

전단파를 이용한 쉘비 튜브의 샘플 교란 효과 평가 Assessing sample disturbance of shelby tube using shear waves

윤형구¹⁾, Hyung-Koo Yoon, 이종섭²⁾, Jong-Sub Lee, 김준한³⁾, Joon Han Kim, 조용순⁴⁾, Yong-Soon Cho

- ¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- ²⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- ³⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate student, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University.
- ⁴⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate student, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University.

SYNOPSIS : To evaluate the engineering properties of soil, the laboratory test always is carried out using samples obtained from the field. There are many studies to estimate the effect of sampling disturbance. The objective of this study appraises the disturbance using the shear wave velocity. The new shelby tube which three transducers are installed every 20cm interval is used. To laboratory tests, the large-scale consolidometer (calibration chamber) is used. During 1cm penetration, the shear wave velocity is measured by every transducer. The initial sampling disturbance is assessed through the velocity difference from bottom to right upside transducer. After finishing the sampling, the velocity is still measured every time to assess the soil disturbance in shelby tube itself. Through the measured velocity, the effect of disturbance is appraised. This study suggests that the sampling disturbance of shelby tube is effectively evaluated using shear wave velocity.

Key words : Shelby tube, Sampling disturbance, Shear wave velocity

1. 서 론

건설 공사의 규모가 날로 증가함에 따라 구조물의 경제적이고 효율적인 시공을 위하여 정확한 지반조사를 수행하는 것은 상당히 중요하다. 이에 따라 현장 실험과 실내 실험이 수행되고 있다. 현장 실험의 경우 대상 지반의 현장 상태 응력을 통해 정확한 물성치를 파악 할 수 있으나 비경제적인 문제, 한 지점에서 측정된 데이터를 통해 대상 지반의 전체적인 특성 반영 그리고 경험적인 관계를 이용하여 관련 지반 계수를 도출 하는 문제점 등이 있다(Than et al. 2002). 따라서 현장에서 추출한 샘플링 시료를 이용하여 실내 실험을 수행해 현장 실험과 병행, 지반 조사의 정확한 물성치를 결정 하고 있다. 하지만, 샘플링은 경제적인 장점이 있는 반면, 그에 따른 응력 해방 및 시추기를 통한 기계적인 교란으로 비배수 전단강도와 압축성을 대변하는 지반 강도 특성을 정확히 반영 하지 못하는 단점이 있다(Chung et al. 2004; 윤여원 외. 2007). 따라서 많은 연구자들이 이런 샘플링 교란 효과에 대해 연구를 수행하고 있다.

본 논문은 국내에서 시료 샘플링을 위해 많이 사용되고 있는 쉘비 튜브관을 이용하여 기존 연구자들의 연구 방법과 달리 유효응력의 함수인 전단파를 이용하여 시간에 따른 속도를 측정하여 비교해 보았다. 전단파를 효율적으로 측정할 수 있도록 개량한 쉘비 튜브에 대하여 서술한 후, 실내 대형 챔버 실험

과 인천 송도 현장에서 추출한 샘플링에 대해 매 시간에 따른 전단과 속도를 측정하여 시간에 따른 변화와 그에 따른 간극수압 소산 정도를 확인 할 수 있었다.

2. 실험 구성

2.1 쉘비 튜브 샘플 (Shelby tube sample)

지반의 정확한 물성치를 파악하기 위해 비교란 시료를 추출하기 위한 장비는 전 세계적으로 널리 개발 및 개량되고 있다. 그에 따라 관입시 전단 비틀림을 방지 하여 교란을 최소화 시킬 수 있는 블록 샘플링과 대구경 샘플링 기술이 제안 되고 있다. 또한 최근에는 시료 추출시 발생하는 응력 해방의 효과를 최소한으로 줄이기 위해 시료 추출시 구속압을 동시에 가하여 현장 상태 응력과 동일한 조건으로 채취 할 수 있는 DFSD(Downhole Freestanding Shear Device) 샘플 방법도 개발되었다(Safaqah and Riemer 2005). 쉘비 튜브는 오픈 드라이브 샘플러중의 하나로서 인력, 잭 그리고 수압등의 압입을 통해 대상 지반의 적절한 심도 까지 관입 후 시료를 추출 하는 방법으로 현재 전세계적으로 가장 널리 사용 되고 있는 방법이다(한국지반공학회 2006).

2.2 장비 개발

기존에 사용된 연구 방법에서 탈피 하여 새로운 방법인 벤더 엘리먼트를 통해 측정된 전단과 속도를 이용하여 교란도를 파악 하기 위해 그림 1과 같이 내경 74mm, 외경 76mm의 표준 쉘비 튜브 관을 이용 하였다. 쉘비 튜브는 면적비(AR: Area Ratio)가 5.19%, 직경비(L/D)는 13.15로서 예민비 5~30의 일반적인 점토 채취가 가능하도록 구성된 쉘비 튜브이다. 내부 여유비(ICR: Internal Clearance Ratio)는 제작상의 문제로 고려되지 않았다(Degroot et al. 2005). 기존의 쉘비 튜브의 상·중·하 부분에 모두 3쌍의 벤더 엘리먼트를 설치할 수 있도록 하였으며, 벤더 엘리먼트의 고정 및 캔틸레버보 효과를 증가 시키기 위해 1.5cm × 1cm (가로×세로) 치수의 얇은 바(bar)를 설치 하였다. 벤더 엘리먼트의 치수는 4mm × 8mm (가로×세로) 로서 장착의 용이성을 위하여 나일론 소재의 스크류를 이용하여 제작하였으며, 나사산으로 제작된 구멍을 통해 쉽게 장착 하도록 하였다. 시료의 커플링과 에너지의 효율적인 전파를 위하여 벤더 엘리먼트의 돌출 길이는 쉘비 튜브 관벽을 기준으로 각각 1mm로 유지 하였다. 일반적으로 시료 교란은 관벽과의 마찰로 인해 발생함으로 돌출길이를 1mm 로 유지 하여 비료란된 영역을 측정하도록 고려하였다(이영생 1996). 또한 쉘비 튜브 선단에서 130mm 떨어지도록 바(bar)를 설치 하여 관입에 의한 선단 교란이 발생하지 않도록 하였다.

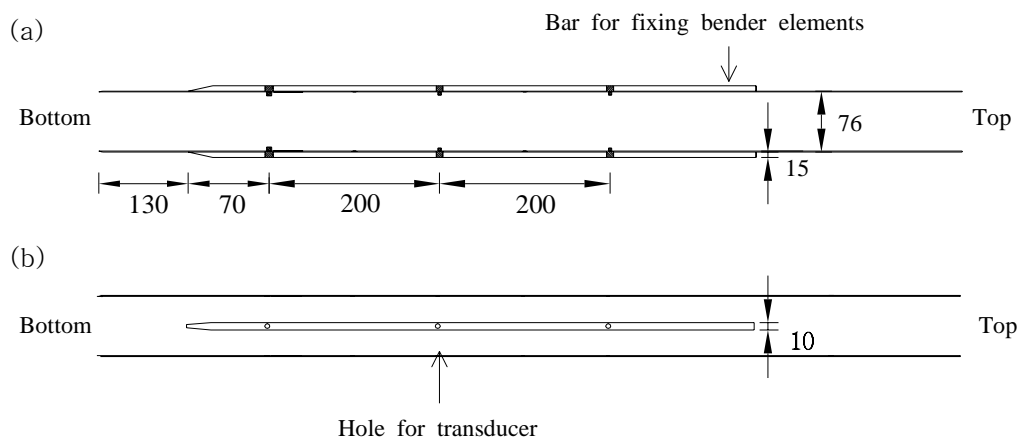


그림 1. 트랜스듀서가 장착된 쉘비 튜브관: (a) 정면도; (b) 측면도 (그림속의 단위는mm 임)

2.3 전단파-유효응력 관계

흙과 같이 입자로 이루어진 재료, 즉 입상 재료의 강성은 유효응력의 함수이다. 입자 골격간의 발생하는 힘이 모세관 현상보다 크다면, 전단파 속도(V_s)는 유효응력으로 표시된다. 따라서 전단파 속도는 파가 전파되는 방향 및 입자가 움직이는 방향의 유효응력에 영향을 받는다고 할 수 있다(Roesler 1979; Knox et al. 1982; Yu and Richart 1984; Santamarina et al. 2001).

$$V_s = \alpha(\sigma'_0)^\beta \quad (1)$$

여기서 σ'_0 는 유효응력, α , β 는 실험을 통해 결정되는 계수이다. 따라서 식 (1)을 이용하여 측정된 전단파 속도를 통해 유효응력의 변화양상을 알 수 있다. 또한 유효응력 양상에 따라 간극수압 소산정도를 예측해 볼 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 실내 실험

그림 2과 같이 높이 1.0m, 내경 0.7m 그리고 두께 22mm인 대형 챔버를 이용하여 실험을 진행하였다. 시료 조성을 위해 슬러리 상태의 재성형 부산 점토를 사용하였다. 시료의 물성치는 표 1과 같다. 배수 및 시료의 균등한 압밀을 위하여 하판 및 상판에 3cm의 모래층과 부직포를 설치하였다. 이틀간 50kPa 압력을 이용하여 시료 안정화를 시켰으며, 그 후에는 압밀을 진행하기 위해 100kPa 압력을 30일 동안 유지 하였다. 벤더 엘리먼트가 장착된 셸비 튜브 관을 관입한 후 시료 추출을 수행하였다. 수분 변화량, 즉 함수비에 따른 간극수압의 변화를 최소화시키기 위해 시료 추출 후 파라핀을 이용하여 셸비 튜브를 밀봉 하였고 랩(wrap) 과 셸비 튜브용 뚜껑을 이용하여 한번 더 밀봉을 하였다. 또한 운반 및 보관에 대한 영향을 최소화 시키기 위해 진동의 영향을 없애고 시료를 항상 수직으로 유지 하여 보관하였다. 약 13일 동안 전단파를 측정하여 시간에 따른 전단파 속도 변화, 즉 간극수압 소산 정도에 따른 유효응력의 양상을 조사 하였다. 또한 벤더 엘리먼트가 설치된 두 개의 로드(rod)를 관입하여 매심도의 전단파 속도를 도출 할 수 있는 RVT(Reference Value Test) 실험도 진행하였다. 이를 이용하여 셸비 튜브에 벤더 엘리먼트가 설치되어 있는 동일 심도에서의 전단파 속도 값을 비교할 수 있었다.

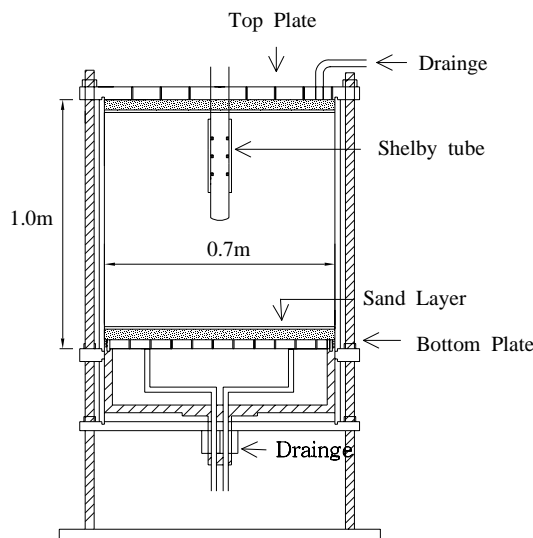


그림 2. 대형 챔버

표 1. 실험에 사용된 점토의 기본 물성치

시료	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수(%)	비중
부산점토	46.3	24.2	22.2	2.64
송도 BH-1	24.5	20.2	4.3	2.67
송도 BH-2	26.0	18.6	7.4	2.63

3.2 현장 실험

인천 송도 지역에서 지반 조사시 BH-1, BH-2 구간에서 채취한 두 개의 시료에 대하여 전단파를 이용한 쉘비 튜브내의 교란 효과를 측정하였다. 해안가 지반으로서 매립이 진행되어 상부 매립층 까지 시추 후 점토 지반에서 현장 시추기를 이용하여 일반적인 시료 추출 방법과 동일하게 쉘비 튜브를 관입하였다. 관입에 따른 쉘비 튜브관 내의 교란도를 측정하기 위하여 매 1cm 간격으로 관입을 시도 하여 하단 벤더 엘리먼트에서 측정된 전단파 속도와 시료가 상단까지 밀려 왔을때의 전단파 속도를 측정하여 쉘비 튜브관속에서의 교란 정도를 파악하고자 하였다. 또한 추출 후 에는 실내 실험과 동일하게 파라핀, 랩, 캡을 이용하여 밀봉 한 후 실험실로 운반하여 25일동안 전단파 속도를 측정하였다. 대상 지반의 시료 특성은 표 1에 요약 되어 있다.

4. 실험 결과

4.1 대형 챔버 실험

대형 챔버 실험을 통해 추출한 시료를 이용하여 13일간 시간에 따른 전단파 속도를 측정하여 그림 3 과 같은 전단파 주상도를 얻었다. 초기 도달 시간을 산정한 후 그림 4와 같이 전단파 속도를 계산하였다. 쉘비 튜브의 중간 부분에 설치된 벤더 엘리먼트를 이용하여 챔버 지표면에서 22cm인 부분의 시료가 유입되어 측정된 전단파 속도는 초기 74m/s에서 86m/s, 상단 벤더 엘리먼트 즉 챔버 지표면에서 12cm 부분의 시료 관입에 따라 측정된 전단파 속도는 81m/s에서 95m/s 까지, 시간에 따라 속도가 증가되는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 이유는 튜브관입시 발생한 간극수압이 시간이 경과하면서 소산 되어 유효응력이 증가하여 전단파 속도가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 그림 5와 같이 시료가 쉘비 튜브 관내로 유입됨에 따라 일직선 형태의 이상적인 모델이 아닌 관벽과의 마찰로 인하여 관벽쪽은 적 게 유입되는 것을 알 수 있으며, 상부 쪽으로 유입될수록 plugging 현상에 의한 다짐효과로 상단의 전단 파 속도가 증가되어 나타난 것을 확인 하였다(Baligh 1985; Baligh et al. 1987).

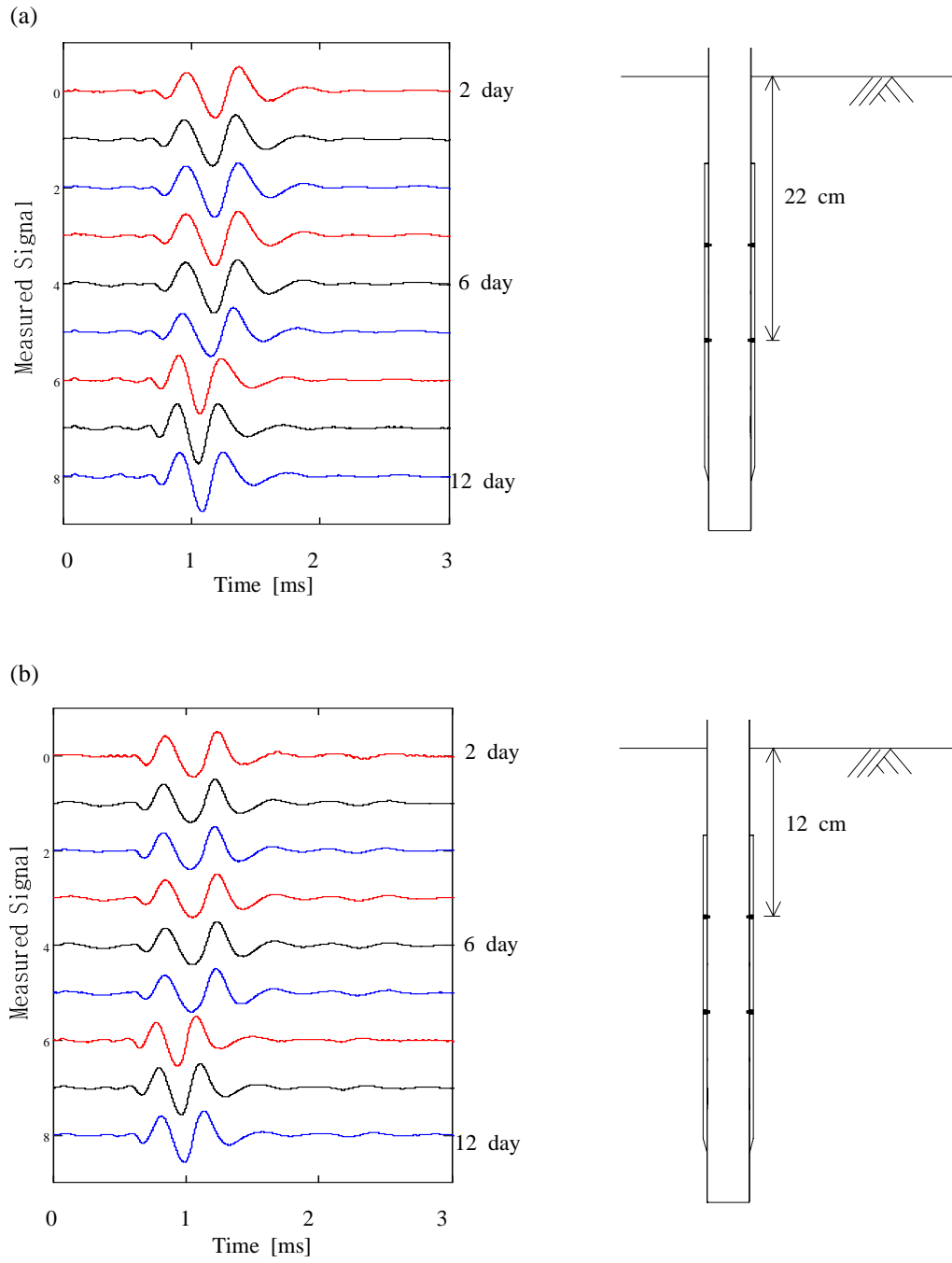


그림 3. 대형 챔버 실험에서 측정된 전단과 주상도: (a) 중간 부분(지표에서 22cm관입된 부분); (b) 상단 부분(지표에서 12cm관입된 부분)

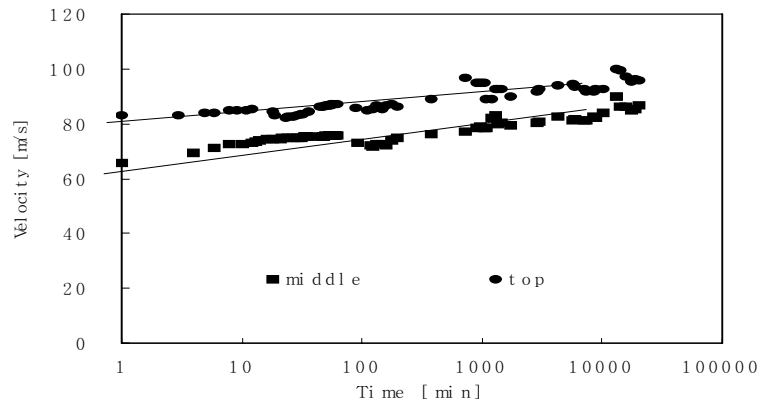


그림 4. 시간에 따른 전단과 속도 변화

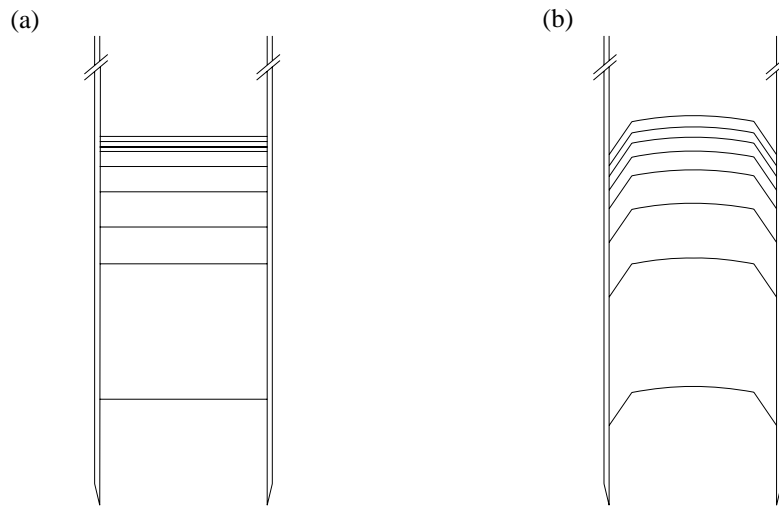


그림 5. 셸비 튜브관내의 시료 유입에 따른 변형 특성: (a) 이상적 시료; (b) 실제 시료

4.2 현장 실험

인천 송도에서 추출한 셸비 튜브 관을 이용하여 시간에 따른 전단과 속도를 측정하여 그림 6에 전단과 주상도, 그림 7에는 전단과 속도를 계산하여 나타내었다. 전단과 속도는 초기 속도보다 시간에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 그림 5와 같이 실내 실험 결과와 비슷한 plugging 현상, 시간에 따라 셸비 튜브 관벽의 간극수압 소산에 따라 전단과 속도가 증가되는 것을 볼 수 있다. 또한 매심도 1cm 마다 관입하여 셸비 튜브관내의 유입되는 시료의 변형특성에 따른 전단과 속도를 측정하려는 실험은 현장에서 시추기와 기타 굴착기계등으로 인한 신호 잡음비(S/N signal to noise)가 상당히 작아져 불량한 신호들로 인하여 정확한 분석이 이뤄지지 못했다. 시료를 추출하여 실험실 운반 시간인 약 500분 전 까지 속도는 거의 일정하며, 이를 통해 진동 및 수직을 고려하여 운반 할 경우에는 운반과정에서 큰 변형이 발생하지 않는다는 것을 확인해 볼 수 있다.

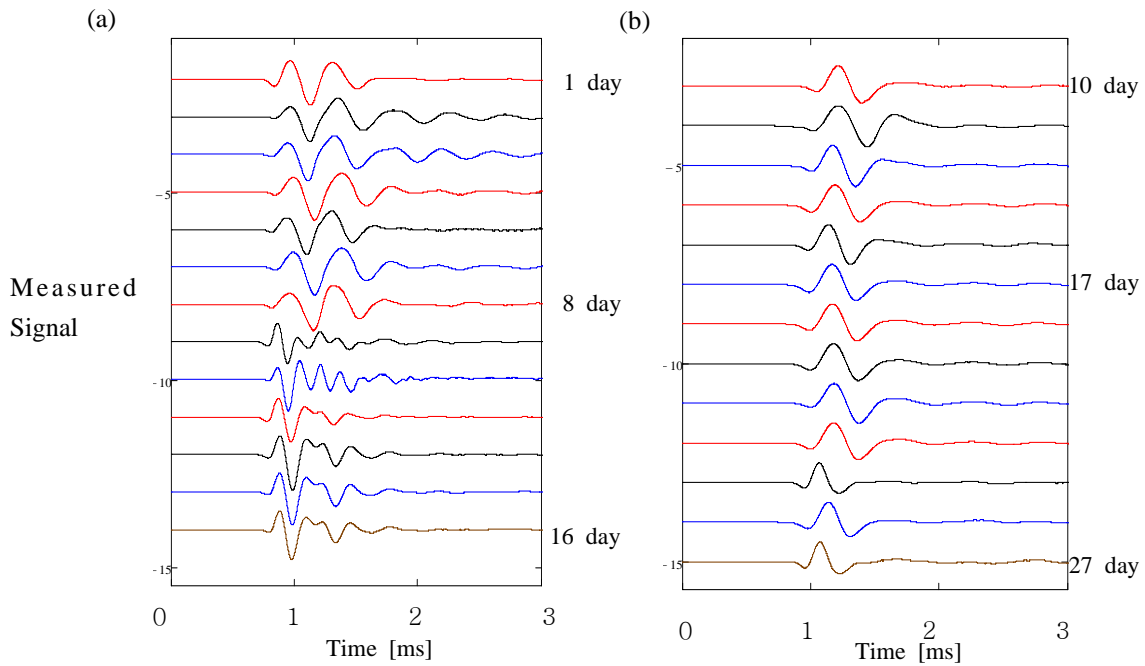


그림 6. 시간에 따른 전단파 주상도: (a) BH-1 현장; (b) BH-2 현장

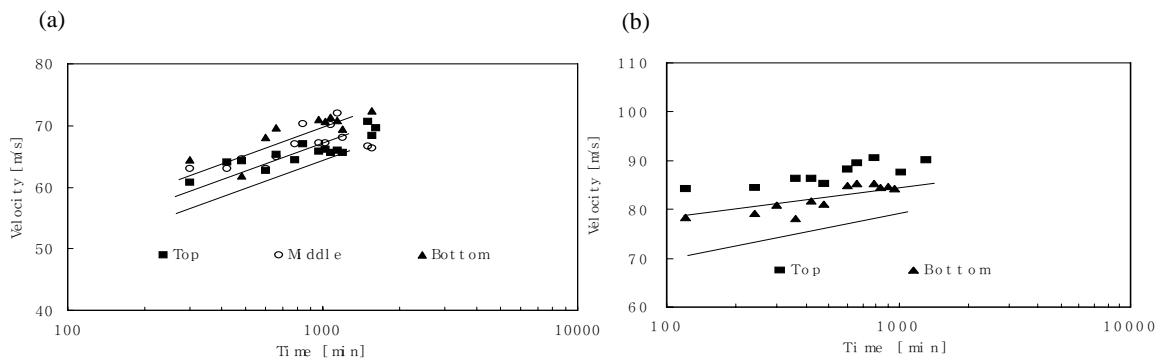


그림 7. 시간에 따른 전단파 속도 로그축: (a) BH-1 현장; (b) BH-2 현장

5. 결론

국내·외에서 실내 실험을 위해 시료 채취용으로 많이 사용되고 있는 쉘비 튜브관의 교란 효과를 기존 방법에서 탈피 하여 유효응력과 직접적으로 관련이 있는 전단파를 이용한 방법을 제시하였다. 면적비 (AR: Area Ratio), 직경비(L/D)를 모두 고려해 기존의 쉘비 튜브에 벤더 엘리먼트를 장착 할 수 있도록 장비를 개량 하여 실내 대형 챔버 실험과 현장 실험을 통해 시료를 추출 하였다. 시료와 커플링 효과의 향상 및 에너지 전파의 극대화를 위해 관벽 기준으로 1mm가 도출 되게 벤더 엘리먼트를 설치 하였다. 이는 기존의 많은 연구를 통해 밝혀진 시료의 교란이 관벽에 의해 발생한다는 것을 고려하여 상대적으로 비교란 영역인 중심 부분을 통해 실험을 수행 하였다.

쉘비 튜브 관 내에서 시간에 따른 입자구조 변화양상을 측정하기 위하여 유효응력의 함수인 전단파 속도를 측정하였다. 쉘비 튜브 관내의 시료는 시간에 따른 간극 수압의 소산 효과로 유효응력이 증가되어 전단파 속도가 증가 되는 현상을 관찰 할 수 있었다. 본 논문은 쉘비 튜브에서 발생하는 기계적인 교란과 시료 입자의 교란 중 입자 구성에 따라 발생하는 교란의 양상을 전단파로 측정하였으며, 시간에 따라 전단파 속도가 증가하고 그에 따라 유효응력이 증가 된다는 것을 볼 때 현재 사용되고 있는 샘플링

튜브 보다 더 효율적인 샘플링 튜브가 개발되어야 한다고 판단 된다.

6. 참고 문헌

1. 윤여원, 김영진, 김영석, 최은호 (2007), “불교란 시료의 채취 방식에 따른 교란도 평가”, **한국지반환경 공학회 학술 발표회**, pp. 209~214.
2. 이영생 (1996), “지반에 관입되는 시료채취관 내 흡시료에 대한유한요소해석”, **대한토목학회논문집**, 16 권 제 3-1호, pp.111~119.
3. 한국지반공학회 (2006), **지반구조물의 내진설계**, 구미서관, 서울, pp.82~97.
4. Baligh, M. M. (1985), "Strain path method", **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 111, No. 9, pp.1108~1136.
5. Baligh, M. M., Azzouz, A. S., and Chin, C. T. (1987), "Disturbances due to IDEAL tube sampling", **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 113, No. 7, pp.739~757.
6. Chung, S. G., Kwag, J. M., Giao, P. H., Baek, S. H., and Prasad, K. N. (2004), "Study of soil disturbance of Pusan clays with reference to drilling, sampling and extruding", **Geotechnique**, Vol 54, No. 1, pp.61~65.
7. DeGroot, D. J., Poirier, S. E., and Landon, M. M. (2005), "Sample Disturbance-Soft Clays", **Studia Geotechnica et Mechanica**, Vol. XXVII, No. 3-4, pp.91~105.
8. 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.
9. Roester, S. K. (1979), "Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy", **J. Geotechnique Engineering**, Vol. 105, No. 7, pp.871~888.
10. Safaqah, O. A. and Riemer, M. F. (2006), "Minimizing sampling disturbance using a new in situ device", **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Vol. 26, pp.153~161.
11. Santamarina, J. C., Klein, K. K., and Fam, M. A. (2001), **Soils And Waves**, WILEY, New York, pp.254~274.
12. Tan, T. S., Lee, F. H., Chong, P. T., and Tanaka, H. (2002), "Effect of Sampling Disturbance on Properties of Singapore Clay", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 128, No. 11, pp.898~906.
13. 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.