

매 설

천부 지반 환경에서 속도검층 난제들에 대한 고찰

조철현^{1*} · 변중무² · 황세호³

¹지하정보기술(주)

²한양대학교 지구환경시스템공학전공

³한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Considerations on the Difficulties in Velocity Logging in the Near Surface Environments

Churl Hyun Jo^{1*}, Joongmoo Byun² and Seho Hwang³

¹Subsurface Information Technologies, Inc.

²Dep. Geoenvironmental system eng., Hanyang University

³Geological & Environmental Hazard Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 토목이나 환경분야에 적용되는 시추공을 이용한 P파와 S파 속도검층 수행 시 여러 고려해야 할 사항이 있다. 토양이나 풍화암 등 연약층에 설치한 케이싱이 탄성과 측정치에 미치는 영향, 사용되는 주파수에 따라 측정되는 탄성과 속도의 변화 등이 그것이다. 또한 속도검층으로부터 구한 탄성계수는 동적특성을 반영한다. 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. 또한 내진설계자들이 속도검층에서 구한 동탄성계수와 실내역학시험에서 구한 정탄성계수와의 차이점을 인식하고 적절히 사용할 수 있도록 조언하는 것도 필요하다.

주요어: 속도검층, 케이싱 영향, 탄성과 속도의 주파수 의존성, 동탄성계수

Abstract: Cares should be taken when performing the P and S wave velocity loggings in engineering and environmental fields. Some of them are the effect of casing, which 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. The elastic moduli obtained from the P and S wave velocity logging have the dynamic characteristics. To overcome these difficulties, the following suggestions are recommended; (1) develop and apply a careful drilling technique that can keep the borehole wall without a casing, and (2) apply the logging methods with the suitable frequency bandwidth for the object of the velocity logging. It is important to make the aseismological engineers understand the difference between the dynamic elastic moduli and the static ones obtained from mechanical test, and to advise them to use the information properly.

Keywords: velocity logging, casing effect, frequency dependency of velocity, dynamic elastic modulus

서 론

탄성과 속도는 토목엔지니어링이나 환경분야의 지반조사에서 가장 많이 측정되고 활용성이 높은 물성으로 연약지반 평가, 암반분류, 연안지역 매립정도 평가, 지반의 굴착 난이도 평가 등에 활용된다. 특히 횡파속도(토목공학에서는 전단파속도

라는 용어를 더 선호함)는 지층의 강성파악과 내진설계에 중요한 정보로 사용되고 있다. 탄성과속도를 측정하는 방법은 현장과 실내기법으로 구분할 수 있으며 각각은 장·단점을 갖고 있다. 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 현장조건을 그대로 반영한다는 강점이 있지만 측정시 세심한 주의를 기울이지 않으면 측정값에 오류가 포함될 위험성이 있다.

지반조사 분야에서는 탄성과속도 측정기법이 다양한 지반평가 시험법의 하나이기 때문에 보통 ○○시험(test)이라는 용어를 쓰기도 한다. 본 논설에서 속도검층이란 표현은 종래의 음파검층과 더불어 하향식탄성파시험(downhole seismic test), 시

2006년 3월 8일 접수; 2006년 8월 3일 채택
한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지엄-시추공 물리탐사-에서(일부)발표
*Corresponding author

E-mail: chjo@geeha.co.kr
Address: Subsurface Information Technologies Inc.,
Suit #321, Byucksan Digital Valley II,
481-10, Gasan-dong, Geumcheon-goo,
Seoul, 153-783 Korea

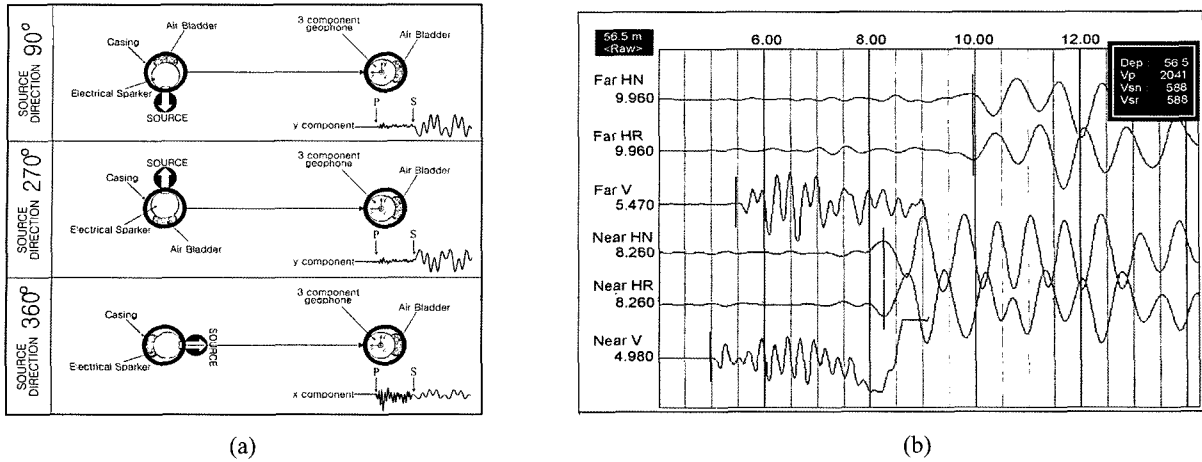


Fig. 1. Generation and detection of S wave (a) bi-directional wave generation and (b) reversed feature of S wave signal (Wightman *et al.*, 2003).

추공간탄성파시험(cross-hole seismic test) 등 시추공을 이용하여 비교적 높은 분해능으로 탄성과 속도를 측정하는 기법을 포괄적으로 의미하고자 함이며, 용어에 대한 새로운 제안이나 정립이 아니다.

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 이를 위해서는 현장 자료취득 단계부터 주의해야 할 점들이 있다. 본 논설은 천부탐사, 특히 토목엔지니어링이나 환경분야 적용시에 발생할 수 있는 속도검층의 문제점을 제시하고 그 해결방안에 대하여 더 넓은 관심과 깊은 연구를 유도하고자 한다. 다음은 본 논설에서 중점적으로 검토하고자 하는 사항들이다.

- (1) 시추공을 굴착하는 지반이 미고결지층이나 풍화대 구간에는 시추공의 붕괴를 방지하기 위해서 다양한 케이싱을 설치하는데 속도검층 시, 케이싱의 영향
- (2) 적용하는 속도검층기법에 따라 음원의 주 주파수 대역이 다르며 사용되는 주파수 변화에 따라서 측정되는 속도의 변화, 혹은 오차 특성
- (3) 속도검층을 비롯하여 탄성과속도에 의해 구해지는 동탄성계수(dynamic elastic modulus)와 실내 역학시험 등으로부터 구한 정탄성계수(static elastic modulus)와의 차이

천부지반탐사용 속도검층법 개략

속도검층은 주로 송수신기 간격을 정해놓고 이로부터 측정된 파동의 초동을 이용하여 구간속도를 결정하는 과정으로 이루어진다. 이때, 탄성과 종파는 초동을 명확하게 분간할 수 있으므로 자료취득 및 속도계산 과정이 비교적 용이하다. 그러나 횡파의 초동은 종파 초동에너지의 파형요소(wavelet) 및 이의 분산, 회절, 반사, 모드변환 등을 겪은 이벤트보다도 늦게 도달

할 수 있으므로 좀 더 정교한 기법을 적용해야 횡파를 구분할 수 있다. 횡파속도를 초동에 의해 계산하는 경우, 발생파원의 극성을 송신기와 수신기의 배열방향에 대하여 수직으로 역전시키는 기법을 채택하여 횡파와 종파를 구분하기 용이하게 한다(Fig. 1).

천부의 토목엔지니어링이나 환경분야에 적용되는 대표적인 속도검층 기법에 대하여 간략히 살펴보기로 한다.

시추공간탄성파시험

시추공간탄성파시험은 시추공 2 개 이상을 가까운 거리에 천공하고 시추공사이 지층의 횡파속도를 측정한다(Fig. 2(a)). 이때 송신공과 수신공사이 지층속도를 측정하는 것이 일반적인 배열이지만, 추가 수신공을 동일한 탐사단면에 천공하여 2 개 수신시추공 사이의 지층속도를 측정하는 경우도 있다. 횡파송신은 발생기구를 공벽에 기계적으로 접합시키고 상하로 타격하여 SV 파를 발생시키는 방법과 좌우로 타격하여 SH 파를 발생시키는 방법이 있다. 케이싱과 지층사이의 접합상태가 양호한 경우 매우 높은 신뢰도로 시추공간 지반의 탄성과 속도를 측정할 수 있다. 음원의 주파수는 기계식의 경우 수 십 ~ 수 백 Hz이다. 이 기법 적용시 가장 큰 문제는 공간거리가 너무 멀지 않아야 한다고 판단하고 있다.

하향탄성파시험

하향탄성파시험은 시추공 부근의 지표면에서 송신하고 이를 시추공에서 심도를 변화시켜가면서 측정하여 구간속도를 계산하는 방식이다(Fig. 2(b)). 횡파송신은 설치된 무게판을 좌우로 타격하여 SH 파를 발생시킨다. 1 개의 시추공을 사용하고 탐사장비도 간단하여 가장 경제적으로 속도정보를 얻을 수 있어 지반조사에서 가장 많이 사용되고 있다. 시추공내의 수신기는 공기를 팽창시키거나 활대를 펴서 시추공벽과 압착시킨다. 공기팽창식을 사용할 경우 지하수 하부에서는 압착력이 떨어져

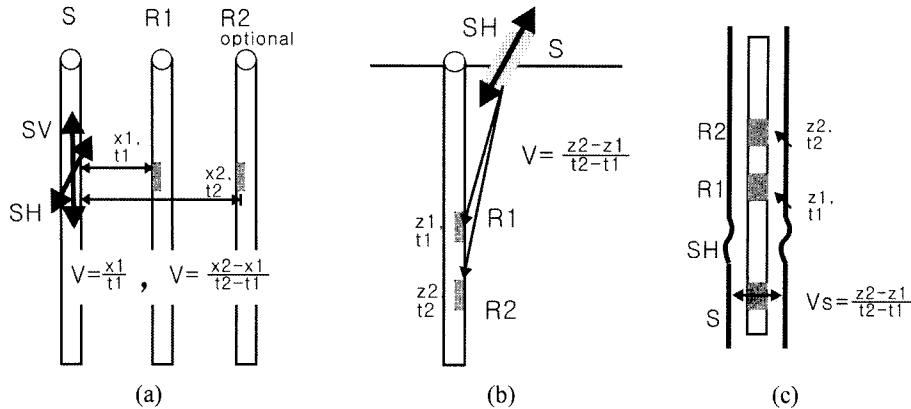


Fig. 2. Schematic diagrams of (a) cross-hole test (b) down-hole test, and (c) suspension PS logging.

서 신호의 품질이 낮아질 수 있다. 음원의 주파수는 수 십 ~ 수 백 Hz이다.

음파검층

음파검층기법은 다양하지만, 천부지반속도취득을 위해서는 부유형 PS 검층기법을 가장 널리 채택하는 추세이다. 따라서 본 논설에서는 음파검층 중에는 이 기법만을 다루고자 한다. 일본 OYO사에서 개발한 부유형 PS 검층은 나공(open hole) 상태와 시추공이 지하수와 같은 유체로 차 있을 경우에 수행 가능하다. Fig. 2(c)에 나타난 R1, R2 수신부는 각각 수평지오폰과 하이드로폰이 설치되어 있어 횡파와 종파를 감지한다. 쌍극자 음원의 주파수는 500 ~ 5,000 Hz이고 음원에서 수신기까지의 거리는 2 m로 연약지반의 S파 속도측정에 적합하다. 수신기 사이의 거리는 1 m로 수직분해능은 높은 편이다. 횡파측정은 송신부에서 비대칭으로 발생한 수압이 좌우 지층에 전달되고 이것이 SH 형태로 전파된 후 수신기에 다시 압력파로 전달되는 원리이다. 송신부에서 주변공벽, 그리고 공벽에서 다시 수신부로 전달되는 과정은 압력-종파이다. 자료 측정시 음원과 수신기의 특성 때문에 정지 상태와 centralizer를 설치해야 양질의 자료취득이 가능하다.

천부지반 속도검층 시 고려해야 할 사항들

자료취득 과정

각 시험별로 고려해야 할 사항을 언급하여 본다.

1) 시추공간탄성파시험

본 기법에 대한 품질관리는 ASTM (American Society for Testing and Materials) D4428/D4428M-91에 정밀하게 규정되어 있다. 현장시험 시 고려해야 할 사항은 케이싱과 지반의 접합상태, 시추공의 휨 정도(well deviation)에 대한 정보, 공간거리가 적절성, 수신기 압착방식이 공기팽창식 일 경우 지하수에 의한 압착력 저하, SH 발생 방식일 경우 송신방향과 수신방향

의 일치 유지, 송신원 파형 기록 등이다. 기계적 타격을 가하는 경우 지하수위 하부에서는 물의 저항 때문에 음원 발생효율이 떨어질 수 있다. 목영진 등(2005)은 지하수의 영향을 극복하는 음원을 고안한 바 있다.

2) 하향탄성파시험

본 시험의 자료취득 시 고려해야 할 사항은 케이싱과 지반의 접합상태, 측정심도의 적절성, 수신기 압착이 공기팽창식 일 경우 지하수에 의한 압착력 저하, 지표 송신방향과 공내 수신방향의 일치 유지, 송신원 파형 기록 등이다.

3) 부유형 PS 검층

본 시험의 자료취득 시 고려해야 할 사항은 지하수의 존재, 케이싱과 지반의 접합상태, 안정된 상태에서 측정, centralizer 설치 등이다. 가급적 케이싱을 사용하지 않는 것이 추천되나 불가피한 경우라도 철재케이싱은 불가하다.

자료취득 시 주의하여야 할 사항을 Table 1에 정리하여 놓았다. Table 1의 사항들 중에서 케이싱과 지반의 밀착 상태 유지를 제외하고는 대부분의 측정환경에 유념하여 자료획득을 하고 있다. 케이싱은 가급적 설치하지 않는 것이 바람직하므로 가장 바람직한 시추 방안은 토층이나 풍화암의 공벽을 유지시키면서 시추하는 기법의 채택이다. 이는 시추속도의 조절과 적절한 시추첨가제의 활용으로 실현 가능하다.

한편 퇴적토, 풍화토, 풍화암 등 연약층에서 공벽보호를 위해 설치되는 케이싱의 영향은 이미 인식하고 있으나 경비와 시간의 이유로 가장 소홀히 하는 항목이다. 이에 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 풍화암

Table 1. Check points in velocity logging acquisition.

Check points	Cross-hole test	Down-hole test	Suspension PS logging
Coupling of source and ground	○	○	—
Coupling of receiver and ground	○	○	—
Maintenance of direction of the source and receiver axis	○	○	—
Measurement of hole deviation	○	△	—
Coupling of casing and ground if borehole must be cased	○	○	○
Casing material	Steel or PVC	Steel or PVC	PVC
Optimal source-receiver distance	max. 10 m	max. 30 m	—
Source signature recording	○ for 1 Rx hole △ for 2 Rx holes	Recommended	—
Centralizer	—	—	Recommended
Ground water	△	△	○

○: Necessary condition, △: Not necessary condition, — : not applicable

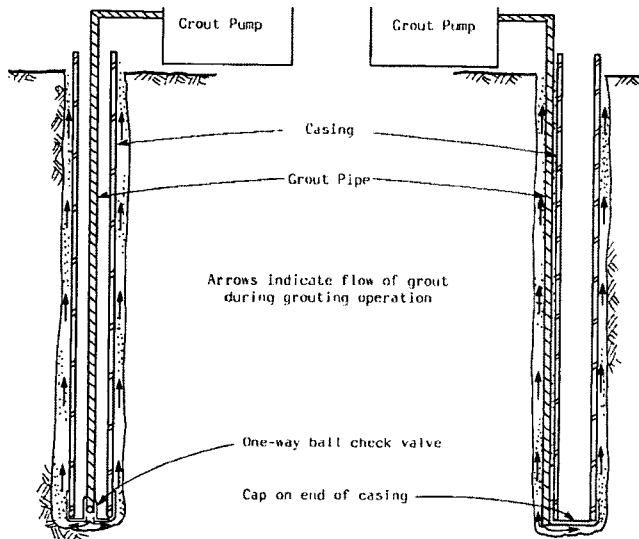


Fig. 3. Grouting method (After ASTM 4428).

층은 시추공벽과 케이싱 사이에 일정한 틈이 존재하게 된다. 이러한 틈을 매워서 탄성파에너지의 투과가 원활하도록 하기 위해서 그라우팅 등을 통한 접합상태를 양호하게 유지시켜야 한다. 이를 위한 방법으로 ASTM의 시추공간탄성파시험 규정을 살펴보면, 시멘트 몰타르(암반에서는 비중 2.20 ton/m³ 로, 토층에서는 2.80 kg 물에 450 g의 벤토나이트와 450 g의 포틀랜드 시멘트를 섞어 비중 약 1.80 ~ 1.90 ton/m³ 로)를 만들어 압력을 잘 유지 시키면서 그라우팅을 실시하도록 요구한다 (Fig. 3). 또한 GEOVision Geophysical Services (2002)의 부유형 PS속도검층 측정 과정에서는 그라우팅을 실시하고 최소 48 시간이 경과한 후에 측정할 것을 권고하고 있다.

이때 현장에서 부딪히게 되는 과제는

(1) 그라우팅을 위해서는 케이싱을 시추심도 끝까지 설치해야 한다. 이는 비용의 증액과 더불어 압층처럼 케이싱이 필요한 구간까지도 케이싱이 설치되어야 하는 단점이 있다.

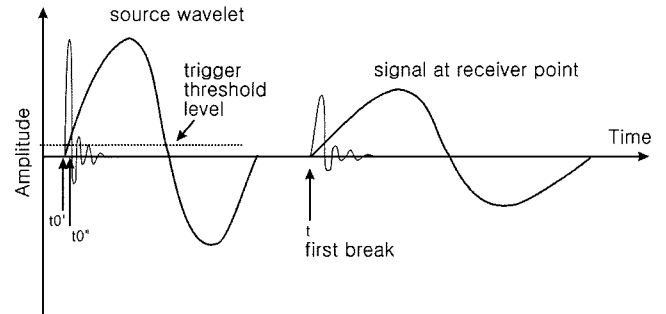


Fig. 4. Timing uncertainty due to threshold level.

(2) 그라우팅 파이프를 케이싱 외부에 부착하여 그라우트 하기 위해서는 NX보다 큰 시추공경이 필요하다. 이는 시추비용을 크게 증대시키며 시추공벽 주변의 그라우트 영역확대로 속도 왜곡 가능성이 있다.

(3) 체크밸브를 사용하여 그라우팅하는 기법은 우리나라에 잘 사용되지 않고 있는 것으로 파악된다.

2) 음원 발생-기준시간의 문제

하향탄성파시험이나 시추공간탄성파시험은 비교적 저주파 음원을 기계적으로 발생한다. 이러한 발생구조는 기준 시간 불확실성이 상대적으로 더 크다. Fig. 4에서 나타나 있듯이 탄성파탐사는 음원발생을 기준으로 기록시간이 결정된다. 고주파 음원의 경우 트리거발생을 감지하는 일정 진폭수준(threshold 값)에 다다른 시간(Fig. 4의 t0')이 좁다. 그러나 저주파의 경우 이러한 지연(Fig. 4의 t0')은 증가한다. 지표 탐사처럼 송수신 간격이 수십 m에서 수 백 m 이상 넓은 경우 이러한 지연은 그리 문제되지 않는다. 그러나 하향탄성파시험에서 속도를 구해내는 구간은 2~5 m 사이이고 시추공간탄성파시험은 3~6 m 정도로 공간거리를 정하는 것이 추천된다. 따라서 이렇게 좁은 거리에서 기준시간의 불확실성은 측정값에 큰 영향을 발생시킬 수 있다.

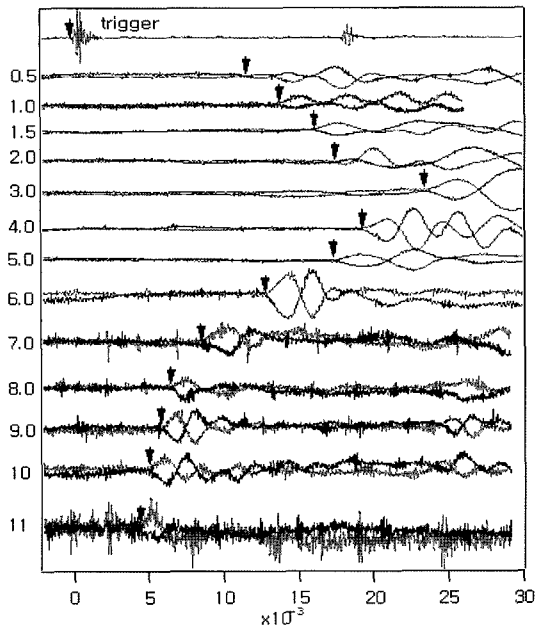


Fig. 5. Typical results of cross-hole seismic test (Kim et al., 2005).

송신원 발생이 일관성을 상실할 경우, 더 먼 곳에서 측정된 시간이 더 빠르게 나타나는, 즉 음의 속도까지 계산될 수 있다. 이를 보정하기 위해서는 수신신호와 더불어 송신파형 자체도 기록하여야 한다. 송신파형 기록이 불가능한 장비를 사용할 시에는 가급적 threshold 값을 낮추고 일관성 있는 송신에 유의하여야 한다. 하향탄성파시험시 심도가 다른 2 개의 수신부로 동시에 측정하거나, 시추공간탄성파시험시 2 개 수신공을 사용하는 기법을 채택하면 이러한 기준시간 불확실성을 원천적으로 극복할 수 있다.

저주파의 완전한 상송곡선은 초동발체과정에서도 불확실성을 야기시킨다. 이들은 주파수에 따른 속도의 차이에도 큰 영향을 주리라 생각되는 요인이다. 이에 대하여는 3.2 절에서 다시 논의하고자 한다.

3) 송신원과 수신기의 거리

시추공 내에서는 횡파의 에너지를 충분히 발생시키기 어렵기 때문에 시추공간탄성파시험시 송신공과 수신공 사이 거리를 지반의 특성을 고려하여 가능한 한 짧게 하는 것이 추천된다. ASTM4428의 모식도에는 시추공 사이의 거리가 3 m로 표시되어 있다. 현장에서는 시추비용의 절감을 위해 동일한 지질조건이 연장되어 있을 것으로 예상되는 3 m 정도의 짧은 구간에 탄성파시험을 위해 별도의 시추를 추가하기를 꺼려한다. 따라서 10 m 이상의 거리를 둔 시추공에서 탐사 수행을 요구받는 경우가 흔하다. 시추공의 거리가 먼 경우 지질의 변화에 대한 보정의 문제는 별도로 하더라도 명확한 신호 측정 자체가 힘들다. Fig. 5 (김동수 등, 2005) 와 같이 측정자료의 신호 대 잡음비가 높은 것은 두 시추공 사이의 거리가 3 m로 비교

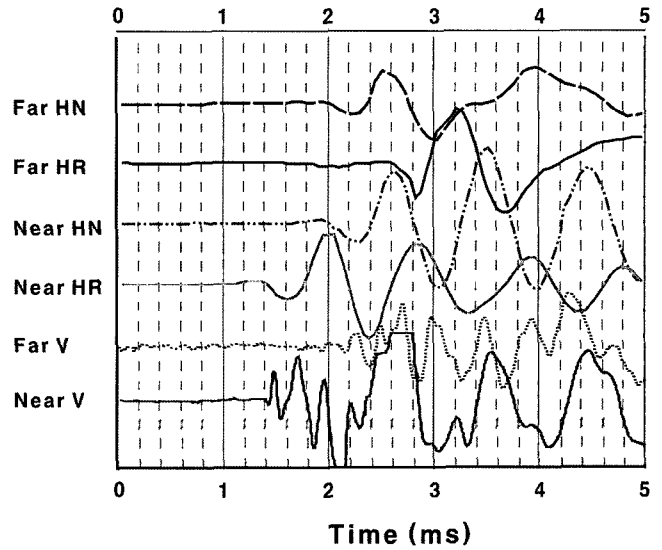


Fig. 6. An example of suspension PS logging when the probe is located within the PVC cased borehole.

적 가깝기 때문일 것이다. 하향식탄성파시험도 횡파 송신원의 한계로 인해 가탐심도가 그리 깊지 않은 것 같다. 일반적으로 가탐심도가 30 m를 넘는 경우는 드물다고 경험하였다.

4) 케이싱의 속도

시추공내에 케이싱이 설치되어 있을 경우의 음파검층 반응은 케이싱의 영향을 받아 케이싱이 없는 나공일 경우와 다른 양상을 보인다. 부유형 PS 검층기와 같은 쌍극자 음원의 경우 송신원이 시추공 중심에 위치하면 쌍극자 모드에 해당하는 파만 생성하나 만약 centralizer를 사용하지 않는다면 시추공이 경사지거나 굴곡진 부분에서 측정 시 검층기가 시추공 중심축에서 벗어난 상황이 된다. 중심축에서 벗어나면 이론적으로 단극자, 쌍극자, 사극자(quadrupole) 등의 모든 다극자 음원에 해당하는 파를 생성하게 된다(Schmitt, 1993). 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 등에 의해 매질로부터의 신호에 대한 신뢰도가 떨어지며 이는 특히 주로 쌍극자 송신원으로 사용하는 저주파수 송신원에서 두드러진다.

Fig. 6은 풍화층에 설치된 PVC 케이싱 내에서 취득한 부유

형 PS검층 자료이다. V로 표시된 부분이 종파이며, H로 표시된 부분이 횡파이다(R은 N에 대하여 방향역전을 의미). 종파의 초동시간과 횡파의 초동시간이 거의 동시에 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이는 PVC 케이싱과 관련되어 발생한 에너지의 간섭 때문으로 해석된다.

시추공내의 파동전파 특성에 대하여는 석유탐사나 생산에 쓰이는 시추공을 대상으로 주로 연구되었다. 석유탐사에 사용되는 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. 참고로 GeoVision Geophysical Services (2002)는 속도 측정에 적합한 시추공경이 10 ~ 20 cm임을 제시하기도 하였다.

케이싱의 영향에 대한 좀더 깊은 이해와 그 대책을 수립하기 위해서는 위에서 열거한 모든 상황을 전부 고려하기 위한 수치모형연구가 필요하다.

음원의 주 주파수 변화에 따른 탄성파 속도 측정값 변화 가능성

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 탄성파 속도는 현지 지반의 다양한 환경을 포함하기 때문에 이러한 차이를 보이는 것이라 간주하고 있다.

VSP 탐사를 이용하여 획득한 구간속도와 음파검층으로부터 얻은 탄성파 속도 사이에 나타나는 차이에 대하여 1980년대와 1990년대에 많은 연구가 심도 있게 수행되었다 (Stewart *et al.*, 1984; De *et al.*, 1994). 본 논의에서 음파검층은 부유형 PS 검층에 적용될 수 있으며 다운홀시험은 VSP탐사에 준하여 설명될 수 있다. Stewart *et al.* (1984)은 두 방법으로부터 구한 속도들의 차이에 대해서 다음과 같이 크게 세 가지 이유를 제시하였다.

(1) 사용하는 송신주파수와 송수신기 배열간격 차이로 인해 측정되는 매질 규모 차이: 음파검층에서 측정되는 속도는 고주파수 성분(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 수 십 내지 수 백 m 를 전파한

주행시간에 기초로 속도를 얻는다. 따라서 음파검층의 경우 시추공으로부터 수십 cm 이내에 있는 매질의 특성을 반영하는 반면 VSP의 경우는 수 m 이내에 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.

(2) 각 탐사에 쓰이는 측정장치의 오차와 자료분석 시에 발생할 수 있는 부정확성: 음파검층의 경우 두 수신기 도달된 시간차를 이용하는 반면 VSP 탐사의 경우 지표에 위치한 송신부로부터 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 주파의 발체방법 또한 측정 자료에서 구한 속도값에 영향을 끼친다.

(3) 두 탐사방법에서 이용되는 파의 서로 다른 전파 특성: 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 짧은 거리의 다중반사파(short-path multiples)와 파의 분산현상이다. 먼저 짧은 거리의 다중반사파들은 원래의 파형을 최대지연 파형요소의 모양으로, 즉 주 에너지가 원래보다 나중에 도달하는 것처럼 변형시킨다. 두 번째로 우리가 사용하는 대부분의 지표탄성파 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 탄성파 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).

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

이는 저주파 음원을 사용하는 기법일수록 측정되는 속도는 낮게 나타날 수 있음을 지시한다. 자료측정 시에 주파수의 영향은 앞의 ‘자료취득 과정’에서 논의한 바 있듯이 측정기준시간의 측면에서 threshold 값을 너무 높게 주면 기준시간의 지연이 발생되어 저주파 음원의 경우 동일한 초동에 대하여 짧은 주시처럼 보일 수 있게 한다(속도를 더 높게 계산할 수 있다). 그러나 비교적 먼 거리를 진행한 초동에너지가 완전한 진폭

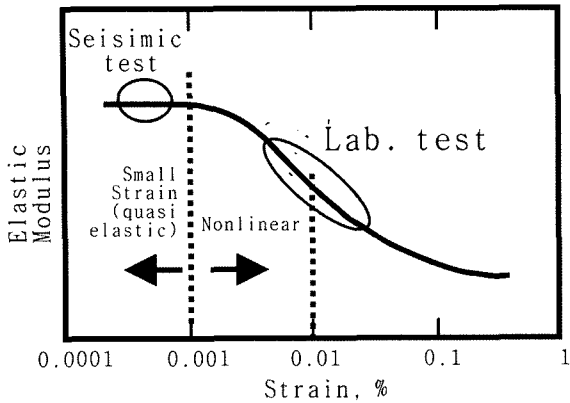


Fig. 7. Elastic modulus versus strain.

상승곡선을 보이면 실제보다 오히려 늦은 시간으로 초동을 발체할 수 있다. 이 경우에는 동일한 초동에 대하여 더 느린 주시처럼 보일 수 있게 한다. 인위적인 방식의 초동 발체는 해석자의 주관에 영향을 받는 데, 저주파일수록 현실적으로 더 큰 영향을 받을 수 있다.

동탄성계수와 정탄성계수와의 차이

속도검층을 비롯하여 탄성파속도에 의해 구해지는 포아송비를 포함한 탄성계수들은 이른바 동탄성계수이며 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{포아송비}(\nu): \nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]}$$

$$\text{동전단계수}(G_d): G_d = \rho V_s^2$$

$$\text{동탄성계수}(E_d): E_d = 2G_d(1 + \nu) \tag{2}$$

$$\text{동체적계수}(K_d): K_d = E_d/3(1 - 2\nu)$$

여기서, V_p , V_s : P파, S파속도, $\rho = \gamma/g$, γ = 단위중량, $g = 9.81$ m/sec.

이들은 실내 역학시험 등으로부터 구한 정탄성계수와는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 즉 동일시험편에 대하여도 동탄성계수는 정탄성계수보다 크게 나타난다. 이는 탄성파시험은 0.001% 이하의 미세 변형을 영역에서 수행되지만 실내시험은 0.01% 내외의 비선형구간에서 수행되는 원리상의 차이이기 때문이다 (Fig. 7). 일례로 동포아송비는 연약지반에서는 거의 0.5에 가까운 값을 보이며 일반 퇴적층이나 풍화층에서도 0.45 이상의 값을 보이는 경우가 대부분이다. 안타까운 현실이지만 국내의 내진설계자들의 일부는 이러한 동적물성과 정적물성의 차이를 모르거나 간과하고 있다. 심지어 계산된 동탄성계수가 너무 크다고 시험의 신뢰도를 의문시하는 경우도 있다. 따라서 물리탐사인들은 이러한 시험결과를 전달하는데 덧붙여 차이점을 인식시켜주는 역할도 하여야 한다.

기본 제안

천부지반환경의 속도검층에서 고려해야 할 사항 또는 해결해야 할 문제들을 열거하고 이에 대한 대응방안을 구하고자 하는 것이 본 논제의 목표이다. 이에 대한 것은 향후 지속적으로 충분한 논의가 필요하다. 또한 이론 및 실험 연구도 뒷받침되어야 하는데, 특히 검층기의 직경보다 불과 2~3 cm 정도밖에 크지 않은 시추공 내에 설치된 PVC 케이싱 내에서 쌍극자 음원을 이용한 음파검층 파동 전파에 대한 수치모델링 연구가 시급하다 할 수 있으며, Georgi et al. (1991)처럼 시추공 내에 케이싱의 설치 전·후에 대한 음파검층을 수행하여 측정자료를 비교하는 연구도 필요하다.

천부지반환경에서 신뢰도 높은 속도검층을 수행하기 위해서는 자료 취득 단계부터 주의를 기울여야 한다. 이 중 가장 현장에서 부주의한 것이 케이싱에 관련된 것이다. 시추공은 가급적 케이싱을 설치하지 않고 자립할 수 있도록 천공하는 것을 요구하여야 한다. 케이싱 설치가 불가피할 경우, 케이싱의 배면과 주변 지층과의 접합이 완전하도록 그라우팅을 수행하도록 한다. 자료의 처리는 주로 초동발체와 관련된 사항으로서 기준시간의 불확실성에 대하여 인식하고 측정 시부터 송신원을 동시에 측정하여 기준시간의 변화에 대한 보정을 수행하여야 한다. 이는 음원의 주 주파수 차이에 따른 탄성파 속도의 변화와도 깊은 관련이 있을 것으로 추측한다. 가장 난감한 경험은 속도검층에 의해 구해진 탄성계수의 특성을 일부 토목설계자들이 오해하고 있는 것이다. 탄성파속도에 의해 구해지는 탄성계수는 동적특성을 반영하고 있으므로 자료에 나오는 정탄성계수와 큰 차이를 보이는 것이 당연하다. 간혹 내진설계자들이 이러한 차이에 대한 기본지식이 부족한 경우를 보이는데 이에 대한 적절한 이해를 시키는 것이 필요하다.

참고로 많은 지반시험이 ASTM에 규정되어 있으나 물리탐사법에 관련된 것은 많지 않다. 이는 물리탐사 기법은 탐사환경에 따라서 일괄적인 방법으로 정리하기 어렵기 때문일 것으로 해석된다. 물리탐사 과정을 일반적으로 규정하는 것이 합당한지에 대하여는 논의의 여지가 있겠으나, 가능한 한 많은 기법에 대하여 가장 기본적인 것이라도 규정화 하는 것이 품질관리를 위해 필요하다고 사료된다.

참고문헌

김동수, 고흥범, 김영수, 방은석, 신형욱, 윤진성, 이양로, 장현삼, 2005, Round robin test를 통한 공내 탄성파 탐사 기법 비교 연구, 한국지반공학회 2005 봄 학술발표회 특별 Session 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round robin test 결과 발표, 73-88.
 목영진, 선창국, 김정환, 정진훈, 박철수, 2005, 횡방향 발전 크로스홀 탄성파 시험을 이용한 지반의 동적 특성 평가, 제7회 특별심포지엄 논문집, 한국물리탐사학회, 전남대학교, 155-175.

- Aki, K., and Richard, P. G., 1980, Quantitative Seismology: Theory and methods, v.II, W. H. Freeman Co.
- ASTM D4428/D4428M-91, *Standard Test Method for Crosshole Seismic Testing*, ASTM International.
- 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.
- GeoVision Geophysical Services, 2002, *P-S suspension logging borehole B-2*, GeoVision Suspension Logging Report.
- Georgi, D. T., Heavysege, 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.
- 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.