

HWAW방법을 사용한 지반의 전단파 속도 2-D 영상화

Two-dimensional imaging of shear wave velocity in the soil site using HWAW method

박형춘¹⁾, Hyung-Choon Park, 김동수²⁾, Dong-Soo Kim, 김종태³⁾, Jong Tea Lim
박헌준³⁾, Hyun-Jun Park, 방은석⁴⁾, Eun-Seok Bang

¹⁾충남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam Nat. Univ.

²⁾한국과학기술원 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Env. Eng., KAIST

³⁾한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Env. Eng., KAIST

⁴⁾한국지질자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, KIGMR

SYNOPSIS : To obtain a shear-wave velocity profile in geotechnical practice, various seismic investigation methods which have their own strength and weakness are being frequently used. Generally, geotechnical site have lateral variation of the properties, so it is needed to determine 2-dimensional shear wave velocity imaging of the site. In this study, harmonic wavelet analysis of wave (HWAW) method is applied to determination of 2-D V_s imaging. HWAW method which is based on time-frequency analysis using harmonic wavelet transform have been developed to determine phase and group velocities of waves. HWAW method uses the signal portion of the maximum local signal/noise ratio to evaluate the phase velocity to minimize the effects of noise. HWAW method determine detailed local V_s profile because one experimental setup which consists of one pair of receivers with spacing of 1~3m is used to determine the dispersion curve of the whole depth. So, 2-D V_s imaging with relatively high resolution can be determined through a series of HWAW test. In order to estimate the applicability of HWAW method, field tests were performed in 4 sites. Through field applications and comparison with other test results, the good accuracy and applicability of the proposed method were verified.

Key words : HWAW, Harmonic wavelet transform, 2-D V_s imaging

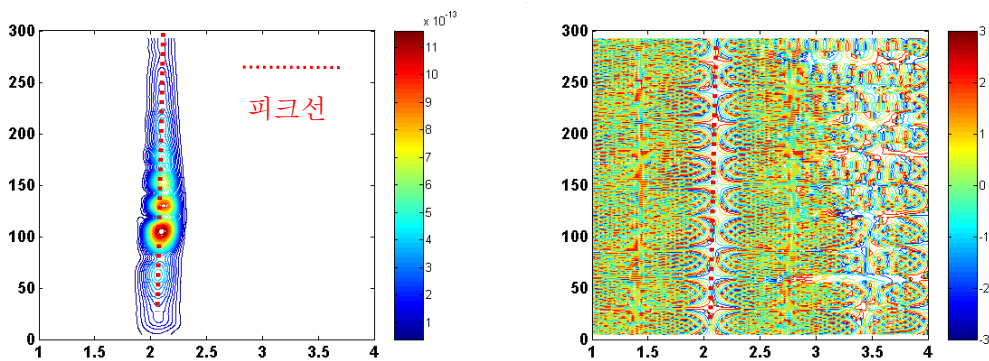
1. 서론

공학적 물성치로서의 저변형율에서의 전단탄성계수의 결정은 다양한 토목분야에서 매우 중요하다. 이러한 지반의 전단탄성계수 주상도는 표면과 지반 탐사를 통하여 결정되는 전단파 속도 주상도로부터 결정할 수 있다. 모든 표면과 지반 탐사는 대상지반의 분산곡선(주파수-위상속도 곡선)을 결정하고, 결정된 분산곡선에 대해 역산을 수행하여 대상지반의 전단탄성계수 주상도를 결정한다. 이러한 표면과 기법은 분산곡선을 결정하는 방법에 따라 그 종류가 나누어지며, 크게 2채널 실험과 다채널 실험으로 구분된다. 이러한 방법들은 각기 고유의 장·단점들을 가지고 있다. 일반적으로 국내지반은 횡방향으로 물성치가 균질하지 않다. 따라서 전단파 속도 주상도의 횡방향 영상화(2-D 또는 3-D 영상화)가 점점 중요해지고 있다. 기존의 표면과 기법들도 지반의 전단파 속도 2-D 영상화에 적용되고 있으나, 상대적으로 긴 감지기 간격 사이의 물성치를 평균적으로 결정하기 때문에, 결정된 2-D 전단파 속도 주상도의 횡방향 해상도가 떨어진다. 본 논문에서는 2-D 전단파 속도 주상도 결정에 있어 기존 표면과 기법들의

단점을 해결하고자 HAWW방법(박형춘, 김동수 2004(a) 2004(b); Park and Kim 2001)을 2-D 전단파 속도 주상도 결정에 적용하였다. 제안된 방법은 2채널 표면파 기법으로 기존의 방법들이 사용하기 어려운 낮은 평균 신호/잡음비를 가지는 현장 계측 신호를 효과적으로 이용할 수 있으며, 적은 에너지를 가지는 슬러지 햄머와 같은 간단한 가진원을 사용하여 깊은 깊이 탐사등을 포함한 지반탐사를 효과적으로 수행할 수 있다. 또한 1~3m의 간격을 가지는 2개의 감지기와 하나의 가진원으로 구성된 단일 실험구성에 대해 한번의 실험으로 대상지반의 관심깊이 전체를 포함하는 분산곡선을 결정할 수 있다. 따라서 상대적으로 현장실험이 단순, 신속하며, 1~3m 간격을 가지는 짧은 감지기 사이의 국부적으로 상세한 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있기 때문에 연속적인 실험을 통해 기존 방법들에 비해 횡방향으로 높은 해상도를 가지는 2-D 전단파 속도 주상도의 결정이 가능하다. 이외에도 다채널 시험과 마찬가지로 모드 분산곡선의 결정이 가능하다. 본 논문에서는 HAWW방법의 특징을 살펴보고, 제안된 방법을 검증하기 위하여 4곳의 현장에서 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 제안된 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

2. HAWW방법을 이용한 파의 위상속도 결정

HAWW방법은 2개의 감지기 사이 매질을 따라 전파하는 파의 주파수별 위상·그룹속도를 결정하기 위해 개발된 방법이다. HAWW방법은 각 감지기에서 얻어진 시간 영역신호를 Harmonic Wavelet 변환(Newland, 1998)을 통해 시간-주파수 영역으로 변환하여, 각 주파수 성분의 시간에 따른 위상·에너지 크기를 결정한 후(그림 1), 각 주파수 성분이 최대 에너지를 가지는 시간영역, 즉 국부 신호/잡음비가 최대가 되는 최대 에너지 선(피크선)의 위상·에너지 정보만을 사용하여 파의 위상·그룹속도를 결정한다. 따라서 기존 방법에서 사용하기 어려운 낮은 평균 신호/잡음비를 가지는 계측 데이터로부터 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며, 2채널 시험을 통해 다채널 시험에서 얻을 수 있는 표면파의 모드 분산곡선 또한 결정할 수 있다.



(a) 크기 시간-주파수 지도

(b) 위상 시간-주파수 지도

그림 1. 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 신호의 크기·위상 시간-주파수 지도의 결정

3. HAWW방법을 이용한 동적지반조사

3.1 지반의 국부적인 전단파 속도 주상도의 결정

HAWW방법을 이용한 표면 계측 동적 지반조사는 짧은 감지기 간격(1~3m)을 가지는 2개의 채널로 구성된 단일한 실험구성으로 이루어진다(그림 2). HAWW방법은 배경잡음의 영향을 효과적으로 제거할 수 있다. 즉 상대적으로 작은 에너지를 가지는 단일 가진원을 사용하여 짧은 감지기 간격을 가지는 단일한 실험구성에 대한 한번의 실험을 통해 전체 깊이를 대표하는 분산곡선(주파수-위상곡선)을 결정할

수 있다. 따라서 실험이 간편하고, 대상지반의 자세한 국부적인 평가가 가능하다. 또한 연속적인 실험을 통해 대상지반의 평균적인 의미가 아닌 세밀한 전단파 속도(전단 탄성 계수)의 영상화가 가능하다.

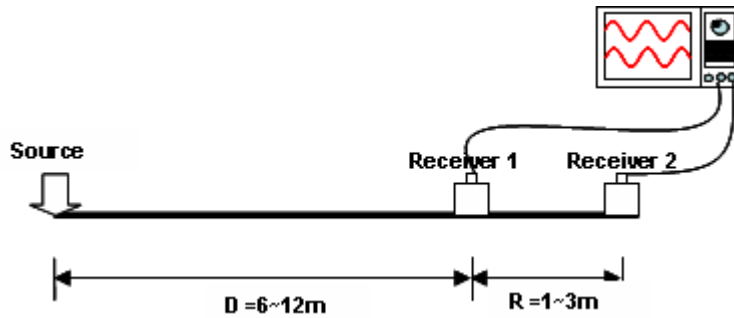


그림 2. HAWW방법을 위한 실험 구성

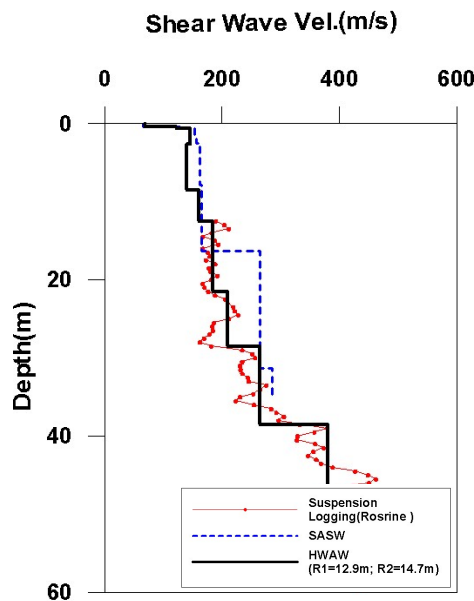


그림 3. HAWW, SASW 그리고 PS-suspension logging Test에 의해 결정된 전단파 속도 주상도 비교

그림 3은 HAWW기법 적용예로서, HAWW, SASW 그리고 PS-suspension logging Test에 의해 결정된 전단파 속도 주상도 비교한 그림이다. 이 그림에서 HAWW실험결과가 PS-suspension logging 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 이로부터 HAWW실험이 대상지반의 국부적인 물성치를 효과적으로 평가함을 알 수 있다. SASW실험결과는 다른 방법들과 약간의 차이를 보인다. 이러한 차이는 대상지반에 횡방향 불균일성이 존재하며, SASW시험은 이러한 대상지반의 평균적인 물성치를 평가하기 때문에 이러한 차이가 발생한다(박형춘, 김동수, 이병식 2004) .

3.2 HAWW방법을 이용한 표면파 모드 분산곡선의 결정

HAWW방법은 시간영역에서 각 주파수 성분의 국부적인 정보만을 사용하여 파의 위상 · 그룹속도를 측정한다. 표면파는 서로 다른 속도를 가지는 여러 모드성분으로 구성되어 있다. 모드 성분들은 가진원로부터 거리가 멀어질수록 시간축상에서 서로 다른 위치에 존재하게 되며, 따라서 시간-주파수 영역에서 각각의 모드 성분들은 서로 다른 파그룹을 형성하게 된다. 이러한 파그룹들은 에너지 피크선을 사용하여 구별할 수 있다. 일단 각 모드성분을 대표하는 파그룹들이 에너지 피크선에 의해 구별되면, 각 피크선에 HAWW방법을 적용하여 각 모드성분의 분산곡선을 결정할 수 있다. 그림 4는 현장적용 예로

HAWAW방법에 의해 결정된 모드 분산곡선과 12채널을 이용한 move-away F-K실험에 의해 얻어진 모드 분산곡선의 비교이다. 그림을 보면 전체적으로 잘 일치함을 볼 수 있다(박형춘, 김동수, 방은석 2006).

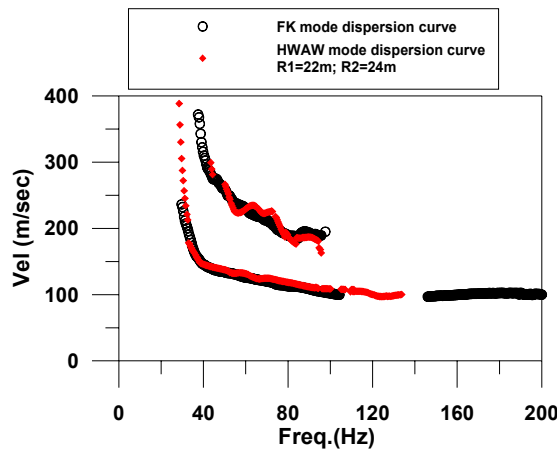


그림 4. HAWAW방법과 F-K방법에 의해 결정된 표면파 모드분산곡선의 비교

4. HAWAW방법을 이용한 지반의 2차원 영상화

3장에서 본 바와 같이 HAWAW방법은 1~3m 간격을 가지는 두개의 감지기 사이의 국부적인 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있다. 따라서 그림 5(a)와 같이 가진원과 감지기를 횡방향으로 이동시켜가며 연속적인 실험을 수행하거나 또는 그림 5(b)와 같이 여러개의 감지기를 설치한 후 가진을 가하고 연속적인 각각의 감지기 쌍(감지기 1-감지기 2, 감지기 2-감지기 3 ……)에서 얻어진 신호들에 대해 HAWAW방법을 각각 적용하여 횡방향으로 1~3m해상도를 가지는 상대적으로 정밀한 2차원 전단파속도 주상도를 결정할 수 있다. 본 논문에서는 4곳의 현장에 HAWAW방법을 적용하여 지반의 2차원 전단파 속도 영상을 결정하였다.

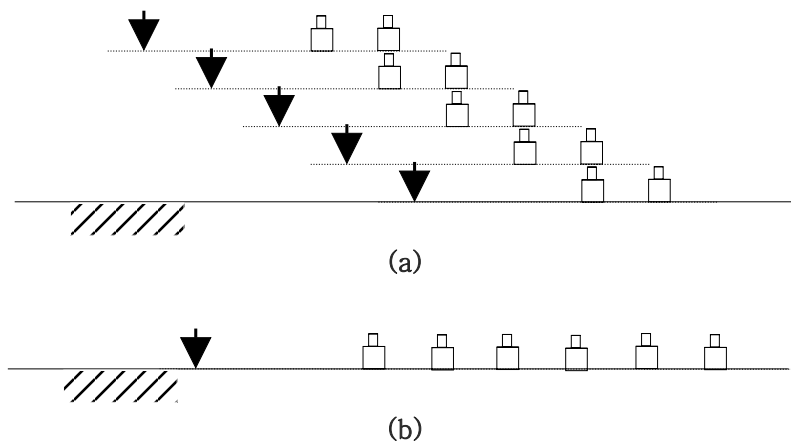


그림 5. 지반의 2차원 전단파 속도 영상화를 위한 실험 구성

첫 번째 부지에서는 3개의 시추공(BH-3, BH-5, BH-7)에서 시추가 이루어졌으며, 시료채취와 표준 관입시험을 통해 대상지반을 매립층, 충적층, 연암층, 경암층으로 분류하였다. 이 부지의 전단파 속도 2

차원 영상화를 수행하기 위하여 시추공 BH-3, BH-5 그리고 BH-7을 따라 2m 간격의 감지기를 사용하여 총 24번의 실험을 수행하였다. 가진원으로는 슬리지 햄머를 사용하였다. 얻어진 24개의 전단과 속도 주상도를 사용하여 대상부지의 전단과 속도 2차원 지도를 결정하였으며, 이를 시추 주상도와 같이 그림 6에 도시하였다. 그림에서 나타나는 바와 같이 약 300m/s 경계에서 매립층과 충적층을 구분할 수 있었고 700m/s에서 충적층과 연암층을, 900m/s에서 연암층과 경암층을 구분할 수 있었다. HWAW방법에 의한 2차원 영상은 시추결과와 유사한 지반구조를 보였으며, 이를 통해 HWAW방법을 사용한 2차원 전단과 속도 지도가 실제 부지에 적합하게 도출되었음을 알 수 있다.

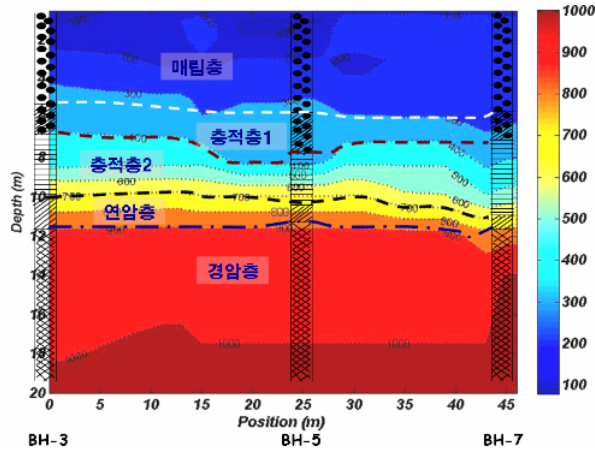


그림 6 첫 번째 부지에서의 2차원 전단과 속도 지도와 시추 주상도

두 번째 부지에서는 4개의 시추공(BH-1, BH-2, BH-3, BH-4)에서 시추가 이루어졌으며, 시료채취와 표준관입시험을 통해 대상지반을 매립층, 충적층, 풍화토, 풍화암, 연암층으로 분류하였다. 이 부지의 전단과 속도 2차원 영상화를 수행하기 위하여 시추공 BH-3과 BH-4을 따라 2m 간격의 감지기를 사용하여 15지점에서 반복 시험을 수행하였다. 가진원으로는 슬리지 햄머를 사용하였다. 얻어진 15개의 전단과 속도 주상도를 사용하여 대상부지의 전단과 속도 2차원 지도를 결정하였으며, 이를 시추 주상도와 같이 그림 7에 도시하였다. 그림에서 나타나는 바와 같이 약 250m/s 경계에서 매립층과 충적층을 구분할 수 있었으며 300m/s에서 충적층과 풍화토층을, 400m/s에서 풍화암과 연암층을 구분할 수 있었다. 두 번째 부지 실험 결과도 HWAW방법에 의한 2차원 영상은 시추결과와 유사한 결과를 보였다.

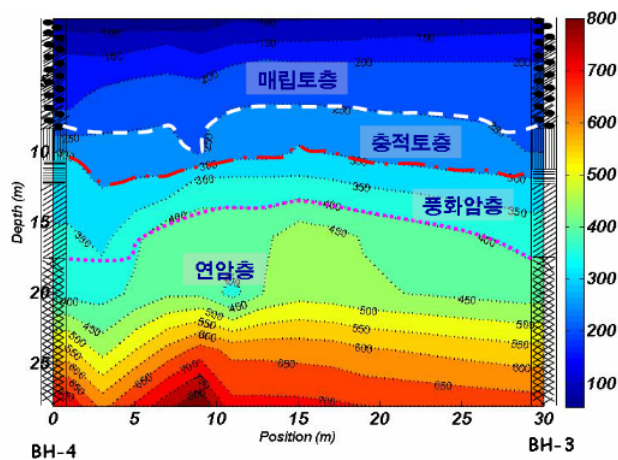


그림 7 두 번째 부지에서의 2차원 전단과 속도 지도와 시추 주상도

세 번째 부지에서는 시추조사 없이 슬러지 해머를 가진원으로 사용하여 2m 간격의 감지기를 사용하여 40번의 실험을 반복 수행하였다. 그림 8은 얻어진 대상 지반의 전단파 속도 2차원 지도이다. 이 그림으로부터 깊이 4m와 7m 사이의 전단파 속도가 300m/s 이상인 조밀한 층과 25m 깊이까지 전단파 속도가 200m/s 이하인 연약층의 깊이 방향 및 길이 방향분포를 확인할 수 있다.

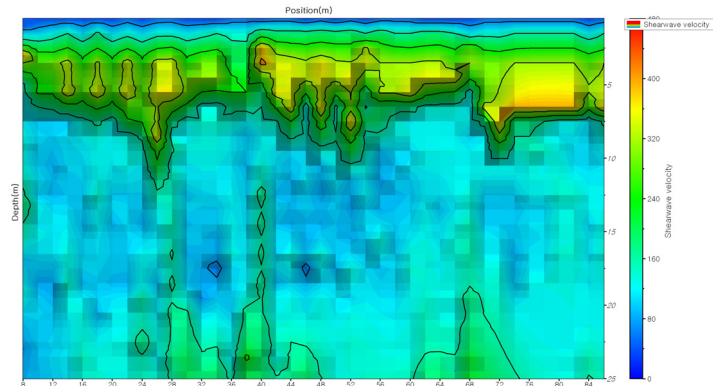


그림 8 세 번째 부지에서의 2차원 전단파 속도 지도

네 번째 부지도 시추조사 없이 슬러지 해머를 가진원으로 사용하여 2m 간격의 감지기를 사용하여 20번의 실험을 반복 수행하였다. 그림 9는 얻어진 대상 지반의 전단파 속도 2차원 지도이다. 이 그림으로부터 표층과 대략 깊이 5m와 15m 사이의 전단파 속도가 100m/s 정도인 연약층의 깊이 방향 및 길이 방향 분포를 확인할 수 있다.

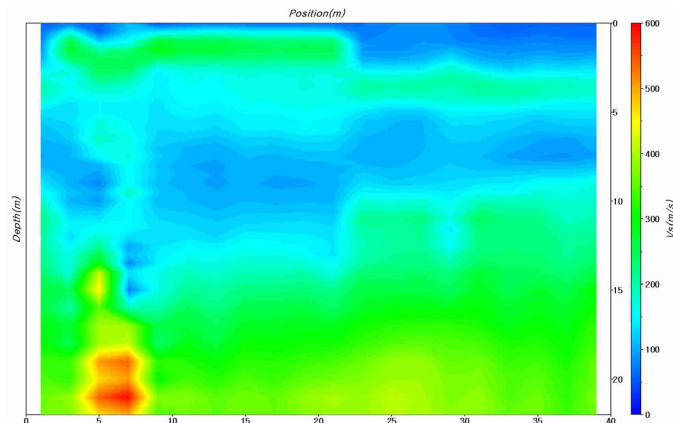


그림 9 세 번째 부지에서의 2차원 전단파 속도 지도

5. 결론

본 논문에서는 시간-주파수 해석을 이용한 파의 위상 · 그룹속도 결정방법인 HWAW방법의 특징을 살펴보고, 지반의 전단파 속도 2차원 영상화에 적용하였다. HWAW방법은 기존의 방법들이 사용하기 어려운 낮은 평균 신호/잡음을 가지는 현장 계측 신호를 효과적으로 이용하여, 적은 에너지를 가지는 슬러지 해머와 같은 간단한 가진원을 사용하여 깊은 깊이 탐사등을 포함한 지반탐사를 효과적으로 수행할 수 있다. 또한 1~3m의 간격을 가지는 2개의 감지기와 하나의 가진원으로 구성된 단일 실험구성에 대해 한번의 실험으로 대상지반의 관심깊이 전체를 포함하는 분산곡선을 결정할 수 있다. 따라서 상대적으로 현장실험이 단순, 신속하며, 1~3m 간격을 가지는 짧은 감지기 사이의 국부적으로 상세한 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있기 때문에 연속적인 실험을 통해 기존 방법들에 비해 횡방향으로 높은 해상도를

가지는 지반의 전단파 속도 2차원 영상화가 가능하다. HWAW방법의 적용성을 검토하고자 4곳의 현장에서 실험을 수행하였으며, 현장실험을 통하여 HWAW방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 박형춘, 김동수 (2004a), "HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정", 대한토목학회 논문집, Vol.24, No.2C.
2. 박형춘, 김동수 (2004b), "HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(II) : 실험구성 및 역산과정", 대한토목학회논문집, Vol.24, No.2C.
3. 박형춘, 김동수, 이병식(2004), "HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave)방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 현장 적용", 지반공학학회논문집, 제20권, 6호, pp. 1-9.
4. 박형춘, 김동수, 방은석(2006), "HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 이용한 표면파 모드분해 및 모드분산곡선의 결정," 한국지반공학학회 논문집, Vol. 22, No. 12, pp. 15-24.
5. Newland DE, (1998), "Time-frequency and time-scale signal analysis by harmonic wavelet", Signal analysis and prediction, chap.1, Birkhauser, 502p.
6. Park, HC., Kim, DS., (2001), "Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform", *NDT&E Int*, **34**, 457-467.