

얕은 심도 V_S 주상도를 활용한 V_{S30} 예측 방법론 비교 및 최적 계수 제시

Comparison of Methods Predicting V_{S30} from Shallow V_S Profiles and Suggestion of Optimized Coefficients

최 인 혁¹ Choi, Inhyeok

곽 동 엽² Kwak, Dongyoup

Abstract

Ground motion models predicting intensity measures on surface use a time-averaged shear wave velocity, V_{S30} , as a key variable simulating site effect. The V_{S30} can be directly estimated from V_S profiles if the profile depth (z) is greater than or equal to 30 m. However, some sites have V_S profiles with $z < 30$ m. In this case V_{S30} can be predicted using extension models. This study proposes new coefficient sets for existing prediction equations using 297 Korea V_S profiles. We have collected V_S profiles from KMA and Geoinfo database. Fitting six existing methods to data, we suggest new coefficients for each method and evaluate their performance. It turns out that if $z \geq 15$ m, the standard deviation (σ) of residual in \log_{10} is 0.061, which indicates that the estimated V_{S30} is nearly accurate. If $z < 15$ m, the σ keeps increasing up to 0.1 for $z = 5$ m, so we caution the use of models at very low z . Nonetheless, we recommend investigating up to 30 m depth for V_{S30} calculation if possible.

요 지

지표면에서의 지반운동을 예측하는 지반운동예측모델은 30m까지의 평균전단파속도인 V_{S30} 을 부지효과를 나타내는 주요한 변수로 사용한다. V_{S30} 은 만약 V_S 주상도 깊이(z)가 30m 이상이면 주상도로부터 바로 계산할 수 있다. 하지만, 모든 부지에서 z 가 30m 까지 있는 것은 아니다. 따라서, $z < 30$ m일 경우 30m까지 연장하는 모델로부터 V_{S30} 을 예측할 필요가 있다. 이번 연구에서는 국내 지반 환경에 맞게 z 가 30m 미만인 부지에서 V_{S30} 을 추정하는 예측 모델에 대한 새로운 계수를 제안하였다. 분석 자료로 기상청과 국토지반정보 통합DB센터에서 획득한 297개의 V_S 주상도를 활용하였고, 선행연구에서 제안한 식의 계수들을 회귀분석을 통해 새롭게 제시하였다. 분석 결과, $z \geq 15$ m 일 경우 대수로그 잔차의 표준편차가 약 0.061이내이므로 신뢰성 높은 V_{S30} 을 예측하는 것으로 확인하였다. $z < 15$ m 일 경우 σ 가 계속 증가하며, $z = 5$ m일 경우 $\sigma = 0.1$ 으로 나타났다. 따라서, 매우 얕은 심도의 V_S 주상도를 모델에 적용하는 경우 주의를 요하며, 가능하다면 30m 깊이까지 지반조사를 실시하여 V_{S30} 을 계산하는 것을 추천한다.

Keywords : Extrapolation, Optimized coefficients, V_{S30} , V_{SZ}

1 비회원, 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Env. System Eng., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Env. Eng., Hanyang Univ., Tel: +82-31-400-5141, dkwak@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

암반은 심층에서 천층으로 갈수록 낮은 압력, 절리 등에 의해 낮은 전단파속도(V_S)를 갖는다. 또한, 표층에 가까워질수록 지층의 구성이 암반이 아닌 토사로 이루어진다. 토사층의 V_S 는 인접한 암반층의 V_S 보다 현저히 낮아, 암반층과 토사층의 경계면에서 큰 임피던스 대조 (Impedance Contrast, IC)를 이루게 된다. 단층의 파열에 의해 심층 진원지에서 발생한 진동은, 거리 증가에 따른 감쇠를 무시한다면, 지표면으로 올라올수록 낮아지는 V_S 에 의해 그 진폭이 커지게 된다. 더군다나, 지표면에 가까운 표층의 V_S 는 심부층보다 더욱 낮고, 큰 IC에 의해 진동의 공명이 생길 수 있어, 지반진동은 지표면 근처 토사층에서 큰 증폭이 수반된다. 1985년 멕시코시티 지진 시 진앙지에서 300km 이상 떨어진 멕시코시티에서 무른 지반의 지반증폭에 의해 수많은 인명피해를 일으켰던 사례가 표층지반증폭의 대표적인 예이다(Campillo et al., 1985). 따라서 표층의 지반증폭 정량화는 지표면에서의 증폭된 지진파 크기를 가늠하기 위한 필수요소이다.

지표면에서의 지반운동을 예측하는 많은 지반운동예측모델들(Ground Motion Models, GMMs)은 지반증폭의 영향을 고려하기 위해 Site term을 모델 안에 포함하고 있다(Boore et al., 2014; Campbell and Bozorgnia, 2014; Abrahamson et al., 2014; Chiou and Youngs, 2014). 이러한 Site term을 표현하기 위한 핵심 변수로 V_{S30} 이 많이 사용된다. V_{S30} 은 깊이 30m까지의 평균전단파속도로, 30m를 0-30m 깊이까지의 V_S 전파시간으로 나눈 속도로 정의된다. V_{S30} 은 국외 여러 나라의 내진설계기준에서 지반분류를 구분하는 상수로도 사용되며(ASCE, 2016), 국내에서도 2016년 이전의 내진설계기준에서 지반분류를 나타낼 때 사용되어 왔다(EESK, 1997). 따라서, 한 부지의 지반증폭정도를 나타내기 위해 V_{S30} 을 파악하는 것은 필수적이다.

V_{S30} 은 지구물리탐사 결과가 30m 깊이까지 진행된다면, V_S 주상도로부터 직접 30m 깊이까지의 V_S 전파시간을 계산할 수 있으므로 바로 계산할 수 있다. 하지만, V_S 주상도 깊이(z)가 30m 보다 낮은 경우, 전파시간은 z 까지만 계산 가능하므로, V_{S30} 은 주어진 정보로부터 예측해야 한다. $z < 30m$ 일 때 V_{S30} 을 예측하는 방법은 다양한 모델이 제시되어 있으며(Boore, 2004; Boore et al., 2011; Midorikawa and Nogi, 2015; Dai et al., 2013; Wang and Wang, 2015; Sun et al., 2007), 각 지역의 지질학적

특수함으로 인해 같은 모델이라도 각 지역마다 다른 계수가 제시되어 있다(Kwak et al., 2017). 국내에서는 $z < 30m$ 일 경우 V_{S30} 을 예측하는 방법으로 Boore(2004)와 같이 z 까지의 평균전단파속도인 V_{S2} 와 V_{S30} 의 관계식을 활용하는 방법과, 주어진 V_S 의 깊이별 형상으로부터 z 하부 V_S 를 예측하여 V_{S30} 을 계산하는 방법이 있다(Sun et al., 2007). $z \geq 20m$ 일 경우 어떠한 방법론을 사용해도 예측된 V_{S30} 값의 차이는 크지 않으나, $z < 20m$ 일 경우 방법론에 따라 예측의 정확성에 차이가 생긴다(Kwak et al., 2017). 따라서, 이번 연구에서는 국내 지반환경에 맞는 V_{S30} 예측 모델의 개발을 위해 국내 V_S 주상도를 사용하여 기존 모델들의 성능을 평가해보고, 최적화된 계수를 제안하여 얇은 V_S 주상도만이 존재하는 부지에서 더욱 정확한 V_{S30} 예측에 기여하고자 한다.

2. 전단파속도 주상도 수집

이번 연구에 사용된 자료는 기상청 지진관측소에서 조사한 V_S 주상도(Lee et al., 2015)와, 국토지반정보 통합DB센터의 V_S 주상도(Geoinfo, 2019)이다. 기상청 지진관측소(KS)는 현재 운영 중인 관측소와 폐쇄된 관측소를 합쳐 총 417개의 관측소가 있으며, 그 중 54개의 관측소에서 30m까지의 V_S 주상도 자료를 수집하였다. 국토지반정보 통합DB센터(Geoinfo)는 전국의 지반조사정

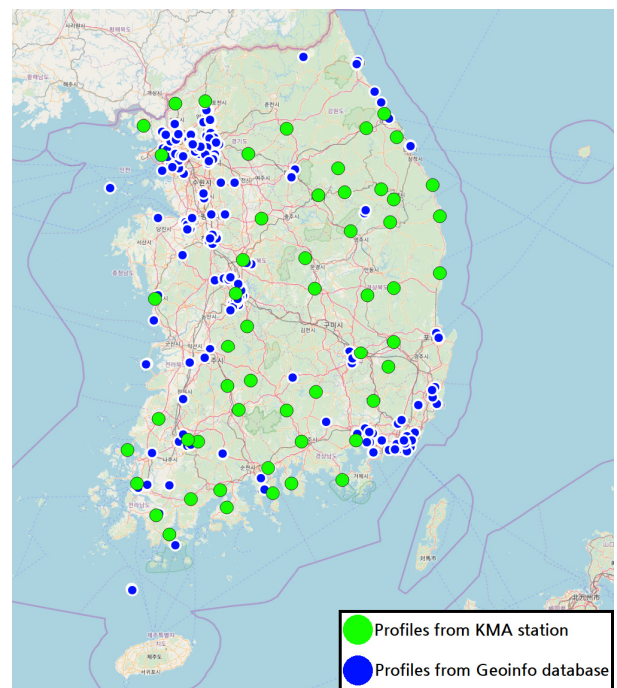


Fig. 1. Location of V_S profiles collected

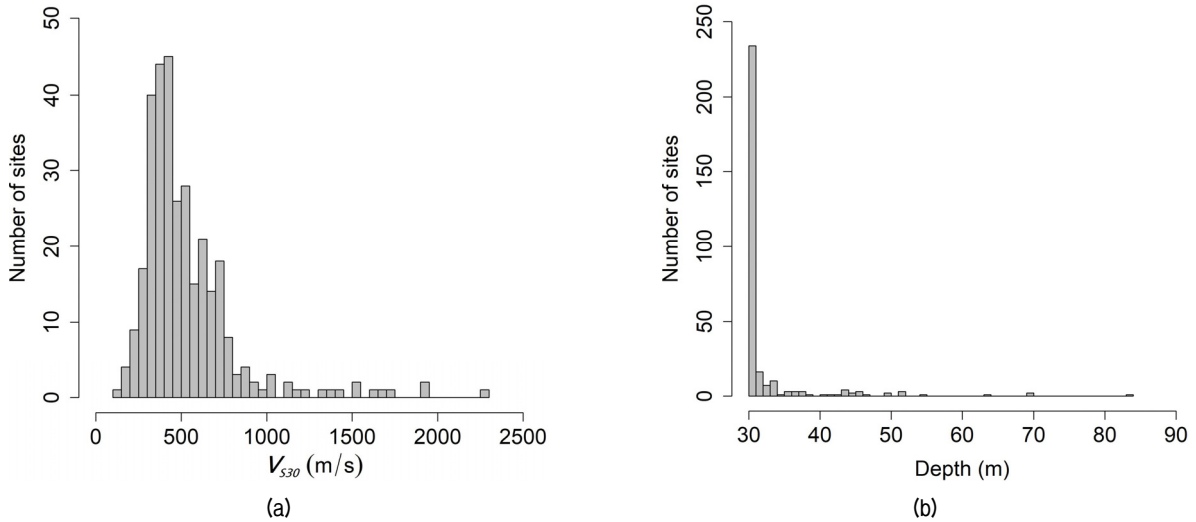


Fig. 2. (a) V_{S30} histogram and (b) z histogram of collected V_S profiles

보를 포함하는 데이터베이스로, 2020년 1월 현재 276,696 개 시추공자료가 존재하며, 실시간으로 업데이트 되고 있다. 이 중 물리탐사자료가 존재하고 $z \geq 30\text{m}$ 인 181개 사업의 256개의 지반정보를 선택하여 V_S 주상도를 수집하였다. 수집한 V_S 주상도 중 다음의 기준을 적용하여 분석대상 V_S 주상도를 선택하였다.

- 시추공이 육상에 위치하고,
- 지질시대를 정의할 수 있어야 하며,
- 층 구성이 두 개 이상이어야 한다.

결과적으로, KS주상도 53개, Geoinfo주상도 244개를 분석대상에 포함시켰다.

Fig. 1은 수집된 전체 V_S 주상도의 위치를 보여준다. 국토지반정보 통합DB센터로부터의 부지는 업로드 되는 자료의 특성(주거 사업 또는 인프라 사업의 지반조사 자료)에 따라, 주로 도시 및 도로 인근에 많이 분포되어 있고, 기상청 부지는 전국에 골고루 분포되어 있다. Fig. 2는 수집한 V_S 주상도 중 $z \geq 30\text{m}$ 인 자료로부터 계산한 V_{S30} 의 히스토그램을, Fig. 2b는 전체 주상도의 z 에 대한 히스토그램을 보여준다. V_{S30} 의 분포가 로그표준정규분포를 이루는 것을 알 수 있다. z 는 30m 깊이가 가장 많이 존재하는데, 이는 대부분의 지반조사에서 V_{S30} 을 계산하기 위해 30m 까지만 물리탐사를 실시했기 때문으로 판단된다.

3. V_{S30} 예측 방법론

$z < 30\text{m}$ 인 얇은 심도의 V_S 주상도로부터 V_{S30} 을 예측

하는 기존의 6가지의 방법을 비교하였다. 6가지 방법은 크게 z 까지의 평균전단파속도(V_{SZ})를 사용하는 방법(Boore, 2004; Boore et al., 2011; Wang and Wang, 2015)과, V_{SZ} 와 깊이 z 에서의 V_S 를 사용하는 방법(Midorikawa and Nogi, 2015; Dai et al., 2013; Sun et al., 2007)으로 나눌 수 있다. 다음으로 각 방법론의 V_{S30} 예측식과 특징에 대해 기술하였다.

3.1 V_{SZ} 를 활용한 V_{S30} 예측 방법

3.1.1 Boore(2004) - B04

Boore(2004)은 캘리포니아 지역의 $z \geq 30\text{m}$ 인 135개의 V_S 주상도를 이용하여 V_{SZ} 로부터 V_{S30} 을 예측하는 간단한 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$\log_{10}(\widehat{V}_{S30}) = a_0(z) + a_1(z) \times \log_{10}(V_{SZ}) \quad (1)$$

여기서 \widehat{V}_{S30} 은 예측되는 V_{S30} 을 말하며, a_0 와 a_1 은 깊이 z 에 따른 회귀계수를 의미한다. 이 식은 로그 V_{SZ} 와 로그 V_{S30} 의 관계를 선형으로 표현한 것이다. z 가 깊어질수록 로그 V_{SZ} 와 로그 V_{S30} 의 상관계수가 증가하여 모델의 정확성이 높아진다.

국내에서도 식 (1)과 유사한 관계식을 활용하여 V_{S30} 을 예측하는 모델이 존재한다(Sun et al., 2007). Sun et al.(2007)은 식 (1)에서 a_1 은 1로 설정하고, a_0 를 깊이의 함수로 나타내었다.

3.1.2 Boore et al.(2011) - BEA11

V_S 주상도 자료를 일본, 캘리포니아, 터키, 유럽으로 확장하여, Boore et al.(2011)은 다음과 같은 V_{S30} 예측 모델을 제시하였다.

$$\log_{10}(\widehat{V}_{S30}) = b_0(z) + b_1(z) \times \log_{10}(V_{SZ}) + b_2(z) \times [\log_{10}(V_{SZ})]^2 \quad (2)$$

여기서 b_0, b_1, b_2 는 깊이 z 에 따른 회귀계수이다. 식 (2) 또한 V_{SZ} 만을 사용하여 V_{S30} 을 예측하는 것으로, 식 (1)과의 차이점은 1차 선형 다항식이 아닌 2차 선형 다항식을 함수로 사용하는 것이다. Fig. 3은 10m 및 20m 깊이까지의 평균주상도(V_{S10}, V_{S20})와 V_{S30} 사이의 관계를 보여준다. V_{S10} 및 V_{S20} 이 증가할수록 V_{S30} 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 식 (1)과 식 (2)의 회귀계수를 한국 자료를 이용하여 새롭게 결정한 B04와 B11의 추세선 또한 Fig. 3에 나타나 있다.

3.1.3 Wang and Wang(2015) - WW15

Wang and Wang(2015)는 회귀계수의 사용 없이, 두 깊이에서의 V_{SZ} 를 사용하여 V_{S30} 을 예측하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\log_{10}(\widehat{V}_{S30}) = \log_{10}(V_{SZ2}) + \frac{\log_{10}(30) - \log_{10}(z_2)}{\log_{10}(z_2) - \log_{10}(z_1)} \times [\log_{10}(V_{SZ2}) - \log_{10}(V_{SZ1})] \quad (3)$$

여기서 V_{SZ1} 및 V_{SZ2} 는 각각 깊이 z_1 및 z_2 까지의 평균

전단파속도를 의미하며, z_2 는 z_1 보다 더 깊은 깊이이다. Wang and Wang(2015)은 일본과 캘리포니아 자료를 사용하여 제안한 식을 검증하였다. z_2 가 주상도의 최하단 깊이에 위치할수록, 그리고 z_1 또한 깊은 위치에 있을수록 정확도가 더욱 향상된다. 하지만, z_2 가 20m보다 낮을 경우 편향된 결과를 나타낸다(Kwak et al., 2017).

3.2 V_{SZ} 및 z 에서의 V_S 를 활용한 V_{S30} 예측 방법

3.2.1 Midorikawa and Nogi(2015) - MN15

Midorikawa and Nogi(2015)는 일본 자료를 사용하여 V_{SZ} 에 추가적으로, 깊이 z 에서의 $V_S(V_{S,z})$ 를 함수에 포함시키는 V_{S30} 예측식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\log_{10}(\widehat{V}_{S30}) = c_0(z) + c_1(z) \times \log_{10}(V_{SZ}) + c_2(z) \times \log_{10}(V_{S,z}) \quad (4)$$

여기서 c_0, c_1, c_2 는 깊이 z 에 따른 회귀계수이다. Midorikawa and Nogi(2015)는 $V_{S,z}$ 에 따라 V_{SZ} 와 V_{S30} 의 관계가 변하는 것에 착안하여 식 (4)와 같이 제안하였다. Fig. 4는 수집된 한국 V_S 주상도 자료로부터 $V_{S,z}$ 에 따라 V_{S10} 및 V_{S20} 과 V_{S30} 의 관계를 표시한 것이다. 식 (4)의 회귀계수를 한국 자료를 사용하여 산출한 MN15와, Fig. 3의 B04, B11 또한 Fig. 4에 도시하였다. MN15 도시를 위해 $V_{S,z}$ 는 각 구간의 중간값을 사용하였다. V_{SZ} 만을 이용하여 V_{S30} 을 추정한다면(B04, B11) V_{SZ} 가 증가함에 따라 평균적으로 깊이 z 에서 30m까지의 V_S 또한 증가하는 것으로 예측한다. 하지만, $V_{S,z}$ 가 어느 값으로 고

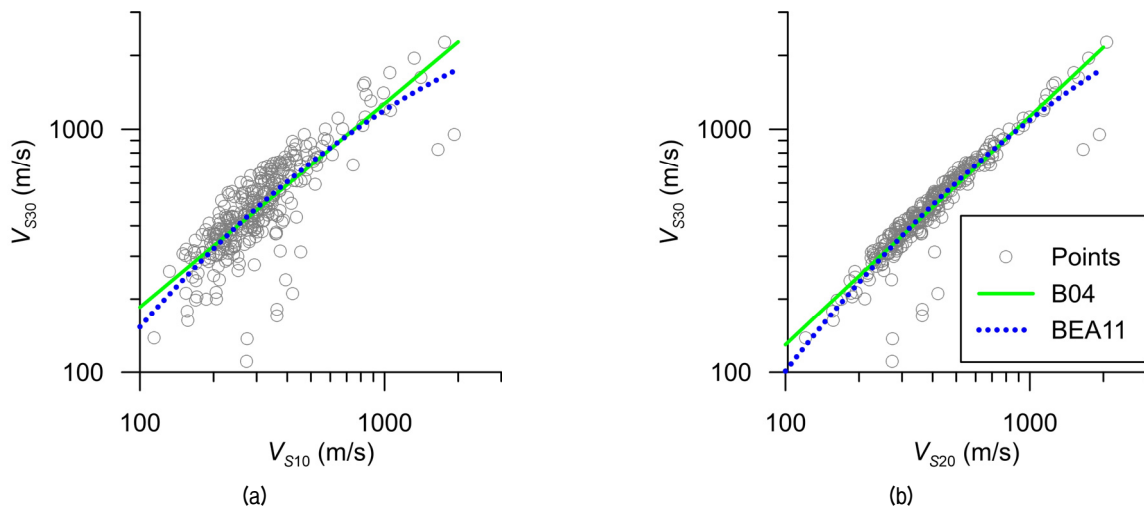


Fig. 3. (a) V_{S10} vs. V_{S30} and (b) V_{S20} vs. V_{S30} using Korea V_S profiles

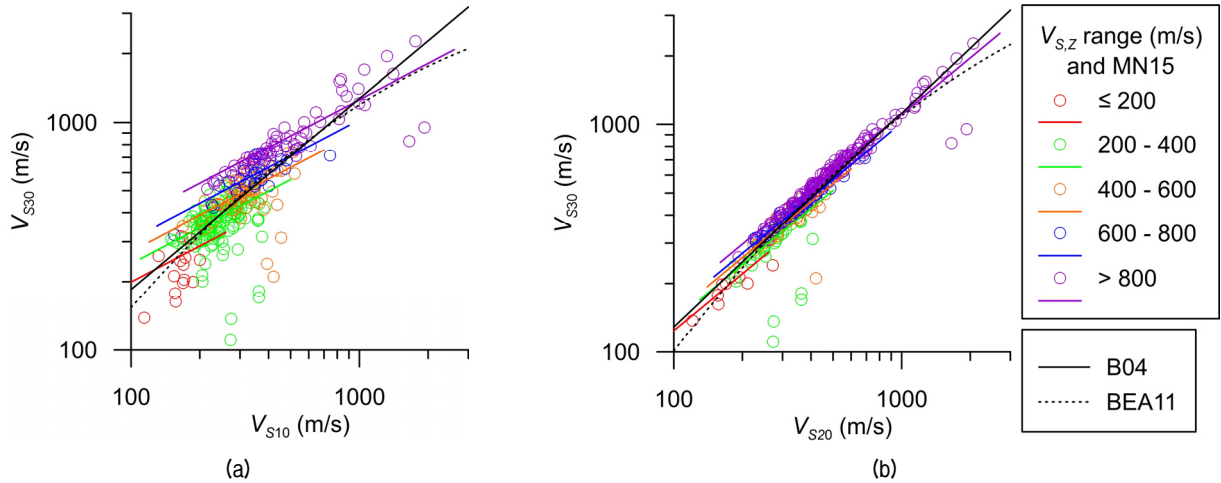


Fig. 4. (a) V_{S10} vs. V_{S30} and (b) V_{S20} vs. V_{S30} dependent on $V_{S,z}$ using Korea V_S profiles

정되어 있을 경우, $V_{S,z}$ 가 증가하더라도, 깊이 z 에서부터의 V_S 는 $V_{S,z}$ 수치에 큰 영향을 받기 때문에, $V_{S,z}$ 에 따른 V_{S30} 의 증가량이 앞 추정방법에 의해 상대적으로 크지 않다(MN15). 이는 Midorikawa and Nogi(2015)에 나타나 있는 $V_{S,z}$ 와 V_{S30} 의 관계에도 나타나 있다.

3.2.2 Dai et al.(2013) - DEA13

Dai et al.(2013)은 V_{S30} 이 지표면에서 30m까지의 V_S 전파시간에 의거하여 계산된다는 점에 착안하여 다음과 같은 V_{S30} 예측식을 제안하였다.

$$\log_{10}(\widehat{V}_{S30}) = d_0(z) + d_1(z) \times \log_{10}(V_{S,z}) \quad (5)$$

$$\widehat{V}_{S30} = \frac{30}{tt_{0z} + \frac{30-z}{\widehat{V}_{S30}}} \quad (6)$$

여기서 d_0 및 d_1 은 깊이 z 에 따른 회귀계수이며, V_{S30} 은 z 에서 30m까지의 평균전파속도, tt_{0z} 는 지표면에서 z 까지의 전파시간이다. 위 식은 요약하자면 V_S 주상도가 존재하지 않는 구간인 z 에서 30m까지의 전파시간(tt_{z30})은 $V_{S,z}$ 의 함수로 예측하고, V_S 주상도가 존재하는 구간의 전파시간은 주상도로부터 직접 계산하여 V_{S30} 을 구하는 것이다. 이 방법은 국외의 V_S 주상도를 활용하여 평가한 결과, 식 (5)에서 1차 다항식을 활용한 선형회귀계수만을 사용했음에도 불구하고 모든 깊이에서 전술한 방법 중 가장 작은 오차율을 나타내었다(Kwak et al., 2017).

3.2.3 Sun et al.(2007) - SEA07

Sun et al.(2007)은 국내 72개소의 부지들에서 수집한 V_S 주상도를 기반으로 z 하부 V_S 의 형상을 다음과 같이 제안하였다.

$$V_S(z_d) = e_0 \times (z_d^2 - z^2) + e_1 \times (z_d - z) + V_{S,z} \quad (7)$$

여기서 e_0 및 e_1 은 형상계수로 Sun et al.(2007)에서는 $e_0 = -0.403$, $e_1 = 30.875$ 로 제안되었다. z_d 는 z 보다 깊은 깊이변수로, V_{S30} 을 구하기 위해서 보통 z 에서 30m까지 변화한다. 식 (7)을 사용한다면 z 까지의 V_S 주상도에 추가적으로 30m까지 연장한 z 하부의 주상도로부터 V_{S30} 을 직접 계산할 수 있다.

4. V_{S30} 예측 모델 최적화 및 성능 평가

3장에서 제시한 각 모델들은 Wang and Wang(2015)의 방법을 제외하고 계수를 필요로 한다. 이번 장에서는 2장에서 수집한 국내 V_S 주상도를 사용하여 각 모델에 대한 계수를 재산정하고, 모델의 예측 정확성에 대해 비교해 보고자 한다.

4.1 각 모델의 계수

국내에서 수집한 $z \geq 30m$ 의 총 297개(KS 주상도 53개, Geoinfo 주상도 244개)의 V_S 주상도를 활용하여 B04, B11, MN15, DEA13에 대한 회귀계수를 산정하였다. 식 (1), (2), (4), (5)에 대한 회귀계수인 $[a_0, a_1]$, $[b_0, b_1, b_2]$,

$[c_0, c_1, c_2]$, $[d_0, d_1]$ 은 z 의 함수로, z 를 5m에서 29m까지 1m 간격으로 변화시키면서 최소자승법을 이용하여 계산하였다. Table 1은 $z = 5 - 29$ m에 대해 계산한 각 모델의 회귀계수들을 보여준다.

SEA07의 식 (7)의 계수는 깊이에 독립적인 상수로 전체 V_s 주상도의 각 깊이별 평균을 따라가는 형상곡선의 계수이다. 형상곡선은 부지가 어느 지질에 속하는지

에 따라 변화할 수 있다. 즉, 상대적으로 토층의 깊이가 깊은 충적층 지역(Young)은 깊이 30m까지는 V_s 의 크기가 크게 증가하지 않을 것이며, 더 오래된 지반(Old)은 깊이가 깊어질수록 V_s 의 크기가 더욱 증가할 것으로 예측해 볼 수 있다. 이러한 경향을 고려하기 위해 총 297개의 주상도에서 161개의 Young 부지(신생대 제4기 충적층 지역), 136개의 Old부지(신생대 제4기보다 오래된

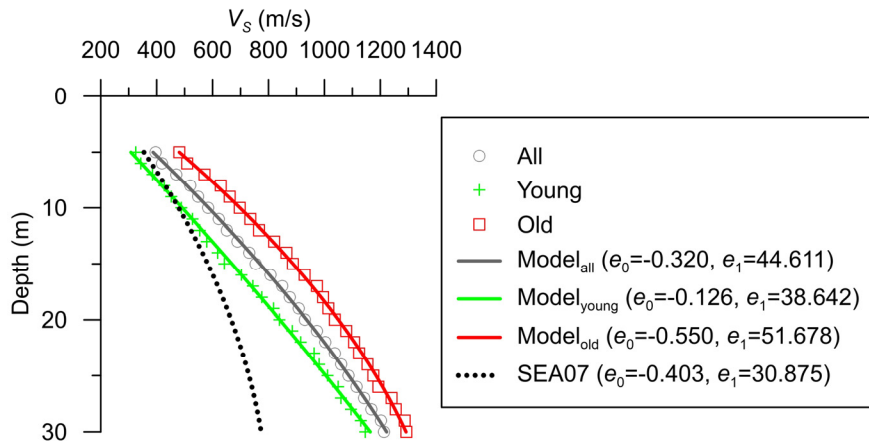


Fig. 5. Shape curve for different geologic age. Shape curve from Sun et al. (2007) is also shown for comparison

Table 1. Regression coefficients for V_{s30} prediction models using Korea V_s profile data sets

z (m)	Boore, 2004		Boore et al., 2011			Dai et al., 2013		Midorikawa and Nogi, 2015		
	a_0	a_1	b_0	b_1	b_3	c_0	c_1	d_0	d_1	d_2
5	0.8196	0.7766	1.6712	0.097	0.1347	1.2477	0.6141	0.9224	0.2852	0.4303
6	0.741	0.804	1.4859	0.2127	0.1166	1.2488	0.6148	0.8649	0.321	0.4129
7	0.6715	0.8272	1.184	0.4228	0.0793	1.1641	0.6433	0.7573	0.3867	0.3834
8	0.6043	0.8493	0.8819	0.6315	0.0425	1.093	0.6662	0.6477	0.4601	0.3483
9	0.5497	0.8663	0.6608	0.7796	0.0168	1.0488	0.6816	0.5886	0.4901	0.3366
10	0.5047	0.8795	0.5092	0.876	0.0007	1.0582	0.6764	0.5493	0.526	0.3119
11	0.4636	0.8911	0.3796	0.956	-0.0125	1.0464	0.6785	0.4977	0.5644	0.2896
12	0.4246	0.9019	0.2628	1.0265	-0.0238	0.9812	0.7012	0.4401	0.581	0.2901
13	0.3879	0.9119	0.1088	1.1258	-0.0407	0.9427	0.7128	0.3935	0.6112	0.2738
14	0.3534	0.9211	-0.0654	1.2407	-0.0606	0.9016	0.7247	0.3319	0.6601	0.246
15	0.3241	0.9283	-0.2159	1.3388	-0.0776	0.9109	0.7214	0.3119	0.6819	0.2291
16	0.2992	0.9339	-0.3259	1.4073	-0.0891	0.9071	0.7194	0.2748	0.7241	0.1989
17	0.2747	0.9393	-0.4115	1.4571	-0.0971	0.864	0.7315	0.2321	0.7564	0.1801
18	0.2512	0.9444	-0.4601	1.4794	-0.1	0.7874	0.7566	0.1976	0.7757	0.1706
19	0.2269	0.95	-0.5001	1.4949	-0.1016	0.6817	0.7906	0.1522	0.8025	0.1582
20	0.2039	0.955	-0.5111	1.4894	-0.0993	0.625	0.8092	0.129	0.82	0.1469
21	0.1816	0.96	-0.4968	1.4655	-0.0937	0.5396	0.835	0.0983	0.8474	0.1291
22	0.1604	0.9645	-0.4671	1.4308	-0.0862	0.5617	0.8266	0.0897	0.8676	0.1106
23	0.1385	0.9694	-0.4283	1.3895	-0.0774	0.4795	0.8521	0.0655	0.8897	0.0958
24	0.1184	0.9737	-0.3703	1.335	-0.0664	0.4464	0.8625	0.056	0.9029	0.0841
25	0.0993	0.9777	-0.2891	1.2642	-0.0526	0.4968	0.8447	0.0476	0.9207	0.0681
26	0.0785	0.9824	-0.2396	1.2165	-0.0428	0.3122	0.9039	0.0245	0.94	0.0557
27	0.0594	0.9866	-0.1865	1.167	-0.0329	0.4508	0.8577	0.0226	0.9572	0.0383
28	0.0395	0.991	-0.1253	1.1117	-0.022	0.241	0.9256	0.0103	0.9703	0.0281
29	0.0194	0.9956	-0.0625	1.0554	-0.0109	0.0591	0.9817	0.0022	0.9854	0.0147

지역)에서의 V_S 주상도의 깊이별 평균으로 형상곡선을 산출하였다(Fig. 5). Old부지에서 깊이에 따른 V_S 의 절대크기는 Young부지보다 약 200m/s 정도 더 크나, 30m 까지의 V_S 증가율은 유사한 것을 알 수 있다. 따라서, 30m 깊이까지의 V_S 평균증가율은 지질에 의한 영향은 그리 크지 않을 것으로 판단된다.

지질 그룹별 형상곡선계수, 총 297개에 대한 형상곡선 계수, 그리고 Sun et al.(2007)에서 제시한 형상곡선 계수를 Fig. 5에 도시하였다. Sun et al.(2007)의 형상곡선은 Young지반의 형상곡선과 표층근처의 V_S 는 비슷하나, 깊이에 따른 V_S 증가량이 더 작은 것으로 나타난다.

4.2 V_{S30} 예측 정확성 비교

각 모델의 예측 정확성은 잔차의 표준편차(σ)의 크기로부터 비교할 수 있으며, 잔차의 평균(μ)이 0으로 수렴하는지 여부에 따라 모델의 편향성을 파악할 수 있다. 이번 연구에서는 예측값과 실측값의 로그에 대한 차이를 잔차로 정의하였으며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$res = \log_{10}(V_{S30}) - \log_{10}(\widehat{V}_{S30}) \quad (9)$$

각 모델에 대해서 식 (9)를 이용하여 계산한 잔차의 μ 와 σ 가 Fig. 6에 나타나 있다. 여기서 WW15 모델의 z_2 는 V_S 주상도 깊이, z_1 은 $z_2 - 1m$ 로 설정하였고, SEA07의 형상곡선계수는 지질 그룹에 따라 변화를 주었다. Fig. 6a에 나와있는 μ 를 분석해보면, B04, BEA11, MN15의 μ 는 모든 깊이에서 0으로 수렴한다. 이 모델들의 계수들

은 $\log_{10}(V_{S30})$ 를 대응값으로 선형회귀분석하여 계산된 것으로, μ 가 0으로 수렴하도록 계수들이 산출된다. WW15는 회귀분석없이 z_2 및 z_1 깊이에서의 V_{SZ} 를 활용하여 V_{S30} 을 예측한 것으로, μ 가 0으로 수렴되지는 않으며 z_2 가 얇아질수록 불편향된 μ 가 증가한다. DEA15는 회귀분석을 사용하여 계수를 산출하나, 회귀분석의 결과로 V_{SZ30} 의 잔차를 최대한 줄이는 회귀계수를 생성하므로, V_{S30} 의 잔차에 대한 μ 는 모든 깊이에서 0으로 수렴하지 않는다. SEA07은 V_S 주상도의 평균으로부터 V_S 주상도를 30m까지 완성시킨 다음 V_{S30} 을 계산하는 것으로, V_{S30} 에 대한 직접적인 회귀분석은 사용하지 않는다. Fig. 6에서 보듯이 DEA15 및 SEA07 모두 주상도의 심도가 25m 이상이면 μ 가 0에 근접하나, 주상도의 심도가 얇아질수록 크기가 증가하는 불편향된 μ 를 나타내는 것을 알 수 있다. SEA07은 15m까지는 DEA15의 μ 와 비슷한 수치를 보이나, 그보다 얇은 심도에서는 불편향된 μ 의 크기가 급격히 증가한다. DEA15와 SEA07의 15m일 때의 μ 는 약 -0.004이다. 이 값은 V_{S30} 이 300m/s일 때 약 3m/s의 오차, 760m/s일 때 약 7m/s 정도의 오차이다. 따라서, 15m 심도보다 깊은 z 는 편향된 μ 가 V_{S30} 예측값에 그리 큰 영향을 끼치지 않는다.

Fig. 6b는 각 모델에 대한 잔차의 σ 를 보여준다. B04 및 BEA11는 상대적으로 높은 σ 를, MN15, DEA13, SEA07은 가장 낮으면서 서로 유사한 σ 를, WW15는 z 가 얇을 경우 가장 높은 σ 를 나타내지만, 깊어질수록 MN15, DEA13, SEA07과 비슷한 σ 를 나타낸다. MN15, DEA13, SEA07 모델의 경우, $z = [5, 10, 15, 20]$ m일 때 $\sigma = [0.10, 0.061, 0.035, 0.017]$ 을 나타낸다. 이는 잔차분포에서 표

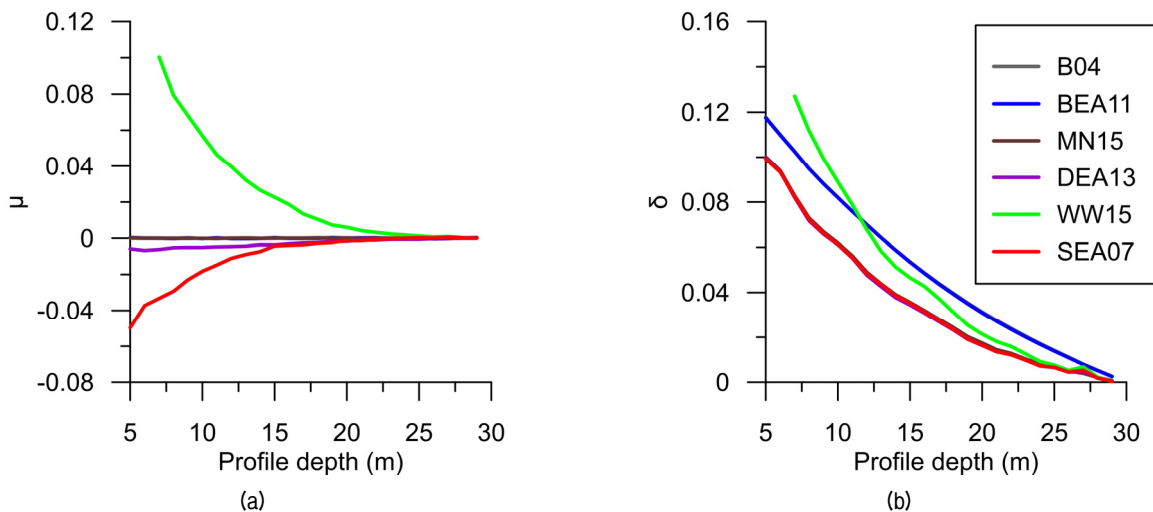


Fig. 6. (a) Mean and (b) standard deviation of residuals for each model

준편차에 해당하는 오차율이 약 25%, 15%, 8%, 4% 정도인 것을 뜻한다.

5. 결론

이번 연구에서는 V_S 주상도 깊이가 30m 미만일 시 V_{S30} 을 예측하는 기존의 방법들에 대해 비교분석하여 각 방법에서 제시한 모델의 계수를 국내 V_S 주상도 자료를 활용하여 국내 지반에 적합하도록 새롭게 제시하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단순히 V_{SZ} 만을 활용한 1차 및 2차 선형 모델(B04, BEA11)은 이번 연구에서 비교한 방법 중 가장 큰 오차를 나타낸다.
- (2) V_{SZ} 에 추가적으로 V_{SZ} 를 변수로 사용한 모델(MN15, DEA13)이 비교적 오차가 낮다.
- (3) 회귀계수 없이 두 깊이(z_2 및 $z_2, z_2 > z_1$)에서의 V_{SZ} 만을 변수로 활용하는 모델(WW15)은 V_S 주상도 깊이가 20m 이상일 경우, 안정적인 잔차평균과 낮은 잔차표준편차를 나타낸다. 또한 z_2 와 z_1 의 차이가 작을수록 더욱 향상된 결과를 보여준다.
- (4) V_S 주상도의 평균증가량을 미조사된 깊이에서의 V_S 주상도로 가정하여 V_{S30} 을 예측하는 모델(SEA07)은 V_{SZ} 와 V_{SZ} 를 변수로 사용하는 모델과 비슷한 잔차표준편차를 나타낸다.
- (5) V_{S30} 을 대응값으로 선형회귀분석하는 모델들은 잔차의 평균이 0으로 수렴되나, 그렇지 않은 모델은 잔차의 평균이 편향되어 있다.
- (6) 고려된 방법 중 잔차표준편차가 낮은 MN15, DEA13, SEA07 방법이 추천된다. 하지만 $z < 15m$ 일 경우, SEA07의 잔차평균이 크게 부편향되므로 사용에 주의가 필요하다. $z > 15m$ 일 때 세 방법에 대한 평균잔차표준편차의 오차율은 8% 이내로, 신뢰성 있는 V_{S30} 의 예측이 가능하다.
- (7) 매우 얇은 깊이($z < 5m$)에서는 잔차표준편차의 오차율이 25% 이상으로 증가하므로, 모델의 적용에 주의를 요한다.

위 연구 결과로 미루어, 이번 연구에서 국내 지반 환경에 맞게 제시한 새로운 계수들은 30m 깊이까지 조사되기 힘든 얇은 심도 V_S 주상도로부터 V_{S30} 을 예측할 때 효과적으로 사용될 것으로 판단된다. 하지만, 이 결과는

30m까지 직접 계측한 V_{S30} 을 대체하지는 않으며, 가능하다면 V_{S30} 계산을 위해 30m 깊이 이상으로 지반조사를 수행하는 것을 추천한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2019R1F1A1062791). 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Abrahamson, N. A., Silva, W. J., and Kamai, R. (2014), "Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions", *Earthq. Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1025-1055.
2. American Society of Civil Engineers (ASCE) (2016), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16)*, American Society of Civil Engineers, 800p.
3. Boore, D. M. (2004), "Estimating $\bar{V}_S(30)$ (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depths < 30 m)", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.94, No.2, pp.591-597.
4. Boore, D. M., Thompson, E. M., and Cadet, H. (2011), "Regional Correlations of V_{S30} and Velocities Averaged Over Depths Less than and Greater than 30 Meters", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.101, No.6, pp.3046-3059.
5. Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., and Atkinson, G. M. (2014), "NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes", *Earthq. Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1057-1085.
6. Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y. (2014), "NGA-West2 Ground Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra", *Earthq. Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1087-1115.
7. Campillo, M., Gariel, J. C., Aki, K., and Sanchez-Sesma, F. J. (1989), "Destructive Strong Ground Motion in Mexico City: Source, Path, and Site Effects during Great 1985 Michocán Earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.79, No.6, pp.1718-1735.
8. Chiou, B. S. J. and Youngs, R. R. (2014), "Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra", *Earthq. Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1117-1153.
9. Dai, Z., X. Li, and C. Hou (2013), "A Shear-wave Velocity Model for V_{S30} Estimation based on a Conditional Independence Property", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.103, No.6, pp.3354-3361.
10. Earthquake Engineering Society of Korea (EESK) (1997), *Standard of Seismic Design*, Earthquake Engineering Society of Korea (in Korean).
11. Integrated DB Center of National Geotechnical Information (Geoinfo) (2020), *Geotechnical Information Portal System*, available at: <https://geoinfo.or.kr/>. (last accessed: January 2, 2020) (in Korean)
12. Kwak, D. Y., Ancheta, T. D., Mitra, D., Ahdi, S. K., Zimmaro, P., Parker, G. A. Brandenberg, S. J., and Stewart, J. P. (2017), "Performance Evaluation of V_{SZ} -to- V_{S30} Correlation Methods Using

- Global V_S Profile Database”, 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Vancouver, July 16-19, 2017, Paper No. 399.
13. Lee, J. K. et al. (2015), *A basic study on building ShakeMap database of scenario earthquakes in the Korean Peninsula*, Report for Korea Meteorological Administration, CATER 2012-5050 (in Korean).
14. Midorikawa, S. and Y. Nogi (2015), “Estimation of V_{S30} from Shallow Velocity Profile”, *J. Japan Assoc. Earthq. Eng.*, Vol.15, No.2, pp.91-96 (in Japanese).
15. Sun, C. G., Chung, C. K., and Kim, D. S. (2007), “Determination of Mean Shear Wave Velocity to the Depth of 30 m based on Shallow Shear Wave Velocity Profile”, *Earthq. Eng. Soc. Korea*, Vol.11, No.1, pp.45-57. (in Korean)
16. Wang, H. Y. and Wang, S. Y. (2015), “A New Method for Estimating $V_S(30)$ from a Shallow Shear-wave Velocity Profile (Depth < 30 m)”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.105, No.3, pp.1359-1370.

Received : January 23rd, 2020

Revised : March 10th, 2020

Accepted : March 10th, 2020