

연약지반의 강성 측정을 위한 벤더 엘리먼트의 현장 적용성 연구

Implementation of Bender Elements to In-situ Measurements of Stiffness of Soft Clays

목 영 진¹ Mok, Young-Jin

정 재 우² Jung, Jae-Woo

한 만 진³ Han, Man-Jin

Abstract

Bender elements, composed of thin piezo-ceramics and elastic shims, have been used to measure shear wave velocities of specimens in laboratories. In a preliminary stage of their field applications, an in-house research of optimizing suitable bender elements and their geometrical arrangement has been carried out in a barrel of kaolinite-water mixture. Two types of measurement configuration, similar to cross-hole and in-hole seismic testing, have been implemented. prototype instrumented rods were penetrated into a soft clay layer in the west coast and excellent shear waves were recorded. Development of penetration device (mandrel) and associated instrumented rods are in progress for deeper investigation.

요 지

1970년대 중반부터 bender elements를 이용하여 흙 공시체의 전단파 속도를 측정하는 기술이 발전되어 왔다. 얇은 피에조 세라믹판과 탄성 매질을 겹쳐서 만든 bender elements는 삼축입축시험장치의 저판(base)와 top cap에 설치하여 액츄에이터와 트랜스듀스로 각각 사용하여 공시체의 전단파 속도를 측정하고 있다. bender elements를 현장에 적용하는 예비 단계로, 최적의 벤더 제작과 기하학적 배치에 대한 연구를 실내 카울리나이트 토조에서 수행하였다. 이 예비시험에서 개발된 bender element를 사용하여 갯벌에서 크로스홀 방식과 인홀 방식으로 탄성과 시험을 수행하였다. 일련의 bender elements를 깊이 2m까지 삽입하여 현장시험의 적용성을 확인하였다. 추후 깊은 심도 까지 삽입할 수 있는 맨드렐(mandrel)과 관입장치를 개발하여 연약지반의 탄성과 속도 측정 장치 개발을 완성하고자 한다.

Keywords : Bender elements, Cross-hole type, In-hole type, Shear wave velocity, Soft clay

1. 서 론

연약한 해성점토나 준설 매립된 연약지반의 개량은 피에조미터(piezometer)를 설치하여 압밀도로 평가되고 있다. 이 방법의 장점은 지반개량의 연속적인 모니터링(monitring)은 가능하나 기초 설계나 안정 해석에 필요한

역학적 물성은 측정하지 못하는 단점이 있다. 역학적 물성은 콘(cone)시험이나 베인(vane)시험으로 측정할 수 있으나, 개량과정의 지속적인 모니터링은 불가능하다. 연약지반의 개량을 역학적 물성(강도나 강성)을 갖대로 지속적으로 모니터링 할 수 있다면, 현장관리를 위한 실시간 모니터링과 함께 역학적 물성 측정이 가능하다.

1 정회원, 경희대학교 토목건축대학 교수 (Member, Prof., Collage of Architecture and Civil Engrg., Kyunghee Univ., yjmok@khu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 경희대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyunghee Univ.)

3 정회원, 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyunghee Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이러한 두 가지 목적을 달성하기 위해, 역학적 물성을 측정할 수 있는 계측기를 현장에 매설하는 기본적 개념에 착안하였다.

본 논문에서는 벤더 엘리먼트(bender elements)를 가용 계측기로 채택하여, 현장에 매설 방안을 시도하였다. 이 소자는 에너지 변환 원리가 간단하고 제어능력이 뛰어난 동시에 소형이어서, 현장 매설에 유리할 것으로 판단하여 채택하였다. 최적의 벤더 엘리먼트 제작과 기하학적 배치에 대한 연구 결과(목영진 외, 2006; 정재우 외, 2005; 정재우, 2005)를 바탕으로 기존의 탄성과 기법인 크로스홀(crosshole)과 인홀(inhole)형의 매설 방안을 고안하였다. 현장 적용을 위해 인근 갯벌에 크로스홀과 인홀 형 방식으로 매설하여 탄성과 시험을 수행하여 데이터의 질을 평가하였다. 깊이 2m까지 현장에 인력으로 관입하여 전단파 발진과 양질의 전단파 신호를 획득하여 현장에서의 적용 가능성을 확인하였다. 매설은 맨드릴(mandrel)을 이용하여 관입시키는 방법을 채택하여 이에 필요한 시험을 수행하였다. 현 단계의 현장 시험에서는 현장 적용에서 도출되는 문제점 해결과 데이터의 질 향상에 초점을 맞추어 수행되었다.

2. 벤더 엘리먼트(Bender Elements) 개요

벤더 엘리먼트는 그림 1과 같이 두 개의 피에조 세라믹이 내부의 금속판(shim)과 접촉된 상태로 구성되어 있다(Santamarina, 2001). 벤더 엘리먼트는 특별히 정해진 표준 단면이나 설치법이 있는 것이 아니라 모양과 단면 및 설치 방법은 다양하다. 시험 조건이나 시험 대상 매질에 따라 가장 잘 반응할 수 있도록 그 단면을 제작하여야 한다.

그림 2는 실제 제작된 벤더 엘리먼트의 모습을 제작 단계별로 나타낸 것이다. 벤더 엘리먼트는 피에조 세라믹과 금속판과의 접합 방식이나 단자 연결 방법에 따라 직렬(series)과 병렬(parallel)의 두 가지 방법이 있다(그림 2 참조). 병렬연결은 같은 전압을 가하였을 때 직렬 연결보다 더 많은 변위를 발생하므로 발진자(source)에 사용되며, 반대로 직렬연결은 같은 변위에서 병렬연결보다 높은 전압이 발생하므로 신호 감지기(receive)에 사용한다(Jung, M. J., 2005).

이러한 벤더 엘리먼트는 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹판이 신장하는 동안 반대편 세라믹판은 수축하게 됨으로써 굴곡 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤

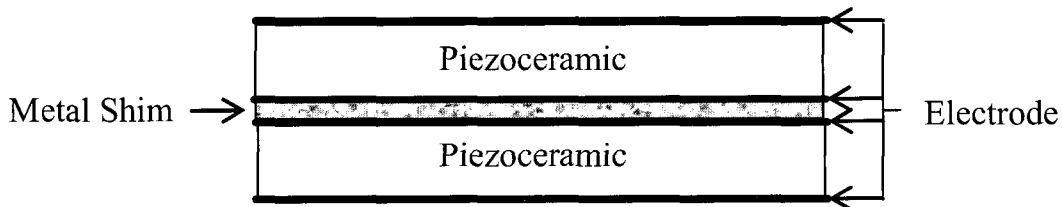


그림 1. 벤더 엘리먼트의 구조

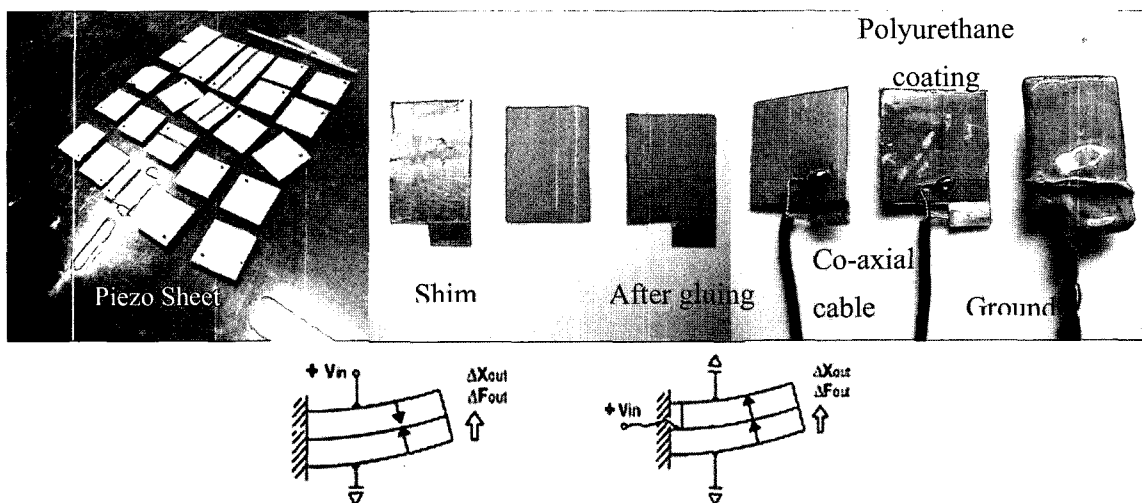


그림 2. 벤더 엘리먼트의 제작과정별 모습(위)과 직렬연결(아래 좌)과 병렬연결(우)

더 엘리먼트가 외팔보(cantilever) 형태로 진동한다. 또 이와는 반대로 외부로부터 벤더 엘리먼트에 휨 변형이 생기면 각 피에조 세라믹판에 각각 압축 및 신장 방향으로 변형이 발생하여 벤더 엘리먼트 내부에 전하가 일어난다. 즉 진동을 전압으로 변환하여 수신을 가능하게 하는 것이다. 이와 같은 원리로 벤더 엘리먼트를 이용하여 간단하게 진동을 발생하고 진동을 수신할 수 있다. 신호발생기(Function generator)로 발생한 전기적 신호(약 10V)를 전압증폭기(Power Amplifier)로 최대 200배(약 200V)까지 증폭하여 벤더 엘리먼트를 가동하여 진동을 발생한다. 이때 신호발생기(Function generator)로부터 1mHz~19.9MHz의 주파수를 조절하여 벤더 엘리먼트와 매질의 공진 주파수에서 측정을 하게 된다. 본 실험에서는 30~50V, 200~2500Hz의 정현파를 벤더 엘리먼트의 발진원으로 사용하였다.

3. 현장 적용 시험

3.1 개요

실내 환경에서 제작되고 검증된 벤더 엘리먼트가 열악한 현장에서도 잘 작동하는지 시험하고자 갯벌에 매설하여 전단파를 발진하고 수신하였다. 벤더 엘리먼트를 발진자와 감지기로 사용하여 기존의 크로스홀(crosshole)과 인홀(inhole) 탄성파 기법을 적용하였다(목영진, 1998; 목영진 외, 2005). 크로스홀 시험에서는 전단파 도달시간 만큼 계측 깊이별 전파거리 측정도 중요하여 거리 보정 방안을 모색하였다. 인홀 시험은 실내에서 시행착오를 통하여 최적의 인홀 장치를 개발하여 갯벌에 삽입하여 전단파 계측에 성공하였다.

3.2 크로스홀 시험

그림 3과 같이 크로스홀 시험은 발진자와 감지기를 벤더 엘리먼트로 대체한 것 이외에는 기존 방법과 동일하다. 한 쪽 룯드(rod)에 발진자용 엘리먼트를 다른 쪽 룯드에는 감지기용 엘리먼트를 설치하여 같은 깊이에 관입시키고, 발진자로 진동을 발생하여 수평으로 전파하는 전단파를 감지기로 계측한다.

실내 토조에서 크로스홀 시험을 수행하여 양질의 신호를 획득하여 현장 적용 가능성을 확인 한 바 있다(목영진 외, 2005, 정재우 외, 2005). 한 룯드에는 1.5cm × 1.5cm

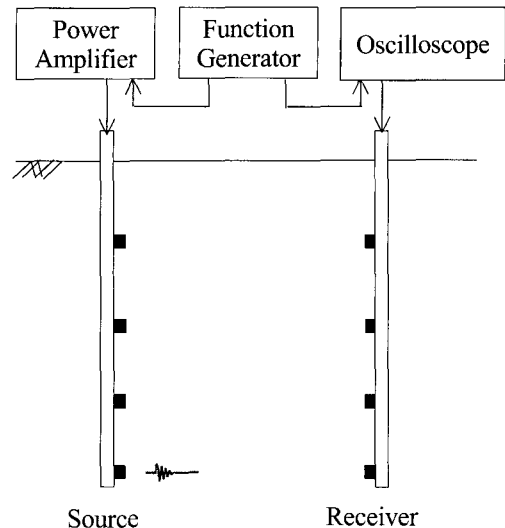


그림 3. 크로스홀 시험 모식도

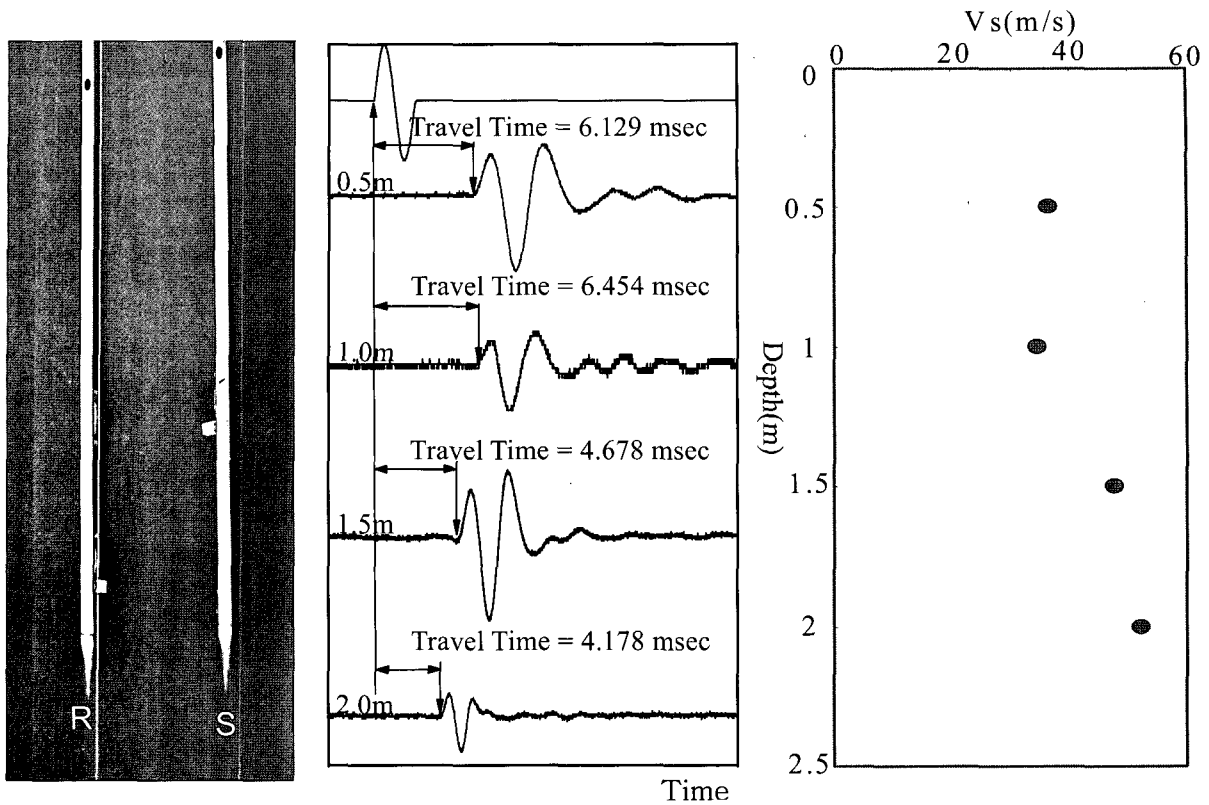
크기의 발진자용 벤더 엘리먼트를 다른 룯드에는 수신기를 그림 4(a)와 같이 약 50cm의 간격으로 설치하여 충남 보령 ○○지역 갯벌에 관입하였다. 벤더 엘리먼트의 바로 밑에 얇은 금속판을 설치하여 관입 도중에 일어날 수 있는 벤더 엘리먼트의 손상을 방지하였다. 깊이 약 2m까지 인력으로 관입하여 그림 4(b)와 같이 깊이 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m 에서 양질의 전단파 신호를 획득할 수 있었다. 발진자와 감지기 사이의 전파거리 20cm를 전단파 통과시간으로 나누어 그림 4(c)와 같은 속도 추상을 얻었다.

크로스홀 시험의 경우 전단파의 전파 거리는 매우 중요한 요소이다. 각 계측 깊이에서 발진자와 감지기 사이의 전파거리를 정확하게 측정하여야만 정확한 전단파 속도를 계산할 수 있다. 경사방향으로 전파하는 전단파를 계측할 수 있도록 발진자와 감지기를 추가로 설치하여 발진자와 감지기 사이의 수평거리를 구하는 방안을 고안하였다. 그림 5와 같이 수평방향의 전단파 통과 시간 t_1 과 경사방향 통과시간 t_2 를 측정하여 수평거리 D 를 계산할 수 있다. 수평 방향과 경사방향의 전단파 속도 (V_s)는 각각 식 (1)과 식 (2)와 같이 계산된다.

$$V_s = \frac{D}{t_1} \quad (1)$$

$$V_s = \frac{\sqrt{D^2 + H^2}}{t_2} \quad (2)$$

여기서, H 는 추가로 설치한 발진자와 감지기 벤더의 수직방향 이격거리이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 V_s 를 소거



(a) 측정 장치

(b) 전단파 신호

(c) 속도 주상도

그림 4. 크로스홀 시험

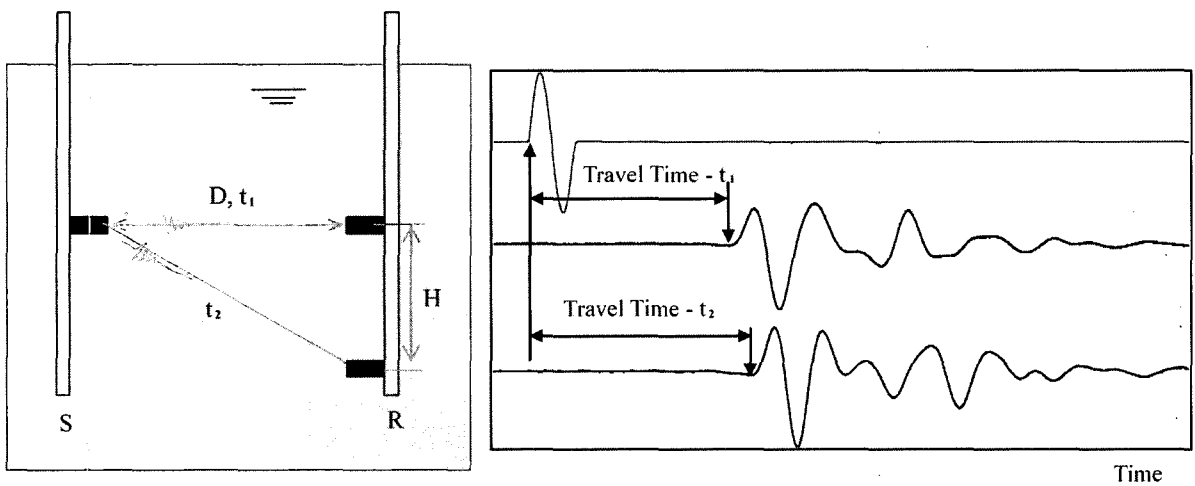


그림 5. 벤더 엘리먼트의 기하학적 배치(좌)와 도달 전단파의 시간차(우)

하여 D 를 계산할 수 있으며 또한, 식 (1)과 식 (2)로부터 D 를 소거하여 식 (3)과 같이 전단파 속도를 계산할 수 있다.

$$V_s = \sqrt{\frac{H^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (3)$$

그림 6과 같이 실내에서 발진자와 수신기의 배치 각

도를 30° , 45° , 60° 로 바뀌가며 전단파속도를 계측하였다. 경사각 30° 일 때는 도달시점이 명확한 경사방향의 전단파 신호가 측정되었으나, 45° 이상에서는 전단파 도달시점이 모호하였다. 경사각 30° 일 때 수평 방향과 경사 방향의 전단파 속도는 각각 식 (1)과 식 (2)로부터 24.9m/s 와 25.7m/s 의 속도를 계산되었으며, 식 (3)을 이용하여 추가로 설치한 계측기의 수직방향 이격거리 H

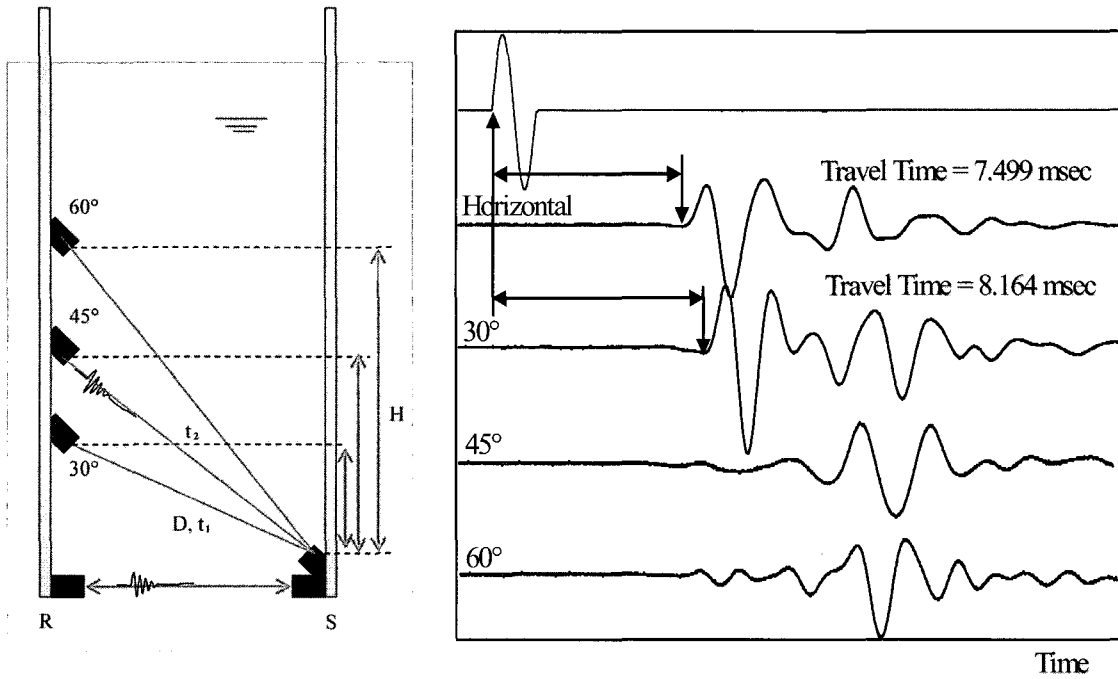


그림 6. 벤더 엘리먼트의 각도별 기하학적 배치(좌)와 도달 전단파의 시간차(우)

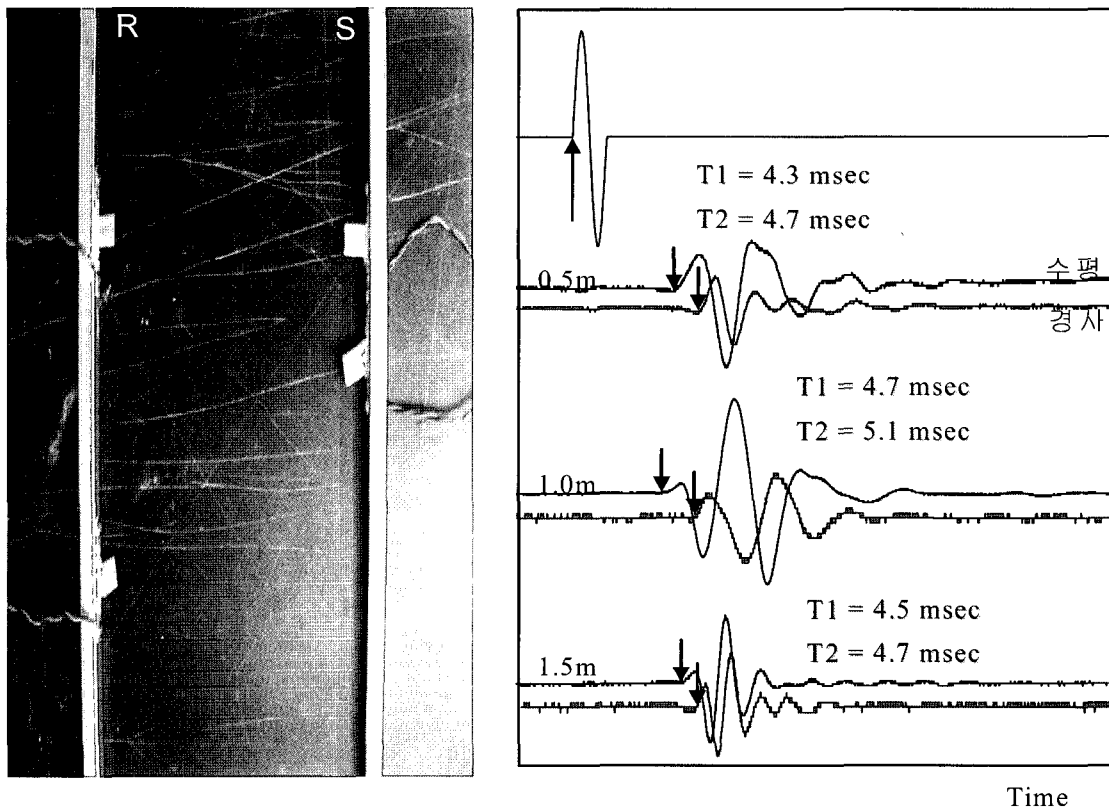


그림 7. 벤더 엘리먼트 측정 장치(좌)와 깊이별 전단파 신호(우)

와, 두 도달파의 시간차로 계산한 값은 26.2m/s로 아주 근사한 값을 얻었다. 45°와 60°의 경사각에서는 정확한 도달 시점을 확인 할 수 없으므로 벤더 엘리먼트를 배치 할 때 45°이상의 과도한 경사는 피해야 할 것으로 보인다.

실내에서 검증한 장치(그림 7 참조)를 현장에 적용하기 위해 평택의 ○○지역 갯벌에 관입하여 현장 시험을 수행하였다. 깊이별 정확한 수평 전파 거리는 모르는 것으로 가정하고, 수평 방향과 경사 방향의 전단파를 그림

7과 같이 측정하여 식 (3)으로부터 깊이별 전단파 속도를 구할 수 있었다.

위에서 언급한바와 같이, 크로스홀 시험에서는 각 측정 깊이에서 발진자와 수신기 사이의 정확한 전파거리를 확보하는 것이 매우 중요하며 그에 따른 많은 노력이 필요하다. 이와 같은 계측상의 어려움을 극복하고자 룯드 하나에 발진자와 감지기 엘리먼트를 장착하여 지반에 관입시켜 전단파를 계측할 수 있는 방안(인홀 시험)을 모색하게 되었다.

3.3 인홀 시험

인홀 시험은 그림 8과 같이 한 개의 룯드에 발진자와 수신기를 모두 설치하여 전단파를 발생하고 계측하는 원리로 발진자와 감지기 사이의 전파거리는 고정되고 지반에 룯드 하나만 관입한다는 장점이 있다. 그러나 이러한 장점에 대하여 치러야할 대가는 룯드를 통하여 감

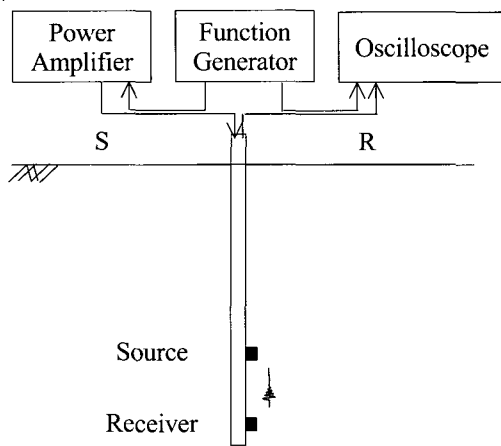


그림 8. 인홀 시험 모식도

지기에 전달되는 진동(noise)이다. 실내 시험을 통해 노이즈를 제거할 수 있는 최적의 엘리먼트 장착 장치를 고안 하였다.

우선 엘리먼트를 그림 9와 같이 발진자와 수신기를 평행하게 약 10cm의 간격으로 룯드에 직접 장착하였다. 발진자에서 발생된 전단파가 주로 횡방향으로 전파되는 반면 아래에 위치한 수신기에 도달하는 에너지는 미약하여, 발진자에서 발생된 진동이 룯드를 타고 수신기에 도달해, 그림 9(우)와 같이 지반을 통과한 전단파 식별이 불가능하다.

그림 10은 그림 9에서의 문제점을 극복하고자 발진자와 수신기를 완전히 분리하고 서로 마주보도록 배치하였다. 발진자와 수신기의 설치간격을 10cm로 하여 한 쌍의 나란한 봉에 각각 장착하였다. 그림 10의 (우)는 이 장치로 계측한 전단파 신호로, 예상한대로 지반을 통과한 전단파신호가 계측되었다. 그러나 한 개의 봉이 아닌 분리된 두 개의 봉을 사용해야하므로 적용하기에는 어려움이 있다.

그림 11은 발진자의 진동방향과 전파경로가 일치하도록 룯드에 외팔보(arm)를 설치하고, 발진자는 외팔보와 직각으로 장착 하고 수신기는 외팔보 끝에 설치하였다. 발진자(위, 아래)와 수신기(중간) 간격을 10cm로 하였다. 위나 혹은 아래의 발진기에서 발생된 전단파는 중간에 위치한 수신기를 향한 방향으로 진동을 하게 되며, 수신기의 작동 방향이 발진기와 직각 방향으로 설치되었더라도 진동의 방향과 같기 때문에 수신기는 그림 11과 같이 상당히 양질의 전단파를 수신 할 수 있었다.

그림 12는 회전하는 외팔보에 발진기와 수신기를 마주보도록 장착하여 갯벌에 매설한 후 전단파를 측정하

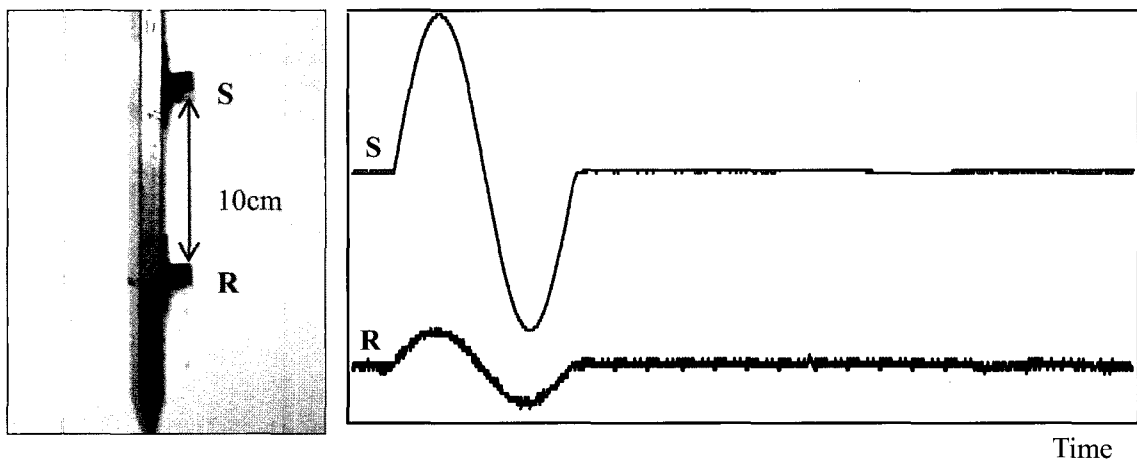


그림 9. 직접장착 장치(좌)와 전단파 신호(우)

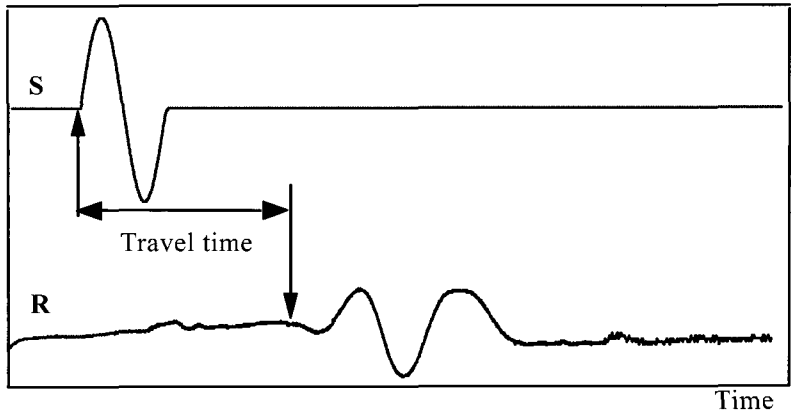
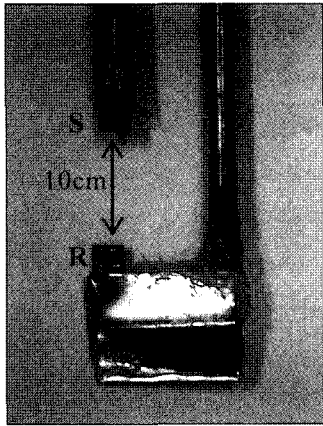


그림 10. 분리형 장치(좌)와 전단파 신호(우)

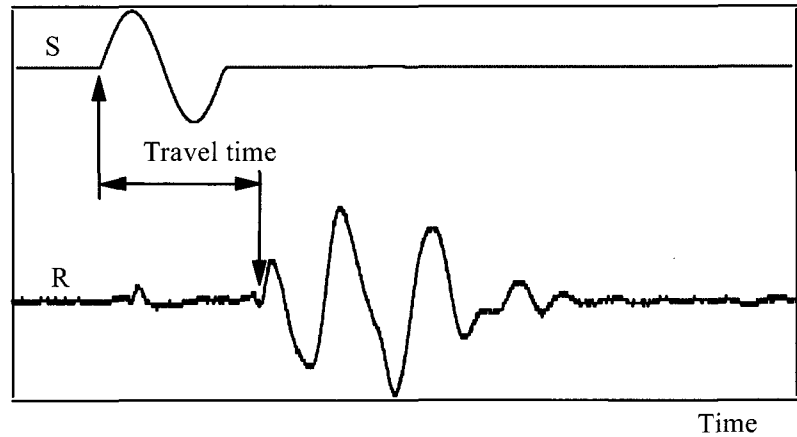
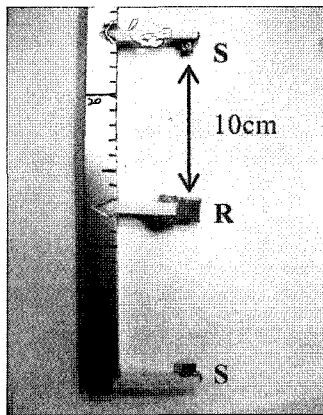


그림 11. 외팔보장착 장치(좌)와 전단파 신호(우)

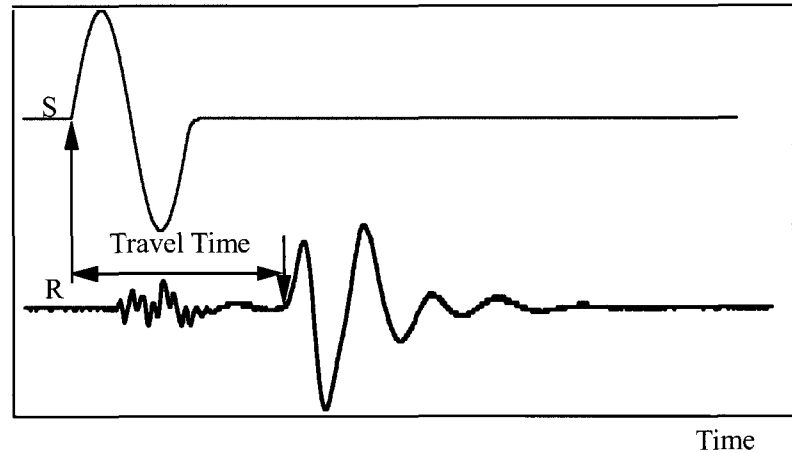
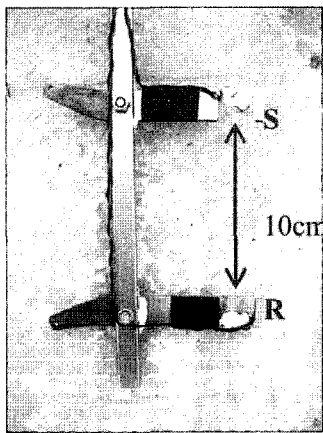


그림 12. 회전식 외팔보 장착 장치(좌)와 전단파 신호(우)

였다. 룯드와 나란하게 외팔보를 접어 관입한 후 외팔보를 직각으로 펼쳐서 전단파를 계측하였다. 그림 12와 같이 식별이 우수한 전단파를 수신할 수 있었다. 크로스홀과 달리 인홀시험에서는 매질을 통해 전파되는 전단파의 신호 앞에 룯드(rod)를 통해 전파되는 신호가 수신되

고 있으나, 이는 장치의 철계 재질과 연약지반의 속도차가 커서 전단파 식별에 아무런 문제가 되지 않고 있다.

상기와 같은 시행착오를 거쳐 그림 12와 같은 회전식 외팔보 장착 장치를 채택하여 갯벌에 관입할 수 있는 장치를 아래와 같이 고안하였다.

4. 관입장치 개발을 위한 예비시험

벤더 엘리먼트를 이용한 크로스홀 시험이나 인홀 시험을 현장에서 약 2m까지 인력으로 관입하여 수행하였다. 현장의 깊은 심도까지 계측하려면, 기계적인 관입 장치의 개발이 반드시 수반되어야 한다. 또한 조개 껍질이나 자갈이 혼재된 갯벌에 관입 할 때 벤더 엘리먼트가 손상될 가능성도 있다. 벤더 엘리먼트가 설치된 룯드를 보호할 수 있는 외관(mandrel)과 함께 지정 심도까지 관입한 후 외관을 인발하는 방안으로 이러한 문제를 해결할 수 있다.

이를 위하여 크로스 홀 형 시험의 경우 그림 13과 같이 벤더 엘리먼트가 설치된 룯드와 맨드렐을 함께 목표 심도까지 관입 한 후 외관을 인발하여 벤더 엘리먼트 손상을 방지하였다. 그림 13과 같이 맨드렐을 인발한 후 회전외팔보(swing arm)를 케이블로 당겨 발진자와 수신기가 서로 마주 보도록 하였다. 벤더 엘리먼트가 외관의 외경 밖에 위치하게 되어 지반과 밀실한 접촉이 가능하도록 하였다. 양질의 전단파 신호를 그림 14와 같이 획득할 수 있었다.

크로스홀 시험과 마찬가지로 인홀 시험에서도 그림 15의 모식도에서 보는 바와 같이 외경 38mm 맨드렐을 이용하여 목표 심도까지 관입 한 후 다시 인발하였다. 외관을 인발한 후 회전외팔보(swing arm)를 케이블로 당겨 벤더 엘리먼트가 서로 마주보게 하였다. 현장에 관입 후 그림 16과 같은 양질의 전단파 신호를 획득하였다. 회전외팔보와 맨드렐을 사용함으로써 엘리먼트를 보

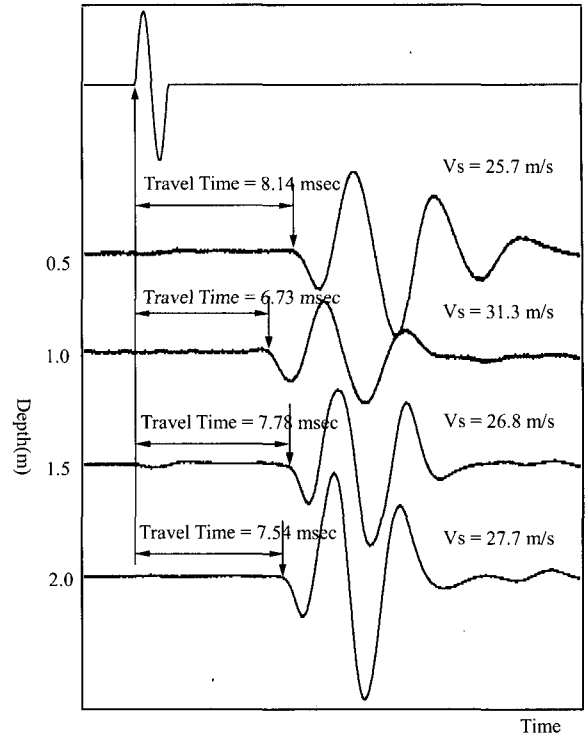


그림 14. 현장 계측 전단파 신호

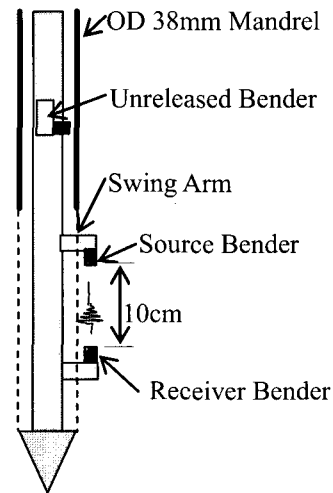


그림 15. 인홀 형 시험의 관입장치 모식도

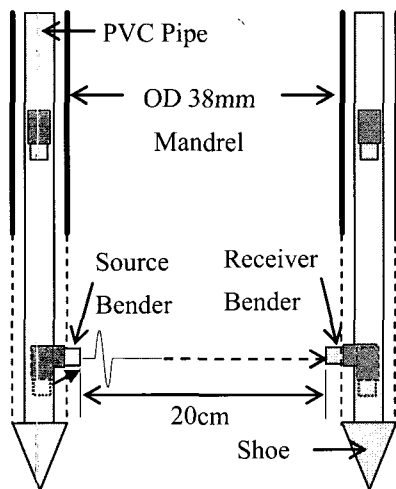


그림 13. 크로스홀 형 시험의 관입장치 모식도

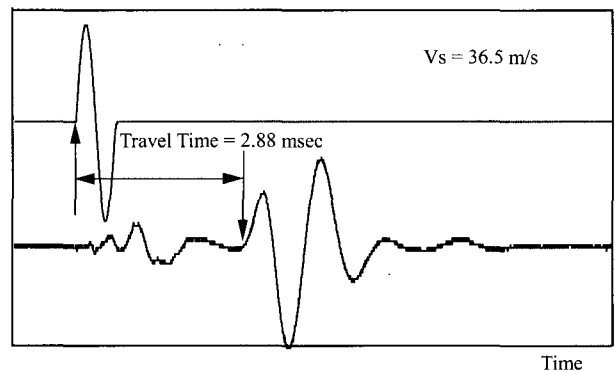


그림 16. 현장 계측 전단파 신호

호하고 지반과 밀실한 접촉이 가능하게 되었다. 현재 이 맨드렐을 관입하는 기계적 장치를 개발하고 있다.

5. 결론

벤더 엘리먼트(bender elements)는 에너지 변환 원리가 간단하고 제어능력이 뛰어난 동시에 소형인 장점을 갖고 있다. 이러한 장점을 살려 기존의 크로스홀(crosshole)과 인홀(inhole) 탄성파 기법과 유사한 방안을 고안하였다. 현장 적용을 위해, 인근 갯벌에 크로스홀과 인홀 형 방식으로 관입하여 탄성파 시험을 수행하여 데이터의 질을 평가하였다. 깊이 2m까지 현장에 관입하여 전단파 발진과 양질의 전단파 신호를 획득하여 현장에서의 적용 가능성을 확인하였다. 맨드렐(mandrel)를 이용하여 관입하는 방안을 채택하여, 벤더 엘리먼트 보호와 깊은 관입이 가능하게 되었다. 현 단계의 현장 시험에서는 현장 적용에서 도출되는 문제점 해결과 데이터의 질 향상에 초점을 맞추어 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다

- (1) 크로스홀시험은 양질의 전단파 계측과 함께, 발진자와 감지기 사이의 전파거리를 정확히 측정하는 방안을 제시하였다.
- (2) 인홀시험은 회전외팔보(swing arm) 장착 장치로 로드(rod)를 통해 전달되는 노이즈(noise)를 제거하고 양질의 전단파 신호를 계측할 수 있었다. 로드 하나만 관입시키는 장점 때문에 크로스홀시험보다 현장

적용에 실현성이 클 것으로 판단된다.

- (3) 벤더 엘리먼트 보호와 관입을 위한 맨드렐(mandrel) 장치가 개발되었고, 이에 맞는 관입기는 개발 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업(C105A1000013-06A030001220)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 목영진 (1998), “크로스홀 시험을 이용한 암반기초의 동적 물성치 측정”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.603-606.
2. 목영진, 정진훈, 김영수 (2005), “지반의 동적물성치 측정을 위한 인홀탄성파시험의 최근 발전”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 1호, pp.105-114.
3. 목영진 외 (2006), “지속 가능한 연약지반 역학적 특성 평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구”, 한국건설교통기술평가원.
4. 정재우, 목영진, 장인성 (2005), “현장 토목 계측을 위한 벤더 엘리먼트의 적용성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권 5호, pp.215-223.
5. 정재우 (2005), *벤더 엘리먼트를 이용한 토목재료의 강성측정에 대한 적용성 연구*, 석사학위 논문.
6. Jung, M.J. (2005), *Shear Wave Velocity Measurements of Normally Consolidated Kaolinite Using Bender Elements*, master Thesis, University of Texas at Austin.
7. Santamarina, J.C. in collaboration with K.A. Klein and M.A. Fam (2001), *Soils and waves*, Chichester ; New York : J. Wiley Sons.

(접수일자 2006. 4. 18, 심사완료일 2006. 11. 8)