

유전자 알고리즘을 이용한 HWAW 방법을 위한 자동화 역산 방법의 개발

Development of Automated Inversion Method for HWAW Method Using Genetic Algorithm

박 형 춘¹ Park, Hyung-Choon

황 해 진² Hwang, Hea-Jin

Abstract

The evaluation of shear modulus (or shear wave velocity) profile of the site is very important in various fields of geotechnical engineering and various surface wave methods have applied to determine the shear wave velocity profiles and showed good performance. Surface wave methods evaluate the dispersion curve in the field and determine the shear wave velocity profile through the inversion process. In this paper, the automated inversion process using the genetic algorithm is developed for HWAW method which is one of surface wave methods recently developed. The proposed method uses the error function based on the wavelength domain dispersion curve and can determine the reliable shear wave velocity profile not only in shallow depth but also in deep depth. To estimate the validity of the proposed method, numerical simulations and field test were performed and the proposed method was applied to determine the shear wave velocity profiles. Through the numerical simulations and field applications, the promising potential of the proposed method was verified.

요 지

깊이에 따른 지반의 전단파 속도(또는 전단탄성계수) 분포는 일반적인 지반 해석·설계 또는 지진해석과 같은 다양한 지반공학분야에서 사용되는 중요한 물성치이다. 이러한 지반의 전단파속도 주상도는 탄성파 탐사를 통해 결정할 수 있으며, 이를 위한 다양한 탄성파 탐사 방법이 연구개발 되어 있다. 표면파 탐사법은 모든 실험이 지표면에서 이루어지는 탄성파 탐사법들 중의 하나로서 현장 실험, 파장(또는 주파수)에 따른 표면 계측파의 위상속도 곡선인 분산곡선의 결정, 역산을 통한 대상 지반의 전단파 속도 주상도의 결정으로 동일하게 구성되어 있다. 본 논문에서는 표면파 실험을 위한 자동화된 역산 방법을 개발하였으며, 제안된 방법을 가장 최근에 개발된 표면파 탐사법들 중 하나인 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 방법에 적용하였다. 제안된 방법에서는 새로운 오차함수를 제안하고 이를 이용한 유전자 알고리즘을 역산에 사용하였다. 제안된 방법의 타당성을 검토하고자 수치모의 실험과 현장 실험을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 방법의 현장 적용성 및 타당성을 확인할 수 있었다.

Keywords : Automated Inversion, Genetic algorithm, HWAW method

1 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)

2 비회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Chungnam National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

깊이에 따른 지반의 전단파 속도(또는 전단탄성계수) 분포는 일반적인 지반 해석·설계 또는 지진해석과 같은 다양한 지반공학분야에서 사용되는 중요한 물성치이다. 이러한 지반의 전단파속도 주상도는 다양한 탄성과 탐사 방법을 통해 결정될 수 있다. 탄성과 탐사 방법은 크게 시추공을 필요로 하는 공내 탄성과 탐사법과 모든 실험이 지표면상에서 이루어지는 비파괴 탐사법으로 구분된다. 표면파 탐사법은 모든 실험이 지표면에서 이루어지는 탐사법으로 경제성 및 실험의 간편성 등으로 인하여 그 사용이 증가하고 있다. 표면파 탐사법은 2개의 감지기를 사용하는 2채널 표면파 탐사법(Stokoe 등, 1994)과 다수의 감지기를 사용하는 다채널 표면파 탐사법(Park 등, 1999; Gabriels 등, 1987)으로 나뉜다. 다양한 표면파 방법들이 존재하나, 모든 표면파 방법은 현장 실험을 통한 파장(또는 주파수)에 따른 표면 계층파의 위상속도 곡선인 분산곡선의 결정과 역산과정을 통한 대상 지반의 전단파 속도 주상도 결정으로 동일하게 구성되어 있다. HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 방법(박형춘 등, 2004a,b)은 최근에 개발된 2채널 표면 계층파를 이용한 탐사기법으로 지반 물성 평가에 매우 효과적으로 사용되고 있다(박형춘 등, 2004; Park 등, 2007; Park 등, 2010).

본 연구에서는 HWAW 방법을 위한 자동화된 역산 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 유전자 알고리즘(Goldberg, 1989; Holland, 1975)을 사용한다. 본 논문은 2장에서 HWAW 기법의 일반적인 사항을 기술하였고, 3장에서 유전자 알고리즘을 사용한 역산과정에 대해 기술하였다. 4장에서는 수치모의 실험을 통한 제안된 방법의 검증을 수행하였고, 5장에서는 현장검증에 대해 기술하였다.

2. HWAW 방법을 사용한 지반조사

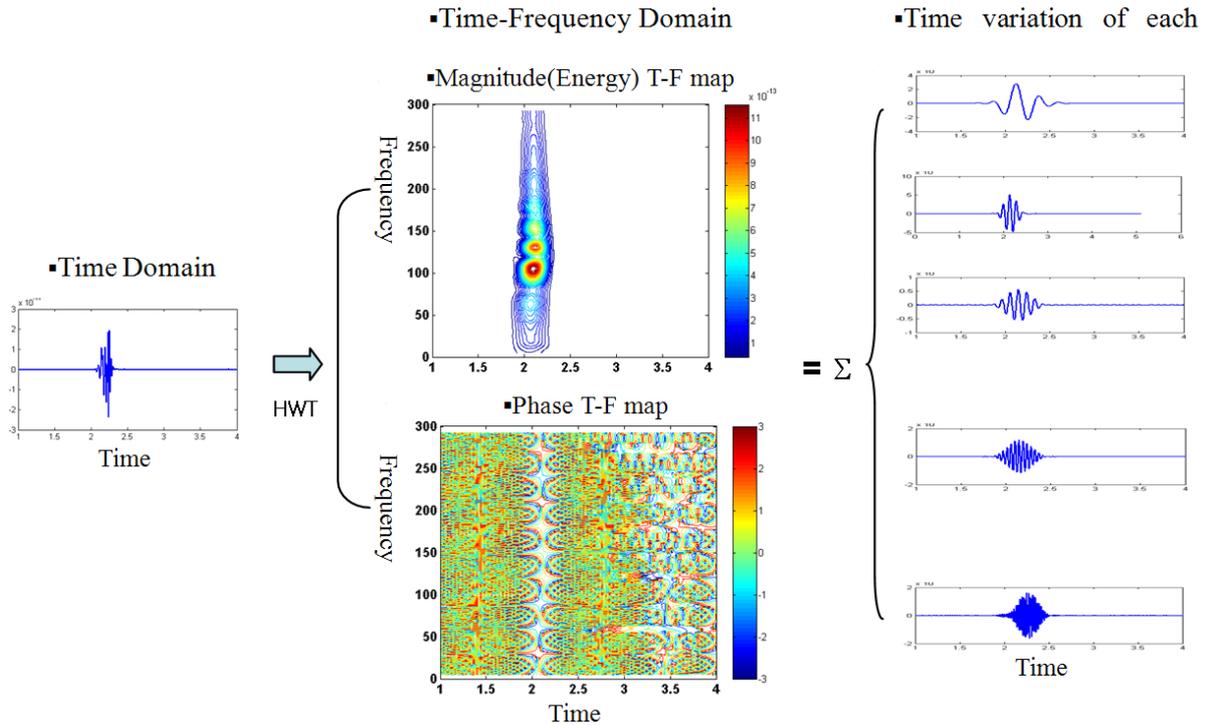
2.1 분산곡선 결정

HWAW 방법은 매질을 따라 전파하는 일반적인 파의 위상·그룹속도 결정을 위해 개발된 방법이다. 이러한 HWAW 방법을 사용한 지반조사는 현장실험, 주파수 또는 파장에 따른 위상속도 곡선인 분산곡선의 결정 그리고 역산을 통한 감지기 사이의 지반에 대한 전단파 속도 주상도 결정으로 구성된다. HWAW 방법은 각 감지기에서 얻어진 신호를 하모닉 웨이브릿 변환을 통해 각 주파수 성분으로 분

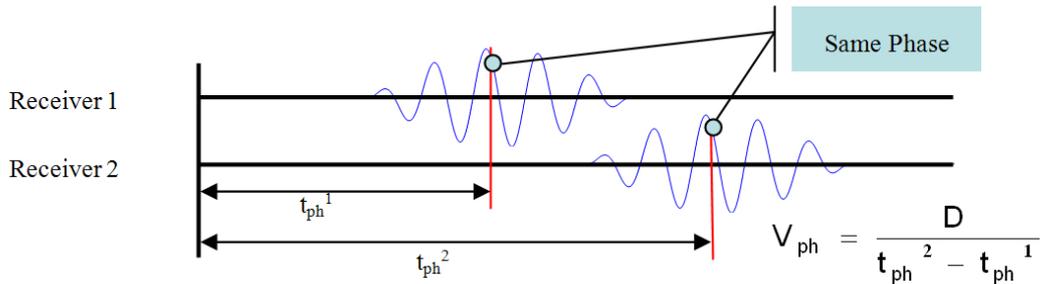
해한 후(Fig. 1(a)), 에너지 시간-주파수 지도에서 에너지가 집중된 영역, 즉 국부적인 신호/잡음비가 최대가 되는 최대 에너지선 주변의 국부적인 에너지·위상의 정보만을 사용하여 분산곡선을 결정한다(Fig. 1(b)). 주어진 주파수 성분의 위상속도는 Fig. 1(b)에 보여진 바와 같이 최대 에너지 위치의 위상이 감지기 1에서 감지기 2로 이동하는 데 걸리는 시간 $t_{ph2}-t_{ph1}$ 을 결정한 후, 감지기 간격 D 를 이동 시간으로 나누어주면 주어진 주파수 성분의 위상속도를 결정할 수 있다. 이러한 과정을 전체 주파수 성분들에 대해 반복적으로 수행하여, 주파수에 따른 위상속도 곡선인 분산곡선을 결정할 수 있다. HWAW 방법은 에너지가 집중된 국부적인 영역의 정보만을 이용하기 때문에 기존의 표면파 기법들에 비하여 현장에 존재하는 배경잡음의 영향을 매우 효과적으로 제거할 수 있다. 이러한 특징은 슬러지 햄머와 같은 작은 에너지 가진원을 사용한 깊은 깊이의 탐사를 가능하게 하며, 기존 표면파실험과 달리 2개의 감지기를 사용한 고정된 단일 실험구성에서, 단일한 실험을 통해 대상 지반의 전체 깊이를 포함하는 분산곡선의 결정을 가능하게 한다.

2.2 실험 방법

HWAW 방법의 기본 실험은 하나의 지표면 진동원과 2개의 감지기로 구성되며, Fig. 2(a)에서 보여지는 바와 같이 1~3m의 감지기 간격, 6~12m의 가진원-감지기1 간격을 가지는 짧은 감지기 간격 실험구성을 주로 사용한다. 일반적으로 지표면 진동원으로 슬러지 햄머를 사용하며 감지기로는 속도계를 사용한다. HWAW 방법은 짧은 감지기 간격 실험구성을 주로 사용하지만, 현장에서 사용된 실험구성, 즉 감지기 1과 2의 위치가 역산과정에서 고려된다면, 현장 실험시 감지기의 위치는 제한이 없다. 즉 더 짧은 감지기 간격이나 더 긴 감지기 간격을 사용하여도 된다. 표면파 기법에서는 감지기 사이의 평균적인 전단파 속도 주상도를 결정한다. 이때 짧은 감지기 간격 실험구성을 사용하는 HWAW 방법의 경우 대상지반의 자세한 국부적인 전단파 속도 주상도와 같은 지반물성치를 결정할 수 있다. 또한 Fig. 2(b)와 같은 연속적인 선(line) 실험 구성을 사용하면 높은 횡방향 해상도를 가지는 2차원 전단파 속도 지도(Park 등, 2007)의 결정이 가능하며, Fig. 2(c)와 같은 격자(grid) 실험 구성을 사용하면 높은 횡방향 해상도를 가지는 3차원 전단파 속도 지도의 결정(Park 등, 2010)이 가능하다.



(a) Decomposition of time record by the harmonic wavelet transform



(b) Determination of phase velocity of each frequency component

Fig. 1. Principles of HAW method

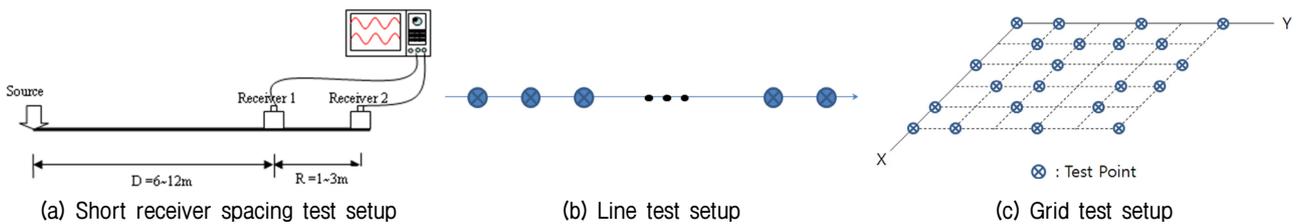


Fig. 2. Test setup for HAW method

2.3 단일 어레이 역산을 통한 전단파 속도 주상도의 결정

현장 실험을 통해 얻어진 탄성과 특성곡선(분산곡선)에 대한 역산 과정을 통해 대상 지반의 전단파 속도 주상도가 결정된다. 역산과정은 현장 실험에서 얻어진 분산곡선과 일치하는 이론 분산곡선을 제공하는 지반의 층상구조를 찾는 과정으로 반복적인 지반 층상구조의 가정

로부터 얻어진 이론분산곡선과 실험분산곡선의 비교로 이루어진다. 역산은 이상적인 층상구조, 즉 횡방향으로 균일한(횡방향으로 층의 두께가 바뀌지 않는) 지반구조에 대해 이론분산곡선을 결정한다. 이론분산곡선과 현장 분산곡선의 비교를 통해 전단파 속도 주상도를 결정하기 위해서는 이론 분산곡선을 결정하는 조건이 현장 조건과 일치하여야 한다. 표면과 기법은 감지기 사이의 평균적

인 물성치를 대표하는 분산곡선을 현장 실험을 통해 결정한다. 일반적인 표면파 기법은 상대적으로 긴 실험측선을 사용하기 때문에 지반물성치의 횡방향 불균일성이 존재하는 경우 물성치의 횡방향 변화를 고려하지 못하고 지반의 평균적인 물성치를 반영하는 실험분산곡선을 결정하게 된다. 이러한 평균적인 실험분산곡선을 사용하는 역산과정에서는 오류가 발생하게 된다. 짧은 감지기 간격을 사용하는 HWAW 기법의 경우 이러한 횡방향 지반 물성 변화의 영향이 반영된 실험분산곡선의 결정이 가능하며, 역산을 통하여 대상 지반의 횡방향 물성 변화가 고려된 정밀한 국부적 전단파 속도 주상도의 결정이 가능하다(박형춘 등, 2004).

표면 가진에 의해 발생되어 표면에서 계측된 파는 체적파 성분과 표면파의 다양한 모드 성분들의 합으로 파 그룹(wave group)을 형성한다. 표면 계측파를 구성하는 이러한 다양한 파성분들은 각기 다른 전파 속도를 가진다. 가진원으로부터 거리에 따라 시간영역신호에서 각각의 파성분들이 위치하는 상대적인 위치가 변화하게 되며, 이러한 상대적 위치의 변화는 파 그룹 형태를 변화시키고, 이러한 파그룹 형태의 변화는 위상속도를 변화시킨다(박형춘 등, 2006). 즉 대상 지반이 횡방향 물성 변화가 없는 완벽한 층상구조라 하더라도 감지기 위치에 따라 분산곡선의 형태가 변화하게 된다. 따라서 역산과정에서 이론분산곡선의 계산시 실험분산곡선 결정을 위해 사용된 현장 실험 구성, 즉 가진원으로부터 감지기 1과 2의 위치와 동일한 감지기 위치에서 이론분산곡선을 결정하여야 한다. HWAW 기법은 분산곡선 결정을 위해 단일한 실험구성을 사용하기 때문에 기존 역산과정에 비해 계산 시간이나 복잡도의 증가 없이 감지기의 위치를 고려한 역산이 가능하다(단일 어레이 역산)(박형춘 등, 2004b).

3. 유전자 알고리즘을 사용한 자동화된 역산

본 논문에서는 자동화 역산을 위한 탐색 알고리즘으로 유전자 알고리즘을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 자연의 진화과정을 단계화한 최적화 알고리즘으로 다양한 분야에 사용되고 있다. 유전자 알고리즘은 초기 다양한 M개의 개체(individual)로 구성된 집단(population)을 생성한다. 역산을 위한 유전자 알고리즘에서 사용하는 개체는 다음과 같이 전단파 속도 주상도로 주상도를 구성하는 층들의 두께 및 속도값으로 이루어진다. 일단 집단이 생성되면 집단을 구성하는 각 개체들에 대해 오차함수를

결정한다.

$$[1^{\text{st}}\text{층 두께}, 2^{\text{th}}\text{층 두께}, \dots, n^{\text{th}}\text{층 두께}, 1^{\text{st}}\text{층 속도}, 2^{\text{th}}\text{층 속도}, \dots, n^{\text{th}}\text{층 속도}] \quad (1)$$

유전자 알고리즘을 사용한 기존 표면파 기법을 위한 역산과정에서는 다음과 같은 형태의 오차함수를 일반적으로 사용한다(Osama, 1998; Yamanaka, 2005).

$$E_r(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{DC_{the}(j) - DC_{i,field}(j)}{\sigma(j)} \right]^2$$

or $\sum_{j=1}^N |DC_{the}(j) - DC_{i,field}(j)| \quad (2)$

여기서, $DC_{field}(j)$ 는 현장에서 결정된 현장 실험분산곡선이며, $DC_{i,the}(j)$ 는 집단을 형성하는 전단파 속도 주상도들 중 i 번째 전단파 속도 주상도를 사용하여 결정된 이론분산곡선이다. N 은 분산곡선을 구성하는 위상속도의 개수이다. $|\cdot|$ 는 절대값을 나타낸다.

오차함수는 현장 실험분산곡선과 집단을 구성하는 각 개체, 즉 각각의 전단파 속도 주상도를 사용하여 결정된 이론분산곡선 사이의 주파수 영역에서의 평균적인 차이를 나타낸다. 주파수 영역에서 분산곡선을 구성하는 각각의 위상속도는 동일한 주파수 대역을 차지한다(Fig. 3(a)). 그러나 실제 물리적 의미를 가지는 파장 영역에서 분산곡선을 나타내면 Fig. 3(b)에서 보여지는 바와 같이 분산곡선을 구성하는 각 위상속도는 서로 다음 길이의 파장 대역을 차지하고 있다. 대부분의 위상속도 값들은 주로 짧은 파장 영역에 집중되어 나타나며, 파장이 증가할수록 위상속도 값들은 띄엄띄엄 나타난다. 즉 각 위상속도들이 점유하는 파장 대역이 다르다. 장파장 성분(저주파 성분)일수록 점유하는 파장 대역이 길어진다.

식 (2)와 같이 모든 위상속도 성분들을 동일하게 취급하는 경우 얇은 깊이에 해당하는 단파장 성분(고주파 성분)들에 의해 오차함수 값이 영향을 주로 받게 된다. 이러한 오차함수를 사용한 유전자 알고리즘 역산에 의해 결정되는 주상도의 깊은 층 두께 및 전단파 속도의 신뢰성은 상대적으로 떨어지게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 분산곡선을 구성하는 각각의 위상속도 값에 대해 그 위상속도 값이 점유하는 파장 대역의 크기를 가중치로 부여하는 다음과 같은 오차함수를 사용한 유전자 알고리즘을 역산과정에 적용하였다.

$$E_r(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |DC_{the}(j) - DC_{i,field}(j)| \times (\Delta\lambda(j))^\alpha$$

Where $\alpha \leq 1$ when $\Delta\lambda(j) \geq 1$
 $\alpha > 1$ when $\Delta\lambda(j) < 1$

(3)

여기서 $\Delta\lambda(j)$ 는 분산곡선의 j 번째 위상속도가 점유하는 파장대역의 길이이다. 본 연구에서 $\Delta\lambda(j) \geq 1$ 일때 $\alpha=0.8$ 을 사용하며, $\Delta\lambda(j) < 1$ 일때 $\alpha=1.2$ 을 사용한다.

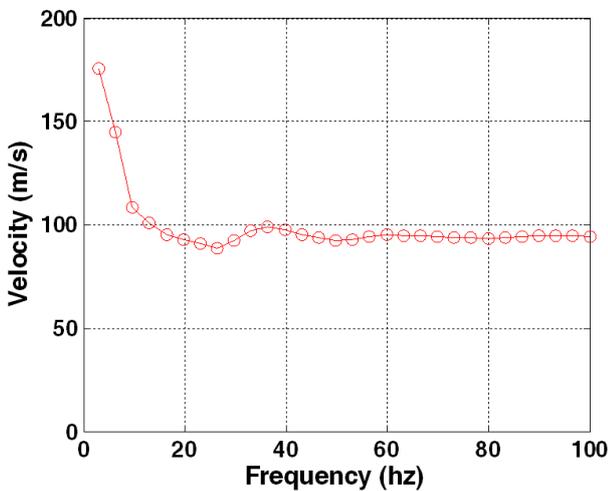
일단 집단을 구성하는 모든 개체에 대해 오차함수가 모두 결정되면, 선택(selection)과정이 수행된다. 선택과정은 M 번 반복된다. 각 개체가 선택될 확률은 각 개체의 오차함수 크기에 반비례한다. 선택과정이 완료되면 교차(crossover)과정이 수행된다. 교차과정에서는 선택과정에서 선택된 개체들 중 임의로 두 개의 개체를 선택한다. 이때 선택된 두 개의 개체를 부모개체(parent)라 한다. 선택된 각 개체들을 구성하는 값들은 Fig. 4와 같은 이진수 형태로 표현된다. 이진수 형태의 개체들은 임의로 선택된 위치(breaking point)에서 분리·교환되어 새로운 두 개의 개체를 생성한다. 생성된 새로운 개체를 자손개체(child)라고 한다. 교차과정은 $M/2$ 회만큼 반복된다. 교차단계가 모두 완료되면 돌연변이(mutation)과정을 수행한다. 돌연변이 단계에서는 이진수 형태로 표현된 임의의 개체를 선택하여 임의로 선택된 위치에서 0은 1로, 1은 0으로 변

화시킨다. 이러한 과정들을 통해 새로운 개체들로 구성된 다음 번 집단이 형성된다. 이때 현재 집단에서 가장 좋은 성능을 보이는 개체는 자동적으로 다음 세대를 구성하는 집단에 살아 남게 된다(elitism). 이러한 과정은 충분히 작은 오차함수값을 가지는 개체들이 출현할 때까지 또는 미리 정해진 횟수만큼 반복된다. 최종 집단에서 가장 좋은 성능을 보이는 개체를 대상 지반의 전단파 속도 주상도로 결정한다.

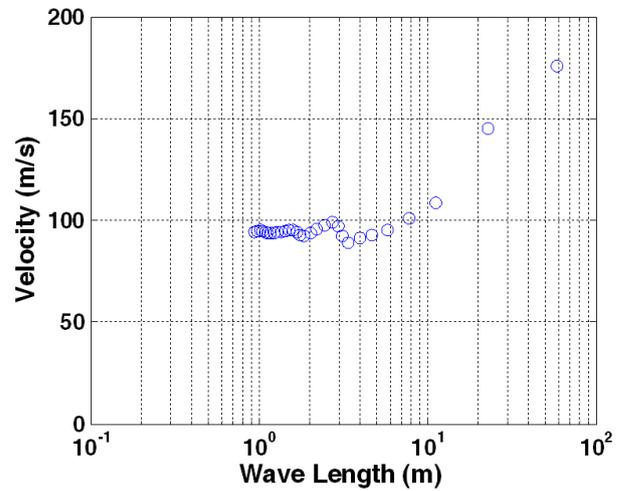
4. 수치 모의 실험을 통한 검증

4.1 수치 모의 실험

제안된 방법을 검증하기 위하여 Fig. 5에 주어진 두 가지 지반조건에 대해 수치모의 실험을 수행하였다. 수치 실험은 동적강성행렬방법(Kausel 등, 1981; Kausel 등, 1982) 사용한 수치해석 프로그램을 사용하여 수행되었다. 수치 모의 실험에 사용된 지반은 Fig. 5(a)와 같이 깊이가 증가함에 따라 매질의 강성이 증가하는 3개의 층으로 구성된 정상적인 주상도(regular profile: case 1)와 Fig. 5(b)와 같이 깊이에 따른 매질 강성 증가가 불규칙적인 4개의 층으로 구성된 비정상적인 주상도(irregular profile: case 2)



(a) Dispersion curve in the frequency domain



(b) Dispersion curve in the wavelength domain

Fig. 3. Dispersion curve in the frequency and wavelength domain

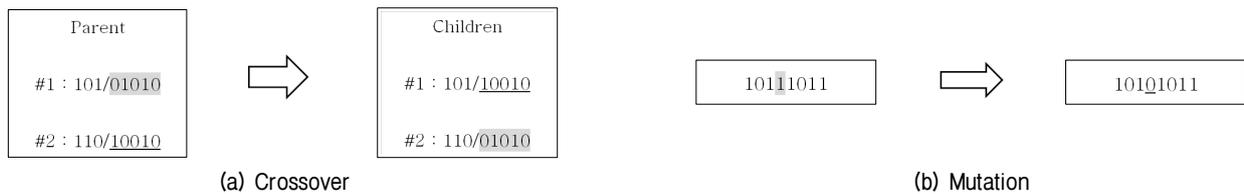
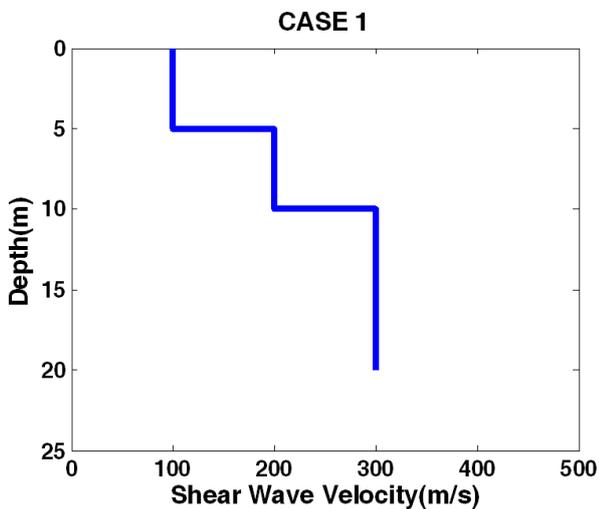


Fig. 4. Genetic algorithm process

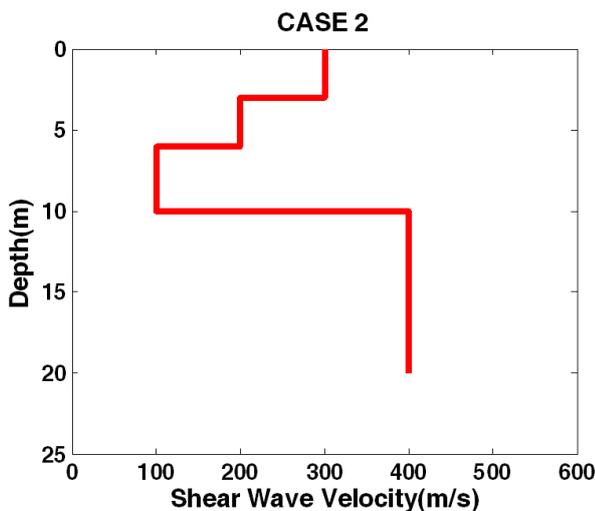
이다. 각 층은 포아송비 0.333, 밀도 $1.8t/m^3$, 댐핑비 0.02를 가진다. 수치 모의 실험은 감지기 1은 가진원으로부터 6m, 감지기 2는 8m에 위치시킨 짧은 감지기 간격 실험구성을 사용하여 수행되었다. 계측된 시간영역신호에 대해 분산곡선을 결정한 후, 이 결정된 분산곡선을 실험분산곡선으로 하여 유전자 알고리즘을 사용한 역산을 수행하였다.

4.2 수치 모의 실험을 사용한 유전자 알고리즘 역산 검증

유전자 알고리즘을 위한 역산을 위해서는 초기 집단을 형성해줘야 한다. 초기 집단 형성을 위해서는 층의 개수와 각 층의 두께 및 전단파 속도 값의 범위를 정해 주어야 한다. 이러한 요소들이 주어지면 자동으로 초기 집단을 구성하는 개체들이 생성된다.



(a) Case 1: Regular profile



(b) Case 2: Irregular profile

Fig. 5. Shear velocity profiles for numerical simulation

역산을 위한 초기 집단 형성을 위해 case 1의 경우 층 개수를 실제 전단파 속도 주상도와 같은 3개로 가정하였으며, 각 층의 두께 및 전단파 속도의 범위를 실제 값의 50%에서 150%로 설정하였다. Case 2의 경우에는 case 1과 마찬가지로 층 개수를 실제 전단파 속도 주상도와 같은 4개로 설정하였으며, 각 층 두께 및 속도 값은 case 1과 마찬가지로 실제 값의 50%에서 150%로 설정하였다. 유전자 알고리즘을 사용한 역산을 위한 돌연변이 확률은 0.01을 사용하였으며, 30세대 동안 반복된 후 종료된다. Fig. 6은 case 1에 대한 세대 수에 따른 정규화된 오차함수 값의 변화 곡선으로, 그림을 보면 약 10세대까지 급격한 오차함수의 감소를 보이며, 10세대 이후에는 상태를 유지하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 유전자 알고리즘을 사용한 자동화 역산을 통해 얻어진 전단파 속도 주상도와 실제 주상도를 비교한 그림이다. 그림을 보면 case 1과 2 모두 역산에 의해 결정된 주상도가 얇은 깊이에서 깊은 깊이에 걸쳐 실제 주상도와 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 8은 수치 모의 실험을 통해 얻어진 실험분산곡선과 유전자 알고리즘 역산을 통해 얻어진 결과 주상도에 해당하는 이론분산곡선을 비교한 그림이다. 그림을 보면 case 1과 2 모두 이론분산곡선과 실험분산곡선이 잘 일치함을 볼 수 있다. 이러한 비교를 통해 제안된 자동화 역산과정이 매우 성공적으로 수행되었으며, 이러한 역산과정을 통해 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도 결정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

앞의 경우에서 역산을 위한 층 개수를 실제 층 개수와 동일하게 가정하여 역산을 수행하였다. 그러나 실제 현장에서는 대상지반을 구성하는 층의 개수를 시추공 조사와 같은 예비적인 조사를 통하지 않고서는 정확히 평가

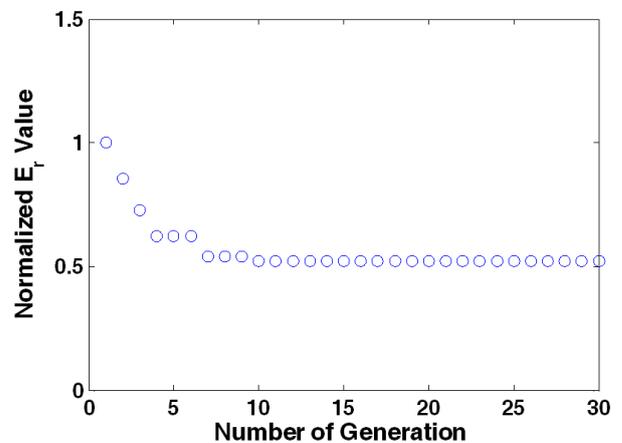


Fig. 6. Change of the normalized error value following the number of generation: Case 1

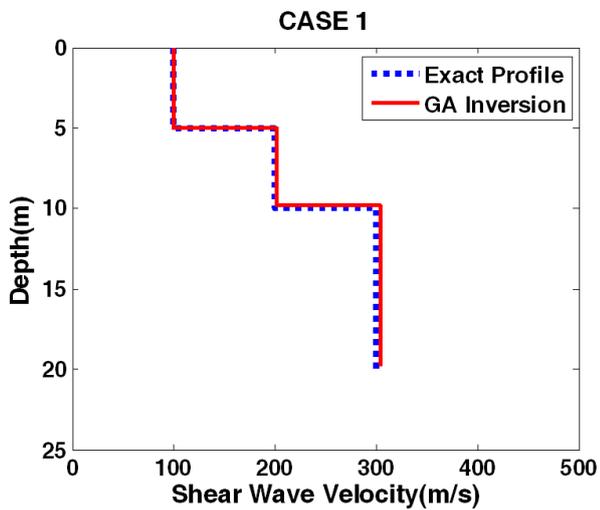
할 수 없다. 이러한 불확실한 현장 조건을 모사하기 위해, 실제 주상도 보다 많은 수의 층 개수를 가정하여 역산을 수행하였다. Case 1의 경우 층 개수를 5개로 가정하였으며, case 2의 경우 7개로 가정하였다. 각 층의 두께 및 전단파 속도의 불확실성은 앞의 경우와 동일하게 부여하여 역산을 수행하였다.

Fig. 9는 유전자 알고리즘을 사용한 자동화 역산을 통해 얻어진 전단파 속도 주상도와 실제 주상도를 비교한 그림이다. 그림을 보면 case 1과 2 모두 역산에 의해 결정된 주상도가 얇은 깊이에서 깊은 깊이에 걸쳐 실제 주상도와 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 비교를 통해 역산과정에서 고려해야 하는 층의 개수, 각 층의 두께, 각 층의 전단파 속도와 같은 현장의 불확실성을 유전자 알고리즘

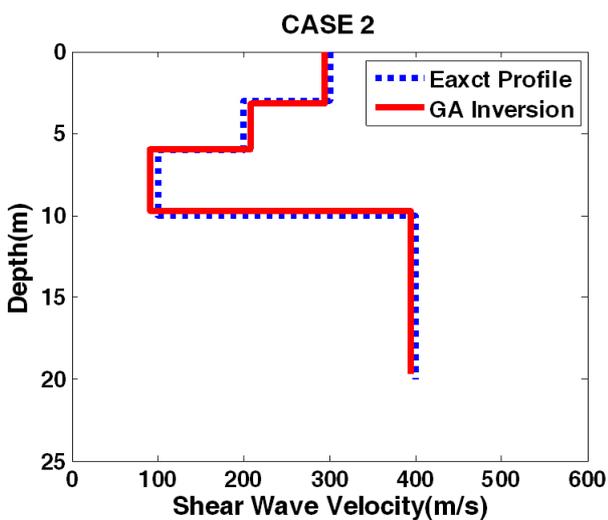
을 이용한 자동화 역산이 매우 효과적으로 고려함을 볼 수 있으며, 이를 통해 현장에서 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도 결정이 가능함을 알 수 있다.

5. 현장 적용

제안된 방법을 00현장에 적용하였다. 현장에서는 감지기 1을 가진원에서 6m, 감지기 2를 7m에 위치시키는 짧은 감지기 구성을 사용한 HAWW 실험이 수행되었으며, 비교를 위해 동일 위치에서 다운홀 실험이 수행되었다. Fig. 10는 현장에서 얻어진 분산곡선과 역산 결과 얻어진 전단파 속도 주상도 해당하는 이론분산곡선을 비교한 그림으로, 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 이로부터 자동화된

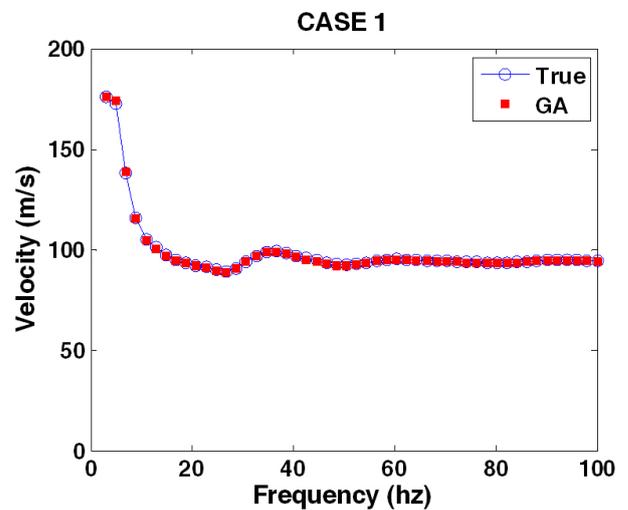


(a) Case 1: Regular profile

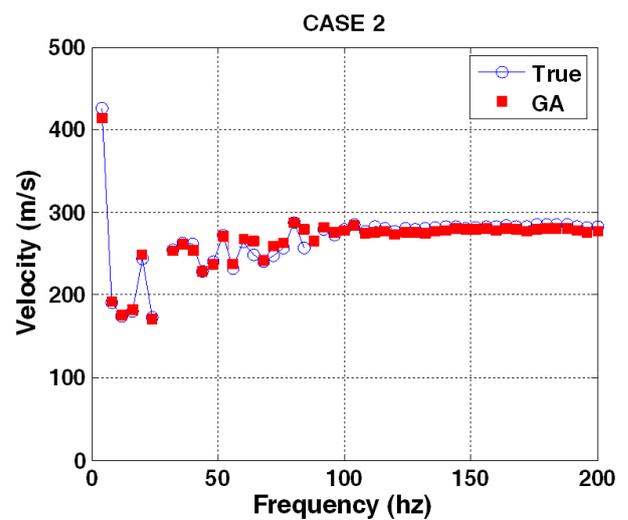


(b) Case 2: Irregular profile

Fig. 7. Comparison of a GA inversion profile and a true profile

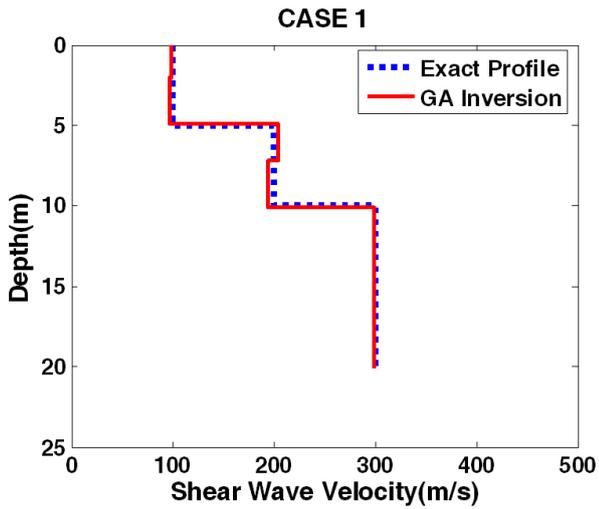


(a) Case 1: Regular profile

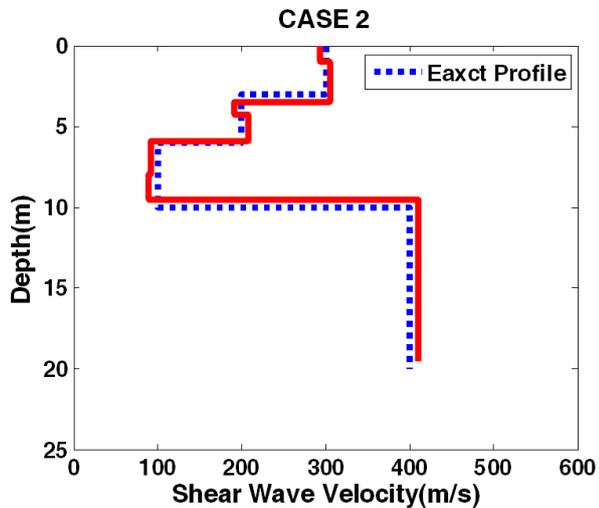


(b) Case 2: Irregular profile

Fig. 8. Comparison of the theoretical dispersion curve determined by a GA inversion and the experimental dispersion curve



(a) Case 1: Regular profile



(b) Case 2: Irregular profile

Fig. 9. Comparison of a GA inversion profiles and exact profiles

역산과정이 효과적으로 수행되었음을 알 수 있다. Fig. 11은 다운홀 실험을 통해 얻어진 전단파 속도 주상도와 제안된 방법에 의해 결정된 전단파 속도 주상도를 비교한 그림이다. 그림을 보면 두개의 주상도가 잘 일치함을 볼 수 있다. 이러한 비교를 통해 제안된 방법이 매우 효과적으로 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 가장 최근 개발된 표면파 탐사 기법들 중 하나인 HAWW(Harmonic Wavelet Analysis of Waves) 방법을 위한 자동화된 역산 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 유전자 알고리즘을 사용한다. 표면파 기법에서

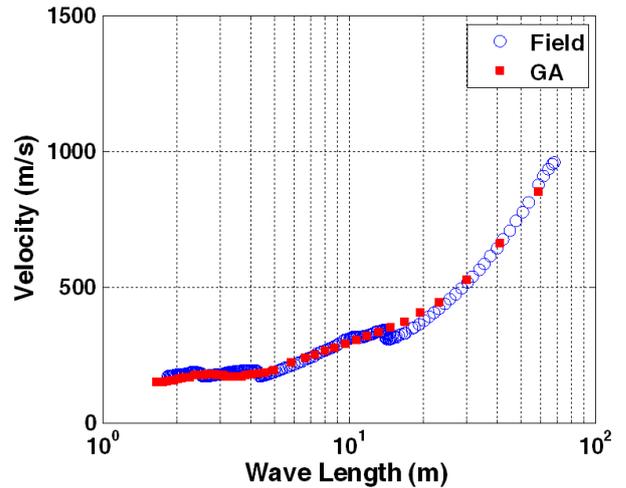


Fig. 10. Comparison of the theoretical dispersion curve determined by a GA inversion and the experimental dispersion curve

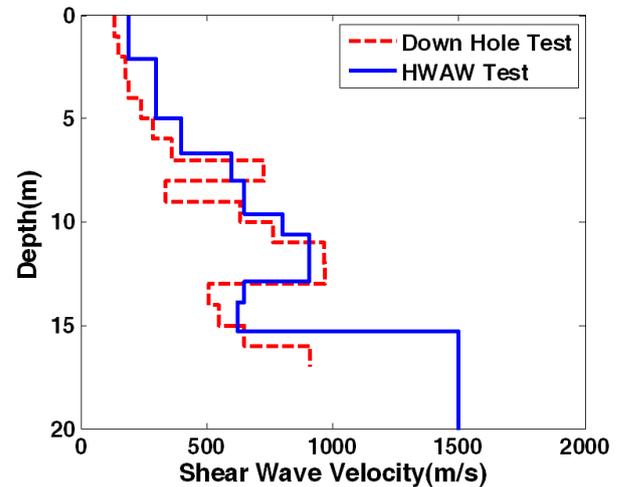


Fig. 11. Comparison of a shear velocity profile by a GA inversion and a shear velocity profile determined by Down Hole test

결정되는 분산곡선은 주파수 영역에서는 전체 주파수 대역에 대해 균등하게 분포하나, 실제 물리적인 의미를 가지는 파장영역에서는 대부분의 위상속도 데이터가 짧은 파장(얕은 깊이)에 집중되어 있어 주파수 영역 분산곡선을 사용하여 역산을 수행하는 경우 결정되는 주상도의 깊은 깊이 층 속도 및 두께 등의 신뢰도가 낮아질 수 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 분산곡선을 구성하고 있는 각각의 위상속도 값들이 점유하는 파장대역을 가중치로 사용한 오차함수를 사용하여 얕은 깊이뿐만 아니라 깊은 깊이에서도 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도를 결정할 수 있는 자동화된 역산 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 수치모의

실험과 현장 실험을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 역산 방법의 신뢰성 및 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0060310).

참 고 문 헌

- 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(2), pp.187-196.
- Goldberg, D. (1989) "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning." *Addison-Wesley Professional*
- Holland, J. H. (1975) "Adaptation in natural and artificial system", *University of Michigan press*, Ann. Arbor, Michigan.
- Kausel, E. and Roesset, J. M. (1981) "Stiffness matrices for layered soils." *BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, Vol.71(6), pp.1743-1761.
- Kausel, E. and Peek, R. (1982) "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: An explicit solution." *BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, Vol.72(5), pp.1459-1481.
- Osama, H. (1998) "Evolution-based genetic algorithms for analysis of non-destructive surface wave tests on pavements." *NDT&E International*, Vol.31(4), pp.273-280.
- Park, C. B., Miller, R. D. and Xia, J. H. (1999). "Multichannel analysis of surface waves." *Geophysics*, Vol.64, pp.800-808.
- 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, *Journal of Korean Society of Civil*, Vol.24(2C), pp.105-115.
- 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, *Journal of Korean Society of Civil*, Vol.24(2C), pp.117-124.
- 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, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.20(6), pp.1-9.
- Park, H. C., Kim, D. S. and Bang, E. S. (2006), Determination of Mode Dispersion Curves of Surface Wave Using HWAW Method, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.22(12), pp.15-24.
- Park, H. C., Kim, D. S., Kim, J. T and Bang, E. S. (2007) "Seismic Site Characterization using Harmonic Wavelet Analysis of Wave (HWAW) Method." *Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece.
- Park, H. C. and Hwang, H. J. (2010) "Determination of 3-D Vs Map of the site using HWAW method (Harmonic Wavelet Analysis of Waves)." *International Association for Engineering Geology and the Environment*.
- Stokoe, K. H., Wright II, Bay, S. G. and Rosset, J. M. (1994). "Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method." *ISSMFE Technical Committee #10 for XIII ICSMFE*, Geophysical Characterization of Sites, A. A. Balkema Publishers/Rotterdam & Brookfield, Netherlands, pp.15-25.
- Yamanaka, H. (2005) "Comparison of Performance of Heuristic Search Methods for Phase Velocity Inversion in Shallow Surface Wave Method." *J. ENVIRON. ENG. GEOPHYSICS*, Vol.10(2), pp.163-173.

(접수일자 2012. 3. 22, 심사완료일 2012. 7. 11)