

동하중재하시 지반진동에 관한 실험적 연구 An Experimental Study of Ground Motion under the Dynamic Load

김문겸* 전중균** 권형오*** 이필규****
Kim, Moon Kyum Chun, Chong Kyun Kwon, Hyung Oh Lee, Phil Kyu

Abstract

Recently, the ground motion occurred by vehicles or trains has been recognized one of the major factors of damage of structures nearby the motion source. To isolate the environments from ground motions, it is necessary to understand the wave propagation in half spaces. Especially, Rayleigh wave is the primary concern because it transmits a major portion of the total source energy and decays the energy more slowly with response to distance than the other waves.

In this study, the preliminary data (wave length and damping effect) to design the isolating system are obtained. For this, a field dynamic test is performed, using the exciter which can generate the 100kN vertical cyclic load in the range of 1-60 Hz is used. The fifteen accelerometers to measure the ground response are set up in 3 radial direction at intervals of 10 meters in each row. The wave lengths are calculated using the distance and the phase between the measuring points. The damping effects of the Rayleigh-wave are also observed from the experiments.

1. 서 론

도로 및 철로면에서 차량 또는 열차에 의해 발생하는 지반진동문제는 인근 구조물의 피해뿐 만 아니라 생활수준의 향상에 따라 주변생활환경을 악화시키는 주요한 요인으로 인식되고 있는 추세이다. 이러한 지반진동문제는 주로 표면을 따라 전달되는 Rayleigh 파의 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있으며, 따라서 이 문제들을 효과적으로 대처하기 위해서는 Rayleigh 파의 지반전파특성을 파악하는 것이 가장 선행되어야 할 것이다.

본 연구는 반무한 지반체를 대상으로 실제 실험을 수행함으로써 진동차단 방진구의 최적화설계에 필요한 기초자료(파의 파장 및 감쇠특성)를 수집하는데 그 목적이 있다. 실제의 진동원을 모형화하기 위해 주파수 범위는 1~60 Hz이고 15Hz에서 최대 100kN의 힘을 발생시킬 수 있는 지반진동발생기를 제작하여 사용하였다. 진동발생기로부터 3가지 방사방향으로 40m까지 간격 10m의 위치마다 가속도계를 설치하여 지반진동을 각 측정위치에서 동시에 측정한다. 각 측정위치에 대한 파의 위상차와 전파거리로부터 이에 상응하는 Rayleigh 파의 파장을 산정하고, 진동원으로부터의 거리에 따른 감쇠효과를 파악하였다.

* 연세대학교 교수, 정회원
** 선문대학교 조교수
*** 유니슨기술연구소 선임연구원
**** 연세대학교 박사과정

2. 지반진동전파 실험

지반진동 실험은 선문대학교(충남 천안 소재) 부지에서 수행하였으며 시험 부지의 지반조건은 주어진 표 1과 같다. 지반은 지표면에서 15m까지는 실트모래질 지반이고 그 아래는 풍화암층으로서 전체 지반은 이 두 개의 층으로 이루어져 있다.

표 1. 시험지반의 물성치

지층	물성	흙의 종류
0~15m	$\rho = 1.6 \text{ ton/m}^3$ $\nu = 0.3$ $E = 75 \text{ MPa}$ $G = 28.8 \text{ MPa}$	실트모래질
15m 이하	$\rho = 2.0 \text{ ton/m}^3$ $\nu = 0.3$ $E = 200 \text{ MPa}$ $G = 76.9 \text{ MPa}$	풍화암

2.1 실험장비의 제원

지반진동발생기는 질량이 100kg인 두 개의 모터를 서로 반대 방향으로 회전하도록 하여 횡방향 불평형력은 상쇠되고, 수직하중만 작용하도록 설계 제작되었다. 가진력의 주파수는 전원주파수를 변경함에 따라 1Hz~60Hz 까지 변경할 수 있다. 불평형력의 크기는 편심질량의 위치에 따라 조절 가능하며, 15Hz에서 최대 100kN의 힘을 발생시킬 수 있다. 진동발생기의 제원 및 형상은 표 2와 그림 1에 나타내었다.

표 2. 정현파 진동발생기의 제원

항 목	내 용
Motor	220V-3상, 3.7 kW-18A 2개, 900rpm-8극
Inverter	입력: 220V-3상 50/60 Hz 출력: 220V-3상 0.5-360 Hz
Exciting frequency	1~60Hz
Dimension	1600×1938×1730 mm
Weight	약 2ton
Exciting force	15 Hz에서 약 100kN

2.2 Rayleigh 파의 파장측정 및 결과 분석

현장에서 Rayleigh 파의 지반 전파 실험을 위해 그림 2 및 그림 3에 나타낸 바와 같이 지반에 직경 3.3m, 높이 0.5m, 무게 10tonf의 원통형 철근 콘크리트 기초 위에 진동발생기를 설치하고 주파수 8.4 Hz로 진동발생기를 작동시켰다. 진동 측정 위치는 진동발생기로부터 최대 40m 까지 10m 간격으로, 각 위치에 지반진동센서를 3개의 방사방향으로 설치하였다.

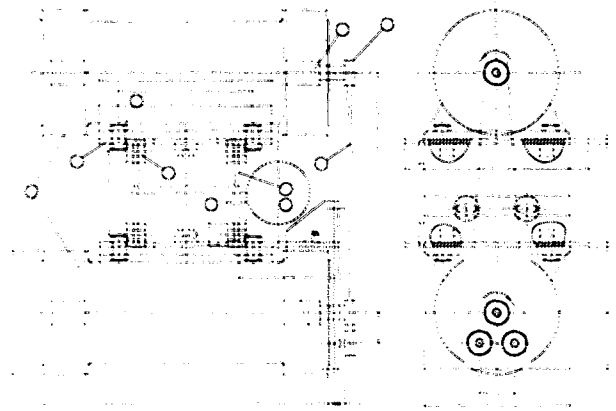


그림 1 정현파 진동발생기

진동발생기에 의해 발생한 지반진동은 진동가속도 센서를 사용하여 계측하고 각각 계측된 신호는 앰프에 의해 증폭된 후 DAT Tape Recorder에 기록된다. 기록된 신호를 FFT Signal Analyzer를 이용하여 시간영역과 주파수 영역에서의 신호 분석을 수행하여 각 측정위치에서의 진동가속도와 파장을 구하였다.

두 측정위치으로부터 얻어진 시간영역에서의 신호를 FFT Analyzer에 의해 크로스 스펙트럼 (G_{XY})을 구한다. 두 측정위치사이의 파 도달시간은 식(1)에 의해 얻어지는 주파수별 위상차 $\phi(f)$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 각주파수별로 구할 수 있다.

$$\phi(f) = \arctan \left[\frac{Im(G_{XY})}{Re(G_{XY})} \right] \quad (1)$$

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{2\pi f} \quad (2)$$

따라서 주파수가 f 인 파의 파속(V_R) 및 파장(λ_R)은 다음 식(3), 식(4)과 같이 구할 수 있다.

$$V_R = \frac{\text{측정위치 사이의 거리}}{t(f)} \quad (3)$$

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f} \quad (4)$$

그림 4 및 그림 5는 진동발생기에서 발생하는 동하중과 진동발생기로부터 40m 떨어진 측정위치 R5에서의 지반 진동값을 시간영역과 주파수 영역에서 도시한 것이다. 주파수 8.4 Hz에서 동하중의 크기는 5.6kN(RMS), 기초에서의 진동값은 0.32m/sec²(RMS), 진동원으로부터 40m 떨어진 지점의 지반진동값은 0.006 m/sec²(RMS)으로 측정되었다.

진동발생기를 사용하여 주파수 8.4Hz, 5.6kN 의 동하중이 원통형 기초에 작용하는 경우에, 지반에서 세 가지 방사방향에 대한 거리별 최대진동가속도응답은 그림 6에 나타난 바와 같다. 그림에서 황색은 진동원으로부터의 거리를 나타내며, 종색은 각 거리별 위치에서 주파수 8.4 Hz에서의 RMS 지반 진동 가속도값을 나타낸다. 굵은 실선은 진동발생기로부터 10m 위치의 지반진동값을

평균한 값에 대한 이론적인 거리감쇠($r^{-0.5}$)현상을 도식한 것이다. 거리에 따른 실제 지반진동 감쇠량은 이론적인 감쇠량보다 다소 크게 나타났으며, 이는 지반의 재료감쇠와 파의 간섭에 기인한 것으로 사료된다. Rayleigh 파의 파장은 세 가지 방사방향에 대해 주파수 8.4에서 측정위치 사이의 위상차로부터 구하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 실험장소에 대한 주파수 8.4 Hz에서 3 가지 방사방향에 파장은 35-41m 범위로 유사한 값을 나타내었다. 이를 통해 파의 전파가 비교적 균질함을 알 수 있었다.

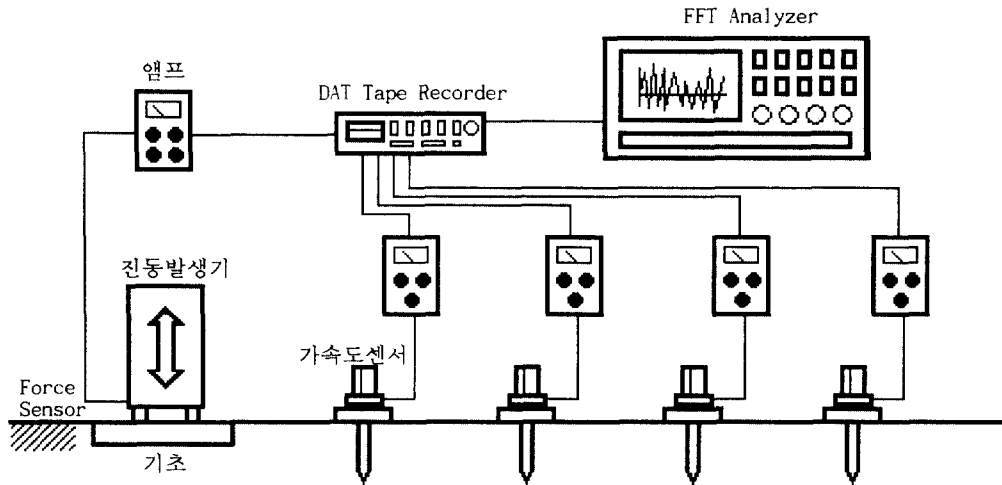


그림 2 실험장비의 구성

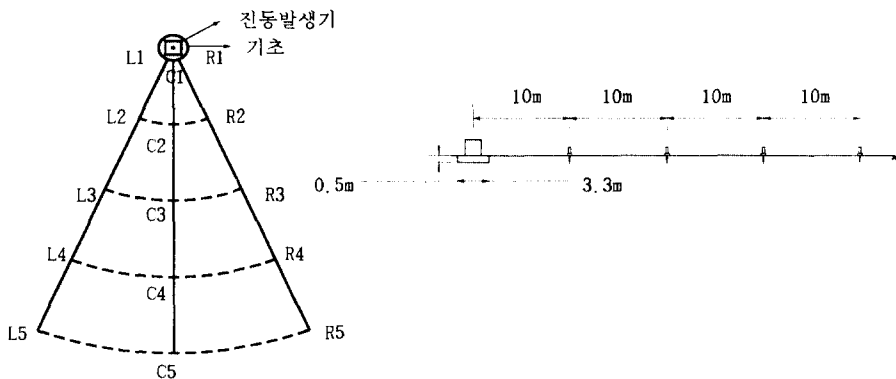
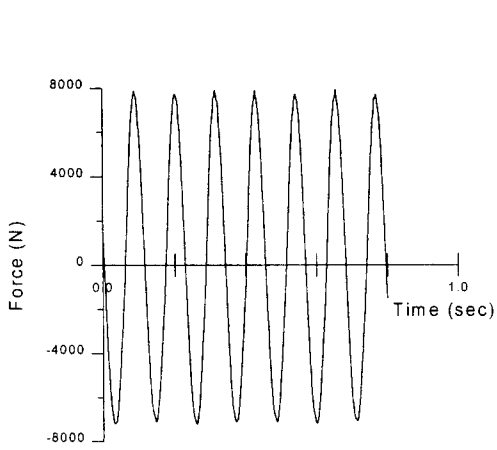
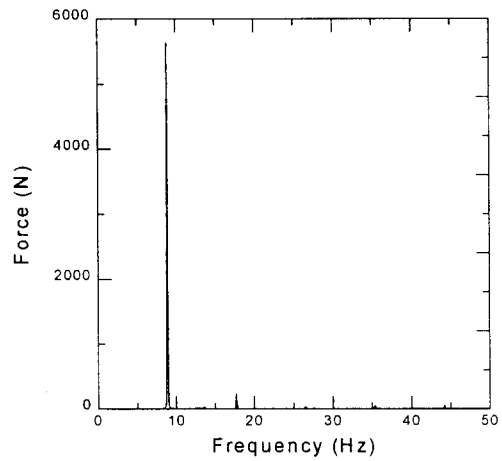


그림 3 측정위치 배치도

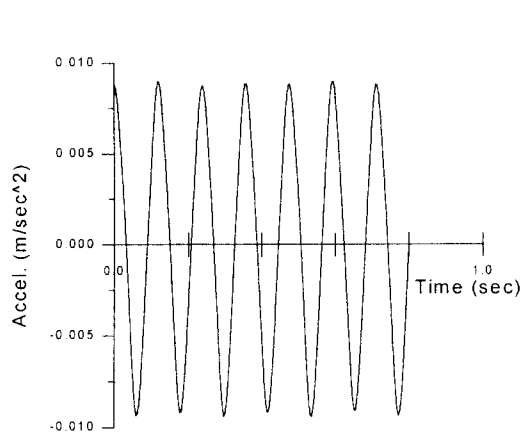


(a) 시간영역

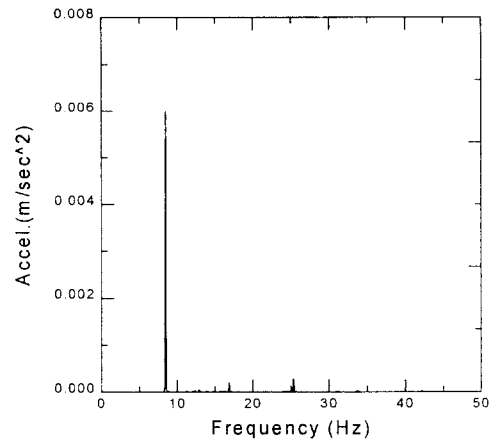


(b) 주파수영역

그림 4 진동발생기의 동하중



(a) 시간영역



(b) 주파수영역

그림 5 측정위치 R5에서의 지반진동

표2. Rayleigh 파의 파장

측정위치	위상차 (π radians)	도달시간 (sec)	거리 (m)	파속 (m/sec)	파장 (m)
R ₄ - R ₅	0.53	0.032	10	312.5	37.2
C ₄ - C ₅	0.48	0.029	10	344.8	41.0
L ₄ - L ₅	0.57	0.034	10	294.1	35.0

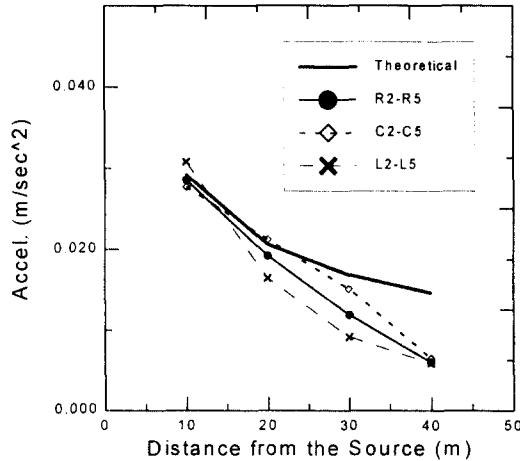


그림 6 진동원으로부터의 지반의 거리별 가속도응답

3. 결론

진동차단 방진구의 최적화설계에 필요한 기초자료를 수집하기 위해 Rayleigh 파의 지반전파특성과 감쇠특성에 대한 진동실험을 수행하였다. 실험은 진동발생기를 단일주파수 8.4Hz로 작동시키고, 진동발생기로부터 3가지 방사방향으로 40m까지 간격 10m의 위치마다 가속도계를 설치하여 지반진동을 각 측정위치에서 동시에 측정하였다.

각 측정위치에 대한 파의 위상차와 전파거리로부터 산정된 Rayleigh 파의 파장은 35~41m로 측정되었고, 이로부터 실험부지의 지반에 대한 파의 전파특성은 비교적 균질하다고 판단할 수 있다. 거리에 따른 실제 지반진동 감쇠량은 이론적인 감쇠량보다 다소 크게 나타났으나, 이는 지반의 재료감쇠와 파의 간섭에 기인한 것으로 사료된다. 향후 진동차단방진벽의 효과적인 설계에 반영될 수 있는 기초자료를 확보하기 위하여, 주파수별 지반전파 특성에 대한 실험이 수행될 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 96년도 건설기술연구개발사업의 연구비로 지원을 받아 수행되었으므로 본 연구를 가능케 한 당국에 깊은 감사를 드립니다.

5. 참고문헌

1. Richart, F.E., Hall, J.R., and Woods, R.D.(1970), "Vibrations of Soils and Foundations," Prentice-Hall.
2. Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A., and Rosset J.M.(1994), "Characterization of Geotechnical Sites By SASW Method," ISSMFE Technical Committee #10, pp.15-25.
3. Das, B.M.(1993), "Principles of Soil Dynamics," PWS-KENT Publishing Company, Boston.
4. Barken, D.D.(1962), "Dynamics of Bases and Foundations," McGraw-Hill Book Co.
5. McNeill, R.L., Margason, B.E., and Babcock, F.M. (1965), "The Role of Soil Dynamics in the Design of Stable Test Pads," Guidance and Control Conference, Minneapolis, Minn., pp.16-18.