

열차 주행에 의한 지반진동의 계측 및 분석

Measurement and Analysis of Ground Borne Vibrations Resulting from Railroad Operation

목 영 진
Mok, Young Jin*

Abstract

Ground Vibrations were measured at one location near the railroad track at a site about 3.2 kilometers north of Chapel Hill, Tennessee, U.S.A.. Measurements were made during the passage of 18 freight trains over the six-day period. The objective of this study was to evaluate ground vibration levels from trains and other traffic at possible construction depths for the Superconducting Super Collider(SSC).

The criterion with which the vibration levels are compared is the more stringent one : that is, 0.0005 inchs(about 0.0127 mm) at 3Hz. The measurements show conclusively that vibration levels generated by railroad traffic in the rock at the depth of 100 ft (30m) or more are at least 10 times smaller than the criterion.

요 약

미국 테네시주 채펠 힐 북쪽 3.2 km, 한 철로변에서 지반진동을 계측하였다. 6일동안 18회의 열차 주행중에 이 계측을 수행하였다. 이 연구의 목적은 열차나 다른 교통수단에 의한 SSC(Superconducting Super Collider) 설치 예상 깊이에서 지반 진동 크기를 분석 평가하는 데 있다. 이 지반 진동과 비교할 기준치는 매우 엄밀히 설정된 값이다 : 즉, 주파수 3 Hz에서 0.0005인치(0.0127mm)이다. 이 계측 결과로는, 지하 100ft(30m)이하 암반에서, 열차 주행으로부터 유발되는 진동 크기는 기껏 커도 기준치의 10분의 1 이하이다.

* 정희원, 쌍용엔지니어링(주)

1. 서 론

1.1 배경

현재 미국 텍사스주에 건설중인 Superconducting Super Collider (이하 SSC라 칭함)유치 경쟁에 텍사스, 테네시, 아리조나주 등 7개주가 참가하여 치열한 경쟁을 벌였다. 본 연구팀 (텍사스 주립대학, 지반공학 연구실)은 테네시주 Tennessee Valley Authority(TVA)의 위촉을 받아 테네시주 Chapel Hill 인근 후보지에 SSC의 지하 설치에 대한 타당성조사에 참가하였다. SSC후보지 선정에 고려할 미국 에너지 성의 지반 진동 규정에 대한 요약은 아래와 같다.

"채석용 발파, 철도, 고속도로나 건설공사 현장으로 부터 발생하는 진동이 SSC설비에 미치는 영향이 지대할 것으로 사료되어 신중한 검토가 필요하다. SSC에 쓰이는 각종 광파 (Beams)는 수분의 일 헤르츠 (Hz)로 부터 수십 Hz사이의 주파수에서 지반 진동에 매우 민감하게 반응한다. 한 광파는 주파수 3Hz의 지반진동과 공명 (Resonance)현상을 일으킬 것으로 예상되어, 지반진동의 진폭이 3Hz에서 0.0005인치 (약 0.0127mm)보다 작아야 한다. 철도노선이 SSC Interaction Point 로 부터 300ft (914m)이내를 통과하면 안된다. 부득이 철도 노선이 통과하면, 열차주행에 의한 지반 진동이 상기 규정한 지반진동 한계치 이내임을 증명할 수 있는 계측 자료를 첨부하여야 한다."

불행하게도, 테네시주가 제안한 후보지 구역내에 두개의 철도 노선이 통과하고 있다. SSC 설비는 대략 지하 100ft - 400ft (30 - 120m)사이 에 환형 (Ring)의 터널을 건설하여 설치한다. 그러므로, 테네시주는 열차 주행에 의한 지반 진동의 공간적 변화 (지상에서 수평거리와 지하 깊이에 따른 진동전파와 감쇠형태)를 규명하여 이 후보지의 타당성을 실증하고자, 현장 계측을 위촉 하였다.

1.2 연구목적과 과업범위

테네시주가 제안한 SSC 후보지의 지반진동 계측및 분석이 이 과업의 목적이다. 특히 SSC시설이 설치될 터널 Ring이 지하 100ft - 400ft (30m - 120m)에 건설될 예정이므로, 열차 주행으로 인한 이 깊이의 지반 진동의 크기가 가장 중요한 관심사이다. 이 깊이에서 계측된 진동의 크기와 에너지성에서 규정한 한계치 (주파수 3Hz에서 0.0005인치 이내)의 상대적 비교를 통하여 테네시주가 제안한 SSC후보지의 적합성을 실증하고자 한다. 이 연구 결과로는, 열차 주행에 의한 지하 100ft(30m) 이하의 지반 진동의 크기는, 최악의 경우, 한계치 (0.0005 인치)의 십분의 일 이하였다.

2. 현 장 계 측

2.1 계측위치

그림 2-1과 같이 테네시주 Chapel Hill 북쪽 2마일, 한 철로변에서 지반 진동을 계측하였다. 이 계측 위치는 TVA당국에서 지질도와 지형도를 참조하고 SSC설치 예상위치를 고려하여 선정하였다. 열차 통과시 발생하는 지반 진동의 진폭과 주파수의 공간적 변화를 조사하고자, 그림 2.2와 같이 지상과 지하에 측정점을 계획하였다. 지상 거리에 대한 지반진동의 변화를 조사하고자 궤도(진동원)로부터 6, 12, 25, 50, 100, 200, 400ft 떨어진 측정점에서 계측을 시행하였다. 또한 궤도에서 수평거리 55ft와 65ft에서 두 보링공을 설치하여 깊이 30ft, 100ft, 200ft, 400ft에서 계측함으로써, 지하 깊이에 대한 지반 진동의 변화를 조사하였다.

2.2 계측장비

Nicolet사, 모델 2090C 오실로스코프 두 대와 Hewlett-Packard사의 파형 분석기 (Waveform Analyzer) 모델 HP 5423A와 HP 3562A를 이용하여 진동파를 기록하였다. 이 네 대의 장비로 최대 10채널의 진동파형을 동시에 기록할 수 있었다. 모든 데이터는 오실로스코프와 파형분석기의 화면(CRT)에서 파형을 검토한후 플로피 디스켓 (Floppy Diskette)에 저장하였다.

Mark Products사의 입자속도 감지기 (Velocity Transducers)를 이용하여 진동파형을 측정하였다. 이 계측에 사용한 감지기의 고유 진동수 (Natural Frequency)는 1, 2 또는 4.5Hz 이었다. 각 감지기의 입자속도 (Particle Velocity)에 비례하는 출력 (Voltage Output)을 Shaking Table에서 계량하여, 측정된 출력으로 부터 지반의 입자속도를 계산할 수 있는 환산 계수 (Calibration Factor)를 산출하였다. 이 산출된 환산계수는 각 주파수에서 조금씩 차이가 있고, 각 감지기의 감지 유효한 주파수 범위는 아래와 같다.

감 지 기	유 효 주 파 수
1 Hz 감 지 기	0.1 - 300 Hz
2 Hz 감 지 기	0.5 - 600 Hz
4.5 Hz 감 지 기	3 - 1600 Hz

각 감지기의 주파수 및 환산계수 곡선 (Calibration Curve)은 그림 2-3과 같다. 연직방향으로 설치된 감지기로 대부분의 진동 계측을 하였다. 이 연직방향 감지기는 연직 방향의 지반 진동을 기록하기 위한 것이다. 1-Hz 감지기는 연직방향 지반진동 측정에만 이용하고, 2-Hz 감지기는 연직방향과 수평방향의 진동, 4.5Hz 감지기는 3차원적 지반진동 (연직방향, 종방향, 횡방향)을 계측하는데 사용하였다.

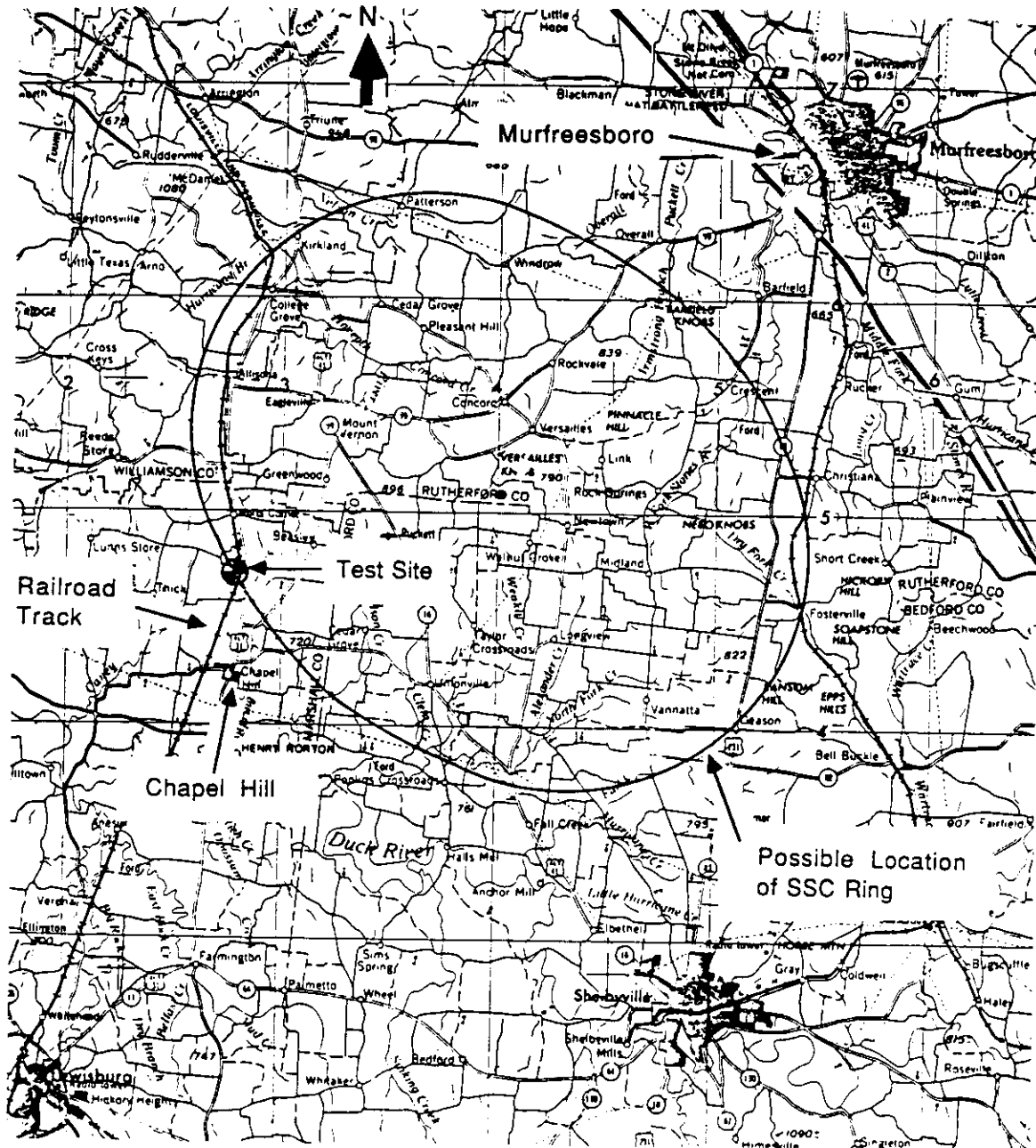


Fig. 2.1 General Location of Railroad Test Site
Near Chapel Hill, Tennessee

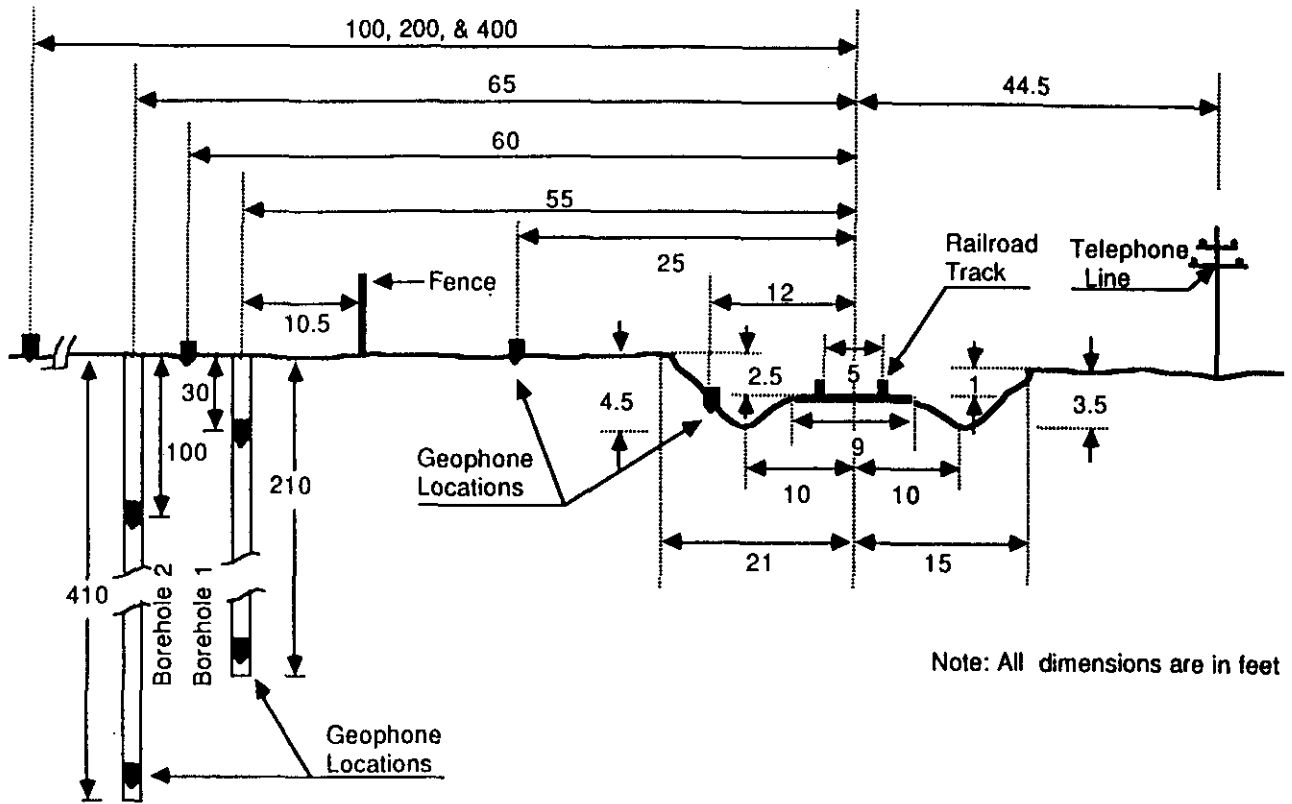


Fig. 2.2 Cross Sectional View of Railroad Track and Vibration Measurement Locations

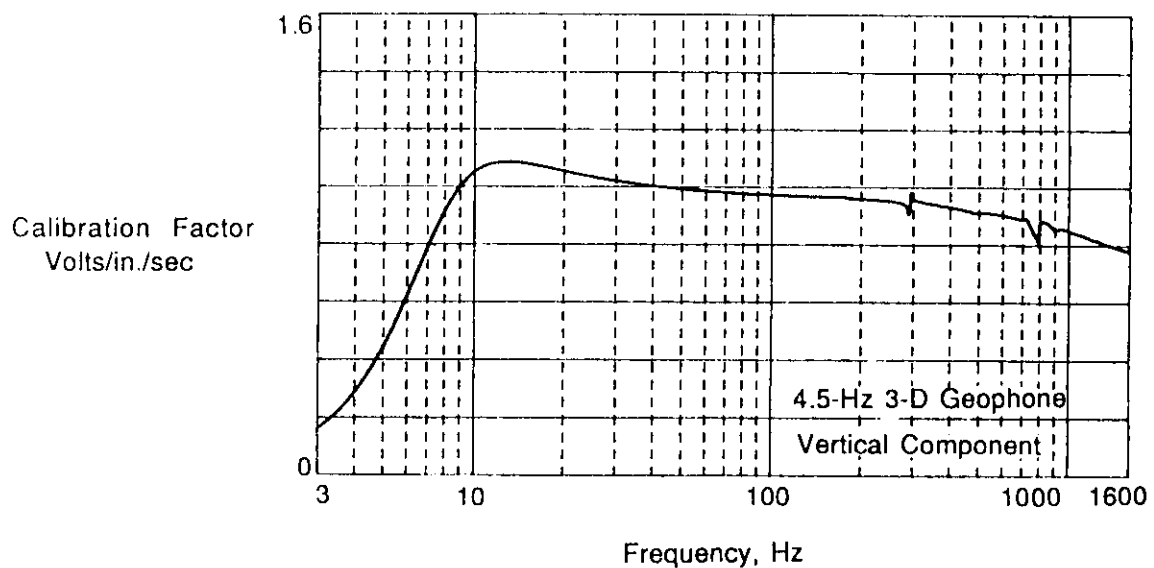
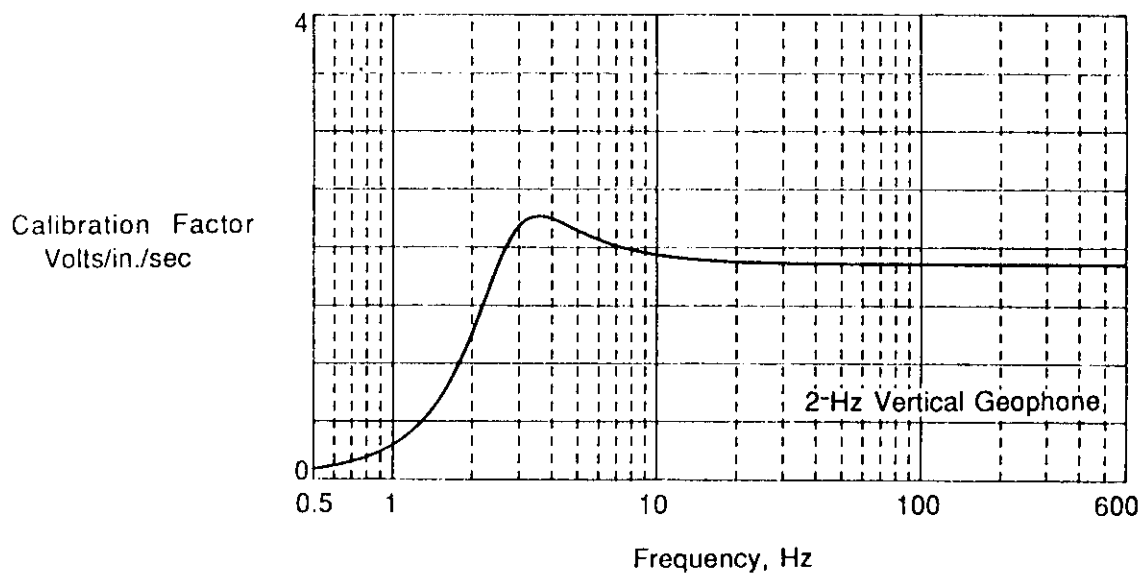
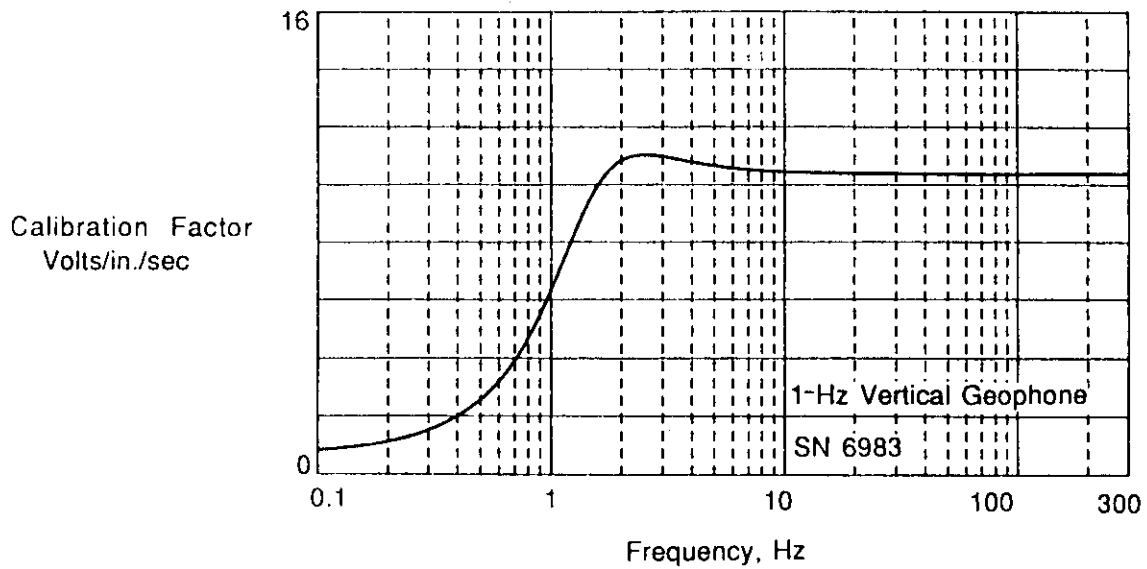


Fig. 2.3 Typical Calibration Curves for the Geophones used in Measurements

2.3 계측 계획(프로그램)

현장 계측 프로그램은 : (1) 기록장치와 감지기 설치, (2) 주변환경 진동(Ambient Vibration) 측정, (3) 열차 운행시의 지반진동 측정으로 이루어졌다. 그 외에 1-Hz 와 4.5-Hz 감지기와 TVA의 "Betsy" 진동원을 사용하여 Downhole 탄성과 탐사를 실시하였다. 주변 환경 진동과 열차 주행에 의한 진동 측정은 매우 짧은 시간내에 (0.4 - 20 sec) 가능하였다. 열차는 수분동안 통과하므로 한 기록 장비로 여러 감지기를 바꿔가며 지반진동 파형을 여러번 측정할 수 있었다. 총 18회의 다른 열차가 통과할 때 지반의 진동을 측정하였다. 기관차 일련번호, 화차의 댓수, 열차 통과시간 등 각 열차의 기록은 표 2.1과 같다.

3. 지반진동 현상

3.1 용어

지반진동이란 지반의 구성요소인 흙과 암반의 입자들이 끊임없이 움직이는 상태를 말한다. 지반이 절리를 따라 서로 움직이거나, 지반이 활동하거나, 숲이나 구조물이 바람에 흔들리는 것과 같은 지질학적, 환경적인 작용에 의해 지반이 진동하고 있다. 또한 채석발파, 각종 기계의 진동, 건설시공, 교통과 같은 인간활동과 관련된 문화적 요인에 의해서도 지반이 흔들리고 있다. 다행스럽게도, 이러한 지반진동의 크기는 대부분 작으므로 매우 감도 높은 감지기를 통하여야만 느낄 수 있다. 특별히 지반 진동이 커서 구조물이나 설비에 피해를 줄 경우에만 공학적 문제로 대두되고 있다.

3.1.1 진동파의 시간 영역 기록 (Time-Domain Records)

그림 3-1은 열차 통과시 발생하는 지반 진동의 대표적인 기록이다. 이 기록은 보령공 1과 보령공 2 내에 설치된 (그림 2-2 참조) 1-Hz 감지기에서 얻어진 것이다. 이 감지기에 직접 기록되는 진동파는 지반 구성입자(흙이나 암석의 입자)의 진동속도(Particle Velocity)이다. 파형 분석기에서 이 기록을 적분하여 지반 입자의 변위 기록을 얻을 수 있다. 그림 3.2는 그림 3.1의 입자 속도 기록으로부터 얻어진 입자의 변위(Particle Displacement) 기록이다. 이러한 변환(입자속도로 부터 입자변위)은 입자속도의 기록과 입자 변위의 상대적 관계를 입증하고자 행하여졌다. 현장의 모든 계측 기록은 모두 입자속도의 시간적 변동을 나타내는 기록이다. 이 기록을 설명하는데 필요한 용어와 그에 대한 짧은 기술은 아래와 같다.

Table 2.1. Summary of Railroad Trains for Which Vibration Measurements Were Performed at Test Site

Train Number	Date	Time	Engine Number*	Direction of Travel	Duration (sec)	Number of Cars	Approximate Speed† (mph)	Type of Load°
1	3 July	12:45p	8142	North	U ^v	U	U	U
2	3 July	1:10p	8328	North	90	U	U	U
3	3 July	5:25p	3251	South	90	113	43	U
4	3 July	8:45p	8092(?)	South	35	U	U	U
5	4 July	9:37a	3805	North	150	137	31	L-M
6	6 July	9:10a	8117	South	U	127	U	M
7	6 July	9:25a	U	South	240	U	U	U
8	6 July	12:12p	8069	North	120	115	33	M
9	6 July	6:34p	5791	South	75	104	47	L-M
10	7 July	7:20a	8238	South	198	132	23	L
11	7 July	8:28a	7270	North	140	126	31	L
12	7 July	9:06a	5576	South	132	110	28	M
13	7 July	10:10a	U	South	U	U	U	H
14	7 July	12:09p	5320	North	123	77	21	H
15	7 July	12:26p	6747	South	U	112	U	L
16	7 July	3:16p	8082	North	80	107	46	M
17	8 July	7:58a	5549	North	90	91	34	M
18	8 July	11:02a	7566	North	80	106	45	M

* Engine Number is from the lead engine

^v U = unknown

† Based on an assumed freight car length of 50 ft

° Load simply estimated by the observer: L = light, M = medium, and H = heavy

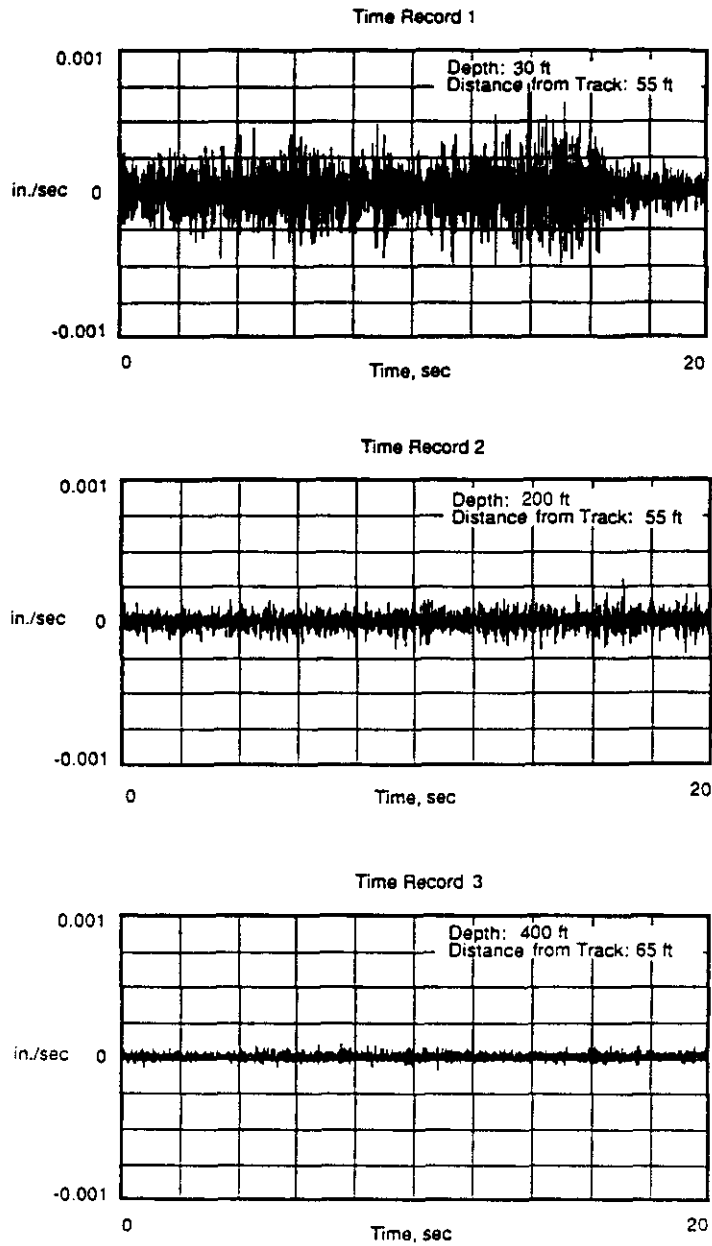


Fig.3.1 Particle Velocity Time Records of Ground Vibrations from Train 8
 Geophones: 1 Hz Vertical
 Distance from Track: 55 ft/ 55ft/ 65ft ; Depths: 30 ft/ 200 ft/ 400 ft

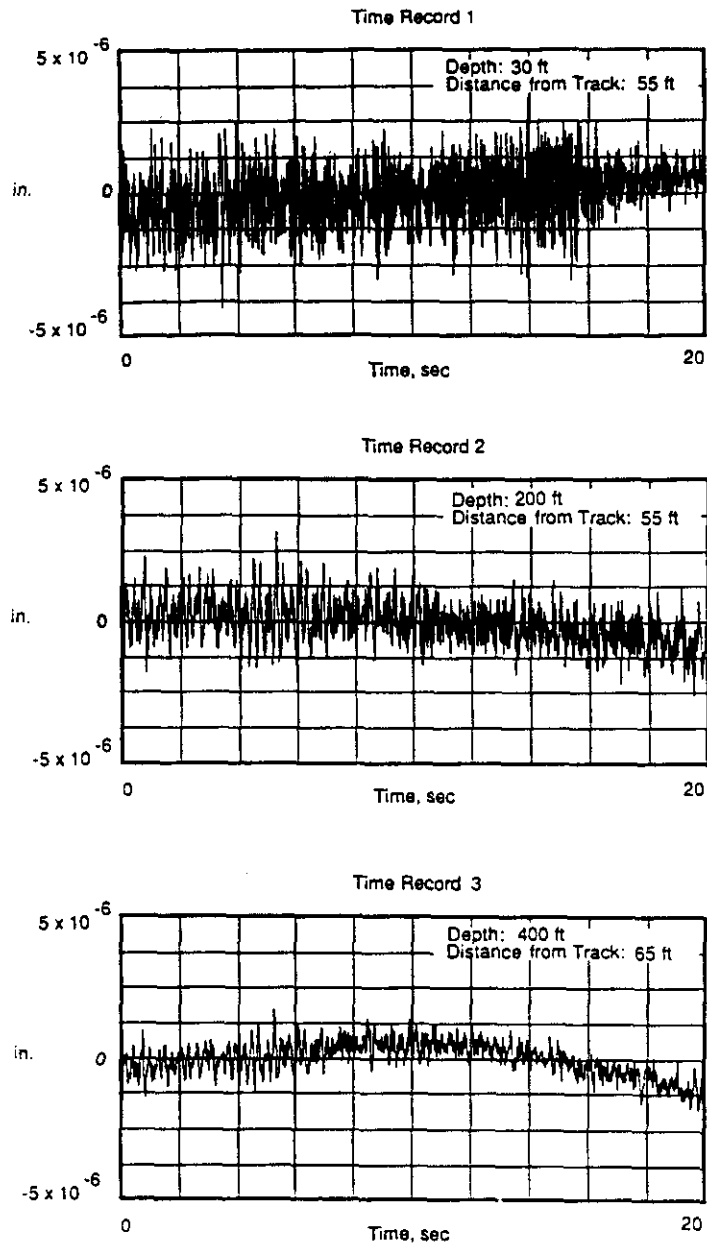


Fig.3.2 Displacement Time Records of Ground Vibrations from Train 8
 Geophones: 1 Hz Vertical
 Distance from Track: 55 ft/ 55ft/ 65ft ; Depths: 30 ft/ 200 ft/ 400 ft

a) 진폭 (Amplitude)

한 측정에서 측정시간내에 지반 진동의 최대(Peak) 출력을 말하며, 변위, 속도 또는 가속도의 단위를 갖을 수 있다 (진동측정 감지기의 종류와 데이터 정리 형태에 따라). 高調派 나 正弦派 에서는 변위, 속도, 가속도의 진폭은 다음과 같은 관계가 있다. :

$$\text{변 위} = A$$

$$\text{속 도} = (2\pi f)A$$

$$\text{가속도} = (2\pi f)A$$

여기서, f 는 진동주파수이고, A 는 변위의 Peak 진폭이다. 진폭의 단위로는 길이와 시간으로 나타내고 (예, 변위는 inches이고 속도는 단위 초당 inches), 때때로 데시벨(Decibel)의 단위를 사용한다. 이 데시벨(dB)의 정의는 아래와 같다. :

$$L_w = 20\log(W/W_0)$$

W 는 Peak 가속도, 속도, 또는 변위이고; W_0 는 기준량이다(이 연구에서는 변위는 1.0 inch이고 입자속도는 1.0 inch/sec 이다).

b) 주파수 (Frequency)

단위 시간당 진폭의 진동회수이다. 주파수는 보통 헤르츠 (Hz)의 단위를 사용하는데 1Hz는 1초당 1회전하는 (1 cycle per second) 진동의 빠르기를 의미한다. 진동주기(T)는 이 주파수와 역수관계에 있다. 즉, $T = f^{-1}$ 이고 단위는 시간이다.

c) 진동감쇠 (Attenuation)

진동원(Source)으로 부터 거리가 멀어짐에 따라 진동의 진폭이 감소하는 현상을 말한다. 이런 진동의 감쇠는 진동원으로 부터 에너지가 점점 큰 체적내에 확산 (Geometrical Damping)되고, 지반의 입자와 입자 사이의 미끄러짐과 마찰열로 바뀌지는 에너지 손실 (Internal Damping)에 의한 것이다.^{(1),(2)}

d) 주변환경 진동크기 (Ambient Level of Vibration)

자연과 원거리의 문화 활동에 의해 발생하는 진동과, 계측장비 자체의 전기적 소음(Noise floor)를 합한 진동 크기를 의미한다.

3.1.2 주파수 영역해석 (Frequency-Domain Analysis)

그림 3.1과 같은 입자의 진동 속도 기록을 주파수 영역에서 해석 함으로서 지반진동의 특성을 보다 완전하게 이해할 수 있다. 시간 영역의 기록으로서는 진동의 우세 주파수

(Predominant Frequencies)를 알 수 없으나, 이 기록을 주파수 영역으로 변환시킴으로서 쉽게 도출할 수 있다. 또한 관심대상의 주파수에서 진폭과 감쇠현상을 주파수 영역 해석을 통해 쉽게 구할 수 있다. 불행하게도 주파수 영역에서 구한 진폭과 시간영역의 진동기록의 진폭을 직접 비교할 수는 없다. 그 이유는, 각각 다른 주파수로 진동하는 입자의 속도는 시간 영역에서 증폭될 때 위상차에 따라 진폭이 배가 될 수도 있고 서로 상쇄되어 감소될 수도 있기 때문이다.

주파수 영역의 데이터는 여러 형태로 표현할 수 있다. 첫번째 방법은 스펙트럼으로 각 주파수별 입자의 속도나 변위를 나타내는 방법이다. 이 방법은 유한한 갯수의 정현파가 혼합 되었을 때 매우 유효한 방법이다. 두번째 방법은 스펙트럼 밀도로 표시하는 방법으로 이는 단순히 스펙트럼을 계속시 사용한 주파수 폭의 이중근으로 나눔으로써 얻어진다.⁽³⁾ 광역의 주파수로 이루어진 파형을 해석할 때는 스펙트럼 밀도 곡선이 스펙트럼 곡선보다 주파수 및 진폭의 분포를 보다 정확히 나타내므로 이 스펙트럼 밀도 곡선을 채택하였다.

그림 3.3은 그림 3.1의 입자속도의 시간적 변화를 나타내는 기록으로 부터 변환시킨 입자속도의 스펙트럼 밀도의 분포 곡선이다. 그림 3.4는 그림 3.2의 변위 스펙트럼 곡선이다. 이와 같은 스펙트럼 밀도곡선은 파형 분석기를 사용함으로써 쉽게 구할 수 있다.

3.2 열차 주행에 의한 진동요인

열차가 궤도상에서 주행할 때 지반 속으로 진동이 전파된다. 이 지반 진동은 궤도의 윤하중에 대한 동적응답, 차륜의 부분적 마모, 레일 이음매의 변위등 여러 진동요인에 의해 발생한다. 이러한 진동은 진동원(궤도)으로 부터 전파되는 진로(Path)상에서 인간, 구조물과 지형물(사면,제방)에게 영향을 주고 있다. 대개는 진동의 크기가 진동원으로 부터 거리에 따라 급격히 감소함으로 열차 주행에 의한 충격은 무시할 정도이다. 열차 주행에 의한 지반진동은 아래와 같은 여러 요인에 의해 영향을 받는다.

a) 궤도의 비평탄성

정렬되지 못한 레일과 레일 이음매와 같은 궤도의 연속적인 평탄성 결여를 뜻한다.

b) 레일 침묵과 도상자갈

도상자갈 상태와 레일과 침묵의 고정상태 또한 진동의 크기에 영향을 준다.

c) 기관차와 화차의 특성

지반진동의 크기는 열차의 무게와 차대지지 장치 형태에 따라 변한다. 레일이 평탄하지 못하고 차륜이 부분적으로 마모되면, 레일에 가해지는 강한 충격이 지반으로 전파된다.

d) 열차의 길이와 속력

대부분의 충격에너지는 차륜과 레일의 비평탄성에 의해 발생하므로, 진동의 크기는 열차 속력에 비례하여 증가한다는 사실이 여러 연구에 의해 밝혀졌다. 열차의 길이도 진동의 크기에 영향을 주고 있다. 즉, 기관차만 주행할 때는 점하중(Point Source)으로 간주할 수 있으나, 80량의 화차가 주행할 때는 선하중(Line Source)으로 작용한다.

이상과 같은 진동요인은 대체로 잘 파악 되었으나, 각 요인의 진동 Mechanism은 복잡하고 상호 서로 관련되었다. 현재, 각 진동 요인의 Mechanism을 고려할 수 있는 수학적 모델 개발

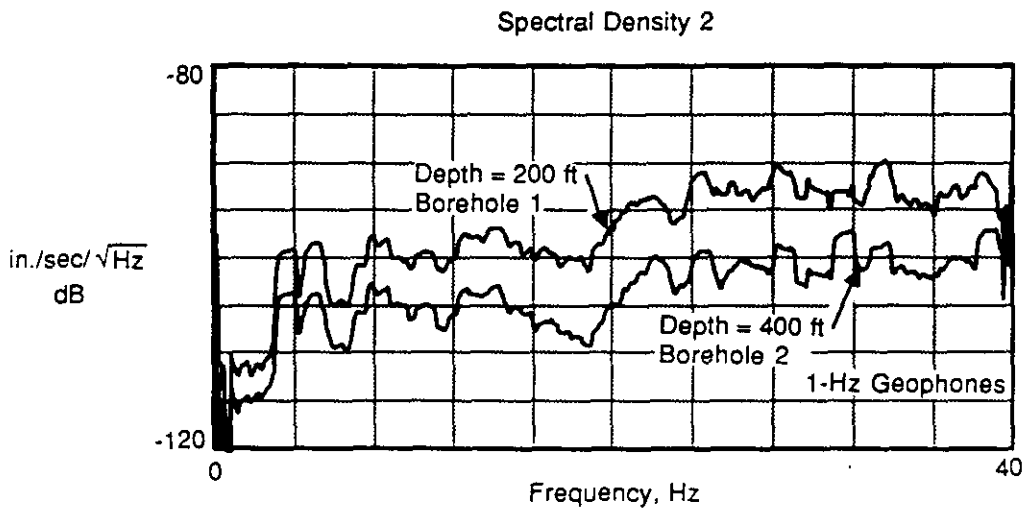
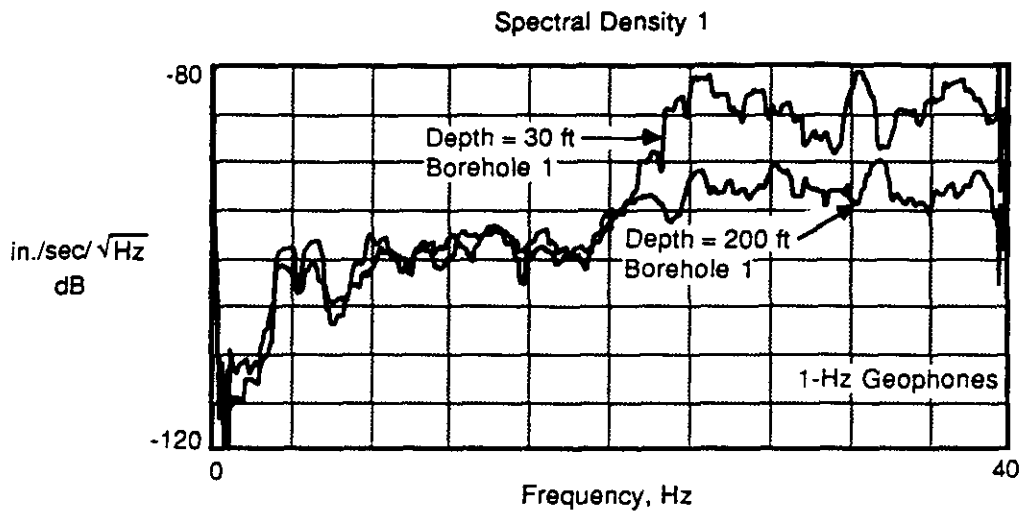


Fig. 3.3 Particle Velocity Spectral Densities Corresponding to Time Records Shown in Fig. 3.1

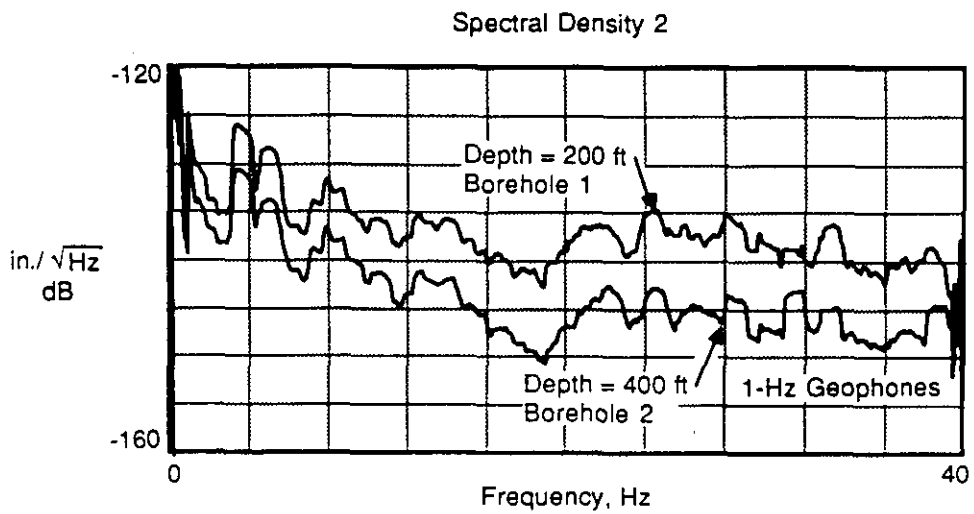
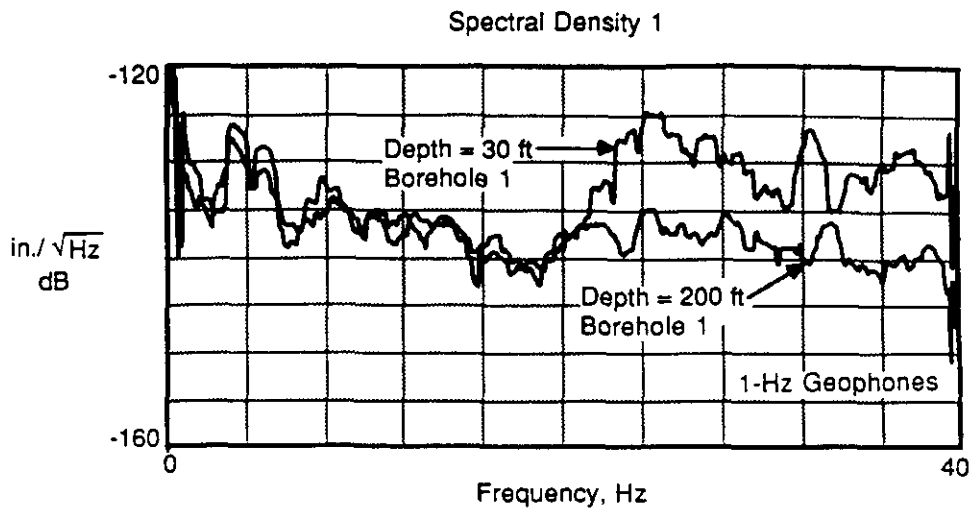


Fig. 3.4 Displacement Spectral Densities Corresponding to Time Records Shown in Fig. 3.2

이 시작 단계에 있다. 따라서 지반진동에 대한 해석적 기법이 현재 없으므로, 열차 주행으로 인한 진동조사 연구는 현장계측에 의존 하거나 비슷한 현장의 계측 결과를 연장하여 수행하는 수 밖에 없다. 현장계측에 근거한 진동 연구는, 계측당시의 조건에서는 진동의 특성을 잘 정량화 할 수 있으나, 조건이 바뀔때 (신기종 열차 주행, 다른 형태의 궤도와 도상자갈) 변화될 진동특성을 예측하기 어려운 단점이 있다.

4. 계측결과와 분석

4.1 지반진동 계측결과

파형분석기 (Waveform Analyzer)로 얻은 진동 기록은 1) 입자속도 (Particle Velocity), 2) 입자속도의 스펙트럼, 3) 변위 스펙트럼, 4) 입자 속도의 스펙트럼 밀도(Spectral Densities), 5) 변위 스펙트럼 밀도이다. 이 현장에서 측정된 대표적인 기록은 그림 4.1부터 그림 4.6과 같다. 주파수 범위, 감지기의 종류, 계측점, 감지기의 방향에 따라 상기와 같은 5種의 진동기록을 계측 및 계산하였다.

주파수 3Hz에서 0.0005 in. 의 허용 기준치와 비교할 수 있는 가장 적절한 진동 기록은 그림 4.5와 그림 4.6과 같은 스펙트럼 밀도 곡선이다. 이 그림상에 허용 한계치를 같이 도시함으로써 열차 주행에 의한 진동 크기와 (또는 주변환경 진동의 크기와) 쉽게 비교할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 열차 주행시 지반 진동의 크기는 허용 한계치의 1/1000 - 1/10 정도이고, 지하 100ft 깊이 이하에서는 주변 환경 진동의 크기는 열차 주행에 의한 진동 크기의 1/100 - 1/10 정도이다. 자세한 설명은 아래와 같다.

4.2 지반 진동 계측결과에 대한 분석

다음과 같은 사항에 초점을 맞추어 열차 주행 진동과 주변 환경 진동 기록을 분석하여 기술하였다.

1. 지반 진동의 주파수 성분은 어떠한가 ?
2. 깊이에 따라 진동이 어떤 경향으로 감소 하는가 ?
3. 각 방향별 (연직방향, 횡방향, 종방향)진동의 상대적 크기는 어떠한가 ?
4. 지하 깊이 100ft 이하에서 진동의 크기는 얼마인가 ?

4.2.1 주파수 성분

그림 4.7부터 그림 4.12에서 알 수 있듯이, 대부분의 진동에너지는 주파수 0.5Hz 부터 400Hz 사이에서가 전파되고 있다. 입자속도 (Particle Velocity)로 볼 때, 가장 큰 진동 진폭이

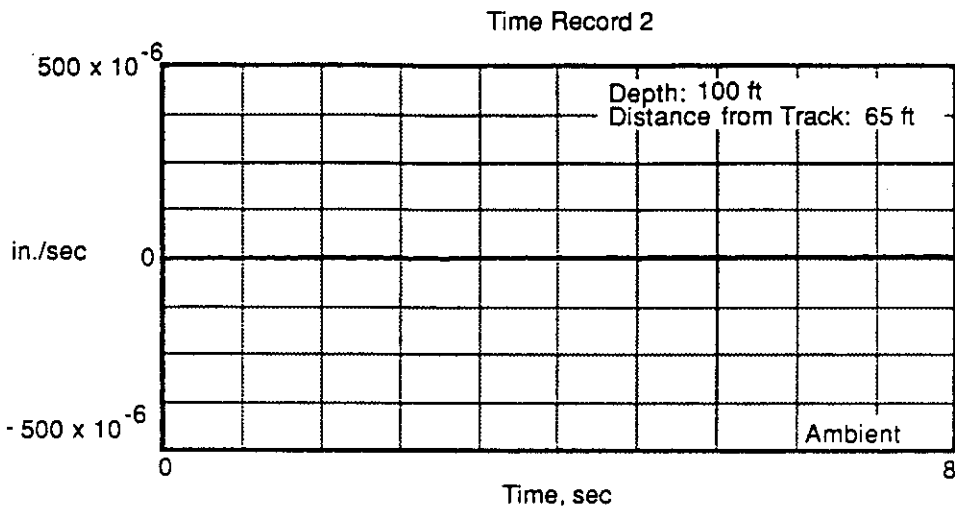
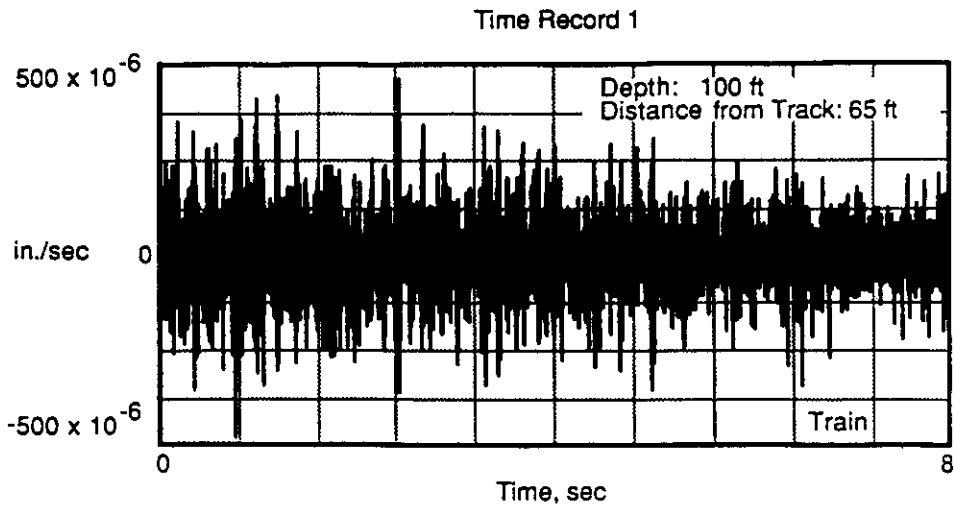


Fig. 4.1 Particle Velocity Time Records of Ground Vibrations from Train 1
 Geophones: 1 Hz Vertical
 Distances from Track: 65 ft ; Depths: 100 ft

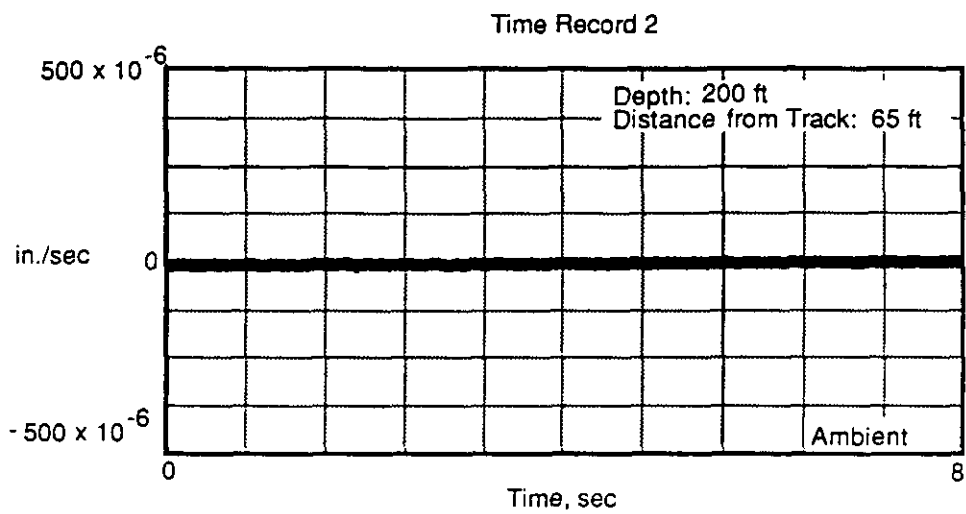
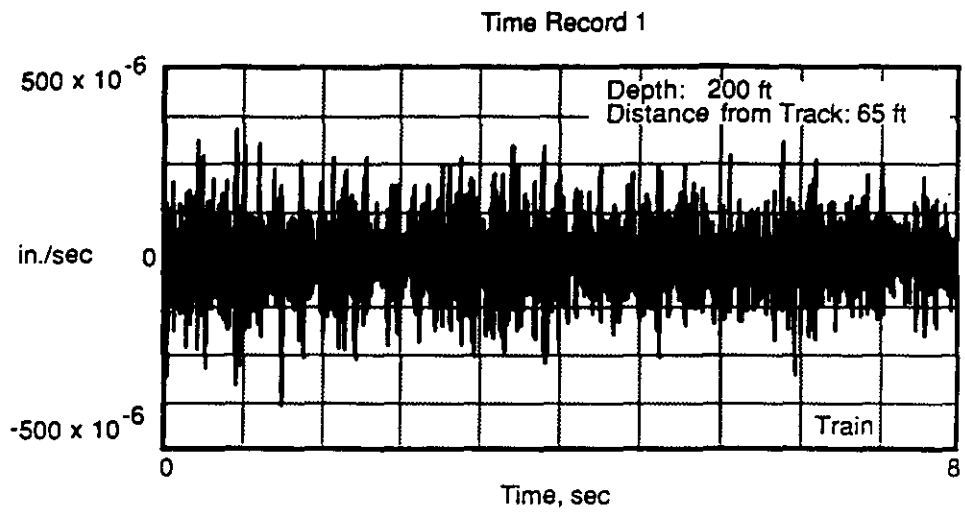


Fig. 4.2 Particle Velocity Time Records of Ground Vibrations from Train 1
 Geophones: 1 Hz Vertical
 Distances from Track: 65 ft ; Depths: 200 ft

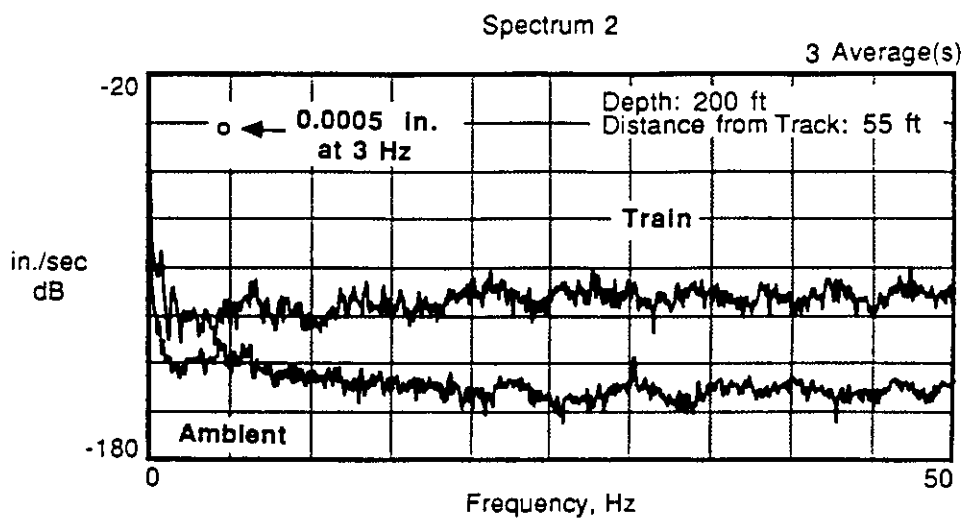
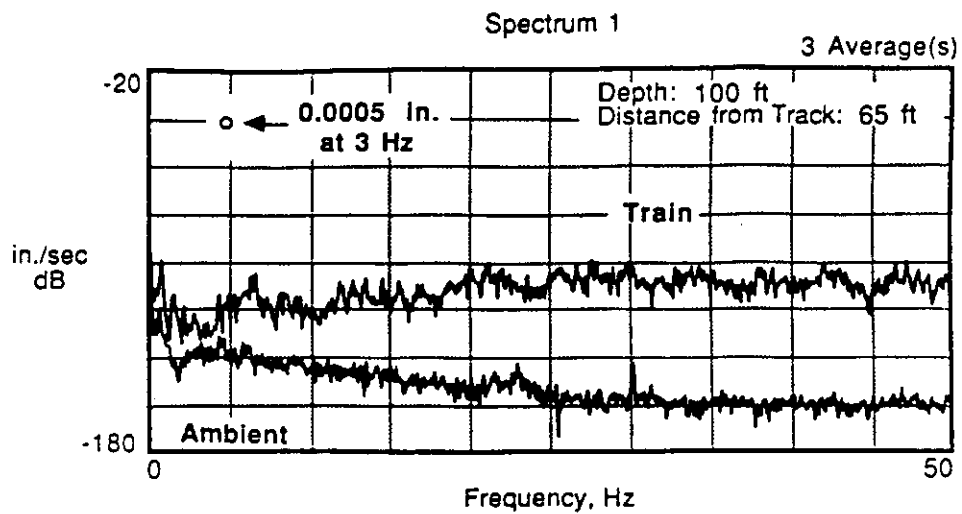


Fig.4.3 Particle Velocity Spectra of Ground Vibrations from Train 1
 Geophones: 1 Hz Vertical ; Bandwidth: 0 - 50 Hz
 Distances from Track: 65 ft / 55 ft ; Depths: 100 ft / 200 ft

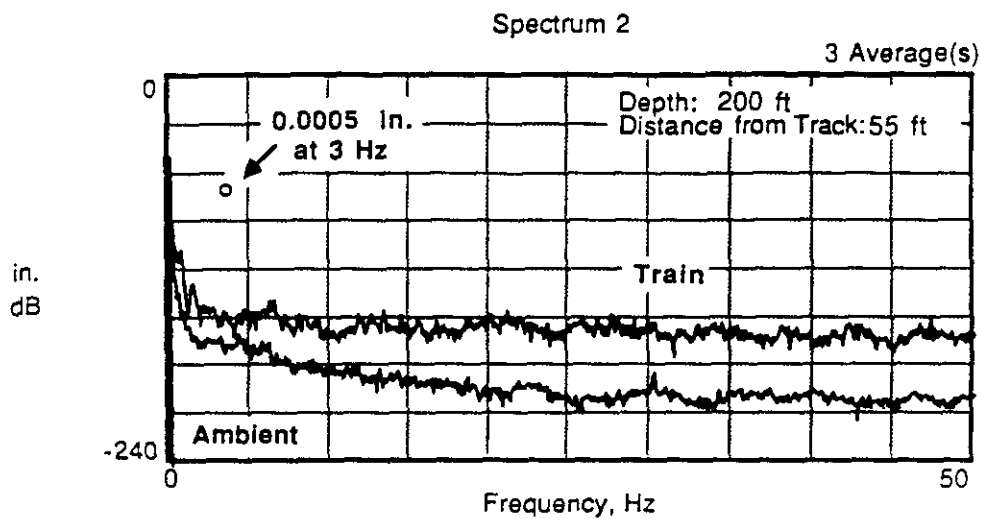
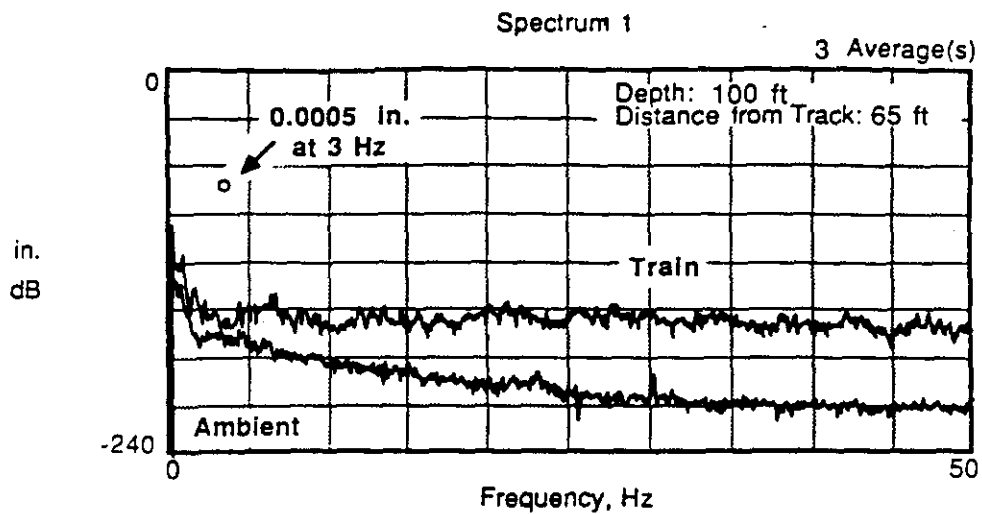


Fig. 4.4 Particle Displacement Spectra of Ground Vibrations from Train 1
 Geophones: 1 Hz Vertical ; Bandwidth: 0 - 50 Hz
 Distances from Track: 65 ft / 55 ft ; Depths: 100 ft / 200 ft

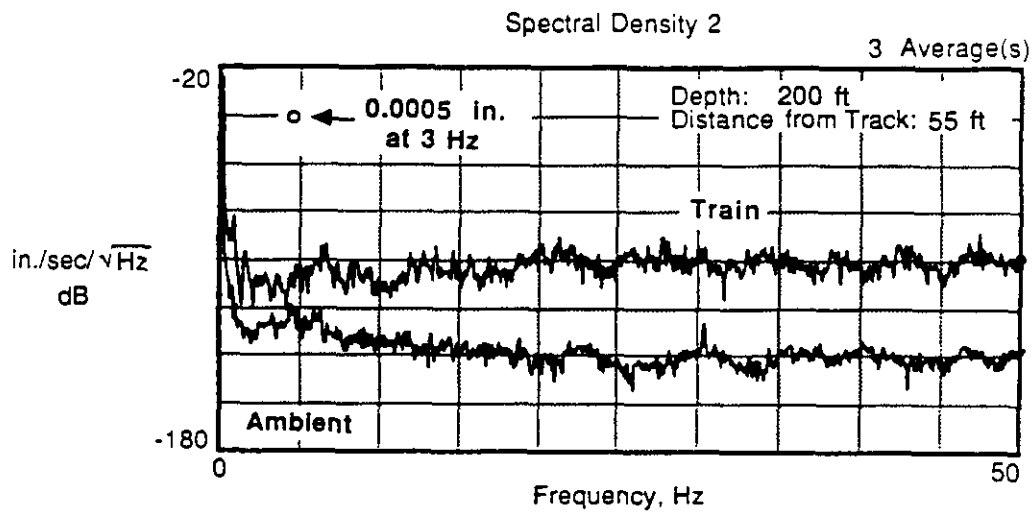
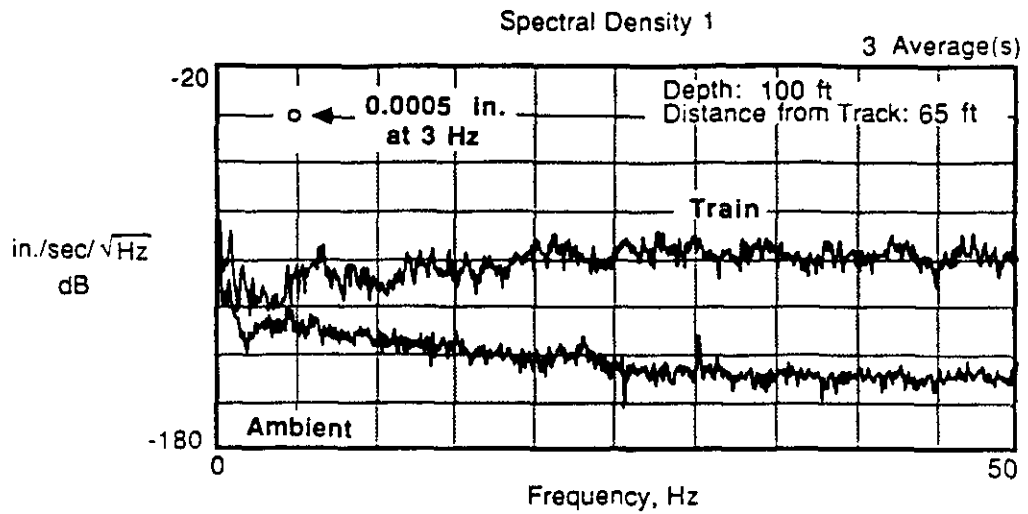


Fig. 4.5 Particle Velocity Spectral Densities of Ground Vibrations from Train 1
 Geophones: 1 Hz Vertical ; Bandwidth: 0 - 50 Hz
 Distances from Track: 65 ft / 55 ft ; Depths: 100 ft / 200 ft

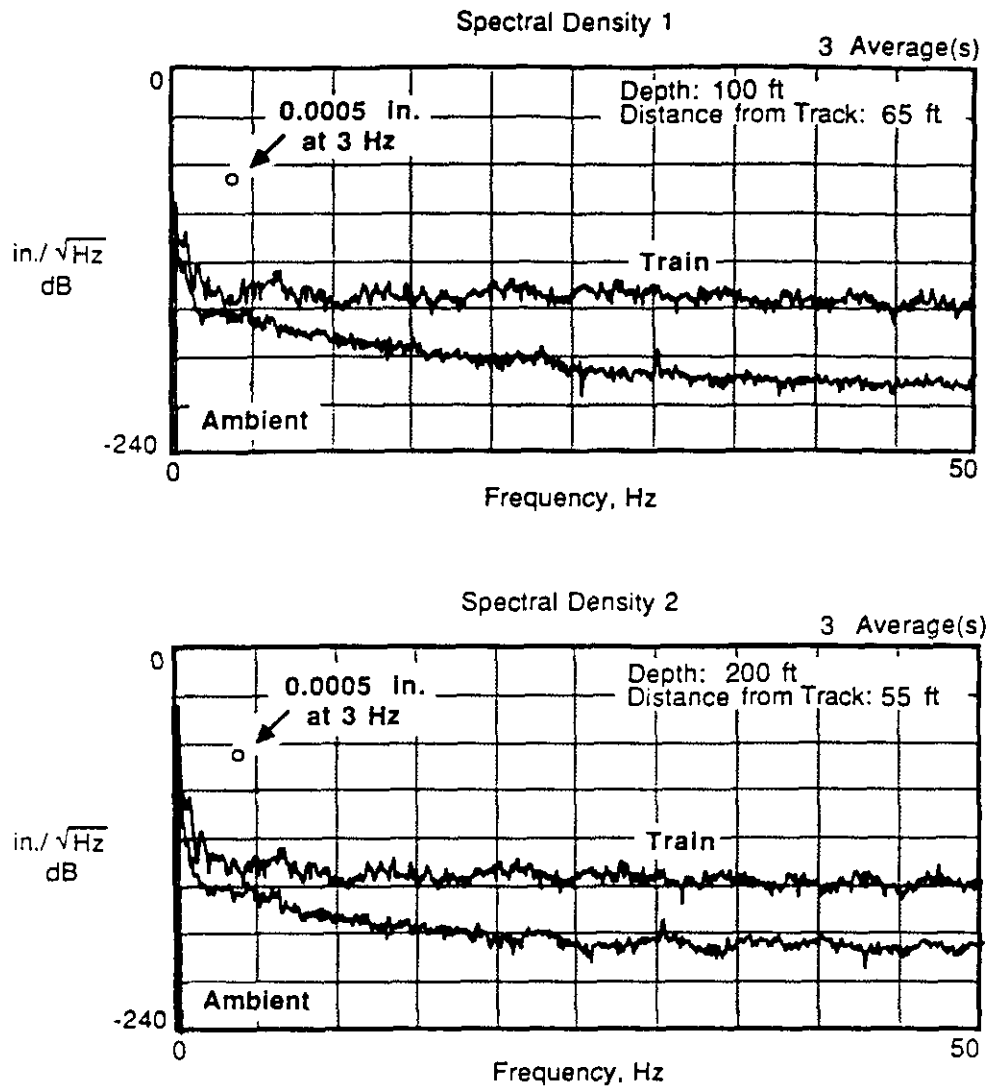


Fig. 4.6 Particle Displacement Spectral Densities of Ground Vibrations from Train 1
 Geophones: 1 Hz Vertical ; Bandwidth: 0 - 50 Hz
 Distances from Track: 65 ft / 55 ft ; Depths: 100 ft / 200 ft

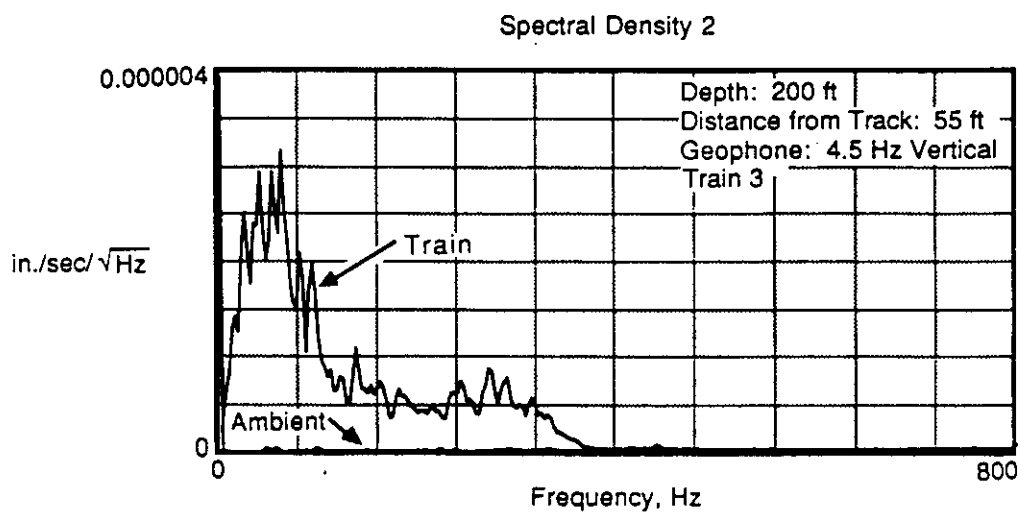
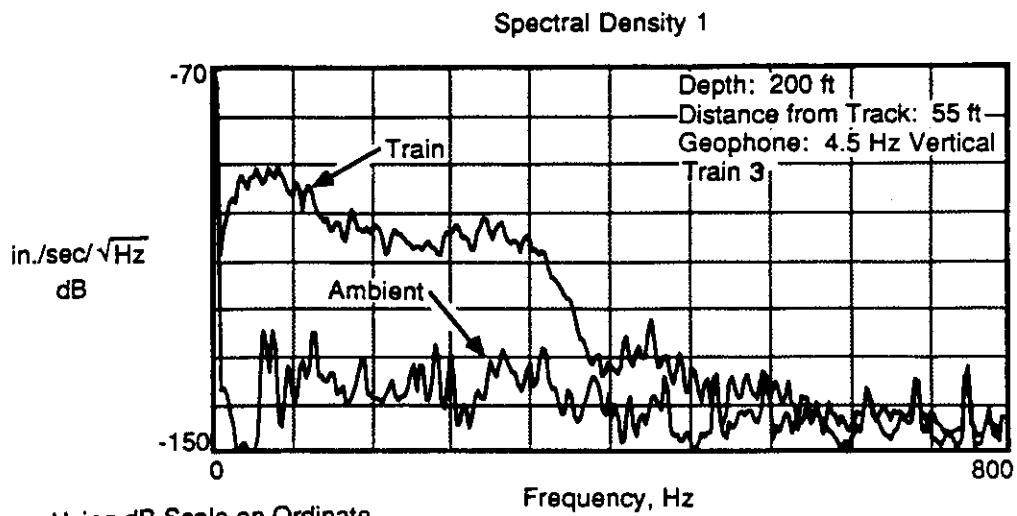
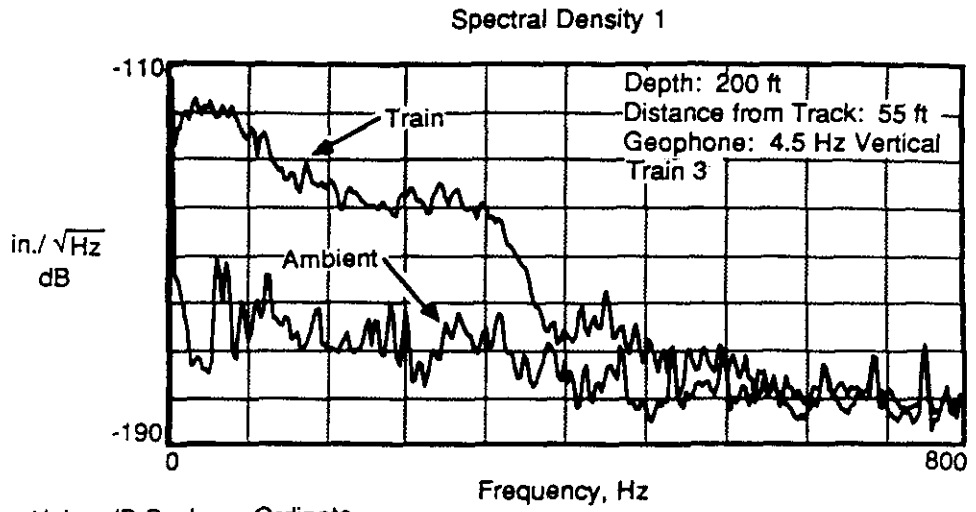
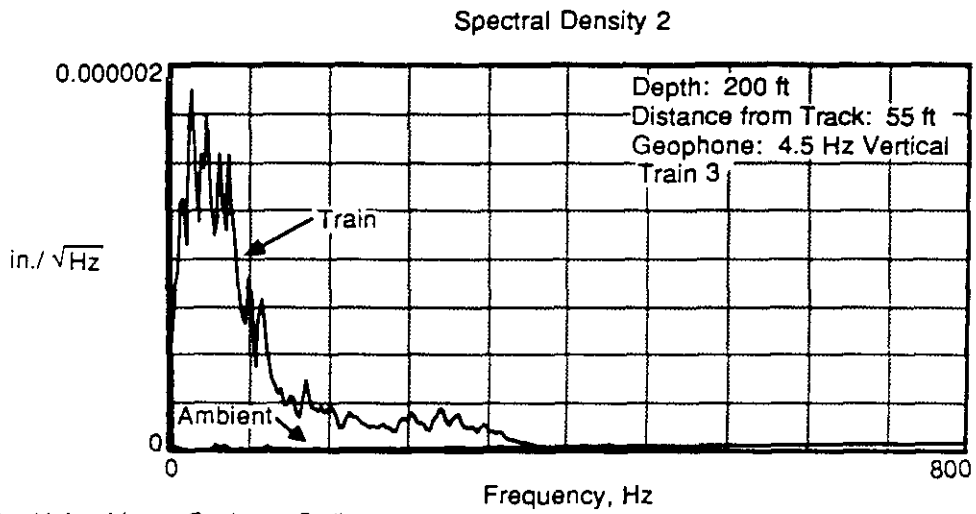


Fig. 4.7 Comparison of Particle Velocity Spectral Densities of Train and Ambient Vibrations for a 0 - 800 Hz Bandwidth: a. dB Scale, b. Linear Scale



a. Using dB Scale on Ordinate



b. Using Linear Scale on Ordinate

Fig. 4.8 Comparison of Particle Displacement Spectral Densities of Train and Ambient Vibrations for a 0 - 800 Hz Bandwidth: a. dB Scale, b. Linear Scale

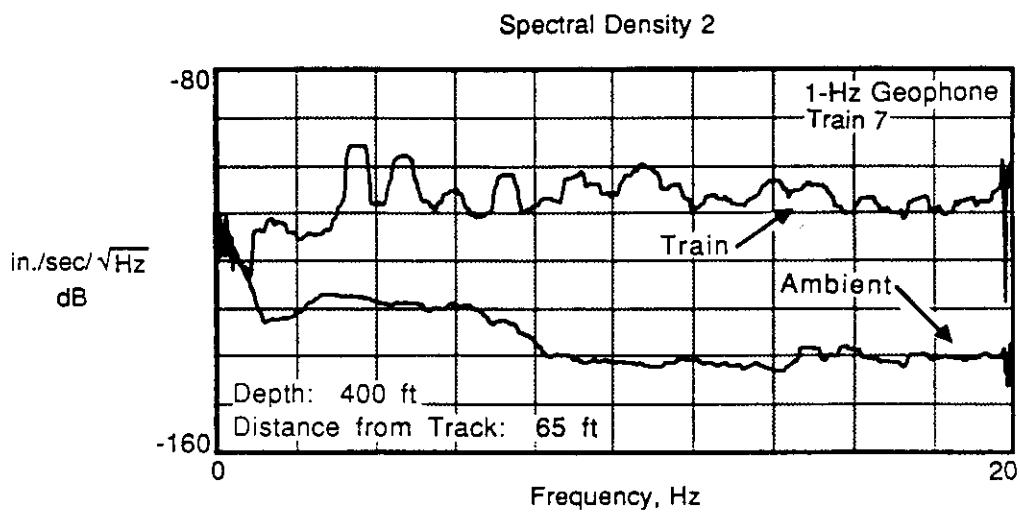
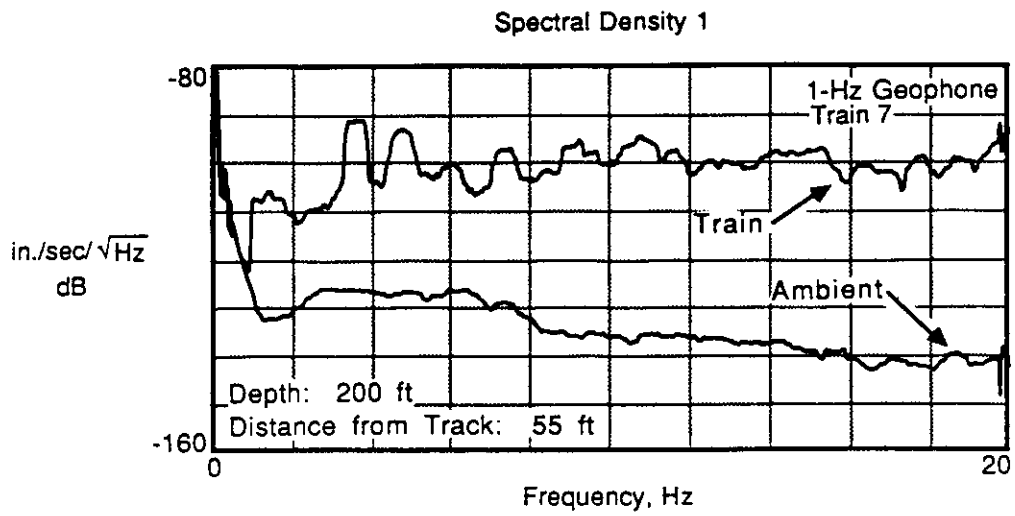


Fig. 4.9 Comparison of Particle Velocity Spectral Densities of Train and Ambient Vibrations for a 0 - 20 Hz Bandwidth

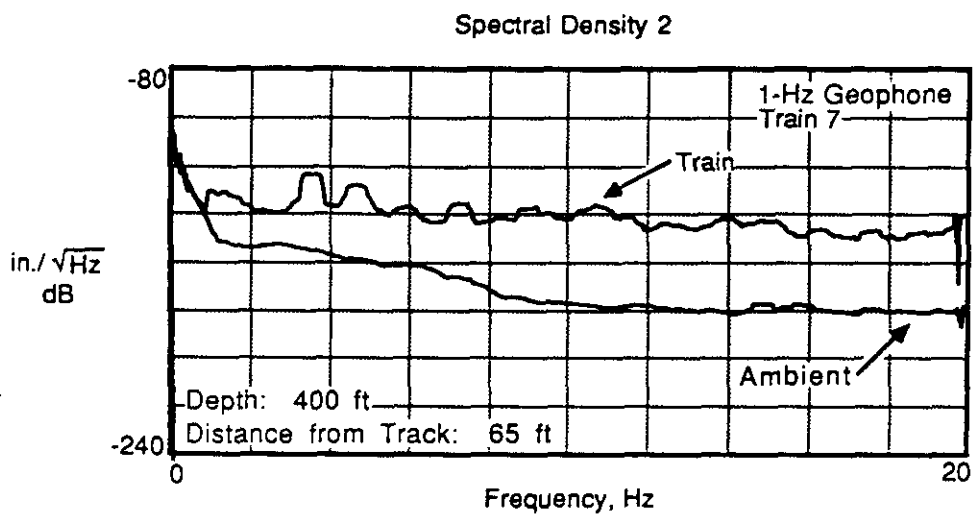
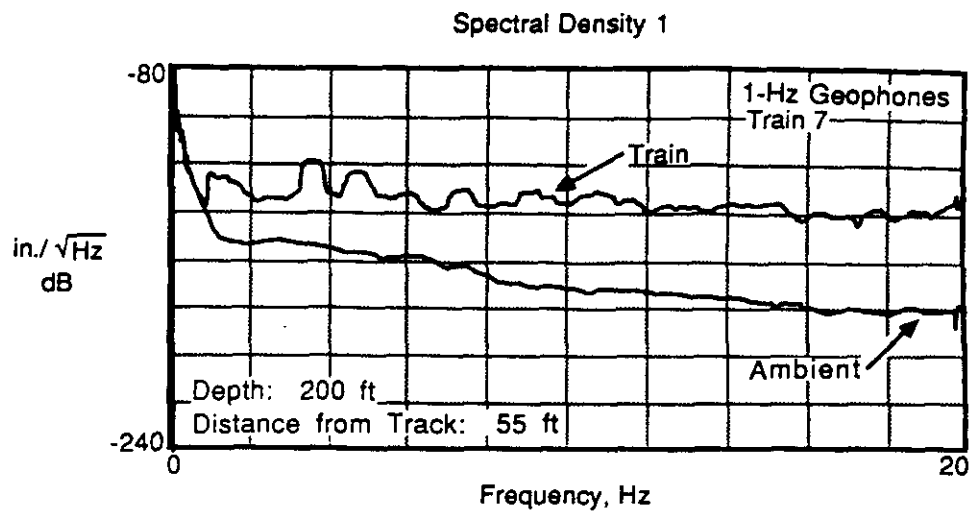


Fig. 4.10 Comparison of Particle Displacement Spectral Densities of Train and Ambient Vibrations for a 0 - 20 Hz Bandwidth

주파수 20Hz에서 100Hz 사이에서 나타내고 있다(그림 4.7, 4.8과 4.11참조). 입자의 변위 (Particle Displacement)로 볼 때는 0.5Hz와 10Hz 사이에서 가장 큰 진폭이 나타났다(그림 4.10과 4.12참조).

4.2.2 깊이에 따른 진동감쇠

그림 4.11의 속도 스펙트럼 밀도곡선과 그림 4.12의 변위 스펙트럼 밀도곡선으로 부터 지반진동의 감쇠 경향을 알 수 있다. 낮은 주파수의 진동 감쇠 형태가 이 연구의 관심 촛점이므로 주파수 0Hz부터 40Hz 사이의 진폭 감쇠에 중점을 두었다. 그림에서 알 수 있듯이 진폭 감쇠가 주파수에 따라 차이가 있다. 즉 주파수 20Hz 이하에서 진폭 감쇠율이 그 이상의 주파수에서 보다 작게 나타나고 있다. 주파수 20Hz 이상에서는 깊이 30ft와 200ft 사이에서 변위의 진폭이 1/2로 감소하고, 깊이 200ft와 400ft 사이에서도 같은 율로 감소하고 있다. 한편, 주파수 20Hz 이하에서는 깊이 30ft와 200ft 사이에서 진폭이 25%의 감소를 보이고, 깊이 200ft와 400ft 사이에서는 50%의 감소만 보이고 있다.

4.2.3 각 방향별 진폭의 크기

그림 4.13은 깊이 200ft에서 각방향 (연직, 종, 횡방향)의 진동 진폭과 주파수 성분을 나타내고 있다. 예상대로 각 방향의 진동은 비슷한 주파수 성분을 포함하고 있고, 이 중에서 연직 방향의 진폭이 가장 크게 나타났다. 따라서 지하 100ft 이하에서, 허용한계치와 가장 큰 연직 방향의 진폭을 비교하였다. 물론 3차원 공간에서 진동의 진폭은 각 방향 진폭의 벡터 합이다 이 벡터의 진폭은 연직 방향 진폭의 약 1.7배이고 지반 진동이 허용 한계치 (0.0005 inches)보다 훨씬 작아서, 연직 방향의 진동 진폭을 사용해서 허용 한계치와 비교 검토하였다.

4.2.4 진동진폭크기 (Amplitude of Motion)

열차별 지반진동의 상이점을 조사하고자 그림 4.14와 4.15와 같이 8편의 열차 주행에서 얻은 진동 기록의 속도 스펙트럼 밀도와 변위 스펙트럼 밀도를 계산하였다. 깊이 200ft에서 모든 스펙트럼 밀도곡선이 20dB 폭 내에 수렴하고 있다. 이는 이 철도 노선을 통과하는 각종 열차가 유발하는 진동은 서로 유사하다는 점을 시사한다. 주파수 3Hz에서 허용 한계치 (0.0005 inches)도 그림 4.14와 4.15에 함께 표시하였다. 깊이 200ft에서는 이런 열차가 유발시키는 지반 진동의 크기는 이 한계치보다 훨씬 작게 나타나고 있다. 0.5Hz에서는 이 한계치의 1/20이고, 1Hz 이상에서는 이 한계치의 1/100 정도이다. 그 외의 모든 열차와 깊이 100ft - 400ft에서는 비슷한 크기의 지반 진동이 나타나, 최대 지반 진동의 크기는 이 후보지 깊이 100ft이하에서는 진동 허용 한계치(0.0005 inches)의 1/10로 요약할 수 있다.

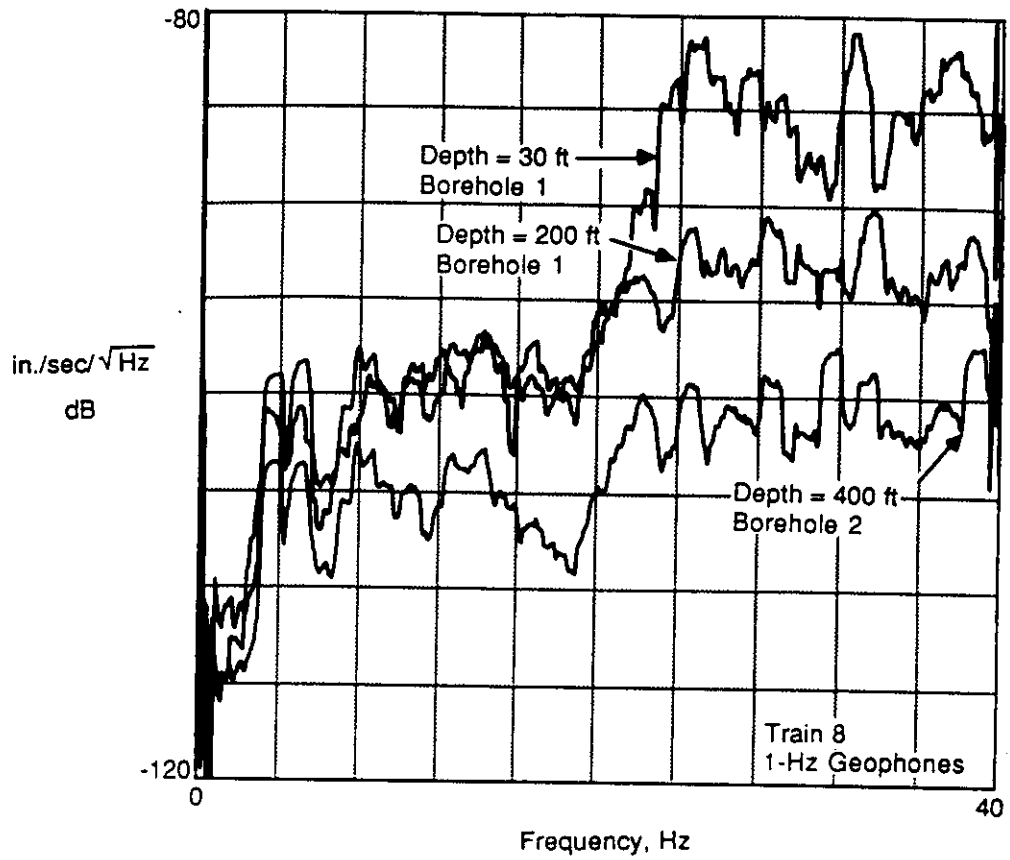


Fig. 4.11 Attenuation of Particle Velocity with Depth

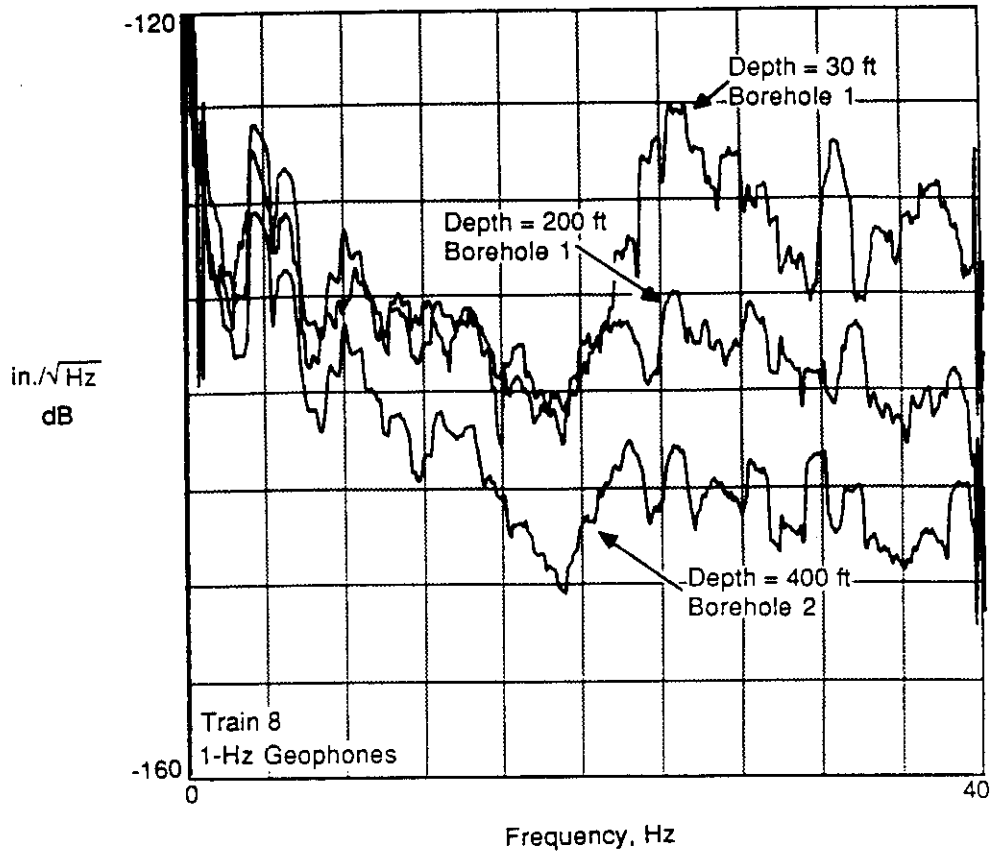


Fig. 4.12 Attenuation of Particle Displacement with Depth

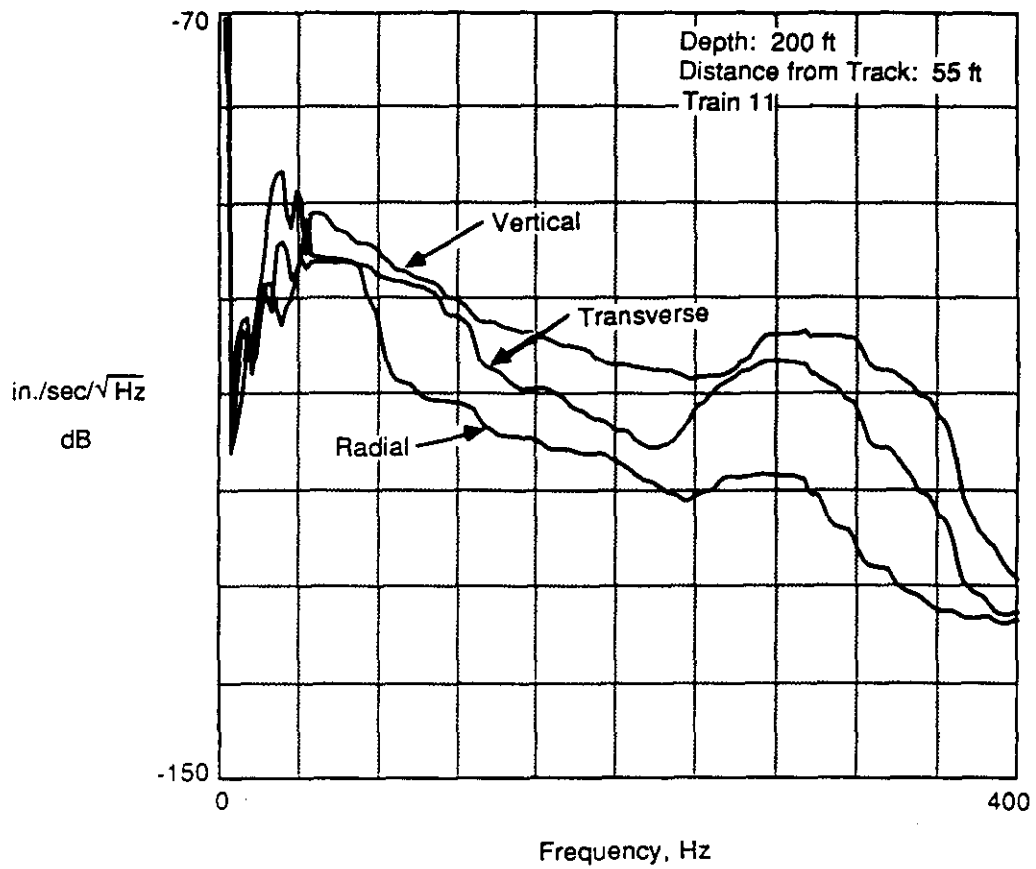


Fig. 4.13 Comparison of Vertical, Transverse, and Radial Components of Particle Velocity for Triaxial Geophone Placed at 200 ft Depth in Borehole 1.

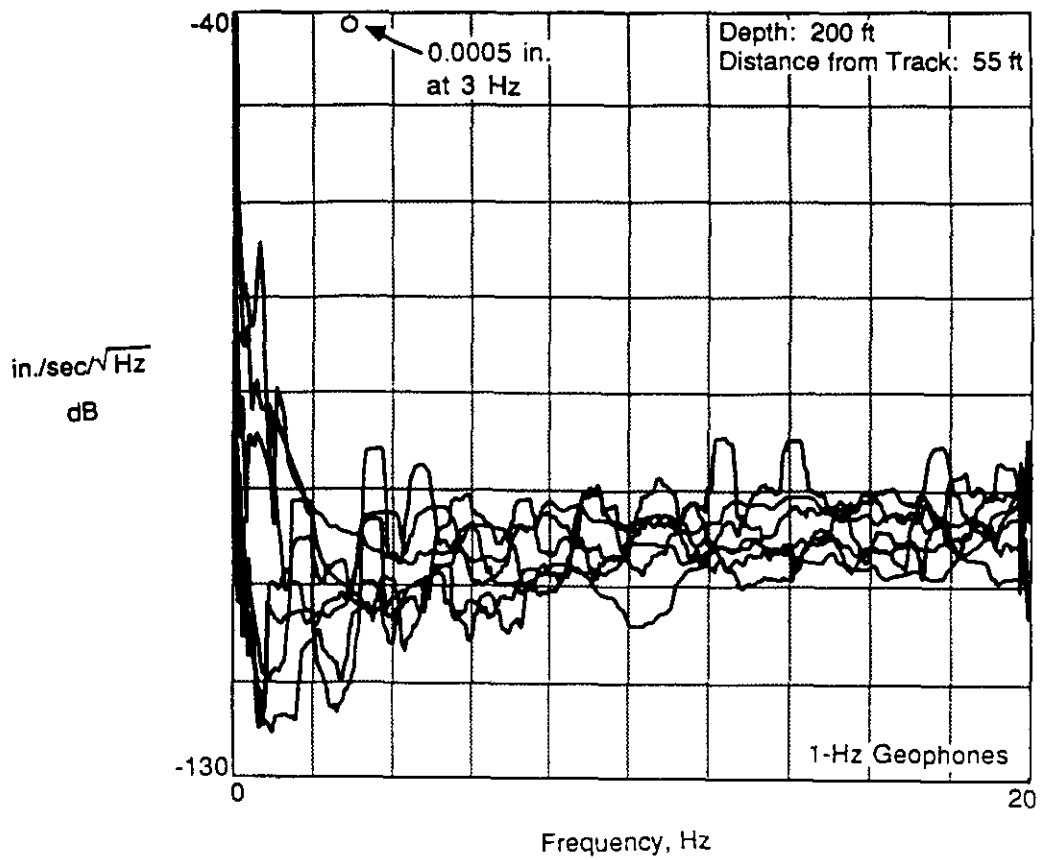


Fig. 4.14 Comparison of Particle Velocity Spectral Densities for Trains 1 through 8.

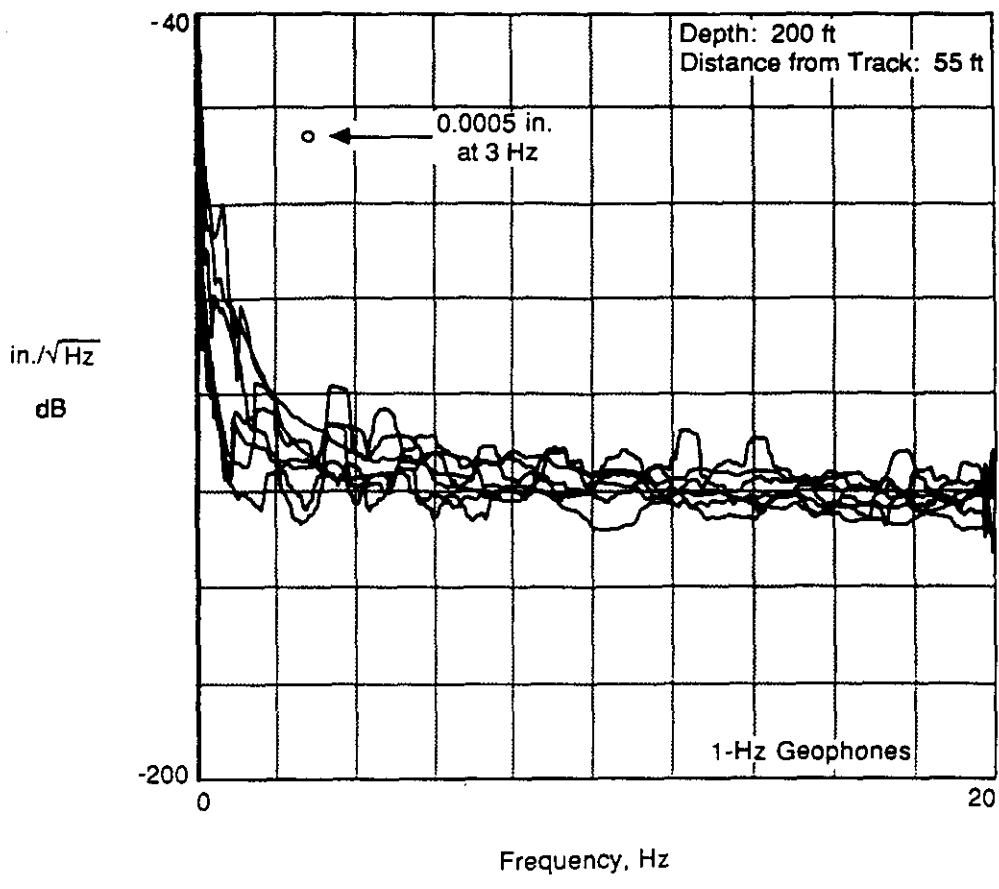


Fig. 4.15 Comparison of Particle Displacement Spectral Densities for Trains 1 through 8

4.3 채석장 발파

인근 채석장의 발파 진동을 깊이 200ft와 400ft에서 1Hz 감지기를 사용하여 측정하였다. 그림 4.16과 4.17은 각각 이 진동의 입자 속도와 변위의 시간 기록이다. 이 기록의 스펙트럼 밀도 곡선은 그림 4.18과 4.19이다. 진동에너지는 주파수 0.5Hz - 6Hz 와 10Hz - 20Hz에 대부분이 존재하고, 진동의 진폭 크기도 작아 약 10^{-6} inches 정도였다.

4.4 Downhole 탄성파 시험

이 계측 장소의 동적 물성치를 측정하고자 압축파 (P-파)를 이용하여 Downhole 탄성파 시험을 하였다. TVA가 소장한 진동원 "Betsy"와 1Hz와 4.5Hz 감지기를 사용하였다. 이 지반의 P-파 속도 분포는 그림 4.20과 표 4.1과 같다. 이 P-파 속도는 40개의 계측결과를 역산 (Inversion)하여 구하였다.⁽⁴⁾ 이 지반은 15ft 두께의 표토층과 그 아래에는 신선한 암반으로 이루어 졌다. 이 암반은 콘크리트의 속도보다 빠른 P-파 속도를 갖는 매우 신선한 암반으로 사료된다.

5. 결 론

1987년 7월 6일동안 18회의 열차 주행에 의한 지반 진동을 계측하였다. 계도아래 깊이 100ft - 400ft 에서 암반의 진동 특성에 대한 결론은 아래와 같다.

1. 진동의 주파수 성분은 0.5Hz - 400Hz 이다. 가장 큰 입자속도의 진폭은 주파수 20Hz - 100Hz 에서 나타나고, 가장 큰 변위의 진폭은 0.5Hz - 10Hz에서 나타난다.
2. 연직방향의 진동이 두 수평방향 보다 크다. 그러나 이 방향별 진동의 진폭은 주파수 200Hz 이하에서는 서로 3배정도이고 주파수 200Hz 이상에서는 10배 이내였다.
3. 열차 주행에 의한 지반 진동은 최악의 경우, 진동 허용 한계치 (0.0005 inches at 3Hz)의 1/10 이하이다. 대부분의 진동의 크기는 이 한계치의 1/1000 - 1/100 정도이다.
4. 주변환경 진동의 크기는 최대 허용 한계치의 1/100 이하이다. 주파수 1Hz - 100Hz 범위에서, 주변환경 진동의 크기는 열차 주행시 발행하는 지반 진동의 1/10 이하이다.

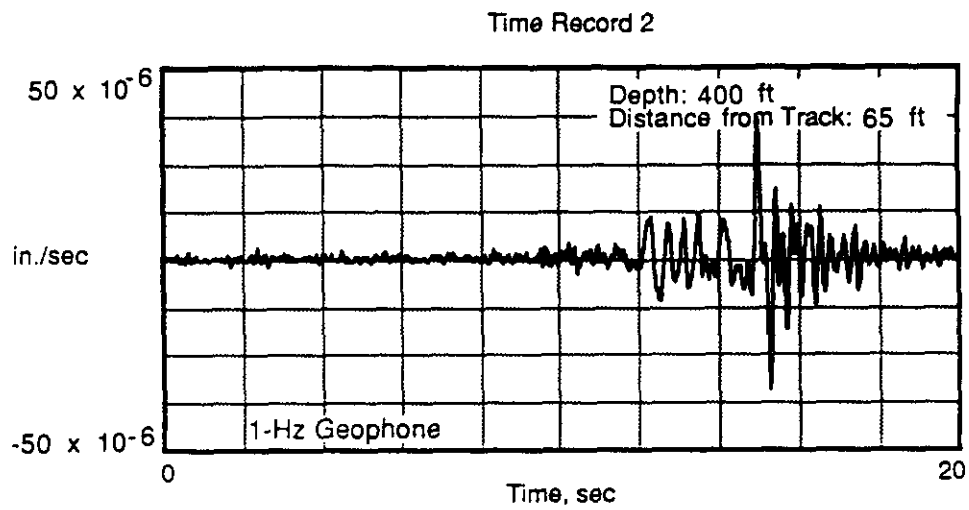
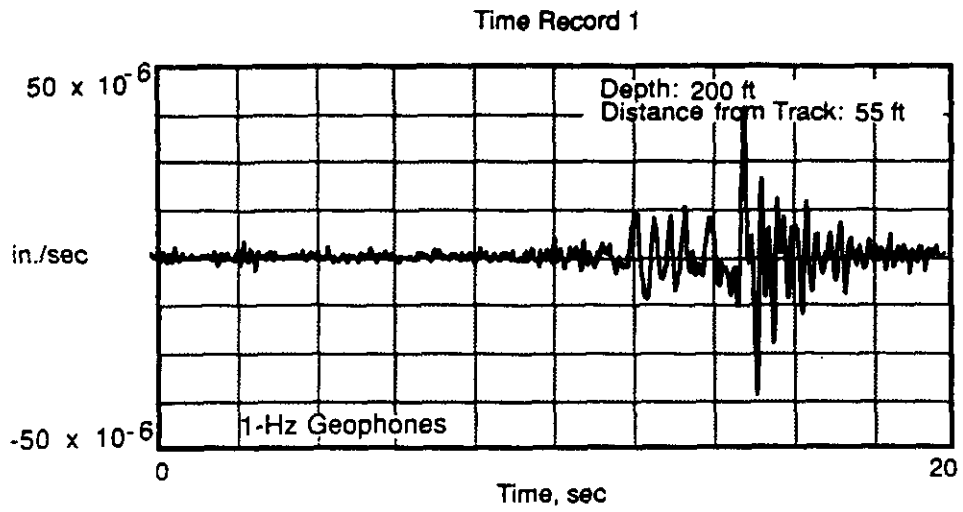


Fig. 4.16 Particle Velocity Time Records of Ground Vibrations from Quarry Blast at 11:46 a.m. CDT on July 7, 1987.

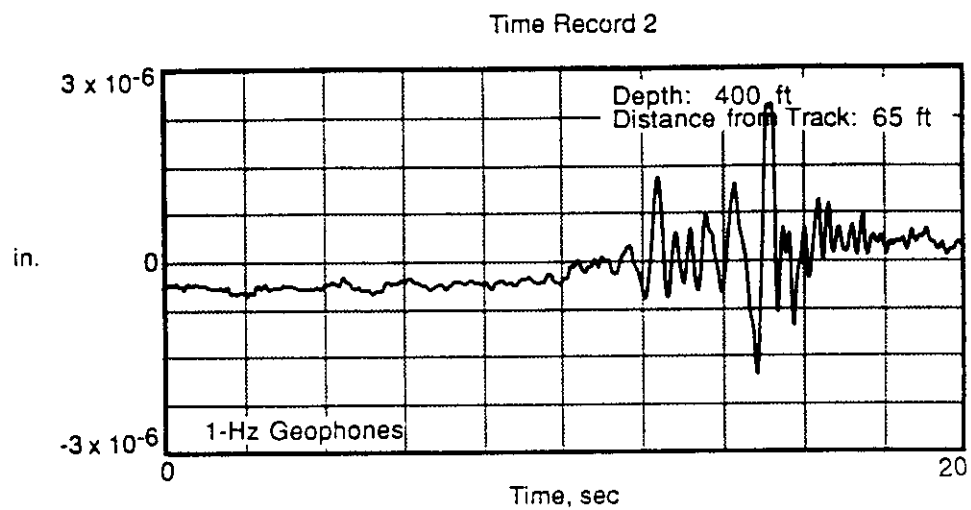
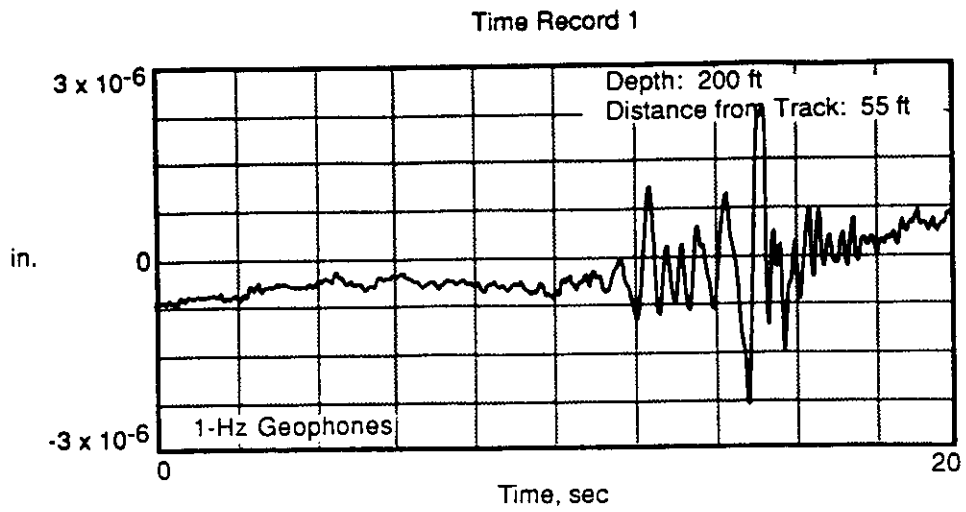


Fig. 4.17 Particle Displacement Time Records of Ground Vibrations from Quarry Blast at 11:46 a.m. CDT on July 7, 1987

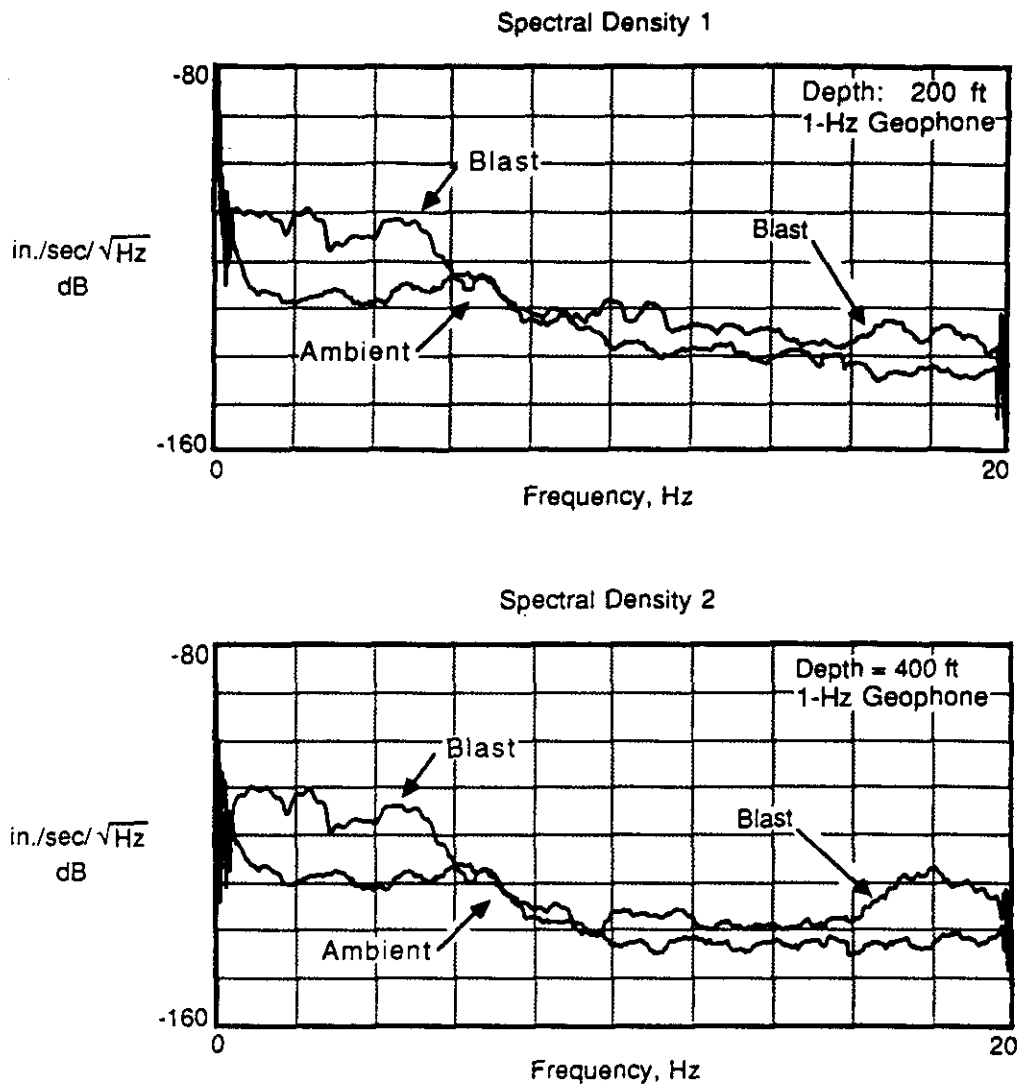


Fig. 4.18 Particle Velocity Spectral Densities of Ground Vibrations from Quarry Blast at 11:46 a.m. CDT on July 7, 1987

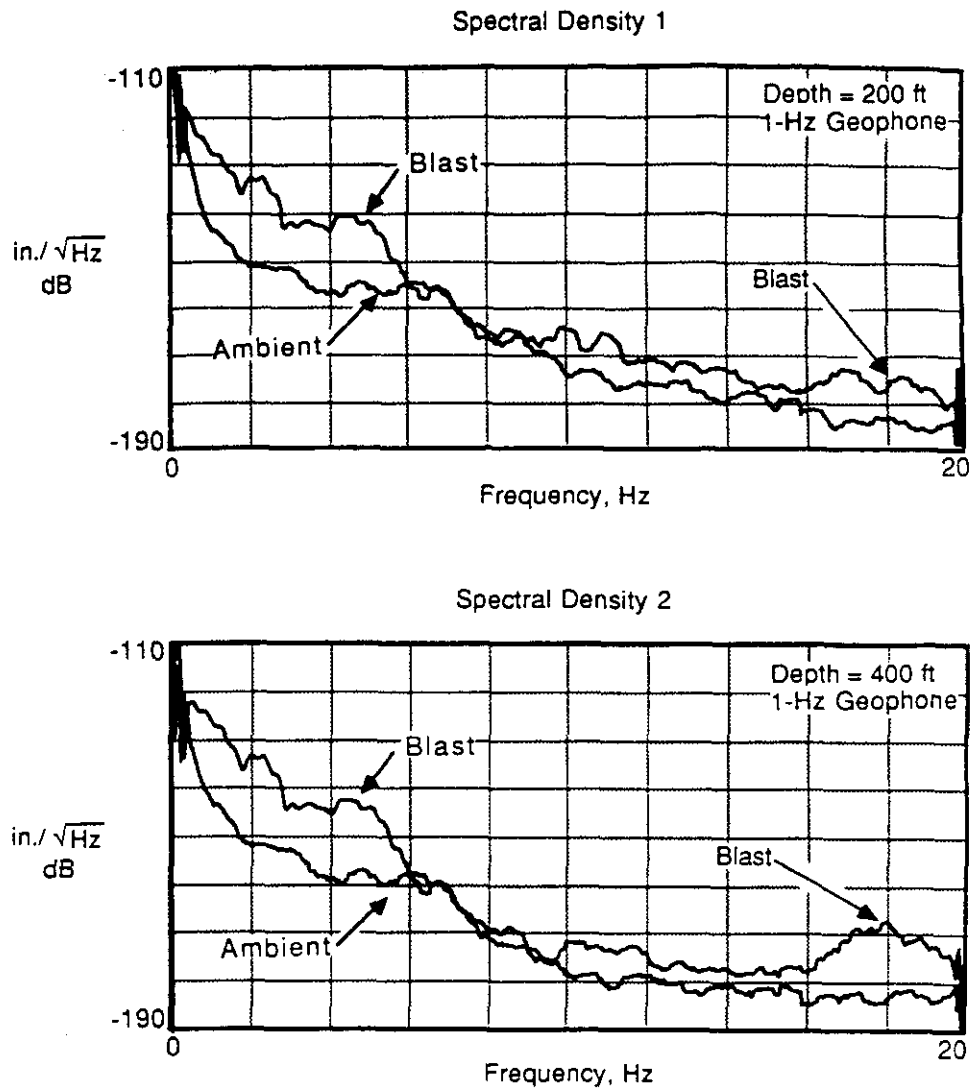


Fig. 4.19 Particle Displacement Spectral Densities of Ground Vibrations from Quarry Blast at 11:46 a.m. CDT on July 7, 1987

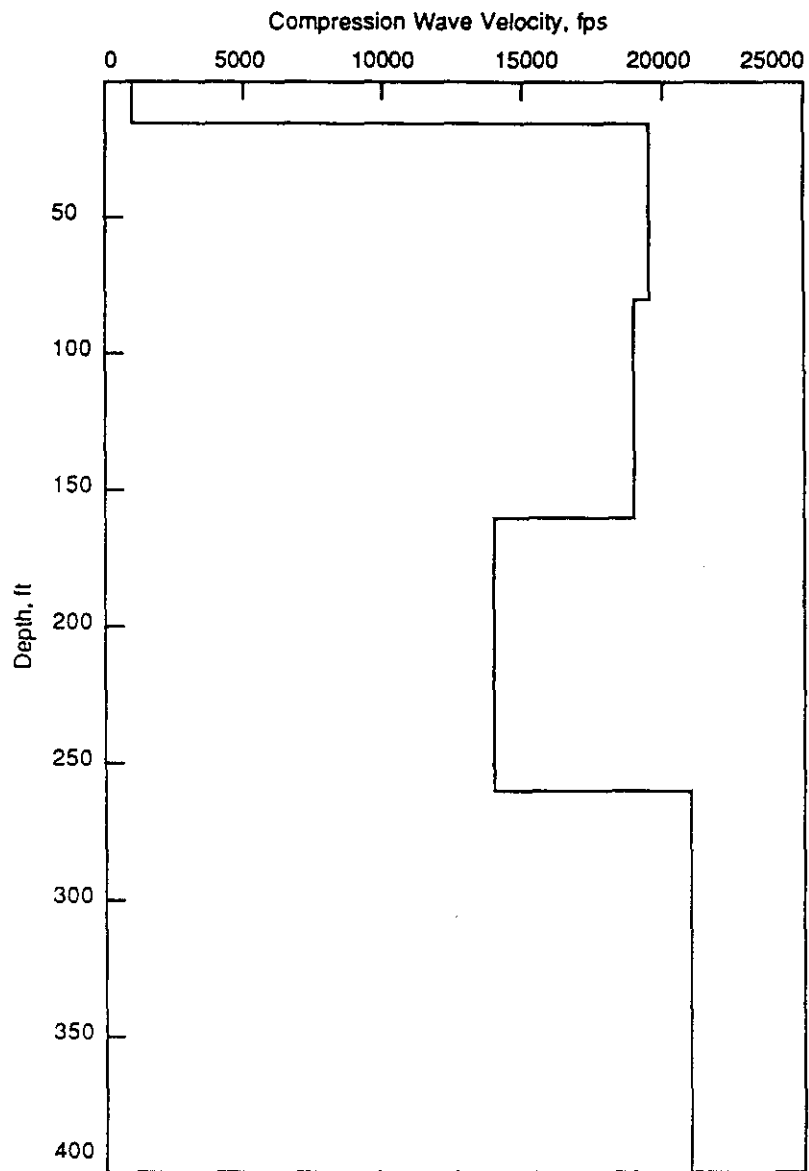


Fig. 4.20 Compression Wave Velocity Profile from Inversion of Downhole Seismic Testing at Railroad Site near Chapel Hill, Tennessee

Table 4.1 In Situ Compression Wave Velocities from Downhole Seismic Testing at Railroad Site near Chapel Hill, Tennessee

Depth (ft)	Layer Thickness (ft)	Depth to Middle of Layer (ft)	Compression Wave Velocity (fps)
0	15	7.5	1660.0
15	65	47.5	19500.0
80	80	120	18900.0
160	100	210	14200.0
260	140	330	21000.0
400			

참 고 문 헌

1. Mok, Y.J. (1987), "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 272p.
2. Mok, Y.J., K.H. Stokoe, II, I. Sanchez-Salinerro, and J.M. Roesset (1988), "In Situ Damping Measurements by Crosshole Seismic Method", Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground Motion Evaluation, ASCE Specialty Conference, Park City, Utah, pp 305-320.
3. McConnell, K.G., Notes on Vibration Frequency Analysis, A Society for Experimental Stress Analysis, Spring Annual Meeting of the SGSA.
4. Mok, Y.J., K.H. Stokoe, II, C.R. Wilson (1988), "Analysis of Downhole Seismic Data Using Inverse Theory", Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, pp 23-25.