

## 표면파 시험을 위한 향상된 위상각 스펙트럼 결정방법의 개발

### Development of advanced phase spectrum for surface wave method

박형춘<sup>1)</sup>, Hyung-Choon Park, 조성은<sup>2)</sup>, Seung-Eun Joh

<sup>1)</sup>충남대학교 토목공학과, Assistant Professor, Dep. of Civil Eng., Chungnam National University

<sup>2)</sup>한국수자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment,  
Korea Water Resources Corporation

**SYNOPSIS** : The dispersive phase velocity of a wave propagating through a system is an important parameter and carries valuable information in non-destructive tests related to multilayered systems such as a soil site. The dispersive phase velocity of a wave can be determined using the phase spectrum, which is easily evaluated through the cross power spectrum. However, the phase spectrum as determined using the cross power spectrum is sensitive to background noise which always exists in the field. This causes difficulties in the determination of the dispersive phase velocities. In this paper, a new method to evaluate the phase spectrum using the harmonic wavelet transform is proposed. The proposed method can successfully remove background noise effects. To evaluate the validity of the proposed method, numerical simulations of multi-layered systems were performed. Phase spectrums by the proposed method were found to be in good agreement with the actual phase spectrums under conditions characterized by heavy background noise. This shows the potential of the proposed method.

**Key words** : 표면파 시험, 위상 스펙트럼, 하모닉 웨이브릿 변환, 분산곡선

## 1. 서론

공학적 물성치인 저변형률에서의 전단탄성계수의 결정은 다양한 토목분야에서 매우 중요하다. 저변형률에서의 전단탄성계수는 현장 표면파 시험을 통하여 결정되는 전단파 속도 주상도를 사용하여 결정할 수 있다. 표면파 시험은 현장시험, 대상지반의 실험분산곡선의 결정, 그리고 역산을 통한 대상지반의 전단파 속도주상도의 결정으로 구성된다. 다양한 표면파 시험법들이 개발되어 사용되고 있다. 이러한 표면파 기법사이의 차이점은 실험분산곡선을 어떤 데이터 해석기법을 사용하여 결정하는냐에 기인한다.

SASW시험(Nazarian and Stokoe 1984)은 대표적인 표면파 시험법으로 매우 성공적으로 현장에 적용되어 왔다. SASW시험은 분산곡선은 결정하기 위한 데이터 해석기법으로 푸리에 변환에 의해 결정되는 크로스 파워 스펙트럼의 위상정보(위상 스펙트럼)을 사용한다. 현장에는 감지기에서 계측되는 신호를 손상시키는 다양한 배경잡음이 존재하며, 푸리에 변환은 이러한 배경잡음(noise)에 민감하여, 경우에 따라 신뢰성 있는 분산곡선을 결정하기 어려운 경우가 존재한다. 이러한 문제점은 가진원에 의해 발생하는 에너지가 배경잡음의 에너지에 비하여 상대적으로 작을때 발생한다. 이러한 현장 잡음에 의한 문제점을 해결하기 위하여 vibrosize와 같은 높은 에너지를 발생시킬 수 있는 가진원이 개발되었다. 이러한 실험장비의 개선을 통해 높은 수준의 배경잡음이 존재하는 경우에서도 신뢰할 수 있는 분산곡선을 결정할 수 있으나, 이런 장비의 사용은 비용 및 시험시간을 증대시키며, 시험의 편의성을 감소시킨다.

본 논문에서는 이러한 고가의 장비없이 배경잡음의 문제를 해결하고자 새로운 데이터 해석기법을 제안하였다. 제안된 방법은 시간-주파수 변환의 한 종류인 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 위상 스펙트

법을 결정한다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 수치모의 실험을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 표면파 기법을 위한 향상된 위상각 스펙트럼 결정방법

### 2.1 위상각 스펙트럼을 이용한 분산곡선의 결정

2채널 표면파 시험인 SASW시험은 두 개의 감지기에서 측정된 신호사이의 주파수별 위상 지체시간을 이용하여 다음과 같이 간단하게 주파수별 위상속도(분산곡선)를 결정한다.

$$V(f) = D/t(f) \quad (1)$$

여기서 D는 감지기 사이의 거리이다. t(f)는 두 감지기 사이의 위상지체 시간으로 다음 수식을 통해 결정된다.

$$t(f) = \delta(f)/2\pi f \quad (2)$$

여기서  $\delta(f)$ 는 두 감지기 사이의 f Hz 성분의 실제 위상차이다. 따라서, 두 감지기 사이의 신뢰할 수 있는 주파수별 위상차(위상 스펙트럼)를 결정하는 것이 표면파시험을 위한 분산곡선 결정에 있어 매우 중요하다.

### 2.2 하모닉 웨이브릿을 사용한 위상각 스펙트럼의 결정 : HW-Phase spectrum

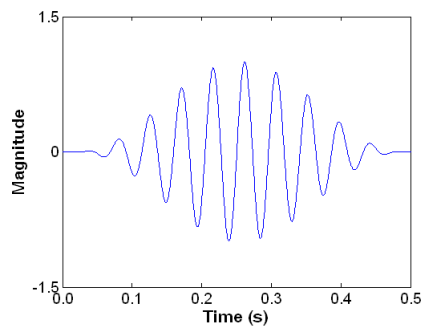
표면파시험에서 가진원에 의해 발생하여 감지기에서 계측되는 신호는 다양한 주파수 성분의 합이다. 계측된 신호를 구성하는 각각의 주파수 성분은 시간영역에서 다음과 같은 진폭 변조된 형태를 가진다 (그림 1(a)).

$$s_f^1(t) = y_f^1(t) \sin[\phi_f^1(t)] = y_f^1(t) \sin[2\pi ft + \theta^1] \quad (3)$$

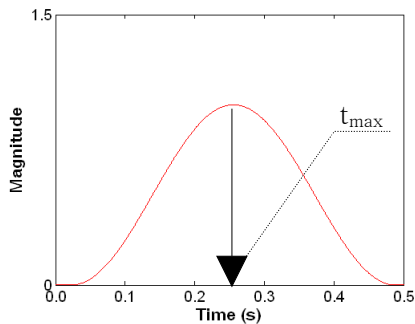
여기서,  $s_f(t)$ 는 시간영역에서의 f Hz 주파수 성분이다.  $y_f(t)$ 와  $\phi_f(t)$ 는  $s_f(t)$ 의 시간에 따른 윤곽선 함수(또는 크기 함수)와 위상 함수로서, 그림 1(b)와 (c)에 보여진 바와 같이 시간에 따라 그 값이 변한다. 그림 1(c)를 보면 시간에 따른 시간-위상함수는  $-\pi$ 와  $\pi$ 사이에서 위치하며, 접힌 형태의 선형 함수라는 것을 알 수 있다. 이때 시간-위상함수의 기울기는 순간 주파수로서 그 크기는 개별주파수 성분의 각주파수(angular frequency :  $2\pi f$ )가 된다. 따라서 만일 임의의 시간에 순간 위상값을 알고 있다면, 이 위상값으로부터 전체 시간-위상함수  $\phi_f(t)$ 를 복원할 수 있다. 만일 신호처리에 사용되는 시간영역신호가 현장에 항상 존재하는 배경잡음에 의해 손상되어 있는 경우, 시간-위상함수 역시 배경잡음에 의해 손상된다. 시간-위상함수의 손상 정도는 시간위치에 따라 다르며, 신호의 크기가 최대가 되는 시간위치(그림 1(b)의  $t_{\max}$ )에서 신호의 손상이 최소이며, 잡음에 의한 신호의 위상정보 왜곡도 최소가 된다. 따라서  $t_{\max}$ 에서 얻어진 순간 위상값으로부터 복원된 시간-위상 함수가 잡음에 의한 손상정도가 가장 작음을 알 수 있다. 따라서 감지기 1과 2에서 얻어진 f Hz 주파수 성분의 크기(에너지)가 최대가 되는  $t_{\max}^1$ 과  $t_{\max}^2$ 에서 얻어진 순간 위상값  $\phi_f^1(t_{\max}^1)$ 와  $\phi_f^2(t_{\max}^2)$ 을 이용하여 복원된 시간-위상함수  $\phi_{\text{Recover}, f}^1(t)$ 와  $\phi_{\text{Recover}, f}^2(t)$ 를 사용하여 f Hz 주파수 성분의 위상차  $\phi_{\text{diff}, f}(t)$ 를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_d(t) &= \phi_f^2(t) - \phi_f^1(t) \\ \phi_{diff,f}(t) &= \phi_d(t) && \text{when } |\phi_d(t)| \leq \pi \\ &= \phi_d(t) - 2\pi \times \text{sign}(\phi_d(t)) && \text{when } |\phi_d(t)| > \pi \end{aligned} \quad (4)$$

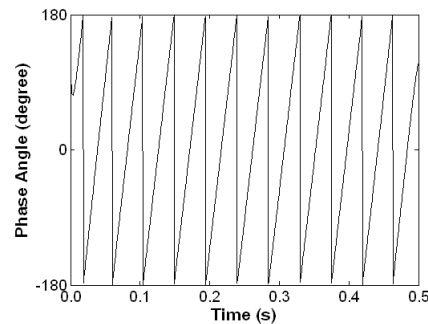
결정된 위상차에서 현장 배경잡음의 영향은 효과적으로 제거된다. 이러한 과정을 전체 주파수 대역에서 수행하여 위상 스펙트럼을 결정한다. 감지기에서 얻어진 신호의 주파수별 분해 및 각 주파수 신호의 시간에 따른 순간 크기 및 위상은 하모닉 웨이브릿 변환(Newland 1998)을 통해 얻어지는 하모닉 웨이브릿 계수의 크기 정보와 위상정보를 사용하여 결정한다(Park and Kim 2001). 일단 하모닉 웨이브릿 위상 스펙트럼이 결정되면, 이 위상 스펙트럼을 이용하여 분산곡선을 결정한다.



(a) 진폭변조 신호



(b) 진폭변조 신호의 신호-윤곽선(크기) 함수



(c) 진폭변조 신호의 시간-위상 함수

그림 1. 진폭변조 신호의 시간-크기, 시간-위상 함수

### 3. 검증

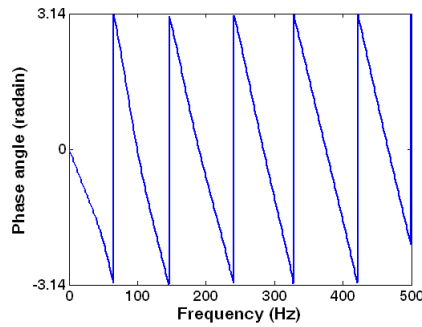
#### 3.1 수치모의 실험

제안된 방법을 검증하기 위하여 2가지 지반조건에 대하여 수치실험을 수행하였다. 수치실험은 동적강성행렬 방법에 기반을 둔 FIT7 프로그램(Joh 1996)을 사용하여 수행되었다. 수치모의 실험을 위한 수치모형 지반은 3개의 층으로 구성된 반 무한체로 주상도 및 물성치는 표 1에 주어져 있다. 2개의 지반 조건은 정상적인 주상도(regular profile : case 1)과 비정상적인 주상도(irregular profile : case 2)로 구성된다. 정상적인 주상도에서는 매질의 강성이 깊이가 증가함에 따라 점점 증가하나, 비정상적인 주상도에서는 강성의 증가가 불규칙적이다. 정상적인 주상도에서는 표면파의 기본 전파모드가 전체 주파수

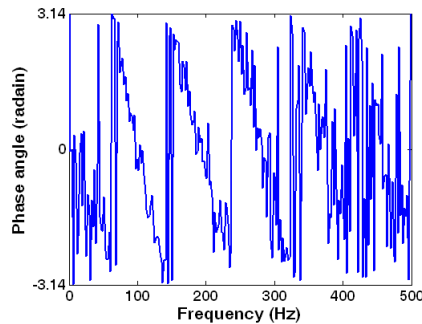
대역에서 지배적이거나, 비정상적인 주상도에서는 주파수에 따라 하나 이상의 표면파 전파모드가 표면파의 전파를 지배한다. 신호의 계측은 가진원으로부터 2m와 4m 떨어진 위치에서 이루어졌다.

표 1. 수치 모의 실험을 위한 지반 주상도

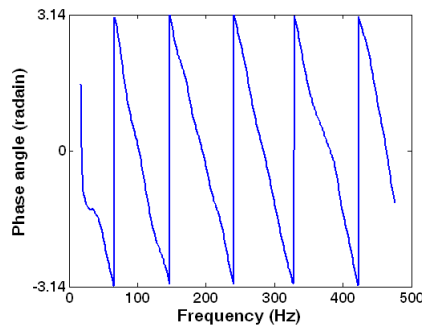
층번호	두께(m)	Vs(m/s)		밀도(t/m <sup>3</sup> )	포아송비
		case 1	case 2		
1	1	200	400	1.9	0.333
2	1	300	300		
3	-	400	200		



(a) 손상되지 않은 신호와 크로스파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼



(b) 잡음에 의해 손상된 신호와 크로스파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼

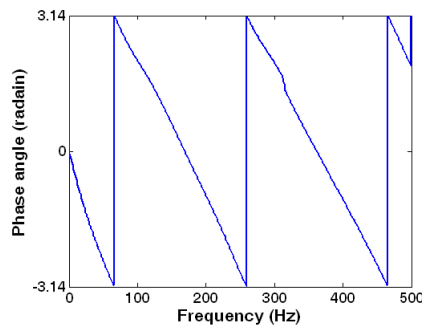


(c) 잡음에 의해 손상된 신호와 제안된 방법을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼

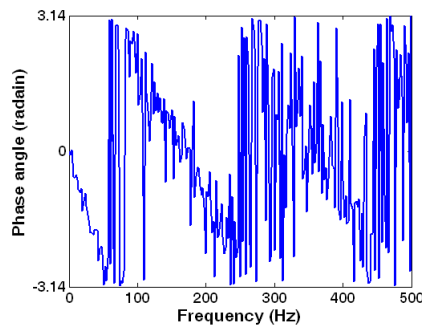
그림 2. 손상되지 않은 신호와 잡음에 의해 손상된 신호를 사용하여 크로스 파워 스펙트럼과 제안된 방법에 의해 결정된 위상 스펙트럼(Case 1)

### 3.2 결과

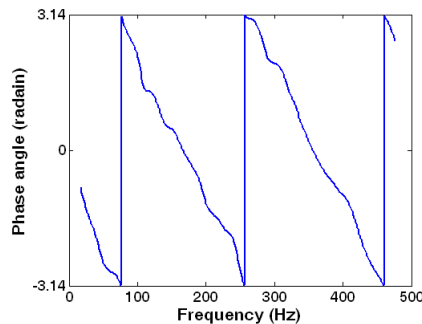
잡음조건 하에서의 제안된 방법의 타당성을 알아보기 위하여 계측된 신호들에 잡음(random white noise)을 더하였다. 그림 2는 case 1의 결과이다. 그림 2(a)는 잡음이 더해지지 않은 신호들과 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼으로 정확한 위상 스펙트럼이다. 그림 2(b)는 잡음에 의해 손상된 신호들과 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼이며, 그림 2(c)는 잡음에 의해 손상된 신호들과 제안된 방법을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼이다. 그림 2(a)와 (b)를 비교하여 보면, 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼이 전체 주파수 대역에서 심각하게 손상되어 있음을 볼 수 있다. 이에 반하여 그림 2(a)와 (c)를 비교하여 보면, 전체 주파수 대역에서 실제 위상 스펙트럼과 거의 같은 결과를 보여준다. 이로부터 제안된 방법이 심각한 수준의 잡음에 의해 손상된 신호에 대해서도 잡음의 영향을 효과적으로 제거하고 신뢰할 수 있는 위상 스펙트럼을 결정할 수 있다는 것을 알 수 있다.



(a) 손상되지 않은 신호와 크로스파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼



(b) 잡음에 의해 손상된 신호와 크로스파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼



(c) 잡음에 의해 손상된 신호와 제안된 방법을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼

그림 3. 손상되지 않은 신호와 잡음에 의해 손상된 신호를 사용하여 크로스 파워 스펙트럼과 제안된 방법에 의해 결정된 위상 스펙트럼(Case 2)

그림 3은 case 2의 결과로서 그림 3(a)는 잡음이 더해지지 않은 신호들과 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼으로 정확한 위상 스펙트럼이다. 그림 3(b)는 잡음에 의해 손상된 신호들과 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼이며, 그림 3(c)는 잡음에 의해 손상된 신호들과 제안된 방법을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼이다. 그림 3(a)와 (b) 그리고 그림 3(a)와 (c)의 비교를 통하여 크로스 파워 스펙트럼은 잡음에 의해 쉽게 손상되는데 반하여, 제안된 방법은 심한 잡음 환경 아래에서도 매우 신뢰할 수 있는 위상 스펙트럼을 결정함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 하모닉 웨이브릿 변환을 사용한 새로운 위상 스펙트럼 결정방법을 제안하였다. 위상 스펙트럼은 표면파 기법 적용시 분산곡선 결정에 사용된다. 기존의 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼은 현장에 항상 존재하는 잡음(noise)에 쉽게 손상되어 경우에 따라 신뢰할 수 없는 결과를 준다. 이에 반하여 제안된 방법은 심각한 잡음 환경 아래에서도 잡음의 영향을 효과적으로 제거하고 신뢰성 높은 위상 스펙트럼을 결정한다. 제안된 방법의 타당성을 알아보기 위하여 2개의 지반조건에 대해 수치 모의 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 제안된 방법의 신뢰성을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Nazarian S, Stokoe KH, (1984),"In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave.", Proc. 8th Conf On Earthquake Eng.S.Francisco, p31-38.
2. Newland DE, (1998), "Time-frequency and time-scale signal analysis by harmonic wavelet", Signal analysis and prediction, chap.1, Birkhauser, 502p.
3. Joh SH, (1996)," Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements.", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
4. Park, HC., Kim, DS., (2001), "Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform", *NDT&E Int*, **34**, 457-467.