

하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 표면파 시험을 위한 향상된 데이터 해석기법의 개발

Development of Advanced Data Analysis Method Using Harmonic Wavelet Transform for Surface Wave Method

박 형 춘¹ Park, Hyung-Choon

조 성 은² Cho, Sung-Eun

Abstract

The dispersive phase velocity of a wave propagating through multilayered systems such as a soil site is an important parameter and carries valuable information in non-destructive site characterization tests. 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 determined using the cross power spectrum is easily distorted by background noise which always exists in the field. This causes distortion of measured signal and 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 and the phase spectrum by the proposed method is applied to the determination of dispersion curve. 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 and dispersion curves determined by the proposed method were found to be in good agreement with the actual phase spectrums and dispersion curves biased by heavy background noise. The comparison manifests the proposed method to be a very useful tool to overcome noise effects.

요 지

지반과 같은 다층으로 구성된 시스템을 통과하여 전파되는 파의 분산특성은 표면파 지반조사에서 매우 중요한 요소이다. 이러한 표면파의 분산곡선(주파수-위상속도 곡선)은 크로스 파워 스펙트럼에 의해 결정되는 위상 스펙트럼을 사용하여 쉽게 결정할 수 있다. 그러나 크로스 파워 스펙트럼에 의해 결정되는 분산곡선은 현장에 항상 존재하는 잡음에 의해 쉽게 손상되며, 손상된 분산곡선을 사용하는 경우 잘못된 조사 결과를 도출하기도 한다. 본 논문에서는 이러한 기존 방법의 문제점을 해결하고자 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 새로운 위상 스펙트럼 결정방법을 제안하고 이를 분산곡선을 결정에 적용하였다. 제안된 방법은 효과적으로 현장에 존재하는 배경잡음의 효과를 제거할 수 있다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 지반을 모사한 다층구조에 대해 수치모의실험을 수행하였다. 수치모의실험을 통하여 제안된 방법이 심한 잡음조건하에서도 효과적으로 신뢰할 수 있는 위상 스펙트럼과 분산곡선을 결정할 수 있음을 볼 수 있었으며, 이를 통하여 제안된 방법의 타당성을 확인하였다.

Keywords : Dispersion curve, Harmonic wavelet transform, Phase difference, Phase spectrum

1 정회원, 충남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., ChungNam National Univ., civilman@cnu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Ph. D., Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

공학적 물성치인 저변형률에서의 전단탄성계수의 결정은 내진해석, 포장체 시스템의 거동해석등 다양한 토목분야에서 매우 중요한 요소이다. 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. 표면파 시험은 크게 2채널 시험과 다채널 시험으로 구분되며, 다양한 2채널 시험법과 다채널 시험법이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 이러한 표면파 기법 사이의 차이점은 실험분산곡선 결정시 어떤 데이터 해석기법을 사용하느냐에 주로 기인한다.

SASW시험(Nazarian과 Stokoe 1984, Stokoe 등 1994)은 대표적인 2채널 표면파 시험법으로 매우 성공적으로 현장에 적용되어 왔다. SASW시험은 분산곡선을 결정하기 위한 데이터 해석기법으로 푸리에 변환을 사용한다. 일반적으로 탐사현장에는 감지기에서 계측되는 신호를 손상시키는 다양한 배경잡음이 존재한다. 푸리에 변환은 이러한 배경잡음(noise)에 민감하며, 경우에 따라 신뢰성 있는 분산곡선을 결정하기 어렵다. 이러한 문제점은 가진원에 의해 발생한 에너지가 배경잡음의 에너지에 비하여 상대적으로 작을 때 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 심한 잡음조건하에서도 슬러지 햄머와 같은 간편한 시험장비를 사용한 표면파 시험에서 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있는 새로운 데이터 해석기법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 SASW기법과 달리 시간-주파수 변환의 한 종류인 하모닉 웨이브릿 변환(Newland 1998)을 사용한다. 본 논문에서는 데이터 해석에 사용된 하모닉 웨이브릿 변환에 대해 간단히 살펴보고, 하모닉 웨이브릿을 사용한 향상된 데이터 해석기법에 대해 논하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 수치모의 실험을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 표면파 기법을 위한 향상된 데이터 해석기법

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 D 는 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 실제 위상차이다. 따라서, 두 감지기 사이의 신뢰할 수 있는 주파수별 위상차를 결정하는 것이 SASW시험을 위한 분산곡선 결정에 있어 매우 중요하다. 이러한 주파수별 위상차는 고속 푸리에 변환(FFT)을 사용한 크로스 파워 스펙트럼의 위상 스펙트럼을 통하여 결정할 수 있다(Bendat과 Piersol 1991). 고속 푸리에 변환에 의한 크로스 파워 스펙트럼은 매우 간단하게 위상 스펙트럼을 결정할 수 있으나, 결정된 위상 스펙트럼은 배경잡음에 의해 쉽게 손상된다. 푸리에 변환을 사용한 위상 스펙트럼 결정시 배경잡음에 의해 발생하는 손상은 하모닉 웨이브릿을 이용한 시간-주파수 해석을 통해 효과적으로 제거할 수 있다.

2.1 하모닉 웨이브릿 변환

웨이브릿 해석은 기본적으로 상관관계(correlation)방법중의 하나이다. 웨이브릿 계수 $a(t)$ 는 주어진 신호 $s(t)$ 와 해석에 사용되는 웨이브릿 $w(t)$ 사이의 형태의 유사성을 평가하며, 이를 통하여 주어진 신호 $s(t)$ 의 구조에 대한 정보를 제공한다. Newland에 의해 개발된 하모닉 웨이브릿은 주파수 영역과 시간영역에서 다음과 같은 단순한 구조를 가진다(Newland 1998).

$$W_{m,n}(\omega) = \frac{1}{(n-m)2\pi} \text{ for } m2\pi \leq \omega < n2\pi$$

$$= 0 \quad \text{elsewhere}$$

$$w_{m,n}(t) = \frac{e^{jn2\pi t} - e^{jm2\pi t}}{j(n-m)2\pi t} \quad (3)$$

식 (3)에서 보여진 바와 같이 주파수 영역에서의 웨이

브릿 $W_{m,n}(\omega)$ 은 정의된 주파수대역에서만 일정한 실수 값을 가지며 그 외의 주파수에서는 영의 값을 가진다. 이러한 사실로부터 각각의 웨이브릿은 이상화된 대역 통과 필터(bandpass filter)와 관계 있음을 알 수 있다. 시간영역에서의 하모닉 웨이브릿은 주기특성을 가지며 국부적으로 존재한다.

박형춘과 김동수(2001)에 의하면 $W_{m,n}(\omega)$ 에 의해 결정되는 하모닉 웨이브릿 계수, $a_{m,n}(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a_{m,n}(t) = s_f(t) + \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s_f(t')}{t-t'} dt' = s_f(t) + jH[s_f(t)] = x(t)e^{j\theta_{m,n}(t)} \quad (4)$$

여기서 $s_f(t)$ 는 이상화된 대역통과 필터작업의 결과신호로서, 이때 필터의 통과대역은 $m2\pi \leq \omega < n2\pi$ 이다. H 는 힐버트(Hilbert)변환을 나타내며, $x(t) = \sqrt{(s_f(t))^2 + (H[s_f(t)])^2}$ 는 $a_{m,n}(t)$ 의 크기 함수이며, $\theta_{m,n}(t) = \tan^{-1}(H[s_f(t)]/s_f(t))$ 는 $a_{m,n}(t)$ 의 위상함수이다. 식 (4)로부터 $a_{m,n}(t)$ 의 실수부는 대역통과 필터작업의 결과신호이며, 허수부분은 실수부분의 힐버트 변환임을 알 수 있다. 즉 $a_{m,n}(t)$ 는 $s_f(t)$ 에 해당하는 해석적 신호(또는 Gabor의 복소 신호)임을 알 수 있다. 일반적인 대역통과 필터작업의 결과신호는 다음과 같은 진폭변조된 형태를 가진다.

$$s_f(t) = y(t) \cos \theta(t) \quad (5)$$

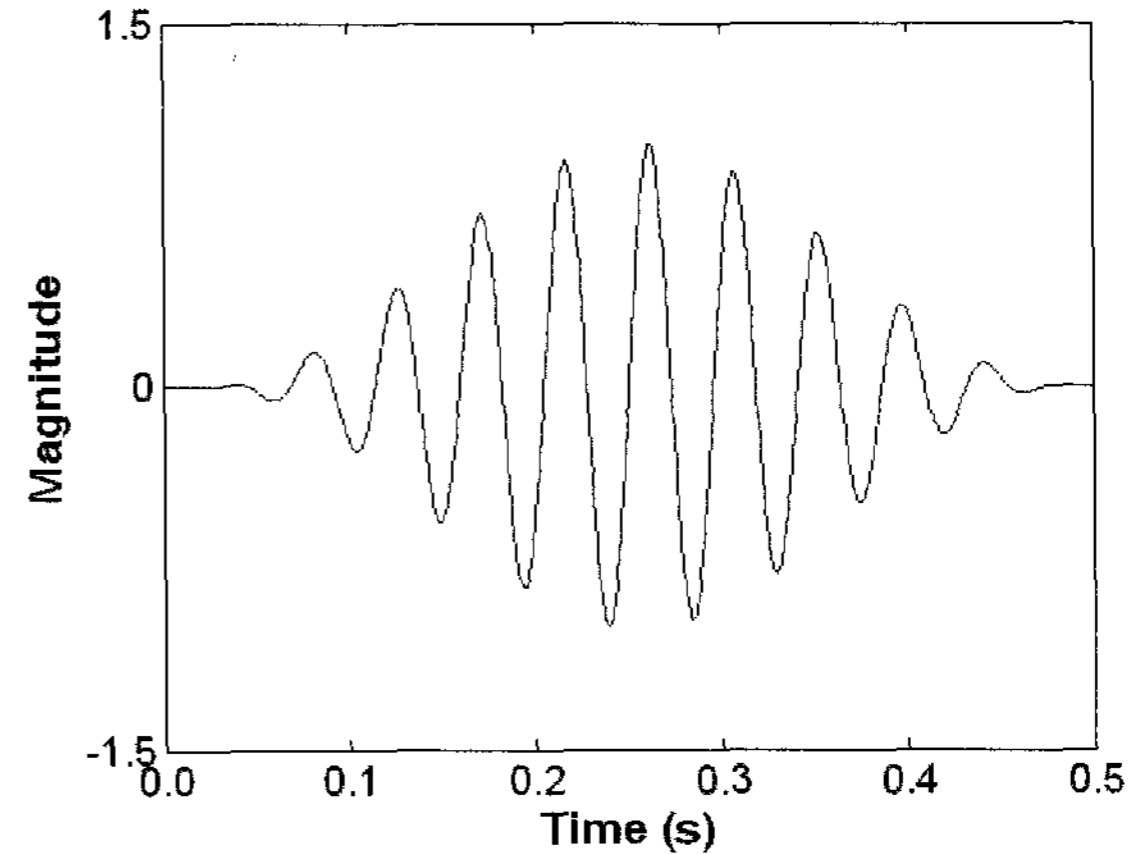
$s_f(t)$ 에 해당하는 해석적 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} a_{m,n}(t) &= s_f(t) + jH[s_f(t)] = y(t) \cos \theta(t) + jH[y(t) \cos \theta(t)] \\ &= y(t) \cos \theta(t) + jy(t)H[\cos \theta(t)] \\ &= y(t)e^{j\theta(t)} \end{aligned} \quad (6)$$

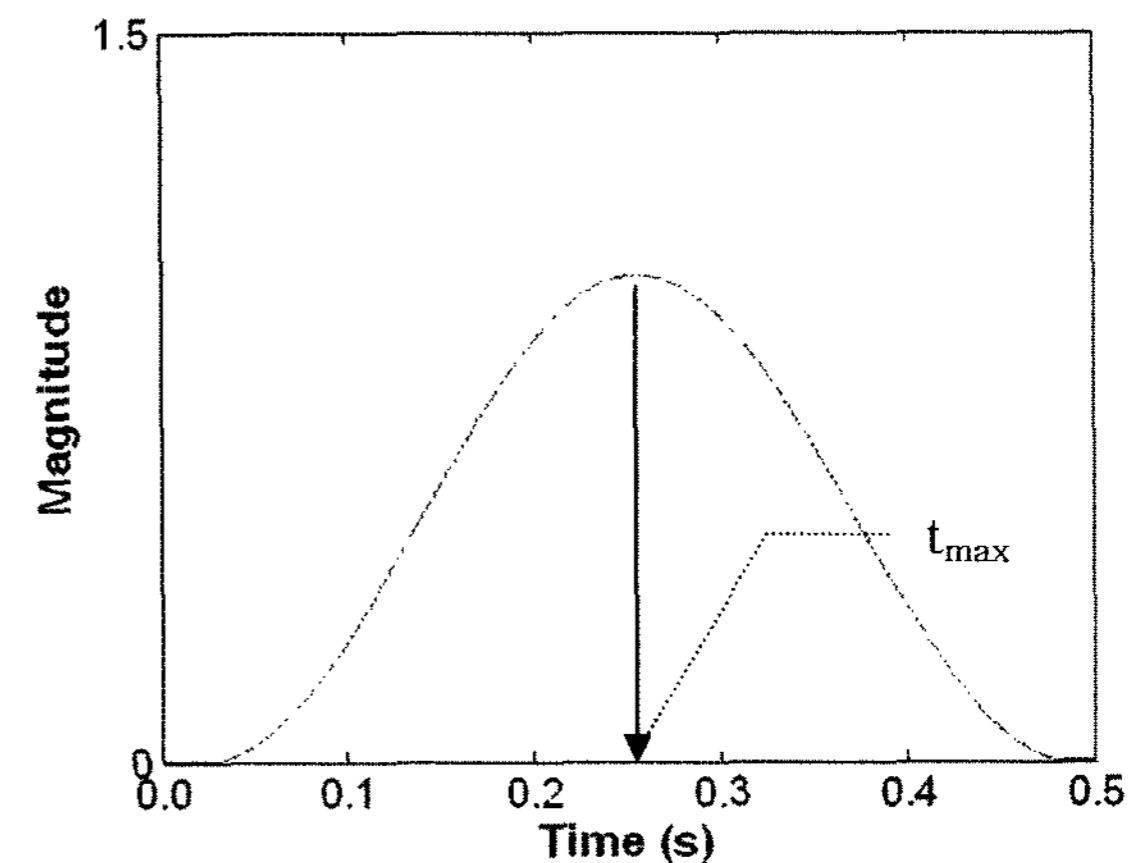
식 (4)와 (6)을 비교해보면, 하모닉 웨이브릿 계수의 크기는 $s_f(t)$ 의 시간에 대한 크기 변화를 나타내며, 하모닉 웨이브릿의 계수의 위상은 $s_f(t)$ 의 시간에 대한 순간 위상(Instantaneous phase)을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 하모닉 웨이브릿 계수의 크기와 위상정보로부터 각 주파수 성분의 시간에 따른 신호의 크기(또는 에너지)변화와 순간 위상값(또는 순간 주파수)의 변화를 결정할 수 있다.

2.2 하모닉 웨이브릿 변환을 사용한 위상각 스펙트럼의 결정 : HW-Phase spectrum

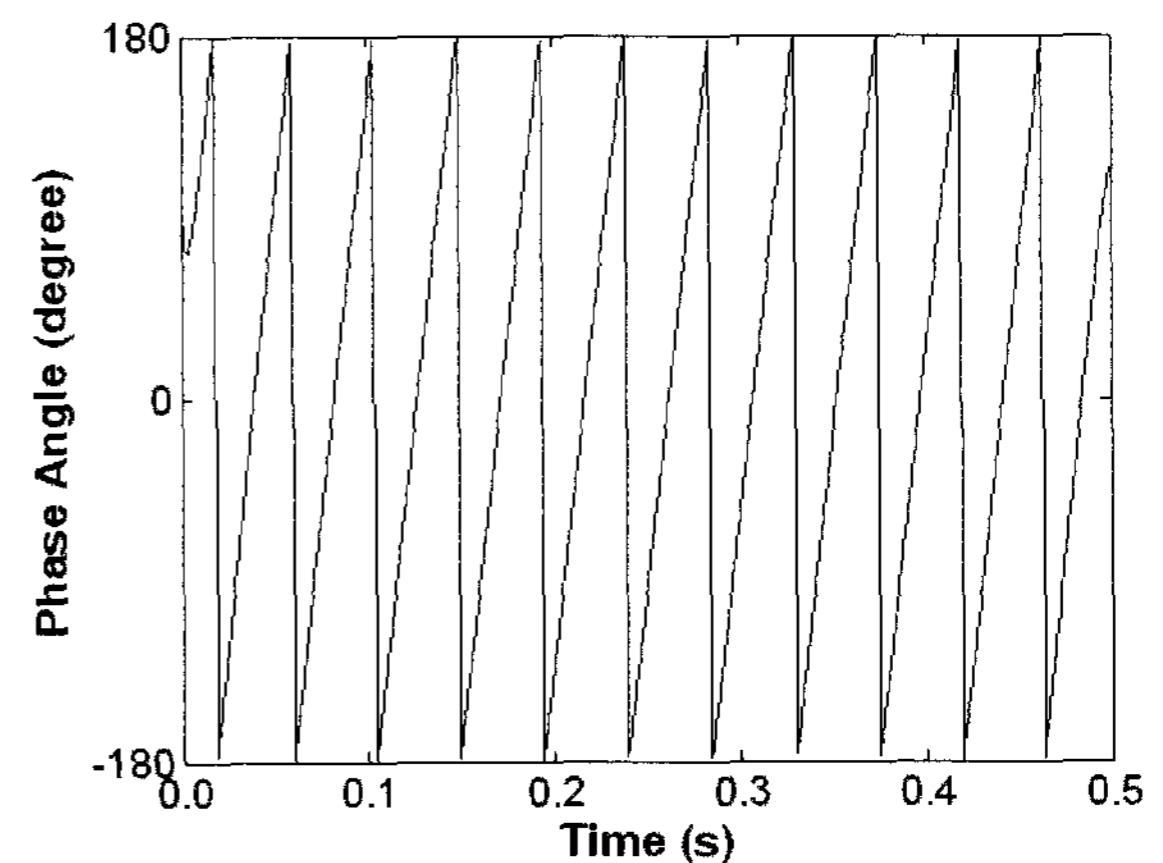
표면파시험에서 가진원에 의해 발생하여 각각의 감지기에서 계측되는 신호는 다양한 주파수 성분의 합이다. 계측된 신호를 구성하는 각각의 주파수 성분은 시간



(a) 단일 주파수 진폭변조신호



(b) 진폭변조신호의 윤곽선(크기)함수



(c) 진폭변조신호의 위상함수

그림 1. 단일주파수 진폭변조신호 및 진폭변조신호의 윤곽선(크기) 함수 및 위상함수

영역에서 그림 1(a)와 같은 진폭 변조된 형태를 가진다. 만일 감지기 1에서 측정되는 신호가 다음과 같은 진폭 변조 신호라면,

$$s_f^1(t) = y_f^1(t) \sin[\phi_f^1(t)] = y_f^1(t) \sin[2\pi ft + \theta^1] \quad (7)$$

지반을 통과하여 감지기 2에서 측정되는 신호 역시 같은 주파수를 가지는 다음과 같은 진폭변조 신호이다.

$$s_f^2(t) = y_f^2(t) \sin[\phi_f^2(t)] = y_f^2(t) \sin[2\pi ft + \theta^2] \quad (8)$$

여기서 θ 첨자는 감지기 번호를 나타낸다. $s_f(t)$ 는 시간 영역에서의 f Hz 주파수 성분이다. $y_f(t)$ 와 $\phi_f(t)$ 는 $s_f(t)$ 의 시간에 따른 유클리드 함수(또는 크기 함수)와 위상 함수로서, 그림 1(b)와 1(c)에 보여진 바와 같이 시간에 따라 그 값이 변한다. 그림 1(c)를 보면 시간에 따른 시간-위상함수 $\phi_f(t)$ 는 $-\pi$ 와 π 사이에 위치하며, 접힌 형태의 함수라는 것을 알 수 있다. 그림 1(a)와 같은 단일 주파수 성분의 순간주파수는 다음과 같이 정의된다.

$$2\pi f(t) = \frac{d\phi_f(t)}{dt} \quad (9)$$

즉 측정이 이루어지는 각각의 시간위치에서 순간 주파수는 시간-위상함수의 기울기가 된다. 그림 1(a)에 주어진 단일 주파수 신호의 경우 순간 주파수는 시간 영역 전체에 걸쳐 단일한 값을 가진다. 따라서 개별 주파수 성분의 위상함수는 일정한 기울기를 가지는 접힌 형태의 직선 함수가 되며, 이 직선 함수의 기울기 값은 개별 주파수 성분의 각주파수(angular frequency : $2\pi f$)가 된다. 따라서 만일 임의의 시간 s 에서 f Hz 성분의 순간 위상값을 알고 있다면, 이 위상값으로부터 전체 시간대역에서의 시간-위상함수 $\phi_f(t)$ 를 다음과 같은 수식을 이용하여 복원할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_f(t) &= 2\pi f \cdot (t - s) + \phi_{f, \text{measured at } s} \\ \phi_f(t) &= \phi_f(t) - (n+1) \cdot \pi \cdot \text{sign}(\phi_f(t)) \\ \text{when } n\pi &< |\phi_f(t)| \leq (n+2)\pi \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 s 는 임의의 측정 시간 위치이며, $\phi_{f, \text{measured at } s}$ 는 시간 s 에 측정된 f Hz 주파수 성분의 순간 위상값이다. $\text{Sign}(x)$ 는 x 가 0보다 크면 1의 값을 주고 0보다 작으면 -1의 값을 주는 함수이다. 일단 감지기 1과 2에서 f Hz

주파수 성분의 시간-위상함수 $\phi_f^1(t)$, $\phi_f^2(t)$ 가 결정되면, f Hz 주파수 성분의 감지기 1과 2 사이에서의 위상차 $\phi_{diff, f}(t)$ 는 다음과 같이 결정할 수 있다

$$\begin{aligned} \phi_d(t) &= \phi_f^2(t) - \phi_f^1(t) \\ \phi_{diff, f}(t) &= \phi_d(t) \quad \text{when } |\phi_d(t)| \leq \pi \\ &= \phi_d(t) - 2\pi \times \text{sign}(\phi_d(t)) \quad \text{when } |\phi_d(t)| > \pi \end{aligned} \quad (11)$$

이 위상차는 $2\pi f$ 를 기울기로 가지는 두개의 평행한 직선 함수 사이의 차이이기 때문에 신호가 존재하는 시간영역 전체에서 일정한 값을 가진다. 푸리에 변환은 시간영역 전체에 걸쳐 일정한 크기를 가지는 사인함수를 기저함수(global basis)로 사용하기 때문에 시간에 따른 주파수 성분의 크기나 위상의 변화를 결정할 수 없다. 단지 시간영역 전체에 걸친 개별 주파수 성분의 평균적인 크기와 위상값만을 결정할 수 있다. 따라서 일반적인 푸리에 변환에 기반을 둔 크로스 파워스펙트럼의 위상각 스펙트럼에서 얻어지는 f Hz 성분의 위상차는 이러한 시간에 따른 위상차 $\phi_{diff, f}(t)$ 의 전체 시간 대역에서의 평균값이며, 식 (11)에서 얻어지는 값과 동일한 값을 가진다.

만일 감지기에서 측정된 시간영역신호가 현장에 항상 존재하는 배경잡음에 의해 손상된 경우, 시간-위상함수 역시 배경잡음에 의해 손상된다. 시간-위상함수의 손상 정도는 시간위치에 따라 다르며, 각 시간 위치에서의 손상 정도는 순간 신호/잡음 비(instantaneous signal/noise ratio)에 의해 표현될 수 있다. 순간 신호/잡음비는 각 시간위치에서 신호의 순간 크기를 동일 시간위치에서의 잡음의 순간 크기로 나누어 결정한다. 실제 현장에서 측정된 신호를 실제 신호와 잡음으로 분해할 수 없기 때문에 순간 신호/잡음비를 결정할 수 없다. 그러나 측정신호를 구성하는 개별 주파수 성분들의 크기가 최대가 되는 시간위치(그림 1(b)의 t_{max})에서 주파수별 순간 신호/잡음비가 최대가 된다고 가정하는 것은 합리적이다. 즉 t_{max} 에서 신호의 손상이 최소이며, 잡음에 의한 신호의 위상정보 왜곡도 최소가 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 임의의 주파수 f Hz에서 시간영역 전체에 걸친 시간-위상함수는 임의의 시간 위치에서 결정된 위상값으로부터 복원될 수 있다. 즉 임의의 f Hz 주파수 성분의 위상값은 시간축상의 샘플링 갯수(시간축상에서 측정된 데이터의 개수)만큼 존재한다. 따라서 각각의 시간위치에서 결정된 순간 위상값들을 이용하여 시간축상 샘플링

갯수 만큼의 시간-위상 함수들을 복원할 수 있다. 복원된 시간-위상 함수들은 서로 동일하다. 그러나 만일 계측된 신호가 현장에 항상 존재하는 잡음(white noise)에 의해 손상된 경우, 순간 위상값들은 잡음에 의해 손상되게 되며, 이러한 손상된 순간 위상값들로부터 복원된 시간-위상 함수들은 잡음에 의한 손상 정도가 다 다르기 때문에 서로 동일하지 않다. 이러한 복원된 시간-위상 함수들 중 t_{max} 에서 얻어진 순간 위상값으로부터 복원된 시간-위상 함수가 잡음에 의한 손상 정도가 가장 작다. 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 $\phi_{Recover, f}^1(t)$ 와 $\phi_{Recover, f}^2(t)$ 를 사용하여 f Hz 주파수 성분의 위상차를 결정하면, 효과적으로 현장 배경잡음의 영향을 제거할 수 있으며 심한 잡음조건 하에서도 신뢰할 수 있는 위상차를 결정할 수 있다. 이러한 과정을 전체 주파수 대역에 적용하여 위상 스펙트럼을 결정하기 위해서는 각 주파수 성분의 시간에 따른 순간 크기와 순간위상을 결정할 수 있어야 한다. 일반적으로 위상각 스펙트럼을 결정하기 위해 사용되는 크로스 파워 스펙트럼은 푸리에 변환에 바탕을 두고 있다. 푸리에 변환은 시간에 따른 각 주파수 성분의 순간 크기 및 순간 위상의 변화를 결정할 수 없으며, 전체 시간 대역에 걸친 평균적인 의미의 크기 및 위상을 결정한다. 따라서 배경잡음이 존재하는 경우 이러한 배경잡음에 의한 신호의 손상을 피할 수 없다. 이에 반하여 하모닉 웨이브릿 변환의 경우 2.1장에서 본 바와 같이 계측된 신호를 각 주파수 성분들로 분해하고, 각 주파수 성분의 순간 크기 및 순간 위상의 변화를 매우 효과적으로 결정할 수 있다. 따라서 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 각 주파수 성분에 해당하는 최대크기 시간 t_{max} 를 결정할 수 있고, 이 시간에서의 위상값을 사용하여 배경잡음의 영향을 제거한 위상 스펙트럼을 결정할 수 있다. 이러한 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 SASW시험의 분산곡선 결정시 매우 중요한 위상각 스펙트럼을 결정하는 과정을 다음과 같이 제안하였다.

- (1) 감지기 1과 2에서 얻어진 신호에 대해 하모닉 웨이브릿 변환을 수행한다(그림 2).
- (2) 임의의 각주파수 $(m+n)\pi$ 에 대하여 다음과 같은 과정을 수행한다. 이때 $(m+n)\pi$ 는 하모닉 웨이브릿 $W_{m,n}(\omega)$ 의 중심 주파수이다.

- (2-1) 감지기 1과 2에서 최대 크기 시간 위치 t_{max}^1 와 t_{max}^2 를 결정한다. 최대 크기 시간 위치는 $a_{m,n}^1$ 과 $a_{m,n}^2$ 의 크기가 최대가 되는 시간이다(그림 3).
- (2-2) $a_{m,n}^1$ 과 $a_{m,n}^2$ 의 위상 정보로부터 t_{max}^1 와 t_{max}^2 에 해당하는 위상값 Φ^1 와 Φ^2 를 각각 결정한다.
- (2-3) Φ^2 를 이용하여 감지기 2에서의 복원된 접힌 형태의 시간-위상함수 $\phi_{Recover}^2(t)$ 를 다음과 같이 결정한다(그림 4(a)).

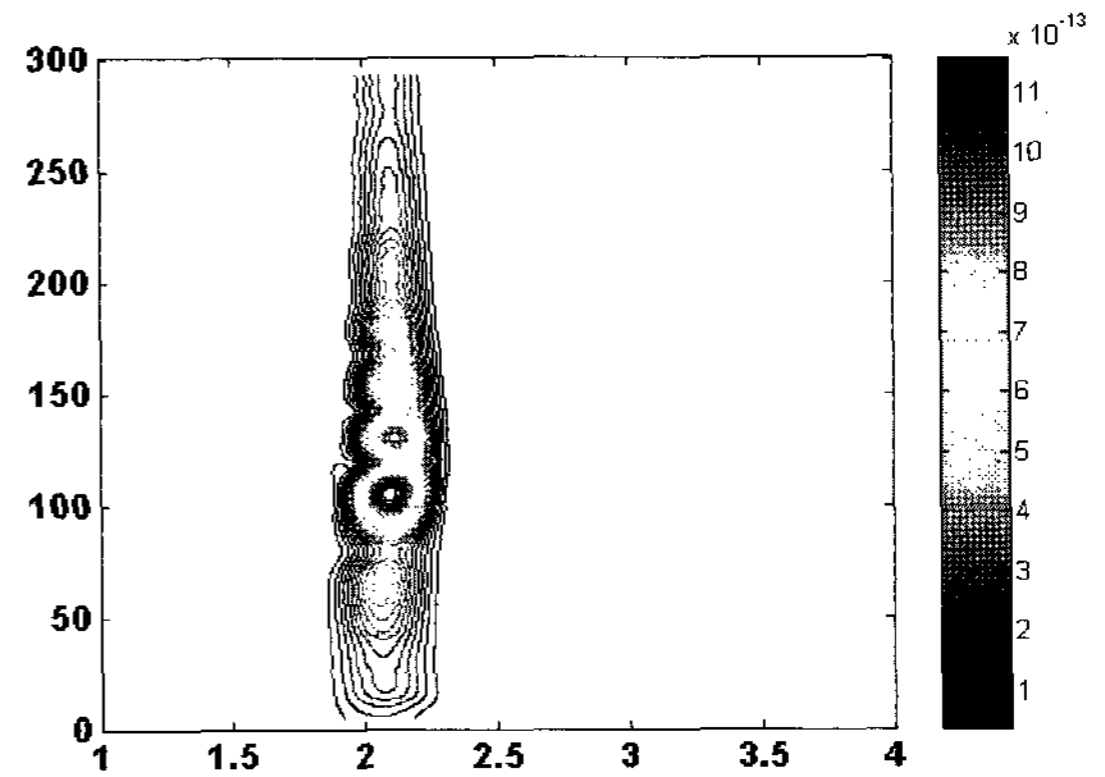
$$\varphi(t) = (m+n)\pi \cdot (t - t_{max}^2) + \Phi^2$$

$$\phi_{Recover}^2(t) = \varphi(t) - (k+1) \cdot \pi \cdot \text{sign}(\varphi(t))$$

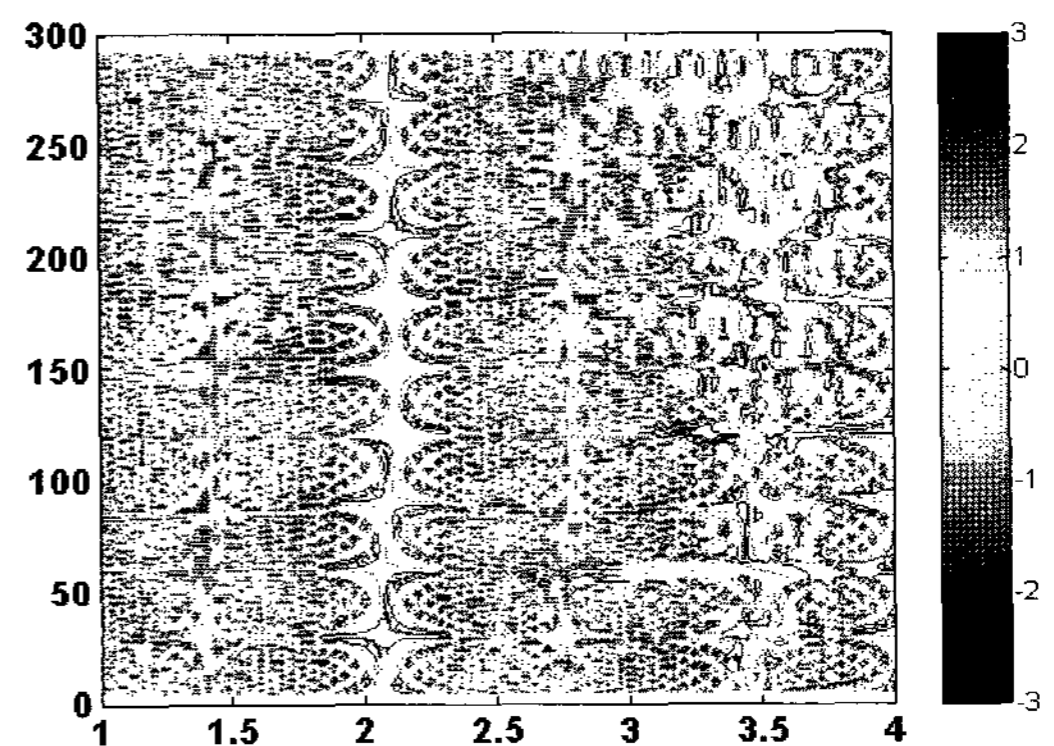
$$\text{when } k\pi < |\varphi(t)| \leq (k+2)\pi \quad (12)$$

- (2-4) 각주파수 $(m+n)\pi$ 에 해당하는 위상차 $\phi_{diff}(t)$ 를 감지기 2에서 복원된 시간-위상함수 $\phi_{Recover}^2(t)$ 와 감지기 1에서의 위상값 Φ^1 를 사용하여 다음과 같이 결정한다(그림 4(b)).

$$\phi_d = \phi_{Recover}^2(t_{max}^1) - \Phi^1$$

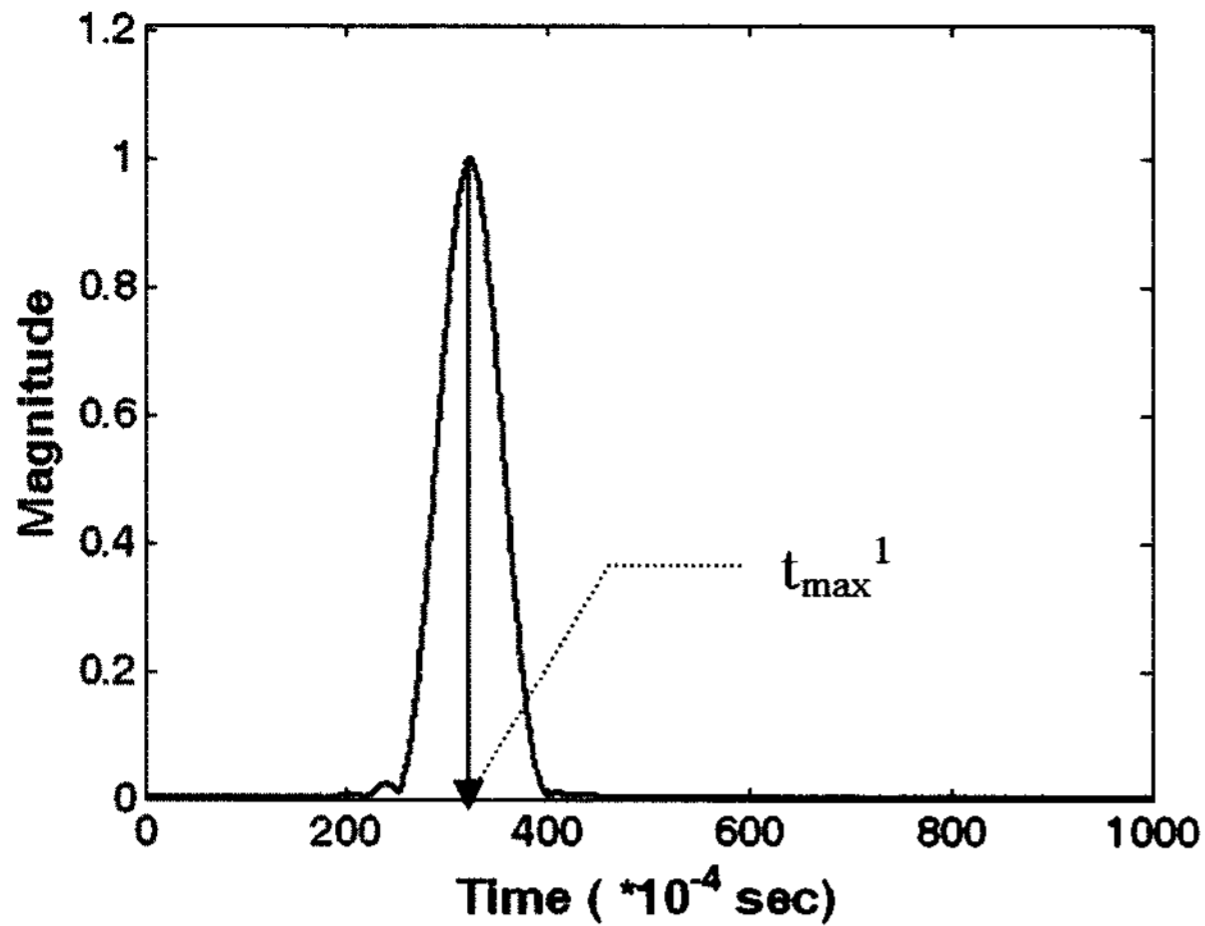


(a) 크기 시간-주파수 지도

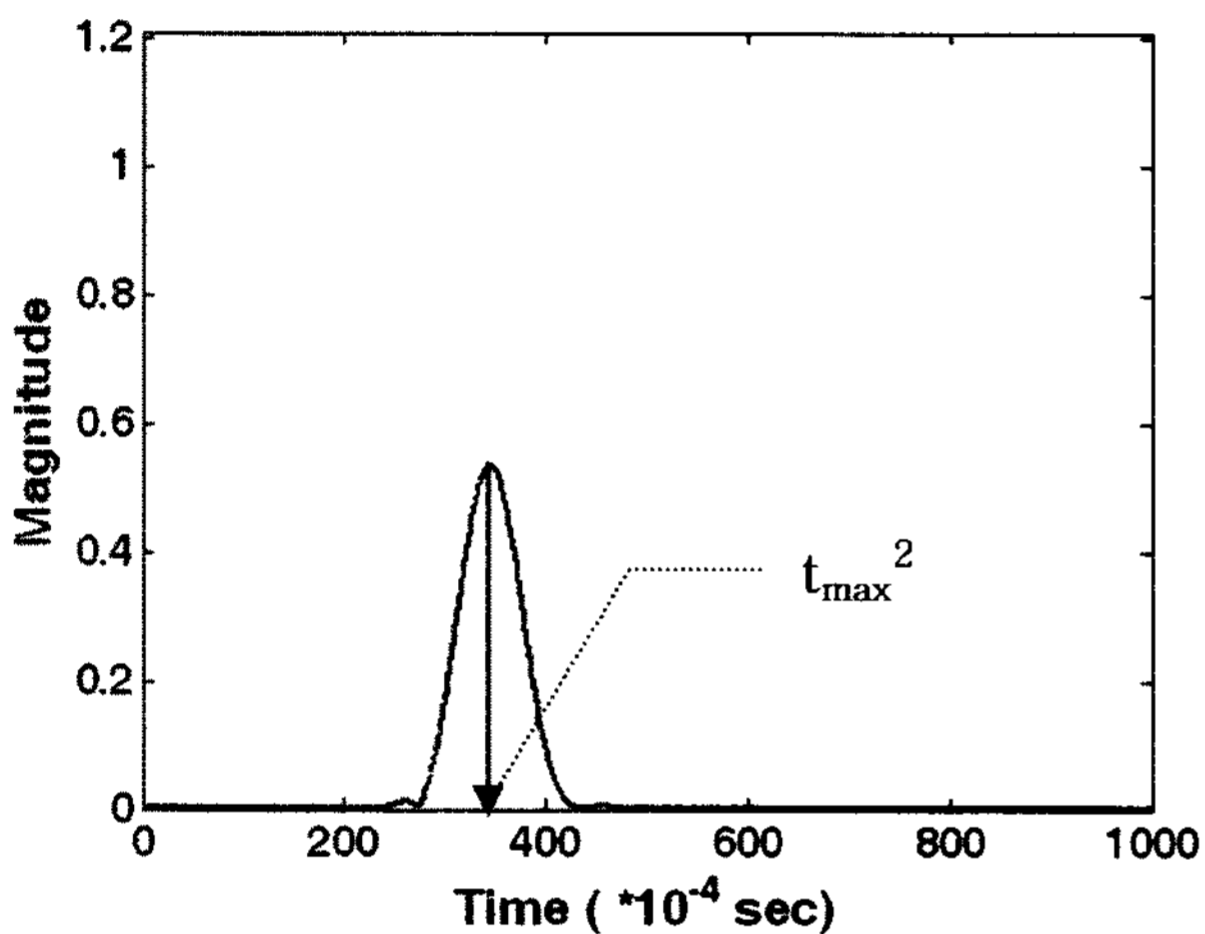


(b) 위상 시간-주파수 지도

그림 2. 감지기에서 측정된 신호의 하모닉 웨이브릿 변환



(a) 하모닉 웨이브릿 계수 $a_{m,n}^1$ 의 크기 정보로부터 감지기 1에서 측정된 신호의 최대 크기 시간의 결정



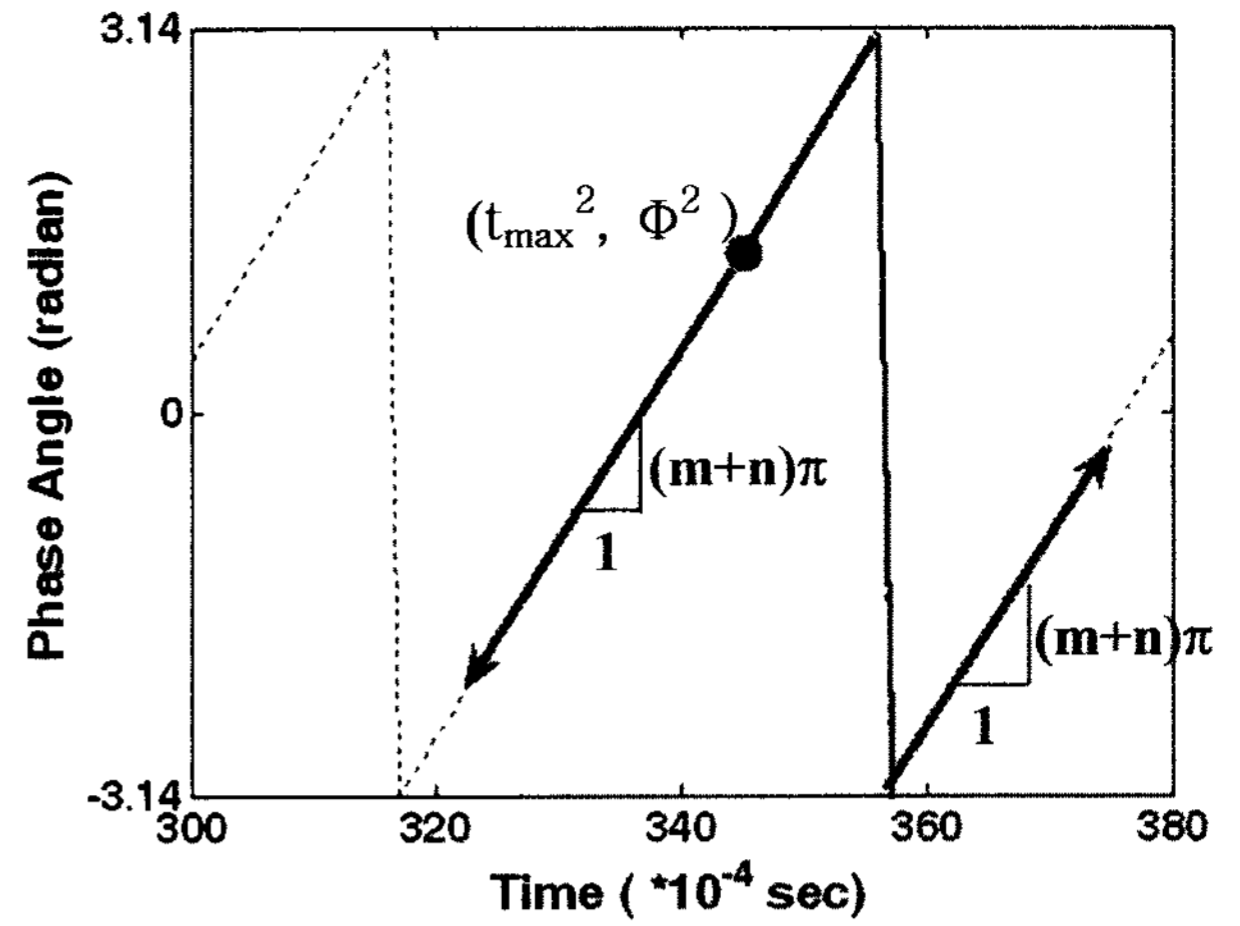
(b) 하모닉 웨이브릿 계수 $a_{m,n}^2$ 의 크기 정보로부터 감지기 2에서 측정된 신호의 최대 크기 시간의 결정

그림 3. 감지기 1과 2에서 계측된 주파수 $(m+n)\pi$ 성분의 최대 크기 시간 결정

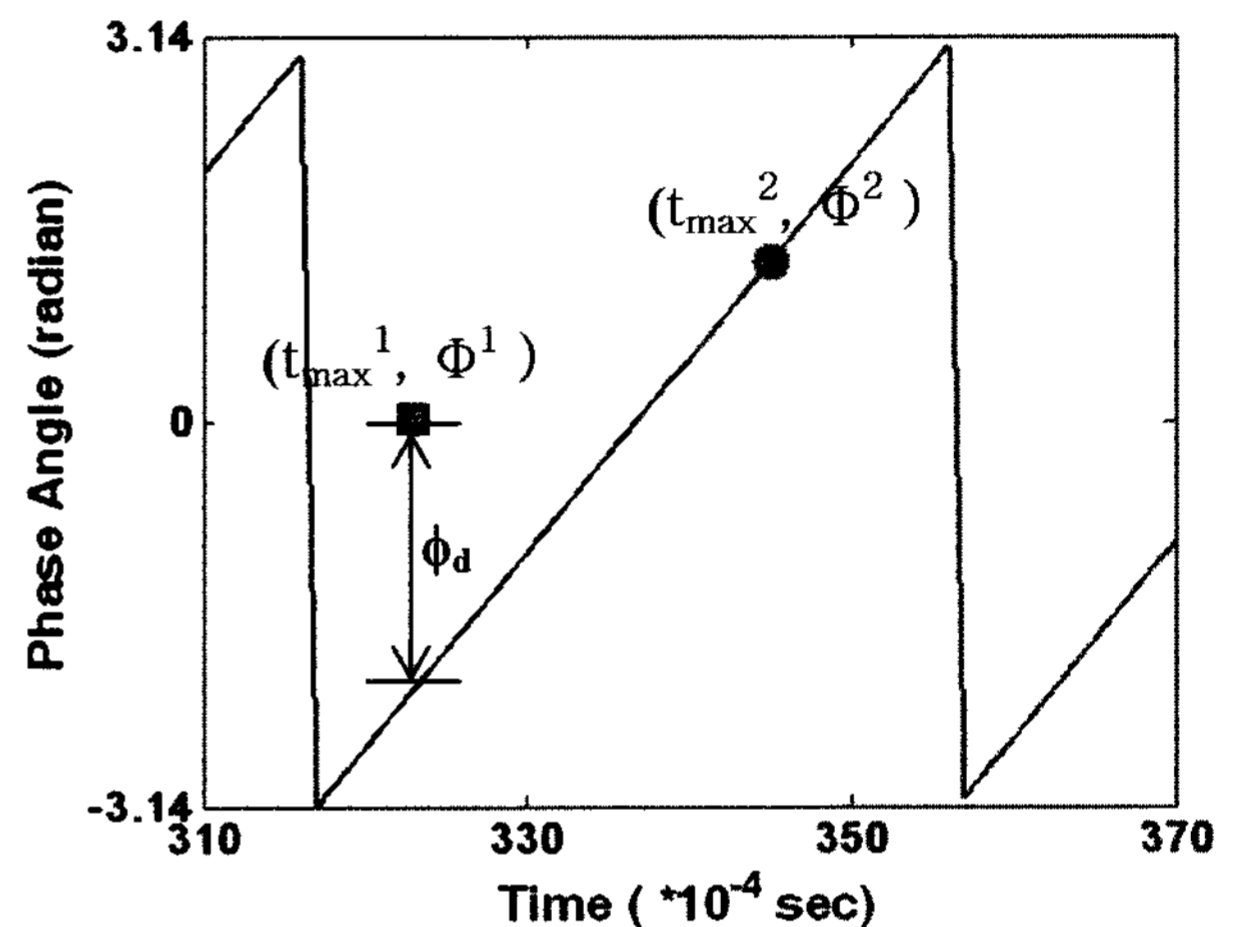
$$\begin{aligned} \phi_{diff} &= \phi_d && \text{when } |\phi_d| \leq \pi \\ &= \phi_d - 2\pi \times \text{sign}(\phi_d) && \text{when } |\phi_d| > \pi \end{aligned} \quad (13)$$

(3) 과정 (2)를 전체 주파수 대역에 대하여 반복 수행한다. 이를 통해 전체 주파수 대역을 구성하는 각각의 주파수에서 위상차를 결정하여, 위상각 스펙트럼을 결정한다(그림 5).

이러한 과정은 개발된 프로그램 HW-Phase에 의해 자동으로 수행된다.



(a) 감지기 2에서 접힌 시간-위상 함수 $\phi_{Recover}^2(t)$ 의 복원



(b) 감지기 1에서 결정된 최대크기시간에서의 위상값 Φ^1 과 감지기 2에서 복원된 시간-위상함수 $\phi_{Recover}^2(t)$ 를 이용한 위상차 결정

그림 4. 주파수 $(m+n)\pi$ 에 해당하는 접힌 형태의 복원 시간-위상함수 $\phi_{Recover}^2(t)$ 와 위상차 결정

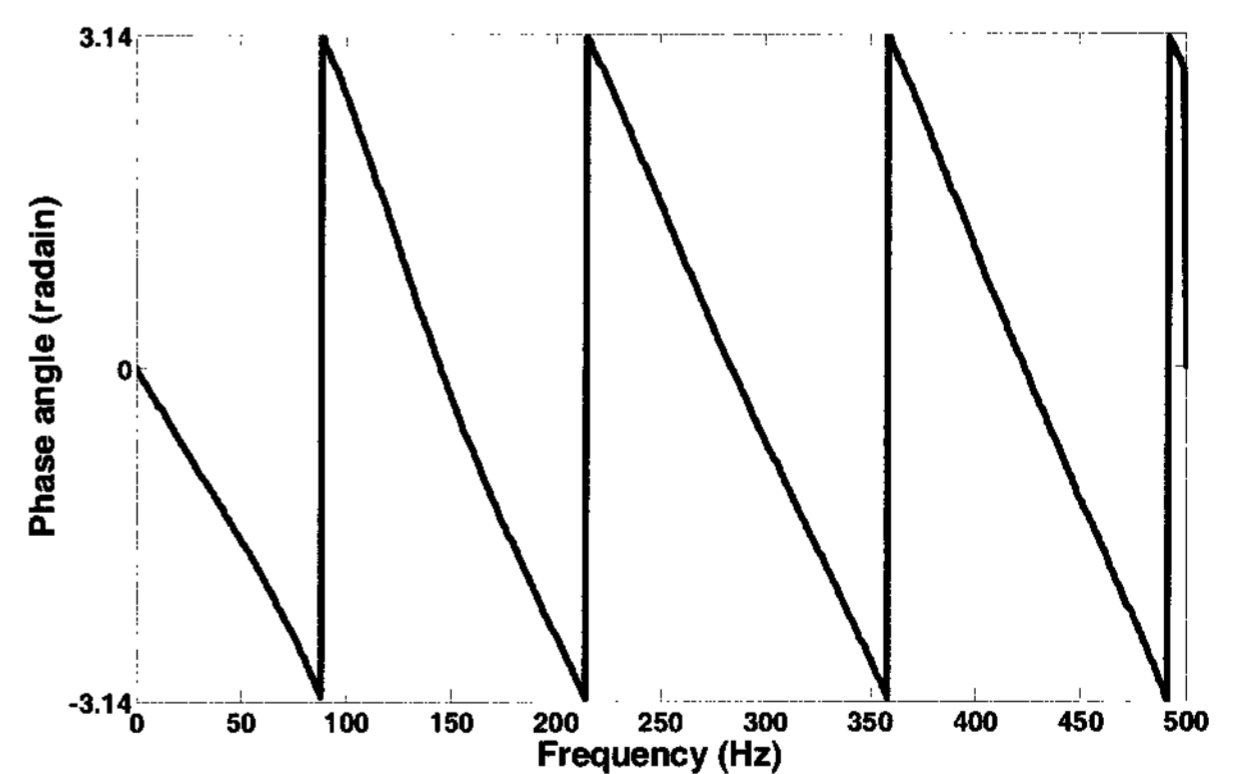


그림 5. 위상 스펙트럼

2.3 하모닉 웨이브릿 위상각 스펙트럼(HW-phase spectrum)을 이용한 분산곡선의 결정

2.2장에서 제안된 방법에 따라 위상각 스펙트럼이 결정되면, 분산곡선 결정을 위해 2.2장에서 얻어진 접힌

(wrapped) 형태의 위상 스펙트럼을 전개(unwrap)하여 각 주파수에서의 실제 위상차 $\delta(f)$ 를 결정하여야 한다. 이러한 위상스펙트럼의 전개는 위상각 전개방법(phase unwrapping method)을 통해 수행된다(Nazarian과 Stokoe 1984). 위상각 전개방법에 의해 두 감지기 사이의 주파수별 실제 위상차가 결정되면, 식 (1)과 (2)를 사용하여 분산곡선을 결정할 수 있다.

3. 검증

3.1 수치모의 실험

제안된 방법을 검증하기 위하여 표 1에 주어진 2가지 지반조건에 대하여 수치실험을 수행하였다. 수치실험은 동적강성행렬 방법(Kausel과 Roesset 1981, 1982)에 기반을 둔 FIT7 프로그램(Joh 1996)을 사용하여 수행되었다. 수치모의 실험을 위한 수치모형 지반은 3개의 층으로 구성된 반 무한체이며, 각 층은 포아송비 0.333, 밀도 $1.8t/m^3$, 댄핑비 0.02 를 가진다. 2개의 수치모형 지반은 정상적인 주상도(regular profile : case 1)과 비정상적인 주상도(irregular profile : case 2)로 구성된다. 정상적인 주상도에서는 매질의 강성이 깊이가 증가함에 따라 점점 증가하나, 비 정상적인 주상도에서는 강성의 증가가 불규칙적이다. 정상적인 주상도에서는 표면파의 기본 전파모드가 전체 주파수 대역에서 지배적이나, 비정상적인 주상도에서는 주파수에 따라 하나 이상의 표면파 전파 모드가 표면파의 전파를 지배한다. 실험구성은 하나의 가진원과 2개의 감지기로 구성된다. 표면에 충격 형태의 가진을 가했으며, 가진원으로부터 2m와 4m 떨어진 위치에서 계측이 이루어졌다.

3.2 결과

잡음조건 하에서의 제안된 방법의 타당성을 알아보기 위하여 계측된 신호들에 서로 독립적인 잡음들을 더

표 1. 수치모의 실험을 위한 주상도 및 물성치

층번호	두께 (m)	V_s (m/sec)		밀도(t/m^3)	포아송비
		Case 1	Case 2		
1	1	300	500	1.9	0.333
2	1	400	400		
3	-	500	300		

하였다. 그림 6은 더해진 잡음들 중 하나의 파워 스펙트럼 밀 텐서티 함수로 주파수별 에너지를 보여준다. 이 그림으로부터 더해진 잡음의 에너지가 전체 주파수 대역에 걸쳐 있는 white noise임을 알 수 있으며, 이 잡음은 전체 주파수 대역에서 신호의 손상을 유발한다.

그림 7과 8은 case 1의 결과이다. 그림 7(a)는 정확한

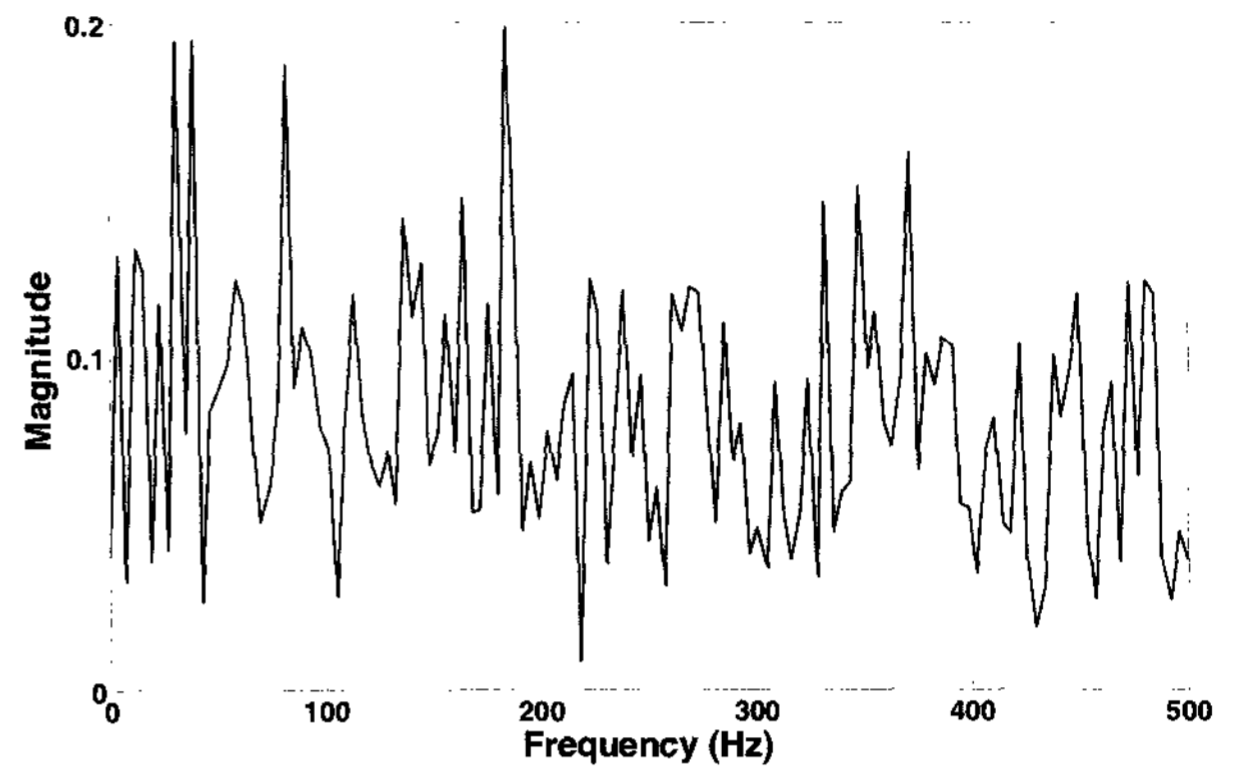
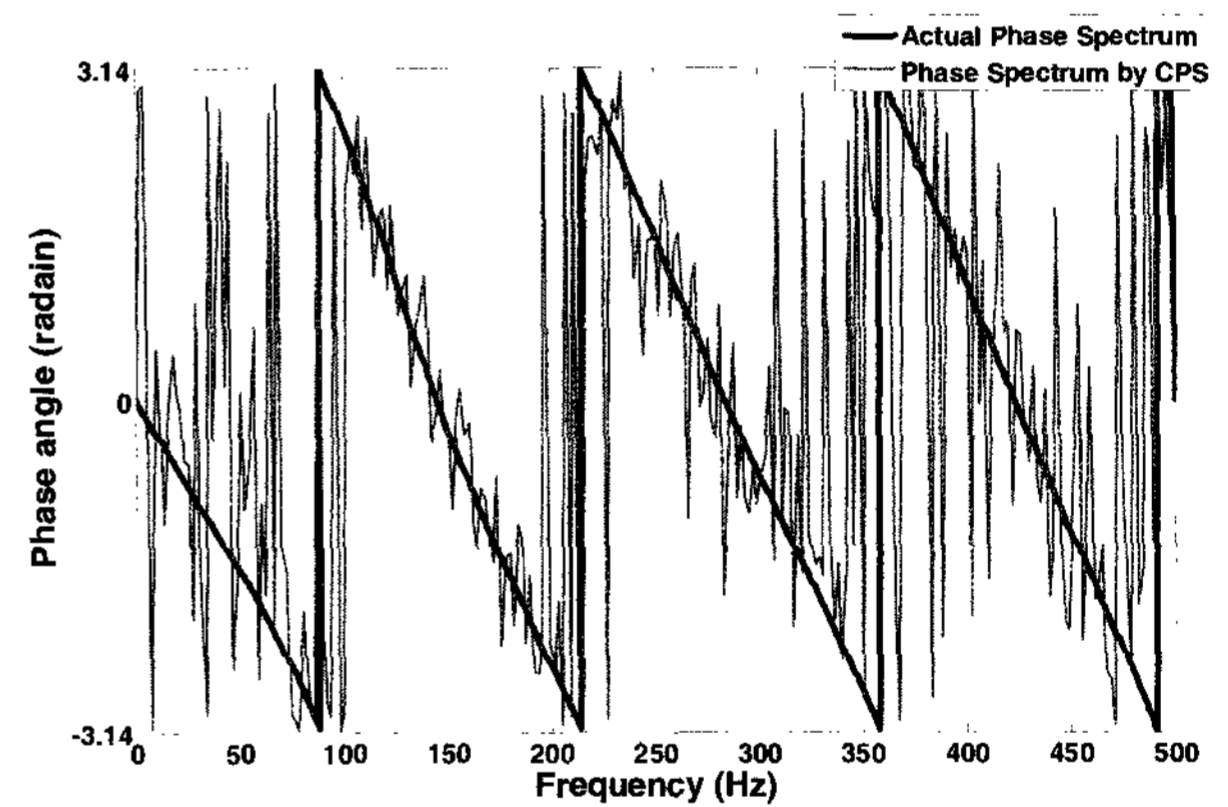
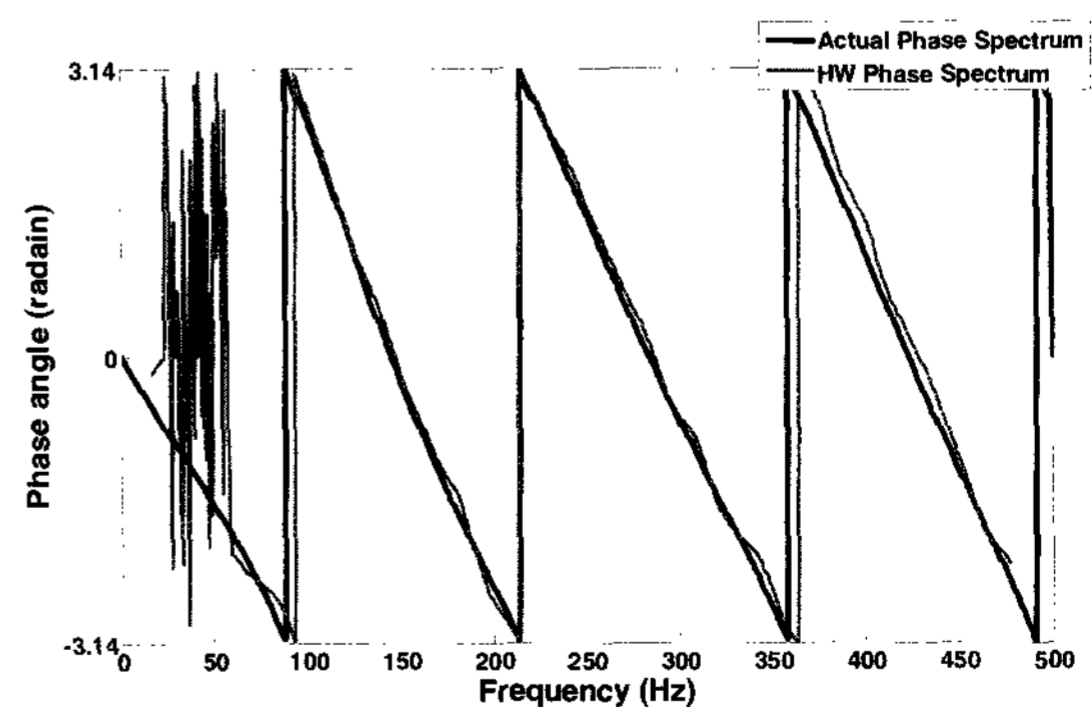


그림 6. 사용된 화이트 무작위 잡음(white random noise)의 주파수별 에너지 분포(spectral density function)의 예



(a) 손상된 신호에 크로스 파워 스펙트럼을 적용하여 결정된 위상 스펙트럼과 실제 위상 스펙트럼의 비교



(b) 손상된 신호에 제안된 방법(HW-phase spectrum)을 적용하여 결정된 위상 스펙트럼과 실제 위상 스펙트럼의 비교

그림 7. 잡음에 의해 손상된 신호에 크로스 파워 스펙트럼과 제안된 방법(HW-phase spectrum)을 적용하여 결정된 위상스펙트럼과 실제 위상 스펙트럼의 비교(Case 1)

위상 스펙트럼과 잡음에 의해 손상된 신호들에 대하여 기존의 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼을 비교한 그림이며, 그림 7(b)는 정확한 위상 스펙트럼과 잡음에 의해 손상된 신호들에 대해 제안된 방법을 사용하여 결정한 위상 스펙트럼을 비교한 그림이다. 여기서 정확한 위상스펙트럼은 잡음에 의해 손상되지 않은 신호들에 대해 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정하였다. 그림 7(a)를 보면 전체 주파수 대역에 걸쳐 크로스 파워 스펙트럼에 의한 위상 스펙트럼이 잡음에 의해 손상되어 되어 있음을 볼 수 있다. 이에 반하여 그림 7(b)를 보면 50Hz 부근의 일부 주파수 대역을 제외한 전체 주파수 대역에서 제안된 방법은 효과적으로 잡음에 의한 손상을 제거하고 실제 위상 스펙트럼과 거의 일치하는 신뢰성 있는 위상 스펙트럼을 결정함을 볼 수 있다. 그림 8은 제안된 방법에 의한 HW-위상스펙트럼을 사용하여 결정된 분산곡선을 이론 분산곡선과 비교한 그림으로 전체 주파수 대역에 걸친 심각한 잡음에도 불구하고 이론 분산곡선과 잘 일치하는 결과를 보여준다. 이에 반하여 크로스 파워 스펙트럼에 의한 위상 스펙트럼은 잡음에 의한 손상으로 분산곡선 결정에 사용할 수 없다.

그림 9와 10은 case 2의 결과이다. 그림 9(a)는 정확한 위상 스펙트럼과 잡음에 의해 손상된 신호들에 대하여 크로스 파워 스펙트럼을 사용하여 결정된 위상 스펙트럼을 비교한 그림이며, 그림 9(b)는 정확한 위상 스펙트럼과 잡음에 의해 손상된 신호들에 대해 제안된 방법을 사용하여 결정한 위상 스펙트럼을 비교한 그림이다. 그림 10은 HW-위상스펙트럼을 사용하여 결정된 분산곡선을 실제 분산곡선과 비교한 그림이다. 그림 9를 보면 case 1의 결과와 마찬가지로 크로스 파워 스펙트럼에 의한 위상 스펙트럼은 잡음에 의해 심각한 손상이 발생함을 볼 수 있으며, 이러한 손상된 위상 스펙트럼은 분산곡선 결정에 사용할 수가 없다. 이에 반하여 제안된 방법은 심각한

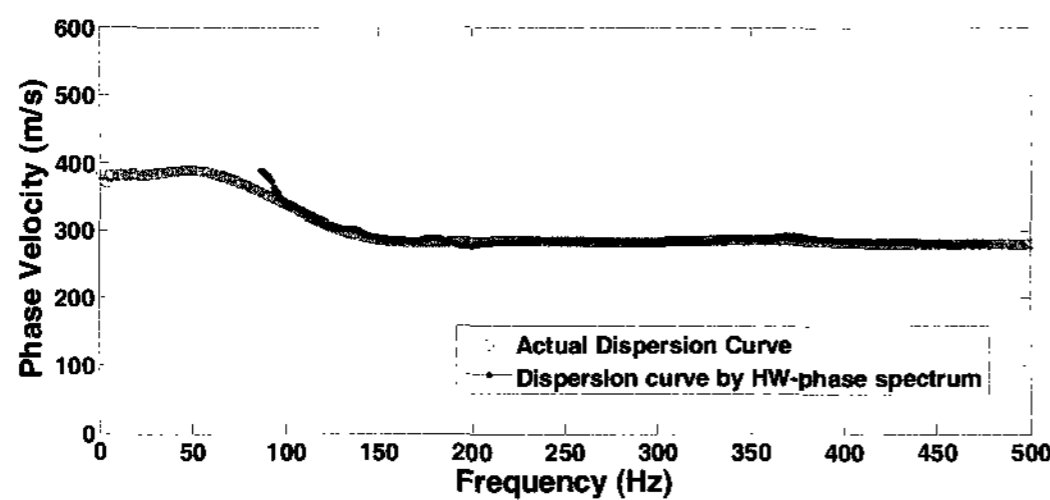
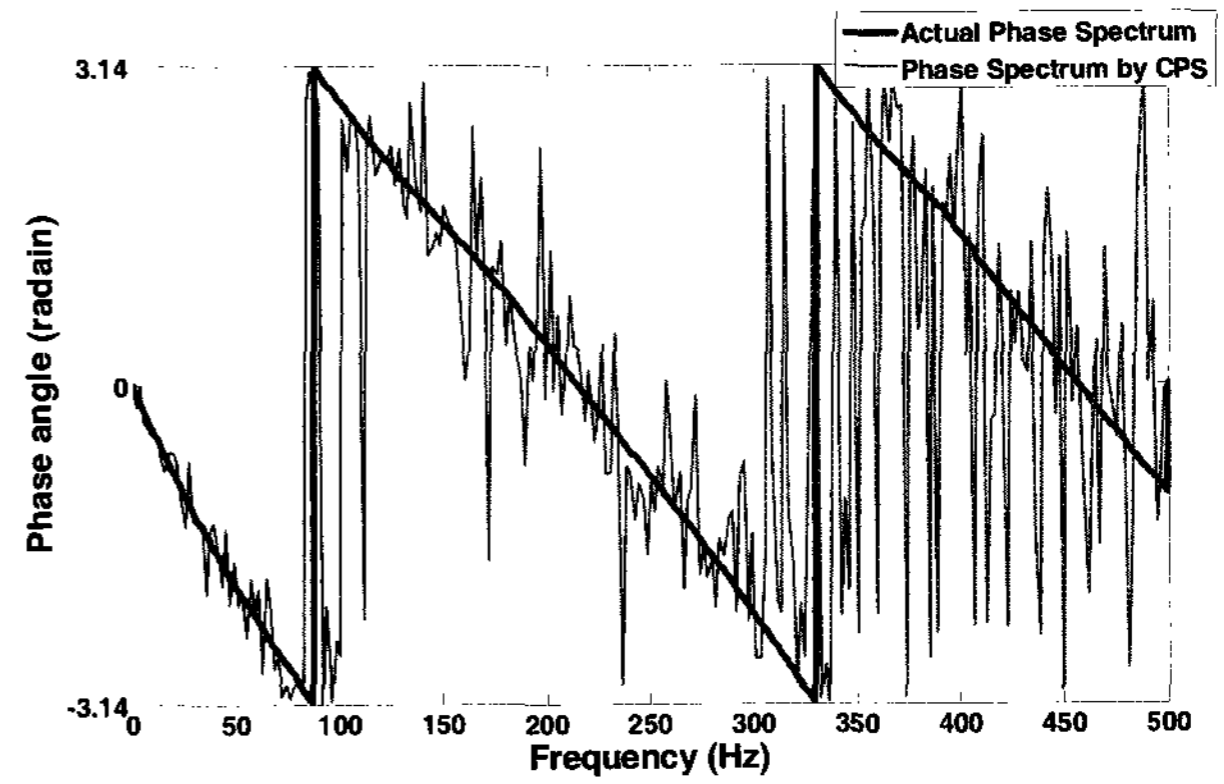
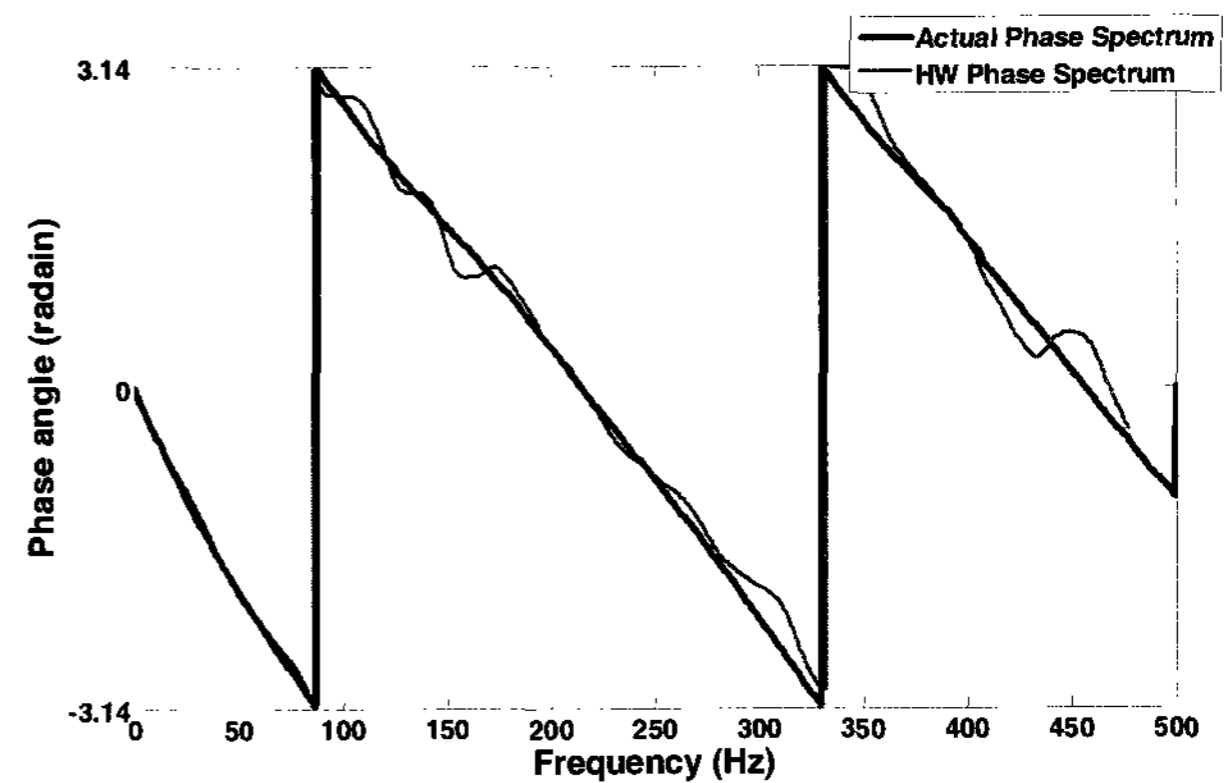


그림 8. 실제 분산곡선과 HW-phase spectrum을 사용하여 결정된 분산곡선의 비교(Case 1)

잡음 조건하에서도 전체 주파수 대역에 걸쳐 실제 위상 스펙트럼과 거의 일치하는 위상스펙트럼을 결정하였다. 또한 심한 잡음조건하에서도 제안된 방법에 의한 위상 스펙트럼을 사용하여 실제 분산곡선과 거의 일치하는 신뢰할 수 있는 분산곡선을 결정할 있음을 볼 수 있다.



(a) 손상된 신호에 크로스 파워 스펙트럼을 적용하여 결정된 위상 스펙트럼과 실제 위상 스펙트럼의 비교



(b) 손상된 신호에 제안된 방법(HW-phase spectrum)을 적용하여 결정된 위상 스펙트럼과 실제 위상 스펙트럼의 비교

그림 9. 잡음에 의해 손상된 신호에 크로스 파워 스펙트럼과 제안된 방법(HW-phase spectrum)을 적용하여 결정된 위상스펙트럼과 실제 위상 스펙트럼의 비교(Case 2)

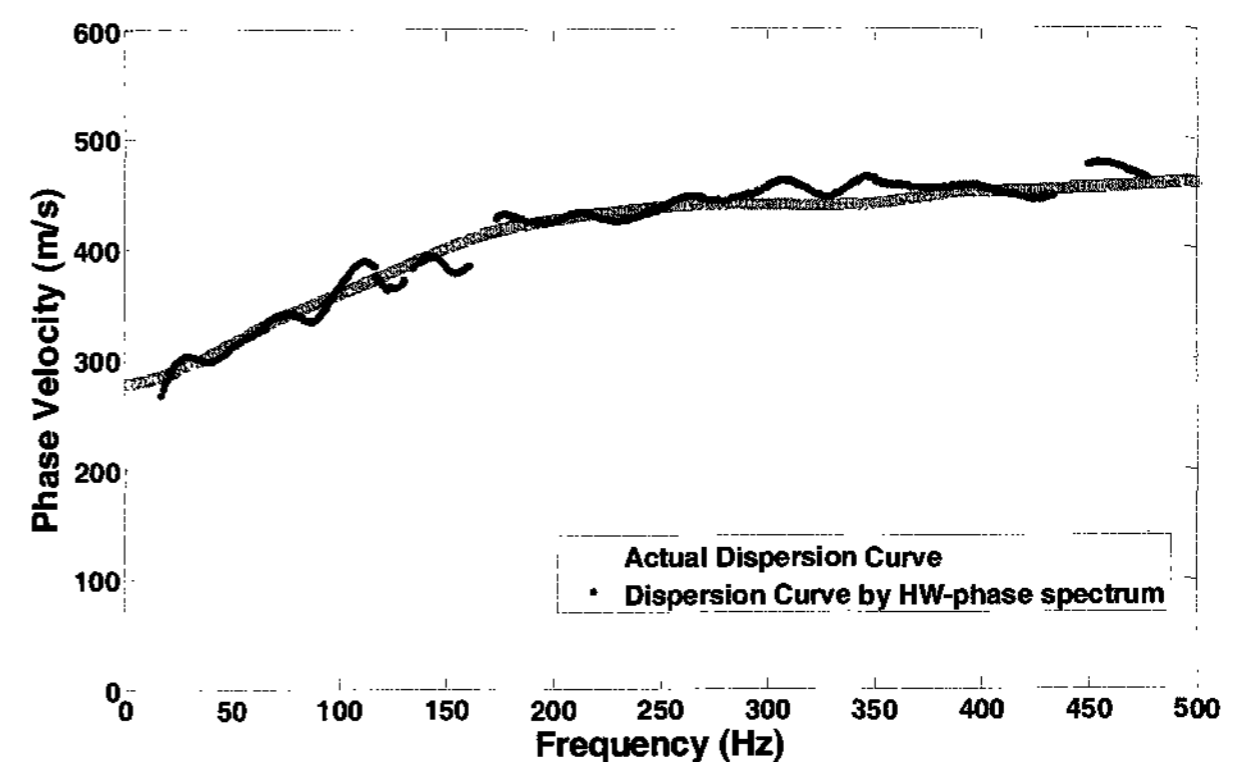


그림 10. 실제 분산곡선과 HW-phase spectrum을 사용하여 결정된 분산곡선의 비교(Case 2)

4. 결 론

본 논문에서는 표면파 시험에서 분산곡선 결정시 사용되는 새로운 위상 스펙트럼 결정방법을 제안하였다. 제안된 방법에 의해 결정된 위상 스펙트럼은 분산곡선 결정에 성공적으로 적용되었다. 제안된 새로운 위상 스펙트럼 결정방법은 하모닉 웨이브릿 변환을 사용한다. 기존의 크로스 파워 스펙트럼에 의해 결정된 위상 스펙트럼은 현장에 항상 존재하는 배경잡음에 쉽게 손상되어 경우에 따라 신뢰할 수 없는 결과를 주며, 이런 현장 잡음의 문제를 해결하기 위해서는 복잡한 고가의 가진원이 필요하다. 이에 반하여 제안된 방법은 신호처리 과정에서 이러한 잡음에 의한 영향을 효과적으로 제거하여, 심한 현장 잡음조건하에서도 간단한 장비를 사용하여 신뢰할 수 있는 분산곡선 결정이 가능하다. 또한 동일한 장비를 사용하는 경우 제안된 방법은 기존 방법에 비하여 좀더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며, 깊이 방향 탐사범위가 더 넓다. 제안된 방법의 타당성을 알아보기 위하여 2개의 지반조건에 대해 수치 모의 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 제안된 방법의 신뢰성을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Bendat JS, Piersol AG. (1991), *RANDOM DATA : Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, New York.
2. Nazarian S, Stokoe KH. (1984), "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave", *Proc. 8th Conf On Earthquake Eng.*, S. Francisco, pp.31-38.
3. Newland DE. (1998), "Time-frequency and time-scale signal analysis by harmonic wavelets". *Chap 1 of the book Signal Analysis and Prediction*, A Prochazka, J. Uhler, P. j. W. Rayner and N. G. Kingsbury eds., Birkhauser, Boston,
4. Joh SH. (1996), *Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements*, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin.
5. Kausel E, Roesset JM. (1981), "Stiffness matrices for layered soils", *Bull Seismological Soc of Am*, Vol.71, pp.1743-1761.
6. Kausel E, Peek R. (1982), "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: An explicit solution", *Bull Seismological Soc of Am*, Vol.72, No.5, pp.1459-1481.
7. Park HC and Kim DS. (2001), "Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform", *NDT&E International*, Vol.34, pp.457-67.
8. Stokoe KH, Wright SG, Bay JA, Roesset JM. (1994), "Characterization of geotechnical sites by SASW method", *Geotechnical characterization of sites*, R. D. Woods, ed., New Delhi, India, pp.15-26.

(접수일자 2008. 2. 28, 심사완료일 2008. 4. 17)