

다양한 지반진동의 신뢰성 있는 계측 및 감쇠특성에 대한 연구

Studies on the Reliable Vibration Measurement and Attenuation Characteristics of Various Ground Vibrations

김동수¹⁾, Dong-Soo Kim, 이진선²⁾, Jin-Sun Lee

¹⁾ 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

²⁾ 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Ph. D. Student, Dept of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

SYNOPSIS : Vibration induced by traffic loading and construction activities often cause damages to adjacent structures and/or complaints to neighbors. In order to solve the vibration related problems, reliable vibration measurement technique, vibration source characterization, and attenuation characteristics of various vibrations were investigated in this paper. The individual geophones were calibrated and the 3-component geophone was developed for in-depth vibration and three dimensional particle motion measurements. Various vibrations induced by train loading, blasting, dynamic compaction, and pile driving were measured and characterized in detail.

KEYWORDS : Ground vibration, Attenuation characteristics, Calibration, Vibration monitoring

1. 서론

지반진동으로 야기된 문제를 해결하기 위하여 올바른 진동 계측 기술의 개발이 필수적이다. 그러나 국내에서는 진동 감지기의 주파수 특성 및 검증(calibration)기술, 신호처리 기술, 감지기와 지반간의 상호작용(coupling)의 영향 등 진동 계측에 중요한 영향을 미치는 요인들에 대한 충분한 이해 없이 형식적 계측만이 무분별하게 이루어져 진동 계측에 착오가 발생할 가능성이 많으며 장기적 진동 관리를 위한 데이터 베이스 형성에 어려움이 있다. 또한 대부분의 계측이 지상에서 이루어져 지중에서는 진동 측정이 불가능한 실정이다.

본 논문에서는 지반진동 측정을 위하여 광범위 하게 사용되어지는 속도계(geophone)의 주파수 특성 및 검증방법에 대하여 기술하였으며, 개개의 검증되어진 속도계를 이용하여 지중에서 3차원 지반진동(연직방향, 종방향, 횡방향)을 계측하기 위한 3방향 진동감지기의 제작, 검증 및 운용 방법에 대하여 설명하였다. 또한 실제 계측되어진 열차진동, 말뚝 향타진동, 발파진동 데이터로부터 여러 지반진동의 주파수 대역 특성 및 감쇠특성에 대해 살펴 보았다.

2. 속도계의 검증 및 3방향 진동측정기의 제작

2.1 속도계의 검증

국내의 진동기준이 대부분 최대입자속도를 기준으로 작성되어 있으므로 진동계측에 속도계가 주로 사용

된다. 그러나 속도계는 종류에 따라 적용가능한 주파수대역이 다르므로 적용 주파수 대역내에 존재하는 진동의 계측에 사용되어야만 하며, 계측에 사용되어지는 개개의 속도계가 어떠한 주파수대역 응답특성을 가지고 있는지를 살펴보는 일 또한 매우 중요하다(Lam, 1989). 속도계의 주파수별 응답특성에 대한 검증하기 위해서는 신호 발생기, 진동대, 속도계, 기준 진동계, 신호 분석기가 필요하다(그림 1).

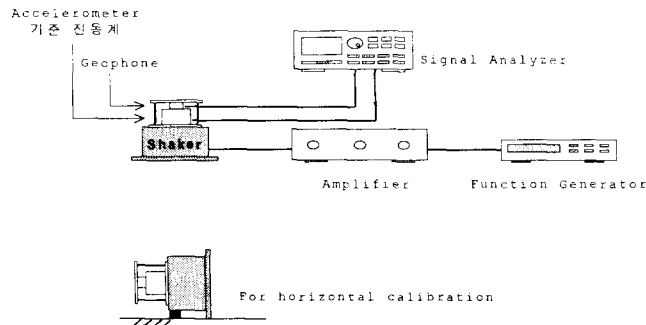


그림 1 속도계 검증 시스템의 개요도

본 논문에서는 속도계의 주파수 응답특성을 검증하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 신호발생기를 이용하여 정현파를 발생시키고 전기신호를 증폭기를 이용하여 증폭시킨 후 진동대에 입력하고, 발생된 진동을 속도계와 기준 가속도계로 계측하여 출력의 절대값과 기준 가속도계의 검증 계수를 이용하여 식 (1)과 같이 속도계의 검증 계수를 구하고, 검증을 실시한 전 주파수 대역에 표시하면 속도계의 주파수별 응답특성을 구할 수 있다.

$$\text{검증계수}(F) = \frac{V_{\text{velocity}}(\text{volt})}{A_{\text{acceleration}}(\text{volt}) / (2\pi f \times a)} \quad (1)$$

여기서, F : 검증에 사용되어진 속도계의 검증 계수 (Volt/(in/sec))

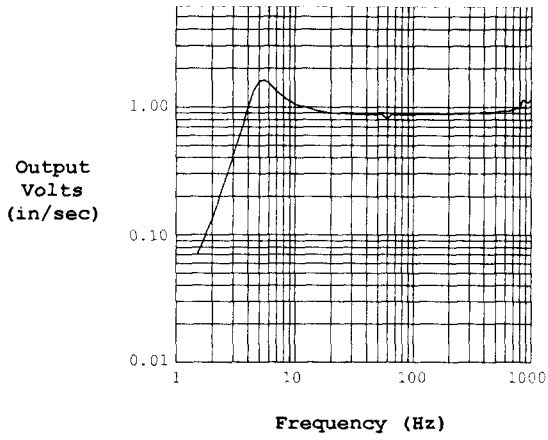
a : 기준 가속도계의 검증 계수 (Volt/(in/sec²))

그림 2a)는 검증된 공진주파수 4.5Hz 속도계의 전형적인 주파수 대역 응답특성이다. 공진 주파수 4.5Hz에서 가장 큰 출력치를 발생하며, 주파수 대역 10~600Hz에서 일정한 출력치를 발생함을 알 수 있다. 또한 60Hz부근에서의 응답특성의 변화는 교류 전원으로부터 발생하는 것으로 판단된다.

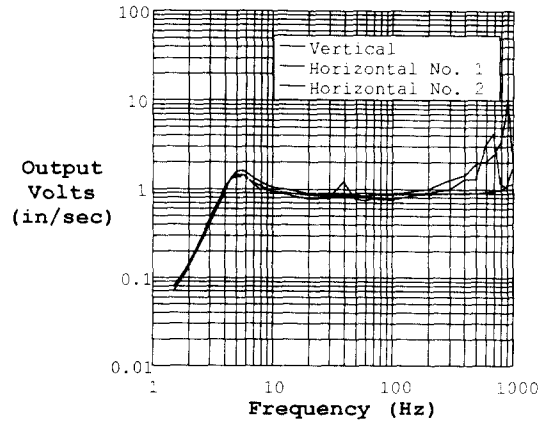
따라서, 검증에 사용되어진 속도계의 경우 주파수에 따라 일정한 출력 전압을 발생시켜주는 진동 주파수 10~600Hz에서 사용해야 함을 알 수 있다.

2.2 3방향 진동측정기의 제작 및 검증

검증되어진 개개의 수평 및 수직 속도계를 이용하여 지중에서 진동 측정이 가능한 3방향 진동측정기를 제작하였다. 이를 위해서는 개개의 검증되어진 3개의 속도계(수직방향(vertical direction), 횡방향(transverse direction), 종방향(longitudinal direction))가 필요하며, 제작되어진 3방향 진동측정기 역시 2.1절에서 설명되어진 바와 같이 검증을 수행하였다. 본 논문에서 제작되어진 3방향 진동측정기는 시추공내에서 에어패드(air pad)를 사용하여 단단히 고정되어 지중 진동을 측정할 수 있도록 제작되었다. 또한 3방향 진동측정기가 지중에서 올바른 방향으로 설치되기위해 지상에서도 설치방향을 알 수 있도록 방향이 표시된 orientation rod가 필요하다. 제작되어진 3방향 진동측정기의 상세한 구조 및 주파수 대역 응답특성은 각각 그림 3, 그림 2b)와 같다.



a) 4.5Hz속도계의 주파수대역 응답특성



b) 3방향 진동 측정기의 주파수대역 응답특성

그림 2 속도계의 주파수대역 응답특성

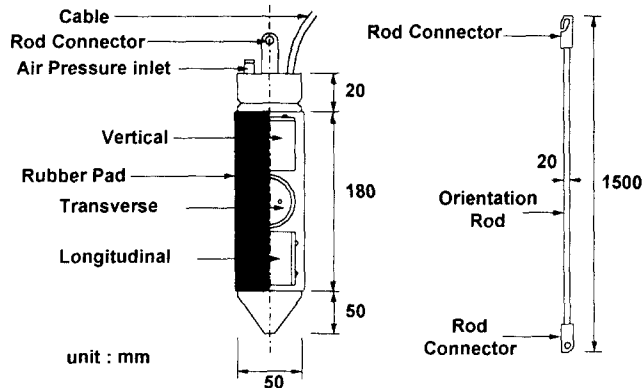


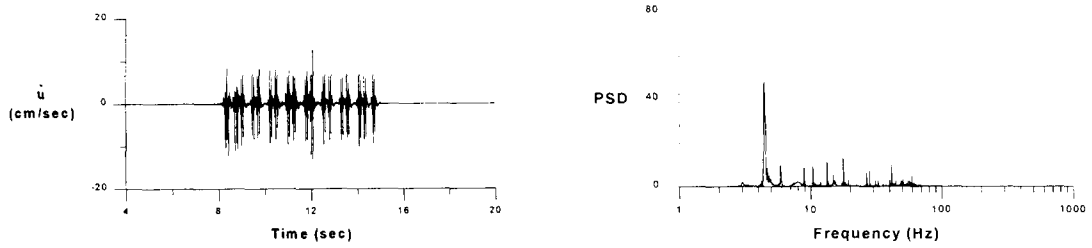
그림 3 3방향 진동측정기의 개요도

3. 지반진동의 계측

앞에서 설명한 방법으로 제작된 수직방향 속도계 및 3방향 진동측정기를 이용하여 열차, 지중발파, 마찰말뚝 항타 등 다양한 진동원으로부터 발생한 지반의 진동을 계측 분석하였다.

3.1 열차진동의 계측

열차진동의 계측을 위해 경부선 상·하행 열차에 대한 진동측정을 수행하였다. 4.5Hz 수직방향 속도계 7개와 3방향 진동측정기 1세트를 이용하여 침목에서부터 약 39m 거리에 이르는 구간에서 총 17번의 계측이 이루어 졌다. 계측되어진 열차진동의 주파수 대역은 열차 속도와 축중에 크게 관계없이 3~70Hz 까지 폭 넓게 분포하였으며, 진동의 크기는 도상 자갈의 영향으로 침목에서 계측(약 10cm/sec, 그림 4) 된 것에 비해 지반에서의 크기는 현격히 감소하였다(약 1cm/sec 이하, 그림 5). 침목 상에서 계측 되어진 열차진동의 대표적인 시간영역 이력 곡선 및 주파수 대역 분석 곡선을 그림 4에 도시하였다. 4.5Hz 부근의 주파수에서 많은 에너지가 측정되는 이유는 침목-레일-지반시스템의 공진에 의한 현상으로 판단 되어 향후 이에 대한 검증을 수행할 예정이다.

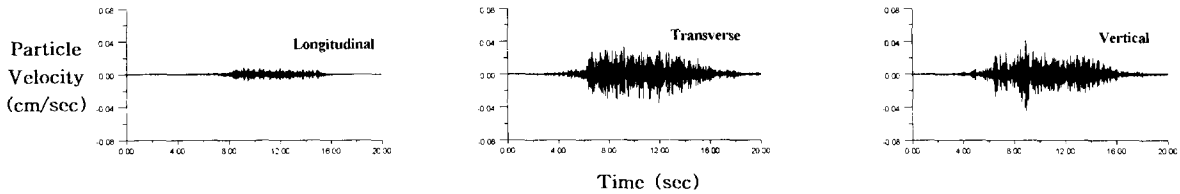


a) 시간영역 이력곡선

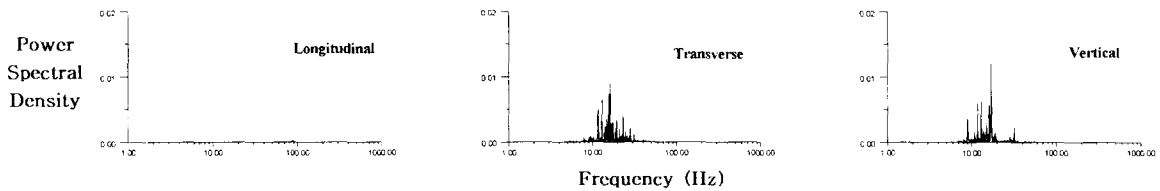
b) 주파수 대역

그림 4 침목에서 계측한 열차진동의 시간영역 이력곡선 및 주파수 대역 분석 곡선
(무궁화, 객차수 : 9량, 통과속도 : 110km/hr, 축중 : 12.17ton)

3방향 진동측정기를 이용하여 침목으로부터 거리 27m 지표면하 약 30cm에서 계측된 열차진동의 지반내에서의 연직(vertical), 종(longitudinal), 횡(transverse)방향 성분의 크기를 측정하여 보았다. 계측결과 그림 5와 같이 연직방향과 횡방향에 비하여 종방향 진동 성분의 크기가 작음을 알 수 있으며 주파수 대역의 경우 침목상에서 계측된 결과에 비해 10Hz 미만 진동에너지의 크기가 적음을 알 수 있다.



a) 시간영역 3방향 열차진동 이력 곡선

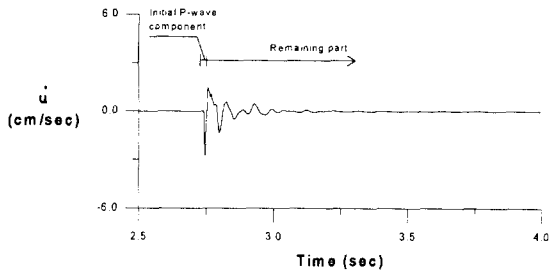


b) 3방향 열차진동 주파수영역 특성

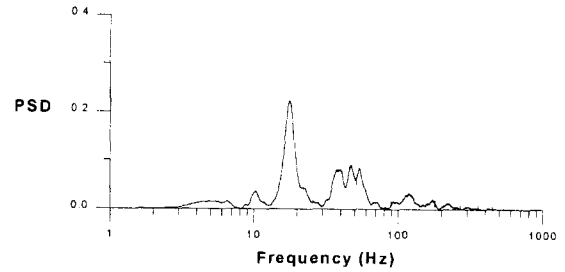
그림 5 3방향 진동측정기로 계측된 열차진동

3.2 발파진동의 계측

발파진동의 계측을 위해 경부고속철도 건설을 위한 터널발파 시험시공지역에서 계측이 이루어 졌으며, 풍화토층이 대략 12m의 깊이로 암반위에 위치하였다. 발파는 1~3kg의 다이내마이트로 28~44m 깊이의 암반내에서 발파가 이루어 졌으며 4.5Hz 수직방향 속도계 4개와 3방향 진동측정기 2세트를 이용하여 발파원으로부터 수평이격거리 82m, 지중 7.5m의 범위에서 총 4회 발파진동을 계측하였다. 계측되어진 발파진동의 주파수 대역은 50Hz 미만의 저주파수 대역 에너지의 크기가 크게 나타났다. 그림 6에 지중에서 계측된 발파진동의 수직방향 시간이력 및 주파수대역을 나타내었다. 그림 6b)에 나타난 주파수 영역 분석곡선을 그림 6a)에서와 같이 초기 압축파의 도달과 지반의 울림현상으로 나누어 분석하면 그림 7a)와 같이 초기 압축파 도달시 진동 에너지는 대부분 고주파 영역이며 그후 발생하는 지반의 울림현상은 깊이 12m지층의 공진 주파수와 동일하였다.



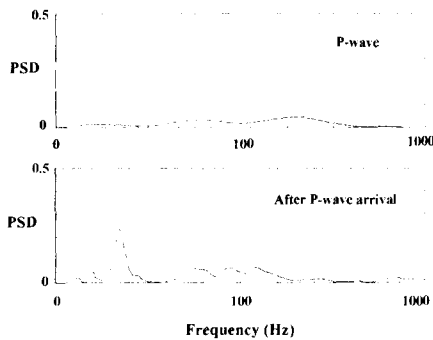
a) 발파진동의 시간이력 곡선



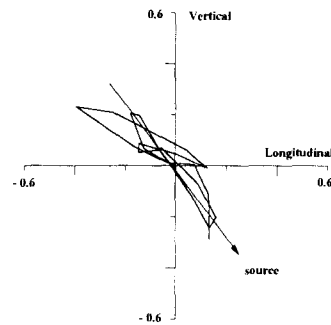
b) 발파진동의 주파수 대역

그림 6 발파진동의 시간이력 곡선 및 주파수 대역
(지중 : 7.5m, 수평이격거리 : 12m, 발파깊이 : 28m, 장약량 : 2kg)

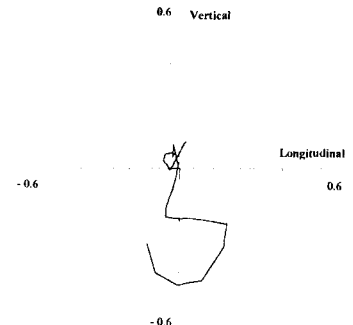
3방향 진동측정기를 이용하여 지중 7.5m(진동원으로부터 12m거리)에서 계측된 발파진동의 지반내에서의 연직(vertical), 종(longitudinal), 횡(transverse)방향 성분의 크기를 측정하여 보았다. 계측되어진 3방향 진동을 2차원 평면상에 도시하면(그림 7), 입자운동의 형태 분석을 통하여 초기 압축파의 도달과 그 이후 발생하는 지층의 공진현상을 분리하여 관찰할 수 있다(Taniguchi and Sawada, 1979).



a) 발파진동의 주파수대역 특성



b) 초기 압축파 도달

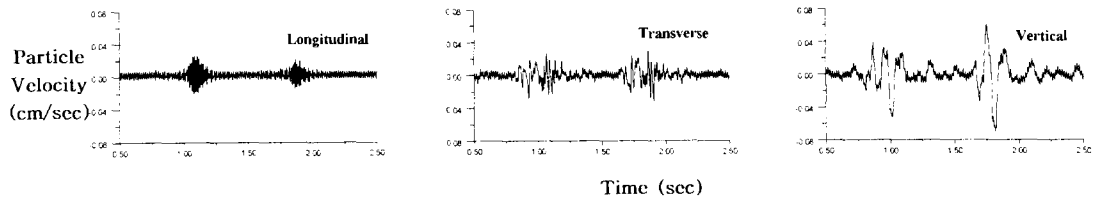


c) 지반의 공진

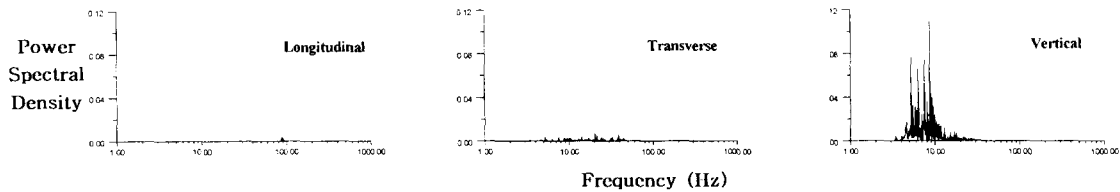
그림 7 발파진동으로 야기된 지반의 입자운동

3.3 말뚝항타 진동의 계측

말뚝항타 진동의 계측을 위해 교각 기초용 말뚝 시험항타지역에서 계측이 수행되었으며, 4.5Hz 속도계 2개와 3방향 진동측정기 2세트를 사용하여 말뚝선단 깊이 16~28m지점의 항타진동을 항타원으로부터 수평이격거리 38m, 지중 깊이 15m 이내에서 계측을 실시하였다. 지표면 및 지중에서 계측된 진동의 크기는 말뚝선단의 깊이가 깊어질수록 그 크기는 작아졌으며 주파수 대역은 약 10Hz 전·후에 분포 하였다. 3방향 진동측정기를 이용하여 항타원으로부터 거리 17m 지표면하 15.5m에서 계측된 항타진동의 지반내에서의 연직, 종, 횡방향 성분의 크기를 측정하여 보았다. 계측결과는 그림 9와 같이 연직방향과 횡방향에 비하여 종방향 진동 성분의 크기가 작음을 알 수 있다.



a) 시간영역 3방향 향타진동 이력곡선



b) 3방향 향타진동 주파수영역 특성

그림 8 3방향 진동측정기로 계측된 마찰지지 말뚝의 향타진동
(향타 깊이 : 17m, 진동원으로부터 수평이격거리 : 17m, 깊이 : 15m)

4. 지반진동의 기하 감쇠특성

지반진동은 지반을 매질로 하여 전파되면서 보유하고 있는 에너지를 손실하게 되고 이에 따라 진동의 진폭 역시 전파거리가 증가함에 따라 감소한다. 진동의 전파거리에 따른 감쇠는 기하감쇠와 재료감쇠의 두가지로 발생한다. 기하감쇠는 진동원으로부터 진동의 전파거리가 멀어짐에 따라 단위 체적당 진동에 너지의 밀도가 감소하기 때문에 일어난다. 또한 지반은 완전 탄성체가 아니므로 진동의 에너지는 주로 흙 입자간의 마찰 및 열로 인하여 감소하게 되며 이를 재료감쇠라 한다. Bornitz(1931)는 진동의 기하감쇠와 재료감쇠를 동시에 포함하는 진동감쇠식을 다음과 같이 제안하였다.

$$A = A_1 \left(\frac{r_1}{r} \right)^n e^{-a(r-r_1)} \quad \text{식 (3)}$$

여기서, A : 진동원으로부터 거리 r 에서의 진동의 입자속도, A_1 : 진동원으로부터 거리 r_1 에서의 진동의 입자속도, n : 기하감쇠 계수, a : 재료감쇠 계수

식 (3)에서 $(r_1/r)^n$ 항은 기하감쇠를 나타내며, $\exp[-a(r-r_1)]$ 항은 재료감쇠를 나타낸다. 표. 1에 진동원의 위치와 형태에 따른 기하감쇠 계수를 나타내었다(Gutowski and Dym, 1976).

표 1. 진동원의 위치와 형태에 따른 기하감쇠 계수

진동원의 위치	하중의 형태	발생파의 종류	기하감쇠계수 n	본 연구결과
반무한 탄성체 표면	점진동원	체적파	2.0	열차(16량 이하), 마찰 말뚝 등다짐
		표면파	0.5	
반무한 탄성체 내부	무한 선진동원	체적파	1.0	열차(16량 이상) 지중 발파
		표면파	0	
반무한 탄성체 내부	점진동원	체적파	1.0	
	무한 선진동원		0.5	

4.1 지반진동의 기하감쇠 특성

지반진동의 재료감쇠 특성은 진동이 전파되는 지반의 감쇠비에 큰 영향을 받지만 기하감쇠의 경우 지반을 반무한 탄성체로 생각했을 때 진동원의 형태 및 위치에 따라 다른값을 가지며 일어나게 된다. 따라서 지반진동의 전파거리에 따른 감쇠를 예측하기 위해서는 동적 지반정수의 결정 뿐만 아니라 진동원의 모델링 역시 매우 중요하다. 각기 다른 4개의 지반진동원(열차, 발파, 말뚝항타, 동다짐)에서 발생하는 진동의 전파거리별 계측기록을 이용하여 개개의 진동원의 기하감쇠계수를 살펴보았다. 지중발파로 인하여 발생한 지반진동의 가장 큰 에너지는 압축파이다. 따라서 지중발파로 발생한 지반진동의 전파거리에 따른 기하감쇠는 P파의 지중 점하중 기하감쇠 계수인 $n=1$ 의 값을 가지며 일어남을 알 수 있다(그림 10 a)). 마찰지지 강관말뚝의 항타로 인하여 발생한 지반진동의 주된 에너지는 수직방향 진동성분이 큰 SV파로 전파됨을 알 수 있으며 전파되는 진동의 감쇠는 SV파의 기하감쇠 계수인 $n=2$ 의 값을 가지며 일어남을 알 수 있다(그림 10 b)).

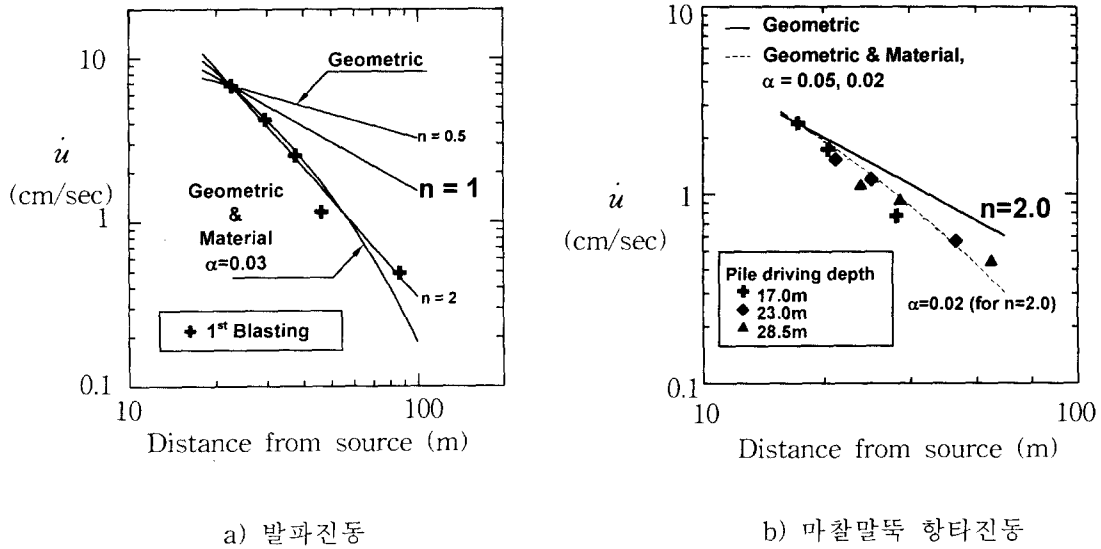


그림 10 발파, 마찰말뚝 항타진동의 기하감쇠특성

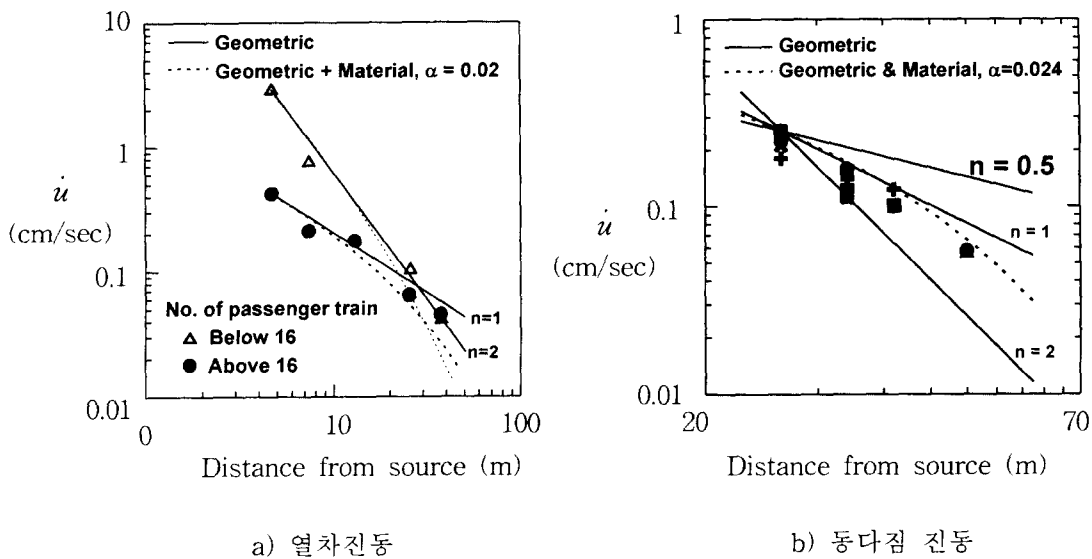


그림 11 열차, 동다짐진동의 기하감쇠특성

열차하중으로 인하여 발생된 지반진동의 기하감쇠 특성은 열차량 16량을 전후하여 기하감쇠 특성이 달라진다(그림 11 a)). 3방향 진동 계측기록으로 부터 열차진동이 SV파가 주된 에너지 성분이라고 가정한다면 열차량 16량 이상의 경우와 16량 이하의 경우 열차하중은 각각 SV파의 기하감쇠계수인 지표면 선하중($n=1$)과 지표면 점하중($n=2$)의 값을 가짐을 알 수 있다. 동다짐으로 인하여 발생한 지반진동의 기하감쇠 특성은 동다짐으로 발생한 진동의 주된 에너지 성분을 표면파로 가정할 때 지표면 점하중의 기하감쇠값인($n=0.5$)의 값을 가지며 전파 거리에 따른 진동의 기하감쇠가 일어남을 알 수 있다(그림 11 b)). 따라서 다양한 지반진동원의 입자운동특성을 살펴봄으로써 진동원의 특성을 모델링하여 각 진동의 기하감쇠 특성을 알 수 있었으며, 이때 진동이 측정된 지반의 재료감쇠계수의 값 a 역시 Wood와 Jedele(1985)이 제안한 지반종류에 따른 재료감쇠계수와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 진동원의 종류와 발생과에 따른 지반진동의 감쇠 특성 연구와 올바른 진동감지기의 사용법 및 제작·검증방법을 설명하였다. 본 논문의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 최근 건설진동 측정에 주로 사용되는 속도계의 주파수대역 응답특성 검증기법을 정립하여 개개의 속도계에 대한 신뢰성있는 측정 주파수 대역을 검증하고 이를 이용하여 3방향 지반진동 측정이 가능한 진동측정기를 제작 및 검증하였다.
2. 다양한 지중 진동 및 3방향 진동측정을 통하여 각 진동원별 진동원 특성의 모델링 및 주된 전파에너지의 특성을 파악할 수 있었다.
3. 발파, 말뚝항타, 열차, 동다짐 진동의 거리별 측정을 통하여 각 진동의 기하감쇠 특성을 결정하였다.

참고문헌

1. Bornitz, G. (1931), *Über die Ausbreitung der von Grossz Kolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe*, J. Springer (Berlin).
2. Dowding, C.(1996), *Construction Vibration*, Prentice Hall.
3. Gutowski, T., Dym, C.(1976), "Propagation of Ground Vibration: A Review", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 49(2), pp 179~193.
4. Lam, Y.(1989), *Laboratory Evaluation of Geophone Performance at High Frequencies*, MSCE Dissertation, The Univ. of Texas at Austin.
5. Taniguchi, E., Sawada, K.(1979), "Attenuation with Distance of Trafficinduced Vibrations", *Soil and Foundations*, Vol 19(2). pp. 16~28.
6. Woods, R., Jedele, L.(1985), "EnergyAttenuation Relationships from Construction Vibrations", *Vibration Problems in Geotechnical Engineering*, ASCE Convention in Detroit, Michigan.

감사의글

본 연구는 한국과학재단 특정기초(KOSEF 95-0600-01-01-3)프로그램의 일부 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.