

물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출

황세호, 이상규(한국자원연구소 자원연구부)

Application of geophysical well logging to fracture identification and determination of in-situ dynamic elastic constants.

Se Ho Hwang, and Sang Kyu Lee

*Geophysical Exploration and Mining Division, Korea Institute of Geology,
Mining & Materials*

요 약: 물리검층은 최근에 토목지반조사분야에 대한 활용성이 증가하고 있다. 이것은 물리검층이 시추공 내에서 분해능 높은 다양한 원위치 물성정보를 제공할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 현재 토목지반조사분야에서 적용되고 있는 것은 주로 암상구분, 파쇄대 인식과 동탄성계수의 산출, 지하수흐름검층 등이다. 이와 관련하여 최근에 활용성이 증가하는 물리검층법에 대한 소개와 지반조사와 관련한 물리검층 사례, 그리고 완전파형음파검층에 의한 탄성과 속도와 암반분류와 관계에 대한 사례를 소개한다.

주요어: 물리검층, 파쇄대, 동탄성계수, 암반분류

Abstract: Recently the application of geophysical well logging to geotechnical site investigation is increasing, because the merit that geophysical logs provide the high resolution and in-situ physical properties in volumes of rock surrounding the borehole. Geophysical well logs are used to identify lithologic boundaries and fracture, to determine the physical properties of rock(i.e., density, velocity etc.), and to detect permeable fracture zones that could be conduits for ground water movement through the rocks. The principle of heat-pulse meter, the calibration of gamma-gamma logging, and principles and data processing of full waveform sonic logging are briefly reviewed, and the case studies of geophysical logs are discussed. Correlation between velocity by sonic logging and rock mass classification such as RMR(Rock Mass Rating) value is considered.

Keywords : geophysical well logging, fracture, in-situ dynamic elastic constants, rock mass classification.

1. 서 론

물리검층은 시추공 주변의 지반에 대한 각종 물성을 원위치에서 측정하는 물리탐사법으로 주로 석유탐사분야에 적용되어 왔다. 최근에는 핵폐기물처분장 부지조사, 터널, 교량, 댐, 비축기지 등의 대규모 토목공사에서 지반의 파쇄대 특성 조사나 내진 설계를 위한 동탄성계수 산출 등의 지반조사 분야나 지하수 조사, 환경오염조사, 광물자원탐사 및 지열자원탐사 분야 등에서 물리검층의 활용성이 날로 증가하고 있다. 현재 국내에서 지반조사에 대한 물

리검층의 활용은 주로 음파검층과 감마-감마(밀도)검층을 이용한 동적 탄성계수의 산출과 지하수흐름측정을 위한 검층이 주류를 이루고 있다. 이는 물리검층의 많은 장점 중에서 극히 일부분만을 활용하는 것으로 점진적으로 물리검층이 지반조사에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

물리검층은 시추공 내에 다양한 센서(검출기, probe) 삽입하여 시추공 주변 약 수cm~1m 정도까지의 물성을 시추공 전구간에 대한 연속적인 측정과 측정값 자체가 현지 지반의 압력, 불연속면의 특성, 지하수, 온도 등 원위치 지반의 특성을 포함하는 특징이 있다. 이와 같은 특징은 시추코아에서 얻을 수 있는 각종 물성정보가 체적이 작은 코아를 사용하여 지반에 대한 대표성이 작다는 것과 코아가 시추로 인한 교란을 받는다는 점, 연속적인 시추코아의 회수가 어려운 경우가 많다는 점에 대비되는 것이다. 물론 물리검층은 시추공 주변에 대하여 보다 넓은 체적에 대한 물성정보와 시추로 인하여 교란된 지반의 영향을 작게 받으며 연속적인 측정이 가능하지만 측정규모가 작기 때문에 공내수, 공벽의 변화 등에 영향을 받으며 많은 장비의 측정원리 및 교정 등에 대한 정확한 이해와 기술적인 숙련이 있어야 정량적인 자료의 획득이 가능하다.

본 논문에서는 지반조사와 관련된 물리검층을 사례를 중심으로 소개하며 각 물리검층에 대한 자세한 설명은 제외하였으며, 현재 지반조사 분야에 활용성이 많은 지하수흐름검층, 밀도검층 및 완전파형음파검층만 간단히 소개하고자 한다. 물리검층을 이용한 파쇄대 확인 사례와 주로 터널이나 대규모 지하공동굴착의 토목 지반조사에서 물리검층을 이용하여 동탄성계수를 산출한 사례를 3개 지역(석회암 지역, 퇴적암 지역 및 화강암 지역)을 중심으로 소개한다. 그리고, 토목 지반조사 분야에서 가장 활용성이 높은 탄성과 속도는 건설교통부 표준품셈, 한국고속도로공사 분류기준, 서울 지하철 분류기준, 고속철도공단 분류기준 등이 있지만 완전파형음파검층에 의한 탄성과 속도자료와 각종 암반분류와의 관계, 암반등급의 판정 등 지반설계에 필요한 설계변수와의 관계가 보고된 사례는 없다. 본 논문에서는 완전파형음파검층에 의한 탄성과 속도와 RMR에 의한 암반분류와 관계, 암반 등급의 결정, RMR 값에서 추정된 변형계수와 물리검층에 의한 동적 변형계수와와의 관계를 사례를 통하여 논하고자 한다.

2. 물리검층을 이용한 파쇄대 인식

물리검층 기록 중에서 공경검층, 음파검층, 단극저항검층, 감마-감마(밀도)검층, 중성자(공극)검층, 온도/전기전도도검층, 지하수흐름검층, 공벽영상화검층 등은 결정질 암반의 불연속면을 인식하는 데 매우 효과적이다. 특히, 가장 최근에 개발된 공벽영상화검층은 시추공과 교차하는 파쇄대의 확인에 유용하게 활용되고 있다. 공벽영상화검층을 제외한 물리검층은 공벽영상화검층처럼 높은 분해능을 제공하지는 못하지만 공벽영상화검층에 의한 수많은 파쇄대 중에서 유효한 파쇄대를 구분할 수 있는 장점이 있다. 이는 물리검층(이하 물리검층은 공벽영상화검층을 제외함을 의미함) 측정값은 Fig. 1과 같이 시추공 주변의 물리적 특성을 측정하기 때문이며 공벽영상화 검층과 비교되는 점이며 Table 1은 파쇄대 탐지와 관련된 물리검층을 요약한 것이다.

Fig. 2는 지하수 흐름을 측정하는 검출기의 구조로 외부 명령에 의하여 순간적으로 데워진(heat pulse) 저항 열선망은 그 주변의 유체 온도를 높이고 유체의 낮은 열전도도 때문에 이 열은 서서히 주변으로 분산된다. 열선망 상·하에 위치한 한 쌍의 열소자(thermistor)가

이를 감지하여 그 차이의 변화 양상을 경과 시간에 따라서 출력한다. 지하수의 흐름을 정밀하게 측정하기 위해 검출기를 정지 상태에서 일정 심도 간격 또는 필요한 심도들에서 측정될 수 있다. 통상 유체의 상향 흐름은 +의 값으로, 하향 흐름은 -의 값으로 출력된다. 상·하 열소자는 열선망으로부터 일정 거리 (예: 5cm)에 위치하여 있으므로 열선망에서 발사된 열 펄스가 상·하 열소자에서 온도차를 일으킬 때까지의 경과 시간에서 유체 흐름의 속도를 산출할 수 있다. Fig. 3은 물리검층기록중 암반균열의 정보를 내포하고 있는 검층기록들과 BIPS에 의해 획득된 전체 및 개구성 균열의 빈도수와 단위 심도당 누적폭 분포를 비교하여 보인 것인데 물리검층기록과 단위 길이당 개구성균열의 누적폭 간에 인지할 만한 상관성이 있음을 볼 수 있다. Fig. 3에서 □으로 표시한 부분은 물리검층기록으로 확인할 수 있는 불연속면의 특징을 예를 들어 보인 것으로, 급격한 공경의 변화(↘), P파 속도의 감소(즉, slowness의 증가)와 단극저항의 감소(따라서 slowness와 SPR 기록을 순차적 나란히 보면 두 기록의 peak가 마주보게 됨(○)), 온도구배 또는 전기전도도구배의 급격한 변화(↗) 등의 특징들이 불연속면의 특성에 따라서 모두 함께 나타나기도 하고 또는 한 두개의 특징만 보이기도 한다. 특히, 개구성 균열이 상당한 지하수의 흐름을 수반할 때에는 온도구배 또는 전기전도도 구배기록에서 심한 변화를 볼 수 있을 뿐 아니라 불연속면 주변에서 공내수의 속도 변화를 충분히 감지할 수 있게 된다. 공내수의 상대적인 속도(relative flow)는 후속의 정교한 calibration에 의하여 유량으로 환산될 수도 있다. 물리검층기록을 통하여, BIPS에 의하여 얻은 수많은 암반균열 중에서 어느 것이 진정한 불연속면으로서의 의미를 갖고 있는가 하는데 대한 추가 정보를 얻을 수 있다는데 그 의의가 있다.

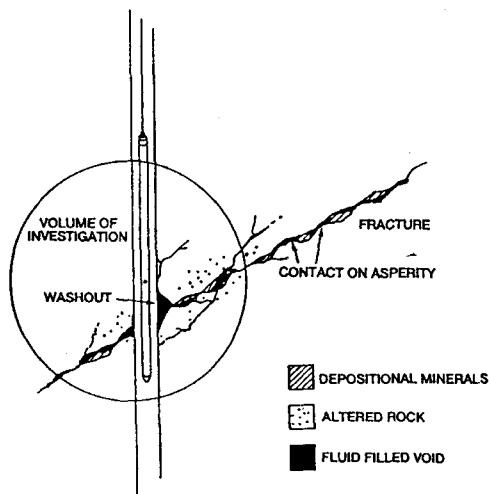


Fig. 1. Schematic illustration of volume of investigation for geophysical measurement in a borehole.

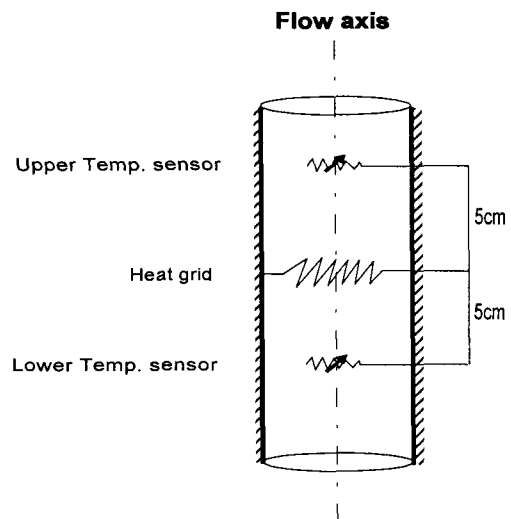


Fig. 2. Schematic illustration of the probe configuration for the heat pulse flowmeter. From Robertson Geologging Limited(1995).

Table 1. Summary of geophysical logs, their conventional application in sedimentary formations, and their application in fracture interpretation(Paillet, 1994).

Log type	Measurement	Conventional Interpretation	Fracture Interpretation	Reference
Natural gamma	Formation gamma emission	Clay mineral fraction	Radioisotopes as infilling	Keys(1979) Aguilera(1980)
Neutron	Neutron flux attenuation	Porosity, clay fraction, water saturation	Alteration minerals	Nelson et al.(1983) Paillet(1991)
Resistivity	Formation electrical resistivity	Water salinity and lithology	Alteration mineral, water quality and permeability	Keys(1979) Katsube and Hume(1987)
Gamma-gamma	Gamma flux attenuation	Density and porosity	Lithology	Keys(1979) Paillet(1991)
Acoustic	Compressional wave travel time along borehole wall	Porosity and lithology	Alteration and fracture porosity	Paillet(1991) Keys(1979)
Acoustic waveform	Acoustic pressure signal	Shear velocity	Tube-wave attenuation, fracture transmissivity	Paillet(1983,1991) Hornby et al.(1989) Tang et al.(1991)
Temperature	Borehole fluid temperature	Thermal conductivity of formation	Inflow and outflow to borehole	Keys(1979) Paillet(1991) Keys and Sullivan(1979)
Spontaneous potential	Electric potential caused by salinity differences in borehole and interstitial fluid.	Water salinity and clay mineral fraction	Streaming potential	Keys(1979)
Fluid conductivity	Electrical conductivity of borehole fluid	Salinity of borehole fluid	Inflow and outflow to borehole	Keys(1979) Hess and Paillet(1990) Paillet(1991)
Caliper	Borehole diameter	Drilling damage and fractures	Hole enlargement	Keys(1979) Paillet(1991)
Flowmeter	Vertical flow in borehole	Permeability	Inflow and outflow to borehole	Hess(1986) Hess and Paillet(1990)

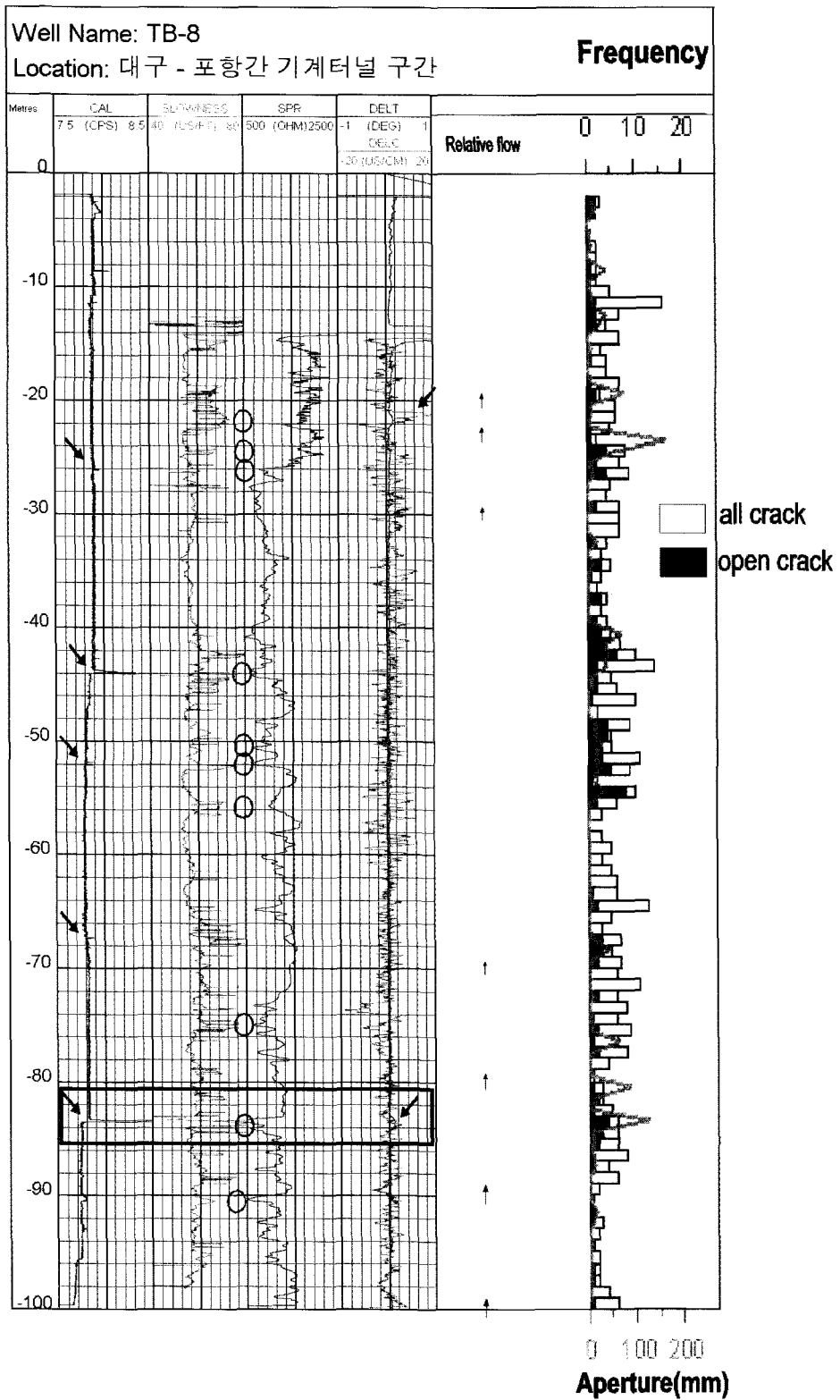


Fig. 3. Comparison the fracture indicator of geophysical well logging and the crack frequency of borehole imaging log(BIPS).

3. 동적지반정수의 산출

지반의 동적지반정수는 지진과 같은 외부의 진동이 지반이나 구조물에 미치는 반응특성을 예측할 수 있는 표준 지표가 되기 때문에 터널, 원자력발전소, 대형교량 및 지하유류 비축기지 등과 같이 진동에 민감한 구조물을 시공할 때는 반드시 지반의 동탄성계수를 측정할 필요가 있다. 이와 같은 동적 분석에 필요한 동적지반정수를 구하는 방법은 하향식(downhole) 및 시추공간(crosshole) 탄성과 탐사법, 표면파를 이용하는 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave)법이 많이 이용되며(한국지반공학회, 1997), 물리검층의 음파검층과 밀도검층을 이용하여 동탄성계수를 구할 수 있다. 물리검층은 시추공 주변의 탄성과속도는 물론 원위치 밀도를 산출할 수 있으며 코어 회수가 불가능하거나 회수율이 작은 구간, 공내시험이 불가능한 구간에 대하여 연속적으로 지반설계에 유용한 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다. 동적지반정수의 산출에 필요한 밀도자료는 감마-감마(밀도)검층을 이용하며 감마-감마(밀도)검층에 대한 설명은 대부분의 물리검층 교재에서 다루고 있다. 그러나, 감마-감마(밀도) 검출기의 교정(calibration)에 대한 설명이 부족하기 때문에 감마-감마(밀도) 검출기에서 측정된 값이 어떻게 밀도로 환산되는가에 대한 이해가 부족하여 검출기 교정에 대한 과정을 소개하기로 한다. 그리고, 최근에 지반조사 분야에서 적용성이 증가하고 있는 완전파형음파검층에 대한 설명과 3개 지역에서 실시한 물리검층자료에서 동적지반정수 산출 사례를 소개하기로 한다.

가. 감마-감마(밀도)검층에서 검출기 교정의 원리

밀도검층은 감마선의 콤퓨턴 산란효과를 이용하여 암석의 체적 밀도(bulk density)를 측정(민경덕 외, 1987)하며 일반적으로 ^{137}Cs 방사능 선원과 일렬 배치된 여러 개의 센서 중 시추공의 여러 환경 중에서 영향을 작게 받는 가장 먼 거리에 있는 센서를 이용하여 밀도를 측정한다. 일반적으로 검출기의 교정은 3단계로 나눌 수 있으며 여기서는 Robertson Geologging사의 밀도 검출기(slim hole용)를 모델로 정하여 설명(자세한 사항은 이상규 외(1998) 참조)하며 대부분의 감마-감마(밀도)검출기의 교정은 이와 비슷하다(Samworth, 1992).

1차 교정에서는 밀도를 정확하게 알고 있는 물질에 대하여 시추공의 크기를 변화시키면서 검출기의 반응을 기록한다. 밀도의 범위는 1.1~2.9g/cc이고 정확한 밀도를 알고 있는 4종류의 물질에 대하여 시추공의 크기를 단계별로 변화시키면서 반복적으로 측정하여 각각의 밀도에 해당하는 검출기의 반응을 기록하여 검출기의 반응과 밀도와의 관계식을 유도한다.

2차 교정은 1차 교정된 검출기를 이용하여 밀도를 정확하게 알고 있는 2개의 교정물질(calibrator, 일반적으로 물과 Aluminium을 이용함)에 대한 반응 값을 측정하고 이 값과 새로운 검출기가 두 개의 교정물질에 대한 반응 값을 비교하는 과정이다. 즉, 1차 교정에 사용한 검출기의 반응이 물과 Aluminium에 대하여 각각 11,000CPS 및 282CPS이고 새로운 검출기가 α CPS 및 β CPS이면 1차 교정에 관계된 CPS로의 환산이 가능하다(Fig. 5 참조). 따라서, 1차 교정에서 유도한 관계식에 CPS 값과 공경을 대입하면 밀도를 계산할 수 있다. 2차 교정에 사용하는 검출기 교정장치는 부피가 크고 무겁기 때문에 제조회사에만 주로 이용하며 최종 사용자는 주로 부피가 작고 가벼운 3차 교정만 실시한다. 3차 교정은 주로 검출기의 정상적인 작동에 대한 확인과 약 30년의 반감기를 갖는 방사능 소스에 대한 보정에 주로 이용된다. Photo 1은 한국자원연구소에서 3차 교정장치인 Aluminium block을 이용하

여 검출기를 교정하는 장면이다. 그리고, 밀도 검층시 주의해야 할 사항은 다음과 같다. 1) 정확한 공경에 대한 자료가 필요하다. 즉, 공경의 변화에 의해 밀도가 변하는 경우, 공경 자료가 없으면 해석상에 오류를 범할 수 있다. 2) 검층의 속도를 충분히 유지해야 한다. 검층 속도가 빠른 경우 감마선을 측정하는 센서(scintillation counter)에 감지되는 감마선이 작기 때문에 통계적으로 불안정하기 때문이다. 3) 소스의 운반, 저장 및 사용에 안전을 기해야 한다. 밀도검층에 이용하는 소스는 3.7GBq ^{137}Cs 밀봉소스로 방사능 취급에 대한 철저한 교육과 훈련이 필요하다.

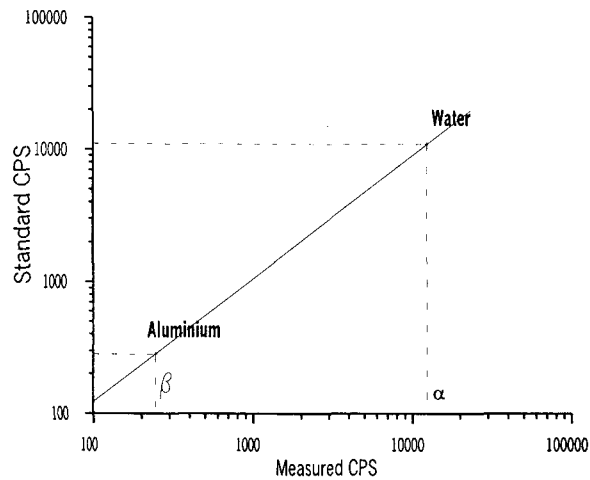


Fig. 5. Dual point calibration of gamma-gamma sonde.

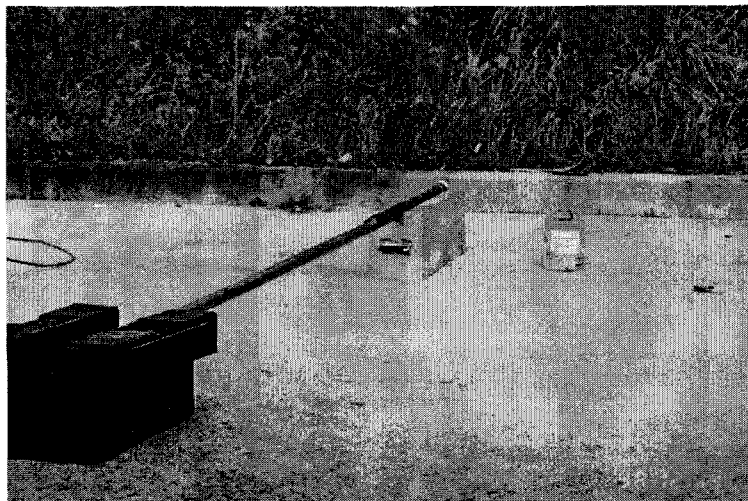


Photo. 1 Tertiary calibration of gamma-gamma sonde with aluminum calibration block in KIGAM.

나. 완전파형음파검층 원리

음파검층은 시추공 내에서 음파 발생 및 수신 장치로 구성된 검출기를 이용하여 시추공 주변의 지반에 대한 여러 가지 유용한 정보를 얻을 수 있는 물리검층이다. 음파검출기는 일반적으로 압전형 음파발생장치(일반적으로 10~30kHz 내외)와 수신장치로 구성되며 시추공 주변의 지반을 전파하는 음파를 연속적으로 측정하여 시추공 주변 지반에 대한 in-situ 탄성파 속도의 수직적 분포를 파악할 수 있는 검층법이다. 즉, Fig. 5에서 음원(TX1, TX2)에서 발생된 음파는 공벽에서 임계굴절 되어 지반을 따라 전파하며 일정 간격으로 설치된 수신기(RX1, RX2)에서 기록되고, 후속적인 자료처리 과정을 통하여 지반의 속도를 결정한다. 음파검출기의 종류는 각각 두개의 음파발생장치와 수신기로 구성되어 시추공경의 변화나 검층기의 기울어짐에 의한 영향을 보정하면서 시추공 주변 지반의 종파(P파) 속도를 측정할 수 있는 보상형음파검층과 수신기 도달하는 모든 파형(Full-waveform)을 연속적으로 측정할 수 있는 완전파형음파검층과 케이싱과 공벽 사이의 시멘팅 상태를 점검할 수 있는 시멘트본드검층이 있다. 현재 국내에서 지반조사에 이용되는 대부분의 음파검출기는 음원이 시추공에 대칭인 monopole 음원을 이용하며 주로 P파 속도의 측정을 목적으로 하지만, 시계열(time series)로 모든 파형을 측정할 수 있는 완전파형음파검층에서는 속도분석과정을 통하여 지반의 S파의 속도를 산출해 낼 수 있다. 음파검층에서 산출되는 지반의 탄성파 속도는 음파검층에서 이용하는 음원의 1파장 범위에 대한 평균 속도로, 지반의 탄성파 속도가 2,000~6,000m/sec이고 음원의 주주파수를 23kHz인 경우 시추공에서 약 10~25cm 반경 내에 있는 지반의 탄성파 속도라 할 수 있다. 이는 시추공이 NX인 경우, 시추코아보다 시추공 주변 수십 배의 큰 영역에 대한 지반의 탄성파 속도를 산출할 수 있는 장점이 있으며, 시추로 발생하는 제반문제(공벽의 손상, 응력집중 등)에 비교적 영향을 적게 받으며 측정 자체가 in-situ이고 시추공 전구간에 대한 속도의 분포 파악이 가능한 장점을 갖는다.

보상형음파검층은 Fig. 5와 같이 음원과 수신기를 각각 2개씩 이용하며 P파의 전달시간을 평균함으로써 공경의 변화나 검출기의 기울어짐으로 인한 오차를 줄인다. 보상형음파기록중 지반의 파쇄가 심한 구간에서는 파형 진폭의 감쇠가 크기 때문에 P파 이후에 도달하는 파를 P파의 도달 시간으로 간주하는 cycle skipping 이라는 현상이 발생하기도 한다(Fig. 3의 slowness참조). 이와 같은 경우는 보통 spike의 형태로 나타나기 때문에 despiking하는 자료처리법으로 제거하며, 한편 이와 같은 cycle skipping은 파쇄대의 지시자 역할을 하기도 한다. 완전파형음파검층은 보통 1개의 음원과 2개의 수신기 또는 array 형태로 구성되며 수신기에 도달되는 신호를 일정한 샘플링 간격으로 기록한다. 특수한 검출기로는 시추공의 투수율을 추정할 수 있는 Tube파의 발생이 용이한 검출기로 저주파음원(보통 수 kHz)을 이용

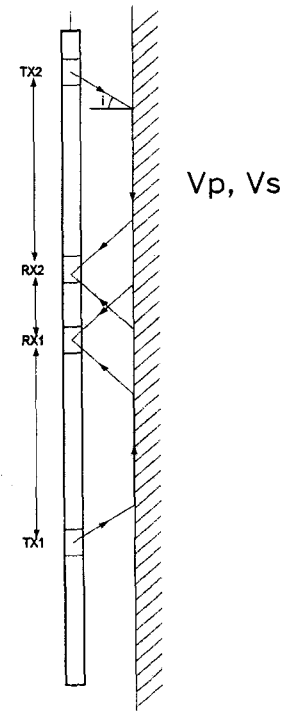


Fig. 5. Schematic illustration of acoustic and receiver configuration in borehole compensated acoustic probe.

하며 S파의 측정을 위하여 축비대칭 dipole 음원을 이용하는 검출기(Kitsunozaki, 1980) 등이 있다.

완전파형음파검층에서 시계열(time series)로 기록되는 자료는 실내에서 고도의 자료처리 과정을 통하여 P파 및 S파 등 각종 정보를 추출해 낸다. Fig. 6은 완전파형음파검층 기록중의 하나로 석회암 지역에서 측정된 자료이다. Fig. 6과 같은 자료를 각각의 수신기에서 심도 별로 표현하여 탄성과 단면도처럼 작성하기도 하며(Fig. 11 참조), (+) 진폭의 값을 흑백음영으로 표현하면(또는 가변밀도방식이라고도 함) 심도에 따른 진폭의 상대적인 변화를 파악할 수 있어서 연약대 또는 파쇄대 유무를 파악할 수 있는 유용한 정보로도 활용할 수 있다.

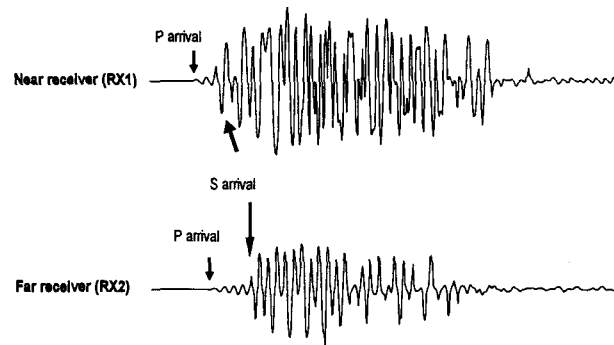


Fig. 6. Examples of full waveform sonic log for the Limestone formation.

완전파형음파검층의 기록에서 P파와 S파의 도달을 확인하기 위해 수치모델링에 의한 인공합성 완전파형음파기록을 살펴보기로 한다. Fig. 7은 시추공과 검출기의 직경이 각각 10cm, 5cm이고 지반의 종파 및 횡파속도를 각각 4000m/sec, 2300m/sec, 밀도가 2.3g/cc이고 음원의 주파수가 17kHz인 White와 Zechman(1968)의 음원을 이용하여 작성한 것이다. Fig. 7에서 P파와 S파의 초동(first arrival)은 거리에 따라서 그 차이가 증가하며 P파나 S파의 초동의 변화는 거리에 따라서 선형인 것을 알 수 있다. 이는 P파나 S파가 시추공벽에서 임계 굴절되어 전파하기 때문이며 지반의 S파 속도가 공내수의 P파 속도(1500m/sec)보다 작은 경우는 S파가 발생하지 않는다. 여기서, P파는 시추공내수와 공벽에서 각각 P파로 전파한 것이며 S파는 공내수에서는 P파로 공벽에서는 지반의 S파로 임계 굴절된 파이고 이외도 다양한 Guide wave가 존재한다. Fig. 8은 각각의 수신기에서 기록된 P파와 S파의 초동을 발췌하여 나타낸 것으로 기울기의 역수가 수치모델에 이용된 속도와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6에서 P, S파에 대한 속도는 각각의 도달시간과 RX1과 RX2 사이의 거리를 알면 쉽게 구할 수 있다. 그러나 시추공에서 획득된 자료는 측정간격이 조밀하고(보통 수십cm), 2회 이상 측정하기 때문에 그 자료가 방대하다. 따라서, 정확하고 신속한 속도분석 방법이 필요하며 탄성탐사의 속도분석에서 많이 이용하는 Semblance방법을 주로 이용한다(Kimball and Marzetta, 1984). 물론 직접적인 picking 방법도 가능하며 이외의 방법에 대한 것은 Engelhard(1985)에 자세히 설명되어 있다. Semblance란 다중 채널상의 일관성에 대한 측정으로, 합산한 후의 평균에너지를 합산전의 각 채널의 평균 에너지로 나눈 값을 의미하며 다음과 같은 식을 이용하여 P파, S파의 속도를 결정한다. 즉, Semblance를 구하는 식은

$$SEM(s, t) = \frac{1}{2} \frac{\int_{t=0}^{T_w} [RX1(t) + RX2(t + D \cdot s)]^2 dt}{\int_{t=0}^{T_w} [RX1(t)^2 + RX2(t + D \cdot s)^2] dt}$$

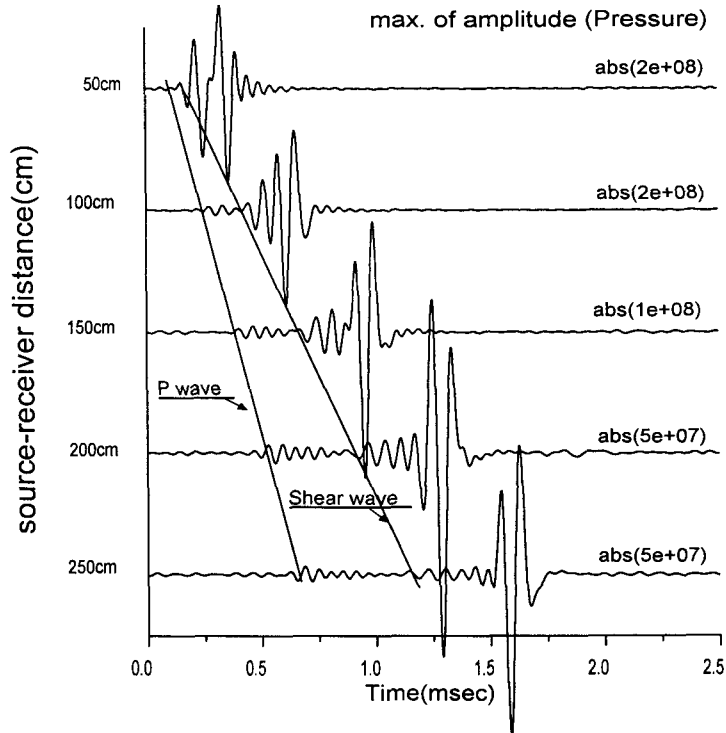


Fig. 7. The computed microseismogram. The amplitude of each trace is scaled for visualizing the P wave and S wave arrivals.

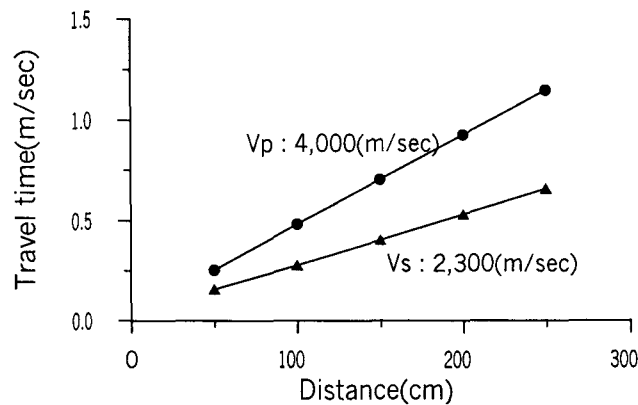


Fig. 8. Picked traveltime of P wave and S wave for Fig. 7. The inverse of slopes are the same velocity as the Model.

이때 SEM이 최대가 되는 peak에서 s 를 결정한다. 위 식에서 s 는 속도의 역수인 slowness를 의미하며 단위는 $\mu\text{sec/m}$ 또는 $\mu\text{sec/ft}$ 이며, t 는 수신기 RX1까지의 전파시간, D 는 RX1과 RX2 사이의 거리이다. 위 식에서 일정한 time window T_w 범위 내에서 두 자료간에

가장 좋은 일관성을 보일 때 SEM 값은 1에 가까운 값을 나타내며 그 반대일수록 0에 가까워진다.

탄성과 속도는 암상, 공극, 밀도, 심도, 고결(cementation) 및 온도 등의 많은 변수에 따라서 그 값이 변화한다. 이들 중, 가장 큰 영향을 미치는 것은 암상과 공극이며 암상을 구분하는 방법으로는 보통 P파 속도(V_p)와 S파 속도(V_s)의 비(V_p/V_s)를 이용한다. 실내 시험을 통해 측정된 V_p/V_s 는 사암의 경우 1.59~1.76, 석회질 사암은 1.67~1.76, 백운암은 1.78~1.84, 석회암은 1.84~1.99, 그리고 셰일은 1.70~3.0이다(Tathamn and McCormack, 1991). Fig. 9는 V_p/V_s 와 포아송비와의 관계를 나타낸 것으로 포아송비를 계산하지 않고 V_p/V_s 에서 포아송비의 값을 쉽게 알 수 있다.

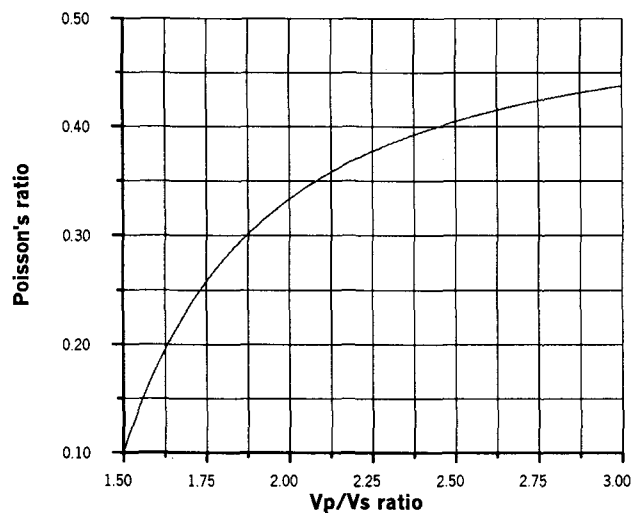


Fig. 9. Poisson's ratio as a function of V_p/V_s ratio.

다. 석회암지역에서의 포아송비 산출 사례

석회암 지역에서 실시한 물리검층 기록인 Fig. 10의 (a)에서 공경(CAL)은 공동이 위치하는 심도 9~10m 이외에서는 변화가 거의 없으며 자연감마선(NGAM)은 매우 낮은 것을 알 수 있다. 자연감마선의 경우 특이하게도 심도 약 25m 부근에서 자연감마선이 높은 것은 지하수의 흐름으로 균열대에 포타슘을 포함하는 물질의 충전이나 변질작용(Alteration)에 의한 것이다. Fig. 10의 (b)는 17.2~34.4m 구간에서 실시한 완전파형음파검층 기록(Fig. 11 참조)에 대한 속도분석 결과(V_p , V_s)와 포아송비를 나타낸 것이다.

완전파형음파검층 자료에 대한 속도분석 결과, V_p 의 평균 속도는 5950(m/sec), V_p/V_s 의 비가 평균적으로 1.97로 통상적인 석회암의 V_p/V_s 의 비인 1.84~1.99의 범위와 일치한다. 검층 구간에 대한 평균 V_p , V_s 는 각각 5950 ± 282 (m/s), 3021 ± 175 (m/s)이며 평균 포아송비는 0.323 ± 0.030 이다. Fig. 11에서 왼쪽은 가까운 거리에 있는 수신기에서 기록된 자료이고 오른쪽은 먼 거리의 수신기에서 기록된 자료로 상대적인 진폭변화를 파악할 목적으로 gain을 심도별로 동일하게 설정하여 측정된 자료이며 진폭감쇠가 큰 구간에 대해서는 gain을 조정하여 검층을 반복 실시한다. gain을 동일하게 설정하며 진폭변화에서 약대나 파쇄대의 위치를 파악할 수 있다. 참고적으로 축대칭 음원을 이용하는 경우, 검출기가 중앙에 잘 위치할

수 있도록 centralizer를 이용해야 양질의 자료를 얻을 수 있다.

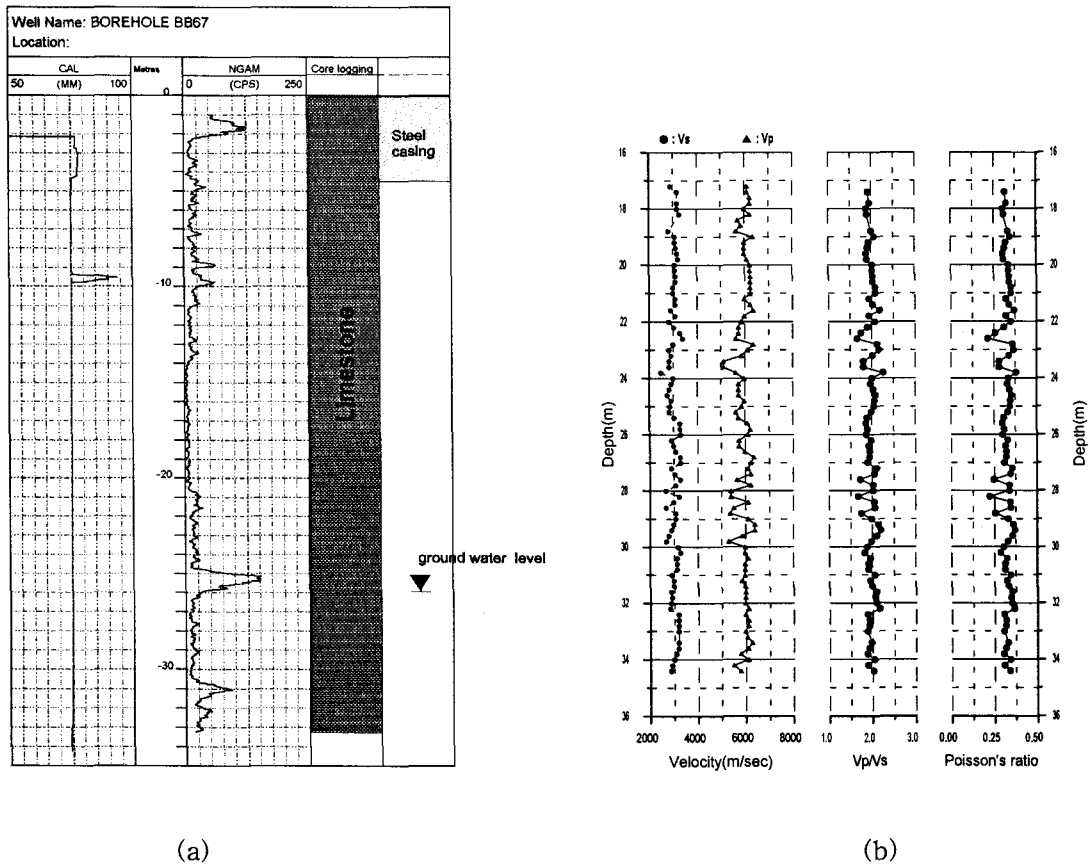


Fig. 10. (a) Geophysical well log in Limestone formation and (b) the profile of Vp, Vs, Vp/Vs and Poisson's ratio calculated by velocity analysis.

라. 퇴적암 지역에서 포아송비 산출 사례

Fig. 12는 퇴적암 지역에서 실시한 물리검층 결과로 시추공의 상태가 나쁘기 때문에 케이싱과 시멘트 그라우팅을 실시한 구간을 포함하고 있는 물리검층 결과이다. 심도 약 21m까지는 철제 케이싱, 36.5m까지는 시멘트 그라우팅을 실시하였고 암상은 사암, 실트암, 이암으로 구성되었다. 이 시추공의 경우, 수위가 낮아 음파검층 구간의 확장을 위해 인위적으로 수위를 높였다. Fig. 12의 (b)는 Fig. 13의 완전파형음파검층 자료에 대한 속도분석결과로 P파의 속도는 전구간에서 결정되었지만 22~29m 사이에서 S파의 속도는 거의 결정되지 않았다. 시멘트 그라우팅 구간의 경우, 시추공 주변 암반 내로 침투된 시멘트의 양과 침투 거리에 따라서 속도에 영향을 주기 때문에 음파검층에 의한 속도는 이와 같은 영향을 포함한다. P파 속도가 3000m/sec 이하인 22~29m 구간은 S파의 속도가 공내수의 P파 속도보다 작거나 비슷하여 S파가 발생하지 않거나 또는 Guide 파와 중첩되거나 Fig. 13에서 보듯이 극심한 감쇠로 S파의 구분이 어렵기 때문이다. 이와 같이 축대칭인 monopole의 음원을 이용하여 연약대나 S파의 속도가 공내수의 P파 속도보다 작은 경우네 S파의 속도를 구하기 위해서는 간접적인 방법을 이용해야 한다(Paillet and Cheng, 1991). Fig. 12의 (b)에서 시

추공 전구간에 대한 P파, S파, V_p/V_s 및 포아송비의 평균은 각각 3760 ± 1085 (m/sec), 2170 ± 415 (m/sec), 2.04 ± 0.25 및 0.33 ± 0.05 이다.

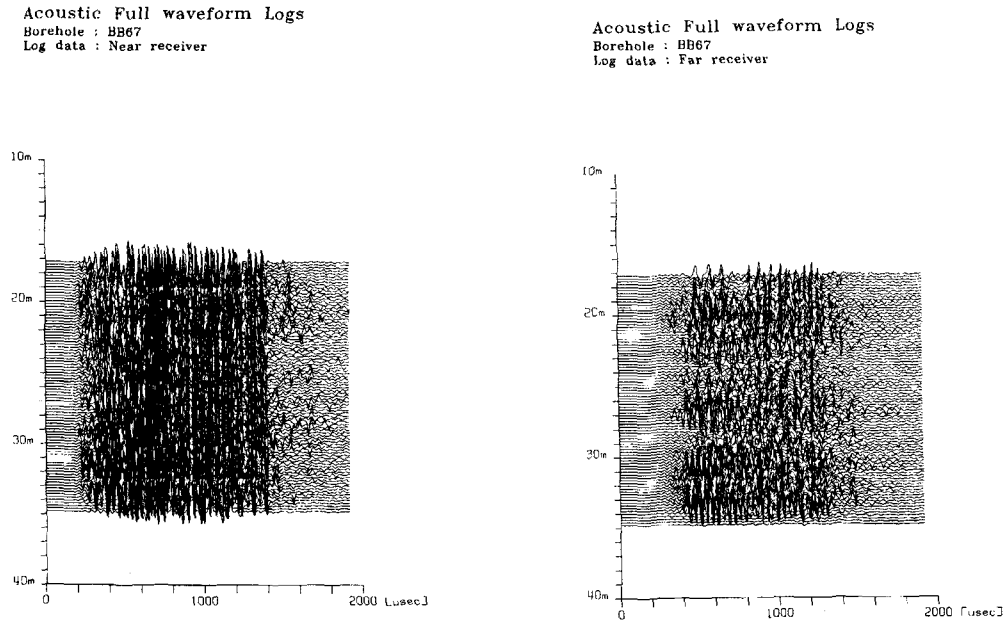


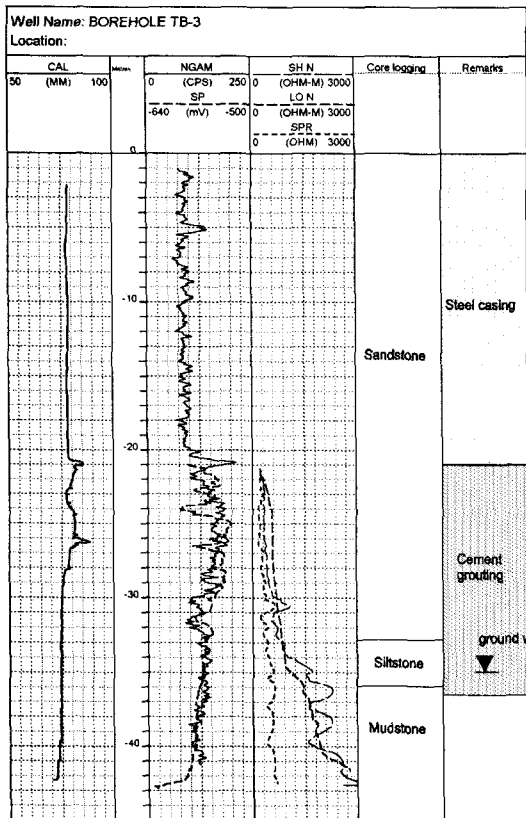
Fig. 11. Full waveform sonic log in Limestone formation.

Fig. 13은 완전파형음검층기록으로 심도에 따른 진폭 변화에서 연약대 또는 파쇄대의 위치 파악이 가능하다. 먼 거리에 위치한 수신기의 자료를 보면 22~29m 사이에서 진폭의 감쇠가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 경우는 1차적으로 gain를 동일하게 설정하여 자료를 획득한 후에, 반복하여 gain 설정을 조정하면서 자료를 취득하는 것이 좋다.

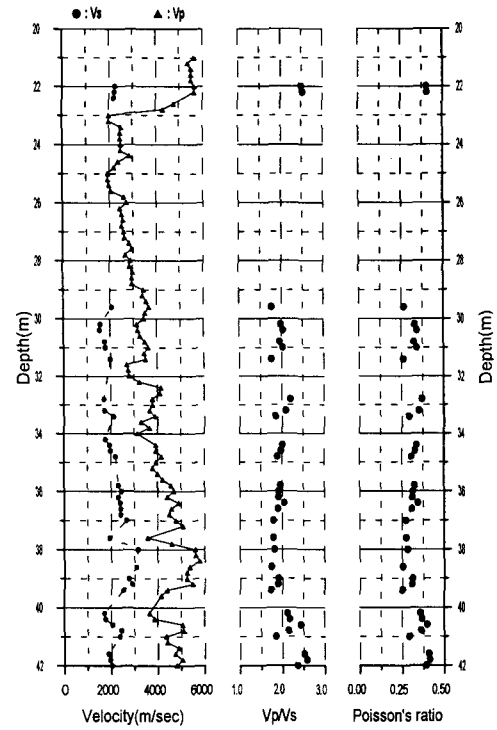
마. 화강암 지역에서의 동탄성계수 산출 사례

지금까지는 완전파형음파검층에 의한 동탄성계수 중의 하나인 포아송비의 산출에 대한 사례를 소개했으며 한국자원연구소 내의 시추공에서 실시한 밀도검층 자료와 완전파형음파검층자료를 이용한 동탄성계수의 산출 사례를 소개하기로 한다. 한국자원연구소 내의 시추공(이하 K-H로 칭함)은 심도가 300m이고 주요 암상은 화강암이다(권광수 외, 1997).

Fig. 14는 시추공 K-H에서 실시한 공경검층, 자연감마선검층, 밀도검층 및 시추공보상형 음파검층 결과를 나타낸 것이다. Fig. 14에서 SVEL(US/F)는 속도의 역수로서 SVEL 값의 증가는 속도가 감소함을 의미한다. SVEL이 증가하는 구간과 공경의 변화가 있는 구간이 잘 일치하고 있으며 이는 공경검층과 SVEL이 파쇄대 지시자의 역할을 하고 있음을 의미한다. Fig. 15는 완전파형음파검층자료에 대한 속도분석 결과(V_p , V_s)와 밀도검층을 이용한



(a)



(b)

Fig. 12. (a) Geophysical well log in sedimentary formation and (b) the profile of V_p , V_s , V_p/V_s ratio and Poisson's ratio calculated by velocity analysis.

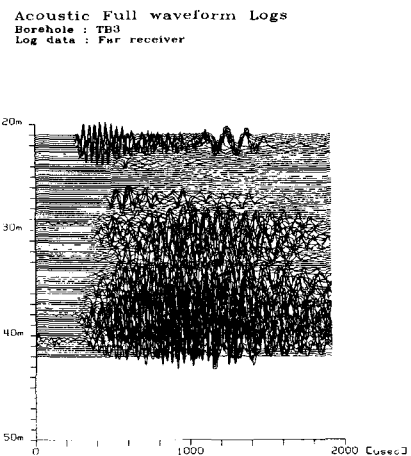
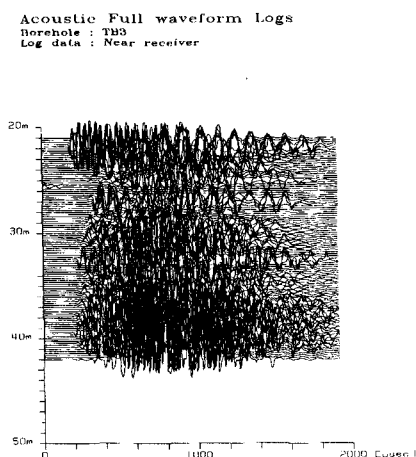


Fig. 13. Full waveform sonic log in sedimentary formation.

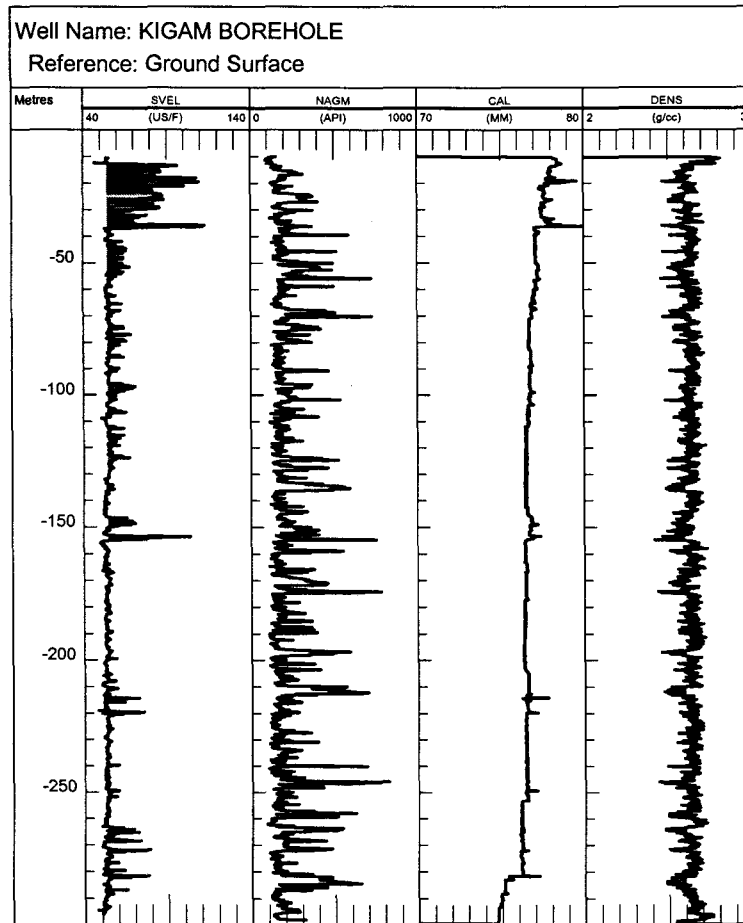


Fig. 14. Geophysical well log in KIGAM borehole.

여 계산한 동탄성계수를 나타낸 것으로 구간의 설정은 신회순 외(1998)에서 암반 분류한 구간과 동일하게 하기 위함이고 특별한 의미를 갖지는 않는다. 30m 천부까지의 탄성과 속도와 밀도가 하부에 비하여 약간 작으며 300m 하부까지의 탄성과 속도 및 밀도, 동탄성계수의 변화가 크지 않아 전반적으로 균질한 암반이라 할 수 있다. 변형계수는 값이 클수록 변형에 대한 저항력이 크다는 것을 의미하므로 지하에 대규모 공동이 설치되는 경우, 변형계수의 수직적 분포를 일정한 시간적 간격으로 측정한다며 지하공동으로 인하여 암반의 변형이 발생하는 구간을 확인할 수 있다.

4. 물리검층에 의한 동적지반정수와 암반분류와의 관계

물리검층자료는 시추공 주변에 대하여 가장 분해능 높은 탄성과 속도나 밀도를 이용하여 내진 설계에 필요한 동적인 지반정수의 산출할 수 있는 장점을 가지고 있지만 내진 설계가 아니 지반정수의 활용에는 많은 기여를 하지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 이유의 주된 원인은 물리검층에 의해 결정된 지반정수가 동적인 값이기 때문에 정적인 지반정수에 비하여 그 값이 크기 때문이다. 따라서, 물리검층 활용성은 기존의 암반분류 결과와의 관련성을 정량적으로 도출한다면 지반조사의 설계변수 설정에도 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

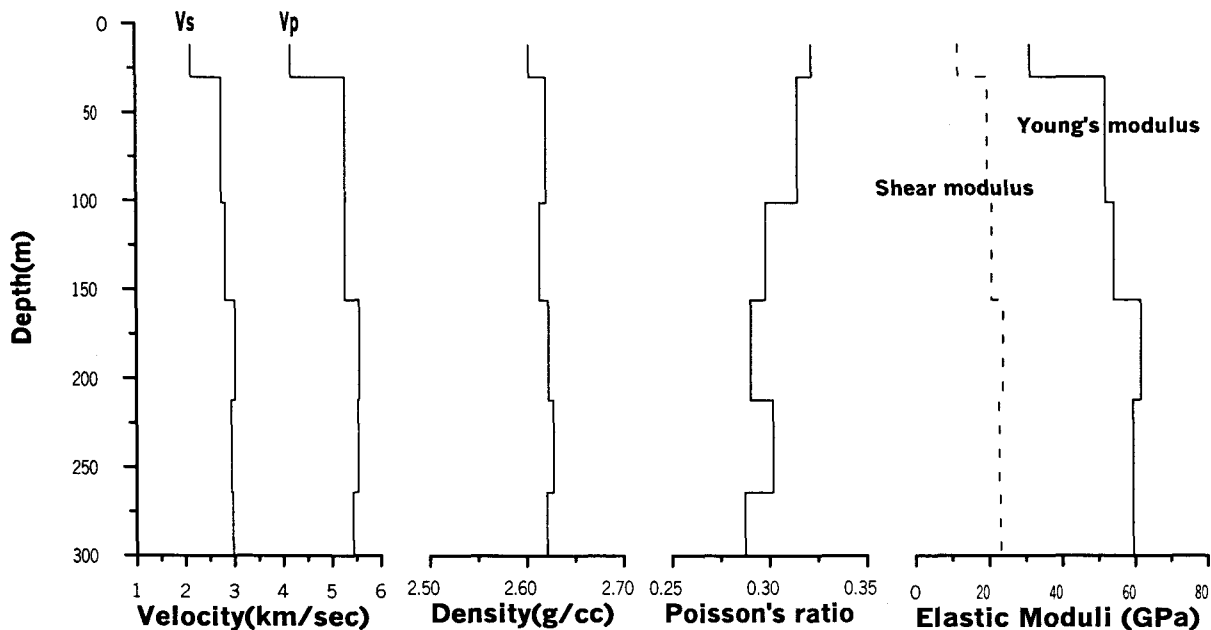


Fig. 15. In-situ velocity, density, Poisson's ratio, and Shear & Young's modulus by geophysical well logging.

암반분류법에 의한 결과와 탄성과 속도와의 관계는 탄성과 종파 속도와 암반분류 중의 하나인 Q 값과의 상관성이 Barton(1991)에 의해 발표된 적이 있으며 RMR(Rock Mass Rating) 값과 Q 값과의 관계, RMR 값에서 암반변형계수의 추정 등 많은 경험식이 발표되었다(지반조사 및 시험기술, 1998). 탄성과 속도를 이용하여 Q 값을 산출하는 Barton(1991)

경험식을 적용한 결과 Q값이 전반적으로 높게 산출되는 경향이 있었으며 RMR 값과 탄성과 속도와의 관계식은 보고된 사례가 없기 때문에 직접적인 RMR 값과의 비교는 불가능하였다. 더욱이 RMR 값에서 암반의 변형계수를 추정하는 경험식은 이미 많이 발표가 되었음에도 불구하고 물리검층에 의해 추정 값이 아닌 실제 암반변형계수를 산출함에도 불구하고 제대로 이용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, RMR 값과 음파검층에 의한 탄성과 속도와의 관련성을 정량적으로 도출한다면 음파검층에 의한 암반분류 및 등급의 판정이 가능해지고 지반조사 분야에 대한 기여도가 더욱 증가할 것이다.

RMR 값에서 암반의 변형계수를 추정한다는 점과 암반의 변형계수와 종파와 관련성이 있음을 발표한 Sjogren et al.(1979) 연구 결과를 단서로 하여 음파검층에 의한 속도와 RMR 값과의 관계를 살펴보았다. RMR 시스템의 분류요소는 5개로 구성되며 압축강도 15점, RQD 20점, 평균불연속면 간격 20점, 불연속면의 상태 30점, 그리고 지하수 상태가 15점으로 각 요소의 중요인자에 대한 가중치를 결정하여 합산한 값을 기본 RMR 값으로 한다. RMR 값을 결정하는 대부분의 요소들은 또한 탄성과의 속도에 영향을 주는 요소와도 관련성이 있으며 완전파형음파검층에 의한 탄성과속도는 주로 시추공에서 20cm 이내의 지반의 특성을 반영하기 때문에 시추코어를 이용하는 RMR 값과의 관계가 좋은 것으로 예상된다. Fig. 16은 터널설계와 관련된 지반조사에서 완전파형음파검층을 실시한 시추공의 탄성과 속도와

RMR 값, 그리고 신회순 외(1998)에 의한 RMR 값과 시추공 K-H에서 완전파형음파검층에 의한 탄성과 속도를 나타낸 것이다. 종파 속도(V_p) 및 횡파 속도(V_s)는 RMR 값과 좋은 상관성을 보이고 있다. 자료의 수가 한정적이고 암종별, 시대별, 심도에 따른 탄성과 속도를 분류하여 RMR 값과 비교하면 국내의 지질적 특성에 적합한 경험식이 도출될 것으로 기대된다. Fig. 16에서 RMR 값이 40 이상인 경우는 보통암(fair)으로 분류하는데 이때의 탄성과 속도는 약 4000m~5000m/sec에 해당한다. 동일한 암반등급이라도 종파의 속도 범위가 크기 때문에 종류별, 심도에 따른 자료의 분류가 필요하며 횡파의 속도도 보조적으로 이용하는 것이 바람직하다.

그리고, RMR 값에서 변형계수를 추정하여 설계에 반영하는데, RMR 값에서 변형계수를 추정하는 관계식 중에서 Serafim과 Pereira(1983)의 관계식에 의한 추정 변형계수(E_m)와 물리검층에 의한 동적 암반변형계수(E_d)를 비교하여 관련성을 고찰하였다. Fig. 17은 암종이 화강암인 시추공 K-H에 대한 RMR 값(신회순 외, 1998)을 Serafim과 Pereira(1983)의 추정식($E_m = 10^{(R-10)/40}$)을 이용한 E_m 과 동적 변형계수(E_d)를 나타낸 것이다. RMR 값을 이용하여 추정한 변형계수(E_m)가 물리검층에 의한 동적 변형계수(E_d)가 보다 약 2배정도 작은 값을 나타낸다. 이와 같은 관련성은 화강암이라는 단일 암종에 대한 국부적인 결과지만 다양한 암종에 대한 비교를 통하여 물리검층에 의한 동적 변형계수를 지반설계에 필요한 변수로 이용할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

최근에 지반조사 분야에서 물리검층을 적용한 사례를 소개했다. 주로 파쇄대 인식이나 동탄성계수의 산출 및 지하수 유동 등의 분야에 대한 것으로 시추공 주변에 대하여 분해능 높은 물성정보를 제공하는 물리검층은 지반조사 분야에 대한 활용이 이제 시작에 불과하여 앞으로 많은 활용이 기대된다. 특히, 완전파형음파검층과 감마-감마(밀도)검층에 의한 동탄성계수의 산출 이외도 공내영상화검층과 더불어 공내수의 흐름이 있거나 유효 파쇄대(effective fracture)의 확인에 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 그리고, 시추공 주변의 현지 지반 특성을 잘 반영하는 완전파형음파검층에 의한 탄성과 속도가 암종별, 심도별, 시대별 등으로 체계적인 분류가 이루어지고 암반분류 결과와의 관계성이 도출된다면 토목지반설계에 더욱 유용하게 이용될 것이다.

사 사

본 연구는 약 1년 반 동안의 조사 결과를 종합한 것으로 이와 같은 결과가 있기에는 많은 사람들의 도움이 있었습니다. 지반조사 분야에 대한 물리검층의 적용에 많은 관심과 자료를 제공한 (주)희송지오택의 김기석 사장님과 완전파형음파검층 모델링에 대한 좋은 자료와 조언을 해주신 한국자원연구소의 이태섭 박사님, 자료 취득 시스템에 대한 많은 도움을 준 한국자원연구소의 황학수 박사에게 감사를 드립니다. 그리고 대부분의 자료취득에 많은 도움을 준 물리검층 연구팀의 박인화씨에게 감사를 드립니다.

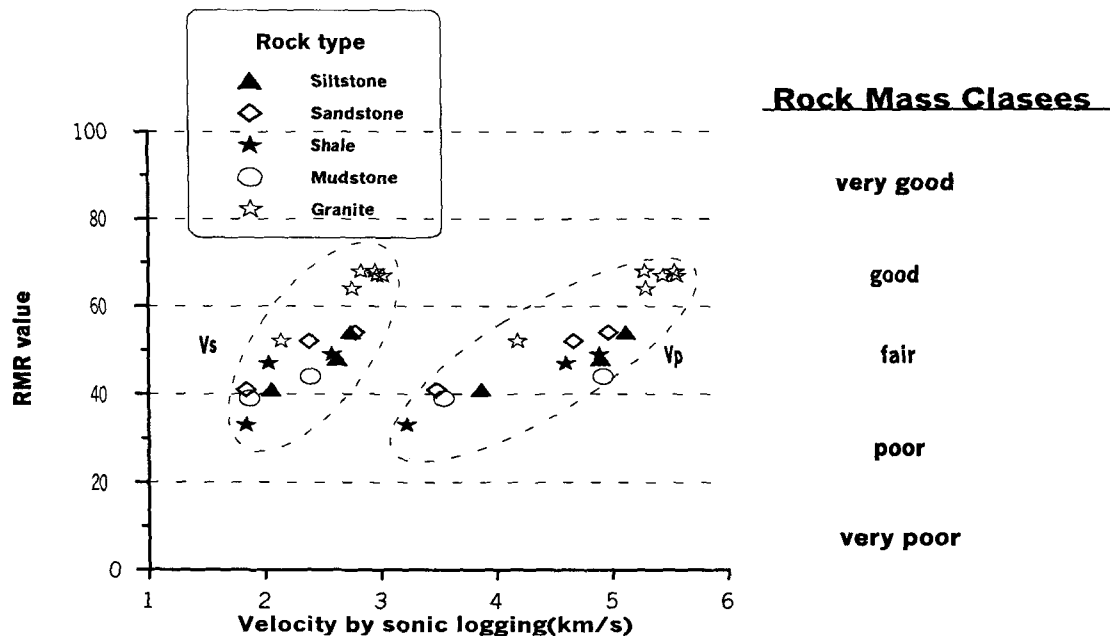


Fig. 16. Relationships between velocity by sonic logging and rock mechanic classifications..

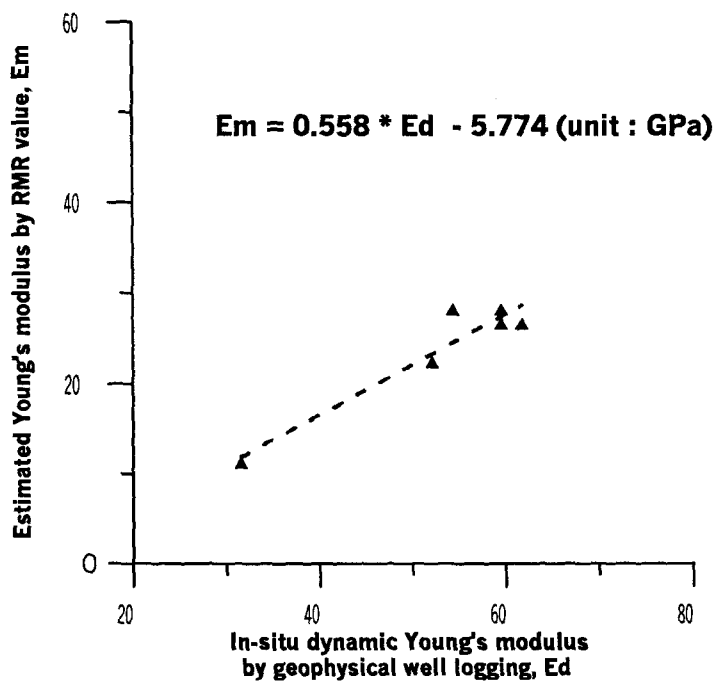


Fig. 17. Relationships between dynamic Young's modulus and estimated Young's modulus by empirical equation(Serafim and Pereira, 1983).

참고문헌

- 권광수, 강상수, 류시영, 류창하, 박찬, 박철환, 박희봉, 선우춘, 송원경, 신중호, 신희순, 이상권, 이종립, 이현주, 정소걸, 최병희, 최성웅, 한공창, 홍기표, 양영석, 김재동, 김기석, 1997, 지하에너지 저장시설 구축 및 유지기술연구: 한국자원연구소, KR-97(B)-2.
- 민경덕, 권병두, 서정희, 1987, 응용지구물리학, 우성문화사.
- 신희순, 강상수, 권광수, 김복윤, 류창하, 박찬, 박철환, 박희봉, 선우춘, 송원경, 신중호, 이상권, 이현주, 정소걸, 최병희, 최성웅, 한공창, 홍기표, 한일영, 이대혁, 김정엽, 서혜훈, 김산웅, 양영석, 김재동, 1998, 지하에너지 저장시설 구축 및 유지기술연구 년차보고서: 한국자원연구소
- 이상규, 황세호, 황학수, 박인화, 1998, 지하물성의 정보화를 위한 물리검층 품질관리 연구: 한국자원연구소, KR-98(C)-10.
- 지반조사 및 시험기술, 1998, 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회, 한국자원연구소, 한국지반공학회, 1997, 진동 및 내진설계: 한국지반공학회 지반공학 시리즈 8
- Aguilera, R., 1980, Naturally fractured reservoirs: Tulsa, Okla., Petroleum Publishing.
- Barton, N., 1991, Geotechnical Design: WT Focus, World Tunneling, Nov.
- Engelhard, L., 1985, Shear wave well logging from wavetrain analysis: Hand book of Geophysical Exploration, Section I, Volume 15A, Geophysical Press, London.
- Hess, 1986, A.E., 1986, Identifying hydraulically conductive fractures with a flowmeter: Canadian Geotechnical Journal, 23, 69-78.
- Hess, A.E., and Paillet, F.L., 1990, Application of the thermal-pulse flowmeter in the hydraulic characterization of fractured rocks: Saunders, W.R., ed., American Society for Testing and Materials, Standard Technical Publication 1101, 99-112.
- Hornby, B.E., Johnston, D.L., and Plumb, R.A., 1989, Fracture evaluation using reflected Stoneley-wave arrivals: Geophysics, 54, 1274-1288.
- Katsube, T.J., and Hume, J.P., 1987, Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs: Geophysics, 52, 342-352.
- Keys, W.S., 1979, Borehole geophysics in igneous and metamorphic rocks: SPWLA Symposium, 20th, Tulsa, Okla., OO1-OO26.
- Keys, W.S., and Sullivan, J.K., 1979, Role of borehole geophysics in defining the physical characteristics of the Raft River geothermal reservoir, Idaho: Geophysics, 44, 1116-1141.
- Kimball, C.V., and Marzetta, T.L., 1984, Semblance processing of borehole acoustic array data: Geophysics, 49, 274-281.
- Kitssnezaki, C., 1980, A new method for shear wave logging: Geophysics, 45, 1489-1506.
- Nelson, P.H., Magnusson, K.A., and Rachiels, R., 1983, Application of borehole geophysics at an experimental waste storage site: Geophysical Prospecting, 30, 910-934.
- Paillet, F.L., 1983, Acoustic characterization of fracture permeability at Chalk River, Ontario: Canadian Geotechnical Journal, 20, 468-476.
- Paillet, F.L., 1991, Use of geophysical well logs in evaluating crystalline rocks for siting

- of radioactive waste repositories: *Log Analyst*, 32, 85-107.
- Paillet, F.L., 1994, Application of borehole geophysics in the characterization of flow in fractured rocks: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 93-4214.
- Paillet, F.L., and Cheng, C.H., 1991, *Acoustic waves in boreholes*: CRC Press.
- Robertson Geologging Limited, 1995, Pro-logger system II Operation manual, version 2.3.
- Samworth, J.R., 1992, The dual-spaced density log characteristics, calibration, and compensation: *The Log Analyst*, 33, 42-49.
- Serafim, J.L., and Pereira, J.P., Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski: Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr., LNEC, Lisbon, 1, 33-42.
- Sjogren, B., Ofsthus, A., and Sandberg, J., 1979, Seismic classification of rock mass qualities: *Geophysical Prospecting*, 27, 409-442.
- Tang, X.M., Cheng, C.H., and Paillet, F.L., 1991, Modeling borehole Stoneley wave propagation across permeable in-situ fractures: SPWLA Symposium, 32d, GG1-GG25.
- Tatham, R.H., McCormack, M.D., 1991, Multicomponent seismology in petroleum exploration, SEG investigation in *Geophysical series Volume 6*.
- White, J.E., and Zechman, R.E., 1968, Computed response of an acoustic logging tool: *Geophysics*, 33, 302-310.