

탄성파 시험을 이용한 그라우팅의 성과 평가 Quality Assessment of Grouting by Using Seismic Testing

목영진¹⁾, Young-Jin Mok, 백영식²⁾, Young-Shik Paik, 임수빈³⁾, Soo-Been Im.

¹⁾ 경희대학교 공과대학 토목·건축공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil and Architectural Engineering, Kyung Hee University

²⁾ 경희대학교 공과대학 토목·건축공학부 교수, Professor, School of Civil and Architectural Engineering, Kyung Hee University

³⁾ 동부엔지니어링(주) 기술연구소 소장, Director, Research Center, Dong Bu Engineering Co.

SYNOPSIS : A seismic testing equipment(called "GeoPing") has been developed for crosshole testing and geotomography techniques during past three years. The key feature of the equipment is the capability of S-wave measurements as well as P-wave measurements in regular NX-Size boreholes. The equipment was used to assess the quality of grouting at a bridge foundation site. The equipment seems to be a valuable tool for characterization of construction sites and assessment of quality control.

Key words : Crosshole, Piezoceramic, GeoPing, Grouting

1. 서론

탄성파 시험은 동적 하중(지진 및 진동)에 의한 지반·구조물 상호 거동 해석에 필요한 지반 물성 산정에 이용되어 왔다. 또한 탄성파 속도와 기존 물성(예 : 밀도)과의 상관관계를 이용하여 토공(동다짐 개량, 성토)의 품질 관리에도 적용되고 있다. 최근에는 탄성파 기법이 지반 물성 산정은 물론, 현장 타설 말뚝, 터널 라이닝, 암반 그라우팅의 품질 및 건전도 평가에도 이용되어 적용 분야가 증가 추세에 있다.

토목공학에 주로 이용되고 있는 탄성파 기법은 시추공(bore hole)을 이용하는 크로스홀(cross hole)·다운홀(down hole)이 있고, 표면에 계측기를 설치하여 표면파(surface waves)를 이용하는 표면파 기법(SASW tests)과 지중 지층 경계면에 굴절되어 지표면에 도달하는 선두파(head waves)를 계측하는 굴절파 기법(refraction tests)이 있다. 최근 토모그래피(tomography) 기법을 적용하여 2차원적 강성 분포의 영상 처리가 토목공학에 이용되고 있다.

본 논문에서는 본 연구진이 지난 3년간 개발한 크로스홀 및 토모그래피 탄성파 장비와 교각 기초를 위한 암반 그라우팅 성과 평가에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

2. 시험 장비

2.1 설계 기본 방안

본 연구진이 개발한 시험 장비(GeoPing으로 명명)는 아래와 같은 사양을 충족시키도록 설계 고안되었다.

- 가. P-파는 물론 S-파 계측이 가능하여야 함.
- 나. NX 크기의 시추공 내에 사용 가능하여야 함.
- 다. 수직공은 물론 수평 및 경사진 시추공에 사용 가능하여야 함.
- 라. 발진자(source)에서 생성하는 탄성파가 반복성이 뛰어나야 함.
- 마. 장비가 소형이고 사용하기 쉬워야 함.
- 바. 장비의 유지보수가 용이하여야 함.
- 사. 장비가 비교적 저렴하여 대중화가 가능하여야 함.

이제까지 사용한 지구 물리 및 자원 탐사용 장비는 뇌관이나 압축공기총(air gun) 또는 전기적 스파커(sparker)를 발진 장치(source)로 사용하였고, 수신 장치(receiver)로는 하이드로폰(hydrophone)을 사용하였다. 이 장비는 시추공 내에 물을 채워 물을 지반과 계측기 사이의 탄성파 전달 매체(coupling)로 이용하므로 발진과 수신의 방향(polarity) 조절이 불가능하여 P-파 계측만이 가능한 단점이 있다. 위의 장비와는 달리 S-파 계측이 가능하도록 고안한 압전소자형 발진 장치와 계측기를 공벽에 밀착시키는 밀착 장치(coupling device)가 본 장비 개발의 핵심이다.

2.2 압전소자

壓電素子(piezoelectric material)는 전기장(electric field)에 의해 변형이 일어나고, 반대로 응력(stress)을 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 1과 같이 디스크형으로 두께팽창 모드(thickness dilation mode)에 이용하였다. 이 모드가 에너지 변환 효율성이 가장 좋다.

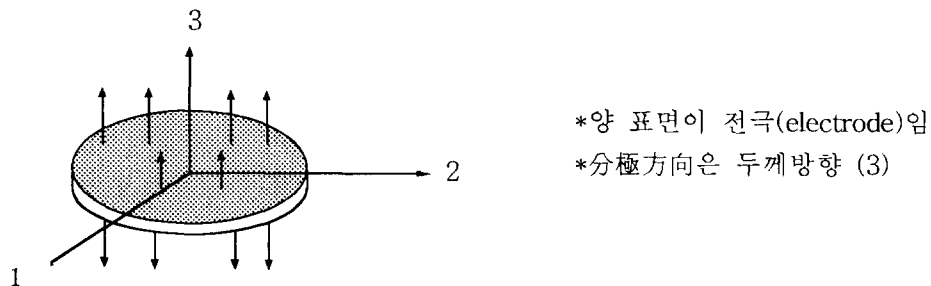


그림 1. 압전소자 디스크의 두께팽창모드

압전소자의 양면에 연결된 전극(electrodes)에 전압을 걸어 주면 압전 세라믹이 용수철처럼 변형되며 콘덴서와 같이 전기적 에너지가 충전된다. 일단 전기 에너지가 충분히 충전된 후에 압전 세라믹의 양 전극판을 쇼트(short)시키면 전기장이 순간적으로 방출되어 충격에너지가 방출된다. 마치 눌렀던 용수철이 튀겨지듯이 탄성에너지가 방출하게 된다. 이 탄성에너지는 압전세라믹에 충전된 최대 전기에너지 양에 비례한다. 콘덴서에 충전되는 전기 에너지는 전기장(electric field)의 제곱에 비례하므로, 큰 전기장을 갖도록 세라믹을 여러 장 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 병렬 연결한 세라믹 스택(ceramic stack)을 사

용하여 탄성 에너지가 최대한 축적된 스프링이 튕겨지는 것과 동일한 개념으로 설계되었다. 반면에 압전 세라믹을 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.

2.3 밀착장치 및 방향조정

P-파는 속도가 가장 빠르므로 발진자 및 감지기의 방향(polarity) 조정 없이도 어느 정도 측정할 수 있다. 탄성과 기록에서 초동(initial arrival)을 취함으로써 P-파의 도달 시간을 측정할 수 있다. 그러나 S-파의 속도는 P-파보다 느려서 P-파의 여진과 S-파가 중첩되어 S-파 도달 시점을 식별하기 어려운 실정이다. 이런 점을 극복하고 S-파 도달 시점 식별이 가능한 탄성과 기록을 얻으려면 발진자와 감지기의 방향을 동시에 조정하여 공벽에 밀착시켜야 한다. 고안된 밀착장치(coupling)는 소방호스(fire hose)를 이용한 것이다. 이 호스는 외피가 직포로 싸여 마모에 강하여 펑크의 염려가 없고 저렴한 것이 특징이다. 유지보수가 거의 필요 없고 값이 싸 본 장비 설계 목적에 아주 잘 부합되는 소재이었다. 단, 이 호스를 양단 봉합시키고 공기 입출을 위한 연결 휘팅(fitting)을 특수 제작하였다. 또한 이 공기 주머니는 세라믹 chamber와 장비의 다른 부분 사이의 진동차단재(isolator) 역할을 할 수 있어 일석이조의 효과를 거둘 수 있다.

2.4 장비 체계

장비는 검측공내에 밀착되는 다운홀 유닛(downhole unit: 발진자와 감지기)과 다운홀 유닛을 작동시키는 지상 제어 유닛(control unit)으로 이루어져 있다. 다운홀 유닛중 발진자의 개념도는 그림 2와 같다. 병렬 연결된 두 조의 세라믹 스택과 전자회로를 집어넣을 방(chamber)과 소방호스를 이용한 밀착장치 및 방향 조정을 위한 연결 고리로 되어 있다. 수신기도 발진자와 동일한 형태이며 세라믹 스택과 전자회로가 다를 뿐이다. 그림 3은 직경 38mm의 압전 세라믹 20장을 병렬로 겹친 총 두께 30mm의 스택 두조를 챔버(chamber)내에 조립하는 과정을 보여주는 사진이다. 한 개의 세라믹 원형판(disk)의 두께는 1.25mm이고 병렬로 20장을 연결할 때 1kV의 전압으로 최대 20,000 V/in의 전기장을 발생시킬 수 있다. 발진자에서 발생하는 탄성과 에너지의 주파수 성분은 세라믹 스택을 집어넣을 챔버(chamber)의 무게에 영향을 받는다. 이 장비는 암반 및 콘크리트에서 사용하고자 주파수 영역을 10kHz 내외에서 작동시키도록 챔버의 재질을 스테인리스강을 사용하여 0.9 kg의 무게가 되도록 제작하였다. 그림 5는 다운홀 유닛을 작동시키는 지상의 제어유닛 내부이다. 이 제어콘트롤 유닛은 발진 및 수신 세라믹을 작동시키는 전자제어와 밀착장치를 작동시키는 압축공기 제어장치로 이루어져 있다. 이 제어장치에서 발진과 수신 전기적 신호는 일반 오실로스코프나 파형 분석기에 연결하여 기록할 수 있다.

본 장비는 손가락으로 크리스탈 잔을 튕기면 “핑”소리가 맑게 울려 퍼지듯이 지반을 경쾌하게 때려 준다는 의미로 “GeoPing”으로 명명하였다. 이 장비의 자세한 설명은 백영식 외(1997)를 참조하기 바란다.

3. 현장 적용

3.1 현장 개요

대상현장은 충청북도 단양군 대강면 두음리와 용부원리에 소재한 중앙고속도로 영주-제천간 10공구 현장내의 두음교 교각 3번 기초지반이다. 이 부근은 석회암지대로 황갈색 점토질과 청회색 석회질대가 북북동 주향 및 고각의 서경사(N10E/85NE)로 교립하여 층리에 의한 불연속면이 뚜렷하다.

위치에 따라 기초 굴착면으로부터 10 m에서 20 m이내에 파쇄가 매우 심하여 일부 공동 징후를 보이

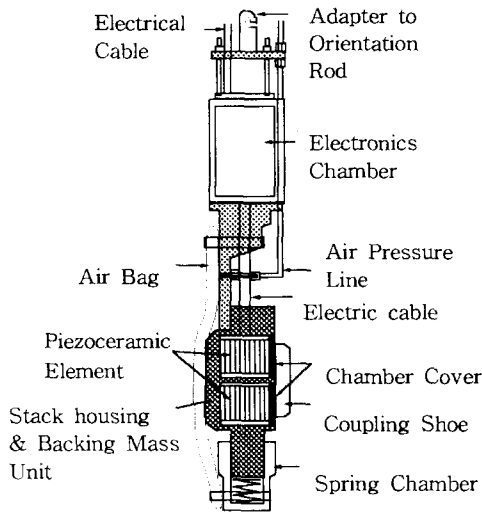


그림 2. 발진자의 개념도

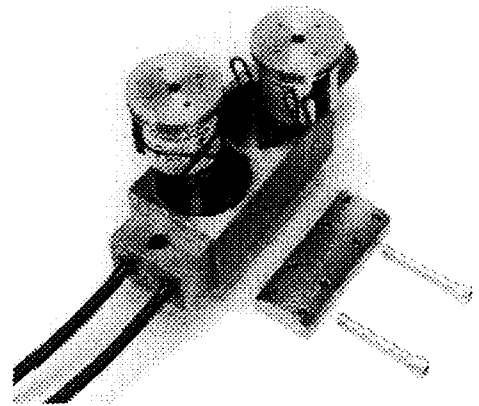


그림 3. 발진자 스택을 챔버에 조립하는 과정

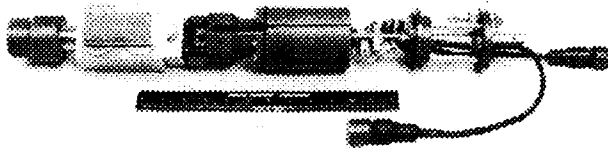


그림 4. 발진자의 조립과정

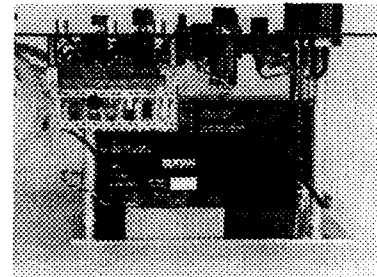


그림 5. 제어 유닛

고 있다. 교각 직접기초 타설 전에 기초지반을 보강하고자 S.I.G 그라우팅을 2.5m간격으로 깊이 25m까지 시행하였다(임수빈 외,1997). 그라우팅 성과 평가의 일환으로 본 연구에서 개발한 GeoPing을 사용하여 크로스홀(crosshole)시험을 수행하였다. 보강전의 지반조사는 본 장비가 개발되기 전에 이미 수행되어 그라우팅 보강 전후의 직접적인 비교는 불가능하나 화약/하이드로폰을 이용한 탄성과 탐사 결과와 간접적인 비교는 가능하다.

3.2 검측공 설치

그림 6은 현장 계측을 위한 검측공의 배치현황이다. 직접기초를 위해 굴착 후 20m×20m×1.5m의 콘크리트 슬래브를 기초지반 위에 타설하고 그라우팅을 실시한 후 슬래브의 네 모서리와 장축의 중앙부 2개소에 시추를 수행하였다. 본 장비의 현장 시험을 위하여 그림6과 같이 검측공 “R”을 추가 시추하였다.

“S”로 표기된 검측공에 발진기를, “R”로 표기된 검측공에는 수신기를 공벽에 밀착시킨다. 두 검측공의 크기는 NX이며 두 검측공 사이의 거리는 7m였다. 본 장비의 발진자 에너지의 한계성과 전단파 계측을 위해 검측공 간격은 7m이하로 제한하였다. 뒤에 언급이 되겠지만 본 장비의 시험거리는 전단파 계측을 감안할 때 5m로 정하는 것이 바람직한 것으로 판명되었다.

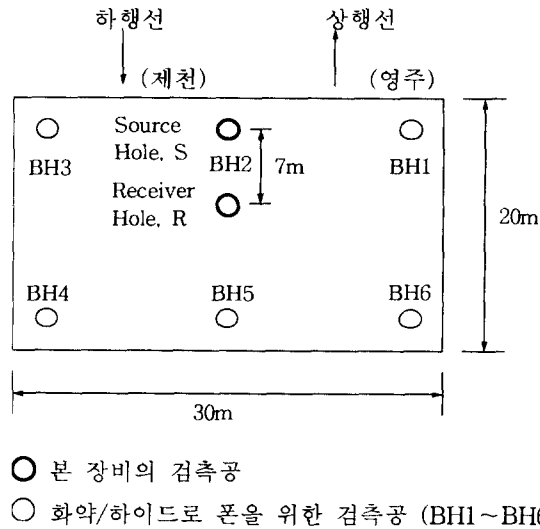


그림 6. 교각 3번 기술지반의 검측공 배치현황도

3.3 현장계측

발진자(source)를 방향조정 막대(orientation rods)에 연결하여 발진자 방향을 조정한 후에 압축공기를 공기주머니(air bag)에 넣어 검측공 내에 발진자를 밀착시킨다. 수신기(receiver)도 마찬가지로 방향조정 막대로 방향을 조정하여 압축공기로 검측공 내에 밀착시킨다. P-파 계측에는 발진자와 수신기를 서로 마주 보게 방향을 조정한다. S-파 계측은 발진자와 수신기의 방향을 전파 경로와 수직방향으로 나란하게 조정한다. 발진자와 감지기를 같은 방향으로 향하게 조정하여 P-파의 후속진동을 극복하고 S-파 에너지 계측을 극대화하여 S-파 도달 시점을 확연하게 구별되도록 한다. 발진자와 감지기를 서로 반대방향으로 향하게 조정하여 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이때 두 계측기록을 중첩시키면 S-파 도달시점에서 파형이 서로 반대 방향으로 갈라져 “나비 날개” 모양을 보이게 된다. 이와 같이 S-파 도달 시점 판독을 용이하게 하기 위해 발진자와 감지기의 방향을 반전시켜 한 계측점에서 1쌍의 S-파 계측을 실시한다. 한 계측점에서 해당계측에 맞게 계측기를 설치 완료 후에 발진자의 압전소자에 고압을 가하고 충격신호(impulse signal)를 보내 발진자 검측공벽에 충격파를 발생시키는 동시에, 충격신호를 기록장치(파형분석기)에 연결하여 기록작동을 시작하고 충격파 발생시점을 결정한다. 검측공벽을 출발한 충격파가 두 검측공 사이의 매질을 통과하여 감지기 검측공벽에 도달, 감지기에 전압을 발생시켜 파형분석기로 기록된다. 한 계측지점에서 P-파 기록과 S-파 기록 1쌍을 플로피 디스켓에 기록한다. 이러한 과정을 깊이 0.5m간격으로 깊이 24m까지 반복하여 P-파와 S-파를 기록하였다

3.4 탄성파 통과시간 결정

P-파 계측의 전형적인 파형은 그림 7과 같다. 위 파형은 발진자의 트리거(trigger)파형이고 아래 기록은 감지기의 P-파의 도달 시점(arrival time) 판독의 이해를 돕기 위해 파형을 두 부분으로 나눈다. 처음 직선부와 1주기의 신호는 발진자 충격신호(impulse signal)에 의한 콘트롤 유닛의 크로스 커플링(cross coupling)에 의해 생기는 전기적 신호이다. 이 크로스 커플링을 지나 연장된 직선부분은 아직 P-파 에너지가 발진자에서 출발하여 감지기에 도달하지 않았다. 이 신호의 두 번째 부분은 직선부분이 끝나고 첫 P-파가 도달한 후 (그림 7에 P-wave arrival로 표기됨) P파의 여진파와 반사파 등 각종 파들의 기록이다. 그림 7에서 발진자 트리거 신호상에 표기된 “T”는 발진자에서 충격파가 출발한 시점이고 감지기 신호상의 “P”는 P-파가 감지기에 도달한 시점이다. “P”와 “T” 사이의 경과 시간이 P-파의 검측공 사이의 거리를 통과하는데 걸린 시간이다.

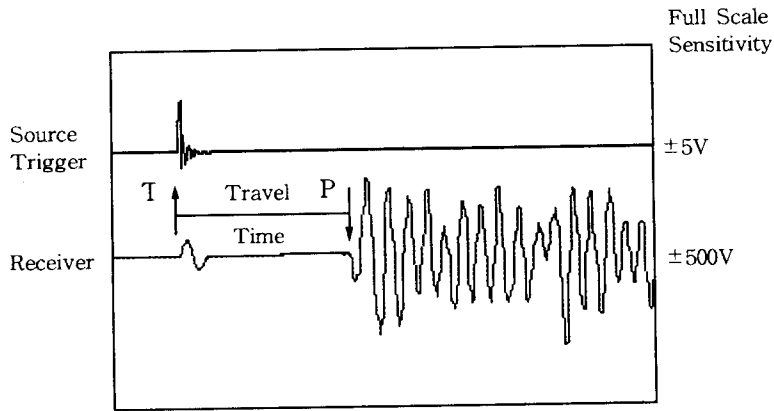


그림 7. Typical P-wave Records at the depth of 15.5m
(Record Length = 8msec)

S-파 계측의 파형은 그림 8과 같다. 앞에서 설정한 바와 같이 S-파 계측도 계측기를 검측공 축선에 대해 횡방향으로 향하게 하여 계측하면 된다. 그림 8의 a)는 발진자와 감지기를 동일한 방향으로 향하게 한 후 기록한 전단파 파형이고 S-파 도달시점은 “S” 로 표시되었다. 마찬가지로 그림 8의 b)파형은 발진자와 감지기를 서로 반대 방향으로 향하게 하여 계측한 S-파 신호이다. “S” 로 표시된 시점에서 a)의 신호와 반대 방향으로 출력이 되어 c)와 같이 중첩시키면 S-파 도달시점의 신호 모양이 “나비모양” 처럼 보인다. 이러한 방법은 S-파 도달 시점의 판독을 용이하게 한다. “T” 와 “S” 사이의 경과시간이 S-파가 발진자 검측공을 출발해 감지기 검측공까지 도달하는 데 걸린 시간이다.

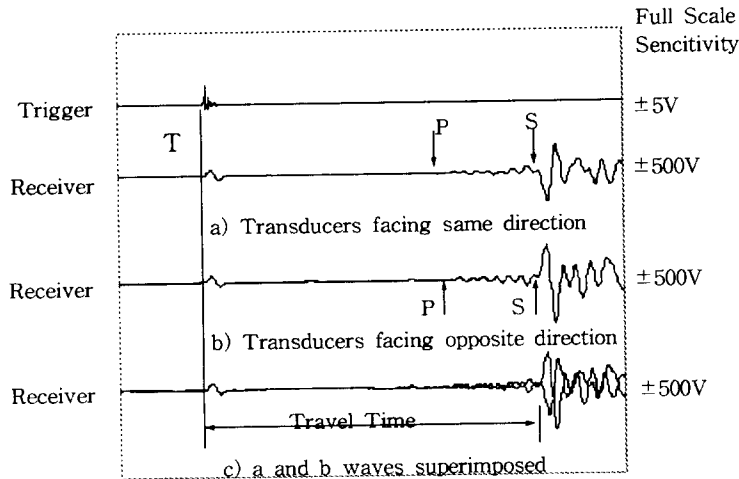


그림 8. Typical S-Wave Records at depth of 18m
(Record Length = 8msec)

3.5 탄성파 속도계산

P-파와 S-파의 계측된 통과 시간으로부터 P-파와 S-파 속도 및 포아슨 비, 탄성계수는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$V_P = \text{통과거리}/\text{P-파 통과시간} \quad (1)$$

$$V_S = \text{통과거리}/\text{S-파 통과시간} \quad (2)$$

$$G = (\gamma / g) V_S^2 \quad (3)$$

$$M = (\gamma / g) V_P^2 \quad (4)$$

$$\nu = [0.5(V_P / V_S)^2 - 1] / [(V_P / V_S)^2 - 1] \quad (5)$$

여기서, V_P = P-파 속도

V_s = S-파 속도
 G = 전단 탄성계수
 M = 구속 탄성계수
 ν = 포아슨 비이다.

그림 9는 깊이별 탄성과 속도 및 포아슨 비이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 깊이 0~10 m까지는 P-파와 S파 속도가 각각 3000 m/sec와 1800 m/sec내외이고 10 m 이하에서는 P-파와 S-파 속도가 각각 6000 m/sec와 3000 m/sec로 나타나 이 기초지반은 크게 2층으로 된 지반으로 판명되었다. 포아슨 비는 대략 0.35 정도이다.

3.6 그라우팅 성과 평가

보강 전 지반조사는 화약/하이드로폰을 이용한 탄성과 탐사가 수행되어 본 장비의 조사 축선과 일치하지 않으나 가장 근접한 축선도인 그림 6과 같이 축선(BH4-BH1)과 축선(BH5-BH2)이다. 이 축선에 화약/하이드로폰과 GeoPing을 사용하여 측정한 깊이별 P파 속도 분포는 그림 10과 같다. 비록 축선이 다르고 사용장비가 다르더라도 그라우팅에 의해 P-파 속도가 증가된 것이 확연하다.

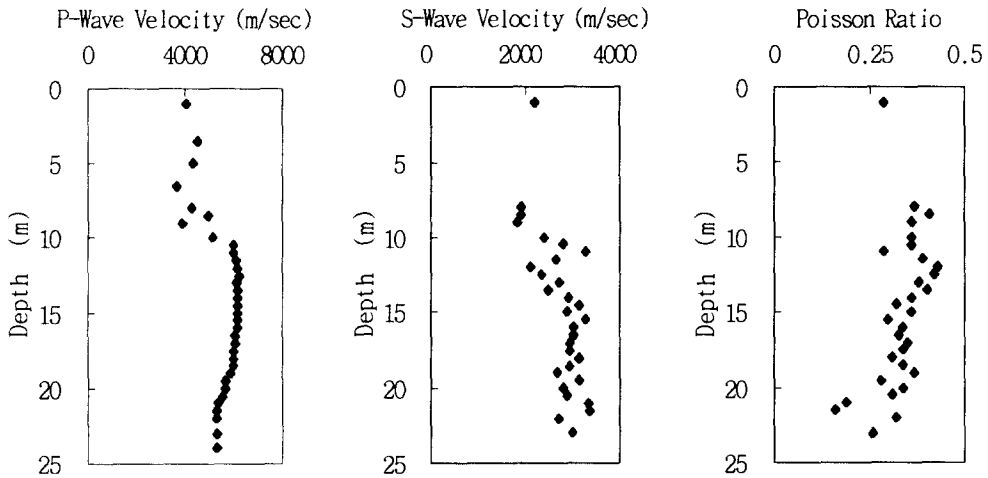


그림 9. 탄성과 속도 및 포아슨비

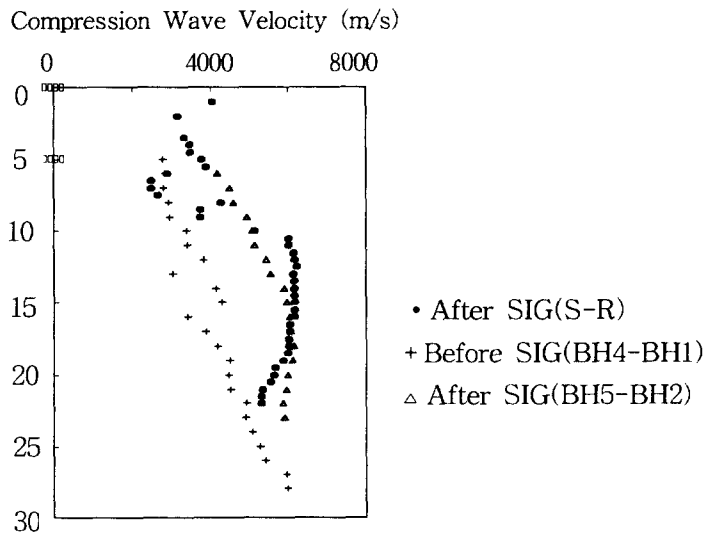


그림 10. 압축파 속도 비교

4. 요약 및 결론

암반 및 콘크리트의 물성 정밀조사를 위한 크로스홀과 토모그래피 기법을 위해 개발된 탄성파 장비 “GeoPing”의 사양 및 특성은 아래와 같다.

- 1) 압전 소자형 장비
- 2) P-파는 물론 S-파 측정가능
- 3) NX 크기의 검측공에 사용가능
- 4) 유지보수 용이
- 5) 정밀한 트리거(trigger) 제어회로로 시간대역 파형을 평균하여 신호-노이즈비 증대

이 장비의 현장 적용성을 입증하고자 교각기초 밑의 암반 그라우팅 성과 평가에 적용하여 보았다. 본 장비는 그라우팅 후 지반의 강도증진을 성공적으로 규명하였으며 기존의 장비로 불가능한 S-파를 측정 하므로서 탄성계수는 물론 포아슨비까지 산출할 수 있어 설계 물성 산정에 효과적으로 사용될 것으로 판단된다. 이외에도 이 장비는 현장 타설 말뚝 및 콘크리트 구조물의 품질관리 및 건전도 평가에 적용 할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 목영진, 1992, “In Situ Measurement of Stiffness and Damping of Soils by Crosshole and Downhole Methods”, 한국지반공학회 지반진동 위원회 제1회 학술논문집 제1권 제1호 pp 1-18
2. 백영식 외, 1997, 지반구조의 영상화를 위한 Seismic Geotomography 개발, 건설교통부
3. 임수빈 외, 1997, 중앙고속도로 영주-제천간 10공구건설공사 “두음교 기초지반의 확인조사 및 처리공법”, 동부엔지니어링(주)

감사의 글

본 연구는 건설교통부 94'연구개발사업(R&D/94-0014)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드린다.