

N값과 전단파 속도의 상관식 비교

Comparison of Correlation Equations between N value and Shear Wave Velocity

공진영¹⁾, Jin-Young Kong, 채휘영¹⁾, Chae, Hwi-Young, 천병식²⁾, Byung-Sik Chun

¹⁾ 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Shear modulus has been recognized as one of the important soil properties in dynamic analysis of ground and can be calculated from in situ measurement of shear wave velocity. Field seismic tests are the most accurate but expensive methods to investigate dynamic ground characteristics. Due to that reason, empirical equations for estimating the shear wave velocity are widely used rather than conducting in-situ tests. The most common equations are based on the N value obtained in conjunctions with a standard penetration test. In this paper, the field datas of standard penetration test and suspension PS logging measured in 126 sites of Korea were summarized and the correlation equations between N value and shear wave velocity are suggested.

Keywords : Shear modulus, Shear wave velocity, Standard penetration test, Empirical equations

1. 서론

지반의 동적 거동을 평가하기 위한 해석 중 하나인 지반응답해석을 하기 위한 기초 자료로 변형률에 따른 전단탄성계수 곡선과 감쇠곡선이 필요하다. 공진주실험과 같은 실내실험을 통해 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})를 구하고, 탄성과실험과 같은 현장실험을 수행해 전단파 주상도를 구함으로써 얻는 최대 전단탄성계수(G_{max})를 이용하여 전단탄성계수곡선을 구할 수 있다.

이러한 지반의 동적해석에 관계된 중요 변수들은 일반적으로 현장실험을 통해 구해지며 고비용이 소요되므로 많은 연구자들이 표준관입시험 결과치인 N값을 이용해 전단파 속도와 전단탄성계수를 추정하려고 노력해왔다(Ohsaki and Iwasaki, 1973; Imai, 1977; Schertmann, 1977; Imai and Tonouchi, 1982). 한편 표준관입시험은 현재 가장 많이 사용되는 지반조사방법 중 하나로써 시험방법이 비교적 간편하며 굴착과 시료채취를 동시에 할 수 있는 등의 장점이 있다. 또한 각종 지반정수로 환산할 수 있는 경험식이 나와 있어 표준관입시험 결과만으로 지반공학분야 설계에 필요한 대부분의 지반정수를 산정하는 것이 국내 지반구조물 설계의 실정이다.

그러나 표준관입시험 자체가 원래 시험이 아닌 굴착과 시료채취를 위해 개발되었기에 이를 이용한 지반정수 산정 경험식들은 서로간 불일치하는 단점이 있다. 더구나 국내에서 사용되는 경험식들의 대부분이 미국, 일본 등 선진국들에서 연구된 것으로 국내 지반에서도 얼마나 정확하게 일치하는지의 여부는 불확실하며 이에 대한 검증이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 서울, 경기, 인천, 경상도, 전라도, 충청도 등 국내에서 표준관입시험을 수행하여 얻어진 N값과 탄성파시험에서 얻어진 전단파속도 V_s 값을 회귀분석하여 상관관계식을 구하고 적용성을 검토하였다.

2. 전단파 속도(V_s)의 경험적 추정방법

지반의 탄성과 속도는 지층의 토질 종류 및 조성상태에 따라 다르게 나타나며, 따라서 탄성과 속도와 지반의 조성상태를 나타내는 현장 원위치 시험 결과를 상호 비교·분석하고자 하는 많은 시도가 있어 왔다(선창국 등(2006), 조진문 등(2006), 황세호 등 1999; 2002).

특히 지반조사시 대표적 현장 원위치 시험방법중 하나인 표준관입시험의 결과를 토대로 표준관입시험치(N_{60})와 지반의 전단파 속도(V_s)의 상관관계에 관련된 연구가 지속적으로 수행되어 왔으며, 이를 토대로 다양한 경험적 산정공식들이 제안되고 있다.

현재 우리나라 지반조사 및 설계과정에서 주로 사용되는 지반의 토질별 전단파 속도(V_s) 추정식들은 대부분 일본에서 연구되어진 공식들이며, 그 내용은 표 1 및 그림 1, 2와 같다.

표 1. 지반 전단파속도(V_s)의 경험적 추정식

제안자	토질	
	점성토	사질토
Ota, Goto (1978)	$\bullet V_s = 69 \cdot N^{0.17} \cdot D^{0.2} \cdot E \cdot F$ 여기서, D : 침도(m) E = 1.0(층적세) = 1.3(홍적세) F = 1.0	$\bullet V_s = 69 \cdot N^{0.17} \cdot D \cdot E \cdot F$ 여기서, D : 침도(m) E = 1.0(층적세), 1.3(홍적세) F = 1.09(세립모래층) = 1.07(중간 모래층) = 1.14(조립질모래층) = 1.15(자갈섞인 모래) = 1.4(모래자갈층)
Yamazaki, Umehara (1987)	$\bullet V_s = 89.1 \cdot N^{0.34}$	
Okamoto (1989)	$\bullet V_s = 125 \cdot N^{0.3}$	
Oba, Toriumi (1990)	$\bullet V_s = 84 \cdot N^{0.31}$	
Imai (1997)	$\bullet V_s = a \cdot N^b$ a = 102, b = 0.29 (층적점토) a = 114, b = 0.29 (홍적점토)	$\bullet V_s = a \cdot N^b$ a = 81, b = 0.33(층적사) a = 97, b = 0.32(홍적사)

통상의 토질 조성상태를 구분할 수 있는 표준관입시험의 최대 경계 값인 N_{60} 50회를 기준으로 하여 50회 이하 토질지반의 토질 및 조성상태에 따른 일반적인 전단파 속도 범위를 여러 가지 경험식들을 이용해 구분하며 대개 점성토 지반의 전단파 속도는 연약한 지층($N < 4$)의 경우 125~190m/sec, 보통 견고($N = 4 \sim 8$)한 지층의 경우 125~230m/sec, 견고($N = 8 \sim 15$)한 지층의 경우 150~280m/sec, 굳은($N = 15 \sim 30$) 지층의 경우 180~350m/sec, 매우 굳은($N > 30$) 지층의 경우 최소 230~350m/sec 이상의 값을 보인다.

사질토 지반의 전단파 속도는 느슨한($N < 10$) 지층의 경우 160~200m/sec, 보통 조밀한($N = 10 \sim 30$) 지층의 경우 160~290m/sec, 조밀한($N = 30 \sim 50$) 지층의 경우 230~340m/sec, 대단히 조밀한($N > 50$) 조성상태를 갖는 지층의 경우는 최소 275~340m/sec 이상의 속도 값을 갖는 것으로 나타난다.

이러한 경험식들은 많은 현장 시험 결과를 토대로 회귀분석을 이용해 제안된 식들이기 때문에, 다소

의 분산은 있으나 실무에서 자주 사용되고 있다.

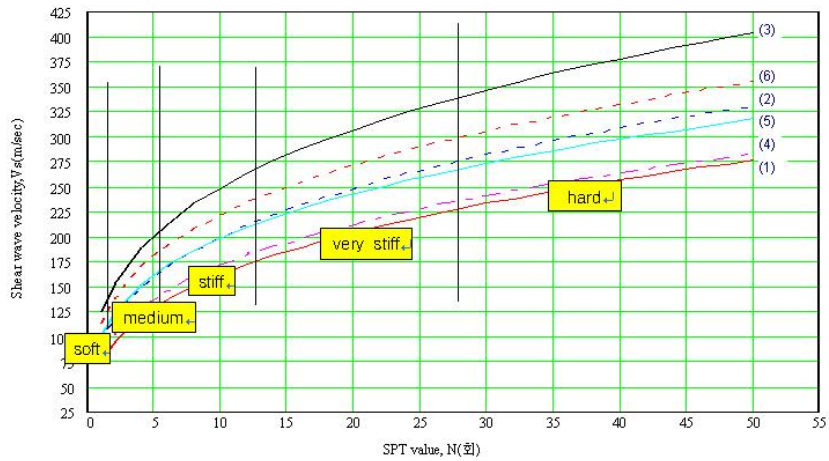


그림 1. 점성토지반

- 여기서, (1) Imai, Yoshimura(1970) : $V_s = 76 \cdot N^{0.33}$
 (2) Imai(1982) : $V_s = 97.0 \cdot N^{0.314}$
 (3) Okamoto(1989) : $V_s = 125 \cdot N^{0.3}$
 (4) Oba, Toriumi(1990) : $V_s = 84 \cdot N^{0.31}$
 (5) Imai(1997) : $V_s = a \cdot N^b$ a = 102, b = 0.29(층적점토)
 (6) Imai(1997) : $V_s = a \cdot N^b$ a = 114, b = 0.29(홍적점토)

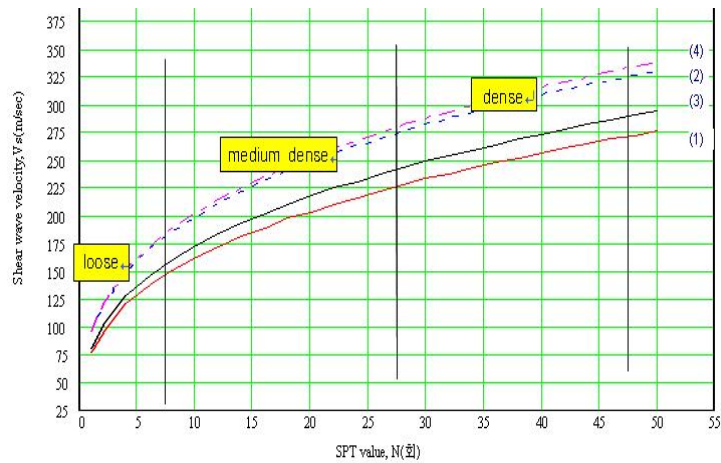


그림 2. 사질토지반

- 여기서, (1) Imai, Yoshimura(1970) : $V_s = 76 \cdot N^{0.33}$
 (2) Imai(1982) : $V_s = 97.0 \cdot N^{0.314}$
 (3) Imai(1997) : $V_s = a \cdot N^b$
 a = 81, b = 0.33(층적사)
 (4) Imai(1997) : $V_s = a \cdot N^b$
 a = 114, b = 0.29(홍적사)

3. 현장시험

3.1 표준관입시험

표준관입시험(Standard Penetration Test)은 국내·외에서 지반조사시 흙의 특성 파악에 가장 널리 사용되는 시험법이다. 표준관입시험은 첫째, 시험에서 결정되는 관입저항치(N값)로부터 지반의 지지력, 흙의 점착력, 내부마찰각 등의 강도정수를 추정하는 경험적 상관관계가 제안되어 있고, 둘째, 장비가 비교적 간단하고, 셋째, 현장시험과 동시에 시료를 채취할 수 있는 등 활용도가 많아 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 널리 사용되고 있다.

그러나 N값의 측정과 해석에 있어서는 햄머의 낙하방법, 시험자의 숙련도와 개인차, 로드 길이에 따른 영향, 상재압의 크기에 따른 영향 등에 의하여, N값의 차이가 생기는 문제점이 있다. 이와 같이 표준관입시험은 표준화되지 못하여 시험결과인 N값을 신뢰성 있게 이용하는 데에는 많은 문제점이 있다. 즉, 같은 시험법으로 동일한 지반에서 시험을 수행하더라도, 각 장비에 따라 구해지는 N값에 차이가 있으므로 측정 장비마다 고유한 에너지를 측정하여 특정한 에너지 비에서 결정된 N값으로 환산하여 적용하는 표준화가 필요하다.

3.2 S-PS 검층(음파검층 탄성파기법)

지반의 동적 물성치(포아송비(ν), 강성율(Gd), 영률(Ed))는 내진 설계에 반드시 필요한 지반정수로 이를 산출하기 위해서는 지반의 전단파 속도를 구하는 것이 필요하다. S-PS 검층은 진원과 수신기가 일련으로 된 Prob의 부유형 수신기(Geophone of floating type)가 공내수의 움직임を検출하는 시스템으로서, 시추공 내의 각 심도별로 구간 전파시간을 측정함으로써 원지반의 P파 및 S파의 속도를 구하게 된다.

특히 종래의 지표기진, 공내 수신방식의 PS 검층(Downhole법)으로는 해상탐사가 불가능한데 반하여, S-PS 검층법은 이를 개선하여 육상은 물론 해상까지도 적용이 가능한 방법이다. S-PS 검층법의 측정 개요도는 그림3과 같다.

실험의 원리는 Sonde에 내장된 코일을 감은 원통형 철심에 전류를 흘려보내 전자 해머가 공축과 직교방향으로 진동하게 한다. 원통형의 철심에 전류를 흘려보내는 방향을 변화시킴으로써 발진의 좌우 방향을 변화시킬 수 있다.

시추공 내부는 물로 채워져 있고, 철심이 공축에 직교하는 방향으로 움직이는 상태를 생각할 수 있는데, 이 때 철심에 순간적으로 전류를 흐르게 하면 전자해머가 한쪽 방향으로 움직이면서 그 방향의 물에 압력을 가하고, 반대쪽의 물은 부의 압력을 받게 된다. 이러한 원리는 공내수의 유동을 고려하지 않은 경우이지만 공내수의 움직임이 있는 경우에도 철심의 움직임이 순간적이라면 전자해머 주변의 물은 가속도운동이 되므로 정부(+ -)의 압력분포가 생긴다. 이러한 압력 분포가 주변의 지반에 전달되어 지반을 변형시킴으로써 P파와 S파를 발생시키게 된다.

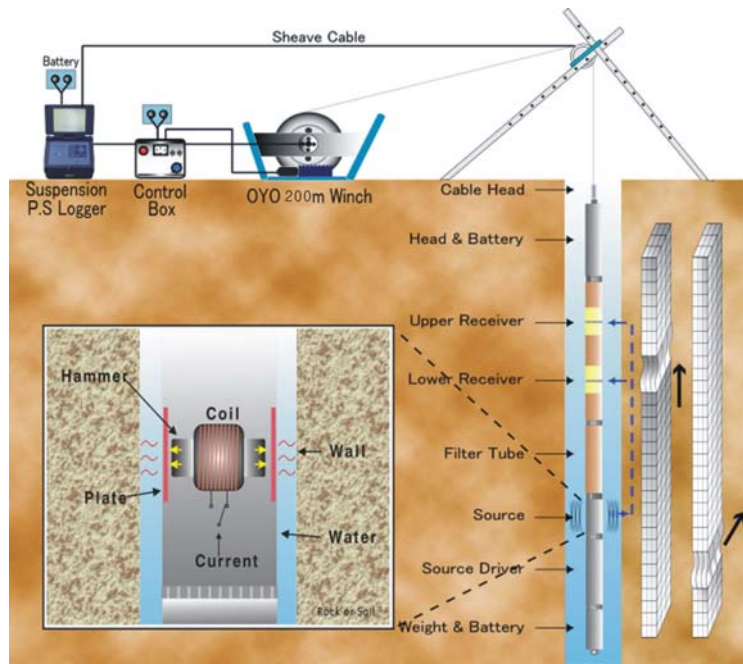


그림 3. S-PS 검층법의 측정개요

3.3 현장시험결과

N값과 전단파 속도의 상관관계를 분석하기 위하여 본 연구에서 사용된 표준관입시험 자료와 탄성과 시험(S-PS검층)자료는 총 126 개소이다. 지역별로 서울, 경기권 42개소, 인천지역 19개소, 충청도 8개소, 경상도 28개소, 전라도 29개소의 현장시험자료들을 분석하였다.

또한 지반을 점토, 사질토, 풍화토로 구분한 후에 각 지층에 해당하는 N값과 전단파 속도의 상관관계를 분석하였다.

표 2. 지역별 현장시험분포

권역	개소(공)
서울, 경기	42
인천	19
충청도	8
경상도	28
전라도	29
합계	126

4. N값과 전단파 속도의 상관관계 분석

4.1 분석기준

본 연구에 사용된 표준관입시험 장비의 에너지 효율은 평균 햄머효율은 64.73% 이며, 깊이별 평균 에너지비는 N_{60} 대비 1.076 로서, 깊이별 평균 에너지비와 상관관계에 사용된 N값 및 장비의 효율성을 매개변수로 하여 N_{60} 을 보정하는데 적용하였다.

표준관입시험의 N값과 전단파 속도의 관계는 강성이 큰 지반일수록 두 값이 모두 증가한다는 가정에서 출발하지만 실제 지반의 지질특성, 지질구조 및 지하수 상태 등과 관련하여 많은 변수가 작용하게 된다. 특히, 전단파 속도를 측정하는 현장탄성과 시험법과 N값을 측정하는 표준관입시험 간의 메커니즘적인 상관관계에 대해서는 아직 그 관계가 명확하게 정의되지 않았으며, 지반의 특성과 입자구성, 밀도 등에 따라서 전단파속도와 N값은 다른 경향을 나타낼 수도 있다.

4.2 토질별 분석

4.2.1 사질토

각 지역별 사질토의 시험결과에 대해 선형회귀분석을 실시하여 그림 4에 나타내었다. 경향을 살펴보면 전반적으로 값들이 분산되어 있으나, N값 10일 때 전단파 속도 200m/s인 점들을 전후로 대각선방향으로 선형적인 경향을 볼 수 있다.

상관관계 분석에는 대표식으로 직선식($V_s = a \times N + b$), 로그식($V_s = a \times \ln(N) + b$), 지수식($V_s = \exp(a \times N + b)$), 차승식($V_s = a \times N^b$)을 사용하였는데 분산의 폭이 커서 선형식, 지수식, 로그식 어느 식으로 회귀분석을 해도 결정계수가 0.5를 넘지 못함을 알 수 있다.

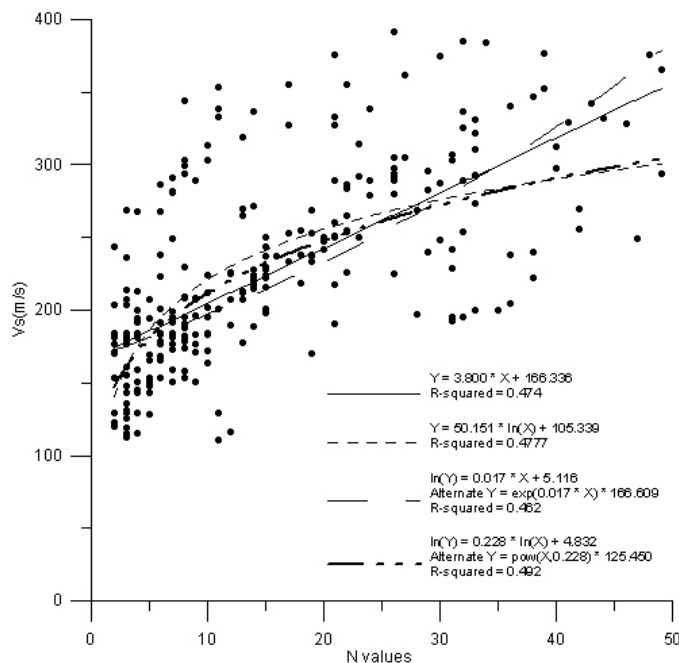


그림 4. 사질토층에서 N값과 전단파 속도

표 3. 사질토층에서 N값과 전단파속도와의 상관관계식

분류	Equation	a	b	결정계수(R^2)
사질토	$Y = a \times N + b$	3.800	166.336	0.474
	$Y = a \times \ln(N) + b$	50.151	105.339	0.478
	$Y = \exp(a \times N + b)$	0.017	5.116	0.462
	$Y = a \times N^b$	125.450	0.228	0.492

이러한 결과를 통해 전단파속도의 증가경향을 N값만으로 결정하기는 어렵다고 판단된다. Ohta and Goto(1978) 등의 기존 연구자들도 전단파속도 회귀분석에 대한 입력변수로 N값 뿐 아니라 다양한 변수를 고려하였는데 주로 심도, 흙의 종류가 가장 많이 고려되었다.

본 연구에서 수집한 전단파속도 분포를 심도에 따라 그림 5와 같이 나타내었다. 심도와 N값은 비례관계를 찾기 어려우나 심도와 전단파 속도는 어느 정도의 비례관계가 있음을 알 수 있다.

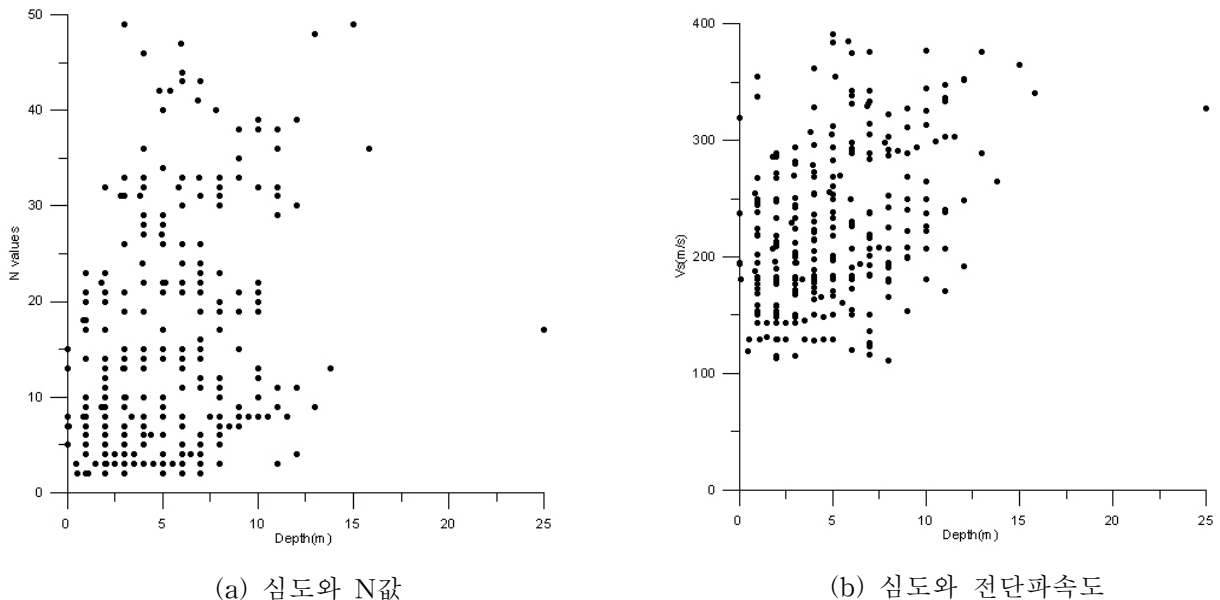


그림 5. 심도와 N값, 전단파속도의 관계

4.2.2 점성토

각 지역별 점성토의 시험결과를 모아서 그림 6에 나타내었다. N값이 증가함에 따라 전단파 속도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 전단파 속도 120~240m/s 까지 고루 분포하고 있어 회귀분석의 신뢰성이 많이 떨어진다. 회귀분석을 실시하면 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 선형식, 지수식, 대수식 어느 식으로 회귀분석을 해도 결정계수가 0.3를 넘지 못함을 알 수 있으며 어느 식이든 신뢰하기 어렵다는 사실을 알 수 있다.

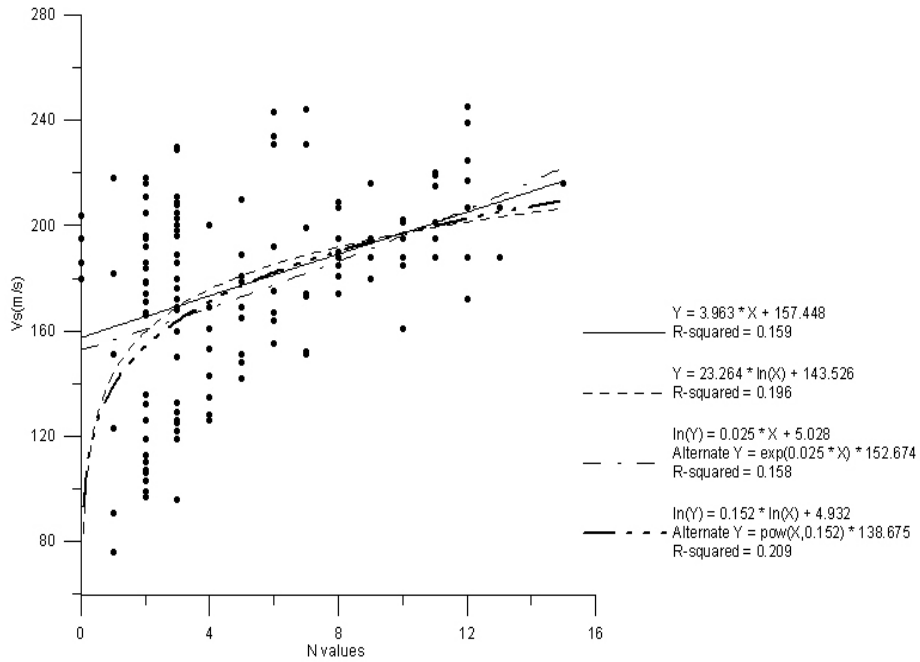


그림 6. 점성토층에서 N값과 전단파 속도 회귀분석

표 4. 점성토층에서 N값과 전단파속도와의 상관관계식

분류	Equation	a	b	결정계수(R^2)
점성토	$Y = a \times N + b$	3.963	157.448	0.159
	$Y = a \times \ln(N) + b$	23.264	143.526	0.196
	$Y = \exp^{(a \times N + b)}$	0.025	5.028	0.158
	$Y = a \times N^b$	138.675	0.152	0.209

4.2.3 풍화토

각 지역별 풍화토의 시험결과를 모아서 그림 7에 나타내었다. N값이 증가함에 따라 전단파 속도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 점성토나 사질토에 비해 상대적으로 전단파 속도가 더 크며 N값이 증가할수록 전단파 속도의 편차가 크다. 회귀분석을 실시하면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 선형식, 지수식, 대수식 어느 식으로 회귀분석을 해도 결정계수가 0.4를 넘지 못함을 알 수 있으며 어느 식이든 신뢰하기 어렵다는 사실을 알 수 있다.

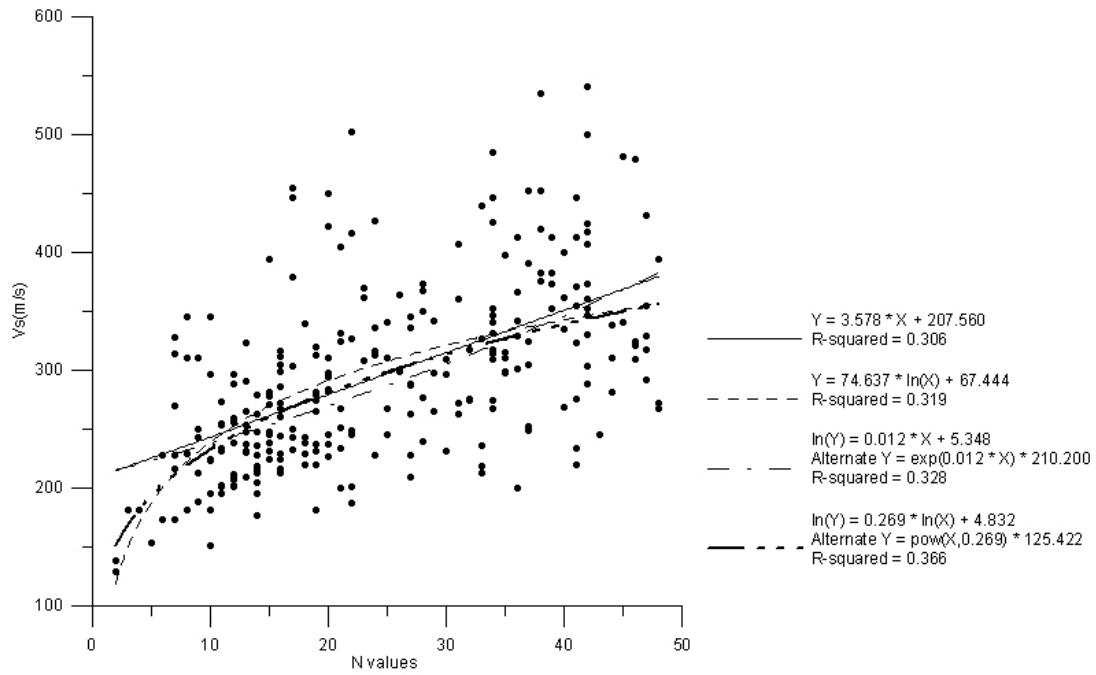


그림 7. 풍화토층에서 N값과 전단파 속도 회귀분석

표 5. 풍화토층에서 N값과 전단파속도와와의 상관관계식

분류	Equation	a	b	결정계수(R^2)
풍화토	$Y = a \times N + b$	3.578	207.560	0.306
	$Y = a \times \ln(N) + b$	74.637	67.444	0.319
	$Y = \exp^{(a \times N + b)}$	0.012	5.348	0.328
	$Y = a \times N^b$	125.422	0.269	0.366

5. 결론

본 연구에서는 서울, 경기, 인천, 경상도, 전라도, 충청도 등 국내에서 표준관입시험을 수행하여 얻어진 N값과 탄성파시험에서 얻어진 전단파속도 V_s 값을 회귀분석하여 상관관계식을 구하고 적용성을 검토하였다.

(1) 국내 지역별, 지층별 표준관입시험 결과 N값과 전단파 속도(V_s)의 상관관계를 도출하기 위하여 서울, 경기, 인천, 경상도, 전라도, 충청도 등 국내 5대권역 126개소에서 조사 축적된 현장자료를 바탕으로 수행된 탄성파시험 결과를 정리하여 전단파 주상도를 제시하였다.

(2) 표준관입시험 및 탄성파시험 결과를 정리 분석하여 회귀분석을 실시하였으나 N값만을 이용한 단순 회귀분석으로는 회귀분석의 신뢰성이 낮았다.

참고문헌

1. 선창국, 김보현, 정충기(2006), “홍성지역 화강풍화지층의 풍화도 및 전단파 속도에 관한 고찰”, **대한토목학회논문집**, 26권 2C, pp. 431-443.
2. 조진문, 유영철, 송무영, 임국묵(2006), “지반조사 현장에서 전단파 추정기법에 관한 사례연구”, **한국지구과학회 추계 학술 발표회 논문집**, pp. 56-60.
3. 황세호, 이상규(1999), “물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출”, **한국지구물리 탐사학회 학술발표회 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움**, pp. 156-175.
4. 황세호, 이상규, 최종호, 송윤호, 조성준, 이명종, 박인화, 손정술(2002), “N값과 원위치 지반물성의 상관성 평가를 위한 물리탐사 및 분석용역”, 한국도로공사.
5. Imai, T. and Tonouchi, K.(1982), “Correlation of N value with S wave velocity and shear modulus”, **Proceedings of 2nd European Symposium of Penetrating Test**, Amssterdam, pp.67-72.
6. Imai, T.(1977), “Velocities of P and S wave in subsurface layers of ground in Japan”, **Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol. 2, Tokyo, Japan, pp. 257-260.
7. Ohsaki, Y. and Iwasaki, R.(1973), “On Dynamic Shear Modulus and Poisson’s ratios of soil deposits”, **JSSMFE**, Vol. 13, No. 4, pp. 59-73.
8. Ohta, Yutaka, Goto, Noritoshi(1978), “Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Charateristics Soil Indexes”, **Earthquake engineering & structural dynamics**, Vol 6, no 2, 1978, pp. 167-187
9. Ogura, K.(1988), “Expansion of Applicablity for Suspension P-S logging” , **OYO Technical Report**, Vol. 10, pp. 69-98.
10. Schmertmann, J.H.(1978), “Use of the SPT to Measure Dynamic Soil Properties”, **ASTM**, No. 654, pp. 351-355.