

# 확률론적 지반 해석을 위한 1차원 지반 구조의 불확실성 고려 방법의 개발

## Development of a New Method to Consider Uncertainty of 1-D Soil Profile for the Probabilistic Analysis

황 헤 진<sup>1</sup> Hwang, Hea-Jin

박 형 춘<sup>2</sup> Park, Hyung-Choon

### Abstract

There always exists uncertainty which is mainly due to uncertainty of the evaluation of a geotechnical structure at a site. The uncertainty in the geotechnical analysis can be considered in the probabilistic analysis using the Monte Carlo Simulation. It needs various soil profiles which could be possible at the target site. In this study, a new method is proposed to generate soil profiles which are probable at the site. The proposed method analyzes a structure of a site and generates one dimensional soil profiles for a probabilistic analysis. Through the field application, the applicability of the proposed method was shown.

### 요 지

지반 해석 결과에는 항상 불확실성이 존재하며, 이러한 불확실성은 주로 지반 구조의 불확실한 평가에 기인한다. 이러한 지반 구조의 불확실성에 따른 지반 해석 결과의 불확실성은 몬테카를로 시뮬레이션을 사용한 확률론적 해석에 의해 고려될 수 있다. 몬테카를로 시뮬레이션을 사용한 확률론적 지반 해석의 수행을 위해서는 대상 지반에서 존재 가능한 다양한 지반 구조의 생성이 필요하다. 본 연구에서는 확률론적 지반 해석을 위한 대상 지반에서 존재 가능한 다양한 지반 구조 생성 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 대상 지반에서 획득된 지반 조사 결과를 바탕으로 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 지반 구조를 평가한 후, 이로부터 대상 지반에 존재 가능한 다양한 지반 구조를 생성할 수 있다. 제안된 방법은 실제 현장 조사 결과들에 적용되었으며 이를 통해 제안된 방법의 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** Uncertainty, Probabilistic analysis, Soil profile, Monte carlo simulation

### 1. 서 론

지반 물성 구조는 지반 조사시 발생하는 측정오차, 지반조사 횟수의 한계로 인한 통계적 오차와 지반 고유의

성질인 불균질한(heterogeneous) 특성 등에 의해 불확실성을 지닌다(Christian et al., 1994; Phoon and Kulhawy, 1999a). 지반 물성치는 지반 및 구조물의 거동에 영향을 주므로, 해석시 지반물성이 가지는 불확실성을 고려해

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

2 정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수 (Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungnam National Univ., Tel: +82-42-821-5673, Fax: +82-42-825-0318, civilman@cnu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

야 한다. 최근 지반에서의 불확실성을 체계적으로 고려하기 위하여 불확실성을 정량적으로 다룰 수 있는 확률론적 접근법이 도입되고 있으며 다양한 확률론적 기법에 관한 연구가 이뤄지고 있다(Li and Lumb, 1987; Alonso, 1976; Vanmarcke, 1977). 특히 최근에는 컴퓨터의 발달로 인한 고속 연산처리가 가능해짐에 따라 발생 가능한 다양한 입력 물성을 생성하여 해석하는 몬테카를로 시뮬레이션을 지반 해석에 적용하여 지반 거동을 확률분포로 제시하고 있다. 이러한 확률론적 접근법은 리스크 관리, 해석결과의 신뢰성 평가와 같이 기존의 일반적인 방식인 결정론적 접근법이 제공하지 못하는 해석 결과를 제공할 수 있다(Griffiths and Fenton, 2000, 2001; Koutsorelakis et al., 2002; Fenton and Griffiths, 2003; Haldar and Babu, 2007; Kim etc, 2007).

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 지반 해석 방법을 적용하기 위해서는 불확실성이 고려된, 대상 지반에 존재 가능한 다양한 지반 물성 분포에 대한 평가 및 생성(혹은 모델링)이 필요하다. 지반은 복잡한 형성과정으로 인해 불균질성을 가지나, 일반적으로 공간상에서 상관성이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 공간상의 상관구조는 평균과 분산만으로 나타낼 수 없다. Lumb(1966)는 위치에 따른 지반 물성을 추세성분과 무작위성분의 조합으로 나타내었으며, Atterberg(1970)는 자기상관함수를 이용하여 지반물성이 공간상에서 변화하는 구조를 설명하였다. Vanmarcke(1977, 1978, 1983, 1984)는 랜덤필드 이론을 사용하여 공간상에서 변화하는 지반 물성을 모사하였으며, 이를 통해 대상 지반에 존재 가능한 지반 물성 생성 방법을 제안하였다. 이러한 기존의 연구는 통계적으로 균질한 하나의 층(a statistically homogeneous layer)에서의 국부적인 불확실성(local uncertainty or local variability)을 고려한다. 그러나 실제 지반은 다층구조로 구성되어 있으며, 이러한 다층구조 지반은 각 층의 두께 및 물성이 수직 및 수평방향으로 변화를 보인다. 이러한 공간에 따른 지반 전체 구조의 불균질성에 의한 지반 구조 평가의 불확실성은 지반 해석시 해석 결과에 불확실성을 유발 할 수 있다. 따라서 이러한 전체 지반 물성 분포 구조의 불확실성(global uncertainty) 또한 확률론적 지반 해석시 고려되어야 한다.

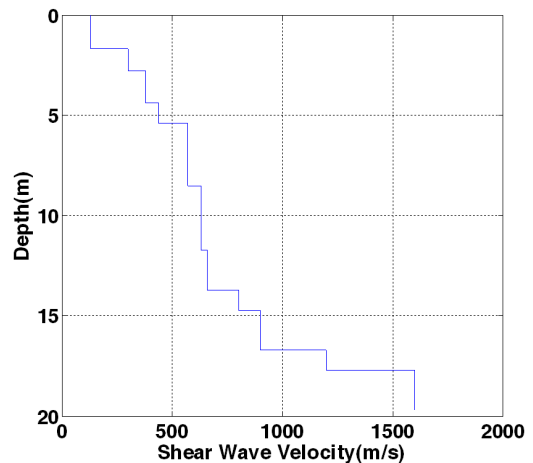
본 논문에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 지반 해석 방법을 위한 대상 지반을 대표하는 1차원 지반 물성 구조의 불확실성 고려 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 현장 지반 조사 결과를 바탕으로

대상 지반에서 존재 가능한 다양한 1차원 지반 구조를 생성하는 방법으로 2장에서는 지반구조의 불확실성 및 평가방법, 3장에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 위한 대상 지반을 대표하며 존재 가능한 다양한 1차원 지반 구조의 생성 방법에 대해 기술하였고, 4장에서는 제안된 방법을 실제 현장에 적용하였다.

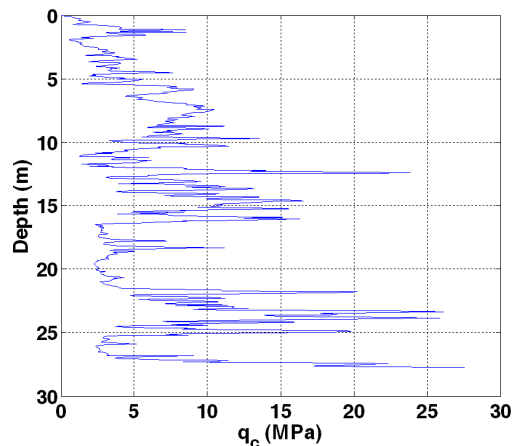
## 2. 지반 구조 평가 및 불확실성

지반의 (1차원) 구조는 탄성과 시험, CPT 등과 같은 다양한 현장 시험을 통하여 결정할 수 있다. 이러한 현장 시험을 통하여 Fig. 1과 같은 깊이에 따른 실험 결과 값들을 얻을 수 있다.

탄성과 시험을 통해 얻어지는 깊이별 전단파 속도, CPT(Cone Penetration Test)를 통해 얻어지는 콘 선단 저항력( $q_c$ ), 주면마찰력( $f_s$ ) 값들을 통해 지반 구조를 평가



(a) Shear wave velocity( $V_s$ ) profile by in-situ seismic test



(b) Cone tip resistance( $q_c$ ) by CPT

Fig. 1. Result of the field test

할 수 있다. 위 값들은 직접적으로 사용되거나 지반 해석 및 설계를 위해 필요한 다른 물성치들을 얻는데 사용된다. Fig. 1과 같이 깊이에 따른 1차원 분포로 나타나는 시험 결과치들은 식 (1)에서와 같이 서로 독립인 다양한 파수(wave number:  $k$ ) 성분들의 조합으로 볼 수 있다. 공간 영역에서의 파수는 시간영역에서의 주파수와 같은 개념으로, 단위 길이당 동일한 위상(형태)을 가지는 값들이 얼마나 자주 나타나는가를 정의하는 값이다. 여기서 각각의 파수 성분은 식 (1)에서와 같이 진폭 변조된 신호의 형태를 가진다.

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

여기서,  $x$ 는 길이 또는 깊이와 같은 공간 좌표를 나타낸다.  $A_k(x)$ 는 공간  $x$ 에 따른 파수  $k$  성분의 크기를 나타내는 크기 함수이며,  $\theta_k(x)$ 는 공간  $x$ 에 따른 파수  $k$  성분의 위상을 정의하는 데 사용되는 위상 함수이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 각 파수 성분의 형태는 크기함수와 위상함수에 의해 결정된다. 따라서 각 파수 성분에 발생 가능한 불확실성은 크기함수와 위상함수의 불확실성에 의해 결정된다.

다양한 요소에 의해 발생하는 불확실 요소들이 지반 구조에 미치는 영향을 고려하기 위해서는 대상 지반의 1차원 구조를 공간상에서의 파수 성분으로 분해한 후 각 파수 성분들의 크기함수와 위상함수에 발생 가능한 불확실성을 부여하여, 대상 지반에 존재 가능한 다양한 1차원 지반 구조를 생성한 후, 생성된 공간분포들에 대해 다양한 지반 해석을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 확률론적 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 1차원 지반 구조를 위한 지반 구조의 파수 성분 분해를 위해 하모닉 웨이브릿을 사용한 공간-파수 변환을 사용하였다.

### 3. 지반조사 결과를 이용한 대상 부지에 존재 가능한 1차원 지반 구조 성분의 생성 방법

#### 3.1 하모닉 웨이브릿 변환

웨이브릿 해석은 기본적으로 상관관계(correlation) 방법중의 하나이다. 웨이브릿 계수,  $a(s)$ 는 계측된 데이터,  $P(s)$ 와 해석에 사용되는 웨이브릿,  $w(s)$  사이의 형태의 유사성을 평가하며, 이를 통하여 주어진 데이터,  $P(s)$

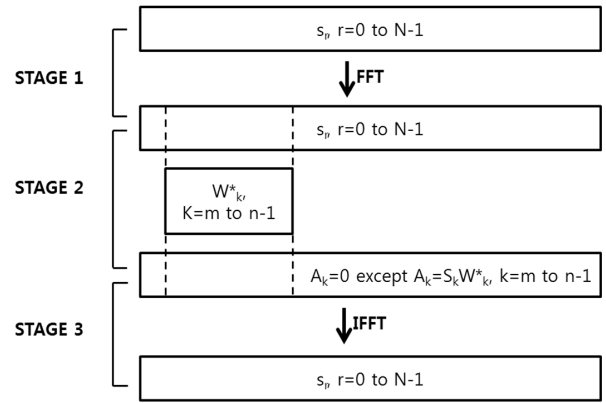


Fig. 2. Harmonic wavelet transform

의 구조에 대한 정보를 제공한다.

$$a(s) = \int_{-\infty}^{\infty} P(s') w^*(s' - s) ds' \quad (2)$$

웨이브릿 해석은 사용되는 웨이브릿에 따라 다양한 종류가 존재한다. Newland(1997)에 의해 개발된 하모닉 웨이브릿은 시간과 주파수 영역에서 정의되어 있으며, 동일한 형태로 파수 영역과 공간영역에서 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$W_{m,n}(k) = \frac{1}{(n-m)2\pi} \text{ for } m2\pi \leq k \leq n2\pi \quad (3)$$

$$= 0 \text{ elsewhere}$$

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

식 (3)에서 보여진 바와 같이 파수 영역에서의 웨이브릿,  $W_{m,n}(k)$ 은 정의된 파수대역,  $m2\pi \leq k \leq n2\pi$ 에서만 일정한 실수값을 가지며 그 외의 파수에서는 0의 값을 가진다. 또한 공간영역에서 하모닉 웨이브릿은 주기특성을 가지며 국부적으로 존재함을 볼 수 있다. 이러한 사실로부터 각각의 웨이브릿은  $m2\pi \leq k \leq n2\pi$ 를 통과 대역으로 하는 이상화된 파수 대역통과 필터(bandpass filter)의 기능을 하며, 이를 통해 각 파수 성분들을 공간영역에서 분해하고, 분해된 각 파수 성분의 공간에 따른 변화 형태를 효과적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다. 하모닉 웨이브릿,  $W_{m,n}(k)$ 에 해당하는 하모닉 웨이브릿 계수,  $a_{m,n}(x)$ 는 Fig. 2에 주어진 알고리즘에 따라 결정되며, 이러한 과정은 모든 하모닉 웨이브릿에 대하여 반복적으로 수행된다.

Park and Kim(2001)에 의하면  $W_{m,n}(k)$ 에 의해 결정되는 하모닉 웨이브릿 계수,  $a_{m,n}(x)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$a_{m,n}(x) = p_{m,n}(x) + \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_{m,n}(x')}{x-x'} dx' \quad (4)$$

$$= p_{m,n}(x) + jH[p_{m,n}(x)] = A_{m,n}(x)e^{j\theta_{m,n}(x)}$$

여기서,  $p_{m,n}(x)$ 는  $m2\pi \leq k \leq n2\pi$ 를 통과대역으로 하는 이상화된 대역통과 필터작업의 결과이며,  $j$ 는 허수를 나타낸다.  $H$ 는 힐버트(Hilbert)변환을 나타낸다.  $A_{m,n} = \sqrt{(p_{m,n}(x))^2 + (H[p_{m,n}(x)])^2}$ 는  $a_{m,n}(x)$ 의 공간에 따른 크기 변화를 나타내는 함수이며,  $\theta_{m,n}(x) = \tan^{-1}(H[p_{m,n}(x)]/p_{m,n}(x))$ 는  $a_{m,n}(x)$ 의 공간에 따른 위상 변화를 나타내는 함수이다. 식 (7)로부터 하모닉 웨이브릿 계수,  $a_{m,n}(x)$ 는 허수부분이 실수부분의 힐버트 변환으로 구성된 복소수로서, 이상화된 대역통과 필터작업의 결과인  $p_{m,n}(x)$ 에 해당하는 해석적 신호(또는 Gabor의 복소 신호)임을 알 수 있다. 일반적인 대역통과 필터작업의 결과신호는 다음과 같은 진폭 변조된 형태를 가진다.

$$p(x) = y(x) \cos[\theta(x)] \quad (5)$$

$p(x)$ 에 해당하는 해석적 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (5)와 (6)을 비교해보면, 하모닉 웨이브릿 계수의 크기는 공간에 따른  $p(x)$ 의 크기 변화를 나타내며, 하모닉 웨이브릿의 계수의 위상은 공간에 따른  $p(x)$ 의 위상값(Instantaneous phase)을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 하모닉 웨이브릿 계수의 공간에 따른 크기와 위상정보로부터 계측된 데이터를 구성하는 각 파수 성분의 공간에 따른 크기 변화(또는 분포)를 알 수 있으며, 위상정보로부터 공간에 따른 위상값 변화(또는 분포)를 결정할 수 있다.

### 3.2 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 대상 지반에 존재 가능한 1차원 지반 구조의 생성 방법

본 연구에서는 하모닉 웨이브릿 변환을 사용한 대상 지반에 존재 가능한 1차원 지반 구조의 생성을 위해 다음과 같은 방법을 제안하였다.

- 1) 대상 부지에서 현장 시험을 통해 깊이에 따른 Fig. 1과 같은 지반 구조를 결정한다.
- 2) 얻어진 지반 구조에 대한 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 공간영역에서 각 파수성분들에 해당하는 웨이브릿 계수를 다음과 같이 결정한다.

$$a_{m,n}(x) = A_{m,n}(x)e^{j\theta_{m,n}(x)} \quad (7)$$

- 3) 대상 지반에 존재하는 불확실성,  $E_{m,n}^A(i)$ 와  $E_{m,n}^\theta(i)$ 을 결정한다. 이때  $E_{m,n}^A(i)$ 와  $E_{m,n}^\theta(i)$ 는  $m2\pi \leq k \leq n2\pi$ 를 통과 대역으로 하는 임의의 하모닉 웨이브릿,  $W_{m,n}(k)$ 에 의해 결정된 하모닉 웨이브릿 계수의 크기함수와 위상함수에 부여되는 불확실성이다. 이러한 불확실 함수는 각 파수 성분들 별로 생성되는 1차원 지반 구조의 개수(N) 만큼 생성되어 사용된다. 각 파수 성분별 불확실 함수는 평균이 0이고 대상 지반에서 파수 대역별로 결정된 표준편차 값을 가지는 정규확률 분포로부터 무작위로 생성된다.

- 4) 단계 2)에서 결정된 각 파수 성분들의 크기함수와 위상함수에 대해 단계 3)에서 결정된 불확실성을 다음과 같이 부여한다.

$$\begin{aligned} a_{m,n}^u(x) &= A_{m,n}^u(x)e^{j\theta_{m,n}^u(x)} \\ \text{이때, } A_{m,n}^u(x) &= A_{m,n}(x) + E_{m,n}^A(i) \\ \theta_{m,n}^u(x) &= \theta_{m,n}(x) + E_{m,n}^\theta(i) \end{aligned} \quad (8)$$

- 5) 단계 3)에서 불확실성이 부여된 파수 성분들에 대해 역 하모닉 웨이브릿 변환을 수행하여 불확실성이 부여된 대상 지반의 1차원 지반 구조를 결정한다.
- 6) 단계 3)-4)를 N번 반복 수행하여 대상지반에 발생 가능한 N개의 1차원 지반 구조를 생성한다.

위에서 제안된 과정은 완전 자동화 되어 있어, 시험 현장 데이터를 사용하여 손쉽게 신속하게 신뢰성 해석을 위한 1차원 지반 구조를 생성할 수 있다.

#### 4. 적용

지반의 구조를 평가하기 위한 다양한 지반 조사 방법이 있다. 제안된 방법은 현장에서 얻어진 지반 조사 결과를 직접 이용하여 대상 지반 상태에 가장 적합한 존재 가능 다양한 지반 상태를 결정할 수 있으며, 생성된 지반 상태들에 대해 각 지반 해석을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 지반 해석 결과의 신뢰성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 방법의 적용성을 검토하기 위하여 부지에서 수행된 HWAW 방법에 의해 결정된 전단파 속도 주상도와 CPT에 의해 결정된 깊이별 콘 선단저항력( $q_c$ ) 분포에 대해 제안된 방법을 적용하여 대상지반을 대표하는 존재 가능한 다양한 1차원 지반 구조를 생성하였다.

##### 4.1 CPT 결과를 사용한 1차원 지반 구조 생성

Fig. 3은 A부지에서 수행된 CPT를 통해 얻어진 깊이별 콘 선단저항력( $q_c$ ) 분포 결과이다.  $q_c$  값은 다양한 방법을 통해 지반해석 및 설계에 필요한 지반 특성을 결정하는 데 사용된다. Fig. 4는 얻어진 깊이별  $q_c$  분포에 대해 하모닉 웨이브릿 변환을 수행해 얻은 크기 및 위상의 공간-파수 지도이다. 이 지도는 각 파수 성분의 공간에 따른 위상 및 크기 정보를 나타내고 있다. 대상 부지에서 수행된 실험결과는 지반 물성치의 공간변동성과 같은 다양한 요소들에 의한 불확실성이 존재한다. 이러한 불확실성을 평가하기 위해 대상 지반의 8지점에서 CPT가 수행되었다. 대상 부지에서 측정된 8개의 깊이별  $q_c$  분포에 대해 모두 하모닉 웨이브릿 변환을 수행한 후 각 파수 대역별 크기와 위상값들의 표준편차를 결정하였다. 결정된 파수 대역별 크기 및 위상의 표준편차 값들은 Fig. 5(a), (b)와 같다. 결정된 파수 대역별 크기 및 위상의 표준편차 값들은 3장에서 서술되어 있듯이 대상 부지에서 수행된 실험결과에 존재하는 불확실성을 고려하는데 사용된다. 지반 물성치 공간 변동성과 같은 요인에 의한 CPT 결과에 존재하는 불확실성이 고려된, 대상 지반에 존재 가능한 깊이에 따른  $q_c$  분포를 3장에서 제안된 방법에 따라 결정하였다. 총 400개의 깊이에 따

른  $q_c$  분포를 생성하였다. Fig. 6(a) 생성된 깊이에 따른  $q_c$  분포를 모두 나타낸 그림이며, Fig. 6(b)는 생성된 깊

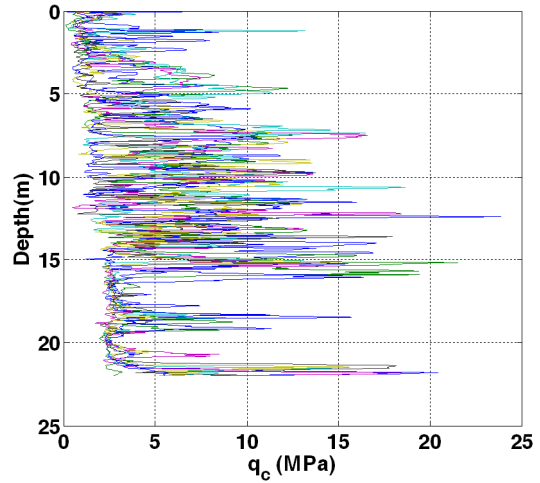
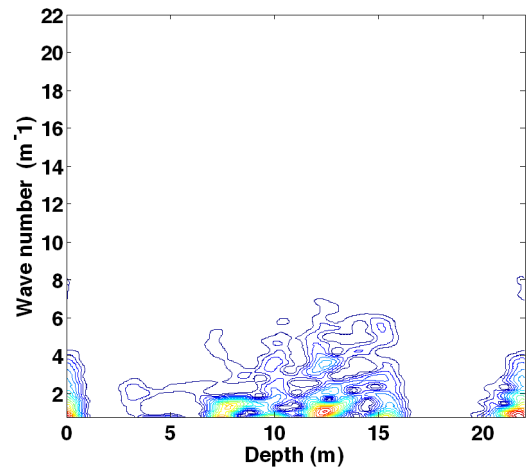
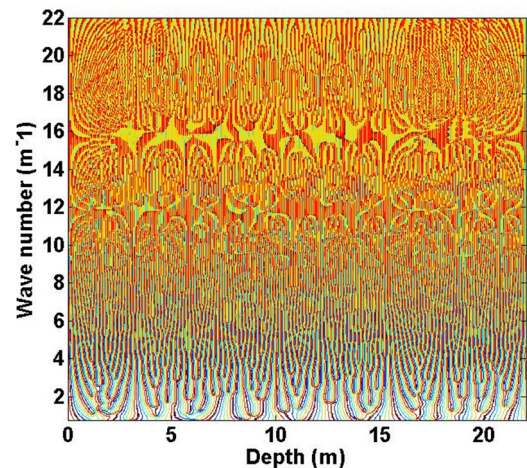


Fig. 3. CPT result at the target site:  $q_c$

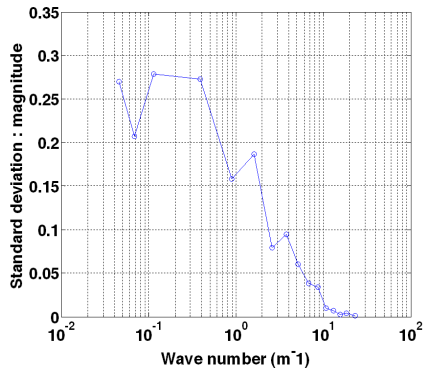


(a) Magnitude space - wave number map

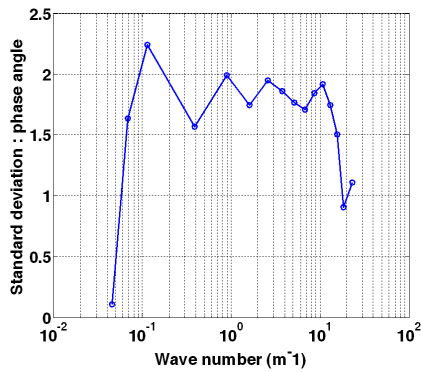


(b) Phase angle space - wave number map

Fig. 4. Space - wave number map of a CPT result



(a) Magnitude



(b) Phase angle

Fig. 5. Standard deviation of magnitude and phase angle with wavelet number: CPT results

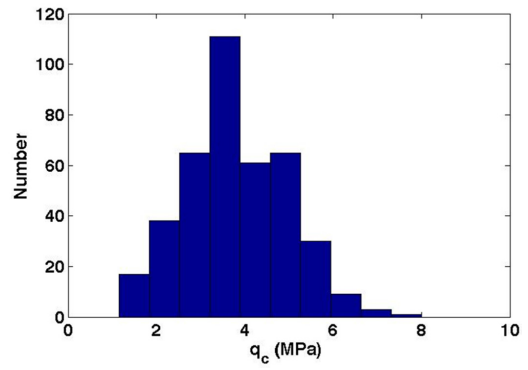
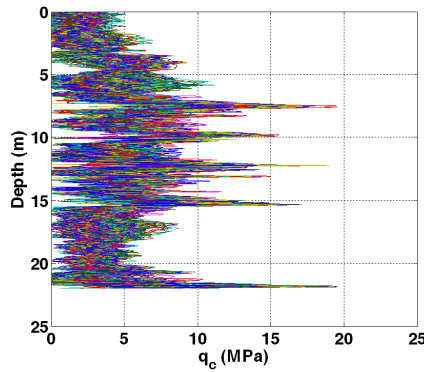
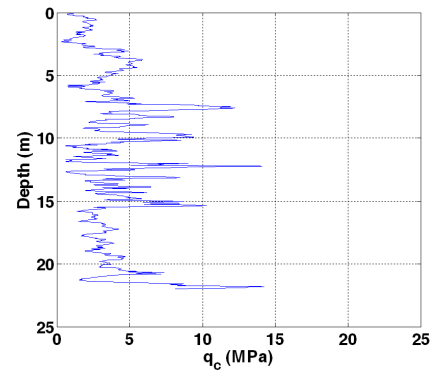
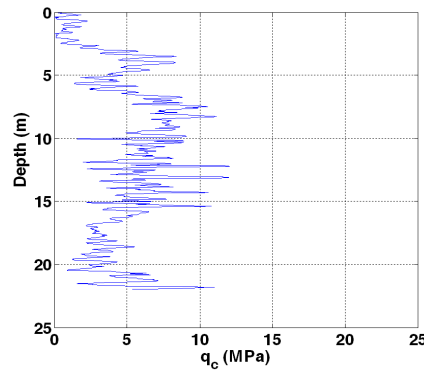
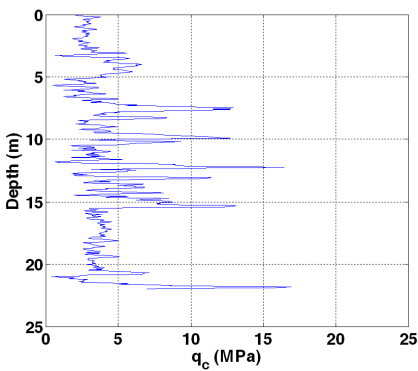


Fig. 7. A histogram of possible  $q_c$  at 5m

이에 따른  $q_c$  분포들 중 3개를 선택하여 도시한 그림이다. 이때 각 분포는  $1/(\text{총 생성된 } q_c \text{ 분포수})$ 의 발생확률을 가진다. Fig. 7은 임의로 선정된 깊이 5m에서 존재 가능한  $q_c$  값들의 분포를 각각의 크기 범위에 대한 빈도수로 나타낸 그림이다. Fig. 7를 보면 각각의 크기가 균등하게 분포하지 않고 특정 값 주변에 몰려 분포함을 볼 수 있다. 즉 동일한 존재 확률을 가지는 다양한  $q_c$  분포가 존재 가능하지만, 많은 수의 주상도가 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 7에서 확인할 수 있다.



(a) Possible  $q_c$  distribution with depth



(b) Arbitrary  $q_c$  distribution with depth

Fig. 6.  $q_c$  distribution considering the uncertainty at the target site



#### 4.2 결정된 전단파 속도 주상도를 사용한 1차원 지반 구조의 생성

대상 부지의 구조는 전단파 속도 주상도 결정을 통해 평가될 수 있다. 전단파 속도 주상도는 다양한 탄성파 실험법들에 의해 결정될 수 있다. 지반내 전단파 속도의

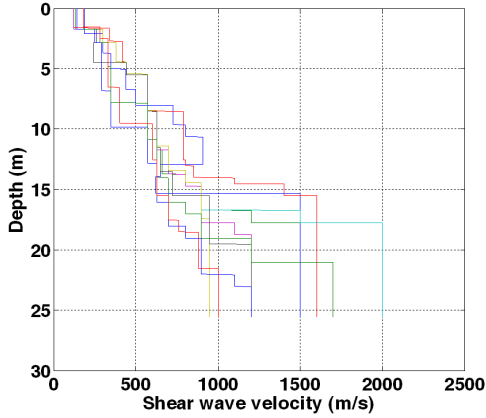
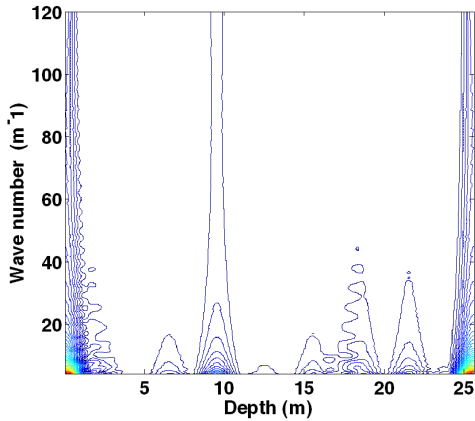
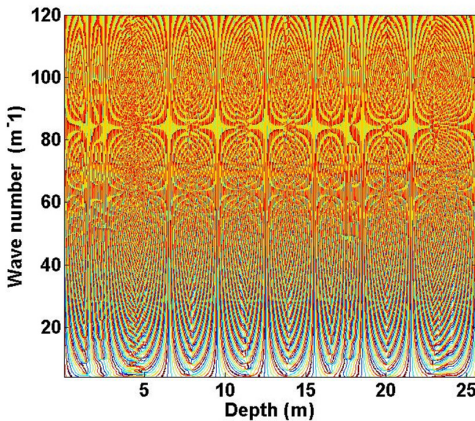


Fig. 8. Result of HAWW test at the site: Vs profile



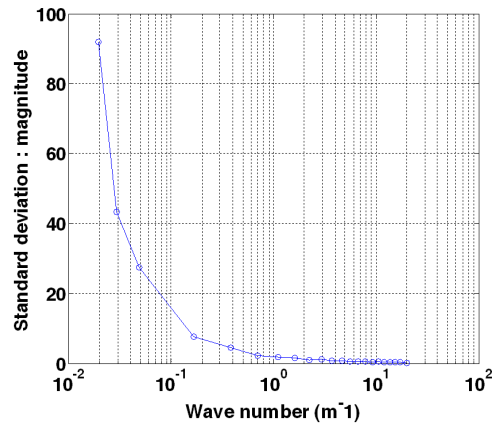
(a) Magnitude space - wave number map



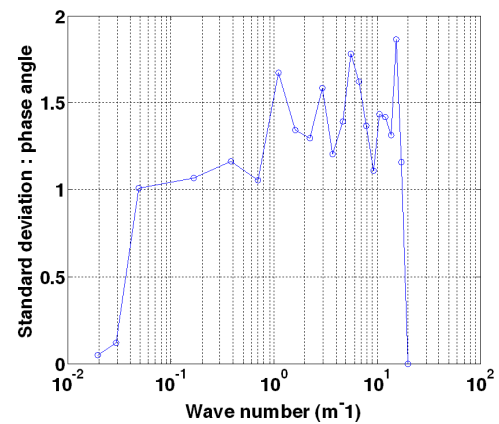
(b) Phase angle space - wave number map

Fig. 9. Space - wave number map of a Vs profile

공간 변동성과 같은 요인에 의해 발생 가능한 지반 조사 결과의 불확실성이 고려된, 대상 부지에 존재 가능한 대상 부지를 대표하는 1차원 전단파 속도 주상도들 결정하기 위하여 대상 부지 B의 서로 다른 10곳의 위치에서 HAWW 시험이 수행되었다. Fig. 8은 HAWW 시험을 통해 결정된 전단파 속도 주상도들을 나타낸다. Fig. 9는 결정된 10개의 주상도들 중 임의의 주상도에 대해 하모닉 웨이브릿 변환을 수행해 결정한 크기 및 위상 공간-파수 지도이다. 이 지도는 각 파수 성분의 공간에 따른 위상 및 크기 정보를 가지고 있다. HAWW 시험을 통해 결정된 전단파 속도 주상도에 대한 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 얻어지는 공간에 따른 크기 및 위상 정보는 대상 지반의 공간 변동성에 의한 전단파 속도 주상도의 불확실성을 고려하기 위한 각 파수 대역별 크기 및 위상의 표준편차를 결정하는 데 사용되었다. Fig. 10은 HAWW 시험 결과들로부터 얻어진 대역별 크기와 위상값들의 표준편차이다. 결정된 파수 대역별 크기와



(a) Magnitude



(b) Phase angle

Fig. 10. Standard deviation of magnitude and phase angle with wavelet number: Vs profiles

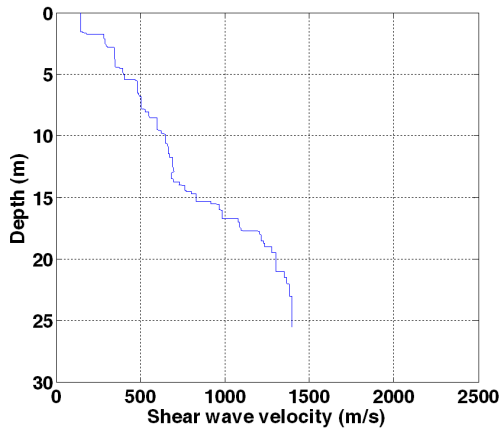
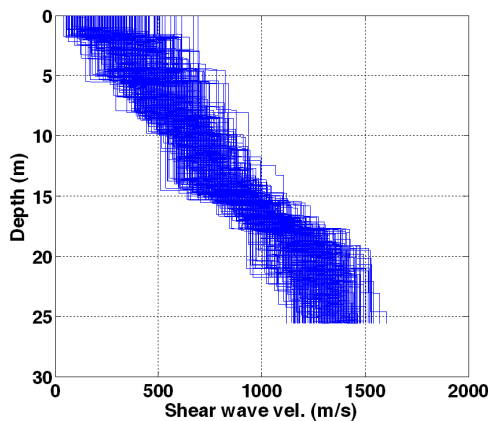


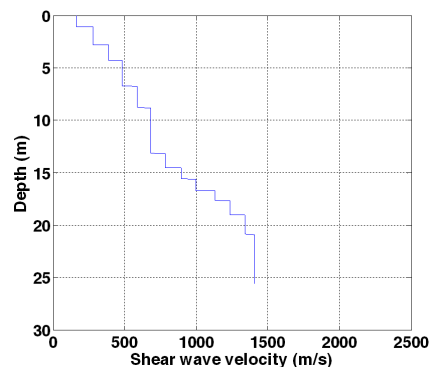
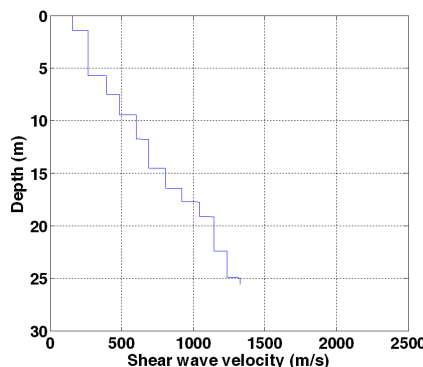
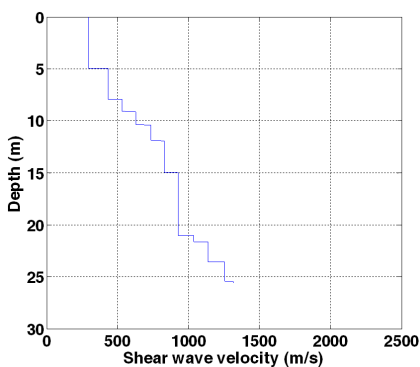
Fig. 11. Vs profile of the target site

위상의 표준편차를 사용하여 대상 부지를 대표하는 불확실성이 고려된 존재 가능한 1차원 전단파 속도 분포를 3장에서 제안된 방법에 따라 결정하였다. 부지 전체를 대표하는 존재 가능한 1차원 전단파 속도 분포들을 결정하기 위해 사용되는 기준 전단파 속도 주상도는 대상 부지에서 결정된 10개의 전단파 속도 주상도의 평균을 사용한다. 만일 부지내 특정 위치에서 존재 가능한

전단파 속도 주상도들의 결정시에는 그 위치에서 결정된 전단파 속도 주상도를 기준으로 결정한다. 대상 부지 전체를 대표하는 존재 가능한 전단파 속도 주상도들을 생성하기 위해 사용된 전단파 속도 주상도는 Fig. 11과 같다. Fig. 11의 전단파 속도 주상도와 Fig. 10의 파수 대역별 크기 및 위상의 표준편차들을 사용하여 총 400개의 전단파 속도 분포를 생성하였다. Fig. 12(a)는 생성된 모든 전단파 속도 분포를 나타낸 그림이며, Fig. 12(b)는 생성된 전단파 속도 분포들 중 3개를 선택하여 도시한 그림이다. 이때 각 주상도는  $1/(\text{총 생성된 전단파 속도 분포 수})$ 의 존재 확률을 가진다. Fig. 13은 임의로 선정한 깊이 5m 및 10m에서 존재 가능한 속도값들의 분포를 각각의 속도 범위에 대한 빈도수로 나타낸 그림이다. Fig. 13을 보면 속도 값들이 대역에 따라 균등하게 분포하지 않고 특정 값 주변에 몰려 분포함을 볼 수 있다. 즉 동일한 존재 확률을 가지는 다양한 전단파 속도 주상도가 존재 가능하지만, 많은 수의 전단파 속도 주상도가 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 13에서 확인할 수 있다.



(a) Possible Vs profiles



(b) Arbitrary Vs profile

Fig. 12. Vs profiles considering the uncertainty at the target site



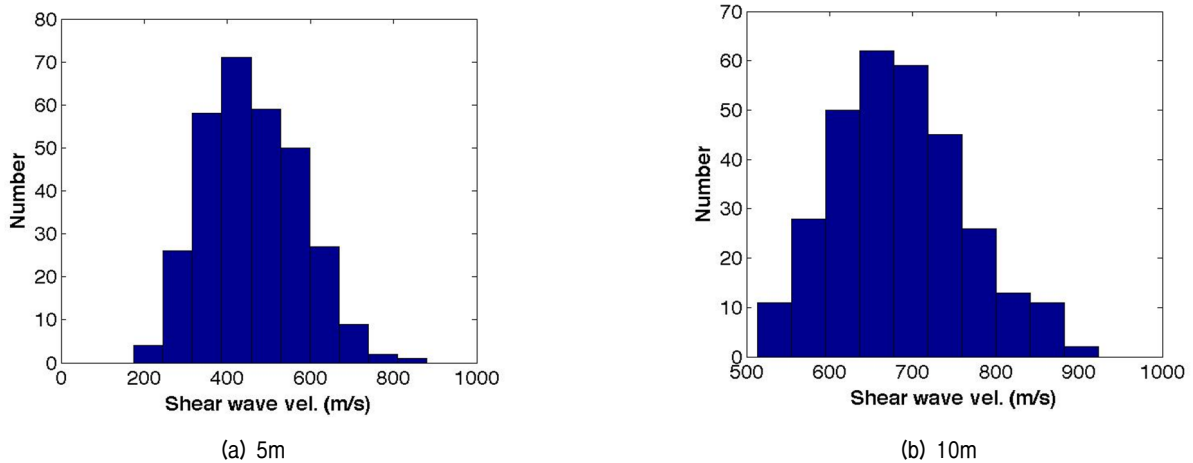


Fig. 13. A histogram of possible Vs at 5m and 10m depth

## 5. 결론

지반물성치의 공간 변동성 등에 의해 발생 가능한 현장 실험을 통해 얻어지는 현장 지반 구조의 불확실성은 대상지반에 존재 가능한 다양한 지반 구조 생성 및 이를 이용한 확률론적 지반해석을 통해 고려될 수 있다. 본 연구에서는 현장 지반 조사 결과를 사용하여 대상 지반의 불확실성이 효과적으로 반영된 대상 지반을 대표하는 존재 가능한 1차원 지반 구조 생성방법을 제안하였다. 제안된 방법은 현장 지반조사 결과에서 조사된 지반 조사 결과를 바탕으로 하모닉 웨이브릿 변환을 이용하여 대상 지반 구조를 평가하고 대상 지반에서 발생 가능한 불확실성을 부여하여 대상 지반에서 존재 가능한 다양한 지반 구조를 생성한다. 제안된 방법은 자동화 되어 있으며, 신속하게 확률론적 지반해석에 필요한 다수의 지반구조를 생성할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 지반해석에 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 추후 연구를 통해 제안된 방법을 다양한 지반 분야의 확률론적 해석 적용할 예정이다.

## 감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

## 참고 문헌

- Alonso, E. E. (1976), "Risk Analysis of Slopes and Its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays", *Geotechnique*, Vol.26, pp.453-472.
- Atterberg, F. B. (1970), "Autocorrelation functions in geology", Proceeding of a colloquium on geostatistics, University of Kansas, Lawrence, pp.113-141.
- Christian, J. T., Ladd, C. C., and Baecher, G. B. (1994), "Reliability applied to slope stability analysis", *Journal of Geotechnical and Engineering*, ASCE, Vol.120, No.12, pp.2180-2207.
- Fenton, G. A. and Griffiths, D. V. (2003), "Bearing Capacity Prediction of Spatially Random Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, pp.54-65.
- Griffiths, D. V. and Fenton, G. A. (2000), "Influence of Soil Strength Spatial Variability on the Stability of an Undrained Clay Slope by Finite Elements", *Slope stability 2000*, Geotechnical Special Publications, No.101, ASCE, pp.184-193.
- Griffiths, D. V. and Fenton, G. A. (2001), "Bearing Capacity of Spatially Random Soil: The Undrained Clay Prandtl Problem Revisited", *Geotechnique*, Vol.51, pp.351-359.
- Haldar, S. and Babu, G. L. S. (2008), "Effect of Soil Variability on the Response of Laterally Loaded Pile in Undrained Clay", *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.537-547.
- Kim, H. K., Narsilio, G. A., and Santamarina, J. C. (2007), "Emergent Phenomena in Spatially Varying Soils", *Probabilistic Applications in Geotechnical Engineering*, ASCE Geotechnical Special Publication, [http://dx.doi.org/10.1061/40914\(233\)10](http://dx.doi.org/10.1061/40914(233)10).
- Koutsourelakis, S., Prevost, J. H., and Deodatis, G. (2002), "Risk Assessment of an Interacting Structure-soil System due to Liquefaction", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol.31, pp.851-879.
- Li, K. S. and Lumb, P. (1987), "Probabilistic Design of Slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.520-535.
- Lumb, P. (1966), "The Variability of Natural Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.3, No.2, pp.74-97.
- Newland, D. E. (1997), "Practical signal analysis: Do wavelets make any difference?", *ASME Design Engineering Technical Conference*, 16th Biennial Conf. on Vibration and Noise, Sacramento, California, 1997.
- Park, H. C. and Kim, D. S. (2001), "Evaluation of the Dispersive Phase and Group Velocities using Harmonic Wavelet Transform", *NDT&E International*, Vol.34, No.7, pp.457-467.
- Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), "Characterization of geotechnical variability", *Journal of Canadian Geotechnical Engineering*,

Vol.36, No.4, pp.612-624.

15. Vanmarcke, E. H. (1977), "Probabilistic Modeling of Soil Profiles", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.103, pp.1227-1246.
16. Vanmarcke, E. H. (1978), "Probabilistic Characterization of Soil Profiles", In Site Characterization and Exploration, Proc. Specialty Workshop. ASCE, Northwestern Uni., Evanston, I 11., pp.199-216.
17. Vanmarcke, E. H. (1983), "Random Fields: Analysis and Synthesis", MIT Press, Cambridge, Mass.
18. Vanmarcke, E. H. (1984), "Random Fields: New Concepts and Engineering Application", Proc. Of 4th ASCE Specialty Conf. on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, ASCE, Berkeley, California, pp.7-17.

(접수일자 2013. 1. 17, 심사완료일 2013. 3. 12)