한국지반공학회논문집 제21권 5호 2005년 7월 pp. 215 ~ 223 / 특별논문집 제2호 /

현장 토목 계측을 위한 벤더 엘리멘트의 적용성 연구

A Pilot Study of Implementing Bender Elements to In-situ Civil Engineering Measurements

정 재 우[1] Jung, Jae-Woo
장 인 성[2] Jang, In-Sung
목 영 진[3] Mok, Young-Jin

Abstract

Piezo-ceramics are special materials which transform energy from mechanical to electrical forms and vice versa. Bender elements are composite materials consisting of thin piezo-ceramics and elastic shims, and are widely used as actuators and transducers in the field of electronics, robotics, autos and mechatronics utilizing the effectiveness of energy transformation capability. In geotechnical engineering, commercial bender elements are used in laboratory as source and receiver in the measurements of soil stiffness. The elements were built by using various metal shims sandwiched between piezo-ceramics and coating over the composite in the research. A pair of elements were buried in a concrete block and used as source and receiver to measure the stiffness of the concrete. The test results were verified by comparing with the resonant column testing results. In a preliminary stage of the development of an in-situ seismic testing equipment using bender elements for soft clay materials, shear waves were generated and measured by burying the elements in the barrel of kaolinite and water mixture. The measured shear wave signals were so distinct for the first-arrival pick that applicability of the elements in the field measurements could be very promising.

요 지

압전 소자는 전기적 에너지를 기계적 에너지로, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 물질이다. 피에조 세라믹판을 이용하여 탄성 매질을 겹쳐서 만든 벤더 엘리멘트는 전압을 가하면 변위가 발생하는 특성을 이용하여 액츄에이터로 사용할 수 있고, 반대로 변위가 생기면 전압이 발생하는 압전 현상을 이용하여 변위를 계측하는 트랜스듀서로 활용하여 탄성파 시험의 발진자와 수진기로 실내 시험에서 사용되고 있다. 벤더 엘리멘트를 이용한 탄성파 시험으로 토목재료로 많이 쓰이는 콘크리트의 강성을 측정하였고, 자유단 공진주 시험을 통하여 그 결과를 평가 하였다. 카올리나이트를 이용하여 연약지반을 모사하여 카올리나이트 슬러리의 압밀에 따른 강성 변화를 탄성파 시험을 이용하여 측정할 수 있다. 벤더 엘리멘트는 연약지반에서 전단파 계측에 탁월한 성능을 가지고 있으며, 장래에 연약지반 현장 계측에 사용될 가능성이 큰 것으로 입증되었다.

Keywords : Bender Elements, Elastic wave velocity, Kaolinite, Piezoelectric effect

1 정회원, 경희대학교 대학원 토목공학 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Kyunghee Univ., jujawo@khu.ac.kr)
2 정회원, 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 선임 연구원 (Member, Senior Researcher, Coastal Engrg. and Harbour Research Division, KORDI)
3 정회원, 경희대학교 토목·건축대학 토목공학 교수 (Member, Prof, Dept. of Civil Engrg, Kyunghee Univ.)

1. 서 론

압전 소자(piezoelectronics)는 전기장(electric field)에 의해 변형이 일어나고, 반대로 응력(stress)을 가하면 전하(electric charge)가 발생하는 물질이다. 즉, 압전 소자는 기계적 에너지와 전기적 에너지 사이의 변환이 가능한 재료이다. 최근에 이 소재의 개발이 활발해지고 이 에너지 변환 원리를 이용한 활용도가 다양하게되었다. 통신기기의 레조네이터, 의료기기의 초음파 혈류계, LCD 백라이트용 트랜스포머, 초정밀 액츄에이터, 각종 정밀센서 등 가정용 제품에서부터 IT, 로봇, 메카트로닉스 등 첨단 산업에 이르기까지 광범위하게 활용되고 있다. 이 소재 개발 및 활용에 대한 연구는 미국, 일본, 유럽의 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

국내에서도 1970년대를 시점으로 1990년대에 본격적으로 통신분야에서 연구 개발이 이루어져 왔으나 그 응용 및 생산 기술에는 선진국에 미치지 못하고 있다. 그러나, 이 소재의 응용에 대한 수요가 급진전 할 것으로 예상되어 보다 많은 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다.

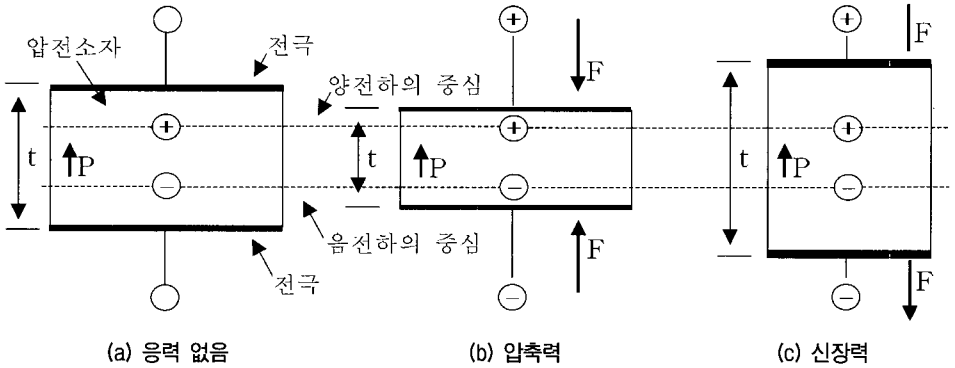
토목공학 분야에서는 전자, 기계, 정보통신, 메카트로닉스 등 타 분야에 비해 이 소재의 활용도는 극히 미미한 실정이다. 얇은 피에조 세라믹판과 금속판을 겹쳐서 만든 벤더 엘리멘트는 삼축 압축 셀에 설치하여 흙 공시체의 강성 측정에 액츄에이터와 트랜스듀서로 활용되고 있다. 또한 디스크 형이나 원주형의 두께 팽창모드를 이용한 공대공 초음파 시험(CSL, Crosshole Sonic Logging), 현장 탄성파 장비 등 이 소재를 이용한 현장 장비가 등장하였다.

본 연구에서는 소형이며 에너지 변환이 우수한 벤더 엘리멘트를 이용하여 현장 계측 액츄에이터와 트랜스듀서로서의 활용도를 검증하고자 한다. 콘크리트 구체 내에 이 벤더 엘리멘트를 매설하여 액츄에이터와 트랜스듀서로 이용 가능성을 평가하고 지반의 강성 측정의 현장 탄성파 장비로 개발에 필요한 일차적 시험을 수행하였다.

2. 압전효과

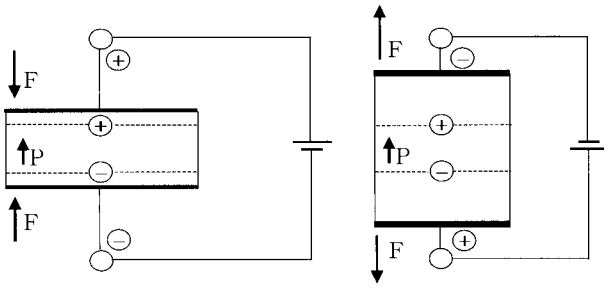
압전 효과란 전압을 발생시키는 기능으로 압전 소자에 외부 응력, 진동 변위 등을 주면 그 출력단에 전기신호가 발생하는 현상을 말하며 착화용 압전 소자나 각종 센서에 응용된다. 또 역압전 효과라고 하는 것은 변위를 발생시키는 기능으로 압전 소자에 외부로부터 전압을 걸어주면 소자가 기계적 변위를 일으키는 현상을 말하며 액츄에이터 등에 적용되며, 통칭해서 압전효과(piezoelectric effect)라고 부르고 있다. 이러한 현상은 전기장을 가하지 않아도 자연적인 전기적 극성(electric polarization)이 생기는 물질인 ferroelectric 물질인 경우와 결정구조의 대칭성이 없는 결정 물질인 경우 발생한다. 압전 현상을 보이는 물질에는 ZnO, CdS, 그리고 PZT($Pb(Zr,Ti)O_3$, lead zirconate titanate)등이 있다.

그림 1은 압전 효과의 설명으로 그림 1(a)는 압전 소자에 외부 응력이 없는 상태에서는 출력되는 전압이 없다. 그러나 그림 1(b)와 같이 F의 압축력을 가하면 상하의 전극에 각각 (+), (-)의 전압이 발생하고 소자 두께는 감소되고, 반대로 그림 1(c)와 같이 신장력 F를 가하면 상하의 전극에 각각 (-), (+)의 전압이 발생하며, 이 때 소자의 두께가 초기 무응력 상태보다 증가하며 압축력을 가했을 경우와 반대 현상이 발생된다. 그림 2는 역압전 효과에 대한 것으로, 여기서는 직류와 교류 전압을 가한 경우 기본 작동을 각각 나타내고 있다. 그림 1(a)와



(a) 응력 없음 (b) 압축력 (c) 신장력

그림 1. 압전 효과



(a) 상부에 +, 하부에 −　　(b) 상부에 −, 하부에 +

그림 2. 역압전 효과

같이 압전 소자에 외부로부터 전압이 가해지지 않은 상태에서 그림 2(a)는 상부에 전원의 (+)극을 또 하부에 전원의 (-)극을 각각 가한 경우로, 압전 소자의 내부 전하와 외부에서 가한 전압이 반발을 일으켜 압전 소자는 압축된다. 이와 반대로 그림 2(b)는 상부에 전원의 (-)극을 또 하부에 전원의 (+)극을 가하면, 압전 소자의 내부 전하와 외부에서 가한 전압이 서로 끌려, 그림 2(a)와 달리 압전 소자가 늘어나는 현상을 나타낸다.

3. 벤더 엘리멘트(Bender Element)

3.1 벤더 엘리멘트의 개요

Bender Element를 이용한 시험은 1978년 Shirley에 의해 실험실에서 전단파 측정으로 처음 소개된 이래 NGI(The Norwegian Geotechnical Institute, 1984)에서 삼축 압축 시험의 공시체에 벤더 엘리멘트를 장착하여 전단파를 측정하였고 NGI에서는 벤더 엘리멘트를 이용한 시험이 S파를 발생시키는 좋은 발진원이라고 제안하기도 하였다.

벤더 엘리멘트는 그림 3과 같이 두 개의 피에조 세라믹이 내부의 금속판(shim)과 접착된 상태로 구성되어 있다.

벤더 엘리멘트는 특별히 정해진 표준 단면이나 설치법이 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.

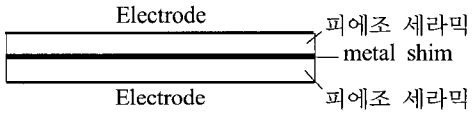


그림 3. 벤더 엘리멘트의 구조

벤더 엘리멘트는 피에조 세라믹과 금속판과의 접합 방식이나 단자 연결 방법에 따라 직렬(series)과 병렬(parallel)의 두 가지 방법이 있다(그림 4 참조). 두 피에조 세라믹판의 직렬 연결은 가장 간단한 연결 방법으로 두 개의 세라믹판 사이 shim을 넣어 접합한 뒤 얇은 coaxial cable을 연결하는 것으로 케이블의 각각을 각 세라믹판의 외부에 납땜하게 된다. 세라믹에 케이블을 납땜으로 연결할 때, 세라믹판에 가해지는 온도가 큐리 온도(curie temperature)를 넘을 경우 세라믹의 전극이 재배열되어 그 기능을 상실하게 되므로 주의하여야 한다. 상용 압전 세라믹의 큐리 온도는 약 300℃ 정도이다. 병렬연결은 한 가닥의 선을 내부 shim에 연결하고, 다른 나머지를 외부 세라믹 판에 연결하는 것으로 직렬연결보다 좀더 까다롭다.

또한 병렬연결은 전압이 가해질 때 각각의 세라믹판이 독립적으로 움직이기 때문에 금속판과 세라믹판의 접합을 전도성 에폭시로 접착하여야 한다. 이 때 두 세라믹판 사이의 합선을 주의하여야 한다. 같은 양의 변위를 얻기 위하여 병렬연결이 직렬연결보다 더 적은 전압을 요구하게 되는데, 즉 같은 전압을 가하였을 때 병렬연결에서 더 많은 변위가 발생하므로 액츄에이터(source)로 많이 사용하며, 직렬 연결은 압전 특성상 작은 변위에서 높은 전압이 발생하므로 신호 감지기(receiver)로 많이 사용하게 된다.

그림 5와 같이 벤더 엘리멘트는 케이블 접합 후 폴리우레탄(polyurethane)으로 얇게 4～5번 코팅하여 케이블이 젖은 흙이나 습기로부터 보호되도록 한다. 코팅 후 전도성 페인트(conductive paint)로 cross-talk과 전기적 노이즈를 방지하기 위한 쉴드(shield)층을 형성하여 그라운드 케이블에 연결한다. 그림 6은 실제 제작된 벤더 엘리멘트의 모습이다.

그림 7은 벤더 엘리멘트의 원리와 전압을 가하였을 때 벤더 엘리멘트의 변형 양상을 나타낸 것이다. 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹판이 신장하는 동안 반대편 세라믹판은 수축하게 됨으로써 굴곡 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤더 엘리멘트가 외팔보(cantilever)

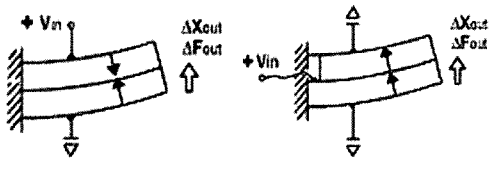


그림 4. 벤더 엘리멘트의 직렬연결(좌)과 병렬연결(우)

형태로 진동한다. 또 이와는 반대로 외부로부터 벤더 엘리멘트에 휨 변형이 생기면 각 피에조 세라믹판에 각각 압축 및 신장 방향으로 변형이 발생하여 벤더 엘리멘트 내부에 전하가 일어난다. 즉 진동을 전압으로 변환하여 수신을 가능하게 하는 것이다. 이와 같은 원리로 벤더 엘리멘트를 이용하여 간단하게 진동을 발생하고 진동을 측정할 수 있다.

벤더 엘리멘트의 공진주파수는 시료의 밀도, 강성, 응력 상태 뿐만아니라 벤더 엘리멘트의 크기와 두께, 길이에 따라 변화한다.

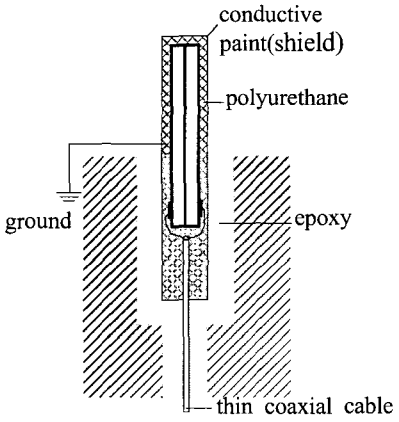


그림 5. 벤더 엘리멘트의 모식도

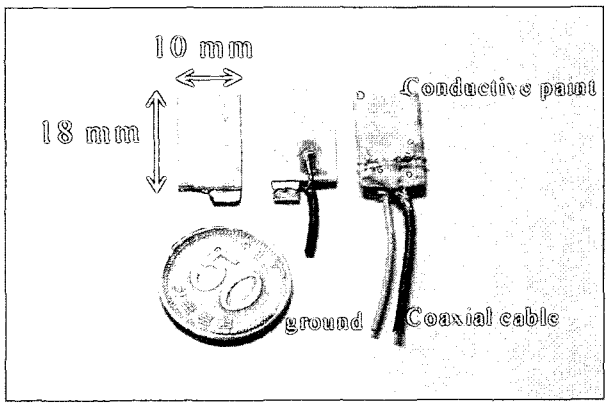


그림 6. 벤더 엘리멘트의 실제 모습

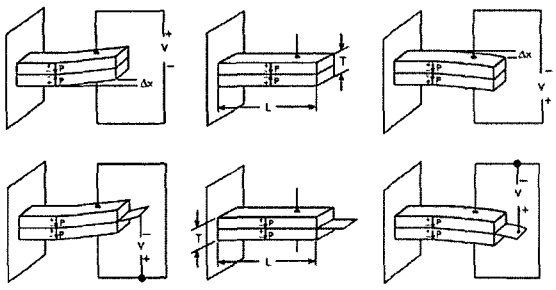


그림 7. 벤더 엘리멘트의 작동 원리

3.2 벤더 엘리멘트 시험의 구성

벤더 엘리멘트 시험의 기본 구성 요소로는 0.191mm 두께의 피에조 쉬트를 원하는 크기만큼(그림 6 참조) 잘라서 만든 벤더 엘리멘트와 전단파 발생 장치인 Function generator로부터 발생된 전기적 신호(약 10V)가 Power Amplifier를 통하여 최대 200배(약 200V)까지 증폭되어 벤더 엘리멘트에 가해지게 된다. 이 때 Function generator로부터 1mHz~19.9MHz의 주파수를 조절하여 벤더 엘리멘트와 매질의 공진 주파수에서 측정을 하게 된다. 직접 제작한 벤더 엘리멘트는 주문 제작하여 만든 기성제품과는 달리 그 반응 주파수 대역이 1mHz에서부터 가능하므로 매질의 종류에 관계없이 그 매질의 공진 주파수를 찾는데 용이하다. 그 신호는 오실로스코프로 수신을 하며 발생 예상되는 전기적 노이즈는 리시버의 그라운드 케이블을 오실로스코프의 어스 단자에 접합하여 발생 노이즈를 최소화한다. 그림 8은 실제 측정 시스템의 모습이다.

4. 벤더 엘리멘트 적용 시험

4.1 개요

지금까지의 벤더 엘리멘트는 실내에서 삼축입축시험 장비에 장착하여 공시체의 P파나 S파의 측정하는데 사용되어 왔으나, 본 연구에서는 현장측정에 활용하는 한 예로, 벤더 엘리멘트를 직접 콘크리트에 매설하여 경화시간별 콘크리트의 탄성계수 변화를 측정하였다. 이에 앞서 석고가 빨리 경화되고 센서 회수가 용이하므로 반

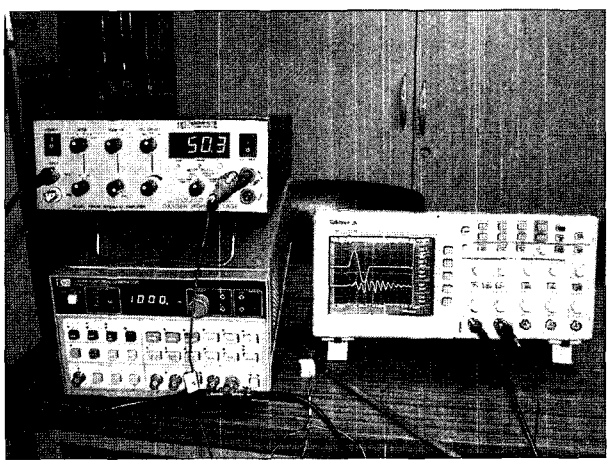


그림 8. 벤더 엘리먼트 측정 장치

죽상태에서 센서를 매설하여 벤더 엘리멘드 제작에 필요한 예비 시험을 수행하였다. 콘크리트 공시체를 만들어 자유단 공진주 시험으로 벤더 엘리멘트 시험 결과를 검증하였다.

4.2 석고

흔히 문방구에서 쉽게 구할 수 있는 학습 교재용 석고를 물로 반죽한 후 벤더 엘리멘트를 설치하였다. 벤더 엘리멘트는 P, S파의 측정이 가능하도록 그림 9와 같이 방향을 조정하여 10cm 간격으로 설치하였다.

석고는 배합 후 약 5분 정도면 굳어지는데, 완전히 굳은 후 P파와 S파를 측정하였다. 그림 10은 60V의 전압과 6.6kHz의 주파수에서 측정한 P파와 100V, 3kHz의 주파수에서 측정한 S파 신호이다. P파의 도달시간(travel time)은 약 40μsec로 P파 속도는 2466.0m/sec이고, S파의 도달시간은 약 61μsec로 S파 속도는 1520.0m/sec이었다.

4.3 콘크리트

석고를 통해 개발된 벤더 엘리멘트를 콘크리트에 적용하고자, 콘크리트 공시체에 매설하여 양생 시간별로 P파와 S파를 측정하여 양생에 따른 콘크리드의 강성변화를 평가하고 자유단 공진주시험으로 이 결과를 검증하였다.

콘크리트의 배합 설계는 표 1과 같으며, 40×25×10cm 크기의 플라스틱 박스에 콘크리트를 타설 하였다. 굵은 골재 최대 치수는 9mm, 잔골재율 48%, 공기량 5%로 하여 첨가제는 사용하지 않은 무근 콘크리트로 하였다. 콘크리트 타설 시 벤더 엘리멘트를 석고 시험과 동일한 배치로 간격 10cm로 배열하였다. 양생시간별 강성변화와 함께 i-Button이라는 온도 센서로 콘크리트의 양생 추이를 검토하였다.

콘크리트 양생 1/2일 전까지는 타설 후 1.5시간에서 3시간 간격으로 측정하였고 그 후 1일 단위로 측정하였다. 그림 11은 콘크리트에서의 벤더 엘리멘트 시험을 통하여 획득한 대표적인 P파와 S파의 모습을 나타내었다.

그림 12는 양생시간에 따른 P파와 S파 속도 변화를 보여주고 있고, 표 2에 그 값을 정리 하였다. 여기서 흥미로운 사실은, 콘크리트가 경화함에 따라 벤더 엘리멘트와 콘크리트 시스템의 공진 주파수가 점점 증가한다는 사실이다. 고주파수에서는 벤더 엘리멘트의 손상을 방지하기 위해 낮은 전압을 사용하였다. 그림 13은 i-Button을 이용하여 측정한 양생 시간별 온도 변화로 콘크리트 타설 후 24시간 동안 급격한 온도 변화를 보이고 있다. 탄성파속도도 처음 24시간동안 급격히 증가하다가 점진적으로 최종 경화한 값에 수렴하고 있다. 이는 처음 24시

표 1. 콘크리트의 배합설계

구 분	시멘트	단위수량	잔 골재	굵은 골재
무 게	5 kg	2.4 kg	7.91 kg	9.80 kg

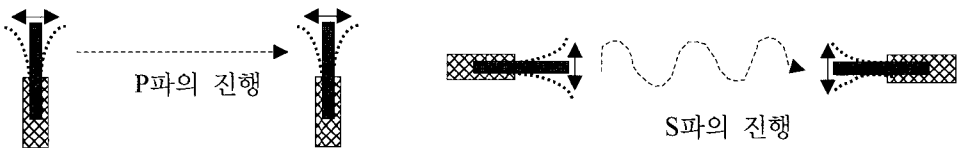


그림 9. P파(좌)와 S파(우)의 측정을 위한 벤더 엘리멘트의 배치

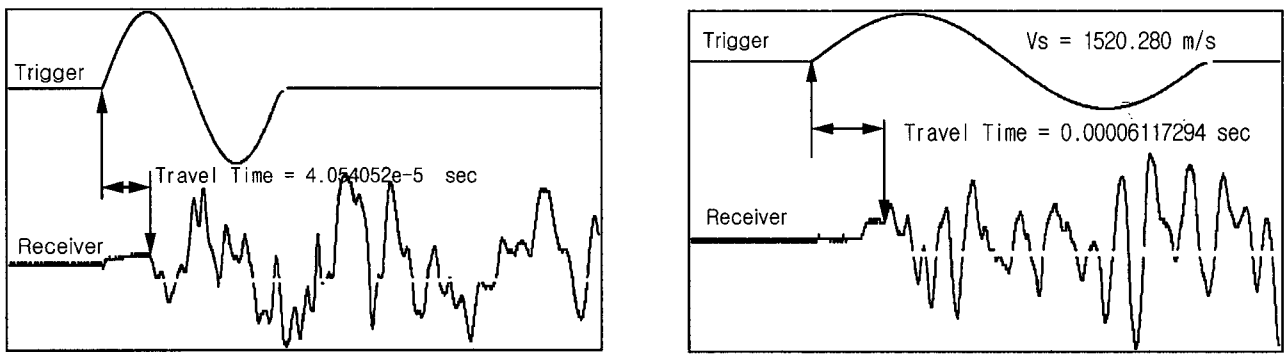


그림 10. 석고에서 P, S파의 도달 시간과 속도

간동안 급격한 수화열을 동반한 콘크리트의 강성이 증가하는 것을 의미한다. 양생시간 1.5, 6, 12, 24에서는 S파 초동 판독이 어려워 S파 속도 측정이 불가능하였다.

벤더 엘리멘트 시험 결과를 검증하기 위하여 동일한 배합으로 콘크리트로 길이 15.1cm, 직경 7.25cm의 공시체를 제작하여 자유단 공진주시험을 실시하였다. 탄성계수를 측정하기 위해 직접파 도달시간(direct travel time)과 공진(resonance)주파수를 측정하였다. 실내 탄성파 시험에 사용된 충격해머는 PCB社의 모델 086C80으로 무게가 작고(1.25g) 끝이 뾰족해 고주파 충격파를 발생시킬 수 있다. PCB사의 가속도감지기(Accelerometer) 모델 353B11은 무게(2.1g)이고 고주파측정에 알맞게 크기와 무게가 작다. 기록장치로는 HP사의 모델 35670 동적 신호분석기(dynamic signal analyzer)를 사용하였다. 그림 14는 자유단 공진주 시험의 전경이다. 콘크리트 공시체의 한 끝 면에 압축파를 가하여 반대편 단면에 설치한

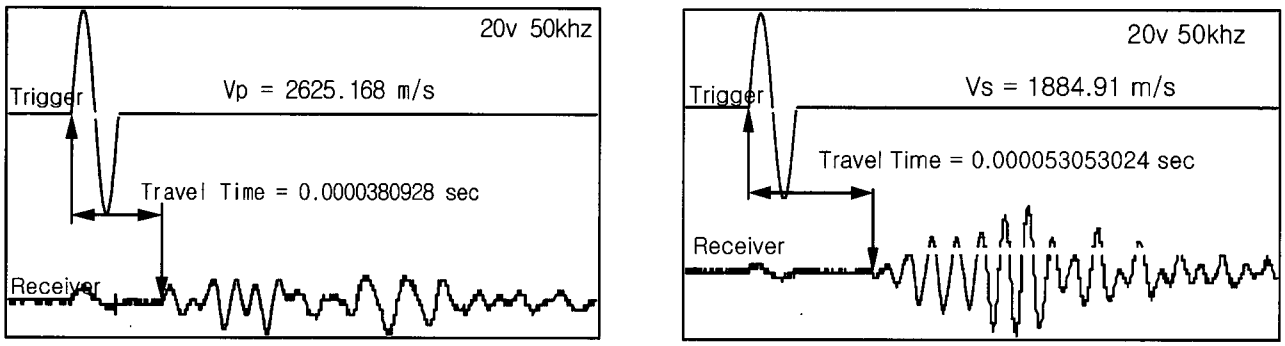


그림 11. 콘크리트에서의 P, S파의 도달시간과 속도

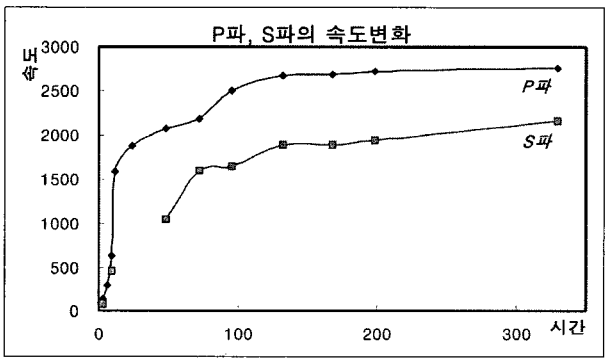


그림 12. 양생 시간별 속도 변화

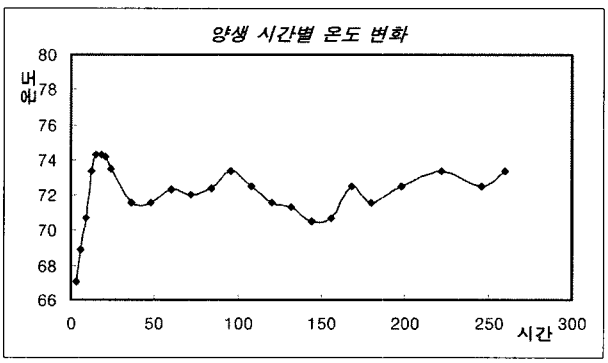


그림 13. 양생 시간별 내부 온도 변화

표 3. 양생 시간별 도달파의 속도 변화

구분	시간	Volt	Freq.	Velocity	구분	시간	Volt	Freq.	Velocity
P파	1.5hr	80 V	2 kHz	99.0 m/sec	S파	1.5hr	신호 판독곤란		
	3	80	2 k	139.0		3	80 V	2 kHz	77.0 m/sec
	6	80	5 k	307.0		6	신호 판독곤란		
	9	60	7 k	636.0		9	50	10 k	463.0
	12	50	12 k	1586.0		12	신호 판독곤란		
	24	45	16 k	1881.0		24	신호 판독곤란		
	48	50	10 k	2070.0		48	40	15 k	1045.0
	72	45	17 k	2180.0		72	40	15 k	1598.0
	96	40	15 k	2498.0		96	30	30 k	1651.0
	132	40	20 k	2668.0		132	20	50 k	1885.0
	168	30	25 k	2678.0		168	20	50 k	1885.0
	198	25	50 k	2715.0		198	20	50 k	1940.0
	330	20	50 k	2754.0		330	20	55 k	2154.0

가속도계에 도달하는 가장 빠른 P파를 그림 15와 같이 측정하여 P파속도 2963.19m/sec를 측정하였다. 전단파속도를 구하기 위한 자유단 공진시험은, 한쪽 면에 가속도계를 공시체 축방향에 수직하도록 부착한다. 그리고 다른 면에 수직방향으로 충격을 가하면 전단에너지에 대한

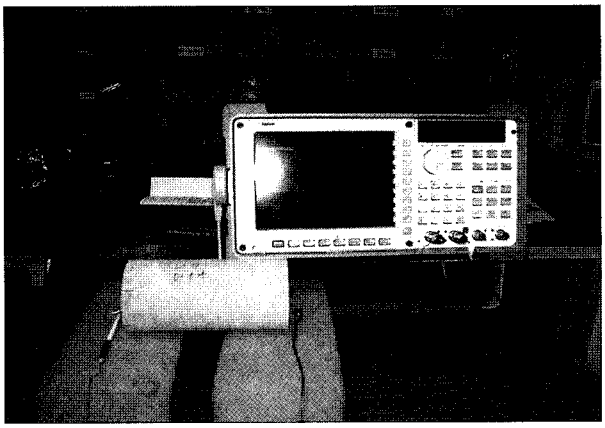


그림 14. 자유단 공진주 시험의 전경

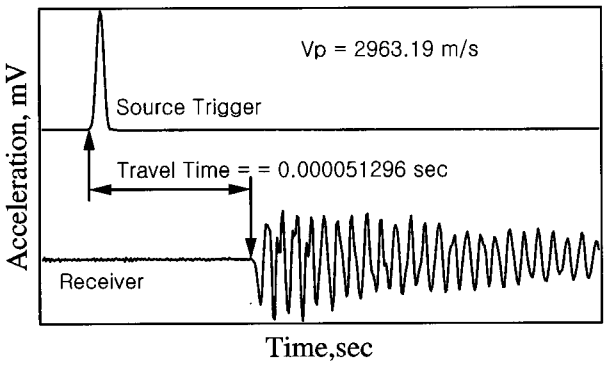


그림 15. P파 속도의 측정 결과

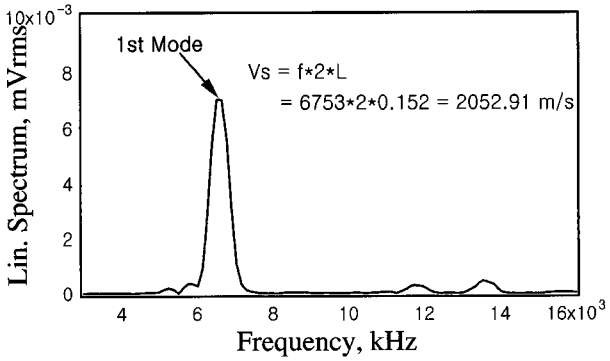


그림 16. S파 속도의 측정 결과

표 3. 콘크리트 탄성파 속도 비교

구 분	P 파	S 파	비 고
벤더 엘리멘트	2753.98m/sec	2154.35m/sec	330시간
자유단 공진주 시험	2963.19m/sec	2052.91m/sec	288시간

공진(resonance) 현상이 발생하여 그림 16과 공진주파수를 측정할 수 있다. 그림 16의 1차모드 공진주파수 6753Hz로부터 식 (1)로부터 전단파 속도 2053m/secec.를 측정하였다.

$$V_s = f \cdot \lambda = f \cdot 2l \tag{1}$$

여기서, f = 공진주파수, λ = 파장, l = 공시체 길이 이다(6753Hz × 2 × 0.152m = 2052.91m/secec).

표 3과 같이 두 시험의 P파와 S파 속도가 상당히 근접하고 있다. 약간의 차이는 콘크리트 타설 과정 중에 골재가 벤더 엘리멘트를 움직여 간격이 달라졌거나, 두 시험 공시체의 양생 조건이 달라 강성의 차이에 의한 것으로 추정된다.

4.4 연약지반

연약지반 적용을 위한 준비단계로, 그림 17과 같이 카올리나이트 100kg과 물 72kg(함수비 80%정도)을 교반하여 지름 50cm 높이 60cm의 원형 통에 담고, S파를 측정하도록 벤더 엘리멘트 한 쌍을 20cm 간격으로 설치하였다. 70V의 전압으로 주파수를 30Hz~500Hz로 변경하며 시험을 수행하였다. 그림 18은 교반 후 5일 경과했을 때 70V, 70Hz에서 획득한 대표적인 전단파 신호로, S파속도가 5.91m/sec로 측정이 되었다. 이 카오리나이트 슬러리는 아직 역학적 압밀이 일어나지 않아, 점토입자가 면과 모서리 또는 면과 면으로 접촉하지 못하고, 점토입자가 흡착수 막으로 둘러싸여 아직 큰 전단저항을 발휘할 수 없어 이러한 작은 S파(전단파)속도가 측정된 것으로 사료된다. 10일후의 전단파 신호는 그림 19와 같고 14.58m/sec의 전단파속도가 측정되었다. 시간이 경

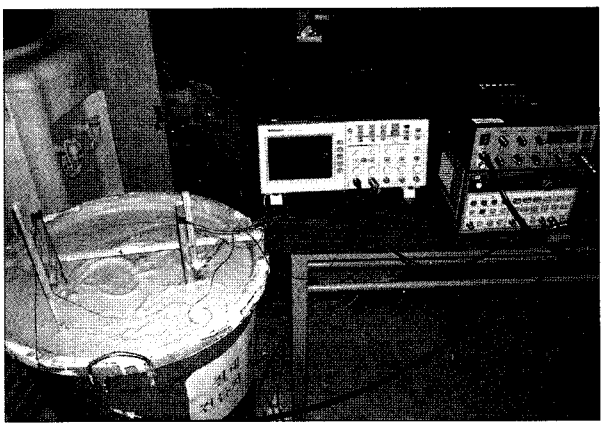


그림 17. 카올리나이트 슬러리의 강성 측정

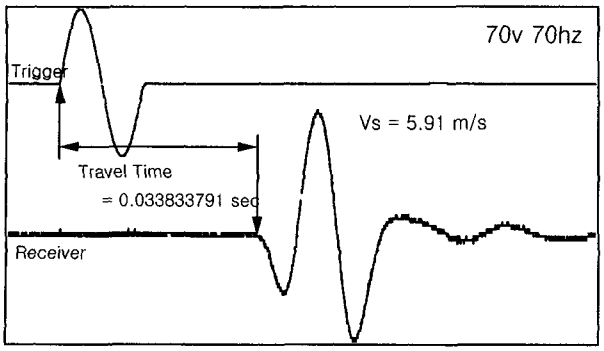


그림 18. 5일 경과 후 전단파 신호

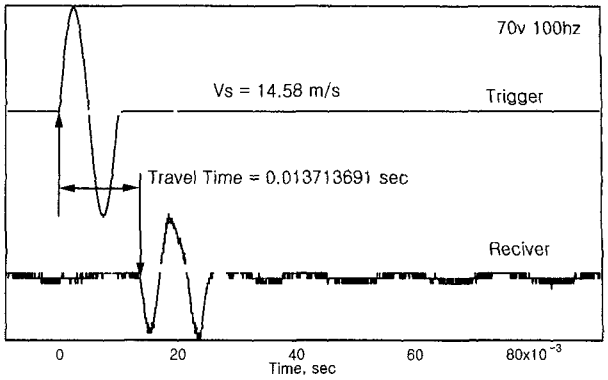


그림 19. 10일 경과 후 전단파 신호

과함에 따라 자중에 의한 압밀이 진행되어 전단저항이 증가로 전단파속도가 증가하고 있다. 그림 18과 19의 전단파 신호는 전단파 초동 시점이 매우 명확한 양질의 신호로, 이 연구에서 제작된 벤더 엘리멘트는 점성토 지반에서 놀랄만한 양질의 전단파를 발진하고 수진하는 우수한 발진기와 수진기로 작동하는 것이 입증되었다. 또한 크기도 매우 작아 현장설치에 큰 장점으로 평가된다. 다만 현장 설치에 수반되는 여러 가지 문제점을 도출하고 해결해 가는데 많은 노력이 필요할 것으로 예상된다.

5. 결 론

벤더 엘리멘트를 현장 토목 계측에 적용하고자 여러 가지 엘리멘트를 제작하였다. 이 엘리멘트를 콘크리트와 카올리나이트 슬러리에 매설하여 P파와 S파를 측정하는 탄성파 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 장비에 장착하지 않고 간단한 벤더 엘리멘트를 직접 매설하여 액츄에이터와 트랜스듀서로 사용하여 현장의 토목재료의 강성을 측정할 수 있다.
(2) 콘크리트내에 벤더 엘리멘트를 매설하여 양생 시간 경과별 콘크리트의 강성 변화를 측정할 수 있다.
(3) 카올리나이트 슬러리의 압밀에 따른 강성 변화를 측정할 수 있다. 벤더 엘리멘트는 연약지반에서 전단파 계측에 탁월한 성능을 가지고 있으며, 장래에 연약지반 현장 계측에 사용될 가능성이 큰 것으로 입증되었다.
(4) 현장에 적용하려면 재료별 측정거리의 제한성, 전기적 노이즈 제거, 설치에 관련된 제반 문제 등을 극복하여야한다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 창의 연구과제 "압전 신소자를 이용한 해양 지반조사용 인홀콘의 시험연구" 사업의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다. 이 연구에 많은 도움을 주신 미국 텍사스대학의 K. H. Stokoe II 교수님과 정민재 연구조교에게 큰 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 목영진 (1997), *불연속면이 있는 암시편의 탄성 및 감쇠특성*, 경희대학교, 신임교원 과제보고서.
2. 목영진 (1999), "자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정", *한국지진공학회 논문집*, 제3권, 제4호, pp.95-100.
3. 목영진, 백영식, 이유근 (1998), "자유단 공진 시험을 이용한 암시편의 동적 물성치 측정", *한국지진공학회 춘계 학술대회 논문집*, pp.75-80.
4. 백영식 외 (1997), *지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발*, 건설교통부.
5. 유재영, 김기일, 손은화 (2002), *압전 세라믹스*, 한국과학기술정보연구원.
6. 조성민 외 (2004), "현장타설 말뚝의 건전도 시험 방법", *한국도로공사 제 21회 연구성과 발표회 논문집*, pp.73-86.
7. 한국지반공학회 지반공학시리즈 (2000), *토목기술자를 위한 암반공학*, 구미서관, pp.222.
8. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Reimer, M.F (1998), "Analysis of Bender Element Test", *Geotechnacal Testing Journal*, ASTM, Vol.21, No.2, pp.42-53.
9. 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.
10. 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, Michgan.
11. Gautschi, G. (Gustav) (2002), *Piezoelectric sensorics*, Berlin ;

New York : Springer.
12. 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.
13. J.C. Santamarina, in collaboration with K.A. Klein, and M.A. Fam (2001), *Soils and waves*, Chichester ; New York : J. Wiley Sons.
14. 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.
15. M. L. Ling and P. D. Greeding (2001), "A novel bender/extender element for soil testing", *Geotechnique*, Vol.51, No.8, pp.713-717.
16. Richart, F. E., Hall, J. R., and Wood, R. D. (1970), *Vibration of Soil and Foundation*, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jerrsey.
17. 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.
18. 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.
19. Uchino, Kenji (1997), *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*, Boston, MA : Kluwer Academic Publishers.
20. Vives, Antonio A. (2004), *Piezoelectric transducers and applications*, Berlin ; New York : Springer-Verlag.
21. Viggiani G. & J.H.Atkinson (1995), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.
22. Vincenzo Fioravante and Roerto Capoferri (2001), "on the use of multi-diredctional piezoelectric transducers in triaxial testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.24, No.3, pp.243-255.
23. Xiangwu Zeng and Bixian Ni (1998), "Application of bender element in measuring G_{max} of sand under K_o condition", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)