

지반 탁월주기와 지반 운동특성에 관한 연구

A Study on Predominant Periods and Attenuation Characteristics
of Ground Motion

김 소 구*¹

Kim, So-Gu

차 정 식*²

Cha, Jeoung-Shik

정 형 식*³

Chung, Hyung-Sik

Abstract

A set of field investigations was performed to estimate accurately the predominant periods of seismic ground motions and the attenuation characteristics of the seismic ground vibration.

Predominant periods of ground motions were estimated from the measurement of the continuous microseismic vibrations of certain periods, inherent in the ground and in the buildings, utilizing the high sensitivity digital velocity seismometer consisting of 3-component geophones and a digital seismograph. Estimated predominant periods of microseismic vibration of the ground(measured on the ground surface) and the building (measured on the second floor) were in the range of 0.18~0.235 sec. and 0.26~0.31 sec. respectively.

The subsurface structure of the site ground was surveyed by the seismic refraction method utilizing the digital seismicwave probing system. The ground structure was found to be a two-layered system: an upper top soil layer of 7m in thickness with the P-wave velocity of 662m/sec and a lower layer of silty-clayey soils with the P-wave velocity of 2210m/sec.

The attenuation characteristics of the seismic ground vibrations were determined by the amplitude decay measurement method using the Seisgun, which produces strong artificial seismic energy. Measured spatial attenuation coefficients of the ground vibration in vertical(Z) longitudinal(X), transverse(Y) direction were 0.1137, 0.0025, and 0.0290 respectively. Estimated Spatial Q_s 's(inverse of the specific dissipation constant w.r.t. shear wave) of

*¹ 한양대학교 지진연구소 교수

*² 한양대학교 지진연구소

*³ 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

X, Y, and Z directions were in the range of 5.913~7.575, 32.371~41.452, 2.794~3.579 respectively. This indicates that aseismic design of the structures on the site should take stronger consideration regarding the earthquake resistance characteristics of the structures against longitudinal ground motion.

요 지

지반진동특성의 지진공학적인 정밀측정의 일환으로 지반진동의 탁월주기와 지반진동의 거리에 따른 감쇠특성을 현장실험을 통하여 조사하였다. 이 조사는 세가지 부분의 실험을 통하여 결과를 얻었다. 첫째, 지반의 탁월주기는 고감도 디지털 속도지진계-3축성분 속도계를 이용하는 Seismometer와 디지털 Seismograph를 이용하여 지반과 건물에서 일정한 주기를 가진 연속적인 미소진동으로 부터 지반 및 건물진동의 탁월주기를 계측하였다. 지반에서의 탁월주기는 0.18~0.23 sec, 건물2층의 탁월주기는 0.26~0.31 sec였다. 둘째, 지반 구조조사는 디지털 탄성파탐사기를 이용하여 굴절법을 이용한 탄성파탐사를 실시하였다. 실험장소인 한양대학교 안산캠퍼스의 지층구조는 상부층(표토층: surface layer)은 저속도층으로서 662m/s, 하부층(지반층: base ground)은 2210m/s의 P파 속도를 갖고, 주시곡선도로부터 표토층의 두께는 약 7m로 검출되었다. 이것은 7m 두께의 표토층(top soil)과 그 하부에 사질 점토성의 지반층(base ground)이 존재함을 암시한다. 셋째, Seisgun을 이용하여 인공적인 탄성파 에너지를 만들어 지반의 진동 감쇠특성을 조사 하였다. 거리 감쇠상수(spatial attenuation coefficient) γ 는 거리에 따른 진폭을 계산하여 Z-성분(vertical)은 0.0137, X-성분(longitudinal)은 0.0025, Y-성분(transverse)은 0.0290이고 Spatial Q_s 의 값은 각각 5.913~7.575, 32.371~41.452, 2.794~3.579의 값이 산출되었었다. 이 결과 다른 두성분에 비해서 종방향(x-성분, longitudinal)성분은 감쇠경향이 낮음을 알 수 있다. 그러므로 이 경우에 구조물 설계시 종방향(x-성분, longitudinal)성분에 대한 내진설계가 고려 되어야 할 것이다.

1. 서 론

우리나라에서도 근래에 들어 Richter 규모로 3~5정도의 지진이 자주 발생되고 있다(대표적인 것으로서 1936년 쌍계사 지진-진도 5.3, 1978 홍성지진 5.2를 들 수 있다). 한편, 심각한 지진피해 기록이 있었던 고려·조선시대 이후 지난 2세기 동안 강진기록이 없었던 것이 이 기간이 지진학적으로 볼 때 지진 휴식기(seismic gap)로서, 지진 에너지가 계속적으로 축적되어 왔을 가능성이 있음을 감안할 때, 향후에는 우리나라에서도 비교적 큰 피해를 일으키는 강진 발생가능성을 배제할 수 없다.

따라서 비록 우리나라에서는 현재까지 주목

할 만한 지진 피해가 발생한 적은 없으나, 앞으로 발생할 수 있는 강진에 대비하여 건축 구조물, 교량, 댐, 원자력 발전소 및 핵폐기물 저장소 등 지진시 큰 피해가 예상되는 주요 토건 구조물들에 대하여 보다 철저한 내진설계를 적용할 필요가 있다. 현재 국내는 이러한 토건 구조물의 내진설계는 구조공학적인 측면에만 치중하고 있고, 지진시 지반운동 특성등을 반영한 지진학적 내진설계 측면을 고려한 보다 포괄적인 내진설계가 적용되지 못하고 있다.

한편, 앞으로 우리나라도 고부가가치 산업의 증가 추세에 따라, 반도체 공장등과 같이 정밀 제품을 생산하는 산업 시설물이나 기타 진동에 예민한 각종 설비 및 기기가 사용되는 첨단구

조물의 건설이 날로 증가하고 있다. 이러한 진동 예민 구조물들은 비단 지진시에 대한 안전성 측면뿐만 아니라, 평상시의 각종 인공적 진동원에 의한 지반진동으로 인하여 발생하는 정밀 작동설비의 오작동 등의 지반진동 피해를 방지하는 측면에서도 내진설계가 필요하다(일례로 64MB DRAM 반도체 칩 제조설비의 경우, 허용 진동변위가 0.3~0.4 μm 이하가 되도록 내진설계되어야 한다).

이와 같은 지진 또는 기타의 인공적 진동원에 대한 내진설계시 주요한 지진공학적 내진설계 사항중의 하나는 지반의 성층구조적 특성에 기인하는 지반 고유의 공진 주파수(또는 탁월주기)와 지진 또는 기타 인공 진동원에 의한 지반 가진 주파수(또는 가진 주기)가 근접할 때 지층이 공진 현상을 일으킴으로써 발생되는 큰 피해를 예방하는 것이다. 그리고, 지반진동의 거리에 따른 감쇠 특성을 고려한 내진설계의 규모를 결정하는데 필요한 지반진동 감쇠 특성치를 결정하고, 특히 진동성분(x, y, z축 성분, 각각 종방향-longitudinal, 횡방향-transverse, 수직방향-vertical)에 따른 상대적인 감쇠특성의 차이를 고려하여 내진설계의 방향성을 감안하는 것도 중요한 사항이다.

지반 및 구조물은 평상시에도 바람 및 해수의 조력운동 등의 기타의 자연적 진동원이나 차량의 주행 및 기계·장비의 가동으로 유발되는 인공적 진동원에 의한 미세한 크기나 끊임없는 연속진동 상태에 있다. 이와 같이 지반 및 구조물에 항존하는 미세한 진폭의 연속진동을 미소진동(microtremors)이라고 하는데, 미소진동은 보통 $10^{-7} \sim 10^{-6}\text{m}$ (0.1~1 μm)의 진동변위 진폭을 갖고, 진동 주파수는 0.5~10Hz의 범위에 놓이는 것으로 알려져 있다. 이처럼 미소진동은 진폭 및 주파수가 매우 낮아 몸으로 체감하기는 어렵고, 그 실체는 검측하기 위해서는 지진학적인 정밀 측정방법을 동원하여야만 한다. 한편, 미소진동은 특정지역에 놓인 지반의 성층구조 및 지질특성에 따라 고유한 진동주기(즉 탁월 주기)를 갖는 것이 특징이다.

그런데, 미소진동의 특성은 지진시 발생하는 지반 진동 특성과 아주 밀접한 상관관계가 있다. 이러한 상관관계에 대한 연구는 지진이 많이 발생하는 일본에서 많은 연구가 수행된바 있는데, Kanai(1962)는 실제 지진시 얻어진 강한 운동(strong motion earthquakes)기록으로부터 미소진동의 주파수 특성(spectrum)을 얻을 수 있음을 구명하고, 실측성과와 이론적 계산을 토대로한 진동 증폭률 산정식을 제시한 바 있다. 한편, Okamoto(1984)는 지진 피해정도가 지반특성에 큰 영향을 받는 것과 관련하여, 지반의 탁월 주기를 내진설계에 반영하는 방법을 제시한 바 있다. 국내 관련 연구로는 구미공단내 렉키금성 반도체 공장 부지 지반의 탁월주기를 측정 한 사례를 대표적으로 들 수 있다.

본 논문에서는 지진시 지반운동 특성의 내진설계 반영과 관련한 주요 설계 고려사항으로서 지반의 탁월주기, 지반의 성층구조 특성, 지반진동의 거리 감쇠특성치의 결정과 관련한 배경이론들을 소개하고, 이들 이론을 토대로 한 실험적 결정 방법을 동원한 현장실험 사례와 그 분석 성과를 소개하고자 한다. 현장실험은 한양대학교 안산 캠퍼스내 이과대학 건물앞 부지와 이과대 건물을 대상으로 실시하였다. 현장실험 위치의 개요도는 Fig. 3에 나타내었다. 이와 같은 현장실험은 다음 세 가지 부분으로 나누어 실시되었다. 첫째로, 시험부지 지반의 미소진동을 지진학적인 정밀 측정방법으로 검측하여 지반의 탁월주기를 측정하였다. 둘째로, 굴절법을 적용한 탄성과 탐사를 실시하여 시험부지 지반의 성층특성(구성 지층의 두께 및 탄성과 속도치)을 조사하였다. 셋째로, 지표면 지반진동과의 거리에 따른 진폭 변화특성을 검측하여 지반진동과의 감쇠 특성치를 결정하였다.

2. 지반 탁월 주기

2.1 이론적 고찰

인간은 해안과 강가의 평지에서 생활터전을

마련하였고, 그 지역들이 개발되어왔다. 최근 세(recent age)의 지질의 형태는 퇴적물인 모래와 자갈들로 복잡하게 이루어져있다. 하부에 존재하는 기반층(base ground)과 그 위에 쌓인 부드러운 표토층(surface layer)으로 나눌 수 있다.

일반적으로 표토층은 복잡한 구조를 가지는데 이것은 지층의 탄성진동에 특징적인 영향을 미친다. 지진이 발생할 때 지표근처로 전파되어 피해를 줄수 있는 주요한 지반진동파(또는 지진파)는 표면파와 S파(전단파)이다. 탄성파의 속도는 일반적으로 지층하부에서 상부로 전파되면서 더 느려지기 때문에 총적층에서 S파는 표면에서 여러가지 반사 현상을 일으킨다. 지표부근에서는 수직운동을 하게되고, 그 결과 지반은 어떤 특정한 주기를 갖고 진동을 하게 되는데 이러한 주기를 지반의 탁월주기라고 한다.

지반의 탁월주기는 표토층의 구조에 의해 결정되는데, 표토층이 균일한 단일층으로 구성되어 있을 때 지반의 탁월주기는(S. Okamoto, 1984) 다음과 같다.

$$T = \frac{4H}{\beta_1} \quad (1)$$

T: 지반의 탁월주기

H: 표토층의 두께

β_1 : 표토층의 s파의 속도

탁월주기의 측정방법은 다음과 같다. 첫째, 고감도 속도 지진계를 이용하여 끊임없이 진동하는 지반의 미소진동을 측정한다. 둘째, 탄성파의 층두께와 속도에 기초를 둔 이론적인 계산을 한다. 셋째, 실제 장소에서 지진운동자료 수집을 한다.

특정 지층으로 입사된 탄성파는 반사와 투과에 의해서 지층간의 경계면이 생기고 복잡한 파동이 발생한다. 2개의 수평층을 가진 구조에서 각층은 균질하고 등방성인 두께 H, 밀도 ρ_1 , ρ_2 그리고 전단탄성계수(shear modulus) G_1 , G_2 이고, S파에 의한 수평변위는 지반진동변위인 u_1 , u_2 에 기인한다. 따라서 S파의 파동의 미분

방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \beta_1^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} \quad \beta_1 = \sqrt{\frac{G_1}{\rho_1}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \beta_2^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} \quad \beta_2 = \sqrt{\frac{G_2}{\rho_2}} \quad (3)$$

β_1 = Layer 1의 S파의 속도

β_2 = Layer 2의 S파의 속도

파동이 서로 다른 두개의 층의 경계면에서 입사될때 한부분은 반사되고 나머지는 통과된다. 이때, u는 임의의 변위함수

Arbitrary Function $F_1(z)$, $z = \frac{t-x}{\beta^2}$

Second Arbitrary Function $F_2(z)$, $z = \frac{t+x}{\beta^2}$

의 함수 형태로 다음의 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_1 = F_1 \frac{t-x}{\beta^2} \quad (4)$$

$$u_2 = F_2 \frac{t+x}{\beta^2} \quad (5)$$

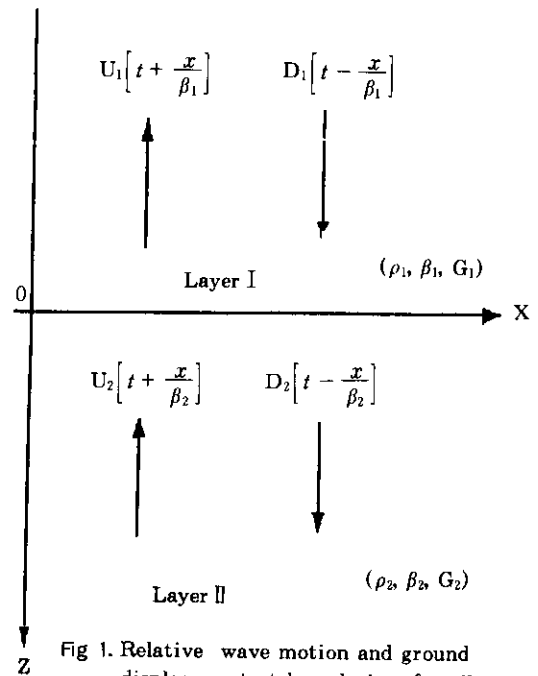


Fig 1. Relative wave motion and ground displacement at boundaries of soil strata.

Fig.1에서와 같이 두층일때의 운동의 일반적인 해는 다음과 같다(Oohara, 1979).

$$u_1(t, x) = U_1\left(t + \frac{x}{\beta_1}\right) + D_1\left(t - \frac{x}{\beta_1}\right) \quad (6)$$

$$u_2(t, x) = U_2\left(t + \frac{x}{\beta_2}\right) + D_2\left(t - \frac{x}{\beta_2}\right) \quad (7)$$

여기서 $U_1, U_2 \dots$ up function

$D_1, D_2 \dots$ down function

지반에 경계층이 있을 때, 입사파의 반사(reflection)와 투과(transmission)가 일어나 다중 반사파의 운동이 된다. 표토층이 단일층으로 구성되어 있을 때 지반을 통하여 나온 파는 S파가 된다. 단위 진폭과 각진동수 w 의 sinusoidal shear wave가 지반층에서 위로 전파한다고 가정할때, up function U_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_2 = \exp\left[iw\left(t + \frac{x}{\beta_2}\right) \right] \quad (8)$$

이다. 이때, 표토층과 지반층에서 파동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$u_2(t, x) = \exp\left[iw\left(t + \frac{x}{\beta_2}\right) \right] + D_2 \exp\left[iw\left(t - \frac{x}{\beta_2}\right) \right] \quad (9)$$

$$u_1(t, x) = U_1 \exp\left[iw\left(t + \frac{x}{\beta_1}\right) \right] + D_1 \exp\left[iw\left(t - \frac{x}{\beta_1}\right) \right] \quad (10)$$

이것은 다음의 경계조건을 따른다.

$$u_1(t, 0) = u_2(t, 0) \quad (11)$$

$$G_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = G_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad \text{at } x = 0$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x = H$$

$$\frac{G_1 \beta_2}{G_2 \beta_1} = \frac{\rho_1 \beta_1}{\rho_2 \beta_2} = k \quad k = \text{ground impedance}$$

세계의 함수 D_2, D_1, U_1 는 위의 식(11)의 경

계조건에 의하여 다음의 식(12), (13), (14)가 된다.

$$D_2 = \frac{(1-k) + (1+k) \exp\left(-2i \frac{wH}{\beta_1}\right)}{(1+k) + (1-k) \exp\left(-2i \frac{wH}{\beta_1}\right)} \quad (12)$$

$$U_1 = \frac{2}{(1+k) + (1-k) \exp\left(-2i \frac{wH}{\beta_1}\right)} \quad (13)$$

$$D_1 = \frac{2 \exp\left(-2i \frac{wH}{\beta_1}\right)}{(1+k) + (1-k) \exp\left(-2i \frac{wH}{\beta_1}\right)} \quad (14)$$

(12), (13), (14)식의 관계에 의해 지표면의 진동 u_0 식을 산출하면 다음과 같다.

$$u_0 = \frac{2}{\sqrt{\cos^2 \frac{wH}{\beta_1} + k^2 \sin^2 \frac{wH}{\beta_1}}} \quad (15)$$

k 와 $\frac{wH}{\beta_1}$ 의 다양한 값으로 u_0 곡선을 그리면

Fig.2과 같다.

만약 표토층이 지반층에 비하여 연약하다면 ($k < 1$) 진동은 확대 된다. 즉,

$$\frac{wH}{\beta_1} = \frac{2\pi}{T} \frac{H}{\beta_1} = \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

파동의 주기는 다음과 같고,

$$T = \frac{4H}{\beta_1} \quad (17)$$

이때 진동의 확장은 최대가 되고 최대값은 $u_0 = \frac{2}{k}$ 가 된다. 그리고 표토층과 지반층사이에서의 진동 u_B 는 다음과 같다.

$$u_B = \frac{2 \cos \frac{wH}{\beta_1}}{\sqrt{\cos^2 \frac{wH}{\beta_1} + k^2 \sin^2 \frac{wH}{\beta_1}}} \quad (18)$$

u_B 와 u_0 사이의 비율은 $\frac{u_B}{u_0} = \sec \frac{wH}{\beta_1}$ 이다. 따라

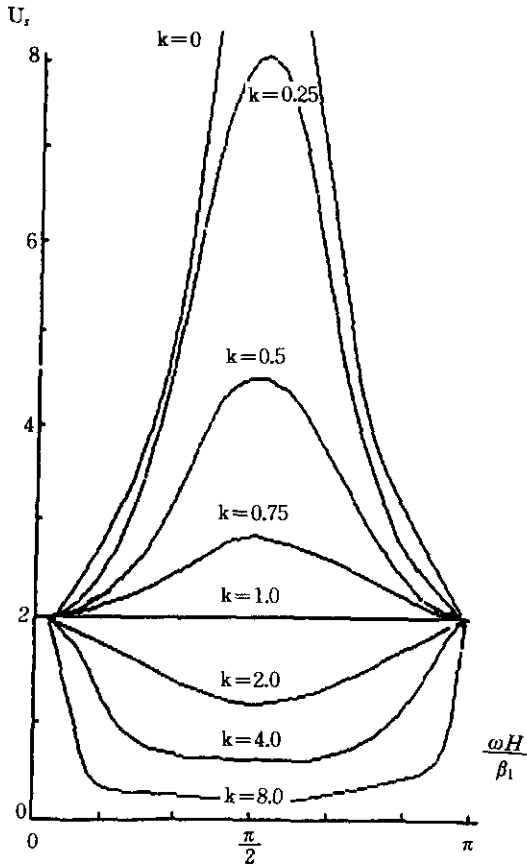


Fig 2. The vibration produced at the ground surface u_s , for various values of k and $\omega H / \beta_1$. (Okamoto, 1984)

서 $\frac{\omega H}{\beta_1}$ 에 따라 0에서 ∞ 값을 취할수가 있다. 즉 지진진동이 있을때 탁월주기, 표토층의 두께 및 전파속도와 밀접한 관계를 가진다.

2.2 자료의 취득 및 분석

본 연구에서는 지반의 탁월주기를 측정하기 위해, 고감도 속도지진계를 이용하여 다양한 미소진동자료를 취득하였다. 측정에 사용된 장비는 Digital Seismograph(DR-2000)으로서 3성분(z성분-vertical, x성분-longitudinal, y성분-transverse)을 취득할 수 있다. 실험장소는 한양대학교 안산캠퍼스 이과대 건물 앞 지반(site 1)과 이과대 건물의 2층(site 2, elevation: 5m)에서 나누어 수행하였다.(Fig. 3 참조)

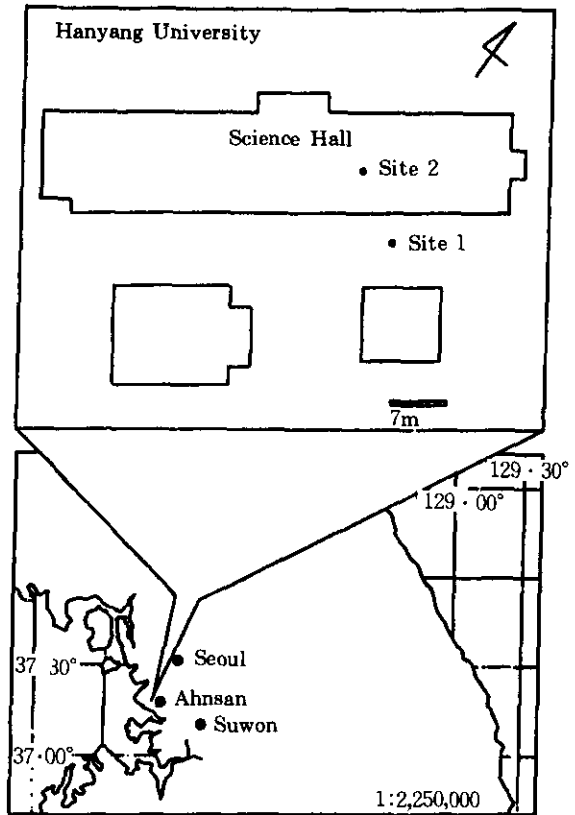


Fig 3. Map of experiment site.(Univ. of Hanyang, Ahnsan, Kyonggido, Korea)

실험은 가능한한 배후 잡음(background noise)이 없는 조용한 시간대(23시부터 새벽6시까지)를 이용하였고 Low-pass Filter를 50Hz로 두고 Sampling Rate는 0.005sec (sps:200Hz)로 하여 10분간 연속적으로 자료를 취득하였다. 다양한 시간별로 측정된 데이터는 각각 3~4초씩 Time Window Sampling한 후 Filter Scan방법을 이용하여 Band-pass Filtering을 하였다. Filter Scan이란 기록된 Data의 Narrow Band Filter를 순차적으로 적용하여 가장 적절한 Frequency Parameter를 결정하는 방법이다. 본 연구에서는 취득된 세 성분중 진동시 가장 영향이 큰 수직 성분(z-성분)를 택하여 분석하기로 했다. 이는 건물 및 지반의 진동시 수직 성분이

수평 성분보다 지반진동에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

앞서 언급한 바와 같이 미소진동은 0.03~20Hz의 영역을 가지기 때문에 0~5Hz, 5~15Hz, 10~20Hz, 15~25Hz, 20~30Hz(frequency parameter)의 Band-pass Filtering을 수행하였다. 지반, 건물 2층에서, 각시간대 별로 10분씩 연속적으로 얻어진 데이터를 Event에 따라 약 10회씩 3~4초 Time Window Sampling하였다. Sampling된 데이터를 Frequency Parameter에 따라 FFT Spectrum 분석하였고 각 Event의 가장 큰 진폭을 갖는 주파수를 취득하였다. 주파수는 주기의 역수이고, Fig. 4, 5에서 보는바와 같이 주기의 빈번도 그래프를 작성하였다. 이 빈번도 그래프에서 특징하게 가장 빈번히 나타나는 주기가 지반과 건물2층의 탁월주기이다.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{\overline{AB}}{\alpha_1} + \frac{\overline{BC}}{\alpha_2} + \frac{\overline{CD}}{\alpha_1} \\
 &= \frac{2H}{\alpha_1 \cos \theta_c} + \frac{X_{cross} - 2H \tan \theta_c}{\alpha_2} \quad (19) \\
 &= \frac{2H}{\alpha_1 \cos \theta_c} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sin \theta_c\right) + \frac{X_{cross}}{\alpha_2}
 \end{aligned}$$

위식에서 α_1 과 α_2 는 상부층과 하부층의 P파의 전파속도이고, H는 상부층의 두께, θ_c 는 임계각이다.

스넬의 법칙에 의해서

$$\sin \theta_c = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (20)$$

이므로, 식(19)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{X_{cross}}{\alpha_2} + \frac{2H \cos \theta_c}{\alpha_1} = \frac{X_{cross}}{\alpha_2} + \\
 &\frac{2H \sqrt{1 - (\alpha_1/\alpha_2)^2}}{\alpha_1} = \frac{X_{cross}}{\alpha_2} \quad (21) \\
 &+ \frac{2H \sqrt{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}}{\alpha_1 \alpha_2} = \frac{X_{cross}}{\alpha_2} + t_1
 \end{aligned}$$

위의 식(21)은 주시곡선도에서 기울기가 $1/\alpha_2$ 이고, 절단시간 t_1 인 직선이다. 상부층 두께 H는 두가지 방법으로 구할 수 있다. 여기서, 절단시간 t_1 는 다음과 같다.

$$t_1 = \frac{2H \sqrt{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (22)$$

첫번째, 절단시간을 이용하여 상부층의 두께 H는 다음과 같다.

$$H = \frac{t_1}{2} \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\sqrt{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}} \quad (23)$$

직접파와 굴절파가 동시에 도달하는 지점인 교차거리 X_{cross} 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{X_{cross}}{\alpha_1} = \frac{X_{cross}}{\alpha_2} + \frac{2H \sqrt{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (24)$$

두번째, 교차거리를 이용한 상부층의 두께 H는 다음과 같다.

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1}} X_{cross} \quad (25)$$

본 연구에서 취득된 데이터는 C. Valides (1989)가 개발한 PCQE라는 디지털 지진동 분석 소프트웨어를 사용하여 처리하였다. 이 소프트웨어는 국제 지진학회(IASPEI: International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior)에서 사용중이고 다채널 데이터를 처리할 수 있고 처리속도가 빠른 장점을 가지고 있다. 이상의 분석에 대한 Flow Chart는 Table 1에서 보는 바와 같고 Fig. 4~5는 지반과 건물2층에서 취득된 지진 기록지와 주기의 빈번도(distribution)를 보여주고 특징하게 빈번한 주기가 결정되어 Table.2를 보면 지반에서 측정된 탁월주기는 0.18~0.23sec이고, 건물2층에서 측정된 탁월주기는 0.26~0.31 sec이다.

Table 1. Flow chart of predominant period analysis

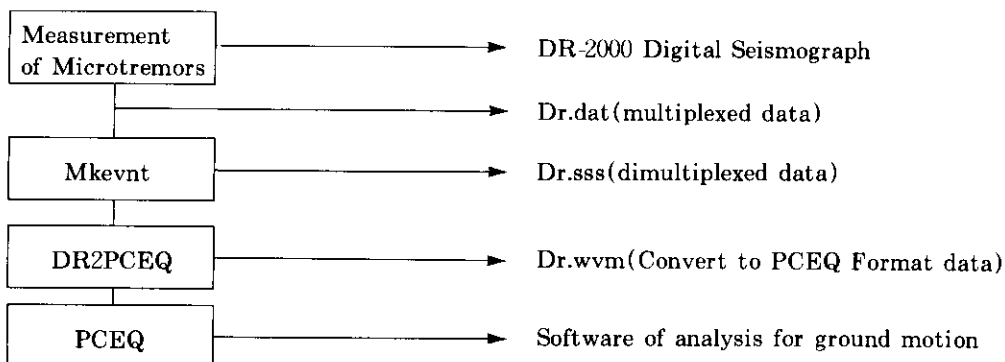


Table 2. Predominant period in ground and building (2F, elevation : 5m)

ground (site 1)			building (site 2)		
	Time	Predominant period		Time	Predominant period
Test 1	23:45~23:55	0.16~0.23	Test 5	23:46~23:56	0.25~0.30
Test 2	01:15~01:25	0.16~0.21	Test 6	02:11~02:21	0.26~0.31
Test 3	03:00~03:10	0.18~0.23	Test 7	03:50~04:00	0.26~0.30
Test 4	04:28~04:38	0.20~0.24	Test 8	05:43~05:53	0.26~0.31
ground predominant period		0.18~0.23	building (2F) predominant period		0.26~0.31

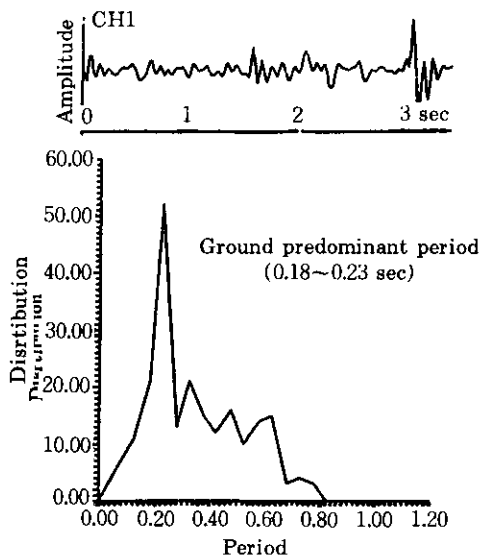


Fig 4. Example of seismogram and distribution of period : ground, time window : 3~4sec, sps : 200Hz, low-pass filter : 50Hz, gain ratio : 9dB

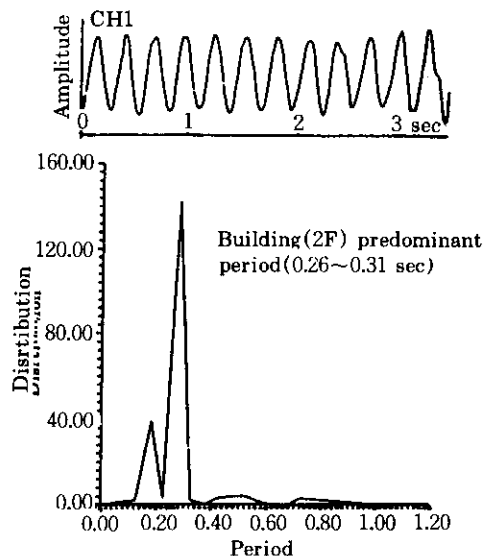


Fig 5. Example of seismogram and distribution of period : bukliding (2F), time window : 3~4sec, sps : 200Hz, low-pass filter : 50Hz, gain ratio : 9dB

3. 지반구조

3.1 탄성과 탐사 이론

본 논문에서 수행하고 있는 실험장소의 지반 구조를 조사하기 위하여 굴절법 탄성과 탐사를 수행하였다. 에너지원으로는 Seisgun과 Hammer를 이용하여 지층의 속도와 지층간의 두께를 산출하였다. 기본적 굴절법 탄성과 탐사이론은 다음과 같다.

굴절법의 원리는 지진학자들에 의해 지구내부의 속도분포를 연구하는데 응용되어져 왔다. 이 방법은 1920년대에 들어와서 석유부존에 중요한 구조인 암염돔(salt dome)을 찾기 위하여 개발되었다. 탄성파의 전파 과정에서 임계 굴절(critical refraction)이 일어날 수 있는 경우에만 사용할 수 있다. 즉, 속도가 낮은 상부층에서 속도가 높은 하부층으로 임계각으로 입사한 파는 층의 경계면에서 평행하게 굴절된다. 이때 에너지는 경계면을 따라 하부층으로 전파되며 일부는 상부층으로 재굴절하여 지표면에 도달하게 된다. 굴절법 탄성과 탐사에서는 각 Sensor(geophone)에 도달하는 초동시간(initial arrival time)을 읽음으로써 주시곡선을 작성하게 되고, 주시곡선상에 나타나는 각 직선들의 기울기로부터 지층의 속도를 결정한 후 각 층의 경계면까지의 깊이를 구한다.

Fig. 6에서 임계거리(critical distance)는 진원으로부터 지표면에서 최초의 굴절파가 감지되는 거리이고, 교차거리(X_{cross} : cross-over distance)는 굴절파가 직접파를 앞질러서 처음 초동으로 나타나는 지점까지의 거리를 말한다. 절단시간(t_i : intercept time)은 굴절파의 주시를 나타내는 직선을 원점거리까지 임의로 연장하였을 때 시간축과 만나는 지점이다.

Fig.6으로부터 굴절파의 경로 A-B-C-D에 상응하는 경과시간 주시 P는 다음과 같다.

Fig.7은 암석의 밀도와 탄성파속도의 예이고 Table.3는 탄성과 탐사시 토양에 따른 속도를 예시하였다(김소구, 1993).

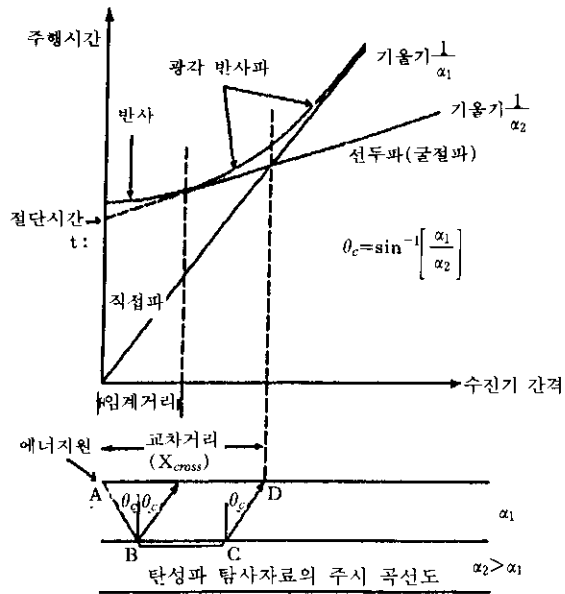
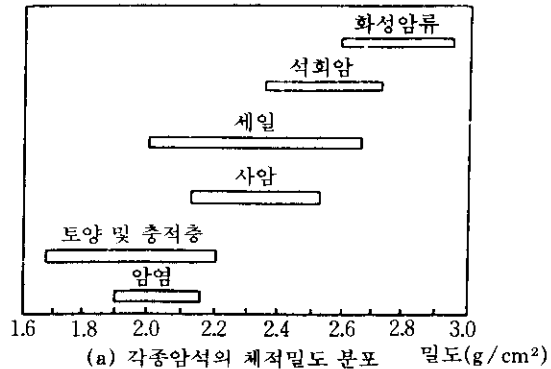
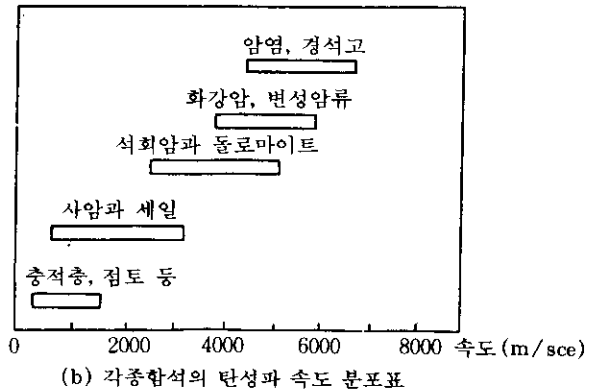


Fig. 6. Traveltime curve of the seismic exploration data in a two-layer case.



(a) 각종암석의 체적밀도 분포 밀도(g/cm^3)



(b) 각종암석의 탄성과 속도 분포표

Fig 7. Distribution of the volume density and the seismic velocity in rocks.

Table 3. Soil type with seismic velocity(김소구, 1993)

종 류	탄성과 속도(P파)m/s
표토	100~600
자갈, 건조모래	500~1000
습한모래	600~1800
모래, 자갈층	1200~1500
사질점토	1800~2400
경암	1000~3000
사암, 응회암	1500~3500
석회암	2000~4000
유문암	3000
안산암	4000
화강암	4000~6000
현무암	5000~6000
변성암	3000~7000
반려암	5000~7000
물	1468 at 15°C

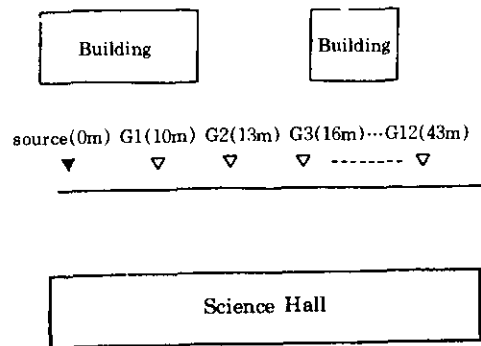
3.2 자료 취득 및 분석

탄성과 굴절법 탐사자료취득을 위한 탐사장비는 스웨덴 ABEM Terraloc MarkⅢ이고, 탐사시 탄성과의 시그널을 기록하는데 최대 48채널의 기록이 가능하다. 본 연구에서는 12채널만을 사용하였다.

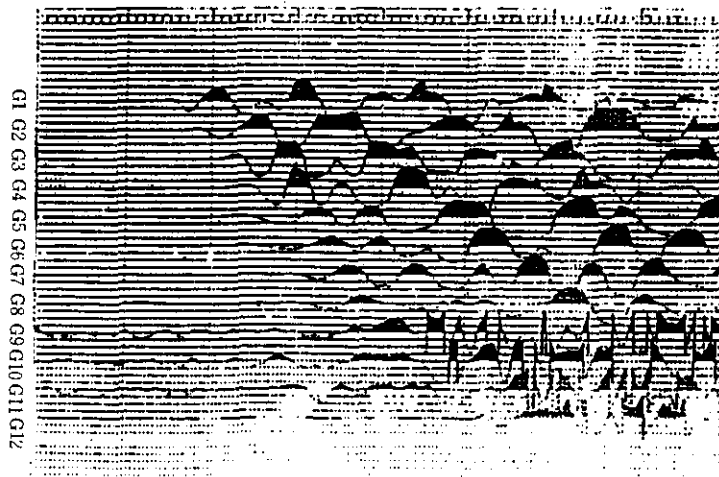
일반적으로 굴절법 탐사에는 Source-Receiver 간격을 반사법에 비해 훨씬 길게 설정한다. 굴절파의 전파 경로가 길기 때문에 고주파 에너지는 지하 매질에 의해 흡수된다. 굴절파탐사 기록은 저주파수 특성을 나타내기 때문에 수신 탐지기인 Geophone은 고유주파수(natural frequency)가 낮은 10Hz Geophone을 사용하였다. 한양대학교 안산캠퍼스 이과대 앞 지하에서 Source와 Geophone을 직선의 측선상에 배열하는 In-line탐사법으로 수행하였다. 보통 Geophone의 간격과 길이는 탐사 심도나 지층의 분해 정도에 의해 결정되고 Geophone의 총 배열 길이는 조사심도의 5배이상 되어야 하는 것으로 알려져있다.

표토층과 지반층의 속도와 경계면의 깊이를 찾기 위해서는, Source 발파점을 Geophone 수

신기의 측선 끝의 양옆에 위치한 상태로 탐사하여 왕복주시곡선을 얻는다. 자료의 신뢰도를 높이기 위해 Geophone과 Source 발파점을 측선을 따라 옮겨 가면서 증첩된 여러개의 측선 양단 왕복주시 곡선을 얻어 분석하는데, 이러한 방법은 지하에 여러층이 존재하는 복잡한 굴절법 자료를 해석하는데 유용하다. 또한 측선 양단의 Source 발파점에서의 주시곡선이 평행하지 않으면 둘째층 하부에 다른 굴절층이 있음을 의미하며, 각 측선 중간 부분에서 발파를 실시하여 제일 상부층부터 순차적으로 지연 시간을 결정하여 각 층의 두께를 알 수 있다. 본 탐사에서는 상부층(surface layer)과 하부층(base ground)의 속도와 경계면의 깊이를 찾기 위하여 Fig.8(a)와 같은 Geophone Array를 하였고 Fig. 8(b)는 각각 Geophone Array에서 나타난 지진 기록지(seismogram)이다. 이 지진 기록지에서 보여진 시그널의 초동주시를 읽어, Fig. 9에서 보는 바와 같이 주시곡선을 작성한다. 주시곡선의 기울기로부터 상부층과 하부층의 P파의 속도, α_1 , α_2 와 경계면의 깊이 H를 찾았다. 탐사결과는 상부층(surface layer)과 하부층(base ground)의 P파의 속도는 각각 662m/s, 2210m/s이며, 두층간의 경계(boundary) 깊이는 교차거리(X_{cross}) 19m를 대입한 결과, 깊이는 6.97이고 절단 시간(t_c) 20.2ms을 대입한 결과, 7.00m임을 알 수가 있었다. 이러한 사실은 Table. 3을 참조할때 약



(a)



(b)

Fig 8. Geophone array(a) and Seismogram(b) of seismic refraction exploration.

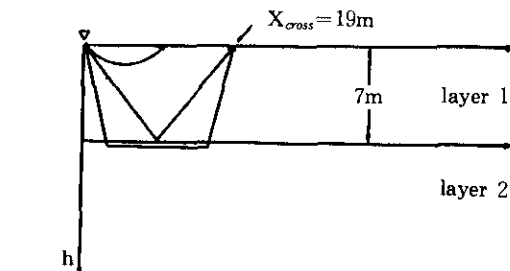
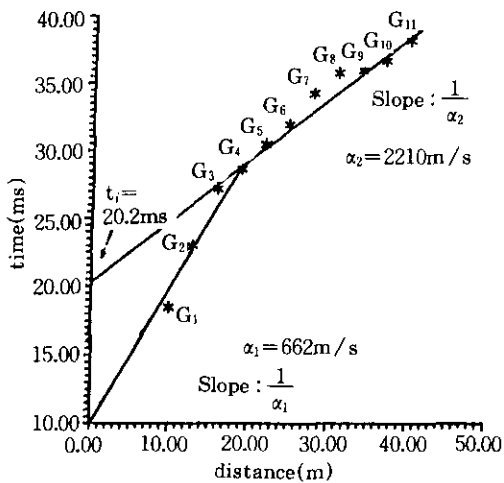


Fig 9. Traveltime curve by seismic refraction method in this study.

7m두께의 표토층과 그하부 지반층은 사질점토성의 지반층으로 추정된다.

4. 지반운동에 대한 지반조건의 영향

4.1 지반 진동의 감쇠이론

지반진동과의 감쇠특성(attenuation)은 지반진동의 서로 다른 진폭, 주파수, 지반에서 파의 함수 상태(saturation condition)에 따라 다르게 나타난다(A. Dowell, 1992).

Attenuation은 다양한 방법으로 측정이 가능한데 만약 낮은 내부 감쇠조건을 가정하면 해는 다음과 같다(1948, Zener. C).

$$\frac{1}{Q} = \tan\phi = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\gamma\beta}{\pi f} = \frac{\gamma}{8.686\pi} \quad (26)$$

$\frac{1}{Q}$: 비손실상수(specific dissipation constant)

$\tan\phi$: 응력파동과 변형률파동 사이의 위상각차 ϕ
(Vssiliou, Salvado and Tittmann, 1984)

δ : 대수감소율(logarithmic decrement)

지수적으로 감소하는 감쇠 자유진동(damped free vibration)의 연속된 진폭의 최대진폭(A_{max})과 최소진폭(A_{min})의 비

$$\delta = \ln \left[\frac{A_{\max}}{A_{\min}} \right]$$

γ : 감쇠상수(attenuation coefficient)

$$A(x, t) = A_0 e^{-\gamma x} e^{i(kx - \omega t)}$$

K_r : 복소 함수치인 파수(wave number) k^* 의 실수부, 즉 $k_r = \text{Re}(k^*)$

$\frac{\Delta f}{f_R}$: 공진 침두주파수대역(resonance peak bandwidth)

f_R : 공진 최대주파수,

Δf : half-power bandwidth

β : S파(전단파)의 속도

각주파수($\omega = 2\pi f$)를 갖고 있는 파의 전파에 의해 매질에 주기적인 응력이 가해지는 경우 비탄성(anelasticity)의 측정은 다음과 같이 주어진다(Aki, Keiiti, 1980).

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (27)$$

여기서 E 는 단위체적당 축적된 최대 변형률 에너지이고, ΔE 는 매 사이클(주기)당 손실되는 변형률 에너지로서 매질이 이상적인 완성 탄성체가 아님으로써 발생하는 파에너지 손실이다.

위의 식(27)은 일정한 값의 주기와 진폭을 가진 응력파가 매질에 투과될 때 직접적으로 사용 가능한 관계식으로서 실험적 측정에 의한 Q 값의 산정에는 보통 다음 두가지 방법이 적용된다(Aki, Keiiti, 1980). 첫째, Temporal(시간적) Q 는 파수(wave number)가 고정된 정상파(standing wave)에서 진폭의 시간적 감쇠(temporal decay)의 측정에 의한 Q 의 값이다. 실제 지진의 Q -value의 측정에 이용된다. 둘째, Spatial(공간적) Q 는 주파수(frequency)가 고정된 진행파(propagation wave)에서의 공간적 감쇠(spatial decay)를 측정하는 것이다. 위의 두가지 경우는 선형 응력-변형 관계를 가정하면 매질에서 진폭 A 는 $E^{\frac{1}{2}}$ 에 비례하므로 다음의 관계식을 얻는다.

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{1}{\pi} \frac{\Delta A}{A} \quad (28)$$

식(28)은 감쇠에 기인한 진폭변동(amplitude fluctuation)을 의미한다.

지반진동감쇠는 두번째 방법에 의하여 측정을 한다. 그러므로 식(29)의 진폭 A 는 거리(x)에 관한 함수이다.

$$\Delta A = (dA/dx)\lambda \quad (29)$$

여기서 λ 는 파장(wavelength)로서 $\lambda = 2\pi\beta/\omega$ 의 관계가 있다.

이때 식(28)은 $dA/dx = -(w/2\beta Q)$ 가 되고 지수적 감쇠식은 다음 식(30)과 같다.

$$A(x) = A_0 e^{-\gamma x} \quad (30)$$

A : 진폭

x : 거리

Q 와 관계된 감쇠상수 γ 는 다음식(31)에 의해 정의된다.

$$\gamma = \frac{w}{2\beta Q} \quad (31)$$

w : $= 2\pi f$

로 표현하고, 식(30)에 자연로그를 취하면

$$\ln A(x) = \ln A_0 - \gamma x \quad (32)$$

가 된다. 이때 γ 를 구하면 Spatial Q 가 다음의 식(33)에 의하여 구해진다.

$$\text{Spatial } Q = \frac{\pi f}{\beta \gamma} \quad (33)$$

4.2 감쇠특성 분석

본 연구의 탐사지인 한양대학교 안산캠퍼스의 지반 감쇠특성을 분석하기 위하여 Source Energy에 의해 발생된 파동(wave motion)이 매질을 통과하면서 지반 고유의 감쇠 상수특성에 의해 나타나는 진폭(amplitude)을 거리에 따라 측정하였다. 측정에 사용된 장비는 디지털 Seismograph(DR-2000)와 Oklahoma Tulsa의 Betsy Seisgun Inc. 제품으로 육, 해상검용의 강력한 탄성과 에너지원(source en-

ergy)인 Seisgun을 사용하였다. 각각 45m, 55m, 60m, 65m, 70m, 97m씩 간격을 두고 측정하였다. 디지털 Seismograph(DR-2000)는 Sampling Duration Time은 50sec, 12.5Hz의 Low-pass Filtering, 10 Gain, Gain Ratio는 9dB로 사용하였다. 3채널(발생된 에너지원에 대하여 각각 수직방향, 종방향, 횡방향 즉 z-성분(vertical), x-성분(longitudinal), y-성분(transverse))의 감쇠상수(attenuation coefficient) γ 는 각각 측정된 자료들은 주파수를 4Hz로 고정하고 거리에 따른 진폭을 계산하였다. 본 연구에서 측정된 데이터중에서 45m에서 측정된 Z-성분에 데이터는 Sensor(seismometer) 근처에 사람의 움직임에 의해서 발생된 수직성분의 잡음때문에 분석시 제외하였다. Fig. 10~11는 아래 식(34)의 1차최적곡선(first order fitting curve)식에 의해 산출되었다(P.G. Guest, 1961).

$$\gamma = \frac{n\sum x_i \sum y_i - \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (34)$$

$$y = y_0 + \gamma x$$

$$y_0 = \bar{y} - \gamma \bar{x} \quad (\bar{x}, \bar{y} : \text{mean})$$

$$y : \ln A$$

$$x : \text{distance}$$

$$y_0 : \ln A_0$$

$$\gamma : \text{slope}$$

Fig.10~11에서 보는 바와 같이 거리에 따른 감쇠상수 γ (spatial)는 상대적인 진폭비의 계산에 의해서 수직방향은 0.0137, 종방향(longitudinal)는 0.0025, 횡방향(transverse)는 0.0290이다.

탐사에 의해서 얻어진 깊이 H는 7m이고, P파의 속도 α_1, α_2 는 662m/s, 2210m/s를 찾아냈고, 지반 탁월주기 관측값은 0.18~0.23이므로 이 결과를 식(1)에 대입하면 표토층의 S파의 속도, β_1 는 121m/s~155m/s의 값을 얻을 수 있다. P파와 S파의 속도와 포아송비의 관계식 $\alpha/\beta = [(1-\nu)/(0.5-\nu)]^{1/2}$ 로부터 측정된 α/β

를 대입하여 표토층의 포아송비 ν 를 추정하면 47~0.48인데 이는 표토층이 포화도가 높은 저속도 토사지반임을 가리킨다. 그러므로 Spatial Q_s 를 $\pi f/\gamma\beta$ 를 이용하여 산출한 결과 x, y, z방향에 대하여 각각 $Q_s(z)=5.913\sim 7.575$, $Q_s(x)=32.371\sim 41.452$, $Q_s(y)=2.794\sim 3.579$ 를 얻었다.

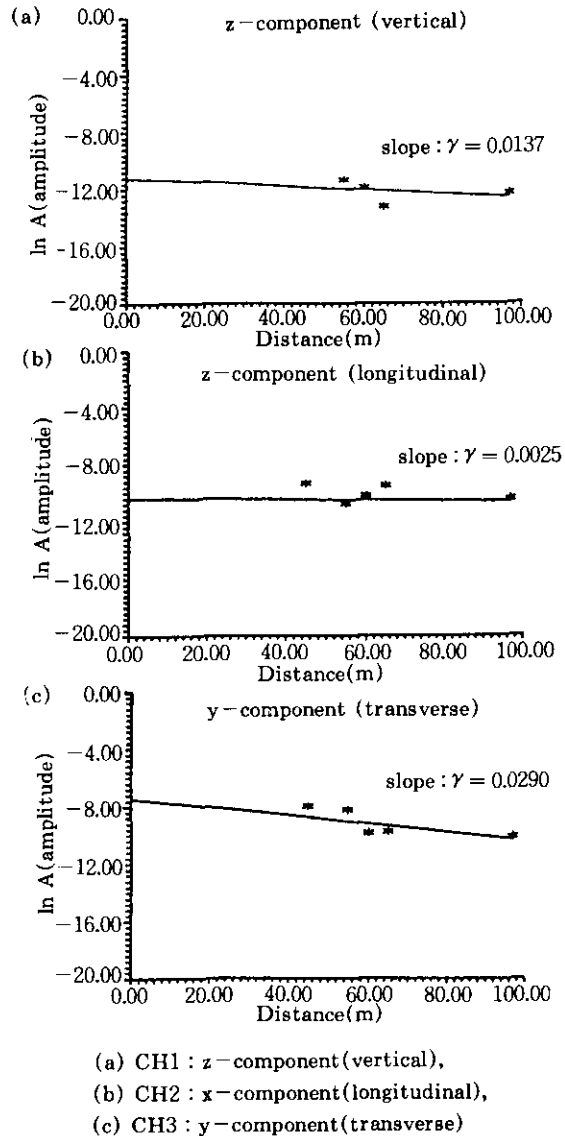
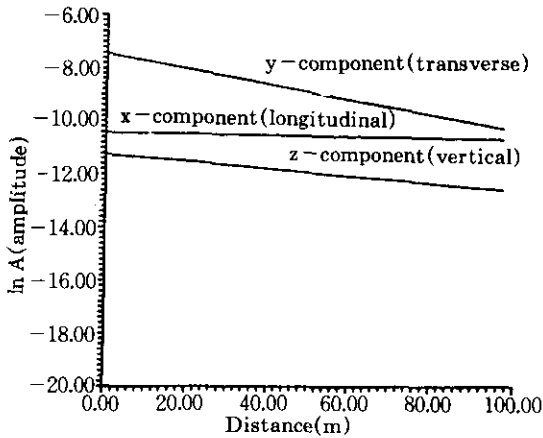


Fig 10. Attenuation coefficient γ for seismic wave with distance : 4Hz fixed,



CH1 : z - component (vertical), $\gamma=0.0137$
 CH2 : x - component (longitudinal), $\gamma=0.0025$
 CH3 : y - component (transverse) $\gamma=0.0290$

Fig 11. Attenuation coefficient γ for seismic wave with distance : 4Hz fixed,

5. 결 론

1) 본 연구는 평상시에 끊임없이 진동하고 있는 한양대학교 안산캠퍼스 지반의 미소진동을 분석하여 탁월주기조사와 지반의 구조조사, 그리고 인공에너지원(Seisgun)을 이용한 감쇠특성을 연구함으로써 지진피해예방(내진설계)과 또한, 정밀제품 생산공장의 제품정밀도 향상을 위한 구조물의 damping설계의 기초자료로 제시한다.

2) 조사를 통한 결과를 보면 한양대학교 안산캠퍼스 지반에서 탁월주기는 0.18~0.23sec이고 건물 2층에서 측정결과는 0.26~0.31sec이다. 이 결과는 건물이 지반에 비해 주기가 길고 그에 따른 건물 진동의 변위도 크다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 지반과 건물에서의 탁월주기 측정자료는 구조물의 damping설계의 기초자료가 되어진다.

3) 본 연구조사에서는 상부층(표토층)의 압축파, P파의 속도는 662m/s, 하부층(지반층)은 2210m/s가 산출되었고, 이론적 계산에 의

해 전단파, S파의 속도는 121m/s~155m/s를 얻을 수 있었다. 표토층은 약 7m의 두께의 포화도가 높은 토사와 그 하부는 사질점토성의 지반층임을 추정할 수가 있었다.

4) 감쇠상수 γ 는 거리에 따른 진폭비의 계산에 의해서 수직성분(vertical)은 0.0137, 종방향성분(longitudinal)는 0.0025, 횡방향성분(transverse)는 0.0290이고, spatial Q_s 의 값은 각각 5.913~7.575, 32.371~41.452, 2.794~3.579의 값이 산출되었다. 이 결과는 종방향성분이 다른 두성분보다 감쇠경향이 훨씬 낮고, 이는 종방향성분이 매질의 영향을 덜 받고 전파됨을 알 수 있다. 반면에 수직성분과 횡방향성분은 감쇠가 잘 일어난다. 이 경우에는 구조물 설계시 세 성분중 종방향성분에 대한 내진설계가 고려되어야 할 것이다. 그리고 대체로 지진파 관측시의 Q_s 값(200~1000)과 비교해서 작은 Q_s 값은 탐사 지역이 얇은 두께(7m)의 매립형태의 아주 연약한 표토층으로 높은 감쇠특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

5) 앞으로 본 연구의 분석방법에 의한 자료와 함께 실제 지진이 발생했을 때 강동가속도계(strong motion accelerograph)를 이용한 최대지반가속도(peak ground acceleration), 최대지반속도(peak ground velocity), 최대지반변위(peak ground displacement)에 대한 지진응답 스펙트럼(earthquake response spectrum) 분석 연구가 이루어진다면 첨단 구조물 등의 건설시 내진설계 기초자료가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육부 기초과학 육성 연구비(BSRI-94-5420)의 지원과 한양 대학교 정책연구비 지원의 보조를 받아 이루어졌다. 이들 지원 기관에 깊은 감사를 말하지 않을 수 없다. 또한 본 논문을 읽고 중요한 부분을 많이 지적해주신 심사 위원님들에게 진심으로 고마움을 전하고 싶다.

참 고 문 헌

1. 김상조(1992), 1978~1992 지진관측보고서, 기상청.
2. 김소구(1987), 지진학, 박영사, pp.184~212.
3. 김소구역(1993), 지하수 탐사법, 문운당, pp. 49~55.
4. 민경덕(1993), 응용지구물리학, 우성문화사, pp. 441~699.
5. 양성진(1979), "탄성과 굴절법 해석", 대한 광산지질학회지 제16권, pp.1~9.
6. Aki. Keiiti(1980), Quantitative Seismology Theory and Methods volume 1, Freeman Company, pp.167~184.
7. Chistine A. Dowell(1992), "Seismic Noise in North Central North Carolina", Bull. Seism. Soc. of America, Vol. 82, No.4, pp.1889~1909.
8. Dobrin, M. B.(1976), Introduction to Geophysical Prospecting, Mc-Graw-Hill, New York, pp. 630.
9. Guest, P. G.(1961), Numerical Methods of Curve Fitting, Cambridge Univerity Press, New York, pp.18~27.
10. G. W. Housner(1970), Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc. Englewood Clifts, N. J., pp.75~106.
11. Indra N. Gupta, Keith L.McLaughlin(1987), "Attenuation of Groun Motion in the Eastern United States", Bull. Seism. Soc. of America, Vol.77, No.2, pp.366~383.
12. John J. Dwyer, Robert B. Herrmann, & Ottow. Nuttli(1983), "Spatial Attenuation of the Lg Wave in the Central", Bull. Seism. Soc. of America., Vol. 73, No.3, pp.781~796, 1983.
13. J.Solnes(1974), Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Noordhoff, Netherlands, pp.118.
14. Kenneth H. Waters(1981), Reflection Seismology: A Tool for Energy Resource Exploration, A Wiley-Interscience Pub, pp.1~16.
15. Kurihara, J. S.(1960), "굴절법 주시곡선 선정법 및 영주시에 의한 굴절주시의 해석법", 일본구주 광산 학회지, Vol.28, No.4, pp.144~168.
16. M.B.Dobrin(1976), Introduction to Geophysical Prospecting, Mc-Grow-Hill, New York pp.39~57.
17. Mario Vssiliou, Carlos A. Salvado, & Bernhard R. Tittmann(1984), Seismic Attenuation.: CRC Handbok of Physical Properties of Rock, CRC Press, Inc., Boca Raton Florida, Vol.3, pp.269~328.
18. Palmer, D.(1981), "An Introduction to the Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation", Geophysics, Vol. 46, pp.1508~1518.
19. Robert B. Herrmann(1980), "Q Estimates using the Coda of Local Earthquakes", Bull. Seism. Soc. Amer., Vol.70, No.2, pp.447~468.
20. S. Okamoto(1984), Introduction to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press, pp.99~143.
21. S. Oohara(1979), Earthquake engineering, Morikitassuppan, Tokyo, Japan, pp.206.
22. W. T. Born(1941), "The Attenuation Constant of Earth Materials", Geophysics, Vol.6, pp.132~148.

(접수일자 1995. 1.20)