한국소음진동공학회논문집 제16권 제5호, pp. 514~520, 2006.

디지털 항타관리기(DPRMS)의 진동영향 평가 및 측정 정밀도 향상 방안에 관한 연구

Vibration Evaluation and Accuracy Improvement for a Digital Pile Rebounding and Penetration Monitoring System (DPRMS)

홍 정 택* · 이 계 영** · 이 상 헌** · 한 승 수** · 정 진 태†

Jungtaek Hong, Kyeyoung Lee, Sanghun Lee, Songsoo Han and Jintai Chung

(2006년 1월 26일 접수 ; 2006년 4월 20일 심사완료)

Key Words : DPRMS(디지털 항타 관리기), Line-scan Camera(일차원 카메라), Pile Driving(항타), Penetration Depth(관입량), Measurement Error(측정오차)

ABSTRACT

In this study, the performance of a digital pile rebounding and penetration monitoring system (DPRMS) is evaluated and the measurement precision of the DPRMS is improved. The DPRMS is a high speed line-scanning camera system to measure the rebound and penetration of a pile in a construction work. A main problem in the DPRMS is a measurement error, which is caused by a shock or vibration due to a hammer impact. The measurement error is investigated by analyzing vibration signals of the DPRMS during the impact. Moreover, the frequency response functions of the DPRMS are also analyzed. As a result, it is found that the tripod height has an influence on the DPRMS performance and a shorter tripod is better. One more founding in this study is that the DPRMS should be placed with a appropriate distance from a pile for improving the measurement precision.

1. 서 론

토목 및 건축현장의 기초공사에서 말뚝(pile)을 시공할 때는 말뚝이 어떻게 얼마나 관입되었는지를 판단할 방법이 필요하다. 말뚝을 어떠한 에너지로 얼마나 관입시켰느냐에 따라 말뚝이 발휘할 수 있는 지지력이 결정되기 때문이다. 따라서 건축현장에서는 몇몇 말뚝을 선택적으로 시험하여 확인하고 나머지는 최종 관입량(penetration)을 측정하여 시공관리를 하고 있다.

말뚝의 최종 관입량 측정방법은 수작업에 의한 방법과 LVDT(linear variable differential transformer)를 이용하여 연속적인 관입량을 측정하는 방법[1], 광학식 변위계를 이용하여 피측정물의 명암의 경계 변화량을 검출하는 방법, 레이저 센서(laser sensor)를 이용하는 방법[2]등이 사용되어 왔다. 그러나 이와 같은 기존의 방법들은 작업자의 안전성, 측정 범위의 한계, 항타(pile driving)에 의한 진동 및 주변의 환경적 요인에 의해 오차가 발생하는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완하여 개발된 것이 항타 관리기(digital pile rebounding and penetration monitoring system, DPRMS)[3~5]이다. 항타 관리기는 말뚝의 관입량 및 반발량(rebounding)을 측정할 수

† 책임저자, 정회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : (031) 400-5187, Fax : (031) 406-5550
* 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과
** 삼성물산㈜ 건설부문 기술연구소

있도록 자동화시킨 항타 관리 시스템이다. Fig. 1과 같이 항타 관리기의 구성요소로서 고속의 영상획득이 가능한 일차원 카메라(line-scan camera)와 말뚝에 부착되는 특정한 패턴을 갖는 표식(mark), 그리고 측정 데이터를 처리하는 PC로 구성되어 있다. 말뚝 항타시 카메라는 말뚝에 부착된 표식의 특정 패턴들 간의 길이 비를 측정하여 말뚝의 수직, 수평 및 회전 변위를 측정하게 된다.

그러나 항타 관리기는 정밀한 계측을 위해 항타 작업시 근접 측정을 필요로 한다. 이런 항타 작업은 순간적으로 말뚝에 강한 충격을 가하여 지반진동을 발생시켜 인접지반을 매개로 항타 관리기의 계측 환경에 악영향을 주어 측정 정보의 신뢰성 및 객관성을 감소시키고 있다. 따라서 자동화된 정밀측정의 방법으로 급부상하고 있는 항타 관리기의 완전한 현장 적용성과 성능 향상을 위하여 항타시 발생 가능한 진동영향을 평가하고 측정 정밀도 향상에 관한 방안을 제시하는 것이 절실히 요구된다.

2. 진동신호 계측 시스템

2.1 실험 대상

이 연구에서 디지털 항타 관리기를 Fig. 2에서 보는 바와 같이 편의상 3가지 모델로 분류하여 기술한다. 모델 1은 초기 개발 모델로써 카메라와 삼각대를 연결하는 조인트부분이 진동에 취약한 구조적 문제를 갖고 있다. 이 모델은 카메라의 무게중심과 삼각대 조인트 부분이 일직선상에 놓여있지 않아 건설현장에서 항타시 발생하는 지반진동의 영향을 민감하게 받는 구조를 가지고 있다. 모델 2는 모델 1의 이러한 취약점을 보강한 모델로써 삼각대 헤드의 연결부에 의해 카메라-삼각대의 조인트 강성이 부가되는 방식에서 헤드가 없는 구조로 볼트에 의해 강성이 부가되는 방식으로 삼각대를 변경하였다. 그리고 카메라 무게중심과 삼각대 조인트부를 일치시키기 위해 카메라 지지부의 구조를 변경하였다. 마지막으로 모델 3은 모델 2의 개선 사항을 모두 반영하고 실험현장에서의 휴대성 및 효율성을 고려하여 일반 PC에도 데이터 분석이 가능하도록 grabber를 카메라 구성부에 일체화한 항타 관리기이다.

현재까지 각 모델에 대한 진동영향 평가가 정량적으로 이루어지지 않았다. 건설현장에서 보다 신뢰성 있는 계측정보를 확보하기 위해서 위에 세가지 모델

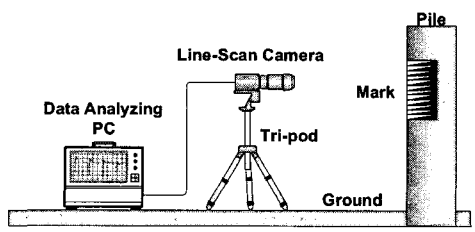
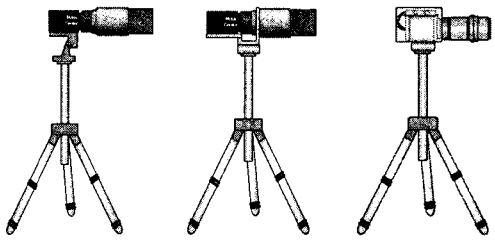


Fig. 1 Components of a DPRMS



(a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

Fig. 2 Various models of a DPRMS

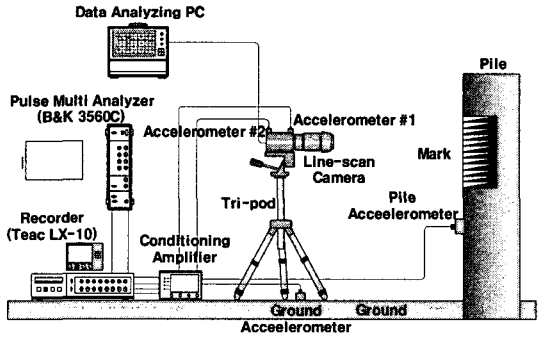


Fig. 3 Experimental set-up for the vibration signal analysis using a line-scan camera

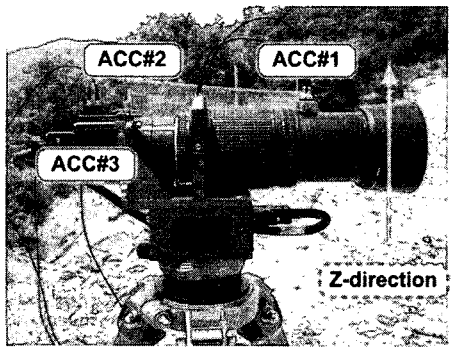


Fig. 4 Experimental conditions and items (Model 3)

에 대해서 항타시 발생하는 지반진동 전달에 의한 영향 평가를 수행할 필요가 있다.

2.2 실험 구성

카메라의 진동신호를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 계측 시스템을 구성하였다. 3축가속도계(B&K 4626A), 단축가속도계(B&K 4381)를 카메라와 지반, 말뚝에 부착하였다. 적분기가 내장된 신호증폭기(B&K Nexus & LION UV-60)를 사용하여 카메라 수직 방향 변위를 측정하였으며 지반과 말뚝에서는 가속도 신호를 계측하였다.[6] 레코더(Teac LX-10)을 사용하여 진동신호를 계측한 후 Pulse Multi Analyzer(B&K 3560C)를 이용하여 측정 데이터를 분석하였다. 또한 항타 관리기의 말뚝 변위 측정도 동시에 이루어졌다.

2.3 측정 조건 및 항목

항타 관리기 카메라부분의 진동 측정은 실제 말뚝 시공현장에서 수행되었다. 가속도계의 진동 변위와 카메라가 측정한 말뚝 변위를 상호 비교하기 위하여 두 측정 시스템의 샘플링 속도(sampling rate)를 2 kHz로 동일하게 설정하였다. 또한 각 모델에 대한 실험에 있어서 말뚝을 관입시키는 항타기의 햄머(hammer) 높이는 2 m로 일정하게 유지하였으며 총 10회의 항타에 대한 항타 관리기 카메라부분의 진동 신호를 측정하였다.

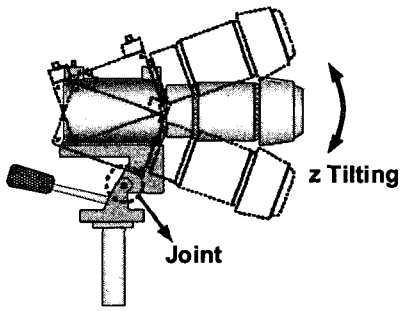
항타시 카메라 부분의 수직 방향 진동신호는 Fig. 4와 같이 렌즈부분, 중앙부분, 카메라 바디 부분에 각각 1개의 가속도계를 설치하여 측정하였다.

3. 진동신호 분석 및 평가

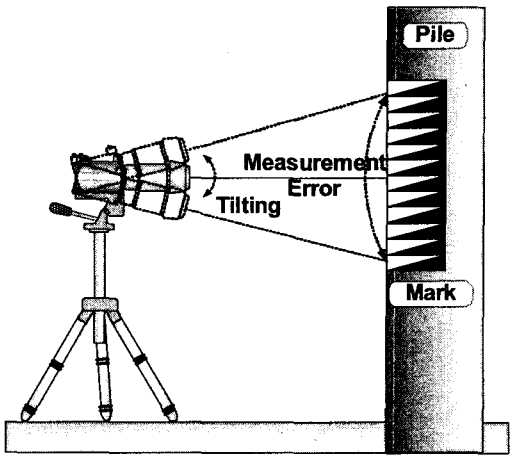
먼저 오차가 발생하는 가장 중요한 메커니즘으로서 Fig. 5(a)와 같이 나타낸 틸팅(tilting) 값을 얻기 위해 각 모델에 있어서 z방향 가속도계 1번 지점 변위에서 3번 지점 변위의 차를 구하였다. 그 후, Fig. 5(b)와 같이 말뚝에 부착된 표식과 카메라사이의 거리에 의해 비례적으로 발생하는 항타 관리기의 측정오차를 구하였다.

이 실험의 객관성을 부여하기 위하여 동일한 실험조건으로 각 모델에 대해 각각 10회 항타에 대해서 측정오차를 구해보았다. Fig. 6과 같이 각 항타에 대해 항타 구간, 여항타 구간으로 나누어 구간별 최대 측정오차 값과 진동 실효값(root mean square)을 구하였다. 여기서 최대 측정오차란 각 구간 중 가장 큰 피크(peak)값을 갖는 부분을 나타내는 것으로 항타 관리기의 진동영향을 파악할 수 있는 척도로 작용한다. 각 모델에 대해 여러 번 실험한 데이터 중에 하나인 측정오차 그래프를 Fig. 6에 나타내었고 여러 데이터들의 구간별 진동 실효값들과 최대 측정오차값들의 평균치를 Table 1에 나타내었다.

모델 3의 구간별 진동 실효값과 최대 측정오차값을 모델 1과 모델 2의 구간별 진동 실효값 및 최대 측정오차 값과 비교함으로써 모델 3이 모델 1과 모델 2에 비해서 얼마나 성능개선이 이루어졌는지를 알아보았다. 항타 구간에서 모델 3는 모델 1에 비해 진동 실효값 및 최대 측정오차 값에 있어서 각각 54.8 %, 55.9 %의 성능향상을 이루었고 여항타 구



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Z-direction titing of line-scan camera
(b) Measurement error of line-scan camera

간에서 각각 68.6 %, 74.9 %의 성능 향상을 이루었다. 마찬가지로 항타 구간에서 모델 3는 모델 2에 비해 진동 실효값 및 최대 측정오차 값에 있어서 각각 50.0 %, 49.6 %의 성능 향상을 이루었으며 여항타 구간에서는 각각 46.8 %, 66.9 %의 성능 향상이 이루어졌다.

이것은 모델 3이 모델 2와 같이 취약점을 보강한 모델로써 설계 단계에서부터 카메라 및 grabber의 무게중심이 삼각대 조인트부와 정확하기 일치되게 설계하였으며 삼각대 헤드의 조임부에 의해 카메라-삼각대의 조인트 강성이 부가되는 방식에서 헤드가 없는 구조로 볼트에 의해 강성이 부가되는 방식으로 삼각대를 변경함으로써 발생한 효과라고 볼 수 있다. 또한 모델 1과 모델 2에서는 찾아볼 수 없는 지그(jig)를 설계 장착함으로써 grabber와 카메라를 일체화 시킴과 동시에 카메라 틸팅 현상을 감소하도록 하는 효과를 발생 하였다.

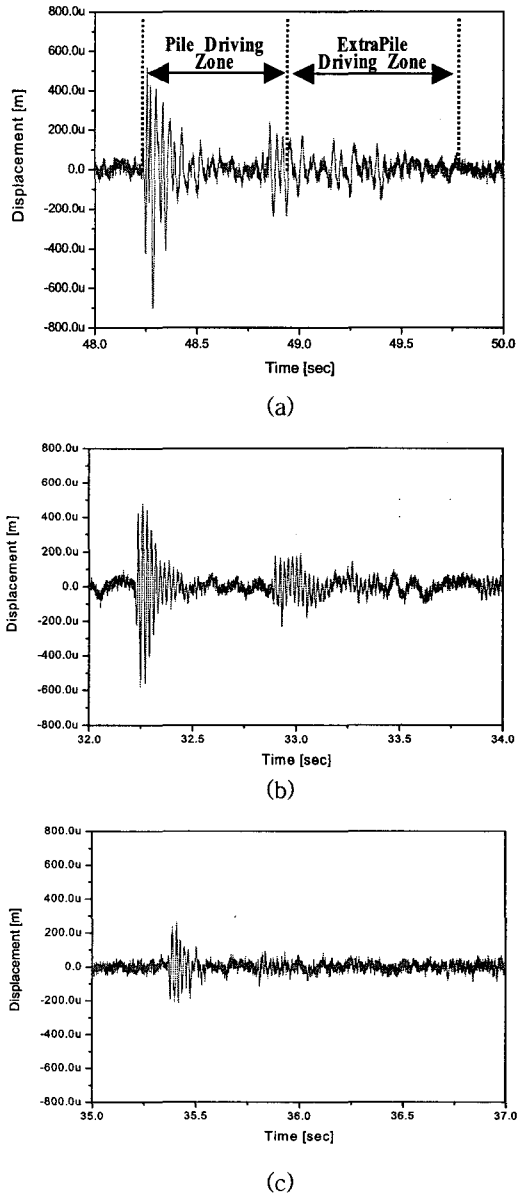


Fig. 6 Measurement error : (a) model 1, (b) model 2, (c) model 3

4. 측정 정밀도 향상 방안

4.1 공진 현상으로부터 안전한 모델 3의 삼각대 높이 제시

현재 건설현장에서 항타 관리기 사용시 삼각대 높이에 대한 아무런 제한 사항이 존재하지 않는다. 항타 관리기는 삼각대의 높낮이에 따라 고유진동수가 변하며 이 고유진동수가 지반진동의 가진 주파수와 일치하게 되면 공진현상이 발생할 가능성이 높아지게 되고 이것은 항타 관리기의 측정 정밀도를 크게 저하시킬 수 있는 요인으로 작용될 수 있다.

Fig. 7은 항타시 발생하는 지반진동에 대한 주파수 분석결과이다. 지반진동은 주로 10 Hz ~ 70 Hz 대역의 주파수 성분으로 이루어져 있으며 이 주파수 영역 중에 인접지반을 통해 카메라-삼각대를 직접 가진하는 주요 주파수 성분은 10 Hz ~ 70 Hz 임을 알 수 있다.

모델 3의 고유진동수가 지반진동의 주요 가진 주파수 영역에 포함될 경우에는 시스템의 공진 발생 우려가 있으며 건설현장에서의 신뢰성 높은 말뚝 변위측정에 어려움이 따르게 되므로 모델 3의 삼각대

Table 1 Comparison of various models

	Pile driving zone		Extra pile driving zone	
	Max. measurement error	Vibration (RMS)	Max. measurement error	Vibration (RMS)
Model 1	0.621	0.146	0.334	0.105
Model 2	0.544	0.132	0.254	0.062
Model 3	0.274	0.066	0.084	0.033
Improvement of model 3 to model 1	55.9%	54.8%	74.9%	68.6%

높낮이 변화에 대한 모달 테스트를 수행해 봄으로써 모델 3의 고유진동수가 지반진동의 주요 가진 주파수 영역에 포함되는지를 확인하는 작업을 수행하였다.

여기서, 지반진동은 지반 특성에 따라 지반의 주파수 특성이 달라진다. 따라서, 실험할 때마다 지반의 주파수를 측정하여 그 기준으로 삼았다.

(1) 실험 구성 및 측정 조건

모델 3의 고유진동수를 구하기 위해서 Fig. 8과 같이 실험장치를 구성하였다. 총 3개의 가속도계(B&K 4626, 4626A, 4393), 충격해머(impact hammer B&K 8202), 신호증폭기(nexus), 주파수 분석기(B&K 3560C)가 사용되었다. 카메라에 가속도계를 #1~#3번 지점까지 부착하고 충격해머를 사용하여 가진 하였다. 모델 3이 삼각대 높이에 따라 어떤 고유진동수 변화가 일어나는지 확인하기 위해 삼각대를 72 cm, 90 cm, 117 cm로 변화해 가며 충격 해머 테스트를 수행하였다.

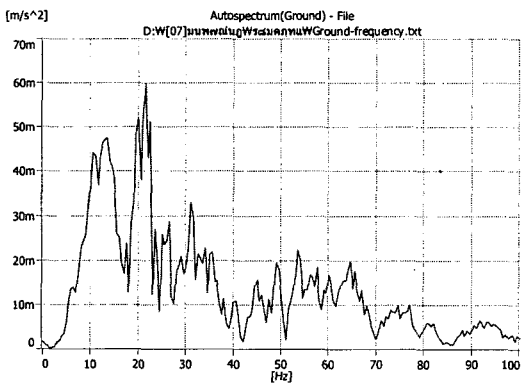


Fig. 7 Frequency spectrums of ground excitation

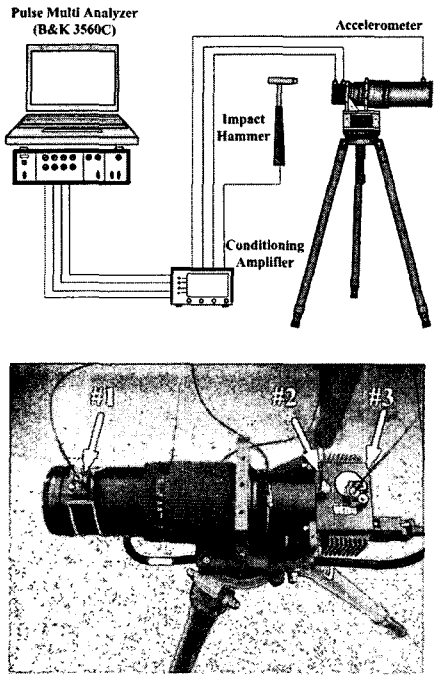


Fig. 8 Impact hammer testing

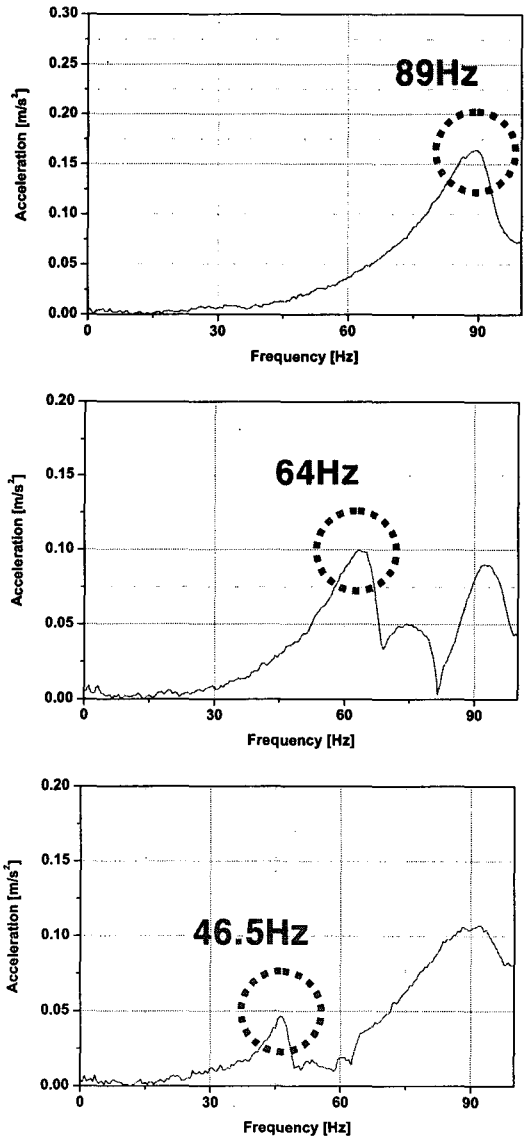


Fig. 9 Natural frequencies of system
: (a) 72 cm, (b) 90 cm, (c) 117 cm

(2) 모델 3의 동특성 해석

Fig. 9는 삼각대 높이에 따른 모델 3의 충격 햄머 테스트 결과를 나타내는 주파수 응답함수이다. 삼각대 높이를 72 cm로 조절했을 경우에 기본 고유진동수는 89 Hz로 지반진동의 가진 주파수 대역인 10 ~ 70 Hz 와는 상당히 거리가 있으므로 지반진동에 대한 공진현상은 우려할 필요가 없다. 그러나 삼각대 높이가 90 cm 일 경우와 117 cm 일 경우의 기본 고유진동수는 각각 64 Hz와 46.5 Hz 로써 모두 지반진동의 가진 주파수 대역에 포함되므로 항타시 카메라에 공진이 발생할 가능성이 크다. 지반 진동의 가진 주파수 대역으로부터 안전한 최소한의 삼각대 높이를 보간법을 이용하여 구한 결과 약 85 cm 였다. 즉, 건설현장에서 모델 3을 이용하여 항타시 파일의 변위를 측정할 경우에는 삼각대의 높이를 85 cm 미만으로 설정한 후 측정을 하는 것이 공진을 피할 수 있는 바람직한 방법이라 할 수 있다.

4.2 모델 3에 대한 말뚝으로부터의 최소 적정거리 제시

항타 관리기는 말뚝의 최대 침하량 및 리바운드량(Fig. 10)을 객관적으로 측정함에 따라 말뚝의 최종 관입량 이외에도 과항타 방지, 지반의 상태를 추정할 수 있는 데이터를 제공해준다. 이것을 항타 관리기를 이용한 변위-시간 이력 항타 관리기법이라고 하는데 변위-시간 이력 항타 관리기법에서 최대 침하량 및 리바운드량의 정확한 측정은 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 항타 관리기로 최대 침하량 및 리바운드량 부분까지 지반진동의 영향 없이 측정하기 위해서는 말뚝으로부터 항타 관리기까지의 거리가 중요하게 작용한다. 항타 관리기가 말뚝과 밀접하게 설치되어져 있다면 말뚝의 최대침하량 및 리바운드량을 측정하기 이전에 지반진동이 삼각대 부분에 전달되어 많은 오차가 포함된 측정값을 얻게 된다. 지반진동을 피하기 위해서 항타 관리기를 말뚝으로부터 너무 멀리 설치하게 되면 카메라가 말뚝에 붙어있는 마크(mark)를 포커싱 하지 못하게 된다.

현재 건설현장에서 항타 관리기 사용시 말뚝과 항타 관리기 사이거리에 대한 아무런 제한 사항이 존재하지 않는다. 최대 침하량과 리바운드량을 지반진동의 영향 없이 정밀하게 측정하기 위해 말뚝으로부터 항타 관리기까지의 최소한의 거리가 정립 되어져야 한다.

Fig. 11에서 보면, 항타 관리기가 항타 시 반응하는데 걸리는 시간은 약 20 ms이다. 하지만 항타 시 발생하는 지반진동이 항타 관리기의 카메라 부분까지 전달되어 측정오차를 발생하게 하는데 까지 걸리는 시간은 17 ms이다. 이것은 Fig. 11에 나타난

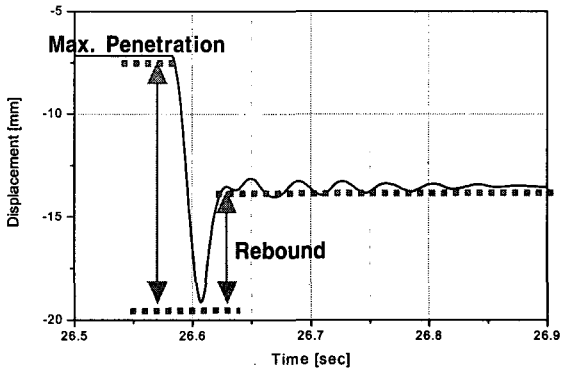


Fig. 10 Maximum penetration and rebounding value

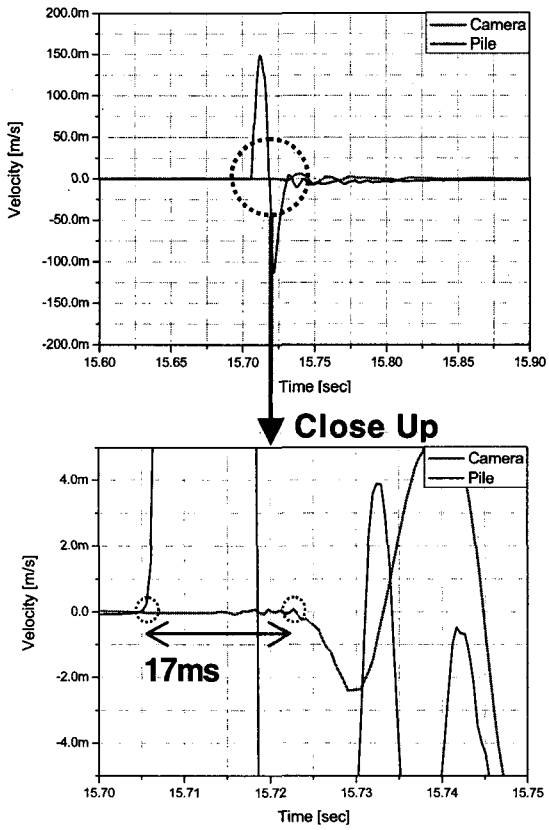


Fig. 11 The measurement signals from the pile and camera

바와 같이 항타시 말뚝과 항타 관리기 카메라 부분의 진동신호를 동기화 시키고 이 신호를 분석해본 결과 나타난 사실이다. 즉, 말뚝의 관입 부분 및 리바운드 부분을 측정하는데 필요한 20 ms 중 3 ms 정도가 측정오차를 포함하고 있다는 것을 의미한다.

이 실험을 수행할 당시 말뚝과 카메라 사이의 거리는 3.75 m 였다. 말뚝과 카메라 사이의 거리와 항타시 지반진동이 카메라까지 전달되는 데에 걸리는 시간 17 ms를 이용하여 지반진동의 전달속도를 계산해 본 결과 지반진동의 전달 속도가 220.6 m/s 임을 알 수 있었다

지반진동의 전달속도와 항타시 말뚝의 관입 부분 및 리바운드 부분을 측정하는데 걸리는 시간을 알고 있으므로 항타 관리기를 이용하여 관입 부분과 리바운드 부분을 오차없이 측정하기 위해 필요한 말뚝으로부터 카메라까지의 최소한의 거리는 4.41 m임을 알 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 토목/건축 공사 현장에서 말뚝의 관입량 및 반발량을 측정하는 항타 관리기의 진동 영향을 분석하였다. 진동에 취약한 구조를 띄고 있던 항타 관리기의 초기 모델인 모델 1과 취약점을 개선하기 위해 구조를 변경한 모델 2의 항타시 지반진동에 대한 영향을 정량적으로 평가하였다. 또 건설현장에서 데이터 분석의 효율성을 증진시키기 위해 개발된 grabber · 카메라 일체형 항타 관리기인 모델 3에 대해서도 지반 진동에 대한 정량적 평가를 수행하였다.

이 모델 3은 모델 1,2에서는 없었던 지그를 장착하여 틸팅 현상을 줄임으로서 모델 1에 비해 항타 구간에서는 55.9 %(최대측정오차), 여항타 구간에서는 74.9 %(최대측정오차)의 성능향상을 보였다.

충격 해머와 laser scanning vibrometer를 이용하여 모델 3에 대한 동특성(dynamic characteristic)을 분석한 후 삼각대 높낮이에 따른 고유진동수를 추출 하였다. 이미 데이터를 확보한 항타 시 지반진동의 주파수분석 자료와 고유진동수를 비교하여 건설현장에서 실험시 항타 관리기가 공진 영역에 포함되지 않기 위해서는 삼각대 높이를 85 cm 미만으로 하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

말뚝과 카메라사이의 동기화 된 신호를 분석함으로써 지반진동의 전달 속도가 220.6 m/s임을 알 수 있었고, 말뚝의 최대 관입량과 리바운드량을 오차없이 측정하기 위해 필요한 말뚝으로부터 카메라까지의 최소 거리는 4.41 m임을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Housel, W. S., 1965, Michigan Study of Pile-driving Hammers, Proceeding of the ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations, Vol. 91, No. SM5, pp.37~64.

(2) Han, S.-S. and Kim, S.-H., 2000, "Pile Rebound and Penetration Monitoring System using Speckle Laser Sensors," Technical Report 2000-0415, Research Institute of Construction Equipment, Samsung Corporation.

(3) You, B.-J., Oh, S,-R., Han, S,-S. and Lee, S,-H., 2003, "High-speed Visual Measurement System of Pile Penetration and Rebound Movement for Construction," 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 435~441.

(4) Lee, S.-N., You, B.-J., Limb, M.-S., Oh, S.-R., Han, S.-S., and Lee, S. H., 2002, "Visual Measurement of Pile Penetration and Rebound Movement Using a High-speed Line-scan Camera, " IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '02), Vol. 4, pp. 4307~4312.

(5) Lim, M.-S., You, B.-J., Oh, S.-R., Han, S.-S., and Lee, S. H., 2002, "Visual Precise Measurement of Pile Rebound and Penetration Movement Using a High-speed Line-scan Camera," Transaction on Control, Automation and Systems Engineering, Vol.4, No.4, pp. 341~346.

(6) Lee, G. Y., Jeong, D. H., Jeong, J. T., Im, H. S., and Kim, Y. H., 2003, "A Study on the Noise and Vibration Reduction of an Industrial Robot," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 838~844.