

연약지반 평가를 위한 블레이드 타입 현장 전단파 속도 프로브

Blade Type Field V_s Probe for Evaluation of Soft Soils

윤 형 구¹ Yoon, Hyung-Koo 이 창 호² Lee, Chang-Ho
엄 용 훈³ Eom, Yong-Hun 이 종 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

The assessment of shear wave velocity (V_s) in soft soils is extremely difficult due to the soil disturbances during sampling and field access. After a ring type field V_s probe (FVP) has been developed, it has been applied at the southern coastal area of the Korean peninsular. This study presents the upgraded FVP "blade type FVP", which minimizes soil disturbance during penetration. Design concerns of the blade type FVP include the tip shape, soil disturbance, transducers, protection of the cables, and the electromagnetic coupling between transducers and cables. The cross-talking between cables is removed by grouping and extra grounding of the cables. The shear wave velocity of the FVP is simply calculated by using the travel distance and the first arrival time. The large calibration chamber tests are carried out to investigate the disturbance effect due to the penetration of FVP blade and the validity of the shear waves measured by the FVP. The blade type FVP is tested in soils up to 30m in depth. The shear wave velocity is measured every 10cm. This study suggests that the upgraded blade type FVP may be an effective device for measuring the shear wave velocity with minimized soil disturbance in the field.

요 지

연약지반의 강성평가는 샘플링(sampling)과 현장 접근에 따른 교란으로 인해 정확하게 평가하는 것이 상당히 어렵다. 이를 위해 개발된 링 타입 FVP를 이용하여 부산 신항에서 실험이 수행 되었다. 이 논문의 목적은 지반 관입 시 발생하는 교란을 최소화 할 수 있도록 기존의 링 타입 FVP를 블레이드 타입 FVP로 개량하는 것이다. 블레이드 타입 FVP는 하단의 웨지 모양, 시료 교란, 트랜스듀서, 케이블의 보호, 그리고 케이블과 트랜스듀서간의 전자기적 커플링을 고려하여 설계하였다. 케이블 간 누화현상은 케이블의 접지와 통합을 통해 제거 할 수 있었다. FVP의 전단파 속도는 초기 도달 시간과 이동거리를 이용하여 간단하게 계산될 수 있었다. FVP 블레이드의 관입에 의한 교란 효과 조사 및 FVP를 통해 측정된 전단파 속도의 타당성을 확인하기 위하여 실내 대형 calibration 챔버를 이용하여 비교 시험을 수행하였다. 블레이드 타입 FVP는 30m 깊이까지 측정이 되었으며, 전단파 속도는 매 심도 10cm마다 측정이 되었다. 본 논문에서 제시된 개량된 블레이드 타입의 FVP는 대상 지반의 교란을 최소화 시키며 현장에서 직접 전단파 속도를 측정 할 수 있는 효과적인 장비라고 할 수 있다.

Keywords : Blade type FVP, In-situ test, Ring-type FVP, Shear modulus, Shear waves, Soft soils

1 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ. jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 국내외에서 발생하는 지진 빈도 및 그 크기가 점점 증가됨에 따라 구조물 설계 시 내진설계의 필요성이 잦아지고 있다. 지반 내진설계 시 저변형률 상태의 최대 전단탄성계수 값의 사용을 위하여 현재 현장 및 실내 시험을 통한 탄성과 시험이 수행되고 있다. 이를 통해 측정되는 전단파 속도의 정확성은 구조물 설계 시 매우 중요하게 작용한다. 하지만, 현장 시험법은 시험 방법, 경제성 및 분석 기법, 현장 시험 여건, 그리고 현장 적용성 등으로 인한 많은 단점이 있고, 실내시험의 경우 시료 취급에 따른 교란 효과가 시험 결과에 미치는 영향이 상당히 큰 단점이 있다(Stokoe et al. 1978; Nazarian and Stokoe 1984; Stokoe et al. 1994; Park et al. 1999; Xia et al. 1999; Louie 2001; Park and Kim 2001; 이종섭 외. 2006). 이러한 문제점들을 개선 시켜 현장에서 직접 탄성파를 측정할 수 있는 링 타입(Ring-type) 현장 전단파 측정 프로브(Field Velocity Probe, FVP)가 기존에 개발되었으며 그에 따른 현장 적용도 시도되었다(이종섭 외. 2006; 이창호 외. 2006).

본 논문에서는 기존에 개발된 링 타입 FVP 장비를 지반 관입 시 교란이 최소화 되도록 블레이드 타입 장비로 개량하고 현장 적용성을 검증하였다. 링 타입 FVP에서 블레이드 타입 FVP 장비까지 개발 과정을 소개하였고 실험 중 발생한 누화현상, 측정을 위해 사용된 시험 주변 장치, 깨끗한 전단파 획득을 위해 사용한 입력 신호 및 해석법 그리고 현장 적용 시험에 대해 서술하였다. 현장 적용 실험은 연약지반 개량을 위한 사석 공법이 적용된 현장에서 수행하였고 개발된 FVP를 이용하여 깊이별 전단파 속도를 도출하였다.

2. FVP의 개발 과정

현장 전단파 측정을 위해 설계, 제작된 FVP는 많은 실내 및 현장 실험, 데이터 분석과 시행 착오를 통하여 링 타입 FVP 에서 블레이드 타입 FVP로 발전하였다.

2.1 형상(Shape)

2.1.1 링 타입 FVP

링 타입(Ring type) FVP 장비는 처음 시도된 장비로써, 현장에 적용하여 대심도 연약지반에서 기존의 현장

시험법의 단점을 보완한 새로운 방법으로 전단파 측정 가능성을 보여준 장비이다. 관입의 용이성과 장치의 안정성을 고려하여 Dilatometer와 유사한 모양의 블레이드(90×305×8, 너비×높이×두께, mm)를 십자 모양으로 교차시킨 후 각 모서리에 전단파 트랜스듀서 설치를 위한 프레임을 연결하였다(이종섭 외. 2006). 프레임을 통한 신호의 직접적 전달을 방지하기 위하여 프레임과 임피던스 차이가 큰 나일론 재질의 스크류를 이용하여 전단파 트랜스듀서를 고정하였다. 또한 트랜스듀서의 선단간 거리를 Shelby tube의 직경과 동일하게 하여 현장에서 측정한 전단파 속도와 UD sampler 내의 전단파 속도를 비교하여 교란도도 쉽게 측정할 수 있도록 설계하였다.

볼트 연결식. 볼트 연결식은 그림 1과 같이 블레이드 모양에 트랜스듀서가 설치된 프레임, 프레임의 균형 및 좌굴 방지 그리고 트랜스듀서를 보호하기 위해 하단에 설치된 링을 모두 볼트로 연결하였다. 이러한 볼트 연결 형식은 트랜스듀서의 고정 및 분리를 쉽게 한다. 또한 하단에 설치된 링은 비대칭 구조의 웨지로 제작된 장비이다. 하지만 현장실험에서 N값이 15이상 되는 모래 지반 시험시 그림 2와 같이 연결 볼트가 부서지는 문제를 보였다.

용접 연결식. 용접식은 볼트 연결식의 단점을 보완한 장비로서 그림 3과 같이 블레이드, 프레임 그리고 하단의 링 부분이 모두 하나의 형태로 용접되어 강성이 강한

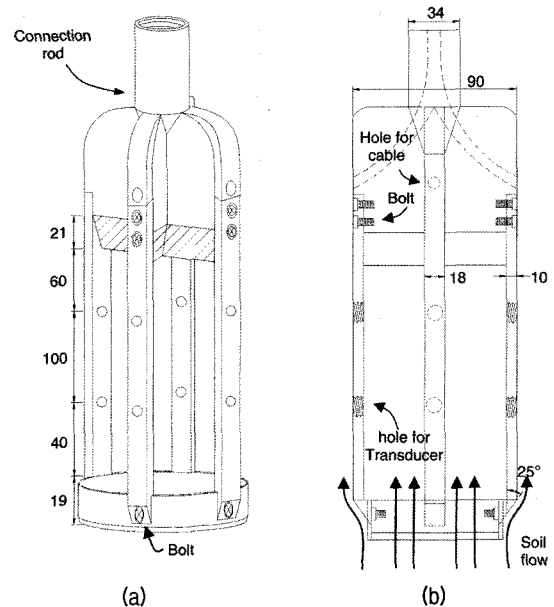


그림 1. 볼트 연결식 링 타입 FVP: (a) 정면도 (b) 측면도. 그림 속의 단위는 mm임

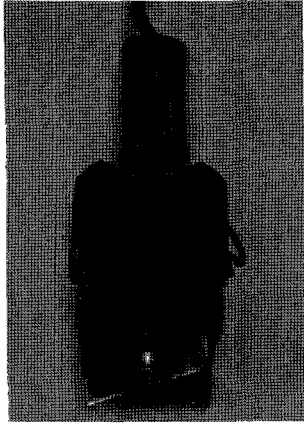


그림 2. 단단한 모래 층에서 볼트 연결식 링 타입 FVP의 손상 (SPT N value = 15)

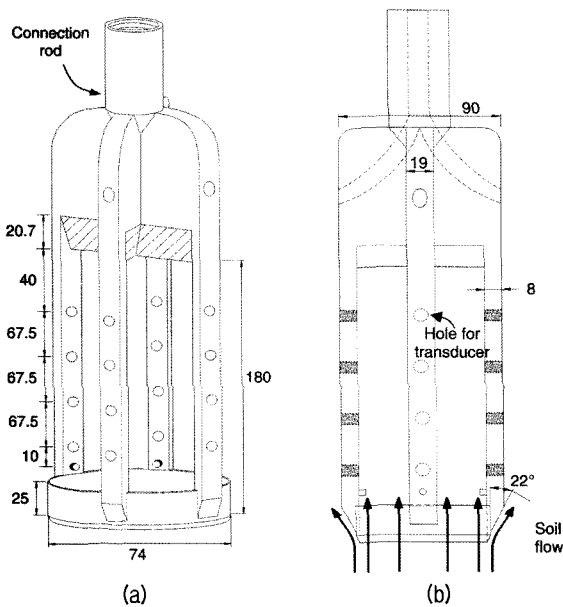


그림 3. 용접 연결식 링 타입 FVP : (a) 정면도 (b) 측면도. 그림 속의 단위는 mm임

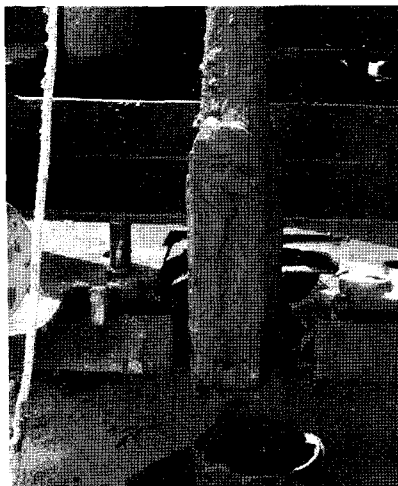


그림 4. 단단한 점토층 관입 후 인발 한 경우 링 타입 FVP 속에 형성된 soil plug

지반에도 관입이 용이 할 수 있도록 개발 되었다. 또한 현장의 이방성도 측정 할 수 있도록 트랜스듀서를 여러 높이에 설치하도록 설계하였다(이종섭 외, 2006). 그러나 그림 4와 같이 다량의 실트질이 포함되어 있는 실트질 점토 지반에서 현장 적용 시 **plugging** 현상이 발생하여 측정된 데이터의 신뢰성에 의문을 갖게 되었다.

2.1.2 블레이드 타입 FVP-1

링타입 FVP는 그림 1, 3과 같이 프레임 하단의 링과 4개의 프레임으로 구성되어 있다. 이는 관입 시 대상지반의 교란을 발생시킬 가능성이 크기 때문에 링 및 여분 2개의 프레임을 그림 5와 같이 제거하였다. 그에 따라 좌굴 방지 및 트랜스듀서 보호를 위해 하단 부분의 링 대신 얇은 프레임을 설치하였으며, 전체적인 모양을 링 타입이 아닌 블레이드 타입으로 변경하였다. 또한, 트랜스듀서를 보호하기 위해 트랜스듀서 하단 부분에 트랜스듀서와 비슷한 두께의 3mm, 너비 15mm 보호대를 각각 설치하였다. 링 타입 FVP와 마찬가지로 각도 별로 트랜스듀서를 회전시켜 현장에서 직접 이방성을 측정할 수 있게 하였다. 그러나 그림 6처럼 하단 부분의 얇은 프레임이 현장 시험 시 휘어져 트랜스듀서간의 정확한 이동거리를 산정하지 못하는 문제점이 발생하였다. 또한 보호대 설치로 인하여 흙의 교란이 발생하므로 새로운 FVP의 개발이 요구되었다.

2.1.3 블레이드 타입 FVP-2

현장 시험 시 블레이드 타입 FVP의 경우 하단부 프레임의 휘어지는 문제로 인하여 그림 7과 같이 하단의 얇은 프레임을 제거하였다. 관입시 프레임의 좌굴을 방지하기 위하여 트랜스듀서가 설치된 프레임의 길이를 축소하였다. 프레임 길이의 축소로 인하여 다수의 트랜스듀서의 설치가 어려워 4쌍의 트랜스듀서만을 설치하였다. 또한 각 트랜스듀서의 하단에 설치하였던 보호대도 최하단의 트랜스듀서에만 적용하였다.

2.1.4 블레이드 타입 FVP-3

관입 시 지반의 교란을 최소화 하기 위하여, 프레임의 두께를 최소화 하였다. 프레임을 통한 신호의 직접적 전달방지와 트랜스듀서의 고정을 위해 사용한 특수 나일론 스크류 대신 적절한 연성과 강성을 동시에 유지하는 특수 에폭시를 이용, 트랜스듀서를 고정하여 프레임의 두께를 약 8mm로 감소시킬 수 있었다(그림 8). 또한

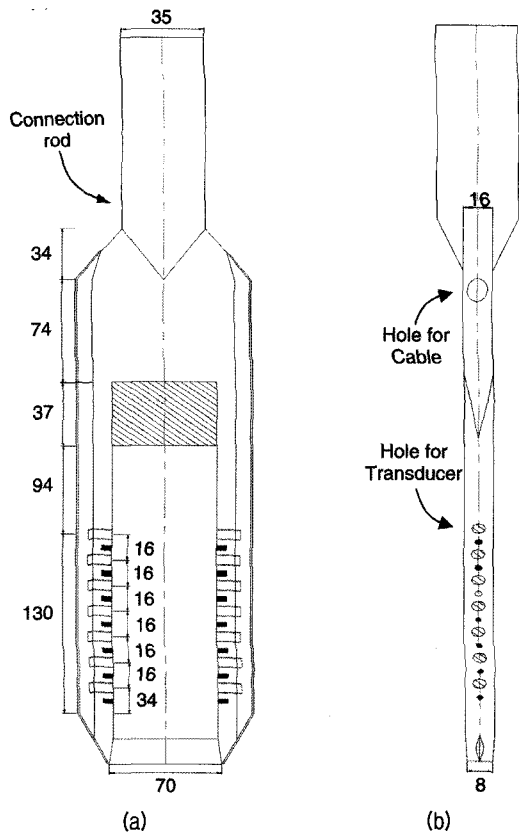


그림 5. 블레이드 타입 FVP-1: (a) 정면도 (b) 측면도. 그림 속의 단위는 mm임

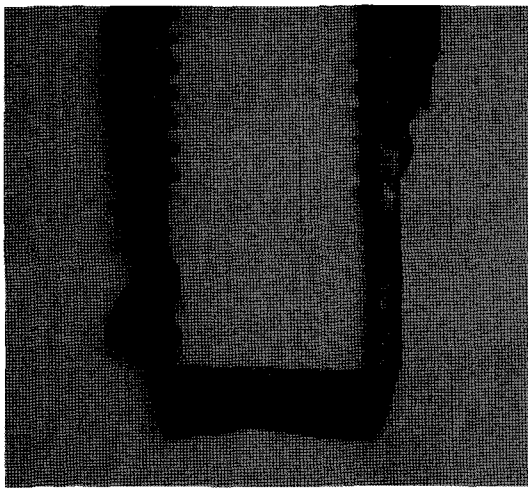


그림 6. 점토-조개껍질 혼합층에서 블레이드 타입 FVP-1의 손상 형상

프레임 모양을 H빔 형태로 제작하여 프레임 내부에 트랜스듀서 전선을 설치하여 프레임의 폭을 최소화 하였다. 트랜스듀서는 프레임 하단의 썸을 돌출시켜 보호 하였으며, 대칭형 썸을 적용하였다. 트랜스듀서 부분의 프레임을 반원형으로 제거하여 트랜스듀서와 흙과의 접촉성을 증가시켰으며, 트랜스듀서의 설치 및 교체를 수월하게 하기 위해 트랜스듀서 프레임을 강성이 큰

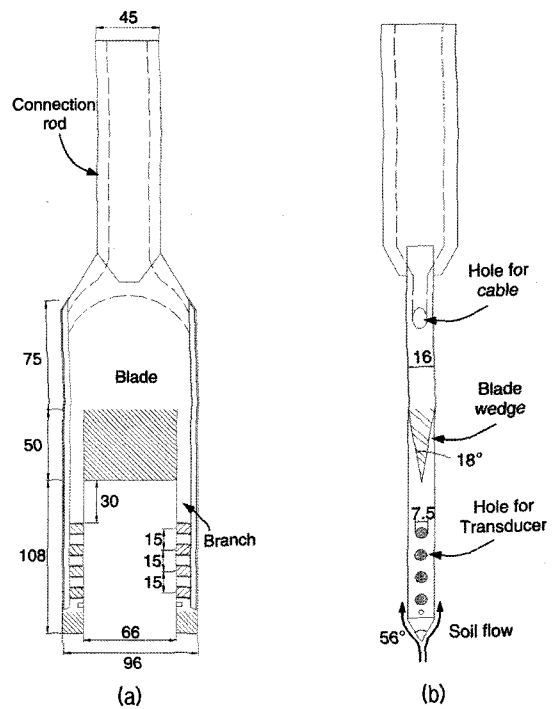


그림 7. 블레이드 타입 FVP-2: (a) 정면도 (b) 측면도. 그림 속의 단위는 mm임

볼트를 이용하여 고정하였다. 그림 9(a)는 현장 측정 시스템을 보여준다. 그림 9(b)는 현장 시험 후 인발된 블레이드 타입 FVP-2를 보여주며 그림 9(b)에 나타난 마와 같이 장비의 파손 및 soil plugging과 같은 문제가 전혀 없음을 알 수 있다.

2.2 누화 현상(cross-talking)

누화 현상이란 트랜스듀서 간의 전기적 간섭 현상으로 유효응력이 작아 전단파 속도가 작을 경우에는 초기 도달 시간 산정에 큰 영향을 미치지 않지만, 유효응력이 증가하여 전단파 속도가 증가하면 초기 도달 시간의 정확한 산정을 어렵게 한다. 이러한 누화현상은 트랜스듀서 자체로 인해 발생하는 문제와 케이블로 인해 발생하는 2가지 문제로 분류 할 수 있다. 트랜스듀서 자체에서 발생한 경우는 병렬형식의 벤더 엘리먼트의 이용과 트랜스듀서 제작 시 전도성 페인트(silver paint)를 이용한 전기적 차폐(shielding) 및 접지를 통하여 누화 현상을 효과적으로 제거 할 수 있다(Lee and Santamarina 2005).

대심도 현장 시험을 위해서는 약 50m 이상의 발신 및 수신용 전선이 필요하며, 이러한 긴 전선간의 간섭현상으로 인해 누화현상이 발생한다. 전선간 누화현상은 발신 및 수신용 다축 전선을 동시에 접지할 경우에도 발생

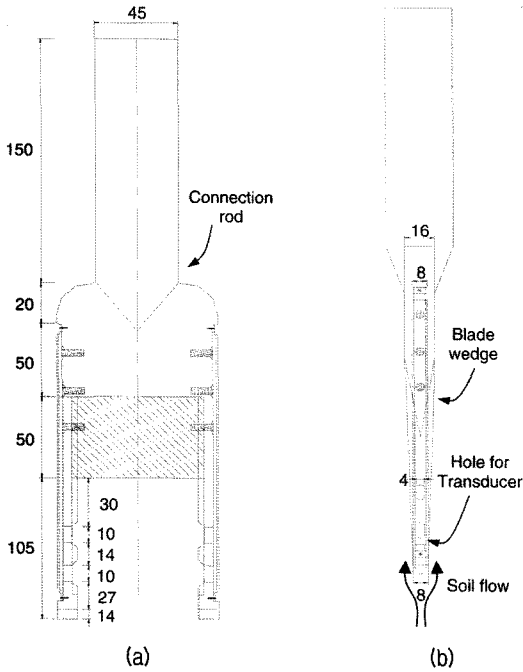
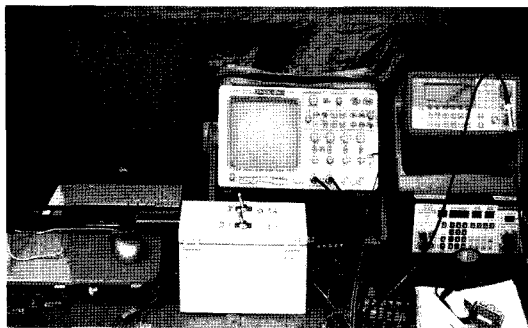


그림 8. 블레이드 타입 FVP-3: (a) 정면도 (b) 측면도. 그림 속의 단위는 mm임



(a)



(b)

그림 9. 실험사진: (a) FVP 실험을 위한 주변 장치 (b) 실험 후 블레이드 타입 FVP-3 인발

한다. 따라서 발신 및 수신용 전선을 분리하고 각각 접지하여 전선간 누화현상을 효과적으로 제거하였다(이종섭 외, 2006).

2.3 주변 장치 및 해석 방법

현장 전단파 측정을 위한 주변장치로는 발신 트랜서듀서에 입력신호를 주기 위한 20MHz파형 발생기 (Agilent 33220A), 수신 신호의 잡음제거와 증폭을 위한 필터-증폭기(Krohn-Hite 3364) 및 수신 신호의 저장을 위한 디지털 오실로스코프(Agilent 54624A)로 구성되어 있다. 고주파수 잡음 제거를 위하여 1024개의 신호를 평균하여 저장하였다.

측정된 전단파 신호는 자료처리 및 분석을 통해 전단파 속도로 계산된다. 수신된 전단파 신호로부터 전단파의 초동시간(1st arrival time)을 근접장 효과를 고려하여야 하며 본 논문에서는 Lee and Santamrina(2005)에 의해 제시된 초동시간 산정법인 zero after first bump 점을 이용하였다. 벤더엘리먼트-휴 간의 상호 작용에 의하여 공명주파수가 결정되며 지반의 전단파 속도와 공명주파수에 의하여 근접장 거리가 결정된다. 본 논문에서는 측정 지점에서 벤더 엘리먼트-휴 간의 공명주파수를 결정된 후, 명확한 전단파 신호를 획득하기 위해 공명주파수와 유사한 정현파를 입력파(10Vpp: Peak-to-peak amplitude)로 이용하였다. 전단파 속도는 전단파의 초기 도달시간과 전단파의 이동거리 즉, 발신 및 수신 트랜서듀서 선단간 거리를 고려하여 다음 식 (1)과 같이 직접 계산할 수 있다.

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

여기서, L은 발신 및 수신 트랜서듀서의 선단간 거리, Δt (초동시간)는 가진 시점과 초기 도달시간의 시간차이다.

3. Calibration 챔버 실험

3.1 Chamber

그림 10과 같이 높이 1.0m, 내경 0.7m, 그리고 두께 22mm를 가지는 대형 calibration 챔버를 이용하여 FVP 관입에 따른 교란효과와 FVP로 산정된 V_s 의 타당성 검증을 수행하였다. 하부 plate에 수압을 작용하여 하중을

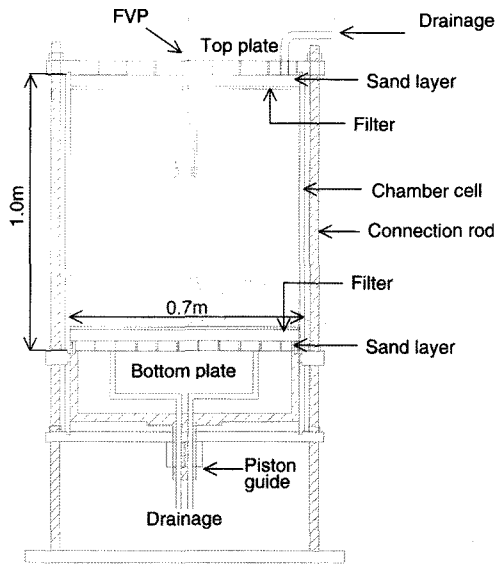


그림 10. 대형 calibration 챔버 장치

가하였으며, 양면 배수 시스템을 적용하였다. 하부 plate와 연결된 피스톤의 변화를 측정하여 시료의 압밀 침하량을 계산하였다.

3.2 시료조성

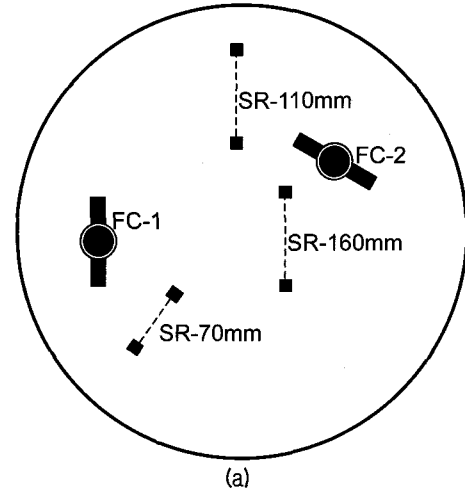
대형 calibration 챔버 실험을 위한 비교란상태의 자연 시료를 얻기는 거의 불가능하기 때문에 재성형 부산 점토를 시험에 이용하였다. 비교란 시료로부터 얻어진 부산 점토의 물리적 특성은 표 1과 같다. 시험에 사용된 점토는 초기 함수비 110%의 슬러리 상태로 믹서에서 물과 잘 혼합하였다. 혼합 중 진공펌프를 이용하여 슬러리 내부의 공기를 제거하였다. 혼합 후 챔버 내부에 슬러리 상태의 시료를 조심스럽게 채운 후 시료를 안정화시키기 위하여 2일 동안 50kPa의 압력을 가하였다. 또한 그림 10과 같이 원활한 배수를 위하여 시료 상부 및 하부에 약 3cm두께의 부직포와 샌드 매트를 설치하였다. 시료가 안정화된 후 100kPa까지 가압하고 30일 동안 압밀 하였다. 32일 이후 시료의 최종 높이는 0.62m였다.

3.3 비교 실험

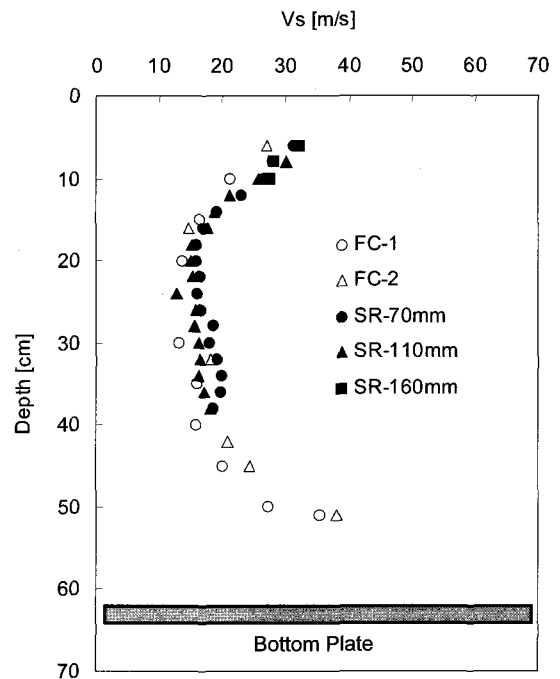
FVP 블레이드의 관입에 의한 교란 효과 조사 및 FVP를 통해 측정된 전단파 속도의 타당성을 확인하기 위하여 chamber 내부에 벤더 엘리먼트가 설치된 길이 600mm, 직경 30mm의 2개의 룯드를 설치하였다. 두 룯드 사이의 이격 거리는 약 250mm이다. 벤더 엘리먼트를 약 100mm

표 1. 부산 점토의 물리적 특성

Soil Properties	Value
Natural Water Content, w_n (%)	73
Liquid Limit, LL (%)	60
Plastic Limit, PL (%)	28
Plastic Index, PI	32
Specific Gravity, G_s	2.64



(a)



(b)

그림 11. 비교시험 결과: (a) 평면도 (b) 깊이에 따른 전단파 속도 FC는 블레이드 타입 FVP-3 시험을, SR은 분리된 룯드 시험을 각각 표시

의 간격으로 설치하였으나, 재성형 시료의 강성이 매우 약하여 설치된 벤더 엘리먼트로 전단파의 측정은 불가능하였다. 그림 11(a)와 같이 2번의 FVP 시험을 실시하

여 그림 11(b)와 같이 시료의 깊이별 전단파 속도를 얻었다. 시료의 깊이별 전단파 속도는 상부, 중부, 하부에서 각각 약 30m/s, 20m/s 이하, 그리고 30m/s로 나타났다. 이러한 깊이별 전단파속도의 분포는 양면 배수의 결과로 판단된다

FVP관입 시험 이후 길이 400mm, 직경 15mm의 깊이별로 벤더 엘리먼트가 설치된 2개의 룯드를 설치하였다. 2개 룯드 사이의 간격은 그림 11(a)와 같이 각각 70mm, 110mm, 그리고 160mm이다. 설치된 룯드에서 얻어진 깊이별 전단파 분포를 그림 11(b)에 겹쳐서 나타내었다. 비록 FVP를 통해 측정된 전단파 속도(FC)가 분리된 룯드에서 측정된 전단파 속도(SR)보다 약간 더 작게 나타났으나, 전단파 속도의 깊이별 분포는 거의 동일함을 알 수 있다.

4. 현장 적용 실험

개발된 시험장비의 현장 적용성 확인을 위하여 현재 시공 중인 부산 신항 북컨테이너 현장에서 현장 시험을 실시하였다. 시험 부지의 원지반은 심도 약 30m 이상의 대심도 연약지반이다. 연약지반 개량을 위하여 샌드 매트, PBD 및 사석을 이용한 선재하 (Preloading) 공법이 적용 되었다. 그림 12와 같이 현장시험은 장비의 개발 및 개량과 시공 과정에 따라 약 1년에 걸쳐 진행 되었다.

그림 12의 현장 실험 개요와 같이 1 차 실험은 가장 초기 모델인 링 타입 FVP를 이용하여 샌드 매트가 시공

된 이후 실시하였다. 원지반 상부 두께 약 5m의 모래층은 약 15정도의 N치를 보여 측정 장비 파손을 방지하기 위하여 선 굴착 후 시험을 수행하였다. 굴착 후 케이싱 인발 과정에서 약 3m 심도에서 공벽이 무너져 지표 하부 3m의 느슨한 모래층부터 1m 간격으로 전단파 측정 실험을 실시하였다. 실험 결과 깊이별 전단파 속도 변화 양상으로부터 모래층과 점토층을 명확하게 구별 할 수 있었다(이종섭 외 2006).

2차 실험은 사석을 이용한 선재하(Preloading) 공법이 실시된 후 블레이드 타입 FVP-1을 이용하여 실시하였다. 실험장비의 여건상 사석층의 관입이 불가능하므로 사석층 및 모래층 약 18m를 선굴착 후 원지반의 전단파 속도를 약 10~50cm 간격으로 측정하였다. 실험 결과 2차 실험 시 측정된 전단파 속도는 PBD 및 선재하공법의 적용에 따른 원지반의 압밀로 인하여 1차 시험 시 측정된 전단파 속도보다 약 3배 정도 증가된 양상을 보였다. 그러나 1차 실험과 달리 약 18m의 사석층으로 인하여 지표로부터 원지반, 즉, 측정 심도까지 길게 이어진 룯드 길이로 인하여 룯드 자체의 좌굴 발생과 증가한 원지반의 강성으로 인한 관입 장비의 반력 부족으로 약 14m (모래층 최상부 기준)까지 실험을 실시하였다.

3차 실험은 블레이드 타입 FVP-3를 이용하여 2차 실험 실시 후 약 8개월 이후에 실시 하였으며 2차 실험과 동일하게 사석층 및 모래층을 선 굴착 후 원지반인 연약지반의 전단파 속도를 10cm간격으로 측정하였다. 그림 13은 3차 실험 시 측정된 심도별 전단파 형상을 보여준

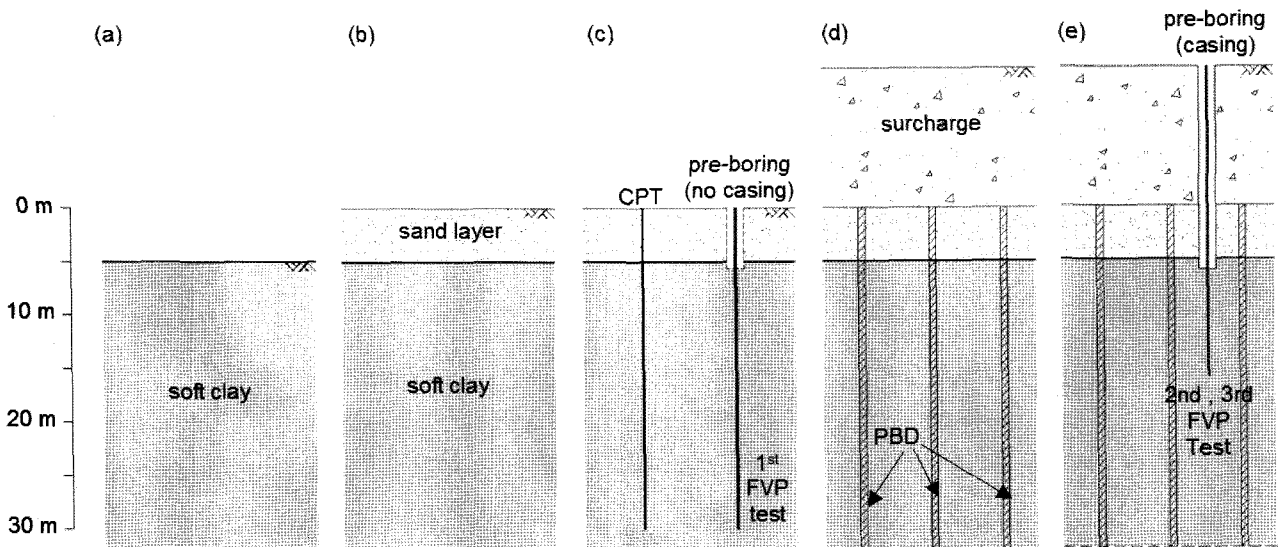


그림 12. 현장 및 현장 실험 개요: (a) 원지반 (b) 샌드매트(Sand mat) 시공 (c) CPT 및 링타입 FVP (2006.3.28) 실험 (d) PBD 및 사석 시공 (e) 블레이드 타입 FVP-2 (2006.9.21), FVP-3 (2007.4.12) 실험

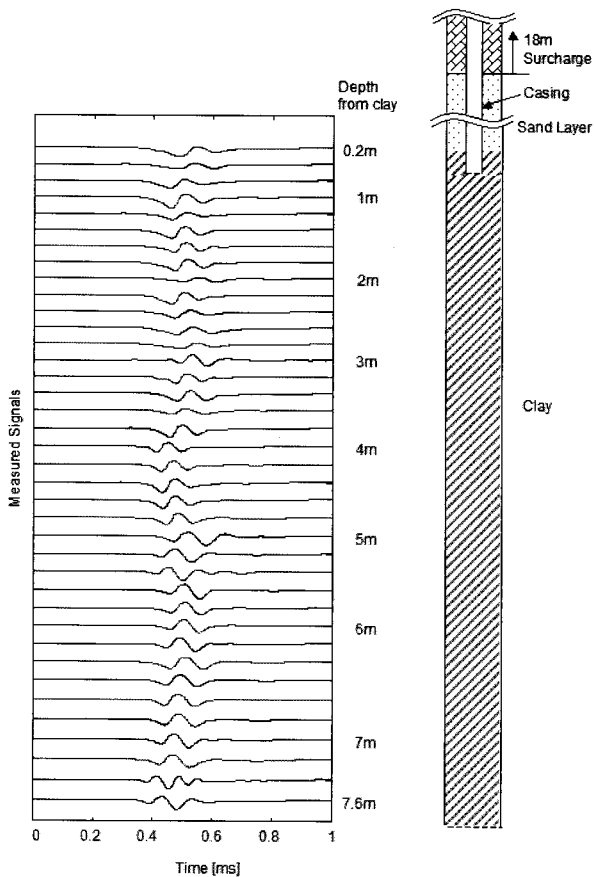


그림 13. 블레이드 타입 FVP-3 심도별 전단파 형상(2007.4.12).

다. 전단파 측정 깊이는 원지반의 최상부층으로 PBD 및 선재하공법에 따른다. 압밀이 거의 완료되어 깊이에 따라 거의 유사한 초기도달시간을 보인다. 1차, 2차 및 3차 실험 통하여 산정된 전단파 속도는 그림 14에 나타내었다. 2차 실험결과와 비교해 볼 경우, 원지반 점토층의 최상부는 압밀이 거의 완료되어 2차 실험과 거의 유사한 전단파 속도를 보이며 심도가 증가함에 따라 시간에 따른 압밀로 인하여 약간의 전단파 속도 증가가 관찰되었다. 전단파 속도 증가는 압밀과정중 유효응력의 증가와 직접적으로 관련되므로 (이종섭과 이창호 2006) 전단파속도의 증가를 통하여 압밀에 따른 유효응력 증가를 추정할 수 있었다.

그림 15는 관입 깊이에 따른 블레이드 타입 FVP-3의 상·하부 트랜서듀서에서 얻은 길이별 전단파 신호이다. 전단파 신호는 약 14mm 간격으로 이격 설치되어 매심도 동일 조건에서 측정하였으며, 트랜서듀서 자체의 특성과 잡음으로 인하여 약간의 파형 차이는 있으나 초기도달 시간은 거의 유사한 것을 알 수 있다. 그림 16는 상·하부 트랜서듀서에서 측정된 전단파 신호로부터 계

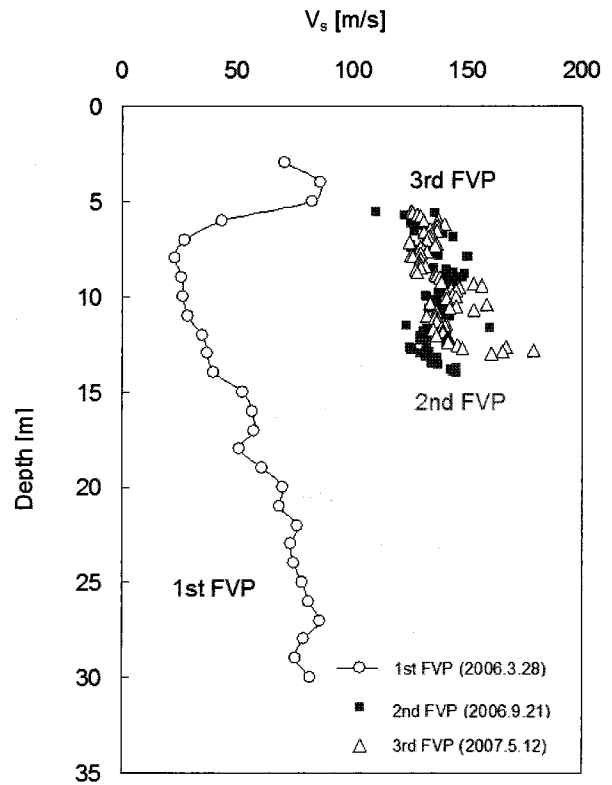


그림 14. FVP 심도별 전단파 속도

산된 전단파 속도이다. 상·하부 트랜서듀서에서 측정된 전단파 속도는 거의 동일하게 나타나고 있다.

5. 요약 및 결론

기존의 링 타입 FVP의 단점을 개량한 블레이드 타입 FVP의 설계 고려사항은 다음과 같다.

- ① 장비 개량 시 하단의 썬기 모양, 프레임 길이, 시료 교란, 연결 룯드, 트랜서듀서 보호대, 케이블 선택, 블레이드 형태 등을 고려하였다.
- ② 트랜서듀서 사이의 전기적 누화현상을 최소화하기 위하여 전도성 페인트 (silver paint)를 이용한 전기적 차폐 (shielding) 및 접지를 실시하였다.
- ③ 전선간 누화현상의 최소화를 위하여 발신 및 수신용 전선을 분리하고 각각 접지하여 전선간 누화현상을 효과적으로 제거하였다.
- ④ FVP 관입으로 인한 교란을 최소화 하기 위하여 트랜서듀서 고정용 스크류를 제거하여 프레임의 두께를 최소화 하였으며, 프레임을 통한 파의 직접적 전달을 방지하기 위하여 약간의 연성을 유지하는 특수 에폭시

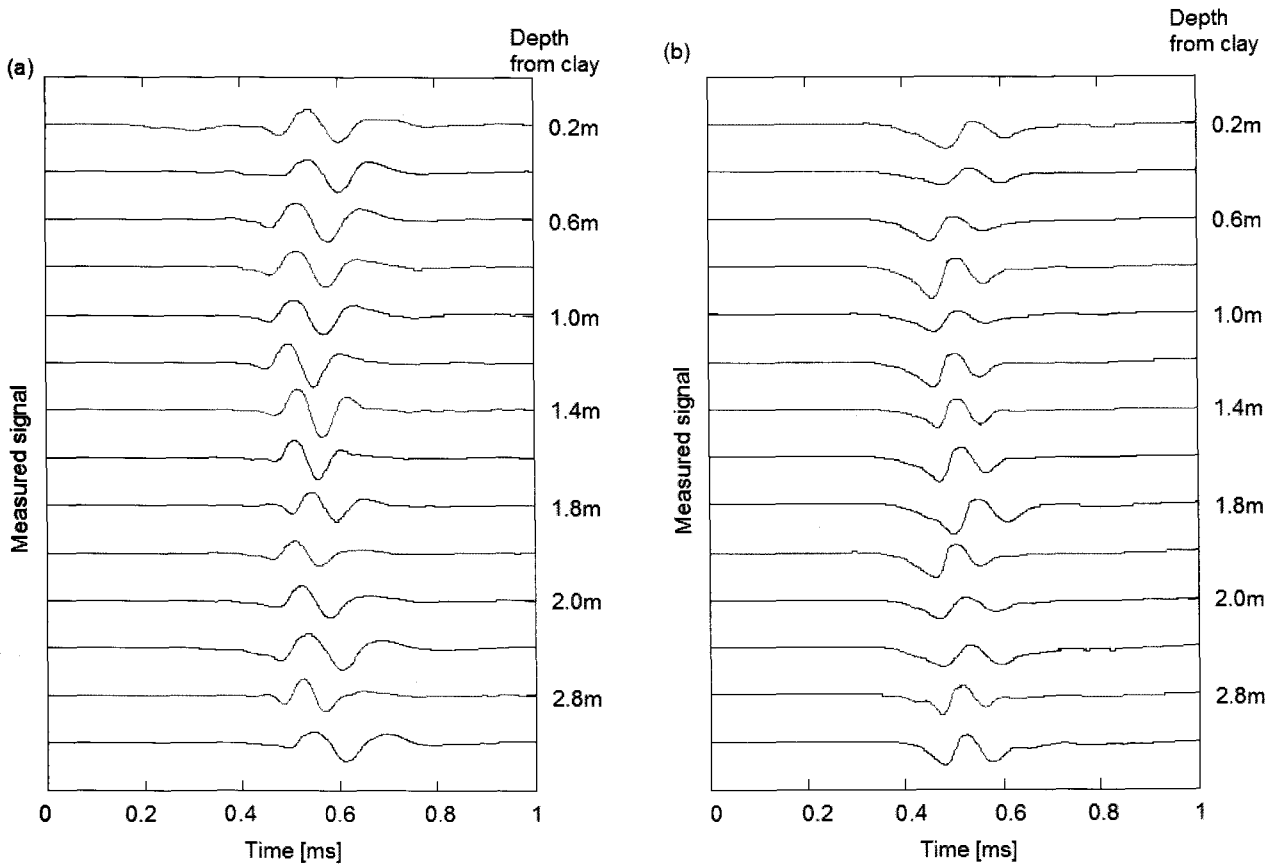


그림 15. 관입 깊이에 따른 블레이드 타입 FVP-3 상·하부 에서 측정된 전단파 신호: (a) 상부 (b) 하부

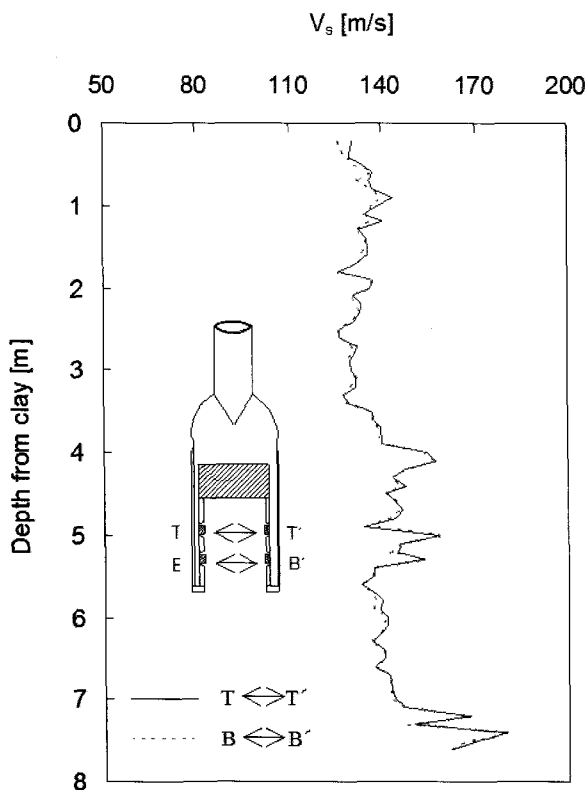


그림 16. 관입 깊이에 따른 블레이드 타입 FVP-3 상·하부에서의 전단파 속도

를 이용하여 트랜스듀서를 고정하였다.

⑤ 명확한 전단파 신호를 획득하기 위해 트랜스듀서의 공진주파수와 유사한 주파수의 단일 정현파를 입력 신호로 사용하였다

개발된 각각의 시험장비의 현장 적용성 파악을 위하여 현장 관입 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 측정된 전단파 초기 도달 시간과 트랜스듀서 간의 간격을 이용하므로 대심도 연약지반의 높은 수직 분해도의 전단파 속도 추상도를 구할 수 있었다.

② 시공 및 시간에 따른 전단파 속도 변화 양상으로부터 압밀에 따른 유효응력의 증가를 추정 할 수 있었다.

6. 감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 이종섭, 이창호 (2006). “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, *한국지반공학학회 논문집*, 제22권 5호, pp.47-57.
2. 이종섭, 이창호, 윤형구, 이우진, 김형섭 (2006). “관입형 현장 전단파 측정 장치의 개발 및 적용”, *한국지반공학학회논문집*, 22(12), pp.67-76.
3. 이창호, 이종섭, 윤형구, 이우진 (2006). “준설 및 초연약지반의 전단파 산정 기법”, *준설매립기술 위원회 학술 발표회 논문집*, pp.87-96.
4. Lee, J. S. and Santamarina, J. C., (2005). “Bender elements: performance and signal interpretation.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(9), 1063-1070.
5. Lee, J. S. and Santamarina, J.C. (2006). “Discussion: Measuring shear wave velocity using bender elements” By Leong, E.C., Yeo, S.H., and Rahardjo, H. (*Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 5).” *Geotechnical Testing Journal*, ASTM. 29(5), pp.439-441.
6. 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.
7. 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.
8. Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). “Multichannel analysis of surface waves (MASW).” *Geophysics*, 64(3), pp.800-808.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

(접수일자 2007. 5. 25, 심사완료일 2007. 12. 18)