

# 액상화 취약심도를 고려한 지반정보에 따른 액상화 평가의 변화

## Liquefaction Assessment Variations with Regard to the Geotechnical Information Considering of Critical Depth for Liquefaction

송성원<sup>1)</sup> · 김한샘<sup>2)</sup> · 조완제<sup>†</sup>

Sungwan Song · Hansaem Kim · Wanjei Cho

Received: February 20<sup>th</sup>, 2020; Revised: March 26<sup>th</sup>, 2020; Accepted: May 4<sup>th</sup>, 2020

**ABSTRACT** : Recently, due to the liquefaction caused by earthquakes in Pohang and surrounding areas, the importance of researches on the liquefaction assessment has increased. The possibility of liquefaction can be assessed using the geotechnical information. The cyclic resistance ratio (CRR) value used in the assessment of liquefaction can be determined by using the SPT-N values or shear wave velocity,  $V_s$  value. A study was conducted to compare the accuracy of the liquefaction assessment using these two types of geotechnical information, and concluded that the results using SPT-N values are more accurate than those using  $V_s$  values. The previous study speculated that the used  $V_s$  value was measured at a depth of 12 m uniformly without considering the critical depth of liquefaction. Therefore, 10 empirical equations that convert SPT-N values measured at critical depth of liquefaction into  $V_s$  values to confirm the validity of geotechnical information measured at 12 m points uniformly are used to assess the liquefaction possibility and the results were compared with the actual liquefaction results to confirm the accuracy. As a result, 7 out of 10 cases considering critical depth for liquefaction show higher accuracy than those not considered.

**Keywords** : Liquefaction, Ground information, SPT-N value, Shear wave velocity, Liquefaction assessment

**요지** : 최근 포항 및 주변 지역에서 지진 발생에 따른 액상화 현상 관측으로 인해 액상화 발생 가능성을 예측하는 연구의 중요성이 대두되고 있다. 액상화 발생 가능성은 지반정보를 활용하여 평가할 수 있는데 평가에 활용되는 전단저항강도비(CRR)값은 두 가지 지반정보인 SPT-N값과  $V_s$ 값을 활용하여 결정할 수 있다. 이 두 가지 지반정보를 활용하여 평가한 액상화 발생 가능성의 정확도를 비교하는 연구가 수행된 바 있으며 해당 연구에서는 SPT-N값을 활용한 결과가  $V_s$ 값을 활용한 결과보다 정확하다는 결론을 지었다. 또한  $V_s$ 값을 활용한 결과의 정확도가 낮은 이유는  $V_s$ 값이 액상화에 취약한 심도를 고려하지 않고 일률적으로 12m 심도에서 측정되었기 때문인 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 일률적으로 12m 지점에서 측정된 지반정보의 타당성을 확인하고자 액상화에 취약한 심도에서 측정된 SPT-N값을  $V_s$ 값으로 환산하는 총 10가지의 경험식을 활용하여 환산된  $V_s$ 값을 통해 액상화 발생 가능성을 평가하고 실제 액상화 발생 결과와 비교하여 정확도를 확인하는 작업을 수행하였다. 그 결과 액상화에 취약한 심도를 고려한 10가지 경우 중 7가지 경우에 대하여 고려하지 않은 결과에 비해 정확도가 높게 나타났다.

**주요어** : 액상화, 지반정보, SPT-N값,  $V_s$ 값, 액상화 발생 가능성 평가

## 1. 서론

최근 우리나라 포항 일대에 규모 5.4의 지진이 발생함과 더불어 인근 지역에 액상화 현상이 관측됨으로 인해 액상화 발생 가능성을 평가하는 연구의 필요성이 대두되고 있다. 액상화란 지진 등의 진동하중이 느슨한 모래 지반에 발생하게 될 경우 간극수압이 증가함에 따라 유효응력이 감소하다가 0이 되고 최종적으로 지반이 전단 강도를 상실하여 상부 구조물이나 물체를 지지하지 못하고 액체처럼 흐르게 되는 현상을 말한다. 따라서 액상화 현상에 대비하기 위해서는 액

상화가 발생하는지 여부를 예측하는 액상화 평가가 정확하게 이뤄져야 한다. 국내에서는 Seed et al.(1985)이 제안한 절차에 따라 우선 안전율을 활용하는 액상화 평가 간편법을 통해 액상화가 발생할 것인지 여부를 예측한다. 액상화 평가 간편법은 안전율을 전단저항강도비(Cyclic Resistance Ratio, CRR)와 전단응력비(Cyclic Shear stress Ratio, CSR)의 비로 정의하여 액상화 발생 가능성을 평가하는 방법이다. CRR과 CSR은 시추공 데이터와 같은 지반정보를 통해 구축된 지반정보DB를 활용함으로써 결정이 가능하다.

한편 Song et al.(2020)은 CRR값을 결정하는데 활용되는

1) Graduated Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Senior Researcher, Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

† Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

지반정보 중 표준관입시험값(SPT-N값)과 전단파 속도값( $V_s$  값)을 통해 액상화 평가를 진행하고 실제 액상화 발생 여부와 비교하는 연구를 수행한 바 있다. 해당 연구에서는 두 가지 지반정보 중 SPT-N값을 활용하는 것이 더 정확도가 높았으며  $V_s$ 값을 활용한 액상화 평가 결과의 정확도가 더 작게 결정된 원인을  $V_s$ 값이 액상화 발생에 취약한 심도에서 측정된 것이 아니라 일률적으로 12m 심도에서 측정되었기 때문이라는 결론을 내렸다. 이에 본 연구에서는 12m 심도에서 측정된  $V_s$ 값의 타당성을 확인하고자 액상화 발생에 취약한 심도를 고려하여 측정된 SPT-N값을 활용하여  $V_s$ 값으로 환산하는 총 10가지의 경험식을 선정하고 10가지의  $V_s$ 값을 결정한 후 액상화 평가를 진행하였다. 또한 평가 결과를 실제 액상화 발생 여부와 비교하여 정확도를 비교하는 연구를 수행하였다. 지반정보는 앞서 SPT-N값과  $V_s$ 값의 비교에 활용하였던 Cetin et al.(2016)이 제시한 값을 사용하였다.

## 2. 지반정보의 활용

### 2.1 연구 대상 지역

Fig. 1과 Fig. 2는 Cetin et al.(2016)이 제시한 시추공 데이터에 명시된 아시아 및 아메리카 지역의 지진 발생 위치를 표시한 그림이다. 본 연구에서는 액상화 평가 간편법을 통해 액상화 발생 가능성을 평가하기 위한 전처리 작업으로 지진 발생지역에 대한 지반정보를 가진 210개의 시추공 데이터를 다음과 같이 활용하였다. 활용한 지반정보는 시추공당 하나씩 측정된 대표 표준관입시험값(SPT-N값), 심도 12m에서 측정된 전단파 속도( $V_s$ 값), 최대지반가속도, 응력 감쇠 계수, 지진 규모, 토층 노화에 따른 보정계수, N값 보정



Fig. 1. Earthquake distribution map in Asia (Song et al., 2020)



Fig. 2. Earthquake distribution map in America (Song et al., 2020)

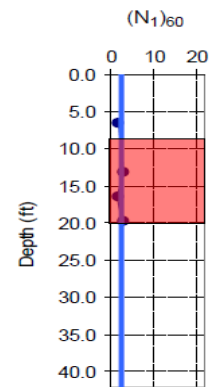


Fig. 3. Critical depth for liquefaction by borehole (Cetin et al., 2016)

에 필요한 보정계수가 있다. Cetin et al.(2016)은 총 210개의 시추공에 대해 각 시추공마다 액상화에 취약한 심도를 Fig. 3과 같이 나타내었고 해당 심도에서 측정된 N값의 평균값을 시추공 대표 N값으로 결정하였다.

### 2.2 액상화 평가

현재 국내에서는 전단저항강도비인 CRR값과 전단응력비인 CSR값의 비율을 안전율로 정의하여 액상화 발생 가능성을 평가하는 액상화 간편예측법을 주로 활용하고 있다. 안전율은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있으며 1.5 이상일 경우 액상화가 발생하지 않는다고 평가하고 1.5 미만일 경우 액상화가 발생한다고 평가하거나 액상화 상세예측법을 실시하도록 되어있다.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

안전율 결정을 위한 CRR값과 CSR값을 결정하는 절차는

다음과 같다. SPT-N값을 활용하여 CRR값을 결정할 수 있는데, 이때 측정된 SPT-N값은 측정값을 보정하는 절차를 진행한 후 계산식에 대입한다. Skempton(1986)은 CRR값을 계산하기 위해 SPT-N값을 보정하는 절차를 각각 에너지 비, 시추공 직경, 로드 길이, 샘플러, 상재압 그리고 세립분 함량에 대하여 상세히 제안하였다. Eq. (2)는 보정된 SPT-N값을 활용해 CRR값을 결정하는 식이며 지진의 규모가 7.5일 때와 대기압이 1atm일 때를 기준으로 한다.

$$CRR = e^{\frac{(N_1)_{60CS}}{14.1} + (\frac{(N_1)_{60CS}}{126})^2 - (\frac{(N_1)_{60CS}}{23.6})^3 + (\frac{(N_1)_{60CS}}{25.4})^4 - 2.8} \quad (2)$$

$V_s$ 값을 활용하여 CRR값을 구하는 경우 역시 측정된  $V_s$ 값을 보정하는 절차를 거친 후 식에 대입하여 계산하도록 되어있다. CRR값은 우선 측정된  $V_s$ 값을 상재압에 의해 보정한  $V_{s1}$ 값에 각각 지진규모계수인 MSF, 토층 노화에 따른  $V_{s1}$  보정계수인  $K_{a1}$ , 토층 노화에 따른 CRR 보정계수인  $K_{a2}$ , 세립분 함량에 따른 보정계수인  $V_{s1}^*$  값을 활용하여 결정할 수 있으며, 이 절차는 Eq. (3)으로 정리할 수 있다.

$$CRR = MSF \cdot 0.022 \left( \frac{K_{a1} V_{s1}}{100} \right)^2 + 2.8 \left( \frac{1}{V_{s1}^* - (K_{a1} V_{s1})} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) K_{a2} \quad (3)$$

안전율 계산에 필요한 CSR값의 경우 지반정보와 함께 시추공 데이터에 명시되었기 때문에 해당 값을 그대로 사용하였다. CSR값을 직접 계산할 경우 다음의 Eq. (4)를 통해서 결정할 수 있다.

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma_{vc}} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{vc}$ 는 상재압으로 액상화 평가의 대상이 되는 지점으로부터 상부에 위치한 토층이 가하는 상재압력을 말하며  $\sigma'_{vc}$ 는 동일한 토층에 대한 유효 상재압력이다.  $a_{max}$ 는 지반의 최대 가속도를 나타내며  $g$ 는 중력가속도,  $r_d$ 는 진원으로부터 거리에 따른 응력 감쇠 계수이다.

### 3. 전단파 속도값의 환산

Song et al.(2020)이 수행한 SPT-N값과  $V_s$ 값을 활용하여 액상화 발생 가능성을 평가한 방법에 대한 정확도를 비교한 연구에서는  $V_s$ 값이 각 시추공 별로 액상화에 취약한 심도를 고려하지 않고 일률적으로 12m 심도에서 측정된 것이 정확도를 저하시키는 원인이라고 판단하였다. 따라서  $V_s$ 값을 활용하는 경우에서도 액상화에 취약한 심도를 고려하기 위해 취약 심도를 고려하여 측정된 SPT-N값을 통해  $V_s$ 값을 환산하는 총 10가지의 경험식을 선정하였고 이를 활용해  $V_s$ 값을 결정하고 액상화 발생 여부를 평가하였다.

활용한 10가지의 경험식은 Table 1에 나타내었다. 각 경험식들은 선형 또는 지수함수의 관계를 나타내었으며, 각 식들의 경향성을 확인하고자 SPT-N값에 대한 환산된  $V_s$ 값을 Fig. 4에 표시하였다. 총 시추공 개수인 210개의 값이 각각 경험식 별로 환산되었고, 모든 값을 활용하여 액상화 평가를 진행한 후 실제 발생 결과와 비교하는 작업을 수행하였다.

각 경험식의 형태를 보면 Schmertman & Palacios(1979)이 제시한 식은 측정된 N값에 상수가 곱해진 형태를 띠고 있으며, 나머지 식들은 측정된 N값의 지수형태에 상수를 곱한 형태를 띤다. 지수형태의 식들 중 Jeong(2009)이 제시한 식이 곱해지는 상수가 가장 높아 가장 높은 값들로 구성이 되어 있으며 나머지 값들은 큰 차이를 보이지 않는 양상을 띤다.

Table 1. The empirical equation for determining Vs using the N value

No	Proposer	Correlations	
01	Sun et al. (2008)	$V_s = 75.76 \cdot N^{0.371}$	$V_s$ : Shear wave velocity $N$ : SPT-N value
02	Jeong (2009)	$V_s = 438.1 \cdot N^{0.11}$	
03	Korea Land and Housing Corporation (2008)	$V_s = 163.9 \cdot N^{0.21}$	
04	Park et al. (2012)	$V_s = 68.59 \cdot N^{0.349}$	
05	Imai & Yoshimura (1970)	$V_s = 92.1 \cdot N^{0.329}$	
06	Schmertman & Palacios (1979)	$V_s = 15.2 \cdot N$	
07	Okamoto et al. (1989)	$V_s = 125 \cdot N^{0.3}$	
08	Imai (1982)	$V_s = 97 \cdot N^{0.314}$	
09	Kalteziotis et al. (1992)	$V_s = 76.2 \cdot N^{0.243}$	
10	Athanasopoulos (1994)	$V_s = 107.6 \cdot N^{0.36}$	

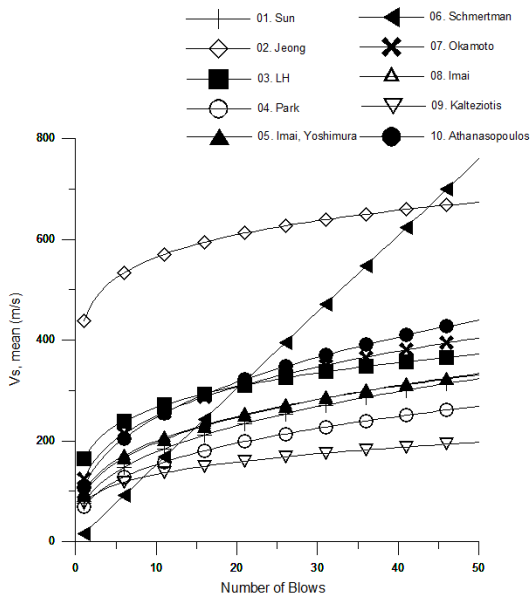


Fig. 4. The trend of  $V_s$  value by each equation

각 경험식들은 연구자가 실험을 통해 얻은 데이터를 기반으로 추론하고 제시한 것을 활용한 것으로 다음의 조건을 통해 실험이 진행되었다. Sun et al.(2008)이 제시한 식은 표면과 탐사법을 활용하여  $V_s$ 값을 측정하였으며 풍화토 지반을 대상으로 연구가 진행되었다. Jeong(2009)이 제시한 식은 SPS검층을 통해  $V_s$ 값을 측정하였으며 풍화토 지반에서 연구를 수행하였다. Korea Land and Housing Corporation (2008)에서 제안한 경험식도 마찬가지로 풍화토 지반을 대상으로 SPS 검층을 통해  $V_s$ 값을 측정하였다. Park et al. (2012)이 제안한 경험식은 SPS 검층과 크로스홀 탐사법을 활용하여  $V_s$ 값을 측정하였으며 화강풍화토 지반이 8m 이상 균질하게 분포하는 경상남도 거창군 일대의 산업단지 내 11블럭과 고속국도 제 12호선 확장공사 제 9공구 현장에서 실험을 진행하였다. Imai & Yoshimura(1970)가 제안한 경험

식은 다운홀 기법을 활용하여  $V_s$ 값을 측정하였으며 일본 내 5개 지역의 충적 및 홍적토와 암반층의 100m 심도까지를 대상으로 연구를 진행하였다. Okamoto et al.(1989)는 표면파탐사법을 통해 일본 텐류강 유역을 중심으로 29개 지역에 대해서  $V_s$ 값을 측정하여 연구를 진행하였다. Imai(1982)는 기존 Yoshimura와 공동으로 진행했던 연구에서 나아가 충적, 홍적, 제3기층을 대상으로 세립토 및 조립토를 구분하여 대상 지역을 선정하였으며 표면파탐사법을 통해  $V_s$ 값을 측정하였다. Athanasopoulos(1994)는 그리스 지역의 221개 데이터를 기반으로 하여 경험식을 추론했으며 표면파탐사 기법을 활용하여  $V_s$ 를 측정하였다. Athanasopoulos(1994)는 추론된 경험식이 모든 토질 조건에서 사용이 가능할 것이라고 제안한 바 있다.

#### 4. 액상화 발생 가능성 평가 결과

위의 과정을 통해 환산된 10개의  $V_{s,mean}$  값을 활용하여 액상화 평가를 진행하고 실제 발생 여부와 비교하여 정확도를 확인하였고 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에는  $V_{s,12m}$  값을 활용한 평가 결과와 10개의  $V_{s,mean}$  값을 활용한 평가 결과 총 11개의 결과를 나타냈으며, 전체 경우와 액상화가 발생한 경우, 발생하지 않은 경우에 대해 평가 결과가 일치하는 시추공의 개수와 정확도를 표시하였다. 평가 결과 전체 시추공에 대해 총 7개의  $V_{s,mean}$  값을 활용한 경우가  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우보다 정확도가 높은 것으로 나타났다. 이 중 Schmertman & Palacios(1979)이 제시한 식과 Athanasopoulos(1994)가 제시한 식이 67.6%로 가장 높은 정확도를 나타냈다. 이는 액상화를 평가에 활용하기 위해 지반정보를 측정할 때 액상화에 취약한 심도를 고려해서 측정

Table 2. Accuracy of liquefaction assessment in each case

No	$V_s$	Total boreholes	Accordance (liquefied)	Accordance (non-liquefied)	Accuracy (%)		
					Total	Liquefied	Non-liquefied
-	$V_{s,12m}$	162	77	15	56.8	85.6	20.8
01	Sun et al. (2008)	210	88	26	54.3	76.5	27.4
02	Jeong (2009)	210	98	25	58.6	85.2	26.3
03	Korea Land and Housing Corporation (2008)	210	97	43	66.7	84.3	45.3
04	Park et al. (2012)	210	97	38	64.3	84.3	40.0
05	Imai & Yoshimura (1970)	210	93	26	56.7	80.9	27.4
06	Schmertman & Palacios (1979)	210	111	31	67.6	96.5	32.6
07	Okamoto et al. (1989)	210	100	38	65.7	87.0	40.0
08	Imai (1982)	210	87	24	52.9	75.7	25.3
09	Kalteziotis et al. (1992)	210	111	29	66.7	96.5	30.5
10	Athanasopoulos (1994)	210	99	43	67.6	86.1	45.3



하는 것이 아닌 다른 지반정보를 통해 환산하는 과정에서 발생하는 오차를 감안하더라도 더 정확한 평가가 가능하기 때문인 것으로 판단하였다. 전체 시추공에 대한 정확도를 Fig. 5에 그래프로 표시하였다.

다음으로 실제로 액상화가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역으로 나누어 평가 정확도를 확인하였다. 우선 액상화가 발생한 지역에서는 총 4개의 값을 활용한 경우가  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우보다 높은 정확도를 나타내었다. 전체 시추공에 대해서는 7개의 경험식이  $V_{s,12m}$  값보다 정확한 결과를 나타냈지만, 액상화가 발생한 지역의 시추공에 대해서는 4개의 경험식에 불과한 것으로 보아  $V_{s,12m}$  값을 활용하는 경우 액상화가 발생하기 쉽다고 평가하는 조건인 안전 측 설계를 고려하는 경우와 동일한 결과를 나타내는 것으로 판단하였다.  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우보다 정확도가 높은 4가

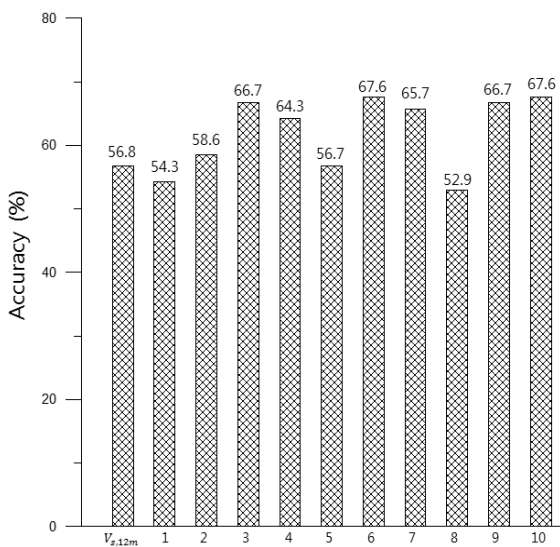


Fig. 5. Accuracy of liquefaction assessment in total boreholes

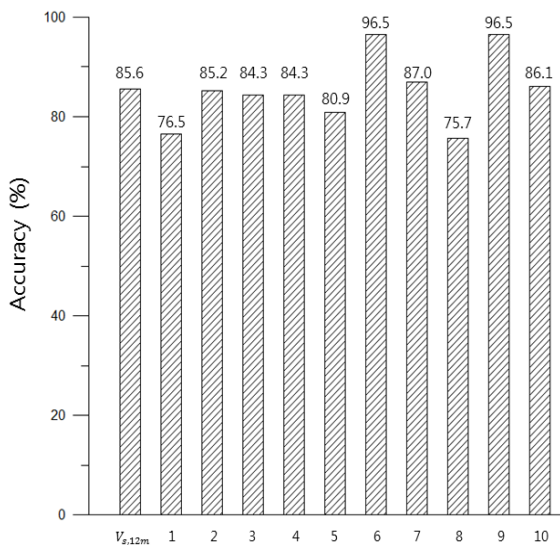


Fig. 6. Accuracy of liquefaction assessment in case of liquefaction

지 경우 모두 전체 시추공에 대해서도  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우보다 높은 것을 확인하였다. 액상화가 발생한 지역에 대한 정확도를 Fig. 6에 그래프로 표시하였다.

다음으로 액상화가 발생하지 않은 지역에 대해서 정확도 비교를 수행하였다. 해당 지역에서는 모든 경험식에 대해  $V_{s,12m}$  값보다 높은 정확도를 보였다. 이는  $V_{s,12m}$  값을 활용하여 액상화 발생 가능성을 평가하면 전체적으로 액상화가 발생한다고 평가하는 안전측 설계와 동일한 조건으로 고려되며 따라서 액상화가 발생하지 않은 지역에서는 정확도가 가장 낮은 비경제적 설계의 결과를 나타낸다고 판단하였다. 액상화가 발생하지 않은 지역에서의 평가 정확도를 Fig. 7에 나타냈다.

전체 시추공에 대해 가장 높은 정확도를 보인 Schmertman & Palacios(1979)이 제시한 식을 활용한 경우는 액상화가 발생한 지역에서도 가장 높은 정확도를 나타내었고 Athanasopoulos (1994)가 제시한 식을 활용한 경우는 액상화가 발생하지 않은 지역에서 가장 높은 정확도를 나타내었다. 이는 환산 경험식에 따라 안전 측 설계의 상황을 묘사하는 경향을 띠는 경우와 경제성을 고려한 설계를 묘사하는 경향을 띠는 경우를 유도할 수 있음을 나타낸다고 판단하였다.

앞서 Song et al.(2020)은 N값의 보정 유무와  $V_{s,12m}$  값에 따른 액상화 평가 결과를 비교한 바 있다. 이를 전체 경우에 대해 가장 정확도가 높았던 Schmertman & Palacios(1979)의 식을 활용한 경우의 정확도 결과와 Athanasopoulos(1994)의 식을 활용한 경우의 정확도 결과를 추가하여 전체 시추공과 각 아시아 및 아메리카 지역으로 구분한 것을 Fig. 8에 나타내었다. 보정된 N값인  $(N_1)_{60,CS}$  값을 이용한 경우 아시아 및 아메리카 그리고 전체 경우에 대해서 모두 정확도가

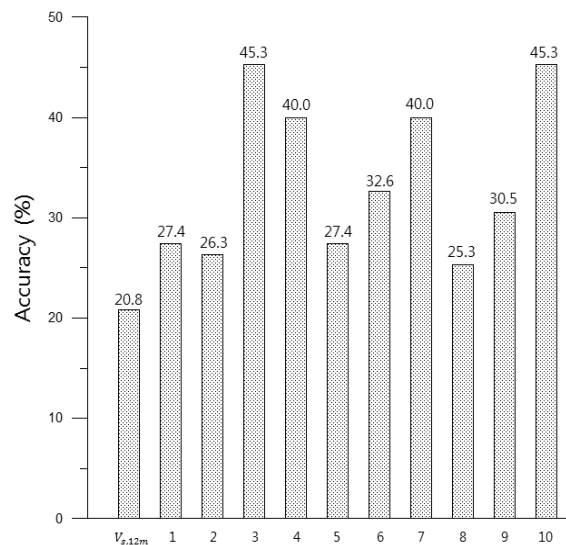


Fig. 7. Accuracy of liquefaction assessment in case of non-liquefaction

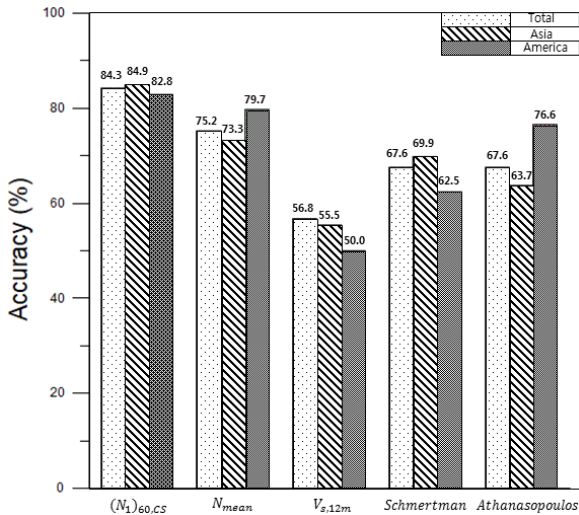


Fig. 8. Accuracy of liquefaction assessment in total case

84.3%, 84.9%, 82.8%로 가장 높았으며, 보정하지 않은 N값인  $N_{mean}$  값을 활용한 경우가 75.2%, 73.3%, 79.7%로 두 번째로 높은 정확도를 나타내었다. 따라서 실제로 측정된 N값을 활용하였을 때 가장 정확하게 액상화 발생 가능성을 평가할 수 있음을 확인하였다.  $V_s$ 값을 활용한 경우를 대해서는  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우가 56.8%, 55.5%, 50.0%로 아시아 및 아메리카 그리고 전체 경우에 대해서 가장 정확도가 낮은 결과를 보였다. 이를 통해 액상화에 취약한 심도를 고려한 값이 액상화 발생 가능성을 평가함에 있어 큰 영향을 미칠 수 있으므로 측정 심도를 고려하는 것이 매우 중요할 것이라고 판단하였다.

경험식에 의해 결정된  $V_s$ 값을 보면 정확도가 가장 높은 경우 중 하나인 Schmertman & Palacios(1979)의 식을 활용한 경우 SPT-N값이 8 이하일 때 가장 낮은  $V_s$ 값 분포를 보였으며 전체 77개 시추공 중 액상화가 발생한 지역 56개 시추공에 대한 정확도가 100%로 가장 정확하다는 결과가 나타났다. SPT-N값이 8에서 20사이의 구간에서는 2번째로 낮은 분포를 보이다가 증가하였으며 해당 구간에서는 액상화가 발생한 시추공에 대해 93.2%로 두 번째로 정확하다는 결과가 나타났다. 해당 구간에서 가장 정확한 경우는 Kalteziotis et al.(1992)이 제시한 경험식을 활용한 경우로 99개 시추공에 중 액상화가 발생한 59개 시추공에 대해 100% 정확한 것으로 나타났다. 해당 경우는 액상화가 전체 시추공에서의 정확도가 두 번째로 높은 경우에 해당한다. Athanasopoulos (1994)의 경험식을 활용한 경우도 해당 구간에서 3번째로 높은 결과를 나타냈다. 다음으로 SPT-N값이 20에서 50사이인 구간은 34개의 모든 시추공에 대해 실제로 액상화가 발생하지 않은 지역으로 나타났다. 해당 구간에서는 선형으로 증가하는 Schmertman & Palacios(1979)의 경험식을 활

용한 경우가 가장 높은 값들을 나타내었고, Athanasopoulos (1994)의 경험식을 활용한 경우가 두 번째로 높은 것으로 나타났으며 두 가지 경우가 차례로 가장 정확한 것으로 나타났다. 또한 그래프 상에서 가장 가운데 위치한 Sun et al. (2008), Imai & Yoshimura(1970), Imai(1982)가 제시한 경험식을 활용한 세 가지 경험식을 활용한 경우가 가장 정확도가 낮은 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구는 지반정보를 측정할 때 액상화 현상에 취약한 심도를 고려하는 것이 지반정보를 활용한 액상화 평가에 영향을 미치는 정도를 확인해보고자 취약 심도를 고려한 SPT-N값으로 환산한 10개의  $V_s$ 값을 통해 액상화 평가를 진행하고 정확도를 확인하였다.

- (1) 총 10개의 환산된  $V_s$ 값을 활용하여 액상화 평가를 진행한 결과 7개의 평가 결과에서  $V_{s,12m}$  값을 활용한 액상화 평가보다 정확하게 나타났다. 이는 액상화에 취약한 심도를 고려하여 액상화 발생 가능성을 평가하는 것이 직접 측정한 것이 아닌 환산을 통해 얻은 지반정보를 활용하더라도 더 정확한 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다고 판단하였다.
- (2) 액상화 현상이 발생한 지역에 대한 액상화 평가 결과의 정확도를 비교하였을 때 12m 지점에서의  $V_s$ 값을 활용한 결과보다 취약심도를 고려하여 환산 값을 활용하였을 때 더 정확한 액상화 평가여부를 판단한 경우가 4개 있었고, 액상화가 발생하지 않은 지역에 대해서는 취약 심도를 고려한 환산값을 적용한 10개 경우 모두  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우보다 정확한 결과를 나타냈다. 따라서  $V_{s,12m}$  값을 활용한 경우는 전체적으로 액상화가 더 많이 일어난다고 평가하는 안전측 설계의 조건과 유사한 상황을 나타낸다고 판단하였다.
- (3) 기존의 N값을 활용한 액상화 발생 가능성 평가 결과와 정확도를 비교해 보았을 때 보정한 N값을 활용한 경우가 가장 높은 정확도를 나타내었으며 보정하지 않은 N값을 활용한 경우가 두 번째로 높은 정확도를 나타내었다. 따라서 전체적으로  $V_s$ 값을 활용한 경우보다 N값을 활용한 경우 더 정확한 액상화 평가가 가능하다고 판단하였다.  $V_s$ 값을 활용하는 경우에 대해서는 측정값을 환산하는 과정에서 발생하는 오차가 정확도 저하의 주된 요인일지 혹은 액상화 평가를 위해 결정되는 CRR값을

계산하는 방법 자체가 요인일지 좀 더 연구가 필요할 것으로 판단된다.

- (4) SPT-N값을 기준으로 구간을 나눠 환산된  $V_s$ 값을 분석한 결과 SPT-N값이 20 이하인 구간에서는 액상화가 발생된 시추공이 지배적이어서  $V_s$ 값이 작게 환산될수록 정확한 값을 나타내는 경향을 보였고, 20 이상인 구간에서는 모든 시추공에 대해 액상화가 발생하지 않았기 때문에 크게 환산될수록 정확한 경향을 보였으나 300m/s 이하의 구간에서는 작게 측정될수록 정확한 경향을 보였다.

전단저항강도비를 결정하기 위해 활용되는 지반정보를 측정할 때 액상화 발생에 취약한 심도를 고려하는 것이 액상화 평가 결과에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 액상화 발생 가능성 평가에 빈번하게 활용되는 지반정보인 콘관입시험값을 통해 액상화 평가를 진행한 후 정확도를 비교하는 연구를 진행 할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야 대학 중점연구소 지원 사업의 연구비 지원(NRF-2018R1A6A1A 07025819) "ICT 융복합 기준건축물 내진리모델링 기술 개발"에 의해 수행되었습니다.

## References

- Athanasopoulos, G. A. (1994), An empirical correlation  $V_s$ -NSPT and evaluation of its reliability, In Proc, 2nd International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design, pp. 219-226.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E., Bilge, H. T., Ilgac, M. and Chowdhury, K. (2016), Summary of SPT based field case history data of CETIN (2016) database (No. METU/GTENG 08/16-01), Middle East Technical University.
- Imai, T. (1982), Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus, In Proceedings of the 2nd European Symposium of Penetration Testing, Amsterdam, 1982.
- Imai, T. and Yoshimura, Y. (1970), Elastic wave velocity and soil properties in soft soil, Tsuchito-Kiso, Vol. 18, No. 1, pp. 17-22.
- Jeong, N. H. (2009), Behavior of Shear Wave Velocity Based on Suspension PS Logging Tests, Doctoral Dissertation of Dankook University, pp. 20, pp. 29-95 (In Korean).
- Kalteziotis, N., Sabatakakis, N. and Vassiliou, J. (1992), Evaluation of dynamic characteristics of Greek soil formations, In Second Hellenic Conference on Geotechnical Engineering 2, pp. 239-246 (In Greek).
- Korea Land and Housing Corporation (2008), Geotechnical Information Manual Vol. 3 Gangwon, Daejeon·Chungnam, Chungbuk, Korea Land and Housing Corporation, pp. 919-1120 (In Korean).
- Okamoto., Kokusho, T., Yoshida, Y. and Kusunoki, K. (1989), Comparison of Surface vs. Subsurface Wave Source for P-S logging in Sand Layer, Proc. 44<sup>th</sup> Annual Conf. JSCE, Vol. 3, pp. 996-997.
- Park, Y. H., Kim, K. S., Lee, S. R. and Do, J. N. (2012), Analysis on Relation of S-wave Velocity and N-value for Stratum in IGM Ground, 2012 Korean Geo-Environmental Society Conference, pp. 245-249.
- Schmertmann, J. H. and Palacios, A. (1979), Energy dynamics of SPT, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 105, No. 8, pp. 909-926.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Chung, R. M. (1985), Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445.
- Skempton, A. W. (1986), Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation, Geotechnique, Vol. 36, No. 3, pp. 425-447.
- Song, S. W., Kim, H. S. and Cho, W. J. (2020), Liquefaction Assessment Variations with Regard to the Cyclic Resistance, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 21, No. 1, pp. 13-19 (In Korean).
- 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, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 12, No. 4, pp. 1-10 (In Korean).