

탄성파탐사에 의한 토양층 지반진동의 감쇠연구 A Study on Attenuation of Ground Vibration Using Hammer Generated Seismic Wave

서 만 철 (Suh, Man Cheol)
손 호 응 (Shon, Ho Woong)

공주대학교 지질환경과학과
배재대학교 자원환경공학과

요약/Abstract

지반진동이 지표면의 토양에서 거리에 따라 어떻게 감쇠되는지 밝히기 위하여 탄성파의 진폭변화를 측정하였다. 야외에서 12-ch 탄성파 탐지기를 이용하여 디지털 자료로 기록한 후 증폭되지 않은 진폭자료를 분석하였다. 탄성파의 주파수분석결과 최대 스펙트럼 진폭은 약 40Hz부근에서 나타나고 있다. 조사지역의 감쇠경향은 지수함수적임을 보여주고 있으며 탐사지역의 지반감쇠 요소들을 계산한 결과 기하감쇠지수(n)는 0.25, 내부감쇠지수(a)는 0.13~0.20임을 보여주고 있다. 습윤토양지역에서는 내부감쇠지수(a)가 0.13, 식생토양지역에서는 0.20를 보여 습윤토양에서보다 식생발달 토양지역에서 지반진동이 훨씬 빨리 감쇠하는 현상을 보인다. 또한 탄성파 자료분석을 통한 탄성파전파속도와 주파수분석을 이용하여 흙의 평균 내부감쇠정수(h)가 0.094임을 밝혔다.

A study on the attenuation of ground vibration was carried out on the soil layer using seismic exploration method. A 12-channel engineering seismograph was used to acquire real digital amplitude data in field work. Frequency analysis of seismic data shows maximum spectrum amplitude around 40Hz. Relative amplitude decreases exponentially as the distance increases and the attenuation factors are $n=0.25$ and $a=0.13\sim 0.20$. Internal attenuation indexes(a) are 0.13 and 0.20 in the wet soil zone and the vegetated soil zone, respectively. It means that ground vibration attenuates faster in vegetated soil zone than in wet soil zone. Average internal attenuation coefficient(h) was determined to be 0.094 from seismic velocity and frequency analysis.

서론

수면에 돌을 던졌을때 생기는 파원, 스프링을 당겼

을때 생기는 소밀의 교대로 인한 진동, 그리고 지진에 의한 건물이나 지반의 흔들림 등은 파가 진행하는 예들이다. 이러한 파동은 지구 및 그 주변공간에서 관측되는 여러가지 현상을 이해하는데 중요한 개

널이다. 지각중의 암석과 퇴적물은 공극(간극)과 공극내에 포함된 공극수(간극수)를 가지고 있다. 이러한 매질을 통과하는 탄성파의 속도와 진폭의 감쇠는 지반을 이루는 고형체와 공간에 충전된 공극수 및 그들 상호간의 작용에 의하여 영향을 받는다(Toksoz et al., 1979; Purnell, 1986).

최근 우리나라에서도 고속전철, 국제공항, 지하철도의 건설 공사 및 운행에 따른 지반진동에 대한 연구가 시작되었으며, 방진재에 대한 연구가 수행된바 있다(천병식 외, 1990; 천병식과 박흥규, 1990).

본 탐사는 탄성과 충격에 파동 에너지원으로 하여 대부분이 토양인 지반을 대상으로 탐사를 실시하였다. 여기서 전파해 나가는 파동의 전파 속도를 측정하여 파동의 전파 유형과 거리에 따른 감쇠현상을 알아보고, 매질의 특성, 종류 및 상태에 따라 발생하는 감쇠 정도의 차이를 알아보았다.

본 연구를 위한 탐사는 토양이 양호하게 발달된 충적층 지역을 선택하여 실시하였다. 탐사지역의 토질성분은 silty clay로 부드러운편이었으며, 그 주변 지역은 시생대층의 운모편암(mica schist)으로 구성되어 있다.

탄성파 에너지

파동의 강도와 진폭 및 에너지의 감쇠는 서로 밀접한 연관성을 갖는다. 파동의 강도(intensity)는 파동의 진행 방향과 직각인 단위면적을 통하여 단위시간당 파동에 의하여 운반되는 에너지의 양을 의미한다. 속도 v로 계속 진행하는 파동에 있어서 파동의 강도(I)는 진폭(A)의 제곱과 주파수(f)의 제곱에 비례한다고 알려져 있다(Kuster and Toksoz, 1974).

일정한 거리 r에 위치하는 체적요소 dv의 진동 에너지를 결정하여 보자. 즉 조화진동을 하는 체적요소의 변위(u)는

$$u = A \cos(\omega t + \gamma) \dots\dots\dots(1)$$

으로 주어지며, 여기서 γ 은 위상각이다. 이 체적의 속도는

$$du/dt = -\omega A \sin(\omega t + \gamma) \dots\dots\dots(2)$$

이므로 최대 운동 에너지는

$$1/2(\rho \delta v) [du/dt]^2 = 1/2(\rho \delta v) \omega^2 A^2 \dots\dots\dots(3)$$

이다. 운동에너지가 최대일 때, 포텐셜 에너지는 0이

므로 상기 값은 체적요소의 총 에너지이다. 따라서 단위 부피당 에너지량, 즉 에너지 밀도(E)는

$$E = 1/2 \rho \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2 \dots\dots\dots(4)$$

으로서, 진폭의 제곱과 주파수의 제곱에 비례한다. 따라서 에너지 밀도(E)와 속도(v)의 곱으로 표시되는 파동의 강도(I)도 $\omega^2 A^2$ 에 비례한다. 즉

$$I = Ev = 1/2 \rho v \omega^2 A^2 = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2 \dots\dots\dots(5)$$

만약 파동 에너지가 일정하게 유지된다고 가정하면 파원으로 부터 거리 r에 있는 단위면적당 에너지, 즉 파의 강도(I)는 $1/r^2$ 으로 감소하고 따라서 진폭은 $1/r$ 로 감소하여 구형발산 효과를 나타낸다.

표면파 에너지도 이와 유사하게 발산하지만 표면파의 파면은 지표면상에서 원형으로 퍼져나가기 때문에 거리에 따라 에너지는 $1/r$ 로, 진폭은 $1/\sqrt{r}$ 로 감소한다. 따라서 진원으로부터 멀리 떨어져 있는 지점에서는 일반적으로 표면파가 훨씬 큰 에너지를 가지고 도달한다.

한편 파가 전파하는 동안 매질에서는 매질입자들 간의 마찰에 의한 발열 등과 같은 에너지의 손실이 발생한다. 이는 역학적에너지가 열에너지로 바뀐 형태로 다시 역학적에너지로 전환되지 않고 매질내에 흡수(absorption)된다. 흡수에 의한 에너지 감쇠는 거리의 지수함수로 다음과 같이 근사적으로 표시된다.

$$A = A_0(r_0/r) e^{-q(r-r_0)} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 A와 A_0 는 각각 진원으로 부터 r과 r_0 떨어진 점에서의 진폭이며, q는 매질의 흡수계수이다(Morgan, 1983; Tolstoy, 1973; White, 1978).

지반 진동의 감쇠는 크게 기하감쇠와 내부감쇠로 분류할 수 있다. 기하감쇠란 진동에너지가 보다 넓은 영역에 확산하여 단위시간당 진동 에너지가 작아져서 시작되는 감쇠를 말하고, 내부감쇠는 파동이 전파해 나가는 과정에서 매질의 내부마찰등 때문에 진동 에너지가 가열 에너지로 전환되어 생기는 것이다.

실제의 지반에서는 내부감쇠도 포함된 거리감쇠가 일어나는데 그 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

표면파의 경우는,

$$A(r) = A(r_0) r_0 / r \exp\{-k_1(r-r_0)\} \dots\dots\dots(7)$$

실체파에 대하여,

$$A(r) = A(r) \sqrt{r_0} / r \exp\{-k_2(r-r_0)\} \dots\dots\dots(8)$$

탄성파탐사에 의한 토양층 지반진동의 감쇠연구

로 정의된다. 여기서 지수항은 내부감쇠를 나타낸 것으로서 그 강도를 나타내는 k_1, k_2 는 지반의 특성이나 진동의 주기등에 크게 좌우되는 정수이다.

일반적인 거리감쇠식은 $r_0=1$ 로 하였을때

$$A = A_0 r^{-n} \exp(-ar) \dots\dots\dots(9)$$

로 표시되는데 여기서 A_0 및 r 는 진폭과 거리이고, n, a 는 각각 기하감쇠와 내부감쇠에 대한 감쇠지수이다. n 은 실제파와 같이 3차원적으로 전파하는 구면에서는 $n=1$, 표면파와 같이 2차원적으로 전파하는 파면에서는 $n=1/2$, 1차원적으로 전파하는 평면파에서는 $n=0$ 으로 기하감쇠가 없다(천병식 외, 1993). 내부감쇠지수(a)는 흙의 내부감쇠 정수를 h , 파의 전달속도를 v , 파의 진동수를 f 로 하면

$$a = 2\pi fh/v \dots\dots\dots(10)$$

로 나타낼 수 있다. 실측자료로부터 식(9)의 n, a , 탄성파속도 및 중심주파수를 결정하면 식(10)으로부터 토양층의 내부감쇠정수(h)를 구할 수 있다.

자료획득 및 처리

탄성과 탐사를 실시하기 위해서는 연구목적에 부합하게 에너지원과 수신기들을 배열하여야 한다. 이 연구에서는 한개의 에너지원에 대하여 같은 선상에 일정간격으로 수신기들을 설치하는 직선배열법을 이용하여 측선을 설치하였다.

그림 1과 같이 150m 되는 길이의 측선을 설정하여 12개의 지오폰을 각각의 간격이 2m가 되게 설치하였다. 먼저 1번 수신기에서 마지막 12번 수신기까지를 A1으로 하여 탄성파자료를 기록하고, 마지막 수신기의 위치를 source로 하여 다시 12개의 수신기를 같은 방식으로 설치하였다. 이러한 릴레이 방식으로 연구지역을 A1-A6의 6개 측선구간을 설정하여 탐사를 실시하였다. A1-A3 지역은 함수토양지역이었으며 A4-A6 지역은 식생이 발달된 토양지역이었다.

1개의 음원과 12개의 수신기로 이루어지는 측정단위별로 거리, 수신기 번호, 고도 등의 자료가 헤더부분에 기록되고 12개의 채널로부터 입력되는 아날로그 자료는 디지털데이터로 변환하여 기록하였다. 사용된 탄성과 탐사기는 캐나다의 SCINTREX사의 S-2 모델로서 12개의 각 채널로부터 0.1msec 간격으로 샘플링한 후 다시 각 채널별로 시계열(time se-

ries)로 나타내는 디멀티플렉싱(demultiplexing) 과정을 거쳐 디지털 자료로 기록할 수 있었다. 각 채널의 기록시간은 100msec로서 1024개의 진폭 자료를 포함한다.

기록된 탄성파자료를 각 채널별로 탄성파형을 도시하여 진폭의 변화를 확인하고(Fig.2), 진폭에 관한 디지털자료를 읽어 각 채널별로 최고치를 구한 후, 거리에 따른 진폭의 변화 경향을 분석하였다. 또한, 각각의 에너지원-수진기 배열에 대한 실험에서 가해지는 충격의 에너지량이 다르기 때문에 에너지원-수진기간의 거리(r_0)가 1m일때의 진폭(A_0)에 대한 각 채널의 진폭의 상대비를 구하여 거리에 따른 지반진동의 감쇠현상을 분석하였다. 또한, 각 채널별로 주파수분석을 실시하여 진폭거리에 따른 주파수 변화양상을 분석하고(Fig.3) 각 채널별로 최대 스펙트럼 진폭을 읽어 진폭감쇠현상을 분석하였다.

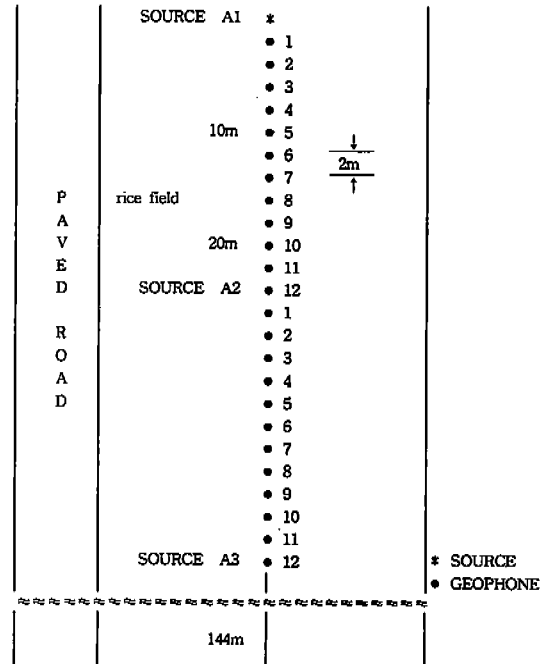


Fig. 1. Source-geophone layout in the seismic track. The offset between source and first geophone is 2 meters and the geophone interval is also 2 meters.

자료 해석

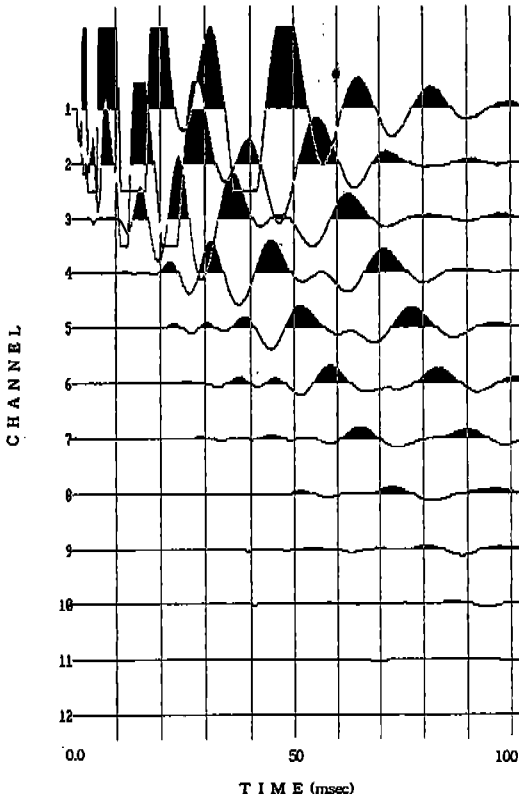


Fig. 2. Seismic record acquired with 12-channel engineering seismograph.

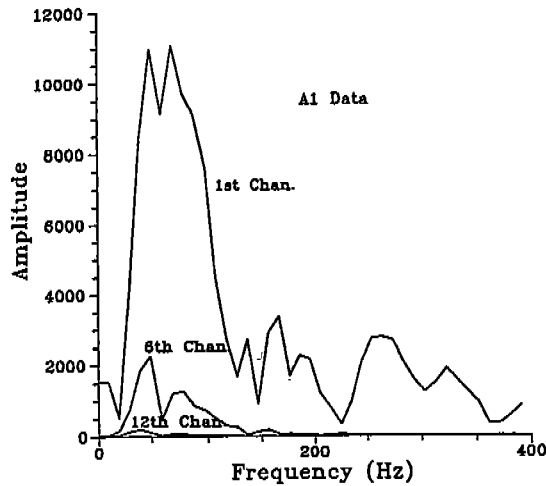


Fig. 3. Spectrum Analysis (amplitude-frequency) of shot gather A1.

A1-A6 축선의 각각 첫 번째, 여섯 번째 그리고 열두 번째 수진기의 탄성과 기록에 대한 스펙트럼 분석을 보면, 에너지원에서 수진기의 거리가 멀어질수록 (채널 1→채널 12)고 주파수 영역이 급격히 감소되어 감을 볼 수 있다(Fig.3). 첫 번째 수진기에서는 0-150Hz 부분에 평균적으로 약 90% 이상의 에너지가 집중되어 있는 반면, 열두 번째 수진기에서는 0-150Hz 영역에 약 99.8%의 에너지가 집중되어 있다. 이와 같이 에너지원으로부터 수진기의 거리가 멀어질수록 고 주파수 영역이 급격히 감소되어 가는 현상은 다른 연구들에 의하여 이미 밝혀진 바 있다 (Barazangi and Isacks, 1971; Claerbout, 1985; White, 1978). 이러한 감소현상은 축선 길이가 24m 인 점을 고려할 때 이는 심부의 영향보다는 천부 토양에 의한 영향이 상대적으로 크다고 볼 수 있다 (Clark, 1966; McDonald et al., 1958). 최대 스펙트럼 진폭은 주파수가 약 40Hz 부근에서 나타나고 있다(Fig.3).

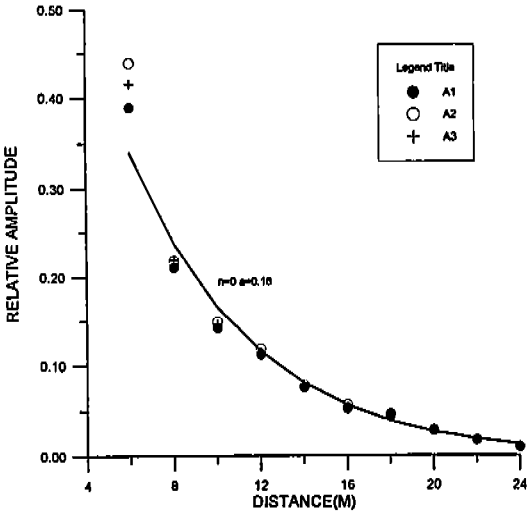
표 1은 A1-A6 축선의 진폭에 관한 수치자료로서, 축선별로 각 채널에 대한 최대진폭치와 최대진폭치의 초기진폭($r_0=1m$)에 대한 상대진폭치를 나타낸다. 채널1과 채널2에서 진폭값과 상대진폭치가 같은 이유는 현장기록시 현장에너지에서 나온 최대에너지가 최대기록허용치를 넘었기 때문이다. 그러므로 채널1과 채널2의 진폭자료는 본 연구의 분석에서 사용하지 않았다. A1-A6 축선에 대한 각각의 최대진폭치를 도시하여 보면, 지반진동의 감쇠경향을 뚜렷하게 알 수 있다. 이 지역의 전체적인 토양조건은 논 지역이었지만, A1-A3 축선 지역은 습윤토양이었고, A4-A6 축선지역은 식생토양이었다.

이러한 사실과 Fig.4의 그래프를 대비하여 보면, 두 지역간의 감쇠특성차이를 알 수 있다. 그림4는 A1-A6 축선들의 각 채널별 초기 진동에너지로 최

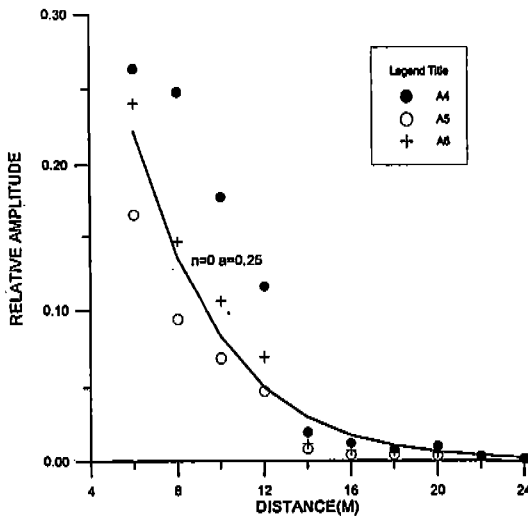
Table 1. Maximum amplitude(arbitrary) and relative amplitude data.

ch line	MAXIMUM AMPLITUDE						AMPLITUDE / AMPLITUDE AT 1M OFFSET					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	2048	2048	2048	2048	1682	2048	0.5184	0.5238	0.5437	0.2634	0.7123	0.2924
2	2048	2048	2048	2048	687	2048	0.5184	0.5238	0.5437	0.2634	0.2809	0.2924
3	1536	1717	1565	2048	391	1687	0.3889	0.4391	0.4155	0.2634	0.1656	0.2409
4	830	850	823	1928	222	1026	0.2101	0.2174	0.2185	0.2481	0.0940	0.1465
5	559	582	550	1381	161	742	0.1415	0.1489	0.1460	0.1777	0.0682	0.1050
6	442	459	429	900	112	483	0.0119	0.1174	0.1139	0.1158	0.0474	0.0690
7	268	304	287	158	20	86	0.1754	0.0778	0.0762	0.0203	0.0085	0.0123
8	209	220	202	98	10	52	0.0526	0.0563	0.0536	0.0261	0.0042	0.0074
9	174	180	169	64	10	44	0.0441	0.0460	0.0449	0.0082	0.0042	0.0063
10	113	115	108	81	9	37	0.0286	0.0294	0.0300	0.0104	0.0038	0.0053
11	70	70	67	28	4	12	0.0177	0.0179	0.0180	0.0036	0.0017	0.0017
12	39	39	39	14	3	8	0.0099	0.0099	0.0103	0.0018	0.0013	0.0011

탄성파탐사에 의한 토양층 지반진동의 감쇠연구



(a)



(b)

Fig. 4. Variation of relative amplitude(A/A_0) with source-geophone distance(r) for shot gathers A1-A3(a) and for shot gathers A4-A6(b).

대진폭치를 나눈 수치를 나타낸 것으로서, $n=0$ 을 가정할 경우 A1-A3 축선들의 평균감쇠정수는 -0.18, A4-A6 축선들의 평균감쇠정수는 -0.25으로 나타나 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 습윤

토양 보다 식생토양에서 더 근폭으로 감소현상이 나타남을 알 수 있다.

또한, A1-A6 축선의 수진기 거리에 대한 각 수진기의 스펙트럼 최대진폭치를 초기최대진폭치로 나눈 상대진폭치를 그래프로 나타내고, 이들 값의 최적 맞춤 곡선 (best fitting curve)을 그렸다(Fig.5). A1-A3축선의 최적 맞춤 곡선은 실선으로 A4-A6 축선은 파선으로 그렸다. 이들 곡선의 감쇠현상은 곡선이 보여주듯 에너지 감쇠는 주로 구형 발산에 의한 것임을 보여주고 있다. A1-A3축선의 감쇠정수는 평균 -0.186이며, A4-A6 축선은 -0.294를 보여주고 있다. 이들 수치는 앞에서 언급된 파형 진폭의 분석결과와 거의 일치함을 보여 주고 있다.

축선 A1-A6들에 대한 상대진폭 및 스펙트럼 상대진폭치를 대상으로 지반진동의 감쇠현상을 분석하여 본 결과 습윤토양조건 보다 식생토양조건에서 감쇠가 더 많이 일어남을 알 수 있다. 그 이유는 함수 토양의 경우 토양의 간극에 존재하는 간극수가 파동의 전파에 도움을 주기 때문인 것으로 해석된다. 물의 P파 전달속도가 약 1500m/sec이고 일반 토양의 P파 전달속도가 수 100m/sec인 점을 고려한다면 위의 설명은 타당한 것으로 판단된다.

본 연구의 대상이 최대진폭을 보이는 부분이므로 이는 표면파로 간주할 수 있다. 표면파에 대한 일반

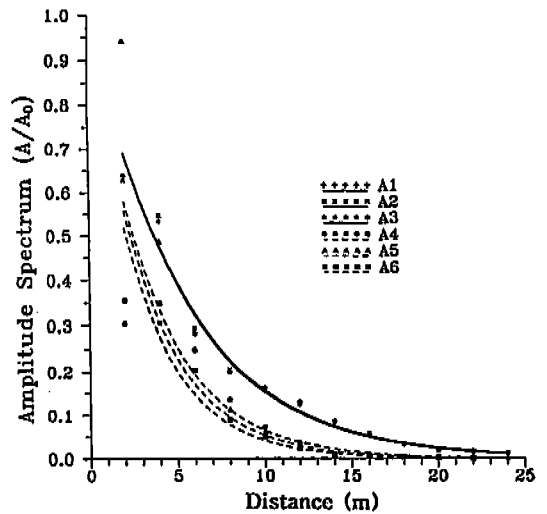


Fig. 5. Relative spectrum amplitude versus distance for shot gathers A1-A6.

적인 거리감쇠식인 식 (9)를 이용하면 각 채널에 대한 a 값을 계산할 수 있다. 계산한 후, 측정자료와 대비하면 지반진동 감쇠계수들을 구할 수 있다. n 값

은 표면파이므로 1/2로 고정된 후 a 값을 각각 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 등의 값을 대입하여 계산한 그래프곡선들과 실측자료들을 비교해 본 결과, A1 ~ A3, A4 ~ A6의 두 경우 모두 $n=1/2$ 의 값으로 최적치를 구하기는 불가능하였다. 그러므로 n 과 a 값

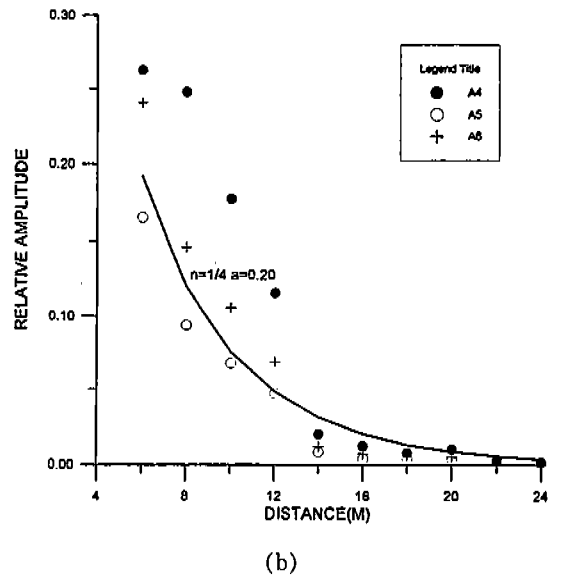
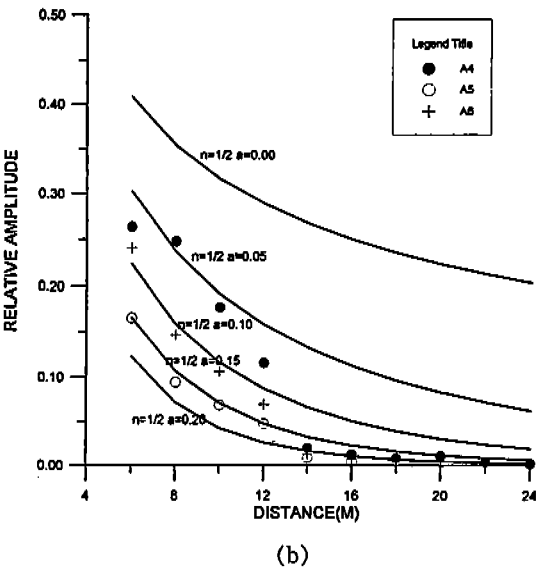
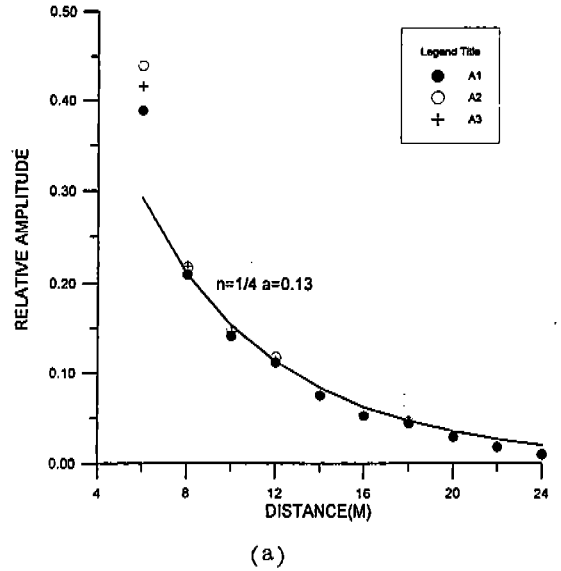
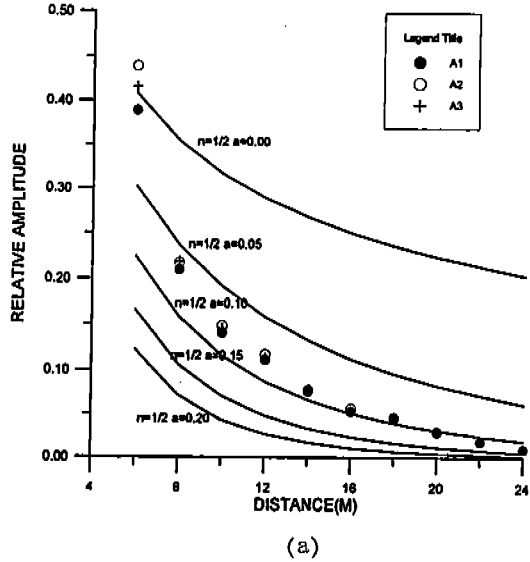


Fig. 6. Correlation of the observed relative amplitude with the computed one for various values of internal attenuation index(a) from 0.00 to 0.20 based on the assumption of surface wave($n=0.5$): (a) for shot gathers A1-A3, (b) for shot gathers A4-A6.

Fig. 7. The best fitting curve for the observed relative amplitude for shot gathers A1-A3(a) and for shot gathers A4-A6(b).

을 변화시키면서 최적 맞춤곡선을 구한결과 A1~A3의 경우 $n=0.25$, $a=0.13$ 일때, A4~A6의 경우에는 $n=0.25$, $a=0.20$ 일때 관측치와 계산치가 잘 맞는 것으로 밝혀졌다(Fig.7). 또한, 탄성파자료 해석에서 얻어진 토양의 평균속도(v)가 250m/s 이고, 스펙트럼 분석으로부터 중심주파수(f)는 40Hz정도로 밝혀졌으므로, 식 (10)을 이용하여 흙의 내부감쇠정수는 $h=0.094$ 임을 알 수 있었다.

토 의

타격에 의한 충격과 진동으로 부터의 지반의 매질 차이에 따른 진동감쇠를 연구함에 있어서 식 (9)에서도 볼 수 있듯이 파장을 표면파로 하여 취급하는가 실제파로서 취급하는가에 따라 진폭의 감쇠특성은 현저히 다르다. 또 흙의 내부감쇠가 다르면 진동원으로부터 멀리 떨어질수록 그 영향은 크게 좌우된다. 실제의 공해진동에서는 대부분의 경우 지표면을 전파하는 파동을 대상으로 하기 때문에 파동을 표면파로 하여 ($n=1/2$), 진동수와 파동의 전파속도에 따라 식 (9)로부터 a 값을 정하면 비교적 균질한 지반에서의 대략의 추정은 가능하다. 지층의 경계면에서 파의 반사, 굴절이 행하여지고 지표에 나타나는 파는 매우 복잡한 경로를 취하기 때문에 파동의 전파는 어느정도 지반을 단순화하여 생각해 볼 필요가 있다.

거리에 따른 진폭의 감쇠를 도시해보면 진원으로부터 가까운 거리에서는 상대진폭이 급격히 감소하지만 거리가 멀어짐에 따라 상대진폭감쇠율이 현저히 줄어드는 경향을 보인다. 이러한 현상은 진원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 실제파보다 표면파가 우세하기 때문으로 해석된다. 즉 실제파는 3차원적으로 지하심부까지 전해져 에너지가 소멸되지만, 표면파는 지표면을 따라 2차원적으로 전파하여 에너지가 보다 적게 소멸하기 때문이다. 그러므로 진원 부근에서는 구형발산 효과가 우세하고, 먼 거리에서는 흡수에 의한 영향이 크게 나타난다. 습윤토양지역과 식생이 발달된 지역을 비교하여 보면, 감쇠계수가 각 0.13과 0.20으로서 습윤토양지역보다 식생발달지역 토양에서 감쇠가 더 많이 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 식 (6)의 흡수계수 q 는 파의 주파수와도 관계가 있으나, 정확한 관계식은 알려져 있지 않다. 다만 관측결과에 의하면 탄성파 탐사에 유효한 주파수 대역에서는 감쇠계수와 주파수는 식점 비례하여 고주

파의 파동에너지가 저주파에서보다 훨씬 많이 감쇠한다. 따라서 저주파의 탄성파가 지구내부로 훨씬 깊게 침투한다. 탄성파 탐사기록의 분해능을 높이기 위해서는 고주파가 바람직하지만 에너지의 감쇠가 심하여 실제 사용이 곤란하다. 야의 조사시 수진기에 포착되는 파의 대부분이 저주파의 파로서, 흡수에 의한 영향은 구형발산 효과에 비하여 훨씬 적으며, 따라서 탄성파 기록상에 나타나는 대부분의 에너지 감소는 구형발산에 의한 것으로 생각할 수 있다. 또 탄성파에너지 전파에 있어서 구형발산과 동시에 토양분자의 운동에너지는 열에너지로 전환되고 이 열에너지는 다시 환원되지 않으므로 흡수현상이 초래된다(Claerbout, 1985; Tolstoy, 1973; White, 1978).

한편 현재 군사적 목적으로 지반에 폭탄을 투여하거나, 기타의 원인으로 인한 폭발에 의해 발생하는 진동의 확산 거리와 주변 매질에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이러한 연구에서 본 연구의 방법 및 결과를 이용한다면 좋은 결과를 기대할 수 있을 것이다.

본 탐사에서는 측정간 지오폰의 거리를 작게 했기 때문에 반사파가 영향을 미칠 수 있는 범위는 지반의 표면에 국한되었지만 만약 측정간 지오폰의 거리를 넓게 배치한다면 지하심부까지 반사파가 통과하기 때문에 매질 성분 분석에 유용하게 쓰여질 수 있을 것이다.

결 론

지반조사에 일반적으로 사용되는 멀티채널탄성파 탐사장비를 이용하여 지반진동의 감쇠현상을 조사하였다. 12채널탄성파 탐사기와 햄머에너지원(hammer source)를 이용하였으며, 1개측선의 에너지원-지오폰 길이는 최대 24m를 유지하였다.

각 지오폰에 기록된 증폭되지 않은 디지털 진폭자료를 분석하여 도시하여 본 결과 매질을 통해 전달되는 탄성파의 진폭이 진원으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 지수함수적으로 감쇠하는 현상을 보인다.

지표면을 따라 전달되는 표면파의 감쇠에 관한 이론식과 실측된 파형의 진폭을 서로 비교하여 조사지역의 감쇠요소들을 결정한 결과 기하감쇠지수(n)는 0.25, 내부감쇠지수(a)는 0.13~0.20임을 알 수 있었다. 습윤토양지역은 내부감쇠지수가 약 0.13이고, 식생이 발달된 토양지역의 내부감쇠지수는 약 0.20을 보여 습윤토양지역보다 식생이 발달된 토양지역

에서 지반진동이 훨씬 빨리 감쇠하는 현상을 보이고 있다. 또한, 이 지역의 탄성과 전파속도가 250m/sec 임을 이용하여 중심주파수(40Hz)에 대한 흙의 내부 감쇠정수(h)는 0.094임을 결정할 수 있었다.

사 사

이 연구는 교육부 기초과학 연구소 육성지원사업의 연구비 지원(BSRI-95-5419)에 의하여 이루어졌으며, 건설적인 토의에 응해주신 강원대 김기영 교수, 교원대 경제복 교수와 자료처리 및 원고정리에 많은 도움을 준 류형주, 박은주양에게 감사의 마음을 드린다.

참 고 문 헌

천병식, 고용일, 오민열, 권형석, 1990, 산업폐기물로 발생되는 석탄 회의 토질역학적 특성에 관한 연구, 대한 토목학회 논문집, 10(1), 115-123

천병식, 박홍규, 1990, 석탄회의 반복재하에 의한 변형특성, 대한 토목학회 논문집, 10(1), 125-134

천병식, 오재응, 1993, 건설기술자를 위한 지반진동 영향과 대책, 건설연구사, 432p.

Barazangi, M., and Isacks, B., 1971, Lateral variation of seismic-wave attenuation in the upper Mantle above the inclined earthquake zone of the Tonga island arc, J. Geophys. Res., 76, 8493-8516

Claerbout, J. F., 1985, Fundamentals of Geophysical Data Processing, Blackwell Sci. Pub.

Clark, S.P., 1966, Handbook of Physical Constants, Memoir 97, GS9A.

Kuster, G. T. and Toksoz, M. N., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I : Theoretical formulations, Geophysics, 39, 587-606.

Morgan, T. R., 1983, Foundations of Wave Theory, IHRDC.

Nostrand R. G., and White, J.E., 1958, Attenuation of shear and compressional waves in Pierre Shale, Geophysics, 23, 421-439.

Purnell, G. W., 1986, Observations of wave velocity and attenuation in two-phase media, Geophysics, 51(12), 2193-2199.

Toksoz, M. N., Johnston, D. H., and Timur, A., 1979, Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks : I. Laboratory measurements: Geophysics, 44, 681-690.

Tolstoy, I., 1973, Wave Propagation, McGraw-Hill.

White, J. E., 1978, Generation and Propagation of Seismic Waves, Hexcon Press.

서만철

공주대학교 지질환경과학과

충남 공주시 신관동 182

TEL : (0416) 50-8512

FAX : (0416) 50-8479

e-mail : suh@geophysics.kongju.ac.kr

손호응

배재대학교 자원환경공학과

대전시 서구 도마동

TEL : (042) 520-5404