

연구논문

수진 거리에 따른 방진구의 진동 저감 연구

송정언* · 김승곤* · 홍응기**

전북대학교 자원·에너지공학과*, 서남대학교 환경·화학공학과**

A Study on the Vibration Reduction of Borehole by the Receive Distance

Jeong-Un Song* · Seung-Kon Kim* · Woong-Ki Hong**

Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Chonbuk National University*
Department of Environmental & Chemical Engineering, Seonam University**

Abstract

The purpose of this study is to estimate the vibration reduction effect of the borehole which is controlled the vibration propagation in the ground. For this study, we measured the vibration velocity before and after the borehole installation. The results are as follows: The peak particle velocity(PPV) and peak vector sum(PVS) was reduced by the borehole. And also, the deviation of vibration velocity before and after the borehole installation showed large values in longitudinal and vertical component depending on the receive distance, and increased depending on the size of vibration energy. Finally, the vibration isolation efficiency was 25~35 percentage at 1.5m receive distance, and was 4~14 percentage at 3.0m receive distance. It was found that the vibration isolation efficiency was good in small vibration energy, but was not good at long receive distance.

Keywords : Borehole, Peak particle velocity(PPV), Peak vector sum(PVS), Vibration isolation efficiency

I. 서론

도심지에서의 재개발 및 부지조성공사 등으로 인한 건설 진동, 건설 및 산업 장비 등의 연속적 기계진동, 자동차 및 지하철 등으로 인해 발생하는 교통 진동은 인간의 생활권 내에서 다양한 민원을 야기하고 있다. 특히, 건설 기술의 발달 및 도심지 교통망의 확충, 고속철도의 개통으로 인한 운전속도 증가 등으로

진동으로 인한 피해가 발생될 가능성이 증대되고 있는 실정이므로 진동 전달 메커니즘 및 저감 대책을 설립하기 위한 효율적인 방법을 연구해야 할 필요성이 대두되고 있다. 일반적으로 이러한 환경공해 진동을 개선하기 위한 최적의 방법으로 진동원에서 발생하는 진동에너지를 1차적으로 제어하는 방법이 진동을 저감하는데 가장 효율적이다. 하지만, 진동원에서

의 진동에너지를 제어할 수 없거나 진동원과 수신부가 시공된 후에 발생하는 진동은 전파경로 상에서의 진동 저감 방법을 찾을 수밖에 없는데, 방진구 및 방진벽의 시공을 통해 전파경로 상의 진동을 차단하게 된다. 다양한 방진구조에 따른 지반 내 방진효과에 대한 실험 및 수치해석 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있는데, Wood(1968)는 층상토사 지반에서 방진구의 형태를 다양하게 변화시켜 가며 지반에서의 진동 차단 연구를 수행하였고, Haupt(1977)는 방진구 및 방진벽, 드릴 공에 대한 수치모형 실험을 하였으며, 전산프로그램을 이용하여 방진구 및 방진공에 따른 진동 차단 효과를 수치해석을 통해 구현해 내는 연구(허영, 1994; 조상호 등, 2000)도 있었다. 또한, 방진구의 재료별 방진효과(이강일, 2006) 및 방진벽의 진동 저감에 영향을 미치는 다양한 매개변수들의 연구(이강일 등, 2003), 진동 차단벽 재료 및 타설 심도에 따른 방진 연구(이강일 · 김태훈, 2004)도 수행되어 왔으며, 진동원으로부터 충격하중을 입력하여 충격 에너지에 따른 진동 양상을 평가해 온 연구(Siemer and Jessberger, 1994; Semblat and Loung, 1998)도 이루어졌다. 최근에 송정연 등(2013)은 측정된 진동의 실측파형을 수치적으로 역산하여 유한요소해석을 통해 방진구의 위치에 따른 진동 저감 효과를 연구하였지만, 실제적으로 진동원과 수신점 사이 고정된 위치에 방진구를 설치하여 그 유무에 따른 수신거리별 진동 저감 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 방진구가 지반 내 진동 전파 경로 상에 존재할 때 수신 거리에 따른 진동 저감 정도를 확인하기 위해서 수행되었다. 먼저, 동일한 지반에서 인위적인 충격진동을 유발시켜 진동원과 근접한 고정 위치에서 방진구의 설치 유무에 따라 각각의 수신부에서 진동속도를 측정하여 진동데이터로 활용하였다. 진동데이터는 진동원에서의 진동에너지 크기와 각각의 수신 거리에 따라 측정되었으며, 성분별 진동속도와 환산거리에 따른 진동속도 관계식을 비교하여 방진구의 진동 저감 정도를 분석하였다. 아울러, 성분별 진동속도의 실벡터합(PVS)을 각각의 수신부에서 방진구의 설치 유무에 따라 비교하여 진동감소계수에 따른 진동차단효율을 산술적으로 평가하였다.

II. 진동속도 측정 및 분석 방법

1. 진동속도 측정

본 연구에 사용된 진동 실험 장치는 Figure 1과 같이, 진동원을 구현해내기 위한 진동에너지 발생 장치와 수신부에서의 진동을 감지하기 위한 진동측정 장치로 구분된다. 진동에너지 발생 장치는 1.0m 높이에서 스틸 볼이 지반에 자유 낙하되도록 설계하였으며, 전자석을 이용하여 스틸 볼이 장치에 고정될 수 있도록 하였다. 또한, 지반 내에서 진동이 균일하게 전파되도록 진동원에 직경 $\Phi 30\text{mm}$, 높이 10cm의 강봉을 지반에 삽입하여 스틸 볼이 그 위에 낙하하도록 유도하였다. 스틸 볼의 규격은 각각 0.11kg, 0.22kg, 0.44kg의 질량을 가진 구형 볼이고, 세 가지 형태의 스틸 볼을 진동원인 강봉에 각각 5회씩 총 15회를 낙하하여 진동에너지를 발생시켰으며, 진동에너지는 스틸 볼의 질량과 중력가속도, 낙하 높이로 구해지는 위치에너지를 산정하였다. 수신부에서의 진동측정 장치는 Canada Instantel사에서 제작된 BlastMate II DS-477 측정기기로서, 진동원으로부터 1.5m, 3.0m 이격된 수신부 1 지점과 수신부 2 지점에 설치하여 각각의 진동속도를 측정하였다. BlastMate 진동 측정기기는 하나의 센서로 최대 진동속도(PPV)의 세 방향 성분인 수직성분(Vertial), 진행성분(Longitudinal), 점선성분(Transverse)을 동시에 측정할 수 있으며, 세 성분의 실벡터합인 PVS(Peak Vector Sum)를 측정할 수 있다. 지반 상태는 일반적인 토질 층이며, 최대건조밀도는 1.8 g/cm^3 수준이다. 진동 실험을 수행하기 전 다짐을 통해 지반을 평평하고 고르게 유지하였다. 진동속도 측정 변수는 지반의 고정된 위치에 존재하는 방진구로서, 진동원과 수신부 1 지점 사이 0.5m 지점에 직경 20mm, 높이 15cm의 원통형 수직 방진구를 5cm 간격으로 7개를 설치하여 방진구들 간의 수평거리를 0.5m 수준으로 맞추어 방사상으로 전파하는 진동을 차단하도록 설계하였다. Figure 2는 진동 실험의 설계 모식도를 보여주고 있다. 진동에너지 발생에 따른 각 수신부에서의 진동속도는 지반 내에 방진구가 설치되어 있지 않을 때 먼저 측정을 하였고, 지반에 방



Figure 1. Vibration experiment instrument

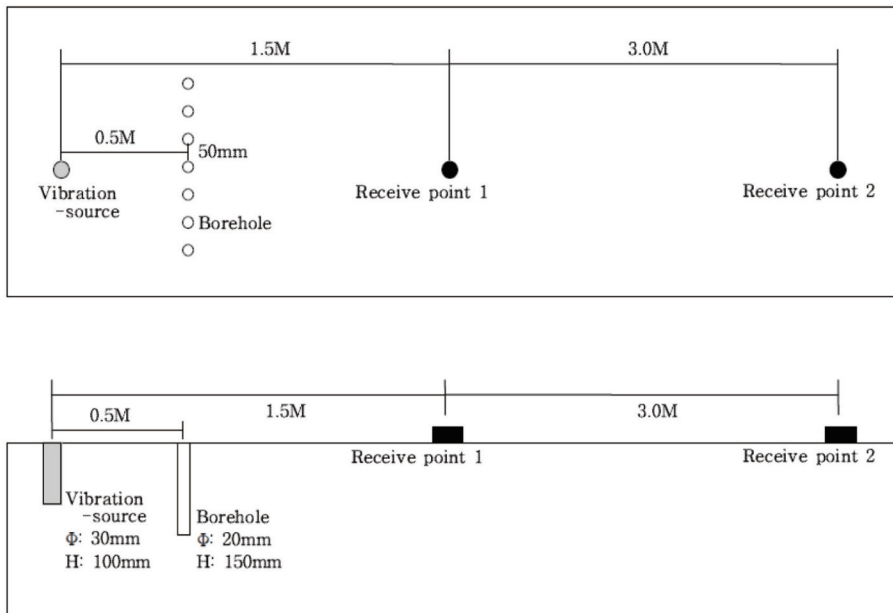


Figure 2. Design of the vibration experiment

진구를 설치한 후에 다시 측정을 하였다.

$$V = K(SD)^n, SD = \frac{D}{\sqrt{E}} \quad (1)$$

2. 분석 방법

(1) 진동속도 관계식

진동에너지에 의한 진동속도 관계식은 환산거리 (Scaled Distance)의 함수로 표현(송정언 등, 2011) 될 수 있으며, 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, V 는 진동속도(mm/s), SD 는 환산거리(m/ \sqrt{E}), D 는 수진 거리(m), E 는 진동에너지(Joules), K, n 는 경험상수이다. 산출된 환산거리와 측정된 진동속도 값들로 최소자승법에 의한 회귀분석을 수행하여 경험상수 K 와 n 을 산정함으로써 진동속도 관계식을 도출할 수 있다.

(2) 진동감소계수 및 진동차단효율

지반 내에서의 진동 전달율로 표현되는 진동감소계수는 지반 구조 내 하나의 수진부에서 방진구가 설치되어 있는 경우 진동속도 값과 방진구가 설치되어 있지 않는 경우 진동속도 값의 비로서 정의내릴 수 있으며, 일반적으로 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_v = \frac{V_{after}}{V_{before}} \quad (2)$$

여기서, D_v 는 진동감소계수, V_{before} 는 방진구가 설치되어 있지 않을 때 진동속도 값, V_{after} 는 방진구가 설치되어 있을 때 진동속도 값이다. 지반 내에서 진동 경로 상으로 전파되는 진동속도가 방진구로 인해 완전히 차단된다면 수진부로의 진동 전달율은 0이 되며, 방진구가 수진부의 변위 변화에 전혀 영향을 주지 못한다면 진동 전달율은 1이 된다(허영, 2000)고 볼 수 있다.

아울러, 진동차단효율은 수진부에서 측정된 방진구의 설치 유무에 따른 진동속도 변화량을 백분율로 표현(송정언 등, 2013)할 수 있으며, 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_v(\%) = [1 - D_v] \times 100 \quad (3)$$

여기서, W_v 는 진동차단효율(%), D_v 는 진동감소계수이다.

III. 연구 결과 및 고찰

1. 성분별 진동속도 비교

진동 실험으로 진동원으로부터 1.5m, 3.0m 이격

된 각 수진부에서 진동에너지에 따라 진동속도를 측정하여 성분별 최대진동속도(PPV)와 실벡터합(PVS)을 산술적으로 비교하였다. Table 1은 진동 실험으로 얻어진 각각의 세 방향 성분별 최대진동속도(PPV)와 실벡터합(PVS)을 방진구의 설치 유무에 따라 비교한 결과이다. 방진구의 설치 유무와는 관계없이 지반 내에서의 진동속도 값은 진동에너지가 커짐에 따라 진동속도 값이 커지는 것을 알 수 있었고, 진동원과 수진부 간의 수진 거리가 멀어질수록 진동속도 값은 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 성분별 진동속도 값을 분석해 보면, 접선성분(Transverse)이 가장 작은 진동속도 값을 보였고, 수직성분(Vertical)과 진행성분(Longitudinal)이 유사한 진동속도 값을 나타내거나 진행성분(Longitudinal)이 우세한 진동속도 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 일반적으로 진동의 세 성분 중 지반 내에서 우세한 값을 보이는 것이 진행성분(Longitudinal)이며, 진동 전파 매질의 감쇠 특성(Wood et al, 1974)에 따라 수직성분(Vertical)이 우세한 값을 보이는 경우도 있다. 성분별 최대진동속도(PPV)로 방진구의 설치 유무에 따른 진동속도 값을 비교해 보면, 진동원으로부터 수진 거리가 1.5m 이격되어 있는 지점에서 진동에너지에 따라 방진구가 없을 때 각각 1.013mm/s, 1.598mm/s, 2.348mm/s의 값을 나타냈고, 방진구가 있을 때 각각 0.581mm/s, 1.012mm/s, 1.450mm/s의 값을 나타냈다. 또한, 진동원으로부터 수진 거리가 3.0m 이격되어 있는 지점에서 진동에너지에 따라 방진구가 없을 때 각각 0.260mm/s, 0.438mm/s, 0.625mm/s의 값을 나타냈고, 방진구가 있을 때 각각 0.225mm/s, 0.410mm/s,

Table 1. Results of the vibration velocity obtained by the vibration experiment

| Receive Distance (m) | Vibration Energy (Joules) | Basic Condition | | | | Borehole Condition | | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|--------------|--------------|------------|--------------------|--------------|--------------|------------|
| | | Tran. (mm/s) | Vert. (mm/s) | Long. (mm/s) | PVS (mm/s) | Tran. (mm/s) | Vert. (mm/s) | Long. (mm/s) | PVS (mm/s) |
| 1.5 | 1.078 | 0.188 | 0.464 | 1.013 | 1.031 | 0.349 | 0.283 | 0.581 | 0.673 |
| | 2.156 | 0.333 | 0.867 | 1.598 | 1.638 | 0.645 | 0.549 | 1.012 | 1.198 |
| | 4.312 | 0.482 | 1.244 | 2.384 | 2.448 | 1.010 | 0.800 | 1.450 | 1.658 |
| 3.0 | 1.078 | 0.146 | 0.260 | 0.254 | 0.302 | 0.172 | 0.127 | 0.225 | 0.260 |
| | 2.156 | 0.194 | 0.438 | 0.435 | 0.511 | 0.321 | 0.216 | 0.410 | 0.476 |
| | 4.312 | 0.238 | 0.606 | 0.625 | 0.730 | 0.476 | 0.298 | 0.591 | 0.695 |

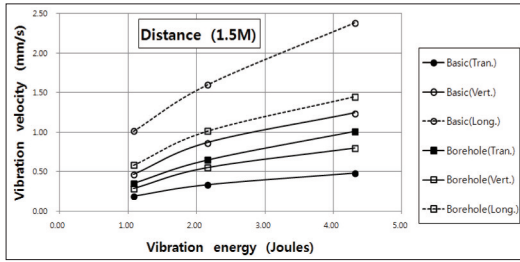


Figure 3. Comparison of vibration velocity between basic and borehole condition on 1.5m receive distance

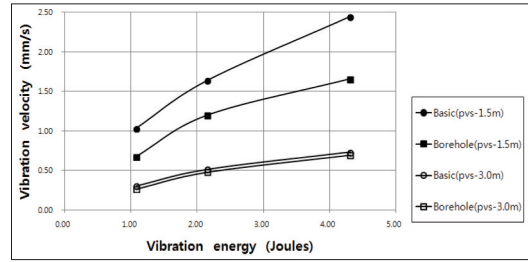


Figure 5. Comparison of peak vector sum between basic and borehole condition

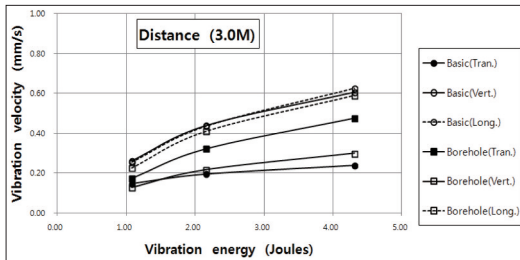


Figure 4. Comparison of vibration velocity between basic and borehole condition on 3.0m receive distance

0.591mm/s의 값을 나타냈다.

Figure 3과 Figure 4는 방진구의 설치 유무에 따른 성분별 진동속도를 진동에너지와 수신 거리에 따라 비교한 것이다. 진동원으로부터 수신부 사이의 수신 거리가 1.5m일 때 성분별 진동속도는 방진구의 설치 유무에 따라 진동속도 값의 차이를 보였다. 세 성분 중 진행성분(Longitudinal)이 가장 큰 진동속도 편차를 나타냈으며, 진동에너지가 증가할수록 진동속도 편차도 증가하는 경향을 보였다. 진동원으로부터 수신부 사이의 수신 거리가 3.0m일 때 성분별 진동속도는 전파 경로 거리 상의 진동 감쇠로 방진구의 설치 유무에 따라 진동속도 값의 차이는 크지 않았다. 세 성분 중 수직성분(Vertical)이 가장 큰 진동속도 편차를 나타냈으며, 진동에너지가 증가할수록 진동속도 편차도 증가하는 경향을 보였지만, 진행성분(Longitudinal)에서는 뚜렷한 증가 경향을 보이지 않았다. 여기서, 접선성분(Transverse)의 진동속도를 보면 진동원과 수신부의 수신 거리와는 상관없이 방진구가 설치되어 있을 때 더욱 큰 값을 나타내는 것으로 확인되었는데, 이는 진동원으로부터 근접 거리에 위치한 방진구가 수직방향 및 진행방향에서는 진동 감쇠 효과를 보이거나 수평방향에서는 방진구 주

위에서 입사파동의 간섭 현상으로 진동이 증폭된 것이라 판단된다.

Figure 5는 성분별 진동속도의 싹벡터합인 PVS (Peak Vector Sum)을 방진구의 설치 유무에 따라 비교한 것이다. 진동에너지가 증가할수록 진동속도 값이 증가하였으며, 진동원으로부터 수신부까지의 수신 거리가 멀어질수록 진동속도 값은 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 방진구가 설치되어 있지 않을 때의 진동속도 값이 방진구가 설치되어 있을 때의 진동속도 값보다 모두 큰 값을 보였으며, 진동원으로부터 수신부까지의 수신 거리가 가까울수록 방진구의 진동 저감 정도가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 진동원으로부터 수신 거리가 멀어질수록 지반 매질의 재료 특성적 감쇠(Wood et al, 1974)로 인해 방진구의 진동 저감 정도는 현저히 떨어졌다.

2. 진동속도 관계식 비교

진동에너지와 수신 거리의 관계로 표현되는 환산 거리에 따라 각각의 진동속도 관계식을 도출하여 방진구의 설치 전후 수신 거리에 따른 진동 저감 정도를 비교하였다. Figure 6과 Figure 7은 수신 거리에 따른 진동속도와 환산거리의 관계를 보여주고 있다. 진동원으로부터 수신 거리가 1.5m 이격되어 있을 때 방진구의 설치 유무에 따라 환산거리와 진동속도의 관계 그래프 폭이 넓게 나타났으며, 진동속도 관계식의 결정계수는 모두 0.92이상이었다. 진동원으로부터 수신 거리가 3.0m 이격되어 있을 때 방진구의 설치 유무에 따라 환산거리와 진동속도의 관계 그래프 폭이 큰 차이를 보이지 않았으며, 진동속도 관계식의 결정계수는 모두 0.96이상이었다. 이는 진동원으로

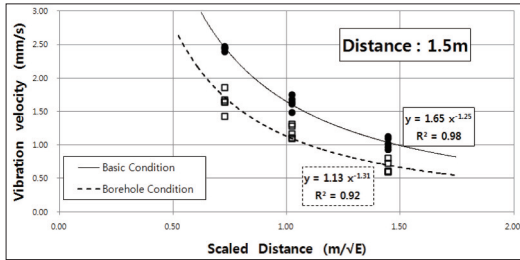


Figure 6. Relation between vibration velocity and scaled distance on 1.5m receive distance

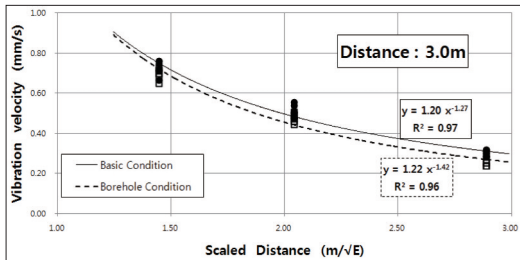


Figure 7. Relation between vibration velocity and scaled distance on 3.0m receive distance

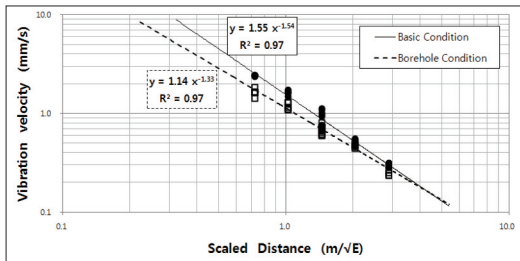


Figure 8. Comparison of vibration equation between basic and borehole condition

부터 수신 거리가 가까울수록 방진구로 인한 진동속도의 감소가 크다는 것을 보여 주고 있는 결과이다.

Figure 8은 방진구의 설치 전후 환산거리에 따른 진동속도 그래프를 보여주고 있다. 선형회귀분석을 통해 환산거리에 따른 진동속도 그래프를 선형화하여 방진구 설치 전후의 진동속도 관계식을 도출하였다. 환산거리가 5이내에서 방진구의 진동속도 감소 정도를 확인할 수 있었으며, 진동속도 관계식을 통해

진동에너지와 수신 거리에 따른 각각의 진동속도 값과 진동 저감 정도를 추정할 수 있다. 진동속도 관계식의 결정계수는 모두 0.97이상으로 나타났다. Table 2는 방진구 설치 전후의 수신 거리에 따른 각각의 진동속도 관계식을 산출한 결과를 나타낸 것이다.

3. 진동차단효율 분석

진동차단효율을 분석하기 위해 1.5m, 3.0m 이격된 두 지점의 수신부에서 진동에너지에 따라 측정된 실벡터합(PVS)을 방진구의 설치 유무에 따라 비교하고, 그에 따른 진동감소계수를 산정하였다. Figure 9와 Figure 10은 각 진동속도의 실벡터합(PVS)을 방진구의 설치 유무에 따라 수신 거리별로 비교한 것이다. 실벡터합(PVS)으로 방진구의 설치 유무에 따른 진동속도 값을 비교해 보면, 진동원에서의 수신 거리가 1.5m 이격되어 있는 지점에서 진동에너지에 따라 방진구가 없을 때 각각 1.031mm/s, 1.638mm/s, 2.448mm/s의 실벡터합(PVS)을 나타냈고, 방진구가 있을 때 각각 0.673mm/s, 1.198mm/s, 1.658mm/s의 실벡터합(PVS)을 나타냈다. 또한, 진동원에서의 수신 거리가 3.0m 이격되어 있는 지점에서 진동에너지에 따라 방진구가 없을 때 각각 0.302mm/s, 0.511mm/s, 0.730mm/s의 실벡터합(PVS)을 나타냈고, 방진구가 있을 때 각각 0.260mm/s, 0.476mm/s, 0.695mm/s의 실벡터합(PVS)을 나타냈다.

Table 3은 측정된 각 진동속도의 실벡터합(PVS)으로 방진구의 설치 유무에 따른 진동감소계수 및 진동차단효율을 나타낸 결과이다. 진동원으로부터 수신 거리가 1.5m일 때 진동에너지에 따라 진동감소계수는 각각 0.653, 0.731, 0.677, 진동차단효율은 각각 34.72%, 26.86%, 32.27%로 나타났으며, 진동원으로부터 수신 거리가 3.0m일 때 진동에너지에 따라

Table 2. The vibration equation obtained by the vibration experiment

| Condition | Vibration velocity equation | | |
|-----------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| | Receive distance | | Total |
| | 1.5m | 3.0m | |
| Basic | $V = 1.65(SD)^{-1.25}$ | $V = 1.20(SD)^{-1.27}$ | $V = 1.55(SD)^{-1.54}$ |
| Borehole | $V = 1.13(SD)^{-1.31}$ | $V = 1.22(SD)^{-1.42}$ | $V = 1.14(SD)^{-1.33}$ |

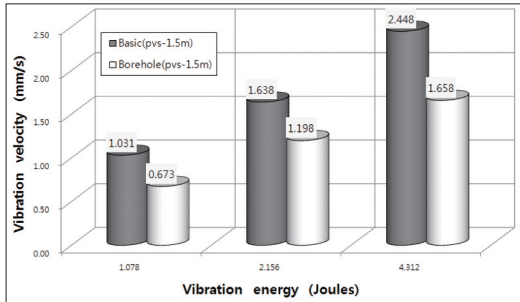


Figure 9. Comparison of peak vector sum between basic and borehole condition on 1.5m receive distance

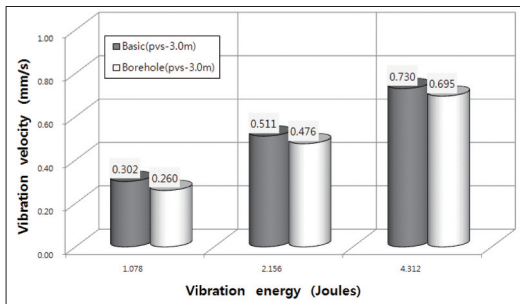


Figure 10. Comparison of peak vector sum between basic and borehole condition on 3.0m receive distance

Table 3. Results of the vibration reduction of borehole

| Receive Distance (m) | Vibration Energy (Joules) | Reduction Coefficient (D_v) | Isolation Efficiency (W_v [%]) |
|----------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1.5 | 1.078 | 0.653 | 34.72 |
| | 2.156 | 0.731 | 26.86 |
| | 4.312 | 0.677 | 32.27 |
| 3.0 | 1.078 | 0.862 | 13.77 |
| | 2.156 | 0.932 | 6.85 |
| | 4.312 | 0.952 | 4.77 |

진동감소계수는 각각 0.862, 0.932, 0.952, 진동차단효율은 각각 13.77%, 6.85%, 4.77%로 나타났다. 이로서, 진동원으로부터 수진 거리가 1.5m 이격된 지점에서는 25%~35% 범위에서 진동차단효율을 나타냈고, 진동원으로부터 수진 거리가 3.0m 이격된 지점에서는 4%~14% 범위에서 진동차단효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한, 진동에너지가 작을수록 진동차단효율이 더욱 양호하게 나타나고, 진동원으로부터 수진부까지의 수진 거리가 멀어질수록 진동차단효율이 현저히 떨어지는 경향을 보였는데, 이는 진동을 유발하는 에너지의 기하학적 특성과 지반

내 전파되는 파동의 거리 상 감쇠 특성 때문에 나타나는 결과라고 판단된다.

V. 결론

본 연구는 지반 내 진동 전파 경로 상에 존재하는 방진구를 이용하여 수진 거리에 따른 진동 저감 정도를 확인하기 위하여 수행되었다. 이에 따라 동일한 지반에 인위적인 충격진동을 유발시켜 각 수진부에서 측정된 성분별 진동속도에 따른 진동 감소 정도를 비교하고, 환산거리별 진동속도 관계식과 실벡터합(PVS)에 의한 진동차단효율을 분석하여 결론을 도출하였다.

진동원과 수진부 사이에 설치된 방진구에 의해 최대진동속도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 수진 거리에 따라 성분별 진동속도의 차이를 나타냈다. 진동에너지와 수진 거리로 표현되는 환산거리와 진동속도 간의 관계식으로 방진구 설치 전후의 진동속도 값을 추정하여 방진구의 진동 저감 정도를 분석할 수 있었으며, 진동속도 관계식의 결정계수는 모두 0.92이상으로 상관성이 높은 것으로 확인되었다. 방진구의 진동차단효율은 진동원으로부터 수진 거리가 1.5m일 때 25%~35%, 수진 거리가 3m일 때 4%~14% 범위를 나타냈다. 또한, 진동에너지의 크기가 작을수록 진동차단효율은 양호하였으나 진동원으로부터 수진 거리가 멀어질수록 진동차단효율은 현저히 떨어지는 경향을 보였는데, 이는 진동에너지의 기하학적 특성과 진동의 거리 감쇠 특성에서 기인하는 것으로 판단된다.

이번 연구는 동일한 지반 상태에서 방진구의 설치 유무에 따른 진동 저감 효과를 실험적으로 연구한 것으로서, 추후 지반의 전파 매질 및 수진 거리와 방진구의 scale unit에 따른 진동차단효율을 평가하여 실제 산업 현장에서 검증하는 연구가 지속되어야 할 것이다.

참고문헌

송정연, 홍웅기, 김승곤, 2011, 매질특성에 따른 층

- 격진동평가에 관한 연구, 한국환경영향평가학회지, 20(5), 641-649.
- 송정연, 김승곤, 박훈, 홍웅기, 2013, 실측파형과 유한요소해석을 통한 방진구의 위치별 진동 저감 연구, 한국환경영향평가학회지, 22(4), 381-387.
- 이강일, 日下部 治, 이진수, 김찬기, 정종범, 2003, 지반환경 진동의 저감효과에 영향을 미치는 매개변수 연구, 대한토목학회지, 23(5C), 299-307.
- 이강일, 김태훈, 2004, 진동 차단벽재료 및 타설심도가 방진효과에 미치는 영향, 한국지반공학학회지, 20(6), 41-49.
- 이강일, 2006, 진동차단공의 재료별 방진효과에 관한 해석적 연구, 한국토목섬유학회지, 5(2), 23-30.
- 조상호, 양형식, 2000, 방진공에 의한 발파진동차단효과의 실험 및 수치해석적 연구, 한국암반공학학회지, 10(4), 481-485.
- 허영, 1994, 진동차단구조물에 의한 지반진동차단 연구, 전산구조공학학회지, 7(4), 127-136.
- 허영, 2000, 방진벽에 의한 진동 환경 개선 연구, 한국지진공학학회지, 4(4), 63-71.
- Haupt, W.A., 1977, Isolation of vibrations by concrete core walls, International Conference of the Soil Mechanics and Foundations Engineering, in processing 9, 251-256
- Semblat, J.F., Loung, M.P., 1998, Wave propagation through soils in centrifuge testing, Journal of earthquake engineering, 2(1), 147-171.
- Simemer, Th., Jessberber, H.L., 1994, Wave propagation and active vibration control in sand, Proceeding of international conference on centrifuge modeling, centrifuge 94, 307-312.
- Wood, R.D., 1968, Screening of surface waves in soils, Journal of the Soli Mechanics and Foundations Division 94, 951-979.
- Wood, R.D., Barnett, N.E., Sagesser, R., 1974, Holography-A new tool for soil dynamics, Journal of the geotechnical engineering, 100(GT11), 1231-1247.