

## 압밀, 토모그래피, 액상화시험에서 벤더엘리먼트의 적용

### Application of Bender Elements in Consolidation, Tomography, and Liquefaction Tests

이 종 섭<sup>1</sup> Lee, Jong-Sub

이 창 호<sup>2</sup> Lee, Chang-Ho

#### Abstract

The scope of this paper covers the applications of bender element tests in consolidation, tomography, and liquefaction. Loading and unloading time during consolidation are evaluated based on shear wave velocity. As S-wave velocity is dependent on effective stress, the loading step may be determined. However, cautions are required due to the different mechanism between the settlement and effective stress criteria. The stress history may be evaluated because the S-wave shows the cement controlled regime and stress controlled regimes. A fixed frame complemented with bender elements permits S-wave tomography. The tomography system is tested at low confinement within a true triaxial cell. Results show that shear wave velocity tomography permits monitoring changes in the velocity field which is related to the average effective stress. To monitor the liquefaction phenomenon, S-wave trans-illumination is implemented with a high repetition rate to provide detailed information on the evolution of shear stiffness during liquefaction. The evolution of shear wave propagation velocity and attenuation parallel the time-history of excess pore pressure during liquefaction. Applications discussed in this paper show that bender elements can be a very effective tool for the detection of shear waves in the laboratory.

#### 요 지

본 논문은 벤더 엘리먼트를 압밀, 토모그래피, 그리고 액상화에 적용하는 방법을 다루었다. 모래와 점토를 이용하여 압밀 시험을 수행하면서 전단파 속도를 측정하여 하중 재하 및 제하 시기를 평가하였다. 전단파 속도는 유효응력의 함수이므로 전단파 속도를 이용하여 하중 재하시기를 결정할 수 있으나, 침하량 기준과 전단파 속도(유효응력) 메카니즘이 다를 수 있으므로 주의해야 한다. 또한 전단파 속도는 고결화 제어 구간(cemented controlled regime)과 응력 제어 구간(stress controlled regime)으로 구별할 수 있어 응력이력현상을 확인할 수 있다. 벤더 엘리먼트가 설치된 고정된 프레임에서 전단파 토모그래피가 가능하다. 낮은 구속응력상태와 진 삼축 장비 내에서 토모그래피 실험을 수행한 결과 전단파 토모그래피는 평균유효응력과 관련된 전단파 속도 변화의 관측에 사용될 수 있음을 보여 주었다. 한편 액상화와 같은 어떤 현상을 관측하기 위하여 반복 주기가 높은 방식의 전단파 트랜스-일루미네이션(trans-illumination)이 적용되었다. 전단파 속도와 크기의 전개는 액상화 동안 과잉간극수압의 경향과 평행함을 알 수 있었다. 본 논문에서 소개한 적용들은 벤더 엘리먼트가 실내 시험에서 전단파 검측에 상당히 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

**Keywords :** Bender elements, Consolidation, Loading and Unloading, Stress history, Tomography, Trans-illumination

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

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

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

국내외적으로 여러 지반공학 분야에 다양한 목적을 위하여 전단파가 적용되고 있다. 실내 시험의 경우 대표적으로 압밀 및 삼축시험 장치에 다양한 전단파 트랜스듀서를 적용하려는 노력이 많은 연구자들에 의해 진행되고 있으며(Pennington et al. 1997; Yamashita and Suzuki 2001; Kuwano and Jardine 2002; Zeng and Groleski 2005; Ismail and Rammah 2006), 지반공학목적 목적을 위한 토모그래피 이미징인 지오토모그래피는 1980대에서야 시작되었으나(Dines and Lytle 1979; Witten and Long 1986), 아직 토질 분야에서의 적용 및 그 활용 분야가 제한적이다. 일반적으로 파동에 기본을 둔 지오토모그래피는 지표면에서의 크로스홀 시험 형태로 적용되고 있다. 또한, 최근 과잉간극수압 발생에 따른 유효응력 감소로 인한 액상화 현상의(Seed 1979; Alarcon-Guzman et al. 1988; Ishihara 1996; Youd et al. 2001) 관측에도 전단파 시험이 적용되고 있다. 이러한 액상화에 관련된 기존의 연구는 주로 실험실에서의 반복삼축시험(Seed and Lee 1966)이나, 센트리퓨즈(centrifuge)에서 1g 상태에서의 진동대 실험(Schofield 1981; Arulanandan and Scott 1993; Kokusho 1999; 박영호 2001), 현장에서 인위적으로 생성된 액상화(Florin and Ivanov 1961; Ashford et al. 2004) 등을 포함하고 있었으며, 최근 미국의 Wildlife site(Youd and Holzer 1994), 타이완의 Lotung(Tang 1987; Zeghal et al. 1995), 일본의 Sunamachi(Ishihara et al. 1998)와 같은 실제 지진 시 액상화를 관측한 경우도 있다. 이와 같은 액상화를 관측하기 위해서 가속도계나 간극수압계 같은 장비가 이용되고 있지만 이와 같은 장비는 장비가 설치된 한 지점만의 값을 측정하는 단점이 있다. 그러나 전단파를 이용할 경우 발진기와 수신기 사이의 값을 측정함으로써 한 지점에 대한 반응이 아니라, 내부 전체의 반응에 대한 평균값을 산정하게 된다.

본 논문에서는 전단파를 이용한 지반 특성 파악에 대한 적용으로써 크게 세 가지 적용 분야를 다루었다. 첫째, 벤더 엘리먼트가 많이 적용되고 있는 압밀시험에서 전단파 속도로 하중의 재하 및 제하시기 결정법을 다루었으며, 벤더 엘리먼트로 산정된 전단파 속도를 이용하여 응력 이력을 평가하는 방법을 소개하였다. 둘째, 벤더 엘리먼트를 이용하여 토모그래피를 수행할 경우, 이에 대한 여러 가지 고려 사항과 적용 방법을 설명하였다. 마지막으로, 토모그래피가 수행되기 어려운 액상화

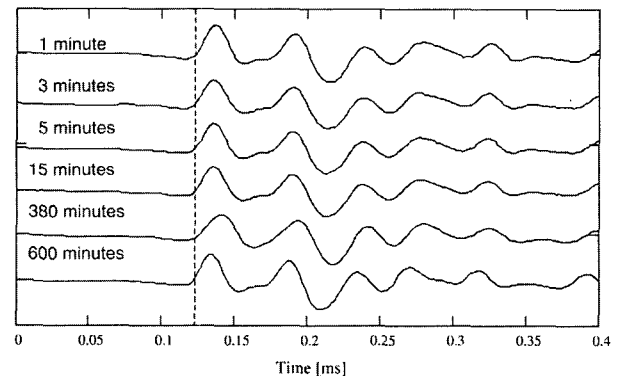
와 같은 현상을 관측하기 위해 새로 고안된 방법 중에 하나인 전단파 트랜스-일루미네이션을 구현하였다.

## 2. 압밀 시험에서의 하중 재하 및 제하시기 결정

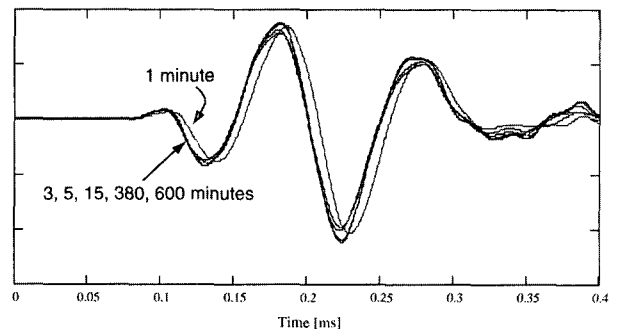
모래와 점토를 벤더엘리먼트가 장착된 압밀 장비를 이용하여 압밀 시험을 수행하면서 전단파 속도를 측정하여 과잉간극수압의 소산을 고려하였으며, 이를 이용하여 하중 재하 및 제하 시기를 결정하는 법을 제시하였다.

### 2.1 모래 지반

모래와 점토 시료의 압밀 시험을 수행할 경우, 어느 시점에서 다음 단계의 하중을 올릴 지 판단이 중요하다. 둥근 모래의 경우, 그림 1(a)와 같이 하중 재하 1분 후부터 전단파 속도가 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 그러나 각진 모래의 경우는 그림 1(b)와 같이 더 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다. 즉, 모래의 경우도 입자에 따라 aging에 필요한 시간이 다르며, 점토의 경우도 이와 같은 방법을 적용함으로써 다음 단계 하중 재하시기를 결정할 수 있다.



(a) 둥근모래

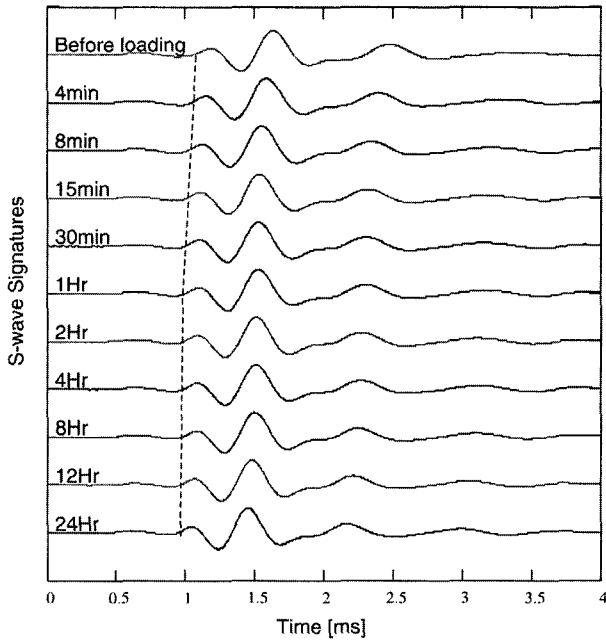


(b) 각진모래

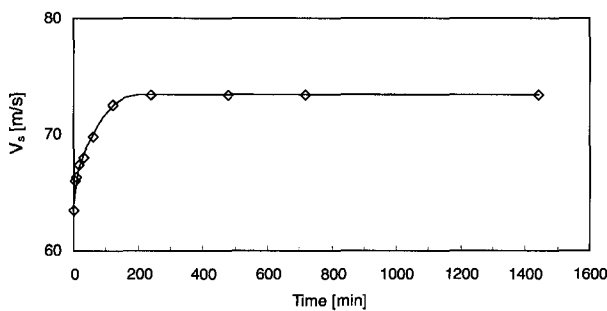
그림 1. 모래 지반에서 하중 재하 시기 결정

## 2.2 점토 지반

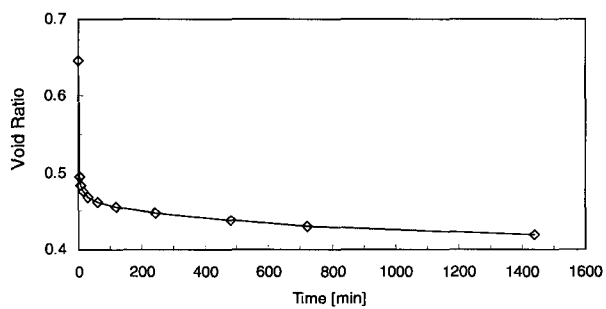
해성 점토를 이용하여 압밀 시험을 수행하면서 전단파 속도를 측정하였다. 다음 단계의 하중 재하 기준을 결정하기 위하여 다이얼 게이지의 침하량과 전단파 속도(유효응력)를 이용하였다. 그림 2에서와 같이 유효응력은 하중 재하 후 240분 후 일정해지지만, 침하는 240



(a) 시간 경과에 따른 전단파 형상



(b) 전단파 속도 - 재하 시간 관계



(c) 간극비-재 하시간 관계

그림 2. 점토 지반에서 하중 재하 시기 결정

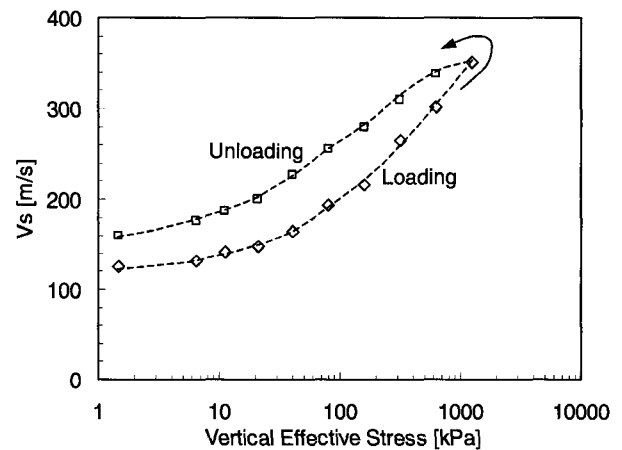
분 이후에도 계속 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉, 압밀도 산정 시 침하량 기준과 전단파 속도(유효응력) 기준이 다를 수 있으므로 주의가 요망된다.

## 3. 압밀 시험을 통한 응력 이력 평가

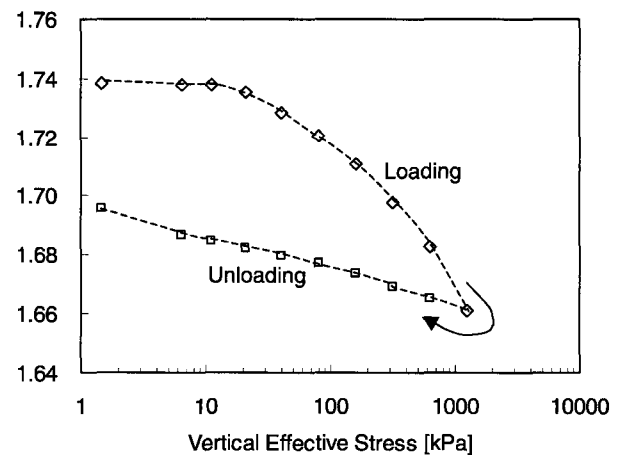
모래와 점토를 이용하여 압밀 시험을 수행하면서 전단파 속도를 측정하여 선행 상재하중을 평가하였다.

### 3.1 압밀셀에서 모래의 수평방향 구속 현상

각진 입자가 주류를 이루는 주문진사를 매우 조밀하게 다진 후 압밀 시험을 수행하면서 전단파 속도를 측정하여 전단파 속도와 압밀 하중, 간극률과 압밀 하중 관계를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 간극률 및 전단파 속도와 압밀 하중 곡선에서 수평방향 응력 구속에 의한 응력 이력 현상을 확인 할 수 있다.



(a) 전단파-유효수직응력 관계



(b) 간극률-유효수직응력 관계

그림 3. 압밀 시험 시 모래 시료의 구속 현상

즉, 압밀 하중의 제하 시 전단파 속도는 수평방향 응력 구속 현상으로 재하 시 동일한 크기의 수직유효응력에 서의 전단파 속도보다 더 크을 알 수 있다.

### 3.2 점토의 선행 압밀 하중 평가

서해안 지역에서 채취한 비교란 점토시료를 이용하여 압밀 시험을 수행하면서 전단파 속도를 측정하였다. 그림 4는 압밀 시험 시 각 하중 단계에서 24시간 경과

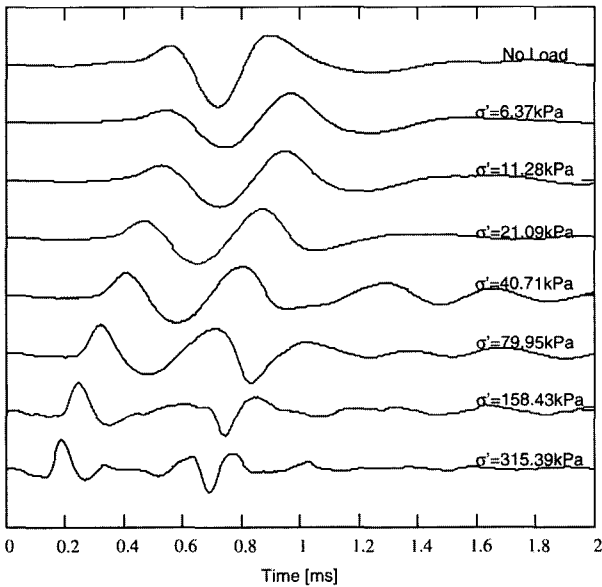
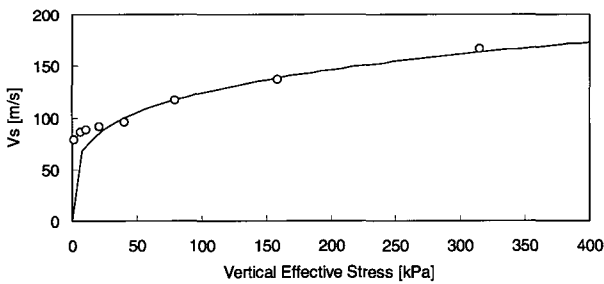
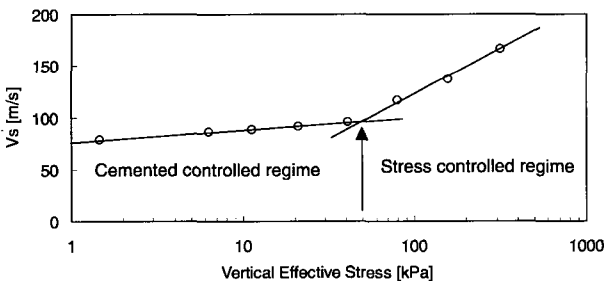


그림 4. 점토 지반에서 재하 시 각 하중 단계에서의 전단파 형상



(a) 신축측 사용



(b) 대수축 사용

그림 5. 전단파-유효수직응력관계

후 측정된 전단파 형상을 보여주고 있다. 압밀 시험 전 측정된 시편의 높이와 전단파 시험 시 측정된 침하량을 이용하여 전단파 속도를 계산하면 그림 5와 같다. 그림 5에서와 같이 전단파 속도를 이용하면, 고결화 제어 구간(cemented controlled regime)과 응력 제어 구간(stress controlled regime)을 구별할 수 있다(Fernandez and Santamarina 2001). 본 논문에 적용된 공시체의 경우, 전단파 속도로 약 50kPa를 기준으로 두 가지 영역을 구분할 수 있으나 침하량에 따른 Casagrande 방법에 의해서는 그림 6에서와 같이 선행압밀하중은 약 60kPa인 것으로 계산되었다. 두 방법에서 비슷한 선행압밀하중이 산정되었으나 전단파로 산정한 방법이 약간 작게 산정되었다. 이와 같은 이유는 고결화 제어 구간에서 응력 제어 구간으로 변화할 때 발생하는 fabric변화가 침하량에 영향을 주기 이전에 미소변형율의 전단파 속도에 영향을 주기 때문이다(Santamarina et al., 2001).

### 4. 전단파 토모그래피

벤더 엘리먼트는 지향성이 약하기 때문에 토모그래피에 적용할 수 있다. 토모그래피는 그림 7과 같이, 경계

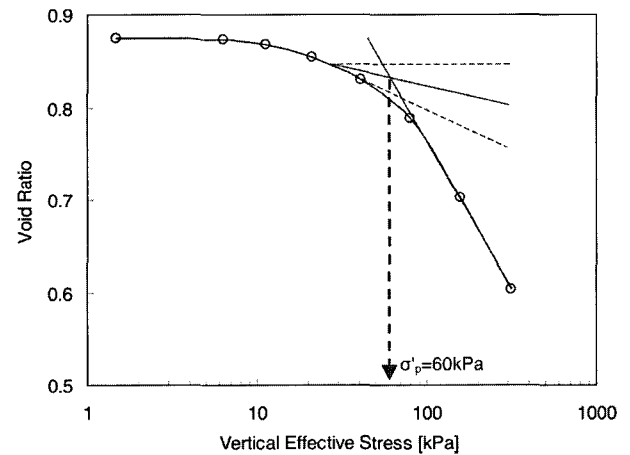
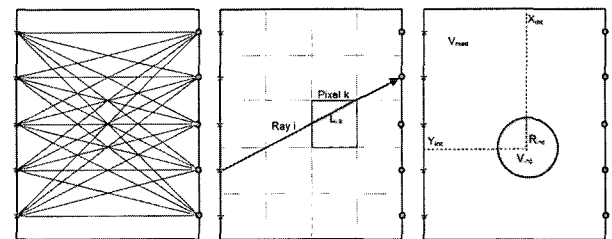


그림 6. 수직유효응력-간극률 관계로부터 선행압밀하중 산정



(a) 크로스홀 토모그래피 측정

(b) 픽셀 표현

(c) Parametric 표현

그림 7. 토모그래피 이미지

에서 발생시킨 파를 다른 쪽 경계면에서 측정하여 내부의 미지의 요소를 픽셀로 표시하거나, 미지의 요소의 크기와 위치의 정보로 표시할 수 있다.

#### 4.1 설계

벤더 엘리먼트를 이용한 토모그래피를 적용하기 위해서는 다음과 같은 여러 가지 특성이 고려되었다.

##### 4.1.1 트랜스듀서

그림 8과 같이 토모그래피의 적용을 위해서 알루미늄 프레임, 나일론 스크류, 벤더 엘리먼트, 그리고 동축선이 필요하다. 첫째, 알루미늄 프레임에 나일론 스크류의 나사산과 동일한 나사산을 제작한다. 둘째, 나일론 스크류에 구멍을 뚫고, 동축선이 연결된 벤더 엘리먼트를 에폭시 등을 이용하여 고정시킨다. 셋째, 프레임을 조립한 후 벤더 엘리먼트가 설치된 나일론 스크류를 프레임에 조립한다. 이와 같은 방법으로 토모그래피용 프레임을 제작할 경우, 고장나거나 오작동하는 벤더 엘리먼트를 쉽게 제거하고 교환할 수 있어 편리하다. 또한 나사산이므로 벤더 엘리먼트를 쉽게 회전시킬 수 있어, 전단파의 polarization 영향을 관찰할 수 있으므로 대상 지반의 이방성 또한 쉽게 조사할 수 있다.

##### 4.1.2 트랜스듀서 설치 간격

추천되는 최적의 벤더 엘리먼트 간격은 Fresnel's

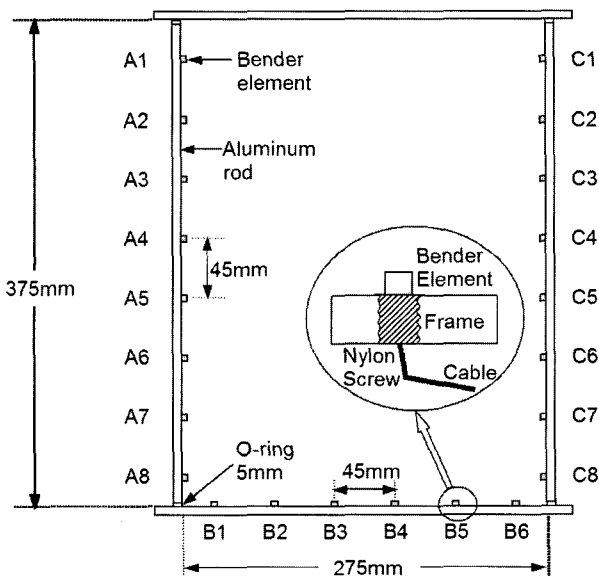


그림 8. 토모그래피 프레임

ellipse에 기초를 두며 이로부터 파장의 절반(1/2)이 얻어진다. 그러나 벤더 엘리먼트의 간격은 파의 이동 시간과 프레임 크기를 고려하여 결정되어야 한다. 본 연구에 사용된 프레임은 그림 8과 같으며 크로스홀 형상에서 벤더 엘리먼트 끝단 간의 거리는 약 263mm, 벤더 엘리먼트의 중심 간 이격 거리는 45mm이다. 보어 홀 형상에서 토모그래피를 구현하기 위하여 하부 프레임에도 벤더 엘리먼트를 설치하였다.

##### 4.1.3 프레임을 통한 진동

발신용 벤더 엘리먼트에서 발생된 파는 프레임을 통하여 전파된 후 수신용 벤더 엘리먼트에서 측정될 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 구리로 제작된 볼트, 고무를 섞은 에폭시, O-링과 와셔를 병행한 나일론 볼트 등과 같은 여러 가지 방법을 적용하였다. 측정된 신호는 그림 9에 나타내었다. O-링과 와셔를 병행한 나일론 볼트를 사용할 경우 프레임을 통한 진동이 거의 측정되지 않았다. 또한 단일 정현파를 입력파로 적용할 경우 진동이 크기가 더욱 감소하였다.

##### 4.1.4 공간적 적용범위와 정보의 내용(Spatial coverage and Information Content)

토모그래피에서는 여러 파의 측정이 중복될 수 있어 많은 수의 측선이 반드시 신호 처리 및 역산 시 over-determined 상태를 의미하는 것은 아니다. 각각의 한 픽셀 내에서 모든 측선에 의해 이동된 전체 길이는 정보에 대한 공간적 분포를 의미한다. 그림 10(a)는 이 연구에 사용된 형상에 대한 모든 측선의 경로를 보여주며 그림 10(b)는 각 픽셀 당 이동 거리에 대한 정보이다. 이와 같은 벤더 엘리먼트의 배열은 단면의 중앙부와 하단부에서

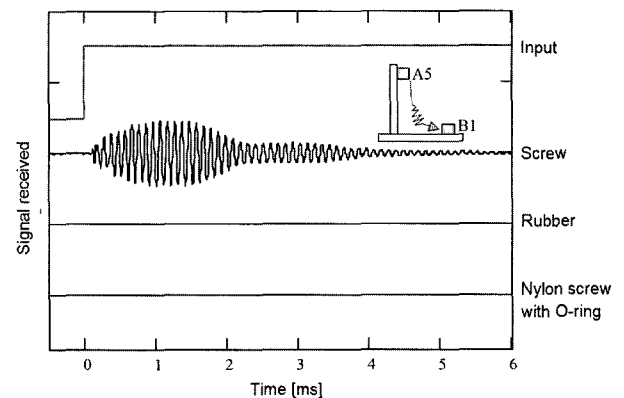


그림 9. 여러 가지 프레임 연결 방식에 대한 프레임을 통한 진동 특성. Source: A5. Receiver: B1

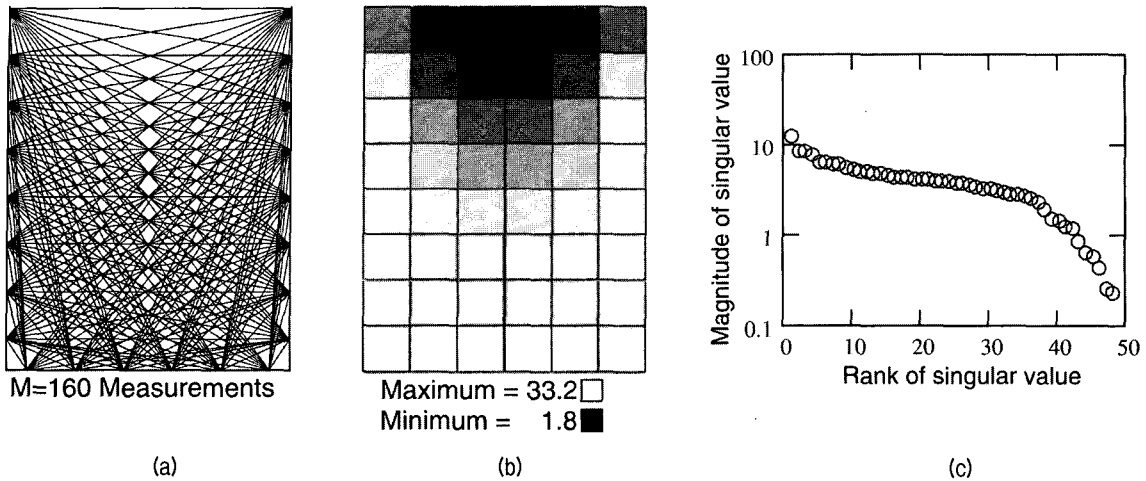
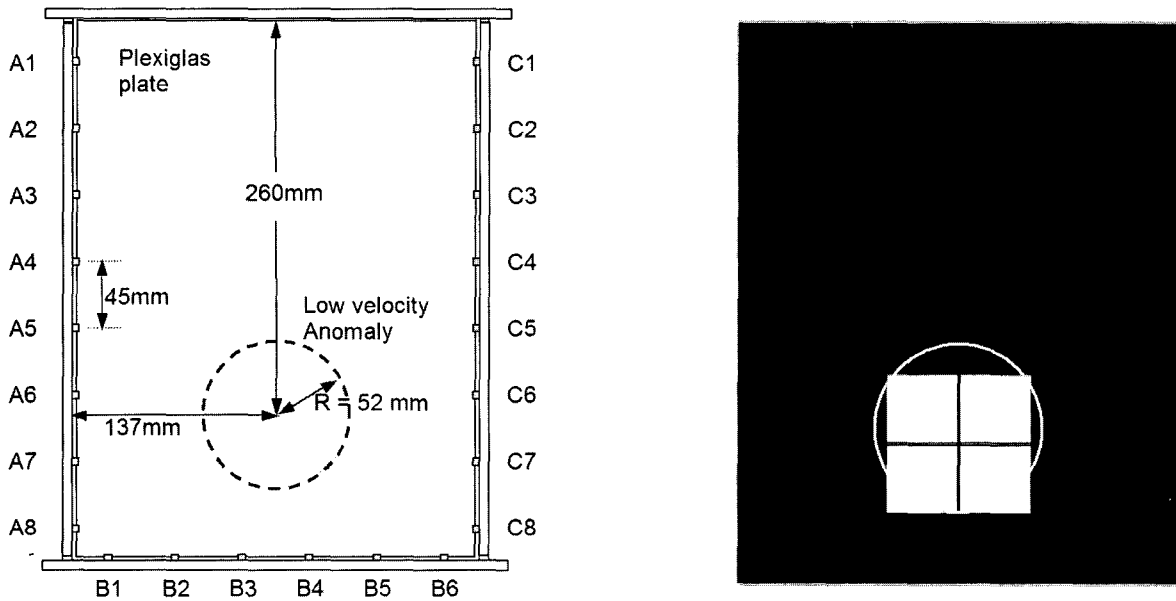


그림 10. 자료 처리: (a) 측선; (b) 공간적 적용범위(Spatial coverage); 각 픽셀의 전체 이동 길이는 픽셀의 너비(43.8mm)로 정규화함; (c) 단일 정보(Singular values)



(a) 시험 장치; 아크릴판 단위: 365×270×3(길이×너비×두께, mm)

(b) 픽셀 표현

그림 11. 낮은 전단파 속도 구간에서 토모그래피 적용

매우 높은 공간적 적용 범위를 보여준다. Decomposition 을 이용하면 독립 방정식의 개수를 알 수 있으며 그림 10(c)에 그림 8과 같은 토모그래피 프레임에 대한 단일 정보를 보여준다.

#### 4.2 토모그래피 적용

낮은 전단파 속도 구간(low velocity inclusion)과 높은 압력 지역(high pressure zone)을 토모그래피를 이용하여 해석하였다.

##### 4.2.1 낮은 전단파 속도 구간(low velocity inclusion)

두께가 3mm인 아크릴 판을 프레임 크기로 절단하고, 그림 11(a)와 같이 벤더 엘리먼트 위에 올려 놓고 토모그래피를 수행하였다. 얇은 판이므로 전단파 대신 Lamb 파가 이용되었지만 원리는 동일하다. 아크릴 판에서 P 파의 속도는 2630m/s이고 S파의 속도는 1370m/s이고, 주파수가 9kHz정도이므로 Lamb 파의 속도는 625m/s로 산정된다(Achenbach 1973; Graff 1975). 우선 구멍이 없는 균질한 판으로 보정 실험을 실시한 후, 반경 52mm의 구멍을 뚫어 낮은 전단파 속도 구간을 인위적으로 제작하였다. 프레임 통해서 전파되는 진동을 최소화 시

키기 위하여 입력파로 단일정현파가 적용되었다.

우선 픽셀을 이용한 토모그래피 이미지는 직측선 (straight ray)이 가정되었으며, 최소제곱해에 라플라시안 스무딩(laplacian smoothing)을 기초한 regularization 행렬을 계산하였다. Regularization 계수는 오차와 픽셀에서의 최대 및 최소값에서의 경향을 고려하여 선정된다. Regularization 계수가 작으면 오차가 작아진다. 반대로 regularization 계수가 커지면 오차가 커지게 되지만, 토모그래피 이미지에서 불균질한 곳(anomaly)의 구별이 어려워진다. 그림 11(b)는 픽셀을 이용한 토모그래피 이미지를 보여준다.

또 다른 방법의 토모그래피는 매질의 속도 즉, 낮은 전단파 속도와 구간의 속도의 크기와 위치의 정보로 표시하는 것이다. 그림 12에 그 결과를 표시하였다. 그림 12로부터 다음과 같은 몇 가지 특이한 사항이 관찰되었다. (1) X좌표보다 Y좌표의 오차 기준(error norm)의 경사가 더 급하다(Santamarina and Reed 1994); (2) 역산된 반경의 크기가 회절로 인한 회복 (diffraction healing) 때문에 조금 작게 선정되었다.

#### 4.2.2 높은 압력 지역(high pressure zone)

그림 13(a)과 같이 세 방향에서의 응력 조절이 가능한

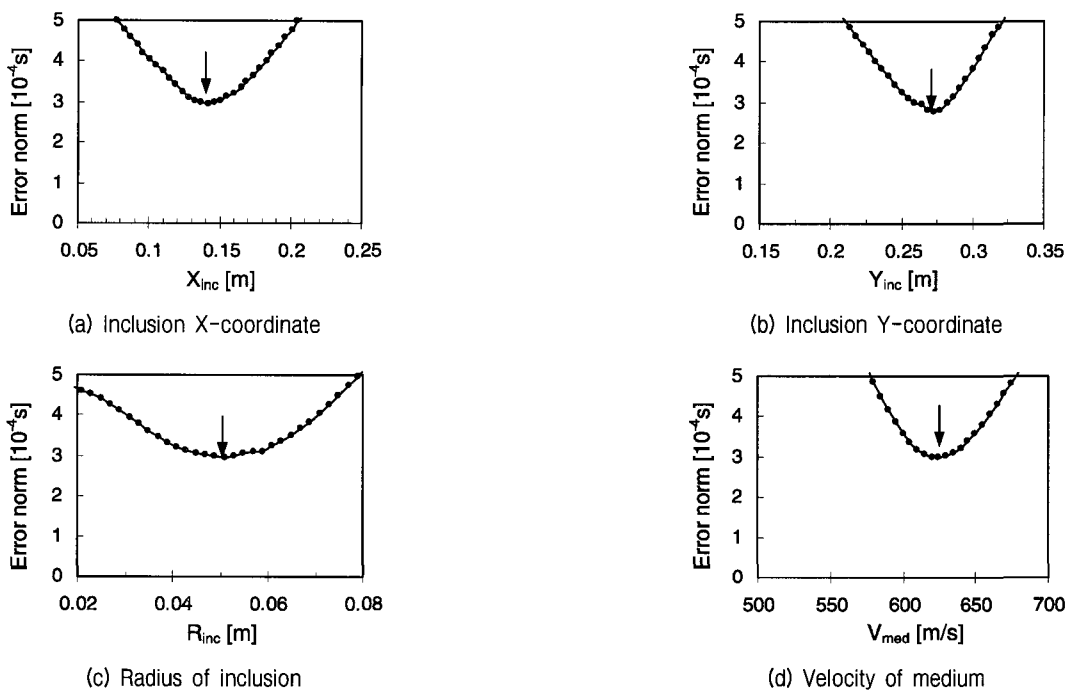


그림 12. Parametric based inversion

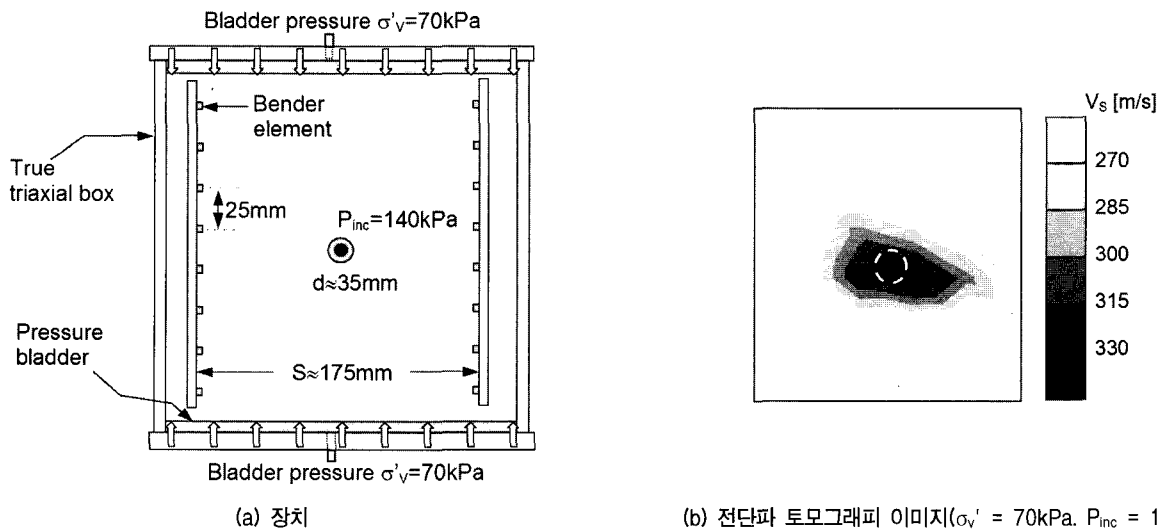


그림 13. 진삼축상자를 이용한 전단파 속도 토모그래피

진삼축상자를 이용하였다. 경계면 응력은 상자의 벽면에 붙여 있는 블래더(bladder)로 조절하였다. 본 토모그래피에서는 그림 13과 같이 각 기둥에 8개의 벤더 엘리먼트를 적용하였다. 강사법으로 모래 지반을 형성하면서 팽창할 수 있는 튜브(초기 직경 35mm)를 지반에 설치한 후 튜브에 외부에서보다 더 큰 압력을 가한 후 압력 크기와 튜브 위치를 산정하는 토모그래피를 수행하였다. 이와 같은 시험은 터널, 현장 시험에서 사용되는 관입기(penetrometer), 말뚝 등을 모델링한 것으로 볼 수 있다. 그림 13(b)에 표시한 것과 같이 수직유효응력이 70kPa이고 튜브 내부의 압력이 140kPa인 경우 픽셀을 이용한 역산 결과, 고압 부분이 분명하게 구별됨을 볼 수 있다(Lee et al., 2005).

## 5. 전단파 트랜스-일루미네이션(Trans-illumination)

토모그래피에서 각각의 트랜스듀서가 발신기와 수신기 될 수 있으며 한번의 실험을 실시하는데 상당한 시간이 소요된다. 따라서 액상화와 같은 현상을 측정하는데 토모그래피는 적합한 방법이라고 할 수 없다. 이와 같은 이유로 트랜스-일루미네이션을 새롭게 제시하였다.

### 5.1 액상화 실험 설계

전단파 트랜스-일루미네이션 장비는 1g상태의 일차원(1D) 액상화에서 평가되었다. 실험은 원형 실린더 탱크(직경 170mm, 높이 270mm)에 그림 14와 같이 다섯

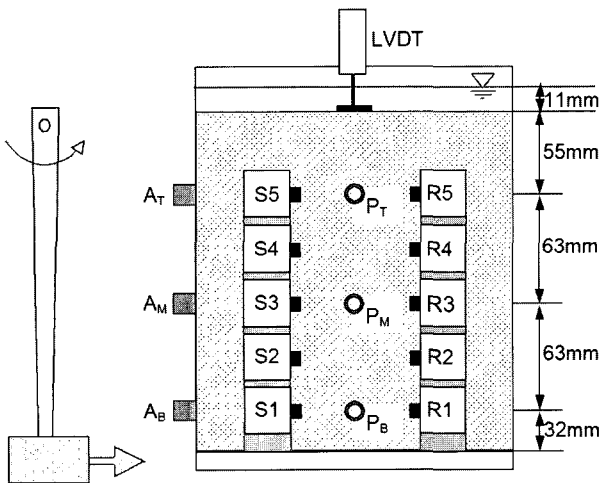


그림 14. 전단파 트랜스-일루미네이션용 액상화 탱크와 측정장비. 아래 첨자 T, M과 B는 각각 Top, Middle 그리고 Bottom을 나타냄; A: 가속도계; P: 간극수압계. S와 R: source와 receiver 벤더 엘리먼트

층의 벤더 엘리먼트를 설치하여 실시하였다. 벤더 엘리먼트의 형상은 토모그래피의 크로스홀과 동일하나, 발신용 벤더 엘리먼트를 동시에 작동시켜 평면파를 발생시킨 후, 흡을 통해서 전파된 전단파를 각각의 벤더 엘리먼트를 통하여 측정하는 것이 토모그래피와 상이하다. 모래 시료는 물 속에서 강사법을 적용하여 조성하였다.

액상화를 유발시키기 위해서 무게 4.4N추를 길이 540mm 막대에 연결한 후 35도 각도에서 자유 낙하시켜 탱크의 바닥을 타격하였다. 이 방법을 적용할 경우 다중 액상화를 동일한 에너지를 이용하여 유발시킬 수 있다. 타격 동안과 타격 후 흡의 반응은 전단파 트랜스-일루미네이션 기법과 다른 보완적인 방법을 이용하여 측정하였다. 또한 3개소에 설치된 가속도계를 이용하여 탱크에 가해진 가속도를 측정하였다.

### 5.2 전단파 트랜스-일루미네이션 결과

타격에 의해 시편은 액상화가 유발되었으며, 각 타격간 시간은 과잉간극수압의 소산과 침하를 고려하여 2분 이상으로 유지하였다. 가속도, 침하, 전기비저항, 간극수압, 전단파 속도와 크기를 측정하였다.

#### 5.2.1 가속도 반응

타격 시 액상화 탱크 벽면 3곳의 위치에서 측정된 전형적인 가속도-시간 관계가 그림 15에 표시되었다. 수평방향의 최대 가속도는 38~53g 정도이며 주파수는 800~1800Hz(우세한 주파수: 1000Hz)이다. 각 가속도계 간 시간 지연은 약 0.5ms 이며 액상화 탱크의 진동은 10ms 이후에 완전히 소멸 되었다.

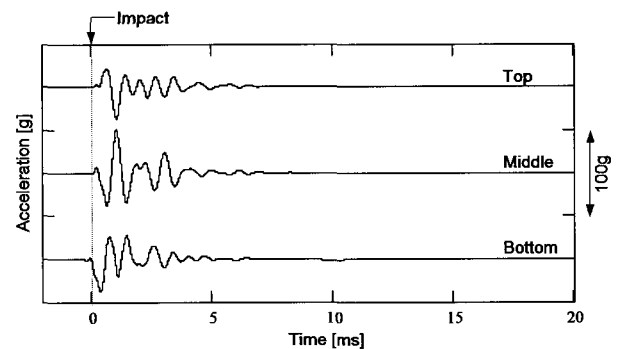


그림 15. 타격 시 3개소에서 측정된 전형적인 가속도 반응



### 5.2.2 타격 시 전단파 전파

매 타격마다 약 1.6초간 전단파를 측정하였다. 입력파는 구형파가 이용되었으며 구형파는 신호 간섭을 고려하여 주기를 약 14ms로 결정하였으며 각 주기당 2번의 전단파를 측정할 수 있어 매 타격당 약 210회의 전단파를 측정하였다. 바닥에 설치된 벤더 엘리먼트에 의해 측정된 전단파의 스냅 사진(snapshot)을 그림 16에 나타내었다. 전단파는 타격 후 완전히 사라졌으며 시간이 경과함에 따라 천천히 회복됨을 볼 수 있다. 즉, 전단파의 이동시간은 점점 짧아지고 전단파의 크기는 시간이 경과함에 따라 점점 커진다.

전단파 속도에 대한 시간에 따른 전개를 그림 17에 나타내었다. Cross-correlation를 통해서 전단파의 속도와 크기를 산정하였다. 전단파 속도는 시료 위보다 바닥면에서 빨리 복원되며 이것은 solidification front의 상향 이동을 보여주는 것이다.

### 5.2.3 과잉간극수압소산과 전단파 관계

동일한 레벨(바닥), 동일한 타격(타격횟수: 40회)에 대하여 과잉간극수압 소산과 전단파 속도 및 크기의 전개를 그림 18에 비교하였다. 그림 18에 나타낸 바와 같이 두 개의 전혀 독립적인 시간 크기가 존재함을 알 수 있다. 즉, 진동과 관련된 아주 짧은 시간 변수(약 6ms)와 과잉간극수압이 소산과 관련된 긴 시간 변수이다. 비록 가속

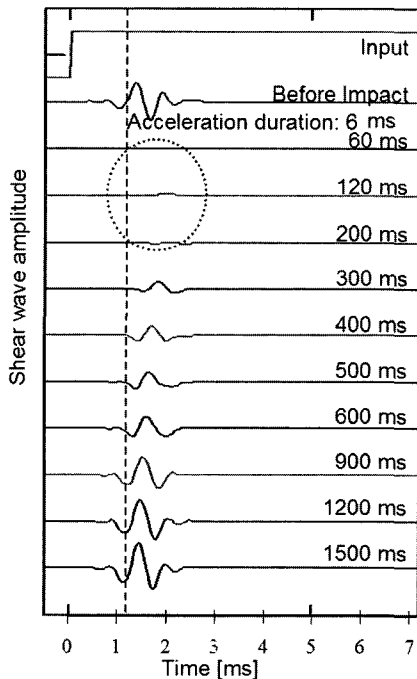


그림 16. 액상화 모니터링을 위한 전단파 트랜스-일루미네이션

도에서 측정된 진동이 매우 빨리 소멸되었지만, 과잉간극수압은 여전히 남아 있고 진동이 완전히 소멸된 후에도 과잉간극수압은 심지어 증가하기까지 한다. Wildlife liquefaction site(Youd and Holzer 1994), 센트리퓨즈 시험(Fiegel and Kutter 1994 Adalier and Elgamal 2002)에서도 유사한 현상이 발견되었다.

전단파 속도와 크기의 전개는 과잉간극수압의 발생 및 소산과 매우 유사한 형상을 나타내고 있다. 즉, 전단파는 입자끼리의 접촉 조건을 강성을 통하여 표시하여 주고 있다(Cascante and Santamarina 1996).

### 5.2.4 연속적인 타격 시 전단파 전파

타격 후 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 전단파 속도의 값을 타격번호와 함께 그림 19에 나타내었다. 깊이가 깊은 곳에서는 유효응력의 크기가 크므로 더 큰 전단

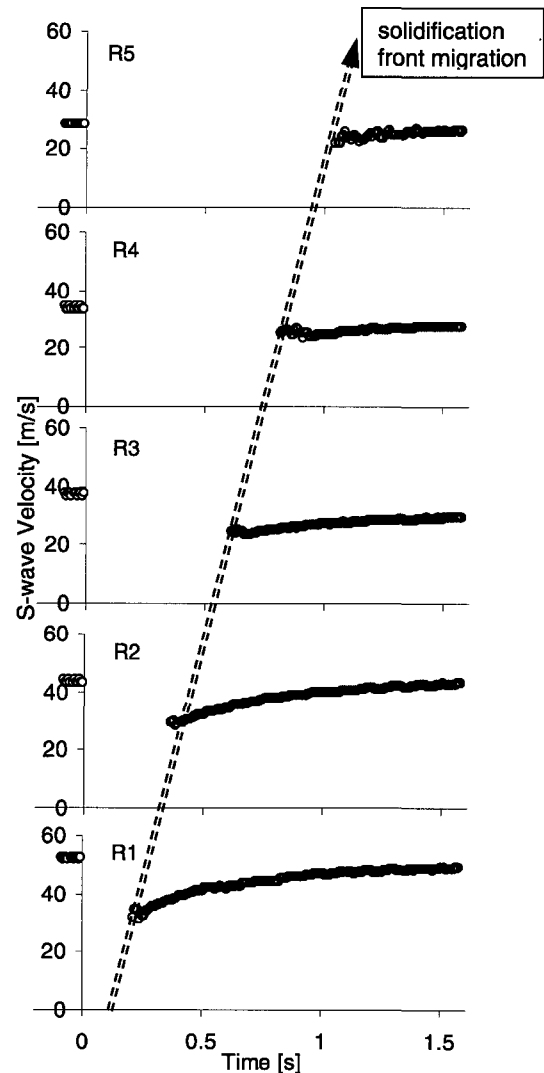


그림 17. 타격 후 전단파 속도의 전개(타격 횟수: 24회)

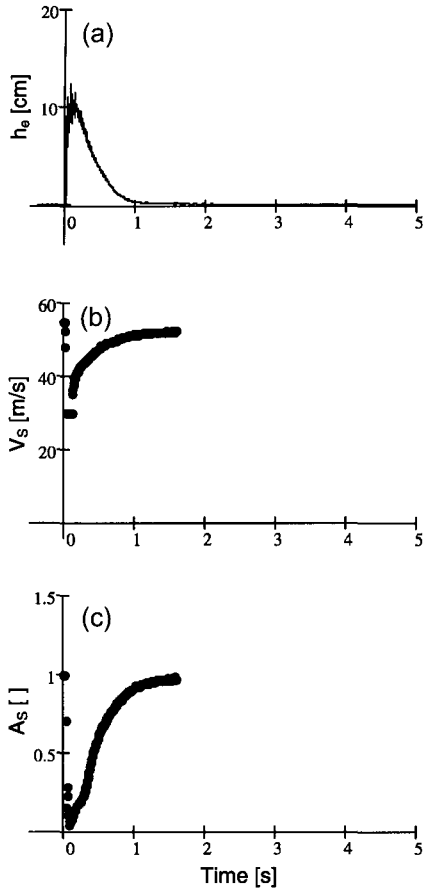


그림 18. 바닥면에서 과잉간극수압과 전단파 비교(타격 횟수: 40회):  
(a) 과잉간극수압 소산: (b) 전단파 속도: (c) 전단파의 크기

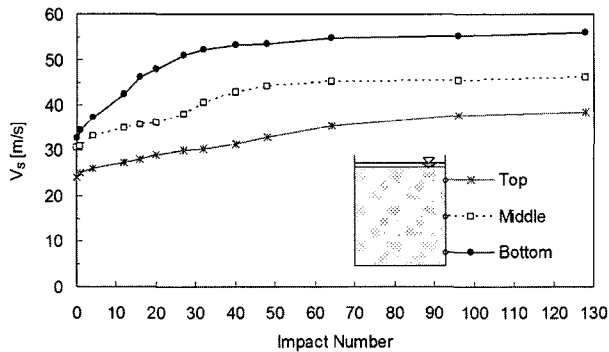


그림 19. 액상화로 인한 과잉간극수압이 완전히 소산된 이후의 전단파 속도와 타격 횟수와의 관계

파 속도가 측정되었다. 본 연구에서 전단파는 이동방향과 입자의 이동 방향이 모두 수평 응력 방향이므로 다음과 같이 전단파 속도가 산정된다(Knox et al. 1982).

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_h + \sigma'_h}{2kPa} \right)^\beta = \alpha \left( \frac{K_o \sigma'_v}{kPa} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서,  $K_o$ 는 정지토압계수이다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 실험적으로 얻어지며 그 관계는 대략적으로  $\beta=0.36-\alpha/700$  이다

(Santamarina et al. 2001).

타격 횟수가 증가함에 따라 전단파의 속도가 증가하며 그림 19에서와 같이 타격회수 128회 이후 전단파의 속도는 액상화 실험을 실시하기 이전보다 약 50~70% 정도 증가하였다. 한편 간극률은 약 16~21% 정도 감소하였다. 이와 같이 전단파 속도의 증가율이 간극률의 감소비보다 큰 이유는 식 (1)에서와 같이 수평응력의 증가가 중요한 요인이라고 볼 수 있다. 그러나 수평방향의 구속이 없는 현장의 경우 이와 같은 이유로 전단파 속도가 증가할 필요는 없을 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 전단파를 이용한 지반 특성 파악의 적용을 다루었다. 본 연구에서의 전단파는 모두 벤더 엘리먼트를 이용하여 발생 및 수신시키는 방식이 이용되었다. 여러 가지 적용의 예로써, 압밀시험 중 하중의 재하 및 제하시기 결정, 응력이력 평가, 낮은 구속응력상태와 높은 구속응력상태에서의 토모그래피, 그리고 토모그래피를 적용할 수 없는 현상의 모니터링 수행할 때 적용할 수 있는 전단파 트랜스-일루미네이션에 대하여 다루었다. 본 논문을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 압밀 시험 시 모래 입자의 형상이 둥근 경우 하중 재하 후 1분이 경과하면 전단파 속도는 거의 일정하게 산정되었으나, 각진 모래의 경우 시간이 약 3분 정도 더 소요되는 것으로 나타났다. 따라서 모래의 경우 입자형상에 따라 하중 재하 및 제하시기를 달리하여야 한다.
- (2) 간극률, 전단파 속도와 압밀 하중 곡선에서 구속 응력에 의한 응력 이력 현상을 확인하였다. 압밀 하중의 제하 시 전단파 속도는 수평방향 응력 구속 현상으로 재하 시 동일한 크기의 압밀 응력에서의 전단파 속도보다 더 크다.
- (3) 압밀 시험을 통하여 선행압밀하중을 산정할 경우, 전단파 속도(유효응력)로부터 산정한 값과 침하량(간극률)으로부터 산정한 값은 비슷하지만 전단파를 이용할 경우 fabric 변화를 감지하므로 침하량에 의한 선행압밀하중보다 약간 작은 값을 산정한다.
- (4) 전단파를 이용한 토모그래피를 위해서는 토모그래

피 프레임이 필요하며 프레임의 설계와 제작을 위해서는 트랜스듀서의 지향성, 트랜스듀서 간의 간격, 정보의 내용(information content)과 공간적 적용 범위(spatial coverage)의 결정이 필요하다. 전단파 토모그래피로 평균유효응력과 관련된 전단파 속도 변화를 관측할 수 있다.

- (5) 전단파 속도를 이용하여 액상화 같은 현상 관측법으로 전단파 트랜스-일루미네이션을 적용하였다. 전단파 속도와 크기의 감소는 액상화 동안 과잉간극수압의 경향과 평행함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 논문은 고려대학교 특별연구비와 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-042-D00315)임을 밝히며 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. 박영호 (2001), *1-g 진동대시험을 이용한 액상화 발생후 과잉간극수압 소산 모델링 및 액상화 대책공법 연구*, 박사학위논문, 토목공학과 서울대학교.
2. Achenbach, J.D. (1973), *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland.
3. Adalier, K., and Elgarnal, A.W. (2002), "Seismic response of adjacent dense and loose saturated sand columns", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, pp.115-127.
4. Alarcon-Guzman, A., Leonards, G.A., Chameau, J.L. (1988), "Undrained monotonic and cyclic strength of sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(10), pp.1089-1109.
5. Arulanandan, K., and Scott, R.F. (1993), "Project VELACS Control test results", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119(8), pp.1276-1292.
6. Ashford, S.A., Rollins, K.M., Lane, J.D. (2004), "Blast-induced liquefaction for full-scale foundation testing", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(8), pp.798-806.
7. Cascante, G., and Santamarina, J.C. (1996), "Interparticle contact behavior and wave propagation", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(10), pp.831-839.
8. Dines, K., and Lytle, J. (1979), "Computerized Geophysical Tomography", *Proceedings of Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Vol.67, No.8, pp.1065-1073.
9. Fernandez, A., and Santamarina J.C. (2001), "Effect of cementation of the small-strain parameters of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.1, pp.191-199.
10. Fiegel, G.L., and Kutter, B.L. (1994), "Liquefaction mechanism for layered soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(4), pp.737-755.
11. Florin, V.A., and Ivanov, P.L. (1961), "Liquefaction of Saturated

- Sandy Soils", *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 17-22 July 1961, pp.107-111.
12. Graff, K. F. (1975), *Wave motion in elastic solids*, Dover Publications.
13. Ishihara, K. (1996), *Soil behaviour in earthquake geotechnics*, OxfordScience Publications, Oxford.
14. Ishihara, K., Huang, Y., and Tsuchiya, H. (1998), "Liquefaction resistance of nearly saturated sand as correlated with longitudinal wave velocity", *Proceedings of the Biot conference on Poromechanics*, Poromechanics A Tribute to Maurice A. Biot. Belgium. pp.583-586.
15. Ismail, M. A. and Rammah, K. I. (2006), "A new setup for measuring Go during laboratory compaction", *Geotech. Test. J.*, 29(4), 1-9.
16. 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.
17. Kokusho, T. (1999), "Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125(10), pp.817-826.
18. Kuwano, R. and Jardine R. J. (2002), "On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains", *Geotechnique*, 52(10), 727-749.
19. 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), pp.336-344.
20. Pennington, D. S., Nash, D. F. T., and Lings, M. L. (1997), "Anisotropy of Go shear stiffness in Gault Clay", *Geotechnique*, 47(3), 391-398.
21. Santamarina, J.C., and Reed, A.C. (1994), "Ray Tomography: Errors and Error Functions", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.32, pp.347-355.
22. 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.
23. Schofield, A.N. (1981), "Dynamic and earthquake geotechnical centrifuge modeling", *Recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla, Missouri, pp.1081-1100.
24. Seed, H.B. (1979), "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquake", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 105(2), pp.201-255.
25. Seed, H.B., and Lee, K.L. (1966), "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, ASCE, 92(6), pp.105-134.
26. Tang, H.T. (1987), *Large-scale soil structure interaction.*, Rep. No. NP-5513-SR, Electric Power Research Institute, PaloAlto, California.
27. Witten, A.J., and Long. E. (1986), "Shallow application of geophysical diffraction tomography", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.24, No.5, pp.654-662.
28. 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.
29. Youd, T.L., and Holzer, T.L. (1994), "Piezometer performance at Wildlife liquefaction site, California", *Journal of Geotechnical*

*Engineering*, ASCE, 120(6), pp.975-995.

30. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F. III, Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. Stokoe, K.H.II. (2001), "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(10), pp.817-833.
31. Zeghal, M., Elgamal, A.W., Tang, H.T., and Parra, E. (1995), "Lotung downhole array II: Evaluation of soil nonlinear properties", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(4), pp.363-378.
32. Zeng, X. and Grolewski, B. (2005), "Measurement of  $G_{max}$  and estimation of  $K_o$  of saturated clay using bender elements in an oedometer", *Geotech. Test. J.*, 28(3), 264-274.

(접수일자 2006. 1. 23, 심사완료일 2006. 7. 6)