

지반의 동적 물성치 측정을 위한 압전소자형 계측기 개발 Development of Piezoelectric Transducers For Measuring Dynamic Stiffness of Subsurface Materials

목영진*
Mok, Young Jin

백영식**
Paik, Young Sik

임수빈***
Im, Soo Bin

ABSTRACT

A pair of piezoelectric transducers was developed for geotechnical site characterization in rock materials. SH-wave measurement capability of the transducers can provide a more complete characterization. The performance of the transducers was tested at a limestone site.

1. 서론

탄성과 시험은 내진 및 지반 동역학적 해석에 필요한 지반의 탄성과 속도(또는 탄성계수)측정에 널리 사용되는 현장시험이다. 가장 널리 알려진 방법은 크로스홀(crosshole), 다운홀(downhole), SASW법(spectral analysis of surface waves)등이다.^(2, 4) 본 논문에서는 크로스홀과 탄성과 토모그래피(seismic tomography)기법을^(1, 3) 위해 개발된 계측기를 소개하고 그 적용성에 대해 논하고자 한다.

2. 지반의 비선형 변형 특성

지반의 비선형 변형곡선은 그림 1과 같이 탄성한계 변형도(elastic threshold shearing strain), γ_e (약 10^{-3} %) 이하에서는 전단변형계수(shear modulus)는 일정하고 그 이상의 변형도 범위에서는 점차 감소하고 있다.

* 경희대학교 부교수, 정회원

** 경희대학교 교수

*** 동부엔지니어링(주), 상무

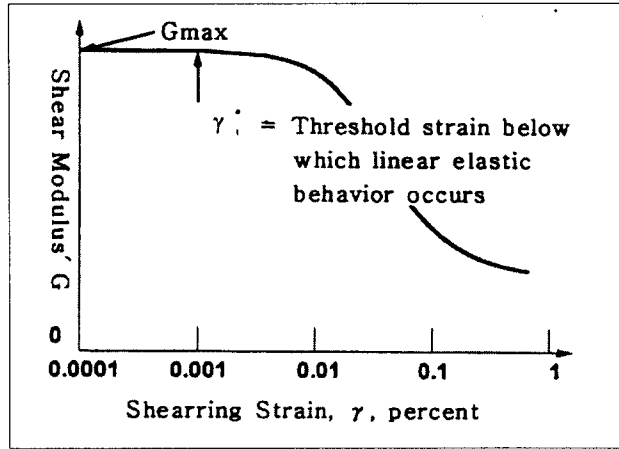


그림 1. Generalized Variation in Shear Modulus with Shearing Strain

일반적으로, 현장 탄성과 시험으로 측정된 전단변형계수는 이 탄성한계변형도 이내에서 측정된 것으로, G_{max} 로 표기한다. 비선형 부분은 실내시험으로 측정하여 현장 시험에서 구한 G_{max} 와 종합하여 그림 1과 같이 비선형 특성을 완성한다. 이 형태의 비선형 곡선이 지진해석이나 동적 구조물-지반 상층거동 해석에 이용되고 있다.

3. 탄성과의 계측

한 매질의 일점에 충격을 가하면, 그 점으로부터 탄성파가 확산된다. 일반적으로 지반은 토사와 암반으로 구성된 탄성 반무한체(elastic half space)로 모사(modelling)된다. 이런 반무한체에서 전파되는 탄성파는 내부를 통해 전파되는 체내파(body wave)와 지표면을 따라 전파되는 표면파(surface wave)로 대별된다.

체내파는 다시 전파속도에 따라 P파와 S파로 나눈다. P파는 속도가 빨라 제일 먼저 도착한다는 의미의 primary의 P를 따서 명명하였고, S파는 두 번째로 빠르다는 의미의 secondary의 S를 따서 명명한 것이다.

P파는 음파와 같이 매질의 진동방향이 파의 진행방향과 일치하고 수축이완 같은 형태 변형을 일으킨다. S파는 광파와 같이 매질의 진동방향이 파의 진행방향과 직각이며 왜곡된 형태 변형을 일으킨다. 이 왜곡되는 방향이 수직이면 SV파, 수평이면 SH파로 다시 세분한다.

지표면을 따라 후진타원운동(retrograde)형태의 입자의 움직임(particle motion)을 보이며 전파되는 파가 Rayleigh wave 또는 표면파를 따라 전파된다고 하여 표면파

(surface wave)로 부른다.

체내파를 이용한 공내 탄성과 시험은 이 파들이 주어진 거리를 통과하는데 소요되는 시간을 측정하는 것이다. 일단 통과 소요시간과 거리가 측정되면 파 속도는 통과 거리를 통과 소요시간으로 나누면 된다.

전단탄성계수(G)와 전단파 속도(V_S), 구속탄성계수(M)와 압축파 속도(V_P)는 탄성이론에 의해 각각 다음과 같은 관계가 있다.

$$G = \rho V_S^2 \quad (1)$$

$$M = \rho V_P^2 \quad (2)$$

- 여기서 G : 전단탄성계수(shear modulus)
M : 구속탄성계수(constrained modulus)
 V_S : 전단파속도(shear wave velocity)
 V_P : 압축파속도(compression wave velocity)
 ρ : 흙의 단위 밀도
(즉, 밀도=단위중량/중력가속도)

4. 계측기 설계 개념

4.1 압전소자

壓電素子(piezoelectric material)는 전기장(electric field)에 의해 변형이 일어나고, 반대로 응력을 가하면 전하(electric charge)가 발생하는 물질이다. 즉, 압전소자는 기계적 에너지와 전기적 에너지 사이의 변환을 가능하게 한다. 본 장비에 사용한 압전소자는 티탄질콘산납(lead zirconate-lead titanate)으로 分極처리(poling)를 하여 압전(piezoelectric)성질을 갖도록 여러 과정을 거쳐 인공적으로 생산한 素子이다.

본 장비에 사용된 압전소자는 그림 2와 같이 디스크형으로 두께팽창모드(thickness dilation mode)를 이용하였다. 이 모드는 에너지 변환의 효율이 가장 큰 모드이다.

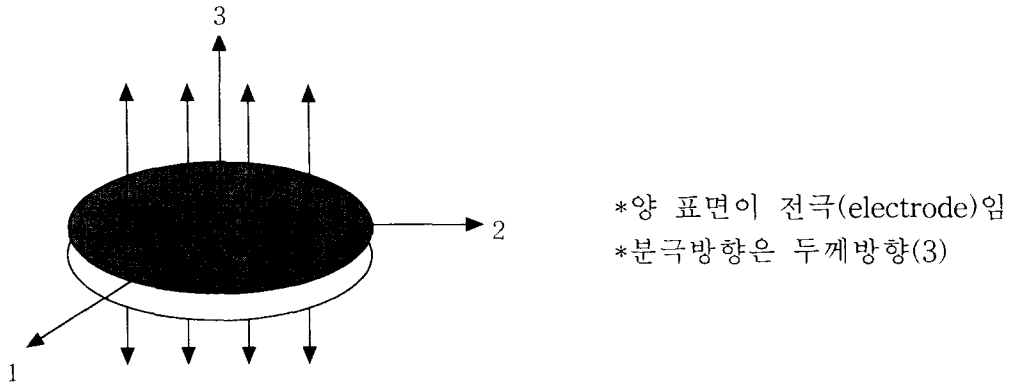


그림 2. 압전소자 디스크의 두께팽창모드

압전소자의 양면에 연결된 전극(electrode)에 전압을 걸어 주면 압전 세라믹이 용수철 처럼 변형되며 콘덴서와 같이 전기적 에너지가 충전된다. 일단 전기 에너지가 충분히 충전된 후에 압전 세라믹의 양 전극판을 쇼트(short)시키면 전기장이 순간적으로 방출되어 충격변형에너지가 방출된다. 마치 눌렀던 용수철이 튕겨지듯이 탄성 에너지가 방출하게 된다. 이 탄성 에너지는 압전세라믹에 충전된 최대 전기에너지 양에 비례한다. 콘덴서에 충전되는 전기 에너지는 전기장(electric field)의 제곱에 비례하므로, 큰 전기장을 갖도록 세라믹을 여러장 겹쳐 (이하 세라믹 스택(ceramic stack)이라 부른다.) 병렬 연결(wiring in an electrically parallel)하면 동일한 전압에서 높은 전기장(electric field) 및 에너지 밀도를 달성할 수 있다. 따라서 발진자(source)는 얇은 세라믹을 여러장 겹쳐 병렬연결한 세라믹 스택(ceramic stack)을 사용하여 탄성 에너지가 최대한 축적된 스프링이 튕겨지는 것과 동일한 개념으로 설계되었다. 반면에 압전세라믹을 감지기(receiver)에 사용할 때는 작은 기계적 변형(진동)에서도 높은 전기적 신호(signals)가 출력되도록 두꺼운 세라믹을 사용하여 최대한의 시그널 대 노이즈 비(signal-to-noise ratio)가 되도록 병렬 연결하였다.

4.2 계측기 방향조정

P-파는 속도가 가장 빠르므로 발진자 및 감지기의 방향(polarity)조정 없이도 어느 정도 측정할 수 있다. 탄성과 기록에서 초동(initial arrival)을 취함으로 P-파의 도달 시간을 측정할 수 있다. 그러나 S-파의 속도는 P-파보다 느려서 P-파의 여진과 S-파가 중첩되어 S-파 도달시점을 식별하기가 어려운 실정이다. 이런 점을 극복하고 S-파 도달 시점 식별이 가능한 탄성과 기록을 얻으려면 발진방향과 감지기의 방향을 동시에 조정하여야 한다.

5. 장비설계 및 제작

아래와 같은 장비의 필수 요건을 충족시키도록 최종설계를 확정 장비제작을 하여 “Geoping”으로 명명하였다.

- a) SH-파를 발진하고 감지할 수 있어야 함
- b) 장비가 소형으로 사용하기 쉬워야 함
- c) 장비의 유지 보수가 용이 하여야 함
- d) 장비가 비교적 저렴하여 대중화가 용이 하여야 함
- e) NX크기의 시추공내에서 사용 가능하여야 함

장비는 검측공내에 설치되는 압전세라믹 transducer(발진기와 감지기), 지상 콘트롤 유닛(control unit)과 기록기(recording system)로 이루어져 있다. 장비개발 중 가장 어려운 부분이 NX크기의 검측공내에 들어갈 수 있도록 (즉 공간의 제한때문) 설계 되어야 하는 발진자와 감지기이다. 발진자에서 발생시키는 탄성과 에너지는 압전세라믹에 충전되는 전기에너지의 양에 의해 제한되므로, 세라믹의 체적에 직접 비례한다. 검측공 크기의 제한 때문에 직경 38mm의 압전 세라믹을 20장 병렬로 겹쳐서 총 두께 30mm의 stack을 2조 사용하였다. 각 세라믹 원판의 두께는 1.25mm이고 병렬로 연결 하였을 때 1킬로볼트의 전압으로 최대 20,000v/in의 전기장을 발생 시킬 수 있다.

발진자에서 발생하는 탄성과 에너지의 주파수 성분은 세라믹 스택(ceramic stack)을 집어넣을 chamber(stack housing and backing mass)의 무게에 영향을 받는다. 압반에서 사용하고자 하는 주파수 대역은 10kHz 내외를 목표로 하였다. 이 chamber는 스테인레스 강재를 사용하여 약 0.90Kg의 무게가 되도록 설계 하였다. 사용된 밀착장치(coupling)는 소방호스(fire hose)를 이용한 것이다. 이 호수는 외피가 직포로 싸여 마모에 강하여 펑크의 염려가 없고 저렴한 것이 특징이다. 유지보수가 거의 필요없고 값이 싸 본 장비 설계목적에 아주 잘 부합되는 소재 이었다. 단, 이 호스의 양단 봉합과 공기 입출을 위한 연결 휘팅(fitting)을 특수 제작하는 것으로 설계하였다. 또한 이 공기 주머니는 세라믹 chamber와 장비의 다른 부분 사이의 진동차단재(isolator) 역할을 할 수 있어 일석이조의 효과를 거둘수 있다. 압전소자를 가동하는 전자회로는 회로 chamber에 내장되도록 설계되었다. 이 transducer의 방향을 조정하기 위해 조정막대를 연결시키는 연결고리가 맨 위에 달려 있다. 본 장비는 손가락으로 튕기듯이 지반을 때려주어 맑은 소리를 내게 한다는 의미로 “Geoping”으로 명명하였다. Geoping의 발진자 개념도는 그림 3와 같고, 조립과정 및 조립후의 장비의 일부는 그림 4~6과 같다.

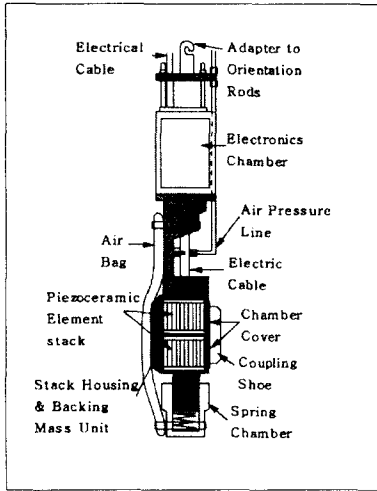


그림 3. 발진자의 개념도

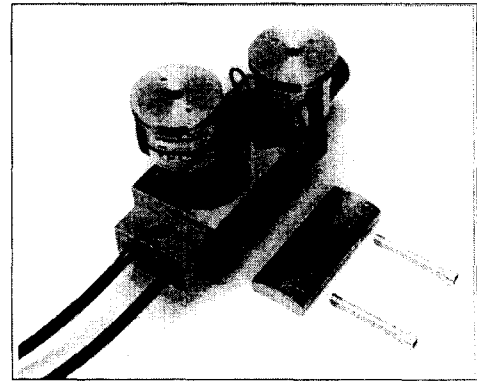


그림 4. 발진자 스택을 챔버에 조립하는 과정

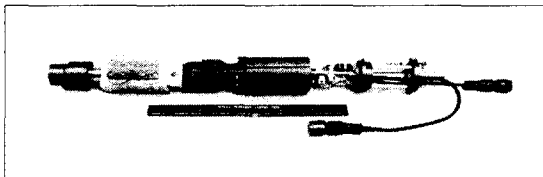


그림 5. 발진자 다운홀유닛의 조립과정

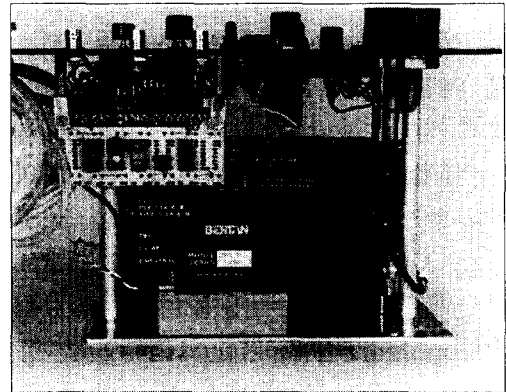


그림 6. 콘트롤유닛

6. 현장 적용

이 계측기의 현장 적용성을 검증하고자 미국 텍사스 대학 구내에 개발된 크로스홀 현장에서 P-파와 S-파를 계측하고 계측기의 기계적 및 전기적 기능을 시운전하였다. 이 현장도 깊이 25ft(7.5m)까지는 풍화된 석회암 층이고 그 아래는 비교적 신선한 석회암 층이었다. 크로스홀의 두 검측공 사이의 거리는 약 10ft(3m)이었다. 그림 7 과 8은 이 현장의 P-파와 S-파 기록의 일부이다.

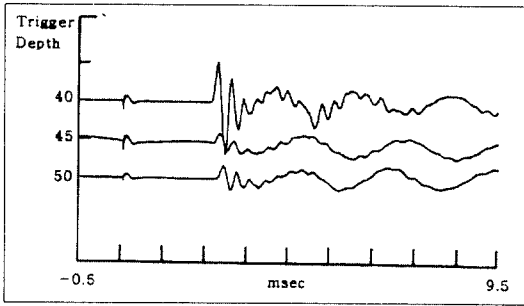


그림 7. 텍사스 대학 현장의 P-파 계측

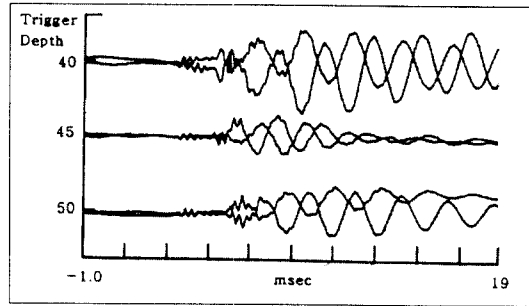


그림 8. 텍사스 대학 현장의 S-파 계측

7. 결론

내진 해석 및 구조물-지반 동적 상호 거동 해석하기 위한 지반의 탄성계수 측정을 위해 압전 세라믹을 이용한 계측기 개발을 하였다. 한정된 현장 시험으로 이 계측기의 전기적 및 기계적 성능을 평가하였다. 이 계측기의 장점으로는 P-파는 물론 S-파 계측의 가능성이 있다. 앞으로 여러 국내 현장에 적용하여 지속적인 개선을 통해 범용성이 큰 계측기가 되기를 희망한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구개발사업(R&D/94-0014) "지반구조 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발" 과제로 수행되었으며, 이의 재정적 지원에 감사드립니다.

8. 참고문헌

1. 백영식 외, 1997, 지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발 (최종보고서), 건설교통부
2. Mok, Y. J. 1987. Analytical and experimental studies of borehole seismic methods. Ph. D. dissertation. The University of Texas at Austin.
3. Roblee, C. J. 1990. Development and evaluation of a tomographic seismic imaging techniques for characterization of geotechnical sites. Ph. D. dissertation. The University of Texas at Austin.

4. Stokoe, K. H. , Nazarian, G. J. Rix, I. Sanchez-Salinerro, J. C. Sheu, and Y. J. Mok 1988. In situ seismic testing of hard-to-sample soils by surface wave method. Proc. Earthquake engineering and soil dynamics II. ASCE Geotechnical special publication. No. 20 : Park City, Utah : 305~320.