한국지반공학회논문집 제30권 5호 2014년 5월 pp. 5 ~ 15
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.30, No.5, May 2014 pp. 5 ~ 15

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2014.30.5.5

국내 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD) 사력존의 전단파 속도 분포 결정(I): HWAW 방법을 사용한 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도 결정

Evaluation of the Shear Wave Velocity Profile of Rockfill Zone of CFRD Using HWAW Method

황 혜 진[1] Hwang, Hea-Jin
박 윤 석[2] Park, Yun-Seok
박 형 춘[3] Park, Hyung-Choon

Abstract

Rockfill zone is a main part of the CFRD for safety and it is important to evaluate the status such as shear wave velocity profile of the rockfill zone. A surface wave method can be used to evaluate the rockfill zone but general surface wave method can have a difficulty to be applied for valuation of rockfill zone because of a stiff slope of dam and background noise in the field. In this research, HWAW method is applied to evaluate the shear wave velocity of rockfill zone. The field test of the proposed method is simple and fast and the HWAW method can determine the reliable shear wave velocity profile under severe noise field condition. To show feasibility of the proposed method, numerical simulation and field tests were performed. Through the numerical and field tests, the applicability of the proposed method was shown.

요 지

CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam) 사력존은 CFRD의 구조적 안전성을 담당하는 부분으로 이러한 사력존의 평가는 댐체 구조안정성 평가를 위해 매우 중요하다. 댐 사력존 평가는 표면파 시험을 통해 효과적으로 수행될 수 있으나 상당한 경사를 가지는 사면위에서 실험이 수행되어야 하며, 실험에서 얻어지는 데이터에는 다양한 반사면에 의해 발생하는 반사파 등으로 구성된 잡음등이 존재하기 때문에 일반적인 표면파 기법 적용이 어렵다. 본 연구에서는 다양한 표면파 기법중 하나인 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 방법을 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도 평가에 적용하였다. HWAW 방법은 상대적으로 단순한 실험구성을 사용하여 신속하고 간편한 현장실험이 가능하며, 높은 잡음조건하에서도 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도 결정이 가능하다. 본 연구에서는 제안된 방법의 적용성을 알아보기 위해 수치모의 실험을 수행하였으며, 국내 CFRD 사력존 평가 및 현장 적용성을 평가하기 위하여 3곳의 CFRD를 선정하여 제안된 방법을 적용하였다. 이를 통해 제안된 방법의 타당성을 확인할 수 있었으며, 국내 CFRD 사력존의 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있었다.

Keywords : CFRD, Rockfill zone, HWAW method, Shear wave velocity profile

1 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ.)
2 비회원, 충남대학교 토목공학과 석사후 연구원 (Researcher, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ.)
3 정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Tel: +82-42-821-5673, Fax: +82-42-825-0318, civilman@cnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD : Concrete Faced Rockfill Dam)과 같은 필댐의 사력존은 모래, 자갈, 암석 등의 투수성 재료로 구성되어 댐체의 구조적 안정성을 담당하는 기능을 수행한다. 일반적으로 지진하중과 같은 외부하중에 의한 CFRD의 동적거동 시 콘크리트 차수벽의 구조적 역할은 미비하며 CFRD의 안정성은 제체의 대부분을 구성하는 사력재료의 전단탄성계수(전단파 속도) 분포와 같은 공학적 특성에 좌우되는 것으로 알려져 있다(Uddin, 1992). 따라서 정확한 사력존의 전단탄성계수 산정은 CFRD의 안전 및 유지관리 차원에서 매우 중요하다. 이러한 사력존의 평가를 위해 탄성파를 이용한 비파괴 시험이 효과적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 다양한 탄성파를 이용하는 비파괴 탐사 방법들 중 표면파 시험을 CFRD 사력존 평가에 적용하였다.

표면파 시험을 이용한 댐 사면 사력존 평가를 위해서는 사면부에서 실험이 수행되어야 한다. 그러나 일반적으로 댐의 사면은 경사를 가지고 있으며(Fig. 1(a)), 이러한 경사는 실험 수행에 있어 장애로 작용한다.

따라서 댐 사면부 사력존 평가는 주로 사면부 중간에 위치하는 소단에서 많이 이루어진다(Kim et al., 2009). 그러나 소단에서 실험시 측면 경계의 존재로 인해 발생할 수 있는 댐 구조의 2차원(또는 3차원) 효과에 의해 실험결과가 영향을 받을 수 있다. 즉 일반적인 반무한 층상 구조 시스템에서 결정된 3차원 이론분산곡선을 역산 과정에 사용하여 전단파 속도 주상도를 결정하는 표면파 시험 수행 시, 결정된 전단파 속도 주상도에 이러한 댐의 기하학적 구조가 영향을 줄 수 있다(Kim et al., 2010). 따라서 정확한 평가를 위해서는 측면 경계의 영향을 최소화 할 수 있는 사력존 표면에서 직접 실험을 수행하는 것이 좋다. 기울기를 가지는 사력존 표면에서 실험을 수행하기 위해서는 평가를 위해 사용되는 현장 실험 구성이 단순하며, 신속한 실험 수행이 가능하여야 한다.

일반적으로 CFRD 사력존은 좋은 입도분포를 갖는 다양한 크기의 자갈들로 구성되어 있으며, 표면은 최대 1,500mm 정도의 크기를 가지는 덮개석들로 덮여 있다(Fig. 1(b)). 이러한 재료들은 다양한 반사면을 가지게 되며, 표면에서 계측된 신호들에는 감지기 사이를 표면상 최단 거리로 진행하는 표면파 및 체적파 이외에 다양한 반사파들에 의한 잡음 성분이 존재하게 된다. 또한 댐 주변부에는 다양한 잡음원이 존재할 수 있으며, 이러한 잡음원에 의해 발생하는 잡음성분 또한 계측 신호에 포함된다. 특히 댐 주변부에 공사 현장이 있는 경우 이러한 외부 잡음의 크기는 매우 크다. 따라서 댐 사면부 사력존 평가를 위해서는 잡음의 영향을 효과적으로 제거할 수 있는 방법의 적용이 필요하다.

표면파 실험은 세단계로 구성된다. 현장 실험, 계측 데이터 분석을 통한 대상 시스템의 분산곡선 결정 그리고 분산곡선에 대한 역산과정을 통한 대상 시스템의 층상구조(전단파 속도 주상도) 평가로 구성된다. 표면파 실험 구성은 분산곡선을 결정하기 위해 사용되는 데이터 분석기법에 의해 결정된다. 표면파 실험은 다양한 방법들이 존재하나 크게 두가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫번째는 퓨리에 변환을 이용하는 두개의 감지기를 사용하는 유형이다(Stokoe et al., 1994; Marosi et al., 2004). 두번째는 주파수-파수 변환을 이용하는 다수의 감지기를 이용하는 유형이다(Park et al., 1999; Gabriels

(a) The slope of rockfill zone

(b) Surface of rockfill zone

Fig. 1. Rockfill zone of CFRD

et al., 1987). 다수의 감지기를 사용하는 표면파 시험은 두개의 감지기를 사용하는 표면파 시험에 비해 배경잡음의 영향을 상대적으로 적게 받는다(Newland, 1993). 그러나 신뢰성 있는 분산곡선을 얻기 위해서는 다수의 감지기로 구성된 긴 시험 측선이 필요하며, 이러한 다수 감지기의 필요성은 현장실험의 복잡성을 증가시켜 댐 사면 평가에 있어 다채널 표면파 시험의 적용성을 저하시킨다. 2채널 표면파 시험법은 다채널 시험법에 비해 현장 실험 구성은 상대적으로 간단하나 배경잡음에 의해 영향을 많이 받으며 신뢰성 있는 분산곡선 결정을 위해서는 높은 에너지를 가지는 가진원을 필요로 한다(Lin, 2007). 따라서 일반적인 2채널 표면파 시험법 또한 댐 사면 사력존의 평가에 적용하기에 어려움이 있다.

본 논문에서는 CFRD 사력존 평가 시 수반되는 여러 제약조건 하에서 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도를 결정하기 위하여, 잡음의 영향을 효과적으로 제거 가능하며, 단순한 실험구성으로 신속하며 간편한 실험이 가능한 표면파 기법인 HWAW방법(Park et al., 2004a,b; Park et al., 2004)을 국내 CFRD 사면 사력존의 전단파 속도 주상도 평가에 적용하였다.

2. HWAW 방법을 이용한 CFRD 사력존의 깊이에 따른 전단파 속도 주상도 결정

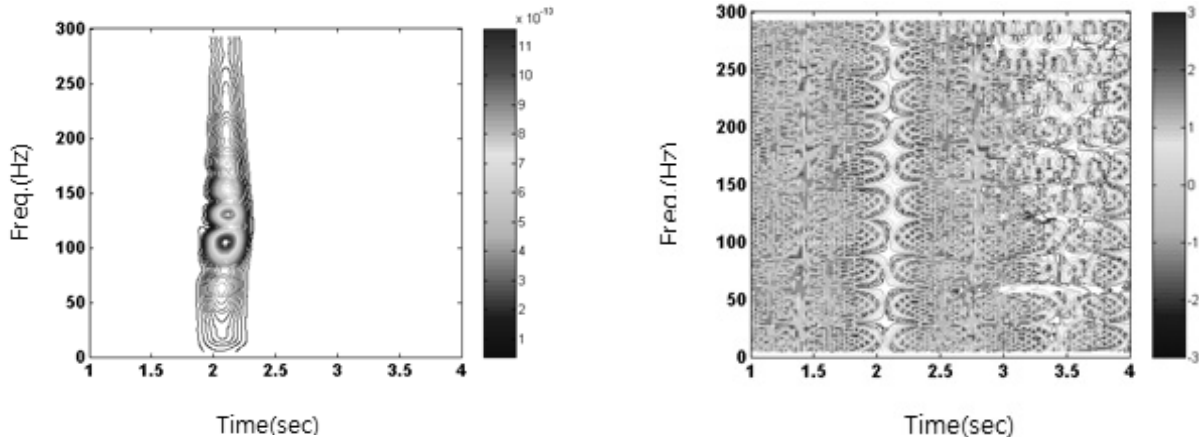
2.1 분산곡선의 결정

HWAW 방법은 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 파를 구성하는 다양한 주파수 성분들의 위상, 그룹 속도를 결정하는 방법이다(Park et al., 2004a). 이 방법에서는 두개의 계측기에서 계측된 신호를 하모닉 웨이브릿 변환을 이용하여 크기 시간-주파수 지도 및 위상 시간-주파수 지도를 결정한다(Fig. 2). 크기 및 위상 시간-주파수 지도는 각 주파수 성분들의 시간에 따른 순간 에너지 및 위상을 나타내며, 이를 통해 각 주파수 성분의 크기 및 위상의 시간에 따른 변동을 결정할 수 있다. HWAW 방법은 파의 위상 및 그룹 속도를 결정하기 위해 각 주파수 성분의 그룹 지체시간과 위상 지체시간을 결정한다. 그룹 지체시간, t_g^1, t_g^2은 각 주파수 성분의 에너지가 최대가 되는 시간으로 에너지 시간-주파수 지도로부터 결정한다(Fig. 3). 두개의 감지기 사이 간격이 D인 경우, 다음과 같이 그룹 속도를 결정할 수 있다.

$$V_g = \frac{D}{t_g^2 - t_g^1} \tag{1}$$

위상 속도를 결정하기 위해서는 위상 시간-주파수 지도로부터 각 주파수 성분의 위상 지체시간, t_{ph}^1, t_{ph}^2를 결정한다. 감지기 1에서의 위상 지체시간, t_{ph}^1은 감지기 1에서의 그룹 지체시간, t_g^1과 같게 정의한다(Fig. 3). 시간, t_{ph}^1에 해당하는 위상값, θ_1을 결정한 후, 감지기 2에서의 위상 지체 시간, t_{ph}^2를 결정한다. t_{ph}^2는 위상값, θ_1을 가지면서 t_g^2에 가장 가까운 위치에 해당하는 시간이다. 일단 위상 지체시간이 결정되면, 다음과 같이 위상속도를 결정한다.

$$V_{ph} = \frac{D}{t_{ph}^2 - t_{ph}^1} \tag{2}$$



(a) Magnitude time-frequency map (b) Phase time-frequency map

Fig. 2. Harmonic wavelet transform

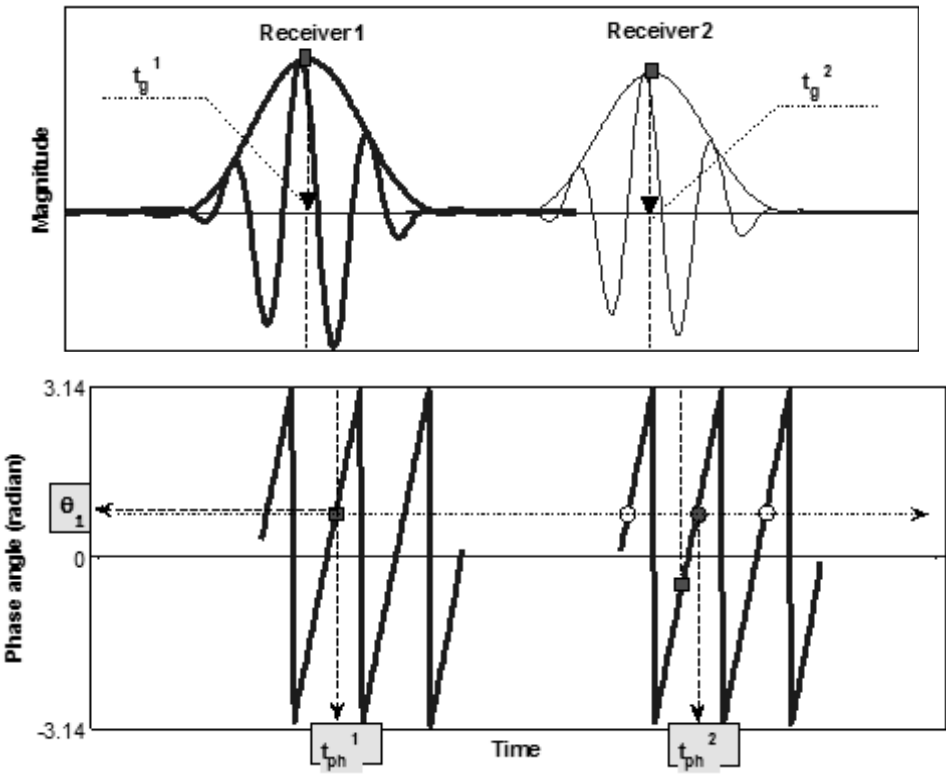


Fig. 3. Determination of phase and group delays

이때 감지기 2에서의 위상지체시간, t_{ph}^2는 시간영역에서 감지기 1과 2에서 결정된 각 주파수 성분의 상대적인 형태 차이가 일정 범위내인 경우에만 유효하다. 이러한 형태의 유사성은 다음과 같은 주기 정규화된 시간차이, Δt_T를 사용하여 결정할 수 있다.

$$\Delta t_T = -\frac{1}{V_{ph}}\frac{dV_{ph}}{d\lambda}D \tag{3}$$

여기서, λ는 파장이다. Δt_T이 커질수록 상대적인 형태의 차이가 커지게 되며, t_{ph}^2는 Δt_T이 0.5보다 작은 경우에만 의미를 가지게 되며, Δt_T이 0.5보다 커지게 되면 식 (4)와 같이 보정을 수행한 후 위상속도 계산에 사용하게 된다.

$$t_{ph,correct}^2 = period \times N + t_{ph,procedure2-D)}^2 \tag{4}$$

여기서, N은 $N-0.5 < \Delta t_T < N+0.5$을 만족시키는 정수이며, period는 주기이다.

표면파 시험에서는 대상 시스템을 모두 포함하는 다양한 파장 대역(또는 주파수 대역)에서 분산곡선의 결정이 필요하다. 일반적으로 CFRD 사력존에서 표면파 시험시 계측된 신호에는 다양한 잡음이 포함되어 있다. 만일 잡음 성분들의 주파수(또는 파장) 대역이 관심 주파수(또는 파장) 대역과 다른 경우 다양한 방법들에 의해 이러한 잡음 성분의 분해 및 제거가 가능하나 (Boudraa et al., 2007; Proakis et al., 1996; Misiti et al.), 잡음의 주파수 대역이 관심 주파수 대역과 일치하는 경우, 잡음의 제거는 기존 방법에서는 매우 어렵다. 표면파 시험에서 잡음의 주파수 대역은 일반적으로 계측 대상이 되는 파가 점유하는 주파수 대역과 일치한다.

잡음에 의한 신호의 왜곡은 두개의 관점에서 평가가 가능하다. 첫번째는 광역 신호잡음비(global S/N) 이며, 두번째는 국부 신호잡음비(local S/N) 이다. 광역 신호잡음비는 계측이 이루어지는 시간영역 전체에 걸친 각 주파수에서의 의미 있는 신호와 잡음 신호의 평균적인 에너지 비이다. 퓨리에 변환을 이용하는 위상각 전개방법(phase unwrapping method)(Nazarian et al., 1984)과 같은 데이터 해석기법에서는 신호의 신뢰도가 광역 신호잡음비에 의해 결정된다. 국부 신호 잡음비는 각 시간위치에서 신호 및 잡음의 순간 에너지 비이다. 광역 신호잡음비는 전체 시간대역에서 측정된 국부 신호잡음비들의 평균이다. 주어진 신호에서 최대 국부 신호잡음비는 시간대역 전체에서의 평균 국부 신호잡음비보다 항

상 크다. 즉 동일한 신호에서 최대 국부 신호잡음비는 광역 신호잡음비보다 항상 크다. 따라서 최대 국부 신호잡음비를 가지는 영역에서의 계측신호만을 데이터 해석에 사용할 수 있으면, 계측된 신호에서 사용할 수 있는 최대 신뢰도의 신호 질(quality)을 확보할 수 있으며, 잡음의 영향을 효과적으로 제거할 수 있다. 국부 신호잡음비를 평가하기 위해서는 시간영역에서 의미있는 신호와 잡음의 분리가 필요하나, 이러한 신호와 잡음의 분리는 불가능하다. 그러나 계측된 신호에서 에너지가 최대가 되는 시간위치, t_g에서 국부 신호잡음비가 최대가 된다고 가정하는 것은 합리적이다. HWAW 방법은 시간영역에서 계측된 신호 데이터중 시간 위치 t_g에서의 신호 데이터만을 사용하여 분산곡선을 결정한다. 계측된 시간영역 신호 중 최대 국부신호잡음비를 가지는 데이터만을 사용하는 HWAW 방법은 계측된 신호에서 추출할 수 있는 최대 신뢰도의 분산곡선을 결정할 수 있다.

높은 신호잡음비를 가지는 신호가 낮은 신호잡음비를 가지는 신호보다 더 신뢰할 수 있는 분산곡선을 제공한다. 높은 신호잡음비를 가지는 계측신호는 의미있는 신호를 생성하는 가진원의 에너지를 증가시켜 획득할 수 있다. 그러나 가진원의 에너지를 증가시키기 위해서는 가진원이 복잡해져, 현장실험의 신속함, 편의성, 단순성을 저해시킨다. HWAW 방법은 동일 가진원을 사용하는 경우 잡음의 영향을 기존 방법에 비해 보다 더 효과적으로 제거할 수 있으며, 동일 현장(잡음)조건에서 적은 에너지를 가지는 슬러지 햄머와 같은 보다 단순한 가진원을 사용하여 대상 시스템을 반영하는 신뢰할 수 있는 분산곡선의 결정이 가능하다. 이러한 간편한 실험장비를 사용한 현장 실험 및 높은 잡음조건에서 신뢰할 수 있는 분산곡선의 결정은 댐 사면 사력존 평가 등에서 매우 중요한 요소이다.

2.2 실험 방법 및 역산

HWAW 방법은 2채널 시험으로, 하나의 충격가진원과 두개의 감지기로 구성된다(Park et al., 2004b). 다층구조 시스템 표면에 가해진 충격 가진에 의해 발생하여 표면을 따라 전파하는 파는 체적파와 다양한 모드성분들로 구성된 표면파로 구성된다. 이때 각 체적파와 표면파 모드성분들은 서로 다른 전파 속도로 매질 표면을 따라 전파된다. 일반적인 2채널 표면파 시험에서는 순수한 표면파의 주파수(또는 파장)별 속도를 측정하여 역산에 사용한다. 순수한 표면파를 측정하기 위해서 측정 깊이에 따른 감지기 위치가 만족시켜야 할 제한 조건들이 제안되어 있다(Ganji et al., 1998). 이러한 감지기 위치에 대한 제한 조건을 만족시키기 위해 일반적인 2채널 표면파 시험은 하나의 전단파 속도 주상도를 결정하기 위하여 감지기 위치를 변화시켜가며 반복적으로 실험을 수행하여야 한다. 이러한 실험구성의 변경 및 반복적인 실험은 표면파 시험의 댐 사면 적용에 어려움으로 작용한다. HWAW 방법은 whole wave field 분산곡선을 현장에서 결정하여 역산에 사용한다. Whole wave field 분산곡선은 표면파 모드 성분들과 체적파를 모두 포함한다. whole wave field를 사용하는 경우, 일반적인 표면파 시험에서 필요로 하는 감지기 위치 제한에 영향을 받지 않으며, 현장 실험을 위한 감지기 위치를 제한없이 자유롭게 선택할 수 있다. 또한 감지기 위치를 바꾸어 가며 반복적인 실험을 수행할 필요가 없으며, 단일한 실험구성에 대해 단일한 가진을 통해 대상 시스템의 평가가 가능하다(Park et al., 2004b).

CFRD 사력존 평가를 위해 HWAW 방법은 짧은 감지기 간격 실험구성을 사용한다. 이 실험구성에서는 가진원과 감지기 1의 거리는 6～12m 사이 값을 사용하며, 두 감지기 사이 간격은 1～3m 사이 값을 사용한다 (Fig. 4). 이러한 짧은 감지기 간격을 사용하는 경우 대상 시스템의 상세한 국부적인 평가가 가능하다. 현장 실험을 통해 분산곡선이 결정되면, 역산과정을 통해 대상 시스템의 층상국조를 결정하게 된다. 역산과정은 대상 시스템의 반무한 층상구조를 가정하고 가정된 층상구조에 대한 이론 분산곡선을 결정한다. 만일 계산된 이론 분산곡선이 실험을 통해 구한 실험 분산곡선과 일치한다며, 가정된 층상구조를 대상 시스템의 층상구조로 결정하며, 만일 같지 않다면 층상구조를 재가정하여 위의 과정을 반복한다. HWAW 방법은 단일 어레이 역산을 사용한다. 위에서 언급된 바와 같이 표면에서 계측되는 파는 다양한 표면파 모드 성분과 체적파 성분의 합이다. 이때

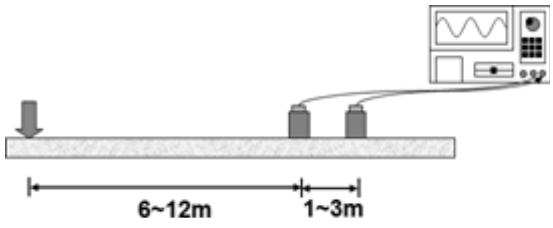


Fig. 4. Test configuration for HWAW method

각 모드 성분들과 체적파들의 전파 속도는 서로 다르다. 따라서 감지기 위치에 따라 계측되는 파의 형태가 변화하게 되며, 이러한 파형의 변화는 파속의 변화를 유발한다. 즉 이상적인 반무한 다층구조(횡방향 수평 층상구조)에서 층상구조의 변화 없이도 감지기 위치에 따라 분산곡선의 형태가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 역산과정에서는 실제 현장에서 사용된 감지기 위치와 동일한 위치에서 이론 분산곡선을 결정하여 역산에 사용해야 한다. 이러한 감지기 위치를 고려한 역산을 어레이 역산이라고 한다. 어레이 역산은 일반적인 2채널 표면파 시험을 위해 제안되었으며, 매우 좋은 실험결과들을 보여주고 있다(Joh, 1996). 그러나 감지기 위치를 변화시켜가며 실험을 수행하는 2채널 표면파 시험에서는 계산의 복잡성이 증가하며, 횡방향 변동성이 있는 층상 시스템에서는 적용시 어려움이 발생할 수도 있다. HWAW 방법에서는 단일한 실험구성을 사용하기 때문에 계산의 복잡성 증대없이 역산과정에서 감지기 위치를 고려할 수 있으며, 짧은 감지기 간격을 사용하기 때문에 횡방향 변동성에 의한 어레이 역산과정 적용의 어려움을 피할 수 있다. 본 연구에서는 역산을 위해 표면파 및 체적파의 영향이 모두 고려된 3D 이론분산곡선을 사용하였으며, 역산 자동화 알고리즘으로 유전자 알고리즘을 사용하였다(Park et al., 2012).

3. 수치실험을 이용한 잡음 조건하에서의 전체 데이터 분석 시스템 검증

잡음이 큰 댐 사면 사력존 실험조건하에서의 HWAW 방법을 이용한 전단파 속도 주상도 평가 시스템 전체의 타당성을 검토하기 위하여 수치모의 실험을 수행하였다. 수치모의 실험은 Fit7 프로그램(Joh, 1996)을 사용하여 수행되었다. Fit7은 동적강성행렬방법(Kausel et al., 1981)을 사용하여 지표면 충격가진에 의해 발생·전파되는 표면파 및 체적파에 의해 임의 지표면 위치에서의 발생하는 지반진동을 시간영역에서 생성한다. 수치모의 실험에 사용된 층상 구조는 Fig. 5와 같다. 여기서 모든층의 단위중량은 1.8t/m^3, 포아송비는 0.3을 사용하였다.

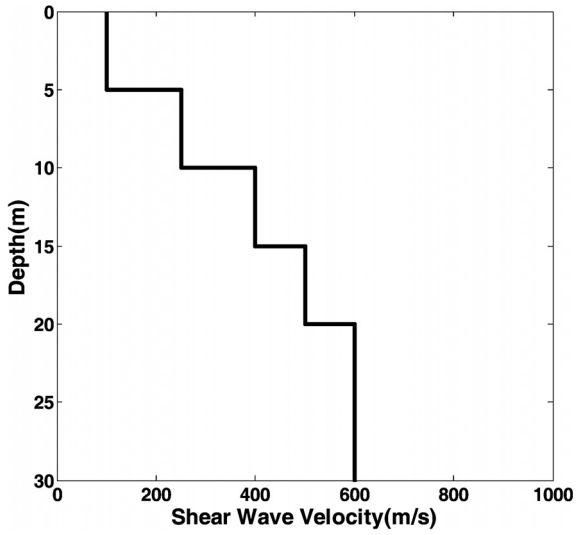
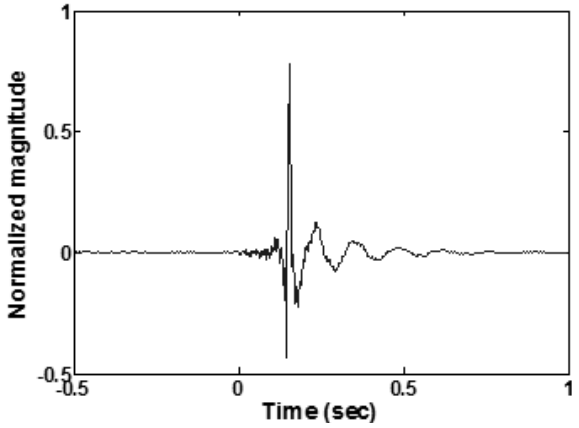
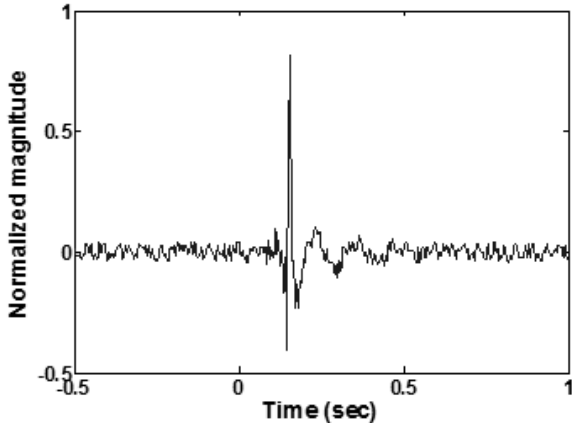


Fig. 5. Shear wave velocity profile for numerical simulation

수치모의 실험을 통하여 실제 댐사면 평가에서 사용된 짧은 감지기 간격 실험구성에 해당하는 가진원으로부터 10m, 13m 떨어진 두개의 감지기 위치에서 시간영역 신호를 생성하였다. 잡음 환경하에서의 HWAW 방법을 이용한 전단파 속도 주상도 평가 시스템의 타당성을 평가하고자 대상 주파수 대역 전체에 걸친 서로 독립인 화이트 랜덤 잡음을 생성하여 두개의 감지기에서 계



(a) Time domain signal without noise



(b) Time domain signal with noise

Fig. 6. Time domain signal without and with white random noise at receiver 2

측된 시간영역신호에 부가하였다. Fig. 6은 감지기 2에서 얻어진 신호와 잡음이 부가된 신호이다.

Fig. 7은 감지기 2에서 계측된 신호와 부가된 잡음의 파워 스펙트럴 밀도 함수를 비교한 그림이다. 이 그림은 각 주파수에서 신호와 잡음의 에너지를 나타내는 그림으로, 이 그림으로부터 부가된 잡음의 에너지가 계측된 신호에 비해 전체 주파수 대역에서 무시할 수 없는 큰 크기를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 계측된 잡음이 없는 신호와 잡음이 부가된 계측신호를 사용하여 결정된 위상각 스펙트럼을 비교한 그림이다. 위상각 스펙트럼은 일반적인 2채널 표면파 시험에서 분산곡선을 결정하는데 사용된다. 이 그림을 보면 잡음이 부가된 신호의 경우 잡음의 영향으로 위상각 스펙트럼의 왜곡이 매우 심해, 결정된 위상각 스펙트럼을 분산곡선 결정에 사용할 수 없다. 즉 부가된 잡음은 일반적인 표면파 방법을 위한 퓨리에 변환에 기반한 데이터 해석시 매우 큰 영향을 줌을 알 수 있다.

잡음 조건하에서 제안된 방법의 분산곡선 결정 성능을 알아보기 위해 Fig. 8의 위상각 스펙트럼 결정에 사용된 잡음이 부가된 계측신호에 대해 HWAW 방법을 사용하여 분산곡선을 결정하였다. Fig. 9는 HWAW 방법에 의한 분산곡선과 대상 층상시스템에 대한 이론분산곡선을 비교한 그림이다. 그림을 보면 잡음 조건하에서도 전체 주파수 대역에 걸쳐 이론분산곡선과 HWAW 방법에 의한 분산곡선이 잘 일치함을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 제안된 방법은 댐 사면 사력존과 같이 잡음이 있는 환경하에서도 신뢰할 수 있는 분산곡선을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

잡음이 부가된 신호를 대상으로 HWAW 방법에 의해 결정된 분산곡선을 사용하여 역산을 수행하였다. 역산은 유전자 알고리즘을 사용한 자동화 역산을 사용하였다. Fig. 10(a)는 실험분산곡선과 역산을 통해 결정된 최종 전단파 속도 주상도에 해당하는 이론분산곡선을 비교한 그림이다. 실험분산곡선과 이론분산곡선이 매우 유사함을 알 수 있고, 이를 통해 유전자 알고리즘을 사용한 자동화 역산의 타당성을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 역산을 통해 결정된 최종 전단파 속도 주상도와 실제 전단파 속도 주상도를 비교한 그림이다. 그림을 보면 두개의 주상도가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 비교들을 통해 제안된 방법은 매우 심각한 잡음 조건하에서도 신뢰할 수 있는 분산곡선 및 전단파 속도 주상도의 결정이 가능함을 확인할 수 있으며, 댐 사면 사력존 평가에 매우 효과적으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있다.

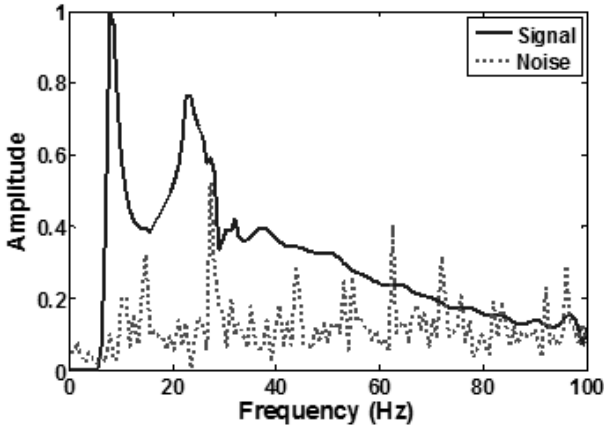


Fig. 7. Comparison of signal and noise energy in the frequency domain

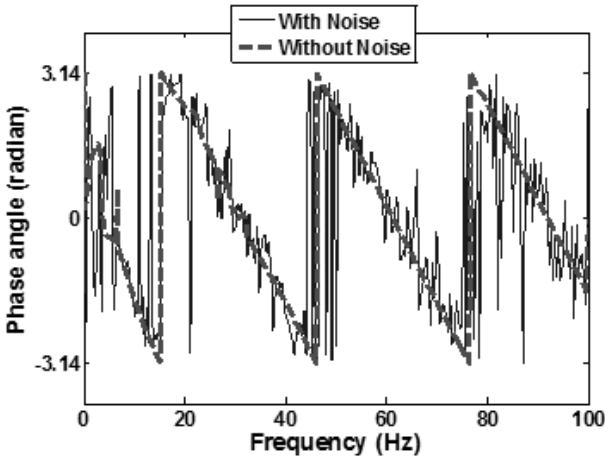


Fig. 8. Comparison of phase spectrum using with and without noise

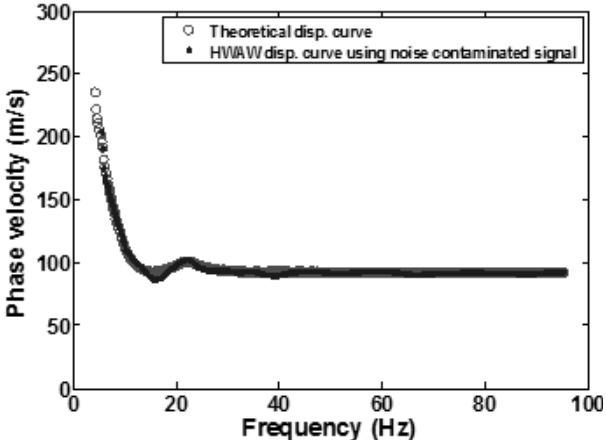
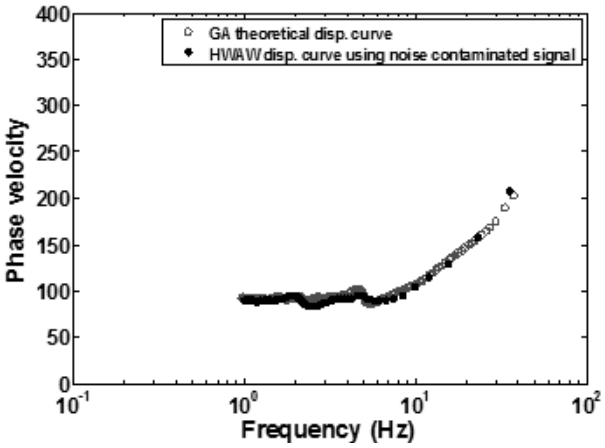
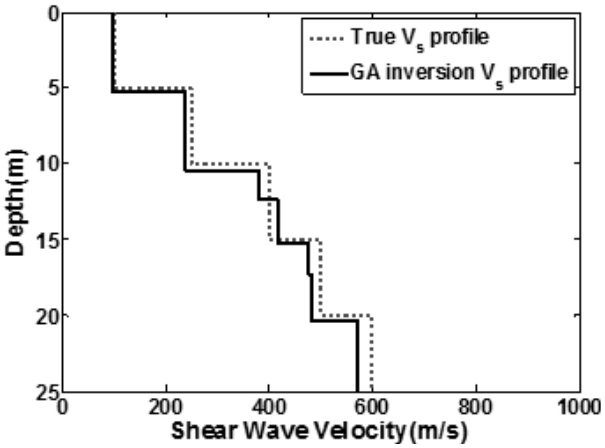


Fig. 9. Comparison of theoretical dispersion curve and experimental dispersion curve by HWAW method



(a) Comparison of dispersion curves using GA inversion shear wave velocity profile



(b) Comparison of shear wave velocity profiles

Fig. 10. Performance of inversion process using automated genetic algorithm

4. 국내 CFRD 사력존의 전단파 속도 주상도 결정

4.1 현장 실험

국내에 건설된 CFRD중 A, B, C댐 3곳을 선정하여 HWAW 현장 시험을 수행하였으며, 이를 통해 사력존 전단파 속도 주상도를 결정하였다. A댐은 Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이 덮개석 사이를 채우고 있는 자갈들의 부분 유실로 인해 표면에서 확인 가능한 공동들이 존재함을 볼 수 있다. 이러한 대형 덮개석 및 공동의 존재는 표면에서 계측되는 파에 상당한 크기의 잡음을 유발할 수 있다. B와 C댐은 A댐과 달리 덮개석 사이를 채우고 있는 자갈들의 유실이 거의 없는 양호한 상태를 보이고 있다(Fig. 11(b)와 (c)). 실험은 사면위에서 수행되었다. A댐에서는 댐 정상부에서 사면을 따라 25m 하부에 위치하며, 관리용 계단을 중심으로 대칭으로 위치한 4곳의 위치(a1, a2, a3, a4)를 선정하여 실험을 수행하였다. B댐에서는 상부에서 18m, 댐 양 끝단에서 144, 123m 떨어진 두 곳의 위치(b1, b2)를 선정하여 실험을 수행하였다. C 댐에서는 댐 정상부에서 17m, 댐 양 끝단에서 120, 105m 떨어진 두 곳의 위치(c1, c2)를 선정하여 실험을 수행하였다.

(a) A dam

(b) B dam

(c) C dam

Fig. 11. Surface of rockfill zone

각 실험위치에서의 실험 구성은 짧은 감지기 간격 실험구성(가진원-감지기 1 : 10m, 감지기 간격 : 3m)을 사용하였다. 사면에 대한 연직방향 가진을 슬러지 햄머를

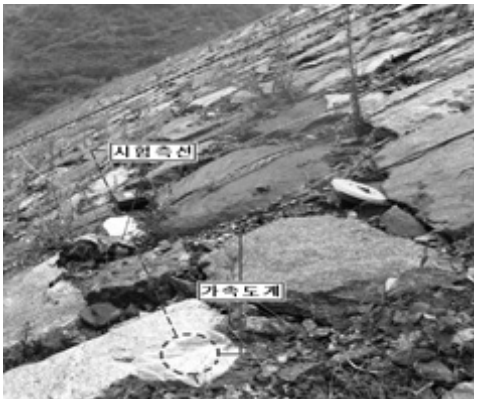


Fig. 12. HWAW test on the slope of the dam

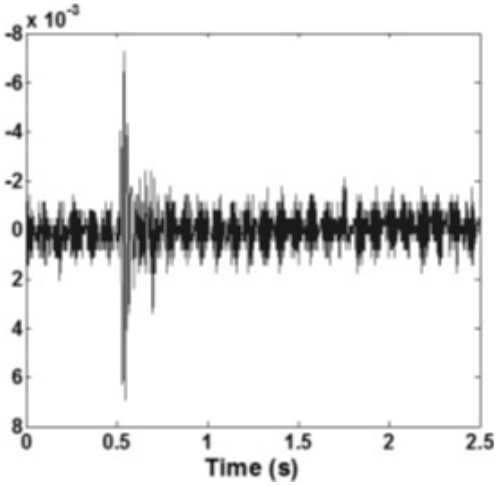
사용하여 가하였으며, 감지기로는 사면에 대해 연직방향으로 설치된 PCB 393C 가속도계를 사용하였다. 감지기는 덮개석 사이의 자갈위에 설치하였다(Fig. 12).

5.2 실험 결과

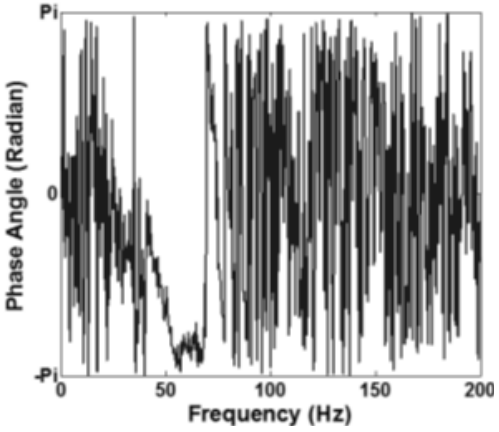
Fig. 13(a)는 댐 사면 현장실험들을 통해 계측된 시간영역 신호들 중 잡음에 의한 손상의 정도가 큰 신호로, 감지기 2에서 얻어진 시간영역 신호 예이다. 신호를 보면 덮개석 및 공동에 의한 파의 난반사, 주변 공사현장 중장비에 의한 진동등에 의해 매우 큰 정도의 잡음이 존재함을 볼 수 있다. 잡음의 영향정도를 보이기 위해 얻어진 시간영역신호를 사용하여 일반적인 2채널 표면파 시험에서 사용하는 위상각 스펙트럼을 결정하였다(Fig. 13(b)). 위상각 스펙트럼을 보면 잡음에 의해 위상각 스펙트럼이 매우 크게 손상되어 있음을 볼 수 있으며, 이러한 손상의 경우 일반적인 2채널 표면파 시험에서는 계측된 신호를 분산곡선 결정에 사용할 수 없다.

Fig. 13(b)에서 보여진 위상각 스펙트럼을 결정하는데 사용된 시간영역 신호에 대해 HWAW방법을 적용하여 분산곡선을 결정하였다(Fig. 14). 그림을 보면 3절에서 수치모의 실험을 통해 보여진 바와 같이 심각한 잡음 조건하의 현장에서도 분산곡선을 효과적으로 결정할 수 있음을 볼 수 있다.

Fig. 15는 A댐의 4개 실험위치에서 결정된 전단파 속도 주상도들이다. 이때 깊이는 사면에 대해 연직한 방향으로 사면 표면에서부터의 깊이를 나타낸다. 그림을 보면 표층 0.5m이내에서는 100m/s이내의 매우 작은 값을 가진다. 이는 자갈재료의 특성상 표층의 낮은 구속압에 기인하는 것으로 판단된다. 깊이가 증가함에 따라 전단



(a) Time domain signal measured at receiver 2 in the field



(b) Phase spectrum

Fig. 13. Time domain signal and phase spectrum

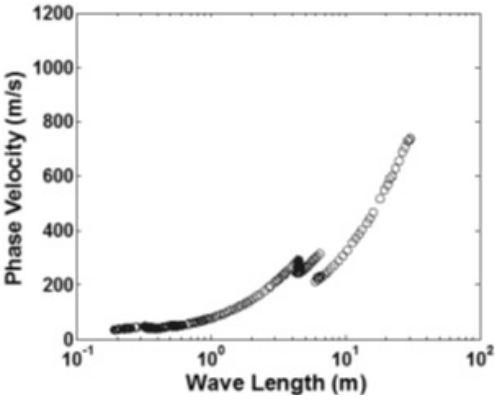


Fig. 14. Dispersion curve by HWAW method under noisy field condition

파 속도는 증가하여 깊이 7m 부근에서 실험위치 b2, b3에서는 전단파 속도가 500m/s 내외의 값을 보이며, 실험위치 b1, b4에서는 400m/s와 300m/s 내외의 값으로 실험위치 b1, b4에 비해 작은 값을 보인다. 깊이 13m 부근

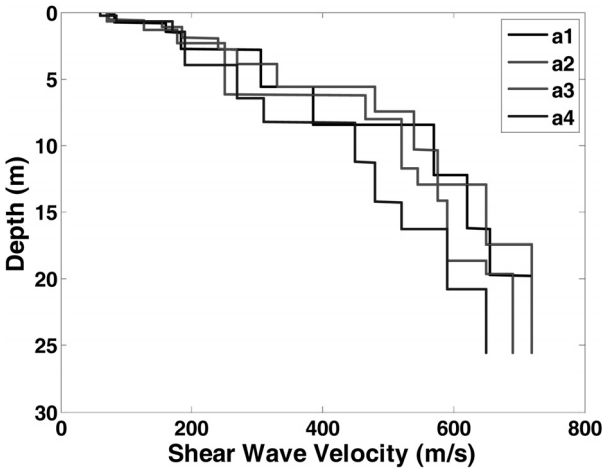


Fig. 15. Shear wave velocity profile of rockfill zone of A dam

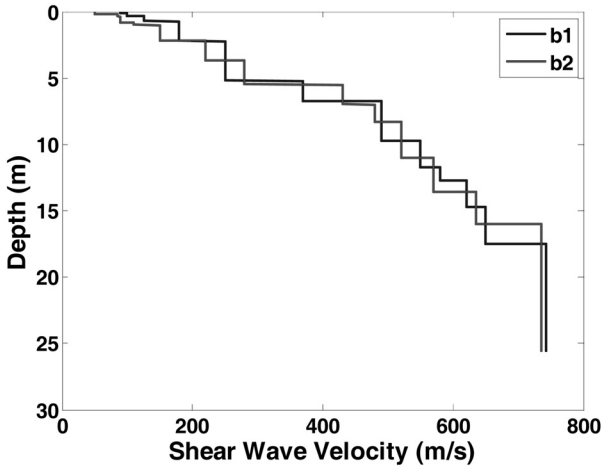


Fig. 16. Shear wave velocity profile of rockfill zone of B dam

에서는 실험위치 b1, b2, b3 모두 620m/s 부근의 유사한 값을 보이나, b4에서는 580m/s의 상대적으로 작은 속도값을 보인다. A댐에서 결정된 4개의 주상도를 보면 깊이에 따른 전단파 속도가 증가하는 유형은 비슷하나 각 깊이에서 속도값을 비교하였을 때 차이를 가짐을 볼 수 있다.

Fig. 16은 B댐의 두개 실험위치에서 결정된 사면의 전단파 속도 주상도들이다. B댐에서도 0.5m 이내 깊이에서는 100m/s 이내의 작은 속도값을 보인다. 깊이가 증가함에 따라 전단파 속도가 지속적으로 증가하여 20m 이상에서는 750m/sce 이상의 속도값을 가짐을 볼 수 있다. 두개의 전단파 속도 주상도를 비교해보면 매우 유사함을 볼 수 있으며, 이로부터 B댐 사면부가 개략적으로 위치에 상관없이 유사한 전단파 속도 구조를 가졌다고 볼 수 있다.

Fig. 17은 C댐의 두개 실험위치에서 결정된 사면의

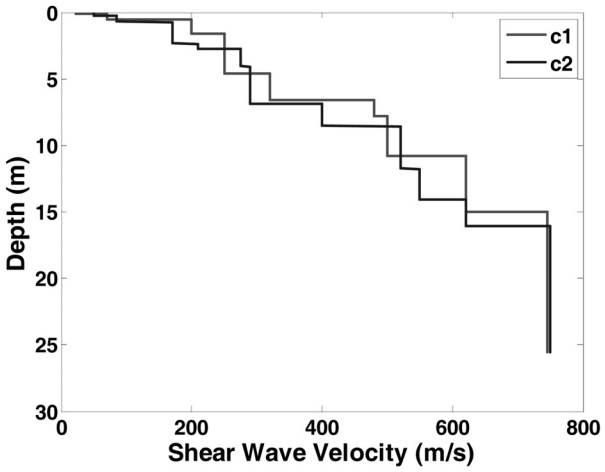


Fig. 17. Shear wave velocity profile of rockfill zone of C dam

전단파 속도 주상도들이다. B댐에서도 0.5m 이내 깊이에서는 100m/s 이내의 작은 속도값을 보인다. 깊이가 증가함에 따라 전단파 속도가 지속적으로 증가하여 20m 이상 깊이에서는 750m/sec 내외의 속도값을 가짐을 볼 수 있다. 두개의 전단파 속도 주상도를 비교해보면 매우 유사함을 볼 수 있으며, 이로부터 댐 사면부가 위치에 상관없이 개략적으로 유사한 전단파 속도 구조를 가졌다고 볼 수 있다.

Fig. 15에서 17을 보면 사력존에서 깊이에 따라 전단파 속도가 유사한 경향을 보이며 증가함을 볼 수 있다. 그러나 전단파 속도 주상도는 서로 일치하지 않으며, 실험위치에 따라 그리고 댐에 따라 동일깊이에서 서로 다른 값들을 보인다. 이러한 차이는 댐 사력존 물성치 분포의 공간 변동성에 의하며, 이러한 물성치 분포의 공간 변동성은 댐 축조 재료의 차이, 댐 축조 조건의 차이 등 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다. 일반적으로 대상 댐 사력존에서 얻어진 전단파 속도 주상도들의 단순 평균을 통해 하나의 대표 주상도가 결정되고, 결정된 대표 주상도는 결정론적 댐 해석을 위해 사용된다. 그러나 이러한 결정론적 단일 해석은 해석결과에 영향을 주는 전단파 속도 분포의 불확실성을 고려할 수가 없다. 경우에 따라 이러한 불확실성은 해석결과에 문제를 야기할 수도 있다. 이러한 불확실성을 고려하기 위해서는 불확실성이 고려된 댐 사력존의 전단파 속도 주상도가 제공되어야 한다.

물성치의 공간변동성이 고려된 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도를 현장에서 결정된 전단파 속도 주상도들로부터 결정하는 방법은 이어지는 논문에서 논하였다.

6. 결 론

CFRD 사력존은 CFRD의 구조적 안전성을 담당하는 부분으로 이러한 사력존의 평가는 댐체 구조안정성 평가 및 유지관리 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 다양한 표면파 기법중 하나인 HWAW 방법을 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도 평가에 적용하였다. HWAW 방법은 다른 표면파 시험법에 비해 상대적으로 단순한 실험구성을 사용하여 신속하면서 간편한 현장실험이 가능하며, 높은 잡음조건하에서도 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도 결정이 가능하다. 본 연구에서는 CFRD 사력존 평가에 있어 제안된 방법의 적용성을 알아보기 위해 수치모의 실험을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 방법이 댐 사력존 평가를 위해 적합한 단순한 실험구성을 사용하여 높은 잡음조건하에서도 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

국내 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도 결정을 위해 3곳의 댐을 선정하여 총 8곳의 실험위치에서 제안된 방법을 적용하였다. 이를 통해 CFRD 사력존의 전단파 속도 주상도를 결정하였다. 결정된 전단파 속도 주상도들을 보면, 깊이에 따라 전단파 속도가 유사한 경향을 보이며 증가함을 볼 수 있으나, 전단파 속도 주상도가 서로 일치하지는 않는다. 즉 댐 내 실험위치에 따라 그리고 댐에 따라 동일깊이에서 서로 다른 전단파 속도 값들을 보인다. 이러한 차이는 댐 사이 또는 동일 댐 사력존 내부 전단파 속도 분포의 공간 변동성에 의한다. 이러한 물성치 분포의 공간 변동성은 댐 축조재료, 댐 축조 조건의 차이 등 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다.

표면파 시험을 통해 얻어진 전단파 속도 주상도들을 단순 평균하여 각 사력존을 대표하는 하나의 전단파 속도 주상도를 결정하는 경우 결정된 전단파 속도 주상도에는 불확실성이 존재하게 된다. 이러한 불확실성을 고려하는 방법은 이어지는 논문에서 다루었다.

참고문헌 (References)

1. Boudraa, A.O. and Cexus, J.C. (2007), EMD-based signal filtering, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.56, No.6, pp.2196-2202.
2. Gabriels, P., Snieder, R., and Nolet, G. (1987), In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode rayleigh waves, *Geophysical Prospecting*, Vol.35, pp.187-196.
3. Ganji, V., Gucunski, N., and Nazarian, S. (1998), Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.8, pp.757-770.
4. 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 of Austin
5. Kausel, E. and Roesset, J.M. (1981), Stiffness matrices for layered soils, *Bull Seismological Soc. of Am,* Vol.71, pp.1743-1761.
6. Kim, J.T., Kim, D.S., Park, H.J., and Kwon, H.K. (2009), Estimation of dynamic material properties for fill dam: I. In-situ shear wave velocity profiles, *J. of the Korean Geotechnical Society,* Vol.25, No.12, pp.69-85.
7. Kim, J.T. (2010), Application of the surface wave method to various geotechnical structures of finite boundaries, Ph.D. Dissertation, KAIST.
8. Lin, Y.C. (2007), Characterizing Vs profiles by the SASW method and comparison with other seismic methods, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
9. Marosi, K. and Hiltunen, D. (2004), Characterization of spectral analysis of surface waves shear wave velocity measurement uncertainty, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.10, pp.1034-1041.
10. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenhein, G., and Poggi, J.M., Wavelet Toolbox™ 5: User's Guide, The MathWorks, Inc.
11. Nazarian, S. and Stokoe, K.H.II. (1984), Use of surface waves in pavement evaluation, *Transportation Research Record,* Vol.1070, pp.132-144.
12. Newland, D.E. (1993), An introduction to random vibration, spectral & wavelet analysis, 3rd ed. Mineola, New York, Dover Publications.
13. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J.H. (1999), Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics,* Vol.64, pp.800-808.
14. Park, H.C. and Kim, D.S. (2004a), Development of seismic site characterization method using HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) Method (I): Determination of dispersion curve, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2C, pp.106-115.
15. Park, H.C. and Kim, D.S. (2004b), Development of seismic site characterization method using HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) method (II): Experimental setup and inversion process, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.2C, pp. 117-124.
16. Park, H.C., Kim, D.S., and Lee, B.S. (2004), Field application of new seismic site characterization using HWAW (Harmonic Wavelet Analysis of Wave) method, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.6, pp.51-59.
17. Park, H.C. and Hwang, H.J. (2012), Development of automated inversion method for HWAW method using genetic algorithms, *J. of the Korean Geotechnical Society,* Vol.28, No.8, pp.55-64.
18. Proakis, J.G. and Manolakis D.G. (1996), Digital signal processing: Principles, algorithms, and applications, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
19. Stokoe, K.H.II., Wright, S.G., Bay, J.A., and Roesset, J.M. (1994), Characterization of geotechnical sites by SASW method, in: ISSMFE Technical Committee #10 for XII IICSMFE, Geophysical Characterization of Sites, A.A.Balkema Publishers/Rotterdam&Brookfield, Netherlands, pp.15-25.
20. Uddin, N. (1992), Seismic analysis of earth-core and concrete-face rockfill dams, Ph.D. Dissertation, University of New York at Buffalo.

Received : October 24th, 2013
Revised : December 23rd, 2013
Accepted : March 31st, 2014