

현장실험을 통한 저진동·저소음 진폭가변형 진동해머 성능 평가

Performance Evaluation of the Vibro Hammer with Variable Amplitude by Field Tests

한진태¹, 이준용^{2*}, 최창호³, 박정열⁴

Jin-Tae Han¹, Joonyong Lee², Changho Choi³, Jeong-Yel Park⁴

¹Nonmember, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

²Member, Post Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

³Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

⁴Nonmember, President, Daedong Eng. Co., Ltd, 345-16 Geumsan-ri, Tanyeon-myeon, Paju-si, Gyeonggi-Do, 413-842, Republic of Korea

ABSTRACT

During installing sheet piles for an impermeable wall or a retaining wall, vibratory hammers are widely used. Among vibratory hammers, a hydraulic hammer is used most commonly. However, a hydraulic hammer causes excessive vibration and noise due to resonance by change of natural frequency according to movements of eccentric shaft when the hammer starts and stops. In this study, new variable amplitude type hammer is developed in order to reduce the vibration and noise due to resonance produced in starting and stopping the hammer. By controlling horizontal angle in two pairs of eccentric body inside of the hammer, the amplitude and vibration of the new hammer can be controlled. The performance tests with the new hammer and existing hammers such as the hydraulic hammer and electric hammer are carried out, and the new hammer shows reduced vibration and noise results in comparison with existing hammers from performance tests. Also, this study shows that penetration rates of sheet pile using the new hammer increase due to impellent force of a backhoe in comparison with the electric hammer and penetration rate increase in comparison with a general hydraulic hammer, since the new hammer can control the amplitude during penetration of sheet pile according to soil condition.

요 지

국내외에서 차수벽이나 흙막이 벽체로 많이 사용되고 있는 강널말뚝의 관입시 일반적으로 진동해머를 이용하여 시공하고 있다. 진동해머 중에서도 유압식 진동해머가 많이 사용되고 있는데, 진동해머의 시동을 켜고 끌 경우 진동해머 편심축의 이동에 따라 고유진동수의 변화로 진동해머에서 공진이 일어나 진동 및 소음이 크게 발생하는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 일반 유압식 진동해머에서 발생하는 공진 발생에 의한 진동 및 소음을 줄이기 위하여 진폭가변형 유압진동해머를 개발하였다. 개발된 진폭가변형 유압진동해머는 두 쌍의 편심체 수평 각도를 조절하여 진동수 및 진폭을 조절할 수 있으며, 일반 유압식 진동해머와 개발된 진폭가변형 유압진동해머의 기진체 현장실험을 이용한 성능 평가 비교를 통해, 기존 일반 유압식 진동해머에 비해 진폭가변형 유압진동해머의 진동 및 소음이 감소함을 확인하였다. 또한 현장실험 결과 진폭가변형 유압진동해머는 굴삭기의 추력으로 인해 기존 전기식 진동해머에 비해 관입속도가 증가하였으며, 일반 유압식 진동해머에 비해서도 진폭가변으로 지반조건에 따라 관입속도가 빨라질 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Sheet pile, Vibro-hammer with variable amplitude, Field test, Ground vibration, Noise

Received 23 Mar. 2015, Revised 24 Jul. 2015, Accepted 31 Jul. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0787; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: joonyong.lee@kict.re.kr (J. Lee)

1. 서론

국내외에서 사용이 많이 늘고 있는 강널말뚝은 차수벽, 흙막이벽체로 이용되며 해상이나 하상 공사시 가물막이 구조물 및 교대로 적용되고 있다. 일반적으로 강널말뚝 관입 방법에는 항타식, 유압식, 진동식 방법의 3가지가 있다 (Fleming et al., 1992). 3가지 방법 중 진동식 방법은 진동해머를 이용하여 강널말뚝 상단에 진동을 가하여 지반을 약하게 만들고 관입하는 방법으로, 최근 진동해머의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 진동해머는 작동방식에 따라 다시 유압식과 전기식 해머로 나눌 수 있는데, 유압식의 경우 경량이고 진동수 조절이 가능해 전기식에 비해 최근 많이 사용되고 있다(Viking, 2002). 하지만 진동해머의 시동을 켜고 끌 경우 진동해머 편심축의 이동에 따라 고유진동수의 변화로 진동해머에서 공진이 일어나 진동 및 소음이 크게 발생하는 문제점이 있다(Bingham et al., 2000).

최근 도심지 등에서는 강널말뚝을 포함하여 말뚝 항타시 진동 및 소음에 의한 민원이 증가하고 있다. 말뚝 시공시 발생하는 진동은 인접구조물에 부동침하뿐만 아니라, 구조물에 직접적인 진동을 전달하여 악영향을 줄 수 있다 (Kim et al., 1994; Kim and Drabkin, 1995; Drabkin et al., 1996). 특히 말뚝 항타 공법 중 타입공법은 상당한 지반 진동 및 소음을 발생시켜 도심지 등에서 이를 자제하는 추세이며, 진동 항타 공법은 타입공법에 비해 환경적 요인으로 인한 문제가 비교적 작아 수요가 증가하였다. 그러나 소음 및 진동 관련 규제들이 점점 강화됨에 따라, 진동해머에 의한 지반 진동 및 소음에 관련하여 민원 발생은 증가 추세이다. 그러나 진동해머에 의한 환경적 요인과 관련

한 국내외 현장시험 연구사례가 많지 않아 진동타입 말뚝의 항타거동이 명백히 규명되어 있지 않다고 볼 수 있다 (Lee et al., 2007).

이러한 지반 진동 및 소음을 감소시키기 위해서는 진동해머의 진폭을 줄이는 것이 진동이 가해지는 지역의 피해를 감소시키기 위한 보편적인 방법(Kim, 2000)이나, 현재 일반적으로 사용되는 진동해머는 진폭 고정형으로 진폭을 조절할 수 없는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 일반 유압진동해머의 시동과 정지 시 일어나는 공진 발생에 의한 진동 및 소음, 그리고 정격 출력 시 발생하는 지반 진동과 소음을 줄이기 위하여 진폭조절이 가능한 진폭가변형 유압진동해머를 개발하였다.

본 연구에서는 현장시험을 통해 전기진동해머, 일반 유압진동해머, 개발된 진폭가변형 유압진동해머에 대하여 작동 시 기진체(exciter)에서 발생하는 가속도, 변위, 소음을 측정하였으며, 비교 분석을 통해 개발된 진폭가변형 유압진동해머의 성능을 검증하였다. 또한, 널말뚝 시공에 따라 발생하는 지반 진동 및 소음 그리고 시공속도를 비교 분석하여, 진폭가변형 유압진동해머의 성능을 평가하고자 하였다.

2. 진폭가변형 유압진동해머 및 실험조건

2.1 진폭가변형 유압진동해머의 특징

일반적으로 전기진동해머는 Fig. 1(a)와 같이 크레인에 진동해머가 매달려 진동해머의 자중 및 진동하중에 의해 강널말뚝을 관입시키는 자유매달림식이며, 개발된 진폭가



(a) free-hanging vibratory-machine



(b) leader-mounted vibratory-machine system

Fig. 1. Vibratory-driving systems for tests

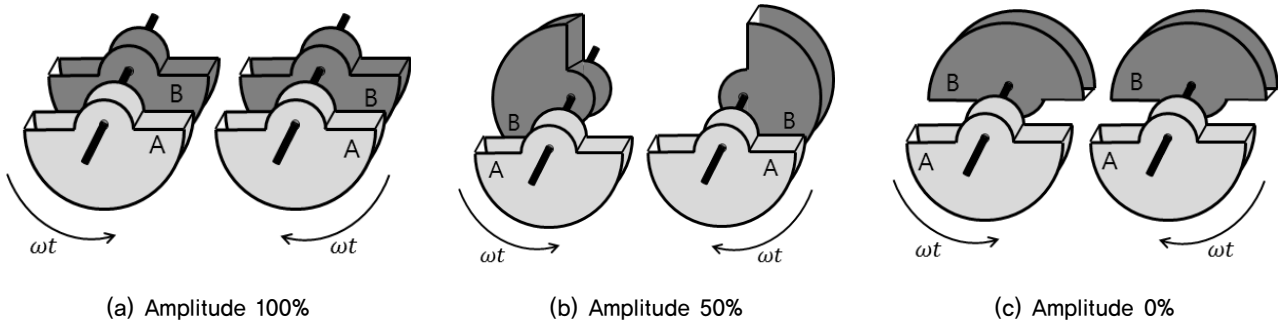


Fig. 2. Concept of vibro hammer with variable amplitude

변형 유압진동해머 및 일반 유압진동해머는 Fig. 2(b)와 같이 굴삭기에 진동해머가 설치되어 굴삭기의 추력 및 해머의 진동하중에 의해 강널말뚝을 관입시키는 리더탑재식 방법을 이용한다.

일반 건설현장에서 많이 활용되고 있는 자유매달림식 전기해머는 해머 구동부가 고정되어 있어 자유로운 강널말뚝의 그립(grip)이나 이동이 어렵다. 즉, 강널말뚝 그립시 말뚝을 와이어로 묶어 공중에서 비 고정상태로 진행되므로 난이도가 높아 작업시간이 오래 걸리며 안전사고 위험이 상존하고 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 진폭가변형 진동해머는 굴절시스템이 적용되어 구동부가 90° 굴절함으로써 해머 자체의 자유로운 회전운동으로 말뚝 그립이 용이하며, 지상에서 말뚝 그립 후 안정적으로 들어올린 후에 향타를 개시하므로 안전사고의 위험이 기존 공법 대비 상대적으로 매우 낮은 장점을 지니고 있다.

Fig. 2는 개발된 진폭가변형 유압진동해머의 개념도이다. 개발된 진폭가변형 유압진동해머의 기진체 내에는 두 쌍의 편심축이 존재하며, 한 편심축에는 A, B로 이뤄진 1조의 편심체가 있다. 각 편심질량(A, B)는 각속도 ω 로 회전을 하며 진폭을 100%로 조절 시에는 A, B 두 개의 편심체가 동일한 위치에서 작동을 하여 편심모멘트가 최대가 된다. 진폭을 0%로 조절 시에는 A, B 두 개의 편심체가 180° 회전돼 실질적 편심모멘트가 0이 되도록 설계하

였다. 진폭이 100%에서 0% 또는 0%에서 100%로 가변시 편심질량체는 Fig. 1(b)와 같이 회전하는 과정을 거친다. 또한 작업진행자가 임의로 진폭을 설정할 수 있기 때문에, 진폭을 조절을 통해 지반진동 및 소음을 줄여 민원 발생을 최소화할 수 있으며, 시동 걸 때와 끝 때 편심체 조절을 통해 편심모멘트가 0이 되도록 조절하여 공진이 발생하지 않도록 설계되었다.

2.2 현장 및 실험 조건

본 실험에서 적용된 전기진동해머(FM2-80)는 발전기의 전기를 이용하여 진동하중을 발생시키며, 일반 유압진동해머(DPD600T) 및 진폭가변형 유압진동해머(DSPD600T)는 굴삭기의 유압에 의해 진동하중을 발생시킨다. 본 실험에서는 전기진동해머의 기진력은 478kN, 일반 유압진동해머는 500kN, 진폭가변형 유압진동해머는 500kN으로 유사한 기진력을 갖는 장비를 사용하여 비교하였으며, 각 장비별 특징은 Table 1과 같다. 진폭가변형 유압진동해머는 진폭을 0~8.8mm까지 조절이 가능하며, 본 실험에서는 진폭가변형 유압진동해머의 진폭을 6mm, 4mm, 2mm로 변화시키면서 진폭가변형 유압진동해머의 성능을 평가하였다.

실험 대상 지반은 매립층 및 풍화토층으로 이루어진 서

Table 1. Basic performance data for vibratory drivers

Hammer Type	FM2-80	DPD600T	DSPD600T
Driving force (kN)	478	500	500
Eccentric moment (kg·m)	36	6,1	7
Frequency (Hz)	18,33	45,8	44,1
Total weight (kgf)	4750	2050	2560
Amplitude (mm)	9,5	8,8	N/A
Acceleration (g)	±12,8	±50	N/A

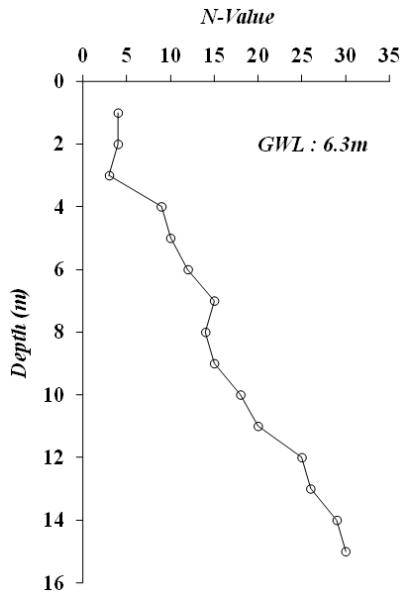


Fig. 3. Result of SPT tests

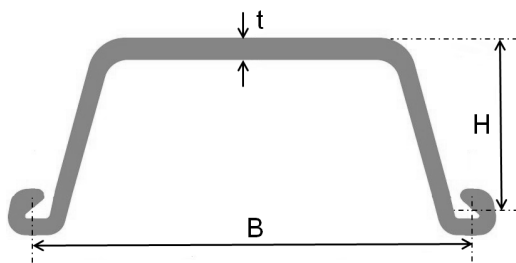


Fig. 4. Sheet pile used for tests

울 ○○지역 공사현장 지반으로, Fig. 3은 대상 부지의 표준관입시험 값을 보여주고 있다. SPT-N값은 4정도인 매립토는 3.3m까지 존재하며, 이후로는 풍화토가 존재한다. 풍화토의 N값은 널말뚝 시편의 길이(10m)를 고려하여, 진동해머에 의한 널말뚝 시공성이 가장 뛰어난 것으로 알려

져 있는 N값 20이내인 지반이다.

현장시험에서 적용된 시편은 SPIIIA(D)으로써 길이는 10m이며, Fig. 4와 같은 U자형 강널말뚝이다. 강널말뚝의 제원은 폭(B) 400mm, 높이(H) 150mm, 두께(t) 13mm, 단면적은 76.4cm²이며, 단면 2차 모멘트는 3060cm⁴이다. 본 연구에서는 강널말뚝의 맞물림효과(interlocking)을 고려하지 않은 단말뚝 조건에서 시험을 시행하였다.

본 실험에서는 향타 시간에 따른 관입 깊이를 측정하기 위해 강널말뚝 두부로부터 0.6m 지점과 지반으로부터 상부 0.1m사이에 wire 변위계를 Fig. 5(a)와 같이 연결하여 설치하였으며, 진동 및 소음을 측정하기 위해 Fig. 5(b)와 같이 일정 간격으로 진동 및 소음계를 설치하였다.

현장실험은 우선 해머 기진체의 성능을 검증하기 위하여 각각의 진동해머가 강널말뚝 없이 진동할 때 발생하는 소음 및 가속도를 측정을 하였다. 소음은 기진체로부터 15m 떨어진 곳에서 진동 및 소음 계측기인 SV-1을 이용하여 측정하였으며, 기진체의 가속도는 Fig. 5(c)와 같이 Measurement Speciaties사의 모델 4001A 가속도계를 사용하여 x, y, z 방향의 가속도 측정하였다. 본 현장실험에서 사용한 모델 4001A 가속도계는 압전(Piezo-electric)형식으로, 가속도계의 측정범위, 민감도, 주파수범위는 각각 ±50g, 40mV/g, 0~800Hz이다. 가속도 측정 시 일반 유압식 해머 및 진폭가변형 해머는 내부와 외부 박스로 이루어져 있기 때문에, 6개의 가속도계로 내·외부의 가속도를 모두 측정하였고, 이와 달리 전기식 해머는 하나의 박스로 되어 있어서 3개의 가속도계로 기진체 가속도를 측정하였다. 소음 측정 시에는 주변 소음을 최대한 배제하기 위해 차도로부터 30m이상 이격된 장소에서 실험을 진행하였다.



(a) wire type LVDT



(b) vibrometer and noisemeter



(c) accelerometer

Fig. 5. Measuring instruments



(a) Electric type



(b) Hydraulic type & Variable amplitude type

Fig. 6. In-situ tests

이후 Fig. 6과 같이 각 해머별로 강널말뚝 관입에 의한 관입성능 평가 및 소음과 지반진동을 측정 및 결과 비교를 통해 개발된 진폭가변형 유압진동해머의 성능을 검증하였다.

3. 기진체 성능 평가 결과

3.1 기진체 가속도 결과

Figs. 7~9는 각 진동해머의 기진체 가속도 결과를 보여주고 있다. 본 현장실험에서는 측정된 가속도 데이터를 고속푸리에변환(Fast-Fourier Transform, 이하 FFT)를 통하여 지배주파수를 분석하고, 분석된 지배주파수를 바탕으로 가속도 측정 시 잡음신호에 의해 교란된 가속도 신호를 후처리하기 위해 지배주파수 부근을 대역통과(band pass) 방식으로 필터링하였으며, 전기진동해머, 일반 유압진동해머, 진폭가변형 유압진동해머의 필터링 조건은 각각

16.6~22Hz, 47~50Hz, 47~50Hz로 설정하였다.

Fig. 7을 보면 전기식 해머의 관입방향인 z 방향의 가속도 크기가 약 50g 정도까지 발생하는 것으로 나타났다. x, y 방향의 가속도 또한 10g 정도까지 발생하였는데, 이는 해머의 기진력이 x, y 방향으로도 어느 정도 발생함을 나타낸다. Fig. 8의 일반 유압진동해머와 Fig. 9의 진폭가변형 유압진동해머의 기진체 가속도 결과를 보면 내부 박스 가속도에 비해 외부 가속도 결과가 전체적으로 작은 것을 알 수 있는데, 이는 내부와 외부 박스를 연결하는 연결부 댐퍼로 인해 가속도가 대부분 상쇄되었기 때문이다. 그러나 Fig. 8의 일반 유압진동해머는 1장에서 언급한 바와 같이 공진에 의해 시동시와 정지시 외부 박스 가속도가 약 50g까지 발생하는 것을 알 수 있으며, 이에 비해 Fig. 9의 진폭가변형 유압진동해머의 경우는 시동시와 정지시 편심체 조절을 통해 편심모멘트가 0이 되도록 조절하여 공진이 발생하지 않도록 설계되었기 때문에 급격한 가속도가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

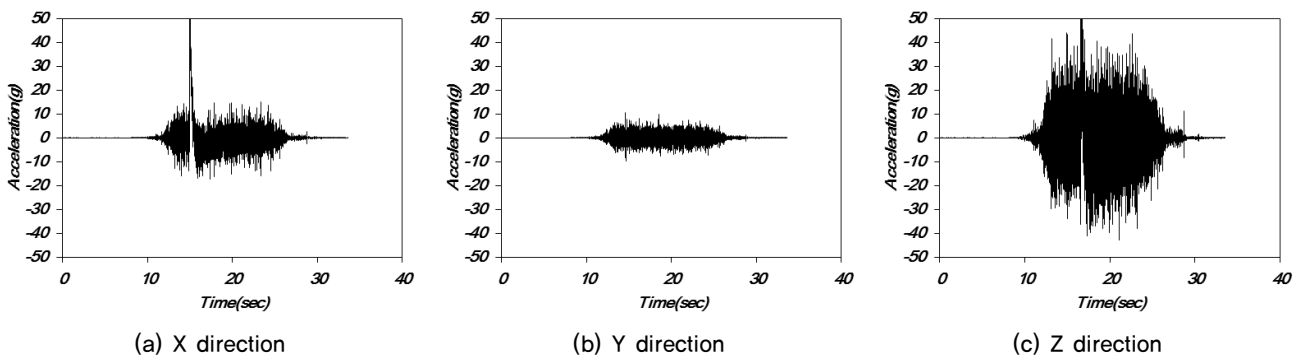


Fig. 7. Acceleration results (Electric type)

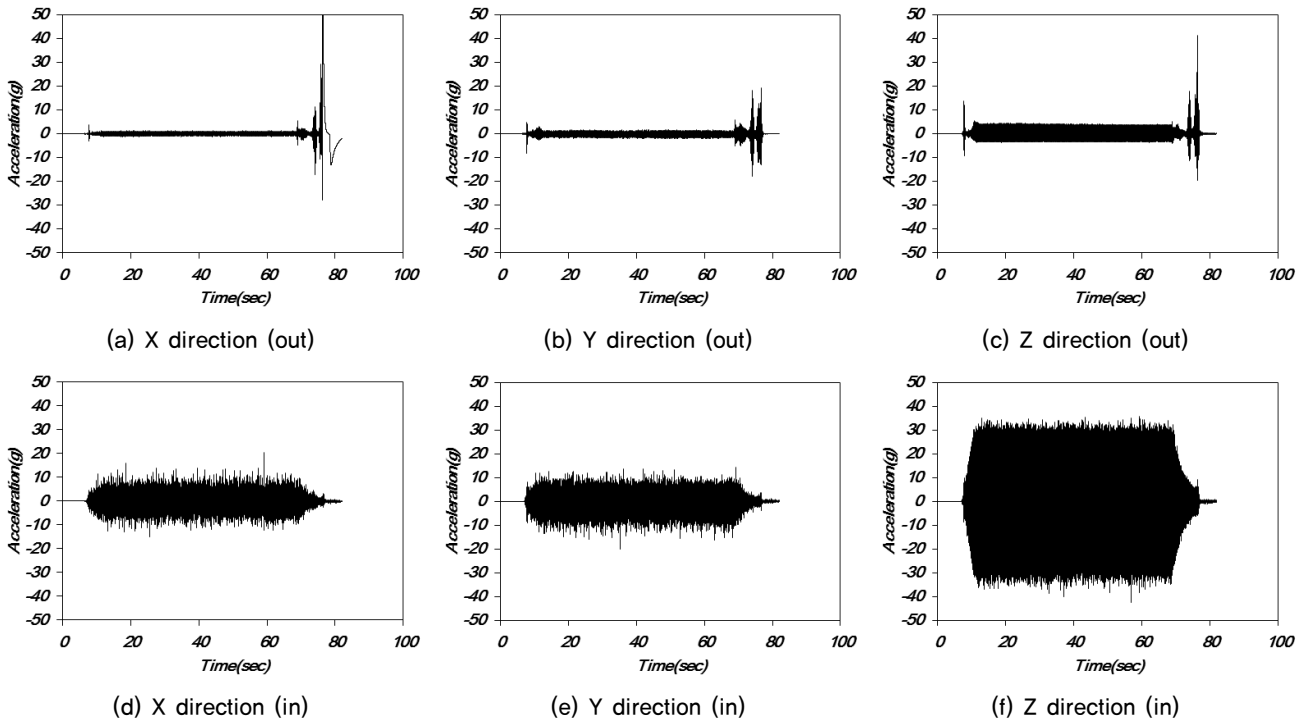


Fig. 8. Acceleration results (Hydraulic type)

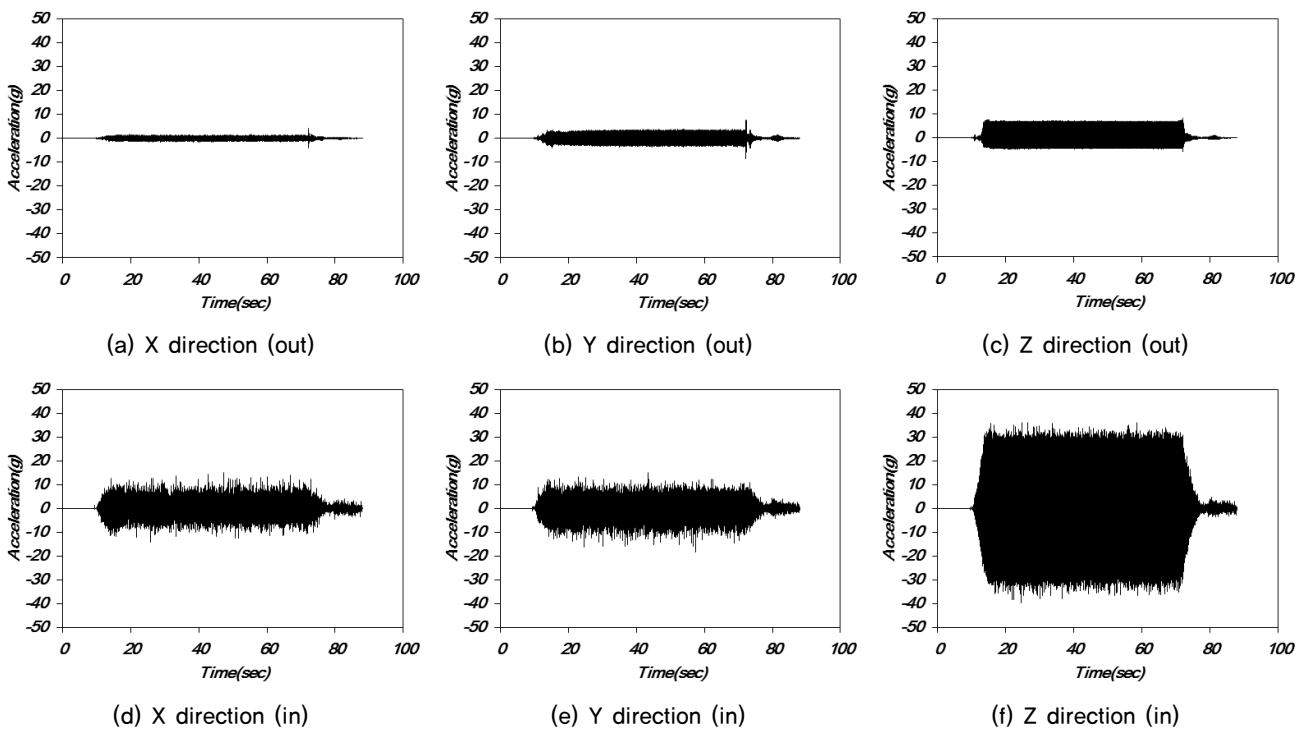


Fig. 9. Acceleration results (Hydraulic type)

또한 Fig. 10는 가속도-시간 이력 결과를 FFT를 이용해서 얻어낸 결과이며, y축의 Y(f)는 스펙트럴 가속도를 의미한다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 전기진동해머는 지배주파수가 18Hz였으며, 일반 유압진동해머 및 진폭가변형 유

압진동해머의 지배주파수는 약 40Hz였다.

Fig. 11은 진폭 가변에 따른 진폭가변형 유압진동해머의 기진체 내부 가속도 결과이다. Fig. 11(a)는 진폭가변형 유압진동해머의 진폭이 6mm일 때의 진동가속도 결과로

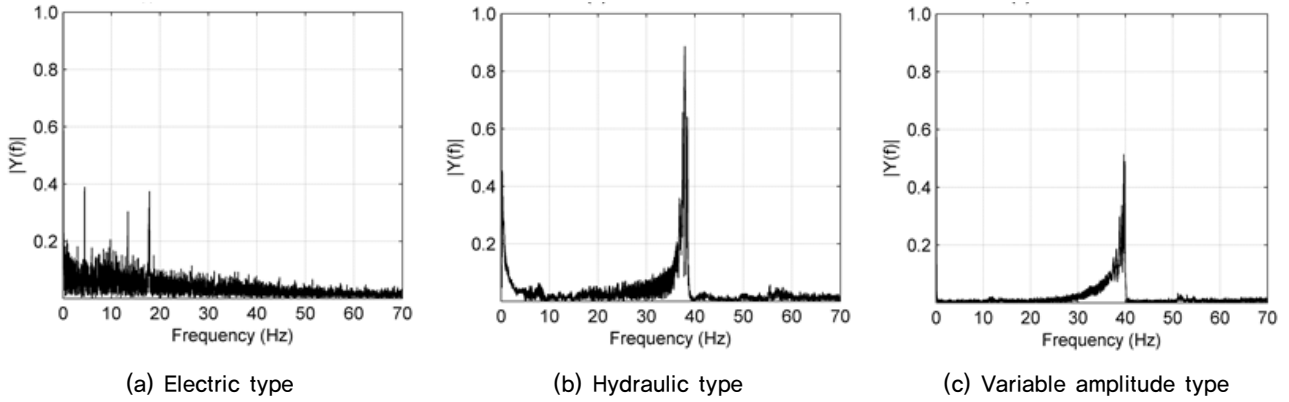


Fig. 10. FFT analysis by each hammer

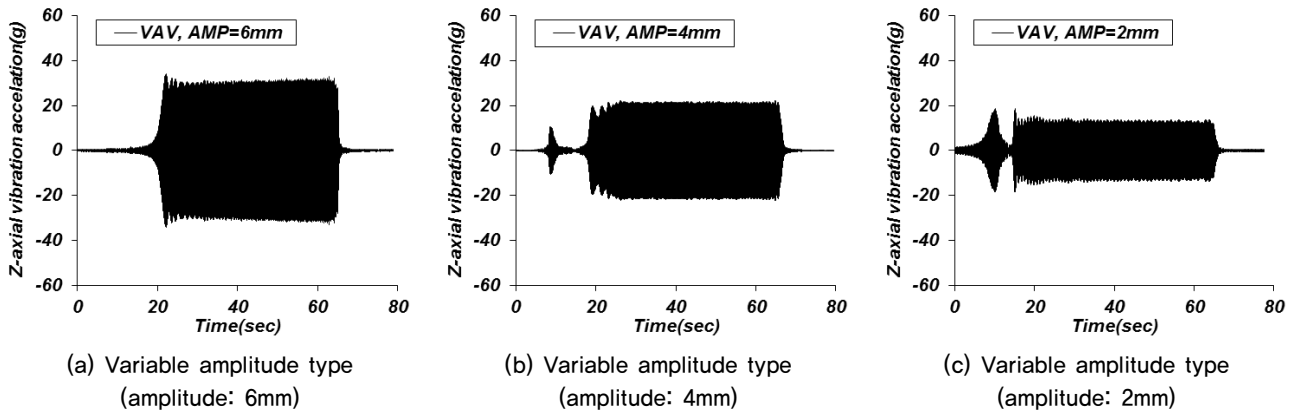


Fig. 11. Acceleration results with amplitude (Variable amplitude type)

$\pm 35g$ 의 진동가속도, Fig. 11(b)는 진폭가변형 유압진동해머의 진폭이 4mm일 때의 진동가속도 결과로 $\pm 20g$ 의 진동가속도, Fig. 11(c)는 진폭 조절가능 진동해머의 진폭이 2mm일 때의 진동가속도 결과로 $\pm 13g$ 의 진동가속도가 발생하였다. Fig. 11(b) 및 Fig. 11(c)를 보면 10초 부근에서 가속도가 발생하였다가 감소하는데 이는 작업자가 진동해머를 작동시킨 후 진폭을 조절하는 과정에서 발생된 결과이다. Fig. 11의 기진체 가속도 결과 기진체의 진폭이 가변함에 따라 발생 가속도가 감소함을 알 수 있다.

3.2 기진체 변위 결과

진동해머의 변위는 진동해머 작동 중 변위를 직접 측정하기 어렵기 때문에 측정된 가속도 결과를 이중 적분하여 계산하였다. 가속도 결과와 같이 대역통과(band pass) 방식의 필터링 기법을 이용하였으며, 발산되는 적분값은 Matlab의 detrend 함수로 보정하였다. Fig. 12는 각 진동해머의 변위 결과이다. 전기진동해머는 9mm($\pm 4.5mm$), 일반 유압진동해머는 9.8mm($\pm 4.9mm$) 정도의 진폭으로 수직운

동을 하였다. 실험으로부터 구한 진폭은 Table 1에 나타난 장비별 기본 사양과 거의 유사한 값으로 나타났음을 알 수 있다. 진폭가변형 유압진동해머의 경우 작업진행자의 조절에 따라 6, 4, 2mm($\pm 3, \pm 2, \pm 1mm$)의 진폭으로 수직운동을 하였다. 본 실험 결과로부터 개발된 해머는 사용자에 필요에 따라 임의로 진폭을 조절할 수 있음을 확인하였다.

3.3 기진체 소음 결과

기진체 소음은 기존 유압식해머에서 시동 및 정지 시 공진에 의해 발생하는 과도한 소음이 개발된 진폭가변형 장비에서 제거되었는지 평가하기 위하여 두 가지 장비에 대하여 약 10m 이격거리에서 강널말뚝을 그림하지 않은 조건에서 측정 비교하였다. Fig. 13에서 나타난 바와 같이 개발된 진폭가변형 유압진동해머는 기진체 가속도 결과와 마찬가지로 기존 일반 유압진동해머와 비교하였을 시 정지 시 과도한 소음이 제거되었으며, 이로 인하여 정지 시 민원요인인 소음 저감 효과를 확인할 수 있다. 또한 일반 유압진동해머와 비교하여 진폭가변형 유압진동해머의 소

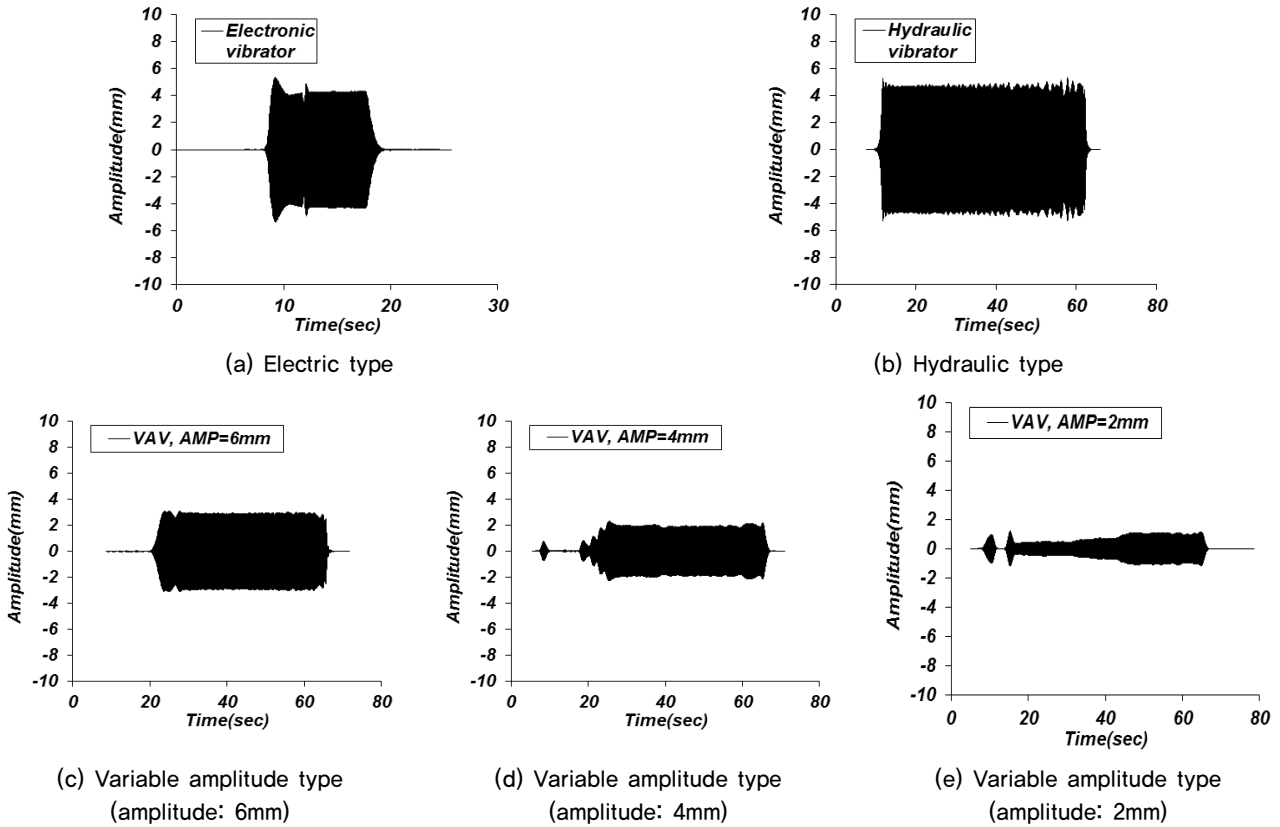


Fig. 12. Displacement results by each hammer

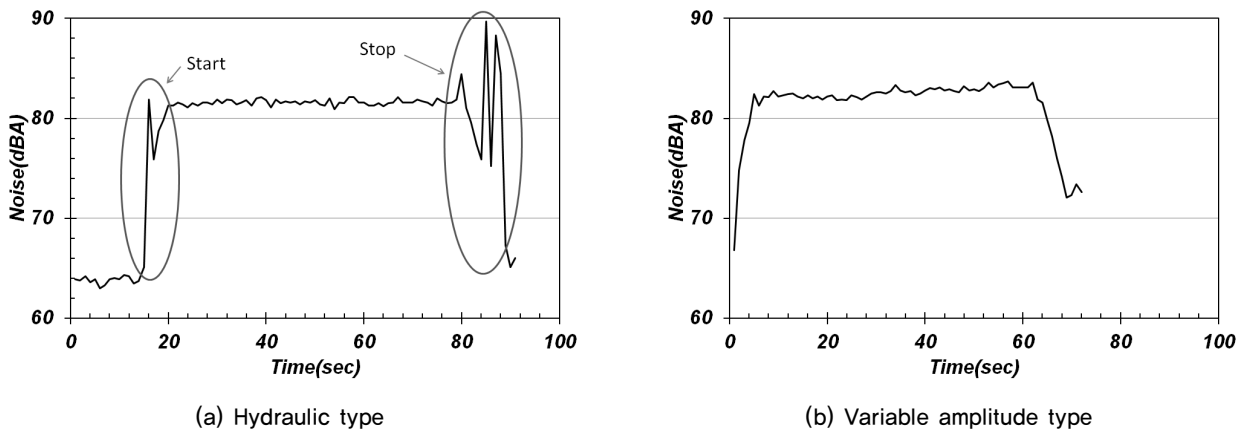


Fig. 13. Noise results

음이 최대 7dBA가 낮은 것을 확인할 수 있다.

4. 진동해머에 의한 강널말뚝 시공 현장시험 결과

4.1 관입성능 평가

강널말뚝 향타에 따른 시간-깊이 관계를 선형(wire type) 변위계를 통하여 산정하였다. 산정결과는 Fig. 14와 같으

며, 강널말뚝은 지반에서부터 약 7~8m까지 관입된 것을 알 수 있다. Fig. 14에서와 같이 시험 시작부터 약 1m까지의 기울기는 이후의 기울기보다 낮은 것을 알 수 있는데 이는 진동해머가 초기에 말뚝을 연직방향으로만 관입시키는데 쓰이지 않고 횡방향으로 힘을 발생시키는데도 쓰이기 때문이다(Lee et. al., 2007; Viking, 2002). 또한 깊이 4m 이후부터 기울기가 이전깊이에 비해 다소 낮은 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 15에서 관입깊이-속도 그래프에

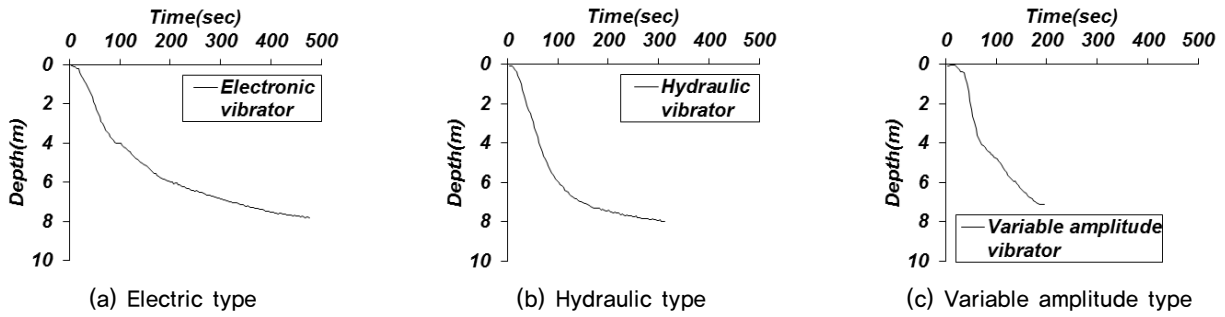


Fig. 14. Penetration depth vs. time

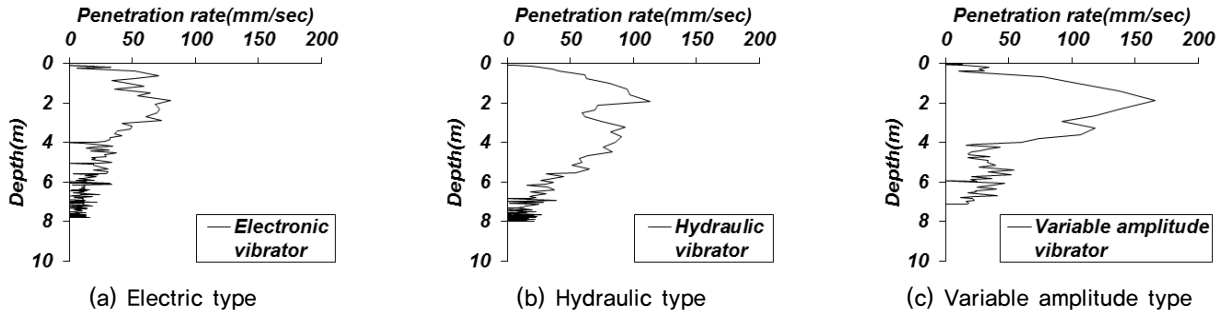


Fig. 15. Comparison of Penetration Rate

서 더 명확히 확인할 수 있다. Fig. 15의 관입깊이-속도 그래프는 3초 동안 와이어 변위계에 의한 깊이의 변화에 따른 평균 속도로 산정하였다. Fig. 15를 보면 전반적으로 2m 깊이까지는 말뚝의 관입속도가 상승하였으며, 이후로는 감소하였고, 특히 깊이 4m 이후로는 관입속도가 현저히 떨어졌다. 이는 Fig. 3의 지반조사 자료의 결과에서와 같이 깊이 4m부터 표준관입시험 N값이 크게 증가하기 때문이다.

동일한 시간에서 Fig. 14의 시간-관입깊이 그래프를 비교하면 유압진동해머가 전기식 진동해머보다 기울기가 급한 것으로 확인할 수 있으며, 유압진동해머에 비해 진폭 조절가능 진동해머가 기울기가 급한 것을 확인할 수 있다. 그러므로 상대적으로 진폭 조절가능 진동해머의 관입속도가 가장 빠르다는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 15의 관입깊이별 관입속도를 통해서도 알 수 있는데, Fig. 15(a)에서 전기식 진동해머는 최고관입속도 80.3mm/sec로 관입되었으며, 약 4m 이후로는 관입속도가 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15(b)는 유압진동해머의 관입깊이-관입속도이며 관입 시 최대 113.1mm/sec로 측정되었다. 전기진동해머와 마찬가지로 약 4m 부근에서 관입속도가 현저히 줄어들었으며, Fig. 15(c)의 진폭가변형 유압진동해머의 경우 진폭이 6mm일 때 관입 최대속도는 165.6mm/sec로 측정되었다. 전반적으로 리더탐재식

진동해머(일반 유압진동해머, 진폭가변형 유압진동해머)가 자유매달림식 진동해머(전기식 진동해머)가 보다 관입속도가 빠른 것으로 나타났다. 기진력이 유사한 조건에서 관입속도가 증가한 이유는 굴삭기의 추력에 의한 것으로 판단된다. 또한 진폭가변형 유압진동해머가 일반 유압진동해머에 비해 관입속도가 빠른 것으로 나타났는데, 이는 작업자가 강널말뚝이 관입될 때 굴삭기에 의한 추력을 증가시킨 것으로 사료된다.

또한 관입 초기에는 관입속도가 느리다가 관입정도에 따라 관입속도가 최대로 증가하였으며 약 4m 부근에서 지반강성의 변화로 인해 관입속도가 줄어들었다. 이는 앞서 설명한 것과 마찬가지로 강널말뚝 관입 초기에 강널말뚝이 수직방향뿐만 아니라 좌우로도 진동하여 에너지 손실이 발생하여 강널말뚝의 관입속도가 줄어든 것으로 판단된다. 본 실험 결과로부터 개발된 진폭가변형 유압진동해머가 기존 장비와 비교하였을 때 강널말뚝의 관입성능은 동등 이상이며, 추력에 의해 같은 기진력을 갖는 전기식 진동해머보다 관입속도가 증가됨을 보여주었다.

4.2 지반진동 결과

지반진동 관련 연구에 의하면 일반적으로 측정된 값 중 최대 입자속도를 지반진동의 대표값으로 산정한다. 이는

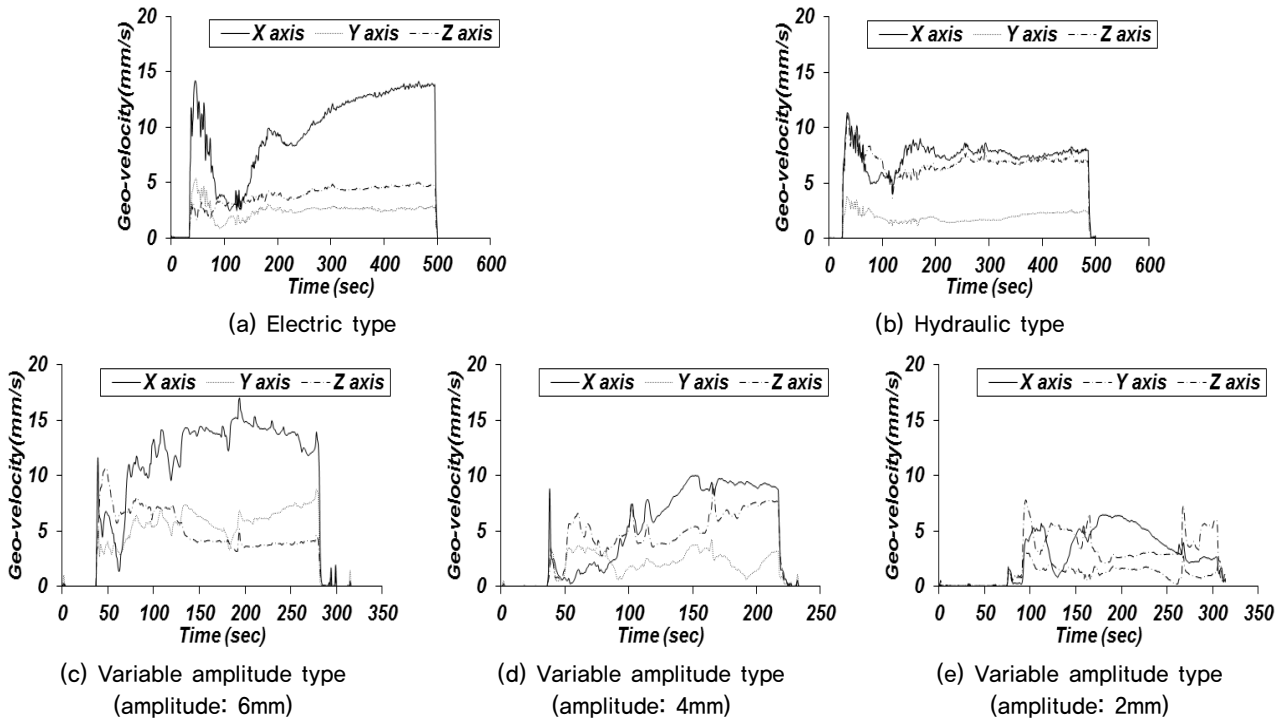


Fig. 16. Ground vibration results

구조물의 균열 발생이 입자속도와 밀접한 관계가 있기 때문이다(Dowding, 1996; O'Rourke and Hobelman, 1992). 이에 본 연구에서는 강널말뚝이 시공되는 지점으로부터 15m 떨어진 지점에서 지반 진동을 계측한 값 중 최대값을 비교 분석하였다. Fig. 16은 각 장비에 따라 강널말뚝 시공 시 15m에서 떨어진 지점에서 측정된 X, Y, Z축의 지반 진동속도이다. 전기식 진동해머의 경우 공운전시 진폭은 9mm(± 4.5 mm)이며 최대 지반진동은 14mm/s로 측정되었다. 일반 유압진동해머의 공운전시 진폭은 9.8mm(± 4.9 mm)이며, 14.5mm/s로 측정되었다. 진폭가변형 유압진동해머는 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 진폭을 6mm, 4mm, 2mm로 제어하였으며, 그에 따른 지반진동은 각각 17mm/s, 10mm/s, 8mm/s로 측정되었다. 일반적으로 진폭이 감소하게 되면 지반에 가해지는 변위 및 에너지가 작으므로 지반진동 또한 감소할 것으로 예상할 수 있으나, 실험 결과 진폭가변형 유압진동해머에서 진폭 6mm일 경우가 진폭이 약 9mm 정도인 전기식이나 일반 유압진동해머 실험시의 지반진동보다 크게 나왔다. 이는 단일 실험의 특정 위치에서 측정된 결과이며, 주변 지반의 비균질성으로 인해 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다. 그러나, 진폭이 6mm에서 4mm 및 2mm로 감소함에 따라 지반진동 또한 17mm/s에서 10mm/s와 8mm/s로 감소되는 것으로 나

타나 개발된 장비로 진폭을 조절하여 지반진동에 대한 민원을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 소음결과

우리나라 환경부 소음·진동 관리법에 따르면 주거지역 등에서의 공사장 소음규제기준은 야침·저녁 시간대에 60dB(A) 이하, 주간 시간대에 65dB(A)이하, 야간 시간대에 50dB(A) 이하로 제시되어 있으며, 특히 주간의 경우 특정공사 사전 신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 3시간 이하일 때는 +10dB(A), 3시간 초과 6시간 이하일 때는 +5dB(A)을 규제기준치에 보정하도록 되어 있다(ME, 2014). 본 연구에서는 1일 3시간 이하일 때의 +10dB(A) 보정치를 사용하여 주간 75dB(A)를 기준을 가지고 소음 결과를 분석하였으며, 일반적으로 소음에 의한 민원 발생 이격거리로 알려져 있는 건설현장으로부터 15m를 기준으로 소음 측정 결과를 분석하였다. 소음 측정 시 말뚝 관입 전 발생하는 주변 환경 소음을 확인하기 위하여 계측 시작 후 약 40~50초 후부터 강널말뚝 시공을 실시하였다. Fig. 17은 소음 발생지로부터 15m 떨어진 장소에서 측정된 진동해머별 강널말뚝 시공에 따른 소음 결과이다. 전기식 진동해머가 최고 98dB, 일반 유압진동해머가 87dB, 진폭가

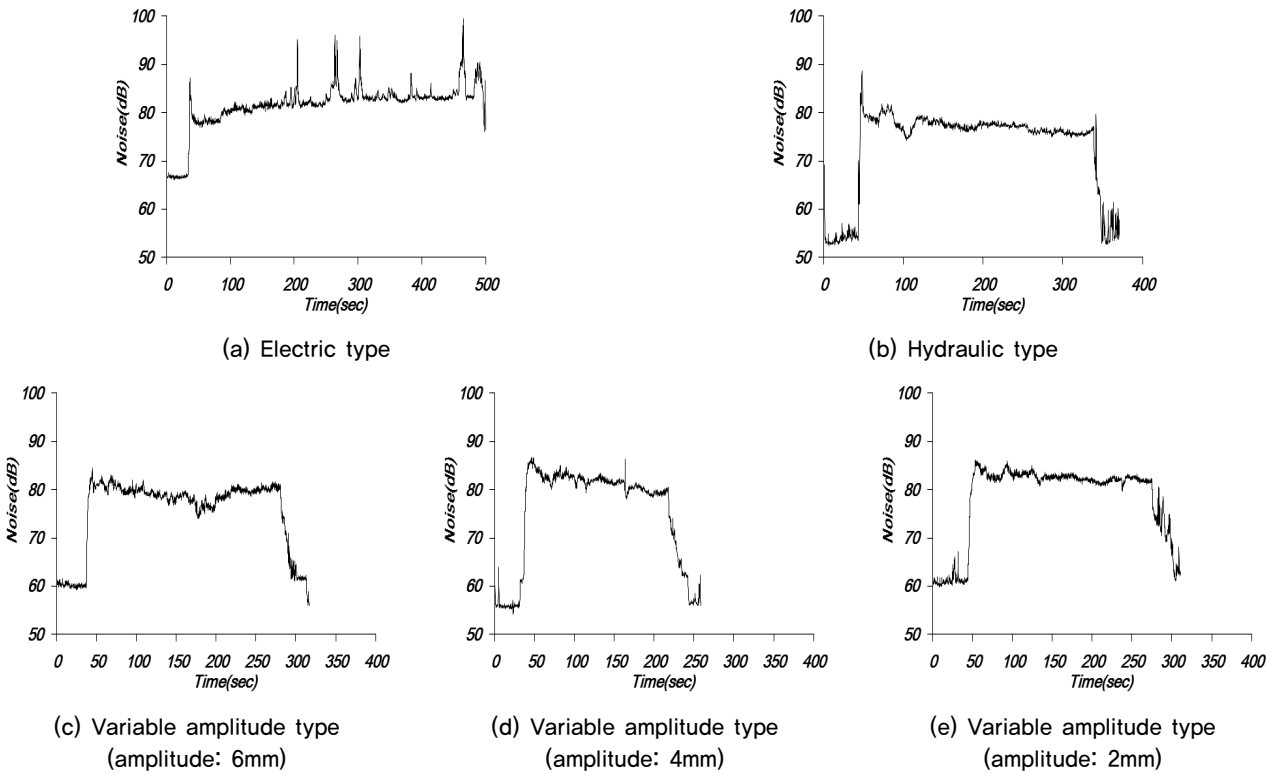


Fig. 17. Noise results

변형 유압진동해머는 진폭이 6mm, 4mm, 2mm일 때 각각 82dB, 83dB, 83dB로 측정되었다. 본 연구의 소음 측정 결과에 따르면, 본 현장실험에 사용한 장비는 모두 환경부 소음 기준 규제치를 상회하는 것으로 나타났다. 하지만, 전기식 진동해머는 관입시 소음이 크게 발생하였으며, 이 소음은 민원 발생의 요지가 가장 큰 것으로 확인되었다. 그림에서 0~50 초까지의 주변 환경 소음이 전기식 진동해머가 리터탑재식 진동해머에 비해 약 10dB 크게 측정되었다. 이는 전기식 진동해머 작동 시 필요한 발전기의 소음에서 기인한 것으로 보이며, 일반적으로 가청범위 내에서 소음이 10dB(A)가 증가하면 사람의 귀는 소음이 2배 더 큰 것으로 인식하는 것으로 알려져 있다. 진폭가변형 유압진동해머의 경우 전기식 진동해머 비해 소음이 작게 발생한 것으로 나타났으며, 진폭가변형 유압진동해머는 일반 유압진동해머에서 시동시에 공진에 의해 나타나는 과도한 소음(Fig. 17(b))이 사라진 것으로 나타나(Fig. 17(c)~ Fig. 17(e)) 이로 인한 민원 발생 가능성을 가장 낮은 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 진동해머를 이용한 강널말뚝 시공시 발생하는 지반진동 및 소음과 일반 유압식 진동해머의 시동과 정지 시 발생하는 공진 발생에 의한 진동 및 소음을 저감할 수 있는 진폭가변형 유압진동해머를 개발하였다. 진폭가변형 유압진동해머는 두 쌍의 편심체 수평 각도를 조절하여 기진체의 진폭을 조절할 수 있으며, 개발된 진폭가변형 유압진동해머의 성능을 평가하기 위하여 전기식 해머, 일반 유압진동해머, 진폭가변형 유압진동해머를 이용한 진동해머의 기진체 실험 및 강널말뚝 시공 현장 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 현장 성능 평가 결과 진폭가변형 유압진동해머는 기존 해머 대비 동등 이상의 강널말뚝 관입성능을 유지한 채 진동 및 소음을 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 특히 기존 유압식해머에서 시동 및 정지 시 공진에 의해 발생하는 과도한 진동 및 소음이 개발된 진폭가변형 유압진동해머에서 제거되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 강널말뚝 관입 시 발생하는 주변 소음 및 지반진동을 기존장비대비 저감할 수 있어, 강널말뚝 관입 작업 시 발생할 수 있는 민원 발생을 최소화 할 수 있는 것으로 기대되며, 향후 도심지공사나 민감시설 주변에서

의 강널말뚝 시공 및 설치에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the research project, “Development of High Efficiency and Low Vibration Sheet-pile Construction Method Using the Vibro Hammer with Variable Amplitude” funded by Daedong Eng. Co., Ltd.

References

1. Bingham, C.M., Stone, D.A., Schofield, N., Howe, D., Peel, D. (2000). “Amplitude and Frequency Control of a Vibratory Pile Driver”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.47, No.3, pp.623-631.
2. Dowding C.H (1996). *Construction Vibrations*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp.601.
3. Drabkin, S., Lacy, H., Kim, D. S. (1996). “Estimating settlement of sand caused by construction vibration”. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, Issue 11, pp.920-928.
4. Fleming, W.G.K., Weltnam, A.J., Randolph, M.F., Elson, W. K. (1992). *Piling Engineering*, 2nd ed., Wiley.
5. Kim, D.S., Drabkin, S., Rokhavarger, A., Laefer, D. (1994). *Prediction of low level vibration induced settlement*, Geotechnical special publication, Vol. 40. New York: ASCE, pp.806-817.
6. Kim, D.S., Drabkin, S. (1995). “Investigation of vibration induced settlement using multifactorial experimental design”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, Issue 4, pp.463-471.
7. Kim, Dong-Soo, Lee, Jin-Sun (2000). “Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.19, pp.115-126.
8. Lee, Seung-Hyun, Lee, Jong-Ku, Yoo, Wan-Gyu, Kim, Byoung-II (2007). “A Study on Vibratory Behavior of Steel Sheet Pile Installed in Sand Ground”, *The Journal of Korean geotechnical society*, Vol.23, No.4, pp.79-90.
9. Ministry of Environment (2014). Enforcement Regulations of Noise and Vibration Control Act.
10. O'Rourke D., Hobelman A.G. (1992). “Excavation and Support for the Urban Infrastructure”, *Geotechnical Special Publication*, American Society of Civil Engineers, No.33, pp.272-279.
11. Viking K. (2002). *Vibro-Driveability - A Field Study of Vibratory Driven Sheet Piles in Non-Cohesive Soils*, Ph.D thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, pp.10-12.