

벤더엘리먼트에서 발생하는 탄성파의 방향성에 대한 실험적 연구

Experimental study on directivity of the elastic wave using bender elements

최종윤¹⁾, Jong-Youn Choi, 김현기²⁾, Hyun-Ki Kim, 조남준³⁾, Nam-Jun Cho

¹⁾ 국민대학교 건설시스템공학과 석사과정, Master Student, Dept. of Civil Engineering, Kookmin University

²⁾ 국민대학교 건설시스템공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kookmin University

³⁾ 국민대학교 건설시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kookmin University

SYNOPSIS : Bender element is made of connecting two piezoelectric elements which have different polarities from each other, and is a kind of sensors which can be used either way as a source making elastic wave or a receiver. Elastic waves generated by stimulating the bender elements can be decomposed to P-wave and S-wave propagation. Numerical and experimental studies are conducted, and results show that multiple measurements are recommended to determine wave arrivals from the received signals.

Keywords : Bender element, Elastic wave, Directivity, Shear waves

1. 서론

벤더엘리먼트(Bender elements)로 발생시킨 탄성파를 이용하여 흙시료의 탄성적 성질을 구하는 시험이 토질역학 분야에서 처음으로 적용된 이후 (Shirley와 Hampton, 1978), 많은 분야에 있어 미소 변위 영역에서의 지반의 물리적 성질을 구함에 있어서 벤더엘리먼트 시험이 많이 이용되고 있다 (Dyvik와 Madshus, 1985; Brignoli 등, 1996; Souto 등, 1994; Nazarian과 Baig, 1995; Nakagawa 등, 1996; Ferreira 등, 2006). 벤더엘리먼트 시험을 통하여 평가된 전단파의 속도 V_s 와 매질의 밀도 ρ 를 알고 있다면 다음의 식을 이용하여 최대전단탄성계수 G_{max} 를 산정할 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

그리고 벤더엘리먼트는 삼축압축시험기나 압밀셀 등 여러 시험기에 비교적 간단히 부착시켜 시료의 교란을 최소화하면서 반복적으로 최대전단탄성계수를 구할 수 있는 장점이 있어 여러 곳에서 사용하고 있다. 하지만, 적절한 조건하에서 시험이 진행되지 않는 경우에는 시료 내외부에 존재할 수 있는 다양한 전자기파의 영향(Sachse와 Pao, 1987), 근처 지반의 영향(Arroyo 등, 2003), 셀의 경계에서 반사되어 전달되는 탄성파(Arroyo 등, 2006) 등의 요인으로 인해 탄성파의 속도를 정확하게 측정하지 못하게 된다. 그리고 시험시 반사되어 도달하는 압축파 및 근접장 효과 등의 영향으로 실제 전단파의 도달 신호 이전에 유사한 신호가 발견될 수도 있기 때문에 벤더엘리먼트 시험시 발생하는 탄성파의 방향성을 확인하는 것은 중요하다(Sachse와 Pao, 1987). 게다가 아직까지 벤더엘리먼트의 설치 및 전단파의 정확한 전파 시간 결정을 위한 시험기법 등이 표준화 되어 있지 못하여 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다 (Viggiani와 Atkinson, 1995; Arulnathan 등, 1998).

본 연구에서는 벤더엘리먼트의 진동으로 인해 방향성을 가지고 생성되는 탄성파로 전단파 속도를 측정하는 경우에 있어서 탄성파 전달의 방향성을 고려하여 전달 속도를 측정함으로써 미소변형 전단탄성

계수 산정에 있어 오류를 줄이는 방법을 제안하고자 한다.

2. 시험개요

2.1 시험방법

그림 1과 같이 발신기(source)와 수신기(receiver)로 사용할 벤더엘리먼트를 설치하여 수신 각도에 따른 파의 전달양상을 확인하고자 하였다.

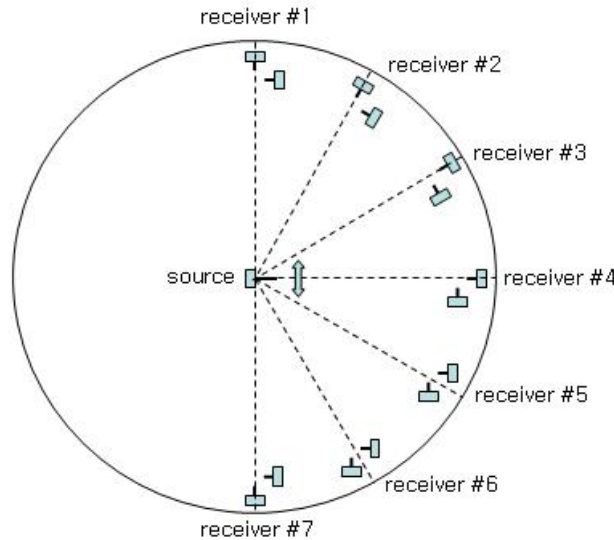


그림 1. 벤더엘리먼트의 방향성을 확인하기 위하여 실험할 위치와 방향

그림 1의 수신 벤더엘리먼트 #1, #4, #7는 발신 벤더엘리먼트의 진동방향과 평행하게 혹은 연직하게 설치되어 있으므로 평행방향으로의 압축파와 연직방향으로의 전단파를 수신할 것으로 예상할 수 있다. 수신 벤더엘리먼트 #2, #3은 발신 벤더엘리먼트의 진동방향과 약 30°, 60° 내외의 전달각도에 설치하여 실험을 실시하는데, 이 영역의 경우에는 전단파와 압축파가 섞이는 영역이지만 수신 벤더엘리먼트의 배치를 전파방향과 평행/수직하게 설치함으로써 압축파와 전단파를 구분하여 수신할 수 있다.

수신 벤더엘리먼트 #5, #6는 수신 벤더엘리먼트 #2, #3와 마찬가지로 발신 벤더엘리먼트의 진동방향과 약 30°, 60° 내외의 전달각도에 설치하여 실험을 실시하는데, 수신 벤더엘리먼트의 배치를 수평, 수직한 방향으로 설치함으로써 의도적으로 압축파와 탄성파가 혼재한 탄성파를 다른 두 방향의 성분으로 측정하여 이를 측정 각도에 대해 분할함으로써 측정 신호에서 전단파 성분과 압축파 성분을 구분하게 된다.

2.2 시험장비

그림 2와 같이 발신기(source)는 사각 기둥으로 제작하여 좌우로 이동이 가능하게 하였고 수신기(receiver)는 원형 기둥으로 360° 회전할 수 있도록 제작하였다. 좌측의 원형 기둥에 장착한 수신기가 우측의 발신기와 이루는 각도가 약 30°, 60° 가 되도록 조절을 해가면서 탄성파가 각도에 따라서 어떠한 파의 형태를 띠게 되는지 확인할 수 있도록 하였다.

각도뿐만 아니라 발신기(source)와 수신기(receiver)의 거리에 따라서 탄성파의 방향성이 일정하게 나타나는지도 확인할 수 있게 제작하였다.

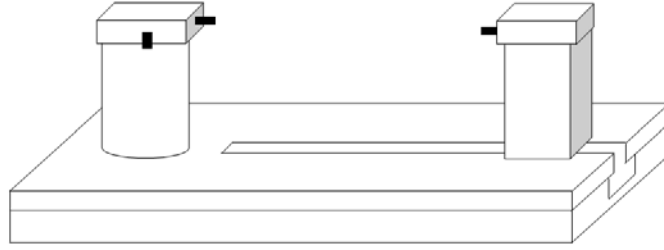


그림 2. 단방향 진동에 따라 발생하는 탄성파의 방향성 시험 장비 개요도

3. 해석 결과

3.1 단방향 진동에 따른 탄성파의 전달과 방향성

Hung 등 (2008)과 Kim(2005)의 연구에 따르면 벤더엘리먼트가 가지고 있는 방향성으로 인하여 전단파와 압축파가 방향에 따라서 발생하게 되고 파가 발생하는 수평선상이 아닌 다른 점에서 전단파와 압축파가 동시에 일어나는 것을 수치해석 결과로 보여주었다.

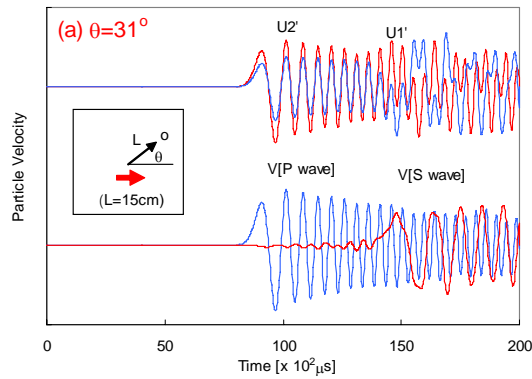


그림 3. 진동점에서 수평방향으로 31° 기울어진 방향으로 전달되는 탄성파 (Kim, 2005)

위의 그림 3는 source로부터 진동방향의 평행방향으로 31° 각도 기울어진 지점을 통과하는 탄성파의 수평 방향 성분(U1)과 수직방향 성분(U2)를 수치해석을 통해 구한 것으로 이 파형에서 어느 부분이 전단파가 전달된 부분이고 어느 부분이 압축파가 전달된 부분인지 구분이 안 가는 것을 보여주고 있다. 이를 그 아래 그림과 같이 전파방향에 대한 평행방향과 연직방향 성분으로 분할하게 되면, 전파방향에 평행하게 진동하며 전달되는 압축파와 연직방향으로 진동하며 전달되는 전단파 성분으로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

3.2 단방향 진동에 의한 탄성파의 방향성에 대한 해석결과

Love(1944; white, 1983)는 시간에 따라 변화하는 힘 $G \cdot g(t)$ 가 등방성탄성 물질에 임펄스의 형태로 재하되어 발생한 탄성파가 전파될 때, 전파된 탄성파가 방사 방향과 그에 직교하는 법선 방향에 대해 어느 정도의 진폭을 가지고 전달되는지를 다음과 같이 계산하였다 (White, 1983):

$$u_r = \frac{G \cos \phi}{4\pi \rho V_p^2 r} g \left(t - \frac{r}{V_p} \right) \quad (1)$$

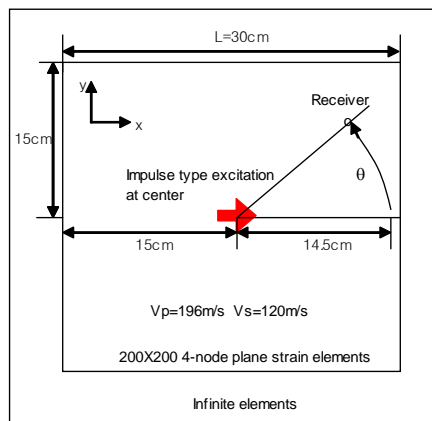
$$u_{\theta} = 0 \quad (2)$$

$$u_{\phi} = -\frac{G \sin \phi}{4\pi \rho V_s^2 r} g \left(t - \frac{r}{V_s} \right) \quad (3)$$

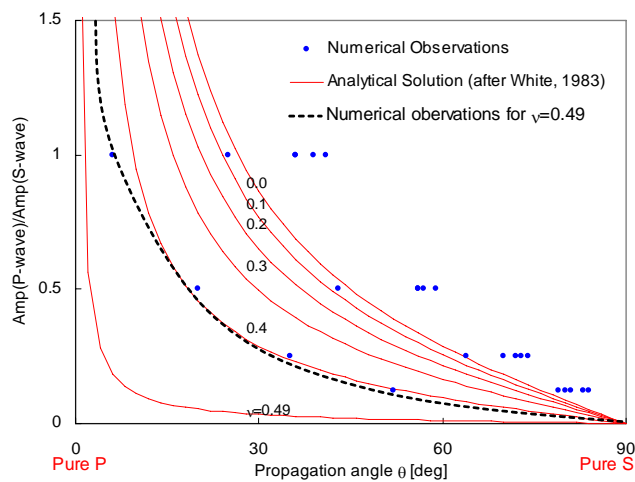
여기서 V_p 는 P파 속도, V_s 는 S파 속도, ρ 는 밀도, 그리고 r 은 원점으로부터의 방사거리이다. 이 식을 이용하여 임펄스 형태의 탄성파가 한 점에서 발생하여 전달될 때, 접선 방향으로 전달되는 탄성파의 진폭에 대한 방사 방향으로 전달되는 탄성파 진폭 크기의 비율을 계산할 수 있다:

$$\left| \frac{u_r}{u_{\phi}} \right| = \frac{1}{|\tan \phi|} \frac{V_s^2}{V_p^2} = \frac{1}{|\tan \phi|} \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (4)$$

그림 4는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 각기 다른 포아송비로 정의된 등방성탄성 매질에 대하여 매질의 중앙부분에서 임펄스 형태의 단방향 진동이 발생하였을 때 전파 방향에 따라 P파와 S파의 성분을 분리하여 그 진폭의 비율을 계산한 것을 보이고 있다. 건조하거나 부분적으로 포화된 흙의 경우에 포아송비가 작게 나타나게 되는데, 이러한 매질일수록 P파와 S파가 서로 혼합되어 전파되는 비율이 높기 때문에 전달속도 측정에 있어서 보다 주의를 기울일 필요가 있다. 단방향으로만 전단파의 속도를 측정할 경우에는 순수 전단파의 전파 방향으로부터 $-20^{\circ} \sim +20^{\circ}$ 내에서만 이루어지도록 설정하는 것이 바람직하다.



(a)



(b)

그림 4. 매질의 포아송비와 전파각도에 따른 탄성파의 방향성

4. 결 론

본 연구에서는 벤더엘리먼트의 진동으로 인해 발생하는 전단파의 방향적 특성에 대해 수치해석적인 방법과 실험적인 방법을 사용하여 분석하였다.

그 결과 단방향에서의 전단파 측정에서 발생할 수 있는 도달시간 측정의 오류를 줄이기 위해서는 최소한 두 방향 이상에서의 수신각도로 측정하여 방향성을 고려하여 전단파 성분을 추려내는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

추후에 방향성을 고려하여 전단파 성분을 분리하여 측정하는 실험이 계획되어 있고, 이를 통해 본 연구 내용에 대한 확인이 가능할 것으로 판단한다.

그러나 실제 흙에서의 탄성과 전달과정은 이상적인 선형탄성물질과는 전달과정에서의 감쇠현상이 다를 뿐더러 수신하는 센서와 흙 사이의 전달과정에서 또한 많은 오차가 포함될 것으로 생각되기 때문에 그 적용에 있어서 이에 대한 고려가 반드시 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수 연구과제사업(KRF-2008-D00600)에 의해 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Arroyo M., Wood M.D. and Greening P.D. (2003). "Source near field effects and pulse tests in soil samples". *Geotechnique* 53(3), pp. 337-345
2. Arroyo M., Wood M.D., and Greening P.D., Medina and Rio (2006). "Effects of sample size on bender-based axial G_0 measurements". *Geotechnique* 56(1), pp. 39-52
3. Arulnathan, R., Boulanger, R. W. and Riemer, M., F., (1998). "Analysis of Bender Elements Tests", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 21, No. 2, pp. 120-131
4. Brignoli, E.G.M., Gotti, M., and Stokoe, K.H. (1996). "Measurement of shear in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 19, No. 4, pp. 384-397
5. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985). "Laboratory Measurements of G_{max} using Bender Element", *Engineering Convention*, Detroit. New York: American Society of Civil Engineers. pp.186-196
6. Ferreira, C., Viana da Fonseca, A. and Sanyos, J.A. (2006). "Comparison of simultaneous bender elements and resonant column tests on Porto residual soil", *Proceedings, Geomechanics: Laboratory Testing, Modeling and Applications. A Collection of Papers of the Geotechnical Symposium in Rome, March 16-17, 2006*, Ling, Callisto, Leshchinsky and Koseki (Eds.), pp. 1063-1070
7. Hung, T., Kim, H. K., Lee, J. S. (2008). "Effects of spatial heterogeneity on elastic wave propagation in soils", *Proc. of the 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM '08)*, Jeju, May 26-28, 2008
8. Kim, H.K. (2005). "Spatial variability in soils: Stiffness and strength", PhD thesis, Georgia Institute of Technology, U.S.A.
9. Lee and Santamarina (2005). "Bender elements: performance and signal interpretation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070
10. Love, A.E.H. (1944), "A treatise on the mathematical theory of elasticity, fourth edition," Dover,

New York.

11. Nakagawa, K., Soga, K. and Mitchell, J.K. (1996). "Pulse transmission system for measuring wave propagation in soils", *Journal of geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 4, pp. 302-308
12. Nazarian, G. and Baig, S.S. (1995). "Evaluation of bender elements for use with coarse-grained soils", *Proceedings of Third International Conference on Recent Advance in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, No. 1, pp. 89-94
13. Sachse, W. and Pao, Y. (1987). "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids", *Journal of Applied Physics*, Vol. 49, No. 8, pp. 4320-4327
14. Shirley, D.J. and Hampton, L.D. (1978). "Shear wave measurements in laboratory sediments", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 63, No. 2, pp.607-613
15. Souto, A., Hartikainen, J. and Ozudogru, K. (1996). "Measurement of dynamic parameters of road pavement materials by the bender element and resonant column tests", *Geotechnique* Vol. 44, No. 3, pp. 519-526
16. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995). "Interpretation of Bender Element Test", *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 149-154
17. White, J.E. (1983), "Underground sound: Application of seismic waves," Elsevier, New York.