

연약지반의 강성 측정을 위한 벤더 엘리먼트의 현장 적용성 연구 Implementation of Bender Elements to In-situ Measurements of Stiffness of Soft Clays

정재우¹⁾, Jae-Woo Jung 한만진²⁾, Man-Jin Han 김봉찬³⁾, Bong-Chan Kim 목영진⁴⁾, Young-Jin Mok

¹⁾ 경희대학교 대학원 토목공학 박사과정 Graduate Student, Dept. of Civil Eng. KyungHee Univ.

²⁾ 경희대학교 대학원 토목공학 석사과정 Graduate Student, Dept. of Civil Eng. KyungHee Univ.

³⁾ (주) 다이크 차장 Chief Manager, DIKE Co.,Ltd

⁴⁾ 경희대학교 토목·건축대학 토목공학 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, KyungHee Univ.

SYNOPSIS : 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 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, has been implemented. A pair of prototype instrumented rods was 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.

Key words : 연약지반, Bender Elements, 전단파 속도, 크로스홀 형, 인홀 형

1. 서론

해성점토나 준설패립된 연약지반의 전단강도는 시료 채취시 수반되는 시료의 교란으로 인해 전단강도의 평가에 어려움이 많아 양질의 시료 채취가 어려울 경우 만족할 만한 결과를 얻기가 힘들다. 본 연구에서는 압전 소자를 이용하여 현장에서 전단파 계측을 수행하였다. 전기장(electric field)에 의해 변형이 일어나고, 반대로 응력(stress)을 가하면 전하(electric charge)가 발생하는 물질인 압전 소자는 1970년대 중반 이후에 실험실에서 흙 시료의 전단파 속도를 측정하는 기술로 발전되어 왔다. 이것이 벤더 엘리먼트(Bender Elements)로 설명되어 진다.

본 연구진은 이미 소형이며 에너지 변환이 우수한 벤더 엘리먼트를 이용하여 현장 계측 액추에이터(actuator)와 트랜스듀서(transducer)로서의 활용도를 검증하였으며(정재우 외, 2005), 벤더 엘리먼트를 현장에 적용하는 예비 단계로, 최적의 벤더 엘리먼트 제작과 기하학적 배치에 대한 연구를 실내 카올리나이트 토조에서 수행하였다. 이 예비시험에서 개발된 벤더 엘리먼트를 갯벌에 삽입하여 크로스홀 방식과 인홀 방식으로 탄성과 시험을 수행하였다. 일련의 벤더 엘리먼트를 깊이 약 2m까지 삽입하여 현장 시험의 적용성을 확인하였으며, 추후 깊은 심도까지 삽입할 수 있는 맨드렐(mandrel)과 관입장치를 개발하여 연약지반의 탄성과 속도 측정 장치 개발을 완성하고자 한다.

2. 벤더 엘리먼트(Bender Elements) 개요

벤더 엘리먼트는 그림 1과 같이 두 개의 피에조 세라믹이 내부의 금속판(shim)과 접착된 상태로 구성 되어 있다.

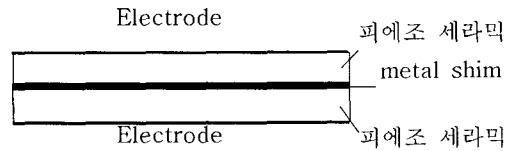


그림 1 벤더 엘리먼트의 구조

벤더 엘리먼트는 특별히 정해진 표준 단면이나 설치 법이 있는 것이 아니므로 그 모양이나 단면, 설치 방법은 다양하다. 각 시험 조건이나 시험 대상 매질에 따라 가장 잘 반응할 수 있도록 그 단면을 제작하여야 한다. 벤더 엘리먼트는 피에조 세라믹과 금속판과의 접합 방식이나 단자 연결 방법에 따라 직렬(Series)과 병렬(Parallel)의 두 가지 방법이 있다(그림 2 참조).

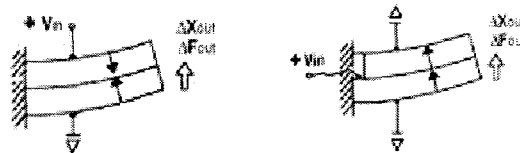


그림 2 벤더 엘리먼트의 직렬연결(좌)과 병렬연결(우)

같은 양의 변위를 얻기 위하여 병렬연결이 직렬연결보다 더 적은 전압을 요구하게 되는데, 즉 같은 전압을 가하였을 때 병렬연결에서 더 많은 변위가 발생하므로 액추에이터(source)로 많이 사용하며, 직렬 연결은 압전 특성상 작은 변위에서 높은 전압이 발생하므로 신호 감지기(receive)로 많이 사용하게 된다.

이러한 벤더 엘리먼트는 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹판이 신장하는 동안 반대편 세라믹판은 수축하게 됨으로써 굴곡 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤더 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 및 진동을 측정할 수 있다.

벤더 엘리먼트 시험의 기본 구성 요소로는 0.191mm 두께의 피에조 슈트를 원하는 크기만큼 잘라서 만든 벤더 엘리먼트와 전단파 발생 장치인 Function generator로부터 발생된 전기적 신호(약 10V)가 Power Amplifier를 통하여 최대 200배(약 200V)까지 증폭되어 벤더 엘리먼트에 가해지게 된다. 이때 Function generator로부터 1mHz ~ 19.9MHz의 주파수를 조절하여 벤더 엘리먼트와 매질의 공진 주파수에서 측정을 하게 된다. 그림 3은 실제 벤더 엘리먼트 실험에 필요한 장비와 크로스홀 형과 인홀형의 실험을 나타낸 것이다.

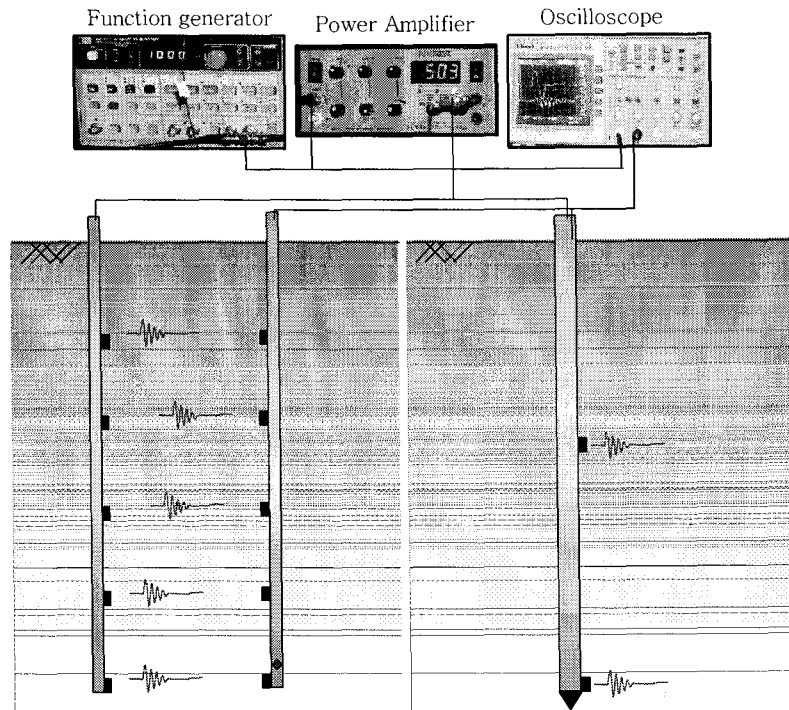


그림 3 벤더 엘리먼트 측정 장치와 실험 모식도

3. 벤더 엘리먼트 적용 시험

3.1 개요

지금까지의 벤더 엘리먼트는 실내에서 삼축 압축시험장비에 장착하여 공시체의 P파나 S파의 측정하는데 사용되어 왔으나(Vincenzo Fioravante and Roerto Capoferri, 2001), 본 연구에서는 현장시험에 활용하는 한 예로, 벤더 엘리먼트를 연약지반인 갯벌에 매설하여 깊이 약 2m까지의 전단파 속도를 측정하고자 하였다. 크로스홀 형의 경우 정확한 전파거리를 모를 경우를 가정하여 벤더 엘리먼트의 기하학적인 배치로 전단파의 도달 시간차를 이용하여 전단파 속도를 구할 수 있었으며, 인홀 형 방식을 이용한 시험은 여러 가지 경우의 수를 두어 최적의 신호를 획득할 수 있도록 벤더 엘리먼트를 배치하는 시험을 실내 카울리나이트 토조를 이용하여 확인하였다.

3.2 크로스홀 형 시험

본 연구진은 이미 전년도 연구에서 크로스홀 형 시험을 실내 카울리나이트 토조를 이용하여 아주 양질의 신호를 획득하여 그 정확성을 입증하였으며, 현장 적용 가능성을 확인 한 바 있다. 동일한 방법으로 두 개의 rod에 한쪽은 발진자용 벤더 엘리먼트를 다른 쪽은 수신기를 그림 4(a)와 같이 약 20cm의 간격으로 설치하여 충남 보령 OO지역 갯벌현장에서 관입시험을 수행하였다. 깊이 약 2m까지 인력으로 관입하여 그림 4(b)와 같은 각 깊이별 양질의 전단파 신호를 획득할 수 있었다. 그림 4의 (a)에서 벤더 엘리먼트의 아래에 위치한 금속판은 벤더 엘리먼트가 관입될 때 손상을 방지하기 위하여 설치한 것으로 벤더 엘리먼트의 두께보다 얇은 판을 사용하였다.

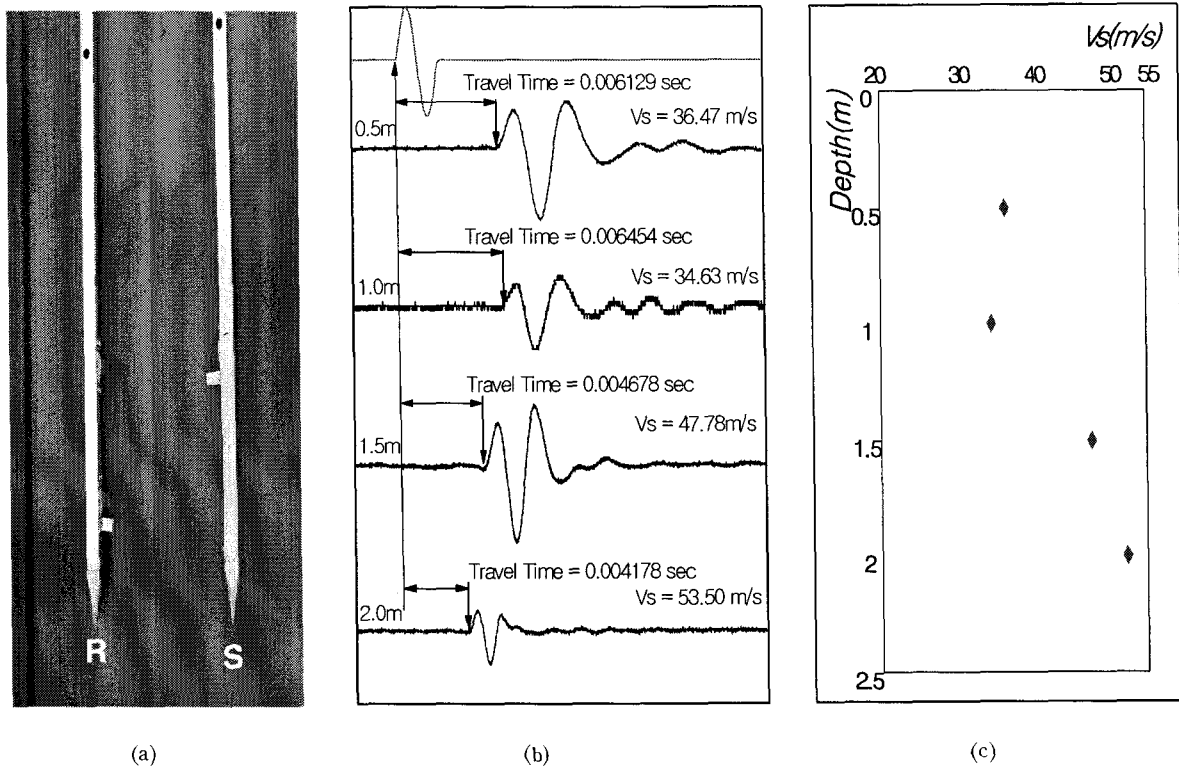


그림 4 크로스홀 형 벤더 엘리먼트 측정 장치(a)와 깊이별 전단파 신호(b) 및 속도 주상도(c)

크로스홀 형 시험의 경우 전단파의 도달 거리는 매우 중요한 요소이다. 그러나 깊은 깊이의 관입시 rod의 휨 등으로 인하여 관입 전의 도달 거리와 차이가 생길 수 있다. 이는 경사계를 부착하여 경사보정으로 정확한 거리를 산정할 수 있다. 그러나 경사계 센서 설치가 고가이고, 벤더 엘리먼트의 기하학적인 배치만으로 정확한 전단파 속도를 구할 수가 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 수신기의 벤더 엘리먼트를 높이 H(약 10cm)만큼 아래에 한 개를 더 설치하여 각 수신기에 도달하는 전단파의 시간차를 이용하여 식 (3)과 같이 전단파 속도를 구할 수 있다. 압밀상태가 균질하고 등방성의 매질이라고 가정한다면 수평 및 경사 방향의 전단파 속도가 같아야한다. 따라서 상대적으로 전파 간격이 더 긴 경사 방향의 도달시간이 수평 방향의 도달시간보다 길어야 하므로 수평 방향과 경사 방향은 아래 그림 5에서 보는 바와 같이 그 도달파의 시간차가 발생하게 되며 식(1), (2), (3)과 같이 전단파 속도를 구할 수 있다.

수평 방향의 전단파 속도는 식 (1)과 같이 수평 방향의 도달시간 t_1 을 이용하여 획득하고, 경사 방향의 전단파 속도는 식 (2)와 같이 경사 방향의 도달시간 t_2 를 이용하여 획득한다.

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

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

또한, 식 (1)과 식 (2)로부터 유도된 식 (3)을 이용하여 전단파 속도를 획득할 수 있다.

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

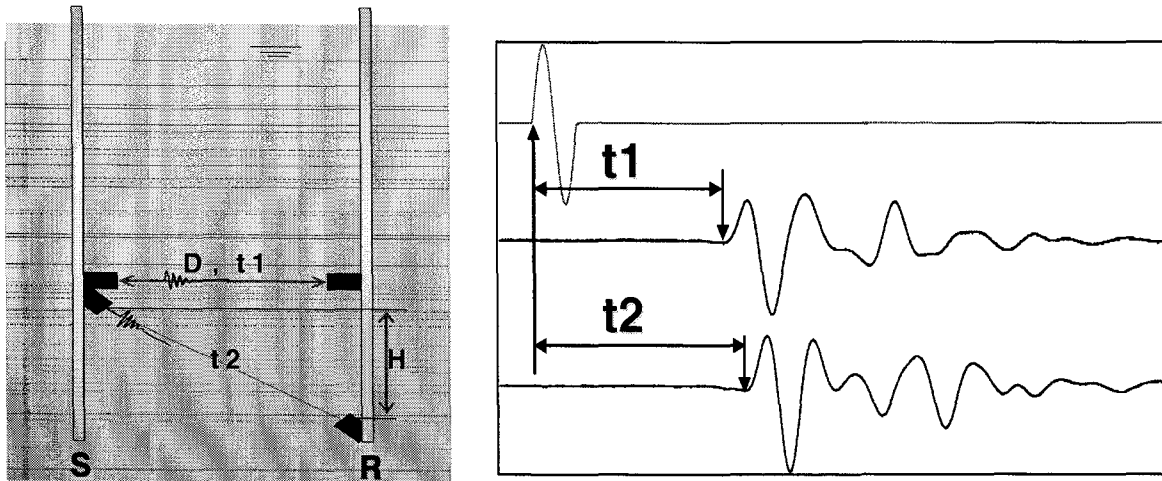


그림 5 벤더 엘리먼트의 기하학적 배치(좌)와 도달 전단파의 시간차(우)

아래 그림 6은 발진기와 수신기의 기하학적 배치를 이용한 것으로 실내 카울리나이트 토조에서 각도를 30°, 45°, 60°로 변화를 주어 각각 측정된 전단파 신호이다. 실제로 수평거리와 경사거리를 정확히 제어 카울리나이트 토조에 관입하여 실험한 것으로 수평 방향과 경사 방향은 각각 24.9 m/s와 25.7 m/s의 속도를 나타내었으며, 위 식 (3)을 이용하여 실제 수평 방향과 경사 방향의 진파 거리를 모른다고 가정하고 두 도달파의 시간차로 계산한 값이 26.2 m/s로 아주 근사한 값을 보여주고 있다. 그러나 경사각도 45°와 60°는 전단파가 매질을 통해 수신기로 도달하는 시간보다 수평거리의 rod에 먼저 도달하여 그 진동이 수신기 벤더 엘리먼트에 먼저 전달되고, 이후에 경사 방향으로 전단파가 수신기에 전달하고 있는 모습이 보여진다. 따라서 45°와 60°의 경사각은 정확한 도달 시점을 확인 할 수 없으므로 벤더 엘리먼트를 배치할 때 45°이상의 과도한 경사는 피해야 할 것으로 보인다.

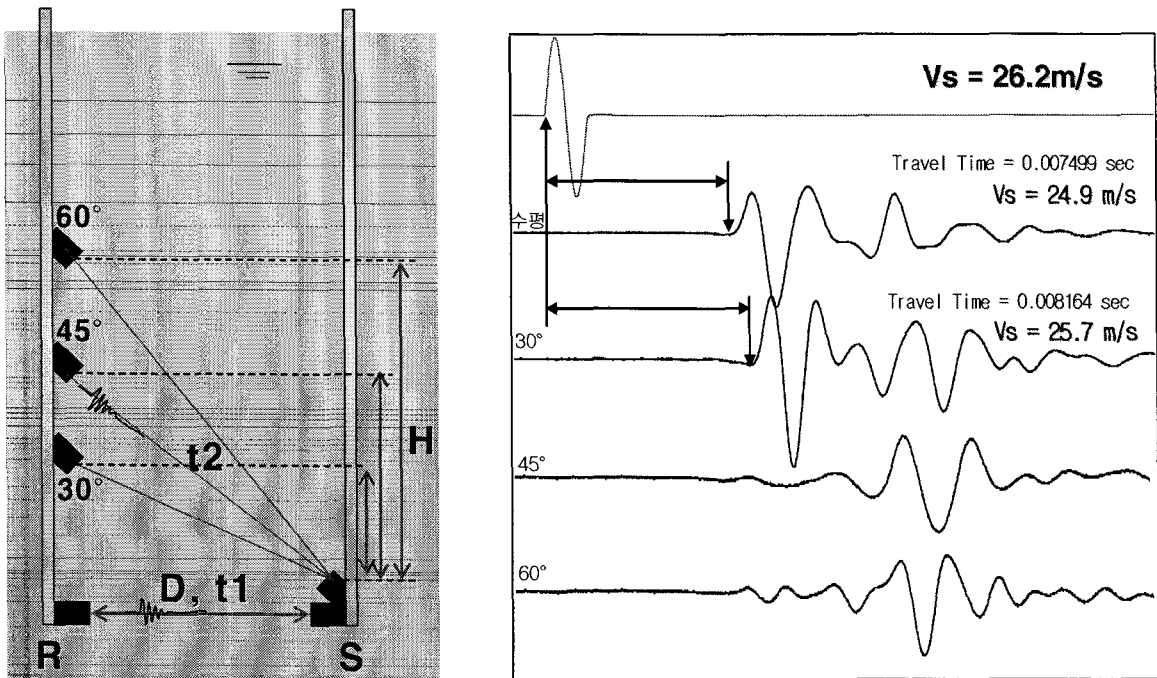


그림 6 벤더 엘리먼트의 각도별 기하학적 배치(좌)와 도달 전단파의 시간차(우)

위 카울리나이트 토조를 이용한 실험을 통해 검증한 장치(그림 7 참조)를 실제 평택의 ○○지역 갯벌에 관입하여 현장 실험을 수행하였다. 정확한 수평 전파 거리를 모른다고 하고 수평 방향과 경사 방향의 전단파를 그림 7과 같이 측정하여 각 깊이별 전단파 속도를 구할 수 있었다.

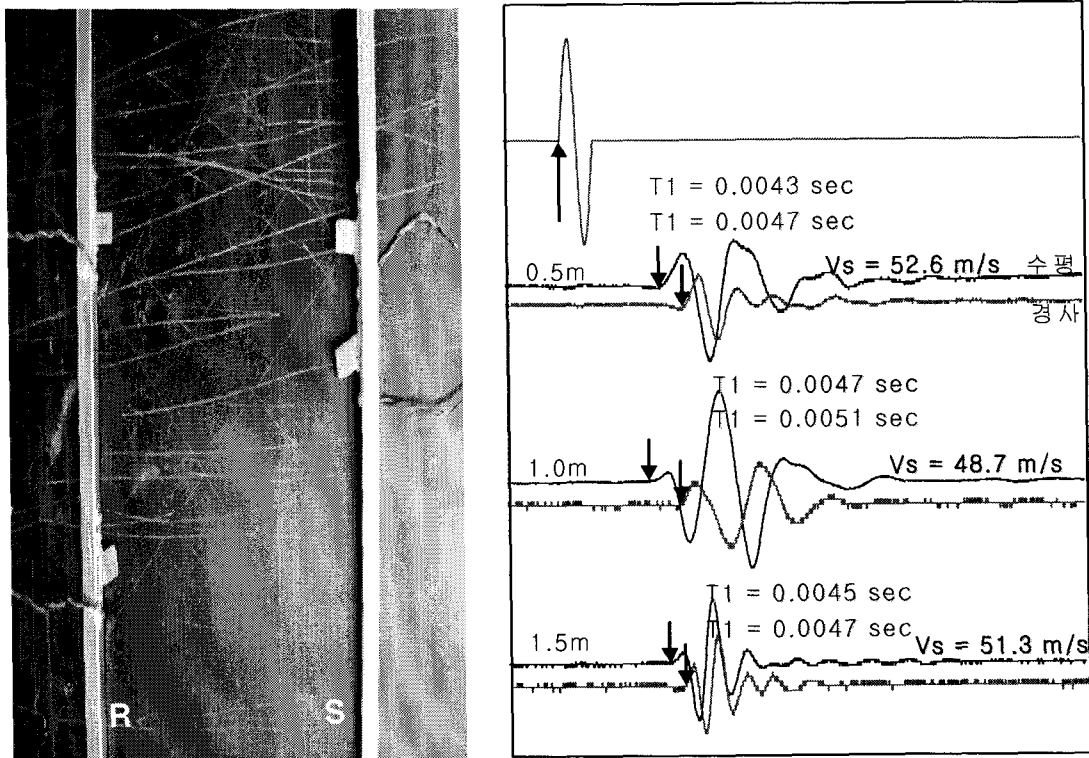


그림 7 벤더 엘리먼트 측정 장치(좌)와 깊이별 전단파 신호(우)

3.3 인홀 형 시험

인홀 형 시험은 기본적으로 1개의 봉에 발진자와 수신기를 설치하여 여러 모형 실험으로 최적의 장착 가능한 모형을 개발하고자 실내에서 카울리나이트 토조를 이용하여 실험을 수행하였다.

인홀 형은 한 개의 rod로 지중에 간단히 삽입해야 한다는 점을 고려하여 그림 8과 같이 고안하였으며, 발진자와 수신기가 일직선상으로 약 10cm의 간격으로 설치가 되어 발진자에서 발생된 신호를 아래에 위치한 수신기가 획득하게 된다. 그림 8과 같이 설치된 형태는 지중 삽입시 벤더 엘리먼트의 손상이 비교적 적을 것이라는 장점이 있다. 그러나 발진자에서 발생된 전단파가 실제로는 수평 방향이기 때문에 수직으로 위치한 수신기에 도달하지 못하고 오히려 발진자에서 발생된 진동이 봉을 타고 수신기에 전달될 우려가 있으며, 실제로 측정한 결과 그림 8(우)와 같이 신호 관독에 어려움이 있었다. 수신기에 도달하는 신호 중 발진기의 신호와 비슷한 것은 Cross-talk현상으로 인한 것으로 발진기와 수신기의 거리가 10cm의 짧은 거리임에도 불구하고 전단파가 도달하는 모습을 보이고 있지 않다.

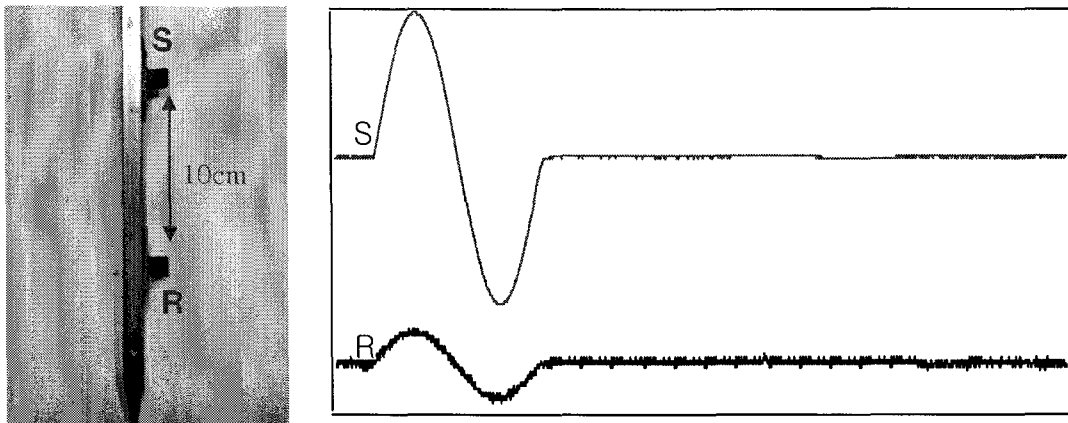


그림 8 A경우의 인홀 형 장치(좌)와 전단파 신호(우)

그림 9는 위 그림 8에서의 문제점을 극복하고자 그림과 같이 발진자와 수신기를 완전히 분리하였다(경우 B). 발진자와 수신기의 설치간격을 10cm로 하여 한 쌍의 나란한 봉에 각각 설치하였으며 실내 카울리나이트 토조에 설치를 하였다. 그림 9의 (우)는 probe로부터 계측한 전단파 신호이다. 이 경우에 신호 판독에는 어려움이 없었으나 한 개의 봉이 아닌 분리된 두 개의 봉을 사용해야하므로 실제 적용하기에는 어려움이 있을 것으로 생각된다.

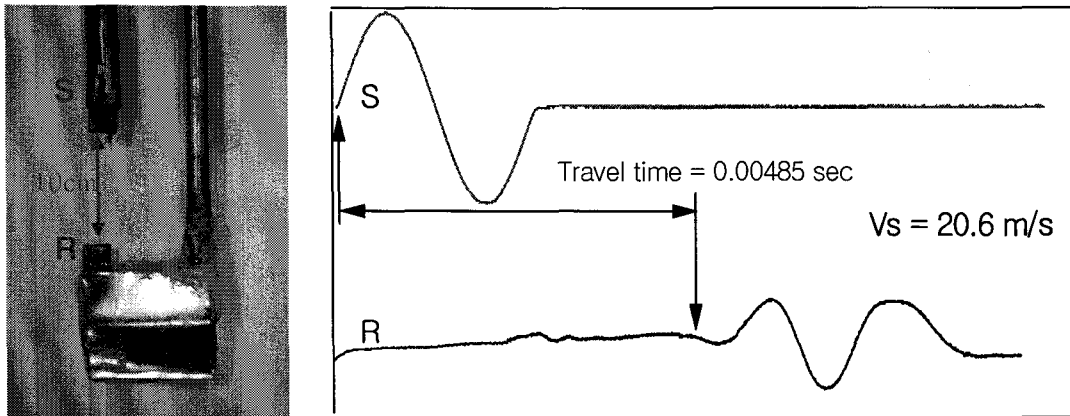


그림 9 B 경우의 인홀 형 장치(좌)와 전단파 신호(우)

그림 10은 위 그림 8에서 발진기와 수신기가 서로 다른 방향으로 인하여 전단파가 도달되는 것을 명확히 감지하지 못하는 점을 보완하기 위하여 고안하였다(경우 C). 한 개의 봉에 발진기(위, 아래)와 수신기(중간)를 거리 약 10cm 간격으로 같은 봉에 설치를 하되 벤더 엘리먼트가 움직이는 방향을 달리 하여 설치하였다. 위나 혹은 아래의 발진기에서 발생된 전단파는 중간에 위치한 수신기를 향한 방향으로 진동을 하게 되며, 수신기의 동작 방향이 발진기와 수직 방향으로 설치되었더라도 진동의 방향과 같기 때문에 수신기는 그림 10의 우측에서 보는 바와 같이 상당히 양질의 전단파를 수신 할 수 있게 된다.

인홀 형 시험을 같은 실내 카울리나이트 토조에서 실시하였으나, 시간이 경과함에 따라 카울리나이트의 강성이 증가하여 측정 시기가 다른 B 경우와 C 경우의 전단파의 속도가 약간 다르게 측정되었다.

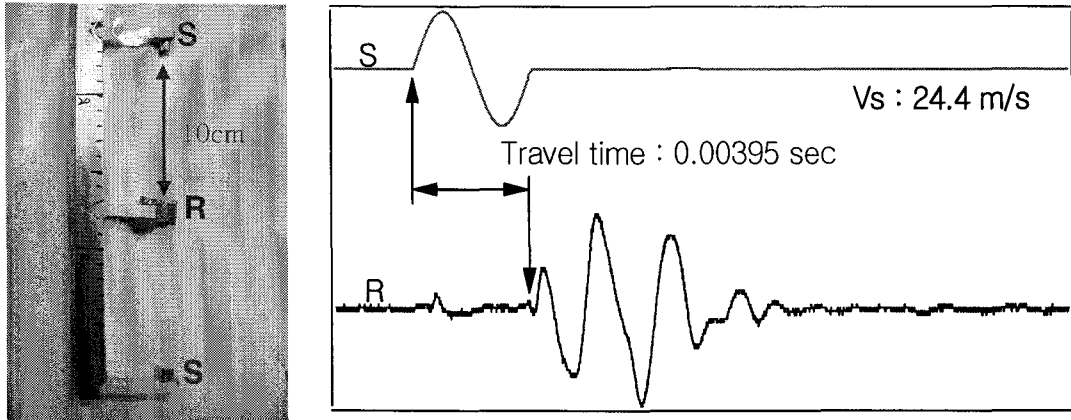


그림 10 C 경우의 인홀 형 장치(좌)와 전단파 신호(우)

4. 관입장치

벤더 엘리먼트를 이용한 크로스홀 형 시험이나 인홀 형 시험을 현장에 적용하기 위하여 깊이 약 2m까지 인력으로 관입하였다. 그러나 갯벌과 같은 연약지반에서 깊이 2m 정도는 인력으로 가능하나 실제 연약지반 계측에 적용할 경우 깊이 수 십 미터까지의 계측을 요구하게 됨에 따라 기계적인 힘을 이용한 관입 장치의 개발이 반드시 수반되어야 한다. 그리고 갯벌과 같이 입자가 고운 지반이 아닌 곳에 관입 할시 벤더 엘리먼트가 손상될 가능성이 있다. 그러나 이는 벤더 엘리먼트가 설치된 봉에 이를 보호할 수 있는 외관을 함께 지정 심도까지 관입한 후 다시 외관을 인발하여 벤더 엘리먼트가 보호될 수 있게 함으로써 해결할 수 있고, 이에 대한 장치 개발의 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 결론

벤더 엘리먼트가 탄성과 발생과 그 수신이 우수하다는 것을 전년도 연구에서 확인한 바 있다. 본 연구에서는 이렇게 제작된 벤더 엘리먼트를 실내 카울리나이트 토조실험을 통해 그 현장 적용성을 확인 하였으며, 실제 연약지반인 갯벌에 관입하여 전단파를 측정하는 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벤더 엘리먼트가 실제 현장에 적용하여도 양질의 전단파를 획득할 수 있어 연약지반의 강성 측정이 가능하다.
- (2) 벤더 엘리먼트는 연약지반에서 전단파 계측에 탁월한 성능을 보이며, 장래에 연약지반 현장 계측에 사용될 가능성이 입증되었다.
- (3) 추후 깊은 심도까지의 계측을 위하여 벤더 엘리먼트 관입장치와 벤더 엘리먼트를 보호할 수 있는 장치 개발에 대한 연구를 계속 수행해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술개발연구사업 “지속 가능한 연약지반 역학적 특성평가를 위한 Piezoelectronics의 실용화 연구” 과제의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

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**, 제 21권, 1호, pp.105~114
3. 목영진, 박철수, 정재우, 박치원(2005). “전단파계측을 이용한 연약지반의 압밀상태와 전단강도 평가” **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp.3437~3440
4. 목영진 외(2005), “해양에서의 탄성파 탐사콘의 적용성 검토”, **한국해양연구원**
5. 백영식 외(1997), "지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography개발", **건설교통부**
6. 유재영, 김기일, 손은화(2002), **압전 세라믹스**, 한국과학기술정보연구원
7. 조성민 외(2004), “현장타설 말뚝의 건전도 시험 방법”, **한국도로공사 제 21회 연구성과 발표회 논문집**, pp. 73-86
8. 정재우, 목영진, 장인성(2005), “현장 토목 계측을 위한 벤더 엘리먼트의 적용성 연구”, **한국지반공학회 논문집**, 제 21권 5호, pp215~223
9. 정재우(2005), **벤더 엘리먼트를 이용한 토목재료의 강성측정에 대한 적용성 연구**, 석사학위 논문
10. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Reimer,M.F(1998), "Analysis of Bender Element Test", **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, vol.21, No.2, pp.42-53
11. Campanella, R.G., Robertson, P.K., and Gillespie,D.(1986), "Seismic Cone Penetration Test," "Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering," **Geotechnical Special Publication**, No.6, Virginia Tech., Blacksburg, VA, PP.116-130
12. Dyvik, R. and Madshus, C.(1985), "Laboratory Measurement of G_{max} Using Bender Elements", **Proceedings ASCE Annual Convention**, Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan
13. Gautschi, G. (Gustav),(2002), **Piezoelectric sensorics**, Berlin ; New York : Springer
14. G.M.Brignoli, Marino Gotti, and Kenneth H. Stokoe,II,(1996), "Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers", **Geotechnical Testing Journal**, vol. 19, No. 4, pp.384-397
15. J.C. Santamarina, in collaboration with K.A. Klein and M.A. Fam,(2001), **Soils and waves**, Chichester ; New York : J. Wiley Sons.
16. Mok, Y.J., Kim, J.H., and Kang, B.S.(2003), "A Pilot Study of In-Hole Seismic Method", **Journal of the Korean Geotechnical Society**, Vol.19, No.3 June, 2003, pp.23-31.
17. M. L. Ling and P. D. Greeding,(2001), "A novel bender/extender element for soil testing", **Geotechnique**, vol. 51, No. 8, pp. 713-717
18. Richart, F. E., Hall, J. R. and Wood, R. D.(1970), **Vibration of Soil and Foundation**, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jerrsey.
19. Richard J. Hoar,(1982), **Field Measurement Of Seismic Wave Velocity And Attenuation For Dynamic Analyses**, Ph.D Dissertation, University of Texas at Austin. pp 37-447.
20. Stokoe, K.H., II and Woods, R.D.(1972), "In-Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method", **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Proceedings, ASCE, Vol. 98, No. SM5, pp. 443-460.
21. Uchino, Kenji,(1997), **Piezoelectric actuators and ultrasonic motors**, Boston, MA : Kluwer Academic Publishers
22. Vives, Antonio A.(2004), **Piezoelectric transducers and applications**, Berlin ; New York : Springer-Verlag

23. Viggiani G. and J.H. Atkinson (1995), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, vol. 45, No. 1, pp. 149-154
24. Vincenzo Fioravante and Roerto Capoferri (2001), "on the use of multi-directional piezoelectric transducers in triaxial testing", *Geotechnical Testing Journal*, vol. 24, No. 3, pp. 243-255
25. Xiangwu Zeng and Bixian Ni (1998), "Application of bender element in measuring G_{max} of sand under K_0 condition", *Geotechnique*, vol. 45, No. 1, pp. 149-154