

시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적 응용

장현삼, 임해룡, 홍재호 ((주)쓰리텍)

Borehole Seismics: Review and Its Application to Civil Engineering

Chang, Hyun-Sam, Lim, Hae-Ryong, Hong, Jae-Ho (ThreeTECH Co., Ltd)

요 약: 지반조사를 위하여 흔히 시행하는 시추공 탄성파탐사, 즉 하향 탄성파탐사(downhole seismic), 수직 탄성파탐사(vertical seismic profiling; VSP), 시추공간 속도측정(crosshole seismic), 탄성파 토모그래피(seismic tomography)에 대하여 원리, 현장측정, 자료처리 등을 간략히 설명하고, 현장자료의 예를 제시하였으며 토목공학적 응용에 대해 검토하였다.

주요어: 하향 탄성파탐사, 수직 탄성파탐사, 시추공간 탄성파탐사, 탄성파 토모그래피

Abstract: Principles, data acquisition, data processing of four frequently used borehole seismic methods, i.e., downhole seismic, vertical seismic profiling(VSP), crosshole seismic, and seismic tomography, are reviewed briefly. Field data examples are presented and their application to civil engineering area was also discussed.

Keywords : Downhole, VSP, Crosshole, Tomography

1. 서 론

최근 각종 토목 및 건축공사의 지반조사를 위하여 물리탐사 방법이 널리 쓰이기 시작하고 있다. 현재까지 이러한 물리탐사에 의한 지반조사는 층서구조 파악, 단층/파쇄대 등 연약대의 파악, 지하공동 존재유무 파악 등 지하구조를 가시화 하는 정량적 목적에 주로 이용되었다. 그러나 산업사회의 발달과 인구증가로 인하여 가용 국토면적이 점점 좁아지고, 토목/건축 기술의 발달로 종래에는 생각하기 힘들었던 대형 구조물들이 점점 증가하고 있고, 또한 점차 지하화하는 추세에 있다. 즉 장대 터널 및 교량, 지하 에너지 비축기지, 원자력 발전소, 초고층 빌딩 등 유사시 사회에 큰 파급효과를 미치는 사회 간접시설 및 대형 구조물들이 점증하고 있다.

현지 지반에서의 정확한 탄성파 속도측정은 지반굴착, 암 발파설계, 터널 및 사면의 안정성 검토, 내진설계 등 토목/건축 구조물의 설계 및 시공을 위하여 매우 중요하다. 즉, 현지 암반의 탄성파속도 측정치는 암반의 탄성파 속도측정치 및 각종 실내 시험값과 더불어 암분류, 지반의 안정성 검토 등 설계/시공을 위하여 매우 중요하게 사용되고 있으며, 이로부터 산출한 각종 동탄성계수는 내진설계에 필수적이다.

한반도의 경우 지진에 비교적 안전한 것으로 간주되어 일반적인 구조물의 경우 내진설계를 거의 하지 않았고(내진설계의 경우 주로 건물 자체의 내진설계에 치중하였고, 지반과 구조물의 상호 거동 분석, 즉 soil-structure-interaction이나 동적분석, 즉 dynamic analysis에 의한 내진설계 개념은 적은 편이었음), 또한 지진으로 인한 큰 물적, 인적 피해는 아직 발생하지 않았다고 볼 수 있다. 그러나 홍성 지진과 같은 비교적 큰 규모의 지진이 몇 차례 발생한 적이 있고, 현재 논란이 되고 있는 활성단층의 존재여부, 이웃 일본에서

의 지진발생 빈도 증가, 국지적 소규모 지진의 발생 등 여러 가지 여건을 고려하여 볼 때 한반도도 결코 지진으로부터 안전하다고 볼 수는 없다. 앞서 언급한 바와 같이 사회적 중요성을 갖는 대형 토목/건축 구조물의 증가로 지진 발생 시 과거와는 비교가 되지 않는 물적, 인적 피해가 예상되는데, 이는 비교적 내진 설계가 잘 되어 있다는 이웃 일본의 경우도 예외는 아니다.

국내의 경우 최근 학계를 중심으로 한반도에서의 과거 지진분석에 의한 내진설계 기준 마련 시도가 일고 있으며, 업계의 경우도 과거에는 생각하지 않았던 터널의 경우도 점차 내진 설계를 도입하려는 시도가 일고 있다. 이러한 내진 설계를 위해서는 지반의 정확한 원위치 탄성과 속도뿐만 아니라 이에 기초한 각종 탄성계수의 산출이 필수적인 바, 본 논문에서는 시추공 탄성과 탐사법에 대하여 그 원리, 자료처리 및 해석 등에 대하여 논하고 현장자료의 예를 제시하고, 이들의 토목공학적 응용에 대하여 논하고자 한다.

2. 시추공 탄성과 탐사

2.1 시추공 탄성과 탐사법

지반조사를 위한 물리탐사법은 크게 공중 탐사법(airborne survey), 지표 탐사법(surface survey) 및 시추공 탐사법(borehole survey)으로 나눌 수 있다. 이 중 시추공 탐사는 일반적으로 공중탐사나 지표탐사를 수행하여 개괄적 지반현황을 파악 한 후 좀더 정밀한 조사를 위하여 수행하는데, 세 방법 중 가장 정밀도가 뛰어나고 설계에 필요한 지반의 물성치 산출에 유리하다고 할 수 있으나 시추공 주변의 국지적 조사에 국한되고, 비교적 비용과 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다.

근본적으로 지표에서 시행할 수 있는 모든 탐사법을 시추공에 적용 할 수 있다. 이 중 탄성과(seismic wave)를 이용한 시추공 탐사법에는 한 개의 시추공을 이용하는 하향/상향 탄성과탐사(uphole/downhole seismic) 및 수직 탄성과탐사(vertical seismic profiling; VSP)와, 두 개의 시추공을 이용하는 시추공간 속도측정(crosshole seismic) 및 탄성과 토모그래피(seismic tomography)가 있다(그림 1). 상향 탄성과탐사는 하향 탄성과탐사와 반대로 시추공내에서 탄성과를 발생시키고 지표에서 수신하는 형태로 자료처리 및 탐사목적은 같으나 자료획득이 더 어려워 잘 시행하지 않는 방법이므로 논의에서 제외하였다. 이 중 하향 탄성과탐사와 수직 탄성과탐사는 하향 탄성과탐사의, 탄성과 토모그래피는 시추공간 속도측정의 한 단계 발전된 형태로, 측정 원리는 같으나 자료획득 및 자료처리 과정이 더 복잡하고 시간이 많이 걸리는 반면 더 정확하고 다양한 정보를 얻을 수 있다는 잇점이 있다.

한 개의 시추공을 이용하는 하향 및 수직 탄성과 탐사의 경우 지표에서 탄성과를 발생시키고 시추공에서 진동을 감지한다는 면에서는 같으나 탐사의 목적과 자료처리에 큰 차이가 있다. 즉 하향 탄성과탐사의 경우 탄성과 속도에 의한 암반구분과 이에 기초한 층별 각종 동탄성계수(dynamic elastic moduli)의 산출이 목적으로 심도에 따라 직접 전달되는 P 파 및 S 파 초동의 도달시간이 주된 측정 대상이다. 반면, 수직 탄성과탐사는 코어 회수를 하지 않는 대구경, 대심도 시추공에서 지층의 정확한 층서 구분을 위하여 주로 사용되는데 직접파(direct waves) 뿐만 아니라 반사파(reflected waves) 등 전 파형을 기록하며, 일반적으로 지표 탄성과탐사에 적용되는 자료처리 과정이 적용된다.

시추공간 속도측정과 탄성과 토모그래피의 경우 한 시추공에서 탄성과를 발생시키고 인접한 다른 시추공에서 이를 기록하는 방법으로 그 측정원리는 같다. 탄성과 발생원과 수

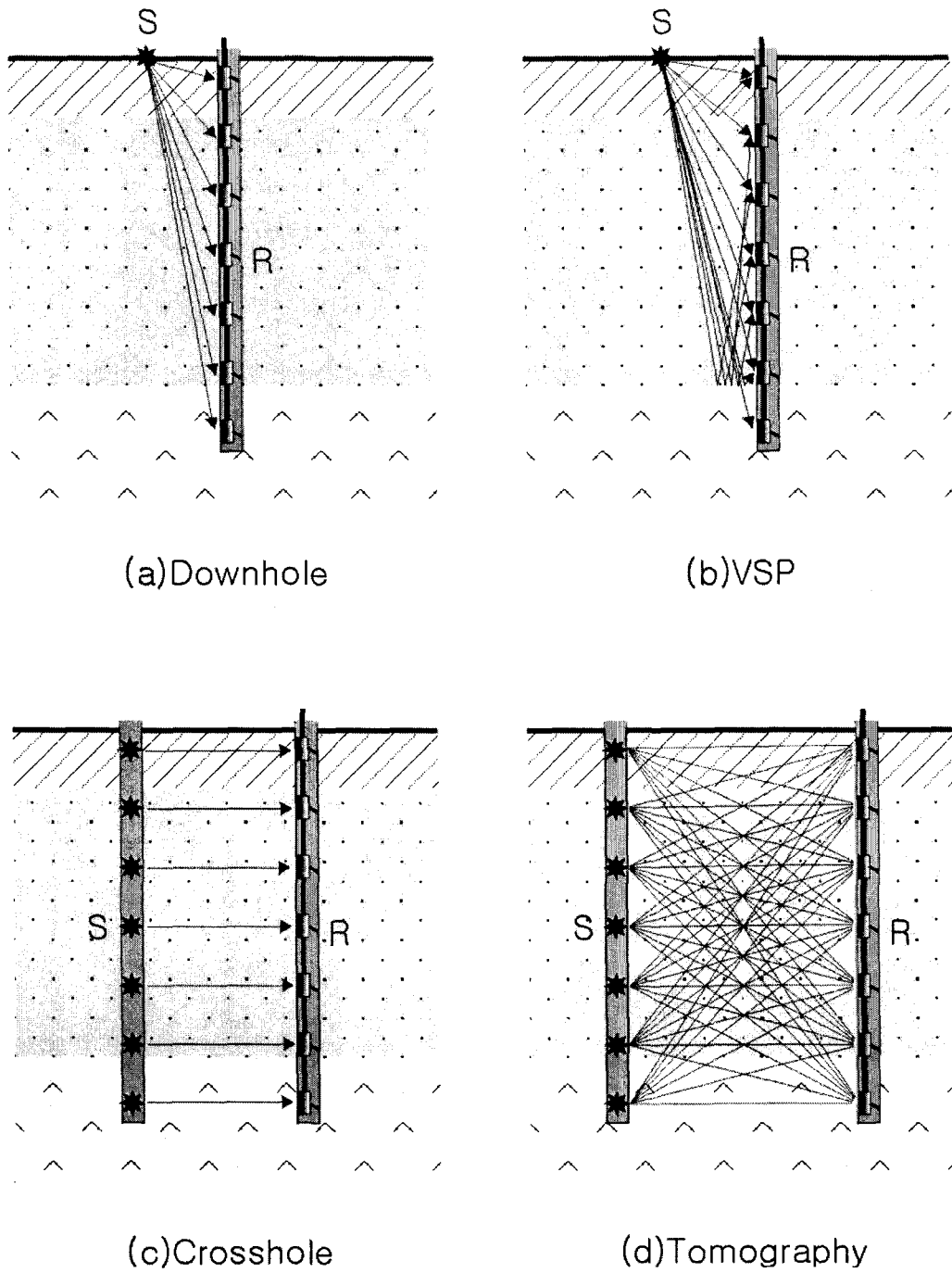


Fig 1. Schematics of common borehole seismic investigations

Table 1. Comparison of borehole seismic methods

	Downhole Test	VSP	Crosshole Test	Geotomography
탐사목적	-탄성파속도 측정 -층서구분 -탄성계수 산출	-층서구분 -시추공 하부 지층구조 예측	-탄성파속도 측정 -층서구분	-지층구조 단면 산출 -연약대 파악 -층서구분
송,수신기 위치	발생원-지표 수신기-시추공내	발생원-지표 수신기-시추공내	발생원-시추공내 수신기-시추공내	발생원-시추공내 수신기-시추공내
측정	심도별 P파 및 S파 초동도달시간	직접파, 반사파 등 전파형 기록	심도별 초동 도달시간	여러 각도에서 도달하는 초동의 도달시간이나 진폭
자료처리	심도-도달시간 그림으로부터 구간속도 산출	지표 탄성파탐사 자료처리 적용	시추공간 거리 도달시간	역산(inversion)
비고	역전층, 두꺼운 표토층 존재시 불리	코아회수 하지않는 대구경, 대심도 시추공 적용	비교적 수평적 지층구조에 적용	가장 정확하나 시간,비용이 많이 듦

신기를 같은 심도에 위치시키고 이를 일정한 간격으로 이동하면서 두 시추공 사이의 평균속도를 구하는 것이 시추공간 속도측정이다. 이에 비해 탄성파 토모그래피는 두 시추공 사이에서 여러 각도로 탄성파를 주고받은 다음 이를 처리하여 두 시추공 사이를 영상화하는 방법으로 의학용 CT촬영의 원리를 지반조사에 이용한 것이다. 따라서 시추공간 속도측정에 비해 자료획득 및 처리 과정이 훨씬 복잡하나 이상지역의 정확한 형상을 2차원 적으로 영상화 할 수 있다는 장점이 있다. 표 1은 각 시추공 탐사법을 간단히 요약한 것이다.

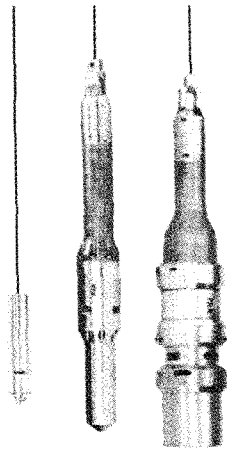
2.1 탄성파 발생원 및 수신기

시추공 탄성파탐사의 경우 지표에서의 탄성파의 발생을 위해서는 일반적 지표 탄성파 탐사와 마찬가지로 dynamite, weight drop, sledge hammer, vibroseis 등을 쓸 수 있고, 시추공 내에서의 탄성파 발생을 위해서는 전기뇌관(혹은 소량의 폭약), mechanical hammer, 시추공용 vibroseis 등 다양한 시스템들이 개발되어 있다. 수신 장비의 경우 하이드로폰(hydrophone)이나 지오폰(geophone)을 사용하는데, 하이드로폰의 경우 물(공내수)을 통하여 진동을 감지하므로 시추공벽에 밀착(clamping)시킬 필요가 없다. 따라서 여러개의 하이드로폰을 일정한 간격으로 연결하여 만든 hydrophone chain을 사용하여 신속하게 자료획득을 할 수 있으나, 공내수가 반드시 있어야 하고 종파(P파)의 감지만 가능하다는 단점이 있다. 시추공용 지오폰의 경우 고무 튜브나 clamping arm을 이용하여 시추공벽에 지오폰을 밀착한 다음 3성분(두개의 수평, 한 개의 수직성분) 측정을 하게 되는데, 케이블 및 clamping device의 무게로 대개 8개 내의 지오폰 체인을 사용하므로 자료획득에 더 많은 시간이 걸리나 P파 뿐만 아니라 S파의 측정도 가능하다는 장점이 있다. 표 2는 시추공 탄성파탐사를

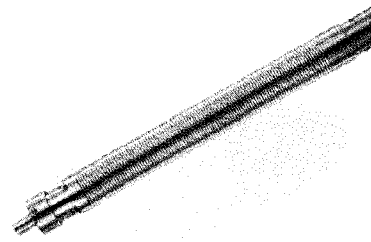
위하여 흔히 사용되는 발생원 및 수신기를 비교한 것이고, 그림 2는 이들의 모습을 보여준다.

Table 2. Comparison of sources and receivers for borehole seismic survey

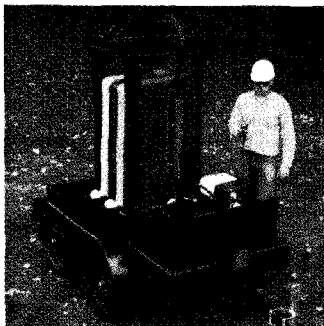
종류		방법	원리	비고
탄성과 발생원	지표 발생원	Dynamite	화약발파	-파형이 깨끗하고, 이동성 좋음 -S파 발생에 불리함 -조사심도 깊으나 발파허가 필요
		Weight Drop	무거운 하중 낙하	-이동성이 좋지 않음 -S파 발생이 힘들
		Sledge Hammer	대형 망치이용	-P파 및 S파 발생용이 -산악지형에 유리(이동성 좋음) -조사심도 얕음
		Vibroseis	기계적 진동	-이동성 좋지 않음 -자료처리 불리
	시추공 발생원	전기뇌관 (or small explosives)	뇌관발파	-파형이 좋고, 조사범위 넓음 -스틸 케이싱 및 공내수 필요 -조사속도 느림
		Mechanical Hammer	기계적 충격	-조사범위 제한 -공내수 혹은 clamping 장치 필요
		Vibroseis	기계적 진동	-강력한 clamping 필요 -자료처리 불리
		Air Gun	압축공기(가스) 이용	-파형이 좋지 않음(버블현상) -이동성 불리
시추공 수신기	Geophone	Mechanical Clamping	소형모터에 의한 Clamping arm or Leaf spring	-P 및 S파, 3성분 측정 -무거워 다중체인 제작에 한계
		공기튜브 방식	공기펌프 이용	-이동성 좋고, 3성분 측정 -수신파형 좋지않음(ringing 현상) -다중채널 불리
	Hydrophone	공내수 통한 진동감지	-P파만 측정 -가벼워 다중체인 제작 유리 -공내수가 있어야 함	



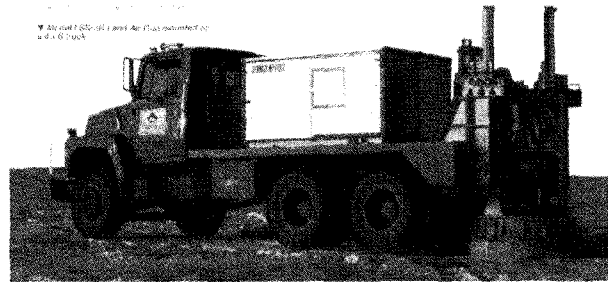
시추공 air gun



Mechanical Hammer



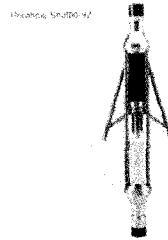
Weight Drop



육상 air gun



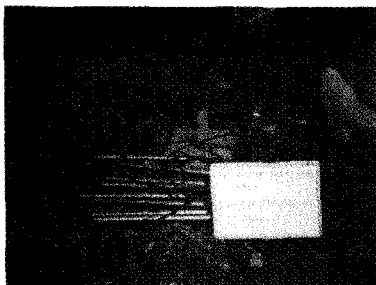
Clamping Geophone
(air pump type)



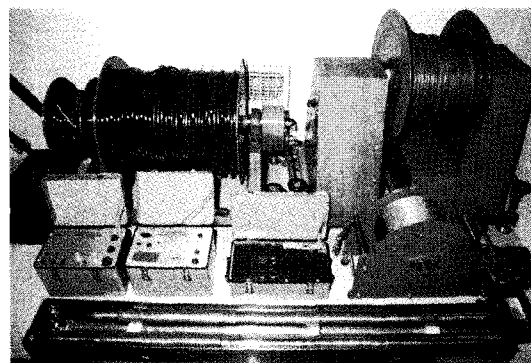
Clamping Geophone
(clamping arm type)



Hydrophone



3-C 지오폰 체인



시추공 탄성파탐사 장비

Fig 2. Various sources and receivers for borehole seismic

3. 암반의 탄성과속도 및 탄성계수

전술한 바와같이 시추공 탄성과탐사의 목적은 지반의 탄성과 속도 측정에 의한 지층 구분과 이에 근거한 암분류 및 각종 동탄성계수의 산출을 시행하여 설계 및 시공의 기초자료를 제공하는데 있다. 특히 각종 건설현장에서의 굴착설계, 발파설계, 사면(법면)의 안정성 검토, 터널의 안정성 검토, 내진설계 등을 위해서는 암반의 정확한 탄성과 속도측정과 이에 의한 암반의 평가가 필수적이다.

3.1 암반의 탄성과 속도

암반의 탄성과 속도는 암종, 암석의 강도, 불연속면(절리)의 발달정도, 풍화정도, 투수(지하수) 특성 등 여러 요인에 좌우된다. 일반적으로 흔히 사용되는 암반 분류법, 즉 탄성과 속도에 의한 분류, 속도지수(Velocity Index)나 속도비(Velocity Ratio)에 의한 분류(Coon and Merritt), 균열계수에 의한 분류 등은 전적으로 탄성과 속도를 암반을 분류 기준으로 삼는 것이고, RQD(Deere), R.M.R(Rock Mass Rating, Bieniawski), R.S.R, Q-system (Barton) 등은 암반의 탄성과 속도 외에 다른 여러 가지 요소를 감안한 암반 분류법이다.

표 3은 토사층, 암석 및 기타 물질에서의 탄성과 P파 및 S파 속도, 푸와송비

Table 3. Seismic velocities of soil, rock and common materials

매질종류		P파 속도 (m/sec)	S파 속도 (m/sec)	푸와송비	밀도 (g/cm ³)
충적층	점성토	250~700	80~160	0.35~0.50	1.3~1.7
	사질토	(1500-포화토의	60~200		1.6~2.0
	사 력	경우)	250~350		1.8~2.1
홍적층	점성토	1000~2000	160~250	0.35~0.50	1.4~1.8
	사질토	(1500-포화토의	200~350		1.7~2.1
	사 력	경우)	300~600		1.8~2.2
암 석	이암	2000~3000	600~1000	0.30~0.40	2.2~2.6
	사암	2000~3500	700~2000		2.5~2.7
	화강암	4000~5700	2100~3300	0.25~0.35	2.6~2.8
		현무암	4400~6700		2500~3800
상부맨틀		7500~8000	4300~4600	≈0.25	≈3.3
공기(건조, 0°C, 1기압)		331	-	-	0
물(중류수, 23~27°C)		1500	-	-	1.0
얼음		3230	1600	0.338	0.338
콘크리트		3100	1960	0.167	2.3
철		5950	3240	0.289	7.86

(Poisson's Ratio), 밀도 등을 보여주고 있다. 현지 토사층 혹은 암반의 경우 풍화정도, 균열의 발달 정도 등 여러 가지 요인에 의해 속도변화가 크므로 일반적 기준으로만 사용하여야 할 것이다.

탄성과 속도에 의한 암반분류 기준은 여러 가지가 있으며, 각국이 자국의 실정에 맞는 기준을 정하여 사용하고 있다. 표 4는 건교부 표준품셈에 따른 암반분류를 보여주고 있으며, 표 5는 화성암과 변성암의 풍화도 및 파쇄도에 따른 분류를 보여주고 있다.

Table 4. Rock classification by seismic velocities(건설부, 표준품셈)

암 구분	그룹	자연상태의 탄성과속도 (km/sec)	암편의 탄성과속도 (km/sec)	암편 내압강도 (kg/cm ²)	비 고
풍화암	A	0.7 ~ 1.2	2.0 ~ 2.7	300~700	<내압강도> 1.시편:5cm 입방체 2.노건조:24시간 3.내압시험 4.시험방법(가압방향) z축(결면에 수직) (탄성과속도가 가장 느린 방향) <암편탄성과 속도> 1.시편:두께 15~20cm 상하면이 평행면 2.측정방향 x 축 (탄성과속도가 가장 빠른 방향) (결면에 평행)
	B	1.0 ~ 1.8	2.5 ~ 3.0	100~200	
연암	A	1.2 ~ 1.9	2.7 ~ 3.7	700~1,000	
	B	1.8 ~ 2.8	3.0 ~ 4.3	200~500	
보통암	A	1.9 ~ 2.9	3.7 ~ 4.7	1,000~1,300	
	B	2.8 ~ 4.1	4.3 ~ 5.7	500~800	
경암	A	2.9 ~ 4.2	4.7 ~ 5.8	1,300~1,600	
	B	4.1 이상	5.7 이상	800 이상	
급경암	A	4.2 이상	5.8 이상	1,600 이상	

암의 분류에서 A, B 그룹의 비교

구 분	A	B
대표적 암명	편마암, 사질편암, 녹색편암, 각섬암, 석회암, 사암, 휘록암, 응회암, 역암, 화강암, 섬록암, 감람암, 사교암, 유문암, 안산암, 현무암	흑색편암, 녹색편암, 휘록응회암, 셰일, 이암, 응회암, 집괴암
함유물 등에 의한 시각판정	사질분, 석영분을 다량 함유하고, 암질이 단단한 것, 고결정도가 높은 것	사질분, 석영분이 거의 없고 응회분이 많은 것, 판매상인 것
500~1000g 햄머의 타격에 의한 판정	타격점의 암은 작고 평평한 암편으로 되어 흐뜨러지거나 거의 암분을 남기지 않는 것	타격점의 암 자신이 부서지지 않고, 분상이되어 남으며, 암편이 별로 흐뜨러지지 않는 것

Table 5. P-wave velocities and description of rocks based on weathering and fracture developments

구분	등급	P파속도(m/s)
신선한 기반암	F	5000 이상
약간풍화/균열간격 넓은	WS	4000-5000
중간풍화/균열간격 중간	WM	3000-4000
심한풍화/균열간격 좁음	WH	2000-3000
풍화암	WC	1200-2000
풍화토(치밀)	RS	600-1200
풍화토(느슨)	RS	300-600

그 외 속도비(Velocity Ratio), 속도지수(Velocity Index), 균열계수(C_r) 등에 의하여 암반을 분류할 수 있는데, 이들은 각각

$$\text{Velocity Ratio} = V_F / V_L$$

$$\text{Velocity Index} = (V_F / V_L)^2$$

$$C_r = 1 - (V_F / V_L)^2$$

로 정의되며, 여기서 V_F = 현장에서 측정한 암반내 탄성파속도, V_L = 그 암반에서 채취한 균열이 없는 암석(intact rock)에 대하여 실험실에서 측정한 탄성파 속도값(주로 P파)을 나타낸다. 표 6는 속도지수와 균열계수에 의한 암반분류를 보여주고 있다.

Table 6. Rock description by velocity index and C_r

속도지수 (V_F/V_L) ²	균열계수 (C_r)	암반상태	R.Q.D	경험적 양부판변
< 0.2	> 0.80	매우불량	0 - 25	절리, 균열이 현저하고 풍화, 변질이 심함
0.2 - 0.4	0.65 - 0.80	불량	25 - 50	절리, 균열이 뚜렷하고, 포화 점토 충전물로 가득참, 암질은 상당부분 변질
0.4 - 0.6	0.50 - 0.65	보통	50 - 75	절리, 균열이 상당히 있고, 절리 충전물 약간, 균열부 풍화
0.6 - 0.8	0.25 - 0.50	양호	75 - 90	절리, 균열이 조금 있고, 균열 표면만 풍화
0.8 - 1.0	< 0.25	우수	90 - 100	절리, 균열이 거의 없고, 풍화, 변질 없음

또한 탄성파(P파) 속도에 따라 암반의 굴착난이도(ripperability)를 평가하기도 하는데, 굴착난이도는 암석의 경도나 균열 발달 정도에 따라 결정되며 굴삭기의 리퍼(ripper)로 굴착가능여부에 따른 평가 방법이다.

3.2 탄성계수

암반의 탄성계수는 지반 지내력 평가, 침하량 혹은 변형률 계산, 안정성 검토, 내진설계 등 설계의 기초자료로 사용된다. 암반의 탄성계수는 암편을 채취하여 실내에서 시험하는 방법과 현장시험을 하는 방법이 있다. 또한 주로 재하시험(loading test)에 의해 응력-변형률 관계로부터 구하는 정탄성계수(E_s ; static elastic moduli)와 탄성파를 이용하여 측정하는 동탄성계수(E_d ; dynamic elastic moduli)가 있는데, 정탄성계수는 하중에 의한 암반 변형률 평가를 위하여 주로 사용되며, 동탄성계수는 내진설계 등 암반의 동적분석을 위하여 주로 사용된다. 표 7은 탄성계수 산출을 위한 실내 및 현장 시험방법을 요약한 것이고, 표 8은 탄성계수 산출 공식 및 각종 탄성계수 사이의 관계를 나타낸 것이다.

Table 7. Laboratory and field test methods for static and dynamic elastic moduli

탄성계수	실내시험		현장시험	
	정탄성계수	동탄성계수	정탄성계수	동탄성계수
시험방법	일축압축시험 삼축압축시험 전단시험 등	공진주시험 (Resonant Column Test)	각종 지표/시추공 재하시험 (Plate-jack, radial jacking, pressure tunnel, flat-jack, 공내재하시험(dilatometer or pressuremeter test))	탄성파 굴절법 하향탄성파탐사 시추공간 속도측정 탄성파 토모그래피 음파검층 등
비고	응력-변형률 곡선 이용	탄성파속도와 밀도 이용	재하량과 응력계측 이용	탄성파 속도와 밀도검층 자료 이용

암반이 신선하고 단단할수록 정탄성계수와 동탄성계수는 거의 차이를 보이지 않는다. 그러나, 탄성파가 지속되는 시간이 아주 짧으며 응력의 크기가 미약하기 때문에 일반적으로 동탄성계수가 정탄성계수보다 높게 측정된다. 그러나 동탄성계수의 경우 암종이나 암석의 경도, 절리/균열의 발달정도, 풍화도, 유체 포화도 등에 크게 좌우되므로 일반적으로 적용되는 관계식을 구하기 어렵다. 그림 3은 조사대상 지역에서의 정적-동적 탄성계수의 관계를 구하고 관계식을 유도한 예를 보여주고 있다. 표 9는 암종에 따른 정적 및 동적 탄성계수(영률)와 그 비율을 보여주고 있다. 설계에 입력자료로 사용할 동탄성계수를 결정하기 위해서는 현장시험으로 구한 동탄성계수를 다른 현장시험이나 실내시험을 실시하여 구한 동탄성계수와 대비하여 평가한다.

Table 8. Formulae for static and dynamic elastic moduli

	정탄성계수	동탄성계수	단위
영률	$E = \sigma/\epsilon$	$E_d = 2G(1 + \nu) = \rho \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2/V_s^2 - 1)}$	Kgf/cm ² (psi, bar)
전단계수	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	$G_d = \rho V_s^2 = \frac{E_d}{2(1 + \nu)}$	Kgf/cm ²
체적계수	$B = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$K = \rho (V_p^2 - \frac{4V_s^2}{3}) = \frac{E_d}{3(1 - 2\nu)}$	Kgf/cm ²
구속계수	$D = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$		Kgf/cm ²
푸와송비	$\nu = \epsilon_l/\epsilon$	$\nu = \frac{V_p^2/2V_s^2 - 1}{V_p^2/V_s^2 - 1}$	
P파 속도		$V_p = [(K + 4G/3)/\rho]^{1/2}$	Km/sec
S파 속도		$V_s = (G/\rho)^{1/2}$	Km/sec
밀도		$\rho = \gamma/g$	Kg/m ³

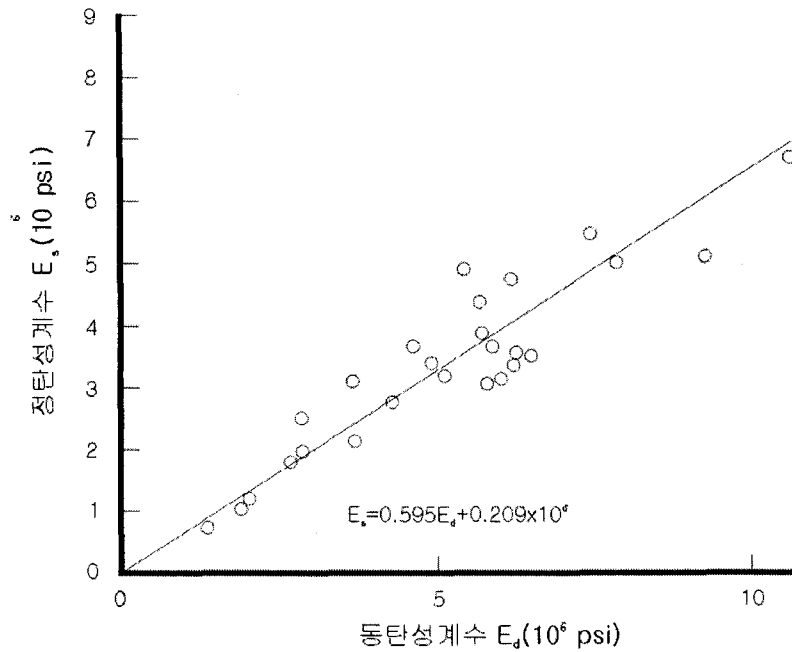


Fig 3. Relationship between static and dynamic elastic moduli

Table 9. Static and dynamic Young's modulus of some rocks

암 종	정탄상계수 $E_s(\text{kgf/cm}^2)$	동탄성계수 $E_d(\text{kgf/cm}^2)$	E_d/E_s
역암	36700~43900	320300	7~9
혈암-사암의 호층	4200~5800	66700	12~16
사암	5000~16500	130000~160000	8~10
세립화강암	3000~10000	93000~174000 109000~204000	9~17 10~20
이암-사암의 호층	8300~8550	49200	5.8~6
	13000~17500	61300	3.5~4.7
	12400~19900	71400	3.6~5.8
반려암	11000	-	-
휘록암	19900	560000	28
세립석영섬록암	18000	434000	24
응회암	100000~160000	430000	2.7~4.3
	100000	445000	4.5
	30000~35000	415000	12~14
	180000~240000	305000	1.3~1.7
점판암	150000~250000	385000	1.5~2.5
	90000	445000	5
세립석영섬록암	18400	-	-
	12900	-	-

4. 하향 탄성파탐사(Downhole Seismic Survey)

4.1 원리

시추공에서 가까운 지표에서 탄성파를 발생시키고 시추공내에 삽입되어 있는 수신기를 통하여 지표에서 직접 전달되는 파를 기록한다. 탄성파의 발생을 위해서는 전술한 여러 가지 지표 발생원을 사용할 수 있으나, 엔지니어링 목적은 얇은 시추공에서는 장비의 이동성이 좋고 P파 및 S파의 발생에 유리한 슬래지 햄머와 평판을 주로 사용한다. 시추공 수신기로는 횡파의 기록을 위하여 클램핑 장치가 부착된 3성분 지오폰을 주로 사용한다. 지표로부터 직접 전달되는 P파 및 S파 초동의 도달시간을 기록하고, 심도-시간 곡선으로부터 구간속도를 구하며, 이와 밀도검층(density logging)에 의한 암층별 밀도자료를 이용하여 동탄성계수 등을 구한다.

4.2 자료획득

양질의 자료로부터 좋은 탐사결과를 얻을 수 있으므로 현장자료 획득은 매우 중요하다. 현장에서의 자료획득을 위하여 고려해야할 주요 사항은 다음과 같다.

1) 시추나 기타 지반조사 자료를 참고하여 조사간격을 결정한다. 지하수위나 파쇄대의 존재, 풍화정도 등도 구간속도에 영향을 미치므로 이를 고려하여 결정한다. 대개 1~5m 정도의 조사간격을 많이 사용한다.

2) 시추공 케이싱이 되어있을 경우 이를 따라 파가 전파되므로 케이싱이 필요한 다른 조사에 앞서 현장자료 획득을 한다. 시추공 붕괴의 위험이 있는 부분만 최소한의 PVC 케이싱을 설치한다.

3) 발생된 탄성파 에너지의 흡수를 막기 위하여 성토층이나 표토층이 존재할 경우 되도록 이를 제거하고, 탄성파 발생을 위한 평판이 지반에 잘 밀착이 되도록 하고 타격에 의하여 움직이지 않도록 한다. 평판의 되로록 시추공 가까이에 위치시켜 에너지가 효율적으로 전달 될 수 있도록 한다.

4) 평판을 수평으로 가격하여 횡파를 발생시킬 경우 반드시 양방향으로 가격하여 180°의 위상차(polarity)를 확인한다. 또한 신호가 미약할 시 여러번 가격하여 이를 중합(stacking) 함으로써 S/N비를 높인다.

5) 자료획득은 시추공 하부에서 상부로 이동하면서 조사하는 상향(uphole)탐사와 반대 방향의 하향(downhole) 탐사를 모두 이용할 수 있으나, 하향탐사로 초동의 도달시간을 추적하여 나가는 것이 유리하다.

6) 3 성분 지오폰을 이용한 횡파 측정시 될 수 있으면 수평성분 측정방향을 햄머 가격방향과 일치하도록 조정하여 최대한의 S/N비를 얻도록 한다.

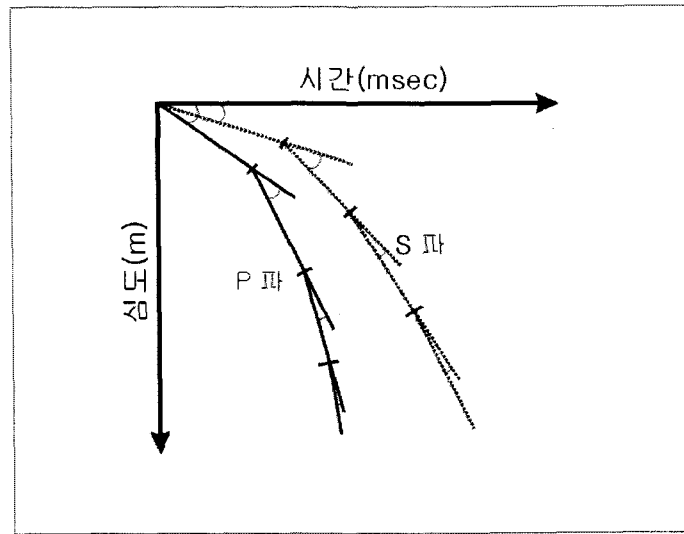
4.3 자료처리

하향탄성파 탐사의 자료처리는 초동발체 및 보정 → 주시(심도-시간) 곡선의 작성 → 구간속도 산출 → 동탄성계수 계산의 순으로 이루어진다.

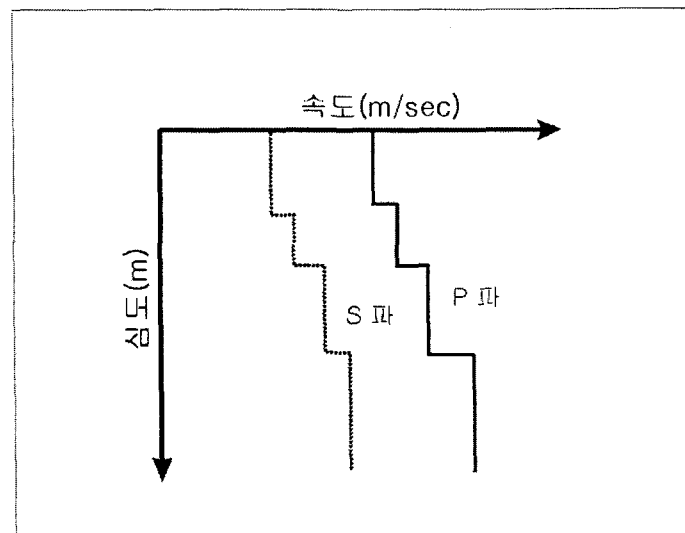
초동주시의 발체는 데이터의 양이 많지 않을 경우 수동피킹이 가능하나 데이터의 양

이 많은 경우 자동피킹을 실시한 후 이를 보정하여 줄 수 있다. 자동피킹을 위해서는 상관법(correlation method), 탐색법(detection method), 스펙트럼 분석법, 예측오차 필터법, 힐버트 변환법 등 여러 가지 알고리즘들이 개발되어 있다. 발체된 초동에 대해서는 시추공과 발생원과의 거리, 케이싱의 영향 등을 고려하여 보정하여 준다.

심도별 P파 및 S파 초동의 도달시간 자료가 만들어지면 이를 심도-시간의 주시곡선으로 작성하고, 직선의 기울기 변화로부터 구간별 속도를 산출한다(그림 4 참조). 암층별 동탄성 계수의 산출을 위해서는 같은 시추공에서 측정된 밀도검층 자료를 이용하는 것이 원



(A)



(B)

Fig 4. (A)Depth-time and (B)interval velocity plot of downhole P and S waves

척이나, 이러한 자료가 없을 시 암편의 실내시험 자료를 이용한다.

4.4 현장자료의 예

현장: 강원도 00지역 시추공 TB17-1

지질분포: 붕적토-풍화토-풍화암-연암-경암 순

자료획득: 발생원-슬레지 햄머, 평판

수신-3성분, clamping(air pump type) geophone, 측정간격 1m

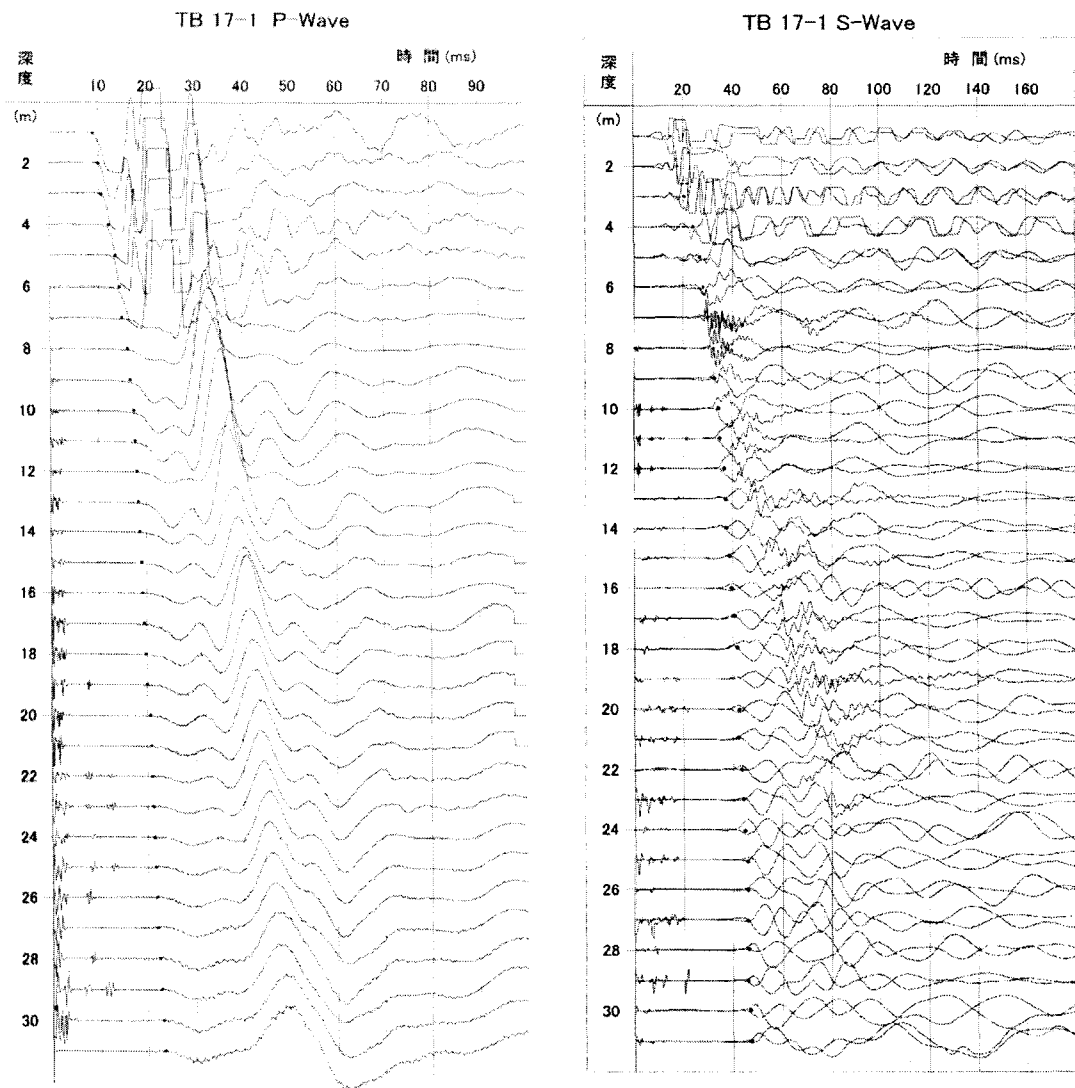


Fig 5. Downhole field data

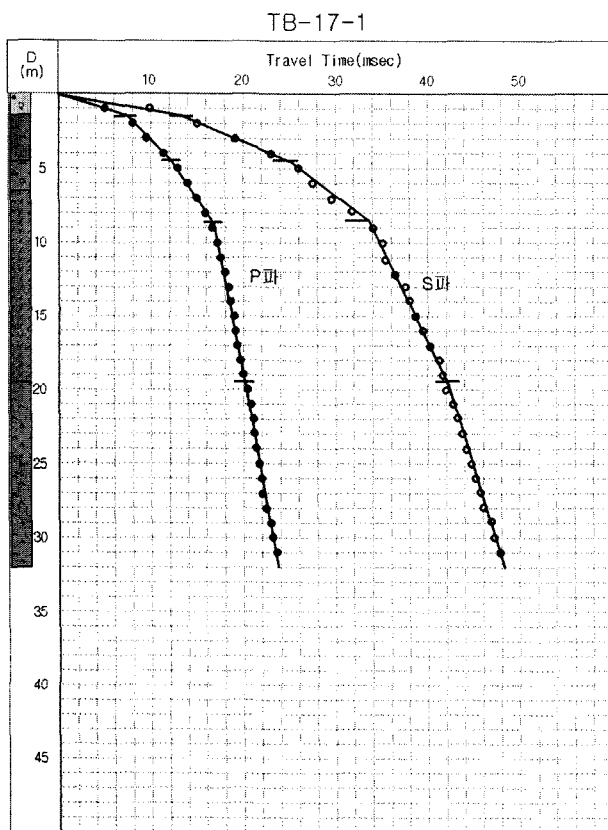


Fig 6. Traveltime(depth-time) plot

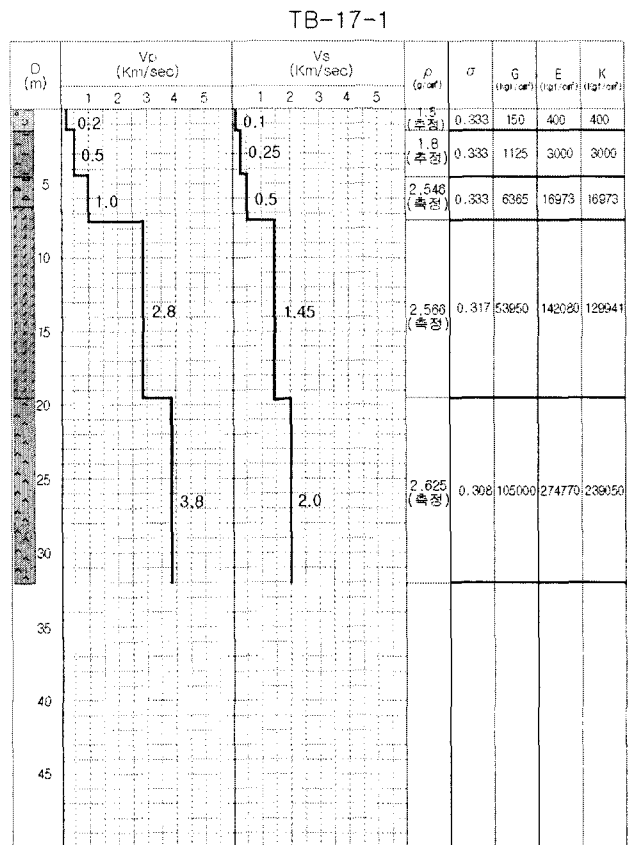


Fig 7. Interval velocity and elastic constants

Table 10. Summary of downhole seismic survey results

암구분	심도구간 (m)	Vp (Km/sec)	Vs (Km/sec)	Vp/Vs	포와송비	전단계수 (Kgf/cm ²)	영률 (Kgf/cm ²)	체적탄성률 (Kgf/cm ²)	적용밀도 (g/cm ³)
풍화토	1.4-4.5	0.5	0.25	2.000	0.333	1125	3000	3000	1.8
풍화암	4.5-8.5	1.0	0.5	2.000	0.333	6365	16973	16973	2.546
연암	8.5-19.5	2.8	1.45	1.931	0.317	53950	142080	129241	2.566
경암	19.5-32.0	3.8	2.0	1.900	0.308	105000	274770	239050	2.625

5. 수직 탄성파탐사(VERTICAL Seismic Profiling; VSP)

5.1 원리

수직 탄성파탐사의 원리는 하향 탄성파탐사의 원리와 같으나, 하향 탄성파탐사에서는 지표로부터 직접 전달되는 하향파의 초동 도달시간이 주 측정대상인데 비하여 수직 탄성파탐사에서는 지층의 경계면에서 반사되는 반사파가 주 측정대상이다. 주로 석유탐사등을 위하여 코아 회수를 하지 않는 대심도 시추공에 적용되는데, 암반의 물성치 측정 등 엔지니어링 목적보다는 지반의 층서구조(stratigraphy)를 밝히는데 더 큰 목적이 있다. 그림 8은 수직 탄성파탐사의 원리를 보여주고 있다. 반사파를 주로 이용하므로 시추공 하부 지역의 지층 경계면이나 연약대 등을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

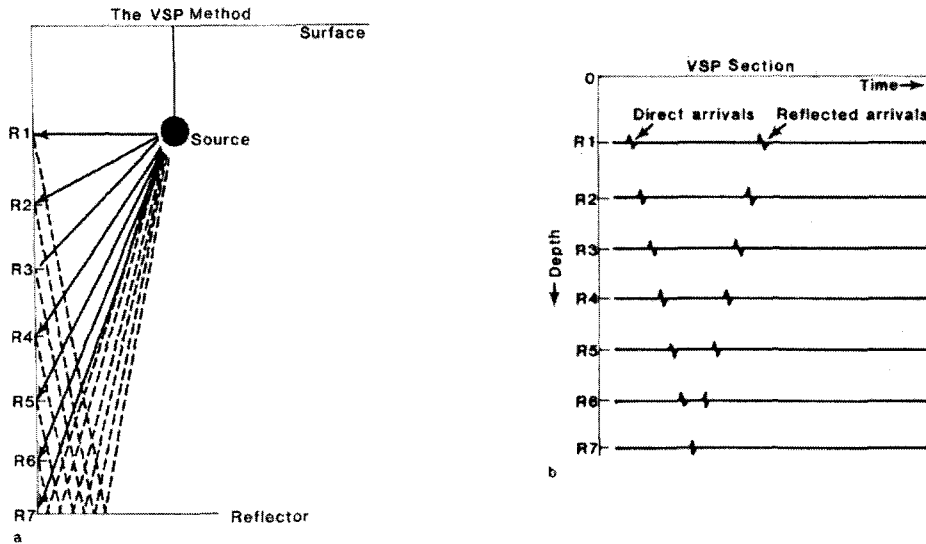


Fig 8. Typical VSP field layout (left) and idealized recorded data set obtained (right)

5.2 자료 획득

수직 탄성파탐사의 자료획득은 하향 탄성파탐사와 같다. 다만 수직 탄성파탐사의 경우 깊은 심도까지의 층서 구조를 밝히는 것이 목적이므로 보다 강력한 지표 에너지 발생원을 사용한다. Vibroseis, weight drop, 다이내마이트, air gun 등이 VSP 탐사를 위하여 흔히 사용되는 에너지원이다.

5.3 자료처리

수직 탄성파탐사의 자료처리는 반사법 탄성파탐사(reflection seismic) 자료처리와 유사한 점이 많으나, 중합(stack)이나 구조보정(migration)에 필요한 모든 과정들(CMP

sorting, velocity analysis, NMO correction 등)이 생략될 수 있다. 반면 상·하향과 분리 (wavefield separation), 트레이스 정렬(trace alignment and shifting), corridor stack 등 별도의 자료처리 과정이 필요할 수 있다.

5.4 현장자료의 예

현장: 미국 유전지대(Bell Creek Field, Montana)

자료획득: 6m 간격, hydrophone(시추공 심도 - 2.1 Km)

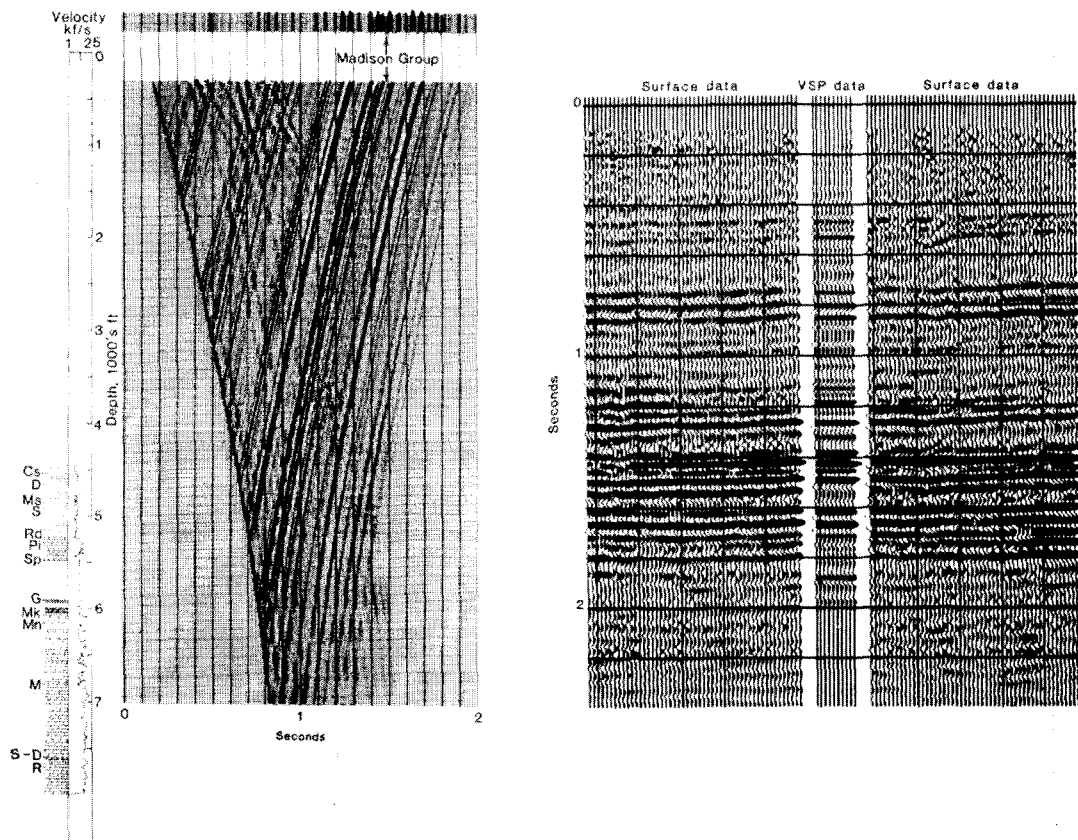


Fig 9. Example of field VSP data (left), and comparison of VSP and surface reflection seismic data (right)

6. 시추공간 속도측정(Crosshole Seismic Survey)

6.1 원리

두 시추공 사이의 평균속도를 구하여 지층구조, 암반의 탄성과 속도 등을 규명하는 방법으로 시추공용 탄성과 발생원과 수신기가 필요하다. 발생원과 수신기를 같은 심도에 위치시켜 측정하고 다시 같은 간격으로 이동하여 측정하게 된다. 평균속도를 구하는 것이므로 시추공 간격을 될 수 있도록 좁게하여 수평적 지층구조를 유지하도록 하는 것이 좋으며, 지층의 경사가 심할 경우 경사방향으로 측정하기도 한다. 일반적으로 시추공 내에서의 횡파 발생이 어렵기 때문에 P파 측정을 주로 하고있는 실정이다. 하향 탄성과탐사에 비해 지표에서의 에너지 흡수가 없으므로 훨씬 깨끗한 신호를 얻을 수 있으며, 탄성과 토모그래피를 실시할 시 이로부터 데이터를 추출해 낼 수 있으므로 별도의 자료획득이 필요 없다.

6.2 자료획득

자료획득은 시추공 내에서 탄성과를 발생시킨다는 차이점 외에 하향 탄성과탐사와 대동 소이하다. 발생원과 수신기를 같은 심도에 위치시켜 수평하게 탐사하는 level scanning을 주로 시행하나 횡파 발생원이 없을 시 발생원과 수신기를 약 45°로 유지하여 발생원의 방사패턴(radiation pattern)에 따른 횡파를 측정하기도 한다.

6.3 자료처리

자료처리 과정은 아주 간단하여 초동 도달시간 발체 후 이를 시추공간 거리로 나누어 평균속도를 구하면 된다. 이때 시추공의 편향(deviation)에 따른 공간거리의 변화를 감안하여 주어야 하며, 암층의 경계 부근에서는 굴절파가 먼저 도달하는 경우가 있으므로 이를 주의하여 해석하여야 한다. 그림 10은 시추공간 속도측정에서 초동주시 발체의 예를 보여준다.

6.4 현장자료의 예

현장: 강원도 00지역

지질분포: 매립토-풍화암-연암-경암

자료획득: 발생원 - 지질탐사용 전기뇌관

수신기 - 48채널 하이드로폰(1m 간격)

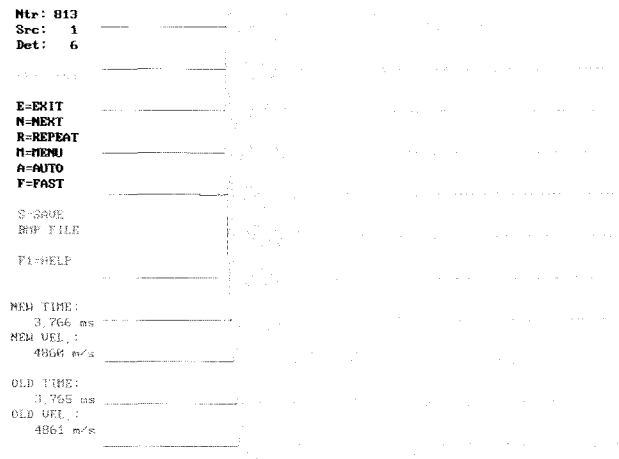


Fig 10. Example of onset time picking

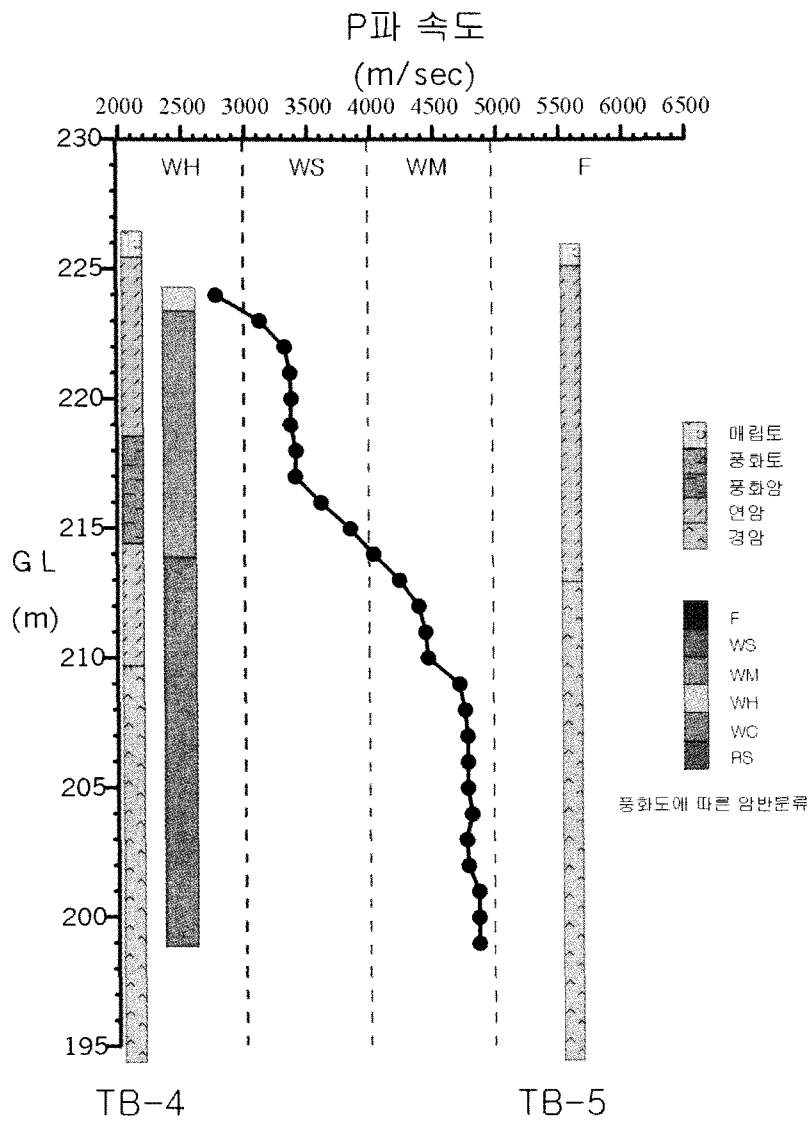


Fig 11. Result of crosshole seismic survey

7. 탄성과 토모그래피(Seismic Tomography)

7.1 원리

의료용 단층촬영(CT)의 원리를 탄성파를 이용한 지반조사에 도입한 것으로 3600 회전하면서 촬영할 수 있는 CT 촬영에 비해 여러 가지 제약조건은 있으나 최근의 연구개발 노력에 힘입어 토목 엔지니어링, 지하자원 탐사 및 평가에 활발하게 사용되고 있다.

탄성파 토모그래피의 가장 일반적인 형태인 시추공간 토모그래피(crosshole tomography)는 한 개의 시추공에는 탄성파 발생 장치를, 다른 시추공에는 수신장치를 삽입한 후 여러 각도로 탄성파를 주고받은 다음, 이들 파의 초동 주시(혹은 진폭)를 발체하고 이를 역산(inversion)하여 두 시추공 사이의 지층구조를 영상화하는 방법이다. 초동 주시를 역산하는 방법을 주시 토모그래피(traveltime tomography), 진폭을 역산하는 방법을 진폭 혹은 감쇠 토모그래피(amplitude or attenuation tomography)라 하는데, 진폭의 경우 여러 가지 요인에 의해 변할 수 있어 주시 토모그래피가 주로 이용되고 있다. 앞서 언급한 방법들이 심도에 따른 지층구조 변화를 얻는 1차원적 방법인데 비하여 지층구조 단면을 얻을 수 있는 2차원적 탐사로 시추공 사이지역 지층 경계면의 변화, 연약대의 형상을 등을 얻을 수 있다. 그림 12는 시추공간 토모그래피 탐사에서의 파선경로를 보여준다.

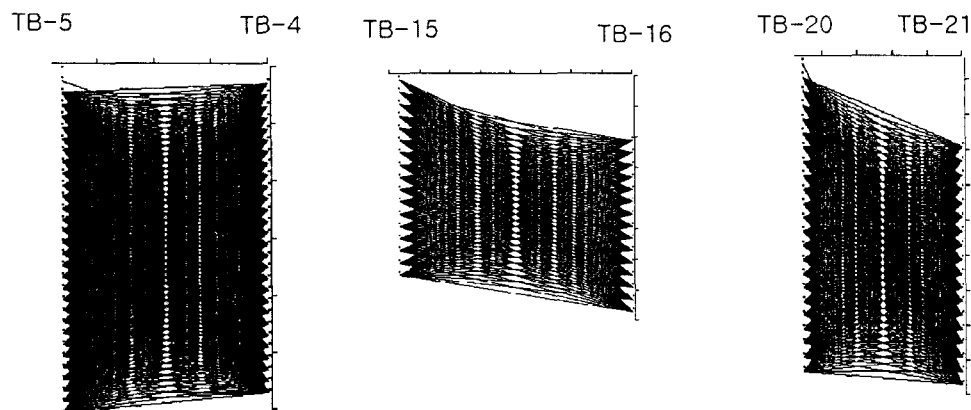


Fig 12. Ray path diagrams of crosshole seismic survey

7.2 자료 획득

시추공간 속도측정과는 달리 여러 각도에서 자료를 획득하여야 하므로 한 지점에서 탄성파를 발생시키고 지오폰이나 하이드로폰 체인을 사용하여 동시에 여러 심도에서 수신하는 방법을 택한다. 전기뇌관은 파형이 깨끗하고 강력하여 넓은 시추공간 거리에도 적용할 수 있다는 장점이 있으나 공벽 보호를 위한 스틸 케이싱이 필요하고, 다중발파가 어려워 1회 발파 후 시추공에서 꺼내어 새 뇌관을 장착하여 주어야 하므로 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 반면, 기계적 충격(mechanical hammer)을 이용하거나 시추공용 vibroseis의 경우 에너지가 약하고 파형이 뇌관에 비해 좋지 않으나 매번 시추공에서 꺼낼 필요가 없으며

로 신호를 중합(stack)하기가 쉽고 탐사 속도가 빠르다는 장점이 있다. 수신기의 경우 하이드로폰은 가볍고 여러개의 하이드로폰(hydrophone chain)을 이용한 신속한 탐사가 가능하다는 장점이 있는 반면 S파의 수신이 불가능하고 공내수가 필요하다는 단점이 있다. 지오폰은 P파 및 S파의 측정, 3성분 측정이 가능하다는 장점이 있으나 clamping 장치로 인하여 무게가 증가하고, 필요 전선수의 증가로 지오폰 체인 제작에 한계가 있다는 단점이 있다.

발생원과 수신기 배열 양단을 연결하는 중앙 부근에서는 파가 통과하지 않아 역산에 충분한 파선밀도(ray density)를 확보할 수 없으므로 조사하고자 하는 단면적 보다 상하로 충분한 자료를 얻는 탐사설계가 필요하다.

7.3 자료처리

탄성파 토모그래피의 자료처리는 초동 주시의 발취 → 발취 주시의 보정 → 역산의 순서로 이루어진다. 탄성파 토모그래피의 경우 그 자료의 양이 많으므로 초동 주시의 발취는 하향 탄성파탐사에서 언급한 여러 가지 자동 발취 알고리즘을 사용하고, 이를 검토한 후 보정하여 준다. 또한 지층의 응력 방향이나 미세 균열의 분포 등에 따라 같은 매질 내에서도 탄성파의 전파방향에 따라 속도가 변하는데 이를 이방성(anisotropy)이라 하며, 이의 영향을 제거하는 과정을 이방성 보정이라 한다. 진폭 토모그래피의 경우 발생원의 방사특성(radiation pattern)에 따른 보정을 실시하여 주어야 한다.

초동주시 발취가 완료되면 이를 역산하여 시추공 사이지역의 탄성파 속도분포를 구하는데 이를 주시역해(traveltime inversion)라 한다. 주시역해는 시추공 사이지역을 여러개의 셀(cell)로 나눈 다음 초동 도달시간과 각 셀에서의 파선길이를 이용하여 각 셀의 탄성파 속도를 구하는 방법이다. 즉 그림 13에서 탄성파가 각 셀을 통과하여 수신에 도달할 경우

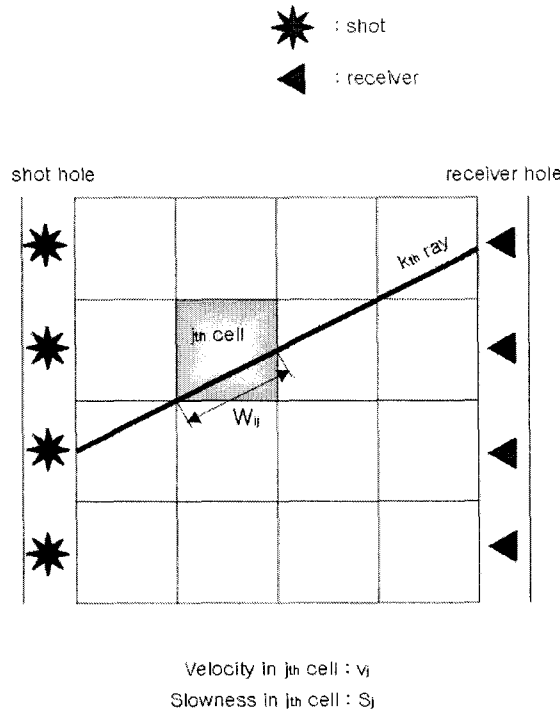


Fig 13. Principle of traveltime inversion

초동도달 시간은

$$t_k = \sum_{j=1}^N W_{kj} S_j$$

로 나타낼 수 있는데, 여기서 t_k =트레이스의 초동주시, W_{kj} =각 셀에서의 파선길이, S_j =각 셀의 slowness(탄성과 속도의 역수)이다. 여기서 미지수 S_j 를 구하는 작업은 수천개의 방정식을 푸는 과정으로 여러 가지 방법들이 제시되어 있으며(ART, SIRT, Least Squares, CG 등) 고도의 전산능력이 요구되는 작업이다. 파선의 경로도 직선파선(straight ray path)을 가정하는 방법과 곡선파선(curved ray path) 적용하는 방법이 있는데, 곡선파선을 적용하는 것이 이론에 더 합당하나 역산에 요구되는 시간만큼 정확성이 증가하지 않아 직선파선 토모그래피가 주로 이용되고 있다.

7.4 현장자료의 예

현장: 서해안 해상, 강원도 육상

지층분포: 해성퇴적토-잔류토-풍화암-연암-경암

자료획득: 발생원-지질탐사용 뇌관, 수신기-48 채널 hydrophone(1m 간격)

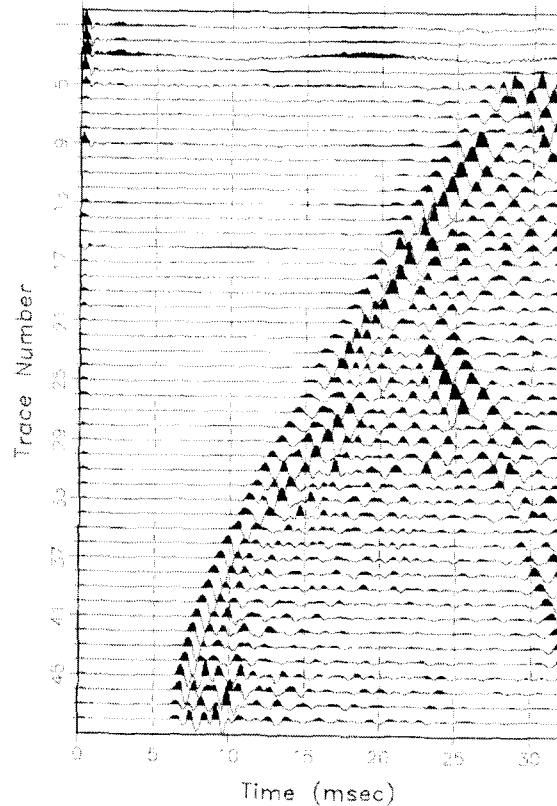


Fig 14. Example crosshole field data
(Common shot gather, source is at near bottom)

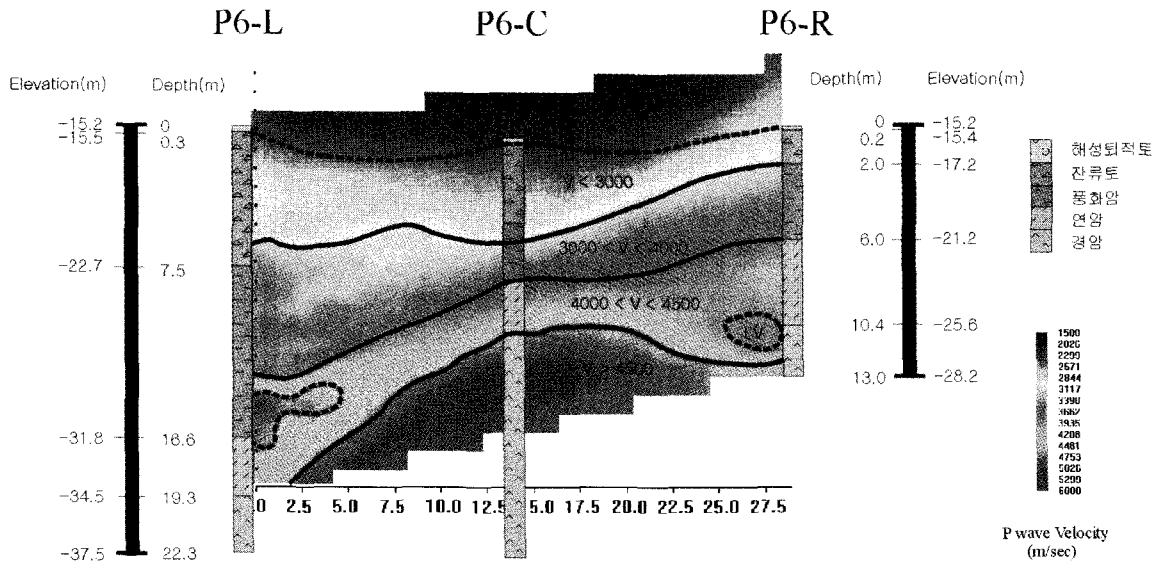


Fig 15. P-wave velocity distribution from crosshole tomography

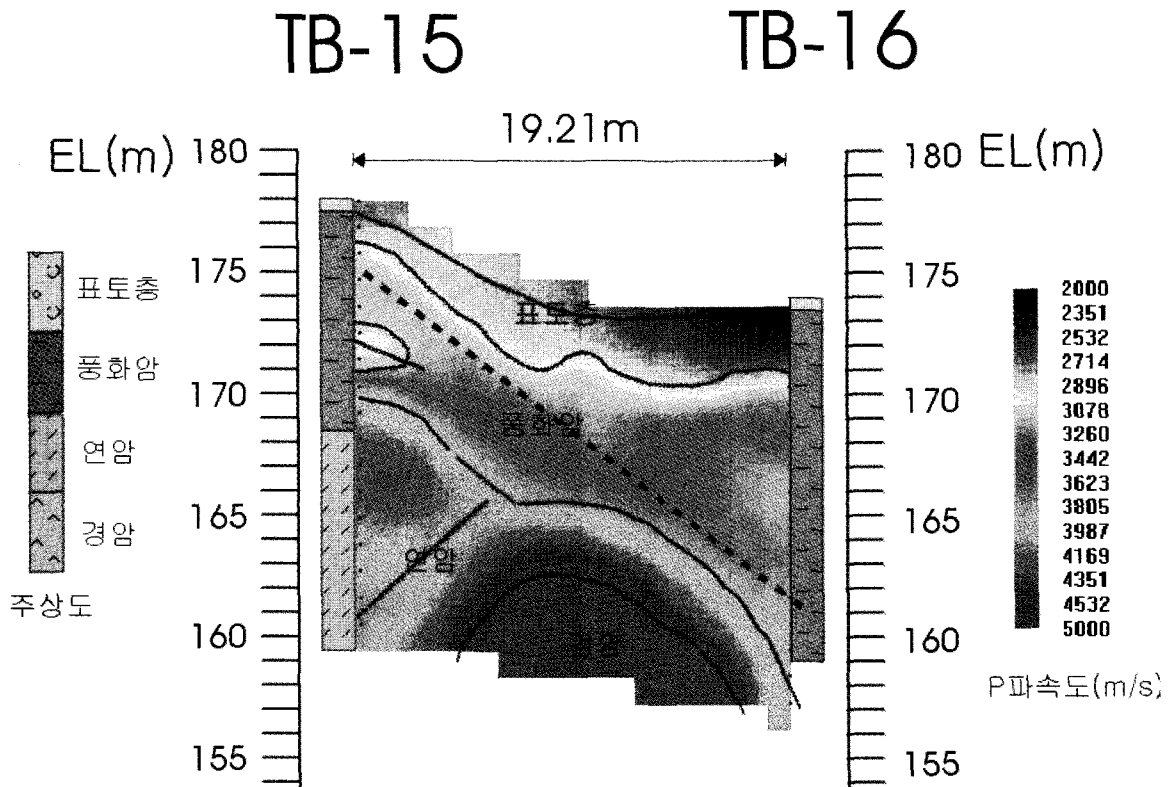


Fig 16. Interpreted tomographic section

8. 결론 및 토의

하향 탄성파탐사, 수직 탄성파탐사, 시추공간 속도측정, 탄성파 토모그래피 등 대표적인 시추공 탐사법에 대하여 원리, 자료처리 및 해석을 논하고, 탐사 결과의 토목공학적 응용에 대하여 검토하였다. 이러한 시추공 탐사법들은 지층구조 파악, 원지반(in-situ) 속도, 동탄성계수의 산출 등 토목 설계 및 시공을 위하여 필요한 자료들을 제공하여 주는데, 각 탐사법에 대하여 간략히 논하면 다음과 같다.

- 1) 하향 탄성파 탐사법은 가장 간편하고 저렴하게 원지반의 P파 및 S파 속도를 얻을 수 있는 방법이나 조사 심도가 얕고, 정확한 지층구조 판별이 어렵다.
- 2) 수직 탄성파탐사는 엔지니어링 목적보다는 석유탐사 등을 위한 대심도 시추공 탐사를 위하여 주로 사용되는데, 층서구조 판별이 주 목적이다. 지표고와 터널고차 차이가 많이나 시추가 불가능할 경우 시추공 하부 층서변화나 파쇄대 탐지를 위하여 사용될 수 있을 것이다.
- 3) 시추공간 속도측정은 하향 탄성파탐사에 비하여 더 정확한 속도측정이 가능하고, 역전층이나 파쇄대 하부에서도 좋은 결과를 얻을 수 있는 반면 S파 측정이 어렵다는 단점이 있다.
- 4) 탄성파 토모그래피는 두 시추공 사이지역의 층서구조, 연약대, 지하공동 등을 2차원적으로 표현할 수 있다는 장점이 있으나, 시간과 비용이 가장 많이 드는 방법이다.

현재 한국적 지형에 적합한 시추공 S파 발생원이 개발되어 있지 않아 하향 탄성파탐사를 제외하고는 대부분 P파의 측정에 그치고 있는 실정이다. 또한 적합한 적용 기준이 마련되어 있지 않아 극히 일부 중요 구조물에만 내진설계를 적용하고 있다. 그러나 내진설계 기준이 점차 정립되어 가고 있고, 각종 물리탐사 기법이 지반조사, 토목설계 등에 활발하게 이용되기 시작하고 있으므로 한국적 지형에 적합한 기술 및 장비의 개발에 힘써 보다 완벽한 지반조사가 이루어 질 수 있도록 준비하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 박인식 역, 1995, 지반조사 핸드북, 도서출판 엔지니어즈.
2. 임한욱 외, 1993, 암발파 설계 기법에 관한 연구, 한국토지개발공사.
3. 임종석 외, 1996, 지반공학 용어사전, 도서출판 엔지니어즈.
4. 현병구 외, 1995, 물리탐사 용어사전, 선일문화사.
5. Balch, A.H., and Lee, M.W., 1984, Vertical seismic profiling, International Human Resources Development Corporation, Boston.
6. Barton, N. et al, 1976, Recent experience with the Q-system of tunnel support design, Proc. Sym. on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Vol. 1.
7. Bieniawski, Z.T., 1984, Rock mechanics design in mining and tunneling, A.A. Balkema
8. Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses, Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., Vol. 15, pp.335-344.
9. Coon, R.F., and A.H. Merritt, 1970, Predicting in-situ modulus of deformation using rock quality indexes, Determination of the In-situ Modulus of Deformation of Rock, ASTM Special Publication 477, Philadelphia, pp. 154-173.
10. Deere, D.U., 1968, Geological considerations, Rock Mechanics in Engineering Practice, ed. R.G. Stagg and D.C. Zienkiewicz, Wiley, New York, pp.1-20.
11. Hardage, B.A., 1992, Crosswell seismology and reverse VSP, Geophysical Press LTD., London.
12. Lines, L.R., and Levin, F.K., 1988, Inversion of geophysical data, Geophysics Reprint Series 9, SEG.
13. Woods, R.D., 1994, Geophysical characterization of sites, ISSMFE Technical Committee #10, International Science Publisher, New York.