

## 지반조사에서 물리검층을 이용한 동탄성계수의 측정

황세호, 이상규, 박 찬, 박인화, 한공창  
권형석, 김기석

한국지질자원연구원  
(주) 희 송 지 오 텍

### 서 론

동적하중을 받는 토목구조물의 설계에서 지반과 구조물과의 상호작용에 대한 이해가 중요하며 이를 위해서는 동적인 지반탄성계수의 측정이 필요하다. 지반의 동탄성계수 측정에서 물리검층을 이용하는 방법은 저변형율 (즉,  $10^{-4} \sim 10^{-3} \%$ ) 범위에서 지반의 동적 물성을 측정하는 방법이라 할 수 있다. 지반의 동적인 특성을 측정하는 물리탐사 방법으로는 시추공을 이용하는 시추공간 탄성과탐사 (Crosshole test), 하향식 탄성과탐사 (downhole test), 물리검층 (geophysical well logging) 등이 있으며 지표탐사로는 지반의 S파 속도 (엄밀한 의미에서 S파 속도는 아니며 S파 속도의 근사치임)를 측정하는 SASW (Spectral Analysis of Surface Wave)가 있다. 이 중에서 물리검층은 시추공내에서 각종 센서를 삽입하여 다양한 물성을 측정하는 물리탐사법의 일종으로 최근 지반조사, 환경오염, 지하수 및 자원평가 분야에 많은 수요가 증가하고 있는 추세이다. 물리검층의 장점은 모든 물리검층 기록이 현지 지반의 특성을 잘 반영하는 원위치 측정값이고 시추공 전구간에 대하여 연속적으로 측정이 가능하고 측정범위가 수 십 cm 정도로 가탐 범위가 크다는데 있다. 본 연구에서는 지반조사시 물리검층을 이용한 지반의 동탄성계수 측정과 경기도 편마암 지대에서 획득한 물리검층 자료를 이용하여 탄성과 P파 속도와 동탄성계수와의 관계에 대하여 유도하였다. 그리고, 동일한 지역에서의 실내암석물리시험 결과의 비교를 통하여 물리검층에 의한 원위치 측정값의 신뢰성을 검토하였다.

### 물리검층을 이용한 원위치 지반의 동탄성계수 측정

현지 지반의 동탄성계수를 측정하기 위해서는 지반의 탄성과속도와 밀도를 측정해야 한다. 지반의 탄성과속도는 완전과형음파검층을 이용하여 측정하는데 이 검층법은 특정 구간에 음파가 전파한 기록을 시계열 (time series)로 기록하여 탄성과 탐사자료의 속도분석과 동일한 개념의 자료처리 과정을 통하여 지반의 탄성과 속도를 측정하며 지반의 밀도는 감마-감마 (밀도)검층을 이용하여 측정한다. 따라서, 정확한 동탄성계수를 측정하기 위해서는 완전과형음파검층과 감마-감마(밀도)검층에 대한 전반적인 이해가 필요하다. 본 연구에서 언급하는 동탄성계수는 지반이 균질, 등방성이라는 가정하에 계산된 값이다 (Sheriff and Geldart, 1995).

#### - 완전파형음파검층의 원리 및 자료처리

그림 1은 축대칭인 음원 (monopole source)을 이용하여 시추공 주변의 탄성파 속도를 측정하는 완전파형음파검층의 원리를 나타낸 것이다. 수신기  $R_1$ 과  $R_2$ 에서 기록되는 파형 들은 시추공내수 (공내수 속도 :  $V_f$ )와 공벽 (지반의 탄성파 P파 및 S파의 속도는 각각  $V_p$  및  $V_s$ )에서 각각  $V_f V_p V_s$ , 또는  $V_f V_s V_p$ 로 전파하는 파와 튜브 (Tube)파와 같은 가이드파 (guided wave), 그리고 공내수를 따라서 전파하는 직접파 들로 구성되며 음원의 주 주파수, 공경의 변화에 영향을 받는다 (Paillet and Cheng, 1991; Paillet et al., 1992). 지반의 탄성파 속도는 검출기 (sonde)가 시추공 중앙에 위치하는 경우, 두 수신기에 기록된 파형의 지연시간을 측정함으로써 계산한다. 축대칭인 단극음원을 이용하여 획득된 완전파형음파검층 자료를 이용한 S파 속도의 측정결과는 검출기의 송·수신기 배열 특성이나 지반의 S파 속도 변화에 따라서 많은 차이가 있다 (White, 1983). 그림 1의 오른쪽 상부 그림은 석회암 지역에서 획득한 완전파형음파검층 기록으로 자료취득에 이용한 검출기는 주 주파수가 23 kHz인 축대칭 음원이고, 송·수신기 거리는 각각 70 cm와 110 cm, 시추공의 크기는 NX 이다. 국내에서 지반조사 목적으로 축대칭 음원을 이용한 완전파형음파검층 자료에 대한 속도분석 결과, 지반의 P파 속도가 최소한 3000~3500 m/sec 이상은 되어야 신뢰성 있는 S파의 속도 분석이 가능하였다 (황세호 등, 1999b). 완전파형음파검층자료에 대한 속도분석에서 속도분석의 알고리즘은 기본적으로 두 개의 수신기에서 기록되는 파형이 비분산 (non-dispersive)으로 일정하여 두 파형의 유사성이 극대화되는 시간지연을 결정하는 것으로 완전파형음파검층 자료의 속도분석은 Kimball and Marzetta (1984)에 의한 semblance 분석법이나 Ingram et al., (1985)의 위상차를 이용한 속도분석법을 많이 이용된다.

#### - 감마-감마 (밀도)검층의 원리 및 자료처리

동탄성계수의 측정에 필요한 또 하나의 물성은 지반의 밀도 값으로 감마-감마 (밀도)검층은 일반적으로 100 mCi  $^{137}\text{Cs}$  방사능소스를 이용하며 감마선의 콤프턴산란을 이용하여 지반의 체적밀도 (bulk density)를 측정한다 (그림 2 참조). 감마-감마 (밀도)검층에 의한 지반의 밀도 측정값은 실내 시험값에 비하여 현지지반의 압력이나 균열, 온도, 지하수 등의 상태를 반영하는 장점이 있다. 밀도검층 센서에 대한 교정원리는 이상규 등 (1998), 소구경 시추공에서의 적용성에 대한 것은 황세호 등 (2000)을 참고하면 된다. 지반조사용으로 굴착하는 대부분의 시추공 깊이가 수십 m 정도이며 심도가 낮을수록 밀도의 변화 폭이 크기 때문에 정확한 지반의 동탄성계수 측정이나 지반의 안정성 분석을 위해서는 밀도검층을 수행하는 것이 필요하다 (황세호 등, 1999a; 황세호 등, 2000).

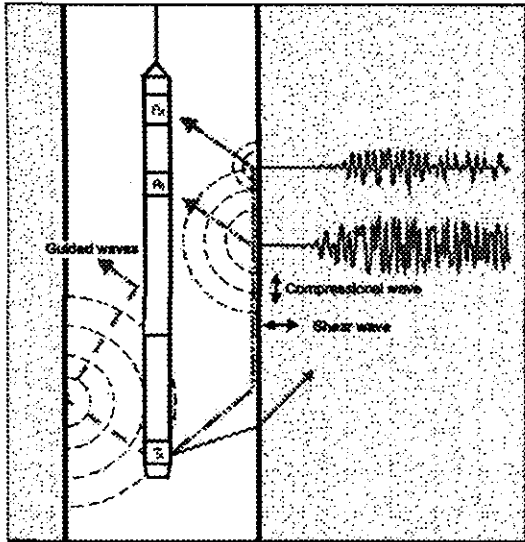


그림 1. 완전파형음파검층의 개념도.

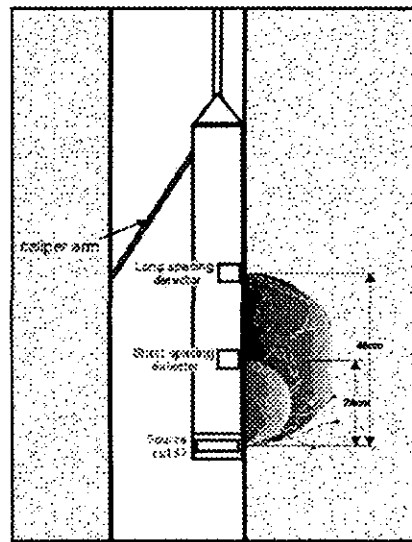


그림 2. 감마-감마 (밀도)검층의 개념도.

- 편마암 지역에서의 물리검층을 이용한 지반의 동탄성계수 측정 사례

지반의 동탄성계수는 완전파형음파검층과 밀도검층에서 탄성과 P파와 S파의 속도와 밀도를 측정하면 정확한 지반의 동탄성계수를 측정할 수 있으며 다음 사례는 편마암지대에서 획득한 물리검층자료를 이용하여 지반의 동탄성계수를 측정한 것이다. 그림 3의 음파검층자료를 보면 파쇄대 또는 연약대 구간에서 측정 신호의 극심한 감쇠가 있는 것을 알 수 있으며 왼쪽과 오른쪽 그림은 각각 송·수신 거리가 70 cm와 110 cm이고 자료 획득시 수신기 이득 (gain)을 최대로 하여 측정한 것임에도 불구하고 진폭의 감쇠가 매우 심하여 속도분석이 가능한 구간은 약 절반 정도이다. 따라서, 탄성과 P파의 속도분석이 불가능한 구간도 존재하며 탄성과 P파의 속도분석은 가능하여도 S파의 속도분석이 어려운 구간이 존재한다. 그림 4는 밀도, 탄성과 속도 및 동탄성계수를 1 m의 구간 평균값으로 나타낸 것이다.

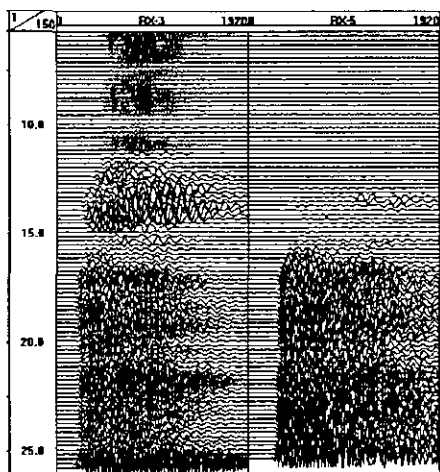


그림 3. 편마암 지역에서 획득한 완전파형음파검층 기록으로 축대칭 음원을 이용하여 측정된 결과이다.

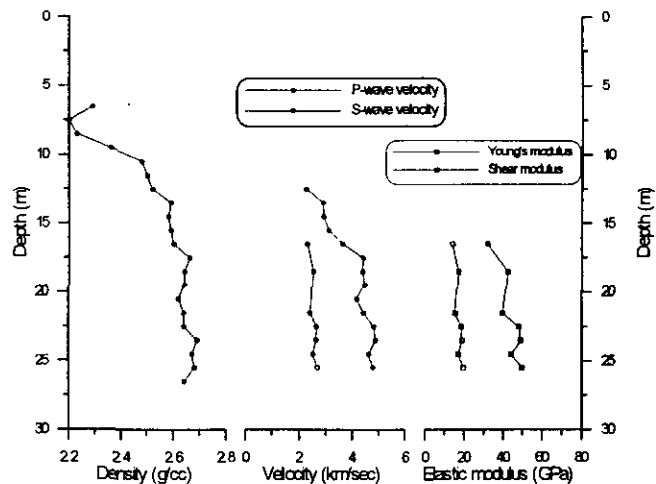


그림 4. 그림 3의 완전파형음파검층 자료에 대한 속도분석 결과와 밀도검층자료를 이용하여 계산한 심도별 동탄성계수의 분포.

## 간접적인 방법에 의한 동탄성계수의 추정

지반조사시 시추공을 이용한 조사에서 탄성과 P파 속도나 S파의 속도는 물론 밀도의 측정이 언제나 가능한 것은 아니다. 이와 같은 경우, 비교적 자료 측정이 용이한 탄성과 P파 속도나 전기비저항값을 이용한 동탄성계수의 추정이 필요하다. 그러나, 경험식은 암상, 공극, 고결화 정도, 압력, 온도 등 여러 요인에 따라서 적용성이 달라지기 때문에 일반화하기는 어렵다. 특히, 퇴적암의 경우는 암종별로 경험식이 많이 발표되었으나 변성암에 대한 경험식은 매우 드물다. 대부분의 경험식 중에서 탄성과 P파와 S파와의 관계는 공극이나 점토의 함량을 이용하여 관계식을 도출하는데 유감스럽게도 소구경에서의 공극검층이 불가능하여 각 측정자료의 단순비교를 통한 관계식을 도출하였다. 본 연구에서는 이용한 자료는 경기도 변성암 지역의 7개 시추공에 대한 물리검층 결과와 23개 시추공에 대한 코아의 실내 암석시험 결과이다.

### - 원위치 탄성과 P파 속도와 S파 속도 및 동탄성계수와의 관계

그림 5는 완전파형음파검층 자료에 대한 속도분석을 실시한 원위치 탄성과 P파 및 S파 속도와의 관계를 나타낸 것이다. 완전파형음파검층 자료에 대한 속도분석 결과, 대부분의 구간에서 P파 속도는 계산이 가능하였으나 S파의 경우는 지반의 S파 속도가 공내수의 P파 속도에 근접할수록 공내수를 따라서 진행되는 직접파와의 중첩이나 진폭의 극심한 감쇠로 많은 구간에서 S파의 속도분석이 어려웠다. 따라서, P파와 S파 속도의 상관관계는 S파의 속도분석이 어려운 구간에서 S파 속도의 추정에 유용하게 이용될 수 있다. 그림 5에서 P파와 S파의 상관관계에 이용된 자료의 수는 68개이며 상관관계는 선형보다는 비선형으로 (1)식으로 표현되는데, 단위는 km/s이고 P파 속도가 3.5 km/sec 이상인 경우에 적용이 가능하다.

$$V_s = 0.047 * V_p^2 - 0.049 * V_p + 1.751 \quad (1)$$

동탄성계수의 계산에서 S파의 속도를 반드시 알아야 변형률 ( $E_d$ )이나 전단계수 ( $\mu$ )를 구할 수 있지만 S파의 속도의 계산이 어렵거나 불가능한 경우는 탄성과 P파 속도와 동탄성계수와의 관계에서 추정할 수 있다. 단일한 암상에서 구한 P파 속도와 동탄성계수와의 상관관계가 좋은 경우는 S파의 속도가 없는 구간에서 동탄성계수를 추정할 수 있다. 그림 6은 P파 속도와 동적변형률 및 동적전단계수와의 관계를 나타낸 것으로 탄성과 P파 속도를 독립 변수로 할 때 2차 다항식으로 표현할 수 있다. P파 속도와 동탄성계수와의 관계는 각각 (2)식 및 (3)식으로 표현되며 동탄성계수의 단위는 GPa이고 탄성과 속도는 단위가 km/s로 3.5 km/s 이상인 경우에 적용 가능하다.

$$E_d = 1.896 * V_p^2 - 2.382 * V_p + 13.949 \quad (2)$$

$$\mu = 0.951 * V_p^2 - 3.452 * V_p + 12.527 \quad (3)$$

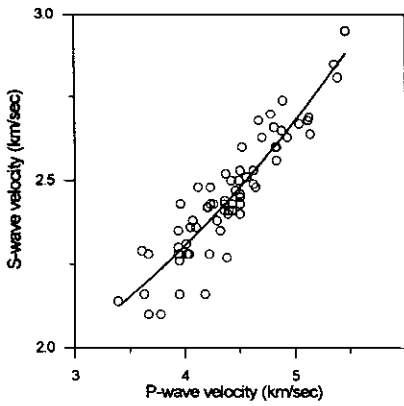


그림 5. 완전과형음파검층에 의한 P파 속도와 S파 속도와의 관계.

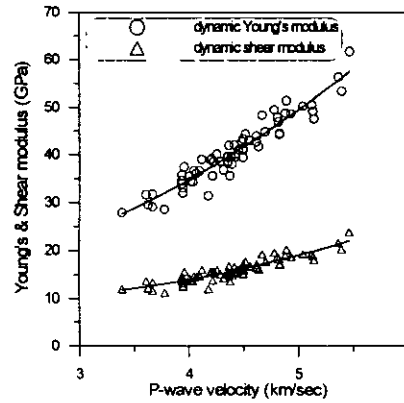


그림 6. 물리검층자료를 이용하여 도출한 탄성과 P파 속도와 동탄성계수와의 관계.

#### - 원위치 및 실내암석시험에 의한 탄성과 속도 및 동탄성계수의 비교

물리검층에 의한 탄성과 속도는 현지의 압력, 균열 등 현지지반의 상황을 포함하는 탄성과 속도로서 공내수가 존재하는 대부분의 구간에서 탄성과 속도의 측정이 가능하다. 음파검층은 시추공에서 수십 cm 거리에 해당하는 지반의 탄성과 속도를 측정하여 측정 범위가 크며 따라서 시추로 인한 영향을 작게 받는 장점이 있다. 실내에서의 암석물성시험은 가장 정확한 측정법이지만 측정 대상이 전체 시추공 중에서 일부이고 대부분의 경우 무결암을 대상으로 하기 때문에 현지 지반의 특성을 반영하기 위해서는 후속적인 절차가 필요하다. 그림 7은 7개 시추공에 대한 음파검층결과 (▲로 표기)와 동일 암상 내의 23개 시추공에 대한 암석물성시험결과 (○으로 표기)를 나타낸 것이다. 음파검층의 경우, P파 속도가 3.5 km/s 이하인 자료가 거의 없어 암석물성시험에 의한 P파의 전 범위에 대한 비교는 어렵지만 3.5 km/s 이상에서는 양호한 것을 알 수 있다. 그림 8은 실내 암석물성시험에 의한 동탄성계수와 그림 6을 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 현장 및 실내의 분석자료가 서로 양호한 일치를 보이며 현장에서 측정한 동탄성계수가 약간 낮은 경향을 보인다. 이는 대부분의 시추공 심도가 수십 m의 천부인데 반하여 실내시험에서 탄성과 속도 및 밀도를 측정한 시료가 무결암이기 때문에 높게 나타난 것으로 해석된다.

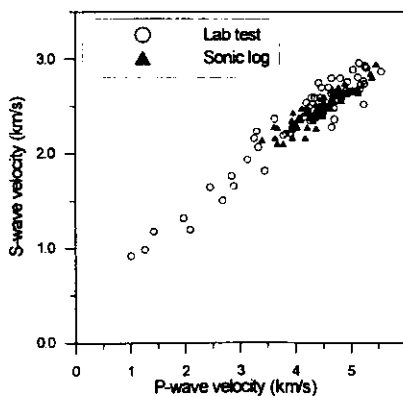


그림 7. 원위치 및 암석물성시험에 의한 탄성과 P파 및 S파 속도와의 관계.

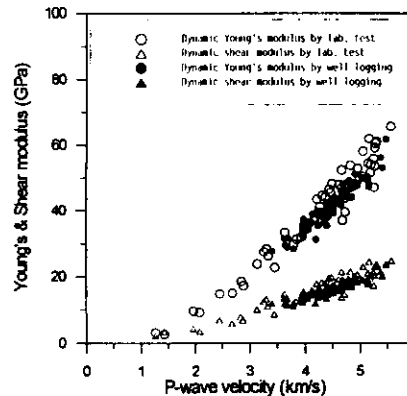


그림 8. 원위치 및 암석물성시험에 의한 탄성과 P파와 동탄성계수와의 관계.

- 탄성과 P파 속도와 전기비저항 검층과의 관계

지반조사시, 터널 상부 또는 교각부에서 실시하는 물리탐사는 주로 탄성과 굴절법 탐사와 전기비저항 또는 전자탐사를 수행한다. 전기비저항탐사나 전자탐사의 경우, 터널 상부에서 터널의 하부까지의 전기비저항 분포를 파악할 수 있는 장점이 있으나 터널이 지나는 구간에 대한 설계정수의 산출에는 많은 어려움이 따른다. 이는 전기비저항 변화의 폭이 크며 전기비저항이 많은 인자에 영향을 받기 때문이다. 물리검층이 동일한 시추공에 대하여 다양한 물성을 측정할 수 있다는 장점을 이용하여 음파검층과 전기비저항검층이 실시된 7개 시추공에 대한 P파 속도분포와 전기비저항검층 기록을 비교·분석하였다 (그림 9 참조). 전기비저항검층 기록은 16인치 노말 (또는 단노말) 검층기록을 이용하였는데 지반의 진비저항은 아니지만 공내수의 전기전도도가 높지 않고 공경의 변화도 거의 없으며 시추공 공경과 검층기 직경의 비도 작아 지반의 전기비저항을 잘 반영한 것으로 보인다. 그림 9에서 전기비저항값에 상응하는 P파 속도의 추정이 가능하며 이는 탄성과 P파 속도와 동탄성계수와의 관계에서 전기비저항을 이용한 동탄성계수의 추정이 가능함을 알 수 있다. 탄성과 P파 속도와 전기비저항과 (ohm-m)의 관계식은 (4)식으로 표현되며 탄성과의 범위는 3 km/sec 부근에서 5.5 km/sec 까지 이다.

$$resistivity = \exp(0.981 * V_p - 33.463) \quad (4)$$

지금까지 국내의 7개 지역에서 터널공사를 위한 지반조사 목적으로 수행한 음파검층과 밀도검층으로 측정된 P파 속도와 동적 변형계수( $E_d$ )와의 관계는 (5)식으로 표현되며 (탄성과

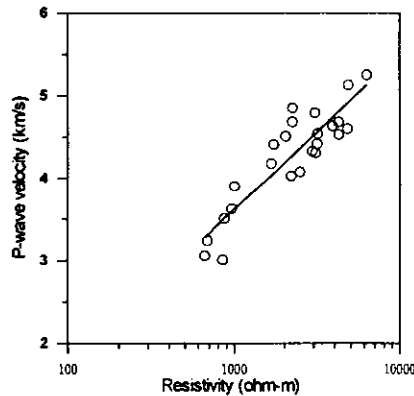


그림 9. 편마암 지역의 7개 시추공에 대한 탄성과 P파 속도와 전기비저항검층에 의한 비저항과의 상관관계.

속도의 단위는 km/s이고 3.5 km/s 이상인 경우에 적용 가능) 탄성과 속도나 밀도 자료는 암종 구분 없이 적용 가능한 것이다. Sjogren et al. (1979)에 의한 탄성과 P파와 동탄성계수와의 관계인 (6)식과 비교 할 때 P파 속도가 증가할수록 동탄성계수는 Sjogren et al. (1979)에 의한 경험식이 높게 나타난다.

$$E_d|_{\text{logging}} = 3.045 * V_p^2 - 11.692 * V_p + 32.443 \quad (5)$$

$$E_d|_{\text{Sjogren}} = 3.878 * V_p^2 - 14.250 * V_p + 25.982 \quad (6)$$

(5)식은 대부분의 암종을 포함하고 있기 때문에 P파 속도를 이용한 동적 변형계수의 추정에 유용하게 이용될 것으로 기대되며 앞으로 경험식의 신뢰성을 높이기 위한 노력이 계속되어야 할 것이다.

## 결 론

본 연구에서는 물리검층을 이용하여 저변형을 하에서 지반의 동탄성계수를 추정에 대한 것에 대하여 논의하였다. 정확한 지반의 동탄성계수는 완전파형음파검층과 감마-감마 (밀도) 검층을 이용하여 지반의 탄성과 속도와 밀도를 측정해야 하나 S파 속도나 밀도검층 자료의 획득이 어려운 경우, 간접적인 방법으로 지반의 동탄성계수를 추정할 수 있다. 경기지역의 편마암 지대에서 획득한 물리검층자료를 검토한 결과, 동탄성계수가 탄성과 P파나 전기비저항검층과 매우 좋은 상관관계를 보여 간접적인 방법으로도 동탄성계수를 추정이 가능하였다. 편마암 지역에서의 물리검층을 이용한 탄성과 P파와 S파 속도, 동탄성계수 및 전기비저항과의 관계식은 다음과 같으며,

$$V_s = 0.047 * V_p^2 - 0.049 * V_p + 1.751$$

$$E_d = 1.896 * V_p^2 - 2.382 * V_p + 13.949$$

$$\mu = 0.951 * V_p^2 - 3.452 * V_p + 12.527$$

$$\text{resistivity} = \exp(0.981 * V_p) * 33.463$$

암종의 구분에 관계없이 탄성과 P파 속도에서 동탄성계수를 추정할 수 있는 관계식은  $E_d|_{\text{logging}} = 3.045 * V_p^2 - 11.692 * V_p + 32.443$ 이다 (위 식들은 탄성과 P파의 속도가 3.5 km/sec 이상인 경우에 적용 가능). 위와 같은 경험식은 일반적으로 적용하기에 앞서 적용 목적에 따라서 타당성을 검토해야 하는데 경험식을 현장에 적용할 때, 반드시 신뢰성 있는 물성자료를 이용하여 타당성을 검토한 후에 적용하는 것이 추천된다.

**사 사** : 본 연구는 산업자원부에서 지원하는 '지반물리탐사 연구'와 한국지질자원연구원의 기관고유연구사업인 '지하 암반내 고온/저온 저장기술연구'의 지원으로 수행되었으며 그림작성에 도움을 준 이미영씨에게 감사 드린다.

## 참 고 문 헌

이상규, 황세호, 황학수, 박인화, 1998, 지하물성의 정보화를 위한 물리검층 품질관리 연구: 한국자원연구소, KR-98(C)-10, 65.

황세호, 이상규, 1999a, 물리검층에 의한 터널설계변수의 산출: 한국자원공학회 추계학술발표

- 회 논문집, 41-44.
- 황세호, 이상규, 1999b, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적지반정수의 산출: 건설현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회, 156-175.
- 황세호, 박 찬, 이상규, 신희순, 2000, 소구경 시추공에서의 밀도검층: 한국자원공학회 · 대한 자원환경지질학회 · 한국지구물리탐사학회 춘계공동학술발표회, 298- 300.
- Ingram, J. D., Morris, C. F., MacKnight, E. E., and Parks, T. W., 1985, Direct phase determination of S-wave velocities from acoustic waveform logs, *Geophysics*, **50**, 1746-1755.
- Kimball, C. V., and Marzetta, T. L., 1984, Semblance processing of borehole acoustic array data, *Geophysics*, **49**, 274-281.
- Paillet, F. L., Cheng, C. H., and Pennington, W. D., 1992, Acoustic-waveform logging - Advances in theory and application, *The Log Analyst*, **33**, 239-258.
- Paillet, F. L., and Cheng, C. H., 1991, *Acoustic waves in boreholes*, CRC Press, Inc.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1995, *Exploration seismology, 2nd Ed.*, Cambridge Univ. Press, 592.
- Sjogren, B., Ofsthus, A., and Sandberg, J., 1979, Seismic classification of rock mass qualities, *Geophys. Prosp.*, **27**, 409-442.
- White, J. E., 1983, *Underground sound*, Elsevier, Amsterdam.