# 벤더 엘리멘트를 이용한 토목재료의 강성측정에 대한 적용성 연구
# A Pilot Study of Bender Elements in Stiffness Measurements of Civil Engineering Materials

목영진[1], Young-Jin Mok, 정재우[2], Jae-Woo Jung, 장인성[3], In-Sung Jang

[1] 경희대학교 토목·건축대학 토목공학 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg, Kyunghee Univ.
[2] 경희대학교 대학원 토목공학 박사과정 Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Kyunghee Univ.
[3] 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 선임 연구원 Senior Researcher, Coastal Engineering and Harbour Research Division, KORDI

**개요(SYNOPSIS) :** Piezo-ceramics are special materials which transform energy between mechanical and electrical forms. 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 is very promising.

**주요어(Key words) :** Bender Elements, 압전효과, 카올리나이트

## 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 변환을 가능케 하는 재료이다. 최근에 이 소재의 개발이 활발해지고 이 에너지 변환 원리를 이용한 활용도가 다양하게되었다. 통신기기의 레조네이터, 의료기기의 초음파 혈류계, LCD 백라이트용 트랜스포머, 초정밀 액츄에이터, 각종 정밀 측정 센서 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 급

진전 할 것으로 예상되어 보다 많은 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다.

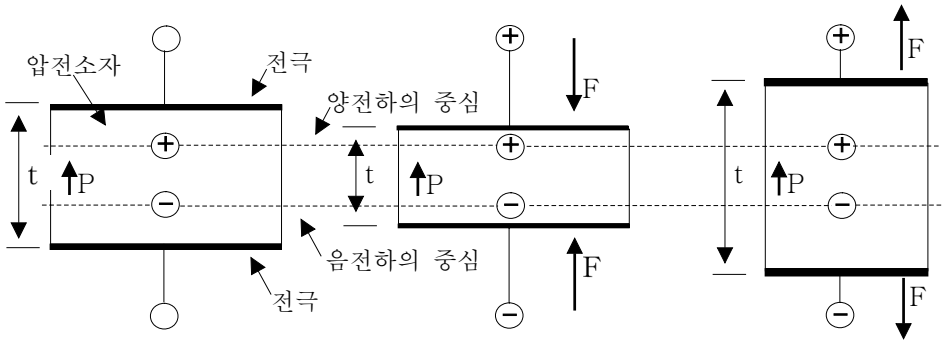
토목공학 분야에서는 전자, 기계, 정보통신, 메카트로닉스 등 타분야에 비해 이 소재의 활용도는 극히 미미한 실정이다. 얇은 피에조 세라믹판과 금속판을 겹쳐서 만든 벤더 엘리멘트는 삼축 압축 셀에 설치하여 흙 공시체의 강성 측정에 액츄에이터와 트랜스듀서로 활용되고 있다. 또한 디스크 형이나 원주형의 두께 팽창모드를 이용한 공대공 초음파 시험(CSL, Crosshole Sonic Logging), 현장 탄성파 장비 등 이 소재를 이용한 현장 장비가 등장하였다.

본 연구에서는 두께 팽창 모드의 압전 소자에 비해 벤더 엘리멘트가 소형이고 에너지 변환이 우수한 점을 이용하여 현장 계측 액츄에이터와 트랜스듀서로서의 활용도를 검증하고자 한다. 콘크리트 구체내에 이 벤더 엘리멘트를 매설하여 액츄에이터와 트랜스듀서로 이용 가능성을 평가하고 지반의 강성 측정의 현장 탄성파 장비로 개발에 필요한 일차적 시험을 수행하고자 하였다.

## 2. 압전효과

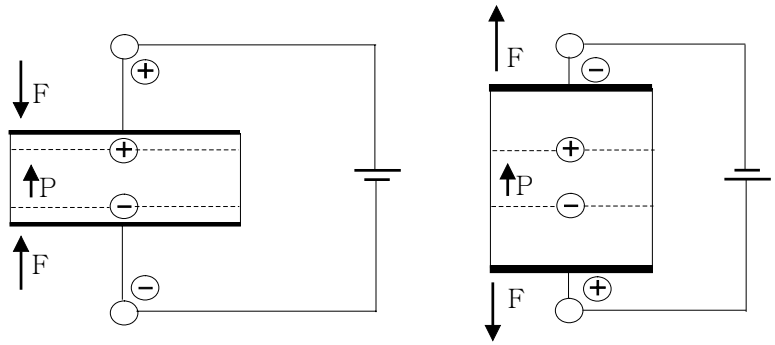
압전 효과란 전압을 발생시키는 기능으로 압전 소자에 외부 응력, 진동 변위 등을 주면 그 출력단에 전기 신호가 발생하는 현상을 말하며 착화용 압전 소자나 각종 센서에 응용된다. 또 역압전 효과라고 하는 것은 변위를 발생시키는 기능으로 압전 소자에 외부로부터 전압을 걸어주면 소자가 기계적 변위를 일으키는 현상을 말하며 액츄에이터 등에 적용되며, 통칭해서 압전효과(Piezoelectric Effect)라고 부르고 있다. 이러한 현상은 전기장을 가하지 않아도 자연적인 electric polarization이 생기는 물질인 ferroelectric 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 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.




(a) 응력 없음 (b) 압축력 (c) 신장력

그림 1 압전 효과




(a) 상부에 +, 하부에 −　　(b) 상부에 −, 하부에 +

그림 2　역압전 효과

## 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 금속 shim과 접착된 상태로 구성되어 있다.

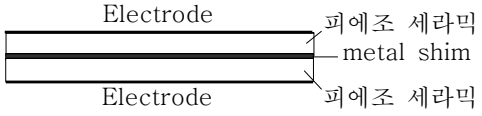



그림 3　벤더 엘리멘트의 구조

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. 벤더 엘리멘트는 피에조 세라믹과 shim과의 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.

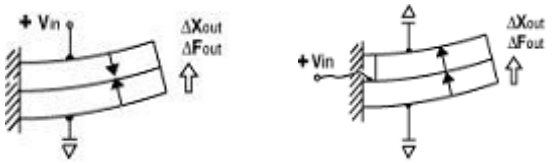
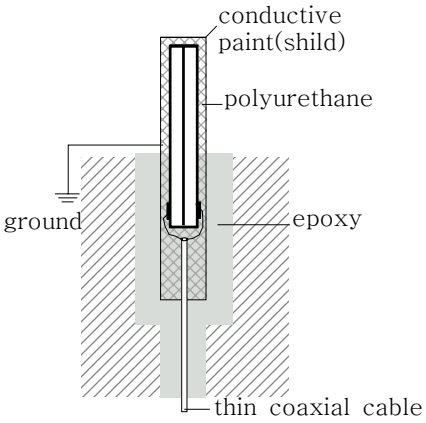



그림 4 벤더 엘리멘트의 직렬연결(좌)과 병렬연결(우)

또한 병렬연결은 전압이 가해질 때 각각의 세라믹판이 독립적으로 움직이기 때문에 금속판과 세라믹판의 접합을 전도성 에폭시로 접착하여야 한다. 이때 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(receive)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.



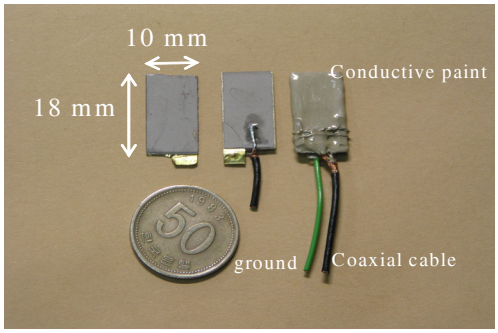




그림 5 케이블 연결과 고정된 모습 그림 6 실제 벤더 엘리멘트의 모습

그림 7은 벤더 엘리멘트의 원리와 전압을 가하였을 때 벤더 엘리멘트의 변형 양상을 나타낸 것이다. 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹 Element가 신장하는 동안 반대편 세라믹 Element는 수축하게 됨으로써 굴곡 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤더 엘리멘트가 외팔보(cantilever) 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 및 진동을 측정하는 것이 가능하다.

벤더 엘리멘트의 resonant frequency는 시료에 가해지는 구속력이나 응력 상태, 밀도, 강성에 따라, 벤더 엘리멘트의 크기와 두께, 길이에 따라서도 일정하게 정해져 있는게 아니라 다양하다.

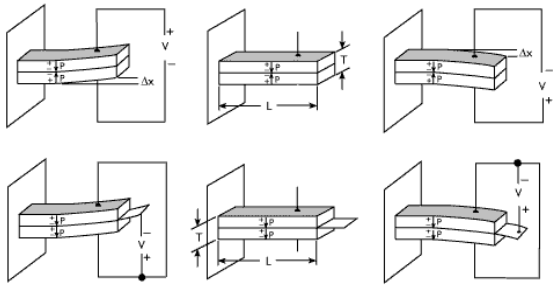


그림 7 벤더 엘리멘트의 동작 원리 및 거동 형태

### 3.2 벤더 엘리멘트 시험의 구성

그림 8과 같이 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. 이때 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. 아래 그림은 실제 측정 시스템의 모습이다.

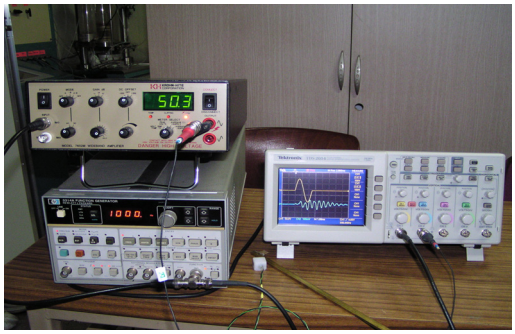


그림 8 Measurement system

## 4. 벤더 엘리멘트 적용 시험

### 4.1 개 요

지금까지의 벤더 엘리멘트는 실내에서 삼축 시험장비등에 장착하여 P파나 S파의 측정을 통한 지반계수를 구하는데 사용되어 왔으나, 본 실험에서는 벤더 엘리멘트가 쉽게 P파나 S파의 발생과 수신이 가능한 점을 이용하여 직접 콘크리트에 매설하여 경화 시간별 속도 변화를 통해 콘크리트의 경화 시점을 알아보고자 하였고, 쉽게 구할 수 있고 단단한 재질의 석고를 통하여 사전 시험을 수행하였다. 더불어 콘크리트 공시체를 만들어 자유단 공진주 시험으로 벤더 엘리멘트 시험험 결과를 검증하였다.

## 4.2 석고

흔히 문방구에서 쉽게 구할 수 있는 학습 교재용 석고를 적당한 비율로 비빈 후 벤더 엘리멘트를 설치하였다. 벤더 엘리멘트는 P, S파의 측정이 가능하게 그림 9와 같이 설치하였으며 각각 사이의 거리는 10cm로 하였다.

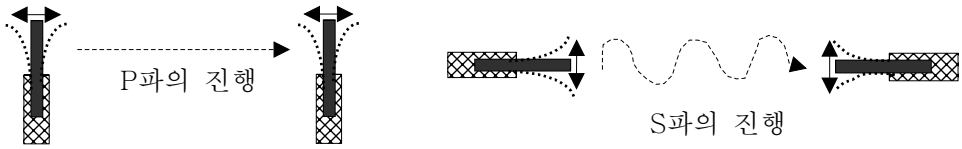



그림 9 P, S파의 발생시 벤더 엘리멘트의 배치

석고는 배합 후 약 5분 정도 경과 후 굳어지게 되는데 완전히 굳은 후 P파와 S파를 측정하였으며 그림 10은 60V의 전압에, 6.6Khz의 주파수에서 측정하였을 때 P파의 travel time과 속도가 2466.67 m/s가 측정이 되었고, 100V, 3Khz의 주파수에서 측정한 S파의 travel time과 속도 1520.28 m/s를 나타내었다.

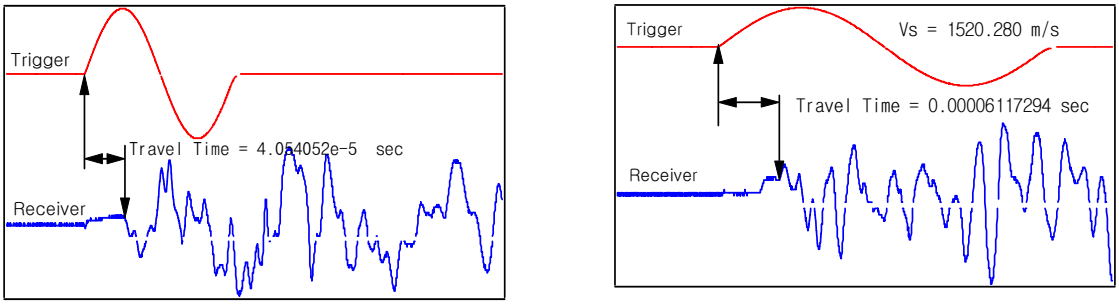



그림 10 석고에서 P, S파의 도달 시간과 속도

## 4.3 콘크리트

### 4.3.1 개 요

정확한 콘크리트 강도를 측정하기 위해서는 강도를 알고자 하는 구조물의 부재에 직접 하중을 가하여 파괴되는 강도를 측정하는 방법이 유일할 것이다. 그런데, 그렇게 할 수는 없으므로 실제 구조물의 강도와 가장 유사한 조건으로 양생한 공시체의 강도를 측정함으로써 본 구조물의 콘크리트 강도를 추정하게 된다. 공시체를 제작하지 않고 슈미트 해머와 같이 비파괴 시험을 통하여 콘크리트의 강도를 추정할 수도 있다. 그러나 양생이 완전히 되지 않았을 경우에 실시한 슈미트 해머 시험은 실제 강도와는 현저한 차이가 있을 것이다. 본 실험에서는 벤더 엘리메트를 이용한 탄성파 시험을 통하여 P, S파가 콘크리트가 타설 후 양생되는 시간별로 그 속도가 증가하는 것을 측정하는 것으로 P파와 S파의 속도가 증가하는 것으로 콘크리트의 양생 정도를 추정할 수 있을 것이다.

벤더 엘리멘트로 측정한 P, S파의 속도를 비교하기 위하여 콘크리트 공시체를 제작하여 자유단 공진주 시험을 통해 두 시험을 비교하였다.

### 4.3.2 시험 방법

콘크리트의 배합 설계는 표 2와 같이 실시하였으며, 철근은 배근하지 않은 40×25×10cm 크기의 플라스틱 박스에 콘크리트를 타설 하였다. 콘크리트의 배합 설계는 굵은 골재 최대 치수 9mm, 잔골재율 48%, 공기량 5%로 하여 첨가제는 사용하지 않은 무근 콘크리트로 하였으며 골재와 시멘트, 물의 양은 표 2와 같다.

표 2 콘크리트의 배합설계

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

콘크리트 타설 시 벤더 엘리멘트의 배열은 석고에서의 실험과 동일하게 하였으며, 각각의 벤더 엘리멘트 사이의 거리는 10cm로 하였다.

타설 후 양생 기간 동안 콘크리트 내의 온도 변화를 알아보기 위하여 i-Button이라는 온도 센서를 같이 설치하였는데, i-Button은 디지털 온도센서의 일종으로, 사용자의 목적에 따라 온도 측정간격을 설정하여 원하는 장소에 설치하면 i-Button의 내부에서 전원을 공급받아 온도 data(1024개)를 스스로 저장할 수 있게 된다. 그 후 저장된 데이터는 언제든지 간편하게 다운로드 할 수 있도록 되어있다. 또한 계측과정은 모두 자동으로 이루어져 사람의 감시가 없어도 가능하게 되어 있다.

### 4.3.3 시험의 결과

콘크리트 양생 1/2일 전까지는 타설 후 1.5시간에서 3시간 간격으로 측정하였고 그 후 1일 단위로 측정하였다. 그림 12는 콘크리트에서의 벤더 엘리멘트 시험을 통하여 획득한 대표적인 P파와 S파의 모습을 나타내었다.

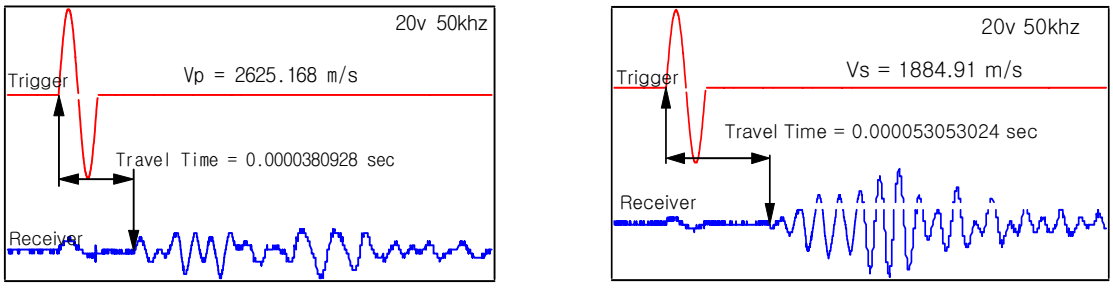



그림 12 콘크리트에서의 P, S파의 도달시간과 속도

그림 13과 같이 시간이 지남에 따라 P, S파의 속도가 점점 증가하는 것을 볼 수 있으며, 표 3과 같이 시간이 경과함에 따라 점점 고주파수일 때 보다 정확한 신호를 획득 할 수 있었는데 이는 벤더 엘리멘트와 콘크리트의 공진 주파수가 경화함에 따라 점점 높아진다는 것을 말한다. 고주파수에서 낮은 전압은 벤더 엘리멘트의 손상을 방지하기 위함이다.

그림 14는 온도 센서인 i-Button을 이용하여 측정한 온도 변화를 나타낸 것으로 콘크리트 타설 후 양생시작 24시간동안 급격한 온도 변화를 보이는 것을 볼 수 있다.

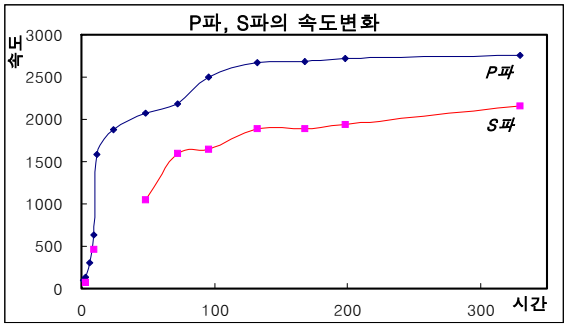



그림 13 양생 시간별 속도 변화

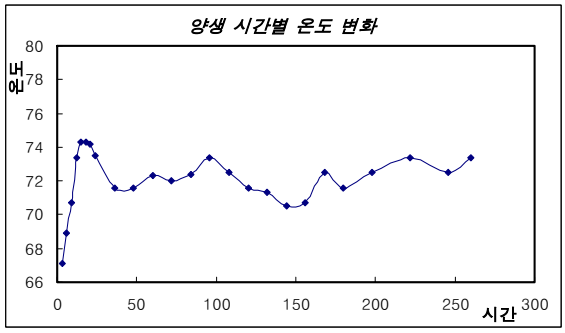



그림 14 양생 시간별 내부 온도 변화

도달파의 속도 또한 처음 24시간동안 많은 변화를 보이는 비슷한 경향을 가지는 것을 볼 수 있다. P파와 S파의 속도로 그 매질의 강성을 간접적으로 추정할 수 있을 때 급격한 변화를 보이는 처음 24시간동안 양생이 많이 되는 것을 알 수 있으며 이때 콘크리트 내의 수화열 또한 많이 발생함을 알 수 있다. S파의 1.5, 6, 12, 24시간은 신호 판독 곤란으로 속도 측정이 불가 하였다.

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/s | S파 | 1.5hr | 신호 판독곤란 | | |
| | 3 | 80 | 2 k | 139.0 | | 3 | 80 V | 2 khz | 77.0 m/s |
| | 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 |

### 4.3.4 검증시험

#### 4.3.4.1 개요

벤더 엘리멘트 시험 결과를 검증하기 위하여 콘크리트 타설 시 동일한 배합설계로 길이 15.1cm, 직경 7.25cm의 공시체를 제작하여 자유단 공진주 시험을 실시하였다.

자유단 공진주 시험은 탄성파전달이론에 근거하여 소변형 탄성계수를 측정하는 실내 탄성파 시험이다. 탄성계수를 측정하기 위해 두 가지 방법이 적용되고 있다. 직접파 도달시간(Direct Travel Time) 측정과 공진(Resonance)측정이다.

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 신호분

석기(Dynamic Signal Analyzer)를 사용하였다. 그림 15는 자유단 공진주 시험의 전경이다.

그림 15 자유단 공진주 시험의 전경

#### 4.3.4.2 도달 시간의 측정

콘크리트 공시체의 한 끝 면에 압축파를 가하여 반대편 단면에 설치한 가속도계에 도달하는 가장 빠른 파가 P파이며, 그림 16과 같이 P파의 속도 측정 결과 2963.19 m/s가 나온 것을 보여주고 있다.

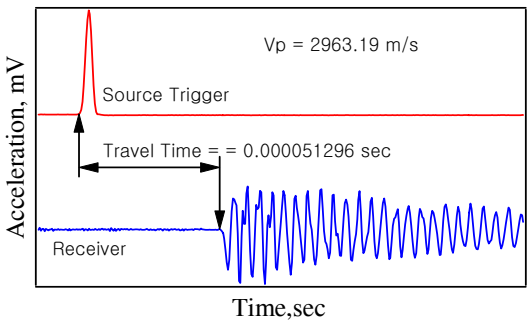



그림 16 P파 속도의 측정 결과

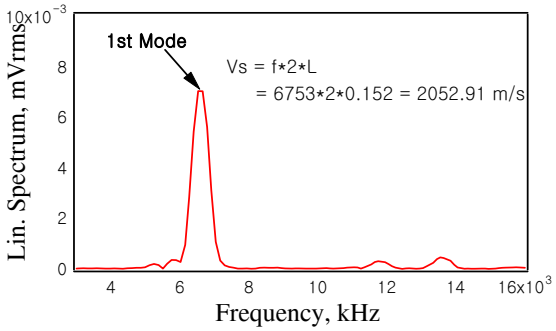



그림 17 S파 속도의 측정 결과

전단파 속도를 구하기 위한 자유단 공진시험은, 한쪽 면에 응력파를 감지할 가속도계를 민감한(Sensitive) 방향이 수직방향이 되도록 부착한다. 그리고 다른 한쪽 면에 수직방향으로 충격을 가한다면 순수전단거동에 대한 공진(Resonance) 현상이 발생하여 지배주파수를 측정할 수 있다. 콘크리트 공시체의 자유단 공진주시험을 수행하여 그림 17과 같은 결과를 획득하였다.

그림 17은 주파수응답으로 여러 주파수의 정현파에 대하여 이에 상응하는 진폭의 크기를 보여 주고 있다. 그림 17에 의하여 1차 모드에서 6753 Hz의 정현파가 최대진폭을 갖게 되어, 이 결과로부터 전단파의 속도를 구할 수 있다. 전단파의 속도는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$V_s = f\lambda = f2l$$

$$= 6753\ \text{Hz} \times 2 \times 0.152\ \text{m} = 2052.91\ \text{m/sec}$$

### 4.3.5 시험 결과의 비교 분석

벤더 엘리멘트를 이용하여 콘크리트 타설 후 1.5시간부터 330시간(13.75일)동안 속도 변화를 측정하였고, 원형 공시체를 제작하여 타설 후 12일째 자유단 공진주 시험을 실시하여 P파와 S파의 속도를

아래 표와 같이 측정하였다.

표 4 두가지 시험의 속도 비교

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

통상 콘크리트의 탄성파 속도는 P파의 경우3100m/s, S파는 1960m/s의 속도를 보인다고 한다(토목기술자를 위한 암반공학, 구미서관). 표 4에서 보는 바와 같이 두 시험간 P파와 S파의 속도가 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 벤더 엘리멘트를 처음 각각 10cm 간격으로 설치하여 콘크리트를 타설하였으나 타설 과정 중과 타설 시 다짐으로 인해 골재가 벤더 엘리멘트를 움직여 전파 거리가 달라졌거나, 두 실험 공시체간의 양생 조건이 달라 강성의 차이가 발생하였을 경우 등으로 인하여 그 속도에 영향을 미쳤을 것이다.

## 4.4 카올리나이트

그림 18과 같이 카올리나이트 약 100kg에 물 72kg으로 교반을 하여 함수비 80%정도로 높이 약 60cm의 원형 통에 시험 준비를 하여 S파를 발생하게 벤더 엘리멘트 한 쌍을 매설하였다.

그림 18 카올리나이트에서의 시험전경

지름 50cm의 원통형 플라스틱 통에 카올리나이트를 높이 60cm로 준비하고 50cm 깊이에 벤더 엘리멘트 한 쌍을 설치하였다. 소스와 리시버 벤더 엘리멘트 사이의 간격은 20cm로하여 실험을 하였다. 70V의 전압으로 주파수를 30hz ~ 500hz로 변경해 가며 실험을 수행하였고, 그림 19는 카올리나이트에서 획득한 대표적인 전단파 도달 시간을 나타내었다. 70V 70hz에서 S파는 5.91 m/s의 속도로 측정이 되었다.

카올리나이트는 시간이 경과함에 따라 입자가 압밀 되어 하부에서부터 그 강성이 증가하게 되는데 시간 간격을 두고 탄성파 측정을 하게 되면 시간 경과에 따른 강성의 증가를 알 수 있을 것이다. 실험 실시 10일후 도달파의 시간을 측정한 결과 그림 20과 같이 14.58 m/s의속도가 측정되었다. 시간이 지남에 따라 입자가 압밀되어 더 조밀한 상태가 되었음을 전단파 속도의 증가로 알 수 있다. 이 연구에서 제작된 벤더 엘리멘트는 점성토 지반에서 놀랄만한 양질의 전단파를 발진하고 수진하는 우수한 발진기와 수진기로서의 사용 가능성이 입증되었다. 또한 크기도 매우 작아 센서로서 적합하다고 할 수 있겠으나, 다만 이 장착에 수반되는 여러 가지 문제점을 도출하고 해결해 가는데 많은 노력과 비용이 예상된다.

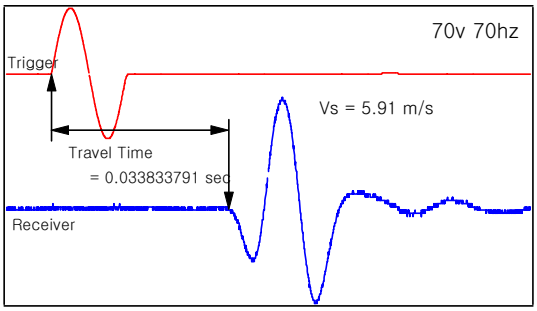



그림 19 5일 경과 후 전단파 신호

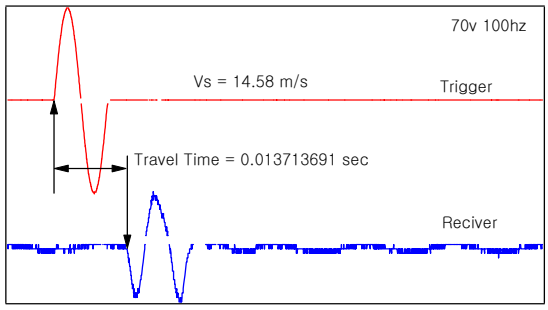



그림 20 10일 경과 후 전단파 신호

## 5. 결 론

벤더 엘리멘트를 이용하여 토목재료의 강성 측정을 시도하기 위해 여러 가지 엘리멘트를 제작하였다. 이 엘리멘트를 콘크리트와 카올리나이트에 매설하여 P파와 S파를 측정하는 탄성파 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 장비에 장착하지 않고 간단한 벤더 엘리멘트와 가이드만으로 실험을 수행하여 탄성파의 발생과 그 수신이 가능하여 간단한 시험 장비로 매질의 강성을 측정 할 수 있다.

(2) 콘크리트내에 벤더 엘리멘트를 매설하여 시간 경과별 탄성파 시험을 한 결과와 공시체의 자유단 공진주 시험 결과를 비교하여 이 벤더 엘리멘트의 적용성을 입증하였다.

(3) 카올리나이트의 경우 시간이 경과함에 따라 압밀되어 그 강성이 증가할 것으로 예상이 되며, 탄성파의 속도 또한 시간이 지남에 따라 증가하여 강성의 증가와 밀접한 관계가 있음을 보였다. 벤더 엘리멘트로 만든 발진기와 수진기가 매우 탁월한 전단파 계측 성능을 보여 앞으로 연약지반에 사용할 우수한 탄성파 시험 장비가 될 것이다.

(4) 벤더 엘리멘트는 탄성파의 발생과 그 수신이 가장 쉬운 방법 중의 하나이다. 그러나 짧은 이격거리로 인해 거리가 정확하지 않을 경우 속도에 오차가 많이 발생할 수 있으며, 각 재료별 파의 전파가능거리가 다르다는 문제, 미세한 전기적 노이즈로 인한 파형 판독의 어려움 등이 앞으로 계속 연구하여야 할 사항이다

## 감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 연구과제의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

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 Geotomography개발", 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., 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