

충청지역 지층별 전단파속도와 N값의 상관관계 분석

Analysis on Relation of S-wave Velocity and N Value for Stratums in Chungcheong Buk-do

도종남¹⁾ · 황필재²⁾ · 정성래¹⁾ · 천병식[†]

Do, Jongnam · Hwang, Piljae · Chung, Sungrae · Chun, Byungsik

ABSTRACT : In this study, features of correlation between S-velocity and N value are derived from 9 suspension PS layers in Chungcheong Buk-do. S-velocity to be measured on Chungcheong Buk-do is classified into 5 as conditions of stratum that are ; cohesive soil layer, sandy soil layer, gravel layer, weathering soil layer, weathered rock layer. Each correlation formulas between N value by SPT and S-velocity is proposed from these classifications. And correlation formula for whole soil body except weathered rock layer also is proposed for reference. Correlation formulas developed this study formed square expression considering existing formulas produced internationally. Strength parameter converted to linear if N value is more than 50. Features of proposed formula which came up with comparative analysis of international result of cohesive soil layer and sandy soil layer and gravel layer show similar to existing ones. But there is deferece that result of correlation formula for weathered rock layer is a little smaller than domestic formula's one. Because correlations of weathered rock layer above the N value of 50 is converted into a linear formation.

Keywords : S-wave velocity, N value, Correlation formulas, SPT, Behavior characteristics

요 지 : 본 연구는 충청 지역에서 측정된 전단파 속도를 지층별로 점성토층, 사질토층, 자갈층, 풍화토층, 풍화암층으로 분류하여 표준관입시험 N값과 전단파 속도의 상관관계식을 제안하였으며, 참고적으로 풍화암층을 제외한 전체토층의 상관관계식을 도출하였다. 제안된 상관관계식은 국내외 기존 제안식을 고려하여 모두 역함수로 산정하였으며 지반강도의 경우 N값이 50 이상일 경우에는 선형으로 환산하여 적용하였다. 금번 연구에서 제안한 관계식을 국내외 사례와 지층별로 비교 분석한 결과 점성토층, 사질토층, 자갈층, 풍화토층의 경우에는 유사한 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 다만, 풍화암층에 대한 상관관계식의 경우 국내 관계식과 다소 낮은 결과치를 나타내는 차이가 있음을 확인하였다. 풍화암층의 경우 상관관계식 산정에 있어 N값이 50 이상일 경우는 선형으로 환산하여 적용함에 따라 지반 강도가 높은 지층인 풍화암층에서 차이가 발생한 것으로 파악된다.

주요어 : 전단파 속도, N값, 상관관계식, 표준관입시험, 거동특성

1. 서 론

해외는 물론 국내에서도 지진 발생빈도가 높아져가고 있어 1988년 일부 건축물을 시작으로 내진설계가 도입되기 시작하여 2002년에는 건설교통부 주관으로 주요시설물 내진설계기준의 재정비를 수립하게 되었다. 내진설계의 신뢰도 제고는 적절한 지반정수의 결정에 있으며, 그중에서도 전단파 속도는 중요한 요소로서 이에 대한 정확한 평가의 필요성이 현저하게 증가하고 있다. 전단파 속도 측정을 위한 시험법은 많은 비용과 시간이 소요되는 점을 고려하여 국내외에서도 지역별·토질특성별 전단파 속도 측정 및 상관관계에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다(강영중 등, 2001).

현재 지반의 전단파 속도를 측정할 수 있는 시험방법은 지반에 전파하는 전단파 속도를 직접 측정하는 방법, 표준관입 시험에서 얻은 N값을 이용하여 전단파 속도를 구하는 방법, 현지 지반에 설치된 실물 기초 또는 모델 기초의 진동 실험에서 기초를 지지하는 지반 스프링 특성 및 감쇠 특성을 직접 구하는 방법 등 여러 가지 기법이 있지만 국내 현장에서 많이 사용되고 있는 방법 중의 하나는 Suspension PS 검층으로 다른 공내 탄성과 탐사에 비하여 장비가 간단하고 실험 수행이 수월한 장점을 가지고 있다(김영완, 2004).

따라서, 본 연구에서는 국내외 탄성과 시험과 표준관입 시험과의 경험적 상관관계식을 분석하고 한국토지주택공사가 수행한 충청 지역 지반보고서의 탄성과 시험과 표준관입 시험 관련 자료를 수집하여 Database를 구축하였으며, 구축

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

2) 비희원, 한국토지주택공사 해외사업처 차장

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

된 Database를 활용하여 충청 지역의 토질 특성별 표준관입 시험 N값과 전단파 속도의 상관관계를 분석하여 추정식을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전단파 속도의 국내외 경험적 제안식

Imai 등(1982)는 다운홀기법을 이용하여, 일본 내 5개소에 대하여 축적 및 홍적사, 암반층을 대상으로 경험식을 제안하였다. 그림 1은 각 대상별로 측정된 전단파 속도를 N값 별로 나열한 그래프이다.

Imai 등(1982)의 전단파 속도와 N값에 관한 경험적 제안식은 식 (1)과 같다.

$$V_s = 92.1 \cdot N^{0.329} \quad (1)$$

Okamoto 등(1989)는 일본 텐류강 유역을 중심으로 4등분하여 29개 지역에서 측정된 자료를 토대로 제안식을 발표하였다. Okamoto 등(1989)은 기존 Imai 등(1982)이 사용한 다운홀기법을 사용하지 않고 표면파탐사(SASW)를 이용하여 S파를 산정하였다. 그림 2는 Okamoto 등(1989)이 N값별로 측정된 전단파 속도를 나타낸 그림이다.

Okamoto 등(1989)의 전단파 속도와 N값에 관한 경험적 제안식은 식 (2)와 같다.

$$V_s = 125 \cdot N^{0.3} \quad (2)$$

Imai 등(1982)은 암반층을 제외한 토사층을 대상으로 축적, 홍적, 제3기층을 대상으로 세립토와 조립토로 분류하여 다운홀 기법을 이용하여 측정하였다. 그 결과 기존에 연구된 전단파 속도 추정식보다는 다소 상향 조정된 전단파 속도 추정식을 제안하였다. 그림 3은 Imai 등(1982)이 N값별

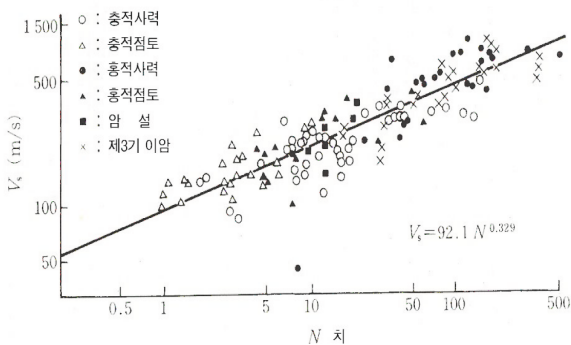


그림 1. Imai와 Yoshimura(1969) N값과 Vs 분포도

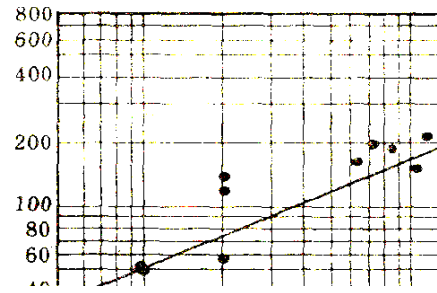


그림 2. Okamoto 등(1989) N값과 Vs 분포도

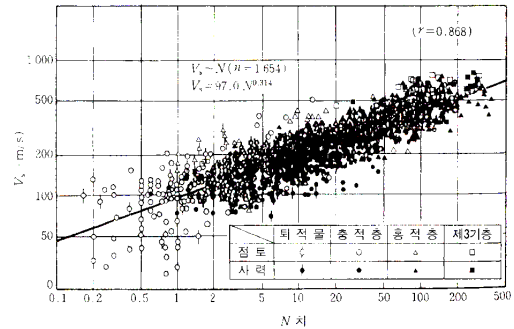


그림 3. Imai 등(1982) N값과 Vs 분포도

로 측정된 전단파 속도를 나타낸 그림이다.

Imai 등(1982)이 제안한 경험식은 식 (3)과 같다.

$$V_s = 97.0 \cdot N^{0.314} \quad (3)$$

Athanasopoulos(1994)등은 SASW등으로 221개의 data를 통하여 그림 4와 같이 추정된 식을 발표하였는데 모든 토질을 대상으로 하였으며 결정계수는 0.75로써 비교적 높은 결과치를 보였다.

Athanasopoulos(1994)가 제안한 경험식은 식 (4)와 같다.

$$V_s = 107.6 \cdot N^{0.36} \quad (4)$$

Jafari(1997)는 다운홀탐사(Downhole test)와 표면파탐사(SASW)를 각각 수행하여 N값별 전단파 속도를 추정하였다. 각 현장시험별로 전단파 속도 산정 후 점토와 실트로 각각 나누어 제안식을 개발하였다. 그림 5는 Jafari(1997)가 산정한 분포도이다.

Jafari(1997)가 제안한 경험식은 식 (5), (6)과 같다(Hasan-ecbi, 2007).

$$V_s = 27.0 \cdot N^{0.73} \quad (\text{Clay Soils}) \quad (5)$$

$$V_s = 22.0 \cdot N^{0.77} \quad (\text{Silty Soils}) \quad (6)$$

Jason T. Dejong(2007)은 전단파 속도를 직접 측정할 수

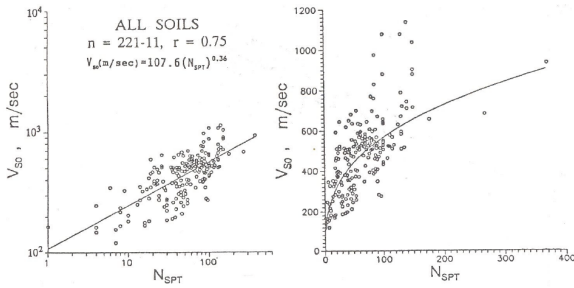


그림 4. Athanasopoulos(1994) N값과 Vs 분포도

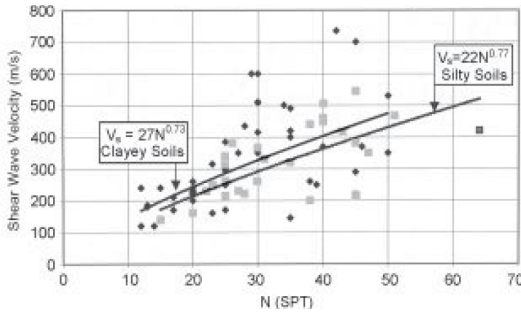


그림 5. Jafari(1997) N값과 Vs 분포도

없을 경우 전단파 속도와 N값의 주요 상관관계식을 종합 정리하였는데 주요 상관관계식은 표 1과 같다.

경험적 추정식 중 Lee(1992), Jinnan(1987), Jafari(1997) 과 Hasancebi와 Ulusay의 상관관계식은 한국과의 지리적 거리, N값의 멱함수 유형과 다른 특성 등을 고려하여 본 연구의 비교 분석대상에서는 제외하였으며 이를 정리하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

국내의 해미, 홍성, 김제, 광주, 경주, 하동, 사천, 통영 등 총 8개소의 26개 지역에서 표준관입시험과 크로스홀, 다운

표 1. N값별 전단파 속도(Vs) 경험적 추정식

제안자	국가	전단파 속도 추정식 (Vs = m/s)	토질조건
Ohta와 Goto(1978)	Japan	$V_s = 86.9 \cdot N^{0.333}$	점성토
		$V_s = 88.4 \cdot N^{0.333}$	사질토
		$V_s = 75.3 \cdot N^{0.351}$	자갈층
		$V_s = 85.34 \cdot N^{0.348}$	전체토
Imai와 Tonouchi(1982)	Japan	$V_s = 107 \cdot N^{0.274}$	점성토
		$V_s = 87.8 \cdot N^{0.314}$	사질토
		$V_s = 97 \cdot N^{0.314}$	전체토
Lee(1990)	Taiwan	$V_s = 105.64 \cdot N^{0.32}$	점성토
		$V_s = 57.4 \cdot N^{0.49}$	사질토
Jinnan(1987)	Shanghai	$V_s = 116.1(N+0.3185)^{0.202}$	전체토
Jafari et al(1997)	Iran	$V_s = 22 \cdot N^{0.85}$	전체토
Hasancebi와 Ulusay (2007)	Turkey	$V_s = 97.89 \cdot N^{0.269}$	점성토
		$V_s = 90.82 \cdot N^{0.319}$	사질토
		$V_s = 90 \cdot N^{0.308}$	전체토

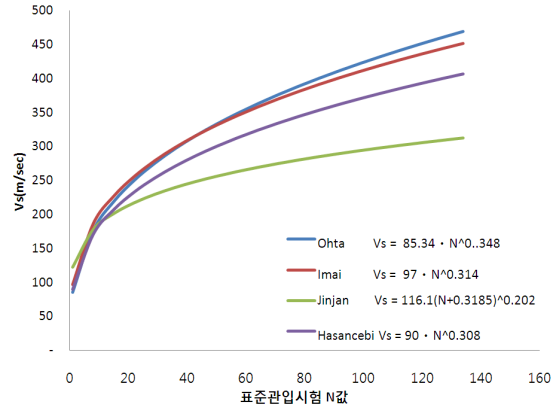


그림 6. Jason T. Dejong의 N값과 Vs의 상관관계식 비교도

홀과 업홀 시험을 깊이별로 시행하여 토질특성별 N값과 전단파속도의 경험적 상관관계식을 개발하였다. 경험적 추정식은 모두 멱함수로서 결정계수는 모래 및 실트질에서 풍화암까지 0.220~0.339로 분포되었으며, 전체토층의 경우 결정계수가 0.558로 비교적 높게 나타났다. 선창국 등(2007)이 개발한 지층별 상관관계식은 표 2와 같다.

정남훈(2009)은 부유형 속도검층에 의한 전단파 속도 거동 연구를 통하여 서울·경기지역 및 경상도 지역 28개소 51개공의 시험조사를 점성토, 사질토, 풍화토층으로 나누어 수행하였으며 산정된 상관관계식은 식 (7)~(12)이며 전국 평균치로 산정한 관계식은 표 3과 같다.

$$\text{점성토 서 울 } V_s = 191.3 \cdot N^{0.099} \quad (7)$$

$$\text{경상도 } V_s = 185.6 \cdot N^{0.149} \quad (8)$$

$$\text{사질토 서 울 } V_s = 90.1 \cdot N^{0.527} \quad (9)$$

$$\text{경상도 } V_s = 185.7 \cdot N^{0.256} \quad (10)$$

$$\text{풍화토 서 울 } V_s = 422.1 \cdot N^{0.111} \quad (11)$$

$$\text{경상도 } V_s = 359.1 \cdot N^{0.188} \quad (12)$$

한국지반공학회(2009)는 14개의 학·연·산 기관이 참여하여 상호검증시험을 통한 지진 지반응답해석 연구 시 전단파 속도와 N값의 상관관계식은 김동수, Umehara, Sun 등

표 2. N값별 전단파 속도(Vs) 경험적 추정식(선창국 등, 2007)

토질분류	전단파 속도 추정식 (Vs = m/s)	결정계수
Sand and Silt	$V_s = 82.01 \cdot N^{0.319}$	0.339
자갈층	$V_s = 78.63 \cdot N^{0.361}$	0.331
풍화토	$V_s = 75.76 \cdot N^{0.371}$	0.282
풍화암	$V_s = 107.94 \cdot N^{0.418}$	0.220
전체토	$V_s = 65.64 \cdot N^{0.407}$	0.558

표 3. N값별 전단파 속도(Vs) 경험적 추정식(정남훈, 2009)

제안자	전단파 속도 추정식 (Vs = m/s)	토질조건
정남훈(2009)	$V_s = 187.3 \cdot N^{0.128}$	점성토
	$V_s = 128.3 \cdot N^{0.386}$	사질토
	$V_s = 438.1 \cdot N^{0.110}$	풍화토
	$V_s = 144.7 \cdot N^{0.380}$	전체토

표 4. N값별 전단파 속도(Vs) 경험적 추정식(선창국 등, 2010)

제안자	전단파 속도 추정식 (Vs = m/s)	비고
김동수(1998)	$V_s = 98.38 \cdot N^{0.29}$	50타 이상 N값은 50으로 가정
Umehara	$V_s = 89.1 \cdot N^{0.34}$	N값은 선형 환산
Sun 등(2006)	$V_s = 65.64 \cdot N^{0.407}$	N값은 선형 환산

표 5. N값별 전단파 속도(Vs) 경험적 추정식(정종석 등, 2009)

토질분류	전단파 속도 추정식 (Vs = m/s)	결정계수
점성토	$V_s = 151.2 \cdot N^{0.225}$	0.293
사질토	$V_s = 173.9 \cdot N^{0.176}$	0.175
자갈층	$V_s = 175.6 \cdot N^{0.161}$	0.147
풍화토	$V_s = 163.9 \cdot N^{0.210}$	0.234
풍화암	$V_s = 182.3 \cdot N^{0.229}$	0.165

(2008)의 5가지지를 적용하였다. 적용한 N값의 경우 50타 이상의 경우 50으로 적용한 경우와 N값을 선형으로 환산하여 적용한 경우로 크게 2가지 방식으로 분류할 수 있으나, 선형 비례 관계 적용을 통한 N값의 재산출에 대한 적합성에 대해서는 SPT 수행상의 문제점, 현장 구속압에 따른 효과, 대상 지질 조건별 차이 등의 여러 의문이 있을 수 있으나, 단순히 50을 이용하는 방법보다는 합리적이라는 관점에는 큰 무리가 없을 것으로 보여 본 연구에서도 N값을 선형으로 환산하여 적용하였으며 이를 정리하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

한국토지주택공사(2008)는 전국 227개 현장에서 408개의 시추공에서 SPS 검층법으로 전단파 속도와 N값의 상관관계식을 개발하였는데 그 결과는 표 5와 같다.

2.2 N값과 전단파 속도 추정식

N값과 전단파 속도(Vs)의 상관관계 경험식을 종합하면 표 6과 같다. 상관관계식의 공통점을 살펴보면 국내의 전단파 속도 추정식은 모두 멱함수기 때문에 충청지역 전단파 속도 추정식 또한 멱함수로 통일하여 분석하였다.

표 6은 N값만을 이용하여 전단파속도와와의 상관관계식을 개발한 것이며, 표 7은 N값을 비롯하여 qt와 같이 제3의 변

표 6. N값별 전단파 속도(Vs) 경험적 추정식 종합

제안자	전단파 속도 추정식(Vs = m/s)	토질조건
Imai와 Yoshimura(1969)	$V_s = 92.10 \cdot N^{0.329}$	전체토
Ohta와 Goto(1978)	$V_s = 86.9 \cdot N^{0.333}$	점성토
	$V_s = 88.4 \cdot N^{0.333}$	사질토
	$V_s = 75.3 \cdot N^{0.351}$	자갈층
	$V_s = 85.34 \cdot N^{0.348}$	전체토
Okamoto(1980)	$V_s = 125 \cdot N^{0.3}$	전체토
Imai(1982)	$V_s = 97 \cdot N^{0.314}$	전체토
Imai와 Tonouchi(1982)	$V_s = 107 \cdot N^{0.274}$	점성토
	$V_s = 87.8 \cdot N^{0.314}$	사질토
	$V_s = 97 \cdot N^{0.314}$	전체토
Athanasopoulos(1994)	$V_s = 107.6 \cdot N^{0.36}$	전체토
김동수(2003)	$V_s = 98.38 \cdot N^{0.29}$	전체토
Sun et al.(2006)	$V_s = 65.64 \cdot N^{0.407}$	전체토
선창국 등(2008)	$V_s = 82.01 \cdot N^{0.319}$	사질토
	$V_s = 78.63 \cdot N^{0.361}$	자갈층
	$V_s = 75.76 \cdot N^{0.371}$	풍화토
	$V_s = 107.94 \cdot N^{0.418}$	풍화암
정남훈(2009)	$V_s = 65.64 \cdot N^{0.407}$	전체토
	$V_s = 187.3 \cdot N^{0.128}$	점성토
	$V_s = 128.3 \cdot N^{0.386}$	사질토
	$V_s = 438.1 \cdot N^{0.110}$	풍화토
한국토지주택공사(2009)	$V_s = 144.7 \cdot N^{0.380}$	전체토
	$V_s = 151.2 \cdot N^{0.225}$	점성토
	$V_s = 173.9 \cdot N^{0.176}$	사질토
	$V_s = 175.6 \cdot N^{0.161}$	자갈층
	$V_s = 163.9 \cdot N^{0.210}$	풍화토
	$V_s = 182.3 \cdot N^{0.229}$	풍화암

표 7. 최대전단계수 및 전단파 속도 경험적 추정식(선창국 등, 2010)

제안자	전단파 속도 추정식	토질조건
Ohsaki와 Iwasaki(1973)	$G_{max} = 12N^{0.8}$	전체토
Imai와 Tonouchi(1982)	$G_{max} = 12.5N^{0.611}$	전체토
Crespellani와 Vannuchi(1991)	$G_{max} = 12.51(q_t/0.45)^{0.611}$	전체토
Rix와 Stokoe(1991)	$G_{max} = 1634q_c^{0.25}(\sigma'_{v0})^{0.375}$	사질토
Mayne와 Rix(1993)	$G_{max} = 406q_c^{0.695}(\epsilon_0)^{-1.130}$	점성토
Mayne와 Rix(1995)	$V_s = 1.75q_c^{0.627}$	점성토
선창국 등(2006)	$V_s = 6.046q_t^{0.387}$	사질토
	$V_s = 24.289q_t^{0.273}$	점성토
	$V_s = 15.140q_t^{0.131}(\sigma'_{v0})^{0.280}$	전체토

수를 포함한 상관관계식 개발 사례를 보여 주고 있다. 본 연구에서는 표 6의 N값만을 이용한 전단파 속도 상관관계식을 대상으로 비교 분석하였다.

3. 현장시험

3.1 현장시험 개요

우리나라 행정구역을 이용한 설계지반운동 수준 결정 시 설계지반운동 수준은 기본적으로 설계지반운동 수준 결정을 위한 지진구역의 구분을 표 8과 같이 구분하고 있어 행정단위 구역 중 지진 I 구역에 속해 있는 충청 지역을 대상으로 현장시험을 실시하였다. 현장시험은 표준관입시험과 표면파 탐사법을 실시하여 지층별 N값과 전단파속도 간의 관계를 규명하고자 하였다.

충청지역의 전단파 속도 및 표준관입시험 N값에 대한 기술통계분석은 제천 강저지구, 충주 연수지구, 음성 신천지구, 진천 혁신도시, 청주 성화2지구, 청원 오송지구를 대상으로 하였으며, 대상지역의 위치는 그림 7과 같으며, 본 연구에서는 시험결과의 불확실성을 제거하기 위하여 성토층에 대한 상관관계분석은 제외하고 원지반에서의 결과만을 검토하였다.

표 8. 지진구역의 구분(장승필 등, 2002)

지진구역	행정구역	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부, 충청, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
II	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

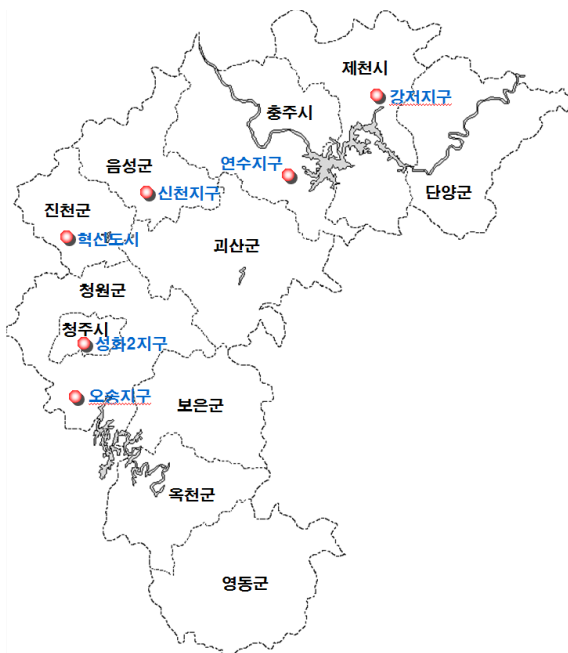


그림 7. 충청 지반조사 대상지역

3.2 현장시험 방법

전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 분석하기 위하여 한국토지주택공사의 충청 지반보고서에 수록된 탄성과 시험 관련 Data를 정리하여 Database를 구축하였다. 구축된 Database는 9개 지역의 현장에서 19개 시추공을 SPS검층법으로 측정된 전단파 속도와 N값을 대상으로 하였다. 그림 8은 구축된 Database를 분석하여 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계식을 개발하는 절차를 보여준다.

충청 지역에서 4개의 업체에서 6개 현장의 9개 블록을 대상으로 19공을 시추하여 탄성과 시험을 실시하였다. 표 9, 10는 충청지역의 지반분류에 따른 전단파 속도 및 표준관입시험 N값의 기술통계를 보여준다. 전단파 속도 및 표준관입시험 N값의 평균값은 단단한 지층에 따라 증가함을 알 수 있으며, 연암이상의 단단한 지층은 표준관입시험의 어려움을 알 수 있다.

3.3 현장시험 결과

N값과 전단파 속도에 대한 상관관계는 국내외 경험적 제안식을 살펴볼때 일반적으로 N값이 증가할수록 전단파 속도가 증가함을 알 수 있다. 충청 지역의 지반조사 시 분류한

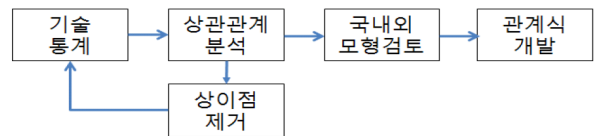


그림 8. 전단파 속도와 N값의 상관관계식 개발절차

표 9. 충청 지역의 전단파 속도(Vs)의 기술통계

지반분류	측정횟수	평균	최소값	최대값
점성토	24	201	89	309
사질토	27	217	89	368
자갈	21	249	173	363
풍화토	102	348	206	625
풍화암	161	607	286	1,163

표 10. 충청 지역의 표준관입시험 N값의 기술통계

지반분류	측정횟수	평균	최소값	최대값
점성토	24	7	1	18
사질토	27	9	1	41
자갈	21	21	5	60
풍화토	102	53	7	125
풍화암	161	286	79	750

점성토, 사질토, 자갈층, 풍화토, 풍화암으로 구분하여 N값과 전단파 속도와와의 상관관계식을 도출하였다. N값이 50이상인 경우 선형으로 환산하여 적용하였으며, 국내의 상관관계식이 멱함수임을 감안하여 분석하였으며, 결정계수는 국내의 사례 대부분이 0.1~0.5의 범위에 있음을 고려하여 0.45를 기준치로 비교 분석하였다.

3.3.1 점성토에 대한 상관관계

그림 9는 충청 지역의 점성토에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 보여주며, 점성토층의 N값은 1~18로써, 전단파 속도는 89~309m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한 동일한 N값에서의 최대 편차는 N값이 3일 경우 전단파 속도가 129~230m/sec의 범위로 나타났다. 또한 점성토에서 N값의 평균치는 7로 산정되었으며, 전단파 속도의 평균치는 201m/sec로 나타났다. 상관관계식의 결정계수는 0.49이며, 관계식은 식 (13)과 같다.

$$V_s = 117.6 \cdot N^{0.28} \quad (13)$$

3.3.2 사질토에 대한 상관관계

그림 10은 충청 지역의 사질토에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 보여주며, 점성토층의 N값은 1~41로써, 전단파 속도는 89~368m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한 동일한 N값에서의 최대 편차는 N값이 4일 경우 전단파 속도가 148~241m/sec의 범위로 나타났다. 또한 사질토에서 N값의 평균치는 9로 산정되었으며, 전단파 속도의 평균치는 217m/sec로 나타났다. 상관관계식의 결정계수는 0.65이며 관계식은 식 (14)와 같다.

$$V_s = 111.7 \cdot N^{0.32} \quad (14)$$

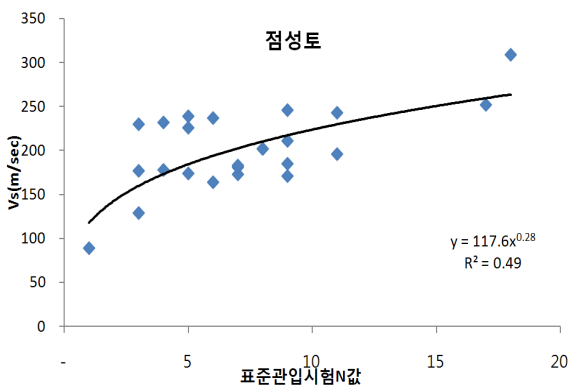


그림 9. 점성토에 대한 전단파 속도와 N값의 상관관계

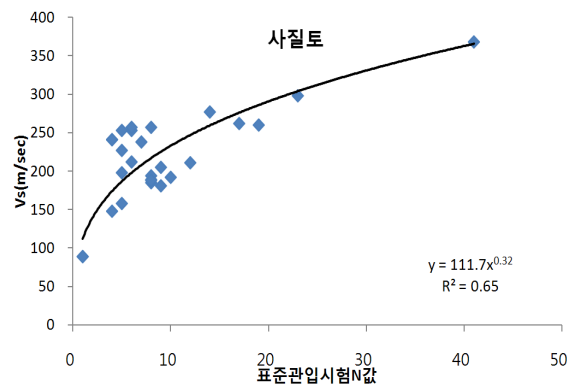


그림 10. 사질토에 대한 전단파 속도와 N값의 상관관계

3.3.3 자갈층에 대한 상관관계

그림 11은 충청 지역의 자갈층에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 보여주며 자갈층의 N값은 5~60으로써, 전단파 속도는 173~363m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한 동일한 N값에서의 최대 편차는 N값이 13일 경우 전단파 속도가 202~236m/sec로써 편차 폭이 매우 좁게 나타나고 있다. 또한 자갈층에서 N값 평균치는 21로 산정되었으며, 전단파 속도의 평균치는 249m/sec로 나타났다. 상관관계식의 결정계수는 0.59이며 관계식은 식 (15)와 같다.

$$V_s = 111.1 \cdot N^{0.27} \quad (15)$$

3.3.4 풍화토에 대한 상관관계

그림 12는 충청 지역의 풍화토층에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 보여주며 풍화토층의 N값은 7~125로써, 전단파 속도는 234~625m/sec의 범위에 분포하고 있다. 또한 동일한 N값에서의 최대편차는 N값이 52일 경우 전단파 속도가 276~550m/sec로써 다소 큰 폭으로 나타나고 있다. 또한 풍화토층에서 N값 평균치는 53이고 전단파 속도의 평균치는 348m/sec로 나타났다. 상관관계식

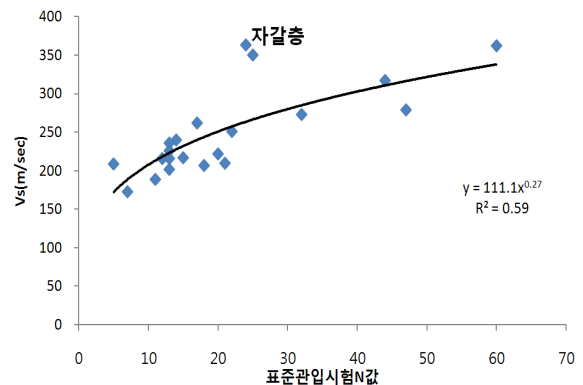


그림 11. 자갈층에 대한 전단파 속도와 N값의 상관관계

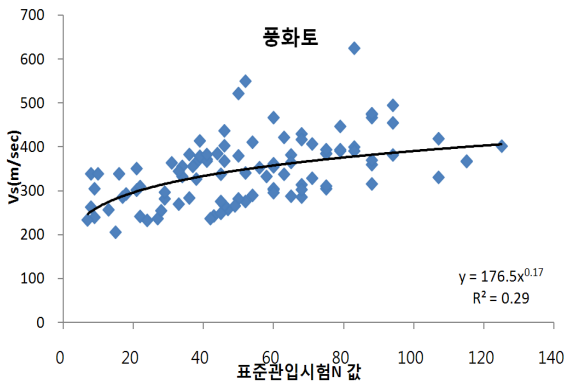


그림 12. 풍화토에 대한 전단파 속도와 N값의 상관관계

의 결정계수는 식 (16)과 같이 0.29로써 다른 토질에 비해 낮게 나타났다.

$$V_s = 176.5 \cdot N^{0.17} \quad (16)$$

3.3.5 풍화암에 대한 상관관계

그림 13은 충청 지역의 풍화암층에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 보여주며 풍화암층의 N값은 79~750로써, 전단파 속도는 286~1,163m/sec의 범위로 넓게 분포하고 있다. 또한 동일한 N값에서의 최대편차는 N값이 115일 경우 전단파 속도가 350~681m/sec로써 다소 큰 폭으로 나타나고 있다. 또한 풍화암층에서 N값 평균치는 286이고 전단파 속도 평균치는 607m/sec로 나타났다. 상관관계식의 결정계수는 식 (17)과 같이 0.25로써 다른 토질에 비하여 낮게 나타났다.

$$V_s = 215.5 \cdot N^{0.18} \quad (17)$$

3.3.6 전체토에 대한 상관관계

그림 14는 충청 지역의 전체토층에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계를 보여주고 있다. 풍화암의

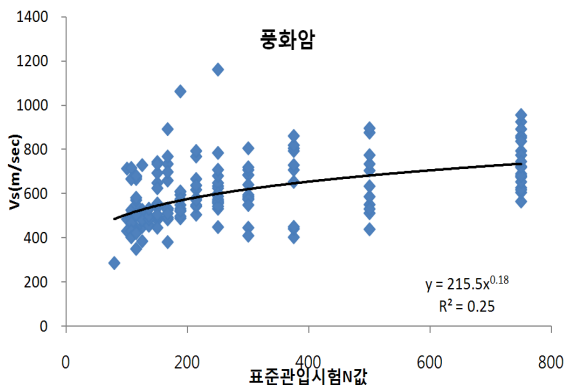


그림 13. 풍화암에 대한 전단파 속도와 N값의 상관관계

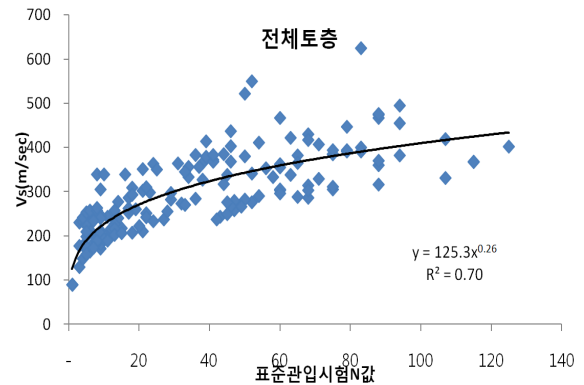


그림 14. 전체토에 대한 전단파 속도와 N값의 상관관계

상관관계식은 표준관입시험의 특성상 N값이 79~750의 큰 편차를 나타내고 있어 N값의 신뢰성 부족을 고려하여 풍화암층을 제외한 점성토, 사질토, 자갈층, 풍화토층 전체에 대한 전단파 속도와 표준관입시험 N값의 상관관계식을 도출하였다. 전단파 속도와 표준관입시험의 상관관계가 높은 수준으로 결정계수는 0.70으로써 식 (18)과 같다.

$$V_s = 125.3 \cdot N^{0.26} \quad (18)$$

4. 분석 및 고찰

4.1 점성토층에 대한 상관관계 분석

충청지역의 점성토에 대한 상관관계 제안식은 $V_s = 117.6 \cdot N^{0.28}$ 로써 국내의 상관관계식과 비교할 경우 유사한 특성을 보이고 있으며, 점성토층의 평균 N값 7을 기준으로 할 경우 전단파 속도는 201m/sec으로, 국내 사례보다는 전단파 속도가 34m/sec 작은 값을 보이고 있으나, 외국의 경험적 상관관계식보다는 62m/sec 높은 특성을 보이고 있으며, 결정계수는 0.49로 0.45를 기준으로 할 경우 비교적 높게 나타났다(그림 15 및 표 11 참조).

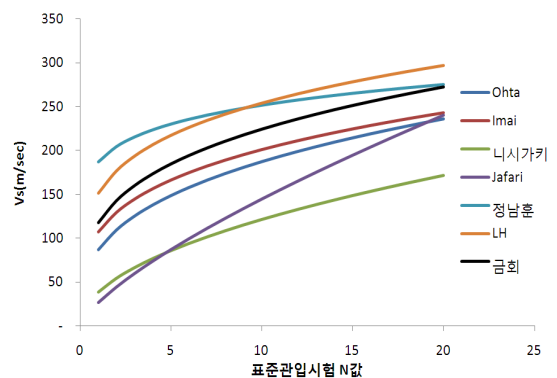


그림 15. 점성토 기준 경험식에 의한 N값별 전단파 속도 범위

표 11. 점성토에 대한 추정식 비교

제안자	전단파 속도 추정식($V_s = \text{m/s}$)
Ohta와 Goto(1978)	$V_s = 86.9 \cdot N^{0.333}$
Imai와 Tonouchi(1982)	$V_s = 107 \cdot N^{0.274}$
Jafari(1997)	$V_s = 27.0 \cdot N^{0.73}$
정남훈(2009)	$V_s = 187.3 \cdot N^{0.128}$
LH(2009)	$V_s = 151.2 \cdot N^{0.225}$
본 연구	$V_s = 117.6 \cdot N^{0.28}$

4.2 사질토층 대한 상관관계 분석

사질토층의 상관관계 제안식은 충청지역의 점성토에 대한 상관관계식은 $V_s = 111.7 \cdot N^{0.32}$ 로써 국내의 상관관계식과 유사한 특성을 갖고 있으며, 평균 N값 9를 기준으로 할 경우 전단파 속도는 217m/sec로써 국내 연구결과와 비교시 평균값을 보이고 있으며, 외국 연구사례보다는 56m/sec 높은 선형특성으로 결정계수는 0.65로 높게 나타났다(그림 16 및 표 12 참조).

4.3 자갈층 대한 상관관계 분석

자갈층에 대하여 본 연구에서 제안한 $V_s = 111.1 \cdot N^{0.27}$ 상관관계식은 국내의 상관관계식과 비교할 경우 유사한 특성을 보였으며 평균 N값 21을 기준으로 할 경우 전단파 속도는 249m/sec로써 국내의 사례 비교 시 평균값으로 나타났으며 결정계수는 0.59로 높게 나타났다(그림 17 및 표 13 참조).

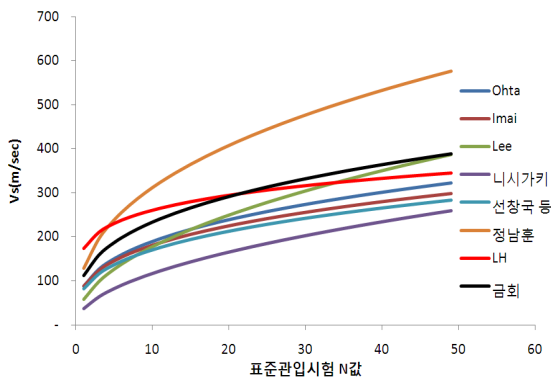


그림 16. 사질토 기준 경험식에 의한 N값별 전단파 속도 범위

표 12. 사질토에 대한 추정식 비교

제안자	전단파 속도 추정식($V_s = \text{m/s}$)
Ohta와 Goto(1978)	$V_s = 88.4 \cdot N^{0.333}$
Imai와 Tonouchi(1982)	$V_s = 87.8 \cdot N^{0.314}$
Lee(1990)	$V_s = 57.40 \cdot N^{0.49}$
선창국 등(2008)	$V_s = 82.01 \cdot N^{0.319}$
정남훈(2009)	$V_s = 128.3 \cdot N^{0.386}$
한국토지주택공사(2009)	$V_s = 173.9 \cdot N^{0.176}$
본 연구	$V_s = 111.7 \cdot N^{0.32}$

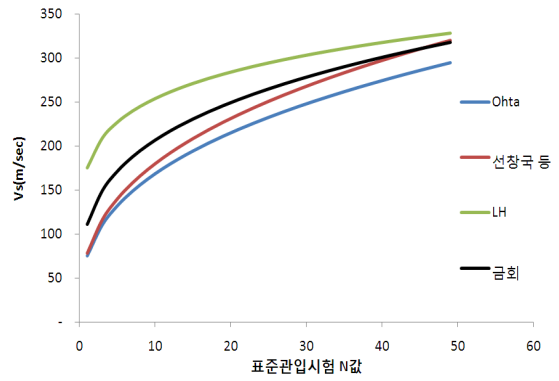


그림 17. 자갈층 기준 경험식에 의한 N값별 전단파 속도 범위

표 13. 자갈층에 대한 추정식 비교

제안자	전단파 속도 추정식($V_s = \text{m/s}$)
Ohta와 Goto(1978)	$V_s = 75.3 \cdot N^{0.351}$
선창국 등(2008)	$V_s = 78.63 \cdot N^{0.361}$
한국토지주택공사(2009)	$V_s = 175.6 \cdot N^{0.161}$
본 연구	$V_s = 111.1 \cdot N^{0.27}$

4.4 풍화토층 대한 상관관계 분석

풍화토에 대하여 본 연구에서 제안한 $V_s = 176.5 \cdot N^{0.17}$ 상관관계식은 국내 상관관계식과 매우 유사한 특성을 보이고 있으며 평균 N값 53을 기준으로 할 경우 전단파 속도는 348m/sec로써 결정계수는 0.29로 낮게 나타났다. N값 50 이하의 결정계수는 0.11로써 풍화토 전체의 결정계수보다 낮은 결과를 보였다(그림 18 및 표 14 참조).

4.5 풍화암층 대한 상관관계 분석

풍화암에 대하여 본 연구에서 제안한 $V_s = 215.5 \cdot N^{0.18}$ 상관관계식은 국내 상관관계식보다 낮은 전단파 속도 값을 보이고 있으며, 선형으로 환산한 평균 N값 286을 기준으로 할 때 전단파 속도는 607m/sec로써 국내 관계식보다 300m/sec

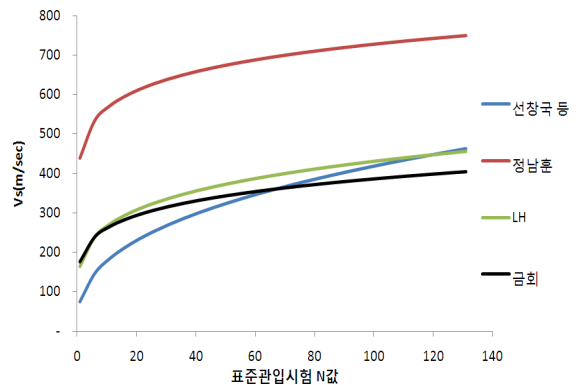


그림 18. 풍화토층 기준 경험식에 의한 N값별 전단파 속도 범위

표 14. 풍화도에 대한 추정식 비교

제안자	전단파 속도 추정식($V_s = \text{m/s}$)
선창국 등(2008)	$V_s = 75.76 \cdot N^{0.371}$
정남훈(2009)	$V_s = 438.1 \cdot N^{0.110}$
한국토지주택공사(2009)	$V_s = 163.9 \cdot N^{0.210}$
본 연구	$V_s = 176.5 \cdot N^{0.17}$

이상의 작은 값을 나타내며, 결정계수 또한 0.25로 낮게 나타났다(그림 19 및 표 15 참조).

4.6 전체토층 대한 상관관계 분석

전체토층은 풍화암층을 제외한 식은 $V_s = 125.3 \cdot N^{0.26}$ 와 같다. 국내의 상관관계식과 비교할 경우 유사한 특성을 보이고 있으나 지층별 상관관계식을 제안하고 있음을 고려하여 지층 파악이 불확실한 경우에 한하여 매우 제한적으로 적용되어야 할 것이다(그림 20, 21 및 표 16 참조).

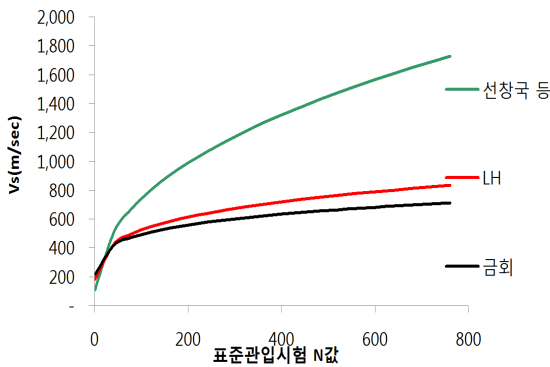


그림 19. 풍화암 기준 경험식에 의한 N값별 전단파 속도 범위

표 15. 풍화암에 대한 추정식 비교

제안자	전단파 속도 추정식($V_s = \text{m/s}$)
선창국 등(2008)	$V_s = 107.94 \cdot N^{0.418}$
한국토지주택공사(2009)	$V_s = 182.3 \cdot N^{0.229}$
본 연구	$V_s = 215.5 \cdot N^{0.18}$

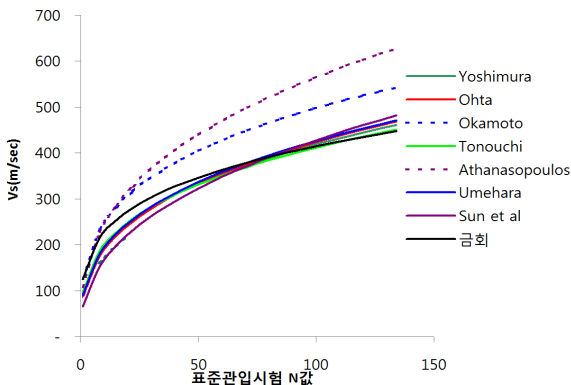


그림 20. 전체토층 국내외 기준 경험식에 의한 N값별 전단파 속도 범위

표 16. 전체토층에 대한 추정식 비교

제안자	전단파 속도 추정식 ($V_s = \text{m/s}$)	제안자	전단파 속도 추정식 ($V_s = \text{m/s}$)
Imai와 Yoshimura (1969)	$V_s = 92.10 \cdot N^{0.329}$	Umehara	$V_s = 89.1 \cdot N^{0.34}$
Ohta와 Goto(1978)	$V_s = 85.34 \cdot N^{0.348}$	김동수 (1998)	$V_s = 98.38 \cdot N^{0.29}$
Okamoto(1980)	$V_s = 125 \cdot N^{0.3}$	Sun et al. (2006)	$V_s = 65.64 \cdot N^{0.407}$
Imai와 Tonouchi (1982)	$V_s = 97 \cdot N^{0.314}$	선창국 등 (2008)	$V_s = 65.64 \cdot N^{0.407}$
Athanasopoulos (1994)	$V_s = 107.6 \cdot N^{0.36}$	정남훈 (2009)	$V_s = 144.7 \cdot N^{0.380}$
Jafari (1997)	$V_s = 22.0 \cdot N^{0.85}$	본 연구	$V_s = 125.3 \cdot N^{0.26}$

5. 결 론

본 연구에서는 국내의 탄성파 시험과 표준관입시험과의 경험적 상관관계식을 분석하고 한국토지주택공사가 수행한 충청 지역 지반보고서의 탄성파 시험과 표준관입시험 관련 자료를 수집하여 Database를 구축하였으며, 구축된 Database를 활용하여 충청 지역의 토질 특성별 표준관입시험 N값과 전단파 속도의 상관관계를 분석하여 추정식을 제안하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 점성토층은 국내의 상관관계식과 비교할 경우 유사한 특성을 보이고 있으며, 점성토층의 평균 N값 7을 기준으로 할 경우 전단파 속도는 201m/sec으로, 국내 사례 보다는 전단파 속도가 34m/sec 작은 값을 보이고 있으나, 외국의 경험적 상관관계식보다는 62m/sec 높은 특성을 보이고 있으며, 결정계수는 0.49로 0.45를 기준으로 할 경우 비교적 높게 나타났다.
- 사질토층은 국내의 상관관계식과 유사한 특성을 갖고 있으며, 평균 N값 9를 기준으로 할 경우 전단파 속도는 217m/sec로써 국내 연구결과와 비교 시 평균값을 보이고 있으며, 외국 연구사례보다는 56m/sec 높은 선형특성으로 결정계수는 0.65로 높게 나타났다.
- 자갈층 또한 국내의 상관관계식과 비교할 경우 유사한 특성을 보였으며 평균 N값 21을 기준으로 할 경우 전단파 속도는 249m/sec로써 국내의 사례 비교 시 평균값으로 나타났으며 결정계수는 0.59로 높게 나타났다.
- 풍화토층은 국내 상관관계식과 매우 유사한 특성을 보이고 있으며 평균 N값 53을 기준으로 할 경우 전단파 속도는 348m/sec로써 결정계수는 0.29로 낮게 나타났다

다. N값 50 이하의 결정계수는 0.11로써 풍화도 전체의 결정계수보다 낮은 결과를 보였다.

- (5) 풍화암층은 국내 상관관계식보다 낮은 전단파 속도를 보이고 있으며, 선형으로 환산한 평균 N값 286을 기준으로 할 때 전단파 속도는 607m/sec로써 국내 관계식보다 300m/sec 이상의 작은 값을 나타내며, 결정계수 또한 0.25로 낮게 나타나고 있어 더욱 많은 데이터 검증이 필요하다.
- (6) N값이 전단파와 역함수의 관계를 갖는 이유는 N값이 현장 유효응력 혹은 강도와 관련이 있고, 전단파는 현장 유효응력에 지배를 받기 때문으로 보여 진다. 이에 따른 상관성 분석 결과, 풍화암층을 제외한 전체토층은 국내 외 상관관계식과 비교할 경우 유사한 특성을 보이고 있으나 지층별 상관관계식을 제안하고 있음을 고려하여 지층 파악이 불확실한 경우에 한하여 매우 제한적으로 적용되어야 할 것으로 사료된다.
- (7) 본 논문은 충청지역을 지역적 구분을 하여 몇 가지 샘플을 선정하여 연구를 수행한 결과로 향후에는 공간적인 분포의 특징을 반영한 연구를 수행하여 보완할 예정이다. 또한, 본 연구에서 수집한 현장별 N값은 지반조사 결과로써 현장조건을 고려한 보정이 이루어지지 않았으므로 향후에는 정량적인 데이터 확보를 위하여 정확한 N값 측정에 의한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 강영중, 한택희, 윤상열(2001), *단지조성에 따른 시설물의 내진 연구*, 한국지진공학회, 한국토지주택공사 연구보고서, p. 78, p. 85.
2. 김동수, 방은석, 서원석(2003), 표준관입시험을 이용한 업소시험에서 전단파 속도 주상도의 도출, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 19, No. 2, pp. 39~50.
3. 김영완(2004), *SPS 검층을 이용한 지반특성 연구*, 석사학위논문, 전남대학교, pp. 11~19.
4. 선창국, 정충기, 김동수(2007), 얇은 심도 전단파속도 분포를 이용한 30m 심도 평균 전단파속도의 결정, *한국지진공학회 논문집*, Vol. 11, No. 1, pp. 45~57.
5. 장승필, 고현무, 박순규, 김동수(2002), *주요시설물 내진설계기준의 재정비*, 한국지진공학회, 건설교통부 2000년 건설교통기술혁신사업 최종보고서, pp. 17~28.
6. 정남훈(2009), *부유형 속도검층에 의한 전단파 속도 거동*, 박사학위논문, 단국대학교, p. 20, pp. 29~95.
7. 정종석, 김동수, 박중배, 임해식, 박광열, 오원근(2009), *내진설계 시 합리적인 지반분류를 위한 전단파 속도 추정 및 적용방안*, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구보고서, pp. 9~79, p. 85, pp. 261~314.

8. 한국지반공학회(2009), *지반기술자를 위한 지질 및 암반공학*, 지반공학특별시리즈 1, 씨아이알, pp. 3~52.
9. 한국토지주택공사 LH(2008), *지반정보편람 제3권 강원 대전 충남 충북*, 한국토지주택공사, pp. 919~1120.
10. Athanasopoulos, G. A., Xenaki, V. C.(1994), Experimental Investigation of the Interaction Mechanism at the EPS Geofamsand Interface by Shear Testing, *Geosynthetics International*, Vol. 8, No. 6, pp. 471~499.
11. Crespellani T., Garzonio C. A., Midiai C. & Vannucchi G.(1997), A Methodology for the Seismic Microzonation of Historical Nuclei in Central Italy, *European Earthquake Eng*, Vol. 11, No. 1, pp. 46~60.
12. Hasancebi, N., Ulusay, R. (2007), Empirical Correlations between Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Ground Shaking Assessments, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 66, No. 3, pp. 203~213.
13. 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.
14. Jafari, M. K., Asghari, A., Rahmani, I.(1997), Empirical Correlation between Shear Wave Velocity(Vs) and SPT-N Value for South of Tehran Soils, *4th Proceeding of International Conference on Civil Engineering*, Tehran, Iran, Vol. 2, pp. 355~365.
15. Jason T. DeJong(2007), *Site Characterization-Guidelines for Estimating Vs Based on In-Situ Tests Stage 1-Interim Report*, University of California, Davis, pp. 7~15, pp. 17~18.
16. Jinan, Z.(1987), Correlation Between Seismic Wave Velocity and the Number of Blow of SPT and Depth, Selected Papers from the Chinese, *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 113, No. 2, pp. 92~100.
17. Lee, S. H.(1992), Analysis of the Multicollinearity of Regression Equations of Shear Wave Velocities, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 205~214.
18. Mayne, P.W. and Rix, G.J.(1993), Gmax-qc Relationships For Clays, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 54~60.
19. Mayne, P. W., and Rix, G. J.(1995), Correlations between Shear Wave Velocity and Cone Tip Resistance in Natural Clays. *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 2, pp. 107~110.
20. Ohasaki Y, Iwasaki R. (1973), On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratio of Soil Deposits, *Soils and Foundations*, Vol. 13, No. 4, pp. 61~73.
21. Ohta, Y., Goto, N.(1978), Empirical Shear Wave Velocity Equation in Terms of Characteristic Soil Index, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, No. 2, pp. 167~187.
22. 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.
23. Rix, G. J. and Tokoe, K. H.(1991), *Correlation of Initial Tangent Modulus and Cone Resistance*, Calibration Chamber Testing, Elsevier, New York, pp. 351~362.
24. Sun, C. G., Kim, H. J. and Chung, C. K.(2008), Deduction of Correlations between Shear Wave Velocity and Geotechnical In-situ Penetration Test Data, *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 12, No. 4, pp. 4~6.

(접수일: 2011. 4. 11 심사일: 2011. 8. 2 심사완료일: 2011. 9. 22)