화, 계기 자체의 가열화 및 계기의 노화현상을 들 수 있으며 이로 인한 크기는 실지 경사치와 중첩되어 특히 장기 측정시에는 상당한 offset을 유발하게 된다. 동적인 요인은 측정 당시의 외부 여건과 상관된다. 즉, 바람, 태양열 방사, 각종 교통차량, 조수간만 차이, 우발적인 충격 등은 때에 따라 큰 측정 오류를 낳게 할 수 있는 것이다.

각 전자 경사계는 고유주파수(damping 포함)를 갖고 있기 때문에 그 자체로서 그들의 응용에 제약이 뒤따르게 된다. 예를 들면, 상기 Schaevitz는 75.8Hz, Tiltmeter는 0.68Hz, ROTLEVEL은 >500Hz 고유주파수를 나타내고 있다(Muehlrath, 1993). 만약, 조사대상(물체)이 바람에 의해 약 0.003Hz~1.5Hz 범위의 변형이 초래된다면 Tiltmeter는 공명현상(resonance)으로 인하여 상당한 측정 오류를 유발할 수도 있는 것이다. 반면, Tiltmeter는 그 자체의 낮은 주파수만 고려한다면 지각의 변위(예: 단층 진행)도 감지할 수 있는 기능을 갖고 있다고 할 수 있다. 한편, ROTLEVEL의 고유주파수는 500Hz 이상이 되기 때문에 어떠한 동적인 요인에 의한 공명현상도 유발될 수 없다고 볼 수 있다. Schaevitz는 그의 고유주파수에 비추어 단기 움직임(그림 16 참조) 계측에 보다 적합하다고 할 수 있겠다.

Calibration은 측정된 전기적인 진폭 크기를 실질적인 경사각으로 전환하는 과정이다. 이에 대한 상관관계는 경사계의 특성에 따라 주어진 측정 범위 내에서 선형(linear relationship)이거나 혹은 비선형이 될 수도 있다. 우선 offset이 교정된 후 그로부터 소위 scaling factor가 산출된다. 한편, calibration은 일반적으로 공인된 연구소에서 수행되기 때문에 장기 측정시에는 주기적으로 매번 경사계를 옮겨야 하는 번거로움이 뒤따른다. 더구나 재 측정시는 그 이전의 계측 여건이 충족되기는 대단히 어렵다고 볼 수 있으며 그에 따라 고급 전문가의 노력이 별도로 요구되는 것이다. 만약, 단순히 calibration 계기 오차만 0.4 arcsec에 달한다면, 상기 경사계의 센서 분해능 자체의 분해능은 그 의미를 잃게 되는 것이다.

Period of typical movements

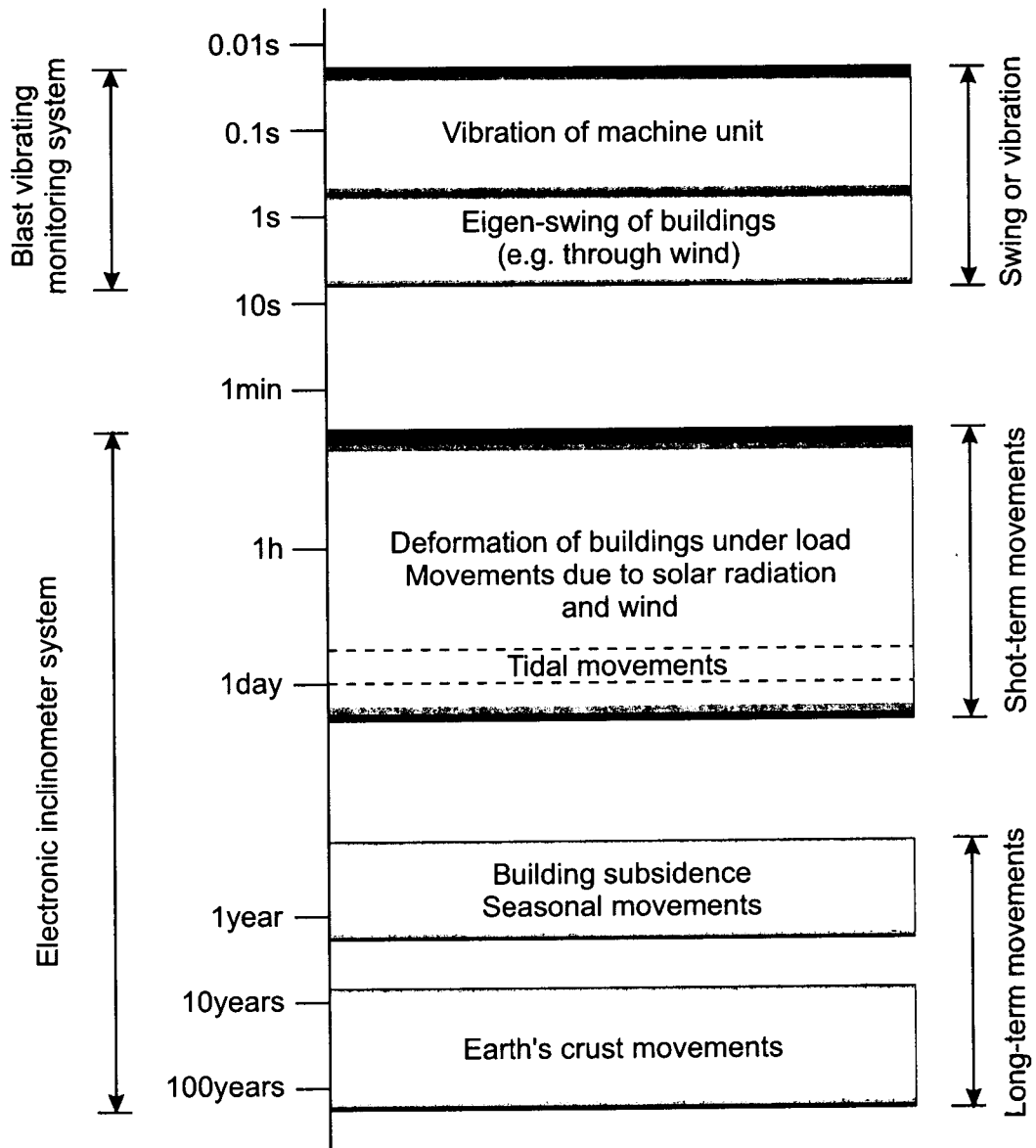


그림 16 전형적인 물체의 진동 및 변위의 주기(Pelzer, 1985).

환원하면, 경사계의 실질적인 분해능을 높인다는 것은 센서 자체의 분해능보다는 바로 상기 세 가지 문제에 어떻게 효율적으로 대처될 수 있는가에 달려 있는 것이다. Schaevitz 및 Tiltmeter에 의한 측정치는 상대치(전기적인 진폭크기)이다. 따라서, 여기에는 반드시 calibration 과정이 수반되어야 한다. 반면, ROTLEVEL은 상기 문제를 극복하기 위한 노력의 일환으로 개발되었기 때문에 그에 의한 측정치는 바로 경사에 대한 절대치가 되며 동시에 그가 보여주는 분해능(< 0.3 arcsec)도 역시 절대치가 될 수 있는 것이다. 따라서, 본 논문에는 우선 전자 경사계로 공인되고 있는 상기 ROTLEVEL의 경사 측정 기능을 관찰하고 또한 그의 현장실험을 통한 응용성을 예시하고 있다.

4.2 ROTLEVEL의 기능 및 그의 현장응용 사례

ROLEVEL(ROTating LEVEL)은 센서로서 Q-Flex servo-accelerometer를 사용하고 있다. 센서 내부에는 특수 제작된 수직 석영추(amorphous Quartz pendulum)가 기울어짐에 따라 그 위치를 옮기게 되며 그에 따른 힘의 균형은 가속도에 비례하는 전기적 진폭 크기로 전환된다. 이러한 면에서 상기 가속계는 물리학적 측면에서 force detector라 할 수 있다. 여기서 가능된 가속도 a 는 그림 17에서 예시한 바 중력가속도 g 에 대하여 다음과 같은 공식에 의해 경사각 α 가 구해진다.

$$\sin \alpha = \frac{a}{g} \quad (1)$$

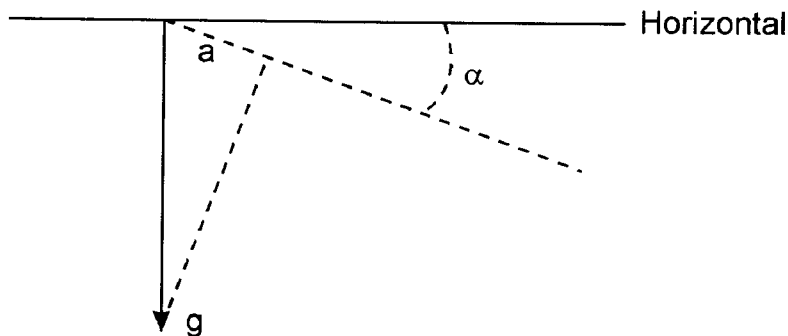


그림 17 중력장에서의 센서축의 기울어짐과 가속도 a 의 기하학적 표현.

서로 수직인 두 성분 가속도를 동시에 측정하는 상기 가속계는 회전 가능한 적은 원판 위에 장착되어 있다. 이 때 가속계는 원판 회전시 도합 6개의 고정 위치에서 측정을 위해 정지된다. 시작점과 그로부터 180° 회전된 지점은 offset 교정을 위해 사용된다. 즉, 한번의 경사 측정을 위해 ROTLEVEL 내부에서는 두 번 측정하게 되는 것이다. 이 경우 소요되는 시간은 약 1분 정도가 된다. 한편, calibration을 위해서는 우선 원판이 주어진 측정범위에 대한 경사각만큼 기울어진 상태에서 상기 두 측정점 위치 이외 그로부터 각각 45° 떨어진 위치에서도 차례로 측정(도합 6번 측정)하여 scaling factor 및 offset이 자동으로 산출된다. 더구나 각 위치에서는 주어진 시간 내에 측정된 모든 값들을 종합하고 동시에 필터 함으로써 있을 수 있는 잡음(예: microseismic, vibration 등)을 최대한 약화시키게 되어 경사 측정의 분해능이 극대화되게 되는 것이다. 지금까지 서술된 모든 기능은 측정 시 software 운영에 의해 자동제어 되고 동시에 데이터 통신망을 통하여 원격 조정도 가능하다(data teletransmission). 여기서 자동제어를 위한 주요 입력 매개변수는 측정시간 간격, 경사치를 종합하는 시간(integration time), calibration 주기, 측정 형태(one component or two component measurement) 등을 들 수 있다.

상기 경사계 시스템은 일반적인 휨선(bending curve)을 추적하는 데에도 쉽게 활용되며 그에 따른 근본원리는 물리학에서 이미 알려지고 있다. 그림 18은 하나의 보기로서 세 개의 디딤목 상태에서 다리의

상판이 휘고 있음을 상징적으로 나타내고 있다. 이 때 변형(deformation) dh 에 의한 경사각 변화(inclination change) $d\alpha$ 측정은 $\alpha(s+ds) - \alpha(s)$ 이 되어 시간 t 에 대한 각 측정점에서의 고저 변화는 다음과 같이 표현된다(예: Heger, 1992).

$$dh_{i-1,i} = \left[\sin\left(\frac{d\alpha_{i-1}}{2}\right) + \sin(d\alpha_i) \right] \times s \quad (2)$$

s : 각 측정점 사이 거리

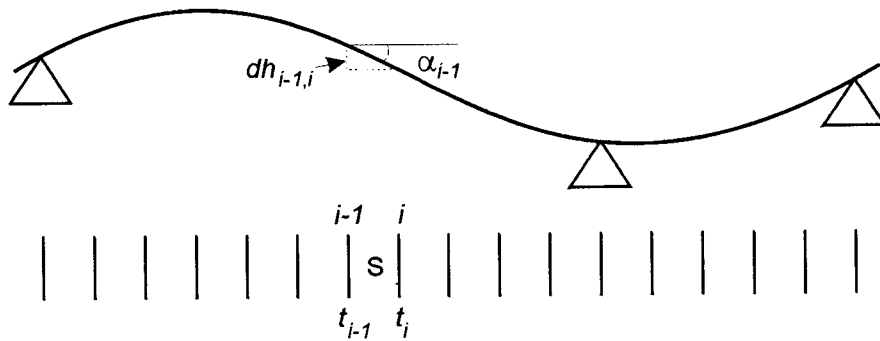


그림 18 세개의 디딤목 상태에서 다리 상판의 휨과 변형.

일반적으로 다리의 시작점과 끝점의 고도는 알려져 있기 때문에 식(2)를 적분한 값은 측정의 오차를 가늠하는 척도가 될 수 있다. 한편, 측정점의 위치는 대체로 경사가 크게 일어나는 곳에서 선정되며 예를 들어 다리의 경우에는 다리 상판의 연결되는 주위가 대단히 효과적인 측정점이 될 수 있겠다.

ROTLEVEL에 의한 측정치는 바로 경사각에 대한 절대치가 되기 때문에 무엇보다 탐사 수행 측면에서도 상당한 경제성을 갖게 된다. 특히, 장기적인 측정과정에서는 데이터의 질의 일관성이 보장되는 장점 이외에도 경사 측정에 대한 실질적인 분해능에 의해 서론에서 언급한 모든 조사 분야에서 그의 응용이 기대되는 것이다.

그림 19는 하나의 전형적인 현장응용 사례를 보여주고 있다. 여기에는 건물 지하실에 도합 10개의 ROTLEVEL을 설치하여 약 200일간 측정한 후 최종 경사정도를 두 성분 기록에 의해 벡터로 나타내고 있다. 일별하여, 건물의 기울어지는 방향 내지 위치가 뚜렷이 인식되고 있다.

그림 20은 주어진 조사지역 내 서로 다른 위치에서 설치한 5개의 ROTLEVEL로부터 단지 하나의 성분기록(x-direction inclination)만을 발췌하여 동시에 나타내고 있다. 그 결과, 4개의 측정지점에서는 거의 완만한 변화가 발생하고 있으나 단지 한 지점에서는 약 160일 후 상대적으로 급격한 경사 변화가 관찰되고 있다.

그림 21은 독일 엘베 사장교(cable-stayed bridge)를 나타내고 있다. 주탑(pylon)에는 도합 5개의 ROTLEVEL을 서로 다른 고도에 설치하였다. 다리와 평행한 방향을 x축, 그와 수직한 방향을 y축으로 하여 5분마다 측정하고 매시간 calibration을 수행하였으며 그에 따른 전체 계측은 약 7시간 소요되었다. 여기서, 조사의 목적은 온도 변화에 따른 주탑의 휨선(bending curve)을 규명하는 것이었다. 그림 22는 식(2)에 의해 계산된 주탑의 휨선(단지 y 성분기록)을 나타내고 있다(Doll et al., 1994). 여기서, 온도는 N1 위치로부터 N5 위치 사이로서 약 30°C가 될 경우이다. 그림에서 주탑 높이 약 41m(N5 위치) 이상에는 계측할 수 없었기 때문에 그 이후에는 외삽되었다. 측정된 휨선은 주탑이 높아짐에 따라 휨 효과가 급증되고 있음을 보여주고 있다.

다음은 진동측정기(가속도 측정)와 ROTLEVEL을 N5 위치에 동시에 설치하여 교통 및 바람에 의한

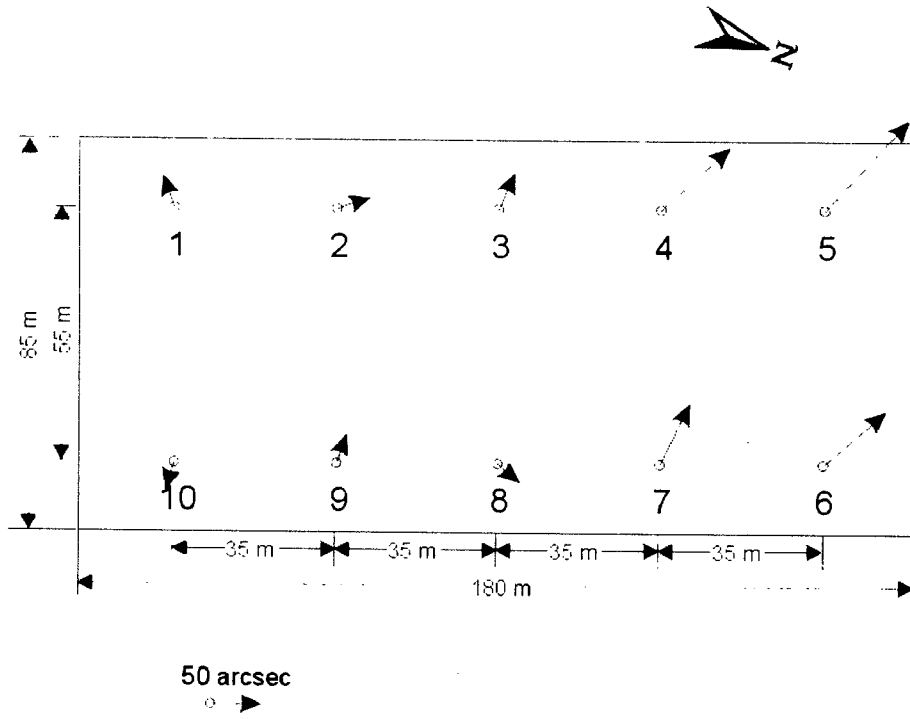


그림 19 시설물의 기울어짐을 벡터로 표현하고 있다.

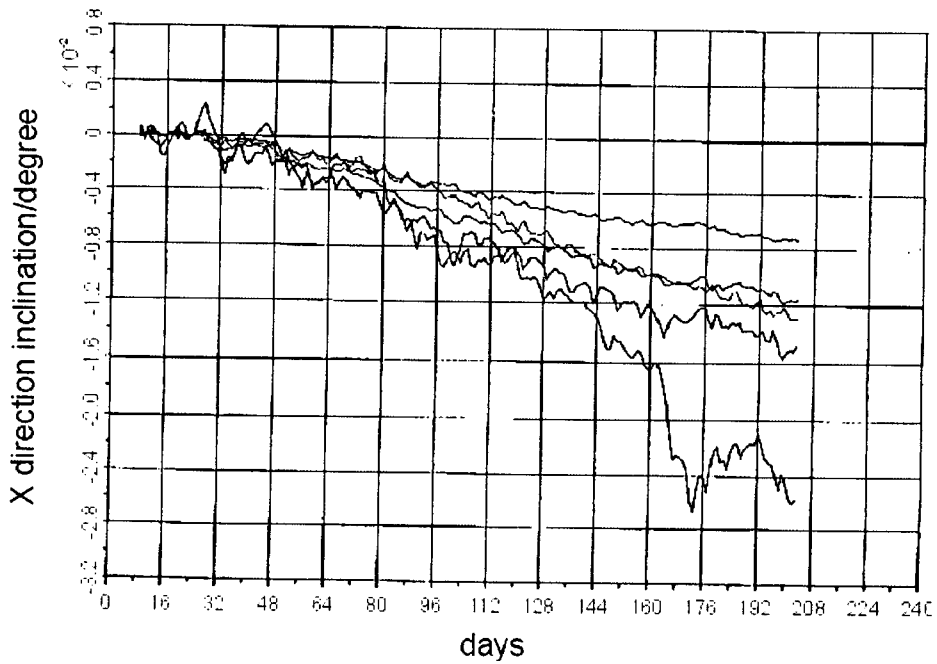


그림 20 탐사지역 내 서로 다른 위치에 설치한 5개의 ROTLEVEL로 부터 단지 하나의 성분기록을 상호 대조하고 있다.

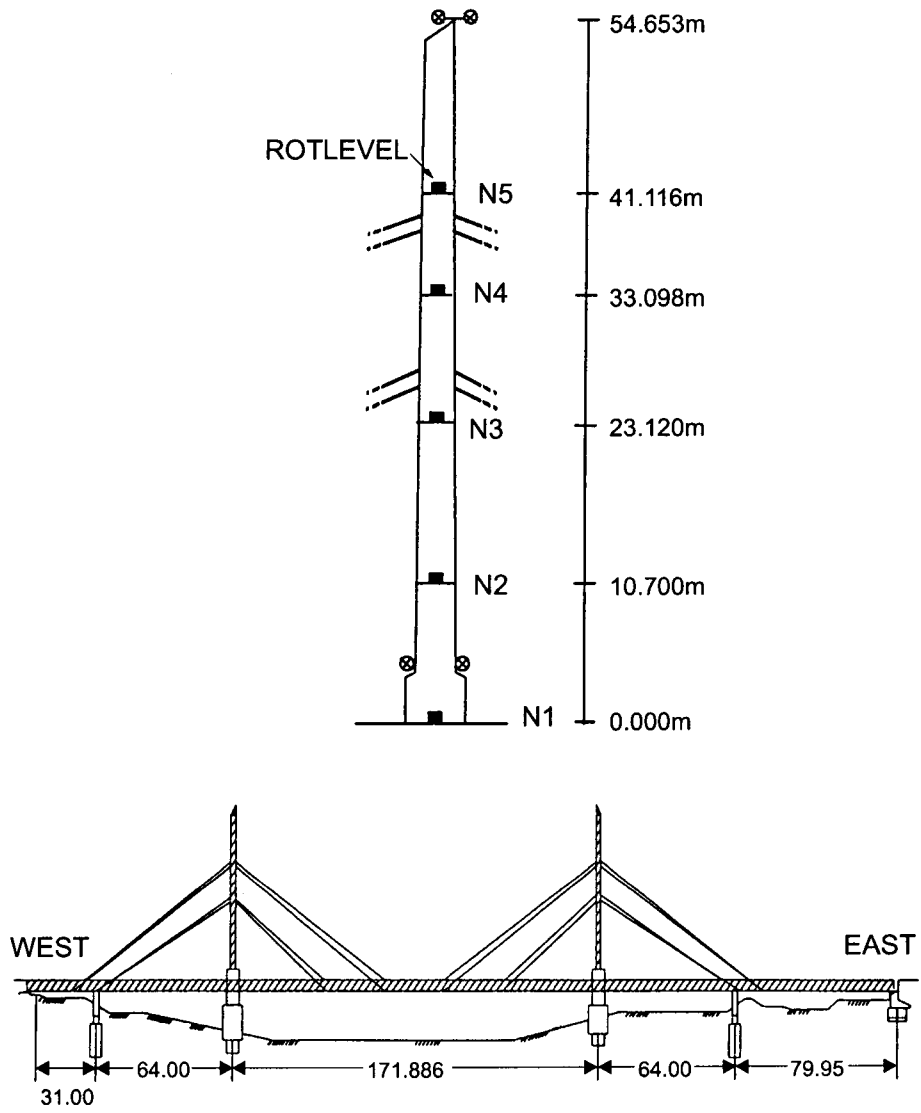


그림 21 독일 엘베강 사장교에서 온도 변화에 따른 주탑의 휨선을 규명하고자 5개의 ROTLEVEL을 설치하고 있다.

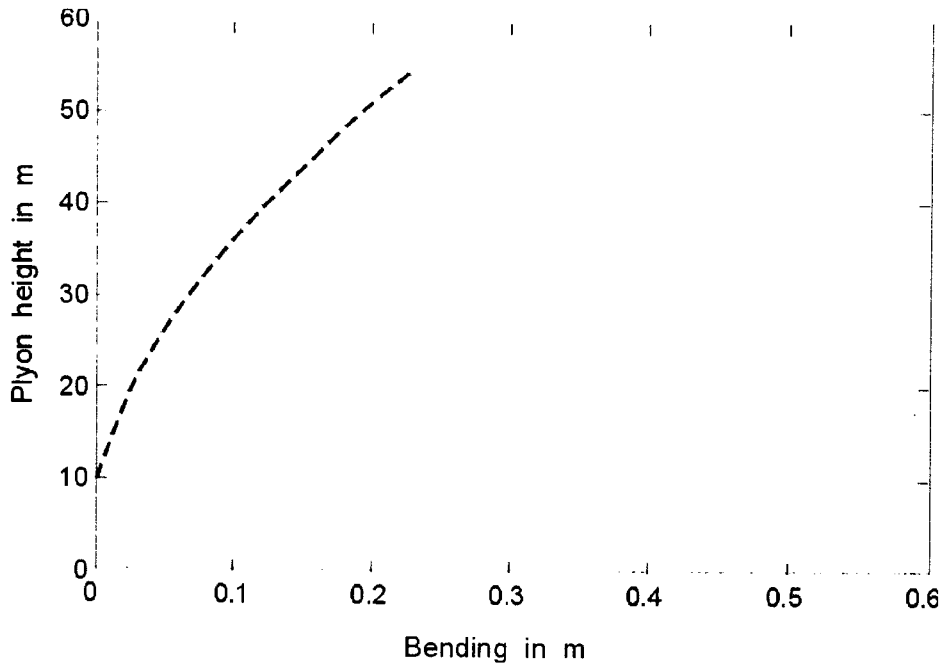


그림 22 ROTLEVEL 데이터로부터 산출된 주탑의 휨선(y 성분기록)을 나타내고 있다.

효과를 서술하고 있다. 이 때 진동측정기는 0.0185 s 간격으로, ROTLEVEL은 0.0038 s 간격으로 측정하였다. ROTLEVEL의 경우에는 짧은 측정시간 간격으로 인하여 offset 교정과 calibration이 매 측정 시 이루어질 수 없었기 때문에 실험실에서 별도로 수행되었다. 두 측정 결과(y 성분)에 대한 주파수 내용은 그림 23에 나타나고 있다. 일별하여, 동일한 주파수에서 높은 에너지를 보여주고 있으며 더구나 진폭의 상대적인 변화도 거의 대등하다. 대체로 0~4Hz 사이에 나타낸 높은 진폭은 다리의 고유주파수에 기인된다고 볼 수 있으며 4Hz 이상에서 관찰되는 주파수 내용에는 여러 가지 복합적인 요인이 결부되고 있기 때문에 이에 대한 구체적인 해석은 본 실험만으로는 어렵다. 그러나, 상기 실험 결과에서 분명한 것은 ROTLEVEL의 고유주파수가 > 500Hz이기 때문에 여러 가지 동적인 요인(차량 통행, 바람 등)에 의한 잡음이 측정 데이터에 전혀 영향을 주지 않고 있다는 점이다.

ROTLEVEL 개발과정에는 다른 전자 경사계 시스템과 비교하여 다음과 같은 문제를 극복하는 데 초점을 두었다. 즉,

- 정적 요인(예: 기기 노화, 소자 가열화)에 의해 초래되는 offset변화
→ 매 측정시 두 위치(180° 간격) 측정에 의해 교정될 수 있다.
- 공명현상 → 센서의 높은 고유주파수(>500Hz)는 어떠한 동적 요인(예: 차량통행, 바람 등)에 의해서도 공명 현상을 일으키지 않는다.
- 별도의 calibration 과정에서 발생하는 측정 오류 → ROTLEVEL 전체의 calibration에 의해 측정 분해능은 물론 측정의 일관성을 기할 수 있게 되었다.
- 측정치를 왜곡할 수 있는 제반 잡음 → 측정치의 중합, 필터에 의해 매 번 측정시 근원적으로 약화시킬 수 있다.

특히, 측정이 장기화되는 경우에는 상기 장점을 갖는 ROTLEVEL이 실질적인 측정 분해능 측면에서 다른 경사계 시스템과 비교하여 상대적으로 우월함을 보여줄 것이 예상되며 더구나 계속에 따른 경제성 측면에서도 대단히 유리하다. 따라서, 터널굴착, 폐광지역의 지반침하 및 부실 시공 등으로 인한 건물의

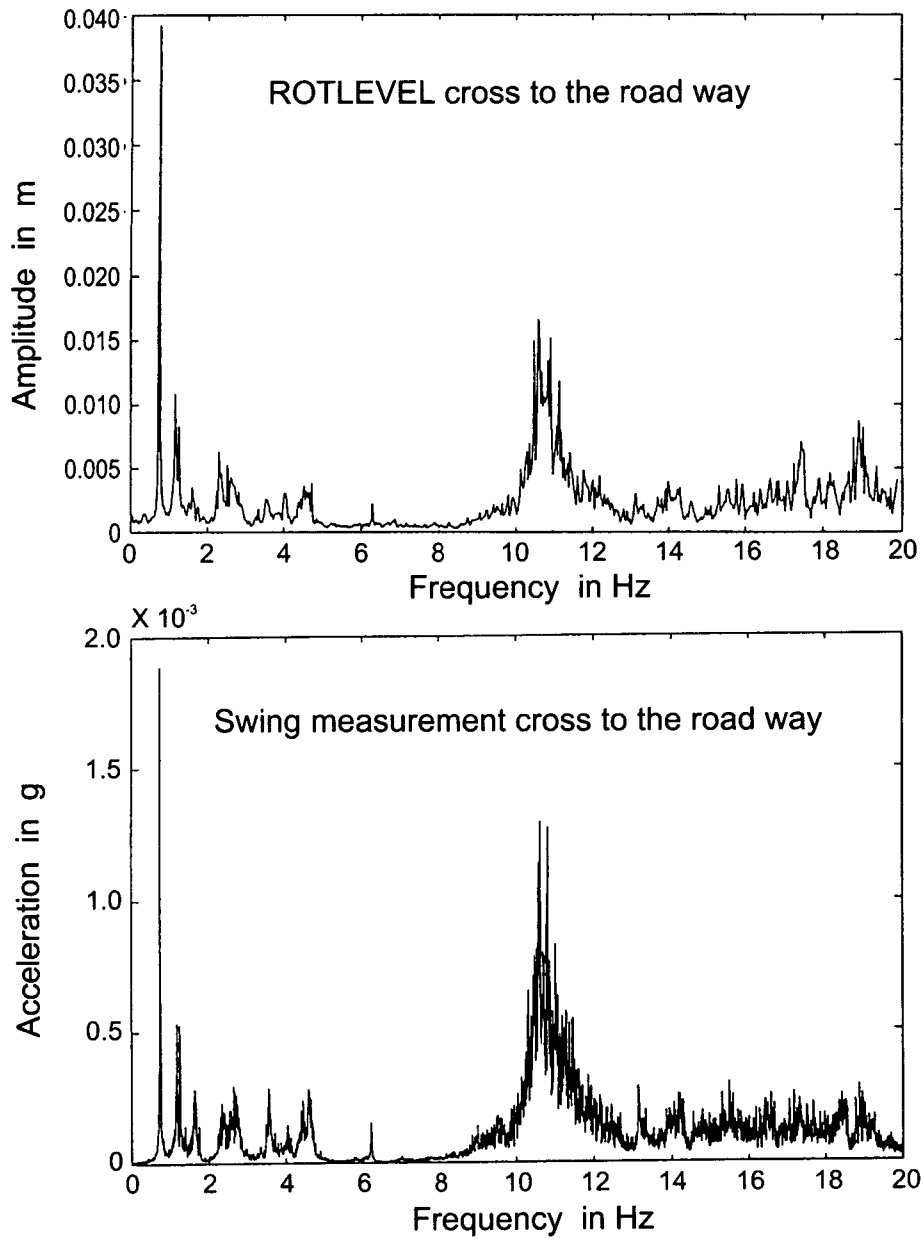


그림 23 진동측정기(가속도 측정)와 ROTLEVEL을 N5위치(그림 21 참조)에 설치하여, 교통 및 바람에 의한 효과를 주파수 내용에 의해 상호 대조하고 있다.

기울어짐에서 댐 및 교량의 변형 상태를 계측하는 데 이르기까지 상기 ROTLEVEL의 응용은 대단히 바람직한 것으로 사료된다.

참고문헌

- 권광수 외(1993), "부평광산 개발구역 안전진단 및 평가 연구", 한국자원연구소, 영풍산업주식회사.
- 김정호, 송윤호, 조성준, 이명중, 신인철(1998), "문경지역 지반안정성 정밀조사 -전기비저항 탐사-", 한국자원연구소, 석탄합리화사업단.
- 김중열(1998), "건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술 -텔레뷰어탐사-", 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회, 한국자원연구소, pp.279-356.
- 김중열(1998), "건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술 -탄성과 토모그래피 탐사-", 한국암반공학회, 한국지구물리학회, 한국자원연구소, pp.57-413.
- Doll, H., W. Heger and H. Kuhlmann(1994), Deformationo-analyse deswestlichen Pylons der Norderelbbrücke mit dem Neigungsme β system ROTLEVEL, Deutsche Geodaetische Kommission,München.
- Heger, W.(1992), Deformationomessung mit Neigungsmessern, DMT INFO, Bochum, Germany.
- Mühlrath, J.(1993), Geraetetechnische Untersuchung verschiedener delktronischer Neigungsmesser, Diplomarbeit, Universitaet Hannover Geodaetisches Institut, Hannover.
- Pelzer, H.(1985), Besonderheiten der Auswertung Kontinuierlicher Messungen und Proleme ihrer Interpretation. In : "Kontinuierliche Messungen in der Ingenieurgeodaesie" Veröffentlichungen des geodaetischen Instituts der RWTH Aachen Nr. 28, 151-171, Aachen.