

# 연속 표면파(CSW)기법을 활용한 노반 강성평가에 관한 연구

## The Evaluation of Roadbed Stiffness using Continuous Surface-Wave (CSW) Method

고학송\*\*\*      조성호\*\*\*\*      황선근\*      이일화\*\*①  
Ko Hak-Song    Joh Sung-Ho    Hwang Sun-Kun    Lee Il-Hwa

### ABSTRACT

Recently, The surface-wave method has widely been used for the site investigation due to the economic advantage and the improved reliability. The typical surface-wave methods currently available are SASW method, MASW method and CSW method. The CSW method has a potential of high-quality measurement, but its inherent problems limited its use to the special cases such as the compaction-quality control. The CSW method uses the steady-state harmonic vibration for the seismic source as in the steady-state Rayleigh-wave method, which is superior to the impact source used for other methods. This study proposed a new procedure to solve the inherent problems of the CSW method and to improve the reliability of the CSW measurements. To verify the validity of the proposed in this study, the SASW results were compared with the CSW results for the numerical simulation of the CSW testing. Also, the feasibility of the proposed method was verified using the field measurements at a geotechnical site.

### 1. 서론

본 연구에서는 노반 강성을 평가하기 위하여 기존의 여러 비관입적 시험들 중 연속표면파(Continuous Surface-Wave)기법을 선택하여 노반의 강성을 평가하는데 적용하였다. 이 기법은 결핵파 레일리와 기법과 동일하게 단일 주파수의 결핵파 진동을 가진원으로 사용한다는 측면에서 고품질 측정의 잠재적 가능성을 가지고 있지만, 그 분석과 해법 기법의 문제점으로 인하여 활용빈도가 낮으나 본 연구에서 CSW 내재적인 문제점을 해결하여 CSW기법의 장점을 극대화할 수 있도록 하였다. 기존 CSW의 문제점은 표면파 실험으로 걸정한 위상속도 분산곡선에서 절단파 속도 추상도를 구하는 역산과정에 있어서도 단순한 경험식을 활용하고 있는 실정이며서 결과로 도출되는 절단파 속도의 신뢰성이 낮은 편이다. 따라서 본 연구에서는 CSW의 내재적인 문제점을 해결하기 위하여 파수복원기법을 제안하였고, 파수복원기법의 신뢰성과 합리성을 검증하기 위하여 CSW 수치실험을 수행하여 SASW실험결과와 비교를 통해 적용성과 타당성을 확인하였다.

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\*한국철도기술연구원    연구원, 비회원

\*\*\*\*중앙대학교 교수, 비회원

## 2. CSW기법(Continuous Surface-Wave Method)

### 2.1 CSW기법의 개요

일반적으로 CSW실험은 4개 이상의 감진기와 경면파를 지표면에 계속적으로 발생시킬 수 있는 진동기(Vibrator), 신호를 측정할 수 있는 동적신호분석기(Dynamic Signal Analyzer)등을 이용하여 그림1.과 같이 실험을 수행한다.

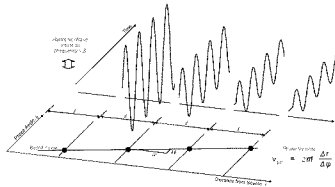


그림1. CSW기법의 개념도

CSW기법은 경면파와 지표면 진동을 이용하여 노반의 전단강성 구조를 평가하는 기법이다. 표면파의 전파속도는 노반의 전단탄성계수, 단위중량, 포아송비 등과 연관되어 있기 때문에, 표면파의 전파속도를 측정하여 노반의 전단강성 구조를 추정하는 원리를 가지고 있다.

CSW기법에서는 다른 비파괴 시험과는 다르게 표면파를 발생시키기 위해서 진동기(vibrator)를 사용하는데, 이 진동기는 일정한 주파수의 경면파 진동을 발생하도록 만들어진 것을 사용한다. 일반적으로 CSW기법에서 사용되는 진동기의 유효 가진 주파수는 5~100Hz의 범위에 있기 때문에, 측정되는 표면파도 진동기의 가진 주파수에 국한되어 측정되며, 측선 당 약 50개 주파수에 대한 표면파 속도가 측정된다. 측정된 표면파 속도는 일차적으로 위상속도 분산곡선으로 변환되어 나타낼 수 있는데, 위상속도 분산곡선은 부지 고유의 특성을 나타내는 요소로, 표면파 주파수에 따른 표면파의 전파속도의 관계로 나타낼 수 있다. 그러므로 위상속도 분산곡선은 노반의 전단파 속도 주상도를 추정하기 위한 중요한 요소라 할 수 있다. 기존의 CSW 실험에서는 표면파의 파장과 측정선도간 경면관계식, 표면파의 위상속도와 전단파 속도의 관계식 등을 이용하여 전단파 속도 주상도를 추정한다.

### 2.2 CSW기법의 해석

CSW기법은 지표면을 따라 전파되는 표면파를 측정한다. 그림1.을 보면 일정한 주파수의 경면파 진동을 발생시키기: 진동기(vibrator)를 이용하여 Rayleigh 파를 발생시키고, 일정한 등 간격으로 설치한 감진기를 이용하여 노반진동에 대한 시계열을 측정한다. 본 연구에서는 감진기를 4개를 사용하였는데, 최근에는 6개의 감진기를 사용하기도 한다. 많은 감진기를 사용하면 그 노반에 대한 정확한 결과를 얻을 수 있다.

측정된 시계열은 푸리에 변환(Fourier Transform)에 의해서 주파수 영역으로 변환되고 가진 주파수에서의 위상각을 계산하게 된다. 계산된 위상각은 감진기의 위치에 대하여 도시하게 되는데, 가진원에서 멀어질수록 위상각이 증가하기 때문에 그림1.의 밑의 그림과 같이 일정 기울기를 가지고 증가하는 경향으로 나타난다. 여기서 가진 주파수를  $f$ , 감진기 간격을  $d$ , 감진기 이격거리를  $r$ , 위상각을  $\phi$ 라고 하였을 때, 가진 주파수  $f$ 에 대한 위상속도는 다음과 같이 결정된다.

식(1)

$$v = f \times \lambda$$

식(2)

$$v = f \times \frac{d}{\frac{\phi}{2\pi}} = 2\pi f \frac{d}{\phi}$$

식(2)에서  $d$ 는 감진기 이격거리( $\Delta r$ )와 같기 때문에 다시 정리하여 CSW기법에서의 위상속도를 구하면 식(3)과 같이 구할 수 있다.

식(3)

$$v_{ph} = 2\pi f \frac{\Delta r}{\Delta \phi}$$

그림1.에서 와 같이 감진기 이격거리-위상각 관계는 직선으로 나타내어지지만, 위상각이 180°를 초과 할 경우 360°의 배수를 감하여 -180°~180°사이의 값으로 표현되게 된다. 그러므로 180°를 초과하는 위상각이 존재하는 경우는 더 이상 감진기 이격거리와 위상각 관계가 단일 일직선 나타낼 수 없고, 두 개 이상의 평행한 직선으로 표현된다. 이러한 경우 보정하기 위해서 위상각의 복원(unwrapping)처리를 하여 식(3)을 적용하여야 한다. 이렇게 해서 구한 위상속도 분산곡선을 가지고 전단파 속도 추상도를 구하게 된다. 전단파 속도 추상도의 결정을 위한 전단파 속도는 식(4)에 의해서 구하고, 추정된 전단파 속도에 대한 심도는 식(5)의 경험식에 의해 결정된다.

식(4)

$$v_s = \alpha \times v_{ph}$$

식(5)

$$d = \beta \times \lambda$$

식(4)에서  $\alpha$ 는 전단파 속도와 표면파 속도와의 비이며 포아송비에 따라 0.9~1 사이의 값을 갖는다. 그리고 식(5)의  $\beta$ 는 표면파 속도  $v_{ph}$ 에 상응하는 심도  $d$ 와 표면파의 파장  $\lambda$ 의 비이며, 개략적으로 지층의 특성에 따라 0.5~1의 값을 갖는다.

### 3. CSW기법의 위상속도 보정을 위한 파수복원기법

#### 3.1 CSW실험의 파수복원기법 제안 및 적용

본 연구에서 제안한 파수복원기법은 위상각의 굴절로 인한 왜곡된 파수를 일정한 범위로 복원하여 수정된 파수를 가지고 수정된 위상속도를 계산 하는 것이 요점이다. CSW 실험의 특징은 진동기(Vibrator)를 이용한 일정한 주파수의 정현파를 구현하여, 가진 신호에 대한 위상각 정보를 이용하여 위상속도를 결정하게 된다. 따라서 감진기가 가진 원에서 멀어질수록 신호가 늦게 도착하여 위상각이 증가하게 되는데, 위상각이 180°를 초과하는 경우 수치적 불안정으로 인하여 위상각이 왜곡이 발생하게 된다. 그러므로 제안한 파수복원기법(Wave-Number restoration technique)을 적용함으로써 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 파수복원기법은 왜곡된 파수를 일정한 범위로 복원한 후, 복원된 파수를 통해 위상속도를 다시 계산 방법이다. 예를 들어 CSW 실험에서 그림1.처럼 가진 원에서 1, 2, 3, 4m 떨어진 4개의 감진기에서 측정된 신호로부터 위상속도를 계산한다. 그리고 식(6)을 통해 각 주파수에 대한 파수를 계산하고 f-k결과를 다음 그림2.처럼 도시 할 수 있다.

식(6)

$$k = \frac{2\pi f}{v_{ph}}$$

여기서,  $k$ 는 파수(Wave-Number)이고,  $f$ 는 주파수(Frequency)이다.

그림2(a)를 살펴보면 f-k 관계곡선이 소규모 그룹을 포함하여 4개의 그룹으로 나누어진 것을 알 수 있다. 그리고 연계성이 없는 소규모 그룹을 제외하고 최종적으로 남은 2개의 그룹의 연계성을 확인한 그림이 그림2(b)이다.

그림2(b)에서 알 수 있듯이 두 그룹간의 파수차이:  $\frac{2\pi}{d}$  인 것을 알 수 있다. 앞서 말했듯이 위상각이 180도를 초과하는 경우에 식(7)와 식(8)을 통해 파수가  $\frac{2\pi}{d}$  차이 나는 것을 확인할 수 있다.

$$\omega = vk \quad \text{또는} \quad 2\pi f = f \frac{2\pi d}{\phi} k \quad \text{식(7)}$$

$$k = -\frac{\phi}{d} = -\frac{2\pi}{d} \quad \text{식(8)}$$

이렇게 두 그룹의 파수가  $\frac{2\pi}{d}$  차이 나는 것을 식(9)을 통해 그림2(c)와 같이 파수를 복원하고, 이 파수를 복원한 결과를 가지고 식(10)을 이용해 위상속도를 구하면 그림2(d)와 같이 수정된 위상속도를 구할 수 있다.

$$k = \tilde{k} + \frac{2\pi}{d} \quad \text{식(9)}$$

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad \text{식(10)}$$

식(9)에서  $\tilde{k}$ 는 왜곡된 파수이고,  $k$ 는 파수복원기법에 의해 수정된 파수이다.

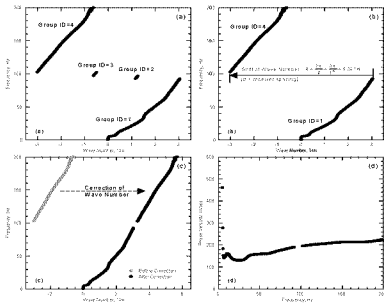


그림 2. CSW산형의 파수복원기법 적용

### 3.2 수치실험 및 결과에 대한 파수복원기법의 적용

#### (1) 수치실험

수치실험 사용되는 모델로는 김포공항 주변 Site 노반에 대한 물성을 가지고 Fit7(Joh, 2003) 프로그램을 사용하여 수행하였다. 김포공항 주변 Site는 주변 농도를 포함한 Site이기 때문에 얇은 층에서의 전단파속도가 크게 나타나는 것을 알 수 있고, 깊이 17m부근에서 베드라이가 발견되어 포아송비, Mass Density가 변하는 걸 알 수 있다. CSW실험에 사용한 주파수는 0~200Hz 이고, 0.3914 Hz 간격으로 모두 512개 주파수의 정현파를 가진 소스로 사용하였다. 그리고 512개의 정현파에 대한 노반응답은 최종적으로 취합하여 시계열 변위곡선으로 나타냈다. 표면파의 감지하기 위한 감진기는 1m 간격으로 256개를 설치하였고, 감진기 4개씩 1set로 CSW실험 자료로 사용하였다.

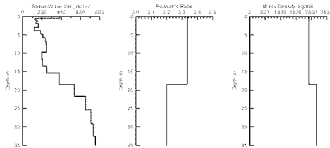


그림3. 수치실험에 사용된 노반의 전단파 속도, 질량, 포아송 비 주상도(김포공항 주변)

#### (3) 수치실험결과에 파수복원기법 적용

수치 실험 모델에 사용된 김포공항 주변 Site에 대한 결과는 감진기 간 거리를 1, 2, 3, 4m를 사용하였고, 파수복원 기법을 적용한 각 감진기 별 f-k 관계곡선과 위상속도, 그리고 위상각 전개법으로 구한 평균 위상속도를 다음 그림에 도시하였다. 위상각 전개법의 적용시 SASW기법에서 고려되는 위상각 보정(masking)은 적용하지 않았다. 김포공항 주변 Site 경우 4m의 감진기간 간격에 해당되는 위상각 전개법 속도는 CSW 속도와 차이가 발생 하고 있다. masking을 적용하지 않고 구한 위상속도의 가이드라인으로 활용할 수 있기 때문에, masking을 하지 않은 위상속도는 큰 의미가 있다 할 수 있다. 그리고 시화호 주변 Site의 경우 위상각 전개법 속도와 CSW속도가 차이가 없었다. 이것은 CSW 기법의 장점으로 부각 될 수 있는 가능성을 가지고 있는 요소로써 얇은 층의 경우 masking 없이 CSW실험으로 간단히 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

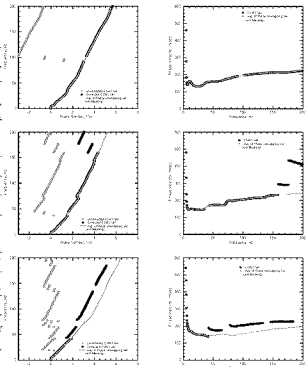
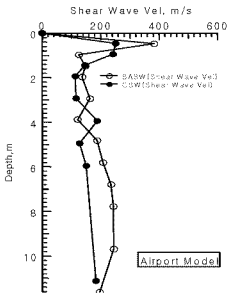


그림5. 김포공항 주변 Site에 대한 CSW 수치실험에 파수복원 기법을 적용한 f-k 관계곡선과 위상속도

#### 4. SASW실험과 CSW실험 결과 비교

본 연구에서 기존의 CSW기법이 가지고 있던 내재적인 문제점을 보완하고 보다 정확한 결과를 얻기 위해서 파수복원기법을 제안 하였다. 이는 파수복원기법을 적용한 CSW 위상속도와 SASW 실험으로 구한 위상속도를 가지고 역산해석을 하여 결과를 비교하였다. 아래 그림은 김포 공항 Site에서 얻은 CSW결과와 SASW결과를 가지고 역산 해석을 한 결과이다. 비교 결과를 살펴보면 전반적으로 역산 해석 결과가 잘 일치하지 않는 걸 알 수 있다. 하지만 CSW 실험의 특성에서 알 수 있듯이 얇은 층에서만 신뢰성을 확보 할 수 있으므로, 본 역산 해석 결과를 살펴보면 얇은 층에서 SASW 역산해석 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러므로 본 연구에서 제안한 CSW 실험의 파수복원기법의 적용은 어느 정도 신뢰성이 있다고 할 수 있다.



#### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 CSW기법의 부정확한 자료 해석과정에서 보다 정확하고, 신뢰성 있는 자료 해석을 위해 파수복원 기법을 제안하여 CSW 실험으로부터 얻을 수 있는 위상속도 분산곡선을 보다 신뢰성 있게 평가하기 위한 기법으로 기존의 CSW기법을 제정하는 계기가 되었다. CSW기법에서 파수복원 기법의 적용함으로써 모드 전환이 발생하는 표면파에 대해 위상속도를 구함에 있어서 특별한 전문가적 경험이 없어도 위상속도를 신뢰성 있게 평가 할 수 있는 점이 CSW기법의 숨은 장점이자, 본 연구에서 얻을 수 있었던 성과라 할 수 있다. 그리고 CSW 실험의 위상속도 분산곡선과 SASW실험으로 구한 위상속도 분산곡선의 비교를 통해 CSW 실험으로 획득한 위상속도 분산곡선으로부터 전단파 속도 주상도를 획득하기 위한 역산 해석을 수행하기 위한 지료를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 CSW역산해석 결과를 살펴보면 SASW 결과와 정확히 일치하는 하지 않았지만, 얇은 층에서 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러므로 어느 정도 신뢰성을 확보 했다고 할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Joh, S. H. (1996). *Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
2. Joh, S. H. (2002). WinSASW 2.0.3, Software of Data Reduction and Analysis for the SASW Measurements, Chung-Ang University.
3. Matthews, M.C., Hope, V.S. and Cayton, C.R.J. (1996) "The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles." Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng 119, April, 84-95.
4. Menzies, B. and Matthews, M. (1996). "The Continuous Surface-Wave System: A Modern Technique for Site Investigation." Special Lecture: Indian Geotechnical Conference, Madras.