

# 벤더 엘리먼트를 이용한 콘크리트의 동적물성치 측정

## Measurements of Dynamic Properties of Concrete Materials Using Bender Elements

유 창 연\*      안 주 옥\*\*      신 우 섭\*\*\*      목 영 진\*\*\*\*  
Yoo, Chang Yeon      An, Ju Ok      Shin, Woo Seop      Mok, Young Jin

---

### ABSTRACT

A series of seismic tests was carried out using piezoelectric elements called "bender elements". A pair of bender elements can be used as a source and a receiver respectively to measure dynamic properties of concrete. The most suitable bender elements were developed and implemented to measure P wave velocity changes due to the cracks of a concrete beam caused by bending.

---

#### 1. 서론

얇은 피에조 세라믹판과 금속판을 겹쳐서 만든 "벤더 엘리먼트(Bender Element)"는 지반공학 분야에서 삼축 압축 셀에 액츄에이터와 트랜스듀서로 활용하여 흙 공시체의 강성을 측정하고 있다. 또한 디스크나 원주형의 두께 팽창모드를 이용한 공대공 초음파 시험(CSL, Crosshole Sonic Logging)(현장 타설 콘크리트 말뚝의 건전도 시험방법, 한국도로공사, 연구성과 발표회 논문집), 현장 탄성과 장비(Geoping, 목영진)에 이 소재가 이용되고 있다. 본 연구에서는 콘크리트재질에 가장 적합한 벤더 엘리먼트를 개발하고 이 최적의 벤더 엘리먼트를 이용하여 콘크리트 보의 균열에 따른 탄성과 속도 변화를 측정함으로써, 건전도 평가 활용 가능성을 검증하고자 한다.

#### 2. 벤더 엘리먼트

##### 2.1 일반사항

벤더 엘리먼트를 이용한 시험은 1978년 Shirley에 의해 실험실에서 진단과 측정으로 처음 소개된 이래 NGI(The Norwegian Geotechnical Institute, 1984)에서 삼축 압축 시험의 공시체에 벤더 엘리먼트를 장착하여 진단과를 측정하였다. NGI에서는 벤더 엘리먼트가 진단과를 발생시키는 좋은 발진원이

---

\* 정회원, 삼환기업      토목사업본부  
\*\* 정회원, 경희대학교      토목공학과 교수  
\*\*\* 정회원, 삼성물산      토목사업본부 현장소장  
\*\*\*\* 정회원, 경희대학교      토목공학과 교수

라고 소개하고 시험에 사용할 것을 제안하였다.

벤더 엘리먼트는 두 개의 피에조 세라믹이 내부의 금속판(shim)에 접촉된 것이다. 전압이 가해질 때 한쪽 세라믹 판이 신장하는 동안 반대편 세라믹 판은 수축하게 됨으로써 굴곡 변형이 발생하게 된다. 즉 전압을 가하면 벤더 엘리먼트가 외팔보(cantilever) 변형형태로 진동한다. 또 이와 반대로 외부로부터 벤더 엘리먼트에 휨 변형이 생기면 각 피에조 세라믹판에 압축 및 인장 변형이 발생하여, 벤더 엘리먼트 내부에 전하가 일어난다. 즉 전압을 진동으로, 다시 진동을 전압으로 변환하여, 벤더 엘리먼트로 진동 발생과 수진이 용이하게 되었다.

## 2.2 최적 벤더 엘리먼트 제작

양질의 탄성파 신호를 얻기 위해 여러 가지 부가적인 재료를 마감재로 처리하여 최적의 벤더 엘리먼트를 제작하였다. 폴리우레탄, 파라핀, 수축고무관(Shrinkage Tube), 스티로폼, 폴리에스테르를 최종 마감재로 활용하여 시작품을 제작하고 시험하였다. 그림 1은 파라핀 마감 벤더 엘리먼트로 측정된 P파 신호이고, 그림 2는 폴리에스테르 마감 벤더 엘리먼트로 측정된 P파 신호이다. 그림 중의 화살표는 P파의 도달 시점을 표시한 것이다. 다른 마감재로 처리한 신호도 그림 1과 유사하며, 폴리에스테르로 처리한 벤더 엘리먼트가 그림 2에서 알 수 있듯이 최적인 것으로 판명되었다. 이 벤더 엘리먼트를 일반 콘크리트에 매설하여 측정 거리, 전압, 주파수를 변화시켜 가며 측정된 결과, 일관성 있는 P파와 S파 속도가 측정되어 포아슨비 0.25도 얻을 수 있었다. (표1 참조)

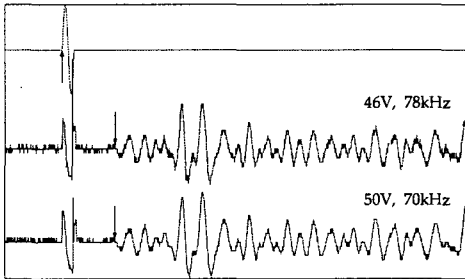


그림 1. 파라핀 마감 벤더 엘리먼트로 측정된 P파

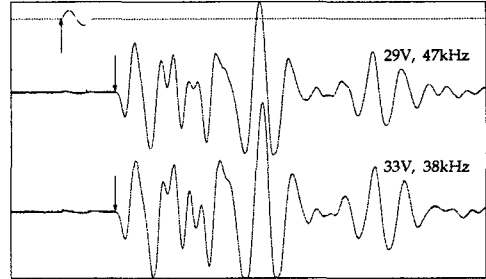


그림 2. 폴리에스테르 마감 벤더 엘리먼트로 측정된 P파

표 1. 각 조건별 탄성파 속도

wave	Distance (mm)	Volt (V)	Freq. (kHz)	Travel Time (sec)	Velocity (m/s)	Poisson's Ratio, $\nu$
P-wave	100	37	77	2.92467E-05	3419.2	0.25
	200	18	56	6.02308E-05	3320.6	
S-wave	100	15	66	6.42078E-05	1557.4	
	200	21	43	1.17566E-04	1701.2	

## 3 균열에 따른 탄성파 속도 변화

### 3.1 콘크리트 링 예비시험

그림 3과 같이 콘크리트 링에 아크릴판을 삽입하여 인공균열을 만들어 벤더 엘리먼트를 균열이 있는

곳과 없는 곳에 각각 설치하였다. 균열이 있는 콘크리트의 탄성과 속도가 균열이 없는 측보다 현저하게 떨어진 것을 알 수 있다. 콘크리트 구조물에서의 탄성과 속도가 균열의 지표가 될 가능성이 있다.

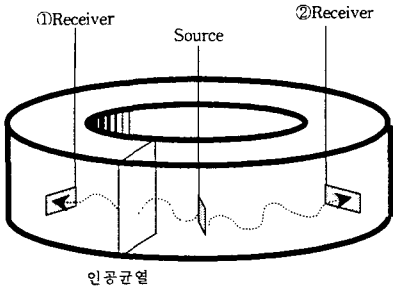


그림 3. 벤더 엘리먼트 설치 모식도

표 2. P파 속도 비교표

시험 차수	인공 균열 콘크리트 ①Receiver측 (m/s)	일반 매질 콘크리트 ②Receiver측 (m/s)
1회차 시험 $V_p$	1376.6	1898.7
2회차 시험 $V_p$	1366.9	1889.5

### 3.2 콘크리트 보 시험

하중을 단계적으로 가하여 실제 휨 균열을 만들기 위해 콘크리트 보를 제작하여 중앙에 벤더 엘리먼트를 100mm간격으로 설치하였다. 중립축이하 깊이에서 상중하 3부분에 각각 설치하여 A점, B점, C점으로 정리하였다.(그림4)

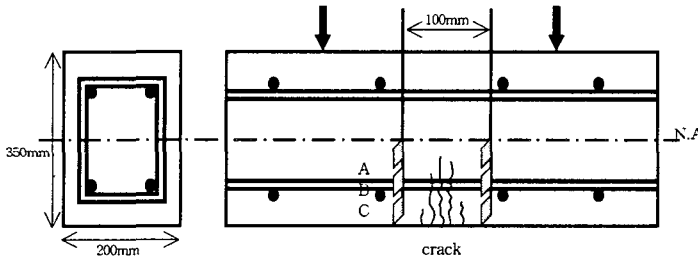


그림 4. 콘크리트 보 단면 및 벤더 엘리먼트 설치도

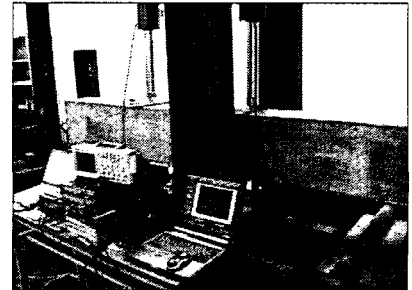


그림 5. 콘크리트 보 시험 전경

재령 28일에 그림5와 같이 단계별로 양쪽 로드셀에 각각 하중을 가하여, 모멘트로 인한 균열을 생성하여 탄성파의 속도를 측정하였다. 그림 6은 양생에 따른 콘크리트의 P파 속도의 변화로 초반 24시간까지는 급격한 속도 변화를 나타냈고 그 이후로 완만한 속도변화를 보였다. 그림 7은 10톤을 재하시여 균열이 발생한 경우에 B점에서 측정된 전형적인 P파이다.

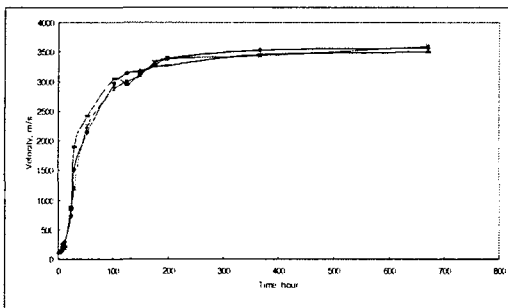


그림 6. 시간에 따른 탄성파 속도 변화

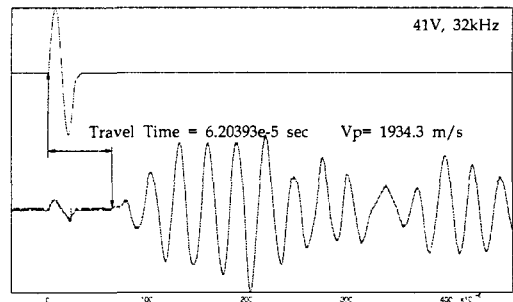


그림 7. 하중 10톤 재하시 B점 P파 측정

표3 에서 본 결과와 같이 하중에 의한 탄성과 속도 저하가 확연하게 나타났다. 이는 발진자와 감지기 사이에 생긴 휨균열이 하중에 의하여 더 커졌고, 이에 기인하여 탄성파의 전파 거리가 그만큼 길어졌기 때문이라고 판단된다. 속도저하 정도를 보면 초기에 급격하게 저하되고 그 이후는 완만하게 저하되었다. 탄성과 속도가 초기에는 중립축까지의 균열 발생으로 급격히 변화하였고, 콘크리트 파괴 이후에는 철근이 응력을 부담하기 때문에 콘크리트 균열발달이 억제된 것으로 판단된다.

표 3 하중에 따른 콘크리트의 P파 속도

하중 (ton)	상부 A점 (m/s)	중부 B점 (m/s)	하부 C점 (m/s)
0	3825.5	3957.4	3160.9
5	2342.2	2608.3	2288.3
10	1871.2	1934.3	1916.4
15	1550.9	1704.4	1622.7

#### 4. 결론

- (1) 신축성이 있는 폴리에스테르 소재로 한쪽 면만을 마감한 엘리먼트가 최적인 것으로 판명되었다.
- (2) 콘크리트 균열이 커짐에 따라 탄성과 속도가 저하된 현상으로부터, 탄성과 속도저하로 균열여부를 판단할 수 가능성이 검증되었다.
- (3) 하중단계를 콘크리트 보의 파괴전까지 조금 더 세밀하게 나눠 시험하고 변위와 탄성파속도와의 관계를 정립한다면, 속도저하와 균열사이의 상관관계를 정립할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 정재우, 목영진 (2005) “벤더 엘리먼트를 이용한 토목재료의 강성측정에 대한 적용성 연구,” 경희대학교, pp. 13-34.
2. 목영진 (1999) “자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정,” 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제4호, pp. 95-100.
3. 콘크리트학회편집부 (2003) 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회.
4. 유재영, 김기일, 손은화 (2002) 압전 세라믹스, 한국과학기술정보연구원.
5. 조성민 외 (2004) “현장타설 말뚝의 건전도 시험 방법,” 한국도로공사 제 21회 연구성과 발표회 논문집, pp. 73-86.
6. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Reimer, M.F (1998) “Analysis of Bender Element Test,” Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol.21, No.2, pp. 42-53.
7. Dyvik, R. and Madshus, C. (1985) “Laboratory Measurement of Gmax Using Bender Elements,” Proceedings ASCE Annual Convention, Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan.
8. Gautschi, G. (Gustav) (2002) Piezoelectric sensorics, Berlin ; New York : Springer.