

## 지반개량을 통한 원지반의 전단파속도 향상에 대한 실험적 연구

정찬유<sup>1\*</sup>, 문재성<sup>2</sup>, 조명수<sup>3</sup>, 강호덕<sup>4</sup>, 양희정<sup>5</sup>

# An Experimental Study on the Shear Wave Velocity Improvement of Ground by Ground Improvement

Chan-Yu Jeong<sup>1\*</sup>, Jae-Sung Mun<sup>2</sup>, Myoung-Su Jo<sup>3</sup>, Ho-deok Kang<sup>4</sup>, Hee-Jeong Yang<sup>5</sup>

**Abstract:** In this study, an experimental study was carried out with variables of the shape of the ground soil-binder in order to find out whether the shear wave velocity and the ground grade were improved by the ground improvement. In this study, the shear wave velocity was measured using the crosshole method with variables of the shape of the ground soil-binder. In addition, the prediction formula of the shear wave velocity for suitability of N-Values for the domestic soil conditions are proposed using the result value of this study and the existing results of shear wave velocity. As a result, the shear wave velocity of the ground has increased. In addition, the prediction formula proposed in this study reasonably issued the existing experimental results regardless of the stratum conditions.

**Keywords:** Seismic, Ground Grade, Shear Wave Velocity, Ground Improvement

## 1. 서 론

최근 한반도는 지진 관측 이래 최대 규모인 2016년 경주지진에 이어 2017년 포항에서 두 번째로 큰 지진이 발생하였으며, 주택, 학교, 아파트 등 구조물 및 비구조물에서 많은 피해가 발생하였다. 이를 계기로 우리나라도 지진에 대한 안전지대가 아니라는 인식과 우려가 제기됨에 따라 지진에 대한 내진설계의 관심이 부각되고 있다.

지진발생시 해안 및 강가의 연약지반이나 준설패립 지반에 설치되는 건축구조물은 연약 점토지반에서의 증폭현상 또는 액상화가 발생할 가능성이 높음에 따라 지진에 의한 피해가 증가 될 수 있다. 지반의 동적 특성은 해당 지층에서의 전단파속도로 대표될 수 있으며, 이에 내진설계를 위해서는 지층별 전단파속도의 측정이 불가피하다.

현재 국내 내진설계기준에서는 전단파속도를 이용하여 지반을 분류하고 있으며, 각 지반의 종류에 따라 설계응답스펙트럼을 적용하여 건축구조물에 작용하는 지진하중을 산정하

고 있다. 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법은 Table 1과 같이 기반암 깊이 및 토층평균전단파속도에 따라  $S_1$ 에서  $S_6$ 까지 6종으로 분류하고 있다(Ministry of Land, 2018).

전단파속도 측정 방법은 시추공을 이용한 시추공 탐사법과 시추공이 없는 표면과 탐사법으로 구분된다. 일반적으로 시추공을 이용한 시추공탐사법은 표면과 탐사법에 비하여 측정방법이나 자료처리과정 등이 잘 정리되어 있으며, 이론적으로 명확하여 신뢰성 있는 전단파속도를 획득할 수 있는 것으로 알려져 있다. 시추공을 이용한 시추공 탐사법은 다운홀(Down hole), 크로스홀(Cross hole), 부유식 음파검층(Suspension PS logging), SPT업홀기법(SPT-Uphole method) 등이 있다. 이 중

**Table 1** Classification of the ground of domestic

Type	Name of ground	Bedrock Depth, (m)	Average shear wave velocity (m/s)
$S_1$	Bedrock	Less than 3	-
$S_2$	Shallow hard	3 to 20 or less	260 or more
$S_3$	Shallow soft		Less than 260
$S_4$	Deep and hard	More than 20	More than 180
$S_5$	Deep and soft	Less than 50	Less than 180
	Very Soft	3 or more	120 or less
$S_6$	Necessary ground where assessment of ground characteristic property and analysis of ground response		

<sup>1</sup>정회원, 이엑스티 주식회사, 기술연구소 책임연구원, 공학박사, 교신저자

<sup>2</sup>정회원, 이엑스티 주식회사, 기술연구소 책임연구원, 공학박사

<sup>3</sup>정회원, 이엑스티 주식회사, 기술연구소 책임연구원, 공학석사

<sup>4</sup>정회원, 롯데건설, 기술연구원 책임연구원, 공학석사

<sup>5</sup>정회원, 롯데건설, 기술연구원 수석연구원, 공학석사

\*Corresponding author: ssbachany@gmail.com

GBC #1402, 165, Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul, Republic of Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2020년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

**Table 2** List of specimens

Specimens	Design strength(MPa)	Diameter of soil mixing (mm)			Test method
		Head	Cone	Tail	
Non	-	-	-	-	Cross Hole
V-2	2.0	1400	1400-600	600	Cross Hole
P-3	2.0	600	600	600	Cross Hole

일반적으로 시험비용, 시간, 접근성 등에 따라 다운홀 및 크로스홀 기법이 주로 사용되고 있으며, 크로스홀 기법이 결과의 신뢰성이 가장 높은 것으로 알려져 있다(Mok, 1987, Choi, 2008).

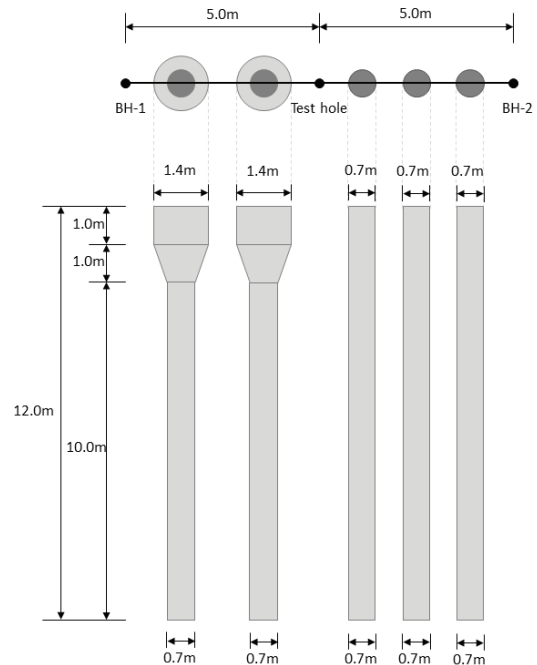
인접국가인 일본의 사상최악의 자연재난인 동일본 대지진은 리히터 규모 9.0의 초강력 지진으로 액상화 및 지반 침하에 의하여 26,914채의 주택에 큰 피해를 발생시켰다. 그러나 지반개량공법이 적용된 상부구조물은 조사 결과 약 93%가 지진에 대해 피해가 없거나 경미한 것으로 조사되었으며, 지반개량공법이 지반의 액상화 저감에 유용하다고 보고되고 있다(Japan Cement Association, 2012). 지반개량공법은 원지반에 소일시멘트를 주입 및 혼합하여 일정 강도로 단단히 굳히는 공법으로 연약지반이 주로 분포된 유럽 일부 국가 및 일본에서 주로 적용되고 있다. 국내의 경우 연약지반이 해안 및 강가에 일부 존재함에 따라 지반개량공법에 대한 성능 검증 및 연구의 미미로 비구조물인 도로 등에 일부 적용되고 있는 실정이다.

이 연구에서는 지반의 개량에 따른 전단파속도 및 지반등급 향상 여부를 알아보기 위하여 지반개량의 형상을 변수로 크로스홀 기법을 이용하여 실험적 연구를 수행하였으며, 기존 전단파속도 측정 결과와 비교 분석하였다. 또한, 이 연구에서 측정된 결과 및 기존 전단파속도 측정결과를 이용하여 국내 실정에 맞는 전단파속도 예측식을 제안하였다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 계획

이 연구에서는 지반개량을 이용한 전단파속도 및 지반등급의 향상 검증을 위하여 지반개량체의 형상을 변수로 실험적 연구를 수행하였다. Table 2는 이 연구에서 수행한 각 실험체의 변수를 나타내며, Fig. 1은 실험 배치 및 계획도를 나타낸다. Table 2와 같이 전단파속도 측정은 크로스홀 기법을 활용하였으며, 지반개량체 형상은 Fig. 1과 같이 Head Ø1,400mm(깊이 1,000mm), Cone Ø1,400mm~Ø700mm(깊이 1,000mm), Tail Ø700mm로 구성된 변단면 형상과 모든 직경이 Ø700mm로 동일한 원통형 형상으로 각각 계획하였다. 개량 깊이는 12m로 동일



**Fig. 1** Details of specimens

하게 계획하였다.

실험체는 Fig. 1과 같이 동일 직경에 지반개량체 형상에 따른 효과를 알아보기 위하여 변단면 형상의 실험체 V-2와 원통형 형상의 실험체 P-3를 동일한 5m 사이에 각각 2EA와 3EA 배치하여 실험을 수행하였다.

### 2.2 현장 지반조건

이 연구에서 적용된 실험구간의 지반조건을 확인하기 위하여 총 2개(BH-1, BH-2)의 시추홀을 통하여 표준관입시험을 수행하였으며, 대상지반의 조사결과는 Table 3에 나타내었다. Table 3과 같이 최상부는 인위적으로 매립한 지층으로 5.0~6.0m의 두께로 분포하며, 토질은 사질토 및 점성토로 구성되어 있다. 사질토는 실트섞인 세립질 모래로 표준관입시험에 의한 N-Value는 3/30~27/30(회/cm), 점성토는 실트질 점토로 N-Value는 2/30(회/cm)로 측정되었다. 퇴적층은 유수에 의하여 운반 및 퇴적되어 쌓인 지층으로서 11.5~11.8m 두께로 매립층 하부에 분포하며, 토질은 실트질 점토, 실트섞인 세

**Table 3** Ground conditions

Division	Stratum	Depth(m)	Thickness (m)	Composition status	N Value
BH-1	Landfill layer (sand)	0.0 ~ 5.0	5.0	silt-weaned seepage	3/30~27/30
	Landfill layer (clay)	5.0 ~ 6.0	1.0	silt clay	2/30
	Sedimentary layers(sand)	6.0 ~ 13.5	7.5	Silt granulated sand	5/30~30/30
	Sedimentary layers(clay)	13.5 ~ 17.5	4.0	silt clay	10/30~15/30
	Weathered soil	17.5 ~ 30.0	>12.5	Sandy Silt	12/30~23/30
BH-2	Landfill layer (sand)	0.0 ~ 6.0	6.0	Silt granulated sand	5/30~25/30
	Sedimentary layers(sand)	6.0 ~ 14.0	8.0	Silt granulated sand	5/30~25/30
	Sedimentary layers(clay)	14.0 ~ 17.8	3.8	silt clay	6/30~8/30
	Weathered soil	17.8 ~ 30.0	>3.5	Sandy Silt	8/30~21/30

립질 모래로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N-Value 값은 점성토층에서 6/30~15/30(회/cm), 사질토층에서 5/30 ~ 30/30(회/cm)로 측정되었다. 풍화도는 기반암의 상부 풍화대로 모든 시추공에서 확인하였으며, 퇴적층 하부에서 12.5m 이상의 두께로 분포한다. 표준관입시험에 의한 N-Value는 12/30 ~ 23/30(회/cm)이며, 모든 지층은 습윤의 함수상태를 나타냈다.

### 2.3 실험방법

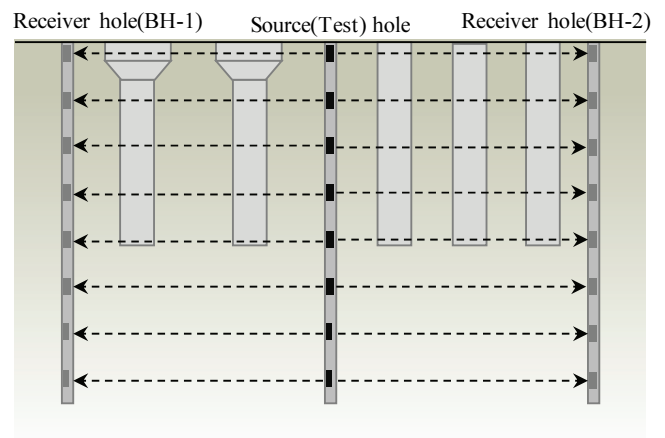
이 연구에서는 각 층에 대한 지반개량에 따른 전단파속도를 측정하기 위하여 크로스홀기법을 이용하였다. Fig. 2은 크로스홀기법을 이용한 전단파속도 측정 방법을 나타낸다. Fig. 2와 같이 지표면으로부터 동일 심도에 가진원과 수신기를 위치시킨 후 탄성파를 발생시켜 1m간격으로 30m까지 측정하였으며, 지반개량 전·후에 따른 전단파 속도를 비교하기 위하여 지반개량 전·후로 각각 총 3회 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 지반개량 전 전단파속도 측정 결과

Table 4와 5는 이 연구에서 측정된 V-2와 P-3 실험체의 전단파속도 측정결과를 나타낸다. 여기서 각 전단파속도는 측정된 초동시간을 시험홀 간의 거리로 나누어 심도별 전단파속도를 나타낸 것이다.

Table 4 같이 지반개량 전(A) 측정된 전단파 속도는 매립층에서 118m/s, 퇴적층(모래)에서 163m/s, 퇴적층(점토)에서 236m/s, 풍화토에서 223m/s로 측정되었으며, 지반이 단단할수록 높은 전단파속도를 나타내었다. 해당 실험구간의 평균 전단파속도



**Fig. 2** Test method (Cross hole method)

는 172m/s로 국내 내진설계기준에서 규정하고 있는 기반암값이 20m초과, 전단파속도 180m/s 미만에 해당하여 S5등급의 지반에 해당되는 결과를 얻었다.

### 3.2 지반개량 후 전단파속도 측정 결과

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 변단면 형상과 원통형 형상으로 지반개량 후 측정된 전단파속도 결과를 각각 나타낸다. Fig. 3에서 Non은 지반개량 전에 측정된 전단파속도를 나타내며, V-2는 변단면 형상, P-3은 원통형 형상으로 지반개량을 수행한 후 측정된 결과를 나타낸다. Table 4와 Fig. 3(a)와 같이 상부(Head)의 직경을 1400mm, 하부(Tail) 직경을 700mm로 지반개량 후 측정된 V-2의 전단파속도는 매립층에서 163m/s, 퇴적층(모래)에서 184m/s로 측정되었으며, 각각 45m/s, 27m/s의 전단파속도가 상향되었다. Fig. 3 및 Table 4, 5에서 퇴적층(점토) 및 풍화토는 지반개량을 수행하지 않은 지반으로 Non 실험체와 동일한 전단파속도를 나타내야 하지만 Non 실험체

**Table 4** Test results of V-2 specimen

Division	shear wave velocity(m/s)			Remarks
	Before (A)	After (B)	Correction (C)	C-A
Landfill layer	118	163	163	45
Sedimentary layers(sand)	163	184	190	27
Sedimentary layers(clay)	236	222	236	0
Weathered soil	223	192	223	0
Average	172 (S5)	184 (S4)	190 (S4)	18

**Table 5** Test results of P-3 specimen

Division	shear wave velocity(m/s)			Remarks
	Before (A)	After (B)	Correction (C)	C-A
Landfill layer	118	140	140	22
Sedimentary layers(sand)	163	174	177	14
Sedimentary layers(clay)	236	222	236	0
Weathered soil	223	192	223	0
Average	172 (S5)	183 (S4)	186 (S4)	14

계측 이후 지반개량체의 양생기간 동안 우기에 의한 지하수 상승과 지층의 함수량 차이 등의 환경적 요인에 의하여 차이가 발생한 것으로 판단된다. Table 4와 같이 V-2실험체의 평균 전단파 속도는 184m/s로 측정되었다. 상기에 기술한 대로 미개량 구간인 퇴적층(점토) 및 풍화토에 대한 전단파속도의 오차를 최초 측정(A)시로 보정(C)할 경우 190m/s로 보정되며, 내진설계기준에서 제시하고 있는 180m/s 초과로 S5등급에서 S4등급으로 1단계 상향됨을 확인하였다.

Table 5와 Fig. 3(b)와 같이 상부와 하부 직경이 0.7m로 동일하게 지반을 개량한 P-3실험체는 매립층에서 140m/s, 퇴적층(모래)에서 174m/s로 측정되었으며, 각각 22m/s와 14m/s의 전단파 속도가 상향됨을 확인하였다. P-3실험체의 평균 전단파 속도는 183m/s, 보정(C)시 186m/s로 V-2 실험체와 동일하게 S4등급으로 1단계 지반등급이 상향됨을 확인하였다.

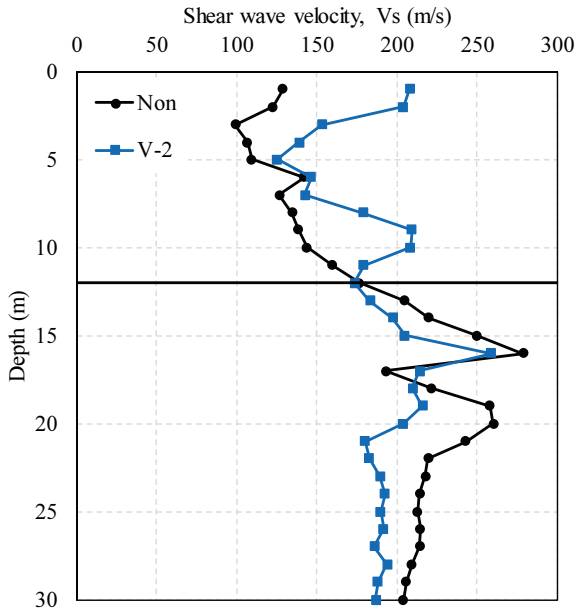
Table 4와 5, Fig. 3과 같이 지반개량을 진행하는 경우 지반개량의 형상과 관계없이 전단파속도는 상향하는 것으로 나타났다. 전단파속도는 매립 등에 의한 지반이 연약한 상부에서는 V-2와 같이 치환면적이 클수록 평균 전단파속도는 크게 상향되는 것을 확인하였으며, 지반이 단단해지는 하부층으로 갈수록 개량효과는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 점토층의 경우 모래층에 비하여 개량효과는 감소하는 것으로 나타났다.

## 4. 지반의 전단파속도 예측식 제안

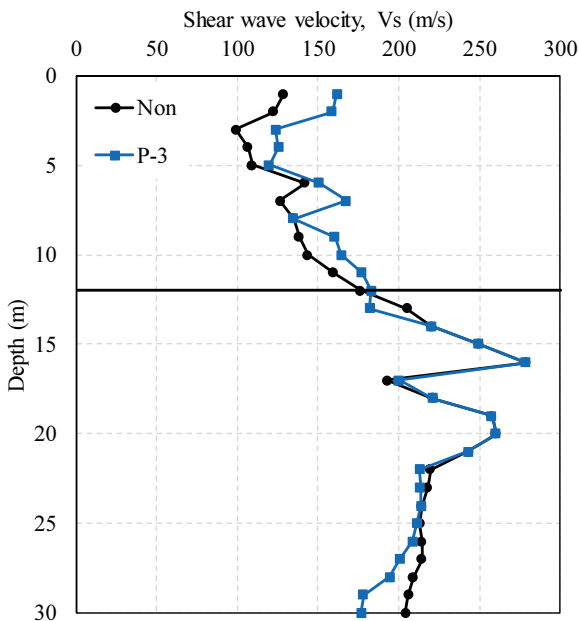
지반의 전단파속도는 3장에서 기술한 바와 같이 지층 조건 및 지반의 N-Value에 영향을 받는 것을 확인하였다. 4장에서는 국내 건설공사 현장에서 수행된 24곳의 지반조사 결과를 이용하여 토질별, N-Value에 따라 전단파속도와 상관관계를 분석하였으며, 국내 지반에 적합한 전단파속도 예측식을 제안하였다.

### 4.1 국내 지반별 전단파속도

Fig. 4는 국내 건설현장에서 수행된 24곳의 지반조사 결과에 따른 전단파속도와 N-Value 관계를 나타낸다. Fig. 4와 같이 점토질의 경우 동일한 N-Value에서 사질토에 비하여 낮은 전단파속도를 나타내었으며, N-Value 5/30이상으로 증가시 증가폭은 감소하였다. 또한, 이러한 경향은 매립층, 퇴적층, 풍화토와 관계없이 동일하게 나타났다. Fig. 4와 같이 각 지층 조건에서의 N-Value와 전단파속도의 분포범위는 점토층의 경우 N-Value 1/30 ~ 28/30, 전단파속도 84 ~ 248m/s 범위에 분포하고 있으며, 사질토의 경우 N-Value 3/30 ~ 30/30, 전단파속도는 146 ~ 343m/s 범위에 분포하고 있다.



(a) V-2



(b) P-3

Fig. 3 Shear wave velocity versus depth relationships

#### 4.2 N-Value에 대한 전단파속도 예측식

현재 국내에서 주로 사용되고 있는 토질별 전단파속도 예측식은 대부분 일본에서 연구된 제안식이다. 기존에 제안된 예측식들은 기존 시험 결과를 바탕으로 회귀분석을 통하여 제안된 식으로 기존 실험결과를 다소 분산되어 결과를 예측하고 있으나 현장 시험결과를 바탕으로 제시되어 실제 적용에 있어서는 신뢰성이 높다고 판단된다. 그러나 이러한 외국

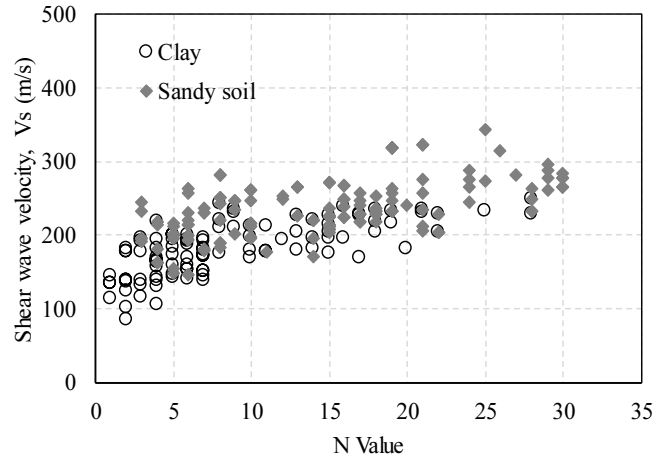


Fig. 4 Shear wave velocity versus N-value using existing results

의 예측식은 국내 지반특성과 조건이 다르기 때문에 적용에는 한계가 있다. 이 연구에서는 Table 6과 같이 4.1절에서 수집한 기존시험결과와 이 연구에서 수행된 결과를 이용하여 국내지반에 적합한 전단파속도 산정식을 제안하였다.

Fig. 5는 기존 실험결과를 이용하여 Ohta and Goto(1978), Okamoto(1989), Imai and Tonouchi(1990)이 제안한 식과 이 연구에서 제안한 식의 비교를 나타낸다. Fig. 5(a)와 같이 Ohta and Goto는 점토와 사질토에 관계없이 N-value 10이하에서는 기존 실험결과를 다소 과소평가하는 경향을 나타내었으며, 전체 실험결과에 대하여 평균 1.13과 변동계수 18.9%로 예측하였다. Okamoto는 Fig. 5(b)와 같이 기존실험결과에 대해서 평균 0.85, 변동계수 17.7%로 예측하였으며, N-Value와 관계없이 다소 과대평가하는 경향을 나타내었다. Imai and Tonouchi는 Fig. 5(c)와 같이 평균 1.12와 변동계수 19.7%를 나타내었으며, N-Value가 10이하에서는 기존실험결과를 과소평가, N-Value 10이상에서는 과대평가하는 경향을 나타내었다. 이 연구에서 제안한 예측식은 Fig. 5(d)와 같이 평균 1.02와 변동계수 14.3%로 점토 및 사질토에 관계없이 N-Value에 대하여 합리적으로 예측하였다.

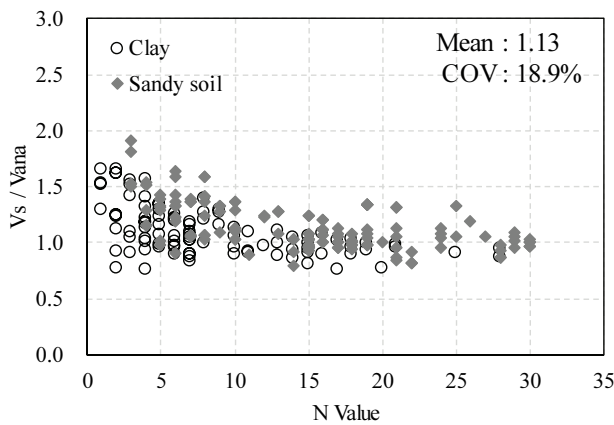
## 5. 결론

이 연구에서는 지반의 개량에 따른 전단파속도 및 지반등급 향상 여부를 알아보기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 또한, 이 연구에서 수행한 결과와 기존실험결과를 수집하여 국내 지반조건에 적합한 전단파속도 예측식을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

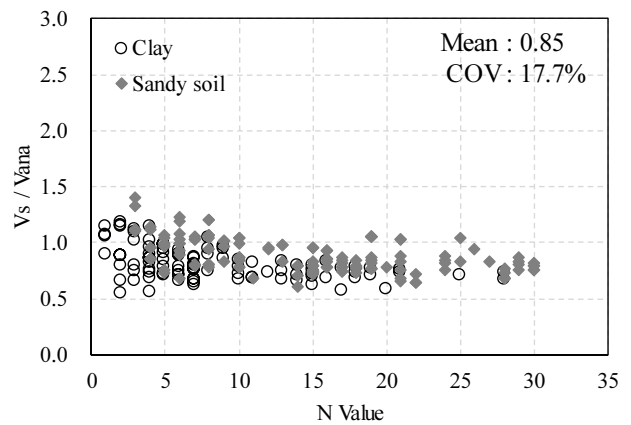
1. 원지반 개량을 통하여 전단파속도를 측정된 결과 점토와

**Table 6** The existing equation to predict shear wave velocity

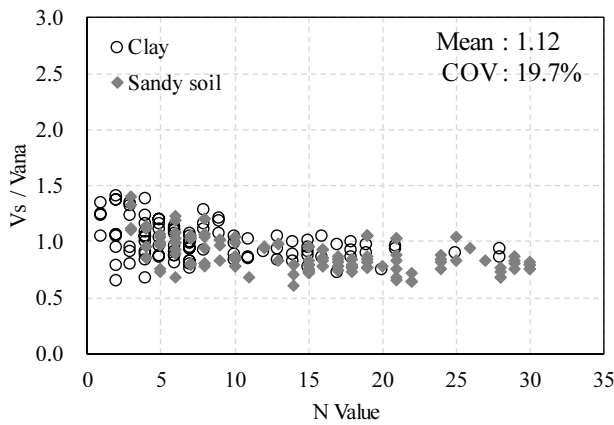
Investigator	Predictive equation	Soil condition
Ohta and Goto(1978)	$V_s = 86.9 \times N^{0.333}$	Clay
	$V_s = 88.4 \times N^{0.333}$	Sandy Soil
Okamoto(1989)	$V_s = 125 \times N^{0.3}$	All
Imai and Tonouchi(1990)	$V_s = 107 \times N^{0.274}$	Clay
	$V_s = 87.8 \times N^{0.314}$	Sandy Soil
Proposed	$V_s = 115 \times N^{0.235}$	Clay
	$V_s = 155 \times N^{0.15}$	Sandy Soil



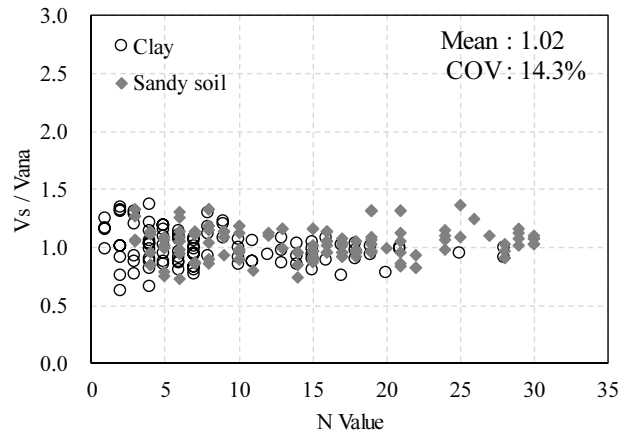
(a) Ohta and Goto



(b) Okamoto



(c) Imai and Tonouchi



(d) Proposed equation

**Fig. 5.** Comparison of existing test results with analytical

사질토에 관계없이 평균전단파속도는 V-2실험체의 경우 172m/s에서 190m/s로, P-3실험체의 경우 172m/s에서 186m/s로 상향됨을 확인하였으며, 지반등급은 모두 S5 등급에서 S4등급으로 1단계 상향하였다. 측정결과와 같이 상부의 연약한 지반에서 치환면적을 크게 할수록 평

균 전단파속도가 크게 상향함을 확인하였다.

2. 기존 실험결과를 이용하여 N-Value와 전단파속도의 상관관계를 비교한 결과 전단파속도는 기반암을 제외할 토층에서 지층조건에 관계없이 N-Value에 영향을 받는 것으로 확인하였으며, 사질토에 비하여 점토층에서 큰

영향을 받는 것을 확인하였다.

3. 기존 실험결과를 바탕으로 기존에 제안된 예측식과 이 연구에서 제안한 예측식을 비교한 결과, Ohta and Goto는 평균 1.13, 변동계수 18.9%, Okamoto는 평균 0.85, 변동계수 17.7%, Imai and Tonouchi는 평균 1.12와 19.7%로 N-Value가 10이하에서는 과소평가, 10이상에서는 과대평가 하는 경향을 나타내었다. 이 연구에서 제안한 예측식은 평균 1.02와 변동계수 14.3%로 점토와 사질토에 관계없이 기존 예측식에 비하여 우수하게 예측함을 확인하였다.

이 연구에서는 지반개량에 따른 전단파속도 영향 평가에 대한 기초연구로 원지반을 지반개량한 경우 전단파속도가 소폭 상승하는 것을 확인하였다. 연구결과로 부터 지반등급 조건에서 근소한 차이로 지반등급이 하향 평가 받는 경우 원지반을 개량함으로써 지반등급을 상향시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 이를 위해서는 다양한 변수 및 조건하에서의 추가적인 실험적, 해석적 검증 연구가 필요할 것이라 판단된다. 또한, 이 연구에서 제안된 예측식은 N-Value에 대한 전단파속도를 비교적 합리적으로 예측함을 확인하였다. 그러나, 이 연구에서 제안된 예측식은 원지반의 N-Value에 대한 전단파속도의 예측식으로 지반개량의 영향이 반영된 예측식을 제안하기 위해서는 다양한 변수를 통한 추가 연구 및 다양한 환경적 조건에서의 데이터 축적이 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업연구개발사업의 연구비지원(19CTAP-C152788-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Choi, W. I.(2008), Investigation on S-wave Velocity for The Marine Deposits in Incheon Coastal Area, Dankook University
2. Imai, T. and Tonouchi, K(1982), Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus, Proc., 2nd Eur, Symp. on Penetration Testing, 1, 67-72
3. Japan Cement Association(2012), Survey report on ground improvement using cement-based solidification material in the Great East Japan Earthquake, Japan Cement Association
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2018), Seismic Design General(KDS 17 10 00 : 2018), Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
5. Mok, Y. J. (1987), Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods, The department of civil engineering, The University of Texas at Austin, Austin, Texas
6. Ohta, Y., and Goto, N(1978), Empirical shear Wave Velocity Equations in terms of Characteristic Soil Indexes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6(2), 167-187
7. Okamoto, S.(1984) Introduction of Earthquake engineering, Tokyo, University of Tokyo Press.

Received : 10/02/2019

Revised : 11/12/2019

Accepted : 11/19/2019

---

**요 지 :** 이 연구에서는 지반의 개량에 따른 전단파속도 및 지반등급 향상 여부를 알아보기 위하여 지반개량체의 형상을 변수로 실험적 연구를 수행하였다. 실험은 지반개량체의 형상을 변수로 크로스홀(Cross hole) 기법을 이용하여 전단파속도를 측정하였다. 또한, 이 연구에서 측정된 결과와 기존 전단파속도 측정결과를 이용하여 국내 지반조건에 맞는 N-Value에 대한 전단파속도 예측식을 제안하였다. 실험결과, 지반개량을 수행하는 경우 원지반의 전단파속도는 소폭 상승하였다. 또한, 이 연구에서 제안한 예측식은 지층조건에 관계없이 기존실험결과를 합리적으로 예측하였다.

**핵심용어 :** 내진, 지반등급, 전단파속도, 지반개량

---