

분니가 발생한 철도 노반토의 역학적 특성 Mechanical Characteristics of Railway Subgrade Materials Experiencing Mud-Pumping

목영진 ¹⁾, Young-Jin Mok, 황선근 ²⁾, Seon-Keun Hwang, 이성혁 ³⁾, Song-Hyok Lee

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

²⁾ 한국철도기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute

³⁾ 한국철도기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : A series of crosshole tests was conducted to evaluate the mechanical characteristics of railway subgrade materials which has been experiencing mud-pumping. The shear wave velocity profiles of mud-pumped sites were compared with those of adjacent intact sites. The shear wave velocities of mud-pumped layers are less than 150 m/sec..

Key Words : Mud-pumping, Ballast, Crosshole, Shear wave velocity,

1. 서론

철도선로 밑의 노상토 및 노반토에 지표수가 유입되고 관입된 자갈의 교반작용(열차진동에 의해)으로 인해 지반이 연약해져 일부 액상화된 상태에서 자갈도상 위로 분출되는 분니현상(mud pumping)이 궤도 유지관리 차원에서 매우 심각한 문제이다. 궤도틀림에 의한 안정성 위협과 궤도의 극심한 진동에 의한 쾌적감 저하 등이 분니현상에 의해 야기되는 문제이다. 이 논문에서는 분니현상 발생원인 규명의 일환으로 크로스홀 시험기법을 도입하여 분니 개소의 노반토의 지층구성 및 역학적 특성을 규명하고자 한다.

분니현상을 규명하려면 궤도 바로 아래의 노상토 및 노반토의 물리적 특성을 측정하여야 한다. 현재 경부선의 경우 약 5분마다 열차가 주행하므로 궤도상에서 시추조사 및 시료채취와 원위치시험이 불가능하다. 이 논문에서는 이러한 기존 조사의 접근성의 한계를 극복하고자, 궤도 양편에 검측공을 설치하고 크로스홀 시험을 수행하여 궤도 바로 아래 지반의 층상구조 및 물리적 특성을 규명하였다.

2. 분니 현상

분니는 선로에 이토(泥土)가 분출하는 현상을 말하며 도상분니와 노반분니로 구분된다. 도상분니는 도상 발라스트가 열차의 반복하중에 의해 마모된 세립분이 물과 혼합되어 도상으로 분출되는 현상이고, 노반분니는 노반토가 우수나 지하수에 의해 연약해지고 열차하중의 교반작용으로 이토화되어 도상위로 분출하는 현상이다.

상이다. 두 현상 모두 열차하중, 우수 및 지하수, 흙과의 상호작용에 의해 이토가 형성되어 도상 위로 분출하고 있다. 그림 1은 이토가 분출된 자갈도상 사진이고, 그림 2는 이토가 묻은 자갈을 가까이 찍은 사진이다.



그림 1. 이토가 분출된 자갈도상

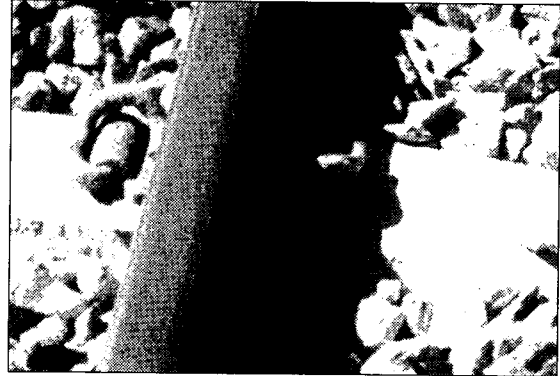


그림 2. 이토가 묻은 자갈

분니의 발생과정은 1) 발라스트(도상 자갈)의 노반내로 관입 2) 노반토의 리몰딩 및 강도 저하 3) 노반토의 세립분(이토)이 상승하여(열차의 반복하중에 의해 발생하는 동간극수압의 증가에 의해) 발라스트의 틈새를 막아 펌프작용이 형성되어 이토가 도상 위로 분출되는 세 단계로 이루어진다. 분니 현상의 원인으로서는 다음과 같이 세 가지로 대별된다.

- 1) 노반 토질의 불량(불투수성 재료)
- 2) 도상과 노반의 배수 불량
- 3) 열차의 반복하중

3. 시험 현장

3.1 현장 선정

경부선 철도 상의 두 개의 현장을 선정하였다. 현재 분니현상이 심하고 크로스홀 검측공 설치와 시험에 필요한 작업 공간이 충분한 곳이어야 한다. 천안 현장은 상행선 서울 기점 95.490km와 95.580km지점이고(이하 천안 95k+470과 95k+580지점으로 부른다.), 조치원현장은 상행선 서울 기점 124.705km와 124.795km 지점이고(이하 조치원 124k+705와 124k+795지점으로 부른다.). 천안 95k+580과 조치원 124k+795는 분니가 일어나 열차주행 시 궤도의 진동이 매우 심하고, 천안 95k+470과 조치원 124k+705는 비분니 지역이나 장래 분니가 일어날 가능성이 큰 지점이다. 천안 현장의 지질학적 특성은 퇴적지반으로 연약한 점성토 및 모래층으로 형성되어 있고, 원지반 위에 성토를 축조하여 궤도가 설치되어 있다. 조치원 현장은 화강암 풍화토(잔류토)를 절토하여 궤도가 설치되었다.

3.2 검측공 설치

천안과 조치원 현장에 각각 분니 지점과 비분니 지점에 천공을 하고 NX크기(내경 75mm)의 플라스틱(PVC)케이싱을 설치하였다. 케이싱 설치 깊이는 5m 내외로 주변 흙과 밀실한 접촉을 확보하기 위하여 시멘트 그라우팅을 실시하였다. 그라우팅 액은 물-포틀랜드 시멘트-조강 팽창 시멘트 비를 1 : 1 : 0.15

비율로 섞어 교반하였다. 크로스홀시험에서 양질의 데이터를 획득하려면 케이싱과 주변 흙 사이의 공간이 그라우팅 재료로 완전히 채워져야 한다. 양생 후 그라우팅의 부피가 줄어 케이싱과 주변 흙 사이에 공간이 형성되는 것을 방지하고자 조강팽창시멘트를 첨가하였다. 또한 그라우팅액의 블리딩(bleeding)현상에 의해 공간이 형성될 것을 우려하여 다단계(3차) 그라우팅을 실시하였다. 설치된 크로스홀 시험 단면은 그림 3과 같다. 발전기 검측공의 지반고를 기준면으로 하여 표고를 계산하였다. 이 시설은 분니현상에 대한 지속적인 연구현장으로 보존하고있다.

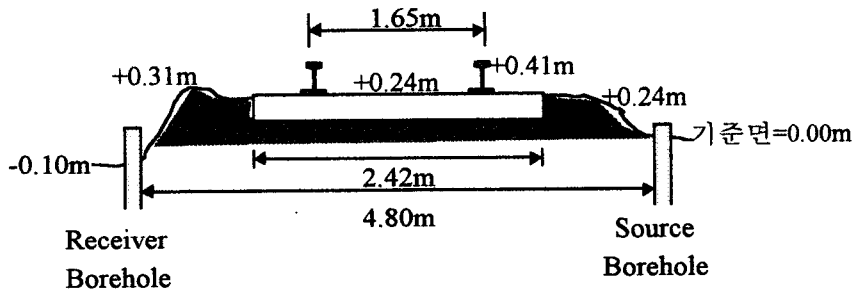


그림 3. 천안 95k+470 단면

4. 크로스홀 시험

4.1 시험 장비

크로스홀 시험(crosshole tests)에 사용하는 장비는 기능에 따라 1) 발전기(sources) 2) 감지기(receivers) 3) 기록기(recording equipment)로 분류된다. 각 장비의 간략한 소개는 다음과 같다.

4.1.1 발전기

발전기의 기능은 식별하기 용이한 P-파(압축파)와 S-파(전단파)를 발생시키는 것이다. P-파의 속도는 가장 빠르기 때문에, 주변 잡음에 비해 P-파의 에너지만 충분하면 P-파 식별은 그리 어렵지 않다. 한편 S-파는 먼저 도달한 P-파의 잔파 및 후속되는 여러 가지 파형과 혼합되어 S-파 도달 시점을 식별하기가 그리 쉽지 않다. 그러므로, 지난 30여 년간 S-파 발전기 개발에 중점적으로 노력하여 식별이 가능한 S-파 발전이 가능하게 되었다(Hoar, 1982; Mok, 1988)

이 연구에 사용한 발전기는 충격파 발전기로 첫 번째 저자에 의해 가장 최근에 개발된 (Mok Source로 명명됨) 것으로, 미국 연구기관(The University of Texas at Austin)에서 많이 활용되고 있다. 이 발전기의 주요 부품은 그림 4에 도시된 대로 1) 4 조의 조오(jaw) 와 2개의 콘(cone)으로 이루어진 밀착부(wedging system) 2) 2-행식 공압 실린더(double-acting air cylinder) 3) 4 개의 붕으로 연결된 상·하부 가격추(upper & lower weights) 4) 2 개의 공압관(air-pressure lines) 5) 가격판 작동 로우프(wire rope) 6) 트리거 감지기(triggering accelerometer)로 이루어졌다.

이 발전기를 공압 실린더로 4개의 조오(jaw)를 방사선 방향으로 돌출 시켜 검측공 내에 꽂 끼게 거치시킨 다음 가격추를 로우프로 상하로 당겨 충격파를 발생시킨다. 이 충격파는 연직방향으로 극성(vertically polarized)을 띤 전단파(SV) 성분이 풍부하며 충격의 방향(상향 과 하향)에 따라 전단파의 첫 번째 파형의 방향이 상향(upward)이나 하향(downward)이 된다. 즉, 충격파 반전이 가능한(reversible) 발전기이다(그림

5 참조).

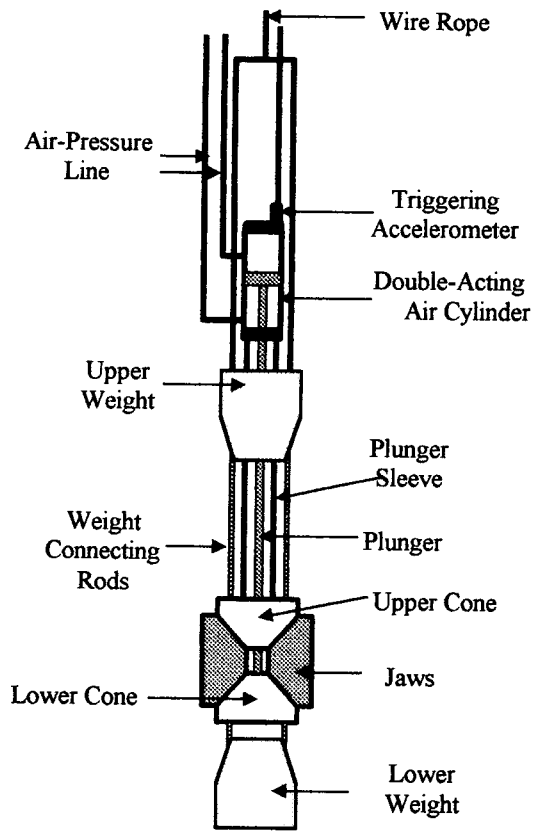


그림 4. 발진기의 개념도

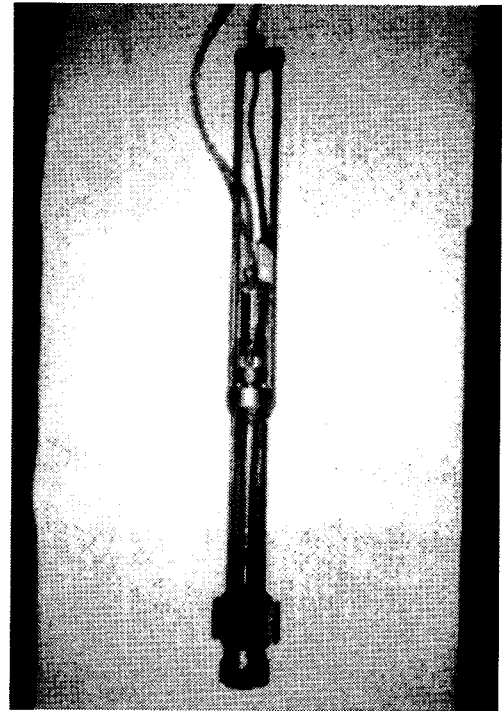


그림 5. 기구식 발진기

4.1.2 감지기

크로스홀에 가장 널리 사용되는 감지기는 속도계(velocity transducer)이다. 이 감지기는 단순히 코일-용수철-자석(coil-spring-magnet)을 작은 통(case)에 배치한 것이다. 코일은 자기장 내에 부상되어 있다. 통이 놓여 있는 매질의 진동으로 통과 자석이 움직일 때, 코일은 관성과 용수철의 반력에 의해 정적인 상태를 유지하려고 한다. 전기장에 대한 코일의 상대적 움직임은 코일의 양쪽 끝 사이에 전위차(전압차)를 발생시킨다. 전위차는, 속도계의 고유 진동수(natural frequency) 이상의 범위에서, 자석 및 통에 대한 상대 속도에 비례한다. 이 속도계는 수직과 수평 진동을 측정할 목적으로 특수 설계·제작하였다. 3-상속도계(three-component velocity transducer)는 1개의 수직 속도계와 2개의 수평속도계를 서로 직교하게 한 통속에 배치하였다(그림 6 참조).

4.1.3 기록기

감지기의 출력을 올바르게 기록하려면, 기록기는 알맞은 주파수응답과 시간 측정 정밀도를 보유하여야 한다. 크로스홀 시험에서 경과시간 계측이 msec. 단위로 이루어지고, 탄성파의 진동수 범위도 수백 헤르쯔(hertz)에서 수천 헤르쯔 범위에 있다. 이 연구에서는 HP-35670 파형분석기(dynamic spectral analyzer)

를 사용하였다(그림 7 참조). 플로피 디스크 드라이브가 내장되어 있어서 3.5인치 디스켓에 시험 자료를 저장하여 추후 자료 분석이 가능하다. 이 장비는 위에 규정한 기본적 사양을 훨씬 능가하는 기능을 갖추고 있다. 시간대역 기록은 물론 패스트 퓨리에 변환(fast Fourier transform)을 이용한 주파수 대역 계측도 가능하다.



그림 6. 감지기

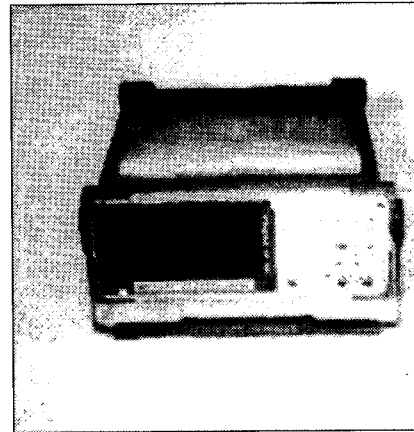


그림 7. 파형분석기

4.2 현장 시험

각 현장에서 ASTM D4428/D 4428M 규정에 따라 크로스홀 시험을 수행하였다. 발진기를 한 검측공에 (source borehole)에 설치하여 P-파와 S-파를 발생시킨다. 발진기와 같은 깊이에 감지기를 설치하여 발진기에서 전파하여 감지기에 도달한 P-파와 S-파를 기록기에 저장한다. 압력 공기로 발진기의 조오(jaw)를 돌출시켜 밀착부(wedging system)를 공내에 꽂 끼게 하고 감지기는 자전거 펌프로 팩커를 부풀려 계측 깊이에 장착시킨다. 발진기의 트리거 가속도계와 감지기를 기록기에 연결한다. 이러한 현장 설치는 그림 8 과 그림 9와 같다.

한 계측 깊이에서 P-파와 S-파 계측을 수행한다. P-파의 입자 움직임은 파의 진행방향(파선 : raypath)과 동일한 방향으로 움직이므로, P-파의 계측은 수평속도계(3상 감지기 중 수평으로 내장된)를 사용하여 기록한다. S-파 계측은 수직속도계(3상 감지기 중 수직으로 내장된)를 사용한 한 쌍의 데이터로 이루어진다. 첫 번째 기록은 가격추를 떨어뜨려 하향 방향의 파형 기록이고, 두 번째 기록은 충격을 상향으로 가하여 기록한 상향 방향의 신호이다. 즉, 충격 방향을 상·하향으로 반전시켜, 파형이 서로 반대 방향으로 갈라져 S-파 도달 시점에서 “나비 날개” 모양을 보이게 된다. 이와 같이 S-파 도달 시점 판독을 용이하게 하기 위해 발진의 방향을 반전시켜 한 계측 점에서 1쌍의 S-파 계측을 실시한다. 이러한 P-파와 한 쌍의 S-파 계측을 깊이 0.2m 간격으로 약 깊이 5m 까지 실시하였다.

5. 결과 및 분석

5.1 탄성파 도달 시점 판독

P-파 도달시점 판독은 자명함으로 생략하고, S-파 판독만 언급하고자 한다. 계측된 전형적인 S-파 파형은 그림 10과 같다. 앞에서 설명한바와 같이 충격방향을 상·하향 방향으로 반전시켜 기록한 한 쌍의

S-파 신호를 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 발진기를 출발해 감지기에 도달하는 데 걸린 시간이다.

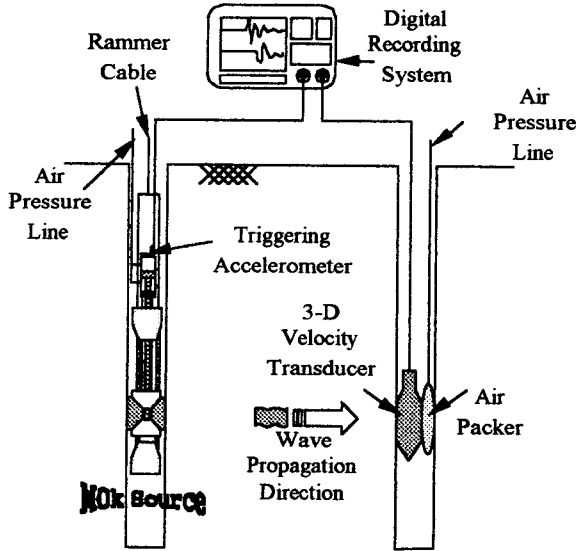


그림 8. 크로스홀 시험 배치



그림 9. 크로스홀 시험 광경

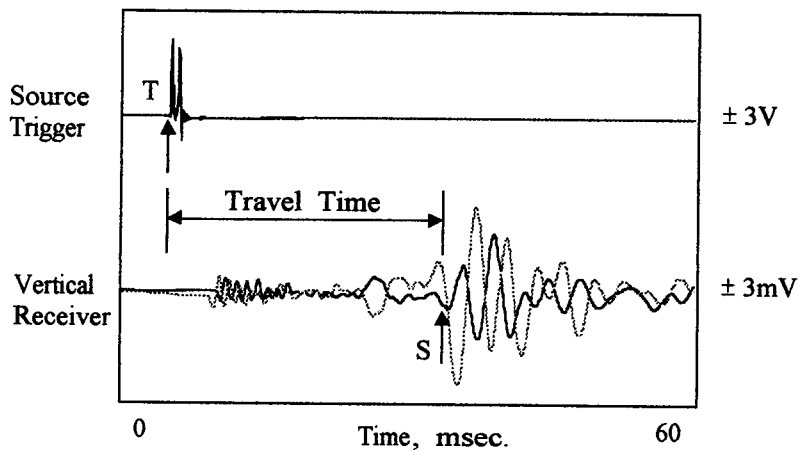


그림 10. S-파 기록 (파일 번호 : 67/68/69/70)
현장 : 천안 95k+470 깊이 : 2.4m

5.2 탄성파속도 및 포아슨비

그림 11은 천안의 분니개소의 의 탄성파 속도 및 포아슨비 깊이 별 분포이다. 이 분포에서 주목할 사항은 아래와 같다. 다른 현장의 분포는 지면 관계상 생략한다.

1) 깊이 1.4m까지의 상부층은 분니가 발생한 층이다. 깊이 0.2m까지 자갈도상층이 관입되고 그 밑의 원지반인 점성토는 자갈이 혼입되고 분니가 일어나 매우 연약하여 전단파속도가 100 m/sec. 내외이다. 자갈

층의 전단파 속도는 300m/sec.를 상회한다. 분니층 위의 단단한 자갈층을 통해 분니층으로 전달되는 굴절파(refracted wave)속도가 측정되었다(약 250m/sec. 내외). 분니층의 한 깊이에서 측정된 두 전단파속도는 자갈층을 통과한 굴절파와 연약해진 점성토층을 통과하는 전단파속도이다.

2) 분니층 아래 원지반의 전단파속도는 120 m/sec.내외로 매우 연약하거나 느슨한 지반이다.

3) P-파 측정으로는 지반의 특성과 파악이 어렵고, 지하수위는 대략 2m 깊이에 위치한다. 깊이 2m부터 3.6m까지의 P-파속도는 800m/sec.에서 1200m/sec.로 유기물에 의한 개스를 다량 함유한 물의 속도인 것으로 추정된다. 깊이 4m 아래에서는 물의 공기 함유량이 거의 없어, 속도가 1500m/sec.에 근접하고 있다.

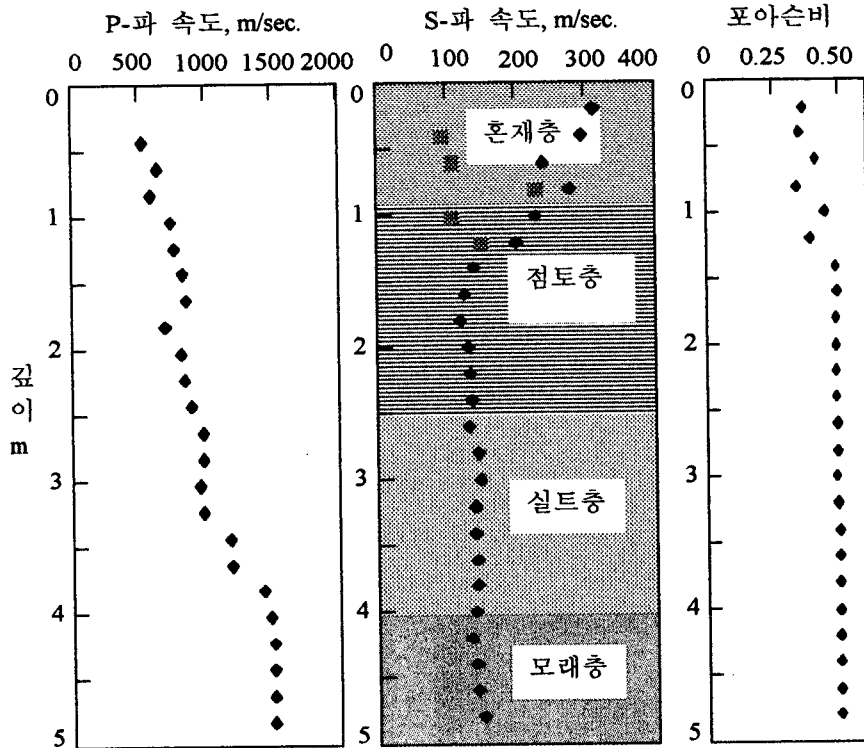


그림 11. 천안 95k+570 지점의 탄성파 속도 및 포아스비

5.3 전단파 속도 비교

그림 12는 천안과 조치원 현장의 분니 지역과 비분니 지역의 전단파 속도를 비교한 것이다. 각 현장에서 분니지역의 전단파 속도의 감소가 확연하게 나타나고 있다.

6. 결론

이 연구에서 도출된 분니 지역의 노반토의 역학적 특성은 아래와 같다.

1) 퇴적토 성토구간의 비분니 개소의 성토층의 전단파속도는 약 200 m/sec.내외이고 그 밑의 퇴적토는 120~150m/sec. 범위로 매우 연약한 것으로 판명되었다. 한 편 100m 정도 떨어진 분니 개소에서 궤도 아래 분니층의 전단파속도는 100m/sec. 이하로 감소하였다. 이 분니층에는 자갈이 다량 혼입된 것으로 판단된다.

2) 잔류토 절토구간에서 분니개소의 분니층 깊이는 1m이고 전단파속도도 150까지 감소하고 있다. 그

밑에는 전단파속도 270~300m/sec. 범위의 불교란된 원지반(화강암 풍화토)이 있다. 한편 100m 떨어진 비분니 개소에서 깊이 1.6m 까지의 상부층의 전단파속도는 160~180m/sec. 범위이고 그 밑에는 전단파속도가 약 300m/sec.의 점성토 원지반이 놓여있다.

3)분니가 일어나는 지역은 지표수가 체류하는 워터포켓 형성 여건인, 투수성이 작고 연약한 지층구조를 갖고 있다.

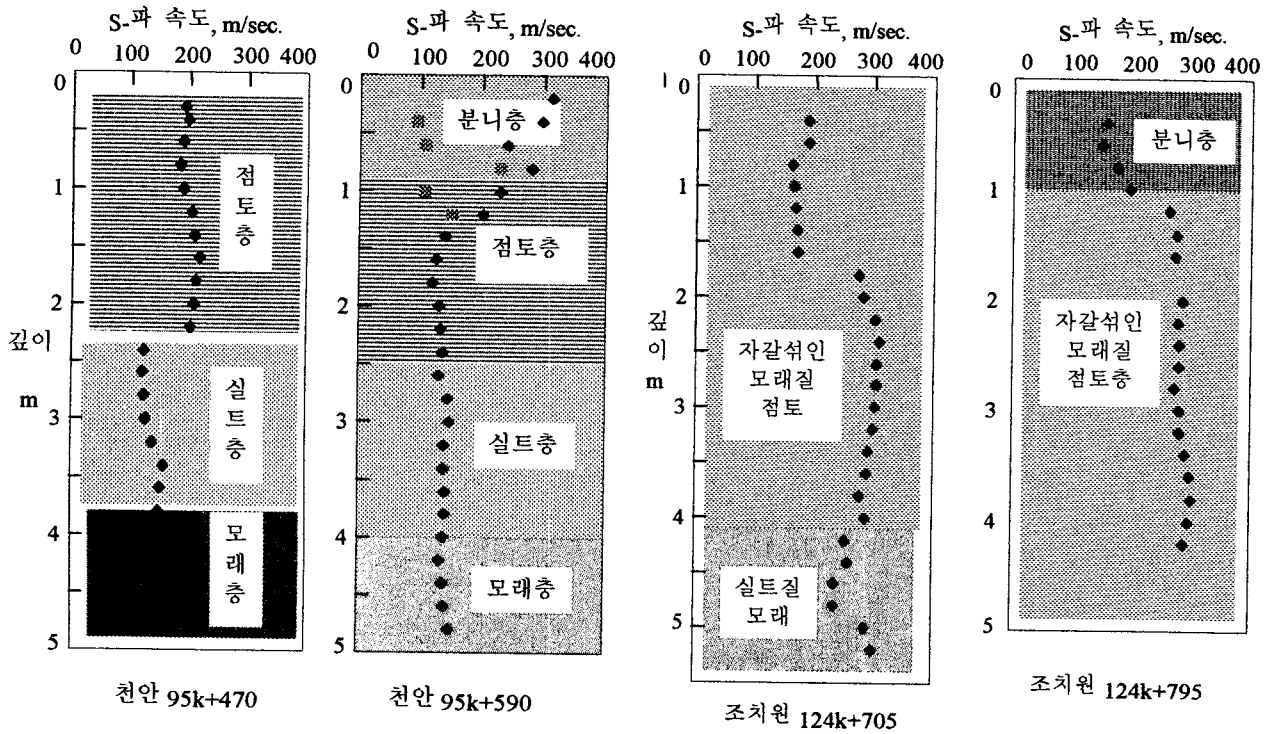


그림 12. 분니 와 비분니 개소의 전단파 속도 비교

참고 문헌

1. Hoar, R. J.(1982), "Field Measurement of Seismic Wave Velocity and Attenuation,"Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 522p
2. Mok, Y. J.(1988), "In Situ Damping Measurements By Crosshole Seismic Method," Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Geotechnical Special Publication No. 20, PP.305-320