

부유형 PS(SPS) 속도검층을 통한 전단파 특성 고찰

Investigation of S-wave Velocity Based on SPS Field Tests

정 남 훈¹ Jeong, Nam-Hoon

이 중 규² Lee, Chong-Kyu

Abstract

To investigate the characteristics of the shear wave velocity of cohesive soils and residual soils in Korea, Standard Penetration Test (SPT), Suspension PS Logging tests (SPS) and other soil tests were performed to analyze the shear wave velocity at each layer. For these purposes, 2 study sites are selected: one is cohesive soils and the other is residual soils. As a results, new empirical formulas are proposed from the relationship between strength of the ground (N value) and shear wave velocity from the test data at each layer. In the case of cohesive soils, the proposed relationships are nearly similar to empirical formulas, however, in the case of residual soils there was a little difference between the empirical formulas and measured velocities in this study. Case examples for shear wave velocities are presented with depth, N-values and compared with Ohta et al. (1978) empirical formula.

요 지

국내 점성토 지반 및 풍화토 지반의 전단파속도 특성을 파악하기 위하여 표준관입시험(SPT), 부유형 PS 속도검층 (SPS) 및 다운홀 등의 시험을 수행하였으며, SPT와 SPS 속도검층 결과로부터 지층별 전단파 속도를 분석하였다. 본 연구대상 지역에서 측정된 전단파 속도를 점성토와 풍화토로 나누어 분석하여 지반강도와 전단파속도와의 상관관계로부터 경험식을 제안할 수 있었는데, 점성토에서는 여러 학자들에 의하여 기존에 제안된 경험식과 유사한 결과를 나타내었으나 풍화토에서는 기존 경험식에 의한 값과 연구대상 지역에서 측정한 실측값과는 다소 차이가 있음을 확인하였다. 아울러 연구 대상지역에 대한 전단파 속도의 깊이에 따른 영향을 제시하였고 이 결과를 Ohta 등(1978)의 경험식과 비교, 검토하였다.

Keywords : N-value, S-wave velocity, Suspension PS logging test

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 구조물이나 건축물의 내진설계에 대한 요구가 증중하고 있는 바 이를 위해서는 지반의 전단파 속도에 대한 정확한 평가가 필수적이다. 현재 지반의 동적특

성을 파악하기 위한 다양한 시험방법이 제안되어 있으나, 현장에서 흔히 사용되는 기법은 다운홀 기법(down hole test)과 부유형 PS 속도검층(suspension PS logging)으로 다른 공내 탄성과 탐사에 비하여 장비가 간단하고 실험 수행이 비교적 수월하기 때문에 판단된다. 그러나, 제한된 장비특성으로 인하여 한 종류의 장비만으로는 모든 지반에 적용하지 못하는 경우가 종종 발생하고

1 정회원, (주)지원지오텍엔지니어링 대표이사 (Member, President, Dept. of Geotechnics, Jiwon Geotechnical Engerg. Co., Ltd.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 명예교수 (Member, Emeritus Prof., Dept. of Civil and Environmental Engerg., Dankook Univ., leec@dankook.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있다. 일반적으로 다운홀 기법은 측정심도가 30.0m 이 내일 경우와 지하수위가 없을 경우 측정값의 정밀도가 높으며, 업홀시험이나 크로스홀 시험등은 장소의 제약 등의 문제가 있어 시행하지 못하고 있는 실정이다. 한편, 부유형 PS 속도검층의 경우 심도에 대한 제약은 없으나, 지하수위가 존재하는 구간에 대해서만 측정이 이루어지는 등의 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 현장시험 중 연구가 비교적 많지 않은 부유형 PS 속도검층과 지반강도별 전단파 속도 특성 연구를 위해 점성토 지반과 풍화토 지반에 대하여 표준관입시험(SPT)과 부유형 PS속도검층(SPS)을 수행하여 각 지반특성별로 전단파 속도를 측정하였다. 측정결과를 통해 산출된 자료를 토대로 심도 및 지반강도가 전단파 속도에 미치는 영향을 고찰하였으며, 지층별로 산정이 어려운 전단파 속도를 간편한 경험식을 통해 한정된 지역이기는 하나 그 범위를 제시하고자 한다. 또한, 부유형 PS 속도 검층결과를 검증하기 위한 방법으로 다운홀 시험과 탄성파콘관입시험(SCPT)을 병행하였으며 기존에 제시된 경험식과 비교 검토하였다.

1.2 국내외 연구동향

전단파 속도 특성에 관한 연구는 주로 일본에서 많은 연구가 진행되고 있으며, Imai(1982), Okamoto(1989)등이 N값과 전단파 속도와의 상관관계를 규명하고자 노력하였다. Ohta등(1978)은 N값, 심도, 지질연대 및 토질조건을 동시에 고려한 전단파 속도 추정식을 제안하였다.

한편, 국내에서는 조성민(2004), 조철현(2006)등이 전단파 속도와 속도 검층을 통한 문제점을 구명하여 현장 시험법의 오류를 줄이고자 하였다. 정영훈(2005)등은

다운홀 기법과 실내시험등을 비교하여 실트질 모래에 대한 최대 전단탄성계수를 평가하였으며, 임국묵(2006)은 연약지반상에서 탄성파콘관입시험(SCPT), 부유형 PS 속도검층(SPS), 업홀(up hole) 시험을 이용한 연구를 수행하였다.

현재 국내 연구 결과를 살펴보면 대부분 특정 토질 조건하에 적합한 시험방법을 적용하여 연구가 진행되고 있으며, 그중에서도 지반의 동적특성을 파악하기 위한 다양한 시험방법중 다운홀 시험에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 있을 뿐 지반강도에 따른 전단파 속도 특성에 대한 고찰은 매우 미진한 상태이다. 본 연구에서는 부유형 PS 속도검층과 지반강도별 전단파 속도 특성을 고찰하고자 하였다.

표 1은 그림 1과 같은 여러 시험방법을 통하여 제안된 전단파 속도에 관한 제안식이다. 이 결과에서 보는 바와 같이 각 지역별 현장조건 및 시험방식에 따라 전단파 속도의 분포범위가 다르고, 또한 시험방법과 현장 상태에 따라서 전단파 속도의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과등을 토대로 현장시험의 경우 지반조건, 진원의 발전방식 및 전달형태, 측정자의 기술적 문제등이 정확한 결과도출에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 각 시험방법별 결과의 상호관계와 이들에 대한 상관성 분석연구가 반드시 필요하다고 Ohta(1978) 등은 주장하였다.

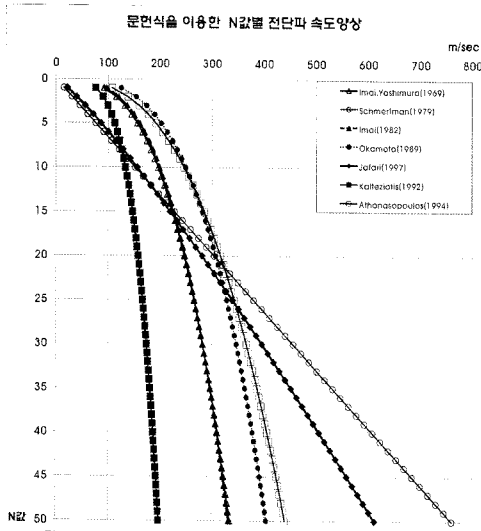
2. 연구 대상지역 현황 및 현장시험방법

2.1 연구 대상지역 지층현황

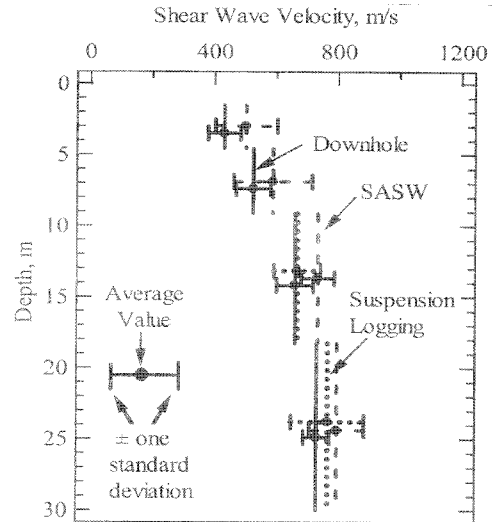
본 연구는 서울·경기지역과 경상도지역을 대상으로

표 1. 전단파속도(Vs)의 경험적 제안식(N값 500이하의 토사지반)

제안자	제안식
Imai, Yoshimura(1969)	$V_s = 92.1 \cdot N^{0.329}$
Schmertman(1979)	$V_s = 15.2 \cdot N$
Okamoto(1989)	$V_s = 125 \cdot N^{0.3}$
Imai(1982)	$V_s = 97 \cdot N^{0.314}$
Kalteziotis(1992)	$V_s = 76.2 \cdot N^{0.243}$
Athanasopoulos(1994)	$V_s = 107.6 \cdot N^{0.36}$
Jafari(1997)	$V_s = 27.0 \cdot N^{0.73}$ (실트) $V_s = 22.0 \cdot N^{0.77}$ (점토)
Ohta(1978)	$V_s = 68.79 \cdot N^{0.171} \cdot D^{0.199} \cdot E \cdot F$ D : 심도(m) E : 지질연대상수 F : 지반상수

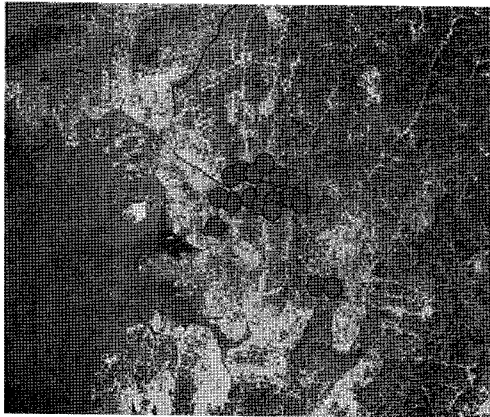


(a) 경험식을 이용한 N 값별 전단파 속도 범위

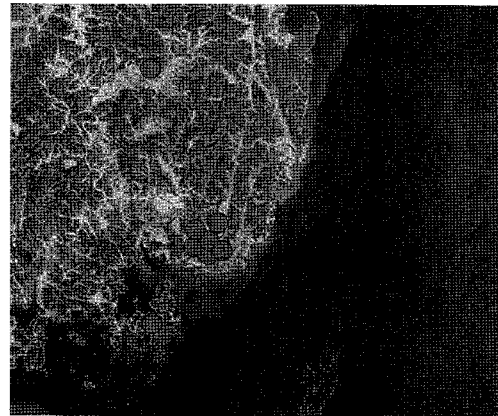


(b) 시험별 전단파속도 평균 (Stokoe et al., 2004)

그림 1. 경험식 제안자별 전단파 속도 범위



(a) 서울·경기지역 (17개소 18공)



(b) 경상도 지역 (8개소 14공)

그림 2. 연구대상지역 내 현장 시험 위치

SIGSD-1	SIGSD-2	SIGSD-3	SIGSD-4
2.2 23.00	2.7 23.00	2.3 3.00	1.8 3.00
11.30	5.20	4.30	3.00
4.3 6.30	14.30	7.30	5.30
5.80	7.30	4.30	5.8 3.90
8.30	5.30	34.30	7.00
27.00	12.30	28.30	8.7 55.30
43.00	44.30	44.30	50.20
50.20	28.30	50.20	48.20
12.4 12.30	13.3 13.30	13.2 21.30	13.0 0.30
24.30	18.30	38.30	8.30
50.20	26.30	50.20	15.30
50.20	37.00	50.17	33.30
18.5 50.7	50.30	50.14	41.30
50.8	50.67	27.0 50.6	45.30
50.8	50.20	50.19	50.18
30.8	50.24	50.17	24.0 50.16
50.4	25.0 30.9	50.4	50.7
26.8	26.0	50.5	30.8
29.6	29.0	29.2	28.5
		31.3	31.5
			33.0

(a) 서울 경기지역 (SK-BH-5)

BH-EX-1	BH-EX-2	BH-EX-3	BH-EX-4
11.80 4.30	4.30	2.3 3.00	1.8 3.00
4.30	4.30	4.30	3.00
4.30	4.30	7.30	5.30
10.9 3.90	3.90	7.30	5.8 3.90
1.30	12.7 7.30	11.3 7.30	7.00
1.30	7.30	7.30	8.7 55.30
1.30	7.30	7.30	50.20
1.30	7.30	7.30	48.20
1.30	7.30	7.30	8.30
1.30	7.30	7.30	15.30
1.30	7.30	7.30	33.30
1.30	7.30	7.30	41.30
1.30	7.30	7.30	45.30
1.30	7.30	7.30	50.18
1.30	7.30	7.30	24.0 50.16
1.30	7.30	7.30	50.7
1.30	7.30	7.30	30.8
45.2 45.2	45.2	47.0 30.8	50.7
52.0 50.4	50.4	50.4 30.8	30.8
60.0 50.4	50.4	50.4	28.5
		50.5	31.5
			33.0

(b) 경상도지역 (KB-EX-1)

그림 3. 연구대상 부지 지층 현황도

하였으며, 연구 대상지역을 조사지역별로 점성토와 풍화토층으로 나누어 각각 수행하였다. 본 연구를 위해 25개소 32공의 시추조사와 더불어 필요한 현장시험을 수행하였다.

본 연구대상지역중 서울·경기지역에 분포하는 점성토층의 두께는 0.50m~11.30m(평균 4.50m), N값은 2~21(평균 10)정도로 다양하였으며, 풍화토층의 두께는 1.20m~12.00m(평균 5.00m), N값은 2~48(평균 32)정

도의 범위를 나타내었다. 그림 3(a)의 조사지역 단면도에서 보는 바와 같이 서울 경기지역의 풍화토층은 경상도 지역에 비해 층두께는 얇으나, 표준관입시험에 의한 N값은 상대적으로 큰 경향을 보였다. 이에 반하여 경상도 지역에 존재하는 점성토층의 두께는 1.60m~17.70m(평균 9.00m), N값은 1~18(평균 4)정도였으며, 풍화토층의 두께는 2.10m~28.40m(평균 10.00m), N값은 12~47(평균 27)정도였다. 그림 3(b)의 경상도 지역 단면도에서 보는 바와 같이 점성토의 두께는 서울 지역에 비해 두껍게 발달한 지역임을 알 수 있고, 이는 대부분이 해안가를 중심으로 하고 있어 해성기원 퇴적층이 넓게 발달한 영향 때문이라고 추정할 수 있으며 N값도 서울 경기지역에 비해 작은 값으로 측정되었다.

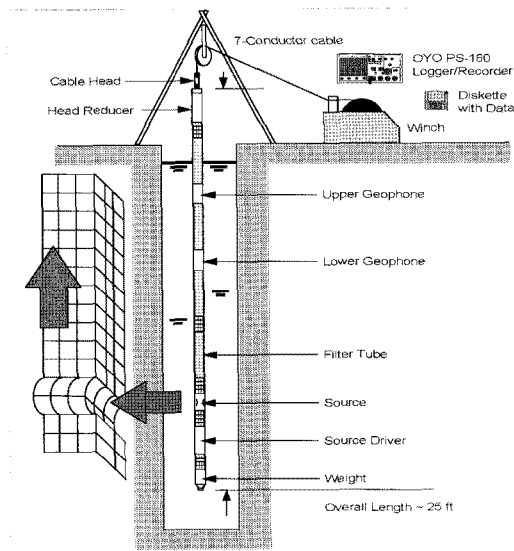
2.2 현장시험방법

본 연구는 표준관입시험의 N값과 전단파 속도간의 상관관계를 구명하고 기존 경험식과의 비교, 검토하기 위하여 표준관입시험을 수행하여 에너지 효율에 대한 보정한 값을 적용하였으며, 각 구간에서의 전단파 속도는 그림 4와 같은 부유형 PS 속도검층기(Suspension P-S logger)로 측정하였다. 전단파 속도 측정을 위한 프로브(probe)는 일본 OYO사에서 제작된 제품으로 Model 3302를 이용하였으며, 측정된 전단파는 Geologger III(Model 3970)로 판독하였다.

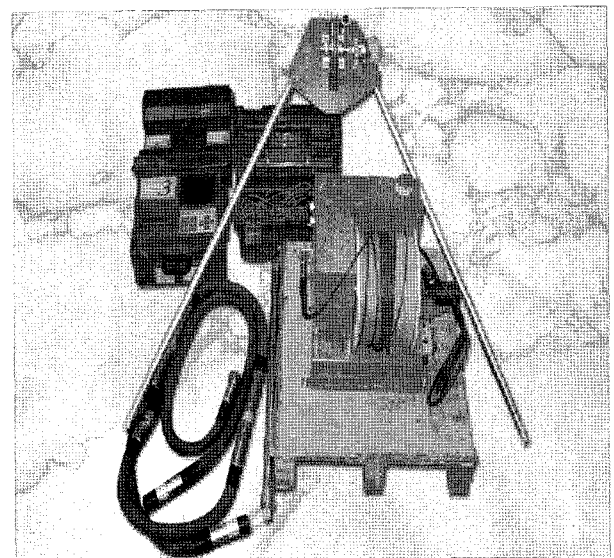
부유형 PS 속도검층은 음파를 이용한 방법으로 지표

나 시추공 내에서 수행되는 탄성과 탐사처럼 수신기에 기록되는 모든 파형을 측정하여 지반의 P파와 S파를 측정한다. SPS 속도검층은 다운홀 또는 업홀시험이 어려운 깊은 심도나 지표에서 음원을 발생시키기 쉽지 않은 교량부 등의 전단파 속도 측정에 효과적이다. 기존 진원과 다른 부분은 방사전력(radiation power)을 증가시키기 위해 타격판의 면적을 넓게 하고 고주파수를 증가시키는 방식을 사용하는 것이다. 이 방식은 진원의 타격에너지를 증가시키기 위해 가진원(source)의 크기를 증가시킬 필요 없이 이 방사전력을 최대 5배까지 증가시킬 수 있으므로 제한된 시추공 직경에서 양질의 횡파를 얻을 수 있는 장점이 있고 횡파가 3km/sec일 때도 유용하다고 보고되었다(Ogura, 1988). 실제 많은 현장에서 이러한 장점을 이유로 사용하고 있으나, 센트럴라이징 여부, 공벽과 케이싱의 이완문제 등에 따라 양질의 자료취득에 어려움이 존재하며 이러한 문제해결을 위해 최근 다양한 논의(조철현 외, 2006)가 진행되고 있다.

기존 자료를 토대로 전단파 속도 측정시 문제점을 최소화하기 위하여 SPS 속도검층기에 센트럴라이저를 설치하여, 전단파 속도 측정 중 시추공벽에 발진부와 수신부가 홀의 중앙에 위치하도록 하였다. 또한 케이싱(casing)과 시추공 사이의 이완문제를 보완하기 위하여, 그 사이에 시추공 주변의 토사로 되메우기를 실시하여 케이싱과 공벽과의 이완을 최대한 방지하려 노력하였다.



(a) Suspension PS 시험기 모식도(GEO vision 2004)



(b) Suspension PS 시험기

그림 4. Suspension PS 시험기 및 모식도

3. 시험 결과

3.1 연구대상지역 토질특성

시추조사시 채취한 교란 및 불교란 시료를 이용하여 물리적 특성을 평가하기 위해 서울 경기지역 72회, 경상도 지역 24회, 총 96회의 토질시험을 실시하였다. 표 2는 연구대상지역의 점성토와 풍화토에 대한 물성시험 결과이다.

표 2와 같이 연구대상지역의 토성시험 결과 점성토는 ML과 CL로 분류되었고, 풍화토는 SM으로 분류되었다. 점성토의 경우 비중과 200체 통과량이 경상도 지역보다 서울 경기지역의 값이 큰 것으로 분석되었으나 함수비와 액·소성한계는 경상도 지역이 큰 값을 나타내고 있다. 특히, 함수비의 경우 경상도 지역의 경우 대부분 해성기원 퇴적으로 인근지역에 분포하는 해수의 영향으로 함수비가 높게 나타나는 것으로 추측된다. 한편,

풍화토의 경우 함수비, 비중 및 200체 통과량 등을 보면 전체적으로 경상도 지역이 서울지역에 비해 큰 값을 알 수가 있었다.

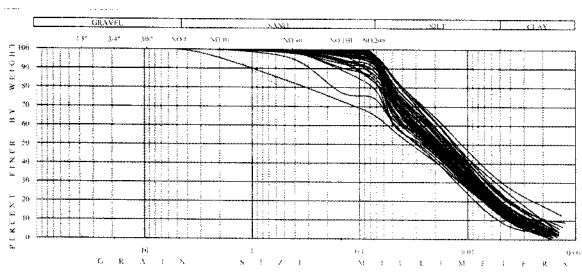
그림 5는 조사 지역별로 체분석을 통한 입도분포곡선을 나타낸 것으로 점성토의 경우 점토보다는 실트성분을 많이 함유하고 있으며, 풍화토의 경우는 모래질 흙이 많이 포함된 것을 알 수 있었다.

3.2 표준관입시험 결과

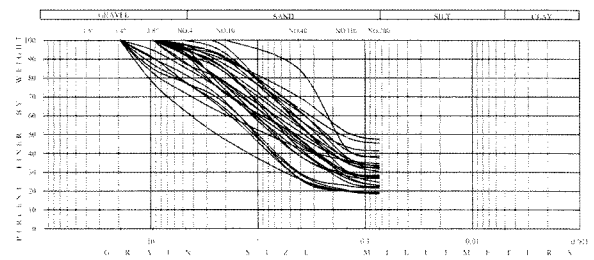
그림 6은 서울 경기지역과 경상도 지역별로 표준관입시험 결과를 나타낸 것으로 에너지 효율로 보정한 수정 N값이다. 표준관입시험에 사용된 장비는 POWER 4000SD형으로 해머 유형은 자동해머(auto hammer)를 이용하였으며, 해머에 대한 에너지 효율 측정결과 69.1%로 측정되었다. 이 측정된 해머의 효율과 각 지층별 상재하중, 지하수위조건, 풋드길이, 시추공의 직경 등을 감안하여 N

표 2. 각 지역별 흙의 기본 물성치

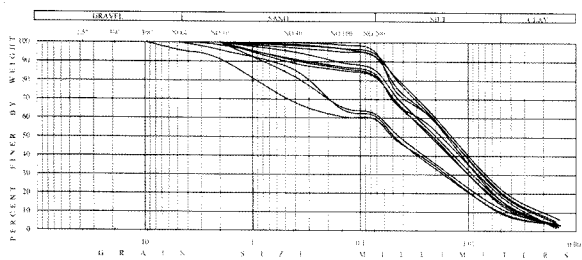
구 분		서울 경기지역		경상도 지역	
		점성토층 (평균값)	풍화토층 (평균값)	점성토층 (평균값)	풍화토층 (평균값)
통일 분류법	USCS	ML, CL	SM	ML, CL	SM
함수비 (%)	ω	30.4	15.1	36.6	17.7
비 중	G_s	2.68	2.63	2.67	2.65
No. 200체 통과량 (%)		85.0	29.4	81.2	41.4
액성한계 (%)	LL	37.6	N.P	43.2	N.P
소성한계 (%)	PL	25.2	N.P	26.7	N.P



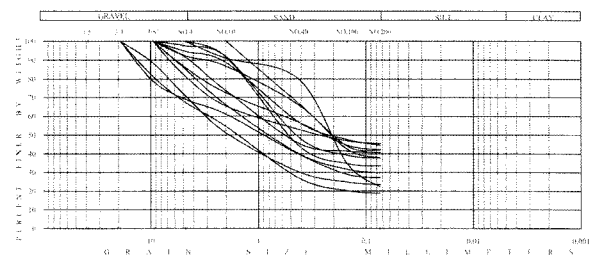
(a) 서울 경기지역(점성토층)



(b) 서울 경기지역(풍화토층)



(c) 경상도 지역 (점성토층)



(d) 경상도 지역 (풍화토층)

그림 5. 각 지역별 입도분포곡선

값 보정에 활용하였다.

그림 6에서 보인 바와 같이 SPT 측정결과 점성토의 경우 서울 경기지역은 심도 10m 이하의 얕은 층에서 N값이 1~20 이내로 광범위하게 분산되어 나타났으며, 경상도 지역의 N값은 전체적으로 $N \leq 10$ 로 심도에 상관 없이 비교적 일정한 값을 보였으며 이는 경상도 지역 점성토가 주로 해성퇴적토로 이루어져 있고 층 두께도 서울지역에 비해 상대적으로 두껍게 발달하고 있는 영향 때문으로 판단된다.

측정된 N값을 산술평균값으로 단순 비교하면 점성토 층의 경우 N값이 서울 경기지역은 심도 증가에 따라 평균적으로 1.5정도의 증가추세를 보이나, 경상도 지역은 심도 증가에 따라 0.5정도 증가추세를 보여 심도가 증가해도 N값이 크게 증가하는 양상을 보이지 않았다. 풍화토층의 경우에는 두 연구 대상지역 모두 심도에 따라 전체적으로 증가추세가 있음을 알 수 있다. 서울 경기지역은 심도가 증가함에 따라 N값이 평균 3.5정도의 범위로 증가하였으며, 경상도 지역은 N값이 2.0정도로 서울

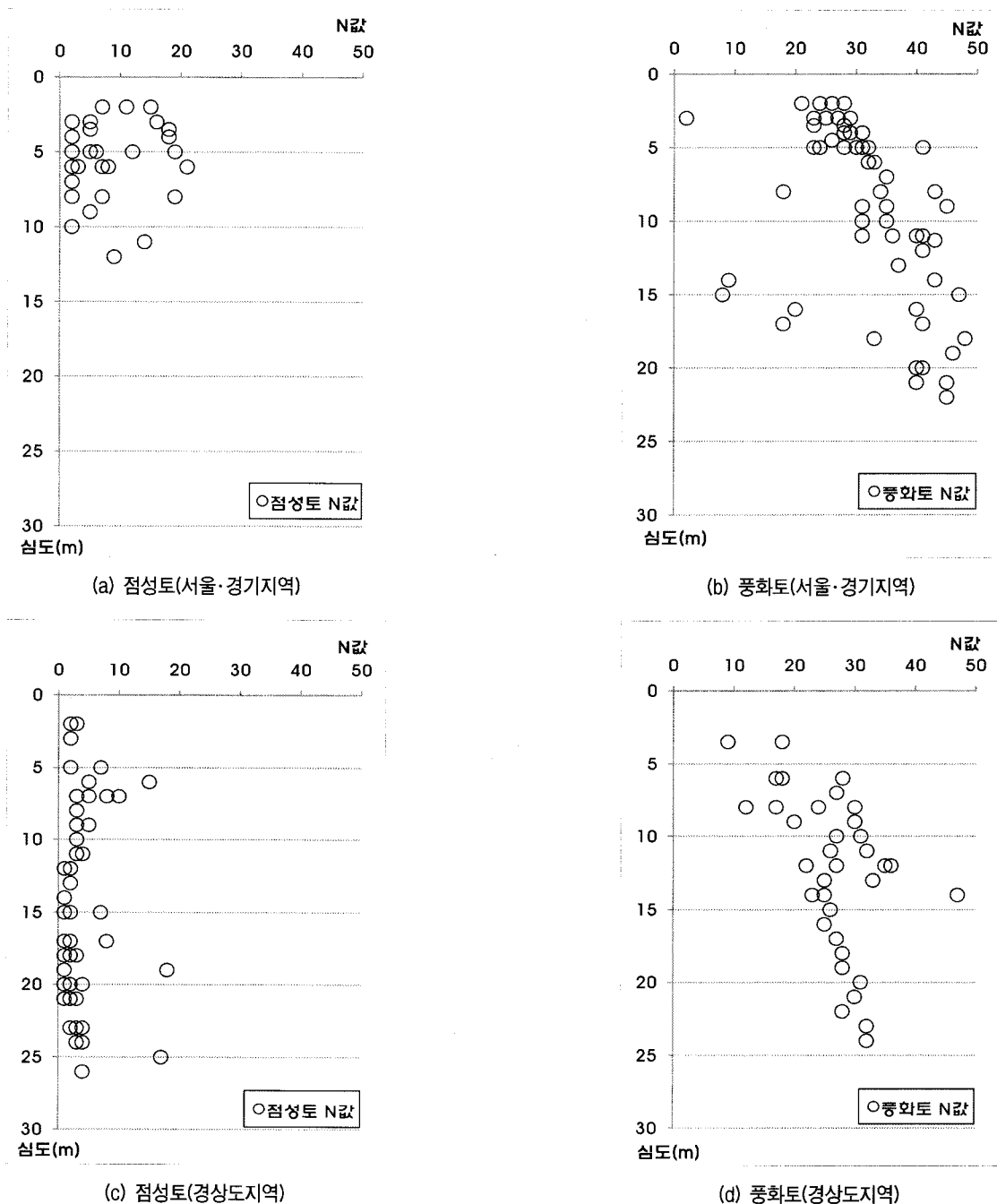


그림 6. 표준관입시험 측정 결과

경기지역이 심도가 증가할수록 N값 증가량이 크게 나타남을 알 수가 있었다.

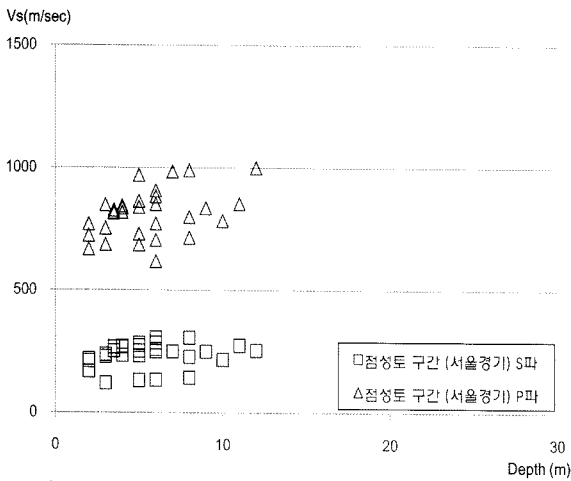
3.3 SPS 검층 결과

그림 7은 서울·경기지역과 경상도 지역의 심도별 SPS 속도검층 측정 결과를 나타낸 것이며, 그림 8은 연구 대상지역의 대표적인 시추공에 대하여 속도분포 및 실측 데이터를 예시한 것이다. SPS 속도검층을 통해 측정된 전단파 속도는 연구 대상지역 모두 심도의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. SPS 검층은 압축파인 P파, 전단파인 S파 모두를 대상으로 시행되었으나 본 연구에서는 내진설계시 지반등급결정에 필요한 전단파(V_s)를 대상으로 하였다.

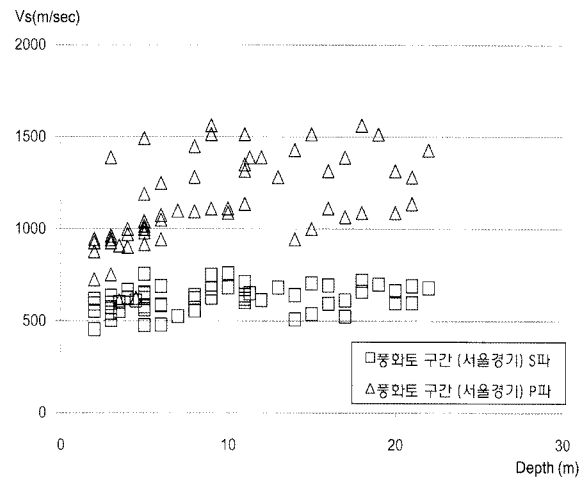
그림 7에서 보는바와 같이 전단파 속도를 기술통계법

을 이용하여 검토한 결과 점성토의 경우 서울·경기지역은 121~306m/sec(평균 238), 최빈값은 249m/sec를 보였으며, 경상도 지역은 132~323m/sec(평균 218), 최빈값은 176m/sec의 범위를 보였다. 이 결과는 전체적으로 서울·경기지역이 평균 전단파 속도와 최빈값이 동일하게 높게 측정되는 결과를 나타낸 것으로 2장에 언급한 연구대상지역의 지층현황 결과와도 일치하는 결과를 보였다.

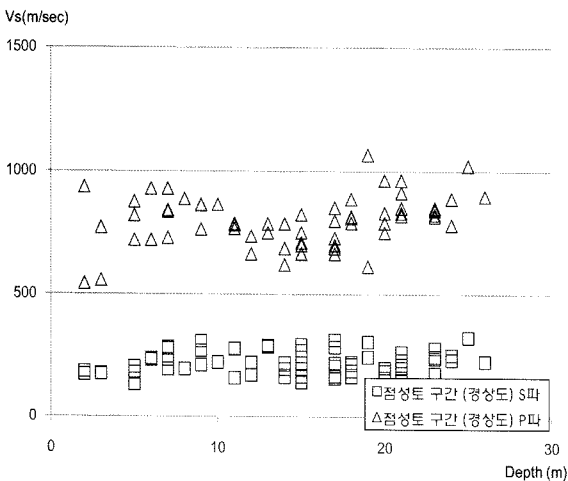
풍화토의 경우 서울·경기지역은 477~759m/sec(평균 622), 최빈값은 620m/sec를 보였으며, 경상도 지역은 550~742m/sec(평균 666), 최빈값은 605m/sec으로 평균적으로 보면 경상도 지역의 전단파 속도가 높게 측정되는 경향을 보였다. 이는 평균 전단파 속도는 서울·경기지역이 낮으나, 최빈값은 서울·경기지역이 높게 나오는 결과로 전단파 속도의 편차가 심함을 알 수가 있



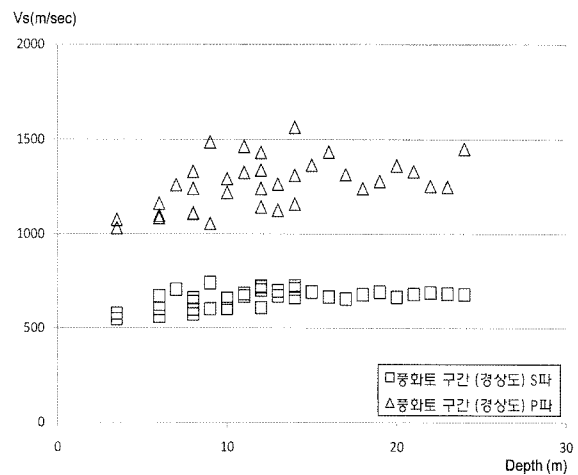
(a) 점성토 (서울 경기지역)



(b) 풍화토 (서울 경기지역)



(c) 점성토 (경상도 지역)



(d) 풍화토 (경상도 지역)

그림 7. 심도별 SPS 측정 결과

다. 서울 경기지역의 평균 N값은 32, 경상도 지역의 평균 N값은 27로 서울 경기지역이 높게 측정되었으나, 서울 경기지역의 N값의 범위가 2~48정도로 경상도 지역 12~47의 범위보다 큰 것을 알 수가 있었다. 이러한 결과로 보면 전단파 속도와 N값은 서울 경기지역이 최소값과 최대값의 편차가 큰 것을 알 수 있었다.

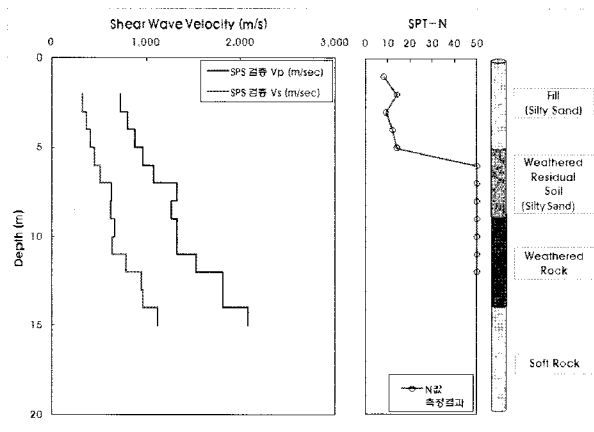
4. 시험 결과 분석

4.1 지반강도에 따른 전단파 속도 특성

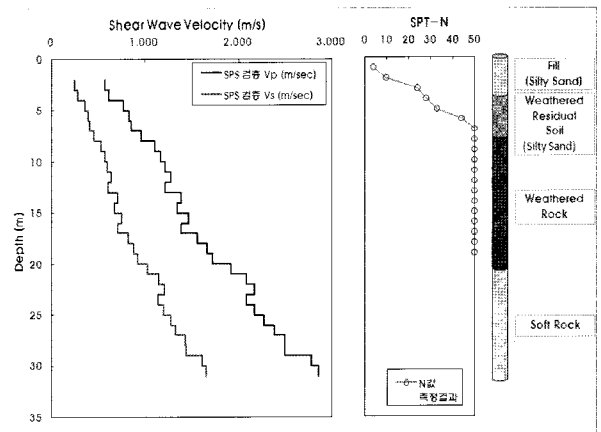
일반적으로 N값이 증가할수록 전단파 속도는 증가된다고 알려져 있다. 본 연구에서는 표준관입시험을 통해 N값을 측정한 후 동일한 지점에서 전단파 속도를 측정하여 그 결과를 분석하여 지반강도가 전단파 속도에 끼치는 영향을 고찰해 보기로 한다. 연구 대상지역인 서울·경기지역과 경상도 지역에서의 점성토와 풍화토에 대하여 지반강도(N값)와 전단파 속도(V_s)와의 관계를

그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 SPS 속도검층을 통해 측정된 전단파 속도는 현장에서 측정된 실측값으로 점성토층에 비해 풍화토층에서 측정된 전단파 속도가 비교적 분산정도가 적은 것으로 보이며, 풍화토층에서도 서울 경기지역의 풍화토층이 경상도 지역에 비해 측정된 전단파 속도 값의 분산범위가 넓게 분산됨을 알 수 있었다.

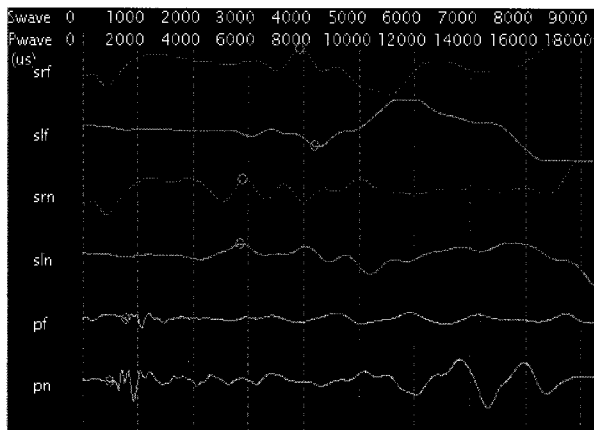
그림 9의 지반강도에 따른 전단파 속도(V_s -N값)를 그림 10과 같이 양대수 그래프로 직선화하여 검토하면 지역에 상관없이 지반강도의 증가에 따라 전단파 속도가 일정한 증가 거동을 나타내었다. 특히, 점성토는 연약한 경우보다는 단단한 경우일 때 일정한 증가현상을 보이는 것으로 나타났는데, 단단한 지층일수록 SPS 속도 검층을 통한 전단파 속도의 변화 양상이 상대적으로 양호한 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 풍화토 지반은 서울 경기지역에 비해 경상도 지역에서 측정된 전단파의 속도 변화가 지반강도의 변화에 밀접하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 대한 연구는 향후 보다 많은 현장자료



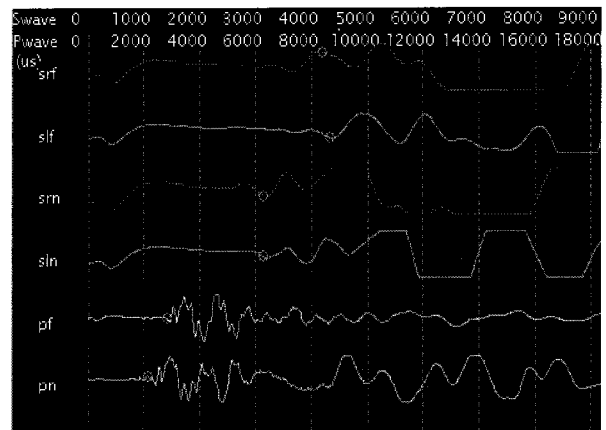
(a) 탄성파 속도 주상도(서울 경기지역)



(b) 탄성파 속도 주상도(경상도 지역)

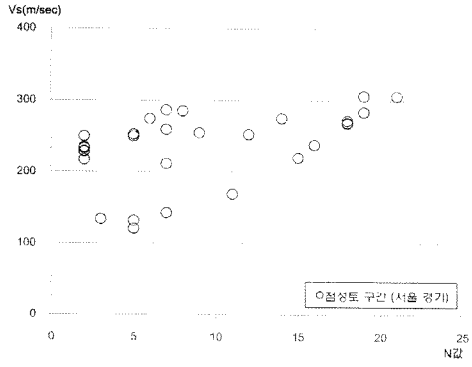


(c) 탄성파 속도 실측 데이터(서울 경기지역)

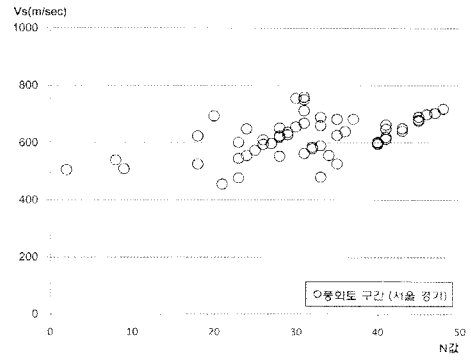


(d) 탄성파 속도 실측 데이터(경상도 지역)

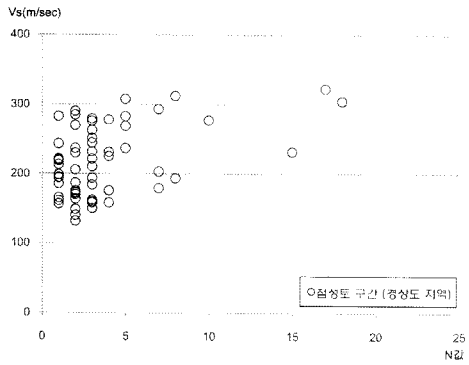
그림 8. 지역별 대표적인 탄성파주상도 및 실측데이터



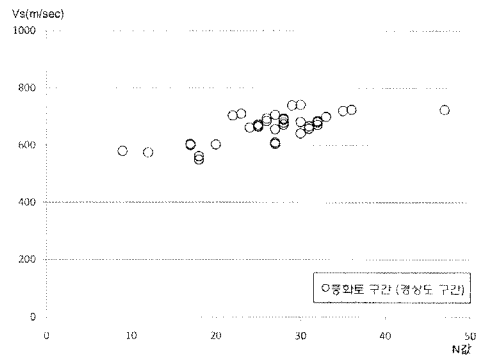
(a) 점성토 측정결과(서울 경기지역)



(b) 풍화토 측정결과(서울 경기지역)

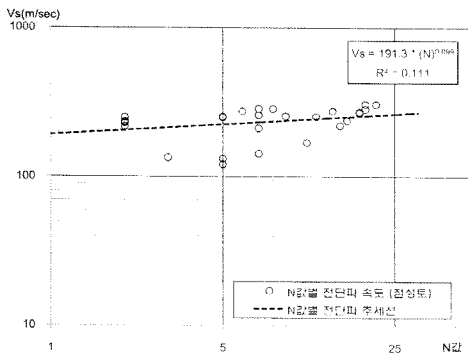


(c) 점성토 측정결과(경상도 지역)

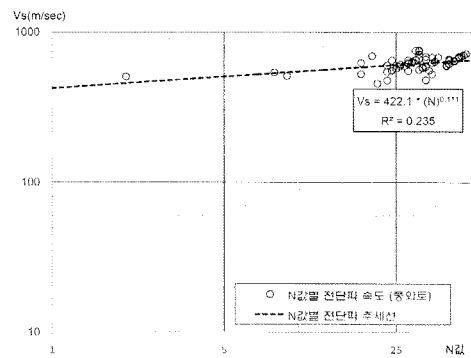


(d) 풍화토 측정결과(경상도 지역)

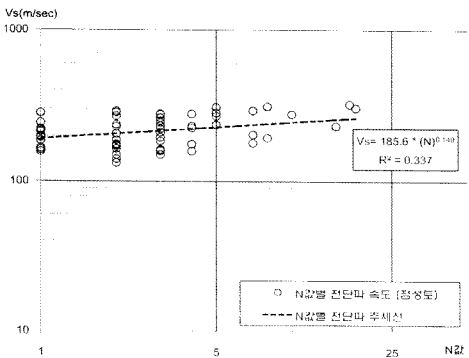
그림 9. 각 지역별 지반강도에 따른 전단파 속도



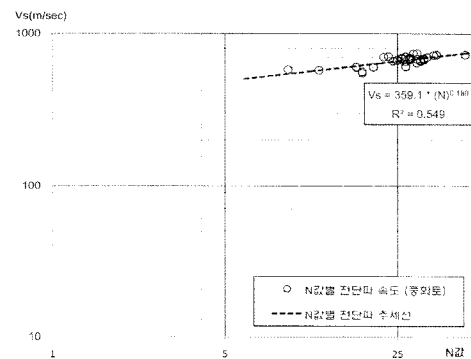
(a) 점성토(서울 경기지역)



(b) 풍화토(서울 경기지역)



(c) 점성토(경상도 지역)



(d) 풍화토(경상도 지역)

그림 10. 각 지역별 지반강도와 전단파 속도와의 관계(log-log graph)

와 각 지역별로 토질특성을 세분화한 후 그 결과를 분석하여, 토질특성별 전단파 속도의 상관관계에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

4.2 SPS 검층과 다운홀 및 SCPT간 전단파 속도 비교

본 연구에서 사용된 SPS 속도검층기를 통해 측정된 전단파 속도에 대한 분석 및 해당 지층별로 측정된 전단파 속도를 동일 지층에서 수행된 다른 현장시험 기법과 비교하여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출해 보고자 하였다. 풍화토의 경우 현장에서 많이 사용되고 있는 다운홀 기법을 이용하여 SPS 검층과 비교하였으며, 점성토의 경우 콘 관입시험(CPT)중 전단파 속도 측정이 가능한 탄성파 콘관입시험(SCPT)를 수행하여 점성토와 풍화토에 대한 지층별 전단파 속도를 비교하였다.

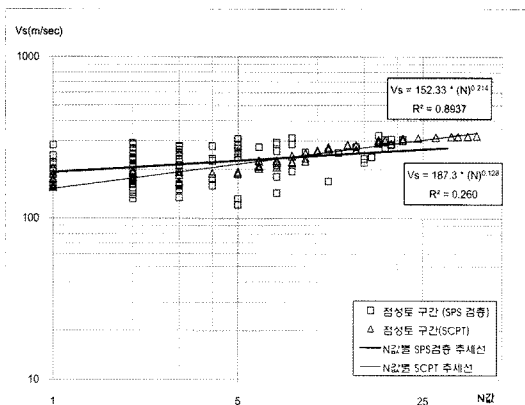
그림 11에서 나타난 결과와 같이 점성토에서는 SPS 속도검층과 다운홀 기법이 유사한 결과를 보여주었으나, 풍화토에서 측정된 전단파 속도의 경우 SPS 검층을 통한 전단파 속도가 다운홀 기법을 통해 측정된 전단파 속도에 비해 크게 나타났다. N값 증가별로 SPS 속도검층을 통해 측정된 전단파 속도는 평균 22m/sec의 증가를 보였으나, 다운홀 기법을 통해 측정된 전단파 속도는 평균 12m/sec의 증가를 보였다. 이러한 결과는 SPS 검층과 다운홀 기법간 전단파 속도 측정방식의 차이에 의한 결과로 볼 수 있다. 다운홀 기법은 상부에서 전단파를 발생시켜 하부로 전달해주는 방식을 취하는 반면, SPS 검층은 하부에서 상부로 진행하며 발진과 수진이 동시에 움직이며 측정되어, 파의 손실을 최소한으로 줄이는 기법을 사용하는데 그 차이가 있다. 따라서, 측정

심도가 깊은 지역일수록 상부에서 발생시킨 전단파의 손실이 발생하는 다운홀 기법에 비해, 발진과 수진이 이동하며 측정이 이루어지는 부유형 PS 검층기법의 신뢰도가 높을 것으로 사료된다.

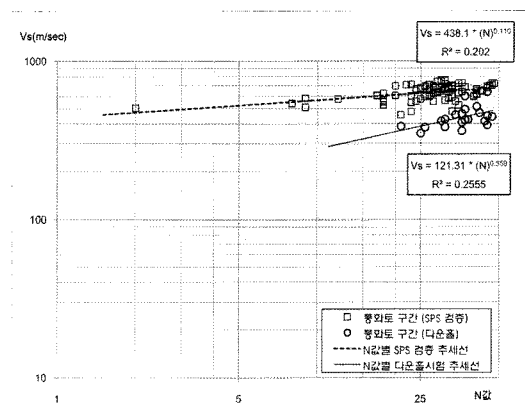
특히, 풍화토가 발달하는 지층의 경우 그림 3에서 보는 바와 같이 서울 경기지역은 평균 G.L(-) 13.0m 깊이에서 출현하고, 경상도 지역은 평균 G.L(-) 23.0m등에서 출현하고 있어 상대적으로 점성토에 비해 심부에서 출현하는 결과로 하부로 갈수록 파의 손실로 인한 전단파 속도가 감소된 결과라 판단된다. 이에 반해 점성토의 경우 대부분 지표에서 가까운 지점에 발달하고 있어, 상대적으로 파의 손실이 적어 SPS결과와 SCPT결과간 큰 차이가 없는 것을 알 수가 있다. 결과적으로 SPS 속도검층결과와 파의 손실이 적어 다운홀 기법을 통해 측정된 전단파 속도와는 차이가 있을 것으로 보이며, 이 결과는 Stokoe 등 (2004)이 연구한 결과와 동일한 것으로 판단된다.

4.3 N값과 전단파 속도와의 상관관계

본 연구 대상지역인 서울 경기지역과 경상도지역에 존재하는 점성토와 풍화토에 대하여 지역에 관계없이 지반강도와 전단파 속도와의 상관관계를 나타낸 것이 그림 12이다. 일반적으로 국내에서 많이 사용하고 있는 표 1의 Imai(1982)식과 Okamoto(1989)식을 본 연구의 SPS 속도검층시 측정된 전단파 속도와 비교하여 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 보는바와 같이 점성토에서는 Imai(1982)의 제안식보다는 Okamoto(1989)가 제안한 경험식과 유사한 결과를 보이고 있으며 특히, $5 \leq N \leq 25$ 의 범위에서는 거의 일치하는 것으로 나타났다.



(a) 점성토 (SPS검층과 SCPT)



(d) 풍화토 (SPS검층과 다운홀시험)

그림 11. 각 토층별 SPS 검층과 SCPT 및 다운홀 시험간 전단파 속도 특성

한편, 풍화토에서 SPS 속도검층을 통해 측정된 전단파 속도는 평균 636m/sec의 범위를 보이며, Imai(1982)가 제안한 경험식으로 산정된 전단파 속도는 258m/sec, Okamoto(1989) 제안한 경험식으로 산정된 전단파 속도는 평균 318m/sec 이다. 이 결과는 연구대상지역에서 측정된 전단파 속도는 Imai(1982) 경험식보다는 평균 40.5%, Okamoto(1989) 경험식보다는 평균 50%정도 크게 측정되는 경향을 보이므로 풍화토등의 사질토에서는 경험

식과 본 연구대상지역 현장에서 측정된 실측값과는 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과를 토대로 한정된 시험결과이기는 하지만 본 연구 대상지역의 점성토층과 풍화토층에서 지반강도와 전단파 속도와의 상관관계를 정리하면 다음과 같다.

$$V_s = 187.3 \times N^{0.128} \quad (1)$$

$$V_s = 438.1 \times N^{0.110} \quad (2)$$

여기서, N는 수정 N값이고, 식 (1)은 점성토, 식 (2)는 풍화토에 적용한 경험식을 나타내었다.

본 연구 대상지역에서의 제한된 자료를 대상으로 경험식을 도출한 것이므로 향후 보다 많은 자료를 수집·분석하여 정확한 상관관계를 도출한다면 실무면에서의 응용이 가능하리라 사료된다.

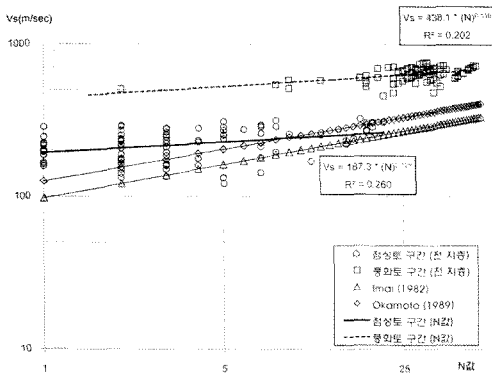
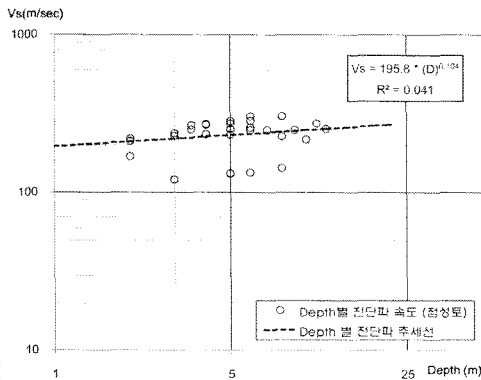


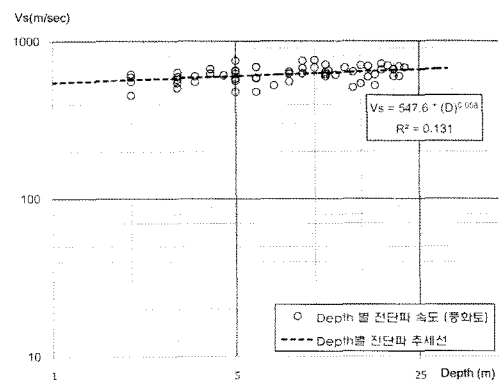
그림 12. N값에 따른 전단파 속도 제안식 결과

4.4 심도에 따른 전단파 속도 특성

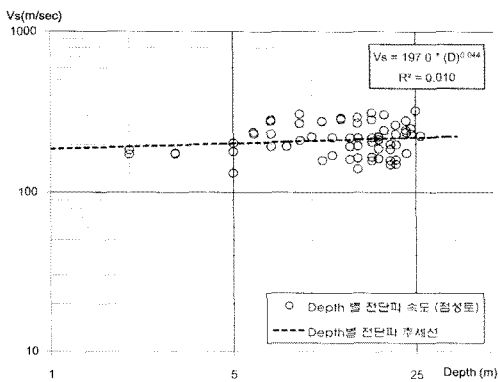
각각의 심도에서 측정된 전단파 속도를 분석하고 아울러 심도에 따른 전단파 속도의 관계를 Ohta 등(1978)



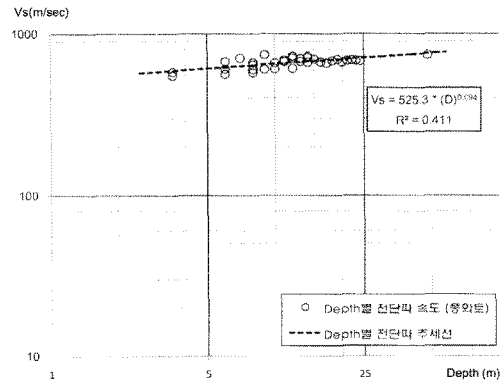
(a) 점성토(서울 경기지역)



(b) 풍화토(서울 경기지역)



(c) 점성토(경상도 지역)



(d) 풍화토(경상도 지역)

그림 13. 각 지역별 심도에 따른 전단파 속도 특성

의 경험식과 비교·검토하였다.

(1) 대상지역별 검토

본 연구 대상지역에 대하여 심도에 따른 전단파 속도를 지역 및 지반종류별로 도시하면 그림 13과 같다.

심도에 따른 전단파 속도의 증가량은 점성토의 경우 서울 경기지역은 심도 증가에 따라 평균 43m/sec의 증가량을 보였으며, 경상도 지역은 평균 14m/sec의 범위를 나타내었다. 즉, 점성토의 경우 서울 경기지역이 경상도 지역에 비해 심도증가에 따른 전단파 속도가 약 30m/sec의 범위로 더 많이 증가함을 알 수 있었다. 이 결과는 그림 6(a)와 (c)의 서울 경기지역의 심도별 N값 증가율이 경상도 지역에 비해 큰 것과 일치하는 경향을 보였다. 한편, 풍화토의 경우 서울 경기지역은 심도 증가에 따라 평균 66m/sec의 증가량을 보였으며, 경상도 지역은 평균 49m/sec의 범위를 나타내어 이 결과 역시 점성토와 같이 N값의 증가율과 유사성을 보였다. 풍화토의 경우 서울 경기지역이 경상도 지역에 비해 심도증가

에 따라 약 17m/sec의 증가량을 나타내는 것으로 분석되었는데, 이러한 경향은 그림 6(b)와 (d)에 나타난 바와 같이 점성토에 비해 풍화토의 지역별 N값 증가율 변화 폭이 적은 결과로 인한 전단파 속도 차이로 할 수 있다.

(2) 토질 조건별 검토

연구결과를 지역에 관계없이 점성토와 풍화토에 대하여 심도와 전단파 속도와의 관계를 그림 14에 나타내었고 이 관계를 정리하면 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$V_s = 215.4 \times (D)^{0.017} \quad (3)$$

$$V_s = 534.7 \times (D)^{0.077} \quad (4)$$

여기서, D는 심도이고, 식 (3)은 점성토, 식 (4)는 풍화토에 적용한 경험식이다.

식 (3)과 식 (4)는 심도의 향으로만 표시되었지만, SPS 속도검층으로 해당심도에서 측정된 값으로 구한 전단파 속도를 회귀분석한 결과이므로 계수속에는 토질조건, 강도(N값)등이 포함된 값이다.

(3) 기존 경험식과의 비교 검토

국내에서 적용되고 있는 전단파속도 추정식은 대부분 지반강도와의 상관관계를 이용하고 있으나 Ohta 등 (1978)은 점성토와 사질토로 나누어 N값과 심도 관계로부터 전단파 속도를 추정하기 위한 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$V_s = 68.79 \times (N)^{0.171} \times (D)^{0.199} \times E \times F \quad (5)$$

여기서, D는 심도, E는 지질연대를 나타내는 상수로서 충적토인 경우 E = 1, F는 지반조건에 따른 상수로써

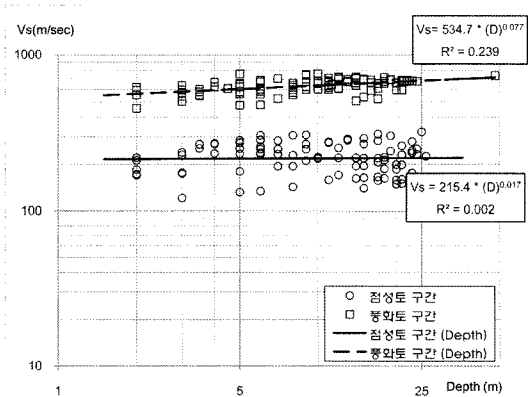
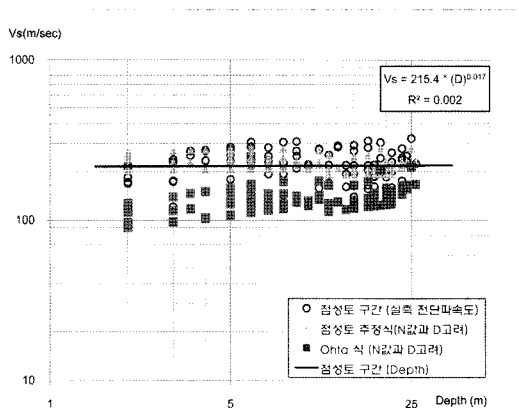
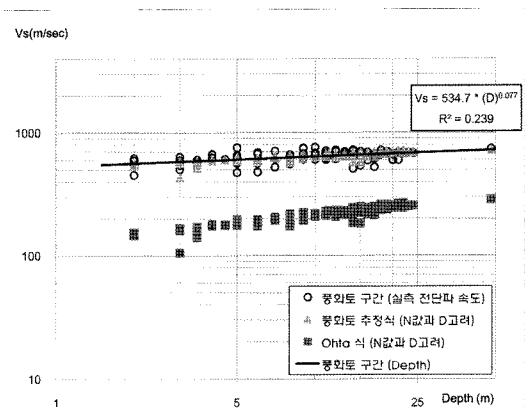


그림 14. 심도와 전단파 속도와의 관계



(a) 점성토(Ohta식과 실측 전단파 속도)



(b) 풍화토(Ohta식과 실측 전단파 속도)

그림 15. 심도에 따른 전단파 속도와 Ohta 등(1978)의 제안식과 비교

점토인 경우 $F = 1$, 모래질 흙인 경우 $F = 1.086$ 이다.

본 연구결과를 N 값과 심도 D 를 적용하여 Ohta 등(1978)이 제안한 식과 비교·검토한 결과를 그림 15에 나타내었다. 전단파 속도와 심도와의 상관관계를 구명하기 위하여 그림 12의 $V_s - N$ 관계와 식 (1), 식 (2)와 그림 14의 $V_s - D$ 의 관계 및 식 (3)과 식 (4)를 참조하여 식 (5)의 Ohta 등(1978)의 경험식과 비교한 결과는 다음과 같다.

• 점성토

$$V_s = 184.6 \times (N)^{0.128} \times (D)^{0.017} \times E \times F \quad (6)$$

단, $E = 1$, $F = 1$ 로 적용.

• 풍화토

$$V_s = 342.2 \times (N)^{0.110} \times (D)^{0.077} \times E \times F \quad (7)$$

단, $E = 1$ 이고, $F = 1.086$ (모래질 흙)로 적용.

식 (6)과 식 (7)은 Ohta 등(1978)의 식과 비교하기 위하여 본 연구결과를 변환하여 추정한 식인데, 본 연구대상지역이 충적층임을 감안하여 식 (5)의 계수 $E = 1$ 로 가정하였고, 식 (7)의 풍화토는 모래질 흙으로 간주하여 $F = 1.086$ 을 적용하였다. 이 관계를 그림으로 나타내면 그림 15에서 보는바와 같이 직선적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

위의 결과에서 보면 Ohta 등(1978)이 제안한 식은 연구대상지역에서 측정된 실측 전단파 속도와는 다른 결과를 보인다. 실측된 전단파 속도를 Ohta 등(1978)이 제안한 식으로 변환한 식 (6)을 적용하여 본 결과 그림 15(a)에서 점성토인 경우 거의 일정한 경향을 보이는데(△으로 표기), 실측한 결과(○으로 표기)와는 큰 차이가 없었으나, Ohta 등(1978)의 값과는 다소의 차이를 나타내었다. 한편, 그림 15(b) 풍화토의 경우에는 깊이에 따라 선형으로 증가하는 경향을 보이는데, (그림 15(b) △으로 표기) Ohta 등(1978)의 제안식으로 변환시킨 식 (7)과 선형으로 증가하는 경향은 동일하나, 전단파 속도는 최대 435m/sec, 최소 330m/sec, 평균 426m/sec로 큰 차이를 보여준다. 따라서, Ohta 등(1978)이 제안한 식을 국내지반에 적용할 경우 강도(N) 및 심도(D)에 대한 요소를 정밀하게 검토한 후 적용하여야 할 것으로 판단되는데, 이는 연구대상지역에 국한되어 측정된 결과이므로 향후 보다 많은 자료를 수집하여 분석하여야만 정확한 상관관계를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 부유형 PS 속도검층을 이용하여 국내 일부 지반(서울 경기지역, 경상도 지역)의 점성토와 풍화토를 대상으로 현장시험인 표준관입시험과 부유형 PS 속도검층 등을 수행하여 전단파 속도 특성을 고찰한 것으로 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연구 대상지역을 대상으로 측정된 전단파 속도는 점성토와 풍화토로 나누어 분석하여 지반강도와 전단파속도와의 상관관계로부터 경험식을 도출한 결과 점성토에서는 기존 연구 결과인 Imai(1982)와 Okamoto(1989)식과 유사하게 나타났으나 풍화토의 경우에는 다소의 차이를 나타내었다.
- (2) SPS 속도검층을 통해 측정된 전단파 속도에 대하여 다른 현장시험 기법과 비교해 본 결과 점성토에서는 SPS 속도검층과 다운홀 기법이 유사한 결과를 보여주었으나, 풍화토의 경우 SPS 검층을 통한 전단파 속도가 다운홀 기법을 통해 측정된 값보다 크게 나타났다.
- (3) 연구 대상지역을 대상으로 전단파 속도와 심도 증가에 따른 분산정도를 보면, 토질 특성별로는 점성토의 경우 풍화토에 비해 심도증가에 따른 전단파 속도 증가 추세는 미미하나 분산범위는 매우 큰 것으로 나타났다. 또한, 연구 대상지역별로는 경상도 지역의 풍화토가 심도에 따라 서울·경기지역보다 전단파 속도가 증가하는 경향을 나타내었지만 전체적으로는 심도에 따른 전단파 속도의 증가는 크지 않은 것으로 판단된다.
- (4) 점성토와 풍화토를 대상으로 전단파 속도를 측정하여 심도별 전단파 속도의 영향을 분석한 결과, Ohta 등(1978)이 제안한 식을 통해 산정된 전단파 속도와는 일치되지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 국내지반에 Ohta 등(1978)이 제안한 식을 적용할 경우 보다 많은 시험을 수행하여 그 결과를 면밀히 분석한 후 적용하여야 할 것으로 사료되는데, 특히 풍화토의 경우에는 적용시 주의를 요한다.

이상의 결과는 제한된 연구 대상지역과 시험 수량을 바탕으로 1차적으로 시도된 연구결과로서 향후 더 많은 시험을 통하여 자료를 수집·분석함으로써 더욱 신뢰성 있는 상관관계를 도출할 경우 표준관입시험과 전단파

속도와와의 제안된 경험식은 향후 토목구조물 설계시 유용하게 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 임국목, 유영철, 송무영, 이상태 (2006), “연약지반에서 SCPT·SPS·UP-Hole을 이용한 진단과 속도분석 및 탐사법의 비교”, *KSEG Conference*.
2. 정영훈, 권영민, 이강원, 정충기, 김명모 (2005), “다양한 시험방법을 이용한 서해안 송도 지역에 분포하는 실트질 모래의 최대 전단 탄성계수 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제9호, pp.65-75.
3. 조성민, 정경자, 김홍중, 정종홍, 선창국 (2004), “탄성파콘관입시험을 활용한 지반의 진단과 전달속도 산정”, *대한토목학회 정기 학술대회 논문집*, pp. 1428-1433.
4. 조철현, 변중무, 황세호 (2006), “천부 지반 환경에서 속도검층 난제들에 대한 고찰”, *물리탐사학회 논문집*, 제9권, 제3호, pp.185-192.
5. GeoVision Geophysical Services (2002), P-S suspension logging borehole B-2, GeoVision Suspension Logging Report.
6. Imai, T. & Tonuchi, K. (1982), “Correlation of SPT N-value with S-wave velocity and shear modulus”, *Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam*, pp.67-72.
7. Ogura, K. (1988), *Expention of Applicability for Sus-pension P-S Logging*, OYO Technical Report, 10, pp.69-98.
8. Ohta, Y., Goto, N. (1978), “Empirical Shear Wave Velocity Equation in Terms of Characteristic Soil Index”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.6, pp.167-187.
9. Okamoto, S., Kokusho, T., Yoshida, Y. and Kusunoki, K. (1989), “Comparison of Surface vs. Subsurface Wave Source for P-S logging in Sand Layer”, *Proc. 44th Annual Conf. JSCE*, Vol.3, pp.996-997.
10. Stokoe K.H., Joh S. H. and Woods R. D. (2004), “Some Contributions of in situ Geophysical Measurements to Solving Geotechnical Engineering problems”, *Proc. of the 2nd International Conf.on Site Characterization ISC'2 Porto*, Portugal, pp.19-42.

(접수일자 2008. 9. 20, 심사완료일 2008. 10. 24)