

# HWAW방법을 이용한 기존 건물 내진 보강을 위한 건물 하부지반 전단파 속도 주상도 결정

## Determination of Shear Wave Velocity Profile under Existing Building for Site Response Analysis Using HWAW Method

박 형 춘<sup>1</sup> Park, Hyung-Choon

황 헤 진<sup>2</sup> Hwang, Hea-Jin

### Abstract

The evaluation of earthquake load on the surface is very important factor for the seismic reinforcement of existing building, and the magnitude of earthquake load depends on a shear wave velocity profile of soil under a building. To determine a shear wave velocity profile under a existing building, test method should be able to determine a reliable shear wave velocity profile under conditions such as heavy background noise and the small test area, and be sensitive to the variation of material property. In this research, HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Waves) method is applied to determine a shear wave velocity profile under a existing building. In this paper, through numerical simulations and field tests, the feasibility of the proposed method was shown.

### 요 지

기존 구조물의 내진 보강을 위해서는 구조물이 경험하게 될 지진 하중의 결정이 매우 중요하며 이러한 지진 하중의 크기는 구조물 하부 지반의 전단파 속도 주상도에 의해 큰 영향을 받는다. 기존 건물 하부지반의 전단파 속도 주상도를 결정하기 위해서는 매우 협소한 공간에서 시험이 가능하며, 배경잡음의 영향을 효과적으로 배제할 수 있고, 하부지반 물성 변화에 민감하게 반응할 수 있는 시험법이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 조건들을 만족시킬 수 있는 HWAW방법을 구조물 하부지반 전단파 속도 주상도 평가에 적용하였다. 제안된 방법의 타당성을 수치 모의 실험과 현장 적용을 통해 평가하였으며, 이를 통해 제안된 방법의 적용성을 확인할 수 있었다.

**Keywords** : Shear wave velocity profile, HWAW method, Existing building, Noise

### 1. 서 론

우리나라는 최근까지 지진 안전지대로 알려져 있으

나 최근 경주지진(규모 5.8 지진 및 여진들)의 발생으로 인해 더 이상 지진 안전지대가 아니며, 신규 건물의 신축성 있는 내진 설계 및 내진 설계 없이 건설된 기존

1 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungnam Nat. Univ., Tel: +82-42-821-5673, Fax: +82-42-825-0318, [civilman@cnu.ac.kr](mailto:civilman@cnu.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam Nat. Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

건물들의 내진 보강과 같은 보다 확실한 지진에 대한 대비가 필요하게 되었다. 내진 설계 및 내진 보강을 위해서는 구조물이 경험하게 될 지진하중의 올바른 산정이 매우 중요하다. 일반적으로 지진파는 기반암에서 토사 지반을 거쳐 지표면이나 지중에 위치한 구조물에 도달 지진하중으로 작용하게 된다. 이때 토사 지반을 거쳐 전파되는 지진파의 크기는 기반암에서 입사된 지진파 크기에 비해 증폭 된다. 즉 기반암 수준에서 동일한 크기의 지진파가 토사 지반으로 입사하는 경우라도 지표면에 위치하는 구조물이 경험하게 되는 지진하중의 크기는 지반 상태에 따라 달라지게 된다. 토사 지반에 의해 발생하는 지진하중의 증폭 정도는 지반의 전단파 속도 주상도에 의해 결정된다. 내진 설계 또는 보강 수준에 따른 기반암에서의 지진하중 크기는 지진위험지도의 형태(Ministry of Construction and Transportation, 1997; National Emergency Management Agency, 2013)로 한반도 전역에서 주어지 있다. 따라서 내진 설계 또는 보강을 위해 필요한 구조물이 경험하게 될 지진하중의 크기는 구조물 하부 지반의 전단파 속도(또는 전단 탄성계수) 주상도에 의해 결정되게 된다(Ministry of Construction and Transportation, 1997; Kramer, 1996). 즉 구조물 하부 지반의 정확한 전단파 속도 주상도 결정이 내진 설계나 기존 건물의 내진 보강을 위한 지진하중 산정에 매우 중요하다.

오래된 학교 건물과 같이 내진 설계 없이 건설된 많은 기존 구조물들은 내진 보강이 필요하며, 내진 보강에 있어 가장 중요한 요소인 지진 하중 산정을 위해서는 기존 건물 하부 지반의 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도 결정이 필요하다. 일반적으로 내진 보강이 필요한 기존 구조물들은 도심에 위치한다. 도심지의 경우 구조물 하부의 전단파 속도 주상도 결정을 위해 접근 가능한 시험 부지가 매우 협소하며, 상시 교통하중과 같은 계측 데이터에 배경 잡음으로 작용하는 많은 요소들이 존재한다. 따라서 기존 구조물 내진 보강을 위한 구조물 하부 지반 전단파 속도 주상도 평가를 위해서는 매우 좁은 시험 영역과 높은 배경잡음 하에서 신뢰할 수 있는 전단파 속도 산정이 가능한 평가방법이 필요하다. 또한 구조물 하중과 같은 상재하중이 지반에 가해지게 되면 기존 지반의 전단파 속도 주상도에는 변동이 발생하게 되며, 이러한 전단파 속도 변화를 평가하기 위해서는 하부 지반 전단파 속도 변화에 민감하게 반응하는 평가방법이 필요하다.

전단파 속도 주상도는 다양한 탄성과 탐사에 의해 결정될 수 있다. 탄성과 탐사는 시추공을 필요로 하는 공내 탄성과 탐사기법(Kim et al., 2004; Stokoe and Wood, 1972)과 지표면에서 모든 시험이 수행되는 비파괴 탄성과 탐사기법(Stokoe et al., 1994; Park, 1999; Park and Kim, 2004(a), 2004(b); Park et al., 2004)이 있다.

본 연구에서는 기존 구조물 하부 지반 전단파 속도 평가에 신속하며, 비파괴적인 시험이 가능한 비파괴 탄성과 탐사기법들 중 하나인 HWAW방법의 적용성을 평가하였다. 제안된 방법의 기존 구조물 하부 지반 전단파 속도 주상도 평가에 있어 타당성을 검토하기 위해 수치모의 실험을 수행하였다. 수치모의 실험을 통해 높은 배경잡음과 좁은 시험영역등과 같은 도심지 구조물 하부 지반 평가에서 만날 수 있는 제한 조건하에서 신뢰할 수 있는 전단파 속도 평가가 가능한지 조사하였고, 구조물 하부 지반 전단파 속도 변화에 대한 민감도 분석을 수행하여 구조물 하중에 의한 전단파 속도 변화를 효과적으로 평가할 수 있는지 조사하였다. 마지막으로 현장 적용을 통하여 제안된 방법의 적용성을 평가하였다.

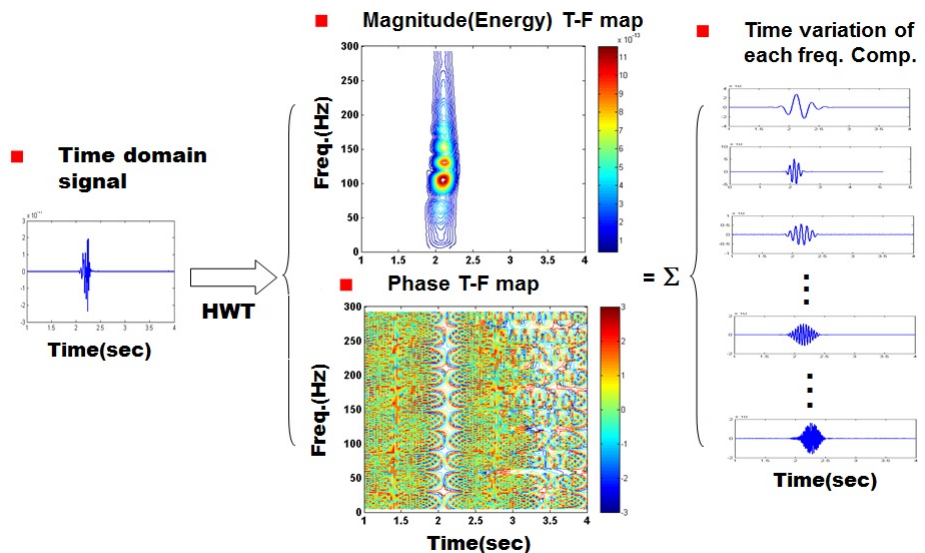
## 2. HWAW방법을 이용한 구조물 하부 지반 전단파 속도 주상도의 결정

HWAW방법은 대상 시스템의 전단파 속도 주상도를 비파괴적으로 평가하는 표면파 시험법의 하나이다. 표면파 시험법은 다수의 감지기를 사용하여 가진원에 의해 발생한 지표면 진동을 계측하고, 감지기들에서 계측된 신호 사이의 관계로부터 정보를 얻어내는 다채널 시험법(Park, 1999)과 두 개의 감지기를 사용한 현장 시험 및 두 개의 감지기에서 얻어진 신호사이의 관계로부터 대상 시스템의 전단파 속도 주상도를 결정하는 2-채널 시험법(Stokoe et al., 1994; Park and Kim, 2004(a), 2004(b))이 있다. 두 종류의 표면파 시험법 모두 현장시험 및 현장시험에서 얻어진 계측기록으로 부터 다층구조 시스템의 파장(또는 주파수)에 따른 표면파 위상속도 그래프인 분산곡선을 결정하는 과정과 결정된 분산곡선의 형태로부터 대상 시스템의 전단파 층상구조를 결정하는 역산 과정으로 이루어져 있다. HWAW방법은 2-채널 시험법으로 가장 향상된 데이터 분석방법들 중 하나인 하모닉 웨이브릿 변환을 이용하는 시험법이다. HWAW방법의 현장 시험법 및 분산곡선 결정법 그리고 역산 과정은 다음과 같다.

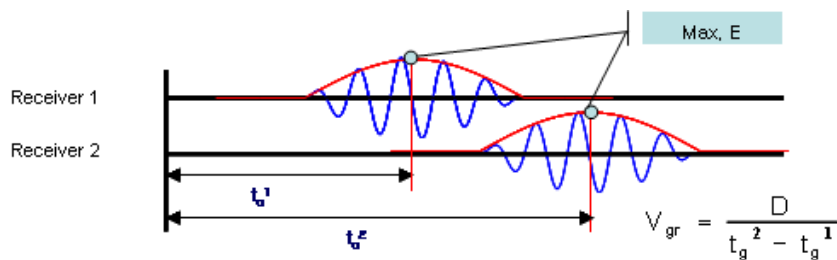
## 2.1 HWAW방법을 이용한 전단파 속도 주상도의 결정

HWAW방법을 위한 시험구성은 하나의 가진원 그리고 두 개의 감지기(일반적으로 속도계 사용)를 사용한다(Fig. 1(c)). 햄머의 지표면 타격과 같은 지표면 가진원에 의해 발생하는 파는 다양한 주파수 성분으로 구성되어 있다. 발생한 파를 구성하는 주파수성분들을 HWAW 방법은 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 시간영역에서 분해하여 각 주파수 성분들의 시간이력을 결정한다(Fig. 1(a)). 시간영역에서 각 주파수 성분들은 진폭변조(AM : Amplitude Modulated)된 형태, 즉 시간에 따라 진폭(에너지)이 변화하는 형태를 가진다(Fig. 1(a), (b)). 위상속도는 특정 위상(파의 형태)이 매질을 따라 전달되는 속

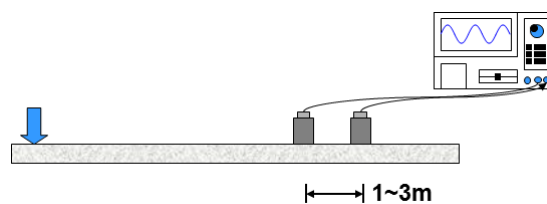
도이다. HWAW방법에서는 각 주파수성분의 시간영역 신호에서 에너지가 가장 큰, 즉 진폭이 가장 큰 위치에서의 위상을 기준으로 위상속도를 결정한다. 만일 배경 잡음이 존재하는 경우 AM신호의 질(quality)은 시간 위치에 따라 변화하게 된다. 즉 국부적인 신호/잡음비가 시간에 따라 변화하게 되며, 진폭이 가장 큰 시간위치에서 국부적인 신호/잡음비가 가장 큰 값을 가지게 된다. HWAW방법에서는 감지기 1에서 측정된 각 주파수 성분의 최대 진폭 위치에 해당하는 기준 위상 값을 결정하고 감지기 2에서 동일 위상이 위치하는 시간위치를 결정한다. 감지기 1과 2에서 기준 위상 값에 해당하는 시간 위치들의 결정 및 이 두 시간 위치 사이의 시간차가 결정되면, 감지기 사이의 간격을 이 시간차로 나누어 기



(a) Decomposition of time domain signal by harmonic wavelet transform



(b) Determination of phase velocity of each frequency component



(c) Test setup

Fig. 1. Principle of HWAW method

준 위상이 두 감지기 사이를 지나가는 속도를 결정할 수 있다(Fig. 1(b)). 이러한 과정을 전체 주파수 성분들에 대해 반복하면, 주파수(또는 파장)에 따른 위상속도 곡선인 분산곡선을 결정할 수 있다(Park and Kim, 2001; Park and Kim, 2004(a)). 분산곡선의 형태는 층상구조 시스템의 전단파 속도 주상도 형태(층의 개수, 각 층의 두께 및 전단파 속도)에 따라 유일하게 존재한다고 알려져 있다. 역산은 현장 시험에서 얻어진 분산곡선의 형태로부터 전단파 속도 주상도를 결정하는 과정으로, 대상 시스템의 전단파 속도 주상도를 가정하고 가정된 주상도로부터 이론분산곡선을 결정한다. 결정된 이론분산곡선과 현장에서 결정된 실험분산곡선을 비교하여 일정 수준 이상 비슷하면, 가정된 전단파 속도 주상도를 대상 시스템의 주상도로 확정하고, 일정 수준 이상 비슷하지 않으면 전단파 속도 주상도를 재가정하여 위의 과정을 반복한다. 이러한 역산 과정은 최적화 과정으로 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 최적화 알고리즘으로 사용한다(Park and Hwang, 2012). 분산곡선은 동일 지반이라도 감지기 위치에 따라 형태가 변화한다. 따라서 역산 과정에서 이론 분산곡선 결정 시 현장 시험과 동일한 감지기 위치에서 이론 분산곡선이 결정되어야 하며, HWAW 방법은 역산 과정에서 현장 시험과 동일한 감지기 구성을 사용하여 이론 분산곡선을 결정한다. 역산 과정에서 현장 시험의 감지기 구성이 사용되는 한 현장 시험을 위한 감지기 위치의 제한은 없다. 따라서 HWAW 방법에서는 감지기 위치의 제한이 없으며, 일반적으로 짧은 감지기 간격 시험구성(감지기 간격 1~3m)을 사용한다(Park and Kim, 2004(b); Park et al., 2014).

## 2.2 구조물 하부 지반 전단파 속도 주상도결정에 있어 HWAW방법의 특징

2.1 절에서 언급한 바와 같이 HWAW 방법은 역산과정에서 현장시험에 사용된 감지기 위치가 고려되며, 현장 시험을 위한 감지기 위치에 제한이 없다. HWAW 방법은 일반적으로 짧은 감지기 간격 시험구성을 많이 사용한다. 이러한 짧은 감지기 간격을 사용하는 경우 매우 좁은 영역에서도 시험을 수행할 수 있으며 세밀한 국부적인 전단파 속도 주상도의 평가가 가능하다(Hwang and Park, 2014; Noh and Park, 2016; Kim et al., 2015). 이러한 좁은 시험영역에서의 평가가 가능하다는 점은 도심지 기존 구조물 하부 지반 평가에 있어 매우 중요한 요

소가 된다.

표면파 시험에서 결정되는 전단파 속도 주상도의 신뢰성은 현장시험에서 결정되는 분산곡선의 신뢰성에 큰 영향을 받는다. 기존의 표면파 시험에서는 퓨리에 변환을 데이터 해석에 사용한다. 퓨리에 변환을 분산곡선 결정에 사용하는 경우 계측된 시간영역 전체 신호를 분석에 사용해야 하기 때문에 가진에 의해 발생한 의미 있는 신호가 존재하는 시간영역만을 분리하지 못하고 배경잡음이 존재하는 시간영역을 포함한 전체 시간대역 신호를 사용하여 분산곡선을 결정하게 된다. 즉 현장에 존재하는 배경잡음에 영향을 크게 받는다. 이에 반하여 하모닉 웨이브릿 변환을 데이터 해석에 사용하는 경우 시간에 따른 신호의 변화를 고려할 수 있으며 가진에 의해 발생한 의미 있는 신호가 집중된 영역(전체 시간영역에서 국부적으로 최대 신호/잡음비를 가지는 영역)만의 시간데이터를 분산곡선 결정에 사용하기 때문에 이론적으로 계측된 신호에서 얻을 수 있는 최대 신뢰도를 가지는 분산곡선 결정이 가능하다. 즉 배경잡음의 영향을 효과적으로 제거할 수 있다. 이러한 특징은 도심지와 같이 다양한 배경잡음이 존재하는 경우에도 간단한 시험장비 및 시험(HWAW방법은 단순한 저에너지 가진원을 사용한 단일 감지기 구성에 대한 단일 시험을 통해 분산곡선 결정)을 통해 신뢰할 수 있는 대상 층상 시스템의 평가를 가능하게 한다. 이러한 특징은 도심지 구조물 하부 지반 평가에 있어 큰 장점으로 작용한다.

## 3. 수치실험을 통한 구조물 하부 지반 전단파 속도 결정에 있어 HWAW방법의 타당성 검토

2장에서 언급한 도심지 하부 지반 전단파 속도 주상도 평가에 있어 HWAW 방법의 특징을 수치모의 실험을 통해 검증하였다. 수치모의 실험은 동적강성행렬 방법(Kausel and Roesset, 1981; Kausel and Peek, 1982)에 기반을 둔 컴퓨터 프로그램인 Fit7(Joh, 1996)을 사용하였다. 수치모의 실험을 통해 잡음조건 하에서의 HWAW 방법의 성능을 평가하였으며, 하부지반 물성치 변화에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 수치모의 실험을 위한 HWAW 실험구성은 협소한 실제 현장에서 적용될 시험 구성과 같은 짧은 감지기 간격 시험구성(감지기 1 : 4m, 감지기 2 : 6m)를 사용하였다.

### 3.1 배경잡음 영향 하에서의 HAWAW방법의 성능

잡음조건하에서의 HAWAW방법의 성능 평가를 위해 짧은 감지기 간격 시험구성을 사용한 수치모의 실험을 Fig. 2와 같은 전단파 속도 주상도를 가지는 층상구조에서 수행하였다. 대상 층상구조를 구성하는 각 층의 단위 중량은  $1800\text{kg/m}^3$ 으로 가정하였다.

잡음조건하에서의 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 감지기에서 측정된 시간영역 신호들에 높은 수준

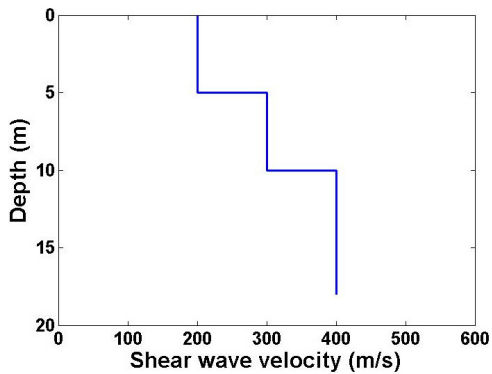


Fig. 2. Shear wave velocity profile used in numerical simulation

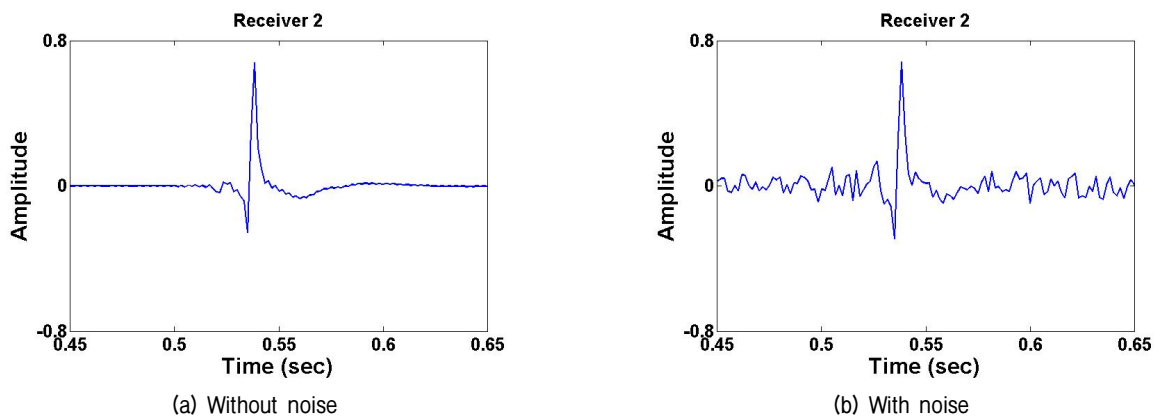


Fig. 3. Time domain signal with and without noise measured at receiver 2 in numerical simulation

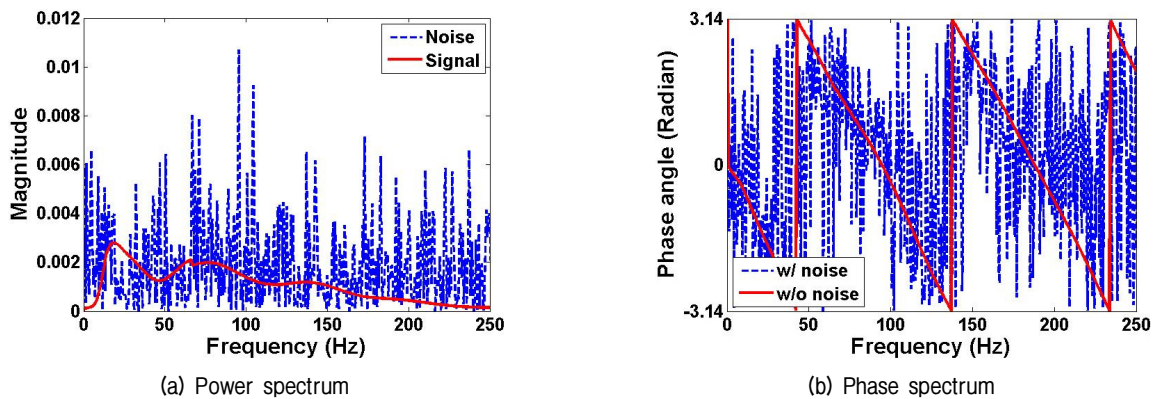


Fig. 4. Comparison of phase and power spectra

의 잡음을 부가하였다. Fig. 3은 감지기 2에서 수치모의 실험을 통해 얻어진 잡음이 없는 시간영역신호(Fig. 3(a))와 잡음이 부가된 시간영역신호(Fig. 3(b))를 나타낸 그림이다. 측정된 신호와 부가된 배경잡음 에너지 수준을 비교하기 위하여 수치모의 실험에서 얻어진 시간영역 신호와 부가된 잡음의 파워스펙트럼 함수를 Fig. 4(a)에서 비교하였다. 그림을 보면 부가된 잡음이 전체 주파수 대역에 걸쳐 상당한 크기의 에너지를 가지는 백색잡음을 알 수 있고, 의미 있는 신호(가진원 의해 발생한 신호)가 점유하고 있는 주파수 대역에서도 상당한 크기의 잡음이 존재하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 잡음이 존재하는 주파수 영역과 의미 있는 신호가 존재하는 주파수 영역이 서로 다를 때 주파수 영역 필터링을 거쳐 시간영역신호에서 잡음의 영향을 제거할 수 있으나, Fig. 4(a)에서 보여진 바와 같은 경우 일반적인 퓨리에 변환에 기반을 둔 주파수 영역 필터를 통해 잡음의 영향을 제거할 수 없다. 일반적으로 현장에 존재하는 잡음은 시험에서 가진원에 의해 발생하는 의미 있는 신호가 점유하고 있는 주파수 대역과 유사한 주파수 대역에

존재하는 경우가 많다. Fig. 4(b)는 잡음이 부가된 감지기 1과 2의 신호를 사용하여 결정된 위상스펙트럼으로 일반적인 2-채널 표면파 시험에서는 위상 스펙트럼으로부터 분산곡선을 결정하게 된다. 잡음이 없는 경우 위상 스펙트럼은 Fig. 4(b)의 빨간 실선과 같이 톱니 바퀴 형상을 가지며, 잡음이 부가된 경우 Fig. 4(b)의 파란 점선과 같이 왜곡된 형태를 보이게 된다. Fig. 4(b)의 왜곡된 위상스펙트럼의 경우 분산곡선을 결정할 수 없는 정도의 왜곡된 형태를 보이고 있다. 따라서 본 수치모의 실험에서 사용된 배경 잡음이 존재하는 경우 푸리에 변환에 기반한 위상스펙트럼을 사용하는 기존의 2-채널 표면파 시험에서는 신뢰할 수 있는 분산곡선, 즉 전단파 속도 주상도를 결정할 수가 없다.

Fig. 5는 잡음이 없는 신호에 대해 결정된 정확한 분산곡선과 잡음이 부가된 신호에 대해 HWAW방법을 적용하여 결정된 분산곡선을 비교한 그림이다. 그림을 보면 잡음이 부가된 경우라도 HWAW방법은 분산곡선을 결정할 수 있으며, 정확한 분산곡선과 비교하였을 때 잡음이 있는 경우라도 HWAW방법은 신뢰할 수 있는 분

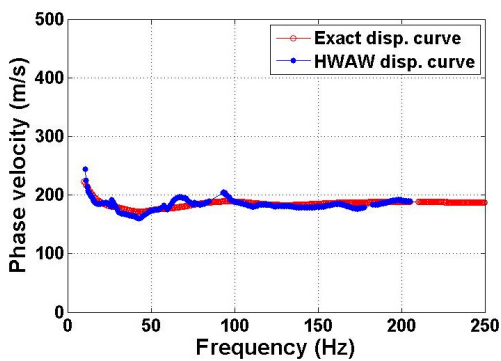


Fig. 5. Comparison of dispersion curves determined by HWAW method using signals with noise and correct dispersion curve

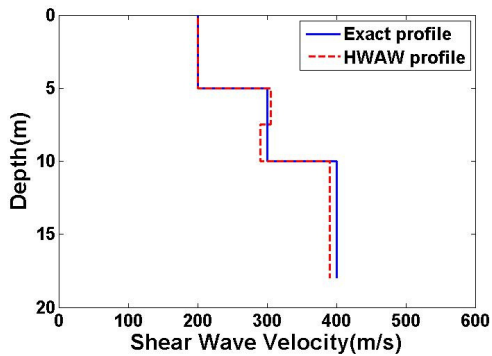


Fig. 6. Comparison of correct Vs profile and that determined by HWAW method using signal with noise

산곡선을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에서 결정된 분산곡선의 신뢰도를 평가하기 위해 Fig. 5에서 주어진 잡음이 부가된 시간영역신호에 대해 HWAW방법을 적용하여 결정된 분산곡선을 사용한 역산 결과(전단파 속도 주상도)를 실제 전단파 속도 주상도와 Fig. 6에서 비교하였다. Fig. 6을 보면 잡음의 영향으로 약간의 차이를 보이거나 결정된 전단파 속도 주상도는 전체적으로 실제 주상도와 잘 일치함을 볼 수 있다.

### 3.2 전단파 속도 변화에 대한 HWAW방법의 민감도 평가

구조물 건설에 따른 구속압 증가 및 구속압 증가에 따른 구조물 하부 지반의 전단파 속도 증가 그리고 이에 따른 구조물 건설 전·후의 전단파 속도 주상도 변화를 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 평가방법이 하부 지반 물성 변화에 민감하게 반응하여야 한다. 표면파 기법의 경우 분산곡선의 형태로부터 대상 시스템의 전단파 속도 주상도를 결정한다. 따라서 하부 지반 물성변화에 분산곡선의 형태가 얼마나 민감하게 변화하는 지가 각 표면파 기법의 하부지반 물성변화 민감도를 나타내게 된다. HWAW방법의 하부 지반 전단파 속도 변화에 대한 민감도 분석을 위해 Fig. 7에서 주어진 두 개의 층으로 구성된 주상도의 하부 층(두번째 층) 전단파 속도를 변화시켜가며 수치모의 실험을 수행하였다. 변화의 정도는 하부 층 전단파 속도가 첫 번째 층 전단파 속도와 동일한 경우(homogeneous)를 기준 속도로 -15%, -10%, -5%, 5%, 10%, 15% 변화시켜가며 분산곡선을 결정하고, 기준 속도에서 얻어진 분산곡선을 기준으로 단위 파장 당 평균 어느 정도의 위상속도값 변화가 발생하는 지 평가하였다. 각각의 전단파 속도 주상도에 대해 HWAW방법에서 사용하는 짧은 감지기 시험구성을 사용한 수치

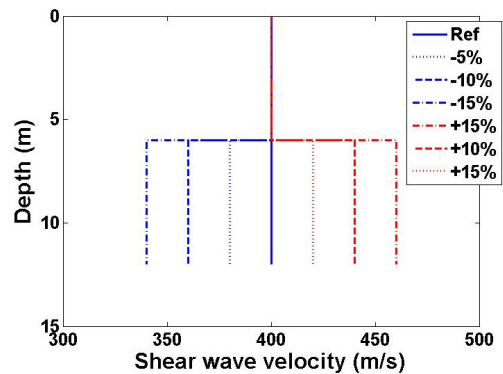


Fig. 7. Shear wave velocity profiles for sensitive analysis

모의 시험과 기존 표면과 시험에서 사용하는 시험구성을 사용한 수치모의 시험을 수행하였다. 이러한 수치모의 시험을 통해 HAWW시험 분산곡선(whole wave field)들과 기존 표면과 시험 분산곡선(far field)들을 결정하였다. Fig. 8은 HAWW방법과 기존 표면과 기법에서 얻어진 분산곡선들의 하부 지반 층 전단파 속도 변화에 따른 평균 변화량을 나타낸 그림이다. 그림을 보면 HAWW 방법은 기존 표면과 시험에 비해 하부 지반 전단파 속도 변화에 민감하게 변화하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 현장 적용

제안된 방법의 구조물 하부 지반 전단파 속도 평가에

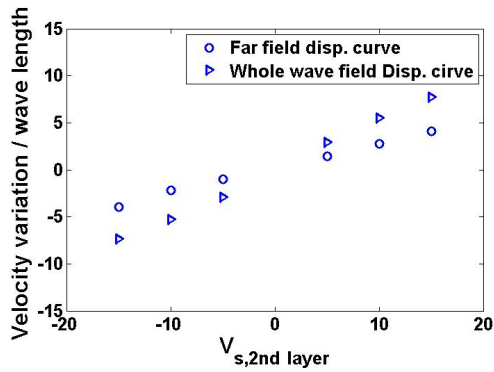


Fig. 8. Comparison of average phase velocity variation with variation of shear wave velocity of the second layer

있어 타당성을 검토하고자 제안된 방법을 실제 현장에 적용하였다. 대상 현장은 모형 교각 설치 현장으로 3단계에 걸쳐 건설되었다. 1단계(Fig. 9(a))에서는 교각 설치를 위한 부지조성단계로 5m 까지 원 지반 굴착이 이루어졌다. 2단계(Fig. 9(b))는 조성된 부지에 얇은 기초(4.5m × 3m)와 교각을 설치하는 단계로, 설치된 교각의 무게는 약 66 ton이다. 마지막 3단계(Fig. 9(c))는 교각 위에 부가적인 하중의 설치단계로 부가된 하중의 무게는 약 30ton이다.

각 건설 단계별 HAWW시험이 수행되었다. 건설 1단계에서는 교각 및 기초를 위해 조성된 부지 바로 옆(D1)에서 시험이 수행되었다(Fig. 10(a)). 건설 2단계에서는 교각 및 기초 완성 후 기초 바로 옆(D2)과 기초에서 거리가 약 6m 정도 떨어진 원지반 위(U)에서 시험이 수행되었다(Fig. 10(b)). 건설 3단계에서는 교각 위 부가적인 하중이 가해진 후 건설 2단계에서 수행된 위치와 동일한 위치(D3)에서 시험이 수행되었다(Fig. 10(c)). 그림을 보면 교각 하부 지반 평가를 위한 접근 가능한 시험 위치가 매우 협소함을 볼 수 있다.

Fig. 11은 건설 단계 2에서 수행된 U와 D2 실험위치에서 결정된 전단파 속도 주상도들을 비교한 그림이다. U와 D2 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도들은 건설 2단계에서 주어진 동일한 부가 하중 조건하에서 하중이 주어진 위치로부터 서로 다른 거리에서 결정된 전단파

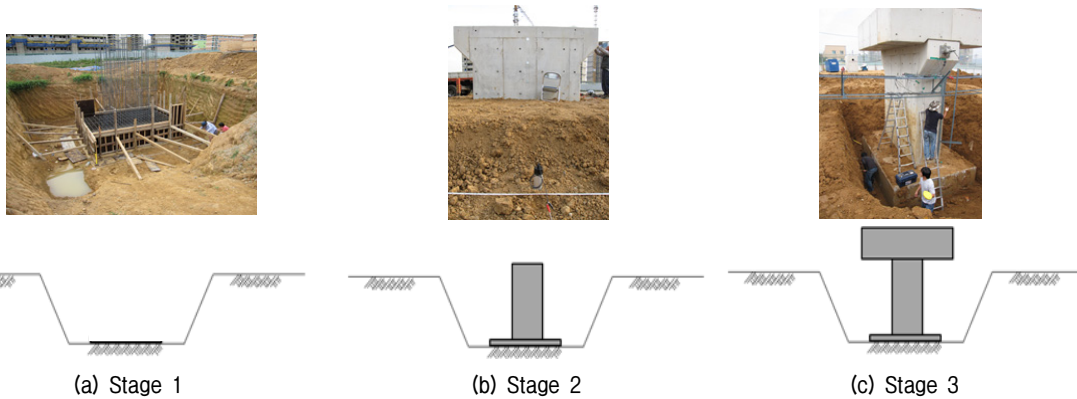


Fig. 9. Model site : construction step

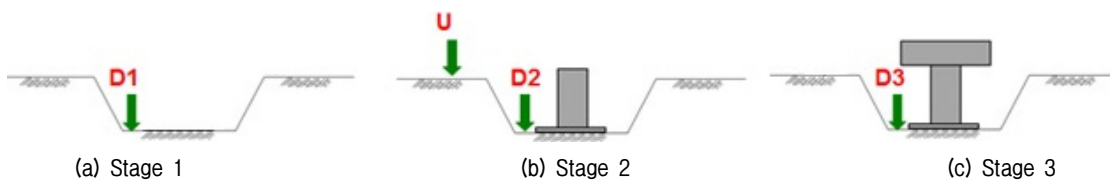


Fig. 10. Test locations for each construction step

속도 주상도들이다. U와 D 위치에서의 전단파 속도 주상도 시작 깊이가 다른 것은 U는 원지반 시험 결과이며, D는 5m 굴착 하부 저면에서 수행된 시험 결과이기 때문이다. 그림을 보면 각 단계에서 동일 하중 조건하에라도 횡방향으로 위치가 다를수록 전단파 속도 주상도 크기가 서로 차이를 볼 수 있다. 이러한 차이는 부가 하중이 1차원 형태로(즉 모든 동일 깊이에서 동일한 크기의 하중증가) 하부지반으로 전달되는 것이 아니라 사다리꼴 형태로 퍼져 전달되기 때문으로 상재 하중에서 일정거리 떨어진 U 위치에서는 지표면 하중 증가에 따른 지중 구속압 증가가 크지 않기 때문이다. 이에 반하여 D2 전단파 속도 주상도는 상재하중에 의한 지중 구속압 증가에 의한 영향이 모두 반영된 전단파 속도 주상도이다. Fig. 11에서는 건설단계 1(굴착 하부 저면에 상재하중이 없는 단계)의 D1 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도와 U 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도 또한 비교가 이루어졌다. 그림을 보면 상재하중이 가해지지 전인 D1 위치(공간적인 위치는 D2와 일치)에서 결정된 전단파 속도 주상도는 U에서 결정된 전단파 속도 주상도와 약 13m 보다 얕은 깊이(원지반 기준)에서 유사한 형태를 보임을 알 수 있다. 이러한 전단파 속도 주상도들 사이의 유사성은 앞에서 언급한 바와 같이 하중에서 일정거리 떨어진 U 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도는 구조물 건설에 따른 지중 구속압 증가 및 이에 따른 구조물 하부 전단파 속도 증가가 반영되지 않은 주상도라는 것을 알 수 있다. 따라서 구조물 건설에 따른 하부 지반 전단파 속도 변동이 반영된 주상도의 결정, 즉 구조물 내진보강을 위해 필요한 내진해석을 위한 구조물 하부 지반의 신뢰성 있는 전단파 속도 주상도를 결정하기 위해서는 구조물에 최대한 인접한 위치에서 시험을 수행하여야 한다. Fig. 11에서 13m 보다 깊은 깊이에서는

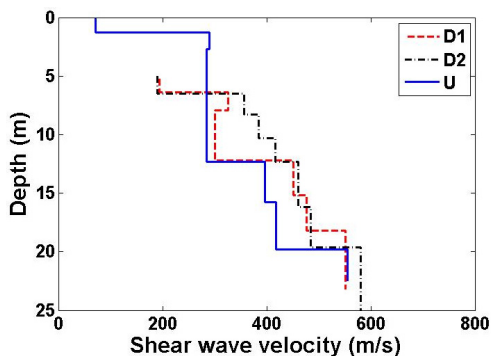


Fig. 11. Comparison of shear wave velocity profiles at different distance from foundation

D2 뿐만 아니라 D1 전단파 속도 주상도 또한 U 전단파 속도 주상도와 차이를 보이는데 이는 대상 지반에 존재하는 지반 물성치 횡방향 변동성에 의한 차이로 생각된다. Fig. 12는 건설 단계에 따라 구조물 바로 인접 위치인 D1, D2 그리고 D3 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도들을 비교한 그림이다. D1, D2 그리고 D3는 공간적으로 거의 동일한 시험위치이다.

Fig. 12에서 y축 깊이는 굴착하부 저면에서 측정된 깊이이다. Fig. 12를 보면 구조물 건설에 따른 상재 하중 증가에 따라 하부 지반의 전단파 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림을 보면 상재 하중에 따른 전단파 속도 증가는 주로 깊이 7m 이하에서 발생함을 볼 수 있다. 깊이가 증가함에 따라 전단파 속도 증가의 정도가 변화하는 것은 지표면 하중에 의한 지중 응력 증가분이 깊이가 증가함에 따라 감소하기 때문이다. 또한 그림에서 D1에서 D2 사이의 속도 증가분이 D2와 D3 사이의 속도 증가분보다 크음을 볼 수 있다. 상재 하중에 의한 지중 전단파 속도증가는 하중 부가 전 지중 평균 유효 구속압과 하중 부가 후 지중 평균 유효 구속압의 비((시공 후 평균 유효 구속압)/(시공 전 평균 유효 구속압))에 비례하는데 건설단계 2(D2)에서의 부가하중에 의한 전단파 속도 증가분에 영향을 주는 건설단계 1에서의 지중 평균 유효 구속압의 크기에 비해 건설단계 3(D3)에서의 부가 하중에 의한 전단파 속도 증가분에 영향을 주는 건설단계 2에서의 지중 평균 유효 구속압의 크기가 크기 때문에 동일하중 증가분에 대한 건설단계 1과 2 사이에서 얻어지는 전단파 속도 증가분이 건설단계 2와 3 사이에서 발생하는 전단파 속도 증가분의 크기와 동일하지 않고 더 큰 값을 가지게 된다. 또한 건설단계 2에서 부가되는 하중의 크기가 건설단계 3에서 부가되는 하중의 크기에 비해 크며, 이러한 상재 하중의 크기 차이

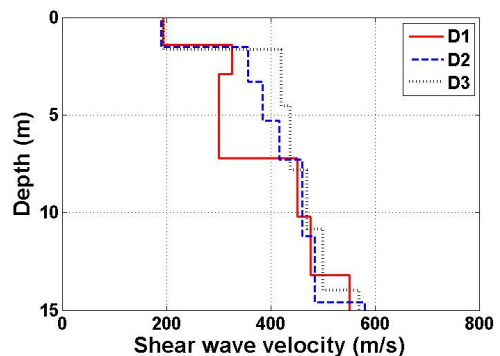


Fig. 12. Comparison of shear wave velocity profiles determined at D1, D2 and D3



또한 각 단계에서 발생하는 전단파 속도 증가분의 크기 차이를 유발한다. Fig. 11과 12로부터 제안된 HAWW 방법은 구조물 하부 지반의 전단파 속도 주상도를 매우 효과적으로 평가할 수 있음을 알 수 있으며, 신뢰성 있는 평가를 위해서는 구조물에 최대한 인접한 위치에서 시험을 수행해야 함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 기존 구조물 내진 보강을 위한 지진하중 산정에 있어 가장 중요한 요소인 구조물 하부 지반 전단파 속도 주상도 결정에 있어 HAWW방법의 적용성을 평가 하였다. 제안된 방법은 기존 구조물 하부 지반 전단파 속도 주상도 결정시 평가 방법이 가져야 할 조건인 협소한 시험 장소에서의 시험 가능성, 배경잡음 조건 하에서 신뢰할 수 있는 결과 도출 그리고 하부 지반 물성 변화에 대한 민감도 등을 수치모의 시험을 통해 검증하였다. 이를 통해 제안된 방법이 기존의 방법에서 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 힘든 배경 잡음 조건에서도 신뢰할 수 있는 실험 결과를 제공할 수 있음을 알 수 있었으며, 협소한 장소를 위해 제안된 실험 구성에서도 하부 지반 물성변화를 민감하게 결정할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 실제 현장 시험을 통해 제안된 방법의 현장 적용성을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. Joh, S.H. (1996), Advanced in interpretation and analysis techniques for spectral analysis of surface waves (SASW) measurements. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin.
2. Hwang, H.J. and Park, H.C. (2014), "Evaluation of Condition of Gravel Ballast Layer on High-speed Railway Using Surface Wave Method based on Harmonic Wavelet Analysis of Waves", *NDT&E International*, Vol.68, pp.78-87.
3. Kim, D.S., Bang, E.S., and Kim, W.C. (2004), "Evaluation of Various

- Down Hole Data Reduction Methods to Obtain Reliable VS Profile", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.6, pp.585-597.
4. Kim, D.S., Kim, J.T., Park, H.J., Bang, E.S., and Park, H.C. (2015), "Verification Study for Surface Wave Method based on Harmonic Wavelet Analysis Waves Using a Large-scale Model Test Site", *J. of Applied Geophysics*, Vol.113, pp.74-85.
5. Kausel, E. and Roesset, J.M. (1981), "Stiffness Matrices for Layered Soils", *Bull Seismol Soc Am*, Vol.71, pp.1743-1761.
6. Kausel, E. and Peek, R. (1982), "Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum: An Explicit Solution", *Bull Seismol Soc Am*, Vol.72, pp.1459-1481.
7. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
8. Ministry of Construction and Transportation (1997), *Korean Seismic Design Standard*, Korea.
9. National Emergency Management Agency (2013), *Public Announcement 2013-179*.
10. Noh, H.K. and Park, H.C. (2016), "Evaluation of Applicability of HAWW (Harmonic Wavelet Analysis of Waves) Method in Determining Grouting Effect in Dam and Embankment", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.5, pp.15-26.
11. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999), "Multi-channel Analysis of Surface Waves", *Geophysics*, Vol.64, No.3, pp.800-808.
12. Park, H.C. and 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.
13. Park, H.C. and Kim, D.S. (2004a), "Development of Seismic Characterization Method using HAWW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) Method (I)", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2C, pp.105-115.
14. Park, H.C. and Kim, D.S. (2004b), "Development of Seismic Characterization Method using HAWW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) Method (II)", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2C, pp.117-124.
15. Park, H.C., Kim, D.S., and Lee, B.S. (2004), "Field Application of New Seismic Site Characterization using HAWW (Harmonic Wavelet Analysis of waves) Method", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.6, pp.1-9.
16. Park, H.C. and Hwang, H.J. (2012), "Development of Automated Inversion Method for HAWW Method Using Genetic Algorithm", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.8, pp.55-63.
17. Stokoe, K. H. and Woods, R. D. (1972), "In Situ Shear Wave Velocity by Cross-hole Method", *Journal of the soil mechanics and foundations Divisions*, ASCE, Vol.98, No.SM5, pp.443-459.
18. Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A., and Roesset, J.M. (1994), *Characterization of geotechnical sites by SASW method*. In: Woods RD, editor. *Geotechnical characterization of sites*. New Delhi, India: Oxford and IBH Publishing Co., pp.15-26.

Received : February 28<sup>th</sup>, 2017

Revised : May 13<sup>th</sup>, 2017

Accepted : May 19<sup>th</sup>, 2017