

## 관입형 현장 전단파 측정장치의 개발 및 적용

### Development and Application of Penetration Type Field Shear Wave Apparatus

이 종 섭<sup>1</sup> Lee, Jong-Sub                      이 창 호<sup>2</sup> Lee, Changho  
윤 형 구<sup>3</sup> Yoon, Hyung-Koo                이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woojin  
김 형 섭<sup>5</sup> Kim, Hyung-Sub

#### Abstract

The reasonable assessment of the shear stiffness of a dredged soft ground and soft clay is difficult due to the soil disturbance. This study addresses the development and application of a new in-situ shear wave measuring apparatus (field velocity probe: FVP), which overcomes several of the limitations of conventional methods. Design concerns of this new apparatus include the disturbance of soils, cross-talking between transducers, electromagnetic coupling between cables, self acoustic insulation, the constant travel distance of S-wave, the rotation of the transducer, directly transmitted wave through a frame from transducer to transducer, and protection of the transducer and the cable. These concerns are effectively eliminated by continuous improvements through performing field and laboratory tests. The shear wave velocity of the FVP is simply calculated, without any inversion process, by using the travel distance and the first arrival time. The developed FVP is tested in soil up to 30m in depth. The experimental results show that the FVP can produce every detailed shear wave velocity profiles in sand and clay layers. In addition, the shear wave velocity at the tested site correlates well with the cone tip resistance. This study suggests that the FVP may be an effective technique for measuring the shear wave velocity in the field to assess dynamic soil properties in soft ground.

#### 요 지

준설 매립된 연약지반이나 해성 점토의 전단강성 평가는 시료 교란의 영향으로 많은 어려움이 있다. 본 연구는 기존의 현장 전단파 시험들의 몇가지 제약 조건을 극복한 새로운 현장 전단파 시험 장치를 개발하고 적용성에 대하여 기술한 것이다. 장치 설계 고려사항은 교란효과, 트랜서듀서 간의 전기적 간섭, 케이블 사이의 전자기 커플링, 자체 음향 차단, 전단파의 이동 간격 유지, 트랜서듀서의 회전, 프레임(frame)을 통한 파의 직접적 전달, 그리고 트랜서듀서와 케이블의 보호를 포함한다. 이들 고려사항은 현장과 실내실험을 통하여 지속적으로 개선되었다. 현장 전단파 속도는, 어떠한 역산기법 없이, 전단파의 이동거리와 이동시간으로부터 직접 계산되었다. 개발된 현장 전단파 프로브는 깊이 30m까지 적용되었다. 실험결과 현장 전단파 프로브를 이용하여 모래와 점토지반에서 매우 세밀한 전단파 프로파일을 산정할 수 있었다. 또한 실험부지에서 수행된 콘관입실험결과와도 좋은 상관관계를 나타내었다. 본 논문에서 제시된 현장 전단파 프로브는 연약지반의 동적 특성 평가를 위한 현장 전단파 속도 측정에 매우 효과적인 장치임 보여준다.

**Keywords :** Bender elements, Cross-talking, In-situ test, Shear waves, Soft clay, Transducer

1 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph. D. student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

5 삼성물산 건설부문, 부산신항 북권 2단계 현장 소장 (Director, Busan New Port North Terminal Project, Samsung Corporation)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 늘어가는 해양 및 항만 개발에 따라 대규모 준설 매립 지반 및 대심도 연약 해성 점토 지반의 개량과 구조물 시공이 증가하고 있다. 이러한 준설 매립된 연약 지반이나 해성 점토의 진단강성의 평가는 시료 채취 및 시료 교란 등의 영향으로 많은 어려움이 있다. 일반적으로 이러한 연약 지반의 미소변형을 및 저변형을 영역에서의 지반의 동적 거동을 예측하기 위해서는 현장 접근성 문제 및 불교란 시료 채취의 어려움 등으로 인하여 현장 탄성과 시험 및 실내 시험이 병행되는 실정이다. 현장 진단과 탐사 시험에는 지표 탐사, 시추공 탐사 등이 있으며(한국지반공학회 2006) 현장 탄성과 시험을 통해 지반의 깊이별 최대 전단파 속도의 변화 양상을 파악할 수 있다. 또한, 동적 삼축 압축 시험, 공진주 시험 및 비틀전단시험 등 실내 시험 결과를 통하여 변형률에 따른 전단탄성계수의 변화 양상을 파악할 수 있다. 그러나 각각의 현장 탄성과 시험법은 시험 방법, 경제성 및 분석 기법, 현장 시험 여건, 그리고 현장 적용성 등에 따라, 실내시험의 경우 역시 시료의 교란 및 취급에 따라 시험 결과에 미치는 영향이 크다.

본 논문의 목적은 기존의 현장 탄성과 탐사 기법의 다양한 시험 제약 조건을 보완한 새로운 현장 진단과 시험법 개발 및 적용성 검증에 있다. 본 논문은 기존 시험의 간략한 장·단점 분석 후, 새롭게 개발된 시험 장치 및 기법을 소개하였다. 개발된 시험 장치 및 기법의 적용성 분석을 위해 30m 이상의 대심도 진단과 시험을 실시하였으며, 획득한 시간 이력곡선을 이용하여 깊이별 전단파 속도를 도출하였다.

## 2. 기존 현장 진단과 시험 분석

지반의 동적 특성을 파악하기 위한 현장 진단과 탐사는 크게 지표탐사와 시추공탐사로 분류할 수 있다. 지표 탐사로는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves method), HWA(Harmonic Wavelet Analysis of Wave), 그리고 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Waves) 등이 있다. 지표탐사 방법은 다음과 같이 3가지로 이루어진다. 1) 소스를 이용하여 입자 운동에 따른 표면파(Rayleigh)를 측정한다. 2) 분산곡선을 이용하여 측정된 전단파 속도를 평가한다. 3) 깊이에 따른 전단파 속도 추상도를 결정한다(Nazarian and Stokoe 1984; Stokoe et

al. 1994; Park et al.1999; Xia et al.1999; Louie 2001; Park and Kim 2001). 지표탐사법의 경우 깊이에 따른 수직 분해능이 감소되어 얇은 층을 분류하기가 어렵고 표면파에 따른 분산곡선을 도출하기가 어려운 문제점이 있다. 또한 SASW 방법을 이용한 실험이 수중에서 적용된 적은 있으나(Luke and Stokoe 1998), 주로 물이 없는 육상에서 사용되고 있다.

시추공탐사로는 크로스홀 기법(crosshole seismic method), 음파검층(sonic logging) 다운 홀(downhole)등이 있다. 일반적으로 크로스홀 방법은 2개 또는 그 이상의 시추공이 필요하며 한 개의 시추공을 발신기, 다른 한쪽은 수신기로 사용된다(Stokoe and Hoar 1978). 크로스홀 방법은 측정된 도달시간을 이용하여 전단파 속도를 쉽게 계산할 수 있으며 깊이에 따라서 분해능이 영향을 받지 않는 장점이 있다. 그러나 다수의 시추공 설치로 타탐사법에 비해 비경제적이고 시추 시 지속적인 수직도 측정이 필요하다. 반면에 음파검층 방법은 한 개의 시추공만을 이용하여 경제적이지만, 케이싱을 통한 Stonely wave의 전파로 인하여 연약지반에서 전단파 산정이 불가능할 수도 있다. 다운홀 방법의 경우, 하나의 시험공만을 이용하여 깊이별 탄성과 속도 측정이 가능하므로 경제적이고 정적 관입 원위치 시험과 동시에 수행이 가능한 장점이 있다. 그러나 가진기 및 수신기 위치에 따른 결과의 오류를 발생시킬 수 있으며, 다층 지반 시험 시 분석 방법이 복잡하고, 많은 가정이 필요하다. 또한 해석 결과 산출 시 엄격한 해석 기법이 요구되며, 수상에서는 시험 자체가 불가능하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이들 방법의 단점을 보완할 수 있는 새로운 현장 진단과 측정 방법을 제시하려고 한다.

## 3. 현장 진단과 프로브(Field Vs. Probe: FVP)

### 3.1 설계

링타입(ring type)의 현장 진단과 프로브(FVP)의 개요도 및 사진을 그림 1에 나타내었다. 관입의 용이성과 장치의 안정성을 고려하여 dilatometer(дил라토미터)의 모양과 유사한 모양의 블레이드(blade: 90×305×8, 너비×높이×두께, mm)를 십자 모양으로 교차시킨 후 각 모서리에 트랜스듀서 설치를 위한 프레임(frame)을 연결하였다.

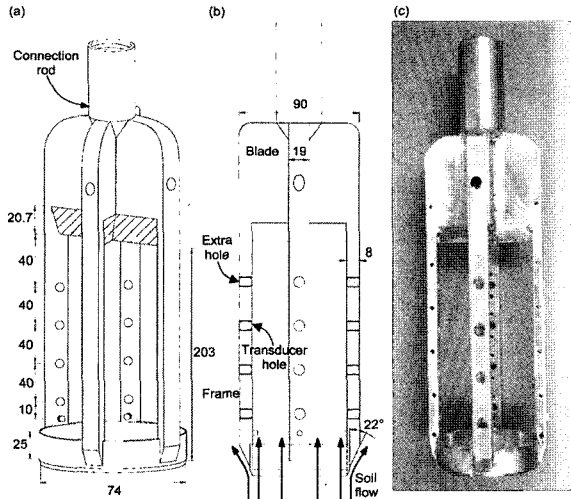


그림 1. 링타입 현장 전단파 프로브 (Field  $V_s$  Probe): (a) 개요도 (3D); (b) 개요도(2D); (c) 사진. 그림 내 숫자의 단위는 mm 이다

### 3.1.1 시료 비교란 효과

그림 1과 같이 전단파 측정에 있어서 시료 교란 효과를 최소화 하기 위하여 전단파 트랜스듀서를 블레이드의 끝단으로부터 블레이드 두께의 10배 이상 이격 시켜 설치하였다. 또한, 프레임 끝단(tip)을 쐐기모양으로 설계함으로써 블레이드의 관입 시 흙이 전단파 측정부 외곽으로 나가도록 하여 교란 효과를 최소화하였다.

### 3.1.2 트랜스듀서간 거리 유지

관입에 의한 지반의 저항력에 의해 트랜스듀서 프레임의 뒤틀림 방지 및 트랜스듀서 간격의 일정한 유지를 위하여 그림 1와 같이 내경 74mm, 두께 2.0mm의 링(ring)을 프레임 하단에 설치하였고, 보조 트랜스듀서 프레임을 추가로 설치하여 블레이드 자체 강성을 증가시켰다. 보조 트랜스듀서 프레임 역시 전단파 트랜스듀서의 설치가 가능하다. 또한 thin walled sampler 내경과 동일한 크기의 링을 설치함으로써 시료의 교란 정도 평가 등 thin walled sample을 이용한 실내 시험 결과와의 비교, 분석을 용이하게 하였다.

### 3.1.3 전단파 트랜스듀서의 설치

전단파의 발진 및 수신을 위한 트랜스듀서(벤더 엘리먼트)의 설치를 위하여 프레임에 나사산을 설치하였다. 발신용 벤더 엘리먼트에서 발생된 파가 프레임을 통하여 직접 전달되는 현상을 방지하기 위하여 길이 12mm, 직경 8mm의 나일론(nylon) 재질의 스크류를 이용(그림 2)하여 벤더 엘리먼트를 프레임에 설치 하였다. 이러한 방법으로 트랜스듀서를 설치할 경우 고장나지

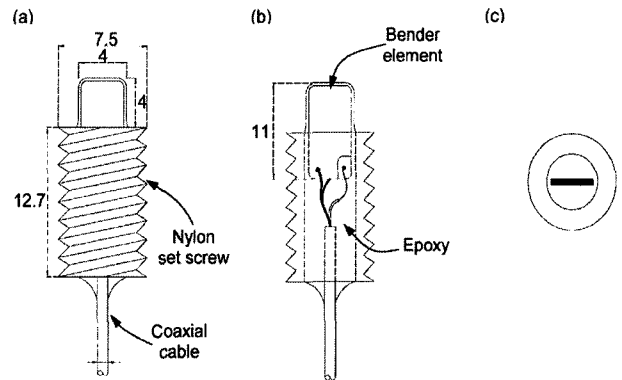


그림 2. 전단파 측정을 위한 벤더 엘리먼트: (a) 정면도(0°); (b) 투영도 (0°); (c) 평면도. 그림 내 숫자의 단위는 mm이다

나 오작동하는 트랜스듀서를 효과적으로 제거, 교체할 수 있다(Lee et al. 2005).

그림 3은 프레임을 통한 파의 직접적 전달 현상을 보여준다. 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 직접 프레임에 설치 할 경우 그림 3와 같이 프레임을 통한 파의 직접적인 전달이 발생하여 측정 대상 매질을 통한 전단파의 전파를 측정할 수 없게 된다. 프레임과 임피던스 차가 큰 나일론 스크류를 이용하여 트랜스듀서를 프레임에 고정할 경우 그림 3과 같이 나일론 스크류가 자체 음향 차단 시스템(self acoustic insulation system)으로 작용하여 프레임을 통한 파의 직접적 전달을 효과적으로 제거하여 양질의 전단파 신호를 획득할 수 있다.

점토의 경우 대표적인 고유이방성 물질이므로 점토의 전단파 속도는 파의 전파(wave propagation) 방향과 입자 이동(particle motion) 방향의 유효응력에 영향을 받게 된다. 벤더 엘리먼트의 경우 압축파 트랜스듀서와 달리 크로스홀 형상 및 보어홀 형상의 두 가지 형상 모두에서 전반적으로 지향성이 낮아 매우 광범위한 방향에서 전단파의 측정이 필요한 경우 상당히 효과적인 트랜스듀서가 될 수 있어 흙의 이방성 평가가 용이하다(이종섭과 이창호 2006). 나선형태의 스크류의 특징상 트랜스듀서를 쉽게 회전시킬 수 있어, 그림 4와 같이 다수의 트랜스듀서 설치 시 전단파의 polarization 영향에 따른  $V_s(HH)$ ,  $V_s(HV)$  및  $V_s(H\theta)$ 의 측정으로 대상 지반의 이방성 또한 조사할 수 있다(이창호 외 2006). 또한 벤더 엘리먼트를 그림 5와 같이 프레임의 다른 높이에 설치함으로써  $V_s(\theta H)$ 도 측정할 수 있어 현장 이방성 연구에 탁월한 효과를 보일 것으로 예상된다.

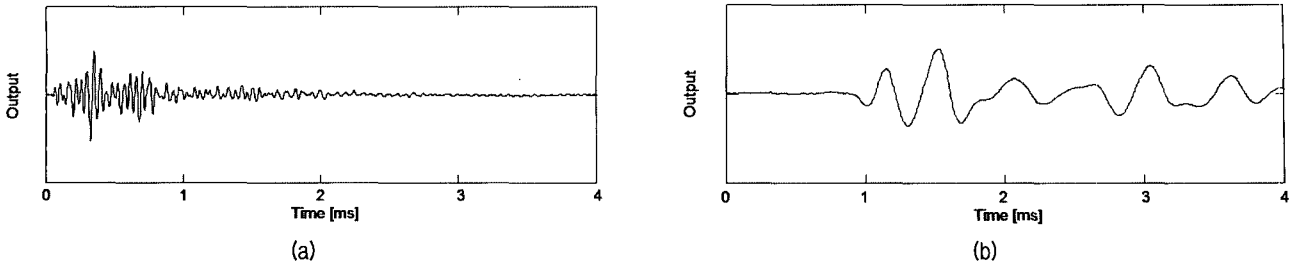


그림 3. 파의 직접적 전달 : (a) frame wave; (b) frame wave를 제거한 S-wave

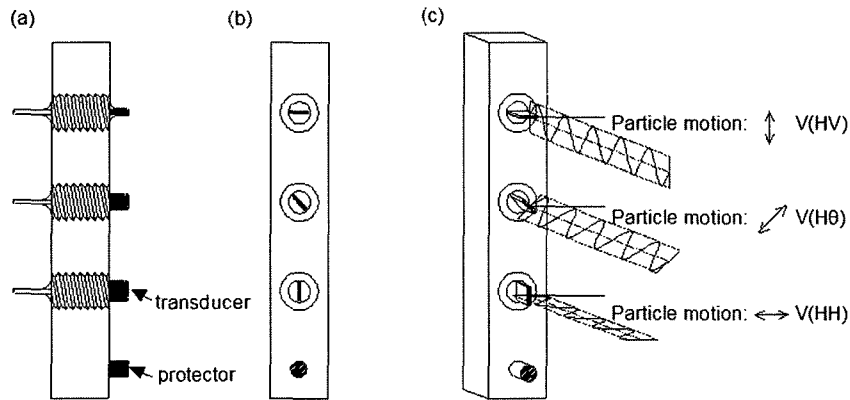


그림 4. 트랜스듀서의 회전 : (a) 측면도(0°); (b) 측면도(90°); (c) 파의 전파(3D)

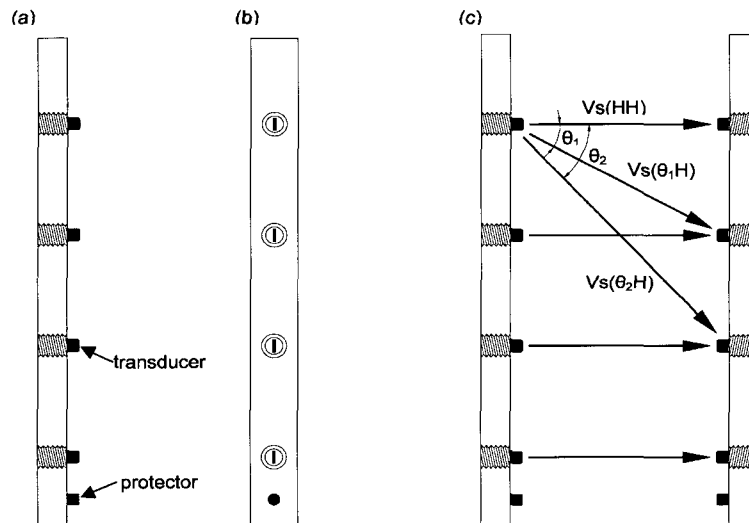


그림 5. 트랜스듀서의 설치 : (a) 측면도(0°); (b) 측면도(90°); (c) 파의 전파(3D)

### 3.1.4 트랜스듀서(벤더엘리먼트) 보호장치

관입 시 밀려 들어오는 흙 및 기타 물질로부터 트랜스듀서를 보호하고 지반의 교란을 최소화시키며 트랜스듀서와 흙의 접촉을 최대화 하기 위해 돌출된 트랜스듀서의 위, 아래에 그림 4 및 그림 5와 같이 직경 3.7mm의 보호 장치를 설치하였다. 트랜스듀서 전선의 보호를 위하여 프레임 바깥쪽에 높이 7.0mm의 커버를 설치하였다. 블레이드의 상부에 위치한 경사 구멍을 통해 각각의 트랜스듀서의 전선을 로드(rod) 속으로 유도하였다.

### 3.1.5 관입용 연결부

마지막으로 측정목표심도까지 현장 전단파 프로브(FVP)의 인력 관입은 불가능하므로 현장 관입 장치와의 연결을 용이하게 하기 위하여 블레이드 상단에 콘관입 시험용 로드 연결부를 설치하였다.

## 3.2 벤더 엘리먼트(Bender Element)

전단파 측정을 위한 트랜스듀서로 벤더 엘리먼트를

이용하였다(Piezo system PZT5H4E Y-poled,  $4 \times 11$ , 폭  $\times$ 길이, mm). 흡과의 뛰어난 결합효과, 낮은 전단파 지향성 등의 장점으로 벤더 엘리먼트는 압밀 및 삼축 시험 등 거의 모든 토질 시험 장치에 설치 할 수 있다(Shirley & Hampton 1978; Shirley 1978; Pennington et al. 1997; Yamashita and Suzuki 2001; Kuwano and Jardine 2002; Zeng and Grolewski 2005; Ismail and Rammah 2006; 이종섭과 이창호 2006). 흡을 통한 전자기 커플링에 따른 트랜스듀서 간 전기적 간섭(cross-talk) 현상을 방지하기 위하여 전도성 페인트(conductive paint)를 이용하여 전기적 차폐(electrical shield)를 하였다. 관입 시 흡과의 마찰에 의한 트랜스듀서의 피해를 최소화하기 위하여 에폭시 코팅을 하였으며, 방수를 위해 트랜스듀서와 전선 연결부 역시 에폭시 코팅을 하였다. 흡과의 접촉을 위해 프레임으로부터 돌출된 트랜스듀서의 길이는 약 4mm 이다(그림 2 참조).

### 3.3 트랜스듀서 케이블

대부분의 준설 매립 지반 및 해성 점토의 경우 전해 질용액인 바닷물의 영향을 받으며 이 경우 벤더 엘리먼트 간의 전기적 간섭이 발생하여 시험 결과 해석이 불가능해 질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 병렬 형식의 벤더 엘리먼트를 적용하였다. 그러나, 유선 콘 또는 딜라토메타 시험과 유사하게 FVP 관입 시험 역시 전단파 측정을 위한 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트와 주변장치 간의 연결을 위한 긴 케이블이 요구되며, 병렬 형식의 벤더 엘리먼트의 경우 많은 가닥의 트랜스듀서 케이블이 필요하다. 다축 케이블을 이용하여 발신용 벤더 엘리먼트와 수신용 벤더 엘리먼트의 접지를 동시에 연결할 경우 케이블은 안테나처럼 작용하여 그림 6(b)와 같이 케이블 사이의 전자기 커플링(electromagnetic coupling) 때문에 전단파의 초동을 분석할 수 없게 된다. 발신용 벤더 엘리먼트와 수신용 벤더 엘리먼트 각각 한

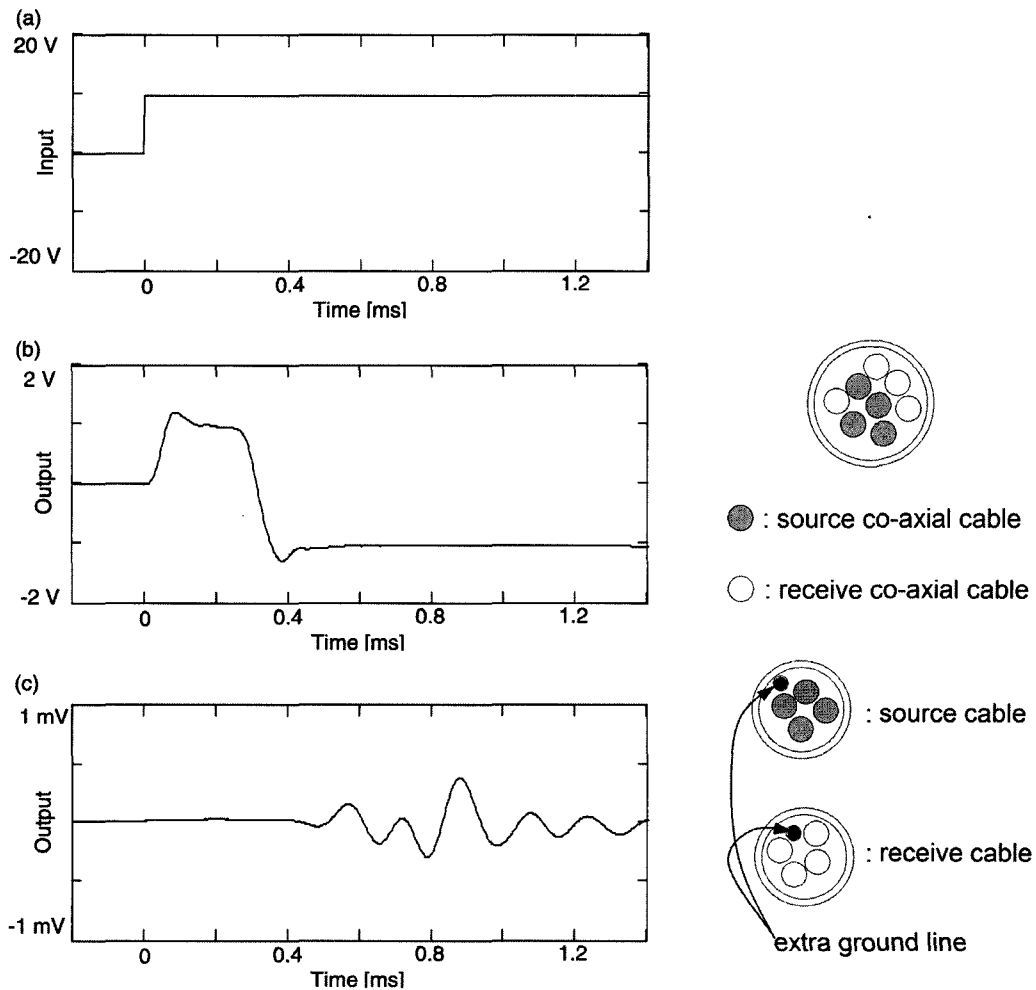


그림 6. 케이블 사이의 전기적 간섭(cross-talking): (a) 입력신호, (b) 발신용 벤더 엘리먼트와 수신용 벤더 엘리먼트의 접지 동시 연결, (c) 발신용 벤더 엘리먼트와 수신용 벤더 엘리먼트 각각 한 개의 동축 케이블 그룹과 접지를 사용하였다

개의 동축 케이블 그룹과 접지를 사용할 경우 그림 6(c)와 같이 케이블 사이의 전기적 간섭 현상을 효과적으로 줄일 수 있다.

### 3.4 시험 및 해석 방법

주변 장치로는 그림 7과 같이 발신 트랜서듀서에 입력 신호를 주기 위한 신호발생기(signal generator: Agilent 33220A), 수신 트랜서듀서의 잡음 제거와 신호 증폭을 위한 필터 및 신호증폭기(filter · signal amplifier: Krohn-Hite Model 3364) 및 디지털 오실로스코프(Agilent 54624A)로 이루어져 있다. 입력 신호로는 정현파(single sinusoidal wave, 10Vpp)를 이용하였으며, 고주파수의 잡음을 제거하기 위하여 스택킹(stack, 1024개 신호 적용)을 실시하였다.

현장 시험을 위한 현장 전단파 프로브(FVP)의 관입은 콘관입 장비(Vander Helm, 20ton)을 이용하여 2cm/sec로 정적 관입을 실시하였으며 1m 단위로 전단파 속도를 측정하였다. 관입 장치의 고유 기계 진동의 영향을 파악하기 위해 그림 8와 같이 관입 장치의 시동을 켜진 상태와 꺼진 상태의 신호를 비교하였다. 그림 8에 나타난 것과 같이 측정된 전단파의 초동(1st arrival)은 관입 장치 고유 진동에 영향을 받지 않으며, 동일한 고주파수 차단 필터를 적용하였을 경우, 관입 장치의 시동이 켜진 상태에서 측정된 파에 기계 고유진동에 의하여 약간의 고주파 잡음이 남았다.

현장 시험을 통해 얻어진 깊이 별 전단파 신호는 자료 처리 및 분석을 수행하게 된다. 수신된 자료로부터 탄성파의 초동 시점(1st arrival)을 판독하게 되며, 획득된 신호에 잡음이 심한 경우 고주파수 차단 필터(low

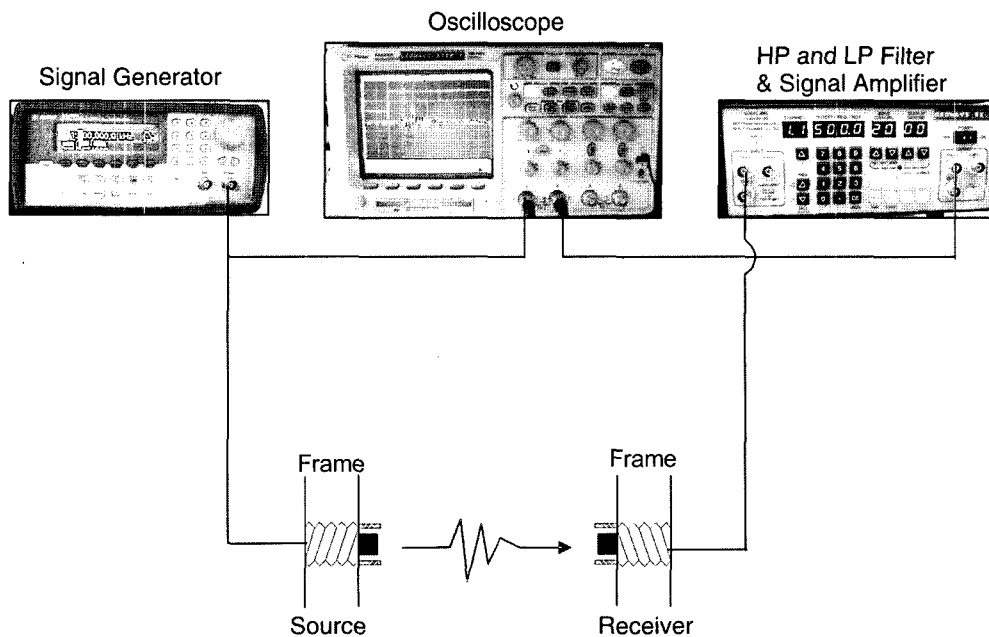


그림 7. 현장 전단파 프로브를 이용한 전단파 측정 주변장치

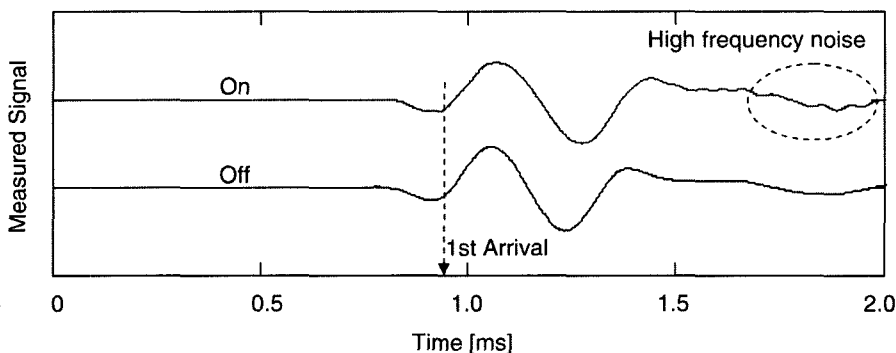


그림 8. 관입 장치 고유 진동 영향

pass filter), 평균 및 중합 등의 처리 기법을 적용하기도 한다. 획득된 자료로부터 입력 신호의 가진 시점과 탄성파의 초동 시점의 시간 차( $\Delta t$ )를 판독하여 트랜스듀서 사이의 거리(L)를 고려하여 다음 식 (1)과 같이 전단파 속도를 직접 산출할 수 있다.

$$V_s = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

본 논문에서 제안한 시험 방법은 전단파의 이동거리에 따른 도달 시간을 직접 측정함으로써 기존의 다른 현장 전단파 시험과는 달리 시험을 통해 얻어진 깊이별 전단파 신호의 초동 시점으로부터 어떠한 역산기법 없이 전단파 속도를 직접 산출할 수 있다.

#### 4. 현장 적용 시험

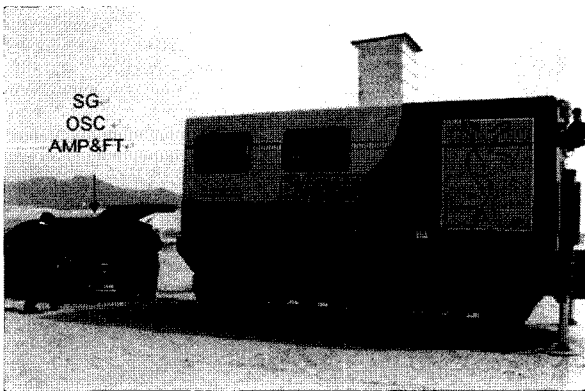
##### 4.1 현장개요

본 논문에서 제안한 시험 장치 및 시험 방법의 검증

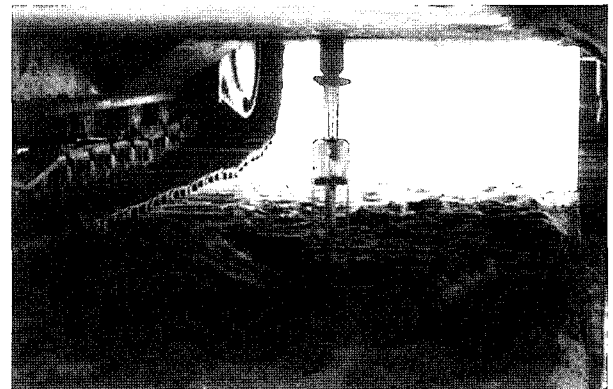
을 위하여 부산 신항 북컨테이너 터미널 축조 공사 현장에서 현장 시험을 수행하였다(그림 9). 시험 부지는 통일분류법상 CL의 심도 45m 이상의 연약지반 구간이다. 실험을 수행한 현장의 상부는 N값이 15정도의 상당히 단단한 모래 지반이 존재하여 5m 선굴착 후 시험을 실시하였다(그림 10참조). 천공 후 케이싱을 제거하는 과정에서 시험공이 무너져 측정된 결과 중 G.L (-) 3.0m부터 5.0m까지는 느슨한 상태의 모래지반이다. 또한 G.L (-) 32.4m부터 단단한 자갈질 점토층이 존재하여 상부 연약층부인 30m까지 전단파 속도를 측정하였다.

##### 4.2 측정된 전단파 신호

그림 11은 깊이에 따라 측정된 전단파 신호를 보여 준다. 그림 11에 나타난 바와 같이 깊이별로 측정된 전단파 신호는 초동 시점이 명확하게 구별되는 양질의 신호이다. 상부 약 3.0m부터 5.0m까지의 느슨한 모래층에서 측정된 전단파 신호의 공진주파수는 낮은 유효응력



(a)



(b)

그림 9. 현장 시험 전경 : (a) 측정 장비 및 관입 장치; (b) FVP 설치

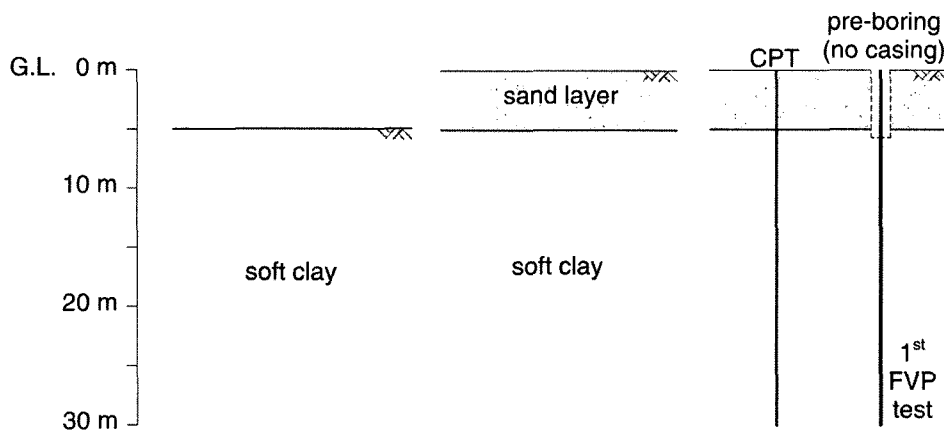


그림 10. 지반 조건 및 FVP 실험 개요도

상태임에도 불구하고 점토지반보다 상대적으로 큰 모래의 강성 때문에 높은 공진주파수를 보인다. 약 6.0m의 점토층의 경우 약 5.0m의 모래층과 비교하여 더 큰 지반응력상태를 가지나, 모래에 비하여 상대적으로 낮은 점토의 강성으로 인하여 모래층에서의 공진주파수와 확연히 구별되는 낮은 공진주파수를 가진다. 점토층

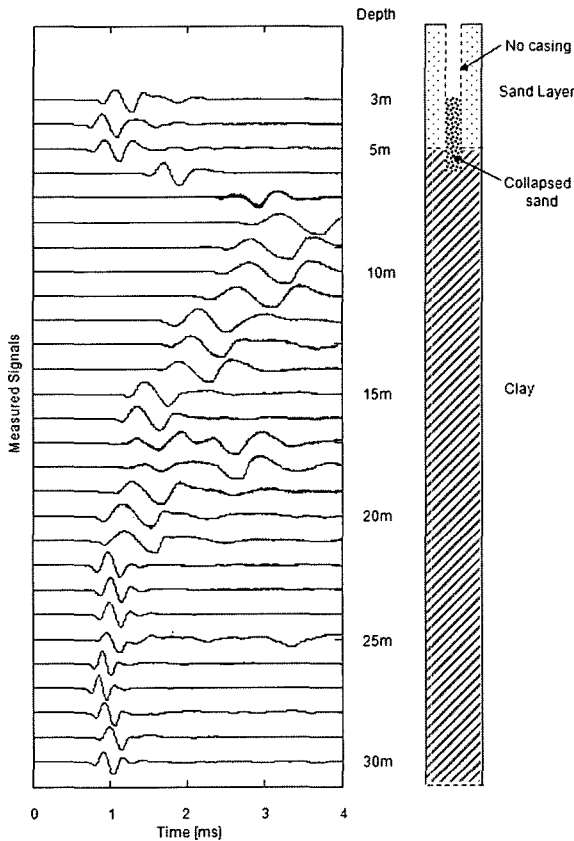


그림 11. 측정된 전단파의 깊이별 전개

에서는(깊이 8.0m 이하) 깊이가 깊어질수록 주위 지반의 응력상태가 점점 커져 높은 공진주파수를 보인다. 흙속에서 벤더 엘리먼트의 공진주파수는 벤더 엘리먼트 자체의 강성 및 형태, 주위 지반의 응력 및 강성에 영향을 받으며 전단파 속도와 공진주파수는 선형관계를 가진다. 일반적으로 심도가 증가함에 따라 흙의 유효응력 및 강성이 증가하여 흙속에서 벤더 엘리먼트 공진주파수 역시 깊이에 따라서 증가하게 된다. 따라서 입력신호의 공진주파수 역시 깊이에 따라 조정 되어야 한다.

### 4.3 전단파 속도와 콘 선단저항력

그림 12는 심도별로 측정된 전단파로부터 구한 심도별 전단파 속도와 콘 관입시험으로부터 산정한  $q_c$  값을 나타내었다. 계산된 전단파 속도로부터 모래층과 점토층을 확연히 구별할 수 있었다. 또한  $q_c$  값 역시 전단파 속도와 유사한 지층분포를 보인다. 콘관입시험의 경우 선굴착 없이 지반으로 직접 관입 시험을 실시하였으나, 현장 전단파 시험의 경우 선천공한 시험공이 무너져 상부 점토 지반의 교란으로 약간 상이한 결과를 보인다. 모세관 현상을 무시할 경우, 비교결화된 흙의 전단강성은 유효응력의 함수이다. 그림 12에 나타난 것과 같이 상부 점토층의 경우, 낮은 전단 강성과 낮은 유효응력수준에서는 약 25m/s의 낮은 전단파 속도를 보인다. 점토층의 깊이가 증가함에 따라 약간의 분산을 보이지만 유효응력의 증가 및 압밀 등으로 인한 전단저항의 증가로 전단파 속도는 증가하는 양상을 보인다.

그림 12에서와 같이 측정 심도에 따른  $V_s$  및  $q_c$  값이

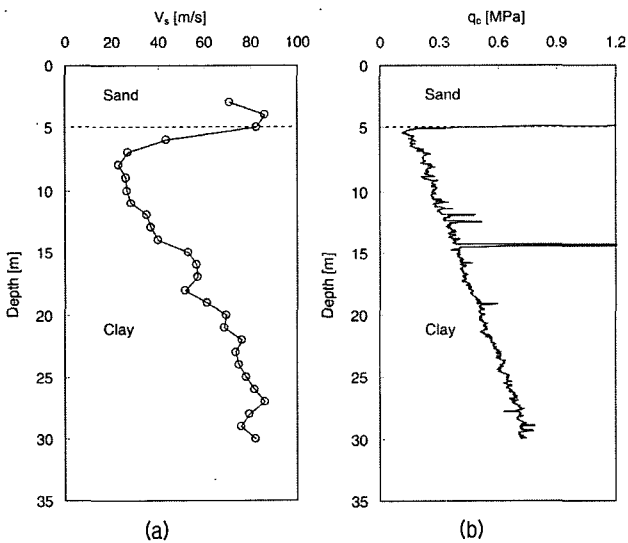


그림 12. 심도별 측정 결과: (a)  $V_s$ ; (b)  $q_c$

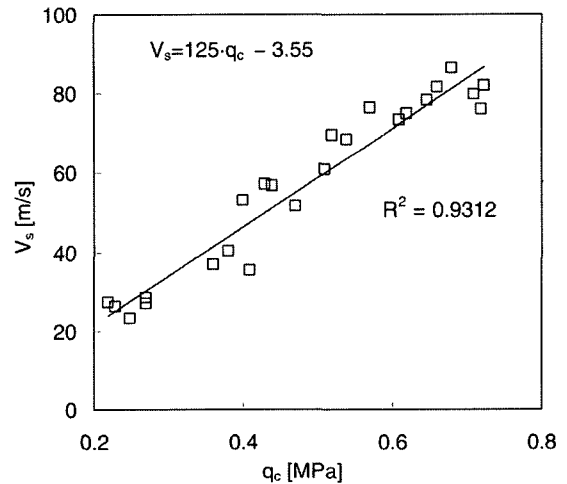


그림 13. 점토에서의  $V_s$ 와  $q_c$ 의 관계



선형관계를 보이므로  $V_s$  와  $q_c$  값의 관계를 비교할 수 있다. 그림 13은 점토층에서의 전단파 속도와 콘 선단저항 간의 관계를 보여준다. 그림 13에서와 같이 점토층에서의 전단파 속도는 콘의 선단저항력이 증가할수록 증가하는 선형관계를 보이며 이에 따른 깊이별 전단파 속도와 콘 선단 저항 간의 관계는 다음 식 (2)과 같다.

$$V_s [m/s] = 125 \cdot q_c [MPa]^{-3.55} \quad (2)$$

여기서,  $V_s$  = 전단파 속도, 그리고  $q_c$  = 콘 선단저항력이다.

미소변형 전단파 속도  $V_s$ 와 대변형 콘 선단저항력  $q_c$ 가 서로 다른 변형형태임에도 불구하고 선형관계를 보이는 이유는 두 값 모두 지반 강성 및 간극비의 함수이기 때문으로 판단된다.

## 5. 요약 및 결론

매립지반 및 대심도 연약지반의 현장 전단강성을 측정하기 위하여 기존의 시험들의 단점을 보완한 새로운 현장 전단파 시험장치를 개발하였다. 새로운 현장 전단파 시험 장치 설계의 고려 사항을 요약하면 다음과 같다.

- ① 현장 시험 장치의 관입 시 지반 교란을 최소화해야 하며 전단파 트랜서듀서 간의 일정한 거리를 유지할 수 있어야 한다.
- ② 트랜서듀서 간의 전기적 간섭 및 케이블 간의 전자기 커플링(electromagnetic coupling)은 측정된 전단파 신호의 초동 분석에 중요한 영향을 미친다.
- ③ 트랜서듀서가 설치된 프레임을 통한 파의 직접적인 전달을 방지하기 위하여 프레임과 임피던스 차가 큰 나일론 스크류를 이용하여 트랜서듀서를 프레임에 고정할 경우 나일론 스크류가 자체 음향 차단 시스템(self acoustic insulation system)으로 작용하여 프레임을 통한 파의 직접적 전달을 효과적으로 제거할 수 있다.
- ④ 다수의 벤더 엘리먼트 설치 시 전단파의 polarization 영향에 따른  $V_s(HH)$ ,  $V_s(HV)$  및  $V_s(H\theta)$ 의 측정으로 대상 현장 지반의 이방성 연구에 탁월한 효과를 보일 것으로 예상된다.
- ⑤ 대심도 관입을 위하여 벤더 엘리먼트를 보호할 수 있는 장치가 필요하다.

개발된 시험장치 및 시험 기법의 적용성 분석을 위하여 심도 30m까지의 현장 관입 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 새롭게 개발된 벤더 엘리먼트를 이용한 현장 전단파 측정 장치는 대심도 연약지반의 전단파 속도 측정 및 강성 평가에 매우 효과적임을 확인하였다.
- ② 제안된 현장 전단파 측정기법은 어떠한 역산법 없이 측정된 전단파 신호의 초동으로부터 전단파 속도를 직접 산출할 수 있다.
- ③ 깊이가 깊어짐에 따라 전단파의 초동시간이 짧아지고 공진주파수가 증가한 것으로부터 전단파 속도가 증가하고 흙의 강성이 증가함을 알 수 있었다.
- ④ 점토층에서의 심도 따른 전단파 속도와 콘의 선단저항력이 서로 다른 변형율에서 측정되었음에도 불구하고 선형관계를 보이는 이유는 두 값 모두 지반 강성 및 간극비의 함수이기 때문으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-311-D00218)이며, 현장 시험에 협조해주신 삼성물산 건설부문, 부산 신항 북컨테이너 터미널 축조공사 2-1단계 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 이종섭, 이창호 (2006), “벤더 엘리먼트시험의 원리와 고려사항”, *한국지반공학회 논문집*, 22(5), pp.47-57.
2. 이창호, 이종섭, 윤형구, 종홍공, 조태현 (2006), “응력 유도 및 유이방성에 따른 전단파 속도 특성”, *2006 한국지반공학회 논문집*, 22(11) pp.47-54.
3. 한국지반공학회 (2006), “*지반구조물의 내진설계*”, 지반공학 시리즈, 구미서관.
4. Ismail, M. A. and Rammah, K. I. (2006), “A new setup for measuring  $G_c$  during laboratory compaction”, *Geotech. Test. J.*, 29(4), pp.280-288.
5. Kuwano, R. and Jardine R. J. (2002), “On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains”, *Geotechnique*, 52(10), pp.727-749.
6. Lee, J. S., Fernandez, A. L., and Santamarina, J. C. (2005), “S-wave velocity tomography: small-scale laboratory application”, *Geotech. Test. J.*, 28(4), pp.336-344.
7. Louie, J. N. (2001), “Faster, Better: Shear wave velocity to 100meters depth from refraction microtremor arrays”, *Bulletin of*

- Seismological Society of America*, 91(2), pp.347-364.
8. Luke, B. A. and Stokoe, K. H. II (1998), "Application of SASW method underwater", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 124(6), pp.523-531.
  9. Nazarian, S. and Stokoe, K. H. II (1984), "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave", *Proc. 8th Conf. On Earthquake Eng.*, San Francisco, pp.31-38.
  10. Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999), "Multichannel analysis of surface waves(MASW)", *Geophysics*, 64(3), pp. 800-808.
  11. Park, H. C. and Kim, D. S. (2001), "Evaluation of the dispersive phase and group velocities using harmonic wavelet transform", *NDT&E Inter.* 34, pp.457-467.
  12. Pennington, D. S., Nash, D. F. T., and Lings, M. L. (1997), "Anisotropy of  $G_0$  shear stiffness in Gault Clay", *Geotechnique*, 47(3), pp.391-398.
  13. Stokoe, K. H. II and Hoar, R. J. (1978), "Variables Affecting In Situ Seismic Measurements", *Proceedings of the Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE Geotechnical Engineering Division, Vol. II, pp.919-939.
  14. Shirley, D. J. and Hampton, L. D. (1978), "Shear wave measurements in laboratory sediments", *J. Acoustical Society of America*, 63(2), pp.607-613.
  15. Shirley, D. J. (1978), "An improved shear wave transducer", *J. Acoustical Society of America*, 63(5), pp.1643-1645.
  16. Stokoe, K. H. II, Wright, S. G., Bay, J. A., and Rosset, J. M. (1994), "Characterization of geotechnical sites by SASW method", in *Geophysical characterization of sites*, ISSMFE Technical committee #10 edited by R. D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.
  17. Xia, J., Miller, R. D., and Park, C. B. (1999), "Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves", *Geophysics*, 64, pp.691-700.
  18. Yamashita, S. and Suzuki, T. (2001), "Small strain stiffness on anisotropic consolidated state of sands by bender elements and cyclic loading tests", *Proc. 15th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, pp.325-328.
  19. Zeng, X. and Grolewski, B. (2005), "Measurement of  $G_{max}$  and estimation of  $K_0$  of saturated clay using bender elements in an oedometer", *Geotech. Test. J.*, 28(3), pp.264-274.

(접수일자 2006. 7. 18, 심사완료일 2006. 12. 19)