

호남고속철도 연약지반구간의 전단파 속도분석과 탐사법 비교

S-wave Velocity Analysis and Each Survey Comparison of Soft Ground in HoNam High-Speed Railway

민경남* 이일화** 정대호*** 안태봉**** 정찬목****
Min, Kyong-Nam Lee, Il-Hwa Jung, Dae-Ho An, Tae-Bong Jung, Chan-Mook

ABSTRACT

This study area located in HoNam High-Speed railway soft ground section. So it carried out the boring survey, field survey and test of laboratory. It collected the engineering data of ground and the data for the establishment arrangement. The investigation did a soil investigation in Nonsan. The investigation item executed seismic piezocone penetration test, s-wave seismic refraction survey, ps logging test, density logging test which is a physical exploration and boring. Eventually, results of geotechnical and shear-wave survey are useful for ground information in soft ground that has identified the characteristics of geological responses and elastic modulus.

1. 서론

국가 경제의 대동맥 역할을 하는 고속철도는 산업과 국민생활에 미치는 영향이 지대하여 고도의 품질과 구조적 안정성이 요구되는 중요한 토목구조물이다. 현재 기본설계중인 호남고속철도는 지형적인 특성상 서해안의 연약지반구간을 많이 통과하게 된다. 경부고속철도 2단계구간에서도 일부 연약지반이 출현하였지만 서해안 연약지반처럼 심각하지 않아 호남구간이 최초의 고속철도 연약지반 통과 구간이 될 것으로 보인다. 연약지반과 관련된 기술적인 문제들에 대한 고민은 1960년대 말 경부고속도로 건설 당시부터 지금까지 지속되어 오고 있으며 연약지반의 조사와 처리를 위한 기술의 발전은 날로 발전하고 있다.

고속철도의 연약지반 침하기준은 열차운행 특성상 잔류 침하량이 고속도로 침하기준의 10배인 10mm로 매우 엄격히 규정되어 있다. 이러한 침하기준을 만족하기 위해서는 아주 정밀한 연약지반조사가 선행되어야 한다. 하지만 현행기준으로 지반조사를 수행할 경우 공사비 상승의 주된 원인이 되고 조사 간격 또한 너무 넓어 고속철도 침하기준에 부합되는 초정밀 조사가 힘들어 지는 것이 현실이다.

다행히 최근에 고속철도, 방폐장, 댐 등 특수한 구조물을 대상으로 한 탄성파탐사법이 활발히 적용되고 있다. 탄성파를 이용한 전단파는 진동에 민감한 구조물의 내진설계를 위해서도 반드시 필요하다. 또한 전단파의 속도는 지반의 물성 뿐만 아니라 지층의 변화를 잘 대변하기 때문에 연약지반 파악, 지반의 다짐효과와 연약지반개량 판정에 활용되고 있다(Stokoe et al, 1999). 이러한 탄성파는 지반물성치를 잘 반영하고 있어 다른 조사방법과 병행 수행되면 기술적으로 향상된 자료를 획득할 수 있을 뿐만 아니라 경제적으로도 다른 조사기법에 비해 상당히 유리한 것으로 보고 되고 있다(목영진 외, 2005).

* 대원토질(주) 설계팀 팀장, 정회원
** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 선임연구원, 정회원
*** 한국철도시설공단 KR기술연구소, 정회원
**** 우송대학교 철도건설환경공학과 교수, 정회원

현재 지반의 동탄성계수를 구할 수 있는 시험방법은 많이 존재하지만, 대개의 경우 과업의 시간 경제적 제약으로 인해 한 두 종류의 시험만을 실시하게 된다. 따라서 특정 시험만을 이용하여 신뢰할 수 있는 동탄성계수를 구하기 위해서는, 우선 동일 위치에 대한 다양한 시험 결과를 서로 비교하여 각 방법 별 결과의 상호관계와 결과들에 대한 상관성 분석연구가 필요하다(Ohta et al, 1978; Wci et al, 1996).

본 연구에서는 호남고속철도 연약지반구간에서 SCPT, SPS, S파 굴절법탐사로부터 전단파 및 압축파 속도를 산출하였고, 밀도검층으로 얻은 밀도값을 이용하여 동탄성계수를 산출하였다. 또한 각 탐사법을 비교하여 연약지반에서의 각 탐사법의 적용성을 분석하였다.

2. 연약지반 현황

호남고속철도의 계획 노선은 평야지대인 논산평야, 김제평야, 호남평야, 영산강 유역을 통과하게 되는데 논산평야 구간의 연약지반이 가장 깊은 것으로 사전 조사되어 이 구간을 연구지역으로 선정하였다.

연구지역인 논산평야는 논산천과 강경천 주변의 충적평야에 위치한다(그림 1). 이 지역은 화강암이 넓게 분포하는 낮은 구릉지 내지 평야지대를 이루며, 구간의 70% 이상이 해발 표고 100m 미만의 저지대이다. 계획노선에는 충적평야가 형성되어 평야의 중심에 위치한 기존 호남선 철도와 유사하게 통과한다. 충적층은 점토, 모래 및 자갈 등으로 구성된 미 고결층의 제4기 퇴적층으로 조사지역내의 금강이나 논산천 등과 같은 수계를 따라 그 주변에 발달한다.

조사구간 일대에서 시행한 시추조사 결과 실트질점토는 평균 11m, 실트질 모래는 3.5m, 모래질 자갈은 4m로 분포하는 것으로 확인되었다. 실트질점토의 실내시험 결과, 함수비는 45.2%, 액성한계는 57.4%, 소성한계 25.1%, 소성지수는 평균 32.3%의 범위로 나타났으며, 통일분류법상 CH로 분류된다. 삼축압축시험 결과, UU Test의 비배수 전단강도는 0.23kgf/cm², CU Test의 점찰력 C는 0.05~0.08kgf/cm², 내부마찰각은 16.1~17.9로 나타났다. 비배수 전단강도는 심도가 증가할수록 대체로 증가하는 경향을 나타낸다.

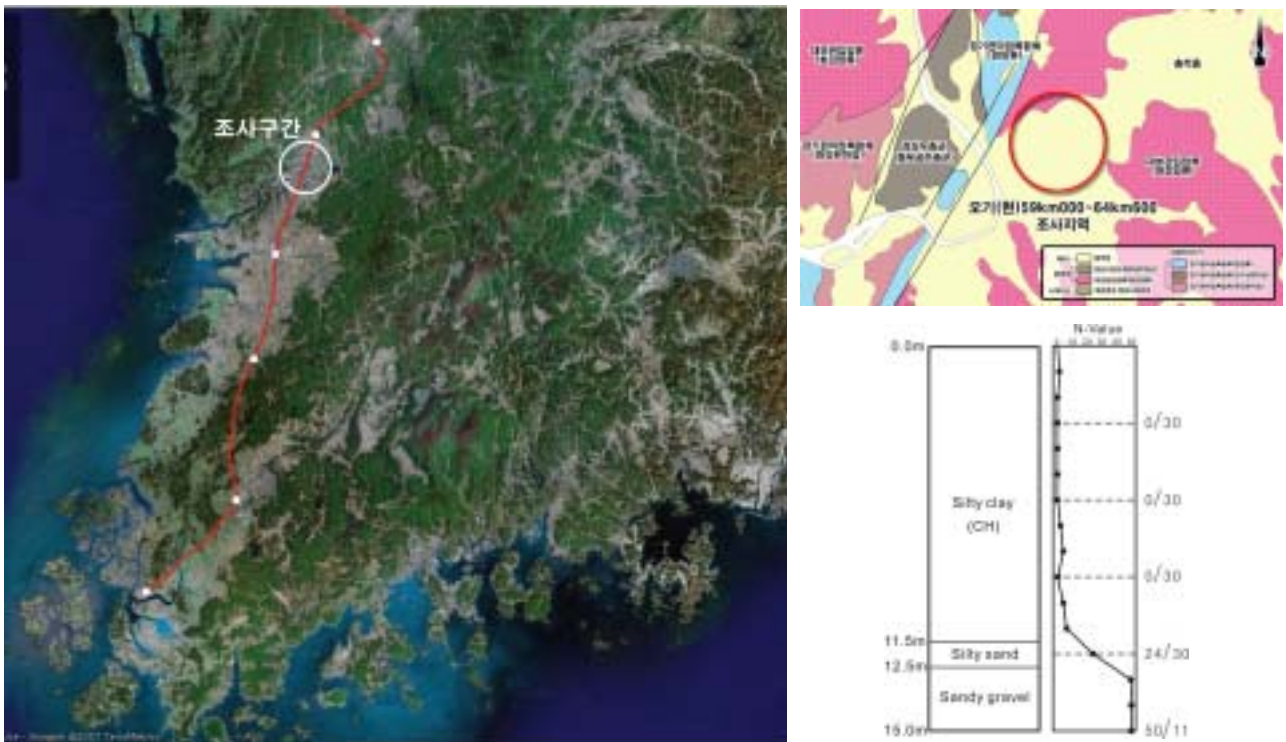


그림1. 위치도 및 시추단면도

3. 탐사방법

본 연구에서는 각 탐사별 비교를 위하여 SCPT, S파 굴절법, 속도검층(SPS)을 실시하고 시험결과는 시추공을 기준으로 대비하였다.

탄성파에 의한 속도는 지층의 연속적인 분포상태와 연약대와 같은 저속도 이상대 유무를 파악하고 시추조사 결과와 연계하여 미시추구간의 암 경계를 추정하는데 아주 유용하다. 특히 표면과 탐사의 낮은 가탐심도를 극복하여 상대적으로 깊은 심도까지 S파 단면을 획득하여 P파와 S파 속도단면으로 동적물성치 산출하는데 그 가치가 있다.

3.1. 탄성파 콘관입시험(SCPT)

탄성파 탐사 콘관입시험(Seismic Cone Penetration Test, SCPT)은 피에조콘의 상단에 진동을 감지할 수 있는 수신기를 설치하여 콘관입시험 도중 지표면의 발진자로부터 발생된 탄성파를 지중에서 평가하는 시험이다. 이 시험은 콘관입시험과 다운홀 시험을 접목한 방법으로 콘관입시험과 함께 지반의 전단파 속도 및 압축파 속도를 동시에 얻기 위해 널리 이용되고 있다. SCPT는 다운홀 시험에 비해 시추공을 별도로 만들지 않아도 된다는 장점이 있으며 수신기와 주변 지반이 완전히 접촉된 상태에서 시험이 수행되기 때문에 보다 정확한 전단파 및 압축파를 측정할 수 있는 장점이 있다(조성민 등, 2004)

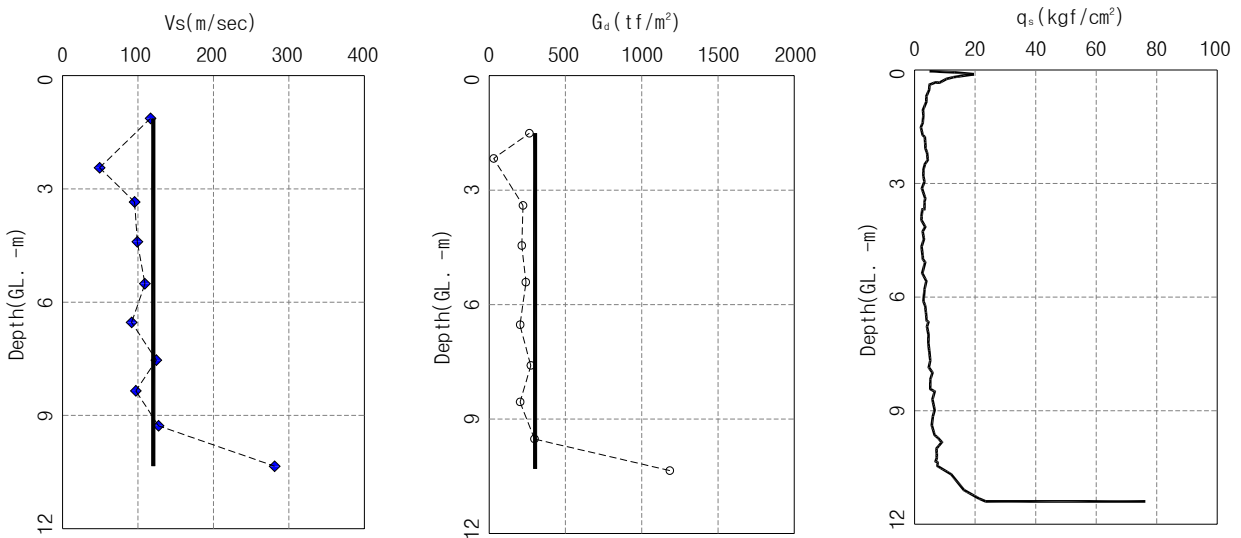


그림 2. SCPT 결과

시험결과는 지층층후별 전단파속도와 동전단계수는 표 1과 같다. 그림 2를 보면 선단저항과 횡과가 비례관계를 보이고 기타 다른 변수들도 밀접한 관계를 보이는 것을 알 수 있다. SCPT의 경우 콘관입심도가 연약층에 국한되어 있으나 공벽에 완전히 밀착되어 교란을 최소화한 상태로 수행되므로 시험결과의 신뢰도가 아주 높다.

표 1. 전단파속도와 동전단계수

전단파속도 (m/sec)		동전단계수 (G_d , tf/m^2)		콘저항치 (q_c , kgf/cm^2)	
범위	평균	범위	평균	범위	평균
56~277	120	59~1175	293	2.24~18.05	4.56

3.2. S파 굴절법 탐사

지표에서 인공적으로 발생된 탄성파 신호를 지표의 측선상에 등간격으로 설치한 지오폰을 이용하여 수신하며 P파는 수직 진원사용하고 S파는 양방향 수평진원을 사용한다. 탄성파 초동은 직접파 또는 지층 경계면에서 임계굴절한 굴절파를 취하고 각 수신점에 도달하는 직접파와 선두파의 초동주시를 읽어 주시곡선을 작성한다. 주시곡선 상에 나타나는 각 직선들의 기울기로부터 지층의 속도를 결정 각 지층의 경계면까지의 깊이를 계산한다.

P파 탄성파의 발생원으로는 뇌관을 사용하였으며, 화약 발파 장치를 지표에 30cm 정도의 발파공간을 만든 후 발파하여 탄성파가 지하로 흡수되도록 하였다.

S파 탄성파 발생은 타격판을 사용하여 좌우측 진원을 발생시키고, 후에 이를 중첩하여 S파를 산출하였다. 기록된 자료를 자료변환, 트레이스 정리, 필터링, 자동이득함수 보정 등의 전처리 과정을 수행한 후, 초동주시를 취합하여 역산과정을 거쳐 속도분포 및 속도 토모그램 작성하였다. 연구지역의 탄성파속도 단면과 동전단계수 단면을 표시하면 그림 3과 그림 4와 같다

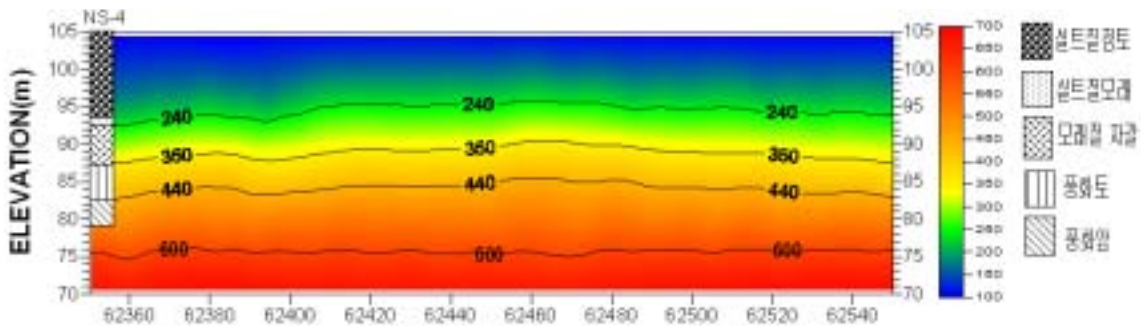


그림 3. S파 탄성파속도단면

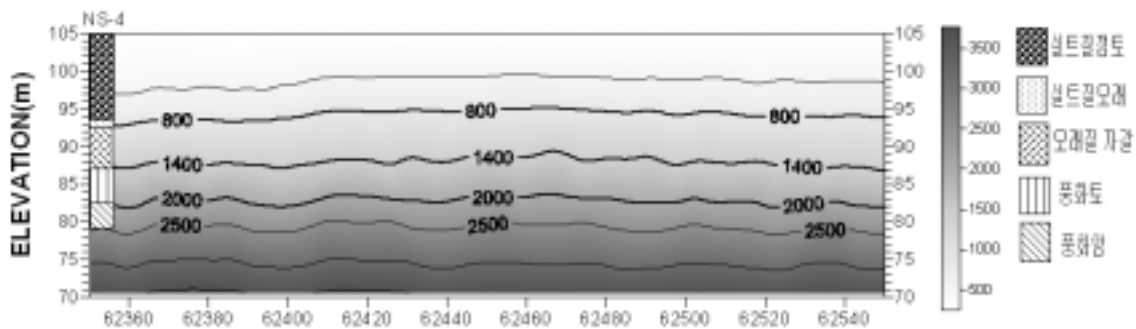


그림 4. 동전단계수(G_d)단면

전반적으로 지층은 수평층을 이루고 있으며, 상부의 실트질 모래 내지 점토로 이루어진 퇴적토가 약 10m 내외의 두께로 상부에 존재한다. 1층(실트질 모래 내지 점토의 퇴적층)의 S파 속도는 240m/sec 미만으로 분포하며 2층(모래질 자갈)은 240~350m/sec, 3층(풍화토)의 속도는 350~440m/sec, 하부 풍화암은 440m/sec이상의 속도분포를 보이고 있다. 지층의 속도는 반사층 속도를 이용하였고 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 속도분석 결과

구 분	실트질 점토, 실트질 모래	모래질 자갈	풍화토	풍화암 이하
각층의 평균속도 (m/sec)	< 0.24	0.24~0.35	0.35~0.44	0.44 <
속도층 평균심도 (GL. -m)	< 10.4	10.4~16.1	16.1~20.7	20.7 <

3.3. Suspension P,S wave Logging (SPS)

본 시험은 장비 특성상 발진원과 수신점이 일체화되어 탐사 심도별로 같이 이동시켜가며 시험이 실시된다. 따라서 시추공을 대상으로 하는 여타 탄성과 탐사 방법인 Downhole test, Up-hole Test 등이 갖고 있는 탄성과 탐사 심도가 깊어짐에 따른 발진원과 수신점의 멀어짐으로 인한 탄성과 수신 불량 문제가 없으며, 전단파의 측정 및 기록이 각 수신기에서 압축파와 별도로 감지되므로 지반의 정확한 전단파 속도를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

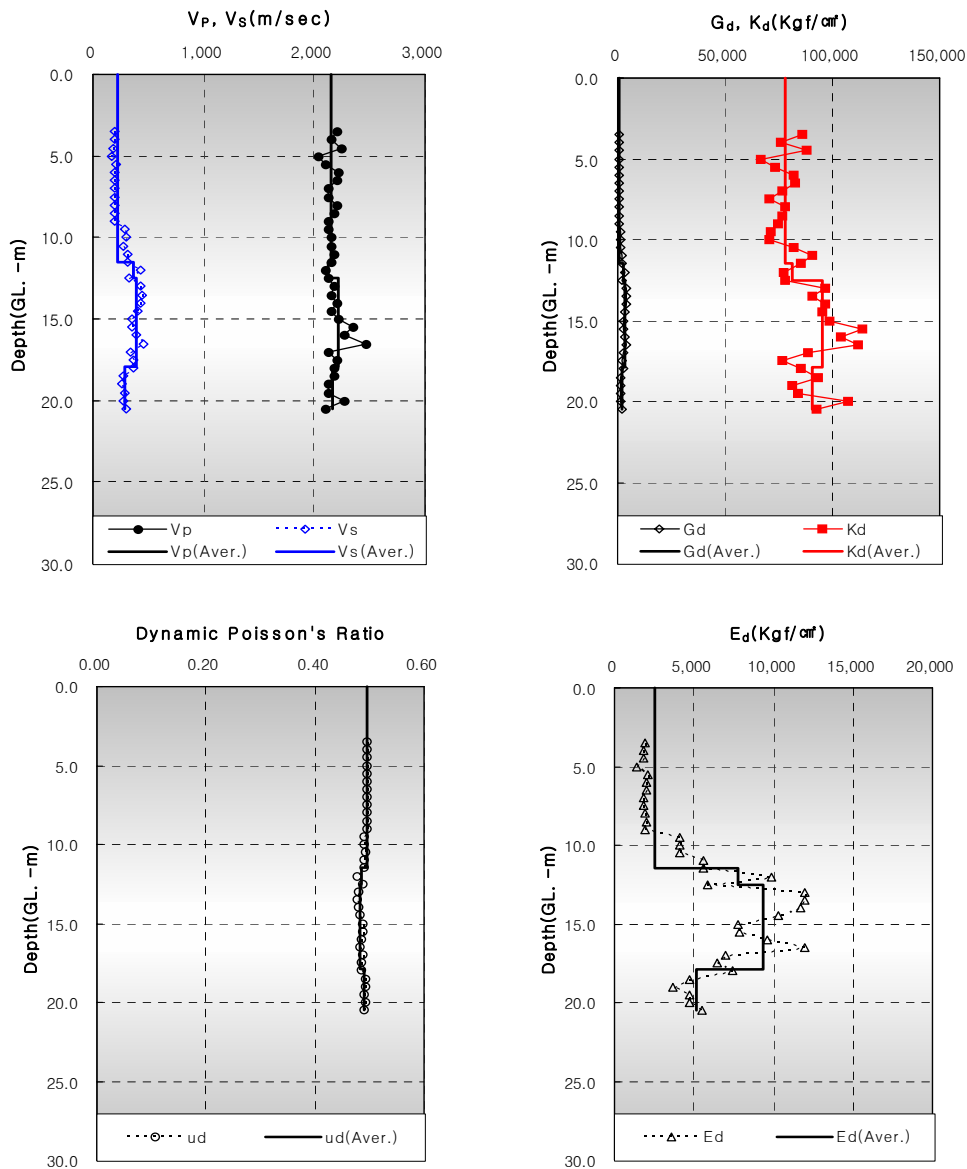


그림 5. SPS 검층 결과

SPS 검층 결과(그림 5) 탄성과속도(V_p , V_s) 값은 각 지층에서 고르게 나타났으며, 풍화토 구간보다 상부에 위치한 모래질 자갈층에서의 속도값이 더 높은 것으로 나타났다. 이 측정치를 가지고 지반의 동적 물성치를 구하였으며, 각 지층의 평균값을 표 3에 정리하였다.

표 3. 해석결과의 평균값

지층구분	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	단위중량 (t/m ³)	동전단계수 (kgf/cm ²)	동탄성계수 (kgf/cm ²)	동체적계수 (kgf/cm ²)	동포아송비
실트질 점토	2,158	219	1.74	881	2,632	81,484	0.495
실트질 모래	2,128	371	1.99	2,852	8,455	87,906	0.484
모래질 자갈	2,222	391	2.01	3,195	9,477	97,354	0.484
풍화토	2,164	293	1.93	1,700	5,067	89,845	0.491

3.4. 밀도검층

밀도검층은 Probe에 장착된 방사성 동위원소로부터 시추공 주변의 공벽으로 방출된 감마선이 지반에 의해 산란, 감쇠하면서 검출기에 들어오고 이때 산란된 감마선의 세기(CPS-Count Per Second)를 연속 측정하고 측정된 계수율은 밀도검층기 교정 과정을 통해 작성된 교정곡선을 이용하여 지층밀도로 환산한다. 교정곡선은 시추공경의 변화나 케이싱의 유무에 따라 크게 달라지기 때문에 시추공 환경에 따라 작성되며 밀도 환산은 측정 당시의 시추공 환경에 적합한 교정곡선을 이용한다.

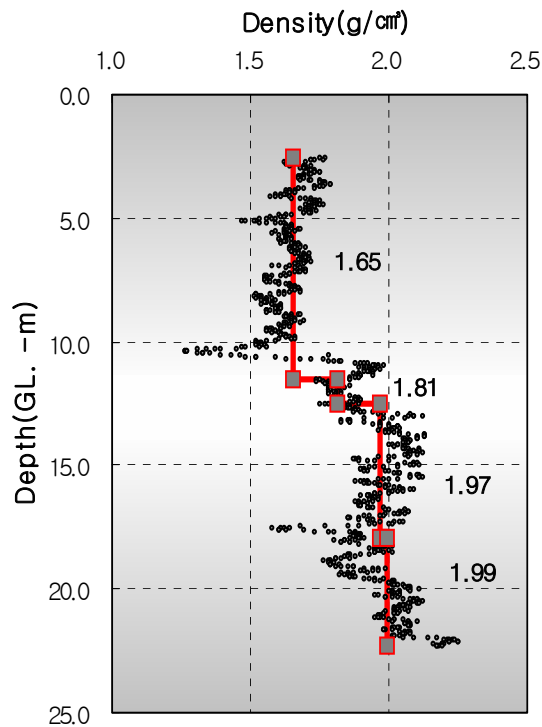


그림 6. 밀도검층 결과

검층 결과(그림 6) 현장 밀도값은 지층분포와 유사하게 나타나며, 10.2~10.5, 17.1~ 19.5m 구간에서 다른 구간에 비하여 저밀도 이상대가 존재한다. 지층별 밀도값은 실트질 점토 1.65g/cm³, 실트질 모래 1.81g/cm³, 모래질 자갈 1.97g/cm³, 풍화토 1.99g/cm³의 현장 밀도값을 산출하였다. 이 밀도값은 1m마다 평균을 내어 전단계수와 체적계수를 구하는데 이용된다.

4. 해석결과 분석 및 고찰

전단파(S파) 비교를 위하여 SCPT, S파 굴절법, 속도검층(SPS)을 실시하고 결과는 시추공을 기준으로 비교하였다. 3가지 탐사방법 모두 유사한 양상을 보이고 밀도 증가와 일치하는 경향을 보였다. 이중 10m 이내 천부에서 SCPT와 S파 굴절법의 양상이 유사하게 나타나고(평균 130 m/sec) SPS의 경우 200m/sec로 다소 높게 나타났으며, SCPT의 경우 콘관입심도가 연약층에 국한되어 있으므로 심도에 한계가 있으나 자료질이 높아 신뢰성 있는 전단파 속도를 도출할 수 있었다. 지층별 시험방법별 속도분석 비교 결과는 그림 7, 그림 8과 같으며 이를 정리하면 표 4와 같다.

SCPT는 별도의 시추공 설치 없이 시험을 할 수 있고 공벽과 밀착된 상태에서 지반교란을 최소화하여 시험을 수행하므로 정밀한 전단파 속도를 얻을 수 있다. 또한 여러 공학적 정수들의 산출이 가능하지만 단단한 퇴적물이나 자갈층에서는 탐사 수행이 어려운 단점이 있다.

S파 굴절법은 탐사의 특성상 심도의 증가와 더불어 속도가 증가하는 경우를 가정한다. S파 굴절법의 가장 큰 장점은 S파의 극성반전을 통해 초동이 발체되고 2차원적인 지층변화를 파악할 수 있는 탐사법이다. 연약지반에서 S파 굴절법탐사는 지층의 굴절에 기인한 주시곡선의 기울기 변화로 지층의 변화 및 심도 그리고 지층별 S파 속도를 직접 구할 수 있고 미시추구간 지층 분석에 아주 유용하다. 또한 표면파 탐사기법의 낮은 가탐심도도 극복할 수 있다.

SPS의 경우 상대적으로 높은 주파수 특성에 기인하여 분해능이 높은 검층법이므로 지층이 역전층일 경우에도 속도산출이 가능한 장점이 있고 심도에 제약이 없는 특징이 있다. SPS는 시추공 안에 발전기와 수신기가 같이 있어 비교적 정확한 값을 얻을 수 있으나 공내수가 없으면 탐사가 불가능하며 상부 토사층에서 케이싱과 공벽의 이완 문제로 극성확인이 불분명해 자료해석에 어려움이 존재하는 단점이 있다.

그 동안 탐사에 의한 지반조사 결과는 신뢰성 부족과 부정확성으로 인해 개략탐사나 예비조사 차원에서 활용되었다. 그러나 장비의 첨단화와 해석기법의 향상으로 점차 활용가치가 높아지고 있다. 각각의 탐사법은 장단점을 가지고 있으나 실내토질시험과의 상관성 분석과 경험식 도출 등이 추가 연구된다면 엄격한 침하관리가 요구되는 고속철도 연약지반 구간에서 내진해석과 더불어 그 활용가치가 매우 높을 것으로 사료된다.

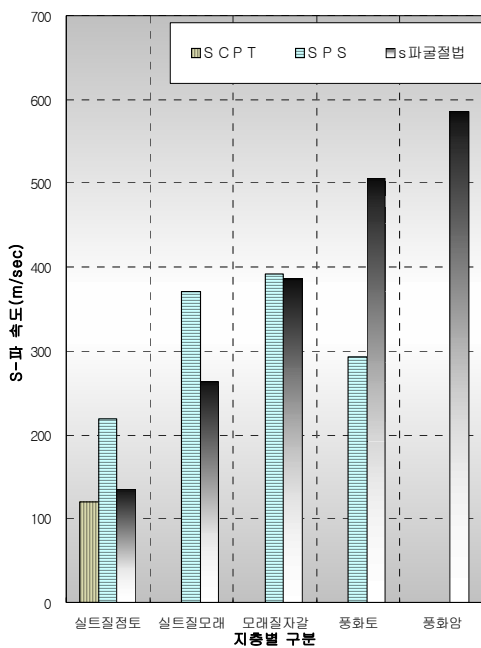


그림 7. 토층간 S파속도 비교 그래프

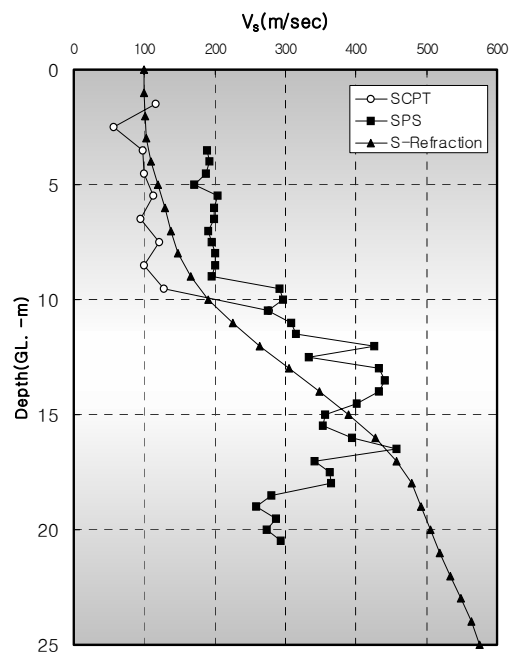


그림 8. 시험방법별 S파속도 비교 그래프

표 4. 취득방법별 S파 통계분석 결과

구 분	S -C P T (m/sec)	S P S (m/sec)	S파굴절법 (m/sec)	최소 (m/sec)	최대 (m/sec)	평균 (m/sec)	편차 (m/sec)
실트질점토	120	219	135	120	219	158	53
실트질모래	-	371	263	263	371	317	76
모래질자갈	-	391	386	386	391	389	4
풍화토	-	293	506	293	506	399	151
풍화암	-	-	585	-	-	585	-

참고문헌

1. Stokoe, K. H., and Rosenblad, B. L., 1999, "Offshore geotechnical investigation with shear waves in Roesset," J. M, ED., 1999 "Offshore Technology Conference," OTC, pp.1-9.
2. 목영진, 김영수, 유창연, 한만진, 2005, "지반물성치 측정을 위한 인홀탐성파시험," 한국물리탐사학회 제7회 특별심포지엄, pp.117-123.
3. Ohta, Y., and Goto, N., 1978, "Empirical Shear Wave Velocity Equations in terms of characteristics soil indexes," Earthquake engineering & structural dynamics, 6, pp.167-187.
4. Wci, B.-Z. et al., 1996, "An Empirical Method to Estimate Shear Wave Velocity of Soils in the New Madrid Seismic Zone," Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 15, pp.399-408.
5. 조성민, 정경자, 김홍중, 정중홍, 선창국, 2004, "탄성파콘관입시험을 활용한 지반의 전단파 전달속도 산정," 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.1428-1433.