

속도검층에서 난제들

조철현¹⁾, 변중무²⁾, 황세호³⁾

Difficulties in P and S wave velocity logging

Churl Hyun Jo¹⁾, Joongmoo Byun²⁾ and Seho Hwang³⁾

요약: 시추공을 이용하여 P파 S파의 속도검층 수행시 여러 고려해야 할 사항이 있다. 토양이나 풍화암 등 연약층에 설치한 케이싱이 탄성과 측정에 미치는 영향, 사용되는 주파수에 따라 측정되는 탄성과 속도의 변화 등이 있다. 이러한 과제를 극복하기 위해서는 탄성파시험이 설정된 시추공에서는 가급적 케이싱을 설치하지 않고 공벽을 유지하는 시추 기술을 개발, 적용하도록 하고, 속도검층의 목적에 맞는 주파수 대역의 시험법을 적용하도록 해야 하겠다.

주요어: 속도검층, 케이싱 영향, 탄성과 속도의 주파수 의존성

Abstract: Care should be taken when performing the P and S wave velocity loggings. Some of them are the effect of casing that is installed to prevent the borehole collapsing when the drilling is done on the loose ground such as soil and/or soft rock, and the discrepancy of the velocities of the same media according to the difference of the source wave frequency spectrum. To overcome these difficulties, the following suggestions are recommended; (1) try a careful drilling technique that can eliminate the necessity of the casing, and (2) apply the logging methods with the proper frequency spectrum that is appropriate to the object of the velocity logging.

Keywords: velocity logging, casing effect, frequency dependency of velocity

1. 서론

탄성과 속도는 지반조사에서 가장 많이 측정되고 활용성이 높은 물성으로 연약지반 평가, 암반분류, 연안지역 매립정도 평가, 지반의 굴착 난이도(rippability)를 평가 등에 활용된다. 탄성과 속도를 측정하는 방법은 현장과 실내기법으로 구분할 수 있으며 각각은 장·단점을 갖고 있다. 지반공학적인 관점에서 실내에서 측정하는 방법은 정확성은 높지만 현장의 다양한 환경, 즉 함수상태, 공극률, 압력 등의 재현이 어렵고 연약지반의 경우 불교란 시료의 확보가 어려운 단점이 있다. 현장 시험은 주로 음원과 수신기의 배열 방식에 따라서 분류하며 본 논문에서는 시추공을 이용하여 탄성과 속도를 측정하는 분야에 국한하기로 한다.

지반조사 분야에서는 탄성과속도 측정기법이 다양한 지반평가 시험법의 하나이기 때문에 보통 ○○시험(test)라는 용어를 쓰기도 한다. 시추공 탄성과 기법은 종류가 매우 다양하여 주로 시추공의 심도에 따라서 탄성과 속도를 측정하는 기법을 속도검층(velocity logging)이라 간주 하

1) 지하정보기술(주)(CEO, Subsurface Information Technologies, Inc.)

E-mail: chjo@gceha.co.kr

2) 한양대학교 지구환경시스템공학전공(Dep. Geoenvironmental system eng., Hanyang University)

3) 지질환경재해해연구부 한국지질자원연구원(Geological & Environmental Hazard Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

였다. 검층이라는 용어는 1927년 Schlumberger에 의해 개발된 전기검층을 처음에는 시추(mechanical coring)와 구분하기 위하여 electrical coring이라 하였으나 시추공 내에서 심도에 따라서 측정한다는 의미로 전기검층(electrical logging)이라 하였다(Allaud and Martin, 1977). 속도검층이라는 용어는 주로 일본에서 많이 이용하며 현병구 등(1995)의 물리탐사 용어사전에도 속도검층은 음파검층(sonic logging)을 의미한다. 본 논문에서 속도검층이란 표현은 종래의 음파검층과 더불어 부유형 PS검층, 하향식탄성파시험(downhole seismic test), 시추공간탄성파시험(cross-hole seismic test) 등 시추공을 이용하여 비교적 높은 분해능으로 탄성과 속도를 측정하는 기법을 속도검층의 범주에 포함시켜 설명하고자 함이며 용어에 대한 새로운 제안이나 정립이 아님을 밝힌다.

지표탐사와는 달리 시추공을 이용하여 지반의 탄성과 속도를 측정하는 속도검층은 측정방법이나 자료처리 과정이 전체적으로 정립이 잘 되어 있어 이론적으로는 매우 정확하고 정밀한 속도측정을 기대할 수 있다. 그러나 현장에서 탄성과 속도를 정확하게 측정하기 위해서는 주의해야 할 점들이 있으며 다음은 본 논문에서 검토하고자 하는 사항들이다.

- (1) 시추공을 굴착하는 지반이 미고결지층이나 풍화대 구간에는 시추공의 붕괴를 방지하기 위해서 다양한 케이싱을 설치하는 데 속도검층 시, 케이싱의 영향
- (2) 적용하는 속도검층기법에 따라 음원의 주 주파수 대역이 다르며 사용되는 주파수 변화에 따라서 측정되는 속도의 변화 특성

본 논문에서 위와 같은 발제의 의도는 위의 문제점에 대한 기본적 고찰과 그 해결방안에 대하여 더 넓은 관심과 깊은 연구를 유도하기 위함이다.

2. 속도검층법 개론

속도검층 기법으로 탄성과 속도를 측정할 때, 속도분석 과정에서 측정하고자 하는 파동에 대한 직접 발체를 하는 경우, 탄성과 종파속도는 초동발체의 용이성으로 자료 취득 및 자료처리 과정이 비교적 용이하다. 그러나 횡파의 초동은 종파 초동에너지의 파형요소(wavelet) 및 이의 분산, 회절, 반사, 모드변환 등을 겪은 이벤트보다도 늦게 도달할 수 있으므로 좀 더 정교한 기법을 적용해야 횡파 도달시간을 결정할 수 있다. 횡파속도를 초동에 의해 결정하는 경우 Fig. 1과 같이 발생파원의 극성을 180도 바꾸는 측정하여 정확한 도달시간을 확인하며 이 경우 횡파는 180도 위상차를 가지고 기록된다.

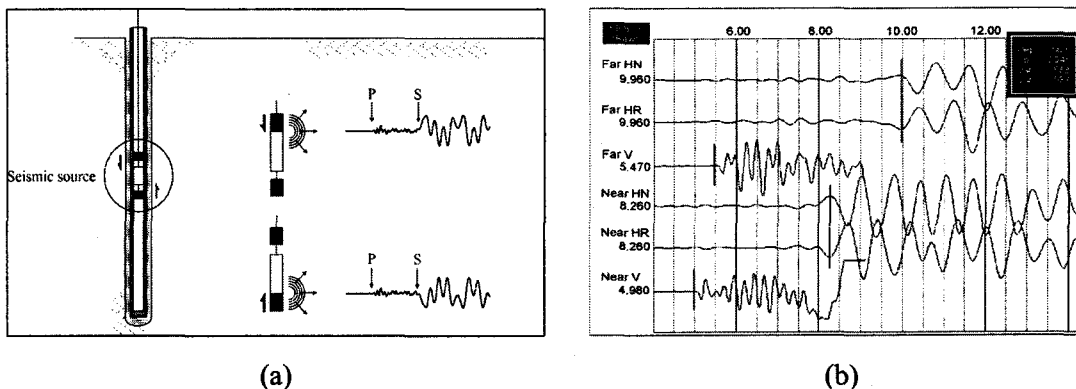


Fig. 1. (a) bi-directional wave generation and (b) received signals (Wightman et al., 2003).

다음은 본 논문에서 관심 대상인 속도검층 기법에 대한 기본적인 사항을 정리한 것이다.

1) 시추공간탄성파시험

시추공간탄성파시험은 케이싱과 지층사이의 접합상태가 양호한 경우 매우 높은 신뢰도로 시추공간 지반의 탄성과 속도를 측정할 수 있다. 미국의 경우, 시추공간탄성파시험법을 ASTM (American Society for Testing and Materials) D4428/D4428M-91 로 제안하고 있는데 이는 속도측정에 대한 전반적인 품질관리가 가능하기 때문이다. 참고적으로 많은 시험을 ASTM에서 제안하고 있으나 물리탐사법에 관련된 것은 많지 않은데 물리탐사 기법은 탐사환경에 따라서 일괄적인 방법으로 정리하기 어렵기 때문이다.

현장시험 시, 고려해야 할 사항은 케이싱과 지반의 접합상태, 시추공의 휨 정도(well deviation)에 대한 정보 등이다. 시추공 내에서는 횡파의 에너지를 충분하게 발생시키기 어렵기 때문에 두 시추공의 거리를 지반의 특성을 고려하여 좁게 것이 추천된다. ASTM의 모식도에는 두 시추공 사이의 거리가 3 m로 표시되어 있으며 Fig. 2 (김동수 등, 2005)와 같이 측정자료의 신호대 잡음비가 높은 것은 두 시추공 사이의 거리가 3 m로 가깝기 때문이다.

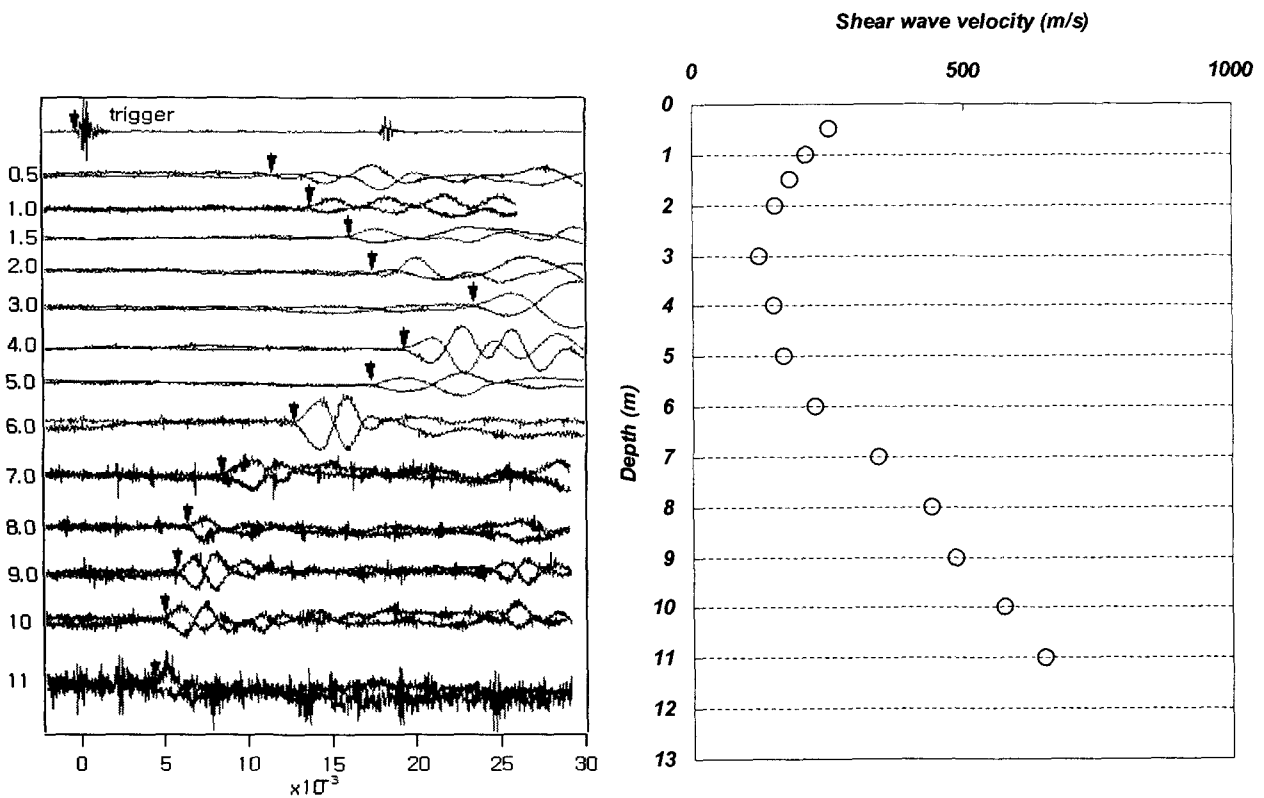


Fig. 2. Typical results of cross-hole seismic test (Kim et al., 2005).

2) 하향탄성파시험

하향탄성파시험은 1개의 시추공을 사용하고 탐사장비도 간단하여 가장 경제적으로 속도정보를 얻을 수 있어 지반조사에서 가장 많이 사용되고 있다. 횡파발생 기구는 SH 형태로 주로 해머가격으로 에너지를 발생시키므로 주파수 대역은 수십 Hz에서 백여 Hz 정도이다. 자료측정, 처리 및 해석과정 전반에 다른 속도검층법에 비하여 품질관리가 잘 되어 있다.

3) 부유형 음파검층

일본 OYO사에서 개발한 부유형 PS 검층은 open hole 상태와 시추공이 지하수와 같은 유체로 차 있을 경우에서 적용이 가능한 음파검층법이다. PVC케이싱이 삽입된 경우는 배면 그라우팅을 실시하고 최소 48시간이 경과한 후에 측정할 것을 권고하고 있다(GEOVision Geophysical Services (2002)의 Procedure for OYO P-S suspension seismic velocity logging 중, 측정환경 참조). 종파와 횡파 속도 측정이 가능한 단극 및 쌍극자의 음원을 이용하며 횡파발생 기구는 변환된 SH 형태이다. 쌍극자 음원의 주파수는 500 ~ 5,000 Hz이고 음원에서 수신기까지의 거리는 2 m로 연약지반의 S파 속도측정에 적합하다. 수신기 사이의 거리는 1 m로 수직분해능은 보통이다. 자료 측정시 음원과 수신기의 특성 때문에 정지상태와 centralizer를 설치해야 양질의 자료 취득이 가능하다.

3. 고려해야 할 사항들

3.1 자료취득 과정

속도검층자료취득시에는 특히 횡파의 발생과 관련한 주의 사항이 많다. Table 1에 주의 사항들을 정리한 것이다.

Table 1. Remarks of velocity logging in acquisition.

Remarks	cross-hole test	down-hole test	suspension PS logging
Coupling of source and ground	○	○	-
Maintenance of direction of the receiver axis	○	○	○
Coupling of casing and ground if borehole must be cased	○ (Steel or PVC)	○ (Steel or PVC)	○ (PVC)
Ground water within borehole	△	△	○

○: Indispensable condition, △: No necessary condition

Table 1의 사항들 중에서 케이싱과 지반의 밀착 상태 유지를 제외하고는 대부분의 측정환경에 유념하여 자료획득을 하고 있다. 그러나 퇴적토, 풍화토, 풍화암 등 연약층에서 공벽보호를 위해 설치되는 케이싱의 영향은 이미 인식하고 있으나 경비와 시간의 이유로 가장 소홀히 하는 항목이다. 이를 주목하여 보자.

1) 케이싱과 지반의 접합 상태: 케이싱과 지반 사이에 틈이 존재하는 경우 탄성파에너지의 전달은 극히 불량하게 된다. 지반이 매우 연약하여 쉽게 함몰되는 해성점토층과 같은 경우를 제외하고는 토층이나 풍화암층은 시추공벽과 케이싱 사이에 일정한 틈이 존재하게 된다. 이러한 틈을 메워서 탄성파에너지의 투과가 원활하도록 하기 위해서 Fig. 3과 같이 ASTM에서는 시멘트 몰타르(암반에서는 비중 2.20 Mg/m^3 로, 토층에서는 2.80 kg 물에 450 g 의 벤토나이트와 450 g 의 포트랜드 시멘트를 섞어 비중 약 $1.80 \sim 1.90 \text{ Mg/m}^3$ 로)를 만들어 압력을 잘 유지 시키면서 그라우팅을 실시하도록 요구한다.

이때의 문제는

- (1) 그라우팅을 위해서는 케이싱을 시추심도 끝까지 설치해야 한다. 이는 비용의 증액과 부유식 PS 검층시 초동의 모호한 범위가 확대되는 단점이 있다. 현재의 방식대로 풍화암 심도까지 케이싱을 설치하면서 그라우팅을 하는 기법 필요함
- (2) 그라우팅 파이프를 케이싱 외부에 부착하여 그라우트 하기 위해서는 NX보다 큰 시추공경이 필요하다. 이는 시추비용을 크게 증대시키며 시추공벽 주변의 그라우트 영역확대로 속도 왜곡 가능성이 있음
- (3) one way ball check valve를 사용하여 그라우팅하는 기법은 우리나라에 잘 사용되고 있지 않은 것 같음

2) 케이싱의 속도: 시추공내에 케이싱이 설치되어 있을 경우의 음파검층 반응은 케이싱의 영향을 받아 케이싱이 없는 나공일 경우와 다른 양상을 보인다. Tubman *et al.* (1984)은 단극자(monopole) 음원을 사용한 음파검층에서 스틸케이싱이 시멘트로 공벽에 잘 부착되었을 경우 케이싱과 시멘트에 의한 영향을 연구하였다. 그 후 Tubman *et al.* (1986)은 스틸케이싱을 사용하긴 했지만 공벽에 잘 부착되지 않았을 경우에 대해 단극자 음원에 의한 음파검층의 반응을 연구하였다. 그리고 풍화층의 횡파속도 측정에 이용되는 쌍극자(dipole) 음원을 이용하는 음파검층의 케이싱 영향은 Schmitt (1993)에 의해 심도 깊게 연구되었다.

단극자 음원을 이용하는 음파검층은 시추공에 설치된 철제 케이싱이 공벽에 부착이 잘 되어 있는 경우 케이싱과 시멘트는 P파와 S파의 도달시간에는 그리 큰 영향을 미치지 않지만 스톤리(Stoneley)파나 유사 레일리파(Pseudo Rayleigh)와 같은 경계파(interface wave) 들의 속도와 파형에는 큰 영향을 미친다. 이 영향은 케이싱, 시멘트, 매질의 성질 모두에 의해 종합적으로 결정된다. 특히 케이싱의 두께, 시멘트의 두께, 속도와 Q값은 파형에 큰 영향을 미친다.

철제 케이싱의 부착 상태가 불량할 경우 이는 케이싱과 시멘트 사이 혹은 시멘트와 공벽 사이에 시추공 유체 층이 하나 더 추가되어 있는 상황으로 표현될 수 있다. 만약 철제케이싱과 시멘트 사이가 떨어져 케이싱이 자유운동을 하면 철제 케이싱을 통해 전달되는 P파의 신호가 증폭되어 시추공 주변 지층에서 오는 P파의 속도에 비해 먼저 도착하게 된다. 이 때 매질의 P 파 속도가 케이싱의 속도와 비슷하면 매질에서 도달한 파가 케이싱으로부터 도달한 파에 가려

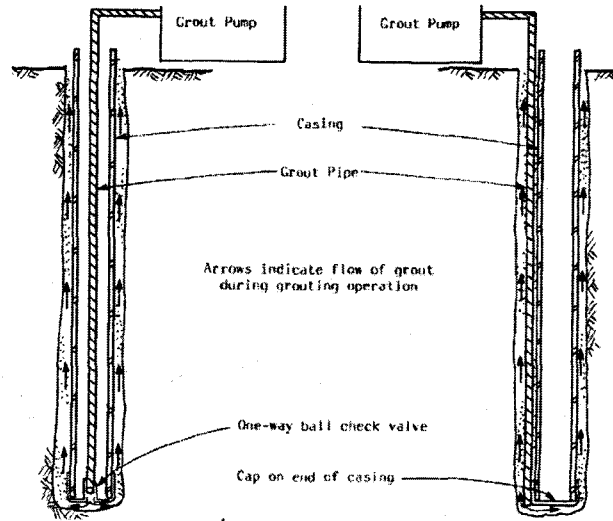


Fig. 3. Grouting method (After ASTM 4428).

구분이 어려우며 매질의 P파 속도가 느린 매질의 경우에는 케이싱으로부터의 P파와 분리되어 도착한다. 케이싱과 시멘트는 잘 부착되어 있으나 공벽에서 떨어져 있는 경우에는 케이싱과 시멘트의 두께와 속도의 조합에 따라 그 영향이 달라진다. 한 가지 특이한 사항은 위의 두 경우 모두 케이싱과 공벽사이의 유체층의 두께가 일정한 두께 이상 되면 부가적인 스톤리파가 생성된다는 점이다. 케이싱 뒷면의 그라우팅이 상태에 따른 음파검층의 수치모델링 결과는 Chang and Everhart (1983), Everhart and Chang (1985)에서도 찾아볼 수 있으며 케이싱의 접합상태가 불량한 경우라도 음원과 수신기 사이가 먼 경우, 횡파의 측정이 가능함으로 보여주고 있다.

쌍극자 음원의 경우 송신원이 시추공 중심에 위치하면 쌍극자 모드에 해당하는 파만 생성하나 만약 중심축에서 벗어나면 이론적으로 단극자, 쌍극자, 사극자(quadrupole) 등의 모든 다극자 음원에 해당하는 파를 생성하게 된다. 이 때 생성되는 스톤리파는 매질의 횡파속도가 감소할수록 진폭이 커지며 풍화층과 같이 매질의 횡파속도가 시추공 유체 속도보다 느린 지층(slow formation)의 경우 매질의 굽힘파(flexural wave)보다 먼저 도착하기도 한다. 이 때 스톤리파의 파형 구간이 길어지면 뒤에 오는 굽힘파를 가려 굽힘파의 파형 분석을 어렵게 할 수도 있다. 특히 케이싱이 공벽에 잘 부착되지 않아 케이싱과 공벽사이에 부가적인 유체층이 존재할 경우 굽힘파는 케이싱의 횡파속도에 많은 영향을 받는다. 또한 케이싱과 공벽사이의 유체에서 발생하는 파들(만약 검층기가 시추공 중심에 있다면 오직 굽힘파, 시추공 중심축에서 벗어나면 스톤리파, 굽힘파, 스크루(screw)파 등)에 의해 매질로부터의 신호에 대한 신뢰도가 떨어지면 이는 특히 주로 쌍극자 송신원으로 사용하는 저주파수 송신원에서 두드러진다.

Exxon 회사의 Georgi *et al.* (1991)에 의하면 사극자 음원과 음원과 수신기 사이의 거리가 먼 경우, 케이싱의 유무와 관계없이 양호한 탄성과 P파 S파의 속도 측정이 가능함을 제시했다. 케이싱 설치 전·후에 대한 측정된 탄성과 속도가 양호하게 일치하여 S파속도 측정에서 지반과 케이싱의 접합상태가 중요함을 제시하였다.

위에서 기술된 선행연구와 현재 국내 지반조사에 많이 이용하는 일본 OYO사의 부유형 PS검층의 경우를 비교하면 다음과 같은 몇 가지 차이가 있다.

- 1) 위의 연구들은 모두 철제케이싱과 관련된 연구이나 지반조사를 위한 시추공에는 주로 PVC 케이싱이 사용된다. PVC의 탄성 성질은 철의 탄성 성질과는 매우 다르며 이로 인해 음파검층 자료에 다른 영향을 끼칠 수 있다.
- 2) 앞서의 연구에 사용되어진 시추공은 석유탐사나 생산에 쓰이는 시추공으로 지반조사에 쓰이는 시추공에 비해 직경이 크다. 석유평가현장에서 사용되는 시추공의 직경이 약 20 cm 인데 반해 지반조사에 주로 쓰이는 시추공의 직경은 약 7.5 cm 이다. 석유에 사용되어지는 음파검층의 경우 검층기의 직경이 시추공의 직경에 비해 상대적으로 작기 때문에 수치모형에 의한 연구시 검층기 매질의 영향은 고려하지 않고 단지 가상의 송신원과 수신기들을 시추공 유체내에 분포시켜 반응을 연구한다. 하지만 지반조사의 경우 검층기가 시추공 내부의 면적을 상당 부분 차지하기 때문에 음파검층의 반응 양상 연구시 검층기의 존재가 고려되어야 한다. 참고적으로 GeoVision Geophysical Services (2002)에서 속도 측정에 적합한 직경이 10 ~ 20 cm임을 제시하기도 하였다.
- 3) 연약지반에서 음파검층 시, PVC 케이싱을 이용하여 공벽을 유지할 때 케이싱이 공벽과 밀착되지 않은 상태에서 검층을 실시하는 경우가 종종 있다. 이 경우는 케이싱과 공벽 사이에 부가적인 유체층이 존재하며 PVC 케이싱이 자유운동을 하는 경우가 된다.
- 4) 음파검층시 centralizer를 사용하지 않았다면 시추공이 경사지거나 굴곡진 부분에서 측정 시 검층기가 시추공 중심축에서 벗어난 상황이 된다.

Fig. 4는 풍화층에서 PVC 케이싱 내에서 취득한 부유형 PS검층 자료로서 매질의 횡파가 먼저 도달하는 파들에 의해 가려져 초동의 피킹이 어려운 경우이다. 앞에서 기술한 연구에 근거하여 볼 때 자료 측정시 시추공의 중심축에서 벗어나기 때문에 쌍극자 음원은 쌍극자 성분 뿐만 아니라 단극자와 모든 다극자 음원에 해당하는 파형을 발생시켰으며 케이싱과 시추공벽 사이의 유체, 매질의 영향으로 생성된 스톤리파가 매질에 의한 굽힘파에 비해 먼저 도달하였기 때문이라고 해석된다. 위에서 열거한 모든 상황을 전부 고려하기 위해서는 검층기의 매질과 시추공 중심축에서 벗어난 검층기의 반응을 고려한 수치모형실험이 필요하다.

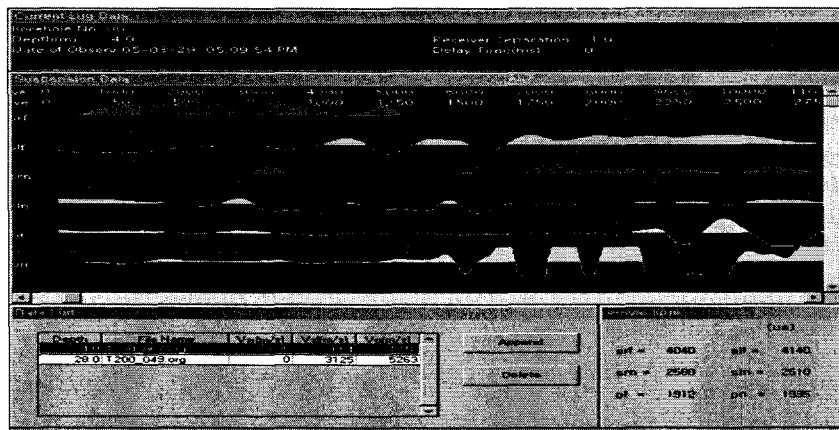


Fig. 4. Records of suspension PS logging system within the PVC cased borehole.

3.2 음원의 주 주파수 변화에 따른 탄성과 속도와의 관계에 대한 고찰

속도측정에 사용되는 주파수 범위에 따른 속도의 변화는 속도검층에서만 발견되는 것은 아니다. 지표탐사에서 해석된 속도와 시추코어에 대하여 수행된 암석속도가 다른 것은 널리 알려진 사실이다. 일반적으로 실내시험에서 이용하는 시추코어는 절리 등 결함이 없는 무결암을 대상으로 하기 때문에 특정 암석이 나타낼 수 있는 가장 높은 속도를 보이며 비교적 깊지 않은 심도에서 측정하는 탄성과 속도는 현지 지반의 다양한 환경을 포함하기 때문에 실내시험으로 측정한 탄성과 속도보다 상대적으로 낮은 속도를 보인다.

속도검층에서 측정 범위의 규모-송신기와 수신기 사이의 거리, 혹은 구간속도를 계산하기 위한 심도차이-가 유사함에도 측정기법에 따라 현격한 차이를 보이는 경우가 있다. Fig. 5는 지하정보기술(주)에서 동일 시추공에 대하여 부유형 PS검층과 하향탄성과시험을 수행한 결과를 비교한 것이다. 여기서 심도 약 15 m 내외까지는 PVC 케이싱의 영향으로 부유형 PS 검층의 속도값이 매우 높게 나올 수 있음과 30 m 하부의 결과는 하향탄성과시험의 신뢰도가 떨어질 수 있음을 감안하더라도, open hole 상태의 하부의 암반층에서 부유형 PS 검층으로 측정한 속도가 하향탄성과시험으로 측정한 속도보다 일반적으로 약 1.5배 정도 높게 나오고 있다.

같은 시추공이라도 하향식탄성과탐사를 이용하여 획득한 구간속도와 음파검층으로부터 얻은 탄성과 속도 사이에는 종종 차이를 보인다. 대부분의 경우 VSP 탐사에서의 주행시간이 음파검층에서 측정된 주행시간 보다 더 크게 나타나며 이는 VSP 탐사에 의해 얻은 탄성과 속도가 음파검층에서 획득한 속도에 비해 더 느리게 나타나는 결과를 가져온다. 이러한 차이가 나는 원인에 대해 1980년대와 1990년대에 많은 연구가 심도 있게 수행되었다(Stewart *et al.*, 1984; De *et al.*, 1994). Stewart *et al.* (1984)는 두 방법으로부터의 속도들의 차이에 대해서 다음과 같이 크게 세가지 이유를 제시하였다.

- 1) 사용되어지는 송신주파수와 송수신기 배치로 인해 측정되어지는 매질의 규모에서의 차이
- 2) 각 탐사에 쓰이는 측정장치의 오차와 자료분석 시에 발생할 수 있는 부정확성
- 3) 두 탐사방법에서 이용되는 파의 서로 다른 전파 특성

첫번째로, 음파검층에서 측정되어진 속도는 고주파수의 (P파의 경우 8 ~ 15 kHz) 파가 시추공 주변의 암석을 약 1 ~ 2 m 정도 전파할 때의 걸린 주행시간을 기초로 얻어지며, VSP 탐사의 경우 약 10 ~ 100 Hz의 주파수대역을 가진 파가 시추공 입구로부터 수십 내지 수백 m를 전파한 주행시간에 기초로 속도를 얻는다. 따라서 음파검층의 경우 시추공으로부터 수십 cm이 내에 있는 매질의 특성을 반영하는 반면 VSP의 경우는 수 m이 내에 있는 매질의 성질을 종합적으로 반영한다. 대부분의 경우 이 두 규모는 비슷한 매질의 특성을 나타내지만 이수의 침투, 시추공 직경의 변화, 시추공 주변의 응력 변화 등으로 인해 다른 속도를 보여주기도 한다.

측정과 분석면에서 살펴보면 음파검층의 경우 두 수신기 도달된 시간차를 이용하여 속도의 역수인 느리기를 구하는 반면 VSP 탐사의 경우 지표의 송신기로부터 시추공 내에 설치된 수신기까지 도달한 시간에 기초하여 속도를 구한다. 각각의 방법 모두 측정 시 여러 가지 이유로 오차를 수반할 수 있다. 특히 파의 도달시간을 결정하기 어렵게 하는 자료상의 잡음과 주시의 피킹방법 또한 측정자료에서 구한 속도값에 영향을 끼친다.

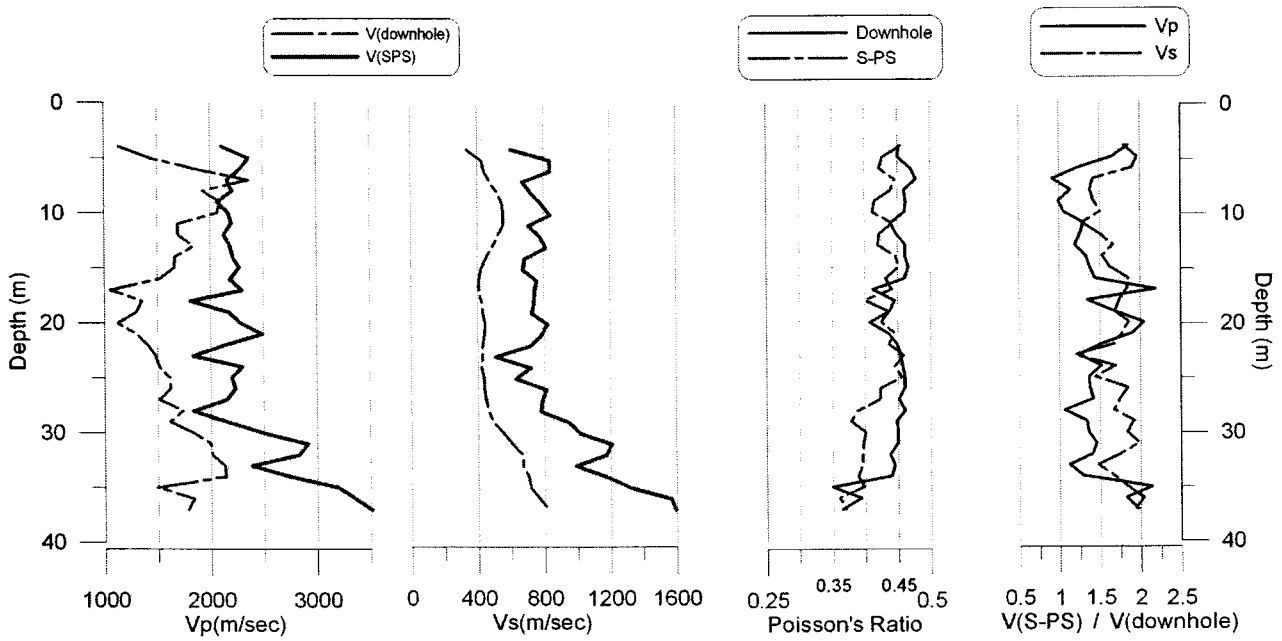


Fig. 5. Down-hole and S-PS velocity logs from the same borehole.

마지막으로 두 탐사방법에서의 속도의 차이는 두 탐사방법에서 파의 다른 전파 특성이다. VSP탐사의 경우 층들에 의해 파의 경로가 심하게 변하거나 굴절파(선두파)가 먼저 도달하는 경우 직선파의 가정에 의한 보정은 더 이상 맞지 않게 되며 이는 특히 얇은 심도 측정에서 심해진다. 심부의 경우에도 층들이 급경사를 이루어 층방향의 속도가 층들의 연직방향의 속도에 비해 빠른 이방성을 보일 경우 VSP 탐사에서의 속도가 수직방향으로의 전파속도를 측정하는 음파검층의 속도에 비해 빠르게 나타날 수 있다.

두 방법의 측정되어진 속도들의 차를 설명하는데 있어서 다른 두 가지 요인은 짧은거리의 다중 반사파(short-path multiples)와 파의 분산현상이다. 먼저 짧은 거리의 다중반사파들은 원래의 파형을 최대지연 파형요소의 모양으로, 즉 주 에너지가 원래보다 나중에 도달하는 것처럼 변형시킨다.

두번째로 우리가 사용하는 대부분의 지표탄성과 탐사와 VSP 탐사의 경우 전파하는 파의 주파수 대역이 제한되어 있기 때문에 그 미세한 차이를 측정할 수 없지만 실제파들은 분산 현상을 일으키며 주파수가 높을수록 더 빠르게 전파하는 성질을 가지고 있다. 따라서 지표 혹은 VSP탐사에서의 탄성과 주행시간이 음파검층에서의 주행시간 보다 더 길게 측정되어진다. 이 주행시간의 차이는 매질의 Q 값이 작을수록, 즉 흡수에 의한 감쇠가 클수록 더 커진다(Aki and Richard, 1980).

$$t_{delay} = \frac{d \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)}{V(\omega_2) \pi Q} \tag{1}$$

속도검층에서 사용하는 주 주파수의 특성에 따라서 속도의 변화가 있는 국내의 지반조사 사례와 기존의 이론적인 연구가 수행되었지만 좀더 확실한 원인에 대한 고찰이 필요한 사항이다. 일례로 황세호 등(2005)과 김동수 등(2005)에서 동일한 시추공에 대한 부유형 PS검층결과 다운홀탄성파시험 결과로 측정된 횡파 속도의 차이가 작은 경우도 있으며 Fig. 6은 Brown et al. (2002)이 SASW 표면파 탐사와 하향식탄성파시험, 그리고 부유형 PS 검층법으로 측정된 횡파속도 분포를 나타낸 것으로 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

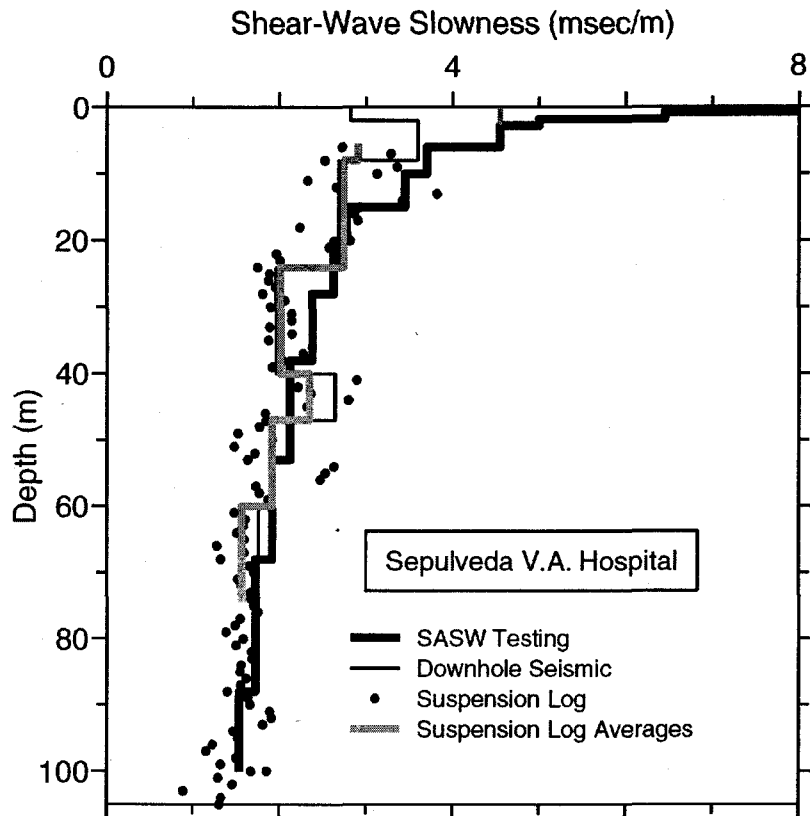


Fig. 6. Comparison of shear wave slowness derived from SASW, downhole test, and suspension PS log (Brown *et al.*, 2002).

4. 기본 제안

속도검층에서 고려해할 사항 또는 해결해야 할 문제들을 열거하고 이에 대한 대응방안을 구하고자 하는 것이 본 논제의 목표이다. 이에 대한 것은 향후 지속적으로 충분한 논의가 필요하며 현재까지의 잠정적인 기본 제안은 다음과 같다.

1) 자료의 취득: 여러 가지 고려해야 할 사항이 있으나 대부분 잘 지켜지고 있다, 그러나 가장 쉽게 이해하고 있으면서도 시간과 경비 때문에 소홀히 하는 사항이 케이싱에 관련된 사항이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 탄성파시험이 설정된 시추공에서는 가급적 케이싱을 설치하지 않고도 공벽을 유지하는 시추법(벤토나이트를 사용하고 굴진속도를 늦추는 등)의 적용이나 케이싱을 설치하는 경우, 정확한 배면 그라우팅의 실시 등이 필요하며 무엇보다도 손데의 직경보다 불과 2 ~ 3 cm 정도밖에 크지 않은 시추공 내에 설치된 PVC 케이싱 내에서 쌍극자 음원을 이용한 음파검층 파동의 전파에 대한 수치모델링 연구가 시급하다 할 수 있다. 또한 Georgi *et al.* (1991)처럼 시추공 내에 케이싱의 설치 전·후에 대한 음파검층을 수행하여 측정자료를 비교하는 방법이 추천되며 무엇보다도 OYO사의 부유형 PS검층시 적절한 centralizer 설치와 안정적인 상태에서의 자료측정, 필터링을 포함한 체계적인 자료처리를 통한 초동의 선택이 중요하다.

2) 음원의 주 주파수 차이에 따른 탄성과 속도의 변화: 국내에서 이에 대한 심도 깊은 연구 결과는 아직 없지만 지반조사 현장에서 음원의 주 주파수가 낮아질수록 발체되는 초동시간이 늦어지는 경향을 보인다. 국내의 경우, 측정심도가 연약지반을 포함하여 보통 수십 m 정도의 심도에 대한 탄성과 속도를 측정하는데 김동수 등(2005)와 황세호 등(2005), Brown *et al.* (2002)에서는 하향식탄성파시험과 부유식 PS검층결과가 잘 일치하는 결과를 제시하기도 하였다. Fig. 5와 같은 속도의 차이가 발생하는 문제가 국내에서 종종 보고 되고 있으나 측정환경, 자료처리에 대한 정확한 정보의 부족으로 속도차이에 대한 원인을 설명할 수는 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 김동수 등(2005)과 황세호 등(2005)과 같이 시험시추공에 대한 시험을 통하여 문제점을 점차적으로 해결하는 것이 추천된다.

지반의 탄성과 속도는 연약지반 평가, 결정질 암반의 암반분류, 다짐의 정도, 내진설계, 지반의 굴착 난이도 등 매우 광범위하게 이용되는 지반 물성으로 그 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 본 논문에서 제시한 문제는 양질의 탄성과 속도를 측정하고자 하는 시도 중의 하나이며 이에 대한 많은 관심과 연구가 계속되어야 한다.

참고문헌

- 김동수, 2005, 강의자료(personal communication).
- 김동수, 고광범, 김영수, 방은석, 신형욱, 윤진성, 이양로, 장현삼, 2005, Round robin test를 통한 공내 탄성과 탐사 기법 비교 연구, 한국지반공학회 2005 봄 학술발표회 특별 Session 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round robin test 결과 발표, 73-88.
- 황세호, 김영환, 박기태, 신제현, 최재화, 홍재호, 박찬, 2005, 물리검층을 이용한 지반의 원위치 지반물성 평가 : Round robin test 결과를 중심으로, 한국지반공학회 2005 봄 학술발표회 특별 Session 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round robin test 결과 발표, 57-71.
- Aki, K. and Richard, P. G., 1980, *Quantitative Seismology: Theory and methods, vol. II*, W. H. Freeman Co.
- Allaud, L. A., and Martin, M. H., 1977, *Schlumberger: the history of a technique*, John Wiley & Sons, 333 p.
- Brown, L. T., Boore, D. M., and Stokoe II, K. H., 2002, Comparison of shear-wave slowness profiles at 10 strong-motion sites from noninvasive SASW measurements and measurements made in boreholes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 3116-3133.
- Chagn, S. K., and Everkart, A. H., 1983, A study of sonic logging in a cased borehole, *Journal of Petroleum Technology*, **35**, 1745-1750.
- De, G. S., Winterstein, D. F., and Meadows, M. A., 1994, Comparison of P- and S-wave velocities and Q's from VSP and sonic log data, *Geophysics*, **59**, 1512-1529.
- Everkart, A. H., and Chagn, S. K., 1985, A theoretical study of dipole shear logging in cased holes, *55th Annual Meeting Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, 72-74.
- GeoVision Geophysical Services, 2002, *P-S suspension logging borehole B-2*, GeoVision Suspection Logging Report.
- Georgi, D. T., Heavysage, R. G., Chen, S. T., and Eriksen, E. A., 1991, Application of shear and compressional transit-time data to cased-hole carbonate reservoir evaluation, *The Log Analyst*,

32, 129-143.

Schmitt, D. P., 1993, Dipole logging in cased boreholes, *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**, 640-657.

Stewart, R. R., Huddleston, P. D., and Kan, T. K., 1984, Seismic versus sonic velocities: A vertical seismic profiling study, *Geophysics*, **49**, 1153-1168.

Tubman, K. M., Cheng, C. H., and Toksöz, 1984, Synthetic full-waveform acoustic logs in cased boreholes, *Geophysics*, **49**, 1051-1059.

Tubman, K. M., Cheng, C. H., Cole, S. P., and Toksöz, 1986, Synthetic full-waveform acoustic logs in cased boreholes, II - Poorly bonded casing, *Geophysics*, **51**, 902-913.

Wightman, W. E., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K., 2003, *Application of geophysical methods to highway related problems : Technical Manual (DTFH68-02-P-00083)*, Federal Highway Administration Central Federal Lands Highway Division.