

## 벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항

### Principles and Considerations of Bender Element Tests

이 중 섭<sup>1</sup> Lee, Jong-Sub

이 창 호<sup>2</sup> Lee, Changho

#### Abstract

The shear wave velocity is related with the stiffness of granular skeleton and mass density. The shear stiffness of the granular skeleton remains unaffected by the presence of the fluid. Bender elements are convenient shear wave transducers for instrumenting soil cells due to optimal soil-transducer coupling. This study addresses the principles of the shear wave, the design and implementation of bender elements including electromagnetic coupling prevention, directivity, resonant frequency, detection of first arrival, and near field effects. It is shown that electromagnetic coupling effects can be minimized using parallel-type bender elements. Thus, the in-plane S-wave directivity is quasi-circular. The resonant frequency of bender element installations depends on the geometry of the bender element, the anchor efficiency and the soil stiffness. One of the most cumbersome parts in the bender element test is near field effects, which affect the selection of arrival time. The selection of the first arrival within the near field is effectively solved by the multiple reflection technique and signal matching technique. Bender elements, which requires several considerations, may be effective tools for the subsurface characterization by using S-wave.

#### 요 지

전단파는 흙 입자의 강성과 밀도에 연관된다. 흙 입자의 전단 강성은 물의 존재 여부에 영향을 받지 않는다. 벤더 엘리먼트는 흙과 트랜스듀서 간의 뛰어난 결합 효과를 보여 토질 시험 장치에 적용하기에 편리한 전단파 트랜스듀서이다. 본 논문은 전단파의 기본 원리를 살펴본 뒤, 전자기 커플링 방지, 지향성(directivity), 공진주파수, 초동 추정, 근접장 효과 등을 포함하여 벤더 엘리먼트의 설계와 설치에 대하여 다루었다. 전해질 용액 속에서의 전기적 간섭(cross-talk)현상은 병렬 타입의 벤더 엘리먼트를 사용함으로써 최소화 할 수 있다. 캔틸레버 보 형식의 벤더 엘리먼트는 전단파의 지향성은 원형에 가깝게 나타났다. 벤더 엘리먼트의 공진주파수는 벤더 엘리먼트 자체의 특성, 흙의 강성 및 앵커 특성에 의존적인 것으로 나타났다. 벤더 엘리먼트 시험에서 가장 어려운 부분 중의 하나는 전단파의 도착시간에 영향을 주는 근접장 효과이다. 근접장 내에서 전단파의 도착시간 산정은 다중반사법(multiple reflection method)과 signal matching 기술을 적용하여 해결할 수 있다. 여러 가지 고려사항이 요구되는 벤더 엘리먼트는 전단파를 이용한 지반 동적 특성 파악에 매우 효과적인 방법이 될 수 있을 것이다.

**Keywords** : Arrival time, Bender elements, Shear waves, Signal processing, Resonant frequency

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

2 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

전단탄성계수( $G_{max}$ )는 동적 하중 하의 기초의 설계, 액상화평가, 지반개량조절 등을 포함하여 다양한 동적 설계에 관련 있는 유용한 토질정수이다. 이러한  $G_{max}$  값은 피에조일렉트릭 트랜스듀서를 이용한 전단파 속도로부터 구할 수 있다.

표준 전단파 피에조일렉트릭 트랜스듀서는 약한 전단파 지향성, 흡과 낮은 커플링 효과, 높은 작동 주파수, 흡과 트랜스듀서 간의 높은 임피던스 mismatch로 흡에서 전단파 속도 측정을 위한 피에조일렉트릭 트랜스듀서로 적절하지 못하다. 벤더 엘리먼트는 이러한 문제를 해결할 수 있다. 얇은 두 개의 피에조 세라믹판과 금속판을 겹쳐서 만든 벤더 엘리먼트는 거의 모든 토질 시험 장치에 설치할 수 있다. Shirley & Hampton(1978), Shirley(1978)에 의해 벤더 엘리먼트를 토질시험에 처음 적용된 이후 Dyvik & Madshus(1985)는 벤더 엘리먼트와 공진주 시험에 의해서 측정된  $G_{max}$ 가 동일하다고 하였다. 그러나 벤더 엘리먼트의 적용에는 흡을 통한 전자기 커플링으로 인한 전기적 간섭, 압축파와 전단파의 혼합 전달, 근접장 효과, 초동의 불확실성 등을 포함하여 몇 가지 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 전단파의 기본원리와 전단파의 발생과 수신을 위해 널리 적용되고 있는 벤더 엘리먼트 시험의 원리와 고려 사항에 대하여 서술하였다.

# 2. 전단파 속도와 응력 관계

모세관 현상을 무시할 수 있는 경우, 유효응력이 비고결화된 흙의 전단탄성계수를 지배하게 된다. 전단탄성계수는 전단파의 속도와 관련되며, 전단파의 속도는 파가 전파되는 방향과 입자가 움직이는 방향의 유효응력에 영향을 받게 된다(Roesler 1979; Knox et al. 1982; Yu and Richart 1984). 유효응력으로 표시하면, 전단파 속도는 다음과 같다.

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

여기서,  $\sigma'_o = (\sigma'_p + \sigma'_m)/2$ 이며,  $\sigma'_p$ 는 파가 전파되는 방향의 유효응력이며,  $\sigma'_m$ 은 입자가 움직이는 방향의 유효응력이다.  $Pa$ 는 대기압이며 유효응력과 단위가 같

다. 알파( $\alpha$ )와 베타( $\beta$ )는 실험적으로 결정되는 계수들이며 알파계수와 베타지수는  $\beta = 0.36 - \frac{\alpha}{700}$ 의 관계를 표시할 수 있다 (Santamarina et al. 2001). 일반적으로 알파( $\alpha$ )의 값은, 둥글고 부드러운 입자의 경우와 조밀한 모래의 경우 0.16~0.20정도이며, 느슨한 모래이거나 각진 입자의 경우 0.25 정도이며, 소프트 점토의 경우 0.3, 과압밀 점토와 고결화된 흙의 경우 0.15정도이다.

그림 1과 같이 압밀 시험장치의 상판과 하판에 벤더 엘리먼트를 설치하여 압밀시험 중에 전단파를 측정하였다. 모래의 압밀시험 중에 측정된 전단파와 수직 유효응력관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(b)는 그림 2(a)를 x-축과 y-축을 대수로 바꾼 것이다. 그림 2(b)에서와 같이 전단파 속도와 유효응력 관계는 대수 축에서 선형관계로 나타난다. 즉, 전단파 속도로부터 유효응력을 산정할 수 있음을 의미한다. 그러나 속도와 유효응력관계가 선형이 아닌 비선형관계이므로, 전단파 속도로부터 유효응력을 산정할 때에는 주의가 요구된다.

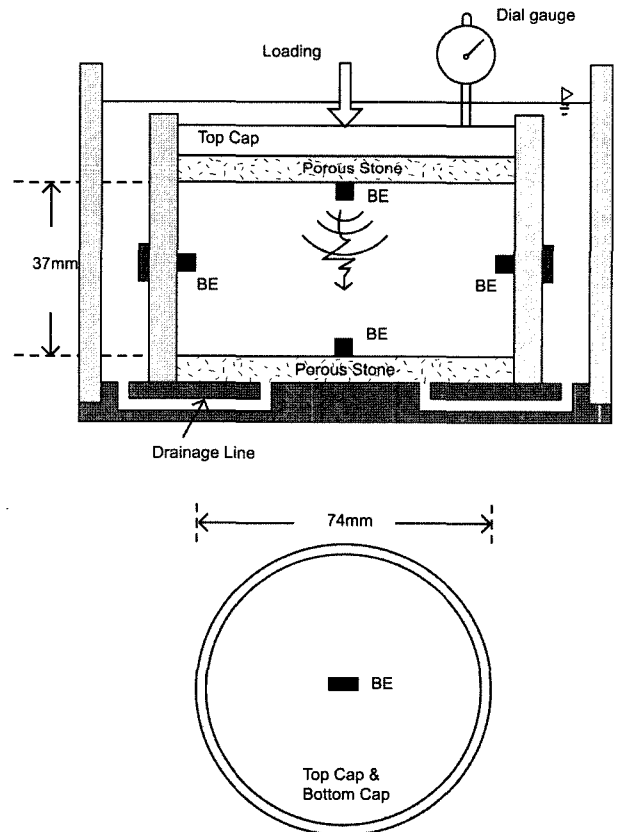


그림 1. 벤더 엘리먼트를 설치한 압밀 시험 장치

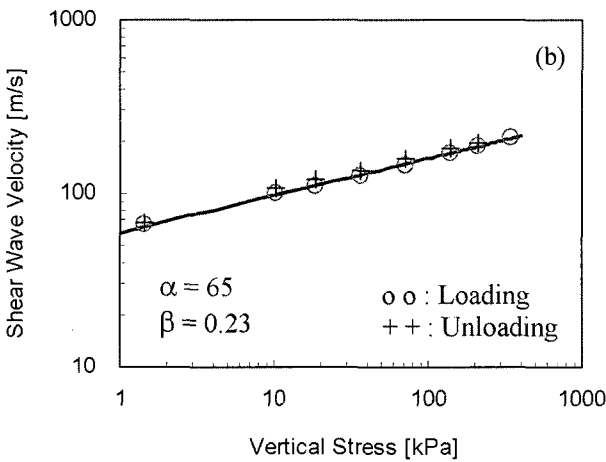
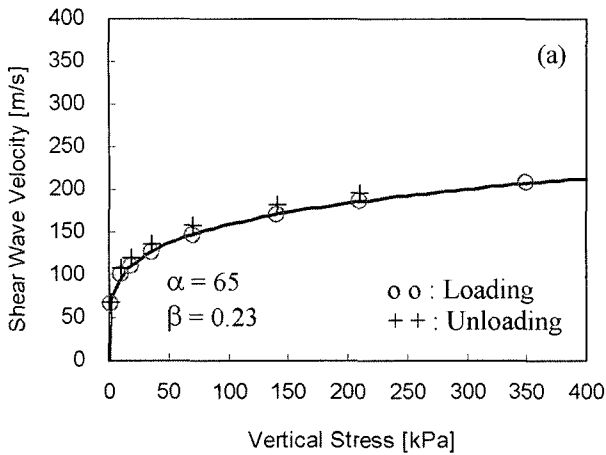


그림 2. 전단파 속도와 수직유효응력 관계(상대밀도 46%인 모래지반)

### 3. 벤더 엘리먼트 시험 시 고려 사항

#### 3.1 벤더 엘리먼트의 선택

일반적으로 사용되는 벤더 엘리먼트는 금속판에 대칭으로 압전소자를 붙이고 바깥쪽에 니켈 등의 전극이 설치된 것으로 압전소자의 poling 방향에 따라 직렬 형식과 병렬 형식으로 분류된다(그림 3 참조). 직렬 형식은 그림 3(b)와 같이 제작에 용이하여 건조시킨 모래 지반에서 실험을 실시할 경우 많이 적용되어 왔으나 전해질 용액 속에서 조성된 모래나 점토에서 실험을 실시할 경우 그림 4(a)와 같이 벤더 엘리먼트 간의 전기적 간섭 현상이 발생하여 시험 결과 해석이 불가능해질 수 있어 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 차폐와 접지가 요구된다. 그러나 그림 3(c)와 같이 병렬 형식의 벤더 엘리먼트를 이용하면 차폐와 접지 없이도 그림 4(b)의 전기적 간섭 문제를 해결하거나 상당히 감소시킬 수 있어 병렬 형식의 벤더 엘리먼트의 사용이 점점 증가하고 있는 추

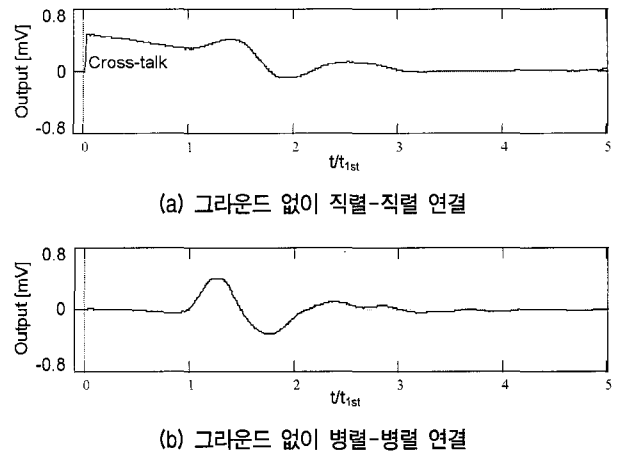
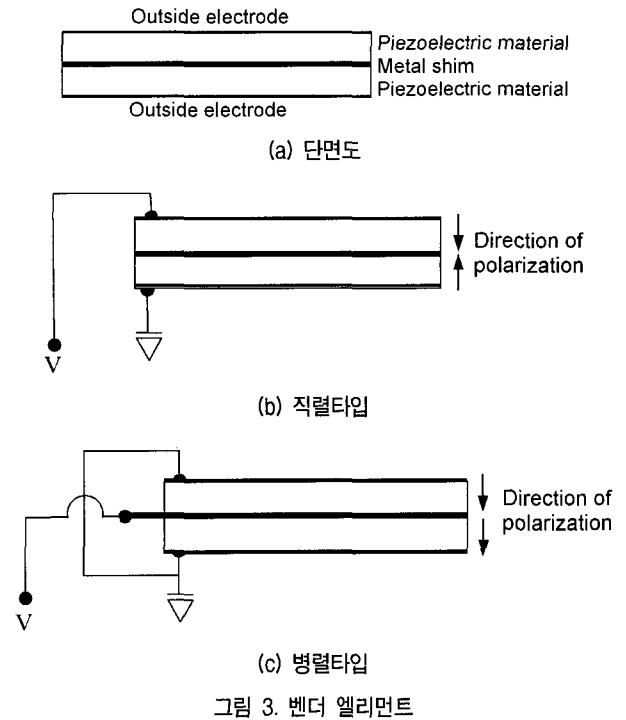


그림 4. 전기적 간섭 효과("t<sub>1st</sub>"는 전단파의 초동 시간을 나타냄)

세이다(Lee and Santamarina 2005).

#### 3.2 지향성(Directivity)

모든 트랜스듀서는 지향성으로 정의되는 어떤 방향으로 에너지를 발산한다. 파동 분야에서 지향성은 발신기에서 생성된 파가 특정 방향으로 얼마나 더 많이 전파되는지를 나타내는 지표이다. 따라서 실험의 목적에 따라 지향성의 조절이 필요하다. 지향성의 특성을 살펴보기 위하여 압축파 트랜스듀서(Panametrics A3441)와 본 논문에서 사용된 벤더 엘리먼트의 지향성을 그림 5에 나타내었다. 첫 번째, 압축파의 지향성을 알아보기 위해

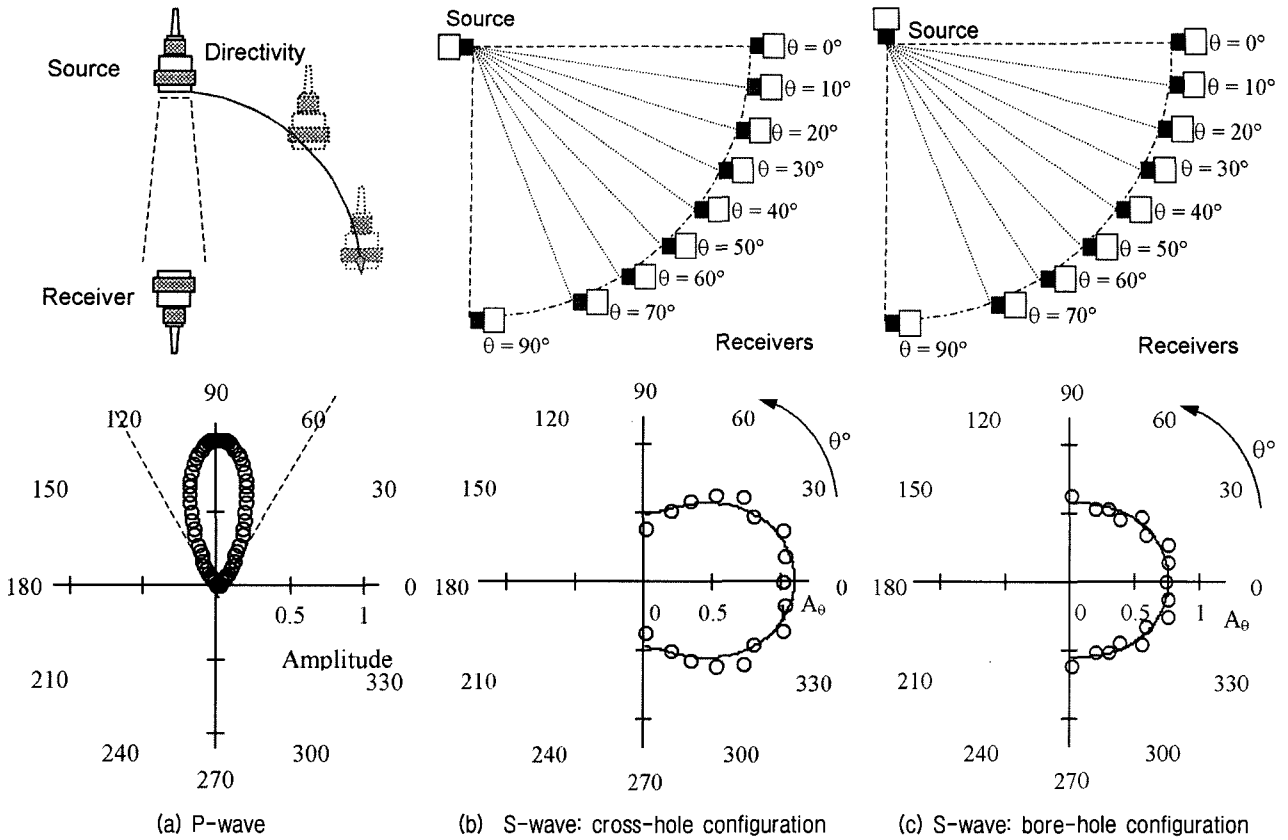


그림 5. 트랜스듀서의 지향성(directivity)

발신기와 수신기의 중심축간 거리를 고정시킨 후 원형 반경을 따라 회전시키면서 수중에서 측정하였다. 두 번째, 벤더 엘리먼트의 끝단 간의 거리를 150mm로 고정 되도록 하였으며 동일한 응력상태와 동일한 감쇠 조건에서 시험을 수행하기 위하여 원형 모양의 배열로 벤더 엘리먼트를 설치한 후 전단파의 지향성을 조사하였다. 입력파로서 압축파의 경우는 임펄스(impulse)가 사용되었으며, 전단파의 경우는 구형파(square wave)가 적용되었다. 지향성은 수신된 신호의 최대 진폭향으로 나타내었다.

그림 5에 나타난 것과 같이 압축파 트랜스듀서는 매우 강력한 지향성을 보여주고 있다. 이와 같이 지향성이 큰 경우 반사파 탐사에서 수평방향의 해상도를 높일 수 있다. 그러나 본 논문에 사용된 벤더 엘리먼트의 경우, 크로스홀 형상에서 지향성이 보여줄 형상보다 크게 나타나지만, 두 가지 형상 모두에서 전반적으로 지향성이 낮은 것으로 나타났다. 즉, 매우 광범위한 방향에서 전단파의 측정이 필요한 경우 벤더 엘리먼트가 상당히 효과적인 트랜스듀서가 될 수 있음을 의미하며 토모그래피에 벤더 엘리먼트를 적용할 수 있다는 의미

가 된다.

### 3.3 공시체 크기

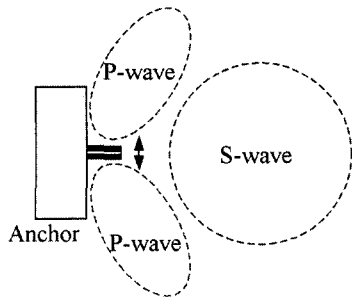
벤더 엘리먼트는 캔틸레버 보 형식으로 주로 사용된다. 이와 같은 이유로 그림 6(a), (b)에서와 같이 벤더 엘리먼트는 측면 방향으로 전파되는 압축파와 앞면으로 전파되는 전단파를 동시에 발생시킨다. 압축파의 속도가 전단파의 속도보다 일반적으로 빠르기 때문에 그림 6(c)와 같이 시편의 측면을 통해 반사된 압축파가 전단파를 간섭하는 현상이 발생할 수 있다. 압축파와 전단파의 속도 비율 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2)$$

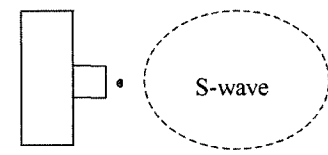
시편의 압축파와 전단파가 간섭현상이 최대인 시편의 반경은 벤더 엘리먼트 끝단 간의 거리 H와 포아송비  $\nu$ 로부터 다음과 같이 표현된다.

$$R = \frac{1}{2\sqrt{1-2\nu}} H \quad (3)$$

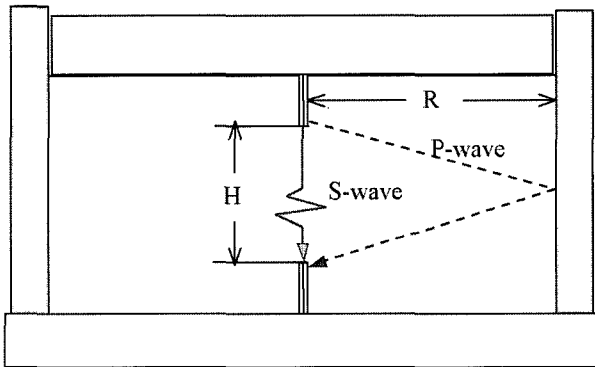
진조한 흙이나 불포화토인 경우, 포아송비( $\nu$ )가 약 0.1정도이므로, 요구되는 반경은  $R > 0.56H$  정도이며, 완전 포화된 흙의 경우 포아송비( $\nu$ )가 약 0.5이므로  $R > 3.7H$



(a) 가로방향(Transverse direction)



(b) 세로방향(In-plane direction)



(c) 파의 간섭(Wave interference)

그림 6. 벤더 엘리먼트의 지향성(Directivity of a bender element)

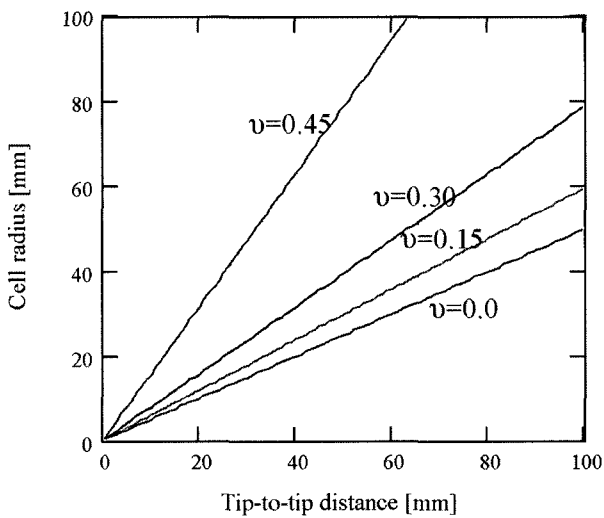


그림 7. 공시체 크기와 끝단 간 거리

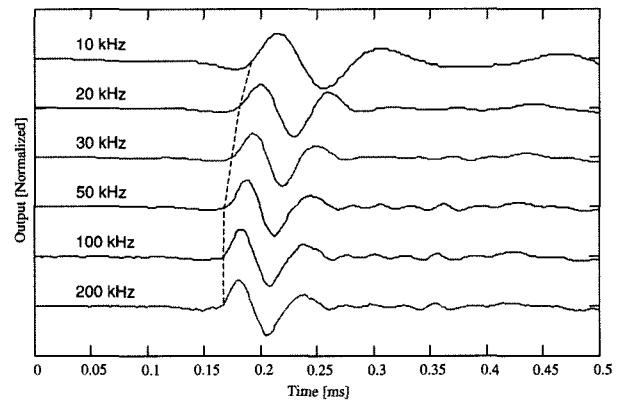
정도가 되어야 한다(그림 7 참조).

### 3.4 필터링

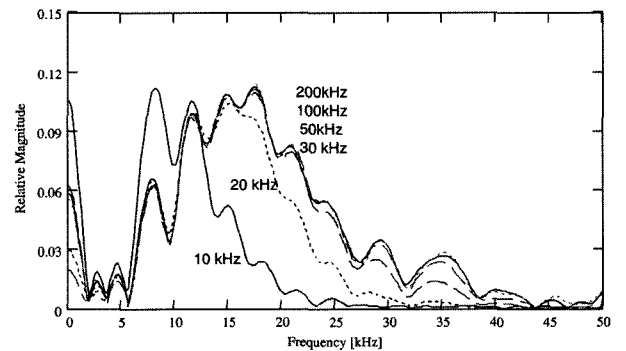
로우패스 필터는 고주파수의 잡음을 없애기 위해 종종 사용된다. 그러나 필터를 사용함으로써 시험 결과 자체에 상당한 영향을 줄 수 있다. 컷오프 주파수를 변경하면서 측정된 로우패스 필터링 효과(Krohn-Hite model 3364)를 그림 8에 시간영역과 주파수영역으로 나타내었다. 컷오프 주파수가 작은 경우 전단파의 도달시간이 길어지고(즉, 속도가 작게 산정됨) 공진주파수가 원래 신호보다 작아짐을 알 수 있다. 그림 8에서 나타난 바와 같이, 실험에 사용된 벤더 엘리먼트의 공진주파수가 약 5kHz이었음을 감안하면, 로우패스 필터링에 사용되는 최소의 컷오프 주파수는 공진주파수보다 충분히 커야 함을 알 수 있다.

### 3.5 스택킹(Stacking) 효과

주변의 고주파수 잡음을 효과적으로 제거하기 위해



(a) 컷오프 주파수에 따른 측정된 파형의 영향



(b) 파워스펙트럼(그래프 상의 같은 로우패스 필터의 컷오프 주파수를 의미)

그림 8. 로우패스 필터링효과(켄틸레버 길이: 2mm)

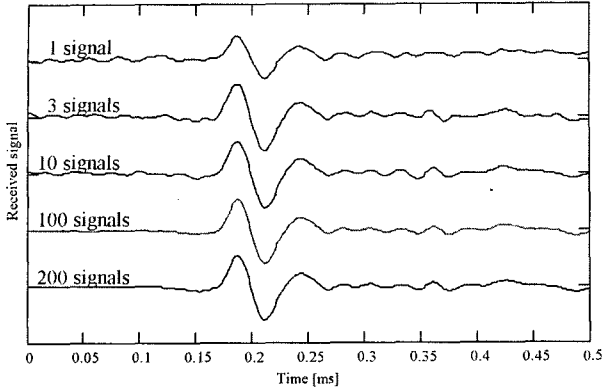


그림 9. 스택킹 효과(캔틸레버 길이: 2mm, 그래프 상의 값은 스택킹 횟수를 의미)

서 사용되는 방법이 스택킹이다. 평균을 취해야 하는 신호의 숫자는 신호-잡음비와 관련되며, 통상적으로 2~200개 정도의 신호가 벤더 엘리먼트 실험에서 이용된다. 그림 9에 스택킹 개수에 따른 측정된 신호를 나타내었다. 측정된 전단파 신호는 스택킹 개수가 증가함에 따라 점점 선명해지며, 고주파수의 주변 잡음이 제거됨을 알 수 있다. 스택킹 횟수는 전단파의 도착시간에 영향을 주지 않음을 또한 알 수 있다.

### 3.6 주파수

벤더 엘리먼트의 공진 주파수는 근접장의 크기, 전단파의 도착시간, 해상도, 그리고 skin depth에 영향을 준다. 그러므로 공진주파수는 벤더 엘리먼트의 설치를 위한 설계상수 결정에 중요한 역할을 한다.

공기 중에서 벤더 엘리먼트의 고유주파수는 캔틸레버 보의 고유주파수와 같으므로, 벤더 엘리먼트 자체의 탄성계수( $E$ ), 단면 2차 모멘트( $I$ ), 단위 길이 당 질량( $\bar{m}$ )이고 길이가  $L$ 인 경우, 고유 주파수는 다음과 같이 표현된다(Meriovich 1967).

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.874^4 E_b I}{\bar{m} (\alpha L_b)^4}} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 벤더 엘리먼트를 지지하는 앵커 효율에 영향을 받은 유효 길이 인자로서 완벽한 강성 앵커인 경우는 1이며, 앵커가 느슨한 경우 1보다 큰 값을 나타낸다.

한편 벤더 엘리먼트가 흙 속에 설치된 경우에는 벤더 엘리먼트 자체와 주변 흙의 응력상태에 영향을 받게 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

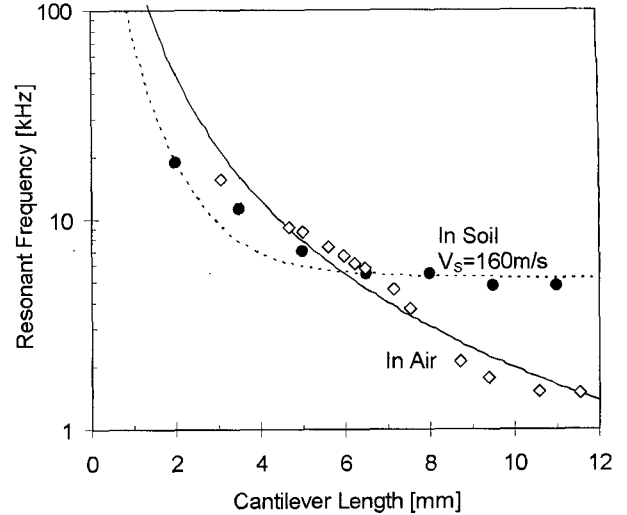


그림 10. 공기 중 및 흙 속에서 캔틸레버 길이에 따른 벤더 엘리먼트의 공진. 실선과 점선은 해석해, 점들은 측정된 값을 의미, 작용 유효연직응력: 148kPa

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1.875^4 \frac{EI}{L^3} + 2V_s^2 \rho_{st} (1+\nu)L}{\rho_{be} b t L + \rho_{st} b^2 L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

여기서,  $V_s$ 는 흙에서의 전단파 속도,  $\rho_{st}$ 은 흙의 단위 질량이며,  $\rho_{be}$ ,  $b$ ,  $t$ 는 벤더 엘리먼트의 단위 질량, 폭 및 두께이다. 벤더 엘리먼트의 길이를 변경하면서 측정된 주파수의 실험 결과와 식 (4) 및 (5)로 산정한 공진주파수 유사하게 나타난다(Lee and Santamarina 2005). 그림 10은 캔틸레버 길이에 따른 실험 결과, 공진주파수를 나타낸 것으로, 벤더 엘리먼트의 길이가 길어짐에 따라 공진주파수가 벤더 엘리먼트 자체보다도 흙에 영향을 받음을 알 수 있다.

### 3.7 Mis-alignment 영향

벤더 엘리먼트를 압밀 셀에 설치하여 실험할 경우, 시료의 비균질성으로 인하여, 시험 도중 상부 캡이 기울어

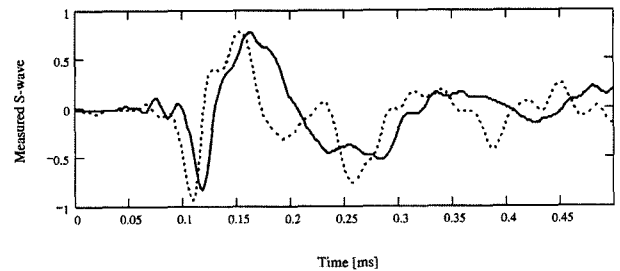


그림 11. Mis-alignment 영향. 실선은 상부 캡이 수평으로 놓은 경우, 점선은 상부 캡이 경사진 경우를 나타냄

질 수 있으며 이로 인하여 측정된 전단파에 이상이 발생할 수 있다. 그림 11은 상부 캡이 압밀셀 중앙에 수평으로 위치한 경우와 시험 도중 시편의 부등침하 등의 이유로 상부의 캡에서 부등침하가 발생하여 상부의 캡이 기울어진 경우이다. 그림 11과 같이 수평에서 벗어난 경우, 전단파의 이동 거리에 대한 신뢰도가 떨어지며 또한 전단파의 형상뿐만 아니라 도착시간도 변하게 되어 측정된 전단파 속도에 대한 신뢰도가 크게 저하될 수 있다.

### 3.8 전단파 속도와 진폭

일반적으로 벤더 엘리먼트는 전단파 속도를 산정하는데 적용할 수 있다. 또한 그림 5에서와 같이 광범위한 방향으로 전단파가 전파되므로 토모그래피에 효과적으로 벤더 엘리먼트가 적용되어 왔다(Lee et al. 2005). 전단파 속도를 적용할 경우 도착 시간만 산정하면 토모그래피를 적용할 수 있지만, 진폭을 적용할 경우 벤더 엘리먼트에서의 커플링, 앵커링, 코팅 두께 등에 영향을 받게 되므로 신뢰성 있는 토모그래피 결과를 얻을 수 없게 된다.

### 3.9 전단파 속도 계산

벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 속도를 구할 때 전단파의 이동 거리와 전단파의 도착시간이 사용된다. 전단파의 이동 거리는 표 1과 같이 대부분의 연구자들에 의해 끝단 간의 거리인 것으로 밝혀졌다. 특히, 공진주 시험 결과와 비교하여(Dyvik and Madshus 1985), 전단파의 이동 시간과 시편의 길이를 비교하여(Viggiani and Atkinson 1995a), 토모그래피 분석을 통하여(Fernandez

2000) 끝단 간의 거리가 전단파의 이동 거리임으로 밝혀졌다. 그러나 벤더 엘리먼트를 사용하여 전단파 시험을 수행할 경우, 실험이 대부분 근접장 내에서 수행되어 도착시간 산정에 큰 어려움을 겪게 된다. 일반적으로 근접장 내에서 수신된 파의 형상은 그림 12와 같으며, 전단파의 도착시간을 A, B, C, 또는 D중에서 선택하여야 한다. 많은 연구자들이 이에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 입력파가 구형파 또는 임펄스파인 경우 표 2와 같이, 입력파가 단일정현파인 경우 표 3과 같이 정리된다. 따라서 전단파의 도착시간은 입력파의 파형, 벤더 엘리먼트의 설치 방법 등에 영향을 받는 것으로 나타났다.

이와 같은 근접장 내에서 전단파의 도착시간 산정의 어려움은 실험적 방법과 수치해석방법을 적용하여 해결할 수 있다. 우선 실험적 방법에서는 그림 13(a)와 같이 다중반사법을 적용하여 산정할 수 있다. 이 방법에서는 반사계수를 증가시키기 위하여 흡과 임피던스 불일치가 큰 스테인레스 철판을 적용하였다. 상부 스테인레스 철판에 설치된 벤더 엘리먼트에서 발생된 전단파가 하부 스테인레스 철판에 설치된 벤더 엘리먼트에서 감지되어 그림 13(b)와 같이 1st event로 측정된다. 또한 전단파가 하부 스테인레스 철판에서 반사되어 상부로 전파된 후 상부 스테인레스 철판에서 다시 하부로 전파되어 그림 13(a), (b)의 2nd event로 벤더 엘리먼트에 측정되어 그림 13(b)와 같은 신호로 표시된다. 이 방법을 적용하면, 파의 이동거리는 항상 스테인레스 철판간의 거리의 2배에 해당되며, 1st event와 2nd event는 cross-correlation을 통하여 산정할 수 있다.

Cruse and Rizzo(1968)가 개발한 수학적 모델을 적용하여 Aki & Richards(1980)가 발전시키고 Sanchez-Saliner(1986)

표 1. 벤더 엘리먼트실험에서 전단파의 이동거리

Length	Reference	Verification
Between mid-heights of the free end	Fam and Santamarina (1995)	No Test
Tip-to-Tip	Dyvik and Madshus (1985)	$G_{max}$ from bender element is same with $G_{max}$ from resonant column test when tip-to-tip distance is used.
	Viggiani and Atkinson (1995)	Travel time versus sample length is plotted at 3 different stress states. As the line is straight and the intersection point is the bender element length, the travel length is tip-to-tip distance.
	Lohani <i>et al.</i> (1999)	Viggiani and Atkinson (1995)'s result is adopted.
	Fernandez (2000)	The shear wave velocity should be uniform in the uniform soil condition in the tomography analysis. Analysis using the tip-to-tip distance renders the most uniform S-wave velocity.
	Kawaguchi <i>et al.</i> (2001)	Dyvik and Madshus (1985) Viggiani and Atkinson (1995)'s result is adopted.

표 2. 입력파가 구형파인 경우의 전단파의 도착시간

Method	Reference	Method	Remarks
Point A	Abbiss (1981)*	It is based on S-wave polarization	It is easy to detect. However, P waves within near field also reverse (Gohl and Finn 1991, Viggiani and Atkinson 1997).
	Fam and Santamarina (1995) Santamarina and Fam (1997)	Shear wave arrival is corroborated by reversed polarity of input wave	
Point B	Dyvik and Madshus (1985)	First significant jump corresponds to the first arrival.	
	Viggiani and Atkinson (1995a)	After comparison cross correlation, cross spectral density of the sine wave, for simple analyses	This method still estimates smaller 1 <sup>st</sup> arrival time than sine wave input. Point C is near to the sine wave results.
	Jovicic <i>et al.</i> (1996) Jovicic and Coop (1997)	Near field effect is until Point B. Analytical solution by Sanchez-Salinerio <i>et al.</i> (1986)'s method is adopted.	This approach is correct when the $d/\lambda$ is 1.
Point C or b/w Point B and D	Lohani <i>et al.</i> (1999)	After comparison sine wave result (zero-to-zero point after first peak).	This method is good when the $d/\lambda$ is larger than 2
	Wood & Stokoe (1985)** Mancuso <i>et al.</i> (1989)**	From the cross correlation between two receivers, reversed polarity makes reversed traces in the crosshole records.	While this method looks like Abbiss' (1981) method, they choose Point C as first arrival.
	Blewett <i>et al.</i> (1999)	After comparison continuous sine wave result (peak-to-peak).	Point C is near the sine wave result.
	Kawaguchi <i>et al.</i> (2001)	While specimen height is different, G value should be same. And Vs should be same.	This method is good when the $d/\lambda$ is larger than 2

\* Abbiss (1981) used pendulum to generate S-wave. \*\* Wood & Stokoe (1985) and Mancuso *et al.* (1989) used borehole hammer.

표 3. 입력파가 단일정현파인 경우의 전단파의 도착시간

Method	Reference	Method	Remarks
Polarity	Brignoli <i>et al.</i> (1996)	First intense signal with same polarity for the input wave is the first arrival	This method suggests Point B as the first arrival.
First arising point	Jovicic <i>et al.</i> (1996)*	High frequency input can remove near-filed at the numerical and experimental solution.	
Peak-to-peak	Lohani <i>et al.</i> (1999)	Peak-to-peak at the high frequency is the first arrival.	Arrival time is underestimated at the very high frequency and negative arrival time can be measured at the very low frequency.
Resonance	Jovicic <i>et al.</i> (1996)**	Resonance frequency is used as input sine wave. Peak-to-peak or troughs-to-troughs in the resonance is first arrival.	It is easy to pick up the 1 <sup>st</sup> arrival.
Cross correlation or Cross spectral density	Viggiani and Atkinson (1995a)	Cross correlation between input and output sine wave	Sine input wave renders sine output wave. Cross correlation between input and output is not always accurate result (Santamarina 1997). Mancuso <i>et al.</i> (1989) algorithm is used.
Phase sensitive detection	Blewett <i>et al.</i> (1999)** Blewett <i>et al.</i> (2000)	Multiplication and filtering between reference input and output signal. From the changes in phase angle ( $d\theta$ ) and the input wave frequency ( $f$ ), the change in arrival time is $dt=d\theta/(360*f)$ .	Blair and Sydenham (1975) suggested this method. The concept is completely same as cross correlation technique.
Least variation with frequency	Lohani <i>et al.</i> (1999)	Frequency is adjusted to get velocity. Zero-zero after first peak is most stable with frequency	Arrival time by this method is similar to resonance method.
Analytical Solution	Sanchez <i>et al.</i> (1986)	Cruse and Rizzo (1968)'s analytical solution is adopted. The first arrival depends on the $d/\lambda$ .	

\*\*\*Jovicic *et al.* (1996) and Blewett *et al.* (1999) and Blewett *et al.* (2000) used continuous sine wave.



가 식 (6)과 같이 정리한 방법을 적용하여 주파수에 따른 이론적인 전단파 속도  $V(\omega)$ 를 산정하였다.

$$V(\omega) = \frac{1}{4\pi\rho(V_s^*)^2} \left[ \left( 1 + \frac{V_s^*}{j\omega L} - \left( \frac{V_s^*}{\omega L} \right)^2 \right) \frac{e^{-j\omega L/V_s^*}}{L} - \left( \frac{V_s^*}{V_p^*} \right)^2 \left( \frac{V_p^*}{j\omega L} - \left( \frac{V_p^*}{\omega L} \right)^2 \right) \frac{e^{-j\omega L/V_p^*}}{L} \right] \quad (6)$$

여기서,  $V_s^*$ 은 복소수 전단파속도,  $V_p^*$ 는 복소수 압축파 속도,  $\rho$ 는 밀도,  $j^2=-1$ ,  $\omega$ 는 각주파수,  $L$ 은 전단파의 이동 거리를 나타낸다.

식 (6)을 이용하여 측정된 파와 비교하여 전단파 속도를 산정하는 signal matching 기법을 개발하였다. 본 방법에서는, 첫째 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파를 측정한다. 둘째 모델을 이용하여 전단파 형상을 구현한 후 측정된 전단파 신호와 비교한다. 셋째, 전단파의 속도와

주파수를 조정한 후 다시 측정된 전단파와 비교하여 오차를 최소화 시킨다. 그림 14에 측정된 신호와 계산된 신호를 함께 표시하였다. 이 방법을 적용할 경우, 도착 시간을 산정하여 전단파 속도를 산정하는 것이 아니라 직접 전단파 속도가 바로 산정된다.

이러한 실험적인 다중반사법과 수학적 모델을 적용한 수치해석적 방법으로 전단파의 속도를 매우 효과적으로 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 벤더 엘리먼트 끝단 간의 거리를 전단파의 이동 거리로 고려할 경우, 전단파의 도착시간은 그림 12에서 B점과 C점 사이(C점에 가까우며)인 것으로 나타났다.

### 3.10 입력파의 선택

벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파를 발생시키기 위하여 구형파(임펄스파 포함)나 단일정현파를 적용할 수 있다. 근접장 밖에서는 입력파가 구형파나 단일정현파를 사용할 경우, 전단파의 도착시간은 그림 15와 같이 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나 입력파로 단일정현파를 사용할 경우 주의해야 할 사항은 그림 16과 같이 입력파의 주파수가 벤더 엘리먼트의 공진주파수와 거의 동일해야 한다는 것이다. 그렇지 않을 경우 그림 16(b) 또는 (d)의 경우와 같이 전단파가 거의 측정되지 않을 수 있다.

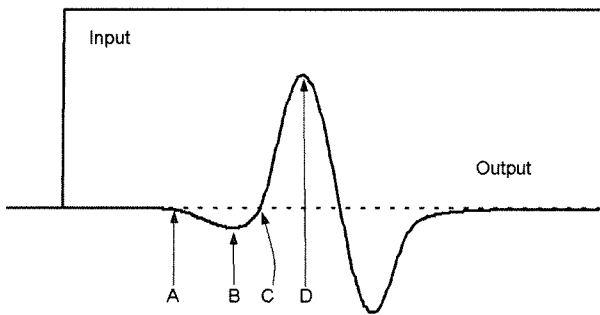
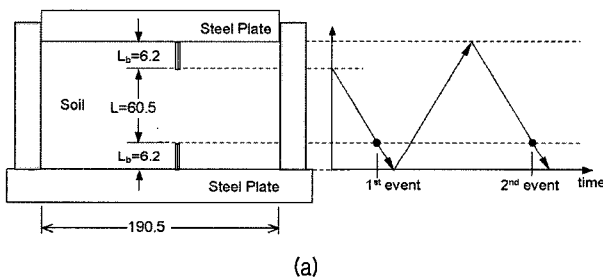
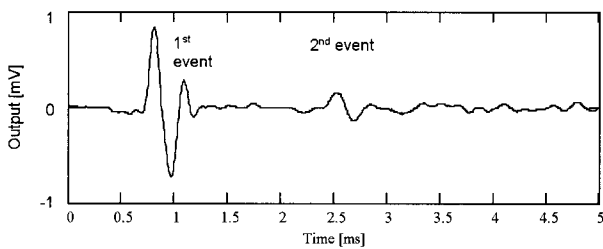


그림 12. 근접장 내에서 수신된 파의 형상( $L/l=1$ ). A: First deflection. B: First bump maximum. C: Zero after first bump. D: Major first peak



(a)



(b)

그림 13. 다중반사법. 단위: mm

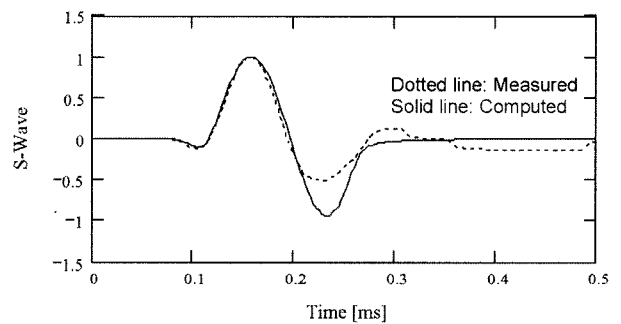


그림 14. Signal matching 기법

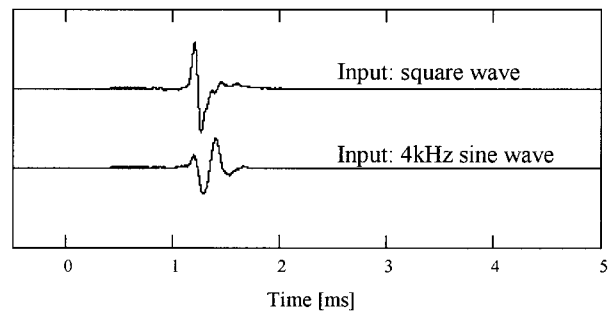
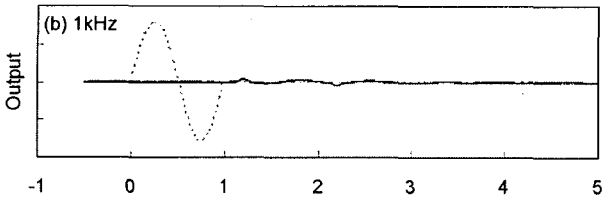


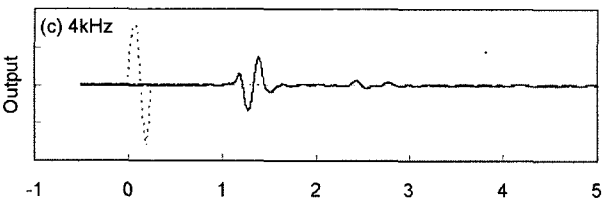
그림 15. 근접장 밖에서의 입력파에 따른 수신파의 형상



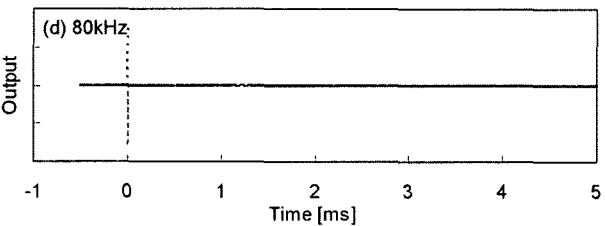
(a) 구형파



(b) 단일정현파 f=1kHz



(c) 단일정현파 f=4kHz



(d) 단일정현파 f=80kHz

그림 16. 입력파 선택. 그림 내 점선은 입력파를 표시(1.0V)

### 3.11 앵커링

벤더 엘리먼트는 캔틸레버 보 형식으로 제작되어 사용되며 앵커를 위하여 에폭시가 일반적으로 사용된다. 앵커는 일반적으로 완벽하게 되었다고 가정하지만, 에폭시의 강성은 실험을 실시할 주변 매질의 강성을 고려하여 선택되어야 한다. 주변 매질의 강성이 앵커 강성보다 큰 경우 전단파가 전파는 되지만 더 큰 전단파가 앵커 쪽으로 발생하게 된다. 즉, 점토나 모래의 경우에는 큰 문제가 발생하지 않지만, 고결화 효과를 고려할 경우 고강도 에폭시의 사용이 추천된다.

## 4. 결론

벤더 엘리먼트를 이용한 전단파의 측정이 급격하게 증가하고 있는 상태에서 시험 원리와 여러 가지 고려사항을

이해하는 것은 전단파 측정에서 매우 중요한 요인이 되고 있다. 본 논문에서는 여러 가지 실험적, 해석적, 그리고 수치적 방법을 통하여 벤더 엘리먼트의 선택, 지향성, 실험 시편의 크기, 필터링, 스테킹, 주파수, mis-alignment, 속도와 진폭 관계, 전단파의 속도 계산, 입력파의 선택, 그리고 앵커링 방법을 검토하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전해질 용액 속에서 조성된 시료를 통한 벤더 엘리먼트 시험에서는 전기적 간섭 현상이 발생하여 시험 결과의 해석이 불가능해 질 수 있으며 차폐와 접지로 최소화할 수 있다. 병렬 형식의 벤더 엘리먼트는 차폐와 접지 없이도 전기적 간섭 문제를 해결하거나 상당히 감소시킬 수 있다.
- (2) 벤더 엘리먼트는 전반적으로 낮은 지향성을 보이므로 토모그래피 같이 매우 광범위한 방향에서 전단파의 측정이 필요한 경우 상당히 효과적인 트랜스듀서가 될 수 있다.
- (3) 캔틸레버 보 형식의 벤더 엘리먼트는 측면 방향으로 전파되는 압축파와 앞면으로 전파되는 전단파를 동시에 발생시켜 시편의 측면을 통해 반사된 압축파가 전단파를 간섭하는 현상이 발생할 수 있다. 벤더 엘리먼트 끝단 간의 거리를  $H$ 라 하면, 건조한 흙이나 불포화토인 경우, 포아송비( $\nu$ )가 약 0.1 정도이므로, 요구되는 시편 반경은  $R > 0.56H$  정도이며, 완전 포화된 흙의 경우 포아송비( $\nu$ )가 약 0.5이므로  $R > 3.7H$  정도가 되어야 한다.
- (4) 로우패스 필터는 고주파수의 잡음을 없애기 위해 사용되지만 시험 결과 자체에 상당한 영향을 줄 수 있다.
- (5) 공기 중에서 벤더 엘리먼트의 고유주파수는 캔틸레버 빔의 고유주파수와 같다. 또한 벤더 엘리먼트가 흙 속에 설치된 경우에는 벤더 엘리먼트 자체와 주변 흙의 응력상태에 영향을 받으며, 벤더 엘리먼트의 길이가 길어짐에 따라 공진주파수가 벤더 엘리먼트 자체보다도 흙에 영향을 받는다.
- (6) 일반적으로 입력파의 파형, 벤더 엘리먼트의 설치 방법 등에 영향을 받는 근접장 효과는 도착시간 산정에 어려움을 준다. 근접장 내에서 전단파의 도착 시간 산정은 다중반사법과 signal matching 기법을 적용하여 해결할 수 있다.

## 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. Abbiss, C. P. (1981), "Shear wave measurements of the elasticity of the ground", *Geotechnique*, 31(1), 91-104.
2. Aki, K. and Richards, P. G. (1980), *Quantitative seismology: Theory and Method*. W. H. Freeman and Company, 932p.
3. Blewett, J., Blewett, I. J., and Woodward, P. K. (1999), "Measurement of shear-wave velocity using phase-sensitive detection technique", *Can. Geotech. J.*, 36(5), 934-939.
4. Blewett, J., Blewett, I. J., and Woodward, P. K. (2000), "Phase and amplitude responses associated with the measurement of shear-wave velocity in sand by bender elements", *Can. Geotech. J.*, 37(6), 1348-1357.
5. Brignoli, E. G. M., Gotti, M., and Stokoe, K. H. II. (1996), "Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers", *Geotech. Test. J.*, 19(4), 384-397.
6. Cruse, T. A. and Rizzo, F. J. (1968), "A direct formulation and numerical solution of the general transient elastodynamic problem", *J. Mathematical Analysis and Applications*, 22, 244-259.
7. Dyvik, R. and Madhus, C. (1985), "Lab measurements of  $G_{max}$  using bender element", *Proc. ASCE convention on Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, 186-196.
8. Fam, M. A. and Santamarina, J. C. (1995), "Study of geoprocesses with complementary wave measurements in an oedometer", *Geotech. Test. J.*, 19(4), 307-314.
9. Fernandez, A. L. (2000), *Tomographic imaging the state of stress*, PhD thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 298p.
10. Jovicic, V., Coop, M. R., and Simic, M. (1996), "Objective criteria for determining  $G_{max}$  from bender element tests", *Geotechnique*, 46(2), 357-362.
11. Jovicic, V. and Coop, M. R. (1997), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, 47(3), 875.
12. Kawaguchi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S. (2001), "Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test", *Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conf. on soil Mech. and Geotech. Eng.*, 155-158.
13. 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.
14. Lee, J. S. (2003), *High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
15. 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.
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. Lohani, T. N., Imai, G., and Shibuya, S. (1999), "Determination of shear wave velocity in the bender element test", *Earthquake Geotech. Eng.*, Seco e Pinto eds., Lisboa, Portugal, 101-106.
18. Mancuso, C., Simonelli, A. L., and Vinale, F. (1989), "Numerical analysis of in situ S-wave measurement", *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Rio de Janeiro, Brazil, 277-280.
19. Meirovitch, L. (1967), *Analytical Methods in Vibrations*, The Macmillan Company, 555p.
20. Roester, S. K. (1979), "Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy", *J. Geotech. Eng.*, 105(7), pp.871-888.
21. Sanchez-Salinerio, I., Rosset, 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.
22. Santamarina, J. C. and Fam, M. A. (1997), "Interpretation of bender element tests -discussion", *Geotechnique*, 47(4), 873-875.
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, 488p.
24. Shirley, D. J. (1978), "An improved shear wave transducer", *J. Acoustical Society of America*, 63(5), 1643-1645.
25. Shirley, D. J. and Hampton, L. D. (1978), "Shear wave measurements in laboratory sediments", *J. Acoustical Society of America*, 63(2), 607-613.
26. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995a), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, 45(1), 149-154.
27. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995b), "Stiffness of fine-grained soil at very small strains", *Geotechnique*, 45(2), 249-265.
28. Woods, R. D. and Stokoe, K. H. II. (1985), "Shallow seismic exploration in soil dynamics", *Proc. a session held in conjunction with the ASCE Convention*, Woods, R. D. eds., Detroit, Michigan, 120-156.
29. Yu, P. and Richart, F. E. Jr. (1984), "Stress ratio effects on shear modulus of dry sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.3, pp.331-345.

(접수일자 2006. 1. 7, 심사완료일 2006. 5. 20)