

# 국내 콘크리트 표면차수벽형 석괴담(CFRD) 사력존의 전단파 속도 분포 결정(II): 물성치의 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 CFRD 사력존의 1차원 전단파 속도 주상도의 결정

## Determination of Representative Shear Wave Velocity Profile for Rockfill Zone of CFRD Considering Uncertainty Caused by Spatial Variation of Material Property

황 헤 진<sup>1</sup> Hwang, Hea-Jin

박 형 춘<sup>2</sup> Park, Hyung-Choon

### Abstract

This paper determines 1D shear wave velocity ( $V_s$ ) distribution of rockfill zone of CFRD using  $V_s$  profile determined by the surface wave test. There exists uncertainty in the field test result because of a spatial variation of material property. The harmonic wavelet transform is used to evaluate the uncertainty of test result and generate random 1D  $V_s$  distributions which may exist in the rock fill zone. Through the statistical analysis of generated random  $V_s$  distributions, the representative 1D  $V_s$  distribution considering the uncertainty of test results is proposed for the rockfill zone of CFRD in Korea.

### 요 지

본 논문에서는 국내 CFRD 사력존을 위한 1차원 전단파 속도 분포를 제안하였다. 이를 위해 선정된 3개의 담 사면 8곳에서 수행된 표면파 시험 결과를 사용하였다. 다양한 원인에 의해 존재 가능한 사력존 물성치 공간 변동성에 의한 표면파 시험 결과의 불확실성을 고려하고자 시험에서 얻어진 개별 주상도들을 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 공간-파수 영역에서 분석하였다. 이를 통해 전단파 속도 주상도에 존재하는 불확실성을 평가하였다. 논문에서 제안된 방법을 통해 사력존에 존재 가능한 1차원 전단파 속도 분포들을 생성하였으며, 생성된 1차원 전단파 속도 분포들을 사용하여 물성치 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 국내 CFRD 사력존의 1차원 전단파 속도 분포를 결정하였다.

**Keywords :** Uncertainty, Shear wave velocity, CFRD, Rockfill zone

1 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ.)

2 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](mailto: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. 서론

콘크리트 표면차수벽형 석괴담(CFRD : Concrete Faced Rockfill Dam)과 같은 필댐의 사력존은 댐체의 구조적 안정성을 유지하는 기능을 수행한다. 일반적으로 지진 하중과 같은 외부하중에 의한 동적거동 시 CFRD의 안정성은 제체의 대부분을 구성하는 사력재료의 공학적 특성에 좌우되는 것으로 알려져 있으며(Uddin, 1992), 특히 사력존의 전단탄성계수는 지진하중 시 댐체 변위에 가장 큰 영향을 주는 요소이다(Ha, 2007). 따라서 사력존의 정확한 전단탄성계수 분포의 결정은 CFRD 안전 및 유지관리를 위한 댐 해석에 있어 매우 중요한 요소이다. 이러한 사력존의 평가는 탄성과 비파괴 시험법인 표면과 시험을 이용하여 대상 댐체에 손상없이 효과적으로 수행될 수 있다(Hwang et al., 2014). 표면과 시험은 대상 시스템의 깊이에 따른 전단파 속도 분포인 전단파 속도 주상도를 결정한다. 전단탄성계수는 전단파 속도로부터 직접적으로 간단하게 결정할 수 있다.

일반적으로 사력존에서 깊이에 따라 전단파 속도는 유사한 경향을 보이며 일정한 범위내에서 증가함을 볼 수 있다(Hwang et al., 2014). 그러나 서로 다른 댐 또는 동일 댐의 서로 다른 위치에서 수행된 실험을 통해 결정된 주상도들은 전체적인 층의 개수, 각 층의 속도 및 두께 등에서 차이를 보인다. 댐 사이의 전단파 속도 주상도의 변동성 또는 동일 댐 내의 위치에 따른 전단파 속도 주상도의 변동성을 포함하는 사력존 전단파 속도 주상도의 공간 변동성은 댐 사이의 축조 재료의 차이, 동일 댐내 위치에 따른 재료의 차이, 시공 조건의 차이, 현장 실험 시 각 위치의 완전히 동일하지 않은 실험조건과 같은 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다. 일반적으로 대상 댐 사력존에서 얻어진 전단파 속도 주상도들의 평균 등을 통해 하나의 대표 주상도가 결정되고, 결정된 주상도를 결정론적 댐 해석에 사용한다. 그러나 이러한 단일한 전단파 속도 주상도를 사용한 결정론적 해석은 해석결과에 존재하는 불확실성을 평가할 수가 없으며, 경우에 따라 이러한 불확실성은 해석결과에 문제를 야기할 수도 있다. 이러한 공간 변동성에 의해 발생할 수 있는 전단파 속도 주상도의 불확실성은 공간 변동성에 의해 특정 존재 확률을 가지고 댐 사력존에 존재할 수 있는 모든 가능한 전단파 속도 주상도들의 결정 및 이에 대한 평가를 통해 고려될 수 있다. 즉 존재 가능한 모든

주상도들에 대한 통계적 평가를 통해 댐 사력존의 물성치 공간 변동성에 의해 발생할 수 있는 불확실성이 고려된 전단파 속도 분포를 결정할 수 있다. 또한 생성된 모든 전단파 속도 주상도들에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 사용한 확률론적 해석을 통하여 해석결과에 존재하는 risk를 평가할 수 있다(Rota et al., 2011; Rathje et al., 2010).

이러한 존재 가능한 모든 전단파 속도 주상도들의 생성은 다양한 지반상태에 대한 예비 조사를 통하여 기 결정된 영향요소 수치값들을 활용한 지반 모델을 통해 이루어지거나(Toro, 1995), 현장에서 계측된 지반조사 결과들에 대한 단순 통계분석을 통해 이루어질 수 있다(Rota et al., 2011). 이 중 기 결정된 영향요소 수치값들을 이용한 지반 모델을 활용하는 방법은 모델 생성을 위해 사용되는 영향요소 수치 값들이 흙 지반을 대상으로 생성된 값들이기 때문에 사력존 평가에 활용될 수 없다. 현장에서 계측된 지반조사 결과들에 대한 단순 통계분석 활용하는 방법은 대상부지의 층상구조가 횡방향으로 매우 유사한 경우, 즉 횡방향으로 지반을 구성하는 층의 개수가 거의 일정하며 각 층의 두께가 크게 차이가 나지 않는 경우, 대상부지의 여러 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도들을 구성하는 각 층의 두께 및 속도값에 대한 통계적 평가를 통해 대상 지반에 존재하는 전단파 속도 주상도들을 생성할 수 있다(Rota et al., 2011). 그러나 실제 현장 실험시 얻어지는 주상도들은 횡방향으로 유사한 구조를 가지더라도 층의 개수가 일정하지 않고 층 두께가 매우 다양하게 존재하는 경우가 일반적이다. 따라서 이러한 일반적인 주상도 생성 방법의 적용은 경우에 따라 어려움이 존재한다. 또한 기존의 주상도 생성 방법은 PS-suspension logging 시험이나 CPT 시험과 같은 실험 결과에는 적용하기가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 제한 사항을 극복할 수 있는 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 대상 시스템에 존재 가능한 전단파 속도 분포 생성방법(Hwang et al., 2012)을 불확실성이 고려된 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도 결정에 적용하였다. 2절에서는 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도 불확실성 고려를 위해 제안된 방법에 대해 설명하였으며, 3절에서는 제안된 방법의 국내 CFRD 사력존 평가 적용을 통해 불확실성이 고려된 국내 CFRD 사력존의 깊이에 따른 전단파 속도 분포를 제안하였다.

## 2. 댐 사력존 전단파 속도 주상도 결정시 물성치의 공간 변동성에 의한 불확실성 고려방법

댐의 거동 해석을 위해서는 Fig. 1과 같은 대상 댐의 전단파 속도 주상도가 결정되어야 한다. 이러한 전단파 속도 주상도는 다양한 탄성파 시험에 의해 결정될 수 있다. 층상구조를 이루는 전단파 속도 주상도는 식 (1)에서와 같이 서로 독립인 다양한 파수(wave number:  $k$ ) 성분들의 조합으로 볼 수 있다.

$$P(x) = \sum_k p_k(x) = \sum_k A_k(x) \cos[\theta_k(x)] \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 길이 또는 깊이와 같은 공간 좌표를 나타내며,  $P(x)$ 는  $x$ 에 따른 전단파 속도의 분포이다.  $p_k(x)$ 는  $P(x)$ 를 구성하는 각각의 파수 성분을 나타내며, 식 (1)에서 보여진 바와 같이 진폭 변조된 신호의 형태를 가진다.  $A_k(x)$ 는  $x$ 에 따른 파수  $k$ 성분의 크기를 나타내는 크기함수이며,  $\theta_k(x)$ 는  $x$ 에 따른 파수  $k$ 성분의 위상을 정의하는 데 사용되는 위상함수이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 각 파수 성분의 형태는 크기함수와 위상함수에 의해 결정되며, 따라서 각 파수성분에 발생 가능한 불확실성은 크기함수와 위상함수의 불확실성에 의해 결정된다.

대상 지반에 존재 가능한 다양한 전단파 속도 주상도는 다음과 같이 결정할 수 있다. 먼저 대상 지반의 전단파 속도 주상도에 하모닉 웨이브릿 변환을 수행하여 전단파 속도 주상도를 구성하는 파수 성분들의 공간상 분포를 Fig. 2(a)와 같이 결정한다. 이때 결정된 각각의 파

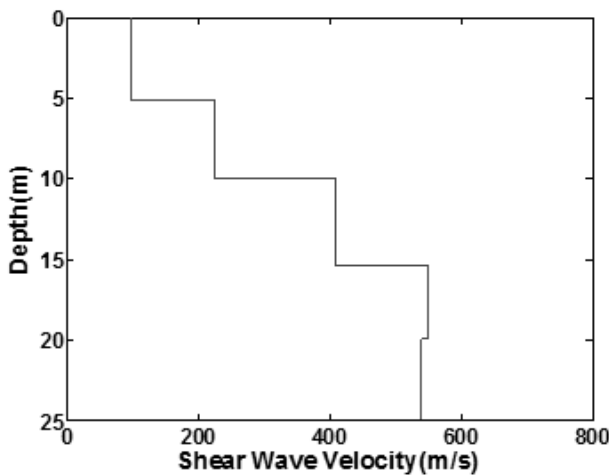


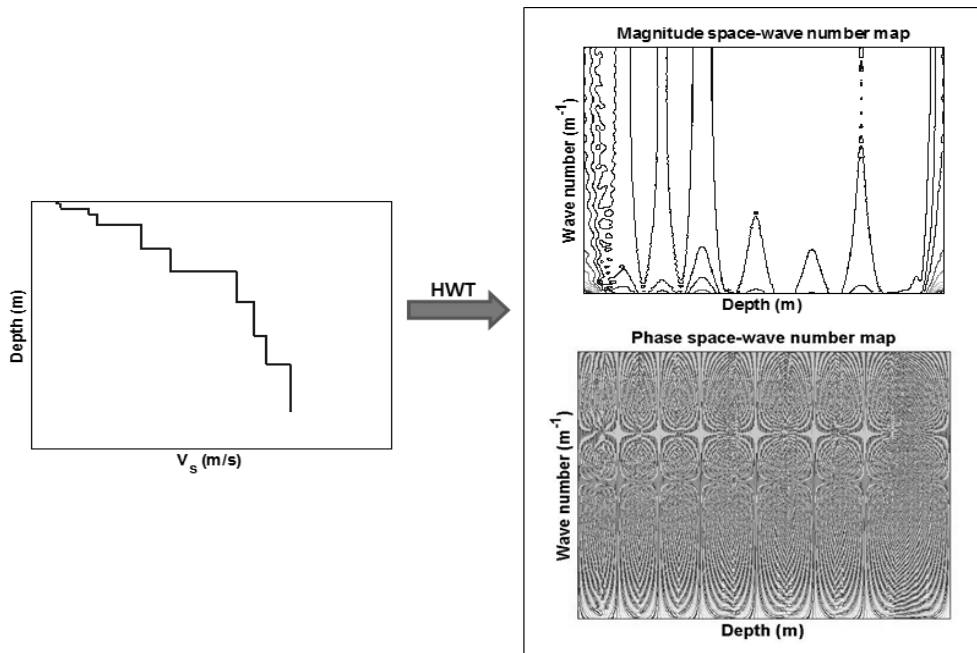
Fig. 1. Shear wave velocity profile

수 성분들의 크기와 위상에 대해 Fig. 2(b)를 활용하여 불확실성을 부여한다. 대상 지반에 존재하는 불확실성을 평가하기 위해 대상 지반에서 얻어진 전단파 속도 주상도들에 대해 Fig. 2(a)와 같이 각 파수성분들을 결정한 후 동일 파수성분들을 구성하는 크기와 위상들의 분산을 Fig. 2(b)와 같이 결정한다. 불확실성의 부여는 결정된 분산값을 이용하여 정규확률분포를 가지는 무작위 값을 Fig. 2(a)에서 결정된 각 파수 성분의 크기와 위상에 부가한다. 크기와 위상에 불확실성이 부가된 파수 성분들에 대해 역하모닉 웨이브릿 변환을 수행하여 불확실성이 부가된 전단파 속도 주상도를 Fig. 2(c)와 같이 결정한다. Fig. 2(b)의 결과를 이용한 각 파수 성분의 크기와 위상을 위한 무작위 값 생성과정과 Fig. 2(c)와 같이 생성된 무작위값과 역하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 존재 가능한 전단파 속도 주상도 생성과정을 N회 반복하여, 대상 지반에 존재 가능한 N개의 전단파 속도 주상도를 결정한다.

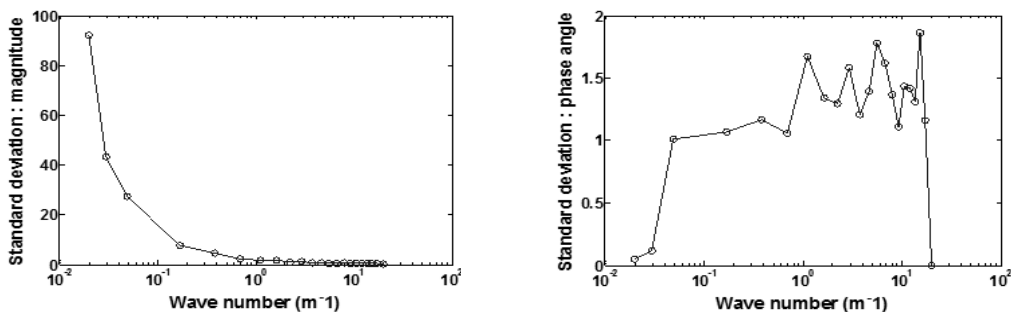
이러한 전단파 속도 주상도들로부터 CFRD 사력존의 깊이별 전단파 속도값 분포를 결정할 수 있다. 즉, 각 깊이에서 어떤 속도값을 중심으로 몇 퍼센트의 확률로 전단파 속도값이 특정 범위내에 존재한다는 것을 결정할 수 있다. 이러한 깊이에 따른 전단파 속도 분포의 결정을 위해 국내 CFRD 사력존 전단파 속도 주상도의 전체 평균을 기준으로 사용하는 경우, 댐 사이의 축조 재료 차이에 의한 물성치 변동성을 포함하는 댐 사력존 물성치의 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 우리나라 CFRD 사력존을 위한 전단파 속도 분포를 결정할 수 있다. 만일 특정 댐의 사력존에서 결정된 전단파 속도 주상도를 기준 주상도로 사용하는 경우 특정 댐 사력존 물성치의 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 특정 댐 사력존의 깊이별 전단파 속도 분포를 결정할 수 있다.

## 3. 물성치 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 국내 CFRD 사력존의 깊이에 따른 1차원 전단파 속도 분포

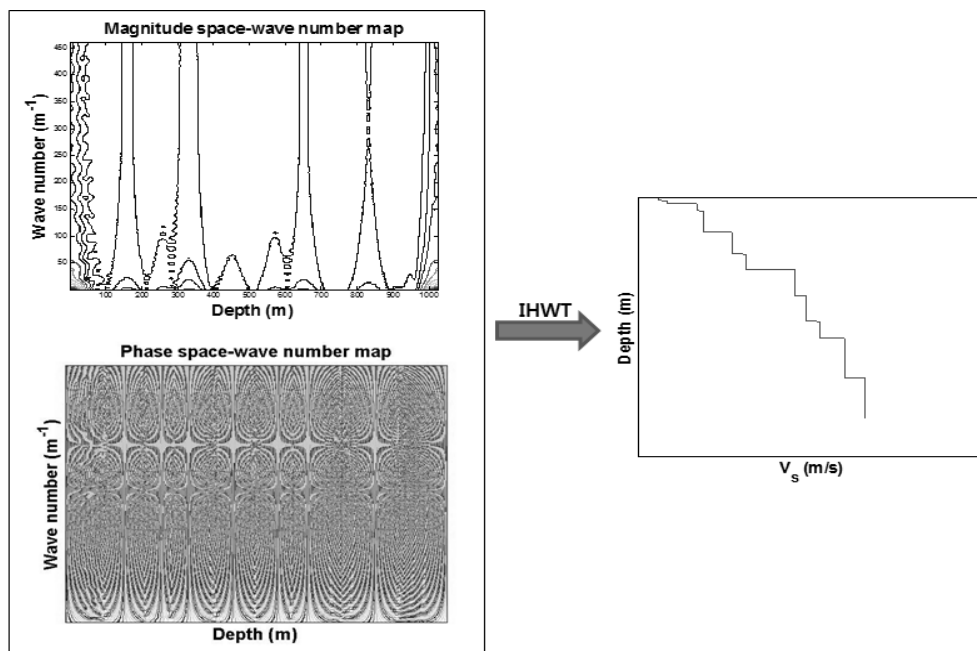
국내 CFRD 사력존의 댐 사이 또는 동일 댐 내 위치에 따른 물성치 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 깊이에 따른 1차원 전단파 속도 분포의 결정을 위해, 국내 3개의 CFRD를 선정하고, 선정된 CFRD 사면위의 8개의 위치를 선정하여 HWAW 시험을 통한 전단파 속



(a) Structure of shear wave velocity profile of site



(b) Standard deviation of magnitude and phase angle



(c) Random shear wave velocity profile which can exist in the site

Fig. 2. Generation of random shear wave velocity profiles considering a spatial variation of the material property in the rockfill zone of a CFRD

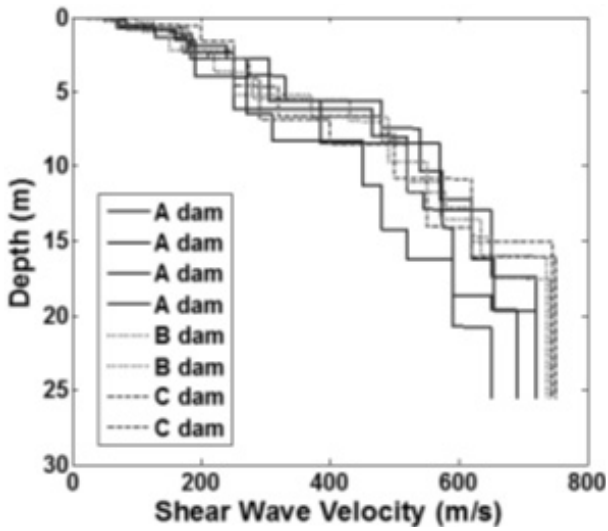
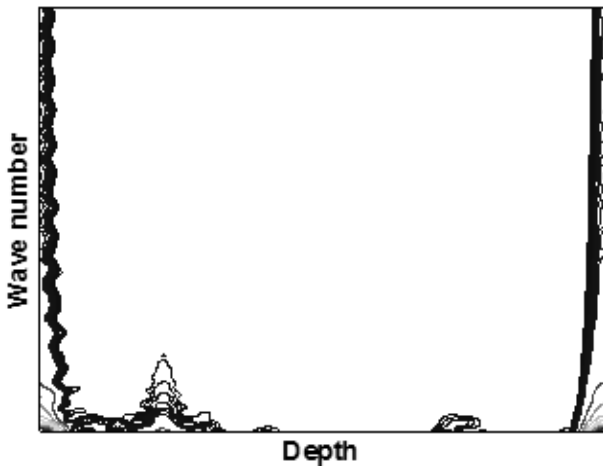
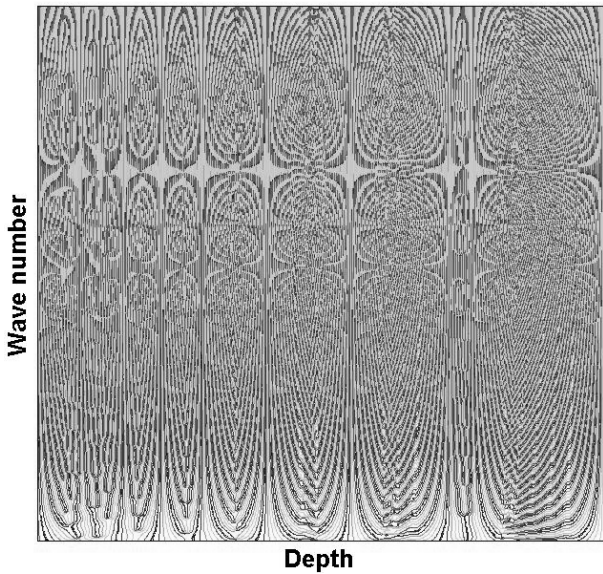


Fig. 3. Shear wave profiles of the rockfill zone of the CFRD



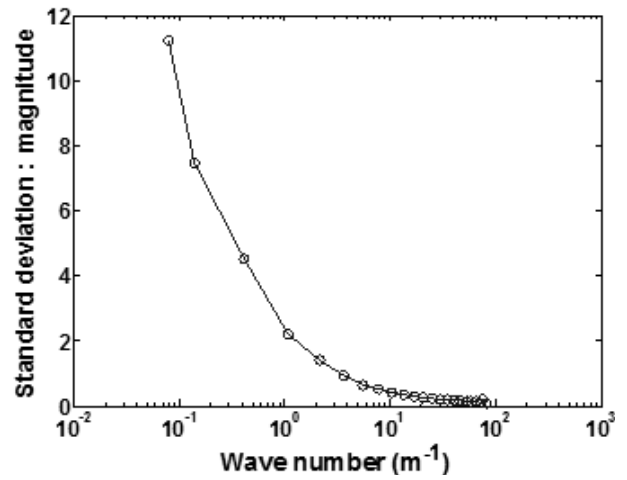
(a) Magnitude



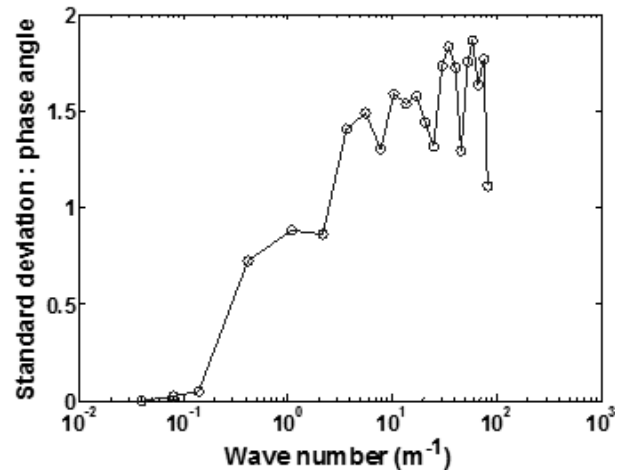
(b) Phase

Fig. 4. The shear wave velocity profile in space-wave number domain

도 주상도들을 Fig. 3과 같이 결정하였다(Hwang et al., 2014). 그림을 보면 국내 CFRD 사력존의 깊이에 따른 전단파 속도(전단탄성계수) 분포는 깊이가 증가함에 따라 속도값이 비슷한 유형을 가지고 증가함을 볼 수 있다. 그러나 모든 전단파 속도 주상도가 동일하지 않으며, 댐에 따라 또는 시험위치에 따라 층의 개수, 동일 깊이에서 층 두께 및 전단파 속도가 서로 다를 수 있다. 이러한 댐 사이의 전단파 속도 주상도의 변동성 및 동일 댐 내 위치에 따른 전단파속도 주상도의 변동성을 포함하는 사력존 전단파 속도 주상도의 공간 변동성은 앞에서 언급된 바와 같이 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다. 결정론적 해석시 이러한 공간변동성에 의한 물성치 불확실성을 고려할 수 없다. 이러한 댐 사력존 전단파 속도 구조의 불확실성은 2절에서 제시된 방법에 따라 고려되었다. Fig. 4는 A댐에서 얻어진 전단파 속도



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 5. Standard deviation of magnitude and phase with wave number

주상도들 중 하나에 대해 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 결정된 파수-공간 영역에서의 전단파 속도 주상도의 구조이다. 이러한 하모닉 웨이브릿 변환을 사용한 전단파 속도 구조의 평가는 Fig. 3에 주어진 모든 주상도들에 대해 동일하게 수행되었다. 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 얻어진 파수-공간 영역에서의 전단파 속도 주상도들의 구조로부터 파수 성분별 크기 및 위상이 가지는 표준편차를 Fig. 5와 같이 결정하였다. 파수 성분별 크기 및 위상이 가지는 표준편차는 댐 사력존에 존재하는 전단파 속도 분포의 불확실성을 나타낸다. 크기와 위상에서 값이 큰 표준편차를 가지는 파수성분은 값이 작은 표준편차를 가지는 파수성분에 비하여 공간 변동성에 의한 불확실성이 크다. Fig. 5에서 얻어진 결과는 2절에서 제안된 방법에 따라 댐 사력존의 물성치 공간 변동성에 따른 불확실성이 고려된 대표 1차원 전단파 속도 분포 결정에 사용되었다.

### 3.1 물성치 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 국내 CFRD 사력존의 깊이에 따른 1차원 전단파 속도 분포 결정

국내 CFRD 사력존에 발생 가능한 깊이에 따른 전단파 속도 분포를 결정하기 위해 Fig. 5에서 결정된 파수 성분별 크기 및 위상의 표준편차를 사용하여 정규분포를 가지는 잡음함수를 Latin hypercube 방법을 적용하여 샘플링하였다(Stein, 1987). Fig. 6은 우리나라 CFRD 사면부(사력존)에서 존재 가능한 2장에서 제시된 방법에 따라 생성된 300개의 1차원 전단파 속도 분포들로서 각

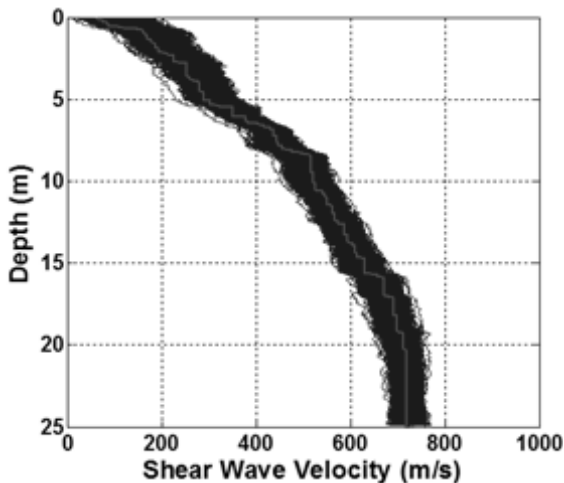


Fig. 6. Shear wave velocity distribution with depth in the rockfill zone of the CFRD

전단파 속도 분포는 각각의 발생 확률을 가진다. 그림에서 빨간선은 현장 실험을 통해 결정된 8개 전단파 속도 주상도들의 단순 평균이다.

국내 CFRD 사력존의 깊이에 따른 전단파 속도 분포를 결정하기 위해, 댐 사면부 사력존에서 발생 가능한 모든 1차원 전단파 속도 분포들에 대해 깊이별 평균값을 결정하고, 각 깊이별 속도값 분포들이 가지는 표준편차를 결정하였다. Fig. 7은 깊이 10m에서 전단파 속도들의 분포이다.

Fig. 8은 물성치의 공간 변동성이 고려된 CFRD 사력존에 존재 가능한 1차원 전단파 속도 분포들로부터 결정된 깊이별 평균 속도값 곡선, (깊이별 평균 속도

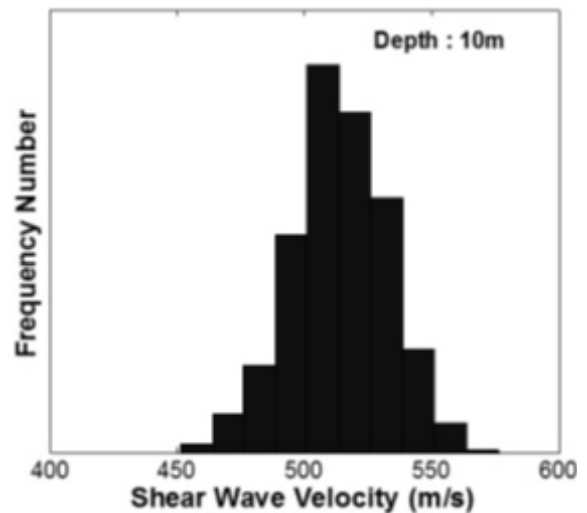


Fig. 7. Shear wave velocity distribution at a depth of 10 m in the rockfill zone

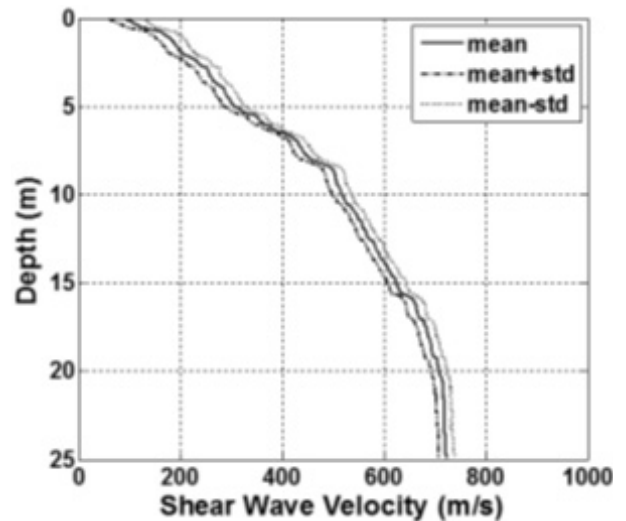
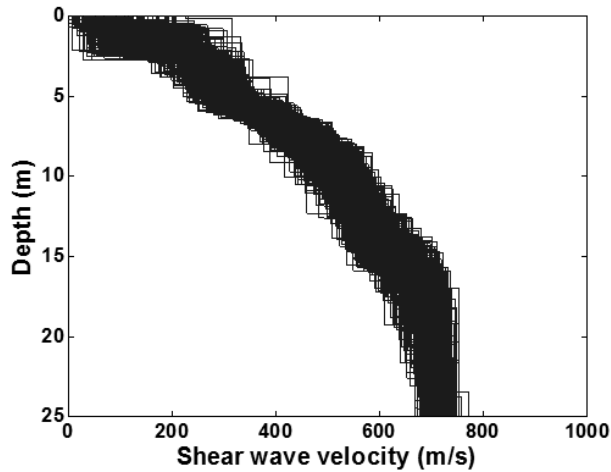
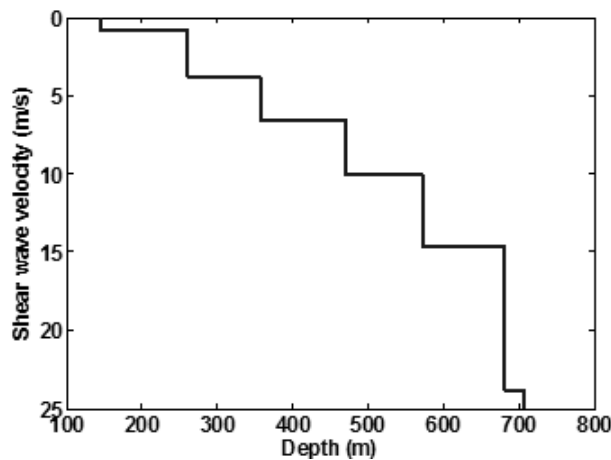
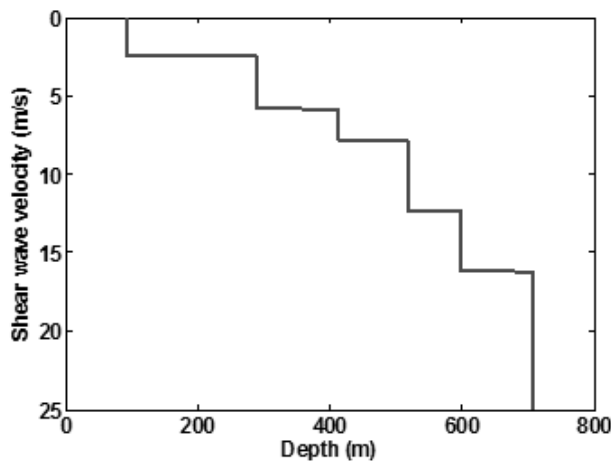


Fig. 8. The range of shear wave velocity distribution with depth in probability of 68%

값)+(1×깊이별 표준편차), (깊이별 평균 속도값)-(1×깊이별 표준편차) 곡선을 나타낸 그림이다. 이 곡선들은 국내 댐 사면 물성치의 공간에 따른 변동성이 고려된 그림이다. Fig. 8을 보면 국내 CFRD 사력존을 대표하는 전단파 속도 분포는 깊이별 대역(bandwidth)으로 주어



(a) Possible shear wave velocity profiles



(b) Arbitrary shear wave velocity profiles

Fig. 9. Possible shear wave velocity profiles in the rockfill zone of CFRD for probability analysis

진다. 이러한 대역폭은 깊이별 전단파 속도 분포가 가지는 표준편차로 표현되는 불확실성에 의해 결정된다. 이러한 대역폭이 의미하는 바는 각 깊이에서 68%의 확률로 주어진 범위안에 전단파 속도값이 존재한다는 것이다. 만일 깊이별 전단파 속도 대역폭을 (1×깊이별 표준편차)가 아닌 (2×깊이별 표준편차)을 가지고 결정하는 경우 대역폭이 의미하는 바는 95%의 확률로 주어진 범위안에 전단파 속도값이 존재한다는 것이다. 이러한 과정은 개별 댐에 적용할 수 있으며, 개별 댐 적용을 통해 개별 댐의 사력존을 대표하는 전단파 속도 분포를 결정할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 6에서 결정된 국내 CFRD 사력존에 존재 가능한 1차원 전단파 속도 분포들로부터 결정한 전단파 속도 주상도들이다. 그림을 보면 매우 다양한 전단파 속도 주상도들이 존재함을 볼 수 있다. 각 개별 주상도들이 존재할 확률은 동일하나, Fig. 7에서 보는 바와 같이 특정 유형의 전단파 속도 주상도들이 상대적으로 많이 존재함을 볼 수 있다. 이러한 주상도들은 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 확률론적 해석에 사용될 수 있다.

### 3.2 물성치 공간 변동성에 의한 불확실성이 고려된 개별 CFRD 사력존의 깊이에 따른 1차원 전단파 속도 분포 결정

개별 댐의 사력존을 위한 전단파 속도 분포를 결정하기 위해 A댐을 선정하여 제안된 방법을 적용하였다. 불확실성을 고려하기 위해 3.1절과 동일하게 Fig. 5에서 결정된 파수 성분별 크기 및 위상의 표준편차를 사용하

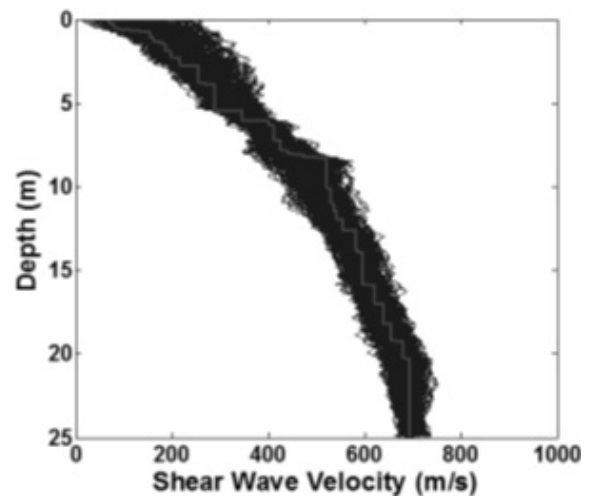


Fig. 10. Shear wave velocity distribution with depth in the rockfill zone of the B dam

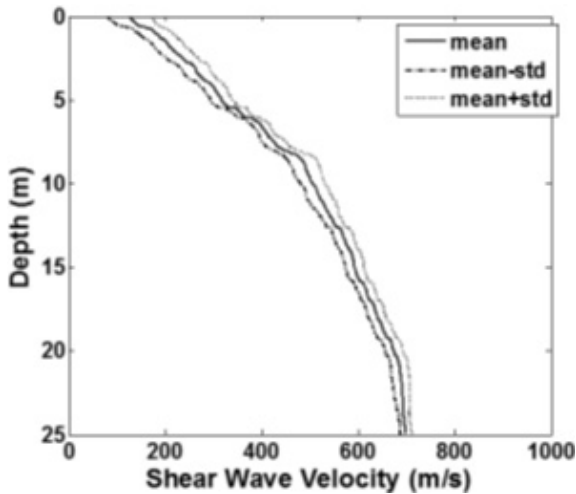


Fig. 11. The range of shear wave velocity distribution with depth in probability of 68%

여 정규분포를 가지는 잡음함수를 Latin hypercube 방법을 적용하여 샘플링하였다. Fig. 10은 A댐 사면부(사력존)에 존재 가능한 300개의 전단파와 속도 분포들로서 각 전단파와 속도 분포는 각각의 발생 확률을 가진다. 그림에서 빨간선은 현장 실험을 통해 결정된 4개 전단파와 속도 주상도들의 단순 평균이다.

Fig. 11은 생성된 속도분포들을 활용하여 결정된 A댐 사력존의 깊이별 평균 속도값 곡선, (깊이별 평균 속도값)+(1×깊이별 표준편차), (깊이별 평균 속도값)-(1×깊이별 표준편차) 곡선을 나타낸 그림이다. 그림에서 깊이별 전단파와 속도를 위한 대역폭이 주어져 있다. 이 대역폭으로 주어진 전단파와 속도 분포는 A댐 사면 물성치의 공간에 따른 변동성이 고려된 대표 전단파와 속도 분포이다. A댐에서는 Fig. 6에 주어진 영역내에 68%의 확률로 전단파와 속도가 존재하게 된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 국내 CFRD 사력존을 위한 깊이에 따른 1차원 전단파와 속도 분포를 제안하였다. 제안된 속도 분포는 국내 CFRD 3개를 선정하여 댐 사면 사력존 표면 8곳에서 수행된 HWAW 시험을 통해 얻어진 전단파와 속도 주상도들을 사용하여 결정되었다. 댐 사력존에 존

재하는 물성치의 공간 변동성에 의한 불확실성은 개별 파수 성분의 크기와 위상이 가지는 분산을 가지고 평가하였다. 이를 통해 댐 사력존에 존재 가능한 300개의 1차원 전단파와 속도 분포를 생성하였으며 이를 활용하여 국내 CFRD 사력존을 위한 깊이별 1차원 전단파와 속도 분포를 제안하였다. 이러한 방법은 개별 댐들을 위한 불확실성이 고려된 사력존 1차원 전단파와 속도 분포를 결정하는 데에도 효과적으로 적용될 수 있다. 본 논문에서는 이에 대한 예시로서 국내 CFRD 중 특정 댐 한 곳을 선정하여 사력존의 물성치 불확실성이 고려된 1차원 전단파와 속도 분포를 결정하였다. 추후 본 논문에서 제안된 방법에 보다 많은 댐의 실험결과를 활용하게 되면 본 논문에서 제시된 사력존의 1차원 전단파와 속도 분포의 신뢰성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌 (References)

1. Ha, I.S. (2007), Sensitivity analysis of rockfill input parameters influencing crest displacement of CFRD subjected to earthquake loading, *J. of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No.1, pp.1-9.
2. Hwang, H.J. and Park, H.C. (2013), Development of a new method to consider uncertainty of soil profile for the probabilistic analysis, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.3, pp.41-50.
3. Hwang, H.J., Park, Y.S., and Park, H.C. (2014), Evaluation of the shear wave velocity profile of rockfill zone of CFRD using HWAW method, *J. of the Korean Geotechnical Society*.
4. Rathje, E.M., Kottke, A.R., and Trent, W.L. (2010), Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.136, No.4, pp.607-619.
5. Rota, M., Lai, C.G., and Strobbia, C.L. (2011), Stochastic 1D site response analysis at a site in central Italy, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No.31, pp.626-639.
6. Stein, M.L. (1987), Large sample properties of simulations using Latin Hypercube Sampling, *Technometrics*, Vol.29, pp.143-151.
7. Toro, G.R. (1995), Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies, *Technical Rep. No. 779574*, Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y.
8. Uddin, N. (1992), Seismic analysis of earth-core and concrete-face rockfill dams, Ph.D. Dissertation, University of New York at Buffalo.

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