

전단파와 전자기파를 이용한 연약 지반의 실내 압밀 특성 평가

Evaluation of Consolidation Properties in Soft Soils Using Elastic and Electromagnetic Waves

이 창 호¹ Lee, Changho

윤 형 구² Yoon, Hyung-Koo

김 준 한³ Kim, Joon Han

이 종 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

A new hybrid oedometer cell is designed and manufactured to investigate a behavior of soft soils by using elastic and electromagnetic waves during consolidation test. Bender elements, which generate and detect shear waves, are placed in the top cap and the bottom plate and mounted on the oedometer wall. Double wedge type electrical resistance probe, which measures local void ratio change, is positioned onto the top cap of the oedometer cell. The bender elements and the electrical resistance probe are anchored into a nylon set screw with epoxy resin. The nylon set screw with epoxy resin minimizes directly transmitted elastic waves through the oedometer cell due to impedance mismatch and allows for easy replacement of defected bender elements and electrical resistance probe. Primary consolidation time can be estimated from the slope of electrical resistance versus log time curve and the evolution of shear wave velocity. The shear wave velocity can be used to assess inherent anisotropy when disturbance effects are minimized because particle alignment affects the shear wave velocity. The void ratios evaluated by the electrical resistance probe are similar to those by the settlement during consolidation. This study suggests that the shear wave velocity and the electrical resistance can provide complementary informations to understand consolidation characteristics such as primary consolidation, anisotropy, and void ratio.

요 지

연약 지반의 거동 특성 평가를 위하여 전단파 속도와 전기저항을 측정할 수 있는 새로운 압밀셀을 개발하였다. 전단파의 발진과 수신을 위한 벤더엘리먼트는 압밀셀의 상·하부판 및 벽면에 설치하였다. 국부적인 간극비 변화를 평가하기 위하여 이중 쐐기 형식의 전기저항 탐침을 적용하였다. 벤더 엘리먼트와 전기저항 탐침은 나일론 재질의 스크류 안에 고정하였다. 나일론 재질의 스크류는 압밀셀과의 임피던스 차이로 인하여 압밀셀을 통한 파의 직접적 전달을 최소화하며, 고장난 벤더 엘리먼트와 전기저항 탐침을 쉽게 교환하게 해준다. 전기저항-대수 시간 곡선의 기울기 및 전단파 속도의 변화로부터 일차 압밀 시간을 평가하였다. 교란 효과가 적을 경우, 입자 배열은 전단파 속도에 영향을 미치며 이로부터 흙의 고유 이방성을 평가할 수 있었다. 압밀 실험동안 침하량으로 산정한 간극비와 전기저항으로부터 계산된 간극비는 거의 유사한 것으로 나타났다. 본 연구는 전단파 속도와 전기저항이 일차 압밀, 고유 이방성, 간극비 등 연약 지반의 압밀 특성 파악을 위한 보완적인 정보를 제공해 줄을 보여준다.

1 정회원, 조지아공대 건축·사회환경공학과 박사후 연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, School of Civil and Environmental Engrg., Georgia Institute of Technology)

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

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

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Department of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Keywords : Anisotropy, Creep, Electrical resistance, Preconsolidation stress, Primary consolidation, Shear waves, Void ratio

1. 서론

자연상태의 많은 흙들은 방향 의존적인 이방 거동 특성을 보인다(전단파 속도, 강도, 강성, 응력-변위 거동, 투과성). 전단파 측정을 통한 전단계수의 이방성은 많은 연구자들에 의해 연구되어왔다. Pennington 등(1997)은 삼축 실험을 할 수 있는 벤더 엘리먼트가 부착된 벨트 패드를 개발하였다; Yamashita and Suzuki(2005)는 삼축 멤브레인에 벤더 엘리먼트를 부착하였다; Zeng and Grolewski(2005)는 큰 직경의 압밀셀에 벤더 엘리먼트를 부착하였다. Ismail and Rammah(2006)는 실내 proctor 시험에 회전방식의 전단파 트랜스듀서를 사용하였다. 또한, 전단계수의 이방성에 대한 연구는 공진주 시험을 통해서도 수행되었다(Yu and Richart, 1984).

최근 들어 유전율 및 전기전도도와 같은 전자기파는 연약 점토의 거동 특성 분석에 널리 이용되기 시작하였다(Klein and Santamarina, 2005). 일반적으로 전기 전도도 측정을 위해서는 수 Hz에서 수십 MHz의 범위에서 네개 또는 두개의 전극을 이용하여 하였으나 최근에는 깊이별 또는 위치별 토질 특성 변화 양상을 추정하기 위한 간소화된 두개의 전극을 이용한 방법의 측정 기법이 제안되었다.

본 연구의 목적은 압밀 시험 동안 전단파 속도와 전기저항을 측정할 수 있는 새로운 압밀 셀을 개발 및 이용하여 연약 지반의 압밀 특성을 파악하는 것이다. 본 논문에서는 벤더 엘리먼트 및 전기저항 탐침의 설계와 설치 방법을 설명하고, 포화된 흙에서의 전기저항과 전단파 속도를 측정하여, 연약 지반의 거동 특성을 분석하는 방법을 기술하였다.

2. 흙에서의 전단파 특성

탄성파의 전파는 구조적 변화 없이 입상 매질의 상태를 평가하는데 사용된다. 이러한 탄성파 중에서 전단파는 파의 전파 방향과 입자의 이동 방향의 유효응력의 크기에 영향을 받으며(Roesler, 1979; Knox et al., 1982; Yu and Richart, 1984), 다음과 같이 유효응력의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_o}{P_o} \right)^\beta = \alpha \left(\frac{\sigma'_w + \sigma'_m}{2P_o} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서, σ'_w 는 파의 진행 방향의 유효응력, σ'_m 는 입자의 이동 방향의 유효응력, $\sigma'_o = (\sigma'_w + \sigma'_m)/2$ 는 파의 진행 방향과 입자 이동 방향에 대한 유효응력의 평균값, P_o 는 σ'_o 와 같은 단위의 대기압, 그리고 α 및 β 는 실험적으로 결정되는 값이다. α 계수는 입자들 사이의 접촉 거동, 입자의 재료적 특성, 그리고 패킹의 형태(i.e., 간극비 및 coordination number)에 영향을 받으며, β 지수는 크기, 모양 그리고 구조 등의 입자의 접촉효과에 의해 제어된다(Santamarina et al., 2001; Lee et al., 2005).

응력 유도 이방성은 이방적 응력체계에 의해 발생하는 반면에 고유 이방성은 퇴적 또는 압밀동안 발달되는 입자 배열의 결과이며, 이러한 입자 배열은 전단파 속도의 차이를 발생시킨다. 그림 1은 전단파의 진행 방향과 입자 이동 방향에 따른 전단파 속도를 나타낸다: 1)

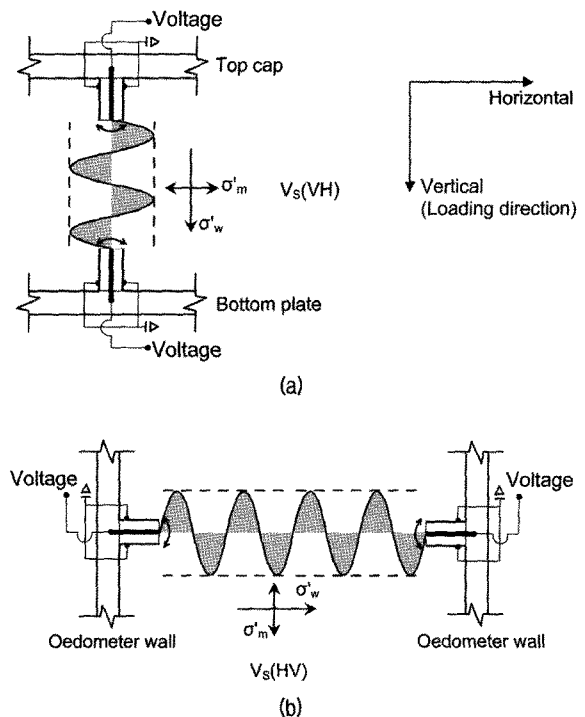


그림 1. 파의 전파 방향과 입자 이동 방향에 따른 전단파 속도: (a) $V_s(VH)$; (b) $V_s(HV)$. 그림 내 σ'_w 와 σ'_m 는 파의 전파 방향과 입자 이동 방향의 응력을 표시함. 단, 압밀 하중 방향은 연직 방향임.

$V_s(VH)$: 파의 진행 방향이 연직 방향(V : 첫 번째 기호) 이고, 입자 이동 방향이 수평방향(H : 두 번째 기호)인 경우의 전단파 속도(연직방향은 압밀 하중 방향)이다.
 2) $V_s(HV)$: 파의 진행 방향이 수평 방향(H : 첫 번째 기호) 이고 입자 이동 방향이 연직방향(V : 두 번째 기호) 인 경우의 전단파 속도이다. 따라서, 흙의 고유이방성은 $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 를 비교하여 평가 할 수 있다(이창호 외, 2006).

3. 포화된 흙에서의 전기저항

전기저항 ρ [$\Omega \cdot m$]은 전기장 속 전하의 이동에 따라 측정되는 전기 전도도 ζ [S/m]의 역수이다. 포화된 흙에서의 전기 전도도는 흙의 간극비 그리고 간극을 채우고 있는 전해질 용액의 전기전도도로 정의된다. 전해질 용액으로 포화된 상태의 평행한 무한이 긴 판 모양(infinitely plate-shaped)의 입자의 전기전도도는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\zeta_{mix} = (1-n)\zeta_p + n\zeta_{el} + (1-n)\frac{\gamma_p}{g} \lambda_{ddl} S_a \quad (2)$$

여기서, n 는 간극율($=e/(1+e)$), ζ_{el} 는 전해질용액의 전기 전도도, ζ_p 는 입자의 전기 전도도, γ_p 는 입자의 단위 중량, g 는 중력가속도, λ_{ddl} 은 입자 표면 전도도, 그리고 S_a 는 입자의 비표면적이다(Santamarina et al., 2001).

만약, 바닷물과 같이 입자의 전기 전도도가 전해질 용액의 전기 전도도보다 훨씬 작을 경우($\zeta_p \ll \zeta_{el}$) 식 (2)의 첫 번째 항은 무시할 수 있다. 또한, 전해질 용액의 높은 전기 전도도로 인하여 입자 표면 전도도 λ_{ddl} 에 의한 영향 역시 작아져 포화된 흙의 전기 전도도는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_{mix} = n\zeta_{el} \quad (3)$$

따라서, 바닷물과 같은 전해질 용액으로 포화된 흙의 전기 전도도 ζ_{mix} 또는 전기저항 ρ_{mix} 은 간극을 채우고 있는 전해질 용액의 전기전도도 ζ_{el} 또는 전기 저항 ρ_{el} 과 간극율 n 의 함수이다. 그러나, 실제 흙에서는 흙 입자의 크기가 유한하고 입자의 구조가 평행하지도 않아 발생하는 전기 전도 경로(conduction path)의 휘어짐으로 인하여 식 (3)은 Archie(1942)의 경험식과 같이 다음 식 (4)로 표시할 수 있다.

$$\rho_{soil} = \rho_{el} \cdot n^\theta \quad (4)$$

여기서 θ 는 상수로 일반적으로 약 -1 ~ -2.4정도이다.

4. 실험 장비 구성

4.1 하이브리드 압밀셀

그림 2와 같이 압밀 시험 동안 전단파 속도와 전기저항을 측정하기 위한 새로운 압밀셀을 설계·제작하였다. 황동 재질의 압밀셀의 치수는 내경 74mm, 높이 63mm, 그리고 두께 16mm이다. 흙 시료의 높이는 37mm가 되도록 설계·제작되었다.

4.2 전단파 측정

송신용 벤더 엘리먼트를 활용하여 전단파를 발생시킨 후 수신용 벤더 엘리먼트로 측정하였다. 벤더 엘리먼트는 흙과 트랜서듀서 간의 뛰어난 결합효과 및 적절한 작용 주파수를 가지는 전단파 트랜서듀서이다. 본 연구에서는 Piezo Systems사의 병렬 형식의 벤더 엘리먼트를 이용하였다. 벤더 엘리먼트의 치수는 11.0×4.0×0.6 (길이 × 너비 × 두께, mm)이며, 시료 속으로 돌출된 길이는 4mm이다(그림 3).

병렬 형식의 연결은 누화현상(crosstalk)이라 불리는 발신기와 수신기 사이의 전기적 간섭을 효과적으로 방지할 수 있다. 병렬 형식의 벤더 엘리먼트에서, 중심 금속관은 동축선의 내부선과 연결되며, 외부선은 접지선과 연결된다. 누화현상은 해성 점토와 같이 전도성 흙에서 중요한 요소이다(Lee and Santamarina, 2005; 이종섭 및 이창호, 2006a). 각 벤더 엘리먼트는 에폭시를 이용하여 방수 코팅을 하였으며, 누화현상을 방지하기 위하여 전도성 페인트를 얇게 바른 후 접지선과 연결하여 전기적 차폐를 하였다. 또한 그림 3과 같이 압밀셀을 통해 직접 전파되는 파를 효과적으로 제거하기 위하여 셀과 임피던스 차이가 큰 나일론 재질의 스크류에 에폭시를 이용하여 벤더 엘리먼트를 고정하였다(이종섭 및 이창호 2006b). $V_s(VH)$ 를 측정하기 위하여 압밀셀의 상·하부판에 벤더 엘리먼트를 설치하였으며, $V_s(HV)$ 를 측정하기 위하여 압밀셀의 벽면에도 벤더 엘리먼트를 설치하였다.

20MHz 신호발생기(Agilent 33220A)에서 발생된 단

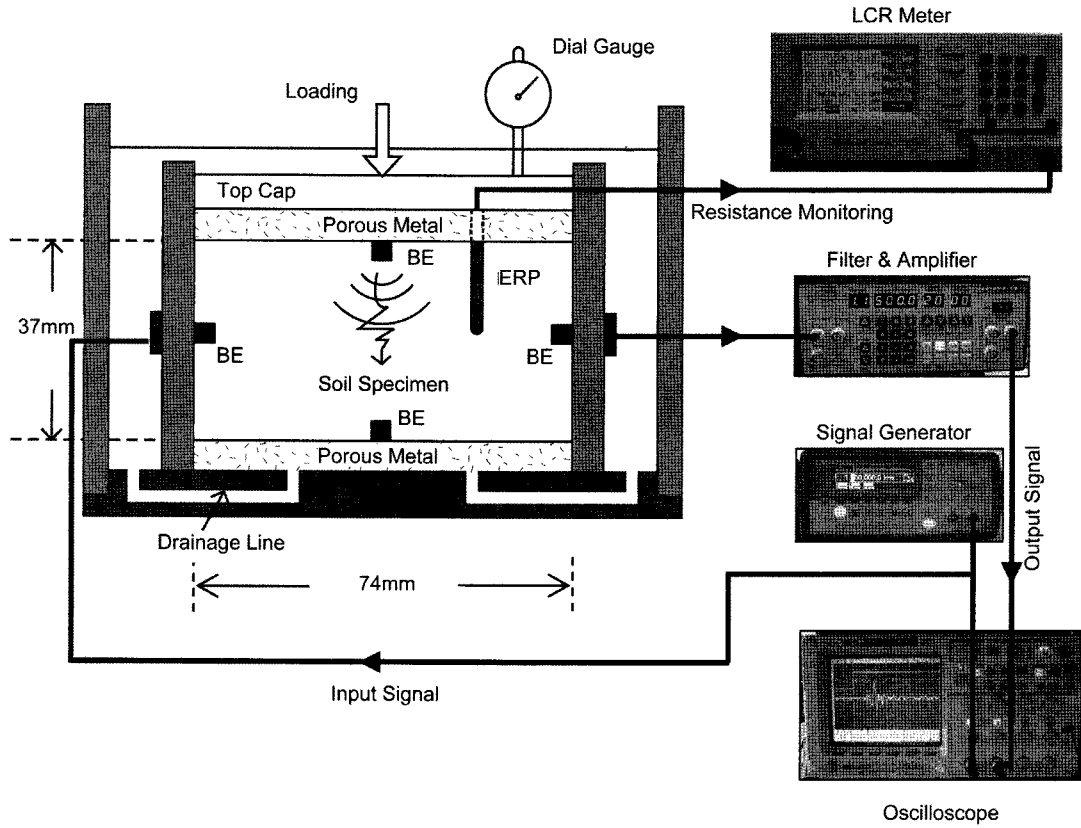


그림 2. 벤더 엘리먼트와 전기저항 탐침이 설치된 압밀셀 및 주변장치. 그림 내 BE 및 ERP는 각각 벤더 엘리먼트와 전기저항 탐침을 의미함.

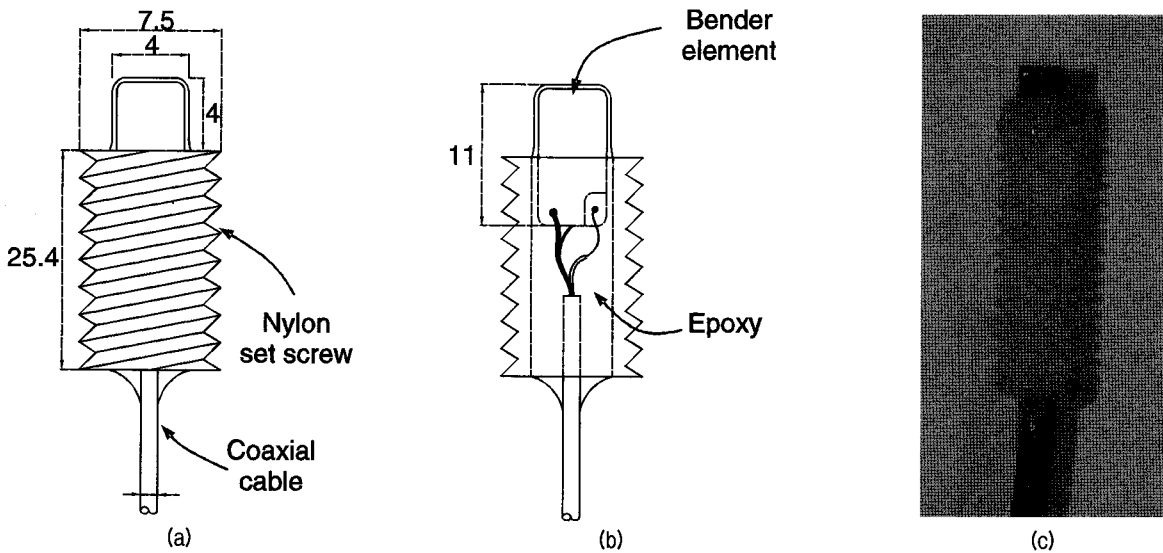


그림 3. 벤더 엘리먼트 및 전기저항 탐침: (a) 측면도; (b) 투시도; (c) 사진.

일 정현파를 연직 및 횡방향 벤더 엘리먼트의 입력 신호로 사용하였다. 발신 벤더 엘리먼트에서 발생한 전단파는 시료를 통해 전파된 후 수신 벤더 엘리먼트에서 감지된다. 수신된 신호는 필터-증폭기(Krohn-Hite 3364)에서 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후 오실로스코프(Agilent 54624A)를 이용하여 전단파를 측정 및 저장하

였다. 고주파수 잡음을 제거하기 위하여 1024개의 신호를 평균하였다. 전단파 속도는 도달 시간으로부터 계산하였으며, 전단파의 이동 거리는 벤더 엘리먼트의 끝단(tip) 간 거리(Dyvik and Madshus, 1985; Viggiani and Atkinson, 1995; Fernandez, 2000)를 이용하였다. 초동 시간 t_{first} 은 근접장 효과를 고려하여 선택하였다(Sánchez-

Salinero et al., 1986; Aki and Richards, 1980; Lee and Santamarina, 2005).

4.3 전기저항 측정

전기저항 탐침은 동축케이블 형식으로 외부 전도체(stainless tube, type 316)와 내부 전도체(copper wire)로 이루어져 있다. 내부 전도체의 직경은 0.8mm이며 외부 전도체의 외경 및 두께는 각각 2.108 및 0.254mm이다. 그림 4와 같이 얇은 금속 튜브(외부전도체) 내부에 부도체로 차폐시킨 내부 전도체(core electrode)를 삽입한 후 도넛 모양의 빈 공간에 부도체(epoxy)를 가득 채워 고정하였다. 또한 하중 증가에 따라 탐침이 시료 속으로 관입될 때 탐침이 휘어지는 것을 방지하기 위하여 이중 썸뿔 모양으로 끝단을 연마하였다(Cho et al., 2004). 전기저항 탐침은 파손 시 교체가 간편하도록 나일론 스크류를 사용하여 그림 2와 같이 압밀셀의 상부판에 고정하였다. 시료 내부로 관입된 전기저항 탐침의 길이는 18.5mm이다.

임피던스 애널라이저(HP-4192A)를 이용하여 전해질 용액과 카올리나이트 슬러리에서 전기저항 탐침의 작동 주파수를 조사하였다. 0.5몰의 염화나트륨 수용액을

전해질로 1.1V의 단일 정현파를 적용하였다. 그림 5는 두개의 탐침을 이용하여 순수 0.5몰의 염화나트륨 수용액과 0.5몰의 염화나트륨 수용액과 혼합한 점토 슬러리(함수비 $\omega=72\%$)에서 얻은 스펙트럼(spectral) 결과를 보여준다. 두 탐침 모두 거의 동일한 스펙트럼 결과를 보이며, 0.5몰의 염화나트륨 수용액과 점토 슬러리의 전기저항은 약 100kHz ~ 1000kHz에서 거의 일정한 값을 보인다. 작동 주파수의 선택 후 LCR meter(INSTEK, LCR-819)를 이용하여 흙의 전기저항을 측정하였다(1.27V, 100kHz 단일정현파).

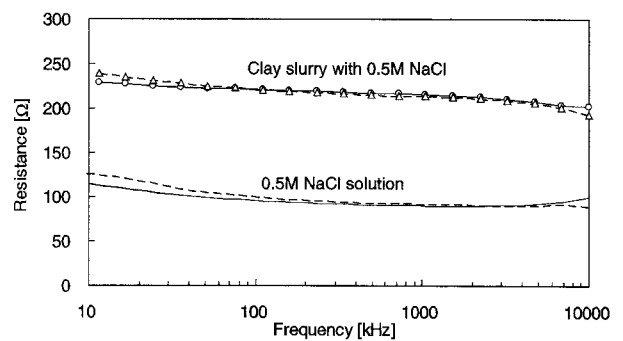


그림 5. 순수 0.5몰 염화나트륨 수용액과 0.5몰 염화나트륨 수용액 - 점토 슬러리 혼합물(함수비 $\omega=72\%$)에서 측정된 전기저항 탐침 스펙트럼 결과.

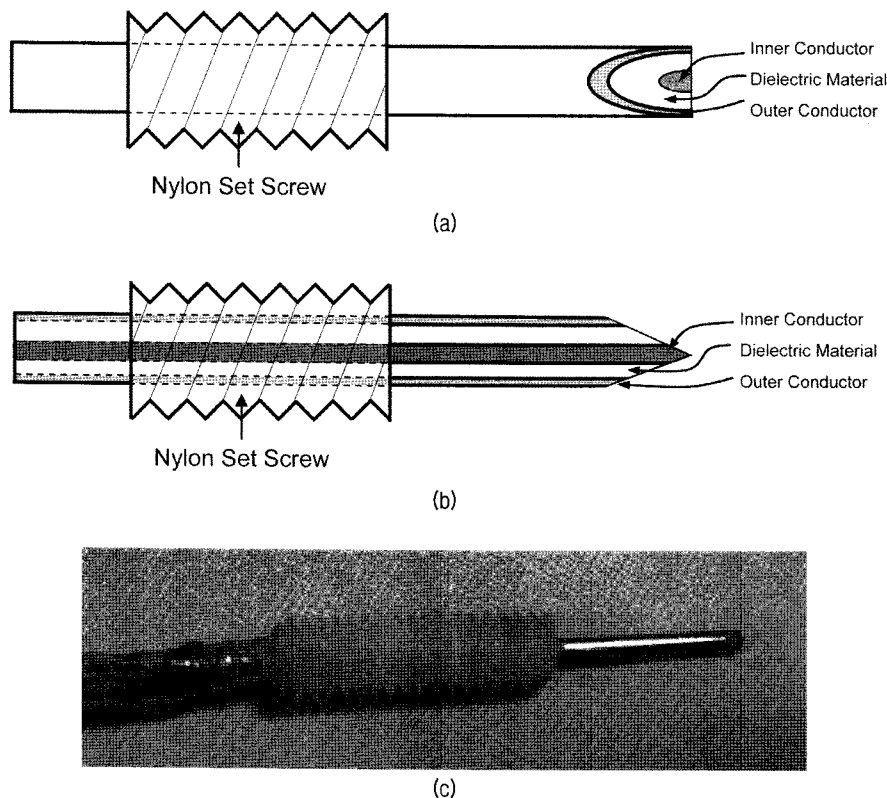


그림 4. 전기저항 탐침: (a) 측면도(0°); (b) 측면도(90°); (c) 사진.

4.4 시료

본 연구에서는 인천 S지구에서 채취한 해성 점토를 이용하였다. 점토의 자연 함수비는 약 25% ~ 47%, 단위 중량은 약 18.5kN/m³, 세립분 함유량은 약 5% ~ 25%이며, 통일분류법(USCS)에 따르면 CL로 분류된다.

5. 실험 결과

5.1 실험 과정

압밀 실험 시 재하 과정 동안 연직응력은 두배씩 증가시켰다. 각 하중 단계는 과잉간극수압의 소산을 위하여 24시간이상 유지하였으며, 제하 과정(unloading)도 동일하게 반복하였다. 표준압밀시험(ASTM D 2435-04)과 동일한 시간 간격으로 침하량을 측정하였으며, 침하량 측정 후 즉시 전단파와 전기저항을 측정하였다.

5.2 압밀 실험 결과

과거에 흙이 받은 최대 연직 응력인 선행압밀하중은 흙의 거동을 미소 변형 탄성거동과 대변형 소성거동으로 구별할 수 있는 항복응력으로 정의된다. 그림 6는 본 실험에서 얻어진 전형적인 $e - \log(\sigma'_{vo}/P_a)$ 곡선을 보여 준다. 응력 해방(stress relief)에 따른 시료 교란 효과로 인하여 $e - \log(\sigma'_{vo}/P_a)$ 곡선에서 명확한 변곡점은 관찰되지 않는다. 그림 6에 나타난 것처럼 선행압밀하중은

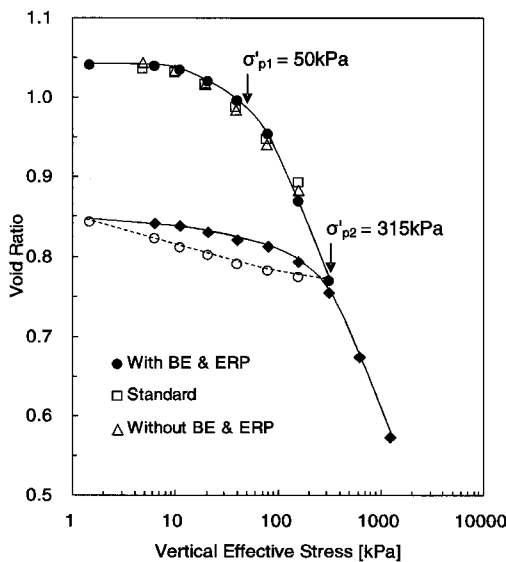


그림 6. $e - \log(\sigma'_{vo}/P_a)$ 곡선.

약 50kPa이며, 현장 연직유효응력은(σ'_{vo})은 약 48kPa이다. 본 연구에 사용된 점토의 압축 지수 C_c 는 0.15~0.3으로 낮은 압축성을 보인다. 연직 유효 응력을 315kPa까지 재하한 후 제하 과정을 실시하였으며, 제하과정 후 1260kPa까지 재재하(reloading)을 실시하였다. 따라서, 재재하 과정에서의 선행압밀하중은 315kPa이다. 본 연구에서 개발된 벤더 엘리먼트와 전기저항 탐침을 설치한 새로운 압밀셀, 벤더 엘리먼트와 전기비저항 탐침을 설치하지 않은 압밀셀, 그리고 표준압밀셀(직경: 63.5mm, 높이: 19mm) 3종류의 압밀셀을 이용하여 비교 실험을 실시한 결과, $e - \log(\sigma'_{vo}/P_a)$ 곡선과 선행압밀하중 등 점토의 압밀 거동은 그림 6과 같이 서로 유사한 결과를 나타내었다.

5.3 전단파 속도 측정 결과

비교결화된 흙의 경우, 전단파 속도는 연직 유효 응력이 증가함에 따라 증가한다. 벤더 엘리먼트의 측면으로부터 압축파가 발생되기 때문에 전단파 측정동안 압축파와 전단파 사이의 간섭이 발생한다(Lee and Santamarina, 2005). 압밀셀 상·하부판에 설치된 벤더 엘리먼트의 경우 압축파의 크기가 상당히 작다. 그러나, 압밀셀의 벽면에 설치된 벤더 엘리먼트의 경우 압축파의 크기는 무시할 수 없으나, 압축파의 주기는 전단파에 비해 상당히 커 고주파 차단 필터로 쉽게 제거할 수 있다.

흙과 벤더 엘리먼트를 포함한 시스템의 공진주파수와 입력 신호의 주파수가 일치할 때 가장 강력한 측정 신호를 얻을 수 있기 때문에(Lee and Santamarina, 2006), 입력 단일 정현파의 주기는 주파수 스위프(sweep)을 통하여 결정하였다. 연직 유효응력에 따른 전단파 속도를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타난 바와 같이, 전단파 속도는 연직 유효응력이 증가함에 따라 증가하였으며,

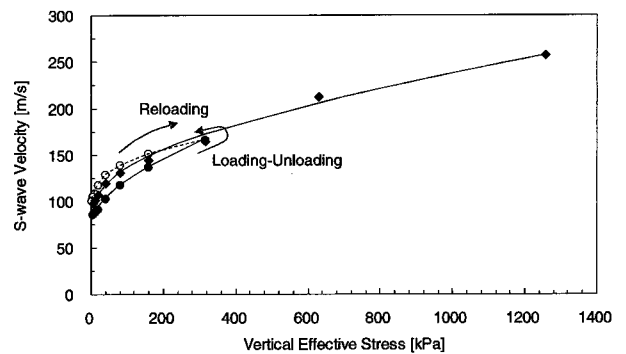


그림 7. 연직 유효응력에 따른 전단파 속도($V_s(VH)$) 변화.

시료의 과압밀과 제하 과정 동안 발생하는 횡방향 응력 구속 현상 때문에 제하 시 측정된 전단파 속도보다 제하 과정의 전단파 속도가 더 빠르다. 최소 제곱법으로부터 얻은 시료의 $\alpha = 28\sim 41\text{m/s}$ 그리고 $\beta = 0.21\sim 0.33$ 이다.

5.4 전기저항 측정 결과

각 하중 단계별로 측정된 전기저항은 그림 8과 같다. 제하 과정 동안 전기저항은 거의 선형적으로 증가하며, 제하 과정 동안 감소한 후, 재제하 과정 동안 다시 증가한다. 이러한 전기저항 값의 변동은 식 (2)에서 언급한 바와 같이 전기저항과 간극율의 관계 때문이다.

6. 분석 및 토의

6.1 일차 압밀 평가

연직응력 630kPa에서 측정된 시간에 따른 간극비, 전단파 속도, 그리고 전기저항의 변화를 그림 9에 도시하였다. 그림 9(a)와 같이 시간에 따른 간극비의 변화는 전형적인 곡선을 보여주며 $\log t$ 방법으로 얻은 1차 압밀 시간은 약 40분으로 나타났다. 그러나, 크립(creep) 효과로 인하여 동일한 하중 단계에서 간극비는 24시간 동안 지속적으로 감소하였다. 그림 9(b)는 시간에 따른 전단파 속도의 증가를 나타낸다. 전단파 속도는 하중 제하 후 일차 압밀 시간인 약 40분 후 일정한 값에 접근한다. 크립 효과가 발생하는 동안 유효응력의 증가는 없지만 크립에 따른 간극비와 흙 구조의 변화로 인하여 전단

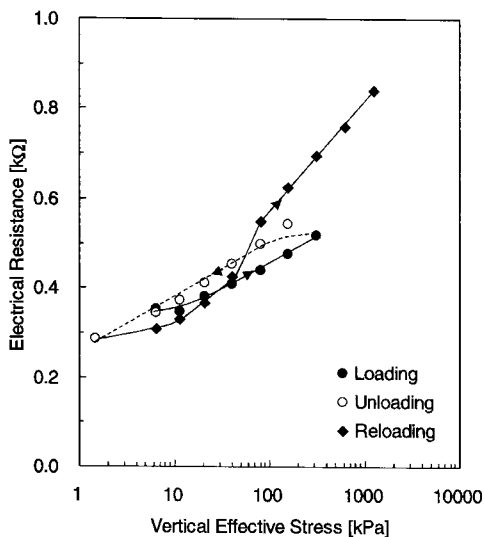


그림 8. 압밀시험 시 하중 단계별로 측정된 전기저항.

파 속도는 약간의 증가 경향을 보인다(Hardin and Black, 1968; Afifi and Woods, 1971; Marcuson and Wahls, 1972; Anderson and Stokoe, 1978). 간극비 및 흙 구조 변화는 식(1)의 α 계수와 β 지수에 반영된다. 전기저항은 간극률의 함수이므로, 그림 9(c)와 같이 시간에 따른 전기저항은 일차 압밀 및 크립 동안 간극률의 감소로 인하여 증가하는 경향을 보이며, 그 기울기는 일차 압밀의 종료 시간 근처에서 변화한다. 크립 동안 작은 간극비의 감소는 전기저항의 큰 증가를 일으키며, 이는 크립으로 인한 흙 구조의 변화가 점토의 이중층과 전기저항 값에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 그러나 본 결과는 표준압밀 시험의 측정 시간에 따라 측정된 값으로 동일한 하중에서의 적은 측정수는 회귀분석의 정확성을 떨어뜨린다.

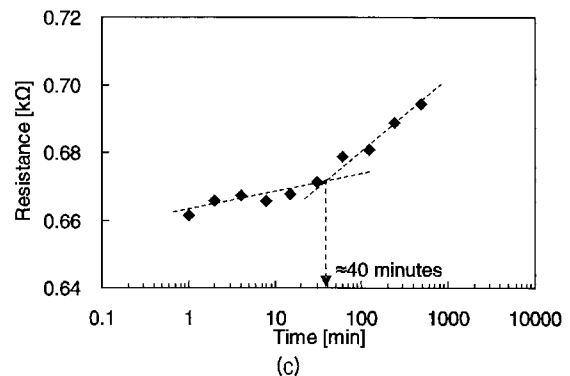
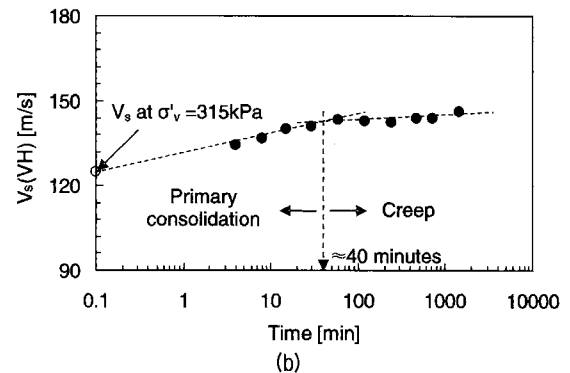
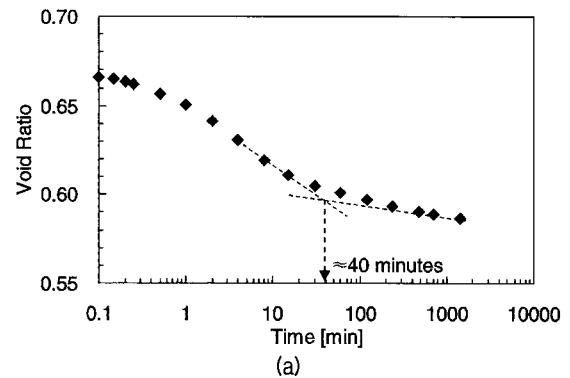


그림 9. 일차 압밀 특성($\sigma'_v = 630\text{kPa}$): (a) 간극비; (b) 전단파 속도; (c) 전기저항.

따라서 추후 다른 하중 조건에서 더욱 세분화된 시간대 별 전단파 속도 및 전기저항값을 측정하는 추가적인 실험을 수행하여 검증할 필요가 있다고 판단된다.

6.2 이방성 평가

고유 및 응력 유도 이방성은 흙의 미소 변형을 거동에 영향을 미친다. 흙의 고유 이방성을 평가하기 위하여 압밀 시험 동안 벡터 엘리먼트를 이용하여 고유 이방성에 따른 전단파 속도를 측정하였다. 또한 점토 시료의 입자 배열을 확인하기 위하여, 건조 후 SEM(Scanning Electron Microscopic) 시험을 수행하였다. 그림 10에 나타난 바와 같이 점토 입자는 퇴적에 따른 영향으로 횡방향 배열을 이루고 있다. 이러한 입자의 배열은 강성 이방성(stiffness anisotropy)으로 나타나며(Santamarina et al., 2001) 이러한 강성 이방성은 전단파 속도 이방성으로 나타난다. 그림 11은 연직 유효응력에 따른 $V_s(VH)$

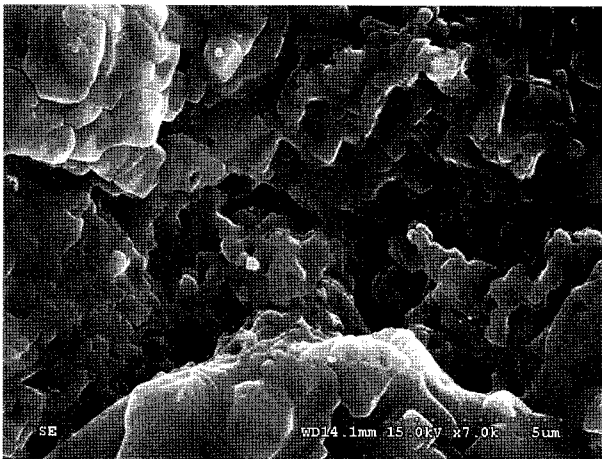


그림 10. 시료의 SEM 이미지.

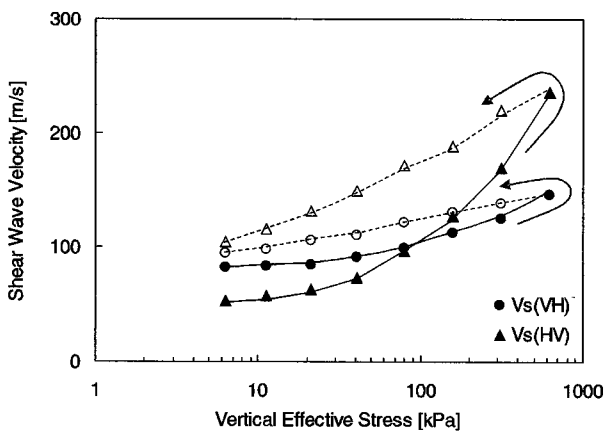


그림 11. 고유 이방성에 따른 전단파 속도. $V_s(VH)$ 및 $V_s(HV)$ 는 파의 진행 방향과 입자 이동 방향에 대한 동일한 유효 응력값을 가진다.

및 $V_s(HV)$ 를 나타낸다. 식 (1)로부터, $V_s(VH)$ 및 $V_s(HV)$ 의 평균 유효응력의 크기는 동일하며, 고유 이방성은 α 계수와 β 지수에 영향을 미친다. α 계수와 β 지수는 입자 모양과 배열에 의해 지배 받는 흙 구조 변화 및 입자 접촉 거동에 의존적이다. 시료 교란으로 인하여 재하 과정 중 낮은 연직 유효응력 하에서 $V_s(HV)$ 는 $V_s(VH)$ 보다 작은 값을 보이나, $V_s(HV)$ 의 증가율이 $V_s(VH)$ 의 증가율보다 더 커 높은 연직 유효 응력 하(선형 압밀하중 이상)에서는 $V_s(HV)$ 가 $V_s(VH)$ 보다 더 큰 값을 보인다. 이는 횡방향 입자 배열로 인하여 $V_s(HV)$ 의 파 전파 방향의 입자 접촉 면적이 증가하기 때문이다(그림 11). 재하 과정 동안 $V_s(HV)$ 의 감소율은 $V_s(VH)$ 보다 더 크다. 이러한 재하 및 재하 실험은 흙 구조 변화가 해석 점토의 고유 이방성을 초래함을 보여준다.

6.3 유효응력 - 간극비 변화

연직 유효응력의 변화에 따라 침하량 및 전기저항으로부터 산정한 간극비의 변화를 그림 12에 나타내었다. 침하량으로 산정한 간극비는 전체 시료의 평균(average) 간극비를 나타내며, 전기저항으로부터 산정한 간극비는 전기저항 탐침의 끝단의 위치의 국부(local) 간극비를 대표한다. 간극비의 변화는 선형압밀하중을 경계로 이중선형 거동을 보인다. 과압밀 구간에서 시료 교란 및 입자(fabric)의 변화 등의 영향으로 전기저항으로 산정한 국부 간극비는 침하량으로 산정한 평균 간극비와 약간의 편차를 보이거나 전체적으로 서로 유사한 결과를 보인다. 정규압밀 구간에서 간극비는 교란 효과 없이 시료의 침하 때문에 변화하므로 전체(average) 및 국부(local) 간극비는 매우 유사하게 나타났다.

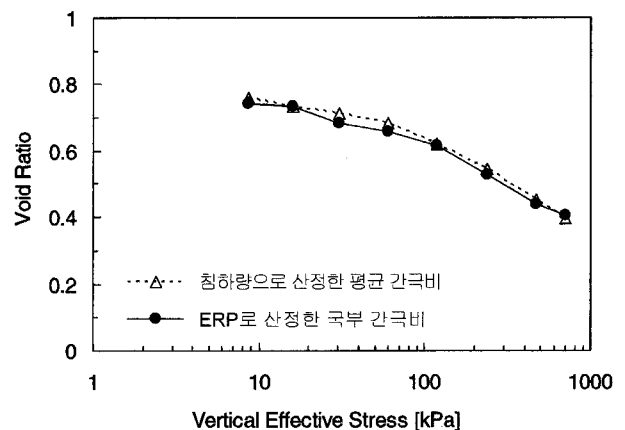


그림 12. 침하량 및 전기 저항으로 산정한 간극비.

7. 결 론

일차 압밀 시간, 이방성, 응력 이력에 따른 국부적인 전기저항의 변화 등의 평가를 위하여 전단파 속도와 전기저항을 측정할 수 있는 새로운 압밀셀을 개발하였다. 하중에 따른 전단파와 전기저항값의 측정은 하중 단계별 시료의 전단탄성계수의 획득 및 이방성 평가가 가능하게 하며, 기존 시험의 결과와 비교를 통하여 일차압밀 종료시점, 응력이력, 그리고 평균값이 아닌 국부적인 간극비 평가 등 보완적인 결과를 제시할 수 있다.

전단파의 발전기와 수신기로 벤더엘리먼트를 이용하였다. 벤더 엘리먼트는 황동 셀을 통한 파의 직접적 전달을 최소화하기 위하여 황동 셀과 임피던스 차이가 큰 나일론 재질의 특수한 소켓 안에 고정하였다. 그리고, 압밀셀의 상, 하부판 및 벽면에 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 국부적인 전기 저항의 변화를 평가하기 위하여 이중 빼기 형식의 전기 저항 탐침을 적용하였다.

일차 압밀 동안 전단파 속도는 대수 시간(log time)에 따라 선형적으로 증가하였으며, 크립 동안 거의 일정하게 유지되어, 하중 재하 후 시간에 따른 전단파 속도의 변화로부터 1차 압밀 시간을 평가할 수 있었다. 또한 전기저항-대수 시간 곡선의 기울기는 일차 압밀 시간의 끝 근처에서 변화하였다. 교란 효과가 적을 경우, 입자 배열은 전단파 속도에 영향을 미치며 이로부터 흙의 고유 이방성을 평가할 수 있었다. 침하량으로 산정한 시료 전체의 평균 간극비와 전기비저항으로부터 산정한 국부 간극비는 서로 유사한 값을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-311-D00218)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업(과제번호: B04-01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이종섭, 이창호 (2006a), “벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항”, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권 5호, pp. 47-57.
2. 이종섭, 이창호 (2006b), “압밀, 토모그래피, 액상화시험에서 벤더 엘리먼트의 적용”, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권 8호, pp.

43-54.

3. 이창호, 이종섭, 윤형구, 종홍공, 조태현 (2006), “응력유도 및 고유 이방성에 따른 전단파 속도 특성”, *한국지반공학회논문집*, 제 22권, 11호, pp.47-54.
4. Afifi, S. S. and Woods, R. D. (1971), “Long-term pressure effects on shear modulus of soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97(10), 1445-1460.
5. Aki, K. and Richards, P. G. (1980), *Quantitative seismology: Theory and Method*. W. H. Freeman and Company, 932p.
6. Anderson, D. G. and Stokoe, K. H. (1978), “Shear Modulus: a time-dependent soil property”, *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM, STP 654, 66-90.
7. Archie, G. E. (1942), “The electrical resistance log as an aid in determining some reservoir characteristics”, *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 146, 54-62.
8. ASTM D2435-04 (2004), “Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading”, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.08.
9. Cho, G. C., Lee, J. S., and Santamarina, J. C. (2004), “Spatial variability in soils: High resolution assessment with electrical needle probe”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(8), 843-850.
10. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985), “Lab measurements of G_{max} using bender elements”, *Proc. ASCE Conference on Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, 186-196.
11. Fernandez, A. L. (2000), *Tomographic imaging the state of stress*. PhD thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
12. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968), “Vibration modulus of normally consolidated clay”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 94(2), 353-369.
13. Ismail, M. A. and Rammah, K. I. (2006), “A new setup for measuring G_0 during laboratory compaction”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 29(4), 280-288.
14. Klein, K. and Santamarina, J. C. (2005), “Soft sediments: wave-based characterization”, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 5(2), 147-157.
15. Knox, D. P., Stokoe, K. H. II., and Kopperman, S. E. (1982), “Effect of state of stress on velocity of low-amplitude shear waves propagating along principal stress directions in dry sand”, *Geotechnical Engineering Report GR 82-23*, University of Texas at Austin.
16. 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.
17. 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*, ASTM, 29, 439-441.
18. Lee, J. S., Fernandez, A. L., and Santamarina, J. C. (2005), “S-wave velocity tomography: small-scale laboratory application.” *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 28(4), 336-344.
19. Marcuson, W. F. and Wahls, H. E. (1972), “Time effects on dynamic shear modulus of clays”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 98(12), 1359-1373.
20. Pennington, D. S., Nash, D. F. T., and Lings, M. L. (1997),

- "Anisotropy of G_0 shear stiffness in Gault Clay", *Géotechnique*, 47(3), 391-398.
21. Roesler, S. K. (1979), "Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(7), 871-880.
 22. Sánchez-Salinero, I., Roesset, J. M., and Stokoe, K. H. II. (1986), Analytical studies of body wave propagation and attenuation, Report GR-86-15, University of Texas, Austin. 272p.
 23. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley and Sons, New York.
 24. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), "Interpretation of bender element tests", *Géotechnique*, 45(1), 149-154.
 25. 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*, 325-328.
 26. Yu, P. and Richart, F. E. Jr., (1984), "Stress ratio effects on shear modulus of dry sands", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110 (3), 331-345.
 27. Zeng, X. and Grolewski, B. (2005), "Measurement of G_{max} and estimation of K_0 of saturated clay using bender elements in an oedometer", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 28(3), 264-274.

(접수일자 2007. 5. 21, 심사완료일 2008. 8. 4)