HWAW방법을 이용한 지반의 전단파 속도 3-D 영상화

3-Dimensional Imaging of Shear Wave Velocity in the Soil Site using HWAW Method

박형춘[1], Hyung-Choon Park, 황혜진[2], Hea-Jin Hwang, 조성은[3], Sung-Eun Cho

[1] 충남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, ChungNam Univ.
[2] 충남대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, ChungNam Univ.
[3] 한국수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Ph. D., Korea Institute of Water and Environment, Korea Resources Corporation

SYNOPSIS : The evaluation of shear modulus (or shear wave velocity) profile of the site is very important in various fields of geotechnical engineering. In the field, there exist spatial variations of shear modulus that case uncertainty in the geotechnical analysis or design. So it is necessary to evaluate the spatial variation of shear wave velocities of the soil site. In this study, the HWAW method is applied to the determination of a 3-D Vs map of soil site. The HWAW method, which is based on harmonic wavelet transforms, has been developed to determine phase and group velocities of waves. The HWAW method uses only the signal portion of the maximum local signal/noise ratio to evaluate the phase velocity in order to minimize the effect of the noise. The field testing of this method is relatively simple and fast because only one experimental setup, which consists of one pair of receivers on the surface, is needed using a short receiver spacing setup (1~3m). These characteristics make it possible to determine detailed local Vs profile in the site with lateral Vs variation and to evaluate 3-D Vs map by performing a series of tests on the grid. To estimate the applicability of the proposed method, field tests were performed. Through field applications validity and applicability of the proposed method were verified.

Keywords : HWAW, shear wave velocity, 3D Vs image

1. 서 론

지반공학의 여러분야에서 전단탄성계수(또는 전단파 속도) 주상도의 결정은 매우 중요하다. 일반적인 지반에서 전단파 속도의 분포는 깊이 및 횡방향으로 균일하지 않다. 이러한 지반의 불균일성은 일반적인 지반 조사에 의해 얻어지는 평균적인 전단파 속도 주상도 결과에 불확실성을 발생시키며, 이러한 불확실성은 해석결과에도 영향을 미치게 된다(Cho;Park, 2010). 따라서 지반 조사 결과의 공간적 불확실성을 감소시키기 위해서는 높은 해상도를 가지는 지반의 전단파 속도 3차원(3-D) 영상화가 필요하다.

본 논문에서는 HWAW방법을 이용한 지반 전단파 속도 3차원 영상화 방법을 제안하였다. HWAW방법은 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 시간-주파수 해석을 사용하여 파의 위상·그룹속도를 결정하는 방법으로, HWAW방법을 이용한 지반조사는 현장시험, 분산곡선의 결정, 단일 whole wave field 역산을 통한 전단파 속도 주상도의 결정으로 구성된다. HWAW방법을 위한 현장시험은 1~3m의 간격을 가지는 2개의 감지기와 하나의 가진원으로 구성되며 분산곡선 결정시 전체 시간신호에서 에너지가 집중된, 국부적으로 신호/잡음비가 가장 높은 영역만을 선택적으로 사용하기 때문에 잡음의 영향을 효과적으로 제거

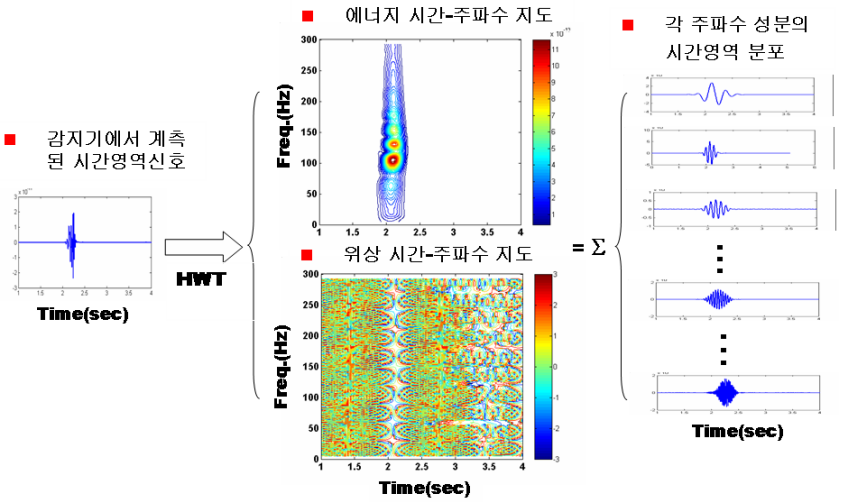
할 수 있다(Park;Kim, 2001). 따라서 한 위치에서 적은 에너지를 가지는 슬러지 햄머와 같은 간단한 가진원을 사용한 한번의 실험(한번의 타격)으로 대상지반의 표층에서 깊은 깊이까지의 국부적인 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있다. HWAW방법은 신속하게 국부적으로 상세한 전단파 속도 주상도의 결정이 가능하기 때문에 임의의 형태를 가지는 그리드 상에서 연속적인 실험을 통해 횡방향으로 높은 해상도를 가지는 3-D 전단파 속도 영상의 결정이 가능하다. 일단 대상 지반의 3-D 전단파 속도 영상 블록이 결정되면, 임의의 위치에서의 전단파 속도 또는 임의 위치, 임의 방향의 단면에서의 전단파 속도 분포를 image processing을 통해 쉽게 결정할 수 있으며, 이를 통해 대상지반에 대해 MRI와 유사한 전단파 속도 영상정보를 결정할 수 있다.

HWAW방법의 지반 전단파 속도 3-D 영상화 적용 타당성을 알아보기 위하여 현장에서 실험을 수행하였다. 이러한 현장실험을 통하여 지반 전단파 속도 3-D 영상화에 있어 HWAW방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

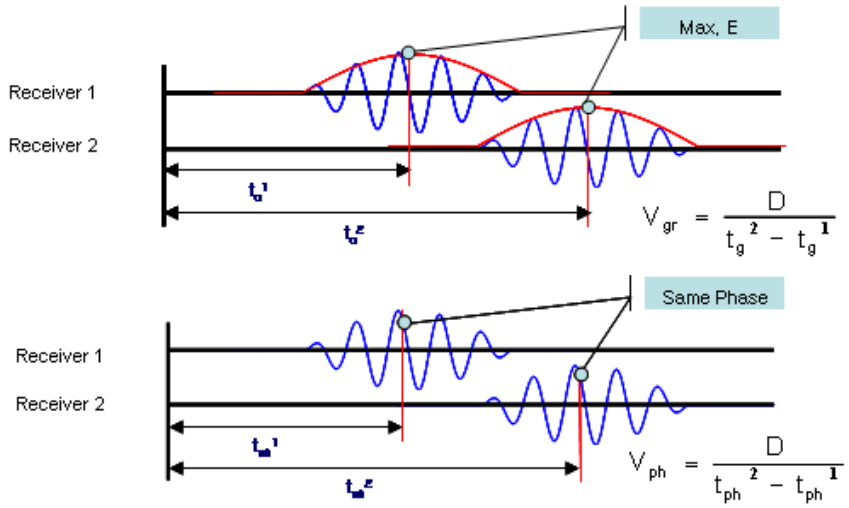
2. HWAW방법을 사용한 지반의 3차원 영상화

2.1 HWAW방법의 기본 원리

HWAW방법은 매질을 따라 전파하는 일반적인 파의 위상·그룹속도 결정을 위해 개발된 방법이다. 이러한 HWAW방법을 사용한 지반조사는 현장실험, 분산곡선의 결정 및 역산을 통한 감지기 사이 지반의 전단파 속도 주상도 결정으로 구성된다. HWAW방법은 각 감지기에서 얻어진 신호를 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 각 주파수 성분으로 분해한 후, 에너지 시간-주파수 지도에서 에너지가 집중된 영역, 즉 국부 신호/잡음비가 최대가 되는 최대에너지선(피크선) 주변의 국부적인 에너지·위상정보만을 사용하여 분산곡선을 결정한다(그림 1). HWAW방법은 에너지가 집중된 국부적인 영역의 정보만을 이용하기 때문에 기존의 표면파 기법들(Gabiels et al., 1987, Joh, 1996, McMechan et al., 1981, Nazarian et al., 1984, Park et al., 1999)에 비하여 현장에 존재하는 배경잡음의 영향을 매우 효과적으로 제거할 수 있다. 이러한 특징은 sludge햄머와 같은 작은 에너지 소스를 사용한 깊은 깊이 탐사를 가능하게 하며, 기존 표면파시험과 달리 2개의 감지기를 사용한 고정된 단일한 실험구성에서 단일한 실험을 통해 대상 지반의 전체 깊이를 포함하는 분산곡선의 결정을 가능하게 한다. 최종적으로 유전자 알고리즘을 사용한 자동화된 whole wave field single array 역산과정을 통해 대상 시스템의 전단파 속도 주상도 결정이 이루어진다.



(a) 하모닉 웨이브릿 변환을 통한 시간영역신호의 분해



(b) 시간영역에서 분해된 각 주파수 성분의 위상·그룹속도의 결정

그림 1. HWAW방법의 기본 원리

2.2 Grid 시험을 통한 3차원 전단파 속도 지도의 결정

HWAW방법을 위한 실험구성(감지기 위치)에는 제한이 없으나, 일반적으로 사용되는 기본적인 실험구성은 그림 2와 같은 짧은 감지기 간격 실험 구성이다. 이 실험구성에서는 가진원-감지기 1 사이 간격 6-12m, 감지기 간격 1-3m 사용한다. 이러한 짧은 감지기 간격의 사용은 대상 지반의 국부적인 전단파 속도 주상도의 결정을 가능하게 하며, 그림 3과 같이 선을 따라 연속적인 실험을 수행하여 대상지반의 2차원 전단파 속도 지도의 생성이나, 그림 4에서 주어진 grid 상의 연속적인 실험을 통해 3차원 전단파 속도 지도의 결정이 가능하다. 3차원 전단파 속도 지도는 3차원 전단파 속도 블록안의 모든 속도 정보를 포함하게 된다. 따라서 일단 3차원 전단파 속도 지도가 결정되면 대상 부지의 임의의 깊이 및 위치, 방향으로의 2차원 전단파 속도 지도 또는 임의 위치에서의 전단파 속도를 쉽게 결정할 수 있다. 본 연구에서 지반 전단파 속도 3차원 영상화를 위해 제안된 grid 시험은 결정하고자 하는 대상 부지에서 4개의 기준점을 결정하고(그림 4의 ref. 1, 2, 3, 4), 4개의 기준점을 코너로 하는 사각형 부지내의 임의의 위치들에서 짧은 감지기 간격 실험들을 수행한다. 최종적으로 수행된 실험 결과들에 대해 영상화 신호처리를 거쳐 전단파 속도 3차원 블록을 결정한다. 높은 횡방향 해상도를 가지며 신속한 실험이 가능한 HWAW방법은 다수의 실험을 필요로 하는 이러한 3차원 영상화에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

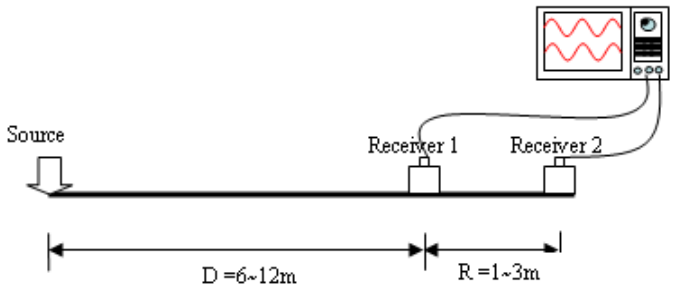


그림 2. Local 시험구성(짧은 감지기 간격 시험)

그림 3. Line 시험구성

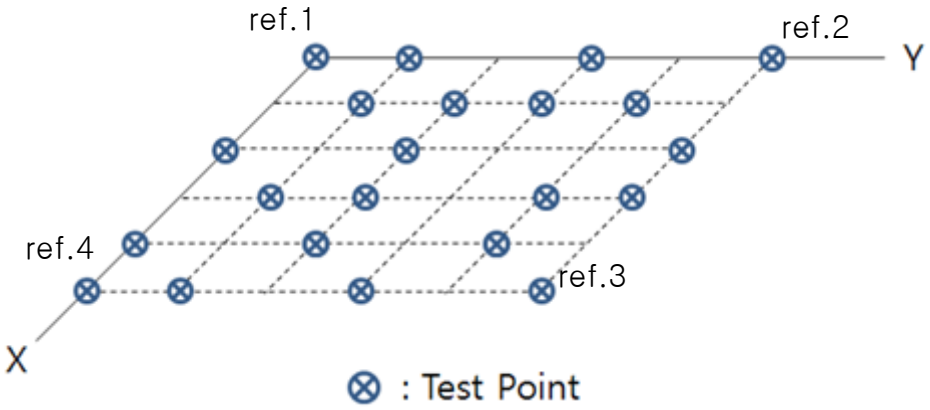


그림 4. Grid 시험구성

3. 현장 적용

제안된 방법의 적용성을 검토하기 위해 HWAW방법을 지반 전단파 속도 3차원 영상화에 적용하였다. 먼저 개별적인 HWAW방법을 사용한 지반조사의 타당성 검토를 위해 한 위치에서 짧은 감지기 간격 시험(local test)시험 및 HWAW방법을 사용한 분산곡선의 결정 그리고 유전자 알고리즘을 사용한 자동화 역산을 수행하여 얻은 결과를 국부적인 지반 평가에 사용되는 PS-suspention logging test 결과와 비교하였다. 그림 5는 그 결과로서 두 실험결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 이로부터 HWAW방법은 국부적인 지반 특성을 매우 효과적으로 평가함을 알 수 있다.

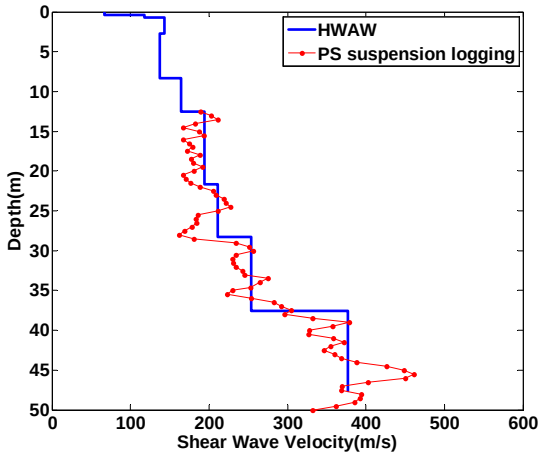


그림 5. HWAW방법 및 PS-suspention logging test 결과 비교

그림 6은 20m×20m 사각형으로 구성된 부지에 6×6 그리드를 설치하여 연속적으로 36개의 실험을 수행하여 얻은 3차원 전단파 속도 블록이다. 개별 HWAW시험을 위하여 가진원-감지기 1 간격 6m, 감지기 간격 2m를 사용하는 짧은 감지기 간격 시험구성을 사용하였다. 그림 7은 얻어진 3차원 전단파 속도 블록에서 결정한 임의 위치에서의 수직면 및 임의 깊이에서의 수평면에서 결정된 2차원 전단파 속도 지도이다.

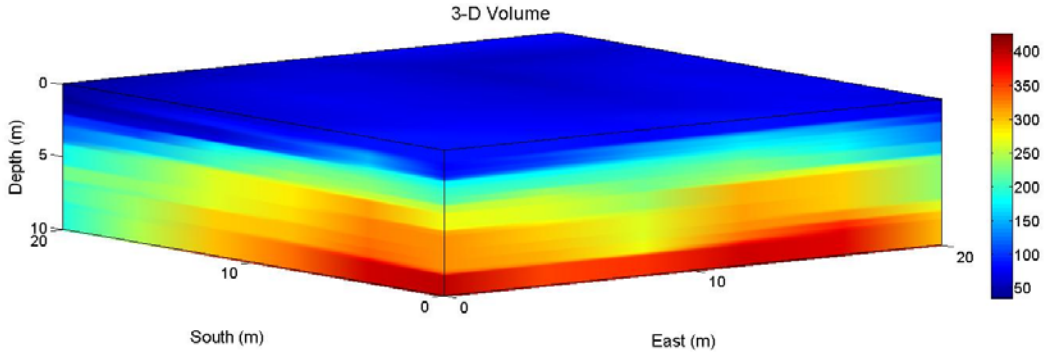
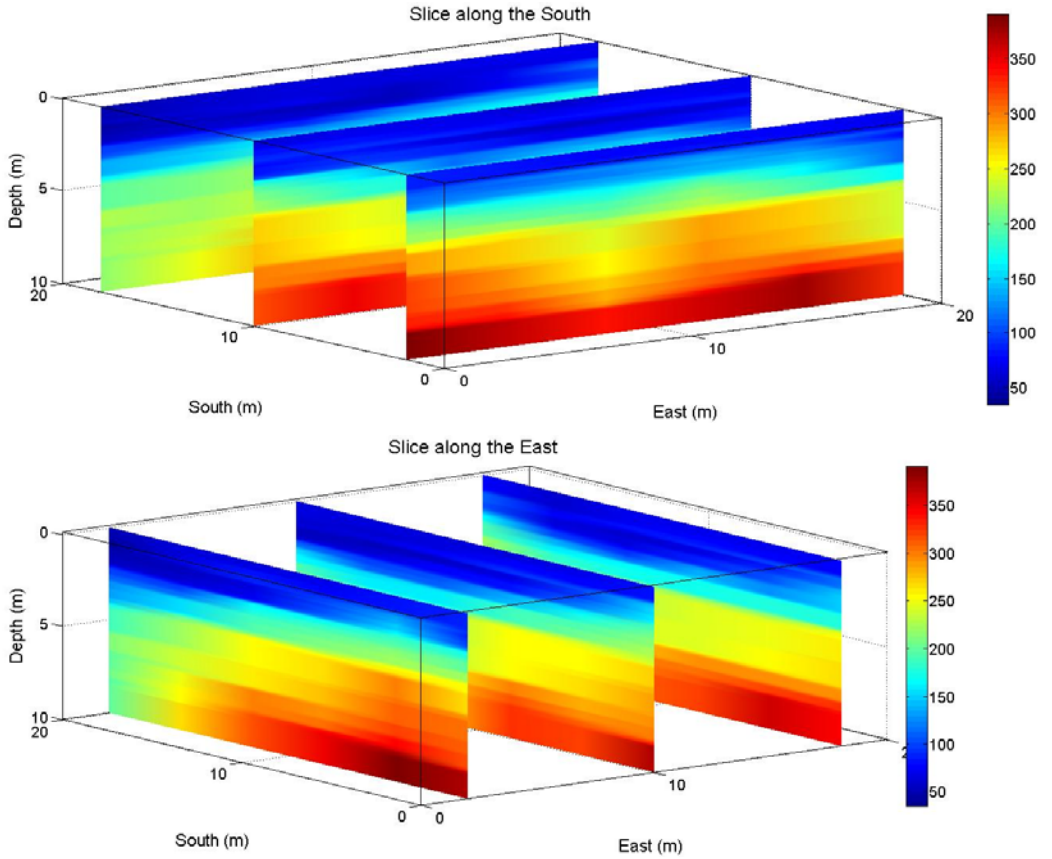
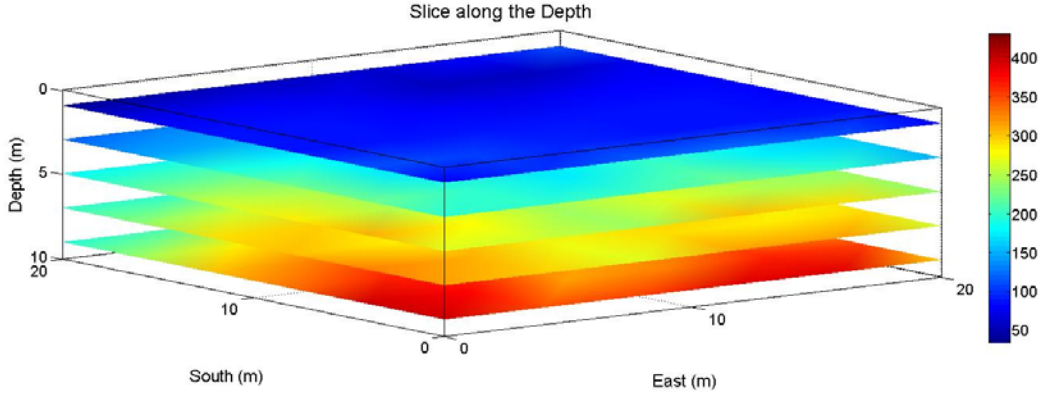


그림 6. HWAW방법에 의해 결정된 전단파 속도 3차원 영상



(a) 임의 위치 수직면에서의 2차원 전단파 속도 지도



(b) 임의 깊이 수평면에서의 2차원 전단파 속도 지도

그림 7. 3차원 전단파 속도 블록을 구성하는 임의 위치 단면에서의 2차원 전단파 속도 지도

4. 결 론

본 연구에서는 HWAW방법을 사용한 지반 전단파 속도 3차원 영상화기법을 제안하였다. 제안된 방법은 grid 시험 구성에서 HWAW 시험을 연속적으로 수행하여 얻어진 결과에 대해 영상화 신호처리를 거쳐 3차원 전단파 속도 지도를 결정한다. 결정된 대상 부지의 전단파 속도 3차원 영상에는 그 블록내의 모든 전단파 속도 정보가 포함되기 때문에 임의의 방향, 임의의 위치 및 깊이에서의 2차원 전단파 속도 지도나 임의 위치에서의 전단파 속도값을 쉽게 결정할 수 있다. HWAW방법은 높은 횡방향 해상도을 가지는 국부적인 전단파 속도 주상도의 결정이 가능하며, 신속한 시험이 가능하다. 따라서 다수의 실험이 필요한 지반의 3차원 영상화에 적합하며, 높은 해상도를 가지는 3차원 영상의 결정이 가능하다. 제안된 방법의 타당성 검토를 위해 현장에 적용하였으며, 이를 통해 제안된 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Cho, S.E., Park, H.C.(2010), "Effect of spatial variability of cross-correlated soil properties on bearing capacity of strip footing", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 34, No. 1, pp.1~26
2. Gabriels, P., Snider, R. and Nolet, G.(1987), "In situ measuremenets of shear wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves", Geophysical Prospecting, Vol. 35, pp.187~196.
3. Joh, S. H.(1996), "Advanced in interpretation and Analysis Techniques for spectral analysis-of-surface-waves(SASW) measurements", The University of Texas at Austin.
4. McMechan, A. George., Yedlin and J. Mathew(1981), "Analysis of depersive waves by wave field transformation", Geophysics, Vol. 46, No. 6, pp.869~874
5. Nazarian, S., Stokoe. K.H.(1984), "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave", Proc., 8th Conf On Earthquake Eng, S.Francisco, 31-3
6. Park, C.B, R.D. Miller and J. Xia(1999), "Multi-channel analysis of surface waves", Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp.800~808
7. Park, H.C., Kim, D.S.(2001), "Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform", NDT&E International, Vol. 34, No. 7, pp.457~467