

진동신호 분석을 통한 DPRMs의 성능평가

최영삼[†] · 신창호^{*} · 정진태^{**} · 한송수^{***} · 이상현^{***} · 이계영^{***}

Evaluation of Performance of a DPRMs by the Vibration Signal Analysis.

Youngsam Choi, Chanho Shin, Jintai Chung, Songsoo Han, Sangheon Lee and
Kyeyoung Lee

Key Words : DPRMs(말뚝 변위 측정 시스템), Line-ScanCamera(일차원 카메라), Pile Driving(항타), Penetration Depth(관입량), Measurement error(측정오차)

Abstract

In this study, the performance of the DPRMs is evaluated and the measurement precision for the pile driving is presented. The DPRMs is a visual-measurement system for the pile rebound and the penetration movement using a high speed line-scan camera. But the measurement errors of the DPRMs are caused by the strong impact for the pile driving. Therefore, the DPRMs should guarantee its measurement values for the pile driving. For this reason, the performance of the DPRMs by the vibration signal analysis is studied. It is found from this study that the measurement values of the DPRMs are reliable.

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 최종관입량을 측정하여 시공 관리를 하고 있다.

말뚝의 최종관입량의 측정방법은 수작업에 의한 방법과 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 연속적인 관입량(penetration)을 측정하는 방법⁽¹⁾, 광학식 변위계를 이용하여 피측정물의 명암의 경계 변화량을 검출하는 방법, 레이저 센서(laser sensor)를 이용하는 방법⁽²⁾ 등이

사용되고 있다. 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 DPRMs(Digital Pile Rebounding and penetration Monitoring System)⁽³⁻⁵⁾이다. DPRMs은 말뚝의 관입량 및 반발량(rebounding)을 측정할 수 있도록 자동화시킨 항타 관리 시스템이다. Fig.1 과 같이 DPRMs의 구성요소로서 고속의 영상획득이 가능한 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 길이비를 측정하여 말뚝의 수직, 수평 및 회전 변위를 측정하게 된다.

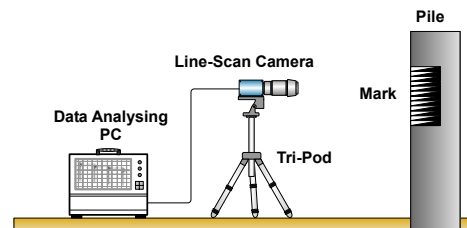


Fig. 1 Components of DPRMs

[†] 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과
E-mail : ssamii@ihanyang.ac.kr
TEL : (031)406-6964 FAX : (031)406-6964

^{*} 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

^{**} 책임저자, 정회원, 한양대학교 기계공학부

^{***} 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

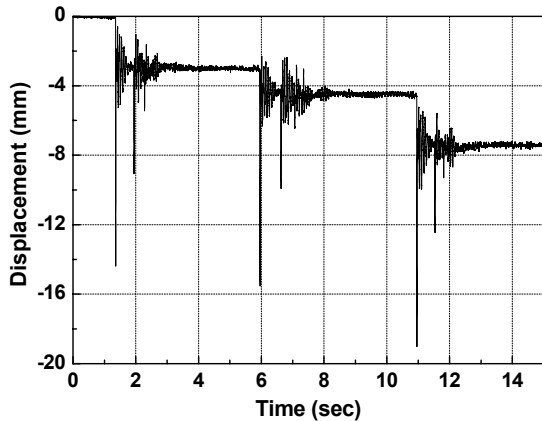


Fig. 2 Measurement for a Real Pile Movement

Fig.2 와 같이 DPRMs 은 항타시 카메라의 영상으로 말뚝의 반발량 및 최종관입량을 절대 변위로 측정하게 된다.

그러나 DPRMs 은 정밀한 계측을 위해 항타작업시 근접 측정을 필요로 한다. 이런 항타작업은 순간적으로 말뚝에 강한 충격을 가하여 지반진동을 발생시켜 인접지반을 매개로 DPRMs 의 계측 환경에 충격 및 진동등의 악영향을 주어 측정 정보의 신뢰성 및 객관성을 감소시키고 있다. 따라서 자동화된 정밀측정의 방법으로 급부상하고 있는 DPRMs 의 완전한 현장 적용성과 성능 향상을 위해 항타시 발생 가능한 진동영향을 평가하는 것이 절실히 요구된다.

본 연구의 목적은 항타시 카메라의 진동에 의한 DPRMs 의 측정오차(measurement error)를 분석하고 항타 시작 시점에서 DPRMs 이 측정한 말뚝의 반발량 및 항타 종료 시점에서의 최종관입량에 대한 측정 데이터의 신뢰성을 확보하는 것이다.

2. 진동신호 계측 시스템

2.1 실험구성

카메라의 진동을 측정하기 위해 Fig.3 과 같이 계측 시스템을 구성하였다. 3 축가속도계를 카메라의 1 번 지점과 2 번 지점에 부착하고 적분기(integrator)를 내장한 증폭기(conditioning amplifier-Rion UV-06A)를 사용하여 항타시 카메라의 진동을 변위로 측정하였다. 그리고 레코더(recorder-Teac LX-10)와 Pulse Multi Analyzer(B&K 3560C)를 이용하여 측정 데이터를 분석하였다.

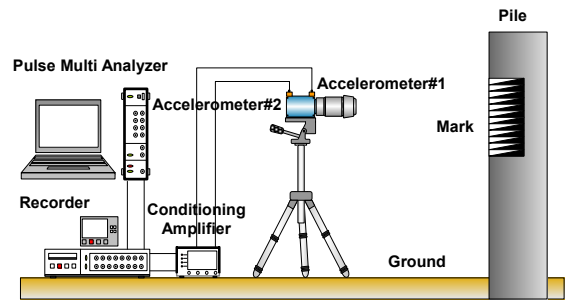


Fig. 3 Experimental Set-up for the vibration signal Analysis of a Line-Scan Camera

2.2 측정조건 및 항목

DPRM 시스템의 진동 측정은 잠실 4 단지 재건축 공사현장에서 유사한 지반조건을 갖는 3 개의 항타지점을 선정하였다. 다음과 같이 항타시 카메라의 수평 방향(y)과 수직 방향(z)의 변위를 3 축가속도계의 y, z 방향의 변위를 측정하였고 동시에 DPRM 시스템도 항타 말뚝의 y, z 방향의 진동을 측정하였다. 가속도계의 진동신호 변위와 카메라 측정신호를 상호 비교하기 위하여 두 측정 시스템의 샘플링 속도(sampling rate)를 2kHz 로 동일하게 설정하였다. 또한 말뚝을 관입시키는 항타기의 햄머(hammer) 높이는 2m 로 일정하게 유지하였다.

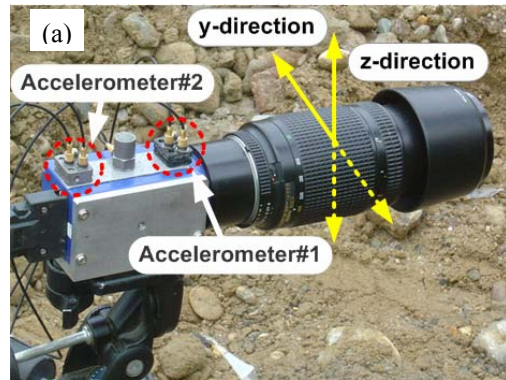


Fig. 4 Experimental Conditions and Items
(a) Measurement Items, (b) Hammer Height

Table 1 Measurement Items and Conditions classified by Site

장소 측정조건	A 장소	B 장소	C 장소
진동 측정방향	y, z 방향	y, z 방향	y, z 방향
항타 횟수	1 항타	1 항타	1 항타
항타 높이	2m	2m	2m
가속도계 사이의 거리	0.07m	0.07m	0.07m
카메라와 말뚝 사이의 거리	2.51m	2.60m	2.33m

Table 1 에서와 같이 항타 장소별 진동 측정방향, 항타 횟수, 항타 높이, 1 번 가속도계와 2 번 가속도계 사이의 거리는 모두 동일하며 단지 항타 말뚝의 배열이나 인접지반의 상태에 따라 카메라와 말뚝사이의 거리를 조정 하였다.

3. 진동신호 분석

3.1 카메라의 y, z 방향 변위 및 틸팅(tilting)

말뚝에 부착된 표식을 촬영하는 카메라는 항타 충격에 의해 진동이 발생하게 되며 특히 카메라의 z 방향 변위는 DPRMs 이 측정하는 말뚝 관입량의 측정오차에 큰 영향을 미친다. 항타시 가속도계 1 지점과 2 지점에서의 y, z 방향의 변위를 Fig. 5 에 나타내었다.

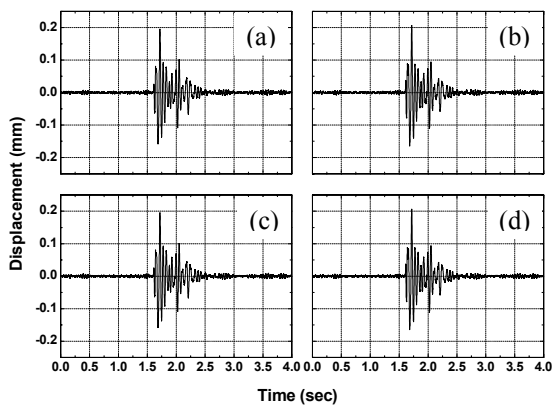


Fig. 5 Displacement of Line-Scan Camera (A-site)
(a) z1-Displacement, (b) z2-Displacement
(c) y1-Displacement, (d) y2-Displacement

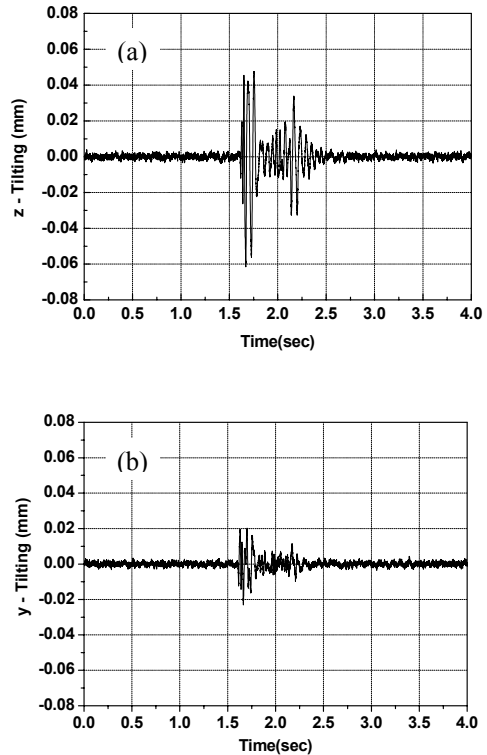


Fig. 6 Tilting of Line-Scan Camera (A-site)
(a) z-Direction, (b) y-Direction

항타시 카메라의 y, z 방향의 진동 변위의 크기는 0.2mm 정도로 거의 유사한 값을 갖는다. 또한 카메라의 틸팅(tilting) 크기를 알아보기 위해 y, z 방향 각각 가속도계 1 번 지점 변위에서 2 번 지점 변위의 차를 구하였다. Fig.6 에서 알 수 있듯이 z 방향의 틸팅이 y 방향 보다 크게 나타나고 있다.

Fig. 7 에서 카메라의 1 번 지점에서의 2 차원 평면운동의 양상을 알아보기 위해 y, z 방향의 틸팅을 시간에 따라 나타내면 틸팅에 의한 z 방향의 운동이 크게 나타남을 알 수 있다.

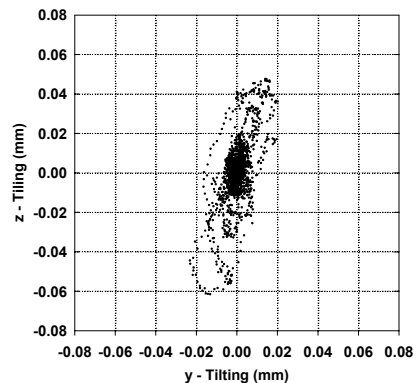


Fig. 7 2-Dimensional Plane Motion of of Line-Scan Camera (A-site)

3.2 측정오차

항타시 카메라의 틸팅이 발생하게 되어 Fig. 8 과 같이 말뚝에 부착된 표식과 카메라사이의 거리에 의해 비례적으로 DPRMs의 측정오차가 발생하게 된다. 그러므로 가속도계 사이의 거리, 카메라의 틸팅, 말뚝과 카메라와의 거리에 대한 비례식으로 시간에 따른 측정오차를 구하면 Fig. 9 와 같다.

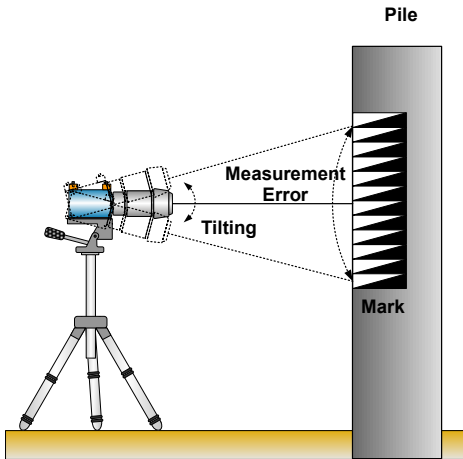


Fig. 8 Measurement Error caused by Tilting of Line-Scan Camera

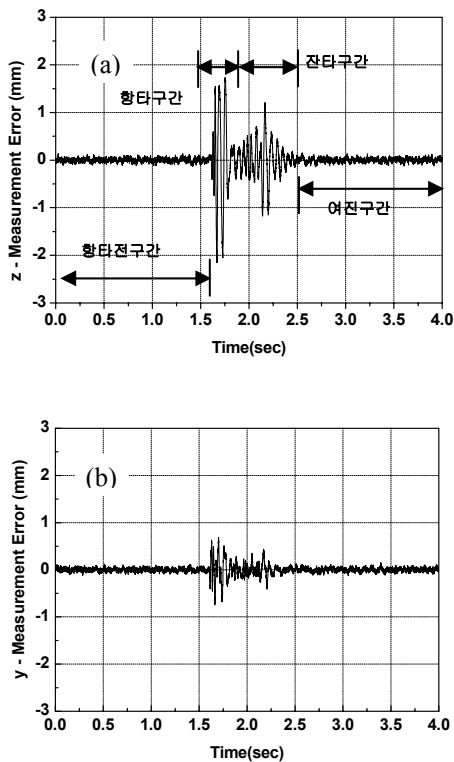


Fig. 9 Measurement Error of DPRMs (A-site)
(a) z-Direction, (b) y-Direction

Table 2 Measurement Error classified by Site

(단위: mm)

구분	항목	항타전 구간	항타 구간	잔타 구간	여진 구간	최대 측정 오차
y 방향	A	0.035	0.270	0.096	0.036	0.747
	B	0.040	0.121	0.052	0.034	0.338
	C	0.033	0.075	0.054	0.037	0.282
Average		0.036	0.155	0.067	0.035	0.455
z 방향	A	0.048	0.821	0.376	0.039	2.160
	B	0.038	0.100	0.089	0.037	0.374
	C	0.041	0.101	0.083	0.043	0.669
Average		0.042	0.340	0.182	0.039	1.067

측정 장소에 따른 y, z 방향의 최대 측정오차 및 항타가 시작되기 전부터 항타가 끝난 이후까지 구간별 RMS(root mean square) 오차를 나타내면 Table 2 와 같다. A 장소에서 발생한 z 방향의 최대 측정오차는 2.16mm 이며 구간별 최대 RMS 측정 오차는 항타 구간에서 발생하였고 약 0.82mm 이다. 위의 세 장소의 y 방향의 평균 최대 측정오차는 0.455mm 정도이고 z 방향은 이보다 큰 1.067mm 의 측정오차가 발생하였다. 구간별 RMS 오차는 항타 구간에서 가장 크고 항타전 구간과 여진 구간에서 가장 작게 나타났다.

4. DPRMs 의 말뚝 변위와 측정오차의 비교

DPRMs 에서 측정한 말뚝변위와 추정오차 그래프를 서로 비교하여 추정오차가 말뚝변위에 어떤 영향을 주는지 Fig. 10 에 나타내었다. 비교 그래프를 통해서 카메라의 y 방향 및 z 방향의 1 번 지점과 2 번 지점은 상당히 미소한 진동이지만 틸팅으로 인한 추정오차는 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 말뚝이 첫 항타에 의해 말뚝이 리바운딩하는 순간까지 DPRMs 의 추정오차가 거의 없음을 알 수 있으며, 그 이후부터 추정오차가 증가함을 알 수 있다. 또한 여진 구간에서 말뚝 변위와 추정오차가 거의 일치함을 알 수 있다.

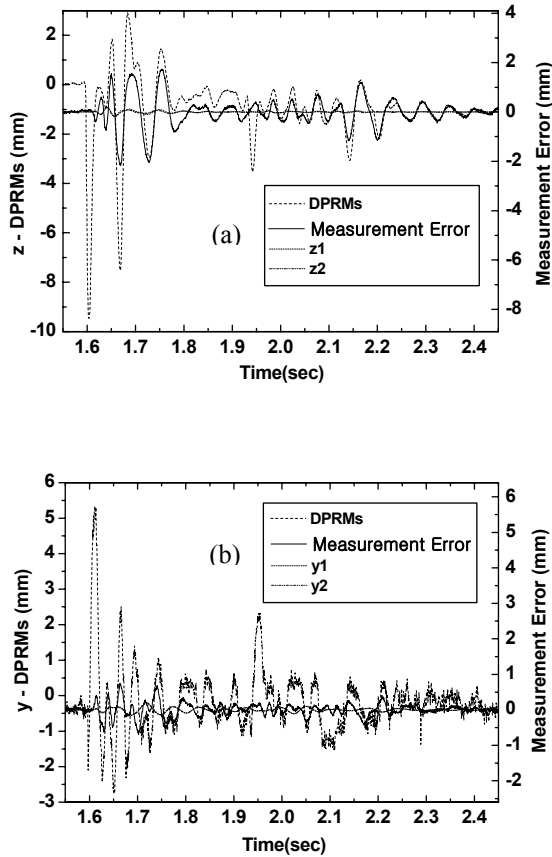


Fig. 10 Comparison of DPRMs with Measurement Error (A-site)
(a) z-Direction, (b) y-Direction

5. 결론

본 연구에서는 말뚝 향타시 카메라의 진동에 의해 발생하는 DPRMs의 측정오차를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) DPRMs이 측정된 말뚝 변위의 측정오차는 말뚝 향타시 카메라가 놓여진 인접지반을 매개로한 진동에 의하여 카메라의 y, z 방향의 틸팅이 발생하고 말뚝에 부착된 표식 사이의 거리에 비례하여 발생된다.
- (2) 1 향타를 기준으로 할 경우 카메라의 틸팅이 크게 발생하는, 향타 시작 시점에서의 측정오차는 잔타구간보다 매우 작기 때문에 말뚝의 반발량에 대한 신뢰성이 검증되었다.
- (3) 각 향타시 여진구간에서 DPRMs이 측정된 말뚝 변위량과 카메라의 측정오차가 거의 일치한다. 그러므로 측정오차에 대한 오차 보

정을 통해 각 향타 후 말뚝의 절대 변위 및 향타 종료 시점에서의 말뚝의 최종관입량에 대한 측정 정밀도를 향상시킬 수 있다.

이상의 결론을 통하여 향후에는 향타시 인접지반의 주파수 분석(Frequency Analysis)와 카메라의 시스템 분석(System Analysis)을 수행하여 DPRMs의 측정 정밀도를 향상 시키는 방안을 마련할 것이다.

참고문헌

- (1) House, 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) Song-Soo Han and Seok-Ho Kim, 2000, "Pile Rebound and Penetration Monitoring System using Speckle Laser Sensors", Technical Report 2000-0415, Research Institute of Construction Equipment, Samsung Corporation, pp.12-21.
- (3) Bum-Jae You, Sang-Rok Oh, Song-Soo Han, San-Heon Lee, 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, Se-Na, You, Bum-Jae, Limb, Mee-Seub, Oh, Sang-Rok, Han, Song-Soo, Lee, Sang Heon, 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) Mee-Seub Lim, Bum-Jae You, Sang-Rok Oh, Song-Soo Han, Sang Hun-Lee, 2002, "Visual Precise Measurement of Pile Rebound and Penetration Movement Using a High-Speed Line-Scan Camera", Transaction on Control, Automation and Systems Engineering, No.4, Vol.4, pp.341-346.