

# 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용한 모형 암반의 위상속도 예측

이종섭<sup>1</sup>, 엄현석<sup>2</sup>, 김동현<sup>3</sup>, 이인모<sup>4\*</sup>

## Evaluation of phase velocity in model rock mass using wavelet transform of surface wave

Jong-Sub Lee, Hyon-Sohk Ohm, Dong-Hyun Kim, In-Mo Lee

**Abstract** Prediction of ground condition ahead of tunnel face might be the most important factor to prevent collapse during tunnel excavation. In this study, a non-destructive method to evaluate the phase velocity in model rock mass using wavelet transform of surface wave was proposed aiming at ground condition assessment ahead of tunnel face. Model tests using gypsum as a rocklike material composed of two layers were performed. A piezoelectric actuator with frequencies ranging from 150 Hz to 5 kHz was selected as a harmonic source. The acceleration history was measured with two accelerometers. Wavelet transform analysis was used to obtain the dispersion curves from the measured data. The experimental results showed that the near-field effects can be neglected if the distance between two receivers is chosen to be three times the wavelength. A simple inversion method using weighted factor based on the normal distribution was proposed. The inversion results showed that the predicted phase velocity agreed reasonably well with the measured one when the wavelength influence factor was 0.2. The depth of propagation of surface wave was from 0.42 to 0.63 times the wavelength. The range of wavelength varying with phase velocity in dispersion curve matched well with that estimated by inversion technique.

**Keywords:** Phase velocity, rock mass, wavelet transform, surface wave, non-destructive method

**요 지** 터널 막장 전방의 암반 물성 변화의 예측은 터널 시공 시 붕괴를 막을 수 있는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용한 모형 암반의 위상속도를 예측하는 비파괴 시험법을 제안함으로써 터널 막장 전방의 암반 물성 변화를 예측하고자 한다. 실내 실험에서는 암반을 모사하기 위하여 강도가 각각 틀린 두 층으로 이루어진 석고 모형을 사용하였다. 가진원은 진동 발생 가능한 주파수 대역이 150 Hz에서 5 kHz인 액츄에이터를 사용하였으며, 감지기는 두 개의 가속도계가 사용되었다. 분산곡선을 계산하기 위하여 웨이블릿 변환 해석을 수행하였다. 실내 실험 결과, 근접장 효과를 없애기 위한 최소 감지기 간격이 탐측 가능 깊이의 3배 이상으로 나타났다. 정규 분포 곡선에 기초한 가중치를 이용한 간단한 역산을 제안하였고, 파장 반영계수가 0.2일 때 예측치와 실측치가 잘 일치하였다. 표면파의 전파 깊이는 파장의 0.42~0.63배로 나타났으며, 분산곡선에서 파장에 따라 위상속도가 변하는 구간이 역산을 통해 계산된 구간과 잘 일치하였다. 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용한 위상속도의 예측은 기존의 표면파 시험법에 비해 실험 구성 및 실험 방법, 역산 과정이 간단하므로 터널 막장 전방의 암반 물성 변화를 예측하는데 효율적인 적용이 가능할 것으로 판단된다.

**주요어:** 위상속도, 암반, 웨이블릿 변환, 표면파, 비파괴 시험법

### 1. 서 론

터널 시공 시 터널 막장 주변의 지반 조건이 예상치 못한 연약층으로 형성되어 있는 경우 막장 전체 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 파괴는 비파괴 시험법인 표면파 시험을 통해 터널 막장 전방의 암반 물성 변화를 예측함으로써 예방할 수 있다. 그러나 두 개의 감지기를 사용하는 SASW의 경우 신호의 잡음이 심할 경우 타당한

누적 위상 그래프를 얻기 힘들고 측정 깊이를 증가시키기 위해 감지기 간격을 늘려야 하며, 신호의 해상도가 뛰어난 주파수-파수 해석법은 여러 개의 감지기를 필요로 한다는 단점이 있다(박형춘과 김동수, 2004).

본 연구에서는 비파괴 시험법으로서 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용한 모형 암반의 위상속도를 결정함으로써 터널 막장 전방의 암반 물성 변화를 쉽게 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 실내 실험에서는 터널 암반을 모사한 강도가 각각 틀린 두 층으로 이루어진 석고 모형을 제작하였고 석고 표면에 위치한 가진원에서 발생한 신호를 두 감지기에서 측정하여 웨이블릿 변환 해석을 수행하였다. 표면파에 대한 웨이블릿 변환을

<sup>1</sup>정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수

<sup>2</sup>비희원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 대학원생

<sup>3</sup>정희원 · GS건설 지하공간팀 과장

<sup>4</sup>정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

\*교신저자: 이인모 (inmolee@korea.ac.kr)

통하여 분산곡선을 계산하고, 파장에 따라 깊이와 폭이 변하는 가중치를 이용하여 역산을 수행하였다.

## 2. 표면파의 특성

### 2.1 균일한 매질에서의 표면파의 특성

저변형률에서의 지진파(seismic wave)는 전파해나가는 거동이 변형률의 크기와는 독립적이며 material damping에 의하여 분산해 나가는 에너지의 양이 적기 때문에 탄성파(elastic wave)라고 불리운다. 탄성파에는 매질 안에서 전파해 나가는 체적파와 매질의 표면에서 전파해 나가는 표면파로 나뉜다. 체적파에는 압축파 팽창을 반복하며 전파해나가는 압축파와 전단 변형을 일으키며 전파하는 전단파가 있다. 표면파에는 압축파와 전단파의 수직성분이 혼합된 입자 운동 형태를 가지는 레일리파(Rayleigh wave), 압축파와 전단파의 수평성분이 혼합된 입자 운동 형태를 가지는 러브파(Love wave)가 있다(Stokoe and Santamarina, 2000). 표면파 시험에서는 주로 레일리파를 사용하며 본 논문에서 표면파는 레일리파를 지칭한다.

등방(isotropic)이며 등질(homogeneous)인 탄성 연속체에서의 탄성파의 전파 이론으로부터 압축파와 전단파의 위상속도를 각각 나타내면 다음과 같다.

$$V_P = \frac{\omega_p}{k_p} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_S = \frac{\omega_s}{k_s} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

여기서,  $V_P$ 는 압축파의 위상속도,  $V_S$ 는 전단파의 위상속도,  $\omega = 2\pi/T$ 는 각주파수,  $k = 2\pi/\lambda$ 는 파수,  $T$ 는 주기,  $\lambda$ 는 파장,  $M$ 은 구속계수,  $G$ 는 전단계수,  $\rho$ 는 매질의 밀도, 아래첨자  $p$ 와  $s$ 는 압축파와 전단파를 의미한다. 압축파의 위상속도와 전단파의 위상속도를 탄성계수  $E$ 와 포아송비  $\nu$ 로 각각 나타내면 다음과 같다.

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

$$V_S = V_S \sqrt{\frac{1-\nu}{0.5-\nu}} \quad (4)$$

표면파는 압축파와 수직성분의 전단파가 혼합된 입자 운동 형태를 가지므로 표면파의 위상속도  $V_R$ 을 압축파의 위상속도와 전단파의 위상속도와와의 관계식인 레일리파 식으로 나타내면 다음과 같다(Achenbach, 1975, Santamarina 등, 2001).

$$\left(2 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^2 - 4\sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_P^2}} \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_S^2}} = 0 \quad (5)$$

표면파의 위상속도를 전단파의 위상속도와 포아송비로 나타내면 다음과 같다.

$$V_R = \frac{0.874 + 1.117\nu}{1 + \nu} V_S \quad (6)$$

식 (4)와 식 (6)을 통해 균일한 매질에서의 탄성파 속도와 포아송비와의 관계를 보면 압축파의 위상속도는 전단파와 표면파의 위상속도보다 크며 표면파의 위상속도는 전단파의 위상속도의 0.874배~0.955배이다.

표면파에 의한 입자 운동 양상을 보면 약 1배 파장의 깊이에 대부분의 에너지가 분포하므로 표면파의 위상속도는 약 0.5배 파장 깊이에서의 매질의 위상속도를 대표한다(이성원, 2006).

진동하는 원형기초에서 발생하는 탄성파의 분포 양상을 보면 체적파의 경우 반구형의 파면으로 전파하며 기하학적 감쇠가 매질 안에서는  $1/r$ , 표면에서는  $1/r^2$ 인 반면에 표면파의 경우 원통형의 파면으로 전파하며 기하학적 감쇠가  $1/\sqrt{r}$ 이다. 즉 표면에서 체적파의 감쇠가 표면파의 감쇠보다 빠르다. 또한 가진원에서 발생하는 에너지의 67%가 표면파의 형태로 전파해 나가므로 탄성파의 전파 영역을 가진원 근처에서 혼합된 형태를 가지는 근거리장 영역(near field)과 가진원에서 파장의 일정 배수의 거리만큼 떨어진 곳에서 각각 분리된 형태를 가지는 원거리장 영역(far field)으로 나눌 때, 원거리장 영역에서는 표면파의 성분이 지배한다(Stokoe and Santamarina, 2000).

### 2.2 표면파의 분산성

실제 지층을 모사하기 위해서는 균일한 매질보다 다층 매질을 고려하는 것이 유리하다. 다층 매질에서 표면파는 주파수에 따라 위상속도가 변하는 분산성(dispersive)

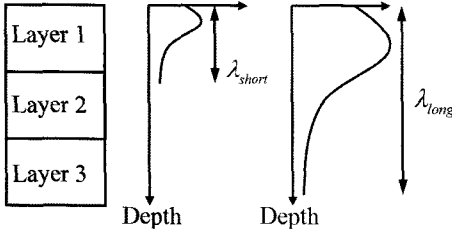


그림 1. 다층 매질에서 주파수에 따른 표면파의 영향 범위

을 가진다. 그림 1과 같이 다층 매질에서 표면파는 파장이 짧은 높은 주파수에서는 얇은 부분의 매질의 위상속도를 나타내고, 파장이 긴 낮은 주파수에서는 깊은 부분의 매질의 위상속도를 나타낸다. 이러한 표면파의 분산성은 표면파 시험에서 중요한 요소가 된다(Stokoe and Santamarina, 2000).

### 3. 웨이블릿 변환을 이용한 위상속도 예측

#### 3.1 웨이블릿 변환의 특성

본 연구에서는 두 개의 감지기만으로 신호의 해상도를 높일 수 있는 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용하였다. 웨이블릿 변환(wavelet transform)은 푸리에 변환(Fourier transform) 및 창 함수를 이용한 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform)과 같은 시간-주파수 해석과는 달리 신호에 포함되어 있는 스케일을 쉽게 분해하여 해석할 수 있는 시간-스케일 해석이라고 불리운다(이승훈과 윤동한, 2004). 예를 들어, 다음식과 같은 시간에 따른 주파수가 변하는 분리 신호를 고려하자.

$$f(t) = \begin{cases} \sin(2\pi \times 20t) & \text{if } 0.1 \leq t \leq 0.4 \\ \sin(2\pi \times 40t) & \text{if } 0.6 \leq t \leq 0.9 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

이 분리 신호를 시간영역에서 표현하면 그림 2와 같다. 또한 분리 신호에 대해서 푸리에 변환과 웨이블릿 변환한 결과는 각각 그림 3과 그림 4와 같다.

그림 3에서 분리 신호의 푸리에 변환으로부터 신호의 주파수 성분을 알아낼 수 있지만 시간에 따른 주파수의 분포는 알 수 없는 반면에 그림 4에서 분리 신호의 웨이블릿 변환으로부터 시간에 따른 주파수의 분포를 알 수 있다.

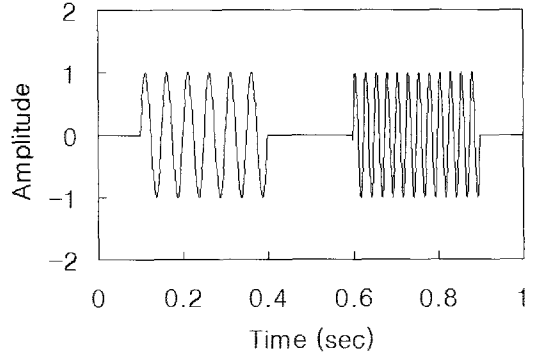


그림 2. 시간 영역에서의 분리 신호

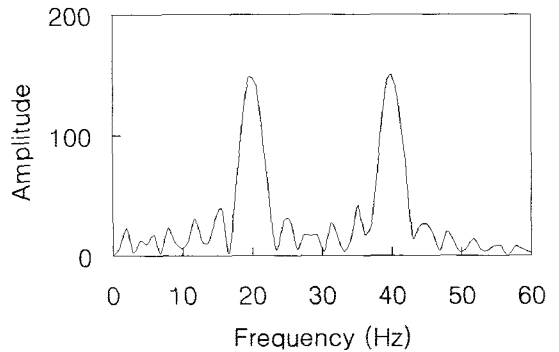


그림 3. 분리 신호의 푸리에 변환

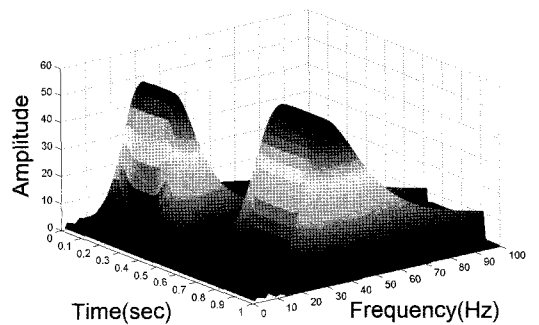


그림 4. 분리 신호의 웨이블릿 변환

그림 5는 STFT 방법과 웨이블릿 변환에서 주파수에 대한 창 크기를 나타내었다. 여러 주파수가 중첩되어 있는 신호의 경우 STFT 방법은 하나의 창함수로 해석하기 때문에 저주파에서 해석이 가능하도록 창의 크기가 크게 정해져 있다면 고주파에서 해석할 수 없다. 반면에 웨이블릿 변환은 주파수에 따라 창의 크기가 변화

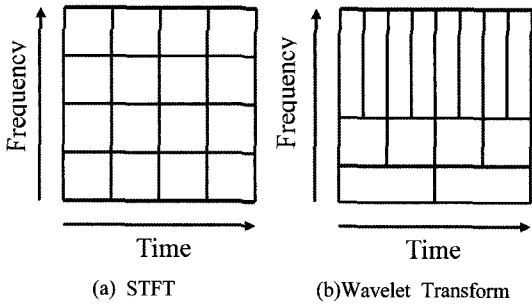


그림 5. STFT 방법과 웨이블릿 변환의 창 크기

하므로 STFT의 단점을 보완한다(이승훈과 운동한, 2004).

### 3.2 웨이블릿 변환의 정의

웨이블릿 변환은 모 웨이블릿(mother wavelet)의 종류에 따라 Morlet 웨이블릿, 미분 가우스 웨이블릿, Barrat 웨이블릿 등으로 나눌 수 있다. 모 웨이블릿을 나타내면 다음과 같다.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (8)$$

여기서,  $\psi(t)$ 는 모 웨이블릿,  $a$ 는 스케일 파라미터(scaling parameter),  $b$ 는 이동 파라미터(translation parameter)를 나타낸다. 웨이블릿 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$Wf(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (9)$$

여기서,  $f(t)$ 는 원신호(original signal),  $\psi^*(t)$ 는 모 웨이블릿의 복소공액(complex conjugate)을 나타낸다. 웨이블릿 변환은 원신호와 모 웨이블릿간의 상호상관(cross-correlation) 관계로 볼 수 있다. 그림 6과 같이 스케일 파라미터가 변함에 따라 모 웨이블릿의 형태가 변하여 다양한 주파수에 대하여 해석이 가능하며, 그림 7과 같이 이동 파라미터가 변함에 따라 모 웨이블릿이 이동을 하여 원신호에 대한 모 웨이블릿의 유사성을 알 수 있다.

본 연구에서는 모 웨이블릿으로 불확정성 원리에 근거하여 시간-주파수 해상도가 가장 뛰어나다는 가버 웨이블릿(Gabor wavelet)을 사용하였다(Inoue 등, 1996). 가버 웨이블릿과 가버 웨이블릿의 푸리에 변환을 각각

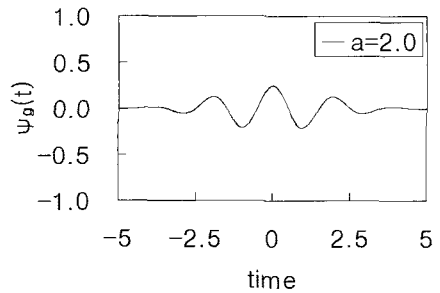
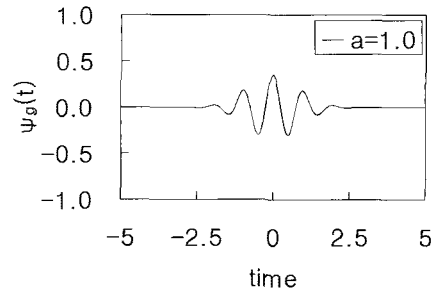
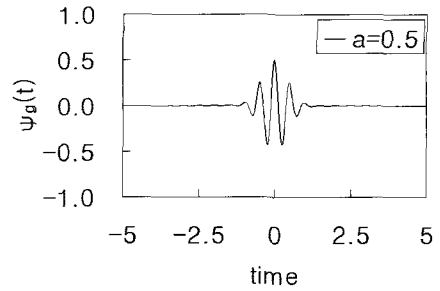


그림 6. 스케일 파라미터에 따른 모 웨이블릿

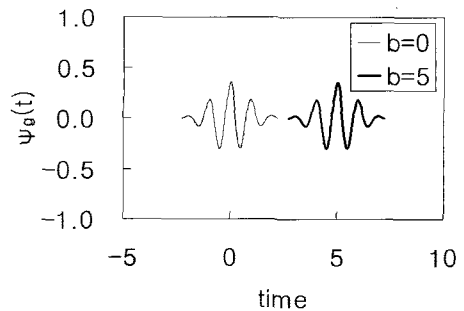


그림 7. 이동 파라미터에 따른 모 웨이블릿

나타내면 다음과 같다.

$$\psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\omega_0}}{\gamma} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (10)$$

$$\Psi_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp\left[-\frac{(\gamma/\omega_0)^2}{2}(\omega-\omega_0)^2\right] \quad (11)$$

여기서  $\gamma$ 는  $\pi\sqrt{2/\ln 2}$ ,  $\omega_0$ 는  $2\pi$ 의 값을 가진다.

### 3.3 군속도와 위상속도

x축 방향으로 전파해 나가는 같은 크기를 가지며 다른 주파수를 가지는 조화운동을 하는 두 개의 파를 합성시키면 다음과 같다(Inoue 등, 1996).

$$u(x,t) = A\cos(k_1x - \omega_1t) + A\cos(k_2x - \omega_2t) \quad (12)$$

$$u(x,t) = 2A\cos(\Delta kx - \Delta\omega t)\cos(kx - \omega t) \quad (13)$$

여기서,  $A$ 는 진폭,  $k_1, k_2$ 는 파수(wave number),  $\omega_1, \omega_2$ 는 각주파수(angular frequency),  $\Delta k$ 는  $(k_1 - k_2)/2$ ,  $\Delta\omega$ 는  $(\omega_1 - \omega_2)/2$ ,  $k$ 는  $(k_1 + k_2)/2$ ,  $\omega$ 는  $(\omega_1 + \omega_2)/2$ 를 나타낸다. 식 (13)에서 앞부분의 삼각함수는 저주파로 신호의 윤곽선이 이동하는 군속도와 관련이 있으며 뒷부분의 삼각함수는 고주파로 신호의 한 입자가 이동하는 위상속도와 관련이 있다. 그러므로 군속도  $V_{group}$ 과 위상속도  $V_{phase}$ 를 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{group} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \quad (14)$$

$$V_{phase} = \frac{\omega}{k} \quad (15)$$

### 3.4 웨이블릿 변환을 이용한 위상속도 예측

두 감지기에서 측정된 신호의 웨이블릿 변환을 이용한 군속도와 위상속도를 각각 나타내면 다음과 같다(Park and Kim, 2001).

$$V_{group} = \frac{d}{t_{gr2} - t_{gr1}} \quad (16)$$

$$V_{phase} = \frac{d}{t_{ph2} - t_{ph1}} \quad (17)$$

여기서,  $t_{gr1}, t_{gr2}$ 는 첫 번째, 두 번째 감지기에서 측정된 신호의 파군 지체시간,  $t_{ph1}, t_{ph2}$ 는 첫 번째, 두 번째 감지기에서 측정된 신호의 위상 지체시간,  $d$ 는 두 감지기 간의 거리를 나타낸다. 그림 8은 두 감지기에서 측정된 신호의 누적 위상 그래프를 나타낸다. 식 (17)을 기하학

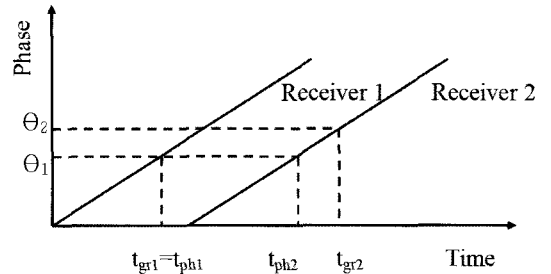


그림 8. 두 감지기에서 측정된 신호의 누적 위상 그래프

적인 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{phase} = \frac{d}{(t_{gr2} - t_{gr1}) - \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{\omega}\right)} \quad (18)$$

여기서,  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는  $t_{gr1}$ 과  $t_{gr2}$ 에서의 위상각을 나타낸다. 실제 실험에서는 식 (18)을 이용하여 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용한 위상속도를 예측하였다.

## 4. 실내실험

### 4.1 모형 제작

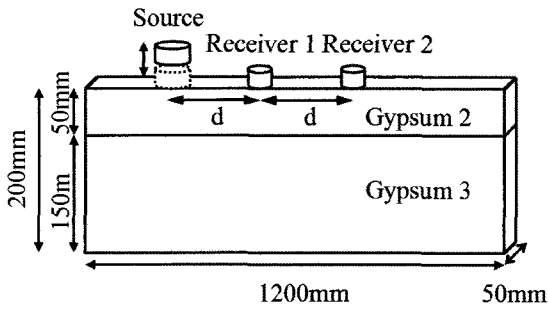
실내 실험에서는 암반을 모사하기 위하여 길이에 비하여 두께가 얇은 두 층으로 이루어진 석고 모형을 제작하였다. 각 경우의 석고 모형은 그림 9와 같이 석고의 크기와 석고의 종류를 다르게 하였다. 표 1은 석고의 재료 특성을 나타낸다.

### 4.2 실험 장비 구성

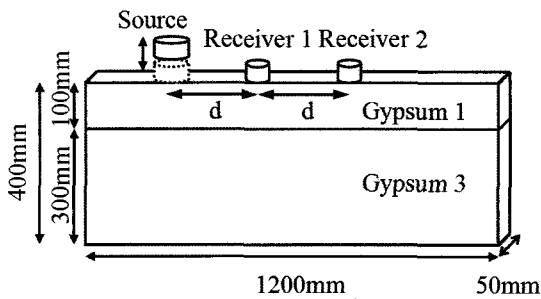
실험 장비는 크게 가진원, 가진원 구동 장비, 감지기, 감지기 구동 장비, 디지털 오실로스코프로 나뉜다. 가진원은 주파수 대역이 150 Hz~5 kHz인 액츄에이터(712A02, PCB)를 사용하였고, 가진원을 구동하기 위하여 신호발

표 1. 석고의 재료 특성

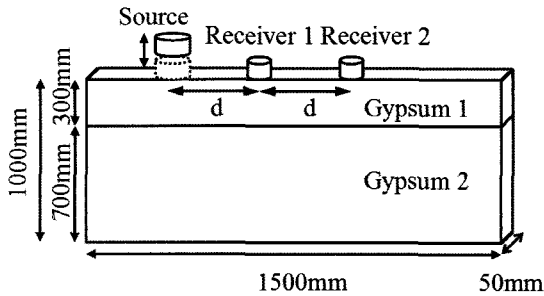
	압축강도 (MPa)	$V_p$ (m/sec)	$V_s$ (m/sec)
Gypsum 1	14	2000	1500
Gypsum 2	30	2500	1600
Gypsum 3	70	3400	2000



(a) Case 1



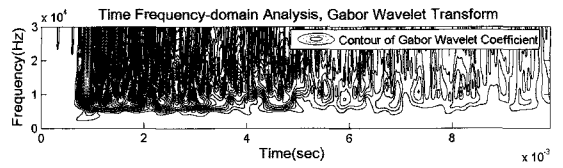
(b) Case 2



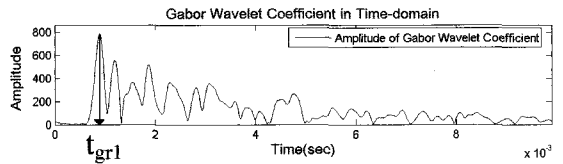
(c) Case 3

그림 9. 실제 실험에 사용한 모형

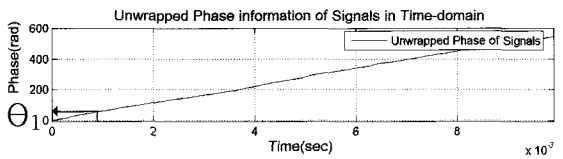
생기(33220A, Agilent)와 최대 200V까지 입력신호를 증폭할 수 있는 신호증폭기(EPA-104, Piezo Systems)를 사용하였다. 감지기는 1 Hz~30 kHz의 주파수 대역을 측정할 수 있는 가속도계(353B15, PCB)를 사용하였고, 감지기를 구동하기 위하여 최대 100배로 입력신호를 증폭할 수 있는 신호증폭기(482A16, PCB)를 사용하였다. 디지털 오실로스코프는 최대 100MS/s의 속도로 신호를 수집할 수 있는 모듈(PXI-5112, National Instruments)을 사용하였다.



(a) 웨이블릿 변환

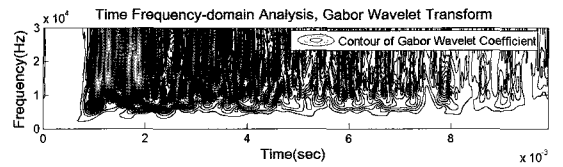


(b) 웨이블릿 변환 단면

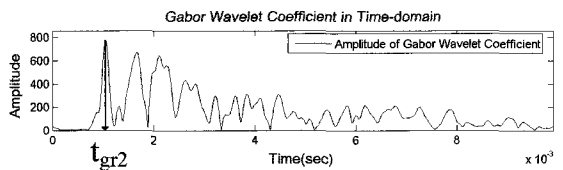


(c) 누적 위상각 그래프

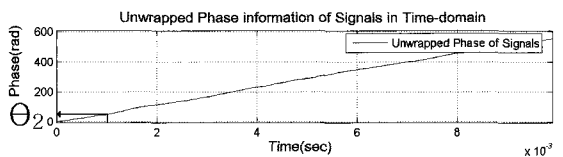
그림 10. 감지기 1에서 측정된 신호



(a) 웨이블릿 변환



(b) 웨이블릿 변환 단면



(c) 누적 위상각 그래프

그림 11. 감지기 2에서 측정된 신호

### 4.3 실험 방법

가진원과 첫 번째 감지기와의 거리는 첫 번째 감지기와 두 번째 감지기와의 거리와 같게 두어 근접장 호

과(near-field effect)와 두 감지기 사이에 발생하는 위신호(aliasing)를 제거하였다(Rix 등, 2000; Rix 등, 2001). 감지기 간격에 따른 표면파의 영향 범위를 알아보기 위하여 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm로 변화하여 실험을 수행한 후 가장 적합한 감지기 간격을 선택하였다. 가진원은 10 V의 크기로 1 Hz의 Square 신호를 발생한 후 20배 증폭을 하여 작동하였다. 감지기에서 측정된 신호는 1 MS/s의 속도로 10000개의 샘플로 수집하였다. 두 감지기에서 측정된 신호를 웨이블릿 변환을 하여 임의의 주파수에서 그림 10, 그림 11과 같은 웨이블릿 변환 단면과 누적 위상각 그래프를 얻는다.

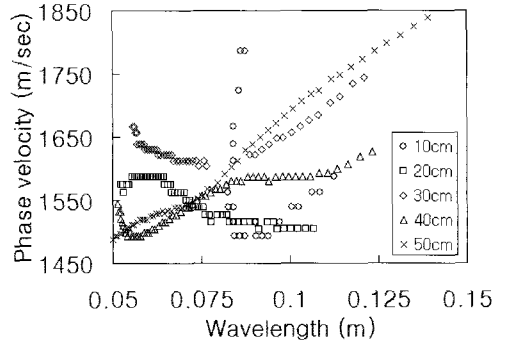
임의의 주파수에 해당하는 웨이블릿 변환 단면에서 크기가 최대가 되는 시간인 파군 지체시간  $t_{gr1}$  과  $t_{gr2}$  를 선택한다. 두 신호의 누적 위상각 그래프로부터 파군 지체시간에 해당하는 위상각  $\theta_1$  과  $\theta_2$  를 선택한다. 위상속도는 식 (18)에 감지기 간격, 파군 지체시간, 위상각, 주파수를 대입하여 예측하게 된다.

### 5. 실험 결과 및 해석

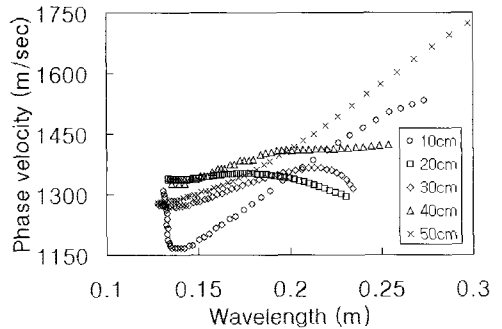
#### 5.1 분산 곡선

간격에 따른 표면파의 영향 범위를 알아보고 각각의 모형에서 가장 적합한 간격을 선택하기 위하여 석고 모형 Case 1, Case 2, Case 3에 대하여 감지기 간격 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm으로 변화시켜가며 표면파 실험을 수행하였다. 또한 측정된 표면파의 위상속도와 이론적인 표면파의 위상속도를 비교하기 위하여 식 (5)에 실제 측정된 압축파 속도와 전단파 속도를 대입하여 표 2와 같이 이론적인 표면파의 위상속도를 계산하였다.

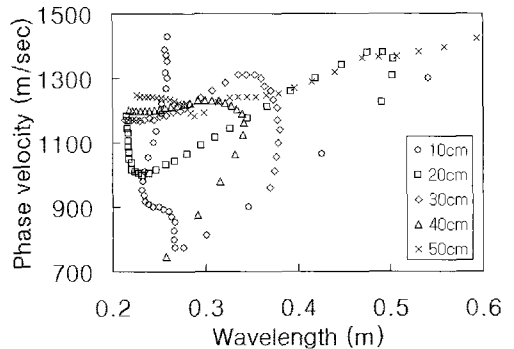
그림 12는 석고 모형 Case 1, Case 2, Case 3에 대한



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

그림 12. 감지기 간격에 따른 분산 곡선

표 2. 석고의 이론적인 표면파 위상속도

	$V_P$ (m/sec)	$V_S$ (m/sec)	$V_R$ (m/sec)
Gypsum 1	2000	1500	1268
Gypsum 2	2500	1600	1444
Gypsum 3	3400	2000	1834

표 3. 탐측 가능 깊이에 따른 최소 감지기 간격

	최소 감지기 간격 $d_{min}$ (cm)	탐측 가능 깊이 $\lambda_{max}$ (cm)	$d_{min} / \lambda_{max}$
Case 1	30	12	2.5
Case 2	40	25	1.6
Case 3	50	63	0.8

여 감지기 간격에 따른 분산 곡선을 나타낸다. 파장이 증가함에 따라 위상속도가 증가하기 시작하는 감지기 간격과 그 때의 파장을 나타내면 표 3과 같다. 표 3과 같이 최소 감지기 간격은 탐측 가능 깊이의 3배 이상일 때 안정권에 들어간다고 판단된다.

## 5.2 역산

본 연구에서는 다음과 같이 정규 분포에 기반한 가중치를 이용하여 간단한 역산 방법을 제안하였다.

$$w(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\alpha\lambda_c} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_c)^2}{2\alpha^2\lambda_c^2}} \quad (19)$$

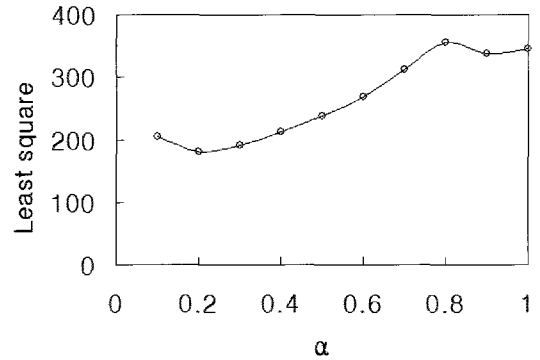
여기서,  $w(\lambda)$ 는 파장에 따른 가중치,  $\lambda_c$ 는 중심파장,  $\alpha$ 는 파장 반영계수를 나타낸다. 가중치는 파장이 증가할수록 중심축이 깊어지며 영향범위도 넓어지므로 표면파의 특성을 반영한다. 가중치는 가정한 위상속도에 적용하여 위상속도의 예측치를 계산한다. 예측치와 실측치의 오차는 다음과 같이 최소제곱법으로 처리하여 오차가 가장 적을 때의 가정한 위상속도를 선택한다.

$$E = V_{meas} - V_{pred} \quad (20)$$

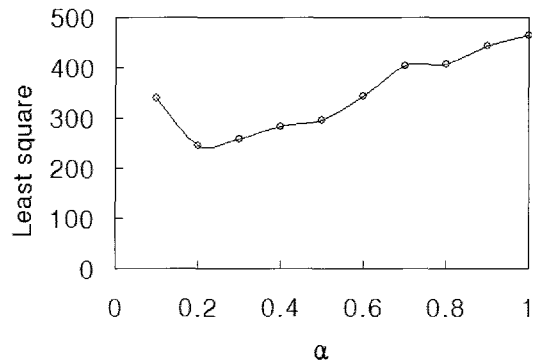
$$L = \left( \sum (E)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

여기서,  $V_{meas}$ 는 위상속도의 실측치,  $V_{pred}$ 는 위상속도의 예측치를 나타낸다. 최적의 파장 반영계수를 선택하기 위해 파장 반영계수에 따른 역산을 수행하여 위상속도의 예측치와 실측치의 오차의 합인  $L$ 값을 계산하여 그림 13에 나타내었다. 그림 13에서 Case 3의 경우 감지기 간격 50 cm 이상에서 실험하지 못한 한계를 고려한다면 최적의 파장 반영계수로 0.2를 선택함에 무리가 없을 것으로 판단된다. 감지기 간격이 50 cm, 파장 반영계수가 0.2일 때 Case 1, Case 2, Case 3에 대하여 역산을 수행하였다.

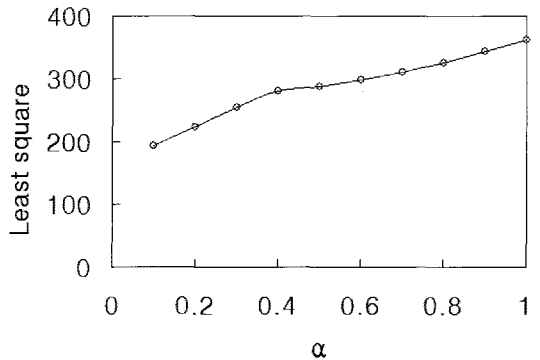
그림 14, 그림 15, 그림 16의 파장에 따른 위상속도의 가정치에서 두 석고의 분리지점을 찾아내면 표 4와 같다. 역산 결과, 두 석고가 만나는 지점의 깊이는 파장의 0.42~0.63배로 나타났다. 이는 위상속도가 대략 파장의 0.5배 깊이의 매질을 대표한다는 점에서 타당한 결과



(a) Case 1



(b) Case 2



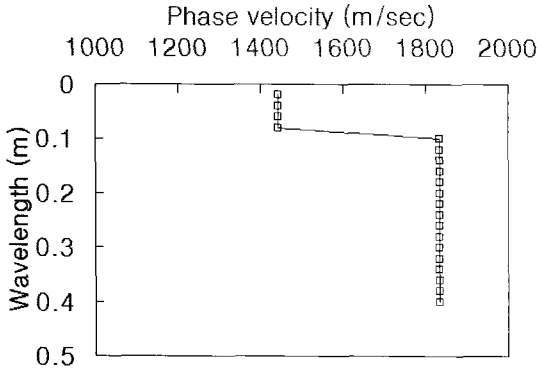
(c) Case 3

그림 13. 파장 반영계수에 따른 L값

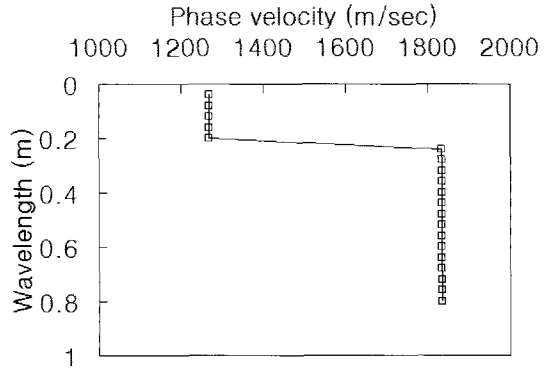
표 4. 두 석고의 분리지점

	실제 깊이 D (m)	파장 $\lambda$ (m)	D / $\lambda$
Case 1	0.05	0.08~0.1	0.5~0.625
Case 2	0.1	0.2~0.24	0.417~0.5
Case 3	0.3	0.5~0.6	0.5~0.6

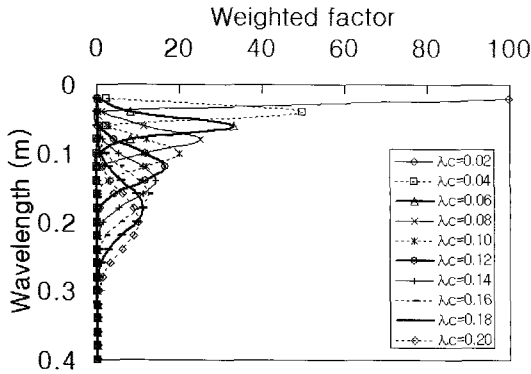




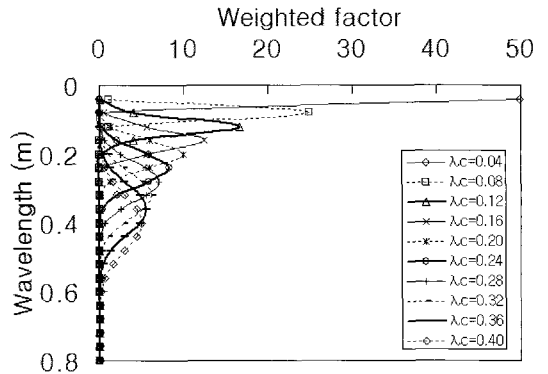
(a) 파장에 따른 위상속도의 가정치



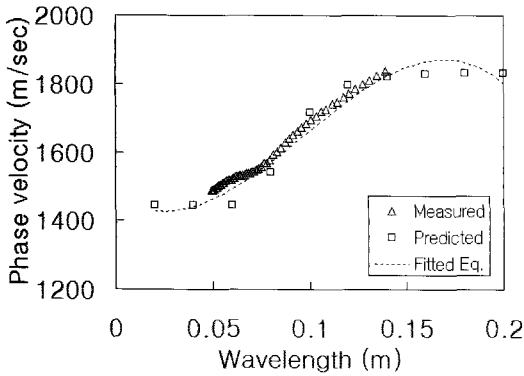
(a) 파장에 따른 위상속도의 가정치



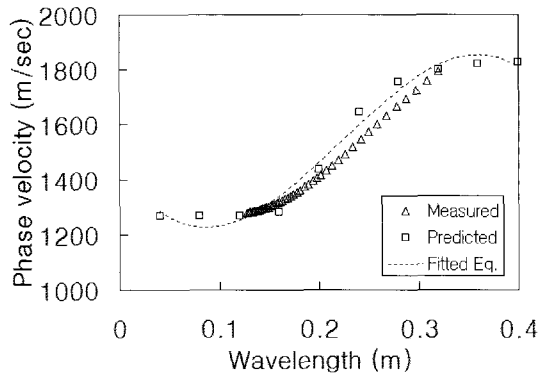
(b) 파장에 따른 가중치



(b) 파장에 따른 가중치



(c) 위상속도의 예측치와 실측치 비교



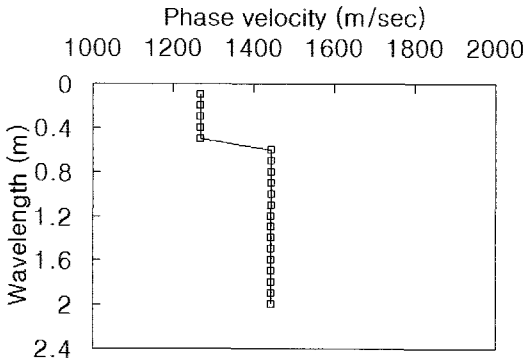
(c) 위상속도의 예측치와 실측치 비교

그림 14. 역산 결과(Case 1)

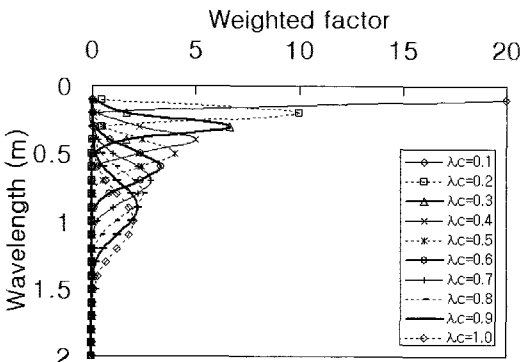
그림 15. 역산 결과(Case 2)

로 해석된다. 그림 14, 그림 15, 그림 16의 위상속도의 실측치에서 파장에 따른 위상속도가 변화하는 구간(전이 구간)과 역산을 통한 파장에 따른 위상속도가 변화하는 구간(분리 구간)을 표 5에 나타내었다. 표 5와 같이

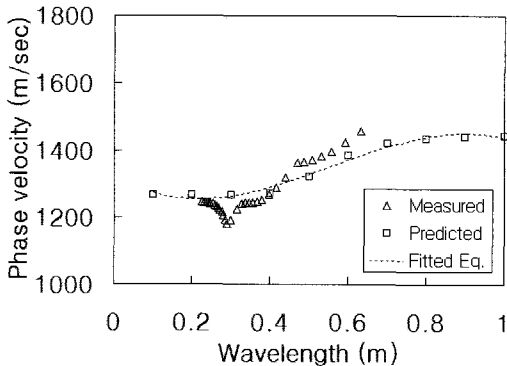
위상속도의 실측치에서 파장에 따른 위상속도의 전이 구간의 중심이 역산을 통하여 얻어낸 분리 구간에 포함되어 있음을 알 수 있다.



(a) 파장에 따른 위상속도의 가정치



(b) 파장에 따른 가중치



(c) 위상속도의 예측치와 실측치 비교

그림 16. 역산 결과(Case 3)

표 5. 위상속도의 전이 구간과 역산을 통한 분리 구간

	전이 구간 (m)	분리 구간 (m)	전이 구간의 중심 (m)
Case 1	0.05~0.14	0.08~0.1	0.095
Case 2	0.13~0.32	0.2~0.24	0.225
Case 3	0.37~0.63	0.5~0.6	0.5

## 6. 결 론

본 연구에서는 표면파에 대한 웨이블릿 변환과 간단한 역산을 통해 모형 암반의 위상속도를 예측하는 비파괴 시험법을 제안하였다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실내 실험을 통해 감지기 간격에 따른 분산 곡선을 얻은 결과, 표면파 시험을 위한 최소 감지기 간격은 탐측 가능 깊이의 3배 이상일 때 안정권에 들 것으로 판단된다.
- (2) 표면파에 대한 웨이블릿 변환을 이용하여 두 감지기에서 측정된 신호를 시간-주파수 영역상에서 해석하여 뛰어난 신호 해상도를 얻었다. 정규 분포 곡선을 이용한 간단한 가중치를 제안하여 역산을 수행하였고, 가중치를 결정하는 요소 중 파장 반영계수가 0.2일 때 가장 타당한 예측치를 얻었다.
- (3) 역산 결과, 실제 깊이는 파장의 0.42~0.63배로 나타났으며 이는 표면파의 영향 깊이가 파장의 약 0.5배라는 경험을 뒷받침하였다. 파장에 따른 위상속도의 전이 구간의 중심이 역산을 통하여 얻어낸 분리 구간에 포함되는 것으로 나타났으며 분산 곡선에서 파장에 따른 위상속도의 전이 구간의 중심을 분리 구간으로 볼 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원과 GS건설의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. 박형춘, 김동수 (2004), "HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(1)", 대한토목학회 논문집 C, Vol. 24, No. 2, pp. 117-124.
2. 이성원 (2006), "웨이블릿 변환을 이용한 터널 암반의 발파 손상영역 평가 연구", 공학박사학위논문, 고려대학교.
3. 이승훈, 윤동한 (2004), "웨이브릿 변환 이론 및 적용",

보성각.

4. Achenbach, J. D. (1975), "Wave propagation in elastic solids", North-Holland Publishing Company, New York.
5. Inoue, H., Kishimoto, K., Shibuya, T. (1996), "Experimental wavelet analysis of flexural waves in beams", *Experimental Mechanics*, Vol. 36, No. 3, pp. 212-217.
6. Park, H. C., Kim, D. S. (2001), "Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform", *NDT&E International*, Vol. 34, pp. 457-467.
7. Rix, G. J., Lai, C. G., Spang, A. W. (2000), "In situ measurement of damping ratio using surface waves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 472-480.
8. Rix, G. J., Lai, C. G., Foti, S. (2001), "Simultaneous measurements of surface wave dispersion and attenuation curves", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 350-358.
9. Santamarina, J. C., Klein, K. A., Fam, M. A. (2001), "Soils and waves", John Wiley & Sons, New York.
10. Stokoe, K. H. and Santamarina, J. C. (2000), "Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering", *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1490-1536.



**이 종 섭**

고려대학교  
건축사회환경공학과  
부교수

E-mail: jongsub@korea.ac.kr



**엄 현 석**

고려대학교  
건축사회환경공학과  
대학원생

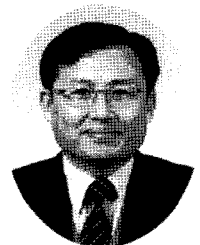
E-mail: hslove99@korea.ac.kr



**김 동 현**

GS건설  
지하공간팀  
과장

E-mail: dhyun@gsconst.co.kr



**이 인 모**

고려대학교  
건축사회환경공학과  
교수

E-mail: inmolee@korea.ac.kr