

# 미세진동 측정을 통한 지반응답특성 평가

## Estimation of Ground Response Characteristics by Microtremor

조성호\*      이일화\*\*      고학송\*\*\*  
Joh sang-ho      Lee il-wha      Ko hak-song

### ABSTRACT

The purpose of the study is to evaluate the usage of microtremor in estimation of subsurface structure and ground response to ground motion. Ground motion amplification based on site condition of an area is an important parameter for dynamic design. Microtremor cover the characteristics in a low frequency range, while forced vibrations cover them in a high-frequency range. Microtremor consider ground characteristics and offer transfer function in area. To determine the dominant frequency, the passive microtremor measurement is performed and to determine the transfer function of test site, active microtremor measurement is performed. Microtremor measurement in the site is compared with theoretical transfer function calculated from the known structures.

## 1. 서론

본 논문에서는 철도 노반면에서 미진동(microtremor) 측정을 이용하여 지반응답특성과 노반면과 기반암 사이의 전달함수(transfer function)를 구하고자 하였다. 구해진 전달 함수는 열차진동, 지진하중 등과 같이 충격하중이 노반에 작용 되었을 때, 보다 정확하게 지반의 응답을 평가하기 위한 필요한 요소이다. 미진동은 길보기에는 불규칙적인 잡음처럼 보이지만 자세히 분석해보면 특정 지역의 고유 타원주파수를 보이며 그 지역의 진동특성을 반영하고 있다. 미진동 측정은 주변의 사소한 진동에 영향을 받기 때문에 다소 신뢰도가 떨어지지만 간편하고 경제성이 있기 때문에 지반조사와 함께 유용하게 쓰인다. 미진동 측정은 크게 두 가지로 나누어 수동 미진동(passive microtremor)과 강제 미진동(active microtremor)으로 나눌 수 있는데, 수동미진동 측정은 노반면에 3방향 감진기를 설치하여 각 방향으로 미진동에 대한 지배적인 진동의 크기와 주파수 성분을 측정하고, 강제 미진동 측정은 실험대상인 노반면에 입력진동과 그에 상응하는 노반의 응답을 측정함으로써 노반의 특성을 파악하였다.

## 2. 미진동의 측정

### 2.1 수동미진동(passive microtremor)

수동 측정보다 정확하는 편광부지에 어떠한 수동미진동이 존재하는지를 파악하기 위하여, 일정위치에 3방향 감진기를 고정시키고 장시간 동안 진동측정을 수행한다. 수동미진동은 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 것으로 교통진동, 바람에 의한 진동, 조석간만 차에 의한 파랑진동 등 크지는 않지만 지속적으로 작용하는 미소진동을 말한다. 이러한 미소진동은 지반에걸을 장거리 전파되면서, 지반에걸의 동적특성에 따라 감쇠되기도 하고 증폭되기도 한다.

### 2.2 강제미진동(active microtremor)

기부 진동원에 대한 지반의 기동특성을 평가하기 위해서는 탄성과 탐사와 일련의 실내실험에 의해 특성을 측정할 후, 이를 바탕으로 파동전파 해석을 통하여 지반의 동적기동 특성을 평가할 수 있다.

\* 중앙대학교 건설대학 토목공학과 부교수, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 레도모토측연구본부 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 레도모토측연구본부 연구원, 정회원

진동에 대한 지반의 응답을 구하기 위한 파동전파해석은 복잡한 문제를 단순화하기 위하여 많은 조건들을 가정하고 있으며, 특히 지반의 불균질성 및 비선형, 해석모델의 경계조건 등 파동전파 해석에 고려할 수 없는 다양한 조건들로 인하여 수치해석에 의한 파동전파해석 결과가 실제 지반의 동적거동과 상이하게 평가될 수 있다. 따라서 본 과제에서는 지하철 진동, 지진 하중 등과 같은 동적하중이 지반에 작용 되었을 때 보다 정확하게 지반의 응답을 평가하기 위하여 강제 미진동 측정에 의한 지반의 전달함수를 측정하고자 하였다.

### 3. 미진동 현장실험

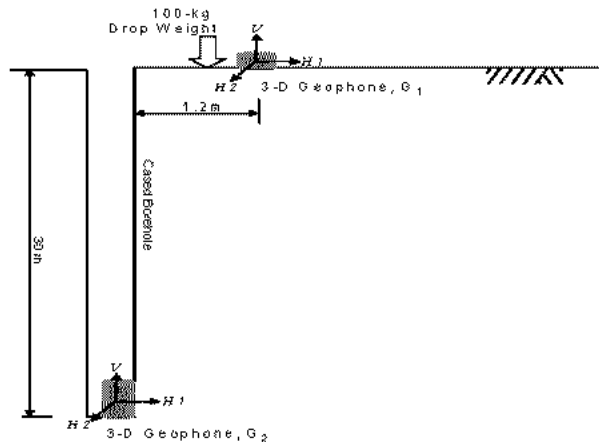


그림 1. 미진동 측정 개요도

현장시험에서는 지표면과 시추공 내의 일정 심도에 3D속도계를 설치하여 각 방향에 대한 지반의 입자시간이력과 속도스펙트럼을 상시미진동과 강제미진동에 대하여 측정하였다. 강제미진동측정시 가진 원은 충분한 에너지를 얻기 위하여 100kg 중량의 drop weight를 사용하였다. 측정지반의 전달함수는 지표면의 입자속도 스펙트럼과 시추공 내의 입자속도 스펙트럼의 비를 이용하여 계산하였다. 현장시험에서의 상시미동측정 결과는 다소 제한적으로 적용할 필요가 있다. 즉, 상시미동 측정시 지반매질의 전달변형률은 미소변형률( $10^{-5}$  %)이므로, 이 대역에서 측정되는 지반매질의 특성은 지반의 미소변형률 특성이라고 할 수 있다.

### 4. 미진동 실험 결과

지반의 상시미진동을 측정하기 위하여 사용된 감진기는 속도변환기인 geophone으로서 진동 주파수에 따라 출력되는 전압의 크기가 달라지는 특성을 가지고 있다. 예를 들어, 주파수가 1Hz인 입력진동과 주파수가 10Hz인 입력진동에 대하여 그 진동크기를 동일하게 하여 geophone에 가해 주었을 때, 측정된 진동의 크기는 입력진동의 주파수에 따라서 다르게 된다. 본 연구에서 사용한 geophone의 주파수 특성은 그림 2에 도시된 바와 같다. 그림 2의 geophone은 공진주파수가 4.5Hz 이어서 입력진동의 주파수가 4.5Hz 일 때 가장 큰 응답을 주게 되며, 그 이외의 주파수에 있어서는 그보다 작은 응답을 주게 된다. 따라서, geophone으로 측정된 신호는 반드시 그 geophone의 주파수 특성에 관한 보정을 하여야 실제 지반 진동의 크기를 알 수 있게 된다. 본 연구에서도 geophone 주파수 특성 보정곡선을 사용하여 현장에서 측정된 진동을 보정하였다.

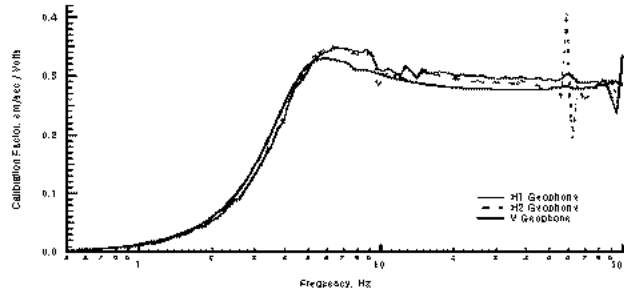
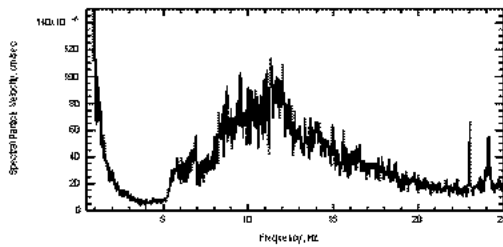


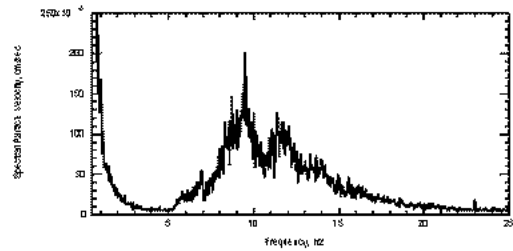
그림 2. Geophone의 주파수특성 보정곡선

#### 4.1 지표면에서의 상시미진동 측정

교통진동에 의한 간섭을 크게 받지 않는 구간에서 수직방향과, 두 개의 직교하는 수평방향에 대해 상시 미진동을 측정하였고, 그 결과를 그림 3에 주파수 영역으로 나타내었다. 본 측정부지의 경우 수직방향과 두 개의 수평방향 진동의 주파수 특성을 살펴보면, 모든 방향의 진동에 약 9~12 Hz의 성분이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a) 수직성분



(b) 수평성분

그림 3. 지표면에서 3방향 입자속도변환기에 의한 상시 미진동 측정

#### 4.2 지표면과 시추공 내에서의 전달함수 측정(수직성분 입자속도)

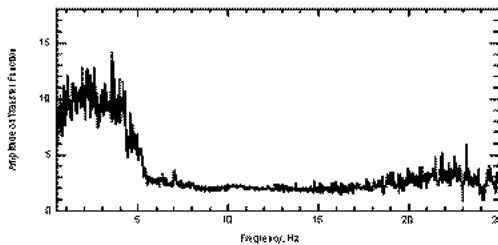


그림 4. 상시미진동 측정으로 결정한 전달함수

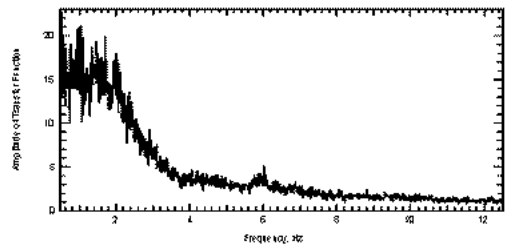


그림 5. 강제진동 측정으로부터 결정한 전달함수

측정대상 부지의 지반응답 특성을 알기 위하여 전달함수를 측정하였다. 전달함수의 측정은 두 가지 방법으로 수행되었다. 첫 번째는 지표면과 시추공 내에서 상시미진동을 측정하여 그 측정결과로부터 전달함수를 계산하였고, 두 번째는 지표면에서 강제진동을 가하여 이로 인하여 야기된 지반의 진동을 지표면과 시추공 내에서 측정함으로써 전달함수를 계산할 수 있었다. 그림 4와 5는 상시미진동과 강

제진동으로부터 결정된 전달함수이다. 상시미진동과 강제진동으로 결정된 전달함수는 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 3~4 Hz 이하의 주파수를 가지고 있는 진동에 대해서는 큰 증폭효과를 보이는 반면, 3~4 Hz 이상의 주파수에 대해서는 증폭효과가 미미하거나 거의 없음을 알 수 있다.

### 5. 이론응답해석

상시미진동 측정 결과에 대한 검토를 위하여 이론해와의 비교를 수행하였다. 이론해는 선형탄성균질의 2층 반무한체로 가정하여 계산하였다. 상부지반층의 두께는 시추조사 및 탄성파조사 결과를 바탕으로 계산하였다. 그림 6은 노반면부터 기반암까지의 선형탄성구간에서의 주파수 및 댐핑에 대한 계산 결과를 나타낸 그림으로서 고유주파수의 경우 현장측정결과와 유사한 값을 나타내고 있다.

$$F = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (\xi kH)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\omega H / V_s) + [\xi(\omega H / V_s)]^2}} \quad (\text{식 1})$$

여기서 F: Natural frequency

$\xi$ : Damping factor

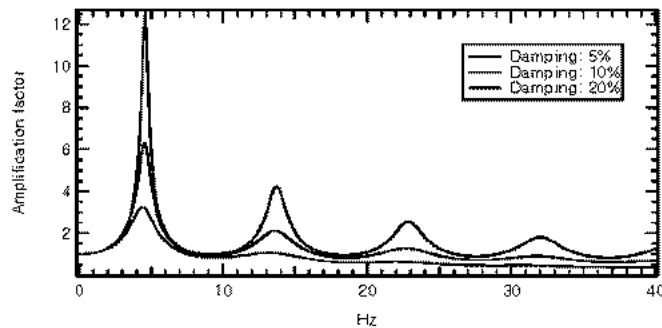


그림 6 댐핑 및 주파수별 이론지반응답곡선

### 5. 결론

지반의 미진동 특성을 이용하여 지반의 동적특성을 파악하기 위하여 상시미진동과 강제미진동 시험을 수행하였다. 상시미진동 측정은 지표면과 시추공 내에서 이루어졌으며, 해당 부지가 가지고 있는 상시 미진동 특성을 측정하였고, 강제미진동 측정에서는 지표면과 시추공 내의 측정자료를 이용하여 부지의 전달함수를 구하였다. 측정 결과, 부지의 전달함수는 2~5 Hz 이하의 진동에 대해서는 큰 증폭효과를 보이고 있는 반면, 그보다 높은 주파수에 대해서는 증폭효과가 미미한 것으로 나타났다. 그리고 상시미진동 측정에서 구한 고유주파수는 실제 시추 결과를 바탕으로 한 이론해석 결과와도 유사한 결과를 나타내었다. 미진동을 이용한 지반응답해석의 적용은 제한적이지만, 그 적용성을 확인하였으며, 다른 해석법과 같이 수행한다면 보다 신뢰성 높은 해석 결과를 제공할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Kohji Tokimatsu, Kenichiro Shinzawa, Shinichi Kuwayama(1992), Use of short-period Microtremors for shear velocity profiling, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.118, No.10.
2. Okada, H., Matsushima, T.(1986), "Estimation of underground structures down to a depth more than several hundreds of meters using long-period microtremors", Proc. of the 7th Japan Earthquake engineering Symp., Science Council of Japan, 211-216